

**Проект компактного источника
нейтронов DARIA для
исследований
методами нейтронного рассеяния**

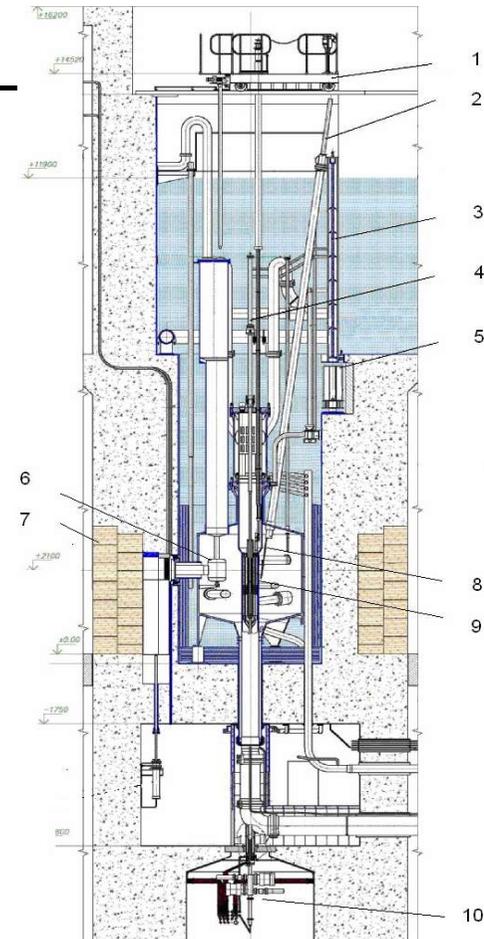
С.В.Григорьев

Содержание доклада:

- **Нейтронные исследовательские центры**
- **Рассеяние нейтронов как метод исследования**
- **Компактный источник нейтронов – мотивация к созданию**
- **Принцип работы КИН**
- **Проект КИН DARIA**
- **Ускоритель, мишенная сборка**
- **Нейтронные установки**
- **Перспективы**

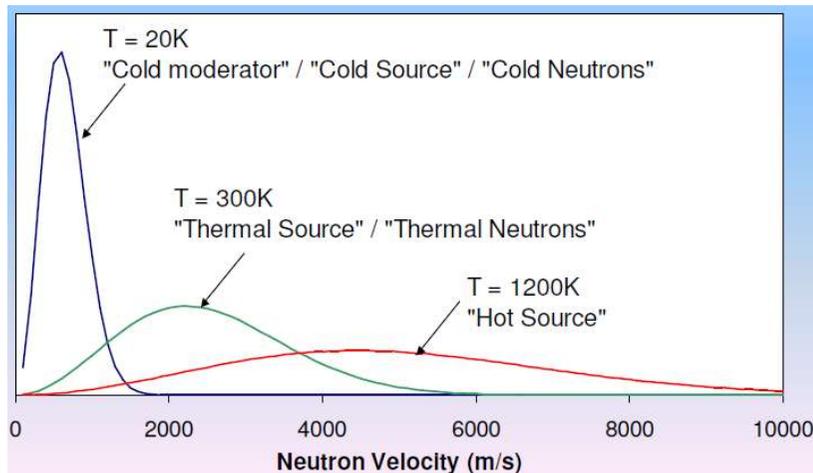
Крупные (мега) нейтронные исследовательские центры

Исследовательский реактор ПИК (НИЦ КИ –
ПИЯФ, Гатчина), как высокопоточный
нейтронный источник



Высокопоточный реактор ПИК: предназначение

- Высокие потоки нейтронов внутри реактора
- Система термализации для обеспечения необходимой энергии нейтронов
- Система транспортировки нейтронов
- Станции рассеяния нейтронов



Ввод в строй реактора ПИК

2018 – 100 кВт

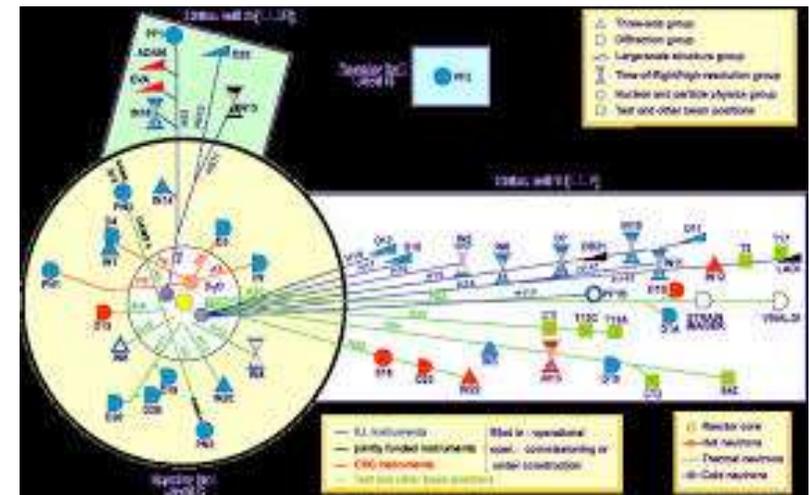
2020 – Лицензия на 10 МВт

2022 – выход на 7 МВт

2024 – (план) 100 МВт

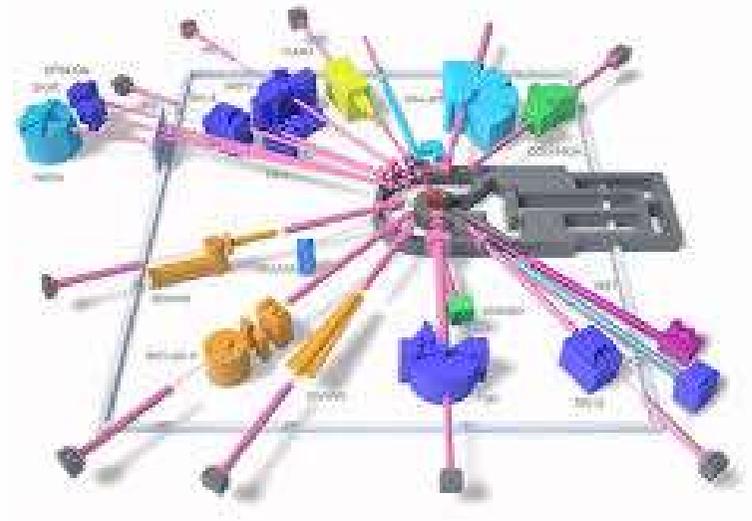
Крупные (мега) нейтронные исследовательские центры

Самый известный исследовательский нейтронный центр в мире – Институт Лауэ Ланжевена (ILL, Гренобль, Франция) со своим высокопоточным реакторомс мощностью 54 МВт и 40 нейтронными станциями.



Крупные (мега) нейтронные исследовательские центры

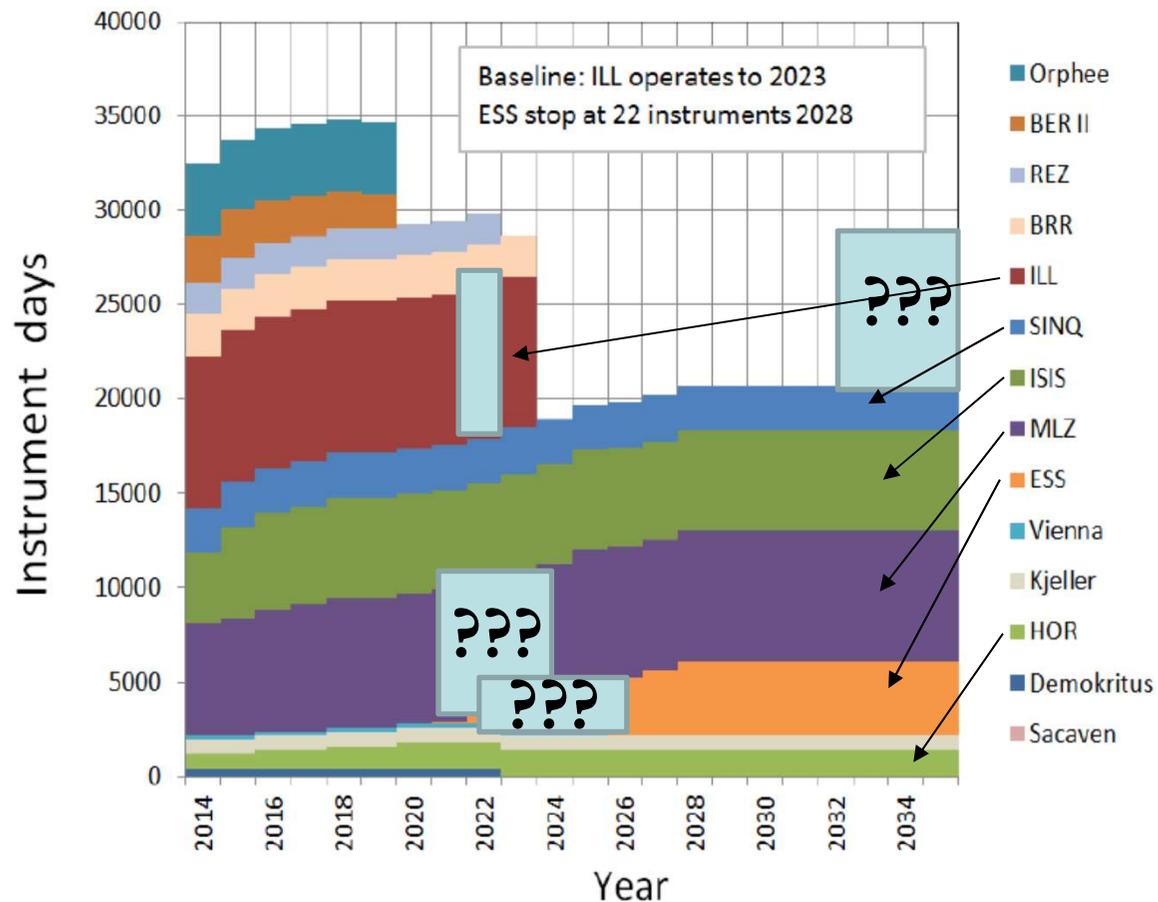
Самый известный исследовательский нейтронный центр в России – Лаборатория Нейтронной Физики (ЛНФ, ОИЯИ, Дубна) со своим импульсным нейтронным источником с мощностью 2 МВт в импульсе и 14 нейтронными станциями.



Высокопоточные реакторы в мире

Facility/ Location	Commissioning Date	Power	Maximum Flux Density	Number of Instruments on Beams
PIK Gatchina, Russia	2022 (under commissioning)	100 MW	5×10^{15} n/cm ² s	25
HFR Grenoble, France	1971	58 MW	1.5×10^{15} n/cm ² s	40
HFIR Oak Ridge, USA	1965 (updated 2007)	85 MW	2.5×10^{15} n/cm ² s	12
FRM2 Munich, Germany	2005	20 MW	0.8×10^{15} n/cm ² s	27
OPAL Sydney, Australia	2006	20 MW	0.4×10^{15} n/cm ² s	15
CARR Beijing, China	2010	60 MW	0.8×10^{15} n/cm ² s	6

Beam Days - Baseline



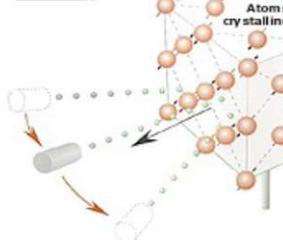
Рассеяние нейтронов – уникальный метод изучения конденсированного состояния

**Клиффорд Шалл
«За создание метода
нейтронной дифракции».**

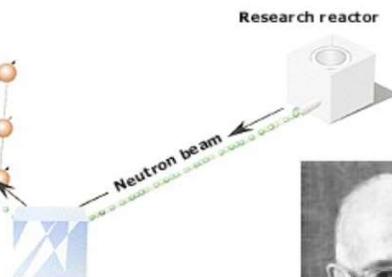
**Бертрам Брокхауз
«За создание метода
нейтронной спектроскопии».**

Neutrons show
where atoms are

When the neutrons
collide with atoms in the
sample material, they
change direction (are
scattered) – elastic
scattering.



Detectors record the directions
of the neutrons and a diffraction
pattern is obtained.
The pattern shows the
positions of the atoms relative
to one another.



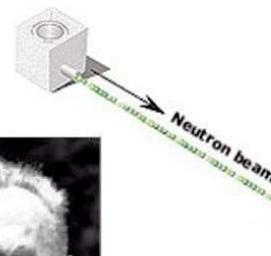
Crystal that sorts and
forwards neutrons of
a certain wavelength
(energy) – mono-
chromatized neutrons



Clifford G. Shull

Neutrons show
what atoms do

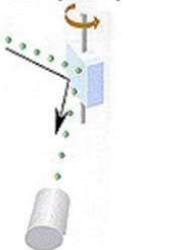
3-axis spectrometer with
rotatable crystals and
rotatable sample



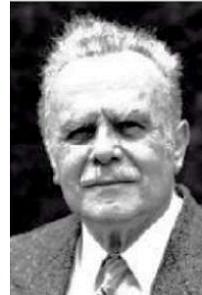
Crystal that sorts and
forwards neutrons of
a certain wavelength
(energy) – mono-
chromatized neutrons

When the neutrons
penetrate the sample
they start or cancel
oscillations in the
atoms. If the neutrons
create phonons or
magnons they
themselves lose the
energy these absorb
– inelastic scattering

Changes in the
energy of the
neutrons are first
analysed in an
analyser crystal...



... and the neutrons
then counted in a
detector.



Bertram N.
Brockhouse

С разрешения
И.А. Зобкало

Нобелевская премия по физике за 1994 г.

Рассеяние нейтронов – уникальный метод изучения конденсированного состояния

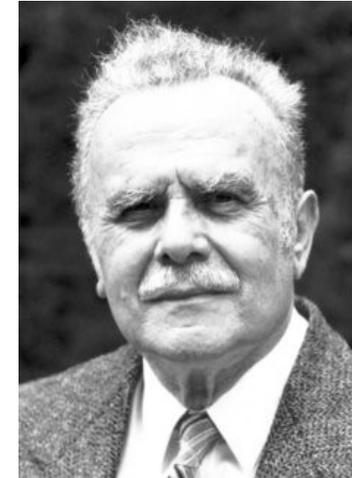
1. Нейтроны – электрически **нейтральные** частицы. Это означает:
- *высокую проникающую способность;*
- *неразрушающее проникновение в материю;*
- *могут быть использованы при исследованиях в экстремальных условиях.*

2. **Энергии** тепловых нейтронов имеют тот же порядок, что и энергии элементарных возбуждений в твердом теле. Таким образом, нейтроны могут «чувствовать»:
- *возбуждения решетки (кристаллической и магнитной);*
- *молекулярные вибрации.*

3. **Длина волны** нейтронов имеет тот же порядок, что и межатомные расстояния. Это позволяет определить:
- *кристаллические структуры и межатомные пространства;*
- *положение атомов с точностью от 10^{-13} см*

4. Нейтроны имеют **спин**, и, соответственно, **магнитный момент**. Это позволяет:
- *формировать пучки поляризованных нейтронов;*
- *изучать когерентное и некогерентное магнитное рассеяние.*
Нейтроны могут быть использованы:
- *для исследования магнитных структур;*
- *для исследования магнитных флуктуаций.*

5. Нейтроны «**видят**» **ядро**. Это означает:
- *чувствительность к легким атомам;*
- *изотопная контрастность;*
- *контраст для изучения сложных молекулярных структур.*



“If the neutron did not exist, it would need to be invented.”
- *W. Bragg*

«Если бы нейтрон не существовал, его надо было бы придумать!»

- Дифракция нейтронов (порошковая и монокристаллическая): атомная и магнитная структура
- Спектроскопия нейтронов: динамика атомной решетки и магнитных структур
- Малоугловое рассеяние нейтронов: нанобъекты, наноструктуры
- Рефлектометрия нейтронов: слоистые системы, поверхности.

