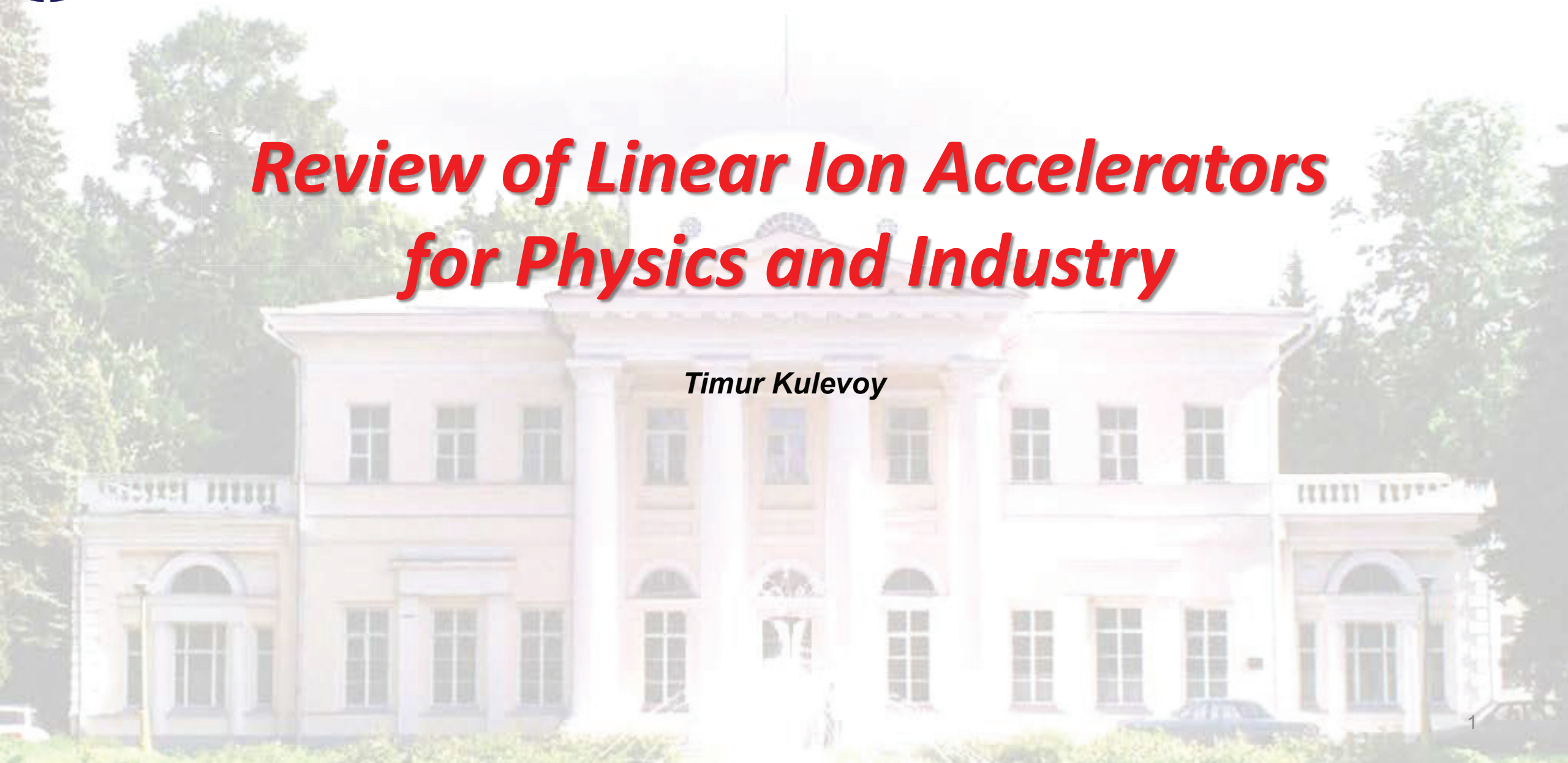




Review of Linear Ion Accelerators for Physics and Industry

Timur Kulevoy





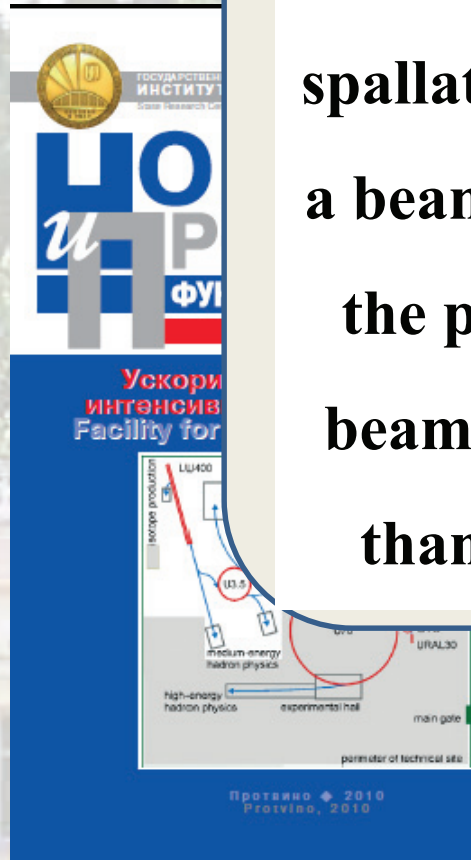
Reactor complex PIK



Spallation Source

The OMEGA Project also foresees construction of the pulsed spallation neutron source utilizing the 3.5 GeV

A prototype of the pulsed source of neutrons utilizing the spallation-evaporation reaction (Protvino, Moscow Region) with a beam of 0.8 microAmp (averaged)/2.7 microAmp (pulse inside the packet), neutron output of 10^{15} per injection cycle, proton beam power at the target of 1kW, proton beam energy of more than 1.3GeV and the maximum number of stations – 6 units

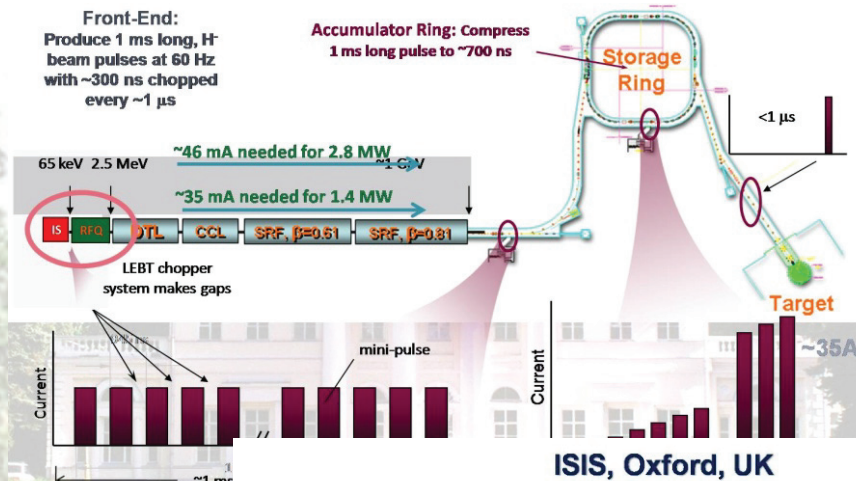


Комплекс расположен в северо-восточной части территории площадки ИЯФ. 1 – линейный ускоритель ЛУ-400 (красный цвет); 2 – быстровращающийся синхротрон У-3.5 (красный цвет); 3 – ТТ – мишень и экспериментальный зал нейтрона источника (красный цвет); 4 – 5 ТЗ и ТЗ – зоны для экспериментов с высокоинтенсивными пучками (розовый цвет). Существующий здание 6 (серый цвет) будет использоваться для технологического обслуживания комплекса. Серыми и желтыми цветами обозначены существующие здания и сооружения. Цирк – колесо ускорителя У-70.
Fig. 1. Location of the Facility for Intense Hadron Beams.
It is located in the north-eastern part of the IYF site. 1 – linear accelerator LU-400 (red color); 2 – rapid cycling synchrotron U-3.5 (red color); 3 – TT – the particle source target and experimental hall (red color); 4 – 5 T3 and T3 – zones for experiments with high intensity beams (pink color); 6 – existing building (blue color) to be used for the technical support. Light-gray and yellow colors mark the existing infrastructure. In this corner – the U-70 ring.



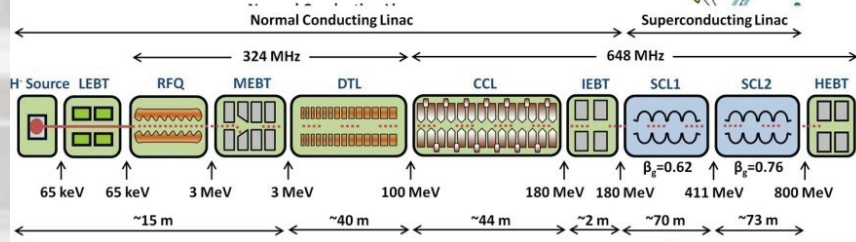
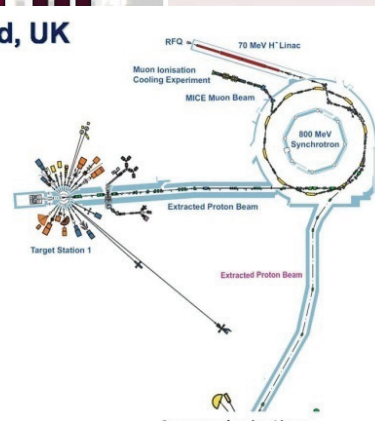
Spallation Source

The SNS accelerator system overview

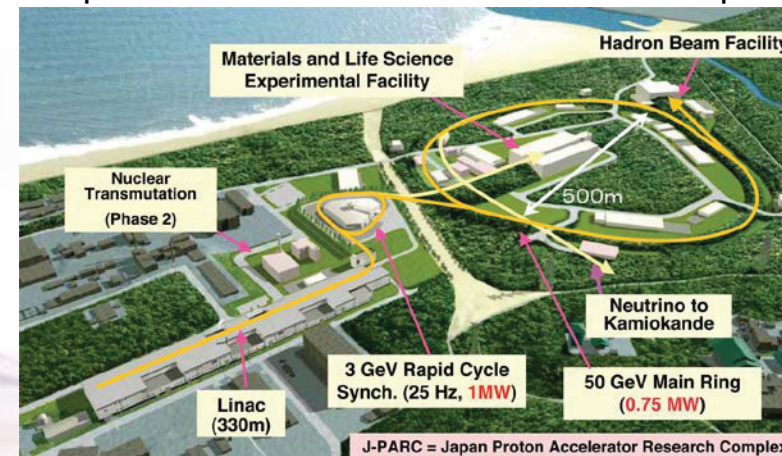


The multi-turn charge ex
accumulator ring require

- Neutron and Muon source used for condensed matter research by 3000 users.
- H⁺ ion source (55 mA)
- 665 keV RFQ (35 mA)
- 70 MeV linac (26 mA)
- 800 MeV 50 Hz, RCS (2.8x10¹³ ppp)
- Target 1 + Muon target (140 kW)
- Target 2 (36 kW)



