

М.А. Киселёв

Атомные реакторы и ядерная энергетика

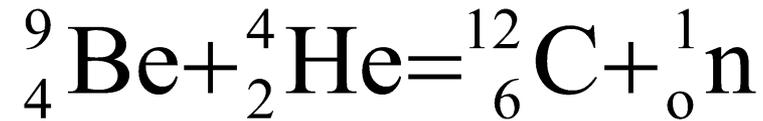
Лекция 2

Нейтрон и его свойства.

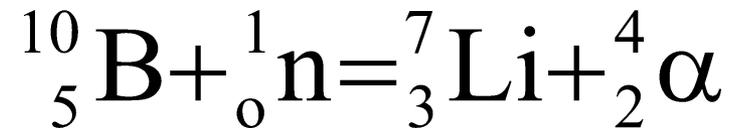
ЛНФ ОИЯИ, 15 сентября 2016

Открытие нейтрона.

Джеймс Чедвик (*James Chadwick*), 1932 год



Регистрация нейтрона



Открытие деления урана (конец 1938 – начало 1939 года)

- Ган и Штрассман – обнаружили барий в продуктах облучения урана нейтронами (!?) – бред какой-то...
- Лиза Мейтнер и Отто Фриш объяснили это делением ядра на два осколка.

Нейтроны при делении и цепная реакция

- Жолио и Ирен Кюри нашли множественность испускания нейтронов при делении.
- Зельдович и Харитон показали возможность цепной реакции деления и создания реакторов (1939)

Свойства нейтрона

Спин=1/2, заряд=0

$$\mu_n \approx -1.9 \mu_B \quad m_n = 1.009 \text{ а.е.м} = 939 \text{ МэВ}$$

$$\mu_p \approx 2.79 \mu_B \quad m_n = 1,3 \text{ МэВ} + m_p$$

$$\mu_B = \frac{e}{m_p \cdot c} \cdot \frac{\hbar}{2} = 5.05 \cdot 10^{-24} \frac{\text{эрг}}{\text{сек}}$$



Получение нейтронов:
Реакторы
Ускорители



Ra, Be
Po, Be → **Источники**
 $10^6 - 10^7$ н/сек

Таблица 42.1. Массы покоя в килограммах, атомных единицах массы и МэВ/c²

Частица	Масса		
	кг	а.е.м.	МэВ/c ²
Электрон	$9,1095 \cdot 10^{-31}$	0,00054858	0,51100
Протон	$1,67265 \cdot 10^{-27}$	1,007276	938,28
Атом ${}^1_1\text{H}$	$1,67356 \cdot 10^{-27}$	1,007825	938,79
Нейтрон	$1,67500 \cdot 10^{-27}$	1,008665	939,57

их можно округлить до

$$1 \text{ а.е.м.} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 931,5 \text{ МэВ}/c^2.$$

$$1 \text{ эв} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$$

Нейтрон – частица и волна

$\bar{E} = \frac{3}{2} kT_0$ Средняя кинетическая энергия нейтронов, находящихся в термодинамическом равновесии со средой

$E \approx kT_0$ Оценка кинетической энергии нейтронов по наиболее вероятной энергии

$$k = 1.38 \cdot 10^{-16} \text{ эрг/сек} \quad T_0 = 273 + t^\circ\text{C} = 300\text{K}$$

$$1 \text{ эВ} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ эрг}$$

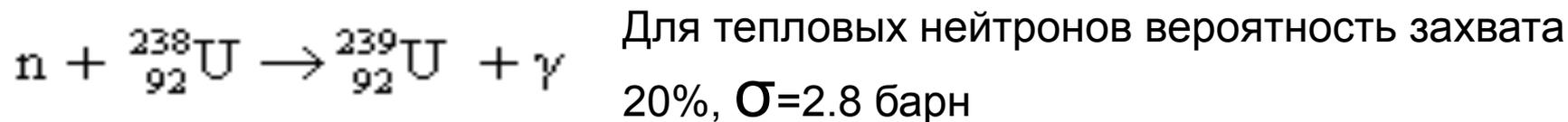
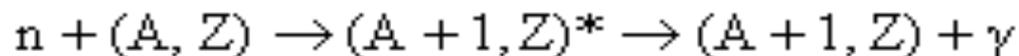
$$1 \text{ эрг} = 6.24 \cdot 10^{11} \text{ эВ}$$

Не путать!

