

Сильноточные линейные ускорители протонов

Л.В.Кравчук

Институт ядерных исследований РАН

Конференция Секции ядерной физики ОФН Рубаков-70, Москва, 17.02.2025

Сильноточные линейные ускорители протонов

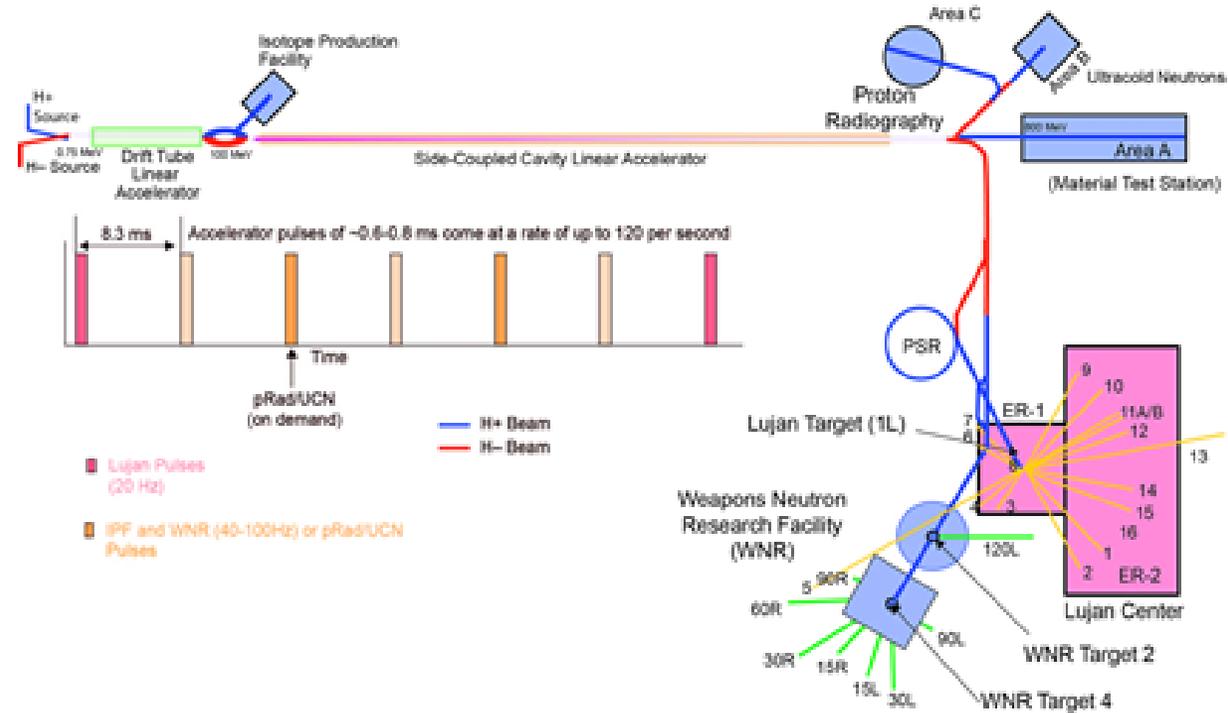
- Импульсные источники нейтронов (spallation) на основе сильноточных линейных ускорителей протонов средних энергий
- Ускорительные подкритические системы ADS
- Исследования фундаментальных свойств материи (отдельные установки и/или инжекторы кольцевых ускорителей)
- Прикладные исследования – изотопы РФП для диагностики и лечения, протонная терапия (флэш!), установки облучения р/э компонентов и устройств и пр.

Мощные ускорительные нейтронные источники (spallation)

- Импульсные источники нейтронов на основе сильноточных линейных ускорителей протонов средних энергий (0.4 - 1.5 ГэВ) становятся важнейшими инструментами исследования вещества: конденсированных сред (~ 70-80% времени работы ускорителей), ядерной физики и работ прикладного характера.
- Основные преимущества нейтронных источников такого типа состоят в следующем:
 - Ядерная безопасность;
 - Широкий спектр нейтронов от холодных до энергии нескольких сотен МэВ;
 - Возможность использования в экспериментах времяпролетной методики для сепарации нейтронов по энергиям и изменения временных и частотных характеристик в широких пределах

Los Alamos Neutron Scattering Center LANSCE

52 years in operation!



The first stage of the accelerator contains injector systems for each kind of particle (H⁺ and H⁻). Each injector system has a 750-keV Cockroft-Walton generator and an ion source. The two ion sources produce H⁺ and H⁻ particles inside high-voltage domes. After they leave the injector, the two ion beams are merged, bunched and matched into a 201.25-MHz drift-tube linac for further acceleration to 100 MeV. The third and longest stage of the accelerator (800m) is the side-coupled-cavity linac, where particles are accelerated to their final energy of 800 MeV.

The LANSCE instruments operate in time-of-flight mode, receiving neutrons from a tungsten spallation target. Four moderators provide epi-thermal, thermal and cold neutrons to specialized beamlines. The facility operates for a total of 3,000 hours per year.

