

# **Основные зависимости и картинки к госэкзамену**

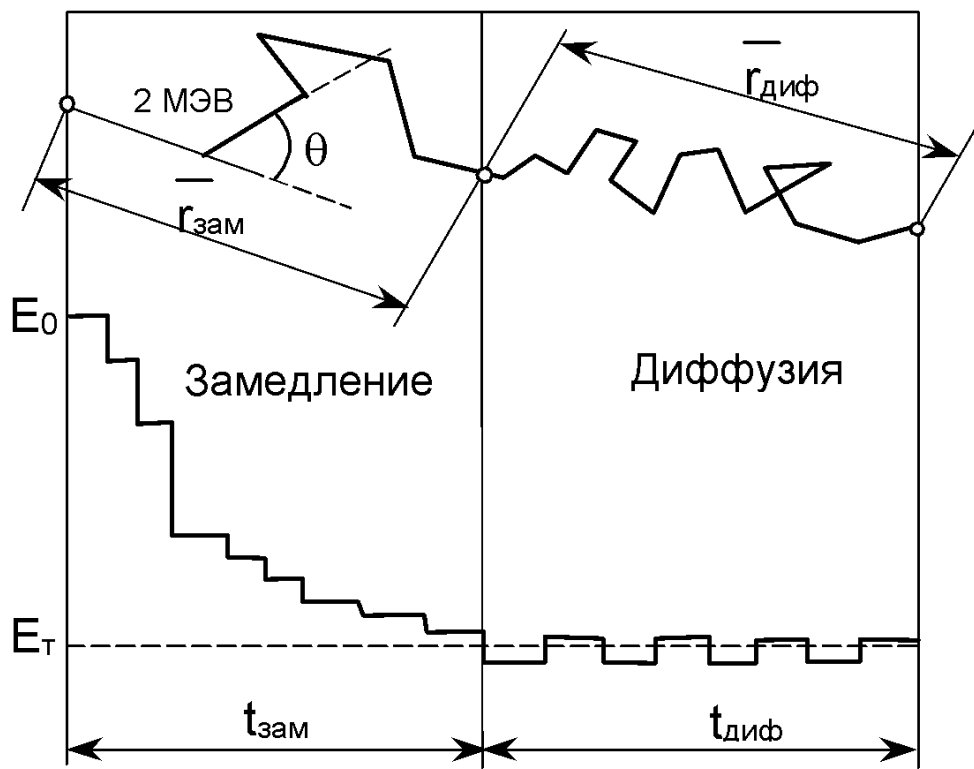
**Баланс нейтронов. Коэффициент размножения.  
Реактивность**

$$\frac{d\bar{n}_T}{dt} = \left( \begin{array}{l} \text{скорость генерации} \\ \text{тепловых нейтронов} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{скорость поглощения} \\ \text{тепловых нейтронов} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{скорость утечки} \\ \text{тепловых нейтронов} \end{array} \right)$$

$$D\nabla^2\Phi - \Sigma_a\Phi + S = \frac{\partial n}{\partial t}$$

$$k_{\text{эф}} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{n_1 \pm \Delta n}{n_1} = 1 \pm \frac{\Delta n}{n_1} = 1 \pm \delta k_{\text{эф}}$$

$$\rho = \frac{k_{\text{эф}} - 1}{k_{\text{эф}}} = \pm \frac{\delta k_{\text{эф}}}{k_{\text{эф}}}$$



$$\tau = \frac{1 - 2}{6} r_{зам} = \frac{\ln \frac{E_0}{E}}{3 \cdot \xi \cdot \Sigma_s^2 \cdot (1 - \overline{\cos \theta})}$$

$$\xi = \ln \left( \frac{E_1}{E_2} \right) = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1}$$

$$K_{зам} = \xi \Sigma_s / \Sigma_a,$$

$$L^2 = \frac{1 - 2}{6} r_{зам} = \frac{1}{3} \Sigma_a \cdot \Sigma_s \cdot (1 - \overline{\cos \theta})$$

