

клеточку таблицы Менделеева, почти ничего не изменит в строении атома. А мы знаем, как разительно могут отличаться атомы из соседних клеточек.

Различие свойств атомов с отличающимся числом электронов находит объяснение в положении электронов в атоме. Для понимания свойств атомов надо выяснить, во-первых, что из себя представляют состояния электрона, движущегося в поле, создаваемом ядром и совокупным действием всех электронов, а во-вторых, надо знать, как заполняют электроны атомные состояния.

Энергия электрона в атоме, как легко видеть на примере простейшего атома – атома водорода, принимает дискретные значения (энергетические уровни). Чего мы еще не рассказали, так это того, что состояние электрона характеризуют четыре числа. Три из них описывают орбитальное движение электрона, а четвертое – проекцию спина. От проекции спина обычно энергия электрона почти не зависит. Различаем состояний с противоположными спинами в хорошем приближении можно пренебречь, т.е. от роли спина можно абстрагироваться. Итак, решив первую половину задачи, мы знаем расположение энергетических уровней. Это позволяет приступить к заполнению уровней электронами.

Согласно принципу Паули в каждом состоянии может находиться один электрон, а если считать, что от проекции спина электрона энергия не зависит, то на каждом уровне может находиться не более двух электронов, при этом, если их два, они имеют противоположные направления спинов.

Заполняют электроны атомные уровни, руководствуясь требованием того, чтобы энергия была минимальна, но чтобы при этом не нарушался принцип Паули. Атом нейтрален. Значит, число электронов совпадает с числом протонов в ядре атома. Нильс Бор показал, что расположение электронов на атомных уровнях с учетом принципа Паули объясняет химические свойства атомов.

Принцип Паули столь важен, что мы решили показать, как он выводится из антисимметрии волновой функции. Пусть греческие буквы α и β обозначают состояния, а арабские цифры 1 и 2 – наборы четырех величин (трех координат и проекции спина). Тогда антисимметричное (по перестановке частиц) состояние двух электронов, в котором один находится в α -состоянии, а другой в β -состоянии, имеет следующую структуру:

$$\Psi(1,2) = \Psi_{\alpha}(1)\Psi_{\beta}(2) - \Psi_{\beta}(1)\Psi_{\alpha}(2).$$

Ясно, что если состояния совпадают ($\alpha = \beta$), то $\Psi(1,2) \equiv 0$ – в одном состоянии оба электрона находиться не могут.

Теперь спросим себя: верно ли, что неразличимость электронов не позволяет наблюдать и исследовать один электрон? Почти всегда отдельный электрон – идеализация. В обычной жизни и в эксперименте мы имеем дело с огромным коллективом электронов. Их число чаще всего не поддается подсчету. Для того чтобы изучить свойства электрона или с его помощью другой

физический объект, мы пытаемся выделить отдельный электрон, прибегая не столько к экспериментальным ухищрениям, сколько к помощи теоретических представлений, основанных на принципе неразличимости, так как уверены, что все электроны ведут себя одинаково.

Пометить электрон нельзя. Но можно попытаться изолировать его от других электронов. Например, локализовать электрон в определенной области пространства. Тогда можно говорить «этот электрон». Существует метод измерения магнитного момента электрона, основанный на резонансном отклике отдельного электрона на высокочастотный сигнал. Для проведения эксперимента в приборе локализуется один (!) электрон. Говорят, лаборант должен следить, чтобы электрон «не сбежал», так как процесс локализации очень труден. Пройдет время, неизбежно возникнет взаимодействие с другими электронами, и этот электрон потеряет свою индивидуальность – превратится в просто электрон.

Другими словами, некоторое время электрон может быть похож на обычный предмет. Но есть кардинальное отличие. Любой предмет (тот же стол, например) тоже может потерять свою индивидуальность – скажем, рассыпаться на щепки, превратиться в труху. При этом он перестанет быть столом. Электрон же, теряющий свою индивидуальность, остается электроном.

Кажется, были попытки построить квантовую электродинамику, в которой есть лишь один электрон, многократно (бесконечнократно) повторяющий себя. Воистину абстрактная теория! К сожалению, не знаю подробностей.

Неразличимость квантовых частиц делает понятия «электрон», «протон»,.. удивительно похожими на математические понятия. Число 5 всегда 5. Можно спросить, 5 – чего, но само число 5 не зависит от того, к чему его относят. Электрон всегда электрон, просто электрон, где бы он ни находился, в чем бы ни участвовал. Мы уже подчеркивали, к элементарной частице не применим вопрос: «Какая из...?» У нее отсутствует индивидуальность, как у многих математических понятий.

Когда бозоны объединяются, они создают более сложную частицу, и частица эта тоже бозон. А вот из фермионов могут получиться либо бозоны, либо фермионы. Если в сложную частицу объединяется четное число фермионов, получается бозон, если нечетное – фермион. Причина проста: у частицы, состоящей из четного числа фермионов, всегда целый или равный нулю спин, а у частицы, состоящий из нечетного числа фермионов, – полуцелый.

Прекрасный пример – два изотопа гелия. У тяжелого, наиболее распространенного изотопа ${}^4\text{He}$ в ядре 2 протона и 2 нейтрона, у легкого, весьма редкого изотопа ${}^3\text{He}$ – 2 протона и 1 нейтрон. В каждом из атомов обоих изотопов 2 электрона. Тяжелый изотоп – бозон, легкий – фермион. Макроскопические свойства изотопов гелия во многом различны.