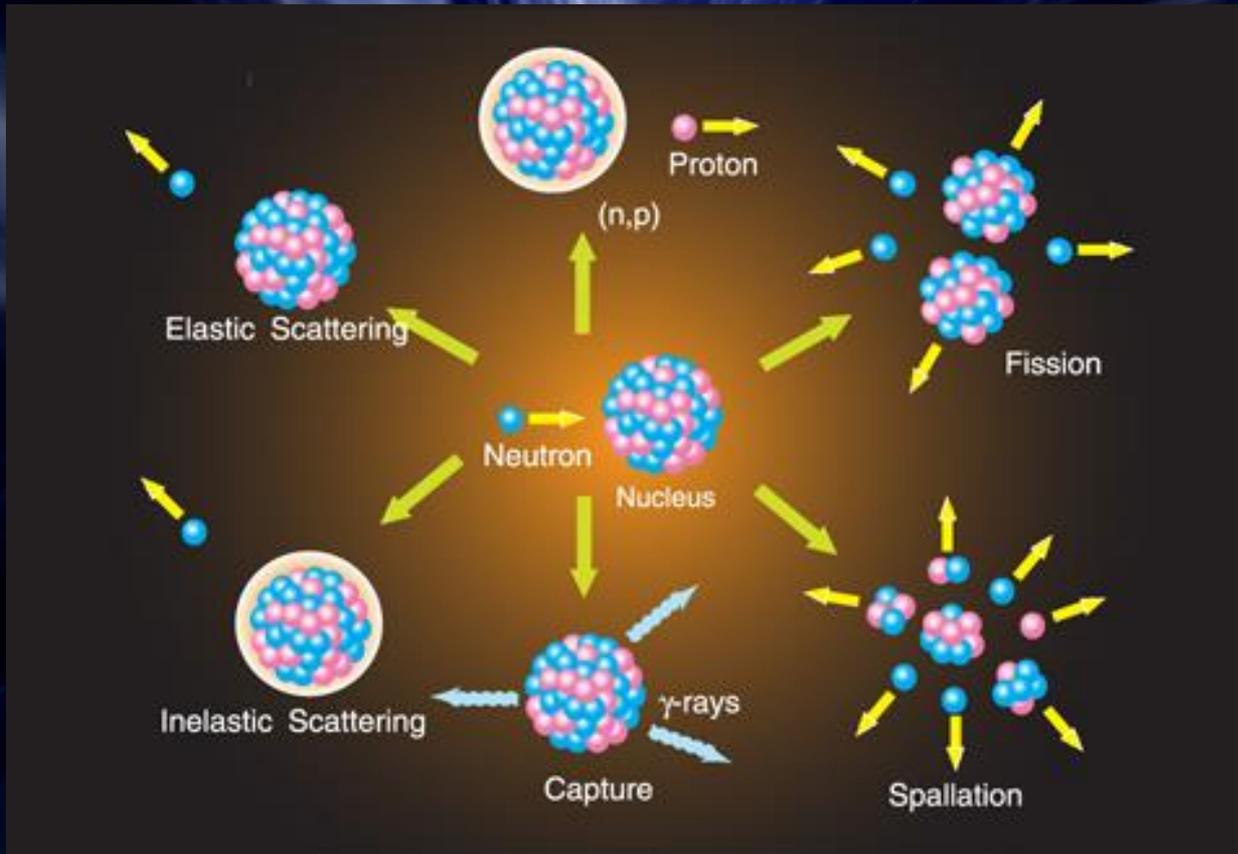


# Нейтронные ядерные реакции



# 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

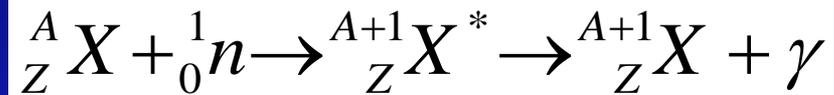
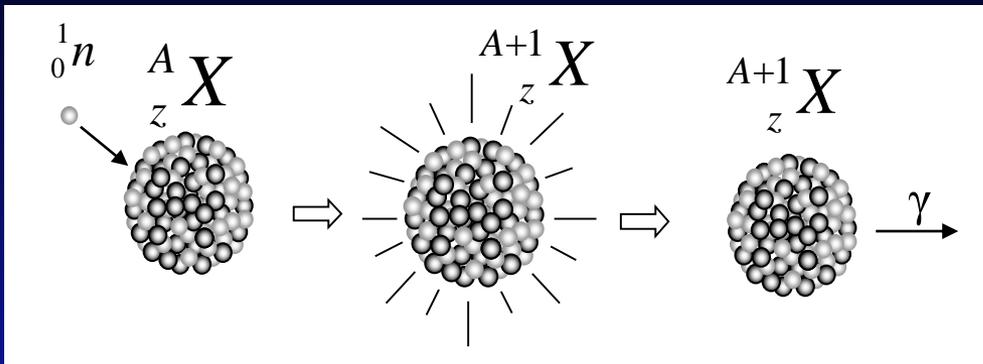
Если в ядро привносится извне дополнительная масса, энергия, то образующееся в результате проникновения в него нейтрона составное ядро - ядро возбуждённое и неустойчивое