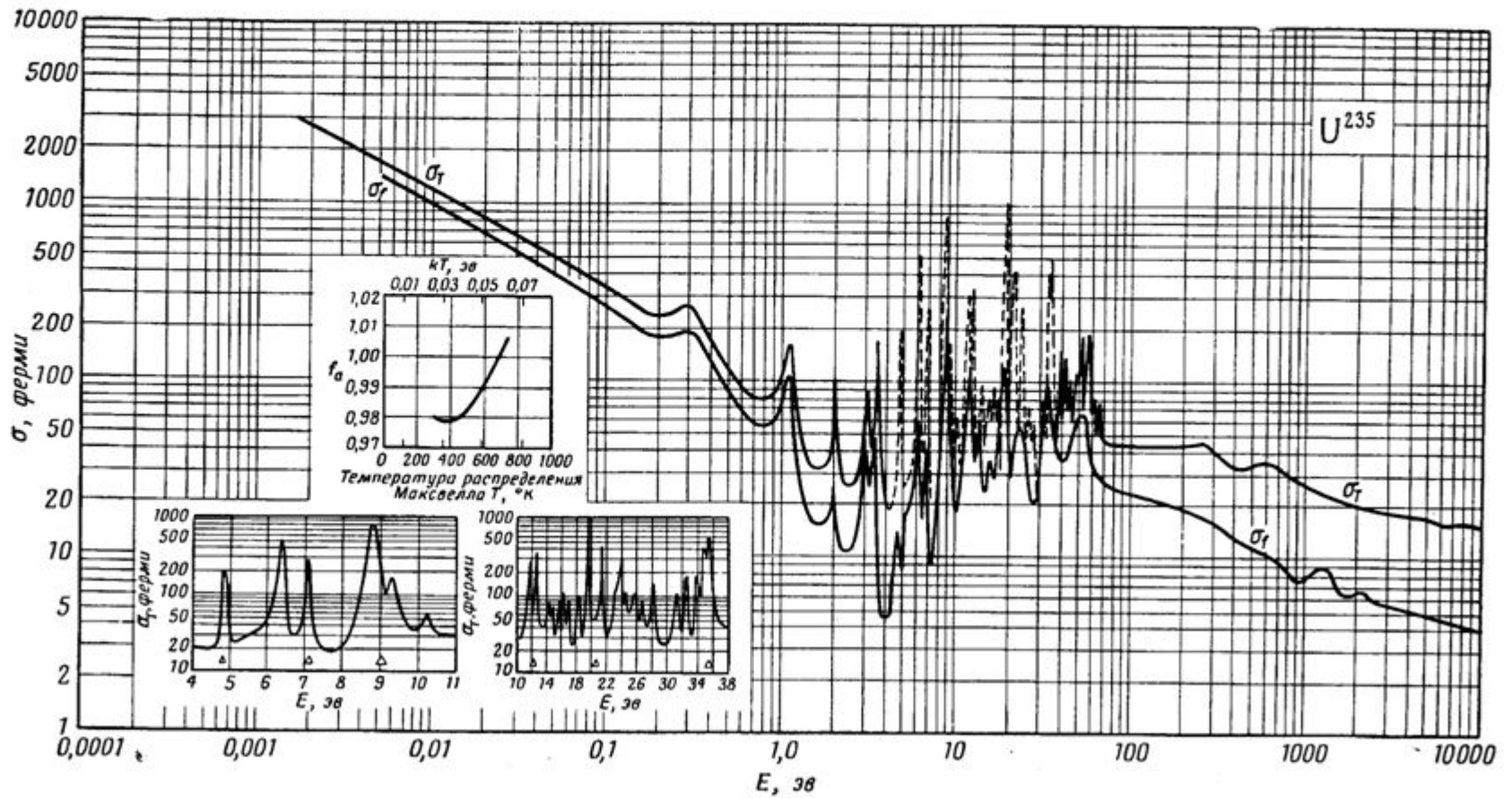
$$M^2 = \tau + L^2$$

$$K_{эф} = K_{\infty} \cdot p_{зам} \cdot p_{диф} = \frac{K_{\infty} \cdot e^{-B^2 \cdot \tau}}{(1 + B^2 \cdot L^2)} = 1$$

$$B^2 = \left( \frac{\Pi}{H + 2\delta_{эф}} \right)^2 + \left( \frac{2.405}{R + \delta_{эф}} \right)^2$$

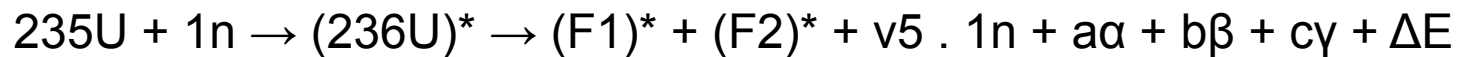
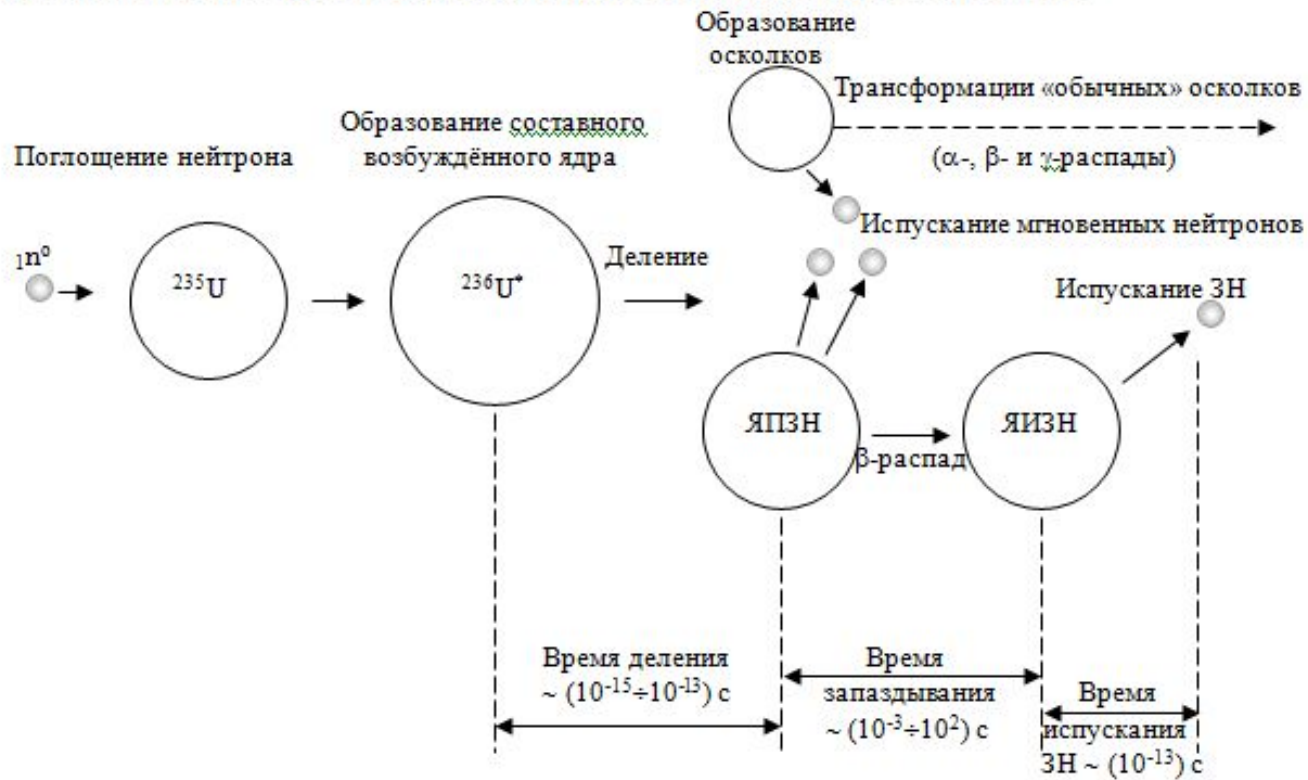
$$K_{\infty} = v_{эф} \cdot \mu \cdot \phi \cdot \theta$$

