

М. А. Марков

О ТРЕХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯХ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

Об образовании понятия
объективной реальности
в человеческой практике

Копенгагенская

Статистическая

Многомировая
Эверетт



URSS

М. А. Марков

О ТРЕХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯХ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

**Об образовании
понятия объективной реальности
в человеческой практике**

Издание второе



**URSS
МОСКВА**

Марков Моисей Александрович

О трех интерпретациях квантовой механики: Об образовании понятия объективной реальности в человеческой практике.

Изд. 2-е. — М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. — 112 с.

В монографии обсуждаются три существующие интерпретации физического смысла квантовой механики: геттингенская (боровская), статистическая (Эйнштейн и др.) и многомировая (Эверетт). Исследуется образование понятия объективной реальности микромира в процессе человеческой деятельности. Рассмотрены гносеологические проблемы в рамках квантовой теории и принципиальная познаваемость микромира.

Книга предназначена для физиков — студентов, аспирантов, научных работников, а также для философов, интересующихся гносеологическими

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
Часть I. О природе физического знания	7
Квантовая теория	11
О физических понятиях	16
Принцип дополнительности	20
Познающий субъект как макроскопический прибор	25
Физический прибор	27
«Модельные» и «немодельные» представления	29
Роль математики	34
Макроскопическая форма нашего знания	37
Деление на субъект и объект	41
Понятие физической реальности	42
Дает ли квантовая теория «полное» описание физической реальности?	47
О форме и содержании нашего знания	49
Возможно ли отображение микромира в иных понятиях, чем понятия классической механики?	53
Современная физика и идеализм	57
Часть II. К редукции волновой функции	63
Вселенная как огромный «игорный дом». Случайность и необходимость	66
«Дифракция поочередно летящих электронов»	71
О трех интерпретациях квантовой механики	72
Копенгагенская интерпретация	72
Роль макроскопического прибора в регистрациях квантовых событий (75). Редукция пакета (78). Заключение по копенгагенской интерпретации (78).	
Статистическая интерпретация	81
Спор Эйнштейна с Бором (85). Понятие квантового ансамбля (94). Заключение по статистической интерпретации (97).	
Многомировая интерпретация	101
Заключение по многомировой интерпретации (108).	

ПРЕДИСЛОВИЕ

Книга состоит из двух частей. Часть I под тем же названием была опубликована более 40 лет назад и представляет собой ответ на вопрос, дает ли появление квантовой механики какие-либо новые аргументы в пользу той или иной философской концепции, которые существовали до появления физики микромира. Здесь имеется в виду материализм*), идеализм и позитивизм.

Этими тремя отношениями мысли к действительности в сущности исчерпывается все *гносеологическое* многообразие философских систем. Так как наше знание всего содержания микромира исчерпывается макроявлениями, вызываемыми взаимодействием микромира с макромиром, то можно сформулировать тезис, что *изучение микромира сводится к изучению особого класса макроявлений. Таким образом, отношения субъекта и объекта в этом смысле остаются отношениями субъекта и объекта, характерными для физики классической. Другими словами, к материализму, идеализму, позитивизму принципиально не добавляются ни новые ...измы, ни новые аргументы в пользу той или иной философской системы.*

В части I книги подчеркивается принципиальная познавательность микромира.

Так как изучение микромира представляет собой изучение особого класса макроявлений (пузырьки в камере Вильсона, показание «стрелок» различных макроприборов и т. д.), то в части I книги эти явления именуются «проекциями микромира на макромир».

Изучение различных (всех) проекций свойств данного микрообъекта на макромир дает *исчерпывающее* представление

*1) Под материализмом нами понимается философская концепция, возникшая после Фейербаха, суть которой сформулирована Марксом в его «Тезисах о Фейербахе». Она отличается от метафизического материализма, в котором действительность рассматривается только в форме объекта, т. е. не в аспекте человеческой практики.

о данной объективной реальности на языке макроскопических понятий (на языке наблюдаемых классической макроскопической физики). Исчерпывающее описание (познание) свойств микрообъекта макронаблюдателем, в частности, иллюстрируется примером возможности полного описания (познания) трехмерного конуса «плоскими жителями» плоскости. Изучение всех возможных *взаимно исключающих* пересечений (проекций) конуса с плоскостью дает представление о том, что плоские жители являются объективной реальностью (трехмерным конусом) как объект, обладающий в их плоском мире совокупностью противоречивых свойств (окружности, эллипса, параболы, линии).

В части I книги нами вводится специальный гермин «кентавр» («кентаврообразность») для описания микрообъекта, если его свойства характеризуются в макроскопических понятиях противоречивыми свойствами, например, электрон обладает свойствами волны и корпускулы («кентавр»).

Моя статья (1947 г.) вызвала ожесточенную дискуссию; ей был посвящен целиком один том журнала «Вопросы философии». В последующие десятилетия в литературе не встречались даже упоминания об этой дискуссии. Лишь спустя почти двадцать лет (1966 г.) Мюллер-Маркус в статье «Нильс Бор во «мраке» и «свете» советской философии» попытался сделать, в частности, обзор дискуссии 1947 г. Я предполагал в приложении данной книги дать полный перевод статьи Мюллера-Маркуса. Но к моменту появления корректуры выяснилось, что только что в одном из наших журналов появился перевод этой статьи. Мне хотелось бы лишь заметить, что тезис Бора о том, что «как бы далеко ни выходили явления за рамки классического объяснения, все опытные данные должны описываться при помощи классических понятий», пока не нашел своей теоретико-познавательной интерпретации ни в нашей, ни в зарубежной литературе:

1. Почему в такой категорической форме диктуется эта необходимость?

2. Почему такое описание гарантирует исчерпывающее знание природы исследуемых явлений?

3. Что собой представляет объективная реальность в рамках такого описания?

Именно эти проблемы трактуются в данной книге.

Следует также заметить, что, как показала прошедшая в 40-х годах дискуссия по поводу моей статьи, в основу дискуссии, на мой взгляд, легло непонимание тезиса Маркса о Фейербахе, непонимание несостоятельности метафизического материализма и процесса своеобразности познания действительности в человеческой практике.

Во всех многочисленных выступлениях, как критиковавших мою статью, так и поддерживавших ее, ни разу даже не упоминался тезис Маркса о Фейербахе, который был взят эпиграфом к моей статье и был основой ее содержания. Это замечание относится также к статье Мюллера-Маркуса.

Именно непонимание основной идеи статьи о возникновении представления об объективной реальности в естественных рамках *человеческой практики**) познания объективного мира явилось причиной для того, чтобы возобновить давнишнюю дискуссию.

Конечно, можно было бы внести существенные коррективы в прежнюю статью, не ограничиваясь, как это видно из старого текста, несколькими фразами, снабдить статью Мюллера-Маркуса рядом комментариев, но часть II книги в какой-то мере выполняет эти функции.

Часть II книги в сущности начинается с параграфа, озаглавленного «Случайность и необходимость». С точки зрения автора этот параграф посвящен, может быть, самому неожиданному и в то же время самому фундаментальному открытию человека в науке о реальном мире: именно открытию в природе существования случая — случайного явления, возникающего не в результате еще не познанной нами необходимости, а в результате *чистого* случая.

Причина, по которой мы начинаем изложение интерпретаций квантовой теории с обсуждения природы, скажем, абсолютной случайности, заключается в том, что она присутствует во всех трех интерпретациях квантовой теории: копенгагенской, статистической и так называемой *многомировой*. В части II главным образом обсуждаются проблемы, связанные с так называемой *редукцией волнового пакета*.

*) Отсюда и второе название книги: «Об образовании понятия объективной реальности в *человеческой практике*».

О ПРИРОДЕ ФИЗИЧЕСКОГО ЗНАНИЯ *

Главный недостаток всего предшествующего материализма — включая и фейербаховский — заключается в том, что предмет, действительность, чувственность, берется только в форме *объекта*, или в форме *созерцания*, а не как *человеческая чувственная деятельность, практика*, не субъективно. Отсюда и произошло, что *действительная сторона*, в противоположность материализму, развивалась идеализмом, но только абстрактно, так как идеализм, конечно, не знает действительной, чувственной деятельности как таковой.

К. Маркс (Тезисы о Фейербахе) // К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения. Т. 3. — С. 1)

Самая непостижимая вещь в мире — это то, что мир все-таки постижим.

А. Эйнштейн (Schilpp P. A. Albert Einstein: Philosopher-Scientist. — Library of Living Philosophers, 1949)

Развитие физики в последние десятилетия значительно обогатило наше знание. Научное проникновение в микромир раскрыло много нового и неожиданного. Оно привело не только к открытию новых, прежде неизвестных объектов микромира — позитрона, нейтрона, мезона и т. д., — но и к открытию специфических закономерностей микромира, столь фундаментально отличных от того, что встречалось нам в макрофизике. Развитие физики привело к новому физическому воззрению, которое имеет огромный теоретико-познавательный интерес. Хотя физические основы этого воззрения с большой полнотой сформулированы около 20 лет назад, значение новой физики для теории познания еще далеко не раскрыто.

*1 Вопросы философии. — 1947. — № 2.

Вряд ли найдутся два физика, вполне согласные друг с другом по принципиальным вопросам теоретико-познавательного характера, связанным с этой концепцией.

В ряде стран за рубежом в последние годы появляются попытки исследований философских проблем, поставленных изучением макромира. Авторы этих исследований — главным образом физики. Не случайно физики стали философствовать: они вынуждены философствовать, ибо для современной физики особенно характерно, что ее нельзя излагать, не затрагивая глубоких вопросов теории познания, — эти вопросы тесно связаны с конкретным содержанием новой теории.

Проблема причинности, понятие физической реальности, наконец фундаментальная проблема взаимоотношения субъекта и объекта — все это оживленно дискутируется в свете конкретных данных о микромире.

Каждый этап в развитии науки и конкретно физики оказывал, как известно, существенное влияние на развитие теории познания; и здесь очень важно выяснить, что же действительно нового привносит с собой в материалистическую теорию познания наше проникновение в микромир.

Многие зарубежные физики, очень авторитетные в своей области, считают, что современная физика развивается в направлении от материализма к идеализму. Изумляющие достижения современной науки часто неожиданно окрашиваются в пессимистические тона. «Точное знание внешнего мира становится для нас невозможным», — пишет Джинс в одной из своих книг.

Поэтому на новом этапе развития науки возникает тот же вопрос: подтверждает ли современная физика идеализм?

Для того чтобы не расплываться в общих фразах по этой многогранной проблеме, мы сознательно сужаем задачу. Мы ограничиваемся «одним» вопросом: действительно ли точное знание внешнего мира становится для нас невозможным?

Если внимательно вдуматься в те принципиальные проблемы, которые требуют обсуждения и обычно обсуждаются в физике микромира, то все они в конце концов призваны решить эту конечную проблему. Поставив этот вопрос, мы вынуждены в какой-то мере коснуться почти всех гносеологических проблем, как это практически и делает физик, ибо вопрос имеет вполне конкретное для физики значение, что и заставляет его отправляться в эту непривычную для физика, такую далекую экскурсию по гносеологическим проблемам.

Постановка вопроса требует в первую очередь внимательного анализа самой природы знания о микромире, которое полно специфического своеобразия.

Это своеобразие заключается в следующем: классическая макроscopicическая механика оказалась неприменимой к микромиру. Современная теория микромира — это так называемая квантовая теория. Структура квантовой теории примерно такова: микроявление наблюдается макроscopicическим прибором; этот макроscopicический прибор устанавливает связь между экспериментатором и микроявлением. Квантовая теория дает физическое истолкование того, что происходит в макроприборе под воздействием микроявления. Образ микроявления воссоздается по результатам показания макроscopicического прибора, к которому применима классическая физика. Поэтому результаты наблюдения мы, естественно, выражаем в понятиях классической механики, например в понятиях импульса или координаты.

На первый взгляд кажется, что получается внутреннее противоречие в самой теории: с одной стороны, отказ в микромире от классической механики и, с другой стороны, признание необходимости истолкования наблюдаемого нами явления микромира в понятиях классической механики.

В квантовой теории это противоречие, как мы увидим ниже, снимается тем, что квантовая теория считает неверным рассматривать некоторые свойства микрообъекта оторванно от макроscopicического прибора, с которым этот объект взаимодействует. В этих случаях принципиально нельзя отвлекаться от роли макроscopicического прибора, которая, как выясняется, может быть различной в зависимости от характера самого прибора.

Во всяком случае современная квантовая теория рассматривает явления микромира только в неразрывной связи с взаимодействующим с ним макроприбором.

Это обстоятельство накладывает известный макроscopicический отпечаток на природу нашего знания микромира, на его внешнюю форму, на «язык» этого знания, на образы. Вот эта *классическая макроscopicическая форма* знания микромира и подлежит в первую очередь тщательному исследованию.

Физика дает конкретные знания микромира при таком макроscopicическом подходе к нему с помощью макроscopicического прибора. Но вопрос, почему познающий субъект *обязан* смотреть на микромир через макроприбор, связан с появлением самого мыслящего и познающего существа в природе как макроscopicического существа и определяется всем историческим процессом возникновения мыслящей материи.

Если бы познающий субъект сам был объектом микромира, вряд ли для него появилась бы необходимость

рассматривать микромир через макроприбор; другими словами, он вряд ли стал бы строить современную квантовую теорию, для которой существенно наблюдение с помощью макроприбора. Эта несколько отвлеченная и парадоксальная постановка вопроса показывает, во всяком случае, что перед нами в основном гносеологическая проблема.

Подчеркиваемая нами макроскопическая природа, макроскопическая форма знания, даваемая квантовой механикой, в том или ином аспекте обсуждалась в литературе очень широко, но в зарубежной литературе все эти вопросы нередко получали чисто субъективное истолкование.

В нашей философской литературе принципиальные вопросы квантовой теории пока не подвергались внимательному анализу. Распространено, по-видимому, мнение, что квантовая механика — «слишком новая» теория, которая еще не устоялась, что в ней много неясностей, которые с развитием теории сами собой исчезнут. Иначе говоря, все трудности ее анализа возлагаются на плечи потомков. Может быть, это очень удобная позиция, но квантовая теория существует уже четверть столетия^{*)}. С фактической, физической точки зрения она блестяще обоснована экспериментом в той области, на которую она претендует. Поэтому вряд ли такая позиция может быть оправдана.

В отличие от такой позиции мы, наоборот, исходим из существующей теории, берем квантовую теорию в ее современном, «сегодняшнем» виде.

С общей точки зрения эта позиция также ограничена. Она ограничена определенной физической концепцией (теория дополнителности). Мы, таким образом, сознательно ставим перед собой частную, но вполне конкретную задачу: выяснить возможность последовательно материалистического истолкования этой физической концепции.

Большое несчастье для материалиста — под покровом случайных, внешних «идеалистических украшений» проглядеть материалистическое содержание новой теории, встать на путь отрицания ее и, оставаясь на старых, привычных позициях, превратиться из новатора, которым должен быть последовательный материалист, в убежденного рутинера.

Ниже дана попытка материалистически истолковать особую роль макроскопического прибора в современной квантовой теории и в связи с этим исследовать макроскопическую природу нашего знания микромира. Насколько эта попытка удачна, покажет ее дальнейшее обсуждение.

^{*)} Статья опубликована в 1947 г.

Квантовая теория

В классической теории состояние частицы в данный момент характеризуется ее точным положением в пространстве (координатой), ее массой и скоростью (импульсом).

В квантовой области «импульс» и «координата» частицы — понятия, взаимно конкурирующие: если имеется состояние частицы с определенным, т. е. точно данным, значением импульса, то к такой реальности неприменимо понятие определенного положения. И обратно, если известно, что частица находится в данный момент в данном месте, т. е. известна ее координата, то к частице неприменимо понятие точного, определенного импульса. Что скрывается за этим словом «неприменимо»? Мы пока раскроем лишь внешний, догматический смысл новой теории, ее формальную сторону.

Какое же содержание имеет фраза: «Неприменимо понятие положения частицы, если известен ее точный импульс»? Смысл утверждения таков: если организовать поиски этой частицы с помощью точных физических приборов, фиксирующих ее положение, то частица обнаруживается с равной вероятностью в любой точке пространства.

Этот ответ, может быть, несколько разочаровывает. Разве в классическом случае точного знания импульса и отсутствия каких-либо сведений о координате имеется другая ситуация? Нет. Но в классической теории предполагается, что этот «элемент незнания» координаты частицы случаен — мы просто не удосужились узнать, измерить координату. В квантовой же области существенно утверждение: невозможно принципиально измерить координату, если желательно *сохранить известным* определенное значение импульса частицы. Оказывается, при измерении положения частицы прибор неизбежно меняет неопределенным образом ее прежний импульс.

Теперь после точного измерения координаты частицы мы имеем другой случай состояния, случай, полностью исключающий предыдущий: точно известно положение частицы, но совершенно неизвестно, как прибор изменил ее первоначальный импульс. После измерения положения частицы ее импульс делается неопределенным. Все «коварство» квантовых взаимодействий заключается в том, что нельзя контролировать изменение импульса при наблюдении координаты. Попытка организовать такой контроль, правда, дает ту величину, на которую изменился импульс частицы, но одновременно, как показывает анализ, она приносит с собой потерю прежнего знания координаты.

Нельзя придумать такой опыт, утверждает квантовая теория, в результате которого можно было бы получить

одновременно точные знания положения частицы и ее импульса. Это утверждение носит принципиальный характер и не зависит от качества аппаратуры наблюдения. По своему характеру оно вполне аналогично утверждению невозможности создания вечного двигателя первого рода, добывающего энергию «из ничего». Самая головоломная конструкция вечного двигателя не способна обойти закон сохранения энергии. Здесь же, в этом «конфликте» координаты и импульса, повинно, по утверждению квантовой теории, атомное взаимодействие, а взаимодействие — неизбежный элемент любого наблюдения с помощью любой конструкции.

При рассмотрении проекта вечного двигателя всегда обнаруживается конкретная причина, почему та или иная конструкция не работает вопреки желанию ее автора. Вполне аналогичным образом при анализе любого предложения аппарата любой конструкции, предназначенного для одновременного точного измерения импульса и координаты частицы, всегда вскрывается конкретная причина, в силу которой аппарат оказывается не в состоянии оправдать ожидания. Проекты такого рода часто обсуждались в первые годы возникновения квантовой теории и получили название «мысленных экспериментов». Хотя рассмотрение этих мысленных экспериментов имеет не большее научное значение, чем обсуждение очередного проекта вечного двигателя, все же некоторый педагогический интерес оно представляет: конкретнее ощущаются эти удивительные закономерности микромира.

Перед нами попытка определить положение электрона с помощью идеального микроскопа. В микроскоп, как известно, можно «что-то» рассмотреть, если это «что-то» по своим размерам не меньше, во всяком случае, длины волны света, которым оно освещается. Чем точнее мы стремимся определить положение электрона, тем меньше должна быть длина волны света. Но другая природа света — это кванты. И если квант света падает на электрон, он сообщает ему какой-то импульс. Энергия этих квантов фатальным для нашего эксперимента образом тем больше, чем меньше длина волны.

Следовательно, при точном определении положения электрона мы должны освещать его светом как угодно малой длины волны. Это значит применять кванты как угодно большой энергии. А это значит — как угодно большое изменение первоначального импульса электрона. Если этот импульс был известен нам до опыта с микроскопом, то после опыта, после попытки точно определить положение электрона, его импульс полностью неизвестен.

Проект потерпел неудачу.

Можно попытаться определить положение электрона с помощью щели. Чем уже щель, через которую пролетает электрон, тем точнее в этот момент фиксируется его положение. Здесь «неприятность» приходит со стороны волновой природы электрона. Волновой луч, проходя через отверстие, через щель, испытывает отклонение, дифракцию: электрон, проходя через щель, в силу своих волновых свойств меняет свое направление, а следовательно, и импульс. На самом деле явление это сложнее, но и здесь та же фатальная закономерность: чем щель уже, чем точнее определяется положение частицы, тем больше дифракционное отклонение, тем значительнее меняется первоначальный импульс. Проект этот терпит неудачу. Так всякий раз при обсуждении подобного рода проектов вскрывается их порочность.

Кроме необычного для классической теории самого факта атомистичности действия, обращает на себя внимание необычная «субъективность» языка изложения: «нельзя одновременно узнать», «принципиально невозможно измерить», «для нас недоступно» и т. д.

В научной литературе по классической физике субъективная терминология, если она иногда встречается, носит случайный характер и имеет точный, строгий перевод на объективный язык физических факторов.

Возникает вопрос: каков объективный смысл чисто субъективного языка квантовой теории? Этот вопрос мы оставляем до следующих параграфов, а здесь продолжим изложение формального содержания квантовой теории, не уклоняясь далеко ни по существу, ни терминологически от обычного популярного пересказа.

Во всех предыдущих случаях имелось в виду точное измерение импульса или координаты частицы, но своеобразное положение создается и при неточном их измерении.

При анализе теории или мысленных экспериментов оказываются возможными такие измерения, в результате которых можно заключить, что координата частицы, правда, точно не известна, но она лежит вот в «таких-то» пределах, что импульс частицы нельзя указать точно, но он заведомо не больше, чем «такой-то» импульс. Иначе говоря, опыт дает координату частицы с «такой-то» ошибкой, с «такой-то» неточностью; эту неточность можно выразить численно. Если выразить неточность в импульсе также в числах, то оказывается, что произведение этих неточностей при одновременном наблюдении над частицей численно никогда не бывает меньше половины кванта действия. В крайнем случае, если условия

опыта являются исключительно благоприятными, произведение этих неточностей равно половине кванта действия. Это как раз то знаменитое «соотношение неточностей» квантовой теории, которое носит универсальный характер и часто возводится в физике в почетный ранг принципа.

Этот принцип является следствием квантовой теории, наиболее сжатой формулировкой ее особенностей. Он разъясняет, что характер взаимодействия таков, что одновременно измерение импульса и координаты возможно, в лучшем случае, только с такими неточностями. Тот или иной эксперимент, та или иная физическая аппаратура, призванная измерить координату и импульс частицы, могут как угодно варьировать эти неточности измерения, но произведение неточностей неизбежно подчиняется данному соотношению. При изложении вопроса это место часто снабжается замечанием: соотношение неточностей, принцип неточностей, формулирует, таким образом, количественное ограничение применимости к образу микромира в один и тот же момент классических представлений импульса и координаты.

Хотя это замечание звучит как резюме, оно тем не менее в чисто логическом отношении совсем не представляется однозначно строгим выводом из предыдущего; оно скорее носит характер «толкования». Во всяком случае, оно возбуждает ряд вопросов, ответы на которые являются в дальнейшем основной целью нашей статьи.

Надо обязательно добавлять «одновременной применимости классических представлений импульса и координаты». В этой оговорке много своеобразного.

Действительно, если бы речь шла о неприменимости понятия координаты для частиц микромира или того же импульса, то такое положение не являлось бы с классической точки зрения необычным. Можно придумать самые разнообразные модели систем в классике, положение которых не характеризуется заданием какой-то одной избранной точки. Но в квантовой теории совсем другая ситуация. Можно, согласно квантовой теории, опытным путем найти точное значение координаты. Значит, координата имеет в квантовой теории для данного примера точно такой же смысл, как и в классической физике. Но в то же самое время к частице неприменимо понятие импульса.

Обратно, интересуясь только импульсом, мы определим точно его значение, и здесь опять нет никакого отличия от соответствующего классического понятия. Значит, импульс и координата — эти классические понятия сами по себе пригодны в микромире. Есть случаи, когда координата

частицы имеет точный, вполне классический смысл; есть случаи, когда импульс частицы имеет точный классический смысл. Но одновременно точные значения этих величин исключают друга друга. Наше наглядное представление отказывается воспринимать что-либо подобное. Перед нашим мысленным взором «маячит» классическая частица, мы ее «видим» с ее определенной локализацией в пространстве, с ее определенной скоростью в определенном направлении.

Но что же это за частица микромира, как ее представлять, если наложены такие ограничения? Здравый смысл не удовлетворен, здравый смысл ропщет, он налагает свое увялое вето: «Не может быть!»

Мы оставим до дальнейшего в стороне этот конфликт между квантовой теорией и наглядным представлением и констатируем пока «деловую» сторону вопроса. Она заключается в том, что при наличии атомизма действия опыт дает информацию о состоянии частицы в том ограниченном виде, о котором сейчас шла речь. Такую информацию о состоянии частицы мы в дальнейшем будем называть коротко «состоянием частицы» или вообще «состоянием рассматриваемой системы», или «волновой функцией». Соответствующая математическая функция удовлетворяет так называемому волновому уравнению.

Если в самом деле то максимальное знание, которое может дать точно и хорошо проведенный опыт,— это сведения о такого рода состояниях, то задача такой теории или, как ее называют, квантовой механики, заключается в том, чтобы находить изменение этих состояний во времени и по этим сведениям (состояниям) предсказывать результаты тех или иных предполагаемых измерений.

Сформулируем, хотя бы очень поверхностно, сходство и различие между классическими проблемами, с одной стороны, и квантовыми — с другой. Если в механике Ньютона при решении конкретных задач задаются значения импульса и координаты в данный момент и находятся значения этих величин в любой другой момент времени, то в квантовой теории в начальный момент задается вероятность найти частицу в любом месте пространства с любым импульсом и отыскивается, как изменяется эта вероятность к любому другому моменту времени. Надо заметить, что по степени совершенства математического аппарата квантовая теория ничем не уступает механике Ньютона. До сих пор мы подчеркивали главным образом то, в чем квантовая теория ограничивает классическую информацию о состоянии частиц. Однако квантовая механика блестяще разрешила множество

проблем, непосильных для классической теории. Но эту сторону квантовой теории, особенно важную и интересную для характеристики ее содержания, мы здесь рассматривать не будем.

О физических понятиях

Излагая соотношение неточностей, мы, следуя многим авторам, повторяли его обычную формулировку: «Нельзя одновременно измерить точно импульс и координату».

В другом месте мы старательно подчеркивали неприменимость понятия координаты частицы в микромире, если ее точный импульс известен, и наоборот. Само собой понятно, что если «неприменимо», то значит и «нельзя», но если «нельзя», значит ли это «неприменимо»?

«Неприменимо» — это утверждение носит вполне объективный характер.

«Нельзя одновременно измерить...» «Нельзя» в буквальном смысле звучит как запрет, ограничивающий познание, но в данном случае в квантовой теории «нельзя измерить одновременно» имеет, как мы увидим, точный смысл слова «неприменимо».

Было бы совершенно неправильно воспринимать соотношение неточностей как какой-то злой рок, своего рода проклятие, тяготеющее над нашими попытками измерить координату и импульс микрочастицы. Предполагать, что частица имеет одновременно такие значения импульса и координаты, которые, однако, по каким-то случайным причинам нельзя точно измерить, — это значило бы прийти в противоречие с квантовой теорией. Речь идет о том, что само понятие импульса (или координаты) объективно теряет смысл в этих условиях. Хотелось бы несколько подробнее остановиться на проблемах физических понятий вообще, на физическом определении их, на том, как они при случае «теряют свой смысл».

С давних пор в физике установилась традиция на первых страницах книги четко определять смысл физических понятий, которые необходимы для дальнейшего изложения. Тем не менее история развития физики показывает, что то или иное «неблагополучие» часто связано с недостаточно строгим определением в прошлом основных физических понятий. Слово «основных» — коварное слово; его коварство заключено в том, что оно скрывает от нас огромное число «неосновных» физических понятий, которые, будучи неосновными, не заслужили в свое время должного внимания.

Возведение понятия в сан «основного» не непогрешимо. И понятия, которые в свое время «обошли» с возведением в ранг основных, часто жестоко «мстят» физикам за невнимание. Об одном таком понятии (понятии одновременности) теория относительности ведет несколько сложный, но поучительный рассказ. Теория относительности в особенности приучила к осторожному обращению с «основными» физическими понятиями, но главное, если можно так сказать, привила высокую культуру физических определений.

Определение физических понятий должно содержать существенным образом описание экспериментов, с помощью которых возможно сделать наблюдения и измерения, относящиеся к данному физическому понятию. Эта возможность измерения должна быть хотя бы принципиальной. Это значит, что должен быть хотя бы мыслим такой эксперимент, т. е. проведение такого опыта не вступало бы, по меньшей мере, в противоречие с той теорией, которая содержит это понятие и которая в настоящий момент обсуждается или даже считается правильной. Если проведение такого опыта противоречит другим положениям теории и в рамках этой теории оказывается поэтому принципиально невозможным, то в рамках данной теории констатируется несостоятельность данного понятия. Если данная теория строго подтверждается экспериментом, то тем самым обсуждаемая экспериментальная несостоятельность раскрывает несостоятельность понятия.

В общем, выражаясь не книжным языком, «физик должен знать, о чем он говорит». Чтобы слова физических определений не были пустыми, физик не только должен рассказать, но и принципиально «показать», о чем идет речь, т. е. провести рассуждение «молча», с помощью приборов.

