Лекция 3. ОСОБЕННОСТИ ЯДЕРНЫХ РЕАКЦИЙ

1. Радиоактивный распад

- **Естественные** радиоактивные ядра это ядра нуклидов, встречающихся в природе.
- **Искусственные** радиоактивные ядра нуклидов получают облучением (бомбардировкой) нейтронами, протонами или другими частицами ядер стабильных нукулидов в ускорителях, а также в результате переработки продуктов деления, образующихся в ядерных реакторах.
- **Последовательность радиоактивных распадов, в которой дочерние ядра нуклидов, получающиеся в результате предыдущего распада, являются материнскими ядрами нуклидов для последующего распада.**
- **Эта последовательность, называемая *радиоактивным семейством или рядом*, заканчивается получением устойчивого ядра.**

- На практике для указания временных характеристик распада чаще всего используют период полураспада $T_{1/2}$т.е. время, за которое распадается половина исходных ядер
- $N_я / N_{я0} = \exp(-\lambda T_{1/2}) = 1/2$.
- Из этого соотношения вытекает связь между периодом полураспада и постоянной распада: $T_{1/2} = 0{,}693/\lambda$.
- Радиоактивный распад ядер разделяется на следующие виды:
- 1) α-распад; 2) β-распад; 3) γ-излучение; 4) вылет нуклонов. Он может происходить одновременно по нескольким каналам. Рассмотрим каждый из процессов радиоактивного распада более подробно.

- **1. В процессе α-распада из радиоактивного ядра испускается ядро гелия**

- 2. **В процессе β-распада из радиоактивного ядра самопроизвольно испускаются либо электрон (β^--распад), либо позитрон (β^+-распад), которые возникают непосредственно в момент распада (в ядре их нет). Третьим видом β-распада является захват ядром электрона из электронной оболочки своего атома (*e*-захват). В результате β^--распада заряд ядра Z увеличивается, а в случае β^+-распада или *e*-захвата уменьшается на единицу.**
- **Энергия β-распада распределяется между дочерним ядром и частицами в соответствии с законами сохранения энергии и импульса.** Часть этой энергии может вызвать возбуждение материнского ядра или электронных оболочек дочернего атома. Затем эта энергия выделяется в виде γ-излучения.
- **Среди продуктов β-распада имеется еще третья нейтральная частица нейтрино (ν), уносящая недостающую по балансу энергию**. Ее масса покоя близка к нулю характерное свойство нейтрино — это огромная проникающая способность. Нейтрино может без взаимодействия с веществом пройти сквозь всю толщину Земли. Мощным источником потока нейтрино ~10^{17} част./(м^2·с) являются ядерные реакторы

3. В процессе γ-излучения радиоактивное ядро самопроизвольно переходит из возбужденного состояния в менее возбужденное или основное состояние.

Излучение γ-квантов является основным процессом освобождения ядра от избыточной энергии.

При этом не изменяется нуклонный состав ядра. Практически все дочерние ядра (продукты α- и β- распада) испускают γ-кванты, так как они образуются обычно в возбужденном состоянии. Энергия γ-квантов после α-распада в основном не превышает 0,5 МэВ, а после β-распада составляет 2 - 2,5 МэВ. Такое γ-излучение представляет основную радиационную опасность для людей при обращении с радиоактивными веществами.

4. Радиоактивный распад с вылетом нуклонов является сопутствующим процессом.

- **После β-распада *дочернее ядро иногда образуется в таком сильновозбужденном состоянии, что энергия возбуждения (8—11 МэВ) превышает энергию связи нуклона в ядре.* Поэтому происходит испускание из дочернего ядра не γ-кванта, а нуклона, который в этом случае называют *запаздывающим.***
- **При β^+-распаде образуется запаздывающий протон, при β^--распаде — запаздывающий нейтрон**
- Испускания запаздывающих нуклонов обнаружены только у искусственных ядер, имеющих сильное отличие по составу нуклонов от стабильных значений.
- Период полураспада изменяется в очень широких пределах (10^{-7} с — $2 \cdot 10^{17}$ лет).
- Одной из характеристик радиоактивного вещества служит его активность - число распадов ядер этого вещества в единицу времени.
- **За единицу измерения активности вещества принимают Беккерель, равный 1 расп/сек. Другая единица - Кюри: 1 Кюри =3,7 х 10^{10} расп/сек.**

2. ПРОЦЕСС ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

2.1. Возможность деления.