Время жизни составного ядра в возбужденном состоянии:

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

Способы снятия возбуждения называются каналами распада

# Радиационный захват

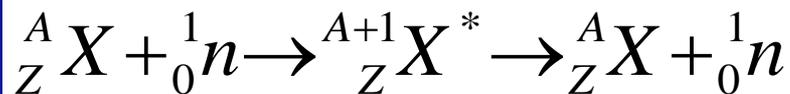
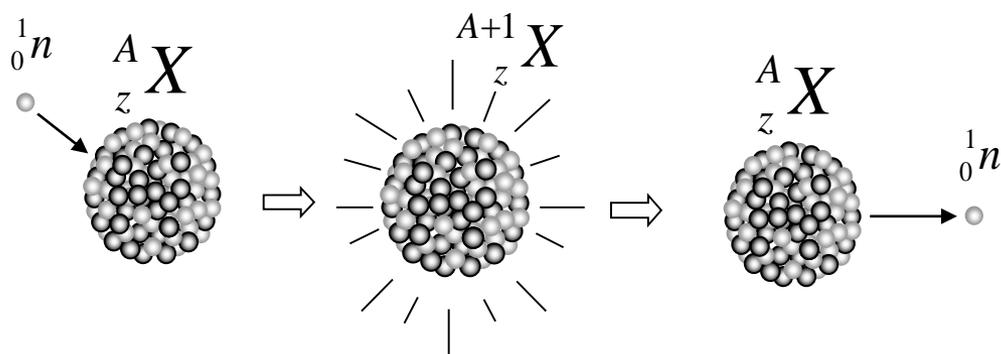


Наиболее склонные к радиационному захвату ядра называют *поглотителями* нейтронов:

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:**

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

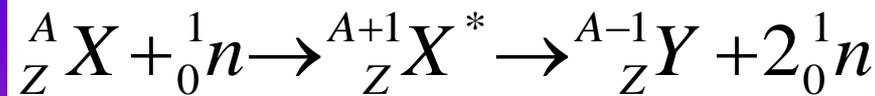
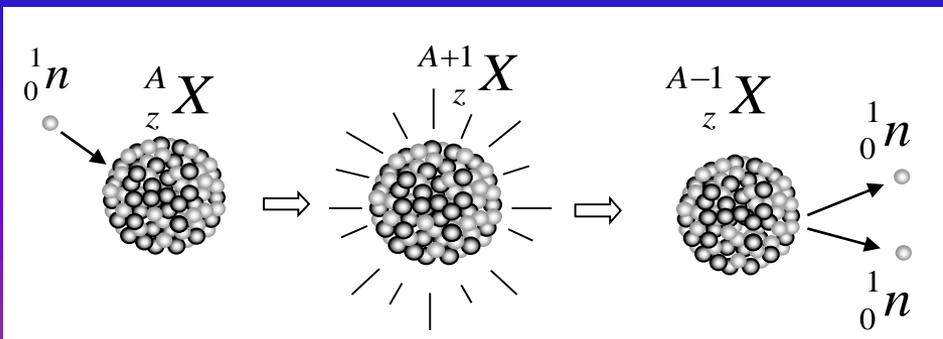
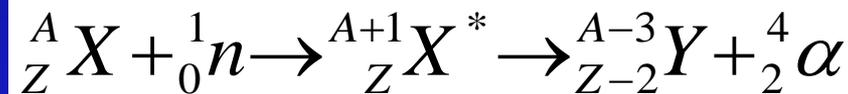
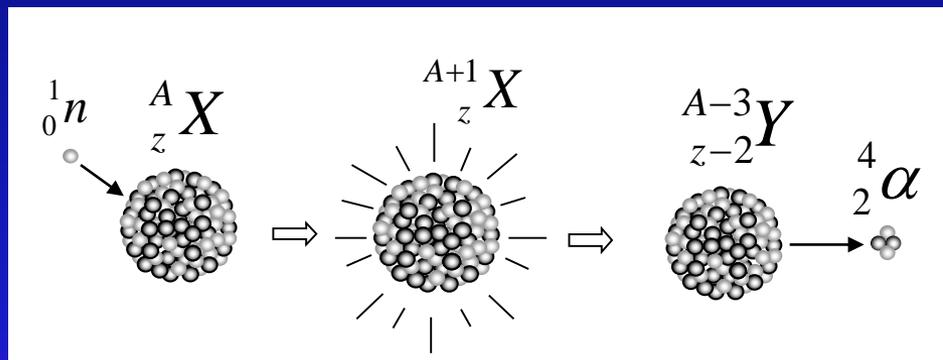
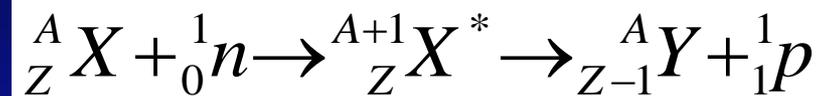
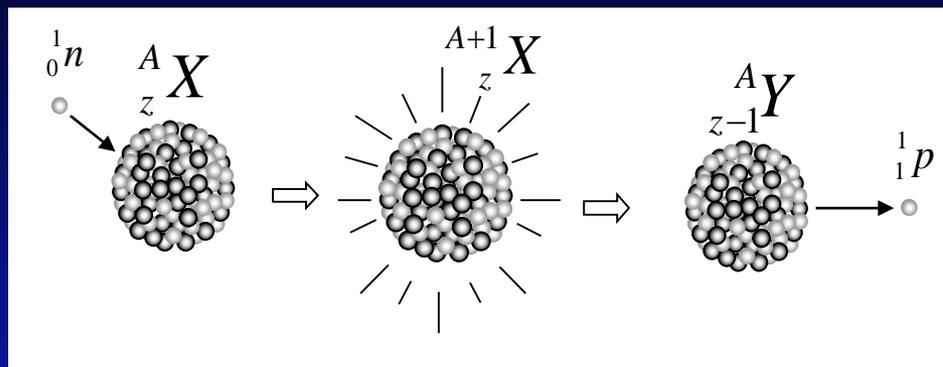
суммы кинетических энергий ядра и нейтрона до и после рассеяния равны между собой