# Ядерные реакции

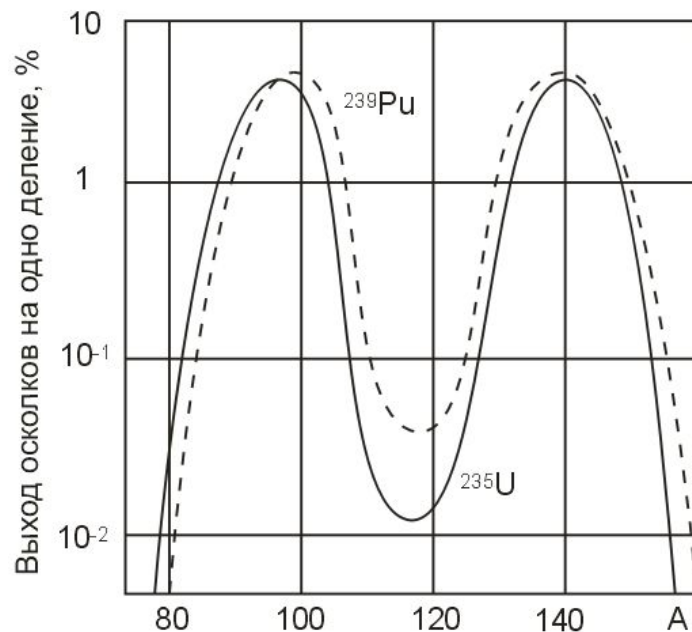


$$\bar{N} = \bar{\Phi} \rho \cdot \sigma_f \cdot E_f \cdot V \quad \Sigma_f = \rho \cdot \sigma_f = \frac{\text{яд}}{\text{см}^3} \cdot \text{см}^2 = \frac{1}{\text{см}} = \text{см}^{-1}$$

# Реакция деления

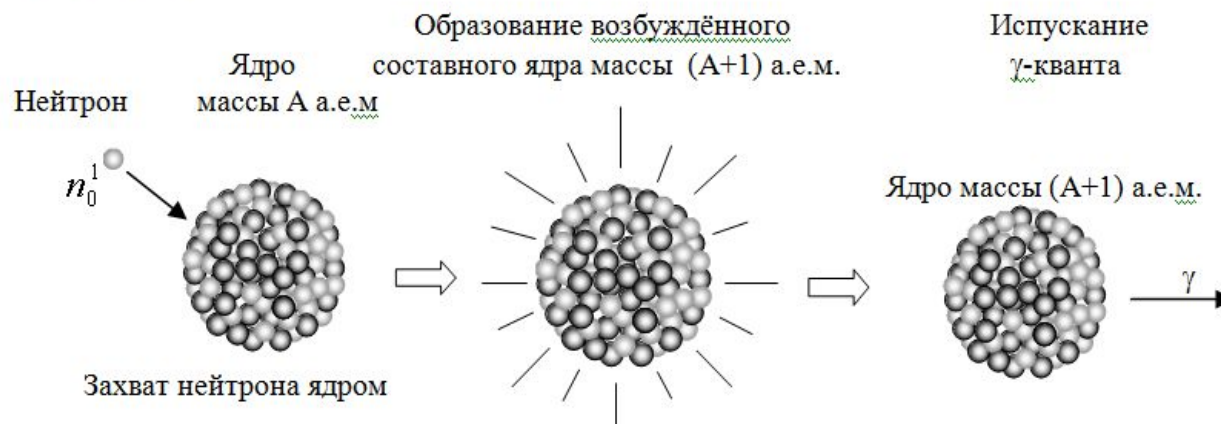


## Удельные выходы осколков деления различных атомных масс при делении ядер $^{235}\text{U}$ (сплошная линия) и $^{239}\text{Pu}$ (штриховая линия)

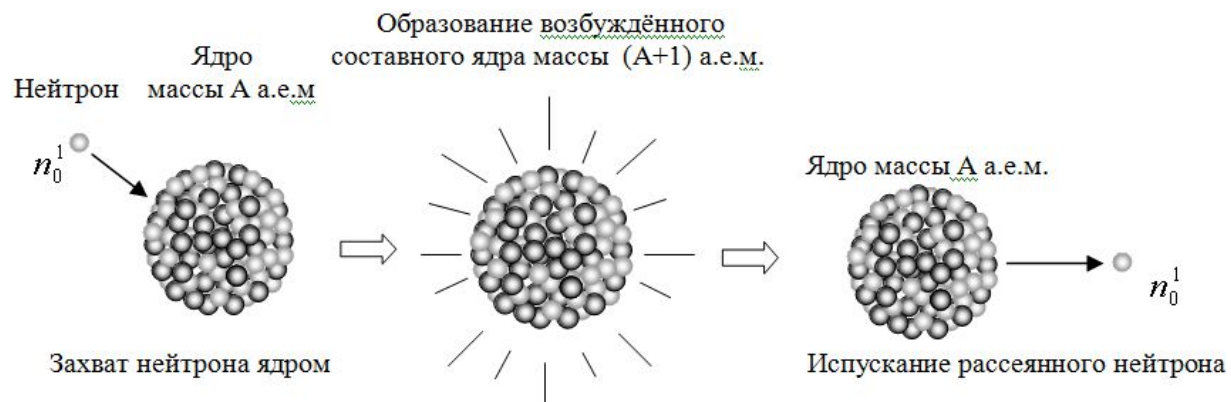


Носители энергии деления	урана-235	плутония-239
1. Кинетическая энергия осколков деления	166.0	171.5
2. Кинетическая энергия нейтронов деления	4.9	5.8
3. Энергия мгновенных гамма-квантов	7.2	7.0
4. Энергия $\gamma$ -квантов из продуктов деления	7.2	7.0
5. Кинетическая энергия $\beta$ -излучения осколков	9.0	9.0
6. Энергия антинейтрино	10.0	10.0
Итого:	204.3 МэВ	210.3 МэВ

