# Радиоактивность. Ионизирующие излучения

Атомное ядро

Известно, что атомное ядро является небольшим образованием, состоящим из нуклонов, которые включают два типа элементарных частиц: протоны и нейтроны. Протон имеет положительный электрический заряд, равный по величине заряду электрона. Масса протона в 1840 раз превышает массу электрона. Нейтрон почти на 0, 1% больше, чем протон, и не имеет электрического заряда.

Каждое ядро характеризуется атомным числом (номером заряда) Z и массовым номером A. Z равно количеству протонов и общему числу нуклонов в атомном ядре. Ядра, которые имеют одно и то же атомное число, но разные массовые числа, называются изотопами. Изотопы элемента являются почти идентичными в химическом отношении.

В атомном ядре действуют три вида сил:

(1) Прочные ядерные силы притяжения, действующие на близком расстоянии, неэлектрические по своей природе. Они действуют между нуклонами, удерживая их вместе.

(2) Электрические силы, которые меньше по величине, являются силами отталкивания между сближенными протонами, но играют важную роль.

(3) Слабые взаимодействия, которые значительно слабее, чем ядерные и электромагнитные силы. Они ответственны за бета-распад.

В природе существует свыше 100 изотопов естественного происхождения и около 300 искусственно созданных радиоактивных элементов. Но есть наиболее неустойчивые нуклиды, которые имеют тенденцию к спонтанному разрушению.

Радиоактивность

Радиоактивность - спонтанный распад (дезинтеграция) атомного ядра с излучением субатомных частиц и электромагнитных лучей. Этот феномен был обнаружен в 1896г французским физиком Беккерелем. Он обнаружил, что уран испускает невидимые лучи, которые могли проходить через непрозрачный контейнер и действовать на фотографическую пластину. Вскоре Пьер и Мария Кюри обнаружили другие радиоактивные элементы: полоний и радий. Радиоактивность скоро была признана наиболее концентрированным источником энергии из тех, которые были уже известны.

Вскоре было обнаружено, что урановое излучение образовано тремя компонентами: α-, β- и γ-лучами. Резерфорд и Содди показали, что радиоактивность является результатом распада атомного ядра. В процессе распада ядро одного химического элемента превращается в ядро другого элемента. Существует два основных вида спонтанного распада ядер.

α-распад. Этот тип распада обычно наблюдается в тяжелых неустойчивых ядрах. При этом разрушается атомное ядро X ("материнское ядро"), образуется α-частица и новое ядро Y ("дочернее ядро"). α-частица представляет собой ядро гелия, имеющее два протона и два нейтрона:

ZXA → Z-2YA-4 + 2α4 ; 2α4 = 2He4

Таким образом, атомный номер дочернего ядра уменьшен на два и массовый номер на четыре по отношению к материнскому ядру. Кинетическая энергия α-частицы очень большая, и она покидает материнское ядро с большой скоростью.

При α - распаде дочернее ядро может переходить в возбужденное состояние. Электроны занимают более высокие энергичные уровни, которые неустойчивы. Поэтому в течение короткого времени, они перемещаются на более низкий энергетический уровень и избыток энергии испускается в форме γ-лучей, представляющих собой электромагнитные волны, или фотоны. Они полностью эквивалентны световым волнам и рентгеновским лучам, которые испускаются возбужденными атомами, но имеют большую энергию. Длина волны - лучей короче, чем длина волны рентгеновских лучей:

ZXA → Z-2YA-4 + 2α4 +γ

β-распад наблюдается в неустойчивых изотопах более легких ядер (гидроген, натрий, азот и т.п.). β - частица испускается материнским ядром и образуется дочернее ядро. Есть три типа β-распада: электронный β- распад, позитронный β- распад и электронный захват.

a) электронный β-распад: из материнского ядра образуется электрон (-1β0-частица). Атомный номер дочернего ядра повышается на единицу по сравнению с материнским ядром. Также образуется антинейтрино – незаряженная частица, практически не имеющая массы - v–:

ZXA → Z+1YA + - 1β0 +v–

b) позитронный β- распад из материнского ядра испускаются позитрон (+1β-частица) и нейтрино (v). Атомный номер дочернего ядра уменьшается на единицу по сравнению с материнским:

ZXA → Z-1YA + +1β0 +v

Позитроны - положительно заряженные частицы с такой же массой, как электрон. Они являются античастицами электронов.