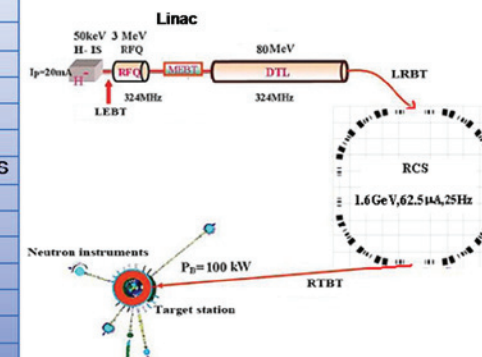
J-PARC Japan Proton Accelerator Research Complex



Project Design

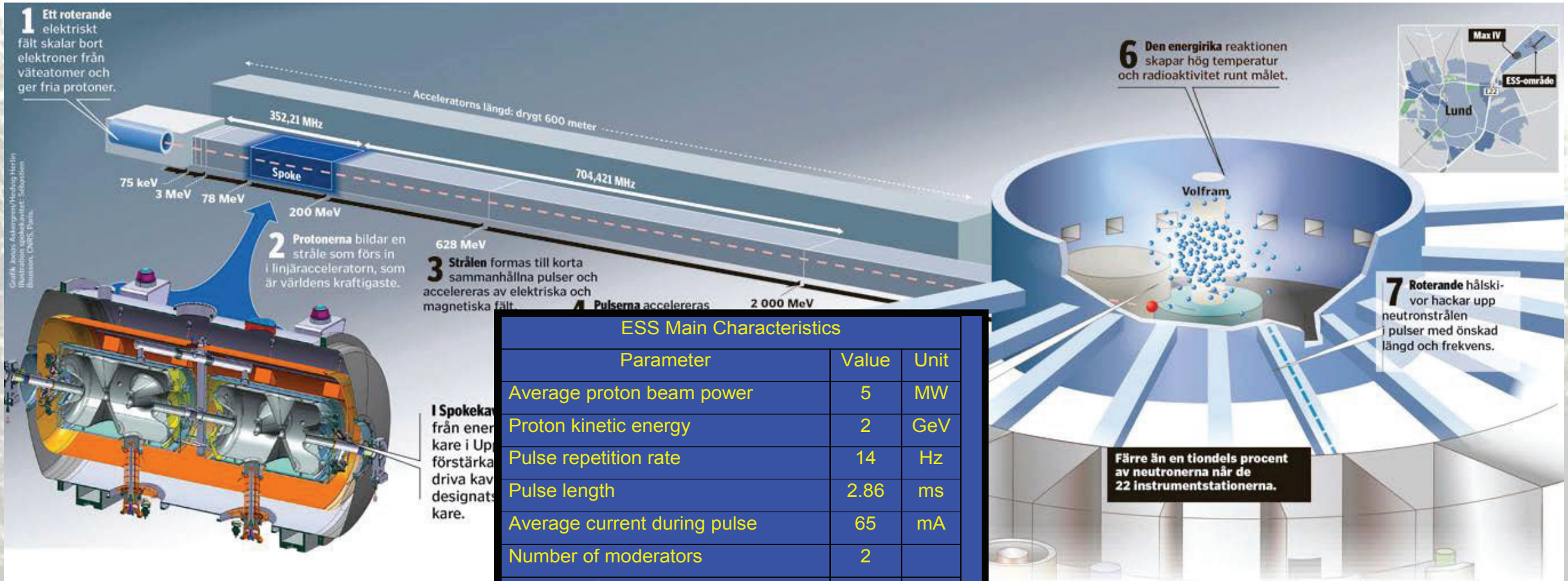
- The phase-I CSNS facility consists of an 80-MeV H⁺ linac, a 1.6-GeV rapid cycling synchrotron(RCS), beam transport lines, a target station, and 3 instruments.

Project Phase	I	II
Beam Power on target [kW]	100	500
Proton energy [GeV]	1.6	1.6
Average beam current [μ A]	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 [μ mm-mrad]	540	540
Target	1	1
Spectrometers	3	20

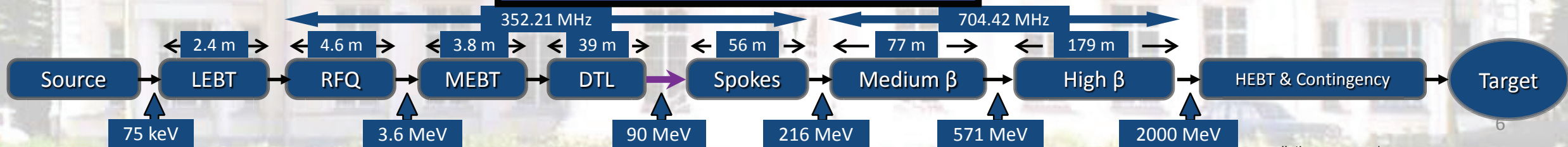


The first high-energy high-intensity proton accelerator in China

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	





МЕГАСАЙЕНС ПРОЕКТ МУНК
Мегаваттный **У**скорительный
Нейтронный **К**омплекс

ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАН



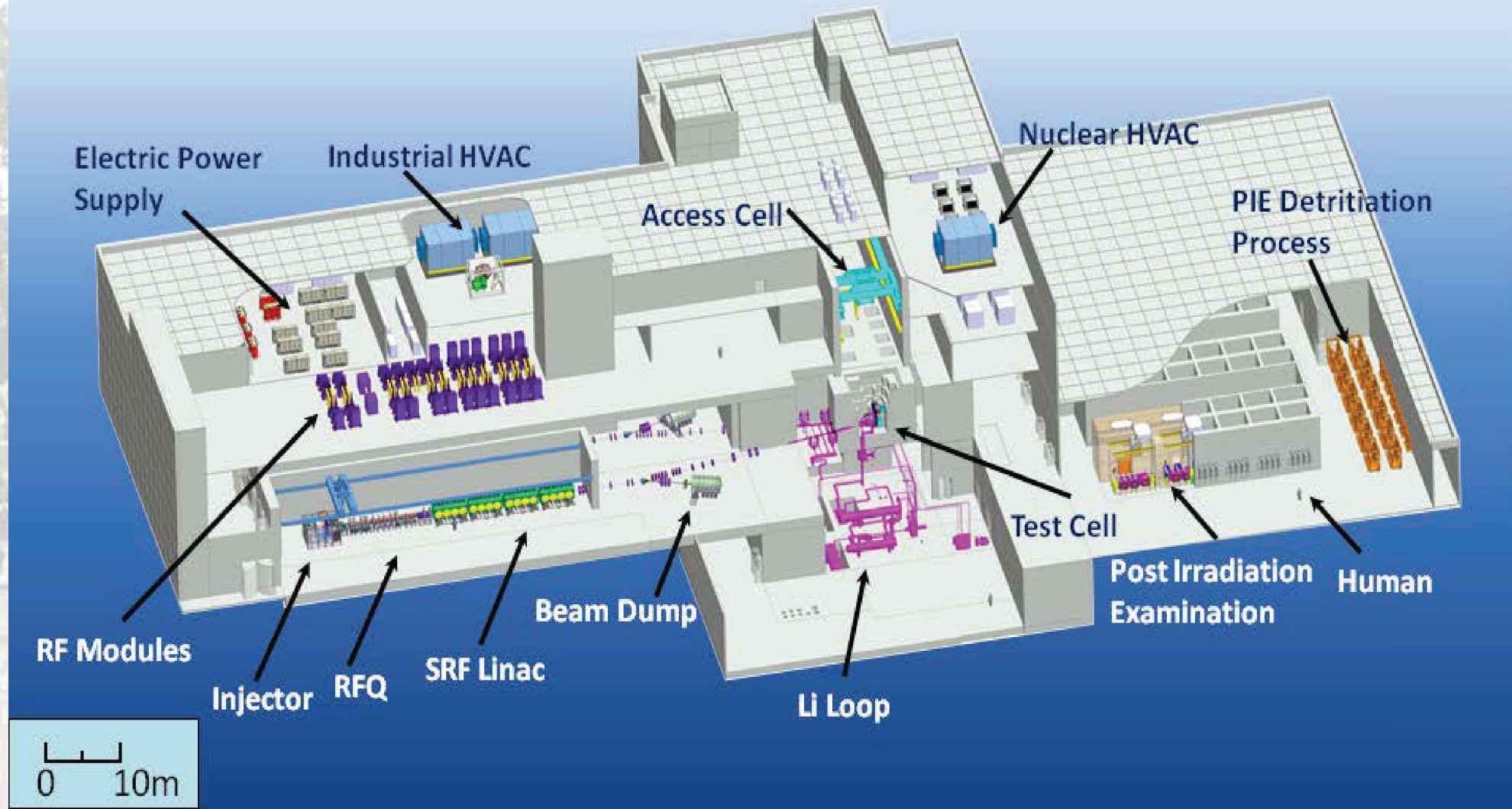
Цель:

создание сверхпроводящего линейного ускорителя протонов (H-) -1мА, 1 ГэВ
- и замены им существующего ускорителя ММФ в ИЯИ РАН, Троицк, Москва.

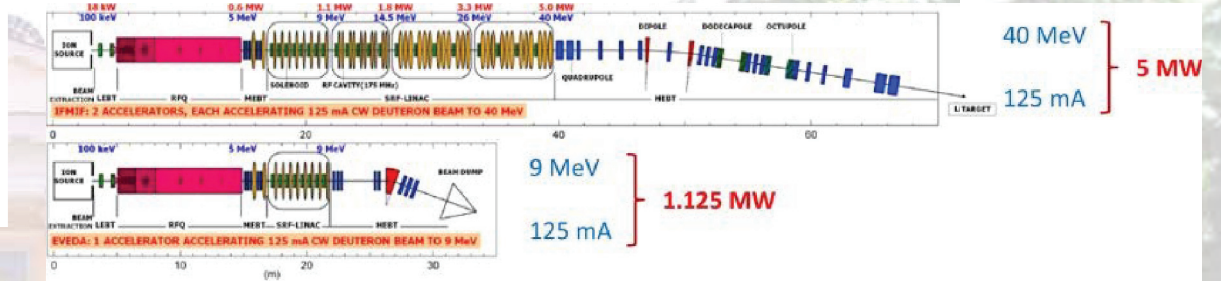
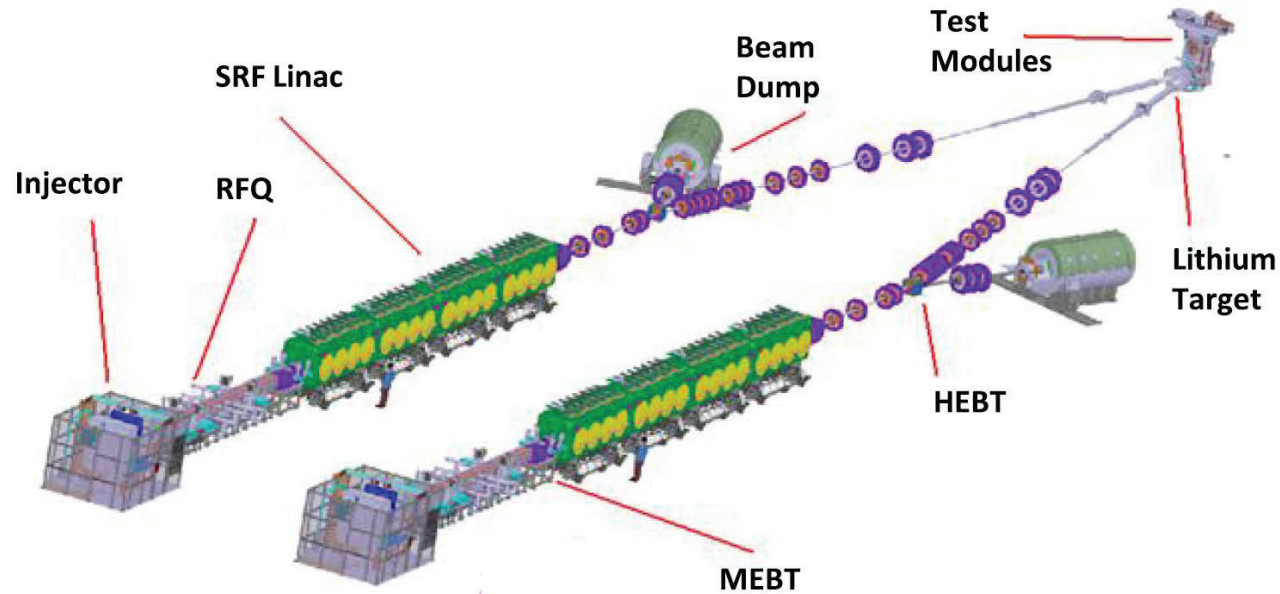
Назначение Линака:

- **источник нейтронов Spallation neutron source, работающий в импульсном режиме,**
- **подкритический ядерный реактор с ускорителем Accelerator Driven System ADS,**
- **нейтринная фабрика,**
- **производство радиоизотопов для радиофармпрепаратов.**

IFMIF facility: **two, high power CW drivers**, each delivering a 125 mA deuteron beam at 40 MeV (5 MW power) hitting a liquid lithium target in order to yield neutrons (10^{17}s^{-1}) via nuclear stripping reactions.

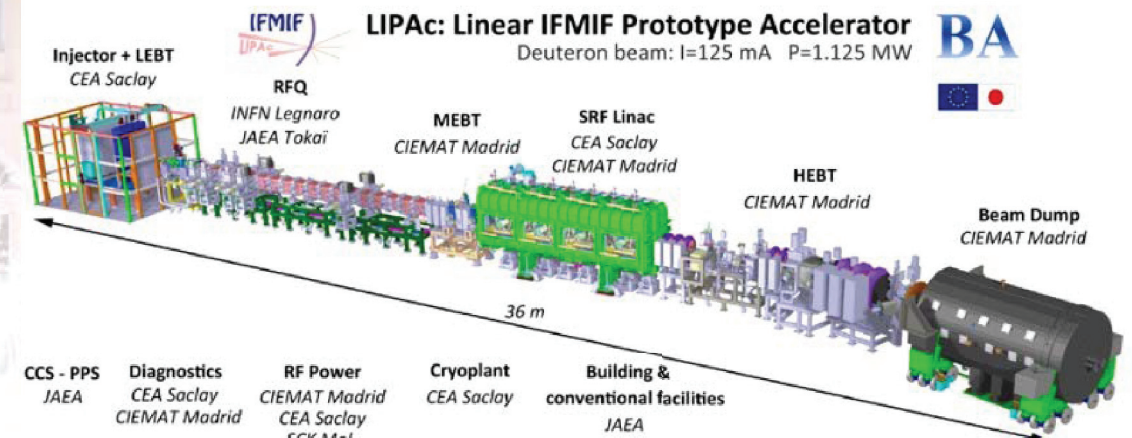


The International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF), Rokkasho, Japan

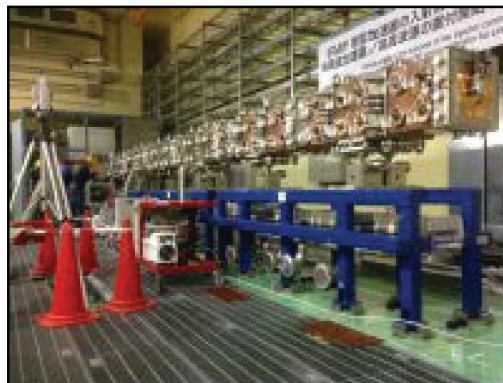


The IFMIF Main Characteristics

Parameter	Value	Unit
Particle	d	
Output energy	9; 40	MeV
Current	125	mA
RFQ frequency	175	MHz
RFQ input energy	100	keV
RFQ output energy	5	MeV
RFQ length	9.8	m
RF power	1.2	MW



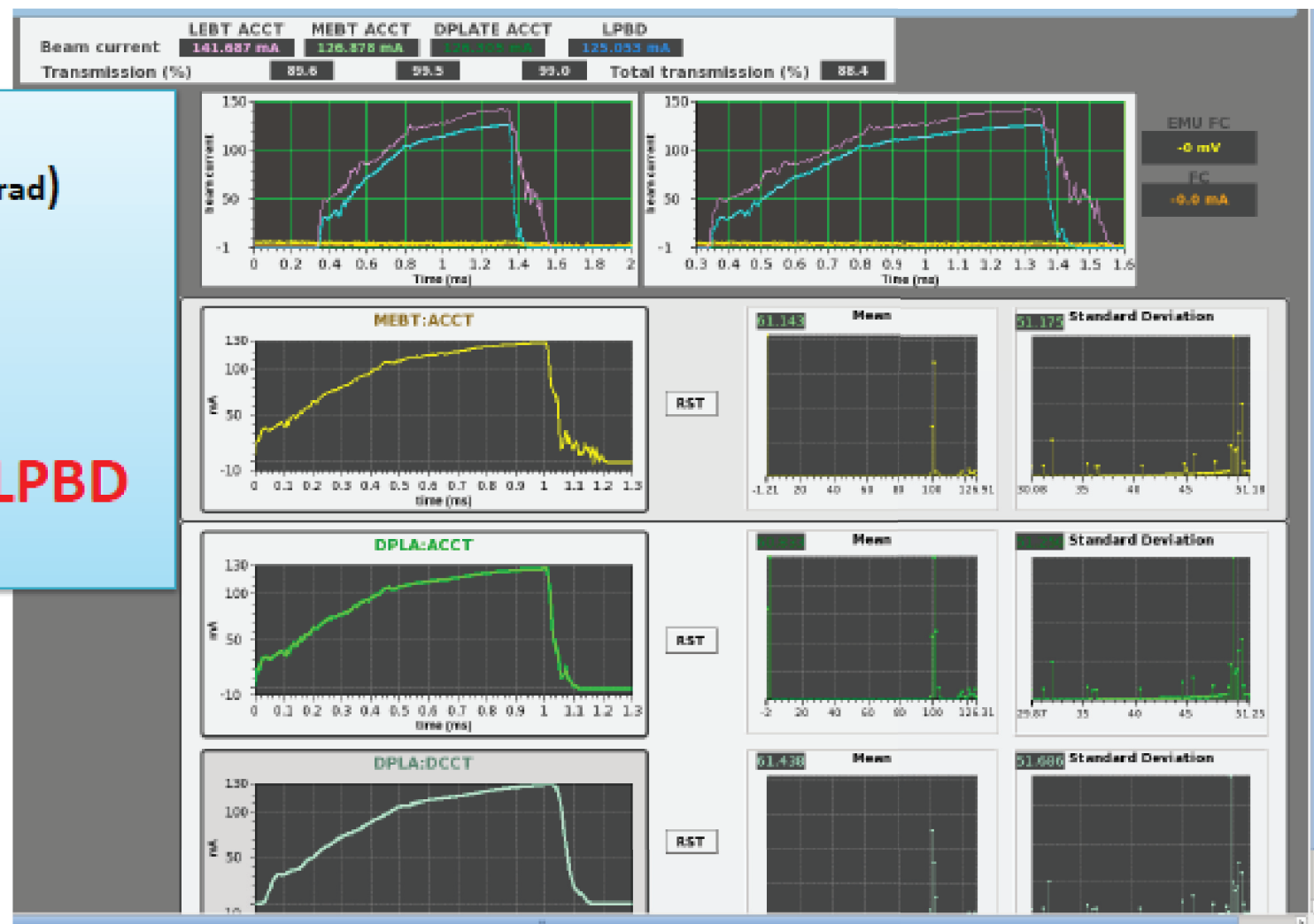
- **Phase A:** 140 mA deuteron beam at 100 keV in CW (DC operation under commissioning just these weeks)
- **Phase B:** 125 mA deuteron beam at 5 MeV at 0.1% duty cycle (accomplished last August)
- **Phase B+:** 125 mA deuteron beam at 5 MeV from low duty cycle up to CW
- **Phase C:** 125 mA deuteron current at 9 MeV at 0.1% duty cycle
- **Phase D:** Ramp up the duty cycle up to CW



- After chopper problem and due to limited time to reach phase B goal, it was decided to switch to large aperture plasma electrode and try to accelerate nominal beam. After some days...

24 July 2019

- 166 mA extracted from source
(D^+ fraction $\sim 85\%$, $\epsilon_{n,rms} \sim 0.2\pi$ mm mrad)
- 142 mA injected to RFQ
- RFQ vane voltage ~ 132 kV
- RF pulse ~ 1 ms, 1 Hz
- 127 mA exit from RFQ (Tr $\sim 90\%$)
- 125 mA transported to LPBD**
- Beam energy ~ 5 MeV



