

Линейные ускорители ионов

А.В.Фещенко

Линейный ускоритель Лос-Аламосского нейтронного научного центра (LANSCe)

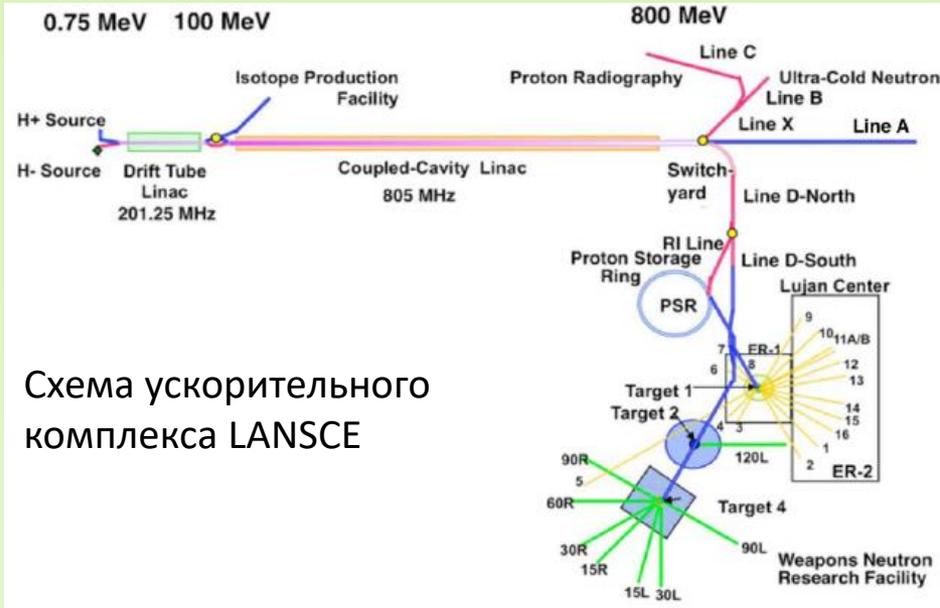


Схема ускорительного комплекса LANSCE

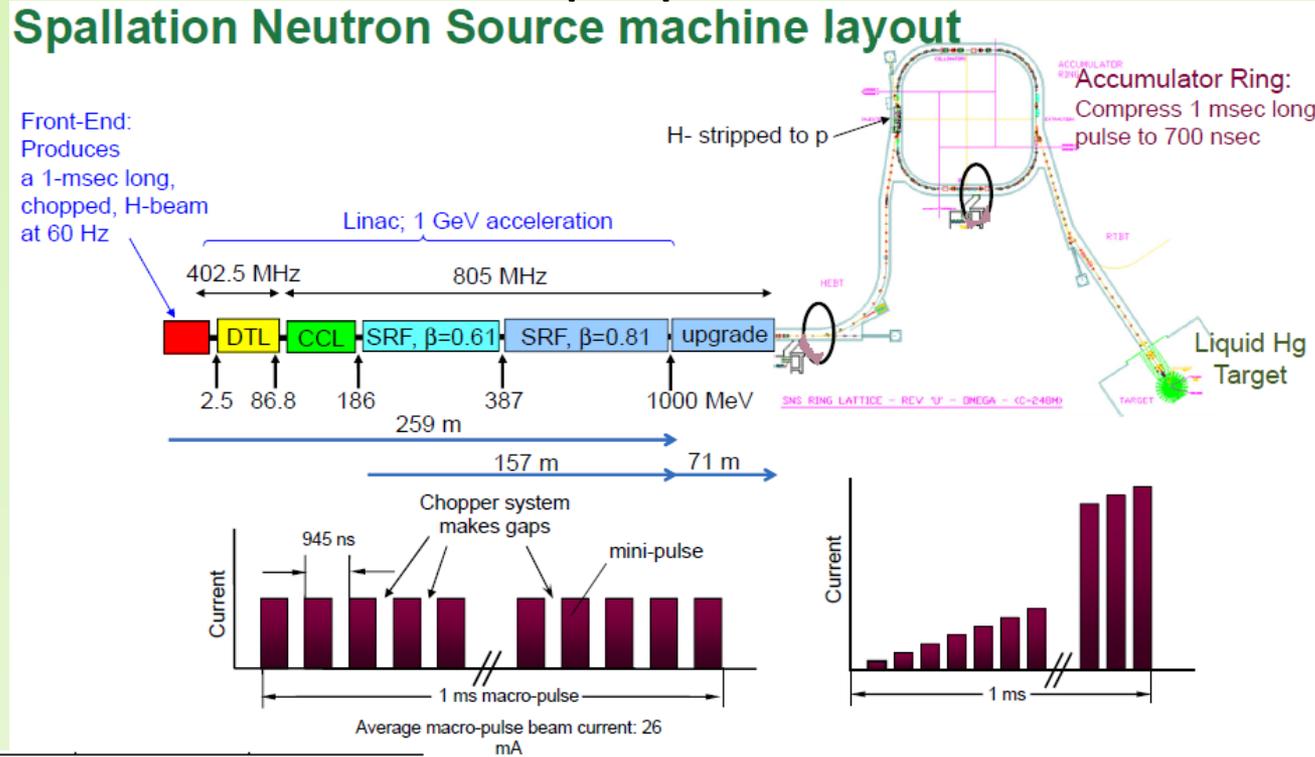
Текущие параметры ускорителя LANSCE

Area	Beam/ Energy (MeV)	Rep Rate (Hz)	Pulse Length (μs)	Chopper	Current /bunch (mA)	Average Current (μA)	Average Power (kW)
Lujan Center	H ⁺ / 800	20	625	0.8	10	100	80
Isotope Production	H ⁺ / 100	100	625	1.	4	250	25
Weapons Neutrons	H ⁺ / 800	100	625	2.8×10^{-3}	25	4.5	3.6
Proton Radiography	H ⁺ / 800	1	625	-	10	<1	<1
Ultra-Cold Neutrons	H ⁺ / 800	10 (every 5 sec)	625	0.8	10	10	8

Параметры после реализации проекта FPNS (Fusion Prototyping Neutron Source)

Area	Beam / Energy (MeV)	Rep Rate (Hz)	Pulse Length (μs)	Chopper	Current/ bunch (mA)	Average Current (μA)	Average Power (kW)
Lujan Center	H ⁺ / 800	20	625	0.8	10	100	80
Isotope Production	H ⁺ / 100	20	662 -826	1.0	18.87	250-312	25-31
Weapons Neutrons	H ⁺ / 800	100	850	2.8×10^{-3}	25	5.95	4.76
Proton Radiography	H ⁺ / 800	1	850	-	10	<1	<1
Ultra-Cold Neutrons	H ⁺ / 800	8 (every 5 sec)	850	0.8	10	10.8	8.6
FPNS	H ⁺ / 800	78	850	1.0	18.87	1251	1001

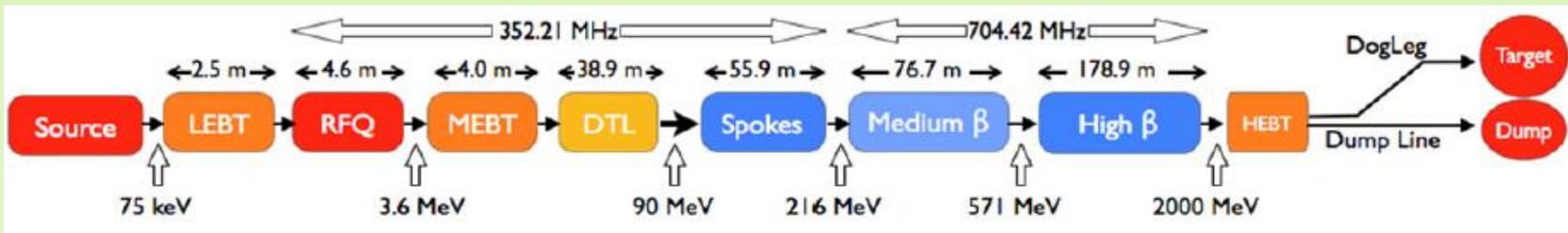
Линейный ускоритель нейтронного источника SNS Ок-Риджской национальной лаборатории



Parameter	Present operation	PPU
Beam power (MW)	1.4	2.8
Beam energy (GeV)	1.0	1.3
Average linac current (mA)	1.6	2.3
Linac macropulse current (mA)	25	39
Beam repetition rate (Hz)	60	60
Linac pulse length (ms)	1	1
Medium beta cryomodules	11	11
High beta cryomodules	12	19
High beta cavities	48	76

PPU – Proton Power Upgrade

Европейский нейтронный источник (ESS), Лунд, Швеция



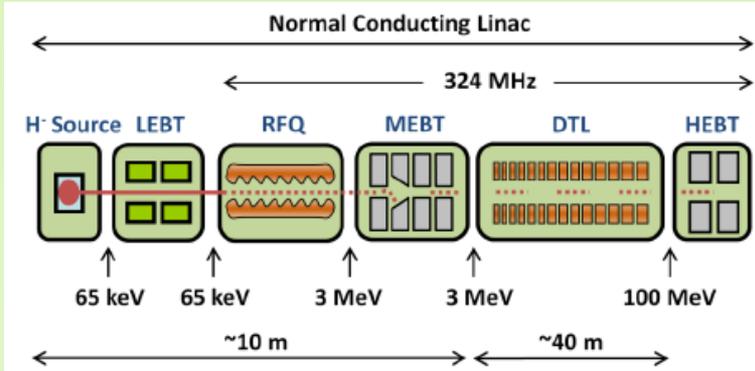
Parameter	Unit	Value
Energy	GeV	2.0
Current	mA	62.5
Pulse length	ms	2.86
Pulse repetition rate	Hz	14
Average beam power	MW	5
Power during pulse	MW	125



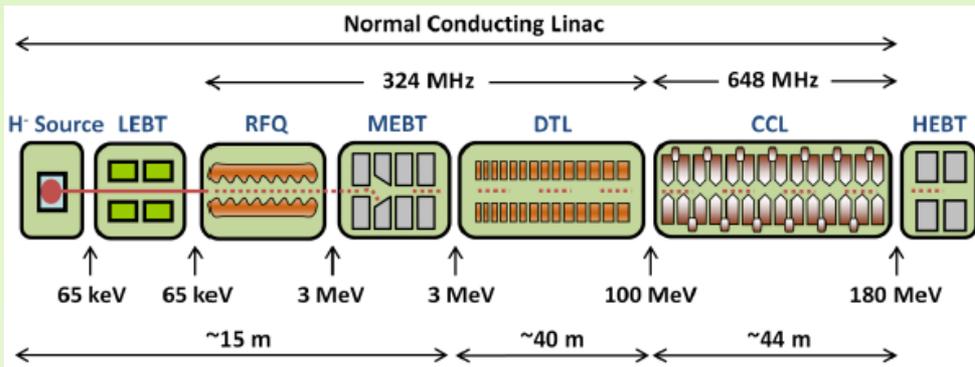
Линейный ускоритель Нейтронного и мюонного источника ISIS лаборатории Резерфорда — Эплтона, Англия



