

Лекция

Тема: Вводная. Принцип работы ядерного реактора

1. Цели и задачи дисциплины.
2. Деление ядер тяжелых элементов. Получение энергии деления.
3. Особенности реакции деления.

Литература:

1. Мерзликин Г.Я. Основы теории реакторов Учеб. пособие. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2011 – 452 с.
2. Дементьев Б. А. Ядерные энергетические реакторы. Г.: Энергоиздат, 1984.

ПРЕДПРИЯТИЯ РОСАТОМА



ЯДЕРНЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

АТОМНЫЙ ЛЕДОКОЛЬНЫЙ ФЛОТ



Росатомфлот, ФГУП⁹

ЯДЕРНАЯ МЕДИЦИНА



Научно-исследовательский институт атомных реакторов (НИИАР)⁶



ДОБЫЧА УРАНА

Урановый холдинг АРМЗ (Атомредметзолото, АО)²
В его состав входят:



Приаргунское производственное горно-химическое объединение²²



Хиагда, АО²¹



ВНИПИПромтехнологии²



Далур, АО¹⁵



РУСБУРМАШ, АО²



Uranium One Inc.²



ОБОГАЩЕНИЕ УРАНА

Топливная компания Росатома «ТВЭЛ»²

ПРОИЗВОДСТВО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА



Ангарский электролизный химический комбинат, АО²⁰



Уральский электрохимический комбинат, АО¹³



Машиностроительный завод, ПАО²



Чепецкий механический завод, АО⁸



ЭХЗ¹⁹
Электрохимический завод, ПО АО



Сибирский химический комбинат, АО¹⁷



Новосибирский завод химконцентратов, ПАО¹⁶



Московский завод полиметаллов, АО²

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИНЖИНИРИНГ И СТРОИТЕЛЬСТВО АЭС

НИАЭП

НИАЭП⁵, АО – АЭС, ЗАО – АЭП, АО – АТОМПРОЕКТ, АО³



Росэнергоатом, Концерн ОАО²



СЕРВИС И ОБСЛУЖИВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ АЭС



Атомтехэнерго, АО²



Атомэнергоремонт, АО²

ЯДЕРНОЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ



Группа компаний Росатома «Атомэнергомаш»²



ЗиО-Подольск²



Гидропресс, ОКБ²



ОКБМ им. И.И. Африкантова⁵

СБЫТ И ТРЕЙДИНГ



Техснабэкспорт (ТЕНЕХ), АО

ЯДЕРНЫЙ ОРУЖЕЙНЫЙ КОМПЛЕКС



ВНИИ экспериментальной физики⁴



ВНИИ технической физики¹¹



Маяк, ПО¹²



Приборостроительный завод¹⁰



Комбинат «Электрохимприбор»¹⁴

ПРИКЛАДНАЯ И ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ НАУКА



Наука и инновация²



Многопрофильный научно-исследовательский институт ФЭИ им. Лейпунского¹



Научно-исследовательский институт атомных реакторов (НИИАР)⁶

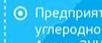


Всероссийская НИИ² химической технологии

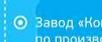
КОМПОЗИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ



Композит², холдинговая компания
В ее состав входят:



Предприятия по производству углеродного волокна: Аргон, ЗУНМ и АЛАБУГА-ВОЛОКНО⁷



Завод «Композит-Волокно»² по производству полиакрилонитрильного волокна (сырьё для переработки углеродного волокна)



Prepreg-СКМ. Совместно с РОСНАНО²

ЯДЕРНАЯ И РАДИАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ



«НО РАО», ФГУП²



Горно-химический комбинат¹⁸



СКЦ Росатома, ФГУП²



Федеральный центр ядерной и радиационной безопасности²



РосРАО, ФГУП²



Научно-производственное объединение Радиевый институт имени В.Г. Хлопина³



Аварийно-технический центр Минатома России, ФГУП³

Разработано — Ritori



+ — и другие предприятия

> 400 ПРЕДПРИЯТИЙ
ОКОЛО 250 000 СОТРУДНИКОВ

Характеристики атома:

- а) Все атомы состоят из положительно заряженного ядра и обращающихся вокруг него отрицательно заряженных частиц - электронов.
- б) Электрический заряд электрона $q_e = -1,6022 \cdot 10^{-19}$ Кл - наименьший электрический заряд.
- в) Атомный номер элемента z - это суммарное количество электронов в атоме.
- г) Устойчивый атом любого химического элемента электронейтрален, отрицательный заряд электронных оболочек в атоме нейтрализуется равным по величине положительным зарядом ядра. Атомный номер химического элемента - это положительный заряд ядра его атома, выраженный в зарядах электрона.
- д) Масса покоя одиночного электрона $m_e = 9,1095 \cdot 10^{-28}$ г ($5,486 \cdot 10^{-4}$ а.е. м.) Практически вся масса атома сосредоточена в его ядре.
- е) Размеры ядра можно оценить по полуэмпирической формуле:
- $$R_{\text{я}} \approx 1,21 \cdot 10^{-13} A^{1/3}, \text{ см}$$
- где A , а.е.м. - атомная масса элемента.

Ядро атома состоит из частиц, называемых **нуклонами**.

Известно два типа нуклонов - **протоны и нейтроны**.

Протоны - нуклоны массой 1 а.е.м. с положительным зарядом, равным единице, то есть элементарному заряду электрона.

Нейтроны - электронейтральные нуклоны массой 1 а.е.м.

Масса ядра равна A , заряд ядра - z , массы протона и нейтрона практически равны.

Ядро электронейтрального устойчивого атома состоит из z протонов и $(A - z)$ нейтронов. Атомный номер элемента z - это число протонов в ядре атома.

Нуклоны в ядре атома подвержены действию **гравитационных сил и кулоновских сил**.

Наличие в природе множества устойчивых ядер приводит к выводу о существовании между нуклонами ядра более мощных, чем кулоновы, **ядерных сил притяжения**, которые, преодолевая кулоновское отталкивание протонов, стягивают нуклоны в устойчивую структуру - ядро.

Первое свойство ядерных сил (в отличие от кулоновых, гравитационных и других) - **короткодействие**: ядерные силы действуют только на малых расстояниях, сравнимых по величине с размерами самих нуклонов.

Второе свойство ядерных сил – насыщение: любой нуклон ядра взаимодействует не со всеми другими нуклонами, а лишь с непосредственными соседями.

Третье свойство ядерных сил - их равнодействие: два протона, два нейтрона или протон с нейтроном взаимодействуют одинаково.

Любое ядро считается индивидуализированным, если известны две его основные характеристики - число протонов z и массовое число A , поскольку разница $(A - z)$ определяет число нейтронов в ядре.

Индивидуализированные ядра атомов принято называть **нуклидами**.

Нуклиды с одинаковым z (числом протонов) называют **изотопами**. Например, ^{233}U , ^{234}U , ^{235}U , ^{236}U , ^{238}U , ^{239}U - все это изотопы урана, который в Периодической Системе элементов имеет порядковый номер $z = 92$.

Изотопы любого химического элемента имеют равное число протонов, но различные числа нейтронов.

Нуклиды равной массы (A), но с различными зарядами z называют **изобарами**.

Изобары, в отличие от изотопов, - нуклиды различных химических элементов.

Масса (m) и энергия (E) - две формы существования материи, пропорционально взаимосвязанные между собой соотношением Эйнштейна:

$$E=mc^2,$$

где c - скорость света в вакууме ($c=2,997924 \cdot 10^8$ м/с).

1 кг массы вещества обладает полной энергией:

$$E \approx 1 \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ Дж} = 2,5 \cdot 10^{10} \text{ кВт}\cdot\text{час} \text{ (т.к. } 1 \text{ кВт}\cdot\text{час} \approx 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж)}.$$

Так как 1 а.е.м. соответствует в единицах СИ массе $1,66056 \cdot 10^{-27}$ кг, то полная энергия 1 а.е.м. вещества равна:

$$E \approx 1,66056 \cdot 10^{-27} (3 \cdot 10^8)^2 = 1,4924 \cdot 10^{-10} \text{ Дж}.$$

В ядерной физике энергии микрочастиц принято измерять в **электрон - вольтах (эВ)**.

