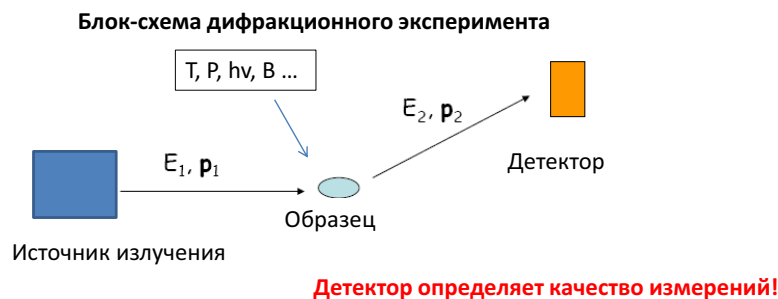


# Основы детектирования нейтронного и синхротронного излучений

Ильин Дмитрий Сергеевич

## Введение



### Что может измерять детектор:

1. Энергию излучения - амплитудные/энергетические характеристики
2. Координату - позиционные характеристики
3. Время - временные характеристики

**Сочетание возможностей и характеристик детектора сильно зависит от его типа!**

### Исследование рассеянного излучения:

- пространственное распределение - задачи дифракции
- энергетическое распределение - спектроскопия

## Лекция 1.

- 1) Введение
- 2) Синхротронное излучение: параметры, источники...
- 3) Нейтронное излучение : параметры, источники...

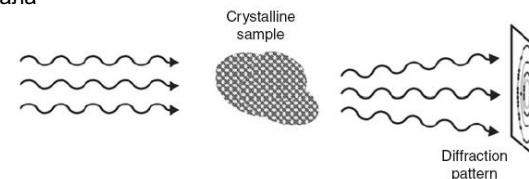
### Пучки фотонов, получаемых на источниках СИ применяются в трех основных областях:

#### • Дифракция и рассеяние:

- Длины волн фотонов  $\sim 1 \text{ \AA}$  ( $\sim 10 \text{ кэВ}$ ) соразмерны с межатомными расстояниями.
- Дифракционная картина, возникающая при рассеянии фотонов, содержит информацию о структуре материала

- биологические объекты
- минералы,
- магнитные материалы и др.

Основной метод исследования макромолекул (протеинов) !



#### Высокая интенсивность современных пучков СИ позволяет

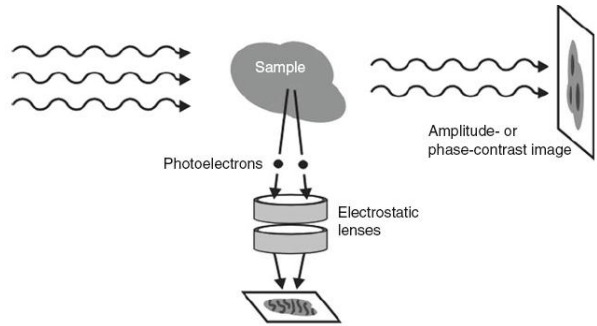
- измерять слабые дифракционные картины с большей точностью
- получать информацию на образцах малого размера (массы)

#### Приоритетные характеристики детекторов:

- позиционная-чувствительность (1D, 2D)
- пространственное разрешение
- эффективность регистрации
- загрузочная способность

**• Микроскопия и отображение:**

- Образцы могут отображаться пучком как при помещении всего образца в пучок так и сканированием узким (точечным) пучком вдоль образца.
- Характер поглощения фотонов может дать дополнительную информацию, например, **хим. состав**



- Широкий спектр СИ позволяет проводить исследования для различных энергий фотонов.
- При сканировании образца узким пучком с использованием позиционно-чувствительного детектора становится возможным комбинирование дифракционных и спектроскопических методик.

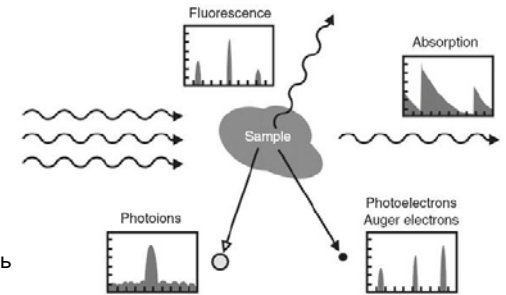
**• Спектроскопия:**

- Исследование поглощения, отражения или флуоресценции образца при различных энергиях фотонов СИ дает информацию о элементном составе в-ва, о его химическом состоянии, и физических свойствах.

- определение состава неизвестных образцов
- исследование свойств новых материалов
- аттестация материала на производстве

**Высокая интенсивность СИ и возможность перестройки по энергии:**

- широкий спектр элементов в очень малых концентрациях
- при сканировании образца микропучком фотонов: хим. состав с координатной привязкой



**Есть и другие возможности:**

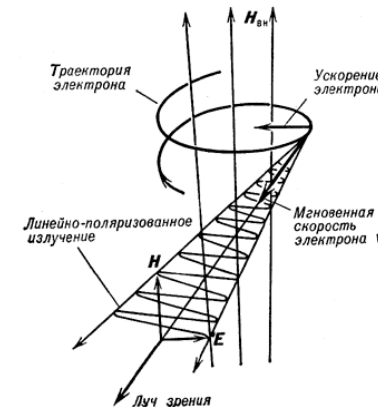
- временная структура СИ дает возможность исследований **быстропротекающих процессов**.

**В материаловедении:** фазовые переходы, полимеризация и механическая деформация.

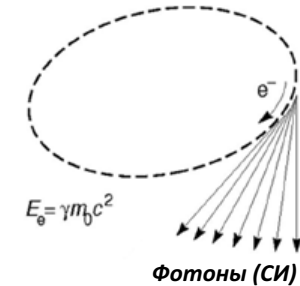
**В химии и биологии:** сокращение мышц, фазовые переходы в липидах, хим. реакции.

**Синхротронное излучение**

**СИ: принцип генерации**



Для получения СИ удобно использовать e- или e+:  
 1) Легко ускоряются  
 2) Теряют много энергии на СИ в магнитном поле

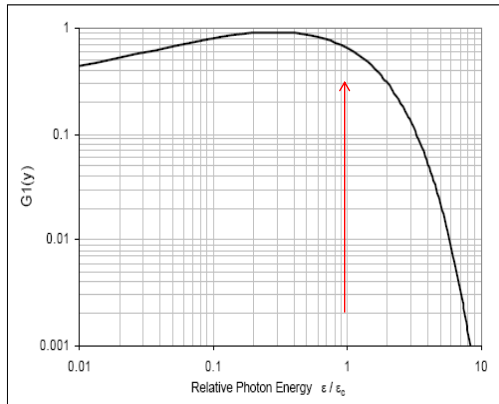


$E_e \gg m_0 c^2$  - энергия электрона

$\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$  - релятивистский фактор

Энергия электронов ( $E_e$ ) в зависимости от конструкции ускорителя :  
 сотни МэВ - неск. ГэВ

## Спектр СИ



Типичный спектр излучения релятивистского электрона при движении по круговой орбите. Например, в поле отклоняющего магнита

Спектральный состав СИ характеризуют **критической длиной волны** (или критической энергией)

$$E_c = \frac{hc}{\lambda_c}$$

$\lambda_c$ : суммарная энергия СИ, излучаемая источником для всех  $\lambda < \lambda_c$ , равная суммарной энергии для всех  $\lambda > \lambda_c$

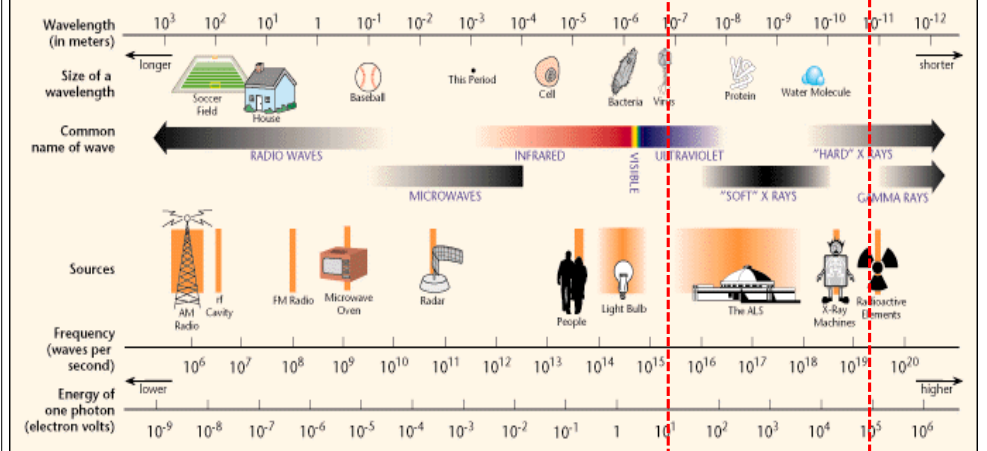
**Критическая энергия фотонов (СИ)**

$$E_c = 0.665 B E_e^2$$

$E_c$  – критическая энергия фотонов (кэВ)  
 $E_e$  – энергия электронов (ГэВ)  
 $B$  – напряженность магнитного поля (Тл)