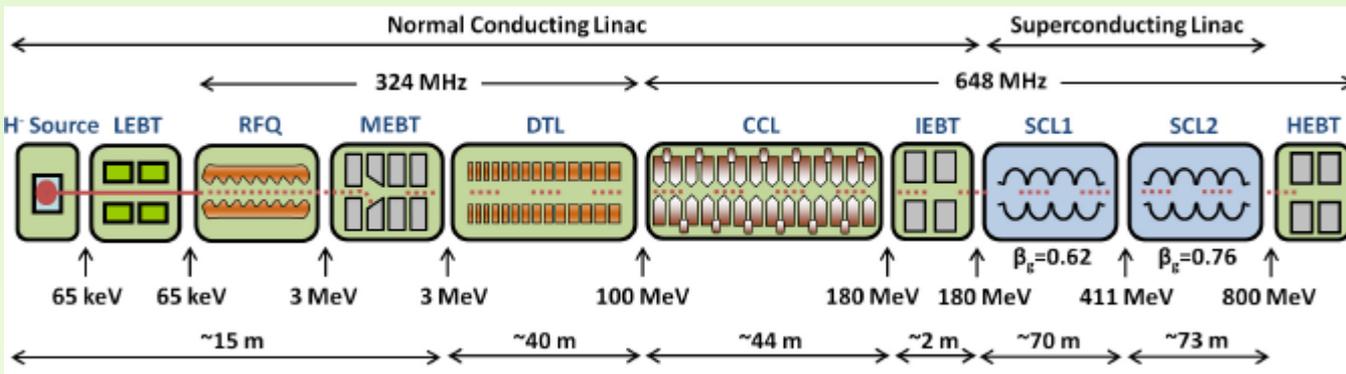
(Рассматриваются сценарии замены существующего 70 МэВ линейного ускорителя)



100 МэВ

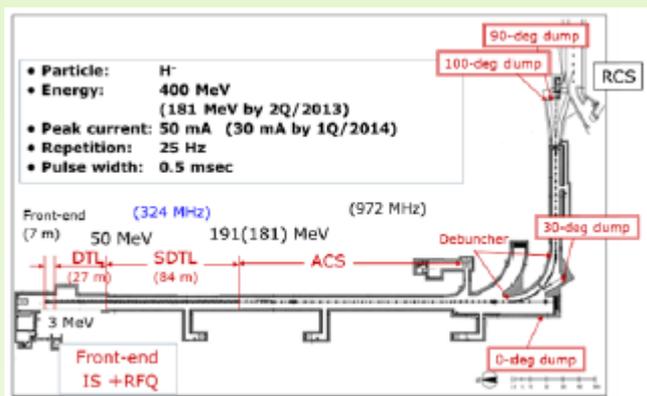
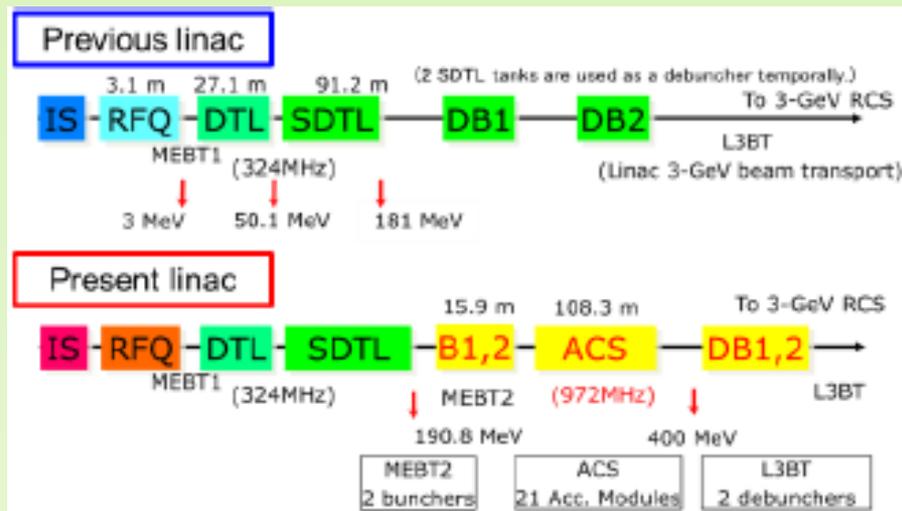
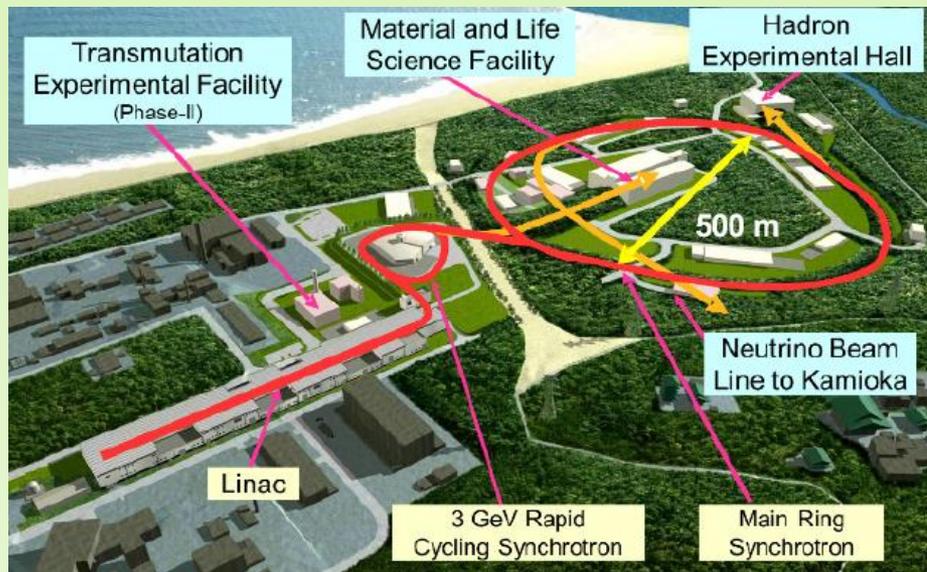


180 МэВ



800 МэВ

Линейный ускоритель исследовательского комплекса J-PARC (Япония)



Планы дальнейшей модернизации

Импульсный ток – 60 мА

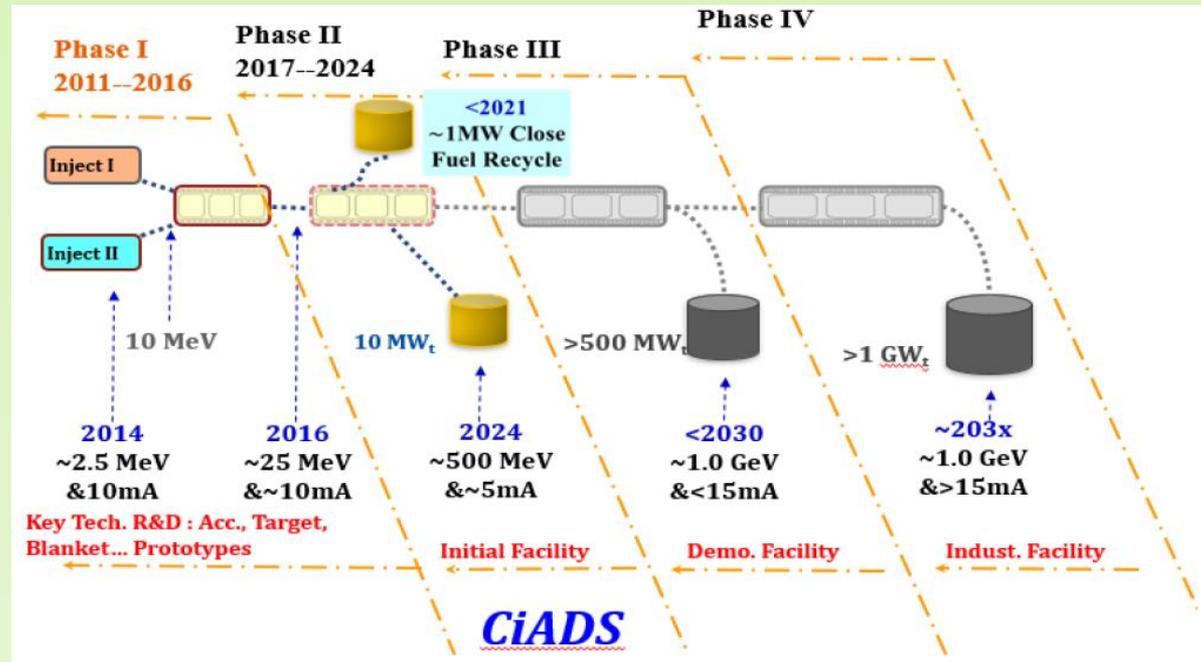
Длительность импульса – 600 мкс

Частота повторения импульсов – 50 Гц

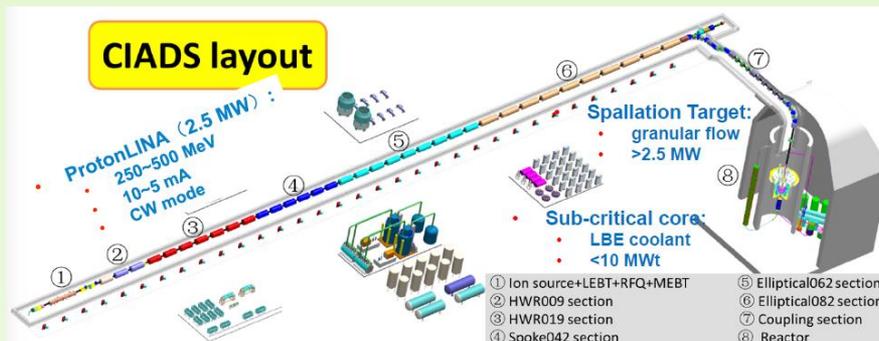
Средний ток – 1,8 мА

Мощность в пучке – 720 кВт

Линейный ускоритель проекта Chinese-ADS (C-ADS)



