

# Экзаменационные вопросы по ФЯР

Выполнила: ст. гр. С18-АЭ Шиганова Анна

## Вопрос 5

### Решение уравнения диффузии в сферической геометрии с источником. Граничные условия

Рассмотрим точечный источник в бесконечной однородной диффузионной среде.

- 1) Выберем систему координат с началом в точечном источнике;
- 2) В этой системе распределение нейтронов сферически симметрично
- 3) Однородное уравнение принимает вид:

$$\left( \frac{d^2}{dr^2} + \frac{2}{r} \frac{d}{dr} \right) \Phi - \frac{1}{L^2} \Phi = 0$$

где  $r$  - расстояние от точечного источника,  $\Phi$  - поток,  $L$  - длина диффузии

# Граничные условия для данной задачи

1. Поток  $\Phi$  конечен всюду, за исключением источника, то есть при всех  $r > 0$
2. Полное число нейтронов, проходящих сквозь поверхность сферы ( $4\pi r^2$ ), должно равняться мощности источника при стремлении радиуса к нулю.

Если  $J$  - плотность потока нейтронов на поверхности сферы, то это условие (условие источника) выражается:

$$\lim_{r \rightarrow 0} 4\pi r^2 J = q_0, \text{ где } q_0 \text{ — мощность источника}$$

# Нахождение произвольных постоянных

$$\Phi = \frac{A \cdot e^{-\frac{r}{L}}}{r} + \frac{C \cdot e^{\frac{r}{L}}}{r}$$

где  $A$  и  $C$  – произвольные постоянные, подлежащие определению из граничных условий

Из 1 условия очевидно, что  $C=0$ , так как в противном случае поток становился бы бесконечным при  $r \rightarrow \infty$

Согласно второму граничному условию источника  $A = \frac{q_0}{4\pi D}$

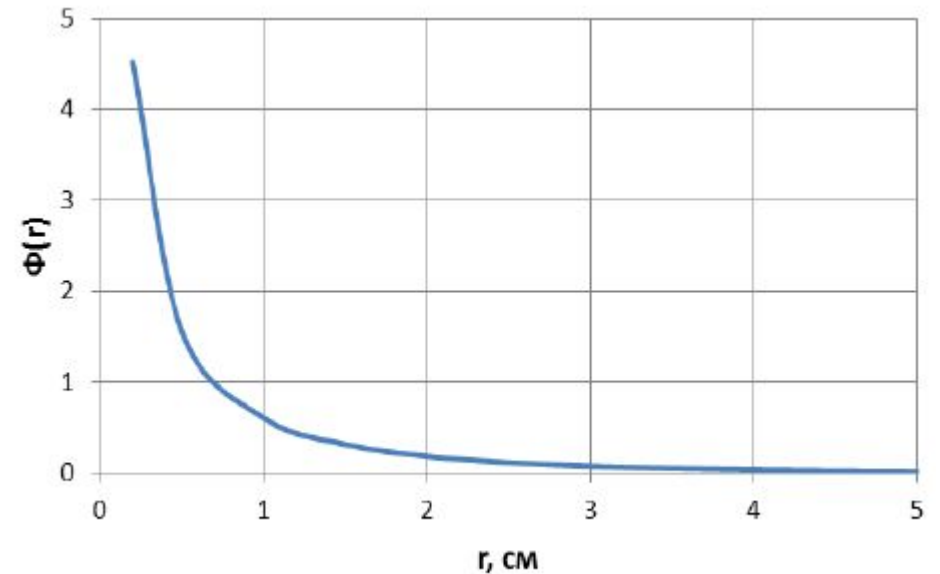
4) Подставляем значение A и (C=0) в

$$\Phi = \frac{A \cdot e^{-\frac{r}{L}}}{r} + \frac{C \cdot e^{\frac{r}{L}}}{r}$$

5) Получаем окончательно  $\Phi(r) = \frac{q_0}{4\pi D} \frac{e^{-r/L}}{r}$

Это выражение дает стационарное распределение нейтронного потока вокруг точечного источника в бесконечной среде.

Поток в каждой точке заданной среды зависит только от расстояния r до источника.



