

# Дифрактометры на реакторе Нептун

**Рабочая группа:** Балагуров А.М., Бескровный А.И., Бобриков И.А., Бокучава Г.Д., Васин Р.Н., Кичанов С.Е., Лукин Е.В., Лычагина Т.А., Николаев Д.И., Сумников С.В., Турченко В.А.

ЛНФ, ОИЯИ

25.10.2022 г.

# Дифракция нейтронов на реакторе Нептун

- ❖ Дифрактометры и мировые тенденции в их развитии
- ❖ Конструкция и характеристики дифрактометров первой очереди для нового источника нейтронов ЛНФ ОИЯИ

«НЕПТУН»

# Специализация нейтронных дифрактометров

## I. Эксперимент с монокристаллом

2D ПЧД,  $\Delta x < 3$  мм  $\rightarrow$  4 $\pi$  ПЧД

## II. Структурный эксперимент на поликристалле

высокое разрешение,  $\Delta d/d \approx 0.002$ , широкоапертурный ПЧД

## III. Магнитная структура (моно- или поликристалл)

среднее разрешение, большие ( $\sim 15$  Å)  $d_{hkl}$

## IV. *In Situ, Real Time* эксперимент

высокая светосила ( $\sim 10^8$  н/с), широкий интервал  $d_{hkl}$

## V. Высокое давление, микрообразцы

высокая светосила, низкий фон

## VI. Длиннопериодные и макромолекулярные структуры

среднее разрешение, очень большие ( $\sim 60$  Å)  $d_{hkl}$

## VII. Локальные искажения структуры

большие переданные импульсы,  $Q_{\max} \sim 40$  Å<sup>-1</sup>

## VIII. Микроструктура материалов и изделий (напряжения, текстура)

высокое разрешение,  $\Delta d/d \approx 0.004$ , высокая светосила

# TOF-diffractometers at pulsed neutron sources (33 instruments)

## I. ISIS (7)

ENGIN-X – engineering  
GEM – powder, HR + HI  
HRPD – powder, HR  
PEARL – high-pressure  
POLARIS – powder, HI  
SXD – single-crystal  
WISH – magnetic

## II. SNS (6)

MANDI – macromolecular  
NOMAD – nanoscale  
POWGEN – powder, HR, HR + HI  
SNAP – high-pressure  
TOPAZ – single-crystal  
VULCAN – engineering

## III. LANSCE (2)

HIPPO – engineering  
SMARTS – high-pressure

## IV. J-PARC (6)

iBIX - macromolecular  
iMATERIA - powder, HR + HI  
PLANET – high-pressure  
SENJU - single-crystal  
sHRPD – powder, HR  
TAKUMI - engineering

## V. IBR-2 (7)

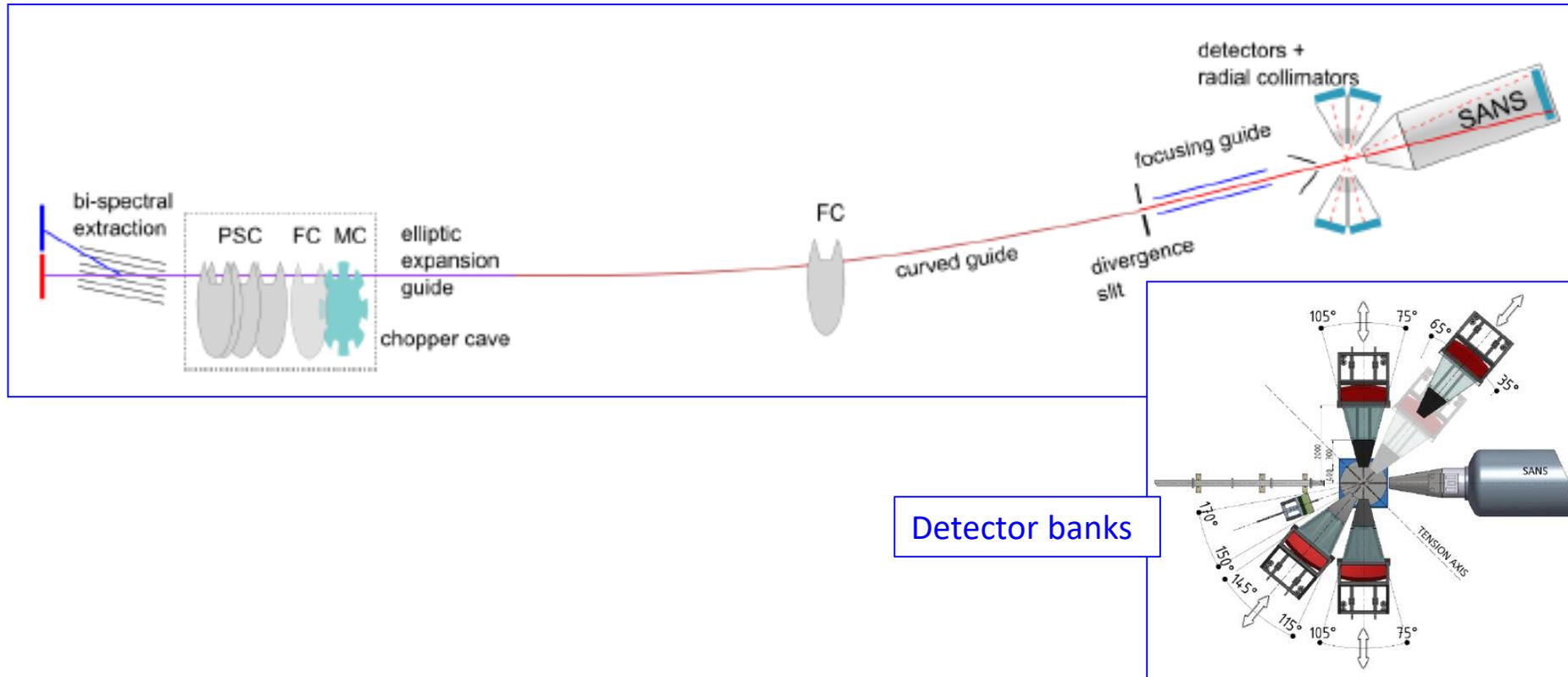
DN-6 – high-pressure  
DN-12 – high-pressure  
FSD – engineering  
HRFD - powder, HR, HR + HI  
RTD - powder, HI  
EPSILON – stress  
SKAT - texture

## VI. ESS (5)

DREAM – powder, HR, HR + HI  
HEIMDAL - hybrid  
MAGiG – polarized, single crystal  
NMX – macromolecular  
BEER – engineering

# Materials engineering diffractometer BEER, ESS

(Diffraction + SANS + Imaging,  $L_1 = 157$  m,  $\Delta\lambda \approx 1.7$  Å,  $\lambda_{\min} \approx 0.6$  Å)



Detector banks

BEER feature: bispectral switch (cold + thermal neutrons)

BEER choppers: (pulse shaping + pulse selection + frame overlap) = 11 choppers

BEER costing (kEu): Detector = 7011, Optic = 3990, Choppers = 1550, Shielding = 700 ...

Total : Min = 19 701; Max = 21 301

# Нейтронный дифрактометр: основные параметры

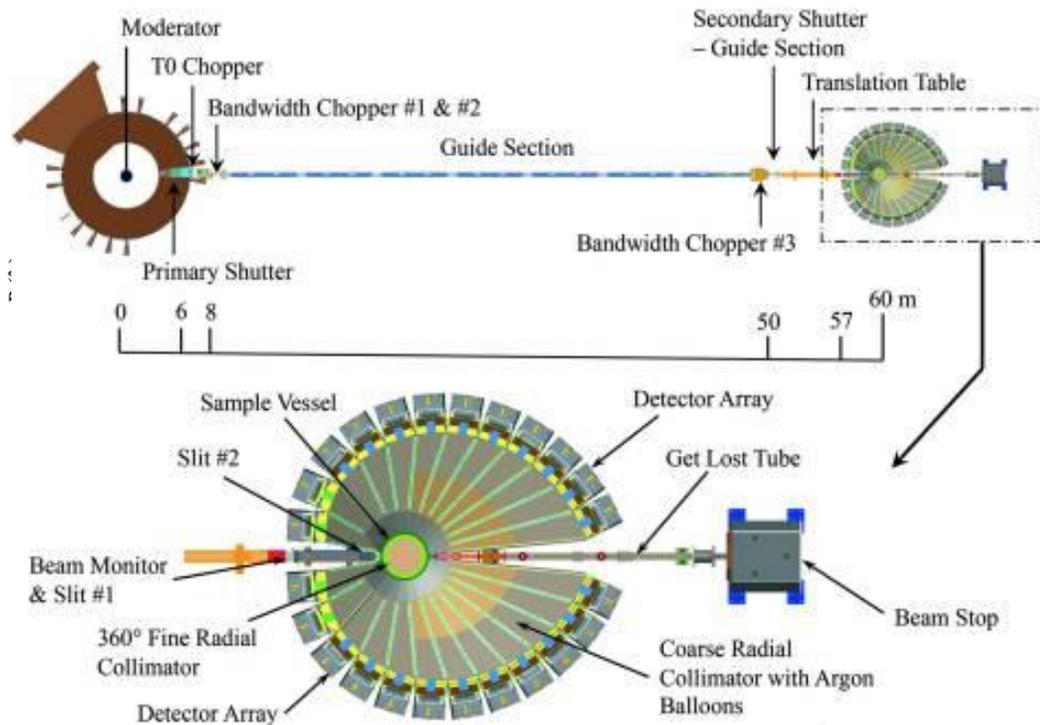
- Поток на образце
- Разрешение
- Телесный угол детектора
- Интервал по  $d\mathbf{hkl}$
- Уровень фона
- ...

# Разрешение TOF дифрактометра

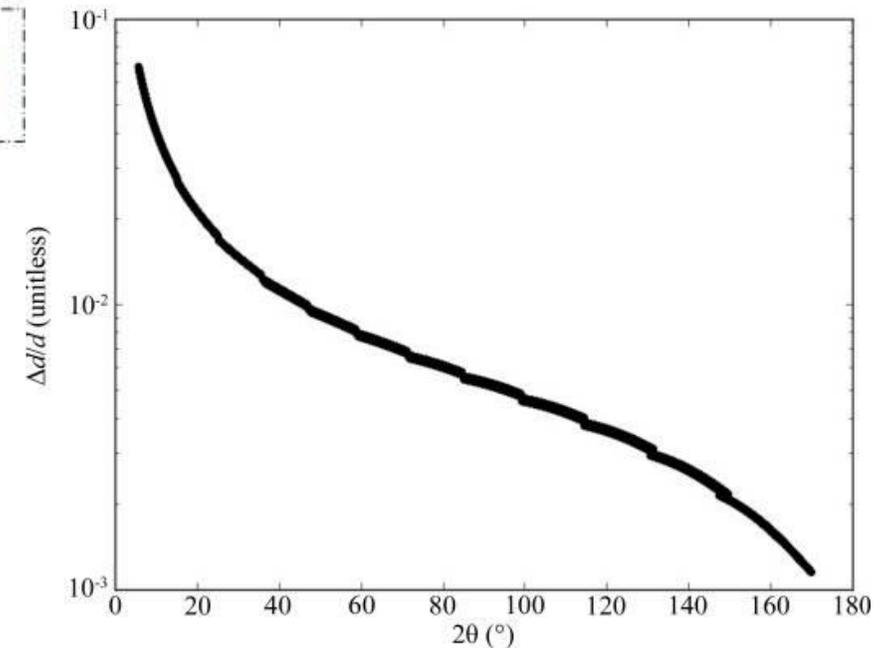
$$(\Delta d/d)^2 = R_t(\lambda) + R_\theta(\theta) = (\Delta t_0/t)^2 + (\Delta\theta/\text{tg}\theta)^2$$

$$R_t \Rightarrow 0 \quad \text{if} \quad \Delta t_0 \Rightarrow 0 \quad \text{or} \quad L \Rightarrow \infty$$

$$R_\theta \Rightarrow 0 \quad \text{if} \quad \Delta\theta \Rightarrow 0 \quad \text{or} \quad \theta \Rightarrow \pi/2$$



Powgen (SNS), HI + HR



# Основные параметры источников Нептун, ИБР-2 и SNS, ESS

|  | <b>Нептун</b>      | <b>ИБР-2</b>       | <b>SNS</b>         | <b>ESS</b>         |
|--|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Средняя плотность<br>потока нейтронов      | $1 \times 10^{14}$ | $8 \times 10^{12}$ | $1 \times 10^{14}$ | $3 \times 10^{14}$ |
| Длительность импульса<br>быстрых нейтронов | 200 мкс            | $\approx 200$ мкс  | 20-50 мкс          | 2860 мкс           |
| Частота импульсов                          | 10 Гц              | 5 Гц               | 60 Гц              | 14 Гц              |
| Уровень фона                               | 2%                 | 5%                 | <1%                | <1%                |
| Число пучков                               | 32                 | 18                 | 22                 | 42                 |