Instrument Suite

- SMARTS – Spectrometer for Materials Research at Temperature and Stress
- Engineering diffraction
- HIPPO – High-Pressure-Preferred Orientation instrument
- Crystallography, engineering and strain, disordered materials
- ERNI – Energy-resolved Neutron Imaging
- Neutron radiography and tomography, neutron resonance spectroscopy, detector development
- Asterix – Neutron reflectometer / cold neutron imaging

*LINAC Upgrade – RFQ and DTL– approved !
2025–2027*

SNS Accelerator Complex

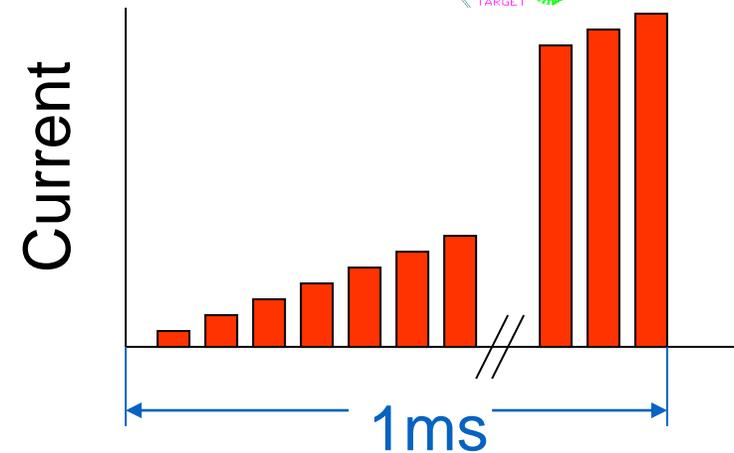
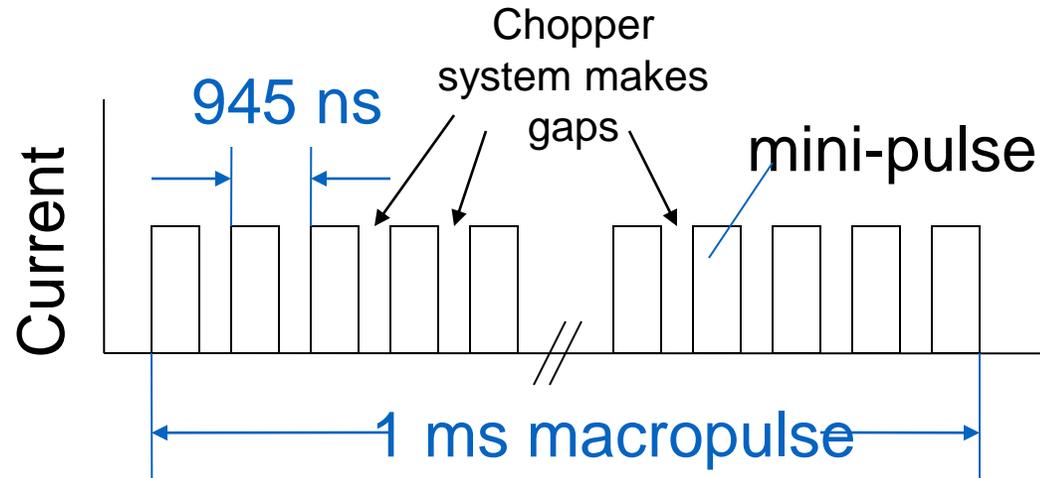
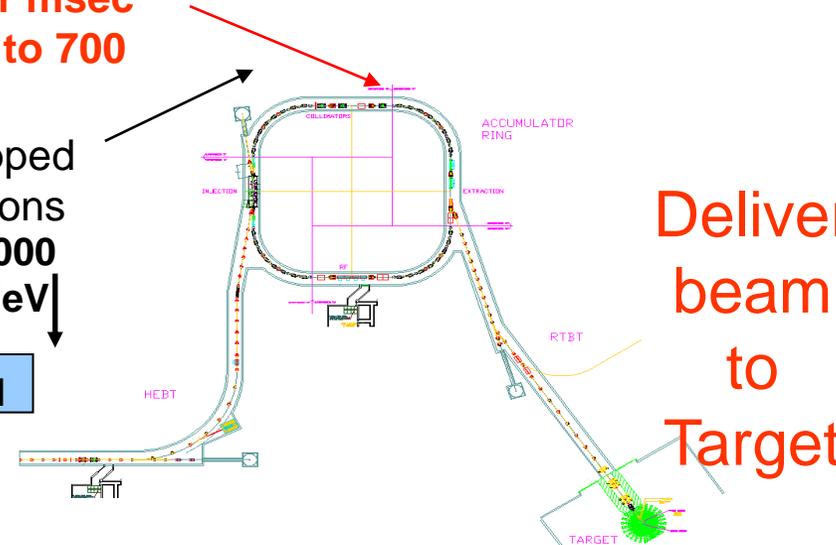
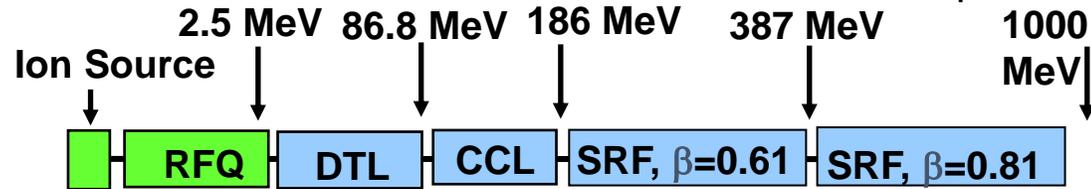
Front-End:
Produce a 1-
msec long,
chopped,
low-energy
H- beam

