



**Национальный исследовательский ядерный
университет «МИФИ»**

Институт ядерной физики и технологий

Лаборатория экспериментальной ядерной физики


<http://enpl.mephi.ru/>

А.И. Болоздыня

Экспериментальная ядерная физика

Лекция №17

Нейтронная физика

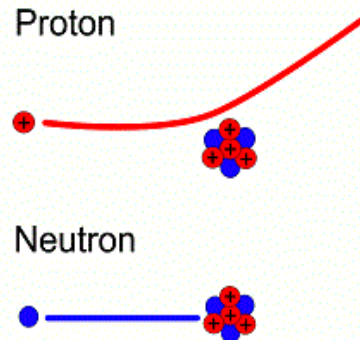


Лекция №17

Нейтронная физика

- 1. Открытие нейтрона**
- 2. Источники нейтронов**
- 3. Взаимодействие нейтронов с веществом**
- 4. Детекторы нейтронов**
- 5. Нейтронная спектроскопия**
- 6. Применения нейтронов**

1. Открытие нейтрона



В 1920 году Э. Резерфорд предположил, что ядро атома состоит из протонов и нейтральных частиц *нейтронов*, сконструированных каким-то образом из протонов и электронов

В 1930 году В. Боте и Г. Беккер открыли высокопроникающее, но не ионизирующее излучение, возникающее при бомбардировка лёгких элементов альфа-частицами.

В 1932 году М.Кюри и Ф.Жолио обнаружили, что новое излучение выбивает энергичные протоны из парафина.

Вскоре после этого в том же **1932 г.** **Джеймс Чедвик (Sir James Chadwick)** экспериментально доказал, что это излучение не гамма-кванты и предположил, что это **нейтроны Резерфорда**, определил их массу, сравнивая энергию и импульсы ядер отдачи водорода и азота, за что получил **Нобелевскую премию по физике в 1935 году.**

Вскоре после этого открытия В. Гейзенбергом и другими была создана модель ядра, состоящего из протонов и нейтронов



Kapitsa as Chadwick's best man, 1925

Открытие нейтрона

1932 г. Дж. Чедвик



Дж. Чедвик
(1891-1974)
Н.п. 1935

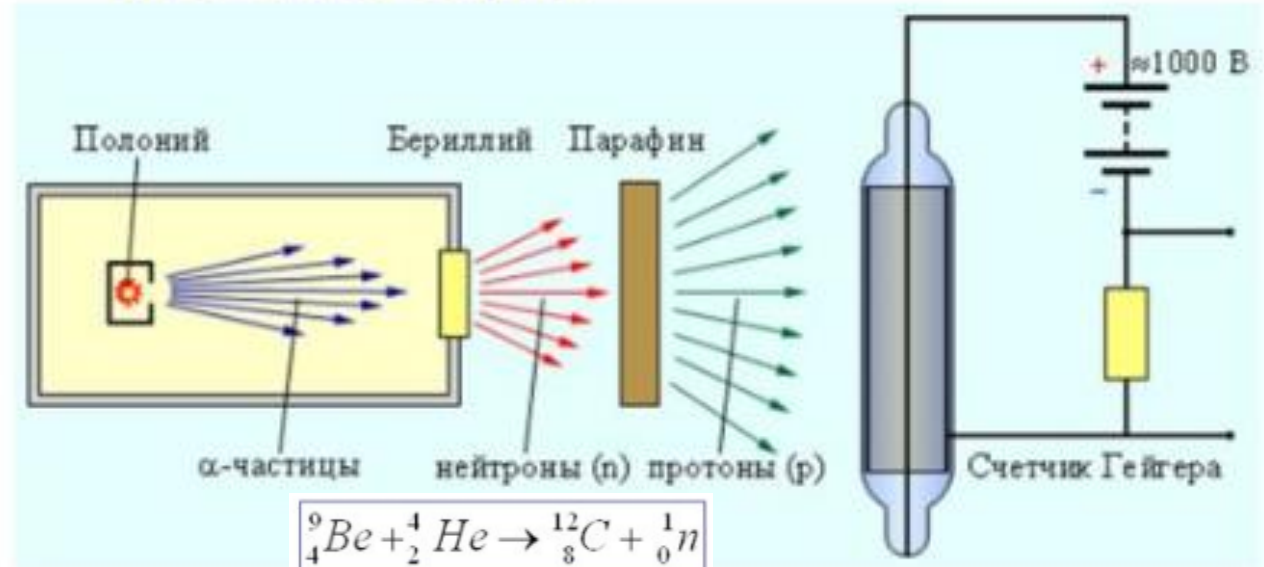
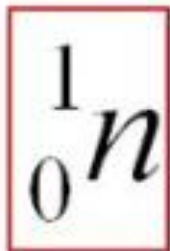


Схема установки для обнаружения нейтронов

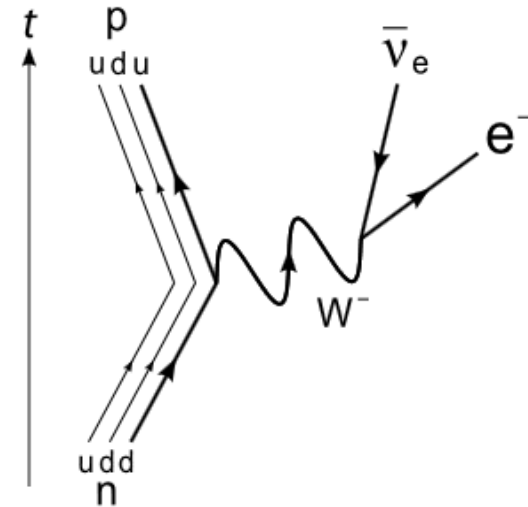
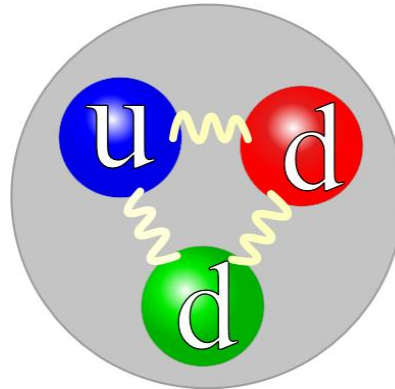
масса нейтрона

$$m_n = 1,67493 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1,008665 \text{ а. е. м.}$$



Свойства нейтрона:

- Масса $939,565\ 4133(58)$ МэВ = $1,674\ 927\ 471(21) \cdot 10^{-27}$ кг = $1,008\ 664\ 915\ 88(49)$ а. е. м. = $m_p + 1,29343$ МэВ
- Заряд 0 . Экспериментальное значение $(-0,2 \pm 0,8) \cdot 10^{-21}e$
- Спин $\frac{1}{2}$
- Изотопический спин $\frac{1}{2}$
- Барионное число 1
- Магнитный момент $-1,913\ 042\ 73(45)$ ядерного магнетона Бора
- Внутренняя чётность +1
- Время жизни «на свободе» = $880,0 \pm 0,9$ с $T_{1/2} = 611$ с
- Основная мода распада



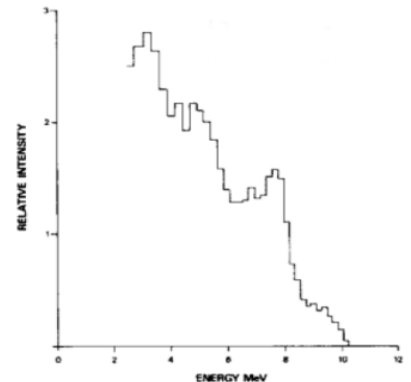
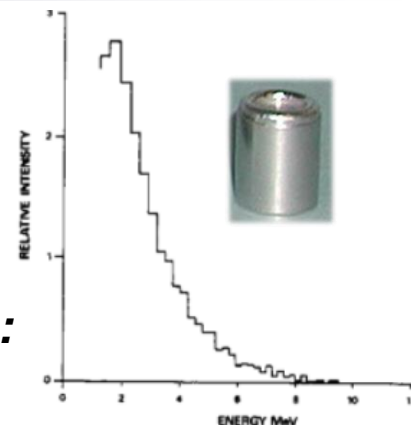
- С парциальной вероятностью 0,001 возможен распад



2. Источники нейтронов

1. Тяжёлые радиоактивные изотопы со спонтанной нейтронной эмиссией, как например ^{252}Cf , ^{238}Pu

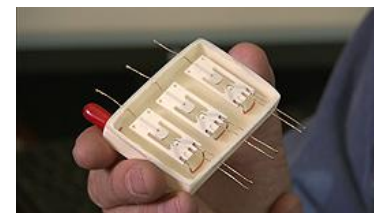
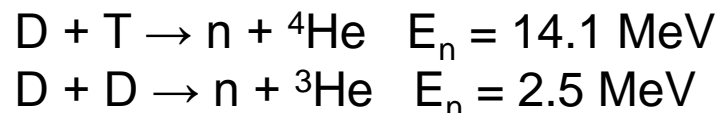
2. Альфа-активные изотопы, окружённые лёгкими элементами: *Pu/Be*, *Am/Be*, *Am/Li* за счет ядерных реакций типа



3. Радиоизотопы, распадающиеся с испусканием энергичных гамма-квантов, в комбинации с бериллием или дейтерием за счет реакций (γ, n)



