

1.21. Квантовая механика

Все согласны, что наша теория безумна. Мы расходимся лишь в одном: достаточно ли она безумна, чтобы быть верной?

Нильс Бор

Поставил Он тьме предел (сказано о конце дней),
когда Уничтожит дух нечистоты на земле, и раскроется
Слава ВСЕВЫШНЕГО... Нет для НЕГО, Благословенного,
большого удовольствия, чем Удовлетворение и Радость
от преобладания Света, происходящего именно от тьмы.

Тания, 33:8–9

В начале XX в. оказалось, что методы исследования и описания макроскопических свойств материи не способны разрешить проблемы, возникшие при исследовании ее микроскопических свойств. «Старое» поколение физиков, воспитанное на классических представлениях, оказалось психологически не готовым преодолеть кризис естествознания.

К концу XIX в. теоретическая механика, термо-, гидро- и электродинамики, теория упругости и др. теории, описывающие свойства материи, непосредственно воспринимаемые человеческими органами чувств, оказались не только логически завершенными по отдельности, но и взаимодополняющими друг друга, что послужило причиной формирования единой классической мировоззренческой картины материального мира. Согласно этой парадигме вещество понималось как система, состоящая из огромного количества частиц, поведение которых подчинялось законам механики Ньютона, электродинамики Максвелла и статистике Больцмана. Характерным для вещества было хаотичное движение корпускул, которые, несмотря на сложность их движения, имели траекторию движения и постоянную локализацию в пространстве и времени. Прямых наблюдений молекул и атомов не было, но молекулярное строение вещества было общепризнано, поскольку основанные на ней кинетическая теория газов и статистическая термодинамика давали прекрасные совпадения с экспериментальными данными. До тех пор, пока непосредственный эксперимент мог служить критерием неоспоримой истины, в Науке царили умиротворенность и порядок. Кризис, разразившийся в естествознании на рубеже XIX – XX вв., был обусловлен вторжением экспериментальной физики в области знаний, в принципе недоступные для непосредственного наблюдения: в мир элементарных частиц, безграничного космоса и далекого прошлого.

Новое поколение физиков, невзирая на «предрассудки» и «здравый смысл» классической физики, стало упорно подбирать математический аппарат под известные экспериментальные факты. Невозможно переоценить их труд: всего лишь за 25 – 30 лет была создана не только эффективная, логически завершенная «квантовая механика», но и взлелеяна новая мировоззренческая картина материального мира.

Проследим еще раз за последовательностью событий. А. Беккерель в 1896 г. открывает естественную радиоактивность. В 1897 г. Дж. Дж. Томсон открывает электрон – частицу, обладающую не только массой, но и зарядом. Планк в 1900 г. вводит понятие квантов электромагнитной энергии для объяснения спектра излучения абсолютно черного тела. 1905 г., Эйнштейн объясняет фотоэлектрический эффект, исходя из схожих предпосылок, что и Планк, т. е. положив, что свет состоит из фотонов, энергия которых квантована и зависит от частоты электромагнитной волны. Эйнштейн в отличие от Планка положил, что квантовые свойства присущи не только процессам испускания и поглощения света, но и объективно присущи свету вообще.

Цитата из официального текста представления А. Эйнштейна к Нобелевской премии 1922 г.: «Альберту Эйнштейну за его вклад в теоретическую физику, и в особенности за открытие им закона фотоэлектрического эффекта».

Резерфорд в 1911 г. устанавливает, что основная масса и заряд вещества сосредоточены в очень маленьких объемах – т. е. «ядрах». На основании этого эксперимента Резерфорд строит планетарную модель атома с положительно заряженным ядром и вращающимися вокруг ядра электронами.

Эрнест Резерфорд (1871–1937), сын переселенца из Шотландии, родился и получил образование в Новой Зеландии (выпускник Кентерберри-колледжа) [95]. За выдающиеся успехи в учебе получил стипендию на продолжение образования в Англии. Вскоре Резерфорд получил приглашение Дж. Дж. Томсона работать в Кембридже в лаборатории Кавендиша. Но основные открытия по радиоактивности Резерфорд сделал на посту профессора Макгиллского университета в Монреале (Канада). В период 1898 – 1907 гг. им было написано 66 ста-