LINAC:
Accelerate
the beam to
1 GeV

Accumulator Ring:
Compress 1 msec
long pulse to 700
nsec

H- stripped
to protons
1000
MeV

**Deliver
beam
to
Target**



Spallation Neutron Source Instruments

[ARCS | Wide Angular-Range Chopper Spectrometer | BL-18](#)
[BASIS | Backscattering Spectrometer | BL-2](#)
[CNCS | Cold Neutron Chopper Spectrometer | BL-5](#)
[CORELLI | Elastic Diffuse Scattering Spectrometer | BL-9](#)
[EQ-SANS | Extended Q-Range Small-Angle Neutron Scattering Diffractometer | BL-6](#)
[FNPB | Fundamental Neutron Physics Beam Line | BL-13](#)
[HYSPEC | Hybrid Spectrometer | BL-14B](#)
[LIQREF | Liquids Reflectometer | BL-4B](#)
[MAGREF | Magnetism Reflectometer | BL-4A](#)
[MANDI | Macromolecular Neutron Diffractometer | BL-11B](#)
[NOMAD | Nanoscale-Ordered Materials Diffractometer | BL-1B](#)
[NSE | Neutron Spin Echo Spectrometer | BL-15](#)
[POWGEN | Powder Diffractometer | BL-11A](#)
[SEQUOIA | Fine-Resolution Fermi Chopper Spectrometer | BL-17](#)
[SNAP | Spallation Neutrons and Pressure Diffractometer | BL-3](#)
[TOPAZ | Single-Crystal Diffractometer | BL-12](#)
[USANS | Ultra-Small-Angle Neutron Scattering Instrument | BL-1A](#)
[VENUS | Versatile Neutron Imaging Instrument | BL-10](#)
[VISION | Vibrational Spectrometer | BL-16B](#)
[VULCAN | Materials Diffractometer](#)

+ 8 under design for the Second target

Upgrade - 1,3 GeV / 2 MW Target 2025-2026

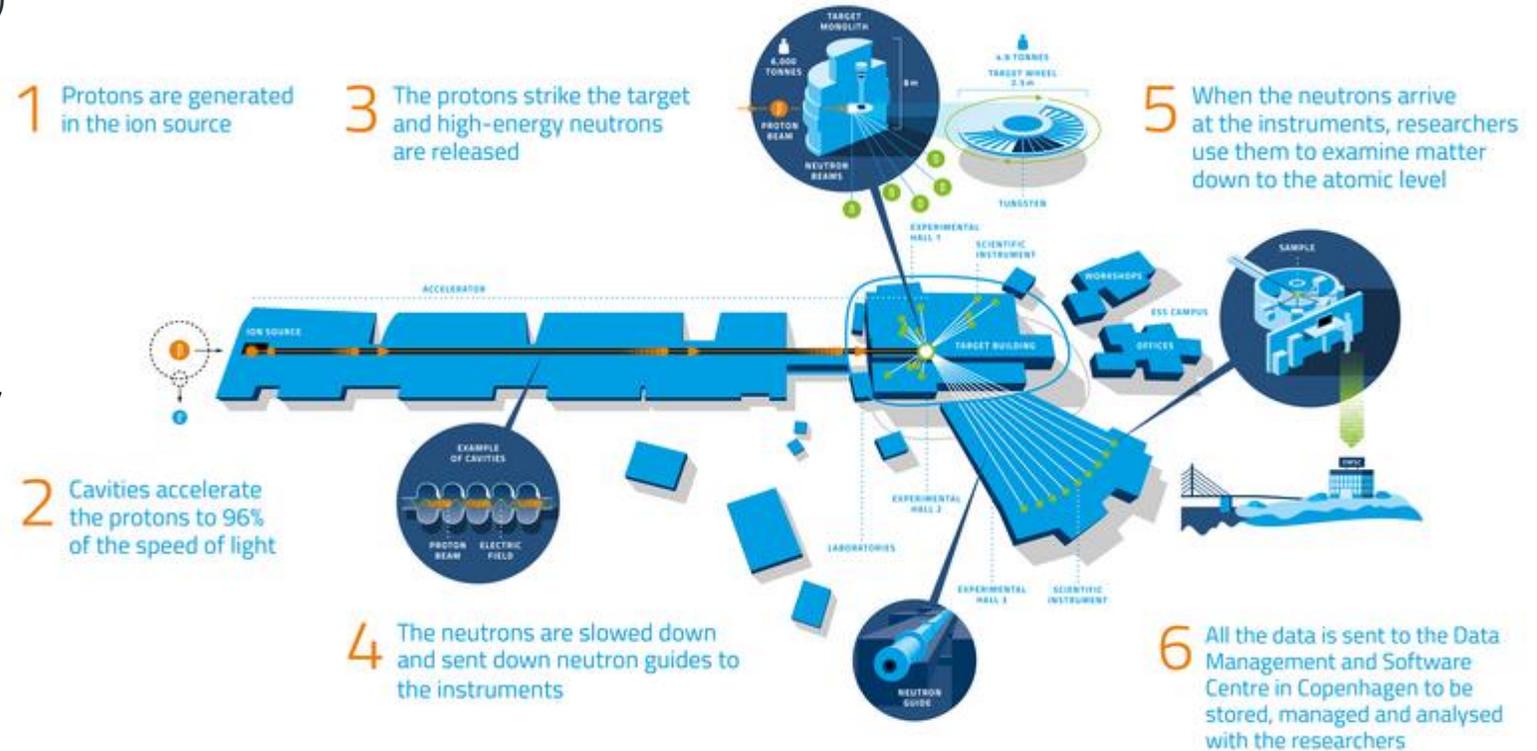
The Proton Power Upgrade (PPU) Project at the Spallation Neutron Source (SNS) at Oak Ridge National Laboratory will upgrade or replace accelerator components for beam power capability from 1.4 to 2.8 MW and upgrade the first target station for 2-MW beam at 1.3 GeV and at 60 pulses per second. The remaining beam power will be available for the future second target station.

