

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**КВАНТОВАЯ ФИЗИКА И ФИЛОСОФИЯ*)****(Причинность и дополнительность)****Нильс Бор**

ОТ ПЕРЕВОДЧИКА. Статья Н. Бора «Квантовая физика и философия» представляет большой интерес особенно потому, что автор значительно приближается в ней к материалистической трактовке основных положений квантовой физики. Так, Бор впервые подчеркивает объективность квантовомеханического описания и независимость его от познающего субъекта. Указывая, что приборы и их показания — только средство для изучения объективных свойств атомных объектов, Бор тем самым признает, что последние обладают не меньшей реальностью, чем первые. Далее, Бор впервые проводит разделение понятий «причинность» и «детерминизм» (в смысле лапласовского детерминизма) и указывает, что причинность в смысле отношения между причиной и следствием полностью сохраняется и в квантовой физике, которая требует лишь отказа от «классического идеала детерминизма». Наконец, при рассмотрении вопроса о взаимоотношении объекта и прибора Бор совершенно обходится без плохо определенного понятия «неконтролируемое взаимодействие», которое играло такую большую роль в его прежних работах; вместо этого Бор подчеркивает, что различие в трактовке объекта и прибора — логического порядка.

В перечисленных улучшениях формулировок нельзя не видеть отголоска наших бесед с Бором в феврале — марте 1957 г. и частичного ответа его на записку, представленную ему нами в ходе этих бесед. Поскольку многие тезисы этой записки изложены также в наших «Замечаниях к статье Бора о его дискуссиях с Эйнштейном**»), печатаемая статья Бора представляет косвенный ответ и на эти «Замечания».

В. А. Фоку

Значение физических наук для философии состоит не только в том, что они все время пополняют сумму наших знаний о неодушевленной материи, но и прежде всего в том, что они позволяют подвергнуть проверке те основания, на которых покоятся наши самые первичные понятия, и выяснить область их применимости. Накопление экспериментальных данных и развитие теоретических понятий несомненно приводят к усовершенствованиям в терминологии. Тем не менее, всякое описание физических результатов основано, в конечном счете, на обычном языке, приспособленном к тому, чтобы разбираться в окружающем и проследивать связи между причинами и следствиями. Галилеева программа, согласно которой описание физических явлений должно опираться на величины, имеющие количественную меру, дала прочные основы для упорядочения опытных данных во все более и более широкой области.

*) Перевод с рукописи, любезно предоставленной автором В. А. Фоку для напечатания в нашем журнале. Название оригинала «Quantum Physics and Philosophy» (Causality and Complementarity). Перевод выполнен В. А. Фоком.

**) УФН 66, стр. 599, декабрь 1958.

В ньютоновой механике состояние системы материальных тел определяется их мгновенными положениями и скоростями. Если известно состояние системы в данный момент времени и если известны силы, действующие на тела, то в ньютоновой механике оказывается возможным, применяя хорошо известные простые законы, определить, единственно из этих данных, состояние системы во всякий другой момент времени. Описание такого рода представляет, очевидно, идеальную форму причинной связи, соответствующую понятию *детерминизма**). Выяснилось, что такое описание применимо и в более широкой области. Так, при отображении электромагнитных явлений, где приходится рассматривать распространение сил с конечными скоростями, оказалось возможным сохранить детерминистское описание, включив в понятие состояния не только положения и скорости заряженных частиц, но и задаваемые по величине и по направлению электрические и магнитные силы в каждой точке пространства в рассматриваемый момент времени.

В этом отношении положение вещей не изменилось существенным образом в результате признания того, что описание физических явлений в определенной мере зависит от системы отсчета, избранной наблюдателем. Признание этого обстоятельства составляет содержание понятия относительности. Мы имеем здесь дело с чрезвычайно плодотворным научным направлением, которое позволило формулировать физические законы, общие для всех наблюдателей, и связать явления, представлявшиеся прежде несвязанными. Хотя в этих формулировках применяются математические абстракции, такие как четырехмерная неевклидова метрика, физическое толкование для каждого данного наблюдателя основано на обычном отделении пространства от времени, причем сохраняется детерминистский характер описания. Сверх того, как было указано Эйнштейном, соответствующая различным наблюдателям координация событий в пространстве и времени такова, что она никогда не заменяет данную причинную последовательность событий на обратную. Поэтому теория относительности не только расширила область применимости, но и укрепила основы детерминистского описания, являющегося характерным для того величественного здания, которое именуется классической физикой.