тей и книга «Радиоактивность». В 1907 г. Резерфорд вернулся в Англию и возглавил кафедру в Манчестере. В 1908 г. ему была присуждена Нобелевская премия по химии «за проведение исследований в области распада элементов в химии радиоактивных веществ». В 1909 г. Резерфорд предложил Эрнесту Марсдену выяснить, могут ли альфа-частицы отражаться от золотой фольги. Резерфорд был абсолютно убежден, что эти массивные частицы должны лишь незначительно отклоняться, проходя через золотую фольгу. Но Марсден заметил: очень малая часть из них все же отклоняется на углы, большие 90° . Резерфорд был потрясен, он писал: «Это было столь неправдоподобно, как если бы произвели выстрел по обрывку папиросной бумаги 15-дюймовым снарядом, а он вернулся бы назад». Данное обстоятельство вынудило Резерфорда предположить, что в золотой фольге должны существовать маленькие сгустки положительных зарядов (суть ядра), вокруг которых вращаются отрицательно заряженные электроны. Группа ученых, работающая под руководством Резерфорда, провела ряд экспериментов с другими материалами. Из этих экспериментов вытекало, что чем больше заряд ядер мишени, тем сильнее отклоняются рассеянные на них альфа-частицы. Группа Резерфорда установила, что не масса влияет на свойства элементов, а заряд. Именно в соответствии с величиной заряда ядер химические элементы выстраиваются в том порядке, в котором расставил их Менделеев, опираясь на свои энциклопедические знания их химических свойств.

Планетарная модель Резерфорда имела крупный недостаток: согласно классической электродинамике вращающиеся вокруг ядра электроны должны излучать и соответственно, теряя энергию, сближаться с положительно заряженными ядрами. Резерфорд был уверен, что решение найдется, но не мог предположить, что так быстро.

В 1913 г. Нильс Херник Давид Бор (1885–1962, Копенгаген) пытался связать линейный спектр излучения атомов водорода с планетарной моделью Резерфорда, что ему удалось сделать на основании идеи о квантованных состояниях электронов в атоме. При этом каждому квантовому состоянию вращающегося электрона соответствует вполне определенная (стационарная) орбита. Двигаясь по такой орбите, электрон, по Бору, не излучает, т. е. не теряет энергию, но при переходе с одной орбиты на другую либо излучает, либо поглощает квант энергии в виде пучка электромагнитных волн. В 1923 г. Артур Комптон (1892–1962) и независимо от него П. Дебай (1884–1966) описали явление рассеяния фотонов на свободных электронах (эффект Комптона), поставив точку в сомнениях насчет корпускулярных свойств электромагнитных волн. Фотон жесткого излучения при взаимодействии с электроном вел себя как частица, обладающая импульсом. Далее Луи де Бройль в 1924 г. предложил почти фантастическую идею существования волн материи, положившую начало мировоззренческой концепции корпускулярно-волнового дуализма. Затем, в 1926 г., Эрвин Шредингер практически угадал дифференциальное уравнение (уравнение Шредингера), которому должны удовлетворять волны материи де Бройля.

Критически относясь к статистике Бозе – Эйнштейна, Шредингер задался вопросом – «почему бы не начать с волнового представления газа, а затем наложить на него условия квантования «а ля Дебай»? После чего следует ключевая идея: «Это означает не что иное, как необходимость серьезно отнестись к предложенной де Бройлем и Эйнштейном волновой теории движущихся частиц». Следующая статья Шредингера уже содержала уравнение, положившее начало квантовой механике. Доводы, приведенные Шредингером при выводе своего знаменитого уравнения, впоследствии были признаны специалистами неверными, однако уравнение оказалось верным. Это не единственный случай в науке. Основные уравнения электродинамики также были получены Джеймсом Клерком Максвеллом из неверных предпосылок о механических свойствах эфира.

В 1927 г. Девиссон, Джермер, Томсон и Татарковский открыли дифракцию и интерференцию элементарных частиц, описываемых на основании идеи существования волн материи. Несколько позже Вернер Гейзенберг (1901–1976), учитывая квантовый характер явлений микромира, свел описание скачкообразных процессов к матричной механике.

Вернер Карл Гейзенберг родился в немецком городе Вюрцбурге, выпускник Мюнхенского университета, был ассистентом профессора Макса Борна в Геттингенском университете. С 1924 г. он работал в институте Нильса Бора в Копенгагене. В 1941 г. Гейзенберг стал профессором Берлинского университета и директором института Кайзера Вильгельма, что вовлекло его в руководство ядерной программой нацистской Германии. Однако сотрудничество с наци не запятнало этого великого ученого.

Макс Борн (1882–1970), учитель Гейзенберга, придерживался взглядов, что явления микромира вовсе не обязаны укладываться в логическую схему обычных понятий, присущих макромиру. Поэтому не следует пытаться объяснить их с помощью методов классической физики. Эти убеждения передались Гейзенбергу. В 1925 г. во время отдыха на острове Гельголанд в Балтийском море Гейзенберга посетила мысль, что электрон в атоме нельзя рассматривать как шарик, движущийся по конкретной траектории, – это нечто более сложное. И если мы хотим описать данный объект, то должны использовать только такие уравнения, которые включают в себя только измеряемые на опыте величины. А из опытов тогда было известно только то, что атом устойчив, состоит из ядра и электронов и может испускать дискретный спектр излучений. Вместо