# Дифракция на импульсном реакторе НЕПТУН

## I ЭТАП:

1. Дифрактометр высокого разрешения (DSHR)

Структурный, порошковый (RTOF)

2. Дифрактометр для материаловедения (MSD) (+ Росатом: необлученные материалы и изделия)

Порошковый (RTOF), остаточные напряжения, *in situ* исследования при нагрузке/температуре

3. Дифрактометр высокой светосилы (DSHI)

Структурный, порошковый (RTOF), режим 1 вспышки

4. Дифрактометр для исследований при высоких давлениях (DHP)

Структурный, порошковый (TOF), для микрообразцов под высоким давлением

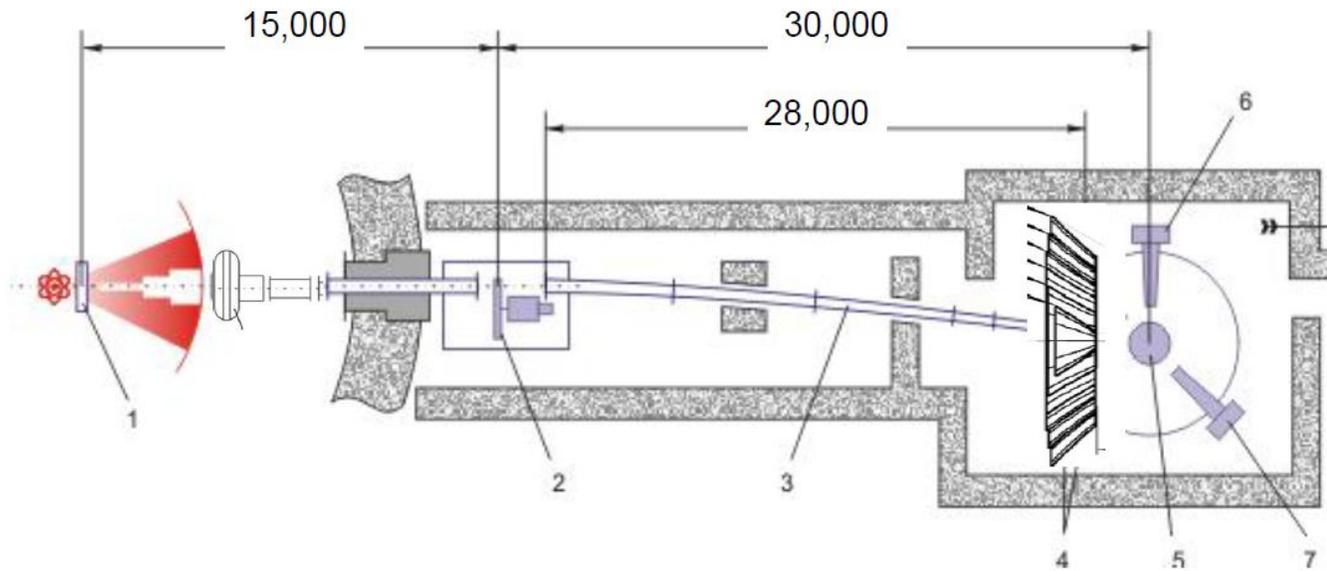
5. Текстуриальный дифрактометр для конструкционных материалов (TDSM)

Для небольших образцов (~1 см) мелкозернистых материалов (RTOF)

6. Текстуриальный дифрактометр высокого разрешения (DTHR)

Для крупных образцов (до 5 см) крупнозернистых материалов (TOF)

# Дифрактометр высокого разрешения (DSHR)



- 1 – замедлитель
- 2 – прерыватель Фурье
- 3 – нейтроновод
- 4 – детектор обратного рассеяния
- 5 – место образца
- 6 – детектор при угле рассеяния  $90^\circ$
- 7 – ПЧД детектор при угле рассеяния  $30^\circ$

Максимальное разрешение по  $d_{hkl}$ :

|  |               |
|--|---------------|
| $2\theta = 170^\circ, d = 2 \text{ \AA}$ | <b>0.0003</b> |
| $2\theta = 150^\circ, d = 2 \text{ \AA}$ | <b>0.0010</b> |
| $2\theta = 90^\circ, d = 2 \text{ \AA}$  | <b>0.0040</b> |
| $2\theta = 30^\circ, d = 2 \text{ \AA}$  | <b>0.01</b>   |

Поток на образце:

|                       |  |
|-----------------------|--|
| с фурье-прерывателем  | <b><math>2 \times 10^7</math> н/см<sup>2</sup>/с</b> |
| без фурье-прерывателя | <b><math>10^8</math> н/см<sup>2</sup>/с</b>          |

