

# ПРИКЛАДНАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА



**Сегодня: пятница,  
20 июня 2014 г.**

## **Список литературы**

### **Основная литература.**

1. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов: Г.Г. Бартоломей, Г.А. Бать. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
2. Ядерная физика и ядерные реакторы: Климов А.Н. – М.: Энергоатомиздат, 1985.
3. Практические задачи по эксплуатации ядерных реакторов: Владимирова В.И. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
4. Физические основы ядерных реакторов: А.П. Рудик. – М.: ЭАИ, 1979.



# ПРИКЛАДНАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА



**Сегодня: пятница,  
20 июня 2014 г.**

## **Список литературы:**

### **Дополнительная литература.**

1. Почти всё о ядерных реакторах: А. В. Матвеев, А. П. Рудик. – М.: ЭАИ, 1990.
2. И. Камерон. Ядерные реакторы. М.: ЭАИ, 1987.
3. Г. Кесслер. ЯЭУ. ЭАИ, 1987.

# ПРИКЛАДНАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА



**Сегодня:**  
**пятница, 20 июня**  
**2014 г.**

## **Основное содержание:**

1. Строение и квантовая структура атомного ядра.
2. Основной закон радиоактивного распада.
3. Взаимодействие нейтронов с ядрами.
4. Микро-и макроскопические нейтронные сечения взаимодействия.
5. Элементарная теория деления атомного ядра. Цепной процесс.

# ПРИКЛАДНАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА



**Сегодня:**  
**пятница, 20 июня**  
**2014 г.**

## **Основное содержание:**

6. Основные стадии процесса деления. Самоподдерживающаяся цепная реакция деления.
7. Ядерный реактор. Принцип работы.
8. Критические размеры ядерного реактора. Эффективный коэффициент взаимодействия.

# ПРИКЛАДНАЯ ЯДЕРНАЯ ФИЗИКА



**Сегодня:**  
**пятница, 20 июня**  
**2014 г.**

## **Основное содержание:**

9. Теория гомогенного и гетерогенного ядерного реактора.
10. Характеристики структуры активных зон тепловых реакторов.
11. Кинетика и регулирование ядерных реакторов.
12. Безопасность ядерных энергетических установок.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



- Ядра делят на *стабильные* и *радиоактивные*.
- Если  $T_{1/2} > 10^{10}$  лет, то ядра считаются стабильными.
- Ядра, распадающиеся более быстро, считаются радиоактивными.
- К *радиоактивным* ядрам относят нестабильные ядра, время жизни которых на несколько порядков больше характерного времени сильного взаимодействия.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра

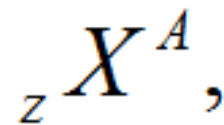


- *Ядром атома* называется центральная часть атома, в которой сосредоточена практически вся масса атома и его положительный электрический заряд.
- *Атомные ядра* имеют размеры порядка  $10\text{E}-12 \dots 10\text{E}-13$  см, линейные размеры атомов  $\sim 10\text{E} - 8$  см.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



- Нейтральный атом и его ядро обозначается одним и тем же символом:



где  $X$  – обозначение элемента;  $Z$  – атомный номер (число протонов в ядре);  $A$  – массовое число, равное числу нуклонов в ядре.



# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



- Нейтрон и протон имеют практически одинаковую массу ( $m_n \geq m_p$ ).

- *Схема распада:*



- *Протон и нейтрон* – это два разных состояния одной и той же частицы под названием *нуклон*.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



- Протоны и нейтроны подвержены действию специфических *ядерных сил*.
- За счет ядерных сил протоны и нейтроны могут соединяться друг с другом, образуя различные атомные ядра.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



## *Основные свойства ядерных сил:*

1. Эти силы являются короткодействующими с радиусом действия  $\sim 10E-13$  см. Длина  $(1,5 \dots 2,2) \cdot 10E-13$  см называется радиусом действия ядерных сил.
2. Они обладают зарядовой независимостью, что проявляется в одинаковости сил взаимодействия нуклонов  $n-n$ ,  $p-p$ ,  $n-p$ .

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



Взаимодействие между нуклонами, возникающее в результате обмена квантами массы  $m$ , приводит к появлению *потенциала Юкавы*  $U(r)$ :

$$U_{\text{яд}}(r) = g_{\text{яд}} \frac{e^{-(mc/\hbar)r}}{r}$$

Где  $g_{\text{яд}}$  — константа взаимодействия частиц с полем квантов, переносящих ядерное взаимодействие.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



- Ядра с одним и тем же  $Z$  и разными  $A$  называются *изотопами*.
- Например, у урана ( $Z = 92$ ) есть изотопы  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ , ...,  $^{238}\text{U}$ . В литературе можно встретить термины *изобары* и *изотоны*.
- *Изобары* – ядра с одинаковыми  $A$  и разными  $Z$ .
- *Изотоны* – ядра с одинаковыми  $N$  и разными  $Z$ .  
Для обозначения атомов определенного изотопа используется термин *нуклид*.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



- *Нуклид* – вид атома, характеризующийся атомным номером  $Z$ , количеством нейтронов  $N$  и протонов  $Z$  в нем и ядерным энергетическим состоянием.
- *Массы* молекул, атомов, ядер и элементарных частиц измеряют в атомных единицах массы (а.е.м), кг, МэВ/с<sup>2</sup>.
- $1 \text{ а.е.м.} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,5 \text{ МэВ/с}^2$ .

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



- *Относительная атомная масса* – это число, показывающая во сколько раз масса атома больше массы одной атомной единицы массы  $m_{\text{а.е.м.}}$ :

$$A = M_{\text{ат}}(A, Z) / m_{\text{а.е.м.}}$$

- Масса (1а.е.м.) равна 1/12 массы атома углерода  $^{12}\text{C}$ .
- *Массовое число* нуклида и его *относительная атомная масса* обозначаются одной и той же буквой  $A$ .

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



- Согласно *соотношению Эйнштейна*, каждому значению массы соответствует определенное количество энергии:

$$E = mc^2 \quad \Delta E = \Delta mc^2$$

- где  $E$  и  $\Delta E$  энергия и ее изменение, соответственно;  $m$  и  $\Delta m$  – масса вещества и ее изменение соответственно;  $c$  – скорость света.



# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



- *Энергия связи ядра:*

$$\Delta E_{\text{св}} = \Delta m \cdot c^2 = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_n - M(A, Z)$$

где  $Z$  – атомный номер (зарядовый номер) ядра;  
 $A$  – массовое число;  $m_{\text{H}}$ ,  $m_n$  и  $M(A, Z)$  – массы атома водорода, нейтрона и соответствующего атома.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



Энергия  $E_p$  отделения протона, т. е. минимальная энергия, необходимая для выбивания протона из ядра  ${}_Z X^A$  равна разности энергий связи ядер  ${}_Z X^A$  и  ${}_{Z-1} X^{A-1}$

$$E_p = \Delta E_{\text{св}}(Z, A) - \Delta E_{\text{св}}(Z - 1, A - 1).$$

**Самостоятельно записать энергию отделения нейтрона и альфа-частицы.**

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



*Масса  $\Delta m$ , соответствующая энергии связи:*

$$\Delta m = \frac{E_{\text{св}}}{c^2} = Zm_{\text{H}} + (A - Z)m_{\text{n}} - M(A, Z)$$

называется  $\Delta$  *дефектом массы ядра*.

