

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

Циклотроны ОИЯИ

Гикал Борис Николаевич

Объединенный институт ядерных исследований

Первый ускоритель в Дубне

В 1949г. в Дубне был введен в эксплуатацию синхроциклотрон с диаметром полюсов 5м, в котором ускорялись дейтроны (280 МэВ), α -частицы (250 МэВ) и протоны (480 МэВ).

В 1953г. полюса синхроциклотрона были увеличены до 6м и в нем были ускорены протоны до энергии 680 МэВ и был получен выведенный пучок.

В 1979-1984 году синхроциклотрон с целью увеличения интенсивности пучка был реконструирован в фазотрон (синхроциклотрон со спиральной вариацией магнитного поля). Интенсивность выведенного пучка была увеличена в 20 раз.

**Фазотрон ОИЯИ -
изохронный синхроциклотрон**

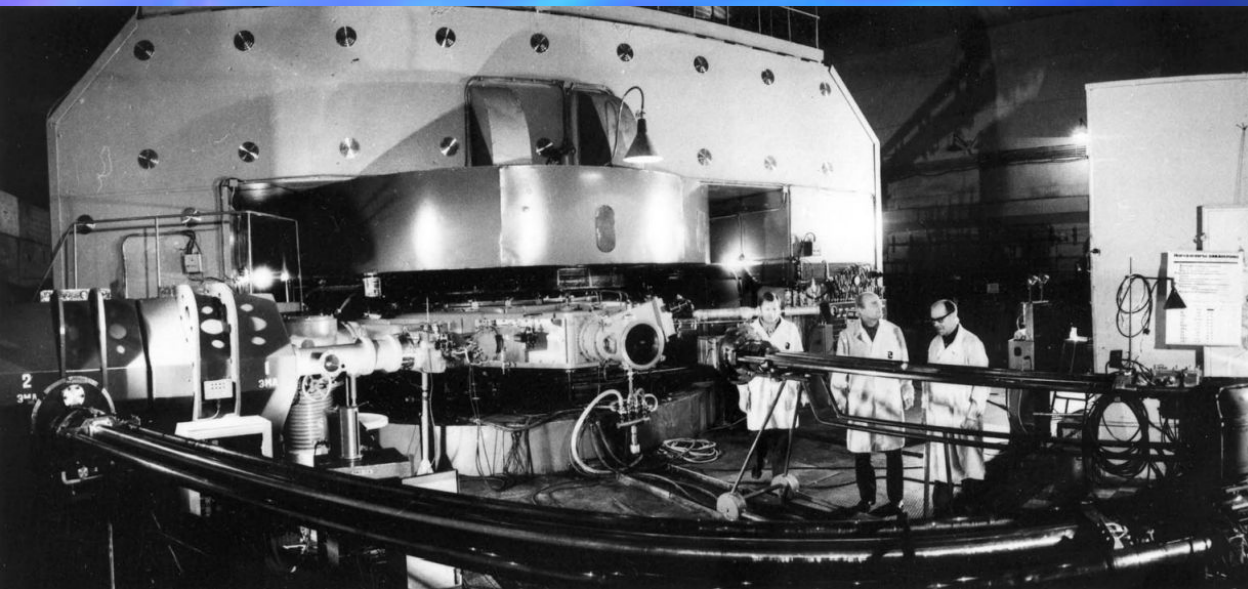
Большой вклад в создание ускорителя внесли специалисты ОКБ и завода "Электросила" Ленинград



**Ускоритель работал в
Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ
по программе физических и
медицинских исследований до 2020 г**

Классический циклотрон тяжелых ионов У-300

У-300 – базовая установка Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ



- запущен в эксплуатацию в 1960 г.
- проведена реконструкция ускорителя в 1989-1991г.

Малышев Иван Фёдорович,
Флеров Георгий Николаевич

- Лаборатория ядерных реакций ОИЯИ была основана в 1957 году.
- Первый директор и основатель лаборатории Флеров Г.Н.
- Циклотрон У-300 был спроектирован в НИИ электрофизической аппаратуры (Ленинград) под руководством И.Ф.Малышева. Изготовлен на заводе объединения “Электросила”.
- Пусконаладочными работами в Дубне руководил Ю.Ц.Оганесян.