Интервал длин волн

**0.9 – 8  $\text{\AA}$**

Сечение пучка на образце

**10x50 мм**

Расстояние замедлитель-образец

**45 м**

Расстояние прерыватель-образец

**30 м**

Детектор обратного рассеяния

**сцинтиллятор**

Детектор при  $2\theta = 90^\circ$

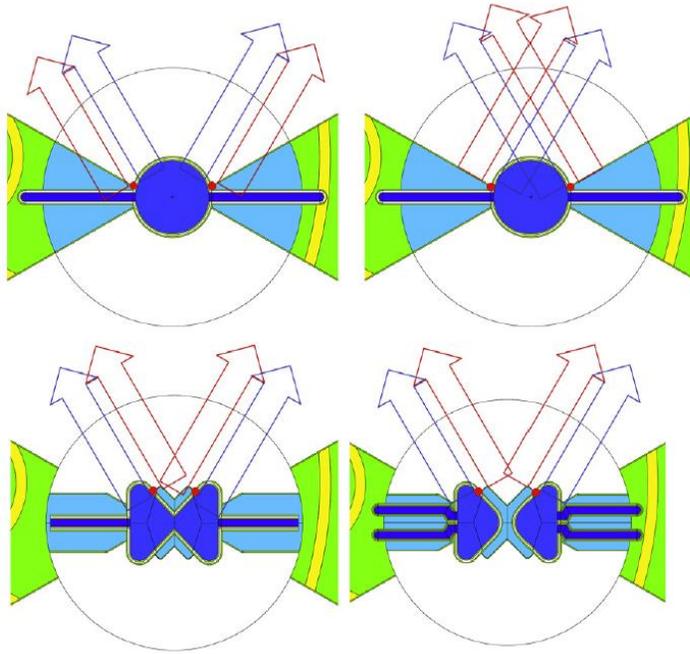
**сцинтиллятор**

Детектор при  $2\theta = 30^\circ$

**$^3\text{He}$ , 2D ПЧД**

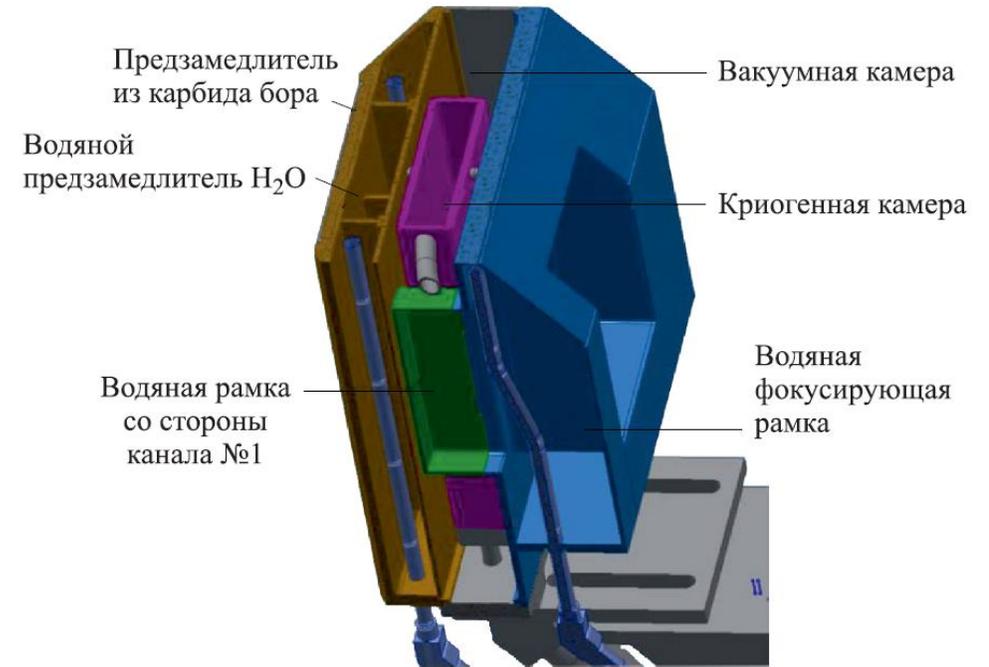
# Замедлители

Симуляция нейтронного спектра на ESS



Интервал длин волн  
Температура в пучке нейтронов  
Поток на образце

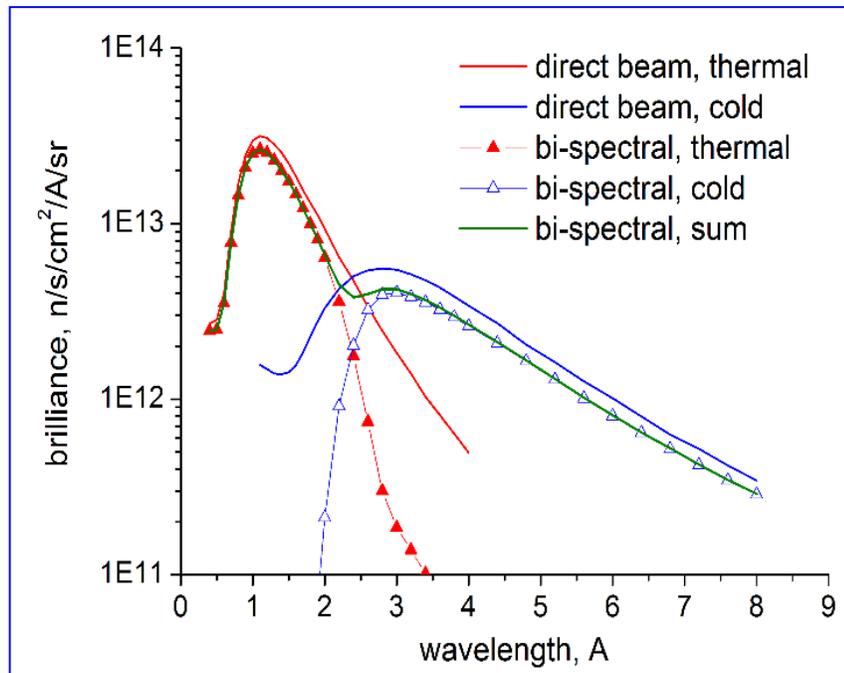
Измеренный спектр на ФДВР ИБР2



**0.9 – 8 Å**  
**300K+ $\approx$ 60K**  
**10<sup>8</sup> н/см<sup>2</sup>/с**

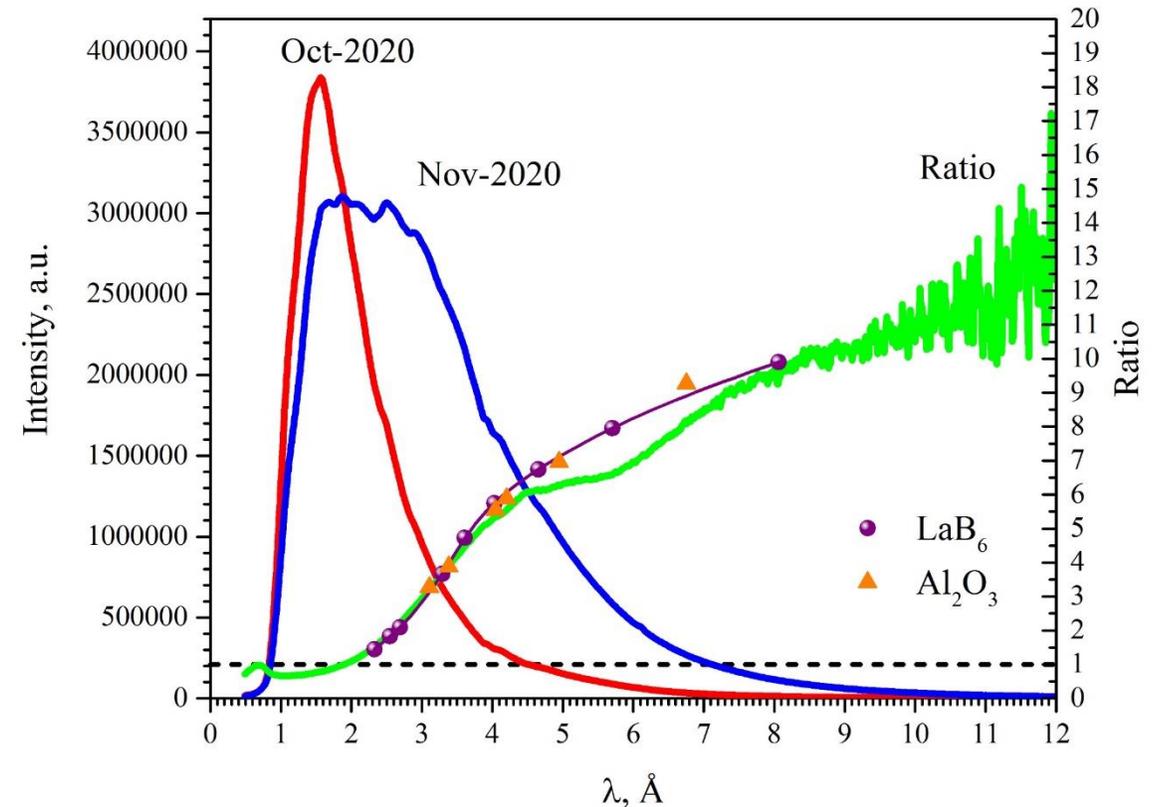
# Замедлители

Симуляция нейтронного спектра на ESS



Интервал длин волн  
Температура в пучке нейтронов  
Поток на образце

Измеренный спектр на ФДВР ИБР2



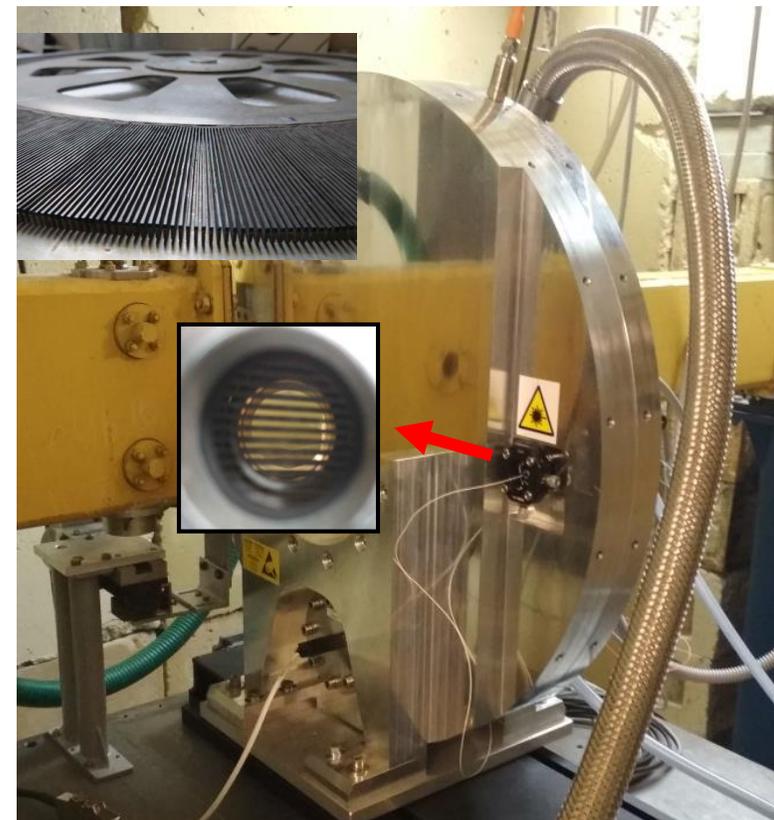
**0.9 – 8 Å**  
**300K + ≈60K**  
**10<sup>8</sup> н/см<sup>2</sup>/с**

# Прерыватель Фурье

Фурье прерыватель на ФДВР



Фурье прерыватель на ФСД

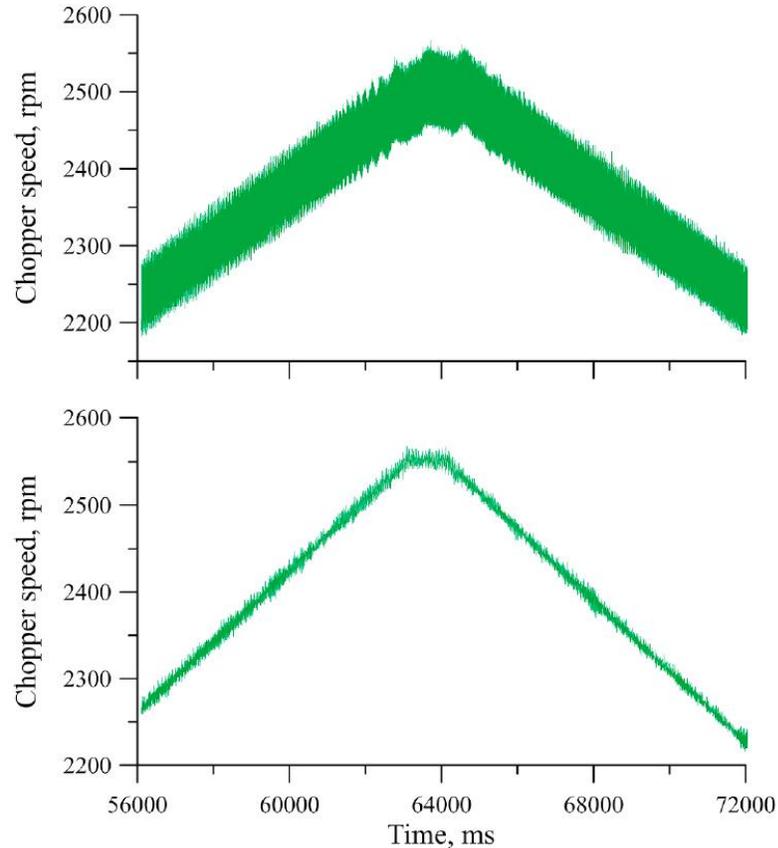


## Основные параметры:

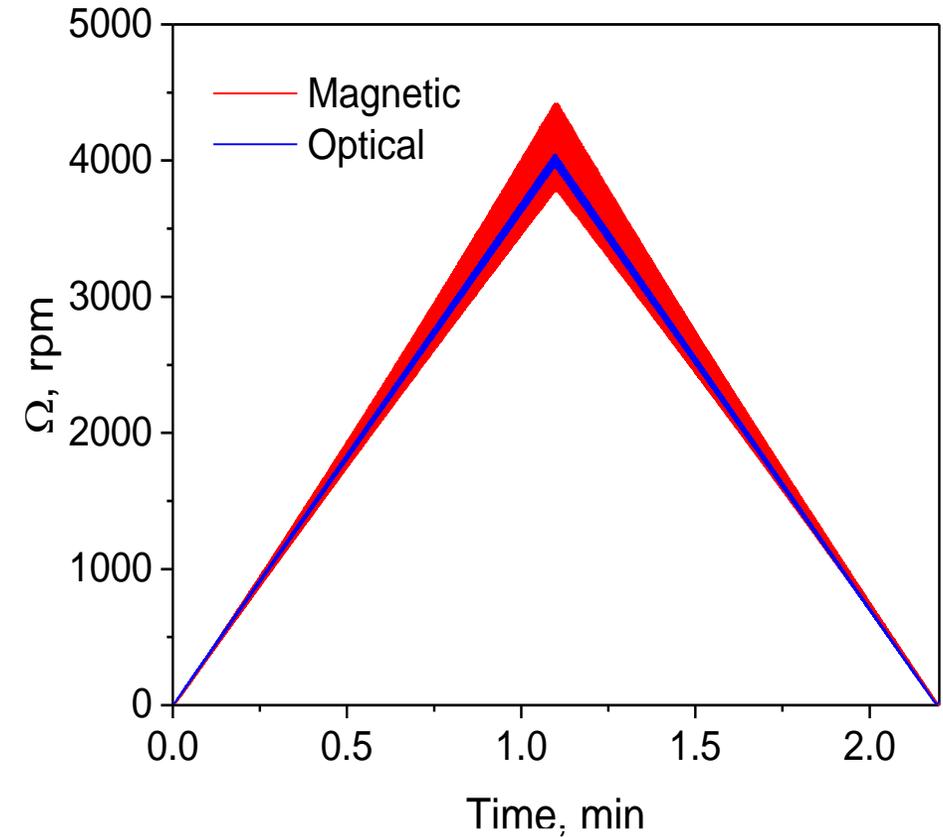
|                           |  |                            |                                   |
|---------------------------|--|----------------------------|-----------------------------------|
| - Макс. скорость вращения | <b>6000 – 9000 об/мин</b>              | - Источников пикап сигнала | <b>оптический энкодер / лазер</b> |
| - Материал статора/ротора | высокопроч. Al сплав                   | - Число щелей              | 1024                              |
| - Диаметр ротора (диска)  | ≈ 540 мм                               | - Поглощающий материал     | $^{10}\text{B}_4\text{C}$ / Gd    |
| - Тип щелей               | прорези в материале /<br>сплошной диск | - Диапазон ускорений       | 0.1 ÷ 300 об/мин/сек              |

# Прерыватель Фурье

Фурье прерыватель на ФДВР



Фурье прерыватель на ФСД



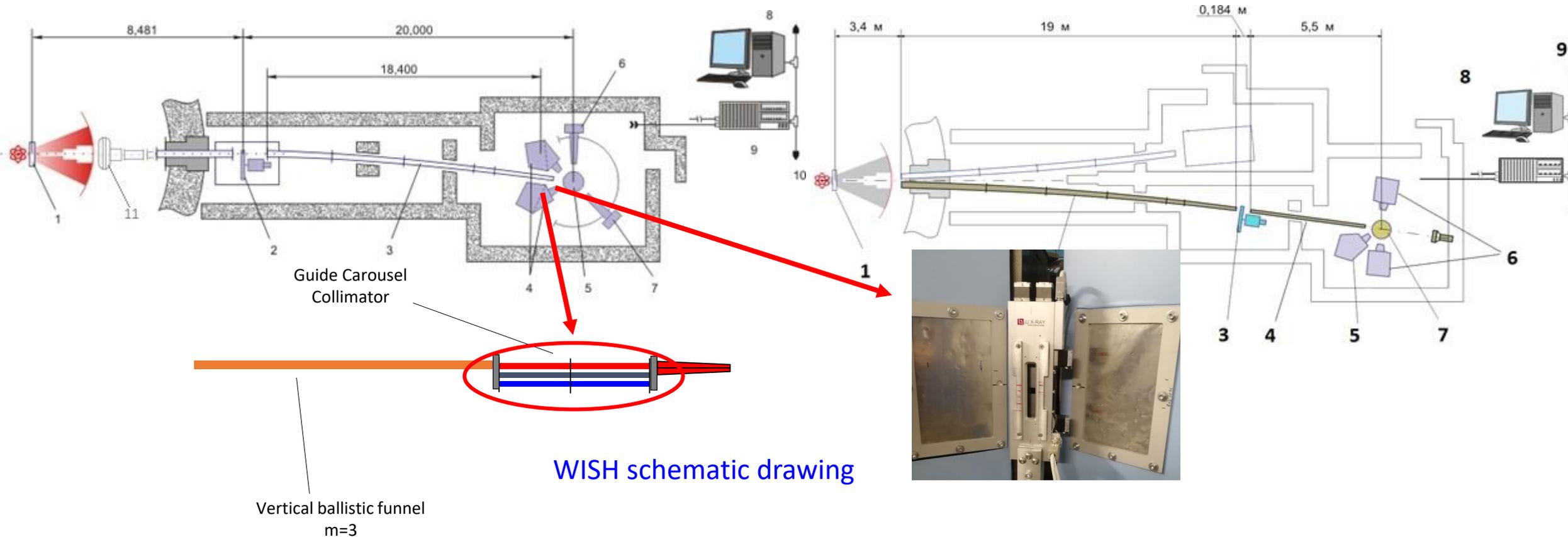
## Основные параметры:

|                           |  |                            |                                   |
|---------------------------|--|----------------------------|-----------------------------------|
| - Макс. скорость вращения | <b>6000 – 9000 об/мин</b>              | - Источников пикап сигнала | <b>оптический энкодер / лазер</b> |
| - Материал статора/ротора | высокопроч. Al сплав                   | - Число щелей              | 1024                              |
| - Диаметр ротора (диска)  | $\approx 540$ мм                       | - Поглощающий материал     | $^{10}\text{B}_4\text{C}$ / Gd    |
| - Тип щелей               | прорези в материале /<br>сплошной диск | - Диапазон ускорений       | $0.1 \div 300$ об/мин/сек         |