кривой, по которой двигается электрон, Гейзенберг ввел набор дискретных чисел, значения которых зависят от начального и конечного состояния «электрона» в атоме. У Гейзенберга электрон как точечный объект просто исчез, вместо этого он представил его в виде бесконечной «шахматной доски», в каждом квадрате которой записаны числа. Номеру строки такой доски соответствовало исходное состояние электрона, а номеру столбца – его конечное состояние, в клетке на пересечении строки и столбца записывалось число, характеризующее переход из начального состояния в конечное. В теории Гейзенберга, если известны эти числа, то об этом атоме известно все: спектр излучения, интенсивность линий в спектре, скорость выбитых из атома электронов и многое другое. С помощью Макса Борна и Паскуаля Йордана было установлено, что таблицы Гейзенберга не просто набор цифр, а матрицы, подчиняющиеся всем математическим действиям с обычными матрицами. Данное обстоятельство послужило основой для развития атомной (квантовой) матричной динамики. Сам Гейзенберг установил, что не все матрицы подходят для квантовой матричной динамики, а только те, которые подчиняются коммутативному (перестановочному) соотношению, которое играло точно такую же роль, как условия квантования в теории Нильса Бора.

Паули писал: «Механика Гейзенберга вернула мне надежду и радость жизни...». Он же, опираясь на матричную механику Гейзенберга, очень быстро разработал квантовую теорию атома водорода, учитывающую все достижения модели атома Бора. С этого момента электрон как точечный объект практически исчез из рассмотрения физиков. Его стали рассматривать как распределенную квантовую систему, движение которой есть изменение состояния этой распределенной системы в пространстве и времени. Идеи Гейзенберга были подхвачены новой волной физиков, и вскоре квантовая механика приобрела вид, способный по логической завершенности и общности конкурировать с классической механикой.

Э. Шрайндер показал, что подходы Шредингера и Гейзенберга адекватны. Для завершения основ квантовой динамики оставалось выяснить физический смысл волновой функции, характеризующей волновые свойства вещества. Однако эта проблема оказалась одной из самых сложных. До сих пор не улеглись споры по этому поводу. Однако подавляющее число физиков приняло интерпретацию, предложенную Максом Борном. Борн предложил рассматривать квадрат модуля волновой функции как плотность распределения вероятности координаты или импульса (в зависимости от представления) элементарной частицы.

До полного завершения Квантовой механики не хватало только обозначить границы ее применимости и указать принципиальное отличие процессов микромира от процессов макромира. Обе проблемы были сняты Гейзенбергом, предложившим соотношение неопределенностей:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2}, \quad (1.6)$$

которое гласит, что произведение неопределенности в месте положения частицы Δx и неопределенности ее импульса Δp принципиально не может быть меньше половины постоянной Планка.

Несмотря на то, что для описания квантовых явлений микромира пришлось привлечь непростой математический аппарат, основная идея (схема) квантовой механики проста: посредством волновой функции ψ_1 задается состояние элементарной частицы до некоего события, характеризуемого гамильтонианом \hat{H} . Далее определяется так называемая S -матрица, описывающая вероятности различных состояний ψ_n после состоявшегося события.

Физики, сами того не осознавая, создали теорию, очень похожую на смесь средневековой алхимии и древней астрологии. Способ получения гамильтонианов носит рецептурный характер. В алхимии для получения драгоценного металла рекомендуется смешать N частей ртути с M частями серы и K частями соли и произнести соответствующее заклинание. В Квантовой механике производятся практически аналогичные действия для получения операторов того или иного действия. Например, чтобы описать поведение элементарной частицы во времени, надо взять классический гамильтониан \hat{H} для макрочастицы и заменить ее координату x и импульс p , входящие в этот гамильтониан на операторы $x \rightarrow X = x$, а $p \rightarrow P = i \hbar \partial / \partial x$ (где i – мнимая единица). «Заклятие» же формулируется в виде операторного уравнения:

$$\hat{H}(x, i\hbar \partial / \partial x) \psi = E \psi, \quad (1.7)$$

где E – собственное значение полной механической энергии данной системы.

Дискретный ряд волновых функций ψ_n соответствующих дискретному ряду возможных значений энергии E_n рассматриваемой системы, удовлетворяющих уравнению (1.7), характеризует состояние элементарной частицы в той или иной физической ситуации.

Далее алхимики занимались трансмутацией металлов – преобразованием одних веществ в другие. Квантовые физики занимаются практически тем же самым: они сталкивают быстро движущиеся частицы разных сортов и наблюдают рождение материальных образований, возникших в результате таких столкновений.

Астрологи, пользуясь богатым опытом астрономических наблюдений и древнейших оккультных познаний, строят предположения о вероятных событиях в судьбе человека или общества. Точно так же методы квантовой механики позволяют определять лишь наиболее вероятные состояния элементарных частиц в тех или иных условиях или процессах.

