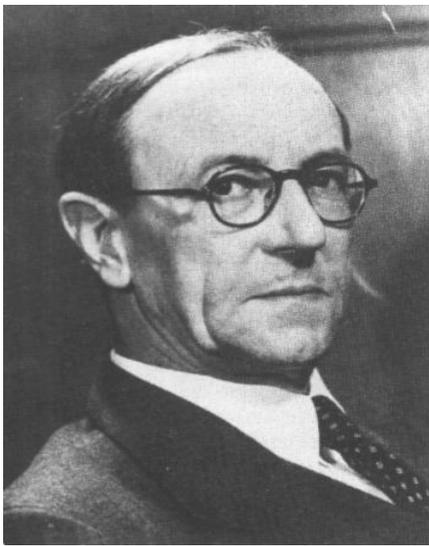


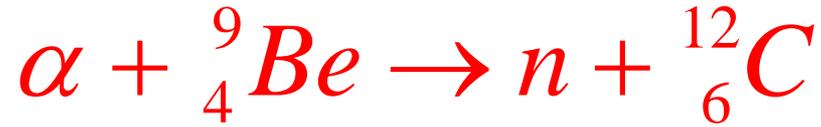


Человек в мире атомных ядер

Нейтронная физика



1932 Открытие нейтрона

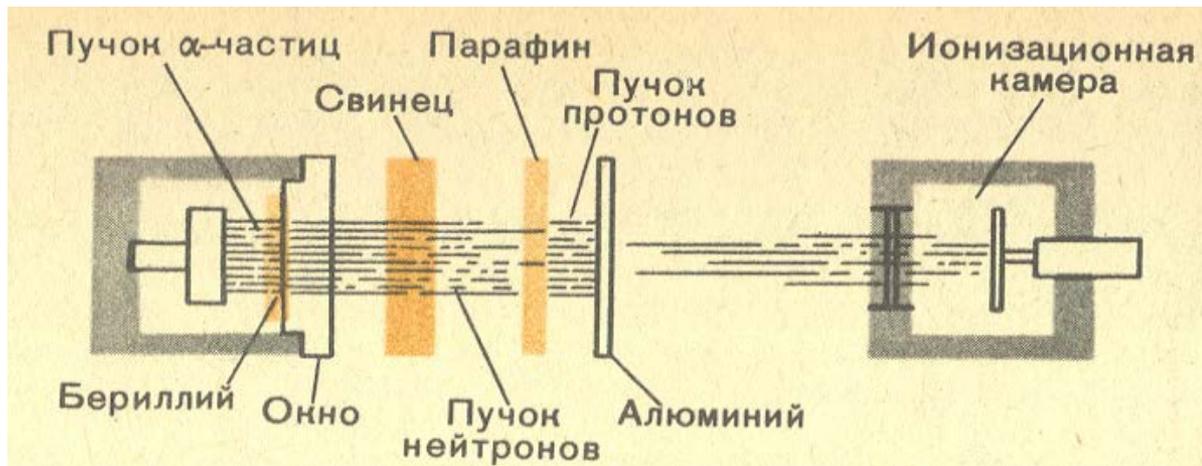


James Chadwick
(1891-1974)

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.)	$1.00727646688 \pm 0.00000000009 u$	$1.0086649159 \pm 0.00000000005 u$
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	$2.792847351 \pm 0.000000009 \mu_N$	$-1.9130427 \pm 0.00000005 \mu_N$
Электрический дипольный момент d	$< 0.54 \times 10^{-23} e \text{ см}$	$< 0.30 \times 10^{-25} e \text{ см}$
Среднеквадратичный зарядовый радиус $\langle r^2 \rangle$	$0.7071 \pm 0.0004 \text{ фм}^2$	$-0.1161 \pm 0.0022 \text{ фм}^2$
Магнитный радиус $\sqrt{\langle r^2 \rangle_M}$	$0.78 \pm 0.04 \text{ фм}$	$0.864 \pm 0.009 \text{ фм}$
Заряд q	$> 10^{33}$ лет	$(-0.2 \pm 0.8) \times 10^{-21} e$

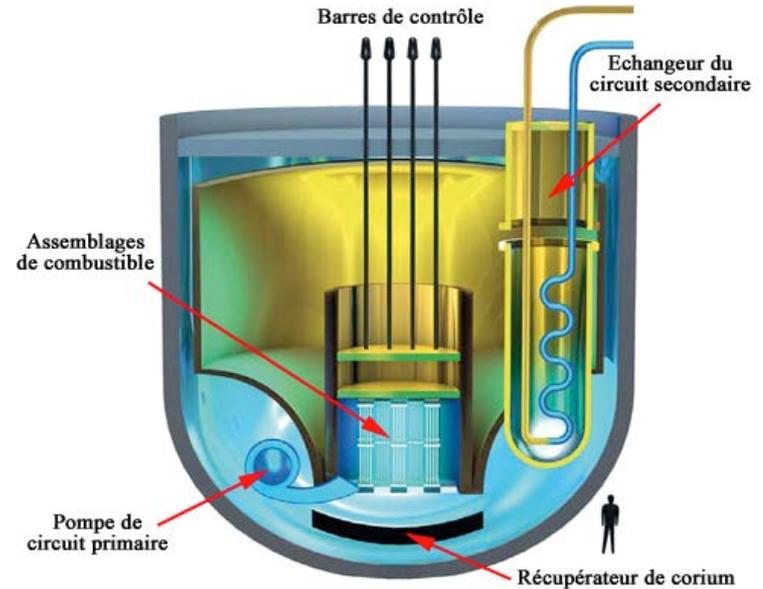
Нейтроны в науке...

- 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:

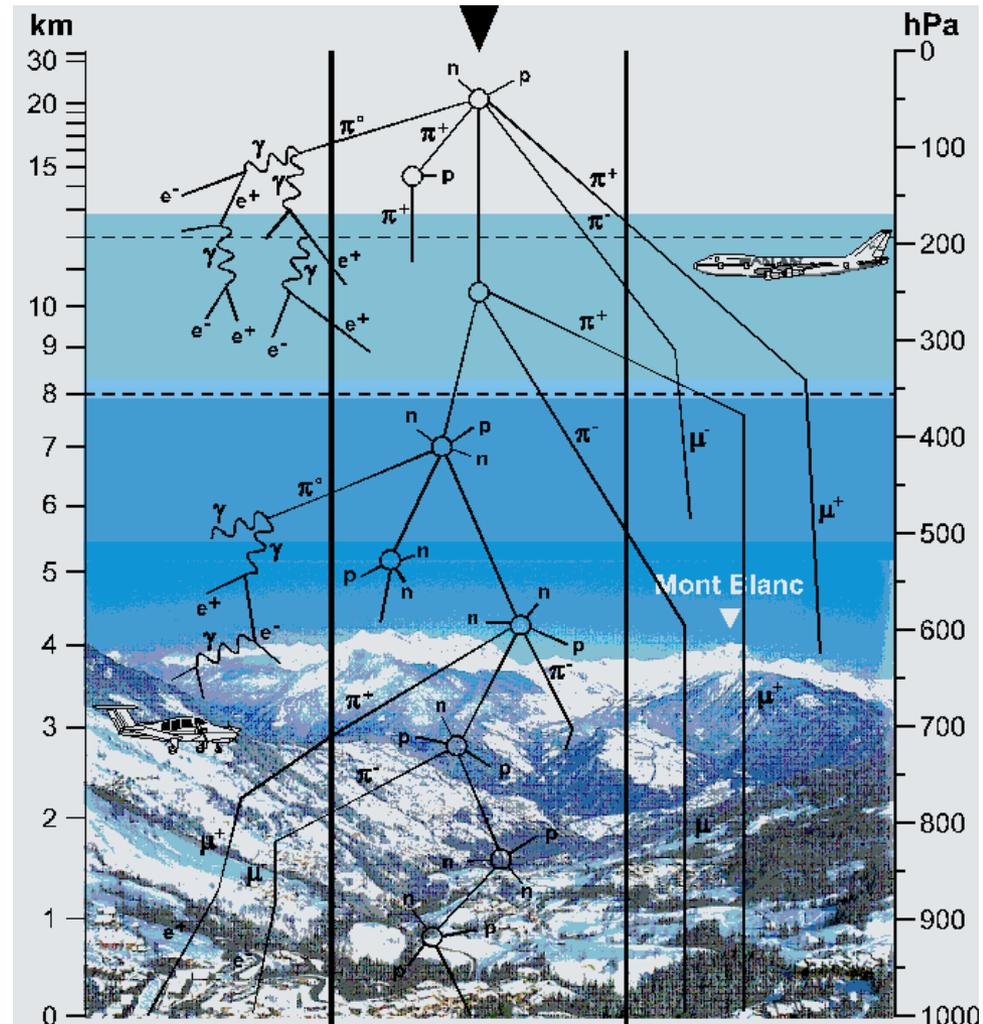
- нестабильность свободного нейтрона

$$\tau \approx 880 \text{ с}$$

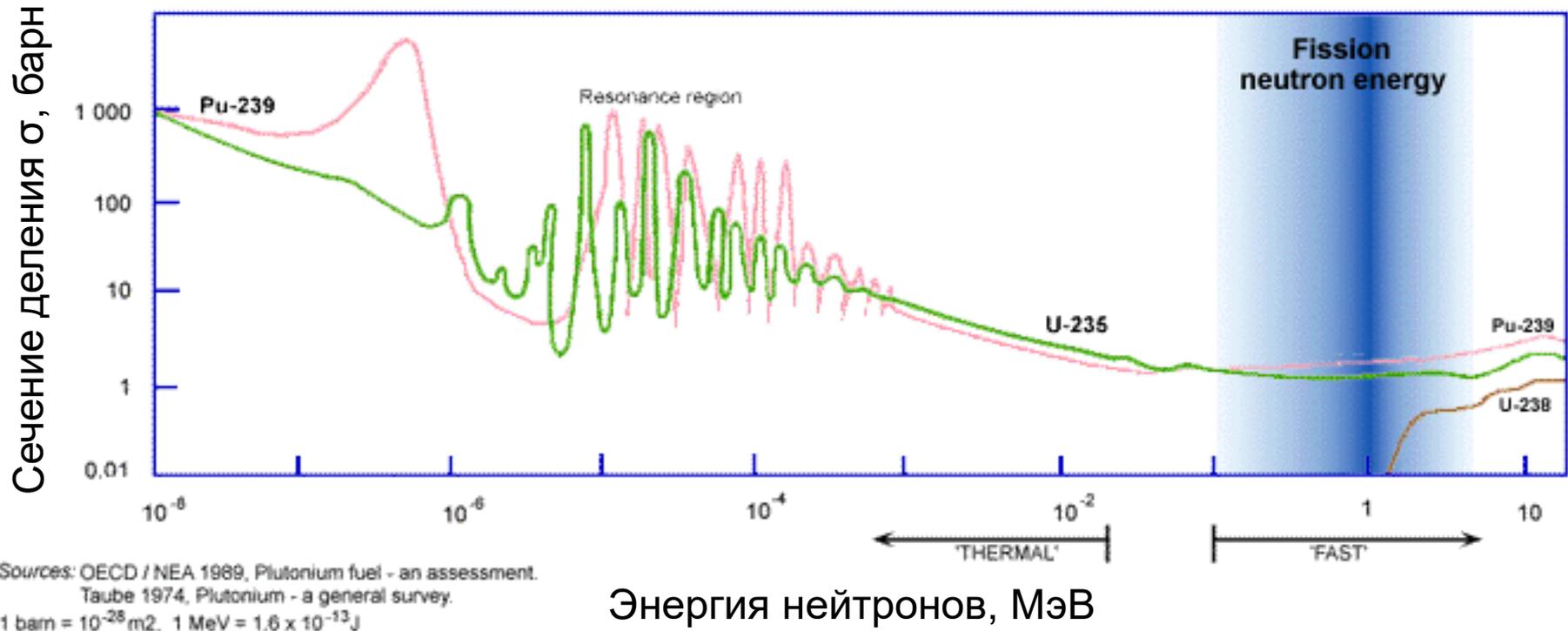
- интенсивные источники нейтронов - сложные и дорогие технические устройства

... В КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

- Космические нейтроны:
 - Продукты галактического излучения;
 - Солнечные нейтроны
- Мониторы нейтронов:
 - Процессы на Солнце
- Защита полетов:
 $dH^*n / dt \approx 1 - 4 \mu\text{Зв/ч}$ на высоте 12 км



Классификация нейтронов



Энергия нейтронов, МэВ

Холодные: большое сечение захвата $\sigma \sim 1/v$, выраженные волновые свойства

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

Резонансные: 0.5 эВ $< E < 1$ кэВ

Быстрые: 100 кэВ $< E < 14$ МэВ

Классификация нейтронов

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

Видимый свет

9×10^2 9×10^1 9×10^0 9×10^{-1} 9×10^{-2} 9×10^{-3} 9×10^{-4} 9×10^{-5}



атом

ядро



10^{-7} 10^{-5} 10^{-3} 10^{-1} 10^1 10^3 10^5 10^7

Энергия, эВ

$< 3 \cdot 10^{-7}$ эВ



Ультрахолодные

$< 0,025$ эВ



Холодные

$< 0,5$ эВ



Тепловые

< 1 кэВ



Резонансные

< 100 кэВ

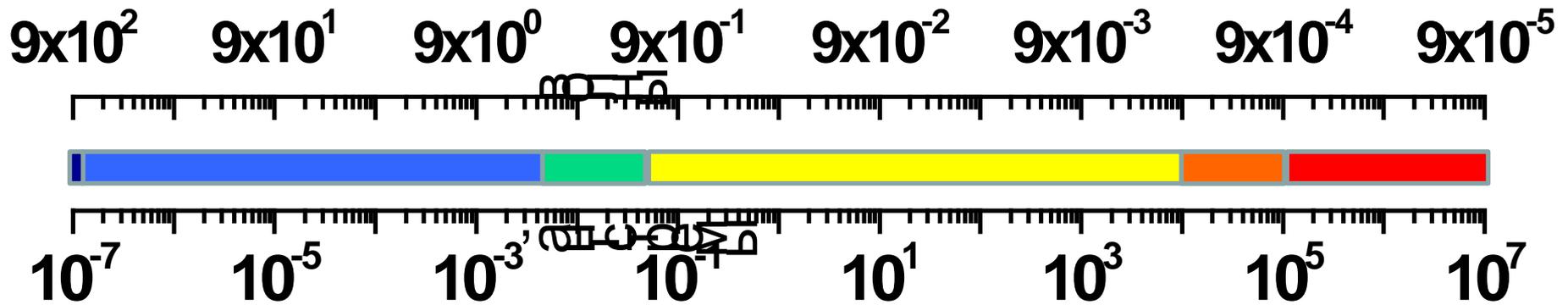


Промежуточные



Быстрые

Медленные нейтроны



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

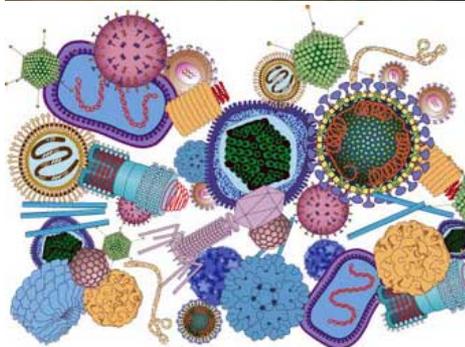
Ультрахолодные нейтроны (УХН)

$V \sim 5 \text{ м/с}$ 20 км/ч



Можно попытаться
обогнать их на
велосипеде

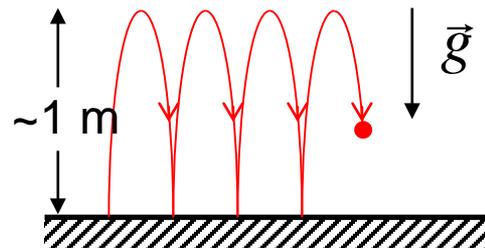
$\lambda \sim 500 \text{ \AA}$ 50 нм



Типичный размер
вирусов

$E \sim 10^{-7} \text{ eV}$

$T \sim 10^{-3} \text{ K}$



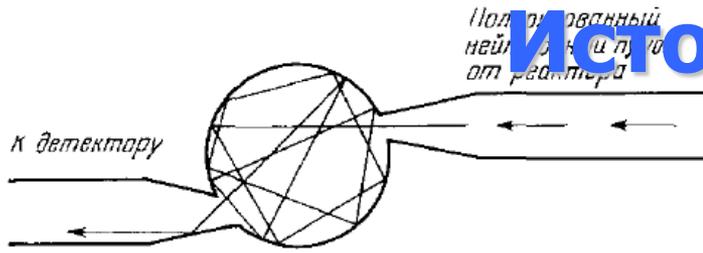
$1 \text{ см} \sim 1.02 \text{ нэВ}$

В ловушке УХН ведут себя как холодный идеальный газ.

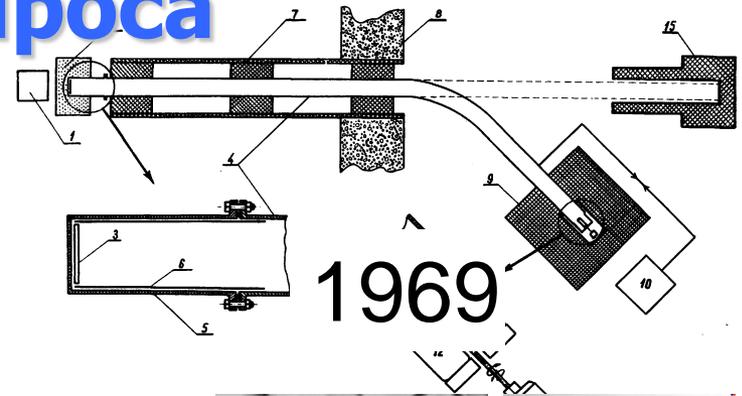
Число упругих отражений достигает 10^5 .

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

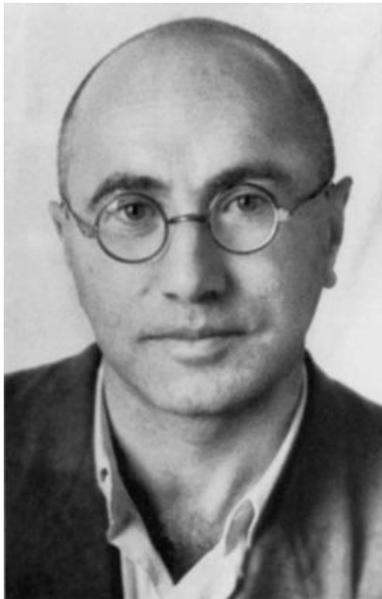
История вопроса



1959 Рис. 7.



1969

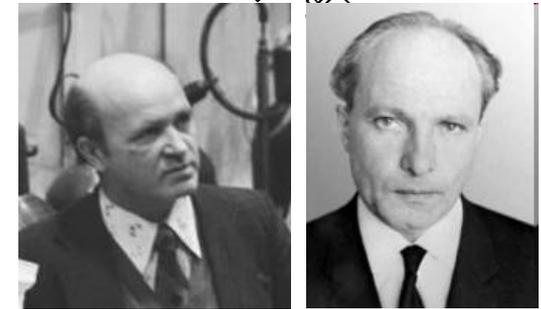


Я.Б. Зельдович,
«Хранение холодных
нейтронов»,
ЖЭТФ, т. 9, стр. 1389, 1959

Lyachagin 2015



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



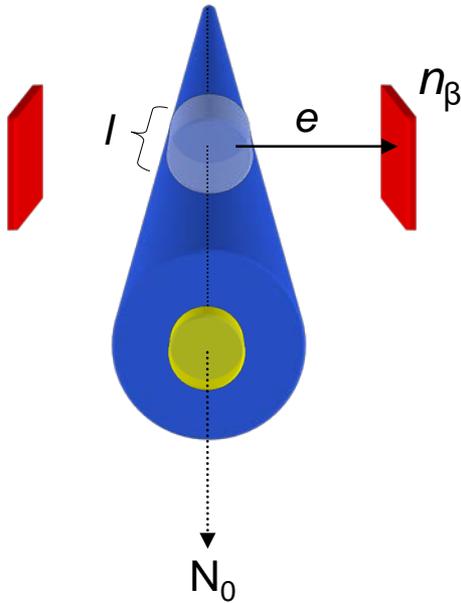
В.И. Луциков, Ю.Н. Покотилловский,
А.В. Стрелков, Ф.Л. Шапиро,
«Наблюдение ультрахолодных
нейтронов»,
Письма в ЖЭТФ, т. 9, с. 23, 1969₁₂



УХН. Время жизни нейтрона

Эксперимент на пучке холодных нейтронов

“что распалось?”