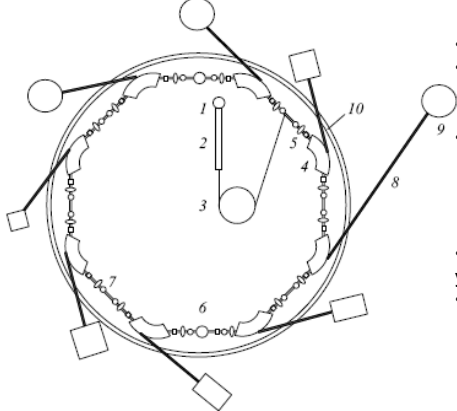
**Управляя магн. полем можно менять спектр СИ**

## THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



**Максимальная интенсивность СИ: УФ – рентген: дес. эВ ÷ дес. кэВ**

## Источники СИ: накопительное кольцо



- Источник электронов (1) - электронная пушка (ТЭЭ)
- Система предварительного ускорения
  - Линак (2) – лин. ускоритель: до 450 МэВ
  - бустер (3) – циклич. ускоритель: до 7 ГэВ
- накопительное кольцо
  - система магнитных линз (5): фокусировка
  - радиочастотный резонатор (6) – разгон электронов и компенсация потерь
  - поворотные магниты (4)
- линейный участок кольца для размещения устройства для получения СИ (7)
- экспериментальная станция (9)

Накопительное кольцо предыдущего поколения – круг, т.е. потери на излучение по всей траектории – плохо!

**Современное накопительное кольцо** - многогранник. Электрон теряет энергию на излучение только в поворотных магнитах (углах). Между магнитами электрон движется прямолинейно.

Радиус орбиты

$$R = \frac{E_e}{eB}$$

R: 10-30м  
 $E_e$ : 1-6 ГэВ  
 Магнитная индукция в поворотных магнитах B: 1-2 Тл

Электронный ток

$$I = \frac{2\pi e N_e R}{c}$$

I: 50-500 мА  
 $N_e$ : число электронов в пучке

- **Полная мощность СИ**, излучаемая электронным пучком за оборот по орбите

$$W \sim \frac{I \gamma^4}{R} \quad \gamma = \frac{E}{mc^2} \text{ – Лоренц-фактор электрона}$$

$$\lambda_c = \frac{4\pi e R}{3\gamma^3}$$

- Размерный параметр источника СИ – **эмиттанс ( $\epsilon$ )** – величина, равная произведению размера поперечного сечения излучающей области пучка электронов на угол расходимости пучка фотонов

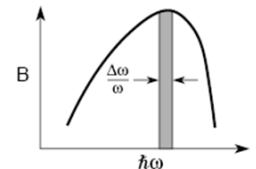
Для современных источников: верт. эм.  $10^{-10}$ - $10^{-8}$  м\*рад,  
 гориз. эм.  $10^{-8}$ - $10^{-6}$  м\*рад

- Интенсивность СИ характеризуют **яркостью** – число фотонов, испускаемых в единицу времени с единичной площади поверхности источника в единицу телесного угла расходимости пучка фотонов.

Яркость – фотон с-1 мм-2 рад-2

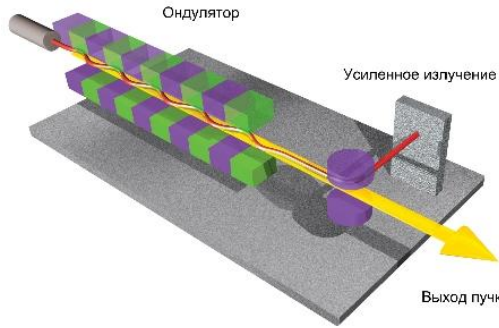
- **Спектральная яркость** – величина светимости, приходящаяся на диапазон энергий ( $D\omega/B\omega$ ) фотонного пучка  $D\omega/\omega$ . Обычно принимают 0.1% от энергии фотонов

$\phi$  с<sup>-1</sup> мм<sup>-2</sup> мрад<sup>-2</sup> 0.1% BW



## Встраиваемые устройства для получения СИ

Источник электронов



- отклоняющий магнит
- виглер
- ондулятор

### Ондулятор (APS)



При движении через виглер траектория электрона - синусоида, интенсивность генерируемого излучения  $\sim$  числу периодов  $N$

## Режимы работы ондулятора

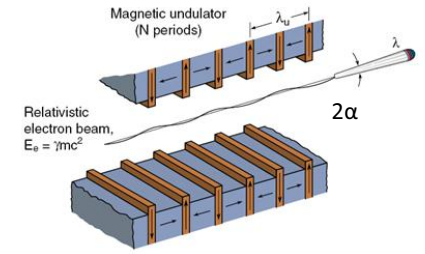
**Коэффициент ондуляторности:**

$$K = \frac{eB\lambda_u}{2\pi m_e c}$$

$B$  – напряженность магнитного поля

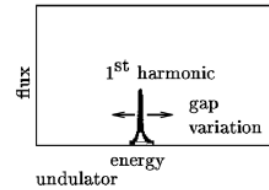
$e$ ,  $m_e$  – заряд и масса электрона,

$\lambda_u$  – период ондулятора

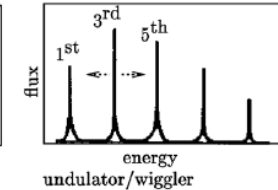


**Параметр  $K$  определяет форму спектра СИ**

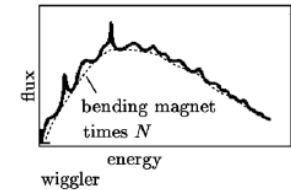
$K \ll 1$ ,  $N$  large



$K \approx 1$ ,  $N$  large



$K > 1$ ,  $N$  smaller



**Энергия фотонов  $n$ -й гармоники:**

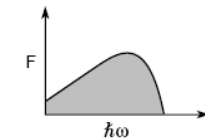
$$E_n (\text{кэВ}) = n \frac{0.95 E^2 (\text{ГэВ})}{\lambda_u (\text{см}) (1 + K^2 / 2)}$$

**Спектр излучения ондулятора (1-я гармоника):**

$$\lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2}\right) \quad \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \approx \frac{1}{N}$$

## Три формы СИ

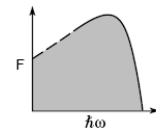
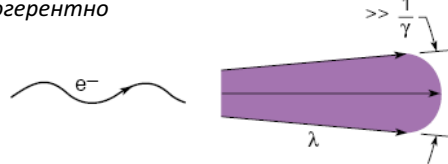
1. Отклоняющий магнит: интенсивность СИ  $I \sim 1$



- Широкий пучок фотонов
- низкая сп. яркость

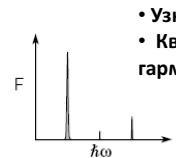
2. Виглер  $B=5-10\text{Тл}$  ( $K \geq 1$ ): интенсивность СИ  $I \sim N$

Интерференции нет – излучение складывается некогерентно



- Широкий пучок фотонов
- Немонохроматическое излучение

3. Ондулятор  $B \sim 1\text{Тл}$  ( $K < 1$ ) интенсивность СИ  $I \sim N^2$  – интерференция пучка



- Узконаправленное
- Квазимонохроматическое - гармоника

## Сравнение встраиваемых устройств

**Отклоняющий магнит**

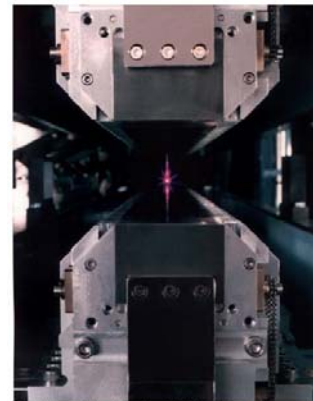
- Широкий спектр СИ
- Интенсивный поток фотонов
- более доступно и дешево

**Виглер**

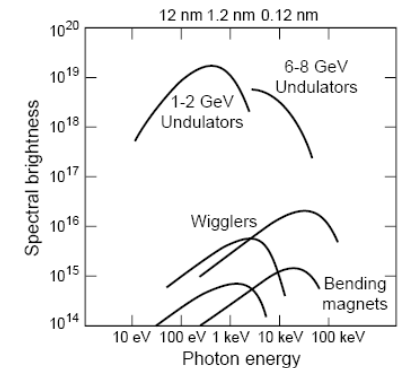
- Более интенсивный источник
- дорогие магнитные системы
- дорогая охлаждаемая оптика
- менее доступно

**Ондулятор**

- Самая высокая спектральная яркость
- эмиттанс (расходимость пучка)
- частичная когерентность
- дорого и менее доступно



