



Санкт-Петербургский государственный университет
Физический факультет
Кафедра ядерно-физических методов исследования



Сыромятников
Арсений Владиславович

*Основы теории взаимодействия
тепловых нейтронов с веществом*

Немного истории



**Джеймс Чедвик
(James Chadwick)**

Открытие нейтрона – цепочка событий на рубеже 20х-30х г.г., заканчивающаяся работой Дж. Чедвика

Джеймс Чедвик

В 1920 экспериментально подтвердил равенство заряда ядра порядковому номеру элемента.

Изучал искусственное превращение элементов под действием альфа-частиц (совместно с Резерфордом).

Большой заслугой Чедвика является открытие им в 1932 году нейтрона при облучении бериллиевой мишени потоком альфа-частиц (Нобелевская премия, 1935 г.).

В 1943—1945 возглавлял группу английских учёных, работавших в Лос-Аламосской лаборатории над проектом атомной бомбы.

Вскоре после этого было понято, что нейтрон является прекрасным инструментом для изучения конденсированных сред

Основные свойства нейтрона

Время жизни $\tau = 886$ с

Заряд 0

Спин 1/2

Магнитный момент $\mu_n = -0.9662 \cdot 10^{-23}$ эрг/гаусс = $-1.913\mu_N = -1.042 \cdot 10^{-3}\mu_B$, где μ_N и μ_B – ядерный магнетон и магнетон Бора, соответственно.

Масса нейтрона $M = 1.675 \cdot 10^{-24}$ г.