9 сентября 1960г. был получен первый пучок ускоренных ионов азота.



ЦИКЛОТРОН У-300

Параметры классического циклотрона У-300

Научная программа

- Синтез новых трансурановых элементов.
- Изучение ядерных реакций с тяжелыми ионами,
- Получение экзотических ядер.
- Изучение новых видов радиоактивного распада.
- На циклотроне впервые в мире синтезировали 104-й и 105-й элементы таблицы Менделеева,
- открыт новый вид радиоактивности — протонная радиоактивность



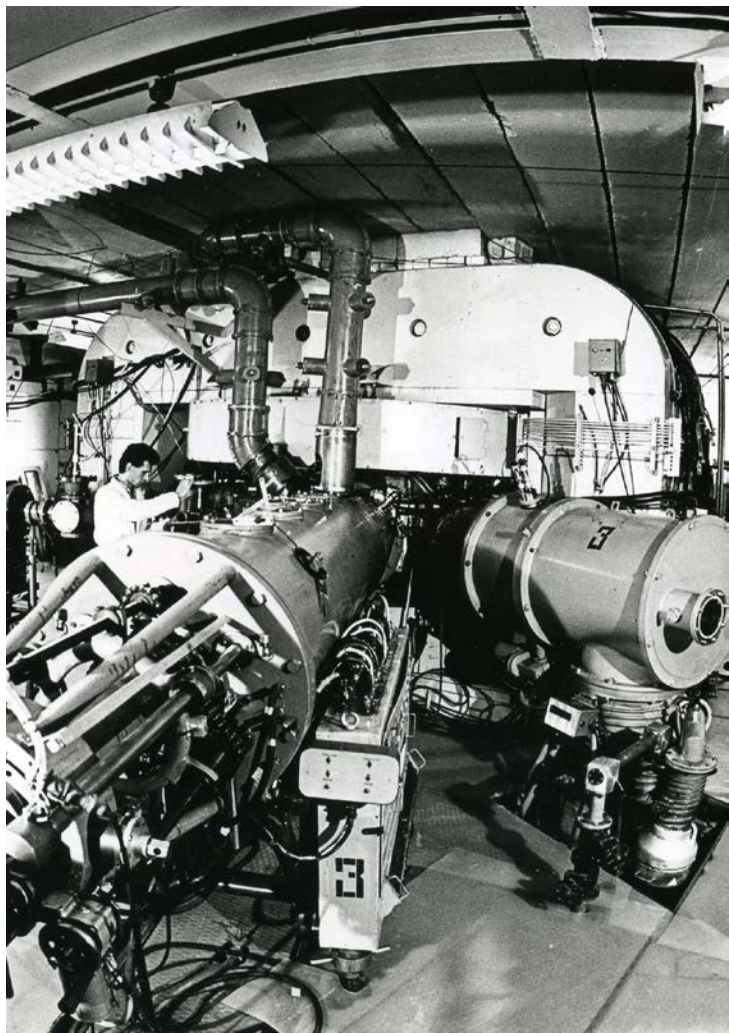
| | |
|---|------------------------|
| Электромагнит | |
| Диаметр полюса | 3,1м |
| Вес магнита | 1900 т |
| Средний воздушный зазор | 540 мм |
| Среднее магнитное поле | 1,67 Тл |
| Число корректирующих катушек | 4 |
| ВЧ-система | |
| Число дуантов | 2 |
| Азимутальная протяжённость | 180° |
| Напряжение на дуанте | 150 кВ |
| Диапазон частот | 3-6 МГц |
| | |
| Давление в вакуумной камере | $6 \cdot 10^{-6}$ Торр |
| Вывод: дефлектор, магнитный канал | |
| Число каналов транспортировки выведенного пучка | 12 |
| Параметры пучка выведенных ионов | |
| Энергия ионов (основной диапазон) | 5-10 МэВ/нукл |
| Отношение массы к заряду (A/Z) ускоряемых ионов | 5-7 |
| Полная энергия | $250 Z^2/A$ |

Циклотрон У-200 лаборатории ядерных реакций ОИЯИ

В середине 60-х годов было принято решение о создании изохронного циклотрона У-200 с диаметром полюсов 2 м. Создан путем реконструкции серийного классического циклотрона У-150 в изохронный циклотрон У-200.

