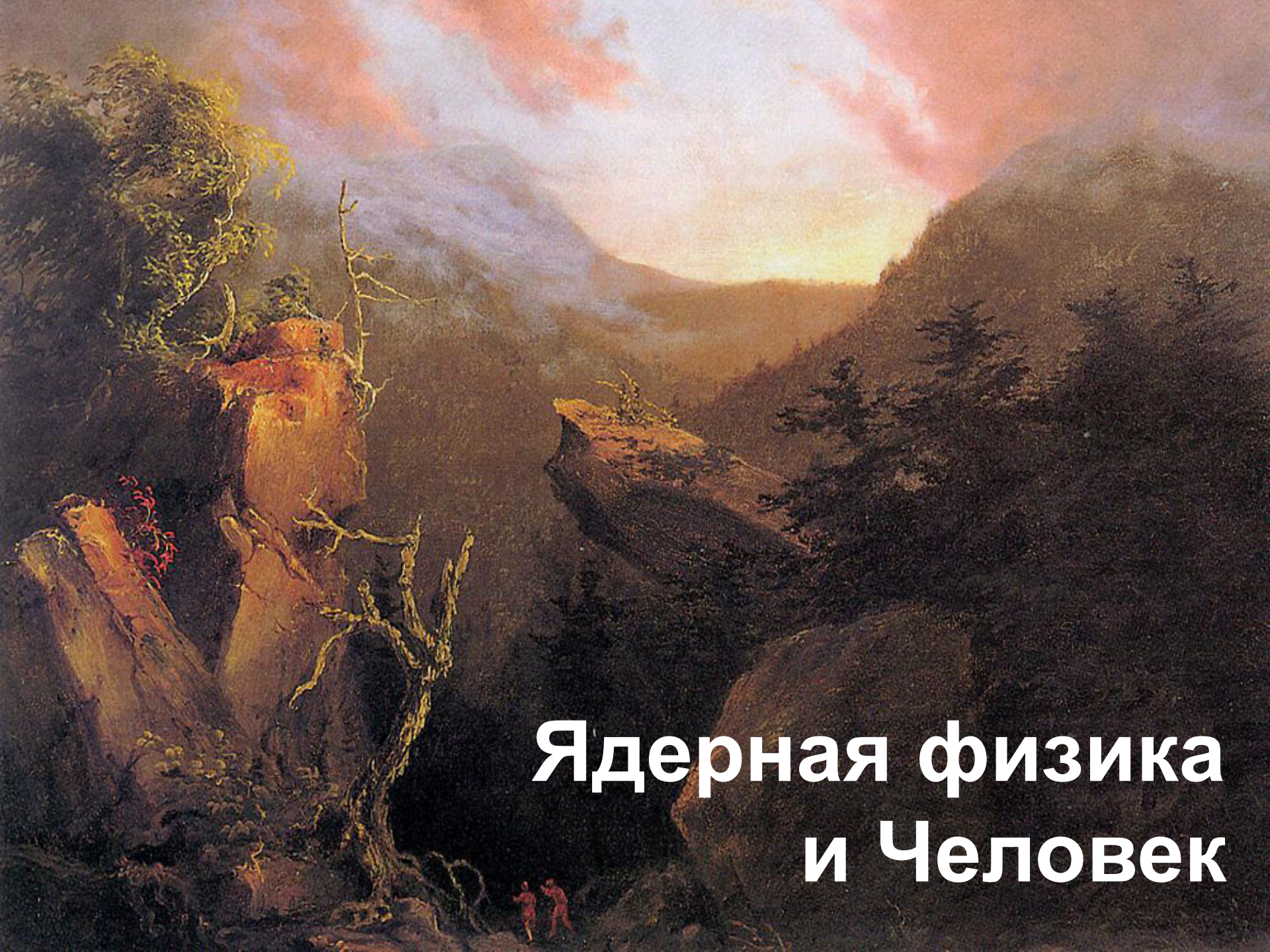
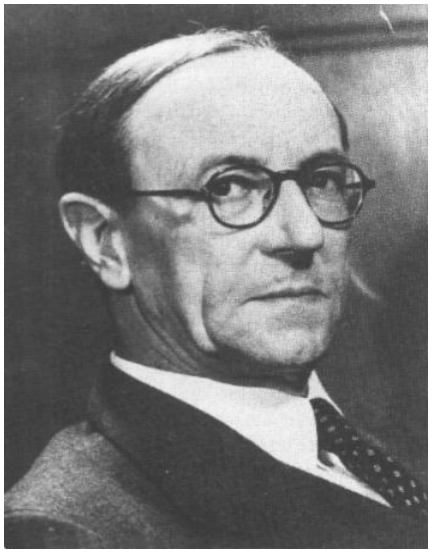


Ядерная физика и Человек

Нейтронная физика



1932 Открытие нейтрона

$$\alpha + {}^{9}_{4}Be \rightarrow n + {}^{12}_{6}C$$

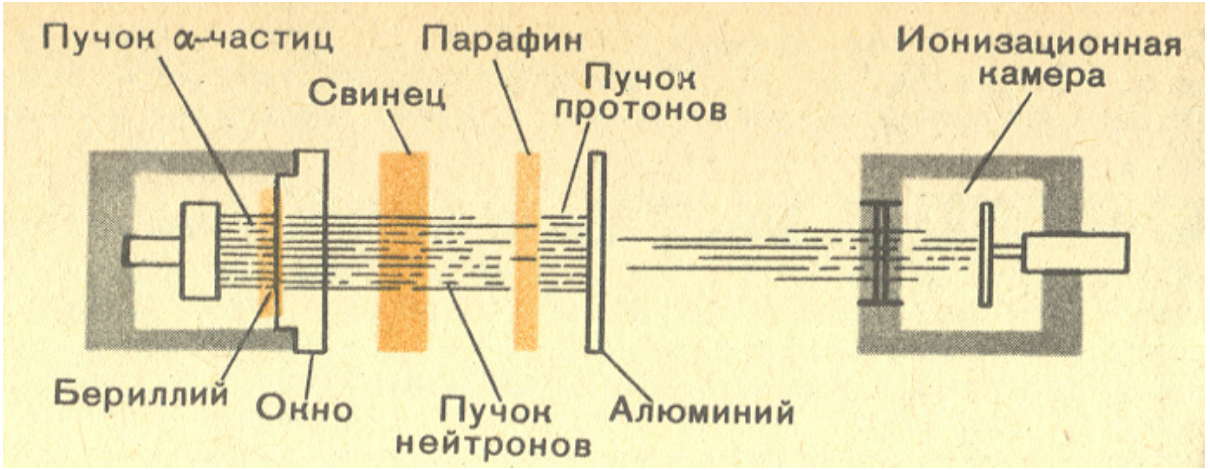
James Chadwick

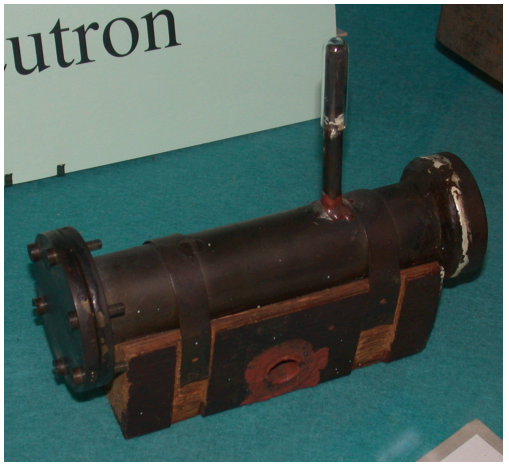
(1891-1974)

Possible Existence of a Neutron

It has been shown by Bothe and others that beryllium when bombarded by α-particles of polonium emits a radiation of great penetrating power, which has an absorption coefficient in lead of about 0·3 (cm.)$^{-1}$. Recently Mme. Curie-Joliot and M. Joliot found, when measuring the ionisation produced by this beryllium radiation in a vessel with a thin window, that the ionisation increased when matter containing hydrogen was placed in front of the window. The

Ref.: J. Chadwick, Nature 132 (1932) 3252





Нобелевская премия по физике

1935 г. – Дж.Чедвик За открытие нейтрона

Нейтроны в науке...

- «Лаборатория» для фундаментальных исследований

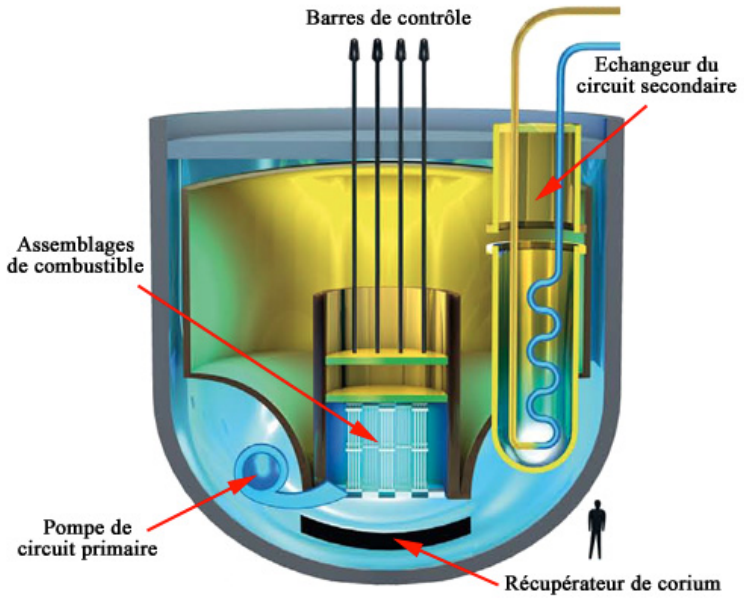
	Протон p	Нейтрон n
Спин J^P	$1/2^+$	$1/2^+$
Изоспин I	1/2	1/2
Масса (а.е.м.)	1.00727646688 ± 0.00000000009 u	1.0086649159 ± 0.0000000005 u
Масса (МэВ/c^2)	938.272081 ± 0.000006	939.565413 ± 0.000006
Среднее время жизни τ	> 10^{33} лет	**880.2 ± 1.0 с**
Магнитный момент μ	2.792847351± 0. 000000009 μ_N	−1.9130427 ± 0.0000005 μ_N
Электрический дипольный момент d	< 0.54 × 10^{-23} e см	< 0.30 × 10^{-25} e см
Среднеквадратичный зарядовый радиус $\langle r^2 \rangle$	0.7071 ± 0.0004 фм^2	−0.1161 ± 0.0022 фм^2
Магнитный радиус $\sqrt{\langle r^2_M \rangle}$	0.78 ± 0.04 фм	0.864± 0.009 фм
Заряд q	> 10^{33} лет	(−0.2 ± 0.8) × 10^{-21} e

Нейтроны в науке...

- Идеальный зонд для исследования материи:
  - Отсутствие электрического заряда
    (глубокое проникновение в вещество);
  - сильное взаимодействие
    (детектирование изотопов);
  - наличие магнитного момента
    (изучение магнитных структур);
  - нейтроны низких энергий
    (изучение кристаллических структур)

Нейтроны … в технологиях

- ВАЖНО: Атомная энергетика
  - **Реакции деления**



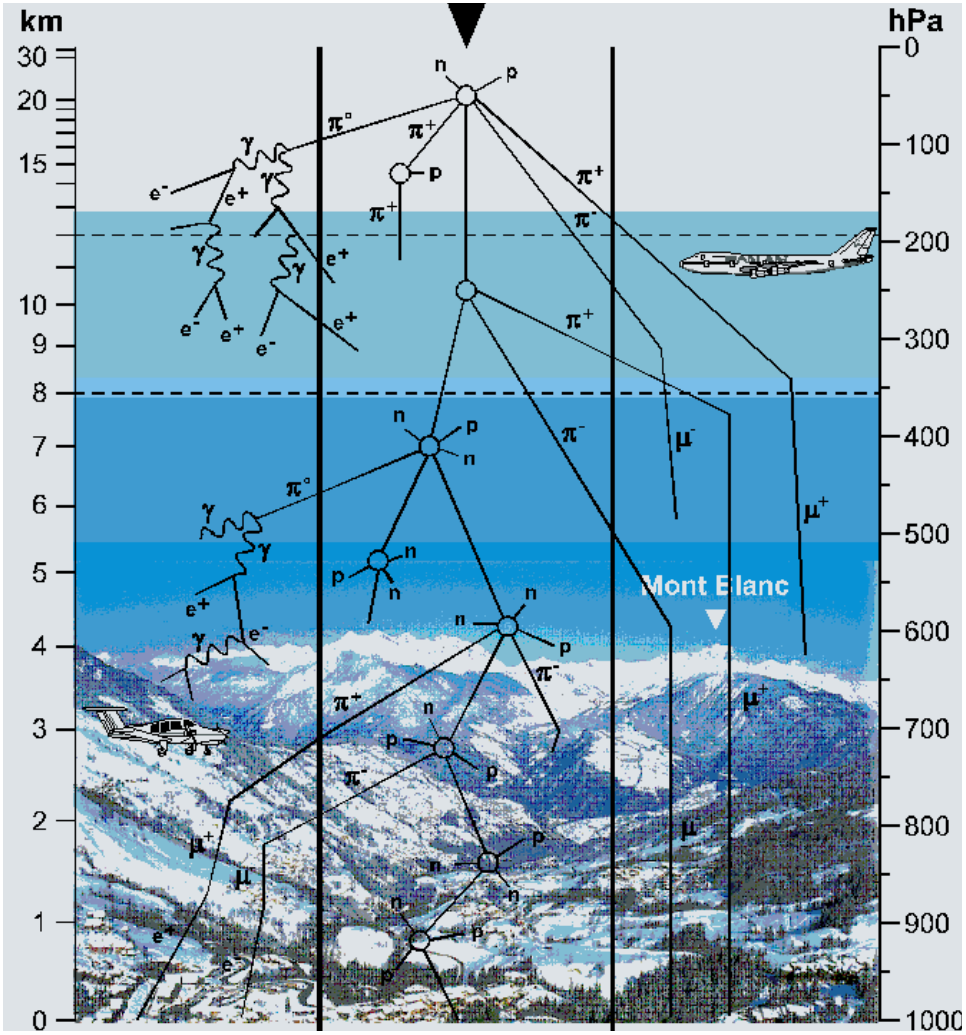
- **Недостатки**:
  - нестабильность свободного нейтрона