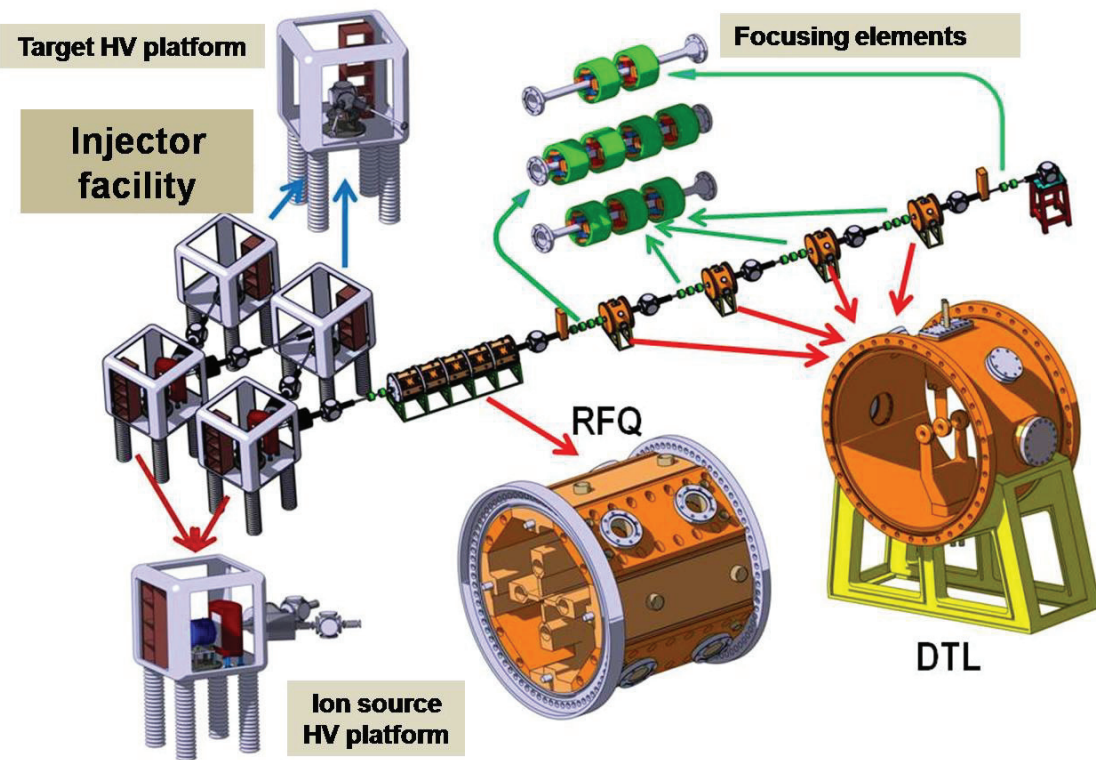


BELA



DARIA

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

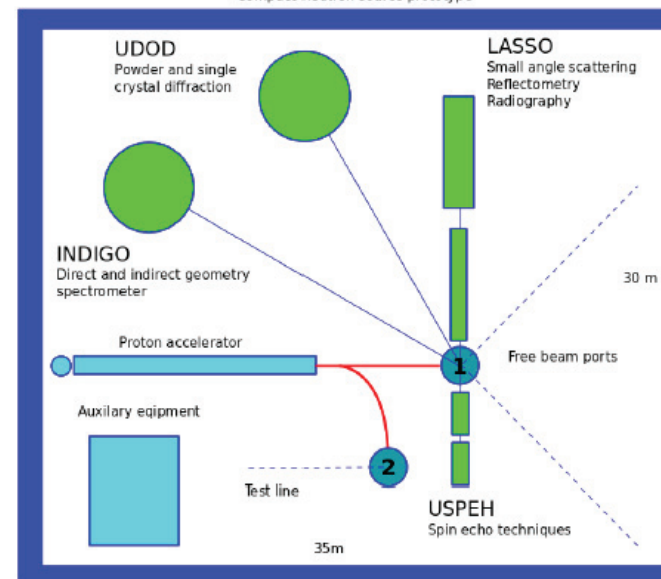


Possible layout



DARIA

Compact neutron source prototype



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



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ
И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

«Компактные источники фотонов и нейтронов на базе линейных ускорителей электронов и протонов»

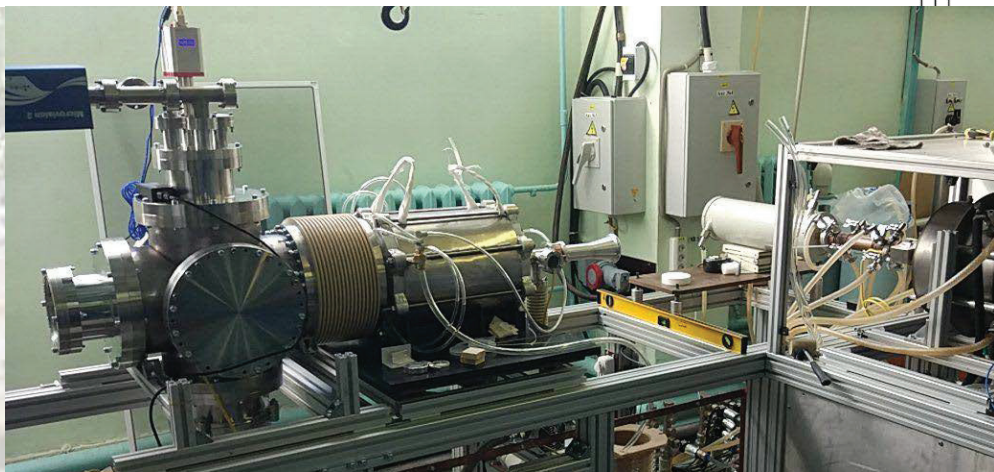
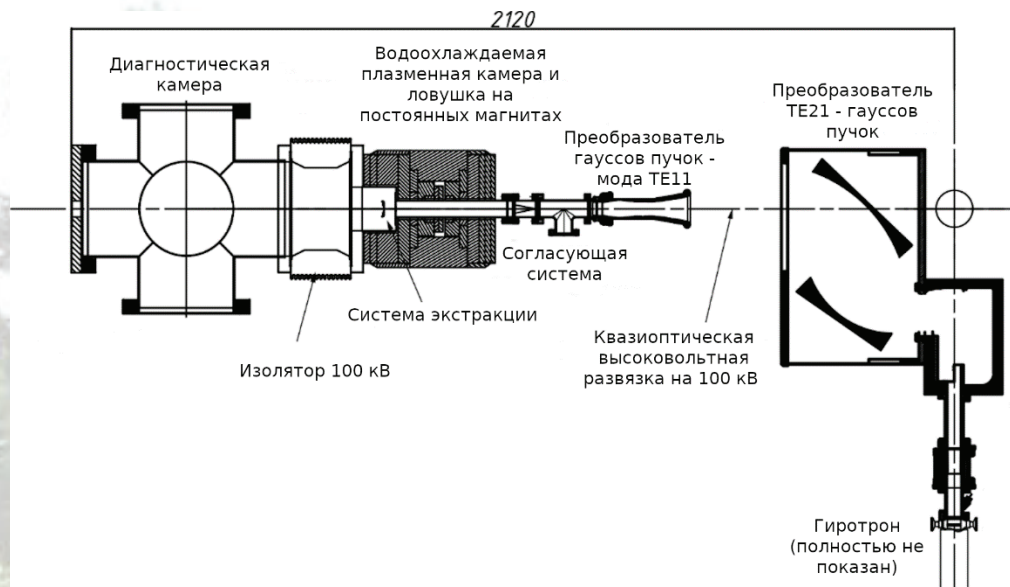
*Лот № 8 «Новые технологии ускорителей электронов и протонов,
необходимые для создания новых источников синхротронного излучения 4-го и
последующих поколений, рентгеновского лазера на свободных электронах и
импульсных нейтронных источников»*

Институт теоретической и экспериментальной физики
имени А.И. Алиханова

Национального исследовательского центра «Курчатовский институт»



ECR ion source (IAP RAS, N.Novgorod)



Гиротрон 24 - 37 ГГц, 10 кВт

Режим работы: Непрерывный / импульсный

Магнитная ловушка на постоянных магнитах

Диапазон давлений в разряде $10^{-6} - 10^{-2}$ торр

Удельный энерговклад до 100 Вт/см^3

Параметры водородного пучка:

Ток пучка до 500 мА

Нормализованная яркость до 50

$\text{А}/(\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад})^2$

Доля атомарных ионов $> 90\%$

Энергия ионного пучка до 100 кэВ

Пучок непрерывный или импульсный

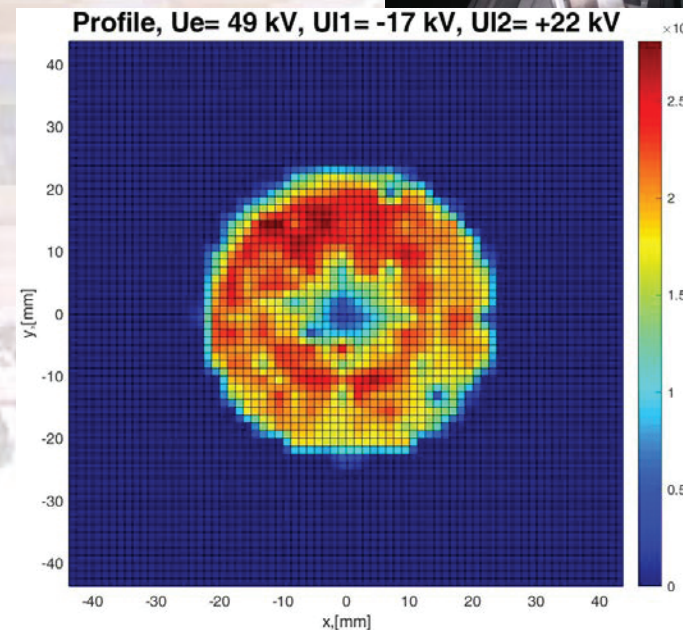
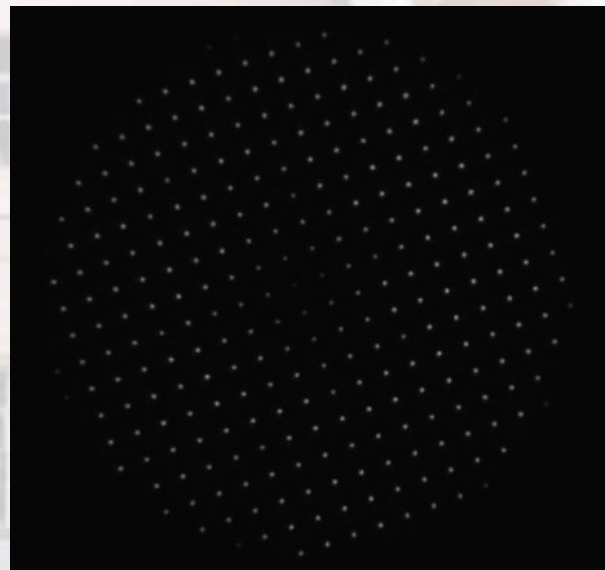
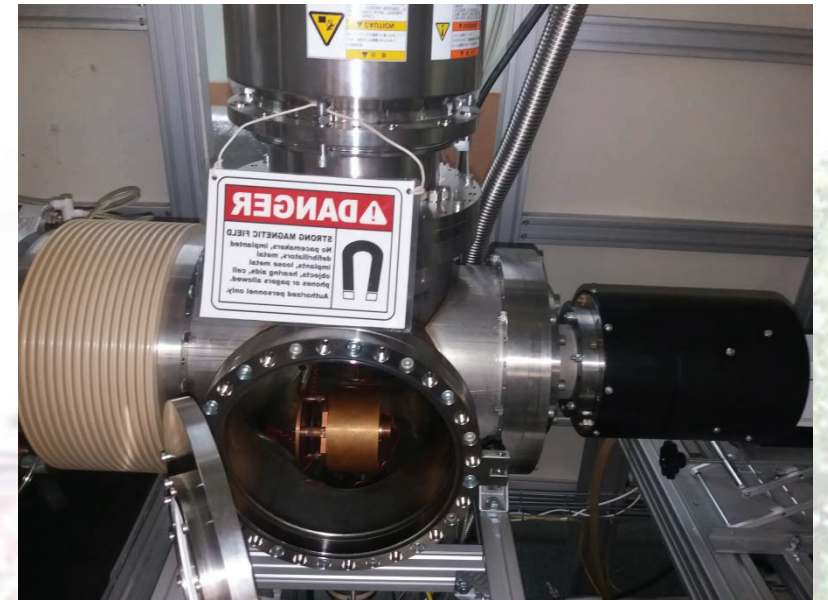
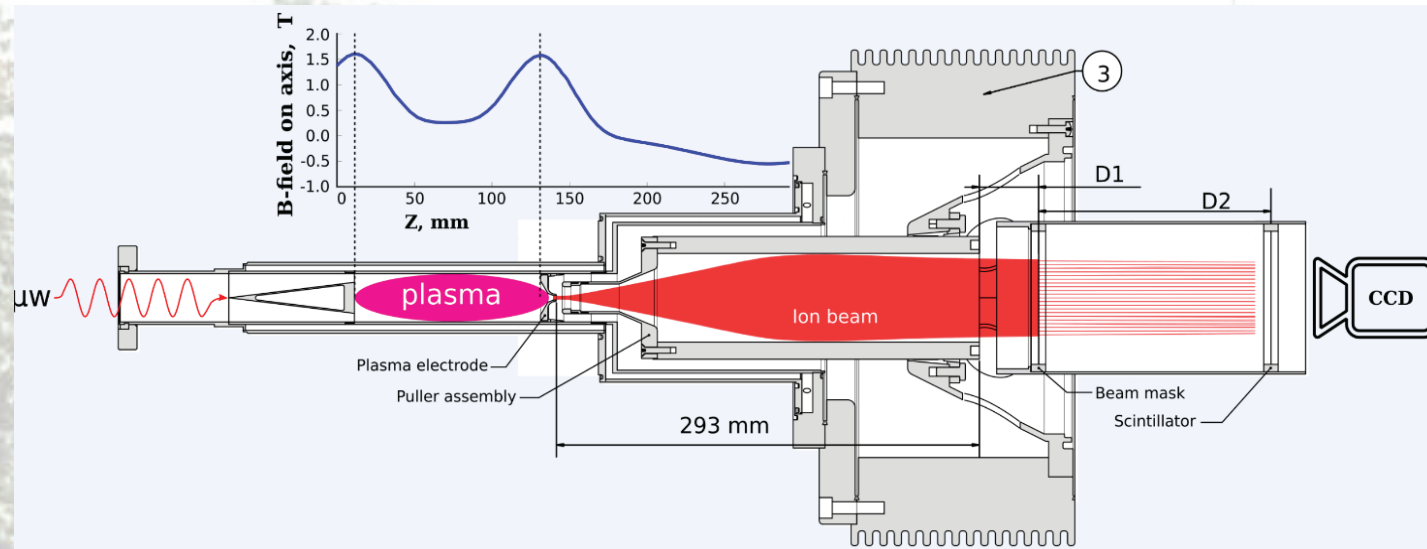
Импульсный режим:

Частота импульсов до 1 кГц

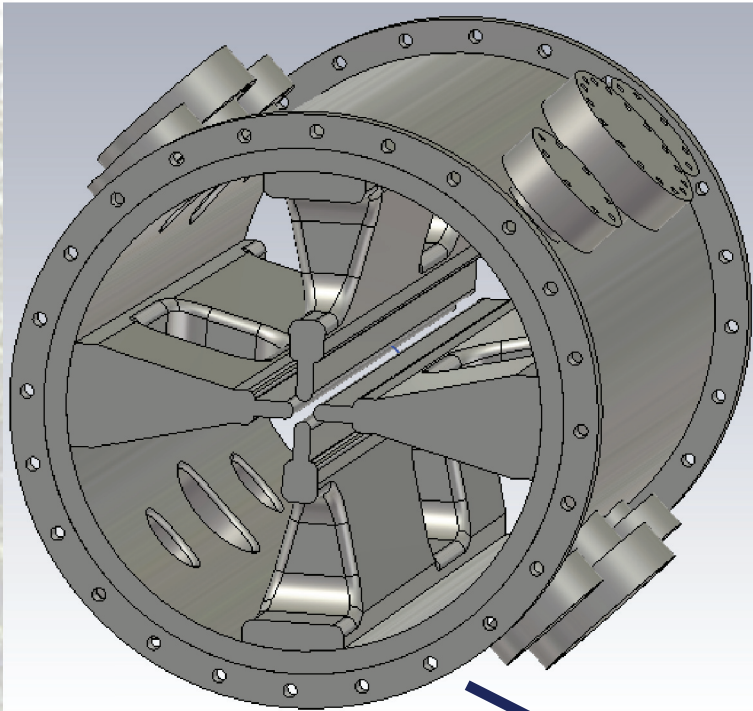
Длительность импульса от 100 мкс

1. V.Skalyga, I.Izotov, S.Golubev, A.Sidorov, S.Razin, A.Vodopyanov, O.Tarvainen, H.Koivisto, T.Kalvas. New progress of high current gasdynamic ion source. Review of Scientific Instruments. 87, 02A716 (2016); <http://dx.doi.org/10.1063/1.4934213>
2. V. Skalyga, I. Izotov, S. Razin, A. Sidorov, S. Golubev, T. Kalvas, H. Koivisto, and O. Tarvainen. "High current proton beams production at Simple Mirror Ion Source 37". // Review of Scientific Instruments, v. 85, no. 2, 2014, p. 02A702-1 – 02A702-3. DOI: 10.1063/1.4825074

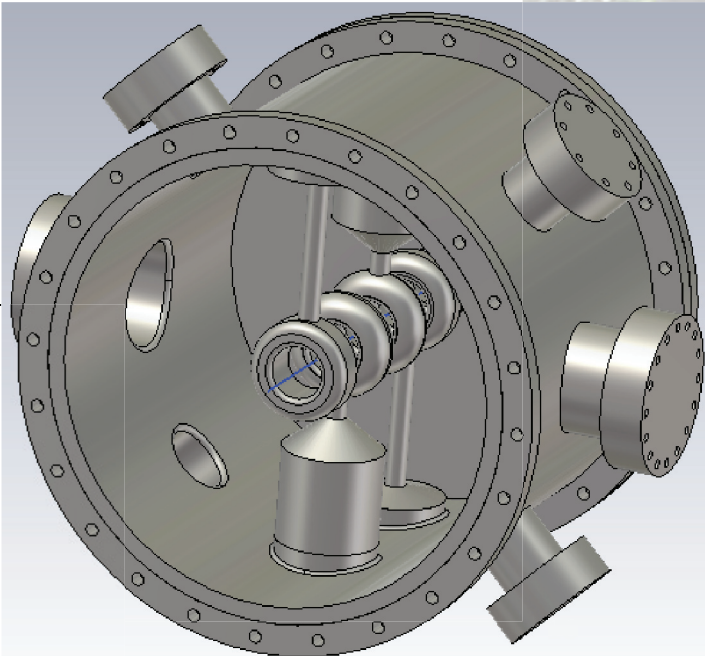
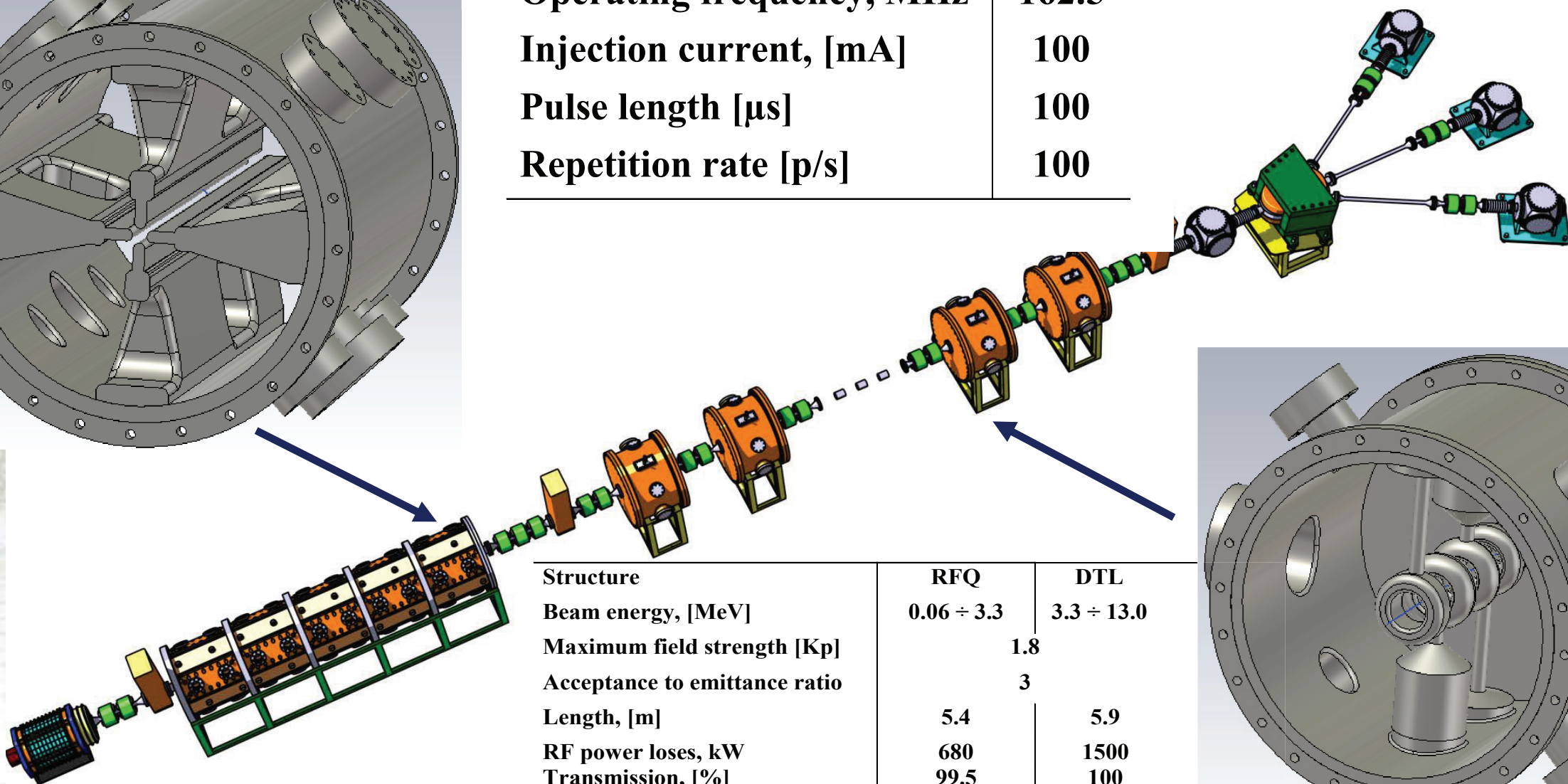
Emittance measurements



Proton linac for DARIA



Operating frequency, MHz	162.5
Injection current, [mA]	100
Pulse length [μs]	100
Repetition rate [p/s]	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 losses, kW	680	1500
Transmission, [%]	99.5	100

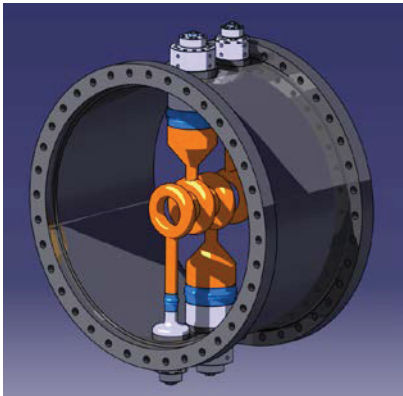
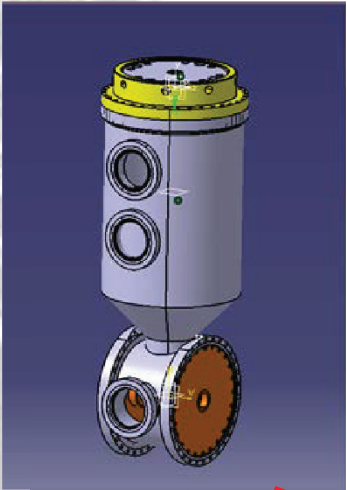
PROTON BEAM THERAPY