- Первый выведенный пучок с энергией 20 МэВ/нуклон был получен в 1968г.

- Вывод пучка из циклотрона осуществлялся методом перезарядки ионов на тонкой углеродной фольге.



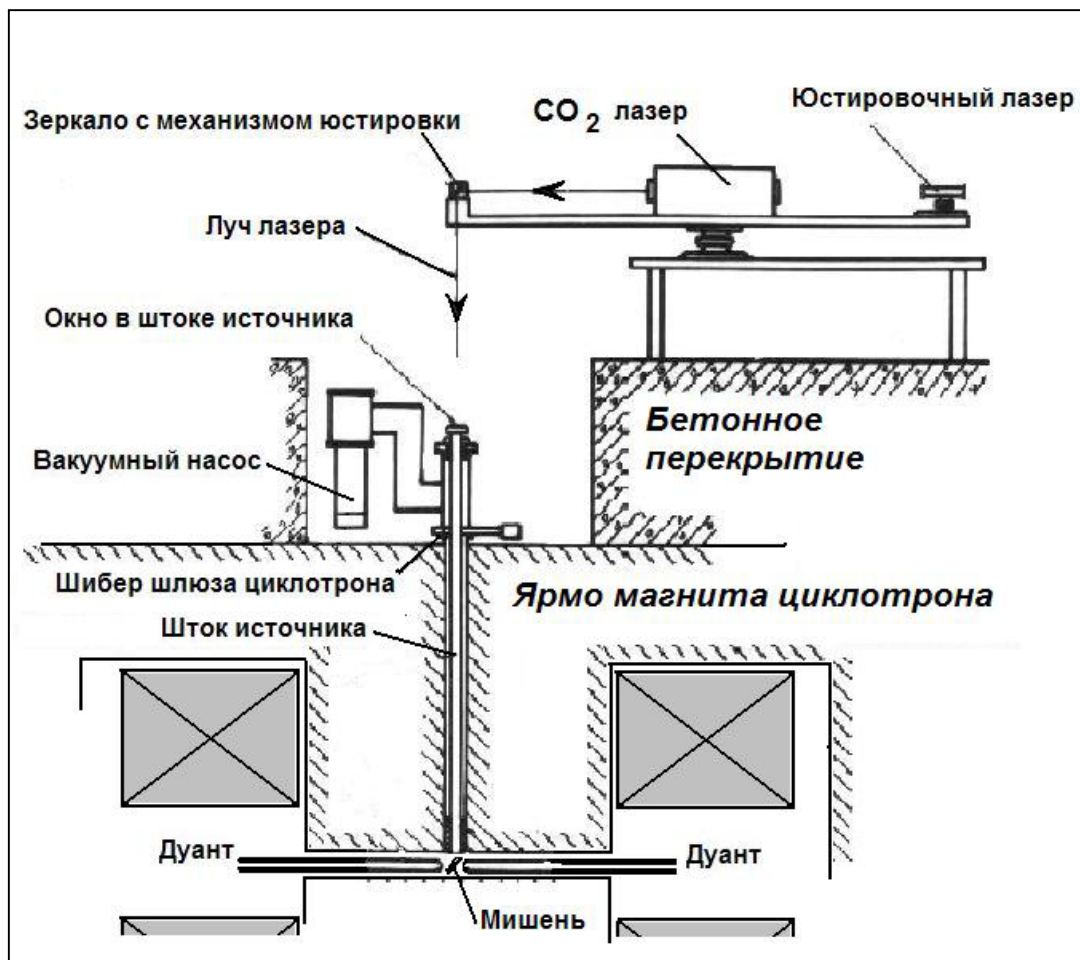
| Ион | Е/А [МэВ/нук] | I _{Выв} [мкА] |
|---|------------------|---------------------------|
| He ₃ ¹⁺ | 16 | 5* |
| (DH) ¹⁺ | 16 | 1* |
| He ₄ ¹⁺ | 9 | 330* |
| (D) ₂ ¹⁺ | 9 | 10* |
| C ₁₂ ²⁺ , C ₁₂ ³⁺ , C ₁₂ ⁴⁺ | 4 - 16 | 10 - 30 |
| N ₁₄ ²⁺ , N ₁₄ ³⁺ , N ₁₄ ⁴⁺ , N ₁₄ ⁵⁺ | 3 - 18 | 6 - 30 |
| O ₁₆ ³⁺ , O ₁₆ ⁴⁺ , O ₁₆ ⁵⁺ | 5 - 14 | 6 - 13 |
| Ne ₂₀ ⁴⁺ - Ne ₂₀ ⁵⁺ | 5 - 9 | 0,5 - 6 |
| <u>Ar₄₀⁷⁺</u> , <u>Ar₄₀⁸⁺</u> | 4,5 - 5,8 | 0,07 |