Для расчетов энергии связи можно пользоваться формулой:

$$\Delta E_{\text{св}} = Z\Delta_{\text{H}} + (A - Z)\Delta_{\text{n}} - \Delta$$

где  $\Delta_{\text{H}}$ ,  $\Delta_{\text{n}}$ ,  $\Delta$  – дефект массы атома водорода, нейтрона и соответствующего атома.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



*Величина  $E_{уд}$*  показывает, какую энергию в среднем необходимо затратить, чтобы удалить из ядра один нуклон, не сообщая ему кинетической энергии.

$$E_{уд} = \Delta E_{св} / A = \Delta m \cdot c^2 / A.$$

Величина  $E_{уд}$  имеет свое значение для каждого ядра. Чем больше  $E_{уд}$ , тем более устойчиво ядро.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра

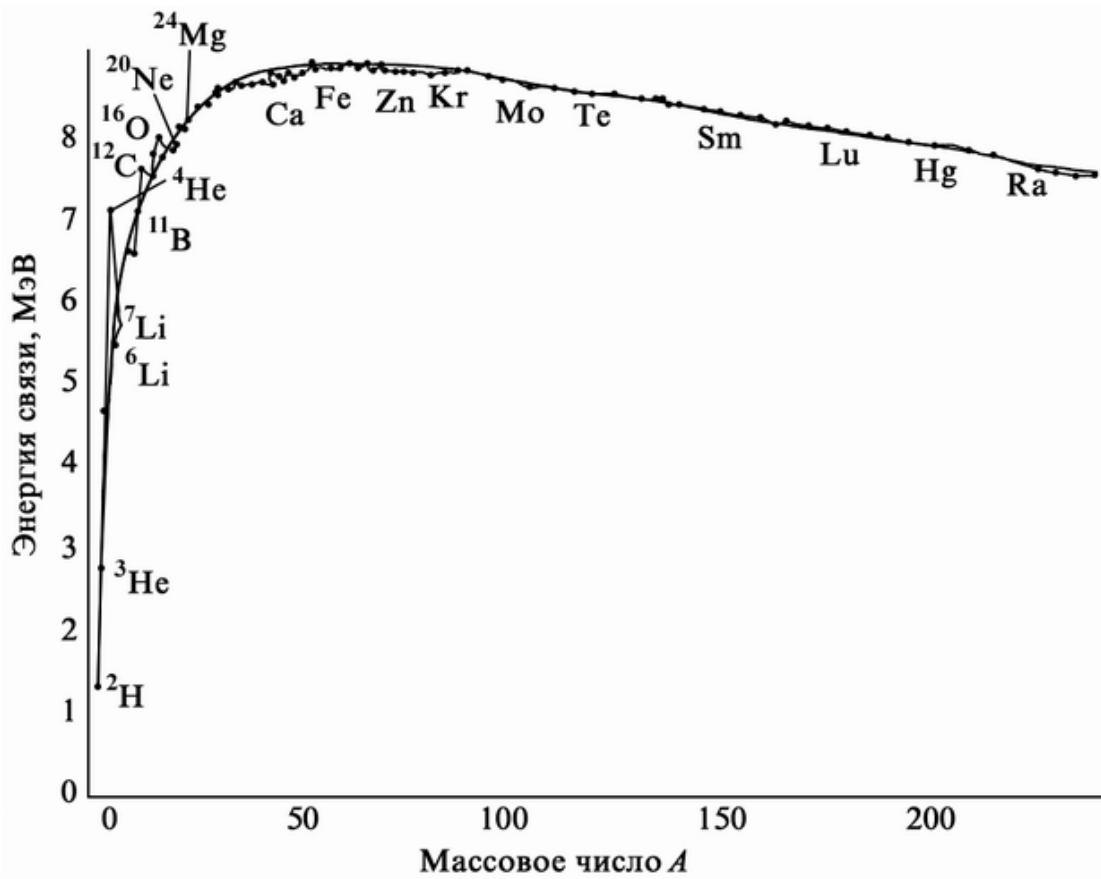


Рис. 1. Зависимость средней энергии связи на нуклон от массового числа  $A$



# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра

- *Энергетически выгодно:*
  1. *Деление тяжелых ядер* на более легкие;
  2. *Слияние легких ядер* друг с другом в более тяжелые.

Как в первом, так и во втором случаях получаются более прочные (более устойчивые) ядра, чем исходные.
- *Проблема термоядерного синтеза* решена наполовину: освоен взрывной синтез.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



*Модели атомных ядер.* К настоящему времени еще нет последовательно законченной теории ядра.

1. Недостаточность наших знаний о силах взаимодействия нуклонов в ядре;

2. Каждое атомное ядро – это квантовая система многих сильно взаимодействующих частиц; задача многих тел в квантовой теории чрезвычайно трудна и громоздка.

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



## *Модели атомных ядер.*

- ***Коллективные модели.*** В этих моделях ядро представляется системой сильно взаимодействующих частиц.
- ***Одночастичные модели.*** В этих моделях предполагается, что нуклоны движутся независимо друг от друга в потенциальном поле, которое образовано суммарным средним действием всех нуклонов ядра.



# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



- *Капельная модель:*

$$R = r_0 A^{1/3}$$

где  $r_0 = (1,4 \div 1,5) \cdot 10^{-13}$  см,  $A$  – массовое число.

$$n = \frac{A}{V} = \frac{A}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (1,45 \cdot 10^{-13})^3 A} \approx 10^{38} \text{ нуклон/см}^3.$$

$$\rho = m_N \cdot n = \frac{(1,66 \cdot 10^{-27}) \cdot A}{\frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (1,45 \cdot 10^{-13})^3 A} \approx 10^{17} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 10^{14} \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$$

# 1. Строение и квантовая структура атомного ядра



- *Полуэмпирическая формула Вейцеккера:*  
**(самостоятельно)**

$$\Delta E_{\text{св}} \sim \alpha A \rightarrow E_{\text{св}} = \alpha A - \beta A^{2/3} \rightarrow$$

$$\rightarrow E_{\text{св}} = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} \rightarrow$$

$$\rightarrow E_{\text{св}} = \alpha A - \beta A^{2/3} - \gamma \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \varepsilon \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A}$$

## 2. Основной закон радиоактивного распада



$$\delta = \begin{cases} +|\delta| & \text{при четных } A \text{ и } Z, \\ & \text{при нечетном } A \text{ (} Z \text{ – любое),} \\ -|\delta| & \text{при четном } A \text{ и нечетном } Z. \end{cases}$$

$$\Delta E_{\text{св}} = 15,75A - 17,8A^{2/3} - 0,71 \frac{Z^2}{A^{1/3}} - 94,8 \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} + \frac{34}{A^{3/4}} \delta,$$

$$M_{\text{яд}}(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n - 5,75A + 17,8A^{2/3} + 0,71 \frac{Z^2}{A^{1/3}} + 94,8 \frac{\left(\frac{A}{2} - Z\right)^2}{A} + \frac{34}{A^{3/4}} \delta$$



## 2. Основной закон радиоактивного распада



- С открытием *радиоактивности* началось интенсивное развитие ядерной физики.
- К *радиоактивным* ядрам относят нестабильные ядра, время жизни которых на несколько порядков больше характерного времени сильного взаимодействия.

## 2. Основной закон радиоактивного распада



- *Радиоактивность* заключается в самопроизвольном (спонтанном) превращении ядер с испусканием одной или нескольких частиц.
- Необходимое *условие радиоактивного* распада:  $M_X > M_Y + m_a + m_b + \dots$

$$Q = |E_{\text{св}}|.$$

$$Q = \left( M_i - \sum M_f \right) \cdot c^2$$

## 2. Основной закон радиоактивного распада



- *Основные радиоактивные процессы:*
  1.  $\alpha$ -распад;
  2.  $\beta$ -распад (включая  $K$ -захват);
  3.  $\gamma$ -излучение;
  4. Спонтанное и вынужденное деление тяжелых ядер;
  5. Испускание запаздывающих нейтронов и протонов.

## 2. Основной закон радиоактивного распада



Если в образце в момент времени  $t$  содержится  $N$  радиоактивных ядер, то количество  $dN$  спонтанных ядерных переходов за интервал времени  $t+dt$ , определяется соотношением:

$$-dN = \lambda N dt$$

*Постоянная распада*, величина, характерная для каждого радиоактивного нуклида.

## 2. Основной закон радиоактивного распада



*Основной закон радиоактивного распада:*

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t},$$

где  $N_0$  и  $N(t)$  – начальное и текущее значение количества радиоактивного нуклида;

$\lambda$  – постоянная распада,  $\text{с}^{-1}$ .



## 2. Основной закон радиоактивного распада



**Закон радиоактивного распада:**

$$-dN = \lambda N dt$$

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

**Активность:**

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N. \quad 1 \text{ Ки} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Бк.}$$

$^{65}\text{Zn}$ :  $\omega_{\beta^+} = 1,46 \%$ ,  $\omega_{\gamma} = 50,7 \%$ .

