

**РОЖДЕНИЕ НЕКЛАССИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ***И.И. Бетеров*

Кризис классических представлений о мире и становление новых, квантовых, представлений – самое интересное, самое захватывающее время в истории физики. Рождение новой физики было очень трудным и даже во многом трагическим. Известно восклицание Лоренца: “Я не знаю, зачем я жил!” [1]. Гейзенберг пишет о дискуссиях, которые приводили его в отчаяние, – неужели природа может быть такой абсурдной [2].

Хотелось бы обратить внимание на моменты в теории и истории физики, которые не представляются широко известными. В университетском курсе квантовой механики, да и в курсе Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица [3] многие принципиальные проблемы квантовой механики не рассматриваются.

К интерпретации квантовой механики возвращаются до сих пор. В последнее время интерес к этой области значительно возрос, что связано, помимо прочего, с совершенствованием экспериментальной техники до такого уровня, который позволяет реально провести классические мысленные эксперименты. В частности, проводились эксперименты по изучению перепутанных состояний частиц [4].

Интерес к истории создания квантовой механики имеет и более глубокие причины. В замечательной книге Р.Юнга “Ярче тысячи солнц” [5] 20-е годы XX в. показаны как благодатные для физиков, очень живо и эмоционально в книге изображена характерная для того времени атмосфера свободного научного творчества. Получаемые результаты настолько поражали своей новизной и необычностью, что вряд ли чувства физиков тех лет были сравнимы с чувствами физиков до или после этой революции в науке. И дело здесь не только в том, что квантовая механика создавалась в очень короткие сроки совместными усилиями многих физиков, когда в спорах и бесконечных раздумьях рождалось что-то совершенно необыкновенное.

Здесь есть и другая очень важная сторона, – это связь между объективными законами физической реальности и нашим мышлением, нашим сознанием. К.Ф.Вайцеккер писал: “Единство природы трудно понять, если мы пытаемся обосновать его с помощью классической физики. Классическая физика говорит о телах, существующих в пространстве и времени. Как можно объяснить и понять жизнь или мышление человека, редуцируя их к телам в пространстве и времени? ... Поэтому по мотивам, которые можно назвать философскими, я чувствую, что объективность классической физики — что-то вроде полуправды. Она весьма хороша, представляет собой выдающееся достижение, но почему-то затрудняет полное понимание реальности в гораздо большей степени, чем кажется” [6].

Можно предположить, что создателей квантовой теории так захватывал открывшийся перед ними новый, непривычный мир, суливший неожиданное и верное решение труднейших проблем физики, что можно было надеяться на разрешение в ближайшем будущем и других, самых сложных вопросов, которые веками стояли перед человечеством.

### **Классическая и квантовая физика**

Какую роль отводит современная физика классической механике и физике? Мы хорошо знаем, что классическая физика полностью сохраняет свое значение в применении к той области явлений, для описания которой она была создана и в которой ее справедливость подтверждается опытом. Всякий раз, когда с определенной степенью точности подтверждается какой-то закон, можно утверждать, что этот результат является в основном окончательным и никакие последующие теории не могут его опровергнуть. Если бы это было не так, то наука вообще не могла бы развиваться. Однако может быть, что появление новых экспериментальных данных или новых теорий приведет к тому, что найденные ранее законы будут рассматриваться как некоторое приближение. Именно таким путем последовательных приближений, устраняя внутренние противоречия, и может развиваться наука. Созданные в процессе ее развития теории входят в качестве составляющих частей в новые, более общие теории [7].

Применение классической физики возможно в масштабах наших повседневных явлений. Но при переходе к масштабам атомов классическое описание уже неприменимо. Это связано с величиной постоянной Планка; в обычных условиях возмущения, вносимые вследствие влияния

квантов, почти невозможно измерить. (Когда-то Г.Гамов юмористически изобразил мир, в котором  $\hbar$  намного больше истинного значения [8]. В этом мире бегущая через лес газель из-за дифракции превращалась в стадо, автомобиль туннелировал сквозь стену в дом.)

Классическая физика изображала Вселенную в виде огромного механизма, поведение которого можно совершенно точно описать, задав положение всех его частей в пространстве и изменение положения со временем. Этот взгляд основывался на некоторых гипотезах. Во-первых, считалось, что можно одновременно задать параметры, отвечающие локализации объекта и его движению. Однако это противоречит существованию кванта действия в квантовой физике. Во-вторых, в классической физике полагается, что можно сделать пренебрежимо малым влияние возмущений, вносимых процессом измерения. Но для атомных масштабов попытка измерить какую-либо величину приводит к неконтролируемому изменению других величин – свойств системы.

