



ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
*INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH
OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES*

СИЛЬНОТОЧНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ УСКОРИТЕЛИ ПРОТОНОВ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

Л.В.Кравчук

10.05.2007 Марковские чтения

Сильноточные линейные ускорители протонов (~ МВт)

- До последнего времени были построены только два сильноточных ЛУП на сотни МэВ – LANL и ИЯИ. В 2006-2007 введены два ЛУП SNS ORNL и J-PARC.
- Большой интерес в последнее десятилетие вызван использованием ЛУП в качестве
 - нейтронных источников (spallation)
 - драйверов ускорителей радиоактивных ионов, нейтринных фабрик, мюонных коллайдеров
 - ADS - подкритических реакторов для трансмутации радиоактивных отходов и производства электроэнергии;
исследования материалов термоядерных реакторов
- Прогресс в технологии сверхпроводящих резонаторов!

Сильноточные линейные ускорители протонов (~ МВт)

Источники нейтронов

- **Fission** 180 MeV/n 2 MeV (ср. кинетич. энергия)
- **Fusion** > 17,6 MeV/n 14 и 3,5 MeV
- **Spallation** 35-50 MeV/n 2-5 MeV

SNS – neutron scattering

- материаловедение, науки о жизни, энергетика,
химия, инженерия, науки о Земле, электроника,
ядерная физика и др. – **нано...**

Специализированные комплексы

Многоцелевые комплексы – SNS +

протонная терапия,
производство изотопов,
физика частиц,
ADS, ...

Accelerator Driven Systems

1. Overall purpose

- Reduce the nuclear waste radiotoxicity & volume before underground storage
- 2500 tons of spent fuel are produced every year by the 145 EU reactors

2. Available strategy

- Partitioning : chemical separation of Pu, MA & FP
- Transmutation : use of the waste as a fuel in dedicated transmuter systems

3. The ADS transmuter system

- A subcritical reactor ($k < 1$), in which the chain reaction is not self-sustained
- An intense spallation source, that provides the “missing” neutrons

From ETWG Report, 2001

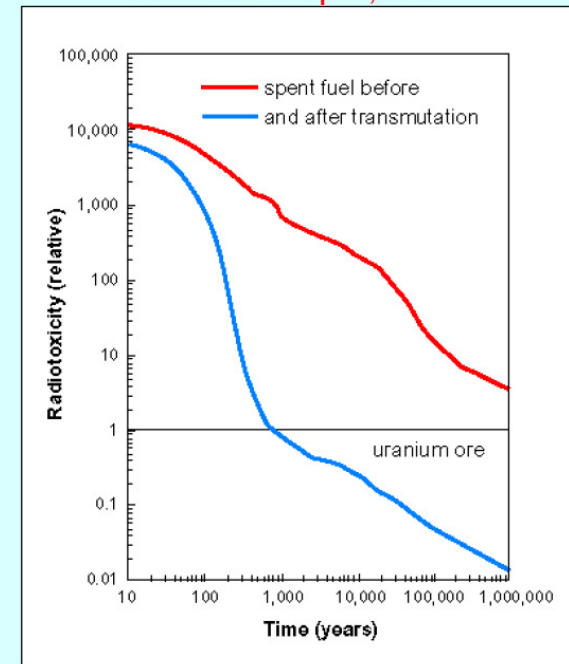
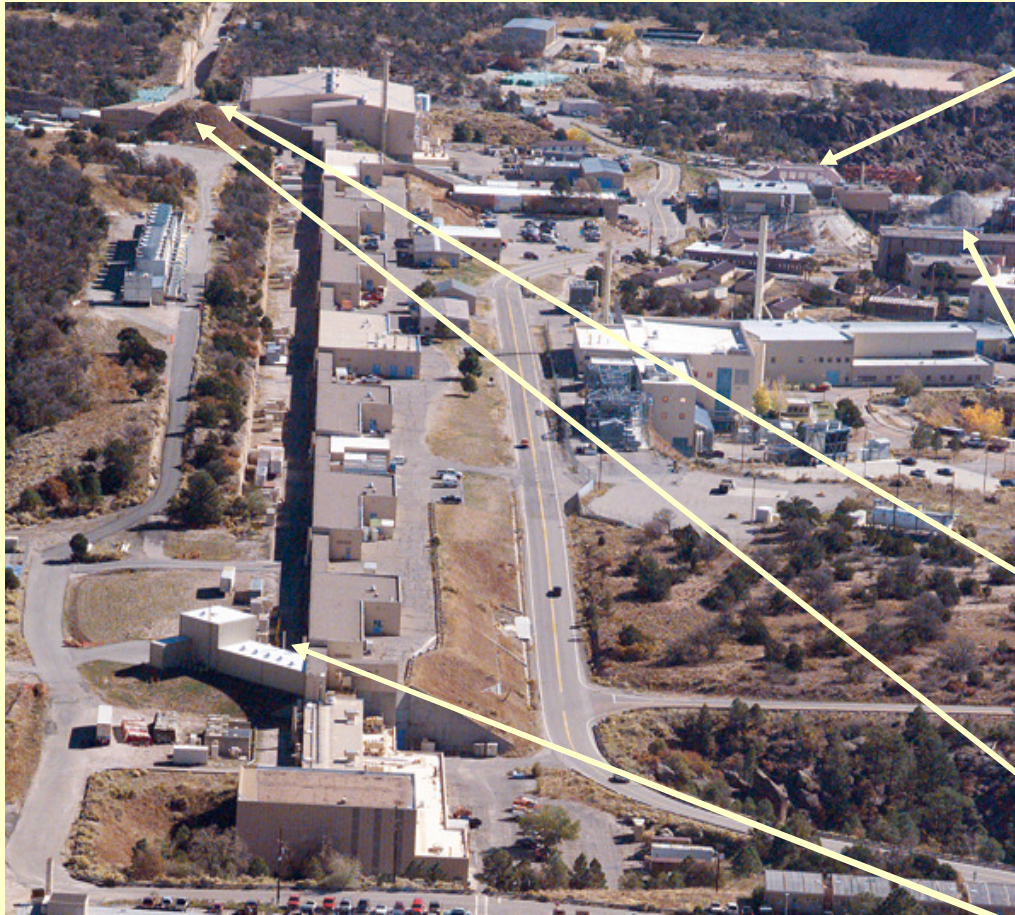


Fig. 1 – Ingestion radio-toxicity of 1 ton of spent nuclear fuel. With a separation efficiency of 99.9% of the long-lived by-products from the waste, followed by transmutation, reference radio-toxicity levels can be reached within 700 years

Сильноточные линейные ускорители протонов

ЛУ	Длительн. имп.(ms)	Частота повт.(Hz)	Имп.ток (mA)	Сред.ток (mA)	Энергия (MeV)	Мощность (MW)
LANSCCE	0,625	60	16	1,0	800	0,8
ИЯИ РАН	0,1	100	50	0,5	600	0,3
SNS	1,0	60	38	1,4	1000	1,4
J-PARC	0,5	25	50	1,25	400/600	1,0(RCS)
ESS SENER	1,2	50	107	3,85 0,125/0,5	1300 50/400	5,0 1,0
CERN SPL(La4)	0,4	50	40	1,0 0,1	3500-5000 160	4,0
FNAL		10		0,25	8000	2,0
PEFP	1,33	60	20	1,0	100/1000	0,9
C SNS	0,2	25	15/30/40	76/151/3I5	81/132/230	0,5(RCS)
ADS EU,США, Япония, Корея, Индия...	--	CW	10 - 20	10 - 20	600 -1000	~10 ÷ ÷100

LANSCCE presently provides the US and International Research Communities a Diverse set of Premier Facilities



Unique, highly-flexible beam delivery to multiple facilities 8 mo/yr @ 24/7 with 1500 projected user visits

Operations talk by Kevin Jones

Lujan Center

- *Materials science and condensed matter research*
- *Bio-science*
- *Nuclear physics*
- *A National BES user facility*

WNR

- *Nuclear physics*
- *Semiconductor irradiation*

Ultra-cold Neutron Facility

- *Fundamental Nuclear Physics*

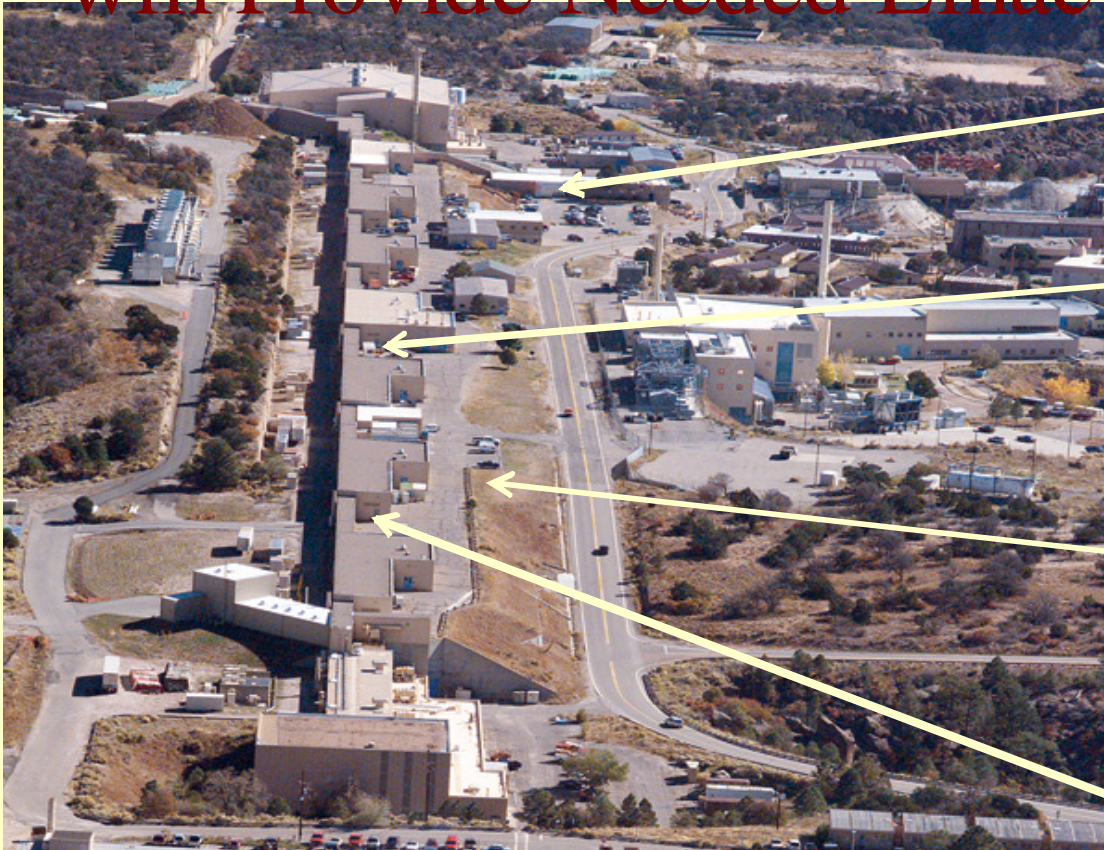
Proton Radiography

- *HE science, dynamic materials science, hydrodynamics*

Isotope Production Facility

- *Nuclear Medicine*
- *Research isotope production*

The LANSCE-R Project, started in FY07, will Provide Needed Linac Modernization



LANSCE-R will ensure reliable operations and enable high-power applications

- **Install modern, maintainable Instrumentation and Control system**
- **Replace High Voltage Power supplies and some klystrons for 805 MHz system for Coupled Cavity Linac (100 - 800 MeV)**
- **Remediate accelerator structures, supporting equipment and power supplies**
- **Replace 201 MHz RF system for the Drift Tube Linac (0.75 - 100 MeV)**

The Spallation Neutron Source, ORNL, USA



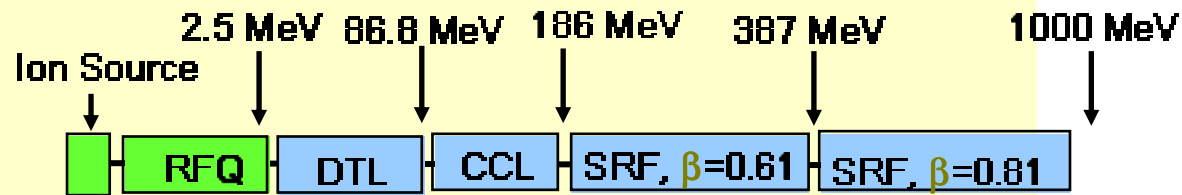
- The SNS construction project has been conclude in 2006
- At 1.4 MW it will be ~8x ISIS, the world's leading pulsed spallation source
- The peak neutron flux will be ~20-100x ILL
- SNS will be the world's leading facility for neutron scattering
- It will be a short drive from HFIR, a reactor source with a flux comparable to the ILL

SNS Accelerator Complex

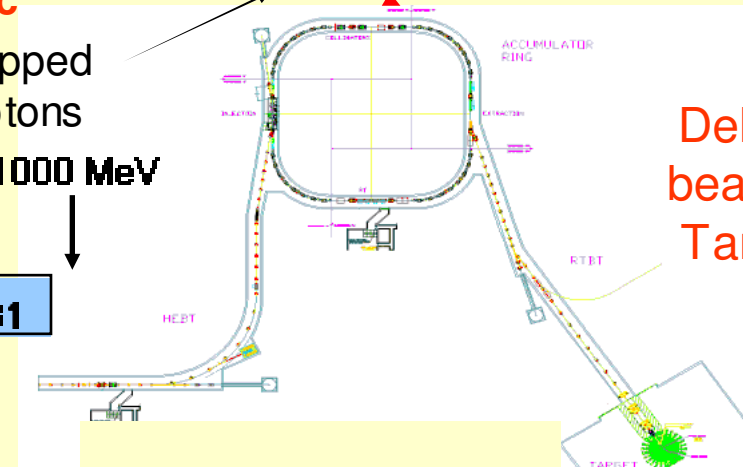
Front-End:
Produce a 1-
msec long,
chopped,
low-energy
H- beam

LINAC:
Accelerate
the beam to
1 GeV

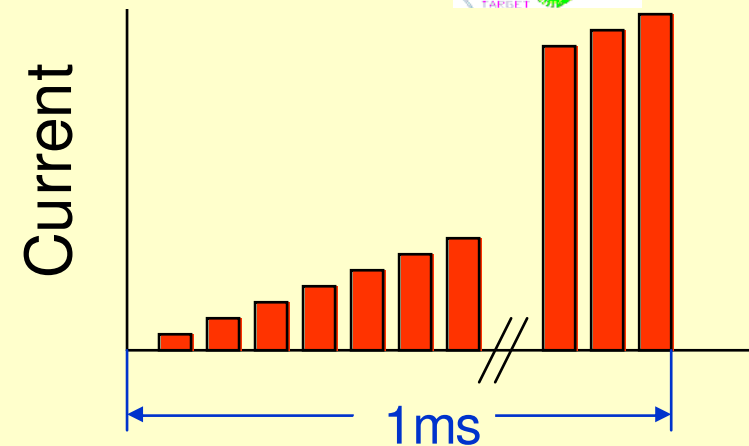
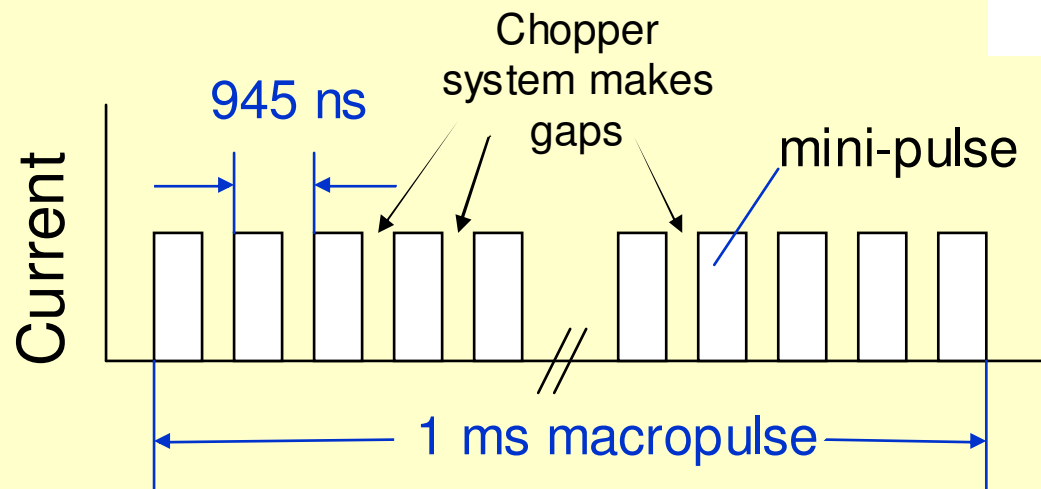
Accumulator Ring:
Compress 1 msec
long pulse to 700
nsec



H- stripped
to protons



Deliver
beam to
Target



The SNS Main Parameters

	Baseline	Upgrade
Kinetic energy, E_k [MeV]	1000	1300
Beam power on target, $P_{\max}$ [MW]	1.4	3.0
Chopper beam-on duty factor [%]	68	70
Linac beam macro pulse duty factor [%]	6.0	6.0
Average macropulse H- current [mA]	26	42
Peak Current from front end system	38	59
Linac average beam current [mA]	1.6	2.5
SRF cryo-module number (med-beta)	11	11
SRF cryo-module number (high-beta)	12	12 + 8 (+1 reserve)
Number of SRF cavities	33+48	33+80 (+4 reserve)
Peak gradient, E_p ($\beta=0.61$ cavity) [MV/m]	27.5 (+/- 2.5)	27.5 (+/- 2.5)
Peak gradient, E_p ($\beta=0.81$ cavity) [MV/m]	35 (+2.5/-7.5)	31
Ring injection time [ms] / turns	1.0 / 1060	1.0 / 1100
Ring rf frequency [MHz]	1.058	1.098
Ring bunch intensity [10^{14}]	1.6	2.5
Ring space-charge tune spread, ΔQ_{sc}	0.15	0.15
Pulse length on target [ns]	695	691