1 эВ - это энергия, приобретаемая электроном при прохождении ускоряющей разности потенциалов в 1 В:

$$1 \text{ эВ} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ Дж или } 1 \text{ Дж} = 6,2414 \cdot 10^{18} \text{ эВ}.$$

Следовательно, энергетический эквивалент 1 а.е.м. вещества:

$$E_{1\text{а.е.м}} = 9,315 \cdot 10^8 \text{ эВ} = 931,5 \text{ МэВ}$$

Разница масс покоя составляющих ядро нуклонов и массы покоя ядра называется **избытком (или дефектом) масс** и обозначается Δm . В общем случае избыток массы ядра с массовым числом A и числом протонов в нем z найдется как:

$$\Delta m = zm_p + (A - z)m_n - M_{\text{я}}$$

где m_p , m_n , $M_{\text{я}}$ – массы протона, нейтрона и ядра соответственно.

Энергия, необходимая для разделения ядра на составляющие его нуклоны, называется **энергией связи ядра**.

Она численно равна энергии, затраченной при создании ядра из отдельных нуклонов, а потому в соответствии с законом А. Эйнштейна она должна определяться избытком (дефектом) массы:

$$E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2 = [zm_p + (A - z)m_n - M_{\text{я}}] c^2$$

СИНТЕЗ лёгких нуклидов (дейтерия ${}_2\text{D}^1$)



У дейтерия $\varepsilon_{\text{св}} = 1,11$ МэВ/нуклон, следовательно, суммарная энергия связи:

$$E_{\text{св}} = 2 \cdot 1,11 + 2 \cdot 1,11 = 4,44 \text{ МэВ.}$$

У продукта синтеза - гелия $\varepsilon_{\text{св}} = 7,07$ МэВ/нуклон, следовательно, энергия связи четырёх его нуклонов

$$E_{\text{св}} = 4 \cdot 7,07 = 28,28 \text{ МэВ}$$

Разница суммарных энергий связи гелия и двух ядер дейтерия:

$$\Delta E_{\text{св}} = 28,28 - 4,44 = 23,84 \text{ МэВ,}$$

и эта энергия **высвободится** при **синтезе** ядра гелия из двух ядер дейтерия.

ДЕЛЕНИЕ ядер тяжёлых элементов (одна характерная из множества возможных схем деления урана ^{235}U):



У лантана $\varepsilon_{\text{св}} = 8,4$ МэВ/нуклон, у молибдена $\varepsilon_{\text{св}} = 8,5$ МэВ/нуклон, следовательно, суммарная энергия связи для этих двух осколков деления:

$$E_{\text{св}} = 8,4 \cdot 139 + 8,5 \cdot 96 = 1983,6 \text{ МэВ.}$$

У урана $\varepsilon_{\text{св}} = 7,6$ МэВ/нуклон, следовательно, суммарная энергия связи нуклонов в нём:

$$E_{\text{св}} = 7,6 \cdot 235 = 1786,0 \text{ МэВ.}$$

Разница энергий связи осколков деления урана и самого ядра урана:

$$\Delta E_{\text{св}} = 1983,6 - 1786,0 = 197,6 \text{ МэВ,}$$

и эта энергия **высвободится** при **делении** ядра урана-235.

Устойчивость нуклидов (то есть их способность к длительному существованию без изменений структуры и характеристик) определяется их массой A и зарядом z и зависит от величины параметра $(A-z)/z$, т.е. от соотношения чисел нейтронов и протонов в ядре.

Диаграмма устойчивости свидетельствует о том, что:

- а) в ядрах лёгких элементов (с атомной массой до 20 а.е.м.) нейтронно-протонное отношение приблизительно равно 1, то есть в лёгких устойчивых ядрах содержится приблизительно одинаковое число протонов и нейтронов;
- б) с дальнейшим ростом атомной массы нуклидов A диапазон устойчивости смещается в область больших нейтронно-протонных отношений, которые достигают при больших значениях A величины 1,65.

Т.е. из этого следует важный практический вывод: при делении тяжёлых ядер образующиеся осколки деления будут наверняка **неустойчивы** (то есть **радиоактивны**) по причине их пересыщенности избыточными для их устойчивости нейтронами.

