

# КОМПАКТНЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ

*Тимур Кулевой*



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



# Линейные ионные ускорители в режиме малой скважности вплоть до непрерывного

*Тимур Кулевой*



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ





# Импульсный или непрерывный

## Динамику пучка:

- $E_k(\text{pulse}) > E_k(\text{cw}), E_k(\text{cw}) \leq 1.4$
- Аксептанс/эмиттанс(имп) < Аксептанс/эмиттанс(непр.)
- Частота(имп) > Частота (непр.)
- Проводка  $_{(вх/вых)}$  (имп) => 95-98% vs Проводка  $_{(вх/вых)}$  (непр) => 100%
- Эффективность  $_{(вх/вых)}$  (имп) => 95 vs Эффективность  $_{(вх/вых)}$  (непр) => 100%
- Согласование (имп) – 4D vs Согласование (непр) – 6D

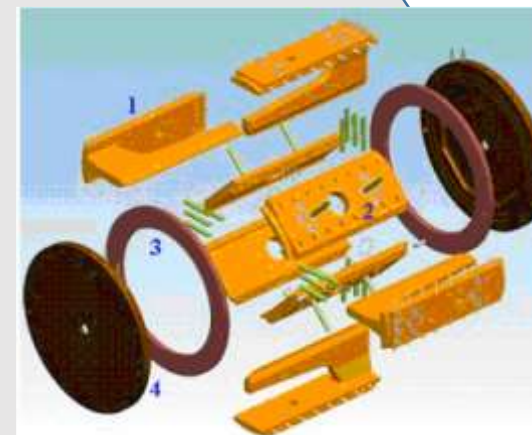
# Pulse vs CW



## Конструкция:

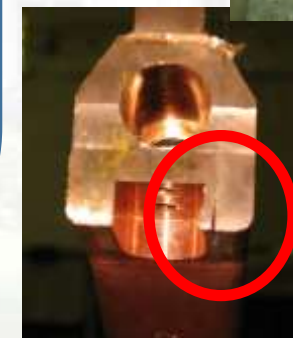
### ➤ **Материал резонатора**

- **Имп.** – нержавеейка покрытая медью
- **Непр** – бескислородная медь
- **Биметалл?**



### ➤ **Охлаждение**

- **Имп.** – не всегда
- **Непр.** – всегда и резонатор и электроды



# Компактный источник нейтронов DARIA

(Dedicated for Academic and Industrial Applications)

Установка  
Малоуглового  
Рассеяния

Холодный рефлектометр

Холодный дифрактометр

Нейтронно-  
активационный  
анализ

Тепловой рефлектометр  
предназначен для исследования  
интерфейсов, поверхностей, тонких  
пленок.

Мишенная  
сборка

Станция для работы с  
протонным пучком

Установка томографии  
область применения станции для  
томографических и радиографических  
исследований

Стресс-дифрактометр

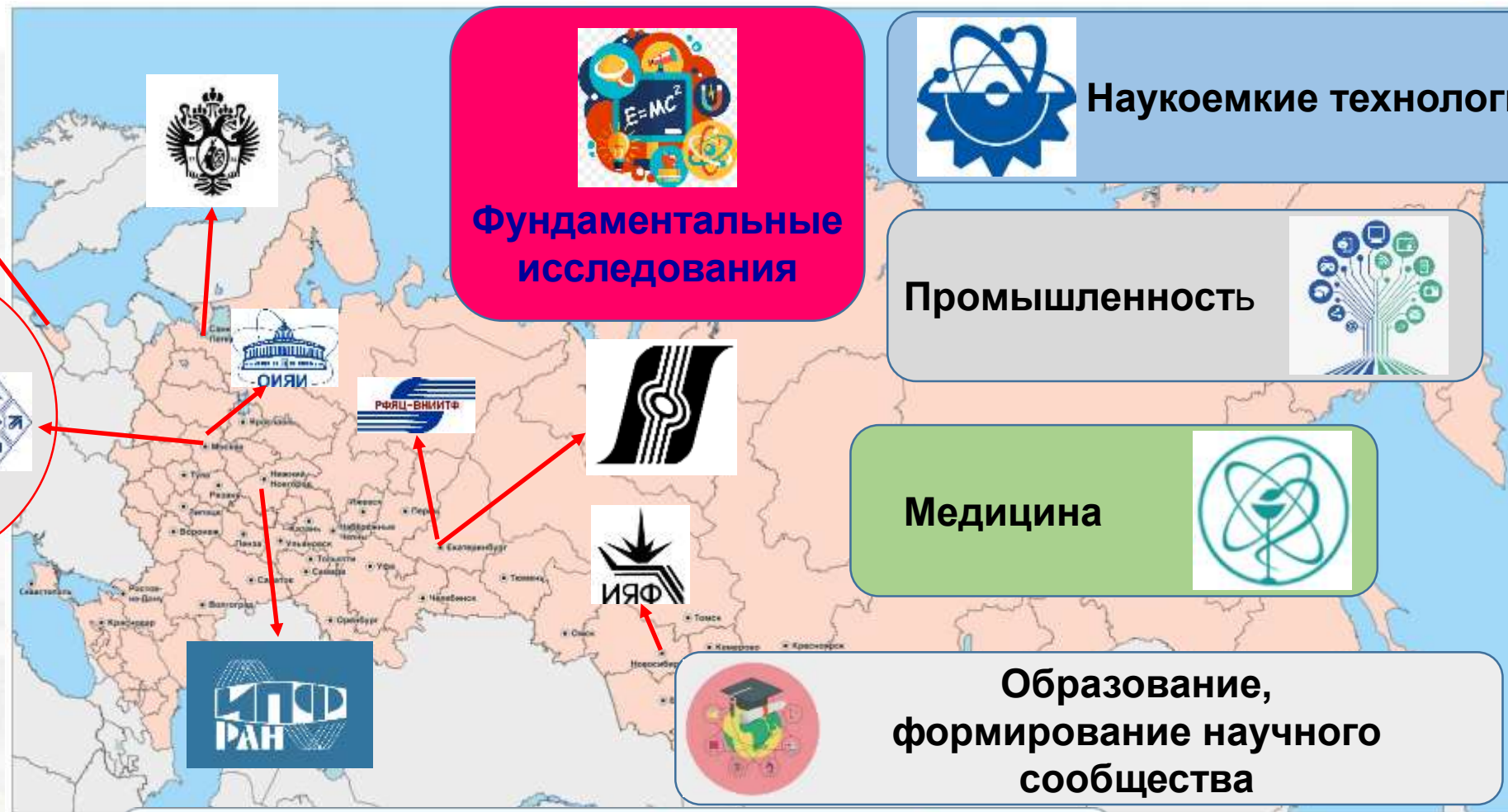
Установка Малоуглового Рассеяния Нейтронов  
(МУРН) предназначена для исследования  
наноструктур и нанобъектов.

H<sup>+</sup>  
13 (30) МэВ  
100 мА  
100 мс  
100 имп/с  
~10<sup>14</sup> н/с



# Создание компактных источников нейтронов и фотонов для

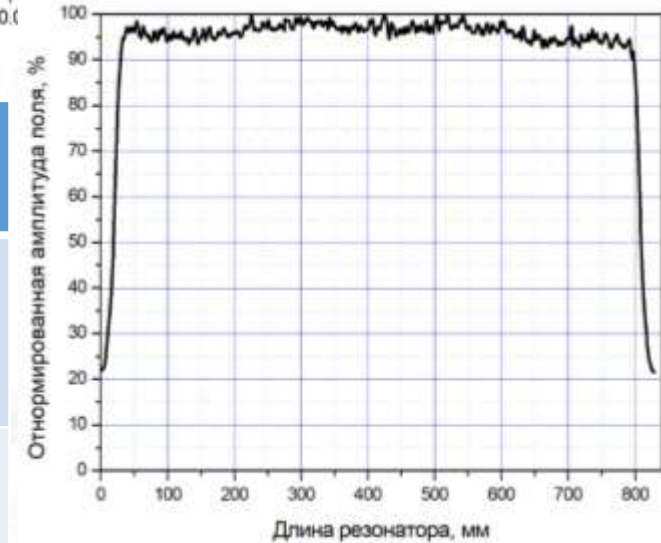
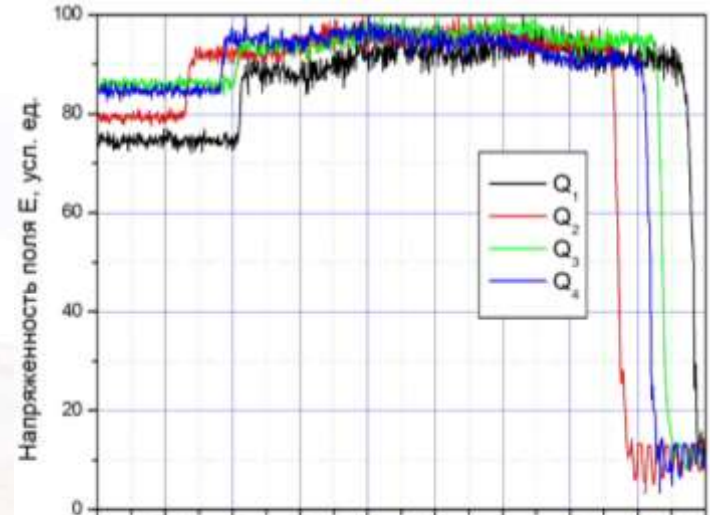
научных и образовательных центров Российской Федерации позволит создать исследовательскую инфраструктуру, охватывающую всю территорию страны от Калининградской области до Дальнего Востока.



# RFQ для работы в режиме малой скважности вплоть до непрерывного

(НИЦ КИ+ВНИИТФ+ИЯФ СО РАН)

**впервые в стране**

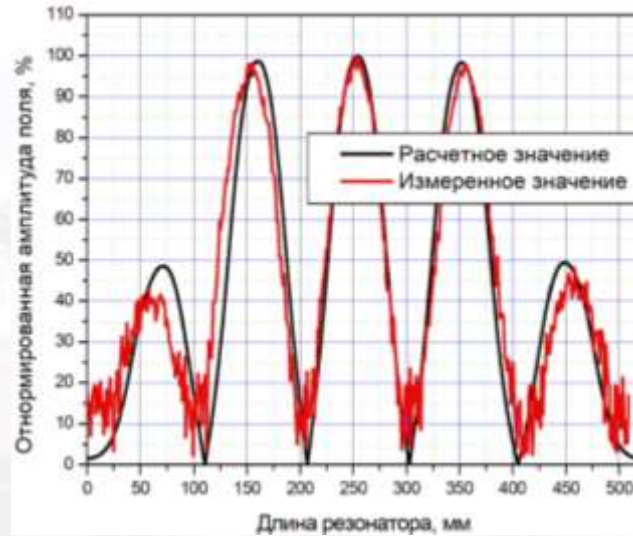


Параметр	Расчетная величина	Измеренная величина
Собственная резонансная частота, МГц	167.4	168.7
Собственная добротность	7500	6300

# DTL для работы в режиме малой скважности вплоть до непрерывного

(НИЦ КИ+ВНИИТФ+ИЯФ СО РАН)

**впервые в стране**

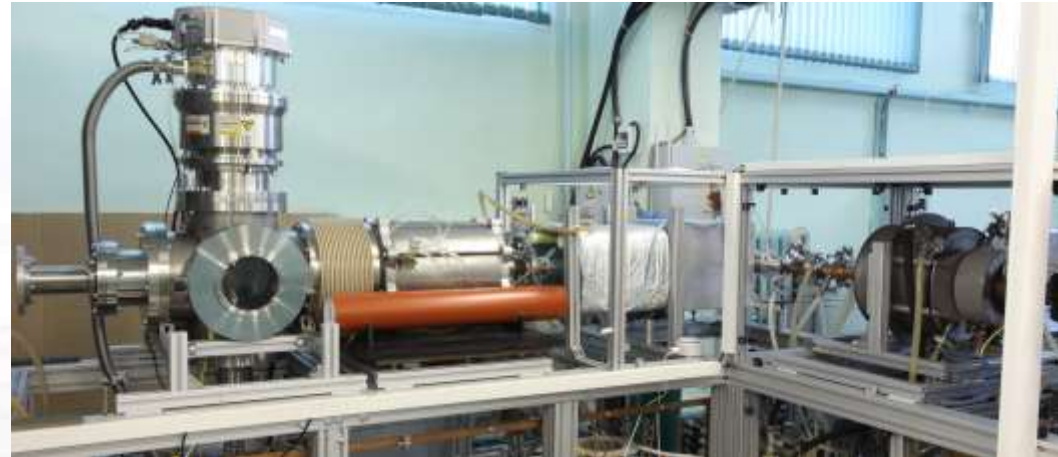


Параметр	Расчетная величина	Измеренная величина
Собственная резонансная частота, МГц	162.0	161.7
Собственная добротность	12000	11400



# Ионный источник GISMO (ИПФ РАН)

GISMO (Gasdynamic Ion Source for Multipurpose Operation) —  
газодинамический ЭЦР ионный источник.



1. ЭЦР нагрев СВЧ излучением гиротрона (28ГГц/10кВт).
2. Удержание в пробкотроне на постоянных магнитах ( $B_{\min}/B_{\max}=0.25\text{Тл}/1.5\text{Тл}$ )
3. Рекордно высокий удельный энерговыход 250 Вт/см<sup>3</sup>
4. Непрерывное извлечение ионного пучка оригинальной системой экстракции с неоднородным полем.

## *Результаты настройки импульсного режима работы источника*

- Ток пучка превышает 120 мА
- Содержание протонов в пучке превышает 99%
- Получены режимы работы, в которых среднеквадратичный нормализованный эмиттанс пучка не превышает 0.5 π мм мрад



**В Российской Федерации под руководством НИЦ «Курчатовский институт» освоены технологии создания нормально проводящих ускорителей ионов для работы в режиме малой скважности вплоть до непрерывного, что позволяет наладить выпуск серийного компактного источника нейтронов, способного заменить исследовательские реакторы малой и средней мощности, тем самым создав исследовательскую инфраструктуру, охватывающую всю территорию страны от Калининградской области до Дальнего Востока**



# Критерий эффективности компактного источника нейтронов

При плотности потока на образце

- $10^7$  n/s/cm<sup>2</sup> – минуты (проект DARIA 70 МэВ)
- $10^6$  n/s/cm<sup>2</sup> – час (проект DARIA 30 MeV)
- $10^5$  n/s/cm<sup>2</sup> – часы (проект DARIA 13 MeV)
- $10^4$  n/s/cm<sup>2</sup> – дни
- $10^3$  n/s/cm<sup>2</sup> – становится неприемлемым

# 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;
- определить положение атомов с точностью от  $10^{-13}$  см

4. Нейтроны имеют **спин**, и, соответственно, **магнитный момент**.

Это позволяет:

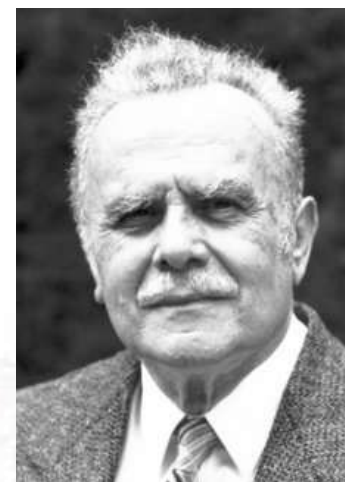
- формировать пучки поляризованных нейтронов;
- изучать когерентное и некогерентное магнитное рассеяние.

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.”*

*- Bertram N. Brockhouse*

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

# Spallation Source

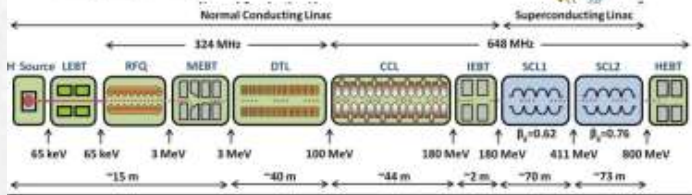
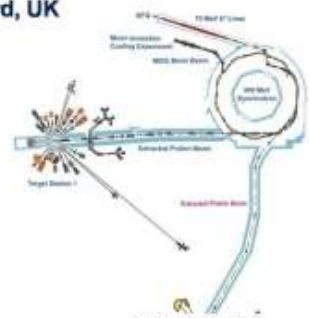


J-PARC

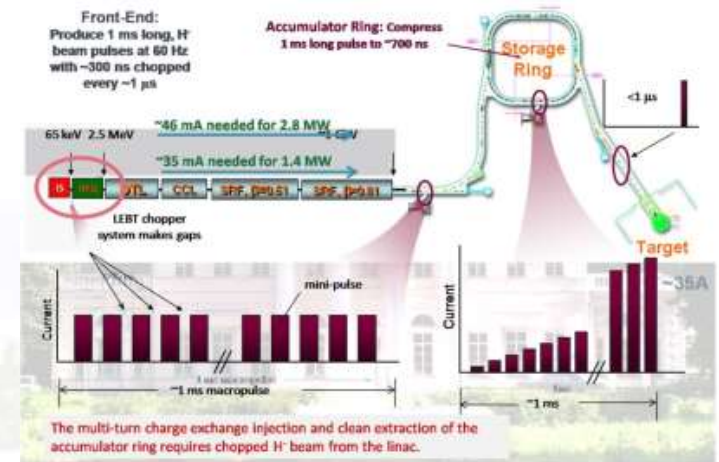
Japan Proton Accelerator Research Complex

ISIS, Oxford, UK

- Neutron and Muon source used for condensed matter research by 3000 users.
- H<sup>+</sup> ion source (55 mA)
- 665 keV RFQ (35 mA)
- 70 MeV linac (26 mA)
- 800 MeV 50 Hz, RCS (2.8x10<sup>13</sup> ppp)
- Target 1 + Muon target (140 kW)
- Target 2 (36 kW)

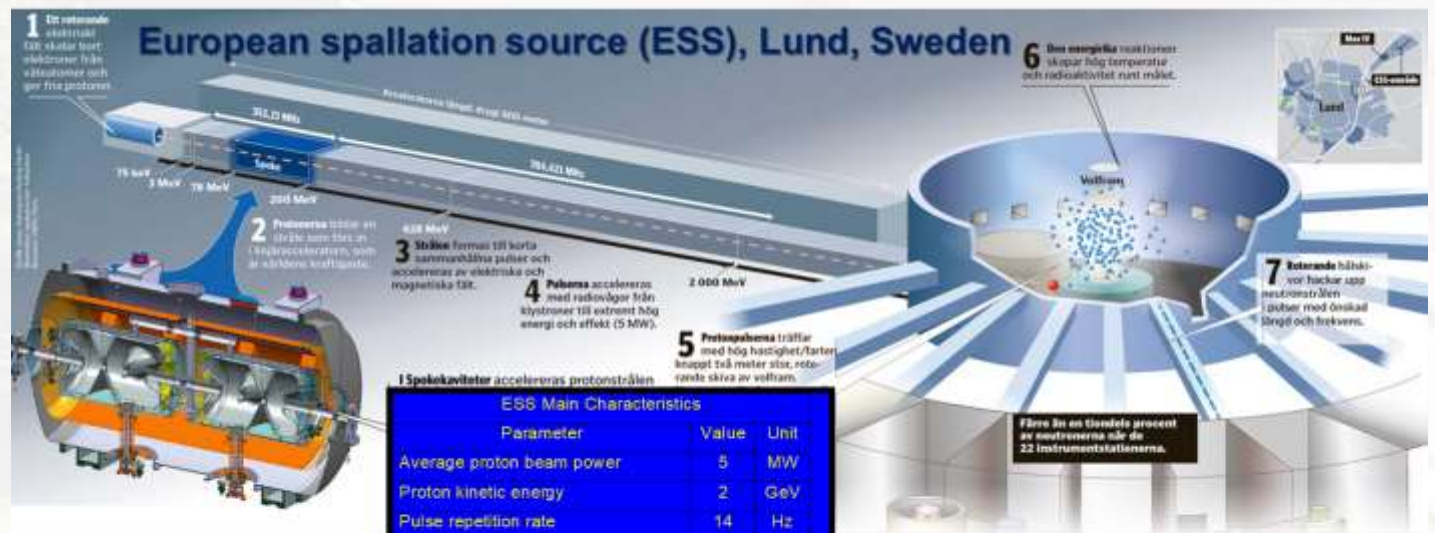


## The SNS accelerator system overview



Joint Project between KEK and JAEA

## European spallation source (ESS), Lund, Sweden

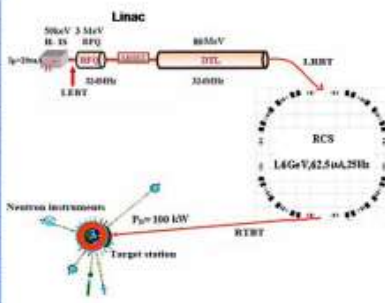


ESS Main Characteristics		
Parameter	Value	Unit
Average proton beam power	5	MW
Proton kinetic energy	2	GeV
Pulse repetition rate	14	Hz
Pulse length	2.86	ms
Average current during pulse	65	mA
Number of moderators	2	
Number of neutron beam ports	42	

## Project Design

- The phase-I CSNS facility consists of an 80-MeV H<sup>+</sup> linac, a 1.6-GeV rapid cycling synchrotron(RCS), beam transport lines, a target station, and 3 instruments.

Project Phase	I	II
Beam Power on target [kW]	100	500
Proton energy [GeV]	1.6	1.6
Average beam current [μA]	62.5	312.5
Pulse repetition rate [Hz]	25	25
Linac energy [MeV]	80	300
Linac type	DTL	+Spoke/PIMS
Linac RF frequency [MHz]	324	324
Macropulse ave current [mA]	15	40
Macropulse duty factor	1.0	1.7
RCS circumference [m]	228	228
RCS harmonic number	2	2
RCS Acceptance [mm-mrad]	540	540
Target	1	1
Spectrometers	3	20



The first high-energy high-intensity proton accelerator in China

# Сила самого сильного иссякает, если ежедневно не подпитывается слабыми

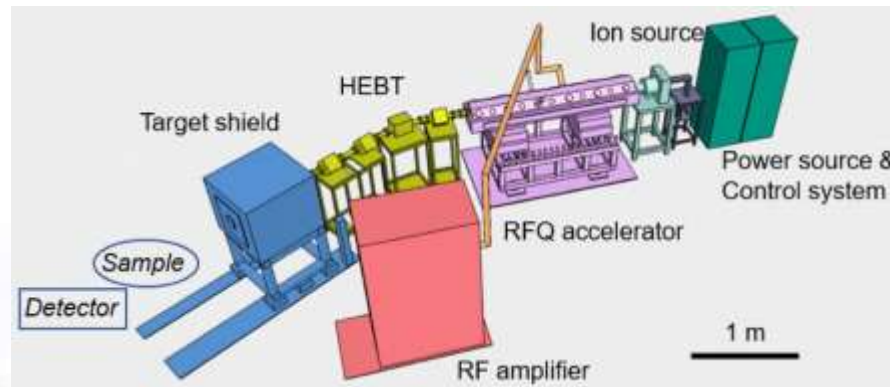


The Official Web Page of  
Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources  
(UCANS)

UCANS  
Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources

The Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources (UCANS) was formed in 2010 to support the ongoing development of small accelerator-driven neutron sources around the world, and to promote the exchange of information on emerging science and novel applications relevant to long-pulsed and/or medium-flux neutron sources.