CiADS – China initiative ADS



TDR Parameters of CiADS Linac

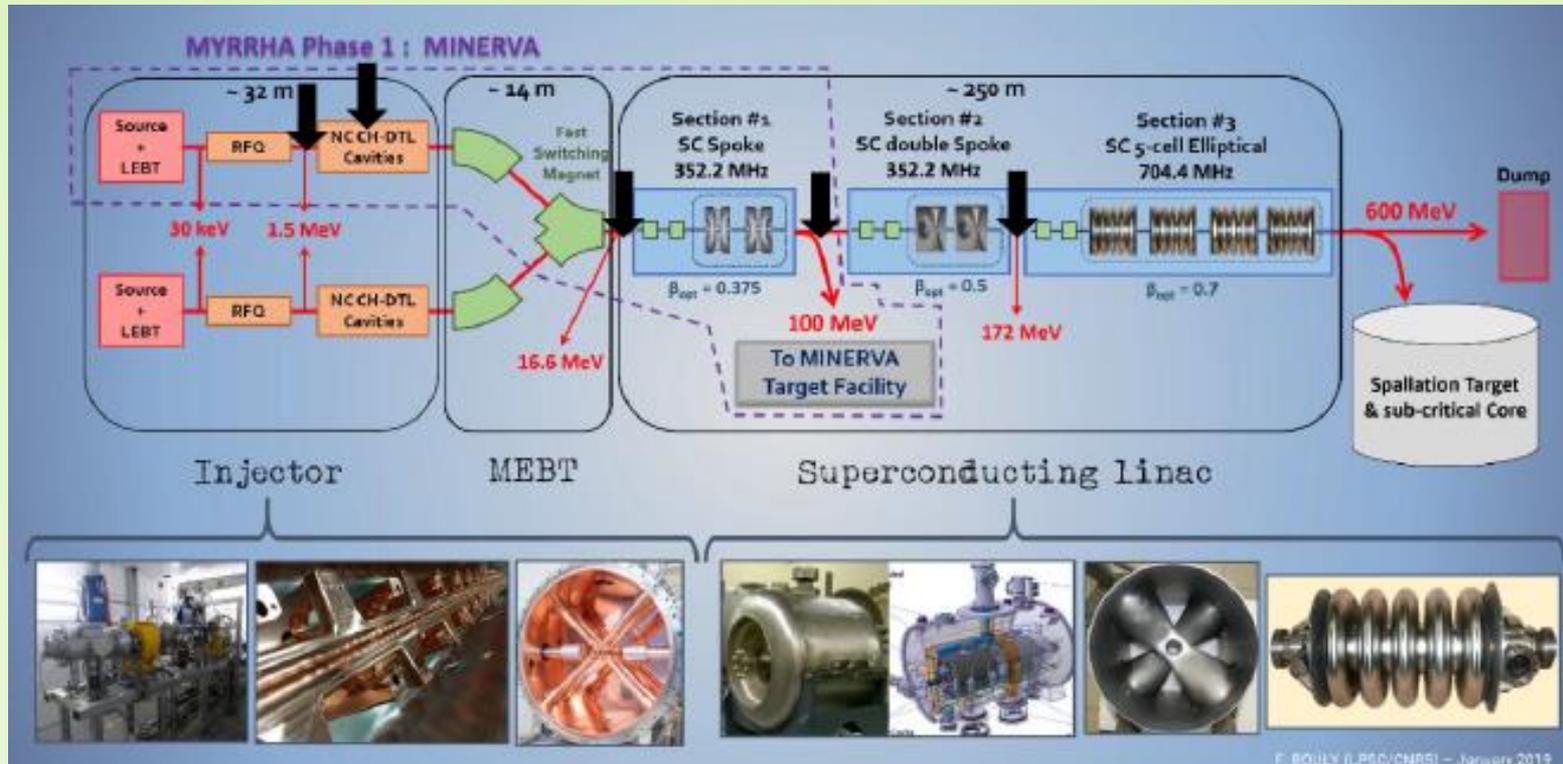
Parameter	Description
Beam energy	500 MeV(upgrade to 1GeV)
Beam current	5 mA(upgrade to 10mA)
Operation mode	CW and pulse
Beam stability	±1%@100ms for energy ±2%@100ms for intensity ±1mm@100ms for centroid
Beam reliability	> 80%@3 months

Линейный ускоритель проекта MYRRHA (Бельгия)

MYRRHA - Multi Purpose Hybrid Reactor for High Tech Applications

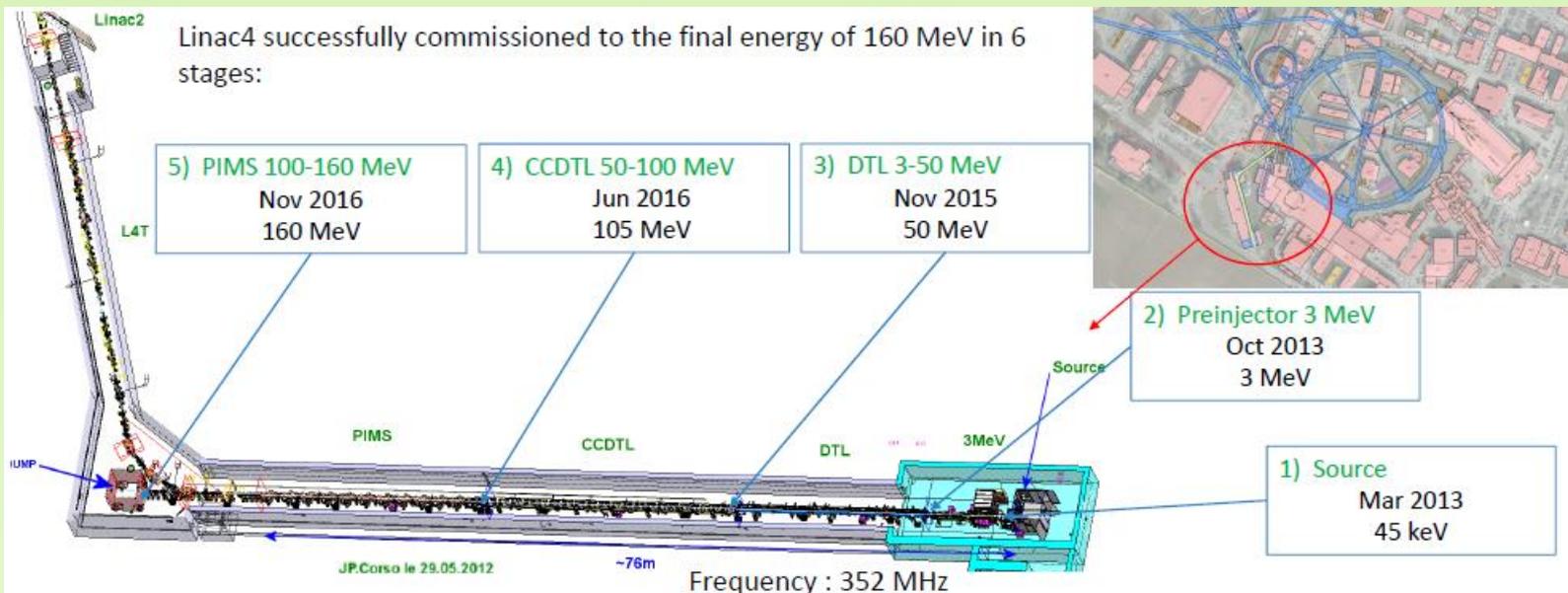
Энергия – 600 МэВ
Средний ток – 4 мА

MINERVA - Первая фаза MYRRHA
Энергия - 100 МэВ



Особенность ускорителей для ADS – высокая надежность вследствие экстремальной тепловой нагрузки мишени (не более 10 прерываний пучка длительностью более 3 секунд за 3 месяца)

Линейный ускоритель Linac-4 ЦЕРН



Энергия – 160 МэВ

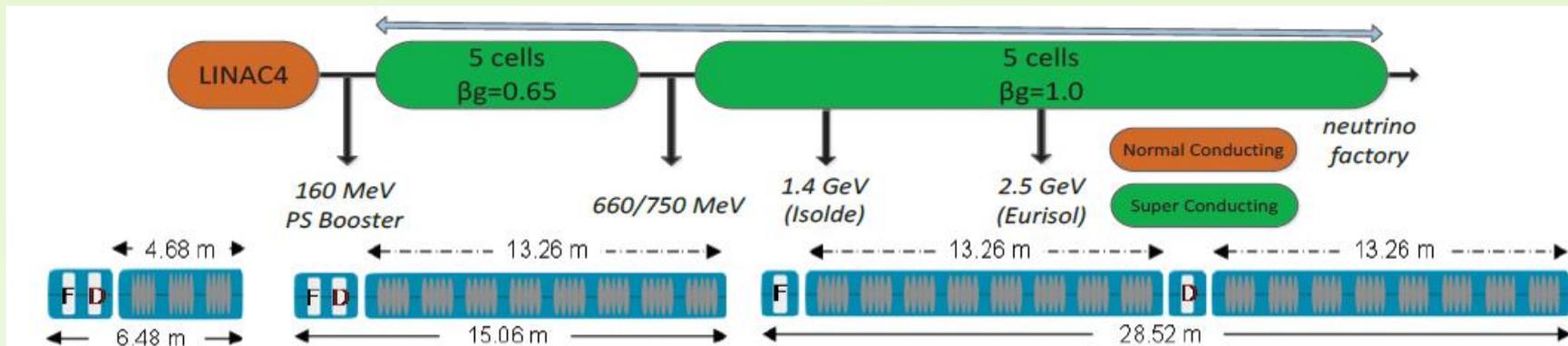
Импульсный ток – 20 мА

Длительность импульса – 600 мкс

Частота повторения – 1 Гц

Проект SPL (Superconducting Proton Linac)

Энергия – 5 ГэВ, Мощность в пучке - 4 МВт, Частота импульсов- 50 Гц



Линейный ускоритель Брукхейвенской национальной лаборатории

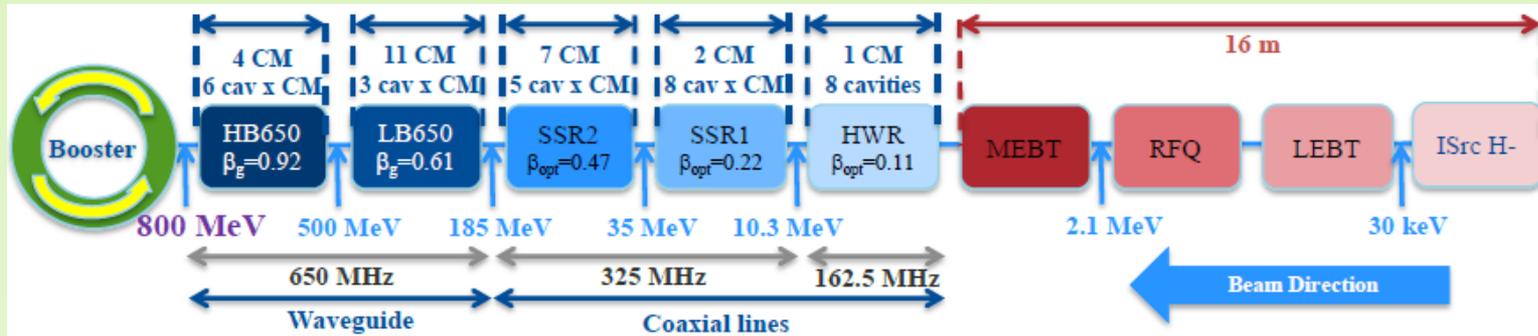


Parameter	Phase I(goal)	Operation 2016	Phase II (goal)
In. Energy (MeV)	0.75	0.75	0.75
Out. Energy (MeV)	200	200	200
Peak Cur. (mA)	45	55	45
Beam PL (μs)	490	470	900
RF PL (μs)	650	620	1100
Frequency (MHz)	201	201	201
Repetition Rate (Hz)	10	6.67	6.57
Ave. Current (μ A)	140	165	250