В таком общем и элементарном изложении с первого взгляда нельзя усмотреть огромную важность этой, казалось бы, простой истины: «физик должен знать, о чем он говорит». Часто недоразумение заключается в том, что физик только «думает», что он знает, о чем он говорит. В таких случаях при обращении к эксперименту получается «возмездие».

С другой стороны, понятия обладают, так сказать, известной агрессивностью: они часто претендуют на области, где, по существу, применимость их лишена смысла, т. е. часто наше сознание по привычке, без достаточного основания, расширяет область применимости того или иного понятия и лишь после, иногда долгое время спустя, именно здесь обнаруживаются источники многих недоразумений. Таким примером служит некритическое применение понятий импульса и координаты к частицам микромра.

Ввиду важности вопроса остановимся вначале на одном совсем элементарном примере — понятии скорости. Мимо нас по шоссе мчится легковая машина. Мы говорим: «Какая бешеная скорость!» Глядя вслед сильной машине, переводим слово «бешеная» на язык цифр: 100—120 километров в час. «100—120 км/ч — такова скорость».

Кажется, что фразу, взятую в кавычки, не может упрекнуть и самая придирчивая критика: нам фраза понятна, «мы знаем, о чем идет речь».

Но здесь могут обратить наше внимание на то обстоятельство, что шоссе вместе с Землей само движется вокруг Солнца со скоростью 30 км/с и что, собственно говоря, мы скорость автомобиля «указали неправильно».

Но, более того, вся Солнечная система с огромной скоростью (около 20 км/с) движется к созвездию Геркулеса. Наконец, Галактика движется тоже...

Какова же в самом деле скорость автомобиля? Откуда мы взяли, казалось бы, понятную цифру 100—120 км/ч?

Последний вопрос имеет однозначный, точный ответ: 100—120 км/ч — это скорость легковой машины относительно нас, стоящих на обочине шоссе.

Теперь настало время признаться в заблуждении. Мы писали: «нам фраза понятна», «мы знаем, о чем идет речь» (100—120 км/ч — такова скорость). В этой фразе пропущены слова «относительно Земли». Без этих слов фраза, ясный смысл которой мы всячески подчеркивали, не имеет никакого смысла.

Но какова же скорость автомобиля вообще, скорость «как таковая», безотносительно к чему-либо?

«Безотносительно к чему-либо...» Это проще всего попытаться представить себе, удалив мысленно деревья, дома, наконец, асфальт шоссе... Мы закрываем глаза и представляем себе в пустой Вселенной «бешено» мчащийся автомобиль. Мы ловим себя на попытке совершить «жульничество» — измерить скорость автомобиля относительно нас самих — и во избежание подобных недоразумений садимся в автомобиль.

Мы знаем, что автомобиль «мчался мимо нас с бешеной скоростью», когда мы удачно вскочили в проходящую машину.

Какова же скорость в настоящий момент?

Здесь физик даст совет, простую, но глубокую мудрость которого оценить по заслугам во всей полноте могли лишь последние десятилетия:

— Измерьте!

Пытаемся это сделать.

Но тут мы замечаем, что измерить скорость не можем. У нас нет другого тела, другого предмета, относительно которого измеряется скорость. И физик резюмирует положение: «Это значит, что понятие скорости здесь неприменимо».

Неприменимо, ибо понятие скорости включает в свое определение два тела и становится бессмысленным, если дано одно из них.

Смысл слова «измерьте» заключается не в том, чтобы испытать ваше искусство экспериментатора — в нем великодушно не сомневаются, предполагается идеальный экспериментатор, вооруженный идеальными инструментами измерения, — это лишь просто способ проверки применимости в данном случае самого физического понятия, о котором идет речь. Приглашение перейти от слов к делу, от психологии к физике, показать, что за словами, которые вы произносите, скрыто реальное или, во всяком случае, внутренне непротиворечивое содержание, — в этом, с другой стороны, заключается и огромное «педагогическое» значение предложения «измерьте».

Часто на некоторые вопросы нельзя ответить не потому, что «здесь наука бессильна», а просто по причине бессодержательности самого вопроса (Какова траектория тела вообще? Какова скорость вообще? и т. д.).

Для того чтобы оградить себя от неуместных вопросов, физики выработали некоторое противоядие, которое в умеренной дозе имеет характер лекарства: они ограничиваются в известном смысле «деловыми» вопросами. Физики считают, что форма обращения к ним должна быть примерно следующая: «Что будет наблюдаться, если я возьму и сделаю то-то и то-то?»

Если теория правильна и полна, она должна ответить на любой такой вопрос и ответить в форме определенного научного предвидения.

Необходимость «указывать на табличку» («Без дела не ходить!») оказывается особенно полезной, когда появляются фундаментальные трудности в теории. Эти фундаментальные трудности связаны часто с неприменимостью старых понятий в какой-то области явлений.

Надо заметить, что мысленный эксперимент имеет значение лишь иллюстрировать внутреннюю непротиворечивость и полноту теории. Если теория к тому же соответствует действительности, то мысленный эксперимент может принципиально стать реальным экспериментом. Если теория терпит крах и наступает эпоха теоретического хаоса, мысленные эксперименты, естественно, ничему помочь не могут.

Здесь помощь можно ожидать только от реальных экспериментов. В квантовой теории мы имеем как раз случай теории, в широких пределах подтвержденной опытом. Поэтому строгий теоретический анализ возможностей измерения в рамках этой теории имеет фундаментальное значение. Анализ возможностей измерения, связанный с соотношением неточностей Гейзенберга, привел Нильса Бора к формулировке так называемого принципа дополнительности.

Принцип дополнительности

Как мы знаем, частица в классической физике характеризуется, с одной стороны, координатой—положением в пространстве и во времени и, с другой стороны,—определенными значениями импульса и энергии. Непрерывный ряд положений частицы в пространстве и во времени дает нам пространственно-временную картину движения частицы.

Знание импульса и энергии частицы и всего, что происходит с этими величинами во всех перипетиях, постигших частицу, дает энергетическую сторону поведения частицы. Энергетическое поведение частицы строго характеризуется законами сохранения энергии и импульса. Пространственно-временная и энергетическая стороны в поведении частицы составляли в классической физике полную характеристику классической частицы.

В квантовой теории, как мы знаем, импульс и координата не могут быть одновременно точно измерены, одновременно они не имеют точного физического смысла. В квантовой теории, таким образом, можно рассматривать либо только энергетическую сторону поведения частицы с точки зрения законов сохранения, либо только пространственно-временную. Если в классике пространственная характеристика частицы как материальной точки, определенным образом локализованной в пространстве, и энергетическая характеристика находят свое отражение в объективном сосуществовании в образе частицы, то образ квантовой частицы таков, что эти стороны исключают друг друга.

Здесь надо ясно себе представлять омысл утверждения «исключают друг друга». «Стороны»—не одушевленные существа, которые как-то борются и «исключают» друг друга. Но здесь все же входит в теорию «субъективный» момент, который может быть исчерпывающе понят при анализе характера нашего познания микромира как объективной деятельности человека. Человек исследует микромир с помощью физических приборов. Одни приборы дают сведения

о микрочастице пространственно-временного характера, другие приборы дают сведения энергетического характера. Эти два класса приборов, вернее, два класса измерений, в известном смысле «враждебны» друг другу. Взаимодействие их с объектом микромира таково, что применение прибора одного класса исключает применение прибора другого класса. И это исключение, как утверждает квантовая теория, принципиально заложено в фундаменте квантовой механики и не зависит от практической конструкции прибора, а зависит лишь от характера его «класса» (пространственно-временного или энергетического).

С этой точки зрения, «субъективный момент» заключен лишь в свободе выбора (для наблюдения) приборов того или другого класса. И, конечно, субъективный момент является моментом объективной деятельности человека. Но один прибор дает нам пространственно-временную картину, другой — энергетическую.

Здесь проявляется принципиальное различие роли прибора в классической и квантовой физике. Если в классической физике прибор вскрывает существующее состояние частицы, то в квантовой физике прибор часто участвует в создании состояния частицы^{*)}, придает ему тот или иной смысл — пространственно-временной или энергетический. Прибор, как говорят, «приготавливает» состояние. Этот несколько «поварской» термин прочно вошел в язык квантовой теории.

Так как речь идет о таких сторонах понятия частицы, которые в классической физике дополняли друг друга, то и соответствующая новая ситуация в квантовой теории обозначена Н. Бором термином «дополнительности»; принцип же, формулирующий особый характер этой дополнительной в квантовой теории, — «принципом дополнительной».

Иногда сравнивают «принцип дополнительной» Бора с «принципом относительности» Эйнштейна. Так как мы не касались последнего, то лишены возможности передать то существенное, в чем усматривается аналогия. Мы рассмотрим совсем простой пример, имея в виду, конечно, что аналогии всегда страдают большими пороками.

Характер траектории движущегося тела, как известно, зависит от системы координат. Авторы популярных книг часто приглашают читателя в вагон железнодорожного поезда и здесь обращают его внимание на ряд поучительных явлений. В вагоне заставляют подбрасывать и ловить пред-

^{*)} В дальнейшем мы неоднократно будем обращаться к этому вопросу и рассматривать его с разных сторон.

меты, следить за движением их с точки зрения наблюдателя, сидящего в вагоне, и наблюдателя, стоящего на полотне железной дороги.

Наблюдатель, сидящий в вагоне равномерно идущего поезда, легко убеждается, что предметы, выскальзывающие из рук пассажира, падают на пол по прямой линии, отвесно; что места, куда падают предметы, не зависят от того, движется вагон или спокойно стоит на станции. Предмет, начавший свое падение, «нацелившись» на пол в середину купе, достигает пола, не сбиваясь с отвесного пути. Движение поезда на путь тела не влияет: предмет не оказывается ближе к дивану, несмотря даже на большую скорость поезда.

Наблюдатель — стрелочник, стоящий у полотна железной дороги, — ясно видит, что книга выскользнула из рук пассажира в тот момент, когда он, наблюдатель, стоял прямо против пассажира, и стукнулась об пол, когда поезд проехал несколько влево. Или, начертив траекторию предмета, стрелочник получает ее в виде кривой. Эту кривую можно жирной линией нанести на рисунке рядом с первой — она тоже траектория тела. Мы видим у одного тела «две траектории», два пути, они мало похожи один на другой. Можно предложить вопрос — какая же из этих траекторий, какой же путь из этих двух, является «истинной»?

«Истинную траекторию нарисовал стрелочник», — так сказали бы несколько веков тому назад, когда не знали движения Земли. Если теперь поставить «стрелочника» на земной орбите, он нарисовал бы третью траекторию, не похожую на две первые; но, учитывая движение Солнечной системы относительно звезд, мы получили бы четвертую траекторию и т. д.

Какая же траектория истинная?

Мы здесь снова встречаемся с ложной проблемой, с неточно поставленным вопросом. В вопросе обязательно надо добавить «с точки зрения такого-то наблюдателя, с точки зрения такой-то системы координат (поезда, полотна дороги)», как часто говорят физики. «Точка зрения» — здесь, конечно, образное выражение: у системы координат (поезда, полотна дороги) нет точки зрения. Речь идет о траектории, которую тело чертит в купе поезда или на пленке киноаппарата, установленного на полотне дороги.

Как прямая, так и парабола могут быть зарегистрированы кинопленкой объективно. Прямая и парабола представляют собой в этом смысле реальность, но в данной конкретной системе они исключают друг друга.

Аналогично этому вопрос: «Имеется ли у данной микрочастицы определенное значение координаты, можно ли

считать, что данная частица «собрана» в какой-то определенной малой части пространства?» оказывается с точки зрения квантовой теории неточно поставленным. Что значит «данная» частица? Каким образом она нам дана? Каким аппаратом вы установили ее существования? В какой связи вы говорите о «данном объекте» микромира как о частице? Если вы установили ее существование аппаратом «энергетического класса», то к объекту, «данному таким образом», неприменимо понятие определенной локализации. Наоборот, микрообъект имеет смысл точно локализованной классической частицы, если он «дан» вместе с аппаратурой пространственно-временного класса.

Как траектории тела имеют смысл не сами по себе, а в связи с данной системой (поезд, полотно), так и старые классические дополнительные понятия импульса и координаты частицы могут характеризовать новый для нас объект микромира, но лишь в связи с аппаратурой того или иного класса и взаимно исключающим образом.

Как различные траектории одной и той же частицы — параболу и прямую — нельзя понимать сосуществующими в данной системе координат, так и точные понятия импульса и координаты классической частицы в применении к микрочастице нельзя представить сосуществующими в данном опыте. И это объективно. Нельзя смотреть на квантовую механику как на испорченную «нашим незнанием» механику классическую. Незнание само по себе — неточное наблюдение части величин в классической механике — никак не может служить источником знания огромного количества новых фактов, даваемого квантовой теорией, и объяснения старых, которых не могла объяснить теория классическая.

Педагогически нелегко передать точно эту особую черту дополнительности в квантовой теории. Трудности заключаются в том, что перед нашим «умственным взором» все время маячит наглядный образ классической частицы; что в квантовой теории мы употребляем тот же термин «частица», в то время как здесь от старой «доброй» классической частицы осталась «половина», правда, «по выбору» либо энергетическая, либо пространственно-временная. Существенно при этом, что в применении к объекту микромира понятия классической «получастицы» определяющую роль играет класс измерений, вообще говоря, «приготавлиющий» данное состояние.

Для дальнейшего необычайно важно иметь в виду, что понятия импульса и координаты, экспериментальный смысл этих понятий — импульса самого по себе, координаты самой

по себе («измерьте!»)—в квантовой области имеют такой же смысл, как и в классической. Важно иметь в виду, ясно себе это представлять, что мы в квантовой теории, несмотря на ее удивительные особенности, подходим к микромиру с классическими понятиями, макроскопическими понятиями, макроскопическими представлениями.

В классической физике основные, фундаментальные понятия—это понятия импульса и координаты, энергии и времени. Эти понятия получены нами в нашей макроскопической деятельности; они, во всяком случае, характерны для микромира. Могло случиться так, что, изучая микромир, мы нашли бы в нем вместо физических явлений, характеризующихся импульсом и координатой, принципиально новые физические явления, характеризующиеся понятиями, адекватными микромиру, но это не случилось. Мы идем в микромир с макроскопическими представлениями, несмотря на то, что классическая теория не может сама по себе объяснить тех новых закономерностей, с которыми мы имеем дело в атомной физике.

То новое, чем характеризуется атомный мир, не дается заменой фундаментальных понятий импульса или координаты классической физики какими-то новыми фундаментальными же понятиями. Новое отображается новым, взаимно исключаяющим применением этих же старых понятий к объекту микромира. Может быть, самое удивительное в новой теории—это то, что многое, и надо сказать очень многое, в ней достигается не введением новых понятий, а взаимным ограничением старых.

Все сказанное выше ни в коей мере не означает, что в микромире нет ничего нового. Наоборот, в физике микромира удивительно много нового, своеобразного; и это новое и своеобразное отображается новыми же понятиями, но эти новые понятия микромира таковы, что они строятся буквально на «обломках» старых понятий классической механики.

Может возникнуть вопрос: почему при анализе микромира, создавая теорию явлений микромира, мы должны такую существенную роль отводить макроскопическому прибору и в связи с этим макроскопическим понятиям вообще? На этот вопрос можно ответить коротко: потому что речь идет о познании, которое само по себе является макроскопической деятельностью человека. Вот почему мы в своем анализе принципиальных вопросов современной физики решили исходить из трактовки познания микромира как макроскопической человеческой деятельности. Только

таким анализом можно получить ясное представление о своеобразном характере теоретико-познавательных проблем, возникающих при нашем научном проникновении в микромир.

Познающий субъект как макроскопический прибор

Анализируя организм человека в его деятельности как «физический прибор», мы констатируем, что перед нами прибор *в основном* макроскопический. Все органы чувств человека возникли и развились в процессе его практической деятельности, в длительной борьбе за существование именно в макромире. Его непосредственное взаимодействие с окружающими его предметами — макроскопическое взаимодействие. Непосредственная деятельность человека как «узкофизического прибора» протекает в макромире. Динамические понятия классической механики, такие, как сила, работа, энергия, с одной стороны, очень «человечны», они как бы вносят в природу антропоморфный элемент, но, с другой стороны, эти понятия получили вполне объективное содержание. Сила выражается через такие объективные категории, как инертная масса и ускорение, энергия понимается также как вполне объективная характеристика движения. Такая возможность объективного подхода к когда-то неопределенным мускульным, во многом очень субъективным ощущениям заключается в том, что человеческий организм во взаимодействии с природой выступает как объект классической механики. И обратно, отсюда, конечно, совершенно не случайно развились именно такие органы чувств, которые дают непосредственную возможность ориентироваться в природе в пространственно-временном и энергетическом отношениях. Эти отношения полностью характеризуют поведение материи в области применимости механики Ньютона, в сфере непосредственной деятельности человека.

Законы классической механики нам потому «близки», а механическое мировоззрение кажется часто наиболее «простым», что наши органы чувств приспособились к непосредственному восприятию этого мира явлений. Они образовались в историческом развитии нашего организма в макромире. В развитии нашего организма не было «жизненной» необходимости для органов чувств «выйти», во всяком случае, далеко за «рамки» ощущения макромира.

Рассматривая человека как физический прибор, мы приходим к выводу, что этот прибор непосредственно «регистрирует» главным образом взаимодействие с макромиром. В силу всяких причин мыслящее существо физически как

орудие исследования представляет собой в основном макроскопический прибор. Но, с другой стороны, объективный мир и наше знание объективного мира не ограничиваются макроявлениями.

Рассматривая различные формы движения материи, можно представить себе такую последовательность.

...микромир — макромир — Вселенная.

Микромир — мир «элементарных» частиц, ядра, атома.

Макромир — мир окружающих нас тел, область применения классической физики.

Наконец, Вселенная... — как ультрамакромир.

(Многоточие поставлено осторожности ради, «на всякий случай».)

Отвлекаясь в область ненаучных фантазий, можно себе представить, что чувствующая и мыслящая материя проявляется в какой-то другой форме, не в форме макроскопического существа. Естественно полагать, что органы чувств такого «индивида», «биологическое» существование которого связано, например, с атомным миром, давали бы «непосредственные сведения» о явлениях микромира. Его мировоззрение на первых порах было бы «электромагнитным», а законы макромира и весь мир макроявлений казались бы ему, может быть, не менее далекими и странными, чем нам закономерности микромира. Он понимал бы их, лишь делая пасилие над своими наглядными представлениями.

Внутриядерное «существо», к зависти современных физиков, было бы буквально «как у себя дома» в вопросах ядерных сил... «Наглядные», «модельные» представления этих «физиков» были бы атомные и ядерные. Атомное и ядерное бытие их наложило бы свой отпечаток на определение физических понятий и, вероятно, на характер самой математики. Во всяком случае, они не построили бы квантовую теорию, т. е. такую теорию, однозначное толкование понятий которой относилось бы к предсказанию результатов, получаемых при помощи данной установки, описываемой чисто классическим образом.

В дальнейшем мы рассмотрим, может быть, несколько более реальную ситуацию, чем возникновение мыслящей материи в микромире. Но сейчас для нас эти примеры имели чисто педагогическое значение: еще раз фиксировать внимание на «земном», человеческом характере квантовой теории, ее понятий.

Возникает вопрос: как познающее существо — человек, органы чувств которого приспособлены главным образом к действиям в макромире, способен к познанию микромира?

Как человек — грубый макроскопический прибор — оказался в конце концов пригодным для «регистрации» явлений микромира?

На этот вопрос легко удовлетвориться до тривиальности «простым» ответом: человек строит себе более «тонкие» приборы, с помощью которых и изучается микромир.

Это истина. Но у каждой истины имеется много сторон. Нас интересуют три стороны такого рода знаний о микромире, знания с помощью «тонкого» прибора: что в этом знании —

от природы,
от прибора,
от человека?

Физический прибор

Рассмотрим внимательно роль физических приборов при изучении микромира в особенности и вообще объектов, непосредственно не воспринимаемых нашими органами чувств: электростатическое поле как таковое и т. д.

Система наших органов чувств — довольно грубый физический прибор. Груз ненамного меньше грамма рука уже не чувствует, нить ненамного тоньше волоса глаз уже не видит.

Но человек узнал размеры атома, взвесил электрон. Это прибор, фантастический прибор, исправил «недостатки» человеческого организма, расширил и дополнил его возможности.

Существенно, что прибор не всегда просто «обостряет» или механически «продолжает» наши органы чувств: он часто посредник в особом ранге между нами и явлением.

Электростатическое поле, например, наши органы чувств непосредственно не воспринимают: электрическое поле действует на электрический заряд, связанный с каким-то телом (массой), «тащит» за собой это тело в направлении действующей электрической силы. Вот это чисто механическое явление воспринимают наши органы чувств.

Совсем другое мы имеем в случае микроскопа, когда с помощью его рассматриваем микроорганизмы. Здесь микроскоп сам по себе «не существует»: глаз «позорче» увидел бы те же самые подробности. Здесь вся видимая картина во всех деталях может быть описана без всякого упоминания о микроскопе.

Другое дело, когда наблюдается явление, которое само по себе не действует на наши органы чувств. В этом случае

принципиально *нельзя описать* сущность явления, не упоминая о приборе. Прибор входит в само определение явления. Например, в само понятие, в само определение электрического поля входит упоминание о пробном заряде: напряженность электрического поля есть сила, действующая на единицу пробного заряда...

Прибор должен быть таким, чтобы показания его могли быть доступны нашим органам чувств, т. е. показания его должны иметь пространственно-временной или энергетический характер. Прибор обнаруживает явление—это значит, что явление «как-то действует» на прибор. Прибор «показывает»—это значит, что под влиянием явления в приборе «что-то меняется», заметное для наших органов чувств. Меняется его состояние как состояние макроскопической системы. Это значит, что прибор в конце концов должен быть объектом классической механики. Требование макроскопичности прибора идет «от человека». Оно обязано его макроскопическому положению в природе.

Если закономерности наблюдаемого явления в принципе не отличаются от макроскопических закономерностей, которым подчиняются прибор и человек, то роль прибора сводится в конце концов к простому, механическому продолжению органов наших чувств. В этом случае прибор не существует для трактовки самого явления—от него можно отвлечься.

Если наблюдаемый мир явлений принципиально отличен от мира макроскопического (микромир) или мира механических явлений (мир электромагнитный), то создается особая ситуация, достойная пристального внимания.

Особая ситуация заключается в том, что каковы бы ни были особенности рассматриваемого мира или явления, но если макроскопический прибор регистрирует это явление, прибор обязательно «рассказывает» о нем на своем макроскопическом языке, в терминах пространственно-временных или энергетических или и тех и других вместе, т. е. в терминах классической механики.

Если речь идет о микромире, то можно сказать, что прибор дает макроскопическое отражение закономерностей микромира. Если речь идет об электромагнитных явлениях, то прибор дает механическое макроскопическое отражение закономерностей явлений электромагнитных.

Макроскопический прибор «наблюдает» микромир, но «разговаривает» он только на языке, на котором умеет,—на макроскопическом языке. Если угодно, он играет роль переводчика. Иногда «запинается», дает бессмысленную фразу и делает примечание: «непереводимая игра слов». Но если

«переводчик» поработает «над текстом», то и здесь он всегда находит на своем языке широкие возможности смыслового перевода.

В макроскопических понятиях, на механическом, макроскопическом языке прибор выражает не только сходство, но и глубокое отличие этих особых закономерностей от закономерностей классической механики.

Это специфическое отличие выражается своеобразной комбинацией макроскопических свойств, таких комбинаций, которые не встречаются в макромире механических закономерностей. (Частица обладает определенным импульсом, неопределенной координатой, она — комбинация волновых и корпускулярных свойств. Каждое из этих понятий в отдельности имеет строгий макроскопический смысл, но простая механическая комбинация их макроскопичности противостественна.) В этом смысле макроскопический характер нашего физического познания не меняется наличием «тонкого» прибора, прибор не меняет макроскопического «языка» нашего познания. Это закономерно, ибо этот «язык» только и понятен макроскопическому существу: макроскопическое существо — человек — пока не знает никакой другой формы познавательной деятельности, кроме макроскопической. *В своей макроскопической деятельности он познает также микромир.*

Совершенно параллельно разделению явлений на класс явлений, непосредственно воспринимаемых нашими органами чувств, хотя бы принципиально, и на класс явлений, воспринимаемых нами через отражение в макроскопическом приборе, разделяются наши представления о явлениях на наглядные и ненаглядные, на «модельные» и «немодельные».

«Модельные» и «немодельные» представления

Крупнейшие физики прошлых столетий утверждали, что они не понимают явления до тех пор, пока не построят его модель. Утверждение это совсем не связано с индивидуальными особенностями научного творчества ученого: оно представляет собой резюме научного мировоззрения целой эпохи.

Успехи классической механики давали надежду понять все явления природы как явления механики, понять все физические явления через механические движения более или менее сложных комбинаций простых частиц.

Даже живое существо, живой организм упрощенно толковался как сложная машина. «Человек — машина», — писали энтузиасты этой концепции.

В таком последовательно механическом мире модель явления только количественно, только размерами отлична от самого явления. «Конструкция» явления и модель содержат в конечном счете один и тот же материал—простые частицы или непрерывную среду. Построить модель явления и понять явление—здесь почти синонимы.

В старой классической модели водорода его ядро представлялось в виде относительно тяжелого положительно заряженного шара—электрон ассоциировался с более легким шариком, несущим заряд другого знака. Все элементы этой модели атома «весомы», «зримы»; они «построены» из материала вещей, которые нас непосредственно окружают; они нам «близки», понятны эти твердые заряженные шарики... Говорили: «Конечно, в действительности атом несколько меньше, намного меньше, но это различие чисто количественное».

Но не по этому пути, как мы знаем, пошло дальнейшее развитие физики. Открылись целые новые миры явлений, для которых нельзя построить наглядных моделей. Рассказать о том, как произошла «катастрофа» модельных представлений,—это значит изложить историю новой физики. «Катастрофа» модельных представлений связана с научным проникновением в мир электромагнитных явлений, с открытием электромагнитной природы материи, со многими новыми понятиями, которые в конце концов формируются в физическое воззрение теории относительности, а затем—квантовой теории.

Наши органы чувств не доставляют нам непосредственных сведений *о природе* электромагнитного поля. В этой цепочке: *электромагнитное поле—пробный заряд—органы чувств* звено «пробный заряд—органы чувств» носит характер механического взаимодействия. Было естественно на первых порах считать и природу электромагнитного взаимодействия (звено «электромагнитное поле—пробный заряд») тоже механическим. (Этим мы имеем в виду лишь сказать, что движение пробного заряженного тела под действием электромагнитного поля предстает перед нами само по себе как механическое движение. Действие электромагнитного поля проявляется посредством механического движения пробного тела.) Такое представление было вполне закономерно и исторически неизбежно, так как наши органы чувств «не знают» никаких взаимодействий, кроме механических, которые давали бы ощущение усилия, силы. Мы знаем, как надо завить стальную проволоку в пружину, чтобы она тянула предмет, но «что» надо «завить» в окружающем пространстве, чтобы «оно»

тянуло кусок железа, заряженное тело? Естественно, что эта мысль волновала физиков с самого начала учения об электромагнетизме. Она привела к идее особой гипотетической среды, предполагаемой арены явлений электромагнитных — эфира. В течение многих десятилетий с большой настойчивостью физики работали над созданием теории механического эфира. Физики стремились выяснить, какими механическими свойствами должна обладать среда, чтобы в ней были возможны специфические действия на электрически заряженные и магнитные тела. Или, говоря иначе, стремились построить механическую модель электромагнитных явлений.

Упорная неудача преследовала эти поиски. По мере накопления фактов среде этой приходилось приписывать все новые и новые свойства. Сами по себе эти свойства, взятые в отдельности, не представляли собой ничего нового, это те же хорошо известные нам из механики свойства твердости, упругости и т. д. Но неудача заключалась в том, что подчас требовалась для толкования того или иного явления самая чудовищная и, по сути дела, взаимоисключающая одна другую комбинация этих свойств. А главное, все модели неизменно «отказывали в работе», как только переходили к исследованию электромагнитных явлений с точки зрения систем,двигающихся с различными скоростями.

Наконец физики признали свое «поражение» в попытках построить механическую модель эфира. Это «поражение» было величайшей победой в более глубоком смысле. Ибо оказалось раскрытым существование принципиально новой реальности — электромагнитного поля. Несмотря на то, что мы не можем построить наглядную непротиворечивую модель этой реальности, мы ее можем описывать, и описывать в понятиях классической механики в терминах импульсов и координат как механическую систему с бесконечным числом степеней свободы; здесь не случайно глубокое методологическое сходство с соответствующей ситуацией квантовой теории, ибо как явления электромагнитного поля, так и микроявления переводятся на показания прибора («пробного тела» в первом случае и соответствующего макроскопического прибора во втором), который подчиняется классической механике.

