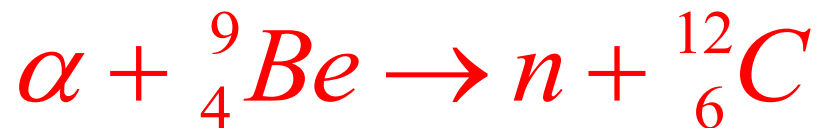
A detailed illustration of a man in a red robe peering through a large, curved, star-patterned structure, possibly a telescope or a window, looking out over a landscape with a tree and a sun with a face.

**Ядерная физика и  
Человек**



# Нейтронная физика

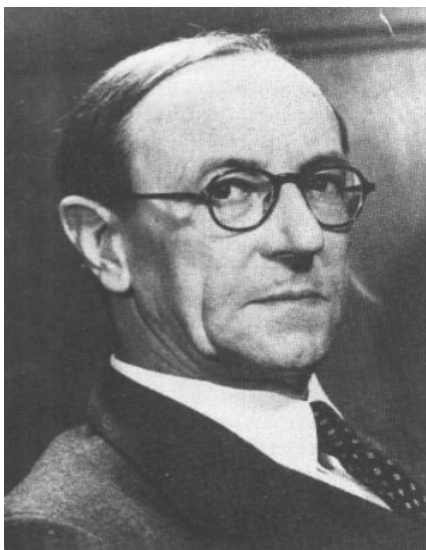
# 1932 Открытие нейтрона



## Possible Existence of a Neutron

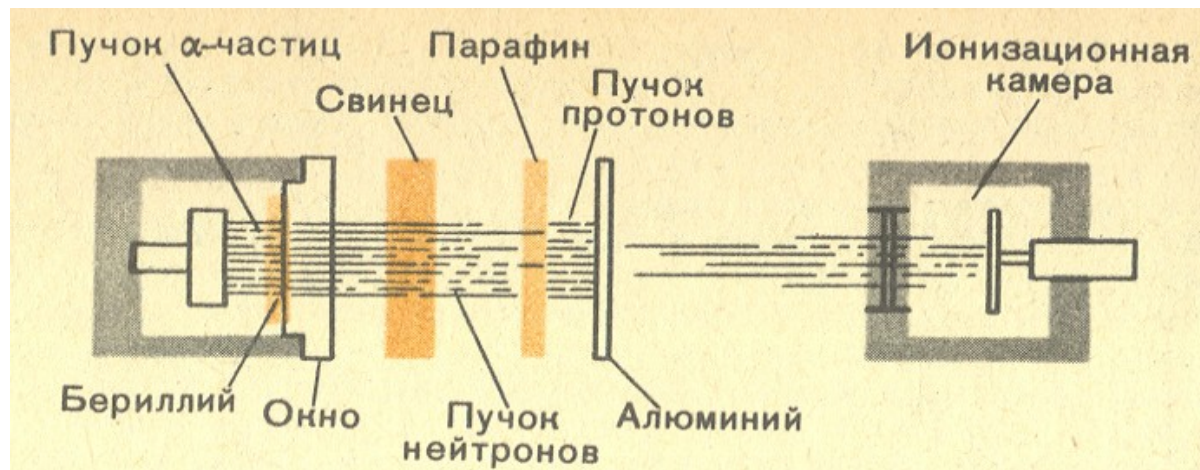
It has been shown by Bothe and others that beryllium when bombarded by  $\alpha$ -particles of polonium emits a radiation of great penetrating power, which has an absorption coefficient in lead of about  $0.3 \text{ (cm.)}^{-1}$ . Recently Mme. Curie-Joliot and M. Joliot found, when measuring the ionisation 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



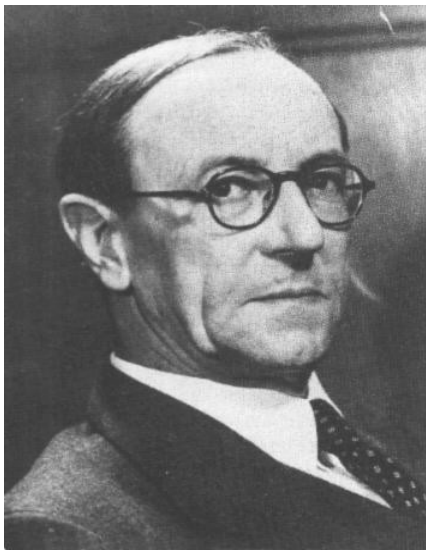
**James Chadwick**

(1891-1974)



**Нобелевская премия по физике**

**1935 г.** — Дж.Чедвик За открытие нейтрона



**James Chadwick**  
(1891-1974)

## 1932 Открытие нейтрона

В 1930–1932 гг. продолжая начатые Резерфордом эксперименты, В. Боте и Г. Беккер при облучении тонких фольг из бериллия  $\alpha$ -частицами обнаружили сильно проникающее излучение, состоящее из нейтральных частиц. Первоначально выдвинутой супругами Кюри гипотеза о том, что это фотоны высоких энергий, не выдержала проверки. Лишь в 1932 г. Д. Чедвик показал, что это новая, до сих пор неизвестная нейтральная частица с массой, приблизительно равной массе протона. Обнаруженная частица была названа **нейтроном**. Сразу после открытия нейтрона Д. Иваненко и В. Гейзенберг независимо друг от друга выдвинули гипотезу, что атомное ядро состоит из нейтронов и протонов.

# Нейтроны в науке...

- «Лаборатория» для фундаментальных исследований

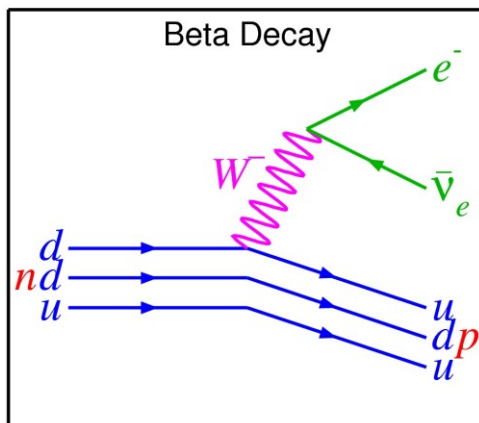
	Протон $p$	Нейтрон $n$
Спин $J^P$	$1/2^+$	$1/2^+$
Изоспин $I$	$1/2$	$1/2$
Масса (а.е.м.)	$1.00727646688 \pm 0.00000000009 u$	$1.0086649159 \pm 0.00000000005 u$
Масса (МэВ/ $c^2$ )	$938.272081 \pm 0.000006$	$939.565413 \pm 0.000006$
Среднее время жизни $\tau$	$> 10^{33}$ лет	<b><math>879.4 \pm 0.6</math> с</b>
Магнитный момент $\mu$	$2.792847351 \pm 0.000000009 \mu_N$	$-1.9130427 \pm 0.00000005 \mu_N$
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 $q$ ( $e$ – заряд электрона)	$1e$	$(-0.2 \pm 0.8) \times 10^{-21} e$

# Нейтроны в науке...

- «Лаборатория» для фундаментальных исследований

Характеристики нейтрона известны с высокой точностью. Его масса близка к массе протона, он электрически нейтрален, однако, благодаря пространственному распределению заряда, он обладает магнитным моментом.

$$n \rightarrow p + e + \nu, \quad Q_\beta = m_n c^2 - m_p c^2 - m_e c^2 = 0,78 \text{ МэВ}$$



Нейтрон распадается в результате бета-распада, его время жизни  **$879.4 \pm 0.6$  с**. Точное экспериментальное определение его времени жизни имеет важное значение и для изучения формирования звезд, и для изучения взаимодействия кварков.

# Нейтроны в науке...

- Нейтроны - идеальный зонд для исследования материи:
  - Отсутствие электрического заряда  
(глубокое проникновение в вещество);
  - сильное взаимодействие  
(детектирование изотопов, высокая чувствительность к легким ядрам);
  - наличие магнитного момента  
(изучение магнитных структур);
  - нейтроны низких энергий  
(изучение кристаллических структур)

# Нейтроны ... в технологиях

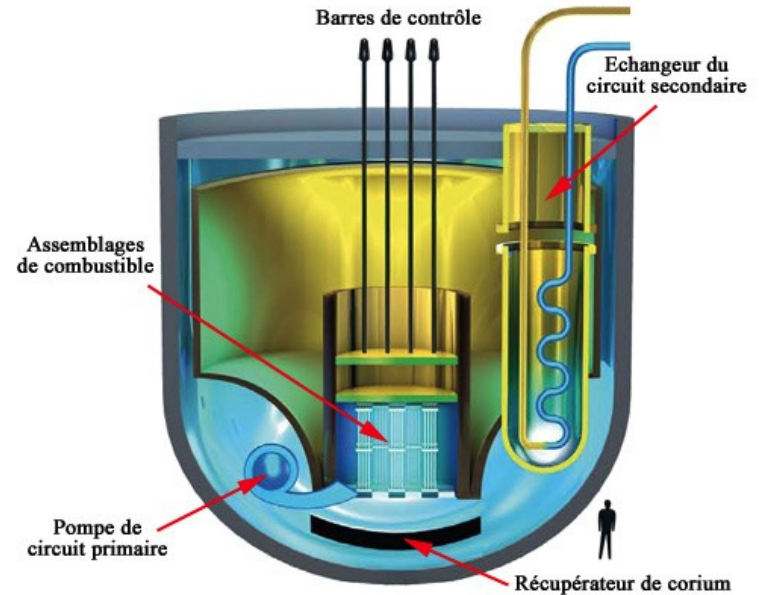
- **Реакции деления**  
(энергетика)
- **Рассеяние нейтронов**  
(исследование вещества)