«Главное, что было достигнуто созданием «модельного» ускорителя У-200 способность и готовность его создателей сооружать новые, большие установки. На очереди стоял ускоритель У-400, моделью для которого был У-200»

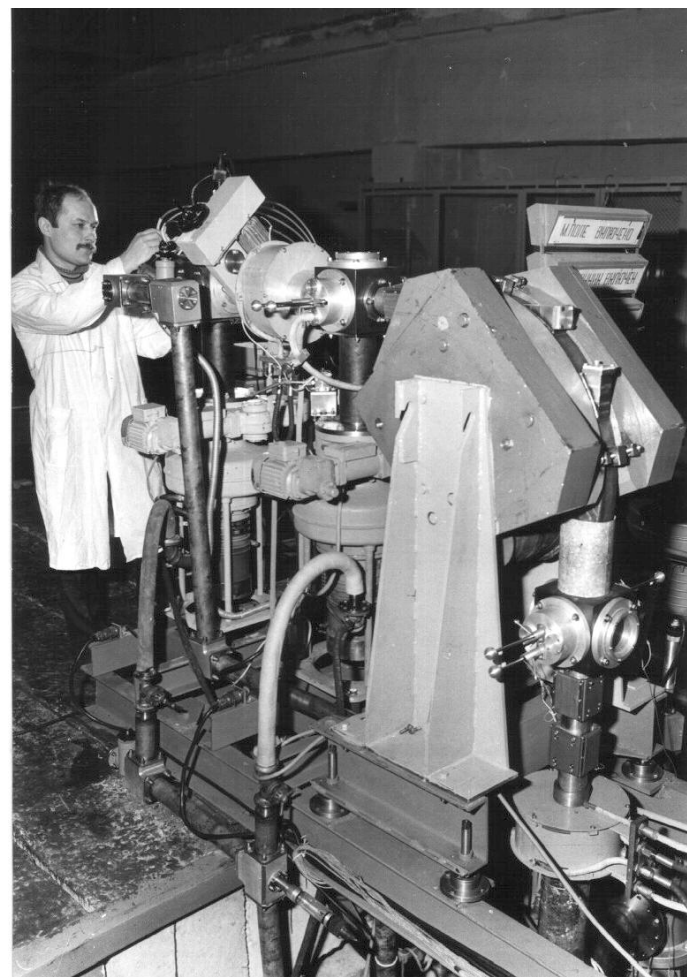
Ю.Ц. Оганесян. Наука и Жизнь №4 1980 год.