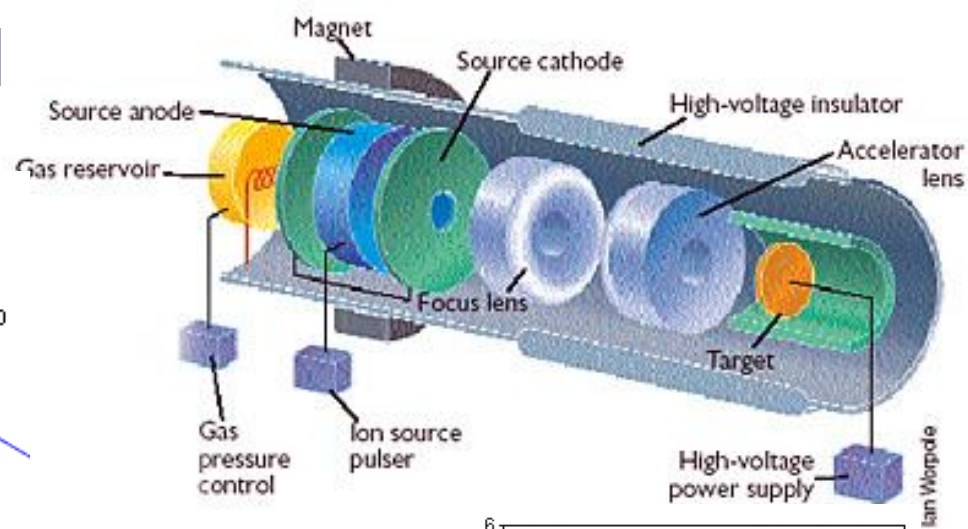
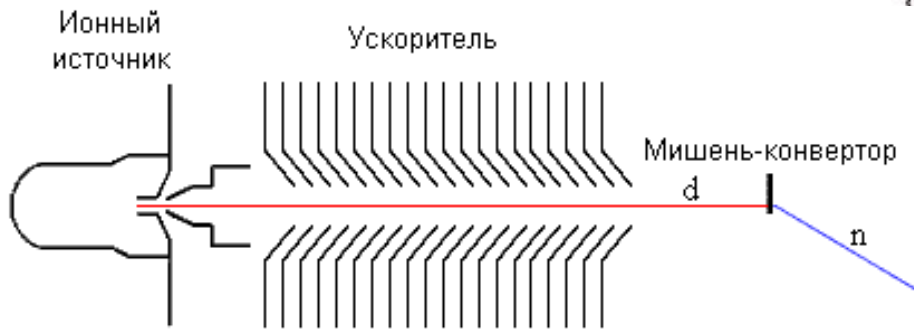
4. Нейтронные генераторы с реакциями синтеза



5. Ядерные реакторы

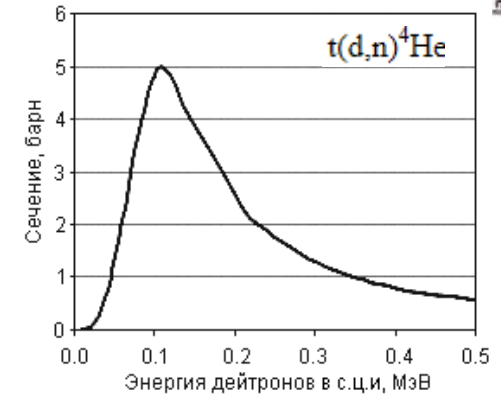
6. Ускорители

Нейтронные генераторы



Jan Worpde

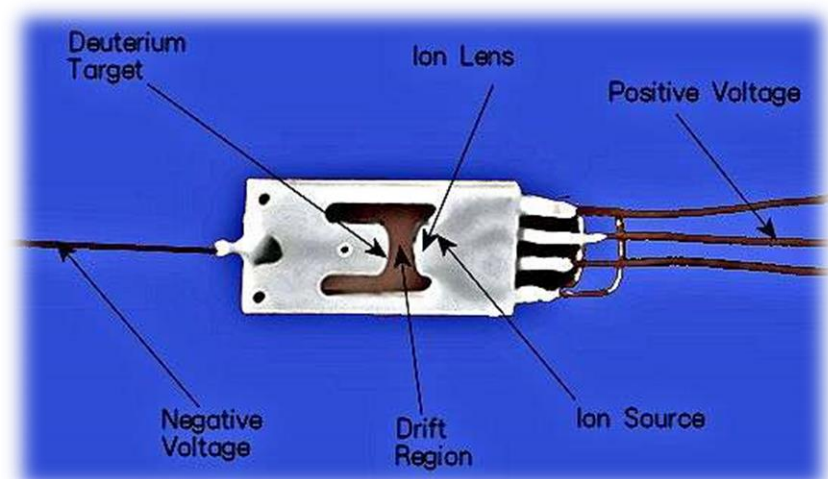
Реакция	Энергия реакции Q, МэВ	Энергия нейтронов, МэВ	Максимальное сечение σ_{max} , барн	Энергия ускоряемой частицы в с.ц.и при σ_{max} , МэВ
$d(d, ^3\text{He})n$	3.3	~2.5	~0.1	~1.0
$d(t, ^4\text{He})n$	17.6	~14.2	5.0	0.13



Используются термоядерные реакции

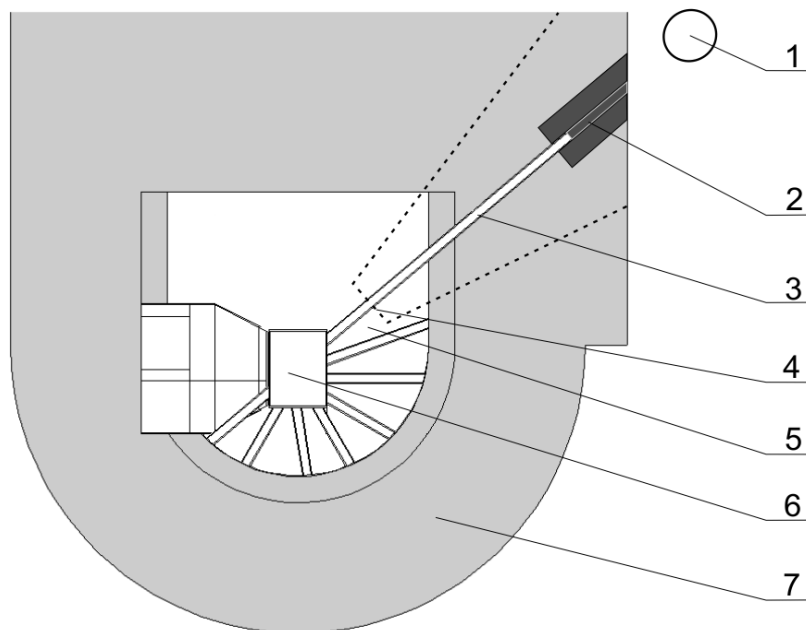


Нейтронный генератор Sandia **Neutristor**.
размер 1.25" x 0.6" x 0.13"
мощность в импульсе 1000n / 500nsec





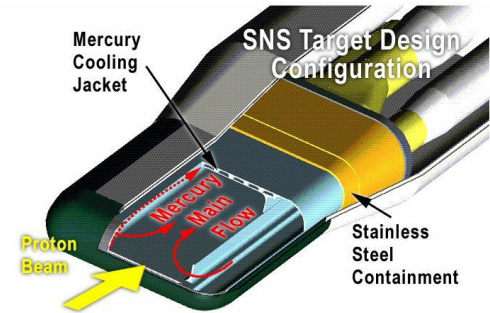
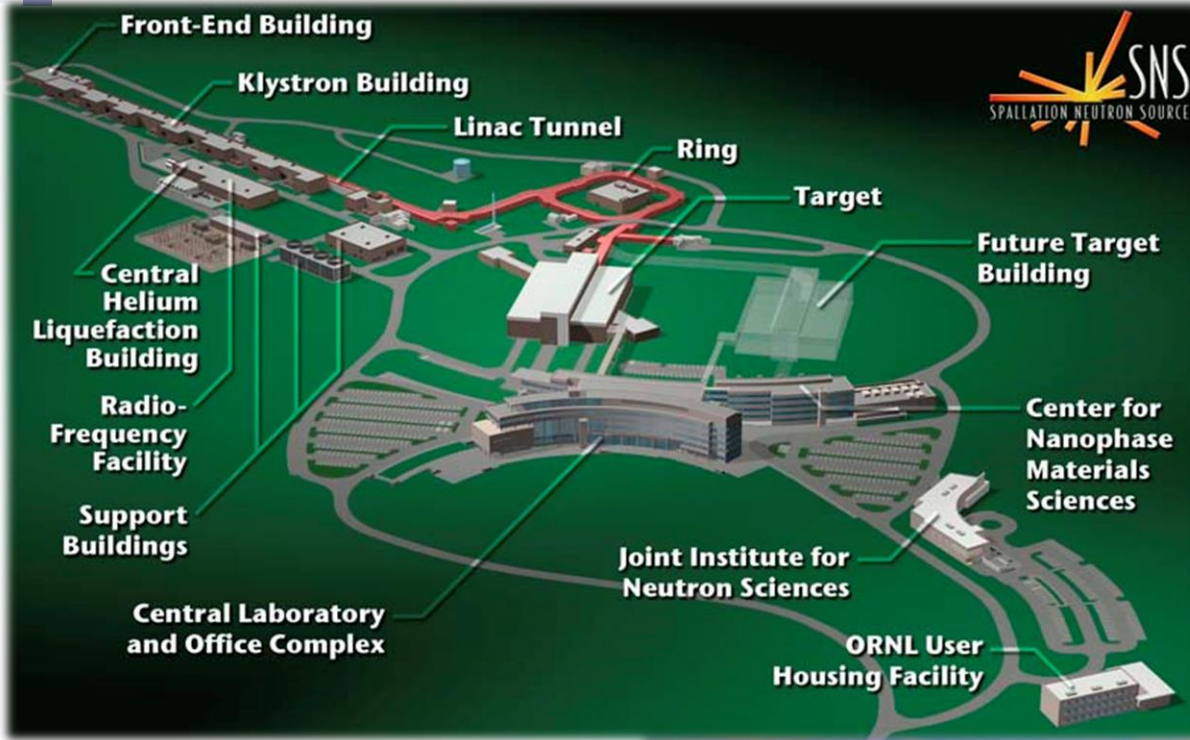
2.5 MW_{th} Исследовательский реактор ИРТ МИФИ



- 1 – Детектор РЭД-1
- 2 – Fe/Al фильтр
- 3 – Горизонтальный канал ГЭК-10
- 4 – Область MCNP моделирования
- 5 – Водный бассейн для отвода тепла
- 6 – Активная зона
- 7 – Бетонная радиационная защита



