



***Compact Neutron Source  
based on  
Linear Accelerator  
(BELA DARIA)***

***Timur Kulevoy***



# Heavy ion irradiation as a tool for simulation of neutron irradiation damage

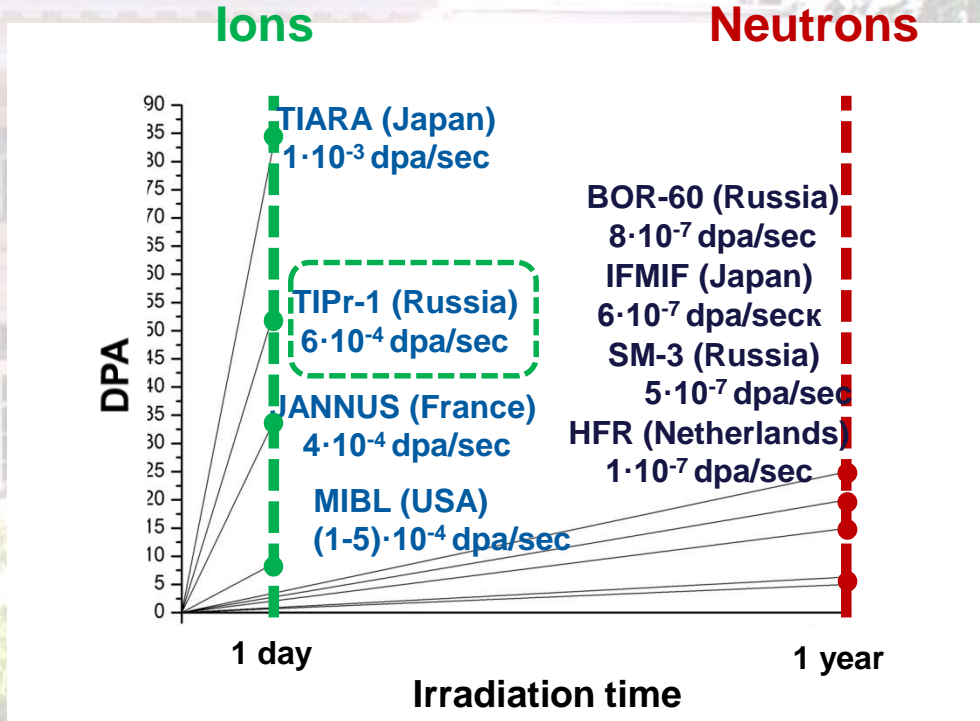
Very fast damage dose acquisition

No activation of irradiated material

Difficulties with the direct comparison with neutron data due to dose rate effect



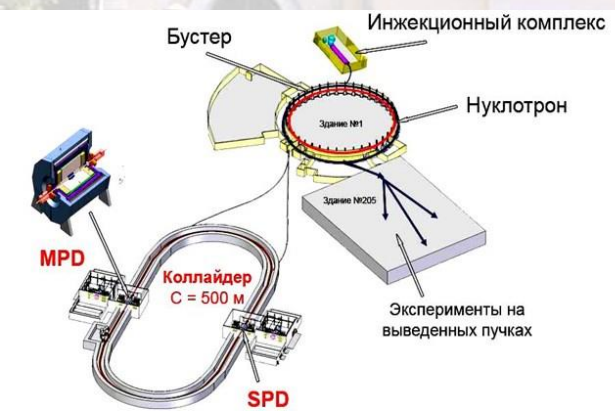
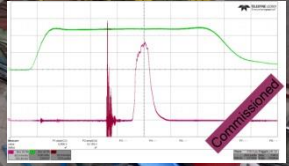
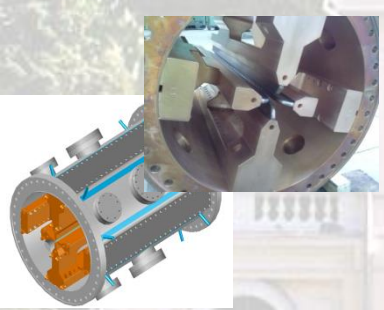
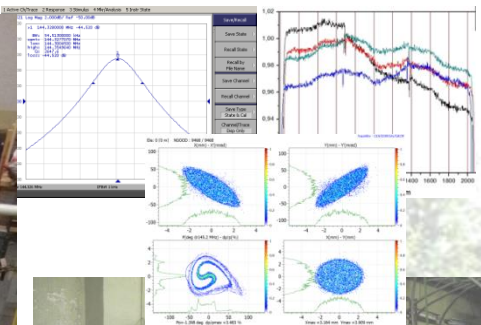
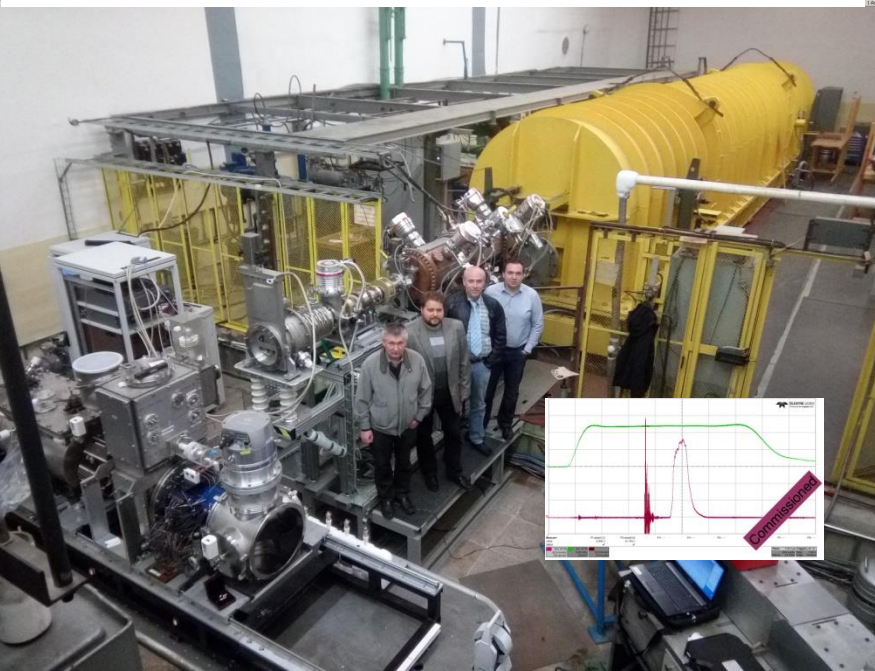
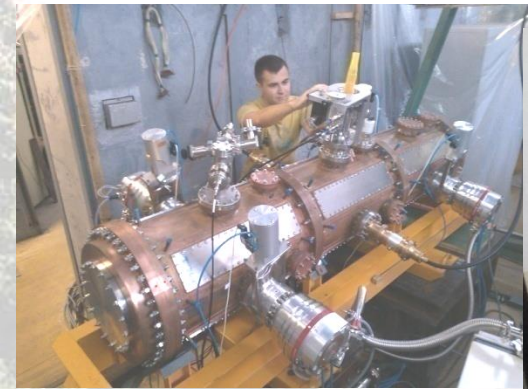
RFQ TIPr-1





# Project NICA (JINR)

## RFQ for-injector Nuclotron



**Трансмиссия канала, %**

$Z/A=0.5; I_{инж}=20 \text{ mA}$			$Z/A=0.3; I_{инж}=10 \text{ mA}$		
FQ out	MEBT (out)	ЛУ-20 (inp)	RFQ (out)	MEBT (out)	ЛУ-20 (inp)
89	81	60	93	92	80





# ***BELA***

***Project  
of***

***Multidiscipline Facility Based on ECR***

***Ion Source  
and***

***Linear Accelerator***

***NRC "Kurchatov institute"-ITEP***



# ***ION BEAMS APPLICATION***



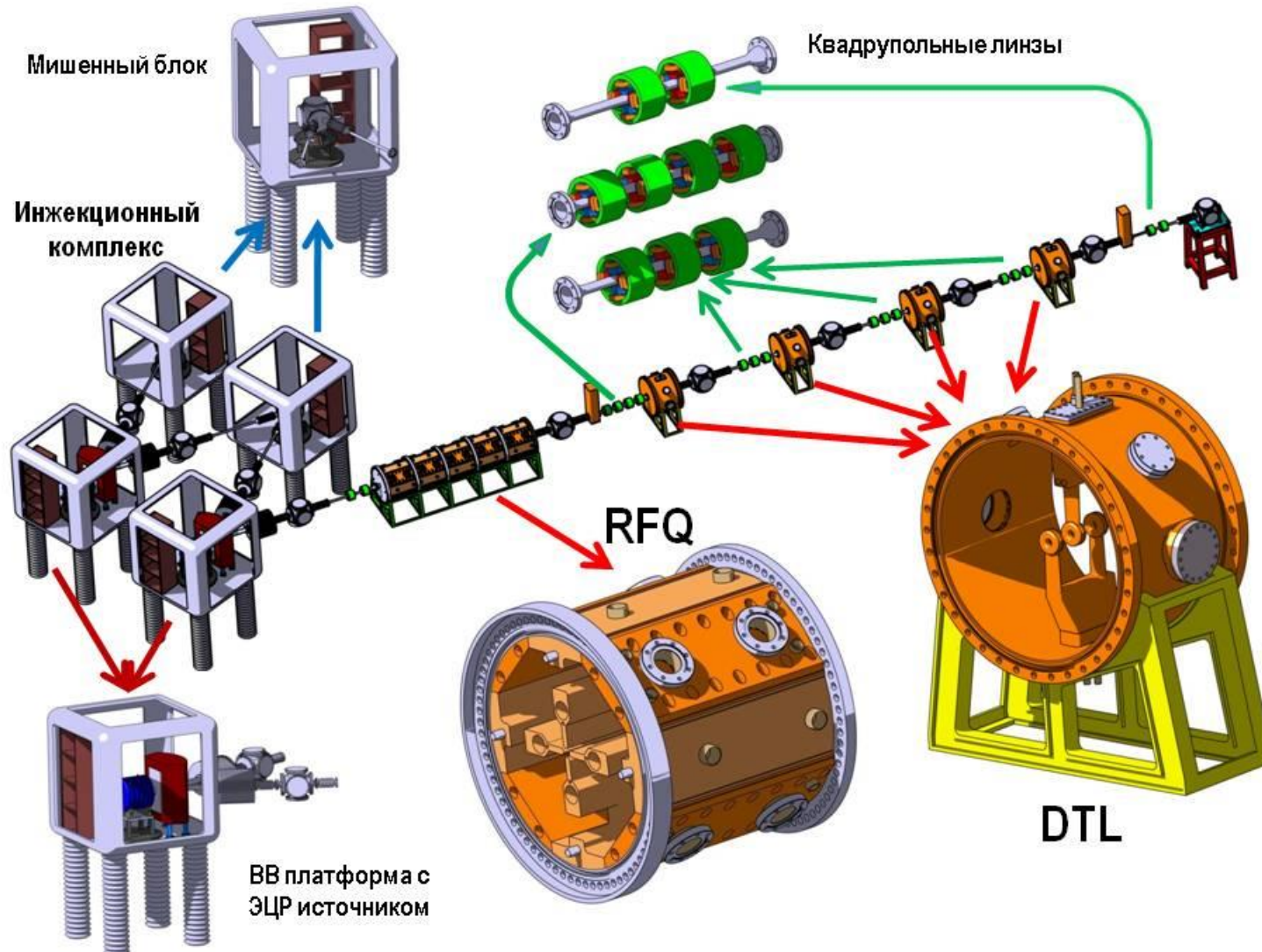
- ✓ **Material science – materials modification, fusion and fission reactor materials investigations;**
- ✓ **Facility for semiconductor industry – improvement of power electronics units by proton/ion beam irradiation;**
- ✓ **Neutron generator;**
- ✓ **Medicine (BNCT, Radiopharmaceutical for PET);**
- ✓ **Astrophysics;**
- ✓ **....**
- ✓ **Spallation Source**
- ✓ **Accelerator Driving Ssystem**



# BELA



New “basic facility” for  
researches with neutron and ion beams

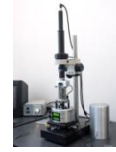
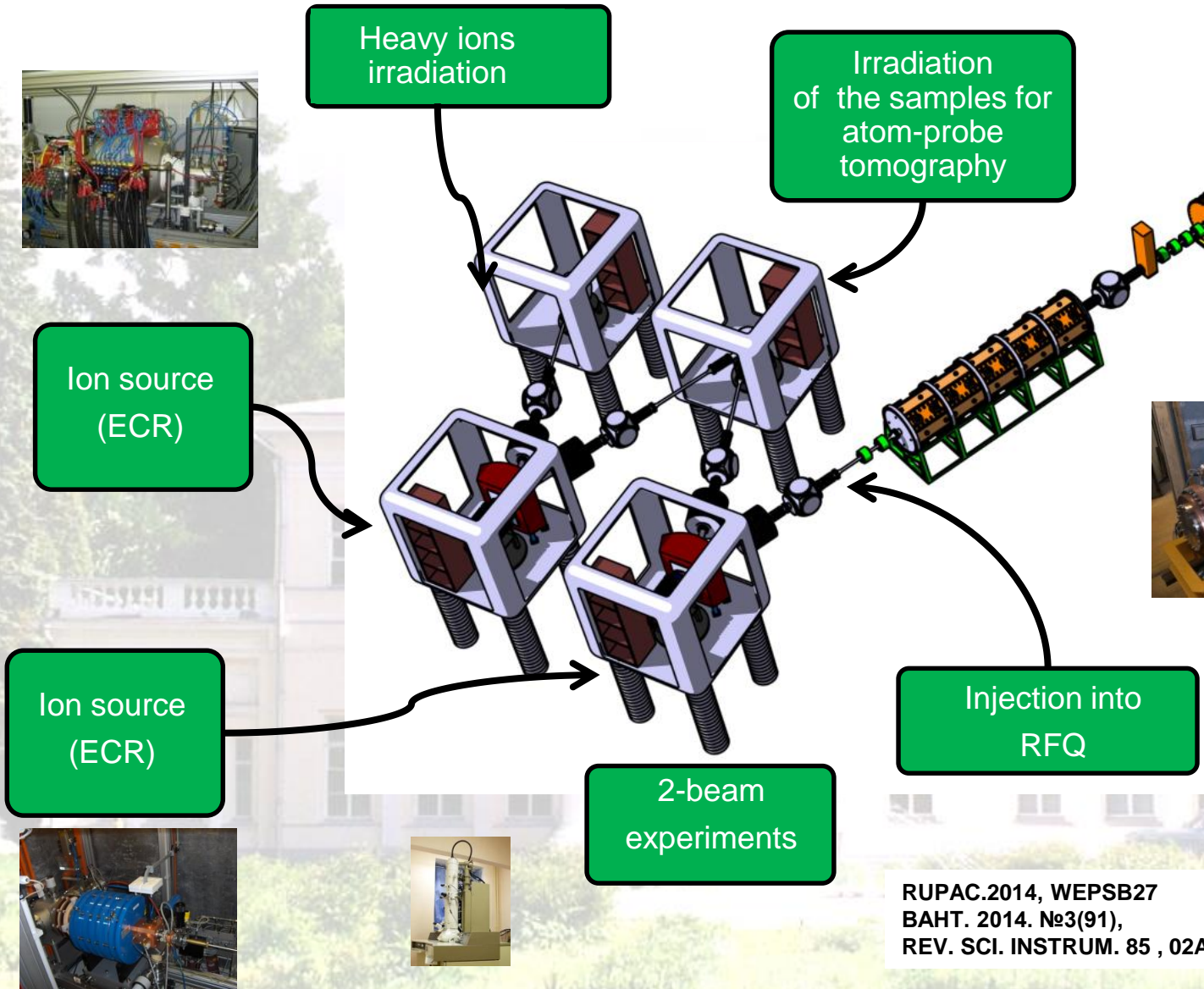




# BELA



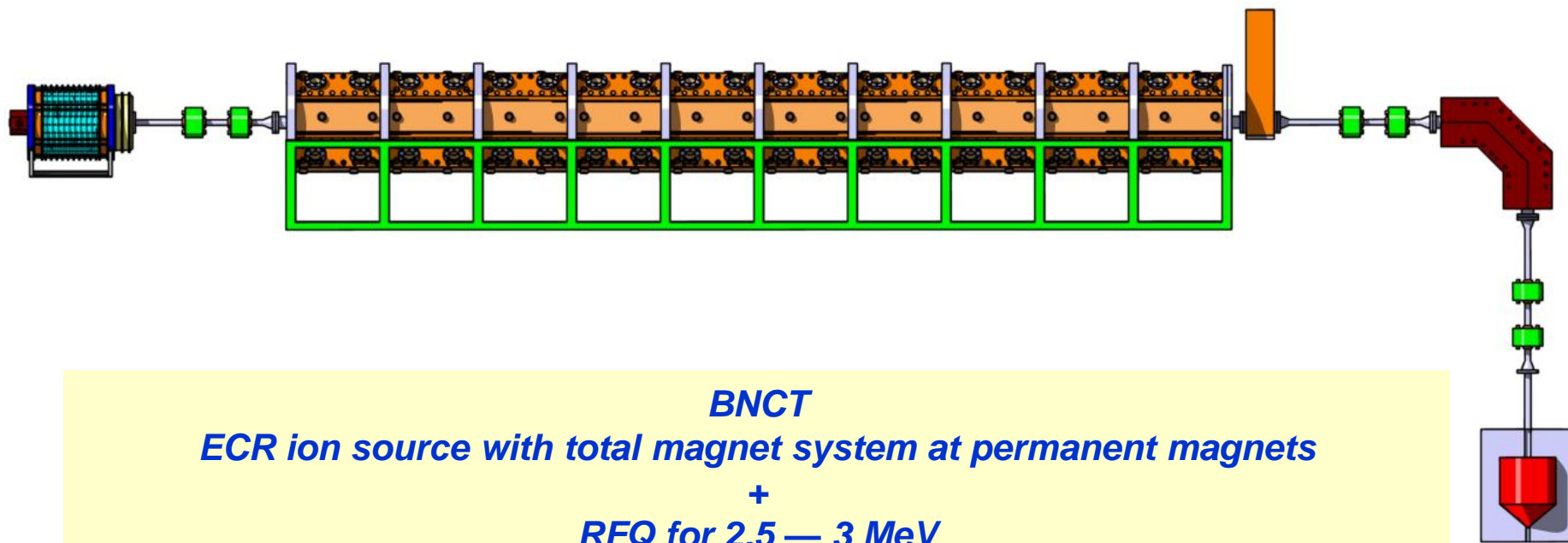
## Stage I ECR IS and cw RFQ (5 years)



RUPAC.2014, WEPSB27  
BAHT. 2014. №3(91),  
REV. SCI. INSTRUM. 85 , 02A910 (2014)



