

МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

Объекты и окружение

Г. фон Оппен

Основания квантовой физики обсуждаются на основе допущения, что фундаментальные законы природы получены путем изоляции объектов от их окружения. Но наблюдаемые объекты связаны с окружением посредством спонтанных квантовых переходов, и поэтому их движение управляется статистическими законами. Полностью детерминированная эволюция возможна только в идеальном случае изолированных объектов. Эволюция таких ненаблюдаемых идеализированных объектов описывается динамическими законами квантовой механики.

PACS numbers: 03.65.Bz, 05.45.+b, 05.70.Ln, 06.20.Dk

Содержание

1. Введение (661).
 2. Три загадки современной физики (662).
2.1. Проблема мезофизики: соответствие между микрофизикой и макрофизикой. 2.2. Проблема необратимости. 2.3. Проблема квантовых скачков.
 3. Наблюдаемость объектов (663).
 4. Изолированные объекты и открытые системы (664).
 5. Необратимость (665).
 6. Коты, демоны и измерительные приборы (665).
 7. Дно элементарности (666).
 8. Заключение (666).
- Список литературы (667).

... мы должны отказаться от описания атомных явлений как явлений в пространстве и времени, мы должны еще дальше отступить от старого механистического воззрения.
А. Эйнштейн, Л. Инфельд "Эволюция физики"

1. Введение

Атомистическая гипотеза состоит в том, что все физические тела составлены из атомов. В соответствии с этой гипотезой макроскопическое вещество структурировано и может быть разложено на все более мелкие части, пока не достигаются атомные размеры. А на атомарном уровне вещество должно описываться совершенно иным

образом по сравнению с исходным макроскопическим телом. Микроскопические частицы, такие как атомы, ионы или молекулы, обнаруживают свойства, в корне отличные от свойств макроскопических тел. Микроскопические частицы (будучи ограниченными в пространстве) имеют дискретные энергии и изменяют свои состояния разрывно — посредством квантовых скачков. Они описываются квантовомеханически. Макроскопические тела, напротив, изменяются и движутся непрерывно в пространстве и времени и описываются классической механикой.

Успешность и продуктивность атомистической гипотезы в понимании физического мира утвердила большинство физиков в уверенности, что исследование основных законов природы связано с дроблением макроскопических тел на все более фундаментальные составные части. Основываясь на этой вере, они продолжают направлять свои усилия на поиски фундаментальных законов физики с помощью расщепления уже и атомных частиц. Многочисленные эксперименты, сделанные на атомных и субатомных частицах показали, что не только атомы, но и ядра и их составные части — нуклоны имеют сложную структуру, образованную более элементарными объектами — электронами и кварками. Эти непрекращающиеся поиски "дна элементарности" [1] заставляют физиков проводить эксперименты в области все более высоких энергий для обнаружения лишенных структуры, точечных частиц.

Несмотря на то, что благодаря всем этим усилиям наши взгляды на природу элементарных физических объектов претерпели значительные изменения, сам руководящий принцип исследований — принцип декомпозиции (представление о возможном разложении вещества на неделимые части) остался неизменным. В данной статье делается попытка уйти от стандартных схем и осознать происходящие в атомной физике изменения с альтернативной точки зрения.

Для начала заметим, что наши самые общие идеи о физической реальности, и, в частности, принцип декомпозиции, неявно используют классическую (или реляти-

G. von Oppen. Institut für Strahlungs- und Kernphysik,
Technische Universität Berlin,
TU Berlin, Sekr. PN 3-2, Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin
Tel. (4930) 314-23021, (4930) 314-23012
Fax (4930) 314-23018
E-mail: oppen@kalium.physik.TU-Berlin.DE

Статья поступила на английском языке 27 сентября 1995 г.;
перевод поступил в редакцию 28 декабря 1995 г.
Перевел М.Б. Кадомцев

вистскую) концепцию о пространственно-временном движении тел. Однако и пространство, и время не даны *a priori*, они скорее являются свойствами непрерывно наблюдаемого с помощью материальных часов и линеек мира. Такой мир, получивший название макроскопического мира, описывается классической физикой. Поэтому представляется разумным при исследовании элементарных физических объектов, принадлежащих уже к миру квантовых, а не классических явлений, свести к минимуму применение пространственно-временных концепций.