European Spallation Source

The European Spallation Source (Lund, Sweden) is one of the largest science and technology infrastructure projects being built today. The facility design and construction include **the most powerful linear proton accelerator ever built, a five-tonne, helium-cooled tungsten target wheel, 15 state-of-the-art neutron instruments.**

Europe's need for an advanced, high-power neutron spallation source was articulated many years ago. The European Spallation Source is a pan-European project with 13 European nations.

The construction of the facility began in the summer of 2014.

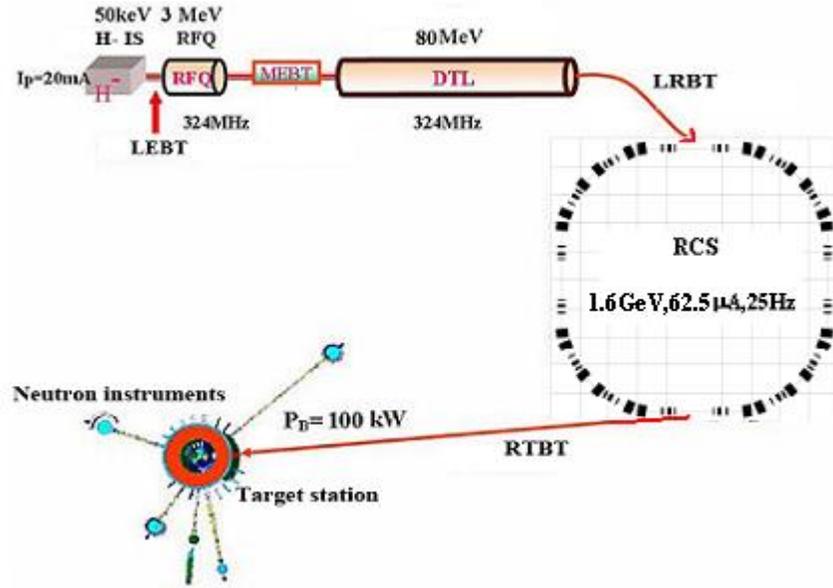


The ESS accelerator high level requirements are to provide a 2.86 ms long proton pulse at 2 GeV at repetition rate of 14 Hz. This represents 5 MW of average beam power with a 4% duty cycle on target.

ACCELERATING CAVITIES-155, HIGH-POWER RF SOURCES-152, APPROX. LENGTH (M)- 600

*The installation of the superconducting part of the ESS Linac is progressing towards **the first operation at 870 MeV on the beam dump in 2024.***

China Spallation Neutron Source (CSNS)