Если кто-либо вздумает изучить квантовую механику с целью познания структурной организации материи, строения элементарных частиц, сущности происходящих событий в микромире, то его ждет полное разочарование. Квантовая механика (и все теории, базирующиеся на ее принципах: квантовая теория поля, квантовая электродинамика, теория суперструн) в принципе не в состоянии ответить на эти вопросы. Однако существует достаточно широкий класс процессов, описываемых квантовыми теориями, например: спектры излучения атомов, вероятные исходы взаимодействия элементарных частиц, эффекты проводимости и сверхпроводимости, эффекты взаимодействия частиц с электромагнитными волнами (фотонами) и т. д.

Эффектов, описываемых методами квантовой механики, много, но полной картины микроскопических явлений квантовые теории не дают и дать не могут в силу ущербности изначально заложенных в нее принципов и положений. Если спросить современного физика: «Что такое электрон?», – то услышим примерно следующее: «Электрон – это элементарная (в смысле неделимая), точечная (т. е. не имеющая размера и внутренней структуры) и в то же время распределенная в пространстве частица, обладающая массой $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$ кг, зарядом $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл, собственным механическим моментом импульса (т. е. спином) $s = \hbar/2 \approx 0,5 \cdot 10^{-34}$ Дж·с.

Электрон, в глазах верного последователя копенгагенского неопозитивизма, обладает еще как волновыми, так и корпускулярными свойствами. Последнее означает, что в некоторых процессах электрон проявляет себя как частица, а в других – как волна.

В отношении внутренней структуры электрона едва живой дух неопозитивизма все еще восклицает свое исходное заклинание: «не знаем, и не узнаем!». Но голос сей как бы из-под земли, и все слабее, а натиск альтернативных воззрений все жестче. Да и принцип дополнительности Бора, являющийся частным случаем поговорки «два еврея – три мнения», из которого возник корпускулярно-волновой дуализм, уже не выглядит столь убедительным.

Состояние электрона в квантовой механике характеризуется волновой функцией или суперпозицией волновых функций, квадрат модуля которой – плотность распределения вероятности места положения или импульса электрона. Очевидно, что не о какой внутренней структуре элементарных частиц в рамках квантовых теорий не может быть и речи хотя бы по тому, что если бы электрон имел какую-либо протяженность, то квантовые физики имели бы массу проблем с объяснением способов существования распределенного заряда. Попытки построения кварковых моделей протонов и нейтронов в рамках квантовых представлений натолкнулись на ряд трудностей, которые, однако, удалось преодолеть на основании весьма искусственных уловок и процедур перенормировки.

Дальнейшее продолжение рассмотрения развития представлений о структурной организации материи на основании квантовых теорий не имеет никакого смысла. Специалистов вряд ли заинтересует такой экскурс, а пылкий ум, только вступивший на путь познания Истины, не сможет по достоинству оценить изящность идей вторичного квантования, калибровочных полей, лагранжева и гамильтонова формализмов, фейнмановских диаграмм и т. д. без многолетней предварительной подготовки.

Побочный результат в исследованиях Амалии Эммы Нётер (1882–1935) – теорема «О четырех тождествах» (написанная в Геттингене и опубликованная в 1918 г.), установила связь между инвариантностью относительно группы непрерывных преобразований с законами сохранения. С тех пор вариационные методы стали необходимым инструментом теоретической физики. Согласно этой теореме если известен лагранжиан некоей системы, то с помощью вариационного метода устанавливается алгоритм получения всех законов сохранения, присущих внутренним симметриям этой системы. Однако этот «королевский путь» в физических исследованиях эффективен лишь в том случае, если угадан лагранжиан системы. В квантовой теории поля рассматриваются лагранжианы, «якобы» соответствующие элементарным частицам. Слово «якобы» употреблено в силу того, что нет обоснованных методов получения лагранжианов квантовых систем. Лагранжианы либо угадываются, либо выбираются методом подбора, т. е. из всевозможных лагранжианов выбираются те, которые приводят к «некому» соответствию математических расчетов с реальными свойствами элементарных частиц и физических полей. Теорема Эммы Нётер сыграла немаловажную роль в развитии Общей теории относительности и явилась, пожалуй, самым величественным инструментом познания современной физической действительности.

Чтобы хотя бы понять, о чем идет речь в квантовой теории поля или теории суперструн, необходимо посвя-

тить 7–10 лет усиленному изучению этих теорий под руководством опытных наставников и в итоге прийти к заключению, что эти теории содержат больше новых вопросов, чем ответов на интересующие Вас вопросы.

