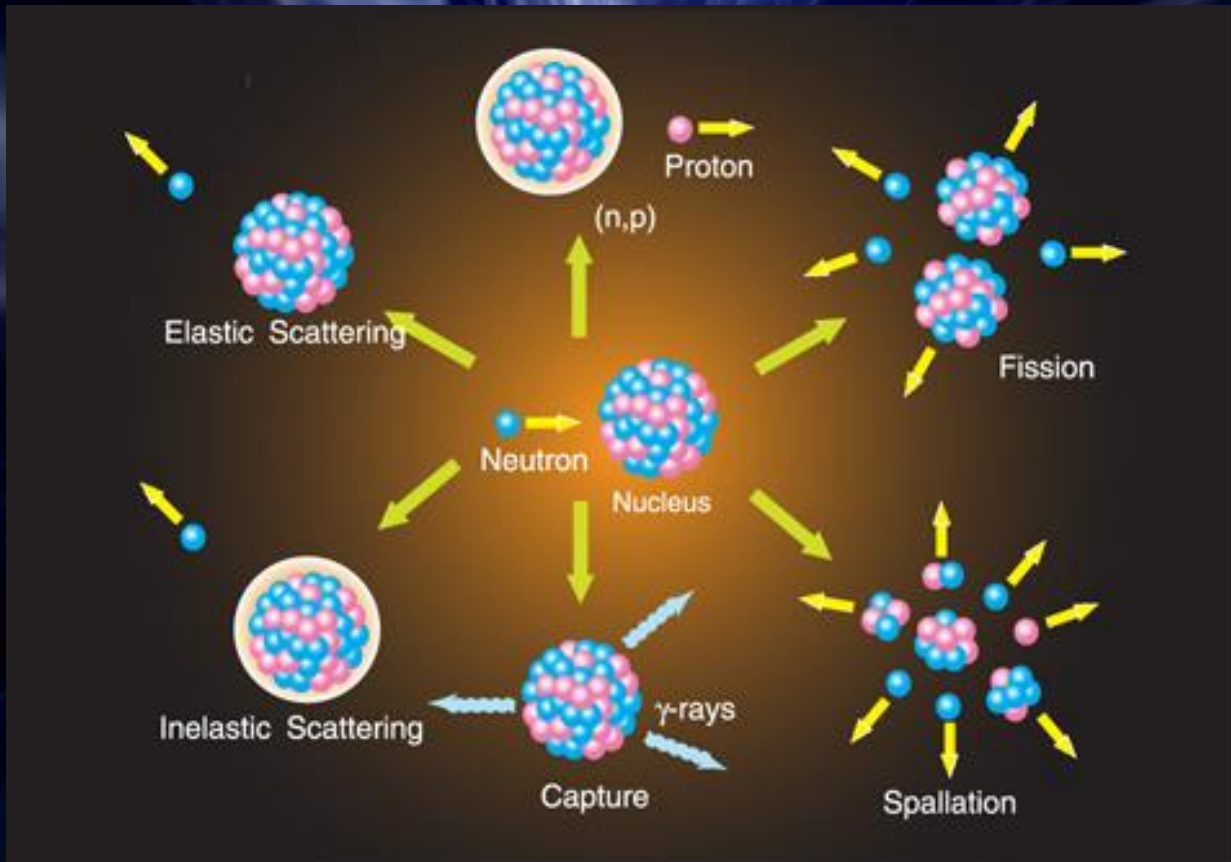


Нейтронные ядерные реакции



Нейтронные ядерные реакции

Ядерная реакция – это процесс и результат взаимодействия ядер с различными ядерными частицами (альфа-, бета-частицами, протонами, нейтронами, гамма-квантами и т.д.)

Нейтронной реакцией называется процесс и результат взаимодействия свободных нейтронов с атомными ядрами.

Нейтронные ядерные реакции

Взаимодействие нейтрона с ядром происходит в поле ядерных сил, на расстоянии порядка 10^{-13} см

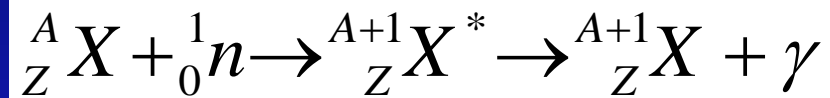
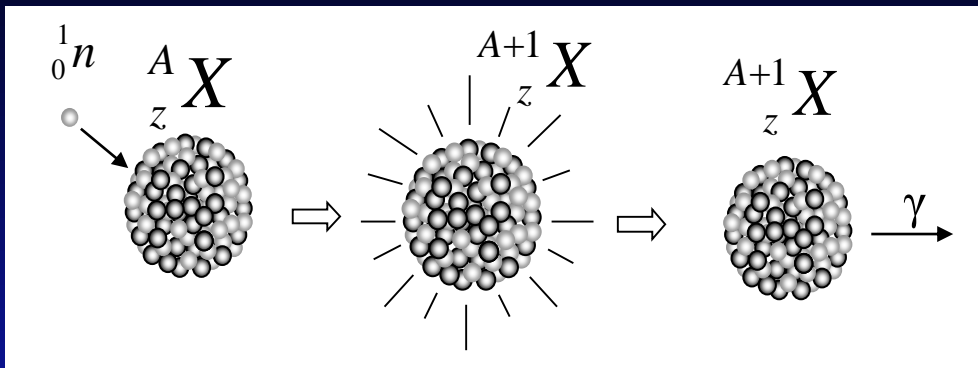
Если в ядро привносится извне дополнительная масса, энергия, то образующееся в результате проникновения в него нейтрона составное ядро - ядро возбуждённое и неустойчивое

