

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

КОРПУСКУЛЯРНЫЙ АСПЕКТ МАТЕРИИ

Я. И. Френкель

1. ВВЕДЕНИЕ

В предыдущей статье о «квантово-полевой теории материи», недавно опубликованной в настоящем журнале¹, я пытался развернуть новую программу развития теории квантов — не как квантовой механики частиц, а как квантовой теории поля.

Цель настоящей заметки состоит в том, чтобы напомнить то обстоятельство, что корпускулярный аспект материи, обнаруживающийся особенно отчётливо в факте существования треков заряженных частиц в камере Вильсона, может быть истолкован с чисто волновой (или полевой) точки зрения при рассмотрении взаимодействия главного объекта (быстро движущейся заряженной «частицы») с множеством других объектов (атомов «среды», которые этой частицей возбуждаются или ионизируются). При этом, как показал ещё в 1929 г. Мотт², оказывается необходимым описывать все эти «частицы», при учёте их взаимодействия с заряженной частицей, в конфигурационном пространстве многих измерений, соответствующем совокупности того, что мы называем «заряженной частицей» и «средой».

Среди некоторых авторов было распространено до сих пор ошибочное мнение, что учёт взаимодействия «частицы» со «средой» приводит к установлению соотношения неопределённости между координатами и импульсами этой «частицы». В действительности, как мы сейчас увидим, это соотношение связано с полевым аспектом того, что мы неправильно называем «частицами» материи, тогда как учёт взаимодействия одной такой «частицы» с окружающей «средой» приводит к ошибочному корпускулярному представлению о микрообъектах природы, как о частицах.

2. КАЖУЩИЕСЯ ТРУДНОСТИ ПОЛЕВОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О МАТЕРИИ

При рассмотрении различных вопросов квантовой механики, относящихся к движению одной частицы в заданном внешнем поле, волновая функция $\psi(x, y, z, t)$ интерпретируется как амплитуда вероятности того, что частица находится в момент времени t в точке с координатами x, y, z ; говоря точнее, квадрат модуля этой функции $|\psi|^2$, умноженный на элемент объёма, — $dx dy dz$, представляет собой меру вероятности того, что частица, описываемая ψ -волнами, находится в момент t в элементе объёма $dx dy dz$.

Эта интерпретация связана с корпускулярным представлением о материи: она предполагает, что материя состоит из отдельных частиц и что движение одной из этих частиц, в отсутствие других, контролируется де-Броглевской волной, согласно чисто статистическому закону, устанавливающему связь между интенсивностью волны в различных точках пространства и вероятностью нахождения частицы в той или иной точке.

В противоположность этой статистической точке зрения, которая была выдвинута М. Борном в 1926 г., де-Брогль и Шредингер пытались вначале (1924—1925) трактовать величину $|\psi|^2$ как плотность самой материи, т. е. рассматривать последнюю как чисто волновое образование. Эта — на первый взгляд весьма заманчивая — точка зрения, обещавшая свести корпускулярно-волновой дуализм материи к монистическому волновому представлению о ней, была вскоре отвергнута в пользу статистической или дуалистической трактовки, предложенной Борном. Причины этого общеизвестны. Всё же я считаю необходимым остановиться здесь вкратце на изложении важнейших из этих причин:

1) Волновой пакет, построенный для изображения материальной частицы де-Броглем и Шредингером, расплывается с течением времени. Это расплывание не представляет, однако, какой-либо угрозы для существования отдельных неизменных частиц с точки зрения Борна, поскольку оно относится не к самой частице, а лишь к пространственному распределению вероятности её локализации.

2) Представление о плоских синусоидальных волнах «материи» позволяет объяснить явления интерференции и диффракции этих волн при прохождении их через кристалл, тогда как аналогичное объяснение оказывается невозможным, если заменить эти волны множеством волновых пакетов, которые при таких условиях лишь разрываются и дробятся.

В связи со вторым из этих соображений необходимо отметить ещё одно.

3) Из явлений диффракции катодных лучей вытекает, что способностью интерферировать друг с другом обладают не

«результатирующие» волны, а волны, контролирующее движение одних и тех же индивидуальных электронов. Таким образом, дифракционная картина, даваемая монохроматическим пучком электронов при прохождении через кристалл, отличается лишь своей большей интенсивностью от той, которая соответствует одному из этих электронов.