Прямым следствием «недоделанности» квантовой механики стал очередной кризис, постигший фундаментальную физику в конце 40-х – начале 50-х годов XX в. Бессмысленность расходящихся выражений в теории слабого взаимодействия и полное отсутствие подходов к единому описанию силовых полей и спектра характеристик многочисленных «элементарных» частиц потребовало направить усилия на поиск новых идей. Однако, не выходя за рамки квантово-механических подходов, удалось разрешить лишь часть проблем. Плодотворные идеи калибровочных полей, спонтанного нарушения симметрии и суперсимметрии, рассмотрение дополнительных измерений физического пространства, топологических, нелинейных и групповых методов позволили частично преодолеть этот кризис без кардинальной ревизии первичных принципов квантовой механики. Однако новые методы выглядят как заплатки из новой материи на старом платье. Математика еще более усложнилась, а физический смысл вовсе растворился в математическом тумане.

Фейнмановские диаграммы создали иллюзию физической картины происходящих событий в микромире, но из-за точечных размеров взаимодействующих частиц в теории присутствуют неустранимые расходимости. При стягивании в точку внутренних линий диаграмм Фейнмана возникают члены ряда, соответствующие бесконечным значениям энергии.

Призванная разрешить эти проблемы теория суперструн позволяет избежать стягивания внутренних линий в точку за счет соответствующей топологии поверхности, «обволакивающей» диаграммы Фейнмана (т. е. замкнутых струн), но эта теория еще далека до завершения, а проверка ее справедливости лежит в области планковских энергий, достичь которые в ближайшем будущем не представляется возможным.

Создание релятивистской квантовой механики относится к 1928 г., когда Поль Дирак предложил свое знаменитое инвариантное уравнение (уравнение Дирака) – релятивистский аналог уравнения Шредингера.

Уравнение Шредингера получается в результате следующей формальной процедуры. Полная механическая энергия E нерелятивистской частицы в некоем потенциальном поле $U(r, t)$ равна

$$E = \frac{p^2}{2m} + U(r, t), \quad (1.8)$$

где p – импульс частицы, r – вектор, задающий ее местоположение в потенциальном поле, t – время, U – потенциальная энергия частицы. Заменяя в уравнении (1.8) физические величины на операторы:

$$E \rightarrow i \hbar \partial / \partial t; \quad p \rightarrow -i \hbar \nabla; \quad U \rightarrow U, \quad (1.9)$$

где $\nabla = \partial / \partial x + \partial / \partial y + \partial / \partial z$, и умножая выражение (1.8) слева на Ψ – функцию, получим знаменитое уравнение Шредингера:

$$i \hbar \partial / \partial t \Psi = \hbar^2 / (2m) \Delta \Psi + U(r, t) \Psi, \quad (1.10)$$

где $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$, на котором основана нерелятивистская квантовая механика.

Релятивистская квантовая механика построена Дираком аналогичным образом, только на основе уже релятивистского выражения для полной энергии частицы:

$$E^2 = c^2 p^2 + m_0^2 c^4 + U(r, t), \quad (1.11)$$

где m_0 – масса покоя частицы. Однако прямая подстановка операторов (1.9) в уравнение (1.11) приводит к уравнению Клейна – Гордона:

$$-\hbar^2 \partial^2 / \partial t^2 \Psi = (-c^2 \hbar^2 \Delta + m_0^2 c^4) \Psi + U(r, t) \Psi, \quad (1.12)$$

некоторые решения, которого приводят к отрицательным значениям квадрата модуля Ψ -функции, что противоречит здравому смыслу, т. к. формализм квантовой механики трактует $|\Psi(r, t)|^2$ – как плотность распределения вероятности места нахождения элементарной частицы, а плотность распределения вероятности не может принимать отрицательные значения по определению. Поэтому уравнение Клейна-Гордона не получило сразу признания в качестве основного уравнения релятивистской теории элементарных частиц. Позже оно заняло достойное место в квантовой теории поля для описания ряда эффектов, но так и не стало основополагающим.

Все проблемы уравнения (1.12) связаны с тем, что оно является уравнением второго порядка по времени.

Гениальная идея Дирака состояла в поиске возможности понижения порядка этого уравнения. Дираку удалось решить эту проблему, но при этом основное уравнение стало носить тензорный характер, а для описаний релятивистских квантовых эффектов потребовались не одна Ψ -функция, а четыре. Две из которых описывают два различных спиновых состояния электрона, а две другие – позитрона (античастицы) (На самом деле события развивались не так гладко. Дирак первоначально полагал, что его уравнение описывает не электрон и позитрон, а электрон и протон. В то время как К.Ф. Андерсон, открывший позитрон, по-видимому на период открытия ничего не знал о теории Дирака).

Уравнение Дирака привело к вычислению правильного значения гироманнитного отношения для электрона и позволило уточнить рассчитанные по уравнению Шредингера энергетические уровни электронов в атомах. Но самое значительное достижение теории Дирака связано с теоретическим обоснованием существования антивещества.