В противоположность к такому подходу, в научной литературе широко используется критерий характерных размеров при отнесении объектов к макро- или микромиру. Как показано в разделе 2, этот критерий приводит к серьезным концептуальным трудностям и не способен установить однозначную границу между областями применимости классической физики и квантовой физики. Поэтому в разделе 4 предложена другая классификация физических явлений, в значительно меньшей степени использующая пространственно-временное описание объектов. Она основывается на анализе взаимодействия между объектом и его окружением (раздел 3). Это взаимодействие является необходимым условием всякого наблюдения и должно рассматриваться как наиболее важное свойство физических систем. Принимая во внимание квантовые характеристики этого взаимодействия, для классификации физических систем можно получить более естественное обоснование, чем их размеры и количество атомов. Вследствие этого я предлагаю пересмотреть основания физики посредством введения следующей гипотезы: принцип декомпозиции должен быть заменен принципом изоляции. Эта гипотеза предполагает, что элементарные физические объекты приготавливаются не за счет разложения материальных тел, а за счет их изоляции от внешнего мира. Принцип изоляции также позволяет вместо туманной классификации на микро- и макрообъекты ввести более ясную классификацию, основанную на взаимодействии физических систем с внешним окружением.

Эта гипотеза может привести к серьезному пересмотру основных представлений во многих областях физики. Некоторые непосредственные следствия, касающиеся квантовой механики и статистической физики, рассмотрены в этой статье. В данном случае наш подход не приводит к каким-то существенно новым выводам, ставящим под сомнение старые результаты. Тем не менее нам представляется, что он может привести к принципиально новому пониманию природы, что позволит пересмотреть понятие "дна элементарности" частиц, а также по-новому взглянуть на законы, управляющие живыми организмами. Хотя большинство возникающих в связи с данным подходом проблем не нашли пока своего решения, я надеюсь, что предложенный в данной работе взгляд на принципиальные вопросы современной физики инициирует поиски более адекватной интерпретации квантовой механики.

2. Три загадки современной физики

Успехи, достигнутые квантовой механикой и статистической физикой, производят большое впечатление — с помощью этих теорий удалось объяснить чрезвычайно большое число микро-, мезо- и макроявлений [2].

Несмотря на это, по-прежнему не утихают дискуссии по поводу основных представлений, лежащих в основе этих теорий. Более того, некоторые фундаментальные вопросы до сих пор так и не нашли вполне удовлетворительного решения [3]. Три из них: 1) проблема мезофизики, 2) проблема необратимости, 3) проблема квантовых скачков будут обсуждаться далее в этой статье.

Все три проблемы взаимосвязаны между собой и каждая является частью общей проблемы измерения [4].

В рамках общепринятого принципа декомпозиции рассмотрение этих вопросов оказывается довольно запутанным. Как показано ниже, использование другого принципа — принципа изоляции позволяет добиться намного большей ясности при исследовании этих проблем.

2.1. Проблема мезофизики: соответствие между микрофизикой и макрофизикой

Микроскопические объекты подчиняются законам квантовой механики, и их стандартные представители молекулы и атомы имеют характерные размеры, не превышающие нескольких атомных единиц. С другой стороны объекты считаются макроскопическими, если их движение подчиняется законам ньютоновой (или релятивистской) механики. Как правило, это видимые объекты, имеющие, следовательно, по крайней мере микронные размеры. Поскольку макро- и микроописания сильно отличаются друг от друга, теоретическое исследование промежуточной области становится весьма трудной задачей. Эта "зияющая пропасть" между двумя картинами мира и носит название "мезомира" [5]. В последнее время в связи с развитием самых передовых технологий значительно возрос интерес к этой переходной области. В частности, в экспериментальной физике создаются столь малые макроскопические измерительные приборы, что они уже (по своим размерам) безусловно принадлежат к мезомиру [6, 7].

С другой стороны, все чаще проводятся эксперименты, в которых, постепенно увеличивая размеры систем (начиная иногда буквально с нескольких атомов) — больших молекул и атомных кластеров, — пытаются найти нижнюю границу сложности макроскопических материалов [8].

2.2. Проблема необратимости

При попытке установления соответствия между макромиром и микромиром мы с неизбежностью сталкиваемся с проблемой необратимости [9]. Суть проблемы состоит в следующем: хорошо известно, что основные законы квантовой физики полностью обратимы во времени, а большинство явлений макромира необратимо. Эти бросающиеся в глаза различия между макро- и микроявлениями обычно объясняются чрезвычайной сложностью макроскопических систем [10, 11]. Опять же концептуальные трудности такого объяснения выявляются при рассмотрении мезосистем. Действительно, несмотря на хорошо определенные различия между обратимой эволюцией квантовых систем и необратимой — макроскопических, провести четкую границу между простыми и сложными, макро- и микротелами не удается. Поэтому большинство мезоскопических объектов удается описывать только за счет искусного комбинирования динамических и статистических физических законов.