Linear Accelerator and RF

BNL, LANL and JLAB

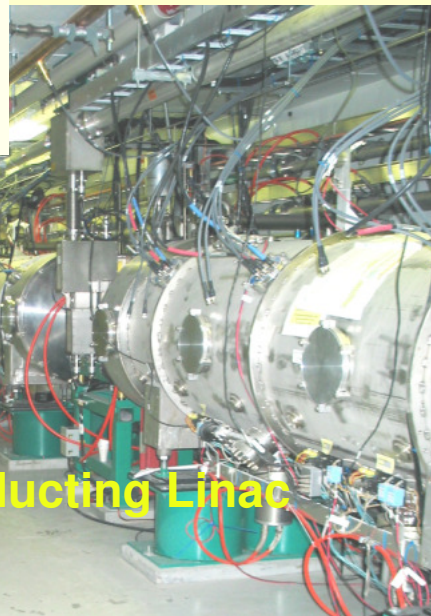
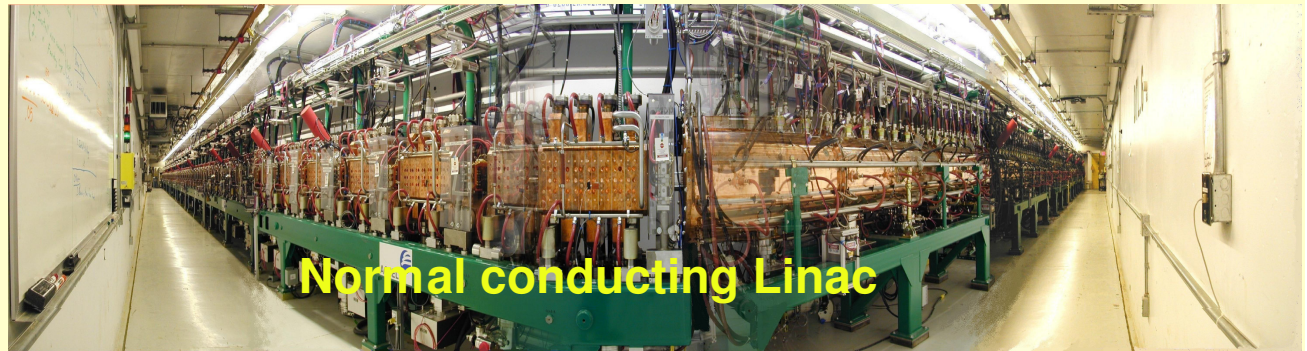
design:

- 1.4 MW, 1.0 GeV energy
- 38 mA peak current
- 1.6 mA average current
- 1 msec long macropulse
- 60 Hz repetition rate
- 6% beam duty factor (8% RF)

World's highest energy and highest power proton linac

powered by 92 klystrons, driven by 14 solid-state modulators

and largest klystron and modulator installation in the world!



Performance Limitations

Beam Losses

- The SNS is a loss-limited accelerator; losses must be kept < 1 W/m to limit residual activation
- Losses in most of the accelerator complex are in line with expectations
- We measure higher than desired losses in the Ring Injection Region:
 - An intensive program of measurements and simulations has revealed weaknesses that are being addressed in this maintenance period

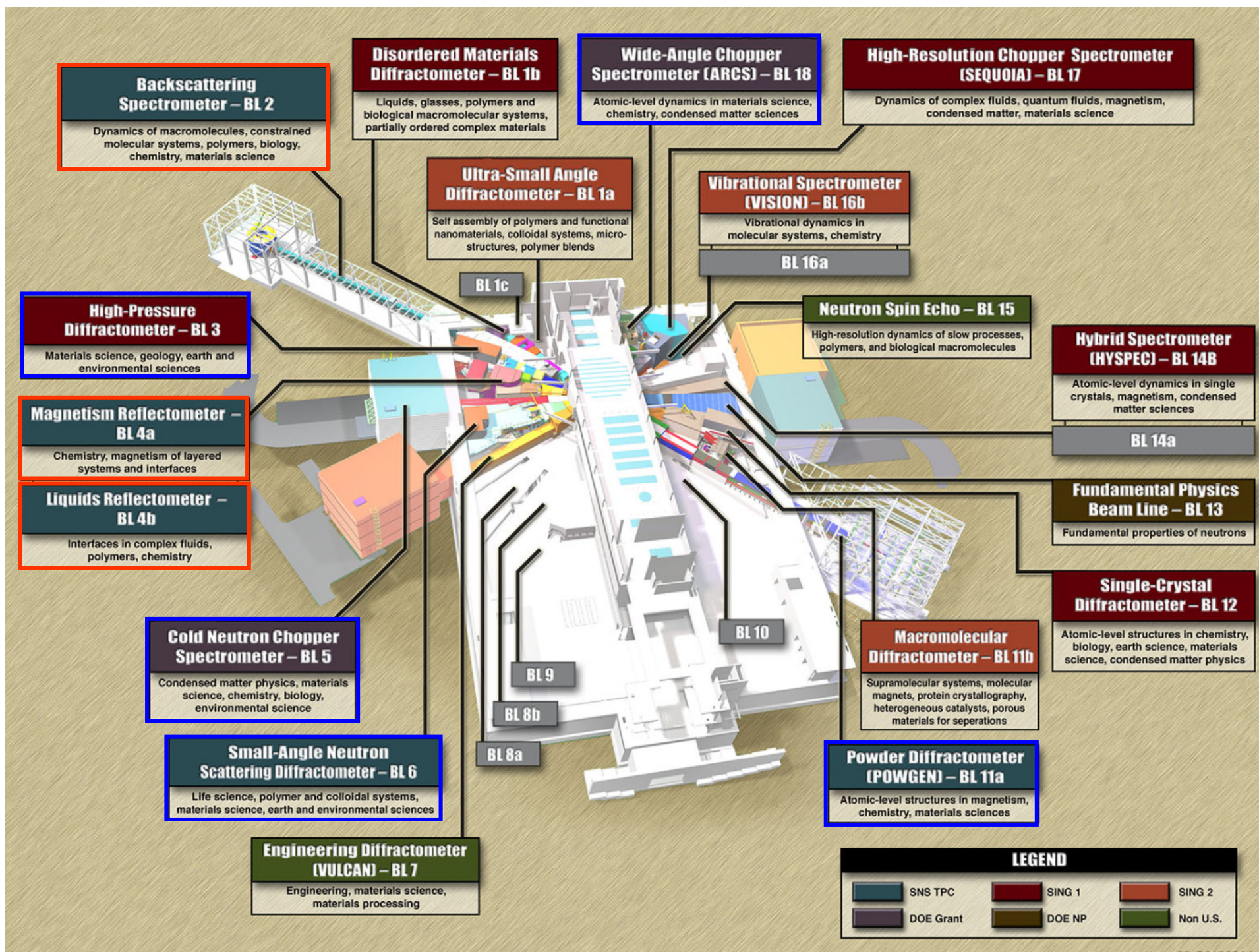
Superconducting Linac

- We are operating with 11 unpowered SC cavities (out of 81), for a variety of reasons, delivering a beam energy of 890 MeV
- We are making use of the inherent flexibility in the SCL design to “tune around” unpowered cavities
- We are establishing cryomodule repair, maintenance and testing capabilities on-site

Reliability

- Beam chopper systems, modulators, ion source, cryogenic moderator refrigerator

- The SNS is now an operating facility- highest energy proton linac
- Routine operation at 60 kW for neutron production – 15 Hz, 890 MeV
- Achieved 90 kW in demonstration run, making rapid progress toward full design capability
- This performance ramp is expected to take 3 years
- Initial user program begins this summer, expect full user program the following year



J-PARC Facility Layout

J-PARC
at Tokai, JAEA Site

Joint Project between KEK and JAEA

Materials and Life Science Experimental
Facility (Neutron & Muon)

Hadron Beam Facility

Nuclear
Transmutation

500 m

Neutrino to
Kamiokande

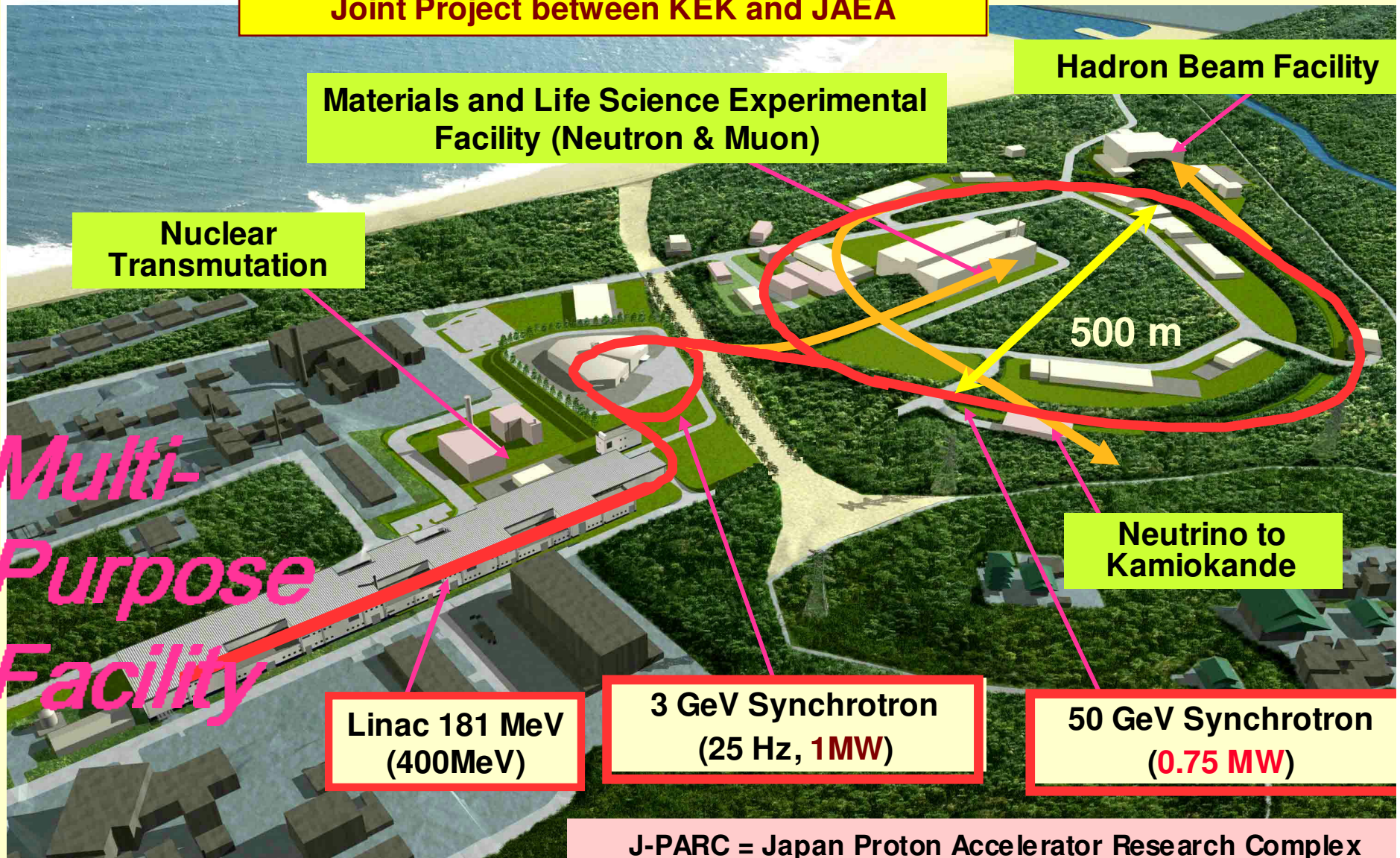
Linac 181 MeV
(400MeV)

3 GeV Synchrotron
(25 Hz, 1MW)

50 GeV Synchrotron
(0.75 MW)

J-PARC = Japan Proton Accelerator Research Complex

*Multi-
Purpose
Facility*



J-PARC LINAC

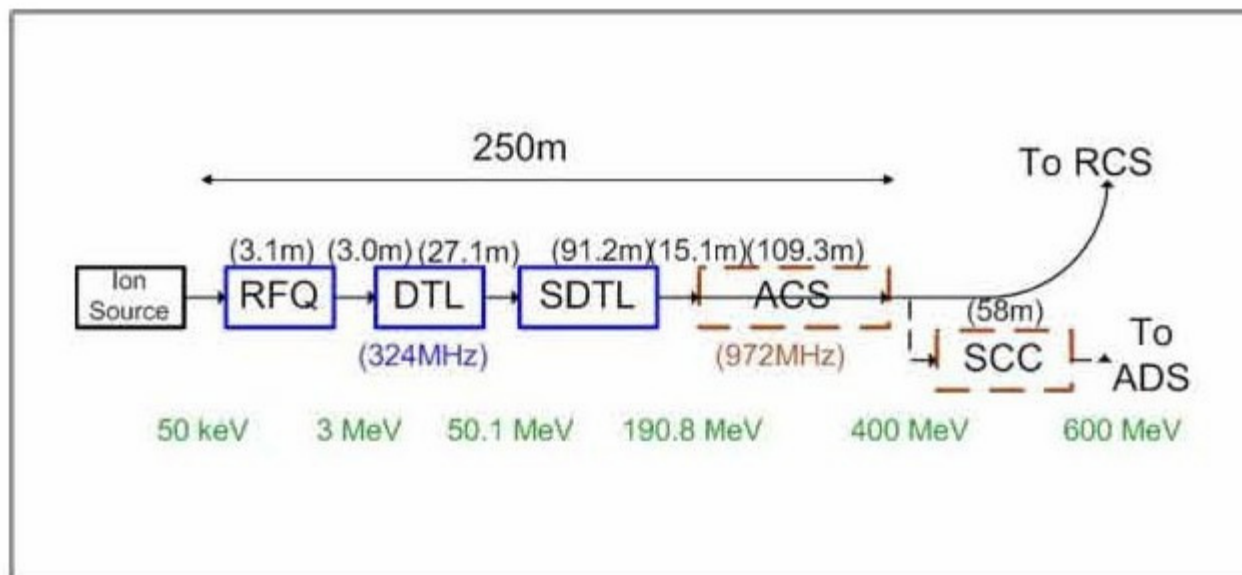
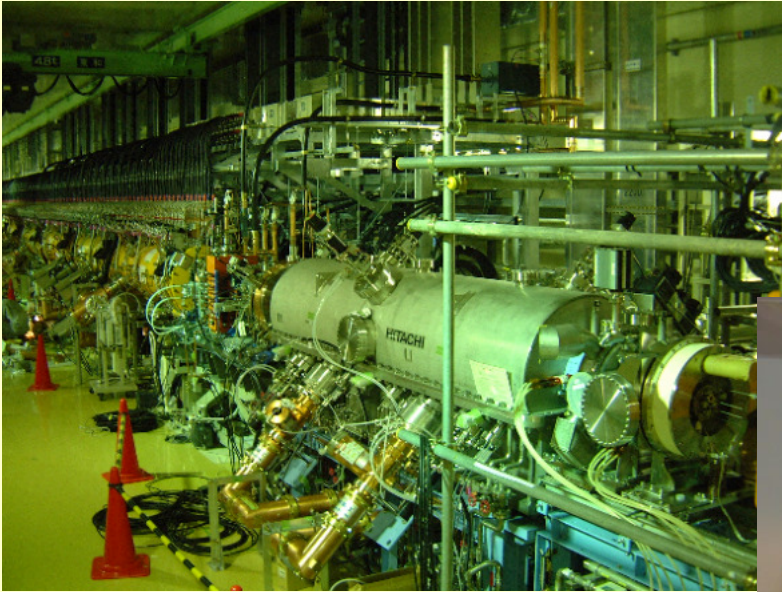


Figure 2: Scheme of J-PARC Linac.

