

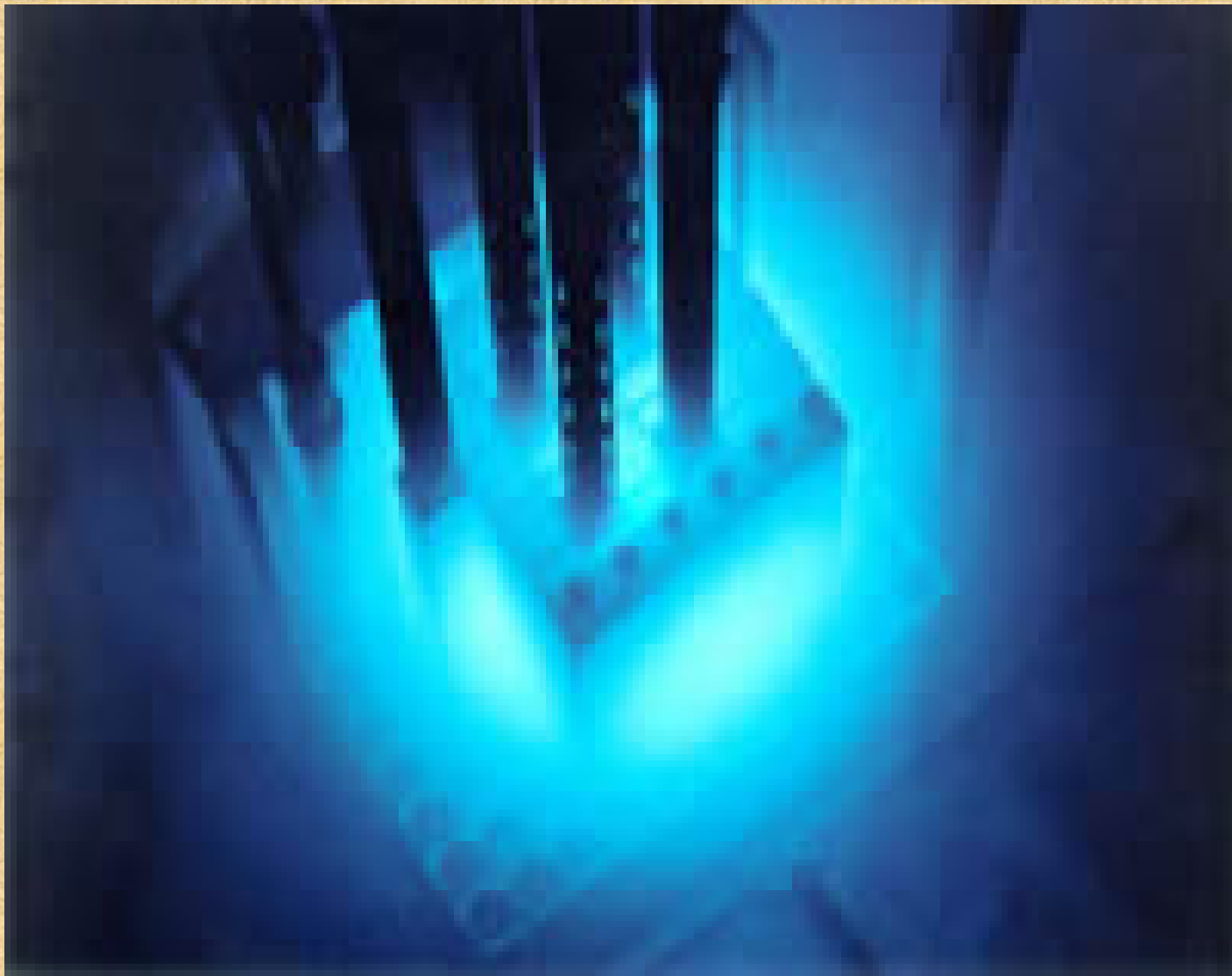
Нейтронные исследования на  
импульсных источниках.  
("Направления нейтронных  
исследований конденсированных  
сред на Нейтронном комплексе ИЯИ  
РАН")

**Р.А.Садыков**

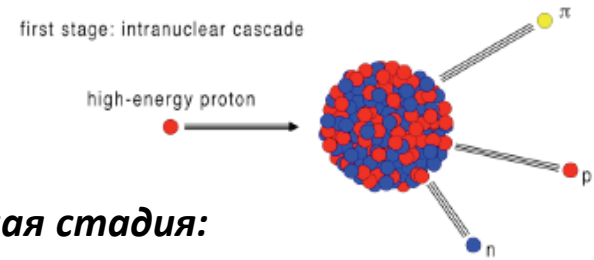
ИЯИ РАН"

Фото

Свечение Черенкова в воде в активных зонах ядерных реакторов.



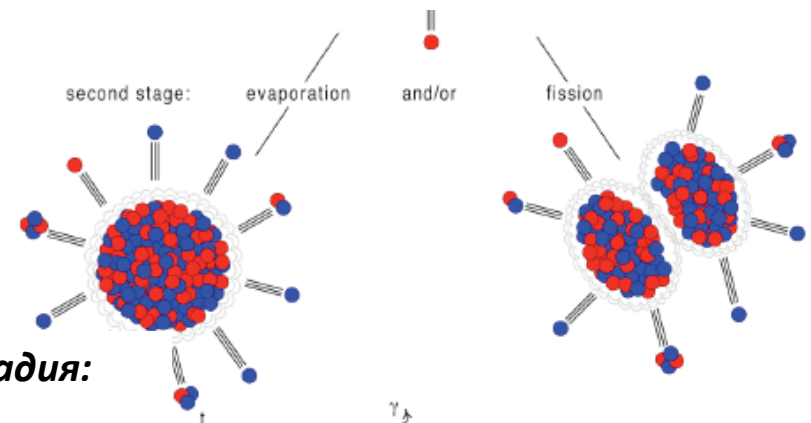
**Первая стадия внутриядерного каскада**  
**Ускоренный протон**



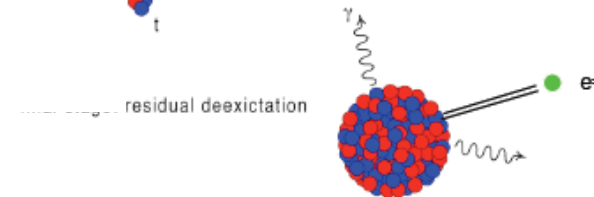
**Промежуточная стадия:**  
**-предравновесное состояние**



**Вторая стадия: испарение и/или деление**



**Конечная стадия:**  
**остаточная релаксация**



**Генерация нейтронов**  
**в процессе**  
**«скалывания»**  
**(spallation neutrons)**

Результат взаимодействия ускоренных протонов с тяжелыми ядрами: неделящимися (процесс скалывания - слева) и делящимися (процесс деления - справа). Среди вторичных частиц преобладают нейтроны. Средняя энергия на нейтрон в реакции скалывания составляет ~30 МэВ, а в реакции деления -150 МэВ. Таким образом, эффективность выбивания нейтронов в реакциях скалывания примерно в пять раз выше, чем при делении.

# Экспериментальный комплекс



**Расположение объектов экспериментального комплекса (систем проводки пучков, биологической защиты, нейтронных мишеней и нейтронографических установок на нейтронноводах).**

# Нейтронные исследования на основе ускорительно-управляемых нейтронных источников :

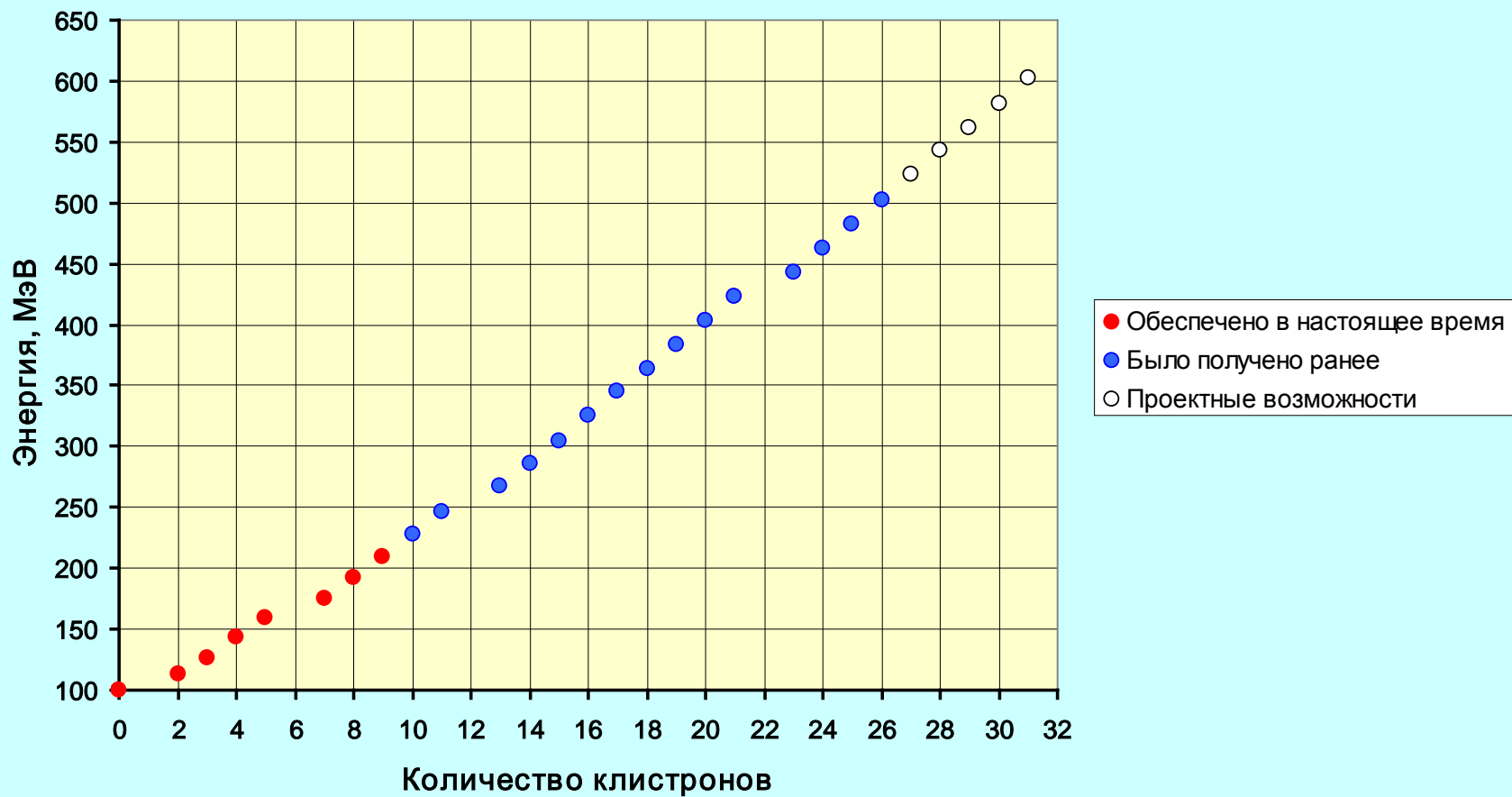


- Новое поколение импульсных источников нейтронов на основе сильноточных ускорителей протонов средних энергий (0.45 - 1.3 ГэВ) становятся одними из важнейших инструментов исследования вещества, конденсированных сред (~ 95% времени работы ускорителей), ядерной физики (~ 2 - 3%) и работ прикладного характера (~ 2%).
- Основное преимущество нейтронных источников такого типа состоит в следующем:
  - Ядерная безопасность;
  - Широкий спектр нейтронов от холодных до энергии нескольких сотен МэВ;
- Возможность использования в экспериментах времяпролетной методики для сепарации нейтронов по энергиям и изменения временных и частотных характеристик в широких пределах;
- Низкое энерговыделение в расчете на один произведенный нейтрон в реакциях взаимодействия протонов средних и высоких энергий с материалом мишени (spallation процесс) по сравнению с реакцией деления.

*Это обстоятельство позволяет получать в источниках нейтронов на основе сильноточных ускорителей существенно более высокие локальные плотности потоков нейтронов, чем в ядерных реакторах при сопоставимых плотностях тепловыделения.*

# Линейный ускоритель

## Зависимость энергии от количества клистронов



В настоящее время в ИЯИ РАН формируется центр нейтронных и рентгенографических исследований для **физики конденсированных сред, материаловедения, геофизики**. Основой центра являются установки на **двух источниках нейтронов - РАДЭКС и ИН-06** и парк **современных рентгеновских дифрактометров**. Уже смонтированы установки для нейтронного рассеяния на 4х экспериментальных каналах с широким выбором опций измерения: дифракция, рефлектометрия, неупругое рассеяние, малоугловое рассеяние. На стадии проектирования находятся еще несколько установок, включая спектрометры неупругого рассеяния нейтронов прямой и обратной геометрий. Условия на образце включают в себя низкие температуры, высокие давления (в том числе для образцов объемом в несколько см<sup>3</sup>), возможность наводораживания и *in situ* измерений под давлением газа

# Нейтронный комплекс ИЯИ РАН:

- Импульсный источник тепловых нейтронов ИН-06
- Импульсный источник эпитепловых и тепловых нейтронов РАДЭКС
- Спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100



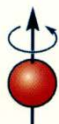
# Используемые методы исследований основаны на особых свойствах нейтрона, таких как:



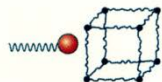
•отсутствие электрического заряда, что позволяет нейтронам проникать внутрь образцов без взаимодействий с атомами вещества;



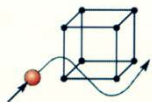
•наличие магнитного момента дает возможность исследования микроскопической магнитной структуры объекта, включая магнитные флуктуации в материале;



•используя наличие спина нейтрона можно изучать ориентацию ядер в атомах среды;



•энергия нейтронов может быть сопоставима с энергиями элементарных возбуждений, что позволяет исследовать колебания молекул, решеточные моды, динамику атомных движений;

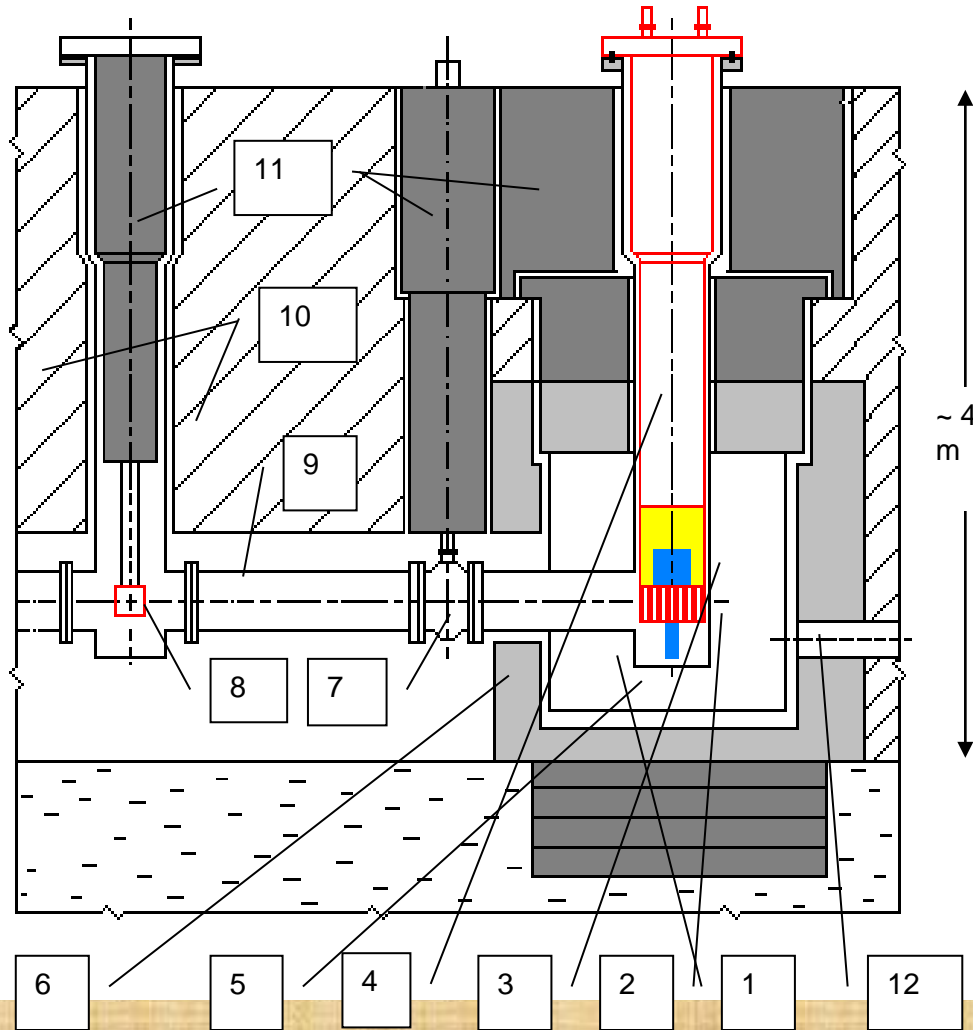


•длина волны нейтронов сравнима с межатомными расстояниями. Это позволяет получать информацию о деталях структуры с размерами от  $10^{-15}$  до  $10^{-6}$  м.