Для того, чтобы образовавшийся при делении осколок стал устойчивым он должен испустить из своего состава избыточные для его устойчивости нейтроны.

Испускание свободных нейтронов при делении тяжёлых ядер, имеющее решающее значение для осуществления **самоподдерживающейся** ¹⁰ **цепной ядерной реакции деления**, обусловлено именно этим фактом.

Ядерной реакцией принято называть процесс и результат взаимодействия ядер с различными ядерными частицами (альфа-, бета-частицами, протонами, нейтронами, гамма-квантами и т.д.).

Нейтронные реакции - это процесс и результат взаимодействия нейтронов с атомными ядрами.

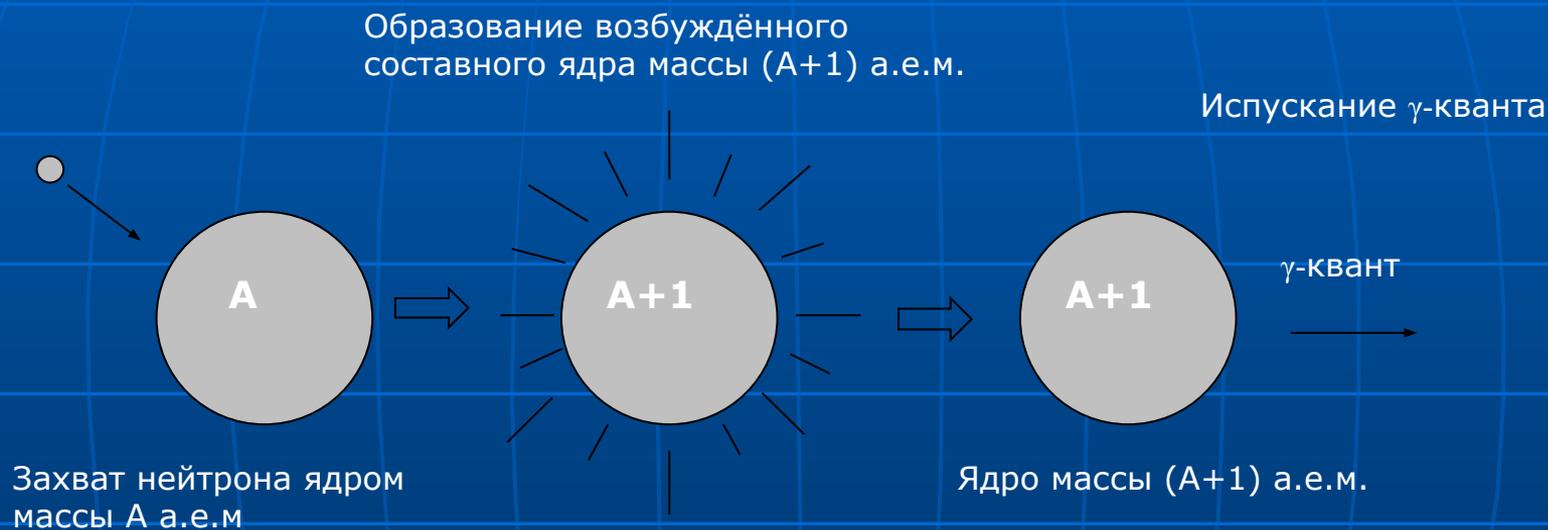
Нейтроны, входящие в состав атомных ядер, называют **связанными**, в отличие от нейтронов, перемещающихся в объёме среды вне ядер атомов, которые называют **свободными**.

Именно свободные нейтроны, сталкиваясь в процессе своего пространственного перемещения с ядрами атомов среды и взаимодействуя с последними, вызывают различного рода **нейтронные реакции**.

Легкая осуществимость нейтронных реакций обусловлена электронейтральностью нейтронов, благодаря которой они имеют возможность легко преодолевать энергетический барьер электростатического поля заряженного ядра, попадать в сферу действия его ядерного притяжения и взаимодействовать с нуклонами ядра, вызывая его кардинальную перестройку.

Радиационный захват.