    $\tau \approx 880$ с

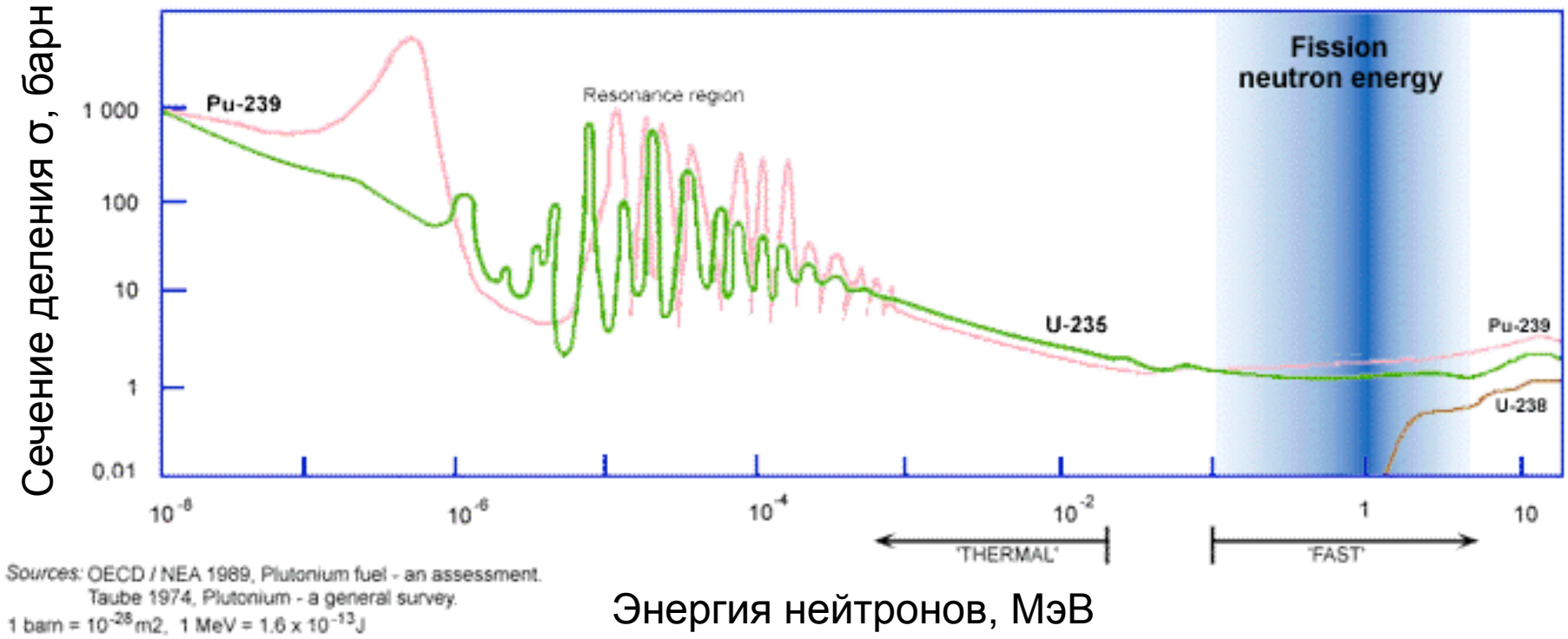
  - интенсивные источники нейтронов - сложные и дорогие технические устройства

… в космических исследованиях

- Космические нейтроны:
  - Продукты галактического излучения;
  - Солнечные нейтроны
- Мониторы нейтронов:
  - Процессы на Солнце
- Защита полетов:
  d*Hn /d*t* ≈ 1 - 4 μЗв/ч на высоте 12 км**



Классификация нейтронов



Холодные: большое сечение захвата σ ~ 1/*v,* выраженные волновые свойства

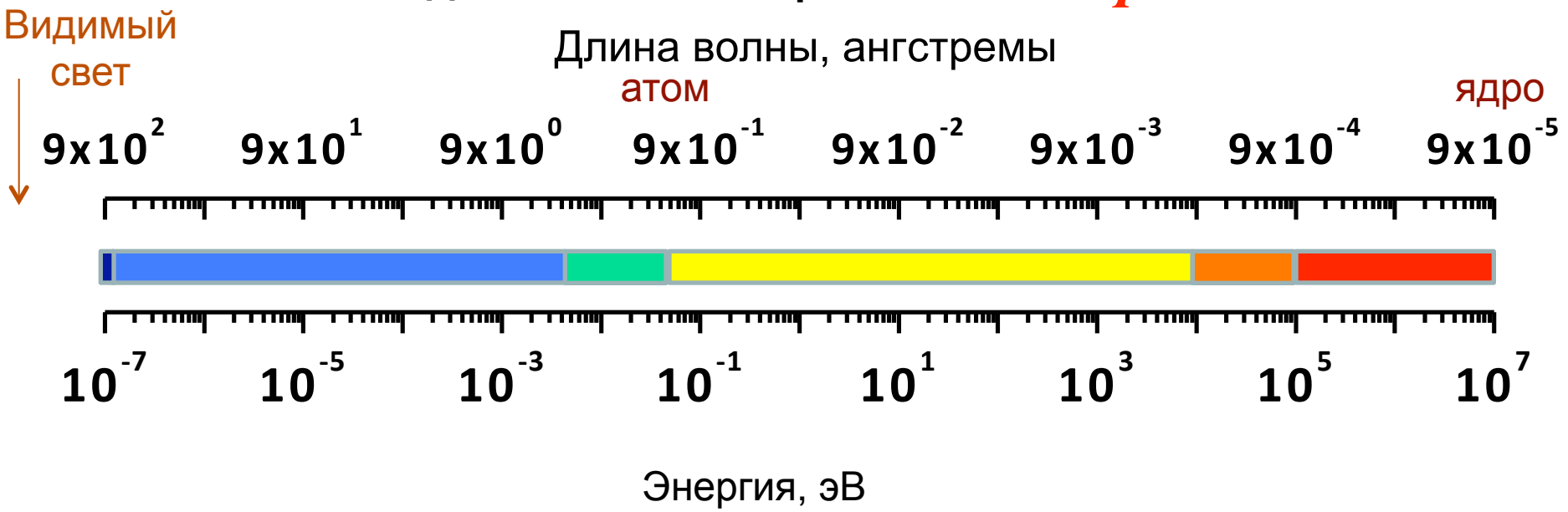
Тепловые: E =kT = 0,025 эВ (T = 300K)

Резонансные: 0.5 эВ < E < 1 кэВ

Быстрые: 100 кэВ < E < 14 МэВ

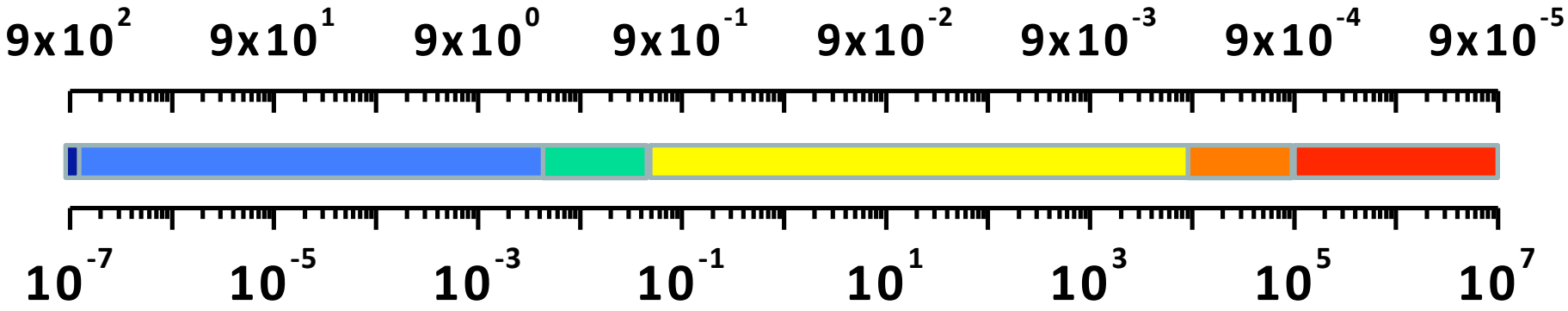
Классификация нейтронов

Длина волны де Бройля: $\lambda = h / p$



Энергия, эВ

< $3 \cdot 10^{-7}$ эВ	Ультрахолодные	Медленные нейтроны
< 0,025 эВ	Холодные	
< 0,5 эВ	Тепловые	
< 1 кэВ	Резонансные	
< 100 кэВ	Промежуточные	
	Быстрые	



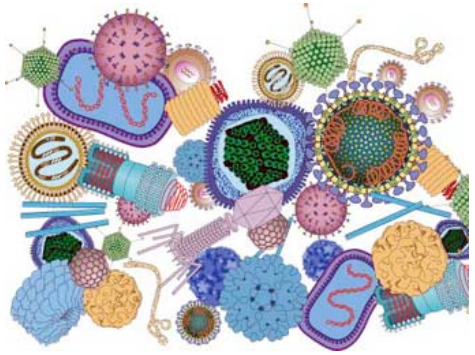
Исследования конденсированного состояния вещества (нейтронография).	Медленные и тепловые нейтроны
Исследования ядерной структуры	Быстрые и резонансные нейтроны
Исследование фундаментальных симметрий взаимодействий	Медленные и тепловые нейтроны
Нейтронный каротаж и поиск воды	Быстрые, резонансные и тепловые
Углеродный метод определения времени	Тепловые нейтроны
Медицина (выжигание раковых опухолей)	Медленные нейтроны
Активационный анализ изотопов	Тепловые нейтроны
Ядерная энергетика	Широкий спектр

Ультрахолодные нейтроны (УХН)

V ~ 5 м/с 20 км/ч

Можно попытаться обогнать их на велосипеде

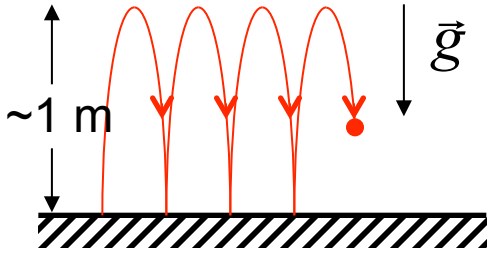
λ ~ 500 Å 50 нм



Типичный размер вирусов

E ~ 10^{-7} eV

T ~ 10^{-3} K



1 см ~1.02 нэВ

В ловушке УХН ведут себя как холодный идеальный газ.
Число упругих отражений достигает 10^5.

УХН могут быть локализованы в ограниченном пространстве, где могут храниться продолжительное время.

История вопроса

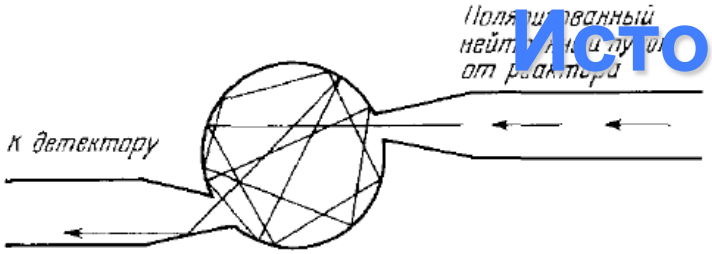
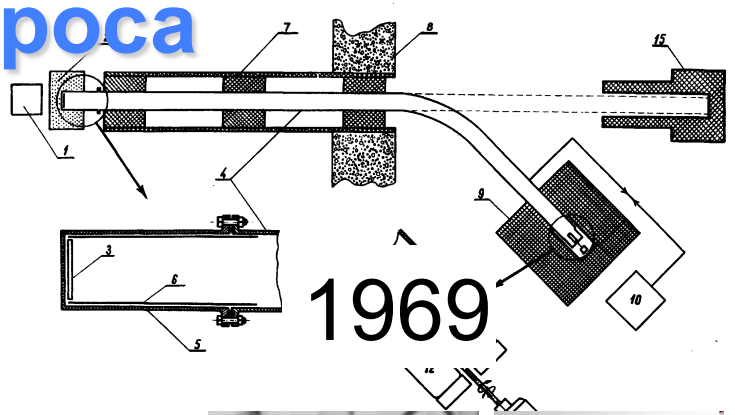


Рис. 7.

1959



1968

1969

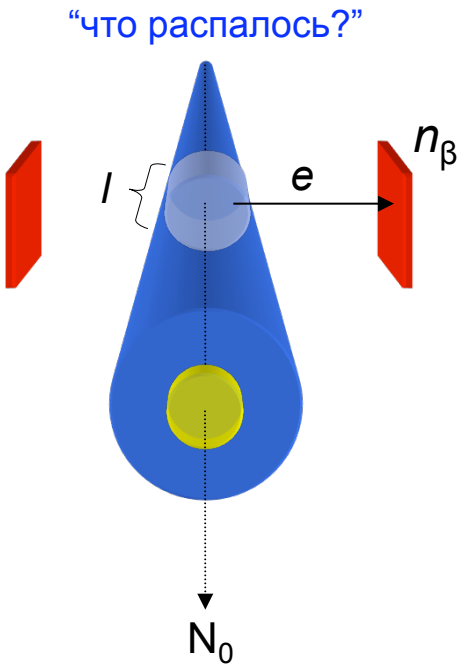
Я.Б. Зельдович,
«Хранение холодных нейтронов»,
ЖЭТФ, т. 9, стр. 1389, 1959

Ф.Л. Шапиро,
«Электрические дипольные моменты элементарных частиц»,
УФН, т. 95, 1968

В.И. Лущиков, Ю.Н. Покотиловский, А.В. Стрелков, Ф.Л. Шапиро,
«Наблюдение ультрахолодных нейтронов»,
Письма в ЖЭТФ, т. 9, с. 23, 1969

УХН. Время жизни нейтрона

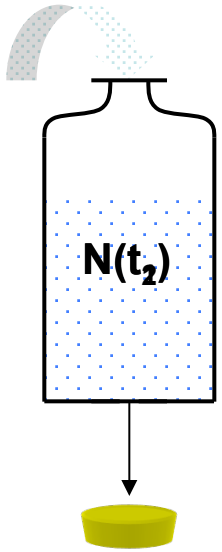
Эксперимент на пучке холодных нейтронов



$$n_\beta = \frac{dN}{dt} = -\frac{N_0}{\tau_n} e^{-\frac{l}{v \cdot \tau_n}}$$

Необходимо **абсолютное измерение двух величин** – числа распадов и количества нейтронов в пучке

Эксперимент с хранением ультрахолодных нейтронов



“что осталось?”