Дифракция Нейтронов

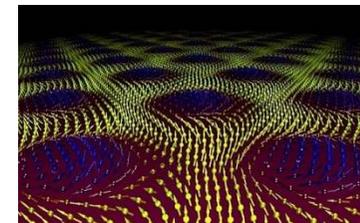
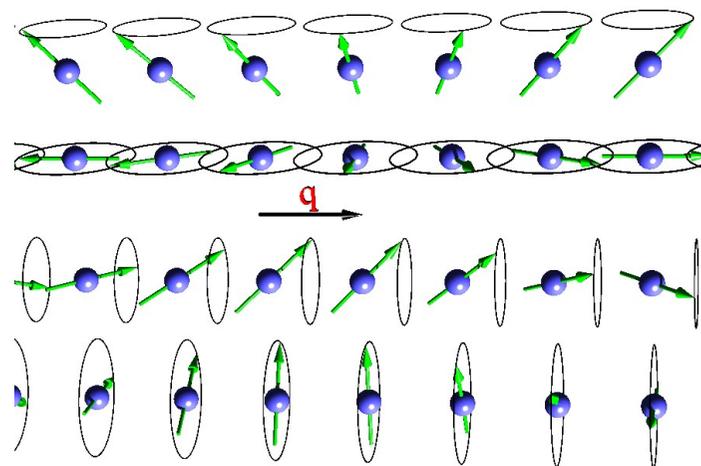
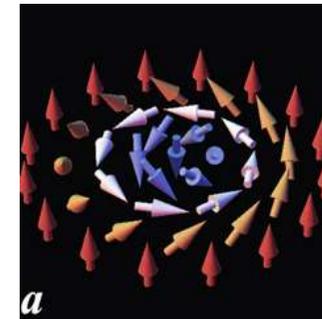
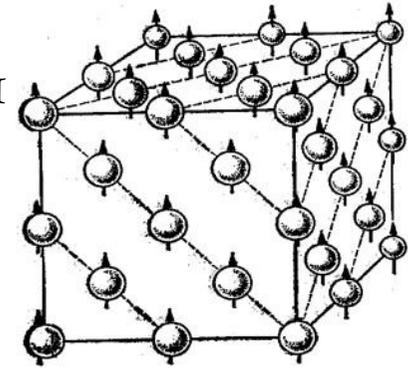
(порошковая и монокристалльная) на магнитных
структурах



Нобелевская премия по физике 1970 года была присуждена Луи Эжэн Феликс Неэль (*Louis Eugène Félix Néel*) «за фундаментальные труды и открытия, касающиеся антиферромагнетизма и ферромагнетизма, которые повлекли за собой важные приложения в области физики твердого тела»

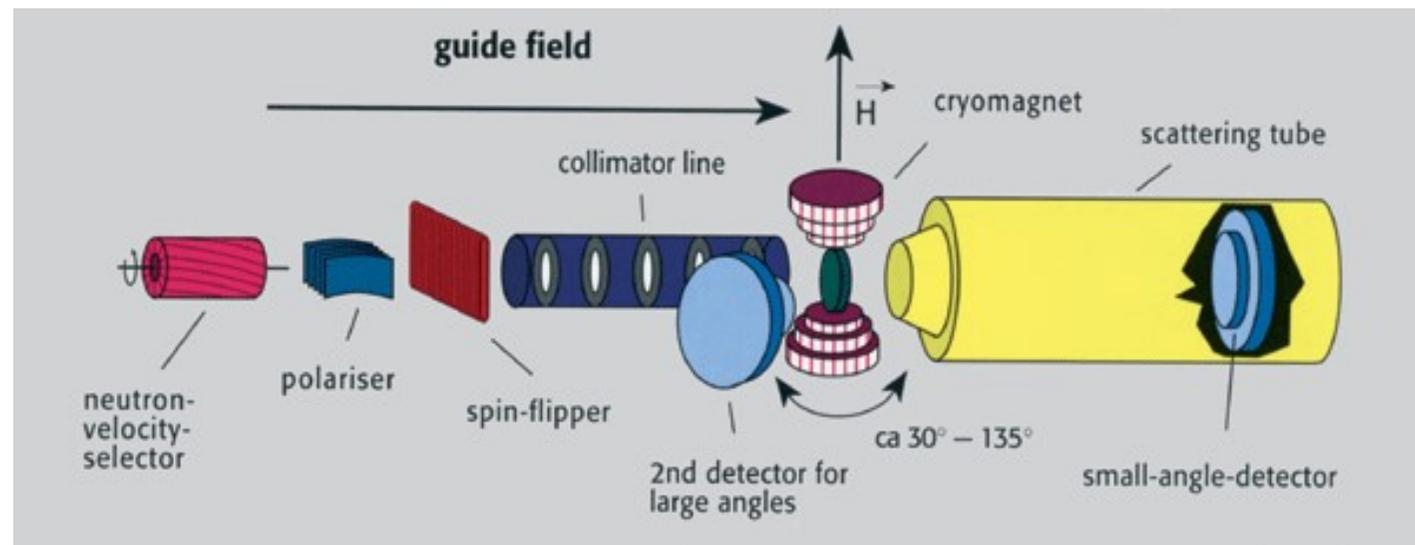
Нобелевская премия по физике за 1970 г.

- Колинеарные, соразмерные спиновые структуры ферромагнетики, антиферромагнетики, ферримагнетики
- Неколинеарные, но соразмерные спиновые структуры
- Неколинеарные и несоразмерные спиновые структуры



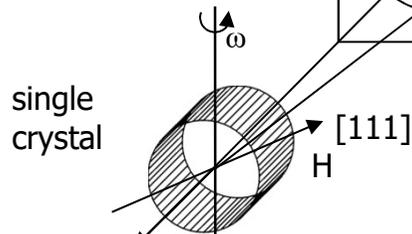
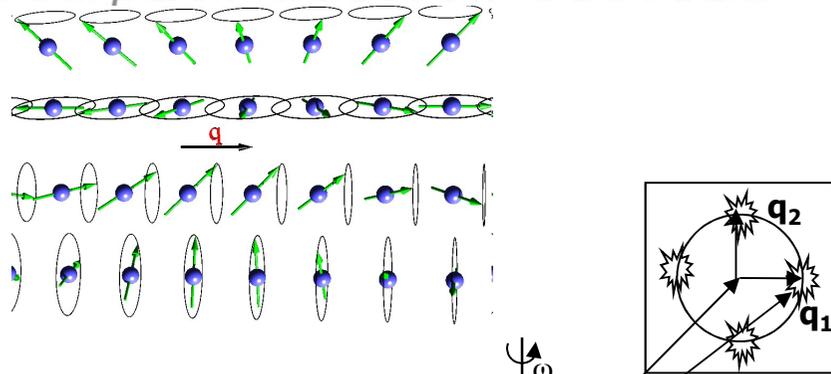


Малоугловое Рассеяние Нейтронов (МУРН)



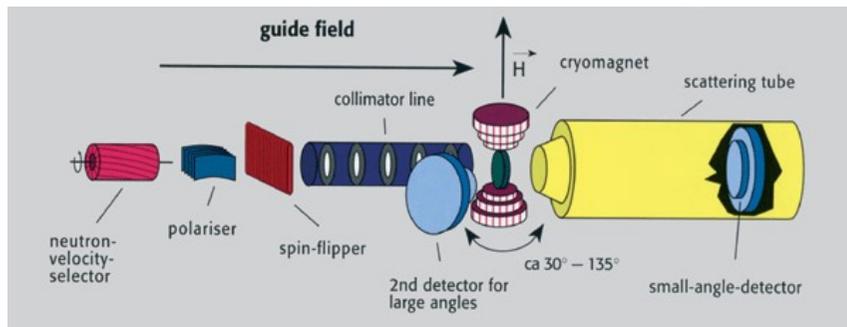
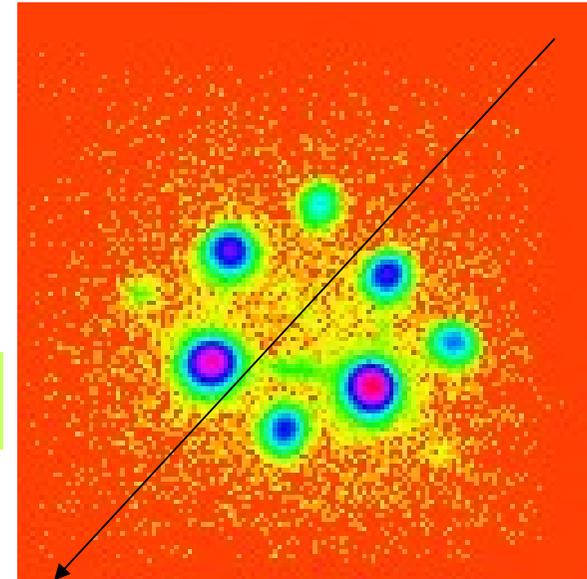
МУРН: пример эксперимента

Фазовый переход
парамагнетик - спиновая
спираль



T = 10 K

Small angle neutron diffraction experiment on MnSi single crystal

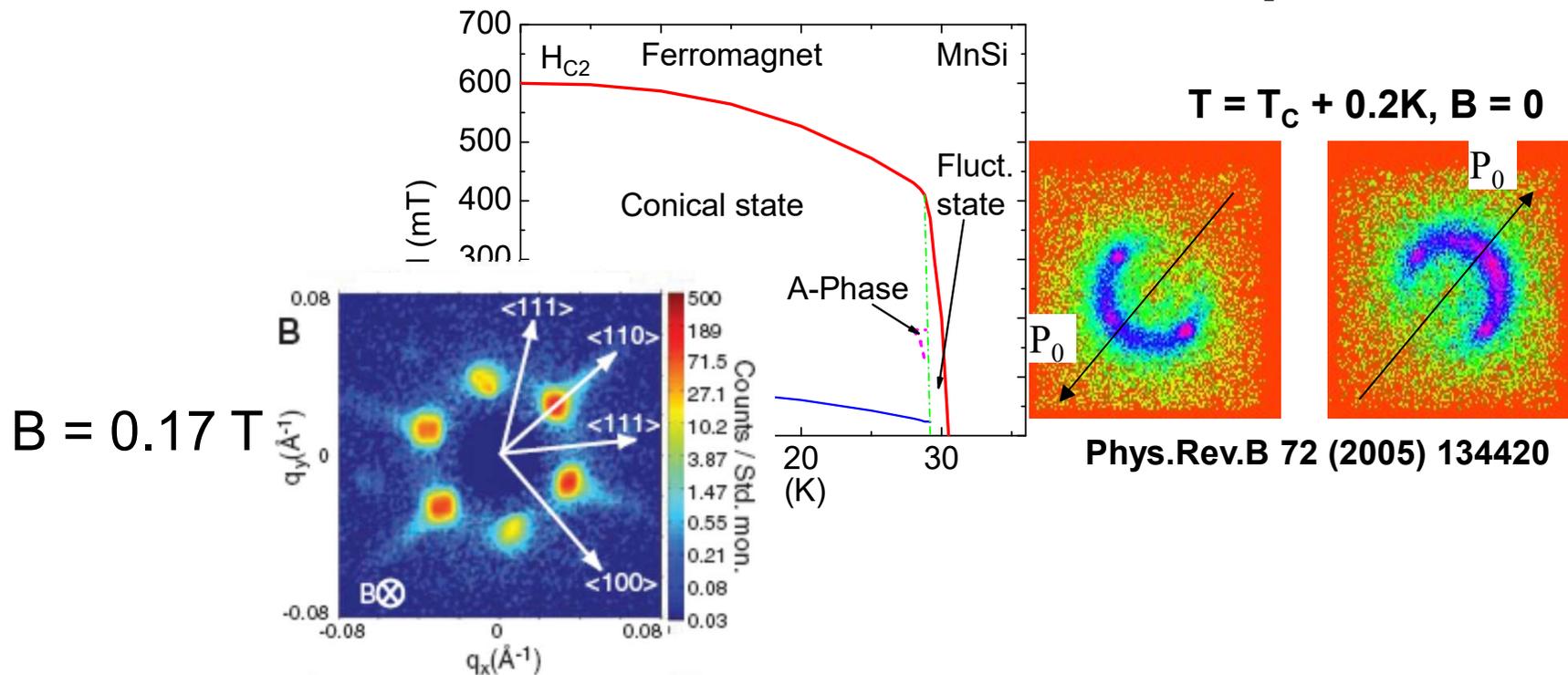


Карты интенсивности
рассеяния нейтронов от
образца монокристалла MnSi

**Фазовая диаграмма:
пример эксперимента**

**В-Т Фазовая
диаграмма**

[1] Y. Ishikawa, G. Shirane, J.A. Tarvin, M. Kohgi,
Phys.Rev.B 16 (1977) 4956.



S. Mühlbauer, B. Binz, F. Jonietz, C. Pfeleiderer, A. Rosch, A. Neubauer, R. Georgii, P. Böni, Science 323 (2009) 915.

Предпосылки создания компактного источника нейтронов

Установки мега-класса требуют колоссальных финансовых затрат как при строительстве (более 100 млрд. рублей), так и при эксплуатации (около 10 млрд. руб./год).

Большая стоимость определяет весьма скромное количество нейтронных центров в мире, что ограничивает их доступность.



Предпосылки создания компактного источника нейтронов

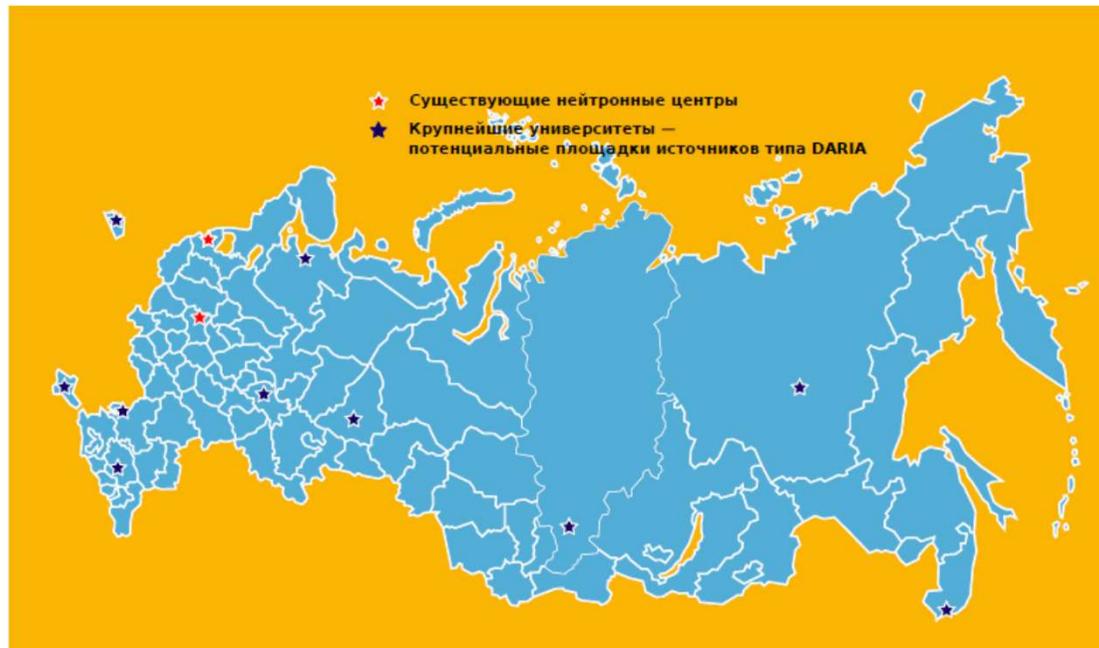
Такая ситуация ведет к
неполному
использованию
потенциала методики
нейтронного рассеяния
в науке и
промышленности.



Исследовательские нейтронные источники в РФ:

- реактор ПИК выйдет на свои проектные показатели с 25 установками к 2025-2027 годам,
- ИБР-2 в Дубне запустится снова в 2024 году и до 2035 года.

Предпосылки создания компактного источника нейтронов



Ответом на этот вызов может стать создание сети компактных источников, которые бы закрыли брешь между флагманскими источниками и широким кругом исследователей.

Стоимость источника при этом составляет 7-10 млрд. руб, а его эксплуатация около 700 млн.руб./ год.

What is a CANS ?

Compact Accelerator-based Neutron Sources (CANS) or Low Energy accelerator-based Neutron Sources refer to sources where the proton (or deuteron or electron) energy is in the range 2–70 MeV and where the main neutron production nuclear process is not spallation but rather lower energy nuclear reactions.

Источники нейтронов на основе компактных ускорителей (КИУ) относятся к источникам, в которых энергия протонов (или дейтронов, или электронов) находится в диапазоне 2–70 МэВ и где основным ядерным процессом производства нейтронов является не расщепление, а довольно низкоэнергетические ядерные реакции.