# Compact neutron generator (BNCT)



*BNCT*

*ECR ion source with total magnet system at permanent magnets*

*+*

*RFQ for 2.5 — 3 MeV*

*+*

*Li target and moderator*

*10 mA proton beam at energy 2.5 MeV generates  $10^{13}$  нейтронов/секунду*

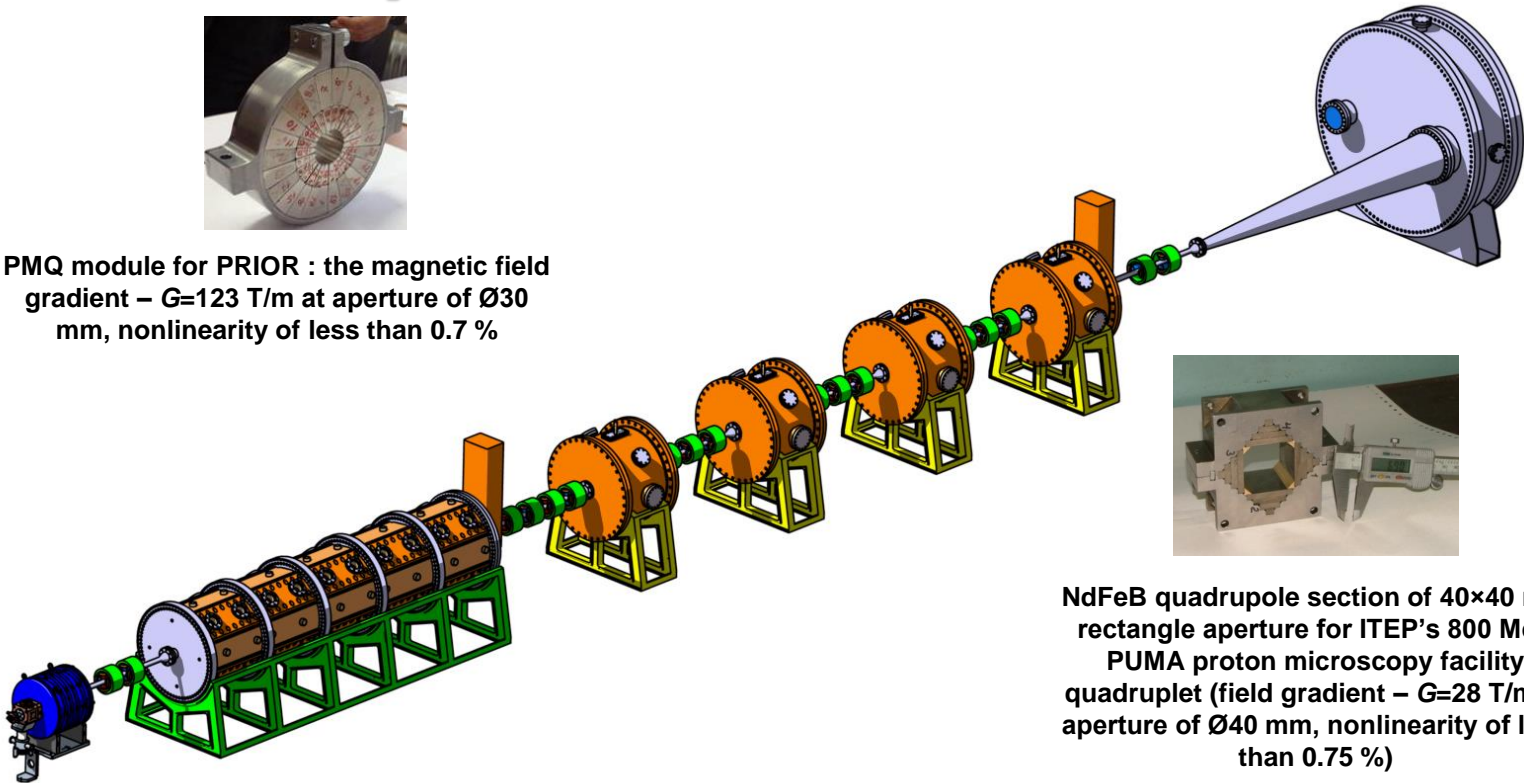




# Facility for neutron generation and production of radiopharmaceutical for PET



PMQ module for PRIOR : the magnetic field gradient –  $G=123$  T/m at aperture of  $\varnothing 30$  mm, nonlinearity of less than 0.7 %



NdFeB quadrupole section of  $40 \times 40$  mm rectangle aperture for ITEP's 800 MeV PUMA proton microscopy facility quadruplet (field gradient –  $G=28$  T/m at aperture of  $\varnothing 40$  mm, nonlinearity of less than 0.75 %)

## PERMANENT MAGNET LENSES

- Radiopharmaceutical for PET prototype of compact facility for clinic application;
- Astrophysics
- Initial part for ADS

# Other applications

Aside from neutron scattering



## 1. Educational:

- ▶ Accelerator technology
- ▶ Dosimetry

## 2. Scientific:

- ▶ Proton beam techniques

## 3. Industrial:

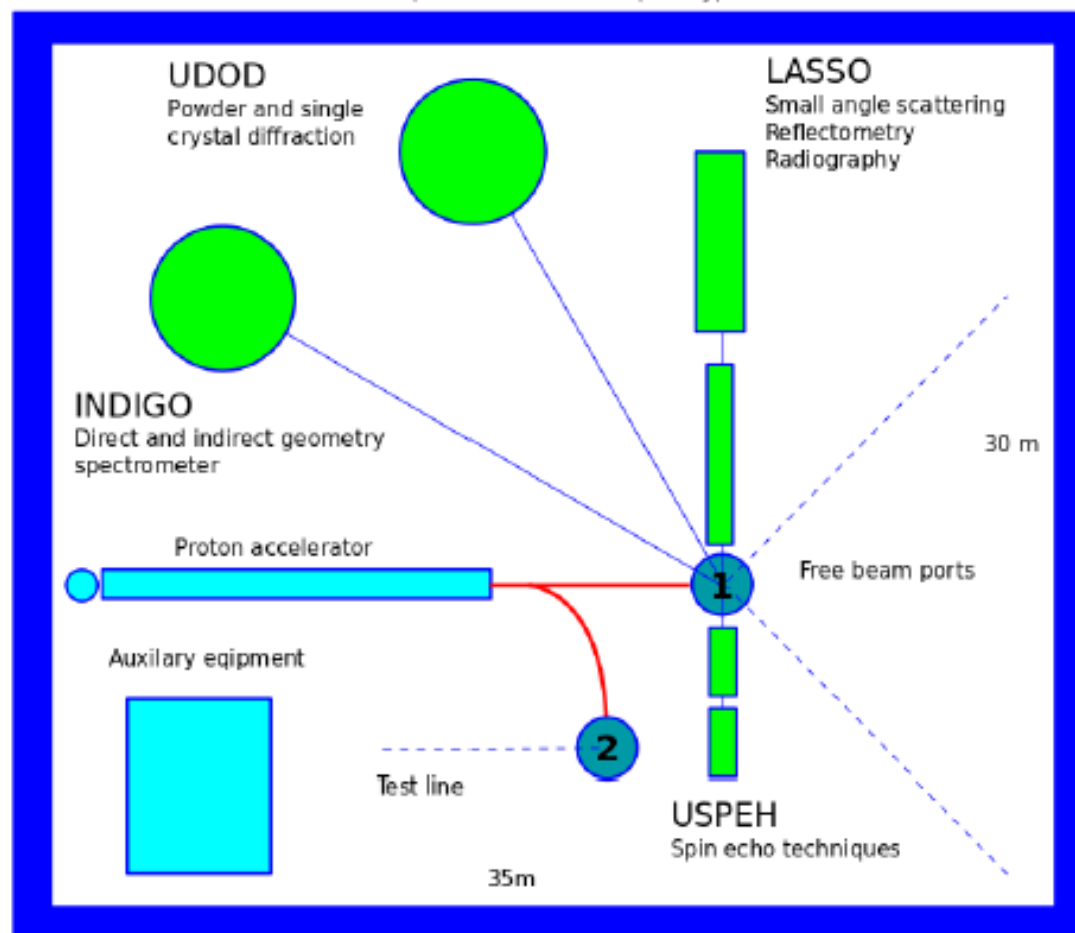
- ▶ Irradiation
- ▶ Isotope production
- ▶ Energy and heat producing
- ▶ Radiography (incl. transportable n sources)

## 4. Medicine

- ▶ Boron-capture cancer therapy

## DARIA

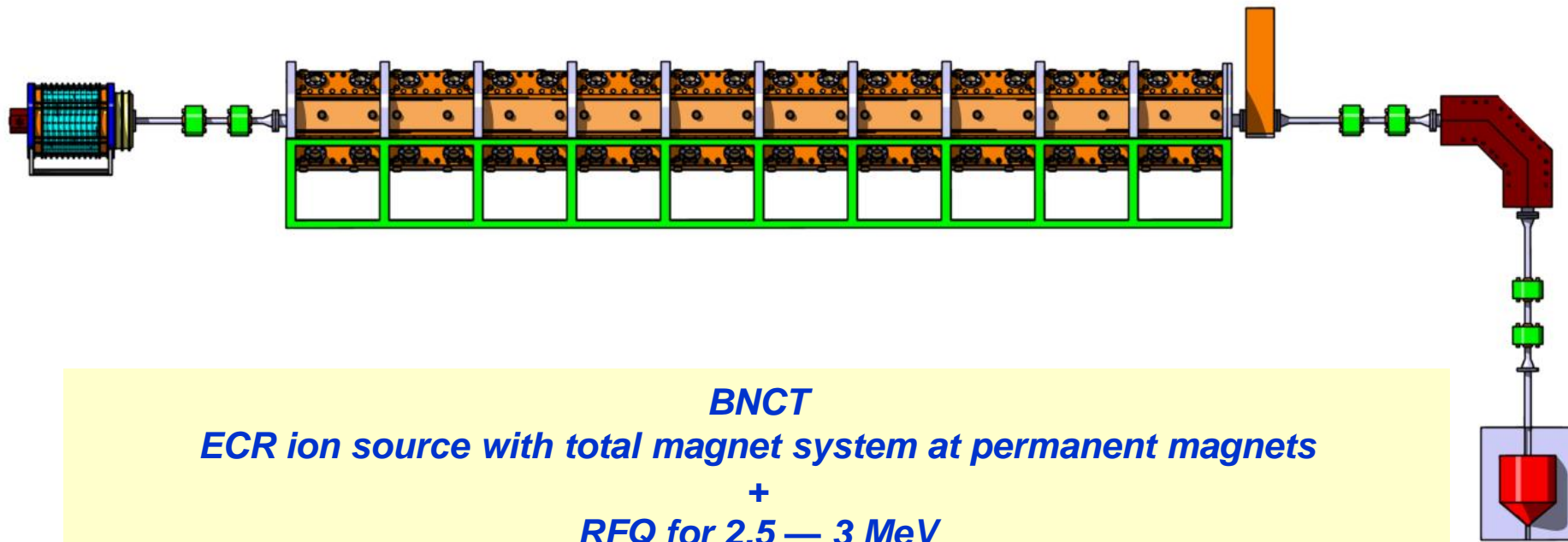
Compact neutron source prototype



- ▶ total  $\approx 1000 \text{ m}^2$
- ▶ flexible geometry
- ▶ optional beamlines



# Compact neutron generator (*BELA DARIA*)



*BNCT*

*ECR ion source with total magnet system at permanent magnets*

+

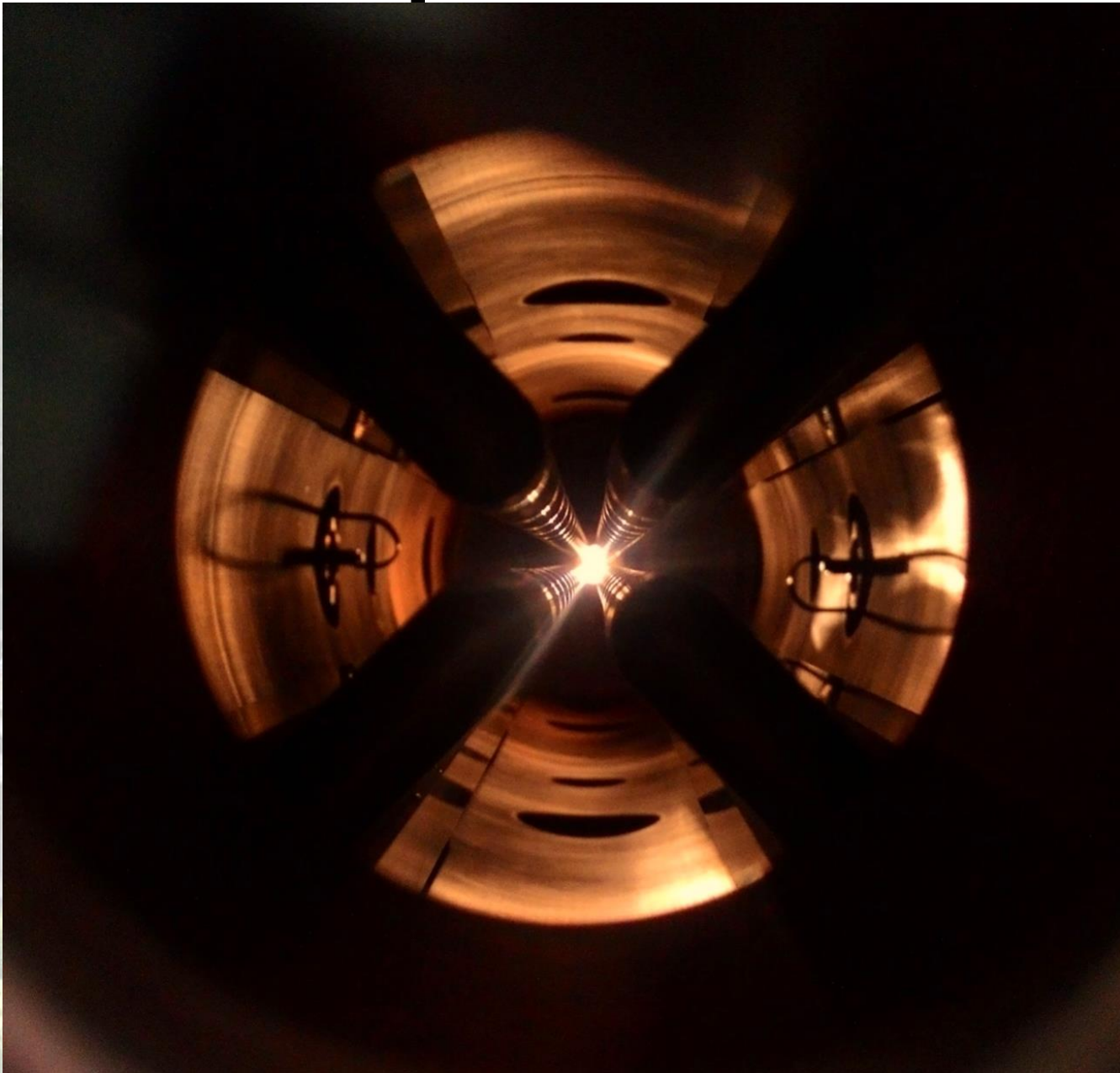
*RFQ for 2.5 — 3 MeV*

+

*Li target and moderator*

*10 mA proton beam at energy 2.5 MeV generates  $10^{13}$  нейтронов/секунду*

# Per aspera ad astra



# Технологии создания ускорителя-драйвера в России

	Разработки	Опытные образцы	Серийная технология	Обладатели компетенций/ Участвующие в зарубежных проектах
Расчет динамики, проектирование	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, МРТИ
Источники ионов	да	необходима доработка	нет	ОИЯИ, ТРИНИТИ, ИТЭФ, ИСЭ
Импульсные нормально проводящие ускоряющие системы	да	да	необходима доработка	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, ОИЯИ, ИЯИ, ИЯФ
СВ нормально проводящие ускоряющие системы	нет	нет	нет	- ИТЭФ, ИФВЭ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ,
СП ускоряющие системы	нет	нет	нет	- ИТЭФ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ ОИЯИ
Постоянные магниты	да	да	нет	ИЯФ, ИФВЭ, ОИЯИ,
СП магниты	да	да	необходима доработка	ИЯФ, ОИЯИ
Современные системы ВЧ питания	необходима доработка	нет	нет	-, ИТЭФ, МИФИ, ОИЯИ, ИЯФ
Системы транспортировки пучка	да	да	необходима доработка	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, МРТИ, ИЯИ, ИЯФ
Диагностика и управление пучком	да	да	необходима доработка	ИТЭФ, ИЯИ, ИЯФ

# Технологии создания ускорителя-драйвера в России

	Разработки	Опытные образцы	Серийная технология	Обладатели компетенций/ Участвующие в зарубежных проектах
Расчет динамики, проектирование	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, МРТИ
Источники ионов	да	необходима доработка	нет	ОИЯИ, ТРИНИТИ, ИТЭФ, ИСЭ
Импульсные нормально проводящие ускоряющие системы	да	да	необходима доработка	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, ОИЯИ, ИЯИ, ИЯФ
СВ нормально проводящие ускоряющие системы	нет	нет	нет	- ИТЭФ, ИФВЭ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ,
СП ускоряющие системы	нет	нет	нет	- ИТЭФ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ ОИЯИ
Постоянные магниты	да	да	нет	ИЯФ, ИФВЭ, ОИЯИ,
СП магниты	да	да	необходима доработка	ИЯФ, ОИЯИ
Современные системы ВЧ питания	необходима доработка	нет	нет	-, ИТЭФ, МИФИ, ОИЯИ, ИЯФ
Системы транспортировки пучка	да	да	необходима доработка	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, МРТИ, ИЯИ, ИЯФ
Диагностика и управление пучком	да	да	необходима доработка	ИТЭФ, ИЯИ, ИЯФ

**Кадров?**

# Технологии создания ускорителя-драйвера в России в результате реализации BELA (I и II)

	Разработки	Опытные образцы	Серийная технология	Обладатели компетенций/ Участвующие в зарубежных проектах
Расчет динамики, проектирование	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, МРТИ
Источники ионов	да	да	да	ОИЯИ, ТРИНИТИ, ИТЭФ, ИСЭ
Импульсные нормально проводящие ускоряющие системы	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, ОИЯИ, ИЯИ, ИЯФ
СВ нормально проводящие ускоряющие системы	да	да	да	- ИТЭФ, ИФВЭ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ,
СП ускоряющие системы	нет	нет	нет	- ИТЭФ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ ОИЯИ
Постоянные магниты	да	да	нет	ИЯФ, ИФВЭ, ОИЯИ,
СП магниты	да	да	необходима доработка	ИЯФ, ОИЯИ
Современные системы ВЧ питания	необходима доработка	нет	нет	-, ИТЭФ, МИФИ, ОИЯИ, ИЯФ
Системы транспортировки пучка	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, МРТИ, ИЯИ, ИЯФ
Диагностика и управление пучком	да	да	да	ИТЭФ, ИЯИ, ИЯФ