$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \frac{N(t_1)}{N(t_2)}$$

$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{\tau_\beta} + \frac{1}{\tau_{wall}} + \frac{1}{\tau_{leak}} + \frac{1}{\tau_{vacuum}} + \ldots$$

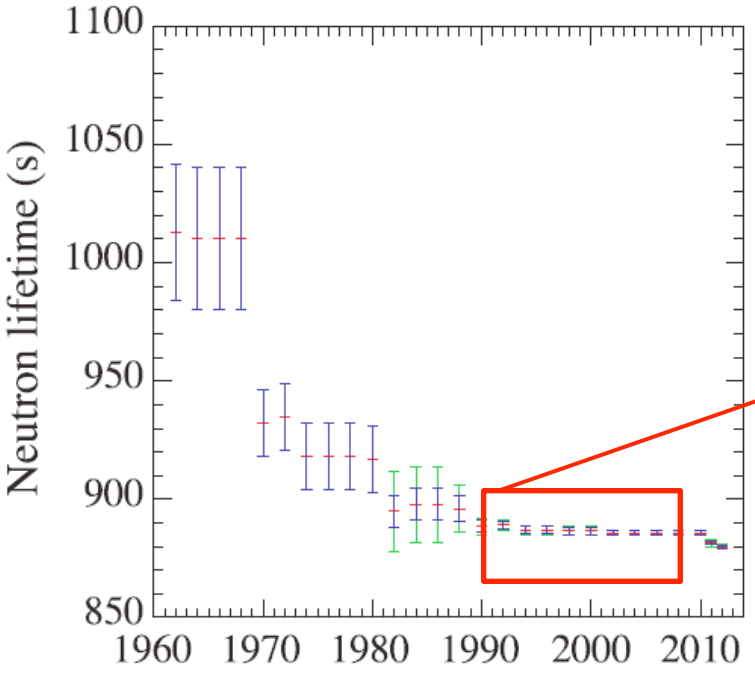
→ 0 (experiment)

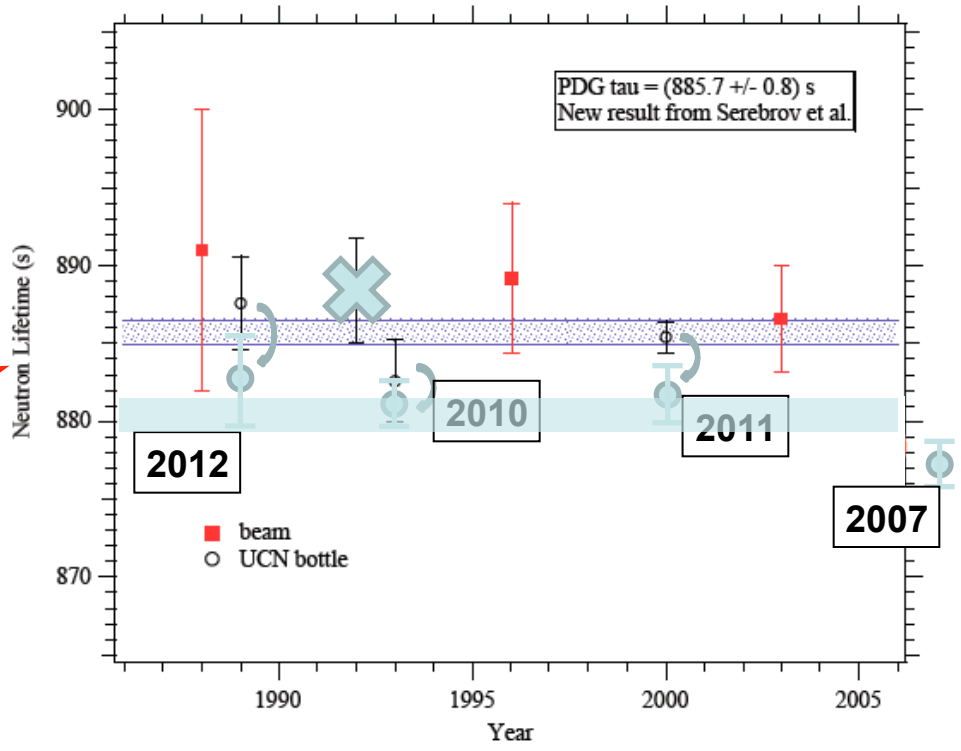
$$\frac{1}{\tau_{wall}} = \mu \cdot v_{eff}$$ → 0 (extrapolation)

$$\rightarrow \quad \frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{\tau_\beta}$$

Необходимо относительное измерение числа оставшихся в ловушке нейтронов

Время жизни нейтрона

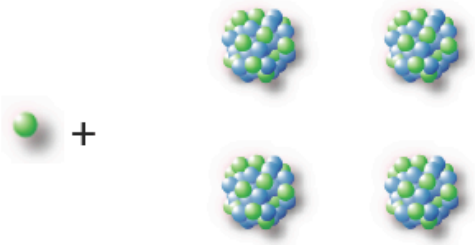




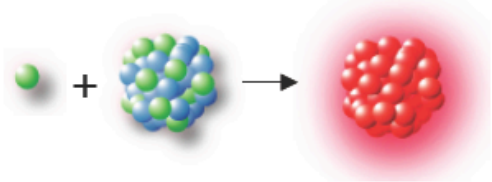
2017
PDG τ_n = (880.2+/-1.0) c

Реакции под действием нейтронов

Рассеяние в конденсированных средах



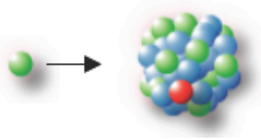
Реакции с образованием составного ядра



$\tau \sim 10^{-16}$

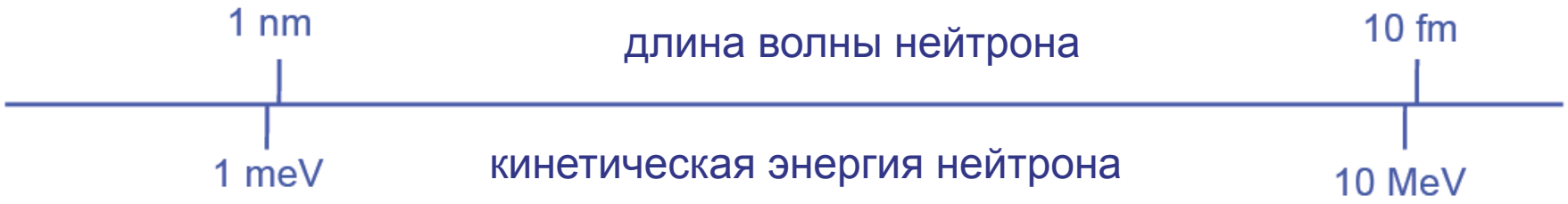
$E_n < 10$ MeV

Прямые ядерные реакции



$\tau \sim 10^{-22}$

$E_n > 10$ MeV



Нейтронные волны в среде

Нейтрон проявляет волновые свойства, если его дебройлевская длина волны соразмерна или превышает межатомные расстояния

$$\lambda \geq 10^{-8} \text{ см}$$

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{4\pi^2\hbar^2}{2m\lambda^2} = 0{,}08 \text{ эВ}$$

холодные нейтроны

$\lambda = 10^{-8}$ см

$$E_\gamma = cp_\gamma = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} = 12{,}5 \text{ кэВ}$$

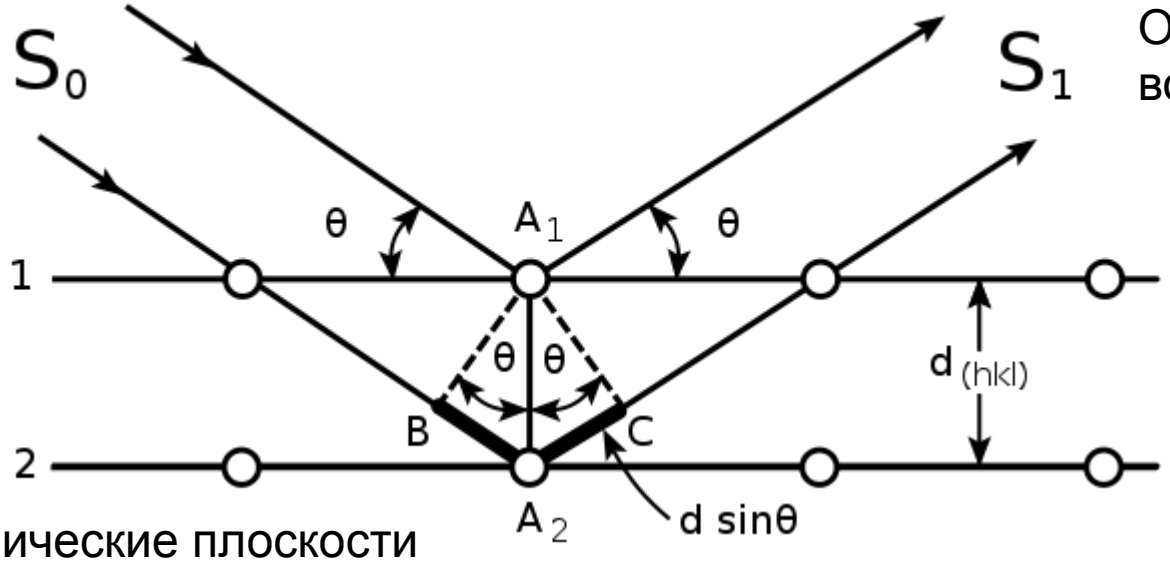
рентгеновское излучение

Нейтронная оптика

Дифракционное рассеяние

Условие Брэгга-Вульфа

Падающая волна



Отраженная волна

Кристаллические плоскости

$$2d\sin\theta = m\lambda$$

θ – угол скольжения
m – порядок отражения

Условие не выполняется при $\lambda > 2d$ (соответствует энергии брэгговского скачка)

Нейтронная оптика

Отличия от рентгеновского излучения

Нейтроны	Рентген
Рассеяние на ядрах	Рассеяние на электронах
Сечения одного порядка	Сечения пропорциональны Z
Изотропное рассеяние	Рассеяние «вперед»
Большая проникающая способность	
Магнитный момент	
Диффузный фон	
Сложность получения пучков	

Диффузный фон

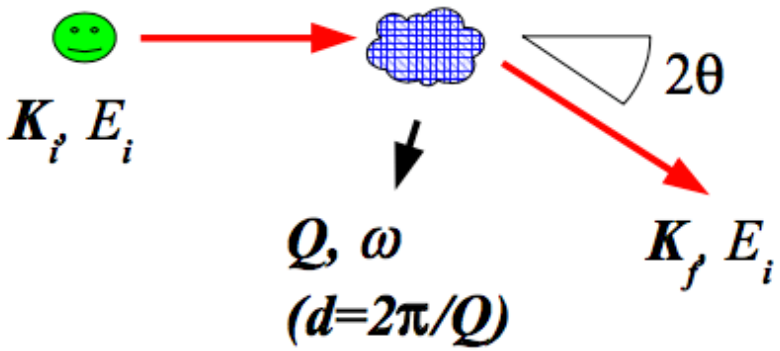
1. Зависимость рассеяния от взаимной ориентации спина нейтрона и спина ядра
2. Различие рассеяния для разных изотопов одного элемента

Нейтронная оптика

Правила отбора

$$\mathbf{K}_f = \mathbf{K}_i + \mathbf{Q}$$

$$E_f = E_i + \omega$$



Условие Брэгга (дифракция на структуре с межатомными расстояниями ***d*****)**

$$\lambda = \frac{2\pi}{K_i} = 2d\sin\theta$$

Сечение рассеяния (интенсивность на единицу телесного угла и энергии, динамика**)**

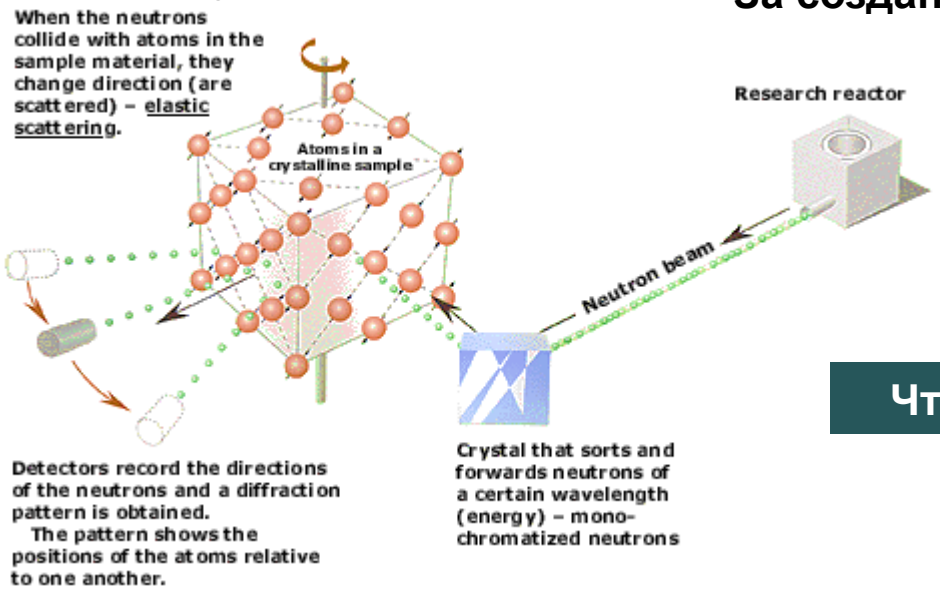
$$\frac{d^2\sigma}{d\Omega dE_f} = a^2\left(\frac{E_f}{E_i}\right)^{1/2} S(Q,\omega)$$

Динамический структурный фактор *S(Q, ω)* несет информацию о материале (положение атомов – молекул, их движение, формирование доменов и тд)

Нобелевская премия по физике 1994

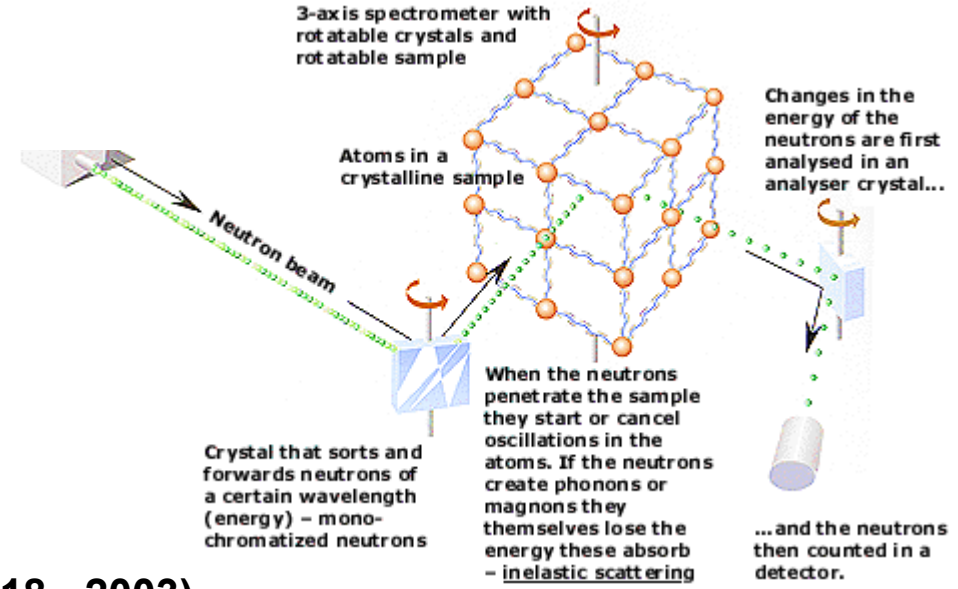
Где атомы находятся?