Статистические законы, использующие понятие вероятностей состояний, были введены Больцманом и Гиббсом для объяснения необратимости макроскопического мира и обоснования второго закона термодинамики. Тем не менее старая проблема благодаря этому только сменила свое одеяние — на практике физики постоянно сталкиваются со странным сосуществованием абсолютно детерминированных динамических и вероятностных статистических законов в природе.

Действительно, ни на основе классической механики, ни на основе квантовой механики не удалось установить вполне ясного соответствия между статистическими и динамическими закономерностями. Тем не менее их комбинация позволяет объяснять огромное множество физических проблем, включая и чисто необратимые процессы.

2.3. Проблема квантовых скачков

Квантовомеханический вектор состояния может изменяться двояким образом [4]. С одной стороны, он непрерывно, в соответствии с уравнением Шрёдингера, изменяется во времени. Но с другой стороны, он может изменяться скачком при измерении. Трудности, которые здесь возникают, связаны с предположением о том, что все физические системы могут быть сделаны замкнутыми (хотя бы эта система и была всей Вселенной) и после этого описываться уравнением Шрёдингера. В этом случае можно ввести вектор состояния для полной системы, включающей не только наблюдаемый предмет, но и сам измерительный прибор. Тогда и сам квантовый скачок являлся бы частью эволюции, описываемой соответствующим уравнением Шрёдингера. Но, как было показано еще фон Нейманом [4], такой наблюдаемый квантовый скачок не может возникнуть в результате обратимой непрерывной эволюции. Эта несовместимость динамической эволюции с квантовыми скачками видна хотя бы из того факта, что динамическая эволюция является строго детерминированной, в то время как квантовые скачки возникают случайным образом. Существование детерминированного поведения со случайными скачками заставляет вспомнить об упомянутом ранее сосуществовании динамических и статистических законов. Этот параллелизм наводит на мысль о том, что статистические законы термодинамики связаны, в конечном счете, с вероятностной природой элементарных квантовых скачков. Обычно придерживаются мнения, что только сложность макроскопических систем является причиной вероятностных методов в статистической физике.

При анализе проблемы измерения [3] сталкиваешься сразу со всеми тремя проблемами. Каждое измерение квантовой системы (атома или молекулы) приводит к тому, что квантовый переход вызывает некоторый необратимый переход в макроскопической измерительной аппаратуре. Поэтому проблема измерения играет центральную роль во всех дискуссиях по проблемам квантовых статистических теорий. Эта дискуссия возобновляется вновь и вновь начиная с первых дней существования квантовой механики [3]. С тех пор эти дискуссии движутся вокруг парадокса измерения, состоящего в том, что невозможно разумным образом согласовать детерминизм и обратимость основных уравнений квантовой механики с вероятностью и необратимостью измерения [12]. Снова и снова анализируется проблема

редукции (коллапса) волновой функции, возникающая при рассмотрении этого парадокса [5, 13]. Вигнер, подводя итог этой дискуссии (точнее одного из ее этапов), пишет: "Вся эта ситуация наводит на мысль о том, что необходим решительный пересмотр основных концепций квантовой механики. Похоже, что статистическая природа измерения является основным постулатом, а функция квантовой механики состоит не в том, чтобы описывать какую-либо *реальность*, а только в том, чтобы описывать наблюдаемые статистические корреляции. Это утверждение сводит вектор состояния к вычислительному приему, пускай полезному и важному, но не представляющему никакой *реальности*" [12]. И несколько позже он замечает: "Пока система изолирована, вектор состояния, детерминированно изменяясь, точно следует квантовомеханическим уравнениям движения. Как только производится измерение, вступает в силу второй тип изменения вектора состояния. Его изменение становится вероятностным, и он испытывает при этом резкие скачки". Представляется, что эти критические замечания Вигнера могут указать путь для лучшего понимания квантовой механики.

В последующих разделах статьи сделана попытка показать, что рассмотрение только одного вопроса — вопроса об изоляции квантовомеханических объектов, позволяет устранить трудности, присущие современным интерпретациям квантовой механики.