Accelerator-driven Neutron Sources for Science (this map is under construction)



## RANS (RIKEN Accelerator-driven compact neutron sources)

2011 start  
2012 construction  
2013 Jan - Neutron production - 2013 April - open to collaborators  
2017 Up-grade, moderators, proton beam monitors  
2018 RANS-II shielding shelter construction

### 1. Daily use

Be (p,n) reaction: Be (Dr. Y. Yamagata)

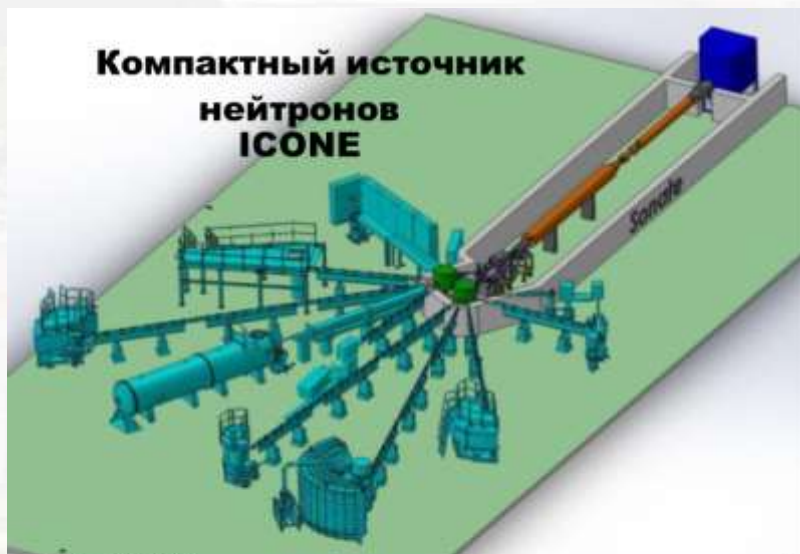
- Neutron flux  $\sim 10^{12}/\text{sec}$  (proton 7 MeV, 100  $\mu\text{A}$ )
- 7 MeV **700W**
- 100  $\mu\text{A}$  maximum averaged current
- 10-180  $\mu\text{s}$  pulse width
- 20-180 Hz repetition rate

Choose them under the condition 1.3 % duty, 100  $\mu\text{A}$

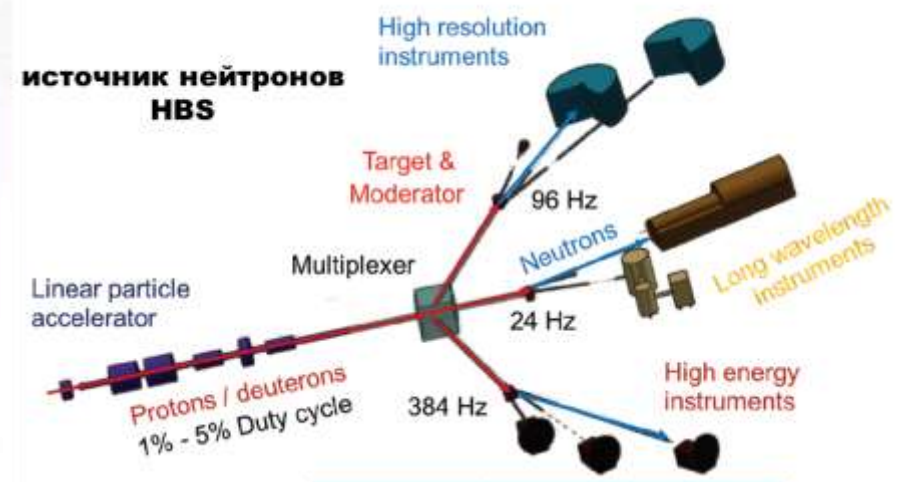
### 2. compact and low cost

proton linac: in our case less than  $<2 \text{億円} = 2 \times 10^8 \text{ yen} = 2 \text{ million US\$}$   
shielding design Multilayer shielding of target station

7 MeV, 100  $\mu\text{A}$ , RF power supply: 350 kW (peak) duty 1.3%, Electric power peak 40 kVA, Cooling water: 75 L/min, pulse width (30 ~ 200  $\mu\text{s}$ ) repetition frequency  $\sim 20 \sim 180 \text{ Hz}$  RF power 425 MHz, Injection energy 0.030-3.5 MeV



$E_p = 20 \text{ MeV}$ ,  
 $I_{\text{peak}} = 100 \text{ mA}$ ,  
duty cycle = 4%,  $P = 80 \text{ kW}$ ,  
fixed Be target.  
correspond to the first 20m of the ESS Linac



	NOWA ERA	Large scale facility
Accelerator	Tandem	Linac (170 MHz) RFQ+3SDTL
Particle type	Proton / Deuteron	Proton
Energy	10 MeV	70 MeV
Current	1 mA	100 mA
Frequencies	48 - 384 Hz	384, 96, 24 Hz
Duty cycle	4%	~ 4.3 %
Peak beam power	10 kW	7 MW
Average beam power	0.4 kW	~ 3 - 100 kW

# Перспективы нейтронных исследований в России к 2035-2040 года

- ✓ Будет функционировать один исследовательский реактор мирового класса ПИК, который расположен стратегически уязвимо и может стать доступной мишенью в случае вооруженного конфликта;
- ✓ Обсуждается строительство реактора УРАЛ в Заречном на замену ИВВ-2М, если будет решено его строить, то он будет работать преимущественно на задачи Росатома (наработка радиоизотопов, исследования и облучение реакторных материалов);
- ✓ Идут обсуждения строительства реактора НЕПТУН на замену реактору ИБР-2 в ОИЯИ, его судьба не ясна;
- ✓ В остальных нейтронных центрах исследования будут прекращены, будут потеряны компетенции

***Необходим по крайней мере еще один источник нейтронов в центре страны, на котором можно вести исследования мирового уровня и малые нейтронные источники по всей стране***

# Площадка для размещения источника на территории Института металлургии УрО РАН в микрорайоне Академический



## Требования к компактному источнику

- Установка мирового класса в плане прикладных и промышленных применений;
- Должен превосходить функционирующие сегодня в России среднепоточные нейтронные источники (кроме реактора ПИК), включая реактор ИБР-2 в ОИЯИ;
- Должен работать в интересах потребителей из УрФО, обеспечивать коммерциализацию научных разработок;
- Нужно обеспечить максимальное импортозамещение при строительстве и эксплуатации источника;
- Максимально задействовать предприятия Урала при строительстве источника;
- Нужно обеспечить самоокупаемость при эксплуатации источника;
- Допускаются исследования двойного назначения.

## Предложения по реализации проекта на Урале

- Энергия протонного пучка - 30 МэВ; ток в импульсе – 100 мА;
- Предусмотреть попеременно работающие две мишенные сборки с тепловым и холодным замедлителями;
- Общее число нейтронных инструментов – до 8;
- Использование выведенного протонного пучка;
- Активно работать с потенциальными потребителями;
- Предусмотреть разработку окружения образца, оптимизированного под прикладные исследования (криостаты, магниты, дилатометр и др.);
- Интеграция источника в материаловедческий центр.

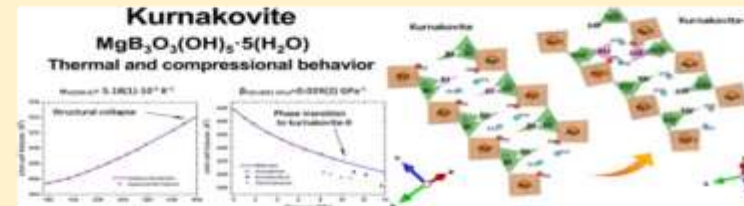
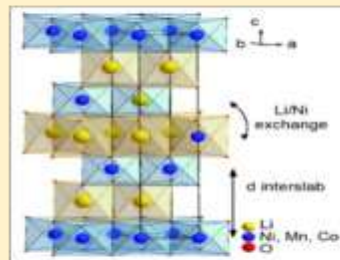
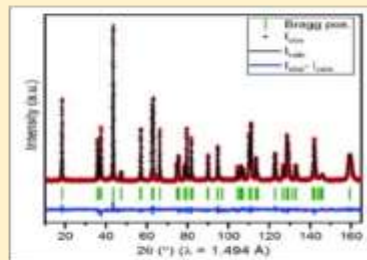
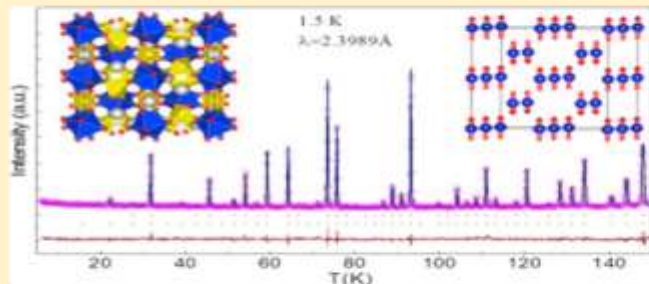
# Применение нейтронов

## Нейтронный дифрактометр: определение атомной и магнитной структуры материалов

Магнитные материалы для микроэлектроники и спинтроники

Материалы для электрохимических генераторов

Конструкционные и функциональные материалы

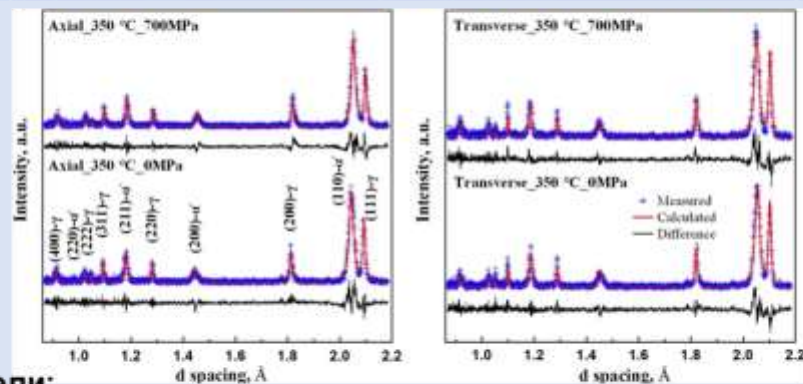


Потребители:

- ✓ Высотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. А. А. Бочвара
- ✓ Институт реакторных материалов ГК «Росатом»

## Нейтронный стресс-дифрактометр

Определение напряженного состояния металлоконструкций, дефектоскопия, продление срока службы ответственных изделий



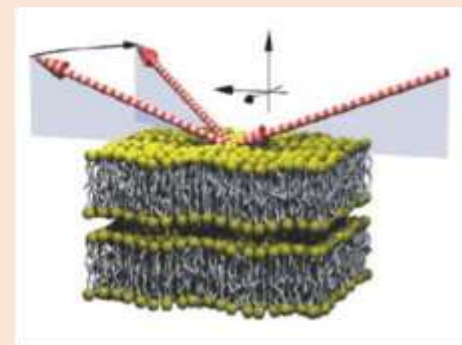
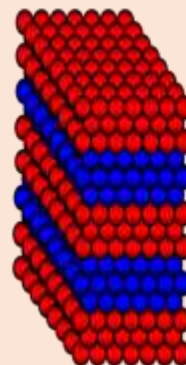
Потребители:

- ✓ АО «Государственный ракетный центр имени академика В. П. Макеева»
- ✓ АО «Научно-производственная корпорация „Уралвагонзавод“ имени Ф. Э. Дзержинского»

## Нейтронный рефлектометр

Наноструктуры на основе различных слоев металла для магниторезистивных применений

Поверхности, межслойные границы в нанобъектах



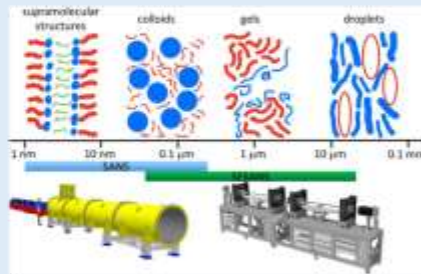
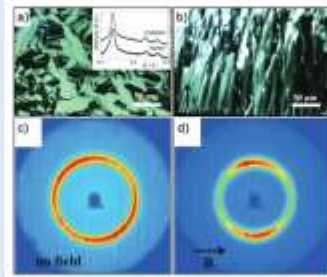
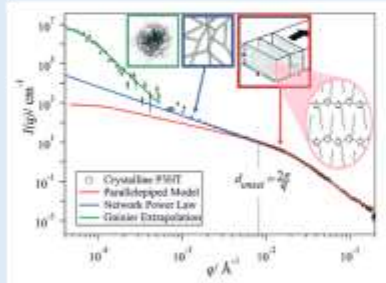
Потребители:

- ✓ НПО Автоматики им. Академика Н.А. Семихатова
- ✓ АО "Зеленоградский нанотехнологический центр"
- ✓ УПКБ «Деталь»

# Применение нейтронов

## Малоугловое рассеяние нейтронов и спин-эхо малоугловое рассеяние нейтронов

Биологические макромолекулы, коллоидные объекты, полимеры, жидкие кристаллы, гели. Магнитные наноматериалы. Функциональные материалы.

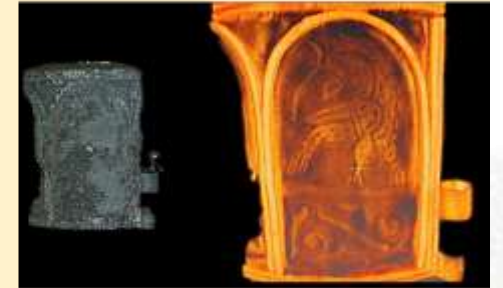
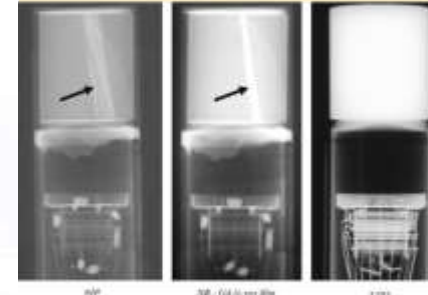


### Потребители:

- ✓ АО «Фармстандарт»
- ✓ ФГБУ «Научный центр экспертизы средств медицинского применения»
- ✓ Центры медицинских и биологических исследований
- ✓ Производители фито- и органической косметики

## Нейтронная радиография и томография

Неразрушающий контроль промышленных изделий, изучение объектов культурного наследия

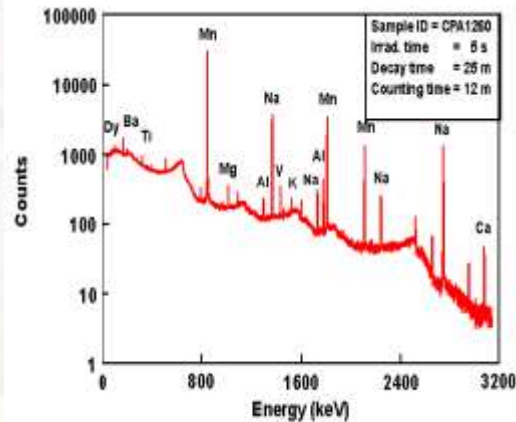


### Потребители:

- ✓ Прецизионная металлургия
- ✓ АО «ОДК-Авиадвигатель»
- ✓ Музеи

## Нейтронный и протонный активационный анализ

Определение количества элементов в образцах с чувствительностью до 10<sup>-10</sup> г



Элемент	Чувствительность, %	Элемент	Чувствительность, %	Элемент	Чувствительность, %	Элемент	Чувствительность, %
1 H	0.0004	13 Al	0.0004	25 Mn	0.0004	37 Rb	0.0004
2 He	0.0004	14 Si	0.0004	26 Fe	0.0004	38 Sr	0.0004
3 Li	0.0004	15 P	0.0004	27 Co	0.0004	39 Y	0.0004
4 Be	0.0004	16 S	0.0004	28 Ni	0.0004	40 Zr	0.0004
5 B	0.0004	17 Cl	0.0004	29 Cu	0.0004	41 Nb	0.0004
6 C	0.0004	18 Ar	0.0004	30 Zn	0.0004	42 Mo	0.0004
7 N	0.0004	19 K	0.0004	31 Ga	0.0004	43 Tc	0.0004
8 O	0.0004	20 Ca	0.0004	32 Ge	0.0004	44 Ru	0.0004
9 F	0.0004	21 Sc	0.0004	33 As	0.0004	45 Rh	0.0004
10 Ne	0.0004	22 Ti	0.0004	34 Se	0.0004	46 Pd	0.0004
11 Na	0.0004	23 V	0.0004	35 Br	0.0004	47 Ag	0.0004
12 Mg	0.0004	24 Cr	0.0004	36 Kr	0.0004	48 Cd	0.0004
13 Al	0.0004	25 Mn	0.0004	37 Rb	0.0004	49 In	0.0004
14 Si	0.0004	26 Fe	0.0004	38 Sr	0.0004	50 Sn	0.0004
15 P	0.0004	27 Co	0.0004	39 Y	0.0004	51 Sb	0.0004
16 S	0.0004	28 Ni	0.0004	40 Zr	0.0004	52 Te	0.0004
17 Cl	0.0004	29 Cu	0.0004	41 Nb	0.0004	53 I	0.0004
18 Ar	0.0004	30 Zn	0.0004	42 Mo	0.0004	54 Xe	0.0004
19 K	0.0004	31 Ga	0.0004	43 Tc	0.0004	55 Ba	0.0004
20 Ca	0.0004	32 Ge	0.0004	44 Ru	0.0004	56 La	0.0004
21 Sc	0.0004	33 As	0.0004	45 Rh	0.0004	57 Ce	0.0004
22 Ti	0.0004	34 Se	0.0004	46 Pd	0.0004	58 Pr	0.0004
23 V	0.0004	35 Br	0.0004	47 Ag	0.0004	59 Nd	0.0004
24 Cr	0.0004	36 Kr	0.0004	48 Cd	0.0004	60 Pm	0.0004
25 Mn	0.0004	37 Rb	0.0004	49 In	0.0004	61 Sm	0.0004
26 Fe	0.0004	38 Sr	0.0004	50 Sn	0.0004	62 Eu	0.0004
27 Co	0.0004	39 Y	0.0004	51 Sb	0.0004	63 Gd	0.0004
28 Ni	0.0004	40 Zr	0.0004	52 Te	0.0004	64 Tb	0.0004
29 Cu	0.0004	41 Nb	0.0004	53 I	0.0004	65 Dy	0.0004
30 Zn	0.0004	42 Mo	0.0004	54 Xe	0.0004	66 Ho	0.0004
31 Ga	0.0004	43 Tc	0.0004	55 Ba	0.0004	67 Er	0.0004
32 Ge	0.0004	44 Ru	0.0004	56 La	0.0004	68 Tm	0.0004
33 As	0.0004	45 Rh	0.0004	57 Ce	0.0004	69 Yb	0.0004
34 Se	0.0004	46 Pd	0.0004	58 Pr	0.0004	70 Lu	0.0004
35 Br	0.0004	47 Ag	0.0004	59 Nd	0.0004	71 Hf	0.0004
36 Kr	0.0004	48 Cd	0.0004	60 Pm	0.0004	72 Ta	0.0004
37 Rb	0.0004	49 In	0.0004	61 Sm	0.0004	73 W	0.0004
38 Sr	0.0004	50 Sn	0.0004	62 Eu	0.0004	74 Re	0.0004
39 Y	0.0004	51 Sb	0.0004	63 Gd	0.0004	75 Os	0.0004
40 Zr	0.0004	52 Te	0.0004	64 Tb	0.0004	76 Ir	0.0004
41 Nb	0.0004	53 I	0.0004	65 Dy	0.0004	77 Pt	0.0004
42 Mo	0.0004	54 Xe	0.0004	66 Ho	0.0004	78 Au	0.0004
43 Tc	0.0004	55 Ba	0.0004	67 Er	0.0004	79 Hg	0.0004
44 Ru	0.0004	56 La	0.0004	68 Tm	0.0004	80 Tl	0.0004
45 Rh	0.0004	57 Ce	0.0004	69 Yb	0.0004	81 Pb	0.0004
46 Pd	0.0004	58 Pr	0.0004	70 Lu	0.0004	82 Bi	0.0004
47 Ag	0.0004	59 Nd	0.0004	71 Hf	0.0004	83 Po	0.0004
48 Cd	0.0004	60 Pm	0.0004	72 Ta	0.0004	84 At	0.0004
49 In	0.0004	61 Sm	0.0004	73 W	0.0004	85 Rn	0.0004
50 Sn	0.0004	62 Eu	0.0004	74 Re	0.0004	86 Fr	0.0004
51 Sb	0.0004	63 Gd	0.0004	75 Os	0.0004	87 Ra	0.0004
52 Te	0.0004	64 Tb	0.0004	76 Ir	0.0004	88 Ac	0.0004
53 I	0.0004	65 Dy	0.0004	77 Pt	0.0004	89 Th	0.0004
54 Xe	0.0004	66 Ho	0.0004	78 Au	0.0004	90 Pa	0.0004
55 Ba	0.0004	67 Er	0.0004	79 Hg	0.0004	91 U	0.0004
56 La	0.0004	68 Tm	0.0004	80 Tl	0.0004	92 Np	0.0004
57 Ce	0.0004	69 Yb	0.0004	81 Pb	0.0004	93 Pu	0.0004
58 Pr	0.0004	70 Lu	0.0004	82 Bi	0.0004	94 Am	0.0004
59 Nd	0.0004	71 Hf	0.0004	83 Po	0.0004	95 Cm	0.0004
60 Pm	0.0004	72 Ta	0.0004	84 At	0.0004	96 Bk	0.0004
61 Sm	0.0004	73 W	0.0004	85 Rn	0.0004	97 Cf	0.0004
62 Eu	0.0004	74 Re	0.0004	86 Fr	0.0004	98 Es	0.0004
63 Gd	0.0004	75 Os	0.0004	87 Ra	0.0004	99 Fm	0.0004
64 Tb	0.0004	76 Ir	0.0004	88 Ac	0.0004	100 Md	0.0004
65 Dy	0.0004	77 Pt	0.0004	89 Th	0.0004	101 No	0.0004
66 Ho	0.0004	78 Au	0.0004	90 Pa	0.0004	102 Lr	0.0004
67 Er	0.0004	79 Hg	0.0004	91 U	0.0004		
68 Tm	0.0004	80 Tl	0.0004	92 Np	0.0004		
69 Yb	0.0004	81 Pb	0.0004	93 Pu	0.0004		
70 Lu	0.0004	82 Bi	0.0004	94 Am	0.0004		
71 Hf	0.0004	83 Po	0.0004	95 Cm	0.0004		
72 Ta	0.0004	84 At	0.0004	96 Bk	0.0004		
73 W	0.0004	85 Rn	0.0004	97 Cf	0.0004		
74 Re	0.0004	86 Fr	0.0004	98 Es	0.0004		
75 Os	0.0004	87 Ra	0.0004	99 Fm	0.0004		
76 Ir	0.0004	88 Ac	0.0004	100 Md	0.0004		
77 Pt	0.0004	89 Th	0.0004	101 No	0.0004		
78 Au	0.0004	90 Pa	0.0004	102 Lr	0.0004		
79 Hg	0.0004	91 U	0.0004				
80 Tl	0.0004	92 Np	0.0004				
81 Pb	0.0004	93 Pu	0.0004				
82 Bi	0.0004	94 Am	0.0004				
83 Po	0.0004	95 Cm	0.0004				
84 At	0.0004	96 Bk	0.0004				
85 Rn	0.0004	97 Cf	0.0004				
86 Fr	0.0004	98 Es	0.0004				
87 Ra	0.0004	99 Fm	0.0004				
88 Ac	0.0004	100 Md	0.0004				
89 Th	0.0004	101 No	0.0004				
90 Pa	0.0004	102 Lr	0.0004				

### Потребители:

- ✓ Прецизионная металлургия
- ✓ Экологические исследования
- ✓ Геология
- ✓ Музеи

## Main Results of Beam Commissioning

FRIB threshold key performance parameter

Date

Measure FRIB driver line  $^{36}\text{Ar}$  beam with energy lower than 200 MeV/u and a beam current lower than 20 nA

Mar 2020

“To date, the primary ion beams of  $^{36}\text{Ar}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{86}\text{Kr}$ ,  $^{70}\text{Zn}$ ,  $^{82}\text{Se}$ ,  $^{124}\text{Xe}$ , and  $^{198}\text{Pt}$  up to 227 MeV/u have been delivered to the target and used to produce nearly 200 unstable isotopes.»