## 2. Основной закон радиоактивного распада



**Активность:**

$$A = \lambda N = \lambda \cdot \frac{N_A \cdot m}{\mu} = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot \frac{N_A \cdot m}{\mu}.$$

Масса  $m$  (кг) радиоактивного нуклида, распадающегося с периодом полураспада  $T$  (с) и имеющего активность  $A$  (Ки) определяется соотношением:

$$m = 8,9 \cdot 10^{-17} \mu \cdot T_{1/2} \cdot A, \text{ кг.}$$

## 2. Основной закон радиоактивного распада



Основные характеристики *радиоактивного* распада:

$$\tau = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \delta N(t) = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} t \lambda N(t) dt.$$

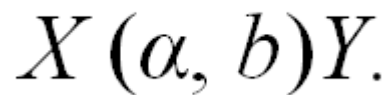
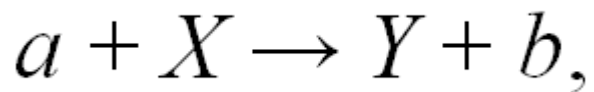
$$\tau = 1/\lambda. \quad T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 \cdot \tau$$

**Сложный радиоактивный распад - самостоятельно.**



# 3. Взаимодействие нейтронов с ядрами

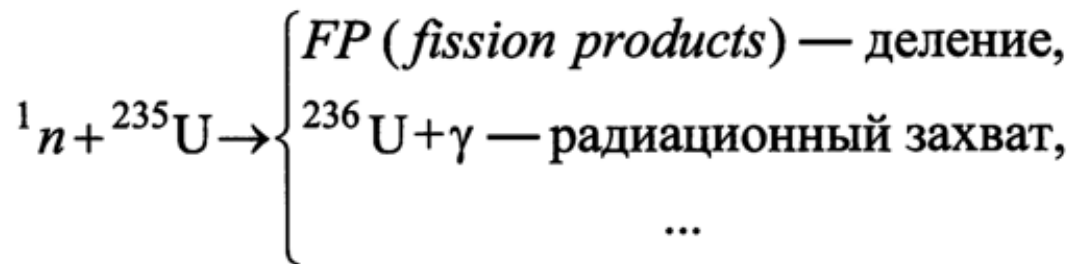
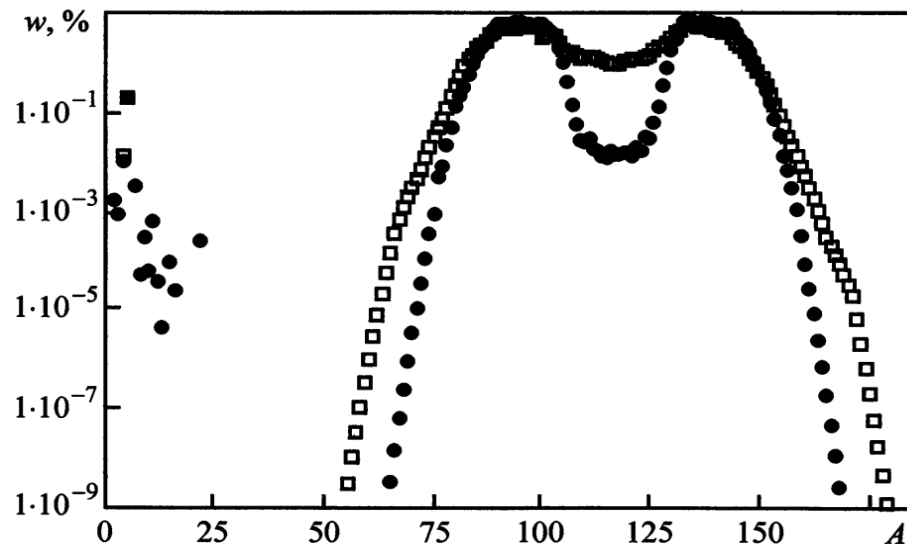
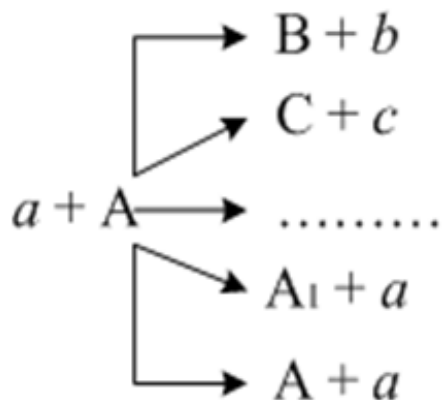
- Символьное обозначение *ядерных реакций*:



# 3. Взаимодействие нейтронов с ядрами



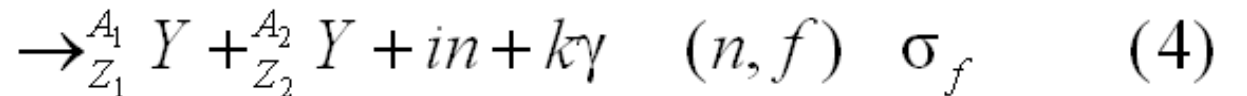
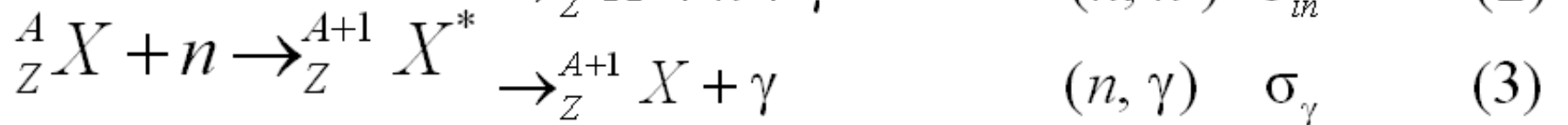
Каналы ядерных реакций:



### 3. Взаимодействие нейтронов ядрами



Реакции идущие через образование составного ядра:



# 3. Взаимодействие нейтронов ядрами



## *Нейтронные сечения*

$\sigma_{\text{comp}}$  – сечение образования составного (компаунд);

$\sigma_S = \sigma_p + \sigma_r + \sigma_{in}$  – сечение рассеяния;

$\sigma_{el} = \sigma_p + \sigma_r$  – сечение упругого рассеяния.

$\sigma_p$  – сечение потенциального рассеяния;

$\sigma_r$  – сечение резонансного рассеяния;

$\sigma_{in}$  – сечение неупругое рассеяния;

$\sigma_a = \sigma_f + \sigma_\gamma$  – сечение поглощения;

$\sigma_{tot} = \sigma_s + \sigma_a$ .

# 3. Взаимодействие нейтронов с ядрами



$$D = a \exp(-b\sqrt{E^*})$$

где  $D$  – среднее расстояние между уровнями энергии, МэВ;

$E^*$  – энергия возбуждения ядра, МэВ;

$a, b$  – коэффициенты постоянные для данного ядра.

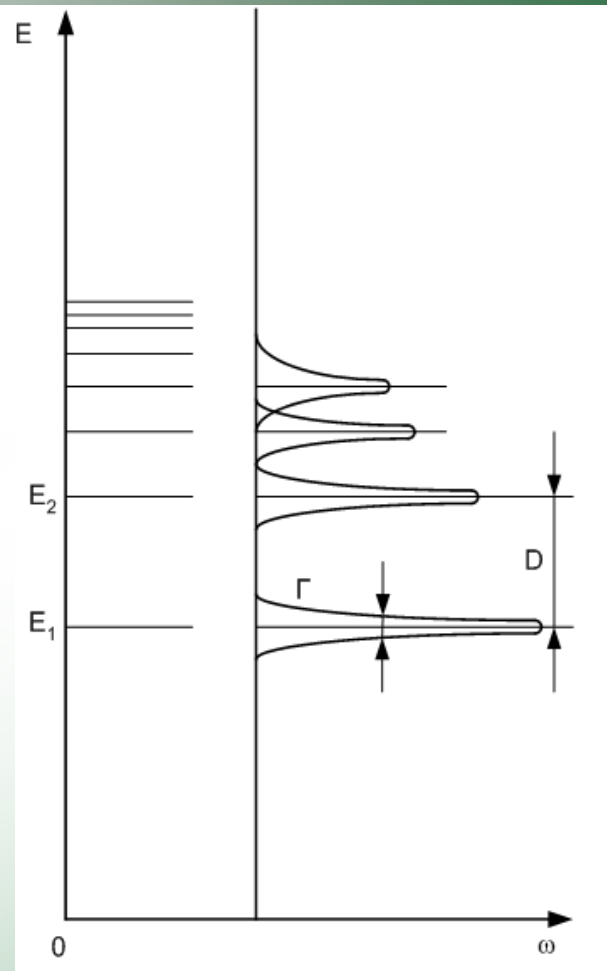


Рис. 2. Схема энергетических уровней ядра



# 3. Взаимодействие нейтронов с ядрами



- **Соотношение Гейзенберга  $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar$ :**

$$\Delta E = \hbar / \Delta t$$

- **Время жизни:**

$$\tau = \hbar / \Gamma$$

- **Вероятность распада:**

$$\omega_i = \lambda_i = \frac{\Gamma_i}{\hbar} \quad \omega = \sum_i \lambda_i = \sum_i \frac{\Gamma_i}{\hbar}$$

$$\sigma_i \sim \sigma^*(c) \cdot \omega_i / \omega = \sigma^*(c) \cdot \Gamma_i / \Gamma$$