Возбуждённое составное ядро оказывается способным *удержать* в своем составе проникший в него нейтрон, а избыток энергии сверх ближайшего уровня устойчивости - "сбросить" в виде испускаемого γ -кванта электромагнитного излучения.

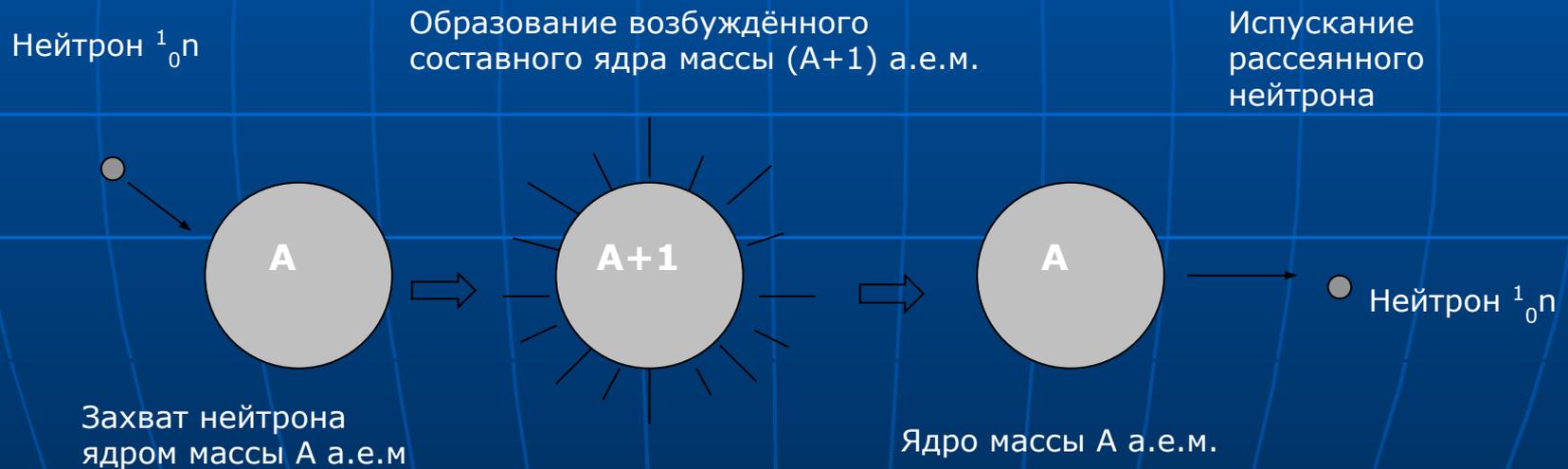


Результатом взаимодействия нейтрона с ядром является захват нейтрона исходным ядром, сопровождающийся испусканием γ -радиации, благодаря чему этот тип нейтронной реакции и получил название реакции **радиационного захвата**.

Наиболее склонные к радиационному захвату сорта атомных ядер называют **поглотителями** нейтронов: бор-10 ^{10}B , самарий-149 ^{149}Sm , ксенон-135 ^{135}Xe , кадмий Cd , гадолиний Gd

Рассеяние.

При неспособности возбуждённого составного ядра удержать в своём составе проникший в него нейтрон природное стремление ядра к устойчивости может быть реализовано путём "выталкивания" из ядра захваченного или любого другого нейтрона, равноценного захваченному по квантовым свойствам.



До, и после взаимодействия нейтрона с ядром имеются свободный нейтрон и одно и то же ядро, результатом такого взаимодействия является то, что кинетические энергии исходного и испущенного нейтронов неодинаковы, и направления движения исходного и испускаемого нейтронов также неодинаковы.

По аналогии с механическими рассеяниями нейтронные реакции подобного типа называют **реакциями рассеяния**.

В тепловом реакторе за счёт реакций рассеяния идёт процесс уменьшения кинетической энергии нейтронов при их перемещении в среде активной зоны - **замедление**. Ядра - хорошие рассеиватели нейтронов, оказываются и хорошими замедлителями: водород (^1H), дейтерий (^2D), бериллий (^9Be), углерод (^{12}C), кислород (^{16}O), цирконий (^{91}Zr).