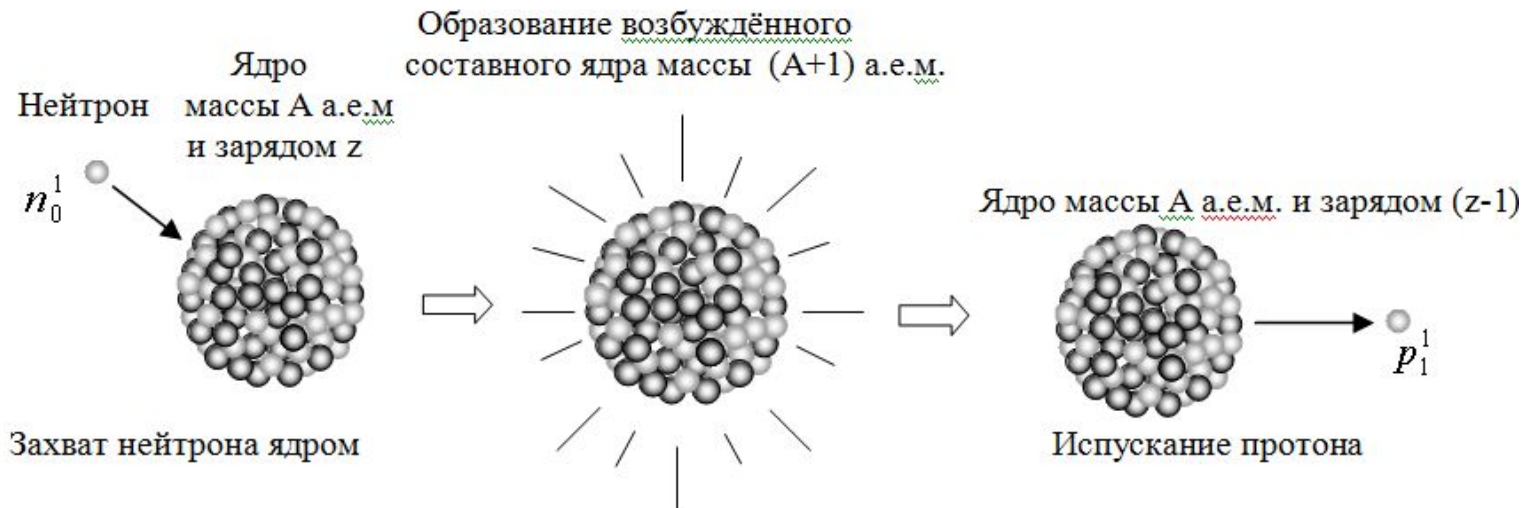
## Радиационный захват



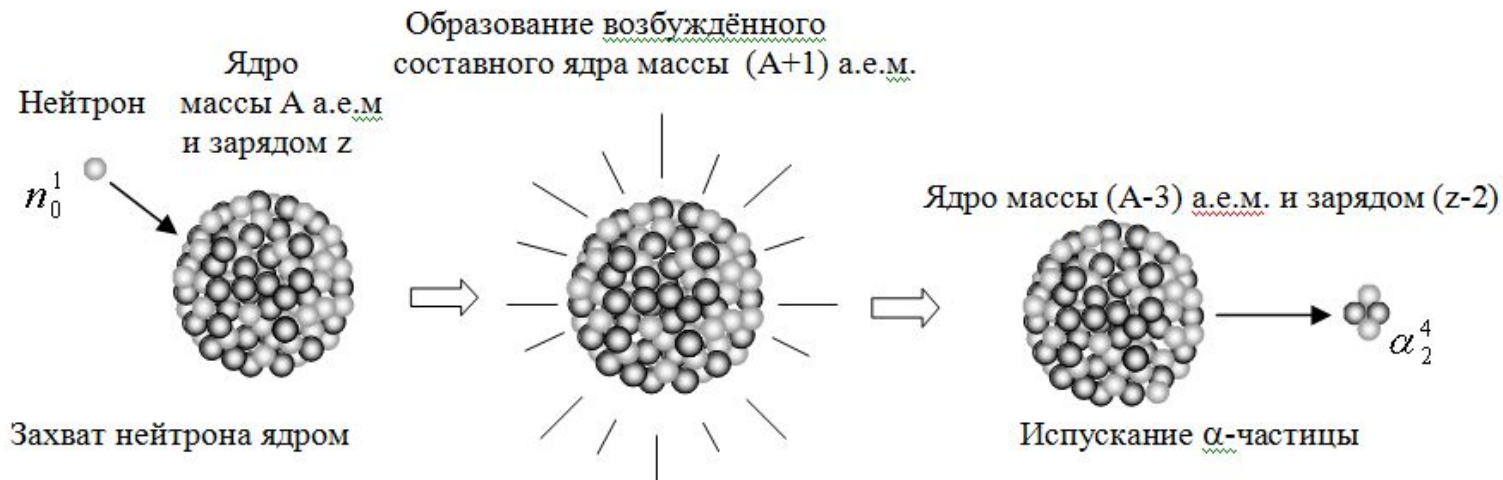
## Реакция рассеяния



## Реакции типа (n,p)

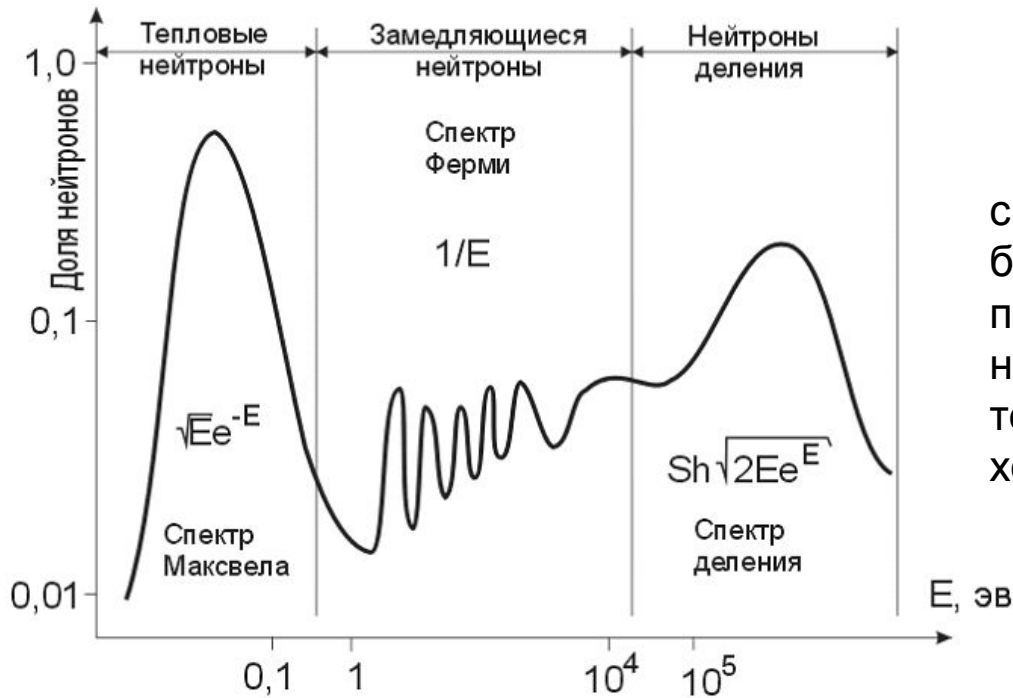


## Реакции типа (n, $\alpha$ )





## Понятие об энергетическом спектре



сверхбыстрые ( $E > 2$  МэВ);  
 быстрые ( $0,2$  МэВ  $< E < 2$  МэВ);  
 промежуточные ( $0,5$  кэВ  $< E < 0,2$  МэВ);  
 надтепловые ( $0,1$  эВ  $< E < 0,5$  кэВ);  
 тепловые ( $E < 0,1$  эВ);  
 холодные ( $E < 5 \cdot 10^{-3}$  эВ).

$$T_{н.г.} \approx T(1 + 1,4 \Sigma a(T) / \xi \Sigma s),$$

## Замедлители

Вещество	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Замедляющая способность	Коэффициент замедления
Легкая вода (H <sub>2</sub> O)	1	1,35	61
Тяжелая вода (D <sub>2</sub> O)	1,1	0,179	1900
Бериллий (Be)	1,85	0,155	125
Окись бериллия	2,96	0,12	170
Графит (C)	1,6	0,064	170
Гелий (He)	0,00018	0,009	45

$$\xi \sum_s \quad \xi = \overline{\ln\left(\frac{E_1}{E_2}\right)} = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1}$$

$$K_{зам} = \frac{\xi \sum_s}{\sum_a} \quad z = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_1}{E_2} = \left( \frac{A}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{18A} \right) \ln \frac{E_1}{E_2}$$

# Мгновенные и запаздывающие нейтроны

## Мгновенные

*Выход нейтронов*

для урана-235	$\nu_5 = 2.416,$
для плутония-239	$\nu_9 = 2.862,$
для плутония-241	$\nu_1 = 2.938$