- **Недостатки:**

- нестабильность свободного нейтрона

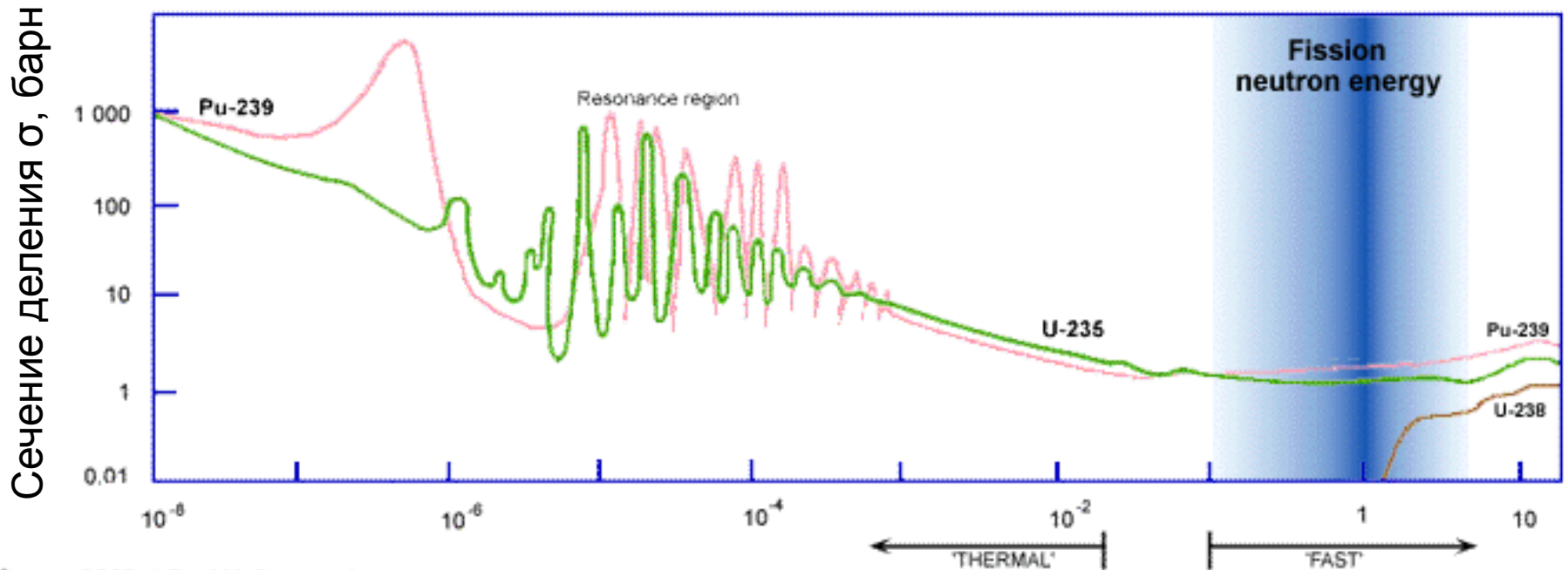
$$\tau \approx 880 \text{ с}$$

- интенсивные источники нейтронов - сложные и дорогие технические устройства
- отсутствие заряда (сложно использовать, детектировать)
- Высокая проникающая способность (трудно контролировать фон)
- Некоторые изотопы (В, Cd, Gd,..) сильно поглощают нейтроны





# Классификация нейтронов



Sources: OECD / NEA 1989, Plutonium fuel - an assessment.  
Taube 1974, Plutonium - a general survey.  
1 barn =  $10^{-28}$  m<sup>2</sup>, 1 MeV =  $1.6 \times 10^{-13}$  J

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:  $\lambda = h / p$

Длина волны, ангстремы

атом

ядро

$9 \times 10^2$     $9 \times 10^1$     $9 \times 10^0$     $9 \times 10^{-1}$     $9 \times 10^{-2}$     $9 \times 10^{-3}$     $9 \times 10^{-4}$     $9 \times 10^{-5}$



Энергия, эВ

$< 3 \cdot 10^{-7}$  эВ



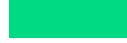
Ультрахолодные

$< 0,025$  эВ



Холодные

$< 0,5$  эВ



Тепловые

$< 1$  кэВ



Резонансные

$< 100$  кэВ

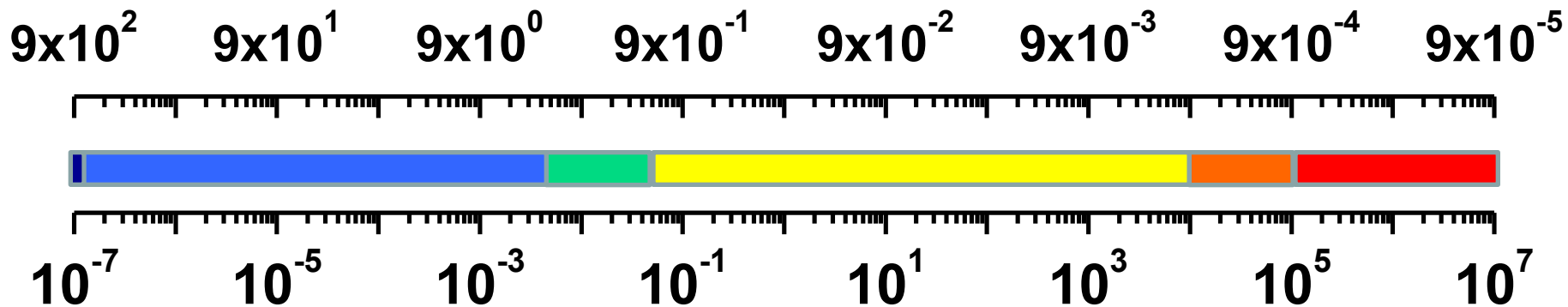


Промежуточные



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

# Классификация нейтронов

В спектре нейтронов выделяют быстрые нейтроны, промежуточные, резонансные, тепловые, холодные и ультрахолодные. Эти группы определяются взаимодействием нейтронов данных энергий с веществом.

Для быстрых нейтронов характерны реакции с выбиванием лёгкой частицы из ядра; в области резонансных нейтронов зависимость сечения взаимодействия с ядром носит резонансный характер; тепловые нейтроны – нейтроны, находящиеся в тепловом равновесии с веществом, длина волны таких нейтронов соизмерима с расстояниями между ядрами в твёрдых телах и жидкостях.

Нейтроны этих энергий используются при изучении конденсированного состояния вещества.

При дальнейшем увеличении длины волны нейтронов наблюдается резкое уменьшение сечения взаимодействия с веществом. За счет увеличения длины волны деБройля холодного нейтрона становится таким «большим», что не «различает» атомную структуру вещества. Взаимодействие холодных нейтронов с веществом описывается через введение некоторого среднего эффективного потенциала, зависящего от концентрации ядер и их свойств. Метод малоуглового рассеяния холодных нейтронов широко применяется в биологии и физики наноструктур.

Когда энергия нейтронов становится меньше величины эффективного потенциала, нейтроны не могут проникнуть внутрь вещества и полностью отражаются от границы. Такие нейтроны называются ультрахолодными.



# УЛЬТРАХОЛОДНЫЕ НЕЙТРОНЫ

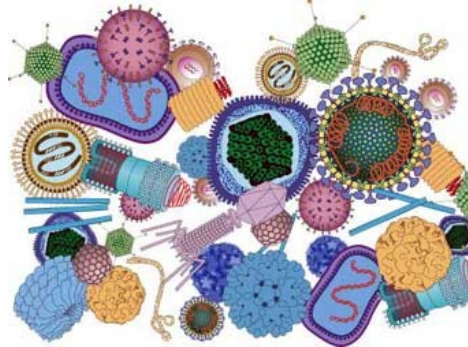
# Ультрахолодные нейтроны (УХН)

Скорость  
 $V \sim 5 \text{ м/с}$     20 км/ч



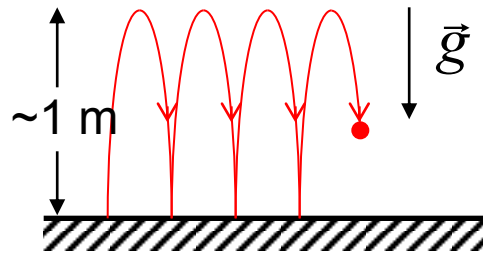
Можно попытаться  
обогнать их на  
велосипеде

Длина волны де Бройля  
 $\lambda \sim 500 \text{ \AA}$     50 нм



Типичный размер  
вирусов

Энергия нейтронов порядка  
100 нэВ, позволяет им  
пониматься в  
гравитационном поле Земли  
на величину порядка 1 м.



1 см  $\sim 1.02 \text{ нэВ}$   
Температура,  
соответствующая  
данной  
энергии, - 1 мК.

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

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

# История вопроса

1959



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

Исторический факт: Энрико Ферми в своём курсе лекций по ядерной физике, прочитанном в Италии в 1949 году, рассуждая о диффузии нейтронов в веществе, и сравнивая нейтроны в веществе с химическим раствором, говорил : «... в то время как обычные растворы можно хранить в сосуде, к сожалению не существует сосудов способных удерживать нейтроны».

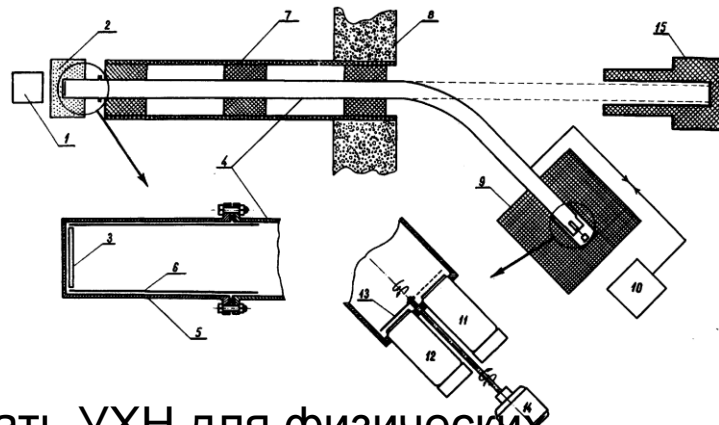
В 1959 году вышла короткая заметка Я.Б.Зельдовича в которой он указал на возможность хранения медленных нейтронов, сделал оценки по времени удержания, плотности накапливаемых нейтронов. Указал на возможность перемещения ловушки с нейтронами от источника для проведения измерений при малом фоне и на основную трудность - получить достаточное количество таких нейтронов.

# История вопроса

1968



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



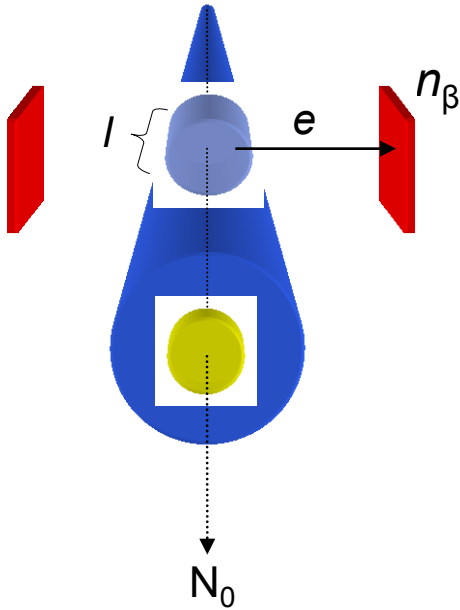
Впервые использовать УХН для физических измерений предложил в 1968 году Ф.Л.Шапиро. Год спустя группа сотрудников лаборатории нейтронной физики ОИЯИ под руководством Шапиро впервые в мире зарегистрировала УХН на импульсном реакторе ИБР в Дубне. На рисунке показана схема эксперимента. УХН должны были дойти до детектора, отражаясь от стен изогнутого нейтропровода, в то время как все остальные нейтроны пролетали через стенки нейтропровода и улавливались защитой. Чтобы убедиться, что регистрируются именно УХН, детектор на некоторое время перекрывался очень тонкой медной фольгой, которая должна была отражать нейтроны и не давать им попасть в детектор. Скорость счёта УХН в первом эксперименте составляла только 1 нейтрон в 100 сек.