# Линейный ускоритель и Экспериментальный комплекс



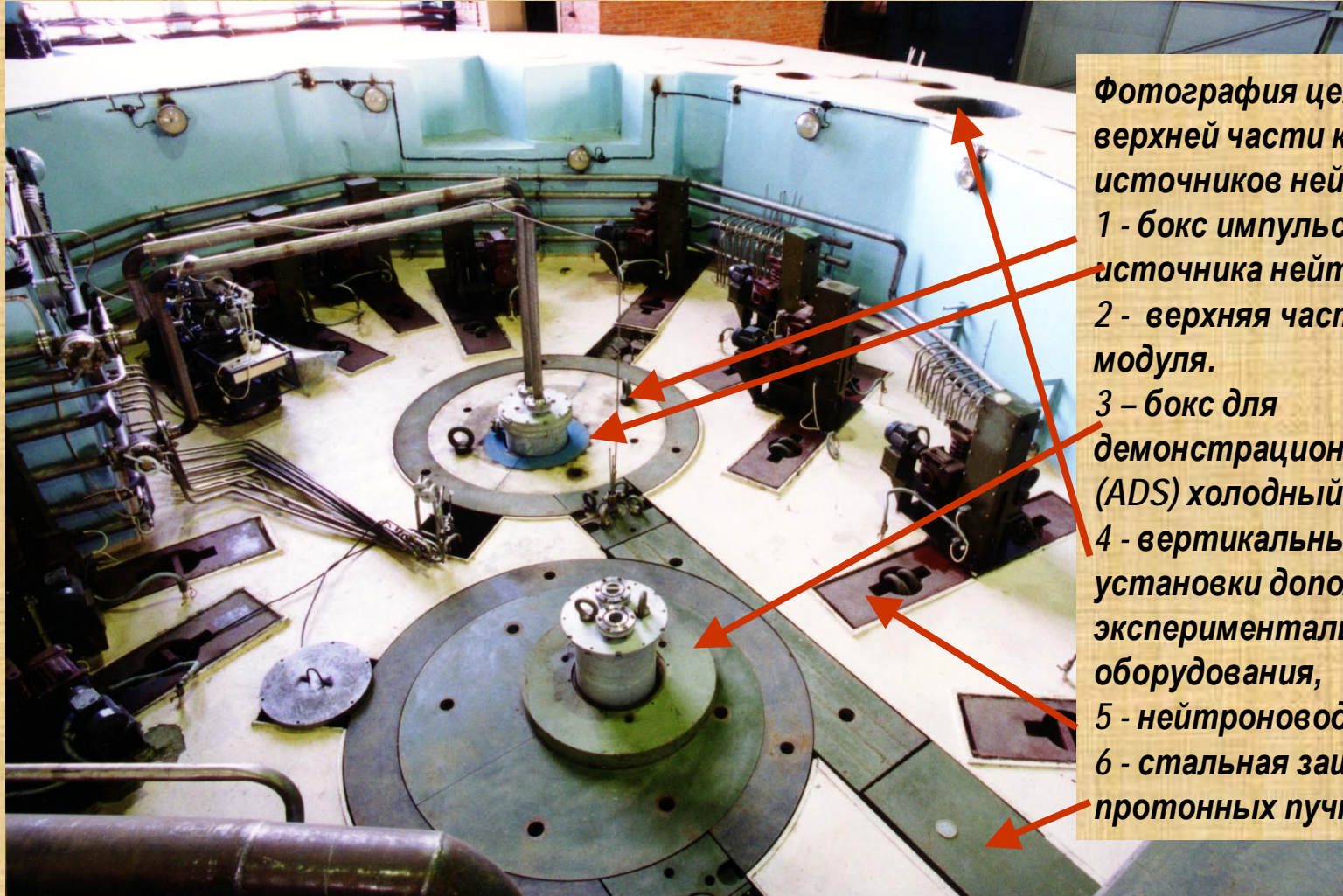
# Источник нейтронов ИН-06



**Принципиальная схема импульсного источника нейтронов в защитном боксе.**

**1 – активная зона, 2 – замедлители, 3 – бериллиевый отражатель, 4 – ампула (модуль) в состав которой входят активная зона, замедлители и защитные стальные пробки. 5 – газовый бак (диаметр ~ 1500 мм), 6 – тепловая защита, 7 – дистанционно-разъемное уплотнение, 8 – датчик положения пучка, 9 – ионопровод, 10 – железная защита, 11 – съемные стальные защитные пробки, 12 – нейтроновод**

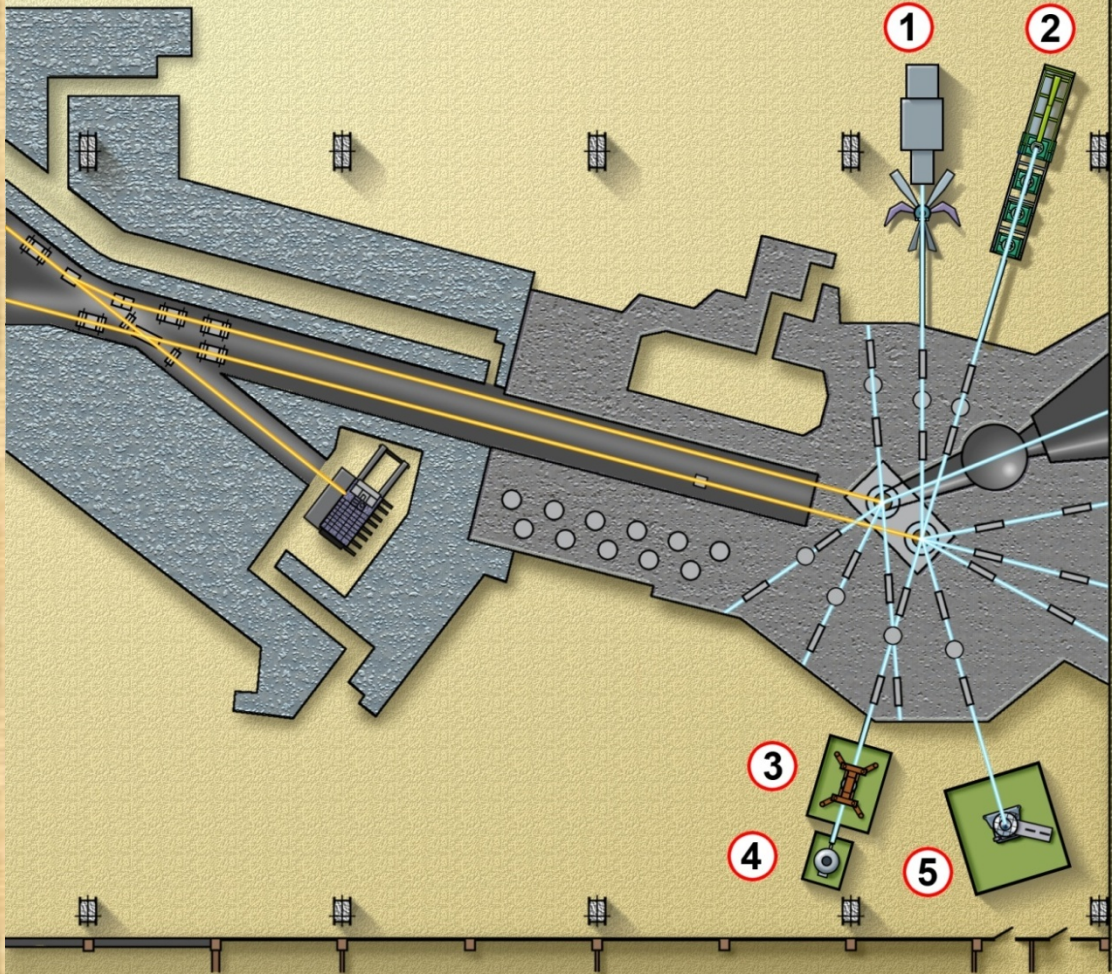
# Источник нейтронов ИИ-06



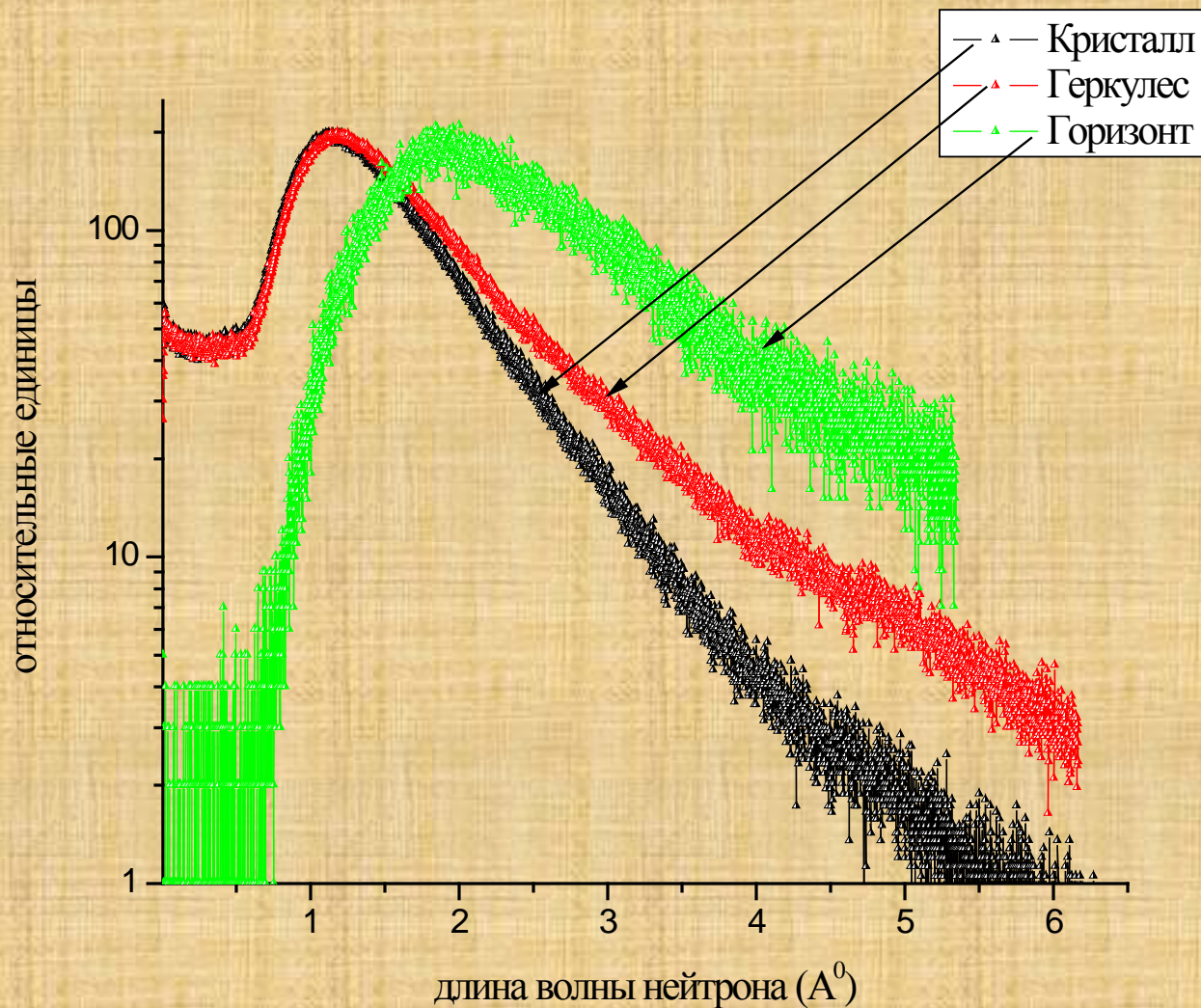
Фотография центральной  
 верхней части комплекса  
 источников нейтронов:  
 1 - бокс импульсного  
 источника нейтронов,  
 2 - верхняя часть мишенного  
 модуля.  
 3 - бокс для  
 демонстрационного стенда  
 (ADS) холодный источник (?),  
 4 - вертикальные проходки для  
 установки дополнительного  
 экспериментального  
 оборудования,  
 5 - нейтронотводы -  
 6 - стальная защита  
 протонных пучков.



# ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ИН - 06

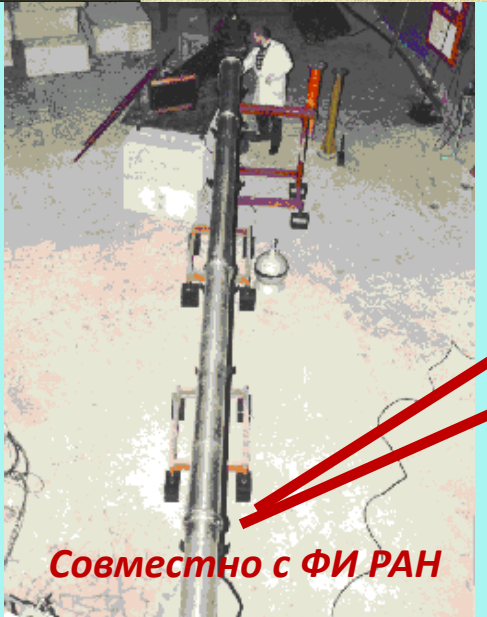


- 1** Многофункциональный нейтронный спектрометр (МНС) для исследований в широком диапазоне характерных размеров от 0.1 до сотен нанометров.
- 2** Многофункциональный нейтронный малоугловой спектрометр (рефлектометр) "Горизонт".
- 3** Нейтронографическая установка для исследования вещества в экстремальных условиях "Геркулес".
- 4** Дифрактометр-спектрометр общего назначения для исследования объёмных поликристаллов "ДИАС".
- 5** Автоматизированный дифрактометр для исследования структуры монокристаллов "Кристалл".