Proton beam therapy complex with a proton accelerator for an energy of 250 MeV

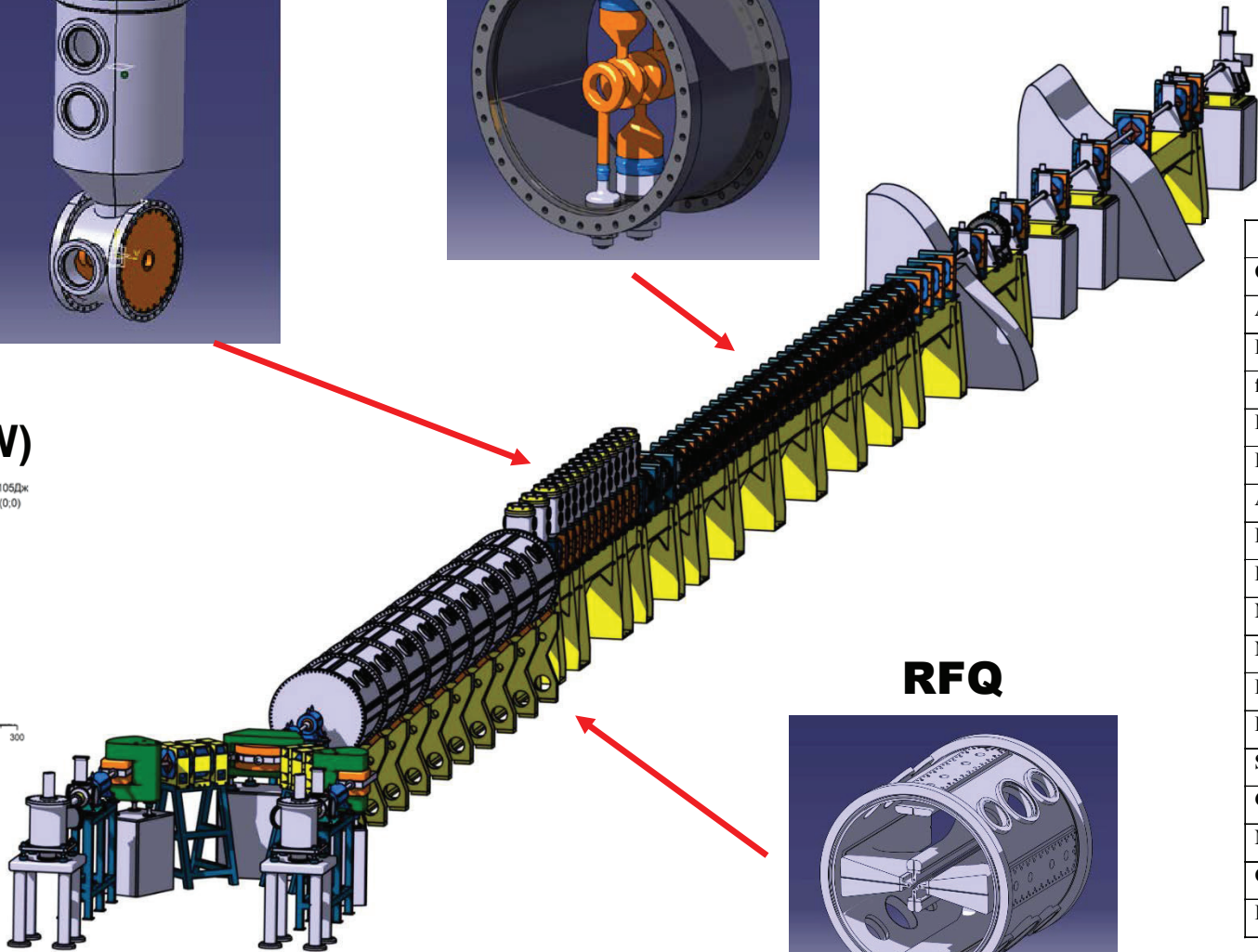
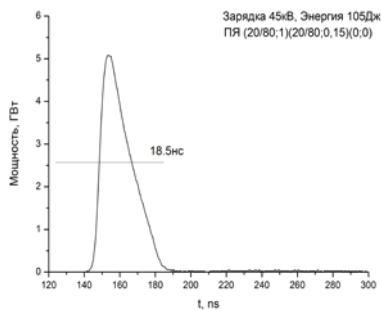


Heavy ion pulse linac

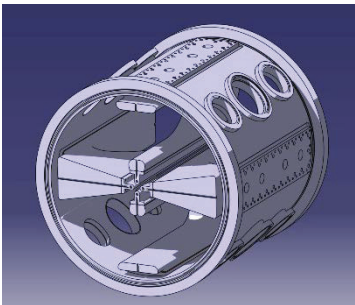
DTL1



Laser ion source (5.3GW)



RFQ



	RFQ	DTL1	DTL2
Operation mode	Pulse		
A/Z	8		
I _{inp} , mA	10		
frequency, MHz	40,625	81.25	162.5
Kilpatrick	1,8E _{кр}		
Emittance 99% , π^*mm^*mrad	2		
Acceptance/emittance, π^*mm^*mrad	3		
Energy, MeV/n	0,00875 – 0.6	0.6÷1.25	1.25÷4
Length, m	10,998	4.896	
Number of gap/resonator		2	5
Number of resonators		12	28
Inner diameter, mm	850		420
Radii resonator/lens, mm		21/22.5	25/22.5
Synchronic phase, grad		-50 ÷ -40	-50÷-40
Gradient (max), T/m		41	45.5
Number of quadrupoles		12	28
Q	≈12500	≈9600	≈7200÷10800
Power, kW	484	≈1100	≈5000

MICROELECTRONICS

semiconductor features modification

by the ion beams

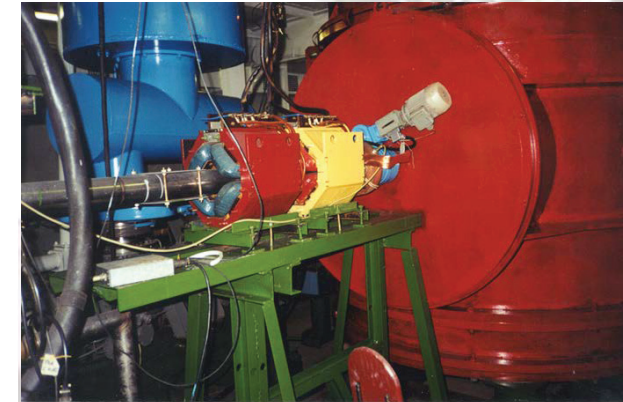
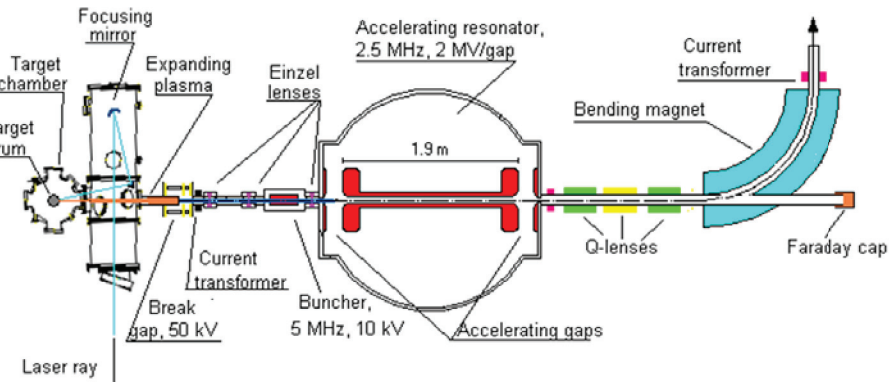
**Proton Alvarez for
ITEP and IPHE**



Proton Alvarez accelerator

Energy, MeV	0,7÷24,6
Beam current, mA	200
Pulse length, μ s	10
Repetition rate, pps	up to 1
RF frequency	148,5
Resonator length, m	18,4
Диаметр резонатора, мм	1370
Average accelerating field, kV/cm	20/23
PulseRF power, MWatt	2,6

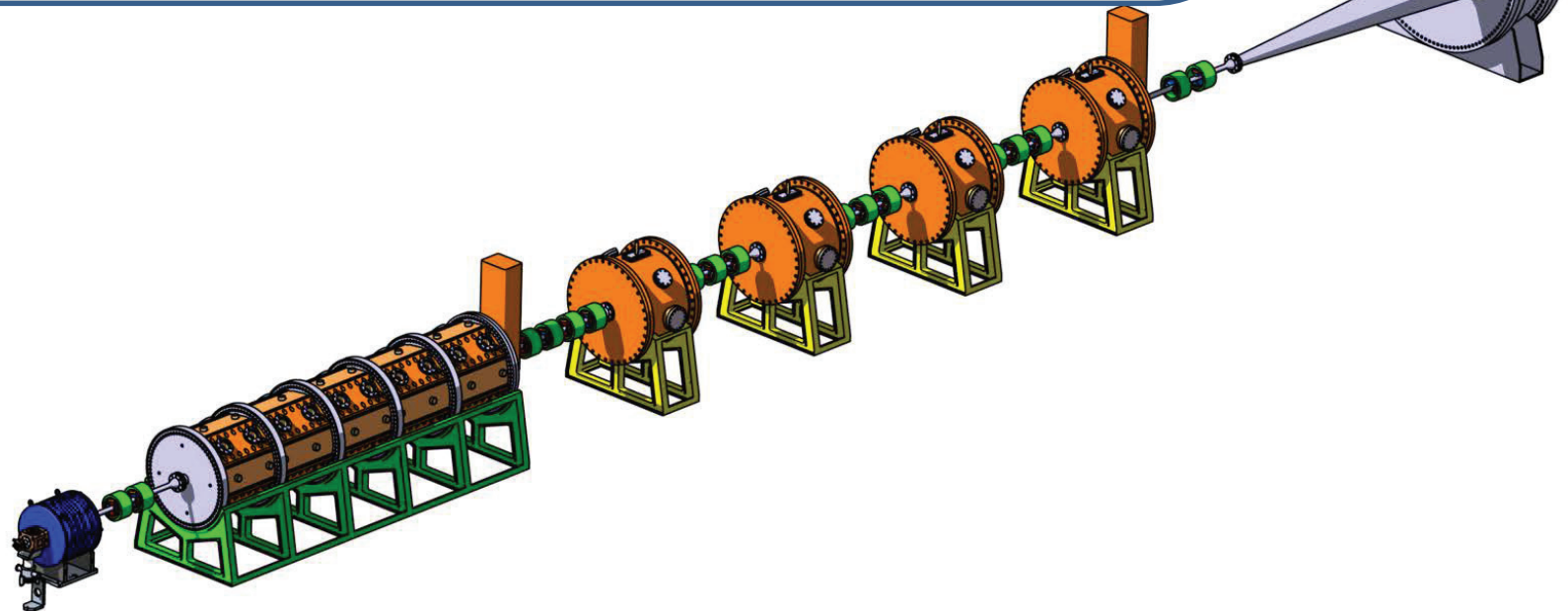
Heavy ion linac



Irradiation by C3+	<i>trr</i> , ns	<i>IR</i> , nA	<i>UF</i> , V (at <i>IF</i> = 10 mA)
Initial	> 100	< 3	0.81 ±0.01
8.4 MeV, $F = 1 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	18 ±2	< 100	0.80 ±0.01
8.4 MeV, $F = 4 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	5.5 ±0.5	900 ± 100	0.76 ±0.01
8.7 MeV, $F = 2 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	2.2 ±0.2	< 10	0.78 ±0.01

Radioisotopes for medicine generated by proton beam

Energy, MeV	Isotopes
0–10	^{18}F , ^{15}O
11–16	^{11}C , ^{18}F , ^{13}N , ^{15}O , ^{22}Na , ^{48}V
17–30	^{124}I , ^{123}I , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{11}C , ^{18}F , ^{13}N , ^{15}O , ^{22}Na , ^{48}V , ^{201}Tl
≥ 30	^{124}I , ^{123}I , ^{67}Ga , ^{111}In , ^{11}C , ^{18}F , ^{13}N , ^{15}O , ^{82}Sr , ^{68}Ge , ^{22}Na , ^{48}V



Технологии создания линейного ускорителя 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
«Теплые» магниты	да	да	нет	НИИЭФА, 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?