Время жизни составного ядра в возбужденном состоянии:

$$\tau = 10^{-15} \div 10^{-13} \text{ с}$$

Способы снятия возбуждения называются каналами распада

Радиационный захват

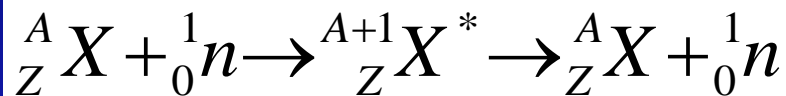
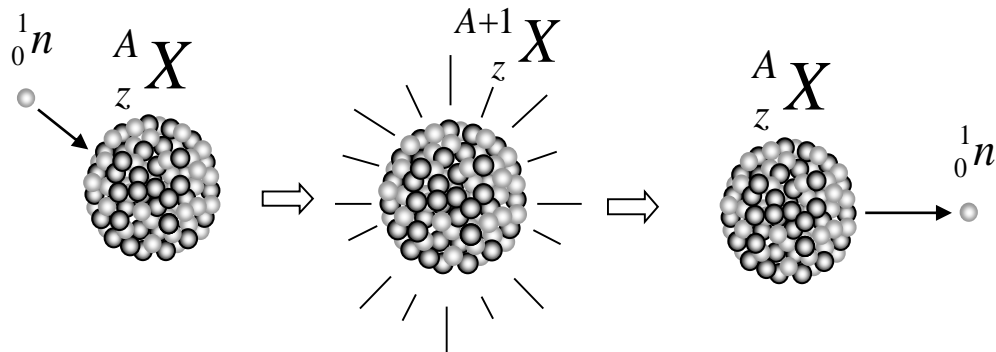


Наиболее склонные к радиационному захвату ядра называют *поглотителями* нейтронов:

бор-10, самарий-149, ксенон-135, европий, кадмий, гадолиний

U-235 и Pu-239 также являются поглотителями

Рассеяние



Кинетические энергии исходного и испущенного нейтронов неодинаковы. В тепловом реакторе за счёт реакций рассеяния идёт процесс уменьшения кинетической энергии нейтронов - *замедление*.

Замедлители:

водород, дейтерий, бериллий, углерод, кислород, цирконий.

Рассеяние

Упругое рассеяние:

$$\left(E_{\text{ядра}} + E_n\right)_{\text{до}} = \left(E_{\text{ядра}} + E_n\right)_{\text{после}}$$

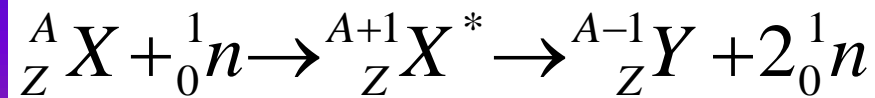
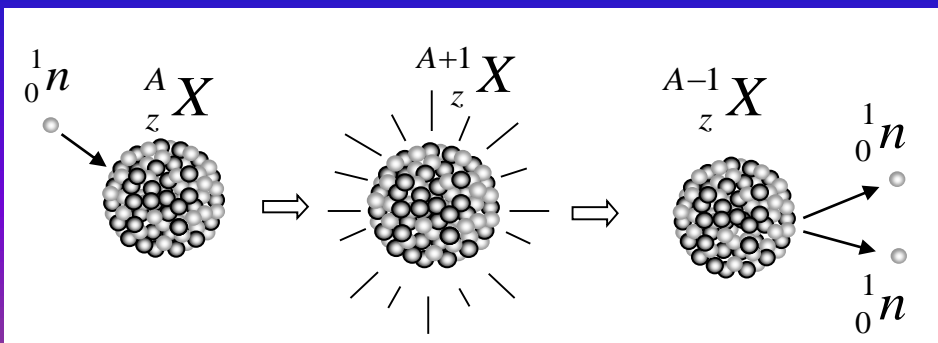
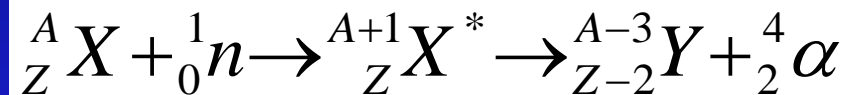
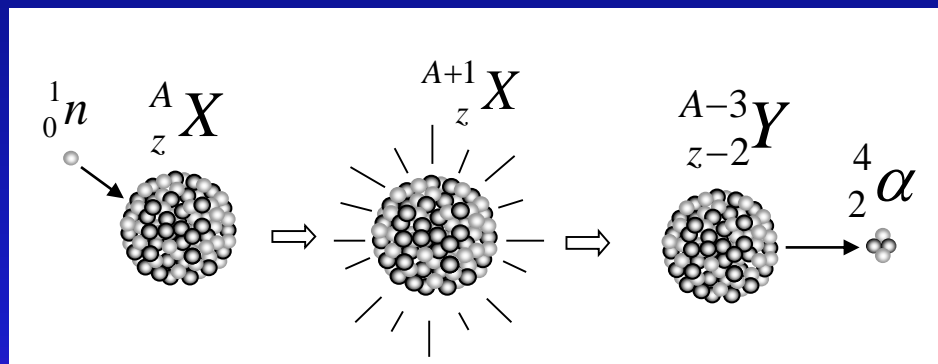
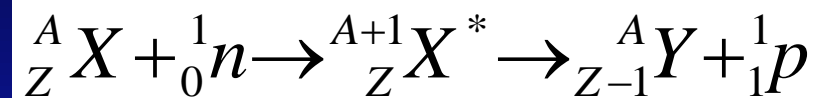
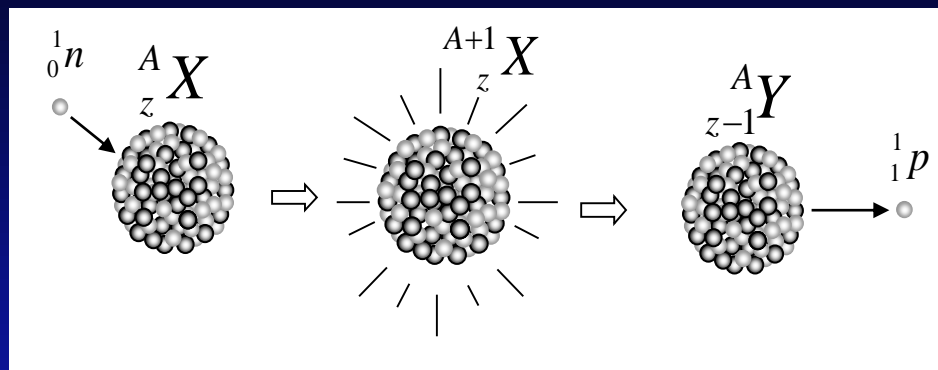
суммы кинетических энергий ядра и нейтрона до и после рассеяния равны между собой