ALS U5 undulator, beamline 7.0,  $N = 89$ ,  $\lambda_u = 50$  mm



## Некоторые часто применяемые формулы СИ

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}; \quad \beta = \frac{v}{c}$$

$$E_e = \gamma mc^2, \quad p = \gamma mv$$

$$\gamma = \frac{E_e}{mc^2} = 1957 E_e(\text{GeV})$$

$$\hbar\omega \cdot \lambda = 1239.842 \text{ eV} \cdot \text{nm}$$

$$1 \text{ watt} \Rightarrow 5.034 \times 10^{15} \lambda[\text{nm}] \frac{\text{photons}}{\text{s}}$$

$$\text{Bending Magnet: } E_c = \frac{3e\hbar B\gamma^2}{2m}, \quad E_c(\text{keV}) = 0.6650 E_e^2(\text{GeV}) B(\text{T})$$

$$\text{Undulator: } \lambda = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2\theta^2 \right); \quad E(\text{keV}) = \frac{0.9496 E_e^2(\text{GeV})}{\lambda_u(\text{cm}) \left( 1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2\theta^2 \right)}$$

$$\text{where } K \equiv \frac{eB_0\lambda_u}{2\pi mc} = 0.9337 B_0(\text{T})\lambda_u(\text{cm})$$

Facility	ALS	MAX II	BESSY II	APS	ESRF
Electron energy	1.90 GeV	1.50 GeV	1.70 GeV	7.00 GeV	6.04 GeV
$\gamma$	3720	2940	3330	13700	11800
Current (mA)	400	250	200	100	200
Circumference (m)	197	90	240	1100	884
RF frequency (MHz)	500	500	500	352	352
Pulse duration (FWHM) (ps)	35-70	200	20-50	100	70
<i>Bending Magnet Radiation:</i>					
Bending magnet field (T)	1.27	1.48	1.30	0.599	0.806
Critical photon energy (keV)	3.05	2.21	2.50	19.5	19.6
Critical photon wavelength	0.407 nm	0.560 nm	0.50 nm	0.636 Å	0.634 Å
Bending magnet sources	24	20	32	35	32
<i>Undulator Radiation:</i>					
Number of straight sections	12	10	16	40	32
Undulator period (typical) (cm)	5.00	5.20	4.90	3.30	4.20
Number of periods	89	49	84	72	38
Photon energy ( $K=1, n=1$ )	457 eV	274 eV	373 eV	9.40 keV	5.30 keV
Photon wavelength ( $K=1, n=1$ )	2.71 nm	4.53 nm	3.32 nm	1.32 Å	0.225 nm
Tuning range ( $n=1$ )	230-620 eV	130-410 eV	140-500 eV	3.5-12 keV	2.6-7.3 keV
Tuning range ( $n=3$ )	690-1800 eV	400-1200 eV	410-1100 eV	10-38 keV	7.7-22 keV
Central cone half-angle ( $K=1$ )	35 $\mu\text{rad}$	59 $\mu\text{rad}$	33 $\mu\text{rad}$	11 $\mu\text{rad}$	17 $\mu\text{rad}$
Power in central cone ( $K=1, n=1$ ) (W)	2.3	0.88	0.95	12	14
Flux in central cone (photons/s)	$3.1 \times 10^{16}$	$2.0 \times 10^{16}$	$1.6 \times 10^{16}$	$7.9 \times 10^{15}$	$1.6 \times 10^{16}$
$\sigma_x, \sigma_y$ ( $\mu\text{m}$ )	260, 16	300, 45	314, 24	320, 50	395, 9.9
$\sigma_x^+, \sigma_y^+$ ( $\mu\text{rad}$ )	23, 3.9	26, 20	18, 12	23, 7	11, 3.9
Brightness ( $K=1, n=1$ ) <sup>a</sup> [(photons/s)/mm <sup>2</sup> · mrad <sup>2</sup> · (0.1% BW)]	$2.3 \times 10^{19}$	$7.8 \times 10^{17}$	$4.6 \times 10^{18}$	$5.9 \times 10^{18}$	$5.1 \times 10^{18}$
Total power ( $K=1, \text{all } n, \text{all } \theta$ ) (W)	83	17	32	350	480
Other undulator periods (cm)	3.65, 8.00, 10.0	5.88, 6.60	4.1, 5.6, 12.5	2.70, 5.50, 12.8	2.3, 3.2, 5.2, 8.5
<i>Wiggler Radiation:</i>					
Wiggler period (typical) (cm)	16.0	17.4	12.5	8.5	8.0
Number of periods	19	13	32	28	20
Magnetic field (maximum) (T)	2.1	1.80	1.15	1.0	0.81
$K$ (maximum)	32	29.3	12.8	7.9	6.0
Critical photon energy (keV)	5.1	2.69	2.11	33	20
Critical photon wavelength	0.24 nm	0.46 nm	0.59 nm	0.38 Å	0.62 Å
Total power (max. $K$ ) (kW)	13	5.9	1.8	7.4	4.8

[http://xdb.lbl.gov/Section2/Sec\\_2-3.html](http://xdb.lbl.gov/Section2/Sec_2-3.html)

## СИ: сочетание уникальных свойств

- Очень высокая светимость /эмиттанс
  - высокая интенсивность
  - высокая степень коллимации
  - высокая степень когерентности



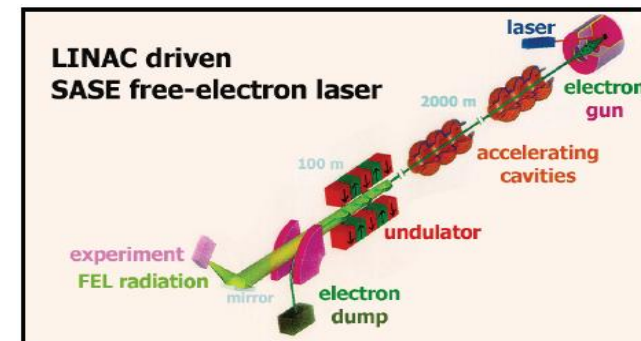
- «Белый» спектр
  - возможность выбора в широком диапазоне: УФ-рентген

- Поляризация пучка
  - спин-чувствительность
  - чувствительность к анизотропным свойствам среды

- Импульсное излучение
  - время-корреляционные измерения

- Высокая экологическая безопасность источников (по сравнению с нейтронными источниками)

## Источники СИ: Лазер на свободных электронах (FEL)



### Накопительное кольцо:

- Сохранение электронов в кольце до десятков часов
- Потери на излучение

### FEL:

- Очень короткий импульс 100 фмс (XFEL, DESY)
- Сп. яркость в  $10^9$  раз выше (!)
- когерентный источник
- широкий диапазон перестройки энергии
- эмиттанс в 100 раз меньше



## FEL: SASE –self-amplified spontaneous emission

• Работа **лазера на свободных электронах** (FEL) основана на явлении **самопроизвольного усиления спонтанного излучения**, при котором спонтанное излучение в передней части длинного ондулятора взаимодействует с электронами периодически изменяя их кинетическую энергию. Такой процесс приводит к модуляции плотности пучка, что в свою очередь приводит к **росту когерентности излучения**, которое в свою очередь увеличивает модуляцию.

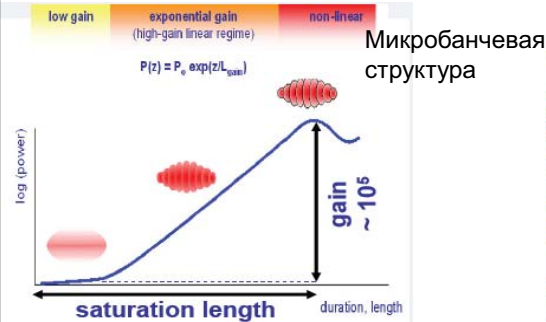
**КИ** - согласованность колебаний э/м поля в разных точках пространства в различные моменты времени. КИ определяет способность излучения к интерференции.

• Результатом этой положительной связи является экспоненциальный рост интенсивности излучения вдоль ондулятора. Расстояние на котором мощность излучения увеличивается в  $e$  раз называется **длиной усиления** (gain length).

Она зависит от Лоренц-фактора  $\gamma$ , электронной плотности  $n_e$  и поперечного размера пучка  $\sigma_r$ .

$$L_g \propto \frac{\gamma \sigma_r^{2/3}}{n_e^{1/3}}$$

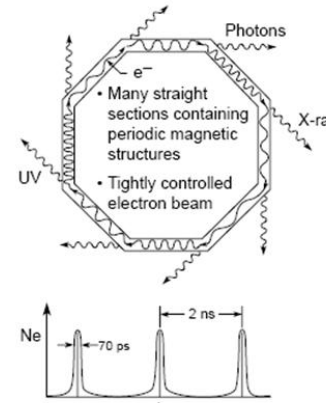
Процесс усиления достигает насыщения приблизительно с  $20 \cdot L_g$ .