# Нейтронород

Схема нейтронорода ФДВР

Схема нейтронорода ФСД



WISH schematic drawing

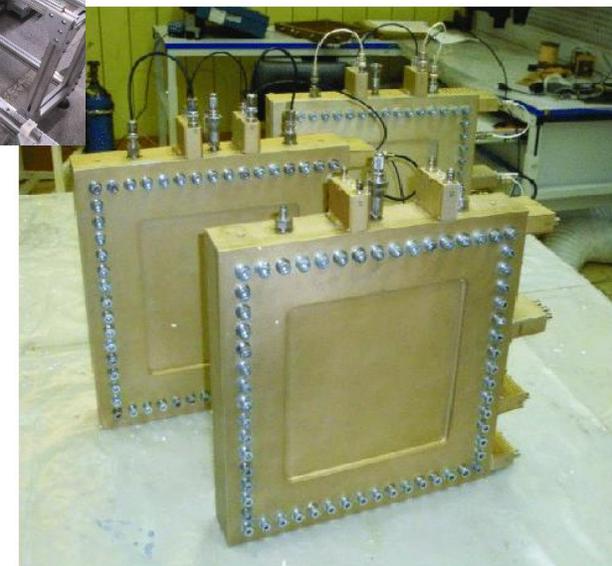
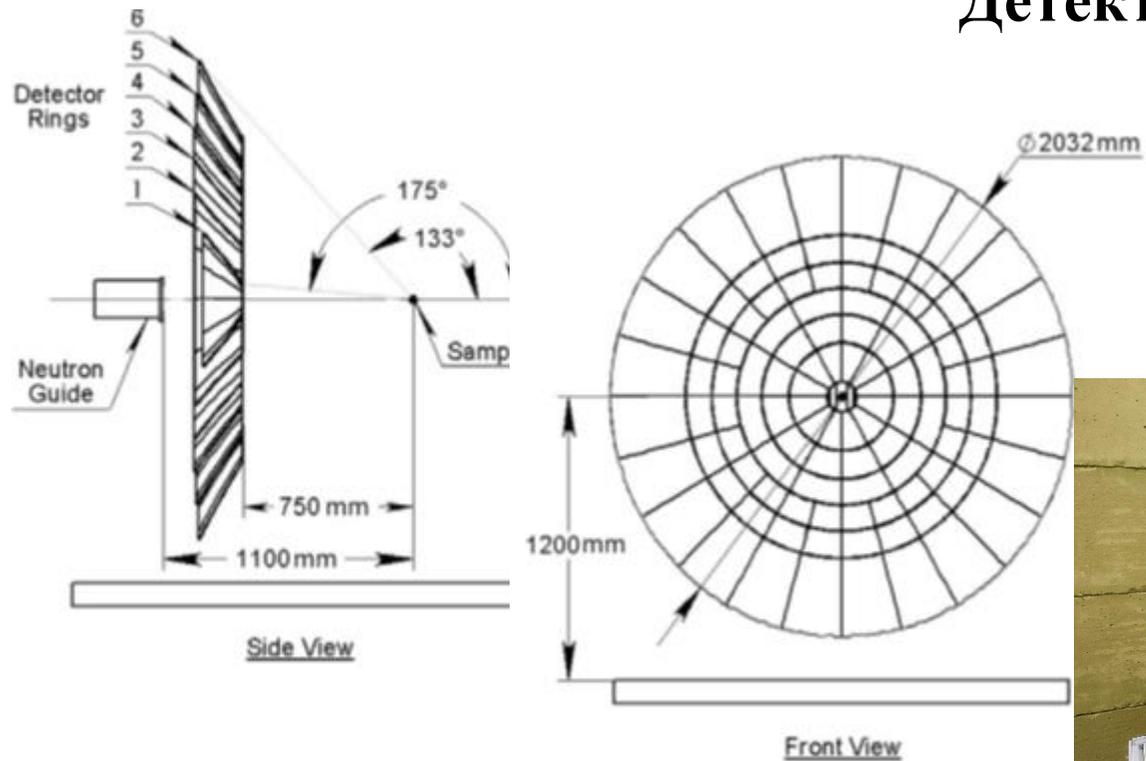
## Основные параметры:

Поток на образце:  
с фурье-прерывателем  
без фурье-прерывателя

$2 \cdot 10^7$  н/см<sup>2</sup>/с  
 $10^8$  н/см<sup>2</sup>/с

Минимальный фон на образце  
поглощение быстрых нейтронов и гамма лучей

# Детекторная система



## Основные параметры:

### Детектор обратного рассеяния

тип: сцинтиллятор

$ZnS(Ag)/^6LiF$

кольцевой, с фокусировкой

телесный угол детектора  $\Omega_d \approx 2.0$  sr,

### Детектор при $2\theta = 90^\circ$

тип: сцинтиллятор

$ZnS(Ag)/^6LiF$

модульный, с фокусировкой

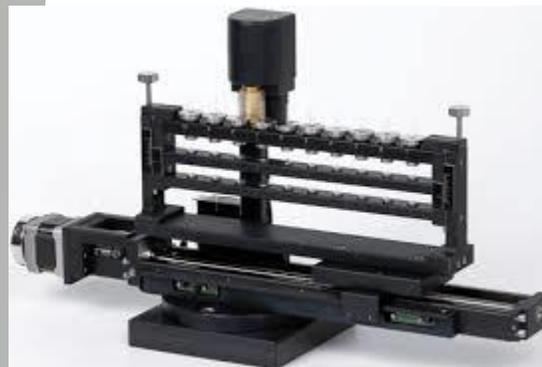
### Детектор при $2\theta = 30^\circ$

Тип: сцинтиллятор

$^3He$

2D ПЧД

## Окружение образца на DSHR



### Основные параметры:

#### Высоко температурная печь

нагреватели и экраны  
ванадиевая фольга  
температурный диапазон  
от RT до 1200°C

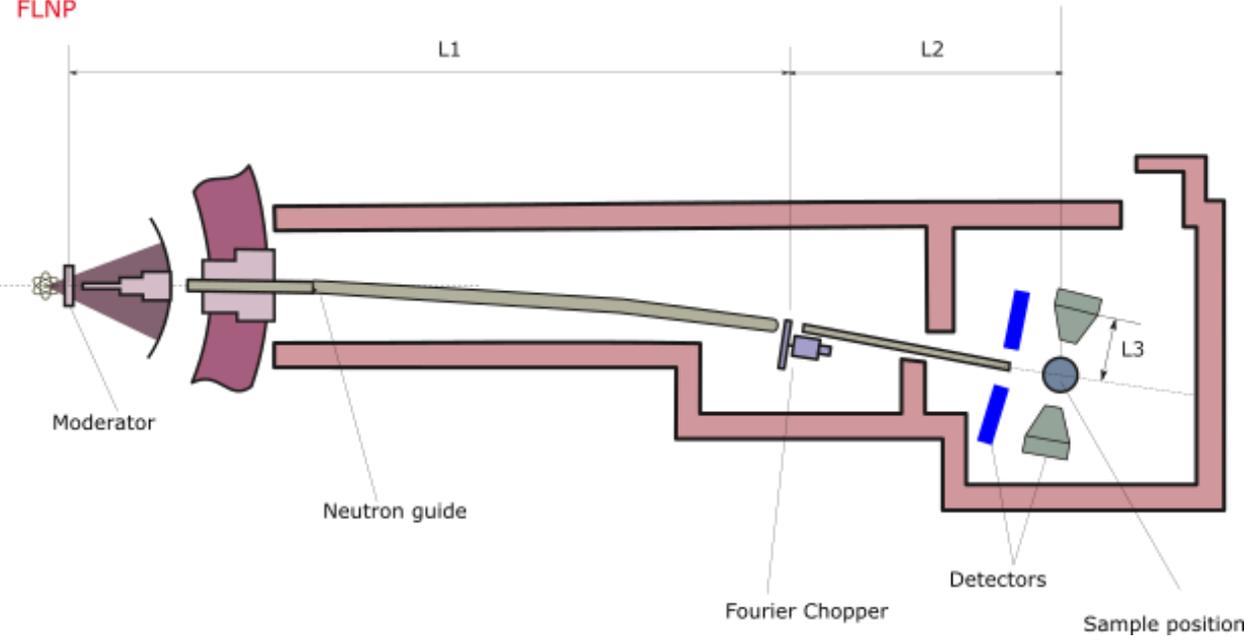
#### Измерения на воздухе

Sample changer  
10-15 позиций  
Гальваностат-потенциостат:  
0-10V, 0-15A

#### Гелиевый рефрижератор

Тип: рефрижератор замкнутого  
цикла  
температурный диапазон  
от 2K до RT / 500°C

# Дифрактометр для материаловедения (MSD)



|                                    |                        |
|------------------------------------|------------------------|
| Расстояние замедлитель-прерыватель | <b>L1 22.5 м</b>       |
| Расстояние прерыватель-образец     | <b>L2 6.0 м</b>        |
| Расстояние образец-детектор        | <b>L3 1.2 м</b>        |
| Общее пролетное расстояние         | <b>L1+L2+L3 29.7 м</b> |

Максимальное разрешение по dhkl:

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| $2\theta = \pm 140^\circ, d = 2 \text{ \AA}$ | <b><math>1.7 \cdot 10^{-3}</math></b> |
| $2\theta = \pm 90^\circ, d = 2 \text{ \AA}$  | <b><math>2.1 \cdot 10^{-3}</math></b> |

|                          |                    |
|--------------------------|--------------------|
| Интервал длин волн       | <b>0.6 – 6 \AA</b> |
| Сечение пучка на образце | <b>10x50 мм</b>    |

Поток на образце:

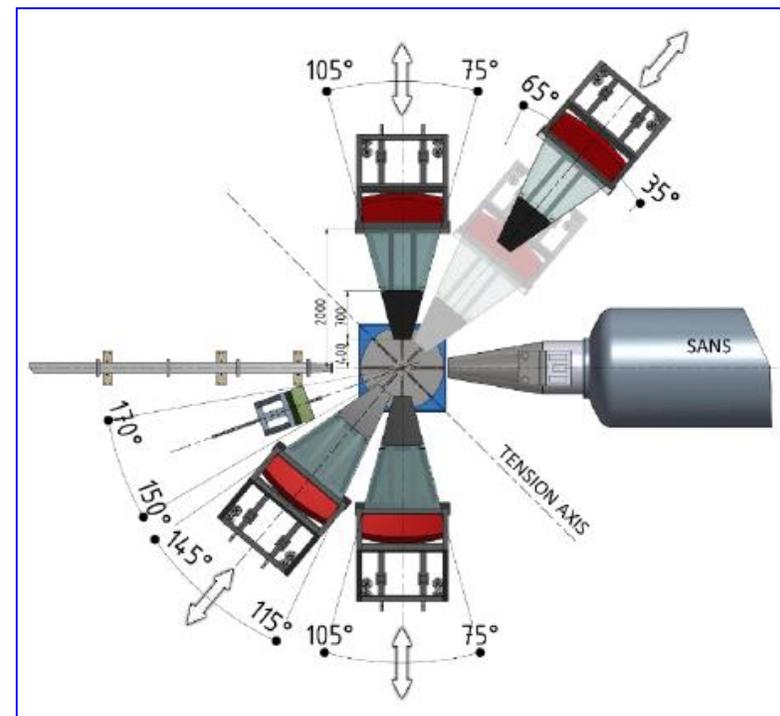
|                       |  |
|-----------------------|--|
| с фурье-прерывателем  | <b><math>2 \cdot 10^7 \text{ н/см}^2/\text{с}</math></b> |
| без фурье-прерывателя | <b><math>10^8 \text{ н/см}^2/\text{с}</math></b>         |

|  |   |
|--|---|
| Детектор обратного рассеяния ( $2\theta = \pm 140^\circ$ ) | <b>ASTRA/2D-ПЧД (<math>^6\text{Li}/\text{ZnS}/*</math>)</b> |
| Детектор при $2\theta = \pm 90^\circ$                      | <b>ASTRA/2D-ПЧД (<math>^6\text{Li}/\text{ZnS}/*</math>)</b> |