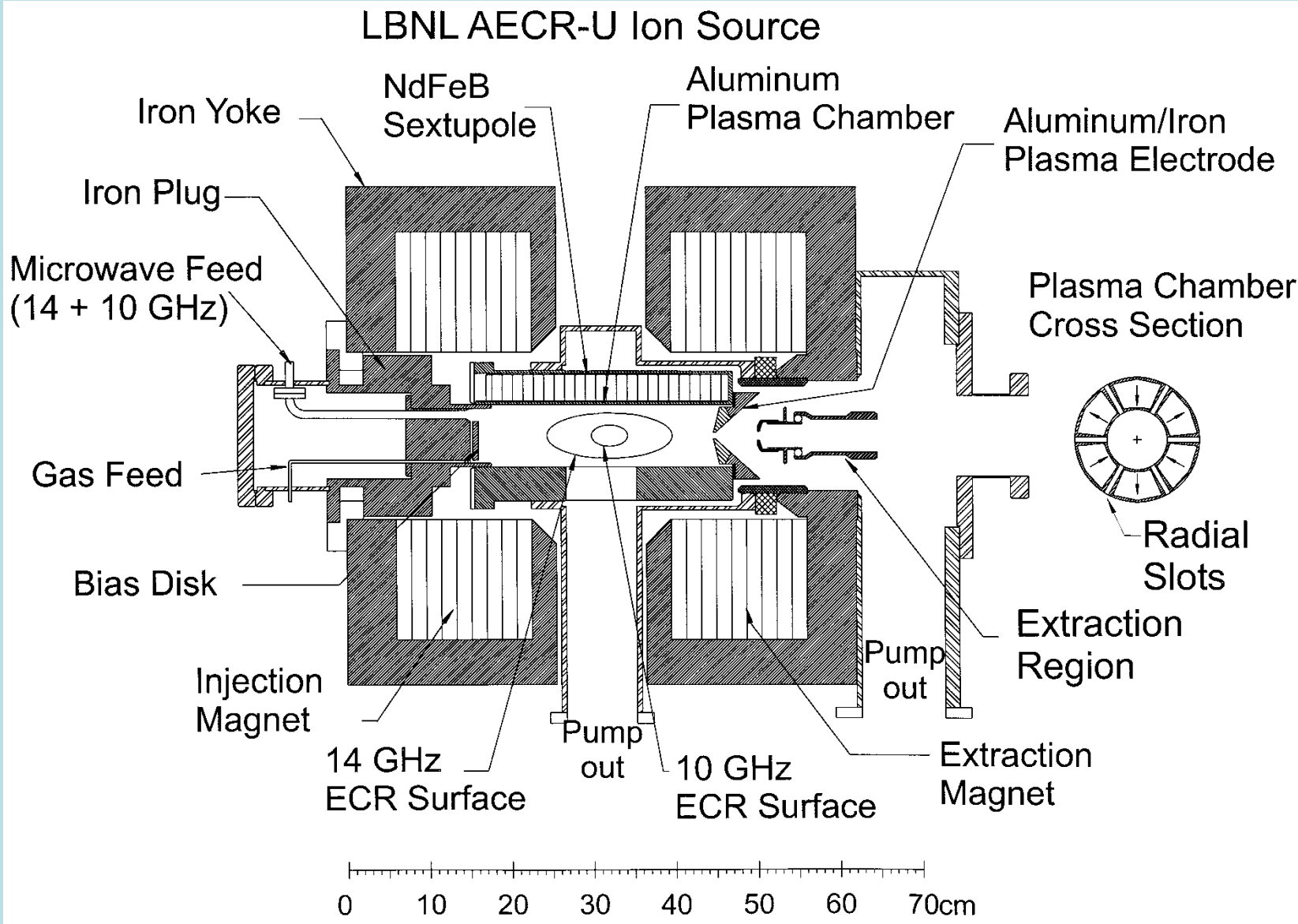
# Технологии создания ускорителя-драйвера в России в результате реализации BELA (III)

	Разработки	Опытные образцы	Серийная технология	Обладатели компетенций/ Участвующие в зарубежных проектах
Расчет динамики, проектирование	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, МРТИ
Источники ионов	да	да	да	ОИЯИ, ТРИНИТИ, ИТЭФ, ИСЭ
Импульсные нормально проводящие ускоряющие системы	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, ОИЯИ, ИЯИ, ИЯФ
СВ нормально проводящие ускоряющие системы	да	да	да	- ИТЭФ, ИФВЭ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ,
СП ускоряющие системы	да	да	да	- ИТЭФ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ ОИЯИ
Постоянные магниты	да	да	да	ИЯФ, ИФВЭ, ОИЯИ,
СП магниты	да	да	да	ИЯФ, ОИЯИ
Современные системы ВЧ питания	необходима доработка	нет	нет	-, ИТЭФ, МИФИ, ОИЯИ, ИЯФ
Системы транспортировки пучка	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, МРТИ, ИЯИ, ИЯФ
Диагностика и управление пучком	да	да	да	ИТЭФ, ИЯИ, ИЯФ

# Технологии создания ускорителя-драйвера в России в результате реализации BELA (III)

	Разработки	Опытные образцы	Серийная технология	Обладатели компетенций/ Участвующие в зарубежных проектах
Расчет динамики, проектирование	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, МРТИ
Источники ионов	да	да	да	ОИЯИ, ТРИНИТИ, ИТЭФ, ИСЭ
Импульсные нормально проводящие ускоряющие системы	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, ОИЯИ, ИЯИ, ИЯФ
СВ нормально проводящие ускоряющие системы	да	да	да	- ИТЭФ, ИФВЭ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ,
СП ускоряющие системы	да	да	да	- ИТЭФ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ ОИЯИ
Постоянные магниты	да	да	да	ИЯФ, ИФВЭ, ОИЯИ,
СП магниты	да	да	да	ИЯФ, ОИЯИ
Современные системы ВЧ питания	да	да	да	-, ИТЭФ, МИФИ, ОИЯИ, ИЯФ
Системы транспортировки пучка	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, МРТИ, ИЯИ, ИЯФ
Диагностика и управление пучком	да	да	да	ИТЭФ, ИЯИ, ИЯФ

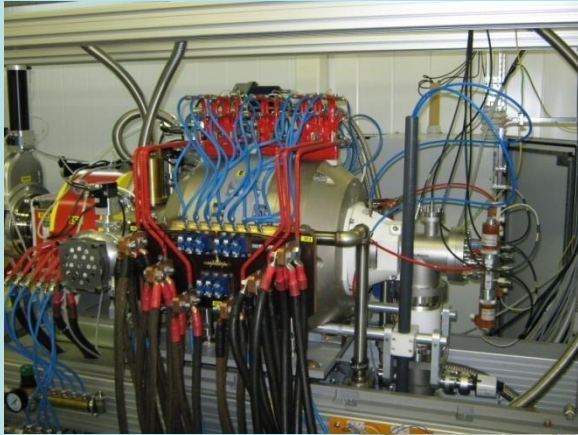
# Конструкция



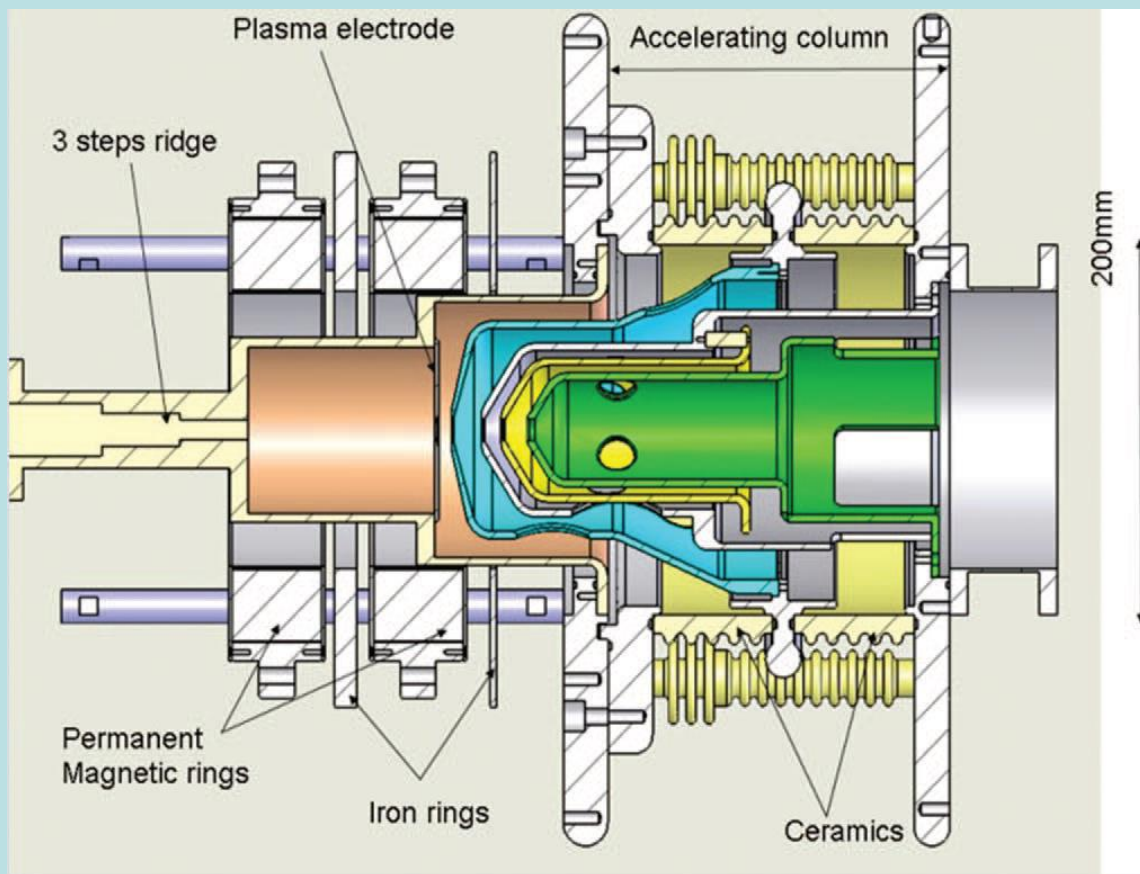
# Конструкция Supernodgin



# Конструкция DECRIС (Дубна)

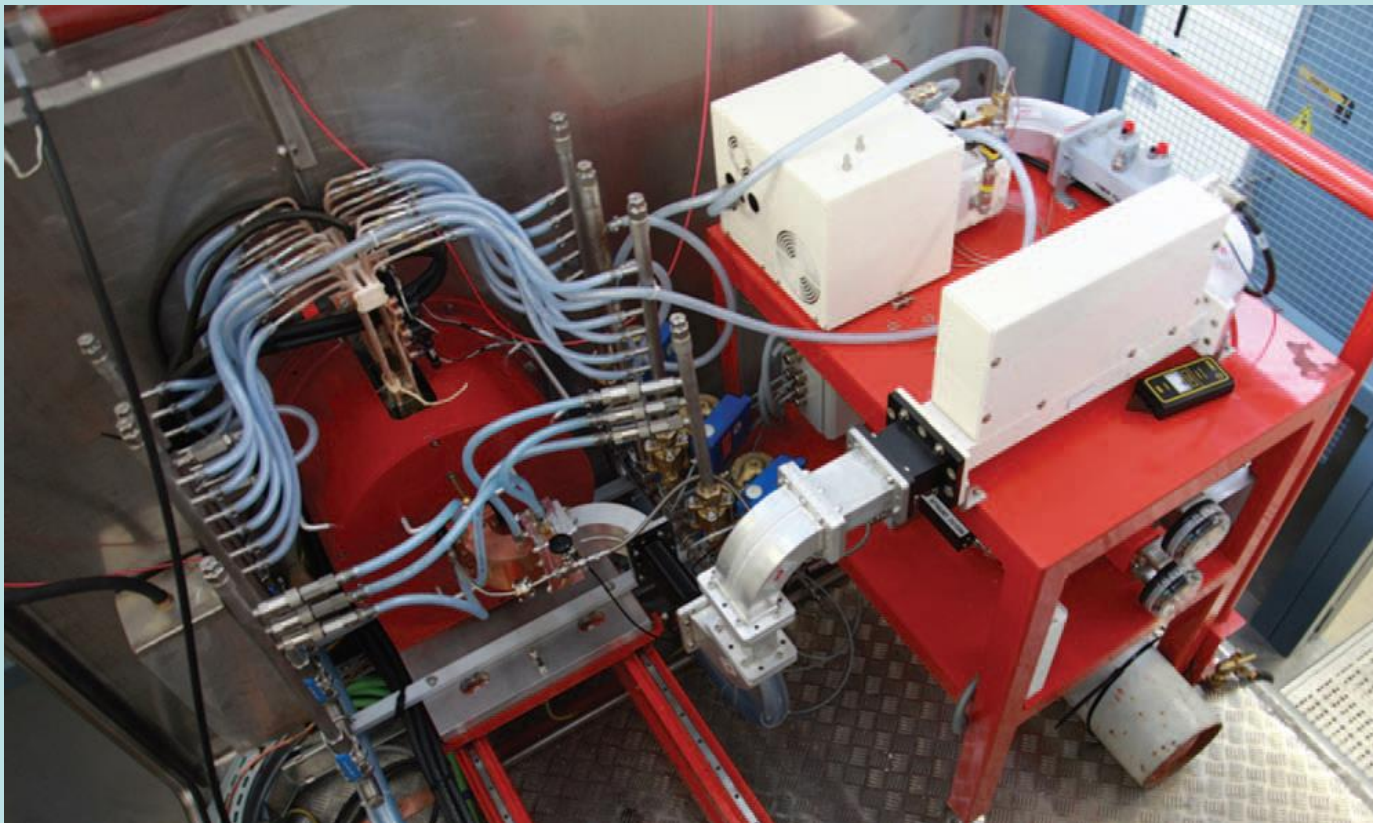


# Конструкция



**2.45ГГц источник ЭЦР протонов и дейтронов на постоянных магнитах производства CEA/Saclay**

# Конструкция



Вид сверху на ЭЦР источник для IFMIF-EVEDA ионов с ВЧ системой и охлаждающими трубками.

## **Period 2005 -2010:**

- **Construction of SNS and J-PARC facilities**
- **China enters with strong accelerator programme**
- **European EUROTRANS research programme**
- **ESS is going from fiction to reality**
- **MYRRHA**

## **Period 2010 - today:**

- **Operational Experience from running facilities SNS and J-PARC**
- **Construction of first stage of MYRRHA**
- **Construction of ESS SC-linac**
- **Construction in China of ADS-linacs at 2 sites**
- **Construction of Linac components is INDIA focused on Thorium ADS**



# The Spallation Neutron Source

ORNL hosts the worlds most powerful accelerator-based neutron source and the highest flux reactor-based research neutron source in the United States. More than 1000 users per year conduct experiments physics, chemistry, biology, material science and engineering.

Currently the SNS operates at 1.2 MW with near term plans to run continuously at 1.4 MW and later up to 2.8 MW to simultaneously support a second target station



	1.4 MW Operation	PPU & STS Upgrade
Energy (GeV)	0.94	1.3
Macro-pulse length (ms)	0.97	0.97
RFQ output beam current (mA)	~35	~46
Macro-pulse un-chopped fraction	0.78	0.82

# The SNS accelerator system

## Overview

### Front-End:

Produce 1 ms long, H<sup>-</sup> beam pulses at 60 Hz with ~300 ns chopped every ~1 μs

**Accumulator Ring:**  
Compress 1 ms long pulse to ~700 ns

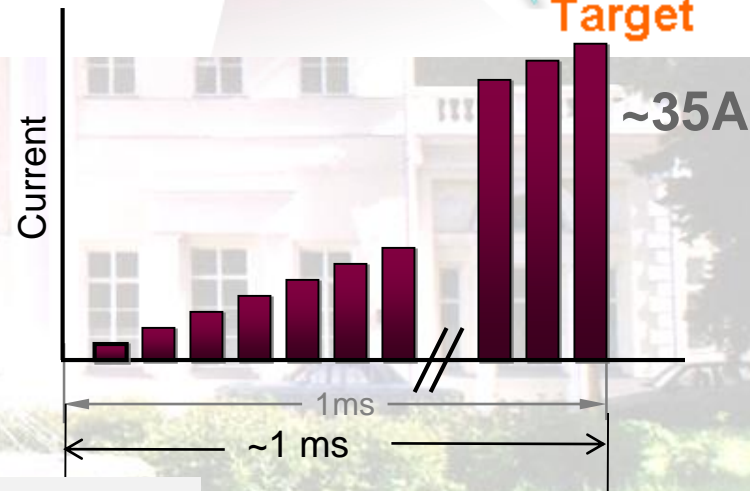
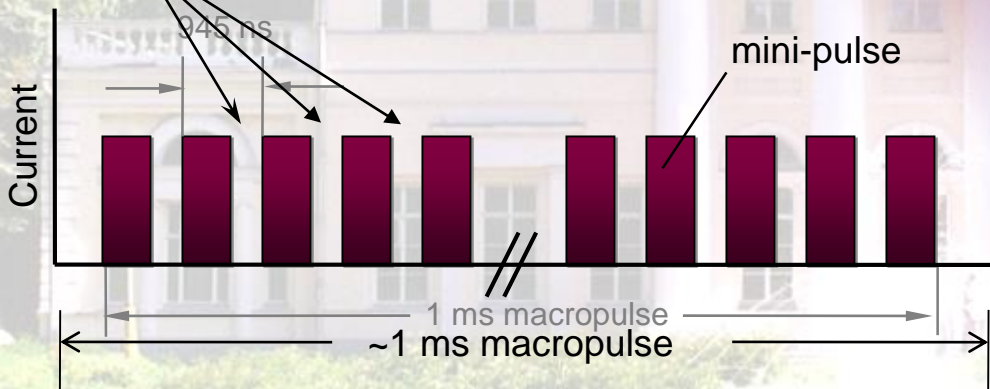
**Storage Ring**