Поскольку энергия связи ядра - это энергия, выделяющаяся при его образовании из протонов и нейтронов, **превращение тяжелого ядра в два более легких и таким образом более устойчивых, должно сопровождаться выделением свободной энергии.**

Если энергетически выгодный процесс в принципе возможен, но не происходит немедленно, это значит, что его течению препятствует **энергетический барьер.**

Барьер при делении определяется силами поверхностного натяжения, которые стремятся сохранить сферическую форму ядра, соответствующую минимуму поверхностной потенциальной энергии.

Следовательно, начальное изменение формы ядра, которое может привести к делению, возможно только при получении извне какого-то количества энергии, то есть при возбуждении ядра

2. ПРОЦЕСС ДЕЛЕНИЯ ЯДЕР

2.2. Делящиеся и сырьевые нуклиды.

Наибольший интерес представляет деление тяжёлых ядер под действием нейтронов, поскольку в результате каждого акта деления появляются новые свободные нейтроны, способные вызвать последующие акты деления, т. е. возникает основа для получения самоподдерживающейся цепной реакции.

Например, при поглощении нейтронов ядрами U-235 или U-238 **фактически делятся составные ядра U-236 и U-239.**

$$U-235+{}^{1}_{0}n \rightarrow U-236^{*} \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}X + {}^{A_2}_{Z_2}Y$$

$$U-238+{}^{1}_{0}n \rightarrow U-239^{*} \rightarrow {}^{A_1}_{Z_1}X + {}^{A_2}_{Z_2}Y$$

Минимальная энергия возбуждения составного ядра есть энергия связи присоединившегося к ядру нейтрона.

Если эта энергия связи больше величины энергетического барьера, то исходное ядро может делиться при поглощении нейтронов с любой кинетической энергией.

Если же энергия связи меньше величины барьера, то деление возможно лишь при условии, что кинетическая энергия нейтрона достаточно высока, чтобы в сумме с энергией связи превзойти величину барьера.

<u>таблица 2.2</u>. *Энергия связи Есв и энергия порога деления Епд для некоторых нуклидов (МэВ).*

Исходный нуклид	Есв составного ядра	Составной нуклид	Епд составного ядра
Th-232	4,79	Th-233	5,9
U-233	6,84	U-234	5,5
U-235	6,55	U-236	5,75
U-238	4,76	U-239	5,85
Pu-239	6,53	Pu-240	5,5

Деление **U-233, U-235, Pu-241** возможно **нейтронами любых энергий. Такие нуклиды называются делящимися.**

Пороги деления составляют у Th-232 около 1,2МэВ, а у U-238 - около 1 МэВ они не могут поддерживать цепную реакцию и называются пороговыми.

В результате захвата ядром нейтрона, не вызвавшего деления, может образоваться другой делящийся нуклид. В таком случае исходное ядро называется сырьевым.

В результате захвата нейтрона ядром U-238 и последующего двойного бета-распада (ядер U-239 и Np-239) образуется **сырьевой нуклид Pu-239, делящийся при низких энергиях нейтронов.**

Другим важным сырьевым нуклидом является широко распространенный в природе **Th-232, ядро которого при захвате нейтрона образует ядро U-233.**

2.3. Осколки и продукты деления.

В момент деления ядра электростатическое отталкивание разбрасывает осколки, и потенциальная энергия их кулонова поля переходит в **кинетическую энергию осколков деления, равную приблизительно 180 МэВ**.