LENS Report

“Low Energy Accelerator-driven Neutron Sources”

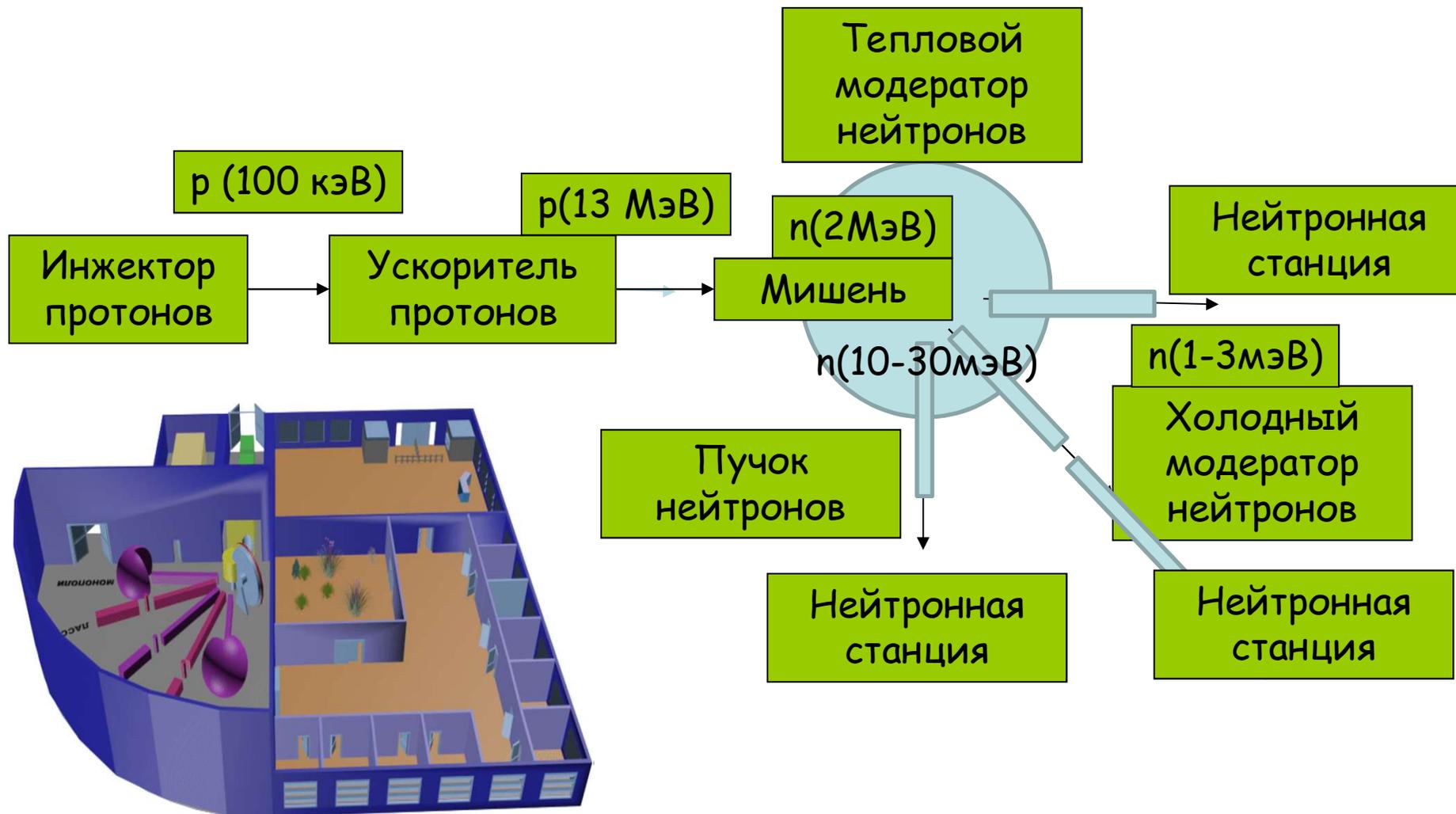
Ключевыми компонентами протонного КИН являются:

- **Импульсный ускоритель протонов** с рабочим циклом в диапазоне 1–4% и максимально высокими пиковыми токами в диапазоне мА а, возможно, и в диапазоне ~ 100 мА для более эффективных CANS.
- **Мишень**, поддерживающая мощность пучка в диапазоне 1–100 кВт, из которой быстрые нейтроны высвобождаются в результате ядерных реакций при бомбардировке протонами.
- **Замедлитель нейтронов**, который снижает энергию нейтронов до тепловых энергий и длин волн, подходящих для исследований в конденсированном веществе.
- **Набор инструментов для рассеяния нейтронов**, томографии, аналитических инструментов.

LENS Report

“Low Energy Accelerator-driven Neutron Sources” Nov. 2020

Принцип работы компактного источника нейтронов



Мощность и нейтронный поток КИН можно регулировать и масштабировать в зависимости от целевых приложений.

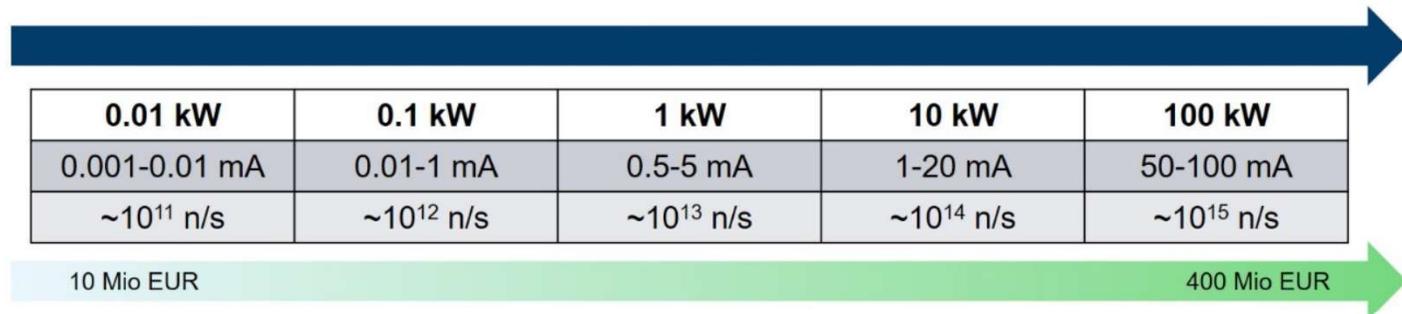
Установки КИН можно разделить на три основные категории:

- i) с низким потоком, малой мощностью (до 1 кВт),
- ii) со средним потоком, со средней мощностью (от 1 до 10 кВт) и
- iii) с высоким магнитным потоком и высокой мощностью (свыше 10 кВт).

Scalable Neutron Sources

Существующие:

LENS (Индиана),
HUNS (Хоккайдо),
CPHS (Циньхуа)

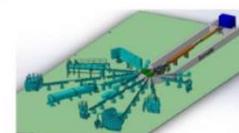


Проектируемые:

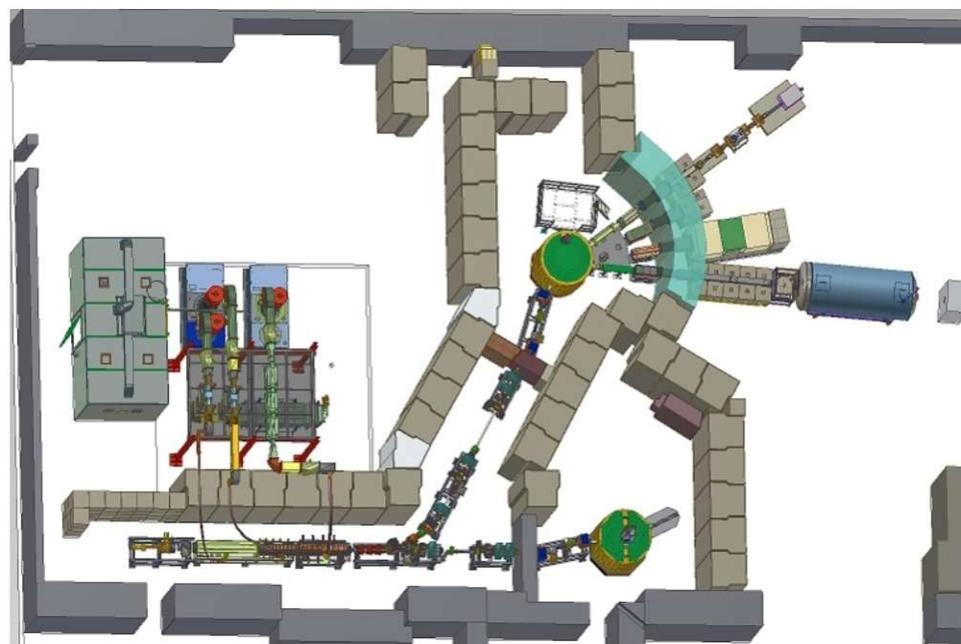
HBS, SONATE,
Mirrotron,
NOVAERA



Prototype



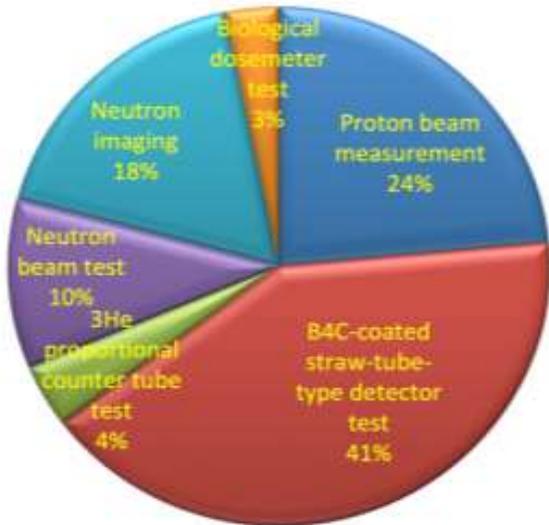
LENS – Low Energy Neutron Source



Источник	$E_{\text{частиц}}$, МэВ	I, мА	Мишень	Мощность, кВт
LENS, США	13	20	Be	3
CPHS, Китай	13	50	Be	16,3
RANS, Япония	7	0,1	Be	0,7
IREN, Россия	200	3000	W	10
NOVA ERA, Германия	10	1	Be	0,4

CPHS - Compact Pulsed Hadron Source

Parameter	Designed Value	Present Value
Beam Energy (MeV)	13	3
Peak Current (mA)	50	28
Beam Pulse Width (μ s)	500	100
Repetition Rate (Hz)	50	20

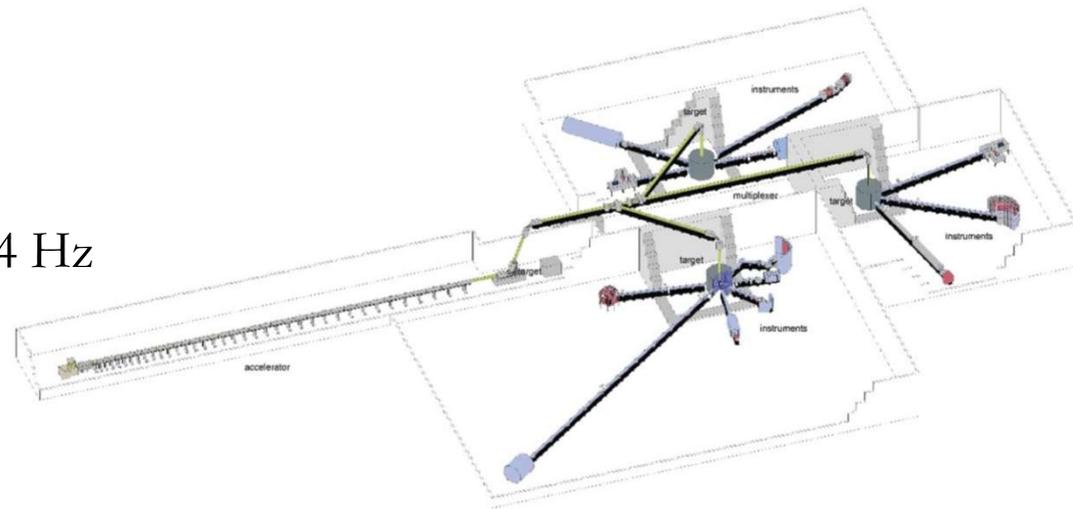


Источник	$E_{\text{частиц}}$, МэВ	I, mA	Мишень	Мощность, кВт
LENS, США	13	20	Be	3
CPHS, Китай	13	50	Be	16,3
RANS, Япония	7	0,1	Be	0,7
IREN, Россия	200	3000	W	10
NOVA ERA, Германия	10	1	Be	0,4

HBS – High Brilliant Source

Accelerator parameters used in the HBS Project.

Accelerator	Linac
Particle type	Proton
Beam energy	70 MeV
Current	100 mA
Frequencies	24, 96, 384 Hz
Duty cycle	~ 4.3 %
Peak beam power	7 MW
Average beam power	~3·100 kW



T. Gutberlet, et al, Neutron News, 31:2-4, 37-43 (2020) Sustainable neutrons for today and tomorrow—The Jülich High Brilliance neutron Source project.

Analytically calculated instrument parameters for HBS

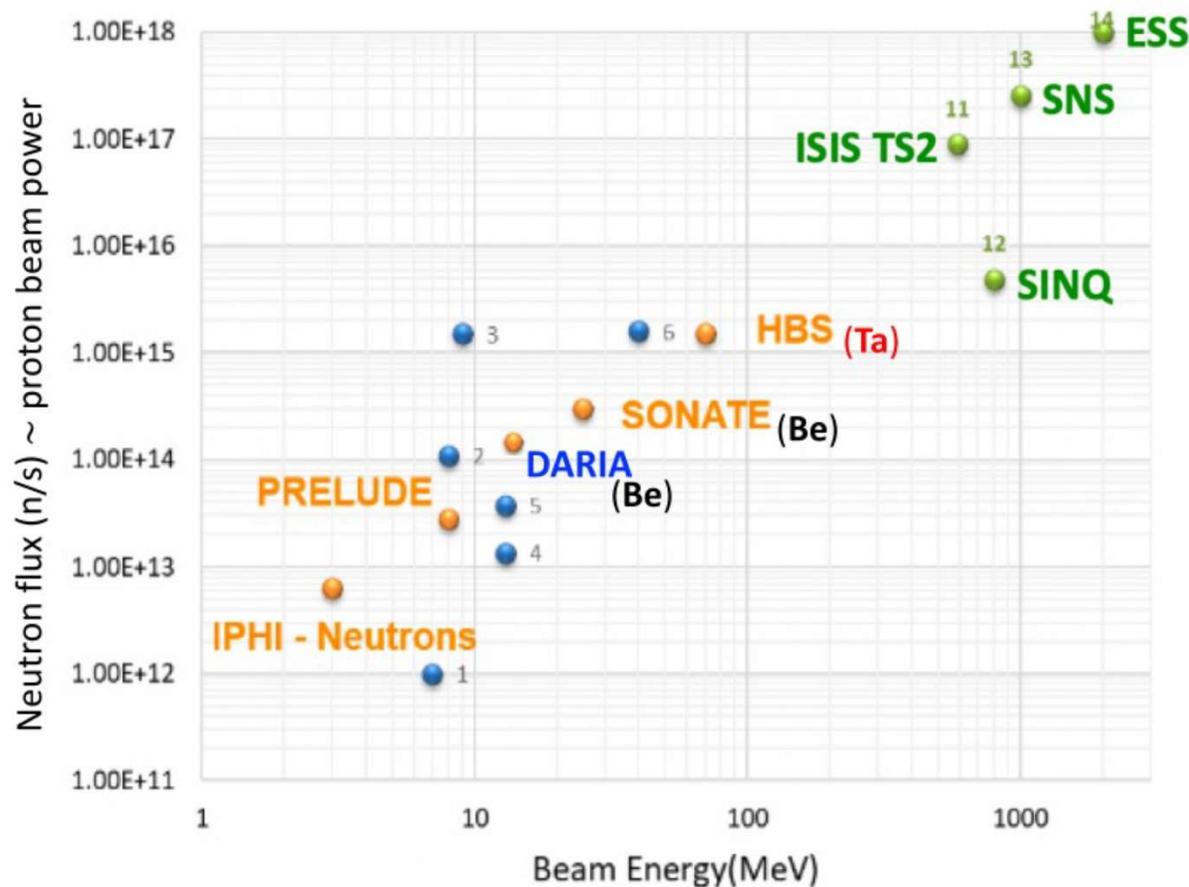
	Resolution [Å ⁻¹]	Bandwidth [Å]	Flux [s ⁻¹ cm ⁻²]
Reflectometer at 24 Hz	0.2	1.2–5.7	1.3 · 10 ⁸
SANS at 24 Hz	0.31	3–8.4	2.4 · 10 ⁷
	0.27	3–7.7	5.3 · 10 ⁶
	0.23	3–7	1.5 · 10 ⁶
	0.2	3–6.4	6 · 10 ⁵
Powder Diffractometer at 96 Hz	0.0032	1.3–2.6	6 · 10 ⁶
Backscattering at 96, 384 Hz	1	1.84	2.5 · 10 ⁷
Cold ToF	3	5	1.3 · 10 ⁵
Thermal ToF	5	4.5	1 · 10 ⁵
Analytics operating at 24 or 96 Hz			
Imaging	1	1.84	2.5 · 10 ⁷
PDGNAA, NDP	—	—	10 ⁵

T. Gutberlet, et al, *Neutron News*, 31:2-4, 37-43 (2020)

Параметры КИН

Название	E_{proton} , MeV	I_{peak} , mA	Коэф-нт заполнения, %	Мишень	P, kW	Нейт-ронные установки	Холодный замедлитель	длин волн для МУРН, Å	Поток на образце для МУРН, n/s/cm ²
LENS, США	13	20	1	Be	3	SANS, SESAM, MIS	метан	4 – 20	10^4
CPHS, Китай	13	50	2,5	Be	16,3	SANS, Neutron Imaging	метан	1 – 10	10^4
RANS, Япония	7	$I_{av} = 0,1$	-	Be	0,7	N Imaging, дифрактометр, SANS	Мезитилен	1 – 7	10^4
DARIA, Россия	13	100	1-3	Be	28	Рефлектометр дифрактометр, МУРН	Мезитилен	1 – 7	$10^4 - 10^5$
HBS, Германия	70	100	4	Ta	7000	До 10 шт.	Мезитилен, Параводород	2 – 10	$10^5 - 10^7$
SONATE, Франция	30	100	4	Be	80	До 10 шт.	Параводород	3 – 16	$10^4 - 10^5$

График: поток (n) – МОЩНОСТЬ (p)



Зависимость потока нейтронов от энергии протонного пучка.