Программа PIP-II в лаборатории им. Ферми

PIP – Proton Improvement Plan

Структура нового инжектора



Main PIP-II Parameters

Parameter	Value	Unit
Linac beam energy	800	MeV
Linac beam current	2	mA
Linac pulse duration	0.55	ms
Linac/Booster pulse repetition rate	20	Hz
Linac upgrade potential	CW	
Booster Protons per Pulse (extract.)	6.5×10^{12}	
Booster Beam Power at 8 GeV	160	kW
MI Cycle Time @ 120 GeV	1.2	s

Комплекс сверхточного линейного ускорителя ИЯИ РАН на карте Google

~720 m



1. **Линейный ускоритель**
2. **Нейтронный комплекс**
 - **Нейтронный источник РАДЭКС**
 - **Импульсный источник ИН-06**
 - **Спектрометр по времени замедления СВЗ-100**
3. **Комплекс лучевой терапии**
4. **Изотопный комплекс**

1970 год – Постановление ЦК КПСС и Совета Министров СССР о создании ИЯИ АН СССР и сооружении линейного ускорителя в г.Троицке.



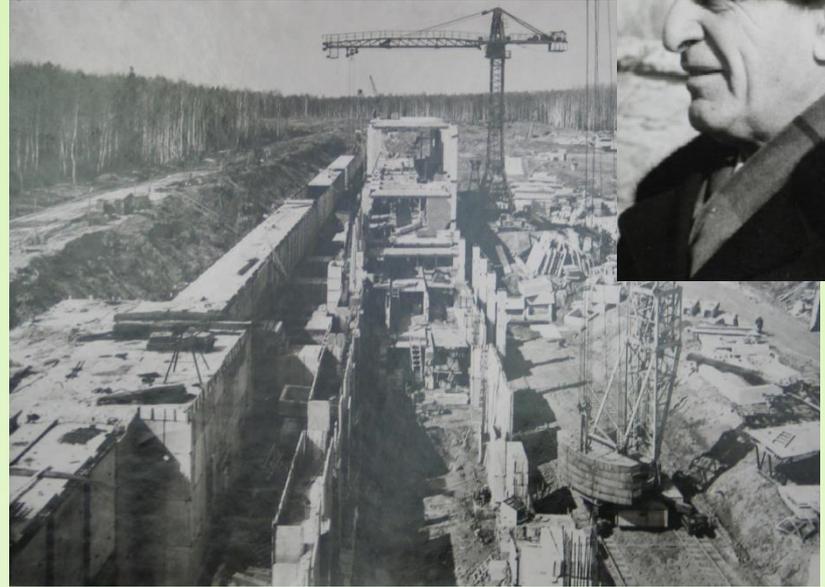
Основные участники сооружения линейного ускорителя ИЯИ РАН

- ИЯИ РАН
- Московский Радиотехнический институт
- Государственный Союзный проектный институт Минсредмаша
- НИИЭФА им.Ефремова Минсредмаша – инжектор ионов, система инжекции, трубки дрейфа и фокусирующие дублеты с системами питания
- ВНИПИ ТПЭП – проект электрической части
- НИИ «Титан» Минэлектронпрома – мощные клистроны на частоте 991 МГц
- НПО «Светлана» Минэлектронпрома – мощные усилительные модуляторные лампы
- МИИГАИК – обеспечение работ по высокоточной геодезии
- Трест № 1 Минсредмаша – монтаж технологического оборудования
- Тамбовский завод «Комсомолец» Минхимпрома – изготовление ускоряющих резонаторов начальной части ускорителя
- Днепропетровский завод Минрадиопрома – система ВЧ питания ускорителя
- Гомельский радиозавод Минрадиопрома – модуляторы начальной части ускорителя и волноводы

А также ряд других научных организаций и промышленных предприятий СССР

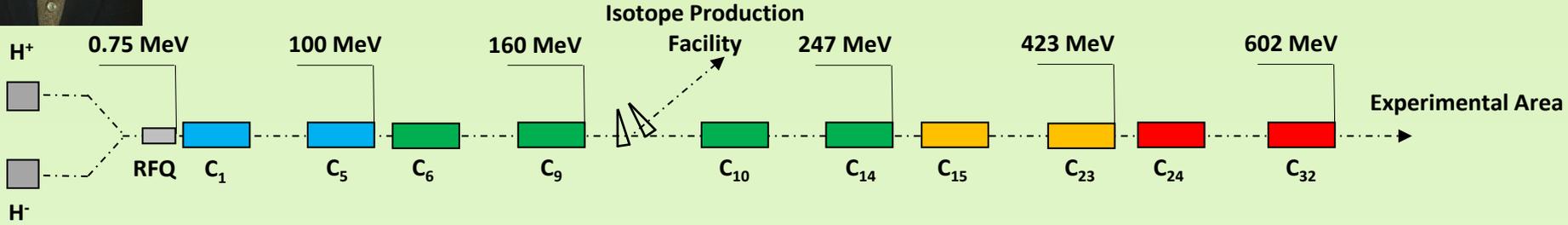
В 1972 году Московским Радиотехническим институтом выпущен технический проект технологической части ускорителя.

Основные параметры	
Ускоряемые частицы	H⁺, H⁻, H⁺поляриз.
Энергия, МэВ	600
Импульсный ток, мА	50
Частота повторения, Гц	100
Длительность импульса, мкс	100
Средний ток, мкА	500