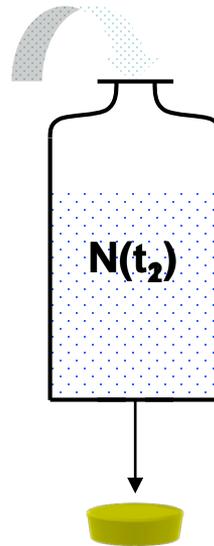


$$n_{\beta} = \frac{dN}{dt} = -\frac{N_0}{\tau_n} e^{-\frac{l}{v \cdot \tau_n}}$$

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

Эксперимент с хранением ультрахолодных нейтронов

“UCN bottle”



“что осталось?”

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

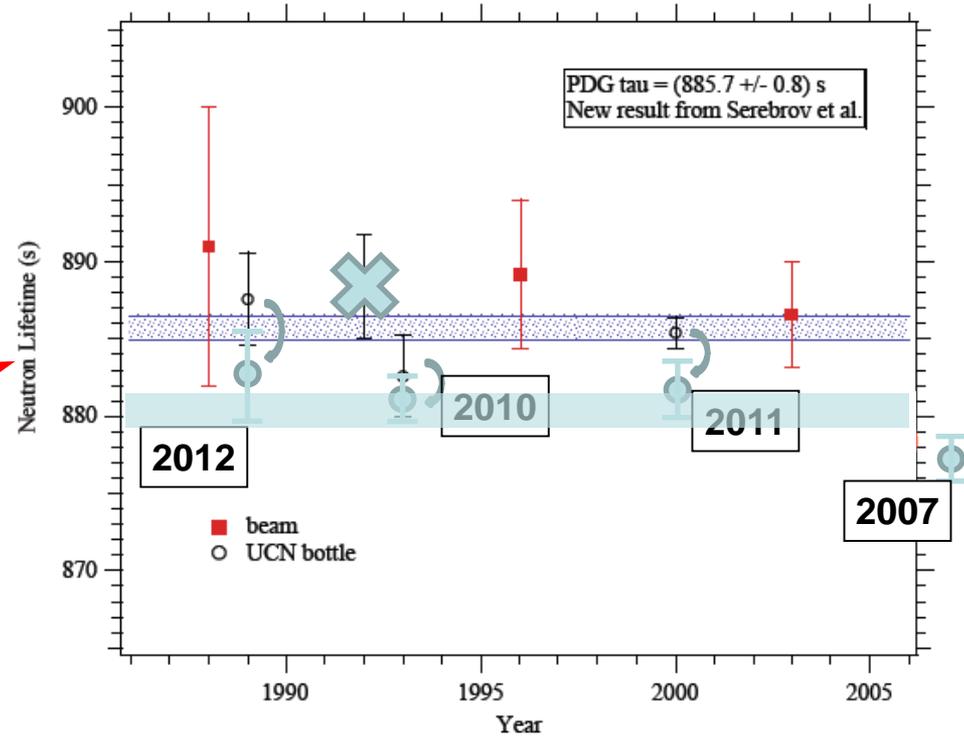
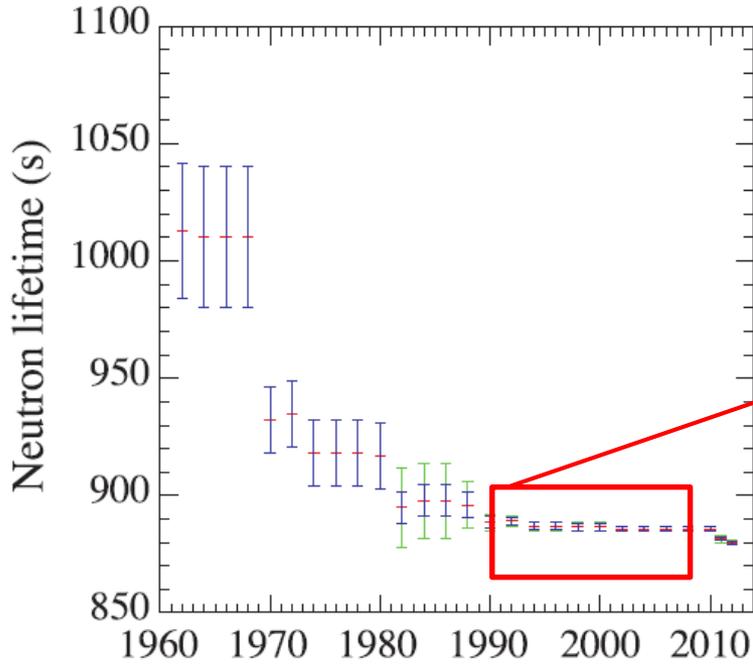
$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{\tau_{\beta}} + \underbrace{\frac{1}{\tau_{\text{wall}}} + \frac{1}{\tau_{\text{leak}}} + \frac{1}{\tau_{\text{vacuum}}}}_{\rightarrow 0 \text{ (experiment)}} + \dots$$

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

$$\longrightarrow \frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{\tau_{\beta}}$$

Необходимо **относительное измерение** числа оставшихся в ловушке нейтронов

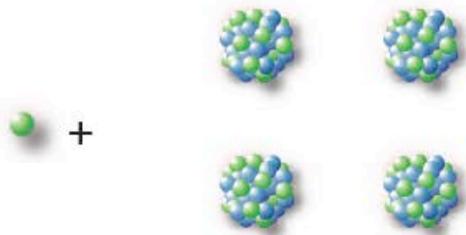
Время жизни нейтрона



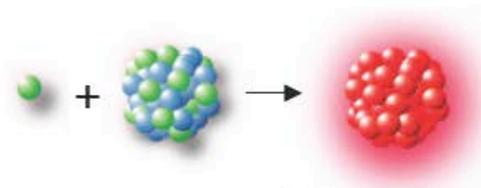
2017
PDG $\tau_n = (880.2 \pm 1.0) \text{ s}$

Реакции под действием нейтронов

Рассеяние в
конденсированных
средах

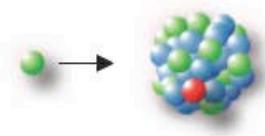


Реакции с
образованием
составного ядра



$$\tau \sim 10^{-16}$$
$$E_n < 10 \text{ MeV}$$

Прямые
ядерные
реакции



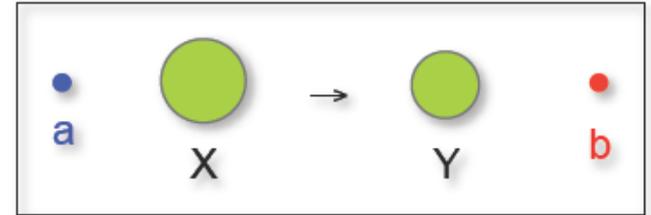
$$\tau \sim 10^{-22}$$
$$E_n > 10 \text{ MeV}$$



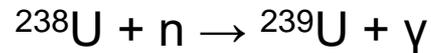
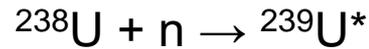
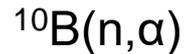
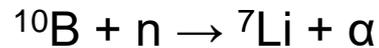
Реакции под действием нейтронов

Реакция:

- $X + a \rightarrow Y + b$
- $X(a,b)Y$
- $X(a,b)$



Примеры эквивалентных обозначений:



Сечение реакции σ , выражается в барн, 1 барн = 10^{-28} м²

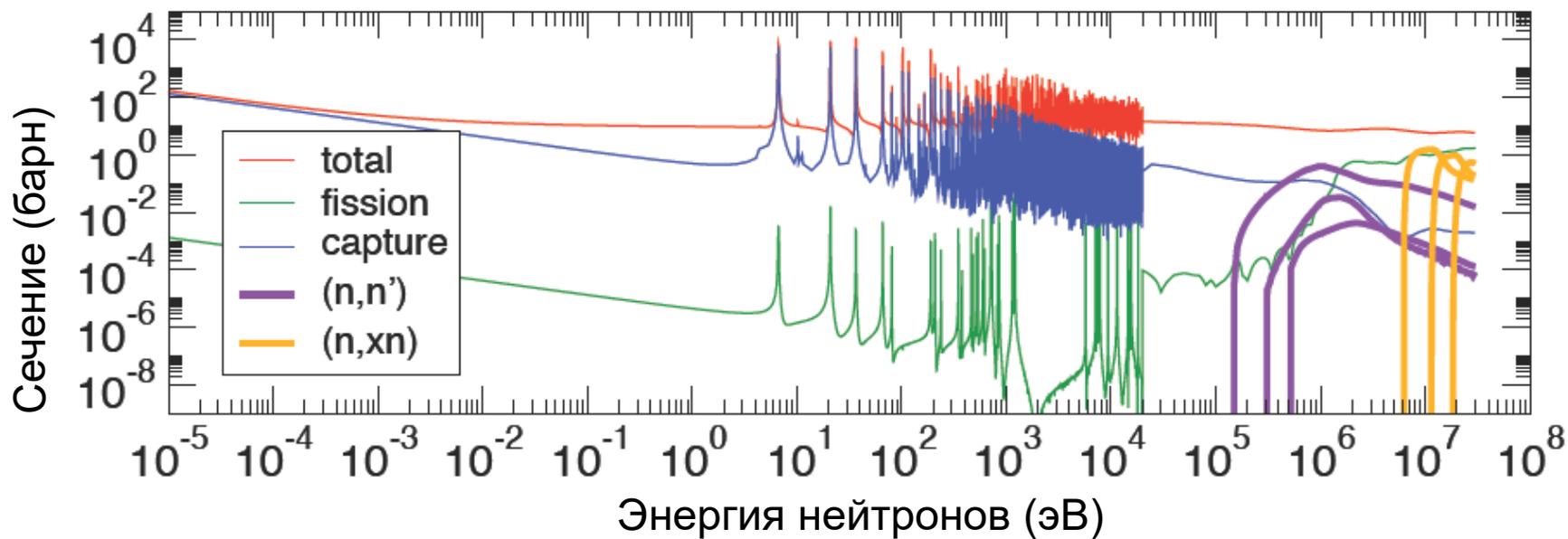
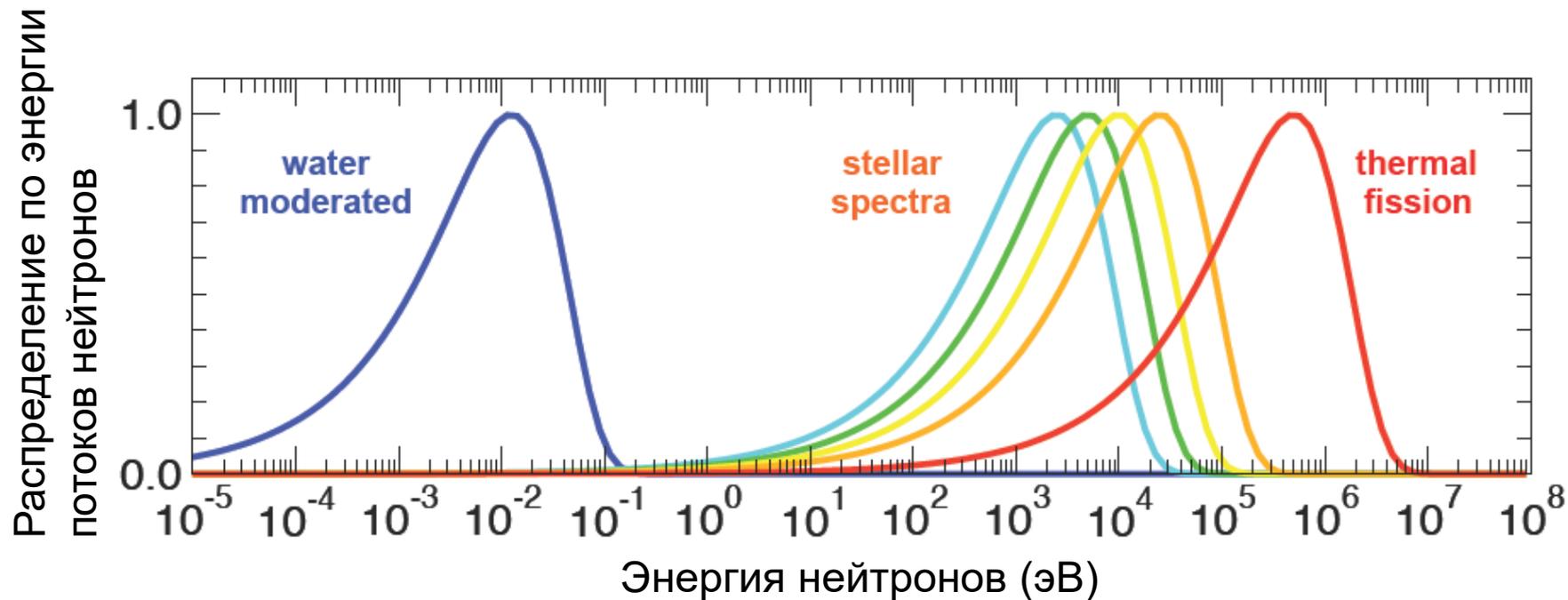
Ядерные реакции под действием нейтронов:

- 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 $0,1 < \sigma_{\text{тепл}} < 10^6$ 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: $n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + p$; $\sigma_{\text{тепл}} = 5400$ барн $n + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{14}\text{C} + p$; $\sigma_{\text{тепл}} = 1,73$ барн
Испускание α -частиц (n,α)	Наиболее важные реакции: $n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^3\text{H} + \alpha$; $\sigma_{\text{тепл}} = 945$ барн $n + {}^{10}\text{B} \rightarrow {}^7\text{Li} + \alpha$; $\sigma_{\text{тепл}} = 3840$ барн
Испускание нейтронов ($n,2n$)	Пороговый процесс ($\sim 10\text{--}15$ МэВ). Сечение порядка нескольких десятых барн
Деление (n,f)	В основном пороговый процесс. Сечение очень мало, исключая отдельные случаи (${}^{235}\text{U}$, ${}^{238}\text{U}$ и тд)



Нейтронные волны в среде

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

$$\lambda \geq 10^{-8} \text{ см}$$

$$\lambda = 10^{-8} \text{ см}$$

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

холодные
нейтроны

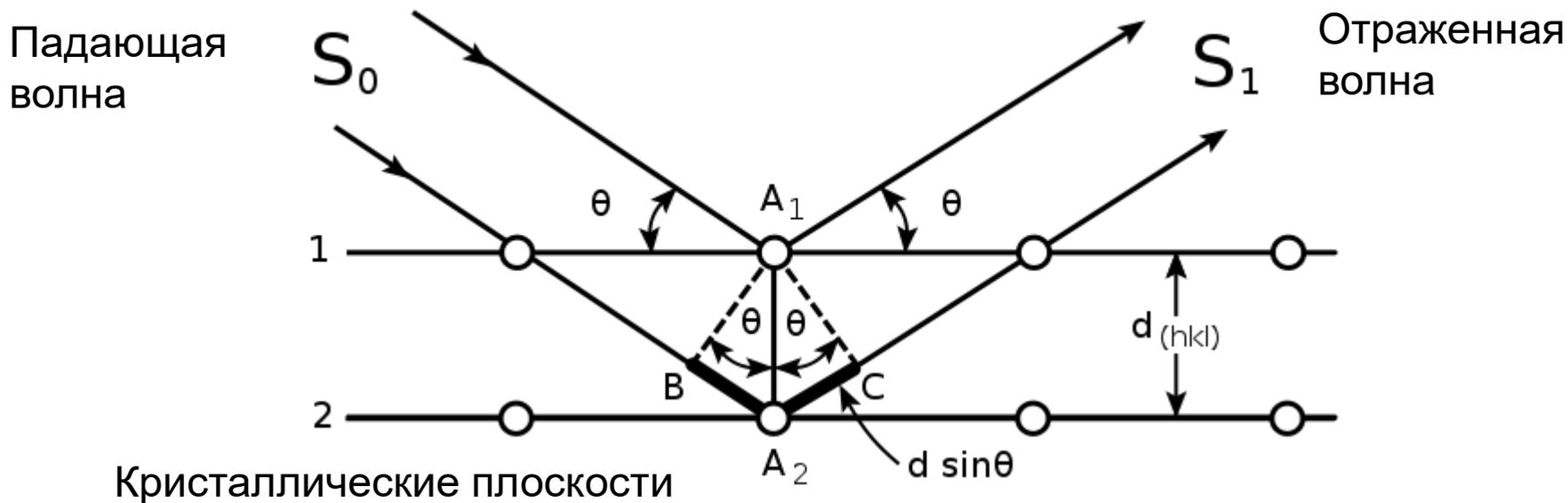
$$E_\gamma = cp_\gamma = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} = 12,5 \text{ кэВ}$$

рентгеновское
излучение

Нейтронная оптика

Дифракционное рассеяние

Условие Брэгга-Вульфа



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

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

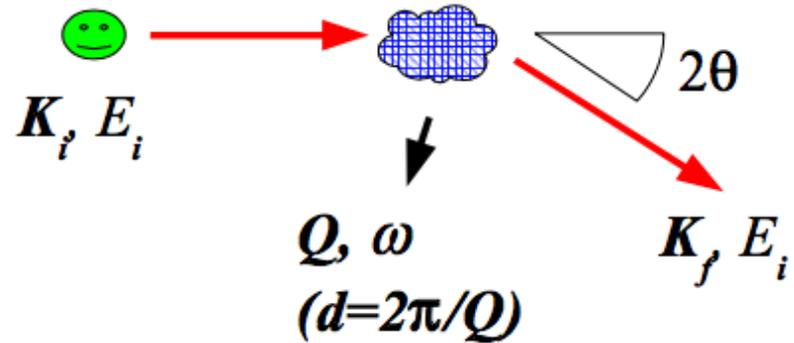
1. Зависимость рассеяния от взаимной ориентации спина нейтрона и спина ядра
2. Различие рассеяния для разных изотопов одного элемента

Нейтронная оптика

Правила отбора

$$K_f = K_i + Q$$

$$E_f = E_i + \omega$$



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)

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

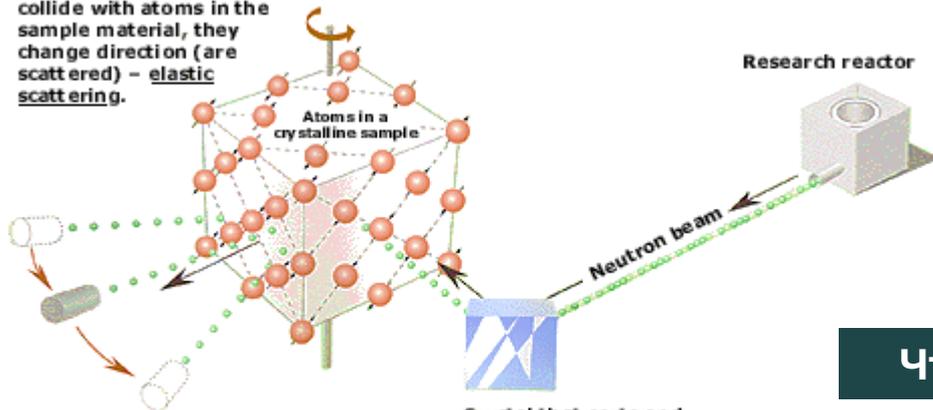
Динамический структурный фактор $S(Q, \omega)$ несет информацию о материале (положение атомов – молекул, их движение, формирование доменов и тд)

Нобелевская премия по физике 1994

Где атомы находятся?

Упругое рассеяние

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



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.

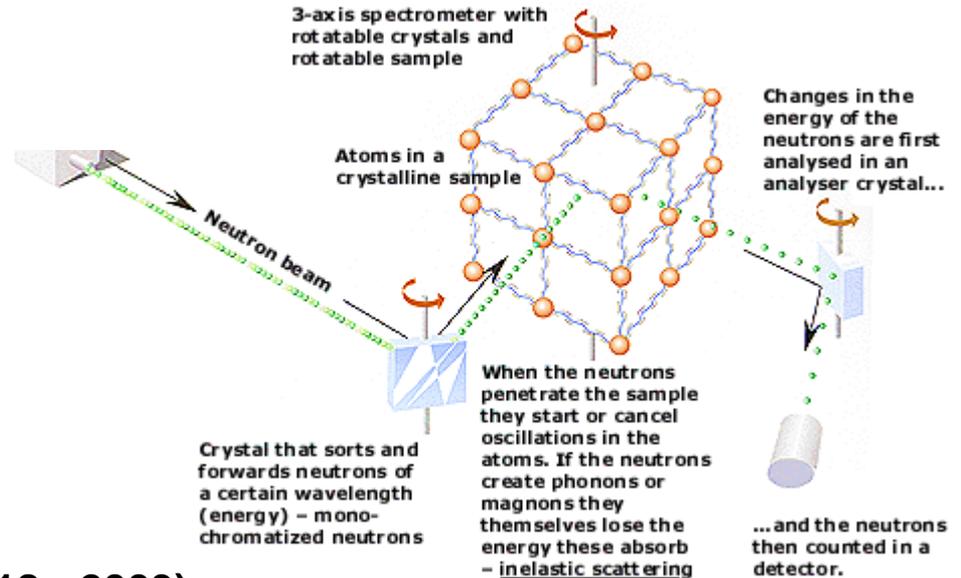
Crystal that sorts and forwards neutrons of a certain wavelength (energy) – monochromatized neutrons

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



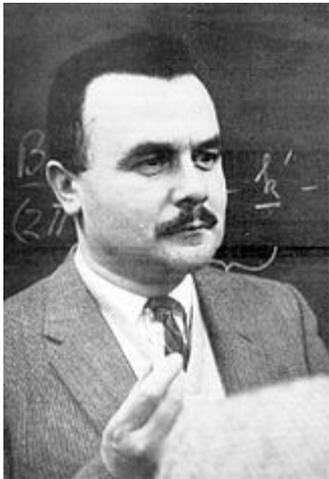
Что атомы делают?