2007 – Linac commissioning, 2008 – 3 GeV injection to MLF
and 50 GeV MR

2009 – operation 50-100 kW, 2012 – 1 MW

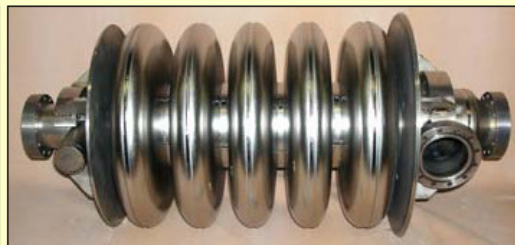
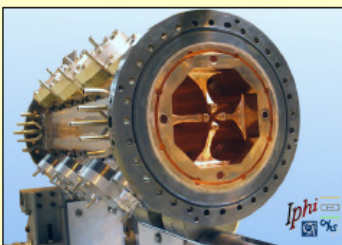
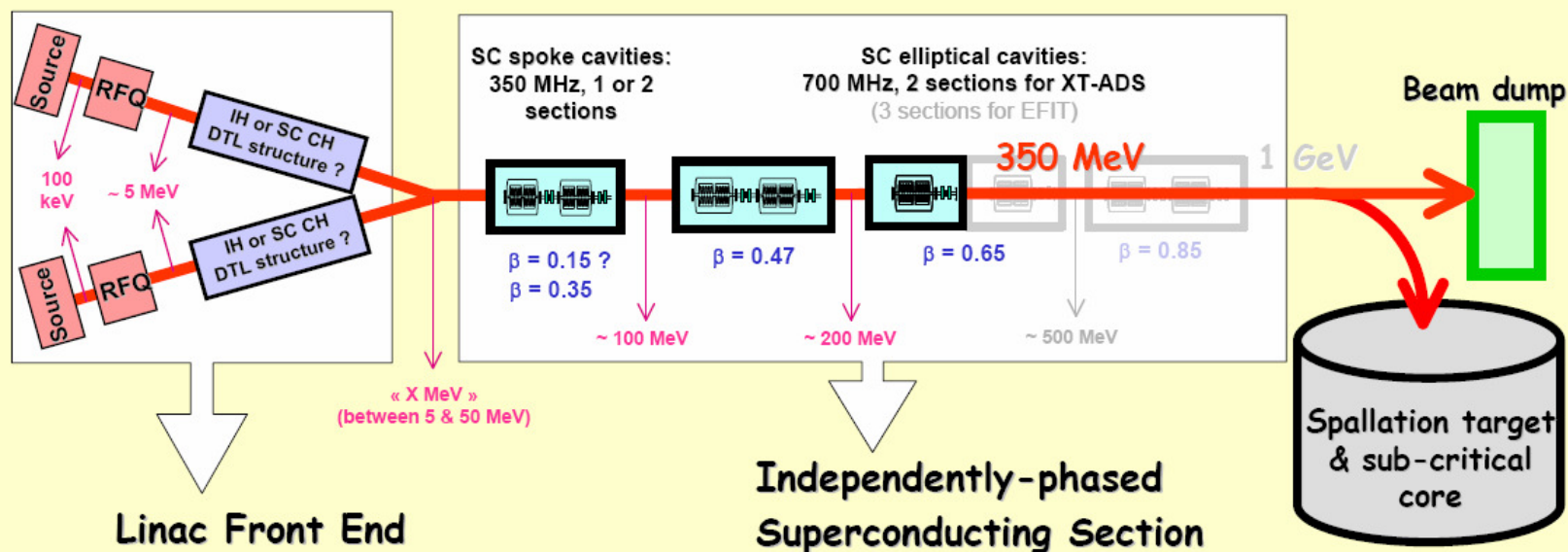


ADS accelerator reference scheme

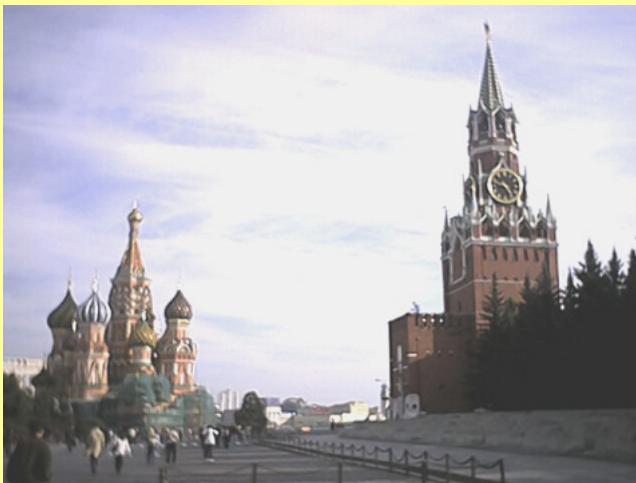
PDS-XADS



Superconducting linac: Highly modular and upgradeable (same concept for prototype & industrial scale) ; Excellent potential for reliability ; High efficiency (optimized operation cost)



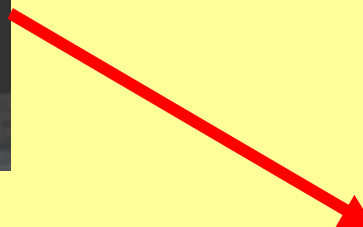
МОСКВА



ТРОИЦК Моск. обл



20 km



ММФ



1 km



**И
Я
Н
И
Р**

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**INSTITUTE
FOR NUCLEAR RESEARCH**

Структурная схема линейного ускорителя Московской мезонной фабрики

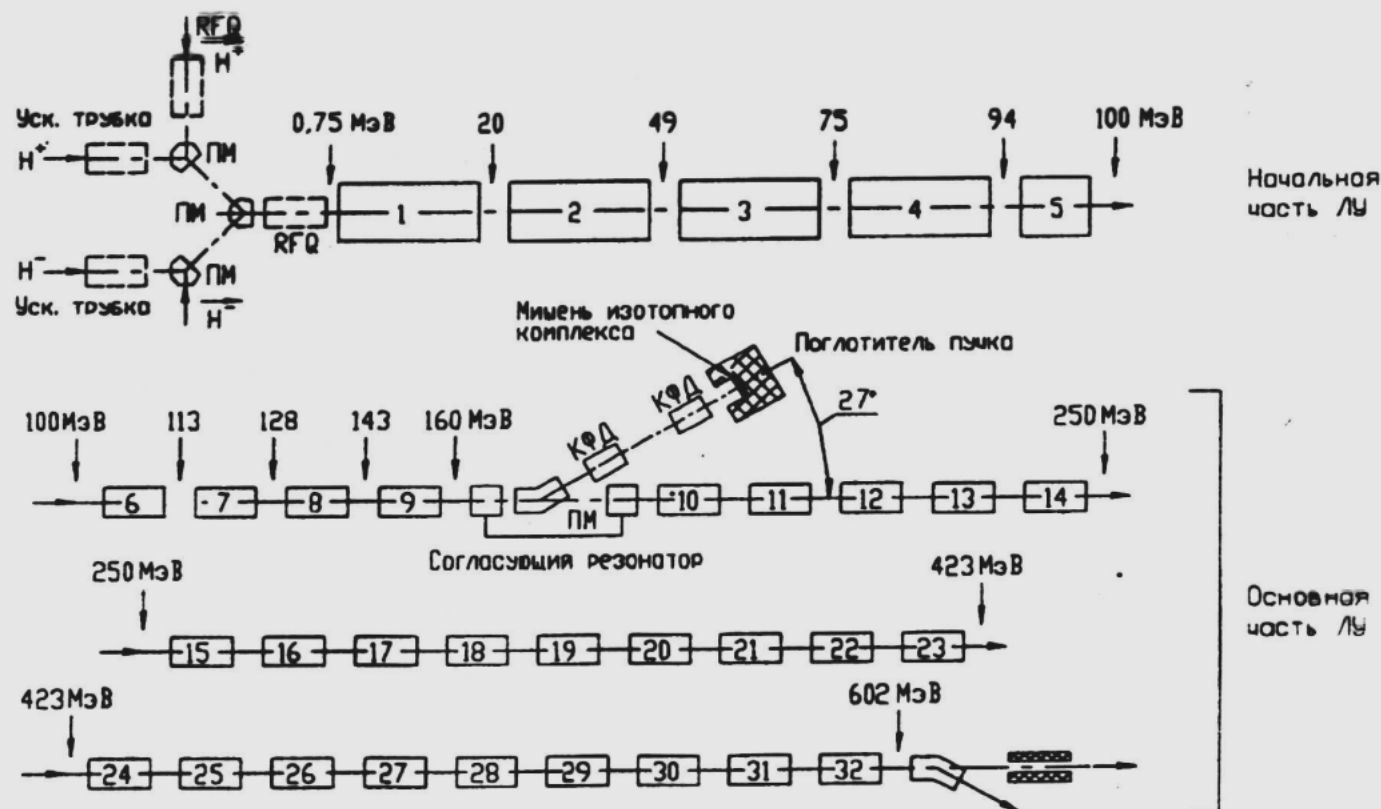
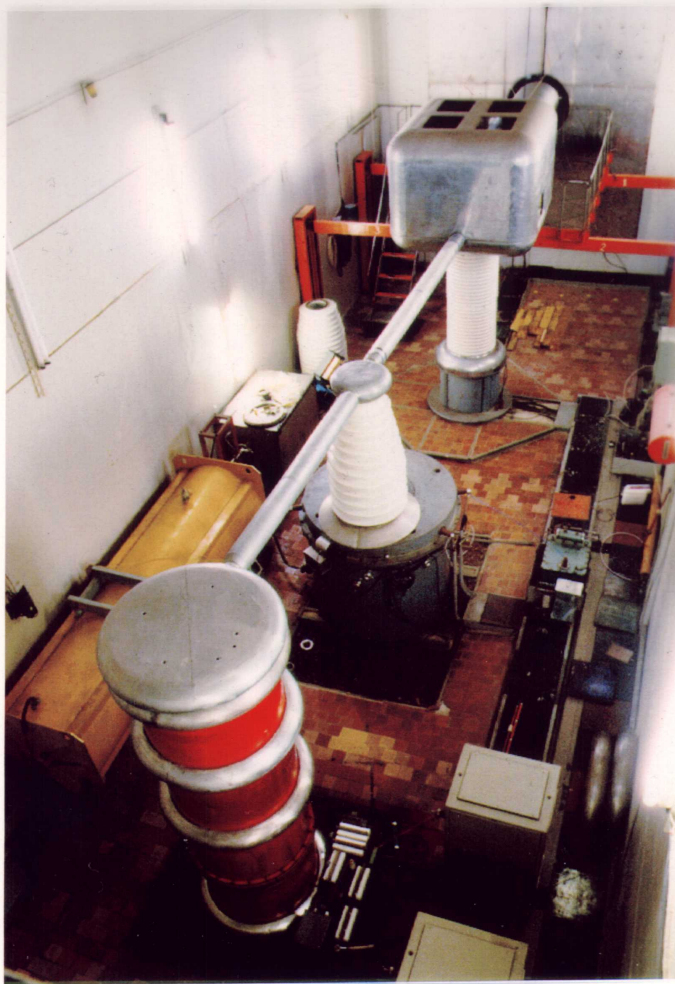


Схема ЛУММФ. 5 структурных секторов.

1-й сектор — инжекторный комплекс, 2-й сектор — начальная часть ЛУ, 3-й, 4-й, 5-й секторы — основная часть ЛУ

Инжектор протонов ЛУ ММФ



Инжектор протонов

На заднем плане перед стальной защитной шторкой расположена ускорительная трубка. Куб на изолирующей колонне содержит систему питания дуоплазматрона (источника протонов). В середине – импульсный трансформатор 750 кВ. На переднем плане – стойка стабилизации вершины высоковольтного импульса (красная колонна)



Начальная часть ЛУ

20 МэВ

49 МэВ

74 МэВ

94 МэВ

100 МэВ

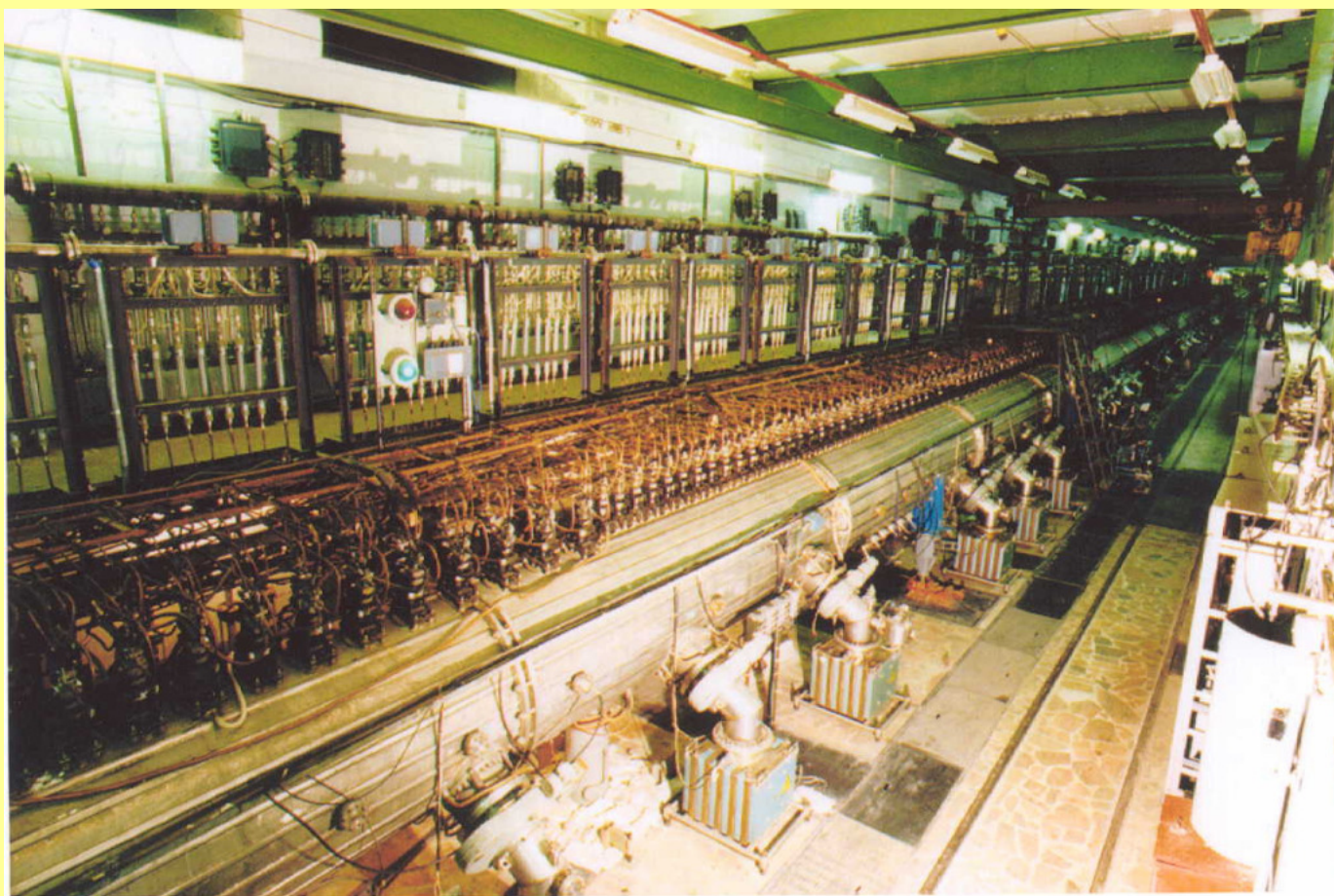
Рез. 1

Рез. 2

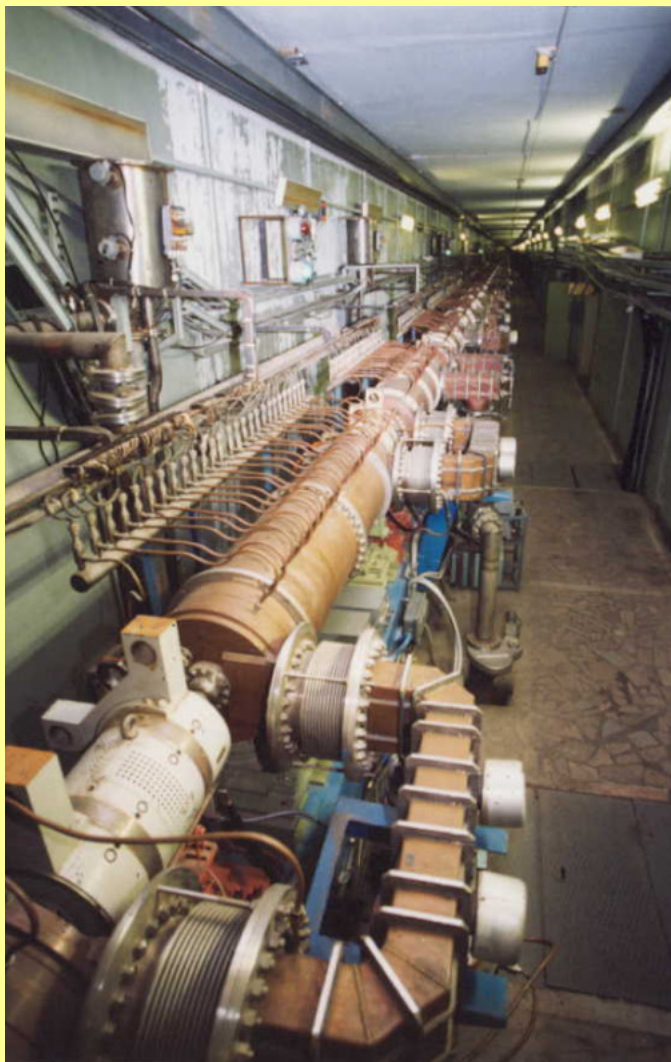
Рез. 3

Рез. 4

Рез. 5



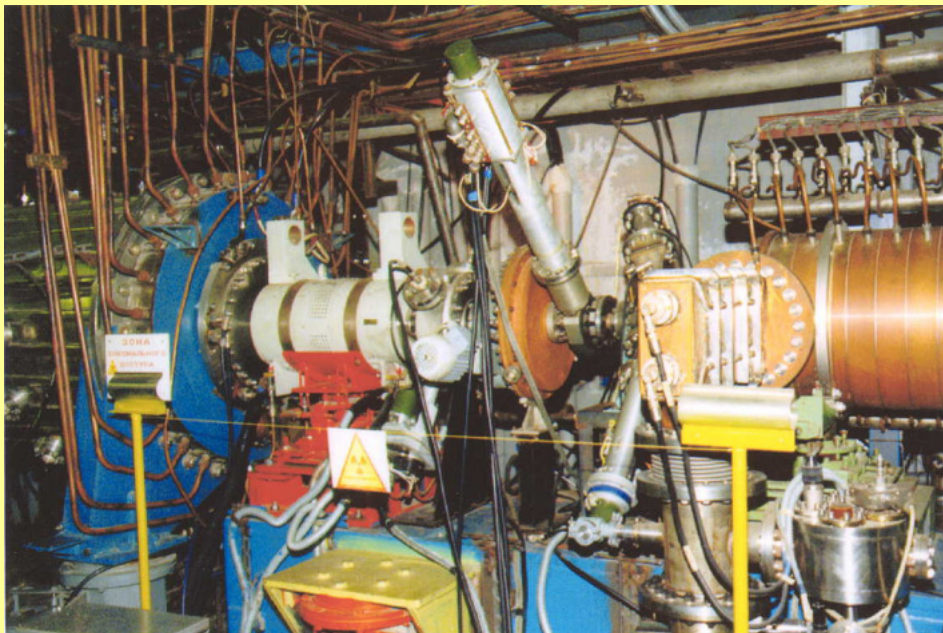
Основная часть ускорителя



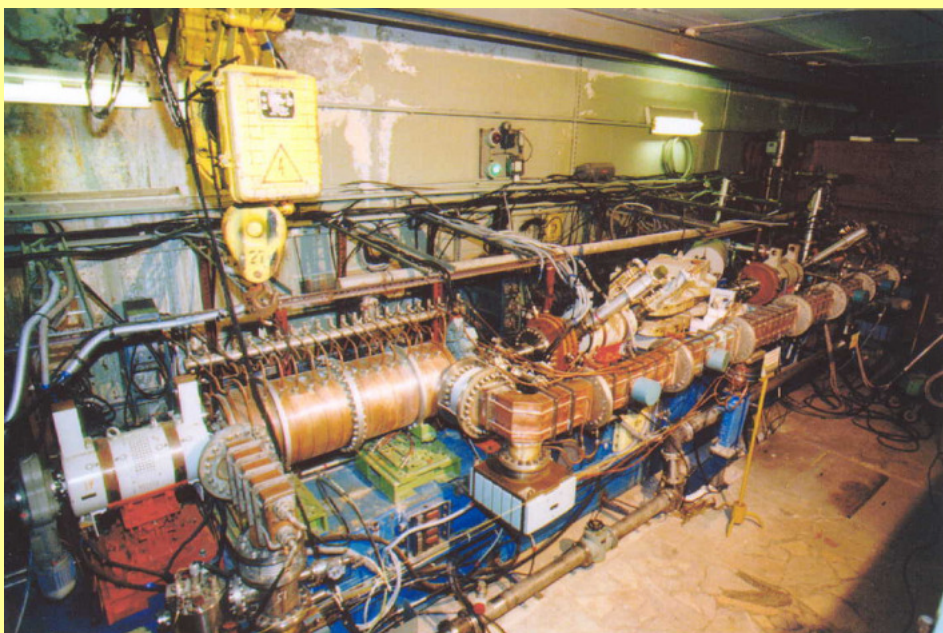
**Ускоряющие резонаторы
основной части ускорителя**