Journal of Physics: Conference Series 2687 (2024) 052012 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2687/5/052012



July 2017  
RFQ acceleration  
0.5 MeV/u

Feb. 2019  
LS1  
20 MeV/u  
Charge stripping

Mar 2020  
LS2  
 $^{36}\text{Ar}$  204 MeV/u

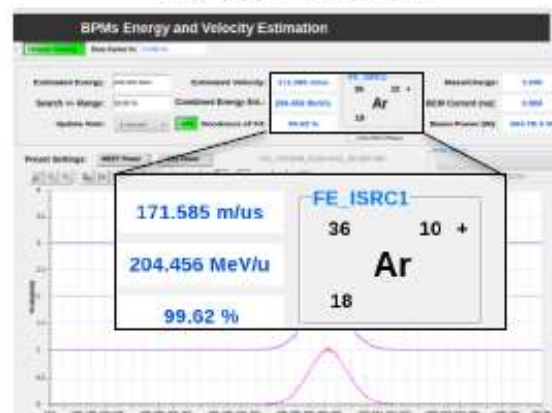
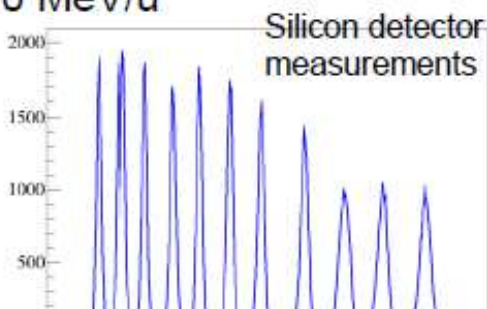
Apr 2021  
LS3  
 $^{86}\text{Kr}$  212 MeV/u

May 2022  
Ribbon-cutting  
ceremony

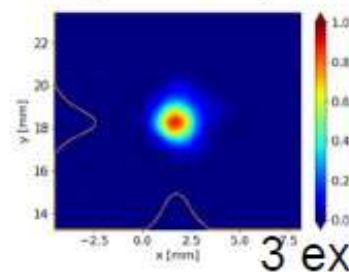
April 2017  
1<sup>st</sup> beam observed  
LEBT 0.012 MeV/u



May 2018  
1<sup>st</sup> acceleration by SC  
cavities  
2.0 MeV/u



Dec 2021  
Beam reached to  
Fragment separator



3 experiments are successfully completed with 1 kW beam



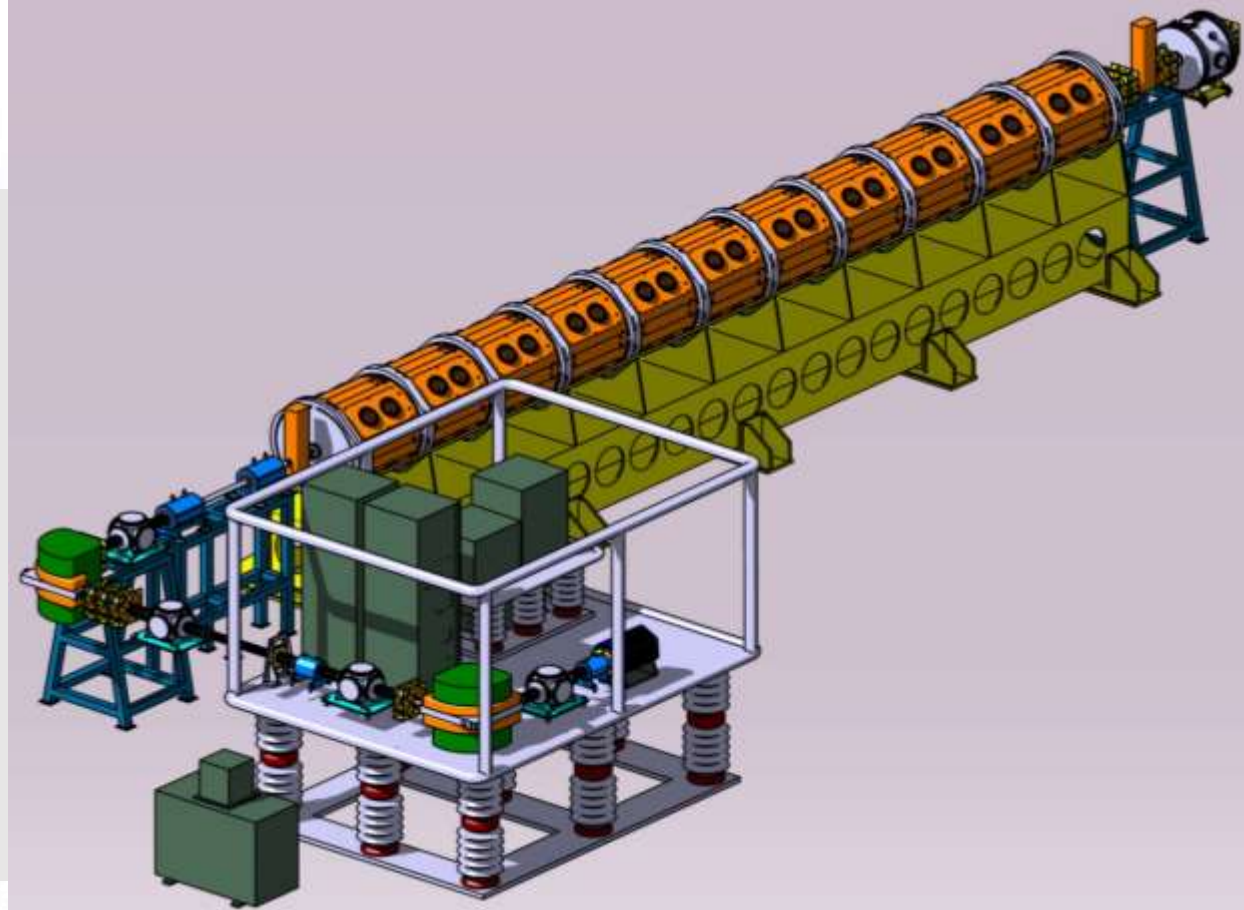
# *RFQ+DTL для физики низких энергий*



**Энергия пучка – 7 МэВ/нуклон**  
**Интенсивность пучка U – 1эМА**


**Экспериментальная установка:**

- **Низкоэнергетическая физика с уникальной интенсивностью**
- **Радиационная модификация полупроводников**
- **Тестирование новых детекторов высокоинтенсивными пучками**



**Линейный ускоритель с энергией ускоренного пучка ионов урана 7 МэВ/н и рекордной интенсивностью не будет иметь себе равных в мире для проведения исследования реакций многонуклонного обмена представляющих интерес не только для фундаментальной физики**

*Per aspera ad astra*



**Спасибо  
за  
внимание!**

*Viam supervadet vadens*

## Технологии создания линейного ускорителя в России

	Разработки	Опытные образцы	Серийная технология	Обладатели компетенций/ <b>Участвующие в зарубежных и отечественных проектах</b>
Расчет динамики, проектирование	да	да	да	НИЦ КИ, МИФИ
Источники ионов	да	да	<b>Необходима доработка</b>	ИПФ РАН, ОИЯИ, ТРИНИТИ, ИТЭФ, ИСЭ
Импульсные нормально проводящие ускоряющие системы	да	да	<b>необходима доработка</b>	НИЦ КИ, <b>МИФИ, ИФВЭ, ОИЯИ, ИЯИ, ИЯФ</b>
СВ нормально проводящие ускоряющие системы	да	да	<b>необходима доработка</b>	<b>НИЦ КИ, ИФВЭ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ, ВНИИТФ</b>
СП ускоряющие системы	<b>нет</b>	<b>нет</b>	<b>нет</b>	- <b>ОИЯИ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ, НИЦ КИ</b>
«Теплые» магниты	да	да	да	НИИЭФА, ИЯФ, ИФВЭ, ОИЯИ, <b>ВНИИЭФ</b>
СП магниты	да	да	да	ИЯФ, ОИЯИ
Современные системы ВЧ питания	да	<b>необходима доработка</b>	<b>необходима доработка</b>	ТРИАДА-ТВ, <b>НИЦ КИ, МИФИ, ОИЯИ, ИЯФ, ВНИИЭФ</b>
Системы транспортировки пучка	да	да	да	НИЦ КИ, МИФИ, ИФВЭ, МРТИ, ИЯИ, ИЯФ, <b>ВНИЭФ</b>
Диагностика и управление пучком	да	да	да	ИЯИ, НИЦ КИ, ИФВЭ, ИЯФ, МИФИ, <b>ВНИЭФ</b>

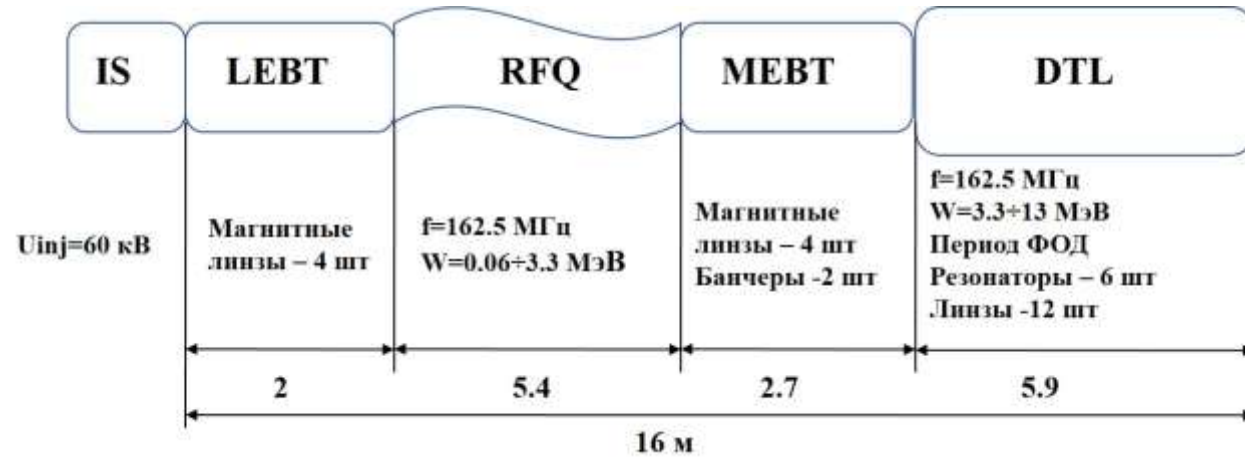
# Федеральная научно-техническая программа развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 - 2027 годы





# Параметры пучка

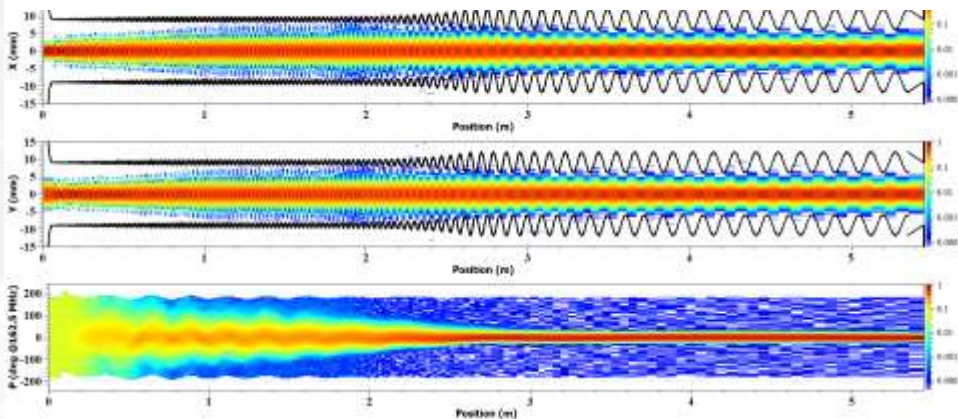
Operating frequency, MHz	162.5	
Injection current, [mA]	100	
Structure	RFQ	DTL
Beam energy, [MeV]	0.06 ÷ 3.3	3.3 ÷ 13.0
Maximum field strength [Kp]	1.8	
Acceptance to emittance ratio	3	
Length, [m]	5.4	5.9
RF power loses, kW	680	1500
Transmission, [%]	99.5	100



## RFQ

### Beam Profile

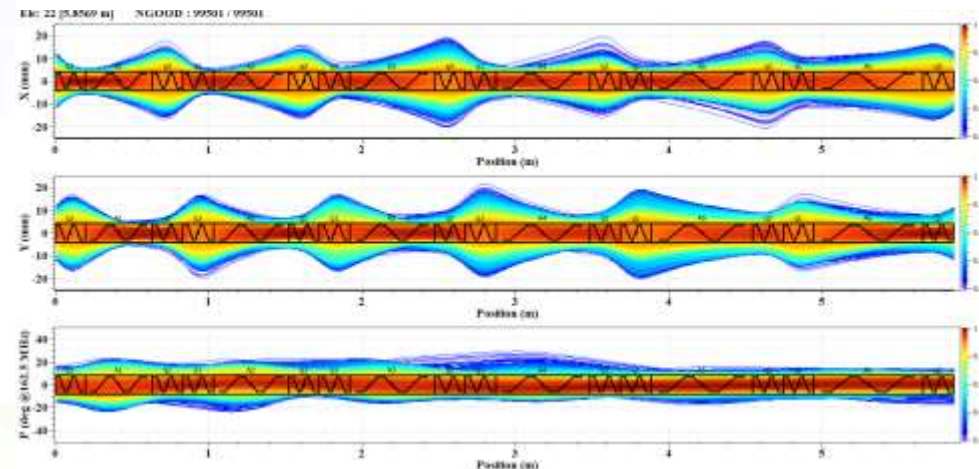
Transport=99.7%; Transmission = 99.5%



## DTL

### Beam Profile

Transport = 100%; Transmission = 100%



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



# Нейтронные центры РФ: status quo (стационарные)

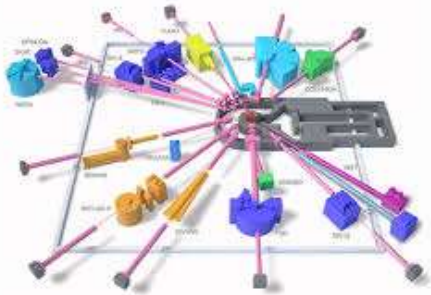


- Исследовательский реактор ПИК (НИЦ КИ – ПИЯФ, Гатчина), высокопоточный нейтронный источник с мощностью 100 МВт
- Исследовательский реактор ИР-8 (НИЦ КИ, Москва), среднепоточный нейтронный источник с мощностью 8 МВт
- Исследовательский реактор ИВВ-2М (ИРМ/ИФМ, Екатеринбург), среднепоточный нейтронный источник с мощностью 15 МВт
- Исследовательский реактор ИРТ-Т (ТПУ, Томск), среднепоточный нейтронный источник с мощностью 6 МВт



## status quo (импульсные)

- Импульсный реактор ИБР2 (ОИЯИ, Дубна), высокопоточный нейтронный источник с мощностью 2 МВт
- Мощный импульсный источник нейтронов ИН-06 (ИЯИ РАН, Троицк)
- Нейтронный генератор на основе линейного ускорителя электронов ИРЕН (ОИЯИ)



# Мегасайенс установка для исследований на пучках нейтронов



← ММФ ИЯИ РАН

У-1.5 НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ →



Параметры	Проект	Достигнуто	2024г
Частицы	Протоны и H <sup>-</sup>	Протоны и H <sup>-</sup>	Протоны
Энергия, МэВ	600	502	420
Импульсный ток, мА	50	16	15
Частота повторений, имп/с	100	50	50
Длина импульса, мкс	100	200	0.3÷200
Средний ток, мкА	500	150	130

Энергия инжекции — 30 МэВ.

Энергия ускоренного пучка — в штатном варианте — 1,32 ГэВ.

Длина орбиты — 99,16 м.

Интенсивность пучка —  $(1-4) \times 10^{11}$  протонов/сгусток.

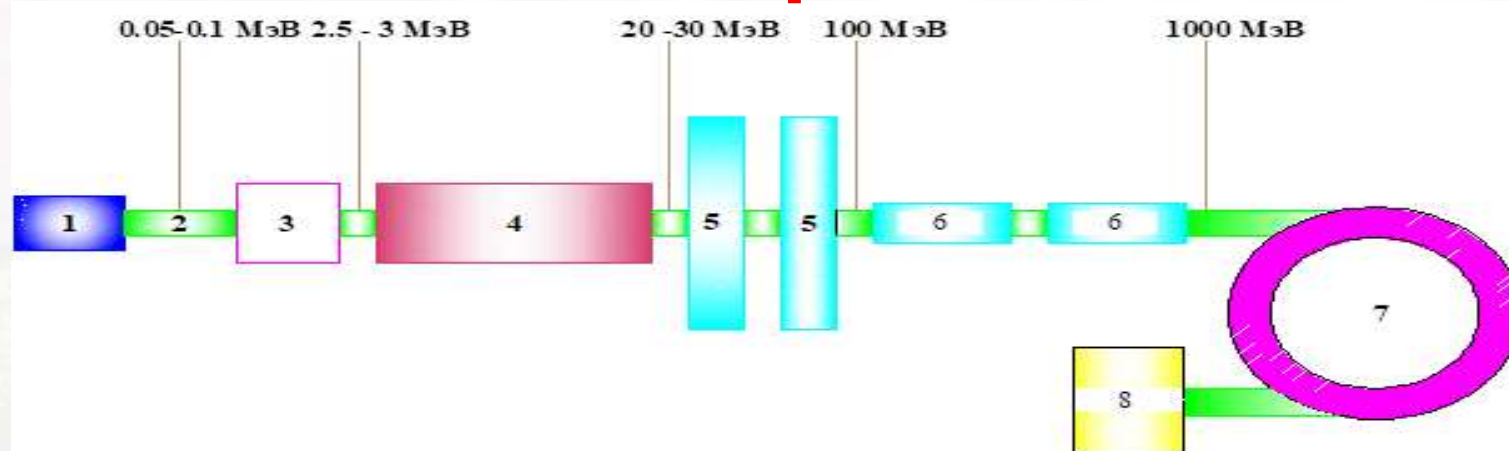
Длительность импульса (сгустка) — 80–100 нс.

Период следования импульсов внутри пакета — 60 мс.

Частота следования импульсов внутри пакета — 50/3 (162/3 Гц).

Период следования пакетов сгустков — 8–10 с.

## RuSS – Russian Spallation Source



# Уральский федеральный округ: центр российского материаловедения



- **Металлургическая промышленность**
- **Машиностроение и металлообработка**
- **Химическая промышленность**
- **Атомная энергетика**
- **Оборонные предприятия**

**На Урале необходим нейтронный источник мирового класса, специализированный для прикладного и промышленного применения, допускающий исследования материалов военного и двойного назначения.**

# Нейтронные установки

Предложены технические решения по конструкции нейтронных установок для КИИ DARIA, методом численного моделирования продемонстрирована реализуемость на КИИ DARIA метода нейтронной дифракции, рефлектометрии и малоуглового рассеяния.

1) Оптимизирован дифрактометр с характеристиками: полоса длин волн 1 - 5 Å, частота повторения импульсов  $f = 42$  Гц, длина импульса  $t = 30$  мкс, длина пролетной базы 25 м, поток  $6.2 \times 10^7$  n/s/cm<sup>2</sup>.

2) Оптимизирован рефлектометр с характеристиками: коллимация – образец - детектор (4+4 м), полоса длин волн 1 - 7 Å, поляризация не менее 0.96, частота повторения импульсов  $f = 80$  Гц, длина импульса  $\tau = 100$  мкс, диапазон переданных импульсов 0.01 - 0.5 Å<sup>-1</sup>, разрешение  $\Delta q/q$  : 2-10 %, поток  $10^6 - 10^7$  n/s/cm<sup>2</sup>.

3) Оптимизирована установка малоуглового рассеяния с характеристиками: коллимация - образец- детектор (5+5 м), полоса длин волн 2 - 8 Å и 6 -12Å, частота повторения импульсов  $f = 40$  Гц, длина импульса  $\tau = 400$  мкс, диапазон переданных импульсов 0.005 - 0.5 Å<sup>-1</sup>, разрешение  $\Delta q/q$  : 10 %, поток  $10^5 - 10^6$  n/s/cm<sup>2</sup>.

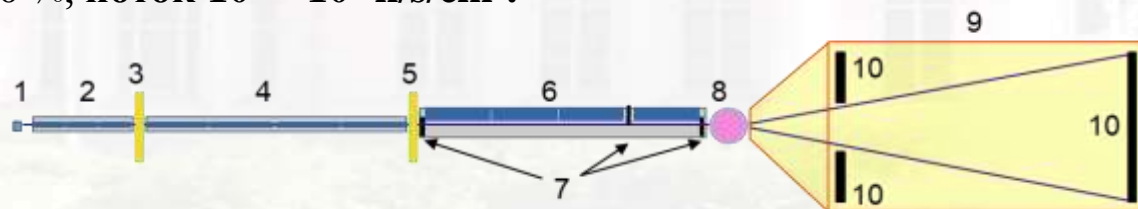
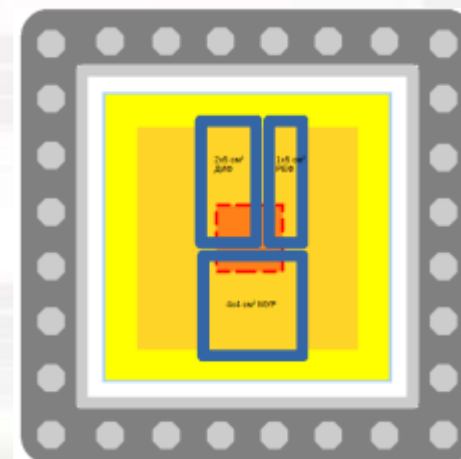
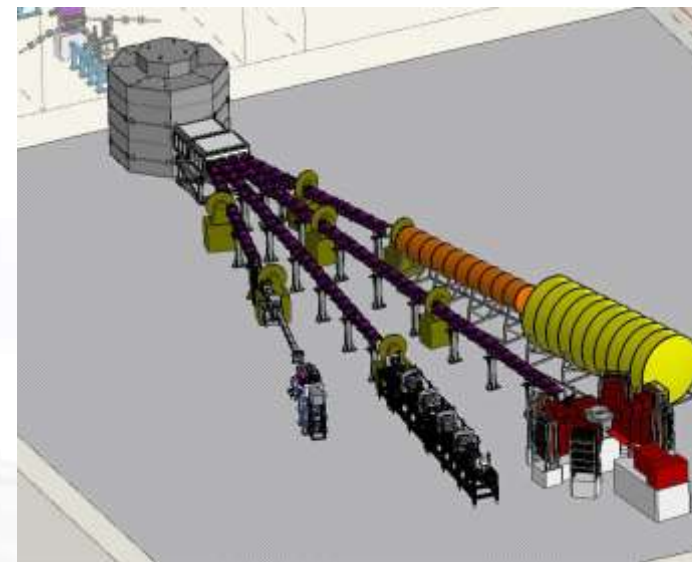