3-axis spectrometer with rotatable crystals and rotatable sample



Бертрам Брокхауз (1918 - 2003)
За создание нейтронной спектроскопии

Неупругое рассеяние



Источники нейтронов

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



Объединенный
институт ядерных
исследований

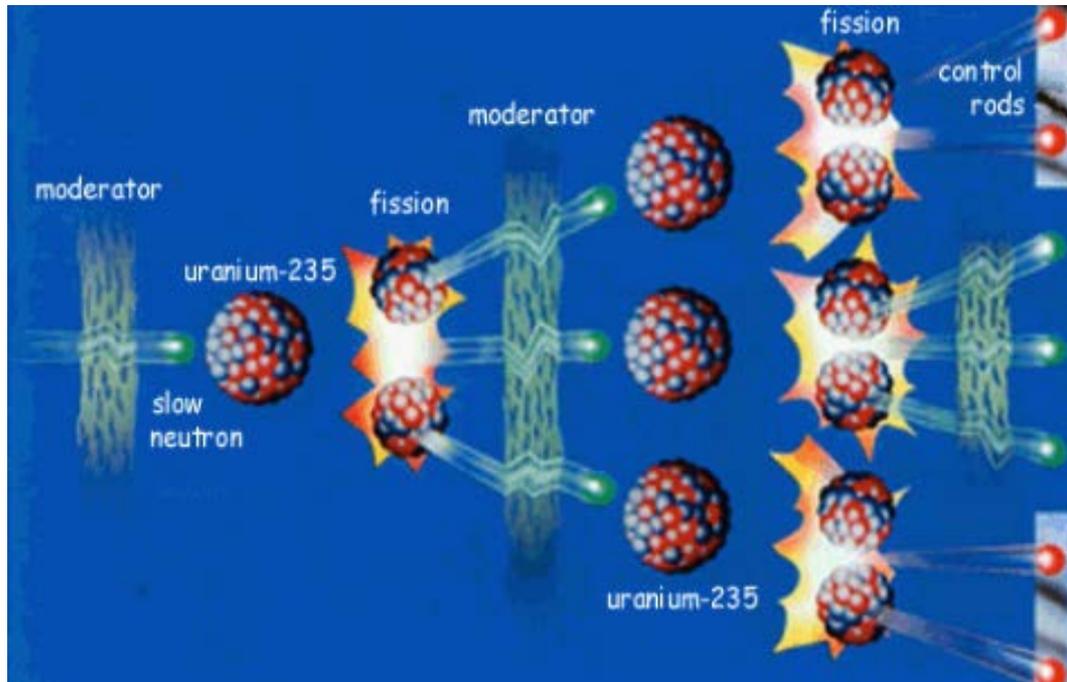


Лаборатория нейтронной
физики имени И.М. Франка



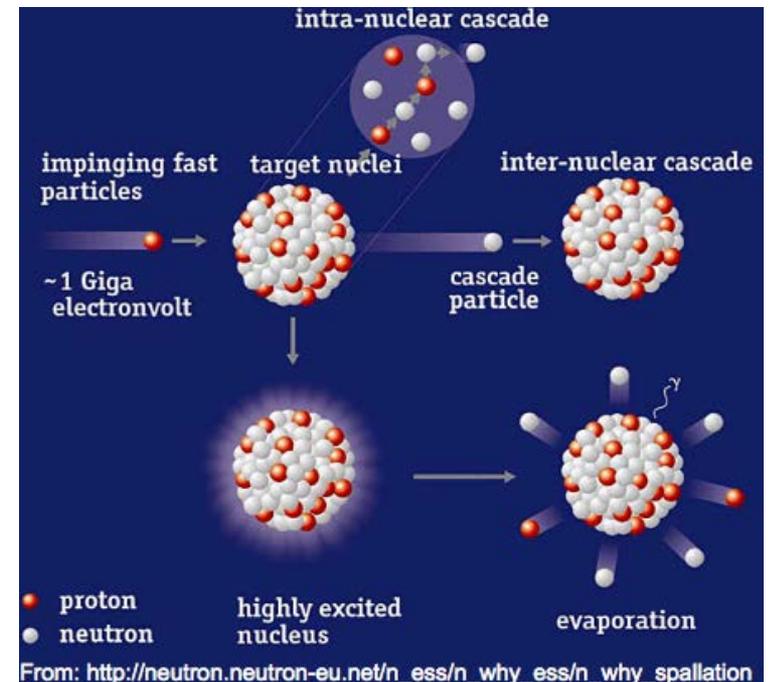
Источники нейтронов

Ядерные реакторы
(цепная реакция деления)