<1 μs

**Target**

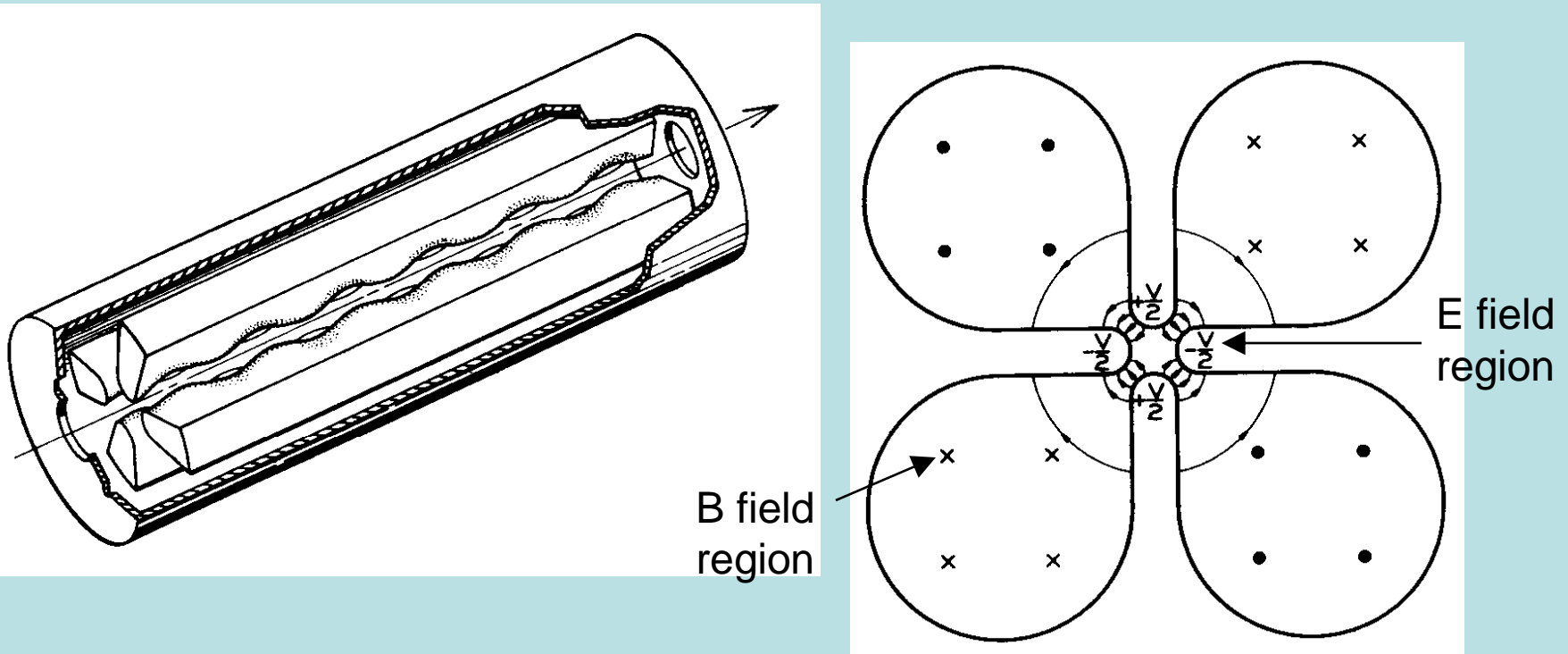


LEBT chopper system makes gaps



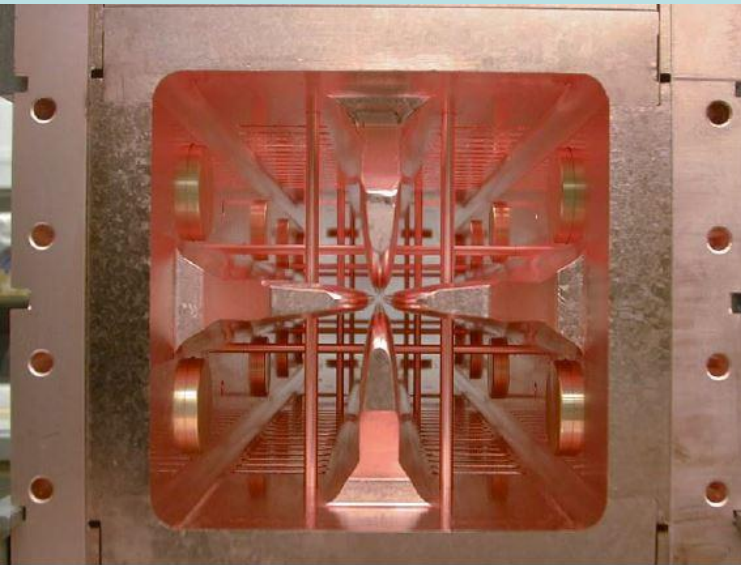
The multi-turn charge exchange injection and clean extraction of the accumulator ring requires chopped H<sup>-</sup> beam from the linac.

# Four-vane Radiofrequency-Quadrupole (RFQ) Cross Section



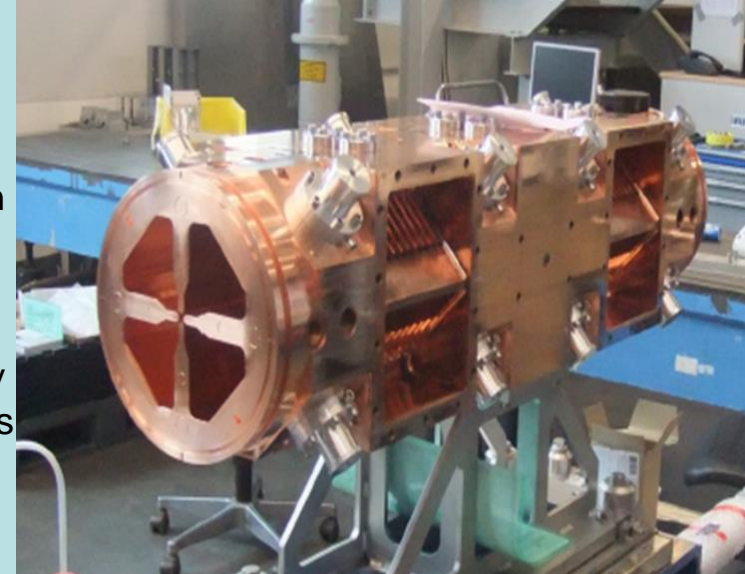
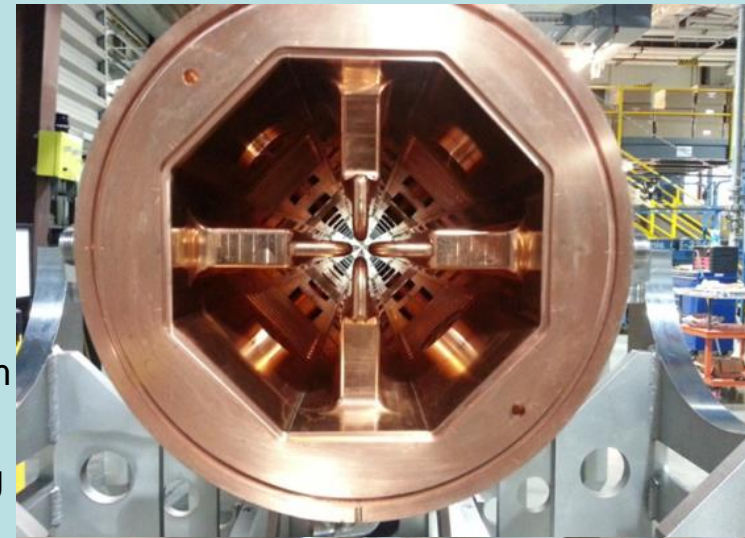
- The four vanetips (poletips) are excited in a TE<sub>210</sub>-like mode with rf electric quadrupole voltages that focus the beam transversely.
- This produces time-dependent alternating polarity FD focusing. (Other accelerators provide spatially-dependent alternating polarity focusing)

# The new RFQ accelerator



**Manufactured by  
Research Instruments,  
GmbH**

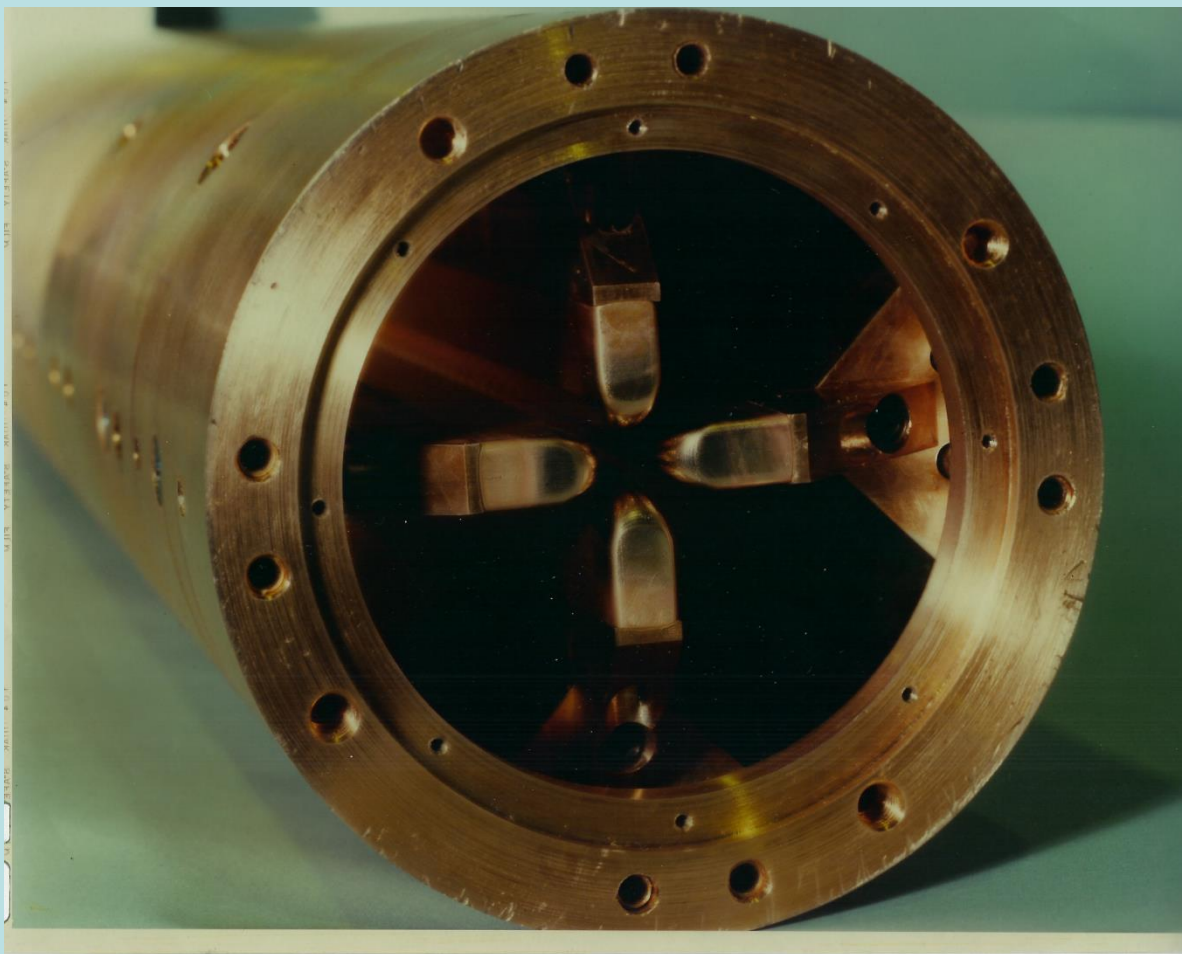
- Mechanical & RF structures designed at ORNL using the Berkeley physics design  $\therefore$  same beam dynamics
- Much better pumping
- No brazed joints (solid Cu) vacuum deformation: -18 vs -119 kHz
- Octagonal shape can provide better vacuum quality and mechanical strength (RF efficiency slightly decreases, but losses by stabilizers are much smaller)
- **RFQ needs to be tested at ORNL: BTF**



# Some RFQ Examples

	CERN- LINAC II	SNS	LANL-LEDA	TRIUMF- ISAC
Ion	H+	H-	H+	Q/A>1/30
Freq (MHz)	202.56	402.5	350	35
Win(keV)	90	65	75	2 keV/u
Wout(MeV)	0.75	2.5	6.7	0.150 MeV/u
Structure	4-vane	4-vane	4-vane	Variant of 4-rod Uses split ring, CW
Length(m)	1.8	3.76	8.0	8.0
E(Kilpatrick)	2.5	1.85	1.8	--
I(mA)	165 to 200	38	100	<1 $\mu$ A
$\epsilon_{rms,n}(mm\text{-mrad})$	1.2	0.21	0.2	0.026

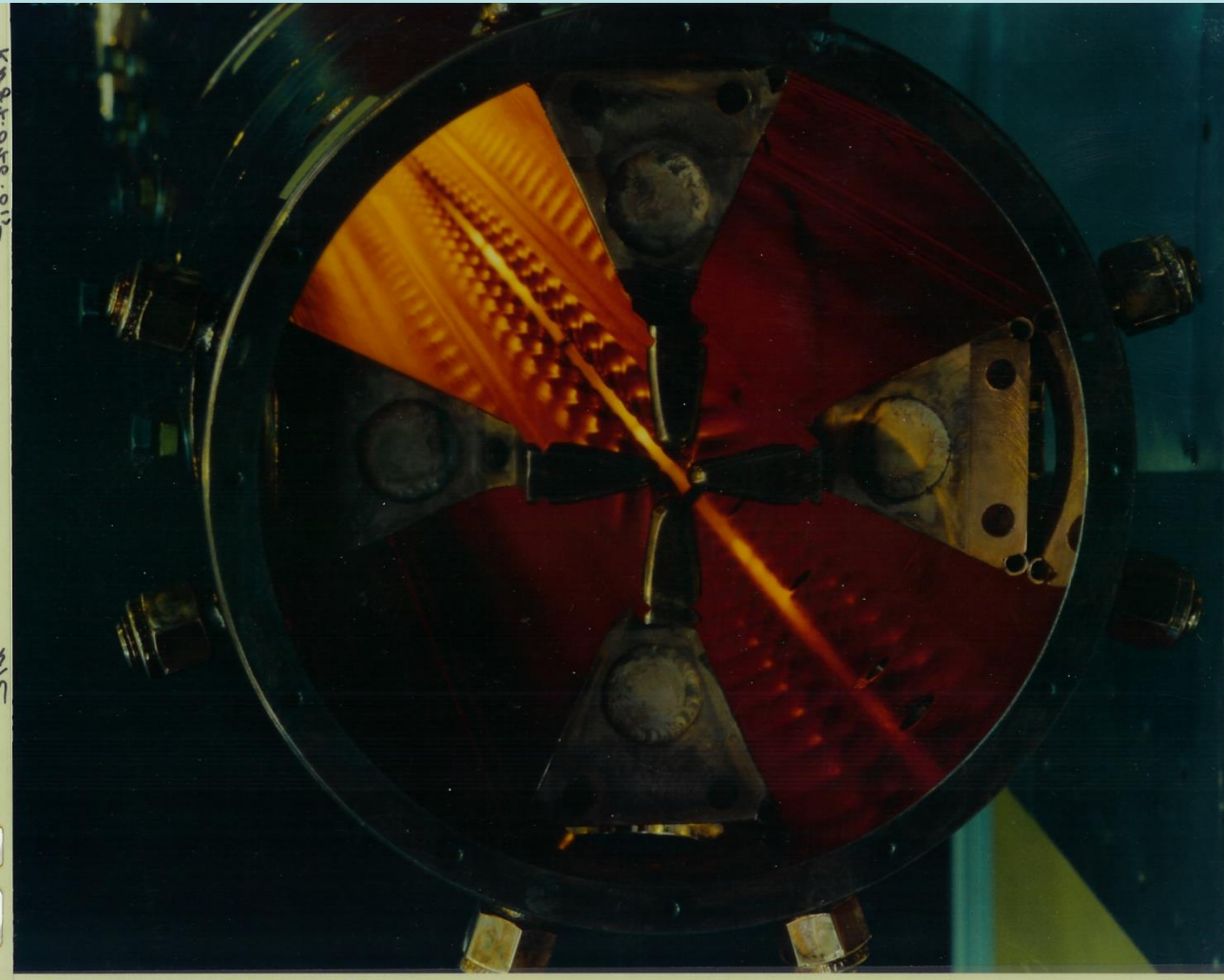
**Proof-of-Principle RFQ –1980- Los Alamos**  
**30-mA proton beam, 100 keV to 640 keV, 425 MHz**



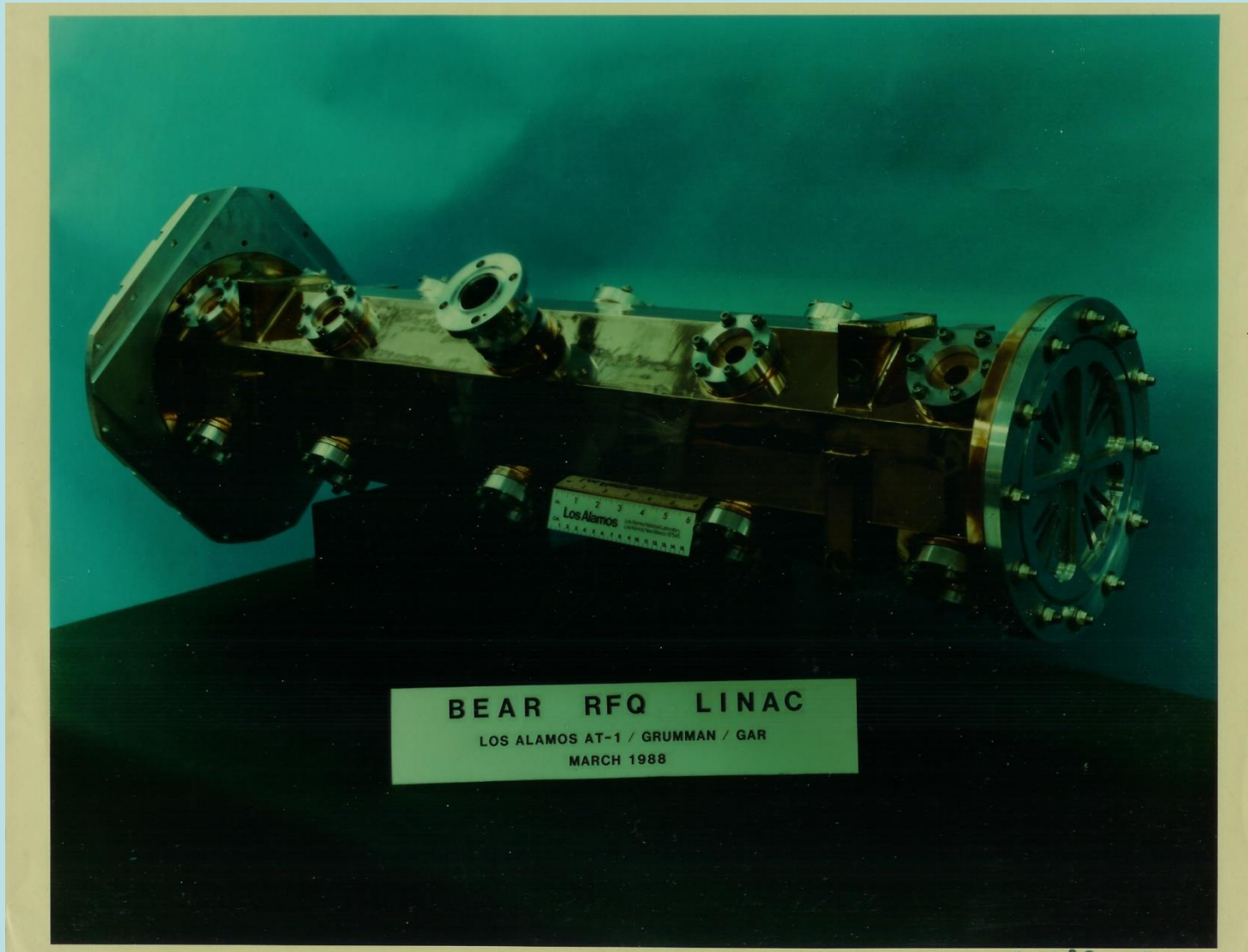
~15 cm

# ATS RFQ – 1985

100 mA protons, 100 keV to 2 MeV, 425 MHz



Beam Aboard A Rocket (BEAR) RFQ – 1989  
30 mA H<sup>+</sup>, 425 MHz, 30 keV to 1 MeV





# LEDA CW RFQ 1999

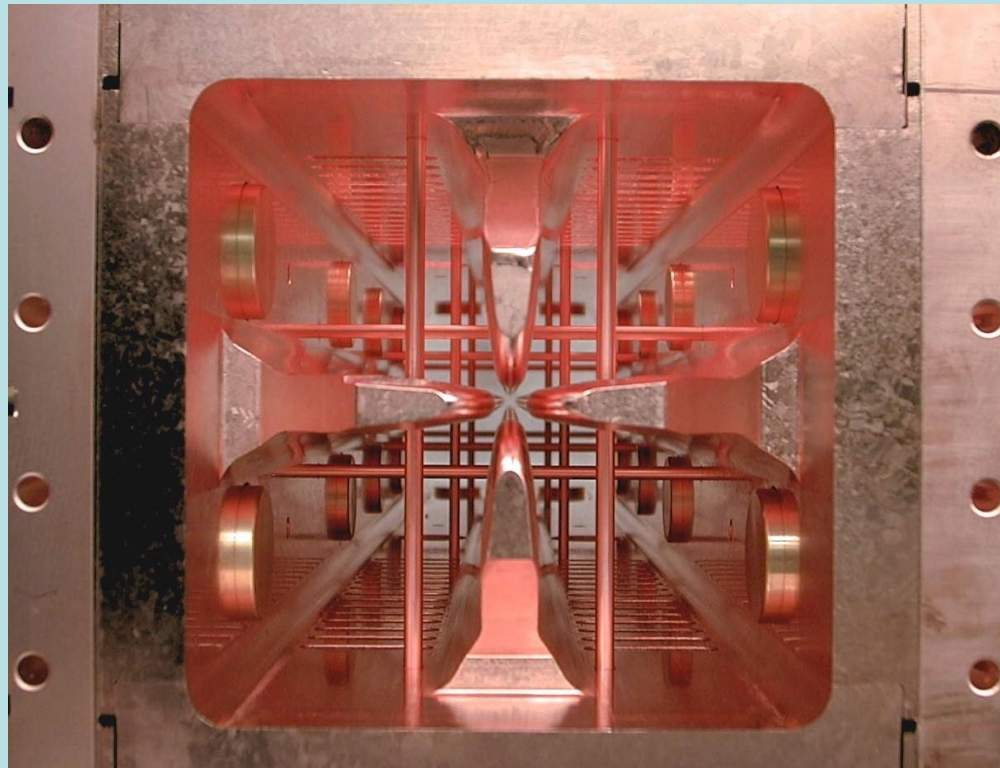
100-mA protons CW, 75 keV to 6.7 MeV, 350-MHz, 8-m long



# SNS H<sup>-</sup> RFQ – designed and built by LBNL

## 65 keV to 2.5 MeV, 402.5 MHz

---



SNS RFQ seen from the LEBT (Low-Energy Beam Transport) side.