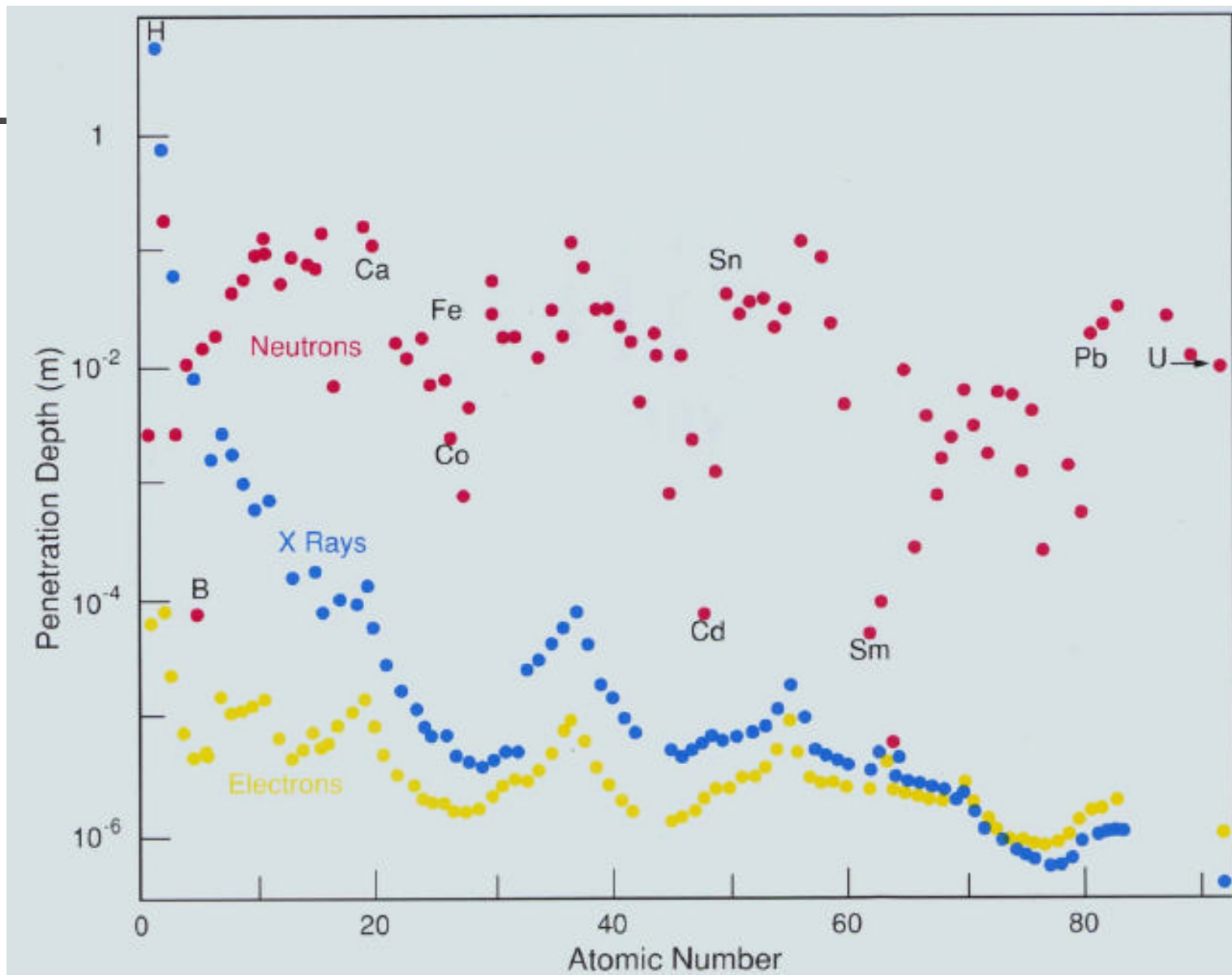
Нейтрон **имеет магнитный момент !**

- Изучение магнитной структуры
- Изучение магнитных флуктуаций

Нейтрон **электронейтрален, он слабо взаимодействует с веществом !**

- Большая глубина проникновения в образец
- Неразрушающий метод исследования

Основные свойства нейтрона



Основные свойства нейтрона

Скорость (v), кинетическая энергия (E), волновой вектор (k), длина волны (λ), температура (T)

$$E = \frac{Mv^2}{2} = \frac{(\hbar k)^2}{2M} = k_B T \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{Mv}{\hbar}$$

	Энергия (meV)	Температура (K)	Длина волны (nm)
Холодные	0.1 – 10	1 – 120	0.4 – 3
Тепловые	5 – 100	60 – 1000	0.1 – 0.4
Горячие	100 – 500	1000 – 6000	0.04 – 0.1

Энергия тепловых нейтронов порядка энергии элементарных возбуждений в конденсированных средах!

- Колебания решетки
- Магнитные возбуждения

Длина волны тепловых нейтронов порядка расстояния между атомами в конденсированных средах!

- Кристаллическая структура

Нейтронное рассеяние. Исторические вехи.

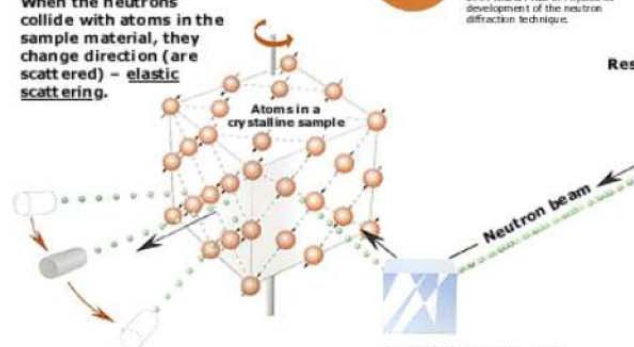
1994 – Нобелевская премия по физике присуждена за: «*Пионерский вклад в развитие методики нейтронного рассеяния в физике конденсированных сред*»

1994 Nobel Prize in Physics

S

Neutrons show where atoms are

When the neutrons collide with atoms in the sample material, they change direction (are scattered) – elastic scattering.



Atoms in a crystalline sample

Neutron beam

Res

Detectors record the directions of the neutrons and a diffraction pattern is obtained. The pattern shows the positions of the atoms relative to one another.