Неупругое рассеяние:

$$\left(E_{\text{ядра}} + E_n\right)_{\text{до}} > \left(E_{\text{ядра}} + E_n\right)_{\text{после}}$$

сумма кинетических энергий ядра и нейтрона после рассеяния оказывается ниже, чем их сумма до рассеяния
Часть энергии после рассеяния идет на увеличение потенциальной энергии ядра

Реакции превращения: (n,p), (n,α), (n,2n)



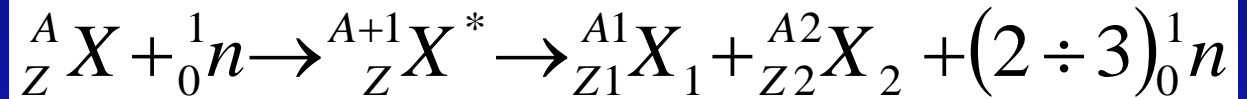
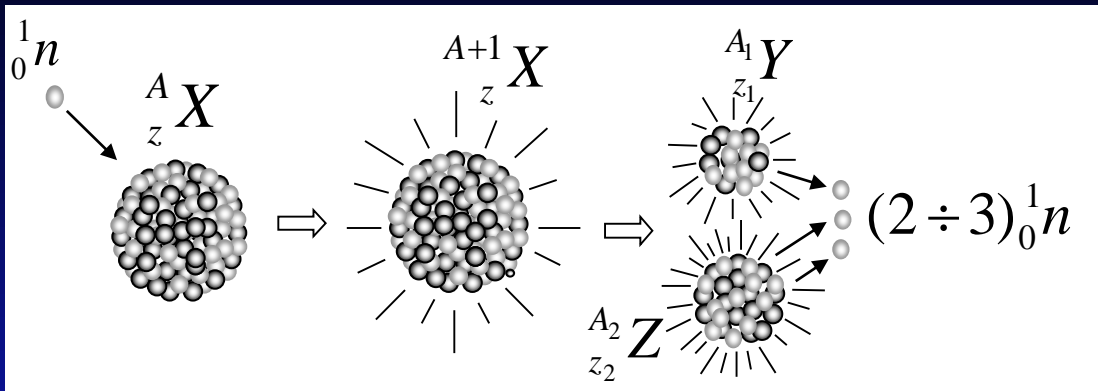
Реакции превращения

Реакции превращения свойственны очень немногим ядрам при взаимодействии с нейтронами высоких энергий.

В ядерных реакторах реакции превращения относительно редки и принципиального влияния на работу реактора не оказывают.

Реакции этого типа используются в плутоний-бериллиевых и полоний-бериллиевых искусственных источниках нейтронов.

Деление



Деление ядра — процесс расщепления атомного ядра на два (реже три) ядра с близкими массами, называемых осколками деления. Это основной тип реакций в работе ядерного реактора, обеспечивающая выделение энергии

К делению склонны **чётно-нечётные ядра** тяжёлых элементов:



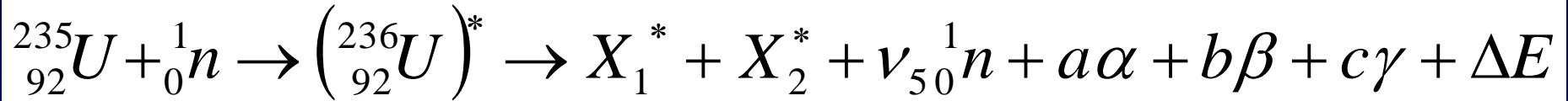
Особенности делящихся ядер

^{235}U делится нейтронами любых кинетических энергий, но лучше всего – нейтронами с малыми энергиями.

