

естественно подумать: Бог создал все атомы водорода или кислорода одинаковыми. И все... Но нет. Такой ответ его не устраивает. Факт тождественности, как любое явление, требует объяснения. Рассуждал Максвелл, наверное, примерно так: всякое созидание начинается с выработки плана постройки. Совокупность планов составляют законы природы. Поняв их, мы сможем постичь, как устроен и функционирует окружающий нас мир. В частности, ответить на вопрос, почему атомы одного элемента одинаковы.

Боюсь, я навязываю Максвеллу свои мысли. Все же хочется подчеркнуть, что квантовая механика объяснила, почему все атомы одинаковы. Правда, почему тождественны электроны, протоны, нейтроны, мне представляется, остается необъясненным фактом – одним из тех фактов, которые составляют основу наших попыток (весьма успешных, подчеркнем) объяснить устройство окружающего нас Мира.

Вернемся к классическим частицам. После довольно подробных разговоров об их тождественности, наверное, несколько странно прозвучит утверждение, что классические частицы не следует считать принципиально неразличимыми. Более того, тождественность и неразличимость следует различать. Поясним.

Классическая частица движется по определенной траектории. Зафиксировав частицу в какой-то момент времени, мы можем непрерывно следить за ее судьбой. Из-за этого нельзя наблюдаемую классическую частицу спутать с какой-нибудь другой частицей, а уж тем более заменить одну частицу другой. Классические частицы именно поэтому не следует считать принципиально неразличимыми, хотя они тождественны.

А вот квантовые частицы принципиально неразличимы. Их неразличимость – следствие отсутствия траектории, наличия у квантовой частицы волновых свойств, существования принципа неопределенности. Неразличимость – типично квантовое свойство.

С принципиальных позиций микромир, мир элементарных частиц, атомов и молекул, проще окружающего нас мира вещей. Хотя бы тем, что мир вещей построен из элементов микромира. Кроме того, все микрочастицы одинаковы, тождественны. Ранее мы поняли, что создание любого понятия, даже самого простого, как стол, например, требует выделения общих для всех столов свойств и пренебрежение менее существенными. Это выделение и пренебрежение – один из типов абстрагирования. Создавая понятие «электрон», нам не пришлось опускать какие-либо свойства, имеющиеся у электронов, чтобы всех их объединить одним понятием. Оно включает в себя все свойства электрона. Каждый электрон несет на себе свойства всех электронов. Это рассуждение, конечно, не означает, что понятие «электрон» является простым или самоочевидным. Само понятие простоты достаточно сложно. Нас серьезно обучали, что «электрон так же неисчерпаем, как атом». Что это точно означает, думаю, не знает никто. И думаю, что атом сложнее электрона. А любая элементарная частица проще, чем макроскопическая конструкция из элементарных частиц. Как мы уже сказали, и тем,

что любая элементарная частица принципиально неотличима от себе подобных.

Может показаться, что неразличимость элементарных частиц (в частности, электронов) несет лишь философскую нагрузку. Это не так. Неразличимость следует учитывать при расчетах разных величин, необходимых при описании физических свойств реально существующих объектов и результатов экспериментов над ними.

Рассмотрим несколько явлений, в которых принимает участие более чем один электрон.

Начнем с рассеяния электрона на атоме. В атоме есть свои электроны. При расчете вероятности процесса рассеяния необходимо учесть факт возможности обмена местами между рассеиваемым электроном и электронами атома. Такие процессы называют процессами обмена. Важно подчеркнуть, что отделить процесс рассеяния с обменом от рассеяния без обмена нет возможности принципиально. Существует единый процесс рассеяния. Зафиксировав рассеянный электрон, нельзя выяснить, тот это электрон, который столкнулся с атомом, или один из электронов атома. Вопрос, какой это электрон, столь же лишен смысла, как вопрос, какова координата электрона, если известен его импульс. Казалось бы, и при принципиальной различимости электронов процессы обмена надо было бы учитывать. Правильно!

Для того чтобы почувствовать, в чем различие, рассмотрим другой процесс рассеяния, напоминающий рассеяние электрона на атоме, – рассеяние мюона на атоме. Мюон очень похож на электрон, у него такой же заряд, как у электрона, но масса его приблизительно в 207 раз больше массы электрона. При рассеянии мюона на атоме отлична от нуля вероятность того, что атом захватит мюон, отдав один из своих электронов. Произойдет обмен электрона на мюон. В отличие от предыдущего случая, это реальный процесс, который можно отличить от рассеяния мюона без его захвата атомом. Более того, можно выделить те атомы, у которых один из электронов заменен мюоном, и исследовать их свойства.²

Неразличимость электронов проявляется не только в процессах рассеяния. Во всех процессах, в которых участвуют два или более электронов, проявляется их неразличимость. При взаимодействии атомов друг с другом процессы обмена электронами приводят к существованию дополнительной энергии взаимодействия между атомами – обменной энергии, не имеющей классического аналога.

Без учета неразличимости и следствий из нее (в частности, обменной энергии) нельзя объяснить существование ферромагнетизма, антиферромагнетизма и других более сложных магнитных явлений. Их так и называют – обменными.

Хотя формально (в уме, на бумаге) электроны ме-

² Атом водорода, в котором электрон заменен мюоном, получил специальное название – мюоний. Исследование свойств мюония – интересная область физики, принадлежащая как физике твердого тела, так и ядерной физике, а также физике элементарных частиц.