# 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

Есть два типа экспериментов для определения времени жизни нейтронов.

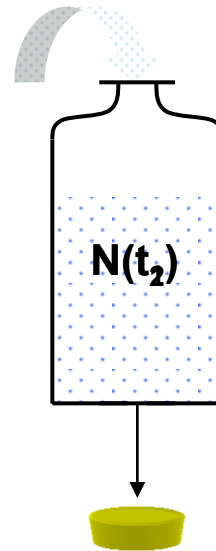
Первый – эксперимент в котором определяется количество распавшихся частиц в пучке холодных нейтронов. Для этой цели регистрируются продукты распада, например электроны. Число регистрируемых электронов связано с временем жизни нейтронов, числом нейтронов в пучке и временем нахождения нейтрона в области наблюдения. Таким образом для определения времени жизни нейтрона необходимо абсолютное измерение двух величин – числа распадов и количества нейтронов в пучке.

# УХН. Время жизни нейтрона

В экспериментах второго типа используется хранение УХН: заполняем бутылку нейтронами и через время  $t_1$  считаем количество оставшихся нейтронов, затем повторяем измерение с другим временем выдержки  $t_2$ . Постоянная времени исчезновения нейтронов из ловушки может быть определена из измеренных величин по простой формуле. Эта постоянная времени связана с распадом нейтрона, а также с дополнительными потерями нейтронов при столкновении со стенками ловушки, на остаточном вакууме в щелях заслонок и т.п. большинство из которых могут быть сделаны в эксперименте пренебрежимо малыми. Таким образом для определения времени жизни необходимо относительное измерение числа оставшихся в ловушке нейтронов.

## Эксперимент с хранением ультрахолодных нейтронов

“UCN bottle”



“что осталось?”

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

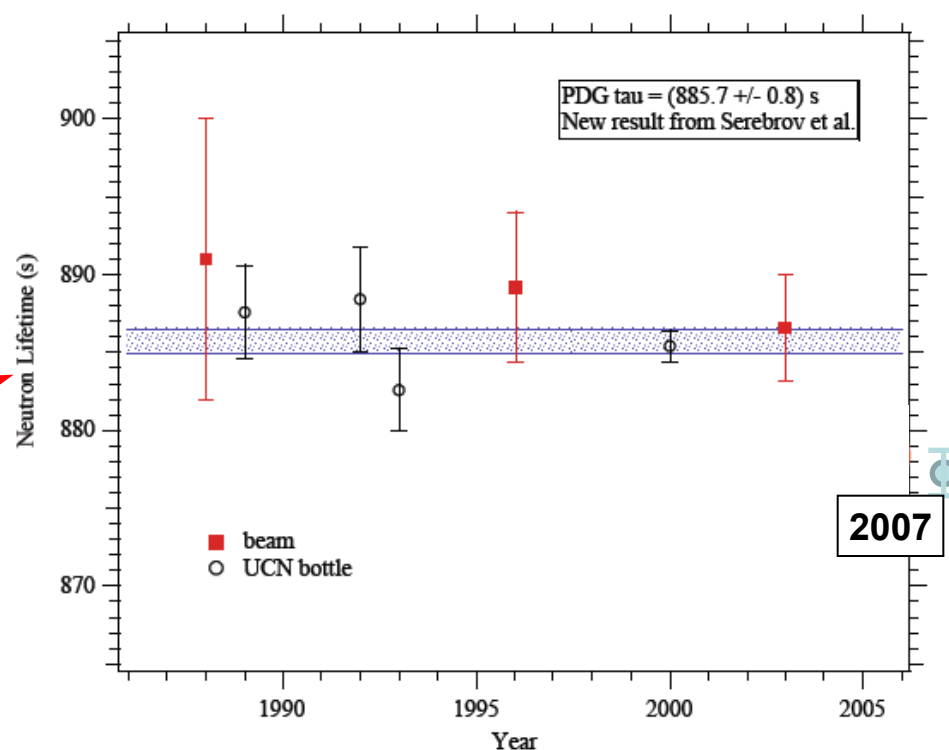
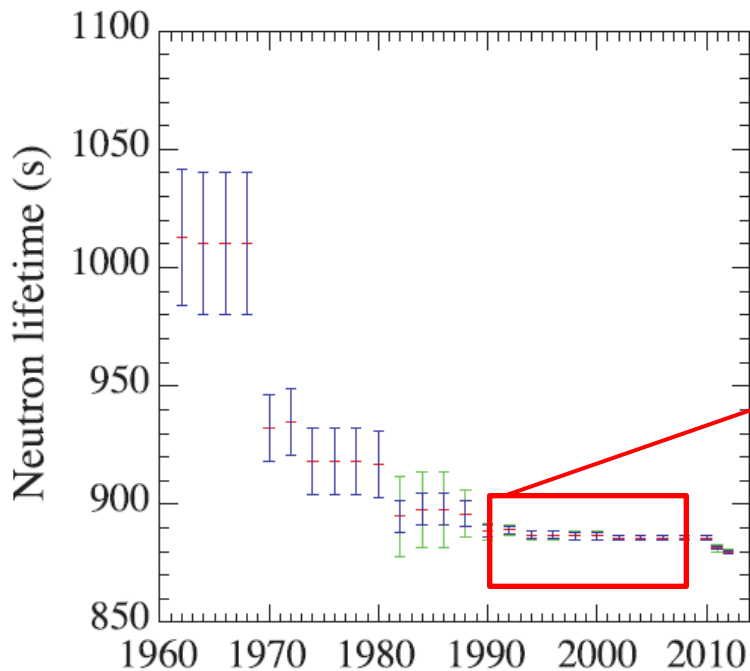
$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{\tau_\beta} + \underbrace{\frac{1}{\tau_{\text{wall}}} + \frac{1}{\tau_{\text{leak}}} + \frac{1}{\tau_{\text{vacuum}}}}_{\rightarrow 0 \text{ (experiment)}} + \dots$$

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

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

Необходимо относительное измерение числа оставшихся в ловушке нейтронов

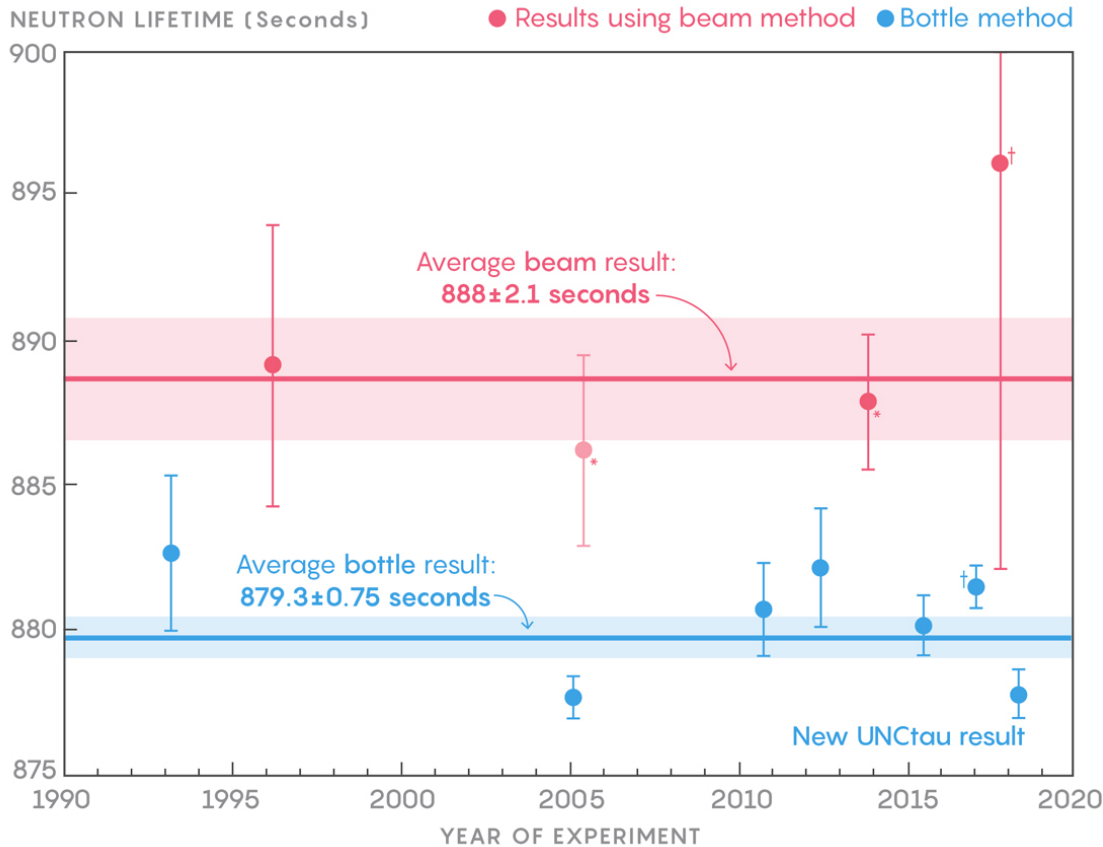
# Время жизни нейтрона



Изменение точности измерений со временем: существенный прогресс наблюдается с 70-х годов когда началось соревнование пучковых и хранительных методов. К 2005 году все наиболее точные результаты находились в согласии.

Однако в 2005 году группа из Гатчины на установке Ковш получила новый результат, отличающийся на 5 ошибок от среднемирового.

# Время жизни нейтрона



**2020**

$$\text{PDG } \tau_n = (879.4 \pm 0.6) \text{ s}$$

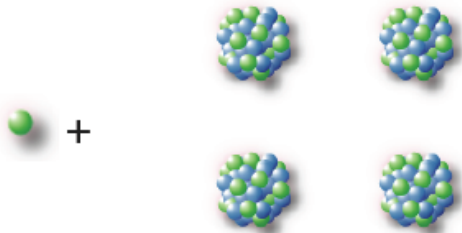
Затем было проведено большое число все более точных хранительных экспериментов. В итоге, в 2013 году PDG сдвинуло среднемировое значение сразу на несколько ошибок. При этом группа, измеряющая время жизни пучковым методом, уменьшила ошибку и сдвинула свое значение вверх. В результате на сегодняшний день результаты пучковых и хранительных экспериментов расходятся на 9 секунд.