## Вопрос 31

**Реакция деления и ее характеристики. Взаимодействие нейтронов с ядрами среды. Сечения реакций. Характеристики нейтронного поля. Число реакций в единице объема.**

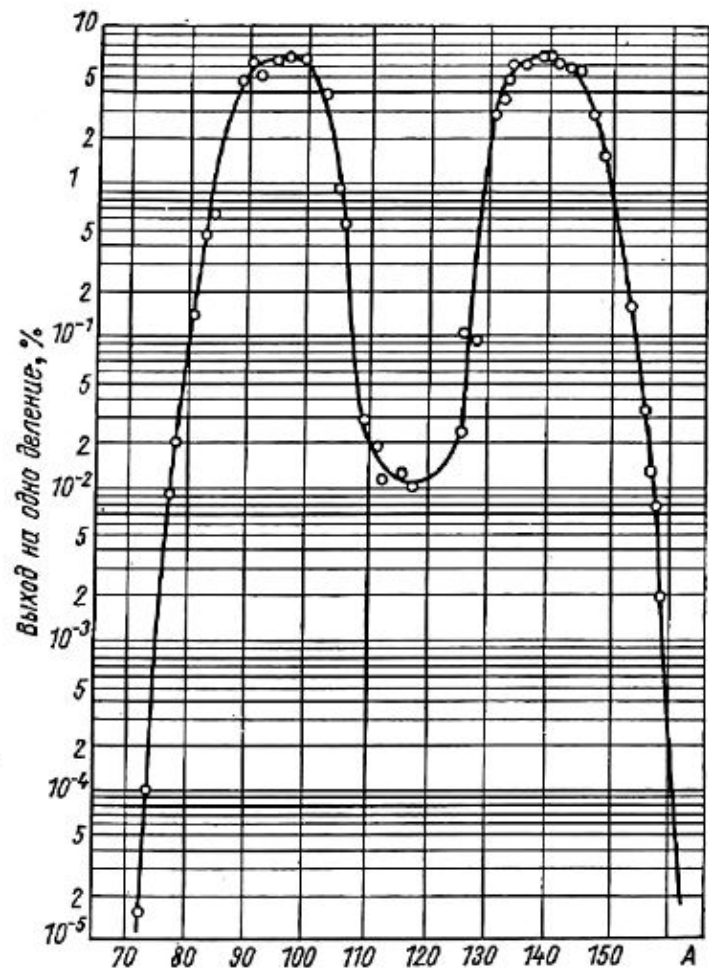
Реакция деления - экзотермическая реакция - с выделением энергии. В процессе деления освобождаются нейтроны, которые инициируют реакцию деления.

Деление характеризуется следующими параметрами:

- сечением деления  $\sigma_f$ ;
- числом мгновенных нейтронов на 1 акт деления  $\nu$ ;
- $\eta$  - числом нейтронов, выделяющихся на 1 акт поглощения;
- $\alpha = \frac{\sigma_\gamma}{\sigma_f}$  - вероятностью тепловому нейтрону поглотиться по отношению к делению;

$$\eta = \frac{\nu}{(1+\alpha)}$$

где  $\alpha, \nu, \eta, \sigma_f$  - зависят от  $E$  и  $A$ .



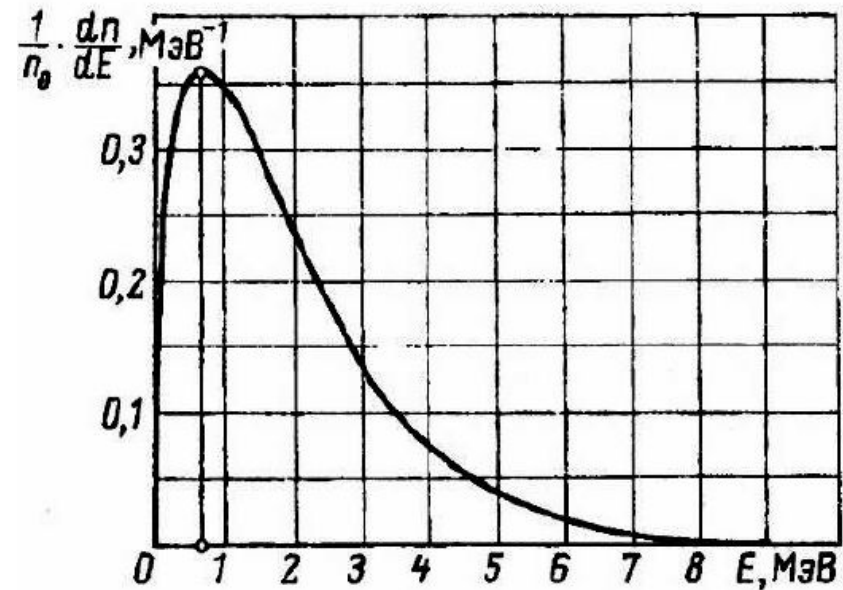
Общий вид распределения осколков по массе (на рис.) сохраняется независимо от того, какое ядро делится и какая энергия была у нейтрона. Средняя энергия на 1 акт деления  $E=200$  МэВ. Осколки - это голые ядра, которые пробегая несколько микрометров становятся нормальными, приобретая электроны.