- 4-vane RFQ with  $\pi$ -mode stabilizers for dipole mode suppression
  - 4 modules with 3.72-m total length
- 402.5 MHz resonant frequency
- 640 kW pulsed power needed to achieve nominal gradient without beam
  - 8 power couplers
  - 80 fixed tuners
  - Dynamic tuning implemented by adjusting cooling water
  - 2.5 min. needed to reach stable operation from cold start

The MSU reaccelerator RFQ will look similar to this CW 4-rod for SARAF (Soreq applied research accelerator facility) in Israel.  
4 mA D+, CW, 3MeV, 176 MHz, 3.8 m , 220 kW, 39 cells.  
Now operating at full power.



# The ISIS Four-Rod RFQ at Rutherford Appleton Laboratory 35 keV to 665 keV H- beam, 202.5 MHz, $V=90$ kV

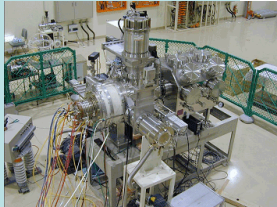


SARAF 4-ROD RFQ – 4-mA D<sup>+</sup> to 3 MeV, 176 MHz,  
3.8 m long, 220 kW power 39 cells



# J-PARC

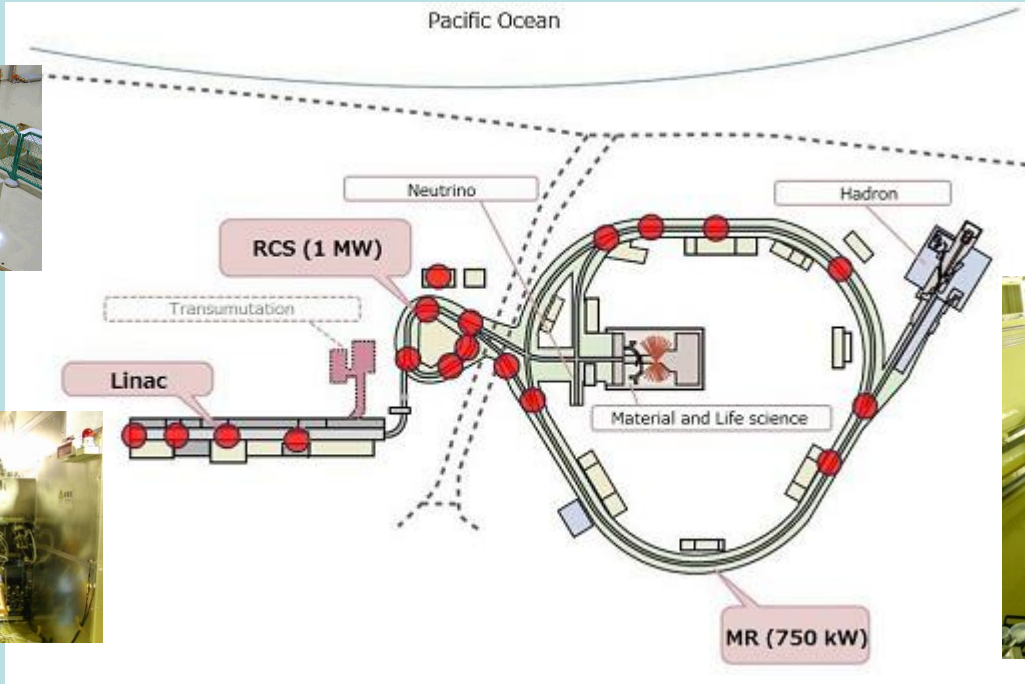
## Japan Proton Accelerator Research Complex



H<sup>-</sup> ion source  
70microA



RFQ



DTL

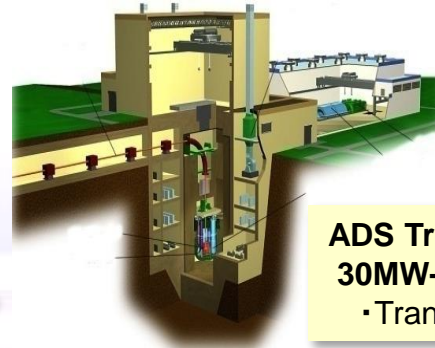


SDTL

# Japan ADS

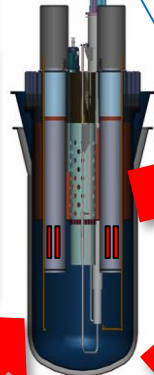
Power ↑

ADS without MA fuel  
(LBE coolant,  
Accelerator,  
Operation of ADS)



**ADS Transmutation plant**  
**30MW-beam, 800MW<sub>th</sub>**  
- Transmute 250kg of MA annually

**Experimental ADS ⇒ MYRRHA**  
**~2.4MW-beam,**  
**50~100MW<sub>th</sub>**  
- Engineering feasibility of ADS and fuel irradiation

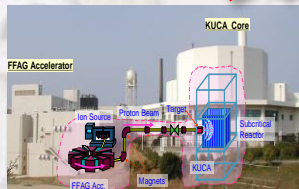


Advanced material  
for beam window

Reactor physics of MA transmutation system and material development for spallation target material



**TEF in J-PARC**  
**250kW-beam**  
- LBE target technology  
- Reactor physics of transmutation system



	TEF in J-PARC	MYRRHA
Purpose	R&D for elemental technology (LBE target, Reactor physics)	Fuel irradiation, Accumulation of operation experience of ADS
Power	250kW-beam TEF-P : 500W (max.)	2.4MW-beam Power : 50~100MW <sub>th</sub>
MA	Mock-up experiments of transmutation system with massive MA (kg order)	Irradiation experiment with small amount

Basic research (LBE loop test, KUCA experiments)

2010

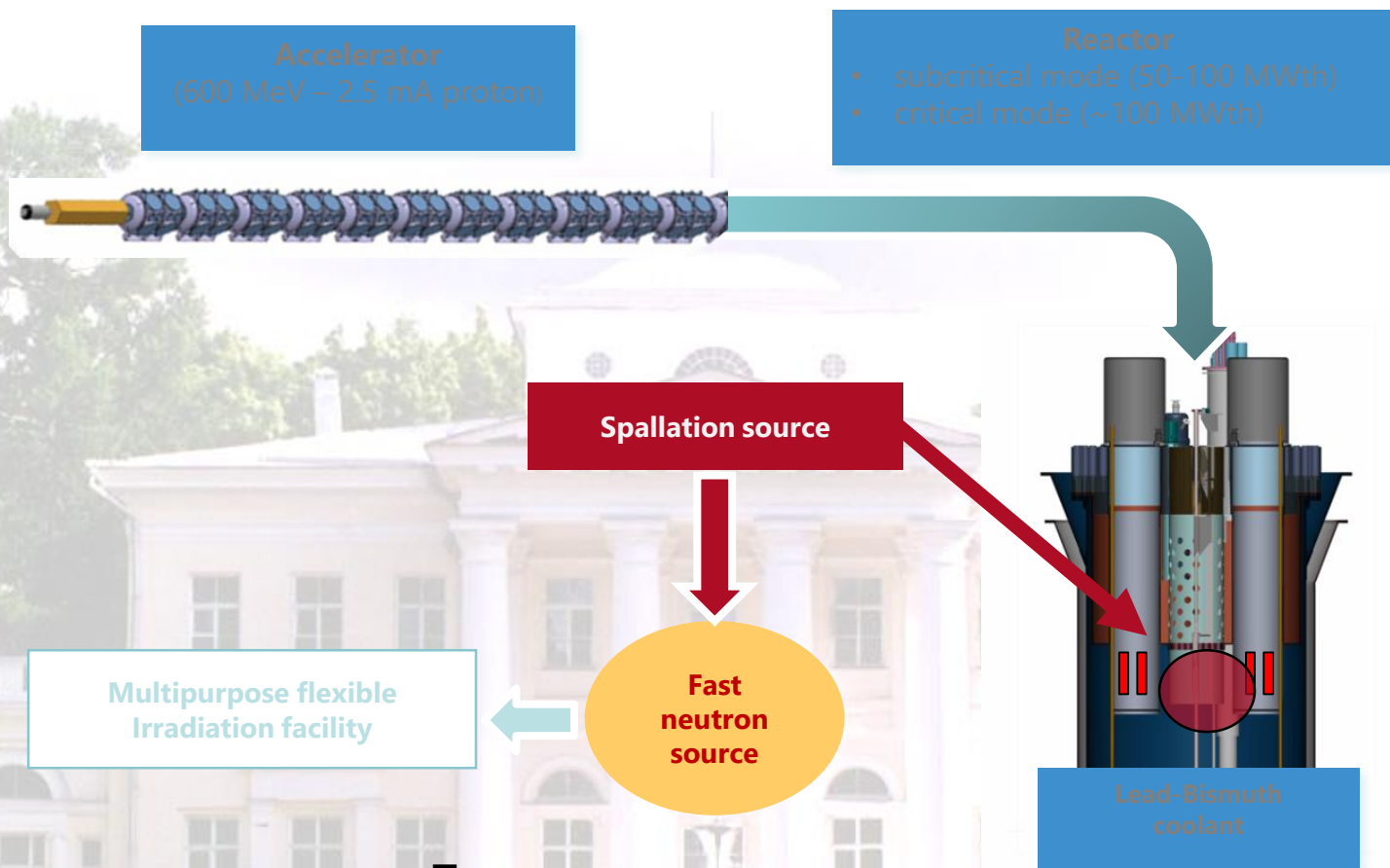
2020

2030

2050

year

# Европейский проект ADS - MYRRHA (Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications)



План реализации проекта :

- i) создание начальной части протонного линейного ускорителя на энергию 100 МэВ (2016-2024 г.г.),
- ii) создание протонного линейного ускорителя на энергию 600 МэВ (2025-2030 г.г.)
- iii) создание реактора и физический пуск всей установки в комплексе (2030-2034 г.г.).

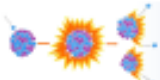
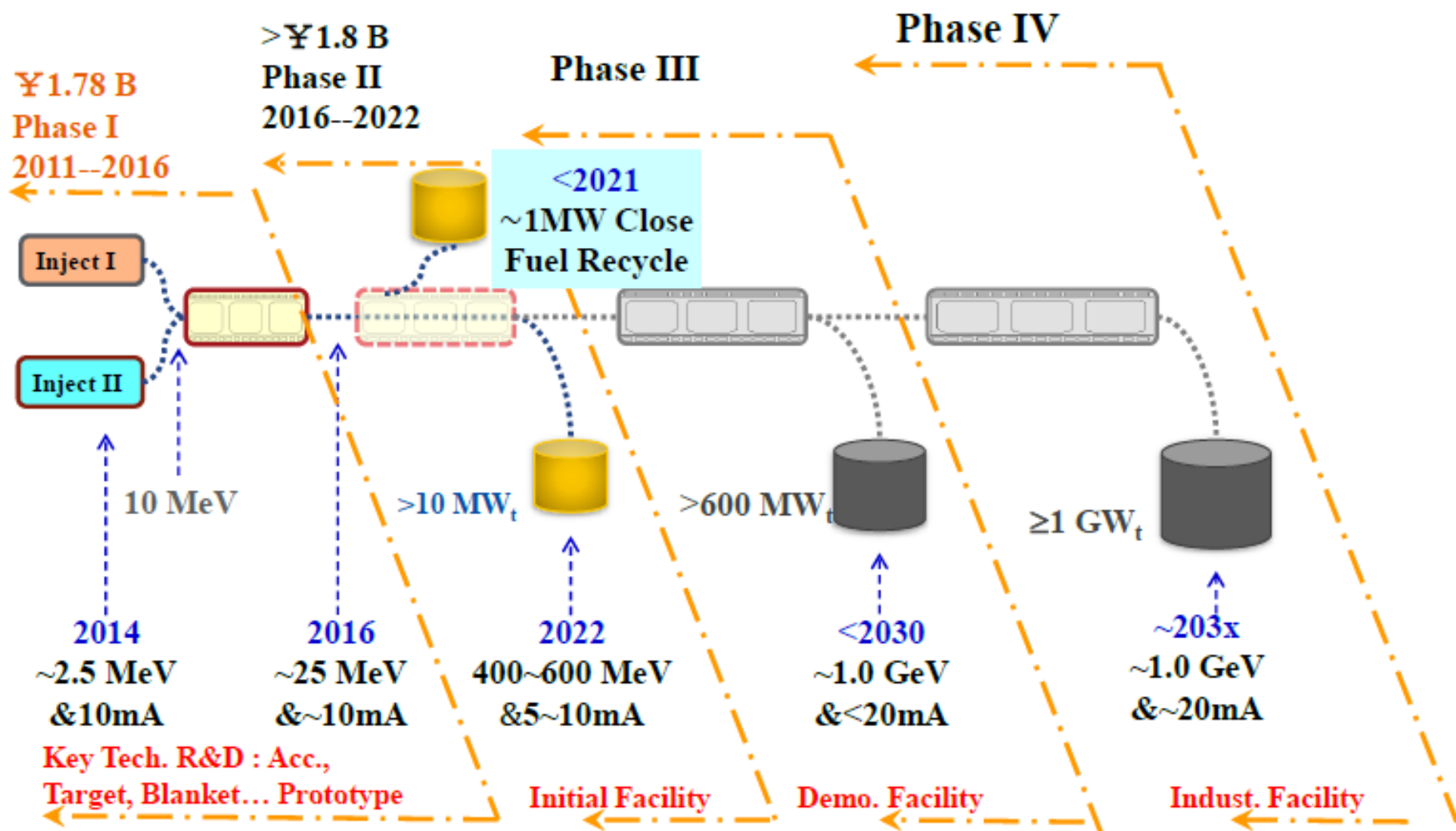


# Journey to deliver the world's leading facility for research using neutrons





# ADS/ADANES Roadmap in China



# Accelerator Development for ADS

## LEHIPA

High current injector 20 MeV, 30 mA

Proton IS  
50 keV

RFQ  
3 MeV

DTL  
20 MeV

### Phase I

### Phase II

SC Linac  
HWR/SSR

200 MeV

### Phase III

SC Linac  
1 GeV

ECR Ion Source

RFQ

DTL

Proton beam from high power accelerator

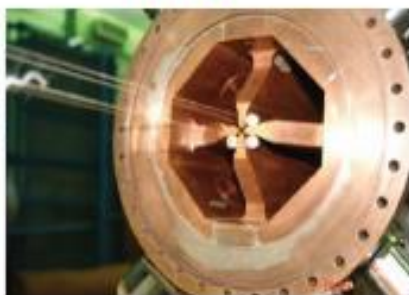
Spallation target: liquid Pb, Pb+Bi; W (solid) etc

Fuel

Breeding  
 $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{U}$   
 $^{238}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Pu}$

Spallation reaction Zone

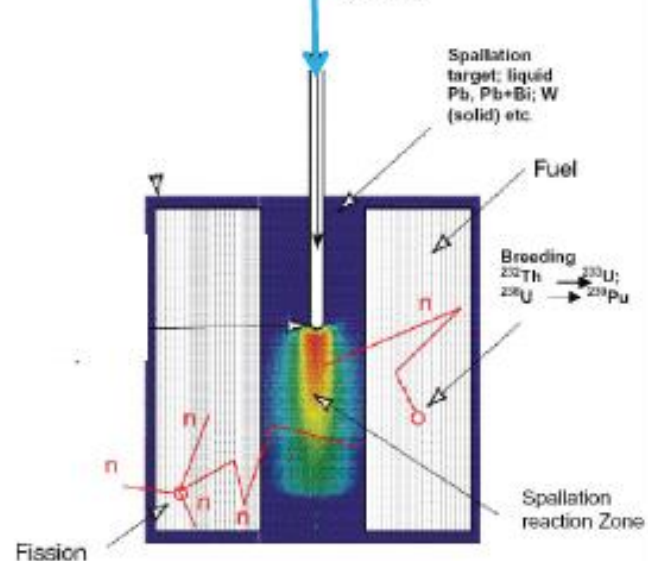
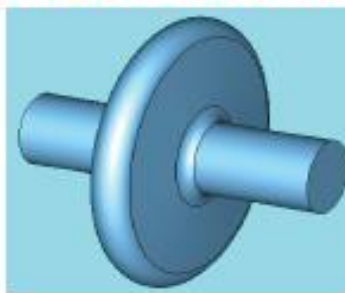
Fission