Следующий шаг в понимании микромира был сделан при создании квантовой электродинамики – последовательной квантовой теории электромагнитных явлений. Наибольший вклад в создание этой науки внесли Дирак, Швингер, Дайсон и Фейнман. Квантовая электродинамика в настоящее время прекрасно развита и служит образцом для построения других физических теорий. С помощью квантовой электродинамики было уточнено значение магнитного момента электрона. Измеренное на опыте значение $1,001159652209 \pm 0,31 \cdot 10^{-10}$ магнетона Бора находится в прекрасном согласии с теоретическим значением, которое вычислено примерно с той же точностью.

Очередной фундаментальный шаг в развитии наших знаний о природе материи связан с исследованием так называемого слабого взаимодействия. Это взаимодействие приводит к β -распаду атомных ядер и к многочисленным превращениям элементарных частиц, в том числе нейтрона – в протон, электрон и антинейтрино, к распадам пионов, мюонов и др. частиц. Первая теория β -распада была создана Э. Ферми. В 60-х годах был завершён современный вариант теории электрослабого взаимодействия (Вайнберг, Салам, Глэшоу). Согласно этой теории электромагнитные и слабые взаимодействия представляют собой две стороны одного и того же явления и, подобно электрическим и магнитным процессам, должны рассматриваться вместе. Их раздельное рассмотрение возможно лишь при низких энергиях, когда единая теория с достаточной точностью может быть разбита на две кажущиеся независимыми части: квантовую электродинамику и теорию слабых взаимодействий (по Ферми).

Теория Вайнберга, Салама и Гленшоу сейчас общепринята и получила название «стандартной» теории. Подобно тому как из уравнений Дирака следовало существование позитрона, из стандартной теории вытекало существование переносчиков электрослабого взаимодействия – промежуточных бозонов – частиц, переносящих как электромагнитное, так и слабое взаимодействие (в то время как фотоны – только электромагнитное). Эти частицы были обнаружены на гигантском ускорителе Европейского центра ядерных исследований.

В последние годы развитие теории идет по двум основным направлениям. Одно из них разрабатывает теорию «сильного» взаимодействия, ответственного за ядерные силы, действующие между почти всеми частицами. Исключение составляют электрон, мюон, τ -частица, их античастицы и γ -квант. Понимание сильных взаимодействий сильно продвинулось. Надежно установлено, что все частицы, кроме названных (и кроме W - и Z -частиц), состоят из субчастиц, получивших название «кварки». Кварки связаны между собой «цветными» силами, переносчики которых носят название «глюоны». В состав элементарных частиц входит два или три кварка и/или антикварка.

Физики, разрабатывающие второе из указанных направлений, пытаются создать единую теорию всех взаимодействий: электромагнитного, слабого, сильного и гравитационного. Однако квантовые подходы слишком сложны, для того чтобы можно было надеяться на завершение этих теорий в ближайшем будущем.

Но как бы то ни было, математический формализм и методы познания объективной реальности, развитые в квантовых теориях, являются величайшими достижениями человеческой мысли, необходимым шагом в движении к постижению Истины.

1.21.1. Аксиоматика квантовой механики. Гильбертово пространство [98]

В конце 50-х – начале 70-х годов XX в. значительные усилия физиков-теоретиков были нацелены на разработку аксиоматики квантовой теории. Предпринимались попытки на строгой математической основе разобраться в том, какие принципы и понятия заложены в фундамент квантовой теории поля (квантовой механики). На основе этого анализа надеялись понять источник трудностей квантовой теории как концептуального, так и технического характера, в частности прояснить причины возникновения расходимостей. Примечательно, что за

исходные стремились выбрать не те положения, которые непосредственно связаны со свойствами классического пространства-времени, а некоторые абстрактные принципы: суперпозиции, причинности, симметрии, аналитичности и другие.

Следует напомнить, что, во-первых, разработка аксиоматики представляет собой метафизическую задачу. Во-вторых, при построении аксиоматики вольно или невольно закладывается та или иная метафизическая парадигма. В-третьих, всякая аксиоматика лишь уточняет и систематизирует сложившиеся представления, а в данном случае это была квантовая теория в копенгагенской интерпретации, т. е. в ней так или иначе были представлены свойства классического пространства-времени. Тем не менее, анализируя минимальные системы примитивов и аксиом, составляющих фундамент квантовой теории, удастся выделить ряд ключевых положений (понятий и закономерностей), общих как для дуалистической, так и монистической парадигмы.

Принято различать квантовую механику и квантовую теорию поля, где используются методы вторичного квантования. Сначала обсудим аксиоматику квантовой механики, придерживаясь ее изложения в книге П. Дирака «Принципы квантовой механики».