Зависимость от энергии

$$\nu_5(E) = 2.416 + 0.1337 E;$$

$$\nu_9(E) = 2.862 + 0.1357 E.$$

$$\lambda = t_{дел} + t_z + t_{диф}$$

Сравнение спектров

$E_{ср} = 1.935 \text{ МэВ}$  - для  $^{235}\text{U}$

$E_{ср} = 2.00 \text{ МэВ}$  - для  $^{239}\text{Pu}$

# Мгновенные и запаздывающие нейтроны

## Запаздывающие

Родона-чальник	Период полураспада	Номер группы	Средний удельный выход группы	Средний период полураспада группы	Абсолютная доля выхода группы
<sup>87</sup> Br	54 с	1	0.00052	55.72 с	0.00021
<sup>142</sup> Cs	66 с	1			
<sup>137</sup> I	24.2 с	2	0.00346	22.72 с	0.00140
<sup>93</sup> Br	15.5 с	2			
<sup>136</sup> Te	20.0 с	2			
<sup>138</sup> I	5.9 с	3	0.00310	6.22 с	0.00126
<sup>89</sup> Br	3.9 с	3			
<sup>139</sup> I	2.7 с	4	0.00624	2.30 с	0.00253
<sup>94</sup> Kr	1.4 с	4			
<sup>144</sup> Cs	1.9 с	4			
<sup>140</sup> I	0.5 с	5	0.00182	0.50 с	0.00074
<sup>93</sup> Br	0.16 с	6	0.00066	0.18 с	0.00027
<sup>145</sup> Cs	0.19 с	6			

а) Доля выхода группы среди всех генерируемых нейтронов

$$\beta_i = \frac{\gamma_i \cdot P_{\beta i}}{V_5}, \quad \beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i = \beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 + \beta_5 + \beta_6.$$

для ядер  $^{235}\text{U}$        $\beta_5 = 0.0064,$   
 для ядер  $^{239}\text{Pu}$        $\beta_9 = 0.0021$

б) Величина начальной кинетической энергии  $E_i$  запаздывающих нейтронов.

