

ПУТИ ПОСТРОЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ КВАНТОВОЙ ТЕОРИИ

© Антонов В.А.¹ и Кондратьев Б.П.², 2005

¹Главная астрономическая обсерватория РАН
Пулковское шоссе 65/1, Санкт-Петербург, 196140, Россия
E-mail: antonov@gao.spb.ru

²Удмуртский государственный университет
Университетская 1, Ижевск, 426034, Россия
E-mail: kond@uni.udm.ru

1. Первые шаги квантовой теории

Квантовая теория с момента возникновения пережила своеобразную эволюцию. В первоначальную эпоху развития атомно-молекулярных представлений исследователи (Клаузиус, Больцман и др.) представляли молекулы наподобие упругих мячиков (кинетическая теория газов), т.е. микромир представлялся им аналогом известного макромира, только с другим масштабом. Однако и такие представления о микромире встречали яростное сопротивление некоторых видных учёных (Мах и Оствальд). Дальнейшее развитие представлений о микромире связано с изучением внутренней структуры атомов и молекул. Поначалу здесь также были сильны механистические представления. Недаром модель атома Резерфорда называлась «планетарной», а в известной модели атома водорода Бора первоначальные орбиты точно воспроизводили (в нерелятивистском случае) орбиты планет солнечной системы. Малое в большом – многие физики видели в этом глубокий смысл и считали такое положение вещей крупным достижением науки. Однако в дальнейшем появились первые, весьма «специфические» неприятности: фотоэффект с его явственно скачкообразным характером и распределение энергии в спектре излучения абсолютно чёрного тела никак не укладывались в закономерности статистической механики, связанная частица (в отличие от свободной) может приобретать только дискретные значения энергии, и т.д.

Попытки преодоления подобных трудностей вначале носили (даже у самого Планка) лишь половинчатый характер. Учёные предпочитали моделировать микромир с точки зрения привычных представлений макромира, добавляя, конечно, те или иные специфические признаки, как, например, запрет на излучение электронов, находящихся на стационарных орбитах, существование разрешённых переходов и т.д.

Фундамент новой, последовательной теории микромира был заложен Гейзенбергом и Шрёдингером в 1926 году. Существенно, что с разработкой уравнения Шрёдингера, которое очень точно даёт количественные характеристики явлений микромира, по крайней мере в не слишком сложных ситуациях, стало затруднительно держаться прежних прямолинейных аналогий. Место уравнений для обычных координат и импульсов заняли уравнения для волновой функции. В связи с этим в новой науке о микромире – квантовой механике – возник вопрос о так называемых *скрытых параметрах*, который в данном случае сводился к выяснению, имеют ли смысл понятия координаты и импульса у микрочастицы. Имеется, конечно, в виду возможность придания им одновременно точных числовых значений. Дело в том, что с формальной стороны, при замене классических q и p операторами, как показал Гейзенберг, аналогия с классической механикой сохраняется.

2. Некоторые проблемы изучения микромира

С рождением квантовой механики появилась и крупная философско-физическая проблема *дуализма волна-частица*. Попытки разрешить этот дуализм предпринимались, но оказывались с самого начала непоследовательными и, в сущности, бесплодными. Так, даже Шрёдингер одно время считал возможным трактовать волновую функцию как дающую реальное распределение материи в пространстве. Но это представление противоречило тому простому факту, что уравнение Шрёдингера во многих случаях, в том числе и для свободно движущейся частицы, приводит к

неограниченному *расплыванию* волнового пакета в пространстве. Тем более несовместимой с таким наглядным представлением волновой функции была необходимость перехода к $3N$ -мерному конфигурационному пространству в задаче N частиц. Математическая абстракция многомерных пространств вступала в неразрешимое противоречие с представлением волновой функции в виде материального облака. Аналогично, не имели успеха и попытки де Бройля найти для частицы-точки место *ведущего центра в самой волне*. Такую интерпретацию волны-частицы не удастся согласовать с твёрдо установленными закономерностями интерференционных явлений (электронография и т. д.), демонстрирующих очевидным образом *равноправие разных участков волны*. Разного рода отражения от границ также не спасают положения – во многих интерференционных опытах явственно выраженных границ вообще нет.

Всё это приводит к главной мысли о том, что в микромире *волновая функция как раз и описывает саму физическую реальность*, а различные суждения о скрытых параметрах (координатах и скоростях частицы) в лучшем случае служат лишь уступкой более привычному образу наших мыслей. На этот счет есть и строгая теорема Неймана. *Решающее же значение всегда имеют выводы, полученные непосредственно из решения уравнения Шрёдингера*. Подчеркнем, что многочисленные руководства по квантовой механике (см., например, [1]), демонстрируя блестящее совершенство математического аппарата, в вопросе о физической реальности в микромире не дают никакой ясной картины. Это и не удивительно, ведь есть удобный в таких щекотливых вопросах позитивизм, пилюли которого заглушают просыпающуюся (время от времени) интеллектуальную совесть исследователя.

