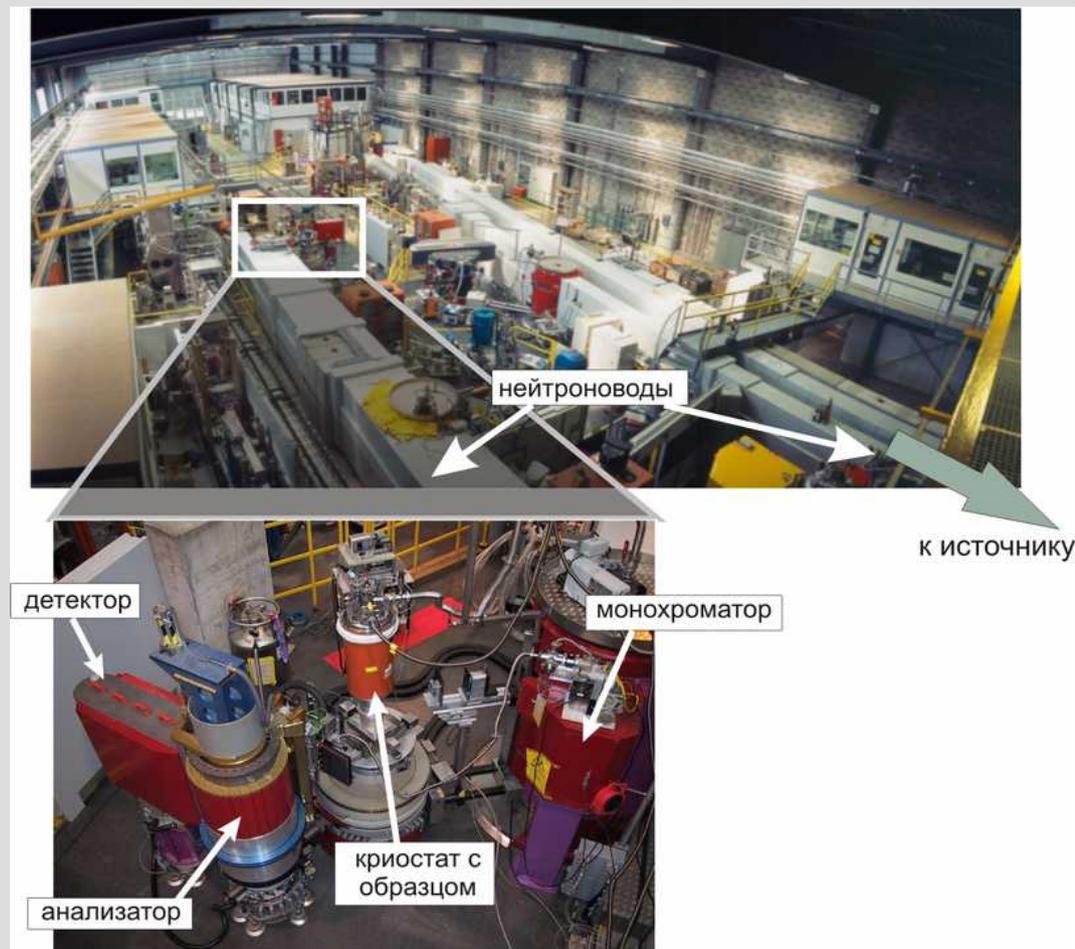


# Дифракция нейтронов: применение "больших установок" в физике твёрдого тела

В.Н.Глазков, с.н.с ИФП им. П.Л.Капицы РАН  
glazkov@kapitza.ras.ru



28 ноября 2016, Олимпиада по  
экспериментальной физике

## Что такое кристалл?

$$T: \vec{r} \rightarrow \vec{r} + \vec{a}$$

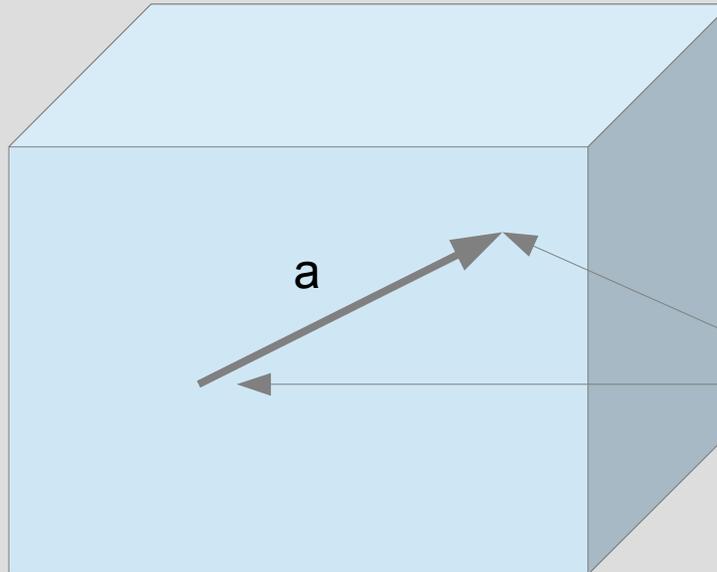
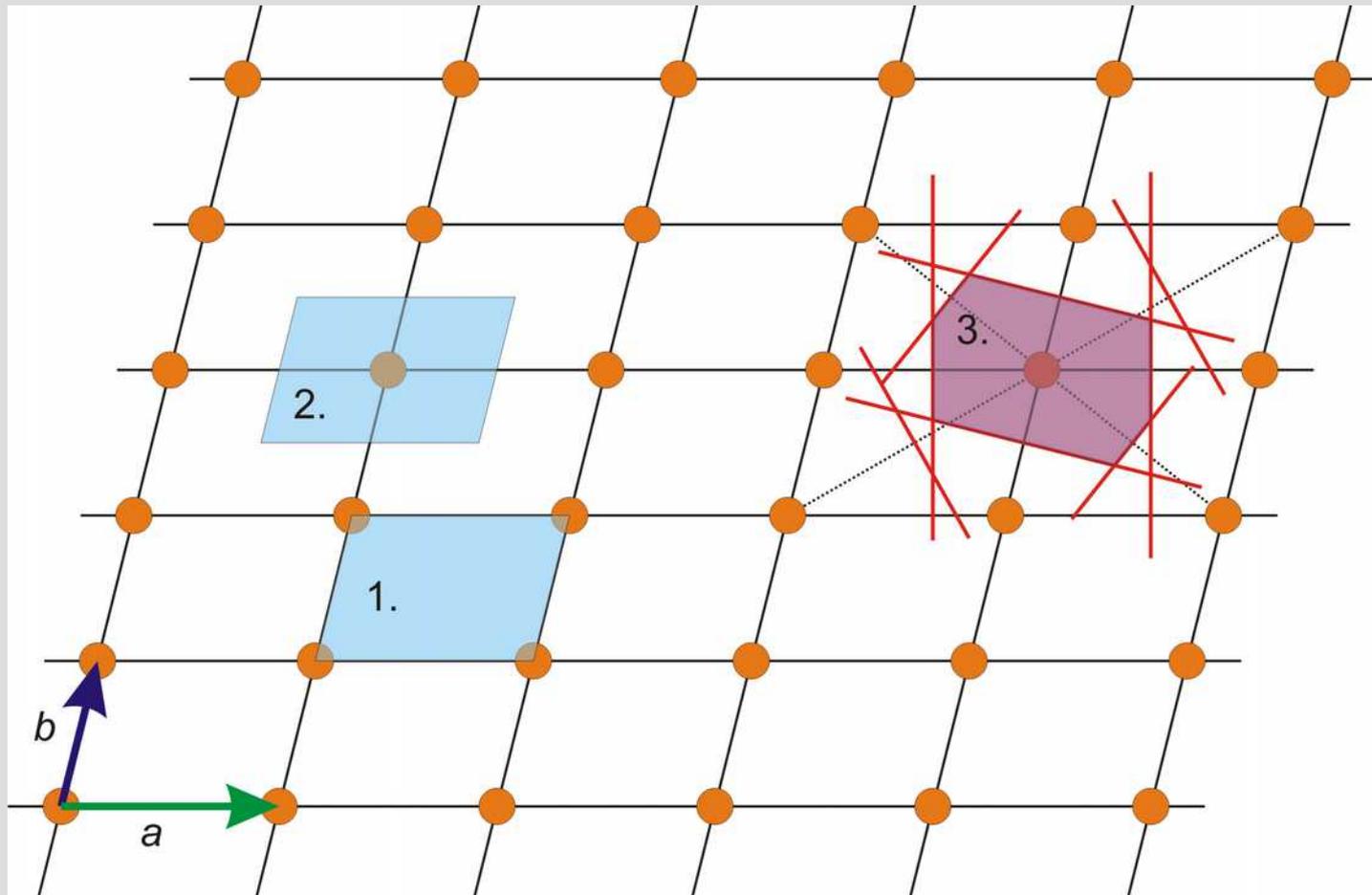


рис. с сайта caricatura.ru

Среда выглядит одинаково для «наблюдателя» в точках с координатами  $\mathbf{r}$  и  $(\mathbf{r}+\mathbf{a})$  = свойства среды не меняются при трансляции на вектор  $\mathbf{a}$ .  
Вектор трансляции  $\mathbf{a}$  определён неоднозначно: вектор  $n\mathbf{a}$  также является вектором трансляции.

Кристалл = среда, обладающая трансляционной инвариантностью

# Решётка кристалла и элементарная ячейка.



Варианты выбора элементарной ячейки на двумерной решётке: 1 и 2 - построение на векторах трансляции с разным расположением элементарной ячейки относительно узлов решётки, 3 - построение ячейки Вигнера-Зейтца.

# Кристаллы, которые мы изучаем... Маленькие, не очень маленькие...



Естественная огранка часто отражает форму элементарной ячейки и наличие осей симметрии

Естественная огранка кристаллов. С сайта Минералогического музея РАН. Верхний ряд: (слева) благородная шпинель, (справа) топаз. Нижний ряд: (слева) топаз, (справа) рутил.

## И большие...

Это человек.  
И это не фотошоп.



Гигантские кристаллы гипса (селенит, структурная разновидность гипса,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) из "Пещеры кристаллов" в шахтном комплексе Найка (Мексика). Фото из статьи в журнале National Geographic

Giant Crystal Cave Comes to Light , <http://news.nationalgeographic.com/news/2007/04/photogalleries/giant-crystals-cave/index.html>

# Зачем?

*«Во-первых, это красиво...»(с)*

Изучение структуры кристаллов	Симметрия кристалла, взаимное расположение его атомов определяет многие свойства кристалла. Например: <ul style="list-style-type: none"><li>• (лекция К.Тихонова!) построение «монополь» это свойство вполне определённой решётки</li><li>• (полупроводниковые технологии) особенности движения электрона в кристалле, структура «электронов» и «дырок» в полупроводнике</li></ul>
Изменение структуры кристаллов	Разного рода фазовые переходы, в т.ч. с упорядочением «элементарных магнетиков» (магнитных моментов атомов) на решётке кристалла
Элементарные возбуждения в кристаллах ↔ квазичастицы	(Аналогия с физикой частиц) Световые волны ↔ фотоны Упругие (звуковые) волны ↔ ФОНОНЫ ит.д.

## Как?



Естественная огранка кристаллов благородной шпинели. С сайта Минералогического музея РАН.

Расстояние между атомами 3-10Å  
Нужен «микроскоп» с таким разрешением...