Полагают, что все элементарные частицы имеют античастицы (антипротоны, антинейтроны и т.п.). Вышеупомянутое антинейтрино является античастицей нейтрино. Когда некоторая частица взаимодействует со своей античастицей, они взаимоуничтожаются с образованием γ-лучей.

c) электронный захват. Один из атомных электронов взаимодействует с ядром (чаще всего с К-уровня, но может и с L-, M- уровней) и захватывается им. В результате протон ядра превращается в нейтрон:

ZXA + - 1e0 = Z-1YA + v

Поскольку при этом освобождаются места на внутренних оболочках и на них переходят электроны с высших оболочек, то при этом излучается характеристическое рентгеновское излучение.

В основе всех типов распадов лежат превращения протона в нейтрон и нейтрона в протон. γ - лучи испускаются в дочерних ядрах при переходе электронов с высших энергетических уровней на низшие.

Активность. Закон ядерного распада

Существует два вида радиоактивности: естественная и искусственная. Естественная радиоактивность происходит спонтанно без любого внешнего воздействия. Она является результатом нестабильности некоторых ядер. Неустойчивые изотопы превращаются в изотопы других химических элементов. Искусственная радиоактивность является распадом искусственно полученных изотопов в результате ядерных реакций.

Активность - показатель дезинтеграции радиоактивных элементов, или показатель уменьшения количества радиоактивных ядер в процессе их распада. Единицей измерения является беккерель (Бк). Один 1Бк равен одну распаду в секунду. Иногда применяют другую единицу измерения - кюри (Ки). 1Кюри составляет 3, 7\*1010 распадов в секунду. Например, активность 1г радия составляет 3, 7\*1010 Бк, или 1Ки.

Ядерный распад является вероятностным процессом. Невозможно точно предсказать, когда разрушится данное ядро. Но количество ядер постоянно уменьшается. Изменение dN числа ядер от исходного числа N0, происходящего в течение короткого времени dt, пропорционально N0 и λ:

dN/dt = - λ·N0 (1)

Знак минус указывает на то, что N0 уменьшается, и dN отрицательно. Константа λ зависит от типа ядер и называется константой радиоактивного распада. Решением уравнения (1) является функция

N = N0·e - λt

Эта функция подразумевает, что если во временя t = 0 имеется N0 ядер, то через время t число оставшихся ядер будет N. Эта функция называется экспоненциальной формулой распада.

Удобно характеризовать ядерный распад периодом полураспада. Период полураспада – это время, необходимое для распада половины исходных ядер. Различные радиоактивные ядра имеют период полураспада в широком диапазоне (например, от 4, 5 миллиардов лет для урана до 10-4 сек для одного из изотопов радия).

Ионизирующие излучения

Радиоактивный распад ядер приводит к образованию нескольких типов ионизирующих излучений. Такое излучение, проходя через вещества, ионизирует их атомы и молекулы, то есть превращает их в электрически заряженные частицы - ионы. Термин "ионизирующие излучения" включает не только радиоактивные излучения, но также рентгеновские лучи.

Все виды ионизирующих излучений могут быть подразделены на два типа: (1) атомное излучение:α - частицы, β-частицы (электроны и позитроны), протоны, нейтроны и т.п.; и (2) волновое излучение - γ-лучи и рентгеновские лучи.

Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом

α - частицы покидают материнские ядра с большой скоростью. При прохождении через вещество, их движение замедляется и прекращается из-за взаимодействия с электронами атомов вещества.β - частицы и протоны подвергаются также частым столкновениям с атомными электронами. Они передают электронам некоторую энергию, а также действуют на электроны электрическим полем. В результате радиоактивные частицы возбуждают и ионизируют атомы вещества. При одиночном столкновении α-частица передает только небольшую часть своей энергии. Пока частица остановится, происходит много столкновений. В результате в веществе остается след, который состоит из нескольких десятков тысяч ионов. При уменьшении кинетической энергии радиоактивной частицы она приобретает два электрона и становится нейтральным атомом гелия.

Поскольку α-частица намного больше, чем электрон, она практически не отклоняется при столкновениях, и ее путь представляет собой почти прямую линию. Этот путь α-частиц и протонов в веществе очень короткий. Средний диапазон пройденного до остановки расстояния изменяется обратно пропорционально плотности среды. Проникающая способность α-частиц небольшая. Они проходят только около 4см в воздухе и не проникают через лист бумаги и верхние слои клеток кожи человека.