Но в квантовой механике эти пилюли, похоже, и вовсе перестают ныне действовать. В трудной борьбе мнений и разных подходов постепенно появляется новое понимание микромира с его парадоксами и проблемами. Здесь следует подчеркнуть именно непривычность закономерностей микромира – внутренних же нелогичностей в нём не обнаруживается, если исключить весьма специфическую проблему устранения сингулярностей в теории поля, не решенную полностью до сих пор. Такое положение много раз встречалось в истории человечества: поначалу разум (или пресловутый *здравый смысл*) отвергал существование разных экзотических животных и даже стран, над которыми солнце движется с востока на запад через северную часть небосвода, т.е. в обратную сторону. Никто иной, как сам Геродот не поверил в этом финикийцам (600 г. до нашей эры), достигшим по приказу фараона Нехо южной конечности Африки. И это «не верю» Геродота звучит не менее решительно, чем знаменитое «не верю» К.С. Станиславского!

Более точно, с нашей точки зрения, «экзотичность» микромира следует связывать с его большой информационной ёмкостью – переход в макромир, как узкое горлышко бутылки, пропускает лишь ничтожную часть информации.

В свете сказанного выглядит, очевидно, непродуктивной модная за последние двадцать лет дискуссия о неравенствах Белла: фактически, они представляются средством проверки того, что уже заведомо отвергнуто самим развитием науки, именно, скрыто существующих координат и импульсов. Ведь для того, что не существует, не имеет смысла и соотношение между вероятностями их проявления. Если в мире в целом есть какая-то логика, неравенства Белла были обречены на невыполнение – и в этом как раз ничего сенсационного, с нашей точки зрения, нет.

3. Связь между микромиром и макромиром

Более животрепещущей оказывается проблема связи между микромиром и макромиром. В самом микромире все подчиняется линейному уравнению Шрёдингера. Законы макромира – совершенно другие, хотя тоже, разумеется, внутренне последовательные. *Но, и в этом главная сейчас проблема, нет уравнений или принципов, которые описывали бы микромир и макромир вместе.*

Разумеется, и в ныне существующей квантовой механике какая-то связь между микро- и макромиром всё же необходима и она есть. Её роль в «копенгагенской» трактовке играет известный постулат Борна (1926 г.): вероятность осуществления макрособытия, зависящего от поведения микрочастиц, пропорциональна квадрату модуля волновой функции соответствующей дискретной реализации. (При измерениях, распределённых в пространстве, речь идёт о плотности вероятности и, соответственно, о непрерывной волновой функции). Принцип Борна до сих пор хорошо работал, за редкими исключениями, но эта работоспособность несколько своеобразна: в противовес определения многих значащих цифр в разных физических константах (постоянная Ридберга,

скорость света и т. д.) попытки такой же точной проверки принципа Борна, насколько нам известно, не предпринимались. В большинстве случаев это и не нужно: наши представления о строении атомов и их ядер опираются на точное измерение энергетических уровней, для которых и не надо особенно хорошего выполнения принципа Борна. То же самое можно сказать об изучении структуры кристаллов просвечиванием рентгеновским излучением, электронами и т.д.

Но в данном вопросе необходимо подчеркнуть следующее. Помимо этой формальной числовой ненадёжности, принцип Борна *вводит и некую принципиальную неопределённость: выбор того или иного варианта макроскопического события зависит неизвестно от чего, раз предсказывается только его вероятность*. Много раз, в даже в академической физической литературе, особенно в трудах конференций, мы наталкиваемся на высказывания, что дело здесь в проявлении какой-то особенного сорта вероятности, отличной от той, какую мы наблюдаем, например, в азартных играх. Но по существу это надо рассматривать как попытку замаскировать истинную проблему словами, лишёнными ясного смысла, или попросту как капитуляцию перед трудностями. Во всей доступной нам природе мы знаем только один общий вид вероятности; для провозглашения же иного её вида, с другими математическими закономерностями, просто нет экспериментальных оснований. Ссылка на то, что в природе и без всякой квантовой механики многое происходит за счёт случайных флуктуаций, ничего не проясняет. Колебания, например, освещённости в заданной точке земной поверхности могут зависеть от трудно предсказуемого закрытия Солнца облаками. Но здесь никто не сомневается, что в случае особой необходимости соответствующий турбулентный процесс в атмосфере может быть рассмотрен во всех деталях и что он подчиняется известным законам газодинамики с подходящими уточнениями. Применительно же к квантовым экспериментам нам оставляют открытую дыру для неопределённости, куда, кстати, очень легко влетает всякая мистика [2].