Ускорители

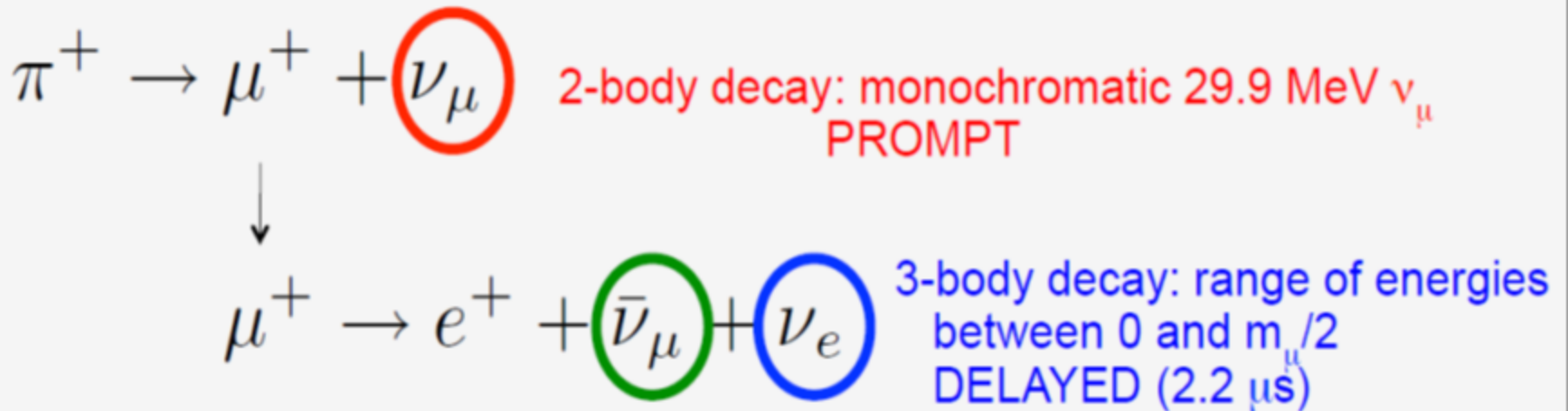
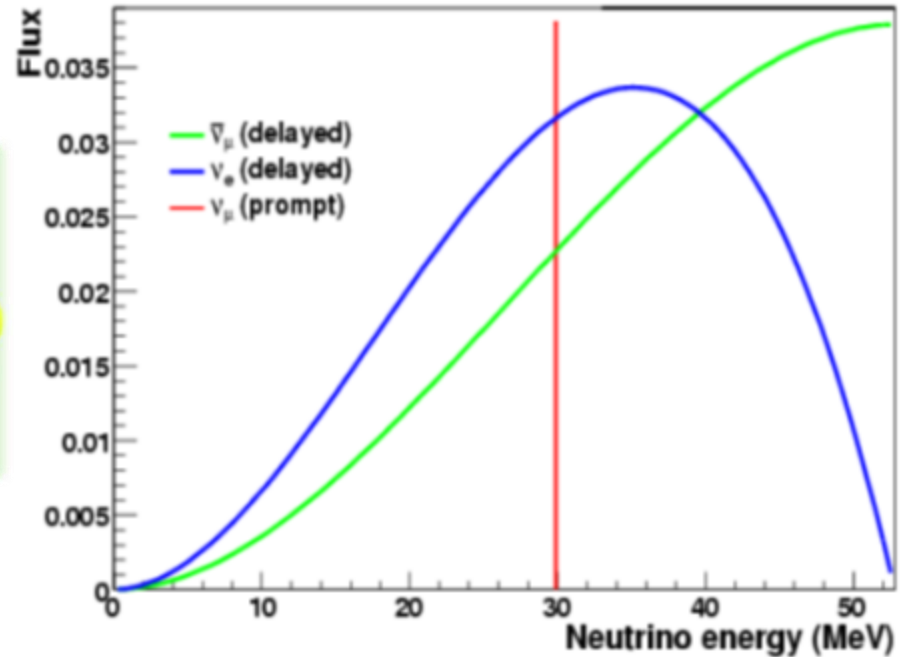
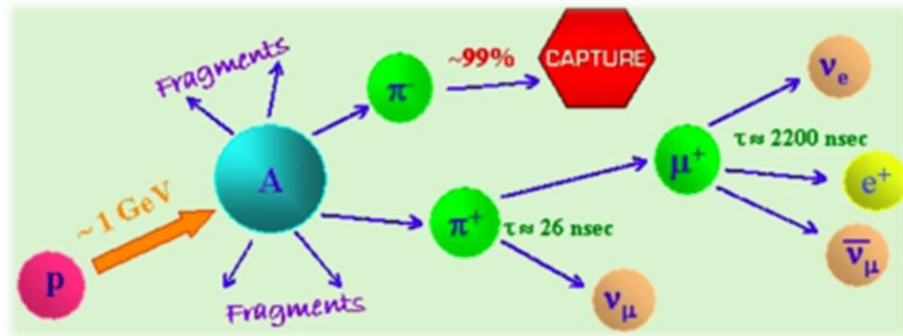


Proton beam energy: 0.9-1.3 GeV
Total power: 0.9-1.4 MW
Pulse duration: 380 ns FWHM
Repetition rate: 60 Hz
Liquid mercury target



Spallation Neutron Source at ORNL

SNS как источник нейтрино



3. Взаимодействие нейтронов с веществом

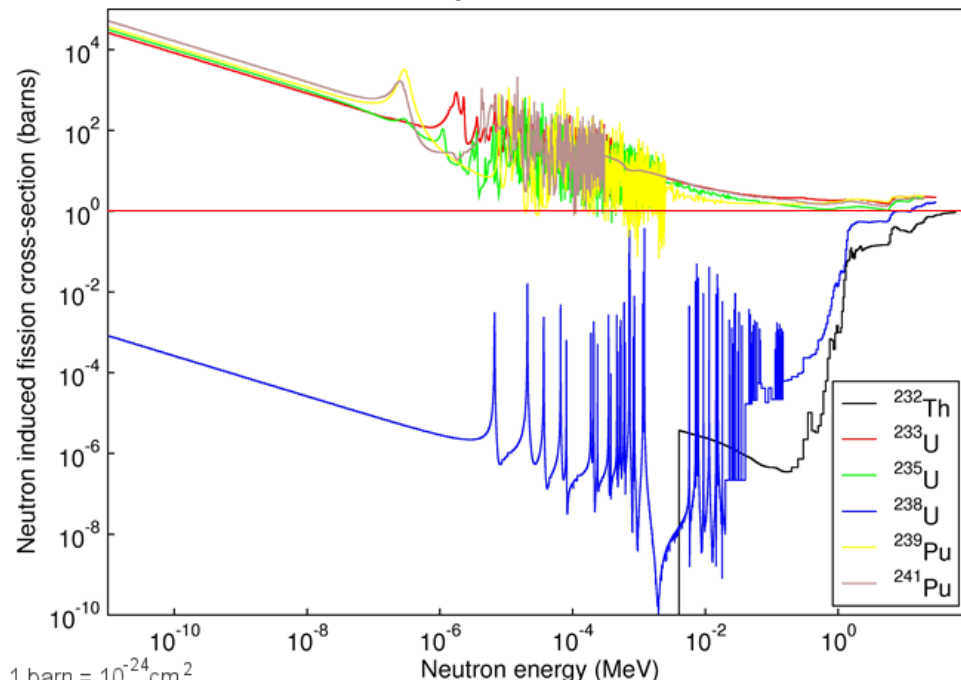
Что происходит с пучком нейтронов при прохождении через вещество?

➔ Поток уменьшается за счёт рассеяния на ядрах и ядерных реакций.

Ядерные реакции ведут к поглощению нейтронов и генерации ионизирующих излучений. Упругое рассеяние ведёт к «замедлению» (потере энергии) нейтронов

$$dI = -I\sigma_t n dx \quad I = I_0 e^{-\sigma_t n x}$$

Сечение взаимодействия нейтронов с веществом сильно зависит от энергии нейтронов и нерегулярно меняется от ядра к ядру (при изменении A)



Классификация нейтронов по энергии

Thermal	$E \approx 0.025 \text{ eV}$
Epithermal	$E \sim 1 \text{ eV}$
Slow	$E \sim 1 \text{ keV}$
Fast	$E = 100 \text{ keV} - 10 \text{ MeV}$

Тип реакции	Сечение реакции
Радиационный захват (n,γ)	Идёт на всех ядрах. Сечение: для тепловых нейтронов варьируется в широком интервале от 0,1 до 10 ³ и даже 10 ⁴ барн (¹³⁵ ₅₅ Xe); для быстрых нейтронов – от 0.1 до нескольких барн.
Упругое рассеяние (n,n)	Сечение варьируется в интервале нескольких барн.
Неупругое рассеяние (n,n')	Пороговая реакция. Сечение по порядку величины несколько барн.
(n,p)	<p>Наиболее важные реакции:</p> $n + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^3_1\text{H} + p + 0.76 \text{ МэВ},$ $\sigma_{\text{тепл.нейтр}} \approx 5400 \text{ барн.}$ $n + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^{14}_6\text{C} + p + 0.63 \text{ МэВ},$ $\sigma_{\text{тепл.нейтр.}} = 1.75 \text{ барн.}$
(n,α)	<p>Наиболее важные реакции:</p> $n + {}^6_3\text{Li} \rightarrow {}^3_1\text{H} + \alpha + 4.78 \text{ МэВ},$ $\sigma_{\text{тепл.нейтр.}} = 945 \text{ барн.}$ $n + {}^{10}_5\text{B} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \alpha + 2.79 \text{ МэВ}$ $\sigma_{\text{тепл.нейтр.}} \approx 3840 \text{ барн}$
(n,2n)	Пороговая реакция. Порог ~10 - 15 МэВ. Сечение: несколько десятых барн.
(n,f)	В подавляющем большинстве случаев пороговая реакция. Сечение очень мало, исключая отдельные случаи ²³⁵ ₉₂ U, ²³⁸ ₉₂ U и т.д.