β-частицы. Электроны и позитроны вылетают из материнских ядер с значительно большими скоростями, чем α- частицы. Однако, в отличие от α-частиц, скорости α-частиц значительно различаются. α-частицы проникают намного глубже в вещество. Они также вступают в конкуренцию с электронами атомов среды и теряют энергию, главным образом, возбуждая и ионизируя атомы. Кинетическая энергия электрона значительно меньше, чем у α-частицы. Ее величина достаточна, чтобы ионизировать только несколько десятков атомов. Из-за небольшой массы, β-частицы сильно отклоняются при каждом столкновении с электронами атомов вещества. Следовательно, электроны распространяются в веществе не по прямой линии, а произвольно. Диапазон пробега электронов в воздухе составляет несколько десятков сантиметров. Они могут быть остановлены несколькими сантиметрами дерева.

Диапазон пробега позитронов является приблизительно такими же, как и у электронов. В конечном счете позитрон замедляется, и взаимодействуя с электроном, уничтожается с испусканием γ-лучей.

γ- лучи ионизируют вещество, теряя энергию, передавая ее электронам атомов вещества. Они обладают широким диапазоном длин пробега в веществе и могут пройти даже через тело человека. Для защиты от γ-лучей, в зависимости от их энергии, требуется толстый экран, сделанный из тяжелого вещества, например, свинца. γ-лучи передают энергию электронам в ходе трех процессов:

a). Фотоэлектрический эффект проявляется, если γ-лучи обладают сравнительно небольшой энергией, а также при взаимодействии с веществом рентгеновских лучей. Фотон γ-луча поглощается атомом, в результате чего освобождается электрон. Этот процесс наиболее вероятен для атомов с большими зарядовыми числами.

б). Если энергия фотонов γ-лучей больше, чем энергия ионизации атомов вещества, то доминирует эффект Комптона. Фотон передает некоторую (но не всю) энергию электрону атома и может ионизировать еще некоторое число атомов.

c). Создание пары электрон-позитрон. Если энергия γ-фотона больше, чем в вышеуказанных процессах, она поглощается атомным ядром, и образуется пара частиц (электрон и позитрон).

Вероятность поглощения γ-лучей уменьшается при нарастании их энергии, поскольку при увеличении энергии γ-лучей они становятся более проникающими.

Нейтроны

Нейтроны являются незаряженными частицами и производят ионизацию косвенно, взаимодействуя первоначально с атомными ядрами, а не с электронами. Они обладают широким диапазоном длины пробега в веществе. Нейтроны содержатся в ядрах всех атомов, кроме водорода. Свободные нейтроны получают в ядерных реакциях. Они вылетают из атомного ядра с различными скоростями и энергией. Нейтроны замедляются при столкновениях с ядрами атомов вещества, при этом происходит передача энергии. Возбужденное ядро вещества испускает протон и γ-лучи. Когда энергия нейтрона уменьшается, он захватывается атомным ядром.

Обнаружение и измерение излучений

Существует много типов приборов, которые используются для обнаружения ионизирующих излучений. Наиболее часто применяют счетчики, которые являются очень чувствительными детекторами α-частиц, но меньше - для γ - лучей. Типичный счетчик представляет собой цилиндр из металла, стенки которого используются как анод. Тонкий провод вдоль оси цилиндра служит катодом. Цилиндр заполнен инертным газом аргоном.

Если аргон находится в молекулярном состоянии, между анодом и катодом электрический ток не проходит. Под действием излучений происходит ионизация атомов аргона и проходит кратковременный электрический ток. Если напряжение между анодом и катодом достаточно велико, каждый электрон, образованный действием на газ излучения, производит несколько второстепенных электронов, которые, в свою очередь, производят другие. В результате электрические импульсы усиливаются и могут быть визуализированы или записаны. Такой детектор называется счетчиком Гейгера-Мюллера. Он компактен и удобен в использовании.

Есть также другие типы счетчиков излучения, например - сцинтилляционный счетчик. Такие счетчики имеют сравнительно высокую эффективность обнаружения излучения. Они наиболее широко используются в решении биомедицинских задач. Сцинтилляционный счетчик состоит из кристалла, который искрится, то есть выдает вспышки видимого света, когда на его атомы попадает ионизирующее излучение.

Вспышки света считают с помощью фотоэлектрического множителя чувствительного устройства. Фотоны видимого света, входя в это устройство, вызывают в нем генерирование электрических импульсов, которые подвергаются очень сильному усилению. Общее число импульсов пропорционально суммарному излучению. Сцинтилляционные счетчики не только измеряют интенсивность излучения, но помогают также идентифицировать его природу.