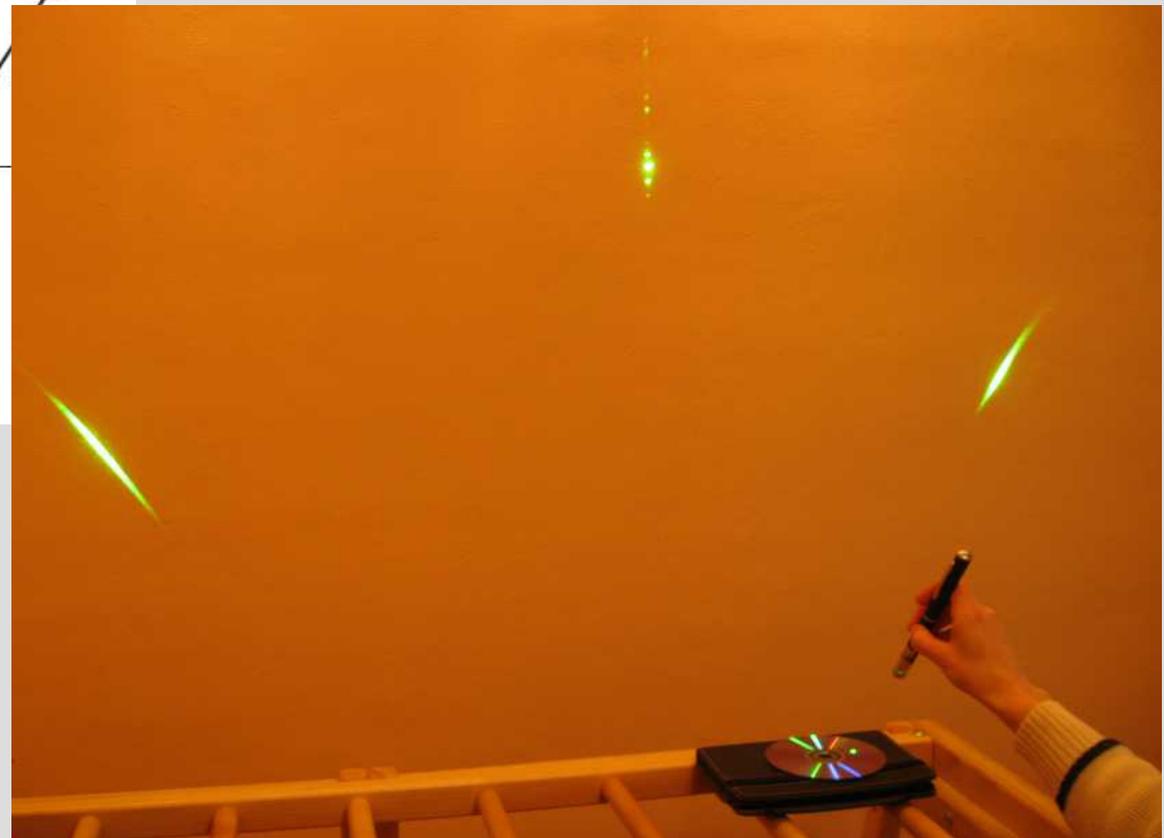
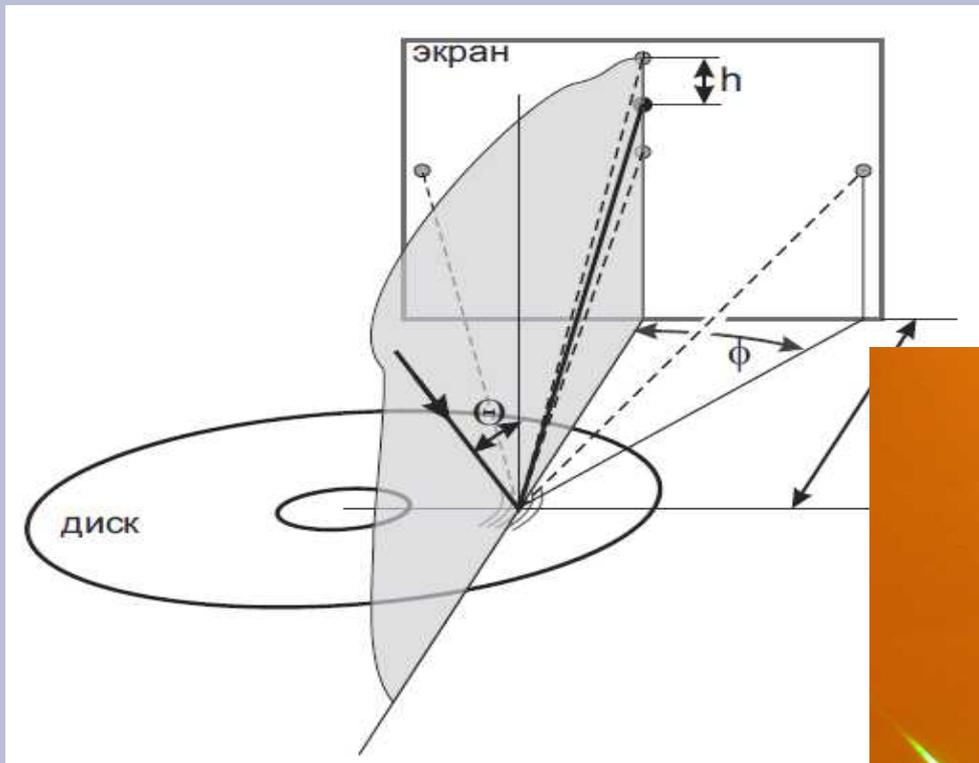
В кристалле атомы расположены на регулярной решётке.

Один из методов:

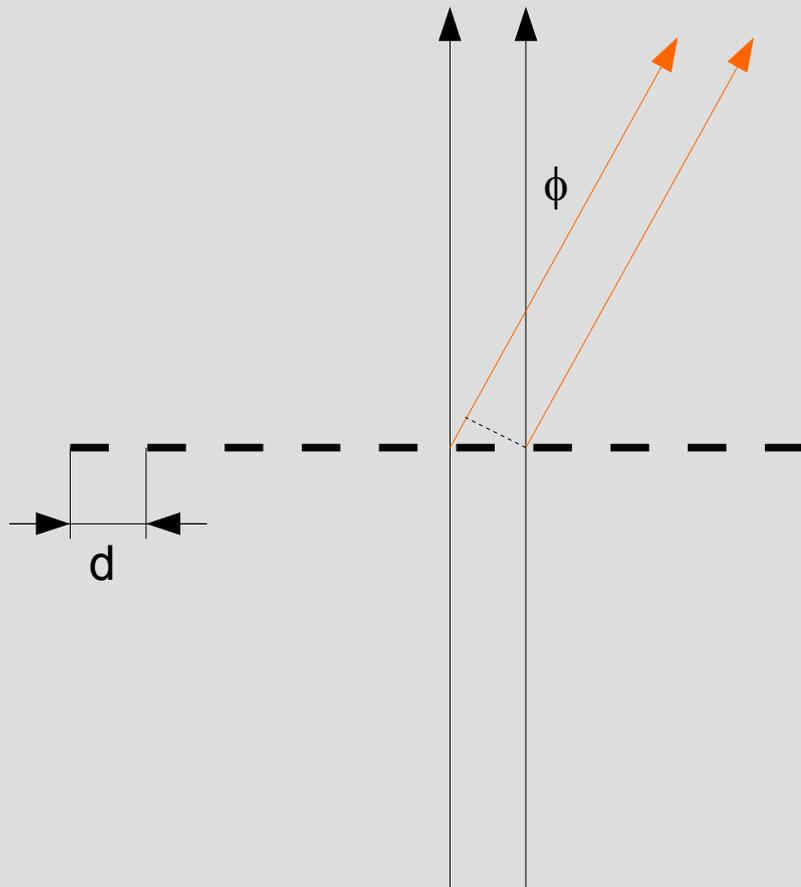
дифракция электромагнитных волн и частиц с подходящими длинами волн (длинами волн де Бройля).

дифракция на 3D  
решётке!

# Дифракция на двумерной решётке.



## Условие дифракции.

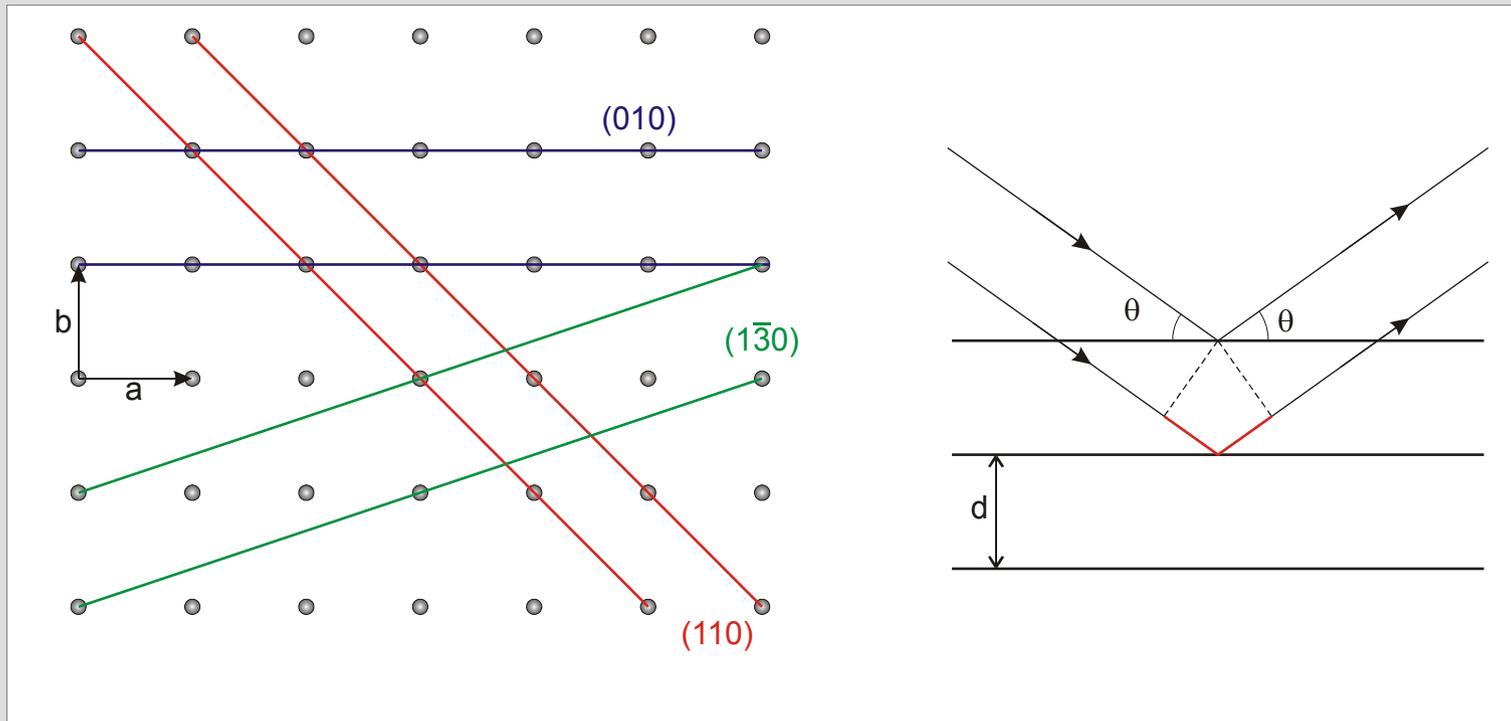


Традиционный вывод для дифракции при нормальном падении на одномерную дифракционную решётку

$$d \sin \phi = n \lambda$$

Что делать при падении света под углом?  
Как описывать дифракцию на двумерной (CD/DVD) или трёхмерной (кристалл) решётке?

# Условие Брэгга для трёхмерной решётки.

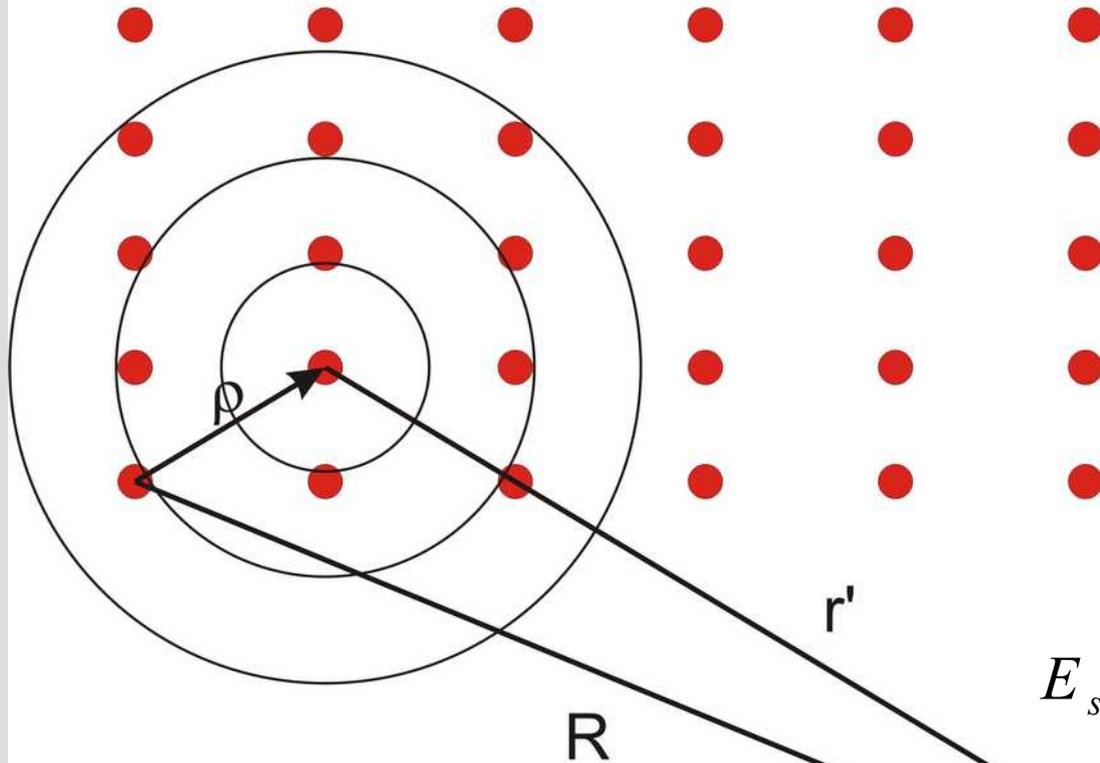


К выводу условия Брэгга. Слева: семейства различных плоскостей в кубическом кристалле в проекции на плоскость, перпендикулярную оси  $c$ . Справа: вычисление разности хода лучей, рассеянных на соседних плоскостях.