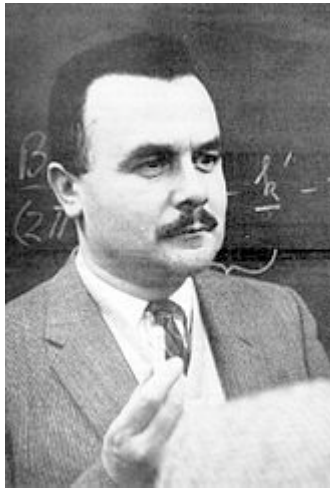
Упругое рассеяние



Клиффорд Шалл (1915 - 2001)
За создание метода нейтронной дифракции

Что атомы делают?





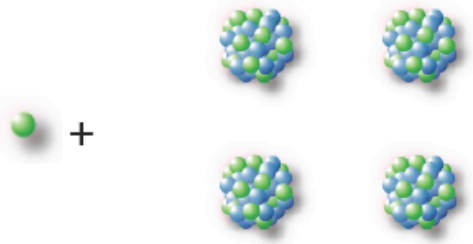
Бертрам Брокхауз (1918 - 2003)
За создание нейтронной спектроскопии

Неупругое рассеяние

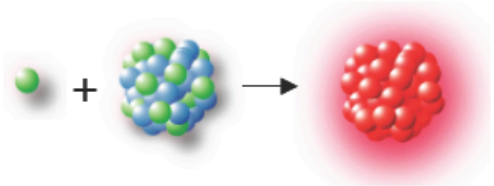
Nobel Media AB 2016

Реакции под действием нейтронов

Рассеяние в конденсированных средах



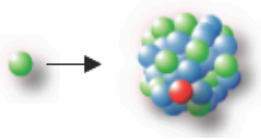
Реакции с образованием составного ядра



$\tau \sim 10^{-16}$

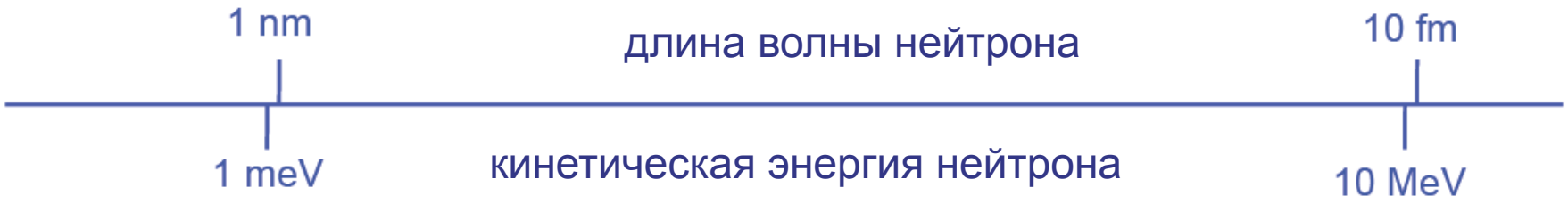
$E_n < 10$ MeV

Прямые ядерные реакции



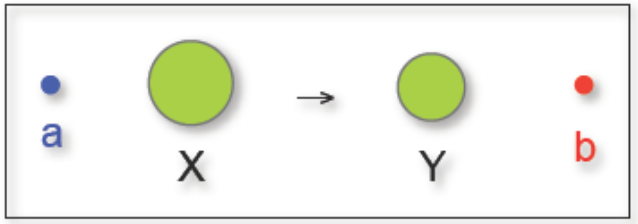
$\tau \sim 10^{-22}$

$E_n > 10$ MeV



Реакции под действием нейтронов

Реакция:
- X + a → Y + b
- X(a,b)Y
- X(a,b)



Примеры эквивалентных обозначений:

$^{10}B + 1n \rightarrow {}^{7}Li + {}^{4}He$
$^{10}B + n \rightarrow {}^{7}Li + \alpha$
$^{10}B(n,\alpha)$

$^{238}U + n \rightarrow {}^{239}U^*$
$^{238}U + n \rightarrow {}^{239}U + \gamma$
$^{238}U(n,\gamma)$

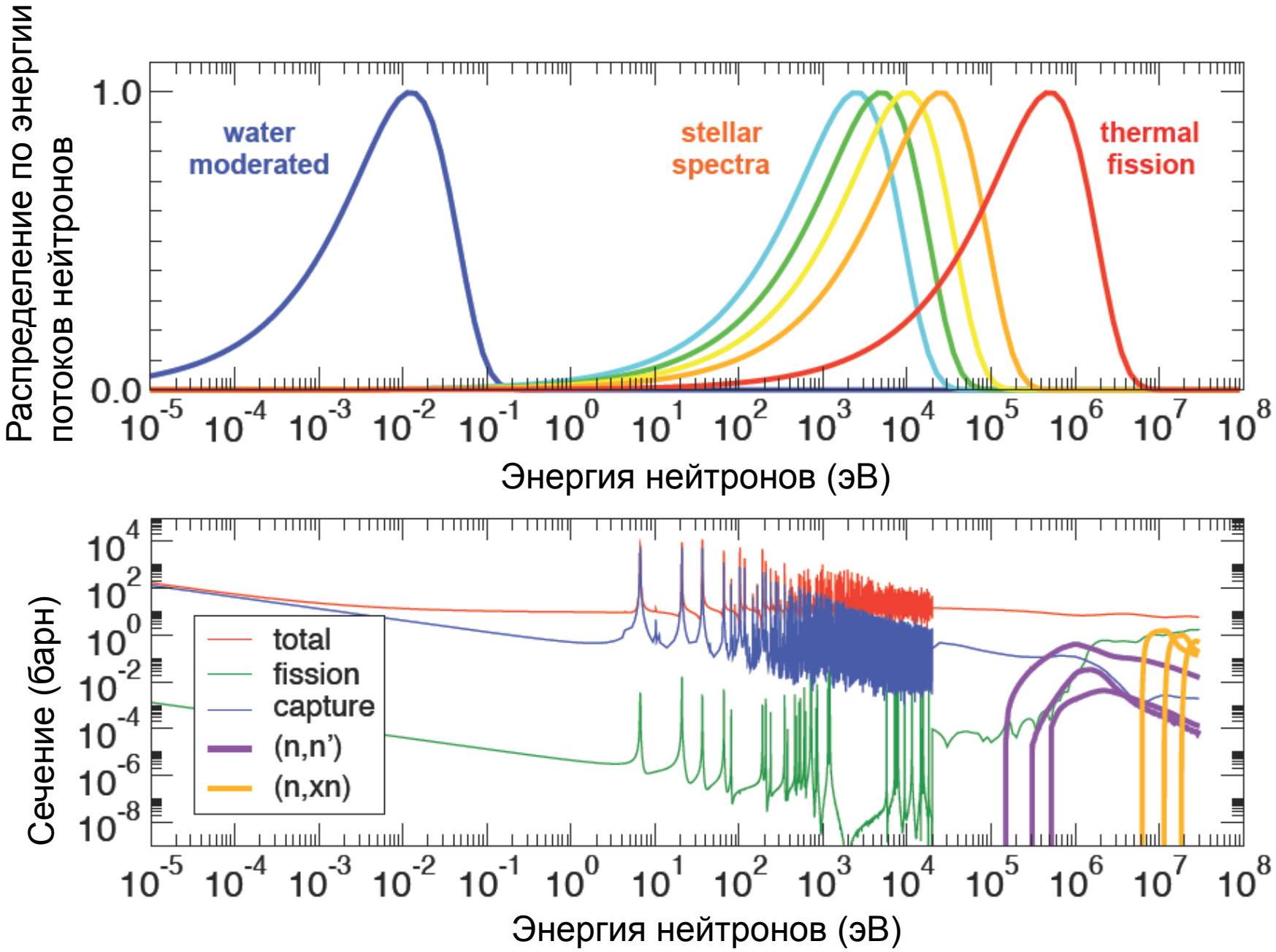
Сечение реакции σ, выражается в барн, 1 барн = 10^{-28} м^2

Ядерные реакции под действием нейтронов:
- упругое рассеяние (n,n)
- неупругое рассеяние (n,n')
- радиационный захват (n,γ)
- деление (n,f)
- испускание частиц (n,α), (n,p), (n,xn)

Полное сечение реакции σ_{tot}: сумма всех каналов реакции

Реакции под действием нейтронов

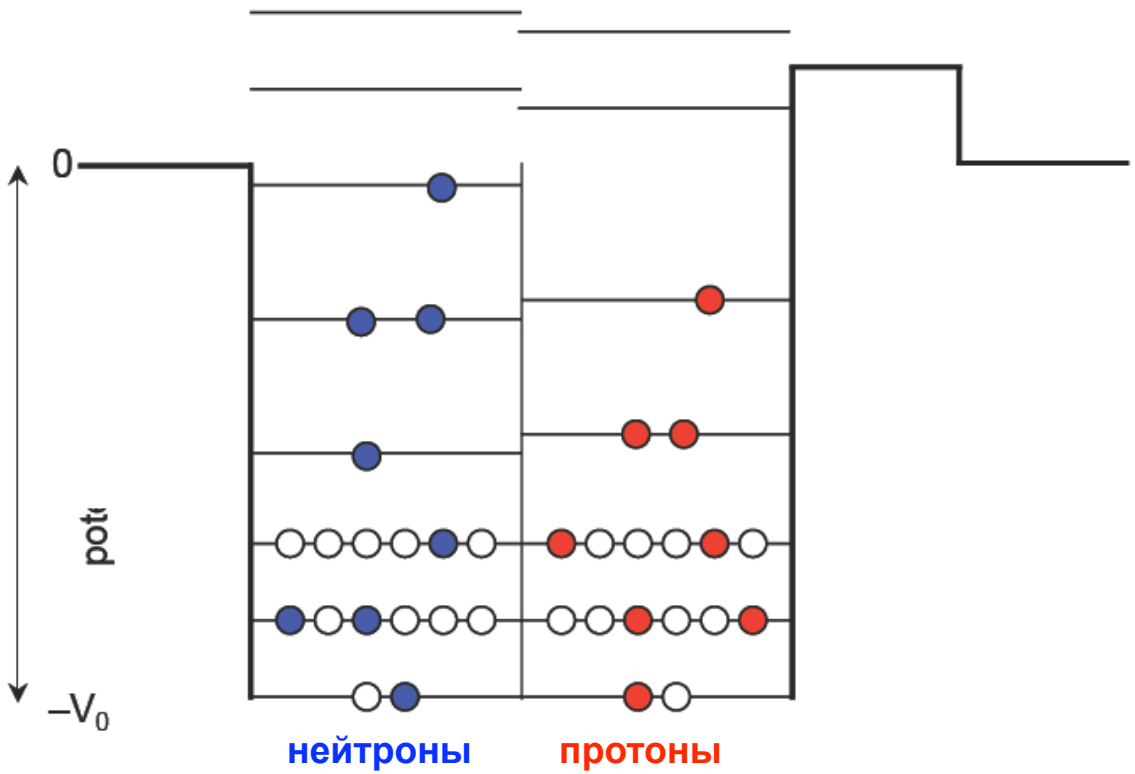
Реакция	Сечение реакции
Радиационный захват (n,γ)	На всех ядрах. Для тепловых $0{,}1 < \sigma_{тепл} < 10^6$ барн, для быстрых $0{,}1 < \sigma < 10$ барн
Упругое рассеяние (n,n)	Сечение варьируется в интервале нескольких барн
Неупругое рассеяние (n,n')	Пороговый процесс. Сечение порядка нескольких барн
Испускание протонов (n,p)	Наиболее важные реакции: ; $\sigma_{тепл}$ = 5400 барн ; $\sigma_{тепл}$ = 1,73 барн
Испускание α-частиц (n,α)	Наиболее важные реакции: ; $\sigma_{тепл}$ = 945 барн ; $\sigma_{тепл}$ = 3840 барн
Испускание нейтронов $(n,2n)$	Пороговый процесс (~ 10−15 МэВ). Сечение порядка нескольких десятых барн
Деление (n,f)	В основном пороговый процесс. Сечение очень мало, исключая отдельные случаи (, и тд)