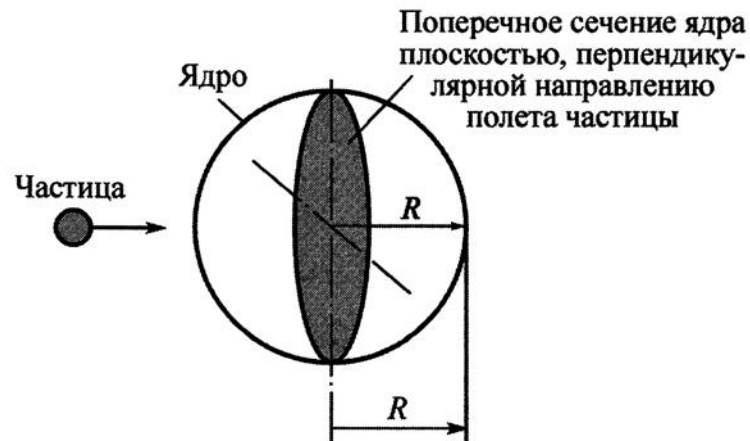
# 4. Эффективное сечение ядерной реакции



- Эффективное сечение  $\sigma_{\text{эфф}}$  ядерной реакции — величина, характеризующая процесс протекания реакции.

$$\sigma = \pi R^2 + \pi r^2$$

$$\sigma_{\text{tot}} = \sum \sigma_i$$



**Рис. 3.** Эффективное поперечное микроскопическое сечение взаимодействия частицы с ядром

# 4. Эффективное сечение ядерной реакции



Реакции идущие через образование *составного ядра* (учет волновых свойств):

$$a + X \rightarrow C^* \rightarrow Y + b \quad \sigma_{ip} = \pi \lambda_i^2 \sum_{l=0}^{l_c} (2l+1) e^{-2C_l} \cdot \frac{\Gamma_p}{\Gamma}$$

$$\sigma_i(c) = \pi \lambda_i^2 \sum_{l=0}^{l_c} (2l+1) e^{-2C_l} \quad \text{– сечение образования составного ядра.}$$

$\xi = e^{-2C_l}$  – коэффициент прилипания, который определяется прозрачностью центробежного и кулоновского барьеров.

$$C_l = \sqrt{\frac{2\mu}{\hbar}} \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{V(r) - E} dr$$

# 4. Эффективное сечение ядерной реакции



- Произведение  $\Sigma = \sigma N$  называют макроскопическим эффективным сечением,  $1/\text{см}$ .
- Характеризует вероятность совершения реакции в  $1\text{ см}^3$  одним нейтроном, имеющим скорость  $v$ .
- Макроскопическое эффективное сечение гомогенной смеси:

$$\Sigma_{\text{см}} = \sum_i \Sigma_i$$

$$N_i = c_i N_A \rho_{\text{см}} / \mu_i$$

где  $c_i$  - массовая концентрация в долях.

# 4. Эффективное сечение ядерной реакции

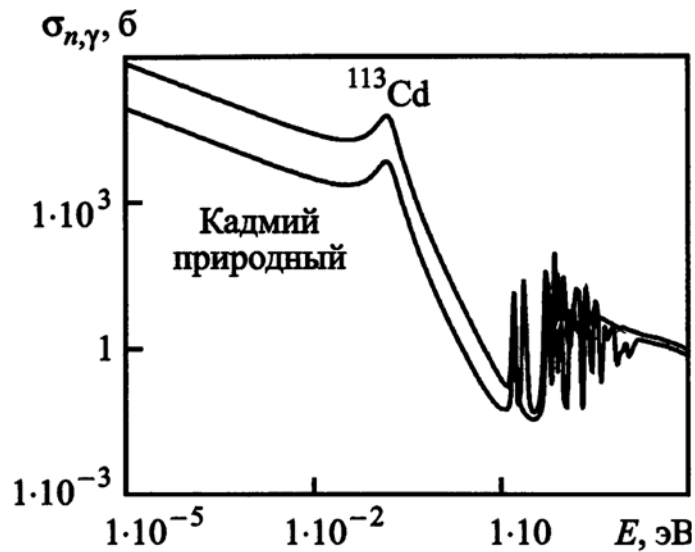


- При гетерогенном расположении материалов необходимо учитывать объемную долю, занятую данным веществом  $\omega_i$ .
- Ядерная концентрация каждого  $i$ -го компонента умножают на  $\omega_i$ :

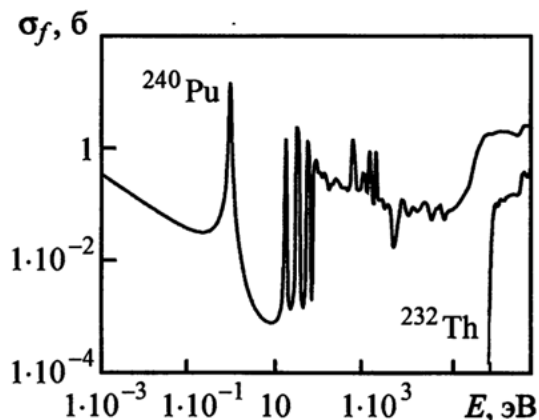
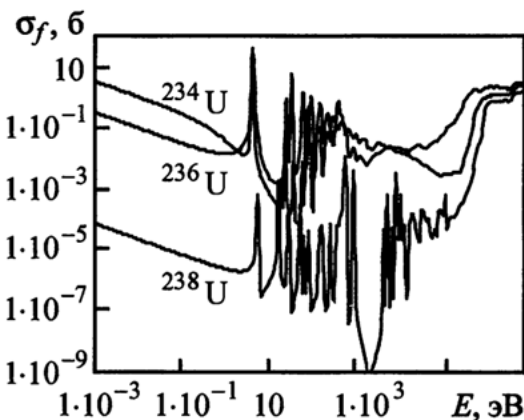
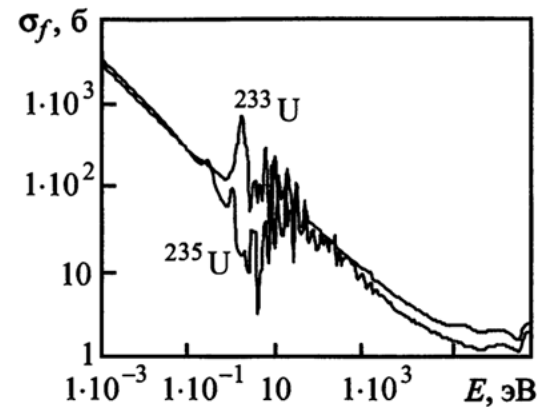
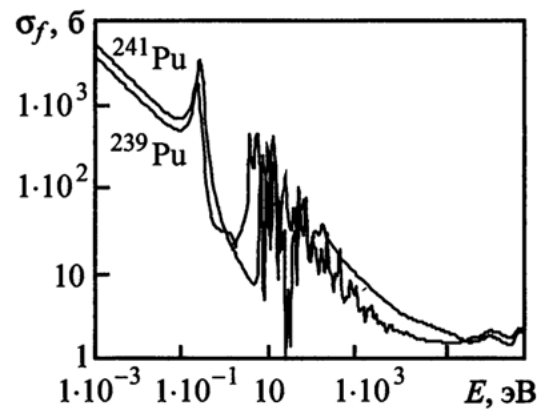
$$N_i = N_{0i} \omega_i$$

