

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК**К ВОПРОСУ О ЕДИНОЙ ТЕОРИИ ПОЛЯ *)****ЗАМЕЧАНИЯ К КВАНТОВО-ПОЛЕВОЙ ТЕОРИИ МАТЕРИИ****Я. И. Френкель****§ 1. КВАНТОВАЯ МЕХАНИКА И КОРПУСКУЛЯРНАЯ ПРИРОДА ВЕЩЕСТВА**

В современной квантовой механике отдельные частицы, так же как и система взаимодействующих частиц, описываются статистически совершенно одинаковым образом (волновой функцией в конфигурационном пространстве системы).

Поскольку при этом все частицы, принципиально локализуемые в пространстве и времени, считаются неизменными, такое статистическое описание фактически означает отказ от механического детерминизма в определении их движения.

Зарубежные физики, развивая идеалистические взгляды и основываясь на анализе роли наблюдателя при воздействии его на исследуемую систему, возвели этот индетерминизм в принципиальную основу квантовой механики. В последние годы в работах советских физиков-теоретиков делались попытки, исходя из материалистических позиций, преодолеть индетерминизм (в ходе событий) и свести его к неопределённости, присущей квантово-механическому определению исходных состояний.

*) Изучение поля как одной из форм материи становится в современной физике всё более актуальным. Развитию теории поля посвящено много научных исследований. Настойчиво работают над теорией поля и советские физики-теоретики.

Редакция печатает посвящённые теории поля статьи Я. И. Френкеля «Замечания к квантово-полевой теории материи» и Д. И. Блохинцева «Элементарные частицы и поле». В них авторы с различных позиций обосновывают одну и ту же идею о «единой полевой теории материи». Разумеется, это ещё не самая теория, а скорее только попытка обоснования её необходимости. Далеко не все даже основные факты рассмотрены в свете новых идей и не все тенденции могут считаться бесспорными. Редакция предоставит страницы журнала для желающих высказаться как по всей проблеме в целом, так и по отдельным идеям, высказанным авторами данных статей. (Ред.)

Я полагаю, что существо вопроса не в этом, а в том факте, что чисто корпускулярная модель строения вещества, которой мы продолжаем пользоваться до сих пор, не адекватна действительности, когда речь идёт о «микромире»*), так как она отражает только корпускулярный аспект материи, не учитывая её полевой природы.

§ 2. ОГРАНИЧЕННАЯ ДЕЛИМОСТЬ ВЕЩЕСТВА

При анализе вопроса о природе материи философы-материалисты древности считали, что макроскопические твёрдые тела состоят, подобно газам, из дискретных частиц — атомов, которые можно рассматривать как очень маленькие твёрдые тела, отличающиеся от обычных лишь своей «сплошностью». Последнее обстоятельство несколько не мешало, однако, трактовать эти маленькие твёрдые тела как состоящие из ещё более мелких частиц, прочно цементированных друг с другом, т. е. подразделять их, хотя бы мысленно, на ещё более мелкие элементы, двигаясь в этом направлении до бесконечности.

Физики начала нашего века в этом вопросе недалеко ушли от древних, лишь несколько уточнив их представления об «атомах». Место последних заняли электроны и нуклоны, причём тем и другим приписываются определённые размеры и даже форма, т. е. эти частицы (так же как у древнегреческих философов) рассматриваются как миниатюрные твёрдые тела, практически не способные к дальнейшему подразделению, но могущие в принципе быть подразделёнными на ещё более мелкие элементы. При неравномерном движении электрона и неизменном относительном расположении его элементов взаимодействие последних друг с другом даёт результирующую силу «самовоздействия» электрона, т. е. действия его на самого себя, которая сводится, в основном, к силе инерции. Насколько серьёзно физики считались при этом с принципиальной делимостью электрона, явствует из большого числа попыток обеспечить устойчивость электрона по отношению к распаду под действием электрических сил взаимного отталкивания между его «элементами» с помощью сил какой-либо другой — неэлектрической природы, способных их уравновесить (Пуанкаре, Ми и др.).