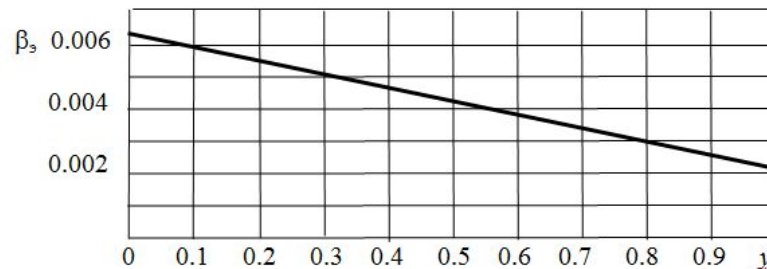
$$\bar{E}_{зн} = \frac{1}{\beta} \sum_{i=1}^6 E_i \cdot \beta_i \approx 0.49 \text{ МэВ}, \quad \gamma = \frac{\beta_{эф}}{\beta} \approx 1 + 20B^2$$

в) Время запаздывания.

$$t_{зани} = \frac{1}{\lambda_i}$$

$$\sum_{i=1}^6 \beta_i t_i = 0,0924 \text{ с}$$

г) Изменение в процессе компани



## Управление ядерным реактором.

$$\rho = \frac{k_{\text{эфф}} - 1}{k_{\text{эфф}}} \quad n = n_0 e^{\frac{\delta k t}{e}} \quad \Phi = \Phi_0 e^{\frac{\delta k t}{e}}$$

$$T = \left( \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} \right)^{-1} = \frac{e}{\delta k}$$

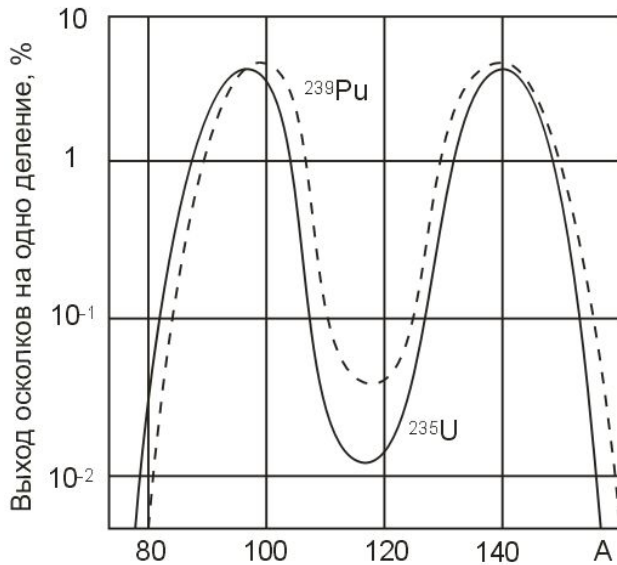
Только мгновенные:  $e = t \approx 10^{-3} \text{ c}$   $T = \frac{e}{\delta k} = \frac{10^{-3}}{5 \cdot 10^{-3}} = 0.2 \text{ c}$

$$\Phi = \Phi_0 e^{\frac{t}{T}} = \Phi_0 e^{0.2} = \Phi_0 150$$

Мгновенные +  
запаздывающие

$$\bar{e} = e(1 - \beta) + \sum_{i=1}^6 \beta_i (t_i + e) = e + \sum_{i=1}^6 \beta_i t_i \approx 0,1 \text{ c} \quad T = \frac{\bar{e}}{\delta k} \approx 20 \text{ c}$$

## Шлакование

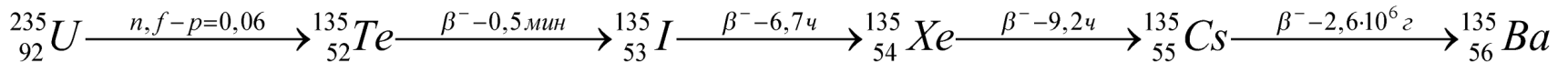


$$\frac{dN_{шл,i}}{dt} = (p_{5,i}N_5\sigma_5^f + p_{9,i}N_9\sigma_9^f)\Phi - N_{шл,i}\sigma_{шл,i}\Phi$$

$$m_{выг} = m_{шл} \approx m_{дел} + m_{\gamma} = 1,05(1 + \alpha) Nt \varepsilon$$

$$N_{шл} = 2N_{дел}^{мон} = \frac{2m_{дел}}{V} \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{235} \text{ядер} / \text{см}^3$$

## Ксенон – 135

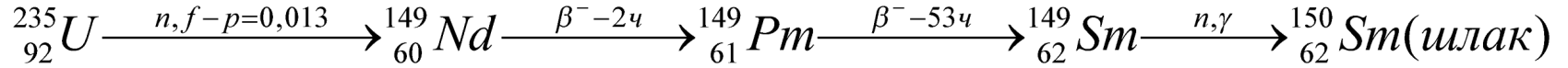


$$\frac{dN_I}{dt} = p_I \Sigma_U^f \Phi - N_I \sigma_I \Phi - \lambda_I N_I$$

$$N_{Xe}(t) = \frac{(p_I + p_{Xe}) \Sigma_U^f \Phi_0}{\lambda_{Xe} + \sigma_{Xe} \Phi_0}$$

$$\frac{dN_{Xe}}{dt} = \lambda_I N_I + p_{Xe} \Sigma_U^f \Phi - N_{Xe} \sigma_{Xe} \Phi - \lambda_{Xe} N_{Xe}$$