^{239}Pu вторичное топливо в урановых реакторах, воспроизводящееся в процессе работы. Также делится нейтронами любых энергий, но лучше всего – тепловыми.

^{238}U – чётно-чётный изотоп урана, имеет более устойчивую структуру. Его деление носит пороговый характер: $E_{\text{п}} = 1,1 \text{ МэВ}$ - энергетический порог деления ^{238}U .

Уравнение реакции деления



X_1^* , X_2^* - осколки деления в возбужденном состоянии;

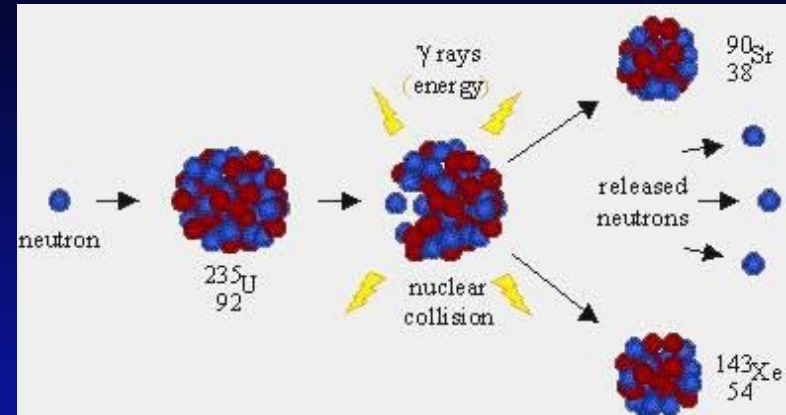
$\nu_{50}^1\text{n}$ - ν_5 нейтронов деления, высвобождающихся в каждом акте деления урана-235

$a\alpha + b\beta + c\gamma$ - a , b и c средние числа α -частиц, β -частиц и γ -квантов, выделяющихся в каждом акте деления урана-235

ΔE - среднее количество энергии, высвобождаемой в акте деления

Особенности реакции деления

- образование осколков деления;
- образование новых свободных нейтронов при делении (*нейтроны деления*);
- радиоактивность осколков деления, обуславливающая их дальнейшие трансформации к более устойчивым образованиям;
- высвобождение энергии при делении (создание энергетических ядерных реакторов)



Каждая из особенностей имеет свое практическое значение

Образование осколков деления

Процесс образования осколков носит вероятностный характер.

Вероятность деления ядра на два осколка составляет более 98%.

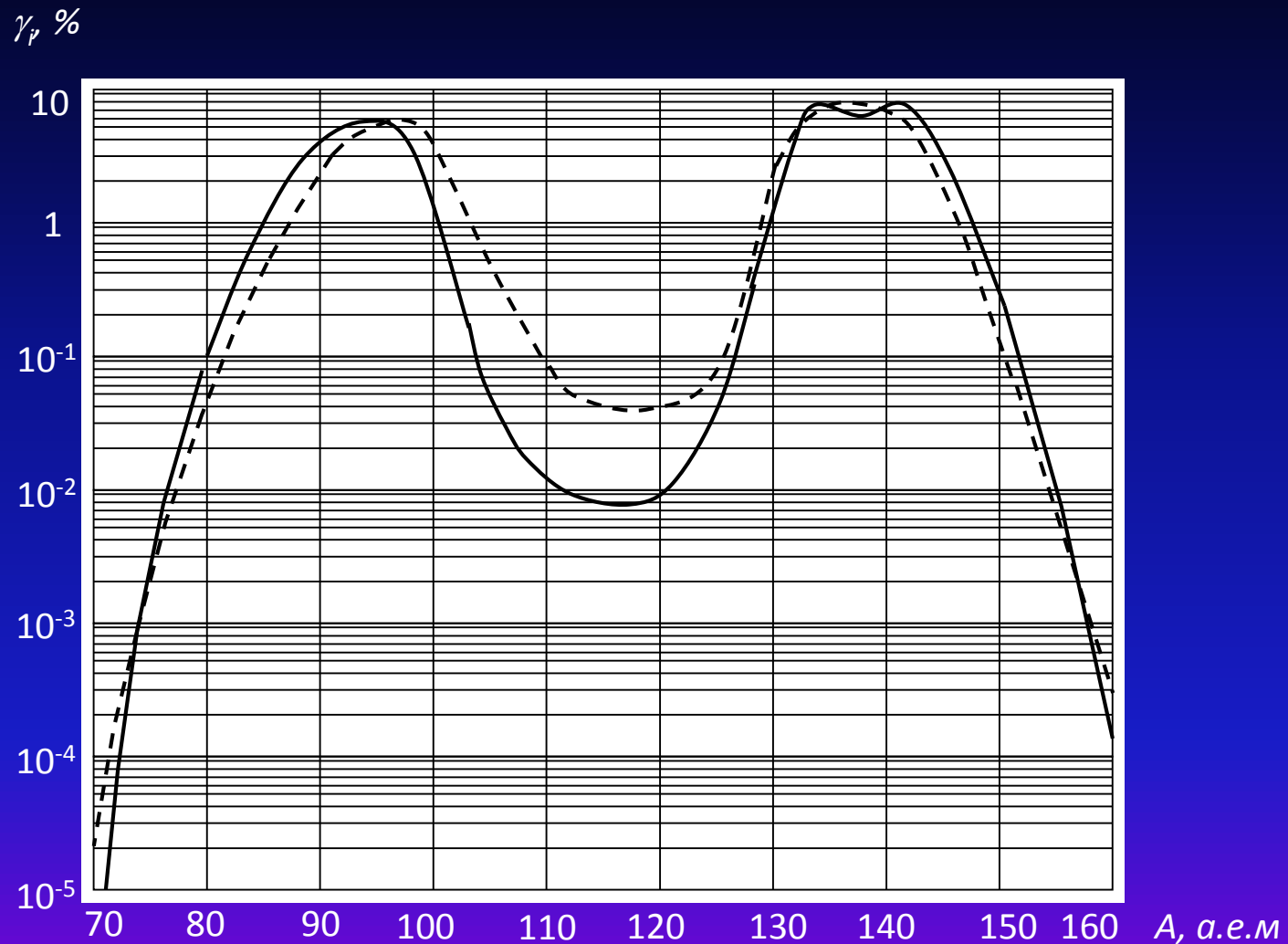
Вероятность появления осколка определённой атомной массы – величина строго определённая, свойственная этому делящемуся нуклиду, и называется *удельным выходом осколка*, γ_i .