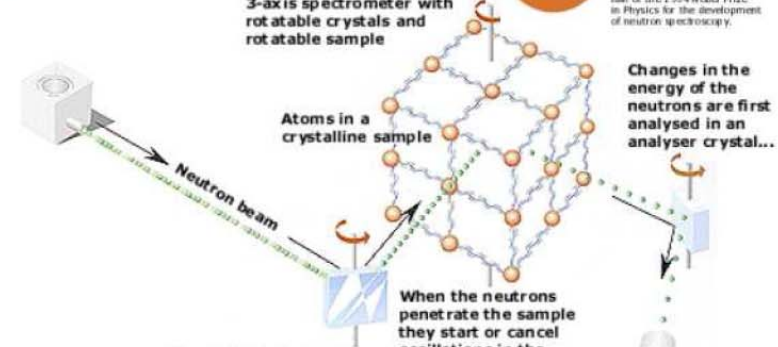
Crystal that sorts and forwards neutrons of a certain wavelength (energy) – monochromatized neutrons

Clifford G. Shull, MIT, Cambridge, Massachusetts, USA, receives one half of the 1994 Nobel Prize in Physics for development of the neutron diffraction technique.

B

Neutrons show what atoms do

3-axis spectrometer with rotatable crystals and rotatable sample



Atoms in a crystalline sample

Neutron beam

When the neutrons penetrate the sample they start or cancel oscillations in the atoms. If the neutrons create phonons or magnons they themselves lose the energy these absorb – inelastic scattering

Crystal that sorts and forwards neutrons of a certain wavelength (energy) – monochromatized neutrons

Changes in the energy of the neutrons are first analysed in an analyser crystal...

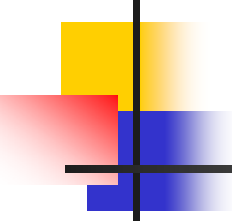
... and the neutrons then counted in a detector.

Betram N. Brockhouse, McMaster University, Hamilton, Ontario, Canada, receives one half of the 1994 Nobel Prize in Physics for the development of neutron spectroscopy.

1932 – Открытие нейтрона, мизерные нейтронные потоки

1952 – Рождение метода, появление интенсивных нейтронных пучков

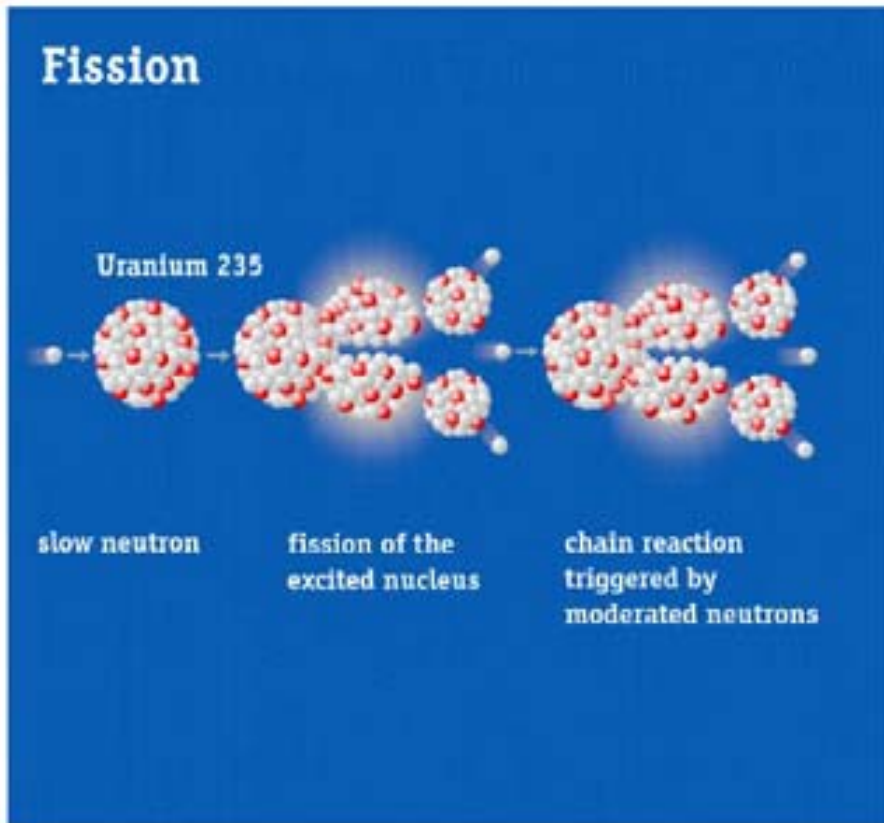
1970 – Нейтронная спектроскопия
1980 становится продуктивным экспериментальным методом