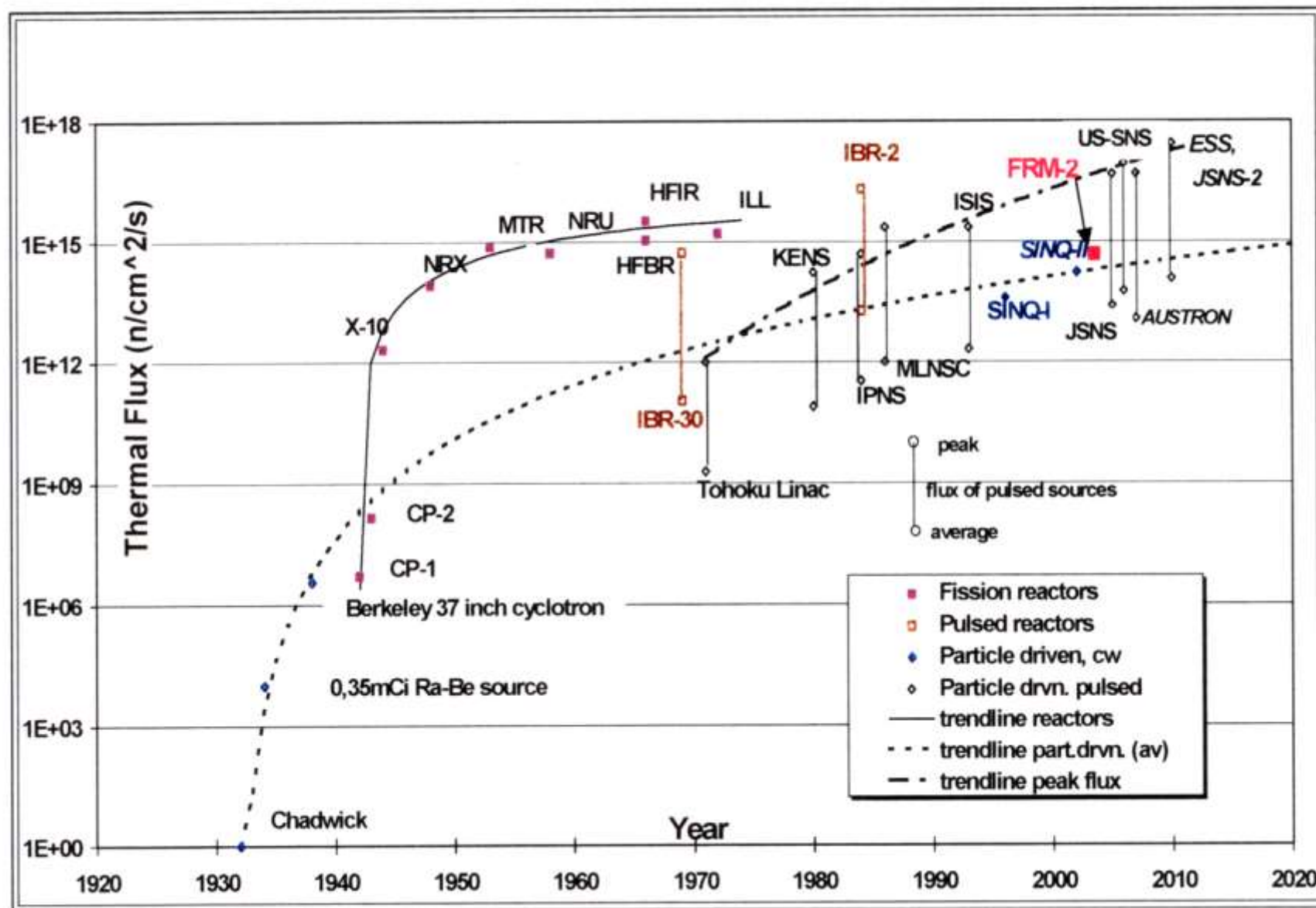
Схема установки малоуглового рассеяния нейтронов

Фронтальный вид нейтроноводов для 3 установок вблизи холодного источника нейтронов



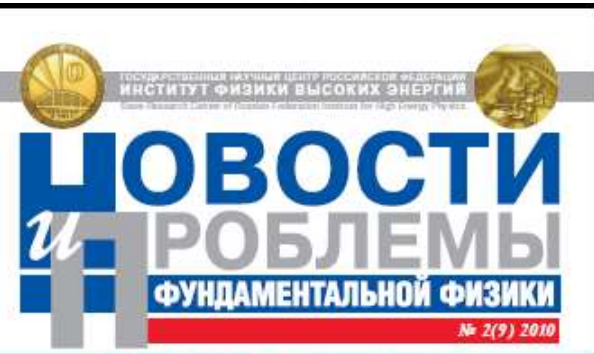
- 2x4 kW 11 MHz (BINP)
- 40 kW 36 MHz (BINP for NICA)
- 2,5 kW 76.4 MHz (JSC "NIIIEFA"))
- 5 kW 180 MHz (BINP)
- 12 kW 180 MHz (BINP)
- 2x12 kW 180 MHz (BINP)
- 10, 300, 600 kW 162 MHz имп. (JINR NICA)
- 150 kW 350 MHz (BINP for SSTRC)
- 20 kW 700 MHz (BINP)
- 0,4 kW 2850 MHz (BINP)
  
- Et cetera

**Развитие нейтронных источников по данным МАГАТЭ. Общая тенденция: преимущественное развитие нейтронных центров на основе сильноточных ускорителей протонов**



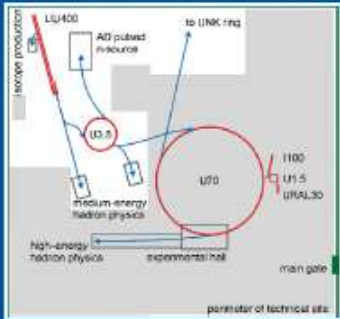


# Spallation Source



The OMEGA Project also foresees construction of the pulsed spallation neutron source utilizing the 3.5 GeV and 1.1 MW proton beam (the study of biological structures, nanostructures, substances, materials, objects). These features of the neutron studies make The OMEGA Project complimentary to the synchrotron radiation sources thus providing unique opportunities for a comprehensive research in the science fields listed above.

**Ускорительный комплекс интенсивных адронных пучков**  
**Facility for Intense Hadron Beams**



Проткина © 2010  
 Protvino, 2010

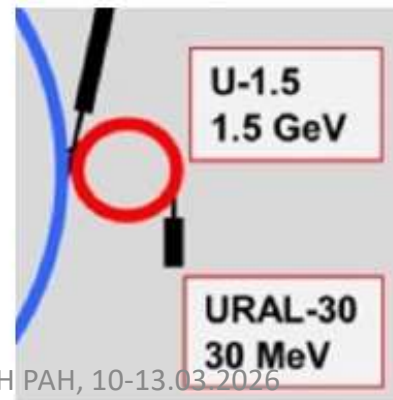


Рис. 1. Расположение комплекса на местности. Комплекс расположен в северо-западной части технической застройки ИИВЭ: 1 – линейный ускоритель, 2В-400 (красный цвет); 2 – высокоэнергетический синхротрон У-3,5 (красный цвет); 3 – ТЭ – машина и экспериментальный зал нейтронного источника (красный цвет); 4 – 5 ТЭ и ТЭ – зоны для экспериментов с высокоэнергетическими пучками (розовый цвет). Структурными зданиями 6 (голубой цвет) будет использоваться для технологического обеспечения комплекса. Северо-серым и зеленым цветами обозначены существующие здания и сооружения. В центре – кольдустороевание У-70.  
 Fig. 1. Location of the Facility for Intense Hadron Beams. It is located in the northwestern part of the IHEP site: 1 – linear accelerator (U-3.5 DWA color); 2 – the high energy synchrotron and experimental hall (red color); 3 – TЭ and ТЭ – zones for experiments with high energy beams (pink color); 4 – existing building (blue color) to be used for the technical support. Light blue and green colors mark the existing infrastructures. In the center – the U-70 ring.

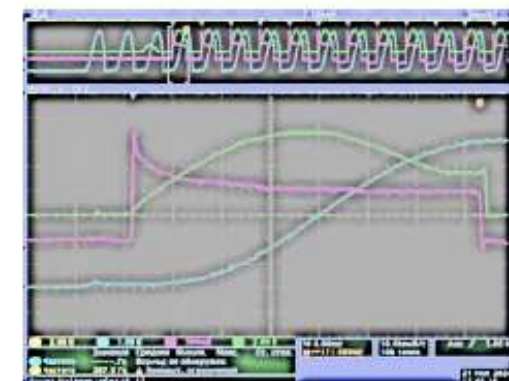


## ОМЕГА: «Реконструкция здания Комплекс Бустер для размещения прототипа импульсного источника нейтронов на основе реакции испарительно-скалывающего типа»

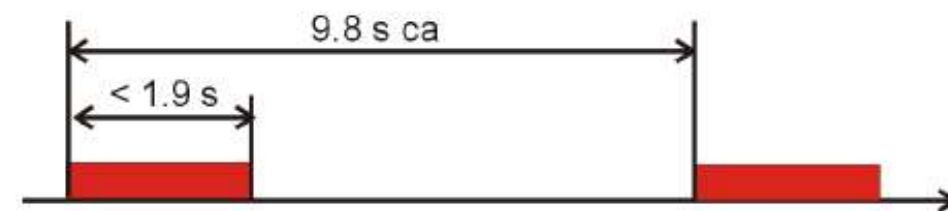
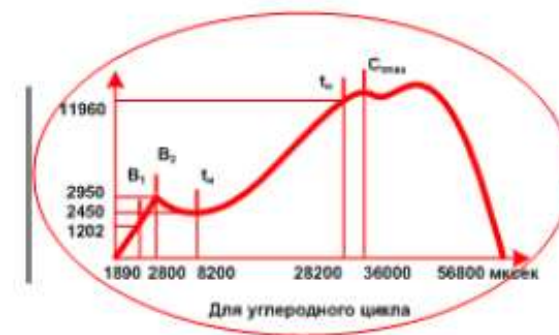
В марте 2023 года проект получил положительное заключение ФАУ «Главгосэкспертиза России». Повторное – октябрь 2024 года



Параметр	Значение	
Энергия ускоренных протонов	1.32(1.50)	ГэВ
Число протонов в импульсе (сгустке)	$1 \cdot 10^{12}$	
Частота следования импульсов внутри пакета	$50/3 = 16\frac{2}{3}$	Гц
Количество импульсов в пакете	29	
Период следования пакетов	6.5	с
Длительность импульса (сгустка),	50	нс
Мощность пучка (средняя)	1.2	кВт
Выход нейтронов	33	n/p
Интенсивность нейтронов на свинцовой (вольфрамовой) мишени полного поглощения	$1.5 \cdot 10^{14}$	n/c
Энергии нейтронов для n-TOF на базе $\geq 20$ м	0.01-1000	эВ



21 ноя 2024





# Spallation Source

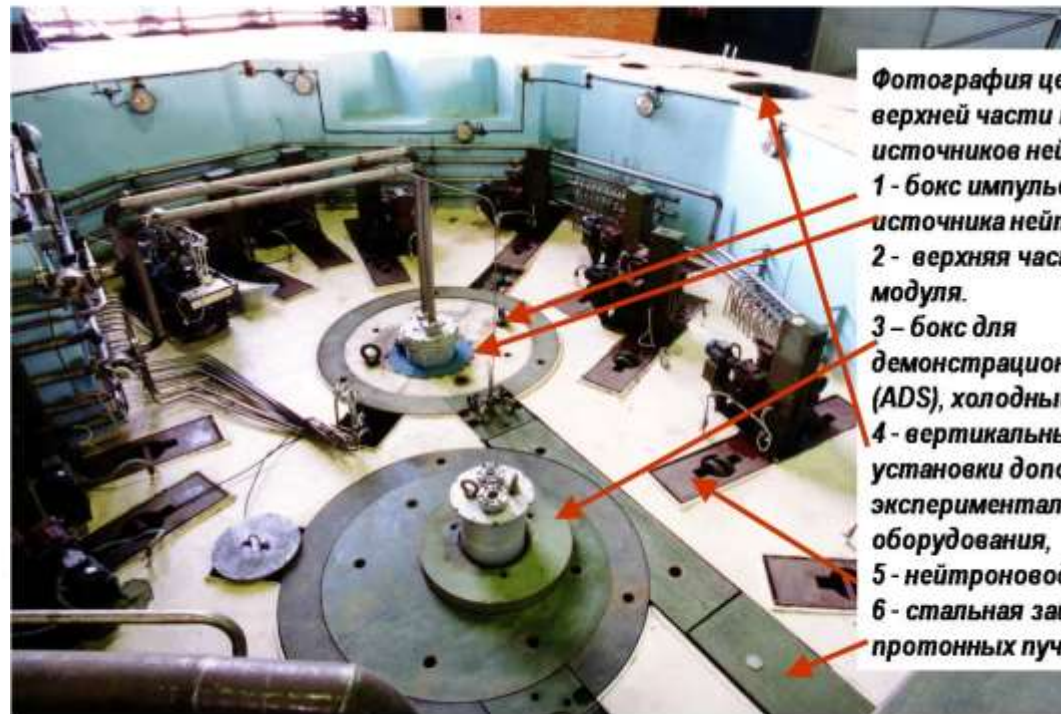


Экспериментальный комплекс ИЯИ РАН в г.Троицке



## Источник нейтронов ИН-06

ИЯИ  
РАН



# LINAC



750 keV

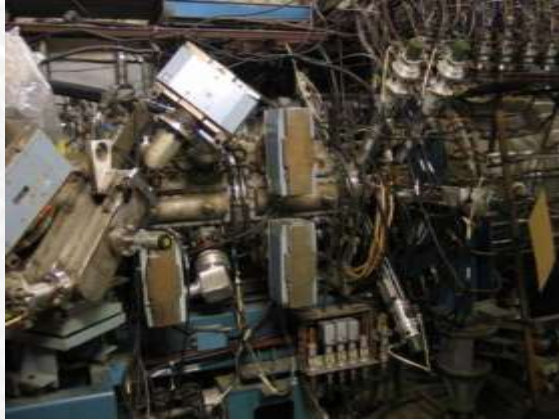
20 MeV

49 MeV

74 MeV

94 MeV

100 MeV



Booster RFQ



Inside Drift Tube Tank



Parameter	Design	Obtained	2024
Particles	p, H-minus	p, H-minus	p, H-minus
Energy, MeV	600	502	420
Pulse current, mA	50	16	15
Repetition rate, Hz	100	50	50
Pulse duration, $\mu$ s	100	200	0.3÷200
Average current, $\mu$ A	500	150	130

# Критерий эффективности компактного источника нейтронов

При плотности потока на образце

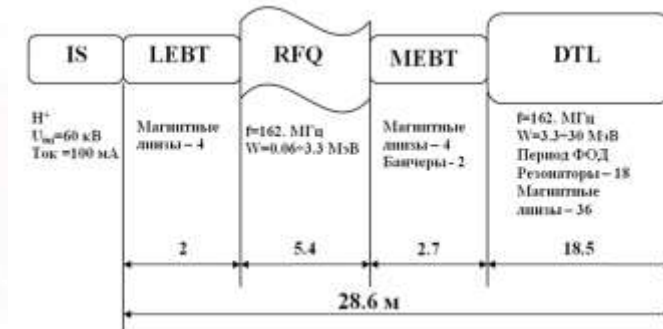
- $10^7$  n/s/cm<sup>2</sup> – минуты
- $10^6$  n/s/cm<sup>2</sup> – час
- $10^5$  n/s/cm<sup>2</sup> – часы (проект DARIA 13 MeV)
- $10^4$  n/s/cm<sup>2</sup> – дни
- $10^3$  n/s/cm<sup>2</sup> – становится неприемлемым

# DARIA – 30(70)

- **Пошаговый выход на энергию 30 МэВ ÷ 70 МэВ с увеличением количества DTL резонаторов**
- **Начало работ на нейтронных пучках уже с 3 МэВ (Li- мишень, затем Be, затем Ta)**
- **Нейтронные станции на современных принципах**
- **Канал протонного пучка**

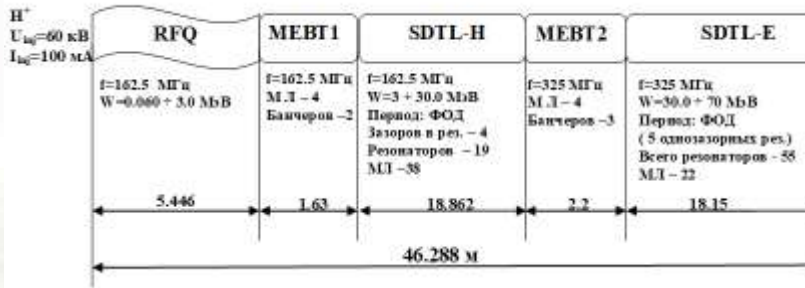
**30 МэВ**

Operating frequency, MHz	162.5	
Injection current, [mA]	100	
Structure	RFQ	DTL
Beam energy, [MeV]	0.06 ÷ 3.3	3.3 ÷ 30.0
Maximum field strength [Kp]	1.8	
Acceptance to emittance ratio	3	
Length, [m]	5.4	18.5
RF power losses, kW	680	4000
Transmission, [%]	99.5	100



**70 МэВ**

Operating frequency, MHz	162.5	325
Injection current, mA	100	99
Structure	RFQ	SDTL-H
Beam energy, MeV	0.06 – 3.0	3.0 – 30.3
Maximum field strength, Kp	1.8	
Acceptance to emittance ratio	3	4
Length, m	5.5	18.1
Transition, %	99	100

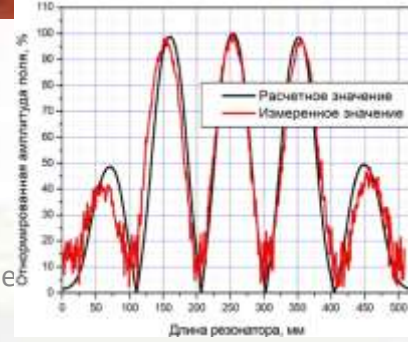
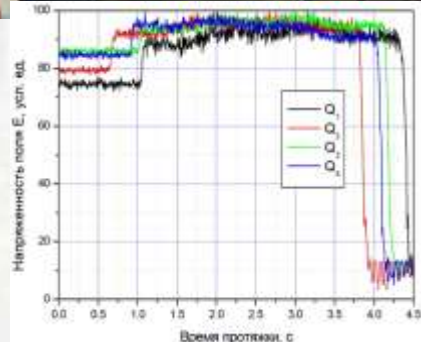
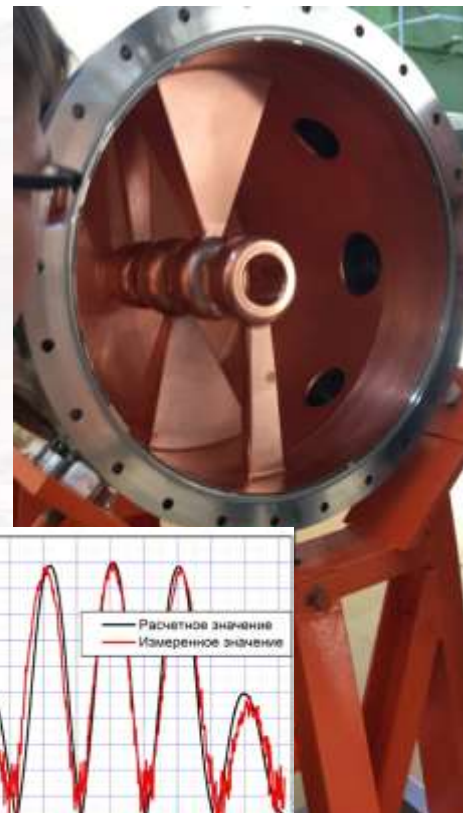
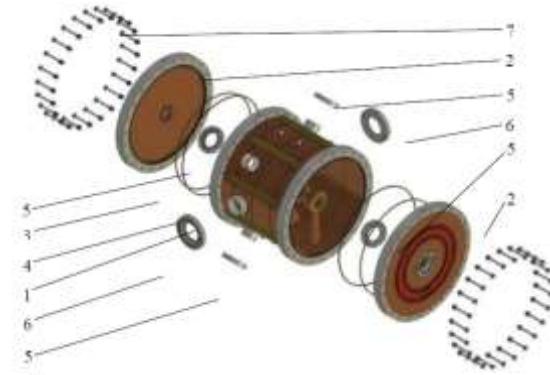
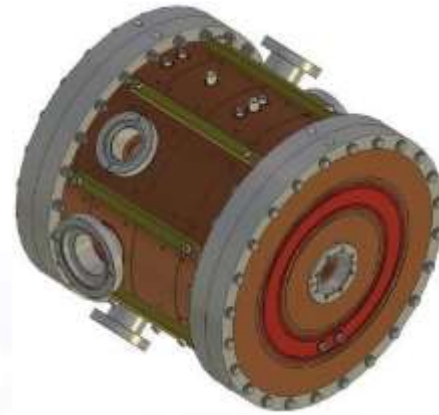
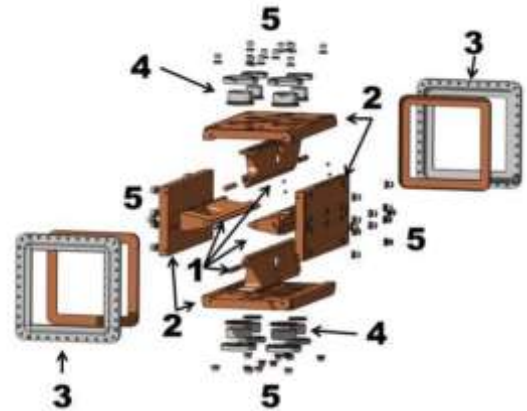
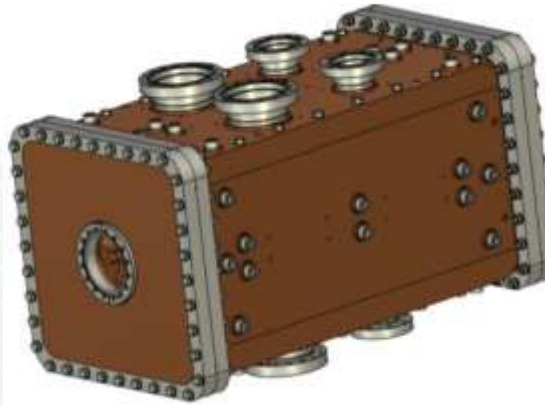


# RFQ и DTL для DARIA

## впервые в стране



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



я-конфере

## Neutrons set to dry up, panel warns



Europe must make better use of its existing neutron facilities, as well as build new ones, if it is to avoid a "neutron drought" in the coming decades. So says a group of experts known as the Neutron Landscape Group (NLG), which forecasts that the continent's supply of neutrons could drop by as much as a half over the next decade. The group says that much of

The expert group says, however, that neutron levels could be kept at up to two-thirds of today's values until 2030, providing that the ILL is operated at full power until then, and that the ESS works at its planned power and is given 35 instruments instead of 22.

<https://europeanspallationsource.se/>

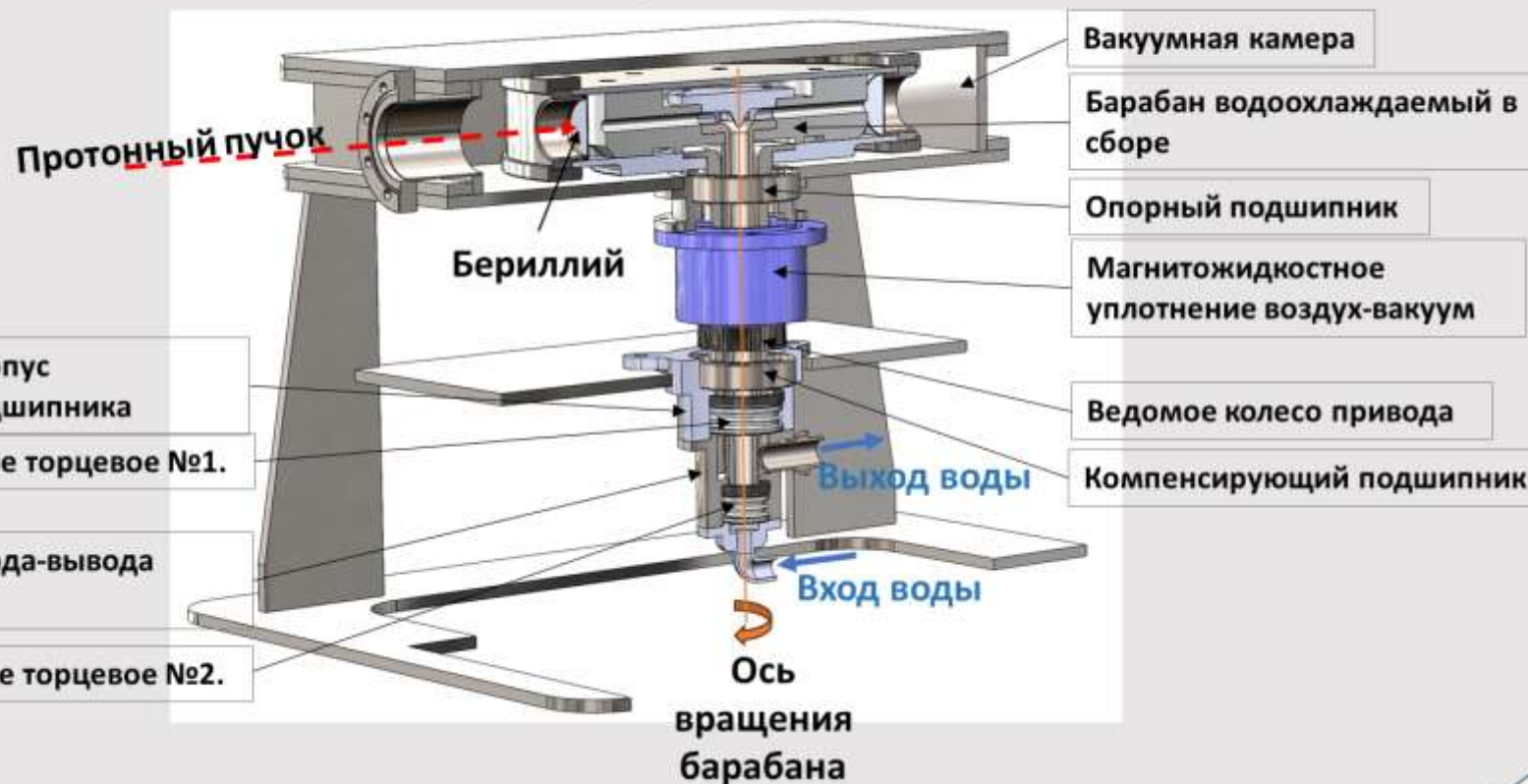
# Компактный источник нейтронов DARIA (Dedicated for Academic and Industrial Applications).