У-200 – стенд для исследования новых систем циклотрона

Лазерный источник ионов.
Совместный проект с МИФИ.
Ускорены ионы $^{12}\text{C}^{3+}$



Система аксиальной инжекции
пучка ионов.
Ускорены ионы $^4\text{He}^{1+}$

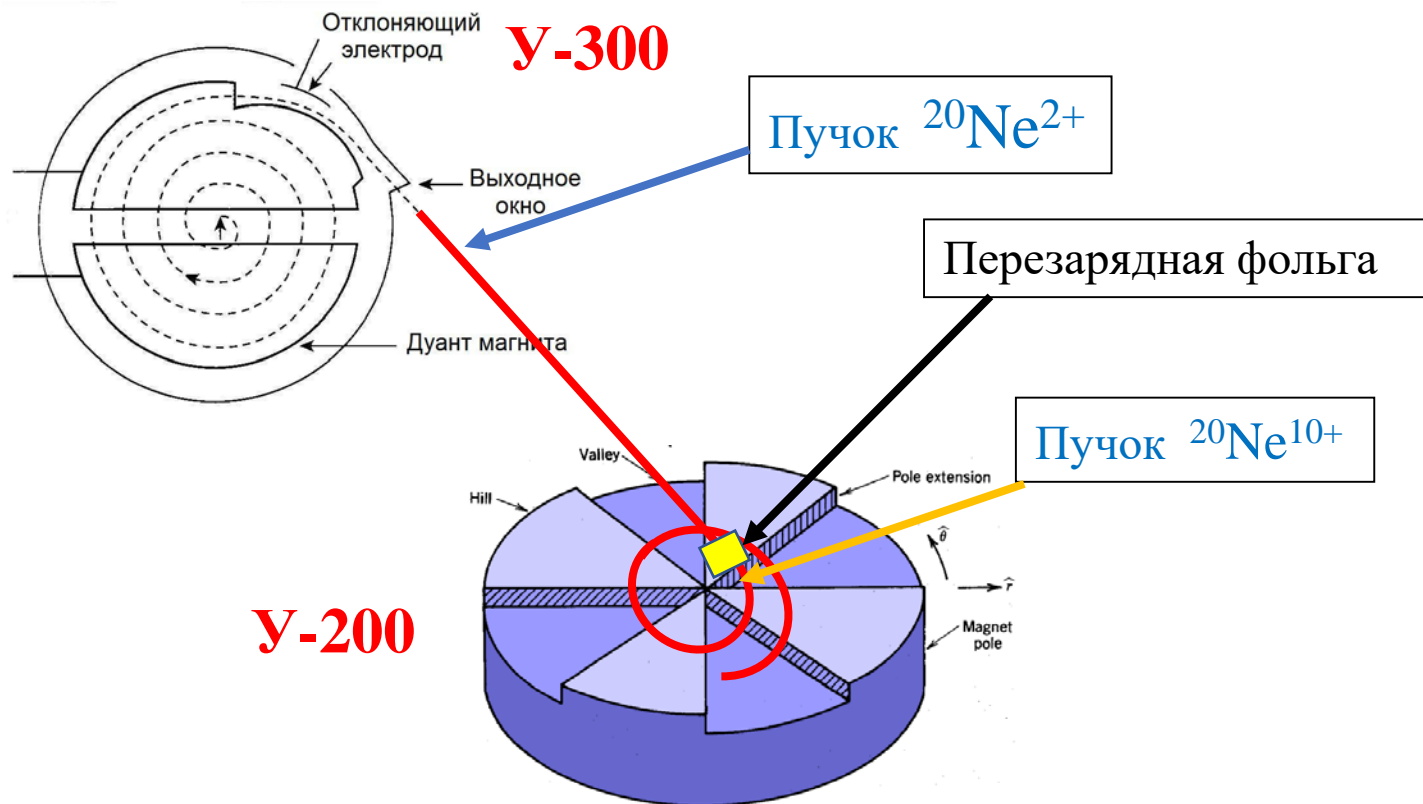


Тендем циклотронов У-300 и У-200

В 1972г. циклотроны У-300 и У-200 были переведены в режим совместной работы, Ускоренные на У-300 ионы транспортировались по ионопроводу длиной 70 м и инжектировались центр ускорителя У-200 для последующего ускорения.