**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)



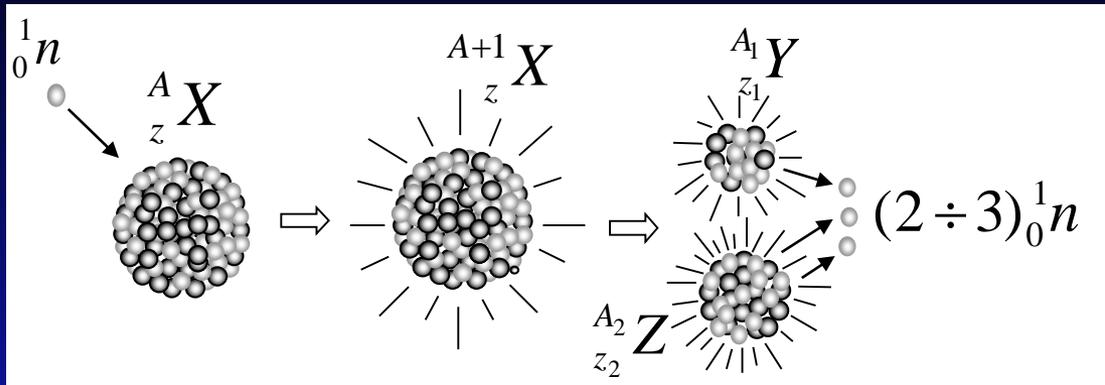
# Реакции превращения

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:



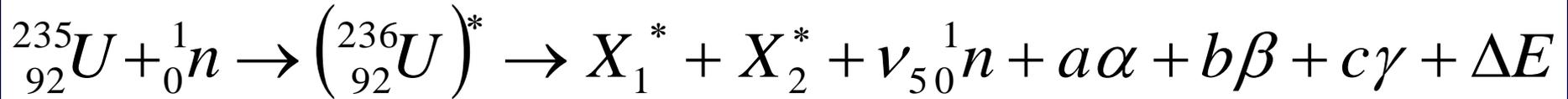
# Особенности делящихся ядер

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

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

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

# Уравнение реакции деления



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

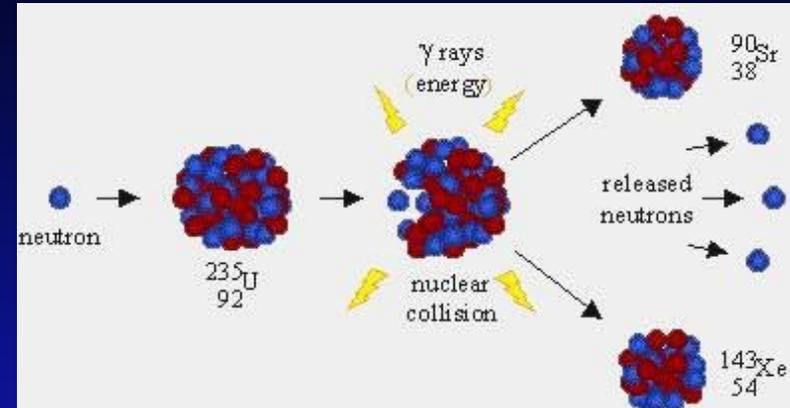
$\nu_{50}^1\text{n}$  -  $\nu_5$  нейтронов деления, высвобождающихся в каждом акте деления урана-235

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

$\Delta E$  - 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%.