Спектр нейтронов деления представлен на рисунке. Он может быть аппроксимирован следующим выражением:

$$s(E) = 0,48e^{-E} \operatorname{sh}\sqrt{(2E)},$$

где  $s(E)$ —число нейтронов деления в единичном интервале энергии.

Площадь под кривой  $\int_0^{\infty} s(E)dE$  равна единице, т. е.  $s(E)$  нормирована на один нейтрон;  $E$ —энергия нейтронов в МэВ.





# Область тепловых нейтронов

$U^{235}$  -единственный природный делящийся элемент, который образует критическую массу.  $U^{233}$  и  $Pu^{239}$  – искусственные элементы, которые также образуют критическую массу. Их основные характеристики для энергии  $E=0,0253$  эВ, соответствующей тепловому равновесию нейтронного газа при  $T=20^{\circ}C$ ,

Среднее число мгновенных нейтронов на один акт деления

Нуклид	$\nu$	$\frac{d\nu}{dE}, 1/МэВ$
$^{233}U$	2,51	0,115
$^{235}U$	2,43	0,115
$^{239}Pu$	2,88	0,110

# Баланс энергии при делении

Энерговыделение при делении складывается из: кинетической энергии осколков деления -  $E_k$ , кинетической энергии мгновенных нейтронов -  $E_n$ , энергии мгновенных  $\gamma$ -квантов -  $E_{\gamma 1}$ , энергии  $\beta$ -частиц, испускаемых продуктами деления -  $E_{\beta}$ , энергии запаздывающих  $\gamma$ -квантов, испускаемых продуктами деления -  $E_{\gamma 2}$  и энергии, уносимой антинейтрино -  $E_{\nu}$ . Суммарная энергия – энергия деления -  $E_f$  [МэВ] представлена в табл. для трех делящихся изотопов.

**Значение энергии деления для основных делящихся изотопов, МэВ**

Ядро	$E_k$	$E_n$	$E_{\gamma 1}$	$E_{\beta}$	$E_{\gamma 2}$	$E_{\nu}$	$E_f$
U-233	160,5	5,0	7,0	9,0	7,0	10	198,5
U-235	166,0	4,9	7,2	9,0	7,2	10	204,3
Pu-239	171,5	5,8	7,0	9,0	7,0	10	210,3

# Взаимодействия нейтронов с ядрами среды

Нейтроны взаимодействуют с ядрами среды.

Мера этого взаимодействия - сечение взаимодействия – эффективная площадь ядра мишени относительно налетающего нейтрона.

Поглощение – включает все виды взаимодействия в результате которых образуется новое ядро и новые частицы (в том числе и нейтроны)

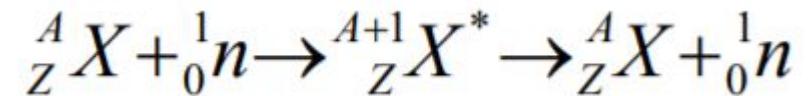
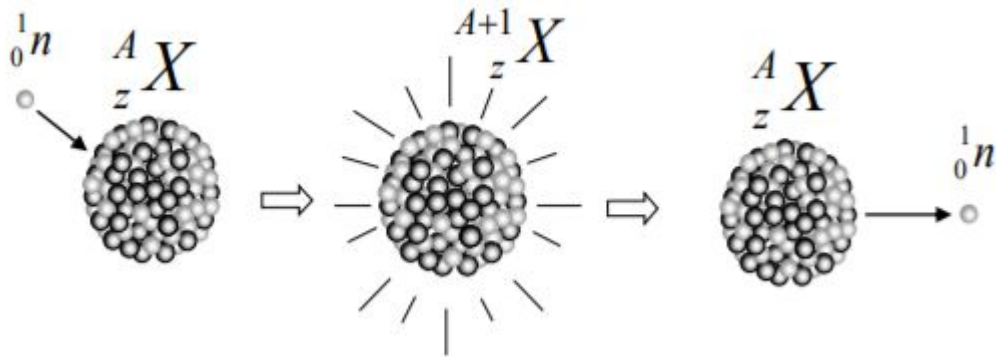
*Потенциальное рассеяние* – рассеяние нейтронной волны на потенциале ядра без проникновения нейтронной волны внутрь ядра. Идет при любой кинетической энергии нейтрона ( $\sigma_p$ )

Рассеяние – новых ядер не образуется, происходит перераспределение кинетической энергии и момента количества движения между нейтроном и ядром

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.