# Система коллиматоров на MSD

Система коллиматоров ФСД

Materials engineering diffractometer BEER, ESS



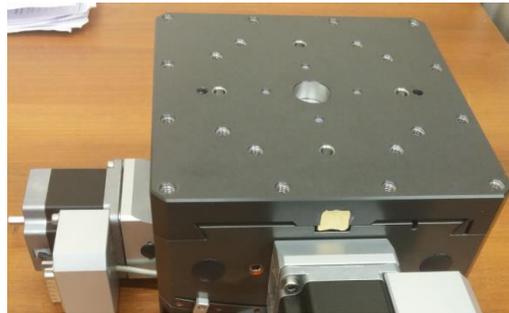
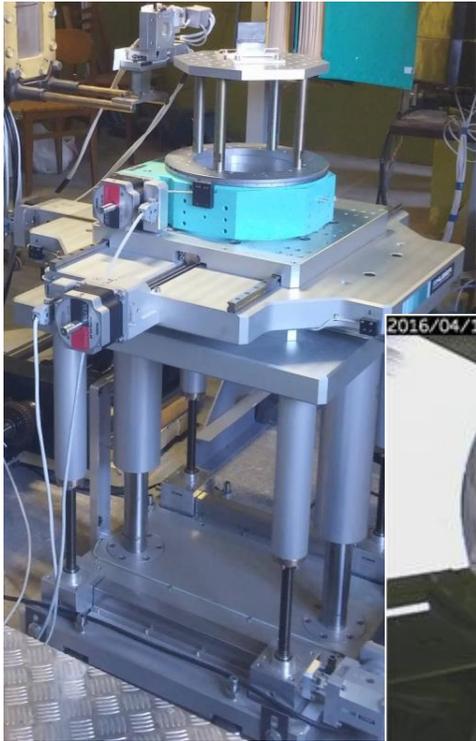
**Основные параметры:**

**автоматизированная диафрагма на падающем пучке**

**набор сменных радиальных коллиматоров с пространственным разрешением 2, 1 и 0.5 мм**

**ВОЗМОЖНОСТЬ ДИСТАНЦИОННО ВВОДИТЬ И ВЫВОДИТЬ КОЛЛИМАТОРЫ**

## Окружение образца на MSD



**основной гониометр**

4-осный - x, y, z,  $\omega$

с точностью около 0.005 мм предельной  
нагрузки до 500 кг

**вспомогательные гониометры**

для перемещения и качения

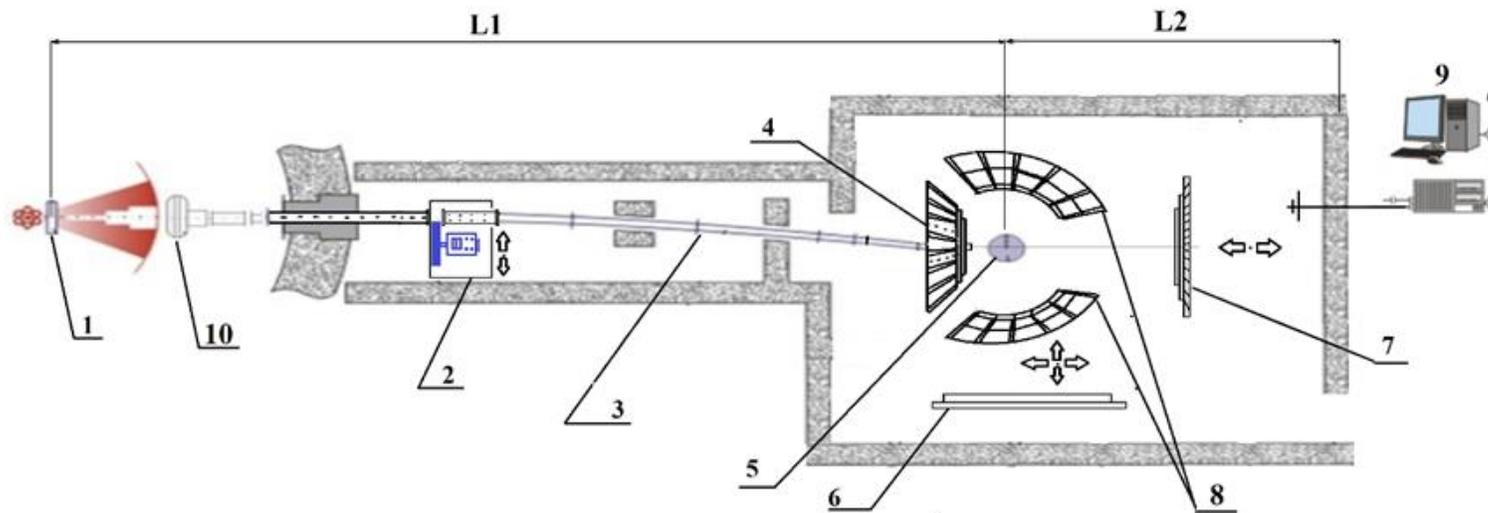
**печи (зеркальные, индукционная)**

температурный диапазон  
от RT до 1000°C

**нагрузочная машина**

усилие до  $F_{max} = 29$  kN  
температурный диапазон  
от RT до 800°C

# Дифрактометр высокой светосилы (DSHI)



Расстояние замедлитель-образец **L1 35 м**

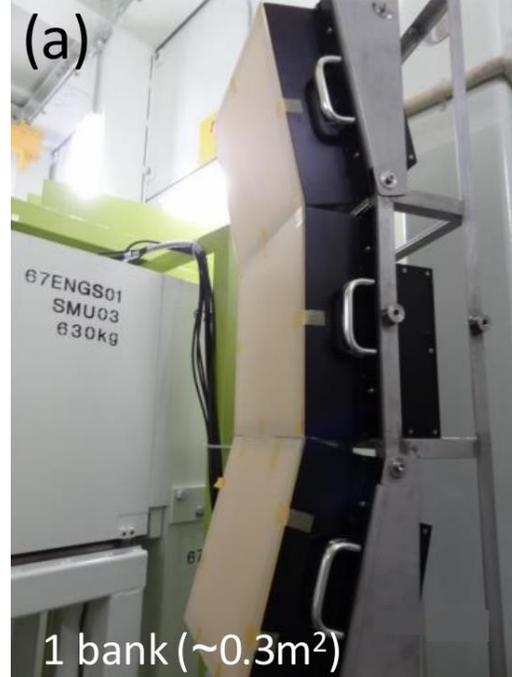
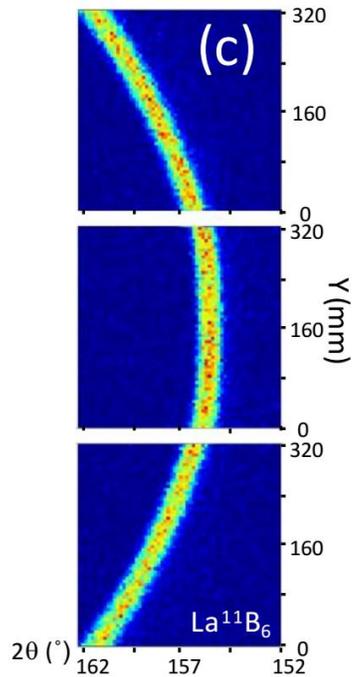
Расстояние образец - beamstop **L2 7 м**

## Детекторы

|  |   |  |   |
|--|---|--|---|
| Поток на образце:                      | <b><math>&gt;10^8</math> н/см<sup>2</sup>/с</b> | Кольцевой детектор обратного рассеяния |   |
| Полный интервал углов рассеяния        | <b>1 – 171°</b>                                 | <sup>6</sup> Li/ZnS/*                  | 133° – 171°   |
| Диапазон межплоскостных расстояний     | <b>0.6 – 300 Å</b>                              | Модульный широкоапертурный детектор    |   |
| Интервал длин волн                     | <b>0.9 – 8 Å</b>                                | <sup>6</sup> Li/ZnS/*                  | 20° – 120°  |
| Сечение пучка на образце               | <b>10 x 50 мм</b>                               | Малоугловой детектор                   |   |
| Разрешение $\Delta d/d$                | с прерывателем                                  | без прерывателя                        |   |
| $2\theta = 170^\circ, d = 2 \text{ Å}$ | 0.0003  | - 0.01                                 | <sup>3</sup> He                                     |
| $2\theta = 150^\circ, d = 2 \text{ Å}$ | 0.0010  | } - 0.1                                | Подвижный ПЧД детектор<br><sup>3</sup> He, ZnS(Ag)? |
| $2\theta = 90^\circ, d = 2 \text{ Å}$  | 0.0040  |  |   |
| $2\theta = 30^\circ, d = 2 \text{ Å}$  | 0.01  |  |   |

# RTOF + PSD ?

ПЧД на основе ZnS(Ag) на нейтронных TOF дифрактометрах SENJU [1,2] и TAKUMI [3] в научном центре J-PARC (Токай, Япония)

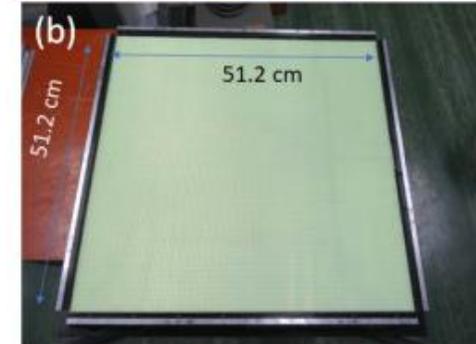


## TAKUMI Engineering Materials Diffractometer

$2\Theta=157^\circ$ ; 4096 pixels

Area:  $320 \times 320$  mm

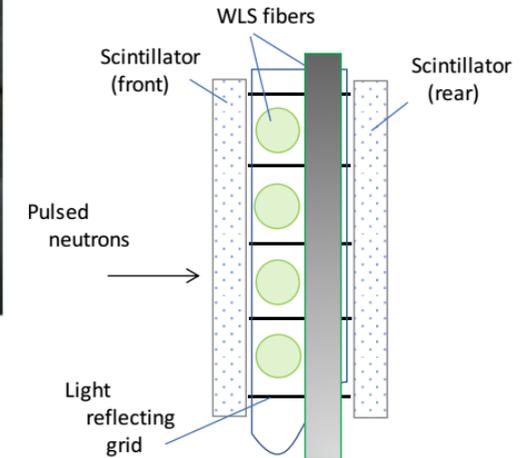
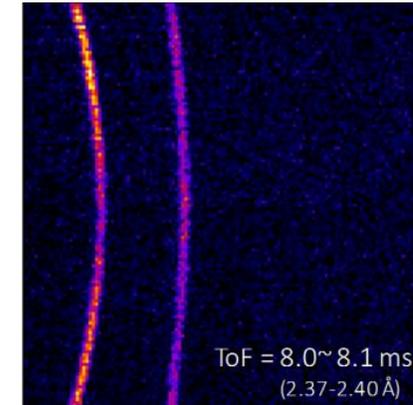
Pixel size:  $5 \times 5$  mm



## SENJU Single Crystal Diffractometer

Area:  $512 \times 512$  mm

Pixel size:  $4 \times 4$  mm



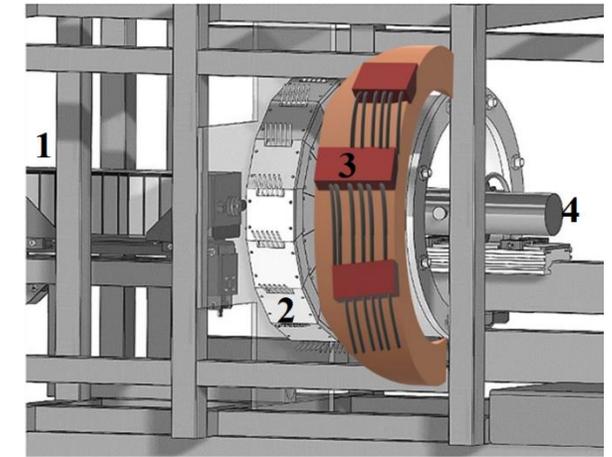
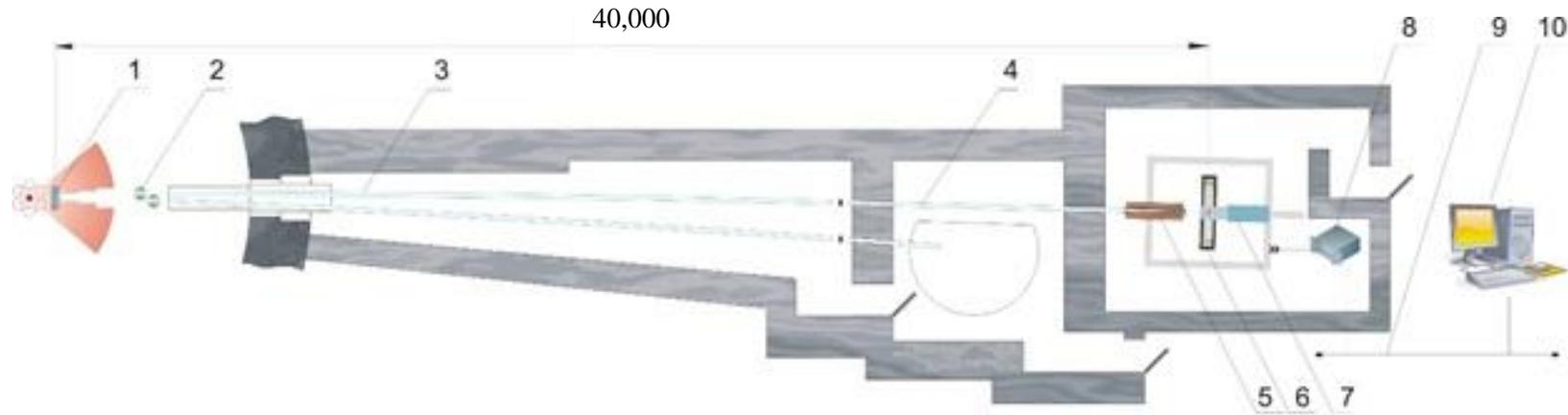
**${}^6\text{Li}:\text{ZnS}(\text{Ag}) + \text{WLS fibers}$**   
Efficiency:  $\sim 45\%$  @  $\lambda=1.8 \text{ \AA}$   
Gamma sensitivity :  $2 \times 10^{-6}$