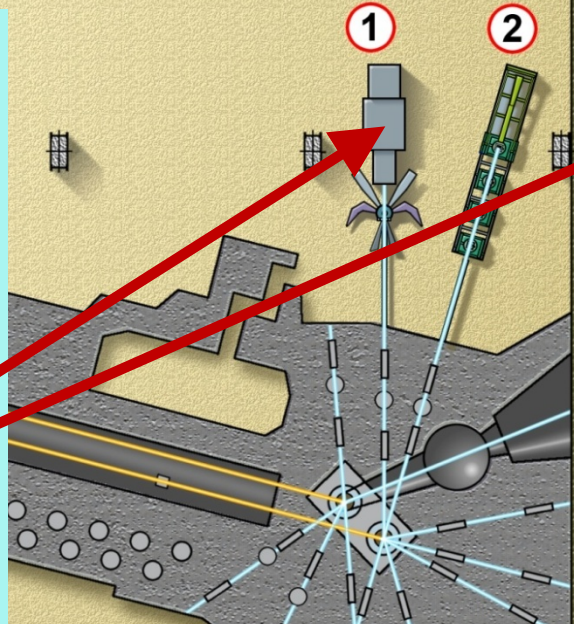


Сравнение спектров нейтронов от длины волны нейтрона для каналов различных установок ИН-06 нормированных на максимум пиков.

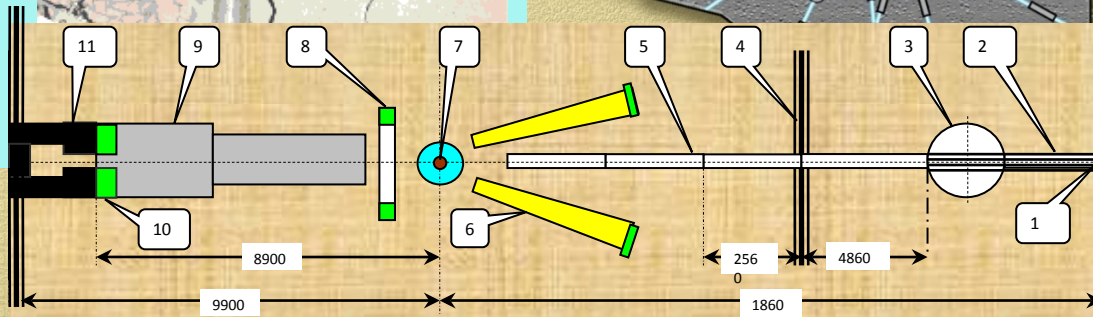
# ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ИН - 06



Совместно с ФИ РАН



- 1 Многофункциональный нейтронный спектрометр (МНС) для исследований в широком диапазоне характерных размеров от 0.1 до сотен нанометров.
- 2 Многофункциональный нейтронный малоугловой спектрометр (рефлектометр) "Горизонт".
- 3 Нейтронографическая установка для исследования вещества в экстремальных условиях "Геркулес"
- 4 Дифрактометр-спектрометр общего назначения для исследования объёмных поликристаллов "ДИАС".
- 5 Автоматизированный дифрактометр для исследования структуры монокристаллов "Кристалл".



- |                            |                                       |                       |
|----------------------------|---------------------------------------|-----------------------|
| 1. Поверхность замедлителя | 5. Нейтроновод                        | 9. Дифрактометр ДМУРН |
| 2. Коллиimator             | 6. Дифрактометр обратного рассеяния   | 10. ПЧД               |
| 3. Колодец                 | 7. Образец                            | 11. Ловушка пучка     |
| 4. Защита источника        | 8. Дифрактометр высокой интенсивности |                       |



## Блок дифрактометра высокого разрешения

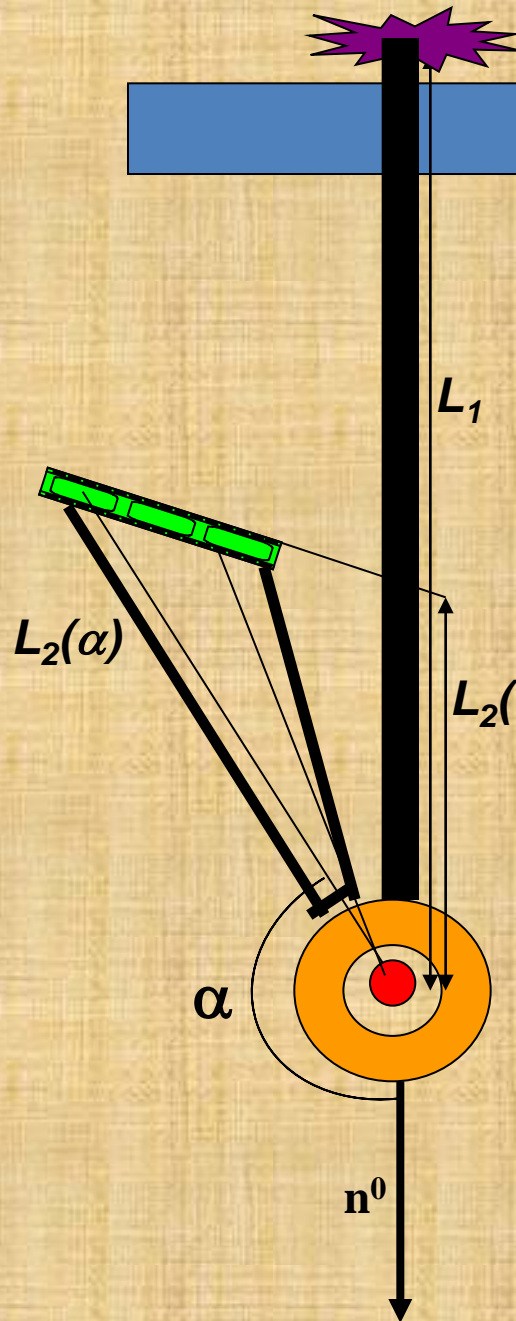
содержит пакет  $\text{He}^3$  -  
детекторов  
сфокусированных по  
времени пролета и  
расположенных в  
геометрии отражения  
назад внутри  
вакуумируемой камеры,  
предназначен для  
порошковой  
дифрактометрии.

Количество детекторов  
в пакете – 13.

Разрешение - 0,3%.

Диапазон углов  
рассеяния  $\alpha$  -  $156^\circ$  -  $165^\circ$ .

Диапазон определяемых  
размеров - 0,05 - 0,5 нм.



Временная фокусировка  
нейтронных детекторов в  
блоке дифрактометра  
обратного рассеяния  
спектрометра МНС

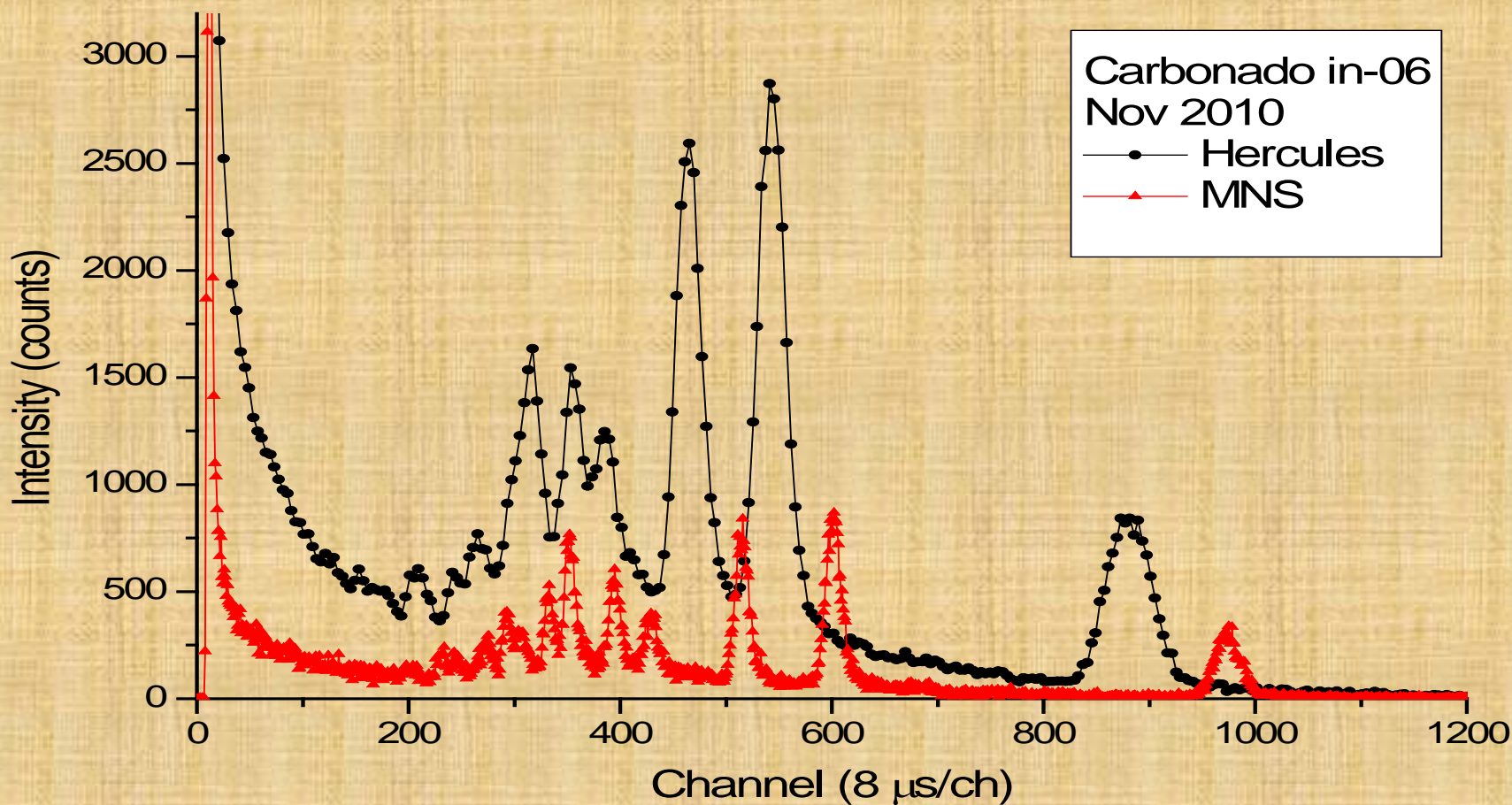
$$L = L_1 + L_2(\alpha)$$

$$Q = \frac{2m}{\hbar} \cdot \left( \frac{L \sin(\alpha)}{t} \right) = \frac{4\pi \sin \alpha}{\lambda}$$

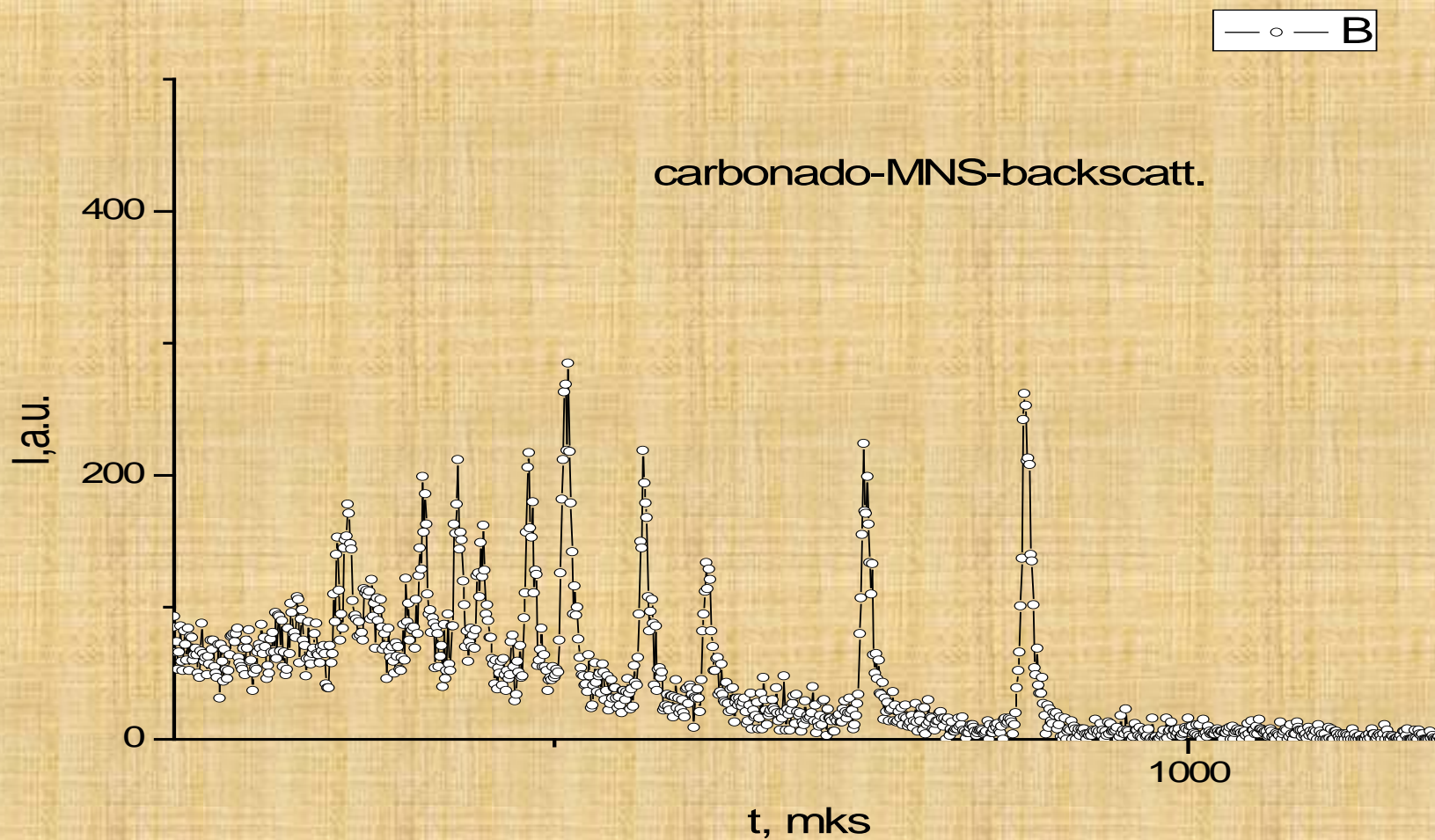
$$L_2(\alpha) = L_1 \cdot \left[ \left( \frac{1 + L_2(\pi)/L_1}{\sin(\alpha/2)} \right) - 1 \right]$$

Нейтрон с заданным  
переданным импульсом  $Q$   
попадает в любой из  
детекторов в одно и тоже  
время, что позволяет  
добиться высокой скорости  
счета и упрощает процесс  
сбора и обработки данных.