F. Gunsing, 2014

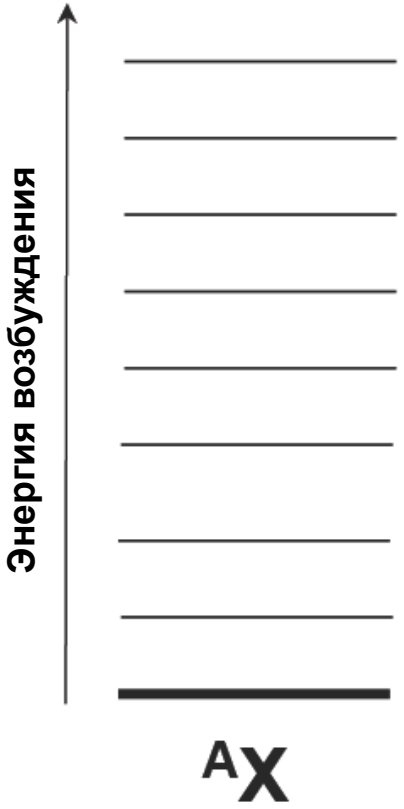
Реакции с образованием составного ядра

Оболочечная модель:
Состояния нуклонов в потенциальной яме



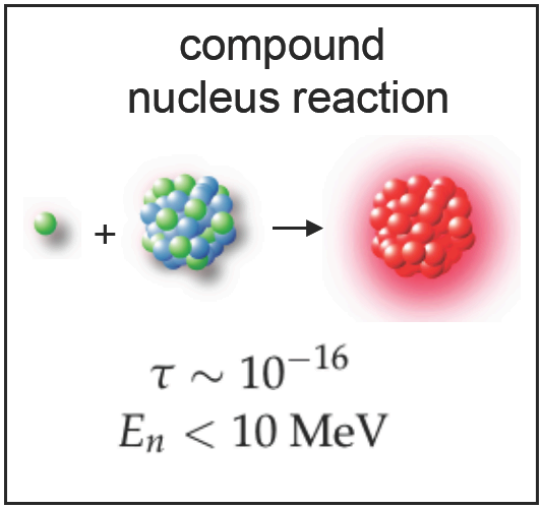
Состояния ядра

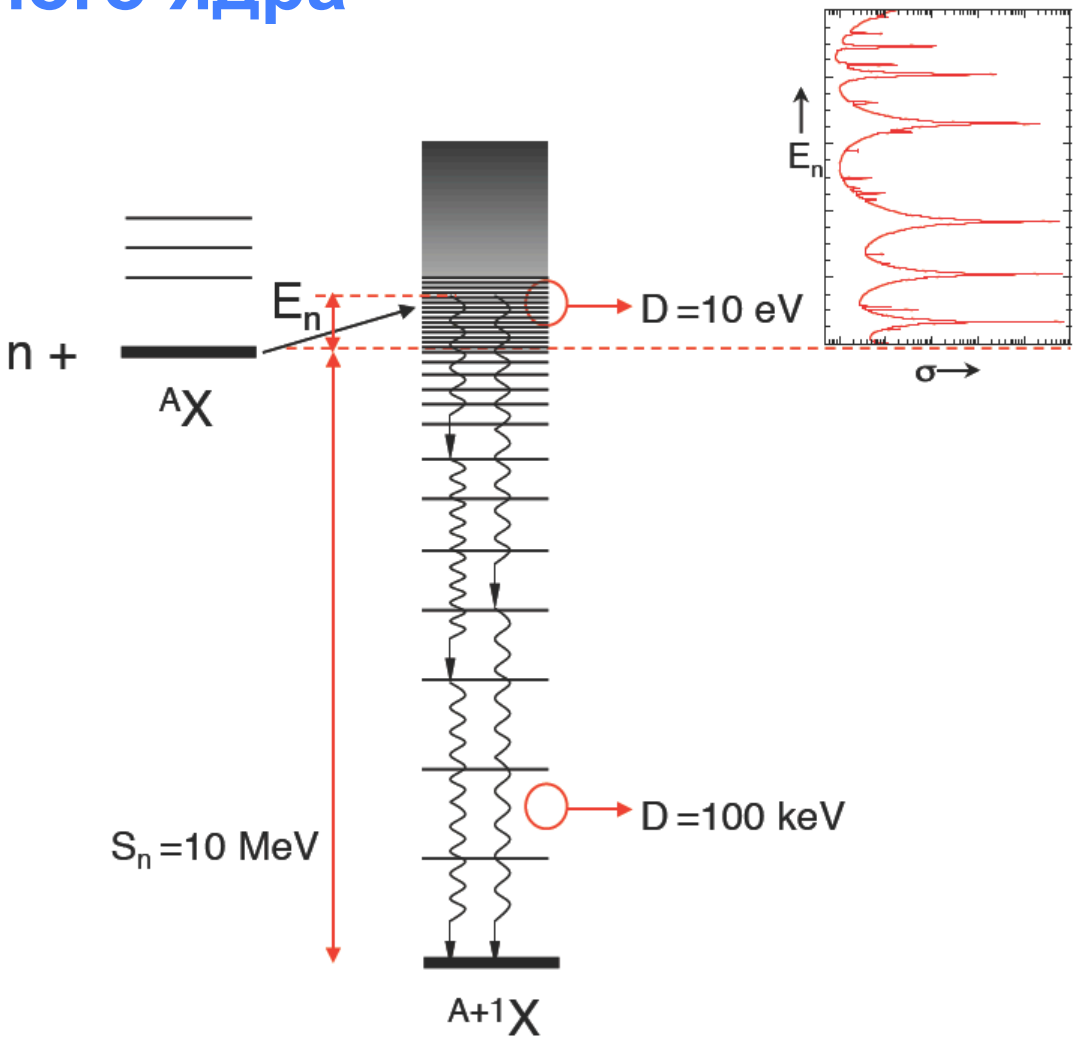
Схема уровней :
Возбужденные состояния ядра



F. Gunsing, 2014

Реакции с образованием составного ядра

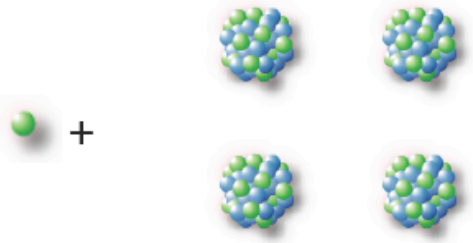




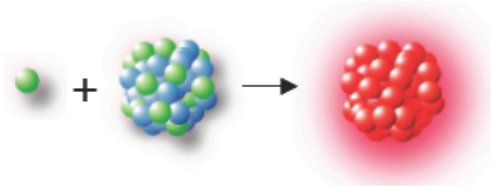
F. Gunsing, 2014

Реакции под действием нейтронов

Рассеяние в конденсированных средах



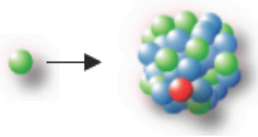
Реакции с образованием составного ядра



$\tau \sim 10^{-16}$

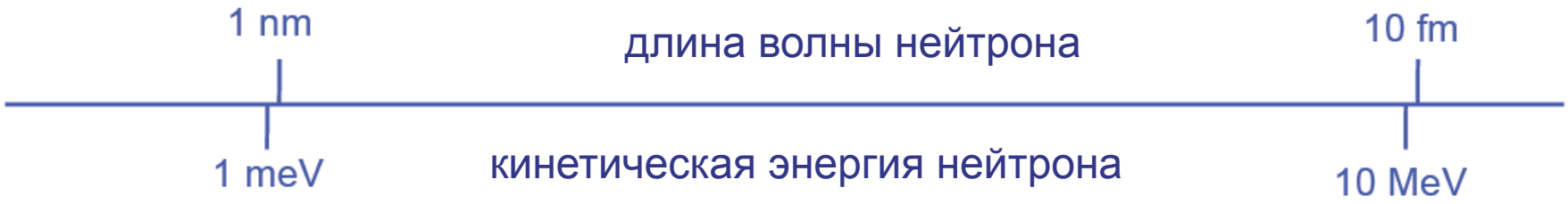
$E_n < 10$ MeV

Прямые ядерные реакции



$\tau \sim 10^{-22}$

$E_n > 10$ MeV



Источники нейтронов

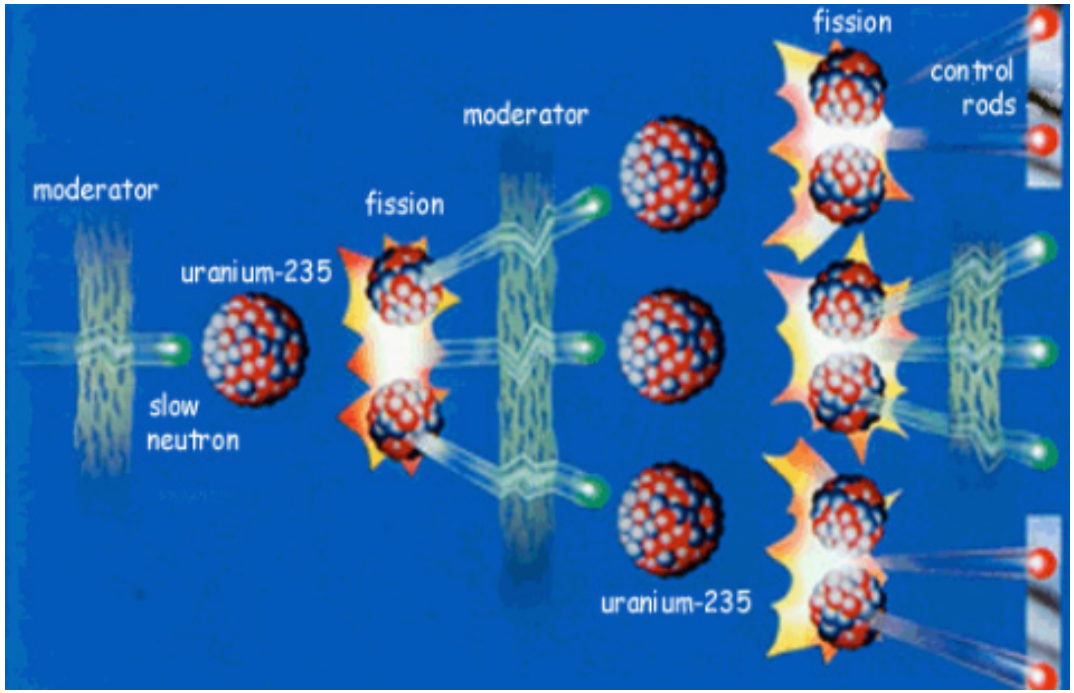
- Радиоактивные изотопы
- Реакции под действием космического излучения
- Ядерные реакторы (импульсные, стационарные)
- Источники на основе ускорителей
- Ядерные взрывы

Объединенный институт ядерных исследований

Лаборатория нейтронной физики имени И.М. Франка

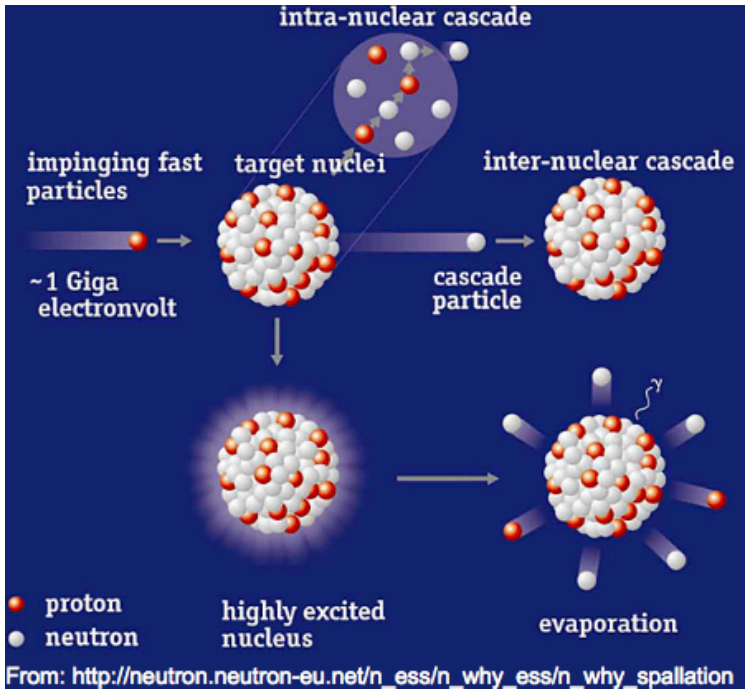
Источники нейтронов

Ядерные реакторы
(цепная реакция деления)