Было бы большой исторической несправедливостью отрицать значение модельных представлений в развитии физики. Они и до сих пор продолжают играть огромную эвристическую роль. Когда мы говорим об отказе от модельных представлений, об отказе от поисков для мира немеханических явлений механических моделей, то речь идет, конечно, о таких механических моделях, которые исчерпывали бы до конца

всю сущность явления. Такое последовательно механическое мировоззрение ушло в прошлое безвозвратно. Но вместе с тем, в некотором ограниченном и в известной мере более абстрактном смысле современная физика также модельна, ибо явления в самых разнообразных областях часто обнаруживают разительное сходство.

С точки зрения модельных представлений содержание теории—это описание модели. Какой же смысл, каково содержание новой теории, которая, как утверждается, не связывает себя модельными представлениями?

Иногда говорят, что на смену модельным представлениям пришло математическое описание. Известен афоризм одного физика: «Теория Максвелла—это уравнения Максвелла». «Волновая механика Шредингера—это уравнение Шредингера». Можно услышать новое издание этого афоризма: «С таким же успехом можно сказать, что механика Ньютона—это уравнения Ньютона», и любая область знания, не чуждая математическому описанию, не была бы здесь исключением.

«Математическое описание» вместо модельного—это ответ несколько не по существу вопроса. Конечно, математика играет в современной физике исключительную роль, но тем не менее математика была и остается для физика только инструментом, поэтому не только в математическом описании вместо модельного заключается то новое, что отличает современную физику от физики классической.

Объектом математического описания является физический образ, и существенное различие старой и новой физики не в математическом описании, а в различии самих физических образов.

Но всякий физический образ приблизительно соответствует объективной реальности: он—ее отражение в науке сегодняшнего дня, если угодно,—ее «модель». В этом смысле новая физика столь же модельна, как и физика старая.

Но модель новой физики отличается от моделей физики классической тем, что она «не наглядна». Более того, с точки зрения «наглядности» она часто противоречива. При построении «моделей» новой физики используются «материалы», которые браковались бы старыми «моделистами».

Не повторяя уже известных нам примеров, мы соплемся на теорию электрона, во многих отношениях хорошо апробированную опытом двух последних десятилетий (речь идет о теории Дирака). Возможно, что в дальнейшем пример окажется не очень удачным, т. е. не исключено, что сама теория Дирака претерпит изменение именно в этом вопросе, но мы будем рассматривать его как повод для утверждений, имеющих более общий смысл.

В теории Дирака электрон точечный, но тот же электрон обладает по абсолютной величине определенным спином (вращением — моментом количества движения). С точки зрения классических понятий момент количества движения и вращение вокруг собственной оси вообще имеют смысл только для тела, обладающего некоторыми размерами. Здесь же берется одно свойство, которое имеет смысл для тела, имеющего принципиально не точечную, т. е. пространственную, форму, и относится оно к объекту, который по своему пространственному смыслу (точечный объект) не мог бы им обладать.

Физик говорит осторожно: электрон — это не просто уменьшенный булыжник, но «нечто», что в некоторых условиях ведет себя, как заряженная точка, а, с другой стороны, в некоторых случаях ведет себя так, как шарик малых размеров, вращающийся с некоторой скоростью вокруг своей оси.

Физик, ищущий наглядных представлений, стал бы придумывать хитроумные, непротиворечивые модели, стараться «изловчиться» построить нечто такое странное.

Современный физик, умудренный богатым опытом, стал «терпимее», осторожнее, он говорит, что его эти обстоятельства в общем перестали смущать. Он рассуждает примерно так.

Микромир, как показывает опыт, существенно отличается от макромира, и в некоторых случаях я неизбежно должен столкнуться с непривычными с точки зрения макромира вещами. Иначе микромир не был бы отличен от макромира. Строго говоря, я мог только сказать, что одна группа свойств данного явления из микромира очень напоминает «вот такие» свойства макроскопических объектов, а в то же время другая группа свойств того же явления имеет большое сходство с совсем другой группой макроскопических свойств. При этом иногда я констатирую, что обе эти группы макроскопических свойств совместно у одного и того же макроскопического объекта никогда не встречаются и по своему макроскопическому смыслу несовместимы.

Представления новой физики в известном смысле так же модельны, как и представления физики классической. Но модель классической физики, в сущности, не отличается от самого явления: она — «работающая» модель. Модель новой физики носит более «иллюстративный» характер. Она «выполнена», построена из «другого материала», чем самое явление: из макроскопического материала. Модель эта в целом — «неработающая» модель.

Хороший художник создает портрет или пейзаж из разноцветных камешков. Демонстрировался как-то неплохой

портрет, выполненный из деталей одного производства. О модели в новой физике можно условно сказать, что она — портрет объекта микромира, выполненный из макроскопических «деталей».

В известном смысле модель новой физики более «модельна», чем модель физики классической. Но эти же модельные представления, которые дают ориентацию в современной физике, часто служат источником заблуждения, что случается всякий раз, когда макроскопическая модель применяется вне границ ее применимости. Мы часто обращаемся с микромиром слишком «по-макроскопически». Его наглядные представления в нашей голове слишком уж «макроскопичны». Мы часто «входим» в микромир с макроскопической невежливостью, «в пальто и калошах».

Роль математики

Конечно, физика становится все более и более математичной, но математика в ней играет некоторую новую, специфическую роль, которая тесно связана с ненаглядностью физических образов новой физики. Одно и то же физическое явление в области микромира приходится часто, как мы знаем, рассматривать с точки зрения самых различных макроскопических аналогий.

Среди земной фауны нет такого чудовища, как кентавр. Мы не можем составить живую «работающую» модель из человека и лошади, но художественное воображение смогло создать такой образ. Теперь нам надо принять как научный результат, что свойства реальности в микромире иногда описываются такими с «макроскопической точки зрения» чудовищами («волны-частицы», «получастицы»). Существенно здесь то, что мифические кентавры созданы свободным полетом фантазии — поэтическим творчеством народа; образы физических «кентавров» явились в великом прозаическом труде ученых *).

Надо сказать, что каждый новый такой «кентавр» встречается в среде физиков с превеликим недоверием и в известном

*) Стоит предостеречь о том, что термин «физический кентавр» не следует понимать слишком упрощенно. Например, представлять себе волновые и корпускулярные свойства частиц в образе волны, во впадине которой «уютным образом» расположился электрон. Методологически здесь была бы такая же ошибка, как если бы электромагнитное поле мы старались представить себе в виде механической среды. Мы этим термином (образным, но не всегда удачным) обозначаем, конечно, всю сложность ситуации, в частности принципа дополнительности.

смысле «сам» завоевывает себе право на существование. Вначале он часто оказывается «практически» необходимым для истолкования физических явлений, а затем приводит к открытию целого ряда новых экспериментальных фактов и органически входит в систему понятий новой теории.

Если поэтический гений древних для описания кентавров создал литературную форму мифа, то современная физика для описания физических «кентавров» нашла богатые и пока единственные возможности в математике, в математическом описании с помощью так называемых математических уравнений. Математическое описание не стеснено ненаглядностью комбинации свойств, с помощью которых удастся характеризовать тот или иной объект микромира. Здесь важно, чтобы математические свойства эти были правильно «записаны», правильно выражены в математических понятиях.

Если найдена адекватная физическим идеям математическая форма, то дальше математический аппарат в общем действует «автоматически», автоматически получаются все следствия, которые вытекают из данных представлений о предмете обсуждения, положенных в основу наших математических уравнений.

Главное, математический аппарат, адекватный физическим идеям, предохраняет от применения макроскопических аналогий там, где они уже теряют свой смысл, т. е. ошибки наглядных представлений, о которых неоднократно шла речь выше. Очень существенно, что этот же аппарат автоматически дает количественную «оценку» критерия применимости того или иного макроскопического понятия.

Иногда математика приводит к таким выводам, которые «здравому смыслу» кажутся абсурдными, кажется, что эти выводы противоречат даже физическим представлениям, лежащим в основе математических уравнений. Но всегда, если «соблюдены правила игры», т. е. если не сделано математических ошибок, математика оказывается правой, оказывается «умнее» человека, как в таких случаях, не переставая удивляться, с удивлением говорят физики.

Любопытно, что часто при дальнейшем изучении того или иного вопроса физики настолько осваиваются с этими, как казалось вначале, абсурдными, результатами, что начинают считать их «само собой понятными и без всякой математики, если хорошенько подумать».

По мере дальнейшего проникновения в микромир изучаемые объекты отображаются все менее и менее наглядными образами, характеризуются все более и более разнообразными свойствами и, с точки зрения макроскопической, часто более

противоречивой комбинацией свойств. увеличивается «кентаврообразность» представления, и математика становится все более и более необходимым инструментом физики. Не удивительно, что роль математики в современной физике непрерывно возрастает, ее аппарат совершенствуется и разнообразится, а язык ее становится очень своеобразным и сложным.

Перед нами книга по теоретической физике. Но «вход сюда нематематику воспрещен» — здесь эта надпись более уместна, чем в древней Академии Платона.

Узор математических знаков производит удручающее впечатление на неспециалиста и является непреодолимым барьером между современной физикой и широкой аудиторией.

За последние десятилетия все чаще и чаще встречается своеобразное, чисто математическое творчество в физике. Физик-теоретик часто, исходя из каких-то более или менее убедительных соображений, «предлагает» свои уравнения для описания целой совокупности физических явлений, как «творец» создает воображаемый мир физических явлений. Часто эти предложения не выдерживают серьезных испытаний экспериментом, но иногда они оказываются неожиданно удачными и тогда производят неизгладимое впечатление на современников.

Какой-то служитель храма Посейдона, как передает легенда, любил показывать дары, приносимые богу Посейдону от терпевших кораблекрушение и обещавших богу эти дары за свое спасение. Он говорил: «Смотрите: они обещали эти дары — и были спасены». Один посетитель обратился с просьбой: «Покажите мне дары тех, которые обещали за свое спасение, но не были спасены».

Такие «физические» дары можно видеть во многих толстых специальных журналах. Они наполняют их в виде не оправдавших себя теорий. Проводник по «храму науки будущего» не назовет имена авторов их, они погибли для потомства вместе с крушением идей и надежд, породивших эти работы. Если иметь в виду легион этих неизвестных имен, то редкие удачи перестанут быть удивительными. Правда, наша характеристика «удачи» носит очень внешний и поверхностный характер. Крупная «научная удача», если ее анализировать детально, оказывается далеко не случайной. После внимательного рассмотрения случайность удачи начинает выглядеть как историческая необходимость, подготовленная всем предыдущим развитием науки.

Есть область, где метод «математического творчества» имеет особенно существенное эвристическое значение. Это

область очень общих законов природы, теория элементарных частиц и пр. Здесь некоторые добавочные условия, добавочные требования, появившиеся в результате фундаментальных открытий новой физики, необычайно уменьшают произвол математического творчества. К числу таких добавочных требований, притом главных, относится требование неизменности формулировки закона для движущегося и покоящегося наблюдателя: закон не должен зависеть от точки зрения наблюдателя, он выражает объективное в природе. Число этих требований небольшое, но они в некоторых случаях так ограничивают математический произвол, что всякий вновь найденный математический аппарат теории, новая теория, благоприятно прошедшая через испытание этих требований, достойны, как показывает развитие физики последних десятилетий, по крайней мере внимания.

* * *

Предельно концентрируя наше внимание на очень узком вопросе, мы ограничились беглыми замечаниями о роли математики в современной физике, хотя эта тема заслуживает самого детального исследования.

В математике нашли отображение в абстрактно-логической форме очень общие соотношения объективного мира. Эта абстрактно-логическая форма содержит такой богатый «концентрат» различных возможностей, что возможность чисто логических исследований и богатство различных вариантов (в чисто математическом аспекте) гипнотизирующе действует на самого математика в такой мере, что он часто только свое собственное «я» считает источником этого богатства.

Роль и место математики в современной физике еще ждут своего исчерпывающего анализа.

Макроскопическая форма нашего знания

Иногда высказываются суждения, что квантовые представления кажутся нам очень своеобразными лишь «с непривычки», что когда физики после долгой «тренировки» привыкают к ним, они начинают мыслить квантово-механическими образами легко и непринужденно. Так же легко и непринужденно тогда представляется мир в квантово-механических понятиях, как некогда он представлялся в понятиях классических.

Здесь о так называемой привычке уместно передать мудрый рассказ одного московского профессора.

К профессору пришел студент сдавать зачет по интегральному исчислению. Студент бойко брал трудные

интегралы. Но перед тем, как поставить в зачетной книжке студента высшую отметку, профессор решил почему-то задать вопрос о самом понятии интеграла. К своему удивлению, профессор не получил правильного ответа. Еще более тяжелым оказался случай с определением дифференциала. Студент явно и безнадежно «плавал».

«Как же это можно?— недоумевал профессор.— Вы прекрасно интегрируете и дифференцируете, но не имеете понятия о том, что такое интеграл и дифференциал? Как это можно?»

«Профессор,— ответил расстроенный студент,— все дело в том, что мы вначале не понимаем, а потом привыкаем».

Если исключить этот тривиальный, но довольно распространенный случай «привычки», то от всей «концепции привычки» остается не так уж много. Правда, остается одна существенная, но все-таки частная деталь: если физик, работавший долгое время над квантовыми проблемами, обращается к задачам классической физики, то квантово-механические аналогии иногда помогают ему в решении классических задач.

На научных семинарах при обсуждении научных докладов очень часто возникают такие ситуации, когда неясное место в каком-либо классическом вопросе вдруг кем-то иллюстрируется на хорошо знакомом квантовом примере, и вопрос становится вполне «прозрачным». Такое разъяснение недоумения всегда вызывает характерную улыбку у участников семинара. В этой улыбке сквозит не только обычное удовольствие наступившей ясностью, но и специфическое отношение к тому пути, на котором достигнута эта ясность.

Эти примеры могут породить и порождают иллюзии того, что макроскопический характер нашего знания—это вопрос сложившейся случайно привычки, что для нашего сознания безразлично, с чего начать при изучении природы—с классических или квантовых представлений. Но здесь уже дело идет о простой ошибке. Иллюзия какого-то чисто квантового подхода создается лишь «короткой памятью» физика, забывшего, что именно на макроскопических «материалах», аналогиях в известной мере построена сама квантовая теория. Нетрудно понять, что во всех этих примерах микроскопические аналогии лишь «возвращаются» обратно в «макроскопику».

«От человека», от его макроскопического положения в природе этот особый макроскопический язык нашего знания вообще и знания микромира в частности. В чем же заключается объективная возможность выражать наше знание микромира в своеобразной «кентаврообразной», но, по существу, в макроскопической форме? Объективная возможность

выражать наше знание микромира в макроскопических терминах заключается в объективной возможности «перевести» явление микромира на «показания» макроприбора.

В камере Вильсона мы видим освещенную цепочку капелек. Это чисто макроскопический объект. Но это в то же время свидетельство движения элементарной частицы и ее взаимодействия с атомами газа, наполняющего камеру. В частности, можно видеть фотографии, где эта макроскопическая цепочка капелек дает нам сведения о таком интересном явлении микромира, как рождение электрона и позитрона световым квантом вблизи атомных ядер. Перед нами опять своеобразная «проекция» явления микромира на макромир.

Эта возможность макроскопического наблюдения микромира определяется тем, что микро- и макромир не разделены непроходимой пропастью, что между микро- и макромиром устанавливается связь, взаимодействие. Это взаимодействие в каждом конкретном случае приводит к тому, что меняется в конце концов макроскопическое состояние какой-то системы (прибора). В этом заложена объективная возможность истолковывать в терминах классической механики каждый данный случай взаимодействия с микромиром. Всегда возможна мысленная замена (подстановка) микрофактора, действующего на макроприбор, «классическим» фактором, приводящим к такому же изменению состояния прибора как объекта классической механики. Этим же определяется возможность и в известном смысле необходимость истолкования законов микромира в терминах классической механики.

Ту же мысль можно передать наглядной схемой, которую легче описать словами, чем нарисовать. Макроскопический прибор «В» регистрирует какое-то явление микромира, он дает его макроскопическую «проекцию». От явления микромира (будем его называть «А») к его макроскопической проекции идут точки: это значит, что данный макроскопический аппарат не дает «подробного» анализа описания самого микроявления, всех его сторон, он регистрирует лишь его данную макроскопическую «проекцию».

Макроскопический наблюдатель по макроскопической проекции начинает воссоздавать объект «А». В его распоряжении имеется только макроскопический материал. Это элементарные понятия, найденные, открытые им при исследовании макромира, — понятие волны, понятие частицы, координаты, скорости, вращения и т. д. Их достаточно для описания каждого конкретного случая изменения, наступающего в приборе, подчиняющемся классической

механике. В этом объективный залог успеха описания явления «А» в терминах классической механики. Правда, наблюдатель не может из классического материала построить непротиворечивую модель того или иного фактического явления в микромире, но может со всякими оговорками в макроскопических терминах («кентаврообразной» комбинацией классических понятий) *исчерпывающе* рассказать о свойствах объекта «А», влияющих именно таким образом на прибор «В».

В этом аспекте квантовая теория представляет собой именно такую теорию, которая дает толкование, предсказание результатов наблюдения явлений микромира с помощью «экспериментальной установки, описываемой чисто классическим образом».

Конечно, по существу своему квантовая теория является теорией микромира, она возникла при нашем проникновении в микромир, ее предметом являются объекты микромира и его закономерности, но «язык» и внешняя форма теории макроскопичны, «классичны».

Кстати, употребляемый нами термин «проекция» микромира на макромир может повести к известному недоразумению, если считать, что с помощью макроскопических проекций мы получаем не исчерпывающее знание микромира, а лишь знание какой-то одной из его сторон. Используя термин «проекция», мы действительно имели в виду, что в каждом данном опыте мы получаем не исчерпывающее знание свойств микрообъекта, а только данную его макроскопическую проекцию. Все же свойства микрообъекта исчерпываются всей совокупностью возможных макроскопических опытов, реализующих всевозможные случаи взаимодействия микрообъекта с различными макроприборами. Исчерпывающее знание микрообъекта дается всеми его макроскопическими проекциями, как пространственный образ исчерпывается его тремя проекциями... Конечно, эта аналогия поверхностна: она не отражает, например, взаимоисключающий характер некоторых «проекций».

Замечание о термине «проекция» имеет своей целью предостеречь от очень распространенной, но неправильной оценки роли макроприбора, когда макроприбор, исследующий микромир, из орудия познания микромира превращают в непреодолимую преграду на пути этого познания.

Излюбленный прием идеалистической философии — давать вещам толкование, диаметрально противоположное их реальному содержанию, и любоваться этим извращением как рафинированной тонкостью мысли: те ощущения, посредством

которых внешний мир становится достоянием нашего сознания, начинают истолковывать не как инструмент знания, а, наоборот, как источник заблуждения; то измерительный прибор, дающий точнейшие сведения о микромире, начинают рассматривать как некую преграду на пути познания микромира.

Макроскопический прибор не ограничивает нашего знания, а лишь придает ему макроскопическую форму.

Здесь для всего анализа вопроса существенна макроскопическая форма познания микромира, определяемая макроскопическим положением человека.

Квантовая механика не могла бы появиться у микросуществ, «населяющих» мир атомов и электронов, для них не было бы никакой ни необходимости, ни надобности смотреть на свой мир через макроскопический аппарат, подчиняющийся законам классической механики.

Макроскопическое положение человека, существенная роль макроскопического прибора придают некоторые новые черты как проблеме субъекта и объекта в физике, так и понятию физической реальности.

Деление на субъект и объект

В проблеме познания правильное разделение на субъект и объект очень существенно, и преувеличение субъективной стороны вопроса часто являлось источником заблуждений и приводило в лоно идеалистической философии.

До научного проникновения в микромир объективный мир представлялся как мир «однородный». Прибор наблюдения, физический прибор, не играл никакой принципиальной роли в процессе познания: прибор молчаливо считался простым продолжением наших органов чувств. Наше сознание и объективный мир связывало, в сущности, только одно звено — ощущение.

Научное проникновение в микромир принесло с собой в известном смысле деление объективного физического мира на макро- и микромир. Причем благодаря особенности познавательной деятельности человека этот микромир отражается в нашем сознании не непосредственно, а через макромир, через макроскопический прибор.

Если бы микромир был просто уменьшенной копией макромира, то «посредничество» прибора с теоретико-познавательной точки зрения совсем не было бы существенно. Постепенно выяснилось, однако, что закономерности микромира существенно отличны от закономерностей макромира.

А судить о них приходится нашему сознанию через отражение их в макроскопических закономерностях. Поэтому отражение микромира в нашем сознании имеет две ступени: а) отражение этого мира в макромире, а затем б) отражение макромира в наших восприятиях, в нашем сознании. Надо подчеркнуть, что первая ступень отражения весьма существенна и своеобразна. Прибор «чувствует» микромир и выражает его на макроязыке.

Очень часто встречаются утверждения, что квантовая теория будто бы внесла кардинально новое в классическое деление на субъект и объект. Здесь не обошлось без некоторого смешения понятий. Поводом к этому недоразумению послужило именно новое звено между объектом микромира и нашим сознанием, т. е. макроскопический прибор. Само же недоразумение заключается в том, что это звено часто по произволу относят то к субъекту, то к объекту. Такое «маневрирование» прибором не всегда остается философски безнаказанным.

Как мы увидим ниже, квантовая теория не внесла ничего нового в само «деление на субъект и объект» в его общепhilosophическом смысле, но она внесла существенно новое в вопрос взаимоотношений субъекта и объекта, раскрывая шире понятие физической реальности и макроскопическую форму нашего знания микромира.

Понятие физической реальности

Во избежание недоразумений необходимо с самого начала подчеркнуть, что в дальнейшем речь пойдет о понятии физической реальности как о некотором новом понятии квантовой теории. Под физической реальностью понимается та форма реальности, в которой реальность проявляется в макроприборе.

Согласно квантовой теории, однозначное определение понятия физической реальности включает в себя необходимым элементом указание на экспериментальную установку, с помощью которой получают результаты, относящиеся к данной физической реальности. Само измерение, само наблюдение существенным образом отражается на результатах наблюдения. Выше мы подробно обсуждали ту своеобразную ситуацию с двумя взаимно исключающими классами измерений. Здесь нас интересует чисто теоретико-познавательная сторона вопроса, именно: что нового в философское понятие объективной реальности вносит квантовая теория? Некоторые авторы утверждают, что в этом фундаментальном вопросе

квантовая теория делает существенный шаг от материализма, под знаменем которого развивалась классическая физика, к идеализму.

Но при ближайшем рассмотрении оказывается, что на самом деле авторы обсуждают неудачу метафизического материализма. И замечания их не имеют никакого отношения к материализму «послефейербаховскому», когда в образовании понятия об объективной реальности в человеческой практике объединяются как объективные, так и субъективные черты познания.

«Однозначное определение понятия физической реальности включает в себя необходимым элементом указание на экспериментальную установку...»

Рассматривая экспериментальную установку как элемент объективного мира, мы, с точки зрения теории познания (не с точки зрения узкофизической), в определении понятия физической реальности квантовой теории *не находим ничего нового*. Конечно, с физической точки зрения сами реальности полны неклассического своеобразия. Физик теперь в смысле отношения к реальности различает случай, когда он измеряет координату электрона, от случая измерения импульса электрона. Так как характер измерения существенно входит в определение физической реальности, то реальность в первом случае отлична от реальности в случае втором: электрон в первом случае «не тот», что электрон во втором. Но как в первом, так и во втором случаях реальности существуют объективно, независимо от сознания самого физика. Поэтому и в квантовой области в практической деятельности физика не возникают новые гносеологические проблемы в трактовке понятия физической реальности.

Но можно предложить вопрос: а если нет экспериментальной установки, то, что же, нет и объективной реальности? Существует ли электрон, когда на него не смотрят? Существует ли объективный мир, когда его не наблюдают?

Если некоторые философские школы утверждали, что в мире нет ничего, кроме наших ощущений, «показаний наших органов чувств», то не пытается ли современная физика утверждать, что в мире нет ничего, кроме «показаний физических приборов»? Не значит ли это появление своеобразного «приборного идеализма» и попытку истолковать отсутствие прибора как отсутствие объективного мира?

Характерным признаком любой модификации материализма является признание существования объективного мира независимо от нашего сознания, признание его объективного существования и до нашего опыта.

Спрашивается: не противоречит ли это утверждение существования объективного мира системе понятий квантовой теории?

Как мы уже подчеркивали, физик отличает случай измерения импульса электрона от случая измерения координаты. Электроны в первом случае и во втором рассматриваются как различные физические реальности. Но физик вместе с тем ясно отличает эти два случая от третьего, когда электрона вообще нет, когда имеется в наличии экспериментальная установка для измерения координаты, имеется в работе установка, измеряющая импульс, но не удастся измерить ни то, ни другое. Иначе говоря, для успешного проведения наблюдения координаты или другого опыта — наблюдения импульса — необходима *общая* для двух опытов объективная предпосылка существования, объективного существования «не-что» до опыта.

Такое общее понятие существования электрона имеется в квантовой теории наряду с более конкретным характером физической реальности. Если электрон существует в природе, то соответствующий интеграл, взятый по всему бесконечному пространству, равен единице; если электрона нет в наличии, то соответствующее выражение исчезает. Это очень общее понятие существования, для которого не имеют значения тот или иной конкретный характер «состояния» электрона (т. е. волновая функция), характер той установки, с помощью которой получены конкретные сведения об электро-не.

Математически последнее обстоятельство выражается тем, что в результате интегрирования получается число единица, независимо от вида самой волновой функции, описывающей состояние.

Квантовая теория не только не противоречит признанию существования объективного мира до всякого опыта, но, как и классическая теория, предполагает его. То понятие существования, о котором шла речь выше, ничем не отличается от соответствующего классического понятия.

В каком же отношении находится это общее и абстрактное понятие существования к более конкретному понятию физической реальности квантовой теории?

С субъективной точки зрения понятие физической реальности квантовой теории, как мы неоднократно подчеркивали, носит на себе печать макроскопической познавательной деятельности человека. Физическая реальность квантовой теории не дается простым созерцанием, она включает в себя момент активной человеческой деятельности, когда с помощью макроприбора проектируется реальность микромира на

макромир — в сферу непосредственно познавательной деятельности макроскопического существа.

Понятие физической реальности квантовой теории в этом смысле «человечно», оно подчинено человеческой деятельности.

Это понятие физической реальности *естественным образом* не возникло бы у жителей микромира, ибо оно существенным образом предполагает аппарат измерения, подчиненный макроскопическим законам классической механики.

Такое понятие физической реальности квантовой теории существенным образом связано с макроскопической формой нашего знания микромира. Это с точки зрения субъективной.

С объективной же точки зрения физическая реальность квантовой теории есть, если можно так сказать, макроскопическая форма проявления реальности микромира, она является макроскопической формой отражения микромира. В этой форме микроразмерность, микромир делаются непосредственно доступными человеку как макроскопическому существу. Естественно, что макроскопическая форма этой реальности не менее объективна, чем всякая другая.

Специфическое понятие физической реальности квантовой теории совсем не исключает, а предполагает существование объективного мира до всякого опыта, но эта реальность в философском смысле проявляется в специфической форме физической реальности квантовой теории, здесь она получает однозначное толкование в макроскопических понятиях.

Таким образом, утверждение, что электрон существует независимо от нашего опыта, имеет определенный смысл и в квантовой теории, но вопрос, в каком виде существует, как «выглядит» этот электрон «сам по себе», когда его не наблюдают, лишен в некоторых своих свойствах однозначной макроскопической определенности. Действительно, само требование описать, «как выглядит» электрон, в скрытом виде подразумевает его описание в макроскопических понятиях. Но для этого необходимо эту реальность «спроектировать» на макромир, а эта «проекция» производится с помощью прибора и оказывается различной в зависимости от характера прибора.

Это, конечно, не значит, что об электроне совсем ничего сказать нельзя, что он превращается в какой-то «бесплотный дух». Многие характеристики электрона не связаны с тем или иным классом макроскопического прибора: заряд электрона, например, его масса, подчинение статистике Ферми, а не Бозе, и т. д. Это обстоятельство надо всячески подчеркивать. Но положение электрона и его импульс

действительно лишены в указанном смысле однозначной макроскопической определенности.

Метафизический материализм, рассматривая предмет, действительность лишь в форме объекта или в форме созерцания, а не в форме человеческой деятельности, не способен материалистически анализировать это сложное взаимоотношение субъекта и объекта. Он игнорирует специфическое макроскопическое положение субъекта и макроскопическую форму познавательной деятельности человека. Он органически «не принимает» квантовую теорию и предлагает искать такую теорию, в которой действительность выступала бы лишь в форме объекта или в форме созерцания.

Идеализм, развивая и подчеркивая действительную субъективную сторону познания, вместе с тем рассматривает ее очень абстрактно, без анализа этой действительной стороны как конкретной объективной деятельности макроскопического существа, познающего в своей деятельности макромир, и, таким образом, чудовищно искажает всю ситуацию. Хотя физики под давлением фактов и пришли к фундаментальному открытию макроскопического характера человеческой познавательной деятельности в микромире, которое заключается в открытии того удивительного положения, что при изучении микромира «для толкования всех измерений в собственном смысле необходимо пользоваться классическими представлениями, несмотря на то, что классическая теория не может сама по себе объяснить таких закономерностей, с которыми мы имеем дело в атомной физике» (Бор), философы обычно воспринимают это положение абстрактно, вне связи с макроскопическим положением человека, что и приводит к философской путанице в этом важном вопросе взаимоотношения познаваемого объекта (микромира) и познающего его макроскопического субъекта.