**Галерея ВЧ питания основной
части ускорителя**



**Участок перехода из
начальной в основную часть
ускорителя (100 МэВ)**



**Участок промежуточного
вывода при энергии 160 МэВ**

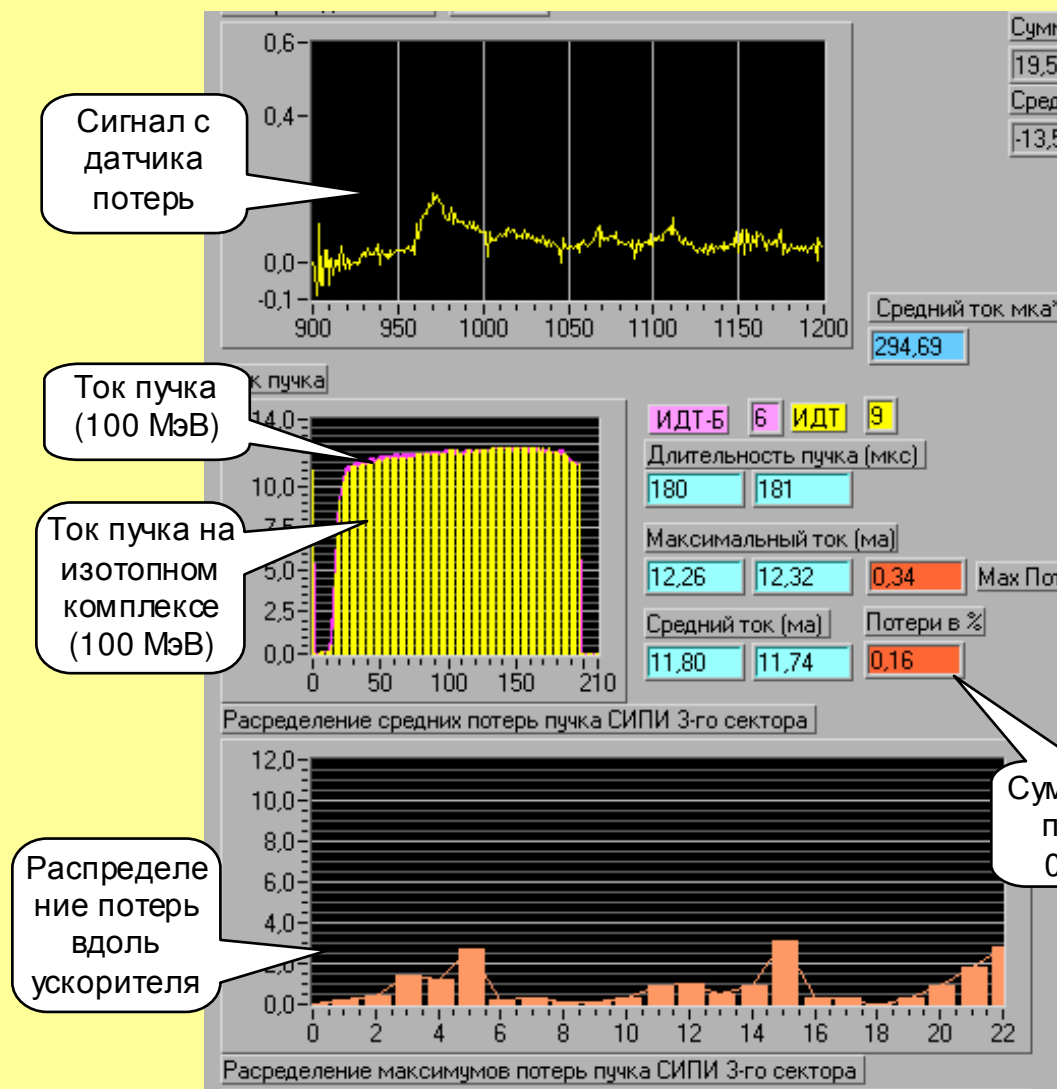
Центральный пульт ускорителя



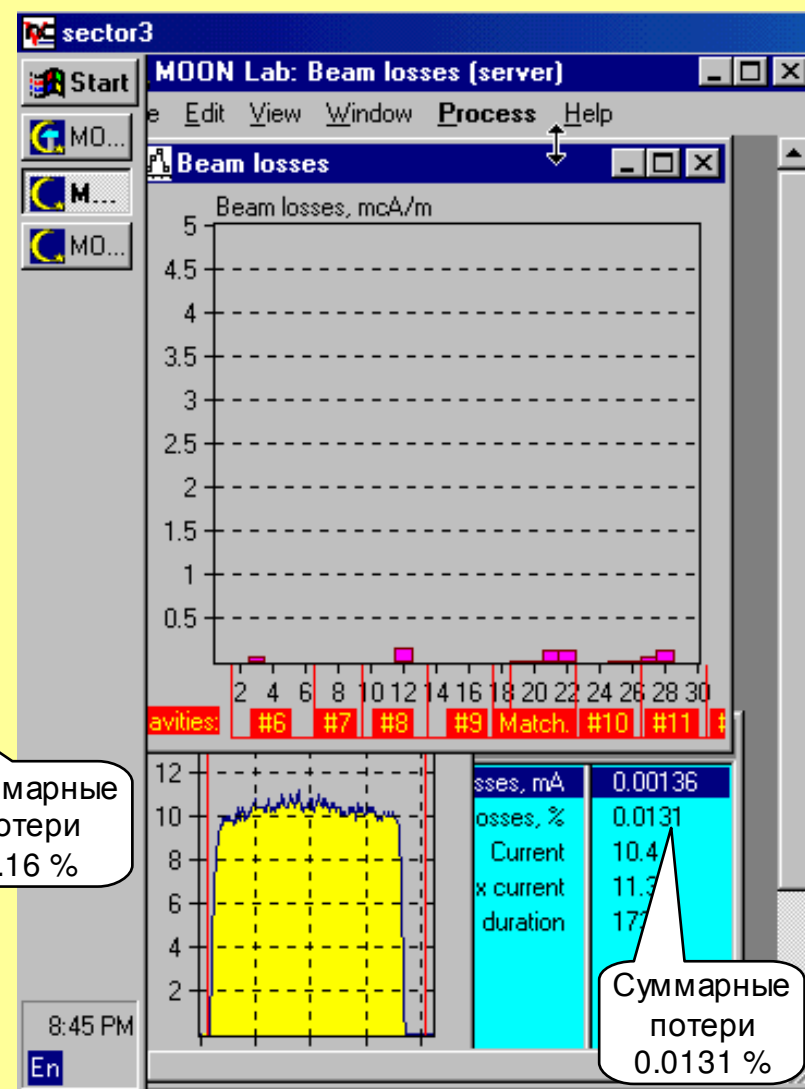
22 10 2003

№	Параметр	Проектное значение	Достигнутое значение	Ноябрь 2004	Декабрь 2006	Перспектива
1	Ускоряемые частицы	H ⁺ , H ⁻	H ⁺	H ⁺	H ⁺ , H ⁻	H ⁺ , H ⁻
2	Энергия, МэВ	600	502	209	209	502
3	Импульсный ток, мА	50	16	12	12	16
4	Частота повторения, Гц	1÷100	1 ÷ 50	1 ÷ 50	1 ÷ 50	1÷100
5	Длительность импульса, мкс	100	0,5 ÷ 200	0,5 ÷ 170	0,25 ÷ 200 (2 импульса)	0,25 ÷ 170 (2 импульса)
6	Средний ток, мкА	500	50 (209 МэВ) 150 (160 МэВ)	50 (209 МэВ) 150 (160 МэВ)	50 (209 МэВ) 150 (160 МэВ)	300

Потери пучка – критерий работы ускорителя



Работа на изотопный комплекс



Работа на экспериментальный комплекс

Работа ускорителя

1993 год - Начало регулярной работы на физические и прикладные задачи

С 1993 ÷ апрель 2007 проведено **74** сеанса общей продолжительностью **30970** часов

В том числе:

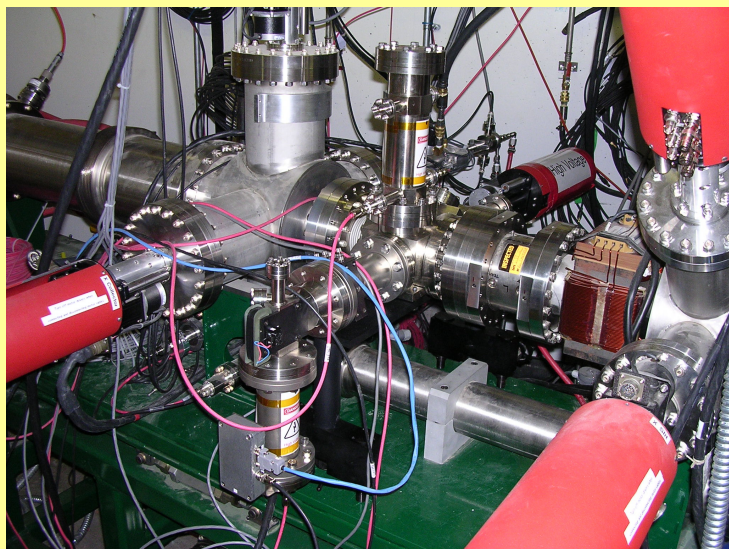
- 1999** год – **2300** часов (5 сеансов);
- 2000** год – **1800** часов (8 сеансов);
- 2001** год – **2400** часов (7 сеансов);
- 2002** год – **1400** часов (6 сеансов);
- 2003** год – **2400** часов (7 сеансов);
- 2004** год – **2200** часов (7 сеансов);
- 2005** год – **1900** часов (6 сеансов);
- 2006** год – **2250** часов (7 сеансов);
- 2007** год апрель – **1220** часов (4 сеанса)

Участие ИЯИ РАН в сооружении и запуске ускорителя нейтронного источника SNS ORNL

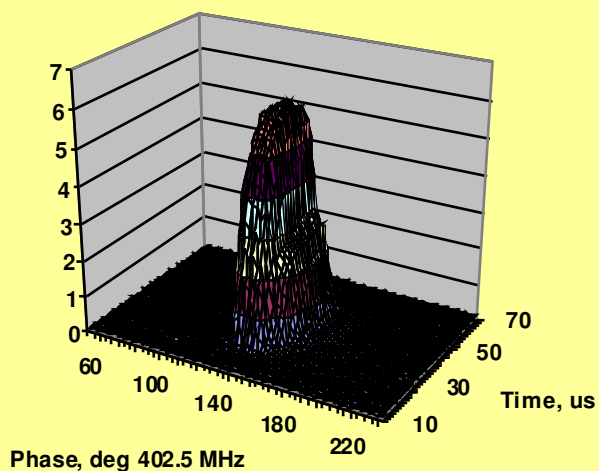
За последние пять лет всего выполнены работы по 15 договорам, 3 договора выполняются в настоящее время.

Основные направления работ:

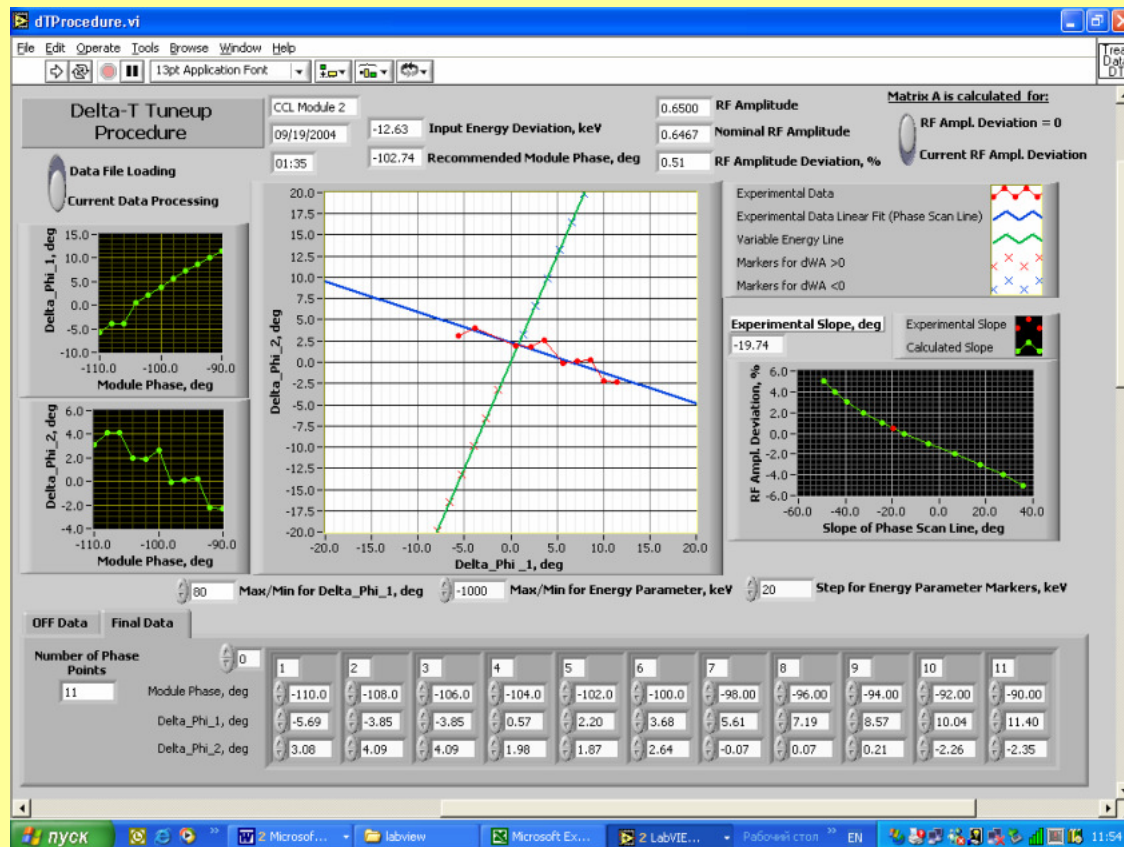
- 1. Разработка, изготовление и наладка измерителей продольных характеристик ускоренного пучка.**
- 2. Разработка и реализация времяпролетной процедуры установки параметров укоряющих полей (ΔT-процедура).**
- 3. Участие в настройке ускорителя.**
- 4. Разработка математических моделей систем автоматического регулирования собственных частот укоряющих резонаторов, настройка и оптимизация работы систем.**
- 5. Участие в разработке и реализации системы измерения потерь ионов в ускорителе, в том числе**
 - Моделирование и расчет потоков вторичных частиц вследствие потерь пучка в ускорителе;**
 - Разработка, изготовление и наладка на ускорителе нейтронных детекторов для системы потерь.**



Анализатор фазового спектра на ускорителе SNS



Эволюция формы сгустков ускоренного пучка в течение импульса на ускорителе SNS



Пример реализации ΔT -процедуры на ускорителе SNS

Возможности модернизации

Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999

UPGRADE STUDY OF INR PROTON LINAC FOR PRODUCTION OF 3 MW BEAM

L. V. Kravchuk[†] and P. N. Ostroumov

Institute for Nuclear Research RAS, 117312, Moscow

Abstract

There are many proposals for the construction of proton linacs with beam power up to 200 MW for various applications (energy production, nuclear waste

purpose is to confirm beam performance parameters, demonstrate an operation of SRF cavities and identify component failure modes.