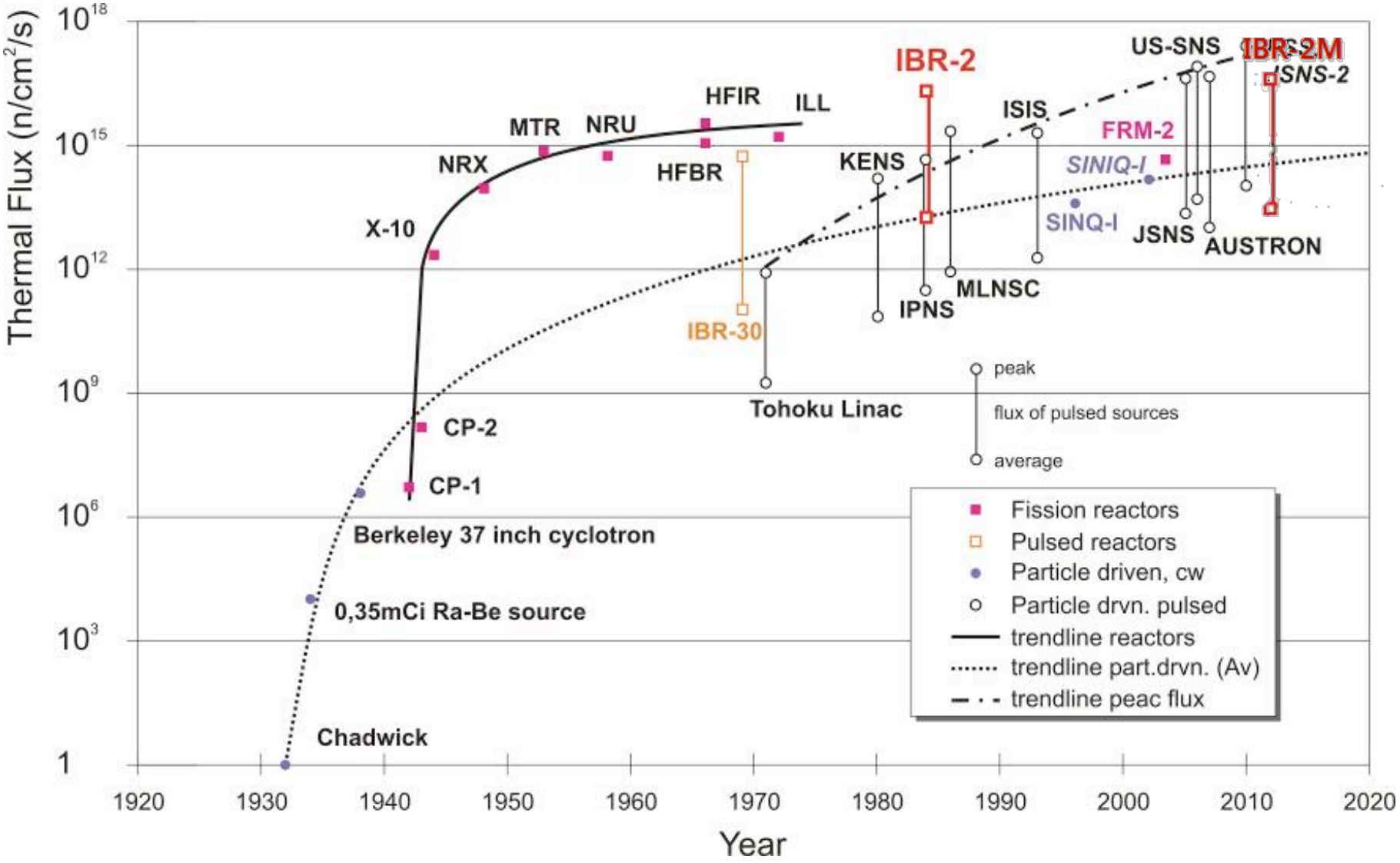
~2-3 нейтрона

Источники нейтронов
на основе ускорителей

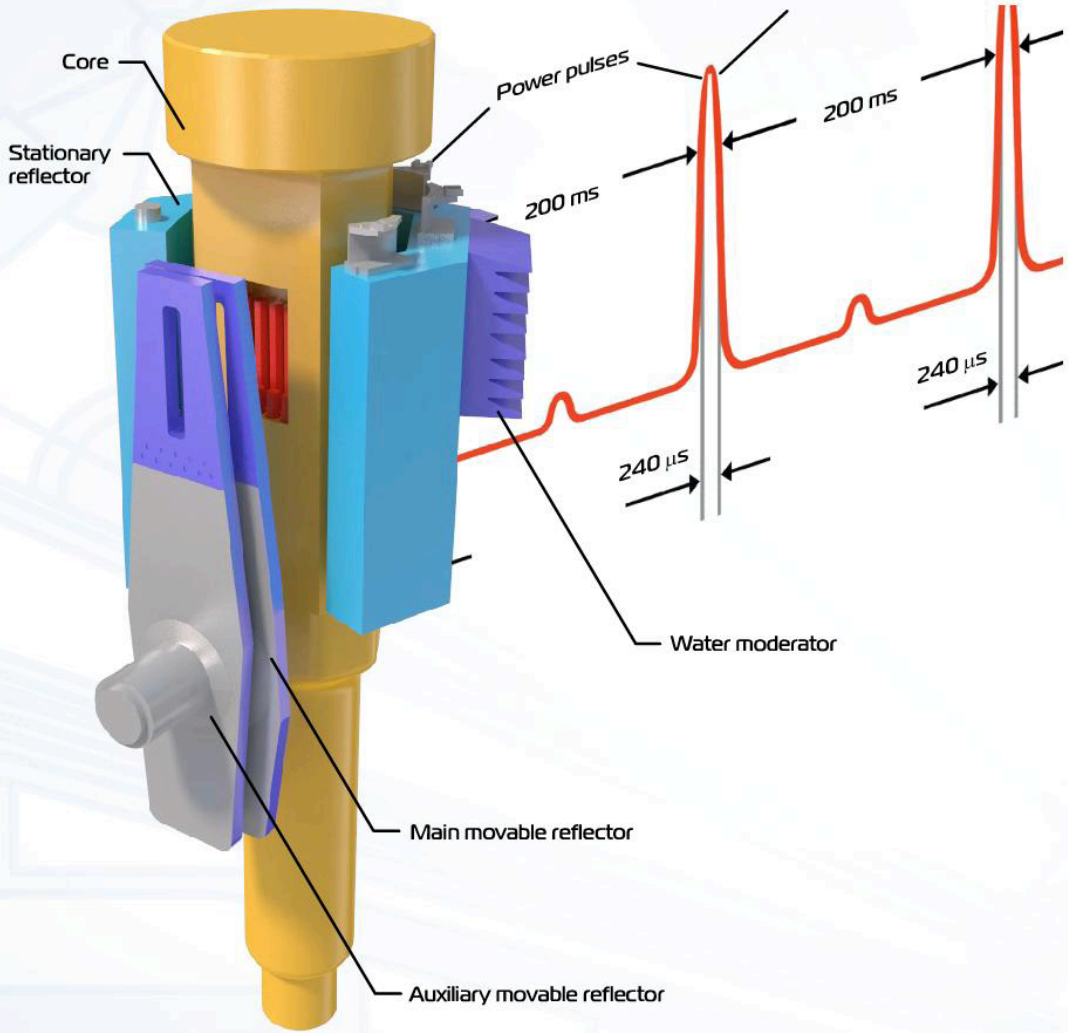


~20-30 нейтронов

Источники нейтронов

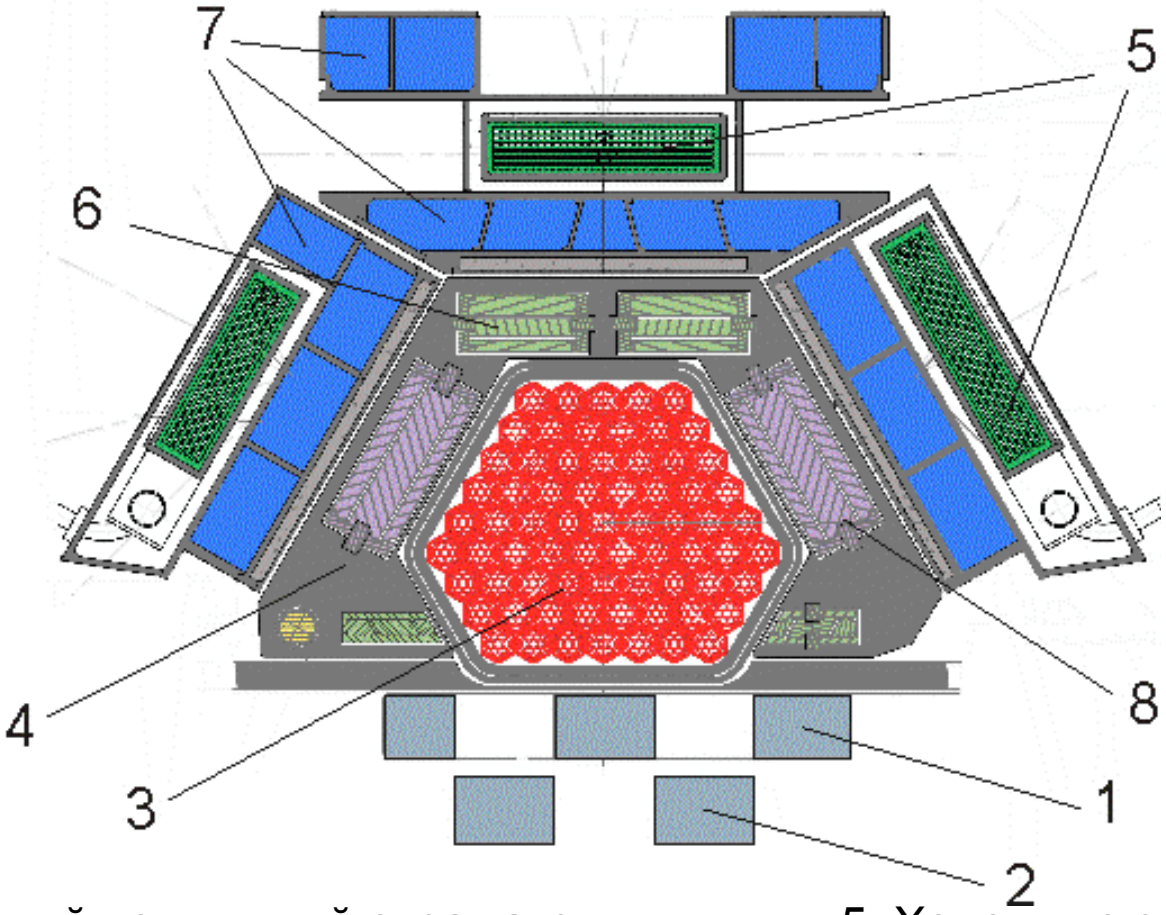


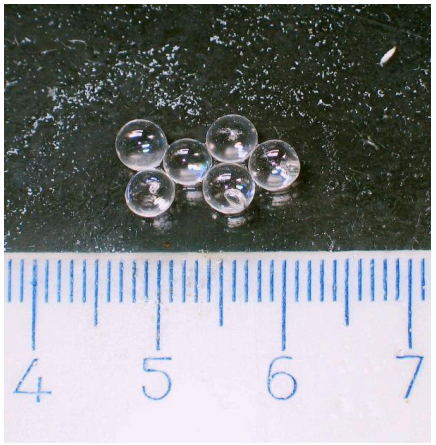
Parameters of IBR-2M



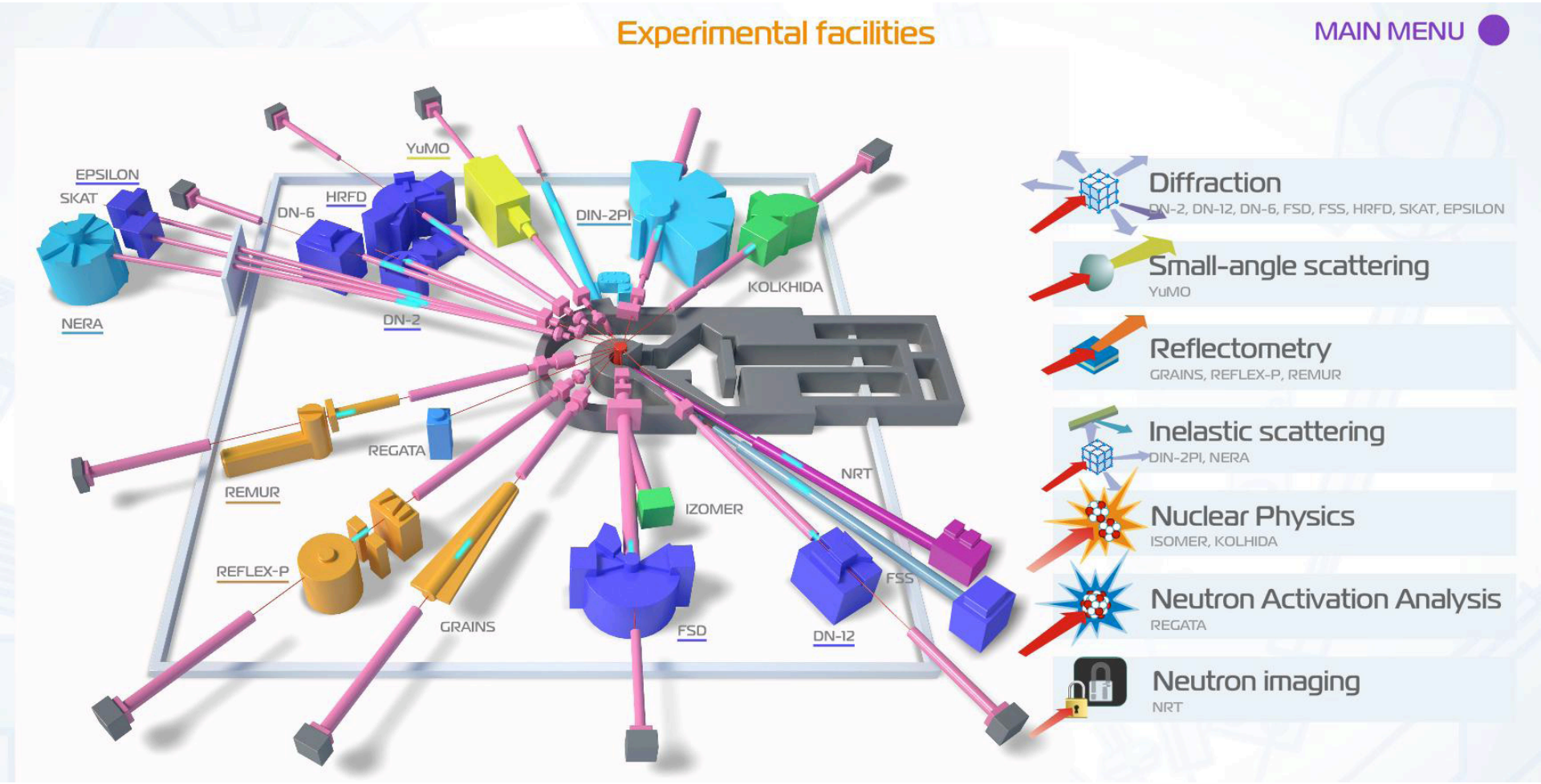
Average power, MW	2
Burst power, MW	1850
Fuel	PuO_2
Number of fuel assemblies	69
Maximum burnup, %	9
Pulse repetition rate, Hz	5; 10
Pulse half-width, μs: fast neutrons thermal neutrons	 240 320
Rotation rate, rev/min: main reflector auxiliary reflector	 600 300
MMR and AMR material	nickel + steel
MR service life, hours	55000
Thermal neutron flux density from the surface of the moderator*: - time average - burst maximum	 ~10^{13} n/cm^2·s ~10^{16} n/cm^2·s

* More precise data on the thermal neutron flux density after the modernization will be available when the reactor operates at full power.