Pulse vs CW

Beam dynamics:

- $E_k(\text{pulse}) > E_k(\text{cw}), E_k(\text{cw}) \leq 1.4$
- $\text{Acceptance/emittance}(\text{pulse}) < \text{Acceptance/emittance}(\text{cw})$
- $\text{Frequency}(\text{pulse}) > \text{Frequency}(\text{cw})$
- $\text{Transport}_{(\text{lin}/\text{lout})}(\text{pulse}) \Rightarrow 95-98\% \text{ vs } \text{Transport}_{(\text{lin}/\text{lout})}(\text{cw}) \Rightarrow 100\%$
- $\text{Transmission}_{(\text{lac}/\text{lout})}(\text{pulse}) \Rightarrow 95 \text{ vs } \text{Transmission}_{(\text{lac}/\text{lout})}(\text{pulse}) \Rightarrow 100\%$
- $\text{LEBT}(\text{pulse}) - 4\text{D matching vs } \text{LEBT}(\text{cw}) - 6\text{D matching}$

Pulse vs CW

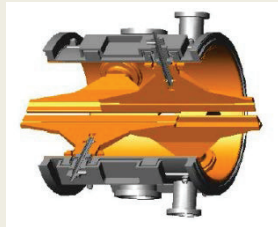
Construction:

➤ Resonator material

➤ Pulse – steel covered by cooper

➤ CW – oxygen free cooper

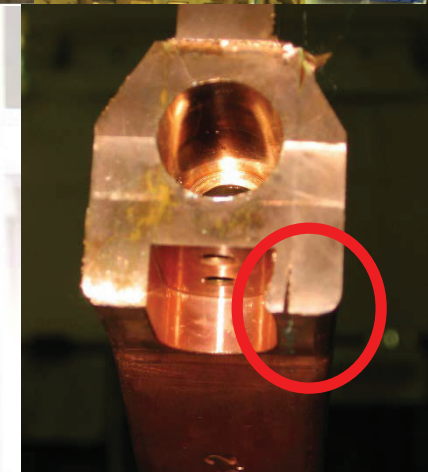
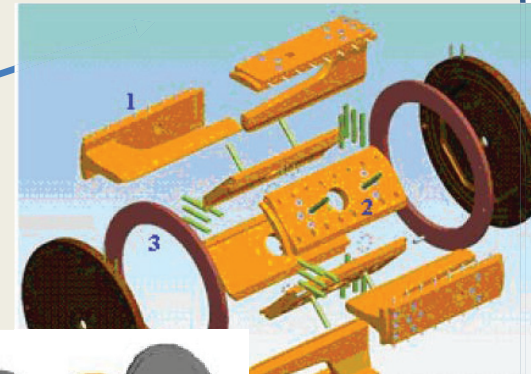
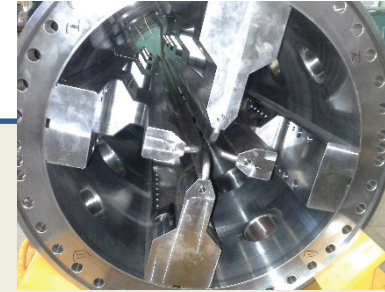
➤ Bemetall?



➤ Cooling

➤ Pulse – Not always

➤ CW – always both resonator and electrodes



Технологии создания линейного ускорителя в России После...

	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	необходима доработка	ОИЯИ, ТРИНИТИ, ИТЭФ, ИСЭ
Импульсные нормально проводящие ускоряющие системы	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, ОИЯИ, ВНИИЭФ ИЯИ, ИЯФ
СВ нормально проводящие ускоряющие системы	необходима доработка	необходима доработка	нет	- ИТЭФ, ИФВЭ , МИФИ, ИЯФ, ИЯИ,
СП ускоряющие системы	необходима доработка	необходима доработка	нет	- ИТЭФ, МИФИ, ИЯФ, ИЯИ ОИЯИ
«Теплые» магниты	да	да	да	НИИЭФА, ИЯФ, ИФВЭ, ОИЯИ,
СП магниты	да	да	необходима доработка	ИЯФ, ОИЯИ
Современные системы ВЧ питания	да	да	да	-, ИТЭФ, МИФИ, ОИЯИ, ИЯФ, ТРИАДА-ТВ
Системы транспортировки пучка	да	да	да	ИТЭФ, МИФИ, ИФВЭ, МРТИ, ИЯИ, ИЯФ
Диагностика и управление пучком	да	да	да	ИТЭФ, ИЯИ, ИЯФ

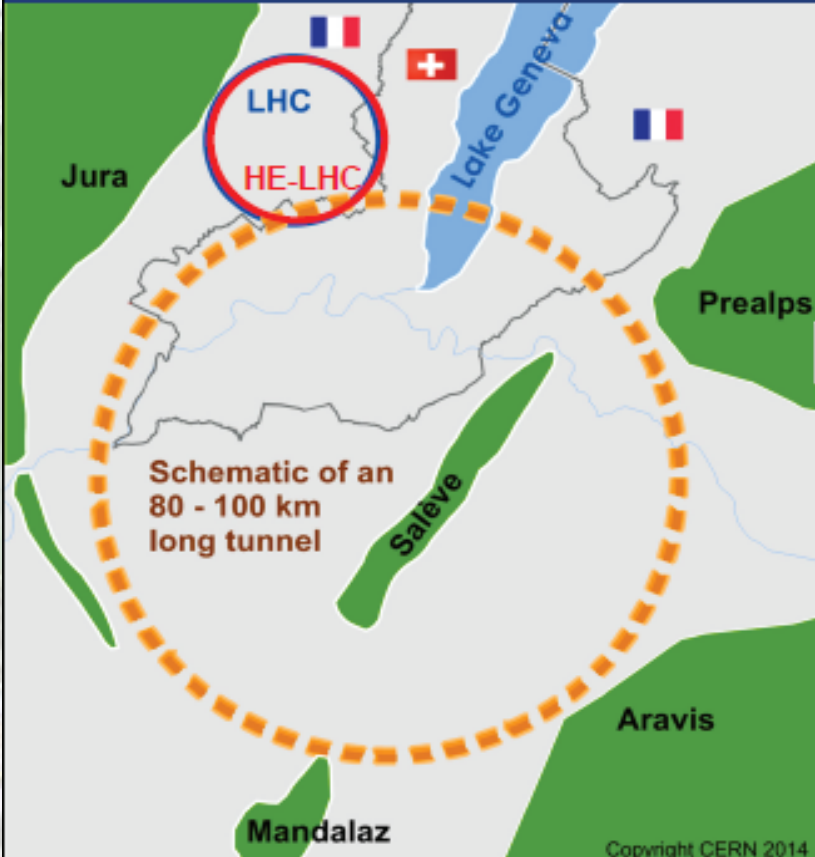
Кадры !



HIGH ENERGY PHYSICS



Future Circular Collider Study - Scope:

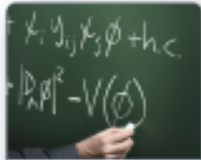


International FCC collaboration (CERN as host lab) to study:

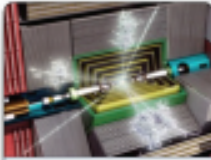
- *pp*-collider (*FCC-hh*)
→ long-term goal, defining infrastructure requirements

~16 T $\Rightarrow$ 100 TeV *pp* in 100 km

- ~100 km tunnel infrastructure in Geneva area, site specific
- *e⁺e⁻* collider (*FCC-ee*), as potential first step
- HE-LHC with *FCC-hh* technology
- *p-e* (*FCC-he*) option, IP integration, *e⁻* from ERL



Physics Cases



Experiments



Arc Design



IR Design

Collider Designs



R&D Programs



Infrastructures



Cost Estimates

Future Circular Collider Study

Overview and Design Status

M. Benedikt and F. Zimmermann

gratefully acknowledging input from FCC coordination group,
global FCC design study team and all other contributors

Физика радиоактивных изотопов (РИ) – магистральное направление развития современной ядерной физики

Карта нуклидов – “основной документ” ядерной физики

- **254** стабильных изотопа,
- **339** можно найти в природе
- Свыше **3100** РИ известно
- Свыше **2500** – не открыто...