	LCLS (USA)	SCSS (JAPAN)	EUROPEAN XFEL (SASE1)
Minimum Wavelength (nm)	0.15	0.1	0.1
Peak Brilliance (photons/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> /0.1%BW)	$8.5 \cdot 10^{32}$	$5 \cdot 10^{33}$	$5 \cdot 10^{33}$
Average Brilliance	$2.4 \cdot 10^{22}$	$1.5 \cdot 10^{23}$	$1.6 \cdot 10^{23}$
Pulses/s	120	60	30 000
Pulse Duration (fs)	100 and below	500	100 and below
First Beam	2009	2011	2014

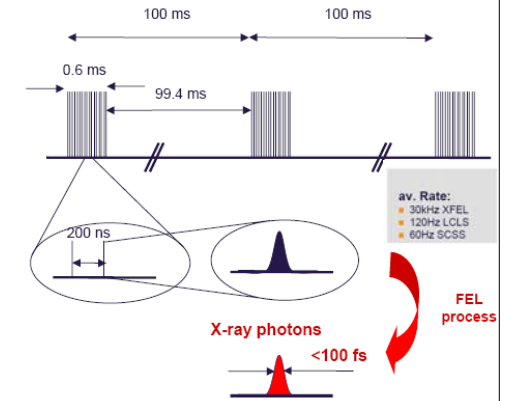
## Временная структура СИ

### Циклический ускоритель



Facility	ALS	APS
Electron energy	1.90 GeV	7.00 GeV
$\gamma$	3720	13,700
Current (mA)	400	100
Circumference (m)	197	1100
RF frequency (MHz)	500	352
Pulse duration (FWHM) (ps)	35–100	170

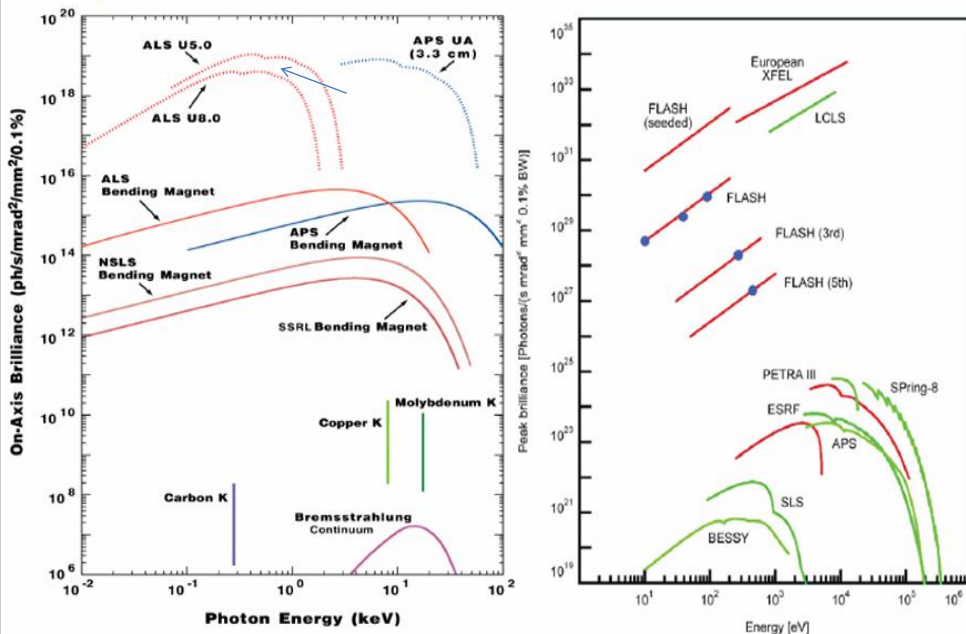
### Линейный ускоритель (FEL)



«Время жизни» пучка электронов:

- ESRF до  $2.5 \times 10^5$  с
- XFEL (linac 2 км)  $6.6 \times 10^{-6}$  с

## Сравнение светимостей источников СИ



## Сравнение источников СИ

- Накопительные кольца – 3-е поколение источников
  - кольцевые ускорители электронов/позитронов
  - Постоянные (условно) – 2-10 нс между банчами
  - высокая стабильность электронных пучков – десятки часов
  - высокая яркость, относительно низкая спектральная яркость

- FEL – 4е поколение источников

- линейные ускорители (LINAC – 15-20 ГэВ)
- с невысокой скоростью циклов XFEL - 30кГц, LCLS – 120 Гц

- длительность импульса менее 1 пкс (в 1000 раз короче)
- предельно высокий эмиттанс (X и Y в 100 и 3 раза)

$$\varepsilon(x) \rightarrow \varepsilon_0 = \lambda/2\pi - \text{дифракц. предел } e-$$

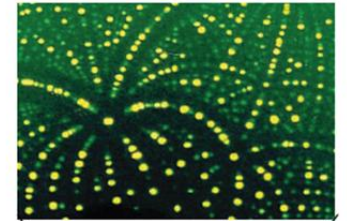
- высокая спектральная яркость, выше «колец» на 9 порядков
- число фотонов на импульс в 300 выше
- высокая степень монохроматичности  $10^{-3}$ - $10^{-4}$  (в 10 раз выше)

## Примеры экспериментов с использованием СИ

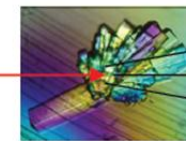
### Кристаллография протеинов



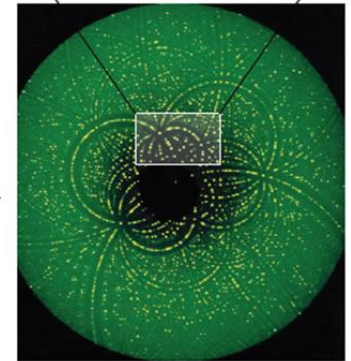
### Diffraction pattern



X-rays

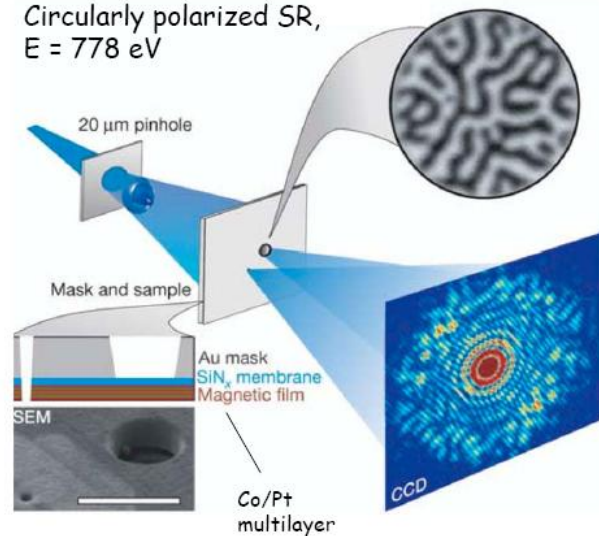


Protein crystal

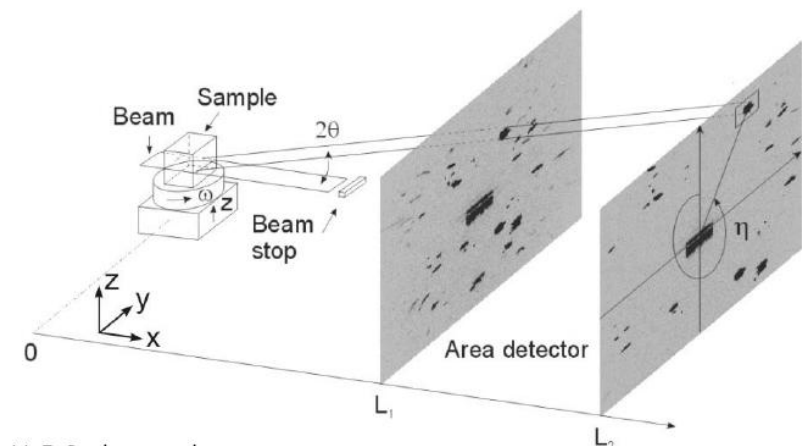


### Магнитные домены в материалах

Circularly polarized SR,  
 $E = 778 \text{ eV}$

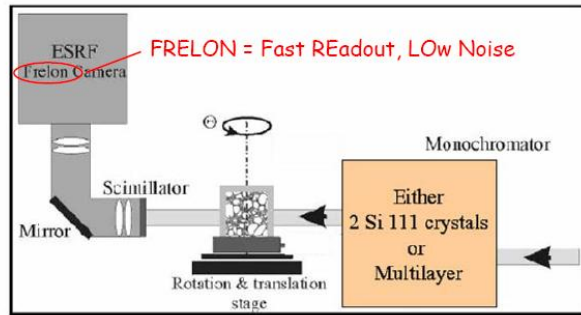


### Исследование зерен в металлах и сплавах (металлургия), изменения микроструктуры при внешнем воздействии

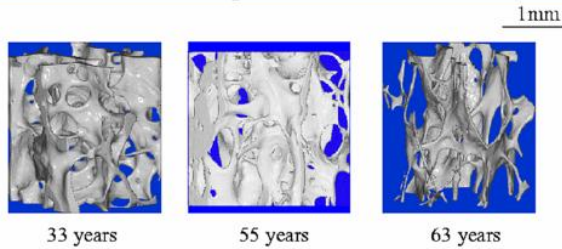


H. F. Poulsen et al.,  
*J. Appl. Cryst.* 34, 751 (2001)

## Микротомография



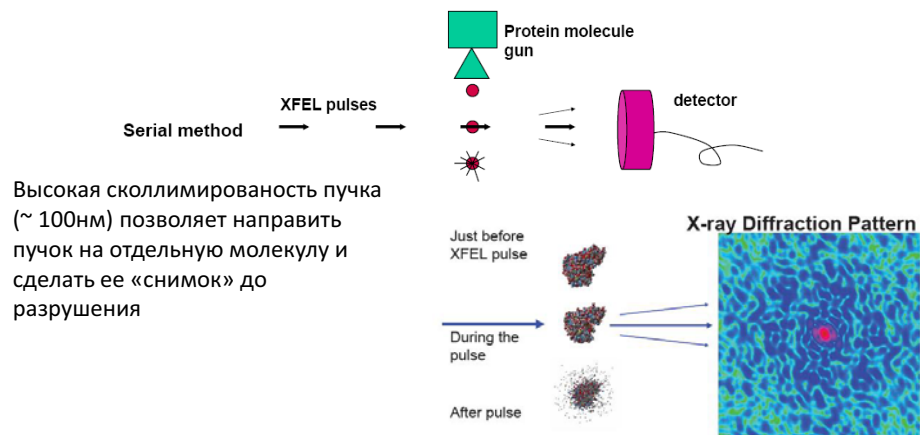
Микроструктура костей:  
развитие остеопороза –  
истончения костной ткани



