

Тожественность и неразличимость

Когда речь идет о макроскопических предметах или даже таких небольших совокупностях атомов, как кристаллит в поликристалле, то каждый из них обладает своей особой неповторимостью. Как бы ни старались, к примеру, сделать все пули одинаковыми, опытный следователь сможет определить, какой из них был произведен смертельный выстрел. А вот элементарные частицы тождественны. Ни один электрон ничем не отличается от другого, то же можно сказать о протоне и нейтроне. Сложнее дело обстоит с атомами и молекулами. Молекулы и атомы обладают определенной структурой. Жесткой структурой. Заэкранированные от воздействия, они не будут изменяться. Если бы кто-то решил заменить «хранящуюся» молекулу на какую-то другую того же сорта (молекулу, скажем, воды на другую молекулу воды), мы не сумели бы определить, сделал ли он замену или не сделал. То же самое с атомами. Ни один атом не отличим от своего собрата. Любой атом, например, азота невозможно отличить от любого другого атома азота.

Правда (и именно поэтому дело обстоит несколько сложнее), и атом, и молекулу можно пометить. Например, возбудить электронную оболочку того сложного образования, которое в зависимости от состава именуется атомом или молекулой. Тем самым можно выделить какой-либо атом, какую-либо молекулу. Но не нужно думать, что метка (возбуждение) накрепко прикреплена к атому или к молекуле, как царапина на пуле, позволяющая ее идентифицировать. Если волею судьбы неподалеку от возбужденного атома окажется невозбужденный, а потом их траектории разойдутся, то мы принципиально не сможем сказать, остался ли возбужденным тот же атом, или возбуждение «перебралось» на другой.

Пометить атом или молекулу можно и более вычурным способом. Многие ядра существуют в разных модификациях, именуемых изотопами. Они отличаются друг от друга числом нейтронов при том же числе протонов. Число протонов задает число электронов в электронной оболочке атома и, тем самым, большинство его химических (атомных) свойств. Переместить нейтрон из ядра в ядро непросто. Нейтроны устойчиво метят атом. Это позволяет с помощью изотопов следить за перемещением отдельных атомов и молекул. Так и говорят – метод меченых атомов. Он широко применяется в разных сферах – от материаловедения до медицины.

Среди микрочастиц особенно важное и почетное место занимает электрон – необходимая составная часть любого атома. Электрон – первая открытая (Дж. Дж. Томсон, 1897) и наиболее изученная элементарная частица. В этом разделе мы будем говорить об электронах, хотя многое, о чем будет рассказано, относится и к другим частицам.

Как и другие элементарные частицы, все электроны тождественны. Тожественность как бы специально предназначена для создания понятия «электрон». Используя это понятие, мы не должны задумываться, идет ли речь о конкретном электроне или об электроне

вообще, об электроне как абстрактном понятии. Это одно и то же. Нет таких черт у электрона, которые можно отбросить, не превратив его в нечто иное.

Остановимся чуть подробнее на тождественности электронов. Сначала – с позиции классической физики. Вне зависимости от того, как мы описываем электроны – с помощью формул классической физики или квантовой, электроны не теряют своей тождественности. Электроны, прилетевшие из космического пространства в составе космических лучей, и электроны в лучевой трубке телевизора не отличаются друг от друга. Тожественность электронов и вообще элементарных частиц редко подчеркивается в классической физике. Не потому, что это – неважный факт, а потому, что воспринимается он как самоочевидный.

Ситуации, когда тождественность частиц необходимо учитывать, встречаются в классической физике нередко. Особенно в статистической физике. При построении теории идеальных газов¹ необходимо уметь подсчитывать физически отличающиеся состояния совокупности частиц газа. Вот цитата из пятого тома курса Л. Д. Ландау и Е. М. Лифшица «Статистическая физика»: «...получим всего [столько-то] возможных распределений, среди которых, однако, есть тождественные, отличающиеся лишь перестановкой частиц (частицы все одинаковы). Число перестановок N частиц есть $N!$ » и т. д. Упоминание об одинаковости частиц, как бы для подчеркивания очевидности сказанного, помещено авторами в скобки.

Великий Джеймс Клерк Максвелл (1831 – 1879, Боже, как мало он прожил!) знаменит главным образом формулировкой уравнений, носящих его имя. Уравнения Максвелла создали современную электродинамику, объединили электричество, магнетизм и оптику. Но, кроме того, Максвелл был одним из создателей кинетической теории газов. Естественно, он столкнулся с необходимостью учитывать тождественность частиц газа. И задолго до открытия структуры атома задумался: «Собственно говоря, почему все атомы одного элемента тождественны?» Действительно, все окружающие нас предметы хоть незначительно, но отличаются друг от друга, а атомы почему-то тождественны. Я вычитал его рассуждения на эту тему в опубликованных лет 30 назад переводах его лекций для сравнительно широкой аудитории (к сожалению, у меня нет их под рукой, когда я пишу этот текст). Меня поразила пронизательность Максвелла. Он понял, что причина неразличимости атомов – существование структуры. Атомы тождественны потому, что построены одинаково, по какому-то неизвестному в то время закону. А ведь, вспомните, атом в то время был последней структурной единицей вещества. Само слово «атом» означает неделимый.

Хочу поделиться мыслью, которая, правду сказать, не имеет прямого отношения к теме рассказа. Наверное, Максвелл был верующим человеком. В те времена неверующих было немного. Казалось бы, ему было

¹ Идеальный газ – типичный пример абстракции. Это газ, при описании свойств которого можно абстрагироваться от взаимодействия частиц газа друг с другом.