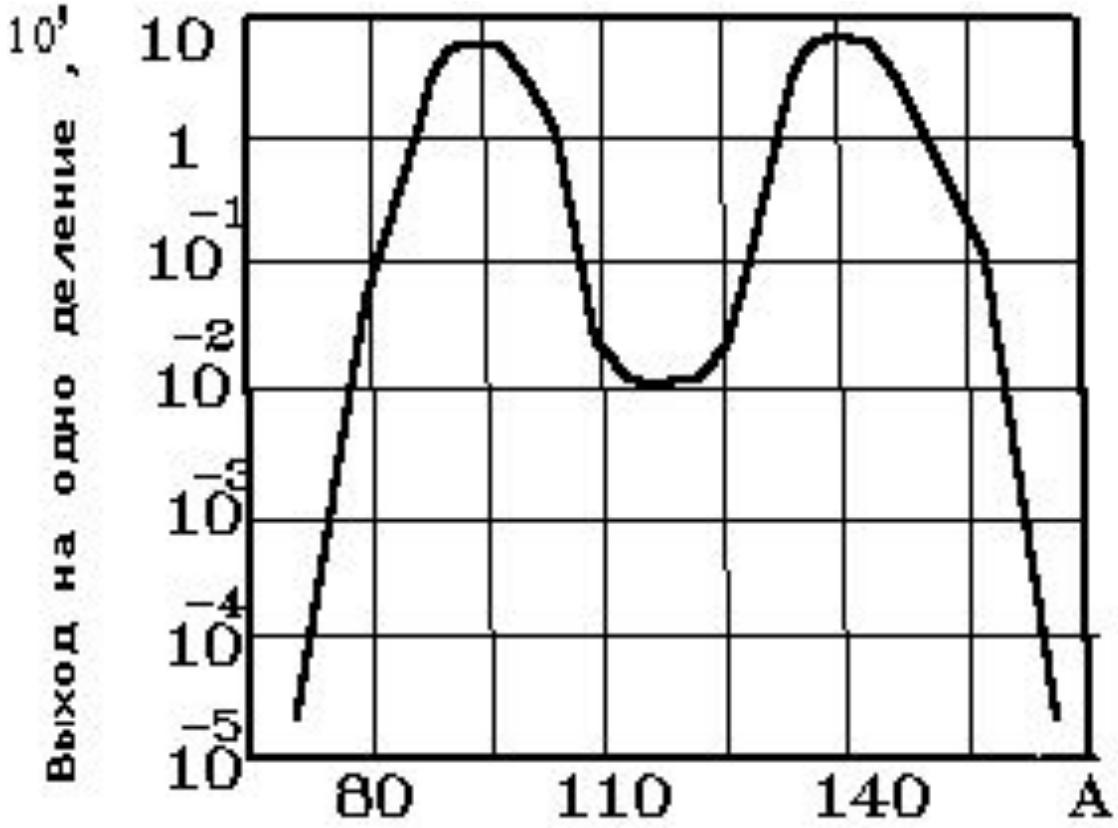
Ускорение осколков заканчивается при достижении ими границ исходного атома r приблизительно равно 10^{-11} м

Двигаясь в веществе, осколки ионизируют другие атомы, и их кинетическая энергия превращается в энергию теплового движения среды. Нейтроны и γ - кванты, испускаемые возбужденными осколками, называются мгновенными. При делении ядер образуются также - частицы и протоны .

После торможения в среде осколки деления превращаются в нейтральные атомы и называются продуктами деления.

- При делении нейтронами отношение масс осколков примерно **3:2.**
- **Продукты деления перенасыщены нейтронами и являются - радиоактивными.**
- **Каждый из атомов -продуктов деления претерпевает в среднем по три -распада, прежде чем приобретает стабильность. Иногда эти распады сопровождаются гамма-излучением, а иногда - испусканием нейтронов.**
- **Нейтроны, появляющиеся спустя некоторое время (до десятков секунд) после деления, называются запаздывающими.**
- **Энергия радиоактивных распадов распределяется между - бета-частицами и нейтрино , и значительная часть её уносится гамма - квантами, сопровождающими бета - распад.**
- **Энергия бета-частиц и гамма - квантов превращается в теплоту, которая выделяется в течение длительного времени и обуславливает так называемое "остаточное тепловыделение".**
- **Бета- и гамма- излучения продуктов деления приводят к высокой радиоактивности отработанного ядерного топлива.**

Зависимость выхода продуктов деления тепловыми нейтронами от массового числа



Ядерные реакции

При движении частиц в веществе они взаимодействуют с его атомами, т. е. с ядрами и окружающими их электронами.

Характер ядерного взаимодействия определяется видом частицы, ее энергией, свойствами вещества и условиями взаимодействия.

В частности, столкновение частиц с ядром вызывает различные ***ядерные реакции,*** **в результате которых происходит изменение заряда или массы частицы либо испускаются γ-кванты**

Ядерные реакции записывают в виде уравнения

- Ядерные реакции, как и химические, записывают в виде уравнения. В левой части уравнения указывают исходное ядро $^{A_1}_{Z_1}X$ и воздействующую частицу *a*, а в правой части — продукты ядерной реакции (новое ядро $^{A_2}_{Z_2}Y$ и выделяющуюся частицу b):

$$^{A_1}_{Z_1}X + a \rightarrow C^* \rightarrow b + {}^{A_2}_{Z_2}Y,$$

- где *C** — составное (промежуточное) ядро в возбужденном состоянии.

.

- Тип ядерной реакции определяется видом воздействующей и выделяющейся частиц (*a, b*).
- Если они совпадают (*a, a*), реакцию называют *рассеянием* частицы *a.* В этом случае состав ядра не изменяется.
- Если в ядерной реакции частица *a* исчезает (поглощается ядром), а вместо нее появляется новая частица *b,* состав ядра изменяется: происходит *ядерное превращение* .
- По механизму взаимодействия ядерные реакции можно разделить на два вида:
- - прямые ядерные реакции;
- - реакции с образованием составного ядра.