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

$$E = E_0 \cos(\vec{k} \vec{r} - \omega t)$$

падающая (плоская) волна  
вызывает колебания  
атомов в узлах кристалла,  
которые генерируют  
вторичные (сферические)  
волны



$$E_{sc}(\vec{\rho}, \vec{r}') = \frac{A}{r'} \cos(\vec{k}' \vec{r}' - \omega t + \phi(\rho))$$

и просуммировать по  
всем центрам  
рассеяния (атомам)

$$E = E_0 \cos(\vec{k} \vec{r} - \omega t)$$

$$|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$$

падающая (плоская) волна вызывает колебания атомов в узлах кристалла, которые генерируют вторичные (сферические)

$$\phi(\rho) = \phi_0 + \vec{k} \vec{\rho}$$

$$R, r' \gg \rho$$

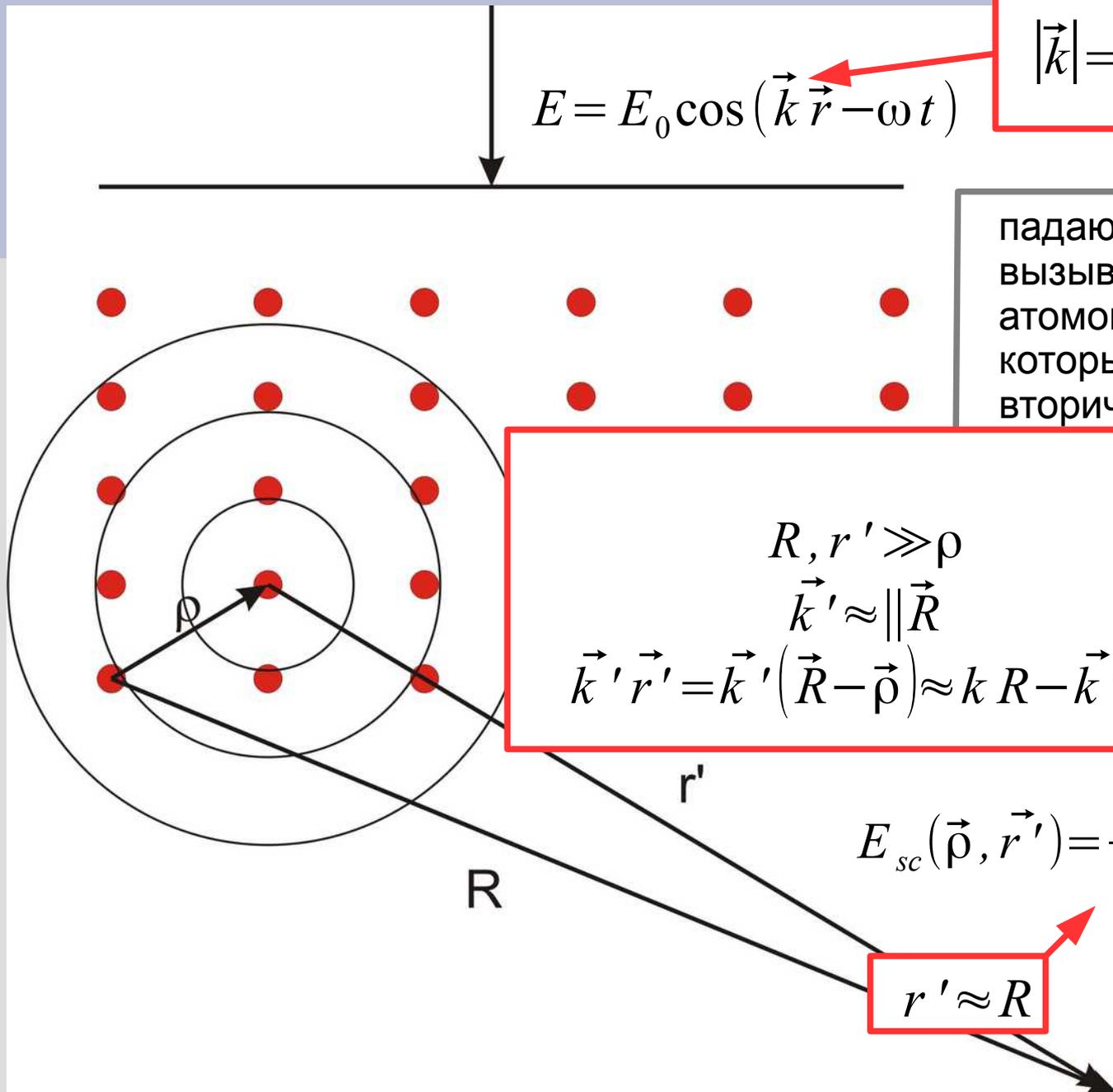
$$\vec{k}' \approx \|\vec{R}$$

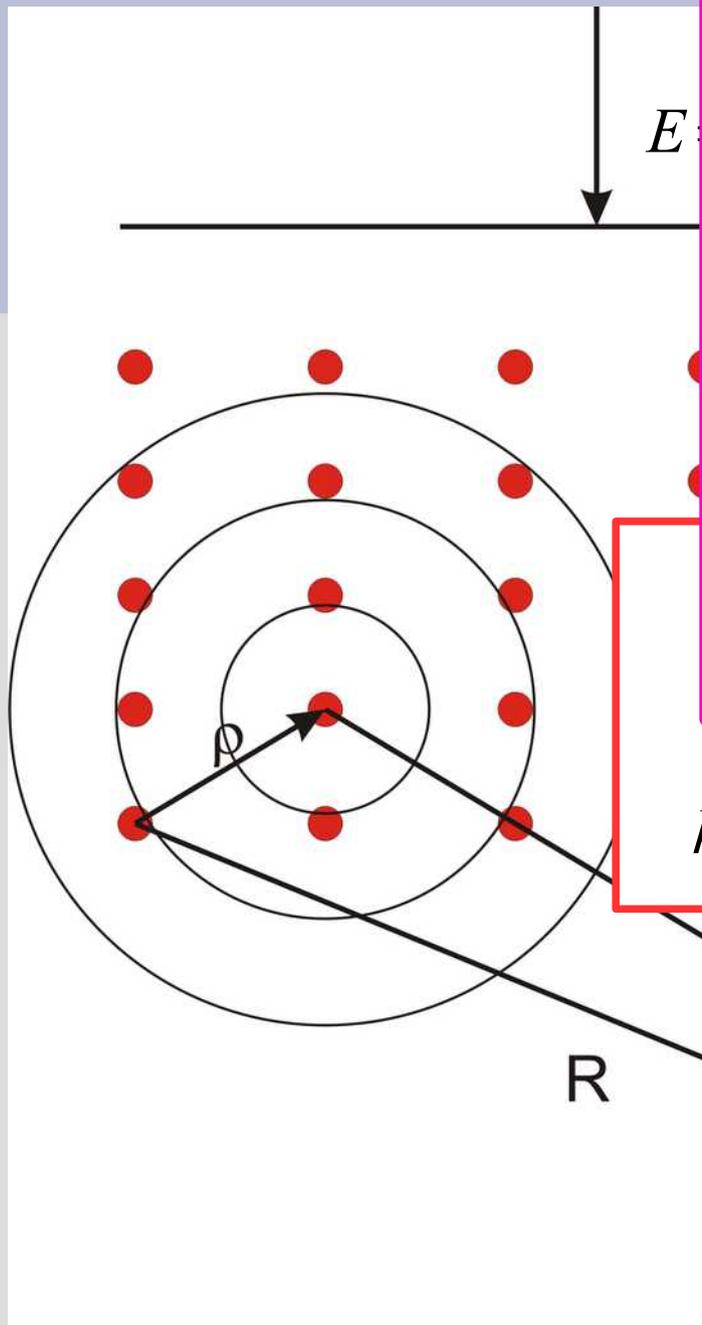
$$\vec{k}' \vec{r}' = \vec{k}' (\vec{R} - \vec{\rho}) \approx k R - \vec{k}' \vec{\rho}$$

$$E_{sc}(\vec{\rho}, \vec{r}') = \frac{A}{r'} \cos(\vec{k}' \vec{r}' - \omega t + \phi(\rho))$$

$$r' \approx R$$

и просуммировать по всем центрам рассеяния (атомам)





$$E \approx \frac{A}{R} \sum_{\vec{\rho}} \cos(kR - \omega t + \phi_0 + (\vec{k} - \vec{k}') \cdot \vec{\rho})$$

Пусть для простоты трансляции ортогональны

$$\vec{\rho} = na\vec{x} + mb\vec{y} + pc\vec{z}$$

Если

$$(\vec{k} - \vec{k}') = n' \frac{2\pi}{a} \vec{x} + m' \frac{2\pi}{b} \vec{y} + p' \frac{2\pi}{c} \vec{z}$$

То  $(\vec{k} - \vec{k}') \cdot \vec{\rho} = 2\pi N$  все в фазе!

$$\vec{k}' \cdot \vec{r}' = \vec{k}' \cdot (\vec{R} - \vec{\rho}) \approx kR - (\vec{k}' - \vec{k}) \cdot \vec{\rho}$$

$$E_{sc}(\vec{\rho}, \vec{r}') = \frac{A}{r'} \cos(\vec{k}' \cdot \vec{r}' - \omega t + \phi(\rho))$$

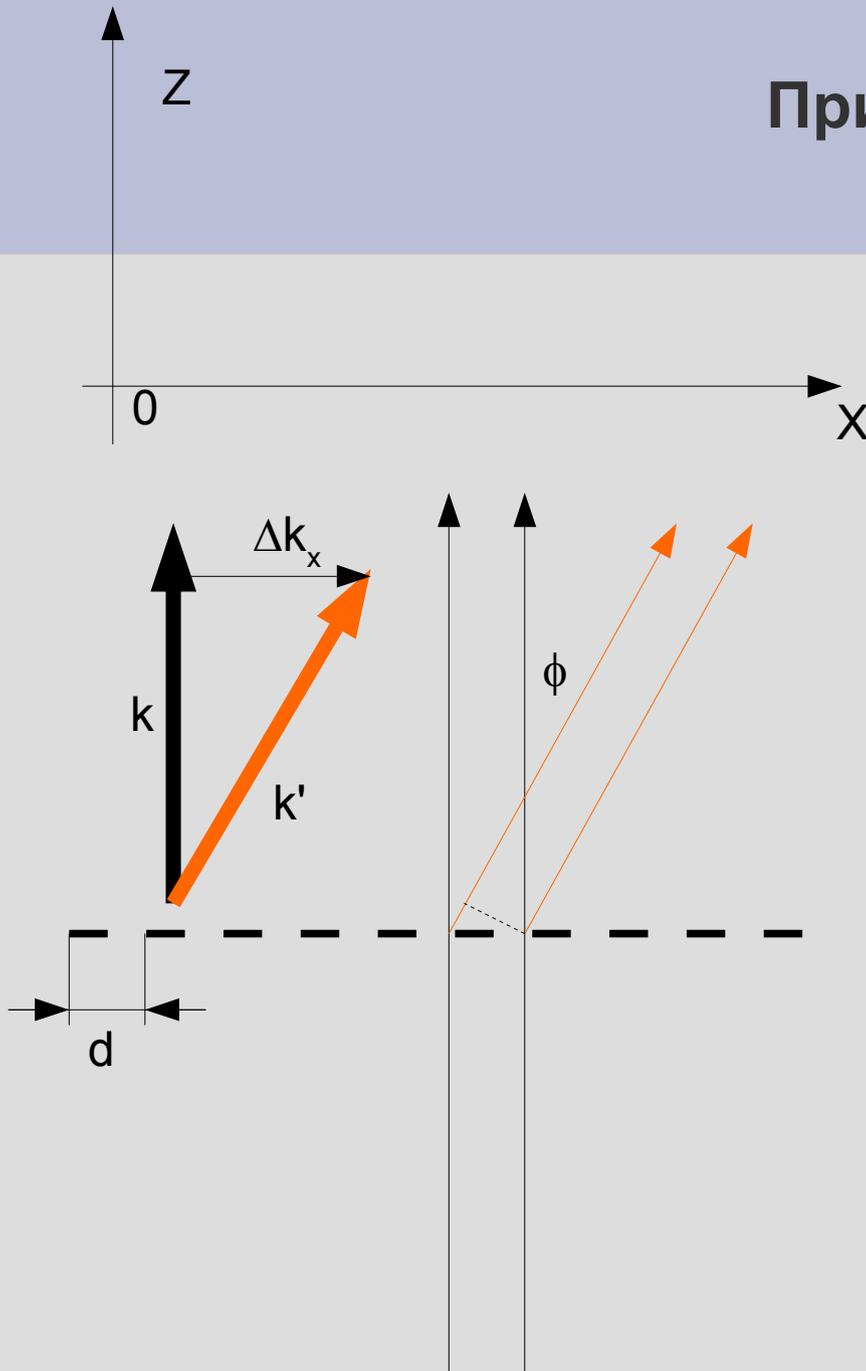
$$r' \approx R$$

и просуммировать по всем центрам рассеяния (атомам)