$$\sum_i^n \omega_i = 1$$

# 5. Резонансная структура сечений

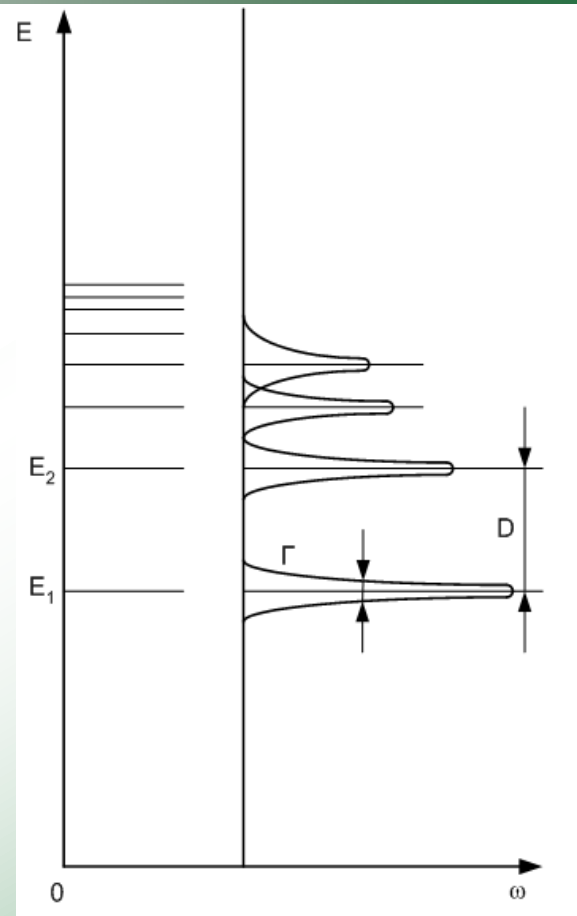
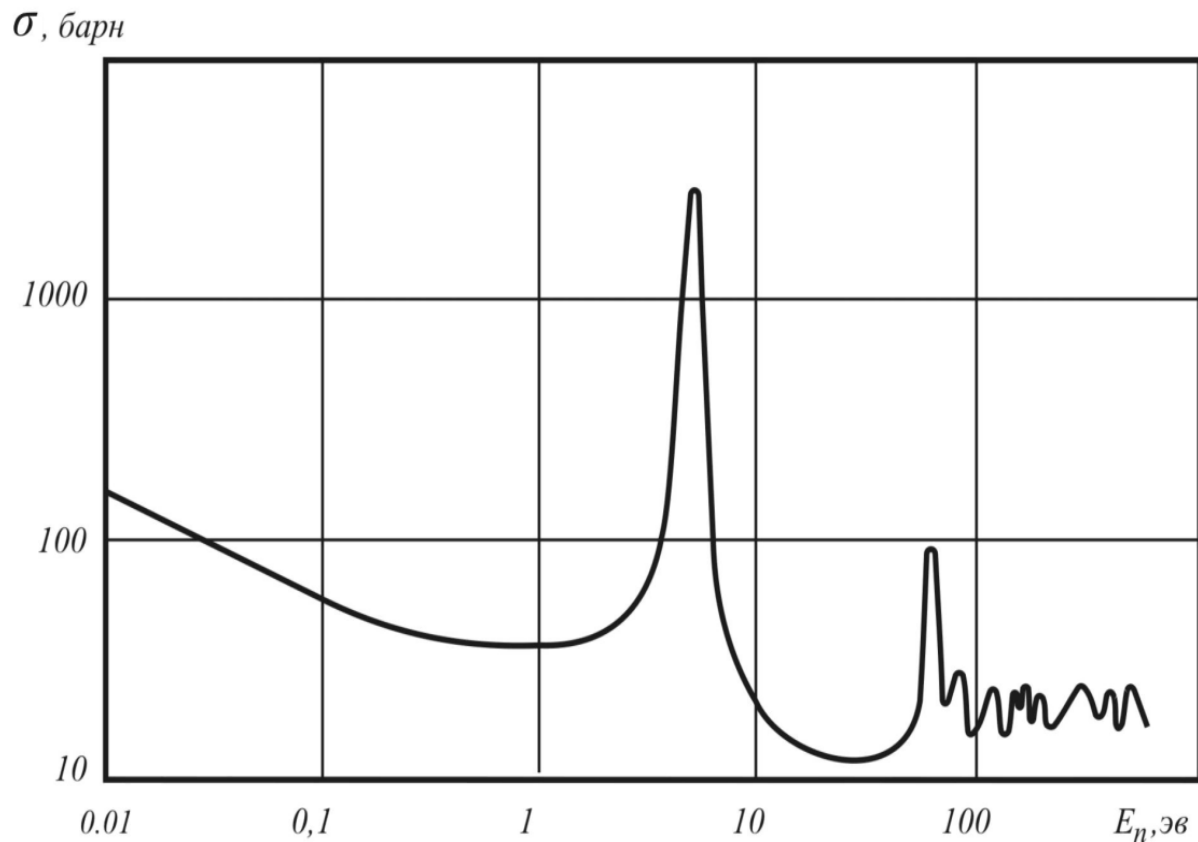


**Рис. 4.** Зависимость микросечения радиационного захвата нейтронов Cd от кинетической энергии нейтрона



**Рис. 5.** Зависимость микросечения реакции деления от энергии налетающего нейтрона для различных нуклидов

# 5. Резонансная структура сечений



**Рис. 6.** Зависимость нейтронного сечения взаимодействия от энергии нейтрона.

# 5. Резонансная структура сечений



- Формула Брейта-Вигнера:

$$\sigma_i(E) = \sigma_{0i}(E_{0i})(\Gamma_i/2)^2(E_{0i}/E_i)^{1/2} / ((E_i - E_{0i})^2 + (\Gamma_i/2)^2),$$

- где  $\sigma_{0i}$  – максимальное значение сечения резонанса  $i$ -го актиноида;  $\Gamma_i$  – полуширина резонанса  $i$ -го актиноида;  $E_{0i}$  – энергия максимума резонанса  $i$ -го актиноида.



# 6. Классификация нейтронов по энергиям:



- Тепловые нейтроны –  $5 \cdot 10^{-3} \dots 0,625$  эВ

**(характеристики найти самостоятельно):**

$$S(E) = \frac{1}{n_0} \cdot \frac{dn}{dE} = \frac{2\pi}{(\pi kT)^{3/2}} \sqrt{E} e^{-\frac{E}{kT}},$$

$$E_{\text{cp}} = \frac{1}{n_0} \int_0^{\infty} E \cdot n(E) \cdot dE = \frac{3}{2} kT_{\text{HГ.}}$$

$$\underline{E_{\text{HB}}} = \underline{kT_{\text{HГ.}}}$$

$$E_{\text{T}} = (0,025-0,5) \text{ эВ.}$$

## 6. Классификация нейтронов по энергиям:



*Классификация нейтронов по энергиям:*

- Тепловые нейтроны –  $5 \cdot 10^{-3} \dots 0,625$  эВ

$$\sigma_{n,\gamma} \sim 1/v$$

$$\sigma = g_W \cdot \sigma_0 \quad g_W = \frac{2}{\sqrt{\pi} \sigma_0 E_T^2} \int_0^{\infty} \sigma(E) E \exp\left(-\frac{E}{E_T}\right) dE.$$

# 6. Классификация нейтронов по энергиям:



- Промежуточные нейтроны –  $0,625...10^4$  эВ  
Спектр Ферми –

$$\Phi(E) \sim 1/E$$

Характеристики спектра Ферми зависят от замедляющих свойств замедлителя.

# 6. Классификация нейтронов по энергиям:



- Быстрые нейтроны –  $10^4$  эВ ... 10 МэВ
- Характеристики спектра Уатта **(найти самостоятельно)**:

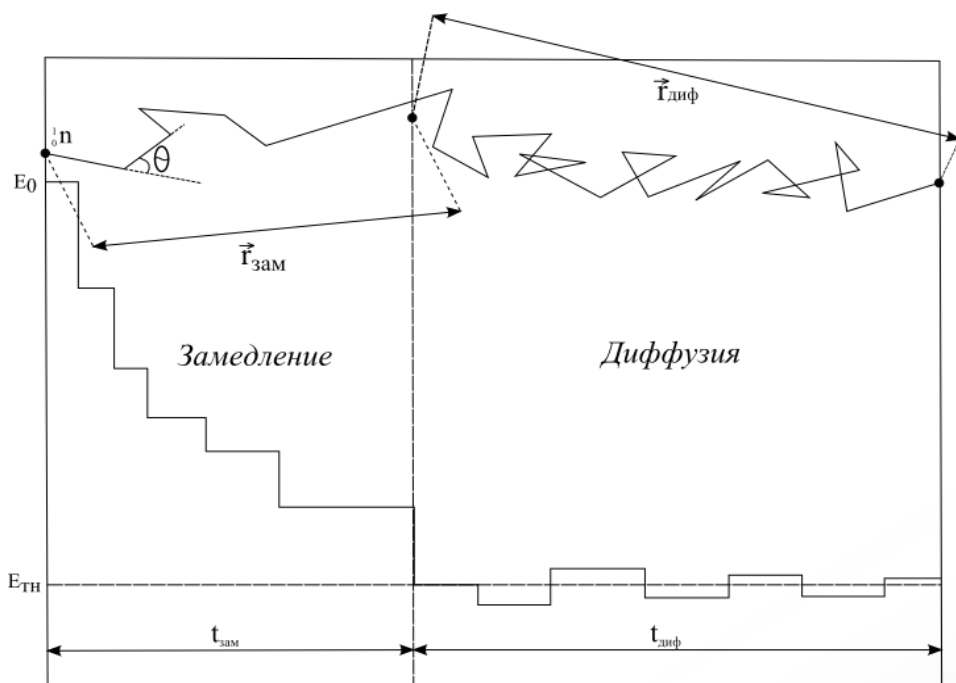
$$S(E) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot a^{3/2} \cdot \sqrt{E} \cdot \exp(-a \cdot E)$$

$$E_{\text{нв}} = 0,71 \text{ МэВ} \quad E_{\text{ср}} = 2,0 \text{ МэВ}$$

$$\sigma_{n,\gamma} \sim 1/E^m, \quad \sigma_{\text{tot}}(E) \approx 2\pi(R + \lambda_n)^2,$$

где  $m$  изменяется в пределах  $1,0 < m < 1,6$  и увеличивается с ростом  $E$ .