The main task for the 3 MW linac is the development of transmutation technologies. After this problem will be successfully solved, the linac can be switched to the

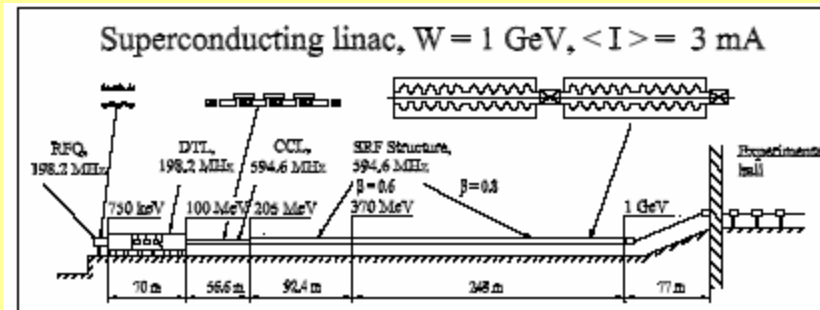
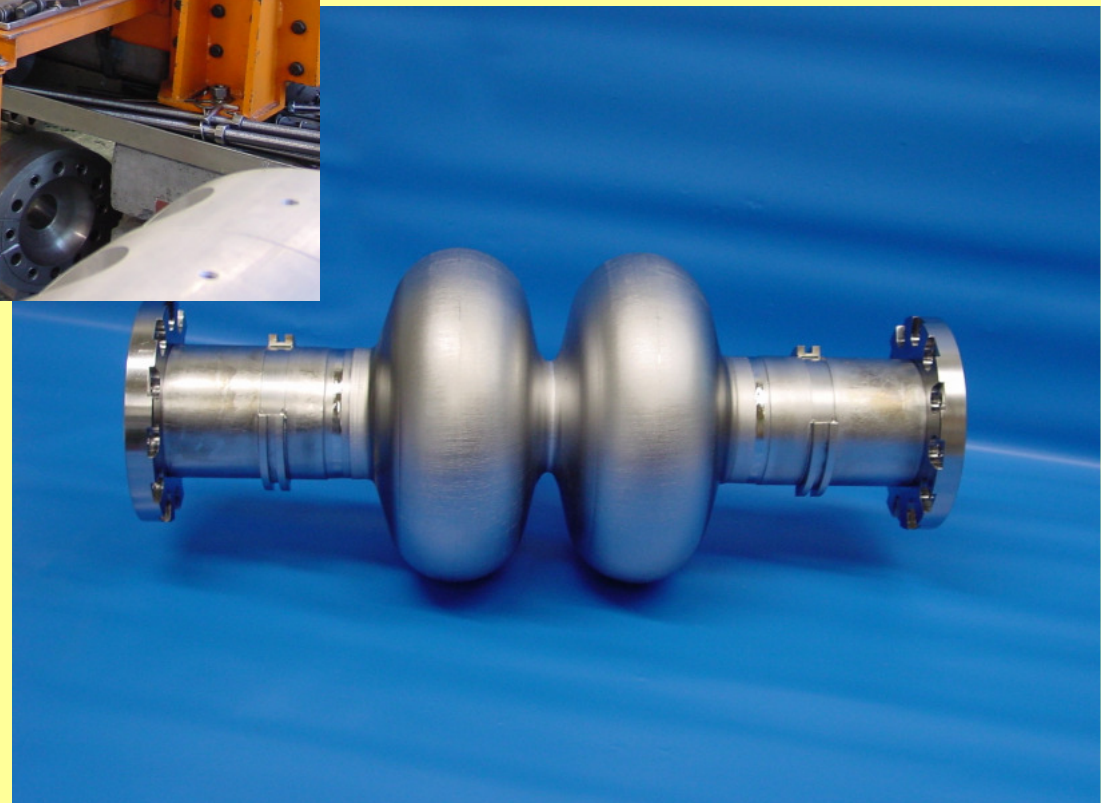


Figure 2: General layout of the 3 MW linac to be located in the MMF.

Технология сверхпроводящих резонаторов

DESY - ИЯИ



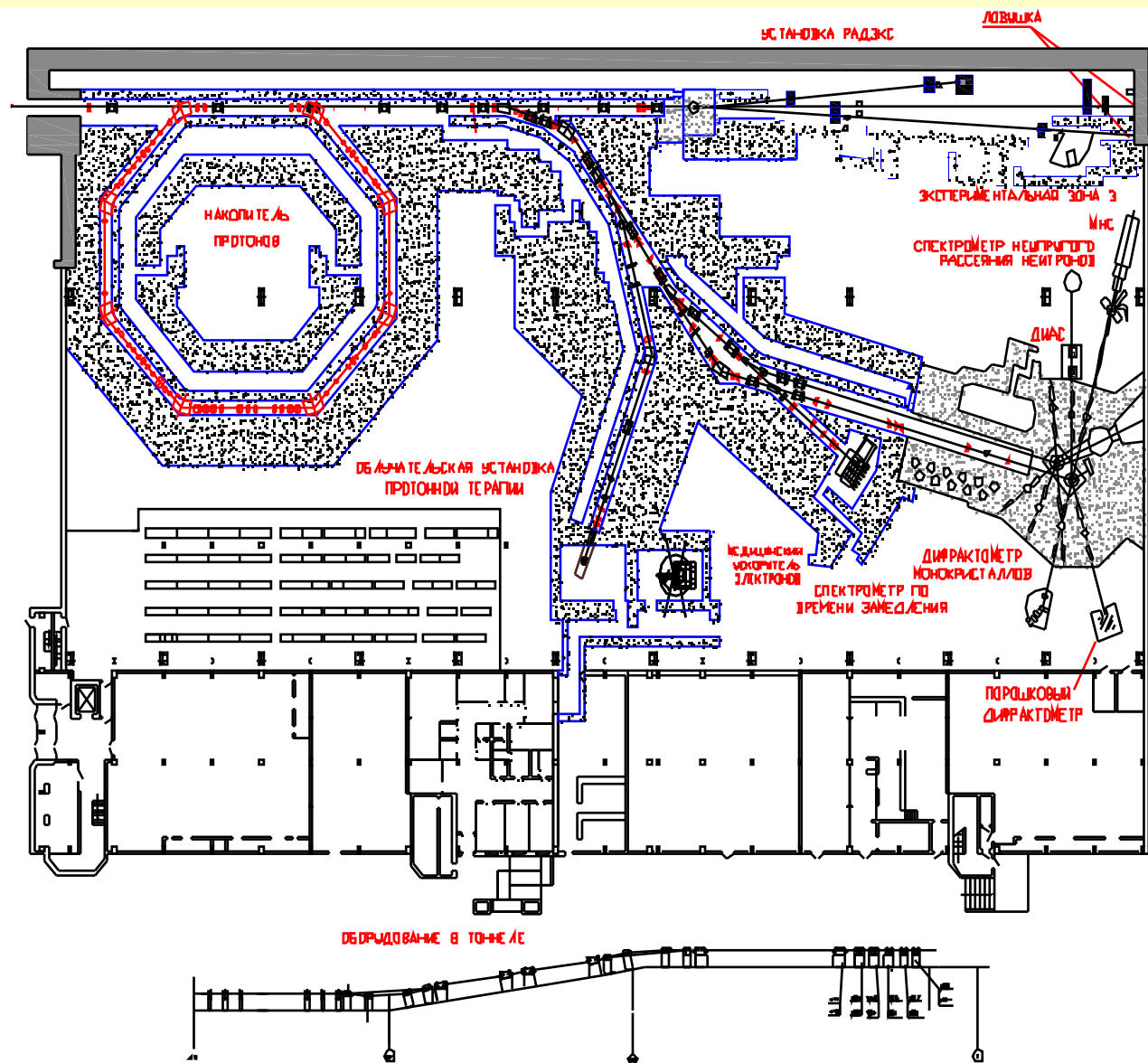
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ММФ





План ЭКМФ

Отдел Экспериментального Комплекса

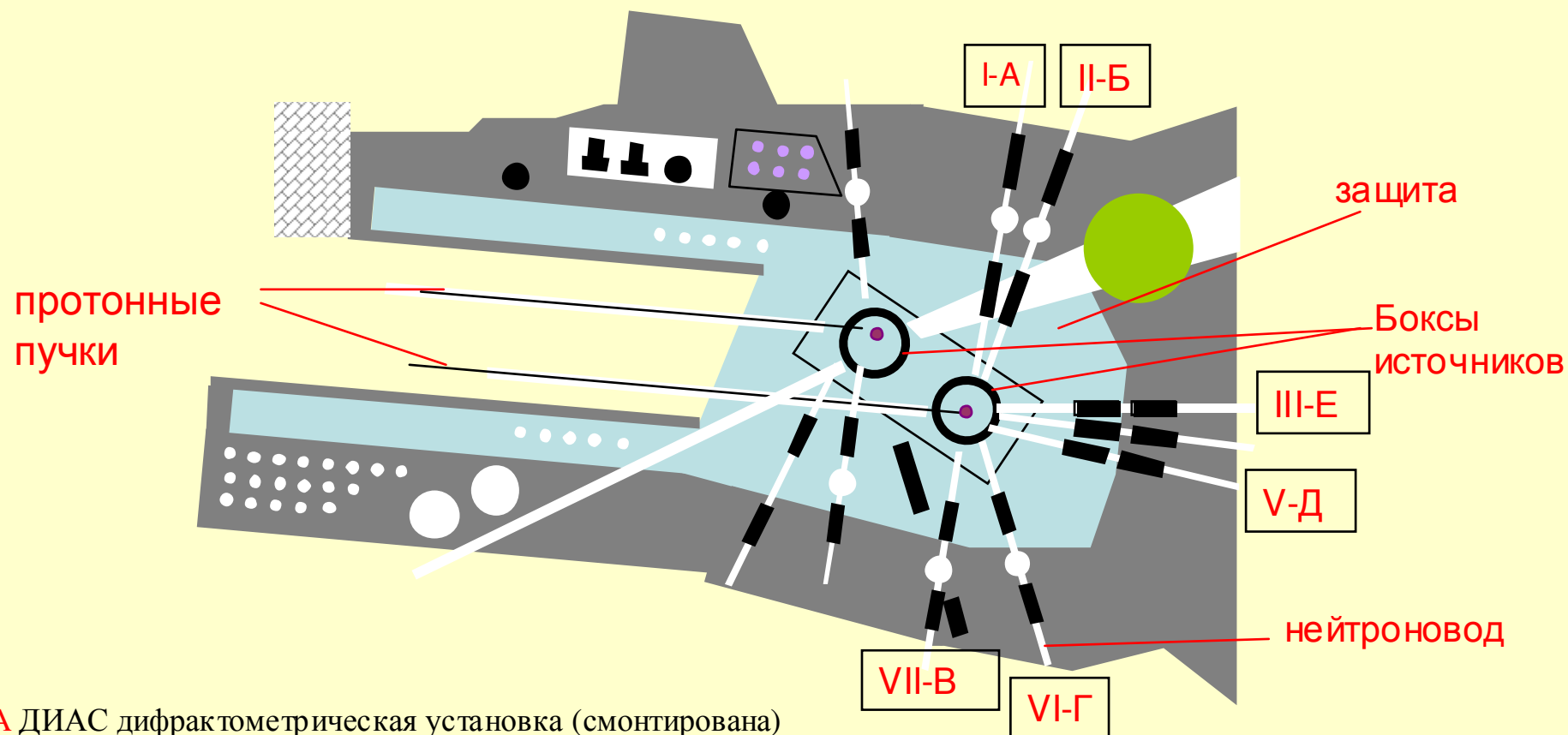




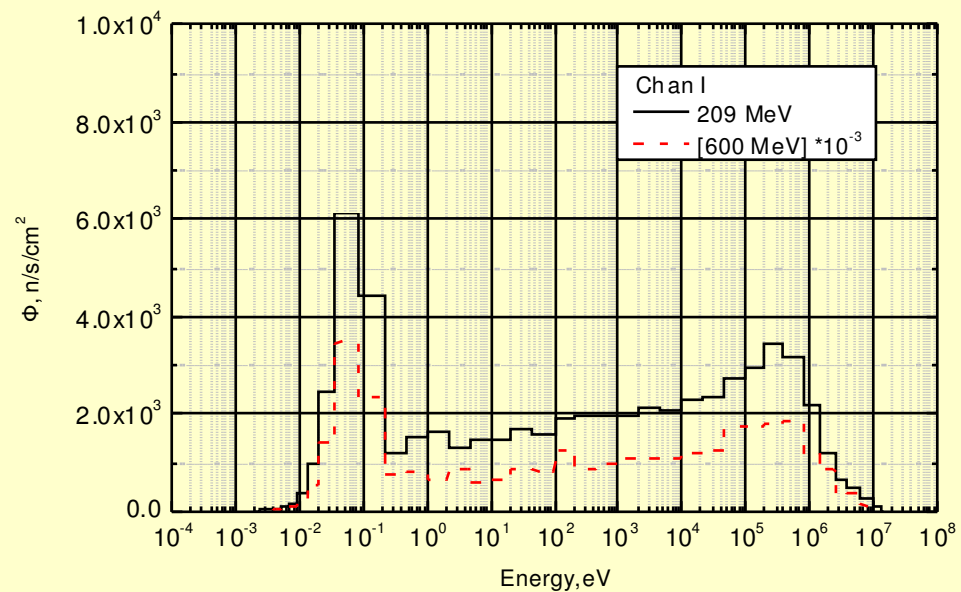
Источник нейтронов ИН-0.6



Схема источника нейтронов ИН-06



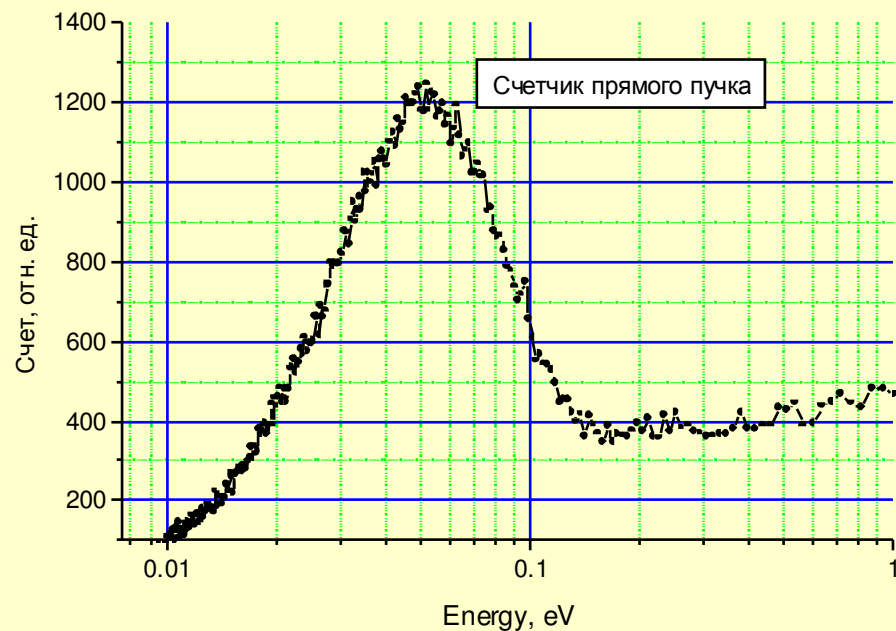
- А** ДИАС дифрактометрическая установка (смонтирована)
- Б** МНС многофункциональный спектрометр (частично смонтирована).
- В** Рефлектометр «Горизонт» (создается).
- Г** нейтроннофизическая установка «Геркулес» создана.
- Д** спектрометр неупругого рассеяния прямой геометрии (проект).
- Е** дифрактометр малоуглового рассеяния (проект).



Расчет спектров на выходе
нейтронного канала I установка ДИАС

209МэВ (1мкА)
600МэВ (50мкА)

Экспериментальные данные, полученные в сеансе XII.2004



Положение максимума
 $E \sim 0.05$ эВ

Спектрометр по времени замедления нейтронов в свинце СВЗ-100 (~120 тонн)

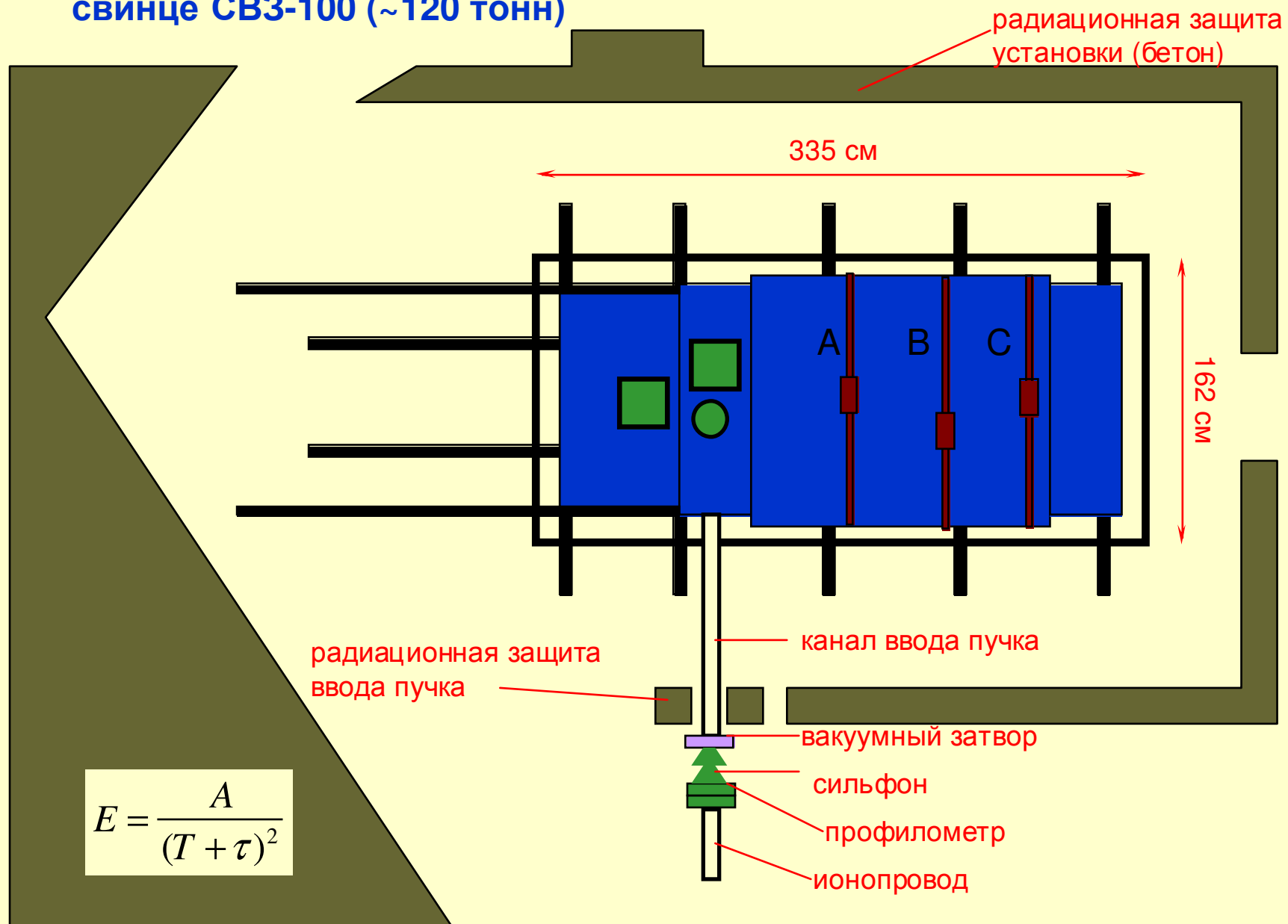
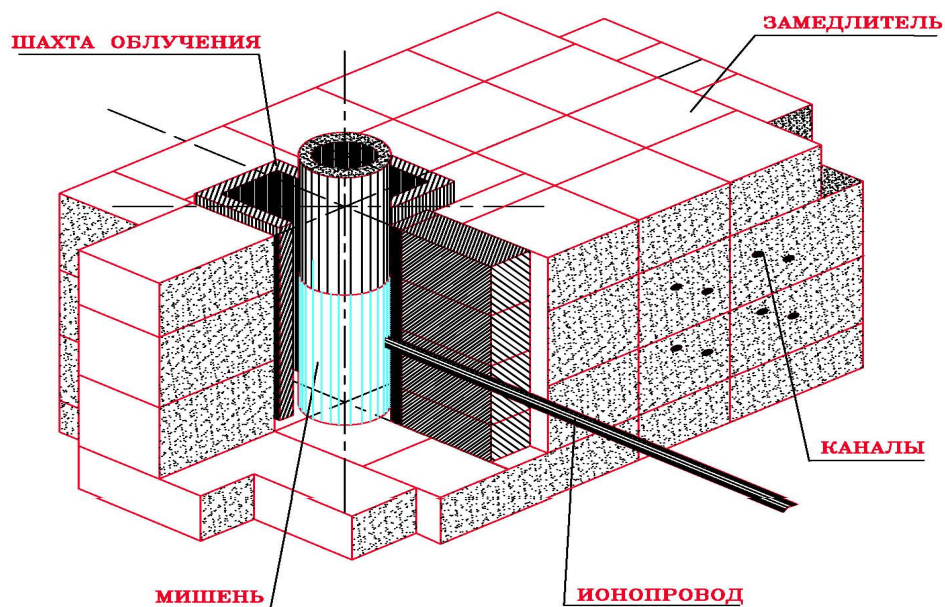