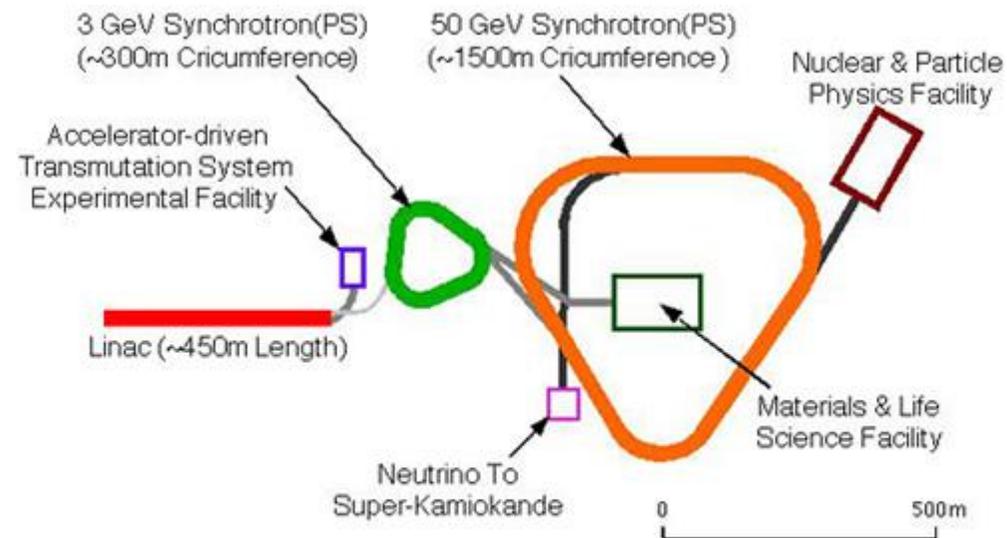
The Basic Parameters of CSNS

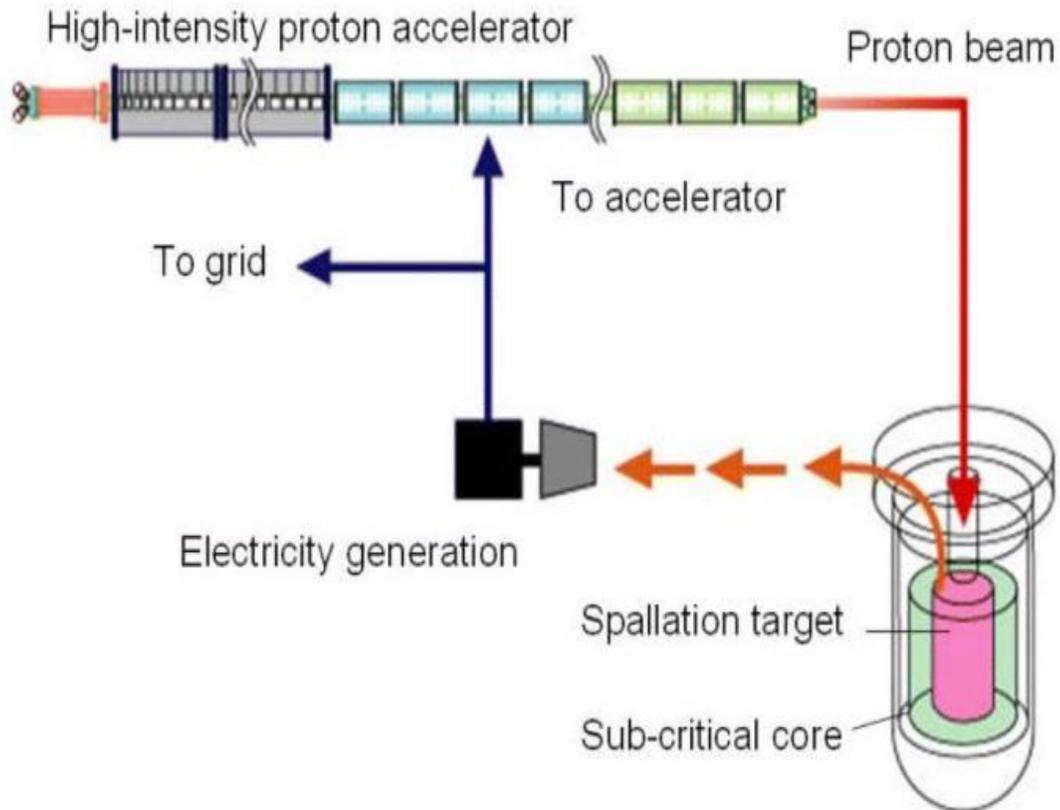
Name	CSNS-I	CSNS-II
Beam power(kW)	100	500
Repetition rate(Hz)	25	25
Target number	1	1
Average current(μ A)	62.5	312
Proton energy(GeV)	1.6	1.6
Linac energy(Mev)	80	250

J-PARC Machine Parameters

	LINAC	RCS	MR (FX / SX)
Energy	400 MeV	3 GeV	30 GeV
Repetition cycle	40 ms (25 Hz)	40 ms (25 Hz)	2.48 s / 5.20 s
Current(pulse or averaged)	60 mA x 500 μ s	176 μ A	16.7 μ A / 1.83 μ A
Beam Power		530 kW	500 kW / 55 kW

400-MeV normal-conducting Linac,
 600-MeV superconducting Linac to increase the energy from 400 to 600 MeV,
 3-GeV synchrotron ring, which provides proton beams at 333microA (1MW), and
 50-GeV synchrotron ring, which provides proton beams at 15microA (0.75MW).
 In addition, an upgrade towards 5-MW proton beam power at the few GeV energy region is proposed as a next step in the future





ADS PROTON LINACS

Parameter	CiADS	MYRRHA	JAEA-ADS
Energy (GeV)	0,5	0,6	1,5
Beam current (mA)	5	4	20
Operation mode	cw/pulse	cw	cw
Maximum beam power (MW)	2,5	2,4	30

- Stable cw operation, beam power of ten to tens of MW
- Beam energy 1-2 GeV for efficient neutron spallation
- Beam current of few to tens of mA
- Beam loss less than 1W/m
- **High reliability** to avoid thermal stress
- High beam stability

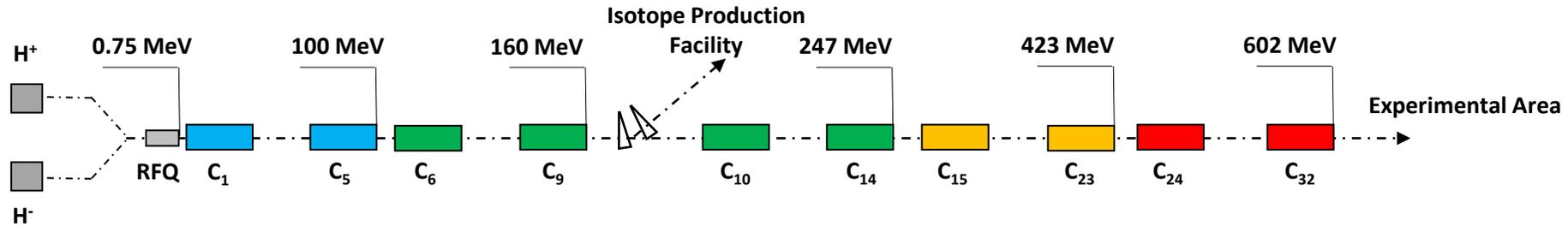
Комплекс сильноточного линейного ускорителя ИЯИ РАН Москва, Троицк



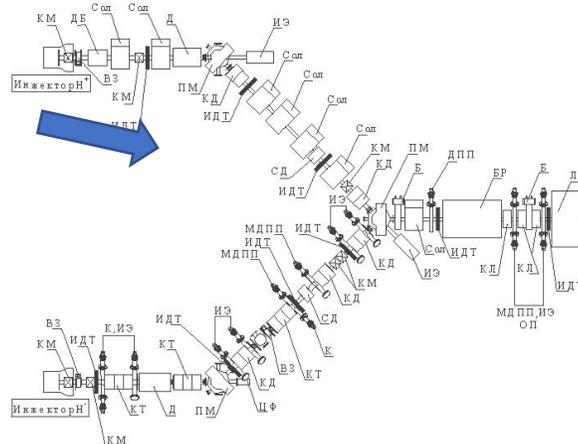
За 33 года эксплуатации
проведено
158 сеансов работы ускорителя
общей продолжительностью
более 55 тыс. часов