Особое место в классической физике занимает теория относительности Эйнштейна. Интересно высказывание Ю.Б.Румера: “Эйнштейн, будучи блестящим революционером в физике, в историческом значении является эпигоном. Он блестяще закончил классическую физику, которая началась с Ньютона, продолжалась Максвеллом и кончилась Эйнштейном. Несмотря на то что он ввел теорию квантов в оптику, создал квантовую теорию света, Эйнштейн всегда к квантам относился чрезвычайно настороженно и враждебно” [9]. Подобное отношение было связано с парадоксальностью квантовой механики. А.Эйнштейн считал, что происходит разрушение идеальной, стройной и рациональной картины мира. Он говорил, что “если это правильно, то это конец физики” [10]. В дополнение можно привести такое свидетельство: “Драма Эйнштейна была драмой человека, который, вопреки возрасту, следует своим путем, становящимся все более пустынным, в то время как почти все друзья и молодежь объявляют этот путь бесплодным и ведущим в тупик” [11]. Что собой представляет научный идеал Эйнштейна, хорошо видно из его работ.

Развитие теории относительности началось с изучения некоторых вопросов, связанных с оптическими явлениями, происходящими в движущихся средах. Представление Френеля о свете предполагало существование эфира, заполняющего всю Вселенную и проникающего во все тела. Теория Максвелла уже не требовала, чтобы световые колебания были колебаниями какой-то среды. Но уравнения Максвелла не

удовлетворяли принципу относительности классической механики. То есть они становились неверными при переходе в другую движущуюся систему координат по классическим законам преобразования координат. Пришлось возвращаться к понятию эфира и считать, что уравнения Максвелла верны только в том случае, если система отсчета неподвижна относительно эфира. В этом случае изменение скорости движения Земли относительно эфира из-за вращения вокруг Солнца должно было быть зарегистрировано в интерференционных измерениях. Опыт Майкельсона – Морли показал, что никакого движения относительно эфира нет.

Почти одновременно с этим были выведены преобразования Лоренца, относительно которых уравнения Максвелла были инвариантны. Были сделаны многочисленные попытки связать эти результаты с классическими представлениями, но все они носили искусственный характер. Делалось даже предположение, что при движении относительно эфира предметы действительно сокращаются.

Эйнштейн в 1905 г. нашел правильную интерпретацию. Она заключалась в том, что именно преобразование Лоренца выражает точную связь между наблюдателями в разных системах отсчета. Отсюда возникают хорошо известные следствия – кажущееся сокращение размеров предметов и замедление хода часов. Также были сделаны обобщения уравнений динамики, в частности было установлено соотношение массы и энергии покоя.

Высшим достижением Эйнштейна стала общая теория относительности. Основная идея общей теории относительности заключается в том, что гравитационные силы всегда пропорциональны массе тел, на которые они действуют. Тогда траектория тел определяется только свойствами гравитационного поля и не зависит от свойств движущегося тела. Это позволило Эйнштейну учесть влияние гравитационных полей введением локальной кривизны четырехмерного пространства. В этом случае положение какой-либо точки в пространстве может быть определено только с помощью криволинейных координат, что приводит к появлению гравитационных сил.

После того как была сформулирована ОТО, главной задачей Эйнштейна было создание единой теории поля, в то время как почти все физики занимались дальнейшей разработкой квантовой теории и ее приложениями к различным задачам. По свидетельству Ю.Б.Румера [12], это привело к тому, что в первые пять лет после 1925 г. работы Эйнштейна по единой теории поля читали потому, что они принадле-

жали Эйнштейну. В последующие десять лет их давали ассистентам посмотреть и попытаться пересказать, а потом их уже никто не читал. Построить единую теорию поля не удалось, но в наше время вновь появился значительный интерес к данной проблеме и достигнуты определенные успехи в этой области. Но задача построения единой теории поля не решена.

Тем не менее, несмотря на необыкновенную красоту и оригинальность теории относительности, ее все-таки следует причислить к классической физике (если рассматривать общие принципы). В моем понимании, границей между классической и неклассической физикой является представление об однозначности или неоднозначности описания физических явлений в рамках пространства и времени. Действительно, идеал классической физики был сформулирован П.Лапласом, и теория относительности соответствует этому идеалу. Дело в том, что общим для всех классических теорий является предположение о возможности описания состояния физического мира, если задавать точное положение отдельных его частей в трехмерном пространстве. Безусловно, есть существенное различие между релятивистской и нерелятивистской теориями. В релятивистской теории пространство и время не абсолютны. Абсолютен лишь четырехмерный континуум. Но все равно делается предположение, что все физические явления независимо от их характера и природы могут быть *однозначно* описаны в рамках трехмерного пространства и времени. Существование кванта действия исключает одновременное определение координаты и скорости (соотношение неопределенности). В результате происходит замена точных законов вероятностными.