# НЕЙТРОННАЯ ОПТИКА

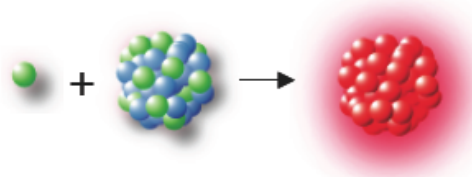
# Реакции под действием нейтронов

Рассеяние в  
конденсированных  
средах



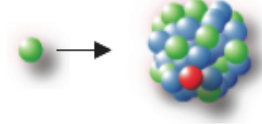
Холодные нейтроны

Реакции с  
образованием  
составного ядра

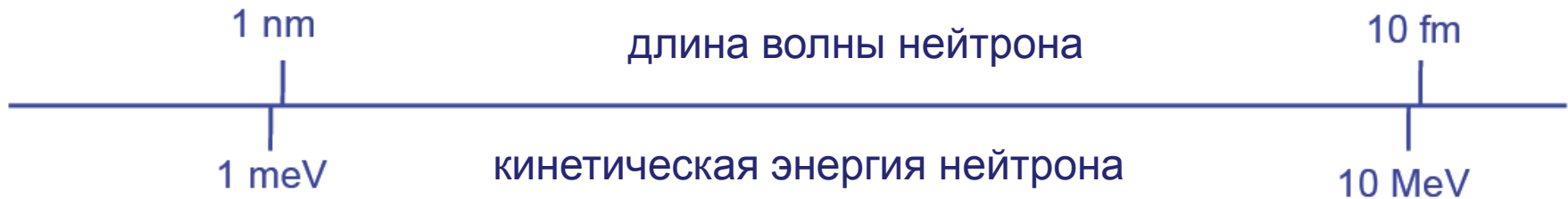


$$\tau \sim 10^{-16}$$
$$E_n < 10 \text{ MeV}$$

Прямые  
ядерные  
реакции



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



# Нейтронные волны в среде

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

$$\lambda \approx 10^{-8} \text{ см}$$

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

холодные нейтроны

$$\lambda = 10^{-8} \text{ см} \quad E_\gamma = c p_\gamma = \frac{2\pi\hbar}{\lambda} = 12,5 \text{ кэВ}$$

рентгеновское излучение

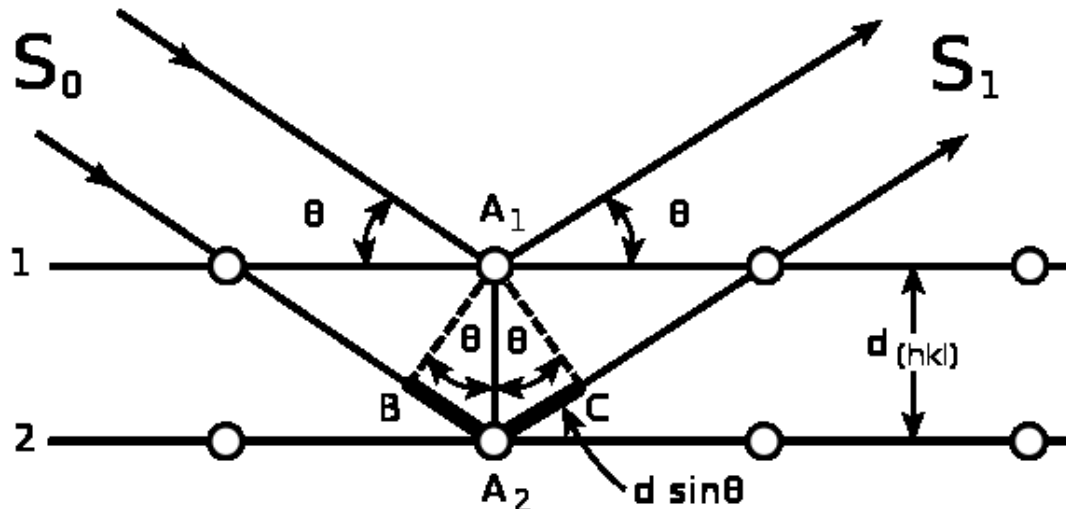
# Нейтронная оптика

## Дифракционное рассеяние

### Условие Брэгга-Вульфа

Падающая волна

Отраженная волна



Кристаллические плоскости

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

$\theta$  – угол скольжения  
 $m$  – порядок отражения

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

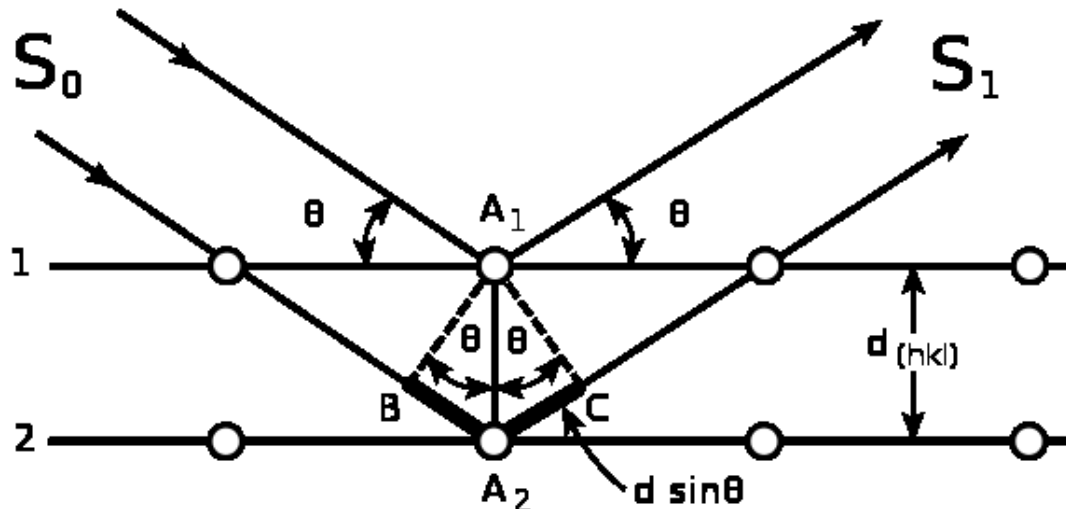
# Нейтронная оптика

## Дифракционное рассеяние

### Условие Брэгга-Вульфа

Падающая волна

Отраженная волна



Кристаллические плоскости

Дифракционное рассеяние нейтронов на кристалле: ядра в кристаллической плоскости отражают нейтронную волну. Отраженные от разных плоскостей волны интерферируют, возникает картина, состоящая из максимумов и минимумов. Для максимума разность хода  $BC$  равна целому числу полуволн (условие Брэгга-Вульфа).

# 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	

МИНУСЫ

### Диффузный фон

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

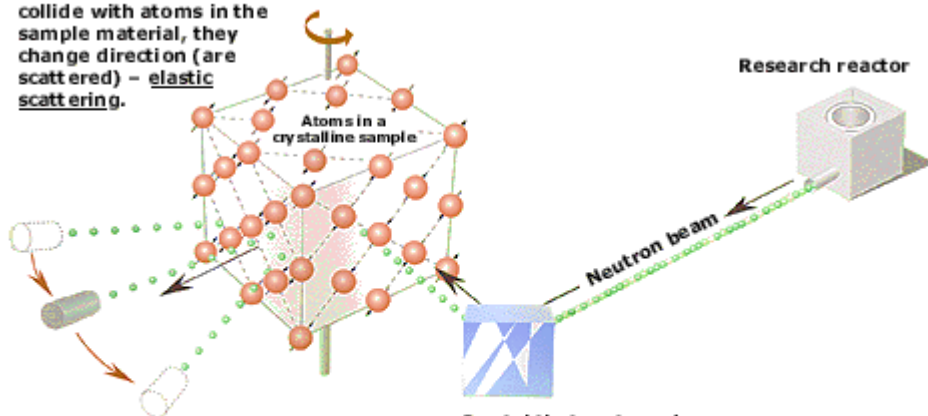


# Нобелевская премия по физике 1994

## 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.

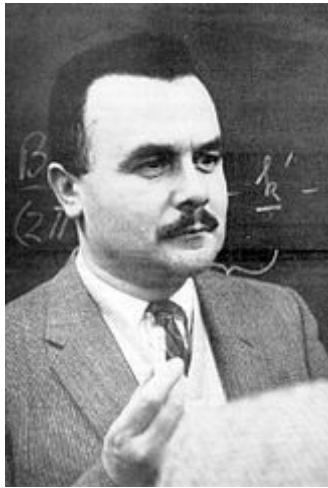
Crystal that sorts and forwards neutrons of a certain wavelength (energy) – monochromatized neutrons

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



**1946 г. Э. Воллан, К. Шалл (Ок-Ридж, США). Дифракция тепловых нейтронов на кристаллах NaCl .** Благодаря волновой природе нейтронов, при их упругом рассеянии может быть получена дифракционная картина, показывающая расположение атомов. Эффективно для определения локализации легких элементов, например, водорода в гидридах металлов или кислорода в органических соединениях, Благодаря наличию магнитного момента у нейтрона, они являются единственным инструментом для изучения магнитного упорядочения в магнетиках.

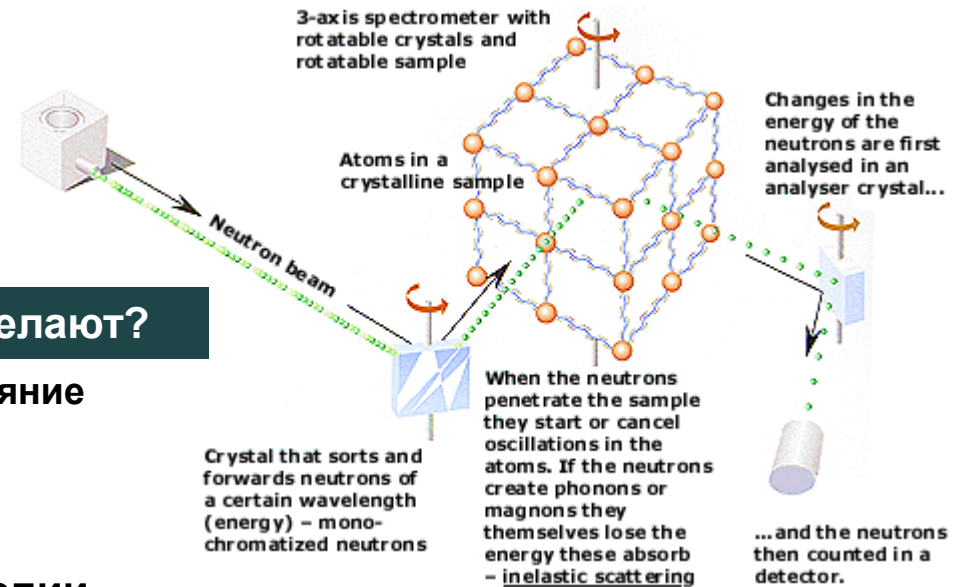
# Нобелевская премия по физике 1994



Что атомы делают?