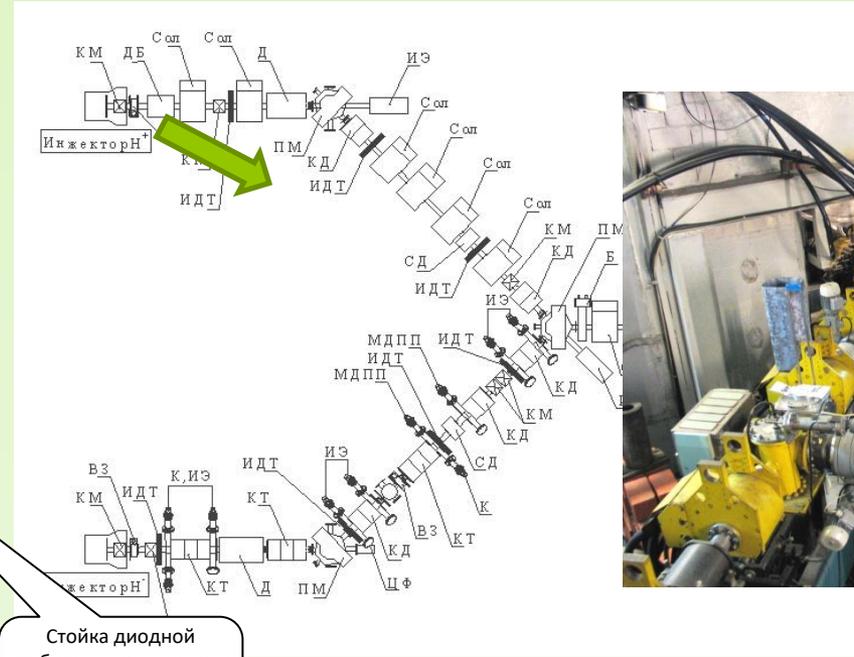


Линейный ускоритель



Платформа блоков питания ионного источника

Высоковольтный импульсный трансформатор 400 кВ



Стойка диодной стабилизации вершины высоковольтного импульса

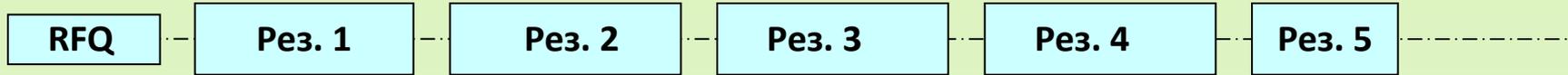


Инжекционные тракты

Инжектор протонов

Начальная часть ускорителя

400 keV 750 keV 20 MeV 49 MeV 74 MeV 94 MeV 100 MeV



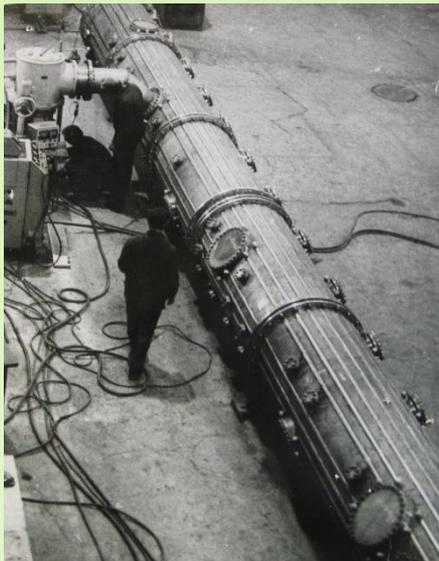
Бустерная секция RFQ



5 резонаторов с трубками дрейфа

Частота – 198.2 MHz

Выходная энергия- 100 MeV



**Резонатор на
тамбовском заводе
«Комсомолец»**



Госкомиссия по приемке резонаторов на заводе



**Загрузка в тоннель
ускорителя**





Трубки дрейфа на заводе ЛЭЗ



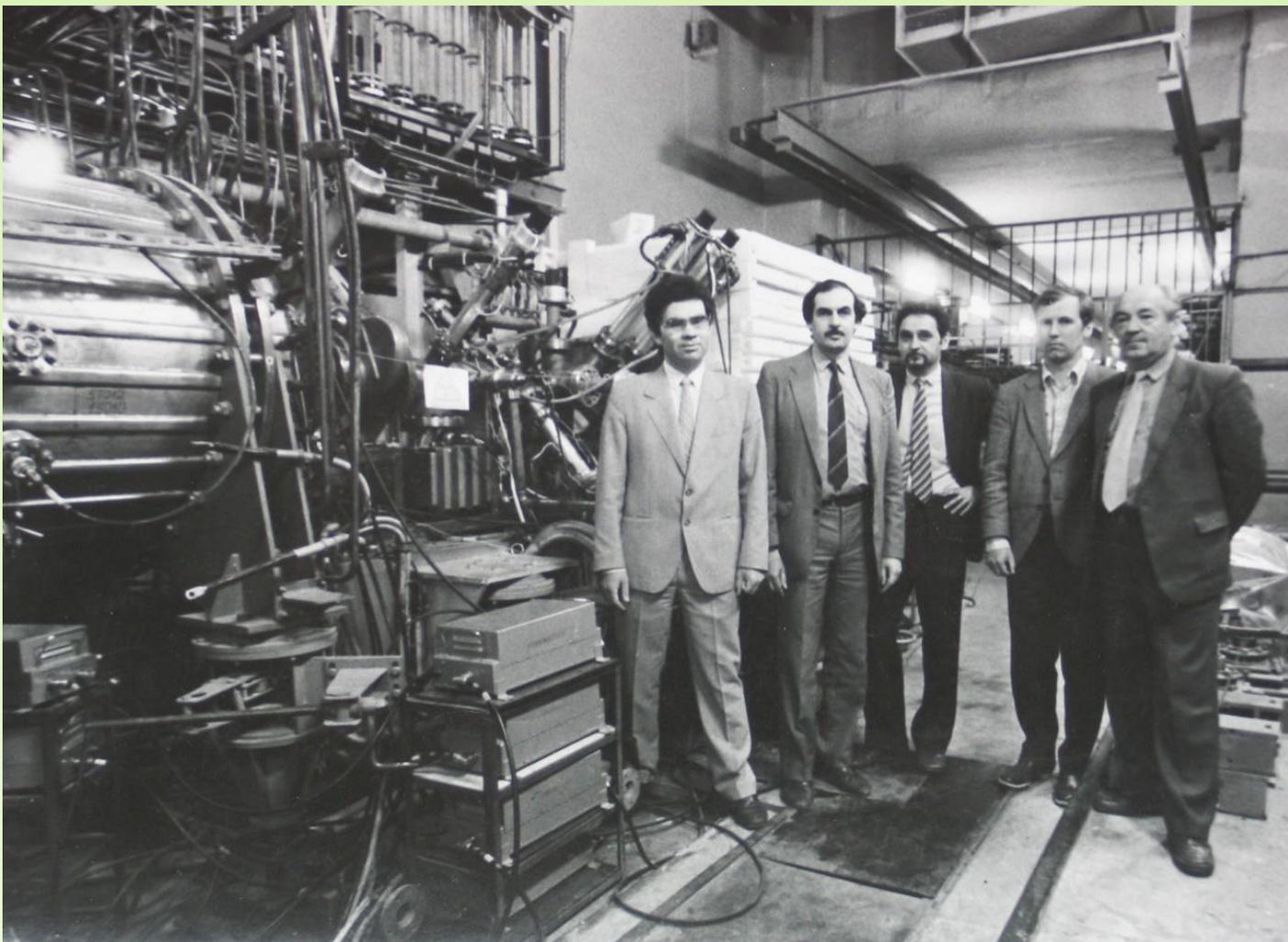
Монтаж трубок дрейфа



Внутри резонатора №1 после окончания радиотехнической настройки



Внутри резонатора №2. Сентябрь 2007г.



**После запуска начальной части ускорителя, 1990 год
(фотография из статьи в CERN Courier)**

Основная часть ускорителя (100-600 МэВ)

27 четырехсекционных резонаторов с шайбами и диафрагмами на частоте 991 МГц.



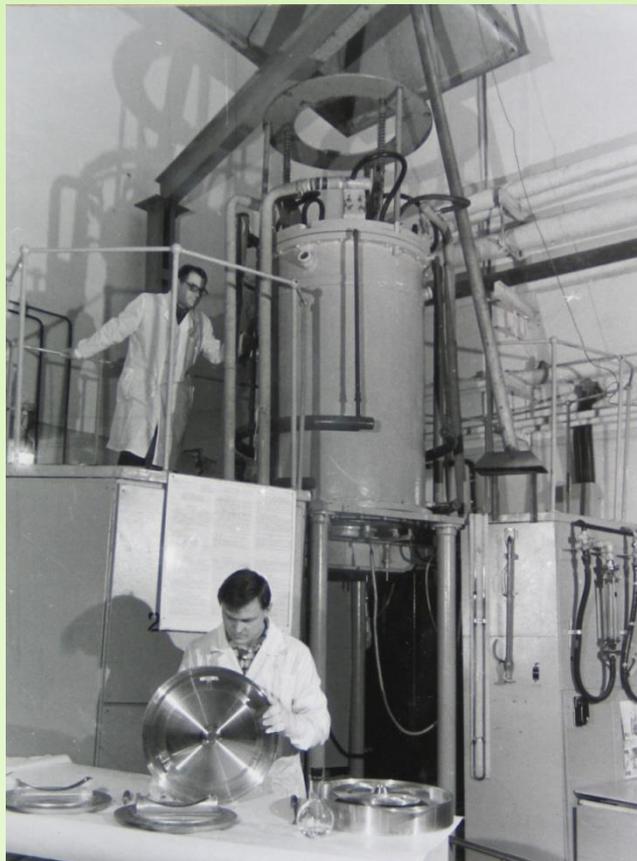
Ускоряющие резонаторы основной части ускорителя



Галерея ВЧ питания основной части ускорителя



Механическая обработка



Участок водородных печей



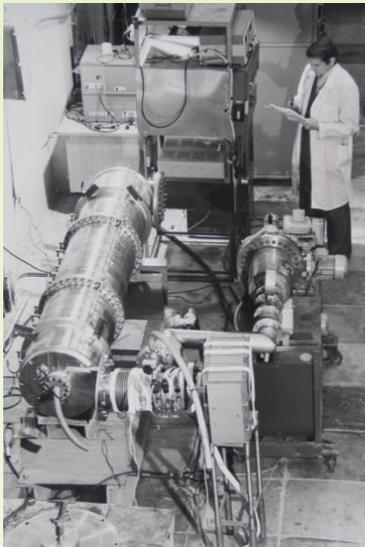
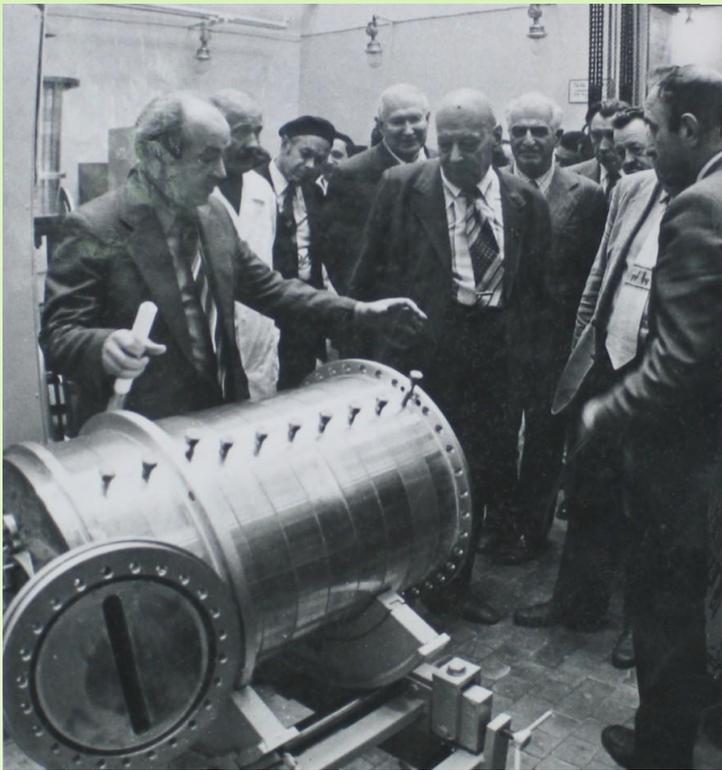
Модуль ускоряющей структуры



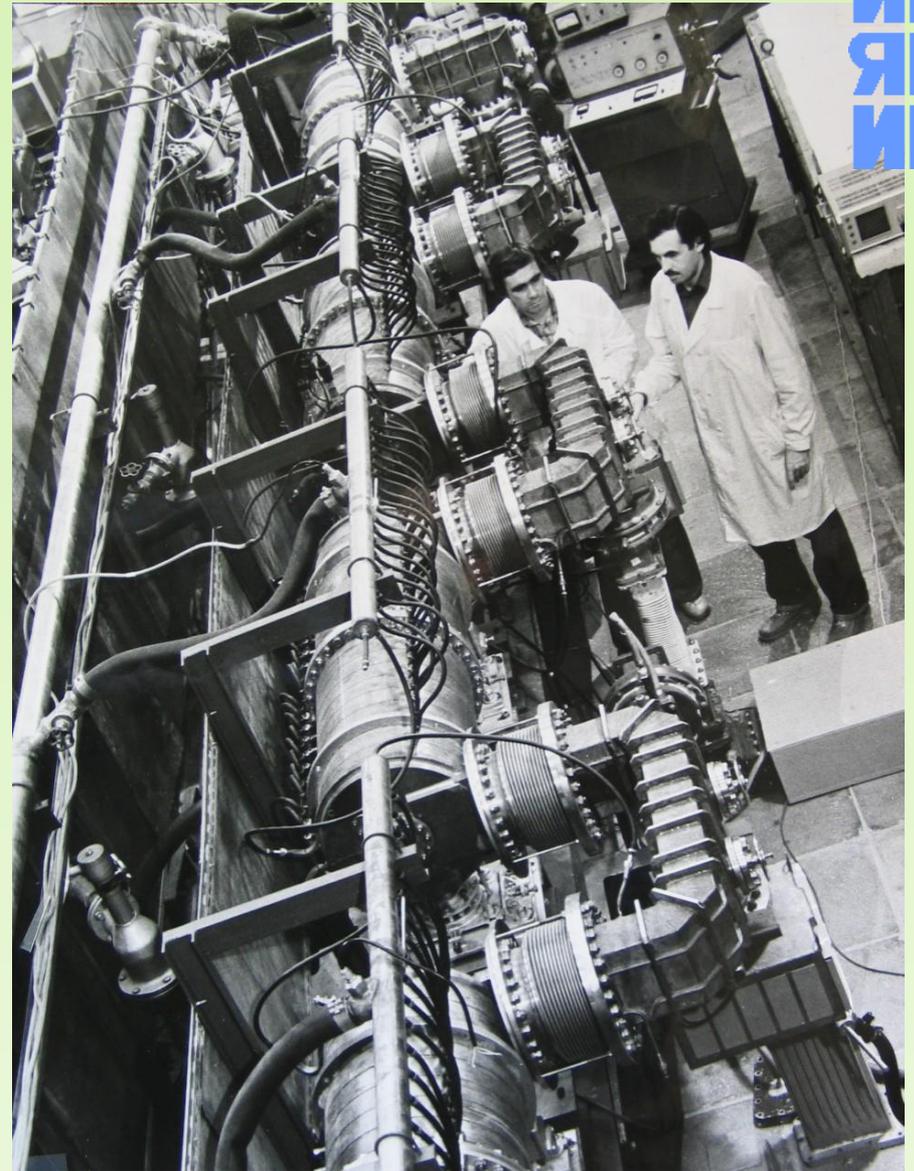
Контроль качества



Сборка секции перед пайкой



**Вакуумные
испытания
секции**



Испытания первого резонатора на стенде



**Группа лауреатов в доме Правительства Российской Федерации после вручения Премии
(Слева направо А.П.Федотов, Е.Д.Лебедев, С.К.Есин, В.А.Матвеев, Б.И.Бондарев,
А.Н.Тавхелидзе, Н.И.Уксусов, Л.В.Кравчук, О.Д.Пронин, В.Л.Серов)**

Основные параметры ускорителя

Параметр	Проект	Достигнуто	Декабрь 2020
Частицы	p, H-minus	p, H-minus	p, H-minus
Энергия, MeV	600	502	305
Импульсный ток, mA	50	16	15
Частота повторения, Hz	100	50	50
Длительность импульсов, μ s	100	200	0.3÷200
Средний ток, μ A	500	150	130

Реально получаемая максимальная энергия в предыдущие годы

2016 год – 209 МэВ

2017 год – 209 МэВ

2018 год – 267 МэВ

2019 год – 267 МэВ

2020 год – 305 МэВ (план на декабрьский 2020 г. сеанс)

Экспериментальный комплекс



1 – Нейтронный источник РАДЭКС

2 – Нейтронный источник ИН-06

3 – Спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100

4 – Комплекс протонной терапии

Распределение пучкового времени в сеансе с 07 декабря по 24 декабря 2020 г.