Реакция деления.

Третий способ выхода возбуждённого составного ядра в более устойчивое образование - деление его на две, три (или даже более) протонно-нейтронных комбинации, называемых **осколками деления**.

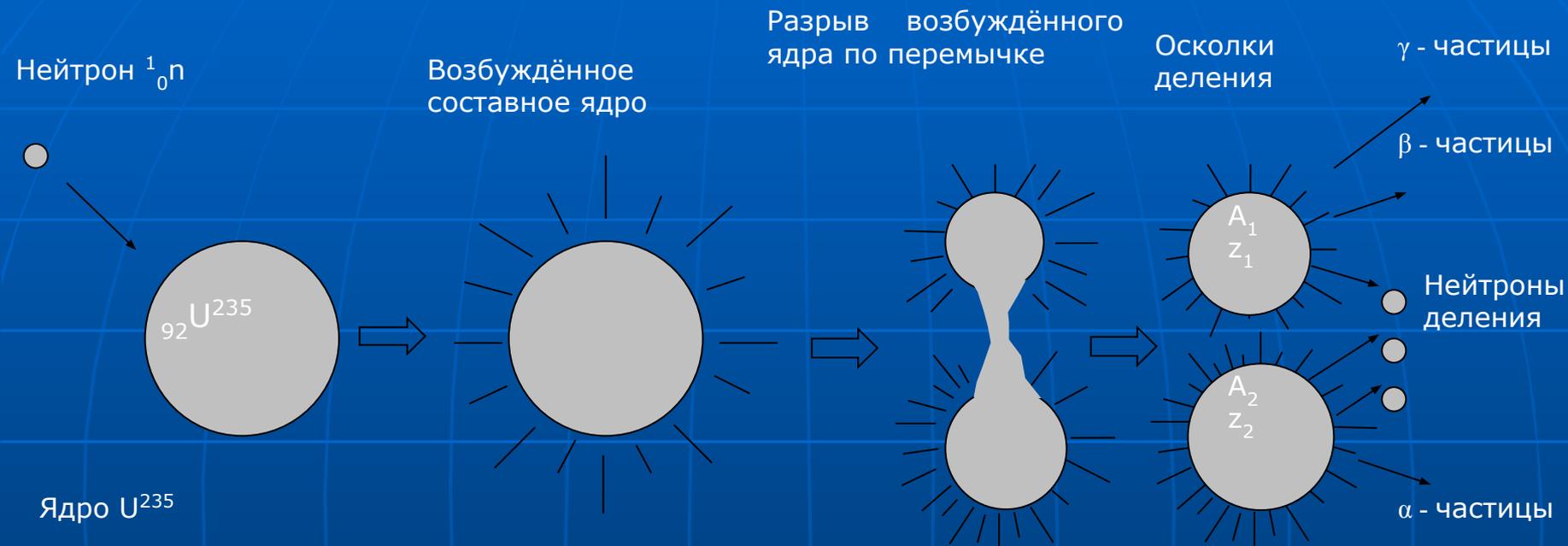
К делению склонны далеко не все известные ядра, а лишь некоторые ядра тяжёлых элементов: ^{233}U , ^{235}U , ^{239}Pu , ^{241}Pu ...

Наиболее важным является уран-235 ^{235}U - основное топливо большинства существующих ядерных реакторов. Уран-235 делится нейтронами любых кинетических энергий.

Другим по значимости делящимся нуклидом является плутоний-239 - вторичное топливо в урановых реакторах, воспроизводимое в процессе их работы. Плутоний-239 делится нейтронами любых кинетических энергий.

Третьим по значению делящимся нуклидом является изотоп урана - уран-238 ^{238}U . Деление урана-238 имеет **пороговый характер**: для инициации деления ядер ^{238}U годны не любые нейтроны, а лишь нейтроны с энергиями выше $E_n = 1,1$ МэВ (энергетический порог деления урана-238).

Деление ядра урана-235



Образование осколков деления

Вероятность появления осколка определенной атомной массы при множестве делений нуклида называется **удельным выходом осколка**.