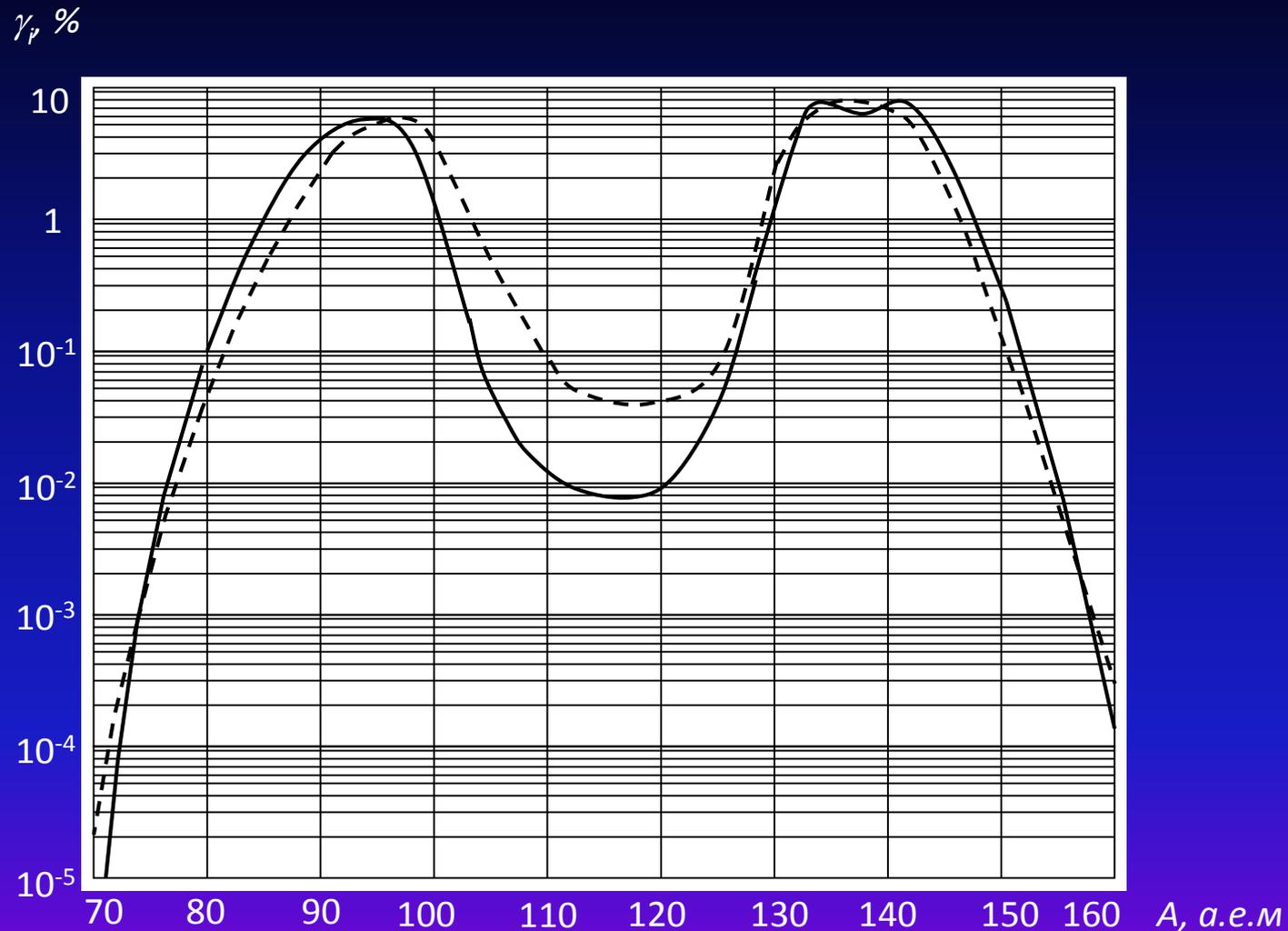
Вероятность появления осколка определённой атомной массы – величина строго определённая, свойственная этому делящемуся нуклиду, и называется *удельным выходом осколка*,  $\gamma_i$ .

Например, удельный выход осколка  $^{135}\text{Xe}$  составляет

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

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

# Образование осколков деления



Удельные выходы осколков деления различных атомных масс при делении ядер  $^{235}\text{U}$  (сплошная линия) и  $^{239}\text{Pu}$  (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  $^{235}\text{U}$  и 0,04% – для  $^{239}\text{Pu}$ .

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

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.