Конечно, основания для таких выводов должны были быть более чем вескими, и пора их проанализировать.

### Рождение квантовой механики

Начало развитию квантовой механики положили работы М.Планка по теории излучения черного тела. Нужно было найти явный вид функции, определяющей спектральную плотность энергии излучения. Определить ее на основе только термодинамики не удалось. Использование электродинамических законов позволило Рэлею получить спектральное распределение:

$$\frac{dE}{d\omega} = \frac{VT\omega^2}{\pi^2 c^3}.$$

(формула Рэля – Джинса). Здесь  $\omega$  – частота излучения;  $\frac{dE}{d\omega}$  – спектральная плотность энергии излучения;  $T$  – температура;  $c$  – скорость света;  $V$  – данный объем. Это распределение противоречило экспериментальным данным, так как предсказанный формулой Рэля – Джинса неограниченный рост спектральной плотности с увеличением частоты в эксперименте не наблюдался, в области высоких частот спектральная плотность снижалась.

Все попытки получить согласующийся с экспериментом результат оказались неудачными. Потребовался принципиально новый взгляд на вещи, который и был сформулирован в работах Планка. Планк представил вещество как набор колеблющихся осцилляторов и поставил задачу исследования равновесия, установившегося в результате обмена энергией между осцилляторами и излучением. Решая эту задачу методом классической физики, он получил распределение Рэля. Было сделано предположение, что неправильность закона Рэля связана со слишком большой ролью, которую в классической картине играют высокочастотные осцилляторы. Чтобы подавить значение высокочастотных осцилляторов, было сделано ключевое предположение, что вещество может испускать излучение только конечными порциями, пропорциональными частоте излучения. Энергия каждого осциллятора  $E_n = n \hbar \omega$ , где  $\hbar$  – постоянная Планка;  $n$  – целое. В результате было получено распределение Планка (1900 г.), которое хорошо согласовывалось с экспериментом:

$$\frac{dE}{d\omega} = \frac{\hbar \omega^3 V}{\pi^2 c^3 (e^{\hbar \omega / T} - 1)}.$$

Сначала это казалось просто остроумной гипотезой, решением частной задачи, но постепенно стало ясно, что эта дискретность порций энергии требует пересмотра принципов классической физики. Квантование энергии имеет смысл только для гармонических осцилляторов, в других задачах квант энергии определяется неоднозначно. Оказалось, что правильно считать, что  $\hbar$  – квант действия. Но уже из существования кванта действия следовала взаимосвязь между динамическими переменными и переменными, характеризующими положение в пространстве, а это не укладывалось в классическую картину мира. Сразу стало очевидным, что аппарат аналитической механики пригоден для введения квантования.

Дальнейшим подтверждением квантовой теории были работы А.Эйнштейна о фотоэффекте (1905 г.) [13] и модель атома Н.Бора (1913 г.) [14]. Фотоэффект – испускание веществом быстрых электронов под воздействием излучения. Оказалось, что энергия испущенных электронов не зависит от интенсивности излучения, а зависит от частоты. Это противоречило классическим представлениям. Эйнштейн предположил, что монохроматическое излучение состоит из квантов, причем энергия каждого кванта  $E = h\nu$ . На основании этого предположения были получены результаты, которые прекрасно согласовывались с экспериментом.

Важным шагом вперед стала атомная теория Н.Бора. Классическая физика не смогла объяснить полученные эмпирическим путем спектральные законы – серии в спектрах излучения атомов. Планетарная модель атома, правильность которой подтверждалась в опытах Резерфорда, противоречила классической электродинамике: электроны должны были терять энергию при вращении вокруг ядра атома и падать на него. Бор сохранил планетарную модель атома, но ввел в нее квантовые принципы. Было сделано предположение, что электрон может находиться в состоянии с определенной энергией и в этом стационарном состоянии не излучения. Излучение возникает только при переходе между состояниями. Принципиальный недостаток теории Бора заключался в искусственном наложении квантовых понятий на классические представления. Кроме того, теория Бора позволяла найти энергию стационарных состояний только для кругового движения. Развитием этой теории стали методы квантования Бора – Зоммерфельда, применимые для многомерного движения. Для определения различных квантовомеханических параметров, которые невозможно было вычислить с имевшимся аппаратом, Бор сформулировал замечательный принцип соответствия, который заключался в том, что для больших квантовых чисел классическая и квантовая физика должны давать одинаковые ответы, – например, по классически вычисленной интенсивности излучения можно вычислить вероятность перехода. В результате было создано то, что называется старой квантовой теорией.

### Волновая и квантовая механика

К 1923 г. стало ясно, что старая квантовая теория – лишь промежуточное звено между классическими представлениями и совершенно новыми взглядами, позволяющими глубже проникнуть в сущность квантовых явлений. В старой квантовой теории условия квантования накладывались

вались в каком-то смысле чисто внешним образом на результаты классической теории. Возникла необходимость в создании новой теории, в основе которой сразу были бы заложены квантовые идеи.