№ п/п	Продолжительность	Начало	Окончание	Наименование работ	Ответственный
1	6 смен	7 декабря 08.00	10 декабря 08.00	Включение и настройка ускорителя с энергией 300 МэВ на 83 ось , сканирование начальной части . $F = 1 \text{ Гц}, \tau = 150 \text{ мкс}, I_{\text{имп.}} = 10 \text{ МА}$	Серов В.Л. Гаврилов С.А.
2	1 смена	10 декабря. 08.00	10 декабря 20.00	Проводка пучка с энергией 300 МэВ на установку РАДЭКС $F = 1 \text{ Гц}, \tau = \text{до } 150 \text{ мкс}, I_{\text{имп.}} = 5-10 \text{ МА}$	Серов В.Л. Гаврилов С.А.
3	10 смен	10 декабря 20.00	15 декабря 20.00	Работа ускорителя с энергией 300 МэВ на РАДЭКС $F = 10 - 50 \text{ Гц}, \tau = \text{до } 150 \text{ мкс}, I_{\text{имп.}} = 5 \text{ МА}$	Серов В.Л. Гаврилов С.А. Конобеевский Е.С Сидоркин С.Ф.
4	5 смен	15 декабря 20.00	18 декабря 08.00	Работа с энергией 300 МэВ на РАДЭКС $F = 50 \text{ Гц}, \tau = 0,3 \text{ мкс}, I_{\text{имп.}} = 5 \text{ МА}$	Серов В.Л. Гаврилов С.А. Джилкибаев Р.М.
5	8 смен	18 декабря 08.00	22 декабря 08.00	Проводка пучка и работа на ИН-06 с энергией 300 МэВ. $F = 25 \text{ Гц}, \tau = \text{до } 150 \text{ мкс}, I_{\text{имп.}} = 5-10 \text{ МА МА}$	Серов В.Л. Гаврилов С.А. Садыков Р.А. Сидоркин С.Ф.
6	5 смен	22 декабря 08.00	24 декабря. 19.00	Проводка пучка с энергией 209 МэВ и работа на КПТ 1) $F = 1-50 \text{ Гц}, \tau = 20-120 \text{ мкс}, I_{\text{имп.}} = 5-10 \text{ МА}, N = 1-1000 \text{ имп.}$ 2) $F = 50 \text{ Гц}, \tau = 100 \text{ мкс}, I_{\text{ср.}} = 20 \text{ н А}$	Серов В.Л. Гаврилов С.А. Акулиничев С.В.

Работа ускорителя

1993 год - Начало регулярной работы на физические и прикладные задачи

С **1993** по декабрь **2020** года проведено **140** сеансов общей продолжительностью **50496** часов (примерно **2100** суток или **5,76** лет)

(внесен планируемый в декабре 2020 года сеанс продолжительностью 420 часов)

В том числе:

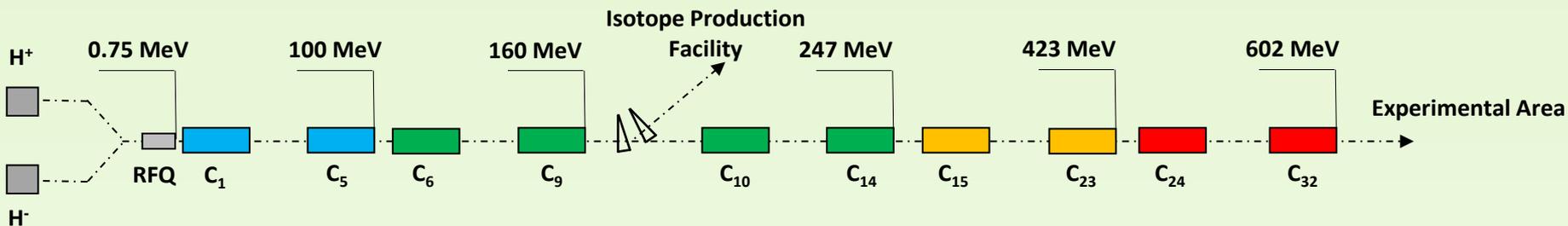
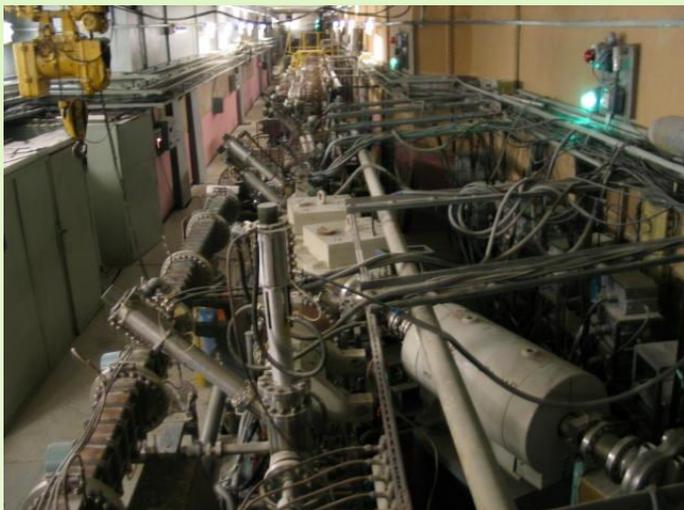
2001 год – 2400 часов (7 сеансов);	2011 год – 1652 часа (5 сеансов);
2002 год – 1400 часов (6 сеансов);	2012 год – 1590 часов (5 сеансов);
2003 год – 2400 часов (7 сеансов);	2013 год – 1212 часов (4 сеанса);
2004 год – 2200 часов (7 сеансов);	2014 год – 1812 часа (5 сеансов);
2005 год – 1900 часов (6 сеансов);	2015 год – 1677 часов (5 сеансов);
2006 год – 2250 часов (7 сеансов);	2016 год – 2050 часов (6 сеансов);
2007 год – 2040 часов (7 сеансов);	2017 год – 1680 часов (4 сеанса);
2008 год – 1300 часов (5 сеансов);	2018 год – 1016 часов (4 сеанса);
2009 год – 1208 часов (6 сеансов);	2019 год – 1296 часов (4 сеанса);
2010 год – 1700 часов (7 сеансов);	2020 год – 1100 часов (4 сеанса);

Основные системы ускорителя

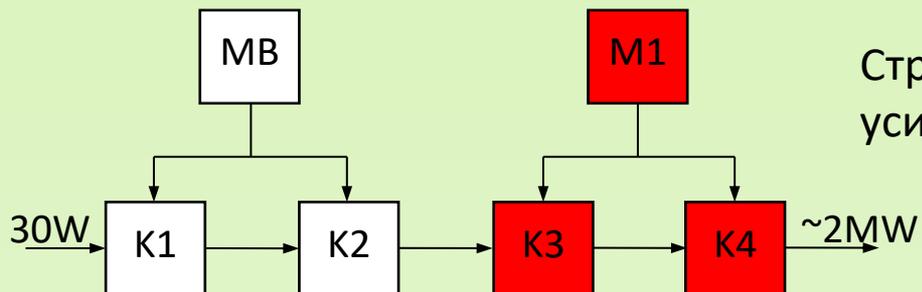
1. Ускоряющая система начальной части ускорителя (198,2 МГц)
2. Ускоряющая система основной части ускорителя (991,0 МГц)
3. Система ВЧ питания начальной части ускорителя
4. Система ВЧ питания основной части ускорителя
5. Система инжекции
6. Фокусирующая система
7. Система питания электромагнитных элементов
8. Вакуумная система
9. Система диагностики пучка
10. Система контроля и управления
11. Система стабилизации и авторегулирования собственных частот ускоряющих резонаторов
12. Система стабилизации и авторегулирования амплитуд и фаз ускоряющих полей
13. Системы измерения потерь пучка, быстрой аварийной защиты, дозиметрического контроля.
14. Система охлаждения оборудования ускорителя
15. Система электропитания ускорителя
16. Общеинженерные системы (энергоснабжение, вода, холодильная вода, вентиляция...)

Некоторые примеры модернизации ускорителя

- A. Постепенное повышение энергии до 350-423 МэВ.
- B. Увеличение частоты повторения импульсов тока пучка с 50 Гц до 100 Гц
 - Инжектор протонов 50 Гц → 100 Гц (Достигнуто)
 - Системы ВЧ питания 50 Hz → 100 Hz (Проведены испытания, имеются проблемы)
- C. Ускорение протонов (50 Гц) и Н-минус (50 Гц) через импульс
- D. Одновременная (через импульс) работа на изотопный комплекс и экспериментальный комплекс с помощью импульсного магнита на участке промежуточного вывода 160 МэВ (Проведены успешные испытания).



Модернизация системы ВЧ питания начальной части ускорителя



Структурная схема канала усиления (всего 7 каналов)

Устройство	Лампа		Замена лампы
	Тип	Состояние	
Каскад предоконечный К3	ГИ-51А	Выпуск прекращен	ГИ-57А
Каскад окончательный К4	ГИ-54А	Выпуск прекращен	ГИ-71А
Модулятор М1	ГМИ-44А	Выпуск прекращен	ГИ-71А!!!