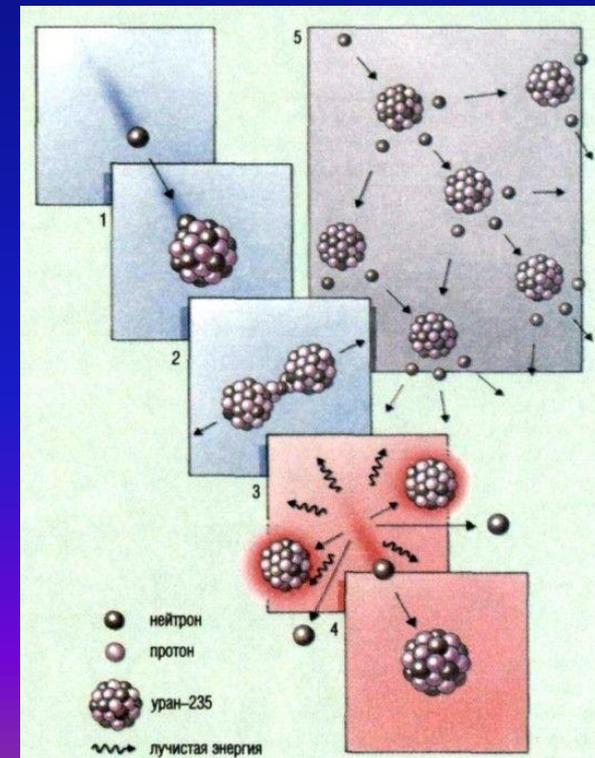
Появление в процессе деления свободных нейтронов дает возможность организовать равномерно следующих во времени друг за другом делений, т.е. «цепную реакцию деления»

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

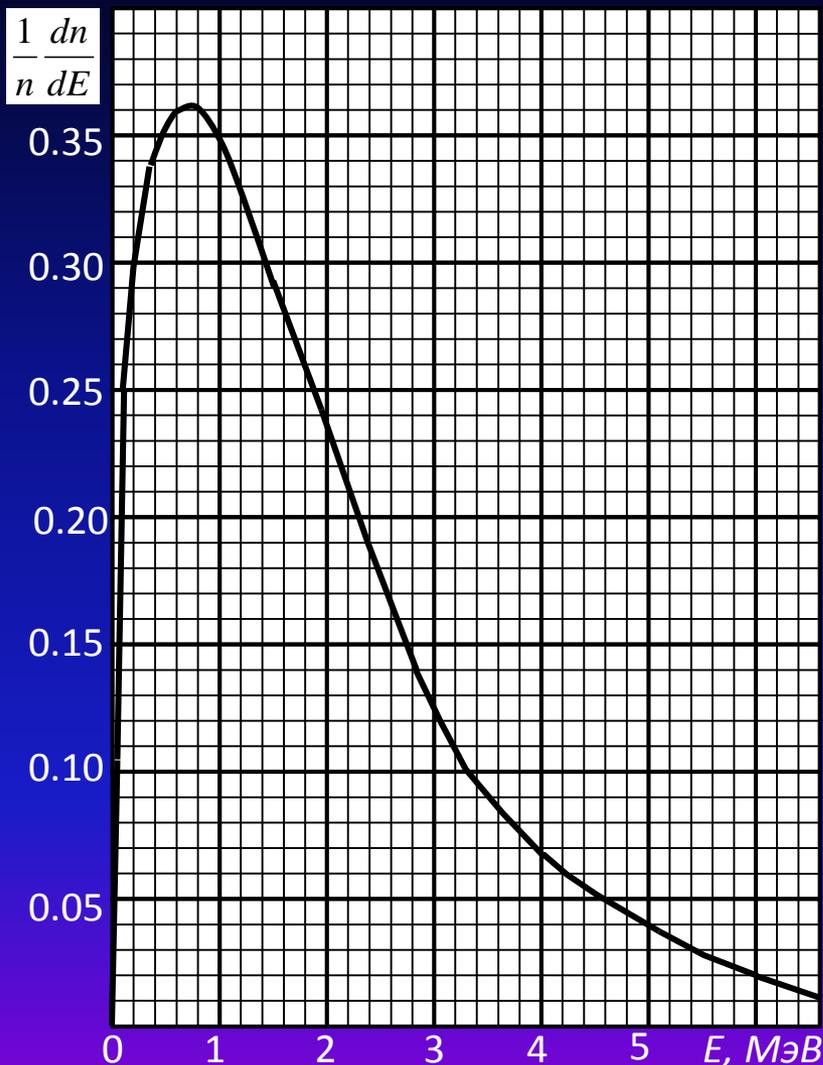
- для урана-235  $\nu_5 = 2.416,$

- 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:

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

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

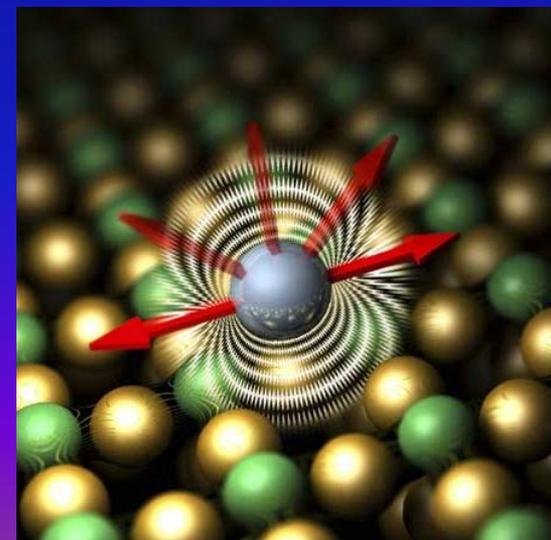
# Радиоактивность осколков деления

Все осколки рождаются сильно возбужденными. Снятие возбуждения осуществляется путём последовательного испускания всех видов радиоактивного излучения ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ). 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  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$

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 $\gamma$ -квантов из продуктов деления	7.2	7.0
5. Кинетическая энергия $\beta$ -излучения осколков	9.0	9.0
6. Энергия антинейтрино	10.0	10.0
Итого:	<b>204.3 МэВ</b>	<b>210.3 МэВ</b>

*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 -  $\Phi$ ;
- 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* ( $E > 0,1$  МэВ)

*промежуточные* ( $0,625$ эВ  $< E < 0,1$ МэВ)

*тепловые* ( $E < 0,625$  эВ)

Энергетический спектр тепловых нейтронов – спектр Максвелла :

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

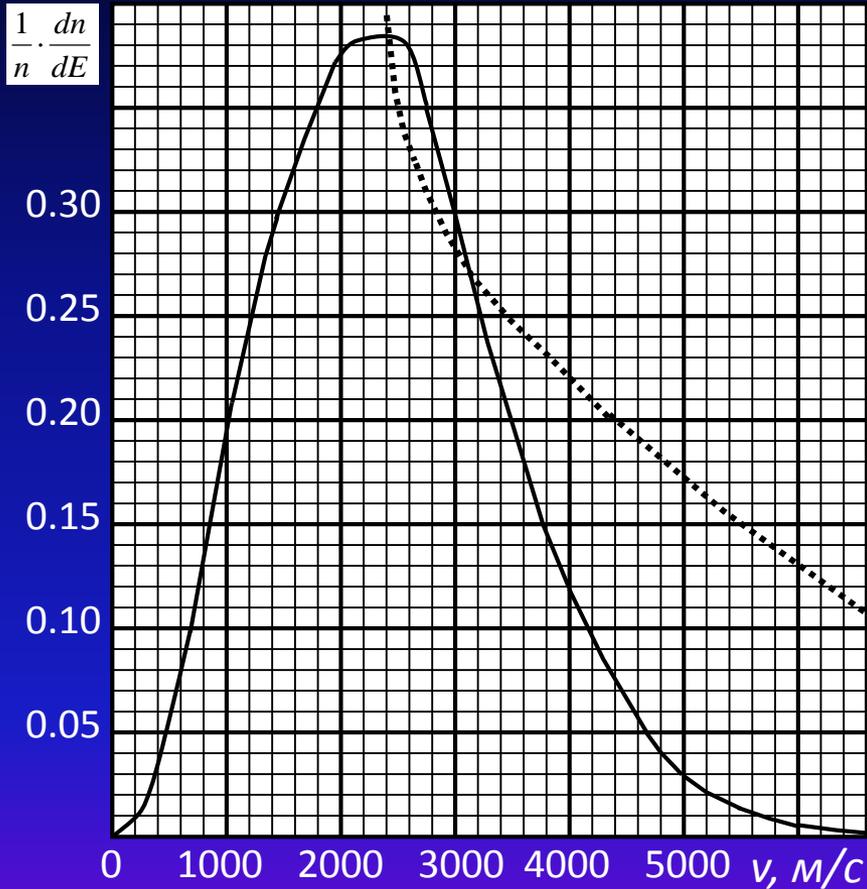
$n(E)$  – плотность тепловых нейтронов, имеющих энергии в элементарном интервале  $dE$  вблизи значения  $E$ ;