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ  
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

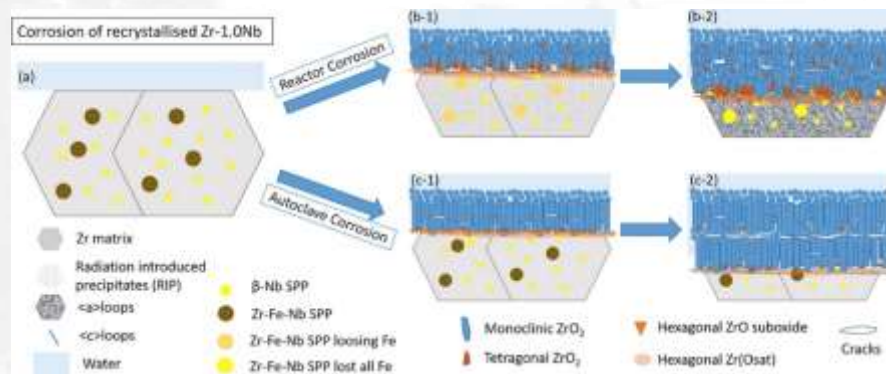


Конструкция узла бериллиевой мишени компактного нейтронного источника.  
Общий вид.

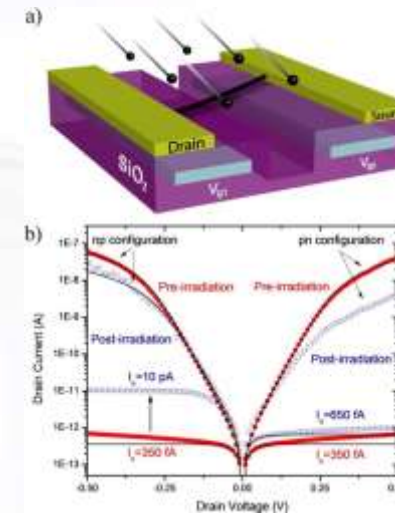


# Применение выведенных протонных пучков

## Моделирование радиационных повреждений в материалах атомных реакторов



## Облучение полупроводниковых приборов для управления характеристиками их переключения



### Потребители:

- ✓ ГК «Микрон»
- ✓ АО «Ангстрем»
- ✓ Институт реакторных материалов ГК «Росатом»
- ✓ УПКБ «Деталь»

# Какие нейтроны нам нужны? И почему?

В Японии реализуется программа создания компактных источников нейтронов для неразрушающего исследования промышленных объектов (на месте/on-site)

RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source, Waco, Japan

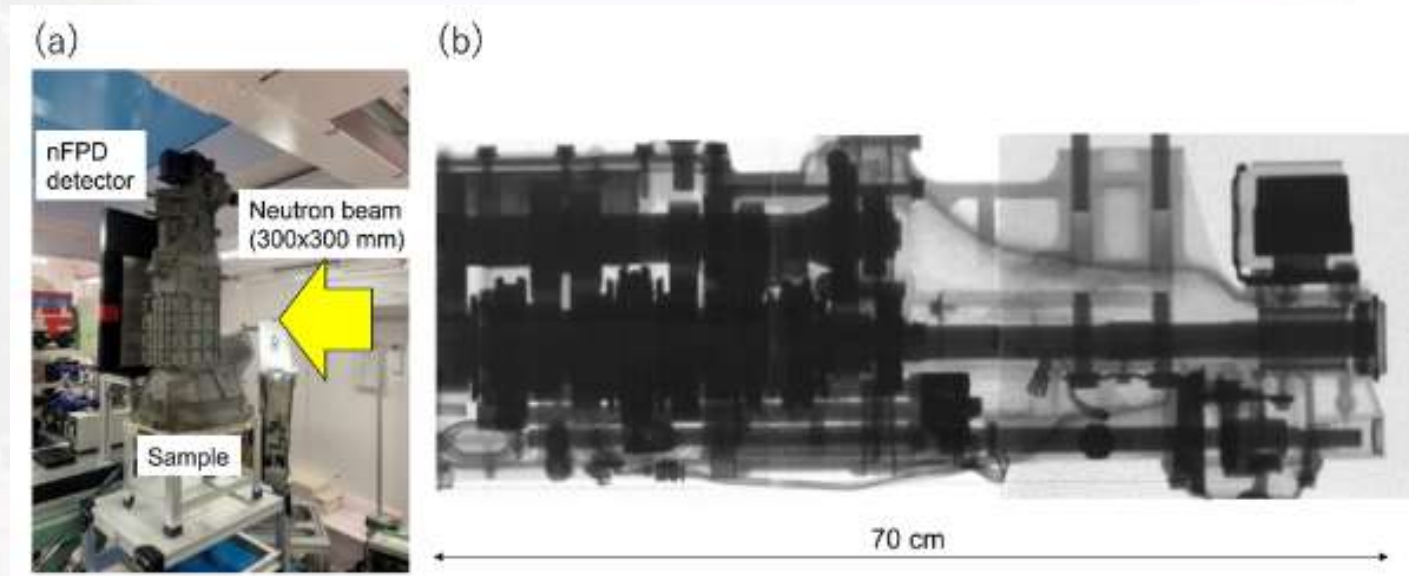
## Compact Neutron Systems to meet the needs for such non-destructive tests on-site!



# Какие нейтроны нам нужны? И почему?

## Compact accelerator-based neutron source (CANS) at the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST) in Tsukuba, Japan

Результаты исследований. Крупногабаритные детали автопрома



Автомобильная коробка передач а) фото, б) радиография.  
Нейтронный пучок размером  $300 \times 300$  мм облучал образец длиной 700 мм в трёх различных областях образца.  
Время облучения для каждого снимка составляло 500 секунд.

Koichi Kino, <https://doi.org/10.1051/epjconf/202429801002>

# Какие нейтроны нам нужны? И почему?

**Compact accelerator-based neutron source (CANS)**

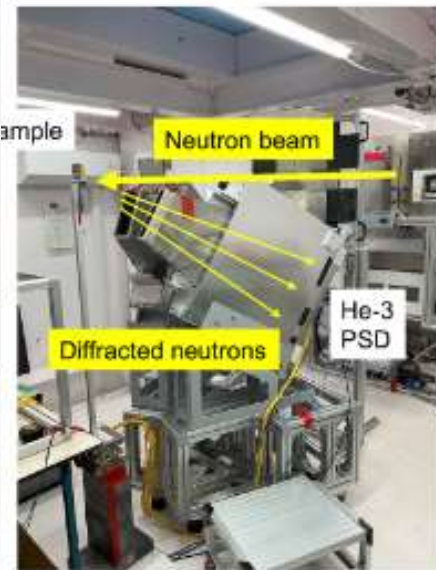
**at the National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)**

**in Tsukuba, Japan**

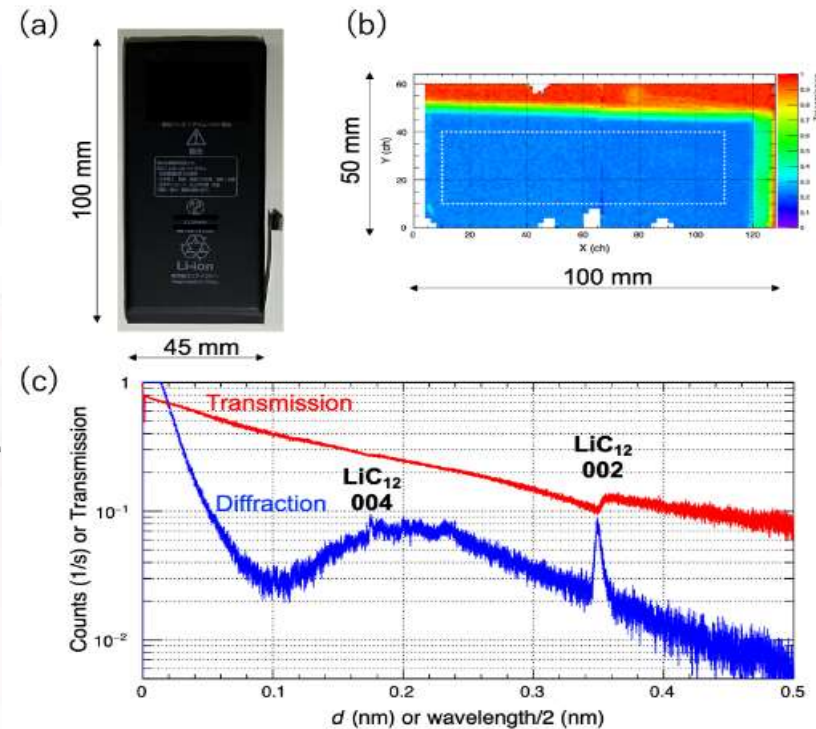
Результаты исследований.

**Литий-ионные батареи**

Метод: Дифракция нейтронов



Дифрактометр на AIST



а) Литий-ионная батарея для смартфонов. Площадь 100×45 мм, а толщина - 3 мм. б) – изображение в диапазоне длин волн от 0.24 до 0.73 нм. с) – спектр пропускания с двумя чёткими пика, которые относятся к кристаллу LiC<sub>12</sub> в графитовом отрицательном электроде. В спектре пропускания имеются соответствующие им брэгговские края.

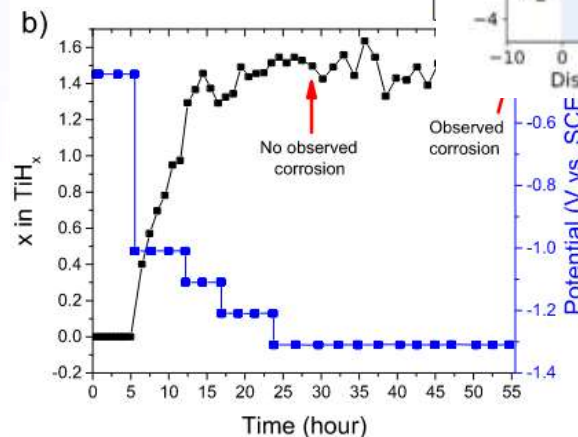
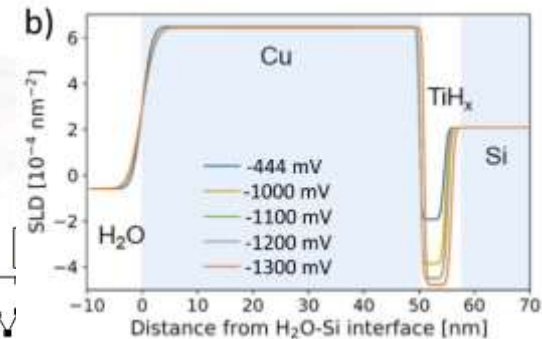
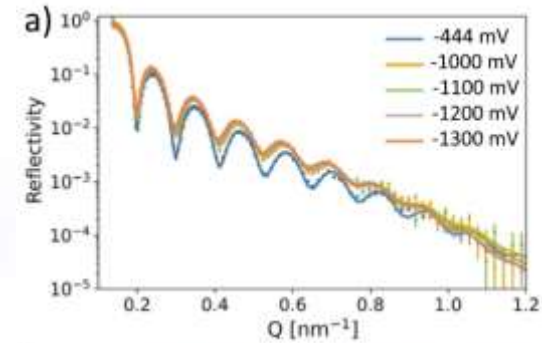
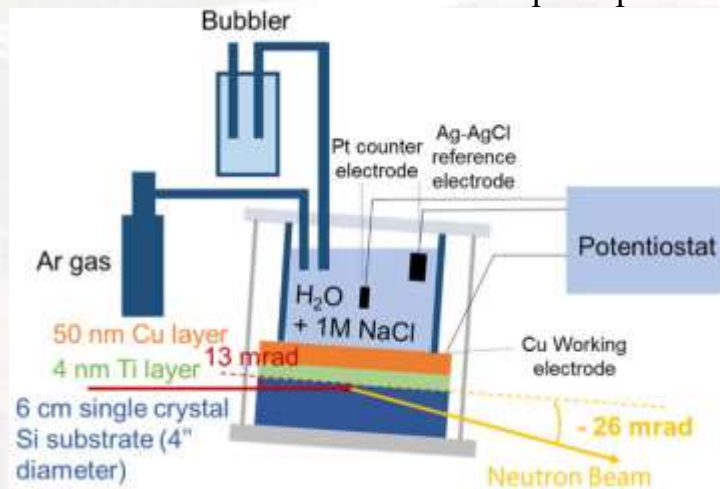
Koichi Kino, <https://doi.org/10.1051/epjconf/202429801002>

# Какие нейтроны нам нужны? И почему?

**Примеры исследований для промышленности на импульсных источниках нейтронов средней мощности**

**In situ поглощение водорода в пленке титана, покрытой медью, измеренное с помощью нейтронной рефлектометрии**

Для утилизации отработанных пучков ТВЭЛов используют контейнеры из углеродистой стали, покрытые слоем меди толщиной 3 мм. Контейнеры помещают в буферные боксы из бентонитовой глины и захоранивают глубоко под землей в породе с подходящими химическими и геологическими характеристикам.



Результат:

Водород не разрушает медное покрытие стальных контейнеров

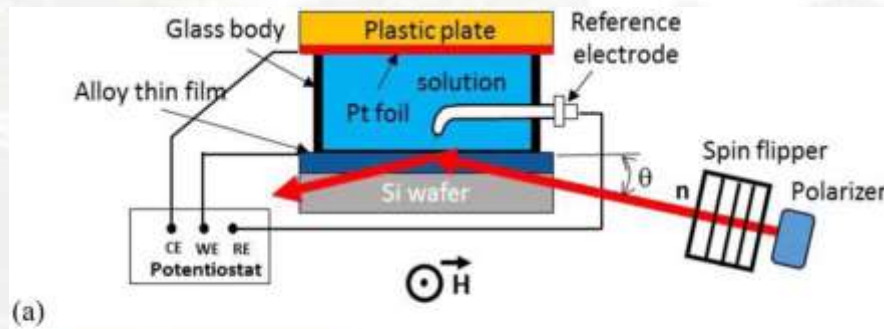
D.S. Hall, Progress in Materials Science, **118**, 2021, 100766.

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН, 10-13.03.2026

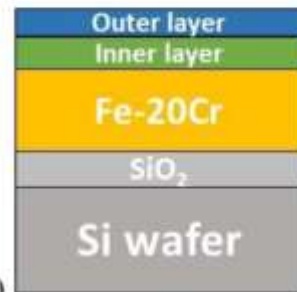
# Какие нейтроны нам нужны? И почему?

## In-situ исследование роста пассивирующей пленки на Fe-20Cr методом рефлектометрии поляризованных нейтронов

**Коррозия** — химическая реакция металла с электроотрицательными элементами в окружающей среде с образованием оксида, гидроксида хлорида, гидроксида и т. д.

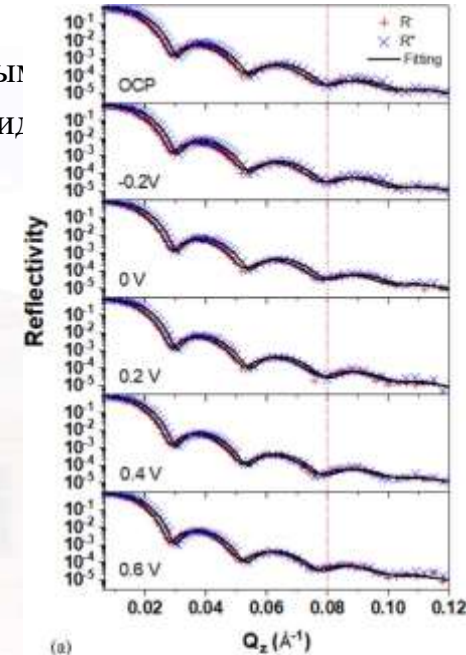


(a)

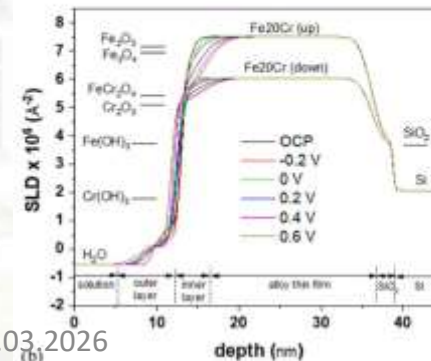


(b)

Результат: Определена степень коррозии и глубина проникновения, типы оксидных соединений, толщины разрушающихся слоев.



(a)

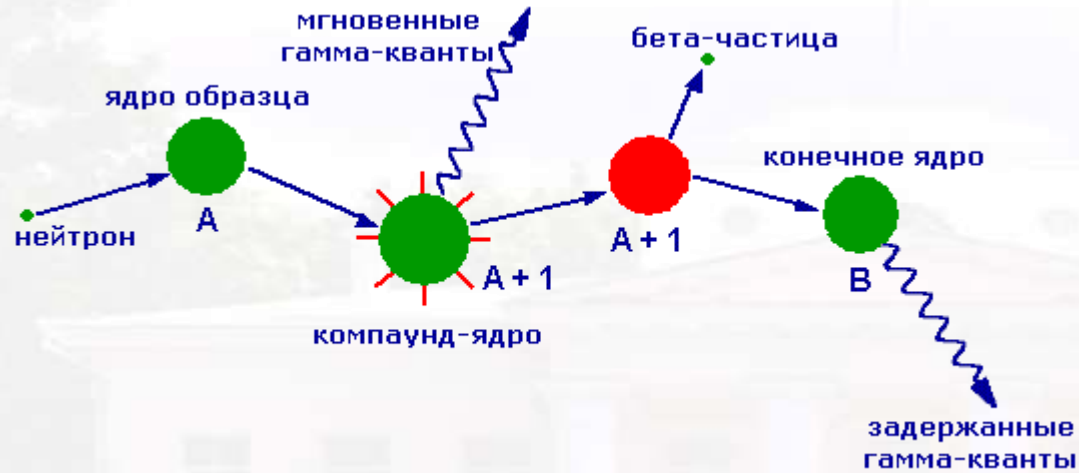


(b)



# Какие нейтроны нам нужны? И почему?

**Нейтрон-активационный анализ** элементного и изотопного состава вещества.



## Области приложений:

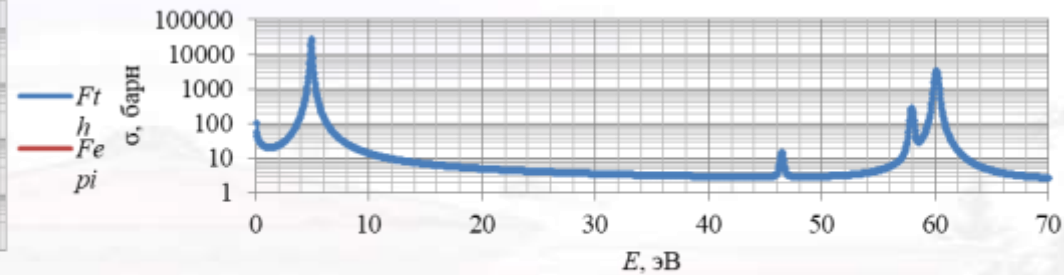
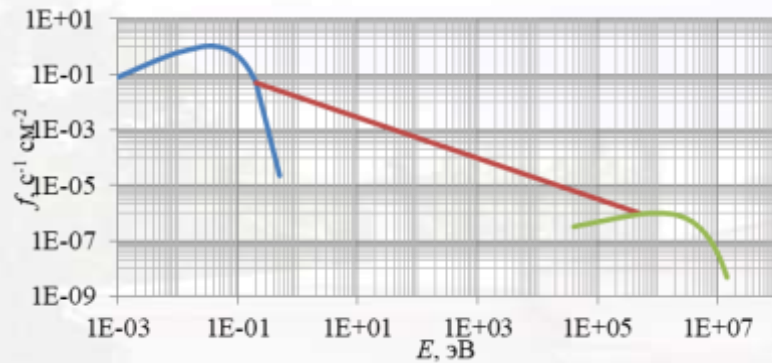
- материаловедение,
- геология,
- биологические объекты,
- системы безопасности.

При нейтронном захвате и распадах ядра возникают в возбужденных состояниях. Изучение электромагнитных переходов лежит в основе ядерной спектроскопии – изучения структуры ядер.

Регистрация этих излучений лежит в основе нейтрон-активационного анализа элементного и изотопного состава вещества.

# Какие нейтроны нам нужны? И почему?

## Экспериментальное определение параметров нейтронного спектра.



Спектр нейтронов после «термализации»:  
тепловые нейтроны (максвелловское распределение), быстрые нейтроны (сохраняют характеристики ядерной реакции рождения нейтрона), промежуточные или эпитепловые нейтроны (спектр характерный для каждой установки).

**Область приложения - определение сечений нейтронного поглощения**  
Зависимость сечения радиационного захвата нейтрона ядром  $^{197}\text{Au}$  от энергии налетающего нейтрона для первых 4-х резонансов.

# Что бы хотелось увидеть в протоколе сегодняшнего заседания

- ***Развитие стратегии нейтронных исследований и инфраструктуры для них требует создания широкой сети установок на базе ускорителей ионов, начиная с компактных источников нейтронов с выходом на создание мега-сайенс установки на основе каскадно-испарительной реакции***

1) Одобрить деятельность и обеспечить ее развитие на ближайшие (до 2030)годы и перспективу до 2050 года.

2) Рекомендовать конкретным институтам РАН внести эти работы до проекта DARPA (научно-технологический проект на ближайшие до 2030)годы. ИФМ СО РАН, ИЯИ СО РАН, ИФФ РАН, ???

3) Рекомендовать Научному совету «Нейтронные исследования на реакторах и импульсных источниках нейтронов» при РАН ввести в совет руководителей и лидеров этого проекта для лучшей координации деятельности на различных источниках нейтронов.

4) Рекомендовать Научному совету «Нейтронные исследования на реакторах и импульсных источниках нейтронов» при РАН внести эту тематику по разработке компактных источников нейтронов и установки класса мега-сайенс (импульсного нейтронного источника на каскадно-испарительной реакции) в Стратегию развития нейтронных исследований РФ.