Лет 60 тому назад ещё можно было относиться к атомам и молекулам, с одной стороны, и к привычной нам природе, с другой стороны, как к совершенно разным мирам, между которыми установлен только хрупкий мостик в виде постулата Борна. Но с тех пор широко развернулись исследования в области промежуточных масштабов, демонстрирующие что эта промежуточная зона вполне познаваема (хотя бы и открывала неожиданные детали) и не даёт повода ни для какой мистики.

С 1994 года нами развивается та точка зрения, что *в мезомире происходят реальные физические процессы расщепления волновых пакетов, которые и дают основу принципу Борна и многочисленным отклонениям от него*.

4. Необходимость нелинейного волнового уравнения в мезомире

Возникает вопрос, как же продолжается уравнение Шрёдингера в макромир. Прежде всего, из-за существования промежуточных масштабов это продолжение не может быть качкообразным, оно должно как-то развёртываться в пространстве и во времени. *Данное продолжение заведомо не линейно, иначе мы столкнёмся с парадоксом кошки Шрёдингера, которая оказывается в суперпозиции живого и мёртвого состояния*. Освобождение бедной кошки от такой суперпозиции может быть сформулировано только в нелинейных терминах.

Просто добавлять наудачу нелинейные члены в уравнение Шрёдингера – совершенно бесперспективный путь. Правда, есть образцы использования нелинейного уравнения Шрёдингера в оптике, но это особая область, не стоящая в прямой связи с квантовой механикой. *Принципы выбора нелинейностей, удачные в одной области, могут оказаться совершенно неудачными в другой*. Во избежание недоразумений подчеркнём ещё, что нелинейности теории поля (программа Гейзенберга и т. д.) также не имеют отношения к рассматриваемой проблеме – у Гейзенберга речь шла только о нелинейных операторах, а сами волновые уравнения остались линейными.

Далее, обсуждаемые здесь нелинейные поправки не могут эффективно сказываться всегда и везде – в противном случае неизбежным было бы искажение большинства результатов и выводов квантовой механики, включая и очень точно установленные. В связи с этим подчеркнём, что постулирование и учёт нелинейных волновых процессов (а конкретно, *коллапсов волновых функций*) в кинетической теории газов, как сделали Б. Б. Кадомцев в [3] и Менский [4], представляется нам совершенно излишним. И вот по каким причинам:

а). Эти два автора вводят коллапсы волновых функций для уменьшения роста дисперсии координат (и скоростей) молекул газа, ссылаясь при этом на нарушение соотношения неопределённостей Гейзенберга

$$\sqrt{(\Delta k)^2 \cdot (\Delta p_k)^2} \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (1)$$

Но, очевидно, неравенство (1) ограничивает дисперсию координат только снизу, но отнюдь не сверху. Поэтому апелляции Кадомцева и Менского к нарушению (1) не имеет доказательной силы.

б). С нашей точки зрения, рост дисперсии координат в заданном объёме газа вполне допустим и не приводит ни к каким катастрофическим последствиям в теории газов. Действительно, в статистической механике конкретные волновые функции описывают молекулы газа во всём допустимом для данного газа в объёме, а не только локально.

Но есть ещё один фактор, делающий сомнительным введение коллапсов волновых функций в газе. Б. Б. Кадомцев вводит принудительное обрезание волновой функции и описывает этот процесс уравнением

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2M} \Delta \psi - i\hbar \kappa R^2 \psi + i\hbar \Gamma \psi. \quad (2)$$

Однако, и в этом суть дела, дополнительные члены в правой части (2) неизбежно нарушают эрмитовость оператора, что, в свою очередь, нарушает и условие нормировки функции ψ , а вместе с тем и весь аппарат квантовой механики.

Надо, по-видимому, предполагать, что нелинейность в квантовой механике следует учитывать не на самой стадии молекулярных столкновений, а на более поздних стадиях эволюции волновой функции. Именно, мы имеем в виду стадию выхода волновой функции из микромира в макромир. Ведь итогом такого выхода волновой функции из микромира в макромир как раз и становится возможность регистрации событий в микромире с помощью той или иной измерительной аппаратуры (фотоплёнка, камера Вильсона, счётчик Гейгера и т. д.).