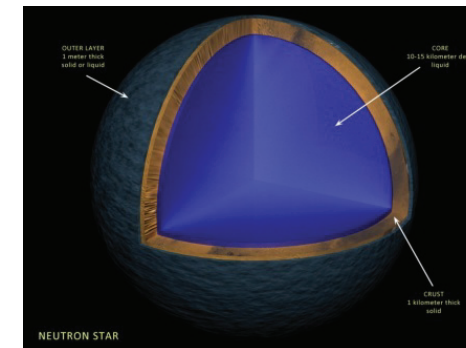
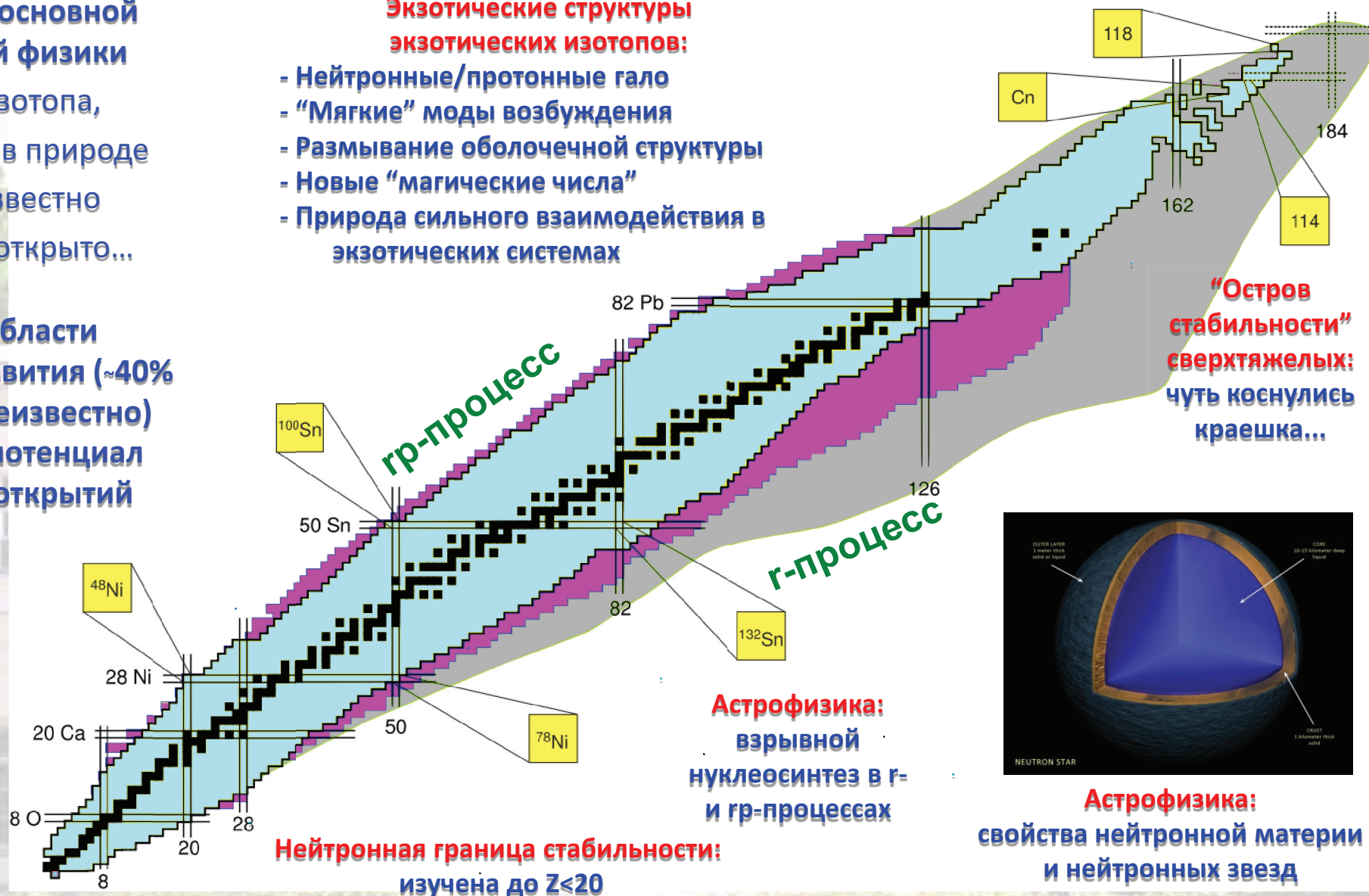
Обширные области экстенсивного развития (~40% изотопов пока неизвестно) и прекрасный потенциал неожиданных открытий

Протонная граница стабильности: изучена до $Z \leq 32$

Пределы существования ядерной структуры: Известны только в легчайших ядрах

Экзотические структуры экзотических изотопов:

- Нейтронные/протонные гало
- “Мягкие” моды возбуждения
- Размывание оболочечной структуры
- Новые “магические числа”
- Природа сильного взаимодействия в экзотических системах



DERICA - Dubna *Electron-Radioactive* Isotope Collider *fA*cility

<http://derica.jinr.ru/>

Совместное предложение Дубна-Новосибирск-Москва

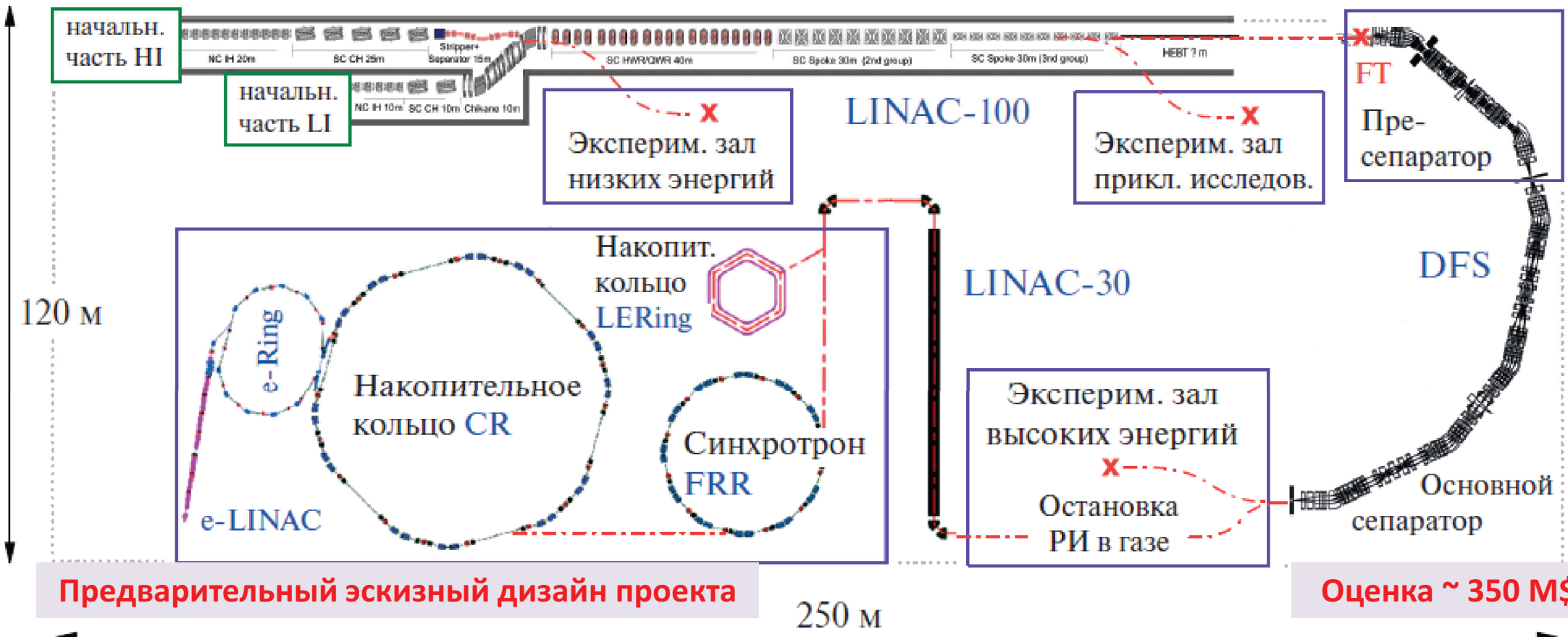
Направление:

Синтез и физика РИ в накопительных кольцах

Критическая инфраструктура:
Рекордный тяжело-ионный
ускоритель непрерывного действия LINAC-100

Конкурентная в мире программа + уникальные возможности:

- Рекордные пучки РИ низких энергий
- Коллайдер электронов и РИ



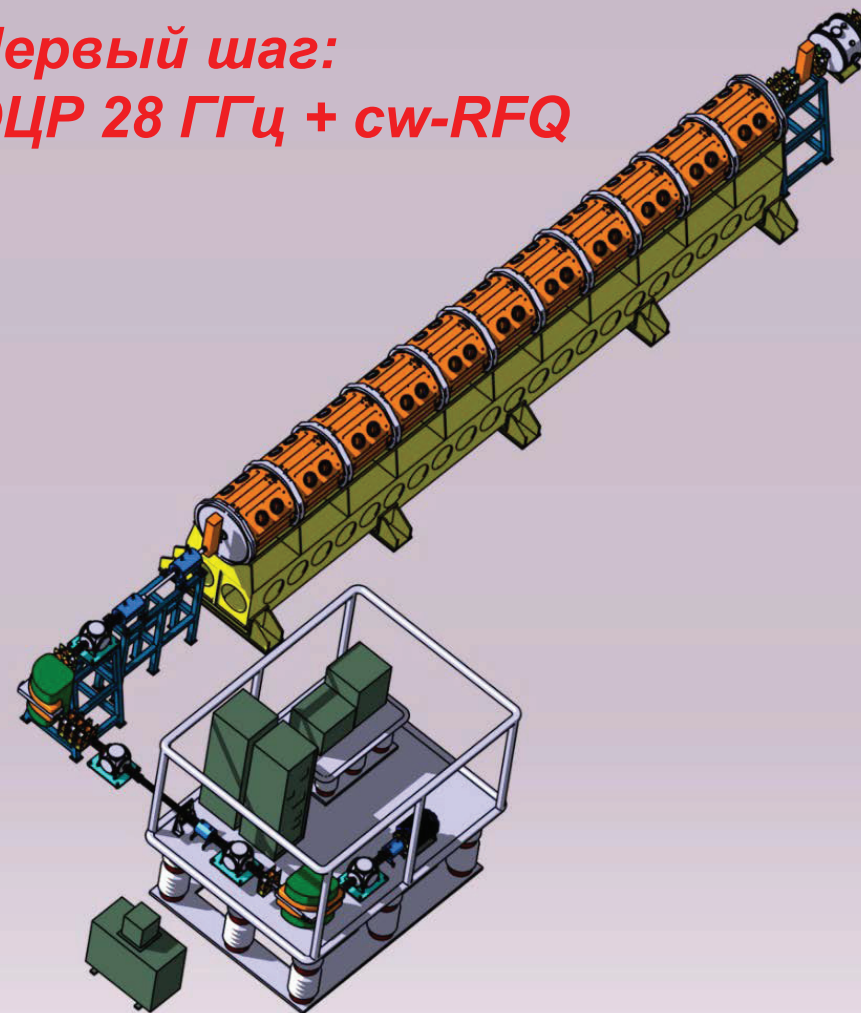
Ключевые отечественные и зарубежные институты в проекте DERICA :

Объединённый институт ядерных исследований – ОИЯИ
(Дубна)

1. НИЦ «Курчатовский институт» (Москва)
2. НИЦ «Курчатовский институт» - ИТЭФ (Москва)
3. ИЯФ СО РАН им. Г.И. Будкера (Новосибирск)
4. ИПФ РАН (Нижний Новгород)
5. НИЯУ МИФИ (Москва)
6. ИЯИ РАН (Москва)
7. НИИЭФА им. Д.В. Ефремова (Санкт Петербург)
8. ИАП РАН (Санкт Петербург)
9. ФГУП «РФЯЦ – ВНИИЭФ» (Саров)
10. ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. Е.И. Забабахина» (Снежинск)

1. ФТИ НАНБ (Минск), Беларусь
2. GSI (Дармштадт) & RI (Дортмунд), Германия
3. CEA (Сакле) & SIGMAPHI (Ване), Франция
4. LNL – INFN (Леньяро), Италия
5. TRIUMF (Ванкувер), Канада
6. IMP (Ланьчжоу), Китай
7. MSU (Мичиган), США
8. Nihon Univ. (Чиба), Япония
9. Univ. of Korea (Сежонг), Корея

*Первый шаг:
ЭЦР 28 ГГц + cw-RFQ*



Per aspera ad astra

Thank You for attention!

Join us!