### **Требования к компактному источнику**

- **Установка мирового класса в плане прикладных и промышленных применений;**
- **Должен превосходить функционирующие сегодня в России среднепоточные нейтронные источники (кроме реактора ПИК), включая реактор ИБР-2 в ОИЯИ;**
- **Должен работать в интересах потребителей из УрФО, обеспечивать коммерциализацию научных разработок;**
- **Нужно обеспечить максимальное импортозамещение при строительстве и эксплуатации источника;**
- **Максимально задействовать предприятия Урала при строительстве источника;**
- **Нужно обеспечить самокупаемость при эксплуатации источника;**
- **Допускаются исследования двойного назначения.**

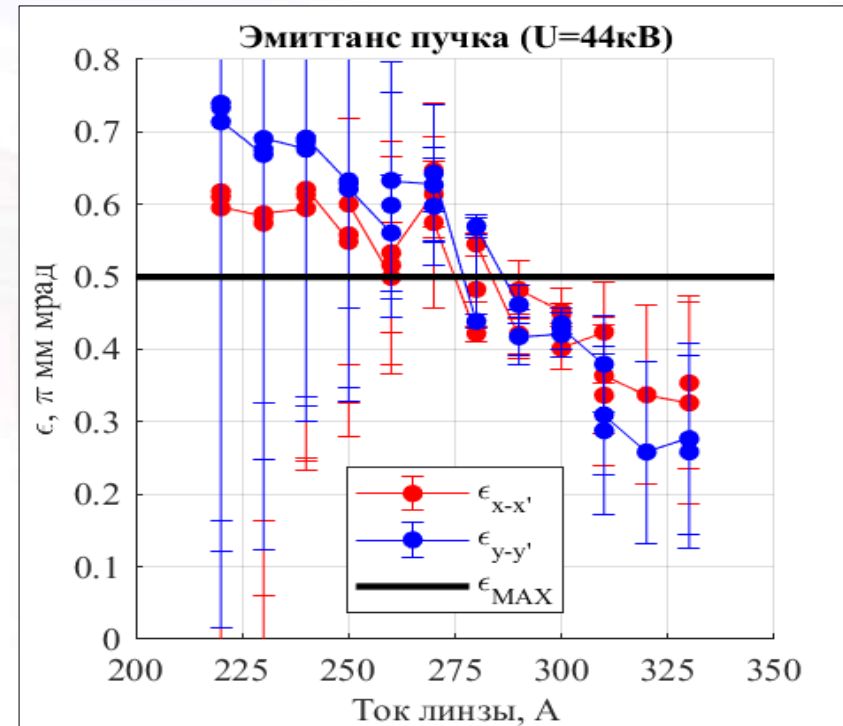
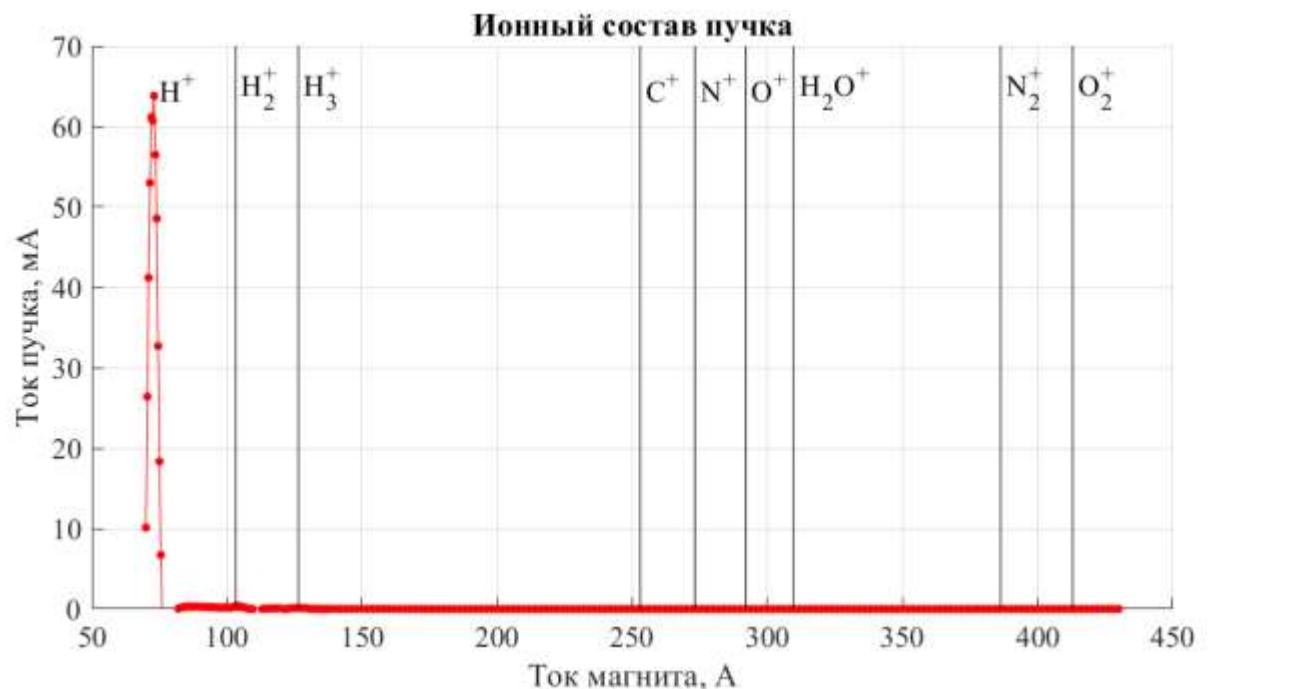
# Предложения по реализации проекта на Урале

## Предложения по реализации проекта на Урале

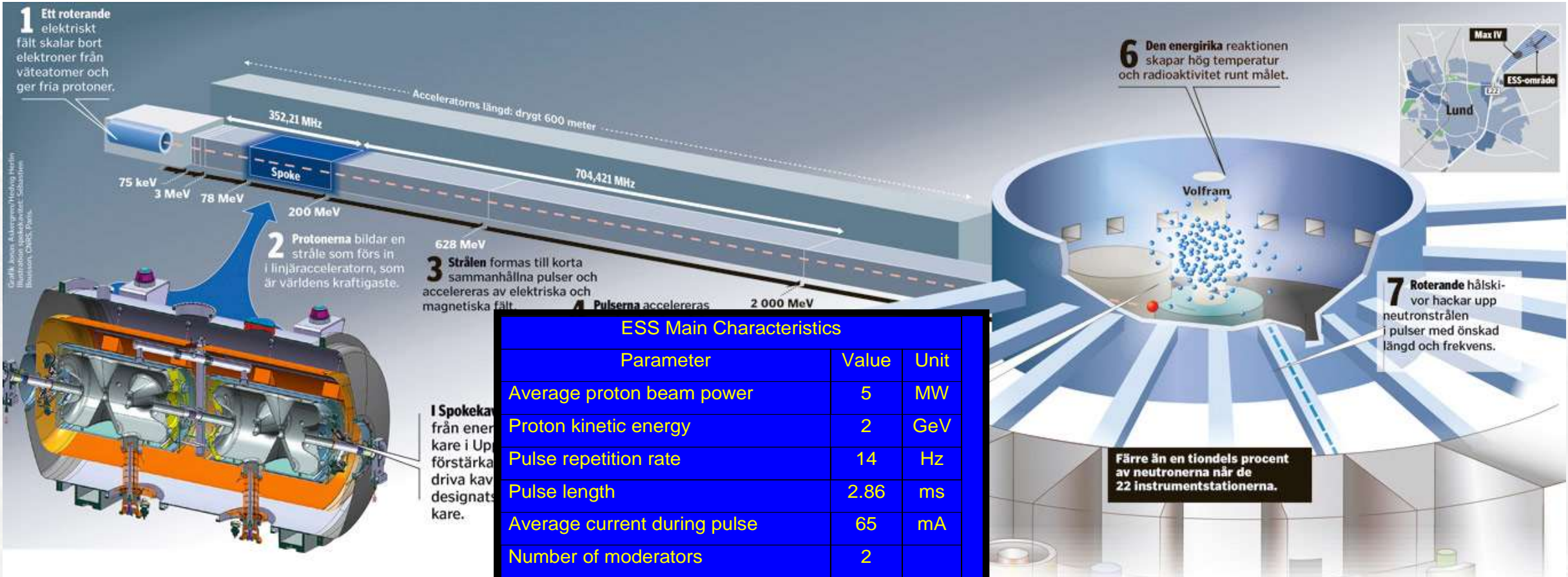
- Энергия протонного пучка - 30 МэВ; ток в импульсе – 100 мА;
- Предусмотреть попеременно работающие две мишенные сборки с тепловым и холодным замедлителями;
- Общее число нейтронных инструментов – до 8;
- Использование выведенного протонного пучка;
- Активно работать с потенциальными потребителями;
- Предусмотреть разработку окружения образца, оптимизированного под прикладные исследования (криостаты, магниты, дилатометр и др.);
- Интеграция источника в материаловедческий центр.

## Результаты настройки импульсного режима работы источника

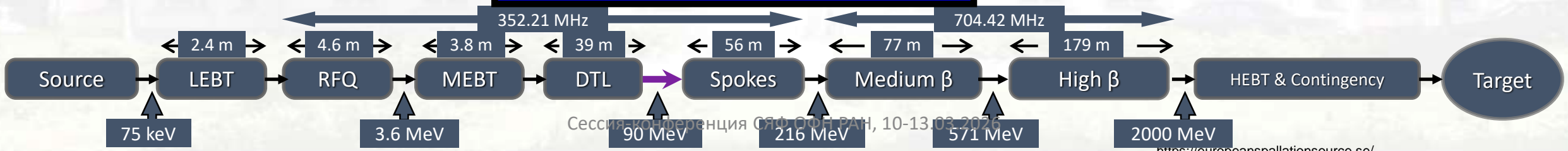
- Ток пучки превышает 120 мА
- Содержание протонов в пучке превышает 99%
- Есть режимы работы, в которых среднеквадратичный нормализованный эмиттанс пучка не превышает 0.5 п мм мрад



# European spallation source (ESS), Lund, Sweden



ESS Main Characteristics		
Parameter	Value	Unit
Average proton beam power	5	MW
Proton kinetic energy	2	GeV
Pulse repetition rate	14	Hz
Pulse length	2.86	ms
Average current during pulse	65	mA
Number of moderators	2	
Number of neutron beam ports	42	





25.X.1968

Описание изобретения 265312

К АВТОРСКОМУ СВИДЕТЕЛЬСТВУ

Зависимое от авт. свидетельства № —

Заявлено 25.X.1968 (№ 1280044/26-25)

Иллюстрации № 10

7.VI.1970

Исходный автор: Илья Капчинский и В. А. Тепляков

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ТЕХНИКА»

Илья Капчинский

Василий Владимирович

Владимир Тепляков

Редакция: Б. В. Федотов. Техредактор: З. Н. Таранова. Куратор: С. А. Кусовникова. Адрес: Москва, ул. Мясницкая, д. 25. Телефон: 198, д. 4-3. Тираж: 480. Подписано в печать: 10.03.1970. Издательство: «Техника». Тираж: 480. Адрес: Москва, ул. Мясницкая, д. 25. Телефон: 198, д. 4-3. Тираж: 480.



Ilya Kapchinskiy



Vasily Vladimirovich



Vladimir Teplyakov

# Система диагностики пучка ЛУ КИИ DARIA (ИЯИ РАН)

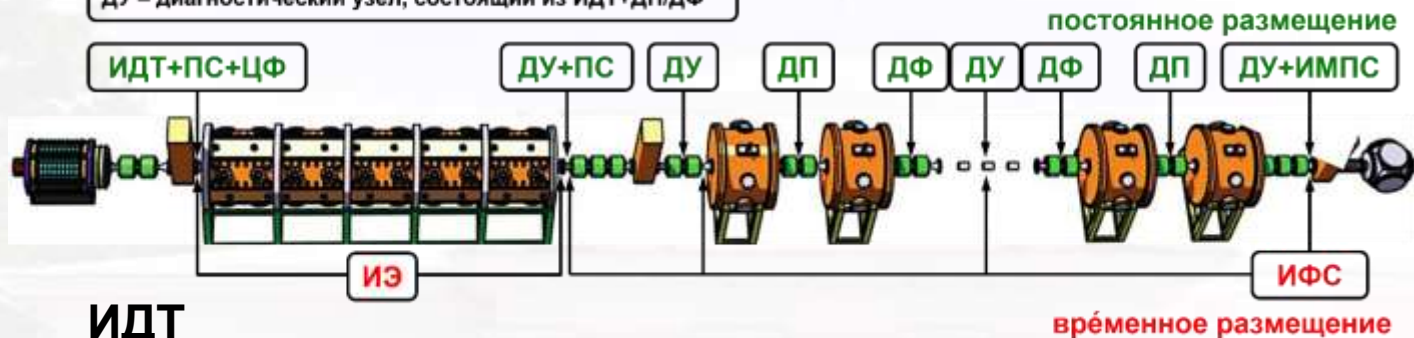
ЦФ



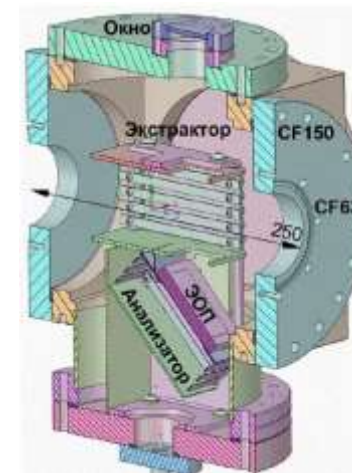
ИДТ – индукционный датчик тока  
 ЦФ – цилиндр Фарадея  
 ДП – датчик положения  
 ДФ – датчик фазы

ПС – проволочный сканер  
 ИЭ – измеритель эмиттанса  
 ИФС – измеритель формы сгустков  
 ИМПС – ионизационный монитор поперечного сечения

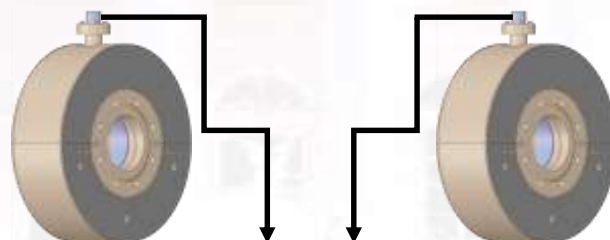
ДУ – диагностический узел, состоящий из ИДТ+ДП/ДФ



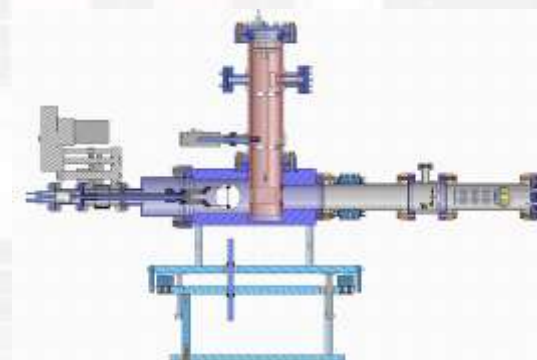
ИМПС



ИДТ



ИФС



система контроля потерь пучка по разности токов

Серия конференция СЯФ ОФН РАН 10-13.03.2026



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

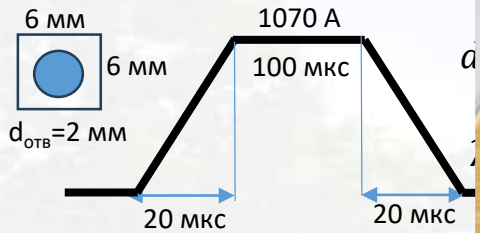


# ГИБРИД ДЛЯ ФОКУС

Компенсация снижения жесткости радиационной деградации намагниченной линзы. Глубина перестройки интегра

## Основные параметры цепи п

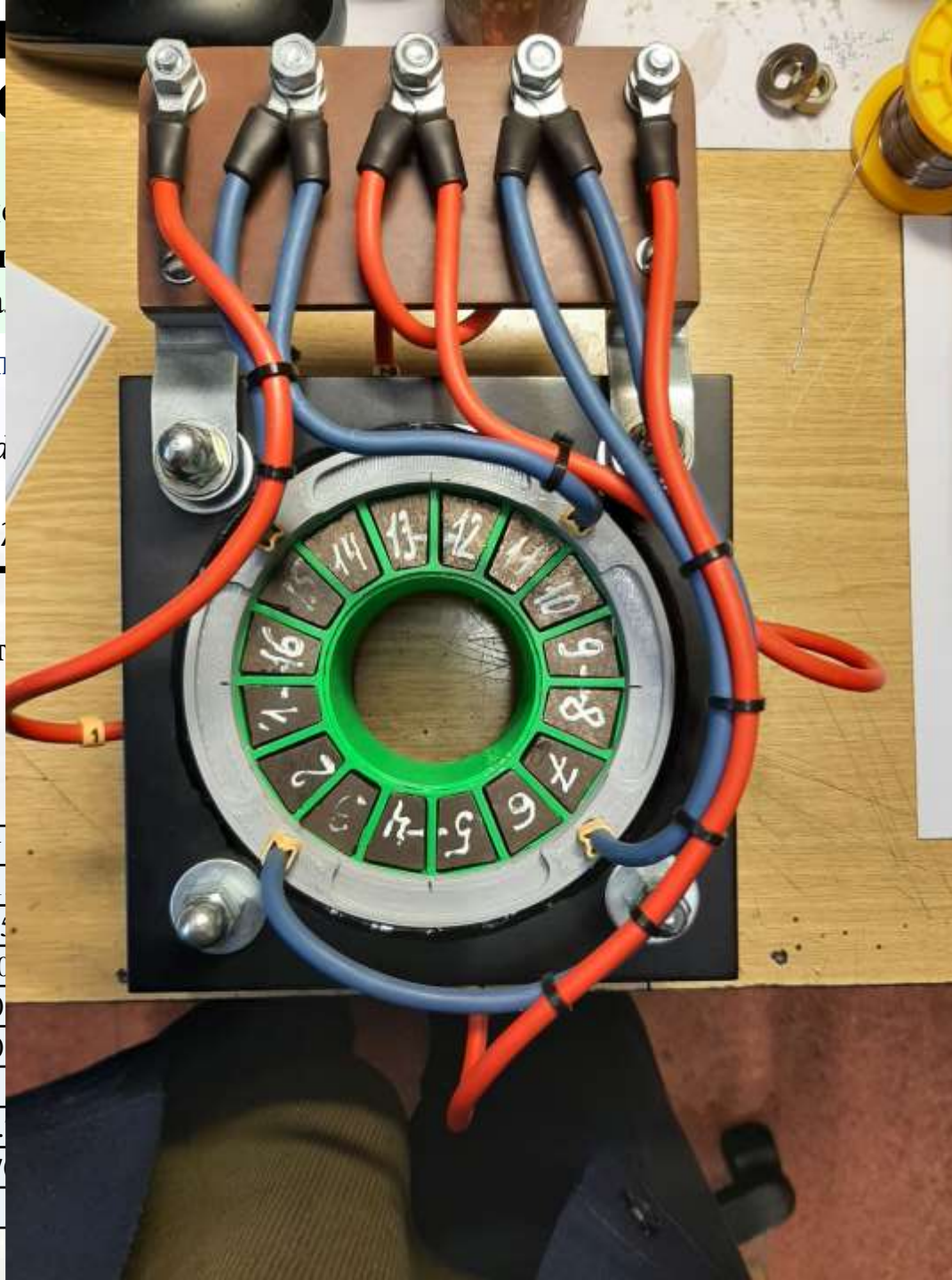
- $P = 5 \text{ кВт}$
- $R = 4 \text{ мОм}$
- $I = 1070 \text{ А}$
- $U_{DC} = 8 \text{ В}$
- $j = 33 \text{ А/мм}^2$
- $L = 40 \text{ мкГн}$
- $U_L = 2 \text{ кВ}$



$$P_{cp} = \frac{P}{\lambda} = \frac{5 \text{ кВт}}{71} = 70 \text{ Вт}$$

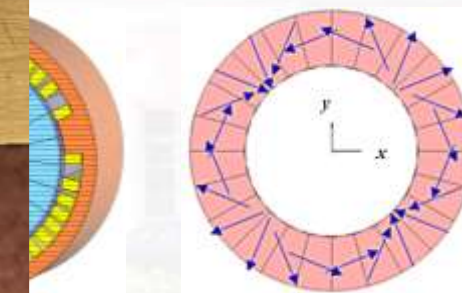
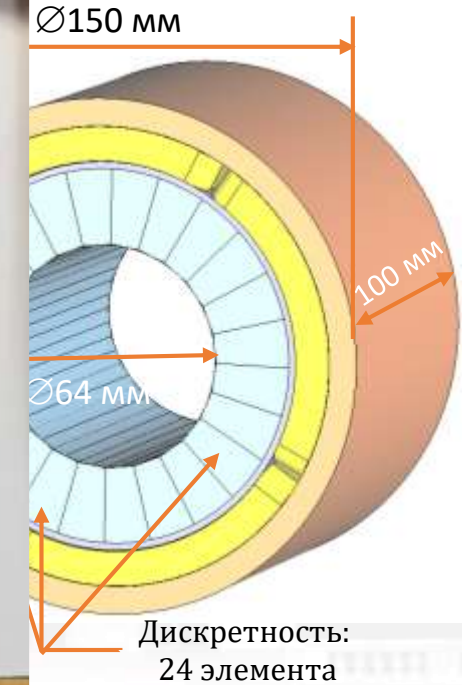
## Основные параметры гибрида и условия его функционирования

Ускоряемые ионы	$p^+$
Энергия пучка, МэВ	$3.3 \div 1$
Ток инжекции, мА	99.5
Длительность пучка, мкс	100
Период следования импульсов пучка, мс	10
Максимальный градиент гибрида, Тл/м	30
Максимальный интеграл градиента, Тл	3
Нелинейность @ 75 % от апертуры, %	< 0.5
Ток возбуждения, А	1070
Мощность рассеяния, кВт (DC)	5



# ВА КСА DARIA

## ПОЛЮСНОЙ ВСТАВКОЙ



Распределение намагниченности



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



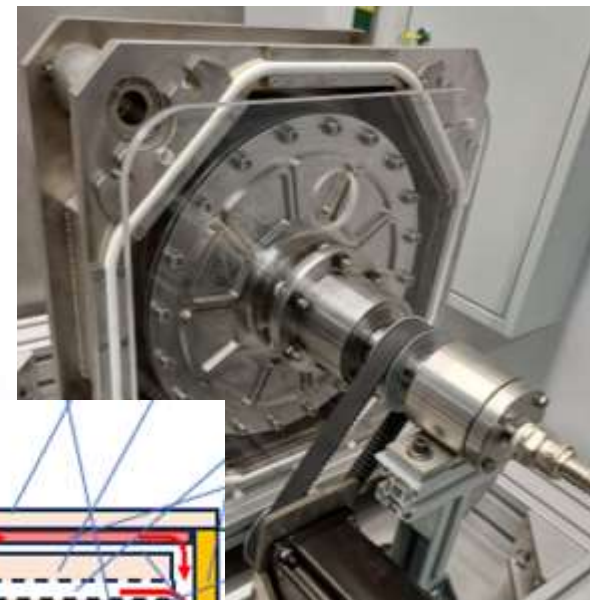


# Вакуумный узел мишенной сборки компактного источника нейтронов

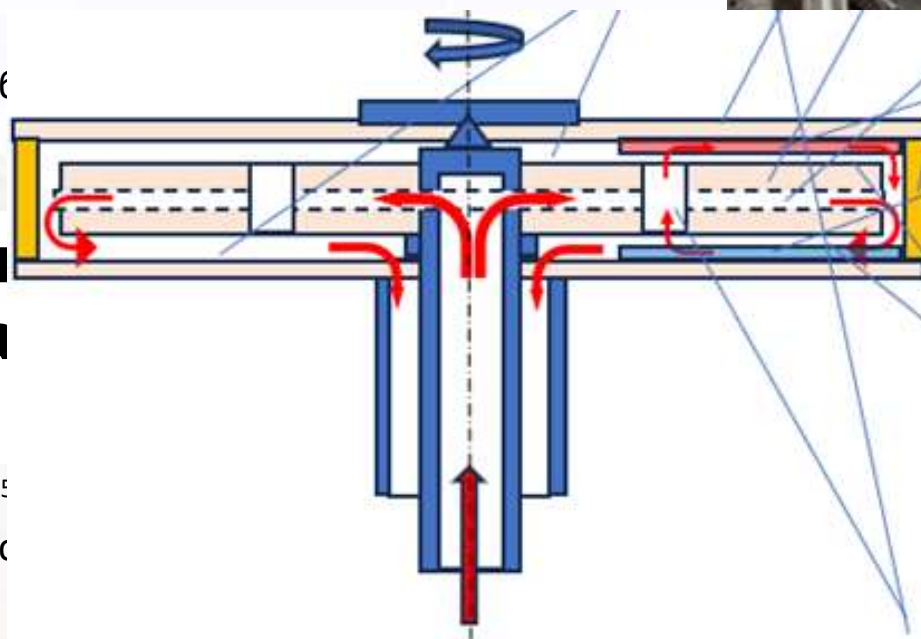
Разработана и изготовлена бериллиевая мишенная сборка компактного источника нейтронов. Проведены технические испытания, тепловые и прочностные расчеты.