Таким образом, последовательный анализ познавательной деятельности человека в микромире как его макроскопической деятельности не обнаруживает никаких новых научных доводов в пользу идеализма.

Современная физика дает ясное представление, что именно рассмотренному нами ограничению применимости классических понятий она обязана своими удивительными реальными успехами. Но восторг успеха, восторженный перечень совершенных наукой дел приправляются часто некоторой дозой мрачного скепсиса, или, осторожнее, какой-то неудовлетворенностью.

«Неполнота» успеха—этот упрек имеет значение лишь в том случае, если его смысл заключается в утверждении неполноты самой теории, в утверждении, что существует

что-то такое, что надо требовать от теории, но теория этого не дает. Возникает вопрос, насколько в этом смысле квантовая механика «полна».

Дает ли квантовая теория «полное» описание физической реальности?

Дает ли квантовая теория «полное» описание физической реальности? Конечно, в своем буквальном смысле этот вопрос более или менее наивен. Мы твердо уверены в том, что любая теория, если она в какой-то мере подтверждена экспериментом, является лишь некоторым приближением к абсолютной истине.

Квантовая теория в этом смысле, конечно, не является и не может быть исключением. Физики могут указать на целый список проблем, не нашедших своего решения в квантовой теории. Различные проблемы элементарных частиц космического излучения, ядерных сил — все это задачи, решение которых физиками часто сознательно связывается с выходом за рамки современной квантовой теории. Вопрос тем не менее имеет некоторое более узкое, но в то же время четкое и однозначное содержание. По этому вопросу лет пятьдесят назад развернулась оживленная дискуссия на страницах специальных физических журналов. Дискуссия была открыта статьями А. Эйнштейна и Н. Бора. Она, правда, не привела к каким-либо принципиально новым научным результатам, но привлекла внимание к некоторым другим вопросам и сыграла существенную педагогическую роль.

Существует понятие «полноты» физической теории в рамках ее применимости. Мы имеем в виду «правильную» теорию, т. е. такую теорию, каждое высказывание которой соответствует действительности и может быть хотя бы принципиально подтверждено экспериментом. Анализ вопроса начинается, таким образом, с полного доверия к теории. Теория считается правильной.

Во всей этой полемике ни одна из сторон, ни один из физиков не высказывал, конечно, сомнения в справедливости квантовой теории в области ее применения. В само же понятие неполноты теории вкладывалось следующее содержание: теория не полна, если в рамках теории можно придумать такой эксперимент, проведение которого само по себе не противоречит данной теории, но результат которого теория предсказать не в состоянии.

Были предложены самые разнообразные мысленные эксперименты, проведение которых будто бы вскрывает неполноту теории, так как они способны дать такие «подробные»

сведения об элементарном процессе, которые теоретически не следуют из квантовой механики. Но тщательный анализ их неизбежно вскрывает порочность рассуждения автора. Неизменно выяснялось, что в том случае, если бы эксперимент мог быть поставлен наилучшим и точнейшим образом, то при учете квантовой природы взаимодействия эксперимент способен дать *только то, что предсказывает квантовая теория.*

Таким образом, если имеется такое положение вещей, для которого характерно, с одной стороны, что «теория предсказывает результаты, которые полностью подтверждаются экспериментом», а с другой стороны, что «эксперимент дает такие и только такие сведения, которые предсказываются теорией», то чего же может требовать физика больше, — сверх такой гармонии между теорией и экспериментом? Имеется ли такая гармония между теорией и экспериментом? Имеется ли такая гармония теории и эксперимента не в сфере логической, не как гармония между теорией и мысленным экспериментом, а как гармония между теорией и реальным экспериментом?

Здесь существенно напомнить, что эксперимент дает блестящее подтверждение квантовой теории. Если эксперимент когда-либо покажет более подробные сведения в смысле классической механики, то это будет доказательством краха квантовой теории, на что пока нет никаких указаний.

Квантовая теория в данном смысле оказывается полной, замкнутой теорией.

Что же достойно сожаления или упрека?

Если анализ характера нашего знания с точки зрения макроскопически-познавательной деятельности человека делает многое понятным в сложном переплетении проблем современной физики, то вместе с тем возникает вопрос: не ограничивает ли макроскопическое положение человека его познание объективного мира? Разве макроскопическая форма знания исчерпывает объективный мир микромира? Разве требование истолковать все явления микромира в макроскопической физике не представляет собой своеобразное «прокрустово ложе» для описания явления микромира? Разве ситуация в квантовой теории не напоминает известную мрачную картину из седьмой книги Платона «Государство»^{*)}? Эту картину иногда рисуют авторы философских книг по физике.

В полутемной пещере сидят прикованные к полу узники. Неверный свет таинственного огня освещает вход в пещеру. За стеной, высотой в человеческий рост, какие-то существа

^{*)} Платон. Государство. — М.: Мир, 1971.

носят на длинных палках чучела животных, птиц, зверей, различные изображения и статуи. Они громко разговаривают между собой, ведут какие-то игры, шествуют в торжественных процессиях. Узники не видят ни этой стены, ни этих существ, ни манекенов—узники закованы, они не могут повернуть головы, и лишь тени транспарантов, рожденные в мерцающем свете отдаленного огня, скользят перед глазами узников по сводам пещеры.

Узники от рождения находятся в пещере, они не знают другого образа жизни, другого существования. Они не знают другого мира, кроме мира теней: тени действуют, тени передвигаются, тени разговаривают. Они знают язык теней, но ничего и никогда—о существах, повинных в этом великом заблуждении.

Если кому-нибудь из этих узников посчастливится в дальнейшем освободиться от оков и заглянуть в мир действительных явлений, то он будет несказанно поражен его богатством и разнообразием. Его мир теней покажется бесконечно бедным, жалким и ограниченным. И если приведет судьба его снова узником в эту пещеру, он будет жить в мечтах о реальном, полнокровном и красочном мире.

Разве соотношение неточностей, принцип неопределенностей—это не те же оковы, мешающие заглянуть в глубь физических явлений? Разве «макроскопическая проекция» микромира—это не мир теней, а макроскопическое существование человека—не «пещера», в которой человек—узник? Разве смутные надежды некоторых физиков на будущую теорию, которая объяснила бы «детальное» (в смысле классическом) поведение элементарного явления,—не здоровая мечта о познании полнокровного физического мира?

Эта поэтическая сказка, однако, не имеет никакого отношения к теории познания. Это только удачный пример очень плохой и поверхностной аналогии. Она может привести и приводит в лучшем случае без всяких на то действительных причин к теоретико-познавательному «самобичеванию».

Здесь мы воспользуемся удобным моментом еще раз внимательно рассмотреть то, что мы называем «макроскопической формой» нашего знания микромира, рассмотреть в аспекте теоретико-познавательном.

О форме и содержании нашего знания

Мы говорим: «макроскопическая форма» нашего знания. Что это значит? Значит ли это, что возможны различные формы знания объективного мира? Под «формой» знания

мы понимаем различные представления о данной реальности, данных реальных отношениях, различный «язык» — если можно так сказать — знания.

Начнем с одного частного и элементарного примера. В математике имеются аналитический и геометрический методы представления одних и тех же математических отношений. Оба метода дают одно и то же знание математических отношений в природе, но форма выражения этих знаний совершенно различная. Настолько различная, что одни из нас предпочитают геометрические представления, другие аналитические. Одни лучше «понимают» геометрический язык, другие — аналитический.

У Дидро в «Письме о слепых в назидание зрячим» рассказывается, как преломляется описание зеркала в представлении слепого: «Я спросил у него, что он понимает под словом «зеркало»?» «Это прибор, — ответил он мне, — который придает выпуклость вещам вдали от них самих, если они расположены подходящим образом по отношению к этому прибору. В этом случае нет вовсе необходимости, чтобы я положил мою руку рядом с каким-нибудь предметом, чтобы почувствовать его»^{*)}.

Один и тот же объект — зеркало — зрячим и слепым описывается различным языком. У того же Дидро можно прочесть: «Кто-то из нас спросил у нашего слепого, был ли бы он доволен, если бы был зрячим». «Если бы меня не одолевало любопытство, то я предпочел бы иметь *длинные* руки, мне кажется, что мои руки рассказали бы мне лучше то, что происходит на Луне, чем ваши глаза и ваши телескопы. Поэтому лучше было бы усовершенствовать у меня тот орган, который я имею, чем наградить меня недостающим мне органом»^{**)}. (Курсив мой — М. М.) *Отсутствие зрения не мешало бы человеку познавать природу, находить ее закономерности, но характер представления природы существенно отличался бы от представления зрячих.*

Приведем еще одну иллюстрацию.

Пусть на плоскости живут плоские мыслящие существа. Их чувству недоступны объемные тела, а по своим представлениям они геометры, а не аналитики.

Пусть в природе имеется трехмерное тело — конус, который в своем движении иногда пересекается с плоскостью мыслящих существ, давая в этом сечении одну из конических фигур. В таких случаях плоские существа констатируют либо

^{*)} Дени Дидро. Избранные сочинения. — М.: ИИЛ, 1941. — С. 307.

^{**)} Дени Дидро. — С. 32.

круг, либо эллипс, либо параболу, а то и просто пару пересекающихся прямых или даже точку. Пусть в своей активной познавательной деятельности они научились управлять этими событиями, передвигая различным образом какие-то рычаги; они получают различные конические сечения. Эти конические сечения представляют собой «формы проявления трехмерной реальности в их двумерном мире». Для наблюдения этой физической реальности требуется плоский аппарат. Этот плоский аппарат и сама плоскость существенным образом входят в самое определение их понятия физической реальности. В практической деятельности этих существ, на двумерном геометрическом языке с помощью этих пяти геометрических образов до конца исчерпывается трехмерное содержание конуса. Правда, двумерные жители будут различать эллипс и круг как две различные физические реальности, но когда они захотят все многообразие наблюдаемых свойств связать с объектом как источником всех этих наблюдаемых реальностей, они будут говорить в каком-то смысле о «сосуществовании» всех этих образов в одном объекте, т. е. о «кентаврообразности» объекта. Во всех аналогиях наряду с необходимыми иллюстративными чертами можно всегда найти известные недостатки. Но аналогии в данном случае помогают нам задержать внимание на самой возможности с различных объективных точек зрения подходить к объективному миру, отражать мир в различных представлениях, особенно, когда познание рассматривается конкретно, как деятельность реального субъекта, а не в форме простого созерцания.

Оставляя в стороне все эти примеры и иллюстрации, сформулируем интересующие нас вопросы по существу. Нас интересуют в основном два вопроса. Первый из них — это насколько полно может быть отражен объективный мир, микромир в особенности, в классических понятиях импульса и координаты? И второй вопрос: не возможен ли для нас принципиально другой подход к микромиру — отражение его в совсем иных понятиях, нежели понятия классической механики?

На первый вопрос мы, в сущности, дали ответ, анализируя саму возможность макроскопической формы познания микромира. Эта возможность определяется тем фактом, что явления микромира отображаются в явлениях макромира и воспринимаются человеком в этой макроскопической проекции. Так как каждое явление макромира представляется в пространственно-временных и энергетических понятиях (импульса и координаты), то и каждое макроскопическое проявление конкретного микроявления, макроскопическое его

отображение, следовательно, как уже *фактически макроскопическое явление*, по определению, обязано отображаться в макроскопических понятиях. Следовательно, *в макроскопических понятиях не может быть выражено только то, что принципиально не проявляется в макромире*. Квантовая теория с некоторой точки зрения представляет собой теорию особого класса макроскопических явлений, связанных с микромиром взаимодействием.

Существование взаимодействия—это объективная предпосылка макроскопических проявлений микромира.

Нам кажется неправильным, антинаучным утверждать, что «что-то» не проявляется в макромире, «что-то» удивительным образом не может принципиально взаимодействовать с ним. Как неоднократно указывалось в работах основоположников современного материализма, обсуждение такого «засекреченного» мира лишено всякого смысла: «Это утверждение, что мы не способны познать вещь в себе..., во-первых, выходит из области науки в область фантазии. Оно, во-вторых, ровно ничего не прибавляет к нашему научному познанию, ибо если мы не способны заниматься вещами, то они для нас не существуют. И, в-третьих, это утверждение—не более чем фраза, и его никогда не применяют на деле. Взятое абстрактно, оно звучит вполне вразумительно. Но пусть попробуют применить его. Что думать о зоологе, который сказал бы: «Собака имеет, по-видимому, четыре ноги, но мы не знаем, не имеет ли она в действительности четырех миллионов ног или вовсе не имеет ног?» (Ф. Энгельс «Диалектика природы».— К. Маркс и Ф. Энгельс. Сочинения.— Т. 20.— С. 565—566.)

Некоторые авторы, склонные к пессимизму, могут найти здесь повод для своего теоретико-познавательного «самостязания»—такой теоретико-познавательный «шахсей-вахсей» можно наблюдать в зарубежных странах на страницах философской литературы. Сами физики здесь также не являются исключением.

В действительности, все, что встречается в человеческой деятельности в макромире, т. е. все, что в этом макромире отображается, все, что с ним взаимодействует,—все это может быть познано человеком. И сама возможность отображения микромира в классических понятиях импульса и координаты связана *только* с вопросом: насколько эти классические понятия правильно отображают макромир (это не опечатка, именно макромир), насколько классическая макроскопическая механика в сфере ее непосредственной применимости (макроскопическая механика) справедлива?

И обратно, в этих понятиях не может быть выражено только то, что с макромиром принципиально не взаимодействует, то, что никогда не встречается в опыте.

Остается второй вопрос: не возможен ли принципиально другой подход к микромиру, отображение его в совсем иных понятиях, нежели понятия классической механики?

**Возможно ли отображение микромира
в иных понятиях,
чем понятия классической механики?**

Иногда, обсуждая удивительное своеобразие закономерностей микромира, высказывают соображения, которые ставят под сомнение «адекватность» современного аппарата квантовой теории задачам отображения микромира. Мы пытаемся выразить и выражаем особые закономерности микромира в макроскопических понятиях. Для отображения микромира в этих понятиях требуется их «кентаврообразное» сочетание.

Не является ли задачей физики будущего найти эти будто бы «более адекватные» микромиру физические понятия? Мы сами неоднократно подчеркивали нашу макроскопическую «невежливость» в обращении с микромиром — мы пытаемся входить в микромир «в пальто и калошах», — но в конце концов проявление нашей «вежливости» заключается в том, что мы снимаем «только пальто» или «только калоши»: подходим к микроявлениям либо «с точки зрения» координаты, либо «с точки зрения» импульса. Нельзя ли снять и «пальто» и «калоши»?

В этом вопросе имеются две стороны: одна тривиальная, которая заключается, по существу, в том же старом затаенном чувстве «недоверия» к полноте квантовой теории, в стремлении обнаружить «скрытые» параметры, которые приблизили бы, по существу, теорию квантовую к теории классической.

В этом узком аспекте вопросы ставились строго математически почти с самого возникновения квантовой теории. Существуют общие математические теоремы, утверждающие, что такие скрытые понятия, параметры несовместимы с квантовой теорией в ее современном виде, несовместимы именно в той ее области, в которой она блестяще оправдана опытом. Догматическими эти с общей точки зрения, правда, существенно ограничены определенным классом математических выражений, представляющих физические величины «скрытых параметров».

В широком логическом аспекте вопрос сводится пока к неопределенному пожеланию будущей теории «более адекватных понятий».

Против такого неконкретного пожелания трудно найти какое-либо конкретное возражение, но анализы конкретных предложений, если они появятся, всегда целесообразны. Правда, надо сказать достаточно определенно, что тенденция в развитии физики не идет в этом направлении.

В первые годы создания квантовой теории физики часто обсуждали так называемый принцип наблюдаемости. «В теорию должны входить только принципиально наблюдаемые величины»,—говорили физики, анализируя новую ситуацию в новой теории. Иногда этот принцип рассматривался едва ли не как основное достижение современной физики, как методологический принцип, дающий чуть ли не однозначную возможность при построении новой теории. Этот принцип действительно оказал известную помощь авторам квантовой теории. Но, к сожалению, как универсальное конкретное орудие он содержит существенный порок неоднозначности: какие величины считать принципиально наблюдаемыми?

Если считать, что ответ на этот вопрос должен дать эксперимент в узком смысле этого слова, то принцип становится тривиальностью. Если дело идет о величинах, принципиально наблюдаемых в мысленных экспериментах с точки зрения данной теории, то принцип в иных словах вскрывает, в сущности, непротиворечивость теории или отсутствие в ней «лишних» элементов.

Во всяком случае, этот «принцип» нельзя рассматривать как единственный фактор при построении новой теории. Более того, если рассматривать науку в ее развитии конкретно, то, в сущности, ясно, что физика всегда неизбежно «захлаплена» всякими ненаблюдаемыми понятиями. В физике сегодняшнего дня ненаблюдаемый фон электронов—в состояниях отрицательной энергии. И все это существует в физике наряду с требованием ее создателей, чтобы в теорию входили только наблюдаемые величины. Они уживаются рядом с этим принципом, говоря житейским языком, может быть, только потому, что «до них не дошли руки». Но, с другой стороны, здесь не простая небрежность и попустительство: это исторически естественный и необходимый момент развития науки. Если бы наука была чиста от них, она бы перестала развиваться—такая теория была бы истиной в конечной инстанции, абсолютной истиной. В этом «хламе» заложены возможности дальнейшего развития науки. Правда, такое толкование науки содержит в себе противоречие, но это—жизненное противоречие науки.

Нельзя развитие науки излагать так: «И вот голову физика осеняет мысль: посмотрю я, какие понятия не

наблюдаемы, выброшу весь этот хлам и построю настоящую теорию». Ничего из этого не выйдет, а главное, не выходит. «Хлам» выбрасывается тогда, когда он становится в физике практически ненужным, что дается самим ходом развития науки, а не абстрактным применением принципа наблюдаемости.

Наконец, имеется некоторая неясность в необходимости и даже обоснованности формулировки принципа: «В теорию должны входить *только* наблюдаемые величины». Не слишком ли большое ограничение налагает этот принцип на нашу способность к абстракциям? Действительно, в своих конечных результатах теория должна требовать наблюдаемых начальных данных, но каждый этап пути получения конечных результатов — промежуточные этапы в аппарате теории — должен ли он подчиняться требованию этого принципа? Этот вопрос нуждается в обсуждении.

Во всяком случае, имеется опасность, что в такой жесткой формулировке принцип является таким же произвольным ограничением, как и классическое требование наглядных представлений, и столь же антинаучным.

Надо заметить, что наряду с четко выраженным желанием известных авторов квантовой теории ввести, как некоторый верховный, принцип наблюдаемости, практически развитие квантовой механики выдвигало конкретные формы теории, в своей основе прямо противоположные этому принципу.

Исключительно любопытно, с этой точки зрения, научное творчество Дирака. Его «ненаблюдаемый» фон электронов отрицательной энергии стал безусловным достоянием науки.

К самой конкретной идее «фона» можно относиться по-разному: возможно, что в будущей теории идея примет какие-то иные формы, но факт остается фактом: двумя десятилетиями подтверждается ее огромная эвристическая ценность. Во всяком случае, развитие современной физики было бы существенно задержано, если бы, уступая требованию принципа наблюдаемости, в свое время отвергли теорию Дирака.

Таким образом, принцип наблюдаемости в его несомненной части вряд ли содержит больше, чем тривиальное утверждение, что теория должна соответствовать эксперименту. Таким образом, и здесь мы не находим логического ответа на наш вопрос.

Но все-таки вопрос имеет более конкретное содержание не в чисто логическом аспекте, а с точки зрения познания как конкретной человеческой деятельности.

В сфере своей деятельности человек встречается с пространственно-временной локализацией событий и с энергетическим

взаимодействием объектов. Всякий опыт ставится в пространстве и во времени, и каждое взаимодействие, по которому делаются заключения о предмете, как известно, исчерпывается энергетическим взаимодействием. Понятия пространства-времени, понятия энергии(материи)-импульса являются отображением в сознании человека его непосредственно макроскопического бытия. Если считать вместе с классической физикой, что это отображение в макроскопических пределах правильно, то какой смысл в предложении искать новые основные понятия для трактовки явлений микромира, понятия иные, чем координата и импульс, время и энергия (материя)? Ведь микромир всегда познается в форме макроскопического проявления.

Смысл предложения, по-видимому, заключается в том, что понятия энергетические и пространственно-временные отображены человеком в его макроскопической деятельности (поэтому они могут быть не адекватны микромиру), что многие наши затруднения отображают лишь недостаток языка макроскопических понятий и этот недостаток подлежит исправлению. Во-первых, этот «недостаток» связан с макроскопическим существованием человека; а поэтому «просто» непоправим, а во-вторых, не нуждается, по-видимому, в исправлении, так как не препятствует познанию природы. Действительно, тезис, утверждающий, что «макроскопический» язык недостаточен для выражения макроскопическим наблюдателем микрзакономерностей, ложен. В самой основе он опровергается тем обстоятельством, тем фактом, что от явлений микромира в макромир идет цепочка взаимодействий. что микромир при всем своем своеобразии *взаимодействует* с макромиром, и это взаимодействие, каждый его случай, с точки зрения макроскопического партнера, *обязан* истолковываться в макроскопических понятиях потому, что они только и характеризуют макроскопического партнера.

Если раньше, исходя из факта взаимодействия микромира с макромиром мы выяснили возможность толкования микромира в макроскопических понятиях, то теперь из анализа макроскопического бытия человека следует, что эта возможность должна реализоваться в нашей теории, по-видимому, довольно однозначным образом, что идея «принципиально немикроскопических» понятий пока не имеет большого конкретного содержания в макроскопической деятельности человека, познающего микромир.

Из анализа макроскопической познавательной деятельности человека вытекает только, конечно, принципиально макроскопический характер этих понятий, с помощью которых

отображается микромир, и ни в коем случае не предпринимается конкретный смысл этих понятий. Только анализ макрофизики указывает на импульс и координату или вообще на так называемые канонические сопряженные переменные, в которых наиболее последовательно и исчерпывающе отображается макромир.

Отсюда также следует, что дальнейшее развитие физических теорий, по-видимому, также не должно порывать с элементами пространственно-временных и энергетических отношений. Это, разумеется, совсем не значит, что наши физические представления о микромире не подлежат дальнейшим изменениям, что пространственно-временные отношения не будут обогащаться новыми фактами, но все эти факты будут, по всей вероятности, все же подчинены макроскопическому эксперименту, протекающему во времени и в пространстве, и всякое явление будущей физики также через цепочку взаимодействий должно оказывать влияние на наш прибор, изменяя его состояние, и на органы наших чувств; оно не только должно быть отлично от вещей макромира, но чем-то «похоже» на них, чтобы иметь *возможность с ними взаимодействовать, чтобы иметь возможность проявляться в нашем опыте*. Ведь «таким образом» явление может изучаться, а многообразие свойств микрообъекта благодаря этому взаимодействию — исчерпываться многообразием проявления микрообъекта в нашем макроскопическом опыте.

Можно подумать, что мы слишком большую роль отводим тому «земному», макроскопическому, что характерно для современной квантовой теории, что мы, наконец, приписываем могучую роль абстрактного мышления. Это неверно: достаточно раскрыть любую книгу по квантовой теории, чтобы убедиться в колоссальной роли и возможностях абстрактного мышления, убедиться в том, что макроскопическая форма нашего знания микромира предъявляет огромные требования именно к абстрактному мышлению, роль которого непрерывно возрастает.

Современная физика и идеализм

Современная физика, как мы видели, не дает никаких аргументов в пользу идеализма. Наш анализ показал, что их нельзя найти ни в физическом, ни в философском понятии реальности, ни в проблеме субъекта и объекта.

Почему же, однако, многие зарубежные авторы считают, что «современная физика идет в направлении идеализма»?

Почему, несмотря на фактически материалистическое содержание современной физики, создатели ее в своих философских истолкованиях, за немногими исключениями, становятся на идеалистическую точку зрения?

Почти до начала текущего столетия физики рассматривали изучаемую ими действительность только «в форме созерцания», а не с точки зрения человеческой деятельности. Познающий субъект, человек, и его макроскопическое положение в природе, макроскопический характер его познавательной деятельности не налагали никакого «субъективного» отпечатка на природу нашего знания. Процесс познания если и трактовался как деятельность субъекта, то как деятельность чисто созерцательная.

В своей практической деятельности физик — всегда стихийный материалист, а такой чисто созерцательный характер познания всецело укладывается в философскую концепцию метафизического материализма, который исторически и был связан с классической физикой. Впервые ясное рассмотрение нашего познания под углом зрения человеческой деятельности вошло в физику вместе с теорией относительности. Теория относительности нанесла сокрушительный удар созерцательному характеру нашего представления о действительности.

В физических рассуждениях появился «наблюдатель», он прочно «усаживается» в «данную систему координат». Хотя законы природы формулируются независимо от этого наблюдателя и присутствие наблюдателя ни в какой мере не уменьшает объективного характера природы, представления многих отношений мира в данной системе координат выглядят иначе, чем в других: здесь иные длины, иные длительности, иные события одновременны^{*)}. Эти отношения останутся теми же, если наблюдателем в данной системе координат будет физический прибор. В этом смысле все эти отношения в данной системе координат также объективны. Но с точки зрения человеческой деятельности важно указать ту систему координат, в которой ведутся наблюдения, так как конкретное проявление закономерностей в вариантных величинах в ней своеобразно. Своеобразие свойственно данной системе координат. Это значит, что в практической конкретной познавательной деятельности человек смотрит на мир

^{*)} Несмотря на то, что законы природы выражаются независимо от системы координат, наблюдение их всегда ведется в какой-то конкретной координатной системе. Невозможно расположить приборы и наблюдать мир с какой-то «внесистемокоординатной» точки зрения.

с какой-то, правда, объективной, но данной, определенной, одной, «конкретной» позиции, под данным объективным, но отличным от других «углом зрения». Метафизический материализм видит в этом «субъекте»-наблюдателе посягательство на саму объективность существования мира и до сих пор не может и не в состоянии примириться с теорией относительности.

Квантовая теория привнесла еще в более конкретной форме рассмотрение действительности с точки зрения человеческой познавательной деятельности, с точки зрения макроскопической «системы координат», с точки зрения макроскопической деятельности человека. Для человека, для познающего субъекта как макроскопического существа, характерно познание микромира через отражение его в макро-явлениях. Это отображение, как показывает квантовая теория, не однозначно и зависит от способа отображения, от той или иной экспериментальной установки. Хотя выбор экспериментальной установки находится всецело во власти субъекта, эта активная роль субъекта нисколько не противоречит объективности данного способа макроскопического проявления микромира, так же, как человеческая деятельность вообще не противоречит существованию объективного мира, а предполагает его. Но становится совершенно невозможным созерцательное отношение к действительности.

Перестает быть однозначным старый, казалось бы, всегда ясный и определенный вопрос: как «выглядит» электрон сам по себе, когда его не наблюдают? С одной стороны, вопрос требует ответа, как электрон «выглядит». С точки зрения познания как человеческой деятельности это значит: как, каким электрон встречается в человеческой деятельности, в опыте? Квантовая теория утверждает, что «выглядеть» электрон будет по-разному в зависимости от того, как «смотреть»: какие установки применять при наблюдении. Но в вопросе поставлено условие: «когда не наблюдают», т. е. когда не указывается характер установки наблюдения. Это условие лишает возможности однозначного ответа. Ситуация совершенно аналогична вопросу: какова траектория или «какова длина стержня безотносительно к какой-либо системе координат»? Отказ от ответа не значит, что стержень вообще не существует, что электрон вообще не существует, но лишь означает неправильную постановку вопроса.

Современная физика после долгих исканий пришла к квантовой теории как теории, толкующей в классических понятиях результаты наблюдения микроявления с помощью макро-прибора: пришла к уяснению своеобразной макроскопической

формы нашего знания микромира, отнюдь не исходя из теоретико-познавательного анализа характера познания макроскопического субъекта, а чисто «эмпирически». В современном изложении квантовой теории ее классический характер кажется случайным; кажется удивительным, что «необходимо пользоваться классическими представлениями, несмотря на то, что классическая теория не может сама по себе объяснить тех новых закономерностей, с которыми мы имеем дело в атомном мире»^{*)}.

В этой фразе сквозит большое удивление. Удивление колоссальному успеху самой возможности с помощью именно этих классических представлений давать исчерпывающее истолкование явлений микромира. Любопытно, однако, что никакой попытки теоретико-познавательного анализа причин такой удивительной ситуации никем не делалось. Эта ситуация трактуется абстрактно, «как данная».