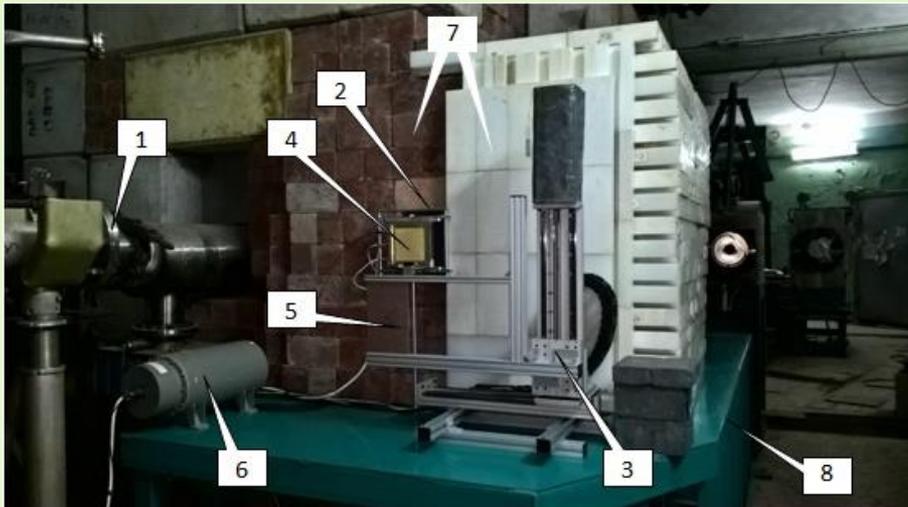
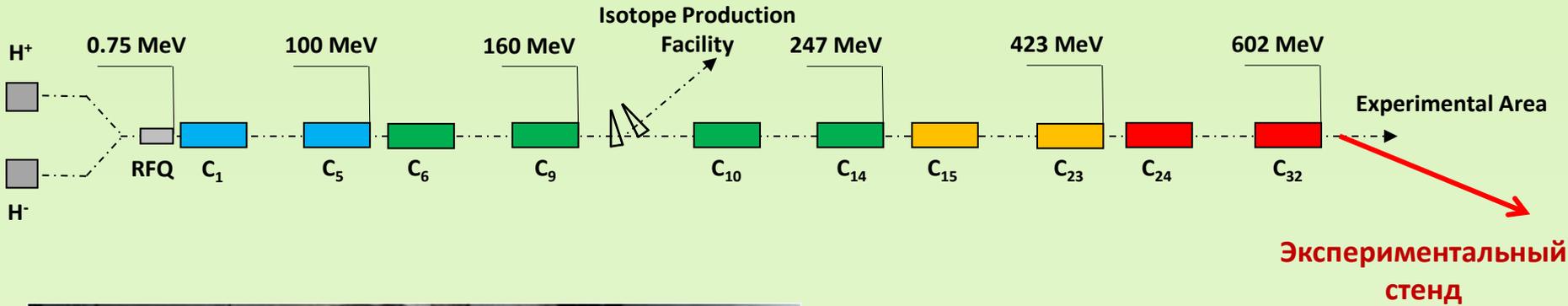
Параметры и надежность работы обеспечиваются с большим трудом.
 Рассматривается возможность восстановления выпуска ГМИ-44А

Модуляторная лампа на базе генераторного триода ГИ-71А

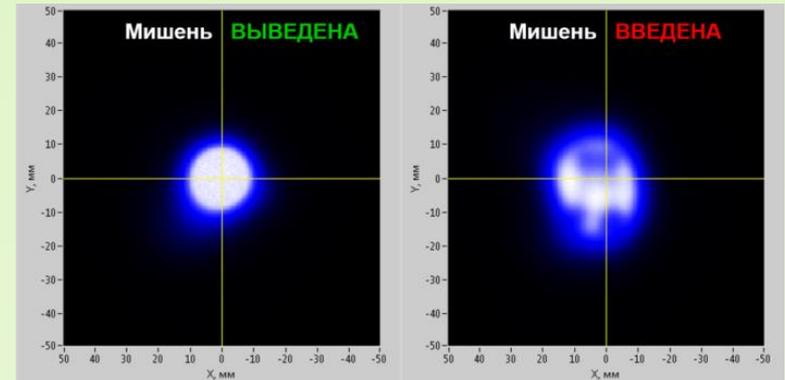


Штатная лампа с магнитной ловушкой ГМИ-44А

Разработка и создание экспериментального стенда для исследования воздействия пучка протонов на узлы радиоэлектронной аппаратуры и иные изделия и материалы (совместно с РФЯЦ ВНИИЭФ)



- 1 - выводное окно канала транспортировки, 2 – графитовый поглотитель, 3 – устройство двухкоординатного перемещения, 4 – мультианодный газовый счетчик, 5 – макет облучаемого изделия, 6 – нейтронный детектор, 7 – защита, 8 – опора



Пример изменения поперечного сечения пучка на люминесцентном экране при введении облучаемой мишени (энергия 49 МэВ)

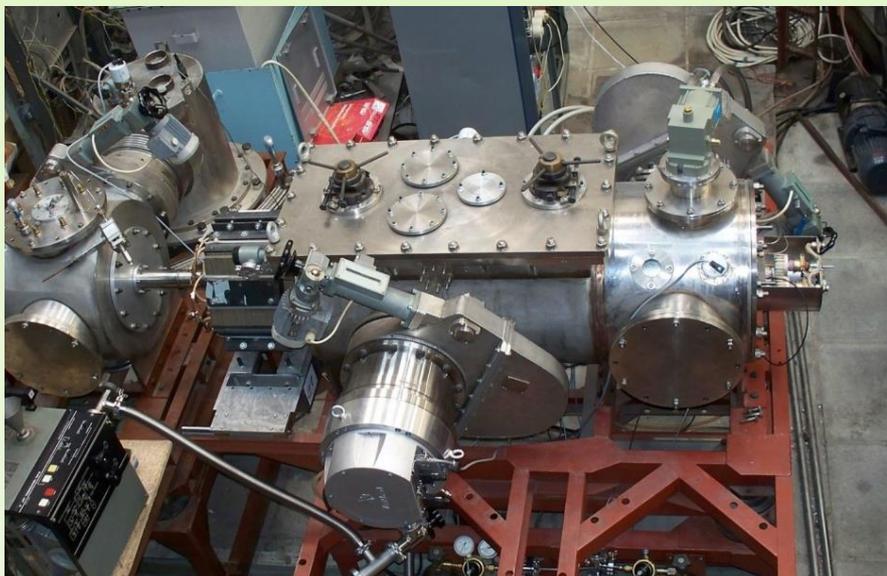
Реально работы проводятся с энергиями от 49 МэВ до 209 МэВ

Разработка и создание узлов и элементов ускорителей для российских и зарубежных ускорительных центров

1. Источники ионов (поляризованные ионы – IUCF, ОИЯИ, ионы Н-минус – ИФВЭ)
2. Нормально проводящие ускоряющие и отклоняющие структуры.
3. Устройства диагностики.

Высокоинтенсивный источник поляризованных дейтронов и протонов для ускорительного комплекса NUCLOTRON-NICA

Источник создан в коллаборации ОИЯИ – ИЯИ РАН на основе работ по источникам поляризованных ионов, выполненных ранее в ИЯИ РАН.



Испытания источника на стенде в ИЯИ РАН

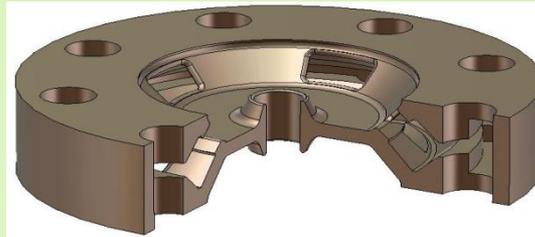
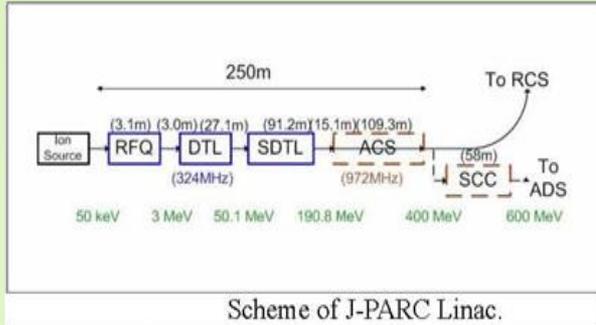


Инжектор поляризованного пучка в ОИЯИ

Разработка и создание нормально проводящих ускоряющих и отклоняющих электродинамических структур

1. Разработка, курирование изготовления и запуска ускоряющей структуры для интенсивного ЛУ комплекса JPARC (Япония) и резонатора бустера для установки PITZ, DESY (Германия), разработка предложений ускоряющих структур для проекта ОМЕГА, ИФВЭ.
2. Разработка ВЧ резонаторов фото-инжекторов для лазеров на свободных электронах для проектов European XFEL, FLASH DESY (Германия), CLARA ASTeC (Великобритания).
3. Для ускорения частиц со скоростью, близкой к скорости света, предложена структура Cut Disk Structure (CDS), по комплексу параметров превосходящая известные аналоги. В коллаборации с ДЕЗИ структура апробирована в эксплуатации на установке PITZ. В дальнейших исследованиях область применимости CDS расширена и структура рекомендована для модернизации первого резонатора основной части ЛУ ИЯИ РАН.
4. Разработка резонаторов, работающих в уникальном сочетании высокой напряженности электромагнитного поля, высокой импульсной и средней ВЧ мощности. В ДЕЗИ завершается изготовление разработанного резонатора фото-инжектора нового поколения Gun 5 для повышения интенсивности генерируемого когерентного излучения комплексов European XFEL и FLASH (ДЕЗИ, Гамбург).
5. Разработка отклоняющих структур. Для измерения характеристик продольного распределения частиц в ультра коротких сгустках сверхвысокой яркости в лазерах на свободных электронах сформирована концепция специализированных структур с минимизированным уровнем собственных aberrаций и повышенной ВЧ эффективностью. Первый отклоняющий резонатор применен на установке REGAE (ДЕЗИ) для измерения распределений в сгустках длительностью менее 20 фемтосекунд.
6. Разработка и изготовление TDS (Transverse Deflecting System) для специальной диагностики пучка в XFEL. Отклоняющие структуры устанавливаются на участках с энергиями 130 МэВ, 500 МэВ и 2 ГэВ.

В коллаборации ИЯИ –КЕК разработана конструкция структуры с кольцевыми ячейками связи (ACS) для участка энергий 180 МэВ – 400 МэВ ЛУ комплекса J-PARC.



