

Глава 1

Строение атома

В этой главе кратко изложены важнейшие теоретические представления, которые в дальнейшем используются при описании свойств неорганических веществ.

Основное понятие химии — вещество. Химики имеют достоверные сведения о более чем 158 миллионах веществ (на начало 2020 года), подавляющее большинство из которых не существует в природе, а получено искусственным путём. Вещества молекулярного строения состоят из молекул, а молекулы — из атомов, соединённых между собой ковалентными химическими связями. В веществах немолекулярного строения основными структурными единицами являются не молекулы, а атомы или атомные ионы.

Атомы состоят из положительно заряженного ядра и электронов, образующих электронную оболочку. Заряд ядра характеризует вид атомов, или химический элемент. К 2020 году достоверно известны 118 элементов, из которых около 90 существуют в природе, а остальные получены с помощью искусственных ядерных реакций.

1.1. Ядро атома. Ядерные реакции

Ядро — положительно заряженная центральная часть атома, в которой сосредоточена основная часть его массы. При этом у любого элемента ядро атома имеет очень маленький размер, примерно 10^{-15} м (фемтометры), что в 100 тысяч раз меньше радиуса атома, имеющего порядок величины 10^{-10} м ($= 1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ нм}$).

Ядро состоит из элементарных частиц двух типов: *протонов* (их число обозначается Z) и *нейтронов* (их число обозначается N). Протон обладает массой 1,0073 а. е. м. и зарядом +1 (за единицу электрического заряда принимается заряд электрона). Масса нейтрона равна 1,0087 а. е. м., а заряд равен 0. Общее число протонов и нейтронов в ядре называют *массовым числом* и обозначают A :

$$A = Z + N.$$

Заряд ядра равен числу протонов Z и совпадает с атомным (порядковым) номером элемента в периодической таблице (закон Г. Мозли, 1913).

Различные виды ядер, отличающиеся друг от друга зарядом или массовым числом, имеют общее название — *нуклиды*. В обозначении нуклидов порядковый номер элемента пишут слева внизу от символа нуклида, а массовое число ядра — слева вверху: A_ZX (например, ${}^{16}_8\text{O}$). Эту форму записи распространяют и на элементарные частицы: электрон по сравнению с протоном имеет ничтожно малую массу, поэтому ему приписывают массовое число 0: ${}^0_{-1}e$. Нейтрон и протон обозначают соответственно 1_0n и 1_1p .

Нуклиды с одинаковым Z , но разными A и N называют *изотопами*, это ядра одного и того же элемента, отличающиеся только массой. Химические свойства изотопов идентичны, некоторые физические свойства незначительно различаются.

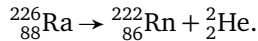
Обычно изотопы различных элементов не имеют специальных названий. Единственное исключение — водород, изотопы которого имеют специальные химические символы и названия: ${}^1_1\text{H}$ — протий, ${}^2_1\text{D}$ — дейтерий, ${}^3_1\text{T}$ — тритий. Это связано с тем, что среди всех элементов именно у водорода массы изотопов различаются в наибольшее число раз.

В химических реакциях ядра атомов не изменяются, а процессы, в которых происходит превращение одних ядер в другие, называют *ядерными реакциями*. Эти реакции бывают двух типов: самопроизвольные (радиоактивный распад) и искусственные.

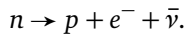
Все ядра подразделяют на стабильные и радиоактивные. Стабильные нуклиды не подвергаются радиоактивному распаду, поэтому они и сохраняются в природных условиях. Примерами стабильных нуклидов являются ${}^1_1\text{H}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{19}_9\text{F}$. Большинство природных элементов состоит из смеси двух или большего числа стабильных изотопов, наибольшее число стабильных изотопов — 10 — имеет олово. В редких случаях, например у фтора, алюминия или фосфора, в природе встречается только один стабильный изотоп, а остальные изотопы неустойчивы. Радиоактивных нуклидов известно значительно больше, чем стабильных. К 2020 году охарактеризовано более 3300 неустойчивых нуклидов (80 % из них — короткоживущие, с периодом полураспада меньше 1 ч), тогда как число устойчивых типов ядер — меньше 300.

Существует несколько видов радиоактивного распада, из которых простейшие — α - и β -. При α -распаде ядро испускает α -частицу (ядро атома гелия ${}^4_2\text{He}$), при этом массовое число уменьшается на 4, а заряд

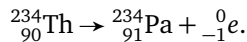
ядра — на 2, например:



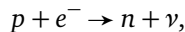
В результате β -распада нейтрон в ядре превращается в протон, ядро испускает электрон (β -частицу) и антинейтрино:



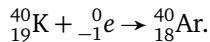
При β -распаде массовое число изотопа не изменяется, а заряд ядра увеличивается на 1, например:



Реакцией, противоположной β -распаду, является электронный захват, или β -захват. Ядро атома захватывает электрон с одного из внутренних электронных уровней, при этом протон превращается в нейтрон:



а заряд ядра уменьшается на единицу, например:



Электронный захват обычно сопровождается испусканием рентгеновского излучения, которое происходит при переходе одного из внешних электронов на освободившуюся вакансию во внутренней оболочке.