- Большинство ядерных реакций с кинетической энергией частиц менее 10 МэВ происходит с образованием составного ядра, Такое ядерное взаимодействие происходит в два этапа.
- Первый этап включает захват частицы ядром и возникновение составного ядра, которое находится в возбужденном состоянии**. Энергия возбуждения *E** складывается из кинетической энергии частицы $E_к$ и энергии связи присоединившегося нуклона $E_{св}$:**
- $E^* = E_к + E_{св}$
- Энергия связи нуклона в среднем равна 8 МэВ, поэтому составное ядро приобретает достаточно высокую энергию возбуждения.

- **При захвате нейтрона** с образованием составного ядра **скорость вылетевшего вторичного нейтрона обычно меньше захваченного первичного нейтрона**. Такой процесс носит название ***неупругого (резонансного) рассеяния*** **частицы.**
- В некоторых случаях **после испускания γ-квантов возбужденное ядро переходит в основное энергетическое состояние. Такой процесс взаимодействия частицы с ядром называют *радиационным захватом частицы*.**
- Образование составного ядра возможно только при определенных значениях кинетической энергии частицы . Если кинетическая энергия частицы отличается от этих значений**, составное ядро не образуется. В этом случае при столкновении частицы с ядром происходит ее *упругое* (*потенциальное*) *рассеяние.***

- **Во время ядерной реакции сохраняется общее число нуклонов и суммарный заряд, а происходит только перераспределение нуклонов и заряда между ядрами и частицами.**
- Ядерные реакции сопровождаются изменением кинетической энергии взаимодействующих частиц.
- Все ядерные реакции подчиняются законам квантовой механики. Поэтому можно рассматривать лишь вероятностные характеристики протекания тех или иных реакций. Эта **вероятность в ядерной физике определяется значением *эффективного сечения* (или просто *сечения)* реакции σ.**

Эффективное сечение **(или просто** ***сечение)*** **реакции σ.**

- Вероятностные характеристики протекания тех или иных реакций **в ядерной физике определяются значениями** ***эффективного сечения*** **(или просто** ***сечения)*** **реакции σ.** Количество ядерных реакций за единичное время определяют формулой

$$P = \sigma\, \Phi\, N_{я,F},$$

- где $\Phi = n\, v$ — плотность потока нейтронов, падающего на пластину (n — концентрация, v — скорость нейтронов).

- **Вероятность ядерной реакции характеризуется своим парциальным сечением, например σ_s — *сечение рассеяния,* σ_γ — *сечение радиационного поглощения,* σ_f — *сечение деления* и т. п. Сумму сечений всех возможных взаимодействий частицы с ядром, включая рассеяние, называют *полным эффективным сечением* σ_t.**
- Сечения реакции и геометрические сечения ядер сравнимы с площадью 10^{-28} **м** ^{2}. Поэтому **за единицу ядерных сечений принят *барн:* 1 б = 10^{-28} м^2.**

- Значения эффективных сечений ядерных реакций σ не совпадают с максимальными по площади геометрическими сечениями ядра. **Так, полное эффективное сечение поглощения теплового нейтрона с нуклидом ^{235}U составляет 705 б, быстрого нейтрона — ~1 б, а геометрическое сечение ядра ^{235}U равно 2,5 б.**
- Такое отличие сечений ядерных реакций от геометрического сечения объясняется тем, что **при взаимодействии нейтронов с ядрами помимо специфических особенностей ядерных сил заметно проявляются волновые свойства частицы**.

- **Поперечное сечение σ, которое относится к одному ядру, называют *микроскопическим* или *ядерным сечением. Макроскопическое сечение* ядерных реакций Σ, имеющее размерность обратной длины, определяют как число взаимодействий нейтронов с ядрами за единичное время и в единичном объеме среды:**

$$\Sigma = N_я \sigma,$$

где $N_я$ — число ядер в единичном объеме.

- Макроскопическое сечение показывает также значение *средней длины, свободного пробега* нейтронов до своего взаимодействия

$$\lambda = 1/\Sigma$$

- В каждом акте рассеяния ядро получает импульс отдачи, а энергия нейтрона при этом уменьшается. **Процесс снижения средней кинетической энергии нейтронов при рассеянии на ядрах называют *замедлением.***
- **Замедление прекращается после достижения нейтронами области энергии теплового движения атомов среды**