1. Линейный ускоритель
2. Нейтронный комплекс
 - Импульсный источник тепловых нейтронов испарительного типа ИН-06
 - Импульсный источник эпитепловых нейтронов РАДЭКС
 - Спектрометр по времени замедления в свинце СВЗ-100
3. Исследовательский комплекс лучевой терапии
4. Радиоизотопный комплекс
5. Экспериментальный стенд для исследования воздействия ионов водорода на узлы радиоэлектронной аппаратуры

Линейный ускоритель протонов и H-



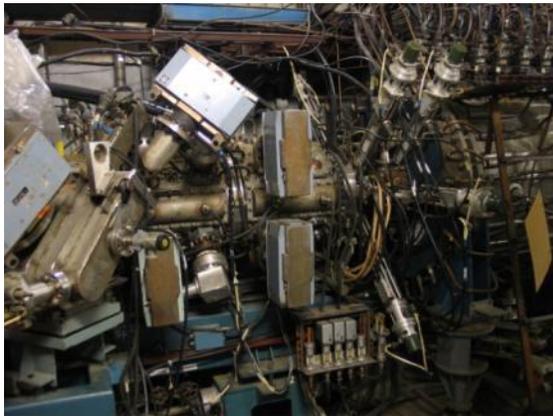
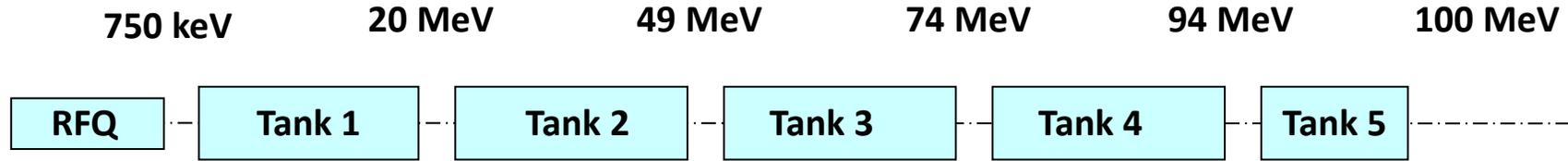
Инжектор протонов



Каналы транспортировки LEBT



Low Energy Part (Drift Tube Linac)



Booster RFQ



Inside Drift Tube Tank



5 Drift Tube Tanks

Frequency – 198.2 MHz

Output energy- 100 MeV

High Energy Part (Coupled Cavity Linac, 100-600 MeV)



27 four-section Disk and Washer cavities

Frequency 991 MHz



Accelerating cavities in the tunnel



Klystron Gallery

Основные параметры ускорителя

Parameter	Design	Obtained	2024
Particles	p, H-minus	p, H-minus	p, H-minus
Energy, MeV	600	502	423
Pulse current, mA	50	16	15
Repetition rate, Hz	100	50	50
Pulse duration, μs	100	200	0.3÷200
Average current, μA	500	150	130

Нейтронный комплекс ИЯИ РАН



- Импульсный источник тепловых нейтронов **ИН-06** для исследований *конденсированных сред и нанодиагностики* с нейтронографическими установками
- Импульсный источник эпитепловых нейтронов с времяпролетными спектрометрами на базе установки **РАДЭКС**
(исследования нейтрон-ядерных взаимодействий, отработка нейтронных методик исследования материалов)
- Спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце **СВЗ-100**
(исследования нейтрон-ядерных взаимодействий)

Поиск новых элементарных частиц и новых сил в природе
**Эксперименты на сильноточном протонном ускорителе
ИЯИ РАН (*beam dump* мода)**

1. Прецизионные измерения сечений когерентного рассеяния нейтрино
2. Миллизаряженные частицы (МСР)
3. Аксионоподобные частицы
4. Стерильные нейтрино
5. Другие модели: темные фотоны, новые легкие скаляры и др.

РАДИОНУКЛИДЫ, ПРОИЗВОДИМЫЕ В ИЯИ РАН, И
ВОЗМОЖНОСТИ ИХ ПРОИЗВОДСТВА ЗА ОДНО
ОБЛУЧЕНИЕ (ПРИ ТОКЕ 120 МКА)



Радио- нуклид	Период полу- распада	Мишень	Диапазон энергии, МэВ	Период облучения, час	Произвед. Активность, Ci
Sr-82	25.5 дн.	Rb	100-40	250	5
Na-22	2.6 лет	Mg, Al	150-35	250	2
Cd-109	453 дн.	In	150-80	250	2
Pd-103	17 дн.	Ag	150-50	250	50
Ge-68	288 дн.	Ga, GaNi	50-15	250	0.5
Sn-117m	14 дн.	Sb, TiSb	150-40	250	3
Se-72	8.5 дн.	GaAs	60-45	250	3
Cu-67	62 час.	Zn-68	150-70	100	10
Cu-64	12.7 час.	Zn	150-40	15	15
Ac-225	10 дн.	Th	150-40	250	4
Ra-223	11.4 дн.	Th	150-40	250	13

КОМПЛЕКС ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ



Пучок протонов: фиксированный горизонтальный

Положение пациента: сидя или лежа

Точность перемещений – 40 мкм

Размер мишени: до 90 мм

Энергия протонов: 70-220 МэВ

Частота макроимпульсов: до 100 Гц

Длительность макроимпульсов:

до 200 мкс

Интенсивность пучка: не ограничена

Эммитанс пучка ~ 3 мрад.