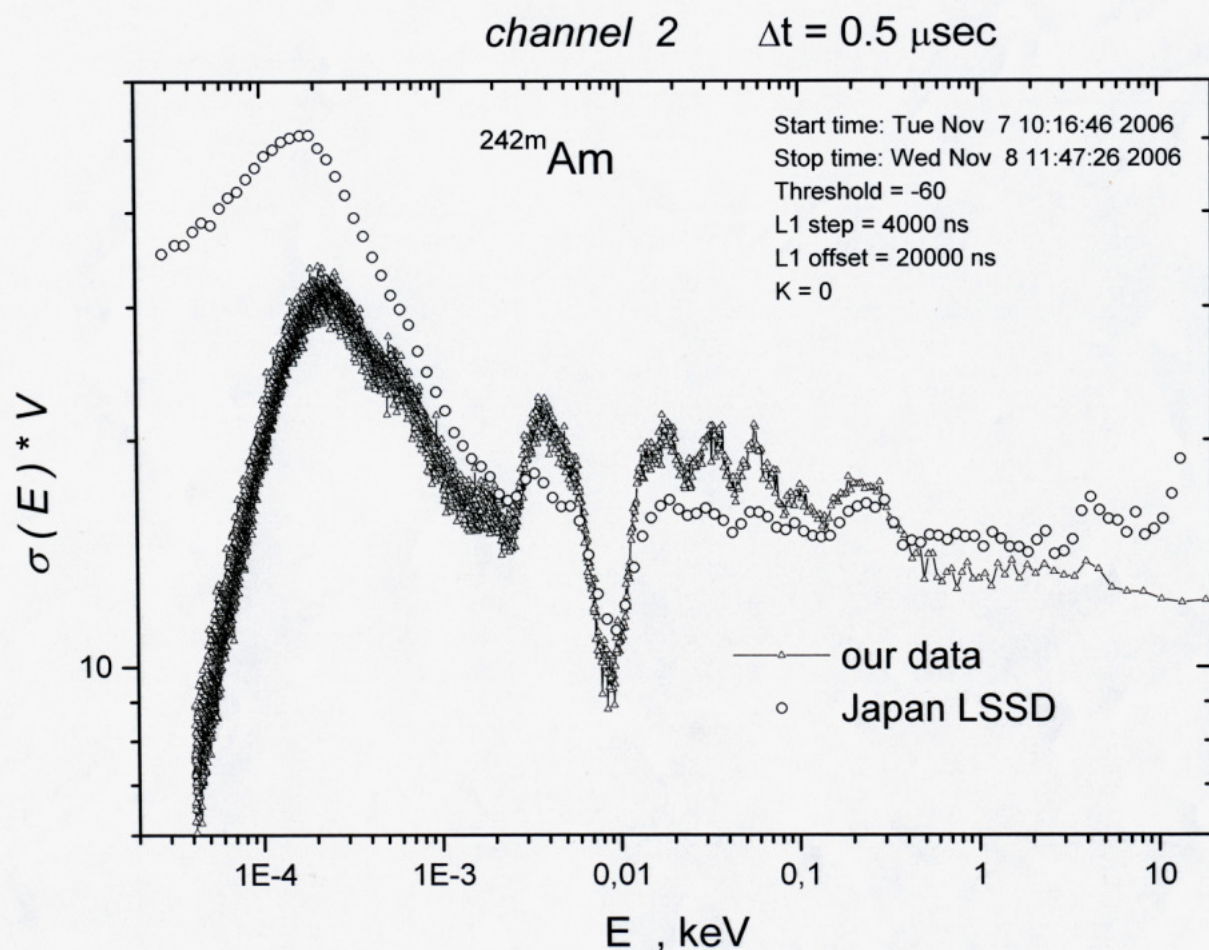


Схема спектрометра по времени замедления нейтронов в свинце

СПЕКТРОМЕТР ПО ВРЕМЕНИ ЗАМЕДЛЕНИЯ
НЕЙТРОНОВ В СВИНЦЕ
(БОЛЬШОЙ "КУБ", $P \sim 120$ ТОНН)



Данные измерений (ноябрь 2006 г.) на *спектрометре по времени замедления в свинце* (СВЗ-100) сечений деления долгоживущих актинидов, необходимых для решения экологических проблем

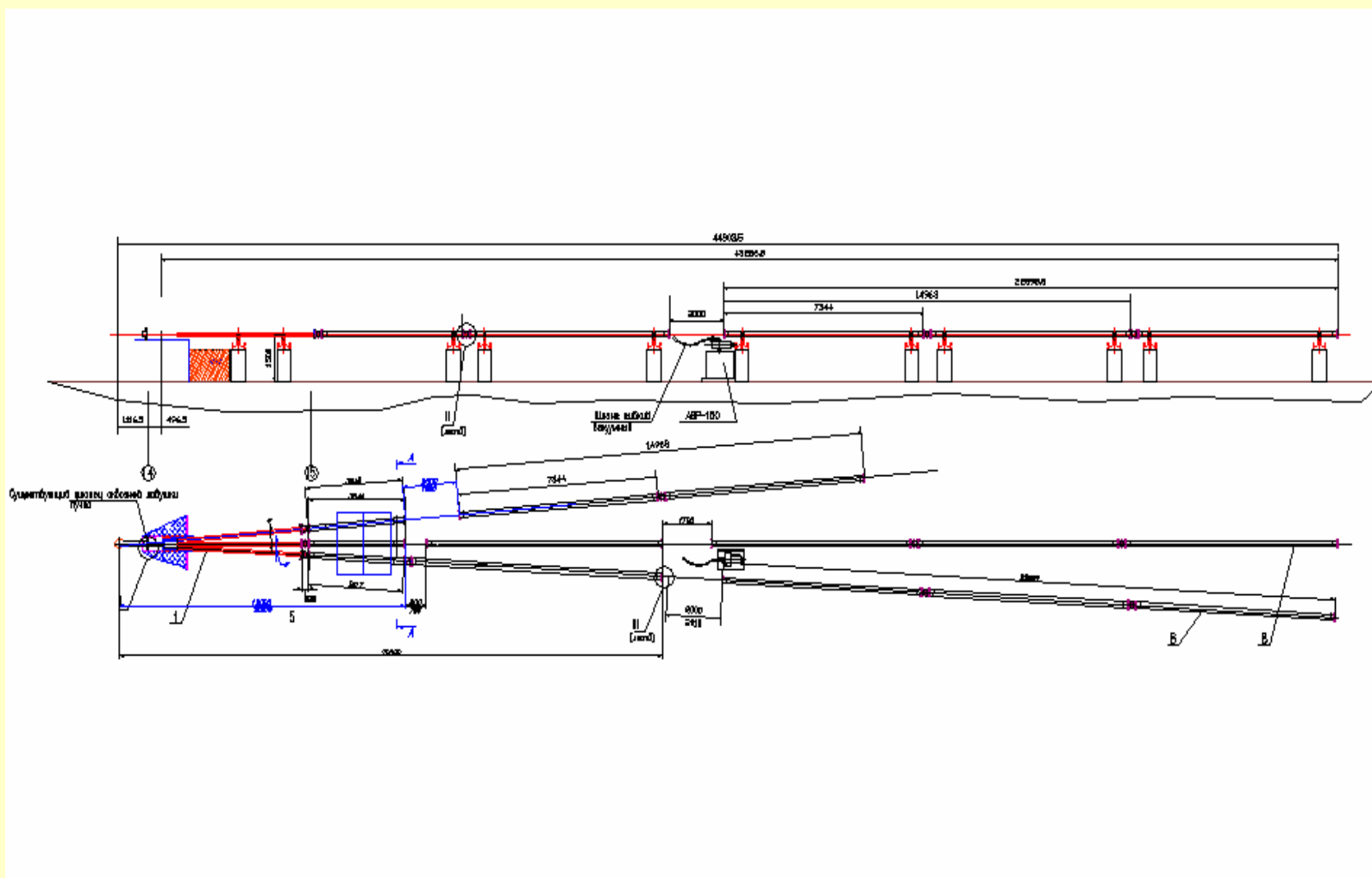


- Сечения деления метастабильного долгоживущего Америция ^{242}m , полученные на спектрометрах СВЗ в Японии и на СВЗ-100 в ноябре 2006г.

- Видно существенно лучшее разрешение на СВЗ-100, обусловленное высочайшей чистотой свинца – 99,996%.



Схема времяпролетных каналов (установка РАДЭКС)



ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИНГЛЕТНОЙ ДЛИНЫ nn-РАССЕЯНИЯ ИЗ ДАННЫХ О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В КОНЕЧНОМ СОСТОЯНИИ В РЕАКЦИИ $nd \rightarrow pnn$

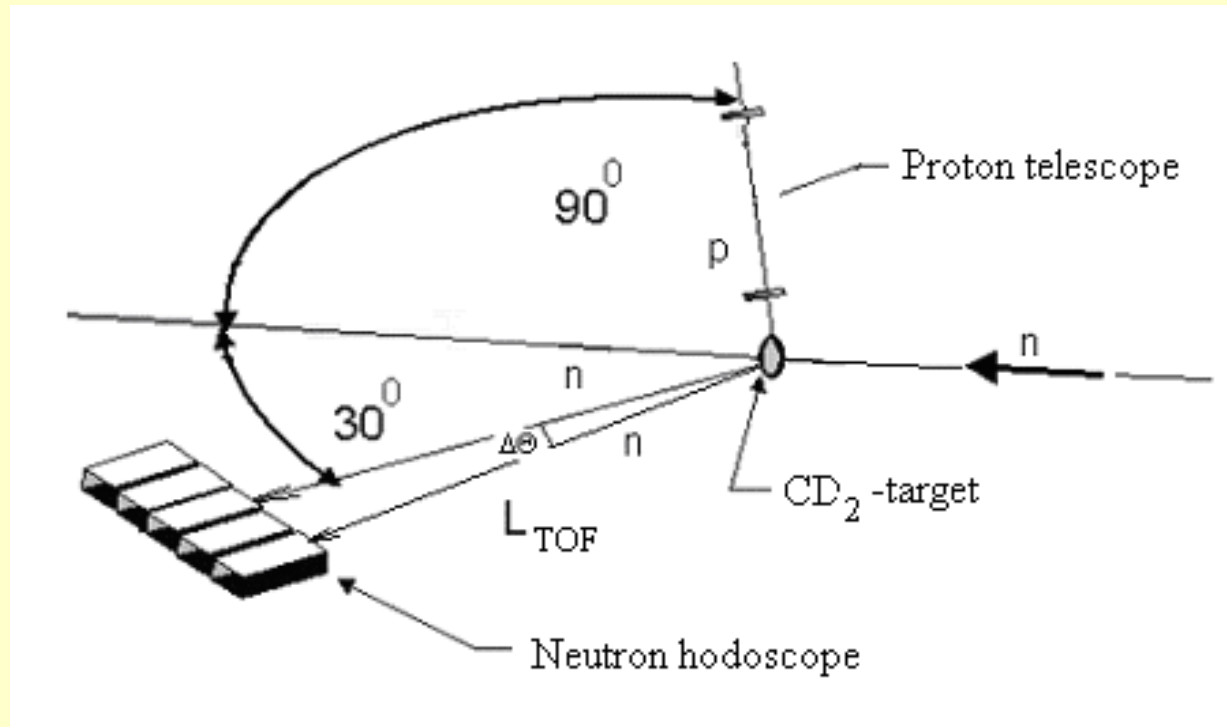
Задача достаточно точного определения синглетной длины нейтрон-нейтронного рассеяния их экспериментальных данных остается актуальной несмотря на большое число работ, выполненных в этом направлении

Синглетные длины pp- и nn-рассеяния a_{nn} и a_{pp} являются очень важными характеристиками нуклон-нуклонного взаимодействия, позволяющими определить меру нарушения зарядовой симметрии (НЗС) ядерных сил.

НЗС, обусловленное согласно современным представлениям различием между u и d кварками является малым эффектом и для теоретического анализа требуются точные данные о длинах рассеяния.

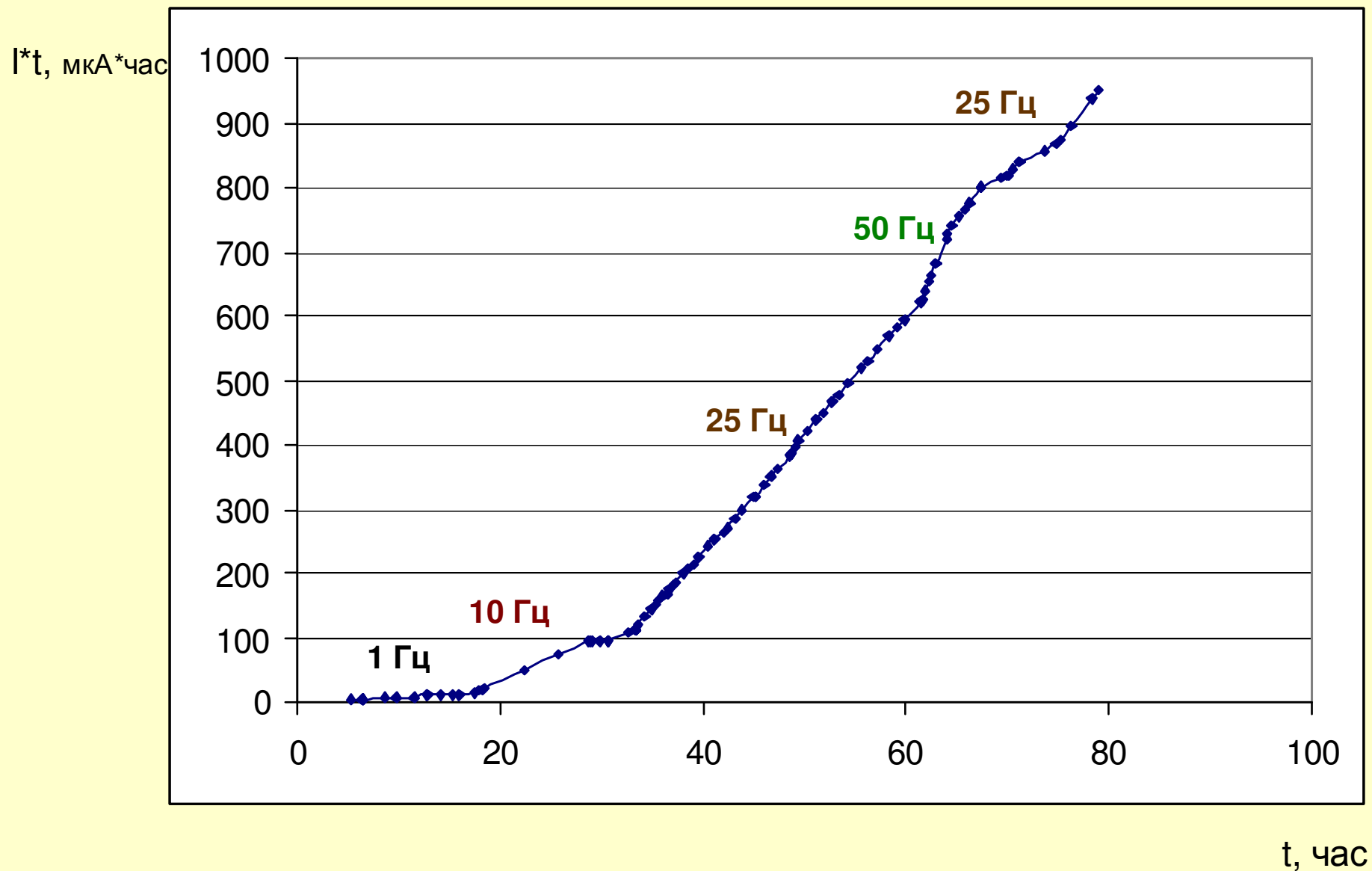
Эксперимент по исследованию реакции $n+d \rightarrow p+n+n$ в кинематической области