В результате были созданы две совершенно разные теории: волновая механика Э.Шредингера (1923–1926 гг.) и квантовая механика В.Гейзенберга (1925–1927 гг.) [15]. Впоследствии была установлена их тождественность [16]. Но уже на этом этапе стало понятным, насколько сложна задача осмысления неочевидных вещей, и эта сложность привела к множеству интерпретаций квантовой механики, различавшихся на уровне “научного идеала”, взгляда автора интерпретации на мир.

Волновая механика родилась в 1923 г. К тому моменту уже был открыт эффект Комптона и изучен фотоэффект в рентгеновских лучах, результаты подтверждали представление Эйнштейна о световых квантах – фотонах. В связи с этим остро встал вопрос о том, что такое свет – волны или частицы. Для описания излучения требовалось применять поочередно картину то волн, то частиц (корпускулярно-волновой дуализм). Такой дуализм возникал после введения квантов и встал вопрос: не является ли он глубоким и неотъемлемым свойством кванта действия? Тогда он должен был бы иметь место во всех квантовых явлениях, и на основании этого можно было бы формулировать предположения, например, о волновых свойствах электрона. Л. де Бройль показал, что движению электрона может соответствовать некоторая волна материи, так же как движению светового кванта соответствует световая волна [17]. Конечно, в то время не было ясно, что означает в данном случае слово “соответствовать”. Де Бройль предложил объяснить условия квантовой теории Бора с помощью представления о волнах материи. Волна, движущаяся вокруг ядра атома, по геометрическим соображениям может быть только стационарной волной; длина орбиты должна быть кратной целому числу длин волн. Позже, в 1927 г., в эксперименте была открыта дифракция электронов, что подтвердило правильность идеи де Бройля о волновых свойствах электрона.

В результате была создана волновая механика. Окончательно это было сделано в замечательной работе Шредингера, опубликованной в 1926 г. Шредингер исходил из того, что классическая механика эквивалентна геометрической оптике, а волновая механика – волновой оптике. Он получил уравнение волн, связанных с частицей, – уравнение Шредингера:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \hat{H} \psi$$



Далее Шредингер предположил, что стационарные состояния соответствуют стационарным волнам. Нужно было найти монохроматические решения, конечные и непрерывные во всем пространстве, нулевые на бесконечности. Шредингер решил задачу для спектра атома водорода, – получились боровские результаты. Но при этом он описывал атом как систему, которая состоит не из ядра и электронов, а из атомного ядра и материальных волн.

Отличия от результатов старой квантовой теории имели место для линейного осциллятора. Полученные результаты – полуцелые квантовые числа – лучше соответствовали экспериментальным данным. Но возникли принципиальные трудности. Во-первых, решения уравнения Шредингера оказывались комплексными, что затрудняло их физическую интерпретацию. Во-вторых, сложные стационарные колебания всегда можно представить в виде ряда Фурье. Трудность возникает, если применить это к атомным системам. По первоначальным представлениям Бора, атом всегда находится в том или ином стационарном состоянии. Получалось, что в общем случае атом может находиться в разных стационарных состояниях одновременно, так как волновая теория не требовала обязательной монохроматичности. Это было лишено смысла с классической точки зрения.

Данные проблемы были решены в рамках вероятностной интерпретации. Вероятностная интерпретация основывается на следующих принципах. Во-первых, точное измерение какой-либо величины может дать в качестве значения только одно из собственных значений оператора. Во-вторых, вероятность найти частицу в заданном состоянии, если известна ее волновая функция, есть квадрат модуля амплитуд компонент разложения по собственным функциям рассматриваемой величины.

Сразу следует подчеркнуть, что правильность этих утверждений никем не оспаривается, как не оспаривается и уравнение Шредингера. Принципиальный момент заключается в более глубоком понимании смысла вероятности в физике: насколько полно отражается действительность в таком описании и для каких систем определяется вероятность.

Одновременно с Шредингером работу над новой квантовой теорией вел В.Гейзенберг, создатель квантовой механики. Гейзенберг принадлежал к школе Бора, которая обычно называется “копенгагенской школой”. В своих работах он исходил из принципа соответствия.

Классическая теория выражает величины, относящиеся к квантованной системе, в виде разложения в ряд Фурье, члены которого соответствуют непрерывному и одновременному испусканию разных излучений.

Квантовая теория разлагает те же величины на элементы, отвечающие переходам между различными состояниями, причем каждый переход связан с испусканием излучения. Отсюда возникла идея представить каждую физическую характеристику матрицей. При этом появилась надежда исключить из теории ненаблюдаемые величины, такие как скорость или траектория электронов. В полной мере это не удалось.