Нейтронogramмы поликристаллического абразива на основе синтетического алмаза-карбонадо измеренные в **ноябре 2010** на установках «Геркулес» (ИЯИ-ИФВД-РНЦ КИ, 10м пролетная база) и МНС (ФИ РАН-ИЯИ, 20-ти метровая пролетная базе при углах рассеяния детекторы расположены под углами 87 и 93 градуса соответственно).



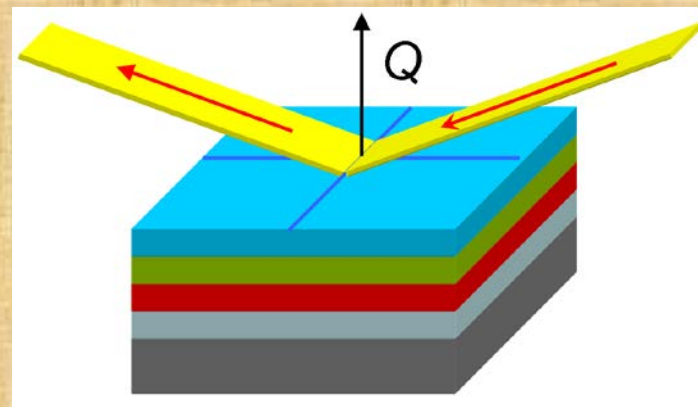
Нейтроннограмма поликристаллического абразива на основе синтетического алмаза-карбонадо измеренная в **ноябре 2010** на установке МНС (ФИ РАН-ИЯИ) с помощью детектора обратного рассеяния и фокусировкой по времени пролета.



# Нейтронный малоугловой спектрометр-рефлектометр «Горизонт» .

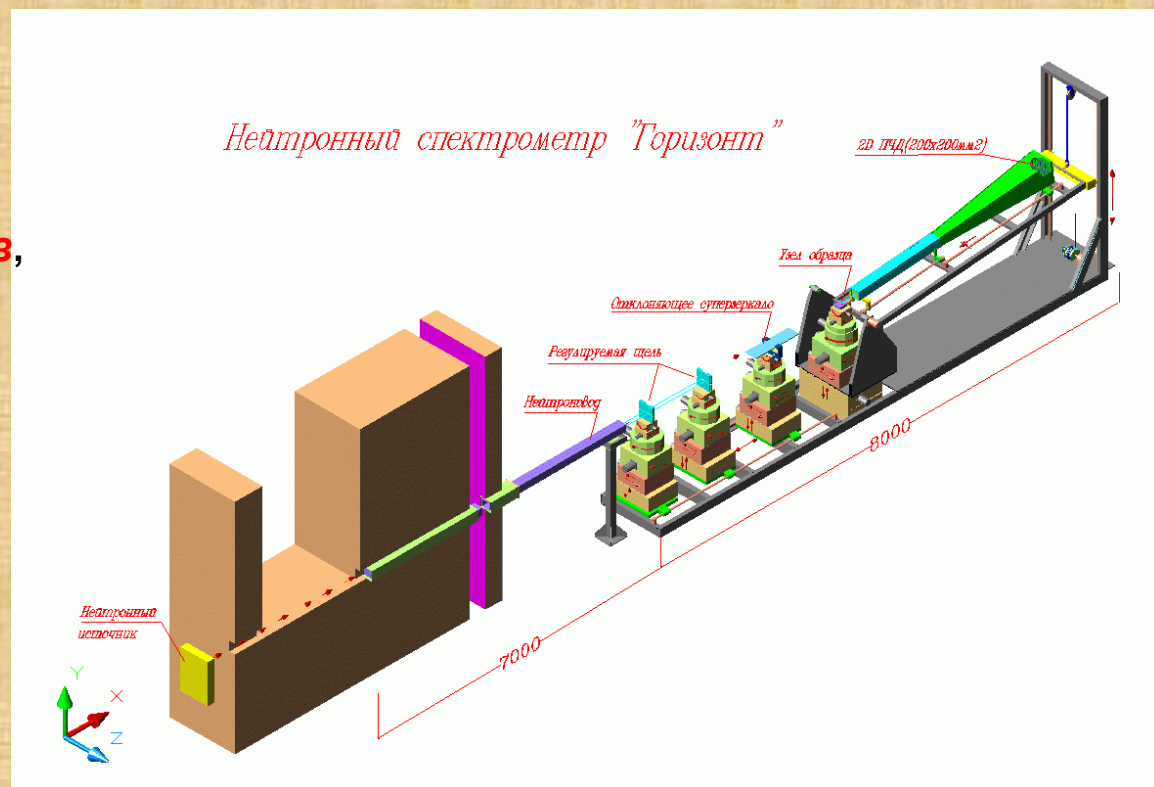
**Нейтронная рефлектометрия позволяет изучать такие объекты,**

- как:
- Магнитные наноструктуры,
  - Полупроводниковые гетероструктуры,
  - Биологические мембраны,
  - Тонкие металлические, полупроводниковые и полимерные пленки.



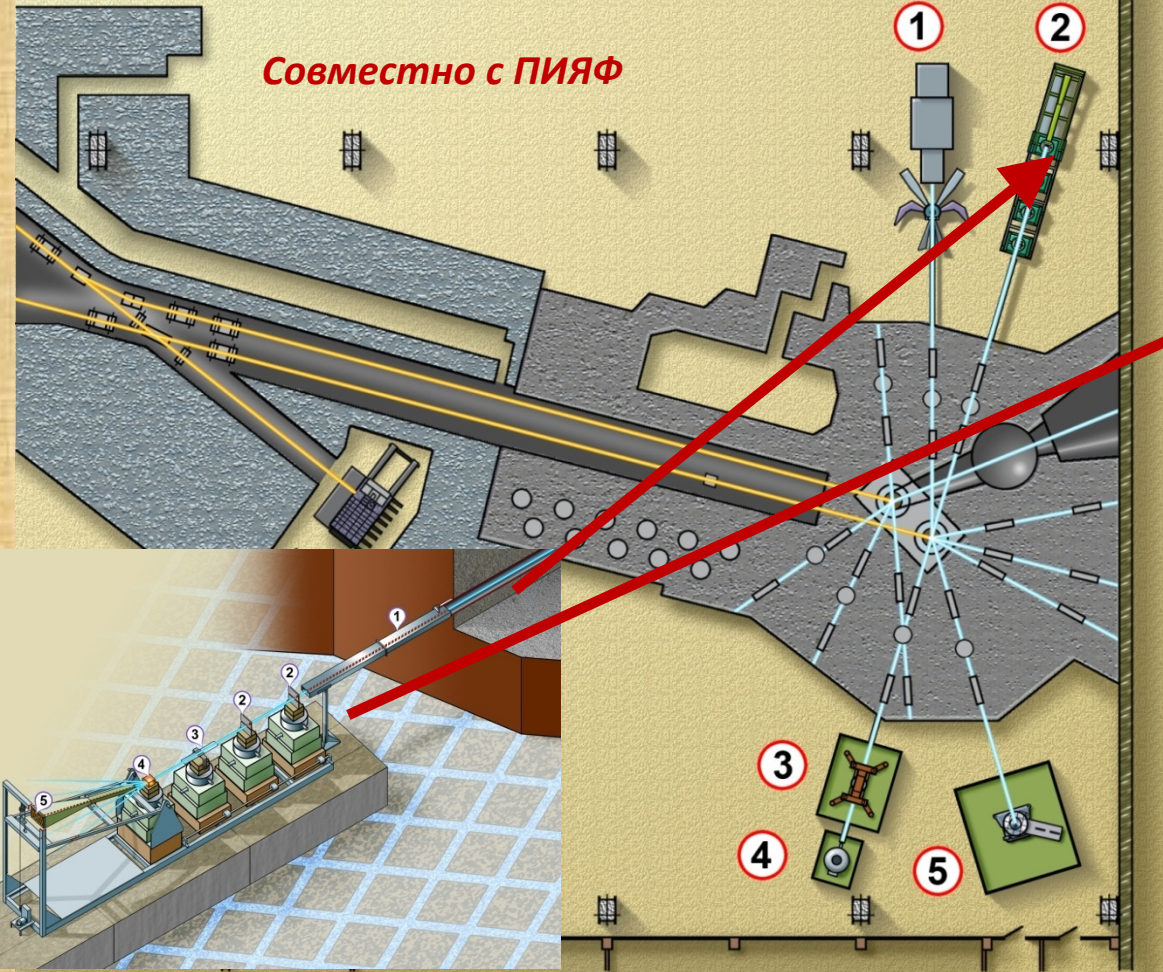
**Малоугловое рассеяние нейтронов применяется для исследования таких объектов,**

- как:
- Полимеры, стекла и другие аморфные тела
  - Биологические макромолекулы, вирусы и т. п.
  - Нанотрубки, фуллерены и другие наночастицы
  - Коллоидные растворы
  - Дефекты в материалах



# ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ИН - 06

*Совместно с ПИЯФ*



- 1** Многофункциональный нейтронный спектрометр (МНС) для исследований в широком диапазоне характерных размеров от 0.1 до сотен нанометров.
- 2** Многофункциональный нейтронный малоугловой спектрометр (рефлектометр) "Горизонт".
- 3** Нейтронографическая установка для исследования вещества в экстремальных условиях "Геркулес".
- 4** Дифрактометр-спектрометр общего назначения для исследования объёмных поликристаллов "ДИАС".
- 5** Автоматизированный дифрактометр для исследования структуры монокристаллов "Кристалл".

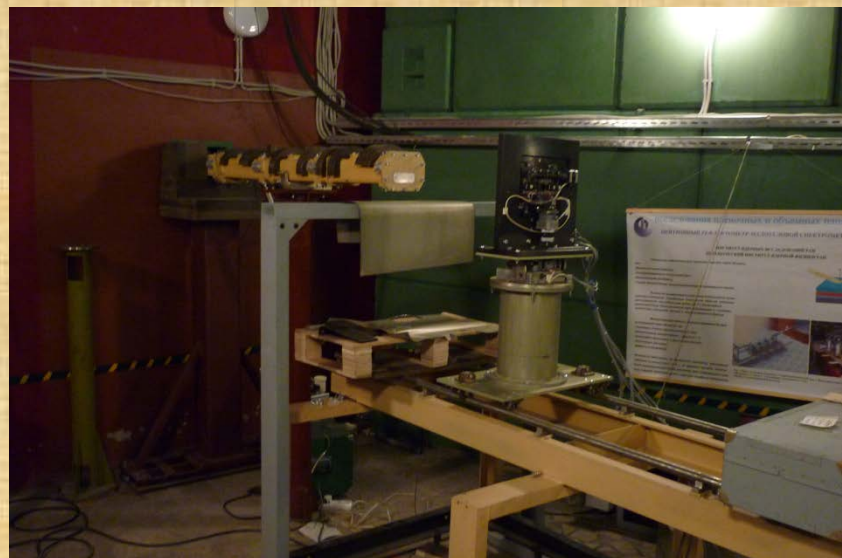
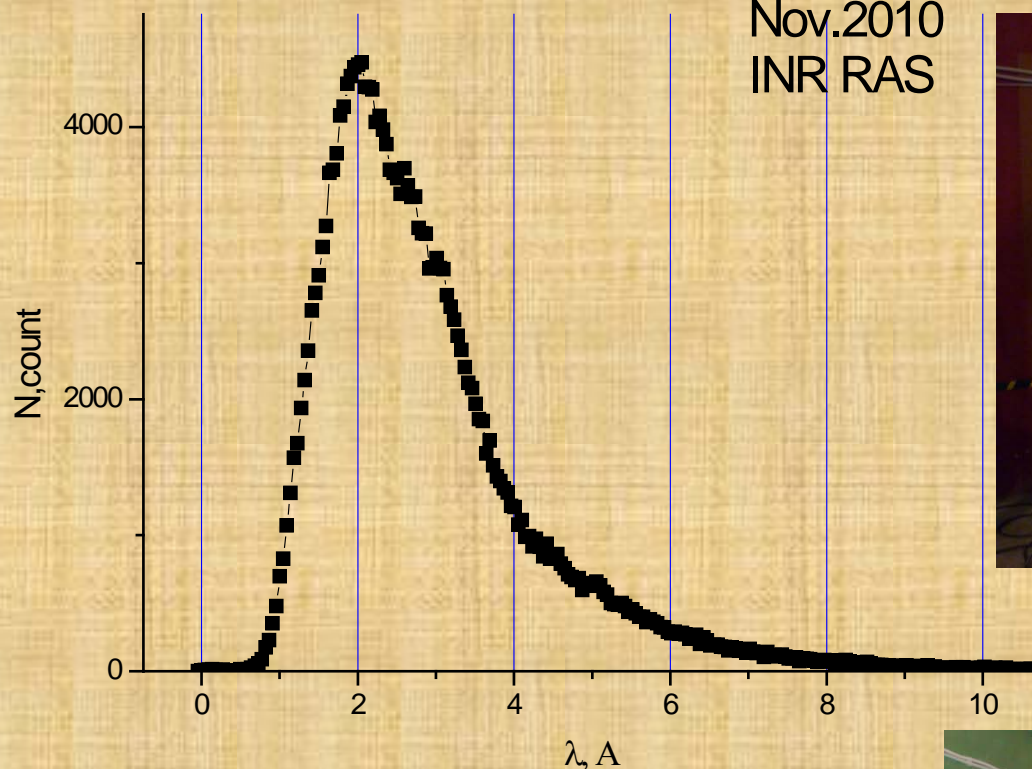


На импульсном источнике нейтронов ИН-06 в ИЯИ РАН совместно с ПИЯФ РАН завершена работа по созданию нейтронного малоуглового спектрометра-рефлектометра «Горизонт».