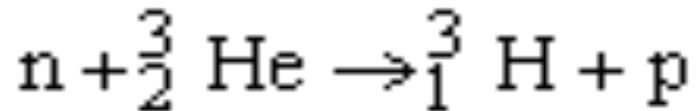
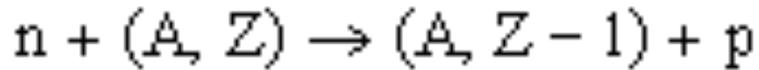
$\bar{E} = 0.039 \text{ эВ}$

$E = 0.025 \text{ эВ}$

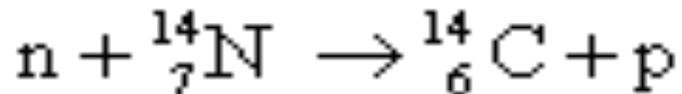
Ядерные реакции с нейтронами



Реакции с образованием протонов, (n,p) реакции:

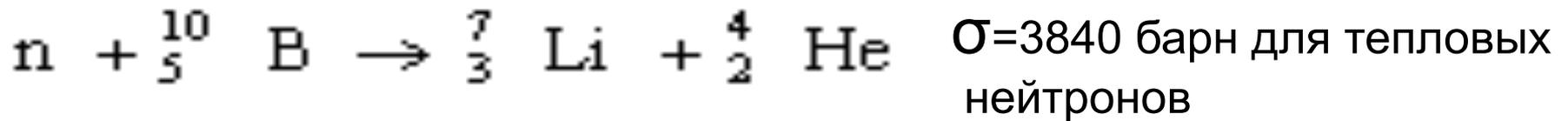
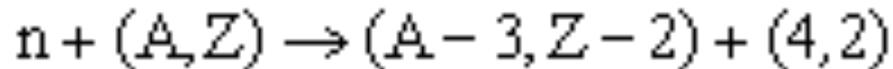


регистрации нейтронов в детекторах, наполненных ${}^3\text{He}$, $\sigma = 5400$ барн



$\sigma = 1,75$ барн. Применяется для получения очень важного в методе меченых атомов β -активного нуклида ${}^{14}\text{C}$ ($T_{1/2} = 5730$ лет)

Реакции с образованием α -частиц, (n, α) - реакции:



Применяются в детекторах нейтронов и счетчиках

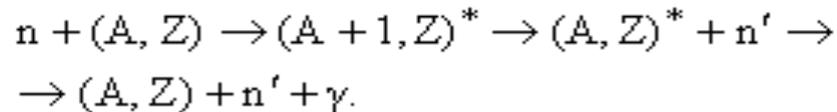
Деление ядер

Реакция деления тяжелых ядер (U, Th, Pu и др.) нейтронами, (n, f) – реакция



При этом: $A_1 + A_2 = A + 1$, $Z_1 + Z_2 = Z$, $\frac{\bar{A}_1}{\bar{A}_2} \approx \frac{2}{3}$

Неупругое рассеяние нейтронов (n, n')



Упругое рассеяние нейтронов (n, n)
(резонансное и потенциальное)