Цель и назначение проекта Мегаваттного ускорительного комплекса

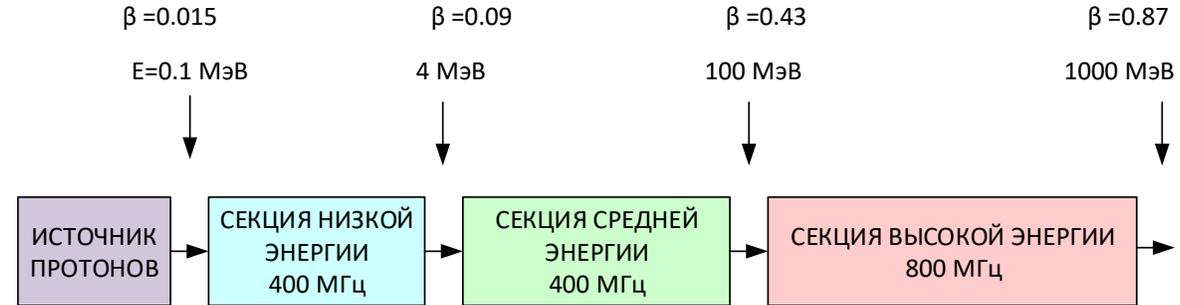
Цель Мегасайенс проекта – модернизация ЛУ и создание Мегаваттного ускорительного комплекса на базе существующих зданий и инженерной инфраструктуры ИЯИ РАН, Троицк, Москва.

Назначение :

- 1 МВт Импульсный источник нейтронов Spallation типа
- подкритическая ядерная сборка Accelerator Driven System ADS - *важны средняя мощность в пучке и высокая надежность,*
- нейтринная фабрика - *средняя мощность в пучке,*
- фундаментальные исследования – *средний ток, временная структура пучка*
- производство радиоизотопов - *средняя мощность в пучке.*

Основные параметры и структура СП ЛУ (предложение)

- Ускорение протонов
- Энергия $E=1$ ГэВ,
- Средний ток $I_a=1$ мА
- Средняя мощность $P_a=1$ МВт
- Импульсный ток $I_p=40$ мА
- Длительность импульса $\tau=1$ мс.



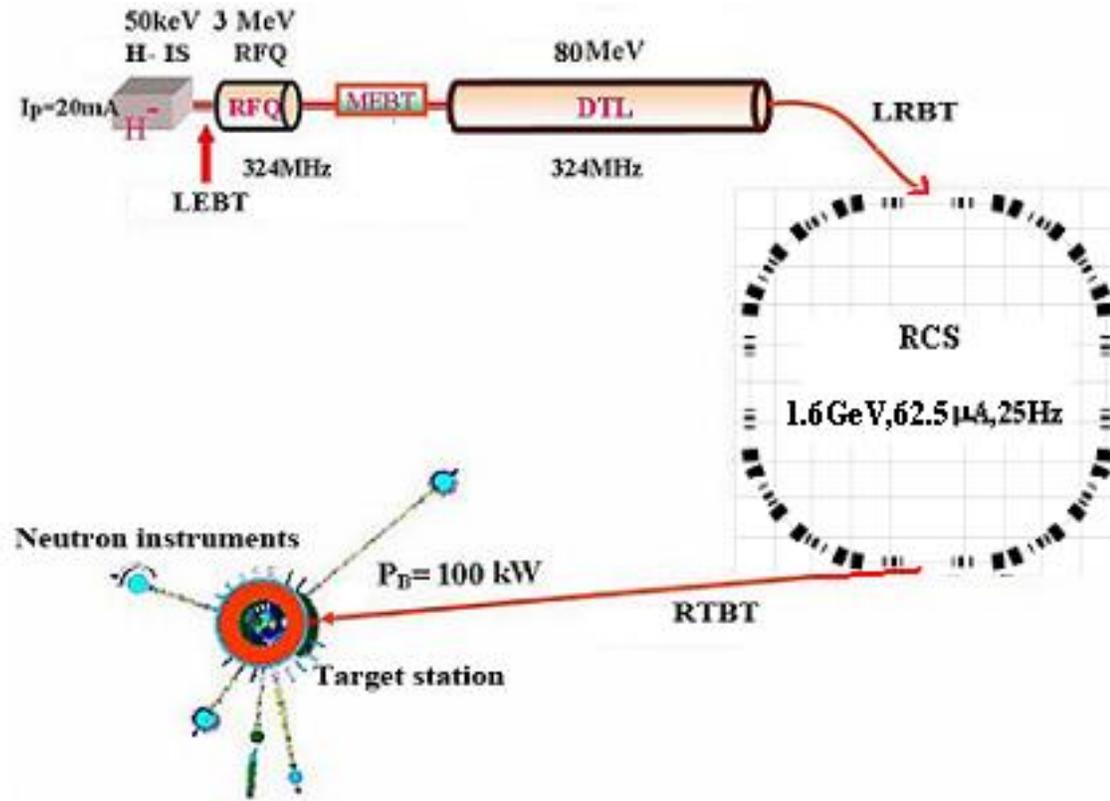
В Техническом предложении рассмотрены четыре варианта реализации линака:

Вариант 1 – ускоритель, работающий в непрерывном режиме или в режиме макроимпульсов, в котором все ускоряющие структуры полностью сверхпроводящие.

Вариант 2 - ускоритель, работающий в импульсном режиме, в котором все ускоряющие структуры полностью сверхпроводящие.