Когда длина волны нейтрона превышает межуатомные расстояния, т.е. при

$$E < 0,005 \text{ эВ}$$

проявляются *волновые свойства* таких *холодных* нейтронов

Для получения монохроматических нейтронов небольших энергий можно использовать их дифракцию на кристалле. Зависимость энергии нейтронов от угла их отражения от поверхности кристалла φ даётся формулой Брэгга-Вульфа

$$E = \frac{1}{2m} \left(\frac{nh}{2d \sin \varphi} \right)^2$$

где m – масса нейтрона, d – расстояние между соседними атомными плоскостями в кристалле, n – целое число (порядок спектра).

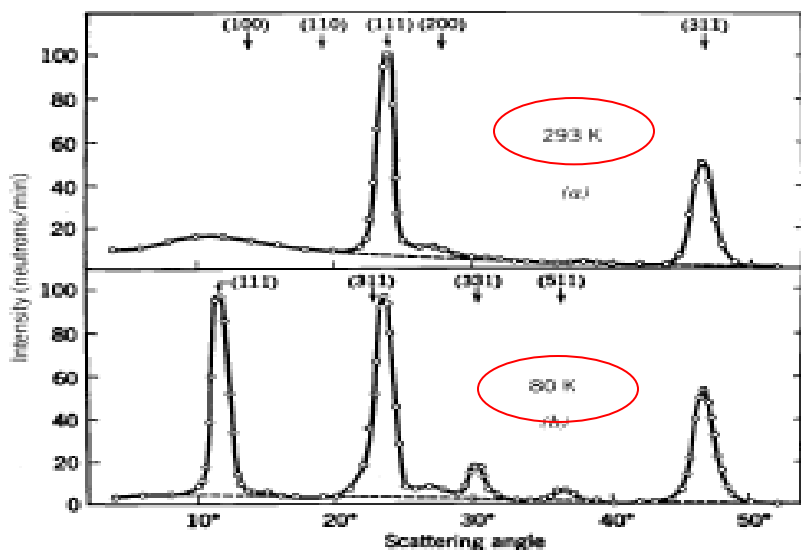


Figure 12.24 The neutron diffraction pattern of MnO (a) above and (b) below the antiferromagnetic transition temperature. Notice the factor of 2 difference in the location of the 111 peak. From C. G. Shull and J. S. Smart, *Phys. Rev.* 76, 1256 (1949).

Интерференция и дифракция нейтронов

Длина волны де Бройля частицы $\lambda = h/p$, где $h = 6.6 \cdot 10^{-34}$ Дж·сек.

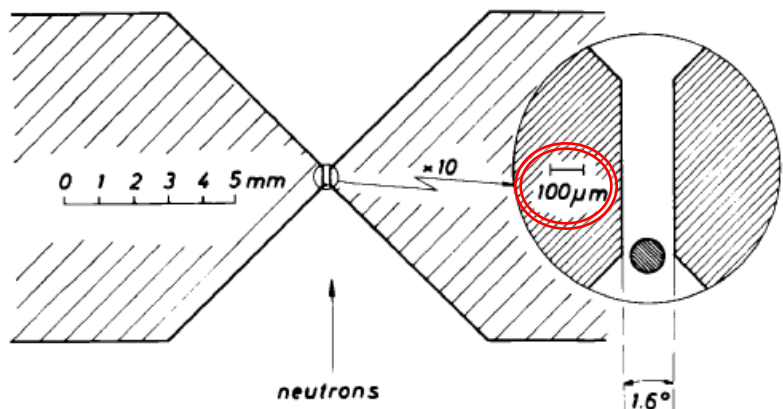
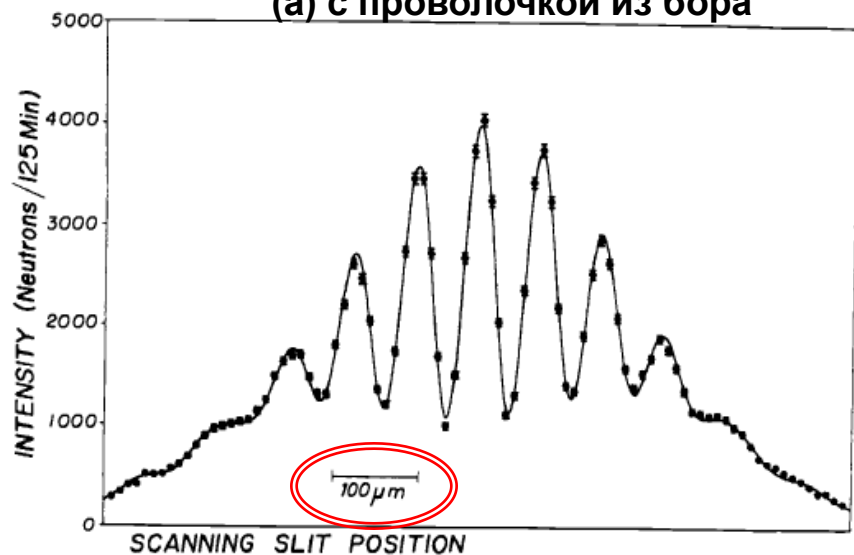


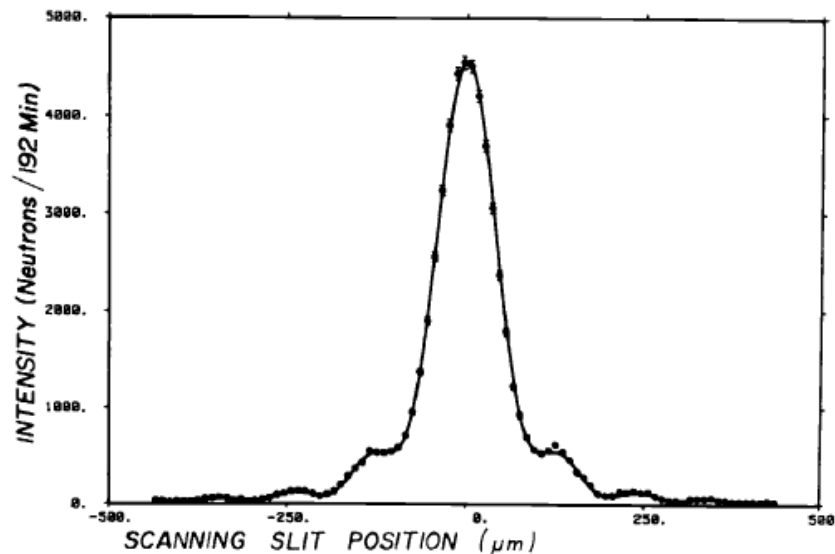
Figure 12.15 (Top) Double-slit apparatus for neutrons. A highly absorbing boron wire is mounted in the gap between two pieces of neutron-absorbing glass to form a double slit. (Middle) Double-slit interference pattern. The dots are the experimental points and the curve is calculated from the Schrödinger equation for a neutron wavelength of 1.845 nm . (Bottom) A single-slit interference pattern. All figures from A. Zeilinger, R. Gaehler, C. G. Shull, and W. Treimer, in *Neutron Scattering—1981*, edited by J. Faber (New York: American Institute of Physics, 1982), p. 93.

Интерференция на щели, когда длина волны сравнима с шириной щели:

(а) с проволочкой из бора



(б) без проволочки (только щель)



Ультра-холодные нейтроны (УХН)

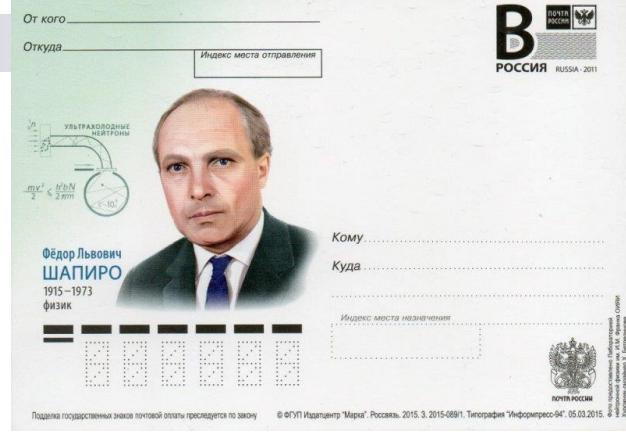
- очень медленные нейтроны со скоростями $\lesssim 5$ м/с,

или кинетической энергией $\mathcal{E} \leq 10^{-7}$ эВ

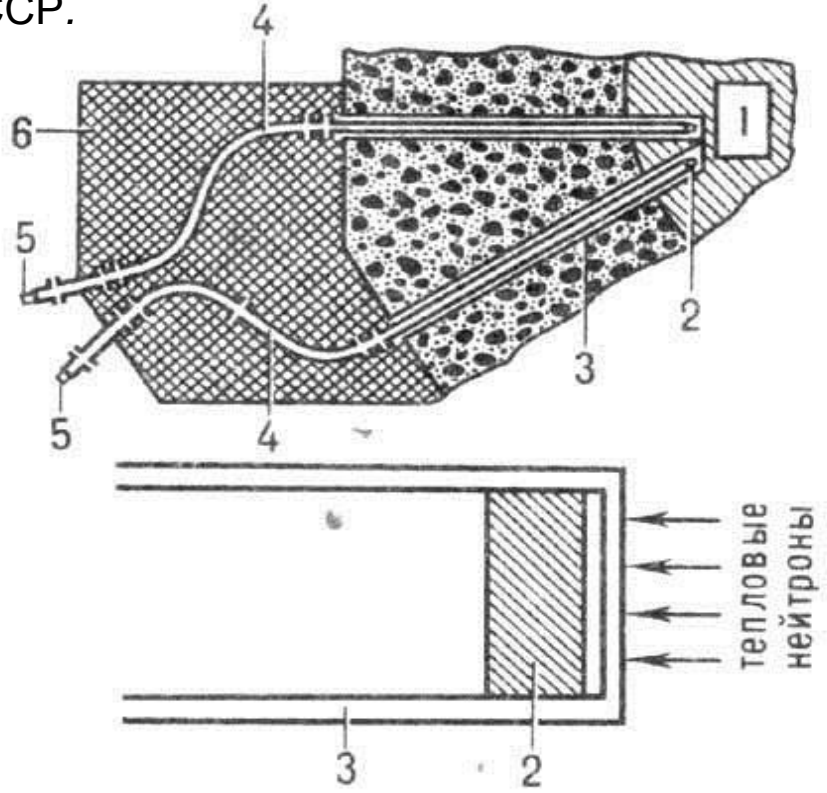
способны к *полному отражению* от поверхности материалов при любых углах падения. Полное отражение таких **УХН** от стенок сосуда позволяет хранить их в течение нескольких минут внутри замкнутых вакуумированных камер в виде своеобразного нейтронного газа.