## Состав устройства:

1. Вакуумная камера.
2. Вращающийся водоохлаждаемый бараб бериллиевыми ячейками.
3. Магнитожидкостные уплотнения.



## Проведены тестовые испытания на ускорителе И2 на

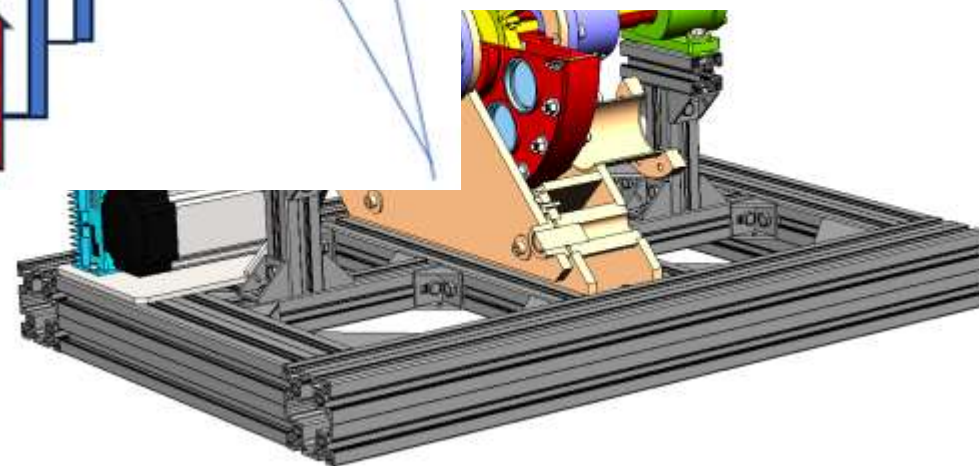


## бериллия на нейтронах с энергией 20 МэВ и

1. Уровень вакуума внутри камеры  $\leq 4 \cdot 10^{-5}$  бар.
2. Давление внутри барабана  $\leq 6$  бар для стальной крышки с бериллиевыми сегментами круглой формы.
3. Частота вращения барабана – 10 Гц.

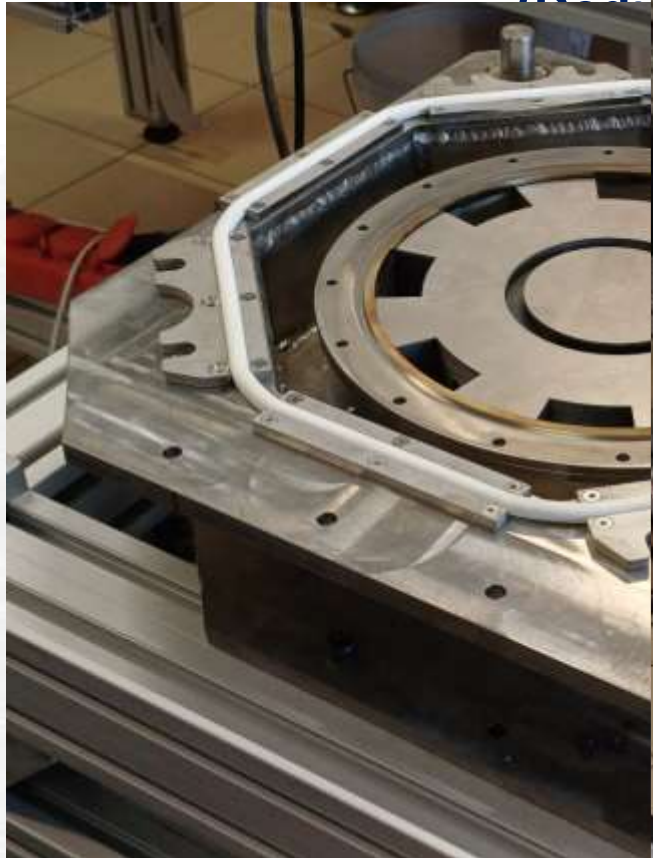
## Расчетные технические характеристики:

1. При энергии пучка 13 МэВ, частоте импульсов 100 Гц и длительности импульса 10 мкс в систему поступит 1,6 кВт тепла. Максимальный теоретический теплоотвод в пределах 10 кВт.
2. Давление внутри барабана  $\leq 9$  бар для стальной крышки с бериллиевыми сегментами круглой формы.



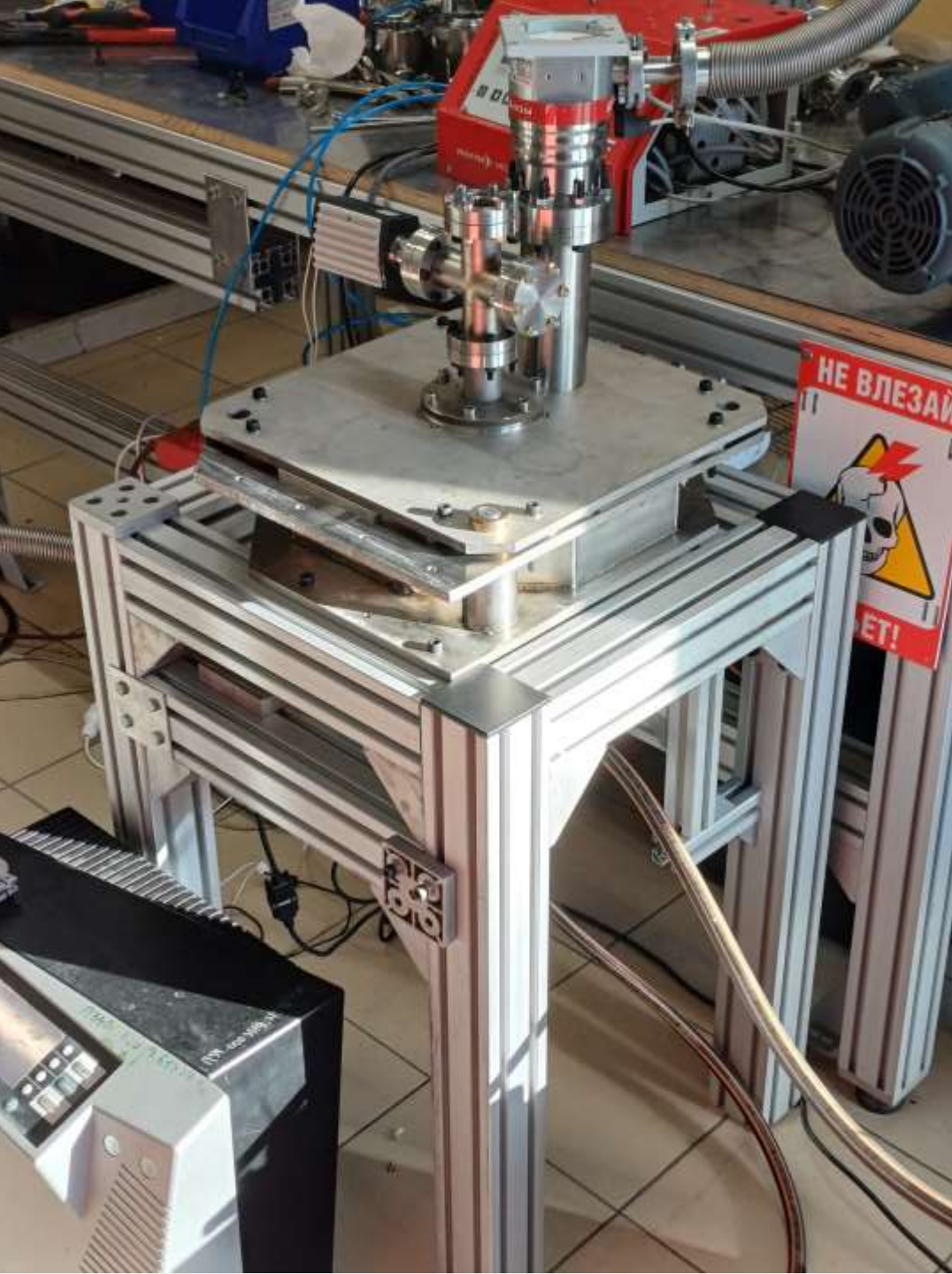
Разработка и изготовление мишенной сборки завершены





Корпус ввода-вывода  
воды

Уплотнение торцевое №2



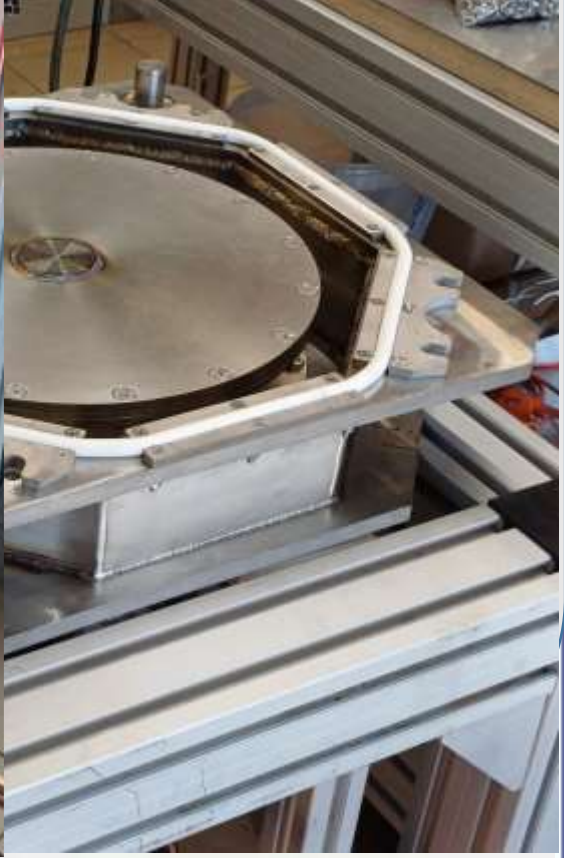
ns).

анта

ного источника.

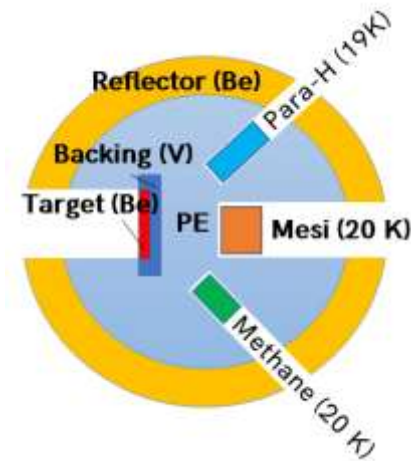
кумная камера

рабан водоохлаждаемый в  
оре

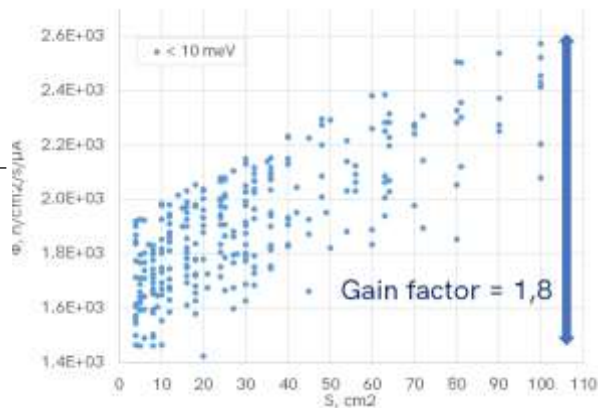


# Мезитиленовый замедлитель

Характеристики мишенной сборки с мезитиленом: Определены оптимальные характеристики мезитиленового замедлителя в составе мишенной сборки. Проведено **свыше 1000** нейтронно-физических расчетов. Установлены характеристики: материал мишени – бериллий, реакция генерации нейтронов со средней энергией 3.3 МэВ -  ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ , с энергией пучка протонов 13 МэВ. Форма – цилиндр с диаметром 50 мм и толщиной 1.1 мм.



В, н/с/см <sup>2</sup> /ср	Multispec	Bi-spectral	
	Mesitylene	Parahydrogen	Water
$4.25\text{E}+10$		$5.80\text{E}+10$	$7.00\text{E}+11$
$\Delta\theta_{inc}, ^\circ$		$\Phi, \text{н/с/см}^2$	
$\pm 0.25$	$5.38\text{E}+03$	$6.90\text{E}+03$	$1.33\text{E}+05$
$\pm 0.5$	$2.15\text{E}+04$	$2.76\text{E}+04$	$5.33\text{E}+05$
$\pm 1$	$8.61\text{E}+04$	$1.10\text{E}+05$	$2.13\text{E}+06$
$\pm 2$	$3.44\text{E}+05$	$4.42\text{E}+05$	$8.53\text{E}+06$



**Изготовлена камера крионого замедлителя (ККЗ) на основе твердого мезитилена. Проведены испытания замедлителя**

Сессия-конференция СЯФ ОФН РАН, 10-13.03.2026



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



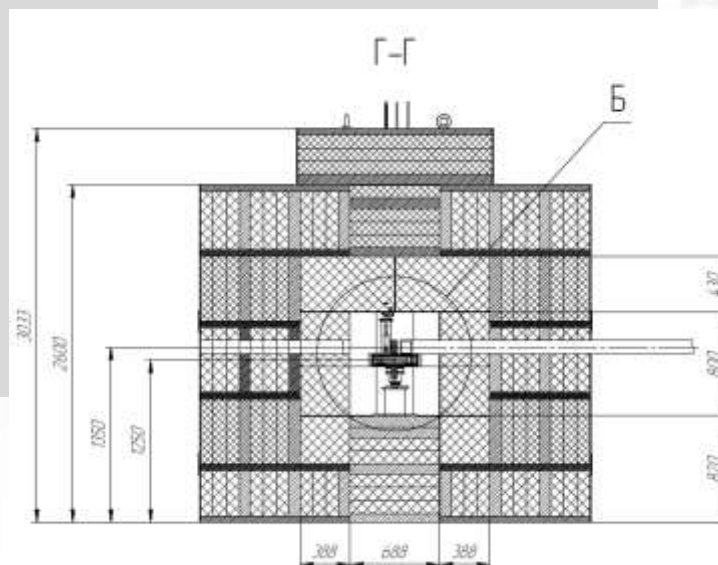
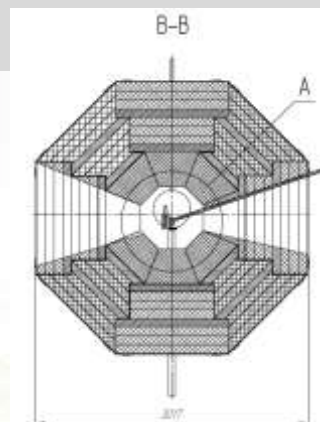
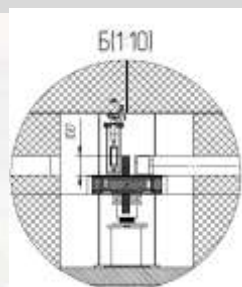
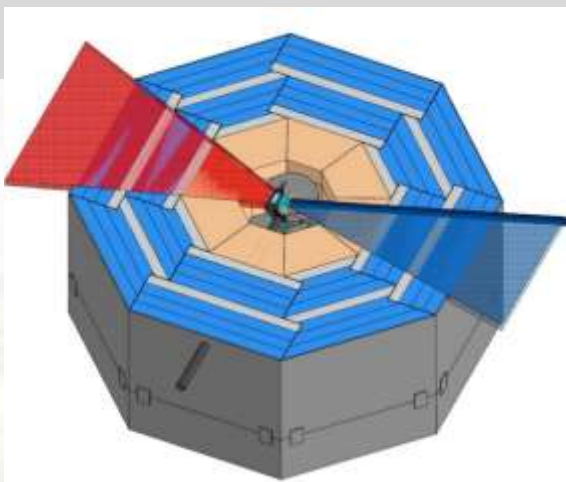
# Компактный источник нейтронов DARIA (Dedicated for Academic and Industrial Applications).

С.-Петербургский Государственный Университет и ИЯИ РАН

Предложены конструкторские решения как основа для эскизного проекта мишенной сборки с нейтрон-генерирующей мишенью на основе бериллия, с тепловым и холодным замедлителями, в комбинации с линейным ускорителем с энергией протонов не более 13 МэВ.

Рекомендации для разработки эскизного проекта мишенной сборки, включающие в себя:

- материал мишени – бериллий, реакция генерации нейтронов со средней энергией 3.3 МэВ -  ${}^9\text{Be}(p,n){}^9\text{B}$ , с энергией пучка протонов 13 МэВ. Форма – цилиндр с диаметром 50 мм и толщиной 1.1 мм,
- Взаимное расположение предзамедлителя, мишени и источника холодных нейтронов на основе мезитилена
- Представлен вариант конструкции биологической защиты мишенной сборки и вывода нейтронных пучков для «холодных» и тепловых экспериментальных установок



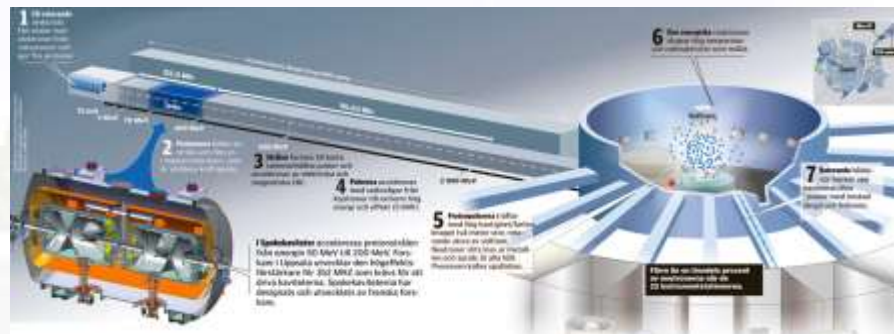
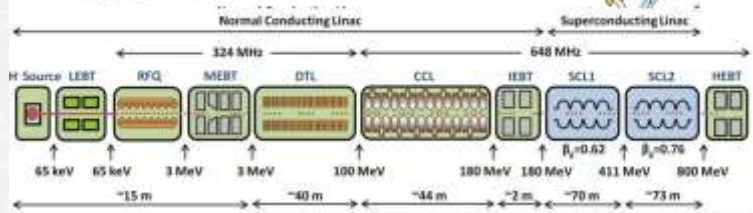
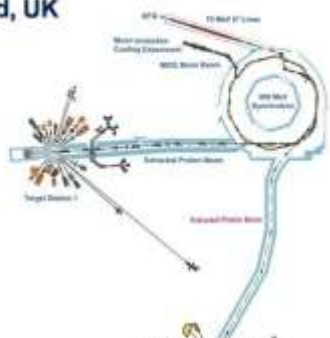


# Spallation Source



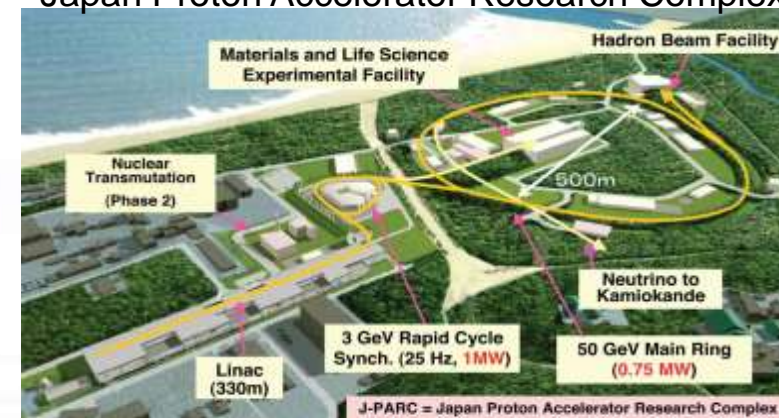
## ISIS, Oxford, UK

- Neutron and Muon source used for condensed matter research by 3000 users.
- H<sup>-</sup> ion source (55 mA)
- 665 keV RFQ (35 mA)
- 70 MeV linac (26 mA)
- 800 MeV 50 Hz, RCS (2.8x10<sup>13</sup> ppp)
- Target 1 + Muon target (140 kW)
- Target 2 (36 kW)



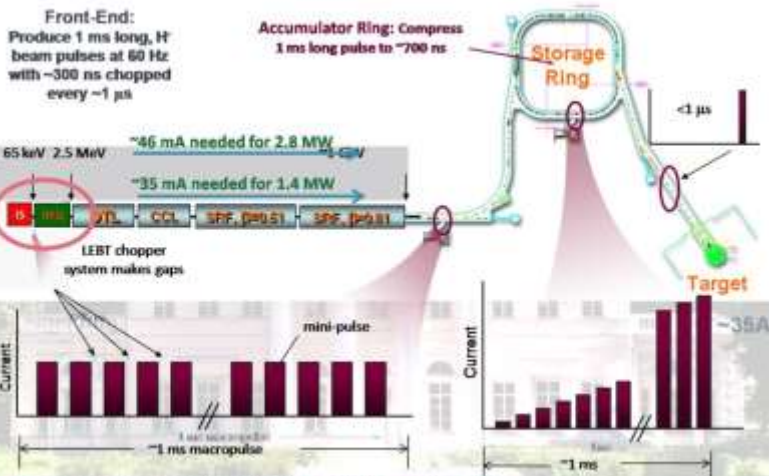
## J-PARC

### Japan Proton Accelerator Research Complex



Joint Project between KEK and JAEA

## The SNS accelerator system overview



The multi-turn charge exchange injection and clean extraction of the accumulator ring requires chopped H<sup>-</sup> beam from the linac.

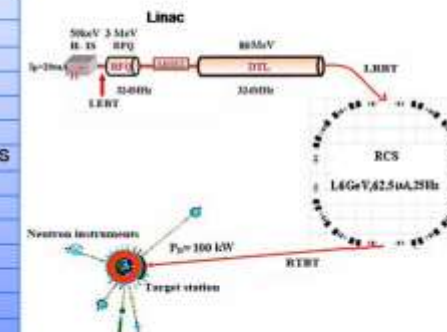
### ESS Main Characteristics

Parameter	Value	Unit
Average proton beam power	5	MW
Proton kinetic energy	2	GeV
Pulse repetition rate	14	Hz
Pulse length	2.86	ms
Average current during pulse	65	mA
Number of moderators	2	
Number of neutron beam ports	42	

### Project Design

- The phase-I CSNS facility consists of an 80-MeV H<sup>-</sup> linac, a 1.6-GeV rapid cycling synchrotron(RCS), beam transport lines, a target station, and 3 instruments.

Project Phase	I	II
Beam Power on target [kW]	100	500
Proton energy [GeV]	1.6	1.6
Average beam current [μA]	62.5	312.5
Pulse repetition rate [Hz]	25	25
Linac energy [MeV]	80	300
Linac type	DTL	+Spoke/PIMS
Linac RF frequency [MHz]	324	324
Macropulse ave current [mA]	15	40
Macropulse duty factor	1.0	1.7
RCS circumference [m]	228	228
RCS harmonic number	2	2
RCS Acceptance [πmm-mrad]	540	540
Target	1	1
Spectrometers	3	20



The first high-energy high-intensity proton accelerator in China



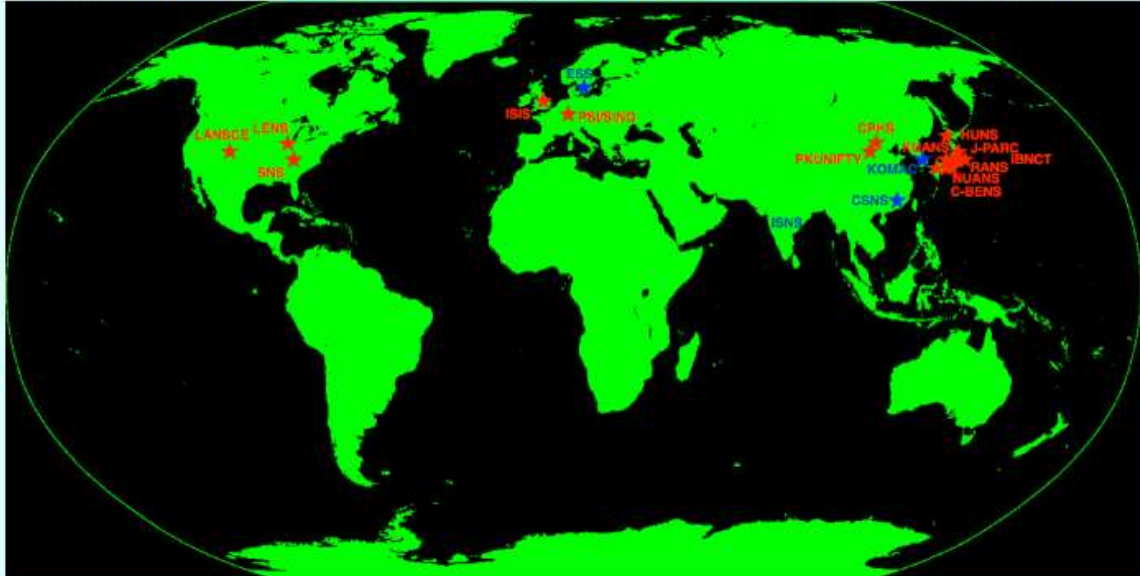
The Official Web Page of  
**Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources  
(UCANS)**

## UCANS

### Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources

The Union for Compact Accelerator-driven Neutron Sources (UCANS) was formed in 2010 to support the ongoing development of small accelerator-driven neutron sources around the world, and to promote the exchange of information on emerging science and novel applications relevant to long-pulsed and/or medium-flux neutron sources.