3. Наблюдаемость объектов

В классической механике считается, что пространственно-временное положение объектов может быть определено с любой, сколь угодно большой, точностью. В реальных экспериментах наблюдение осуществляется за счет рассеяния света на исследуемых объектах. В классической электродинамике свет представляет из себя непрерывно распространяющиеся электромагнитные волны. Поскольку нет принципиальных ограничений на длину волны или частоту, предположение о потенциальной возможности наблюдения любых, сколь угодно малых деталей движения объекта, кажется вполне правдоподобным. Несмотря на постоянно получаемую информацию, влияние наблюдения на законы движения можно считать пренебрежимо малым. Действительно, хотя исследуемые объекты находятся в постоянном взаимодействии с окружением (в частности, с измерительным прибором и наблюдателем), за счет уменьшения интенсивности света это взаимодействие можно сделать сколь угодно малым. Таким образом, в классической физике позитивистское требование о необходимости оперировать только наблюдаемыми величинами не накладывает никаких ограничений на справедливость динамических законов, и наблюдаемые классические объекты можно считать замкнутыми системами.

После открытия Планком кванта действия \hbar произошел кардинальный пересмотр всей картины. Согласно квантовой механике, объекты уже не могут быть непрерывно наблюдаемыми, и взаимодействие между объектом и измерительным прибором становится дискретным: фотоны, например, испускаются и поглощаются. Это взаимодействие квантованно и происходит спонтанно. Уменьшая теперь интенсивность света, мы уменьшаем количество элементарных измерительных актов и, таким образом, постепенно перестаем видеть систему.

Следовательно, *наблюдаемый* объект не может считаться изолированным — он с необходимостью должен спонтанно взаимодействовать с окружением.

Кроме того, из-за наличия кванта действия, наблюдаемость объектов становится количественной характеристикой, зависящей от интенсивности взаимодействия между объектом и окружением. При определенных экспериментальных условиях эту интенсивность (или информационная связь [5, 14]) можно произвольным образом уменьшать, и в предельном случае, когда она обращается в нуль, объект становится изолированным. Поскольку объект не может спонтанно взаимодействовать с внешним миром, он становится ненаблюдаемым. Если, с другой стороны, скорость спонтанных взаимодействий повышается до экстремально больших значений, объект начинает наблюдаться квазинепрерывно и в конце концов достигает классического предела. Однако движение (квази)непрерывно наблюдаемых объектов не может быть полностью определено из динамических законов. Из-за спонтанных, чисто случайных взаимодействий с окружением, их движение является частично стохастическим, и только тогда, когда спонтанными взаимодействиями можно пренебречь, движение может описываться динамическими законами классической физики. Итак, когда необходимо учитывать влияние окружения, динамические законы должны быть дополнены статистическими.

В наблюдаемом макроскопическом мире влияние спонтанного взаимодействия на движение объектов может не приниматься во внимание. Однако при разложении макроскопических тел на мелкие части, влияние спонтанных взаимодействий растет, и мы постепенно покидаем область применимости классической физики.

Поэтому статистические закономерности начинают превалировать над динамическими, как в случае броуновских частиц. Только в предельном случае, когда эти мелкие объекты становятся изолированными, снова вступают в силу динамические законы движения. Теперь, однако, они являются квантовыми, а не классическими законами.

Согласно нашему рассмотрению, развитие основных физических представлений шло не за счет разложения макроскопической материи, а за счет изоляции физических объектов. Некоторые следствия из этого утверждения будут рассмотрены ниже.

4. Изолированные объекты и открытые системы

Из рассмотрения раздела 3 можно сделать вывод о том, что наблюдаемость является существенным свойством объектов. Все физические объекты можно считать открытыми системами, поскольку любое их наблюдение осуществляет связь с внешним миром. В частности, все объекты так называемого макромира являются в действительности открытыми системами, несмотря на то, что в рамках классической физики они считались бы замкнутыми из-за чрезвычайно малого влияния наблюдения на характер их движения. Таким образом, изолированные системы являются идеализированным предельным случаем. Благодаря открытому Планку действия, эта идеализация может быть иногда достигнута экспериментально. Атомы и молекулы были первыми изолированными системами, которые удалось

получить экспериментально. Наилучшими реализациями изолированных объектов являются одиночные электроны (или основные состояния ионов и атомов), удерживаемые ловушкой в ограниченной области пространства, вследствие чего их взаимодействие с окружением практически полностью подавлено [15]. Главные черты таких изолированных систем, сильно отличающие их от классических объектов, были обнаружены и сформулированы Бором [16] в двух знаменитых постулатах:

1) существование стационарных состояний с дискретным набором энергий,

2) возможность квантовых скачков, сопровождаемых эмиссией и поглощением фотонов.