Неупругое рассеяние

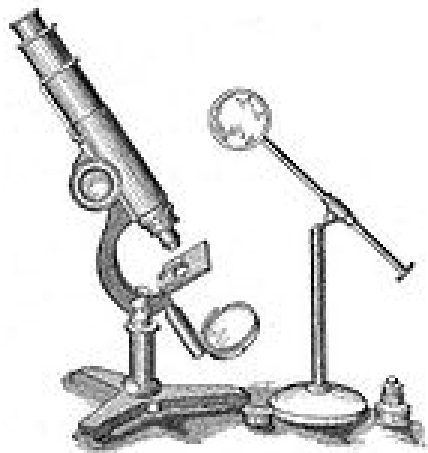
**Бертрам Брокхауз (1918 - 2003)**  
За создание нейтронной спектроскопии



**1955 г. Б. Брокхауз (Чок-Ривер, Канада) Создание первого трехосного нейтронного спектрометра.** Использование неупругого рассеяния нейтронов (изменение направления движения и энергии нейтронов при столкновении с атомом). При столкновении нейтроны инициируют или останавливают колебания атомов в кристаллической решетке или реагируют на движение атомов в жидкостях.

С помощью своего спектрометра Брокхауз измерял энергию фононов (колебания атомов) и магнонов (магнитные волны), а также исследовал изменения атомных структур в жидкостях.

# Нейтронная оптика



Оптический микроскоп



Электронный микроскоп

Разрешение до  $\sim 5$  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  $\sim 0,4$  нм

## Tomography Result: Virtual Reality



5 mm



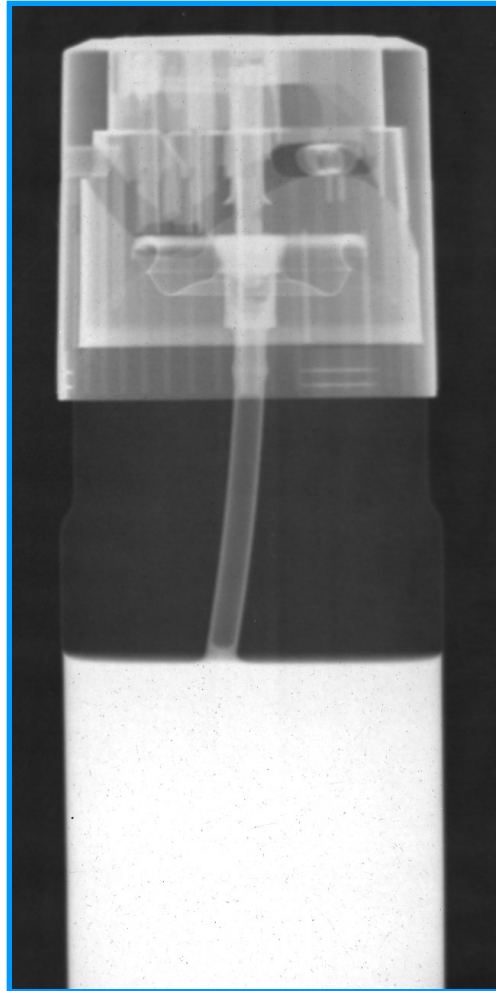
Micro-Tomography  
with cold neutrons

from E. Lehmann, PSI

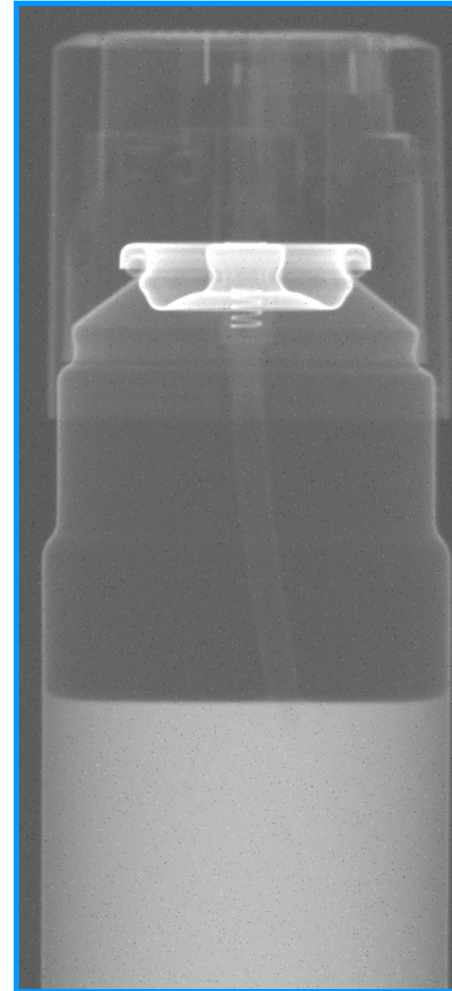


# Нейтронография

Нейтроны



Гамма лучи

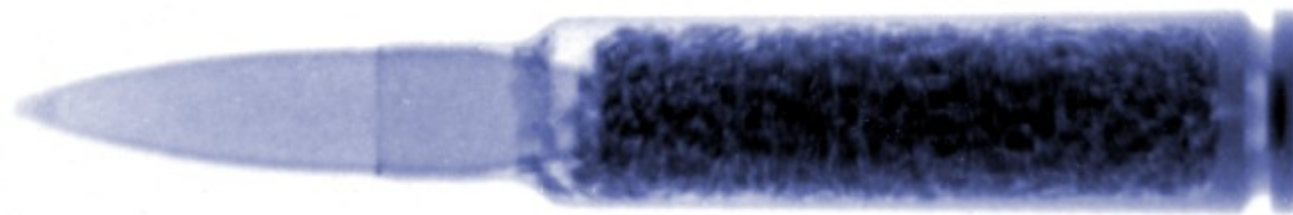


Различный контраст для металла и пластика

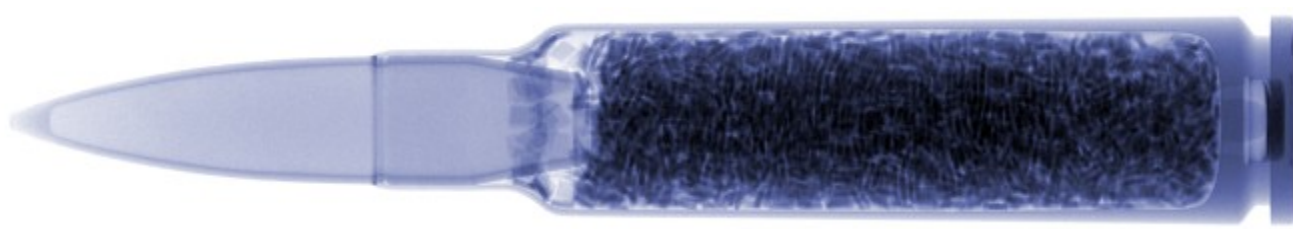
# Нейтронография



Гамма-лучи



Нейтронная  
радиография  
(обычное  
разрешение)



Нейтронная  
радиография  
(высокое разрешение)



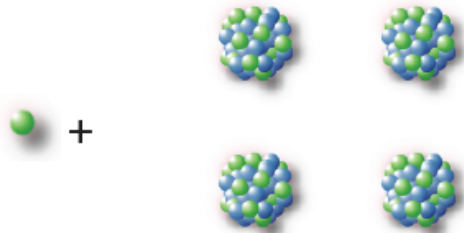
Нейтронная томография  
(высокое разрешение)  
вертикальный слой 13  
мкм



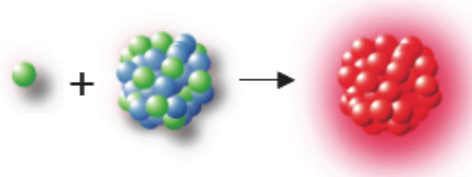
# РЕАКЦИИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ НЕЙТРОНОВ

# Реакции под действием нейтронов

Рассеяние в конденсированных средах



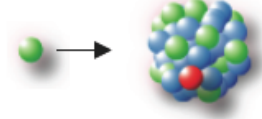
Реакции с образованием составного ядра



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

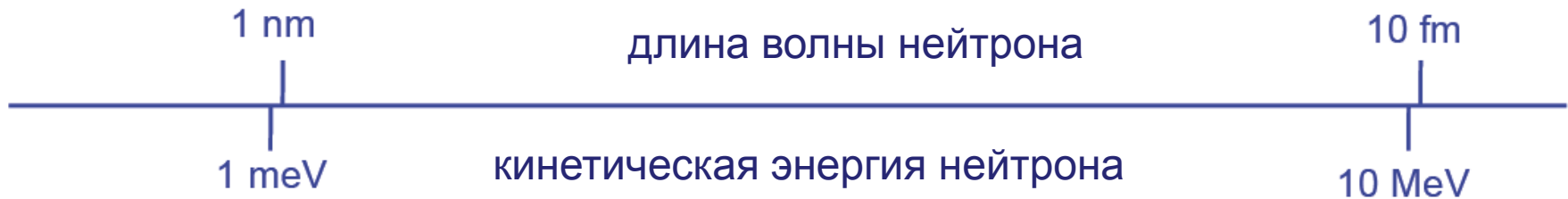
резонансные

Прямые ядерные реакции



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

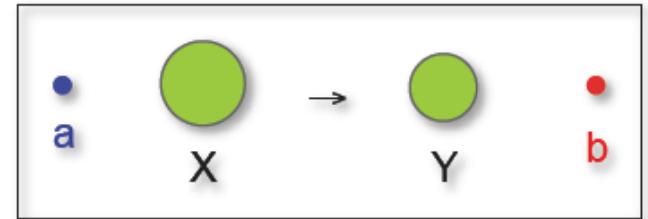
быстрые



# Реакции под действием нейтронов

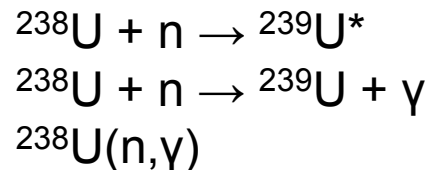
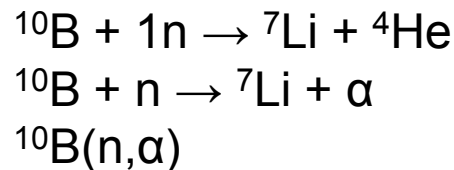
Реакция:

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



Легкие частицы определяют тип реакции, единый для разных ядер-мишеней

Примеры эквивалентных обозначений:



Сечение реакции  $\sigma$ , выражается в барн, 1 барн =  $10^{-28}$  м<sup>2</sup>

## Ядерные реакции под действием нейтронов:

- упругое рассеяние  $(n,n)$
- неупругое рассеяние  $(n,n')$
- радиационный захват  $(n,\gamma)$
- деление  $(n,f)$
- испускание частиц  $(n,\alpha)$ ,  $(n,p)$ ,  $(n,xn)$

Полное сечение реакции  $\sigma_{\text{tot}}$ : сумма всех каналов реакции

# Реакции под действием нейтронов

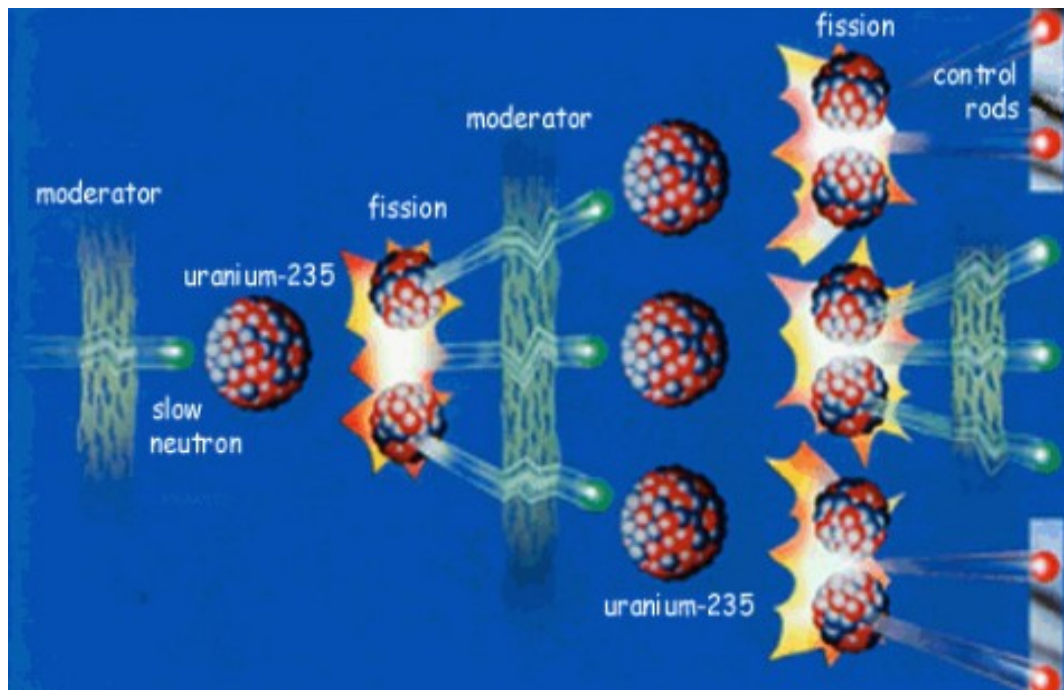
Реакция	Сечение реакции
Радиационный захват ( $n,\gamma$ )	На всех ядрах. Для тепловых $0,1 < \sigma_{\text{тепл}} < 10^6$ барн, для быстрых $0,1 < \sigma < 10$ барн
Упругое рассеяние ( $n,n$ )	Сечение варьируется в интервале нескольких барн
Неупругое рассеяние ( $n,n'$ )	Пороговый процесс. Сечение порядка нескольких барн
Испускание протонов ( $n,p$ )	<b>Наиболее важные реакции:</b> $n + {}^3\text{He} \rightarrow {}^3\text{H} + p$ ; $\sigma_{\text{тепл}} = 5400$ барн $n + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{14}\text{C} + p$ ; $\sigma_{\text{тепл}} = 1,73$ барн
Испускание $\alpha$ -частиц ( $n,\alpha$ )	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)

# Источники нейтронов

- Компактные:
  - Радиоизотопные (спонтанное деление)  $^{252}\text{Cf}$
  - Радиоизотопные (реакция  $\alpha, n$ )  $\text{PuBe}$ ,  $\text{AmLi}$
  - Ядерная реакция ( $\gamma, n$ ) на  $^9\text{Be}$  или  $^2\text{H}$
  - Генераторы (например, реакция  $^3\text{H} + ^2\text{H} \rightarrow \alpha + n$ )
- Реакции под действием космического излучения
- Тормозные фотонейтронные системы (реакция ( $\gamma, n$ ))
- Ядерные реакторы (импульсные, стационарные)
- Распадные источники на основе ускорителей протонов с энергией около 10 ГэВ (spallation neutron source)
- Ядерные взрывы

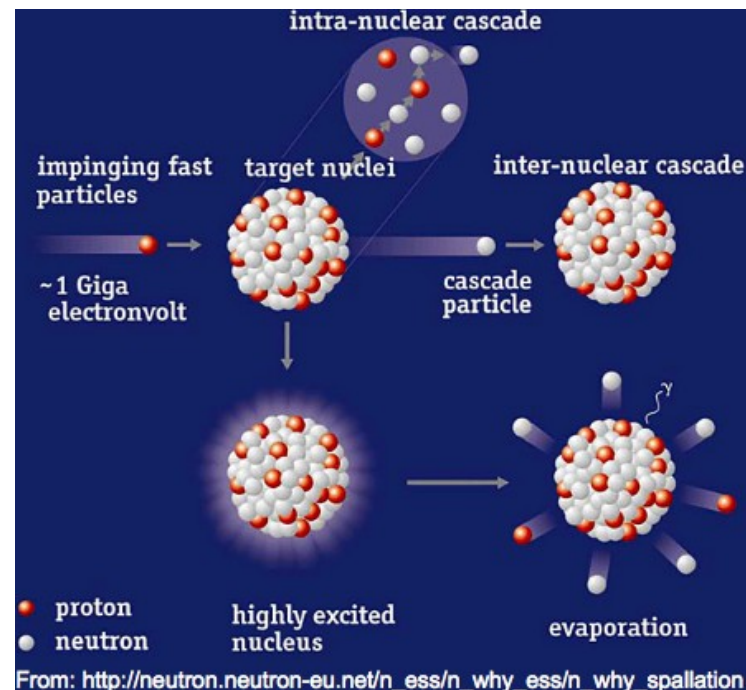
# Источники нейтронов

Ядерные реакторы  
(цепная реакция деления)



~2-3 нейтрона

Источники нейтронов  
на основе ускорителей



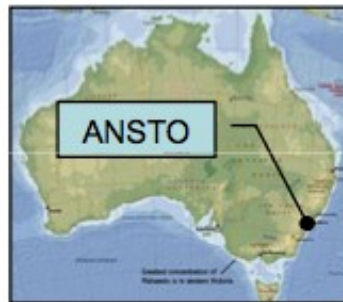
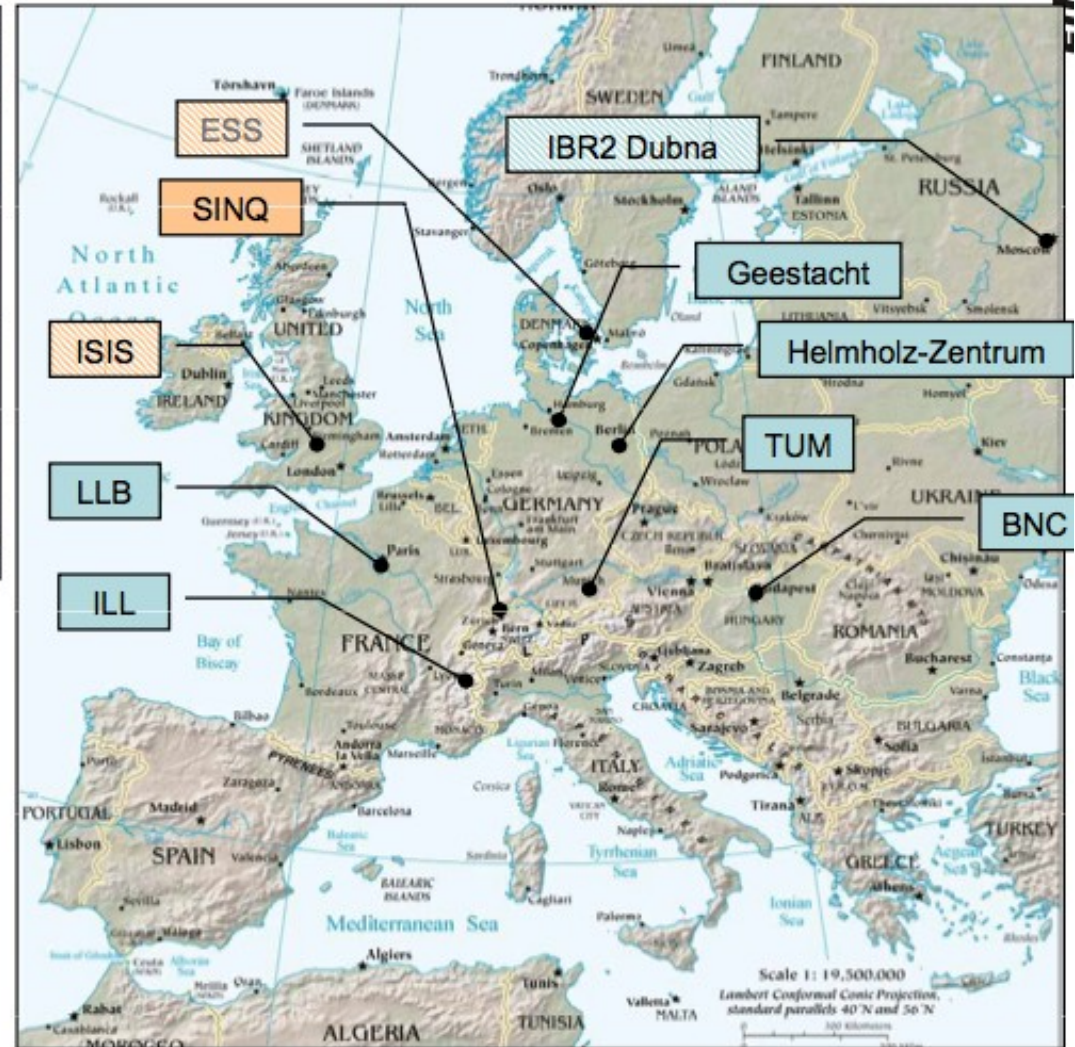
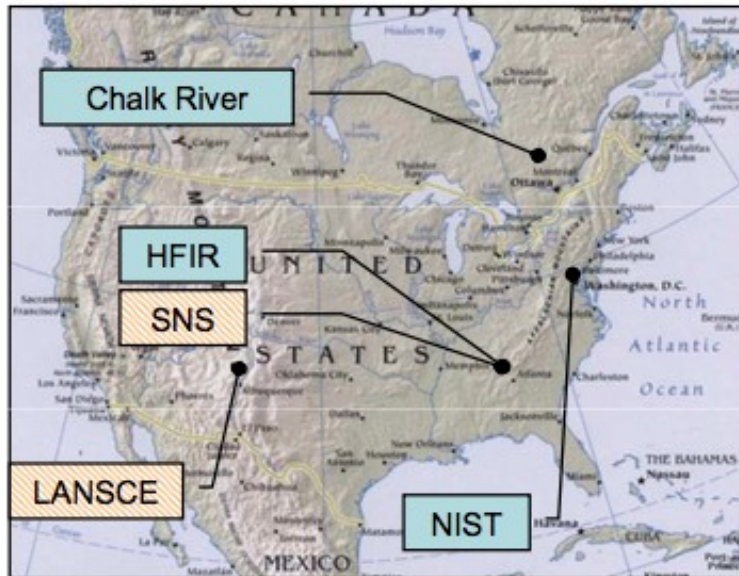
~20-30 нейтронов