С открытием Планком элементарного кванта действия и я началась, однако, новая эпоха в физических науках. Это открытие обнаружило свойственную атомным процессам черту *цельности*, идущую гораздо дальше старой идеи об ограниченной делимости материи. Стало ясным, что свойственное классическим физическим теориям наглядное картинное описание представляет идеализацию, применимую только к явлениям, которые удовлетворяют условию, что все величины размерности действия, встречающиеся в их анализе, настолько велики, что по сравнению с ними квантом действия можно пренебречь. В явлениях обычного масштаба это условие выполняется с избытком; напротив, в опытных данных, относящихся к атомным частицам, мы наталкиваемся на закономерности нового типа, не поддающиеся детерминистскому анализу. Эти квантовые законы обуславливают замечательную устойчивость атомных систем и определяют их реакции; тем самым они, в конечном счете, ответственны и за те свойства материи, от которых зависят наши способы наблюдения.

Задача, с которой столкнулись физики, состояла, таким образом, в том, чтобы рациональным образом обобщить классическую физику, гармонически включив в нее квант действия. После предварительного исследования полученных из опыта данных, произведенного более гру-

*) Согласно этому определению Бор здесь и в дальнейшем понимает под детерминизмом лапласовский детерминизм. (В. Ф.)

быми методами, эта трудная задача была в конце концов решена путем введения надлежащих математических абстракций. Так, в аппарате квантовой механики на месте величин, характеризующих в обычной механике состояние физической системы, выступают символические операторы, подчиненные некоммутативному правилу умножения, содержащему постоянную Планка. Эта формулировка предотвращает фиксирование такого рода величин с точностью, потребной для детерминистического описания, принятого в классической физике, но вместе с тем позволяет находить спектральное распределение этих величин в соответствии с данными об атомных процессах. Сообразно его не-модельному характеру, физическое толкование математического аппарата находит свое выражение в законах существенно статистического (вероятностного) типа, относящихся к результатам наблюдений, полученным в данных экспериментальных условиях.

Несмотря на то, что квантовая механика представляет могущественное средство для упорядочения огромного экспериментального материала, относящегося к атомным объектам, тот факт, что она так сильно отклоняется от привычных требований причинного объяснения явлений, естественно дал повод поставить вопрос, действительно ли мы имеем здесь дело с полным описанием того, что дает опыт. Для ответа на этот вопрос очевидно требуется тщательное рассмотрение условий, необходимых для однозначного применения понятий классической физики к анализу атомных явлений. Решающим является здесь признание того положения, что описание экспериментальной установки и результатов наблюдений должно производиться на понятном языке, надлежащим образом усовершенствованном путем применения обычной физической терминологии. Это есть просто требование логики, так как под словом эксперимент мы можем разуметь единственно только процедуру, о которой мы можем сообщить другим, что нами проделано и что мы узнали.

В действительных экспериментальных установках выполнение такого рода требований обеспечивается тем, что в качестве измерительных приборов применяются твердые тела, достаточно тяжелые, чтобы можно было характеризовать их относительные положения и скорости чисто классическим образом. В связи с этим существенно иметь также в виду, что всякая однозначная информация об атомных объектах выводится из положения исчезающих отметок на телах, определяющих экспериментальные условия, — отметок, подобных пятну на фотографической пластинке, вызванному ударом электрона. Необратимые усилительные эффекты, на которых основана регистрация наличия атомных объектов, не вносят при этом никаких особых затруднений, а только напоминают нам о том, что самое понятие наблюдения связано с существенной необратимостью. Описание атомных явлений имеет в этом отношении совершенно объективный характер, в том смысле, что оно обходится без явной ссылки на какого-либо индивидуального наблюдателя; по этой же причине передача информации не связана с какой-либо неоднозначностью, если только учитывать требования теории относительности.

Во всех этих отношениях проблема наблюдения в квантовой физике ни в какой мере не отличается от классического физического подхода. Существенно новой чертой анализа квантовых явлений является, однако, то, что вводится фундаментальное различие между измерительным прибором и изучаемыми объектами. Оно представляет прямое следствие необходимости описывать работу измерительных приборов на языке классической физики, не вводя явным образом кванта действия*). С другой

*) Песк-лику неравенства Гейзенберга справедливы и для приборов, при описании их работы квант действия неявным образом все же учитывается. (В. Ф.)