1.Главный подвижный отражатель,
2. Второй подвижный отражатель,
3. Топливная сборка,
4. Стационарный отражатель,
5. Холодные замедлители,
6. Система безопасности,
7.Водяные замедлители,
8.Стержни управления;



Виртуальная экскурсия на спектрометры ИБР-2М

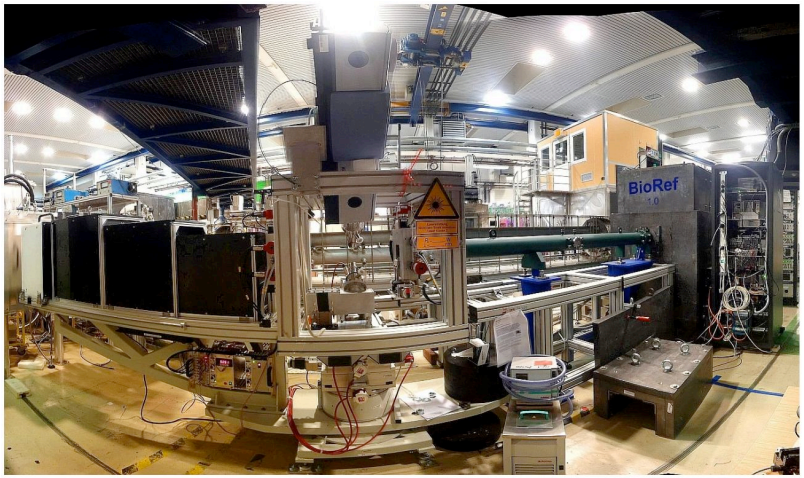
http://uc2.jinr.ru/pano/lnf/

Нейтронная оптика

Оптический микроскоп

Электронный микроскоп

Разрешение до ~5 нм

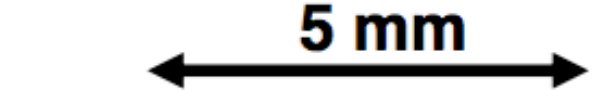


A fish-eye perspective of the new BioRef neutron reflectometer at the neutron source BERII at the Helmholtz Zentrum Berlin with the sample position in the center. The neutrons are guided through a chopper system from the right side and are detected with a position sensitive detector on the left side. As a special feature an infrared beam line is installed on the sample stage, with an infrared spectrometer on top, in order to perform combined infrared spectroscopy and neutron reflectivity measurements. The software

Нейтронный спектрометр

Разрешение ~ 0,4 нм

Tomography Result: Virtual Reality

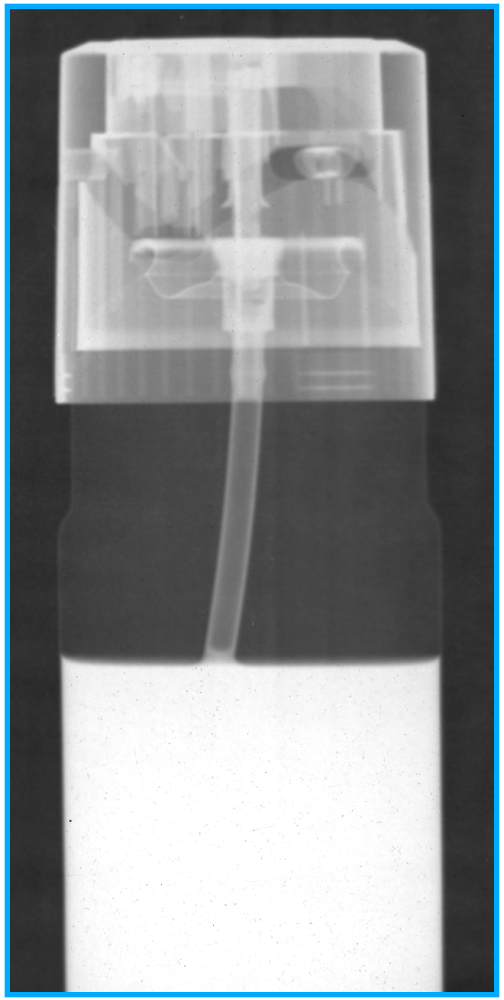


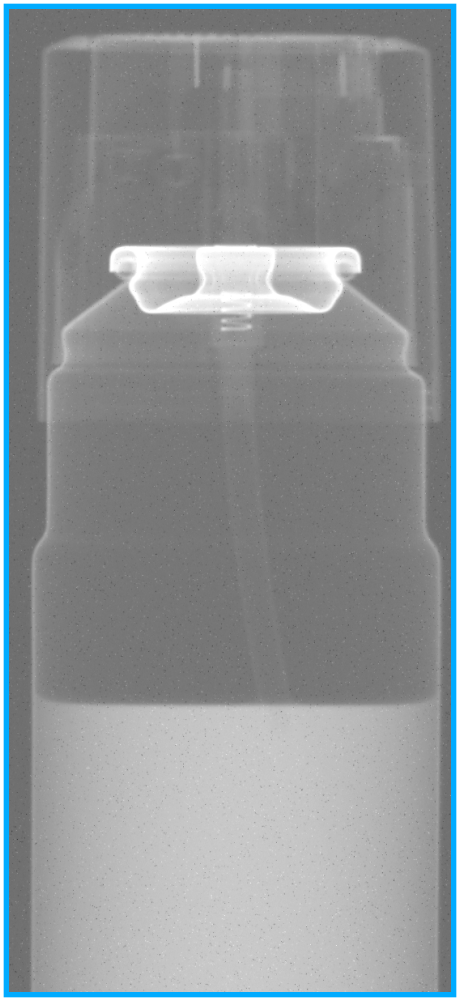
Micro-Tomography
with cold neutrons

from E. Lehmann, PSI

Нейтронография

Нейтроны





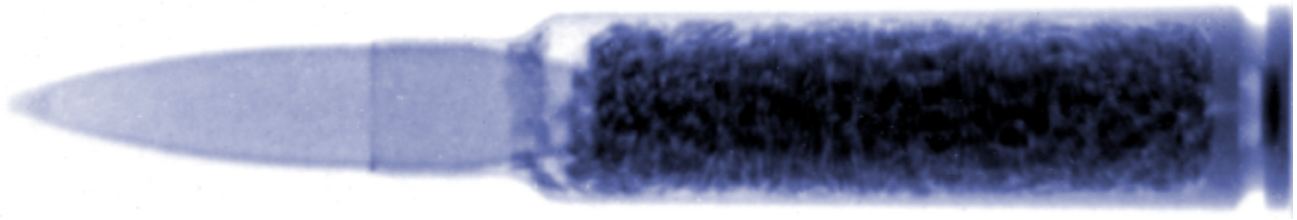
Гамма лучи

Различный контраст для металла и пластика

Neutron imaging
NRT

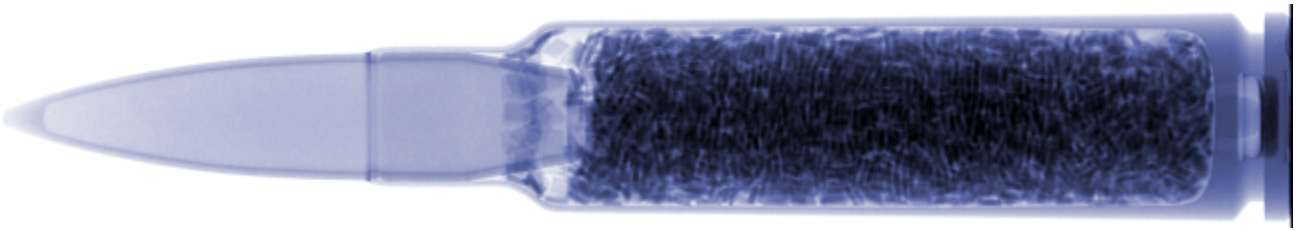
Нейтронография

Гамма-лучи



Нейтронная радиография

(обычное разрешение)



Нейтронная радиография

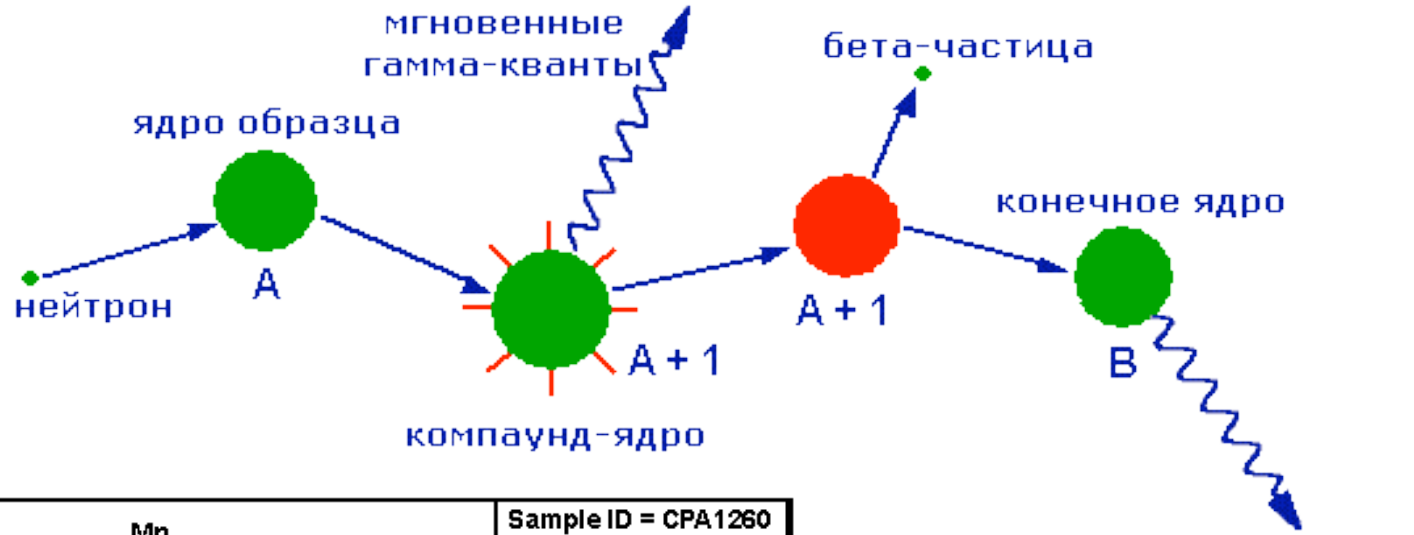
(высокое разрешение)

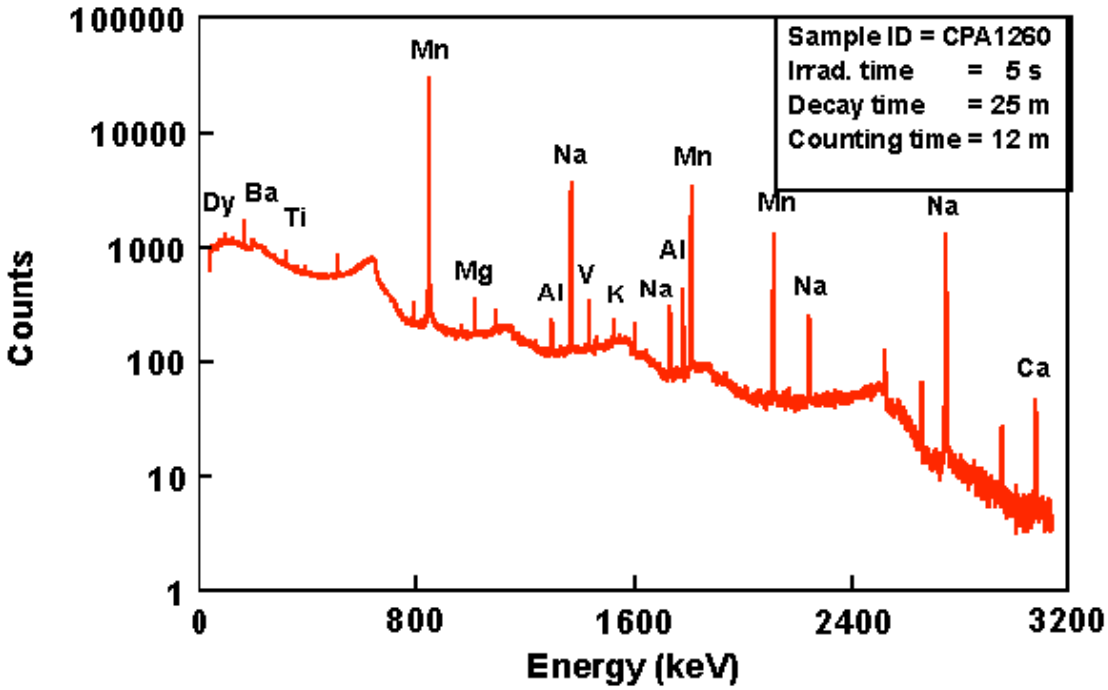
Нейтронная томография

(высокое разрешение) вертикальный слой 13 мкм

FLNP

Нейтронно-активационный анализ





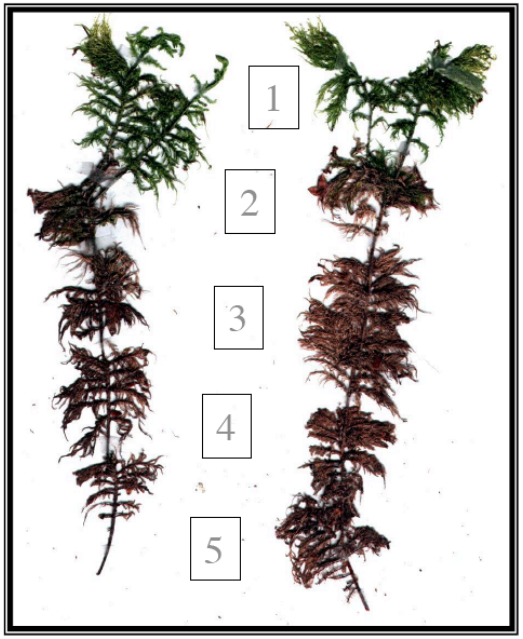
Нейтронно-активационный анализ

ICP Vegetation Programme Coordination Centre

Мхи как биомониторы атмосферного загрязнения Европы тяжелыми металлами

Мхи собирают примерно в 7,300 точках. Число стран-участниц достигает 29.