В качестве ключевых понятий (примитивов аксиоматики) Дирак выбрал состояние системы (из частиц и переносчиков взаимодействий) и динамические переменные. Он писал: «Состояния и динамические переменные должны характеризоваться математическими величинами другой природы, чем те, которые обычно используются в физике. Новая схема станет точной физической теорией, если будут перечислены все аксиомы и правила действия для математических величин и если, кроме того, будут установлены некоторые законы, связывающие физические факты с математическим аппаратом».

Аксиоматика квантовой механики Дирака, как и аксиоматика геометрии, состоит из нескольких блоков, которые разобьем на две части. Первую часть составляют блоки аксиом гильбертова пространства, которые имеют наиболее фундаментальный характер, подчеркивавшийся многими исследователями. Можно установить соответствие этих блоков аксиом трем блокам в аксиоматике геометрии пространства-времени.

Перечислим аксиомы гильбертова пространства:

1. Аксиомы векторного пространства. В качестве исходного момента для развертки аксиоматики выбран принцип суперпозиции для состояний квантово-механических систем, который можно усмотреть уже в волновых уравнениях квантовой механики. Поскольку они линейны, то обладают тем свойством, что сумма двух решений также является решением, а каждое решение трактуется как состояние. Этот принцип не имеет прямого классического аналога. «В классическом смысле слова нельзя представить себе, что система находится частично в одном состоянии, а частично в другом и что это эквивалентно тому, что система целиком находится в некотором третьем состоянии. Здесь вводится совершенно новая идея, к которой нужно привыкнуть и на основе которой следует строить точную математическую теорию, не имея при этом детальной физической картины».

Математическая реализация этой идеи достигается в рамках понятий векторов, точнее, элементов линейного векторного пространства. Как известно из геометрии, сумма двух векторов также является вектором. Отличие от привычных векторов заключается в том, что обычно имеют дело с векторами в пространствах конечного числа измерений, а в данном случае пространства могут быть бесконечномерными. Дирак разработал специфическую систему обозначений, в которой вектор A изображается в обрамлении сориентированной скобки (кет) вида $|A\rangle$.

Названное выше свойство суперпозиции означает, что любым двум векторам $|A\rangle$ и $|B\rangle$ из данного линейного векторного пространства однозначно сопоставлен третий элемент этого же векторного пространства, что в обозначениях Дирака записывается следующим образом:

$$|A\rangle + |B\rangle = |C\rangle. \quad (1.12a)$$

Определенная в линейном векторном пространстве операция сложения векторов обладает обычными свойствами:

а) коммутативности

$$|A\rangle + |B\rangle = |B\rangle + |A\rangle; \quad (1.12б)$$

б) ассоциативности

$$(|A\rangle + |B\rangle) + |C\rangle = |A\rangle + (|B\rangle + |C\rangle). \quad (1.12в)$$

Кроме того, постулируется существование нулевого состояния (нулевого вектора) $|0\rangle$ такого, что

$$|A\rangle + |0\rangle = |A\rangle. \quad (1.12г)$$

Эти свойства означают, что состояния (векторы) образуют абелеву группу. Для элементов линейного векторного пространства также определена операция умножения на комплексные числа, обладающая свойством

дистрибутивности. Напомним: это означает, что, если $a, b \in C$, где C – поле комплексных чисел, то имеют место соотношения:

$$\text{а) } a(|A\rangle + |B\rangle) = a|A\rangle + a|B\rangle; \quad (1.12\text{д})$$

$$\text{б) } (a + b)|A\rangle = a|A\rangle + b|A\rangle; \quad (1.12\text{е})$$

$$\text{в) } 0 \cdot |A\rangle = |0\rangle. \quad (1.12\text{ж})$$

Принцип суперпозиции и связанное с ним линейное векторное пространство составляют устойчивое ядро многих аксиоматик квантовой механики (теории).

Прибавлять – это самое легкое и приятное занятие для человека, поэтому мы всякий раз радуемся, когда удается хоть что ни будь суммировать. (Это правило не распространяется на спецслужбы, которые более предпочитают отнимать и делить). Тем более, если оказывается, что аддитивными свойствами обладают абстрактные вектора в гильбертовом пространстве, имеющие, хотя и призрачную, но вполне осязательную связь с реальностью.

Перечисленные свойства в совокупности определяют линейное векторное пространство. Легко проверить выполнимость всех этих свойств для решений линейных волновых уравнений, в частности уравнения Шредингера (1.10), где $\Psi = |A\rangle$, записанных в предыдущих главах. Заметим также, что эти свойства, как правило, нарушаются в случае нелинейных уравнений. Это послужило одной из основных причин неудач при разработке программ построения единой нелинейной теории поля.