Упругое рассеяние: суммы кинетических энергий ядра и нейтрона до и после рассеяния равны |  $(\sigma_{el})$  любой

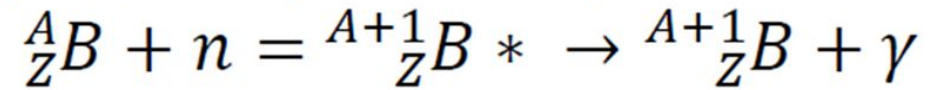
$$(E_{\text{ядра}} + E_n)_{\text{до}} = (E_{\text{ядра}} + E_n)_{\text{после}}$$

Неупругое рассеяние: 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

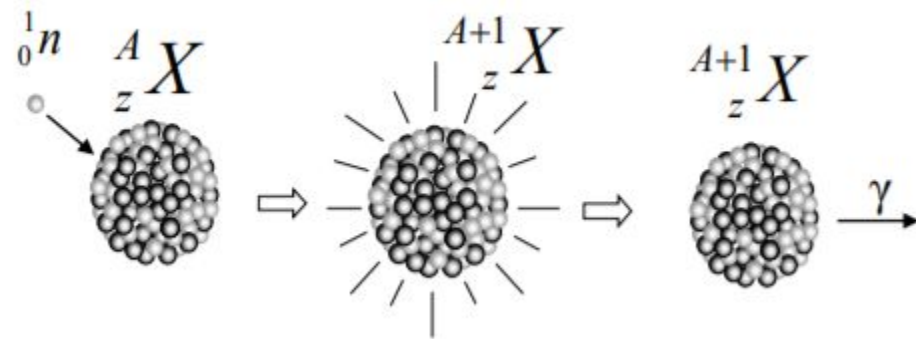
$$(E_{\text{ядра}} + E_n)_{\text{до}} > (E_{\text{ядра}} + E_n)_{\text{после}}$$

Радиационный захват – реакция поглощения нейтрона в результате которой нейтрон захватывается ядром и вся энергия возбуждения уносится  $\gamma$  – квантами ( $\sigma_c$ )



Наиболее склонные к радиационному захвату ядра называют поглотителями нейтронов:

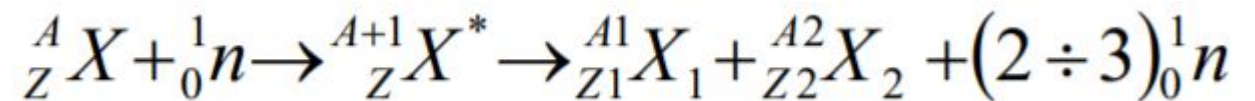
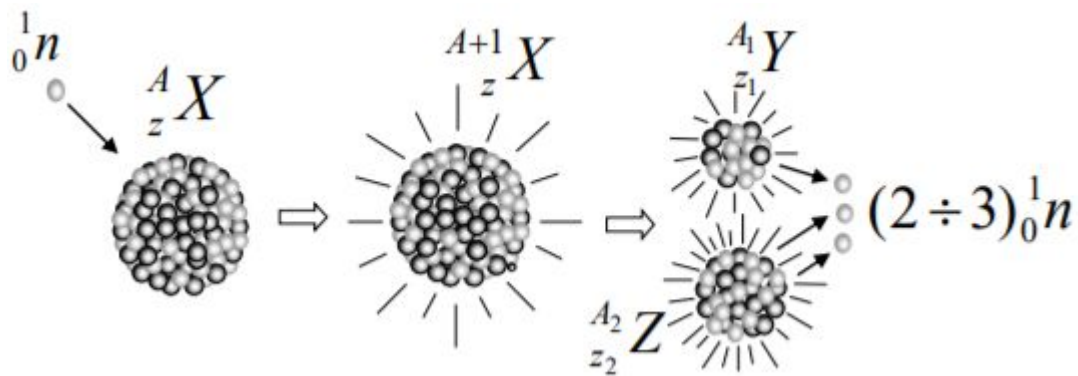
бор-10, самарий-149, ксенон-135, европий, кадмий, гадолиний U-235 и Pu-239 также являются поглотителями



Деление – составное ядро распадается на несколько осколков ( $\sigma_f$ )

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



# Характеристики нейтронного поля

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

Характеристики нейтронного поля:

- плотность нейтронов -  $n$ ;
- скорость нейтронов -  $v$  (или их кинетическая энергия );
- плотность потока нейтронов -  $\Phi$ ;
- плотность тока нейтронов –  $I$ .