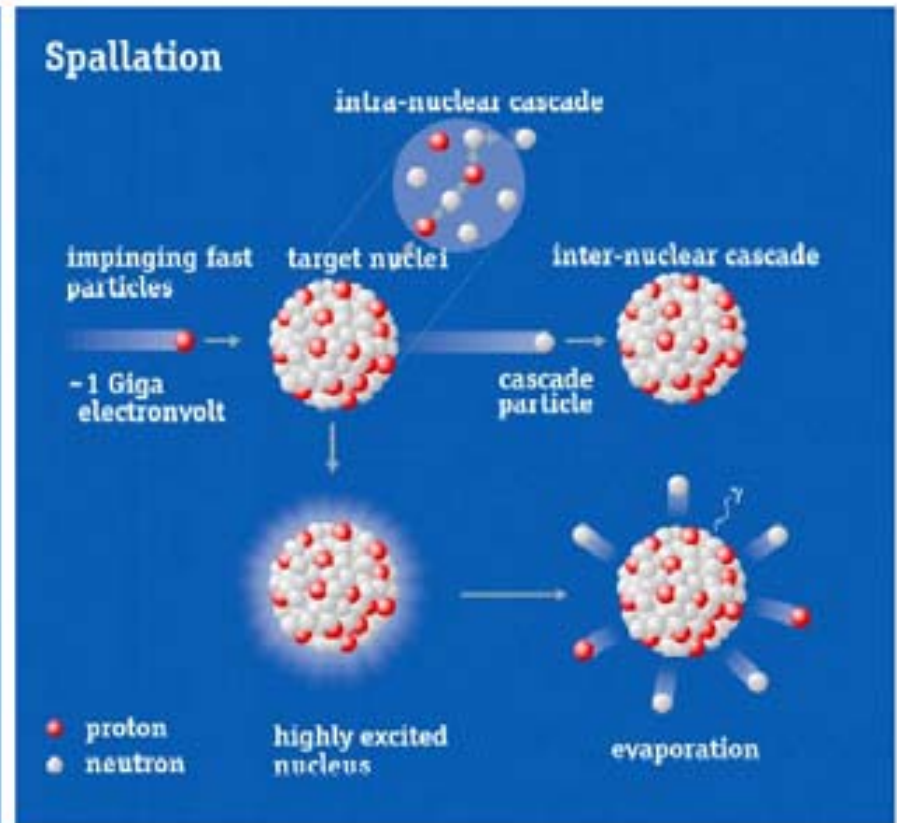
Недостатки метода рассеяния нейтронов

- Малая интенсивность, разрешение и когерентность
- Нужны образцы большого размера
- Наличие сильно поглощающих элементов (например, В, Cd, Gd)