GORIZONT

Nov.2010

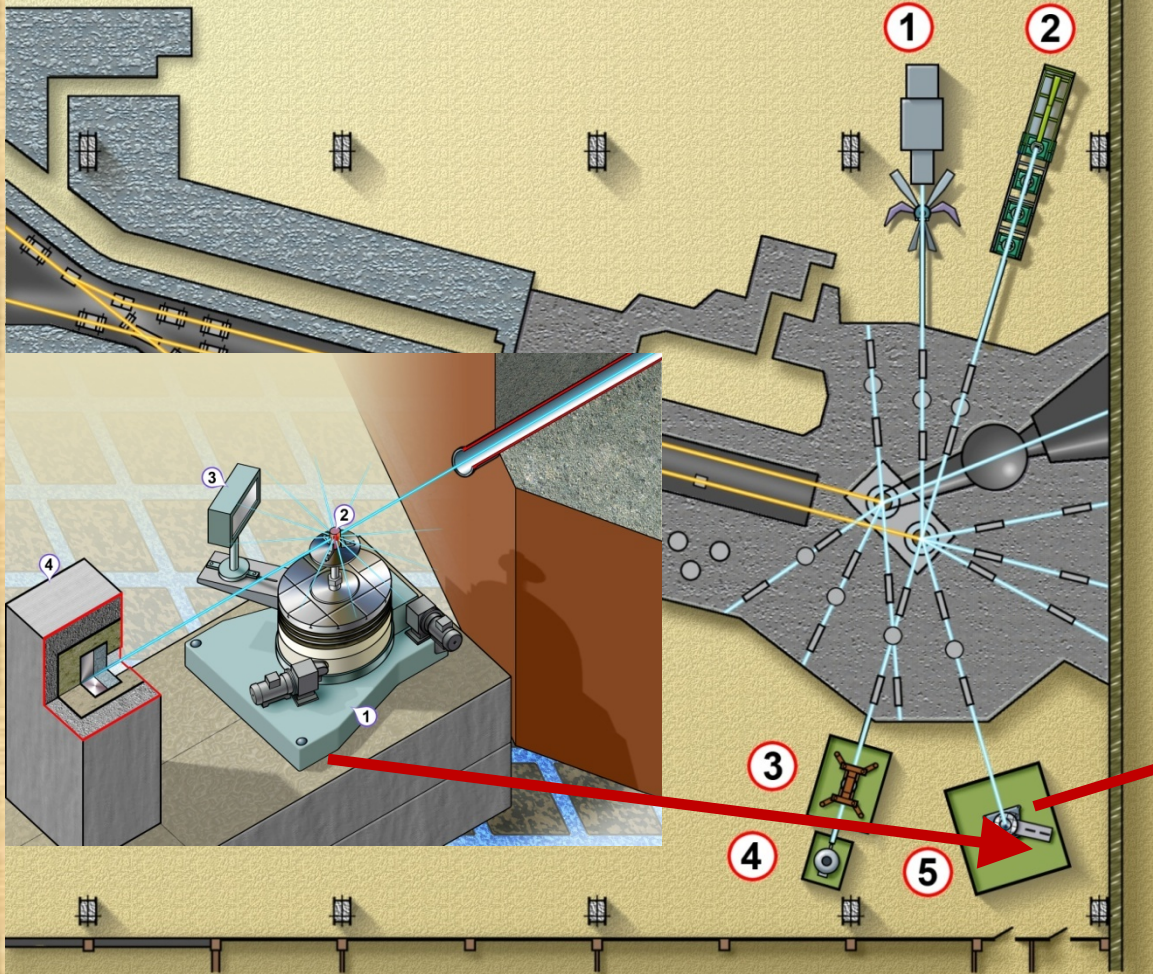
INR RAS



Спектр нейтронов на выходе нейтронновода установки «Горизонт», измеренный в **ноябре 2010**, при работе нового импульсного источника нейтронов ИН06 ИЯИ РАН.



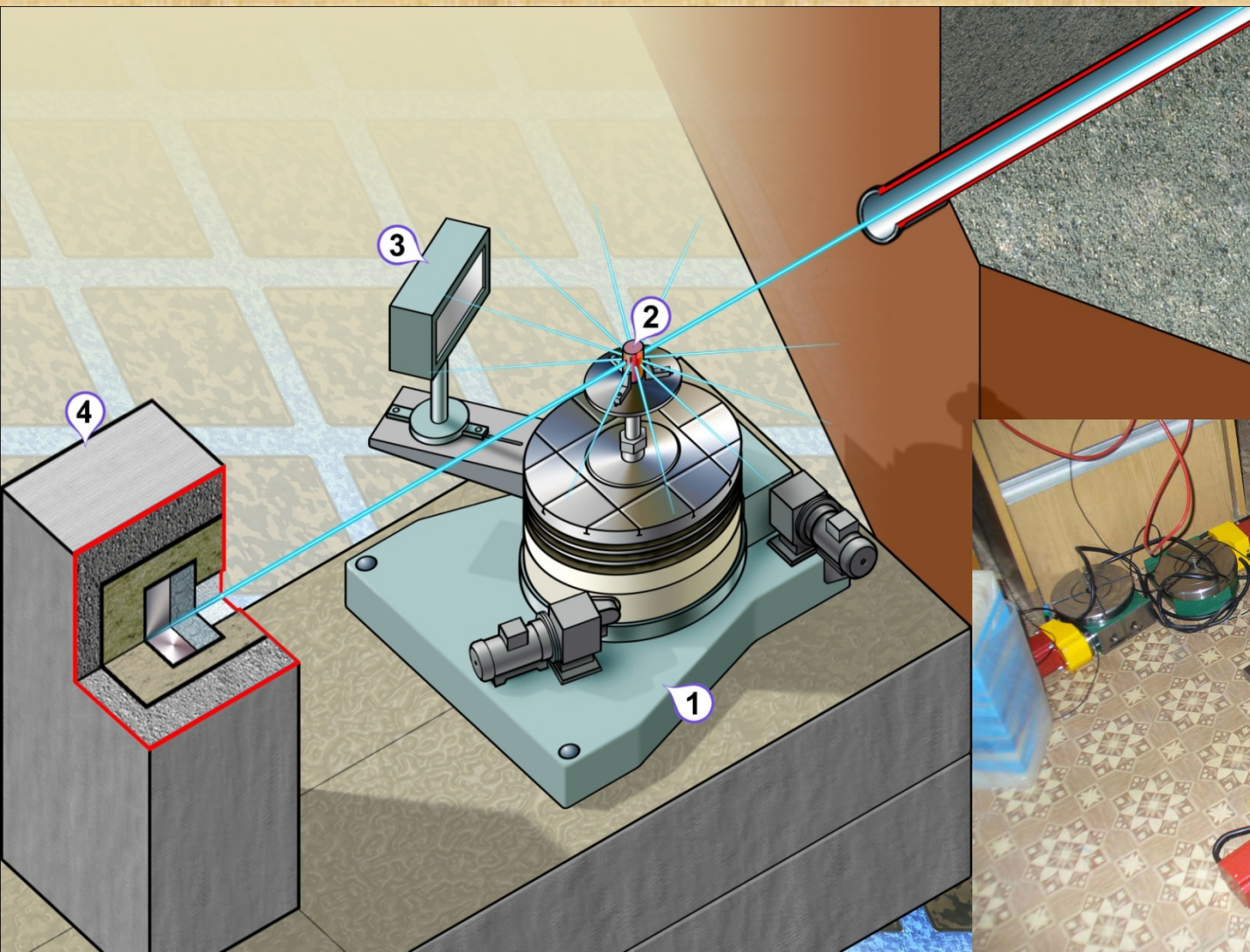
# ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ИН - 06



- 1** Многофункциональный нейтронный спектрометр (МНС) для исследований в широком диапазоне характерных размеров от 0.1 до сотен нанометров.
- 2** Многофункциональный нейтронный малоугловой спектрометр (рефлектометр) "Горизонт".
- 3** Нейтронографическая установка для исследования вещества в экстремальных условиях "Геркулес"
- 4** Дифрактометр-спектрометр общего назначения для исследования объёмных поликристаллов "ДИАС".
- 5** Автоматизированный дифрактометр для исследования структуры монокристаллов "Кристалл".



# Автоматизированный дифрактометр для исследования структуры монокристаллов «КРИСТАЛЛ»



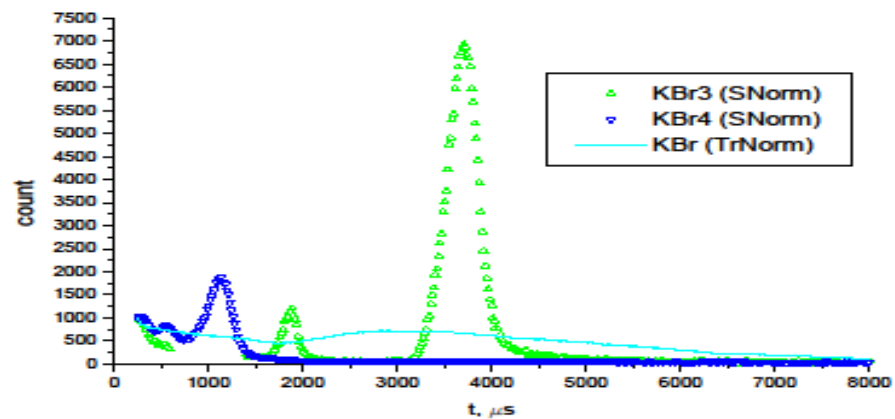
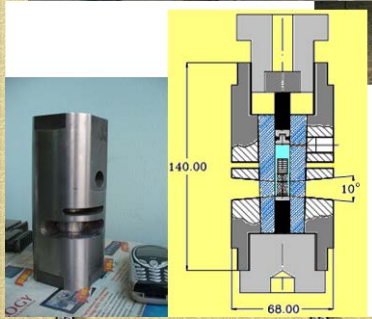
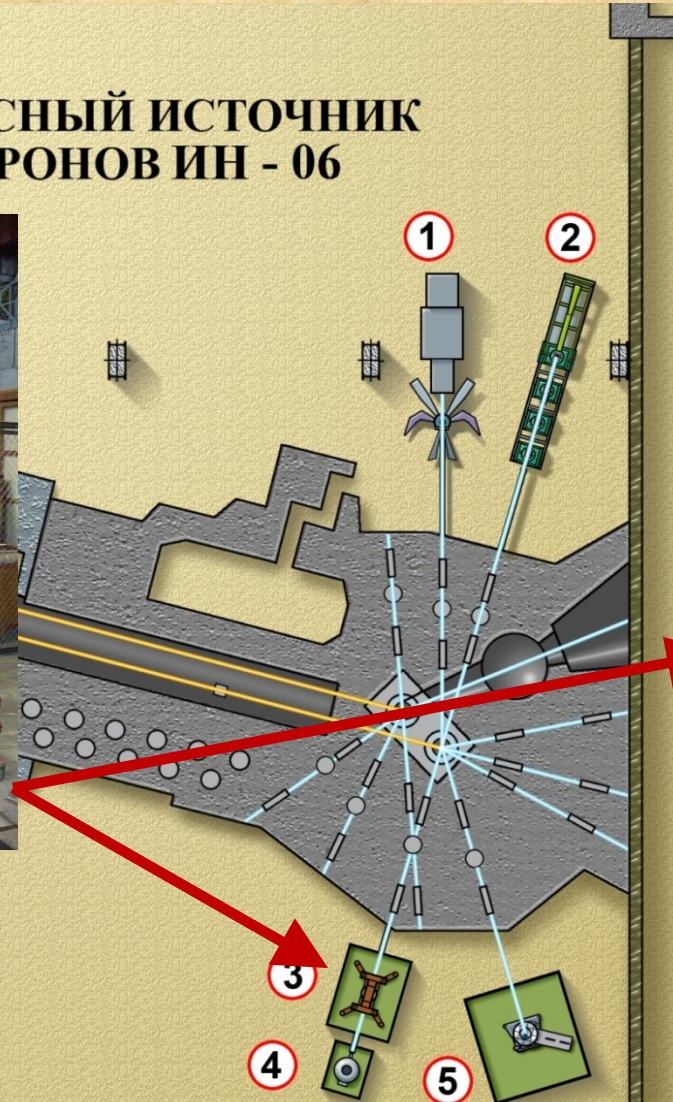


Рис. 2. Спектры дифракции нейтронов на монокристалле KBr измеренные на однокристалльном спектрометре установки для исследования эффектов не сохранения пространственной четности установленной на 8 канале ИН-06. Зеленые треугольники вверх - угол  $\Theta = 0,191968$  радиана, синие треугольники вниз -  $\Theta = 0,057964$  радиана. Сплошная кривая - пропускание, угол 0.

# ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ ИН - 06



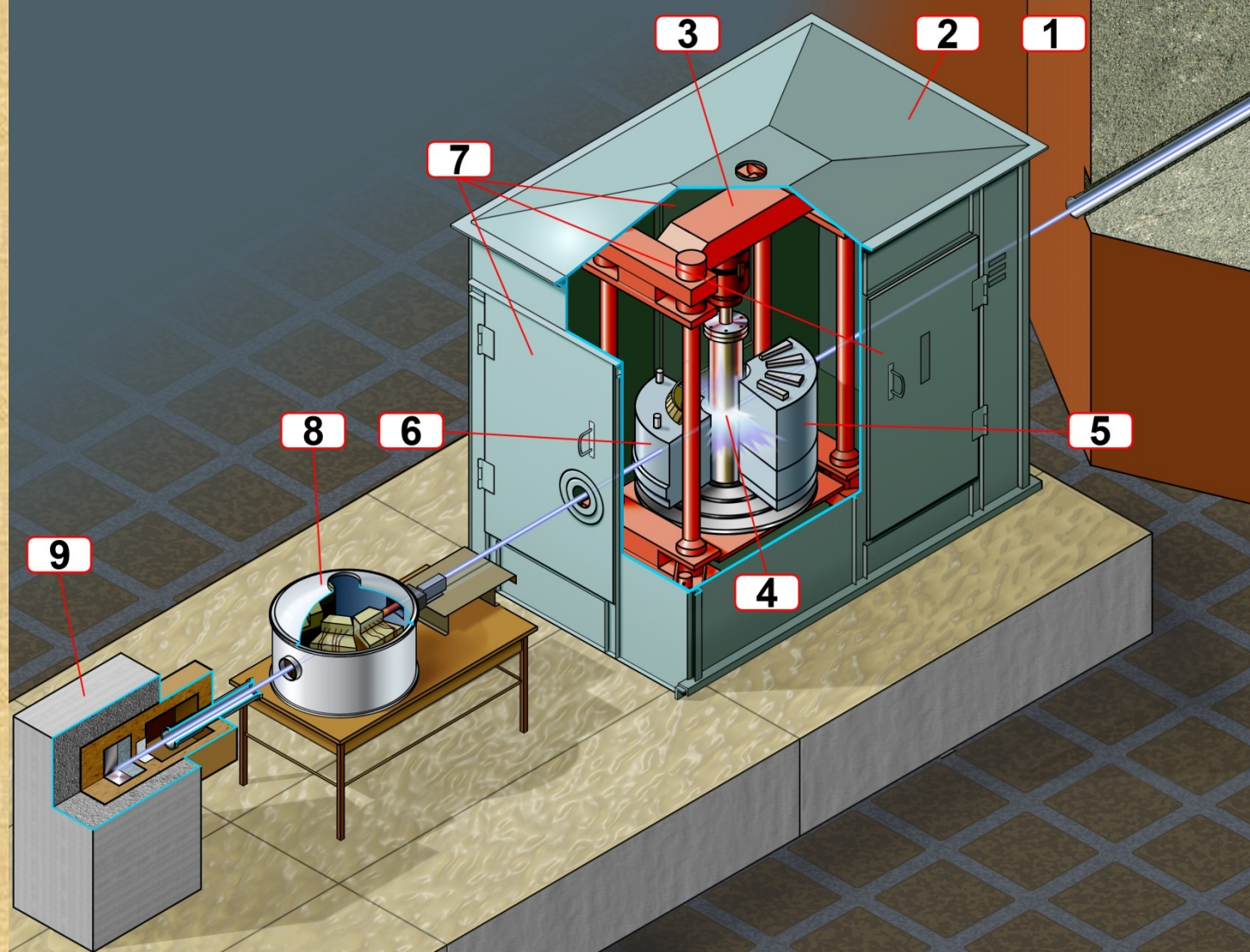
**Совместно с  
ИФВД и РНЦ КИ**



- 1** Многофункциональный нейтронный спектрометр (МНС) для исследований в широком диапазоне характерных размеров от 0.1 до сотен нанометров.
- 2** Многофункциональный нейтронный малоугловой спектрометр (рефлектометр) "Горизонт".
- 3** Нейтронографическая установка для исследования вещества в экстремальных условиях "Геркулес".
- 4** Дифрактометр-спектрометр общего назначения для исследования объёмных поликристаллов "ДИАС".
- 5** Автоматизированный дифрактометр для исследования структуры монокристаллов "Кристалл".