стороны, квантовые черты явления содержатся в выводимой из наблюдений информации об атомных объектах. В то время как в классической физике взаимодействием между объектом и прибором можно пренебречь или, если надо, можно его компенсировать, в квантовой физике это взаимодействие составляет нераздельную часть явления. Сообразно этому, однозначное описание собственно квантового явления должно, в принципе, включать описание всех существенных частей экспериментальной установки.

Повторение одного и того же опыта, характеризующегося как описано выше, дает, вообще говоря, р а з н ы е отсчеты, относящиеся к объекту; этот факт непосредственно приводит к выводу, что обобщающая формулировка полученных из опыта результатов в этой области должна выражаться в форме статистических (вероятностных) законов. Едва ли нужно особо подчеркивать, что мы имеем здесь дело отнюдь не с чем-либо аналогичным обычному применению статистики к описанию физических систем, чересчур сложных для того, чтобы можно было практически дать полное определение их состояния, достаточное для детерминистского описания. Такое описание подразумевает возможность неограниченно подразделять и детализировать события, тогда как в случае квантовых явлений эта возможность принципиально исключается в силу требования конкретно указывать экспериментальные условия. В самом деле, типичная для собственно квантовых явлений черта цельности находит свое логическое выражение в том обстоятельстве, что всякая попытка определенным образом подразделить данное явление потребовала бы изменения в экспериментальной установке — изменения, несовместного с определением данного явления.

В области применимости классической физики все стороны и свойства данного объекта могут быть в принципе обнаружены при помощи одной экспериментальной установки, хотя на практике часто бывает удобно применять для изучения разных сторон явления разные установки. В самом деле, полученные таким путем данные просто складываются и могут быть скомбинированы в одну связную картину поведения изучаемого объекта. Напротив, в квантовой физике данные об атомных объектах, полученные при помощи разных экспериментальных установок, находятся в своеобразном дополнительном отношении друг к другу. Действительно, следует признать, что такого рода данные хотя и кажутся противоречащими друг другу при попытке скомбинировать их в одну картину, на самом деле исчерпывают все, что мы можем узнать о предмете. Отнюдь не ограничивая наши стремления задавать природе вопросы в форме экспериментов, понятие дополнительности просто характеризует возможные ответы, получаемые в результате такого исследования, в том случае, когда взаимодействие между измерительным прибором и объектом составляет нераздельную часть явления.

Разумеется, классическое описание экспериментальной установки и необратимость отсчетов, относящихся к атомному объекту, обеспечивают последовательность между причиной и следствием в соответствии с очевидным и элементарным требованием причинности. В то же время окончательный отказ от классического идеала детерминизма находит себе яркое выражение в соотношениях дополнительности, представляющих условия для однозначного применения основных понятий, безусловное и неограниченное применение которых составляет основу классического описания. В самом деле, для констатации наличия атомной частицы в ограниченной области пространства и времени требуется экспериментальное устройство, связанное с переносом количества движения и энергии к телам, подобным неподвижным масштабам и синхронно

идущим часам; а этот перенос не может быть включен в описание работы упомянутых приборов без отказа от их пригодности к выполнению их роли фиксировать систему отсчета. Обратно, всякое строгое применение к атомным процессам законов сохранения количества движения и энергии предполагает, в принципе, отказ от детальной локализации частиц в пространстве и времени.

Эти обстоятельства находят себе количественное выражение в соотношениях неопределенности Гейзенберга. Последние дают связь (обратную пропорциональность) между неточностями допустимого в квантовой механике фиксирования тех кинематических и динамических переменных, которыми в классической механике определяется состояние физической системы. Действительно, некоммутативность математических символов, которыми в аппарате квантовой механики представлены эти переменные, соответствует несовместимости экспериментальных установок, необходимых для их однозначного определения. В связи с этим заметим, что мы, очевидно, имеем здесь дело не с ограничениями точности измерений, а с ограниченной применимостью пространственно-временных понятий и динамических законов сохранения; эта ограниченная применимость связана с необходимостью проводить различие между измерительными приборами и атомными объектами.

При рассмотрении задач атомной физики, для выполнения конкретных вычислений удобнее всего пользоваться шредингеровской функцией состояния. Путем применения определенных математических операций из этой функции могут быть выведены статистические законы для результатов наблюдений, получаемых при определенных условиях. Следует, однако, признать, что мы имеем здесь дело с чисто символическим приемом, однозначная физическая интерпретация которого требует, в последнем счете, ссылки на определенную экспериментальную установку. Неучет этого обстоятельства приводил иногда к недоразумениям. В частности, применение таких выражений, как «наблюдение возмущает явление» или «измерение создает физические атрибуты объектов», едва ли совместно с общепринятым значением употребляемых терминов и с обычным словоупотреблением.