Источники нейтронов

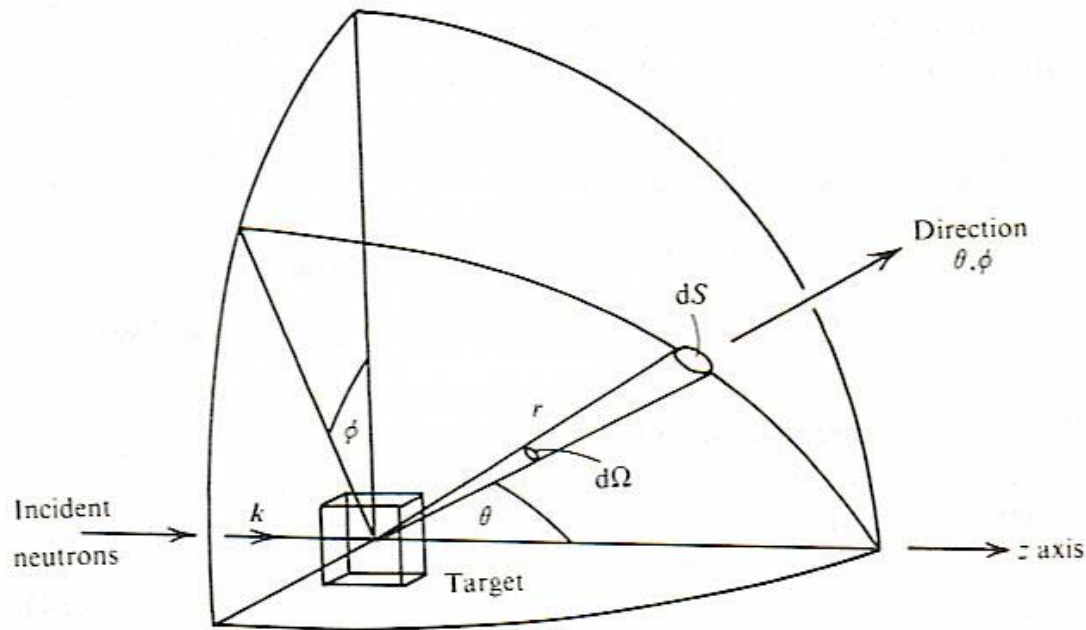


Постоянные источники.
Ядерные реакторы.



Импульсные источники

Сечение рассеяния нейтронов



Φ = число падающих нейтронов на см^2 в ед. времени

$$\sigma_{tot} = \frac{\text{полное число нейтронов, рассеянных в ед. времени}}{\Phi}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\text{число нейтронов, рассеянных в ед. времени в } d\Omega}{\Phi d\Omega}$$

$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} = \frac{\text{число нейтронов, рассеянных в ед. времени в } d\Omega \text{ \& } dE}{\Phi d\Omega dE}$$

σ измеряется в барнах: $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ см}^2$

Соотношения между сечениями

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \int_0^{\infty} \left(\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE} \right) dE$$

$$\sigma_{tot} = \int \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) d\Omega$$

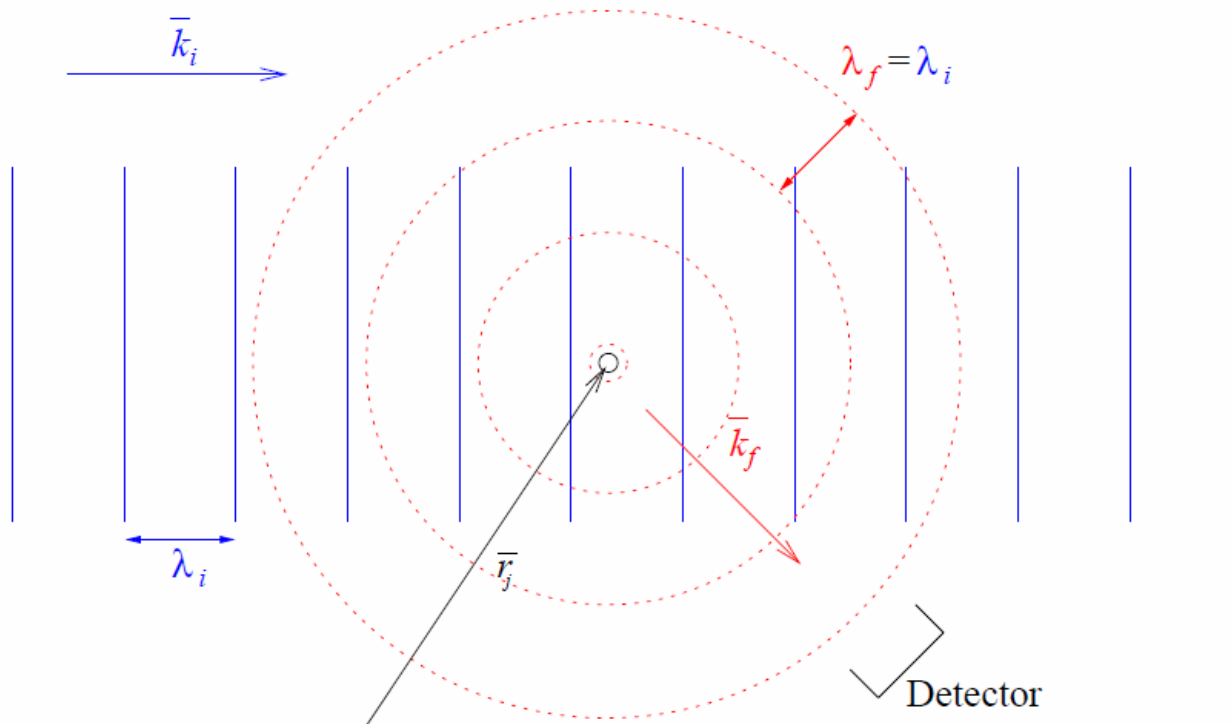
Упражнение 1. Упростить последнее выражение в случае, когда рассеяние аксиально симметрично.