3. РЕАЛЬНОСТЬ ДЕ-БРОГЛЕВСКОГО ПОЛЯ ДЛЯ ОДНОГО ИЗОЛИРОВАННОГО МИКРООБЪЕКТА

Несмотря на эти факты, вопрос о полевой природе материи нельзя, по моему мнению, считать решённым в отрицательном смысле. Прежде всего нет никаких оснований искать (как это делал сам де-Брогль) полевой прообраз материи в виде волнового пакета, напоминающего частицу. Это представление может относиться только к «коротковолновым» макроскопическим объектам, но отнюдь не к микроскопическим (которым соответствуют относительно длинные волны). Если же отказаться от такого «квазикорпускулярного» представления, то можно отлично примириться с любой постоянной или переменной во времени полевой структурой микрообъекта, не связанной с уподоблением его частице. Рассматривая, например, электромагнитное поле световых волн, мы отнюдь не пытаемся свести его к волновым пакетам, которые изображали бы отдельные фотоны. Если отказаться от корпускулярности материи, то нет решительно никаких оснований пытаться представить её в «квазикорпускулярном» виде. Квантованность поля, образующего эту материю, заключается лишь в соответствии его целому числу микрообъектов (квантов); «форма» же этих микрообъектов не может иметь существенного значения и даже вообще физического смысла *).

Мы видим, таким образом, что мы сами запутали сравнительно простой физический смысл понятия о квантованном поле материи, пытаясь навязать ему наше примитивное и наивное представление о частицах, т. е. пытаясь соединить в понятии «материи» два аспекта — полевой и корпускулярный. Эта двойственность может появиться лишь в том случае, если мы оперируем с собранием некоторого (целого) числа микрообъектов одинакового сорта и то лишь в той мере, в которой она обнаруживается в факте квантованности поля. Пока же мы имеем дело с одним микрообъектом данного сорта или неопределённым их числом, привешивание к понятию поля понятия «частицы» не имеет никакого резона. Иными словами, корпускулярные представления могут появляться лишь при трактовке системы

*) Так, например, обстоит дело с формой световых квантов, которые могут соответствовать плоским или шаровым волнам, и. т. д.

микрообъектов; до тех же пор, пока мы оперируем с тем, что называется «одним микрообъектом» или неопределённым их числом, вопрос о корпускулярных представлениях не должен возникать в нашем сознании при описании явлений природы.

Таким образом, сказанное нами выше о ненужности корпускулярных представлений при «интерпретации» квантовой «механики» и о возможности непосредственно трактовать поле ψ , как физическую реальность, пользуясь соотношением неопределённостей $\Delta x \cdot \Delta k > 1$, как непосредственным следствием полевых представлений, остаётся в силе, несмотря на соображения, изложенные в предыдущем параграфе.

Некоторое затруднение представляет собой, с этой точки зрения, вопрос о выборе рационального выражения для потенциальной энергии в том или другом случае, например о выборе потенциальной энергии в виде $\frac{Ze^2}{r}$ при рассмотрении процесса, который мы называем «движением электрона в кулоновом поле неподвижного центра». Занимаясь определением волновой функции ψ , которая якобы «контролирует» движение электрона в этом случае, мы должны, прежде всего, забыть о существовании электрона, как точечного заряда, и решать рассматриваемую задачу примерно так же, как решается задача о колебаниях электромагнитного поля в шаровом эндовибраторе с надлежащим распределением «показателя преломления волн». Выбор именно данного, а не какого-либо другого выражения для вычисления этого показателя можно при этом связать с макроскопическими данными о кулоновском поле, которые вследствие случайности дают правильный (или почти правильный) результат.

Точно так же туннельный эффект и вообще проникновение волновой функции ψ в область, запрещённую классической механикой (т. е. соответствующую отрицательному знаку кинетической энергии), следует рассматривать просто как частный случай полного внутреннего отражения волн при мнимости слагающей волнового вектора в направлении к соответствующей поверхности, а не пускаться в сложные и малоубедительные рассуждения о неопределённости скорости частицы, рассматриваемой в полупространстве, как это делается обычно.

До тех пор пока мы рассматриваем одну «частицу» или неопределённое число частиц, без учёта их взаимодействия друг с другом, наши соображения должны относиться только к де-Броглевскому полю. При этом последнее можно трактовать чисто классическим образом, не считая его, однако, скалярным, и колебательный его характер связывать с наличием отличной от нуля энергии (или массы) покоя у соответствующих «частиц».

4. ОБНАРУЖЕНИЕ КОРПУСКУЛЯРНОГО АСПЕКТА МАТЕРИИ ПРИ УЧЕТЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ «ЧАСТИЦЫ» СО «СРЕДОЙ»

В 1929 г. Мотт показал, что для истолкования треков быстро движущихся наэлектризованных частиц (например, α -частиц в камере Вильсона) необходимо рассматривать эти «частицы» совместно с другими нейтральными «частицами», образующими материальную среду, в которой происходит движение ионизирующей частицы, т. е. рассматривать последнюю совместно с этой средой в многомерном координационном пространстве всех частиц, и что лишь при таких условиях понятие «трека» как видимого следа ионизирующей «частицы» приобретает физический смысл. Если же описывать ионизирующую «частицу» самое по себе с помощью контролирующей её трёхмерной волны, то, как было известно ещё ранее, представление о её корпускулярной природе и о прямолинейности её «траектории» утрачивает всякий смысл.