В реакциях радиоактивного распада, как и во всех ядерных реакциях, не выполняется закон сохранения массы: масса распадающегося ядра не равна сумме масс образующихся частиц. Часть массы может превращаться в энергию, однако изменение массы в ядерных реакциях обычно очень мало по сравнению с массами протона и нейтрона. Общее число протонов и нейтронов не изменяется, поэтому можно говорить о сохранении массового числа A : в уравнениях ядерных реакций сумма верхних индексов в обозначениях ядер и элементарных частиц одинакова в левой и правой частях. Аналогично сумма нижних индексов в левой части уравнения совпадает с таковой в правой части; это означает, что общий электрический заряд системы в ядерных реакциях не изменяется.

Скорости распада у разных нуклидов могут сильно различаться. Каждый нуклид характеризуется *периодом полураспада* $T_{1/2}$ — временем, за которое самопроизвольно распадается половина ядер. Период полураспада — важная и постоянная характеристика ядра, он не зависит ни от количества ядер, ни от внешних условий (температура, давление), ни от времени. Для разных нуклидов период полураспада может составлять от 10^{-10} секунд до 10^{10} лет. Так, для урана-238

$T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ лет, этот изотоп распадается медленно. Для радия-226 $T_{1/2} = 1600$ лет, поэтому активность радия больше, чем урана. Чем меньше $T_{1/2}$, тем быстрее протекает радиоактивный распад.

На период полураспада не влияют даже химические реакции, так как последние затрагивают лишь внешний электронный уровень атома, но не изменяют свойства ядра. Так, например, период полураспада урана один и тот же и в простом веществе, и в любых соединениях урана — оксидах, фторидах, солях.

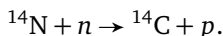
Период полураспада входит в уравнение радиоактивного распада, которое описывает зависимость массы m распадающегося вещества от времени:

$$m(t) = m(0) \left(\frac{1}{2}\right)^{t/T_{1/2}}.$$

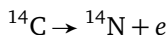
Это уравнение универсально, оно справедливо для всех неустойчивых нуклидов.

Радиоактивные нуклиды широко применяют в различных областях науки и техники. С их помощью определяют утечку жидких и газообразных веществ из водопроводов и трубопроводов, следят за перемещением лекарств в организме человека, изучают механизмы химических реакций. Радиоактивное излучение некоторых нуклидов используют в радиационной терапии онкологических заболеваний.

Ещё одно применение радиоактивных нуклидов связано с определением возраста геологических объектов (геохронология). Один из наиболее распространённых методов — радиоуглеродный — основан на измерении содержания тяжёлого углерода ^{14}C . Этот радиоактивный нуклид непрерывно образуется в верхних слоях земной атмосферы при бомбардировке атомов азота нейтронами, входящими в состав космических лучей:



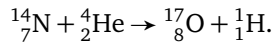
В форме оксида углерода (IV) тяжёлый углерод поглощается всеми растениями в процессе фотосинтеза, а также попадает в организм животных, питающихся этими растениями. Там он распадается, испуская β -частицы:



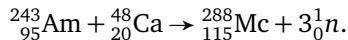
с периодом полураспада 5715 лет. Содержание углерода-14 в живых тканях постоянно, так как убыль тяжёлого углерода за счёт радиоактивного распада компенсируется его непрерывным поступлением в организм из окружающей среды. Когда организм погибает, поглощение им тяжёлого углерода прекращается, а уже имеющийся ^{14}C

распадается. Измеряя содержание радиоактивного углерода в исследуемом образце (путём подсчёта числа β -распадов в единицу времени), можно определить его возраст.

Превращения ядер могут происходить не только самопроизвольно, но и при их бомбардировке другими ядрами или элементарными частицами. Первая искусственная ядерная реакция была осуществлена Э. Резерфордом в 1919 году при бомбардировке ядер азота α -частицами:



С помощью ядерных реакций были синтезированы неизвестные ранее элементы: технеций, франций, астат, а также все элементы с порядковыми номерами выше 93. Так, например, ядра 115-го элемента московия (Mc) были впервые получены в 2003 году в Дубне в результате ядерной реакции:



1.2. Квантовые числа электрона.

Электронная конфигурация атома

Атом в целом электронейтрален, он не имеет электрического заряда, поэтому общее число электронов в атоме равно заряду ядра Z и совпадает с порядковым номером элемента. Для описания электронных оболочек атомов используют законы квантовой механики.

Согласно квантовой механике состояние каждого электрона в атоме описывается энергией и волновой функцией, которую называют *орбиталью*. Орбиталь характеризует плотность электронного облака, создаваемого данным электроном в атоме. Для того чтобы найти энергии и орбитали всех электронов в атоме, надо решить уравнение Шрёдингера — основное уравнение квантовой механики. Ввиду сложности уравнения мы не будем его записывать и тем более решать, а ограничимся готовыми результатами.

Каждая орбиталь в атоме характеризуется тремя квантовыми числами — n (главным), l (орбитальным, или побочным) и m_l (магнитным), которые подчиняются следующим правилам.

1. Главное квантовое число n определяет общую энергию электрона на данной орбитали (номер энергетического уровня). Оно может принимать любые целые значения начиная с единицы и до бесконечности: $n = 1, 2, 3, \dots, \infty$.

Главное квантовое число ∞ означает, что в этом состоянии электрон не связан с ядром, он удаляется из атома и атом превращается в ион.