А.И. Иоффе РНИКС-2021



Проект компактного источника нейтронов

Абревиатура DARIA (Dedicated to Academic
Research and Industrial Applications) принята

для названия проекта

компактного источника нейтронов

предназначенного для академических
исследований и промышленного применения

НИЦ «КИ» - ПИЯФ/СПбГУ



НИЦ «КИ» - ИТЭФ



ИПФ РАН



ОИЯИ



БФУ им. И. Канта



ИФМ УрО РАН



Цель: Разработка и создание компактного
нейтронного источника, готового к запуску в
«серийное» строительство.

Задачи:

- Обеспечение широкой доступности нейтронов для экспериментаторов и связанный рост качества экспериментов на ведущих источниках;
- Обеспечение тесного сотрудничества с промышленностью и коммерциализация нейтронного рассеяния;
- Новый импульс развитию методик нейтронного эксперимента;
- Новый импульс развитию ускорительной техники.

Финансирование проекта DARIA

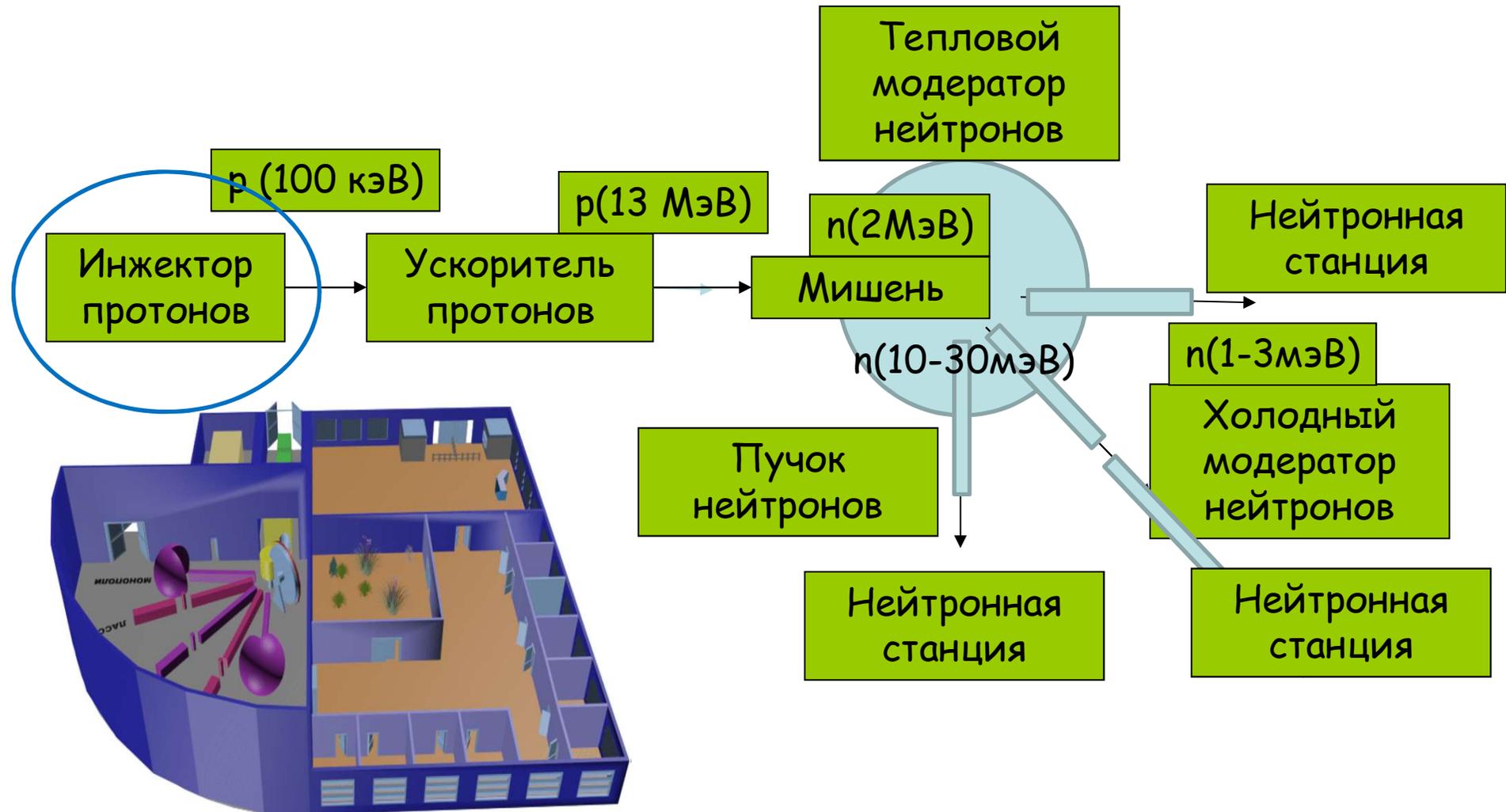
С 12.10.2021 по 31.12.2023 работа по проекту поддержана в рамках ФНТП развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 – 2027 годы

«Разработка компактных источников фотонов и нейтронов на базе новых технологий линейных ускорителей - основных элементов лазера на свободных электронах и импульсных нейтронных источниках».

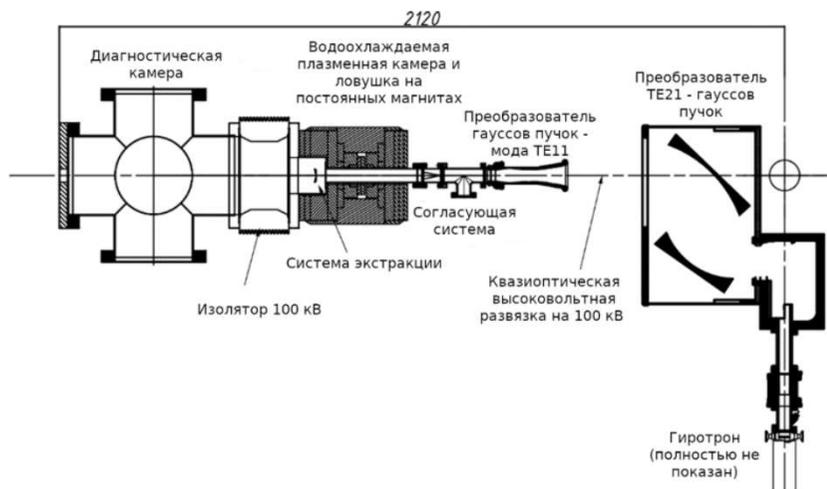
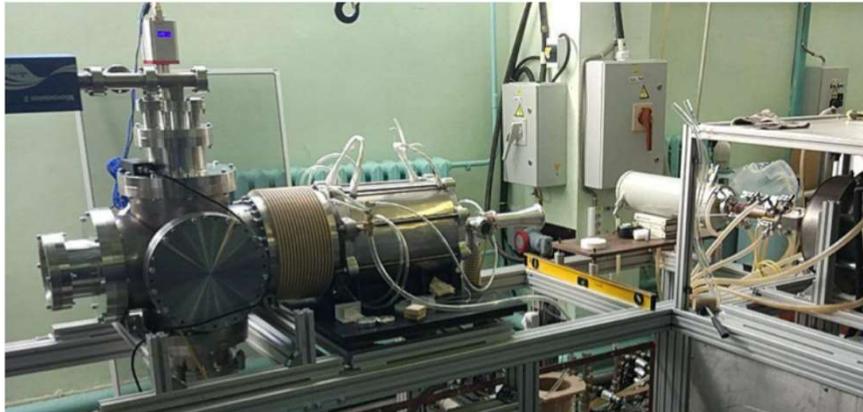
(Соглашение №075-15-2021-1358 от 12.10.21).



Принцип работы компактного источника нейтронов



Проект DARIA: ЭЦР источник



Характеристики ЭЦР источника

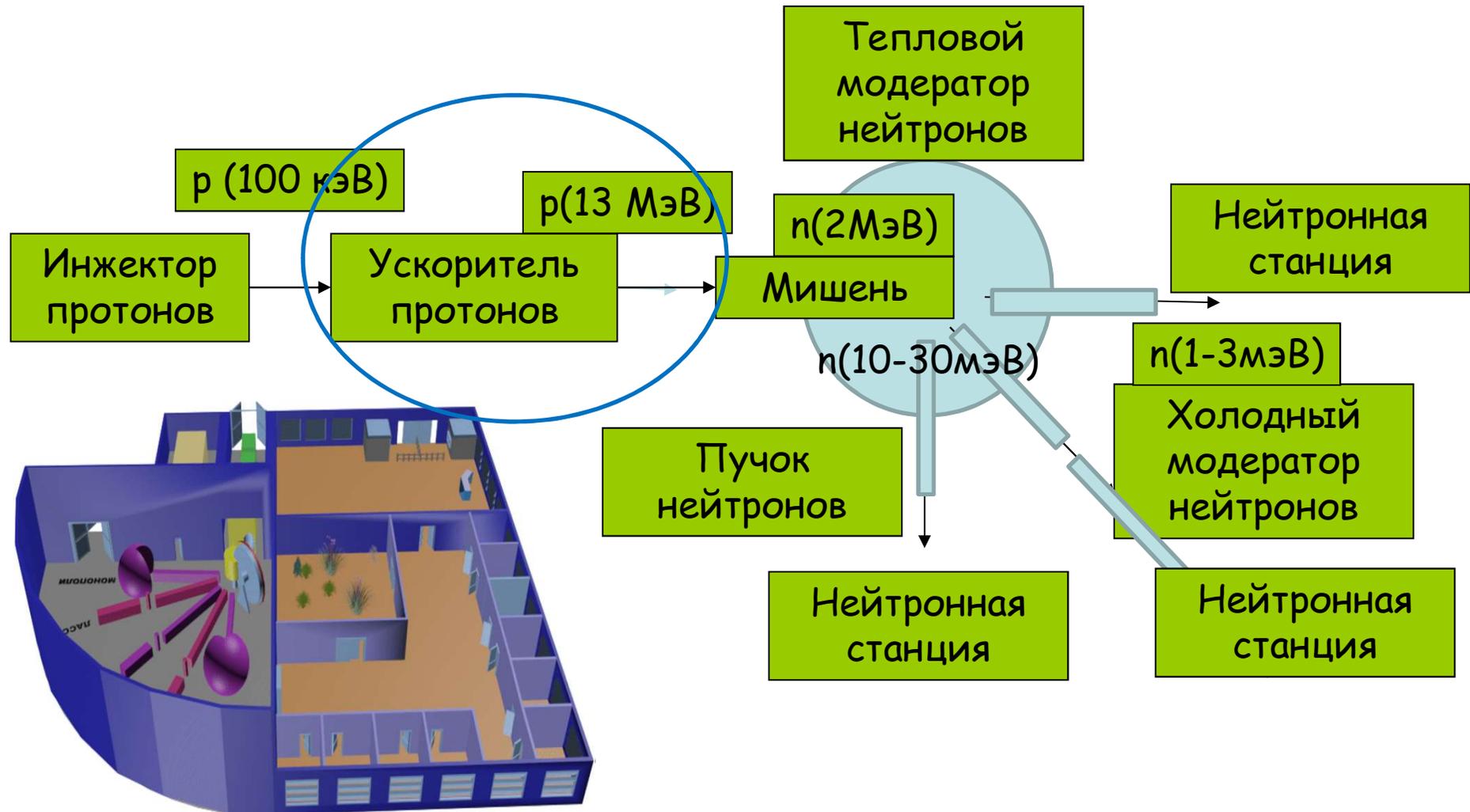
- Ток до 500 мА
- Эмиттанс меньше, чем $0.2 \pi \text{ mm mrad}$
- Энергия до 100 кэВ
- Импульсный и постоянный режимы
- Частота импульсов до 1000 Гц
- Длина импульса $>100 \text{ мкс}$
- Эмиттанс был измерен для токов вплоть до 200 мА в 2020 г. [1]

ИПФ РАН:

В.А. Скалыга, И.В. Изотов

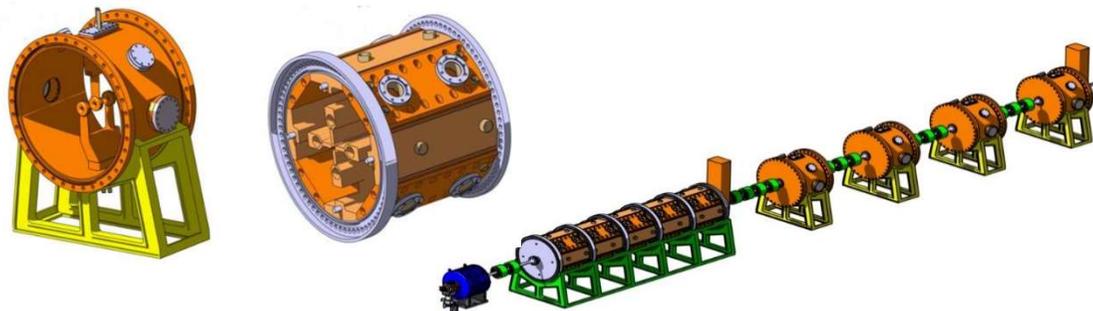
[1] Письма в журнал технической физики, т.47, в. 10 стр. 7 - 10 (2021).

Принцип работы компактного источника нейтронов



Проект DARIA: протонный ускоритель

Протонный ускоритель, состоящий из структур RFQ и DTL (резонаторы с трубками дрейфа) до энергии 13 МэВ [2], формирует импульсную структуру пучка на Be мишени с пиковым током до 100 мА и частотой до 200 Гц.



RFQ - Radio Frequency Quadrupole, ускоряющая структура с пространственно - однородной квадрупольной фокусировкой, изобретенной И.М. Капчинским и В.И. Тепляковым. Ускоряет протоны до 3 МэВ.

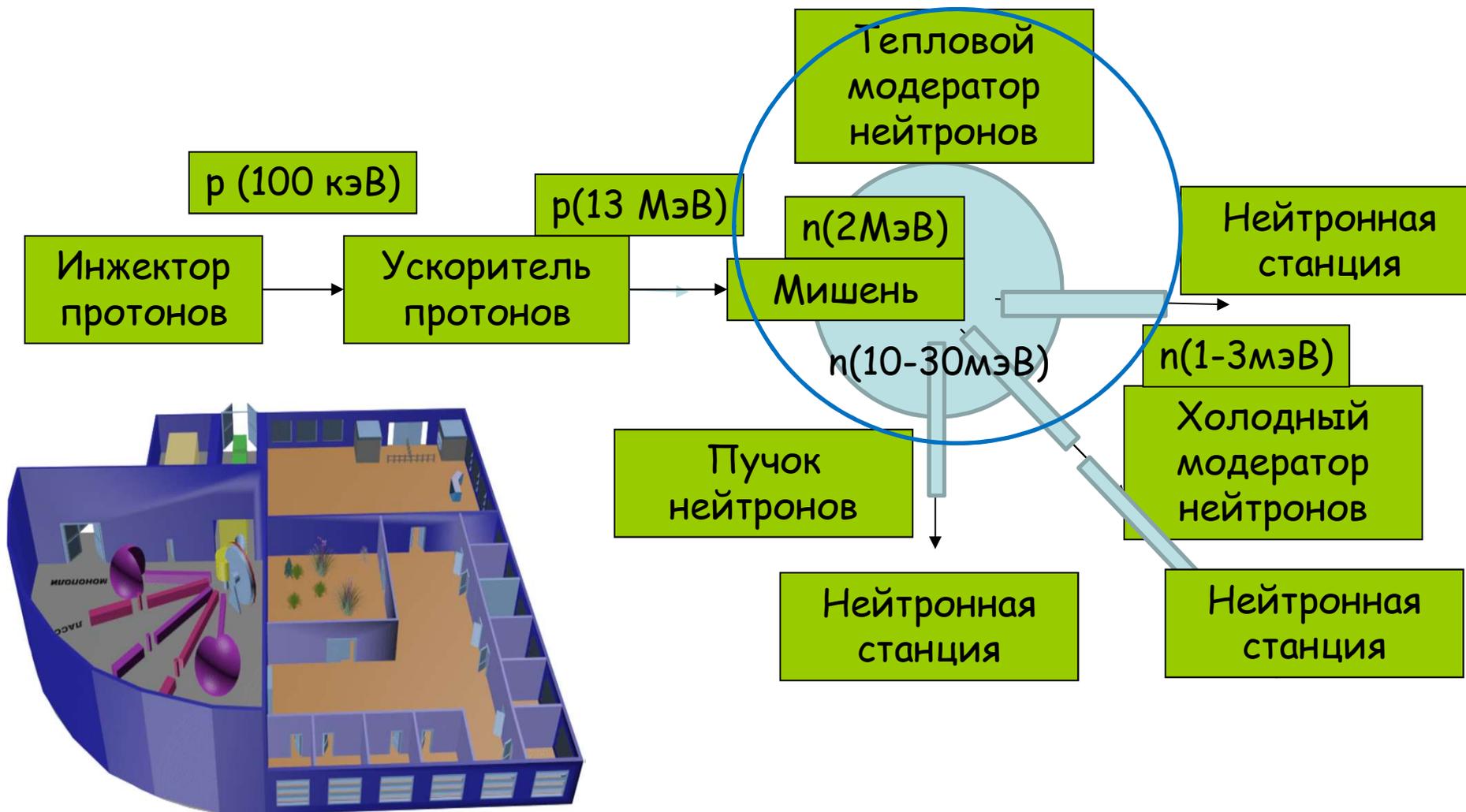
НИЦ «КИ» - ИТЭФ:

Г.Н. Кропачев,
А.А. Ситников,
Т.В. Кулевой

Name	Parameters
Accelerator	LINAC
Particle	Proton
Target / thickness	Be / 1.1 mm
Energy	13 MeV
Peak current	100 mA
Duty cycle	1-3%
Power at target	28 kW

DTL - Drift Tube Linac, резонаторы с трубками дрейфа. Набор резонаторов обеспечивает ускорение протонов до 13 МэВ, с возможностью регулировки выходной энергии.