При полной изоляции энергетические уровни будут бесконечно узкими, но они приобретают некоторую ширину при спонтанном взаимодействии с окружением. Ширина уровня Γ определяется частотой γ :

$$\Gamma = \hbar\gamma. \quad (1)$$

Спонтанные распады, равно как и взаимодействие с тепловыми фотонами, определяют величину этого спонтанного взаимодействия. Если ширина мала по сравнению с расстояниями между уровнями, объекты можно считать практически изолированными. Спонтанное взаимодействие таких объектов приводит к упорядоченным во времени квантовым скачкам. Эволюция между двумя последовательными скачками описывается квантовой физикой. Эта эволюция полностью детерминирована, поскольку объект не взаимодействует все это время с окружением, и поэтому всякая случайность в данном случае исключается. Тем не менее, зная эволюцию квантовой системы, мы можем дать только вероятностное предсказание следующего квантового прыжка, который вызовет наблюдаемое событие в описываемом классически окружении.

Изолированные объекты являются чисто квантовыми системами, даже если они имеют очень сложную структуру. Они могут быть, например, тяжелыми ядрами с большим количеством нуклонов, или произвольно большим молекулярным кластером из многих атомов. Если только значения их энергетических уровней хорошо определены, т.е. если

$$\Delta E \gg \Gamma, \quad (2)$$

они подчиняются законам квантовой динамики.

В реальных экспериментах, однако, чем более сложным является объект, тем труднее его сделать изолированным, поскольку с ростом сложности резко возрастает плотность энергетических уровней.

Поэтому можно считать, что структура уровней сложных атомных агрегатов обычно сильно смазана, что приводит к условию

$$\Delta E \ll \Gamma, \quad (3)$$

характерному для объектов классической физики. Такие объекты уже имеют наблюдаемую пространственную структуру. Очевидно, что неравенства (2) и (3) описывают два предельных случая: либо *почти* изолированных объектов с наблюдаемой структурой уровней, либо *широко* открытых систем, имеющих наблюдаемую пространственную структуру. Это определение в общем соответствует объектам, обычно называемым микроскопическими и макроскопическими.

В заключение отметим, что классификация, основанная на свойстве наблюдаемости, позволяет четко разграничить области применимости классической физики и квантовой физики. Квантовая динамика — это теория изолированных объектов. ненаблюдаемые системы не подвержены спонтанным воздействиям, и, следовательно, их развитие строго детерминировано. Но поскольку они удалены из воспринимаемого нами мира, их эволюция не может иметь пространственно-временного характера. Детерминированное развитие иногда прерывается из-за спонтанного взаимодействия с внешним миром и вследствие этого для описания таких систем могут быть применены статистические законы. При приближении к классическому пределу законы эволюции могут опять стать по существу детерминированными, из-за возможности усреднения по огромному числу случайных актов взаимодействия (используя при этом законы больших чисел). Таким образом, можно получить, в частности, законы классической физики. Но классическая физика не объясняет всех явлений макроскопического мира. Наличие жизни убеждает в том, что огромное число окружающих нас явлений не вписывается в жесткую картину мира классической физики. По-видимому, большое число случайных взаимодействий еще не является гарантией того, что макроскопический мир становится детерминированным в классическом смысле слова.

5. Необратимость

Согласно разделу 4, случайность является основной чертой физического мира. Именно случайность приводит к необратимости наблюдаемых явлений. Как было замечено Вайцекером [9], обратимость основных законов природы совместима с термодинамической необратимостью, если для наблюдаемых процессов осуществить статистический анзац. Фон Вайцекер иллюстрирует эту совместимость игрой с белыми и черными шарами, впервые предложенной в работе П. и Т. Эренфестов [17].

С точки зрения нашего подхода необратимость наблюдаемых процессов является следствием случайных квантовых скачков, время от времени происходящих в изолированных объектах. Нам не нужно, как в игре Эренфестов, постоянно тасовать шары между двумя ансамблями — почти изолированный объект просто обменивается квантом с измерительным прибором, а говоря шире, с окружением. При этом только изолированный объект описывается обратимыми уравнениями квантовой механики, а открытый для внешнего мира измерительный прибор или просто макроскопическое окружение принципиально не может быть описано вектором состояния. Поэтому в соответствии с нашим общим принципом, естественно предположить, что случайные взаимодействия с окружением необратимы, и, в частности, могут вызвать процесс измерения.

Различие между изолированными и открытыми системами открывает возможность определить области применимости не только квантовой механики, но и статистической термодинамики. В то время как изолированные системы описываются квантовой механикой, описание открытых систем, в частности, таких систем, которые находятся в равновесии с окружением, дается законами термодинамики.