## Самарий-149

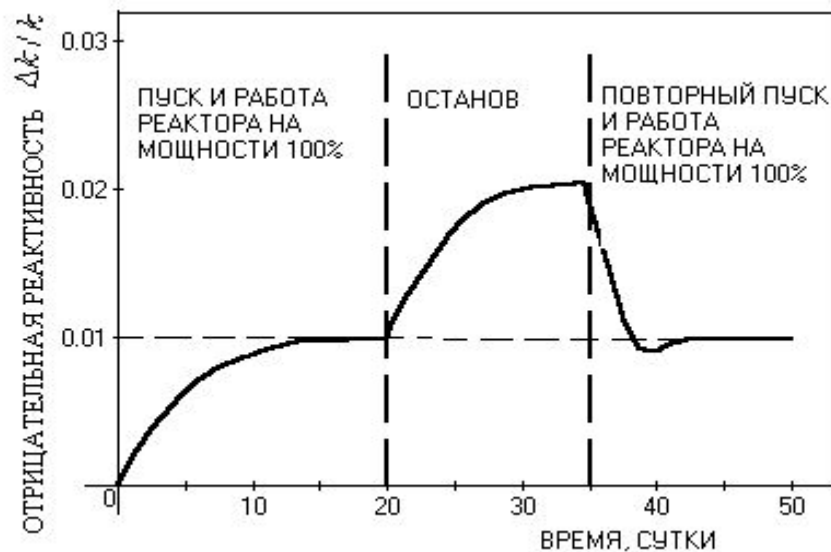
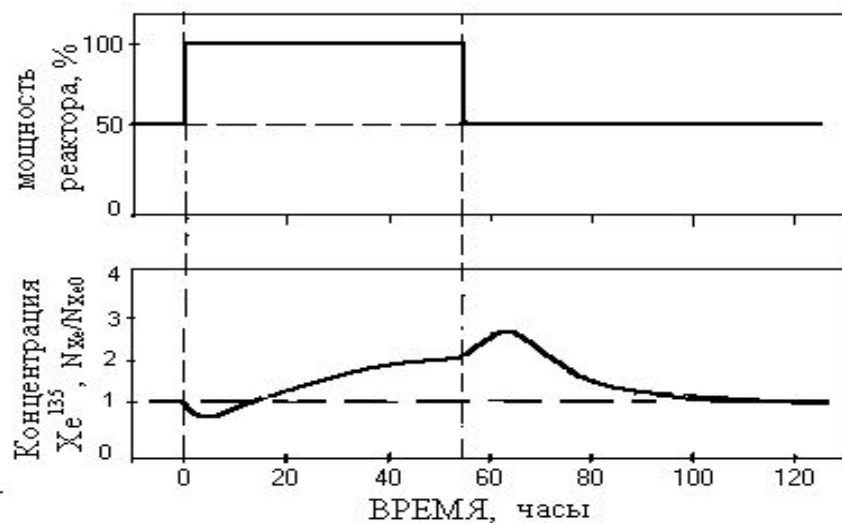


$$\frac{dN_{Pm}}{dt} = p_{Pm} \sum_U^f \Phi - \lambda_{Pm} N_{Pm} \quad N_{Pm}(t) = \frac{p_{Pm} \sum_U^f \Phi_0}{\lambda_{Pm}} [1 - \exp(-\lambda_{Pm} t)]$$

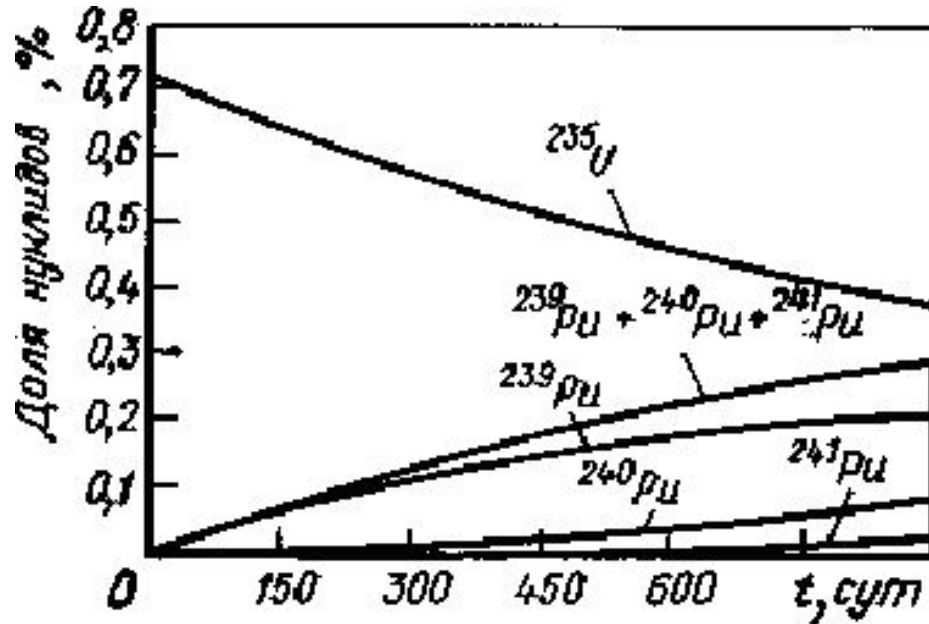
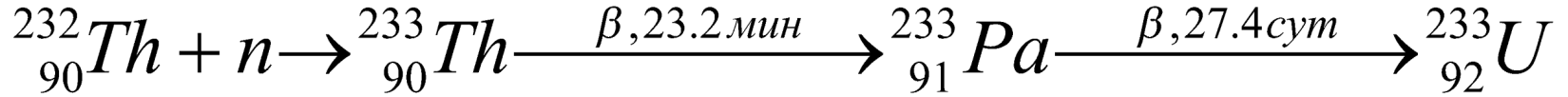
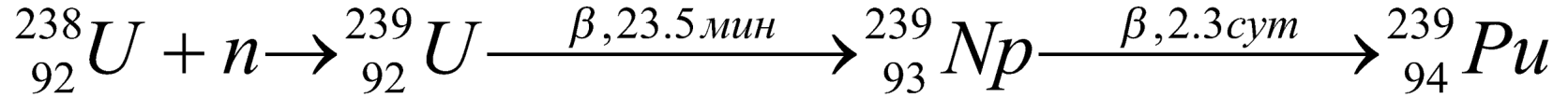
$$\frac{dN_{Sm}}{dt} = \lambda_{Pm} N_{Pm} - N_{Sm} \sigma_{Sm} \Phi \quad N_{Sm,0} = \frac{p_{Pm} \sum_U^f \Phi_0}{\sigma_{Sm}}$$