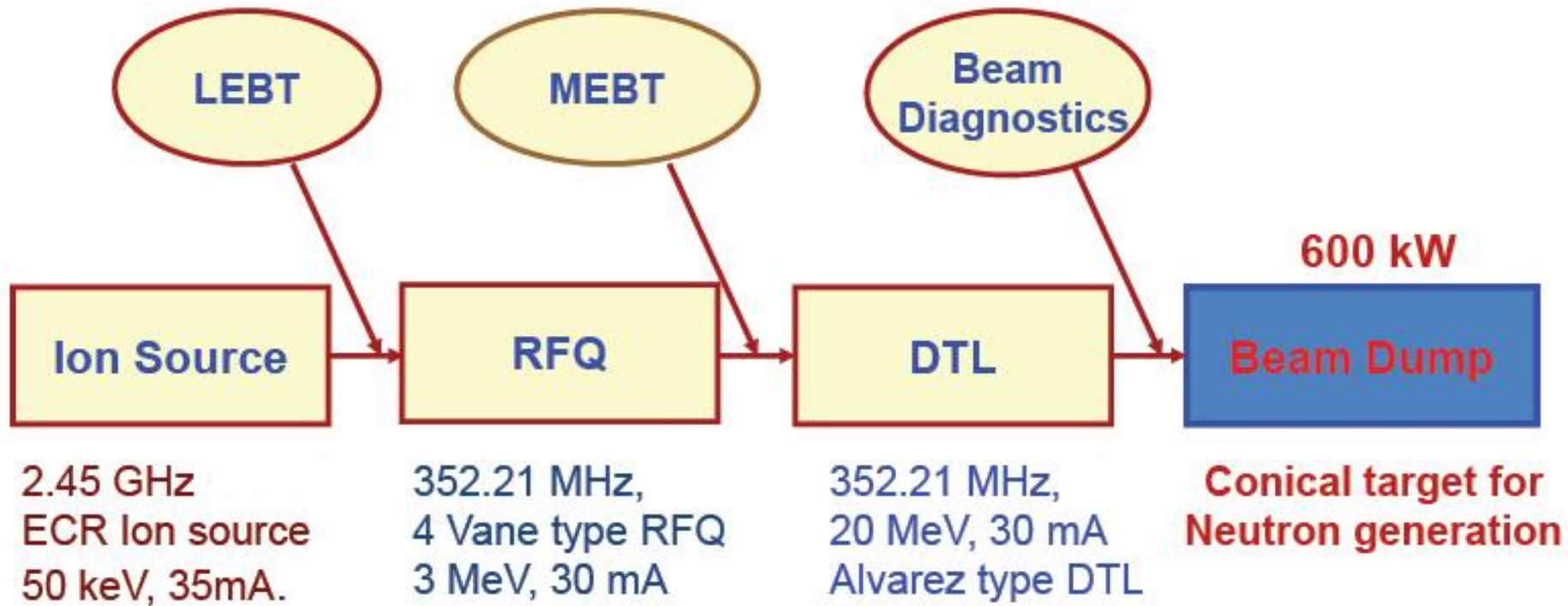
400 keV RFQ

LEBT

Elliptical SC Cavity



# 20 MeV Linac (LEHIPA) at BARC



ECR



LEBT



RFQ



DTL



Beam Dump

# ***“Small” powerful neutron generators***

- **FRANZ** –

the Frankfurt Neutron source at Stern-Gerlach-Zentrum

- **SARAF** –

Soreq Applied Research Accelerator Facility

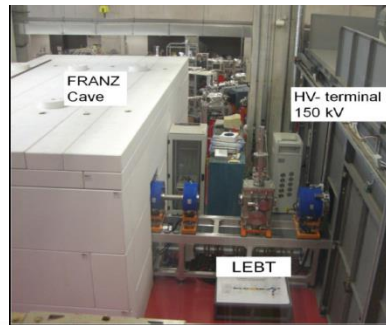
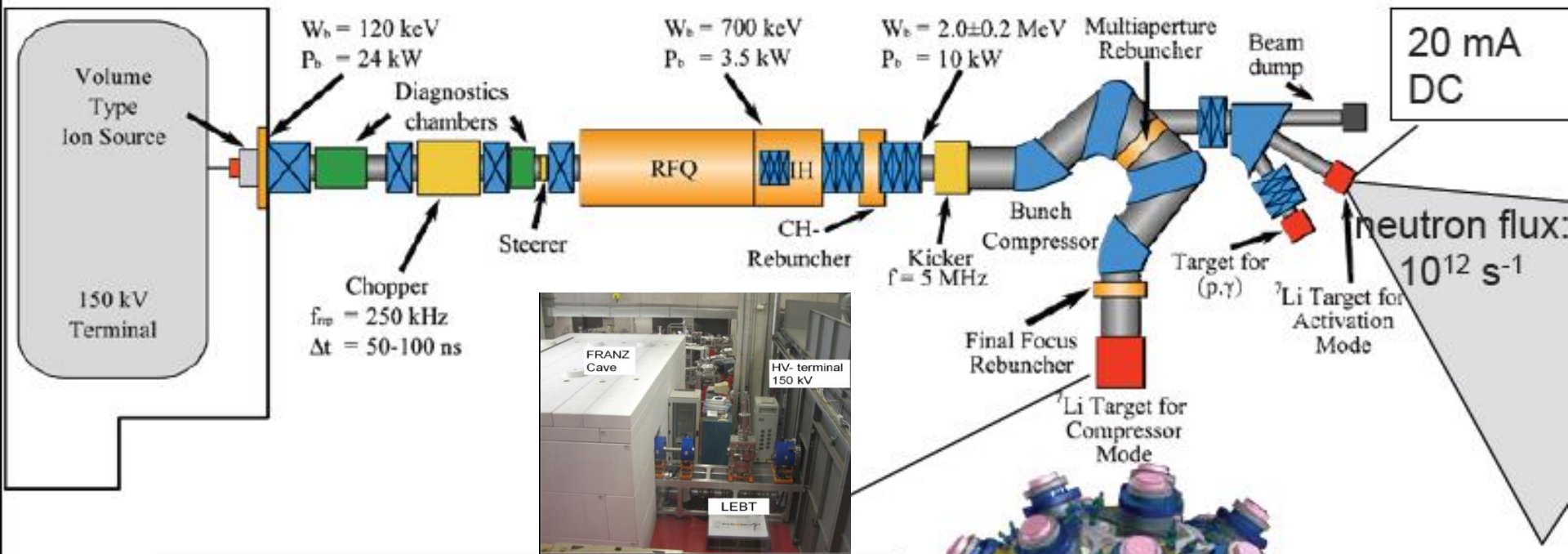
- **IFMIF** –

International Fusion Materials Irradiation Facility

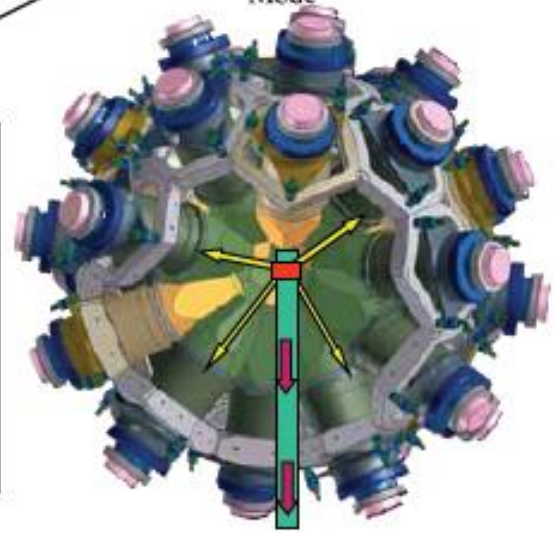
- **EVEDA** –

Engineering Validation and Engineering Design  
Activities -> prototype for IFMIF

# The Frankfurt neutron source at the Stern-Gerlach-Zentrum (FRANZ)

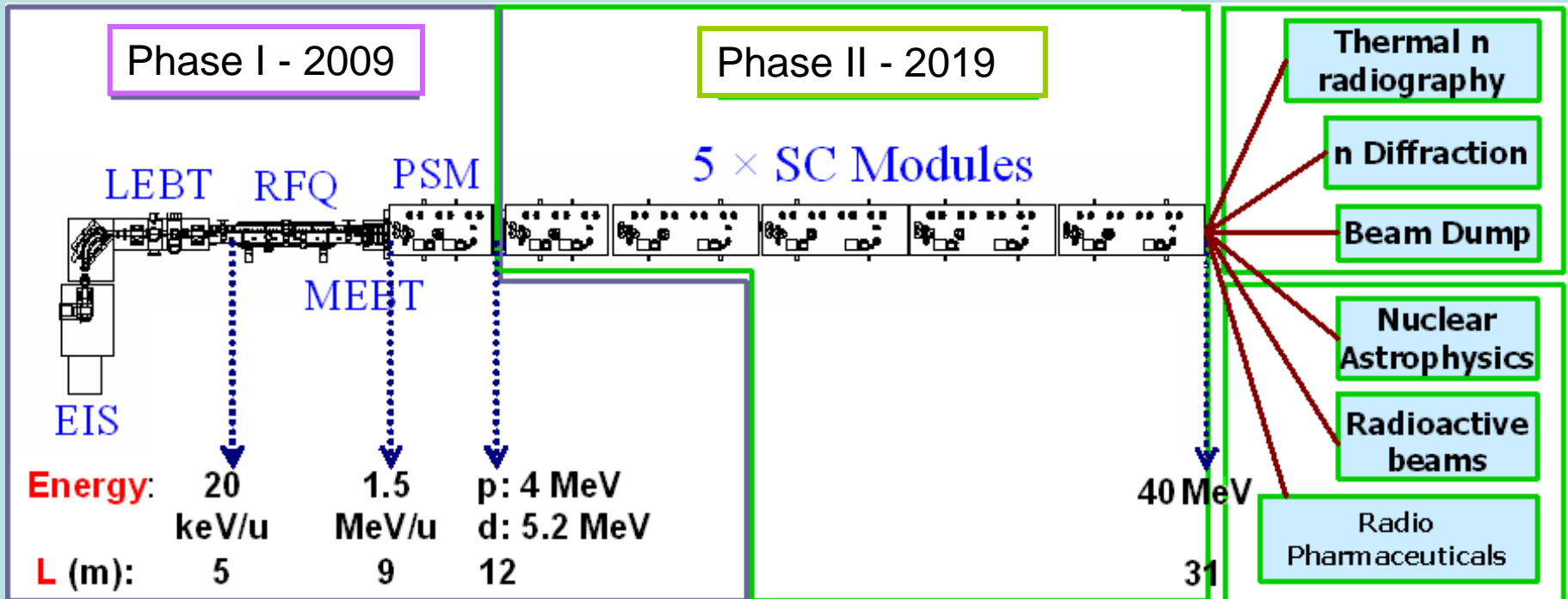


2 mA proton beam (8 A peak current)  
250 kHz  
< 1 ns pulse width  
neutron flux at 1 m:  $10^7 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$   
neutron flux at 0.1m:  $10^9 \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$



# SARAF Accelerator Complex

Parameter	Value	Comment
Ion Species	Protons/Deuterons	$M/q \leq 2$
Energy Range	5 – 40 MeV	Variable energy
Current Range	0.04 – 5 mA	CW (and pulsed)
Operation	6000 hours/year	
Reliability	90%	
Maintenance	Hands-On	Very low beam loss



# Liquid Lithium Target - LiLiT

- The basis for most of the R&D at SARAF
- Liquid target enables utilization of the SARAF high power beam

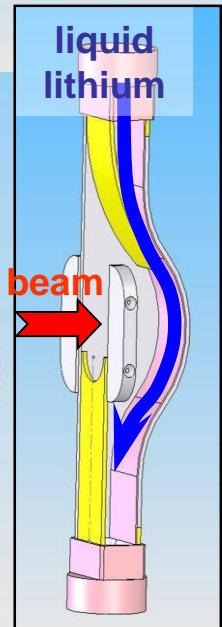
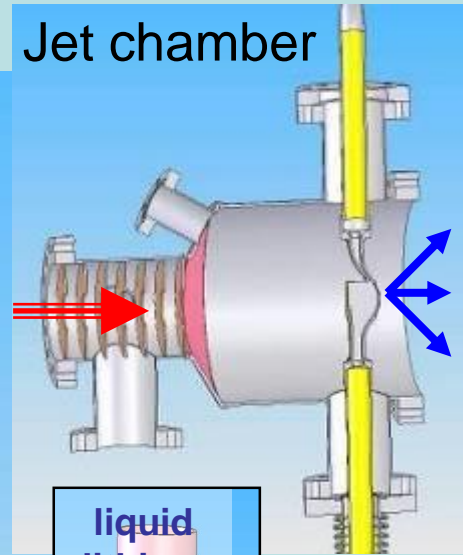
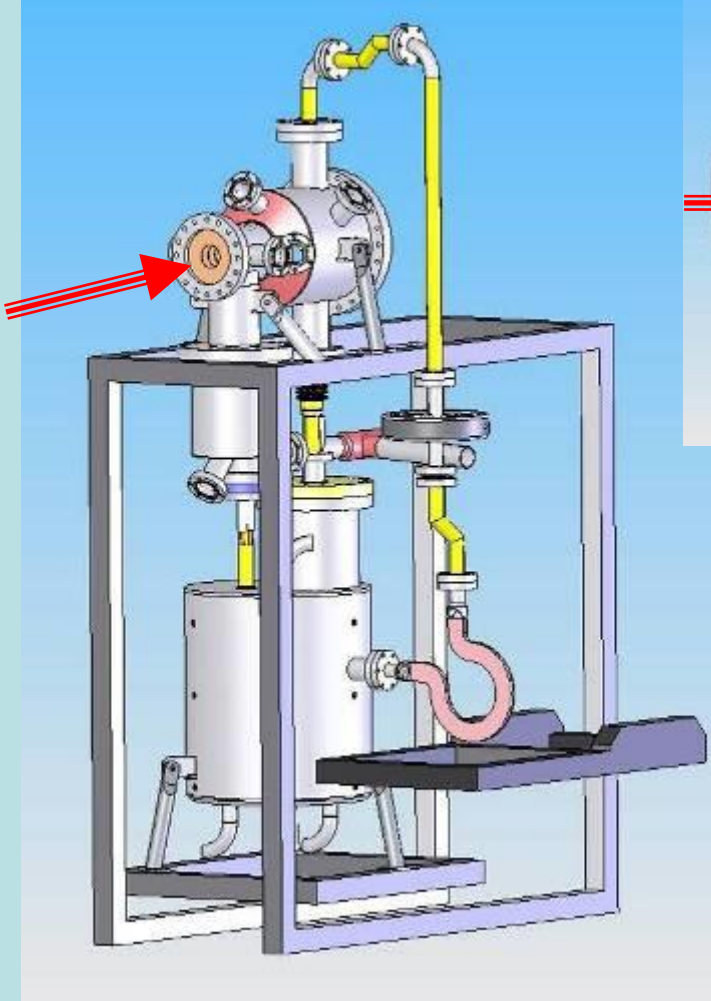
At SARAF Phase I:



*M. Paul  
(HUJI)*

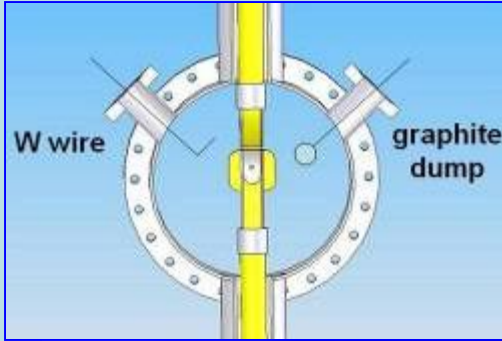
At SARAF Phase II:

An upgrade of LiLiT will be used with a deuteron beam to produce faster neutrons and higher flux