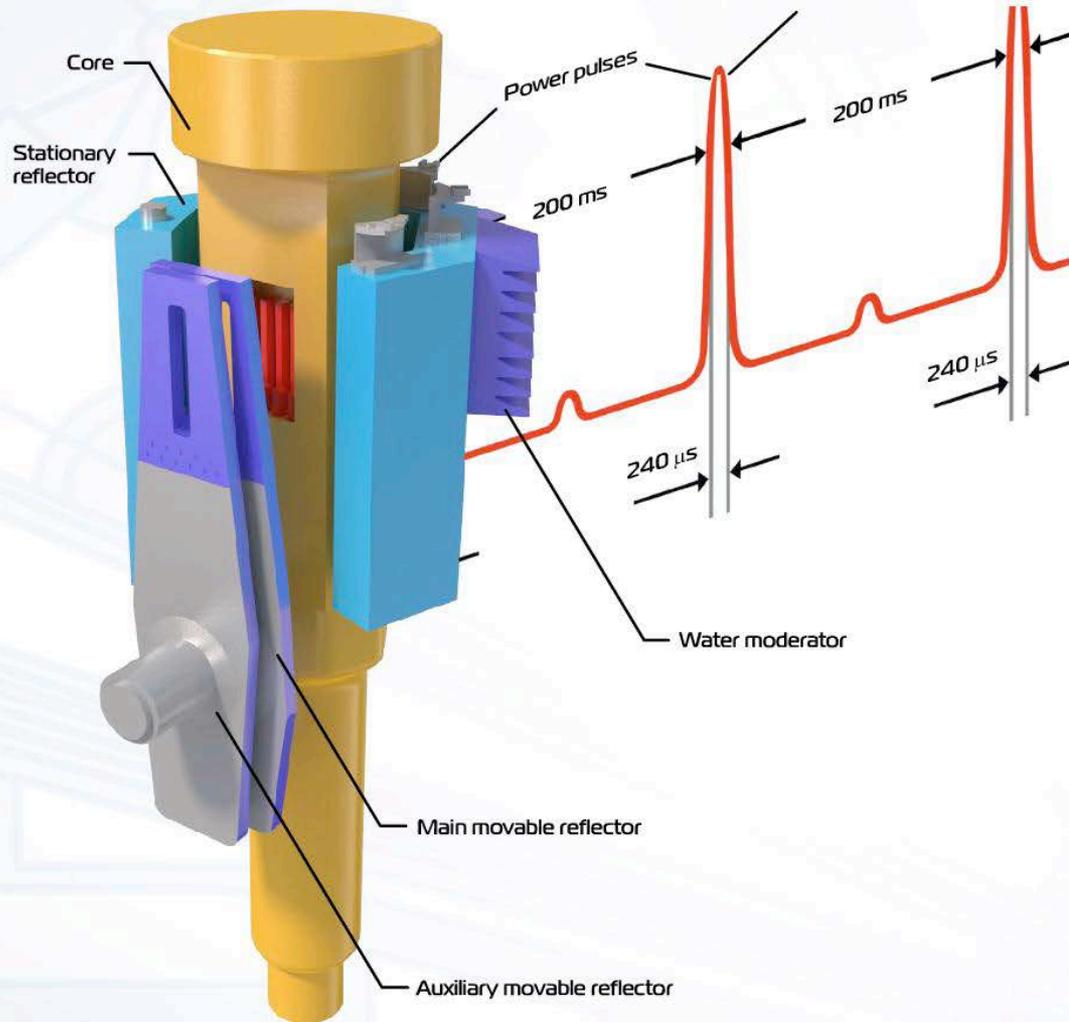
~2-3 нейтрона

Источники нейтронов
на основе ускорителей



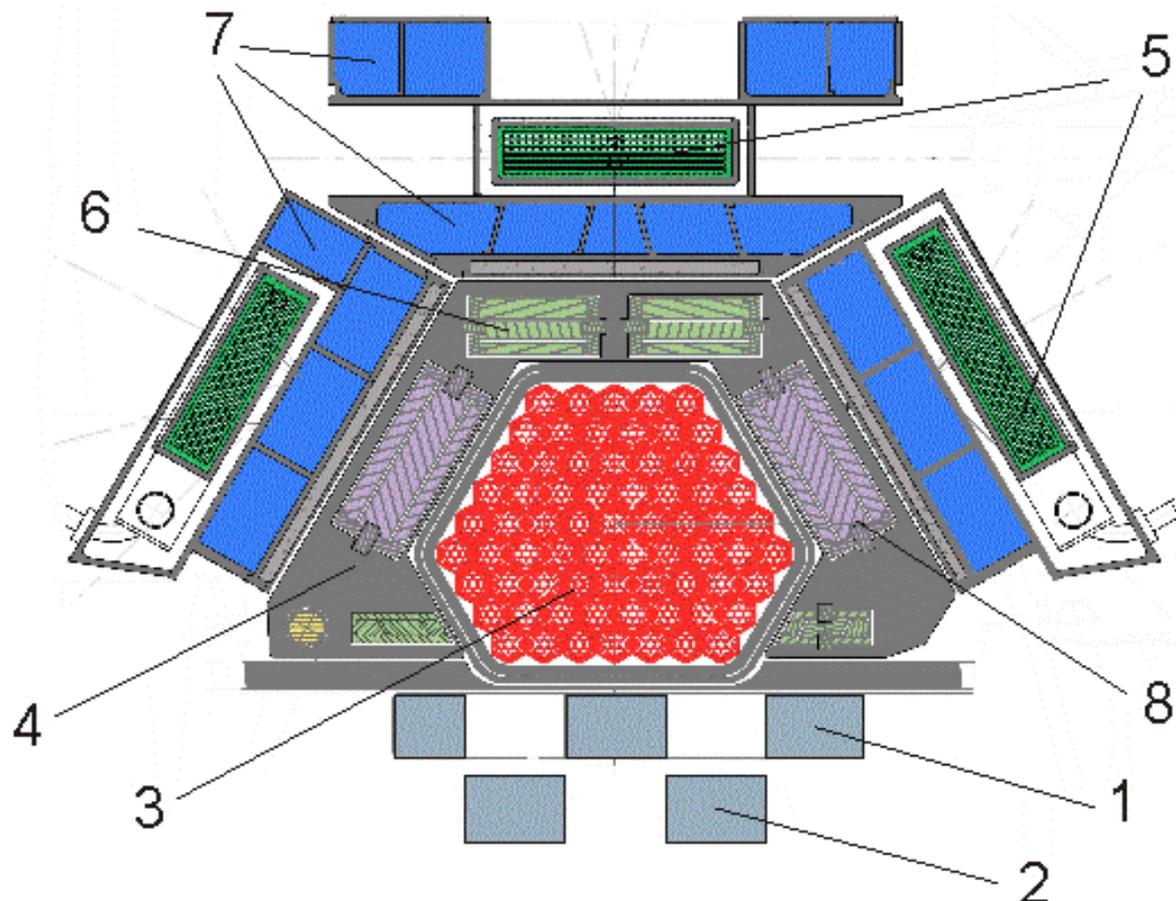
~20-30 нейтронов

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
Background, %	7.5
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.

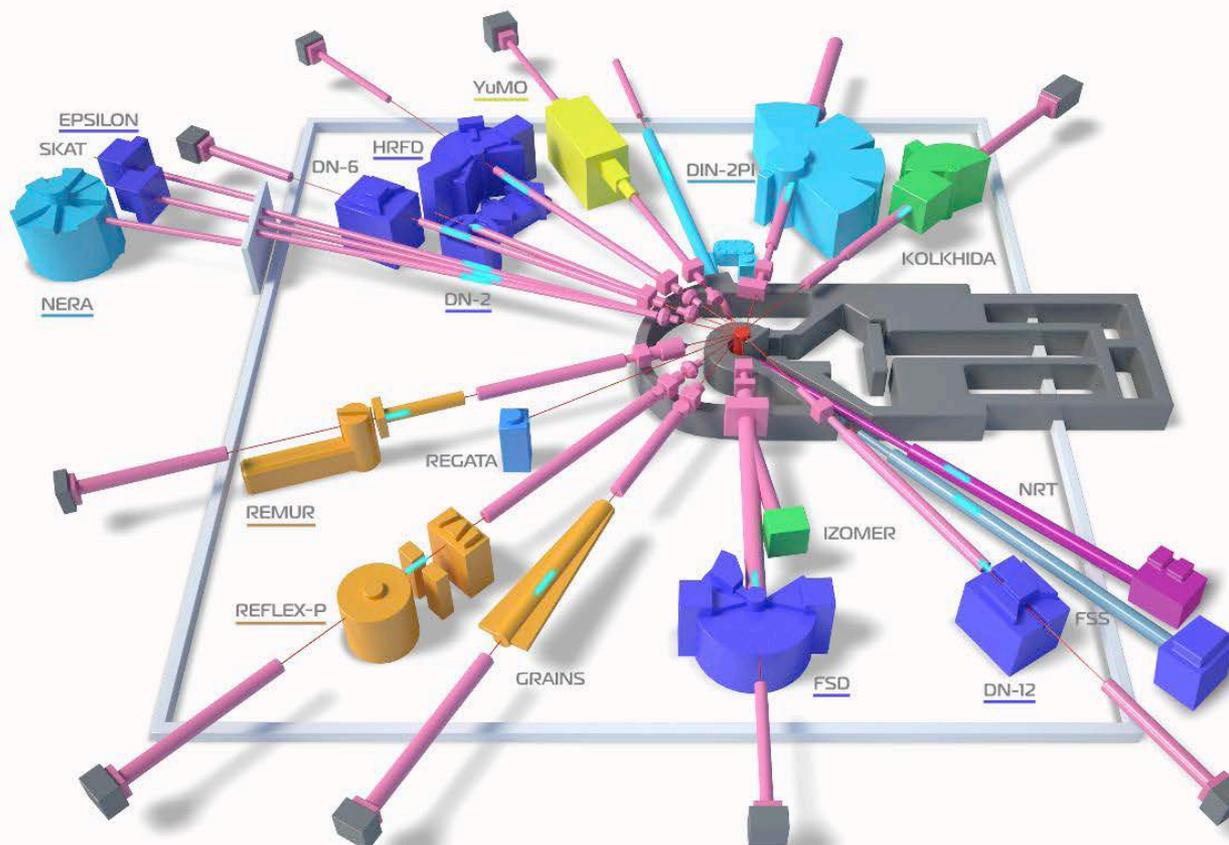


1.Главный подвижный отражатель,
 2. Второй подвижный отражатель,
 3. Топливная сборка,
 4. Стационарный отражатель,

5. Холодные замедлители,
 6. Система безопасности,
 7.Водяные замедлители,
 8.Стержни управления;

Experimental facilities

MAIN MENU



-  **Diffraction**
DN-2, DN-12, DN-6, FSD, FSS, HRFD, SKAT, EPSILON
-  **Small-angle scattering**
YuMO
-  **Reflectometry**
GRAINS, REFLEX-P, REMUR
-  **Inelastic scattering**
DIN-2PI, NERA
-  **Nuclear Physics**
IZOMER, KOLKHIDA
-  **Neutron Activation Analysis**
REGATA
-  **Neutron imaging**
NRT

Виртуальная экскурсия на спектрометры ИБР-2М
<http://uc2.jinr.ru/pano/Inf/>

Нейтронная физика



Активационный анализ

Строительство IREN

Ion beam analysis

Нейтроны в космосе

Прикладные

Фундаментальные свойства нейтрона

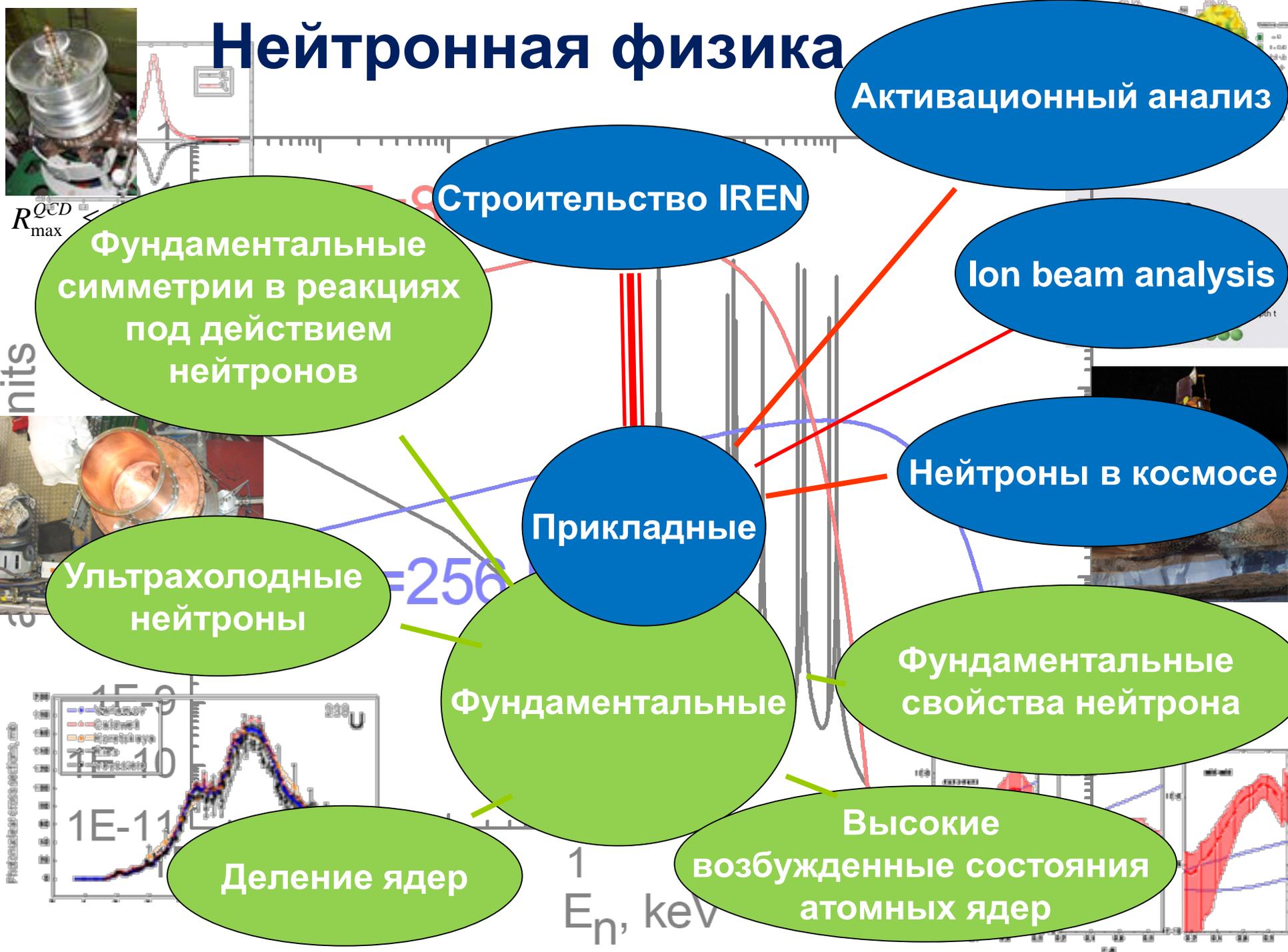
Фундаментальные

Высокие возбужденные состояния атомных ядер

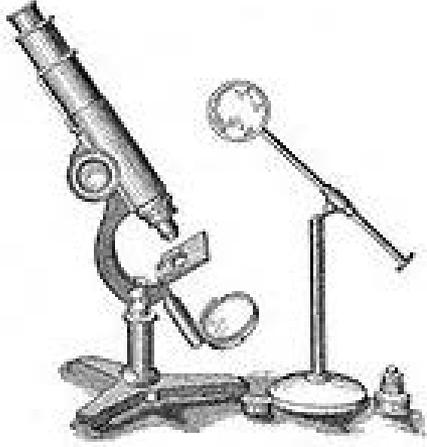
Деление ядер

Ультрахолодные нейтроны

Фундаментальные симметрии в реакциях под действием нейтронов



Нейтронная оптика



Оптический микроскоп



Электронный микроскоп
Разрешение до ~ 5 нм



A fish-eye perspective of the new BioRef neutron reflectometer at the neutron source BER2 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 $\sim 0,4$ нм