Ввести квант действия в теорию Гейзенберга стало возможным, выразив через него коммутатор матриц. Именно некоммутативность определяла квантовый характер теории. Из некоммутативности матриц следовало соотношение неопределенностей. Качественная форма соотношения неопределенностей выглядит следующим образом: если измерение координаты производится с точностью  $\Delta q$  и одновременно производится измерение импульса с точностью  $\Delta p$ , то всегда выполняется соотношение  $\Delta p \Delta q \geq \hbar$ . Таким образом, существует предел точности одновременных измерений импульса и координаты, превысить который невозможно.

Для матриц Гейзенберг написал уравнения Гамильтона. С помощью этого метода удалось решить задачи для атома водорода и линейного осциллятора, причем результаты получились такие же, как у Шредингера.

Шредингер смог доказать тождество волновой и квантовой механики. Для этого каждой физической величине был поставлен в соответствие оператор. Из матричных элементов этого оператора, как оказалось, состояли матрицы Гейзенберга.

### **Борьба различных интерпретаций. Копенгагенская интерпретация**

Существует достаточно много различных интерпретаций квантовой механики. Во-первых, это копенгагенская интерпретация Бора, Гейзенберга, Борна и Паули. Именно она принята большинством ученых и отражена в “Квантовой механике” Л.Д.Ландау и Е.М.Лифшица и двухтомнике Мессиа [18]. Из-за этого ее еще называют ортодоксальной. Во-вторых, имеются многочисленные интерпретации, которые в той или иной мере возвращаются к классическим взглядам, и парадоксальные интерпретации, авторы которых обычно исходят из классических парадоксов квантовой механики. Ниже будут изложены копенгагенская интерпретация квантовой механики и дан краткий обзор

альтернативных интерпретаций (обычно основанных на критике копенгагенской интерпретации) и парадоксов квантовой механики. Существует классификация различных интерпретаций квантовой механики [19], но из-за ее сложности приводиться здесь не будет.

Копенгагенская интерпретация начинается с парадокса [20]. Каждый физический эксперимент описывается в терминах классической физики. Классическая физика определяет язык, на котором ведется описание опытов и результатов. Но применение классической физики к микромиру принципиально ограничено соотношением неопределенностей. Дело в том, что принципиальная сложность описания микромира заключается в том, что мы описываем его в терминах макроскопической физики. А эксперименты в микромире имеют принципиальное отличие: мы не можем измерить характеризующую объект физическую величину, не изменив при этом его состояния.

Процесс измерения имеет в квантовой механике важную особенность: он всегда оказывает воздействие на подвергаемую измерению частицу, и это воздействие при данной точности измерения не может быть сделано сколь угодно слабым. Чем точнее измерение, тем сильнее оказываемое им воздействие. Поэтому, по Гейзенбергу [21], описание экспериментальной ситуации дается функцией вероятности, которая представляет собой объединение факта и степени знания факта.

В интерпретации Гейзенберга, можно рассчитать изменение функции вероятности с течением времени и тем самым получить вероятность какого-то результата измерений в следующий момент времени. При этом функция вероятности не дает описания того, что происходит с объектом в промежутке между двумя измерениями. Только последующее измерение создает связь функции вероятности с действительностью. Само наблюдение прерывным образом изменит функцию вероятности: оно выбирает из всех возможных событий то, которое фактически совершилось. Это изменение происходит мгновенно и не описывается уравнением Шредингера. Поскольку наше знание под влиянием наблюдения изменяется прерывно, постольку и величины, входящие в его математическое представление, изменяются прерывно, и потому мы говорим о “квантовом скачке”.

Очень важен принцип дополнительности Бора (1927 г.) [22]. Он заключается в том, что необходимые для описания объекта корпускулярная и волновая картины противоречат друг другу, но это противоречие снимается принципом неопределенности. Если для электрона наблюдается интерференция, его нельзя считать локализованным. Если

электрон локализован, его волновые свойства исчезают. Но для описания электрона обе картины необходимы. Если использовать обе картины, переходя от одной к другой и обратно, то в конце концов мы получим правильное представление о примечательном виде реальности, который скрывается за экспериментами с атомами.

Ясно, что в рамках копенгагенской интерпретации не может идти речи о детерминистическом описании свойств объекта, и вообще его свойства имеют смысл только при их измерении. В связи с этим встает вопрос об объективности копенгагенской интерпретации. Гайзенберг дает следующий ответ: квантовая теория не содержит субъективных черт, так как она не включает в себя разум физика как часть атомного события. Субъективность квантовой теории состоит лишь в применении классического языка к микромиру, так как язык классической физики формировался в результате исторического пути человечества и не является объективным [23].