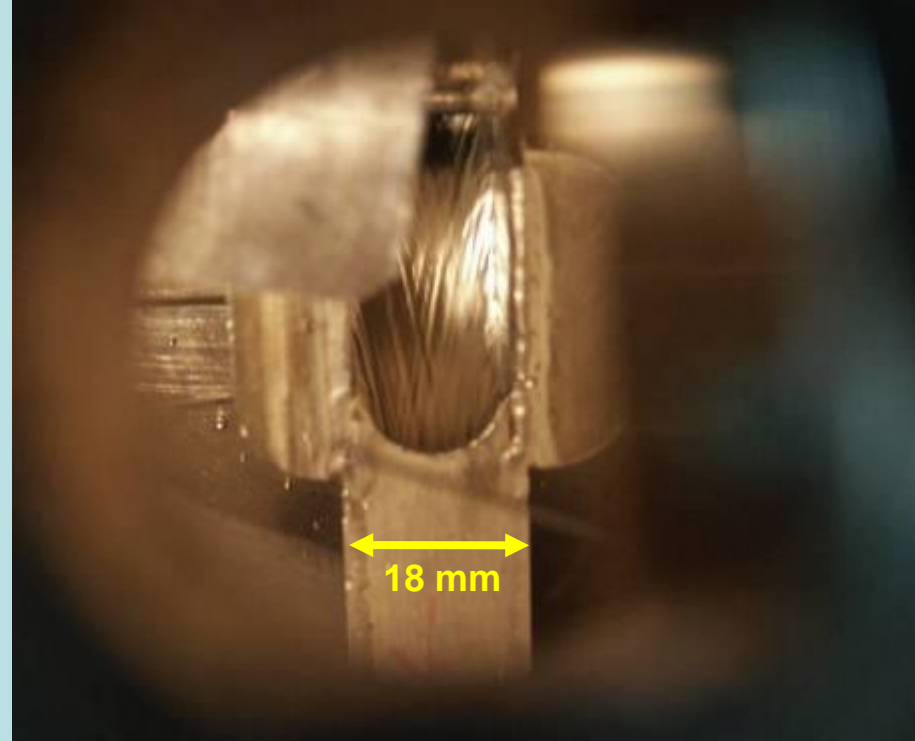




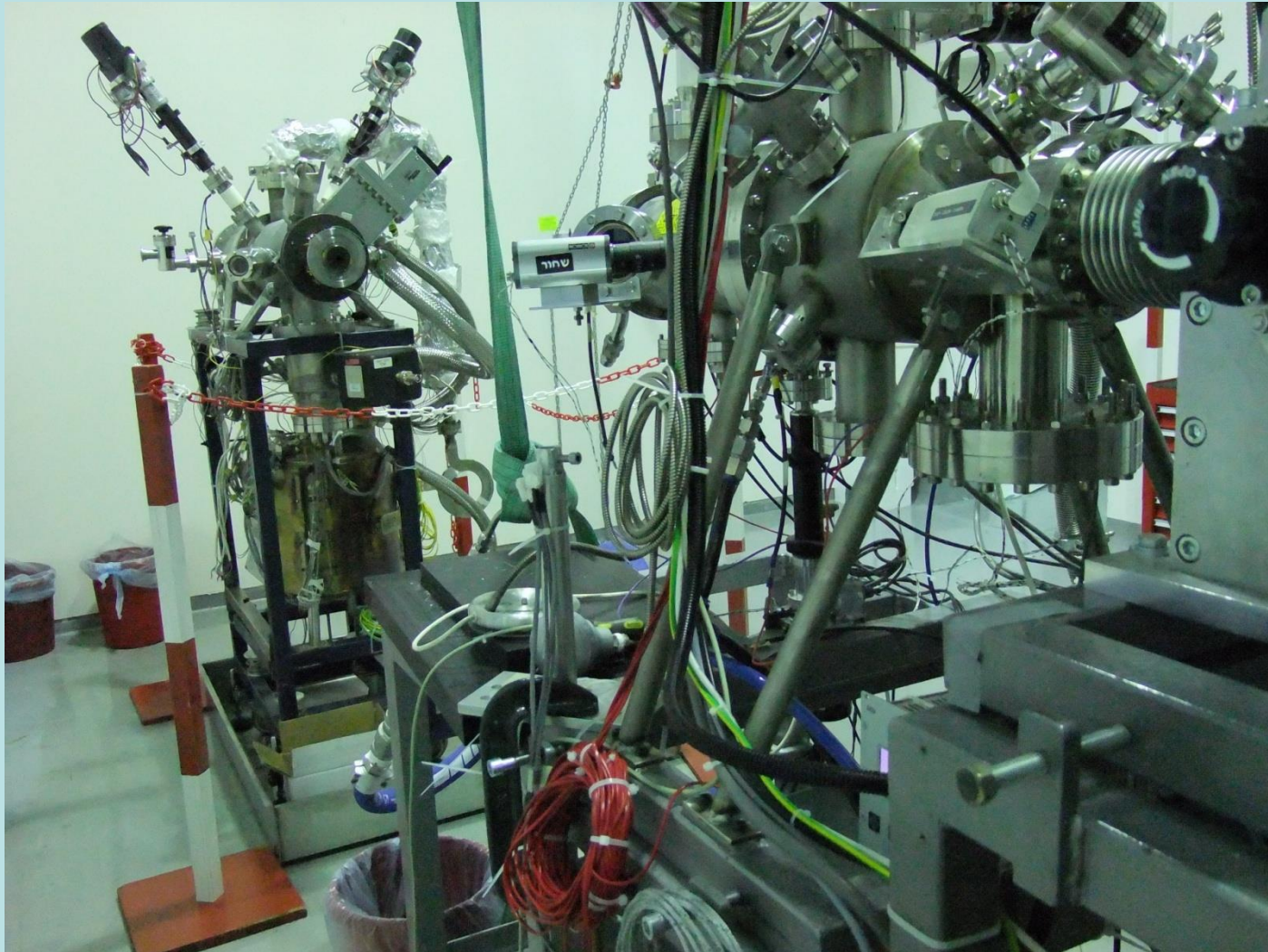
# Lithium jet circulating



**Measured velocity 7 m/s**  
**Maximum e power density**  
**2.0 MW/cm<sup>3</sup> @ 4 m/s**

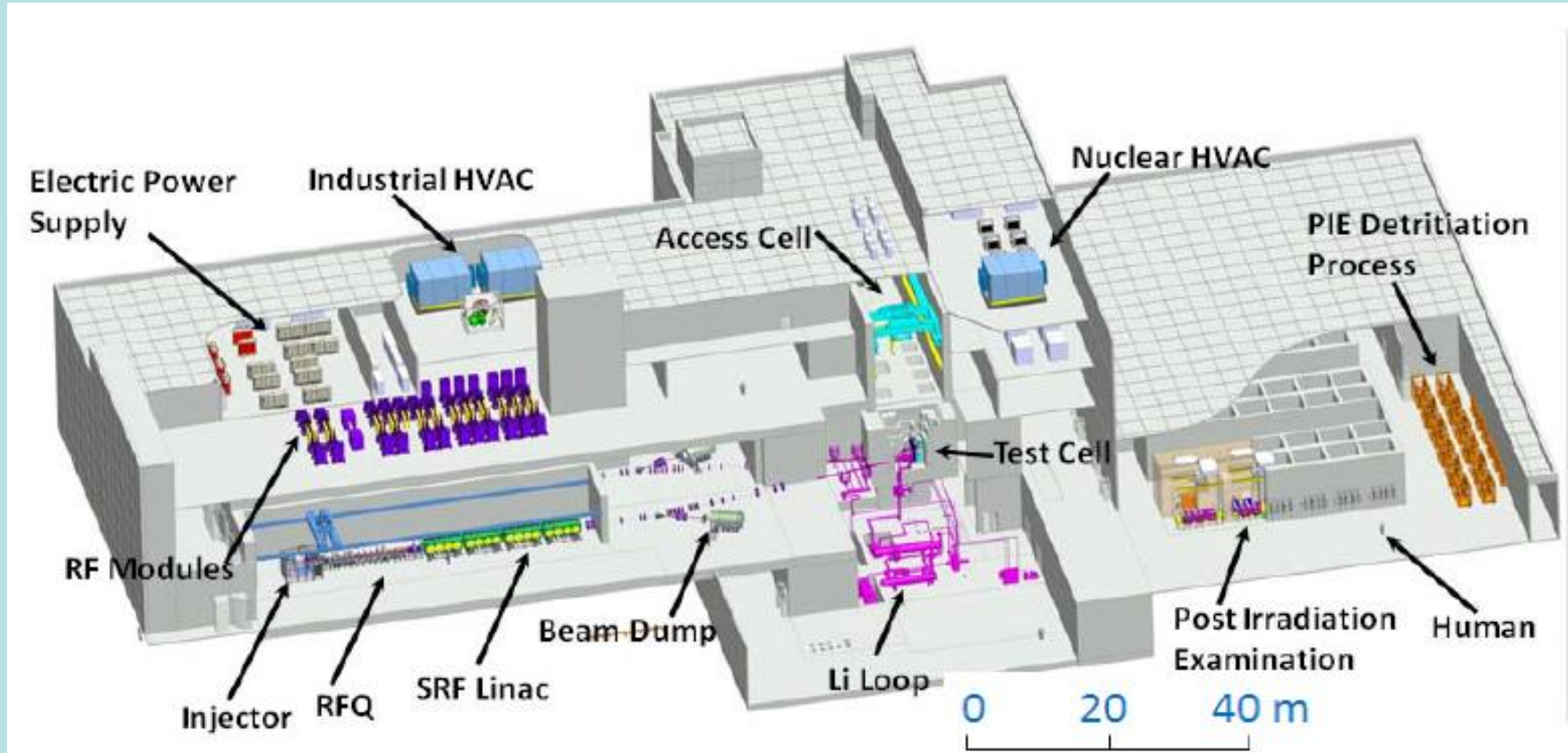


# LiLiT installation at SARAF



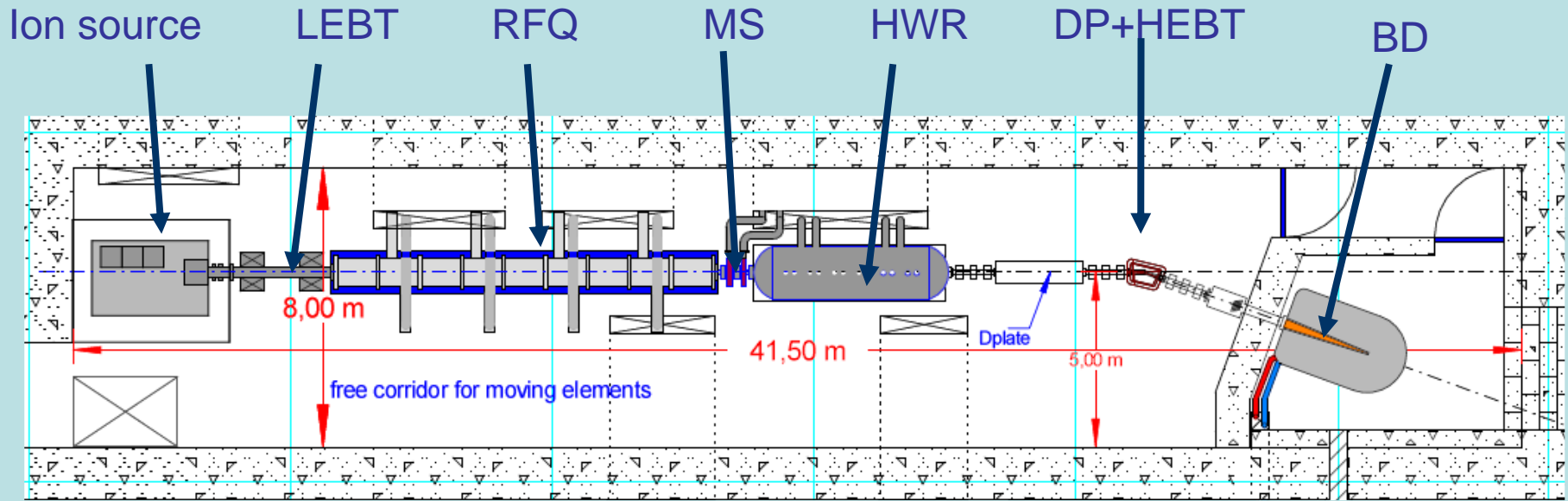
# The IFMIF/EVEDA EU-JA Project

- IFMIF: International Fusion Materials Irradiation Facility -> intense flux of 14MeV neutrons for material characterization (2 CW linacs, 125mA deuterons, 40MeV, lithium target)



- EVEDA: Engineering Validation and Engineering Design Activities -> prototype for IFMIF (1 CW accelerator 125mA, 9MeV)

# IFMIF-EVEDA Accelerator

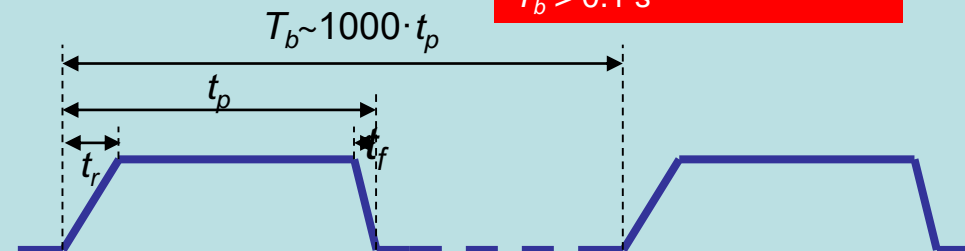


## Commissioning

- 5 MeV for RFQ commissioning:
  - From 0.5 mA to 125 mA.
  - Pulsed and CW operation.
- 9 MeV for HWR commissioning and beam characterization :
  - From 0.5 to 125 mA.
  - Pulsed and CW operation.

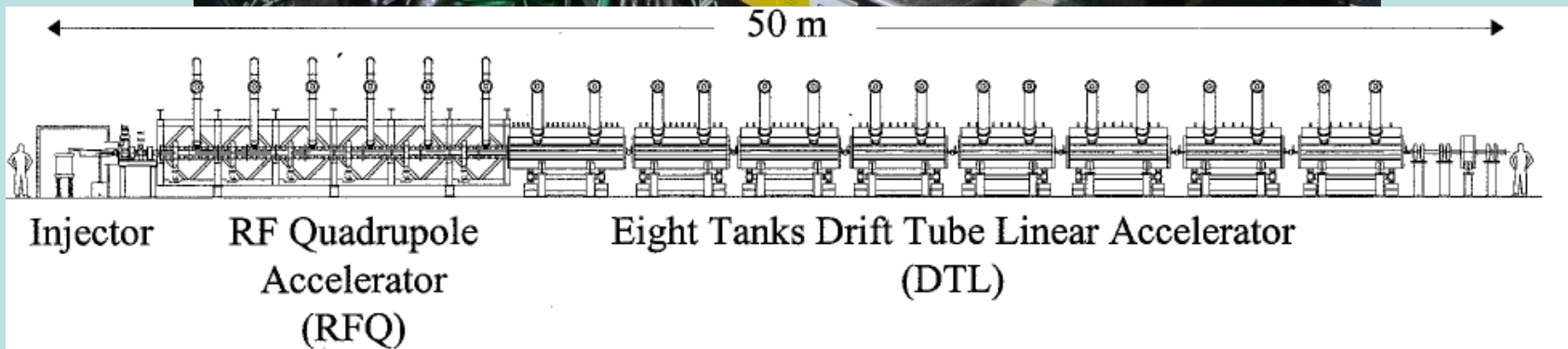
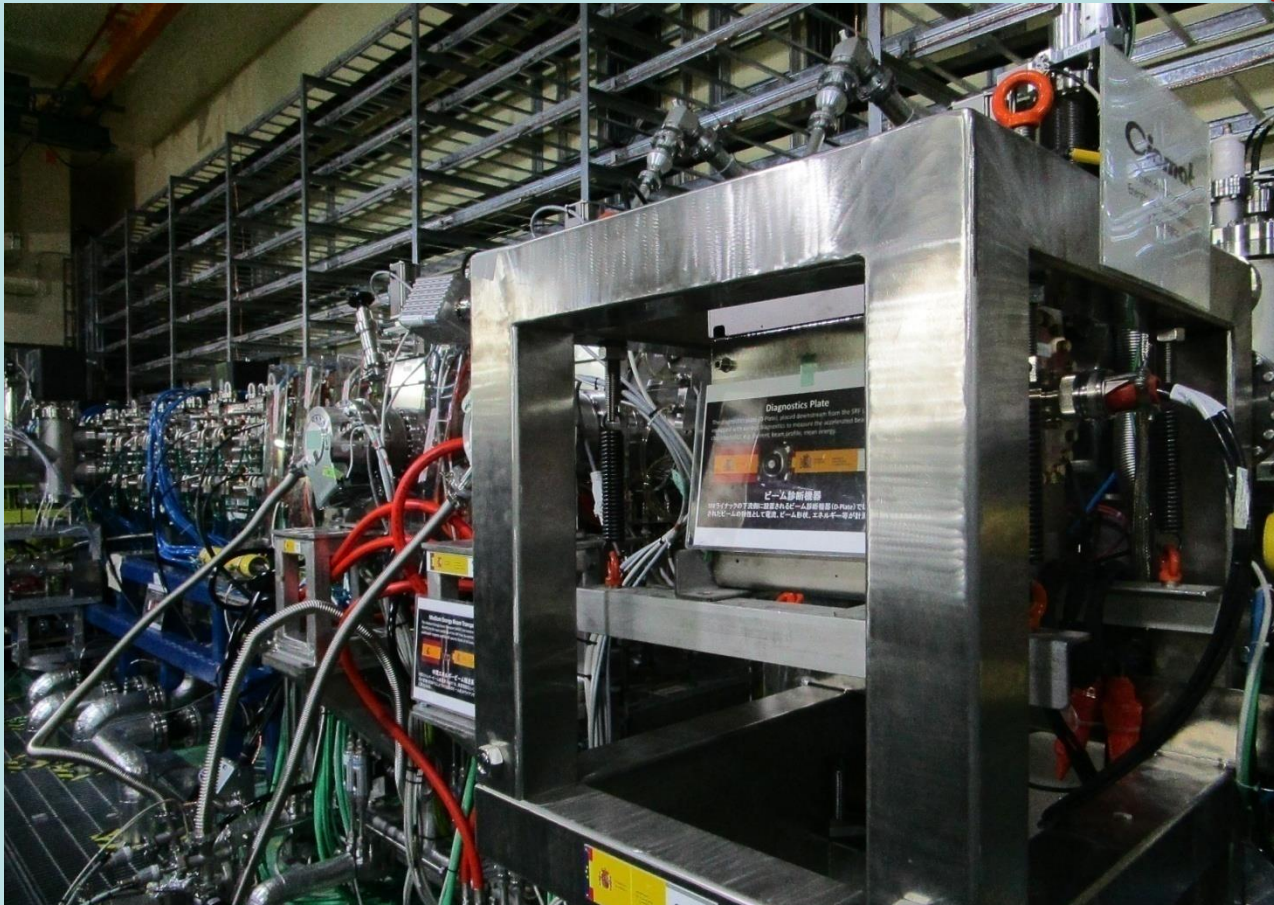
ECRIS Pulse characteristics

$t_r > 10-20 \mu\text{s}$   
 $t_f > 45 \mu\text{s}$   
 $t_p > 100 \mu\text{s}$   
 (200  $\mu\text{s}$  for stabilization)  
 $DC = 0.1\%$   
 $T_b > 0.1 \text{ s}$



# The IFMIF/EVEDA EU-JA Project

October  
2017



# Comparison of neutrons flux density

Project	IFMIF *	SARAF
Reaction specification	d(40MeV) +Li	d(40MeV) +Li
Projectile range in target (mm)	19.1	19.1
Maximum beam current (mA)	2 x 125	5
Beam spot on the target (cm <sup>2</sup> )	~100	~1
Beam density on the target (mA/cm <sup>2</sup> )	2.5	5
Neutron production over 4π (n/deuteron)	~0.07	~0.07
Neutron source intensity (n/s)	~10 <sup>17</sup>	~10 <sup>15</sup>
Maximal neutron flux on the back-plate [n/(sec • cm <sup>2</sup> )] (0-60 MeV neutrons)	~10 <sup>15</sup>	~5•10 <sup>14</sup>
<En> on the back-plate (MeV)	~10	~10

\* D.Ridikas et.al. "Neutrons For Science (NFS) at SPIRAL-2 (Part I: material irradiations), Internal Report DSM/DAPNIA/SPhN, CEA Saclay (Dec 2003)

# ***BELA - What for?***

## ✓ **Material science**

In ITEP the imitation experiments for reactor material radiation resistance investigation on the ion beams ongoing since 2007. The facility with two dc beam irradiation of the samples under controlled heating till the 700°C together with Laser atom-probe tomography will create the “world level” center. (In word - JANNUS French, FRANZ Germany, DuET Japan, MIBL USA) .

## ✓ **Facility for semiconductor industry**

Improvement of power electronics units by proton beam irradiation (IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistors, and FRD Fast Recovery Diodes). Russian market today requires irradiation of several thousands samples per year and will increase. The facility in ITEP both for samples irradiation and for development of compact linac for serial production.

## ✓ **Medicine (BNCT, Radiopharmaceutical for PET)**

- Experimental facility in ITEP for BNCT development with medics (Oncological centre “N. N. Blochin”, Botkin Hospital, Herzen Institute);
- Prototypes of compact facilities based on linac for hospital application - serial production of BNCT complex for hospitals.
- Experimental facility in ITEP together with chemical laboratory provides Radiopharmaceutical complex.
- Prototypes of compact facilities based on linac for PET centers.

Now more than 50 PET are bought for Russian medical centers (according word standard it is necessary to have 1 PET for 1.5 million of citizens). About each of them needs Radiopharmaceutical complex based on accelerator but less than 10 Cyclotrons is under operation now.