Все эти попытки исходят из наивных механистических концепций о природе основных элементов вещества и характера их движения — представлений, скопированных с макроскопических предметов.

*) Эта точка зрения впервые была изложена автором на публичной лекции в Академии наук СССР в 1947 г.

§ 3. ОГРАНИЧЕННОСТЬ ЧИСТО КОРПУСКУЛЯРНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ И ПОЛЕВАЯ ТЕОРИЯ МАТЕРИИ

Развитие теории квантов поставило на очередь вопрос о решительном отказе от этих механистических взглядов.

Прежде всего опыт показал, что основное, по существу метафизическое, представление теории материи классической физики — представление об абсолютной «твёрдости» или, вернее, о неизменности основных её элементов (электронов и нуклонов) не соответствует действительности.

Мы знаем теперь, что электроны не «вечны», но могут, при сохранении общей энергии, возникать и исчезать совместно с их антиподами — позитронами, подобно тому, как при поглощении света исчезают, а при его испускании возникают световые кванты (фотоны).

Мы имеем весьма убедительные основания думать, что столь же изменчивыми окажутся и более тяжёлые частицы-нуклоны, когда мы сможем располагать энергиями свыше миллиарда вольт, необходимыми для создания пары нуклон — антинуклон*).

Во всяком случае, закон сохранения вещества в его прежнем классическом смысле, т. е. закон сохранения элементарных частиц, из которых, якобы, одних состоит вещество, можно считать уже теперь экспериментально опровергнутым.

Это обстоятельство ни в коем случае не следует рассматривать, как угрозу закону сохранения материи. Само собой разумеется, что материя сохраняется вместе с присущими ей свойствами — энергией, массой, количеством движения, моментом количества движения и т. д. Неверно лишь то, что материя состоит из неизменных элементарных частиц. Эта старая чисто корпускулярная, метафизическая модель вещества должна быть оставлена и заменена новыми представлениями, в основе которых лежит способность материи существовать не только в корпускулярной, но также и в другой некорпускулярной форме.

Это положение не ново. В теоретической физике оно пребывает себе дорогу уже свыше двадцати лет; при этом вторая форма проявления природы материи называется волновой или, более обще — полевой.

Волны или поля, о которых идёт речь, похожи на обычные — «классические» (например, электромагнитные) лишь в том отношении, что они распределяются в пространстве непрерывным образом; однако действия этих волновых полей проявляются в виде дискретных квантовых эффектов, которые мы в простейшем случае представляем себе в виде отдельных частиц.

*) В настоящее время мы знакомы лишь с фактом взаимной превращаемости протонов и нейтронов в ядре при одновременном испускании или поглощении электрона или позитрона и нейтрино.

Таким образом, новые квантовые поля представляют собой своеобразное диалектическое единство пространственно-временной непрерывности с дискретностью или квантовостью действия, — единства, для которого физики не могли до сих пор придумать, никакой иной модели, кроме модели классических волн, с одной стороны, и классических частиц — с другой.

Эта концепция неадекватна в том отношении, что корпускулярный и волновой аспект материи в ней как бы эквивалентны. В действительности же, как мы знаем, частицы или кванты, связываемые нами с представлением о поле, при надлежащих энергетических условиях могут возникать и исчезать (в отдельности или попарно*), тогда как полевая основа материи если и изменяется, то, во всяком случае, не может полностью исчезнуть, являясь, повидимому, основным средоточием динамических свойств материи, т. е. её энергии, количества движения и т. д.

§ 4. ЭЛЕМЕНТАРНЫЕ ЧАСТИЦЫ, КАК КВАНТЫ ПОЛЯ

Характер рассматриваемого соотношения в некоторой мере раскрывается в классической теории электромагнитного поля. В этой теории, согласно Лорентцу, носителем динамических свойств наэлектризованной материи является само поле, а не заряженные частицы, которые обычно трактуются как его «источники».