Нельзя созерцательно воспринимать микромир (микроявления), надо предварительно отобразить его в макромире. Для этого необходима активная деятельность познающего субъекта.

Метафизический же материализм стал в оппозицию к развивающейся науке — оппозицию, в известном смысле, воинствующую, так как она требует изгнания субъективных моментов из познания, изгнания из него его действительной стороны. Фактически, как показывает полустолетнее развитие науки, метафизический материализм лишь на словах объявляет непримиримую войну «субъективизации» природы. На самом же деле такой ложной «объективизацией» он привносит субъективные моменты, искажающие действительную картину объективного мира. Это стремление к ложной объективизации доводится до своего логического конца в известном наивном вопросе озадаченного ученика, с которым он обращается к своему учителю: ученик добросовестно усвоил все перипетии с историей открытия электрона и изучением его свойств, но никак не может постигнуть, как обнаружили, что данная частица называется электроном.

Эта «глубокомысленная» проблема не слишком далека от тех проблем, над которыми в течение многих десятилетий безуспешно бьется метафизическая мысль механистического материализма. Метафизический материалист — большой мастер ставить несуществующие проблемы.

Отправляясь с хорошими намерениями исследовать процессы, объективно протекающие в природе, метафизический

^{*)} Нильс Бор. Избранные труды. Т. II. — М.: Мир, 1971. — С. 189.

материалист на своей «спине» приносит «вязанку дров» в общий «идеалистический костер».

Но физика продолжала развиваться своими путями. Действенная, субъективная сторона познания, ее человеческий земной характер выступили ярче.

Субъективная, действенная сторона познания, в противоположность метафизическому материализму, развивалась идеализмом, хотя абстрактно и односторонне. Во всяком случае, здесь физика, освобождаясь от уз метафизического материализма, нашла готовую систему понятий, готовую терминологию, выражающую субъективные моменты познания и большое желание видеть в науке подтверждение своих философских позиций.

Эти «услуги» идеализма в какой-то мере «оплачены» в высказываниях многих крупнейших физиков, создателей современной квантовой теории, но оплачены все-таки «фальшивой монетой»: физика, как мы видели, не подтверждает идеализма.

Освобождая современную физику от уз метафизического материализма, идеалистическая философия пытается в той или иной мере «освободить» ее от признания объективного мира.

Если метафизический материализм игнорирует субъекта, его конкретную, познавательную чувственно человеческую деятельность и абстрактно-метафизически трактует объективный мир, то идеализм игнорирует объективный мир и односторонне, абстрактно-метафизически рассматривает роль субъекта в познании объективного мира.

Метафизический материализм не может примириться с квантово-механическим определением понятия физической реальности, так как оно дано под углом зрения макроскопической познавательной человеческой деятельности.

Идеалистическая философия с энтузиазмом воспринимает этот макроскопический и человеческий «субъективный» угол зрения, но искажает его конкретное объективное содержание. Объективное содержание его безнадежно исковеркано односторонним и абстрактным подходом к толкованию познавательной деятельности.

Только «послефейербаховский» материализм гарантирует полноту рассмотрения вопроса.

Послефейербаховский материализм рассматривает познающее существо — человека — в противоположность идеализму не абстрактно, а как часть того же объективного мира, как конкретно существующего человека. Познавательная способность субъекта рассматривается «послефейербаховским»

материализмом не как абсолютная познавательная характеристика некоего абстрактного познавательного «начала», а, наоборот, рассматривается совершенно конкретно, как познавательная способность человека, которая появилась на определенной ступени развития материи в процессе материально-трудовой и общественно-исторической практики людей.

Такое общее и вместе с тем конкретное рассмотрение взаимоотношения субъекта и объекта, объективного мира в целом и познавательной деятельности человека исключает возможность теоретико-познавательных заблуждений. Конкретное физическое содержание объективного мира и его закономерностей раскрывается физикой, подтверждается согласием физической теории с экспериментом и не может быть предписано априори.

На предыдущих страницах текста, конечно, заметна печать их почти полувековой давности (1945—1946 гг.). Из последующих в литературе дискуссий следует, что в этой (по годам «древней») статье не оказалось места поистине своеобразной природе вероятностного толкования физических явлений в микромире. Со временем статистическая интерпретация имела тенденцию обособиться от интерпретации копенгагенской, исключив применимость квантовой теории к единичному объекту. В 1957 г. возникла конкурирующая с копенгагенской интерпретация — так называемая многомировая (эвереттовская).

В 1971 г., примерно четверть столетия спустя после появления в печати предыдущего текста на страницах «Physics Today» возникла дискуссия, инициированная Б. Де-Виттом, по поводу интерпретации квантовой механики^{*)}, которая показала, что среди семи физиков, принявших участие в дискуссии, отсутствует единство взглядов. А совсем недавно прошла конференция, посвященная спору Эйнштейна с Бором. Все это заставило автора включиться в продолжавшуюся мировую дискуссию — теперь по физическому истолкованию математического аппарата квантовой теории.

^{*)} Quantum Mechanics Debate // Phys. Today.— 1971, April.

К РЕДУКЦИИ ВОЛНОВОЙ ФУНКЦИИ

Переход от представлений классической физики, в частности классической механики, к физике квантовой механики исторически был не прост. Парадоксом выглядит утверждение, что В. Гейзенберг, которому принадлежит высокая честь открытия фундаментального для квантовой теории соотношения неопределенностей, или, что то же самое, принципа неопределенностей, согласно которому неточности в измерении импульса (p) частицы и одновременно ее координаты (q) связаны соотношением

$$\Delta q \Delta p \geq \hbar,$$

где $\hbar$ — постоянная Планка, сам допустил принципиальное непонимание этого принципа в существенной области его применения. В его чикагских лекциях 1929 года можно прочесть:

«Заметим, однако, уже сейчас, соотношение неопределенности, очевидно, не относится к прошлому, так как если сначала известна скорость электрона, а затем будет точно измерено положение, то возможно и для времени *перед* измерением положения точно вычислить положение электрона. Для прошедшего времени произведение $\Delta q \Delta p$ меньше чем обычная граница. Однако это знание прошлого имеет чисто умозрительный характер, так как оно никоим образом не входит как начальное условие в какое-либо вычисление будущей судьбы электрона и вообще не играет роли ни в каком физическом эксперименте»^{*)}.

Цитированное утверждение Гейзенберга ошибочно по существу, как со стороны физического содержания относительно того, что одно знание прошлого не имеет отношения к знанию будущего, так и с точки зрения понимания новизны физических представлений о своеобразной реальности свойств частицы в микромире.

^{*)} «Физические принципы квантовой теории» (Л.; М.: Гостехиздат, 1932. — С. 21).

На первый вопрос, имеет ли отношение знание прошлого к знанию будущего, отвечает статья Эйнштейна, Толмана, Подольского^{*)}. Авторы в описании некоторого мысленного эксперимента показали, что если воспользоваться утверждением Гейзенберга о возможности знания прошлого одной частицы, то согласно приводимой ими схеме эксперимента, можно предсказать будущее некой второй частицы. Авторы полагают, что таким образом критикуются основы квантовой механики.

Мной было написано (в 1935 г.) письмо Н. Бору с критикой цитированного положения Гейзенберга. Н. Бор согласился с этим утверждением^{**)}. Вторая ошибка Гейзенберга, связанная с первой, относится к неправильному истолкованию специфичности квантовой физики и ее физических объектов. Гейзенберг, в сущности, допускает такое толкование обсуждаемой ситуации, согласно которому электрон *на самом деле* обладает одновременно точными значениями импульса и координаты, но *мы не можем* их одновременно измерить.

Как это подробно развивалось в первой части нашей статьи такое истолкование принципа неопределенностей, если бы оно было правильно, вело бы к философскому агностицизму.

Появление квантовой теории и ее многолетнее развитие характеризуются еще одним любопытным на первый взгляд парадоксом. Квантовая механика частиц со скоростями, меньшими скорости света, так называемая нерелятивистская квантовая механика, в известном смысле заключена в одном уравнении Шредингера $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H}\psi$, где $\hat{H}$ представляет собой, как говорят, *оператор*^{***)} кинетической и

^{*)} Einstein A., Tolman R., Podolsky B. Knowledge of Past and Future in Quantum Mechanics // Phys. Rev.—1931.—V. 37.—P. 780 (А. Эйнштейн. Собр. соч. Т. III.—М.: Мир, 1966.—С. 631).

^{**)} Моя статья с критикой цитированного утверждения Гейзенберга и переписка с Н. Бором опубликованы также в книге: Марков М. А. Размышляя о физике.—М.: Наука, 1978.

^{***)} Мы употребили термин «оператор». Какой смысл имеет этот термин? Построение математического аппарата волновой (квантовой) механики носит, если можно так сказать, «рецептурный характер», как в сказке, когда волшебница изрекает: «Возьми то-то и то-то, поступай так-то и так-то и ты достигнешь цели». Только появление этой рецептуры—не результат указаний волшебницы, а результат сложной познавательной деятельности поколений физиков-теоретиков, математиков и экспериментаторов. Для того чтобы получить уравнение Шредингера, представляющее собой математический аппарат нерелятивистской квантовой теории, рекомендуется

потенциальной энергии. Решение этого уравнения, т. е. функция ψ , в простом случае свободного движения частицы описывает некоторую волну. Поэтому ранее часто квантовую механику называли волновой механикой.

Мы знаем, что представляет собой волна в различных средах, в частности звуковая волна, волна в оптике.

Но как же физически интерпретировать решение уравнения Шредингера — ψ -функцию, волну в квантовой физике?

Со времени появления уравнения Шредингера (1926 г.) и до настоящего времени идут дискуссии физического толкования ψ -функции, физического толкования решения уравнения Шредингера. Упомянутый парадокс заключается в том, что несмотря на отсутствие единого мнения о физическом толковании решения уравнения Шредингера квантовая механика (в частности уравнение Шредингера) бесконечно обогащило наше знание о микромире. Такая ситуация, другими словами, такая возможность в существенной части связана с тем, что квантовая физика возникла главным образом как физика атома, атомных систем. Была необходимость в объяснении количественных значений энергетических спектров атомных, молекулярных систем. Квантовая механика — уравнение Шредингера, а в релятивистской области (где v — скорость электрона, близкая к скорости света) уравнение Дирака — блестяще справилась с этой задачей. Решение волновых уравнений дает вместе с математическим видом функции ψ спектр оператора энергии $\hat{H}$ в данном «состоянии системы», т. е. ψ . От функции ψ часто требуется лишь свойство, чтобы интеграл от $\psi^*\psi$ (где ψ^* — функция, комп-

слагающей импульса, например по оси x , сопоставить производную по x : $p_x \rightarrow \hat{p}_x = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$; знак $\wedge$ над p_x означает, что речь идет не о числе, а об операции дифференцирования. Соответственно классическому соотношению кинетической энергии частицы $E_x = p_x^2/2M$, где M — масса частицы, сопоставляется оператор кинетической энергии $\hat{E}_x = -\frac{\hbar^2}{2M} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$. Полной энергии H (кинетическая $E = p^2/2M$ плюс потенциальная энергия $U(r)$) сопоставляется оператор

$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2M} \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \hat{U}(r).$$

Операции дифференцирования по времени $\partial/\partial t$ сопоставляется оператор энергии $i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \rightarrow \hat{H}$. Умножая правую и левую части «операторного» равенства на ψ , мы получаем написанное в тексте уравнение Шредингера.

лексно-сопряженная функции ψ) по всему пространству равнялся бы единице:

$$\int \psi^* \psi dv = 1.$$

Этот интеграл представляет собой в известном смысле «гробницу» физических свойств волновой функции ψ . Это свойство ψ -функции выполняется независимо от различных возможностей толкования ее физического смысла.

Перед тем как перейти к обсуждению различных физических интерпретаций квантовой физики, целесообразно уделить некоторое внимание проблеме «случайности». С открытием новых физических явлений (здесь мы имеем в виду явление радиоактивности, начиная с α -распада) возникли такие формы случайных событий, которые вошли в противоречие с привычным толкованием случайности как непознанной необходимости. Как-то так получилось, что как философы, так и физики не обратили внимания на это обстоятельство, которое, по-видимому, представляет собой нечто самое важное и наиболее фундаментальное новое даже по сравнению со всеми последующими открытиями в физике микромира. Итак, «случайность и необходимость».

Вселенная как огромный «игорный дом».

Случайность и необходимость

Понятие «случайности» нам знакомо по ситуациям из нашей повседневной жизни. Анализируя конкретные примеры какого-либо, так называемого случайного происшествия, мы обычно находим цепочку событий, которая необходимо приводит к данному происшествию. Мы даже часто говорим, что это происшествие возникло с необходимостью в результате известной цепочки событий. Так возникла интерпретация «случайности» как «непознанной необходимости». Такое представление о случайности уживается с понятием «вероятности» в рамках статистической механики.

Случайность в рамках статистической механики могла бы формулироваться как результат непознанной необходимости. Согласно этой точки зрения никакой случайности в природе нет, а также ее нет и в коллективе как угодно большого числа взаимодействующих между собой частиц. Другими словами, если бы были известны начальные данные всех частиц коллектива (даже во Вселенной) в какой-то определенный момент времени, то все последующие события и явления в этом коллективе могли бы быть в принципе вычислены и предсказаны.

Этот так называемый лапласовский детерминизм и его предполагаемая осуществимость не нарушали привычную детерминистическую картину физических явлений и позволяли без дальнейших раздумий принимать «дары» вероятностных оценок явлений там, где это оказывалось возможным. Но в явлениях радиоактивного распада, в частности распада нейтрона на протон и электрон, мы не можем утверждать, что данный случай распада нейтрона, последовавший, например, через 15 секунд после его появления, определяется какими-либо определенными начальными характеристиками именно этого нейтрона. Более того, мы не можем приписать каких-то специфических параметров возникающим в этом акте распада протону, электрону и нейтрину, зная которые, мы могли бы вычислить неизбежность распада данного нейтрона именно через 15 секунд; так, протон, электрон и нейтринно рождаются именно в процессе распада нейтрона и даже не содержатся в нейтроне до его распада. При нашем открытии явлений α - и β -распада мы молча прошли мимо чего-то фундаментально нового в закономерностях явлений в природе. В этих явлениях природа как бы играет с нами в кости^{*)}, на гранях которых отмечены различные моменты времени возможного распада атомного ядра. Мы молча прошли мимо, может быть, самого необычно нового, с чем человек встречался до сих пор в своем изучении природных явлений даже в последующих открытиях в физике микромира.

Пытливый ум может задать вопрос: «А не является ли такое состояние теории радиоактивного распада просто ее недостатком?» Иначе говоря, не следует ли полагать, что в какой-то будущей, более совершенной теории найдется ответ, почему данный нейтрон распался именно через пятнадцать секунд? Не существуют ли какие-то скрытые от нас явления, которые управляют обсуждаемым процессом? Современный ответ на эту возможность, если быть крайне осторожным, скорее отрицательный. Если в α -распаде перед фактом распада имеется система, состоящая из α -частиц и потенциального барьера, который предстоит преодолеть α -частицам (и в принципе возможны какие-то, правда, как известно, сомнительные, модели, ведущие к существованию неких скрытых параметров, определяющих скрытый детер-

^{*)} Здесь мы перефразировали известное выражение Эйнштейна, сказанное им при обсуждении квантовой механики: явления такого же класса интерпретируются им, как если бы «Бог играл со Вселенной в кости».

минимум квантового эффекта), то в распадающемся нейтроне до распада нет будущего протона, электрона и нейтрино, и ситуация здесь в этом смысле сложнее. Другими словами, можно сказать, что в физике давно обнаружены фундаментального значения эффекты, согласно которым следует признать существование в некоторых событиях в природе случайности не как непознанной необходимости, а как абсолютного шанса, появление которого регулируется лишь в среднем по множеству событий (в случае β -распада — энергией распада, фазовым множителем, определяющим число возможных состояний распадающегося нейтрона, и т. д.).

После очень важных для дальнейшего сведений о существовании в природе случайности как абсолютного шанса, т. е. принципиально не связанного цепочкой необходимостей, мы можем рассмотреть существующие интерпретации квантовой механики. При всем их различии общим для них оказывается существование случайности как абсолютного шанса.

Выше мы не совсем удачно характеризовали проявление абсолютного случая в природе, говоря, что в этих явлениях «Бог как бы играет со Вселенной в кости». Было бы точнее сказать, что природа играет в кости сама с собой. Правильнее в этом смысле рассматривать природу саму по себе без какого-либо наблюдателя. В качестве примера проявления абсолютного шанса мы назвали только распад нейтрона. Но при изображении материи Вселенной как совокупности взаимодействующих, так называемых элементарных частиц вся природа и все элементарные взаимодействия в ней предстают перед нами как мир господства абсолютного случая. Возбужденные атомы и молекулы излучают свет по закону, аналогичному распаду нейтрона. Возникающие во взаимодействиях фотонов с веществом позитроны образуют с электронами позитроний, который распадается на два γ -кванта в пределах среднего времени жизни позитрония непредсказуемым образом. Угол рассеяния элементарных частиц друг на друга тоже в известных пределах подчиняется абсолютному шансу. Мы с полным правом могли бы озаглавить этот параграф так: «Вселенная как огромный игральный дом (казино), где роль естественных «рулеток» играют элементарные физические процессы».

Общим для всех трех интерпретаций квантовой механики является принятие двух положений Бора:

1. Для толкований всех измерений в собственном смысле необходимо пользоваться классическими представлениями, несмотря на то, что классическая теория не может сама

по себе объяснить тех новых закономерностей, с которыми мы имеем дело в атомной физике*).

II. Как бы далеко ни выходили явления за рамки классического объяснения, все опытные данные должны описываться при помощи классических понятий**).

Именно эти положения Н. Бора формулируют точку зрения о наших восприятиях микроявлений как особого класса макрособытий, регистрируемых макроприборами, что оставляет неизменными при изучении микромира старые гносеологические проблемы, давно сформулировавшиеся в нашей макроскопической практике.

Общим для всех трех интерпретаций квантовой теории является принятие существующих уравнений квантовой механики (уравнений Шредингера, Дирака) без каких-либо их модификаций.

Описывает ли квантовая механика единичные объекты микромира или она способна описывать только какие-то ансамбли, не лишне напомнить, что в ранних изданиях книг по квантовой механике речь шла об описании в квантовой (волновой) механике единичных объектов, возникших еще в классической механике, таких как осциллятор, ротатор и атом Бора. Так, Зоммерфельд в своей книге (1928 г.) подробно обсуждает осциллятор, ротатор, атом Бора и кеплерову проблему, имея в виду, в частности в этих системах, одну движущуюся микрочастицу.

Но классические свойства частицы модифицируются существенно в рамках квантовой механики. Забегая несколько вперед, заготовим для будущего рассмотрения своеобразные свойства локализации микрочастицы в основном состоянии квантового линейного осциллятора. Этот несколько абстрактный пример можно сопоставить с реальным атомом водорода, в котором электрон находится в основном состоянии (*S*-состоянии).

Пусть ставится эксперимент в случае классического линейного осциллятора, находящегося в покое (т. е. в основном, невозбужденном состоянии), целью которого является определение положения осциллирующей частицы. Пусть аккуратно проведенное единичное измерение показывает, что частица находится точно в начале выбранной системы координат. Последующие измерения над тем же осциллятором, допустим,

*1) Бор Н. Избранные труды. Т. II.— М.: Наука, 1971.— С. 190.

**2) Если в первом тезисе подчеркивается ситуация, с которой «мы имеем дело в атомной физике», то второй тезис, повторяя мысль предыдущего тезиса, в известном смысле обращен в будущее физики, «как бы далеко мы ни выходили за рамки классического объяснения».

через очень долгое время, когда возможные возмущения осциллятора, вызванные первым наблюдением, затухнут, неизбежно дадут значение, полученное в первом измерении. Если же повторное измерение случайно не совпадает с первым, то эта случайность окажется вполне причинно объяснимой в истории колебаний возбужденного классического осциллятора.

Но повторные измерения положения над одной и той же осциллирующей частицей квантового осциллятора, каждый раз приводимого в основное состояние, вообще говоря, дадут несовпадающие результаты. Именно распределение положений частицы опишется известной функцией Гаусса

$$\varphi(x) \sim e^{-\frac{x^2}{a^2}},$$

где a — константа, характеризующая упругую силу осциллятора. Если первое измерение координаты осциллирующей частицы дает $x_1=0$, а второе измерение $x_2>0$, то эти результаты несут такие черты случайности, которые не имеют причинного объяснения. Здесь случайность в этом смысле для наблюдателя возникает не в форме непознанной необходимости, а в форме случайности, так сказать, «абсолютного шанса», беспричинной случайности. Правда, набор этих случайных событий (статистика) не абсолютно хаотичен в том смысле, что он укладывается в данном случае в гауссову функцию.

В классическом осцилляторе в основном состоянии частица покоится, т. е. обладает нулевым импульсом. В квантовой физике среднее положение частицы, ее координата x , т. е. Δx , связано со средним значением ее импульса p , т. е. Δp , известным соотношением неточностей Гейзенберга

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2; \quad \Delta x = \sqrt{\bar{x}^2}, \quad \Delta p = \sqrt{\bar{p}^2}.$$

Обычно говорят, что наблюдение координаты квантовой частицы неконтролируемым образом меняет ее импульс. Это верно, но упоминание о наблюдателе и вся фраза в целом совместимы с таким содержанием, что частица объективно имеет какое-то точное значение координаты, но наблюдение этого состояния наблюдателем, вмешательство наблюдателя существенно меняет состояние частицы и ее импульса. Но это не так. Приведенный нами пример с квантовым линейным осциллятором показывает, что квантовая частица не обладает свойством классической частицы всегда иметь определенное положение в пространстве. И это свойство представляет собой не результат вмешательства

наблюдателя, а новые по сравнению с классической физикой свойства самой микрочастицы.

Можно напомнить, что атомы кристалла, «сидящие» в узлах кристаллической решетки, на самом деле не имеют точного положения — они совершают так называемые нулевые колебания относительно геометрической точки узла. И благодаря этим свойствам квантовых частиц эти нулевые колебания совершаются и при абсолютном нуле температуры кристалла.

Возвращаясь к случаю квантового линейного осциллятора, можно определить среднее расстояние частицы от начала в основном состоянии квантового осциллятора. Его можно обозначить той же буквой λ , которой мы обозначили среднее время жизни нейтрона. В отличие от распада нейтрона здесь следует признать существование абсолютного шанса уже не в локализации во времени, а в локализации квантовой частицы в пространстве. Об этом примере, характеризующем специфические отличия в свойствах квантовой частицы от частицы классической, мы вспомним в свое время в дальнейшем.

К этому следует добавить ту информацию о свойствах отдельной микрочастицы (электрона), которую доставляют нам эксперименты, проводимые с отдельными электронами.

Характерная квантовая характеристика — дифракция электронов — могла бы в принципе быть явлением, возникающим в коллективе взаимодействующих друг с другом электронов, но прямые опыты показывают, что это совсем не так.

«Дифракция поочередно летящих электронов»

Под таким названием появилась (в 1949 г.) статья трех авторов: Бибермана, Сушкина и Фабриканта^{*)}. Авторы поставили своей задачей наблюдать волновые свойства электрона (дифракцию электрона) в условиях, когда в реальном эксперименте наблюдаются волновые свойства — говоря определеннее, наблюдается дифракционная картина в условиях, когда она вызывается отдельно одним электроном, проходящим через кристаллическую решетку данного кристалла. Для этого авторам эксперимента было необходимо создать такие условия, когда в приборе, фиксирующем явление, заведомо проходит один электрон. В этом эксперименте среднее время между прохождением в приборе двух электронов равнялось $2,4 \cdot 10^{-4}$ с. Электроны разгонялись наложенным потенциалом до такой энергии (72 000 эВ), что они

^{*)} Биберман Л., Сушкин Н., Фабрикант В. // Докл. АН СССР.— 1949.— Т. 66.— С. 185.

проходили весь прибор от катода до фотопластинки, где фиксировалась дифракционная картина за $8,5 \cdot 10^{-9}$ с, т. е. время движения электрона в приборе было в $3 \cdot 10^9$ раза меньше среднего промежутка времени между попаданиями двух последовательных электронов в любую точку фотопластинки. Большая разница этих времен делает маловероятной флуктуацию, в результате которой через прибор пролетали бы одновременно даже два электрона. Дифракционная картина, т. е. расположение колец, в этом случае совпадала с расположением колец, которое возникало на фотопластинке при одновременном падении на кристалл большого числа электронов, когда интенсивность электронных пучков увеличивалась на семь порядков.

Другими словами, опыт показывает, что дифракция электрона не есть свойство коллектива частиц. Во избежание недоразумений следует подчеркнуть, что при прохождении одного электрона через систему на фотопластинке возникает только пятно, а не дифракционная картина колец. Дифракционная картина в виде колец возникает от последовательного и независимого падения электронов на фотопластинку.

О ТРЕХ ИНТЕРПРЕТАЦИЯХ КВАНТОВОЙ МЕХАНИКИ

В настоящее время в сущности можно обсуждать три различных интерпретации квантовой механики. Они сводятся к трем различным физическим интерпретациям ψ -функции — решению уравнений квантовой механики.

Наиболее распространенная из них — это так называемая копенгагенская интерпретация, обязанная в основном Н. Бору. Достаточно распространенная и так называемая статистическая интерпретация, идущая от Борна, в каком-то смысле от Эйнштейна, и поддерживаемая широким кругом физиков-теоретиков, использующих аппарат квантовой теории для практических применений. Третья интерпретация, обязанная своим появлением Эверетту (так называемая многомировая интерпретация, возникшая значительно позже двух предыдущих — в 1957 г.), имеет малое, но постепенно увеличивающееся число сторонников — точнее, в научной литературе стало возрастать число упоминаний о ней.

Копенгагенская интерпретация

В этой интерпретации ψ -функция рассматривается как список возможностей, из которых при взаимодействии микрообъекта с макрообъектом реализуется только одна. Если

отдельные возможности в состояниях квантовой системы описываются волновыми функциями ψ_n с амплитудами a_n , то полная ψ -функция представляет собой суперпозицию этих состояний, а амплитуды (вернее, их квадраты) характеризуют относительную вероятность реализации этого состояния ψ_n : $\psi = \sum a_n \psi_n$, т. е. ψ -функция представляет собой суперпозицию всех состояний ψ_n . В частности, n может быть равно единице. Вероятностная (или, говоря осторожнее, *статистическая*) интерпретация коэффициентов a_n присуща всем трем интерпретациям квантовой теории, о которых идет речь.

Во всех интерпретациях функция $\psi(x, t)$ удовлетворяет уравнению квантовой механики и, следовательно, во времени развивается причинным образом, как и решения уравнений классической физики. Начальные данные о ψ -функции в момент t_0 определяют уравнением вид ψ -функции к любому другому моменту t .

Физические наблюдения микроявления осуществляются с помощью макроприбора, и каждое взаимодействие макроприбора с микроявлением регистрируется показанием стрелки макроприбора. Положение стрелки отвечает лишь *одной* возможности, содержащейся в ψ -функции; такая однозначность принципиальна: стрелка прибора одновременно не может находиться в разных положениях. В этой интерпретации существенно, что причинное развитие ψ -функции (список возможностей) происходит до взаимодействия прибора с микрообъектом. Во время одноактного взаимодействия микрообъекта с макроприбором из всех возможностей, которые описываются ψ -функцией, происходит отбор всегда лишь одной возможности, и подчеркнем, *по закону абсолютной случайности*.

Происходит, как говорят, «редукция» волнового пакета, сведение всех его возможностей к одной, к одному показанию стрелки макроприбора. Все другие возможности в списке, которые составляют волновую функцию, не реализуются в этом взаимодействии макрообъекта с микрообъектом. Для физика-реалиста, воспитанного на уравнениях классической механики, термин «список возможностей» вызывает опасения, не порывается ли здесь с представлением об объективном существовании описываемых явлений? Но в конкретных случаях ψ -функций проявляется их объективный смысл уже в том, что для осциллятора этот список выглядит совершенно по-другому, чем, например, для ротатора, для свободного движения частицы или атома водорода. Существование различной объективной реальности диктует различный перечень возможностей для описания того или иного объекта

микромира. Может быть, более удивительным является то, что, согласно уравнению Шредингера, «список возможностей» (т. е. ψ -функция) развивается причинным образом во времени. Если ψ -функция задана в момент t_0 , то уравнение Шредингера определяет однозначным образом вид ψ -функции в любой последующий момент. В этом смысле, повторяем, уравнения квантовой теории не менее детерминистичны, чем уравнения классической механики. Но квантовая теория как теория микромира, кроме ее математического аппарата, скажем для определенности — уравнения Шредингера, включает в себя также проблему измерений, связанную с проблемой наблюдений. Именно здесь возникают различия в интерпретациях квантовой теории и понимания физического смысла ψ -функции.

Приведем простой пример, с которого начинается обсуждение, как оказывается в дальнейшем, совсем не простой проблемы редукции в копенгагенской трактовке.