# 7. Характеристики нейтронных полей



$$E_0 = 2 \text{ МэВ}$$

$$E_{ТН} = 0,025 \text{ эВ}$$

**Рис. 7.** Замедление и диффузия нейтронов.

- Уменьшение кинетической энергии нейтронов в среде называется **процессом замедления**.
- Движение нейтронов в среде, при котором их энергия в среднем остается неизменной, называется **процессом диффузии нейтронов**.

# 7. Характеристики нейтронных полей



Для характеристики поведения нейтронов в процессе замедления и диффузии используются следующие понятия:

- **Длина свободного пробега нейтрона:**  $\lambda = \Sigma^{-1}$ , см.
- **Длина рассеяния:**  $\lambda_s = \Sigma_s^{-1}$ , см.
- **Длина поглощения:**  $\lambda_a = \Sigma_a^{-1}$ , см.
- **Длина переноса:**  $\lambda_{tr} = \Sigma_{tr}^{-1} = \frac{\lambda_s}{1 - \cos \bar{\psi}}$ , см.



# 7. Характеристики нейтронных полей

- **Возраст нейтронов:**  $\tau = 1 / 6 \left( r_{\text{зам}}^2 \right), \text{ см}^2.$
- **Длина диффузии нейтрона:**  $L^2 = 1 / 6 \left( r_{\text{зам}}^2 \right), \text{ см}^2.$
- **Длина миграции:**  $M^2 = \tau + L^2, \text{ см}^2.$

- **Коэффициент замедления нейтронов:**

$$K_{\text{зам}} = \xi \Sigma_S / \Sigma_a$$

- **Средний логарифмический декремент энергии:**

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



# 7. Характеристики нейтронных полей

*Замедляющие характеристики некоторых веществ*

Вещество	$\xi\Sigma_s, \text{см}^{-1}$	$\xi\Sigma_s / \Sigma_a, \text{см}^{-1}$
H <sub>2</sub> O	1,3500	61
D <sub>2</sub> O	0,1790	1900
<sup>12</sup> C	0,0640	170
<sup>7</sup> B	0,0930	$8,6 \cdot 10^{-4}$
Уест	0,0033	$9,4 \cdot 10^{-3}$

**Время замедления нейтрона:**

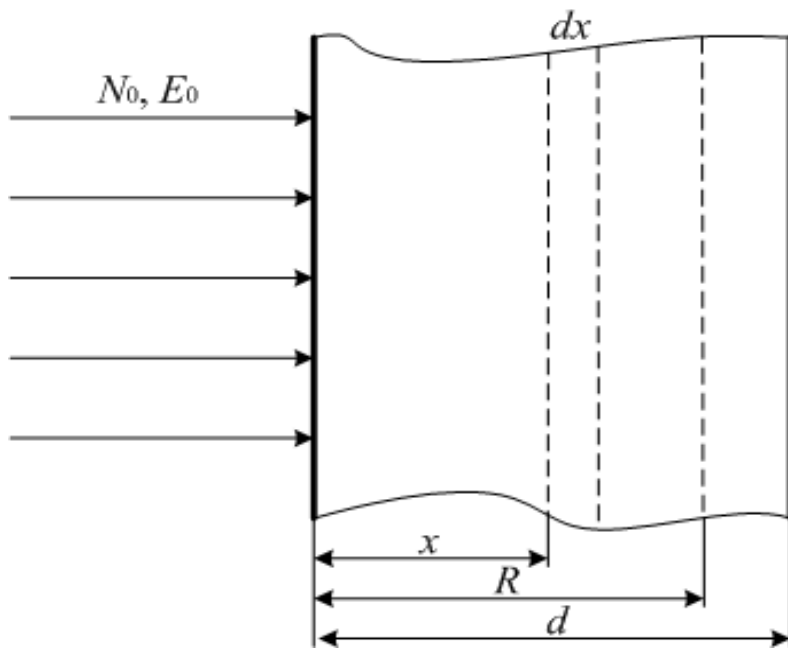
$$t_3 = \sqrt{2m} \frac{E_T^{-1/2} - E_0^{-1/2}}{\xi\Sigma_s} \approx \frac{2}{\xi\Sigma_s v_T}$$

**Время диффузии нейтрона:**

$$t_{\text{диф}} = \lambda_a / v = 1 / \Sigma_a v.$$



# 7. Характеристики нейтронных полей



## 1. Тонкая мишень ( $d \ll R$ ).

$$Y = n\sigma R,$$

где  $Y$  – выход реакции;

$n$  – концентрация ядер мишени, яд/см<sup>3</sup>;

$\sigma$  – эффективное сечение реакции, см<sup>2</sup>;

$R$  – пробег частицы в веществе, см.

$$Y = 1 - \exp(-\sigma N x) \text{ - толстая мишень.}$$

**Рис. 8.**  $x$  – глубина, на которой рассматривается взаимодействие подающих частиц с ядрами мишени,  $R$  – пробег частицы в веществе,  $d$  – толщина мишени.



# 7. Характеристики нейтронных полей

## 2. Толстая мишень ( $d > R$ ).

В тонком слое  $dx$ , находящемся на глубине  $x$ , выход равен:

$$dY = \sigma(x)ndx,$$

Глубина мишени равна пробегу бомбардирующих частиц  $R$ , следовательно:

$$Y = n \int_0^R \sigma(x) dx.$$

# 7. Характеристики нейтронных полей



Сечение реакций  $\sigma(E)$ :

$$Y(E) = n \int_{E_0}^0 \frac{\sigma(E)}{\frac{dE}{dx}} dE = n \int_0^{E_0} \frac{\sigma(E)}{-\frac{dE}{dx}} dE = n \int_0^{E_0} \frac{\sigma(E) dE}{\left| \frac{dE}{dx} \right|}.$$

$$\frac{dY}{dE} = n \cdot \frac{\sigma(E)}{\left| \frac{dE}{dx} \right|},$$

$$\sigma(E) = \frac{1}{n} \cdot \frac{dY}{dE} \cdot \left| \frac{dE}{dx} \right|.$$

# 8. EXPERIMENTAL NUCLEAR REACTION DATA (EXFOR)



EXFOR/CSISRS: Experimental Nuclear Reaction Data - Mozilla Firefox

Файл Правка Вид Журнал Закладки Инструменты Справка

http://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm

EXFOR

Experimental Nuclear Reaction Data (EXFOR)  
Database Version of April 16, 2009  
Software Version of 2009.02.06 Old interface is [here]

News

2009/02 Improvements and extensions:  
1) New output format X4±: EXFOR interpreted-interactive-tree [about] [example]  
[History]

The EXFOR library contains an extensive compilation of experimental nuclear reaction data. Neutron reactions have been compiled systematically since the discovery of the neutron, while charged particle and photon reactions have been covered less extensively.  
The library contains data from 17827 experiments (see statistics and new compilation).

Request Examples: 1 2 3 4

Submit Reset Help

Target   >>  
Reaction   >>  
Quantity   >>  
Product   >>  
Energy from  to  eV >>  
Author(s)   >>  
Publication year   >>  
Accession #   >>

Extended  
Keywords  
Expert

Submit Reset

Options

- Exclude superseded data
- No reaction combinations (ratios,...)
- Retrieve listing only
- Disable Prompt-Help

Sort by:

- Reaction
- Accession# (Entry#, Subent#)

Ranges (Z,A)

Reaction Sub-Fields

- SF1  >> Target
- SF2  >> Incident Particle
- SF3  >> Product Particle/Process
- SF4  >> Product
- SF5  >> Branch
- SF6  >> Parameters
- SF7  >> Particles Considered
- SF8  >> Modifiers

Tip of the day: video-guide

How-to video-guide

- Plot EXFOR-ENDF double differential cross-sections

Advanced plotting

- Cross sections
- Angular distribution
- Emission spectra
- Double differential
- NUBAR