## Возможности FEL

- Отображение малых объектов
  - единичные биомолекулы (кристаллы)
  - наноструктуры
- Ультра быстрые процессы
  - химические реакции
  - изменение состояний намагниченности
- Экстремальные состояния
  - высоко ионизированные состояния материи
  - нелинейные взаимодействия фотонов
  - создание высоких температур и давлений

Высокая интенсивность и временная структура источников FEL позволяет проводить эксперимент в течение одного импульса

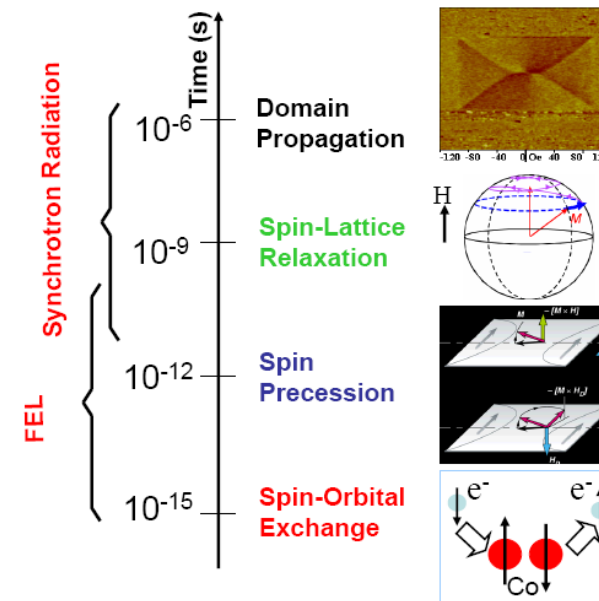


Высокая сколлимированность пучка (~ 100нм) позволяет направить пучок на отдельную молекулу и сделать ее «снимок» до разрушения



Вращение образца относительно оси пучка позволяет восстановить 3D модель молекулы

## «Магнитная» временная шкала





## Что касается детекторов для СИ:

Разные задачи – разные детекторы  
 Один тип детектора не способен обеспечить эффективную работу для всего диапазона энергий СИ (см. далее)

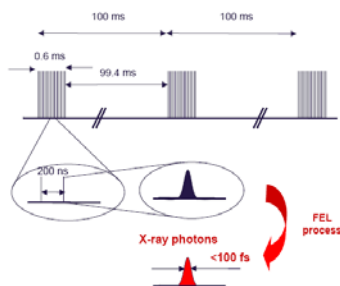
- Спектроскопия - измерение энергии фотонов:
  - энергетическое разрешение мэВ-1 кэВ
  - Временное разрешение <100 пкс (TOF)
  - Позиционная чувствительность да/нет
- Отображение (Imaging) – измерение пространственного распределения интенсивности
  - мкм- мм пространственное разрешение
  - Динамический диапазон (интенсивность макс/мин)
  - двухкоординатность
- Рассеяние – измерение интенсивности как функции переданного импульса (угол)
  - Малоугловое рассеяние (неск. град) до кристаллографии протеинов ( $\pi$  и более)
  - большие площади (1D-2D)
  - Регистрация времени (счет) каждого события – временное разрешение

Кроме того:

- 1) Высокая эффективность и быстродействие – быстрый набор статистики, эффективное использование пучкового времени
- 2) Динамический диапазон – быстродействие электроники + детектор, и уровень их шума

## Детекторы для FEL

- Очень высокая интенсивность –  $10^{12}$  фотонов/имп (100фмс)
  - счет отдельных фотонов пока невозможен:
    - интегральный режим работы («покадровая съемка»)
    - поканальный съем (для рег.координат)
- Нужен динамический диапазон  $>10^4$  ф/пиксель (реально до  $\sim 10^6$ ) с однофотонной чувствительностью
  - применяются схемы с динамическим переключением режимов усиления
- Проблема радиационной стойкости детекторов!
- Быстродействие электроники: хранение, считывание сигналов
  - На каждый пиксель детектора - отдельная ячейка памяти



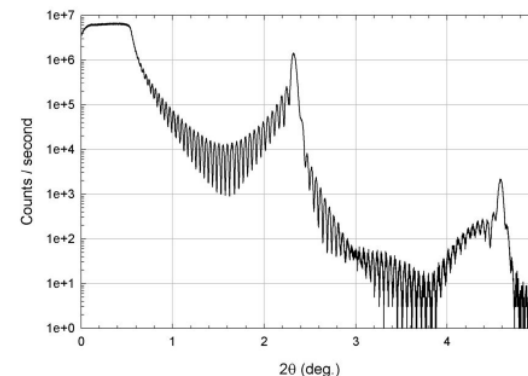
## Динамический диапазон, простой пример

**Динамический диапазон (интенсивность)** – отношение максимальной детектируемой интенсивности к уровню внутреннего шума детектора:

$$D = I_{\max} / I_{\min}$$

$I_{\min}$  - интенсивность срабатываний детектора без облучения

Отражение фотонов от многослойного зеркала  
 Детектор: Лавинный фотодиод (APD)



- Около нуля градусов отражение может достигать 100%, поэтому интенсивность может достигать  $10^{10}$  ф/с даже для старых источников СИ - просчеты событий

- Минимальная скорость счета (интенсивность) ограничена шумом детектора

## Характеристики популярных фото-детекторов

Тип детектора	Диапазон Энергий, кэВ	ΔE/E для 5.9 кэВ (%)	Мертвое время, мкс	Максимальная скорость счета, Гц
• Газовый ионизационный (токовый режим)	0.2–50	n/a	n/a	10 <sup>11a</sup>
• Газовый пропорциональный	0.2–50	15	0.2	10 <sup>9</sup> /mm <sup>2</sup>
• Газовый микростриповый	3–50	20	0.2	10 <sup>6</sup> /mm <sup>2</sup>
• Сцинтилляционный (NaI(Tl))	3–10,000	40	0.25	2 × 10 <sup>6</sup>
• Кремниевый, германиевый п/п	1–10,000	3	0.5–30	2 × 10 <sup>5</sup>
• П/п поверхностно-барьерный	0.1–20	n/a	n/a	10 <sup>8</sup>
• Лавинный фотодиод	0.1–50	20	0.001	10 <sup>8</sup>
• CCD	0.1–70	n/a	n/a	n/a
• Сверхпроводящие	0.1–4	< 0.5	100	5 × 10 <sup>3</sup>
• Image Plate	4–80	n/a	n/a	n/a

<sup>a</sup> Максимальная скорость счета ограничена объемным зарядом: область  $\sim 10^{11}$  фотонов /с на 1 см<sup>3</sup>

Существующие детекторы не обеспечивают временного разрешения соответствующего интенсивности современных источников СИ (виглеры, ондуляторы, FEL) и часто являются «узким» местом экспериментальной установки. Чтобы найти решение этому несоответствию, модернизируют существующие технологии детекторов и ведется активный поиск новых подходов.