Специальный герметичный сейф для исследований водородосодержащих образцов в процессе наводороживания

Специальные криостат и камера высокого давления для водородосодержащих образцов.



**Рис.1** Нейтронографический комплекс «Геркулес-Диас»: 1 - защита источника нейтронов, 2 — герметичный сейф с возможностью создания водородной атмосферы, 3 — пресс для создания давления, 4 — образец в криостате, 5 — блок детекторов упругого рассеяния, 6 — блок детекторов неупругого рассеяния, 7 - двери сейфа, 8 — многоцелевой дифрактометр «Диас», 9 — ловушка нейтронного пучка.

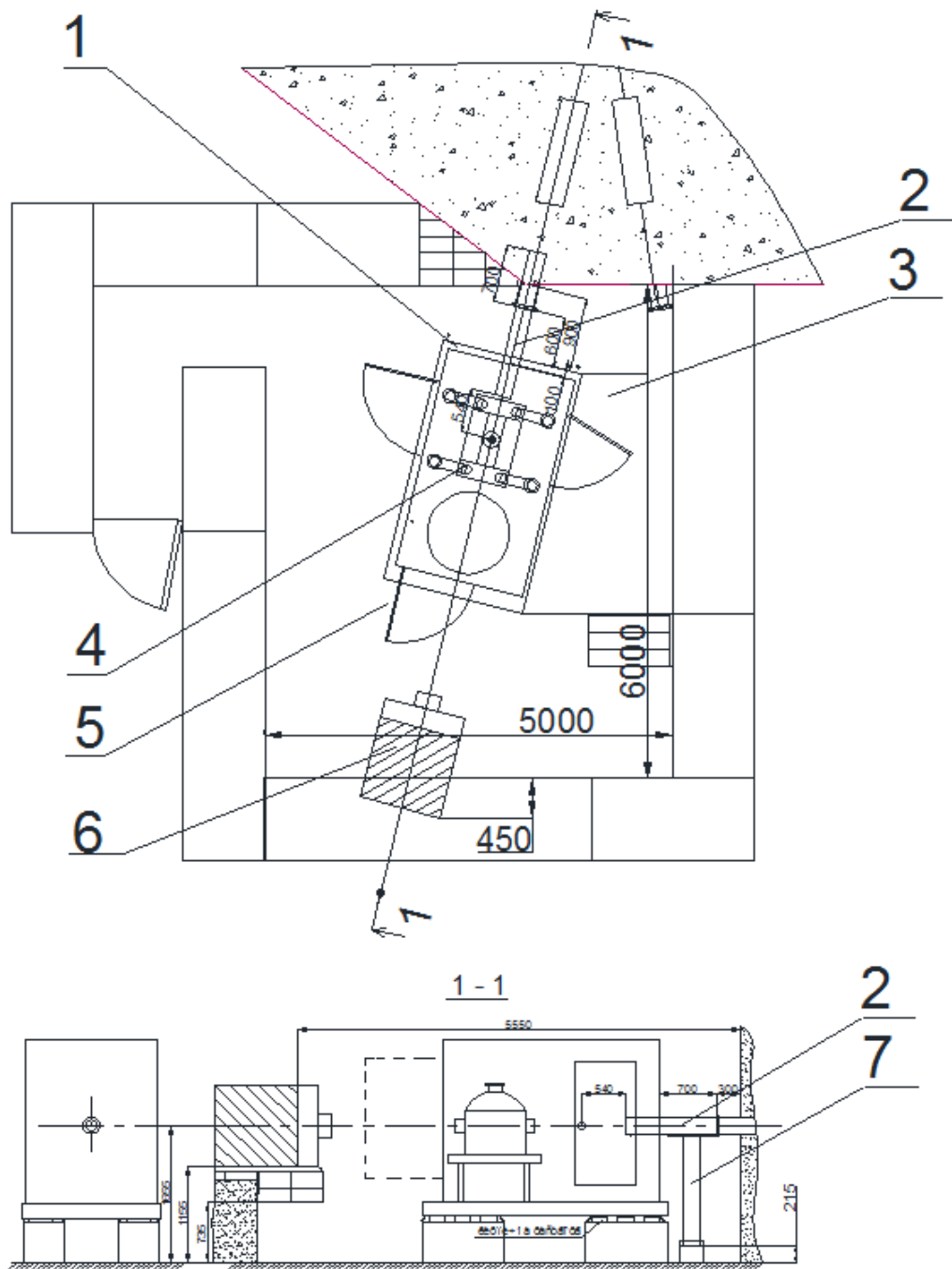
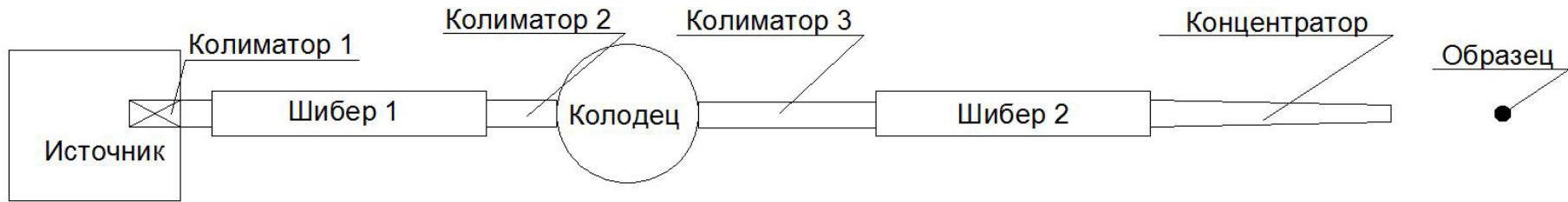


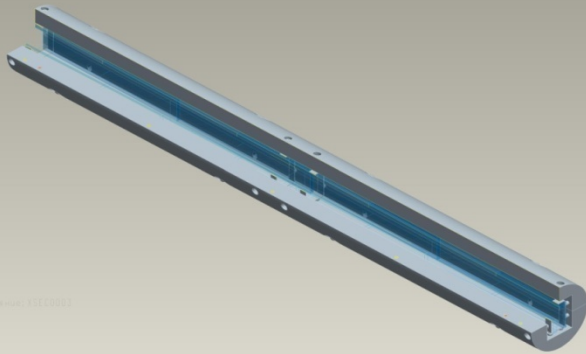
Рис.  
 Схема сектора «Геркулес»:  
 1 – Бетонная опора под  
 пресс,  
 2 – Нейтронный  
 концентратор,  
 3 – Металлическая  
 платформа,  
 4 – Пресс,  
 5 – Герметичный сейф,  
 6 – Ловушка,  
 7 – Опора под  
 концентратор нейтронов.

# Нейтронно - оптический тракт комплекса Геркулес - Диас

Схема нейтронно-оптического тракта



## Нейтронный концентратор



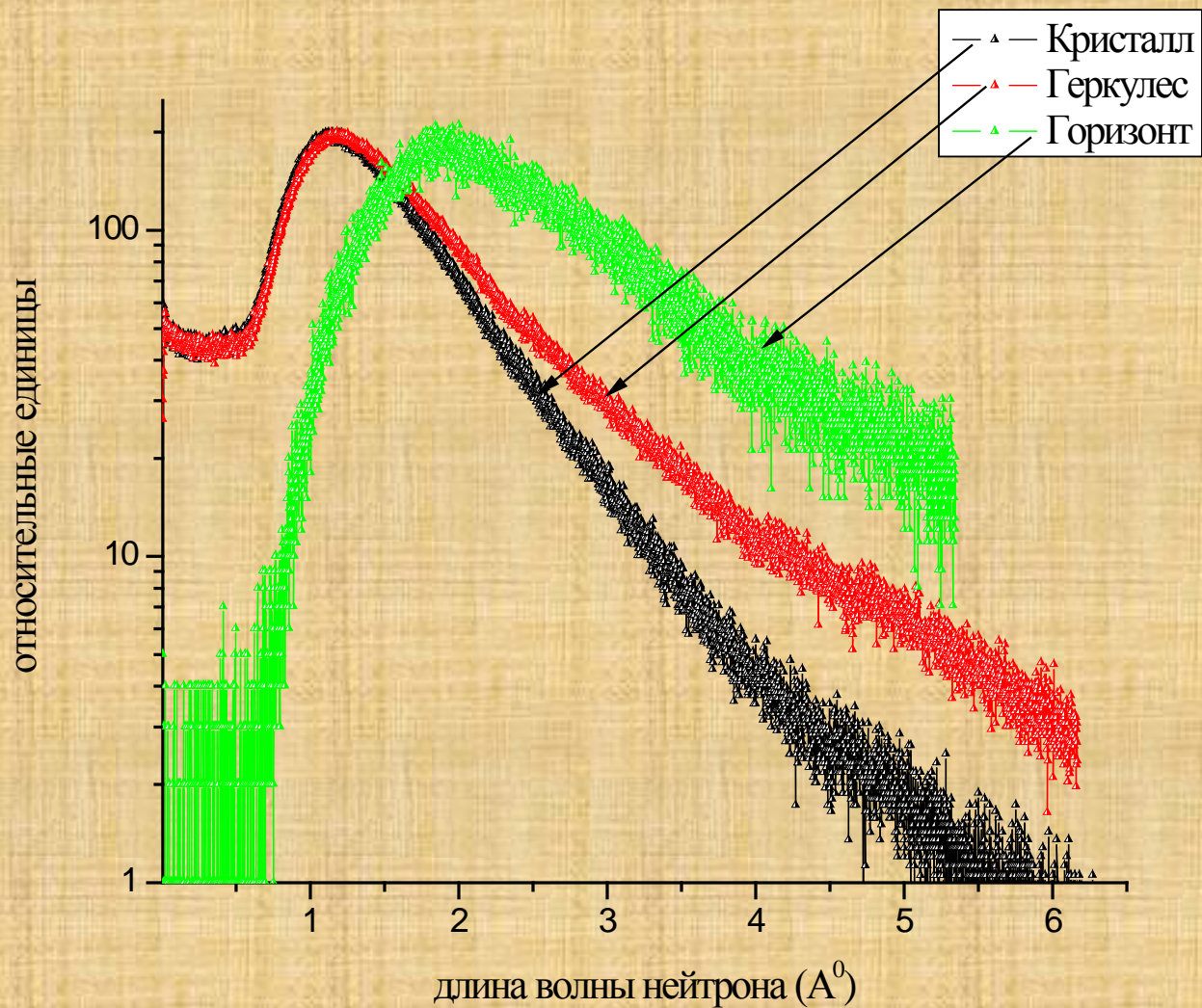
**длина 1800 мм**  
размеры внутреннего трапециевидного канала (мм).  
входной  
горизонталь: 55  
вертикаль: 75  
выходной  
горизонталь: 24  
вертикаль: 48

«Суперзеркала» - нейтронно-оптические элементы с многослойным покрытием на основе Ti и Ni. «Суперзеркала» для «нейтронного концентратора» должны обеспечивать критический угол отражения нейтронов не менее 2.5 величины критического угла изотопа  $^{58}\text{Ni}$  (т.е. кратность «суперзеркала»  $m \geq 2.5$ ).

Нейтронные коллиматор и концентратор позволяют увеличить интенсивность падающего на образец потока нейтронов в  $\sim 3$  раза для нейтронов с  $\lambda > 2,5 \text{ \AA}$

# Сборка нейтронного концентратора для установки Геркулес



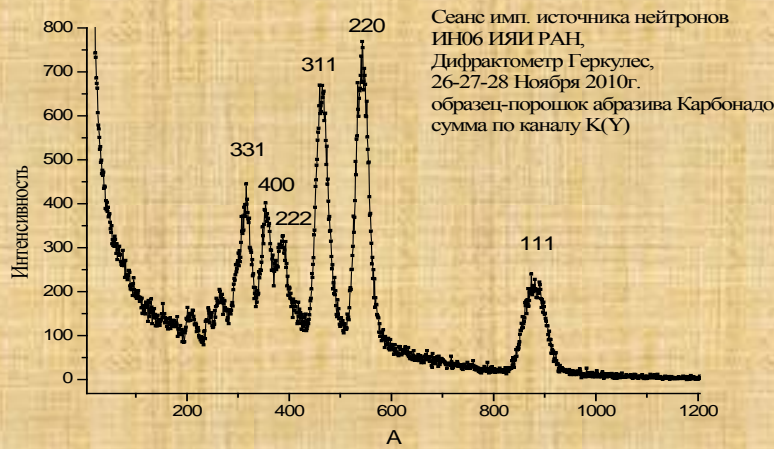
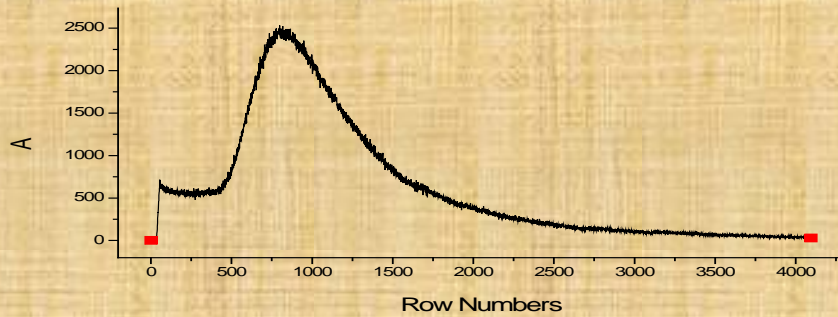


Сравнение спектров нейтронов от длины волны нейтрона для каналов различных установок ИН-06 нормированных на максимум пиков.

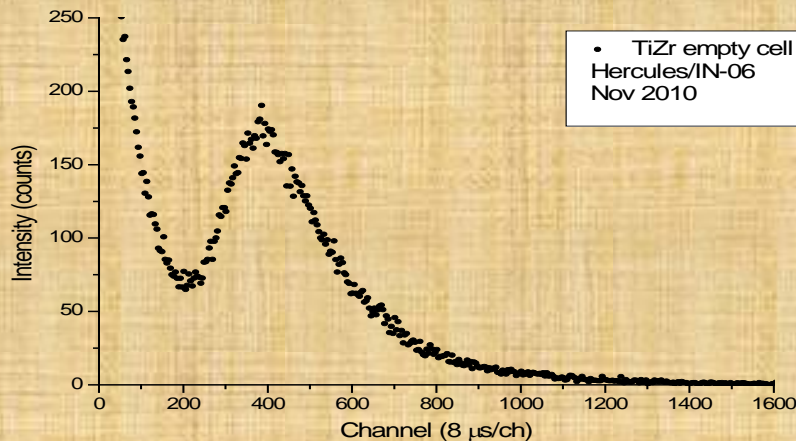




Спектр прямого пучка  
нейтронографической установки  
высокого давления «Геркулес»,  
максимум длины волны нейтронов  
1.2А. 25Ноября2010г.