$$\sigma_{tot} = ?$$

Рассеяние на изолированном (закрепленном) ядре

$$r_{\text{int}} \sim 10^{-14} \div 10^{-15} \text{ М} \quad \lambda \sim 10^{-10} \text{ М}$$

$$r_{\text{int}} \ll \lambda \quad \Rightarrow \quad S\text{-рассеяние}$$



$$\psi_{\text{inc}} = e^{ikz}$$

$$\psi_{\text{sc}} = -\frac{b}{r} e^{ikr}$$

$$\psi = \psi_{\text{inc}} + \psi_{\text{sc}}$$



Длина рассеяния

Вообще говоря, $b \in \text{Im}$ и зависит от E .

$\text{Im}(b) \gg \text{Re}(b)$ в очень сильно поглощающих ядрах таких, как ^{10}B , ^{103}Rh , ^{113}Cd , ^{157}Gd

Но в большинстве случаев b можно считать вещественным.



Длина рассеяния

$$\text{Спин ядра } I \rightarrow \begin{cases} I + 1/2 \rightarrow b_1 \\ I - 1/2 \rightarrow b_2 \end{cases}$$

Nuclide	Combined spin	b/fm	Nuclide	Combined spin	b/fm
^1H	1	10.85	^{23}Na	2	6.3
	0	-47.50		1	-0.9
^2H	$\frac{3}{2}$	9.53	^{59}Co	4	-2.78
	$\frac{1}{2}$	0.98		3	9.91