Принцип работы компактного источника нейтронов



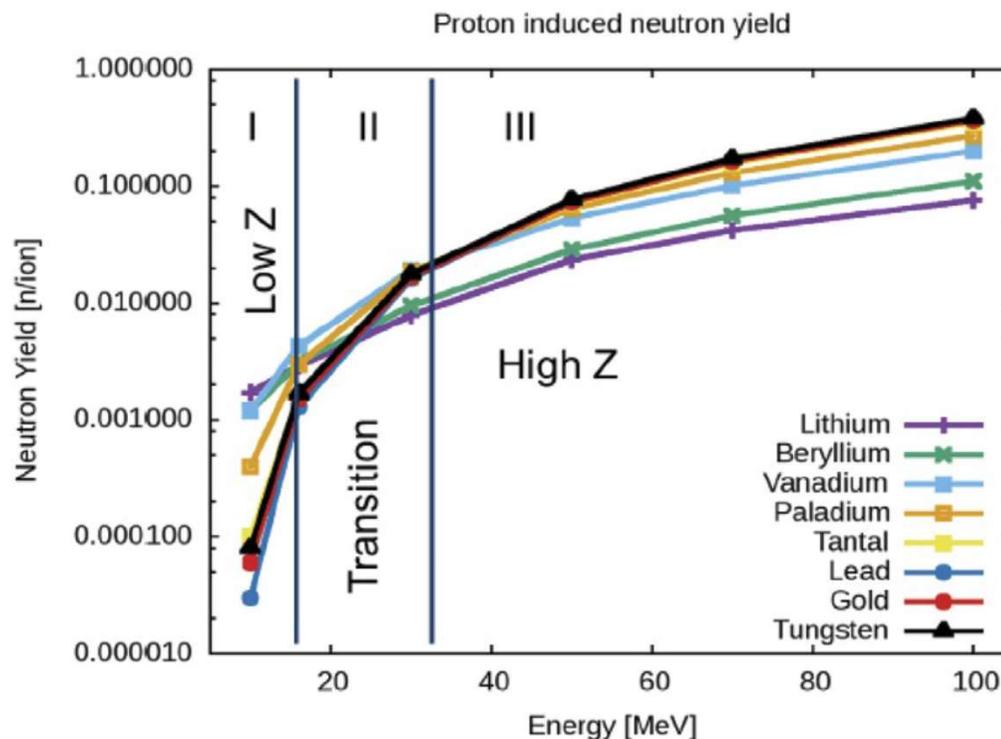
Проект DARIA: мишечная сборка

Для создания нейтронов используется реакция столкновения протонов с ядрами бериллия, обеспечивающая ВЫХОД НЕЙТРОНОВ, ДОСТАТОЧНЫЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ФИЗИКЕ КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ, ПРИ УМЕРЕННОМ ВЫДЕЛЕНИИ ТЕПЛА.

Реакция ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ может проходить без генерации трития, что исключает необходимость его улавливания и удаления и упрощает лицензирование источника.

НИЦ «КИ» -
ПИЯФ/СПбГУ:

Н.А. Коваленко,
К.А. Павлов, А.Е. Павлова,
В.В. Субботина, П.И. Коник



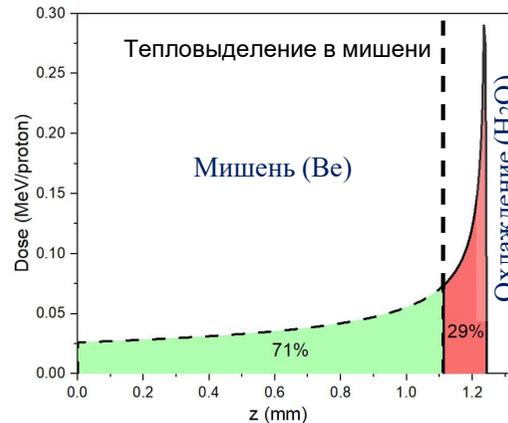
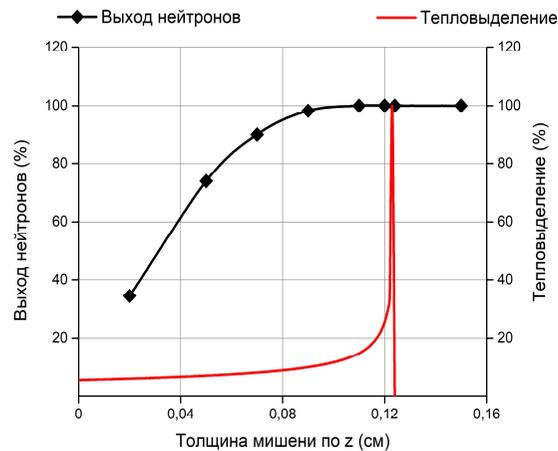
Проект DARIA: мишенная сборка

Разработка мишенного узла связана с большим количеством ограничений и требований:

- высокая механическая стойкость в условиях повышенной тепловой нагрузки;
- высокая температура плавления;
- хорошая теплопроводность;
- радиационная стойкость элементов конструкции;
- устойчивость к блистерингу, приводящему к разрушению мишени.

При оптимизации параметров мишени необходимо также добиваться наибольшего числа генерируемых нейтронов.

Характеристики мишени



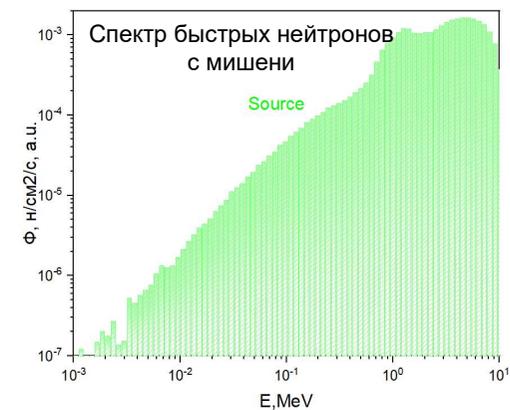
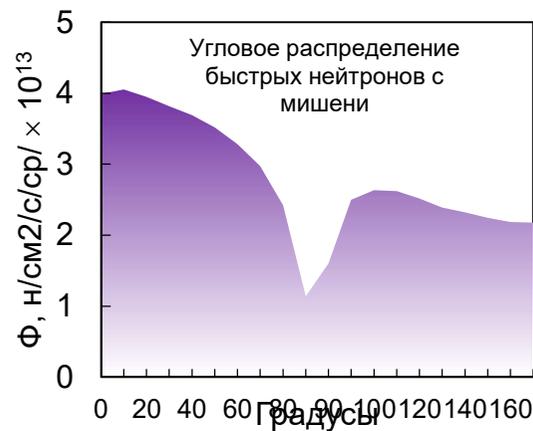
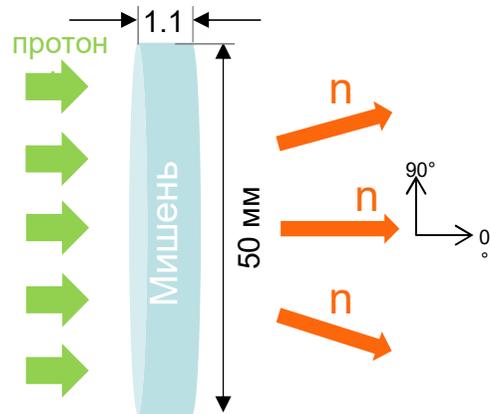
Толщина мишени – **1,1** мм

Диаметр мишени – **50** мм

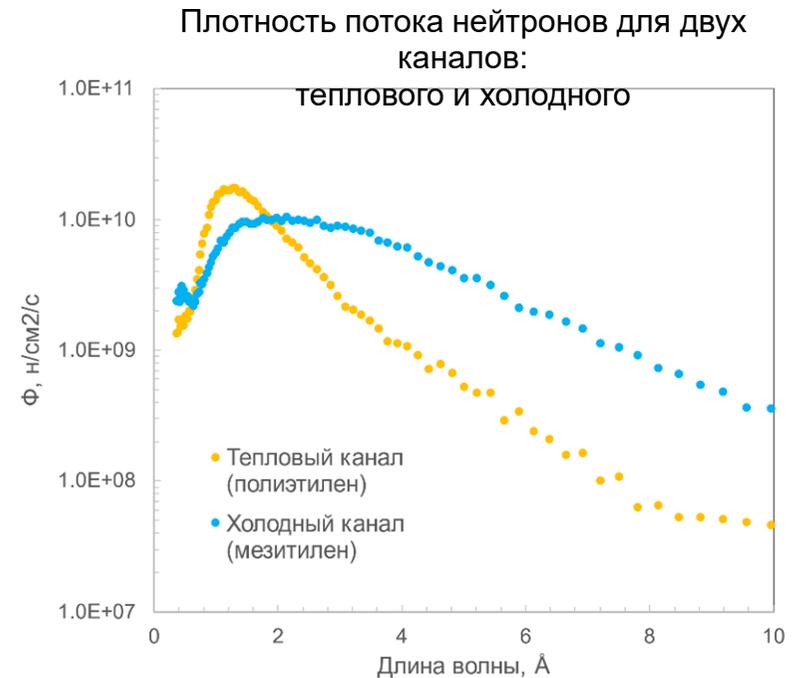
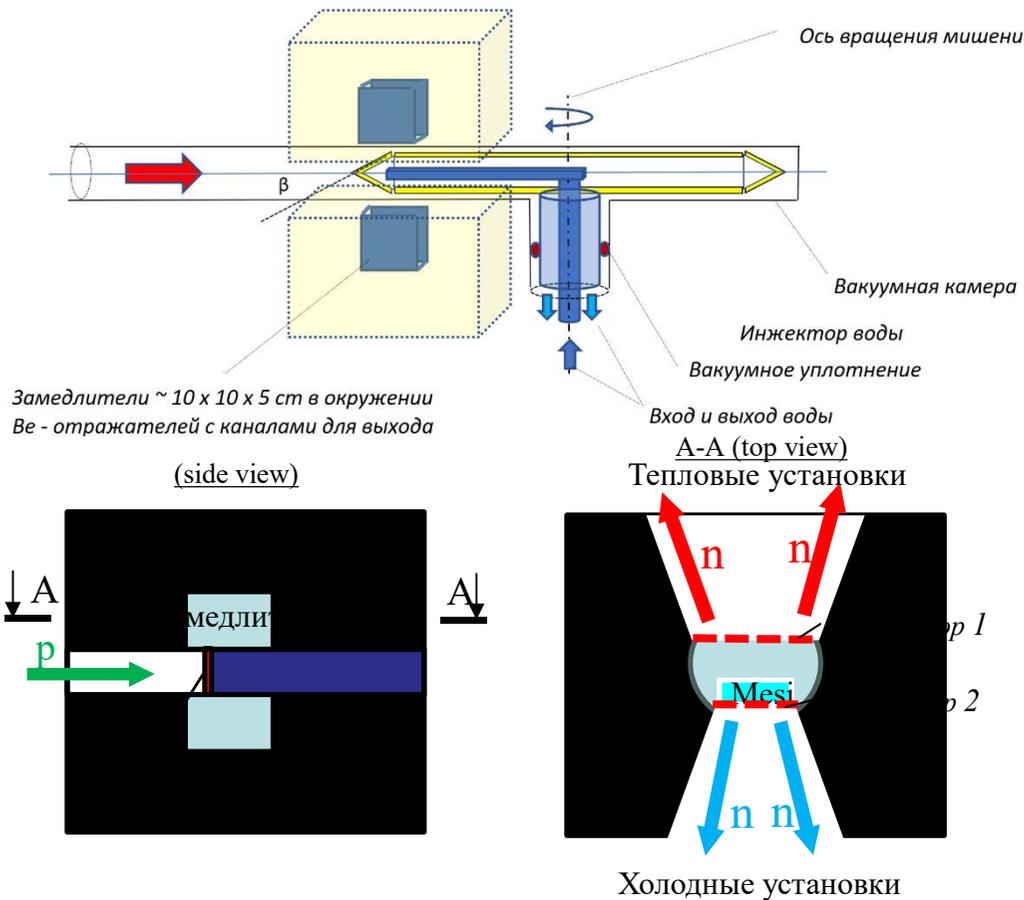
Тепловыделение в Be – **28** кВт

Пиковый поток n с Be – **2e15**

н/с

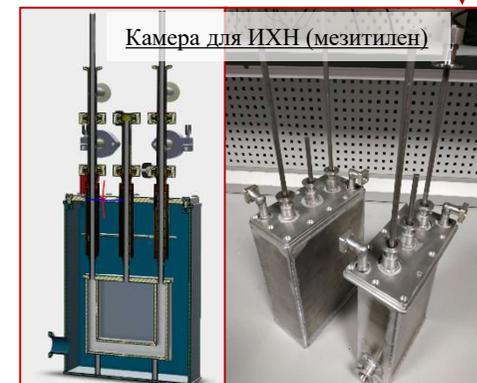
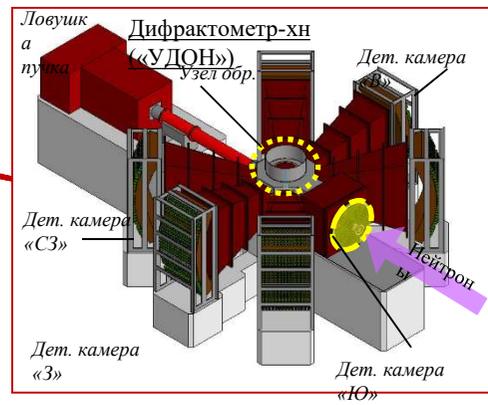
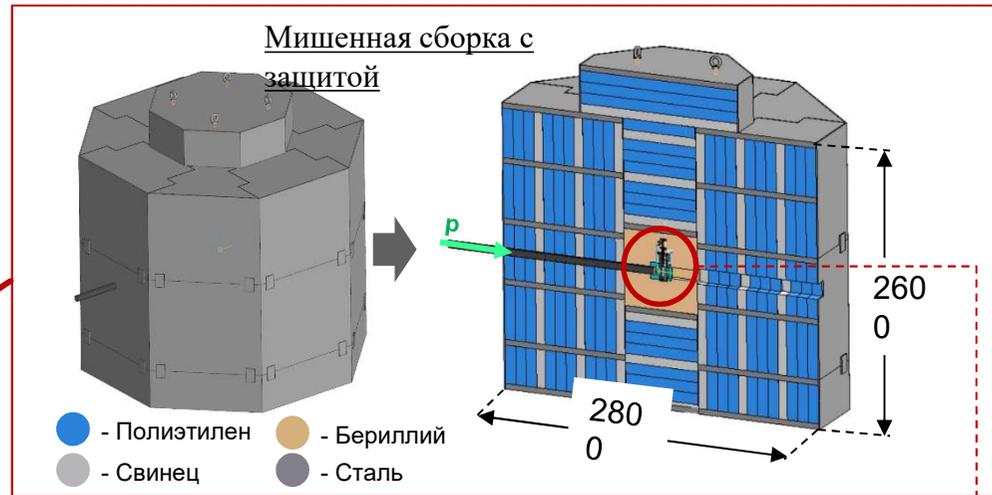
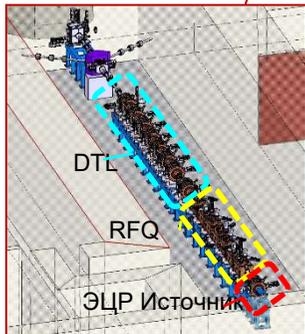
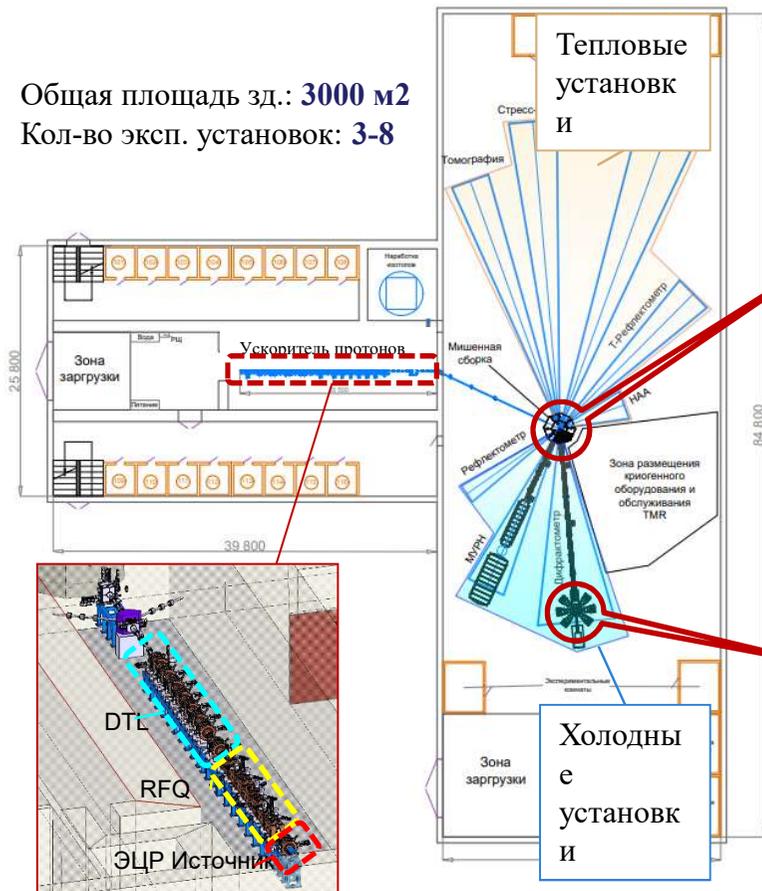