## Необходимое условие дифракции (для случая решётки с ортогональными трансляциями)

$$(\vec{k} - \vec{k}') = n' \frac{2\pi}{a} \vec{x} + m' \frac{2\pi}{b} \vec{y} + p' \frac{2\pi}{c} \vec{z}$$

## Применение



Вдоль оси X период  $d$   
Вдоль оси Z период бесконечен  
Вдоль оси Y (в экран) однородность  
полосок решётки, период «равен  
нулю»

$$(\vec{k} - \vec{k}') = n' \frac{2\pi}{a} \vec{x} + m' \frac{2\pi}{b} \vec{y} + p' \frac{2\pi}{c} \vec{z}$$

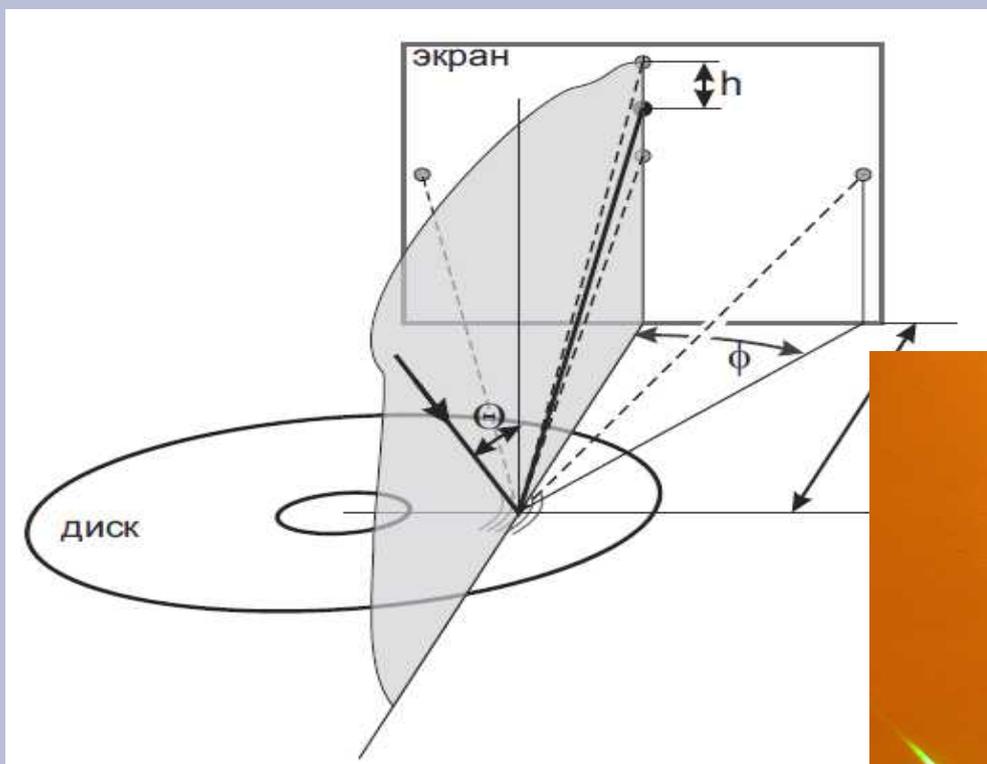
Правила отбора:

$$k_y = \text{const}$$

$\Delta k_z$  — произвольно

$$\Delta k_x = n' \frac{2\pi}{d} \longrightarrow \frac{2\pi}{\lambda} \sin \phi = n' \frac{2\pi}{d}$$

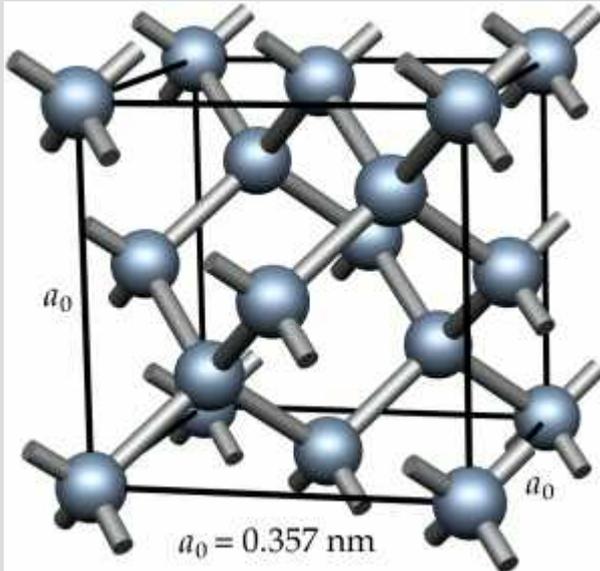
# Дифракция на диске — «домашняя работа» для желающих



двумерная решётка:  
дорожки+модуляции дорожек



# Дифракция на кристаллах: что можно использовать



Структура алмаза (с сайта <http://www.e6cvd.com/cvd/page.jsp?pageid=361>)

$$(\vec{k} - \vec{k}') = n' \frac{2\pi}{a} \vec{x} + m' \frac{2\pi}{b} \vec{y} + p' \frac{2\pi}{c} \vec{z}$$

$$|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda} \quad 2d \sin \theta = n\lambda$$

Электромагнитные волны рентгеновского диапазона (K-альфа линии меди, энергия кванта 8кэВ, длина волны 1.5Å)

## Дифракция частиц

Длина волны де Бройля  $\lambda = \frac{h}{p}$

Электроны: 150 эВ ↔ 1Å

Нейтроны: 25 мэВ ↔ 1.8Å

## Некоторые физические свойства нейтрона

Масса (энергия покоя): 1 ГэВ

Энергия нейтронов в рассматриваемых опытах: ~20 мэВ, нерелятивистские

Электрического заряда нет

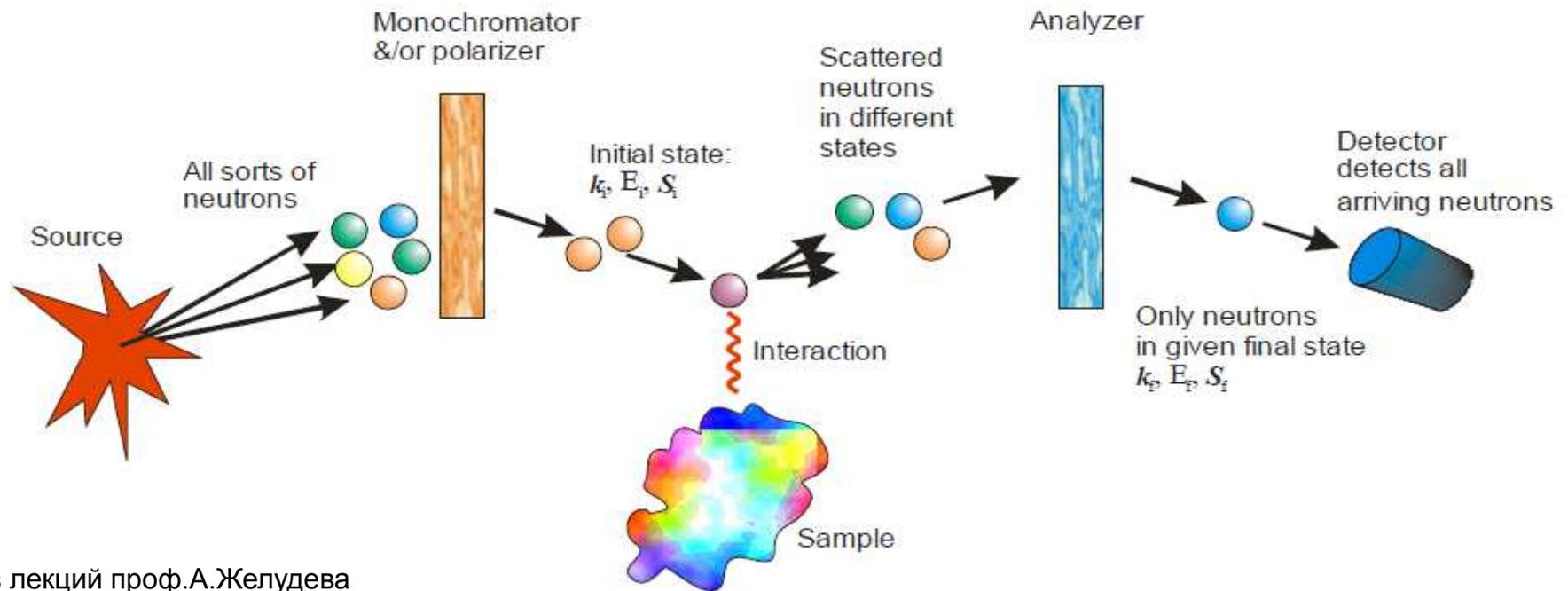
Магнитный момент есть

В свободном состоянии распадается на протон и электрон за примерно 700 секунд

Взаимодействие с веществом:

- сильное взаимодействие с ядрами атомов
- магнитное взаимодействия с «элементарными магнетиками» в кристалле

## Грубая схема эксперимента



из лекций проф.А.Желудева

В лучших приборах:

поток от источника  $10^{15}$  1/(см<sup>2</sup> сек)

после монохроматора  $10^8$  1/(см<sup>2</sup> сек)

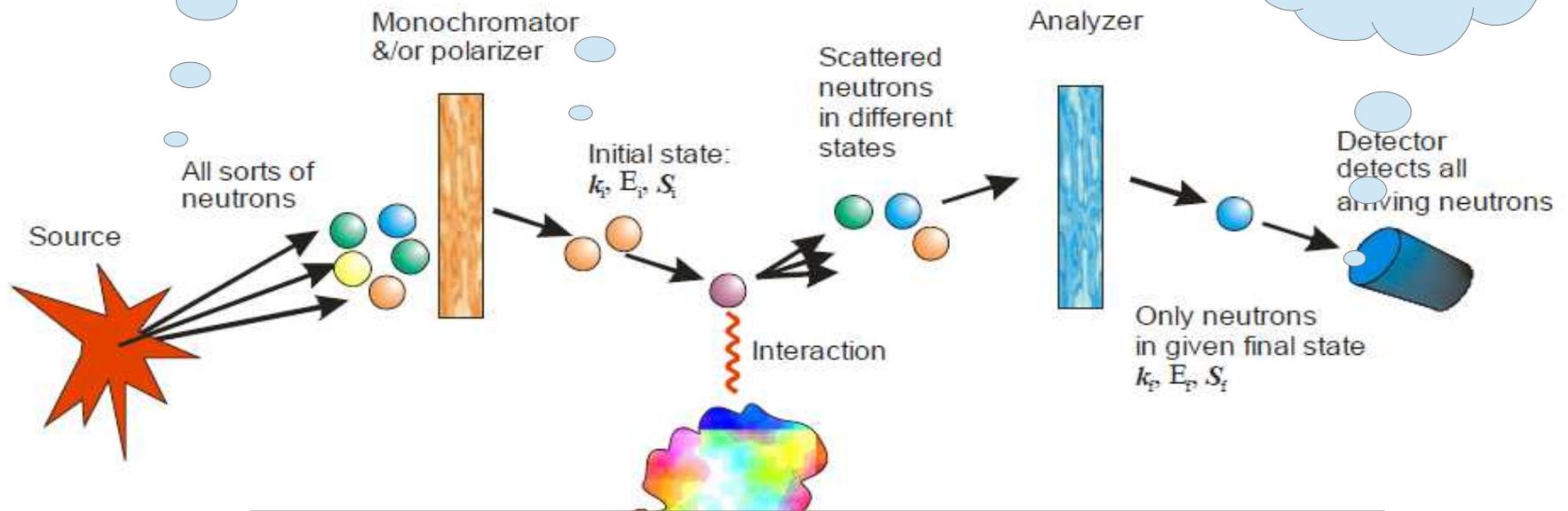
на детекторе иногда считанные отсчёты в секунду...

где  
взять?

как  
выбирать?

эксперимента

как  
обнаружить?



из лекций проф.А.Же

Решение этих вопросов объединяет знания из многих разделов физики.