Например, удельный выход осколка ^{135}Xe составляет

$$\gamma_{\text{Xe}} = 3/1000 = 0,003 \text{ от всех делений,}$$

т.е. в одном акте деления ^{235}U вероятность появления ^{135}Xe составляет $\gamma_{\text{Xe}} = 0.3\%$.

Образование осколков деления



Удельные выходы осколков деления различных атомных масс при делении ядер ^{235}U (сплошная линия) и ^{239}Pu (штриховая линия)

Образование осколков деления

Атомные массы осколков лежат в пределах $70 \div 165$ а.е.м.

Симметричные деления ядер крайне редки: их удельный выход не превышает 0,01% для ^{235}U и 0,04% – для ^{239}Pu .

Чаще всего образуются лёгкие осколки с $A = 83 \div 104$ а.е.м. и тяжёлые осколки с $A = 128 \div 149$ а.е.м. ($\gamma_i = 1\%$).

Деление ^{239}Pu влечёт образование несколько более тяжёлых осколков по сравнению с осколками деления ^{235}U .

Генерируемые при делении осколки обладают высокими кинетическими энергиями.

Передавая при столкновениях с атомами среды топливной композиции свою кинетическую энергию, осколки деления тем самым повышают температуру в ней.

Большая часть тепла в реакторе образуется именно таким путём

Образование нейтронов деления

Благодаря образованию нейтронов деления при делении тяжёлых ядер появляются новые свободные нейтроны взамен тех, что вызвали деления.

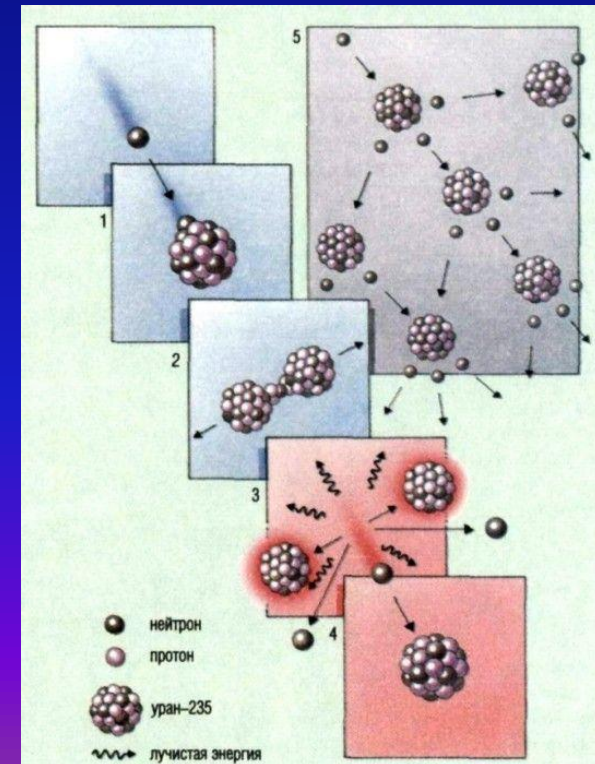
Появление в процессе деления свободных нейтронов дает возможность организовать равномерно следующих во времени друг за другом делений, т.е. «цепную реакцию деления»

Число нейтронов деления, испущенных осколками каждого сорта, является определённым и называется *среднее число нейтронов, испускаемых в одном акте деления, ν* .