[1] T. Kawasaki et al., *NIMA*, 2014, Vol. 735, pp. 444–451. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2013.09.057>

[2] T. Nakamura et al., Proc. of IEEE NSS/MIC, 26 Oct.-2 Nov. 2019, Manchester, UK. <https://doi.org/10.1109/NSS/MIC42101.2019.9059981>

[3] T. Nakamura et al., Proc. of the J-PARC2019, 2021, 011097. <https://doi.org/10.7566/JSPSCP.33.011097>

# Дифрактометр для исследований при высоких давлениях (ДНР)



## Основные параметры

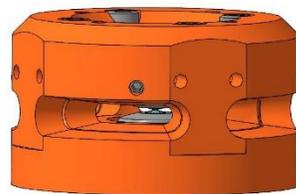
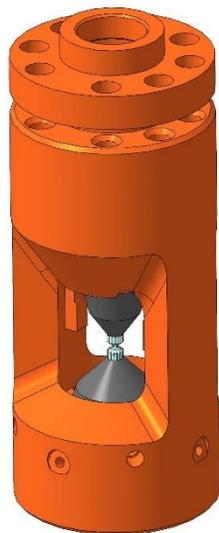
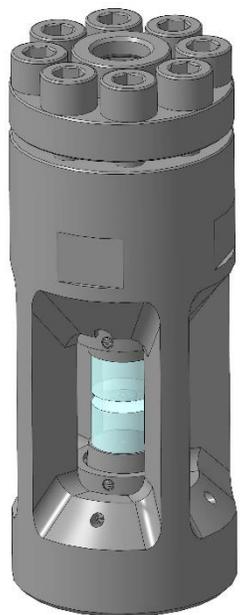
|   |                       |  |                           |
|---|-----------------------|--|---------------------------|
| - Поток на образце:                         | $\sim 5 \times 10^8$  | - Детектор при $2\theta \sim 90^\circ$               | $^3\text{He}$ , модульный |
| - Сечение пучка                             | 5x5 мм                | - Детектор при $2\theta \sim 30^\circ-70^\circ$      | $^3\text{He}$ , 2D ПЧД,   |
| - Пролетная база, м:                        | 40.0                  | - Разрешение дифрактометра при $d = 2 \text{ \AA}$ : |                           |
| - Диапазон по углу рассеяния $2\theta$      | $30^\circ - 98^\circ$ | при угле рассеяния $2\theta = 30^\circ-70^\circ$     | 0.020                     |
| - Диапазон по $d_{\text{hkl}}$ , $\text{Å}$ | 0.6 – 12.8            | при угле рассеяния $2\theta \sim 90^\circ$           | 0.015                     |
| - Температурный диапазон, К                 | 1.5 - 560             | - Объемы исследуемых образцов, $\text{мм}^3$         | 0.00001 – 2               |
| <b>- Диапазон достижимых давлений, ГПа</b>  |                       | <b>0 – 100</b>                                       |                           |

Камеры высокого давления:

-С наковальнями из сапфира До 7 ГПа

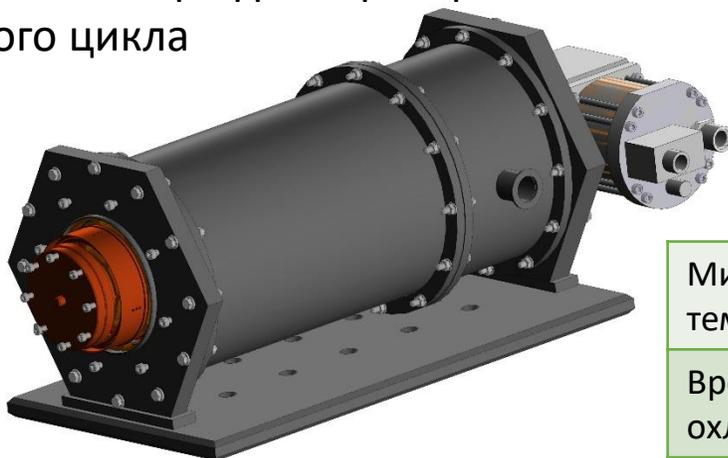
-С наковальнями из муссанита до 15ГПа

-С наковальнями из алмаза до 50 ГПа



## ДАВЛЕНИЕ

Горизонтальный рефрижератор замкнутого цикла

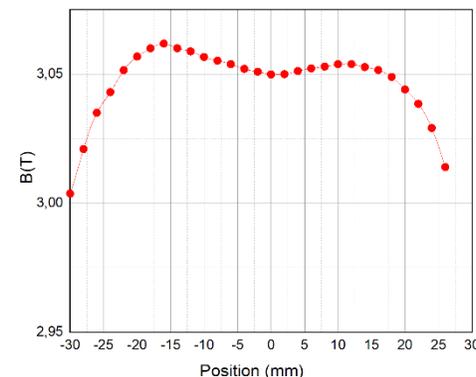
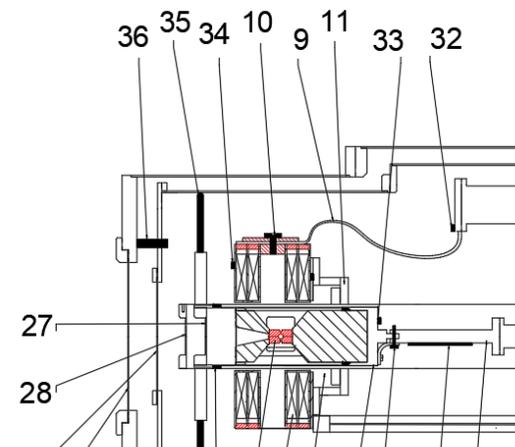


## ТЕМПЕРАТУРА

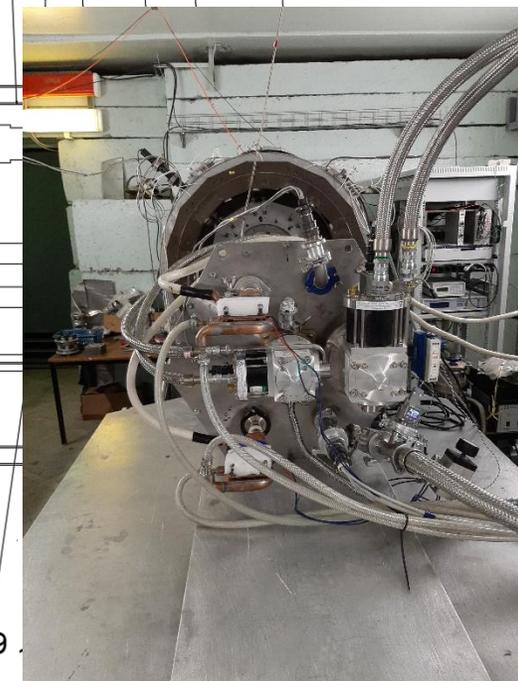
|                         |         |
|-------------------------|---------|
| Минимальная температура | <3.5 К  |
| Время охлаждения        | <60 мин |

Горизонтальный криомагнит

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ + ДАВЛЕНИЕ+ ТЕМПЕРАТУРА**



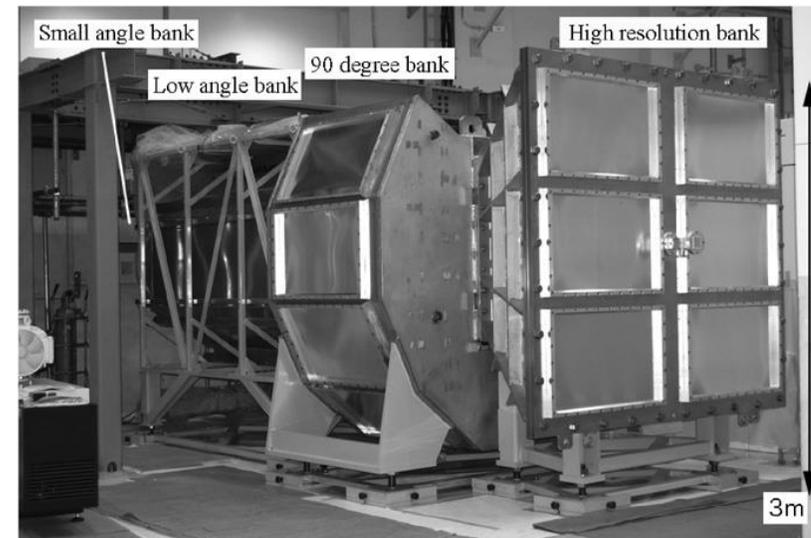
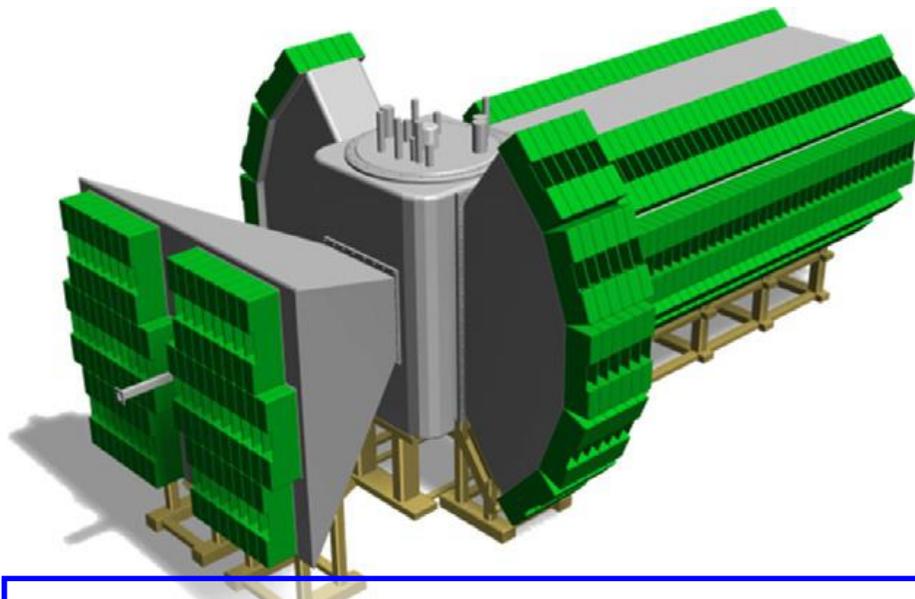
Профиль поля вдоль оси магнита, однородность 0,3%.