Tomography Result: Virtual Reality



5 mm



Micro-Tomography
with cold neutrons

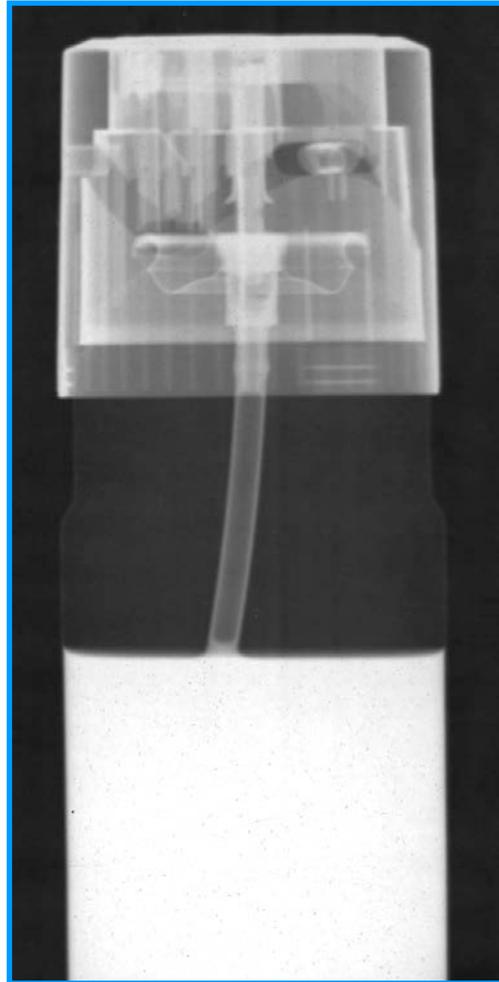
from E. Lehmann, PSI



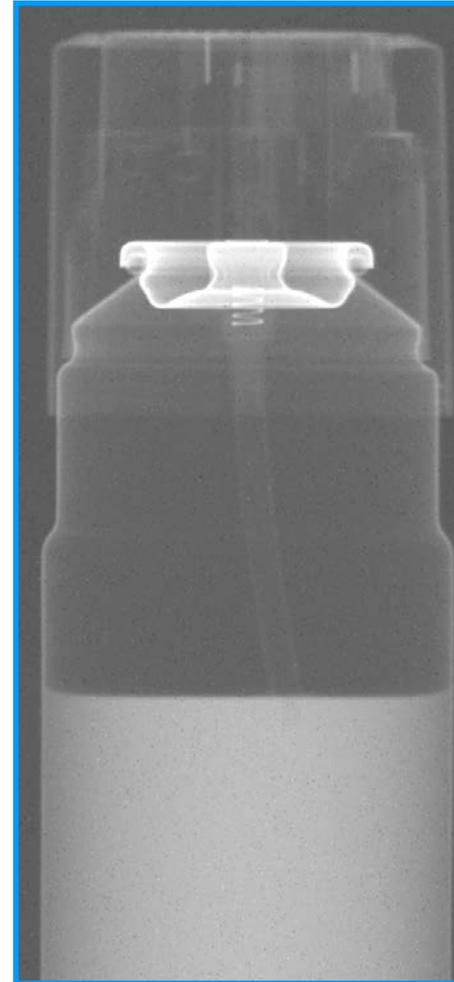
Neutron imaging
NRT

Нейтроннография

Нейтроны



Гамма лучи



Различный контраст для металла и пластика

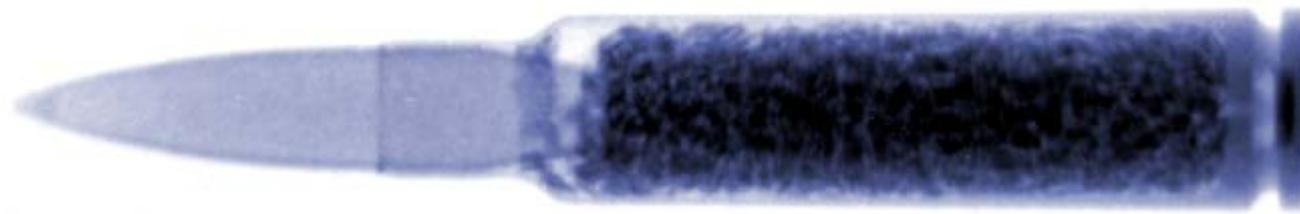
Neutron imaging

NRT

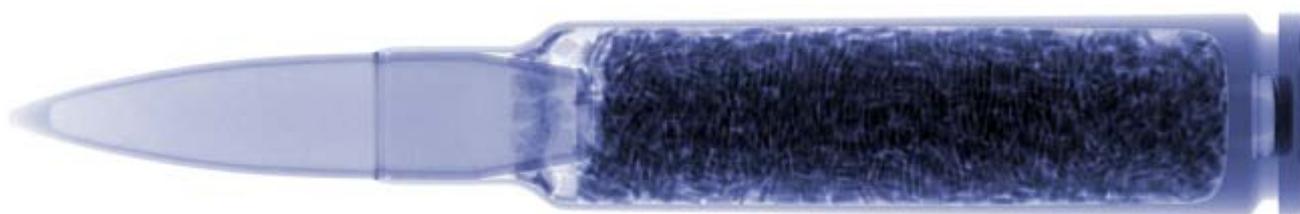
Нейтронография



Гамма-лучи



Нейтронная
радиография
(обычное
разрешение)



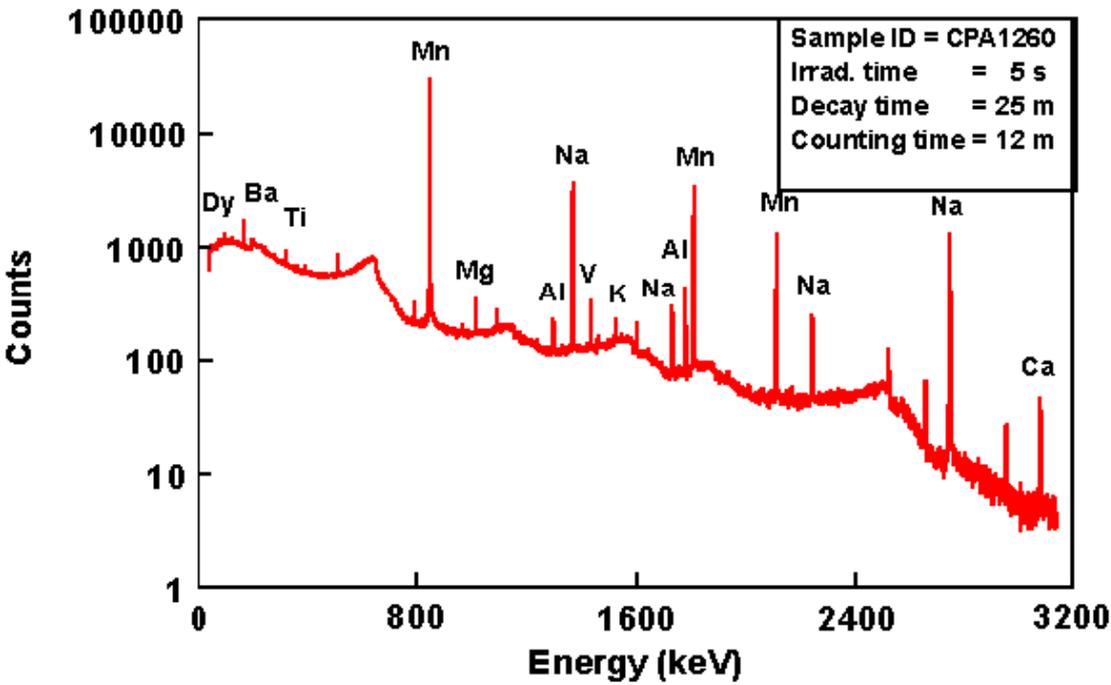
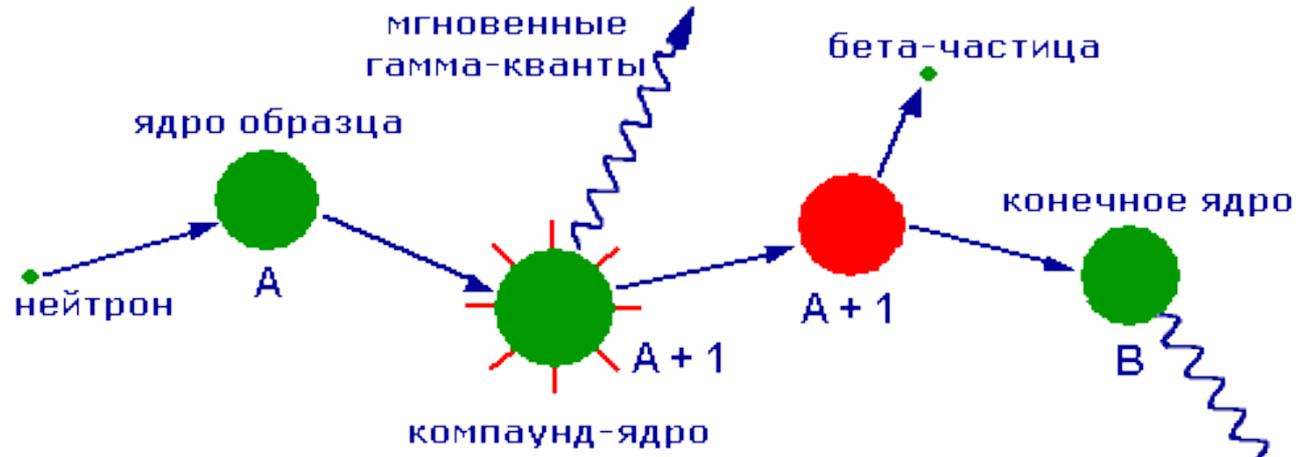
Нейтронная
радиография
(высокое разрешение)