ВКС, отвечающей малой энергии относительного движения двух нейтронов

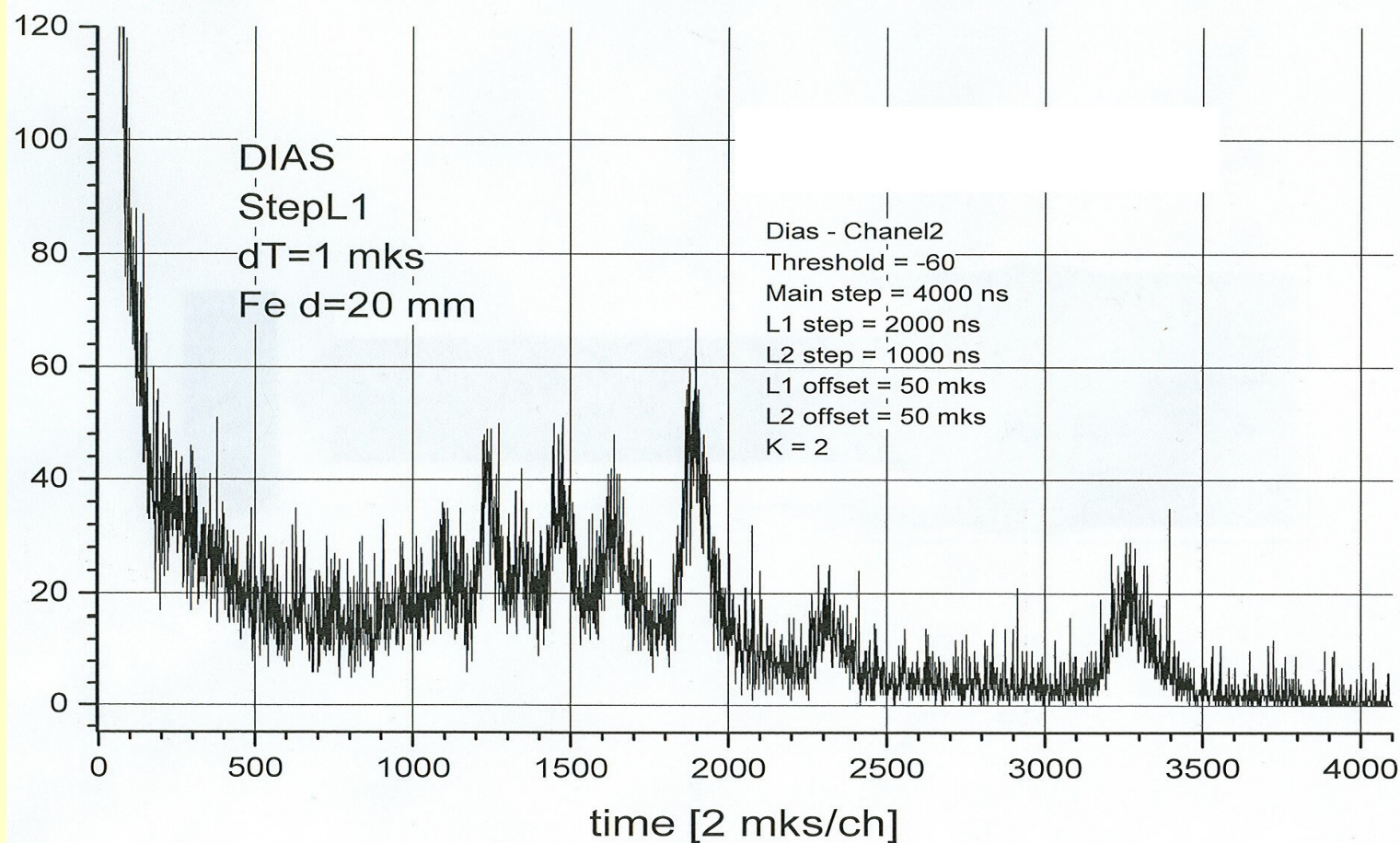


- ❖ Регистрация в совпадении протона и двух нейтронов
- ❖ Измерение энергии каждого нейтрона E_1 и E_2 и угла $\Delta\Theta$ между ними.
- ❖ Кривая выхода реакции от относительной энергии двух нейтронов чувствительна к величине a_{nn} .

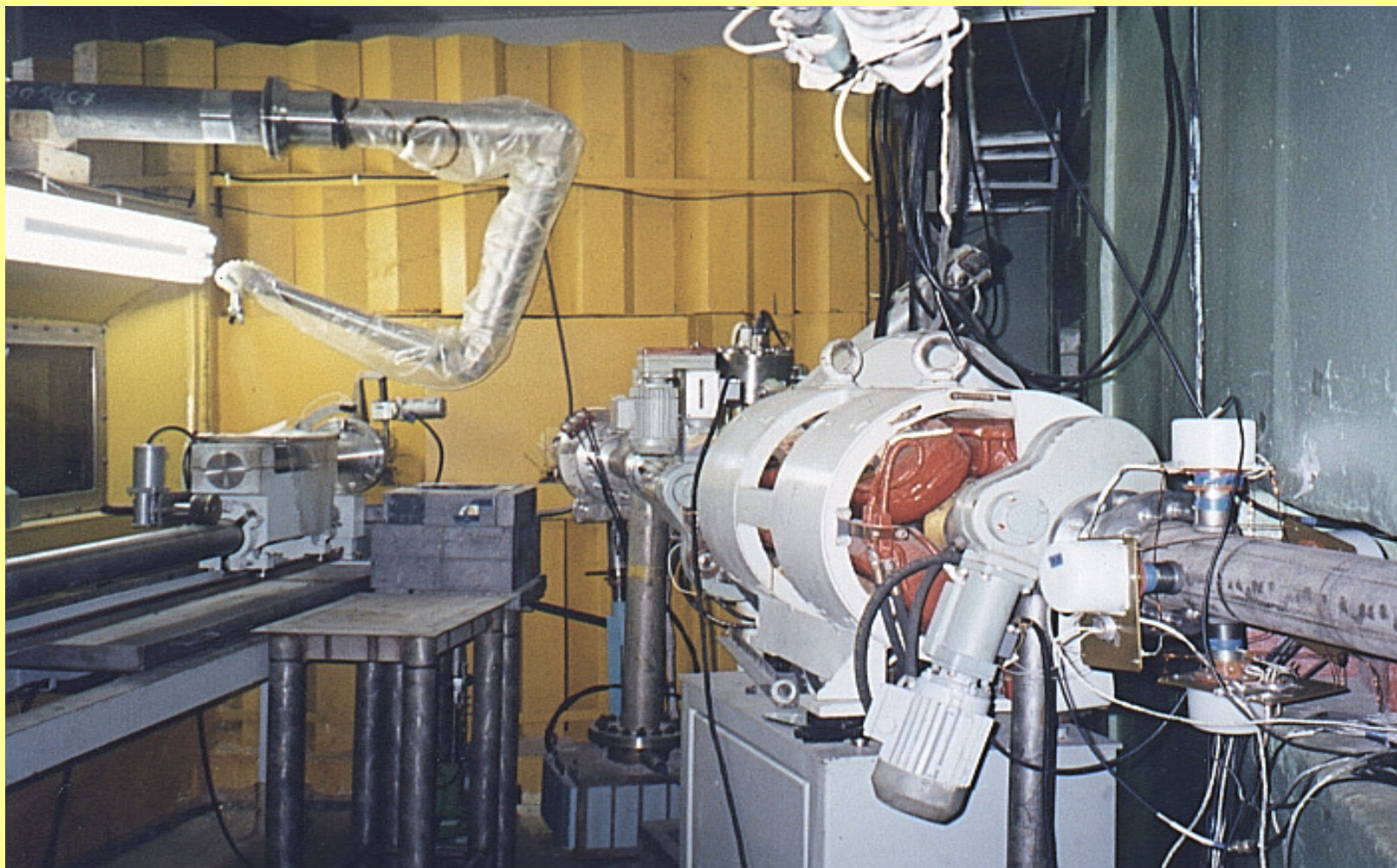
**Интеграл тока на нейтронообразующей мишени
канала РАДЭКС в сеансе октября-ноября 2006 г.**



Нейтроннограмма поликристаллического железа полученная на импульсном источнике нейтронов РАДЭКС-ИЯИ РАН с помощью времени пролета с использованием макетного варианта спектрометра . (27 Апреля 2007г.)



Получение радиоизотопов



- **Существующее производство**
Sr-82, генератор Sr/Rb-82, Na-22, Cd-109
- **Методические разработки, готовые к широкому использованию**
Sn-117м (без носителя), Ge-68, Se-72, Pd-103, альбуминовые микросферы с Pd-103
- **Перспективные разработки**
As-225, Cu-64 и 67, As-76 (без носителя), генератор Se/As-72
- **Другие возможности**
Tl-201, I-123 и 121, Mo-99, F-18, Ti-44, Co-57

Принцип работы стронций/рубидиевого-82 генератора

Инжекционная система

Физиологический
раствор
0.9% NaCl

Г е н е р а т о р

SnO_2 – сорбент

Адсорбированный ^{82}Sr (25 дней)
распадающийся в ^{82}Rb (1,3 мин)

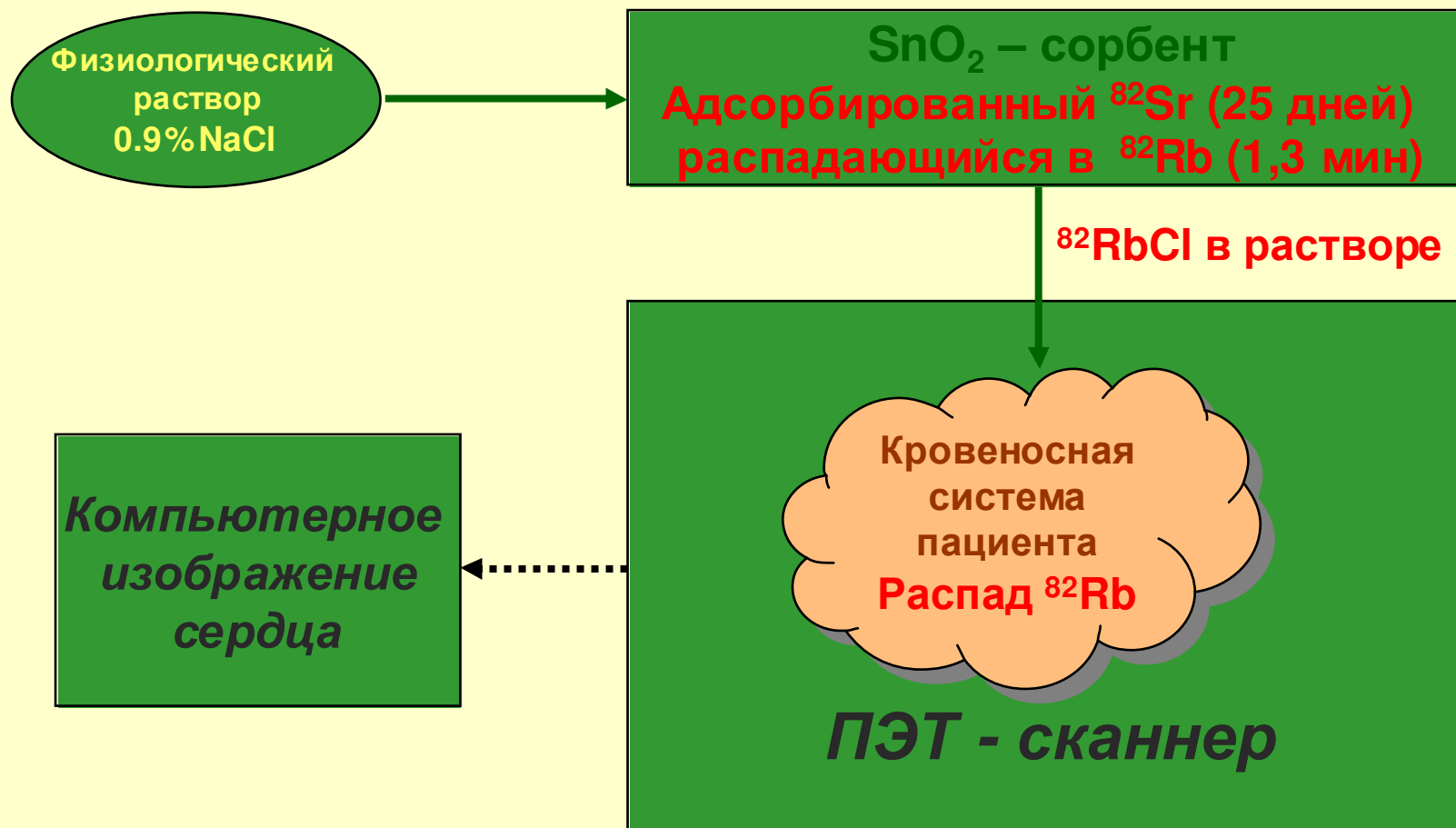
$^{82}\text{RbCl}$ в растворе

Компьютерное
изображение
сердца

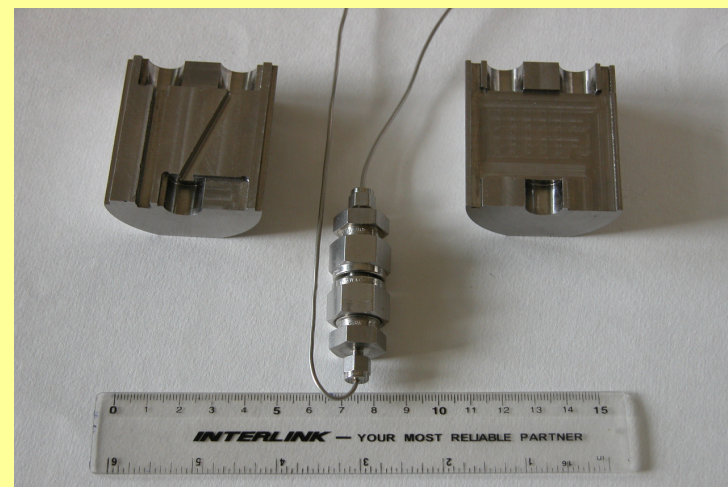
Кровеносная
система
пациента

Распад ^{82}Rb

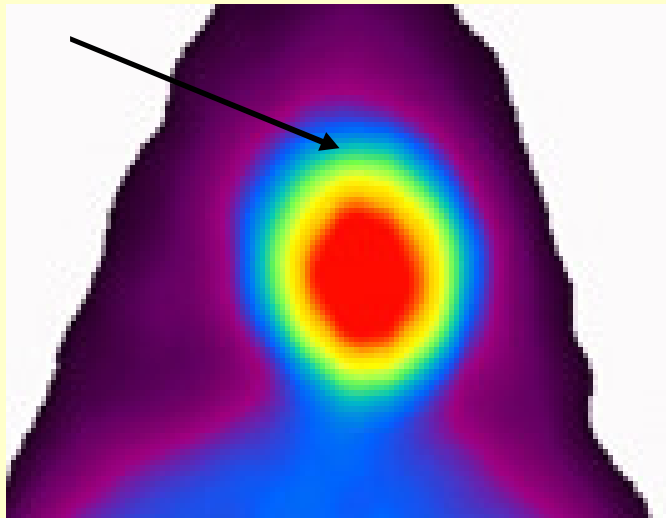
ПЭТ - сканнер



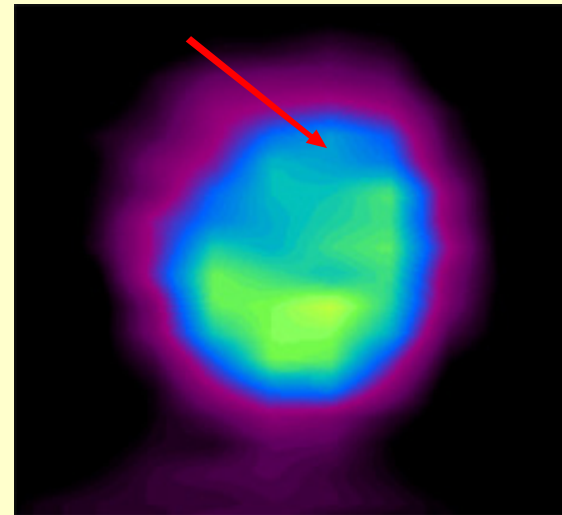
Генератор Sr/Rb-82, изготовленный ИЯИ РАН, заряжается на заводе «Медрадиопрепарат» Минздрава



***PET- grams of rabbit heart obtained with the present
Russian Sr/Rb-82 generator
(Frontal slices)***



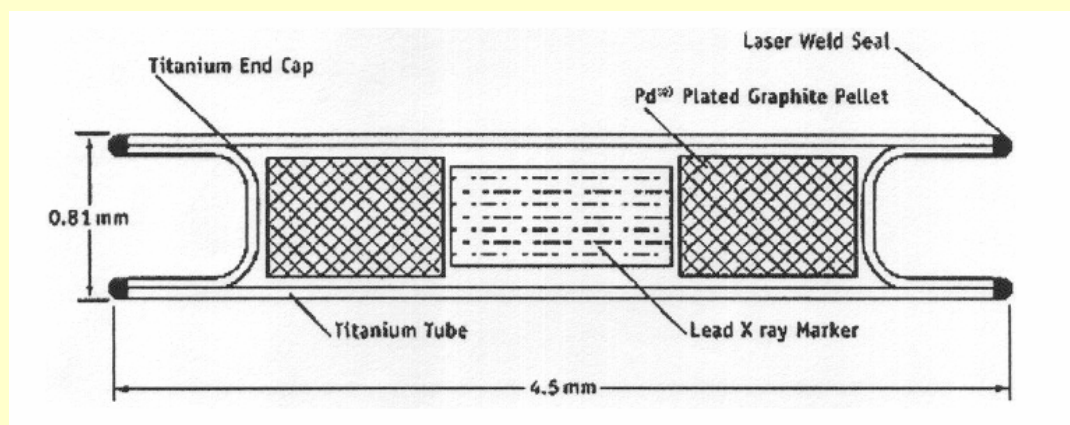
**Healthy rabbit heart
Heart is shown with
the arrow**



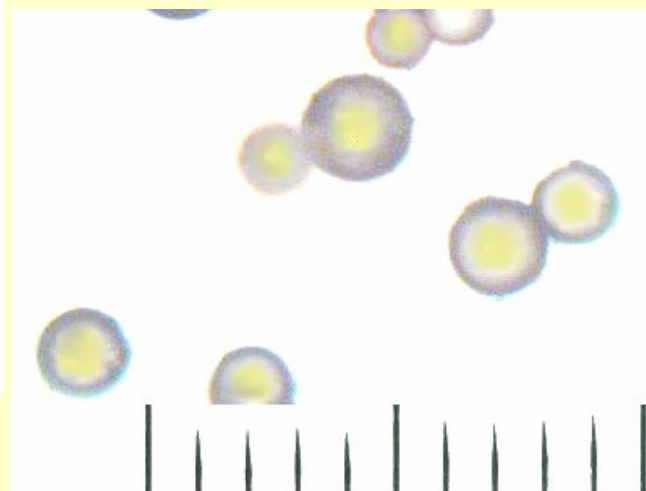
**Infarcted rabbit heart
Infarct area is shown
with the arrow**

Препараты на основе палладия-103

“Seeds”–источники для терапии простаты
(Theragenics Co.)