Default

- Map

Готово

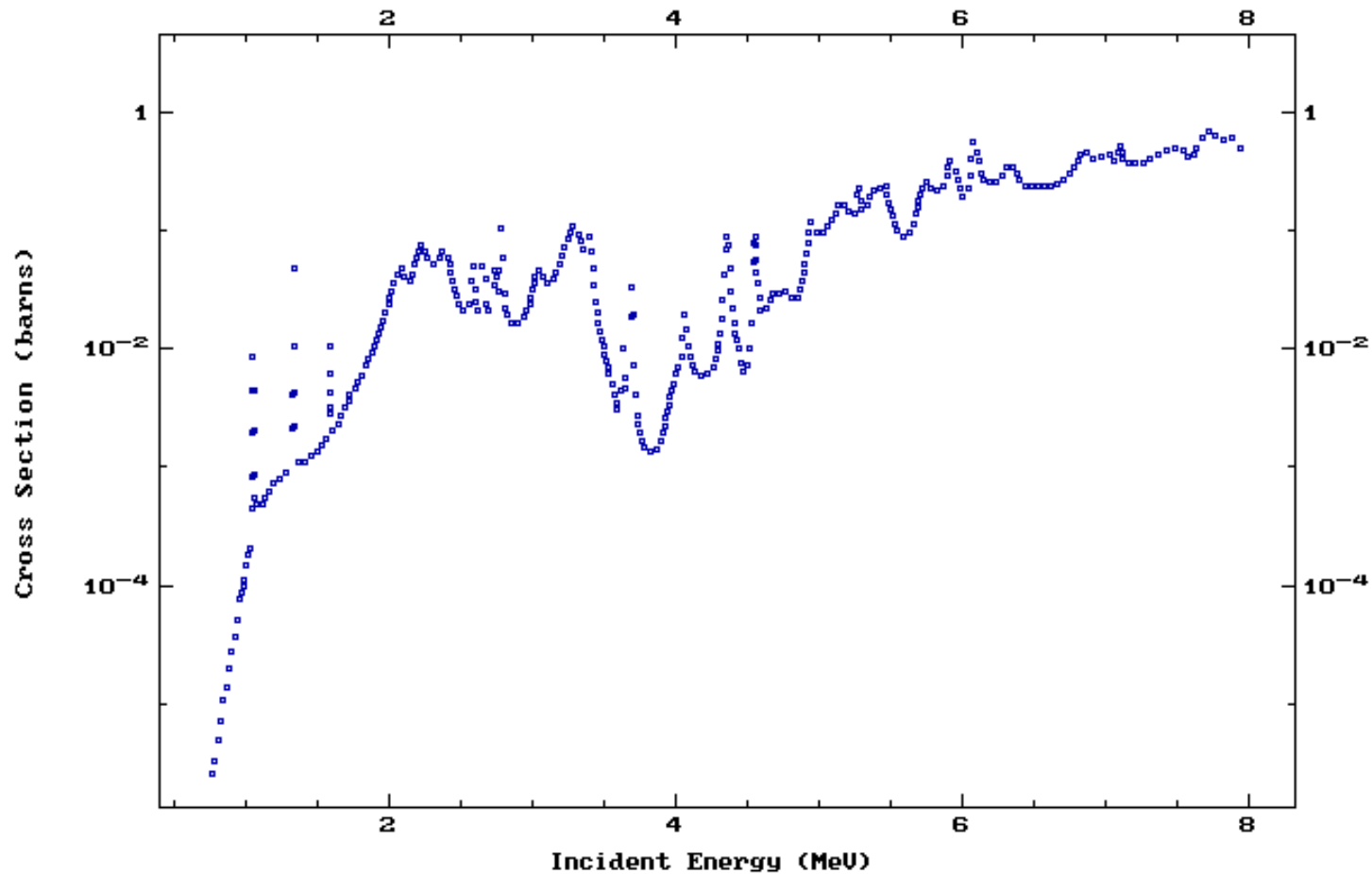
пуск Зарождение ... EXFOR/CSISR... Центр ядерн... Загрузки ABBYY Lingvo 12 18. Duran Dur... Документ1 - ... RL 17:34