### 3. Нейтроны

- Диапазоны энергий
  - УХН  $E < 0.2$  мэВ ( $> 2000$  пкм)
  - Холодные  $E = 0.2 - 2.0$  мэВ (640-2000 пкм)
  - Тепловые  $E = 2 - 100$  мэВ (90-640 пкм) ( $kT = 2.5$  мэВ,  $T = 300$  K)
  - Эпитепловые  $E$  до 1 эВ (28-90 пкм)
  - Промежуточные  $E = 1$  эВ - 10 кэВ
  - Быстрые  $E$  до 20 МэВ
- Магнитный момент - возможность исследования магнитной структуры веществ
- Низкое воздействие на образец / Высокая проникающая способность

$$E = h^2 / (2m_n \lambda^2)$$

$$h = 6.262 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \text{ – постоянная Планка}$$

$$m_n = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ кг – масса нейтрона}$$

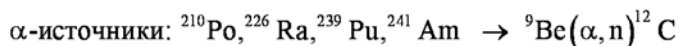
$$\lambda (\text{Å}) \text{ – длина волны, } 1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ м}$$

$$E(\text{эВ}) = 8.18 \cdot 10^{-2} (\text{эВ}/\text{Å}^2) / \lambda^2(\text{Å}^2) \text{ – энергия нейтрона}$$

### Изотопные источники

- 1) Спонтанное деление  $^{252}\text{Cf}$ ,  $T_{1/2} = 2.645$  года
  - 97%  $\alpha$ -распад: 6.08 МэВ (15%) и 6.12 МэВ (82%)
  - 3% деление: 20 фотонов/дел.; 80%  $< 1$  МэВ
  - 4 нейтрона/дел.  $\langle E \rangle = 2.14$  МэВ

- 2)  $\alpha$ -источник  $\rightarrow$  реакция  $(\alpha, n)$ :



**Характеристики таких источников:** **поток  $< 10^8$  н/с**  
**сплошной спектр 0.1-12 МэВ**  
**высокий гамма-фон**

- 3) Источники монохроматических нейтронов:

монохроматический  $\gamma$  источник  $^{208}\text{Tl}$  ( $E_\gamma = 2.62$  МэВ)  $\rightarrow$

$d(\gamma, n)p$  (энергия реакции  $Q = -2.23$  МэВ)  $E_n = 0.2$  МэВ

или

монохроматический  $\gamma$  источник  $^{214}\text{Bi}$  ( $E_\gamma \approx 1.78$  МэВ)  $\rightarrow$

$^9\text{Be}(\gamma, n)^4\text{He}$  ( $Q = -1.65$  МэВ)  $E_n = 0.11$  МэВ

### Нейтронное излучение: источники

#### North America

- Spallation Neutron Source, Oak Ridge
- Los Alamos Neutron Science Center (LANSCE)
- University of Missouri Research Reactor Center
- High Flux Isotope Reactor, Oak Ridge
- Canadian Neutron Beam Centre, Chalk River, Canada
- Indiana University Cyclotron Facility

#### Europe

- ISIS-Rutherford-Appleton Laboratories, United Kingdom
- Institut Laue-Langevin, Grenoble, France
- Leon Brillouin Laboratory, Saclay, France
- Berlin Neutron Scattering Center, Germany
- GEMS at Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Germany
- Juelich Center for Neutron Science, Germany
- FRM-II, Munich, Germany
- Budapest Neutron Centre, Hungary
- RID, Delft, The Netherlands
- SINQ, Paul Scherrer Institut (PSI), Switzerland
- Frank Laboratory of Neutron Physics, Dubna, Russia
- St. Petersburg Neutron Physics Institute, Gatchina, Russia

#### Asia and Australia

- ISSP Neutron Scattering Laboratory, Tokai, Japan
- JAEA Research Reactors, Tokai, Japan
- KENS Neutron Scattering Facility, Tsukuba, Japan
- Hi-Flux Advanced Neutron Application Reactor, Korea
- Bragg Institute, ANSTO, Australia

<http://www.ncnr.nist.gov/nsources.html>

### Ядерные реакторы



**Стационарные:**  
 • постоянный во времени поток

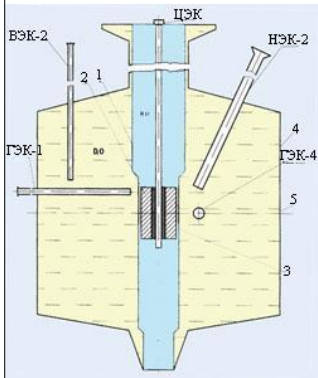
**Импульсные:**  
 • короткие мощные импульсы нейтронов

Реактор	Мощность, МВт	Поток $\times 10^{14}$ , нейтр. $\cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
ПИК, Гатчина, Россия	100	45
HFIR, Ок-Ридж, США	85	30
HFR-ILL, Гренобль, Франция	58	15
HFBR, Брукхейвен, США	60	9
FRM-2, Мюнхен, ФРГ	20	8
NRU, Чок-Ривер, Канада	120	3
ORPHEE, Сакле, Франция	14	2.5
JRR-3M, Ибараки, Япония	20	2
Dhruva, Бомбей, Индия	100	2
ИР-8, Москва, Россия	8	1
BER-II, Берлин, ФРГ	10	1

- Импульсный реактор
- Бустеры - фотоядерные реакции

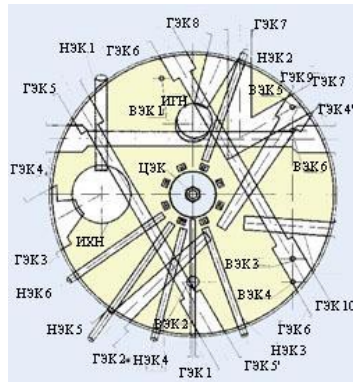
...

## Стационарный реактор ПИК, Гатчина



### Схема реактора ПИК

- 1 - направляющая опорной решетки
  - 2 - активная зона (51 л, ТВЭЛ тип СМ-2:  $UO_2$ ),
  - 3 - корпус реактора,
  - 4 - бак отражателя ( $D_2O$ ),
  - 5 - средняя плоскость зоны
- Охлаждение  $H_2O$ , 50 бар



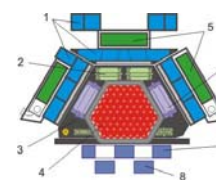
### Схема расположения экспериментальных каналов реактора ПИК

ЦЭК - центральный канал,  
ГЭК - горизонтальный экспериментальный канал,  
НЭК - наклонный экспериментальный канал,  
ВЭК - вертикальный экспериментальный канал,  
ИХН - источник холодных нейтронов,  
ИГН - источник горячих нейтронов

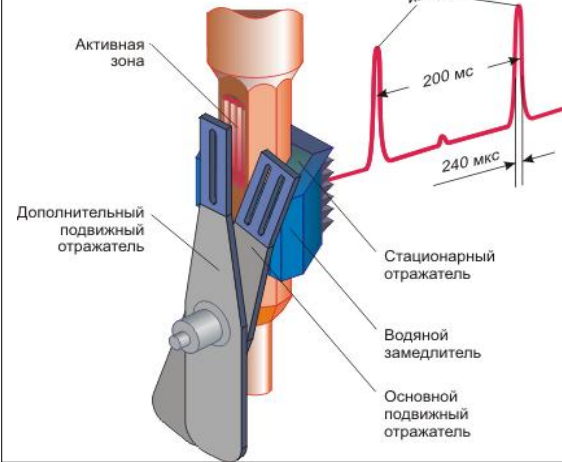
Максимальная плотность потока тепловых нейтронов в центре центрального экспериментального канала (ЦЭК) достигает  $4,2 \times 10^{13}$  н/см<sup>2</sup>с МВт

## Импульсные источники

### Схема реактора ИБР-2 (Дубна, ОИЯИ)



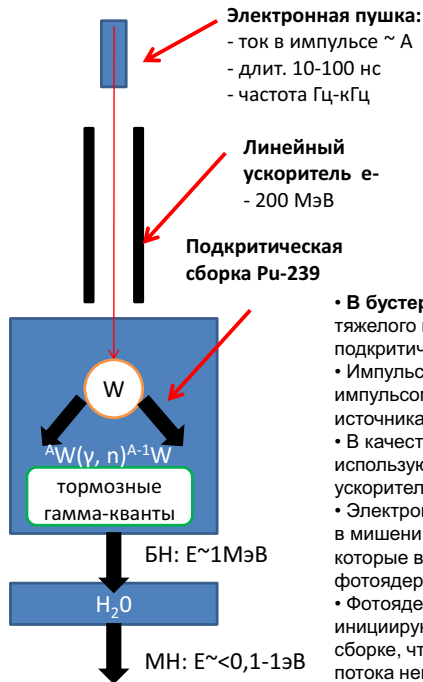
- 1 - Водяные замедлители
- 2 - Система аварийной защиты
- 3 - Стационарный отражатель
- 4 - Тепловыделяющие сборки
- 5 - Холодные замедлители
- 6 - Регулирующие стержни
- 7 - Основной подвижный отражатель
- 8 - Дополнительный подвижный отражатель



Модуляция реактивности осуществляется с помощью подвижных отражателей. Когда отражатели оказываются напротив зоны генерируется нейтронный импульс:  
1) надкритич. сост.  $k > 1$  - цепная реакция  
2) Подкритич сост.  $k < 1$  - затухание

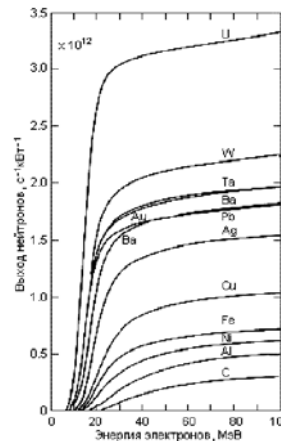
Средняя мощность, МВт	2
Тип топлива	$PuO_2$
Количество ТВС	69
Максимальное выгорание, %	9
Частота импульсов, Гц	5; 10
Полуширина импульса, мкс:	
быстрые нейтроны	240
тепловые нейтроны	340
Скорость вращения, оборотов в минуту:	
основной отражатель	600
дополнительный отражатель	300
Материал ОПО и ДПО	никель + сталь
Эксплуатационный ресурс ПО, часы	55000
Фон, %	7,5
Плотность потока тепловых нейтронов с поверхности замедлителя*:	
- усредненная по времени	$\sim 10^{13}$ н/см <sup>2</sup> ·сек
- максимум в импульсе	$\sim 10^{16}$ н/см <sup>2</sup> ·сек