Масса ядра

$$M = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - \Delta W$$

ΔW — энергия связи нуклонов в ядре

$$R = 1.4 \cdot 10^{-13} \cdot A^{1/3}$$

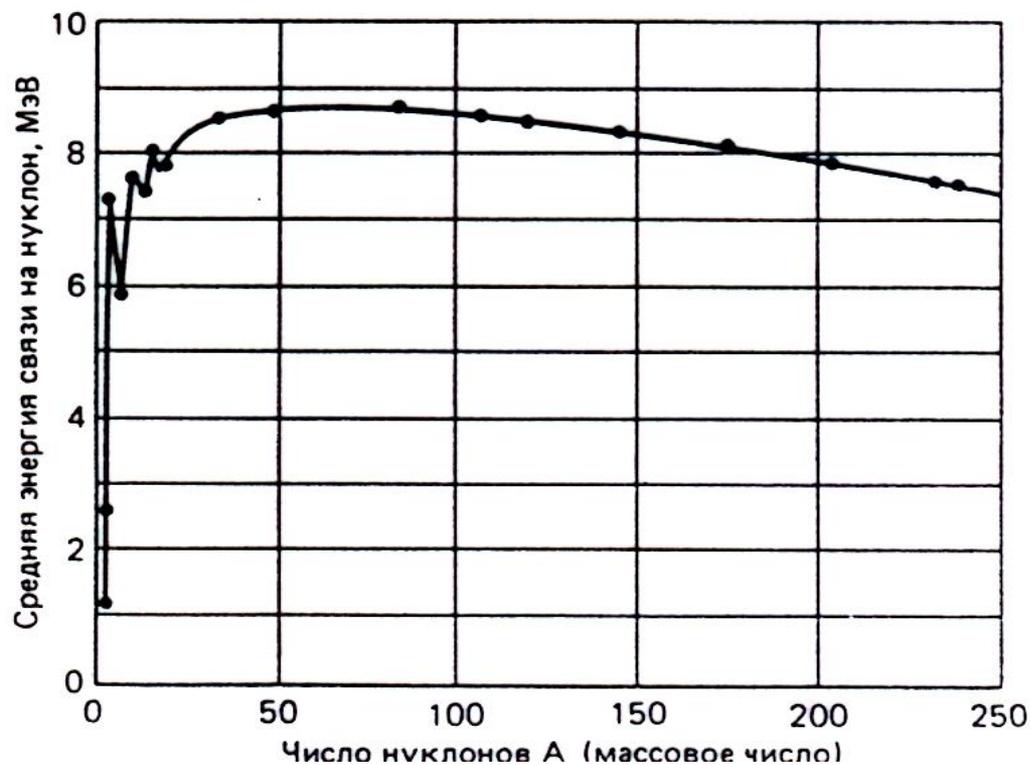
Формула Вейцзеккера

Магические ядра
2, 8, 20, 50

$$\Delta W = \alpha \cdot A - \beta \cdot A^{2/3} - \gamma \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} - \zeta \cdot \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + \delta \cdot A^{-3/4}$$

$\delta =$	$+ \delta $	Для четно-четных ядер
	0	Для нечетных ядер
	$- \delta $	Для нечетно-нечетных ядер

Зависимость средней энергии связи на нуклон от массового числа A



Поток нейтронов

$$\Psi = J \cdot N \cdot \sigma$$

Число актов рассеяния (поглощения) за 1 сек
в 1 см³

J – коллимированный поток нейтронов н/сек · см²

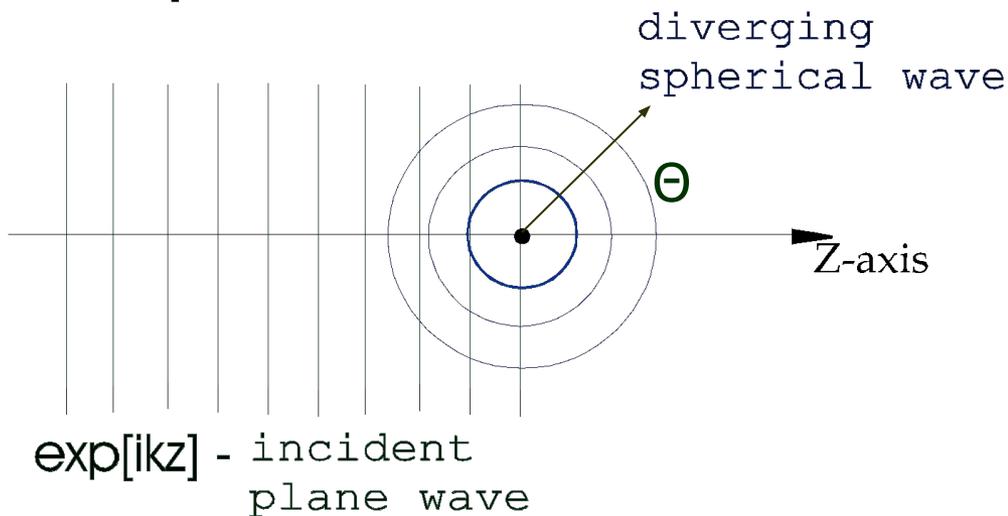
N – число ядер в 1 см³

σ - микроскопическое сечение рассеяния (захвата, деления)

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$$

1 барн = 10⁻²⁴ см²

Микроскопическое сечение рассеяния



$$k = \sqrt{2mE / \hbar^2}$$

$$\psi(r, \theta) = \exp(ikz) + \frac{f(k, \theta)}{r} \exp(ikr)$$

$$d\sigma = |f(k, \theta)|^2 d\Omega$$

$$d\Omega = 2\pi \sin \theta d\theta$$

Амплитуда рассеяния, длина рассеяния, плотность
длины рассеяния $\rho(x)$

Рентгеновские лучи с длиной волны около 1.5 \AA

$$\rho_e(x) = n(x) \cdot r_o \quad r_o = \frac{e^2}{mc^2} = 2.82 \cdot 10^{-13} \text{ см}$$

Тепловые нейтроны с длиной волны от 1 до 10 \AA

$$\rho_n(x) = \frac{\sum b_i}{V}$$

Элемент	H	D	^{12}C	^{14}N	^{16}O	^{31}P	^{32}S
Длина рассеяния $b, 10^{-12} \text{ см}$	-0.37	0.67	0.67	0.94	0.58	0.51	0.28

Зависимость амплитуды рассеяния от энергии

$$a = -\lim_{k \rightarrow 0} f(k) \quad \text{Длина рассеяния}$$

При условии малости энергии нейтрона по сравнению с ядерным потенциалом

$$\frac{1}{f_{\Pi}(k)} = -\frac{1}{a} \cdot \left(1 - \frac{1}{2} \cdot k^2 r_0 a \right) \quad \text{Для тепловых нейтронов } E=0.026 \text{ эв}$$