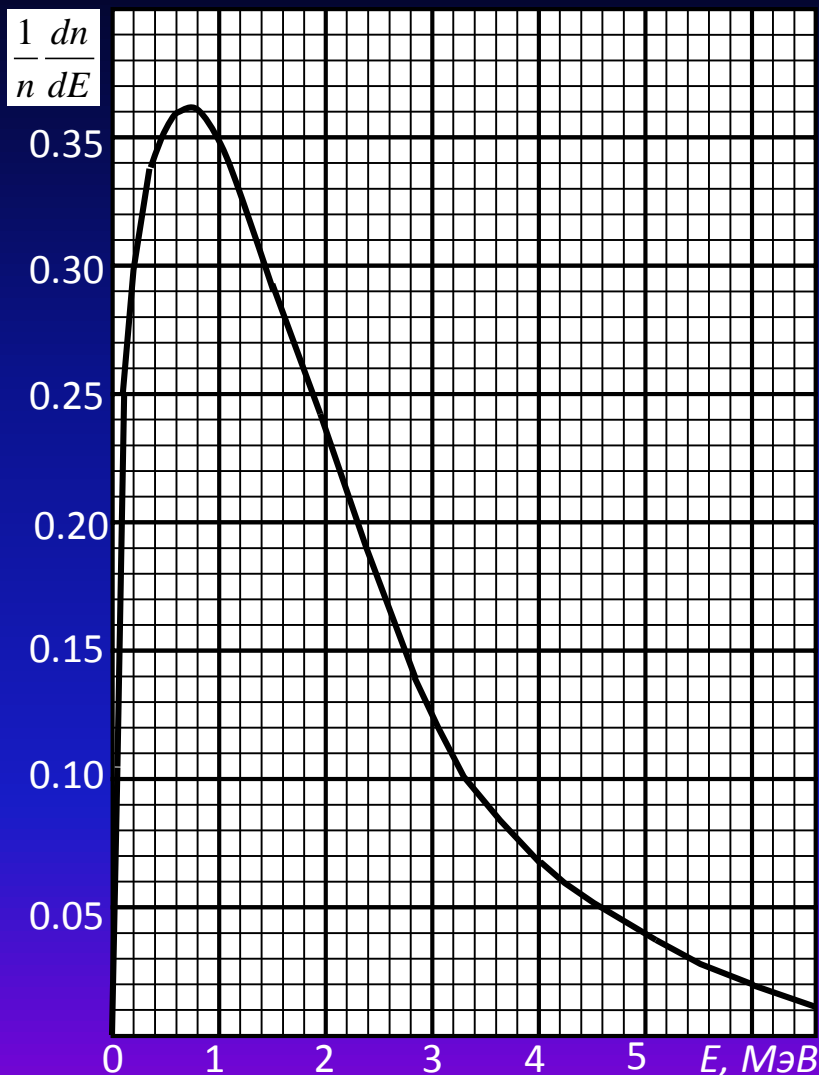
- для урана-235 $\nu_5 = 2.416,$

- для плутония-239 $\nu_9 = 2.862,$

- для плутония-241 $\nu_1 = 2.938$



Спектр нейтронов деления



Энергетический спектр нейтронов деления –
спектр Уатта

Распределение нейтронов деления по энергиям достаточно точно описывается *спектральной функцией Уатта*:

$$n(E) = 0.4839 \exp(-E) \cdot sh\sqrt{2E}$$

Наиболее вероятная энергия нейтронов деления:

$$E_{нв} = 0,7104 \text{ МэВ}$$

Средняя энергия нейтронов деления:

$$E_{ср} = 1,935 \text{ МэВ} - \text{для } ^{235}\text{U}$$

$$E_{ср} = 2,00 \text{ МэВ} - \text{для } ^{239}\text{Pu}$$

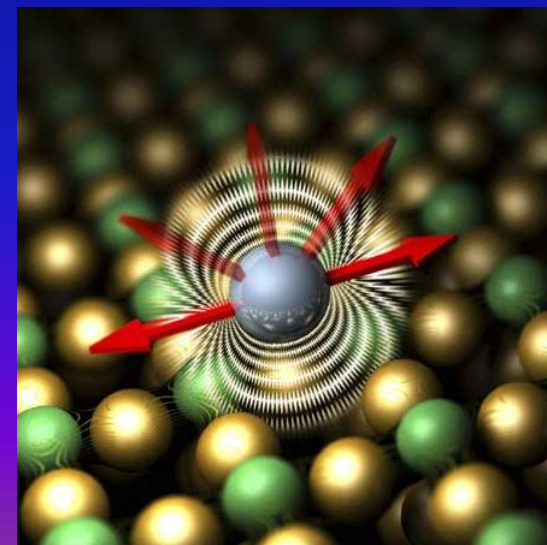
Радиоактивность осколков деления

Все осколки рождаются сильно возбужденными. Снятие возбуждения осуществляется путём последовательного испускания всех видов радиоактивного излучения (α , β , γ). Тип излучения и время снятия возбуждения зависит от типа осколка.

В работающем ядерном реакторе идёт не только процесс накопления радиоактивных осколков, но и процесс непрерывной их трансформации. Трансформация продолжается и в остановленном реакторе (остаточное тепловыделение).

Радиоактивность осколков деления обуславливает необходимость биологической защиты работающего реактора и длительное «расхолаживание» активной зоны после остановки реактора.