## ✓ **Neutron generators**

experimental facility for scientific researches

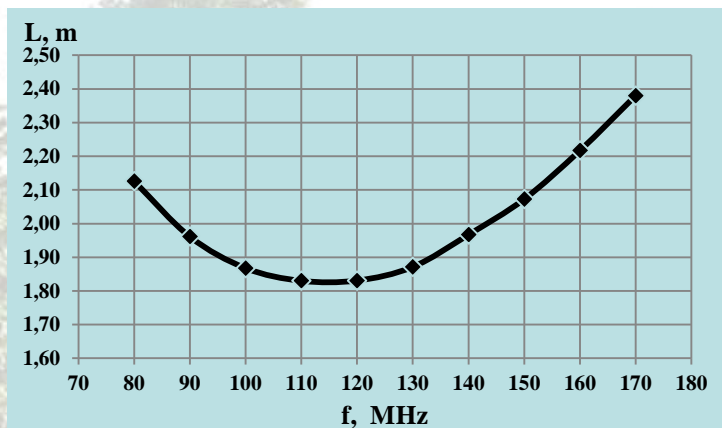
# Выбор частоты для RFQ непрерывного типа (cw) на энергию

$$W_k/A = 1.5 \text{ MeV/u};$$

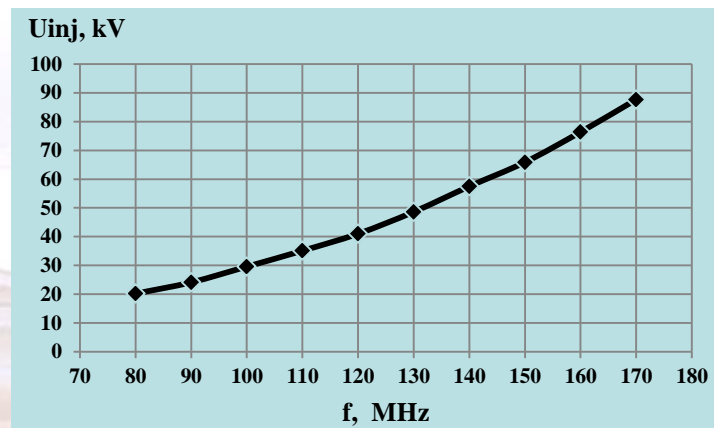
$$\varepsilon_{n \text{ inp}} = 0.1 \pi \text{ cm}\cdot\text{mrad} \quad A_k = 1 \pi \text{ cm}\cdot\text{mrad}$$

$$A_k / \varepsilon_{n \text{ inp}} \sim 10; \quad E_{smax} / E_{kp} = 1.6 \leftrightarrow \text{cw}$$

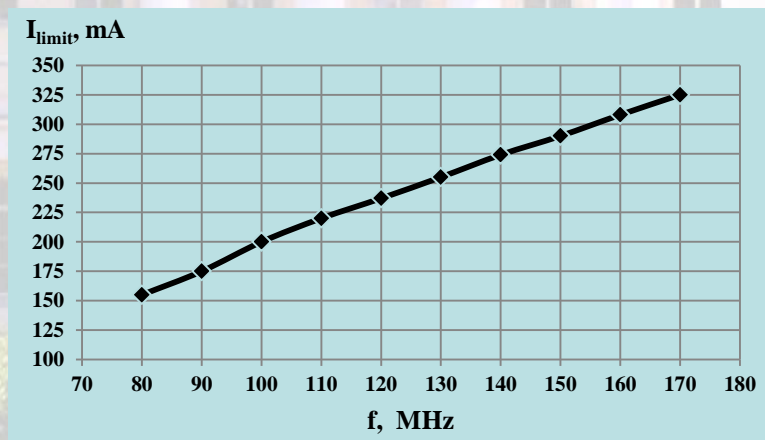
$$Z/A = 1$$



Зависимость длины ускорителя от частоты



Зависимость напряжения инжекции от частоты



Зависимость предельного тока от частоты



# RF system



Оконечный каскад  
на GI-27AM



Двухкаскадный  
генератора на триодах  
GI-50A



Твёрдотельный ВЧ генератор  
для ускорителя NILAC, ОИЯИ



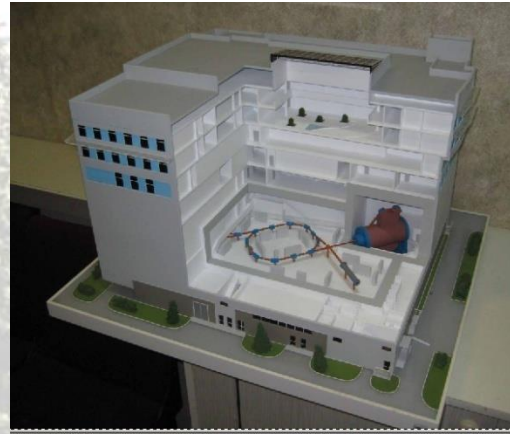
Твёрдотельный ВЧ генератор для  
ПЭТ циклотронов на рабочую  
частоту 72 МГц с выходной  
мощностью 10 кВт (слева)



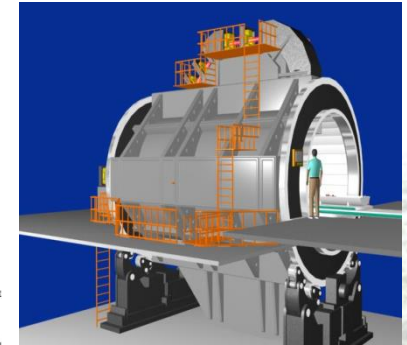
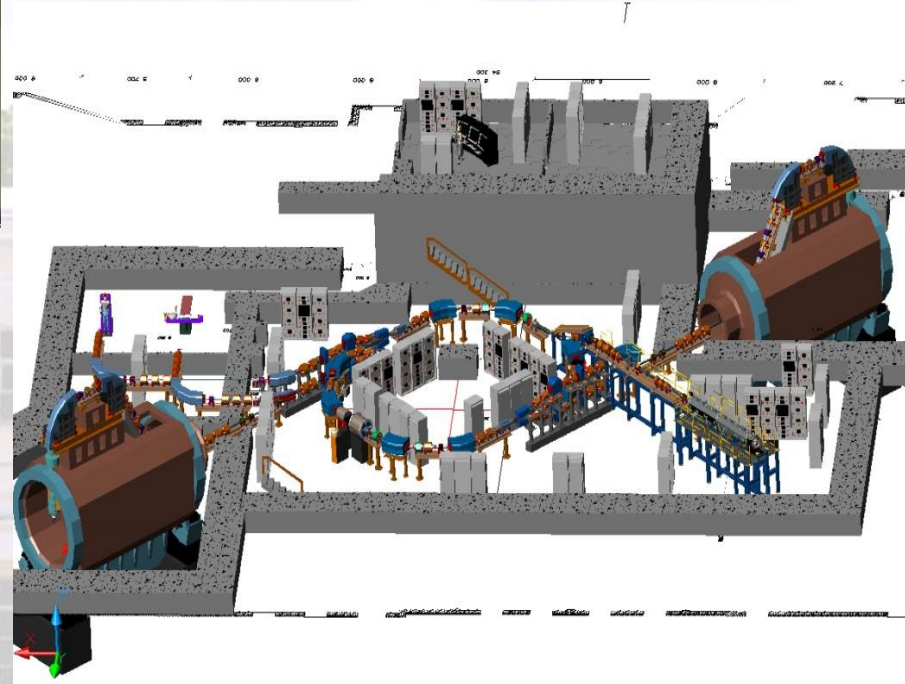
твёрдотельный ВЧ усилитель для  
ускорителя ESS (Швеция) на рабочую частоту  
352 МГц с выходной мощностью 400 кВт.



# Project of **CENTRE** for Proton Therapy



Layout of CPT for Botkin hospital (Moscow)



Gantry

Synchrotron magnet



Linac



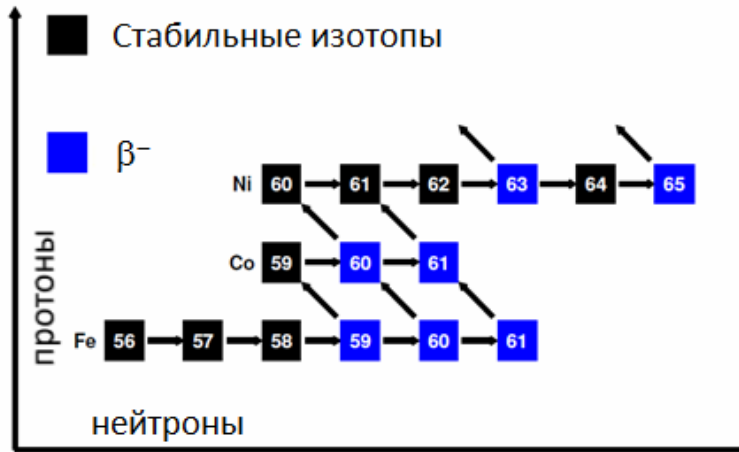
## International ion accelerator facilities used for radiation damage studies

	<b>DuET</b> (Kyoto University, Japan)	<b>TIARA</b> (JAERI, Takasaki, Japan)	<b>MIBL</b> (Michigan University, USA)	<b>JANNUS</b> (Saclay, France)	<b>DCF</b> (University of Manchester, UK)	<b>TAMU</b> (Texas A&M University, USA)
Target temperature, C	<b>crio-1773</b>	<b>RT-800</b>	<b>RT-600</b>	<b>cryo-800</b>	<b>RT-400</b>	<b>RT-800</b>
Accelerator type	1.7 MV Tandetron	3 MV tandem 400 kV injector 3 MV single-ended	3 MV Pelletron 1.7 MV Tandetron 400 kV injector	3 MV Pelletron 2.5 MV Van de Graaff 2 MV tandem	5 MV tandem Pelletron	1.7 MV Tandetron 400 kV Van de Graaff 3 MV NEC tandem accelerator
Type of ions/ion source	Fe, Si, Ni, C, <b>He</b>	Fe, Si, Ni, C, <b>He</b>	ECR source Fe, Ni, Cr.... <b>He, H</b>	ECR source Fe, Ni, Au.... <b>He, H</b>	SNICS for heavy ions TORVIS for He, H	Fe, Si, Ni, C, <b>He</b>
Beam currents and energies	Fe 6.8 MeV 10 $\mu$ A He 1 MeV 100 $\mu$ A	Ni 18 MeV 6 $\mu$ A He 3 MeV 50 $\mu$ A Ar 400 keV 50 $\mu$ A	Fe 2-9 MeV >200nA He 5MeV >200nA	Heavy ions <100 $\mu$ A He 2.5 MeV 40 $\mu$ A	Heavy ions 10 $\mu$ A He 15 MeV 15 $\mu$ A	
Simultaneous irradiation	<b>2 beam</b>	<b>3 beam</b>	<b>2 beam</b>	<b>3 beam</b>	<b>1 beam</b>	<b>2 beam</b>



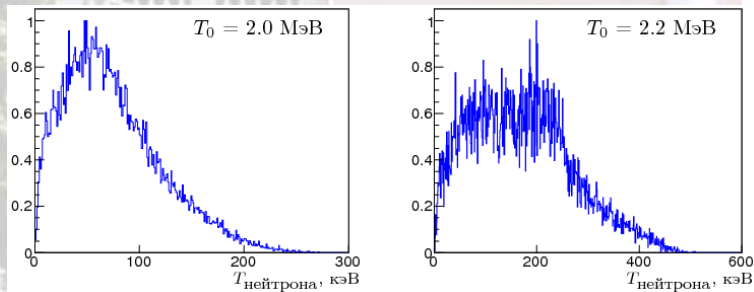
# Astrophysics

## ОБРАЗОВАНИЕ $^{60}\text{Fe}$ В S-ПРОЦЕССЕ



Важную роль в процессе эволюции Вселенной играют s-процессы, т.е. образование более тяжелых ядер через захват нейтронов. По современным представлениям, примерно половина наблюдаемого количества тяжелых ядер образуется в результате s-процесса. Для эффективного протекания s-процессов в звездах, необходимо, чтобы температура вещества была более  $10^9$  К при плотности нейтронов около  $10^{10}$   $\text{см}^{-3}$  нейтронов. Исходным элементом для такой цепочки ядерных реакций служит  $^{56}\text{Fe}$ . Наибольший интерес в последние десятилетие вызывает нуклеосинтез  $^{60}\text{Fe}$ , распространенность которого в межзвездном пространстве свидетельствует о формировании массы объектов Солнечной системы из нескольких массивных звезд. Для большинства моделей эволюции Вселенной, процессы  $^{59}\text{Fe}(n,\gamma)^{60}\text{Fe}$  и  $^{60}\text{Fe}(n,\gamma)^{61}\text{Fe}$  являются определяющими. Кроме того, в настоящее время не существует экспериментальных данных по сечениям для реакции  $^{59}\text{Fe}(n,\gamma)^{60}\text{Fe}$ , а теоретические предсказания дают различие в 100%. На рисунке показан путь от начала цепочки к элементу  $^{60}\text{Fe}$  через  $^{59}\text{Fe}$ , время жизни которого составляет примерно 44 дня.

Измерение сечений нейтронного захвата изотопами железа входит в программу исследований экспериментов FAIR и FRANZ.



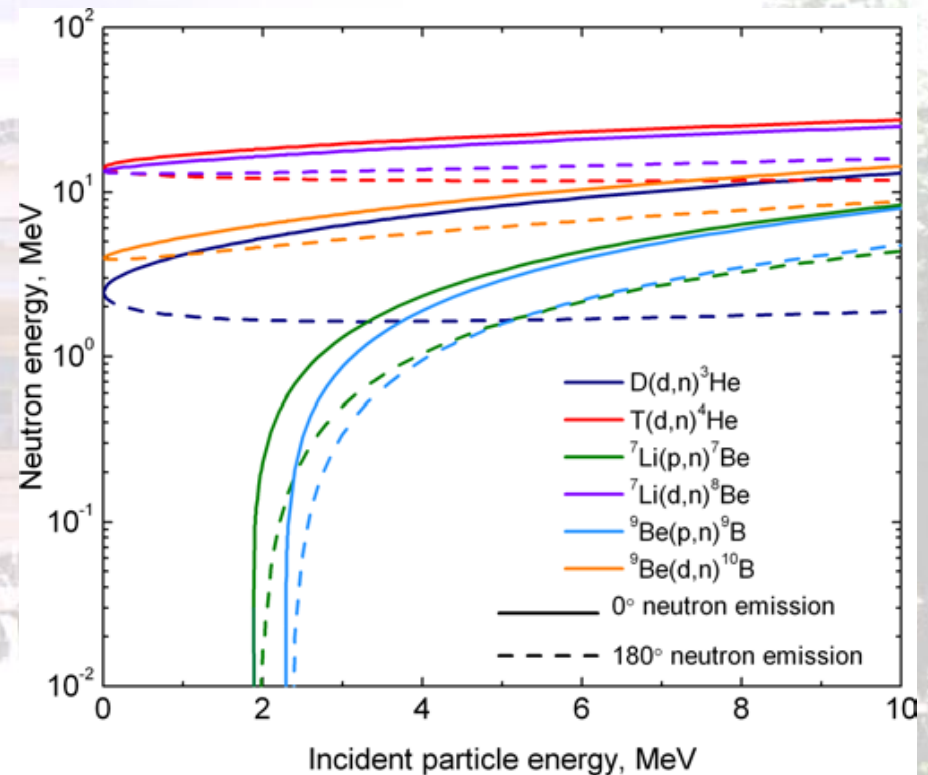
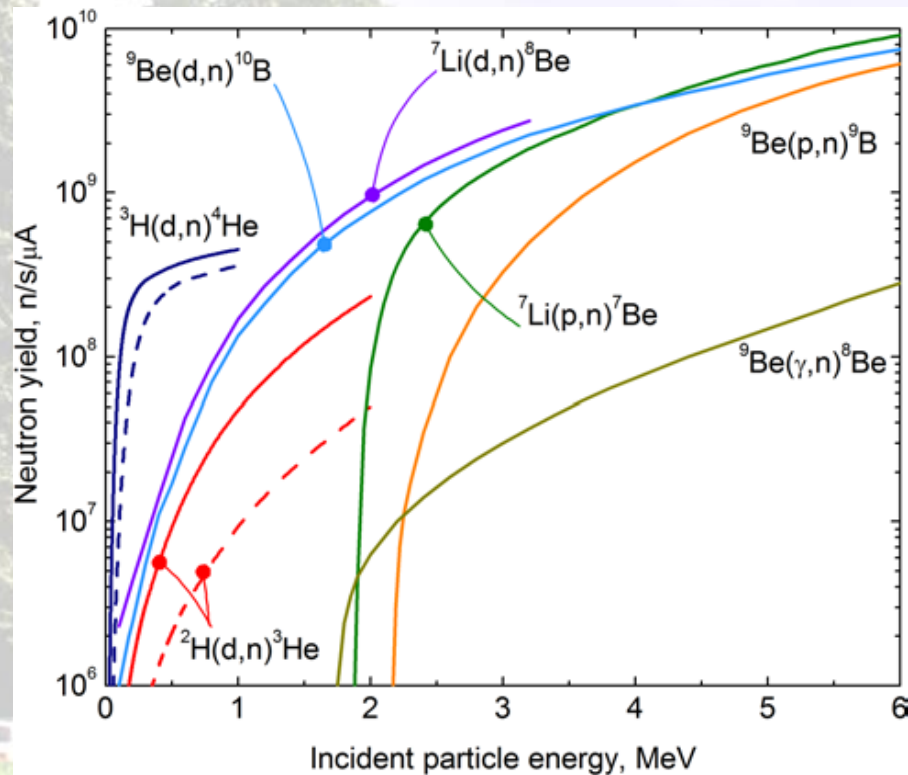
Взвешенный спектр нейтронов, образующийся в реакции  $^7\text{Li}(p,n)^7\text{Be}$  на мишени радиусом 5 мм и толщиной 30 мкм. Данные приведены для двух энергий протона  $T_0$ .



# Neutron production by ion beam

INDUSTRIAL ACCELERATORS AND THEIR APPLICATIONS

*Edited by Robert W. Hamm, Marianne E. Hamm*



# Необходимые условия для организации экспериментальной лаборатории по изучению, производству и тестированию сверхпроводящих резонаторов для современных ускорителей элементарных частиц

## Не зависят от типа резонаторов и сверхпроводящего материала:

- Помещения
- Персонал соответствующей квалификации, молодые специалисты
- Современная механическая мастерская
- Гелиевая станция (Лучше иметь свою или надёжный и регулярный источник на первых порах)
- Система сбора гелия (Возможна очистка и повторное использование или отправка грязного на завод)
- Система откачки гелия (в случае 1.8 К)
- Жидкий азот
- Чистые газы (He, Ar)
- Система деионизованной воды (18 МОм)
- Водяной компрессор с керамикой 200 атм
- Ультразвуковые ванны для очистки поверхности
- Система сбора и нейтрализации химических продуктов
- Система управления электрохимическими процессами
- Система радиационной защиты криостата
- Чистая комната для монтажа резонаторов
- Камеры для хранения резонаторов в защитной атмосфере
- Современный гелиевый течеискатель
- Набор откачных систем с турбомолекулярными и ионными насосами
- Различные измерители и регуляторы вакуума, давления, температуры, низких температур, уровней жидких азота и гелия – все обязательно с компьютерными интерфейсами
- ВЧ система для измерений и тренировки, покрывающая все типы резонаторов для протонного драйвера- от 50 до 1500 МГц,

## Зависят от типа резонаторов и/или сверхпроводящего материала:

- Криостат
- Химическая фабрика
- Установка для промывки резонаторов деионизованной водой при 200 атм
- ВЧ усилители мощности (100 – 2000 Вт), циркуляторы на нужные частоты
- Технология производства резонаторов
  - Ниобий
    - Высокочистый ниобиевый лист RRR>250
    - Дефектоскопия листа
    - Нарезка, штамповка (гидравлическая), формовка, радиально-винтовая прокатка, глубокая вытяжка
    - Вакуумная электроннолучевая сварка
    - Отжиг в вакууме в присутствии геттера, при необходимости
    - Химическая или электрохимическая полировка
    - Промывка водой при 200 атм
  - Медь, Ниобий на Меди
    - Чистая бескислородная медь
    - Механическая обработка
    - Вакуумная печь для пайки структур
    - Механическая, электрохимическая, химическая полировка, пассивация
    - Высоковакуумная система напыления (катодное или магнетронное распыление)
    - Напыление Ниобия
    - Промывка водой при 200 атм