Из-за случайных взаимодействий открытые системы не обладают фиксированным квантовым состоянием, более того, их вектор состояния все время флуктуирует. В тепловом равновесии, эти флуктуации приводят в конце концов к каноническому распределению Гиббса для вероятности состояния $|i\rangle$ [10]

$$w(i) \propto \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right), \quad (4)$$

зависящего от температуры окружения T .

Итак, главная черта термодинамических систем — необратимость и стохастические флуктуации состояний не являются внутренними свойствами замкнутых систем, а целиком определяются связью с окружением. Таким образом, не "сложность" систем заставляет флуктуировать их состояния. Поэтому можно приписать вполне определенную температуру даже единичному атому (или иону) в ловушке [18], если только он достаточно сильно взаимодействует с термостатом.

6. Коты, демоны и измерительные приборы

В термодинамике обычно рассматриваются равновесные открытые системы. Но такие системы являются слишком идеализированными. В реальном мире все объекты связаны с окружением, не являющимся, однако, равновесным. В действительности, объекты только тогда становятся наблюдаемыми, когда они связаны с неравновесным окружением. Необходимость условия неравновесности впервые была отмечена Демерсом [19] и позднее подробно обсуждалась Бриллионом в связи с проблемой демона Максвелла [14]. Тем не менее в этом анализе считалось, что сам демон является частью замкнутой системы. Такое предположение не согласуется с нашим подходом — не только наблюдаемые объекты, но и наблюдающие субъекты не могут быть частью замкнутой системы, они должны быть только открытыми системами.

В то же время знаменитый кот Шрёдингера [9], безусловно, может считаться открытой системой. Поэтому у нас с ним не возникает никаких хлопот — кот просто не может описываться волновой функцией, и, следовательно, переход между живым идохлым котом не является квантовомеханическим.

Все приборы, все живые существа и все наблюдаемые объекты, составляющие наш *реально* воспринимаемый мир, принадлежат к неравновесной вселенной. Пытаясь понять эту многообразную вселенную, мы искусственно создаем (или находим в природе) почти идеальные объекты, которые в большей или меньшей степени вырваны из своего окружения. На этом пути соответственно с помощью квантовой механики и статистической физики удается вполне корректно легко объяснить два специальных класса полностью изолированных и полностью равновесных систем. Однако такие идеализированные построения приводят к игнорированию многих важных свойств реального мира, в частности, свойства наблюдаемости, являющегося необходимым условием всякого экспериментального знания. Мир в своих многочисленных проявлениях намного богаче того мира, который мог бы возникнуть только на основе идеализированных теоретических подходов.

Таким образом, главное утверждение этой статьи, что изоляция объектов послужила бурному расцвету

экспериментальной физики, наводит, кроме того, на мысль, что наиболее глубокие теоретические разделы физики непосредственно применимы только к узкому классу специально приготовленных систем. Поэтому для объяснения более реальных физических проблем необходимо привлекать те или иные варианты теории возмущений. Например, спонтанный распад атомных частиц не может рассматриваться в рамках чистой квантовой механики. Для корректного описания такой системы необходимо учитывать взаимодействие изолированного объекта с окружением, т.е. использовать теорию возмущений. На остающийся открытым вопрос: существует ли *альтернатива квантовой теории* [20], ответ возможен только тогда, когда процессы случайных взаимодействий будут прямо включены в основные положения теории, а не привноситься извне, как в теории возмущений. В любом случае такая теория, будет ли она создана или нет, должна одновременно учитывать как детерминизм квантовой динамики, так и вероятностные свойства квантовых скачков.

7. Дно элементарности

Механистические представления, в частности, представление о телах, движущихся по пространственно-временным траекториям, придали физикам уверенность в том, что фундаментальные законы природы могут быть найдены при разложении материи и исследовании бесструктурных, точечных частиц. Однако следует подчеркнуть, что пространственно-временной континуум является чистой абстракцией, порожденной нашим опытом общения с макроскопическими, непрерывно наблюдаемыми телами. Пространство и время измеримы только в рамках представлений классической физики, где всегда считается возможным использование часов и линеек.

Отметим, что хотя современные часы и могут быть сделаны на основе атомной физики, полный часовой механизм является непрерывно наблюдаемой макросистемой. Пространственно-временное представление сразу теряет свое экспериментальное основание, как только мы переходим к миру (почти) изолированных квантовомеханических объектов. Пока объект полностью изолирован, его пространственная структура не может быть обнаружена. Единственной наблюдаемой величиной является случайная по времени последовательность квантовых скачков.