Если нами получена информация, заключающаяся в одной фразе:

«На темном небе возшла луна»,

то в связи с этой фразой в нашем сознании возникает «список различных возможностей», так как фразой не конкретизируется состояние луны. Этот «список возможностей» содержит все возможные состояния луны — от тончайшего серпа нарождающейся луны до ущербного серпа луны исчезающей. Среди них особо выделяется состояние полнолуния. Начинаем эксперимент. Для этого достаточно посмотреть в окно. Эксперимент обнаруживает полную луну. Таким образом, весь «список возможностей» различных состояний в данном случае свелся (редуцировался) к единственному состоянию «полнолуния». В нашей макроскопической практике мы все время встречаемся со случаями редукции первоначально заданного списка возможностей. В дальнейшем проблема редукции будет нами обсуждаться с точки зрения различных интерпретаций квантовой механики. Важно упомянуть, что в лекциях по общей физике раздел, посвященный акустике, часто сопровождается демонстрацией, которая состоит в том, что на столе располагается ряд полых сосудов, которые резонируют (т. е. начинают звучать) на какие-то различные звуковые частоты или группы частот. Производится некий звуковой сигнал и часть из стоящих на столе сосудов начинает звучать. Звучание отдельных резонаторов свидетельствует о том, что звуковой сигнал реально содержит в своем составе такие звуковые волны. Обозначая звуковой сигнал

через φ , можно сказать, что в данной демонстрации он разлагается на ряд звуковых сигналов φ_i , который записывается в виде

$$\varphi = \sum_1^n a_i \varphi_i,$$

если оказывается n звучащих резонаторов. В частном случае может оказаться, что $n=1$. Значения a_i свидетельствуют о той или иной интенсивности данной звуковой частоты. Демонстрация акустического опыта очень поучительна для понимания интерпретации волновой квантовой функции как записи различных возможностей.

Лектор по своему усмотрению может ставить набор полых сосудов, отвечающих на различные звуковые составляющие исходного звукового сигнала. Естественно, что в условиях нахождения на столе в данный момент только *другого* набора детекторов *возможности* предыдущего опыта не реализуются.

Но на этом аналогия акустической волновой функции и волновой функции квантовой механики кончается. В квантовой механике наборы детекторов в «первом» и «втором» случае могут оказываться физически несовместимыми, когда наблюдаемые ими величины не коммутируют.

Роль макроскопического прибора в регистрациях квантовых событий. Согласно всем трем интерпретациям микромир квантовых объектов наблюдается нами как особый класс макроявлений, который появляется в макросистемах, в частности приборах, когда эти системы находятся в столь нестабильном состоянии, что очень слабые взаимодействия их с микрообъектом способны изменить состояние макросистемы, в конце концов возбудить какое-то положение «стрелки» макроприбора.

Один такой поучительный пример взаимодействия микрочастицы с макросистемой приводится Блохинцевым ^{*}). Обсуждается взаимодействие микрочастицы массой μ с макрошариком массой M , находящимся в неустойчивом положении — в неглубоком «горном» кратере. В данном примере «стрелкой» является сам макроскопический шарик. Приведенный Блохинцевым пример иллюстрирует, в чем заключается роль макроскопического прибора. Решение уравнения Шредингера находится для системы, состоящей из падающей

^{*}) Блохинцев Д. И. Принципиальные вопросы квантовой механики. — М.: Наука, 1966.

микрочастицы, которая в момент t_0 до взаимодействия описывается волновой функцией

$$\psi_0(\xi) = A^+ e^{ik\xi} + A^- e^{-ik\xi},$$

где ξ — координата микрочастицы, k — ее импульс, и макросистемы — шарика массой M , состояние которого до взаимодействия с частицей μ описывается волновой функцией

$$\Psi_0(Q) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-Q^2/2a^2},$$

где $a = \sqrt{\hbar/M\omega_0}$, ω_0 — частота колебаний шарика в воронке очень неглубокого кратера, Q — координата шарика. Задача эксперимента — определить импульс частицы μ по ее столкновениям с шариком M . Волновая функция всей системы до столкновения в момент t_0 записывается в виде

$$\Phi(Q, \xi, 0) = \Phi_0(Q, \xi) = \Psi_0(Q) \psi_0(\xi),$$

где Q — координата шарика, ξ — координата частицы. Гамильтонианом уравнения Шредингера, описывающим эту систему, будет выражение

$$H(Q, \xi) = -\frac{\hbar^2}{2M} \frac{\partial^2}{\partial Q^2} + U(Q) - \frac{\hbar^2}{2\mu} \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + W(Q, \xi).$$

Микрочастица μ считается свободной; шарик M находится в потенциальном поле $U(Q)$. Величина $W(Q, \xi)$ — энергия взаимодействия микрочастицы с шариком, которое будем считать точечным:

$$W(Q, \xi) = g\delta(Q - \xi).$$

Решение уравнения Шредингера

$$i\hbar \frac{\partial \Phi}{\partial t} = H(Q, \xi) \Phi$$

ищется в виде

$$\Phi(Q, \xi, t) = \Phi_0(Q, \xi) + \Phi^+(Q, \xi, t) + \Phi^-(Q, \xi, t).$$

Далее конкретный вид Φ^+ и Φ^- получен Блохинцевым в первом приближении теории возмущений.

В результате вычислений, оказывается, что функция $\Phi^+(Q, \xi, t)$ отлична от нуля только в области $0 < Q < \infty$. В этом случае шарик падает из кратера направо. В случае $\Phi^-(Q, \xi, t)$ шарик падает из кратера налево, т. е. при

значениях $\infty < Q < 0$. Плотность вероятности

$$\rho(Q, \xi, t; Q', \xi', t) = \Phi^*(Q, \xi, t) \Phi(Q', \xi', t)$$

записывается в общем виде с помощью девяти слагаемых:

$$\begin{aligned} \rho(Q, \xi, t; Q', \xi', t) = & \Phi_0(Q, \xi, t) \Phi_0(Q', \xi', t) + \\ & + \Phi_0(Q, \xi, t) \Phi^+(Q', \xi', t) + \Phi_0(Q, \xi, t) \Phi^-(Q', \xi', t) + \\ & + \Phi^+(Q, \xi, t) \Phi_0(Q', \xi', t) + \Phi^-(Q, \xi, t) \Phi_0(Q', \xi', t) + \\ & + \Phi^+(Q, \xi, t) \Phi^-(Q', \xi', t) + \Phi^-(Q, \xi, t) \Phi^+(Q', \xi', t) + \\ & + \Phi^+(Q, \xi, t) \Phi^+(Q', \xi', t) + \Phi^-(Q, \xi, t) \Phi^-(Q', \xi', t). \end{aligned}$$

Вычисления показывают, что при $Q' \rightarrow +\infty$ все функции зануляются, за исключением Φ^+ и, следовательно, ей сопряженной Φ^+ . Функция Φ^+ описывает ситуации, связанные с движением шарика, падающего справа от кратера (при $Q' \rightarrow \infty$). Функции Φ^- и Φ^- описывают движение шарика, падающего налево от кратера (при $Q' \rightarrow -\infty$). Плотность вероятности ρ , которая только и отлична от нуля, записывается в виде двух слагаемых:

$$\begin{aligned} \rho(Q, \xi, Q', \xi', t) = \\ = \Phi^+(Q, \xi, t) \Phi^+(Q', \xi', t) + \Phi^-(Q, \xi, t) \Phi^-(Q', \xi', t). \end{aligned}$$

Функции Φ_0 исчезают при $Q' \rightarrow \pm\infty$, так как при больших Q' исчезает функция, описывающая положение шарика в кратере как $e^{-Q'^2/2a}$ при $Q' \rightarrow \pm\infty$. Именно на этом основании исчезают три первых члена в выражении плотности вероятности. Вычисления показывают, что Φ^- исчезает при $Q' \rightarrow +\infty$: оно описывает ситуацию, при которой шарик оказывается слева от кратера, т.е. при отрицательных значениях координаты Q' . Наоборот, Φ^+ обращается в нуль при отрицательных значениях Q' .

Таким образом, дается описание взаимодействия квантового объекта, скажем частицы μ , с макрообъектом — шариком массой M (которая при большой неустойчивости его в кратере может быть макроскопически большой). Именно, квантовое описание с помощью уравнения Шредингера показывает, что при взаимодействии микрочастицы μ с макросистемой со временем исчезает интерференция состояний типа $\Phi^+\Phi^-$. Физически это означает понятное утверждение, что макроскопический шарик не может одновременно находиться справа и слева от кратера после своего выпадания из него. Но уравнение Шредингера, описывающее взаимодей-

ствие микрочастицы с макроприбором, в котором шарик играет роль стрелки, указывающей на результат взаимодействия, предоставляет две возможности для выпадания шарика, вообще говоря, с различной вероятностью. Но предсказать результат единичного измерения квантовые уравнения не могут.

В рамках копенгагенской интерпретации, как обычно говорят, вводится постулат о редукции (стягивании) волнового пакета во время взаимодействия микрообъекта с макросистемой.

Так как показание макроприбора — его стрелки, фиксирующей результат, — может иметь лишь одно положение, а волновая функция Φ содержит различные возможности, то утверждается, что во взаимодействии микрочастицы с макроприбором случайным образом реализуется лишь одна единственная возможность. В данном случае вторая возможность (падение шарика в другую сторону), а в общем случае — множество других возможностей не реализуются.

Редукция пакета. Природа редукции волнового пакета при взаимодействии микросистемы с макросистемой, находящейся в крайне нестабильном состоянии, являлась и является предметом многочисленных обсуждений. Иногда проблема формулируется в следующем виде: до взаимодействия систем состояние (волновая функция) согласно уравнению Шредингера развивается причинным образом. Макроприбор является сложной совокупностью микросистем. Казалось бы, взаимодействие микросистем, точнее микрочастицы с макроприбором, сводится к взаимодействию множества микросистем; и именно в результате такого квантового взаимодействия «должно» было бы возникнуть данное однозначное показание стрелки макроприбора без наложения нового требования в виде постулата редукции.

В стремлениях вывести этот постулат из уравнений квантовой теории делались даже (безуспешные) попытки модифицировать каким-то (в частности нелинейным) образом существующие уравнения Шредингера.

Заключение по копенгагенской интерпретации. Основная неудовлетворенность копенгагенской трактовкой квантовой механики обычно связывается с необходимостью принятия ею постулата о редукции волновой функции в момент макроскопического наблюдения микрособытия.

Говорят, что детерминистическое описание явления до момента взаимодействия микрообъекта с прибором, протекающего согласно уравнению Шредингера, в момент взаимодействия нарушается. Квантовая механика становится

неприменимой к описанию объективного явления — взаимодействия микрообъекта с макроприбором. Кстати, такое описание ситуации не совсем точно. Более того, оно просто неверно: рассмотренный нами эксперимент взаимодействия микроявления с макроприбором описывается непрерывно уравнением Шредингера, т. е. *причинным* образом до конца, до $t = \infty$.

Аппаратом теории при $t \rightarrow \infty$ автоматически исключались («занулялись», как это следует из вычислений) интерференции макроскопических состояний, которые не реализуются в макрофизике, например одновременное пребывание шарика после взаимодействия как налево, так и направо от прибора. Другими словами, квантовомеханическое описание взаимодействия микрообъекта с макроприбором не перестает действовать — в обсужденном примере оно дает две функции макроскопического состояния прибора, каждая из которых может реализоваться в макромире, т. е. описание взаимодействия микрообъекта с макроприбором ведется в рамках квантовой механики. Но опыт показывает, что из этого списка возможностей на опыте реализуется лишь одна. Тем не менее нам представляется, что эта редукция является результатом квантового описания явления. При обсуждении редукции волнового пакета часто задается вопрос: в какой момент в аппарате наблюдения происходит редукция? Из обсуждаемого нами эксперимента Блохинцева, строго говоря, эта возможность редукции возникает при $t \rightarrow \infty$, а практически в момент t , когда недиагональные члены типа $\psi_\mu \psi_\nu^*$ при $\mu \neq \nu$ ненаблюдаемы.

Иногда место редукции «помещают» даже в мозг наблюдателя. Чтобы избежать этих недоразумений, целесообразно при обсуждении редукции вообще исключить наблюдателя и даже построенного им прибора. Редукция в природе возникает всякий раз, когда возникает взаимодействие микроявления с макрообъектом: пузырьки — след заряженной частицы — видны не только в камере Вильсона, построенной человеком, но и в природе в прозрачных кристаллах минералов.

Строго говоря, квантовомеханическое описание взаимодействия микроявления с макрообъектом никогда не нарушается. И в примере Блохинцева оно справедливо до $t = \infty$. В этом случае, согласно уравнению Шредингера, имеются два волновых пакета, связанных с Φ^+ и Φ^- при $t = \infty$. Именно обращение в нуль при $t = \infty$ недиагональных элементов ($\Phi^+ \Phi^- = 0$) ведет к невозможному существованию Φ^+ и Φ^- в момент $t = \infty$, т. е. к редукции, которая происходит для Φ^+ или Φ^- по закону абсолютного случая. То, что реальный эксперимент заканчивается при конечном t , означает лишь

малость интерференционных членов. Очень важно подчеркнуть, что рассмотрение редукции волновой функции на фундаментальном уровне законно лишь при $t \rightarrow \infty$ и что рассмотрение реально (в эксперименте) возникшей редукции при $t < \infty$ и анализ ситуации при замене t на $-t$ с отбрасыванием за малостью интерференционных членов совершенно незаконно.

Заклячая *квантовое* описание всего процесса измерения в своем примере, Блохинцев замечает: «Этого следовало ожидать от хорошего прибора: его стрелка должна занимать одно из возможных определенных положений. В нашем примере стрелкой служит тяжелый макроскопический шарик».

Это утверждение справедливо и в общем случае, когда речь идет о функции

$$\psi = \sum_1^n a_i \psi_i,$$

где имеется для редукции n возможностей. В общем случае можно сформулировать теорему: если при взаимодействии микрообъекта ($\psi = \sum a_i \psi_i$) с макросистемой к какому-то времени t практически зануляются все недиагональные элементы матрицы плотности:

$$\psi_i \psi_k^* = 0, \quad \psi_i^* \psi_k = 0 \quad \text{при} \quad i \neq k,$$

то в результате взаимодействия микросистемы с макросистемой (прибором) может реализоваться по закону случая лишь одно и только одно состояние, т. е. какое-то состояние $\psi_i \psi_i^*$, и возникнуть лишь одно показание стрелки прибора. Справедливость теоремы доказывается от противного. Допустим, что кроме состояния $\psi_i \psi_i^*$ оказывается отличным от нуля состояние $\psi_\mu \psi_\mu^*$, где $\mu \neq i$. Но тогда должно быть отличным от нуля одновременное появление как состояния ψ_i , так и состояния ψ_μ , т. е. должен быть отличен от нуля в матрице плотности недиагональный член, именно

$$\psi_i \psi_\mu^* \neq 0,$$

что противоречит исходному условию.

Иначе говоря, случайную редукцию волновой функции в этом смысле следует рассматривать не как принципиально новое в физике, а лишь как один из частных случаев реализации в природе «абсолютного шанса» — случайности, за которой *нет* непознанной необходимости.

Статистическая интерпретация

Решению уравнения Шредингера — ψ -функции — первое время пытались придать смысл некоего физического поля в какой-то, может быть очень далекой, аналогии с известными полями, скажем, типа электромагнитного, или даже трактовать в рамках каких-то гидродинамических свойств материи. Общее математическое свойство ψ -функции во всех физических приложениях — именно интеграл

$$\int \psi^* \psi dv = 1.$$

Интеграл, привычный в теории вероятности, в статистике наводил на мысль о том, что в интерпретации волновой функции и в существенной части физики микромира должна каким-то образом играть роль вероятность, статистика. М. Борн впервые обратил внимание на возможность или желательность привлечения статистики к интерпретации функции ψ .

Имеется прекрасный пример использования методов статистики в проблеме многочисленных ансамблей частиц в классической статистической механике. В книге Д. И. Блохинцева^{*)} сказано, что «квантовая механика изучает законы движения микрочастиц в квантовом ансамбле». Но сразу возникает вопрос, а что же такое «квантовый ансамбль», как его определить физически. Является ли квантовая теория, говоря попросту, классическая статистическая механика, подправленная соотношением неточностей Гейзенберга, теорией многих микрочастиц или это что-то совсем другое?

Другой важный вопрос: применима ли квантовая механика к описанию единичного объекта?

В обстоятельной статье Баллентайна^{**)} утверждается, что «квантовое состояние представляет собой ансамбль одинаково приготовленных систем, но не обеспечивает полное описание одной индивидуальной системы». Такой точки зрения до конца своей жизни придерживался и А. Эйнштейн.

В книге Блохинцева лейтмотивом является статистическая интерпретация квантовой теории, но принятая им в литературном отношении своеобразная, по-своему блестящая, форма изложения помогает ему в ряде случаев уходить от категорических суждений. По последнему фундаментальному вопросу в книге Блохинцева можно прочитать следующее:

«В связи с дальнейшим мы хотели бы отметить, что вопрос о том, относится ли вероятность $W(p, q)$ к одной

^{*)} См. ссылку на с. 75.

^{**) Ballentine L. E. // Phys. Rev.—1970.—V. 2.—P. 358, 361.}

частице, или она является характеристикой многих частиц (вопрос, который задают из соображений главным образом сектантских: «Како веруюши?»), не имеет большого значения» *).

Как известно, Эйнштейн полагал, что квантовая механика, понимаемая как теория ансамбля, должна в дальнейшем иметь в своей основе описание единичного объекта. Баллентайн не утверждает столь категорично, но в сущности солидаризируется с Эйнштейном. В конце концов идет речь о возможном существовании скрытых параметров. У Баллентайна мы читаем:

«Статистическая интерпретация, в которой рассматривается квантовое состояние как описание ансамблей тождественно приготовленных систем, совершенно открыта в отношении скрытых параметров. В этой интерпретации не требуются скрытые параметры, но полагаются поиски их разумными (что соответствует точке зрения Эйнштейна (1949)). С другой стороны, копенгагенская интерпретация рассматривает вектор состояния как исчерпывающее описание индивидуальной системы, так как идея скрытых параметров, т. е. более подробное описание, чем это дает вектор состояний, входит в противоречие с данной интерпретацией» **).

Блохинцев, которого Баллентайн зачисляет в последовательные сторонники статистической интерпретации, вообще говоря, скептически относится к возможности обнаружения скрытых параметров.

«Кажется, ничто не обнаруживает поиски подобного, более тонкого ***) описания истории микрочастицы: в самом деле, нельзя указать ни одного опытного факта, который указывал бы на неполноту квантовой механики в том круге атомных явлений, который образует подвластная ей территория микромира. Но будем все же осторожными и вспомним Козьму Пруткова: «Кто мешает выдумать порох неподмокаемый» ****).

Другими словами, с помощью характерного для Блохинцева литературного приема он опять уходит от определенного ответа. Хотя, казалось бы, начальные фразы цитированного текста даны в полной солидарности с копенгагенской трактовкой и «поиски более тонкого описания», по существу, означают поиски строго причинного описания, против чего

*) Блохинцев Д. И.—С. 26.

**) Ballentine L. E.—Р. 344.

***) Курсив наш.

****) Блохинцев Д. И.—С. 157.

так яростно выступает Блохинцев с начала до конца своей книги. Ведь книгу он начинает с параграфа, озаглавленного «Иллюзия детерминизма». Им в § 2 критикуется даже причинность в классической механике, в теоретических рамках которой уместен лапласовский детерминизм.

Сильная сторона статистической интерпретации состоит в том, что в большом количестве случаев экспериментатор, изучая квантовые явления, имеет дело действительно «с ансамблем одинаковым образом приготовленных систем». Но как быть с предельными случаями «ансамбля», состоящего из одной системы, даже из одной микрочастицы? Баллентайн лишь упоминает о возможных таких предельных случаях, но не анализирует физику взаимодействия с макрообъектом таких ансамблей, т. е., в сущности, одиночных микрочастиц. У Баллентайна нет даже упоминания об экспериментах типа Бибермана — Сушкина и Фабриканта, которыми мы не случайно предварили обсуждение различных интерпретаций квантовой теории. Но опыты показывают, что единичные электроны, проходя через дифракционную решетку, интерферируют «сами с собой». Это свойство единичных микрочастиц. Такими же свойствами обладают, как показывает опыт, и единичные кванты света. В уже цитированной нами книге Блохинцева (1966 г.) также нет упоминания об эксперименте с единичными электронами, а в его же учебнике, изданном почти на двадцать лет ранее (1949 г.), цитируются опыты Бибермана — Сушкина — Фабриканта и сопровождаются таким текстом:

«Этот факт показывает, что «каждый из электронов дифрагирует независимо от других», поэтому существование волновых явлений нельзя связывать с наличием одновременно большого числа частиц». «Чтобы еще больше подчеркнуть это обстоятельство, заметим, что волновые явления в движении микрочастиц проявляются и в таких случаях, когда говорить о среде, образованной совокупностью частиц, не приходится. Действительно, такие свойства проявляют электроны, движущиеся в атомах, где их число невелико (один в водороде, два в гелии и т. д.)»^{*)}.

Но в книге Блохинцева можно прочесть, что «во многих курсах квантовой механики подчеркивается, что волновая функция есть характеристика состояния *отдельной частицы*. Если это так, то, будьте любезны, укажите такое измерение на отдельной частице, скажем на электроны,

^{*)} Блохинцев Д. И. Основы квантовой механики. 2-е изд. — М.: Гостехиздат, 1949. — С. 43.

которое позволило бы определить его «персональную» волновую функцию. Такого измерения не существует».

Убедительность этого рассуждения так понравилась Баллантайну, что он приводит его в своей статье.

Но ранее нами обсуждалась волновая функция одной частицы в S -состоянии осциллятора.

С другой стороны, на с. 59 Блохинцев пишет: «Для определенности мы можем представить себе, что дело идет об измерении $\rho(x)$ и $\theta(x)$ в атоме или ионе с одним электроном (курсив наш), находящемся в S - или P -состоянии. В первом случае волновая функция сферически-симметрична и токи отсутствуют, так что

$$\psi(x) = \sqrt{\rho(x)},$$

и измерение дает нам прямо значение волновой функции».

Могут возразить, что у Блохинцева речь идет об единичном измерении, а измерение плотности требует ансамбля измерений, чтобы определить функцию $\psi(x)$. Это верно. Но такая же ситуация была бы в классическом случае атома Бора в P -состоянии, когда требовалось бы определить не волновую функцию электрона, а его P -орбиту. Единичным измерением измерить «классическую» орбиту электрона (или нашей планеты) также нельзя. Другими словами, в квантовой физике здесь нет отличия от «классики».

В квантовых явлениях процесс измерения наблюдаемой величины как правило возмущает (меняет) состояние наблюдаемой микросистемы. Но в то же время имеется класс измерений, которые не меняют состояния системы, и тогда в принципе имеется возможность провести повторные измерения на том же единичном микрообъекте.

Напомним наш пример с измерением координаты осциллятора в S -состоянии.

Так, если в аккуратном единичном измерении зарегистрировано, что z -компонента спина электрона или атома равна $\hbar/2$, то, спрашивается, какое предсказание дает статистическая теория для вторичного измерения z -компоненты спина данного единичного микрообъекта? Казалось бы, ответ на этот вопрос находится вне рамок статистической интерпретации как вопрос, относящийся к единичному наблюдению единичного микрообъекта. Но не значит ли это, что согласно статистической интерпретации, если она по своей физической сути отлична от статистики копенгагенской интерпретации, результат первого измерения не обязательно должен повториться? Другими словами, не может ли явиться

проведение подобного характера повторных измерений критерием правильности существенных черт статистической интерпретации, в которой действительно нет места эксперименту над единичным микрообъектом?

Представляет интерес, что как Блохинцев, так и Баллентайн не приводят, не обсуждают и не критикуют определение понятия физической реальности, сформулированное в работе Эйнштейна, Подольского и Розена (Э. П. Р.—см. далее), взамен также не дают своего определения, справедливого в квантовой механике.

Спор Эйнштейна с Бором. Хотя в нашей статье о понятии физической реальности (1947 г.) речь шла о содержании многолетнего спора Эйнштейна с Бором, последующие многочисленные обсуждения различных сторон этого спора, которые продолжаются и до настоящего времени, показали, что пока недостаточно поняты изложенная нами гносеологическая суть и значение этого спора.

Именно в работе трех авторов (Э. П. Р.)—Эйнштейна—Подольского—Розена,—появившейся еще в 1935 г., дана формулировка понятия физической реальности. Эта формулировка содержится в следующей фразе:

«Если мы можем без какого-либо возмущения системы предсказать достоверно (т. е. с вероятностью, равной единице) значение некоторой физической величины, то существует элемент реальности, соответствующий этой физической величине»^{*)}. Обсуждаемые мысленные эксперименты показывают, что подобные («косвенные») возможности сохраняются и в аппарате квантовой механики, но возникающая здесь ситуация приходит в противоречие с определением физической реальности, данным авторами приведенной работы. Возникает вопрос, в чем же заключается порок их определения понятия физической реальности? Дело в том, что это понятие дано авторами, как следует из приводимого нами тезиса Маркса о Фейербахе, в рамках понятий «дофейербаховского материализма включительно», т. е. в рамках метафизического материализма. В то время, как (повторяем фразу из тезиса, о котором идет речь) «главный недостаток всего предшествующего материализма, включая и феербаховский, заключается в том, что предмет действительности, чувственность, берется только в форме объекта, или в форме созерцания, а не как чувственная человеческая деятельность, не субъективно» (курсив наш).

^{*)} (Э.П.Р.): Einstein A., Podolsky B., Rosen N. // Phys. Rev.—1935.—V. 47.—P. 777 (русский перевод: А. Эйнштейн. Собр. соч. Т. III.—М.: Мир, 1966.—С. 604).

В описании и понимании квантовой физики создалась такая ситуация, что «предмет», «действительность», описывается в классических понятиях механики: в импульсах, координатах и т. д., но на совместную применимость которых в явлениях микромира наложено соотношение неточностей Гейзенберга. Здесь реальность дается не «сама по себе», а в различных условиях макрообстановки. Момент субъективности формулировки понятия *реальности*, о котором говорит Маркс, здесь заключается в том, что *наблюдатель может менять макрообстановку*, по своему усмотрению, а это в свою очередь ведет к тому, что действительность принимает другие черты, следуя выбранной макроскопической обстановке, говоря точнее, согласно тому классу приборов наблюдения, через которые наблюдатель «смотрит» на микроробъект.

Поэтому естественный в классической физике вопрос, как выглядит электрон сам по себе («в форме объекта»), когда на него не смотрят, в квантовой теории теряет свой, казалось бы ясный, смысл. Но вопрос получает однозначный смысл, если указан прибор, с помощью которого наблюдается эта реальность: реальность принимает действительно ясный объективный смысл лишь в данной макроскопической обстановке *).

Авторы (Э. П. Р.) приводят пример системы, состоящей из двух частиц, состояние которой описывается функцией

$$\psi_1(x_1, x_2) \sim 2\pi\delta(x_1 - x_2 - x_0).$$

Это значит, что дан реально существующий объект, состоящий из двух одинаковых частиц с равными и противоположно направленными импульсами. Другими словами, ψ -функция, о которой идет речь, описывает объективно существующую систему двух частиц с полным импульсом, равным нулю. Если в данном состоянии системы мы измерим импульс первой частицы и получим его конкретное значение

$$p_1 = p_0,$$

то из написания ψ -функции следует, что импульс второй частицы равен

$$p_2 = -p_0.$$

*) Так же, как траектория падающего тела в вагоне движущегося поезда лишена смысла «сама по себе» без указания системы координат, в которой находится наблюдатель — пассажир поезда или стрелочник, стоящий на платформе станции, — эти аналогии следует повторять многократно.

Здесь авторами (Э. П. Р.) подчеркивается, что знание импульса второй частицы получено без какого-либо взаимодействия с ней. И если бы мы измерили импульс второй частицы непосредственно, мы могли бы согласно квантовой теории подтвердить наш предварительный теоретический вывод. Но в то же время координата второй частицы (x_2) остается полностью неизвестной. Вместо импульса мы могли бы также измерять координату первой частицы (x_1). Пусть мы получили значение

$$x_1 = x.$$

Тогда из записи ψ -функции следует, что волновая функция второй частицы

$$\psi_{II} \sim \delta(x_1 - x_2 - x_0),$$

что соответствует

$$x_2 = x + x_0.$$

Мы определили координату второй частицы (x_2), не входя с ней в какое-либо взаимодействие. Но согласно функции ψ_{II} импульс второй частицы теперь делается полностью неопределенным.

В своем анализе обсуждаемого мысленного эксперимента авторы (Э. П. Р.), исходя из своего определения физической реальности, пришли к выводу, что квантовая механика неполна, так как она не дает возможности определить одновременно p_2 и x_2 ; хотя при измерениях на вторую частицу прибором не воздействовали, но *при этом приходится менять прибор*.