## Бустерные источники нейтронов

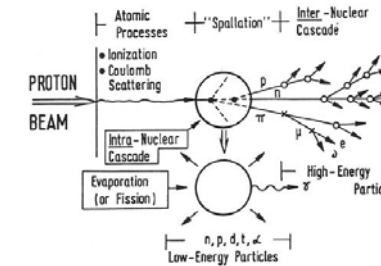


Нейтронный источник	$\langle I_n \rangle, 10^{15}$ н/с	$t, \mu s$
<b>FAKEL</b> (IAE, Russia)	0.003	50
<b>ORELA</b> (ORNL, USA)	0.13	30
<b>GELINA</b> (IRMM, Belgium)	0.05	1
<b>LANSCE</b> (LANL, USA)	10	125
<b>CERN PS TOF facility</b>	0.4	10
<b>IREN</b> (JINR)	1.0	400

- В бустере мишень-конвертер из тяжелого металла помещена в подкритическую сборку.
- Импульс мощности инициируется импульсом нейтронов от внешнего источника.
- В качестве внешних источников используются сильноточные ускорители электронов (30-200 МэВ).
- Электроны из ускорителя рождают в мишени тормозные гамма-кванты, которые в свою очередь вызывают фотоядерные реакции ( $\gamma, xn$ ).
- Фотоядерные нейтроны инициируют цепную реакцию в сборке, что приводит к увеличению потока нейтронов в 10-30 раз.



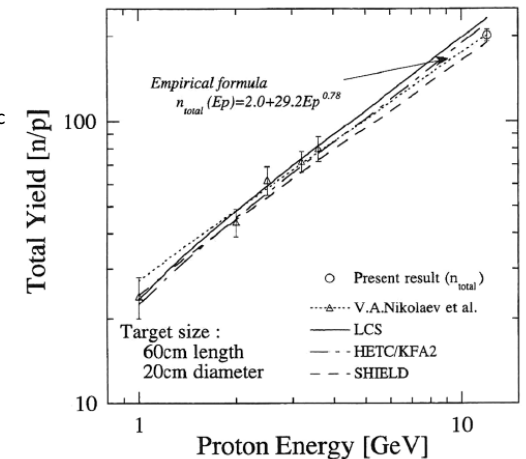
## Нейтронные источники, основанные на реакции скалывания (spallation sources)



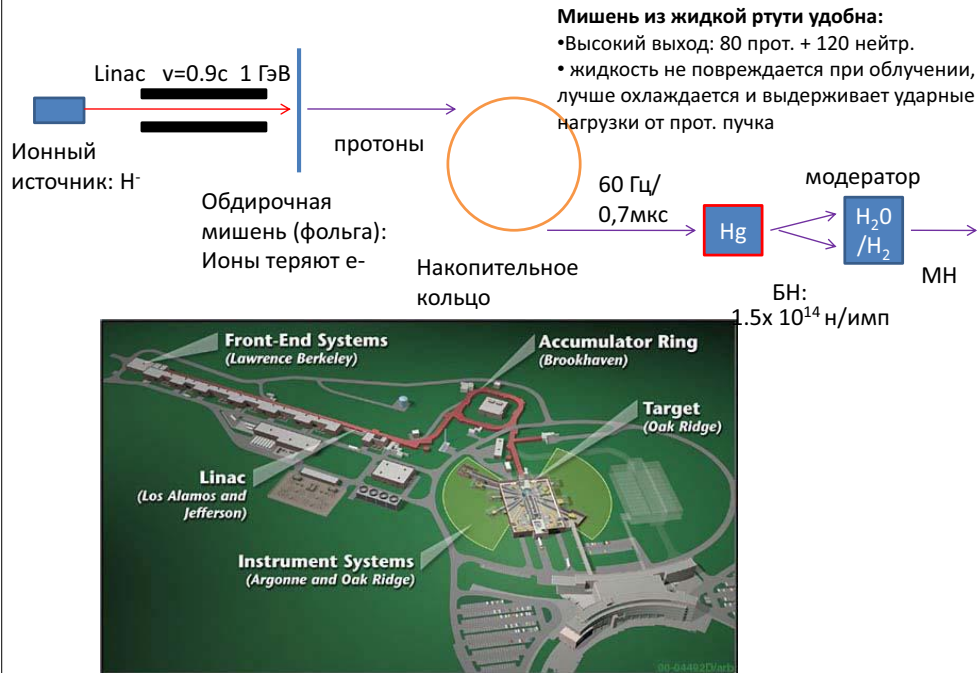
- Реакция скалывания для протона начинается с  $\sim 100$  МэВ.
- Протон взаимодействует с нуклонами ядра, передавая им часть своей энергии.
- Нуклоны, в свою очередь, взаимодействуют с другими нуклонами.
- В результате этого внутриядерного каскада, энергия налетевшего протона перераспределяется по все большему количеству нуклонов ядра и через некоторое время образуется составное ядро.
- Часть нуклонов (в т.ч. нейтроны) при развитии внутриядерного каскада вылетает из ядра.

Выход нейтронов из свинцовой мишени как функция энергии налетающего протона

Выход  $n/p \sim E_p$  приблизительно до 12 ГэВ



## Схема источника SNS ORNL (SS)



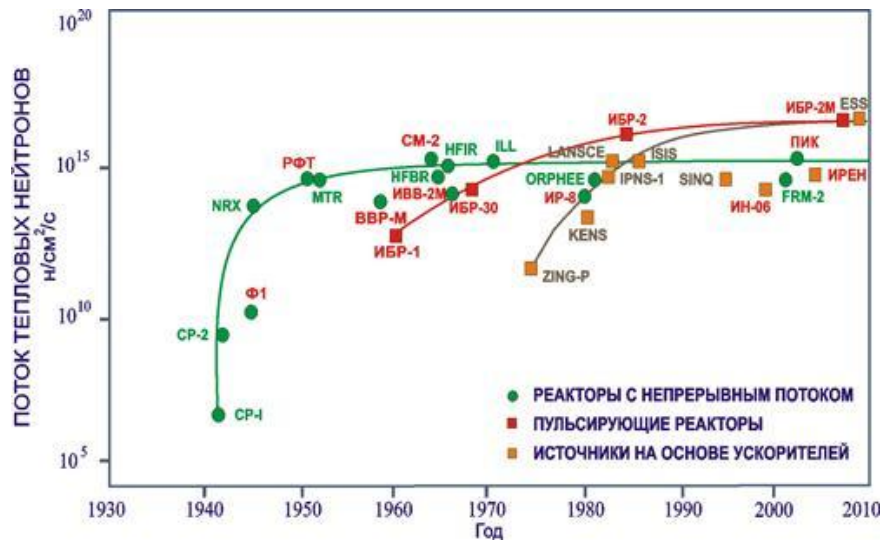
## Основные параметры некоторых SS

Table 2.2 Past, existing, and future spallation source and their respective parameters

Country	United States	United States	United States	U.K.	Switzerland	China	Europe	Japan	Japan
Neutron source Organization	IPNS	LANSCE	SNS	ISIS	SINQ	CSNS	ESS	KENS	JSNS
	Argonne National Laboratory	Los Alamos National Laboratory	Oak Ridge National Laboratory	Rutherford Appleton Laboratory	Paul Scherrer Institute	Institute of High Energy Physics	Undecided	High Energy Accelerator Research Organization	Atomic Energy Agency
Proton energy (MeV)/ Current (μA)	450/15	800/70	1000/1400	800/200	590/1500	1600	1333/7500	500/9	3000/333
Proton beam power	7 kW	56 kW	1.4 MW	160 kW	1 MW	100 kW	5 MW	4.5 kW	1 MW
Repetition rate (Hz)	30	20	60	50/10 (2 targets)	Continuous	25	16 (long pulse)	20	25
Target material	Depleted Uranium	Tungsten	Mercury	Tantalum	Zircaloy	Tungsten	Mercury	Tungsten	Mercury
Moderator	S-CH <sub>4</sub> /L-CH <sub>4</sub>	L-H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	L-H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub> O	L-H <sub>2</sub> /L-CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O	L-D <sub>2</sub> /D <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> O/L-CH <sub>4</sub> -H <sub>2</sub>	L-H <sub>2</sub>	S-CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> O	L-H <sub>2</sub>
Number of instruments	12	7	24 (beam ports)	22 (TS1) 7 (TS2)	15		20 (beam ports)	15	23 (beam ports)
Existing neutron imaging instrument					NEUTRA [30] and ICON [31]				
Facility operating since or planned to operate in	1981 (closed 2008)	1983	2006	1985 (TS1) 2008 (TS2)	1996	2014	Under planning	1980 (closed 2005)	2008

IPNS: Intense Pulsed Neutron Source [32]; LANSCE: Los Alamos Neutron Science Center [33]; SNS: Spallation Neutron Source [8, 9]; ISIS: [34, 35]; SINQ: Swiss Spallation Neutron Source [36, 37]; CSNS: Chinese Spallation Neutron Source [10, 11]; ESS: European Spallation Source [38, 39]; KENS: Koh-Enryu-ken Neutron Source [40, 41]; JSNS: Japanese Spallation Neutron Source [8, 9]. Consult the websites for these facilities to obtain additional information and current details.