Вопрос о "*дне элементарности*" приобретает существенно иной смысл, если мы вспомним, что именно изоляция систем от случайных неконтролируемых внешних влияний служит идеалом физических исследований. Если при этом пространственная структура становится полностью ненаблюдаемой, как можно вообще говорить о поиске элементарных точно-подобных частиц? Почти все изолированные системы, такие как электроны, нуклоны, ядра, атомы или молекулы, могут рассматриваться как элементарные объекты. Однако, хотя мы и не можем увидеть никакой *пространственной структуры*, в экспериментах мы ясно видим некоторую *структуру уровней*. Поэтому более осмысленным кажется вопрос о том, что является истинным основанием для теорий, описывающих структуру уровней и связь этих уровней с окружением? Что является основанием квантовой механики?

Современная квантовая физика, даже в своем наиболее принципиальном разделе квантовой теории поля по-прежнему считает частицы движущимися в пространстве и времени, хотя и не по классическим траекториям. Такое представление несовместимо с нашим подходом. Когда рассматриваются теории изолированных систем, следует избегать любых упоминаний о пространстве и времени. Пространственно-временные представления имеют надежную экспериментальную основу только в случае квазинепрерывно наблюдаемых систем.

Хотя все выше сказанное и может показаться несколько надуманным, можно подозревать, что существует подходящий математический аппарат для описания физических свойств изолированных систем. Такое подозрение согласуется с заключением Вигнера, цитируемым в разделе 2: вектор состояния всего лишь вычислительный трюк и не представляет никакой *реальности*.

В пользу возможности существования такого математического аппарата говорит тот факт, что когда мы приготавливаем изолированные объекты, мы покидаем окружающий нас чувственный мир, и поэтому как бы приближаемся к миру чистой математики. Несмотря на отсутствие законченной теории, некоторые структурные параметры (почти) изолированных объектов — такие как масса или константы связи могут быть (в принципе) измерены с неограниченной степенью точности.

Какова бы не была фундаментальная теория изолированных объектов, она все равно не станет "*теорией всего*" [21]. Цель такой теории по необходимости будет более скромной. Согласно нашему подходу, изолированные объекты, которые только и могут описываться фундаментальными теориями, являются идеализированными системами. Для придания им реального смысла, идеальные объекты должны, хотя бы пертурбационным образом, взаимодействовать с окружением. Не следует забывать, однако, что такая теория возмущений определена только в случае выполнения неравенства (2). Остается также открытым вопрос, насколько хорошо явления макромира могут быть поняты на основе теории изолированных систем и концепции спонтанных переходов. Если говорить о квазинепрерывно наблюдаемых системах, то возникают вопросы: как пространственная структура становится наблюдаемой характеристикой и как соотносится понятие пространственно-временного континуума с математической структурой изолированных систем? Если бы была законченная фундаментальная теория изолированных объектов, было бы возможно, по крайней мере, понять, как возникают понятия классической механики — пространство и время — в результате идеализации физических процессов в сильно открытых системах. Кроме того, при попытке прояснить происхождение главных понятий классической механики на основе более фундаментальной теории изолированных систем, возможно удалось бы найти какие-либо физические подходы для описания жизни, само существование которой, с точки зрения современного аппарата теоретической физики, представляется парадоксальным явлением.

8. Заключение

Руководствуясь положением о том, что фундаментальные физические законы устанавливаются за счет изоляции объектов от их окружения, я заново рассмотрел

концептуальные основания квантовой механики. При этом вместо обычного разделения на микроскопические и макроскопические тела потребовалось ввести новую классификацию объектов по степени их связи с внешним миром. Эта связь является количественной характеристикой, и обязана своим происхождением кванту действия \hbar . Согласно данной классификации, существуют два предельных случая — изолированных объектов и сильно открытых систем, и кроме того промежуточная область, характеризующаяся хорошо определенной количественной величиной. В этой схеме необратимые явления возникают за счет спонтанных квантовых скачков, и, таким образом, справедливость законов статистической физики получает у нас качественно новое объяснение. С другой стороны, квантовая механика должна рассматриваться в таком подходе как теория полностью изолированных, идеализированных объектов. Кому-то такое утверждение может показаться странным — не только классическая механика, но и квантовая должны считаться теориями идеализированных систем. Ни одна из них не является более фундаментальной — просто это теории, описывающие две разные ситуации. Наш подход утверждает, что и статистическая термодинамика описывает только идеализированные системы, находящиеся вблизи теплового равновесия. Хотя наши выводы, на первый взгляд, кажутся неправдоподобными, они создают реальную возможность для наведения мостов между двумя столь антогонистическими дисциплинами, как физика и биология. В любом случае, обнаруженный нами факт, что даже наиболее фундаментальные физические теории описывают лишь некоторые идеализированные случаи, позволяет устранить многие концептуальные трудности (в частности, упомянутые в разделе 2), присущие современной физической картине мира.