В результате получается сложный (и дорогой) экспериментальный комплекс

В лучших приборах поток от источника после монохроматора на детекторе и

## «Большие установки» - фабрики нейтронов



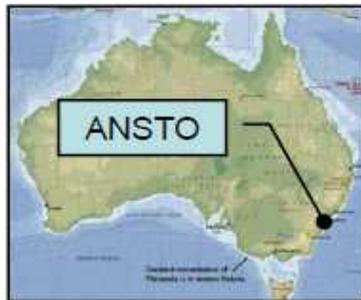
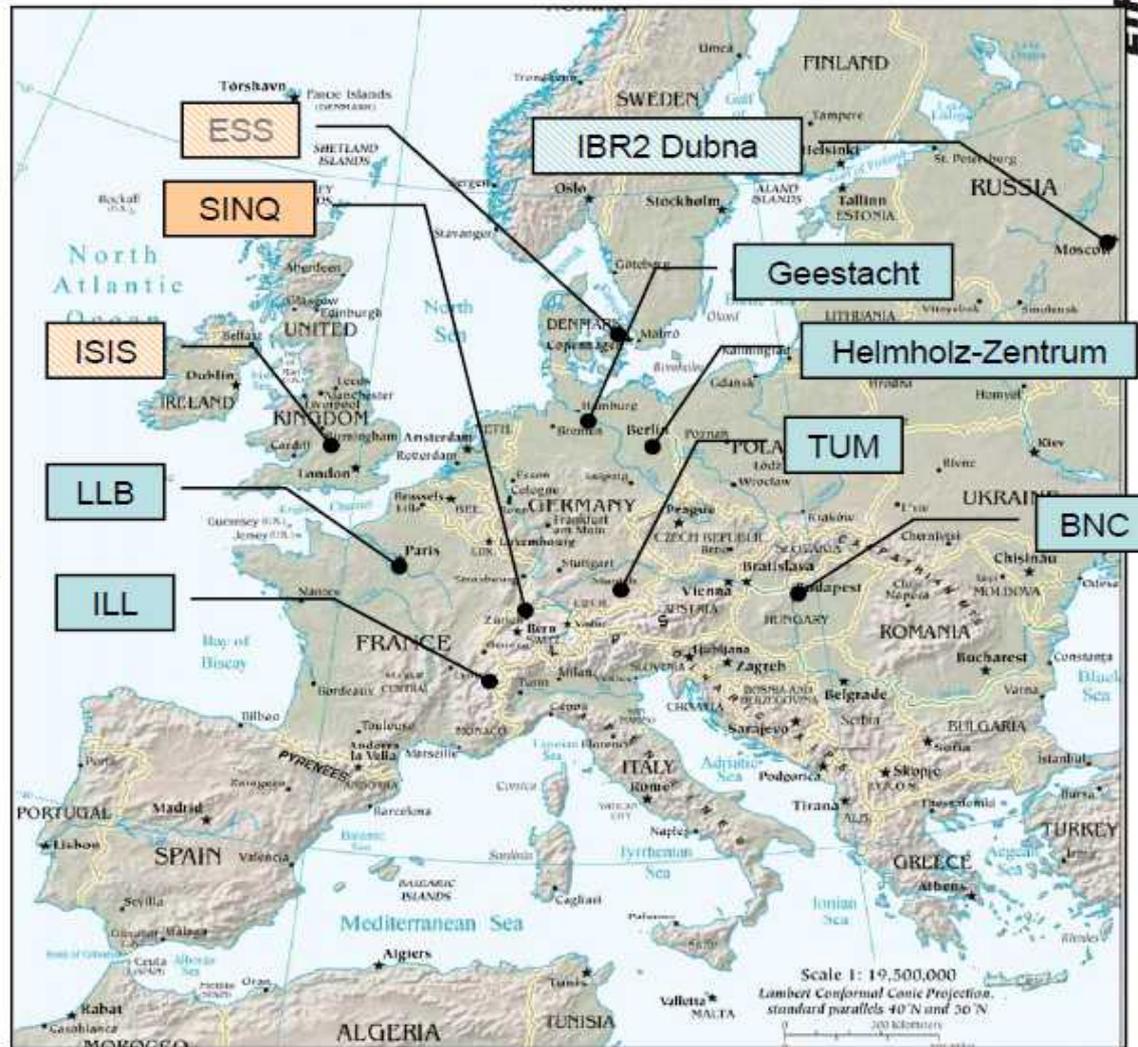
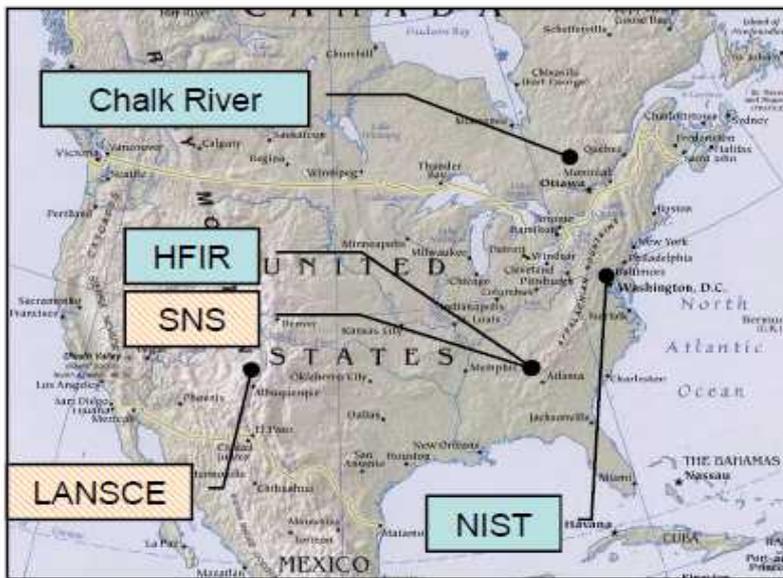
Комплекс Института Лауэ Ланжевена (реакторное здание слева) и синхротрона ESRF (кольцо вдали) ночью. С сайта [www.ill.eu](http://www.ill.eu)

# «Лаборатория»



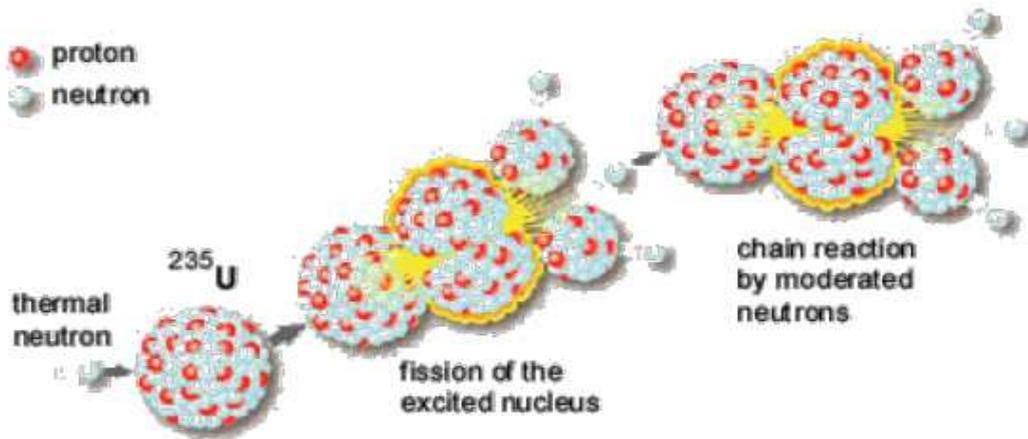
Экспериментальный зал источника нейтронов SINQ Института Поля Шерера (Виллиген, Швейцария). С сайта [www.psi.ch](http://www.psi.ch)

# География



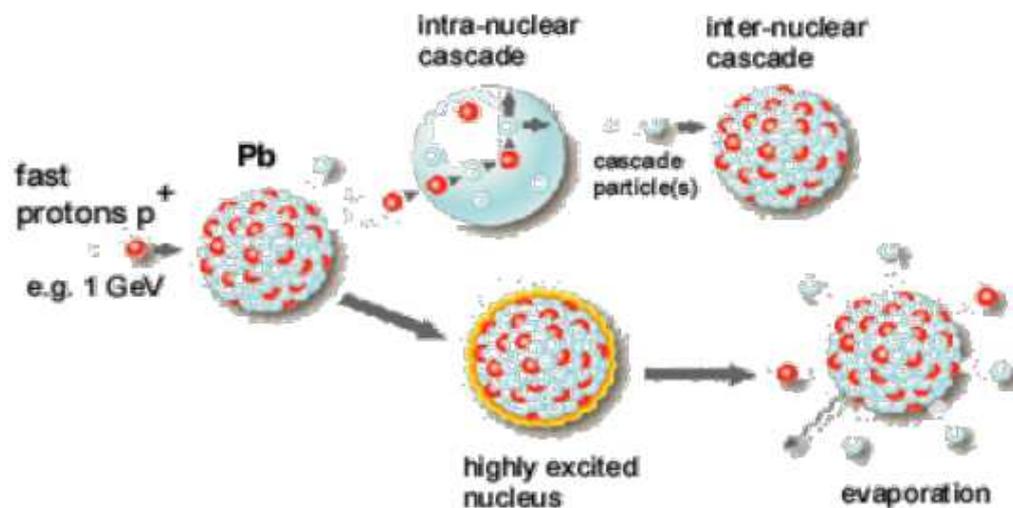
Расположение наиболее известных функционирующих нейтронных источников (2012 год). Из лекций проф. А.Жёлуева

# Откуда берутся нейтроны для эксперимента?



## Fission

- Chain reaction
- Continuous flow
- ~ 1 neutron/fission



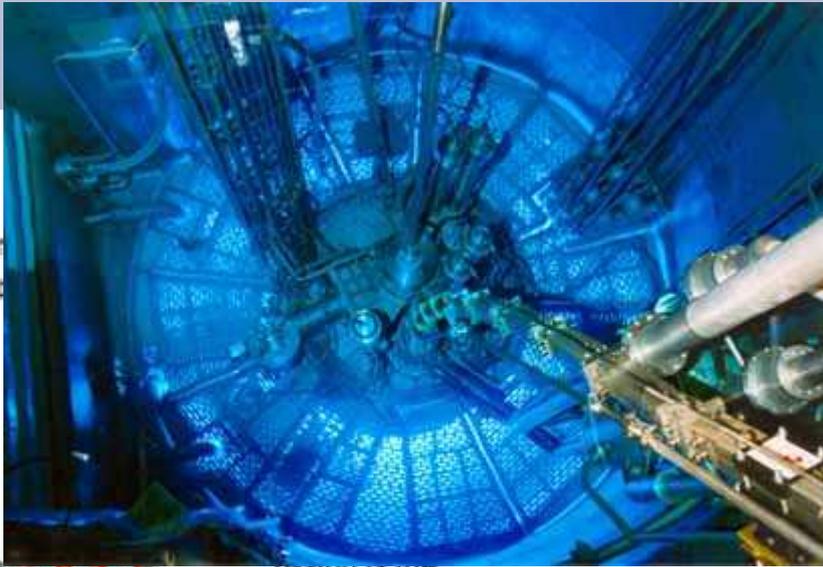
## Spallation

- No chain reaction
- Accelerator driven
- Pulsed operation
- ~ 30 neutrons/proton

## ы для эксперимента?

● proton  
● neutron

thermal  
neutron



fission of the  
excited nucleus

## Fission

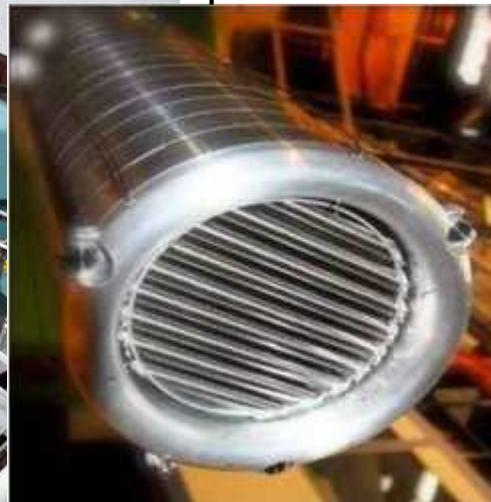
- Chain reaction
- Continuous flow
- ~ 1 neutron/fission



psi.ch

## Spallation

- No chain reaction
- Accelerator driven
- Pulsed operation
- ~ 30 neutrons/proton



расщепление ядра (англ. spallation). Из лекции

# ы для эксперимента?



proton  
neutron

thermal  
neutron



Независимо от метода, энергия получающихся нейтронов порядка 1-10 МэВ

А для «подходящих» длин волн нужно 10 мэВ

1:1,000,000

## Fission

Chain reaction

continuous flow

neutron/fission

ion

chain reaction

Accelerator driven

Pulsed operation

~ 30 neutrons/proton



## Как затормозить нейтрон?

Механика+термодинамика:  
после столкновений с  
модератором при температуре  $T$   
«горячие» нейтроны  
«термализуются» до  $E \sim kT$