ACS cells for J-PARC

2000



2013

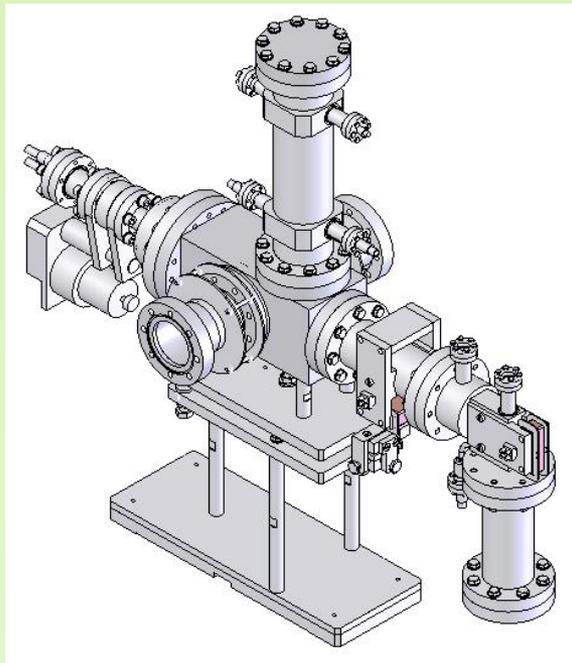


Разработка и создание устройств диагностики

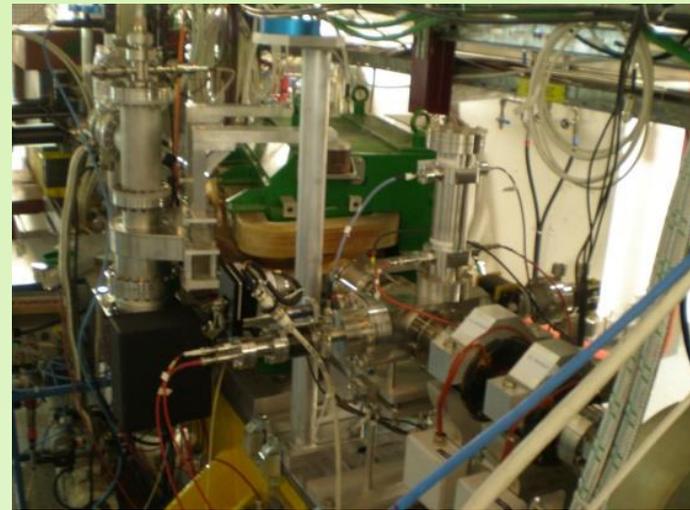
1. **Ионизационный монитор поперечного сечения пучка**
2. **Измеритель продольного распределения заряда в сгустках ускоренного пучка (измеритель формы сгустков, анализатор фазового спектра, Bunch Shape Monitor - BSM)**

Измеритель формы сгустков

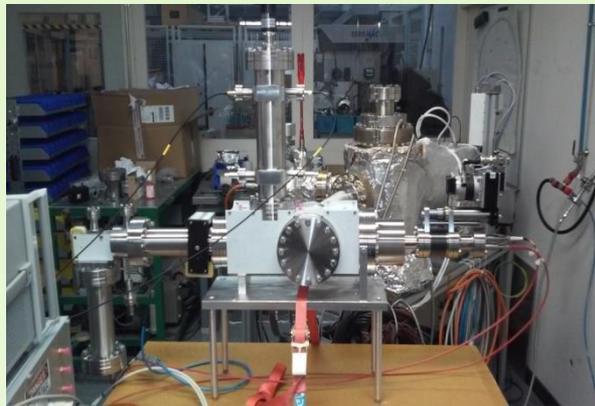
К настоящему моменту создано свыше тридцати измерителей разных модификаций для ведущих ускорительных центров мира: ИЯИ РАН, SSC, CERN, DESY, KEK, J-PARC, SNS, LANSCE, FRIB, GSI, ESS. Разработан измеритель формы сгустков для проектируемого ускорителя DERICA ОИЯИ, закончена разработка и начато изготовление измерителя для сооружаемого ускорительного комплекса MYRRHA.



BSM №1 для Linac-4



BSM №1 в канале MEFT Linac-4

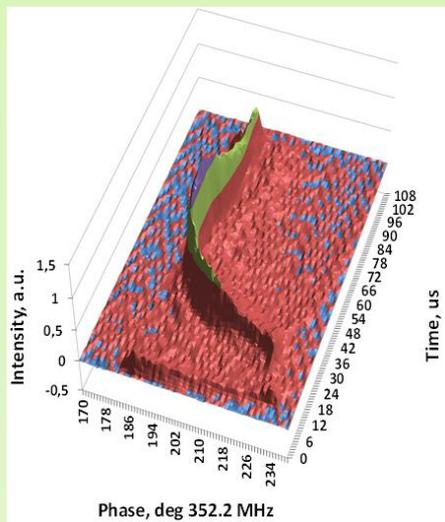


**BSM №2 для Linac-4 на
испытательном стенде в ЦЕРН**

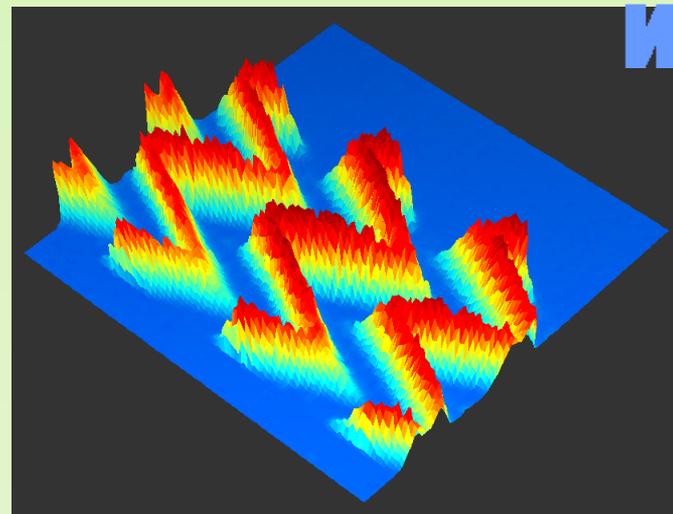
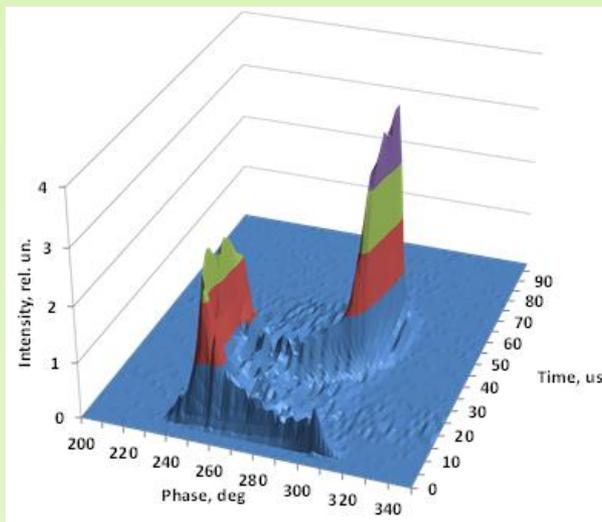


**Стойки электроники
измерителей формы
сгустков в
клистронной галерее
ускорителя Linac-4**

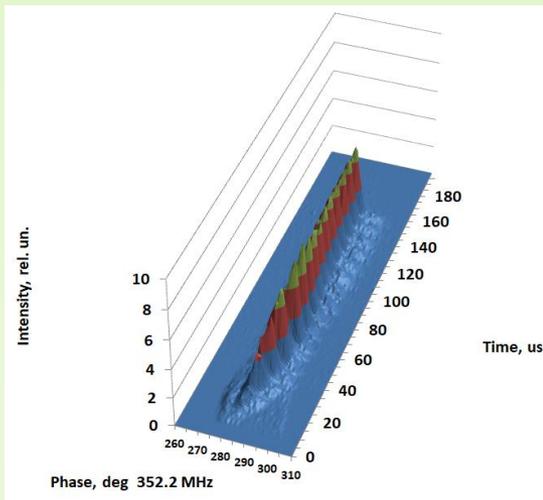
Некоторые примеры измерений



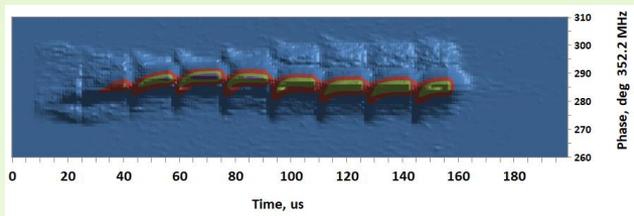
Наблюдение переходных процессов в начале импульса (BSM-1, выход Linac-4)



Поведение сгустков при модуляции энергии для обеспечения режима инжекции в бустер методом Painting (BSM-2, канал транспортировки из Linac-4 в бустер)

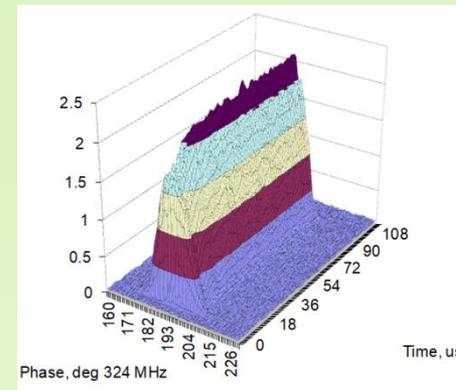


Наблюдение формы сгустков при чоппировании пучка (BSM-1, выход Linac-4)



Бывали и проблемы

J-PARC Влияние краевых полей квадрупольных линз



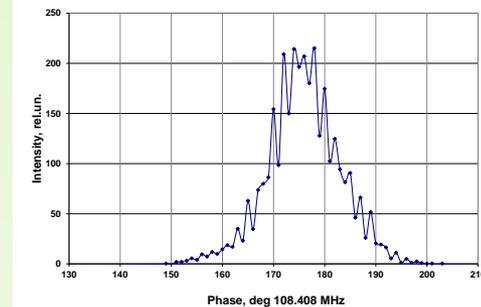
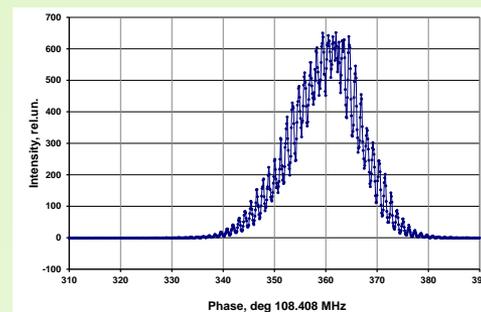
GSI Влияние вибраций от механических вакуумных насосов



Испытания измерителя формы на стенде в GSI



Испытания измерителя формы сгустков в GSI в канале инжекции UNILAC с пучком Ar⁹⁺, 1.4 MeV/u



Вместо заключения

Спасибо всем, кто создал сильноточный линейный ускоритель ионов водорода ИЯИ РАН - национальное достояние России, а также всем, кто своим самоотверженным трудом обеспечивает его поддержание, модернизацию и успешную работу.