Некоторые осколки способны испустить «запаздывающие» нейтроны



Высвобождение энергии при делении

Величина высвобождаемой при делении ядра энергии прямо пропорциональна величине дефекта масс:

$$\Delta E = \Delta mc^2 = [M_{\text{я}} + m_n - M_{\text{оск}}] \cdot c^2$$

Распределение энергии деления ^{235}U и ^{239}Pu

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 МэВ	210.3 МэВ

Тепловая мощность реактора прямо пропорциональна средней скорости реакции деления в его активной зоне

Основные характеристики нейтронных полей

Нейтронное поле - это совокупность свободных нейтронов, движущихся и определённым образом распределённых в объёме материальной среды (активной зоны).

Нейтронное поле описывает:

- сколько нейтронов в рассматриваемый момент времени находятся в единичном объёме среды?
- каковы эти нейтроны?
- каков характер движения этих нейтронов - хаотический, направленный или сложный?

Характеристики нейтронного поля:

- плотность нейтронов - n ;
- скорость нейтронов - v (или их кинетическая энергия $E = mv^2/2$);
- плотность потока нейтронов - Φ ;
- плотность тока нейтронов - I .

Плотность нейтронов

Плотность нейтронов (n) - это число нейтронов, находящихся в данный момент времени в единичном объеме среды.

$$n = dN/dV, \left[\text{нейтр./см}^3 \right]$$

Это статическая характеристика, показывающая наличие нейтронов в единичном объеме.



Скорость нейтронов и их кинетическая энергия

По энергетическому спектру нейтроны классифицируются на:

быстрые ($E > 0,1 \text{ МэВ}$)

промежуточные ($0,625 \text{ эВ} < E < 0,1 \text{ МэВ}$)

тепловые ($E < 0,625 \text{ эВ}$)

Энергетический спектр тепловых нейтронов – спектр Максвелла :

$$n(E)dE = n_0 C E \exp(-E/kT)dE$$

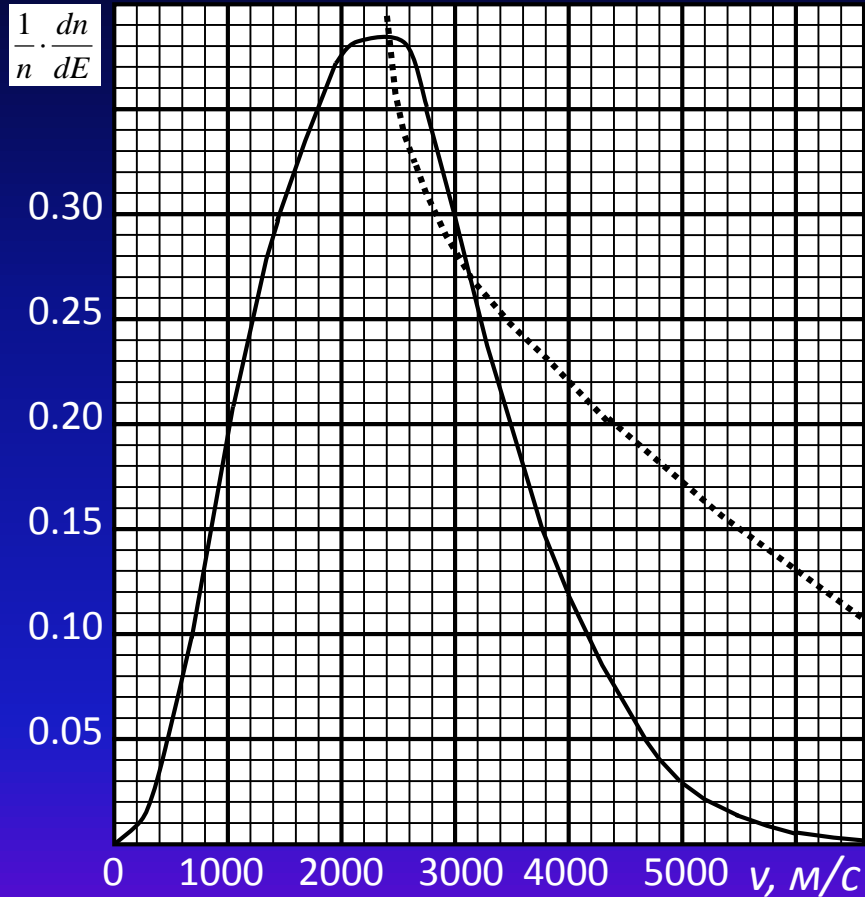
$n(E)$ – плотность тепловых нейтронов, имеющих энергии в элементарном интервале dE вблизи значения E ;

n_0 – интегральная плотность тепловых нейтронов всех возможных энергий в среде с так называемой температурой нейтронов T_n ;

$k = 8.62 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$ – постоянная Больцмана;

C – постоянный множитель нормировки.

Спектр Максвелла



Максимум спектра скользит по гиперболе « $const / v$ », зависящей от температуры тепловых нейтронов

Наиболее вероятная энергия:

$$E_{HB} = kT_H$$

Соответствует максимуму распределения тепловых нейтронов по энергиям при температуре T_H .