Термин "УХ" объясняется тем, что примерно такой же энергией обладают молекулы газа при температуре среды $T \sim 10^{-3}$ К.

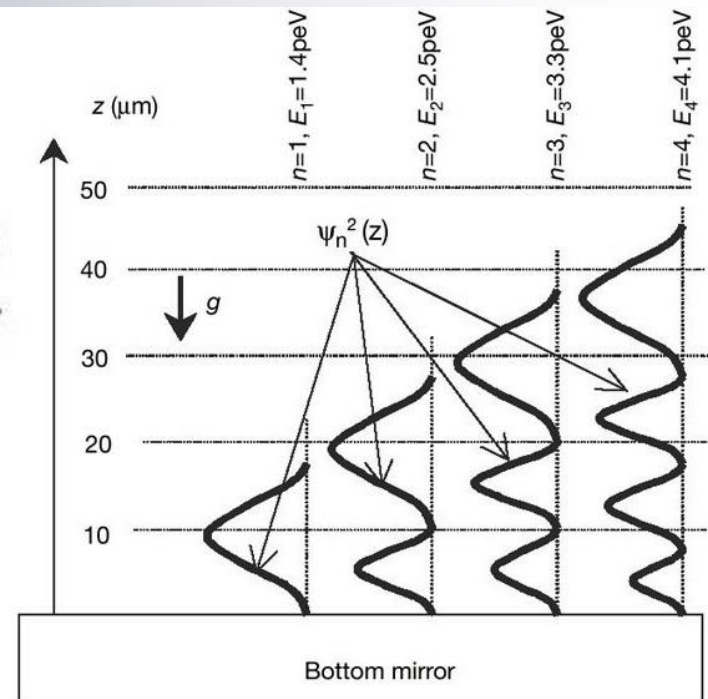
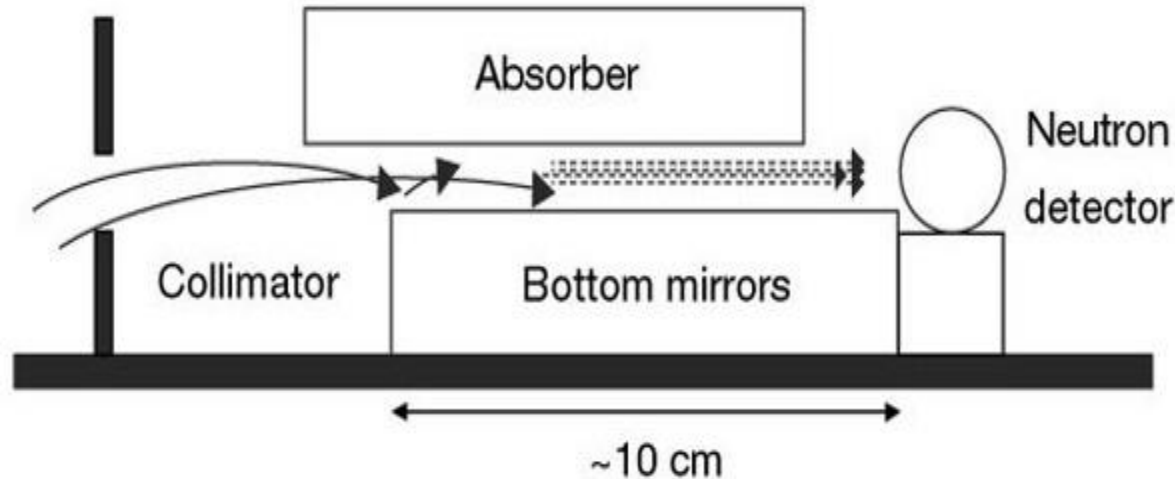
Время хранения УХН в замкнутых сосудах ограничено временем жизни свободного нейтрона до бета-распада (887 секунд), а также процессами *радиационного захвата* и неупругого рассеяния нейтронов при отражении от стенок сосуда. Практически в сосуде объёмом 50 л можно накопить 10^5 нейтронов и получить время хранения ~ 500 -800 с.



УХН чаще всего получают путём выделения медленной компоненты Максвелловского спектра тепловых нейтронов, выходящих из замедлителя ядерного реактора. Впервые **УХН** были выделены Ф. Л. Шапиро в 1968 году время-пролётным методом на импульсном реакторе в Ин-те химфизики АН СССР.



Установка для получения ультрахолодных нейтронов:
 1-активная зона реактора; 2-конвертор внутри нейтроновода 3;
 4 - изогнутые участки нейтроновода; 5 - детектор нейтронов; 6-защита.



Обнаружение **квантовых состояний** нейтронов в гравитационном поле

Поток ультрахолодных нейтронов, проходя через коллиматор (collimator), движется в строго горизонтальном направлении. Воздействие гравитации превращает горизонтальные траектории частиц в параболические (они показаны *сплошными линиями*). Благодаря узкому зазору между гладким зеркалом (bottom mirrors) и шершавым рассеивателем (absorber), движение нейтронов помимо классических траекторий приобретает и квантовую составляющую (*пунктирные траектории*). В зависимости от величины зазора, размер которого регулируется, распределение нейтронов по вертикали описывается функциями, графики которых показаны на рисунке справа. Детектор регистрирует это распределение..

4. Детекторы нейтронов

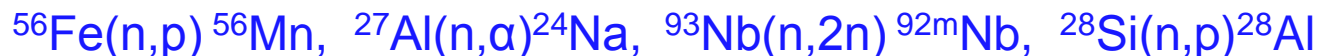
Поскольку нейтроны не производят ионизации, для регистрации нейтронов используются вторичные эффекты, связанные с ядерными реакциями типа



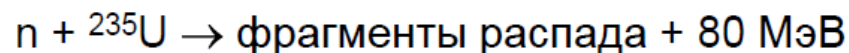
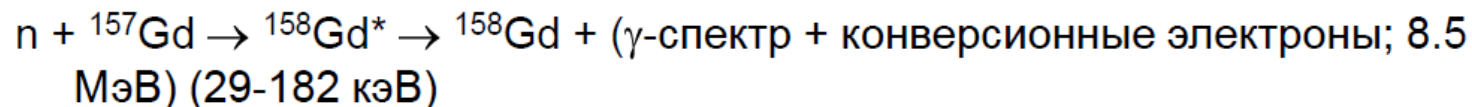
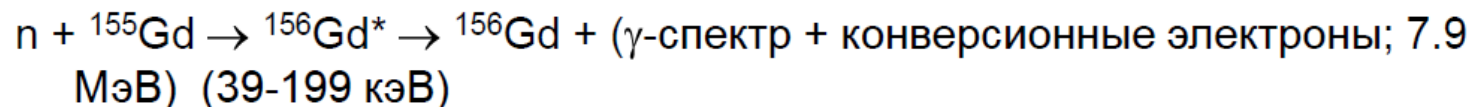
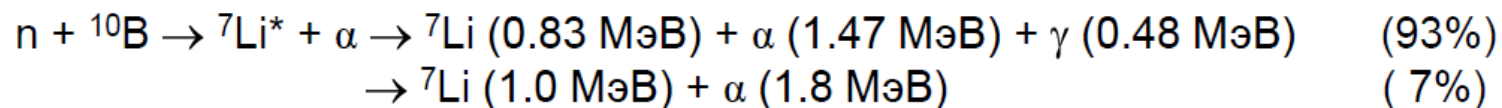
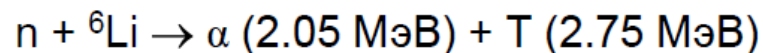
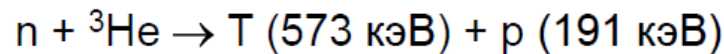
Например, используют реакцию $^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li}^* + \alpha$ в которой чаще всего образуется возбужденное ядро $^7\text{Li}^*$ с энергией возбуждения 0,48 МэВ

Условно детекторы нейтронов можно разделить на несколько групп:

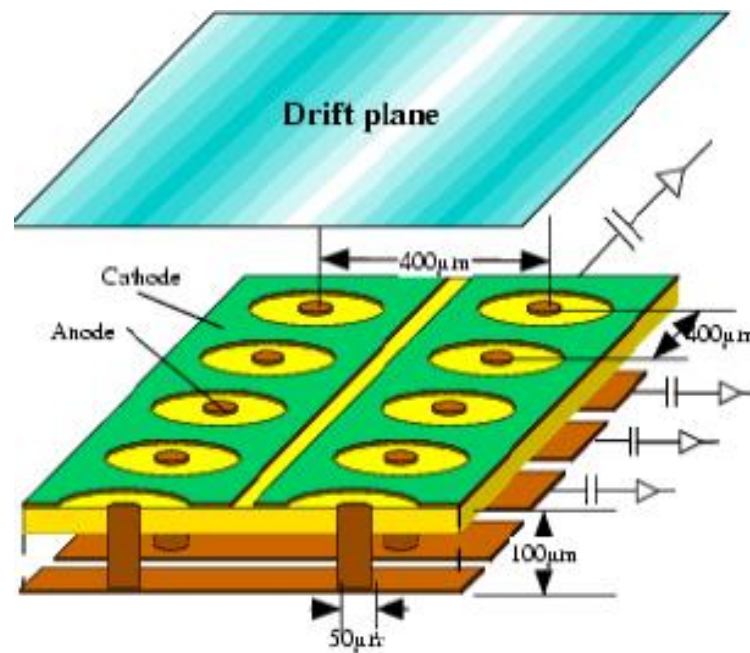
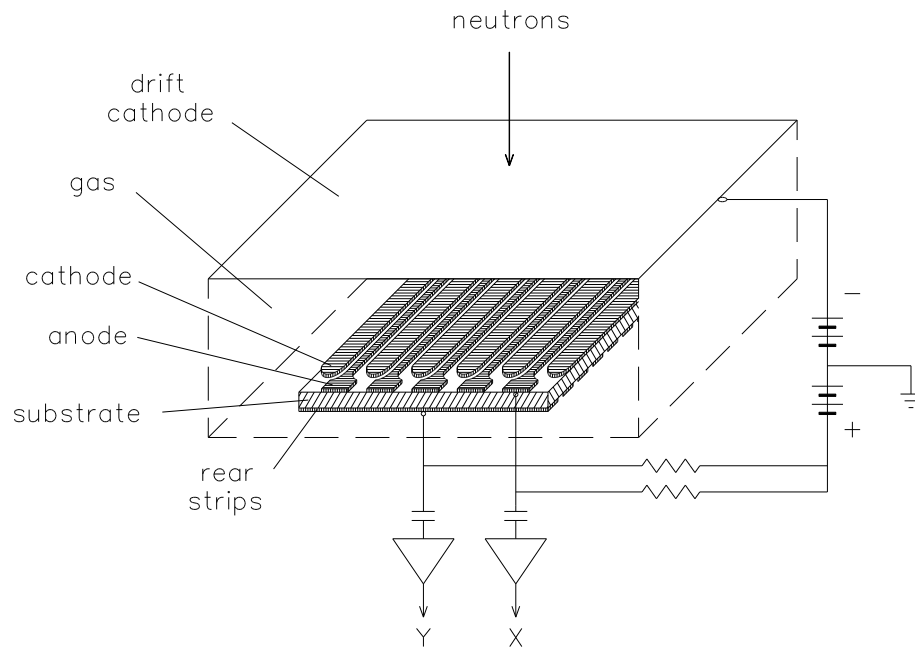
1. Газонаполненные детекторы ^3He , BF_3 enriched boron-10
2. Сцинтилляционные детекторы LiCaAlF_6
3. Полупроводниковые детекторы
4. Нейтронно-активационные детекторы



Изотоп	Агрегатное состояние	Сечение реакции, барн(1.8Å)	Длина своб. пробега λ	Продукты реакции и их энергии (кэВ)		Приблизительный пробег частиц
^3He	газ	5330	70 мм.атм.	p: 573	T:191	3.8 мм.атм. C_3H_8
^6Li	тв.	940	230 мкм	T: 2750	α : 2055	130 мкм
^{10}B	тв.	3840	20 мкм	α : 1472	^7Li : 830	3 мкм
$^{10}\text{BF}_3$	газ	3840	97 мм.атм.	α : 1472	^7Li : 830	4.2 мм.атм.
^{155}Gd	тв.	49000	6.7 мкм	Конв. электроны: 39-199		12 мкм
^{157}Gd	тв.	254000	1.3 мкм	Конв. электроны: 29-182		12 мкм

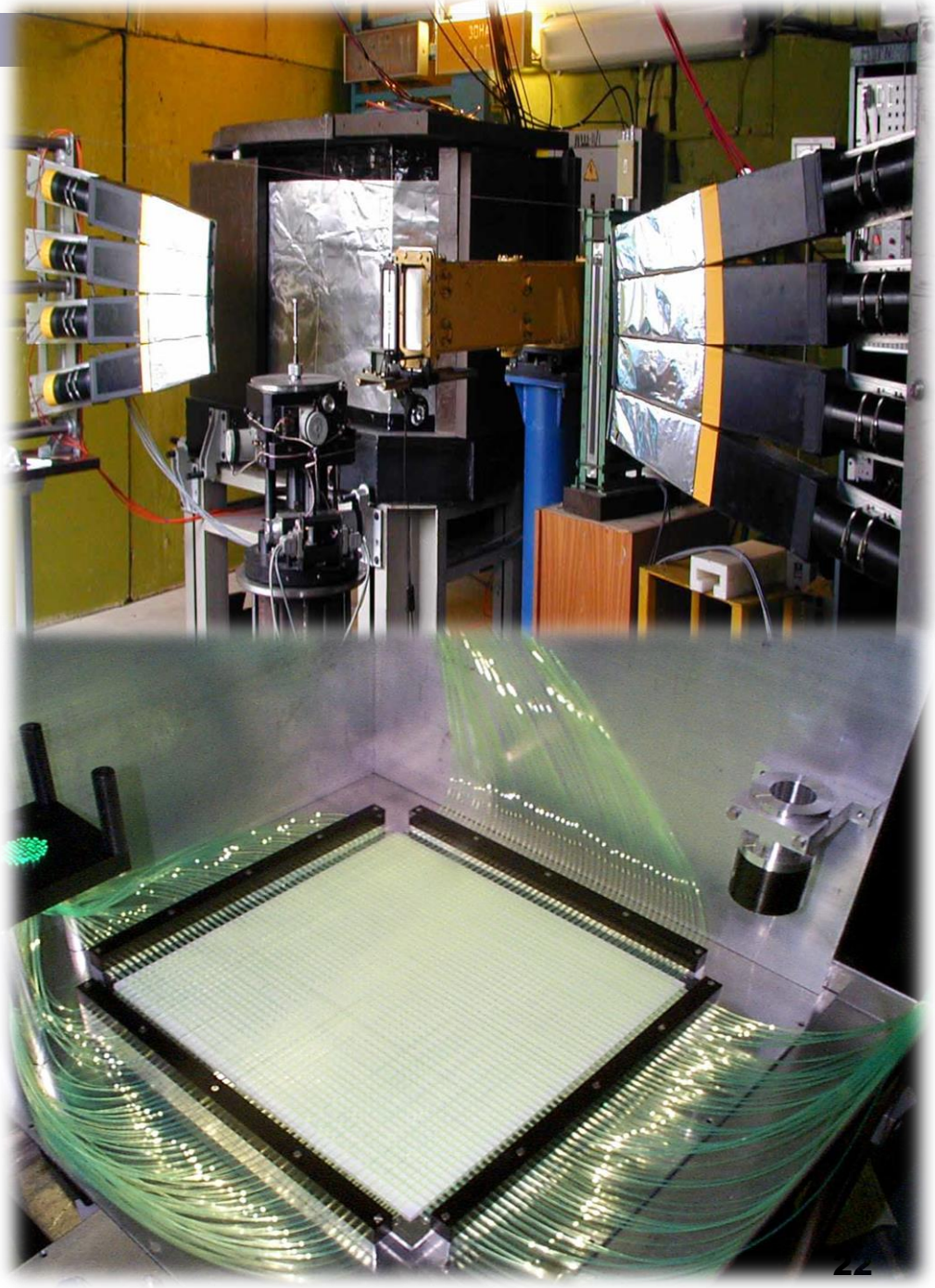
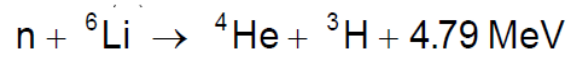
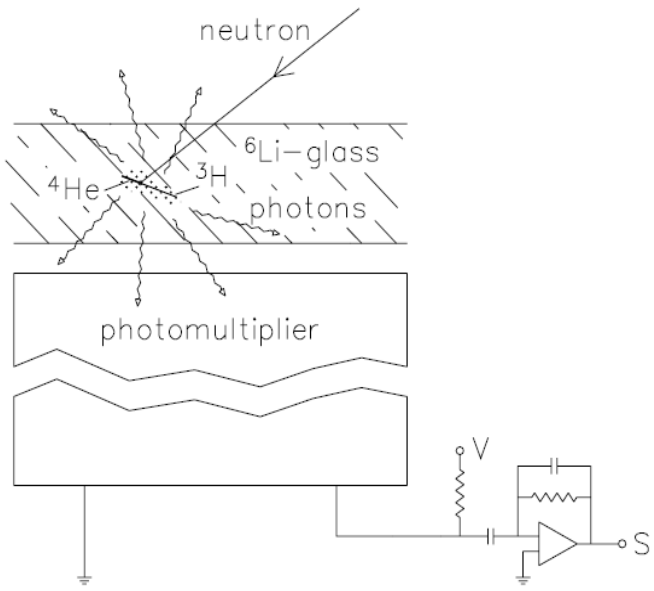