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

$k = 8.62 \cdot 10^{-5}$  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

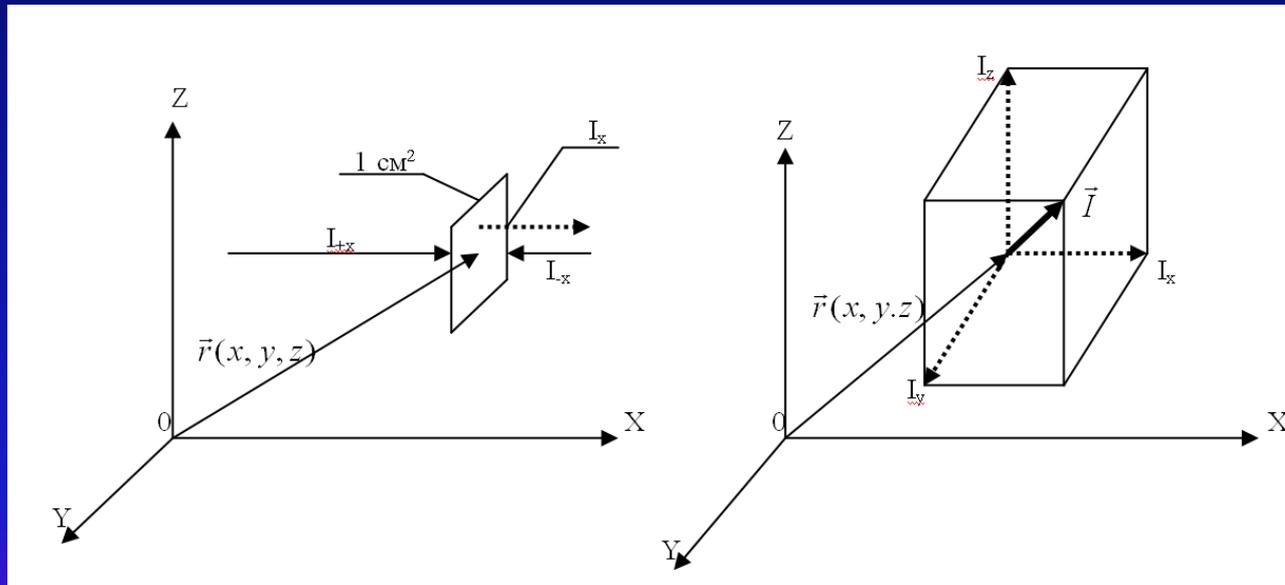
*Плотность потока нейтронов ( $\Phi$ )* - это отношение числа нейтронов, ежесекундно падающих на поверхность элементарной сферы, к величине диаметрального сечения этой сферы.

$$\Phi = n \cdot v$$

Это суммарный ежесекундный путь всех нейтронов в 1 см<sup>3</sup> 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 ( $1 \text{ см}^3$ ) 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  $^{235}\text{U}$ ;

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

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

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

***Продолжение следует...***