# Плотность нейтронов

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

Это статическая характеристика, показывающая наличие нейтронов в единичном объёме.

$$n = dN/dV, [\text{нейтр./см}^3]$$

# Скорость нейтронов

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 :

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

# Плотность потока нейтронов

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

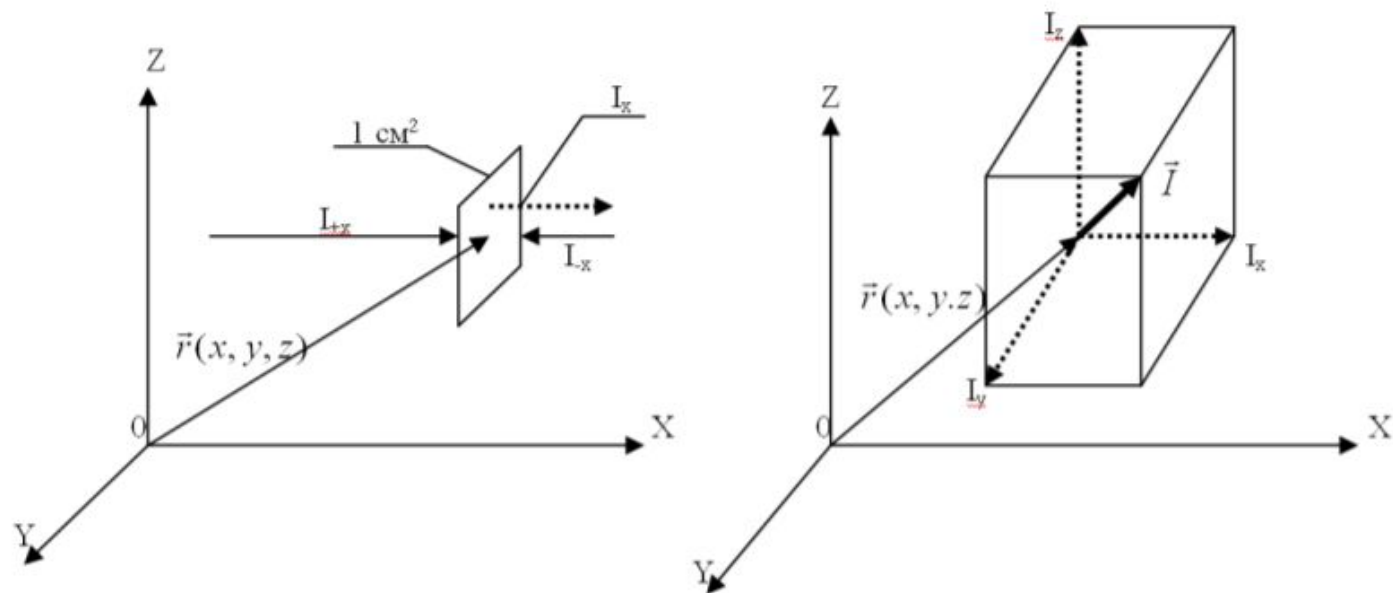
Это суммарный ежесекундный путь всех нейтронов в 1 см<sup>3</sup> среды.

Величина скалярная.

$$\Phi = n \cdot v$$

# Плотность тока нейтронов

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



# Число реакций в единице объема

Число взаимодействий нейтронов в единице объема за единицу времени

$v \cdot n \cdot 1 \text{ с}$  = сумма путей всех нейтронов за 1 с

$\frac{v \cdot n}{\lambda} = v \cdot n \cdot \Sigma = \Phi \cdot \Sigma$  – число взаимодействий нейтронов в 1 объеме за 1 времени

$N_a = \Phi \cdot \Sigma_a$  = число поглощений в 1 объеме в 1 времени

$N_f = \Phi \cdot \Sigma_f$  = число делений

$$3,1 \cdot 10^{10} \cdot q_v = N_f = \Phi \cdot \Sigma_f$$

$q_v$  - объемная плотность энерговыделения в активной зоне [Вт/см<sup>3</sup> ]