Газовые детекторы



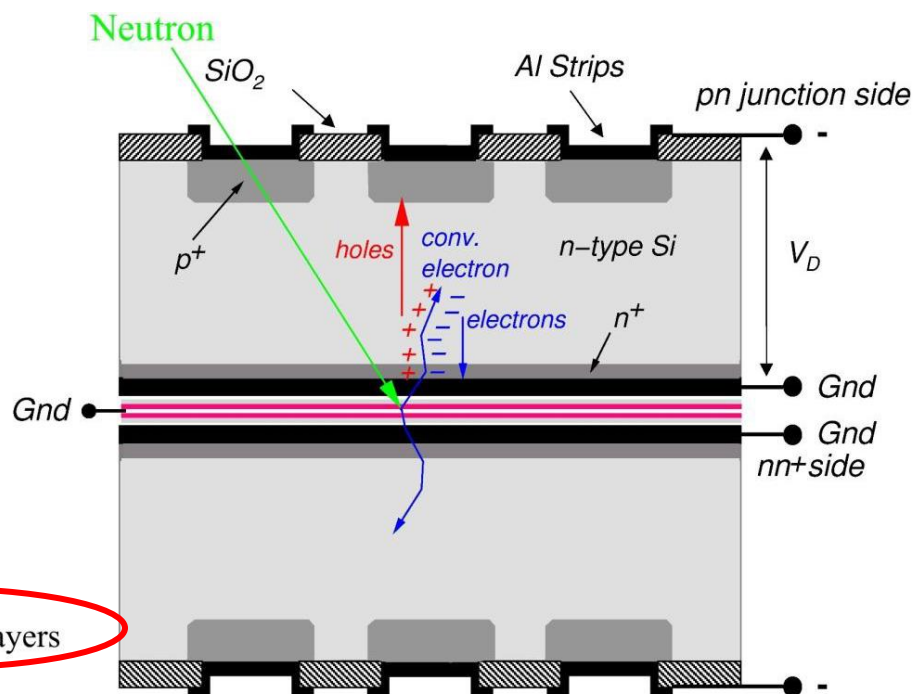
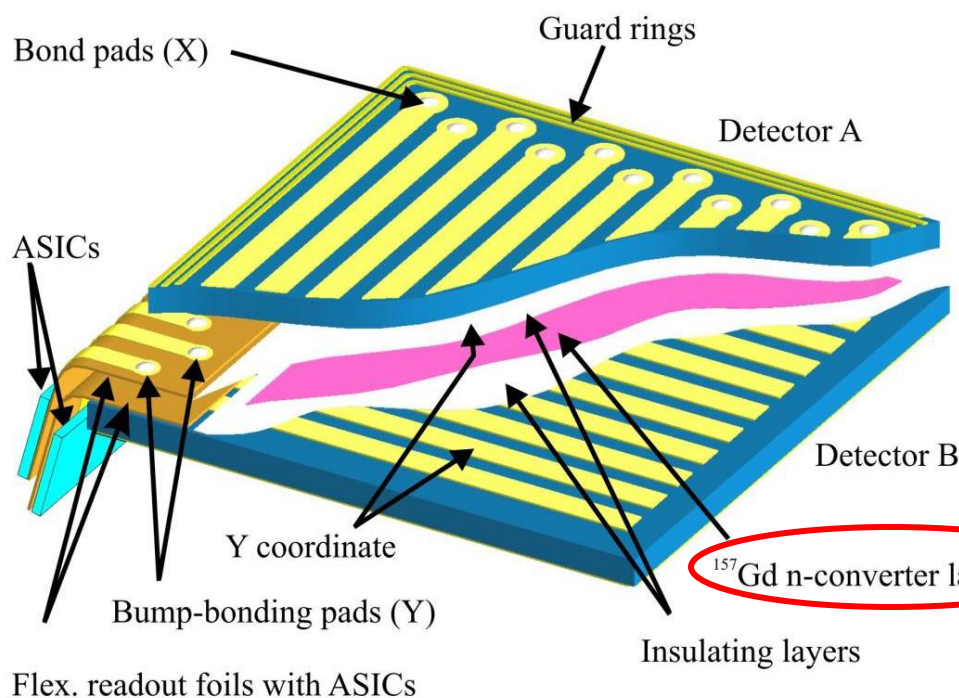
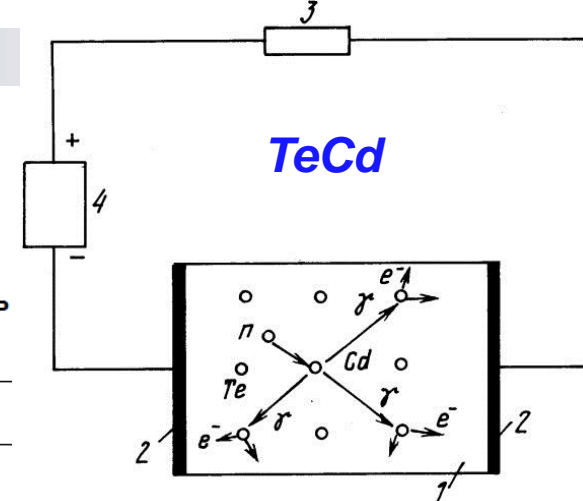
Микропиксельная камера

Сцинтилляционные детекторы



Полупроводниковые детекторы

Конвертор	Заряж. частица	Энергия	Пробег (R)	Длина своб пробега нейтрона (λ_n)	R/ λ_n	Оптим. толщина конвертора	Максимальная эффективность (1.8A)
${}^6\text{Li}$	T	2.7 МэВ	130мкм	230мкм	0.56	97мкм	10%
${}^{10}\text{B}$	α	1.47 МэВ	3мкм	20мкм	0.16	3.5мкм	4%
${}^{157}\text{Gd}$	e^-	< 0.182	12мкм	1.3мкм	9.15	3мкм	60%

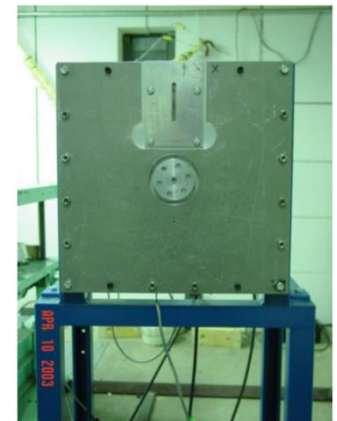
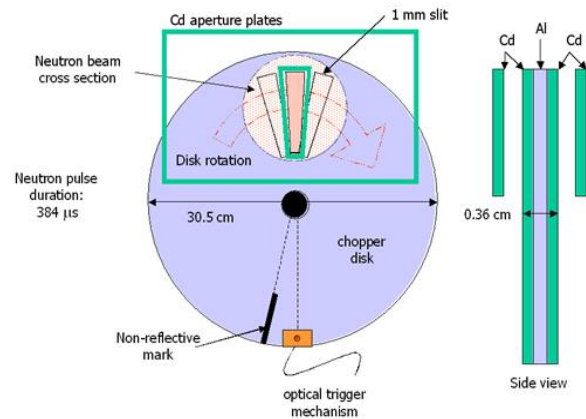
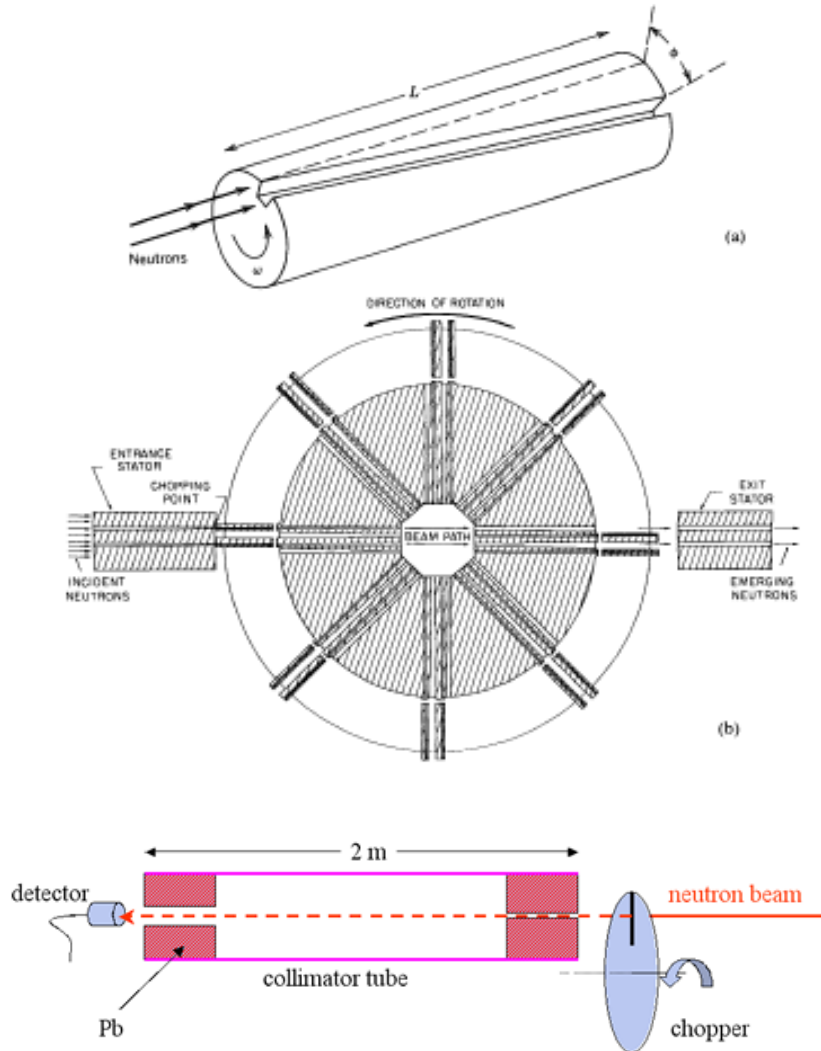


Gd/Si microstrip detector

5. Нейтронная спектроскопия

Механический монохроматор медленных нейтронов

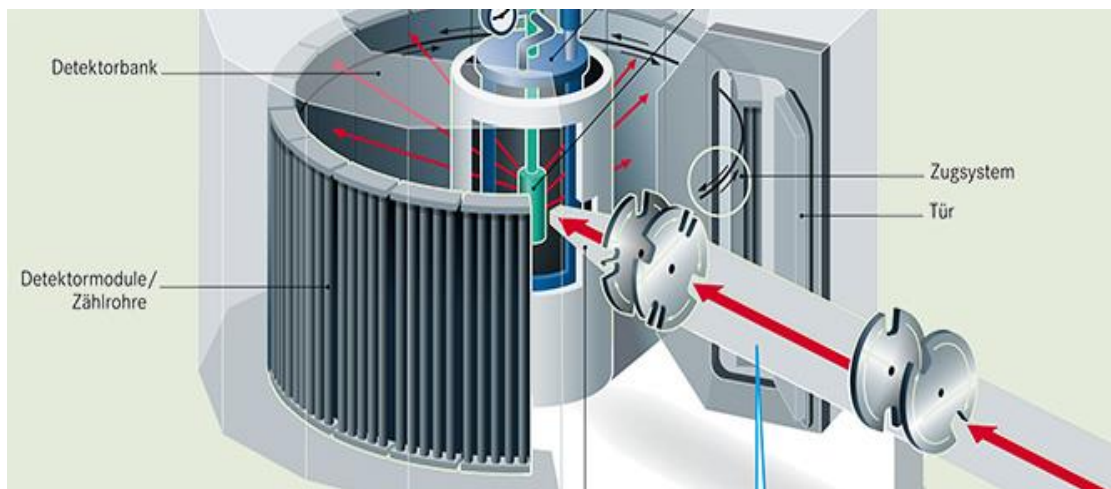
Механический прерыватель пучка нейтронов