Если сумму «самовоздействия», т. е. силы, которую электрон оказывает сам на себя, и внешней силы, которую он испытывает со стороны других частиц, приравнять нулю, то его движение будет происходить в соответствии с законами ньютоновской или, точнее, эйнштейновской, релятивистской, механики. При этом энергия, количество движения и момент количества движения, которые ранее относились к электронам, оказываются свойствами электромагнитного поля и удовлетворяют законам сохранения. При таких условиях представляется естественным рассматривать электроны (и позитроны) не как источники электромагнитного поля, но как его продукты, совершенно оставляя в стороне силы их взаимодействия или самовоздействия и рассматривая их перемещение в пространстве и времени как результат изменения поля, в соответствии с законами сохранения энергии и т. д.

Эта программа, намеченная Лорентцем около 50 лет тому назад, оставалась до сих пор незавершённой из-за проблемы «внутреннего строения электрона», рассматриваемого как маленькое твёрдое тело.

Ныне, после полувекового развития квантовой теории, мы должны на новой основе вернуться к этой фундаментальной задаче и пересмотреть её заново.

*) Соответственно в случае фотонов и в случае электронов (отрицательных или положительных).

С этой новой точки зрения электроны и позитроны следует рассматривать не в прежнем смысле, как маленькие твёрдые шарики, но как особого рода «кванты» электромагнитного поля. Эти кванты не следует, конечно, смешивать с фотонами, которые соответствуют энергии поля, и то лишь в волновой зоне.

Идентичность всех электронов (в отношении величины их заряда и покоящейся массы) представляется с новой точки зрения очевидной, поскольку все они соответствуют одному и тому же полю. Вопрос о подразделении каждого электрона на бесконечно малые элементы и о взаимодействии последних друг с другом утрачивает всякий смысл: кванты наэлектризованной материи (с отличной от нуля покоящейся массой) также лишены какой-либо внутренней структуры, как и кванты света (покоящаяся масса которых равна нулю).

Как известно, нуклоны, образующие сложные ядра, также связаны с некоторым «нуклоновым» полем, являясь его квантами, причём энергии и импульсу этого поля соответствуют, повидимому, мезоны — заряженные частицы, играющие по отношению к нему такую же роль, как фотоны по отношению к электромагнитному полю.

Этот вопрос нуждается в дальнейшей разработке в связи с существованием мезонов с различными массами, которым, повидимому, соответствуют различные состояния одной и той же полевой системы.

Не углубляясь в эти ещё неразрешённые вопросы, мы можем, однако, с полной уверенностью утверждать, что законы макрофизики потому отличны от законов микрофизики, что объектами последних являются не «обыкновенные» частицы, для которых «классические» законы были сформулированы, а качественно отличные от них формы материи, именно квантованные поля, т. е. непрерывные в пространстве и времени поля, проявляющиеся в виде дискретных эффектов, с которыми связываются модельные представления о частицах, хотя бы и неизменных.

Механический материализм в отличие от диалектического материализма из всех форм движения (в широком смысле слова) рассматривает только одну простейшую форму — движение механическое. До последнего времени многим физикам казалось, что в области механики, и в частности квантовой механики, эта простейшая форма механического движения и связанный с ней механический детерминизм является единственно возможным. Но и здесь механистическая картина мира потерпела фиаско: микрофизические процессы утратили механистический характер и приобрели характер более общий и сложный, который можно было бы назвать квантово-полевым (или корпускулярно-полевым).

Зарубежные физики видят выход из трудностей, связанных со старой чисто механистической концепцией материи, только в от-

казе от детерминизма и причинности, т. е., в конце концов, в отказе от материализма. В отличие от них, советские физики должны искать решение вопроса в дальнейшем развитии теоретической физики на основе философии диалектического материализма. Основным направлением для дальнейшей работы, по мнению автора, является построение монистической полевой теории материи.