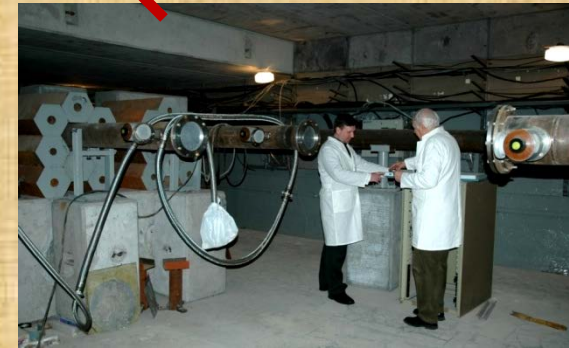
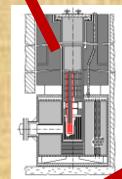
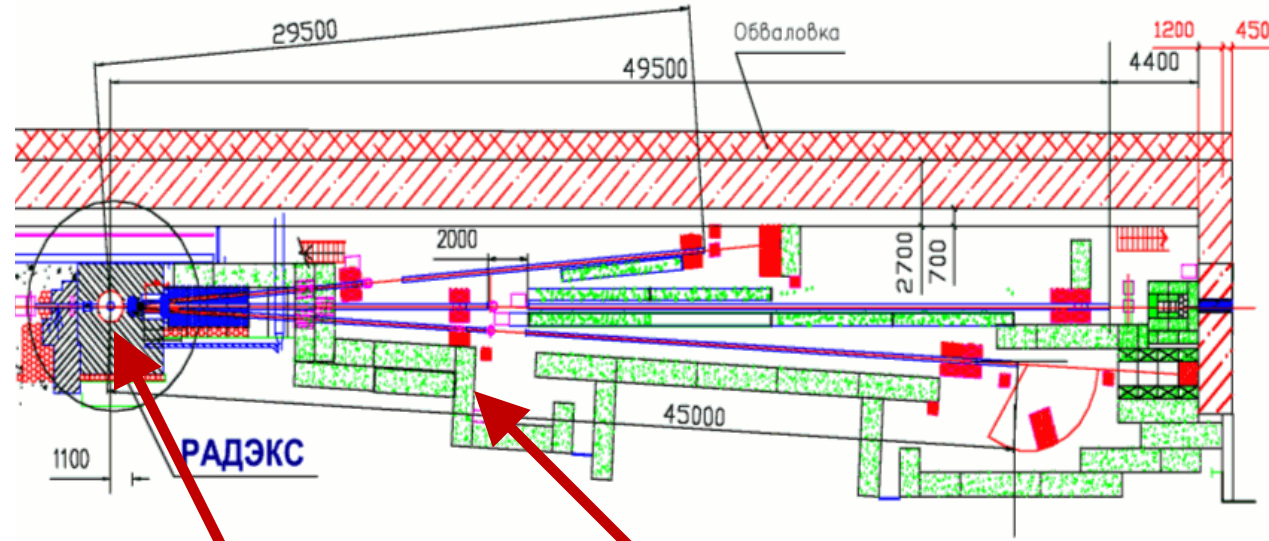
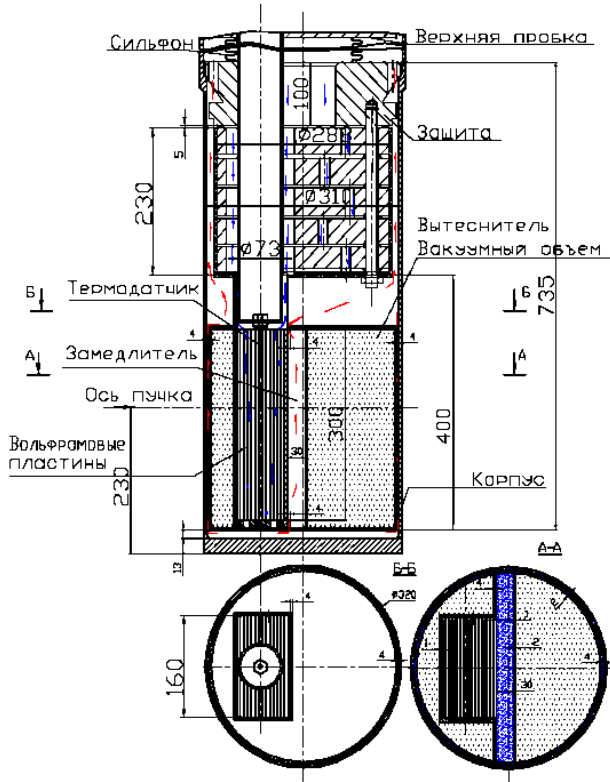


Нейтронограмма поликристаллического абразива на основе синтетического алмаза-карбонадо, измеренная на установке «Геркулес» (ИЯИ-ИФВД-РНЦ КИ) при угле рассеяния близком к 90 град.



Нейтронограмма сплава с нулевой матрицей TiZr для элементов камер высокого давления и контейнеров образцов для нейтронографических измерений.

# Импульсный источник эпитепловых нейтронов на базе модифицированной ловушки: установка РАДЭКС с времяпролетными спектрометрами

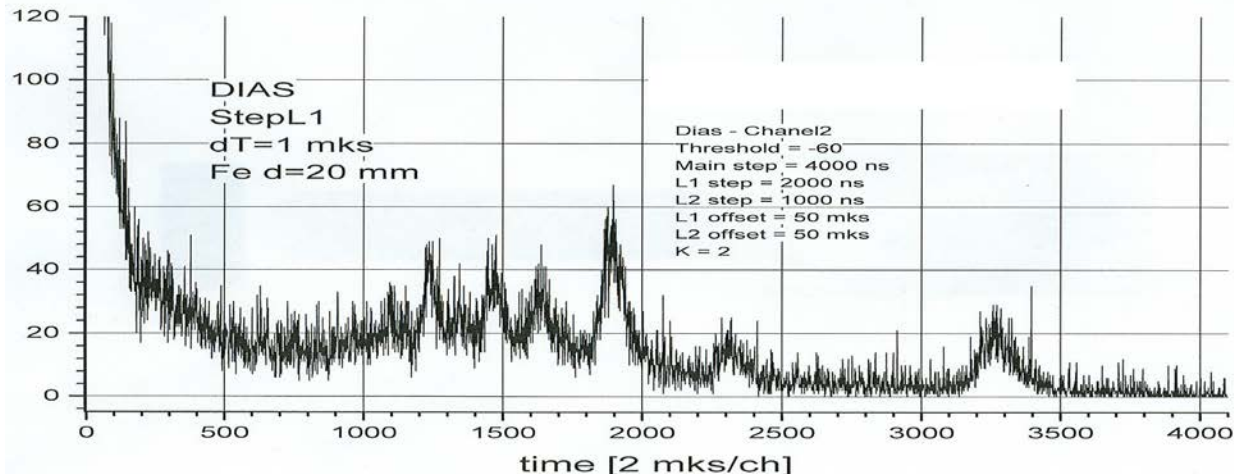


# Установка РАДЭКС (модифицированная ловушка) -

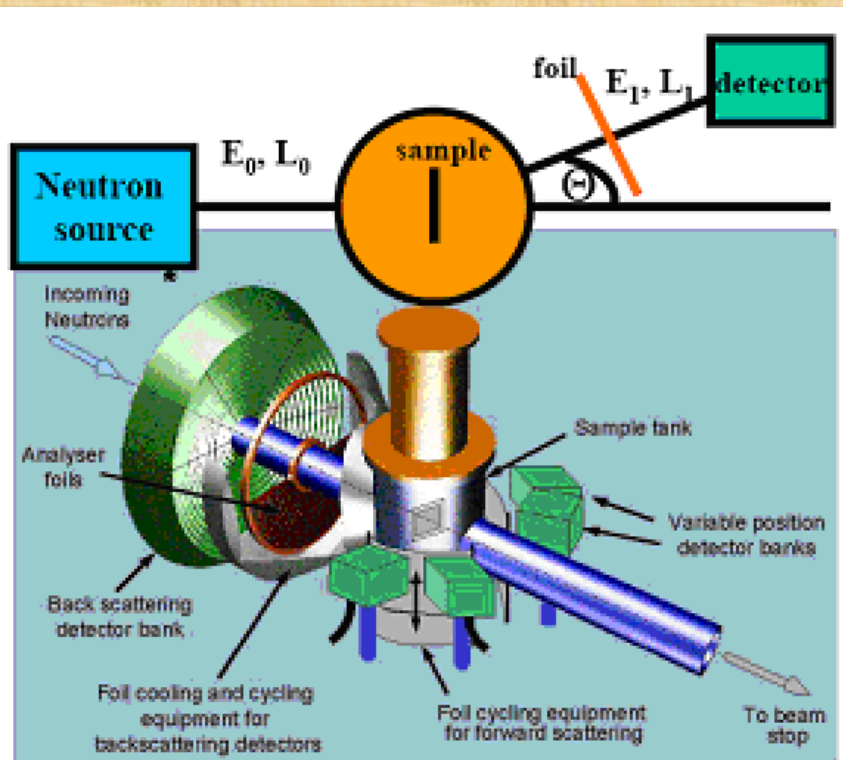
**Это работающий в настоящее время в ИЯИ РАН импульсный источник тепловых и эпитепловых нейтронов с нейтронотодами для исследований динамики и структуры конденсированного состояния веществ, включая наноматериалы методом времени пролета .**

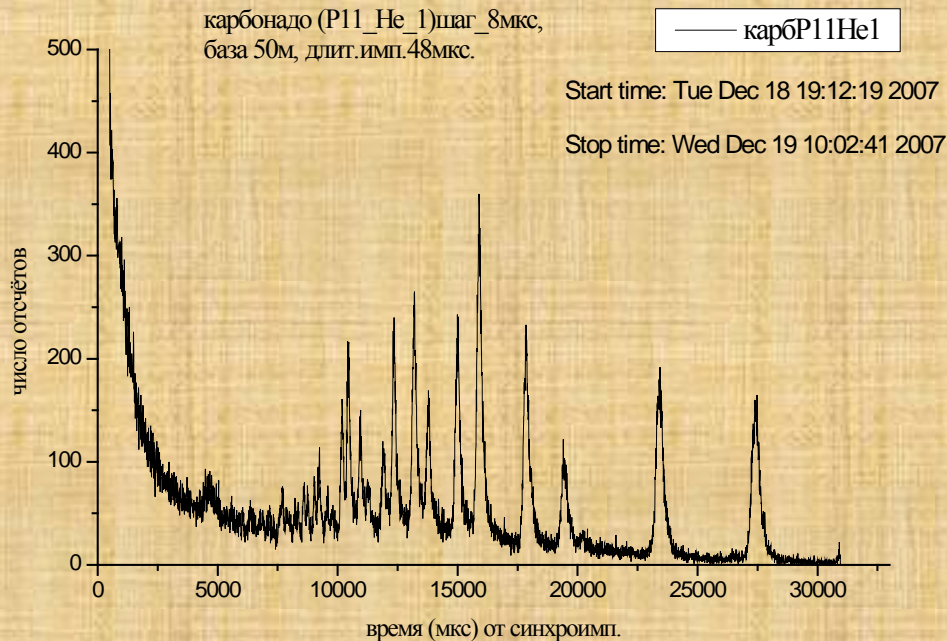
**В настоящее время проведены первые эксперименты показавшие возможность исследования структуры методом нейтронографии на данном источнике.**

**Нейтронограмма поликристаллического железа полученная на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС-ИЯИ РАН с помощью времени пролета с использованием макетного варианта спектрометра ДИАС (совместно с РНЦ-КИ) . ( 27 Апреля 2007г. )**



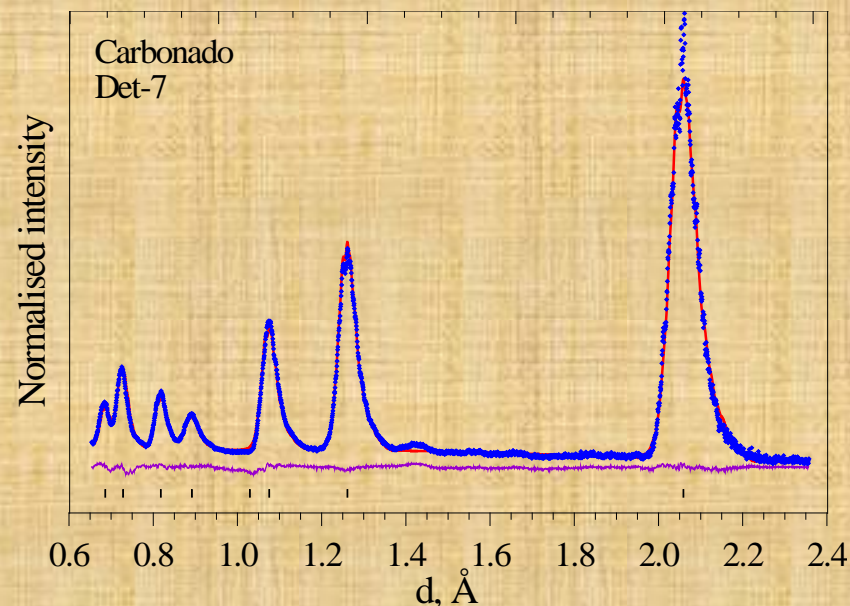
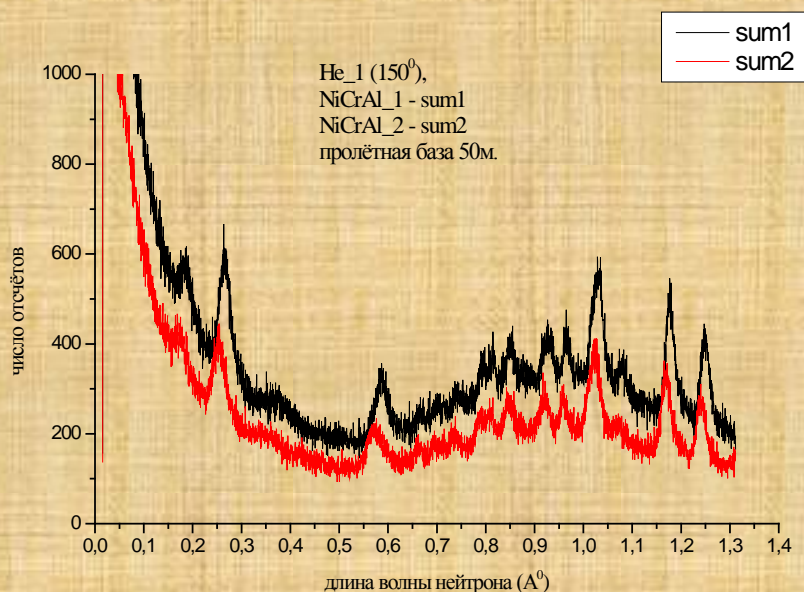
**Спектр установки РАДЭКС по сравнению с источником тепловых нейтронов ИН-06 значительно «обогатён» эпитепловыми нейтронами, что позволяет развивать новые методы исследования динамики конденсированного состояния веществ, включая наноматериалы. Глубоко неупругое рассеяние эпитепловых нейтронов позволяет определить кинетическую энергию ядер в структуре веществ, что недоступно другим методам. В настоящее время проведены первые тесты с целью разработки и создания подобной установки имеющий аналог в ISIS(Англия).**