# 8 EXPERIMENTAL NUCLEAR REACTION DATA (EXFOR)

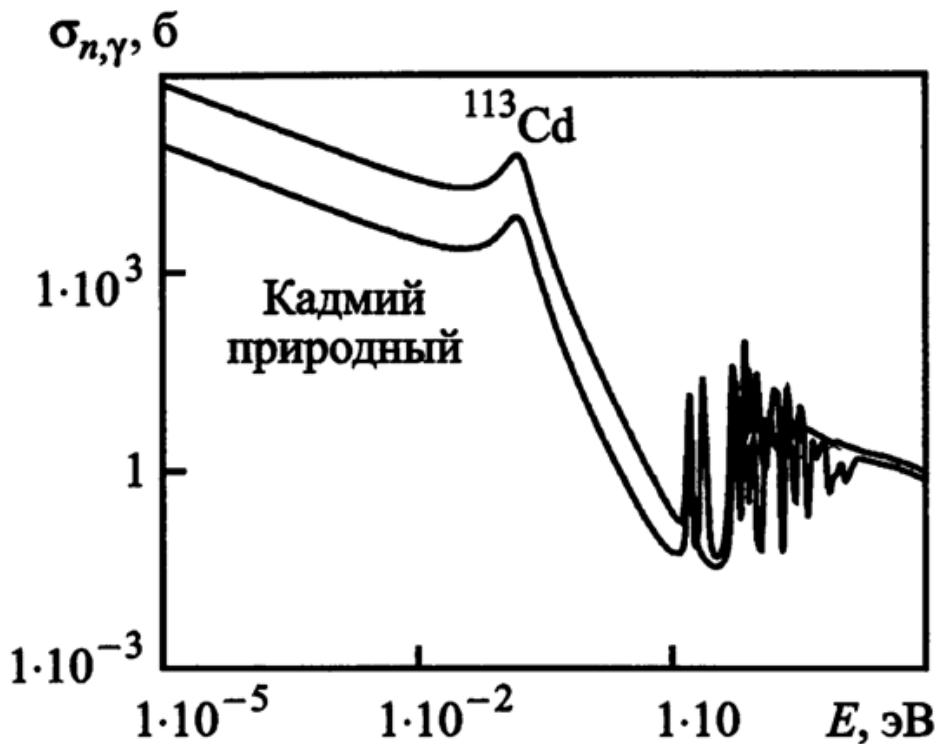


6-C-13(A,N)8-0-16

EXFOR Request: 1964/1, 2009-Mar-27 18:58:45

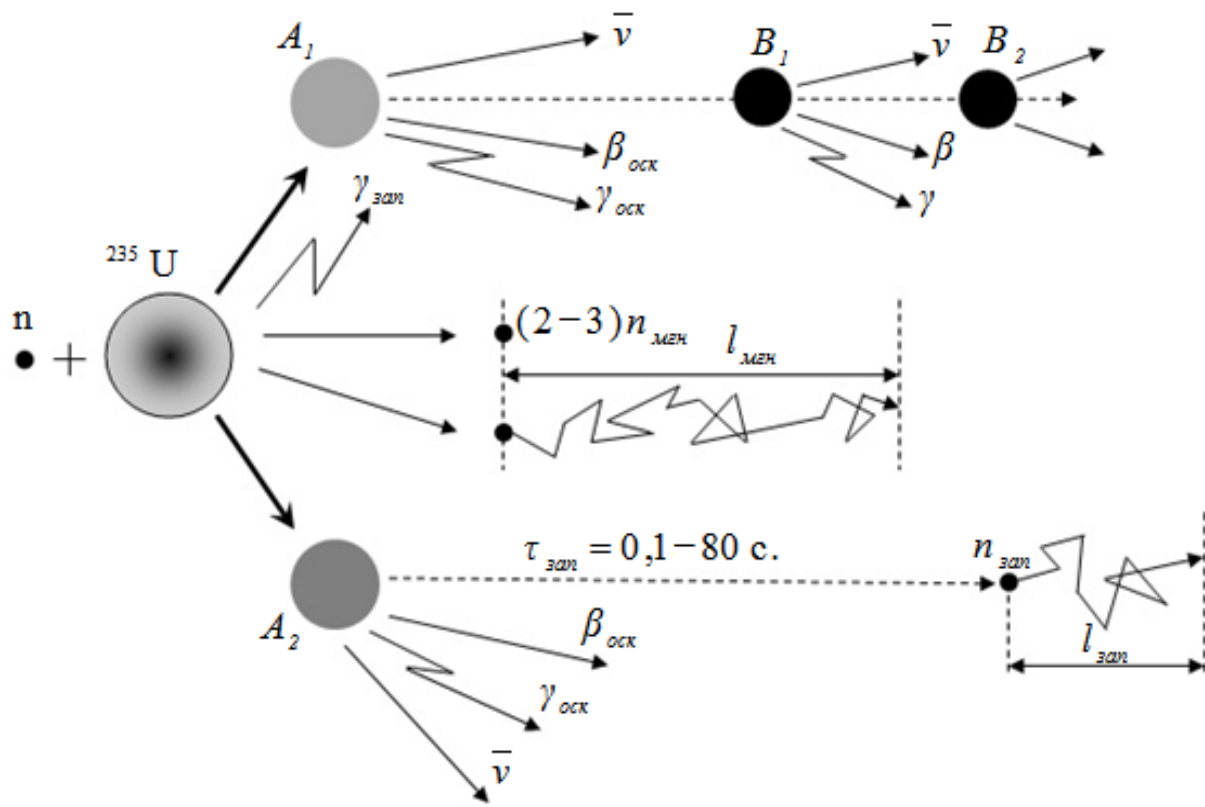


# 8. Элементарная теория деления атомного ядра



**Рис. 9.** Зависимость микросечения радиационного захвата нейтронов Cd от кинетической энергии нейтрона

# 9. Элементарная теория деления атомного ядра



**Рис. 10.** Схема деления ядра урана  ${}^{235}\text{U}$  тепловыми нейтронами

# 9. Элементарная теория деления атомного ядра

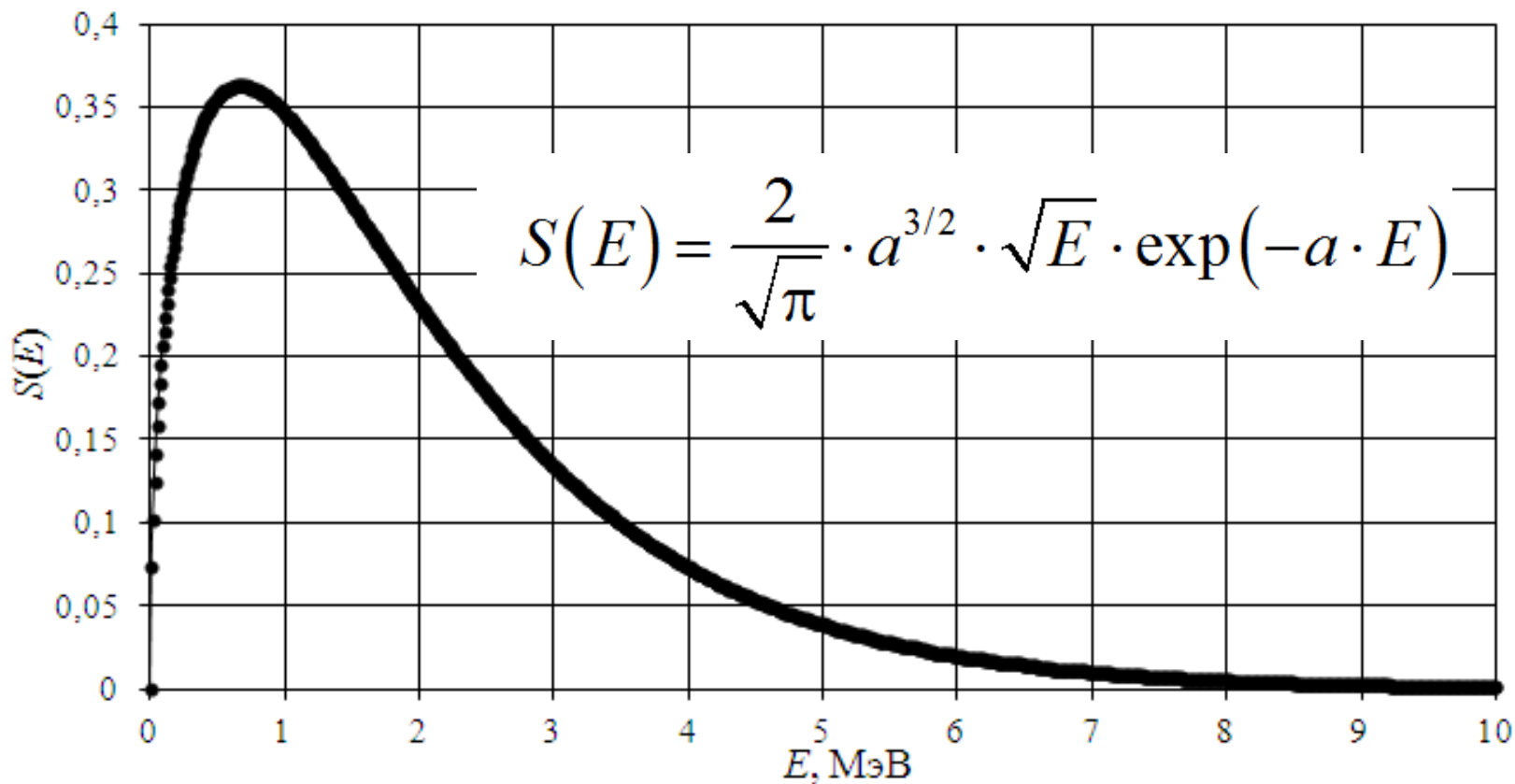
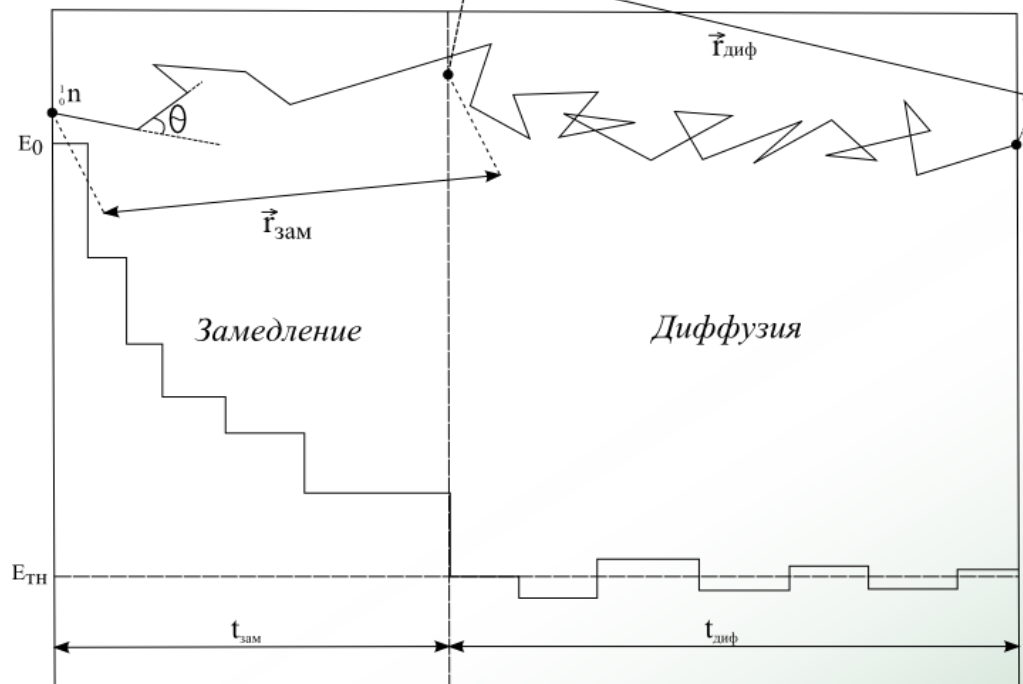


Рис. 11. Спектр нейтронов деления ядер урана-235



# 9. Элементарная теория деления атомного ядра



$$E_0 = 2 \text{ МэВ}$$

$$E_{\text{ТН}} = 0,025 \text{ эВ}$$

**Рис. 12.** Схема замедления и диффузии нейтронов в размножающей среде



## Выводы:

1. Взаимодействие нейтронов с ядрами составляют самый обширный класс ядерных взаимодействий, так как нейтроны входят в состав любого ядра, в котором они прочно связаны ядерными силами.
2. Первичную классификацию взаимодействий нейтрона с ядром сводят к двум процессам: упругому рассеянию в поле ядерных сил, либо к захвату нейтрона ядром с образованием составного ядра.
3. Протекание той или иной реакции процесс вероятностный и характеризуется микро- и макро-сечениями.



## Выводы (продолжение):

4. Сечения зависят от энергии нейтронов. Формально нейтроны делятся на 3 три группы: тепловые, резонансные и быстрые нейтроны.
5. Энергетическая зависимость сечения от энергии для каждой группы имеет свой определенный вид.
6. Сечения нейтронных реакции в резонансной области сложным образом зависят от энергии нейтронов.

**Программное обеспечение: Internet Explorer 5.0 и выше. — Режим**

**доступа:** <http://www.lib.tpu.ru/fulltext/m/2010/m2/main.html>. 67