### Accelerator-driven Neutron Sources for Science (this map is under construction)



[Top page](#)

[About UCANS](#)

[Outline Organization Members](#)

[Documents](#)

[Facilities](#)

[Research](#)

[Publications](#)

[Documents \(Internal\)](#)

[Link](#)

[Contact](#)

# Компактный источник нейтронов RANS

RANS (RIKEN Accelerator -driven compact neutron sources)

## 1. Daily use

Be (p,n)reaction: Be (Dr. Y.Yamagata)

• Neutron flux  $\sim 10^{12}/\text{sec}$  (proton 7 MeV, 100  $\mu\text{A}$ )

• 7 MeV 700W

• 100  $\mu\text{A}$  maximum averaged current

• 10-180  $\mu\text{s}$  pulse width

• 20-180Hz repetition rate

Choose them under  
the condition 1.3 %  
duty, 100  $\mu\text{A}$

## 2. compact and low cost

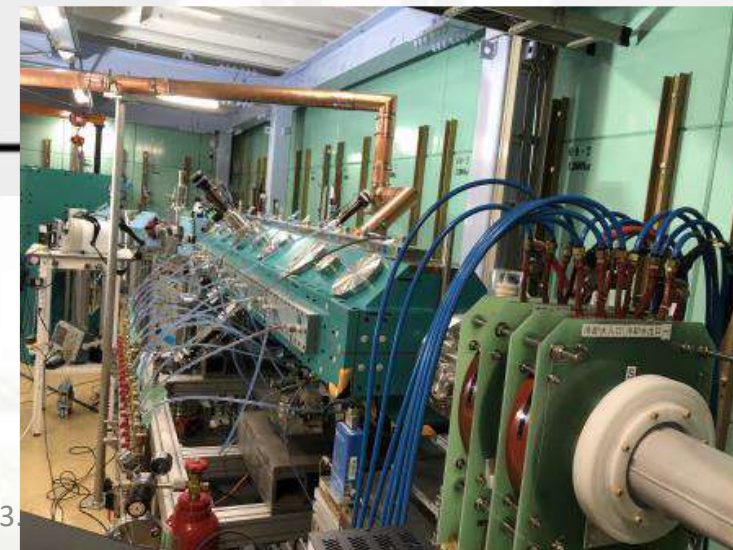
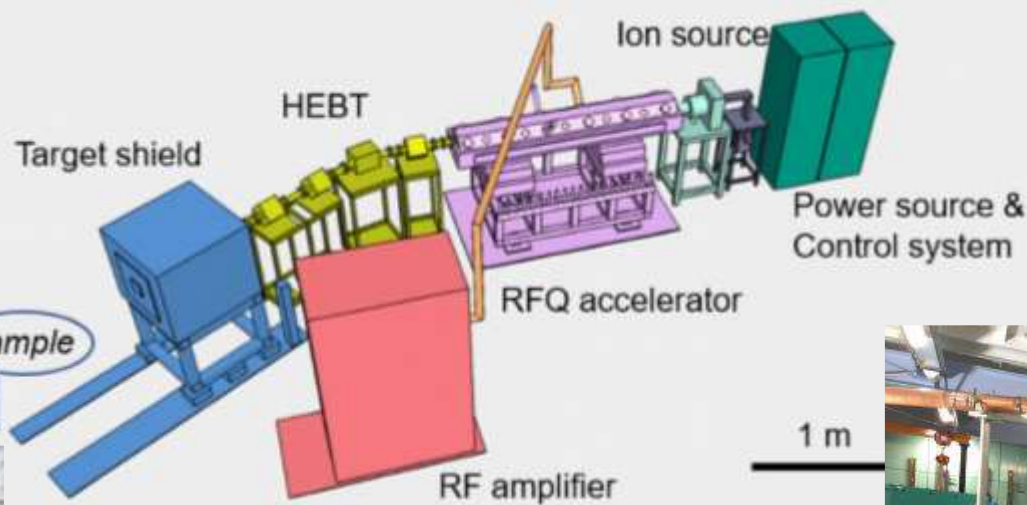
proton linac: in our case less than <2億円=2\*10<sup>8</sup> yen=2 million US\$

shielding design Multilayer shielding of target station

7 MeV, 100  $\mu\text{A}$ , Rf power supply: 350kW(peak) duty 1.3%, Electric power peak 40kVA, Cooling water: 75L/min, pulse width (30~200  $\mu\text{s}$ ) repetition frequency  $\sim 20 \sim 180\text{Hz}$  RF power 425MHz, Injection energy 0.030-3.5 MeV

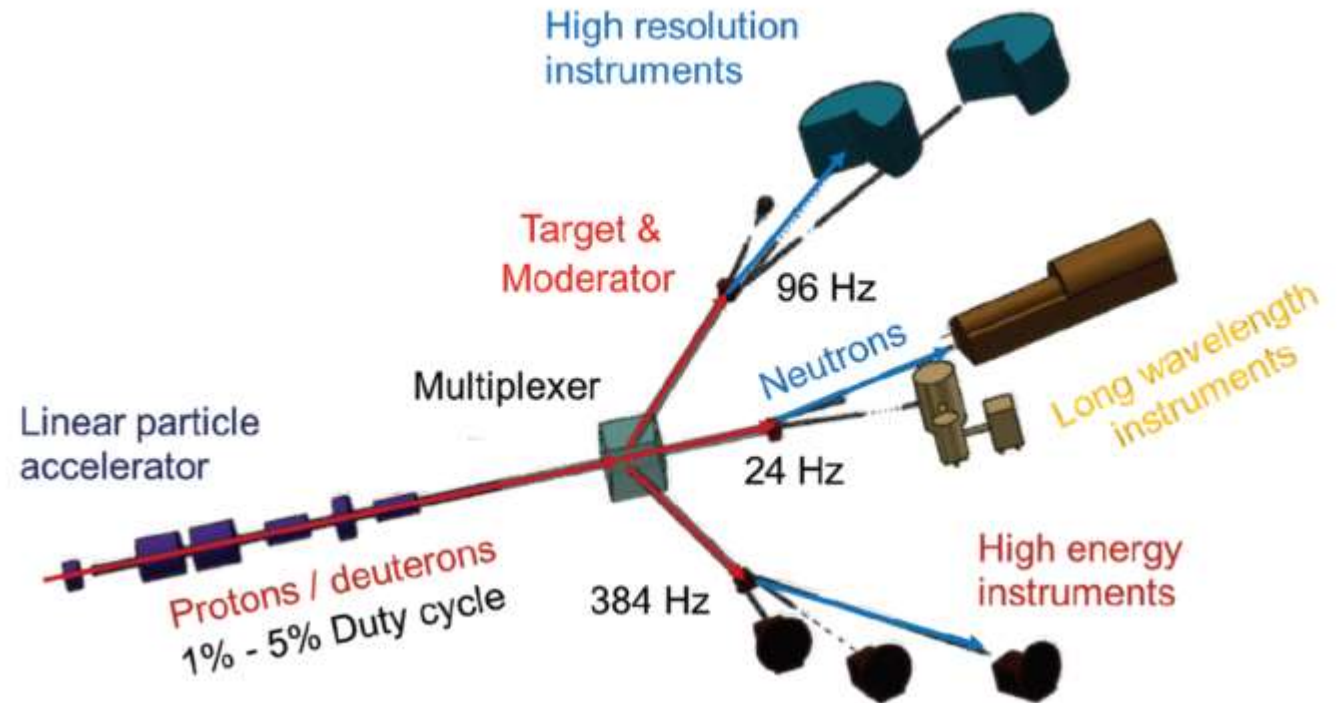
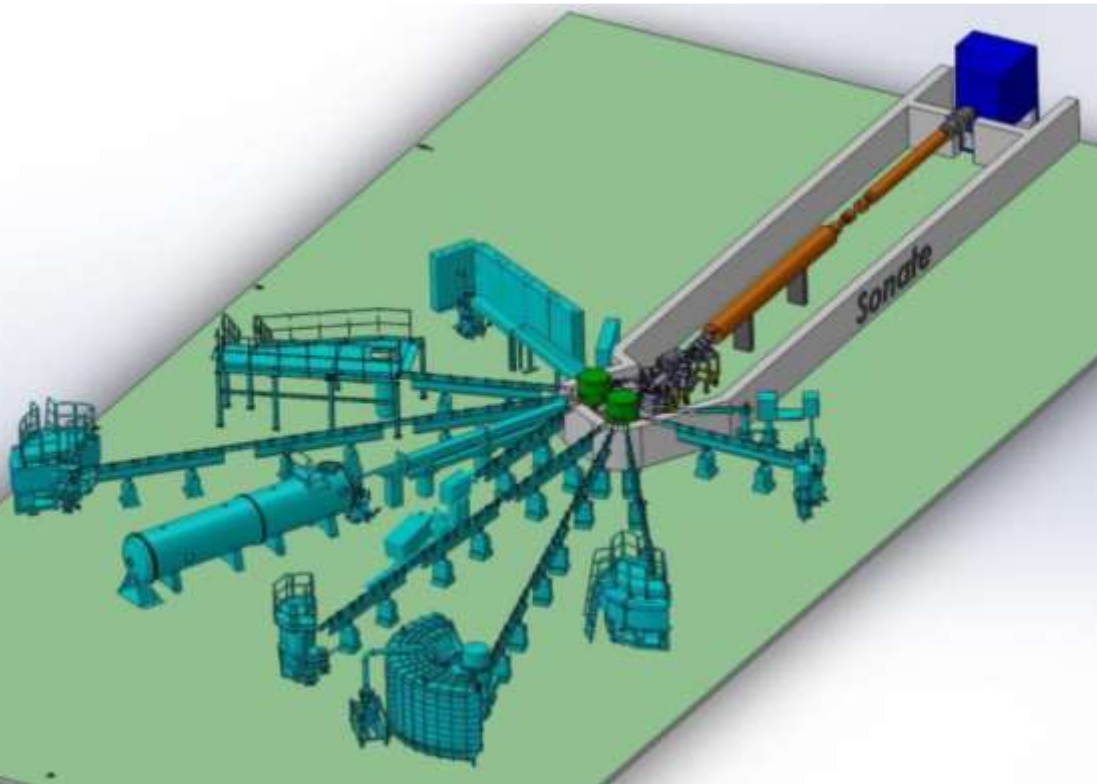
2011 start  
2012 construction  
2013 Jan Neutron production 2013 April - open to collaborators

2017 Up-grade, moderators, proton beam monitors  
2018 RANS-II shielding shelter construction



# Компактный источник нейтронов ICONE

# Проект высокоинтенсивного источника нейтронов HBS



$E_p = 20\text{MeV}$ ,  
 $I_{\text{peak}} = 100\text{mA}$ ,  
 duty cycle = 4%,  $P = 80\text{kW}$ ,  
 fixed Be target.  
 correspond to the first 20m of the ESS Linac

	NOVA ERA	Large scale facility
Accelerator	Tandem	Linac(176MHz) RFQ+35DDL
Particle type	Proton / Deuteron	Proton
Energy	10 MeV	70 MeV
Current	1 mA	100 mA
Frequencies	48 - 384 Hz	384, 96, 24 Hz
Duty cycle	4%	~ 4.3 %
Peak beam power	10 kW	7 MW
Average beam power	0.4 kW	~ 3 - 100 kW

# High averaged power linac: driver for ADS/SNS/FRIB

201.25 MHz

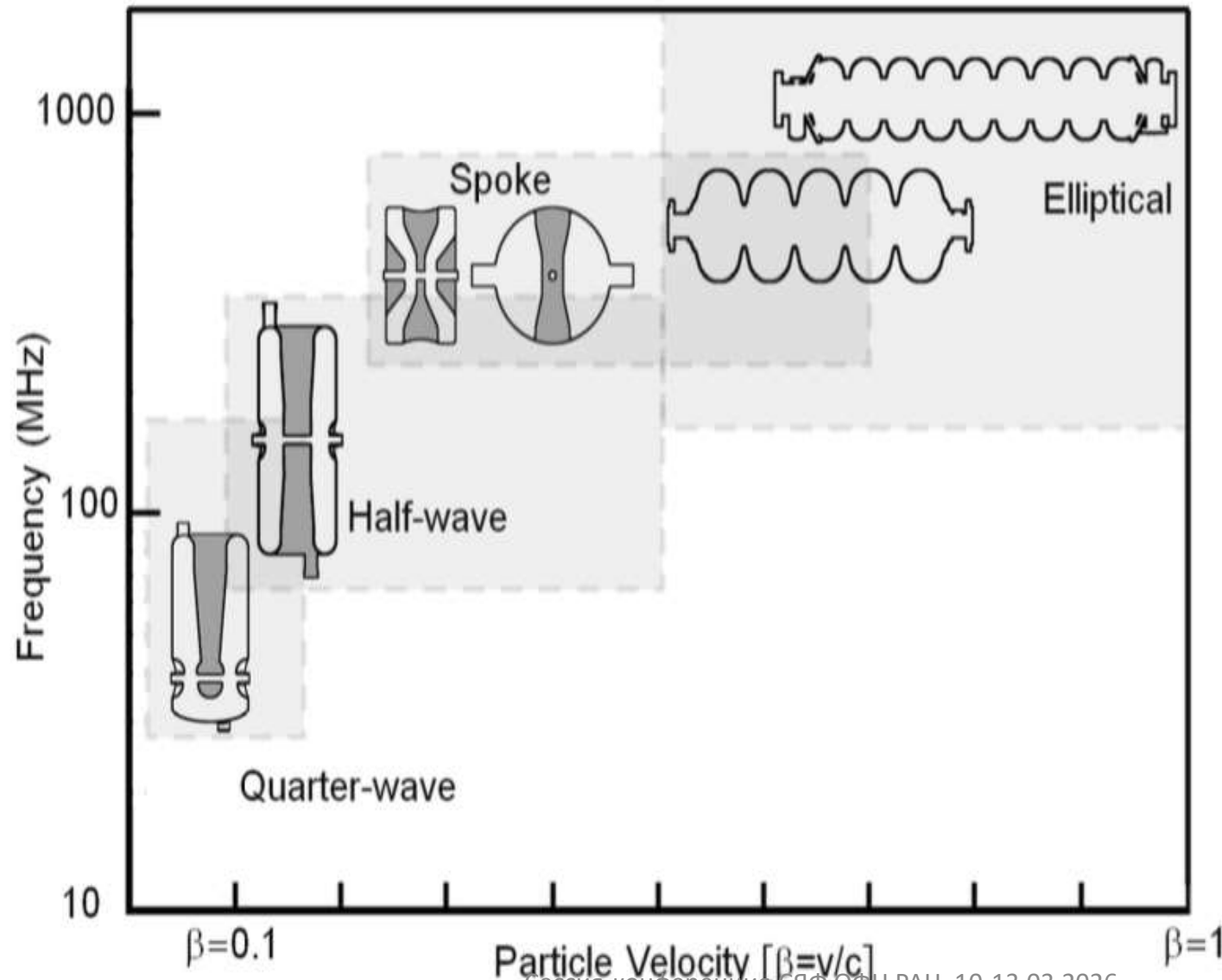
805 MHz

**For new projects SC part starts for lower and lower energies:**  
**LAMPF – fully NC;**  
**SNS 186 MeV;**  
**ESS 90 MeV;**  
**MYRRHA 17 MeV;**  
**ChADS 6 MeV;**  
**Spiral2 0.75 MeV/u;**  
**ALPI 0.1 MeV/u etc.**

2002

Injector	2.5 MeV	86.8 MeV	186 MeV $\beta=0.55$	391 MeV $\beta=0.71$	1 GeV $\beta=0.87$
----------	---------	----------	-------------------------	-------------------------	-----------------------

# Optimal SC cavities for different wave-length and phase (geometric) velocity



**Important note:**  
**the accelerating gradient for NC cavities is limited by the RF discharge, but for SC cavities – by the quench caused by surface currents !**

**The overvoltage coefficients (both for electric and magnetic fields) is also crucially important.**

# Проект DARIA: применение.

С.В. Григорьев  
СПбГУ/НИЦКИ-ПИЯФ  
«консорциум» DARIA



# Какие нейтроны нам нужны? И почему?

## **Выводы:**

**В стратегии развития нейтронных исследований в России должен появиться раздел**

**«Развитие импульсных источников нейтронов на базе источника DARIA»** в части углубленной специализации нейтронных установок при соответствующей реконструкции мишенной сборки, но сохранении параметров протонного ускорителя.

## **Специализации:**

- 1) магнетизм и кристаллография,**
- 2) материаловедение и промышленные применения,**
- 3) биология и медицина.**

# Какие нейтроны нам нужны? И почему?

Тепловые нейтроны (10-30 мэВ) с длиной волны порядка 1 Ангстрема для дифракции на кристаллической решетке.



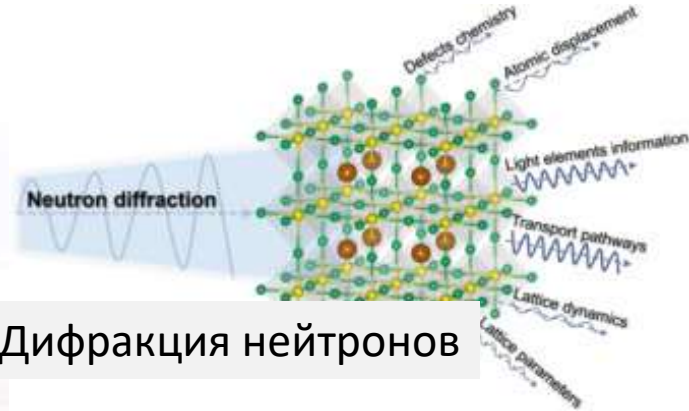
Холодные нейтроны (1-3 мэВ) с длиной волны порядка 5 Ангстрем для дифракции на наноструктурах.



Нейтронное излучение таких энергий представляет собой окно в мир атомной решетки и объектов наномира.

# Рассеяние нейтронов, как метод исследования

- 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



Рефлектометрия нейтронов

Малоугловое рассеяние нейтронов



# Какие нейтроны нам нужны? И почему?

## Свойства нейтрона:

- **отсутствие заряда** → глубокое, неразрушающее проникновение в вещество (= радиография и дифракция промышленных объектов)
- **наличие магнитного момента** → прямое обнаружение магнитных структур и исследование магнитных материалов (= магнетизм переходных и редкоземельных металлов и сплавов на их основе).



# Какие нейтроны нам нужны? И почему?

## RIKEN Accelerator-driven compact Neutron Source, Waco, Japan

визуализация в просвечи  
вающем режиме с использованием  
тепловых и холодных нейтронов,  
дифракция, малоугловое рассеяние  
нейтронов, фазово-контрастная  
визуализация, визуализация обратного  
рассеяния быстрых нейтронов (от 500  
кэВ до 5 МэВ) и элементный анализ  
(метод мгновенной активации гамма-  
излучения).

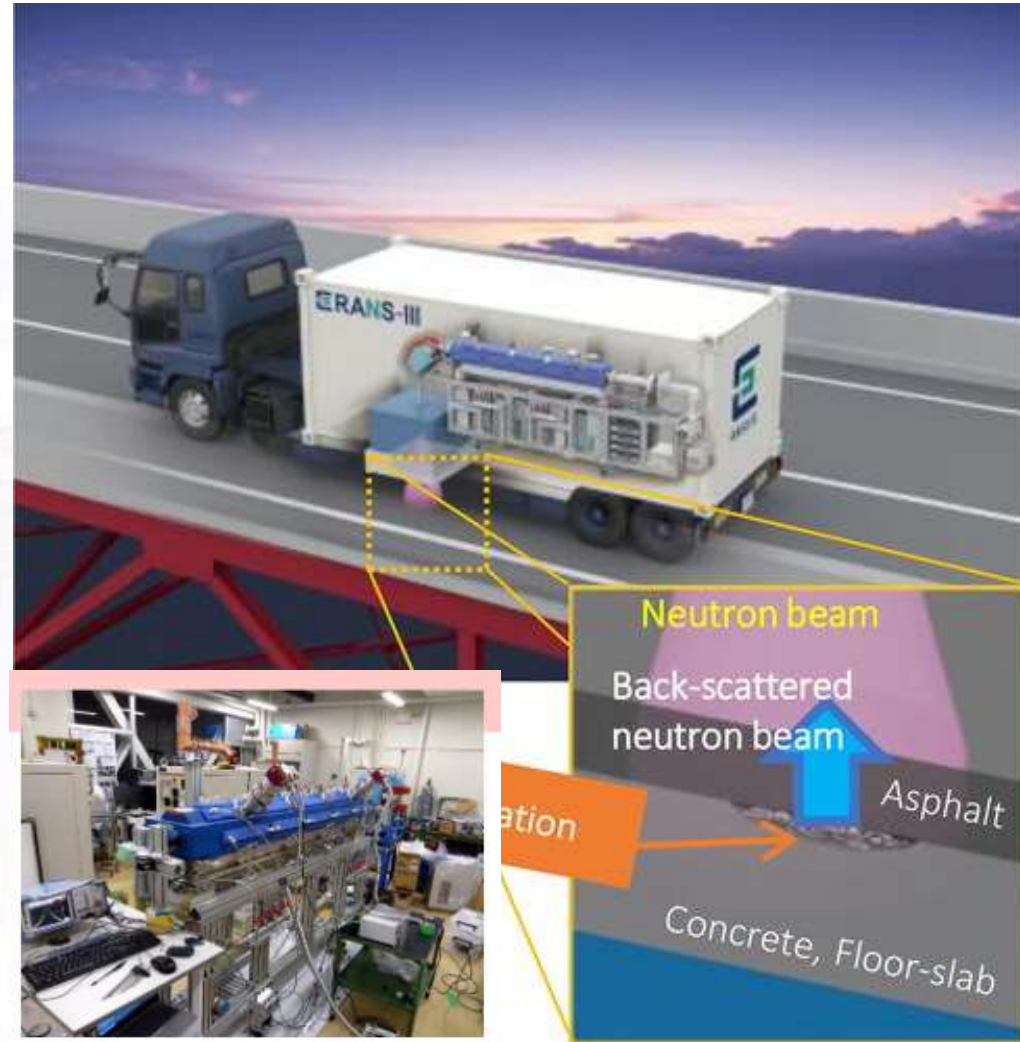


## Какие нейтроны нам нужны? И почему?



**RANS-III** - контейнерная портативная система источника нейтронов для неразрушающего внутреннего контроля мостов, автомагистралей и других открытых объектов инфраструктуры:

- визуализации пустот, отложений и застойной воды в бетонных перекрытиях.
- контроль коррозии в местах крепления тросов подвесного моста.
- измерение концентрации хлоридов в стальных материалах покрытых защитным слоем 10 см и более.



Yoshie Otake, (2020) <https://doi.org/10.1051/epjconf/202023101009>

Yoshie Otake, et al., (2023) DOI: 10.1080/10619127.2023.2198914