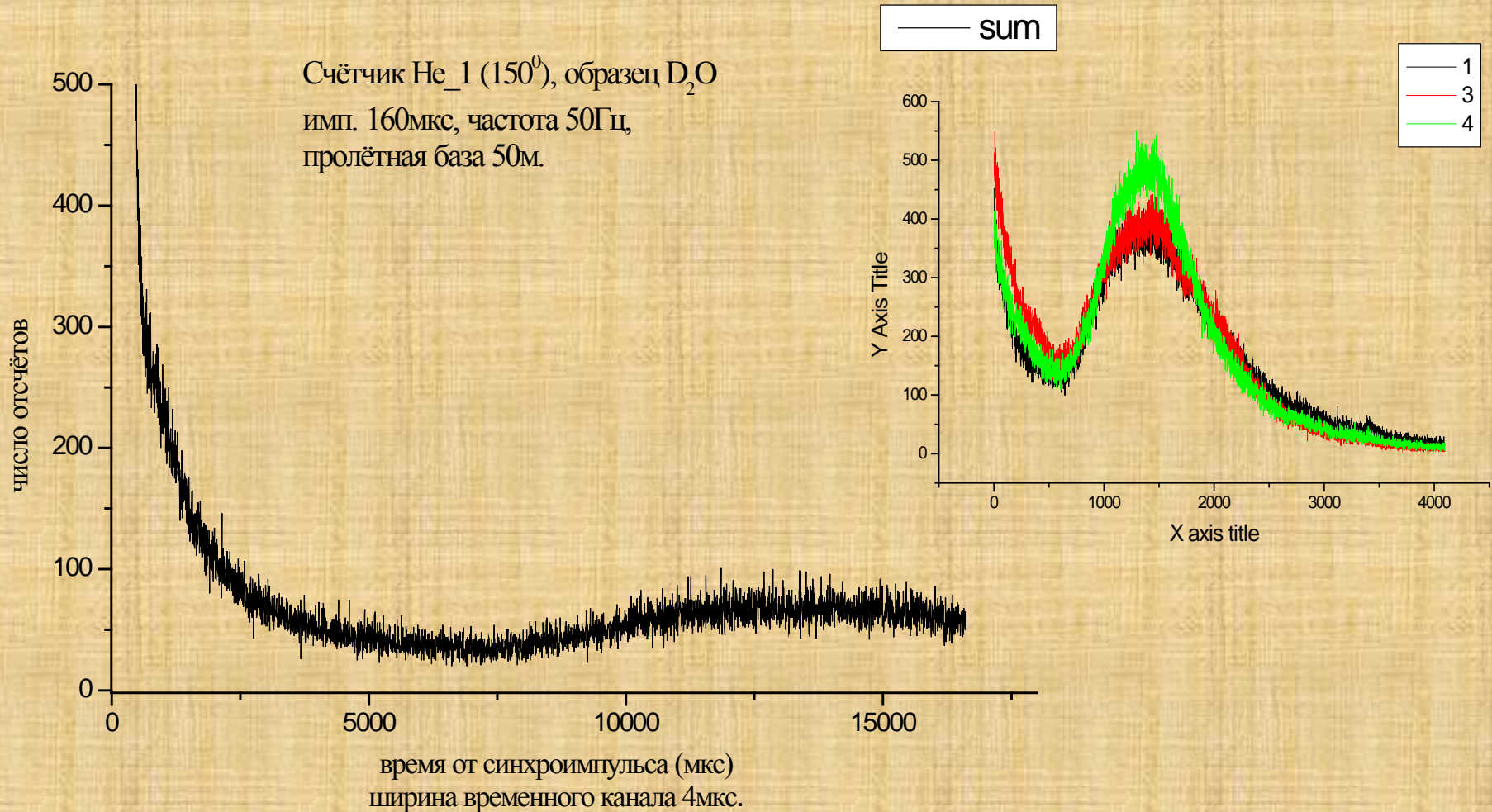
## Возможности 50 метровой пролётной базы установки РАДЭКС нейтронного комплекса ИЯИ РАН для исследований в области физики конденсированных сред

На время-пролётном нейтронном спектрометре РАДЭКС московской мезонной фабрики существует на настоящий момент несколько пролётных баз – 20м, 30м, 50м



Один из спектров, обработанный по Ритвельду. Авторы благодарят А.М. Балагурова (ОИЯИ) за обработку спектров.

# Рассеяние нейтронов на тяжёлой воде



***Таким образом источники тепловых нейтронов  
ИН-06 и эпитепловых и тепловых нейтронов  
РАДЭКС взаимодополняют друг друга, используя  
более широкий спектр нейтронов, что не  
реализовано в других нейтронных центрах.***



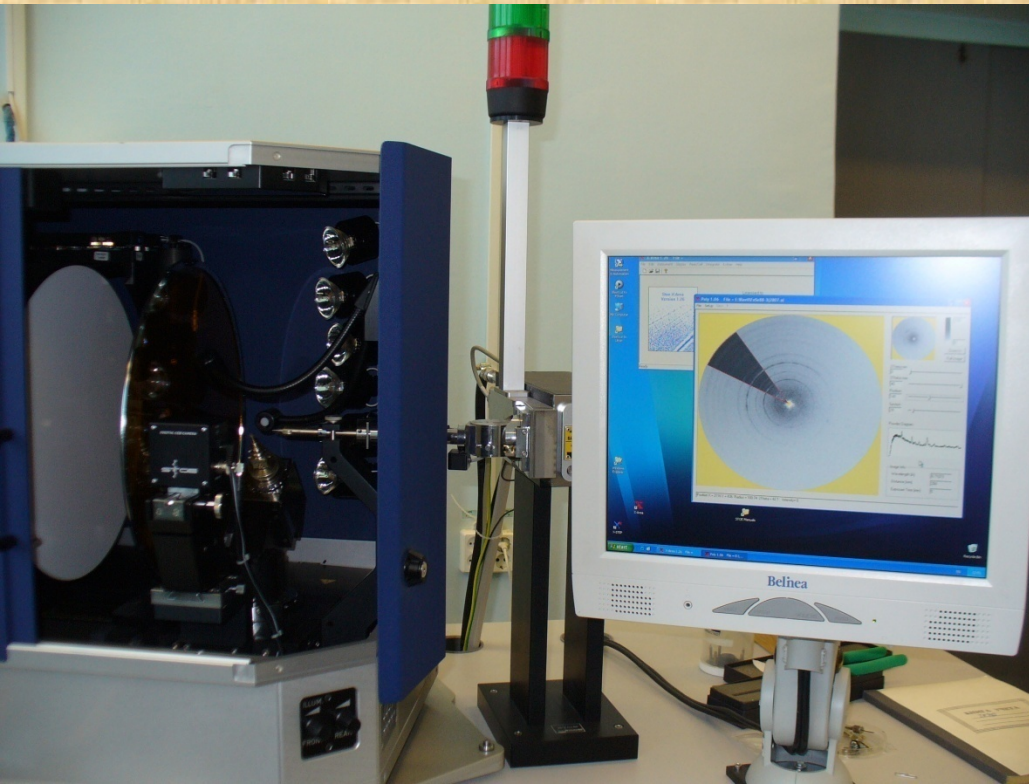
# Установки рентгеноструктурного анализа



Порошковый дифрактометр STADI MP фирмы STOE.



- 4-х кругный дифрактометр для исследования моно-кристаллов при низких температурах фирмы HUBER



- дифрактометр для исследования монокристаллов IPDSII с IMAGE PLATE фирмы STOE.

# Ближайшие цели

- Отработка регистрации нейтронов на установках
- Оснащение нейтронных спектрометров позиционно-чувствительными детекторами
- Подготовка к исследованиям материалов при экстремальных условиях

# Возможности развития нейтронного комплекса ИЯИ РАН.



## ПРОЕКТ УСТАНОВОК НЕУПРУГОГО РАССЕЯНИЯ НЕЙТРОНОВ И ДИФРАКТОМЕТРА ЭПИТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА ИМПУЛЬСНОМ ИСТОЧНИКЕ ИН-06 ИЯИ РАН

### Установки 2-й очереди:

1. Спектрометр обратной геометрии «Глобус»

2. Гибридный спектрометр прямой геометрии «Гибрид»

3. Дифрактометр для сильно поглощающих нейтроны материалов «Градус»

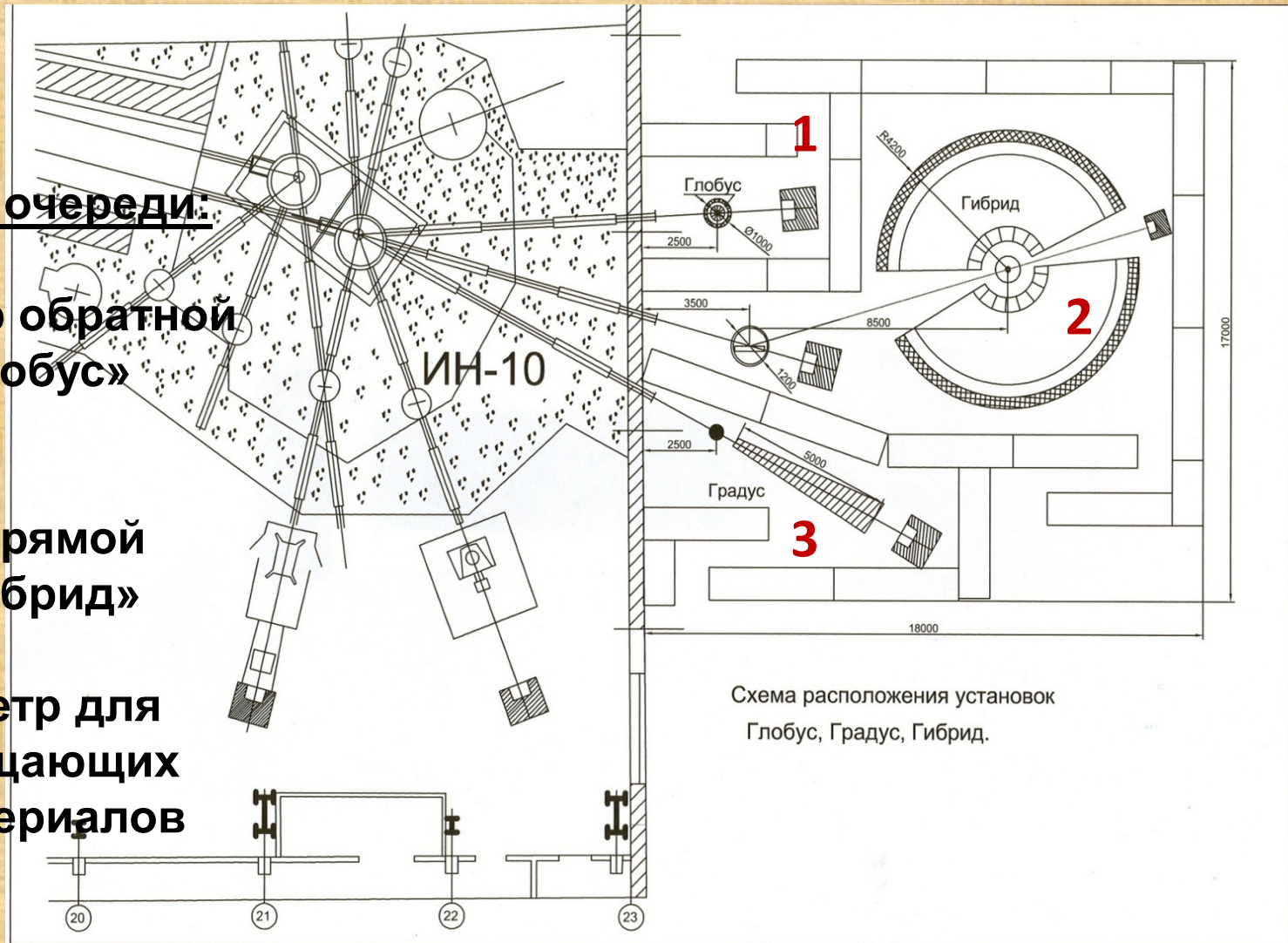


Схема расположения установок  
Глобус, Градус, Гибрид.

# Возможности развития нейтронного комплекса ИЯИ РАН

- **Увеличение числа используемых нейтроноводов за счет ввода в эксплуатацию трех каналов РАДЭКС и трех каналов ИН-06, направленных за пределы здания экспериментального комплекса. Оснащение этих каналов установками.**
- **Разработка и создание мишени второго бокса ИН-06 для получения холодных нейтронов. Ввод в эксплуатацию 7 каналов для работы установок на холодных нейтронах. Создание соответствующих нейтронографических установок.**

Необходимо отметить участников подготовки к научной эксплуатации нейтронных источников и установок Нейтронного комплекса ИЯИ РАН.

Коптелов. Э.А.<sup>1</sup>, Грачев М.И.<sup>1</sup>, Рябов Ю.В.<sup>1</sup>, Алексеев А.А.<sup>1</sup>, Сидоркин С.Ф.<sup>1</sup>,  
Грачев М.И.<sup>1</sup>, Федченко В.А.<sup>1</sup>, Артюшин А.П.,  
Литвин В.С.<sup>1</sup>, Клементьев Е.С.<sup>1,4</sup>, Аксенов С.Н.<sup>1</sup>, Марин В.Н., Поташов С.И.,  
Кузнецов В.Л., Волков А.Н., Кузнецов С.П.<sup>3</sup>, Алексеев П.А.<sup>4</sup>,  
Трунов В.А.<sup>5</sup>, Булкин А.П.<sup>5</sup>, Ульянов В.А.<sup>5</sup> и др.

<sup>1</sup> *Институт ядерных исследований РАН, Москва*

<sup>2</sup> *Институт физики высоких давлений РАН, Троицк*

<sup>3</sup> *Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Москва*

<sup>4</sup> *РНЦ «Курчатовский институт», Москва*

<sup>5</sup> *Петербургский институт ядерной физики, Гатчина*

**Благодарю за внимание**

## • Сектор конденсированных сред ИЯИ РАН

- 1. Садыков Р.А.- кфмн, Зав СКС.
- 2. Клементьев Е.С.- кфмн, снс.
- 3. Гаврилюк А.Г.- кфмн, снс.
- 4. Лебедь Ю.Б.- кфмн, снс.
- 5. Литвин В.С.- кфмн, нс.
- 6. Аксенов С.Н.- мнс.
- 7. Трунов Д.Н.- аспирант.
- 8. Столяров А.А.- аспирант.
- 9. Кононыхин А.С.- вед.инж.
- 10. Афонин Е.М.- аспирант.
- -----