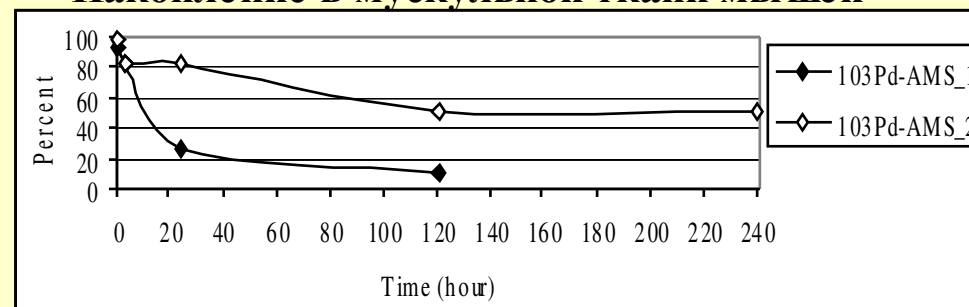


Альбуминовые микросферы
(20-40 мкм)



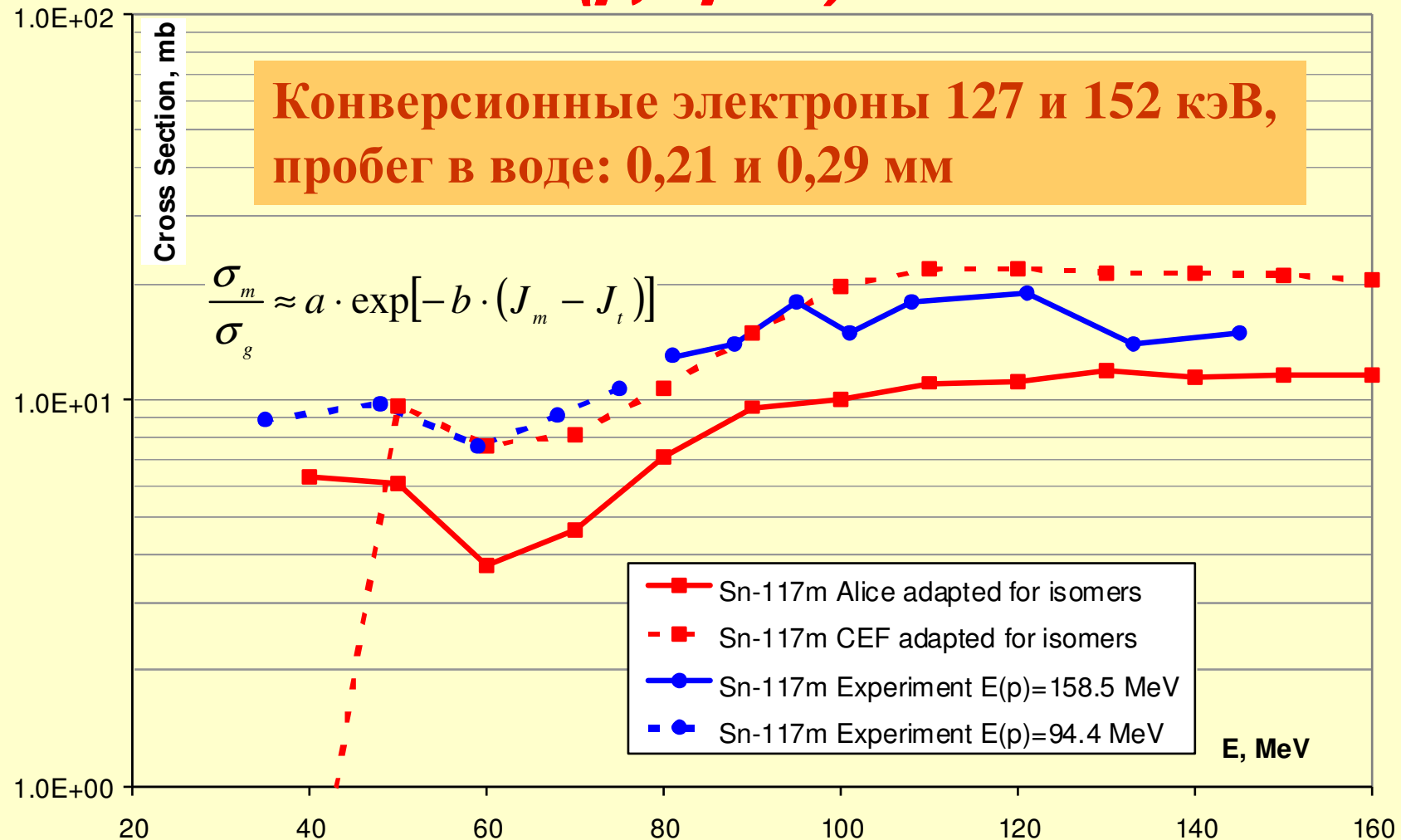
Совместно с НИФХИ им. Карпова
и ГУ МРНЦ РАМН (Обнинск)

Накопление в мускульной ткани мышей



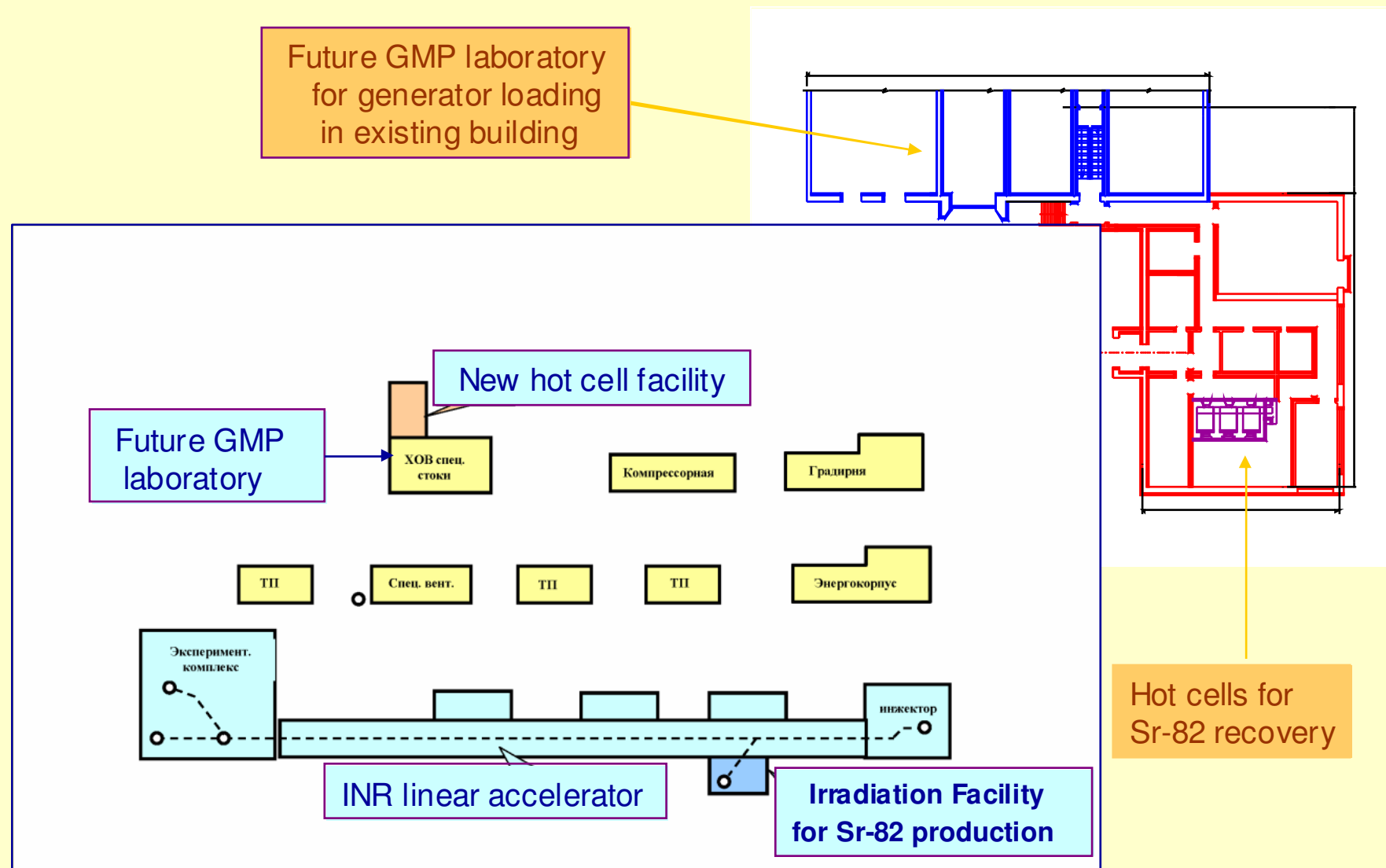
Сечения образования ^{117m}Sn

$^{121,123}\text{Sb}$ (p; 2p xn) ^{117m}Sn



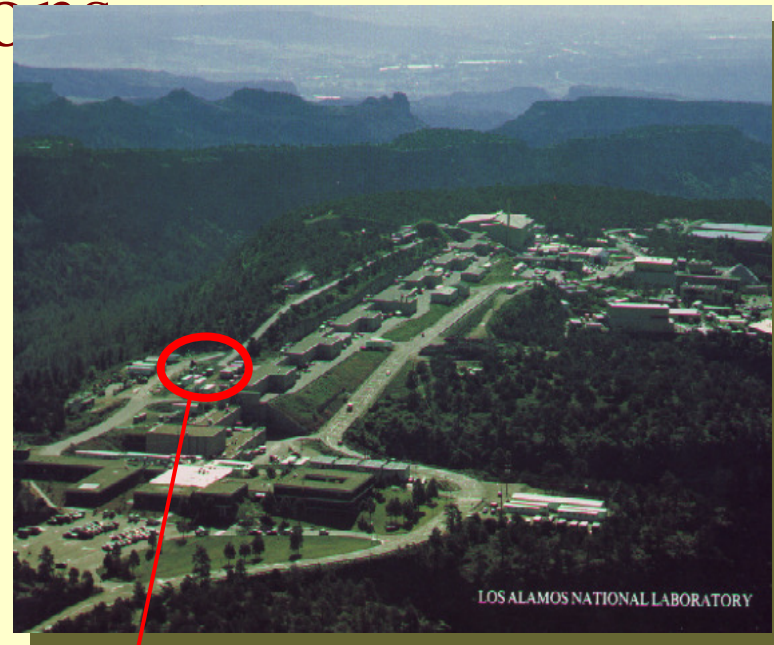
Участники проекта: ИЯИ РАН, BNL (USA), ГНЦ ФЭИ, МГУ им.М.В.Ломоносова

Future Radiochemical Hot Cell Laboratory at INR for Production of Medical Isotopes



LANSCCE isotope production provides critical radioisotopes for medical and industrial applications

- Radioisotopes are produced for medicine, environmental tracers, basic and applied physical science R&D, and industrial products, e.g.:
 - ^{82}Sr , cardiac imaging
 - $^{65,67}\text{Cu}$, ^{32}Si for cancer/other research, treatment, diagnosis
- LANSCE customer base consists of over 250 hospitals, research institutions, and private sector companies
 - Major pharmaceutical manufacturers, such as GE Healthcare, Mallinckrodt, and DuPont, are customers
 - Demand is growing
- LANSCE recently addressed a critical national shortage of ^{82}Sr by dedicating operations



The \$23 M, 100 MeV Isotope Production Facility (IPF) at LANSCE.

Комплекс лучевой терапии ИЯИ РАН

Основная задача:

облучение злокачественных опухолей протонами самостоятельно или в сочетании с облучением фотонами.

Базовые установки:

- линейный ускоритель протонов ММФ ИЯИ (энергия 74 – 247 МэВ),**
- медицинский линейный ускоритель электронов СЛ-75-5-МТ (энергия электронов 6 МэВ).**

В состав Комплекса также входят:

- канал транспортировки протонов,**
- 2 камеры облучения (протонами и фотонами),**
- амбулатория на 30-40 пациентов в день.**

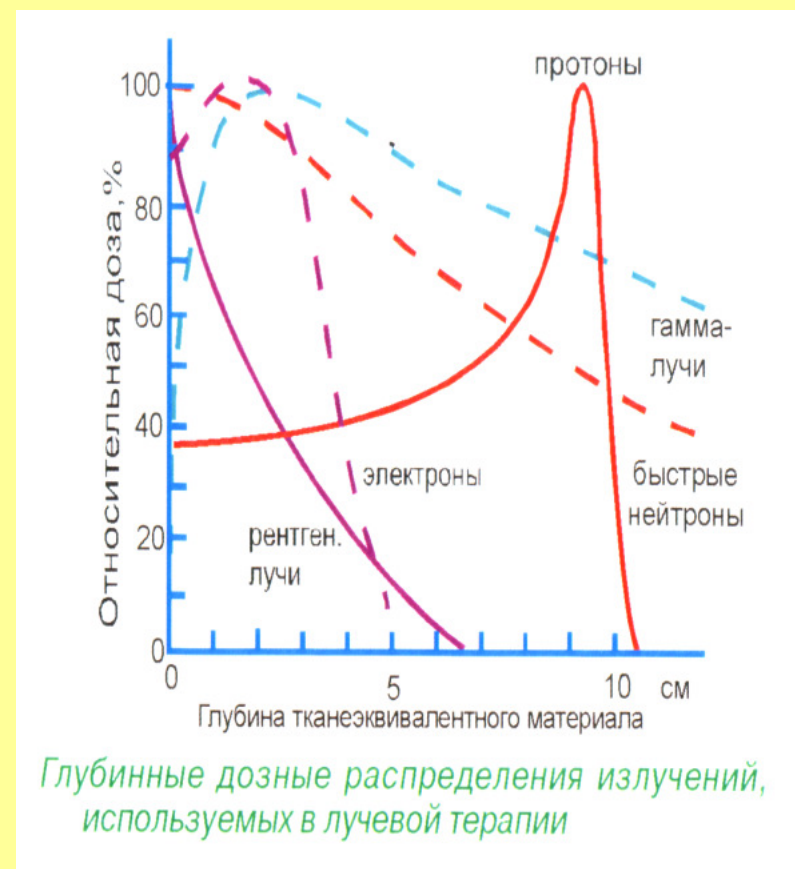


Преимущества использования протонов для облучения опухолей

Конформность облучения протонами позволяет разрушить опухоль без повреждения здоровых тканей.

Протонная (адронная) терапия не имеет альтернативы, если опухоль находится вблизи критических органов.

Протоны обеспечивают снижение лучевой нагрузки на здоровые ткани минимум в 2 раза .



Амбулатория в Экспериментальном комплексе ИЯИ РАН:

Пропускная способность-
30-50 пациентов в день.

Количество рабочих мест – 12-15.

Площадь помещений (с
кондиционированием воздуха)- 400
м².

Возможность увеличения еще на 150
м² (для томографа и контактной
радиотерапии).



Медицинская программа:

Примеры локализаций облучаемых опухолей:

1. Глаз (протоны, кресло),
2. Головной мозг, гипофиз, рото-носо-гортаноглотка (фотоны + протоны, кресло+стол),
3. Предстательная железа, матка (фотоны+протоны, стол),
4. Кишечник (фотоны + протоны, стол),
5. Конечности (фотоны+ протоны, стол).
6. Легкие (фотоны + протоны, стол).

Возможные дозы для сочетанного облучения:

1. Опухоли гол. мозга (фотоны 40 Гр + протоны 15 Гр).
2. Опухоли гипофиза (фотоны 44 Гр + протоны 15 Гр).
3. Метастазы гол. мозга (фотоны 40 Гр + протоны 14 Гр).
4. Рак рото- носо- гортаноглотки (фотоны 48 Гр + протоны 16 Гр).
5. Рак решетчатого лабиринта (фотоны 50 Гр + протоны 16 Гр).



ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
*INSTITUTE FOR NUCLEAR RESEARCH
OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES*

Заключение

1. Исследования, разработка, проектирование и сооружение сильноточных линейных ускорителей протонов широко осуществляются во всем мире.
2. В пределах возможностей Института поддерживаются работоспособность Ускорительного и Экспериментального комплексов ИЯИ РАН и актуальные направления исследований. Для функционирования на базе установок Института современного Национального Центра необходимы государственная программа и поддержка....

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!