### **Критика копенгагенской теории и предлагаемые альтернативы**

Критика копенгагенской интерпретации в основном имеет целью сохранение объективности и реальности мира и свойств объектов независимо от измерений, сохранение детерминизма и элементов классического видения мира в целом.

Прежде всего, существуют ансамблевые интерпретации, в которых считается, что волновая функция не дает полного описания свойств объекта, а описывает только свойства ансамбля объектов. Среди них есть интерпретации, полагающие, что отдельные объекты ансамбля не обладают какими-то свойствами, а сам ансамбль характеризуется средним значением физических величин. То есть средняя скорость электрона является свойством ансамбля электронов, при этом сам электрон скоростью не обладает. Принадлежность электрона к ансамблю объективна и не зависит от наблюдателя. Волновая функция, следовательно, является свойством ансамбля. Влияние приборов на измеряемые объекты в статистической интерпретации становится несущественным, так как приборы не влияют на весь ансамбль частиц. В результате можно установить объективные закономерности, существующие независимо от наблюдателя. Этой точки зрения придерживались Л.И.Мандельштам и Д.И.Блохинцев.

Блохинцев [24] также критикует копенгагенскую интерпретацию за то, что в ней на первый план выдвигаются не объективные особенности микромира, а возможности наблюдателя и его приборов. Кроме того, в копенгагенской интерпретации волновая функция представляется не как объективная характеристика системы, а как степень нашего знания о ней, т.е. субъективно.

В свою очередь, Гейзенберг [25] критикует позицию Блохинцева. В частности, он утверждает, что принадлежность к ансамблю не может быть объективной, так как она содержит характеристику знания системы наблюдателем. Также Гейзенберг критикует позицию, согласно которой волновая функция обладает объективностью и связано это с тем, что происходит объективное взаимодействие объекта и прибора. Гейзенберг считает, что конкретный результат измерений не описывается в квантовой теории, он вносится искусственно введением представления о наблюдателе. Следовательно, из объективности процесса взаимодействия нельзя делать выводов о характере волновой функции.

Принципиально иная ансамблевая интерпретация выдвигалась А.Эйнштейном [26] и позднее более последовательно К.Поппером [27]. Этот подход основывается на том, что принцип неопределенности не работает применительно к прошлому, т.е. если мы создали электрон с заданной скоростью, а затем измерили его координату, то можно сказать, где этот электрон находился в момент задания скорости. На основании этого Поппер приписывает электрону одновременно импульс и координату, а принцип неопределенности применяет к ансамблю частиц.

Следующий важный вопрос – это интерпретация дополненности и понятие скрытых переменных. Если система находится в состоянии, не являющемся собственной функцией физической величины, то в копенгагенской интерпретации эта величина не имеет определенного значения, а в интерпретации скрытых переменных она имеет определенное значение, но квантовая механика неполна и не позволяет это значение определить.

Важнейшие проблемы квантовой механики были сформулированы в двух широко известных парадоксах. Это парадокс Эйнштейна – Подольского – Розена [28] и “кот Шредингера” (1935 г.) [29].

В формулировке Д.Бома [30] ЭПР-парадокс выглядит следующим образом. Пусть задано перепутанное состояние двух электронов с полным спином  $S=0$ . Электроны удаляются друг от друга на такое расстояние, что между ними взаимодействие исчезает. Пусть измерена проекция спина первого электрона на ось  $x$  и получена  $S_{1x}=1/2$ . Тогда

проекция спина второго электрона на ось  $x$  будет  $S_{2x} = -1/2$ , при этом второй электрон измерением не возмущался. Это значит, что проекция спина второго электрона на ось  $x$  объективно существовала и до ее измерения. Но пусть вместо измерений проекции на ось  $x$  измерили проекцию на ось  $z$  спина первого электрона. В этом случае будет известна проекция спина и для второго электрона. Следовательно, значение проекции на ось  $z$  существует объективно. Ранее было показано, что значение проекции на ось  $x$  также существует объективно. Это значит, что существуют одновременно проекции спина электрона на оси  $z$  и  $x$ , что противоречит квантово-механическому описанию. На основе этого Эйнштейн сделал вывод о неполноте квантовой механики. Д.Бом интерпретирует ЭПР-парадокс следующим образом: ошибочно утверждать, что каждому “элементу реальности” должен соответствовать однозначно определенный элемент полной математической теории.

К.Поппер [31] обращает внимание на принципиальное отличие формулировки, предложенной Бомом, от первоначальной формулировки ЭПР-парадокса. Это отличие заключается в том, что Эйнштейн, Подольский и Розен рассматривали импульс и координату частиц, а Бом рассматривает проекции спина на различные оси. Поппер допускает, что ЭПР-парадокс в формулировке Боба неэквивалентен исходному варианту и что эксперименты в постановке Боба могут привести к принципиально иным результатам, чем эксперименты в классической постановке Эйнштейна.