Н. Бор, исходя из толкования ψ -функции как записи реальных возможностей эксперимента, истолковывает результаты эксперимента таким образом, что эксперимент только изменит список возможностей — как говорят, редуцирует состояние. А макроскопический эксперимент (макроскопический прибор), который только имеется в виду в копенгагенской интерпретации квантовой теории, обладает свойством точного измерения либо импульса, либо координаты.

Таким образом, квантовая механика полна, так как полностью отвечает процедуре измерения описываемых возможностей. Другими словами, определение понятия физической реальности, даваемое авторами (Э. П. Р.), противоречит толкованию ψ -функции как списку возможностей будущих экспериментов, регулируемых соотношением неточностей Гейзенберга.

Излагать проблему спора можно и поучительно на аналогичном по сути мысленном эксперименте, предложенном

Д. Бомом^{*)}. Предположим, что мы имеем молекулу со спином, равным нулю, содержащую два атома в состоянии, в котором спин каждого атома равен $\hbar/2$. Грубо говоря, это значит, что спин одного атома направлен точно противоположно спину другого атома, поскольку можно говорить, что спин имеет определенное направление.

Предположим, что молекула расщепляется на атомы при помощи такого процесса, который не меняет полного момента количества движения. Атомы начинают отдаляться друг от друга и через какое-то время практически перестанут взаимодействовать. Но их суммарный момент количества движения (суммарный спин) остается равным нулю. Предполагается, что извне на систему не действует никакой вращательный момент. В классической картине между векторами спиновых моментов должна быть определенная корреляция. После того, как атомы отдалились друг от друга, корреляция сохранилась динамическими уравнениями движения для отдельных векторов спина, что приводит к сохранению каждой компоненты обоих векторов спинового момента. Если измеряется спиновый момент какой-нибудь одной из этих частиц, скажем, первой частицы, то вследствие существования корреляции можно заключить, что вектор момента количества движения второй частицы равен и противоположен тому же вектору первой частицы. Таким образом, можно измерить косвенно момент количества движения второй частицы, измеряя только соответствующий вектор первой частицы.

Существенно, что знание момента второй частицы получается без какого-либо взаимодействия с ней. Так описывается возможность косвенного наблюдения в классической физике. На первый взгляд может показаться странным, что такая же возможность косвенных измерений сохраняется и в квантовой теории. Именно это обстоятельство вызвало пристальное внимание Эйнштейна к обсуждаемому типу мысленных экспериментов. Но, приступая к обсуждению подобного мысленного эксперимента, авторы ограничили определение понятия физической реальности, смысл и недостаток которого обсуждался нами ранее.

Обсуждаемые мысленные эксперименты показывают, что подобные косвенные эксперименты сохраняются и в квантовой теории, но возникающая ситуация приходит в противоречие

^{*)} Бом Д. Квантовая теория.— М.: Наука, 1965.— С. 700.

с определением понятия физической реальности, данным авторами выше.

В квантовой теории компоненты спина σ_x , σ_y , σ_z не коммутируют друг с другом. В одном опыте экспериментатор может измерить точно только одну из компонент спина первой частицы. Но выбор компоненты находится во власти экспериментатора. Другими словами, в то время, когда атомы разлетелись на относительно большие расстояния друг от друга, экспериментатор может решить измерять компоненту спина первого атома по своему выбору по оси x , y или z . Существенно, что тем самым должна определяться соответствующая слагающая спина второй частицы по той же оси. Другими словами, если экспериментатор нашел, что слагающая спина первого атома по оси y равна $+\hbar/2$, то, делая затем измерение над вторым атомом, он убедится, что спин его направлен по оси y и имеет значение $-\hbar/2$. Вся, казалось бы, острота ситуации заключается в том, что экспериментатор мог вдруг решить измерять спин по оси x и, допустим, получает значение $+\hbar/2$. Но спин второго атома, с которым не было никакого взаимодействия, окажется соответствующим образом равным $-\hbar/2$ по оси x . Другими словами, в каждом случае экспериментатор всегда может по своему желанию переориентировать аппаратуру в произвольном направлении, когда атомы уже разлетаются, и таким образом получить определенное (но заранее непредсказуемое) значение компоненты спина в любом избранном им направлении. Поскольку это может быть выполнено без какого-либо возмущения второго атома, то, следовательно, если применим критерий понятия физической реальности Эйнштейна — Подольского — Розена, во втором атоме должны как-то сосуществовать вполне определенные элементы реальности, соответствующие трем компонентам его вектора спина.

Этот мыслимый опыт рассмотрен Бомом в рамках математического аппарата квантовой механики. Существенно напомнить, что система двух атомов, имеющих результирующий спин, равный нулю, описывается волновой функцией

$$\psi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_c - \psi_d),$$

где $\psi_c = u_+(1)u_-(2)$; $\psi_d = u_-(1)u_+(2)$. Здесь u_+ и u_- — спинные волновые функции одного атома, представляющие соответственно спины $\hbar/2$ и $-\hbar/2$, относящиеся к частице, имеющей этот спин. Функции ψ_c и ψ_d представляют два

возможных состояния, в которых каждая частица имеет определенную z -компоненту спина в направлении, противоположном z -компоненте другой частицы. Кстати, полный спин системы, равный $\hbar$, описывается функцией, также состоящей из ψ_c и ψ_d , но теперь она имеет вид

$$\psi_{\pi} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_c + \psi_d).$$

Таким образом, если полный спин имеет определенное значение, то тогда неправильно считать (и в этом ошибка Э. П. Р.), что любой атом имеет определенное значение своего собственного момента. Если для первого атома в результате измерения оказывается состояние $u_+(1)$, то для второго атома остается $u_-(2)$. Возвращаясь к случаю ψ_0 , следует напомнить, что эта функция аналогичным образом выражается через слагаемые спина по оси x $v_+(1) v_-(2)$ и $v_-(1) v_+(2)$:

$$\psi_0 = \frac{1}{\sqrt{2}}(v_+(1)v_-(2) - v_-(1)v_+(2)).$$

Другими словами, если бы мы захотели измерить слагающую спина по оси x у первого атома и получили бы состояние $v_+(1)$, то, не измеряя состояние второго атома, мы могли бы с уверенностью сказать, что его слагающая спина имеет значение $-\hbar/2$. Но в данный момент для нас важно, что Эйнштейн, в сущности, согласился с возражениями Бора, т. е. с тем, что в рамках аппарата квантовой теории такого внутреннего противоречия, на которое указывала бы работа Э. П. Р., нет. Но Эйнштейн сохранил неприятие копенгагенской интерпретации, рассматривая ее философски как позитивистскую. Это свое отношение к боровской интерпретации в целом Эйнштейн четко излагает в своей последней статье (1953 г.). В этой статье Эйнштейна, подводящей итог дискуссии, говорится: «Своеобразие современной ситуации в квантовой механике состоит в том, что сомнениям подвергается не математический аппарат теории, а физическая интерпретация ее утверждений. Каково отношение ψ -функции к конкретной единичной ситуации, т. е. к индивидуальному состоянию некоторой отдельно взятой системы? Иными словами: что говорит ψ -функция об (индивидуальном) «реальном состоянии»? Прежде всего можно усомниться в том, что такой вопрос вообще имеет какой-нибудь смысл. Действительно, можно встать на такую точку зрения: «реальное» — есть только результат

отдельного наблюдения ^{*)}, а не то, что объективно *существует в пространстве и времени, независимо от акта наблюдения*. Принимая эту чисто позитивистскую точку зрения, можно, очевидно, не думать о том, как понимать «реальное состояние» в рамках квантовой теории. Тогда попытка ответить на поставленный вопрос напоминает борьбу с призраками ^{**)}.

Другими словами, разногласия между Бором и Эйнштейном об интерпретации квантовой теории, начатые в чисто физическом аспекте, закончились аспектом чисто философским. Эйнштейн считает копенгагенскую трактовку квантовой теории ведущей к философскому позитивизму. С другой стороны, Бор, несмотря на его часто неудачную терминологию в изложении копенгагенской интерпретации, также не приемлет (по свидетельству непосредственных бесед Бора с Фоком) позитивистскую основу для своей интерпретации квантовой теории.

Эйнштейн в одной из своих статей, именно «Физика и реальность» ^{***)}, справедливо подчеркивает, что проблема реальности тесно связана с проблемой познаваемости. В этом смысле Эйнштейн высоко ценил заслугу Канта: «Одна из заслуг Канта,— писал Эйнштейн в цитируемой работе,— состоит в том, что он показал бессмысленность утверждения о реальности внешнего мира без его познаваемости». Ранее мы подробно обсуждали макроскопические проявления мик-

^{*)} Эйнштейн согласен, что при такой интерпретации понятия реальности нет предмета спора.

а) Действительно ли такое понятие реальности содержится в копенгагенской трактовке?

б) Если да, то является ли такая точка зрения позитивистской?

В копенгагенской трактовке «реальное» есть действительно результат *отдельного* наблюдения. Если в словах «отдельное наблюдение» содержится смысл «наблюдение в данной макроскопической обстановке», т. е. с данными измерительными приборами, приспособленными в случае примера (Э.П.Р.) к измерению только импульса первой частицы или к измерению только ее координаты.

Если пользоваться аналогией классической механики — понятием реально существующей траектории падающего предмета в вагоне движущегося поезда, то это понятие имеет смысл отдельного наблюдения (т. е. отдельно, специально, указана система координат, в которой рассматривается траектория падающего тела в вагоне движущегося поезда). Не существует понятия траектории — в пространстве и времени без указания места «отдельного наблюдения». В этом определении реальности нет никакого позитивизма. Оно содержит лишь элемент относительности.

^{**)} А. Эйнштейн. Собр. соч. Т. III.— М.: Мир, 1966.— С. 617.

^{***)} Einstein A. Physik und Realität // J. Franklin Institute.— 1936 (русский текст: А. Эйнштейн. Собр. соч. Т. IV.— М.: Мир, 1967.— С. 200).

ромира. Повторяя, мы можем сказать: «Так как явления микромира проектируются на макромир, проявляются в макроскопических эффектах, то познаваемость макроскопических явлений обеспечивает познаваемость микромира, и таким образом решается и вопрос о его реальности».

Поучительно привести страницу текста из статьи Эйнштейна (1948 г.)^{*)}, в которой почти точно изложено содержание копенгагенской трактовки квантовой механики:

«б) Частица не имеет в действительности ни определенного импульса, ни определенного положения в пространстве, описание с помощью ψ -функции является в принципе полным. Точное местонахождение частицы, которое я получаю в результате его измерения, не может быть интерпретировано как местоположение частицы *до* измерения. Точная локализация, которая обнаруживается при измерении, будет проявляться только через неизбежное (не существенное) воздействие измерения. Результат измерения зависит не только от *реального положения частицы* и от принципиально *неполного знания природы* механизма измерения. Аналогично обстоит дело и в том случае, когда измеряется импульс или некоторая другая относящаяся к частице наблюдаемая величина. Это, пожалуй, наиболее предпочтительная у физиков современная интерпретация; следует признать, что в рамках квантовой механики только она естественным образом согласуется с эмпирическими фактами, выраженными в принципе неопределенности Гейзенберга.

Согласно этому толкованию, две различные (не только тривиально) ψ -функции описывают всегда две различные реальные ситуации, например частицы с точно определенным положением в пространстве и, соответственно, частицы с точно определенным импульсом».

Неточность изложения копенгагенской интерпретации содержится только в выделенных нами словах «реального положения частицы», которые вступают в противоречие с начальной фразой этой цитаты: «Частица не имеет в действительности ни определенного импульса, ни определенного положения в пространстве...».

В цитате, с одной стороны, говорится о реальности, соответствующей понятию реальности в послефейербаховском материализме, в определении которой существенное значение имеет та или иная макроскопическая обстановка реализации микрореальности, а в конце концов и субъективные моменты

^{*)} «Квантовая механика и действительность» (А. Эйнштейн. Собр. соч. Т. III.—М.: Мир, 1966.—С. 613).

«практики», которой Эйнштейн же, вспоминая Канта, придает важнейшее значение в обосновании понятия объективного существования. С другой стороны, он употребляет слова «реального положения частицы», т. е. чего-то без указания макроскопической обстановки наблюдения частицы. Настоящая мысль о возможном существовании точного положения частицы «самого по себе» все время незримо присутствует между строками текста. Эйнштейн никак не может выйти за пределы метафизического материализма. Создается впечатление: если бы Эйнштейн знал о часто цитируемом нами тезисе Маркса о Фейербахе, то — трудно отделаться от этой мысли — не стал бы он считать Маркса просто не материалистом? Но спор Эйнштейна с Бором высветил очень важную черту квантовой теории. Ведь возможность косвенных измерений, вернее косвенных заключений о значении некоторых физических величин без прямых взаимодействий с ними, осуществляется в классической физике на основе законов сохранения. Если известно, что суммарный импульс системы, состоящей из двух макроскопических тел, равен нулю, если измерение импульса одного из этих тел дает значение p , то без всякого измерения следует, что импульс второго тела — $-p$. Если момент количества движения микроскопической системы, состоящей из двух микроскопических тел, равен нулю, если измерение момента количества движения одного из микроскопических тел этой системы оказывается равным p , то без всякого измерения следует, что момент количества движения второго тела этой системы равен $-p$. Это следствие законов сохранения должно выполняться и выполняется в математическом аппарате квантовой теории. В частности, в основном состоянии атома гелия два электрона, согласно принципу Паули, должны быть в состояниях с противоположными спинами, и наблюдение над спином одного из них должно давать заключение о спине другого без всякого взаимодействия с ним. В противном случае нарушался бы принцип Паули. Возможность в аппарате квантовой теории косвенных измерений — не порок, а большой триумф теории.

С другой стороны, этот триумф теории с некоторой точки зрения тривиален, так как в аппарате квантовой теории заложены законы сохранения. В эксперименте (Э.П.Р.) речь идет о законе сохранения импульса системы двух частиц; во втором случае — о законе сохранения суммарного момента двухатомной молекулы. Если бы в квантовой механике не были бы возможны косвенные измерения, то не выполнялись бы законы сохранения. А формализм квантовой теории инвариантен относительно соответствующих преобразований.

Понятие квантового ансамбля. В статистической трактовке с самого начала возникает некоторая неясность с определением самого понятия квантового ансамбля. Согласно Баллентайну «квантовое состояние представляет собой некоторый ансамбль одинаково приготовленных систем».

На примере вводимого академиком Мандельштамом «микромеханического коллектива» (или «электронного коллектива») академик Фок показывает, казалось бы, несостоятельность такой трактовки квантовой теории. Свое возражение Мандельштаму Фок формулирует следующим образом *):

«Элементами статистических коллективов, рассматриваемых в квантовой механике, являются не сами микрообъекты, а результаты опытов над ними, причем определенная постановка опыта соответствует определенному коллективу. Поскольку же получаемые из волновой функции распределения вероятностей для разных величин относятся к разным постановкам опыта, они относятся к разным коллективам. Таким образом, волновая функция ни к какому определенному коллективу относиться не может». (Курсив наш.) И далее:

«Более глубокая причина того, что волновой функции нельзя сопоставить никакого статистического коллектива, состоит в том, что понятие волновой функции относится к потенциально возможным (к не произведенным еще) опытам, тогда как понятие статистического коллектива относится к осуществившемуся наблюдению (к результатам уже произведенных опытов)».

Блохинцев также настаивает на определении квантового ансамбля как «ансамбля одинаково приготовленных систем». При более внимательном рассмотрении формулировок понятий квантового ансамбля Фока и Баллентайна — Блохинцева можно сформулировать ситуацию в следующем виде.

В. А. Фок в сущности обсуждает смысл волновой функции с точки зрения теоретика как решение уравнения Шредингера. Здесь ψ -функция дает возможность распределения вероятностей для разных величин. Но чтобы получить их реально и записать в записной книжке в виде ансамбля, надо в соответствии с каждой наблюдаемой величиной использовать соответствующий аппарат измерения. И эти аппараты измерения исключают друг друга, если операторы, соответствующие наблюдаемым величинам, не коммутируют друг

*) Фок В. А. // Успехи физ. наук.— 1957.— Т. 62, вып. 4.— С. 461.

с другом. Другими словами, исключают возможности одновременно записать результаты наблюдения в виде статистических ансамблей. Блохинцев, как кажется с первого взгляда, хочет все время, описывая смысл волновой функции, оставаться в рамках эксперимента.

Блохинцев пишет: «Правильно ли представление о том, что волновая функция есть записная книжка наблюдателя?...»^{*)}.

В этом полемическом вопросе неясно, чью формулировку Блохинцев обсуждает. Если речь идет о приведенной выше формулировке Фока (т. е. Бора)^{**)}, то там как раз не говорится о том, что волновая функция есть записная книжка наблюдателя, в которой наблюдатель записывает результаты своих измерений. Волновая функция—это список возможностей будущих экспериментов; если можно говорить о записной книжке, то речь идет о записи не результатов эксперимента, а записи только различных возможностей будущих экспериментов.

Волновая функция может быть получена как в результате решения соответствующего уравнения Шредингера, так и в результате измерений. Функция Гаусса, описывающая S -состояние осциллятора, может быть получена как соответствующее решение уравнения Шредингера; с другой стороны, эта же функция может быть получена в результате эксперимента и записана в записной книжке. Но эта же функция *дает возможность* вычислить и (таким образом) предсказать результаты возможного эксперимента по наблюдению, например импульса частицы в S -состоянии осциллятора.

«...Книжка, в которой он записывает результаты своих измерений, произведенных над микросистемой?»

Здесь опять «литературный прием», который помогает автору критиковать изложение вопроса, данное Фоком. Ведь речь идет не о записной книжке, а о результатах эксперимента, записанного в записной книжке. Данная реальность, описанная

^{*)} «Следует напомнить, что были попытки изложить квантовую теорию, не используя волновую функцию, а используя так называемую матрицу плотности, которая квадратична относительно ψ -функции. Вместо уравнений Шредингера писались соответствующие уравнения для матрицы плотности. Но, ограничиваясь матрицей плотности, можно описать лишь некоторую группу явлений микромира. В квантовой механике фундаментальную роль играет принцип суперпозиции состояний, т. е. именно ψ -функции» (см. Блохинцев Д. И. § 7. «Можно ли обойтись без ψ -функции?»).

^{**)} Статья Фока появилась на десять лет раньше книги Блохинцева, но она не цитируется в его книге.

в записной книжке, ничем (в смысле существования объективной реальности) не отличается от записи, например, наблюдений орбиты Луны астрономом в его записной книжке.

Более того, если очистить текст Блохинцева от незаслуженных Бором гносеологических упреков, изложение Блохинцева становится очень близким к копенгагенской трактовке^{*)}. Остается только противоречивое утверждение автора о неприменимости или применимости квантовой механики к описанию индивидуального микрособытия («Какое веруешь?»). В этом смысле Баллентайн более последователен в своих утверждениях о неприменимости квантовой теории к описанию единичных объектов.

Вопрос же о редукции волновой функции в рамках статистической интерпретации сводится к сведению одного статистического ансамбля к другому^{**)}.

Книга Блохинцева в основном содержит критику философских положений Н. Бора. Что касается до философских высказываний самого Нильса Бора, то он настолько небрежен в своей терминологии при описании отношения субъекта к объекту, что иногда его можно упрекнуть в агностицизме, иногда субъективном идеализме, но чаще всего в позитивизме. Здесь, если что и представляет интерес, это ответы самого Нильса Бора на прямо поставленные ему вопросы. В этом случае известны свидетельства профессора Л. А. Слива, который некоторое время проходил стажировку в Копенгагене в Институте Нильса Бора. Профессор Слив сказал Бору, что в Советском Союзе Н. Бора часто считают субъективным идеалистом. Затем следовал прямой вопрос: считает ли Бор, что микрообъект, пусть электрон, существует объективно вне нашего сознания. Н. Бор, по словам Л. А. Слива, даже не сразу понял вопрос. Но поняв, Н. Бор ответил: «Как же иначе... конечно, существует объективно, независимо от нашего сознания». И далее продолжал: «И в нашей стране иногда приписывают мне такую же точку зрения, какую, как Вы говорите, приписывают у вас». Мюллер-Маркус

^{*)} Во-первых, им принимаются тезисы Н. Бора о классическом языке описания микромира. Термин «макроскопический язык» описания микромира фактически введен нами в статье, которая появилась на двадцать лет ранее книги Блохинцева. Развернутый смысл этого термина обсуждается на многих страницах и с разных сторон в этой статье (см. с. 25 этой книги). Во-вторых, по поводу ответа Н. Бора на утверждения (Э.П.Р.) Блохинцев пишет: «В этом объяснении нет никакой неправды».

^{**) Ballentine L. E.— P. 370 (см. ссылку на с. 81).}

в своей статье также говорит «О концепции теории познания Бора», элементы которой будто бы исправлял В. А. Фок *).

У Н. Бора нет какой-либо специфической концепции теории познания — у него есть физическая интерпретация содержания квантовой механики, сформулированная в приведенных его двух тезисах плюс соотношение Гейзенберга и связанный с ним принцип дополнительности. Но диалог В. А. Фока и Н. Бора, о котором пишет Мюллер-Маркус, важен в том отношении, что по свидетельству В. А. Фока Бор категорически отрицал свою принадлежность к позитивистам.

Заключение по статистической интерпретации. Главное отличие статистической интерпретации квантовой теории от копенгагенской состоит в утверждении, что квантовая механика не описывает единичный объект микромира. В тексте книги мы привели доводы против такого утверждения. Но, уступая высказываниям сторонников статистической интерпретации, мы должны сформулировать ситуацию, возникающую в физике в случае справедливости их утверждений. В этой ситуации возникает основной вопрос: как всё-таки складывается в этом случае проблема описания единичных объектов микромира?

а) Надо ли стремиться всё-таки к поискам теории, способной описывать единичные объекты микромира?

б) Необходима ли такая теория?

в) В случае невозможности создания такой теории не будет ли это означать ограничение нашей познавательной способности?

В статье Баллентайна сказано: «Статистическая интерпретация, которая рассматривает квантовое состояние как описание ансамбля одинаково приготовленных систем, полностью открыта в отношении «скрытых параметров».

Эту фразу, по-видимому, следует рассматривать как несколько робкое утверждение неудовлетворительности поисков теории более совершенной. Блохинцев более критичен по отношению возможностей скрытых параметров. Его книга содержит параграф, озаглавленный «Возможна ли индивидуальная история частицы?», о содержании которого следует сказать «мудрствует лукаво»: «Есть люди, которых беспокоит невозможность методами современной квантовой механики

* Что касается до того, что будто бы Бор в результате обсуждения с Фоком изменил что-то в своем толковании квантовой теории, то это недоразумение, которое выяснилось в результате прямого вопроса Бору во время одного его пребывания в нашей стране.

описать судьбу одного электрона. Такая тревога за судьбу отдельной микрочастицы, отдельного индивидуума микромира кажется все же здоровым ханжеством, так как на самом деле и в макром мире судьба конкретного объекта не может быть предсказана на длительное время.

А. Эйнштейн в своем последнем высказывании по этому вопросу в письме Л. де Бройлю от марта 1954 г. пишет прямо, «не мудрствуя лукаво»:

«Дорогой де Бройль,

Вчера я прочел уже знакомую мне переведенную на немецкий язык Вашу статью по проблеме «кванты и детерминизм» и доставила большое удовольствие ясность Вашей мысли... На самом деле я точно так же, как и Вы, убежден, что надо искать субструктуру, тогда как современная квантовая механика искусно прячет эту необходимость, применяя статистическую форму»^{*)}.

По-видимому, не исключена, если так можно сказать, «последовательная» статистическая интерпретация. Именно, если квантовая теория неприменима к описанию единичного объекта, то в принципе возможен такой повторный эксперимент над единичным объектом, который всегда исключал бы повторяемость результата. Если, допустим, в данном одиночном, предельно аккуратном эксперименте обнаруживается, что электрон или атом имеет слагающую спина по оси x : $S = \hbar/2$, то, спрашивается, какое предсказание даст статистическая теория для повторного эксперимента, т. е. каково продолжение этого эксперимента над этим же электроном рядом стоящей установкой? Казалось бы, если теория неприменима к единичному объекту, то она не в состоянии ответить на этот вопрос, т. е. следует обратиться в этом случае к эксперименту. Здесь в принципе возможен другой результат, чем копенгагенский. Так что повторные эксперименты над единичным объектом в этой связи могли бы стать арбитром между *таким* вариантом статистической интерпретации и копенгагенской интерпретацией.

Здесь уместно сравнить точки зрения на определение объективной реальности Маркса, Бора и Эйнштейна, совместив соответствующие цитаты, которые уже имеются в тексте.

Маркс: «Главный недостаток всего предшествующего материализма — включая и фейербаховский — заключается в том, что предмет, действительность, чувственность, берется

^{*)} Из переписки А. Эйнштейна и Л. де Бройля (ВИНЕТ АН СССР. — 1981. — № 1).

только в форме объекта, или в форме созерцания, а не как человеческая чувственная деятельность, практика, не субъективно. Отсюда и произошло, что деятельная сторона, в противоположность материализму, развивалась идеализмом, но только абстрактно».

Другими словами, «предмет, действительность ... должны рассматриваться обязательно «не только в форме объекта», а и «субъективно», в рамках человеческой «практики».

Бор: «1. Для толкования всех измерений в собственном смысле необходимо пользоваться классическими представлениями, несмотря на то, что классическая теория не может сама по себе объяснить тех новых закономерностей, с которыми мы имеем дело в атомной физике.

2. Как бы далеко ни выходили явления за рамки классического объяснения, все опытные данные должны описываться при помощи классических понятий».

Классические понятия — это понятия импульса, координаты, времени, энергии, которые сформулировались у человека в его макроскопической (классической) практике, и ψ -функция уравнения Шредингера во всех интерпретациях является функцией именно этих переменных. Эти понятия возникли и связаны с существованием самого человека как макроскопического объекта. Микромир изучается человеком в его «проекциях» на макромир, которые составляют специфический класс макроявлений (цепочка пузырьков в камере Вильсона — свидетельница траектории микрочастицы и т. д.). В результате *человеческой практики* выясняется, что в одной макроскопической обстановке (при участии одного класса приборов) электрон, например, обладает свойством иметь определенное положение и не иметь определенного импульса. В других макроусловиях (другие приборы наблюдения) электрон может обладать определенным импульсом, но не иметь определенного положения. В своей практике человек волен менять макроусловия эксперимента. Таким образом, *субъективность* в описании реальных свойств микромира связана с макроскопическим своеобразием познания его человеком (его практикой). Необходимость описывать объективную реальность микромира в макроскопических (классических) понятиях *идет от человека* (от его практики) как макросущества, но она не ограничивает познание объективной реальности. Но эта реальность описывается в классических понятиях в соответствии с тем классом макроскопических проекций макроявлений подчас очень своеобразным образом.

Следует подчеркнуть, что некоторые свойства объекта микромира в смысле отношения субъекта и объекта укладываются в гносеологические рамки «дофeyerбаховского материализма включительно». Например, такие объективные свойства электрона, как его масса покоя, его электрический заряд, его спин, всегда существуют в форме объекта и не требуют для своего истолкования привлечение обсуждаемого нами тезиса Маркса о Фейербахе, т. е., говоря образно, «субъективных моментов». Последние слова мы взяли в кавычки, ибо на самом деле они означают также объективные отношения объекта и познающего его субъекта: положение субъекта в определенной системе координат (если речь идет о траектории падающего в вагоне предмета) или учет аппарата средств наблюдения импульса или координаты электрона, избираемые *субъективно* по воле наблюдателя.

Нам представляется, что тезисы Бора интерпретируют на частном случае реальности микрообъектов недостаточность понимания метафизическим материализмом того понятия объекта, которое возникает (согласно Марксу) в рамках человеческой практики. Кажется, что Н. Бору было бы близко толкование Марксом материализма и «субъективных» моментов объективной реальности в человеческой практике.

Эйнштейн: Эйнштейн фактически требует, чтобы понятие объективной реальности всегда формулировалось вне рамок человеческой практики, чтобы предмет, действительность всегда брались только «в форме объекта». В классической механике это значило бы требовать описание (как выглядит?) траектории частицы, не указывая систему координат, в которой определяется (наблюдается) траектория частицы. В квантовой механике это значило бы требовать описание свойств микрочастицы вне макроскопических условий и наблюдения (существования).

Познаваемость объекта человеком свидетельствует, согласно еще Канту *), об объективном существовании предмета познания. Но познаваемость представляет собой *элемент человеческой практики*, которая вносит в понятие объективной реальности некоторые черты в какой-то степени субъективизма, что и подчеркивается тезисом Маркса о Фейербахе. Мы уже приводили в первой части нашей книги, что вид траектории тела, падающего в вагоне движущегося поезда, не имеет реальной формы «самой по себе», «когда на нее не смотрят», — важно указание системы координат, в которой

*) Важность этого критерия объективного существования предмета познания особенно подчеркивается Эйнштейном.

находится наблюдатель и где производится на практике наблюдение формы траектории. Примеры справедливости поправки Маркса к определению понятия реальности, даваемые Э. П. Р., можно бесконечно множить.