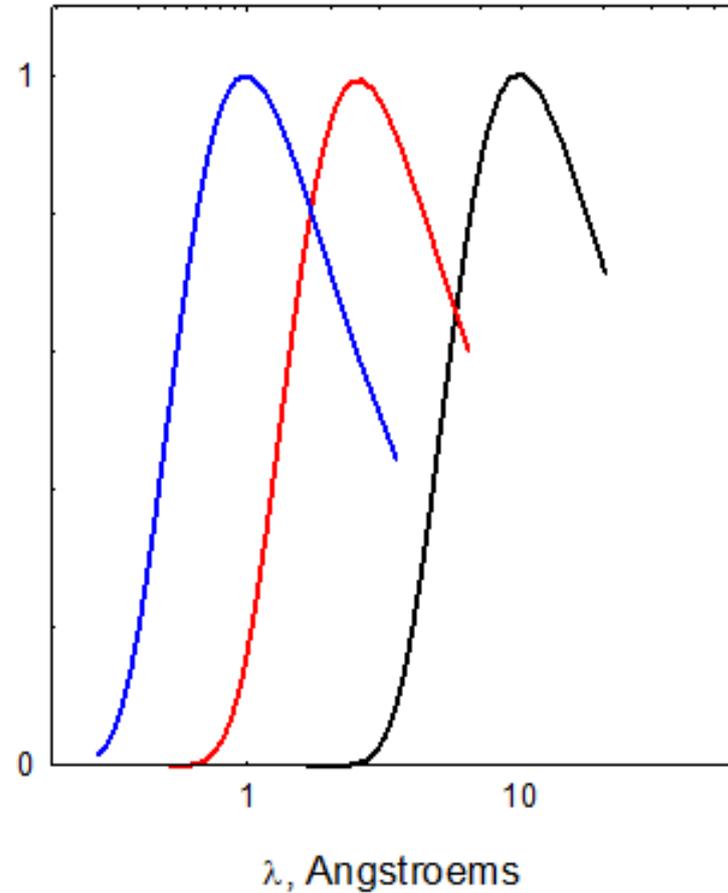
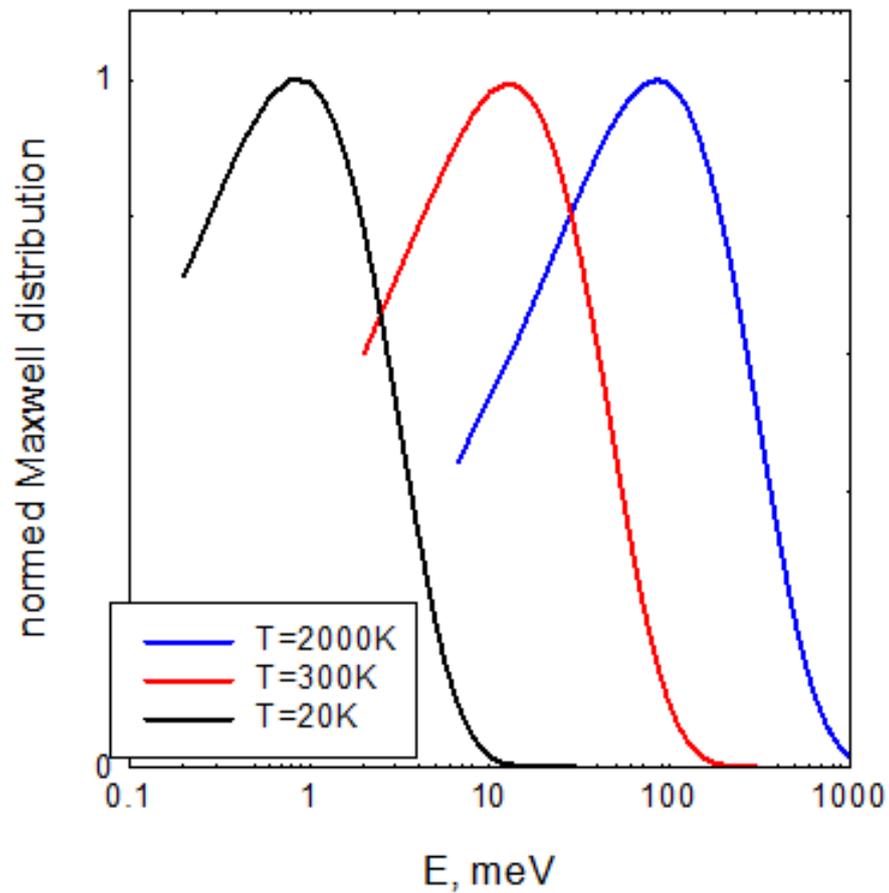
Требования:

- малая масса ядра
- отсутствие поглощения нейтронов

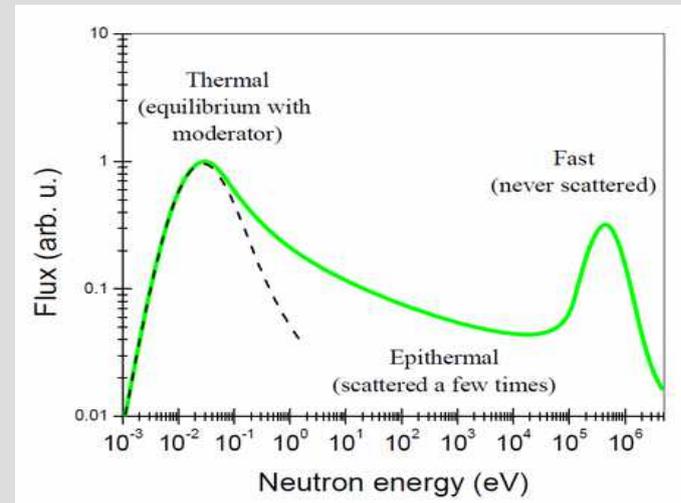
Варианты:  
графит, тяжёлая  
вода, жидкий  
дейтерий



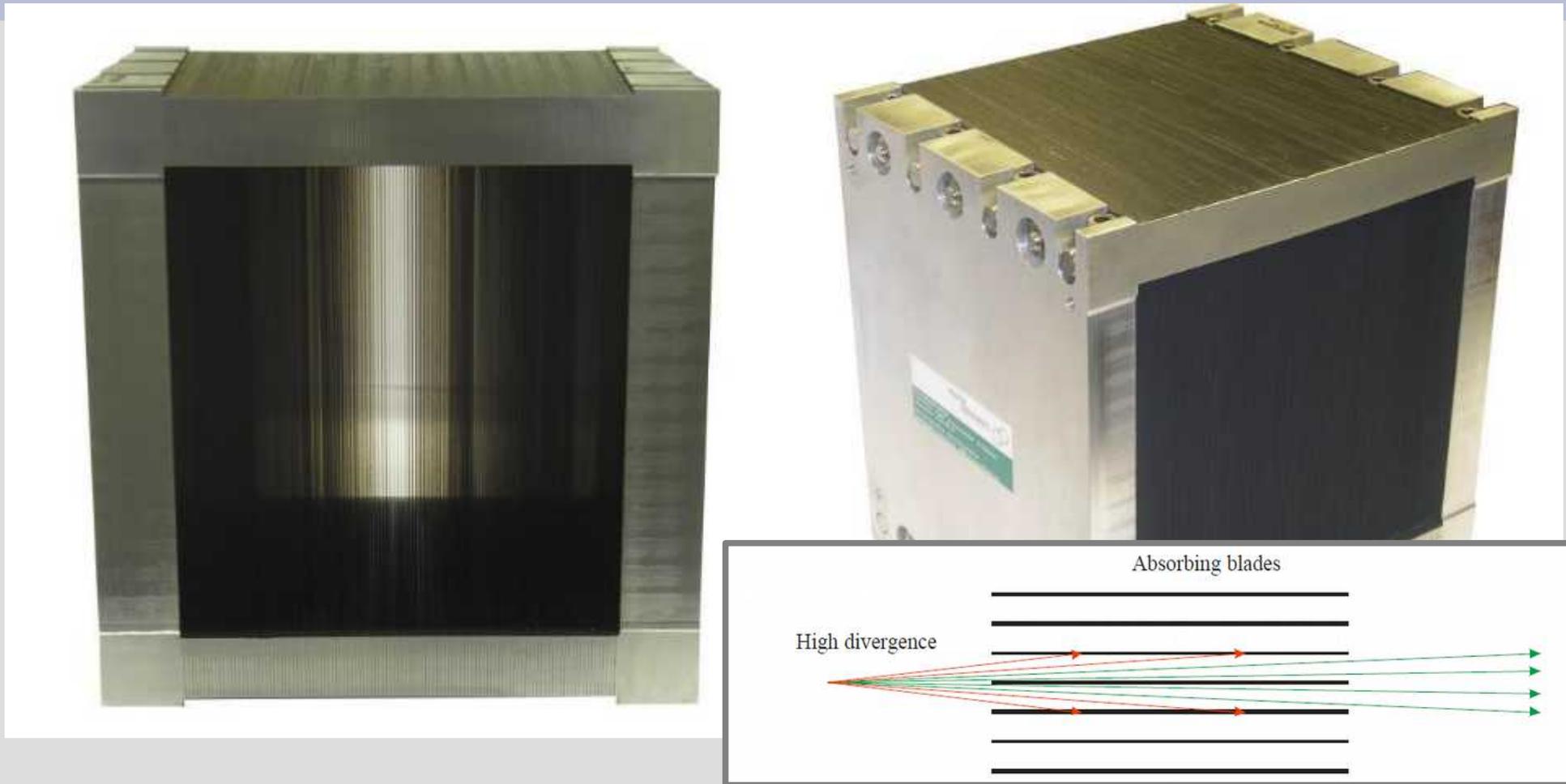
Танк модератора источника SING. Диаметр около 2 метров, видны выходы для нейтронных пучков и (ответвление большого диаметра) место для установки низкотемпературного модератора для получения холодных нейтронов. С сайта psi.ch



Реальное распределение нейтронов по энергии после модератора при комнатной температуре. Из лекций проф. А.Желудева



# Как сделать пучок нейтронов параллельным?

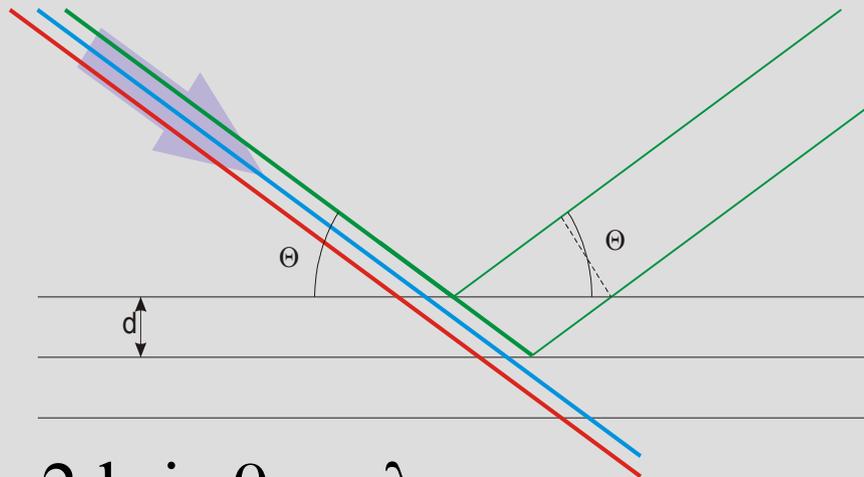


(основное фото) Изготовленный фирмой Euro Collimators коллиматор с расхождением пучка 0.5 градуса. Размер 274x325x330 мм, 113 зазоров, разделённых 25-микронной майларовой плёнкой с покрытием изотопически обогащённого карбида бора (толщина плёнки с покрытием 100 мкм). Изготовлен в 2011 году для Научного центра Юлиха (Forschungszentrum Juelich). С сайта производителя

(схема на вставке) Схема коллимации пучка из лекций проф.А.Желудева

# Как сделать пучок нейтронов «монохроматичным»?

«оптическое» решение



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

«механическое» решение

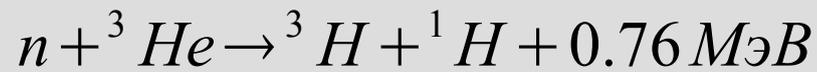


Диск прерывателя пучка с времяпролётного спектрометра в Техническом университете Мюнхена. Поперечный размер ~10 см. Из лекций проф.А.Желудева