Позже Дж.Белл [32] ввел понятие объективной локальной теории, суть которой заключалась в том, что каждая частица характеризуется некоторыми переменными, возможно коррелированными, при этом результаты измерения зависят только от начальных условий и на результаты измерений одной частицы не окажет влияния другая частица. На основе этих утверждений в 1964 г. были сформулированы неравенства Белла [33], которые не выполнялись в эксперименте А.Аспекта [34], поставленном в 1980 г. Таким образом, можно считать квантовую механику нелокальной, а объективную локальную теорию неверной, хотя существуют аргументы против этой позиции.

Второй хорошо известный парадокс – это “кот Шредингера” [35]. Парадокс заключается в следующем: в квантовой теории суперпозиция состояний измеряемого объекта должна приводить при измерении к суперпозиции состояний прибора, т.е. суперпозиции состояний макроскопической системы. Чтобы драматизировать этот парадокс, Шредингер предложил взять в качестве измеряемого объекта радиоактив-

ный атом, находящийся в суперпозиции распавшегося и не распавшегося состояний. Прибор – счетчик Гейгера, бомба и кот. Когда счетчик Гейгера регистрирует распад атома, бомба взрывается и кот погибает. В данной постановке задачи при квантово-механическом рассмотрении кот должен находиться в суперпозиции живого и мертвого состояний.

Разрешением этого парадокса может быть декогеренция окружением. Явление декогеренции заключается в перепутывании состояний системы и ее окружения, и вследствие большого числа степеней свободы окружения происходит превращение суперпозиции состояний в смесь состояний, которая описывается матрицей плотности.

Такая интерпретация подходит для открытых систем, т.е. систем с внешним окружением. Трудность возникает при описании закрытых систем, не имеющих внешнего окружения. Пример такой системы – Вселенная. В результате были сделаны попытки расширить теорию квантовых измерений, и одна из них – многомировая интерпретация Эверетта – Уилера [36]. В этой интерпретации система включает в себя всю Вселенную, декогеренции не происходит, каждая из компонент суперпозиции описывает целый мир, все возможные результаты измерений реальны, но имеют место в разных мирах.

Тем не менее было бы ошибочным считать, что найдены не вызывающие сомнений интерпретации классических парадоксов. В данном случае не следует упрощать ситуацию.

\* \* \*

Выбор интерпретации действительно очень трудное дело. Большинство интерпретаций опираются на матричную или волновую механику и, следовательно, позволяют правильно предсказать результаты экспериментов. Значит, для анализа экспериментальных данных обычно не имеет значения, какой интерпретации придерживается исследователь. Таким образом, выбор интерпретации квантовой механики определяется научными идеалами исследователя, его мировоззрением. При этом возникает необходимость в интерпретации достаточно сложных мысленных экспериментов, ведущих к парадоксам, исключению противоречий. Часть теорий, содержащих “скрытые параметры”, была опровергнута математически строго.

В.Гейзенберг справедливо отмечает, что наши философские взгляды формируются на основе нашего опыта, круга общения и множества других факторов [37]. В связи с этим приходится с еще большей осторожно-

стью относиться к выбору интерпретации, понимать сложность и субъективность этого выбора.

В свое время И.Е.Тамм верно заметил, что, как и всякий человек, Гейзенберг может ошибаться, но ошибки человека такого масштаба всегда будут нетривиальны и очень поучительны, поэтому нельзя отвергать с ходу даже те его идеи, которые на первый взгляд кажутся сомнительными [38]. То же самое можно сказать и о других крупных физиках, которые придерживались других взглядов. Применительно к квантовой механике сложность заключается в том, что раскол имел место с самого начала: Шредингер, Бор, Эйнштейн и многие другие великие физики придерживались разных позиций. Но благодаря этому остается надежда на новую научную революцию, которая разрешит старые проблемы и сформирует новые, не менее интересные.