Однажды у меня с моим знакомым зашел разговор о понятии объективной реальности. Мой новый знакомый был известный химик. Он яростно утверждал, что субъект должен отсутствовать в понятии объективного существования физической реальности. Мою ссылку на то, что речь идет о понятии физической реальности в человеческой практике, где только и проявляется познаваемость объективного мира, мой оппонент не посчитал убедительной.

Мы сидели напротив друг друга на песчаном пляже одного из прибалтийских курортов. Я нарисовал на песке изображение одной цифры и спросил его, какую цифру я изобразил. Он, пожав плечами, нехотя сказал: «Ну, девять, ну и что?» Я с небрежным видом парировал его утверждение: «А по-моему, шесть». «Теперь уйдемте отсюда. И я Вас спрошу, предположим, какая цифра *истинно* нарисована на песке? Имеет ли мой вопрос объективный смысл?» Мой собеседник произнес только что-то невнятное и недоуменно почесал затылок. А я продолжал разговор, предлагая ему заменить нас — наблюдателей — приборами, например говорящими компьютерами: каждый из них неизменно повторял бы свое и они не могли бы перекричать друг друга. Мой простой житейский пример как-то так подействовал на собеседника, что при дальнейших встречах неоднократно, улыбаясь, он вспоминал: «Значит и шесть, и девять...» Любопытно: и шесть, и девять... Это действительно «кентавр». Электрон — частица и волна, в человеческой практике — это «кентавр».

Многомировая интерпретация

Несколько меньше года после смерти А. Эйнштейна Эверетт в черновом варианте тезисов сформулировал новую интерпретацию квантовой теории. В 1957 г. на ту тему появилась статья Эверетта под заглавием «Relative state formulation of Quantum Mechanics»^{*)}. Современное название этой интерпретации принадлежит Б. де Витту. Оно впервые дано в его лекциях по квантовой механике^{**)}, затем опубликованных в сборнике, изданном Б. де Виттом

^{*)} Everett H. // Rev. of Mod. Physics.—1957.—V. 29.—P. 254.

^{**)} De Witt B. // Foundation of Quantum Mechanics.—N.Y.: Acad. Press, 1971.

и Н. Грахамом под названием «Многомировая интерпретация квантовой механики»^{*)}. В этом сборнике содержится и полный текст диссертации Эверетта, статья Уилера, поддержавшего в свое время эту деятельность Эверетта, и статьи других авторов, в какой-то мере принимавших участие в развитии этой интерпретации. В литературе по квантовой механике в нашей стране эвереттовская интерпретация практически не излагалась.

Множество вселенных Эверетту понадобилось для истолкования редукции волновой функции. Если в копенгагенской интерпретации из всех возможных состояний, содержащихся в начальной волновой функции, в макроскопическом приборе реализуется лишь одно значение наблюдаемой величины, все другие возможности оказываются не реализованными, то согласно Эверетту данное значение наблюдаемой величины соответствует эксперименту в данной вселенной. Все другие возможности реализуются в других вселенных. Напомним, что геттингенская интерпретация редукции волновой функции заключается в том, что в макроскопическом приборе наблюдения реализуется лишь одно состояние, одно показание (в примере, о котором речь шла выше, шарик падал из кратера либо налево, либо направо). Квантовое состояние — волновая функция, описывающая налетающие на прибор квантовые μ -частицы и макроприбор, состоит из двух членов. Один из них описывает состояние шарика, падающего налево, а другой — направо. Шарик не может одновременно падать налево и направо — реализуется одна из двух возможностей.

Дадим слово одному из горячих сторонников многомировой интерпретации квантовой механики Дэвиду Дейчу:

«Если мы будем искать в квантовой теории, т. е. нашей лучшей и наиболее глубокой физической теории, ответ на вопрос о том, что есть реальность, мы обязаны идти глубже, чем констатировать правильность приближенного согласования результатов (квантовой и классической) физики. Мы должны найти интерпретацию предсказания теории в случае, когда измеряется наблюдаемая, которая принимает более одного значения (т. е. когда эти значения заметно отличаются в разных вселенных)».

Если иметь в виду волновую функцию обсужденного выше эксперимента с действием квантовых μ -частиц на макроскопический шарик, когда вся система описывается уравнением Шредингера, то, согласно Эверетту, эта волновая

^{*)} The Many-World Interpretation of Quantum Mechanics.— Princeton, New Jersey: Princeton Univ. Press, 1974.

функция описывает две различных возможности, реально возникающие в разных двух вселенных. Нельзя не признать, что идея полагать реальными все слагаемые волновой функции как до измерения макроприбором, так и после, может быть соблазнительной. Но такая действительно соблазнительная интерпретация физического смысла волновой функции требует немалой оплаты. Дело в том, что макроскопический эксперимент свидетельствует о том, что стрелка макроприбора показывает лишь одно значение наблюдаемого состояния (помним однозначный результат с падением шарика), а квантовая теория (та волновая функция, которая описывает прибор и взаимодействующий с ним микрообъект) дает в принципе много состояний ($\psi = \sum a_n \psi_n$). Согласно копенгагенской интерпретации все возможности, кроме одной, не реализуются в эксперименте. Д. Дейч так формулирует описанную выше ситуацию в копенгагенской интерпретации:

«Именно в этом пункте копенгагенская интерпретация оставляет попытки придания смысла квантовой теории и принимает радикально новую аксиому: *квантовая теория несправедлива в момент измерения*. Более конкретно, утверждается, что при проведении любого измерения состояние мира мгновенно прекращает подчиняться детерминистическим законам эволюции состояний квантовой теории, внезапно переходя в одно из собственных состояний измеряемой величины. Собственное состояние, в которое осуществляется переход, выбирается *случайно*. Эта случайность и есть то, что делает копенгагенскую версию квантовой теории антидетерминистичной. Именно с этой чертой теории никогда не мог согласиться Эйнштейн; именно этот пункт является главным в знаменитых его продолжительных дискуссиях с Бором по вопросу об основаниях квантовой теории. По его словам: «Бог не играет в кости со Вселенной». Следовательно (предполагает профессор Брайс де Витт), Эйнштейн, возможно, положительно оценил многомировую интерпретацию».

В многомировой интерпретации явление продолжает развиваться согласно уравнению Шредингера и во время обусловленного взаимодействия и после него, но различные значения наблюдаемой оказываются «просто» в различных вселенных. Мы заключили слово «просто» в кавычки, потому что эта «простота» связана с тем, что если в копенгагенской интерпретации «все возможности», кроме одной, «просто» не реализуются в природе, то в многомировой интерпретации все остальные состояния, кроме одного, реализуются в природе, но не в данной вселенной, а соответственно во многих

других вселенных, которые, однако, «просто» из данной вселенной не наблюдаются. Вселенная в целом оказывается очень своеобразной и далеко не «простой» реальностью. Лучше здесь опять процитировать Д. Дейча:

«Многомировая интерпретация утверждает, что состояние мира не является само по себе наблюдаемой величиной, однако оно по-прежнему описывается в любой момент времени набором (ненаблюдаемых) значений, а закон его эволюции по-прежнему *детерминистичен* (курсив наш — М. М.). Этот набор величин и закон их изменения есть «истинная реальность» мира, его *состояние*. То, что мы непосредственно наблюдаем вокруг себя и о чем мы привыкли думать как о реальности, — «Вселенная» — есть на самом деле лишь проявление более грандиозной реальности (в которой существует и взаимодействует множество вселенных, каждая из которых содержит копию нашей).

Стоит повторить, что в квантовой теории, так же как и в классической физике, эволюция состояния мира *полностью определяется* законами физики. Отличие от классической физики состоит в том лишь, что квантовое состояние непосредственно не наблюдается.

В цитате из статьи Дейча выделено слово «детерминистичен». Собственно говоря, цель многомировой интерпретации — придать аппарату квантовой теории последовательно детерминистический смысл и, таким образом, приблизить квантовую теорию к теории классической — как в смысле «объективного реализма» (термин, употребляемый Дейчем), так и в смысле детерминизма. Имея в виду последнее замечание, теперь настал момент в нашем изложении вспомнить ранее сформулированные нами положения о роли «случайности как абсолютного шанса» в квантовых явлениях. Мы даже анонсировали в начале нашего изложения положение, состоящее в том, что общим для всех трех интерпретаций является признание существования случайности не как непознанной необходимости, а как абсолютного шанса. То, что данный нейтрон в данной вселенной у данного наблюдателя распался именно через 15 секунд, — предсказывается ли в многомировой интерпретации именно такое фактическое время жизни данного нейтрона? Ответ однозначен: *нет*. Многомировая интерпретация также не дает детерминистического описания этому квантовому явлению, она должна также в рамках своей интерпретации признать существование случайности не как непознанной необходимости, но как абсолютного шанса.

Вспомним наш пример повторного наблюдения координаты частицы в основном состоянии квантового осцил-

лятора и того, что экспериментатор при повторном наблюдении координаты находит другое значение этой наблюдаемой. Как интерпретировать эту ситуацию в многомировой концепции? Мы ранее интерпретировали эту ситуацию как проявление абсолютной случайности, как явление, не содержащее в своей физической природе какой-то непознанной необходимости. В многомировой интерпретации можно, правда, утверждать, что экспериментатор оказался на этот раз в другой вселенной. Но не придется ли тогда признать, что наблюдатель оказался в результате повторного измерения именно в данной новой вселенной благодаря опять же *абсолютной случайности*? Таким образом, абсолютная случайность, по-видимому, может содержать даже антропоморфный смысл.

В самом простом случае ψ -функции, когда ею описывается пакет волн, когда наблюдаемые (координата частицы и импульс частицы) принимают континуум значений, по-видимому, приходится признать существование континуума вселенных... Более того, детерминистическое развитие волновой функции во времени согласно уравнению Шредингера касается только возможности определить вид ψ -функции в любой момент t по заданной функции ψ_0 в момент t_0 . Но распывание волновой функции волнового пакета означает увеличение значения $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$. А это значит возникновение новых значений наблюдаемых p и x , которых не было в ψ_0 при t_0 . Правда, всегда можно сказать, что данные значения наблюдаемых существовали и ранее, но в очень малом количестве вселенных, состояние которых множилось на малую амплитуду a_n *). Но увеличение a_n значит увеличение на какое-то число вселенных данного типа, которые в таком количестве ранее не существовали. Можно ли утверждать, что появление их, рождение их не является также абсолютной случайностью в многомировой интерпретации? Конечно, распывание волнового пакета происходит детерминистично — оно подчиняется уравнению Шредингера. Но это распывание характеризуется ростом неопределенностей наблюдаемых величин, например соотношение неточностей $(\Delta x \Delta p)$ становится как правило много больше $\hbar$: $\Delta x \Delta p \gg \hbar$. Другими словами, изменение со временем величин a_n , определяющих к данному моменту число вселенных данного сорта, заложено в образе

*) В копенгагенской интерпретации коэффициенты a_n ($\psi = \sum a_n \psi_n$) связаны вероятностью ψ_n состояний. В многомировой интерпретации $a_n = A_n/N$ — это отношение данного числа вселенных A_n к полному числу вселенных N .

волновых функций в начальный момент ($\psi(t_0)$) взаимной недетерминированностью канонически сопряженных величин, например импульса и координаты ($\Delta x \Delta p > \hbar$). Если детерминизм в классической физике представляет собой детерминистическое описание изменения канонически сопряженных наблюдаемых, то детерминистическое изменение со временем волновой функции представляет собой детерминистическое описание роста величин, характеризующих возрастающее отклонение от строгого детерминизма развития во времени классических величин (в частности импульса и координаты). Надо помнить, что в многомировой интерпретации в каждой из огромного числа вселенных имеется свой наблюдатель и этот наблюдатель не является простой копией данного наблюдателя в данной конкретной вселенной, опыт (измерение) которого обсуждается. Так, все другие наблюдатели обладают другими измерительными приборами — другими показаниями стрелок.

Таким образом, кроме пакета волн, пакета вселенных, необходимо допустить существование «пакета наблюдателей», а главное, измерение сопровождается редукцией пакета наблюдателей к данному наблюдателю, который (повторяю) оказался в данной вселенной по закону абсолютного случая... и все другие (в данном случае даже трудно употребить термин «копии») по крайней мере во время проведения его эксперимента ненаблюдаемы.

Не исключено, что в многомировой интерпретации еще многое непонятно и со временем ее можно изложить в каком-то более совершенном, вернее подробном, виде.

Следует подчеркнуть, что любая новая теория завоевывает свое признание тем, что она приводит к предсказанию существования в природе чего-то нового, что не только не предсказывается, но и не укладывается в рамки старых теорий. Пока нельзя констатировать, что многомировая интерпретация квантовой теории проявила себя как теория такого типа. Хотя некоторые сторонники многомировой интерпретации не оставляют надежды в «более тонких»^{*)}

^{*)} Какие соображения можно высказать о содержании «более тонких» экспериментов, которые могли бы обнаружить существование других миров? Если полагать, что эти эксперименты должны обнаружить какое-то сосуществование другой вселенной с данной, то единственная возможность, на которую непосредственно указывает детальное описание процесса измерения (например опыт Блохинцева), — это отличие от нуля недиагональных элементов матрицы плотности при малых временах. Это значило бы возможность одновременного падения шарика как направо, так и налево. В кон-

экспериментах осуществить экспериментальное подтверждение существования в «грубых» экспериментах ненаблюдаемых миров^{*)}. Возможное преимущество многомировой интерпретации иногда связывают с описанием начальной стадии развития Вселенной. Дело в том, что свойства квантовых объектов изучаются нами в проявлениях особого класса макроскопических явлений. По общему мнению начальная стадия Вселенной имеет существенно квантовый характер. При переводе квантового характера микроявлений в эту эпоху на макроскопический язык необходимо взаимодействие начальной стадии вселенной с макроприбором наблюдателя. Но, спрашивается, существует ли такая даже мыслимая возможность? Макроприбор — это в конечном счете значит и существование наблюдателя...

Правда, есть одно кардинальное решение этой проблемы в том случае, если все наши макроскопические наблюдаемые, с помощью комбинации которых мы описываем и макроскопические проявления микромира (скажем, в частности, наблюдаемые p , t и x , E), теряют свой физический смысл. Соответственно теряют свой смысл (т. е. попросту нарушаются) все законы сохранения, и абсолютный случай достигает своего предельного могущества. Возможно, что такая ситуация возникает, например, при взрыве сверхновой звезды, когда она превращается в коллапсирующую черную дыру. И если по каким-либо причинам коллапсирующая материя не достигает сингулярности, то объект имеет в принципе возможность инфляционного расширения в новую вселенную в пространстве, находящемся в абсолютном будущем по отношению к пространству, в котором произошел взрыв

кретном случае эксперимента Блохинцева эти члены при более точном вычислении зануляются при как угодно малых временах. Но если в каких-то особых физических ситуациях недиагональные элементы окажутся отличными от нуля, то это совсем не обязательно будет свидетельствовать об обнаружении другого класса вселенных, если найдет свое естественное описание в рамках геттингенской интерпретации как такой вид реализации из пакета возможностей волновой функции. Для утверждения интерпретации многомирового формализма необходимо найти такие экспериментальные возможности обнаружения «других вселенных», которые не могли бы быть интерпретированы в рамках геттингенского толкования. Обсуждение подобных экспериментов требует большой аккуратности. Из прошлого опыта мы знаем, сколько труда тому же Бору стоило «опровержение» полноты квантовой теории в многочисленных мыслимых экспериментах.

^{*)} В случае неудачи этой возможности в многомировой интерпретации возникает опасность сойти на позиции философского агностицизма.

сверхновой^{*)}. По-видимому, в своем развитии коллапсирующий объект должен проходить размеры (объемы) порядка планковских, что дает известные основания полагать, что такие макроскопические наблюдаемые, как x , t , p , E , могут действительно лишиться своего смысла, и возникающая вселенная в новом пространстве может иметь абсолютно случайно самые разнообразные параметры. Таким образом, тезис Бора о том, что классические понятия (x , t , E , p) и в этом предельном случае используются для описания физической реальности, но их отношение друг к другу может претерпевать дальнейшие изменения. Например, x и t могут оказаться некоммутирующими и даже в какой-то области терять свой смысл без замены какими-то новыми понятиями, не встречающимися в макроскопической («классической») деятельности человека.

Следует подчеркнуть, что множественность и многообразие по своим параметрам начальных вселенных, описываемых соответствующей волновой функцией, может не иметь какого-либо отношения к эвереттовской множественности вселенных в обычной квантовой механике. Может, например, оказаться лишь то, что конкретные значения параметров, характеризующие данную вселенную, взятую из целого множества вселенных, непредсказуемо, но оно может определяться макроскопическим наблюдателем в дальнейшей истории данной вселенной, если в ней возникают в какой-то фазе ее развития макроскопический наблюдатель. А *prigori* нельзя утверждать, что в будущей теории начальных состояний вселенных обязательно возникнут какие-то закономерности в их распределении по характеризующим их параметрам.

Заключение по многомировой интерпретации. Основная цель многомировой интерпретации — сохранение детерминизма в истолковании редукции ψ -функции. Но следует подчеркнуть, что при таком описании полностью игнорируется фундаментальное открытие — существование в природе недетерминированного случая (β -распад нейтрона и т. д.). Не надо ли вспомнить известную поговорку: «Снявши голову, по волосам не плачут»? Обращение к часто упоминаемому детерминизму волновой функции в уравнении Шредингера не сопровождается конкретным анализом этого детерминизма. Этот детерминизм волновой функции не сопровождается детерминистическим развитием наблюдаемых величин, на что указывает рас-

^{*)} М. А. Марков «Коллапс звезд как возможный источник замкнутых и полужамкнутых вселенных». (Доклад на конференции, посвященной столетию А. А. Фридмана. — Июнь 1988 года, Ленинград.)

плывание волновых пакетов со временем. Более того, когда данная наблюдаемая имеет много значений (даже континуум значений), то, по-видимому, следует считать, что только по закону абсолютного случая данный наблюдатель в этот момент оказался во вселенной с данным значением измеряемой наблюдаемой. Последняя фраза значит, что при признании существования в природе абсолютного случая копенгагенская и многомировая интерпретации оказываются в некотором смысле тождественными: если в первом случае наблюдатель в результате абсолютного случая регистрирует данное значение наблюдаемой величины, то в многомировой интерпретации данный наблюдатель в результате абсолютного случая находится именно в той вселенной, где данная наблюдаемая имеет данное значение. Многомировая интерпретация еще требует своего дальнейшего развития. И, может быть, самая главная ценность многомировой интерпретации заключается не в установлении в частном явлении квантовых событий обсуждаемого довольно узкого детерминизма (т. е. детерминизма волновой функции, а не наблюдаемых), а в возможности при дальнейшем развитии этой интерпретации квантовой теории открыть все-таки новые эффекты, подтверждающие реальное существование множества вселенных. Да и описание сверххранней вселенной, т. е. «квантовой» вселенной, может внести свои коррективы.

Другие книги нашего издательства:



URSS

Квантовая механика и квантовая теория поля

- Фок В. А. Начала квантовой механики.
Фок В. А. Квантовая физика и строение материи.
Фок В. А. Работы по квантовой теории поля.
Брайль Л. де. Введение в волновую механику.
Кемпфер Ф. Основные положения квантовой механики.
Мотт Н., Снеддон И. Волновая механика и ее применения.
Тарасов Л. В. Основы квантовой механики.
Тарасов Л. В. Введение в квантовую оптику.
Грин Х. Матричная квантовая механика.
Галицкий В. М., Карнаков Б. М., Коган В. И. Задачи по квантовой механике. В 2 кн.
Флюгге З. Задачи по квантовой механике. В 2 кн.
Горбачевич А. К. Квантовая механика в общей теории относительности.
Килин С. Я. Квантовая оптика: поля и их детектирование.
Вильф Ф. Ж. Логическая структура квантовой механики.
Эддингтон А. Относительность и кванты.
Ван дер Варден Б. Л. Метод теории групп в квантовой механике.
Бауэр Э. Введение в теорию групп и ее приложения к квантовой физике.
Петрашень М. И., Трифонов Е. Д. Применение теории групп в квантовой механике.
Маслов В. П., Шведов О. Ю. Метод комплексного роста в задаче многих частиц и квантовой теории поля.
Визгин В. П. Единые теории поля в квантово-релятивистской революции.
Бриллюэн Л. Квантовая статистика.
Хинчин А. Я. Математические основания квантовой статистики.
Дирак П. А. М. Лекции по квантовой теории поля.
Стойановский А. В. Введение в математические принципы квантовой теории поля.
Серия «Классики науки»
Ньютон И. Математические начала натуральной философии.
Гейзенберг В. Избранные труды.
Смординский Я. А. Избранные труды.
Толдхантер И. История математических теорий притяжения и фигуры Земли от Ньютона до Лавласа.
Серия «Из наследия мировой философской мысли: философия науки»
Аристотель. Физика.
Дюгем П. Физическая теория. Ее цель и строение.
Пуанкаре А., Кутюра Л. Математика и философия.
Дриш Г. Витализм. Его история и система.
Кроль Дж. Философская основа эволюции.
Энгельмейер П. К. Теория творчества.
Васильев А. В. Пространство, время, движение.
Ренан Э. Будущее науки.
Франк Ф. Философия науки: Связь между наукой и философией.

Другие книги нашего издательства:



URSS

Серия «Синергетика: от прошлого к будущему»

Пенроуз Р. **НОВЫЙ УМ КОРОЛЯ.** О компьютерах, мышлении и законах физики. Пер. с англ.

Майнцер К. **Сложносистемное мышление: Материя, разум, человечество. Новый синтез.** Пер. с англ.

Хакен Г. **Информация и самоорганизация.** Пер. с англ.

Малинецкий Г. Г. **Математические основы синергетики.**

Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б. **Нелинейная динамика и хаос: основные понятия.**

Малинецкий Г. Г., Потапов А. Б., Подлазов А. В. **Нелинейная динамика.**

Малинецкий Г. Г. (ред.) **Будущее России в зеркале синергетики.**

Малинецкий Г. Г. (ред.) **Синергетика: Исследования и технологии.**

Арнольд В. И. **Теория катастроф.**

Редько В. Г. **Эволюция, нейронные сети, интеллект.**

Чернавский Д. С. **Синергетика и информация (динамическая теория информации).**

Безручко Б. П. и др. **Путь в синергетику. Экскурсы в десяти лекциях.**

Данилов Ю. А. **Лекции по нелинейной динамике. Элементарное введение.**

Трубецков Д. И. **Введение в синергетику. В 2 кн.: Колебания и волны; Хаос и структуры.**

Князева Е. Н., Курдюмов С. П. **Основания синергетики. Кн. 1, 2.**

Баранцев Р. Г. **Синергетика в современном естествознании.**

Баранцев Р. Г. и др. **Асимптотическая математика и синергетика.**

Анищенко В. С. **Знакомство с нелинейной динамикой.**

Анищенко В. С. **Сложные колебания в простых системах.**

Тюкин И. Ю., Терехов В. А. **Адаптация в нелинейных динамических системах.**

Белотелов Н. В., Бродский Ю. И., Павловский Ю. Н. **Сложность. Математическое моделирование. Гуманитарный анализ.**

Олемский А. И. **Синергетика сложных систем: Феноменология и статистическая теория.**

Пригожин И. **От существующего к возникающему.**

Пригожин И., Стенгерс И. **Время. Хаос. Квант. К решению парадокса времени.**

Пригожин И., Стенгерс И. **Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой.**

Пригожин И., Николис Г. **Познание сложного. Введение.**

Пригожин И., Гленсдорф П. **Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций.**

Суздальев И. П. **Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов.**

Тел./факс:

(499) 135-42-46,

(499) 135-42-16,

E-mail:

URSS@URSS.ru

<http://URSS.ru>

Наши книги можно приобрести в магазинах:

«Библио-Глобус» (м. Лубянка, ул. Мясницкая, 6. Тел. (495) 625-2457)

«Московский дом книги» (м. Арбатская, ул. Новый Арбат, 8. Тел. (495) 203-8242)

«Молодая гвардия» (м. Полизна, ул. Б. Полизна, 28. Тел. (495) 230-5001, 780-3370)

«Дом научно-технической книги» (Ленинский пр-т, 40. Тел. (495) 187-6019)

«Дом книги на Лаводской» (м. Бауманская, ул. Лаводская, 8, стр. 1. Тел. 267-0302)

«Гюэкс» (м. Умыватель, 1-й этаж корпус МГУ, комн. 141. Тел. (495) 939-4713)

«Универсари» (РГТУ) (м. Новослободская, ул. Чапаева, 13. Тел. (499) 873-4301)

«СПб. дом книги» (Невский пр., 28. Тел. (812) 448-2355)

Уважаемые читатели! Уважаемые авторы!

Наше издательство специализируется на выпуске научной и учебной литературы, в том числе монографий, журналов, трудов ученых Российской академии наук, научно-исследовательских институтов и учебных заведений. Мы предлагаем авторам свои услуги на выгодных экономических условиях. При этом мы берем на себя всю работу по подготовке издания — от набора, редактирования и верстки до тиражирования и распространения.



URSS

Среди вышедших и готовящихся к изданию книг мы предлагаем Вам следующие:

- Севальников А. Ю.* Интерпретации квантовой механики: В поисках новой онтологии.
Шредингер Э. Мой взгляд на мир. Пер. с нем.
Борн М. Моя жизнь и взгляды. Пер. с англ.
Гейзенберг В. Философские проблемы атомной физики.
Гейзенберг В. Часть и целое (беседы вокруг атомной физики).
Бунге М. Философия физики.
Джеммер М. Понятие массы в классической и современной физике.
Бриллюэн Л. Научная неопределенность и информация.
Рейхенбах Г. Философия пространства и времени.
Рейхенбах Г. Направление времени.
Уиттроу Дж. Естественная философия времени.
Грюнбаум А. Философские проблемы пространства и времени.
Кассирер Э. Теория относительности Эйнштейна.
Вигнер Э. Инвариантность и законы сохранения. Этюды о симметрии.
Кузнецов Б. Г. Развитие физических идей от Галилея до Эйнштейна.
Кузнецов Б. Г. История философии для физиков и математиков.
Кузнецов Б. Г. Беседы о теории относительности.
Кузнецов Б. Г. Основы теории относительности и квантовой механики в их историческом развитии.
Кузнецов Б. Г. Принципы дополнителности.
Аксенов Г. П. Причина времени.
Могилевский Б. М. Природа глазами физика.
Гиндилис Н. Л. Научное знание и глубинная психология К. Г. Юнга.
Майданов А. С. Методология научного творчества.
Лекторский В. А. Эпистемология классическая и неклассическая.
Новиков А. С. Философия научного поиска.
Яновская С. А. Методологические проблемы науки.
Гришунин С. И. Философия науки: Основные концепции и проблемы.
Гришунин С. И. Возможна ли современная наука без интуиции.
Минасян Л. А. Иммануил Кант и современная космология.
Минасян Л. А. Единая теория поля. Опыт синергетического осмысления.
Поппер К. Р. Объективное знание. Эволюционный подход. Пер. с англ.
Поппер К. Р. Знание и психофизическая проблема. Пер. с англ.

По всем вопросам Вы можете обратиться к нам:
 тел./факс (499) 135-42-16, 135-42-46
 или электронной почтой URSS@URSS.ru
 Полный каталог изданий представлен
 в интернет-магазине: <http://URSS.ru>

**Научная и учебная
литература**

Моисей Александрович МАРКОВ

(1908–1994)

Выдающийся советский физик-теоретик в области квантовой механики, классической электродинамики, квантовой теории поля, физики элементарных частиц, теории гравитации, физики нейтрино, космологии, методологии физики. В 1930 г. окончил Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова. До 1934 г. работал в Физическом институте при МГУ, затем — в Физическом институте Академии наук, в Объединенном институте ядерных исследований в Дубне. В 1966 г. избран действительным членом АН СССР. В 1968–1988 гг. — академик-секретарь Отделения ядерной физики АН СССР, с 1988 г. — советник Президиума АН СССР (затем РАН). В период с 1973 по 1987 гг. являлся членом Совета и Исполкома Пагуошского движения ученых, а также председателем Советского национального комитета этой организации. М. А. Марков был одним из инициаторов и организаторов создания Института ядерных исследований АН СССР. Автор фундаментальных философских и публицистических работ по методологии науки и научного познания. Герой Социалистического Труда (1978), награжден тремя орденами Ленина, орденом «Знак Почета», а также многими медалями СССР.



Представляем другие книги нашего издательства:



2330 ID 105459

НАУЧНАЯ И УЧЕБНАЯ



Тел./факс: 7 (499)
Тел./факс: 7 (499)

интернет-магазин
OZON.ru



28930323

SS.ru



в Интернете:
<http://URSS.ru>

Любые отзывы о настоящем издании, а также обнаруженные опечатки присылайте по адресу URSS@URSS.ru. Ваши замечания и предложения будут учтены и отражены на web-странице этой книги в нашем интернет-магазине <http://URSS.ru>