Средняя энергия тепловых нейтронов:

$$\bar{E} = 4kT_H / \pi \approx 1,273kT_H = 1,273E_{HB}$$

Плотность потока нейтронов

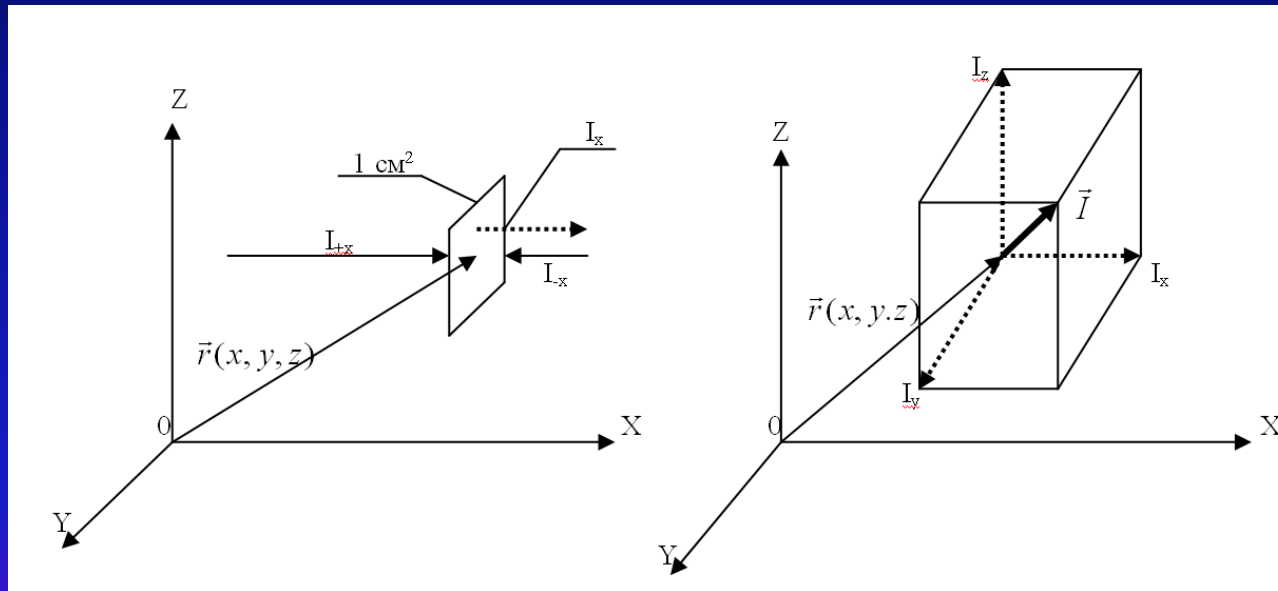
Плотность потока нейтронов (Φ) - это отношение числа нейтронов, ежесекундно падающих на поверхность элементарной сферы, к величине диаметрального сечения этой сферы.

$$\Phi = n \cdot v$$

Это суммарный ежесекундный путь всех нейтронов в 1 см³ среды. Величина скалярная.

Плотность тока нейтронов

Плотность тока нейтронов (I) – это вектор, модуль которого численно равен разности чисел нейтронов, ежесекундно пересекающих единичную площадку, перпендикулярную направлению этого вектора, в двух противоположных направлениях.



Она показывает генеральное направление перемещения больших количеств хаотично движущихся нейтронов и интенсивность перемещения нейтронов в этом направлении.

Скорости нейтронных реакций

Скоростью нейтронной реакции на ядрах i -го компонента среды называется число актов этой реакции, ежесекундно происходящих с этими ядрами в единичном объёме (1 см^3) среды:

$$R_j^i(E) = \sigma_j^i(E) \cdot N_j \cdot n(E) \cdot v(E) = \Sigma_j^i(E) \cdot \Phi(E)$$

$$\sigma_j^i(E)$$

– микроскопическое сечение взаимодействия i -го нуклида по отношению к j -ой реакции;

$$N_j$$

– ядерная концентрация i -го компонента в среде;
– плотность нейтронов с энергией E ;

$$n(E)$$

– скорость нейтронов при их кинетической энергии E ;

$$v(E)$$

$$\Sigma_j^i(E)$$

– макроскопическое сечение взаимодействия вещества по отношению к рассматриваемой (j -ой) нейтронной реакции;
– плотность потока нейтронов

$$\Phi(E)$$

Типы реакций и обозначения

Скорости реакций удобно обозначать символом $R_j^i(E)$, где j указывает тип нейтронной реакции, а i обозначает нуклид или соединение, на ядрах которого происходит рассматриваемая нейтронная реакция.

c (capture) – радиационный захват;

f (fission) – деление;

a (absorption) – поглощение;

s (scattering) – рассеяние: s_e (elastic) – упругое и s_i (inelastic) – неупругое

Примеры:

$R_f^{235\text{U}}$ – скорость реакции деления ядер ^{235}U ;

$R_a^{239\text{Pu}}$ – скорость поглощения нейтронов ядрами ^{239}Pu ;

$R_c^{238\text{U}}$ – скорость радиационного захвата нейтронов ядрами ^{238}U ;

R_a^{Xe} – скорость поглощения нейтронов ядрами ксенона.

Продолжение следует...