Хотя наш подход предполагает радикальный пересмотр основных положений квантовой механики и статистической физики, практическое применение этих хорошо работающих теорий к реальным физическим задачам остается вне пределов нашей критики. Тем не менее, мы верим, что наша точка зрения может привести к пересмотру мировоззренческого статуса современной физики и инициировать появление новых областей научных исследований.

Objects and environment

G. von Oppen

*Institut für Strahlungs- und Kernphysik, Technische Universität Berlin
TU Berlin, Sekr. PN 3-2, Hardenbergstr. 36, 10623 Berlin
Tel. (4930) 314-23021, (4930) 314-23012
Fax (4930) 314-23018
E-mail: oppen@kalium.physik.TU-Berlin.DE*

The conceptual foundations of quantum physics are discussed based on the hypothesis that physics progressed towards the basic laws of nature by isolating objects from their environment. Observable objects are coupled to their environment by spontaneous quantum jumps and, therefore, their motion is affected by statistical laws. A completely deterministic evolution is possible only in the idealised case of isolated objects. The evolution of these unobservable idealised objects is described by the dynamical laws of quantum mechanics.

PACS numbers: 03.65.Bz, **05.45.+b**, 05.70.Ln, 06.20.Dk

Bibliography — 21 references

Благодарности

Я благодарен своим коллегам Ю. Кришеру, О. Ройшу и Б. Скваллу за многочисленные и плодотворные дискуссии. Ю.Л. Соколов и В.Г. Пальчиков привлекли мое внимание к фундаментальным проблемам квантовой механики в процессе нашей совместной работы, поддержанной Фондом Фольксвагена. Я искренне благодарен им обоим и фонду V.W. за возможность осуществить совместные работы.

Список литературы

1. Weisskopf V F "What is an elementary particle?", in *Physics 50 Years Later* (Ed. S C Brown) (Washington D C: National Academy of Sciences, 1973)
2. Balian R *From Microphysics to Macrophysics* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 1991)
3. Wheeler J A, Zurek W H (Eds) *Quantum Theory and Measurement* (Princeton: Princeton Univ. Press, 1983)
4. Von Neumann J *Grundlagen der Quantenphysik* (Berlin: Springer-Verlag, 1932)
5. Кадомцев Б Б *УФН* **164** 449 (1994) [*Phys. Usp.* **37** 425 (1994)]
6. Feynman R *Journ. of Microelectromech. Syst.* **2** 4 (1993)
7. Kastner M A *Atomic Physics* **13** 573 (1992)
8. Benedek G, Martin T P, Pacchioni G *Elemental and Molecular Clusters* (Springer Series in Material Science Vol. 6) (Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1988)
9. Von Weizsacker C F *Der Aufbau der Physik* (Munchen: Carl Hanser Verlag, 1985)
10. Reif F *Statistical and Thermal Physics* (New York: McGraw Hill, 1965)
11. Ландау Л Д, Лифшиц Е М *Статистическая физика* (М.: Наука, 1977); Landau L D, Lifschitz E M *Lehrbuch der theoretischen Physik*, Bd. V und IX (Berlin: Akademie-Verlag, 1979)
12. Wigner E P, in Ref. [3] p. 260
13. Garstens M A, in *Quantum Theory and Beyond* (Ed. T Bastin) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1971) p. 85
14. Brillouin L *Science and Information Theory* (New York: Academic Press, 1956)
15. Neuhauser W et al. *Phys. Rev. A* **22** 1137 (1980)
16. Bohr N *Philos. Mag.* **26** 1, 476, 857 (1913)
17. Ehrenfest P, Ehrenfest T *Math.-Naturwiss. Blatter* **11** 12 (1906)
18. Nagourney W, Sandberg J, Dehmelt H *Phys. Rev. Lett.* **56** 2797 (1986)
19. Demers P *Can. J. Research* **22** 27 (1944); **23** 47 (1945)
20. Prigogine I, Petrovsky T Y *Physica A* **147** 461 (1988)
21. Salam A, in *The New Physics* (Ed. P Davies) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 1989) p. 481

Received 27 September 1995