Осколок ксенона-135 (${}^{135}\text{Xe}^*$) при осуществлении каждой тысячи делений ядер ${}^{235}\text{U}$ появляется в среднем в трёх случаях. Т.е. удельный выход осколка ${}^{135}\text{Xe}^*$ составляет $\gamma_{\text{Xe}} = 3/1000 = 0,003 = 0,3\%$ (вероятность того, что деление ядра завершится образованием именно осколка ксенона-135).

Роль осколков деления

Генерируемые при делении осколки деления обладают высокими кинетическими энергиями. Передавая при столкновениях с атомами среды свою кинетическую энергию, осколки деления тем самым повышают средний уровень кинетической энергии атомов и молекул, что в соответствии представлениями кинетической теории воспринимается нами как повышение температуры топливной композиции или как тепловыделение в ней.

Большая часть тепла в реакторе образуется именно таким путём!

Образование нейтронов деления.

Ключевым физическим явлением, сопровождающим процесс деления ядер, является испускание возбужденными осколками деления **вторичных быстрых нейтронов**, называемых мгновенными нейтронами.

Благодаря этому при делении тяжёлых ядер появляются новые свободные нейтроны, которые могут взаимодействовать с другими делящимися ядрами в топливе и вызывать их деления, сопровождаемые испусканием новых нейтронов деления и т.д.

Среднее число нейтронов деления, испускаемых в одном акте деления, есть физическая константа делящегося нуклида и обозначена **ν** .

При делении под действием тепловых нейтронов:

- для урана-235 $\nu_5 = 2,416$,
- для плутония-239 $\nu_9 = 2,862$,
- для плутония-241 $\nu_1 = 2,938$ и т.д.

Факт, что для всех делящихся нуклидов $\nu > 1$, создает предпосылку к осуществимости **цепной нейтронной реакции деления**. Для реализации самоподдерживающейся цепной реакции деления необходимо создать условия, чтобы один из ν получаемых в акте деления нейтронов обязательно вызывал следующее деление другого ядра, а остальные $(\nu - 1)$ нейтронов исключались из процесса деления ядер (в противном случае интенсивность делений во времени будет лавинообразно нарастать - атомная бомба).

Радиоактивность осколков деления.

Установлено около 600 типов осколков деления и все они рождаются сильно возбуждёнными и продолжают "сбрасывать" избыточную энергию. Этот сброс осуществляется путём испускания осколками альфа-, бета- и гамма- радиоактивного излучения.

Т.о., в работающем ядерном реакторе идёт не только процесс накопления радиоактивных осколков, но и процесс непрерывной их трансформации. Поэтому радиоактивные излучения не только сопровождают реакцию деления в **работающем** реакторе, но и длительное время испускаются в его активной зоне после его останова.

Во-первых, этот фактор порождает особый вид физической опасности - опасности **облучения персонала**, кратко именуемой **радиационной опасностью**. Это вынуждает конструкторов реакторной установки окружать её **биологической защитой** и принимать ряд других мер по исключению возможности опасного облучения людей и радиоактивного загрязнения окружающей среды.

Во-вторых, после останова реактора все виды радиоактивного излучения продолжают взаимодействие с материалами активной зоны и передают свою кинетическую энергию атомам среды, т.е. в реакторе после его останова имеет место **остаточное тепловыделение**.

Возникает необходимость длительного **расхолаживания** активной зоны реактора после его останова с целью снятия остаточных тепловыделений.

Позитивчик!

В радиоактивных превращениях осколков деления есть позитивный аспект, которому ядерные реакторы буквально **обязаны своим существованием.**

Из большого множества осколков деления есть около 60 типов таких, которые после первого β -распада становятся **нейтроноактивными**, способными испускать так называемые **запаздывающие нейтроны.**

Запаздывающих нейтронов в реакторе испускается сравнительно немного (приблизительно 0,6% от общего числа генерируемых нейтронов), однако именно благодаря их существованию возможно **безопасное управление** ядерным реактором.

Высвобождение энергии при делении.