Реакция скалывания (spallation) происходит при взаимодействии протонов высокой энергии с тяжелым ядром: протон выбивает отдельные нуклоны, оставляя ядро в возбужденном состоянии. Ядро сбрасывает протоны, альфа-частицы, нейтроны, за пределы мишени излучаются только нейтроны, не имеющие заряда.

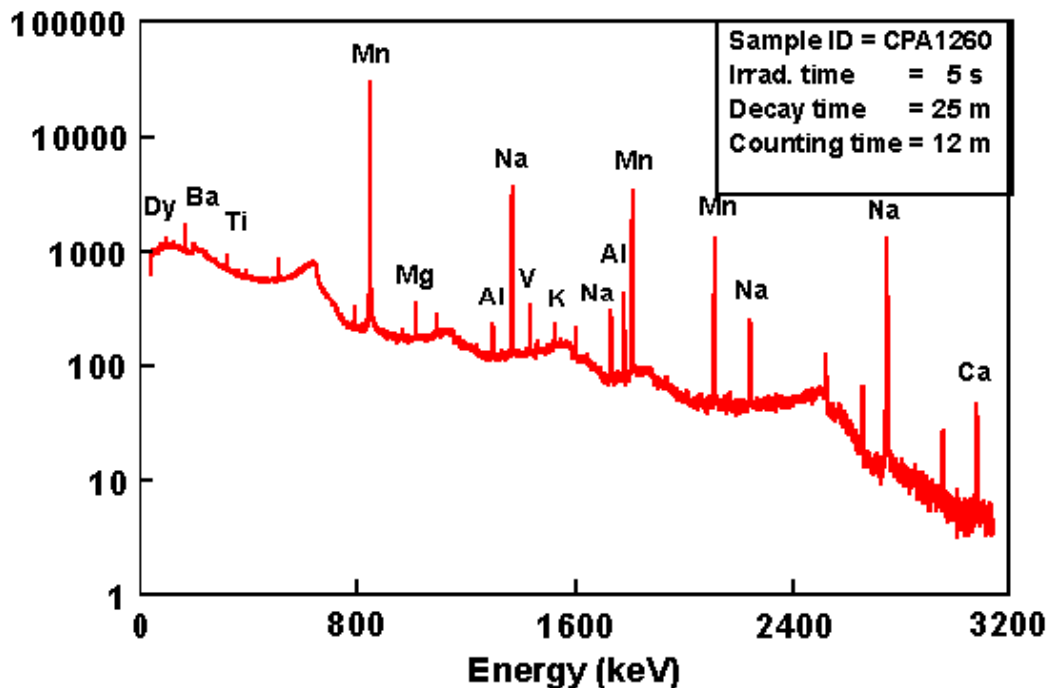
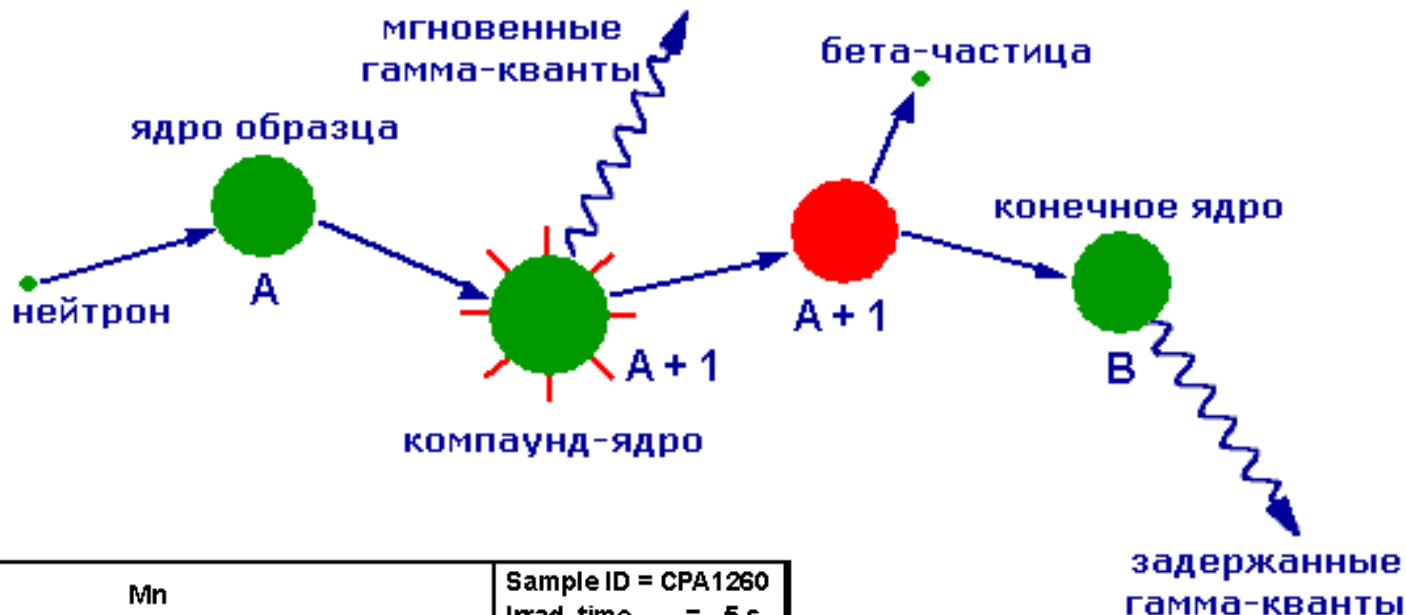


# Источники нейтронов

Ведущие научные центры нейтронных исследований



# Нейтронно-активационный анализ

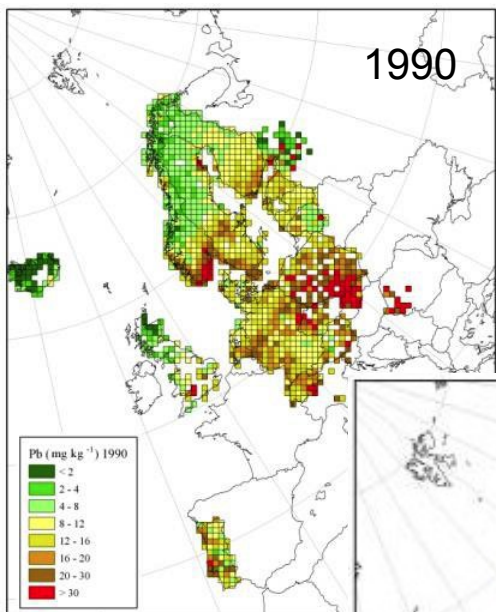


**Активационный анализ** – это определение качественного и количественного состава вещества, основанное на измерении характеристик распада радиоактивных изотопов, образующихся в веществе при облучении его нейтронами (или другими частицами)

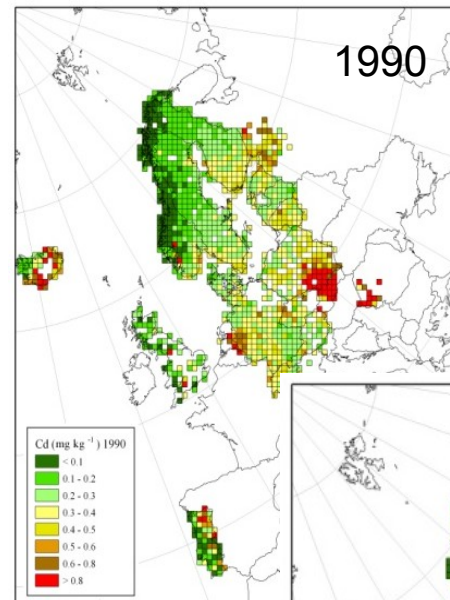
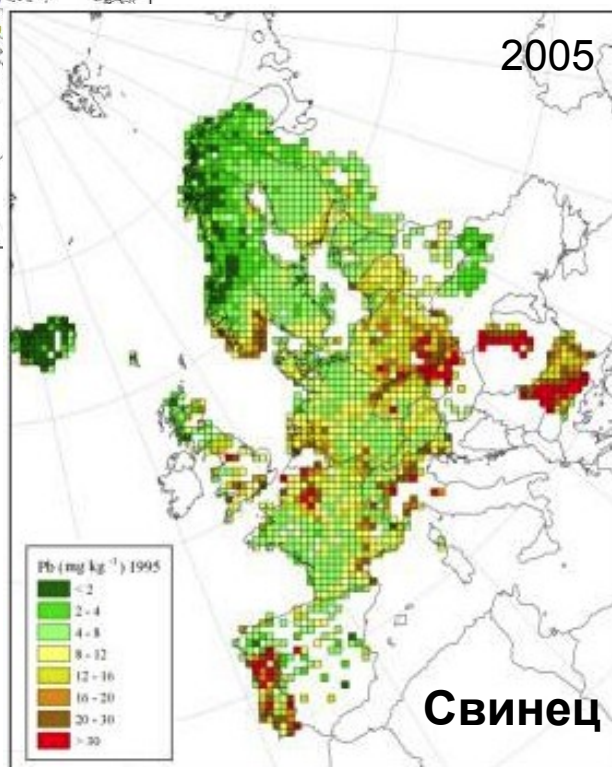