Сечение рассеяния

$$v dS |\psi_{sc}|^2 = v dS \left(\frac{b}{r} \right)^2 = v b^2 d\Omega$$

$$\Phi = v |\psi_{inc}|^2 = v$$

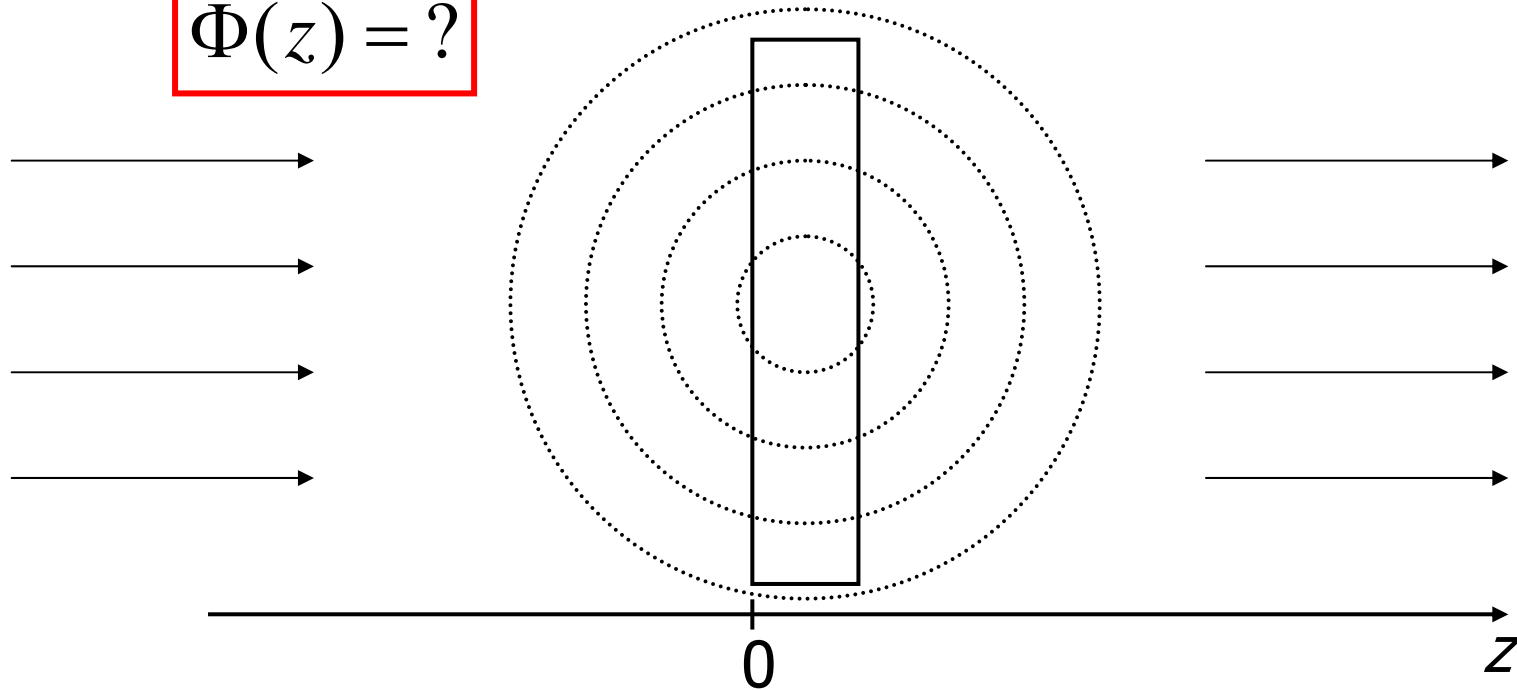
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{v b^2 d\Omega}{\Phi d\Omega} = b^2$$

$$\sigma_{tot} = 4\pi b^2$$

Ослабление прямого пучка нейтронов при прохождении через образец

Упражнение 2. Найти ослабление (attenuation) прямого пучка нейтронов в результате рассеяния при прохождении через образец. Полное сечение рассеяния атома типа i равно σ_i . Число атомов типа i в ед. объема равно n_i .

$$\Phi(z) = ?$$



Сечение поглощения нейтронов

$$\sigma_a = \sigma_{a,th} \frac{V_{th}}{V} = \sigma_{a,th} \frac{\lambda}{\lambda_{th}} \quad v_{th} = 2200 \frac{m}{s}, \quad \lambda_{th} = 1.798 \text{ \AA}$$

1 mm of aluminum has 99% transmission

0.020" of cadmium has 0.3% transmission

1 m of dry air scatters 4.8%, absorbs 0.7%

0.1 mm of water scatters 5.5%

(These results were obtained using thermal neutron (2200 m/s, 1.8 Å) absorption cross sections.)

Сечение поглощения нейтронов

Упражнение 3. Как изменится ответ к Упражнению 2 для $\Phi(z)$, если учесть поглощение нейтронов. Сечение поглощения атома типа i равно σ_{ai}

$$\Phi(z) = ?$$