Напомним, что в учении о свете аналогичная ситуация имела место в прежнее время, когда основным свойством света представлялась прямолинейность световых лучей (в однородной среде). Для получения подобного «светового луча» требовалось применение диафрагм или экранов, способных выделить и пропустить дальше только небольшой участок световой волны. Это обстоятельство в начале прошлого века было выяснено Френелем в его опытах над диффракцией света и привело к твёрдому установлению волновой природы последнего (в связи с малостью длины световых волн). В современной квантовой теории света дело обстоит совершенно так же. Положение изменилось лишь в том отношении, что действие света на «электроны» приобрело квантовый характер, которого оно не имело раньше и который объясняется, если рассматривать фотоны и электроны с полевой точки зрения в их взаимодействии друг с другом, а равным образом и другими объектами.

Как показал Мотт, то же самое следует сказать о выявлении корпускулярного аспекта всех других микрообъектов и, в частности, так называемых «электронов» или «альфа-частиц». При этом роль экранов или диафрагм, выделяющих эти «частицы» и создающих впечатление о прямолинейных или криволинейных траекториях их движения, играют те микрообъекты материальной среды, через которые проходят волны, соответствующие ионизирующим частицам.

Необходимо лишь помнить, что превращение этих волн в «частицы» не имеет места на самом деле, но вытекает из квантовой природы самих волн, или, точнее, из квантового характера эффектов их взаимодействия с другими волнами (или полями), с которыми мы связываем представления о других частицах.

5. УТОЧНЕНИЕ ТЕОРИИ МОТТА И ЕЕ ФИЛОСОФСКОЕ ДОПОЛНЕНИЕ

Напомним вкратце сущность теории Мотта. Мотт рассматривает наряду с трёхмерной волной $\Psi(\mathbf{R})$, описывающей так называемую «альфа-частицу», трёхмерные волны $\psi_s(\mathbf{r})$, описывающие атомы среды (воздуха) в различных состояниях s , от нормального $s=0$ до ионизованного. Далее, из этих волн он строит комбинированную «многомерную» волну

$$\Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots),$$

описывающую « α -частицу» и «атомы» совместно друг с другом, и, наконец, из этой комбинированной волны образует новую трёхмерную волну:

$$f_{s_1, s_2, \dots}(\mathbf{R}) = \int \Psi(\mathbf{R}, \mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots) \psi_{s_1}^*(\mathbf{r}_1) \psi_{s_2}^*(\mathbf{r}_2) \dots d\mathbf{r}_1 d\mathbf{r}_2 \dots,$$

которая определяет вероятность того, что в рассматриваемый момент времени, когда « α -частица» находится в точке \mathbf{R} , атомы находятся в квантованных состояниях s_1, s_2 и т. д. Если все s_i ($i=1, 2, 3, \dots$) равны нулю, кроме, скажем, $s_j \neq 0$, то функция f зависит от расстояния атома j от точки O , в которой «начинается α -луч». Для объяснения прямолинейности трека α -частицы остаётся, таким образом, доказать, что функция $f(\mathbf{R})$ при нескольких s_j , отличных от нуля, весьма мала, если эти атомы (ионизованные или возбуждённые) не расположены на прямой линии, проходящей через O и j .

Мы не будем воспроизводить доказательство, которое было дано Моттом и которое читатель может найти в его статье². Для нас важно отметить, что результат, найденный Моттом, имеет весьма существенное философское значение, которое ускользнуло от самого автора и которое заключается в том, что «частицы» представляют собой лишь некоторый облик чисто полевых процессов, выявляющийся в случае учёта взаимодействия волн одного сорта с волнами другого сорта (также воспринимаемыми нами в виде «частиц»), причём эти волновые процессы описываются в многомерном пространстве, связываемом с совокупностью соответствующих частиц.

Последнее обстоятельство является, на первый взгляд, некоторой трудностью полевой теории материи, согласно которой совокупность большого числа одинаковых микрообъектов соответствует высоко возбуждённым состояниям соответствующего единого квантованного поля. Теорию Мотта нетрудно, однако, преобразовать к чисто полевому виду, рассматривая атомы среды, как кванты соответствующего поля, аналогично тому, как это делается,

например, в квантовой теории радиационного трения (или ширины спектральных линий).

На более подробном рассмотрении этого вопроса мы не можем здесь останавливаться.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Я. И. Френкель, УФН, **42**, 69 (1950).
 2. Н. Ф. Мотт, Волновая механика и физика ядра, стр. 97, перевод К. В. Никольского, ОНТИ (1936); «The Wave Mechanics of α -Ray Tracks», Proc. Roy. Soc. A **126**, 79 (1929).
-