Криомагнит на дифрактометре ДН-12. Тестовые испытания.

|                                     |                   |
|-------------------------------------|-------------------|
| Индукция магнитного поля            | До 4 Т (ток 240А) |
| Минимальная температура на образце  | 3.6 К             |
| Максимальная температура на образце | 273 К             |

# Пример текстурного дифрактометра: iMATERIA at J-PARC



Without detectors & shielding

## BL20: iMATERIA

### IBARAKI Materials Design Diffractometer

Диапазон по  $d$ : 0.181-450 (до 900) Å

Диапазон по  $2\theta$ : 12-175°

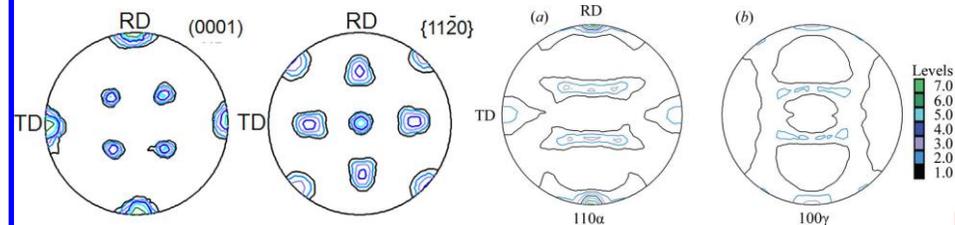
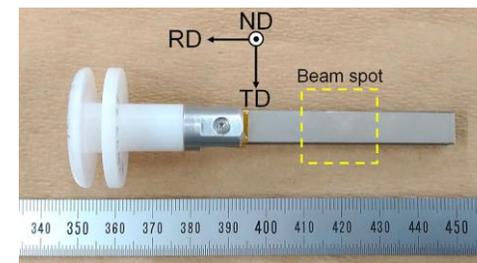
Измерения текстуры без вращения образца  
( $V \approx 1 \text{ cm}^3$ ):

~ **10 минут** для стали

~ **1 час** для Ti-6Al-4V (при 1/5  
мощности

протонного пучка)

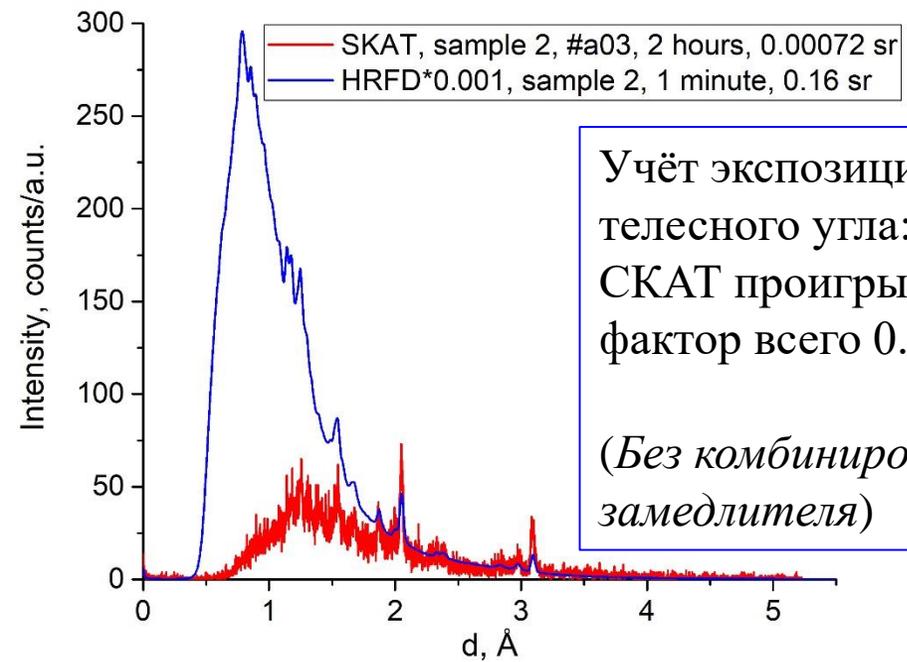
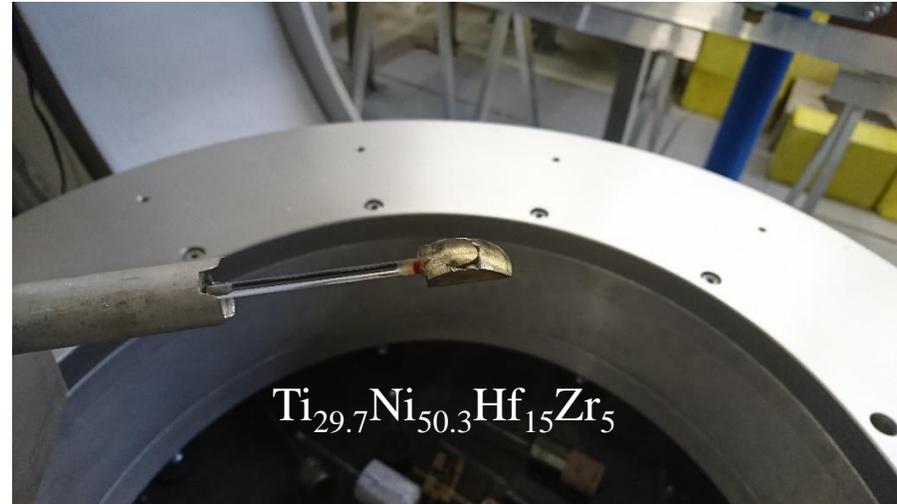
**Не только текстура!** (in situ эксперименты,  
длиннопериодические структуры, ...)



*T. Ishigaki et al. (2009) Nucl. Inst. Meth. A. 600, 189-191.*

*Y. Onuki et al. (2017) Adv. Eng. Mater. 00, 1700227.*

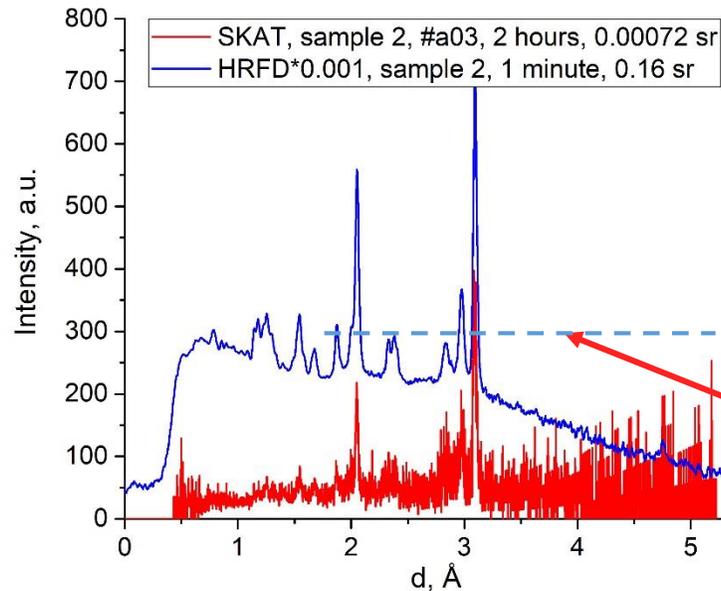
# СКАТ?



Учёт экспозиции и телесного угла:  
СКАТ проигрывает, но фактор всего 0.54.

*(Без комбинированного замедлителя)*

# СКАТ?



Martensite B19' ( $P2_1/m$ )

At 20°C:

$$a = 3.053(1) \text{ \AA}$$

$$b = 4.065(1) \text{ \AA}$$

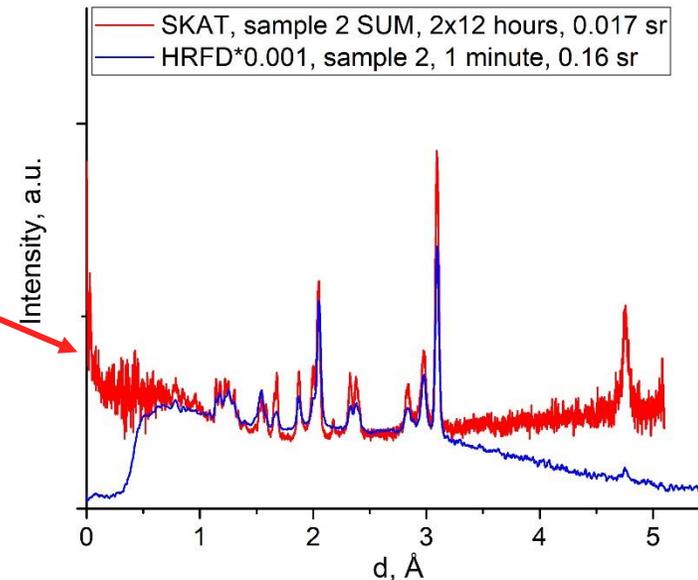
$$c = 4.871(2) \text{ \AA}$$

$$\beta = 103.10(3)^\circ$$

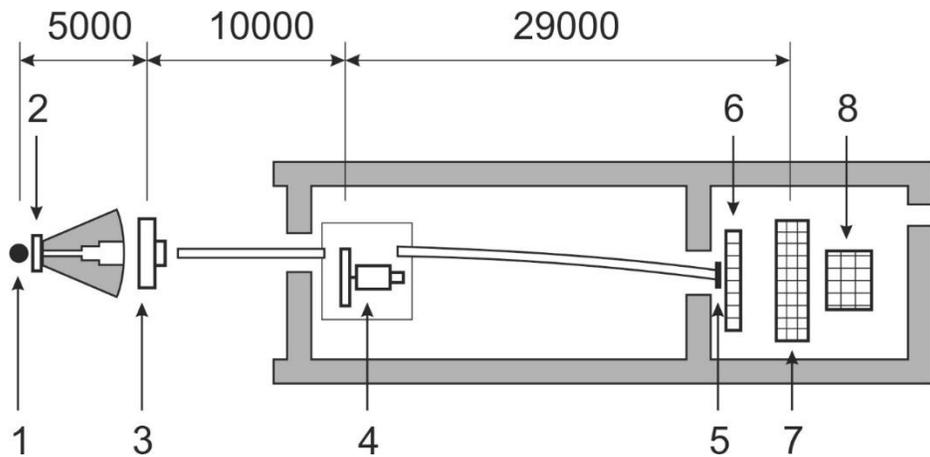
Нужен комбинированный  
замедлитель даже для сплавов!

Не в масштабе (суммирование  
данных СКАТа с дополнительными  
нормировками, чтобы «убрать»  
текстуру).

По сравнению с ФДВР (в режиме без  
фурье-прерывателя): обмен  
небольшого (< 2 раз) выигрыша в  
разрешении на  $d < 2.2 \text{ \AA}$  на  $\approx 2$   
порядка интенсивности.



# Текстурный дифрактометр для исследования конструкционных материалов (DTSM)



- 1 – источник нейтронов,
- 2 – замедлитель,
- 3 – фоновый прерыватель,
- 4 – фурье-прерыватель
- 5 – монитор пучка,
- 6 – блок детекторов обратного рассеяния,
- 7 – блок детекторов 75-105°,
- 8 – блок детекторов 20-40°.

Быстрые (*in situ*?) измерения кристаллографической текстуры в образцах функциональных сплавов, композитов, конструкционных материалов и других материалов с характерными размерами зёрен до ~ 50 мкм

|                                       |  |   |                                       |
|---------------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| <b>Замедлитель</b>                    | <b>300+60 К</b>                              | <b>Интервал длин волн</b>   | <b>до 8.8 Å</b>                       |
| Сечение пучка на образце              | 20x20 мм                                     | Детекторная система:  | блоки ПЧД аксиально-симметрично пучку |
| Расстояние фурье-прерыватель-детектор | ≈30 м  | Расстояние замедлитель-детектор   | ≈45 м                                 |
| Окружение образца:                    | одноосная нагрузка + нагрев + магнитное поле | Разрешение Δd/d (временная компонента, без фурье-прерывателя, d = 2 Å, Δt = 350 мкс): |                                       |
| Поток на образце:                     |  | 2θ = 145-175°   | 0.008                                 |
| без фурье-прерывателя                 | 10 <sup>8</sup> н/см <sup>2</sup> /с         | 2θ = 75-105°  | 0.01-0.013                            |
| с фурье-прерывателем                  | 10 <sup>7</sup> н/см <sup>2</sup> /с         | 2θ = 20-40°   | 0.022-0.044                           |

# Текстурный дифрактометр для исследования конструкционных материалов (DTSM)

## Что нужно решить:

Выбор оси вращения образца (текстура низкосимметричных материалов):

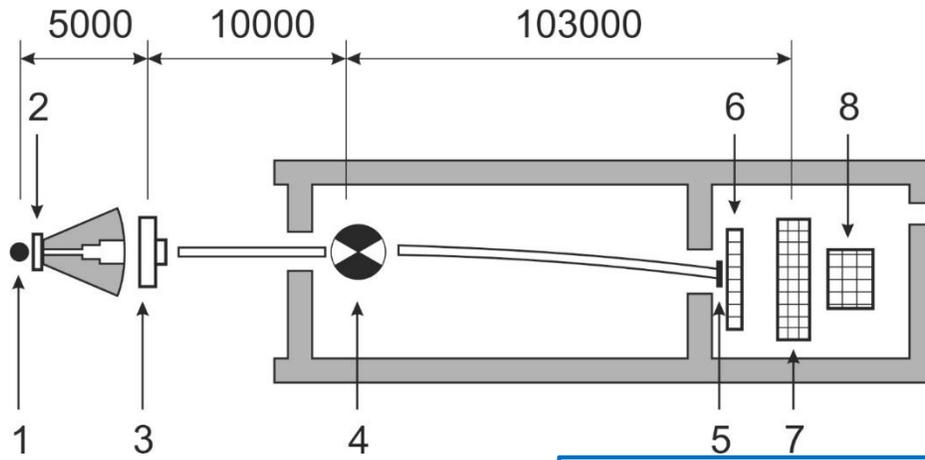
- 1) Вертикально (HIPPO, iMATERIA) – проще установка систем окружения образца, возможно сечение пучка 15-20x50-100 мм (?).
- 2) Горизонтально (СКАТ) – более равномерное покрытие полюсных фигур, выгодно при *in situ* нагрузочных экспериментах (есть измерения вдоль векторов рассеяния  $\parallel$  и  $\perp$  нагрузке), но сечение пучка 20x20 мм (?).