$k \approx 10^9 \text{ 1/см}$

Оценивая $a \approx 10^{-12} \text{ см}$, $r_0 \approx 10^{-13} \text{ см}$,
Получаем, что

$$\frac{1}{f_{\Pi}} \approx -\frac{1}{a}$$

Плотность длины рассеяния $\rho(x,y,z) =$
сумма длин рассеяния ядер в элементе
объема тела

Знак амплитуды рассеяния определяется конкуренцией потенциального и резонансного рассеяния

$$f = f_{\text{п}} + f_{\text{р}} = f_{\text{п}} + \frac{\Gamma_{\text{н}} / 2k}{(E - E_0) + i\Gamma / 2}$$

Для медленных нейтронов $E \ll E_0$ и $\Gamma \approx \Gamma_{\gamma}$

Для большинства ядер $\Gamma_{\gamma} \ll E_0$.



$$f = f_{\text{п}} - \frac{\Gamma_{\text{н}}}{2kE_0}$$

Поскольку $\Gamma_{\text{н}} \approx k$ то амплитуда от энергии не зависит

Дифференциальное микроскопическое сечение рассеяния

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\text{рассеянный поток} / \text{телесный угол}}{\text{начальный поток} / \text{площадь}} = \frac{\text{см}^2}{\text{стерадиан}}$$

Полное микроскопическое сечение рассеяния

$$\sigma = \frac{\text{рассеянный поток}}{\text{начальный поток} / \text{площадь}} = \text{см}^2$$

Макроскопическое сечение

$$\Sigma = N \cdot \sigma \quad \text{Размерность см}^{-1}$$

$$N = \frac{\text{ПЛОТНОСТЬ}}{\text{АТОМНЫЙ ВЕС}} \cdot \text{число Авогадро} \quad N_A = 6.025 \cdot 10^{23} \text{ атом/моль}$$

$$\Psi = J \cdot \Sigma \quad \text{Число событий, одноатомное вещество}$$

$$\Psi = J \cdot N_{\text{mol}} \cdot \sum_i n_i \cdot \sigma_i \quad \text{Молекулярное вещество}$$

Уменьшение потока при прохождении нейтронами вещества

$\Sigma \cdot \Delta x$ вероятность того, что произойдет столкновение нейтрона с ядром вещества на пути Δx

$1 - \Sigma \cdot \Delta x$ Вероятность того, что нейтрон пройдет путь Δx без столкновений

Вероятность пройти расстояние $x = n \cdot \Delta x$ без столкновений

$$(1 - \Sigma \cdot \Delta x)^n = (1 - \Sigma \cdot \Delta x)^{\frac{x}{\Delta x}} = (1 - \Sigma \cdot \Delta x)^{\frac{x \cdot \Sigma}{\Delta x \cdot \Sigma}}$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} (1 - \Sigma \cdot \Delta x)^{\frac{x \cdot \Sigma}{\Delta x \cdot \Sigma}} = e^{-\Sigma \cdot x}$$

Ослабление пучка нейтронов при прохождении вещества

$$I = I_0 \cdot e^{-\Sigma \cdot x}$$

Длина свободного пробега нейтрона

$$\int_0^{\infty} e^{-\Sigma x} \cdot \Sigma dx = 1$$

Вероятность того, что нейтрон испытает столкновение при прохождении бесконечно большого пути

$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x \cdot e^{-\Sigma x} \cdot \Sigma \cdot dx}{\int_0^{\infty} e^{-\Sigma x} \cdot \Sigma \cdot dx} = \int_0^{\infty} x \cdot e^{-\Sigma x} \cdot \Sigma \cdot dx = \frac{1}{\Sigma}$$

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma} = \frac{1}{N \cdot \sigma}$$

Важные соотношения

$$\lambda_s = \frac{1}{\Sigma_s} = \frac{1}{N \cdot \sigma_s}$$



$$\frac{1}{\lambda} = \Sigma_t = \frac{1}{\lambda_s} + \frac{1}{\lambda_a}$$

$$\lambda_a = \frac{1}{\Sigma_a} = \frac{1}{N \cdot \sigma_a}$$

$$\tau = \frac{\lambda}{v}$$

Среднее время между двумя столкновениями

$$\frac{1}{\tau} = \frac{v}{\lambda} = v \cdot \Sigma$$

Число столкновений за секунду

Задачи:

1. Рассчитать плотность ядерного вещества.
2. Рассчитать плотность длины рассеяния нейтрона в H_2O и D_2O .
3. Рассчитать ослабление пучка нейтронов при прохождении 1, 2 и 5 см H_2O и D_2O .