Нейтронная томография
(высокое разрешение)
вертикальный слой 13
мкм

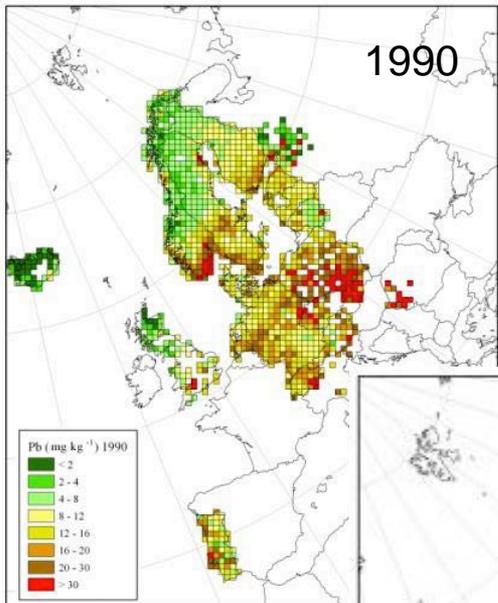


Нейтронно-активационный анализ

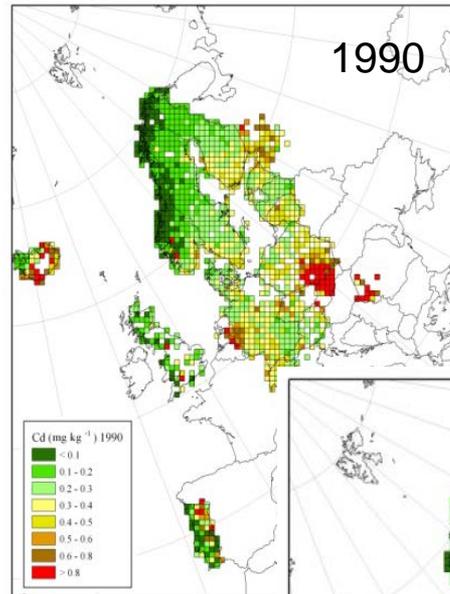
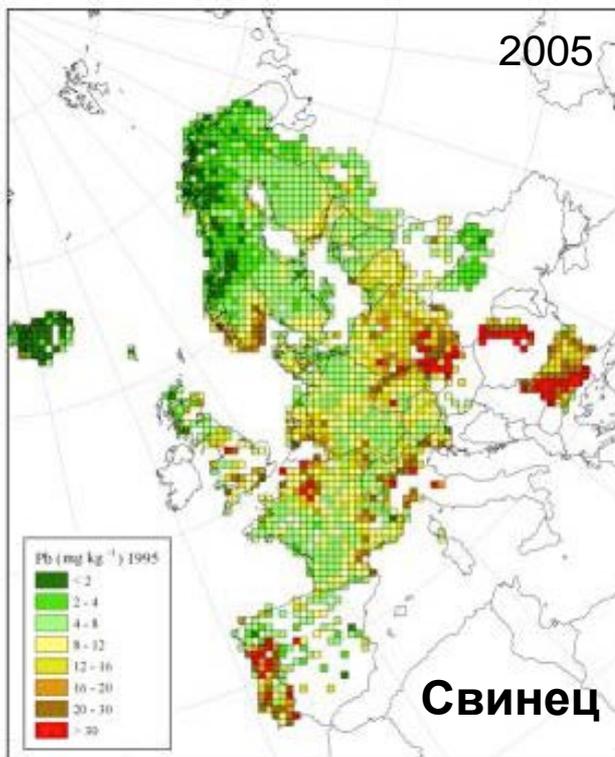




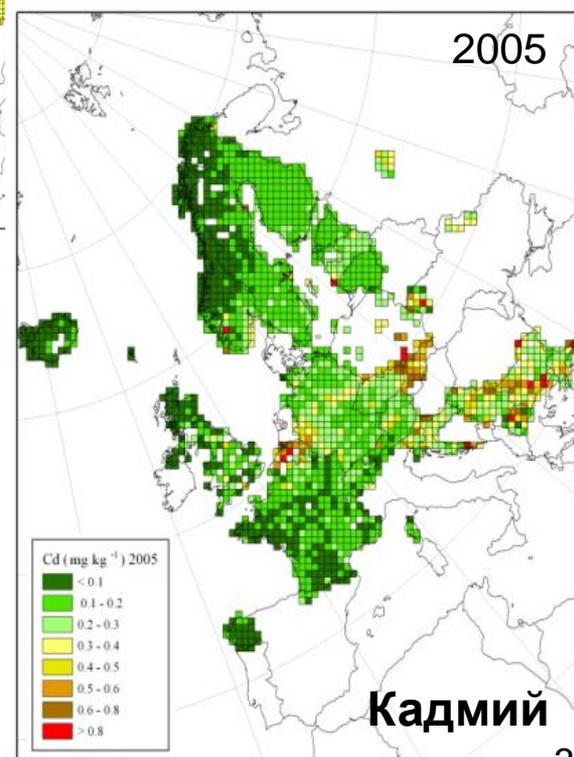
Нейтронно-активационный анализ



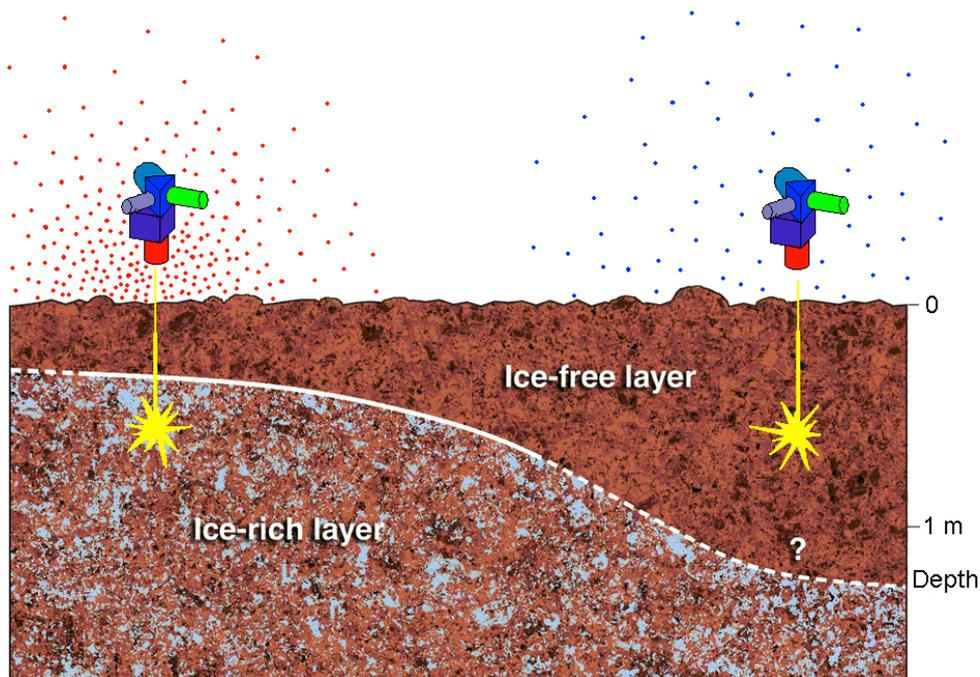
↓ 72%



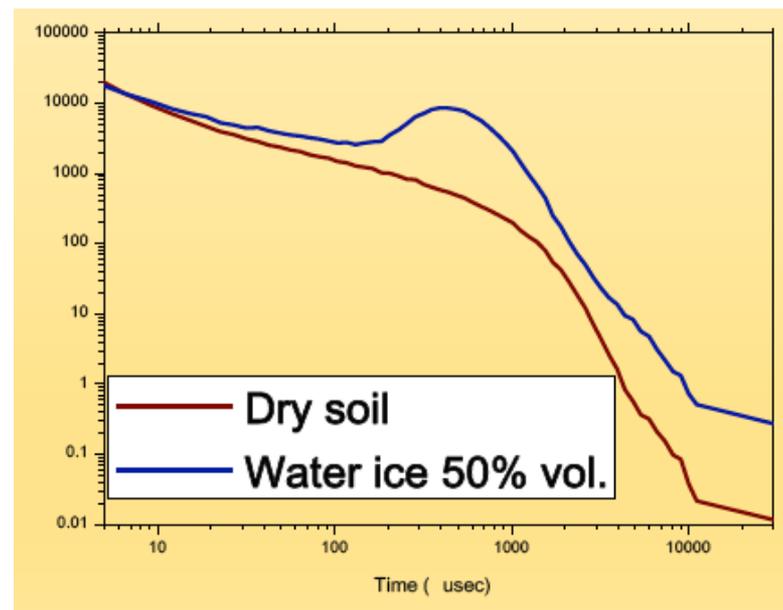
↓ 52%



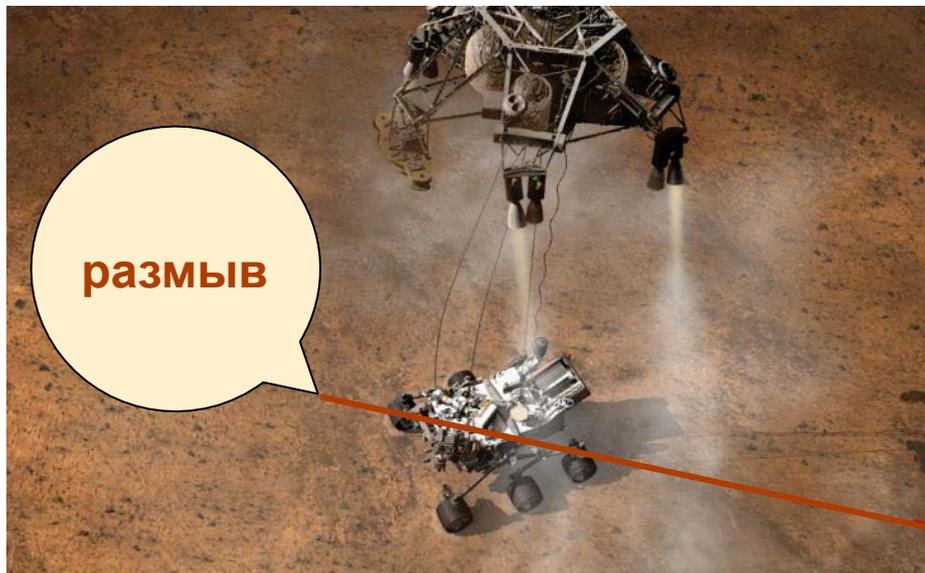
Dynamic Albedo of Neutrons (DAN): русский детектор на борту Curiosity Rover



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.



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