Вариант 3 - ускоритель, работающий в импульсном режиме, в котором секция низкой энергии нормальнопроводящая, а секции средней и высокой энергии - сверхпроводящие.

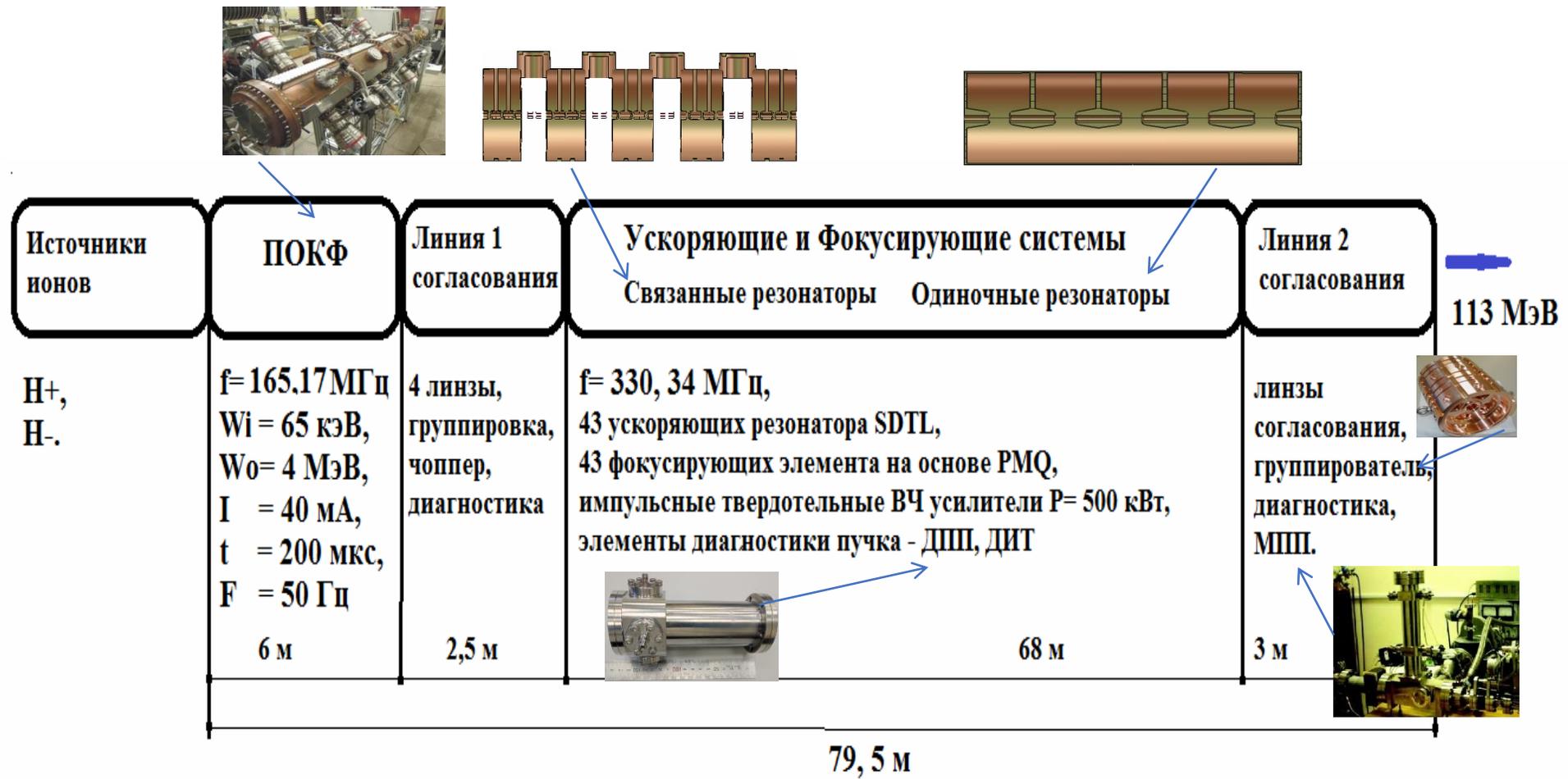
Вариант 4 - ускоритель, работающий в импульсном режиме, в котором секции низкой и средней энергии нормальнопроводящие, а секция высокой энергии - сверхпроводящая.



ЛУ 423 МэВ + синхротрон RCS 1,3 – 1,5 ГэВ



1. Модернизация начальной части ЛУ!



Модернизация начальной части ЛУ (предложение)

слайд В.Парамонов

Заключение

1. В ИЯИ РАН функционирует Экспериментальный комплекс на базе Линейного ускорителя протонов. Необходима срочная модернизация отдельных систем ускорителя (НЧ!) для обеспечения устойчивой работы с пучком 423 МэВ с временем на пользователей около 3000 часов в год.
2. Мегаваттный импульсный источник нейтронов spallation-типа в РФ необходим для проведения широкого круга исследований, что подтверждается активностью в этом направлении в мире: SNS, ESS, CSNS и др. Большая программа фундаментальных и прикладных исследований с ускоренными протонами.
3. СП ЛУП и/или ЛУ+ RCS могут быть построены на базе существующего туннеля, зданий, сооружений и инженерной инфраструктуры ускорительного комплекса ИЯИ РАН, что позволит существенно уменьшить капитальные вложения и сроки ввода в эксплуатацию .
4. Создание МУНК возможно лишь в тесной кооперации с институтами и предприятиями ГК Росатом, МОН, НИЦ КИ, ОИЯИ, ГК Ростех и др. Просим поддержки и приглашаем к сотрудничеству.

Спасибо за внимание