В связи с этим поднимался даже вопрос, не следует ли, в целях более точного представления сложившейся ситуации, прибегнуть к многозначной логике. Предыдущие рассуждения показывают, однако, что какие бы то ни было отклонения от общепринятого языка и обычной логики полностью устраняются, если употреблять слово «явление» только в смысле чего-то такого, о чем возможно однозначным образом информировать; слово «измерение» должно при этом употребляться в своем прямом смысле количественного сравнения (сравнения с эталоном). Такая осторожность в выборе терминологии особенно важна при исследованиях в новой области, где информация не может быть заключена в привычную схему, нашедшую столь широкое применение в классической физике.

Только имея все это в виду, можно убедиться в том, что квантовая механика удовлетворяет, в отношении своей непротиворечивости и полноты, всем требованиям, какие можно предъявить к рациональному объяснению. Так, для непротиворечивого толкования аппарата квантовой механики существенно исходить из отсчетов, делаемых на приборах при вполне определенных условиях опыта. Этот упор на конкретные отсчеты приборов становится на место основной предпосылки классического физического описания, согласно которой каждое звено в причинной цепи событий допускает, в принципе, непосредственную проверку. Полнота же описания, подобная той, к какой стремилась классическая физика, достигается принципиальной возможностью принимать во внимание все мыслимые экспериментальные установки.

Разумеется, такого рода рассуждения вовсе не означают, что атомная физика не принесет нам больше ничего нового в отношении экспериментальных открытий и математических средств для их описания и понимания. В самом деле, весьма возможно, что для объяснения новых закономерностей, открывающихся при исследовании атомных процессов весьма большой энергии, потребуется ввести в математический аппарат дальнейшие абстракции. Решающим является, однако, то обстоятельство, что при этом не может быть и речи о возвращении к такому способу описания, которое в большей степени шло бы навстречу привычным требованиям наглядного модельного представления связи между причиной и следствием.

Тот факт, что квантовые закономерности не могут быть проанализированы в классическом духе, обуславливает, как мы видели, необходимость ввести при описании того, что мы узнаем посредством опыта, логическое различие между измерительными приборами и атомными объектами — различие, принципиально исключающее возможность исчерпывающего детерминистского описания. Резюмируя, можно сказать, что более широкие рамки дополнительности отнюдь не означают произвольного отказа от идеала причинности. Понятие дополнительности непосредственно выражает наше положение в вопросе об отображении фундаментальных свойств материи, которые считались подлежащими классическому физическому описанию, но оказались вне пределов его применимости.

При всех различиях в ситуациях, характерных для применений понятий относительности и дополнительности, эти ситуации представляют в гносеологическом отношении значительное сходство. В самом деле, в обоих случаях мы имеем дело с исследованием закономерностей, которые не могут быть охвачены наглядными представлениями, пригодными для отображения физических фактов в более ограниченной области. Решающим является, однако, то обстоятельство, что ни в одном из этих случаев расширение рамок наших понятий не предполагает какой-либо ссылки на наблюдающий субъект (эта ссылка была бы препятствием для однозначной передачи опытных фактов).

В рассуждениях теории относительности такая объективность обеспечивается учетом зависимости явлений от системы отсчета наблюдателя, тогда как в дополнительном описании какая-либо субъективность исключается благодаря учету тех обстоятельств, которые делают однозначным применение наших первичных понятий.

В общефилософском аспекте знаменательно здесь то, что в отношении анализа и синтеза в других областях знания мы встречаемся с ситуациями, напоминающими ситуацию в квантовой физике. Так, цельность живых организмов и характеристики людей, обладающих сознанием, а также и человеческих культур, представляют черты целостности, отображение которых требует типично дополнительного способа описания*). Передача опытных фактов в этих обширных областях знания требует богатого словаря, а из-за того, что словам иногда придается различный смысл, и прежде всего из-за различия в принятых в философской литературе толкованиях понятия причинности, цель такого рода сопоставлений часто понималась превратно. Но постепенное развитие терминологии, пригодной для описания более простой ситуации в области физики, показывает, что мы имеем здесь дело не с более или менее туманными аналогиями, а с отчетливыми примерами логических связей, которые, в разных контекстах, встречаются в более широких областях знания.

*) См. Н. Б о р, *Атомная физика и человеческие знания* (N. B o h r, *Atomic Physics and Human Knowledge*. John Wiley and Sons, Ltd, New York, 1958).