## Интенсивности пучков на исследовательских источниках нейтронов

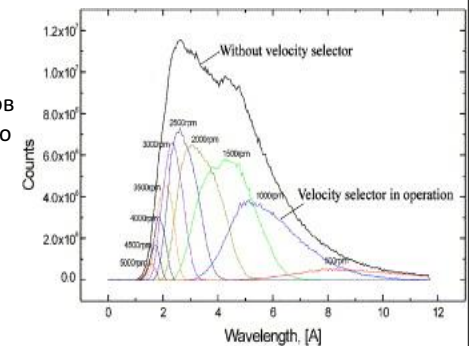
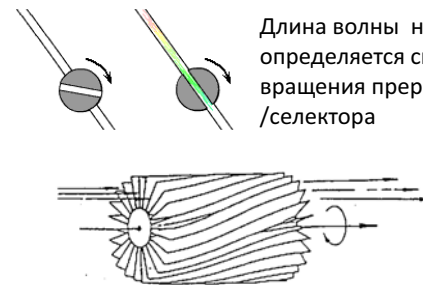


- Реакторы с непрерывным потоком – ограничение по потоку из-за проблем с охлаждением
- Импульсные реакторы – при той же средней мощности выход нейтронов выше

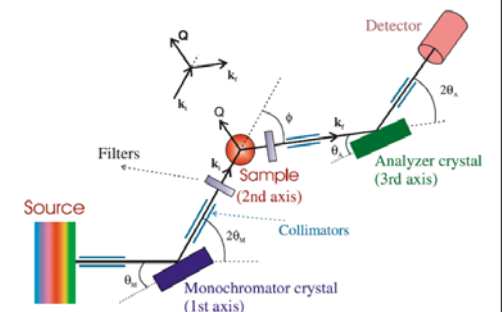
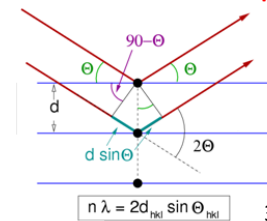
## Монохроматизация пучка

### Механические Прерыватель Ферми

Длина волны нейтронов определяется скоростью вращения прерывателя /селектора



### Кристаллические - более прецизионные

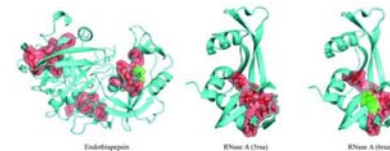
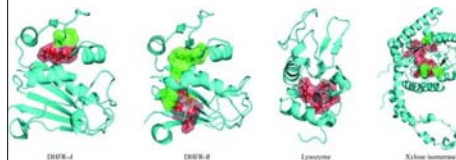




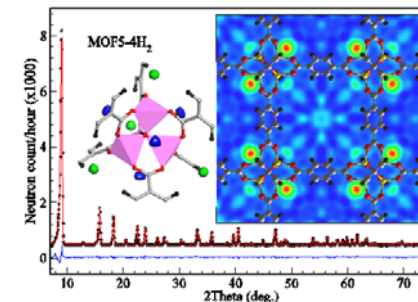
# Примеры экспериментов с использованием нейтронов

## Структурные исследования

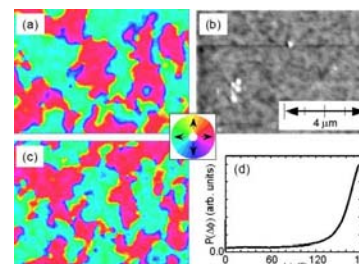
Биология: вирусы/протеины



MOF – структуры (ионы металлов + органическая молекула): альтернативные источники энергии



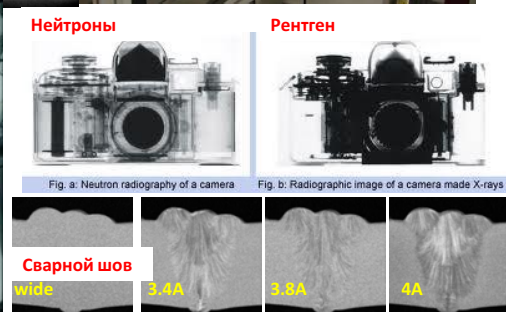
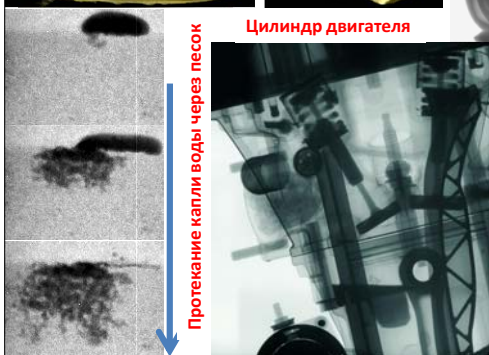
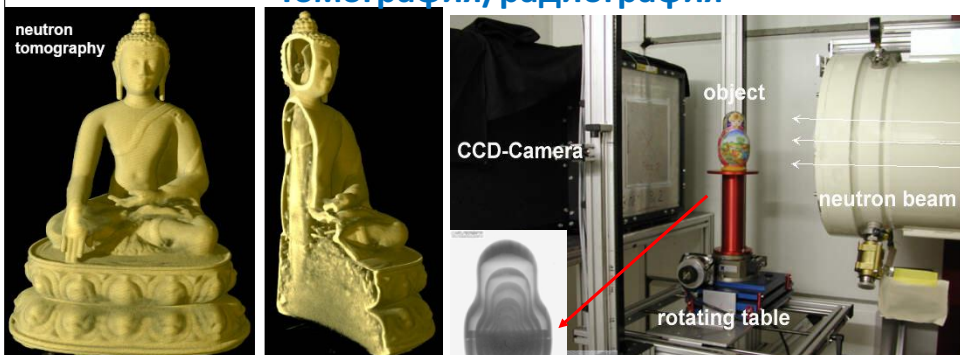
Магнитные структуры: домены, спиновые волны ...



И многое другое...

Бронзовый Будда

## Томография/радиография



## Экспериментальные установки и детекторы

Требования к детекторным системам на новых импульсных источниках нейтронов

Тип установки	Расст. «образец-детектор»	Размер детектора/апертура	Размер пиксела	Загрузка (интегр/лок), Гц	Диапазон энергий
Однокрист. дифрактометр	< 1 м	2 π	< 1 мм <sup>2</sup>	1 МГц	0.3 – 5 Å
Порошковый дифрактометр	1 м	π	5 мм x 5 мм	0.1 МГц	0.3 – 5 Å
Дифрактометр для исслед. неупорядоченной структуры	> 1 м	π	5 мм x 50 мм	0.1 МГц	0.1 – 5 Å
Малоугл. дифр.	2- 10 м	1 м <sup>2</sup>	1x1- 5мм x 5 мм	1МГц	1 – 20 Å
Неупругое изотроп. дифр.	2-6м	10 м <sup>2</sup>	20мм x 20 мм	10кГц	1 мэВ – 1эВ
Радиограф/томогр		20мм x 20 мм	0.02мм – 0.2мм	1МГц	1 – 150 мэВ

Что приоритетно?

- эффективность регистрации
- пространственное разрешение
- временное разрешение
- n/γ разделение
- площадь регистрации
- компактность
- цена

## Нейтронные детекторы

- Нейтроны не имеют заряда и регистрируются не прямым путем через взаимодействие с ядрами
- Эффективность взаимодействия со средой (конвертор) существенным образом зависит от энергии нейтронов, которая и определяет выбор типа и конструкции детектора для данной задачи
- Число «эффективных» конверторов мало (далее)
- Каждый тип конвертора и его состояние (газ, тв.) имеет свои +/-
- Наиболее распространены сцинтилляционные детекторы и газовые
- Проблема  $n/\gamma$  разделения, например для Gd
- Экономический фактор: популярный газовый конвертор He-3 дефицитен, Но!

Трудности с He-3 играют положительную роль в развитии альтернативных технологий:

- Гибридные детекторы
- новые конструкции
- поиск новых материалов сцинтилляторов

## Итак,

- Современные источники СИ - импульсные источники с высокой интенсивностью
- Исследовательские источники нейтронов - стационарные (реакторы), импульсные (имп. реакторы, на основе ускорителей...)
- Для получения СИ используют специальные устройства ввода – отклоняющие магниты, виглеры, ондуляторы – определяющие св-ва СИ
- Яркость современных источников СИ существенно выше источников нейтронного излучения (+ структура импульса). Поэтому требования по быстродействию детекторов обычно выше, +проблема радиационной стойкости
- Энергия фотонов (СИ) < 100 кэВ
- Нейтроны для структурных исследований – медленные < 1 кэВ
- Нет «универсального» детектора для каждого из излучений, эффективно работающего во всем диапазоне энергий
- Более того, разнообразие проводимых экспериментов требуют детекторов с различным набором характеристик