Детекторы:

- 1) Расстояние образец-детектор (уменьшить угловой размер детектора, но какие потери в интенсивности?)
- 2) ПЧД (Powtex). Обработка данных? Угловое разрешение на полюсных фигурах?
- 3) Точечные (iMATERIA). Оптимизация расположения для измерений без вращения и с вращением образца, с учётом систем окружения.
- 4) Коллиматоры?

Окружение образца

# Текстурный дифрактометр высокого разрешения (DTHR)



Изучение кристаллографической текстуры в образцах с линейными размерами до 5 см с высоким разрешением  $\Delta d/d$ .

- 1 – источник нейтронов,
- 2 – замедлитель,
- 3 – фоновый прерыватель,
- 4 –  $\lambda$ -прерыватель,
- 5 – монитор пучка,
- 6 – блок детекторов обратного рассеяния,
- 7 – блок детекторов 75-105°,
- 8 – блок детекторов 20-40°.

Окружение образца:  
 Одноосная нагрузка + нагрев  
 ???

|  |                                       |
|--|---------------------------------------|
| Замедлитель  | 30 К                                  |
| Сечение пучка на образце   | 55x55 мм                              |
| Расстояние замедлитель-детектор  | ≈120 м                                |
| Поток на образце:  | $5 \times 10^6$ н/см <sup>2</sup> /с  |
| Интервал длин волн   | до 3.3 Å                              |
| (с пропуском каждого 2-го импульса)  | до 6.6 Å                              |
| (с пропуском 2-х импульсов из 3-х)   | до 9.9 Å                              |
| Детекторная система:   | блоки ПЧД аксиально-симметрично пучку |
| Разрешение $\Delta d/d$ (временная компонента, $d = 2$ Å, $\Delta t = 350$ мкс): |                                       |
| $2\theta = 145-175^\circ$  | 0.003                                 |
| $2\theta = 75-105^\circ$   | 0.004-0.005                           |
| $2\theta = 20-40^\circ$  | 0.008-0.017                           |

# Текстурный дифрактометр высокого разрешения (DTHR)

**Что нужно решить то же, что и для DTSM:**

Выбор оси вращения образца

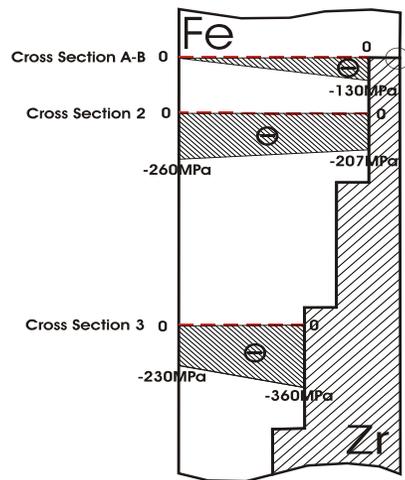
Детекторы

Окружение образца

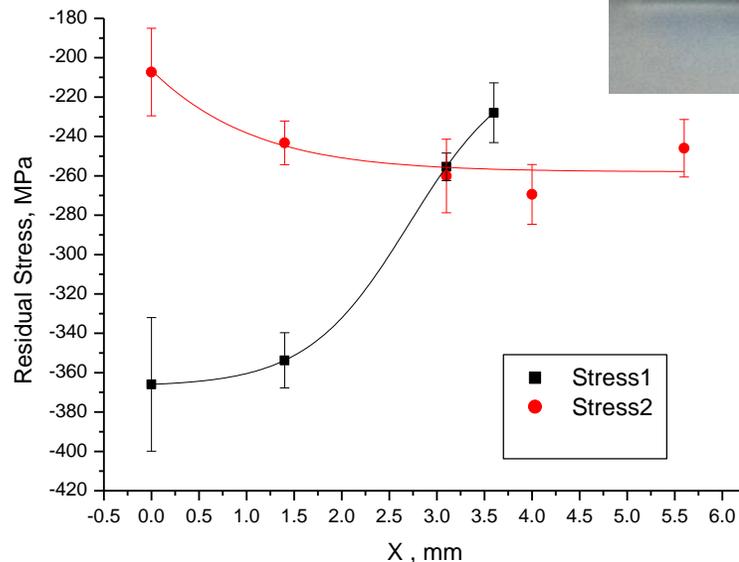
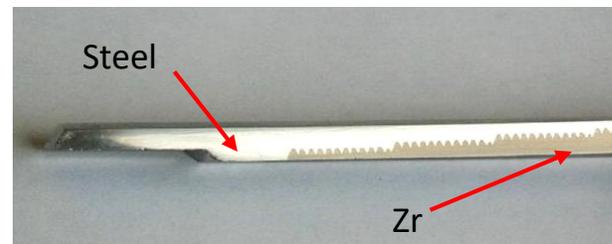
# Residual stress study by neutron diffraction in RBMK reactor components



Курская атомная электростанция (построена в 1985 году): мощность - 4000 МВт, 4 энергоблока типа РБМК-1000 (мощный каналный реактор с графитовым замедлителем).



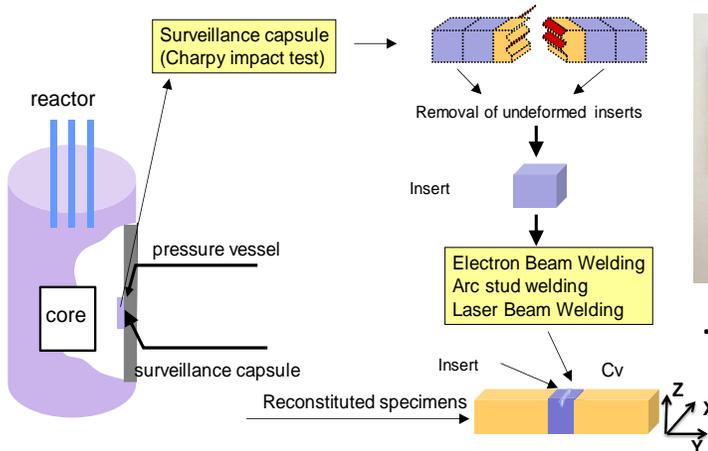
Биметаллическая переходная стенка из стали и циркония исследована на нейтронном дифрактометре HRFD. Поперечное сечение биметаллического переходника сталь-цирконий, используемого в компонентах реактора РБМК



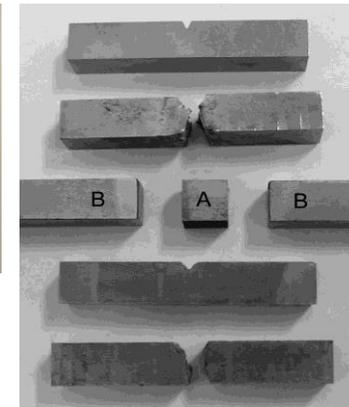
Остаточные напряжения после изготовления (вакуумное спекание при температуре 700°C) в таких соединениях вызваны разницей коэффициентов теплового расширения двух металлов, что часто приводит к возникновению трещин и разрушению.

Радиальная составляющая тензора напряжений в сечении I (черный) и сечении II (красный)

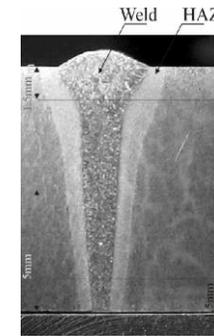
# FSD@IBR-2: Charpy surveillance specimens reconstituted by welding



...by arc stud welding (ASW)



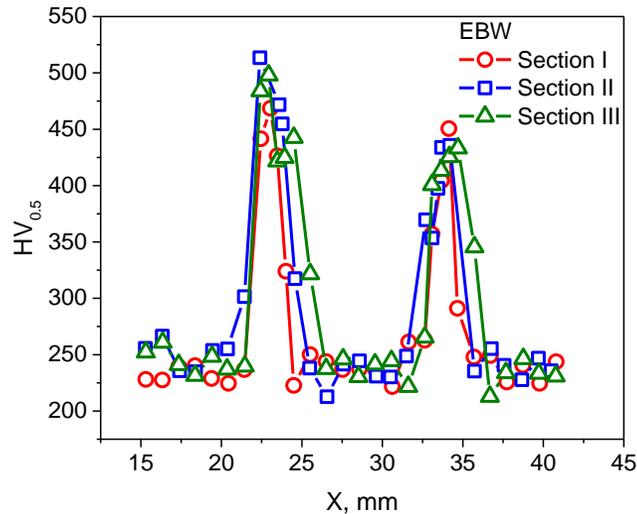
... by electron (EBW) or laser (LBW) beam welding



Typical macrograph of weld joint

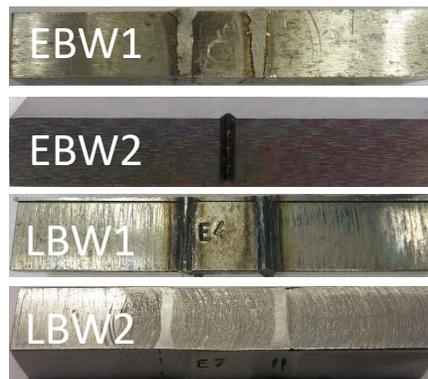
Charpy specimen reconstitution...

*in collaboration with Institute of Electronics of BAN (Sofia, Bulgaria)*

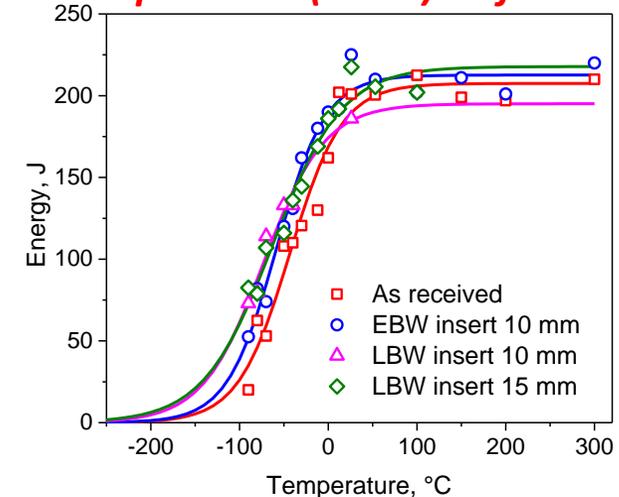


Microhardness distribution for EBW Charpy specimen

Specimens studied by neutron diffraction



**Ductile-Brittle Transition Temperature (DBTT) shift ?**



Total absorbed energy during Charpy impact tests

# Дифракция на импульсном реакторе НЕПТУН

## II ЭТАП:

1. Порошковый дифрактометр с поляризованным пучком (магнитный) (DMP)
2. Total scattering diffractometer for atomic pair distribution function analysis (TSD)  
Option: RTOF+Fermi choppers (interchangeable ?)
3. Дифрактометр для исследования облученных материалов (для задач **Росатома**) (DIM)  
Аналог MSD(?) + спец.оборудование + внешние воздействия (нагрузка+температура)
4. Дифрактометр для исследования монокристаллов (MONO)
5. Дифрактометр с импульсными внешними полями (магнитным, электрическим) (DPEF)
6. Macromolecular diffractometer (MACRO)

# Список тестовых работ на ИБР-2

## 1. Детекторные системы

сцинтилляторы ПЧД высокого разрешения на основе ZnS(Ag) или  ${}^6\text{Li}$ -стекла

## 2. Прерыватели

## 3. Система сбора и накопления данных

## 4. Биспектральный замедлитель

## 5. Формирование нейтронного пучка

## 6. Печки

## 7. Магниты и другое окружение образца

## Заключение

Глобально новое и чего нет на ИБР-2:

1. Поток  $\Phi=10^8$  н/с/см<sup>2</sup>
2. Низкий фон  $\approx 2\%$
3. Частота импульсов 10 гц

Чем заинтересовать РОСАТОМ:

1. Исследование необлученных материалов и изделий

“Белое пятно”:

1. Дифрактометр для исследования облученных материалов

**Спасибо за внимание!**