Одномоментные сборы мха в Европе проводятся каждые 5 лет



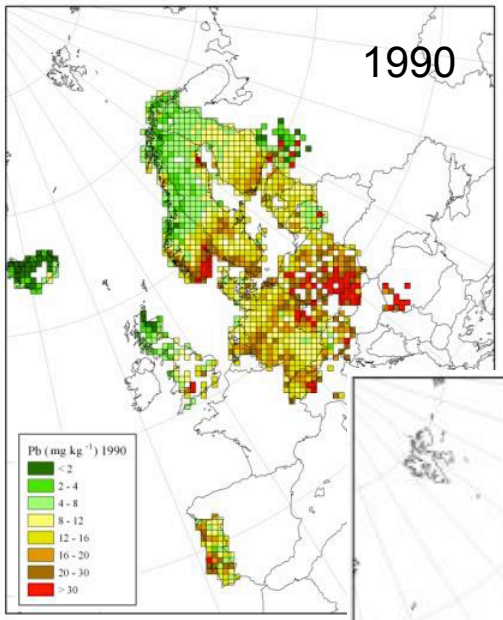
Годовые приросты

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	*Cu*	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	*Cd*	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	*Pb*	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac**											Rf	Db	Sg	Bh	Hs
	*	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
	**	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lw		

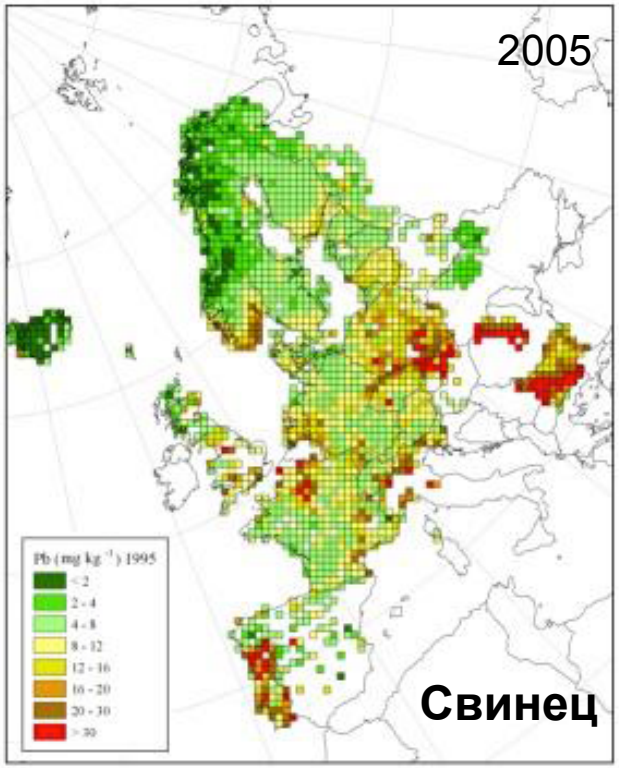
NAA ~ 55 elements

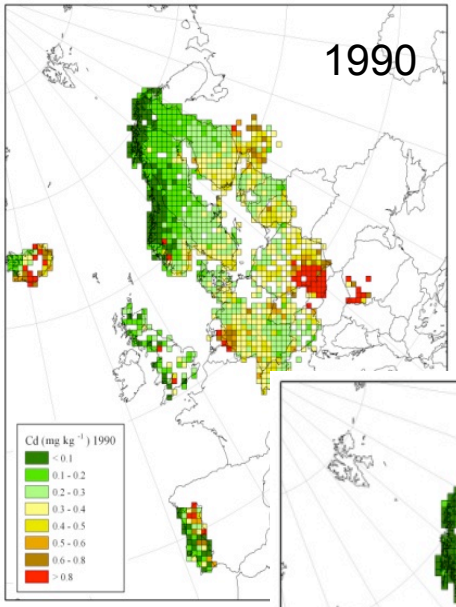
Neutron Activation Analysis

Нейтронно-активационный анализ

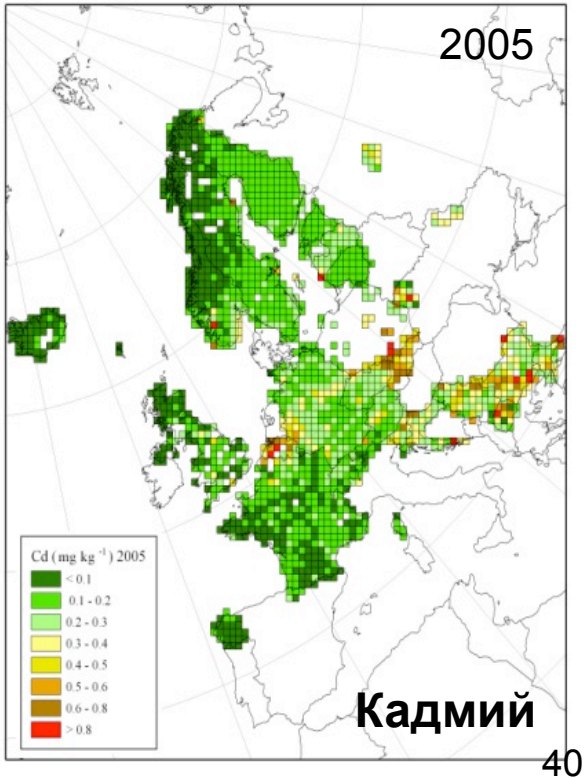


72%





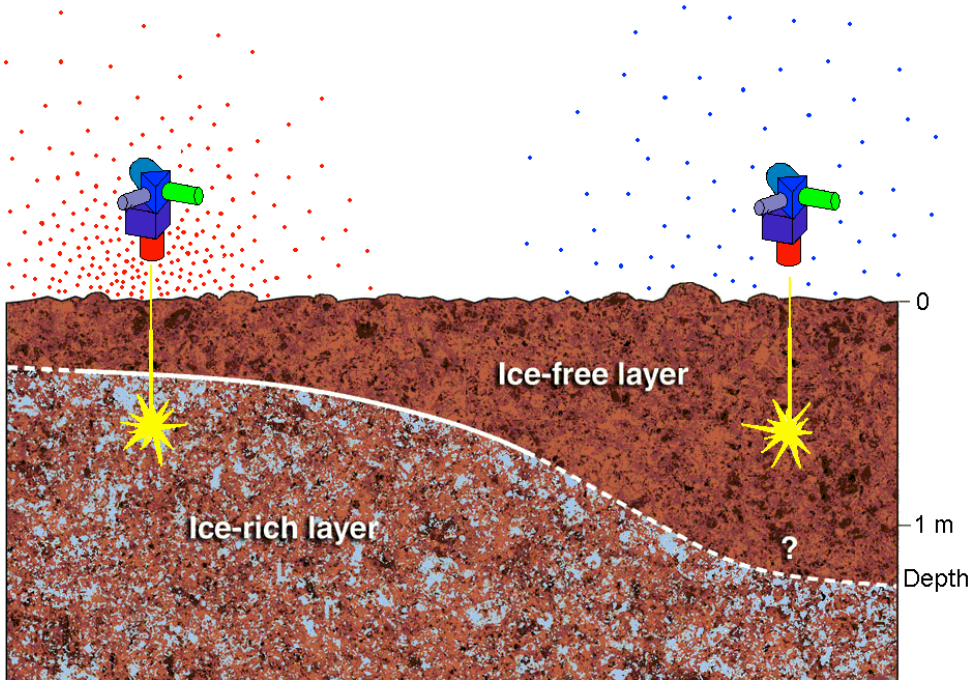
52%



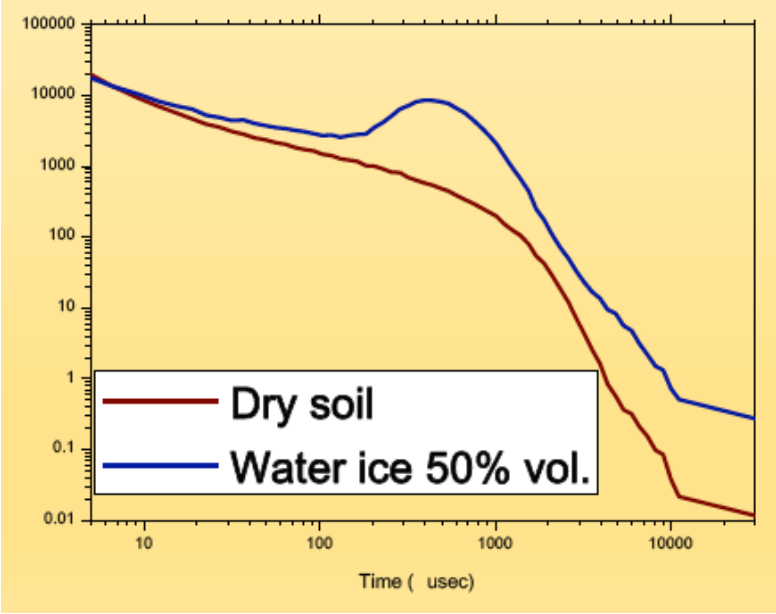
М. Фронтасьева, 2015

Не удается отобразить рисунок.

Dynamic Albedo of Neutrons (DAN): русский детектор на борту Curiosity Rover

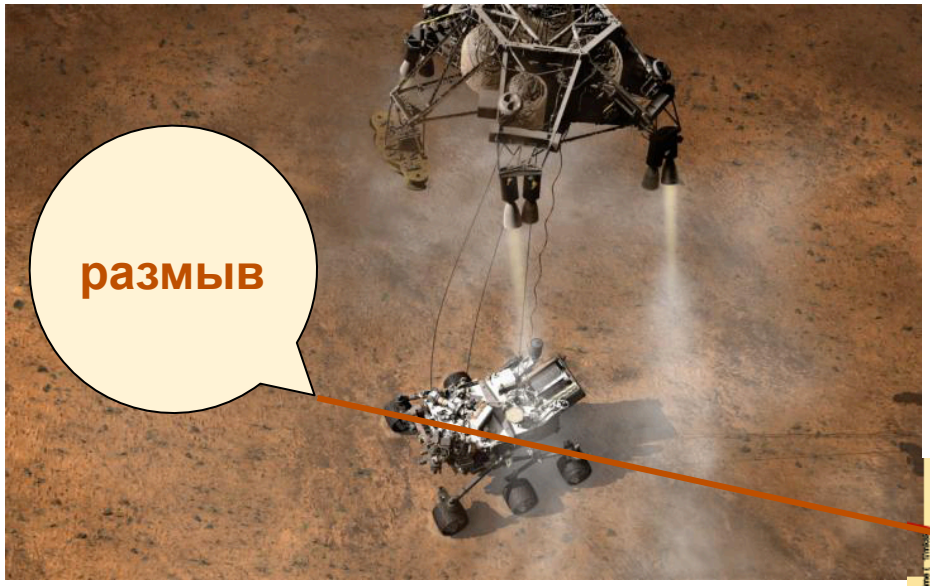


Импульсный нейтронный каротаж: идея принадлежит Г.Н. Флерову. Быстрые нейтроны от генератора проникает в почву и замедляются. Зависимость от времени числа нейтронов, зарегистрированных счетчиком над поверхностью земли, зависит от насыщенности почвы водой.

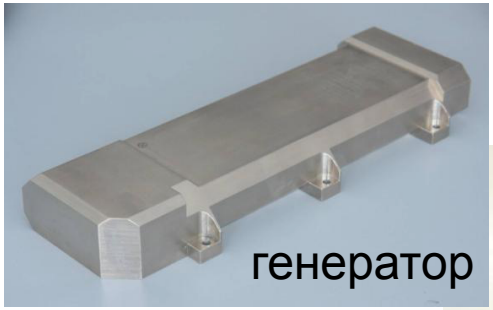


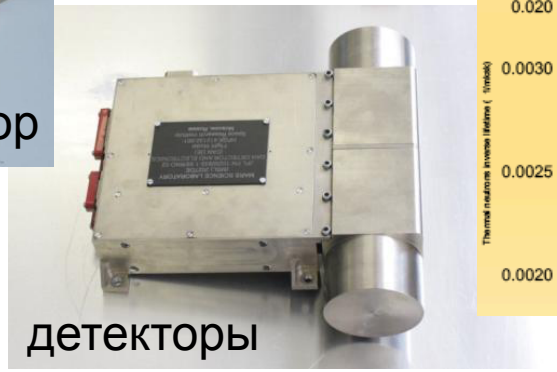
V. Shvetcov, 2015

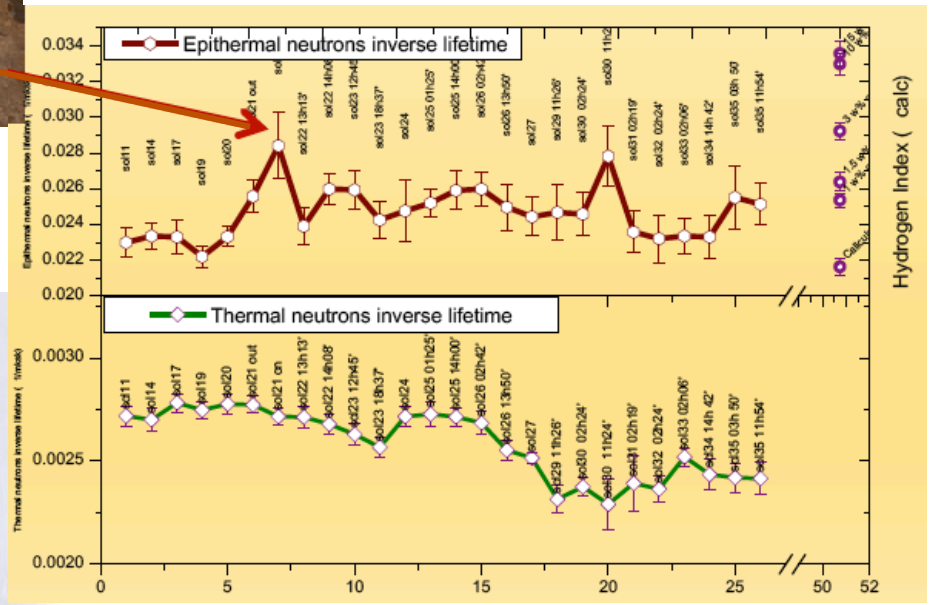
Dynamic Albedo of Neutrons (DAN): русский детектор на борту Curiosity Rover



Во время посадки Curiosity на Марс верхний слой почвы был снесен в сторону и появился некий размыв (глубиной несколько сантиметров). При движении sol21 Curiosity в районе размыва DAN зарегистрировал различие потоков тепловых нейтронов над размывом и в стороне от него

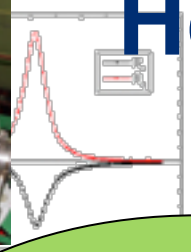






V. Shvetcov, 2015

Нейтронная физика



$R_{\max}^{QCD}$

IREN

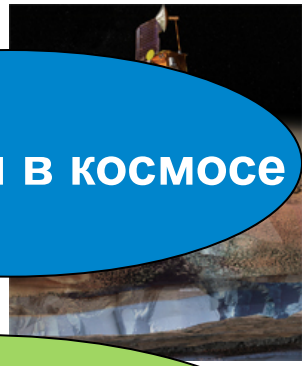
Активационный анализ

Фундаментальные симметрии в реакциях под действием нейтронов

Ion beam analysis

Прикладные

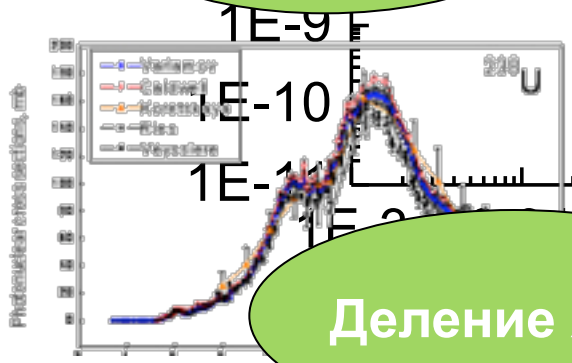
Нейтроны в космосе

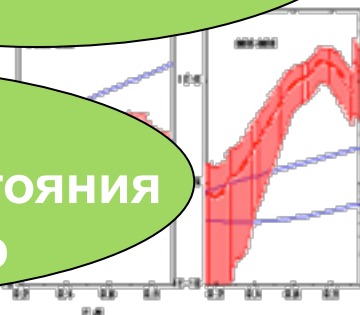


Ультрахолодные нейтроны

Фундаментальные

Фундаментальные свойства нейтрона



Деление ядер

Высокие возбужденные состояния атомных ядер