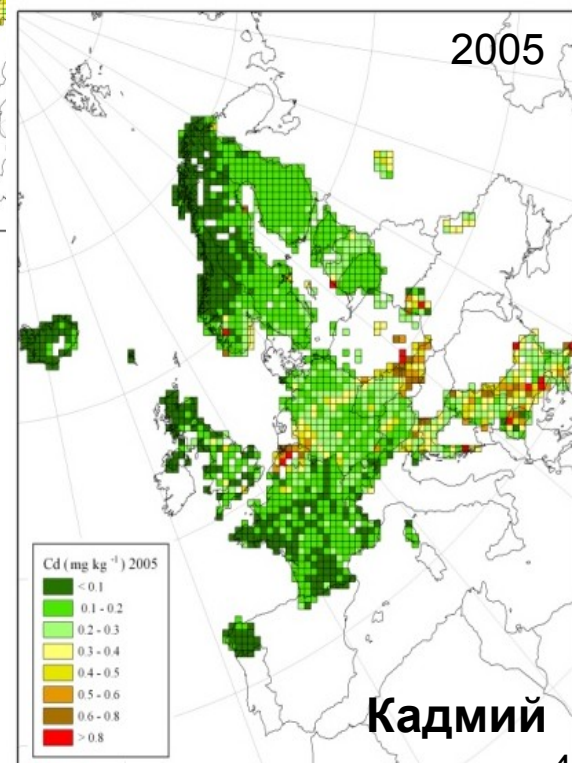
# Нейтронно-активационный анализ



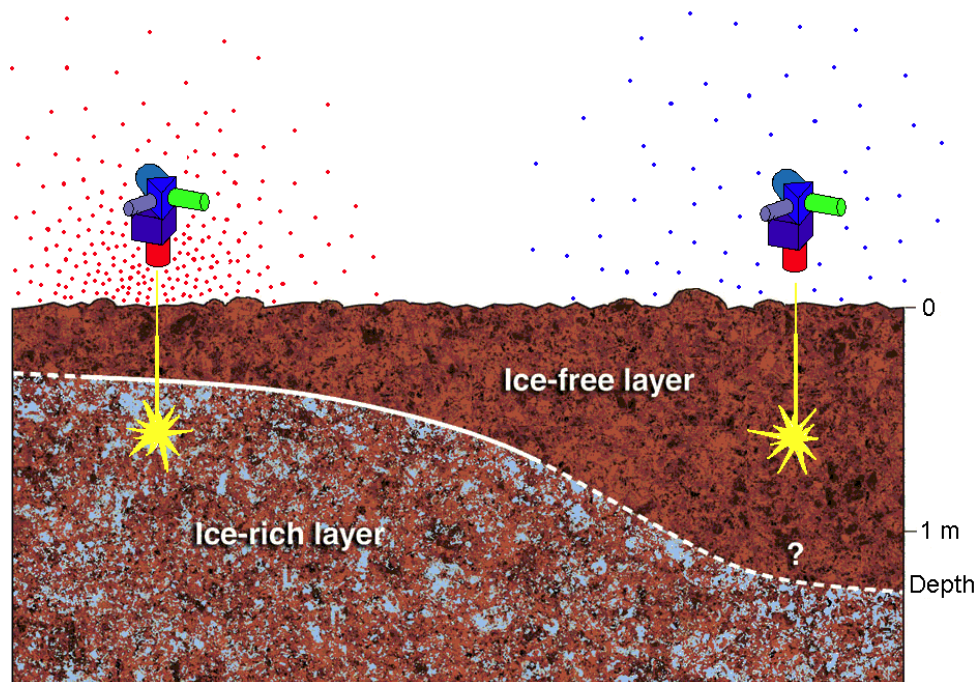
↓ 72%



↓ 52%

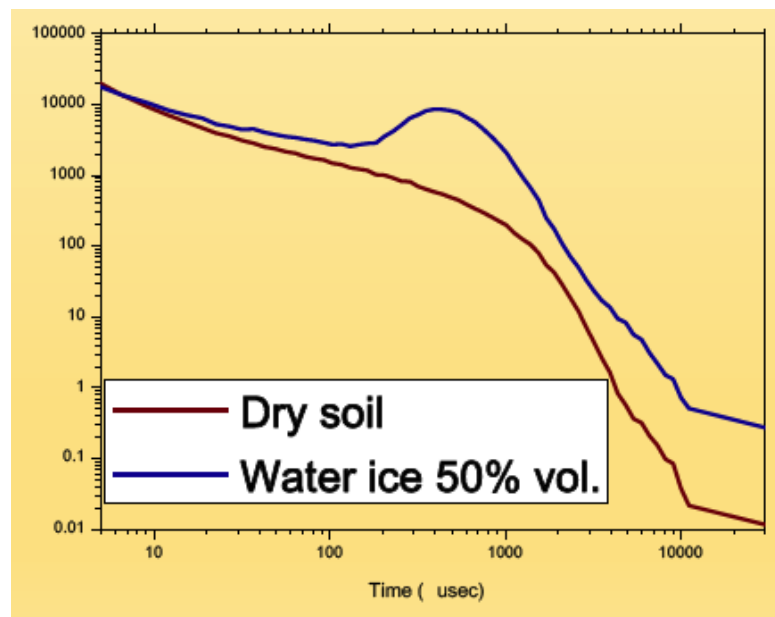


# Dynamic Albedo of Neutrons (DAN): русский детектор на борту Curiosity Rover

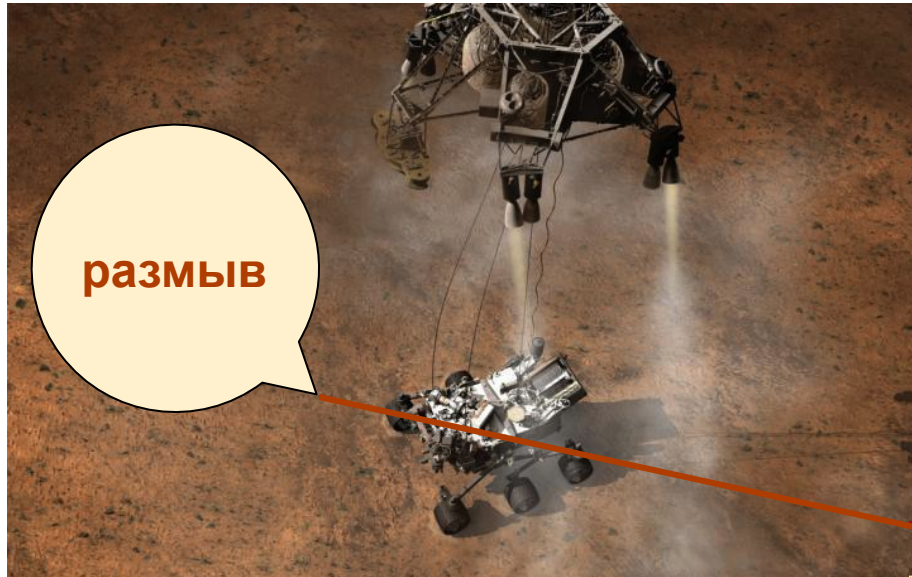


Нейтронный каротаж (исследование горных пород методом активации) впервые был осуществлен в США в 1941 году (Бруно Понтекорво)

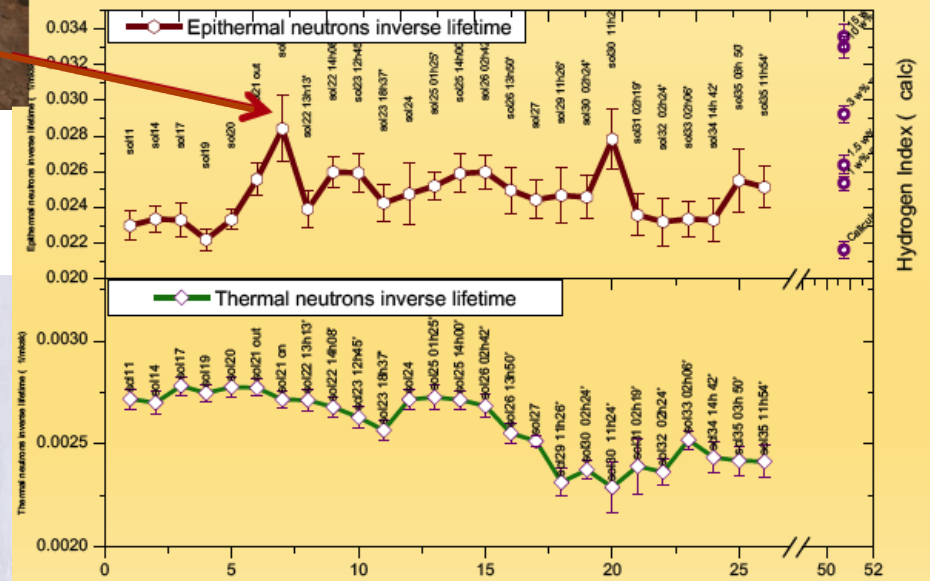
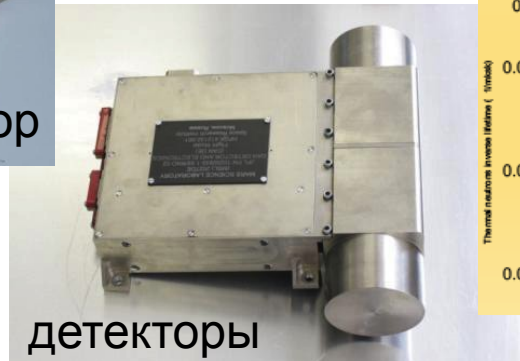
**Импульсный нейтронный каротаж:** идея принадлежит Г.Н. Флерову. Быстрые нейтроны от генератора проникает в почву и замедляются. Зависимость от времени числа нейтронов, зарегистрированных счетчиком над поверхностью земли, зависит от насыщенности почвы водой.



# 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







Рассеяние нейтронов – 60 лет на службе науке и техническому прогрессу