§ 5. ОСНОВЫ МОНИСТИЧЕСКОЙ ПОЛЕВОЙ ТЕОРИИ МАТЕРИИ

В существующих ныне вариантах полевой теории материи последняя рассматривается как комбинация квантованных полей, с одной стороны, и частиц — с другой, причём энергия всей системы связывается отчасти с полем, отчасти с частицами и, наконец, с взаимодействием поля и частиц. Эта дуалистическая трактовка приводит к сохранению всех тех принципиальных затруднений, которые свойственны чисто корпускулярной теории, приводя, в частности, к расходящимся или неопределённым выражениям для энергии, массы и т. д. Я полагаю, что эти затруднения коренятся в чисто корпускулярном облике, приписываемом веществу, рассматриваемому только как совокупность частиц, и что они могут быть устранены лишь путём полного и решительного отказа от ограниченных корпускулярных представлений. Представление о частицах как квантах поля не нуждается в самостоятельной основе: основой его должно явиться представление о квантованном поле.

При этом само поле рассматривается в двух формах своего проявления, тогда как понятие частиц в классическом смысле слова не фигурирует вовсе. Это значит, что все динамические свойства материи, ранее относившиеся к частицам и до сих пор связываемые с частицами, как, например, масса, энергия, количество движения и т. п., целиком и полностью переходят к полю.

При таких условиях самое название физического учения о материи и движении должно быть изменено таким образом, чтобы из него было совсем изгнано слово «механика» и ныне принятое название «квантовой механики» заменено названием квантово-полевой теории.

Я полагаю, что контуры этой теории мною правильно наме-
чены и что познание истинной природы материи лежит на этом немеханическом пути.

На этом же пути решается и поставленный выше вопрос о преодолении индетерминизма: квантовая теория поля является строго детерминистической. Кажущийся индетерминизм появляется в квантовой теории лишь тогда и постольку, когда и поскольку мы пытаемся согласовать друг с другом полевое и корпускулярное описание явлений. В квантово-полевой теории такое сопоставление оказывается возможным лишь на чисто статистической

основе, т. е. на основе теории вероятностей. Это обстоятельство, однако, несколько не затрагивает детерминизма физических явлений, рассматриваемых с квантово-полевой точки зрения.

§ 6. РАДИКАЛИЗАЦИЯ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ТЕОРИИ В СООТВЕТСТВИИ С КВАНТОВО-ПОЛЕВОЙ

В заключение этой статьи хочу дать краткий автореферат двух статей, опубликованных мною ранее и посвященных некоторым особенностям корпускулярной трактовки материи в связи с теорией относительности, но без учёта полевой теории*).

С чисто корпускулярной (заведомо неправильной) точки зрения представляется естественным еще более радикализировать отступления квантовой теории от классических представлений о движении неизменных материальных частиц.

Поскольку элементарные частицы могут исчезать и вновь возникать, представляется естественным рассматривать процессы, в которых они, кажущимся образом, сохраняются, как «регенеративные», — в том смысле, что движение частицы в пространстве может быть описано, как исчезновение ее в исходном месте и появление в другом, более или менее близком от исходного. Такое толкование непосредственно напрашивается из рассмотрения движения электрона в релятивистской теории Дирака.

Как показал Шредингер, при рассмотрении скорости электрона, движущегося по инерции, наряду с постоянной составляющей скорости, обнаруживается составляющая с частотой $2 m_0 c^2 / \hbar$, которая связывается Шредингером с переходом электрона из состояний положительной энергии в состояния отрицательной энергии.

Если заменить несуществующие состояния отрицательной энергии позитронами, то этот результат можно интерпретировать, как появление по соседству с рассматриваемым электроном пары электрон — позитрон, причем позитрон взаимно уничтожается с исходным электроном, который оказывается замененным новым электроном в новом положении. В случае частиц с конечной покоящейся массой такое «возрождение» частицы должно наблюдаться в бесконечно близком положении в соответствии с классическим представлением о непрерывности движения, в случае же фотонов, которые покоящейся массой не обладают, понятие о «траектории» частицы утрачивает всякий смысл.

*) Релятивистская квантовая механика сложных частиц, ЖЭТФ, 1947 г. — Теория движения частиц в релятивистской квантовой механике. ДАН, 1949 г.