2. Аксиомы скалярного произведения. В линейном векторном пространстве нет понятия длины. Строго говоря, два вектора, отличающиеся комплексным множителем, следует считать за один и тот же вектор, т. е. свойств линейного векторного пространства недостаточно для построения квантовой теории. Для определения амплитуды вероятности процессов необходимо ввести в векторное пространство операцию скалярного произведения векторов, означающую, что каждой паре элементов $|A\rangle, |B\rangle$ линейного векторного пространства поставлено в соответствие комплексное число – своеобразная метрика. Отметим, что понятие метрики составляет собой другой примитив аксиоматики.

Важно отметить, что для определения операции скалярного произведения Дираку и его последователям потребовалось ввести пространство ко-векторов, строящееся из элементов пространства векторов: каждому вектору $|B\rangle$ соответствует ко-вектор $\langle B|$, изображаемый в иначе ориентированных обкладках (брэк). Скалярное произведение вектора $|A\rangle$ на $|B\rangle$ изображается в виде символа упорядоченного $\langle B|A\rangle$, где вместо первого вектора берется ко-вектор, а вертикальные линии двух составных частей совмещаются друг с другом. Таким образом, в обозначении скалярного произведения два вектора оказываются заключенными в своеобразные скобки (по-английски bracket (скобка) состоит из двух слогов: brae (брэк) и ket (кет)).

Скалярные произведения обладают следующими свойствами:

$$\text{а) } \langle B|A\rangle = \langle A|B\rangle^*, \quad (1.12\text{з})$$

где $*$ – означает комплексное сопряжение, т. е. перестановка местами двух векторов приводит к комплексно сопряженному результату;

$$\text{б) } \langle a A|B\rangle = a \langle A|B\rangle, \quad (1.12\text{и})$$

т. е. множитель (C -число) выносится за знак скобки;

$$\text{в) } (\langle A| + \langle B|)|C\rangle = \langle A|C\rangle + \langle B|C\rangle \quad (1.12\text{к})$$

$$\text{г) } \langle A|A\rangle > 0, \text{ если } |A\rangle \neq 0. \quad (1.12\text{л})$$

В последнем выражении введена длина (норма) вектора, которая характеризуется вещественным положительным числом.

Перечисленные два блока свойств определяют так называемое унитарное, или гильбертово пространство. Этот блок аксиом квантовой механики имеет глубокое метафизическое содержание, особенно важное для интерпретации квантовой механики в монистической парадигме. Во-первых, определение векторов и со-векторов состояний можно понимать как проявление двух противоположностей платоновской диалектики – двух сторон единого (двуединого) первоначала. Во-вторых, в данном блоке аксиом определено скалярное произведение векторов, описывающих начальное и конечное состояния системы. Комплексное число, которым характеризуется скалярное произведение, описывает амплитуду вероятности перехода между этими состояниями – третья мета-

физическое начало квантовой механики, соответствующее аристотелевской сущности. Таким образом, в этом блоке аксиом заложена как двоичность, так и троичность метафизической системы (монистической парадигмы).

3. Гильбертово пространство. В квантовой теории используется векторное пространство с условиями непрерывности (полноты). Не будем выписывать все необходимые для этого понятия и определения, полагаясь на интуицию читателя, знающего хотя бы в общих чертах, как в математике определяется непрерывность. Отметим, что Дирак также уходит от деталей, заявляя: «Пространство векторов и ко-векторов, имеющих конечную длину и конечное скалярное произведение, называется математиками пространством Гильберта».

Однако следует заметить, что в квантовой теории фактически используются более общие пространства, чем пространство Гильберта, так как во многих случаях встречаются векторы с бесконечной длиной. Это подсказывает, что в данном блоке аксиом содержатся некоторые избыточные условия на квантово-механические системы. Впрочем, это характерно и для аксиоматики геометрии пространства-времени, где, кроме точек с реальными частицами, рассматриваются и все промежуточные (пустые) точки.

Установим следующие параллели между примитивами аксиоматики гильбертова пространства, аксиом геометрии и ключевыми физическими категориями:

- 1) состояние системы – геометрическая точка – категория частиц;
- 2) скалярное произведение – метрика – категория переносчиков взаимодействий;
- 3) непрерывные множества – категория пространства-времени.

В этом случае аксиоматика векторных пространств в какой-то мере заменяет аксиомы порядка в геометрии, аксиомы скалярного произведения векторов соответствуют метрическим аксиомам в геометрии, а понятие непрерывности (полноты) в пространстве Гильберта – топологическим аксиомам в геометрии.

Подчеркнем, что здесь речь идет не о полном соответствии, а лишь о параллелях в двух аксиоматиках.

Данную статью из [98] мы привели с целью показать, что аксиоматика квантовой механики содержит некий алфавит «символов» и систему их взаимоотношений, срисованных с природы явлений микромира. Безусловно этот алфавит пригодится для установления «речевого» общения с Живым Естеством окружающего нас Бытия.