Конкретно, развивая нелинейный математический формализм, мы требуем, чтобы введение нелинейности не выводило нас за рамки таких обычных понятий, общих для классической и квантовой механики, как принципиальная обратимость и сохранение энтропии в отсутствие специальных диссипативных эффектов. Поэтому мы полагаем, что нелинейное уравнение Шрёдингера, как и линейное, связано с некоторым вариационным принципом. Пример такого вариационного перехода и дан в [5]. Подчеркнем, что введение внешнего «шума» мы считаем существенным для того, чтобы результат процесса носил случайный характер. При этом, однако, процесс идет в сторону уменьшения неопределённости: из сравнительно разнообразных суперпозиций получаются более определённые классические состояния. Поэтому мы считаем нужным включать в категорию влияний внешнего мира ещё и процесс затухания, но направленный не прямо на волновую функцию, а на вспомогательную переменную $\lambda(t)$. Таким образом, неопределённость всё время сбрасывается из нашего мира. При определённом подборе нелинейных уравнений, удовлетворяющих вышеприведённым условиям, процесс распада суперпозиции оказывается в среднем уравновешенным, наподобие известной задаче о разорении игрока в справедливой игре или симметричной диффузии частицы на прямолинейном отрезке. Сама же диффузия продолжается до тех пор, пока существует суперпозиция макроскопических состояний и процесс диффузии прекращается, в силу наших уравнений, когда достигается то или другое из допустимых крайних состояний и суперпозиция исчезает. (Правда, у нас это исчезновение, строго говоря, лишь асимптотическое.)

5. Перспективы

Указанные выше примеры подчёркивают, что логика развития физической науки требует в ближайшие годы освоения *нелинейной квантовой механики*. Такая точка зрения была изложена и обоснована нами в монографии [5]. Там дан математический пример построения нелинейной квантовой механики и рассмотрен ряд частных случаев по описанию эволюции волновой функции в промежуточной зоне (*мезомире*) между микромиром и макромиром. Существенным становится

понимание процессов *рассеяния* волнового пакета, а также того, что постулат Борна носит ограниченный характер. К этому остается добавить следующее. По-видимому, важную роль в процессах разбивки волновых пакетов играет хаотический характер энергетического спектра на промежуточной стадии *мезомира*. Судя по примерам, данным в [7], хаотичность часто возникает при взаимодействии высоко возбужденных частиц или молекул с окружающими небольшими коллективами, что типично именно для мезомира. Рассеяние волновых пакетов происходит, по-видимому, на кластерах атомов или молекул с характерными размерами $10^3 - 10^4 \text{ \AA}$. С физической точки зрения рассеяние на кластерных частицах описывается формулой [8]

$$I(\nu) \propto \nu^{D_s-6}, \quad (3)$$

где I – интенсивность рассеянного излучения, D_s – фрактальная размерность рассеивающей поверхности кластера. Мы обращаем внимание на хаотический характер энергетических спектров ещё и потому, что системы с *регулярным* спектром достаточно изучены: их квантовые свойства, соответствующие обычной теории, часто продолжают в макромир в виде различных макроскопических квантовых явлений. В качестве эффектного (достоверность информации [9] должна быть подтверждена) примера можно указать на СКВИДы, на практике демонстрирующие нерасщепление волнового пакета для системы из многих миллиардов электронов, т.е., фактически, для макроскопического тела. Система электронов в СКВИДах *регулярно устроена*. Поэтому наибольшие шансы обнаружить квантовую нелинейность имеются там, где интерференцию волновых пакетов ранее не искали – в опытах с *фрактально устроенными волновыми функциями*. Фрактальное устройство волновых пакетов означает, что они состоят из Фурье-компонент совершенно разного масштаба. Но связи с опытом для такого класса задач пока не видно.

Ссылка на квазистационарные состояния в [5] также служит, неизбежно на первых порах, упрощению сути дела. Скорее всего, при более точном анализе надо воздействия от внешнего мира связывать с *переходами* между разными состояниями. Иначе не совсем ясно, как удаётся регистрировать квантовые скачки [10] в состоянии отдельных атомов или системы нескольких атомов. При описании атома просто функцией плотности без учёта динамики взаимодействия с фоном получилась бы просто стационарность, не дающая основания для *расщепления*.