Общая концепция мишенной сборки

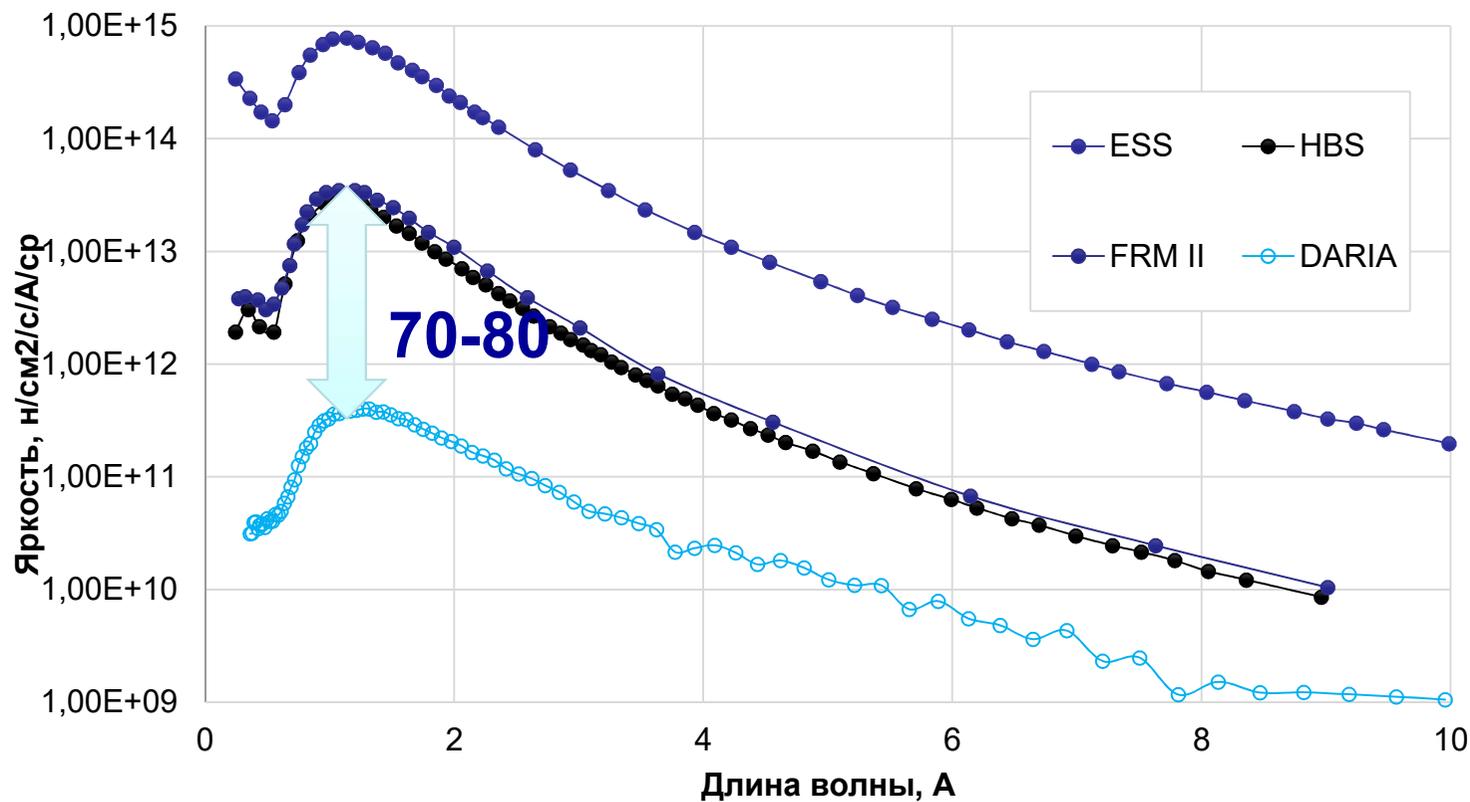


Общий вид размещения КИН

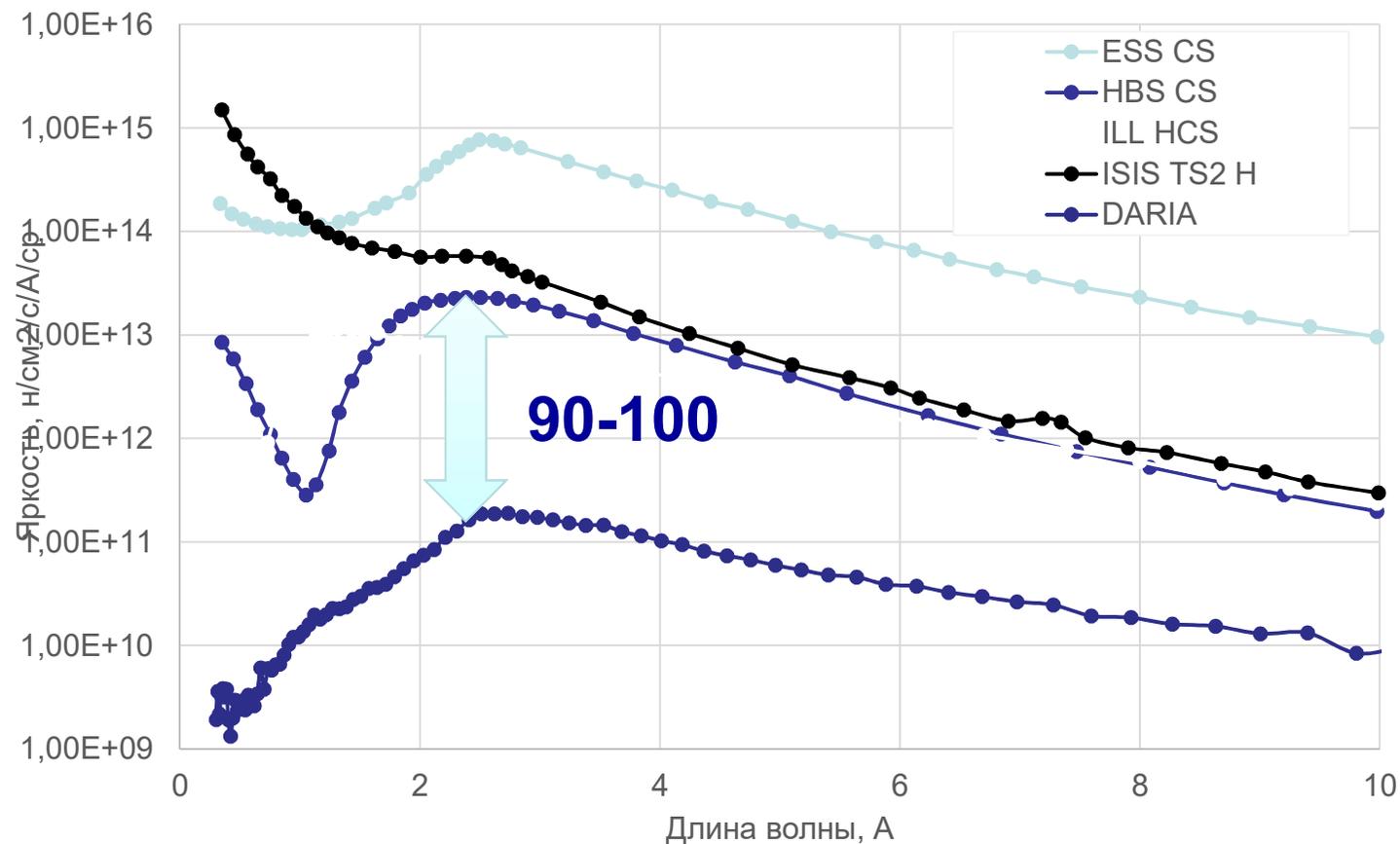
Общая площадь зд.: 3000 м²
Кол-во эксп. установок: 3-8



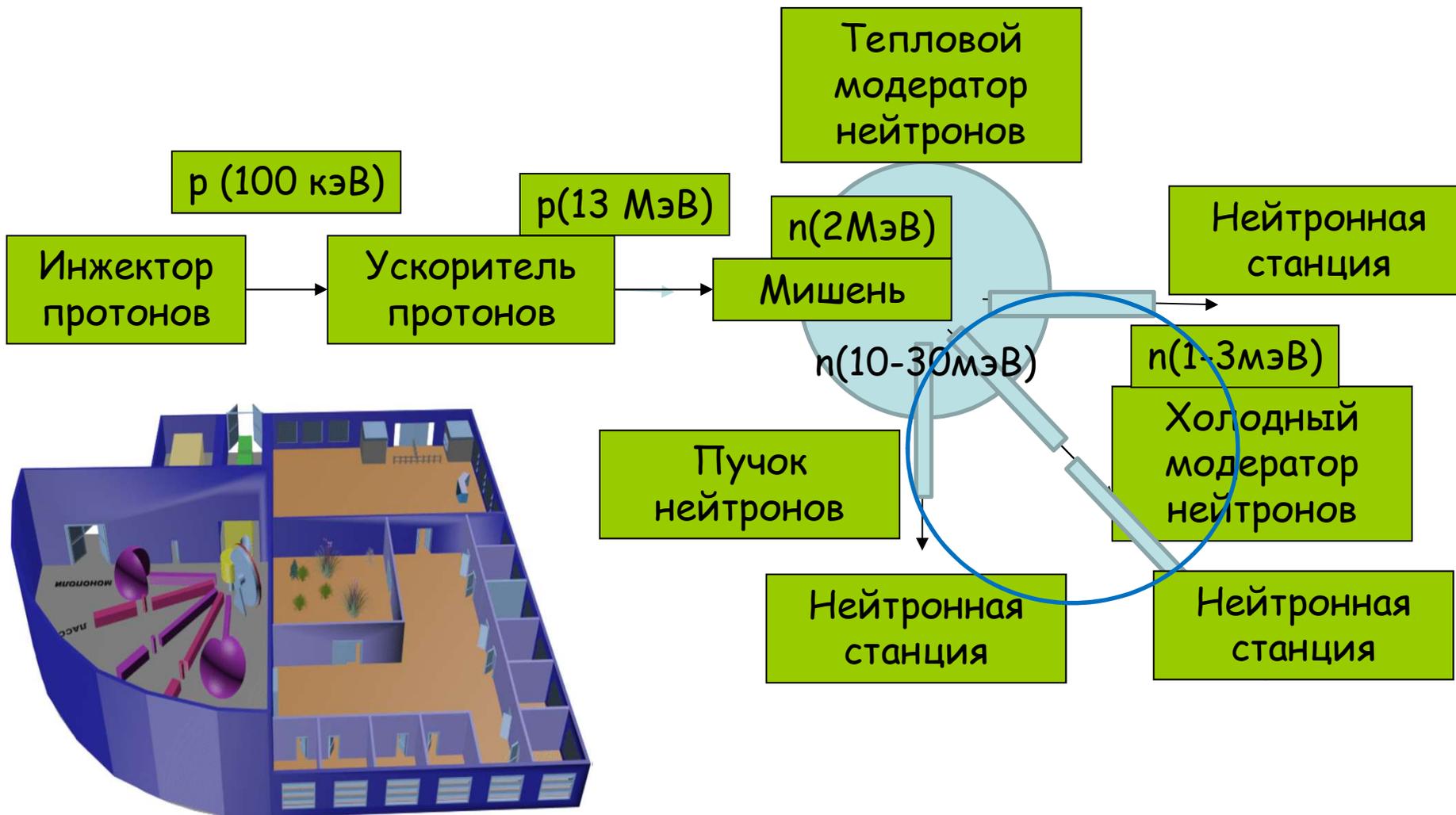
Яркость теплового источника



Яркость холодного источника



Принцип работы компактного источника нейтронов



Проект DARIA: мишенная сборка

Эффективность источника холодных нейтронов в основном определяется свойствами материала, используемого в качестве замедляющего вещества.

Мезитилен лучше водорода термализует нейтроны до заданных энергий и имеет широкий интервал рабочих температур 10–150К. Такие свойства делают источник универсальным и адаптируемым к конкретному эксперименту.

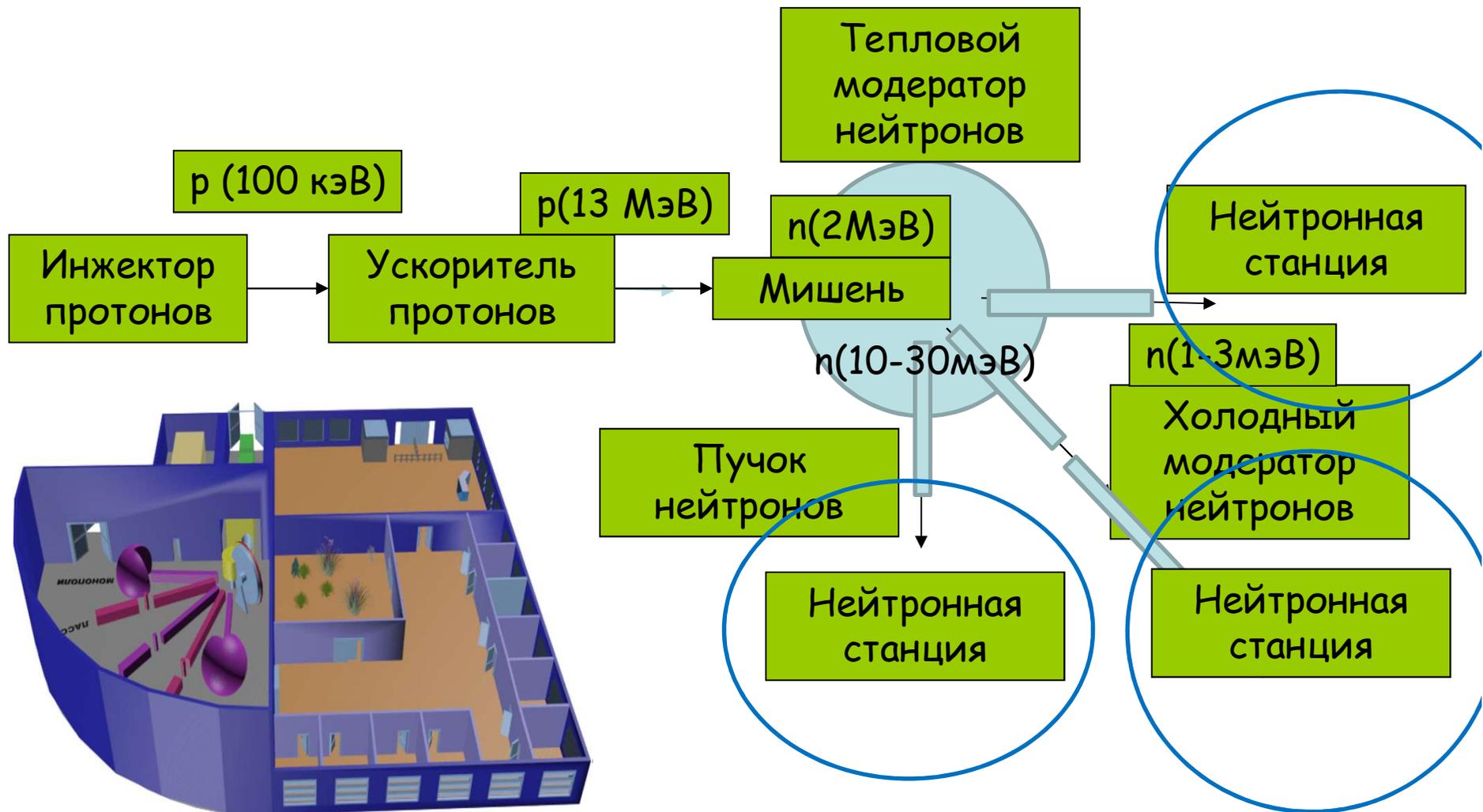


ОИЯИ:

М.В. Булавин,
К.А. Мухин

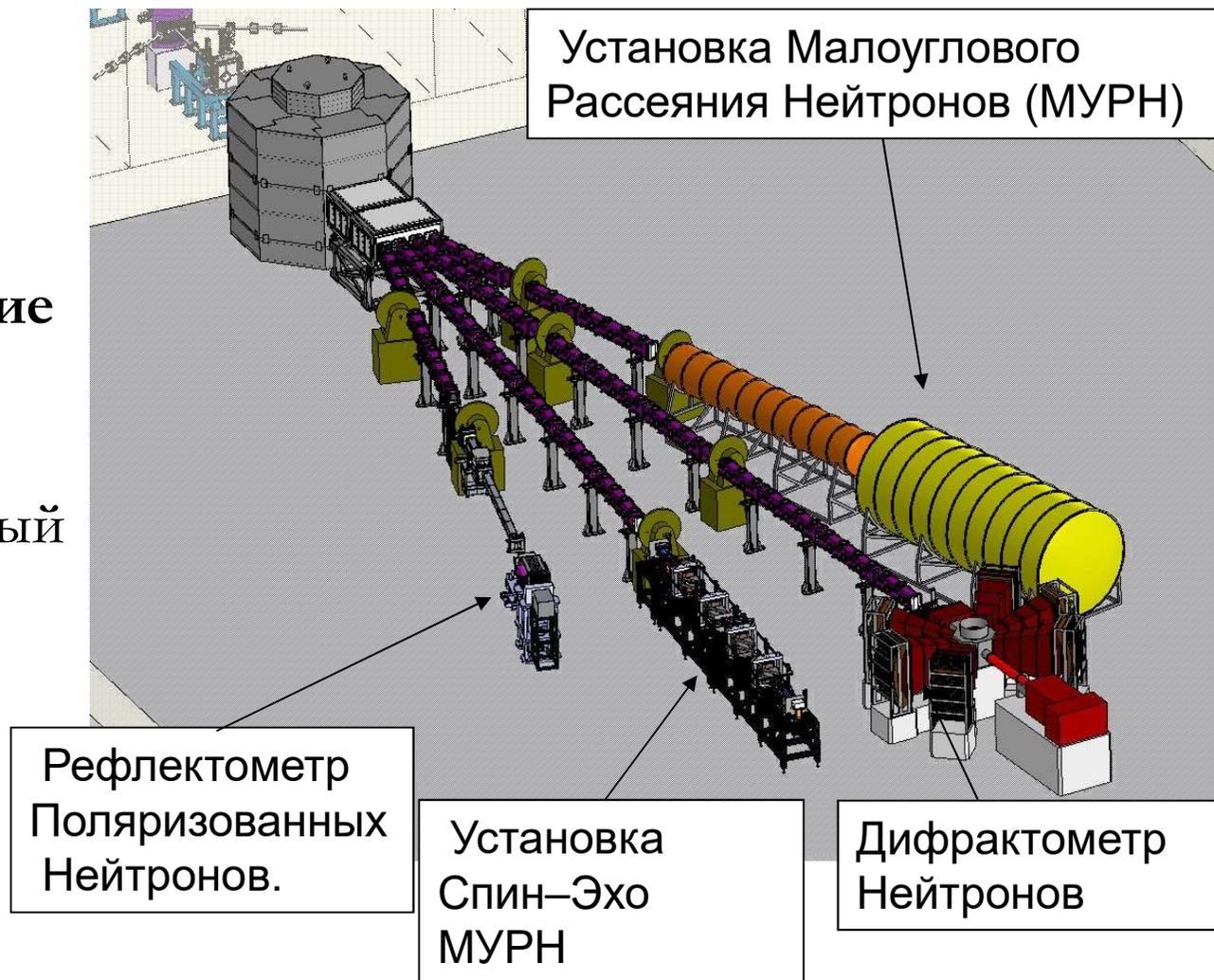
Модель и прототип криогенной камеры для мезитилена.

Принцип работы компактного источника нейтронов

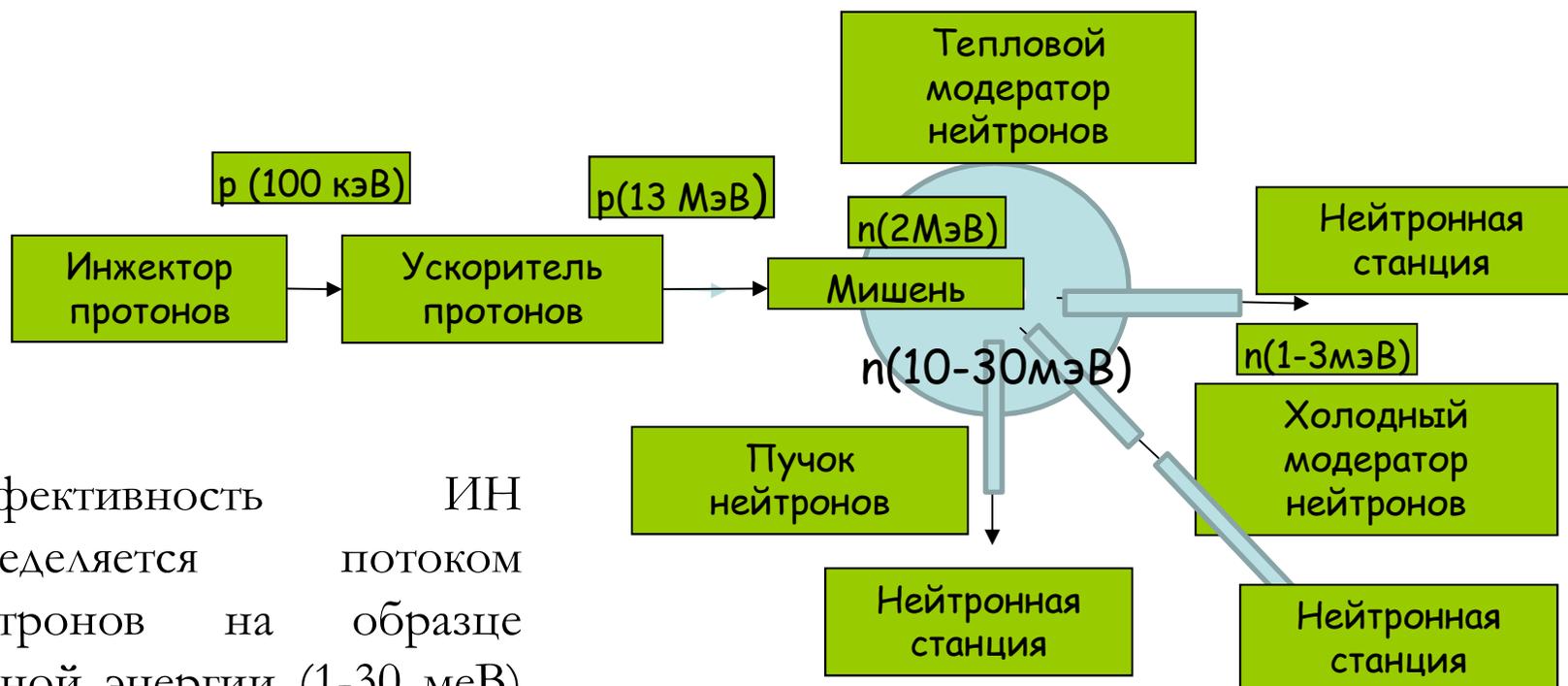


Принцип работы компактного источника нейтронов: методы

дифракция
рефлектометрия
малоугловое рассеяние
Нейтронов - МУРН
Радиотомография
Нейтрон активационный
анализ.



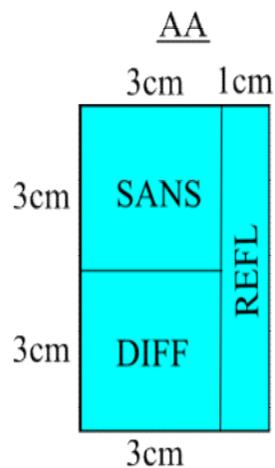
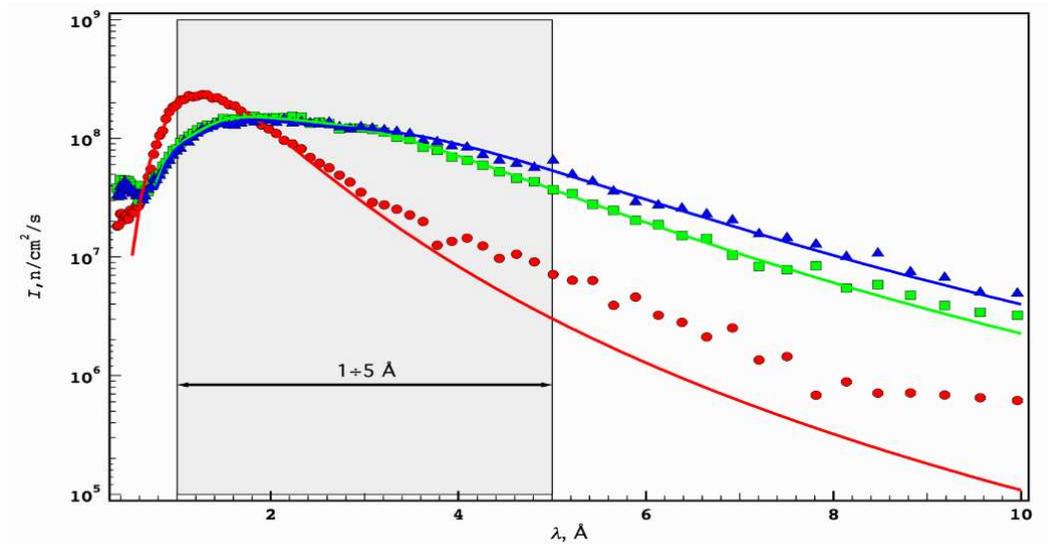
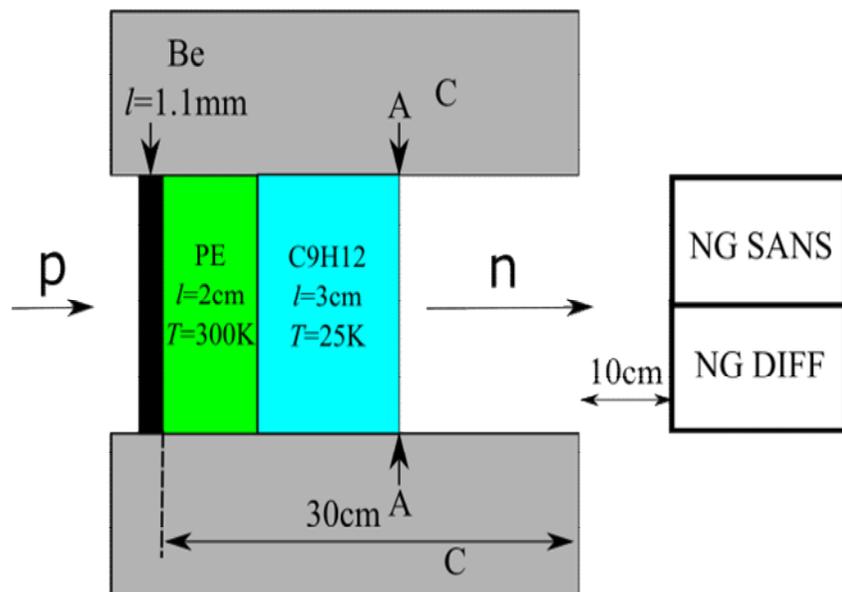
Критерий эффективности компактного источника нейтронов



Эффективность ИИН определяется потоком нейтронов на образце нужной энергии (1-30 меВ) и с приемлимым разрешением по углу (расходимостью пучка) и по энергии (длиной базы L к длительности импульса τ).

При плотности потока на образце 10^7 n/s/cm² время измерения дифрактограммы составляет минуту (зависит от объема образца), 10^6 n/s/cm² – час, 10^5 n/s/cm² – часы, 10^4 n/s/cm² – дни и 10^3 n/s/cm² - становится неприемлимым.

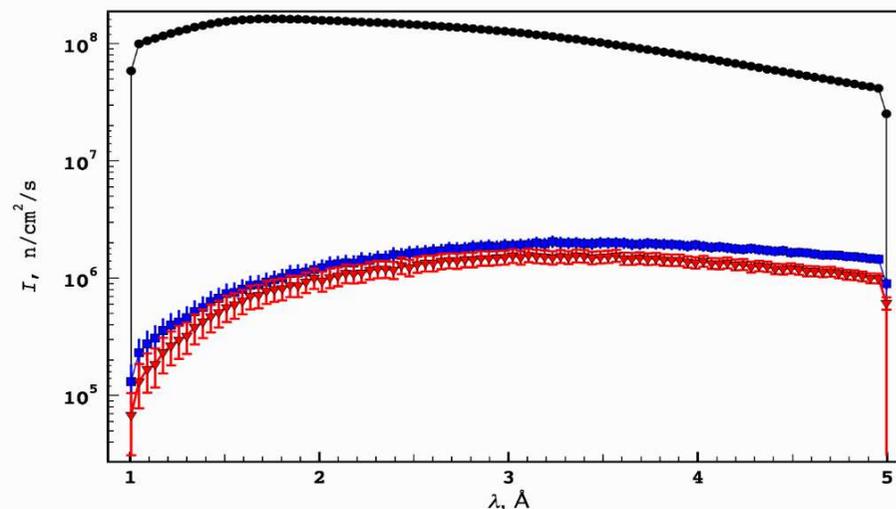
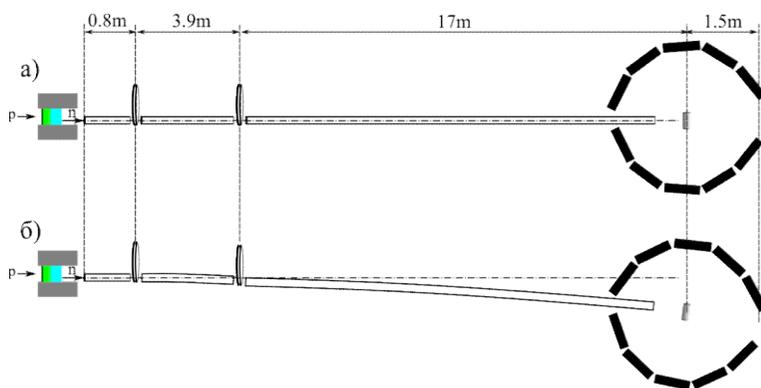
Проект DARIA: холодный ИСТОЧНИК



НИЦ «КИ» -
ПИАФ/СПбГУ:
Н.А. Коваленко,

Порошковый дифрактометр с биспектральным замедлителем.

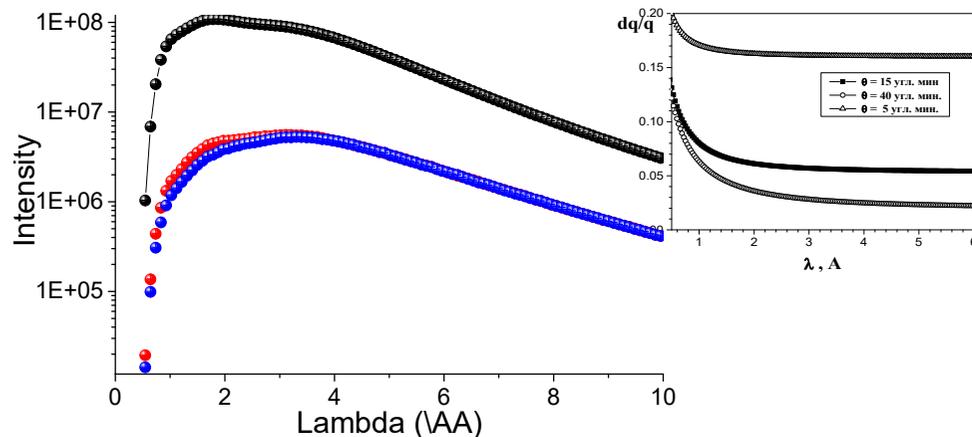
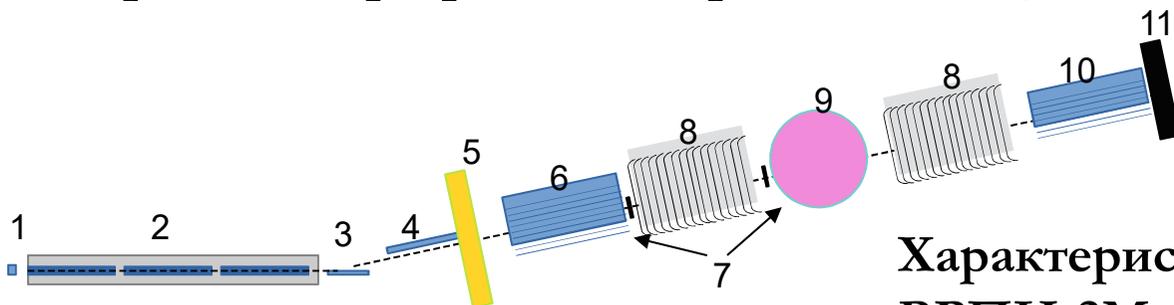
- Диапазон длин волн 1 - 5 Å (широкий диапазон измеряемых d).
- $f = 42$ Гц,
- длина импульса $t = 30$ мкс
- длина пролетной базы 25 м
- Плотность потока нейтронов 8×10^6 n/s/cm²



Сравнение основных параметров нейтронного дифрактометра для КИН DARIA и дифрактометра ДРВ в ОИЯИ

Тип дифрактометра	дифрактометр для КИН DARIA	дифрактометр ДРВ в ОИЯИ
Нейтронород	Суперзеркальный, $m = 2$	Ni, зеркальный
Поперечный размер нейтронорода	20 мм × 50 мм	15 мм × 180 мм
Диапазон рабочих длин волн	1 – 5 Å	1 - 18 Å
Диапазон углов рассеяния	10 - 170°	1 - 170°
Диапазон межплоскостных расстояний	0.5 ÷ 29 Å	0.6 - 300 Å
Относительное разрешение по переданному импульсу $\Delta q/q$	0.5 %	(1 – 10) %
Поток нейтронов на образце	$8 \cdot 10^6 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$	$\sim 10^7 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$
Расстояние замедлитель - образец	22.50 м	23.75 м
Расстояние образец - детектор	1.50 м	0.15 - 2.00 м, изменяемое

В качестве прототипа для двухмодового времяпролетного Рефлектометра Поляризованных Нейтронов ВРПН-2М рассматривается рефлектометр РПН-4М (Гатчина).