### Примечания

1. См.: Данин Д. Нильс Бор. – М.: Мол. гвардия, 1978. (Сер.: Жизнь замечательных людей).
2. Гейзенберг В. Физика и философия. – М.: Наука, 1989.
3. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. – М.: Наука, 1972.
4. См.: *Aspekt A.* // Nature. – 1999. – V. 390, № 189; *Titel W.* e.a. // *Europhys. Let.* – 1997. – V. 40. – № 595.
5. См.: Юнг Р. Ярче тысячи солнц. – М.: Атомиздат, 1960.
6. Вайцеккер К.Ф. Физика и философия // *Вопр. философии.* – 1993. – № 1. – С. 115–125.
7. См.: Бройль Л., де. Революция в физике. – М.: Атомиздат, 1965.
8. См.: Гамов Г. Приключения мистера Томпкинса. – М., 1993.
9. См. пластинки с записью выступлений Ю.Б.Румера.
10. Кузнецов Б.Г. Эйнштейн. – М. 1963.
11. См.: Кузнецов Б.Г. Эйнштейн. – С. 365.
12. См. пластинки с записью выступлений Ю.Б.Румера.
13. См.: *Einstein A.* On a heuristic viewpoint concerning the production and transformation of light // *Annalen der Physik.* – 1905. – V. 17. – P. 132–148.
14. См.: *Bohr N.* The spectra of helium and hydrogen // *Nature.* – 1913. – V. 92. – P. 231–232 [рус. перев.: Бор Н. Спектры водорода и гелия // Бор Н. Избранные научные труды. – Т. 1. – С. 149–151]; *Id.* On the constitution of atoms and molecules // *Philos. Mag.* S. 6. – 1913. – V. 24. – P. 1–25.
15. См.: *Schrödinger E.* Quantisation as a problem of characteristic values // *Ann. Phys.* – 1926/ – V. 79. – P. 361–376; *Id.* Quantisation as a problem of characteristic values: Part II // *Ibid.* – P. 489–527; *Id.* The relation between the quantum mechanics of Heisenberg, Born and Jordan and that of Schrödinger // *Ibid.* – P. 734–756; *Heisenberg W.* “Über quantentheoretische Kinematik und Mechanik // *Mathematische Annalen.* – 1925. – Bd.95. – S. 683–705; Бройль Л., де. Волны и кванты // *Comptes Rend.* – 1923. – V. 177, № 548.
16. См.: *Schrödinger E.* The relation between the quantum mechanics...



17. Бройль Л. де. Волны и кванты.
18. См.: Мессиа А. Квантовая механика. – М.: Наука, 1978. – Т. 1, 2.
19. См.: Печенкин А.А. Три классификации интерпретаций квантовой механики (см.: www.philosophy.ru).
20. Гейзенберг В. Физика и философия.
21. Там же.
22. См.: Bohr N. The quantum postulate and the recent development of atomic theory // Nature. – 1928. – V. 121. – P. 580–590.
23. См.: Гейзенберг В. Физика и философия.
24. См.: Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. – М.: Высш. шк., 1961.
25. См.: Гейзенберг В. Физика и философия.
26. См.: Эйнштейн А. Собрание научных трудов: В 5 т. – М., 1966. – Т. 3. – С. 528, 529.
27. См.: Popper K.R. Quantum theory and the schism in physics. – London; New York, 1982. – P. 54, 55; Поннер К. Квантовая механика и раскол в физике / Пер., коммент. и послесл. А.А.Печенкина. – М.: Логос, 1998.
28. См.: Einstein A. Podolsky B. Rosen N. // Phys. Rev. – 1935. V. 47. – P. 777 [рус. перев.: Эйнштейн А., Подольский Б., Розен Н. // УФН. – 1936. – Т. 16, № 4. – С. 440]; Бом Д. Квантовая теория. – М., 1961; Менский М.Б. Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов // УФН. – 2000. – Т. 170. – С. 631.
29. См.: Менский М.Б. Квантовая механика...
30. См.: Бом Д. Квантовая теория.
31. См.: Popper K.R. Quantum theory and the schism in physics; Поннер К. Квантовая механика и раскол в физике.
32. См.: Bell J.S. Speakable and unspeakable in quantum mechanics: Collected papers on quantum philosophy. – Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1987; *Id.* // Physics. – Long Island City, N.Y., 1964. – V. 1, № 195; Менский М.Б. Квантовая механика...
33. См.: Bell J.S. Speakable and unspeakable...; *Id.* // Physics. – 1964. – V. 1, № 195.
34. См.: Aspect A. // Nature. – 1999. – V. 390, № 189.
35. См.: Менский М.Б. Квантовая механика...
36. См.: Менский М.Б. Квантовая механика...; Everett H. III // Rev. Mod. Phys. – 1957. V. 29, № 454; *Id.* // Quantum Theory and Measurement / Eds. J.A.Wheeler, W.H.Zurek. – Princeton, N.J.: Princeton Univ. Press.
37. См.: Гейзенберг В. Физика и философия.
38. См.: Воспоминания об И.Е.Тамме. – М.: Наука, 1981.

Новосибирский государственный  
университет, г. Новосибирск

### **Beterov, I.I. The origin of non-classical physics.**

The paper deals with the origin and making of non-classical physics. The main issues are the connection between classical and non-classical physics and their conceptual difference, and the history of creation of quantum mechanics as a review of the problems of analysis of experimental results and ways for their solution. Various interpretations of quantum mechanics and its classical paradoxes are also considered.