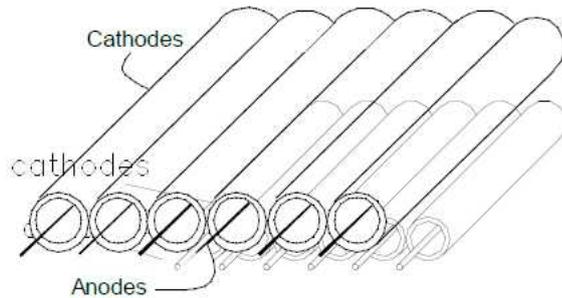
Вертикальный фокусирующий монохроматор с кристаллами ориентированного пиролиитического графита производства компании Swiss Neutronics. Размер 300x170 мм, состоит из 13 полос на которых находится 78 кристаллов графита с мозаичностью около 0.1 градуса, минимальное фокусное расстояние 600 мм. С сайта производителя

# Как обнаружить нейтрон?

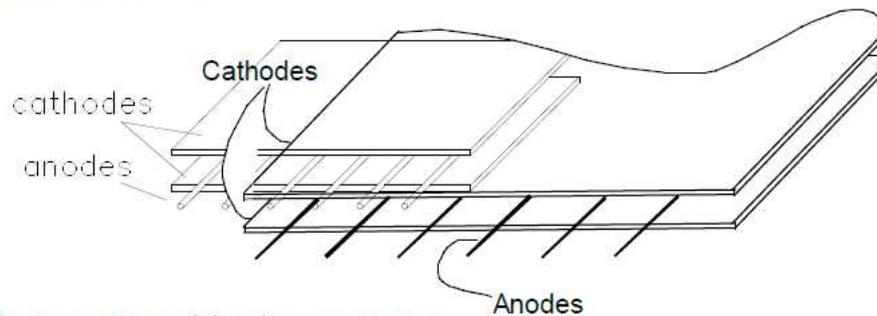


ядерная физика+электростатика

## Multi-Wire Proportional Counter

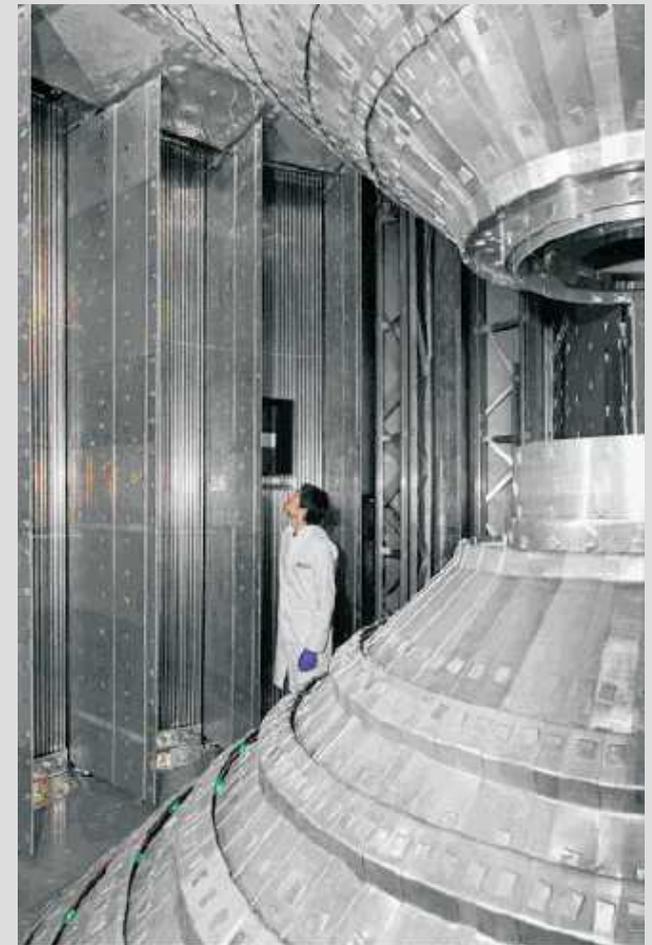


- Array of discrete detectors.



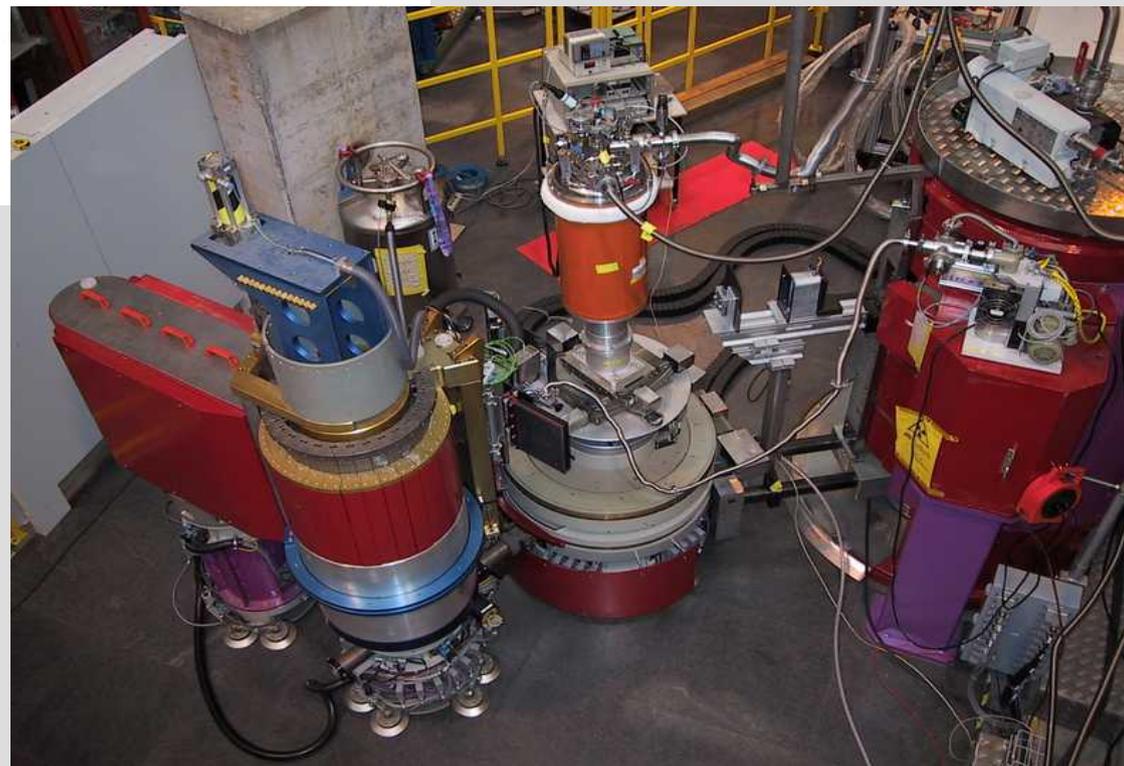
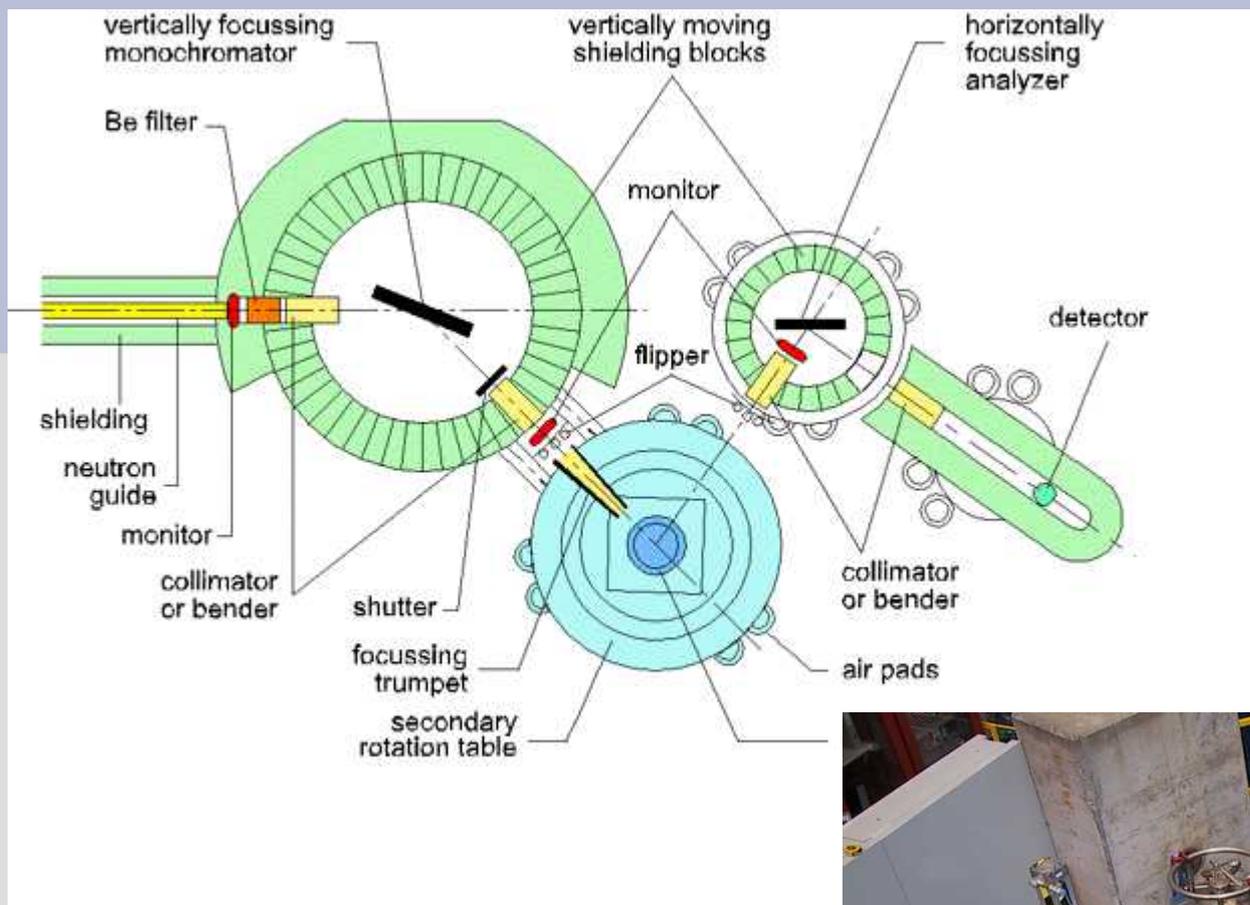
- Remove walls to get multi-wire counter.

Схема многопроволочного пропорционального газового счётчика. Из лекции J.Carpenter "Detectors for Slow Neutrons"



фотография массива детекторов спектрометра LET

## «ОПТИЧЕСКИЙ» вариант спектрометра

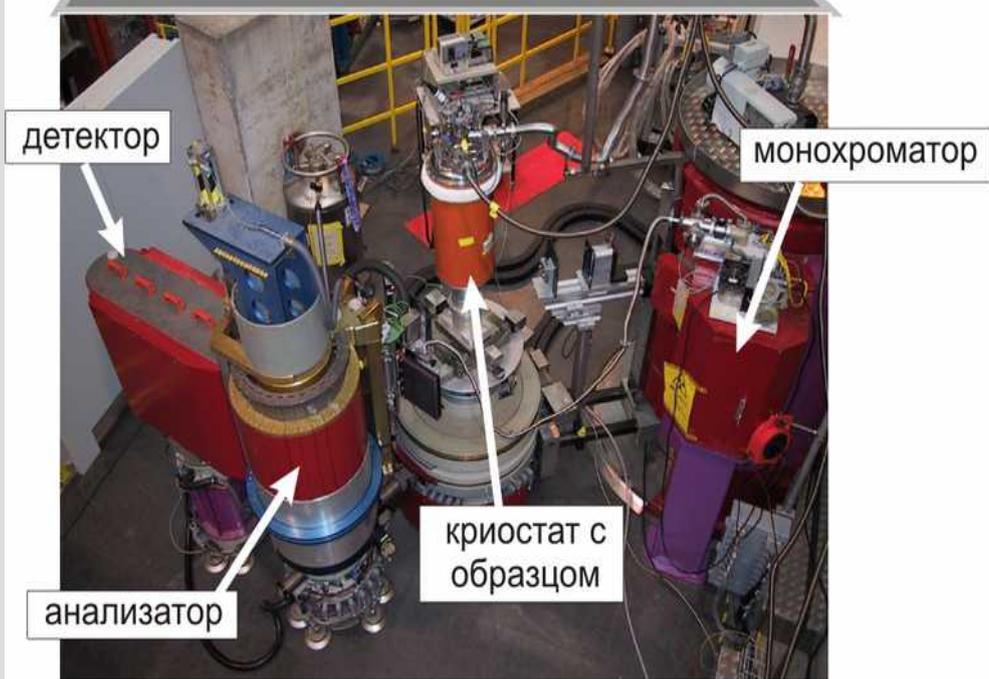


Спектрометр TASP (Институт Поля Шерера). Слева направо: детектор (красный "прямоугольный" блок), анализатор (цилиндрический блок), криостат с образцом (оранжевый), монохроматор. С сайта psi.ch