Характеристики рефлектометра ВРПН-2М

Геометрия: коллимация - образец-детектор (8 м)

полоса длин волн 1 - 7 Å

Поляризация не менее 0.96

Поток $10^6 - 10^7$ n/s/cm²

$f = 40$ Гц, $\tau = 100$ мкс

Диапазон q -range 0.01 - 0.5 Å⁻¹

разрешение $\Delta q/q$: 2-10 %

Сравнение основных параметров нейтронного рефлектометра для КИИ DARIA и рефлектометра РЕФЛЕКС в ОИЯИ

Тип рефлектометра	рефлектометр для КИИ DARIA	рефлектометр РЕФЛЕКС в ОИЯИ
длина пролетной базы	8 м	43 м
Система формирования пучка	Нейтронород (m=2), длина 1.5 м, сечение 10×50 мм ²	нейтронород (m=1.2), длина 27 м, сечение 10×80 мм ²
Диапазон рабочих длин волн	1 – 7 Å	1.4 – 10 Å
Максимальный доступный диапазон по переданному импульсу q	(0.001 – 0.5) Å ⁻¹	(0.001– 0.13) Å ⁻¹
Относительное разрешение по переданному импульсу Δq/q	(2 – 10) %	(3 – 10) %
Поток нейтронов на образце	10 ⁵ с ⁻¹ см ⁻²	10 ⁵ с ⁻¹ см ⁻²
Детекторы	Двухкоординатный ³ He ПЧД ;	Двухкоординатный ³ He ПЧД

Характеристики:

Геометрия: коллимация - образец- детектор (5 м +5 м)

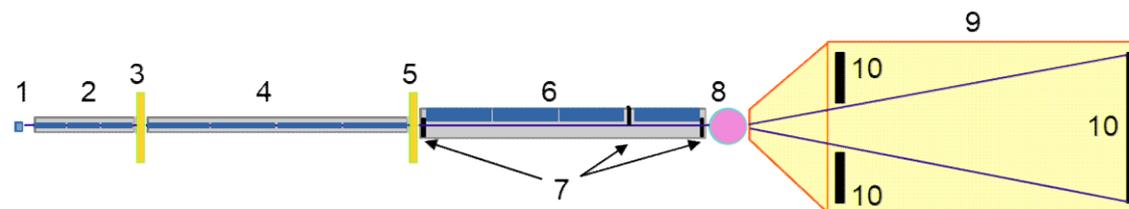
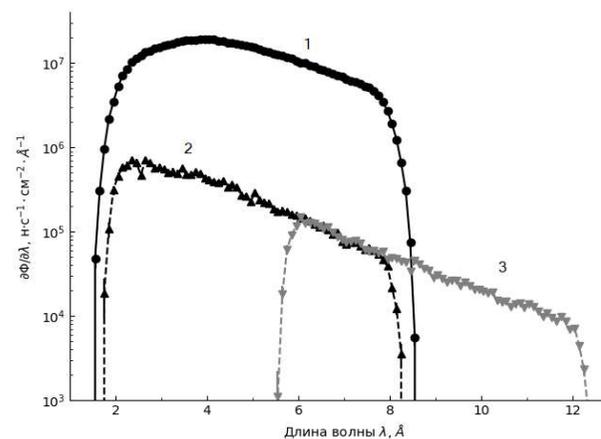
Para-H₂ модератор, полоса длин волн 2 - 8 Å + 6 -12Å

Система из 2 прерывателей

Поток $10^5 - 10^6$ n/s/cm²

$f = 40$ Гц, $t = 400$ мкс

Диапазон q-range 0.005 - 0.5 Å⁻¹

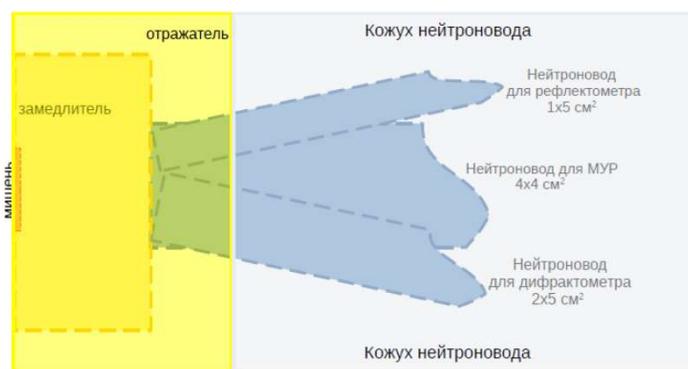


Сравнение основных параметров установки МУРН для КИН DARIA и установки МУРН ЮМО в ОИЯИ

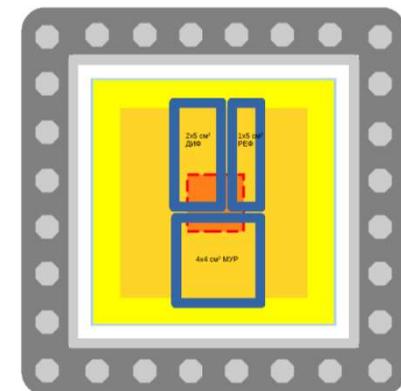
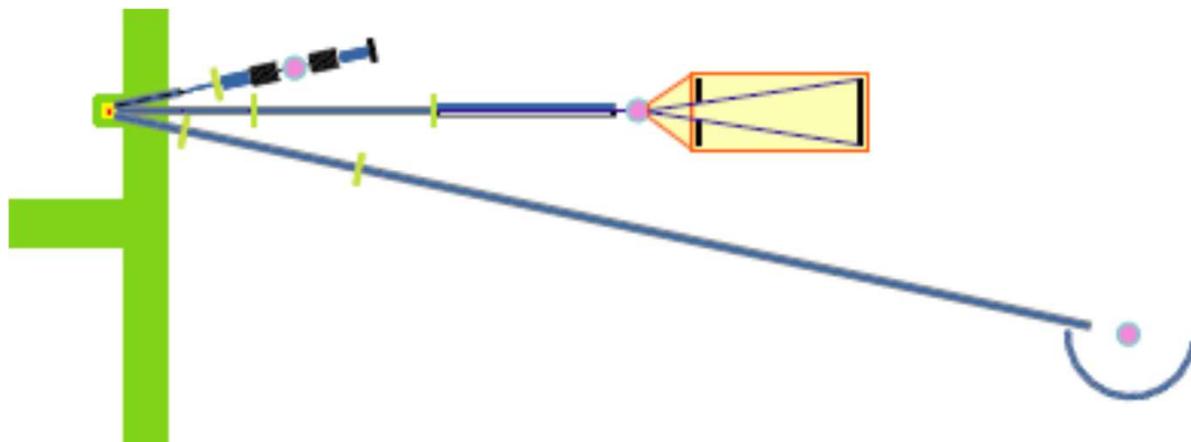
Тип установки МУРН	МУРН для КИН DARIA	МУРН ЮМО в ОИЯИ
длина пролетной базы	18 м	43 м
Система формирования пучка	нейтроновод ($m=2$) сечение $40 \times 40 \text{ мм}^2$	нейтроновод ($m=1.2$), сечение $30 \times 30 \text{ мм}^2$
Диапазон рабочих длин волн	$2 - 8 \text{ \AA}$ и $6 - 12 \text{ \AA}$	$0.5 - 8 \text{ \AA}$
диапазон по q	$(0.005 - 0.5) \text{ \AA}^{-1}$	$(0.007 - 0.7) \text{ \AA}^{-1}$
разрешение $\Delta q/q$	$(5 - 10) \%$	$(5 - 15) \%$
Расстояние образец-детектор	$(1 - 5) \text{ м}$	$(2 - 10) \text{ м}$
Поток нейтронов на образце	$3 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1} \text{ см}^{-2}$ для $(5+5)$ метров;	$10^7 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{ см}^{-2}$
Детекторы	^3He ПЧД $500 \times 500 \text{ мм}^2$; ^3He ПЧД $600 \times 600 \text{ мм}^2$;	2 ПЧД ^3He

Проект DARIA: сравнение с ИБР2.

Ключ к пониманию - геометрия КИН DARIA

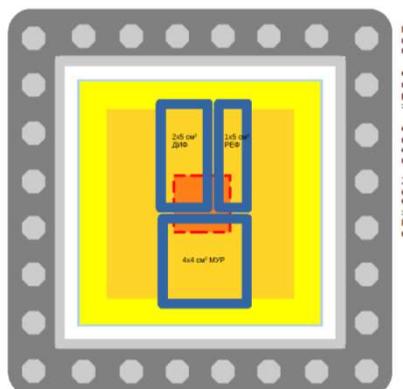
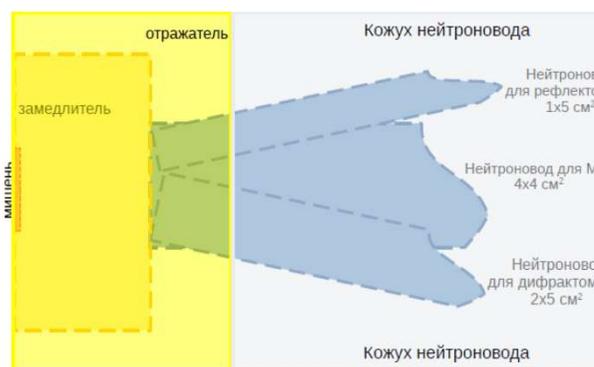


Тип установки	КИН DARIA	ИБР2
Имп. поток в модераторе	$8 \times 10^{11} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-1}$	$8 \times 10^{14} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$
Средний поток нейтронов на входе в канал	$10^9 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$	$10^9 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$



Эффективность производства и доставки нейтронов теплового и холодного спектра к образцу

Сравнение основных параметров для КИН DARIA и ИБР2



Тип установки	КИН DARIA	ИБР2
поток в модераторе в импульсе	$8 \times 10^{11} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-1}$	$8 \times 10^{14} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$
Частота и длительность импульса	$f = 40 \text{ Гц}$ и $\tau = 300 \text{ мкс}$	$f = 5 \text{ Гц}$ и $\tau = 320 \text{ мкс}$
средний поток Φ нейтронов на поверхности модератора	$1.6 \times 10^{11} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-1}$	$1.3 \times 10^{13} \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$
Расстояние до фланца канала или нейтроновода	0.1 м	4-6 м (воздух)
Сечение канала	10 см^2	100 см^2
Средний поток в канале	$\Phi \cdot 10^{-2} \text{ н}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$	$\Phi \cdot 10^{-4} \text{ н}/(\text{с} \cdot \text{см}^2)$
Поток нейтронов на входе в канал	$10^9 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$	$10^9 \text{ н} \cdot \text{с}^{-1} \text{см}^{-2}$

Заключение

- Представлены концепции, принципиальные схемы и параметры (1) порошкового дифрактометра, (2) рефлектометра поляризованных нейтронов и (3) установки МУРН. Экспериментальные установки, оптимизированы по диапазону переданных импульсов, инструментальному разрешению, а так же по частоте повторения и длительности нейтронных импульсов.
- Показано, что компактные источники нейтронов на 3 порядка выигрывают своих гораздо более мощных «собратьев» по эффективности производства и доставки нейтронов теплового и холодного спектра к образцу.
- Как показывает численное моделирование, расчетный поток нейтронов Φ в позиции образца на компактном источнике нейтронов не уступает по своим значениям потокам нейтронов Φ на импульсных источниках, типа ИБР-2 в ОИЯИ.

Проект DARIA: заключение.

Проект DARIA призван переформатировать нейтронный ландшафт Российской Федерации

- Создание сети нейтронных источников
- Развитие нейтронных методик
- Коммерциализация нейтронного рассеяния
- Проектирование следующего флагманского источника на основе протонного ускорителя.





Консорциум проекта DARIA

НИЦ «КИ» - ПИЯФ /СПбГУ: К.А. Павлов, Н.А. Коваленко, П.И. Коник, Е.В. Москвин, Н.А.

Григорьева, В.В. Воронин, С.В. Григорьев

НИЦ «КИ» - ИТЭФ: Г.Н. Кропачев, А.Л. Ситников, Т.В. Кулевой

ИПФ РАН: В.А. Скалыга, И.В. Изотов, С.С. Выбин, А.Ф. Боханов,

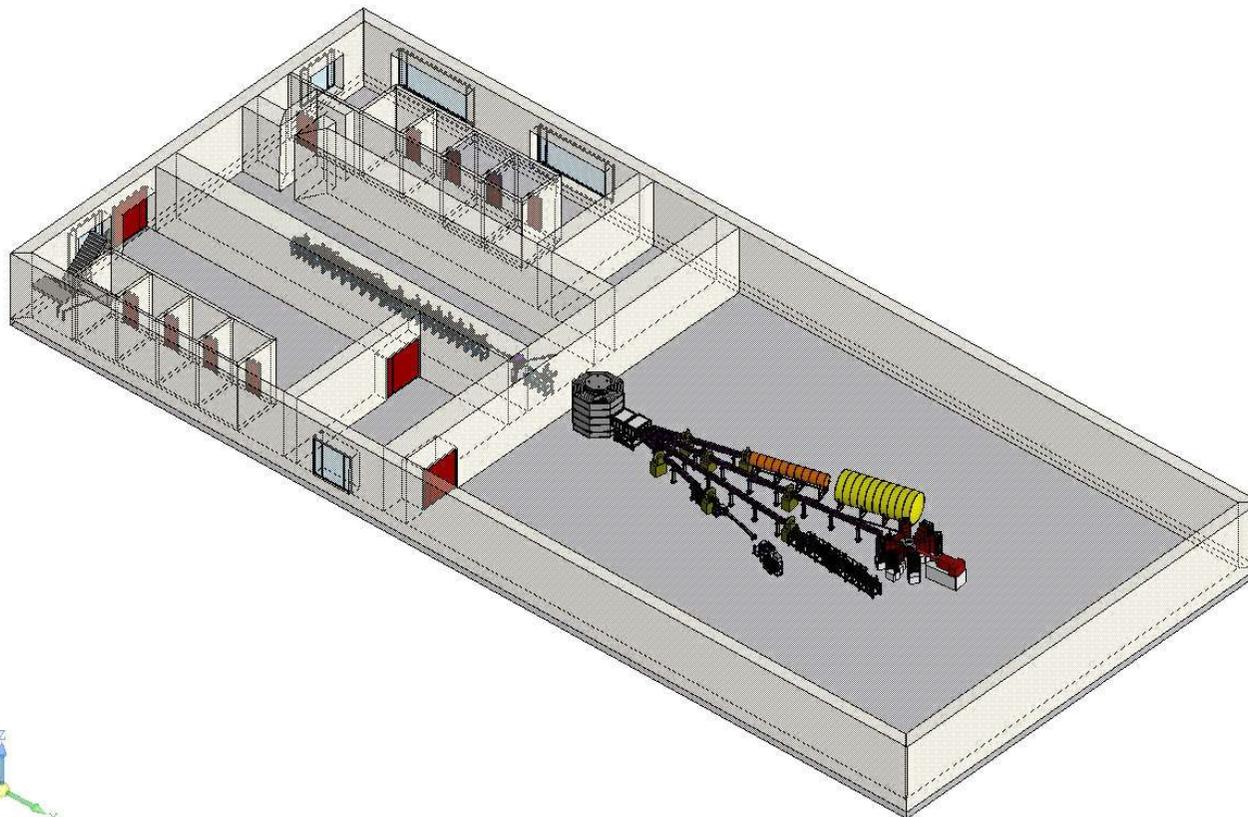
ОИЯИ: М.В. Булавин, К.А. Мухин, А.А. Рогов

БФУ им. И. Канта: А.Гойхман, Д. Серебренников, А. Синицин, Е.С. Клементьев, Р. Прокопович

ИФМ УрО РАН: Е.А. Кравцов



Спасибо за внимание!



Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках Соглашения № 075-15-2022-830 от 27 мая 2022 г.
(продолжение Соглашения №.075-15-2021-1358 от 12 октября 2021г).