Эффект Соколова. В опытах Соколова [11] – здесь мы вступаем на более зыбкую почву – смущает независимость эффекта в виде «поля Демона» от интенсивности пучка атомов, так что сама *нелинейность* уравнения Шредингера пропадает. Мы предлагаем несколько иное истолкование опыта Соколова: по-видимому, поверхность образца металла, мимо которого пролетали микрочастицы (атомы водорода), в этих опытах находится в *особом, закаленном* состоянии, и в таком поверхностном слое сохраняется *квантовая суперпозиция* коллективных состояний, которые мало помалу *разрушаются* взаимодействием с отдельно пролетающими атомами, выполняющими роль некоего катализатора процесса. Тогда каждый атом водорода вызывает свой эффект, и результаты просто суммируются. Если наше предположение о причине эффекта Соколова верно, должно наблюдаться постепенное старение, или исчерпание эффекта при длительном использовании установки с одним и тем же куском металла (из опубликованных отчетов эффекта Соколова не ясно, идет ли такой процесс старения в действительности). Кстати, конечность времени «жизнеспособности» аппаратуры, регистрирующей космические влияния (не совсем нам понятные) подчеркнута в [12].

С обсуждаемым кругом проблем, видимо, связаны случаи загадочной задержки регистрации эффекта в совершенно различных опытах. Сюда относится излучение ридберговских атомов в резонаторе [13]

Квантовый эффект Зенона [14] и регистрация широких атмосферных ливней с энергией $\approx 10^{16}$ эВ [15]. Сюда надо причислить и установившиеся выше опыты с макроскопическими флуктуациями при регистрации актов радиоактивного распада и т. п. Как показала, в частности, последующая дискуссия в УФН, результаты по объяснению макроскопических флуктуаций не укладываются ни в какие правила статистики, если считать, что регистрация идет в режиме реального времени – отсюда необходимость постулировать задержку порядка секунды. Наконец, хотя здесь пока не видно связи с квантами, существует проблема редкого «запаздывающего эха» в радиосвязи [16], не объяснимая, по обстоятельствам наблюдения, отражением от чего бы то ни было. Таким образом, создается впечатление, что иногда нелинейный квантовый процесс затягивает на интервалы порядка

секунды выход информации в наш обычный мир. Возможно, таких фактов на самом деле больше, но они скрываются в мало доступных изданиях или вообще не публикуются под предлогами необычности.

6. Некоторые выводы

В заключение, в отличие от [2], подчеркнём *объективный* характер проблемы перехода микромир-макромир. Как раз исследования последних десятилетий наглядно демонстрируют реальность процессов, происходящих в промежуточных масштабах, в противовес эпохе рождения квантовой механики, когда переход от процессов микромира представлялся чем-то вроде прыжка через пропасть. Ныне эта пропасть постепенно заполняется. Продолжать закрывать глаза на мезомир как на важную физически реальную зону – значит заранее строить препятствия на пути познания. *В опытах с микрообъектами мы имеем дело с фактами столь же реальными, как и окружающие нас явления.* Подходящей аналогией может служить статистическое утверждение: заболеваемость малярией выше в заболоченных местностях. Очень плох был бы в наше время тот эпидемиолог, который объявил бы это болото «первичной случайностью» и тем самым упустил бы важнейший фактор – комара.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Квантовая механика. Нерелятивистская теория. М.: ГИФМЛ, 1963.
2. Попов М.А. УФН **173** №12 1382 (2003).
3. Кадомцев Б. В. Динамика и информация, (М.: ред. журн. «Успехи физических наук», 1997; 2-е изд. – 1999).
4. Менский М. Б. УФН **173** №12 1199 (2003).
5. Кондратьев Б. П., Антонов В. А. «Решение парадокса кошки Шредингера. Опыт создания нелинейной квантовой механики» Ижевск: Изд-во Удмуртского Гос. Университета (1994).
6. Антонов В.А., Кондратьев Б.П. Журнал экспериментальной и теоретической физики **125** №5 1204–1212 (2004).
7. Заславский Г. М. УФН **129** 211 (1979).
8. Шредер М. «Фракталы, хаос, степенные законы» Москва-Ижевск: РХД (2001).
9. Нудельман Р. Знание-Сила №12 (2003).
10. Драбович К. Н. УФН №3 **158** 499 (1989).
11. Соколов Ю. Л. УФН №5 **169** 559 (1999).
12. Мишин А. М. Проблемы исследования Вселенной. Вып. 23. Изд-во СПбГУ (2001).
13. Бетеров И. М., Лернер П. Б. УФН №4 **159** 665 (1989).
14. Itano W. H., Heinzen D. J., Bottlinger J. J., Wineland D. J. Phys. Rev. Ser A. **41** 2295 (1990).
15. Жданов Г. Б., Чубенко А. П. Материалы семинара, посвященного 80-летию со дня рождения М. И. Подгорецкого. Дубна с. 32 (2000).
16. Гиндилис Л. М. Земля и Вселенная №2 78 (1976).