нейтроноводы

к источнику

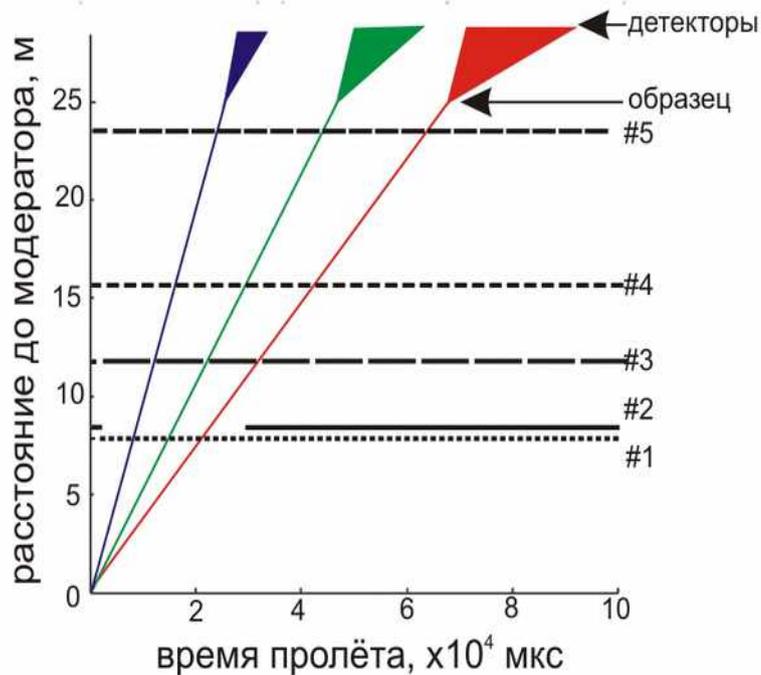
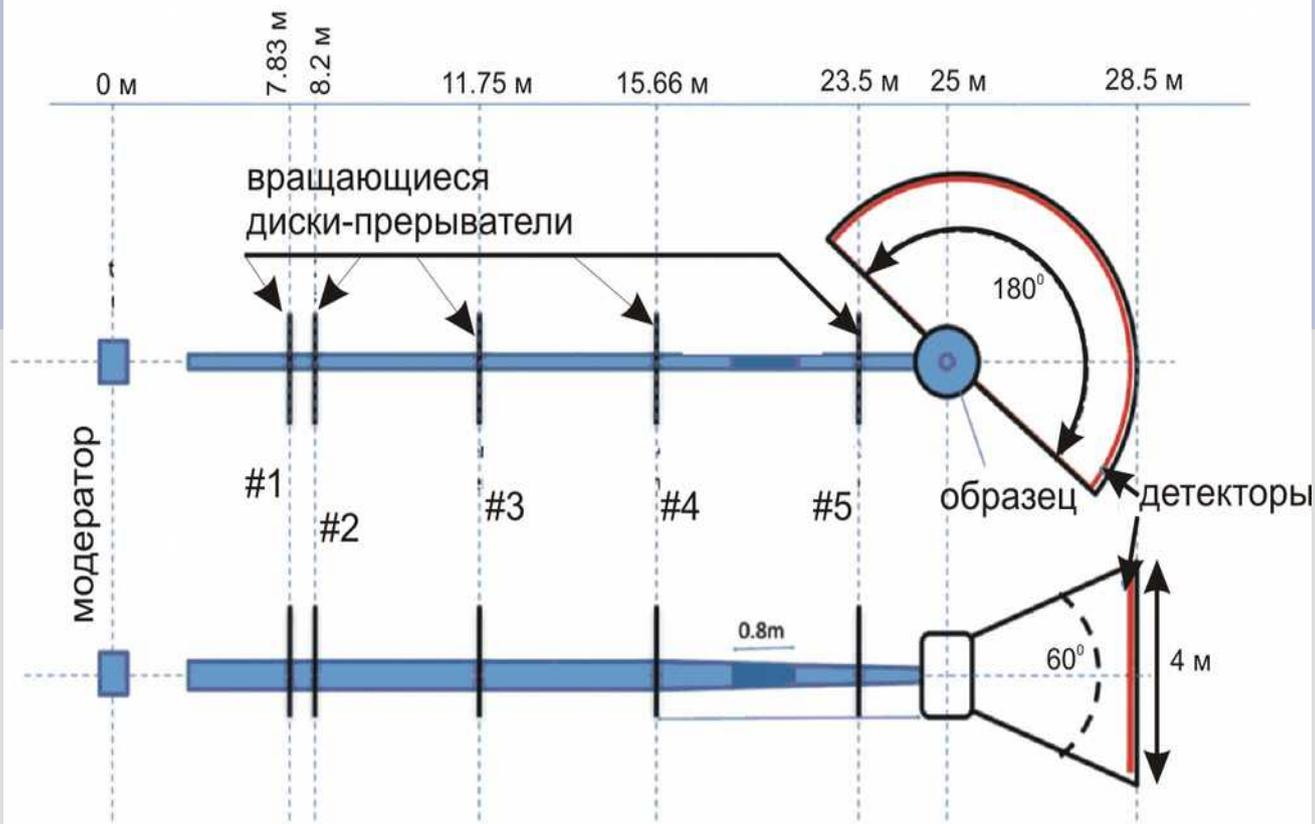


детектор

монокроматор

анализатор

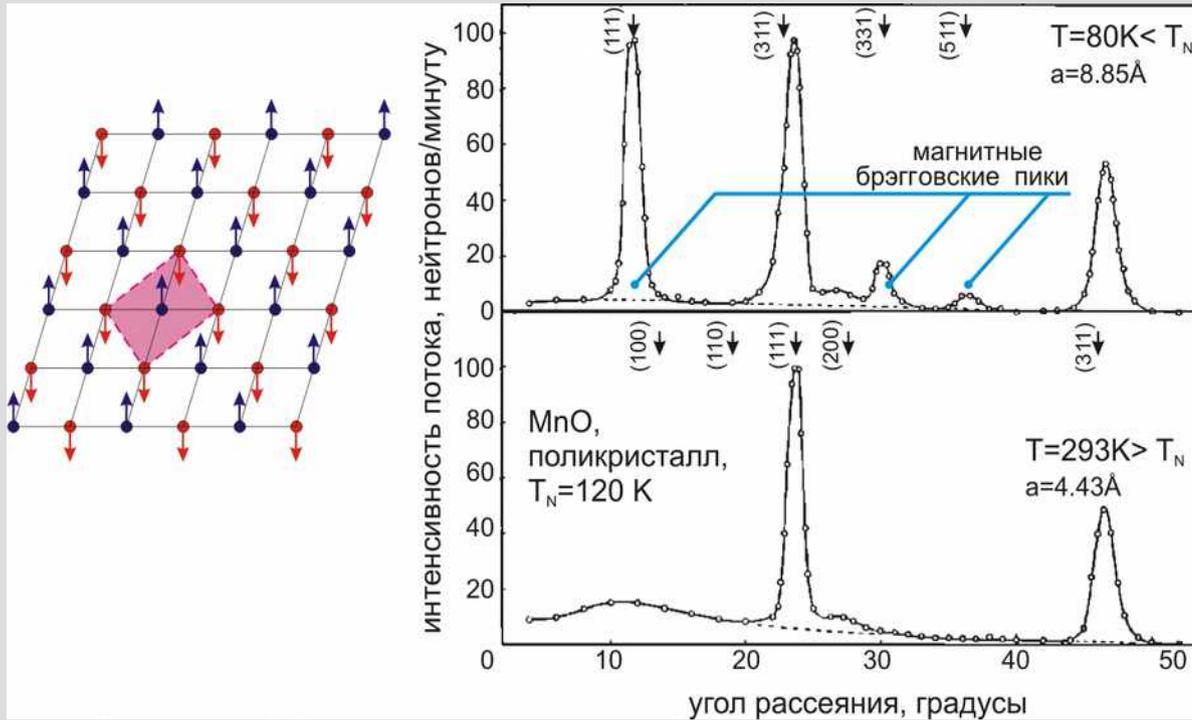
криостат с образцом



«механическая» схема спектрометра:  
 кинематическая  
 фильтрация+подсчёт  
 каждого нейтрона

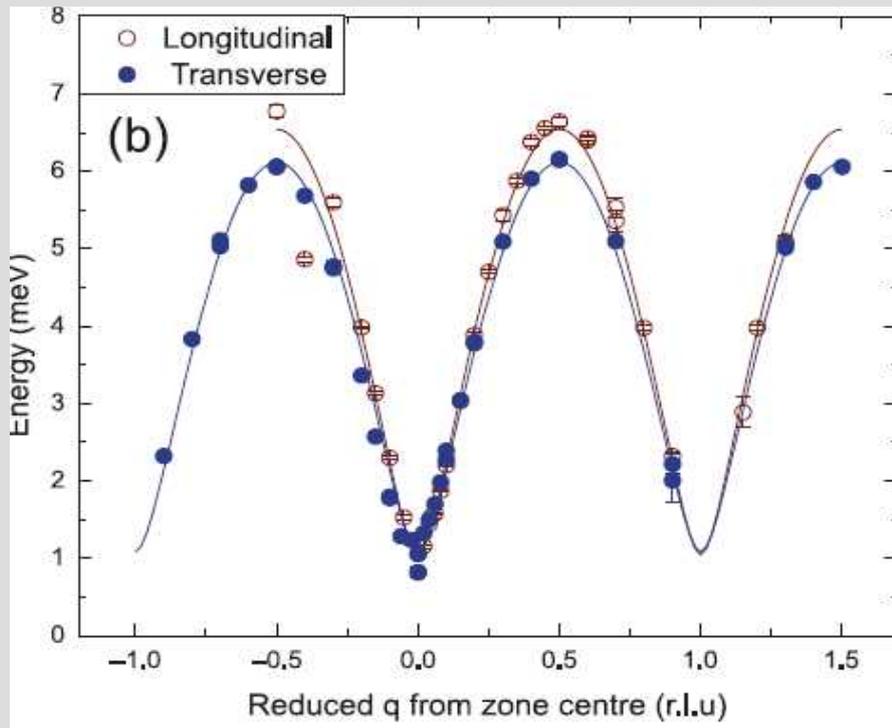
Сверху: схема расположения прерывателей потока нейтронов и массива детекторов во время пролёта нейтронов в спектрометре LET центра ISIS (Великобритания). Расстояния отсчитываются от модератора. Слева внизу: мировые линии нейтронных импульсов, проходящих через систему прерывателей. Пробелы в пунктирных линиях изображают моменты, когда соответствующий прерыватель открыт. Видно, что из одного пакета нейтронов на входе формируется три импульса монохроматических нейтронов (с энергиями около 5 мэВ, 1,5 мэВ и 0,7 мэВ), падающие на образец в разные моменты времени. Таким образом, рассеяние нейтронов с разными энергиями может наблюдаться в одном эксперименте. Снизу справа: фотография массива детекторов спектрометра LET.

# Что можно определить в таком эксперименте?



упругое рассеяние  
(дифракция):  
в т.ч. возникновение и  
структура магнитно-  
упорядоченного состояния

# Что можно ЕЩЁ определить в таком эксперименте?



MnF<sub>2</sub>, спектры для двух поляризаций антиферромагнитных магнонов с волновым вектором  $q$ , измеренные по неупругому рассеянию нейтронов. Волновой вектор нормирован на вектор обратной решётки. Кривые — расчёт в модели спиновых волн.

Z. Yamani, Z. Tun, and D.H. Ryan, "Neutron scattering study of the classical antiferromagnet MnF<sub>2</sub>: a perfect hands-on neutron scattering teaching course.", Canadian Journal of Physics 88, 771 (2010)

Законы сохранения энергии и импульса означают, что при неупругих процессах энергия отдаётся каким-то волнам (колебаниям) в кристалле.

Эти волны (аналогия ЭМ-волны/фотоны) могут быть описаны как некоторые квазичастицы.

Т.о. может быть установлен закон  $E(p)$  для этих квазичастиц:

- гораздо больше вариантов, чем для «обычных» частиц
- всевозможные примеры распадов, взаимодействий частиц
- в т.ч. переход от «безмассового» линейного спектра к квадратичному «спектру массивных частиц» (аналог взаимодействия Хиггса)

## Выводы

- Рассеяние нейтронов (дифракция и неупругое рассеяние) является одним из наиболее сильных методов спектроскопии в физике твёрдого тела.
- Методика проведения эксперимента использует всё богатство физического знания — от кинематики до ядерной физики и оптики.
- Организация эксперимента в специализированных исследовательских центрах является примером физики «больших установок».