## Влияние на реактивность Xe и Sm



## Воспроизводство ядерного топлива



$$KB = \frac{dN_9/dt}{dN_5/dt}$$

## Выгорание ядерного топлива

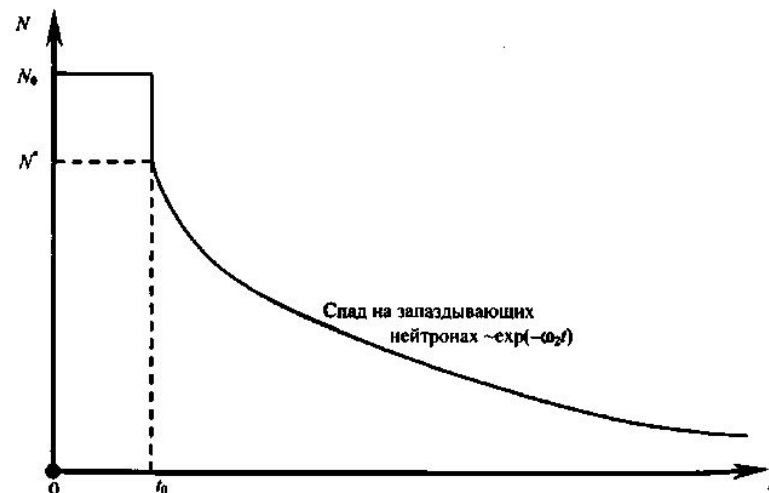
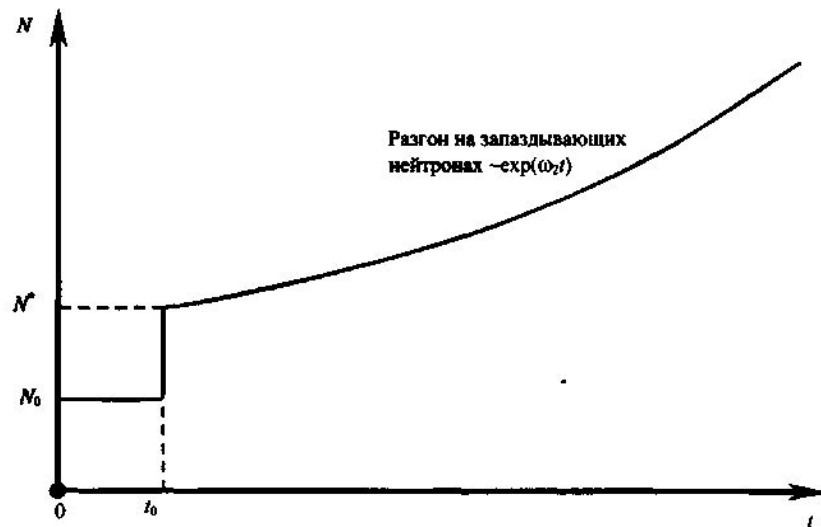
$$x = (mU^{235}/mU) \cdot 100\% \approx (NU^{235}/NU) \cdot 100\%,$$

$$m_U = m_U^{об} \frac{x - x_{отв}}{x_0 - x_{отв}}$$

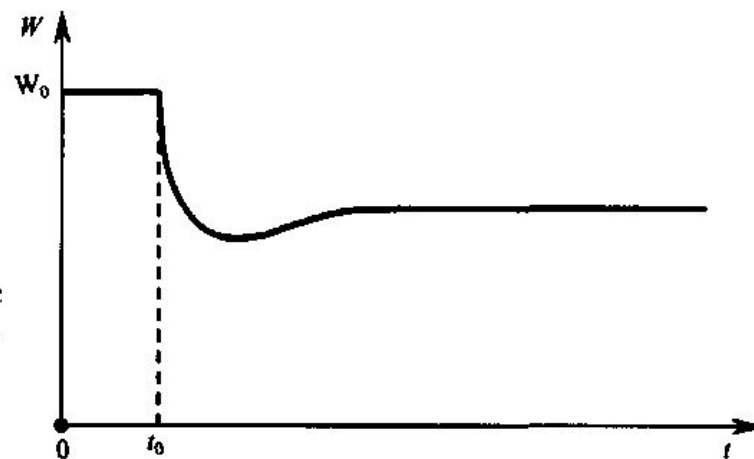
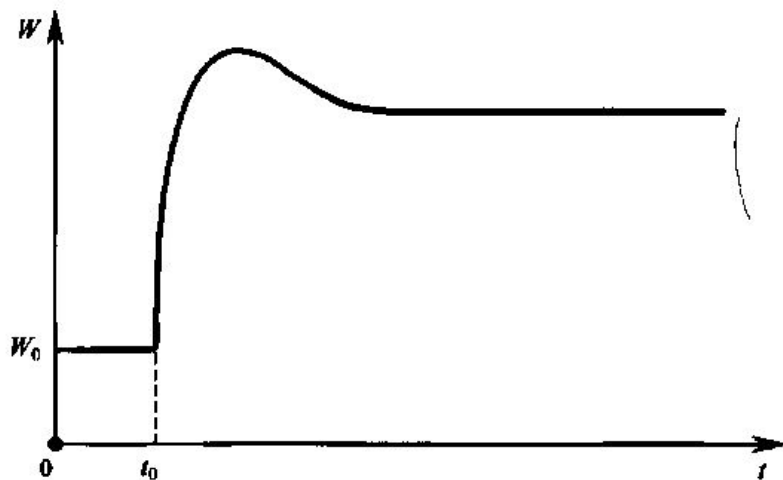
$$\bar{B} = \frac{Q_k}{m_{мон}} = \frac{Nt}{m_{мон}}$$

$$\bar{B} = \frac{Nn}{24m_U} \cdot \tau_{ЯР}$$

## Поведение реактора при скачке реактивности



*Изменение нейтронной мощности реактора  $N$  при положительной реактивности и отрицательной реактивности*



## Уравнение обратных часов

$$\rho = \frac{l}{T \cdot k_{\text{эфф}}} + \sum_i \cdot \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i \cdot T} \approx \frac{l}{T} + \frac{\bar{l}}{\tau_{\text{зан}} + T}$$