Величина высвобождаемой при делении ядра энергии прямо пропорциональна величине дефекта масс, причём коэффициентом пропорциональности в этой взаимосвязи является квадрат скорости света в вакууме

$$\Delta E = \Delta m c^2$$

При делении ядра избыток (дефект) масс определяется как разница сумм масс покоя исходных продуктов реакции деления (т.е. ядра и нейтрона) и результирующих продуктов деления ядра (осколков деления, нейтронов деления и остальных микрочастиц, испускаемых как в процессе деления, так и после него).

Спектроскопический анализ позволил установить большинство продуктов деления и их удельные выходы. На этой основе при различных результатах деления ядер урана-235 рассчитана средняя величина высвобождаемой в одиночном делении энергии:

$$\Delta m c^2 = 200 \text{ МэВ}$$

Энергия деления рассеивается из микрообъёма, где произошло деление ядра, через посредство различных материальных носителей: осколков деления, нейтронов деления, α - и β -частицами, γ -квантами и даже нейтрино и антинейтрино.

Распределение энергии деления (МэВ) ядер урана-235 и плутония-239 между продуктами деления.

Носители энергии деления	Урана-235	Плутония-239
1. Кинетическая энергия осколков деления	166,0	171,5
2. Кинетическая энергия нейтронов деления	4,9	5,8
3. Энергия мгновенных гамма-квантов	7,2	7,0
4. Энергия γ -квантов из продуктов деления	7,2	7,0
5. Кинетическая энергия β -излучения осколков	9,0	9,0
6. Энергия антинейтрино	10,0	10,0
Итого:	204,3	210,3

Временное распределение энергии деления

Первые три составляющие обращаются в тепло за время менее 0,1 с и называются **мгновенными** источниками тепловыделения.

β - и γ -излучения продуктов деления испускаются возбужденными осколками с различными по величине периодами полураспада (от нескольких долей секунды до нескольких десятков суток) и называется **остаточным тепловыделением**.

Мощность остаточного тепловыделения в реакторе после его останова снижается за первую минуту - на 30-35%, по истечении первого часа стоянки реактора она составляет примерно 30% от мощности, на которой реактор работал до останова, а после первых суток стоянки - примерно 25 %.

Пространственное распределение энергии деления.

Топливная таблетка, в составе которой находятся делящиеся нуклиды, содержится в герметичных оболочках твэлов, препятствующих выходу образующихся осколков деления в охлаждающий их теплоноситель.

Осколки деления в герметичных твэлах не выходят в теплоноситель, и кинетические энергии осколков и слабопроникающих β -частиц обращаются в тепло внутри твэлов. Считается, что внутри твэлов обращается в тепло приблизительно 90% всей энергии деления (то есть ~ 180 МэВ).

Энергии нейтронов деления и γ -излучения трансформируются в тепло внутри твэлов лишь частично: проникающая способность нейтронов и γ -излучения порождает унос большей части их начальной кинетической энергии от мест их рождения.

Доля энергии деления, получаемой в виде тепла вне твэлов в активной зоне реактора зависит от его типа и устройства и лежит в пределах (6 ÷ 9)% от полной энергии деления.

Например, у ВВЭР-1000 эта величина приблизительно равна 8,3%, а у РБМК-1000 - около 7%.

Тепловая мощность реактора прямо пропорциональна интенсивности реакции деления в его активной зоне.

Для того, чтобы реактор работал на постоянном уровне мощности, необходимо создать в нём такие условия, чтобы реакция деления в его активной зоне протекала с неизменной средней скоростью во времени. Для увеличения (уменьшения) мощности реактора нужно найти способы соответственного увеличения (или уменьшения) скорости реакции деления.

В этом - основной смысл управления мощностью ядерного реактора!

Тепловая мощность реактора и распределение тепловыделения в его активной зоне связаны прямой пропорциональной зависимостью с распределением скорости реакции деления по объёму топливной композиции активной зоны реактора.

Скорость реакции деления должна быть связана с количеством свободных нейтронов в среде активной зоны, так как именно они (свободные нейтроны) вызывают реакции деления, радиационного захвата, рассеяния и другие нейтронные реакции.

ВЫВОД: скорость реакции деления, энергосвободное выделение в активной зоне и тепловая мощность реактора явно должны быть связаны с ²⁵ характеристиками нейтронного поля в его объёме.