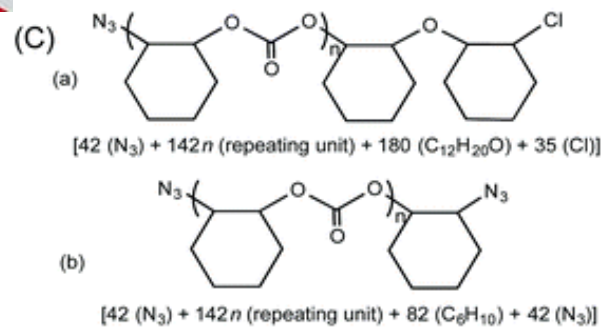
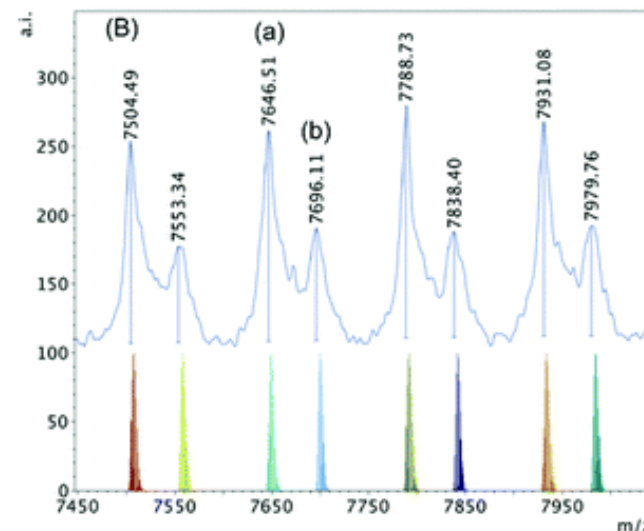
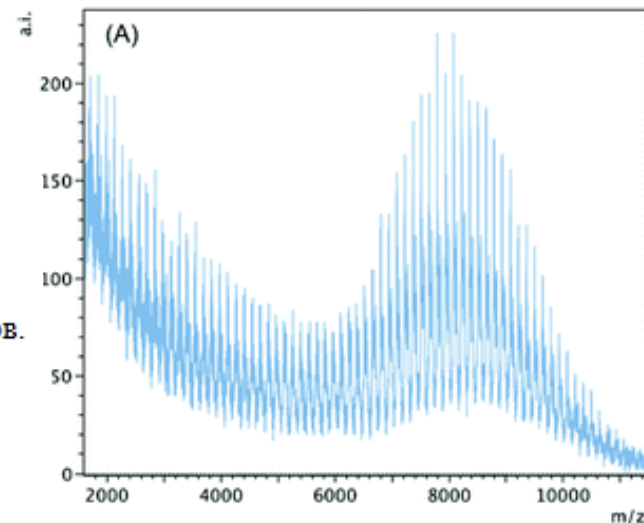
6. Применения нейтронов

В нейтронной физике главным образом используются нейтроны с энергиями от 10^{-7} эВ до 10^7 эВ. Соответственно длины волн (де Бройля), отвечающие таким нейтронам, изменяются в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-12} см. Этот диапазон длин волн отвечает размерам тех микрообъектов, которые можно изучать с помощью нейтронов. Таким образом, меняя энергию нейтронов от 10^7 эВ до 10^{-7} эВ, можно исследовать объекты размером от 10^{-12} см (атомные ядра) до 10^{-4} – 10^{-5} см (молекулы биополимеров, видимые в оптический микроскоп).

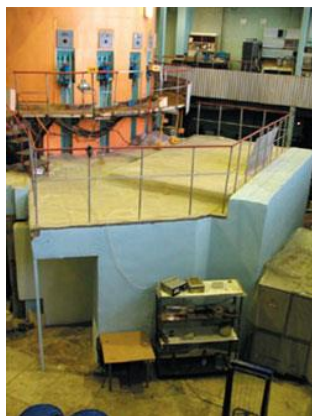
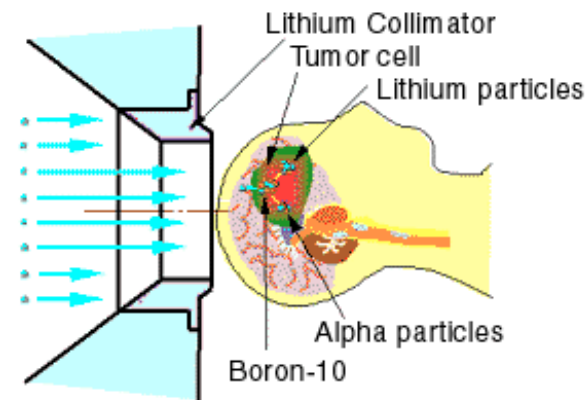
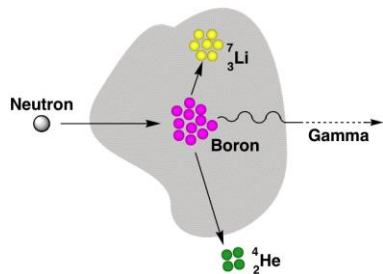
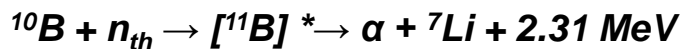
Исследование сложных молекул



Время-пролетный спектрометр NEAT-II



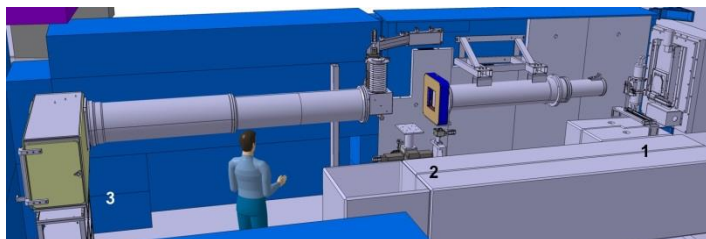
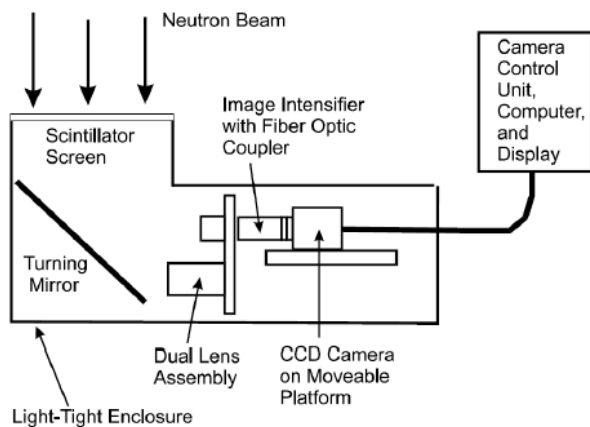
Нейтрон-захватная терапия



ИРТ МИФИ

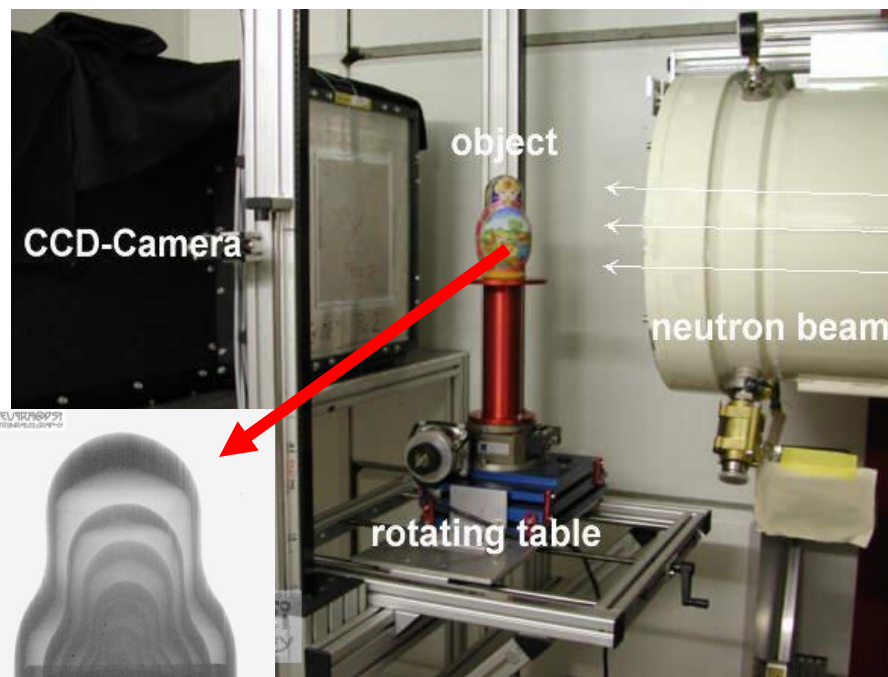


Нейтронная томография



Томограф NEUTRA (PSI)

- Размер образца 4x4 –30x30 см
- Динамический диапазон до 16 бит
- пиксель 0.02 –0.15 мм
- число пикселей 1024 до 2048 (X, Y)



<https://www.psi.ch/sinq/neutra/>

Вместо Заключения:

« Открытие нейтрона ... явилось, вероятно, одним из наиболее значительных научных событий нынешнего столетия. Оно стимулировало целый ряд новых поразительных открытий и явилось толчком для развития таких фундаментальных направлений науки, как физика атомного ядра и физика элементарных частиц »

*А.И.Франк
УФН 137(1982)5-37*

Источники информации

1. К.Н. Мухин. Экспериментальная ядерная физика. В 3-х тт. СПб.: Издательство «Лань», 2008. §§39-46
2. K.S. Krane. Introductory Nuclear Physics. John Wiley & Sons, 1988. §§12.1-12.12;
<http://faculty.kfupm.edu.sa/PHYS/aanaqvi/Introductory-Nuclear-Physics-new-Krane.pdf>