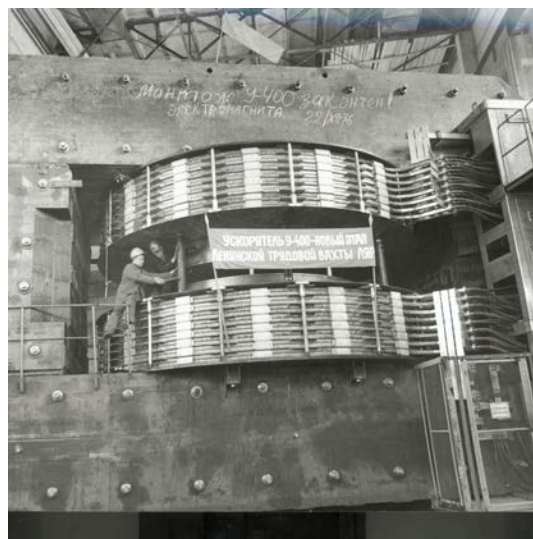
Впервые были получены пучки ионов Хе с энергией ≈ 1 ГэВ и интенсивностью 10^{10} ион/сек.

Этот первый в мире тендем стал прообразом подобных систем, созданных позднее во Франции, США, Китае, Швейцарии, ЮАР и Японии.

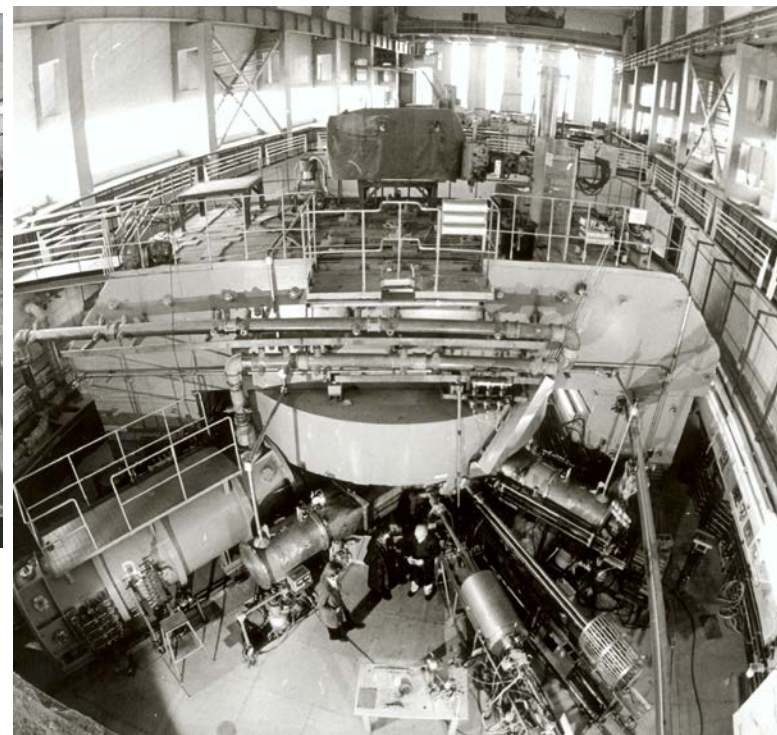


Циклотрон У-400 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ

- У-400 проектировался в конструкторском бюро ЛЯР, узлы циклотрона изготавливались в основном в Опытном производстве ОИЯИ, монтажные работы производились сотрудниками мастерских ЛЯР.
- Работами по проектированию и сооружению У-400 руководил Ю.Ц.Оганесян.
- Сооружение У-400 было осуществлено с июля 1975г. до августа 1978г.
- **В декабре 1978г состоялся запуск циклотрона.**
- Были получены пучки тяжелых ионов с энергией от 3 до 20 МэВ/нуклон. Интенсивность пучков оставалась рекордной в мире на протяжении многих лет.
- Вывод пучка осуществлялся методом перезарядки ионов на тонкой графитовой фольге.
- Дальнейшее совершенствование У-400 связано с созданием в 1996г. системы аксиальной инжекции ионов из ECR-источника, разработанного в ЛЯР.
- **Таким образом, были созданы благоприятные условия для успешного синтеза сверхтяжелых элементов с $Z=112\div 118$.**



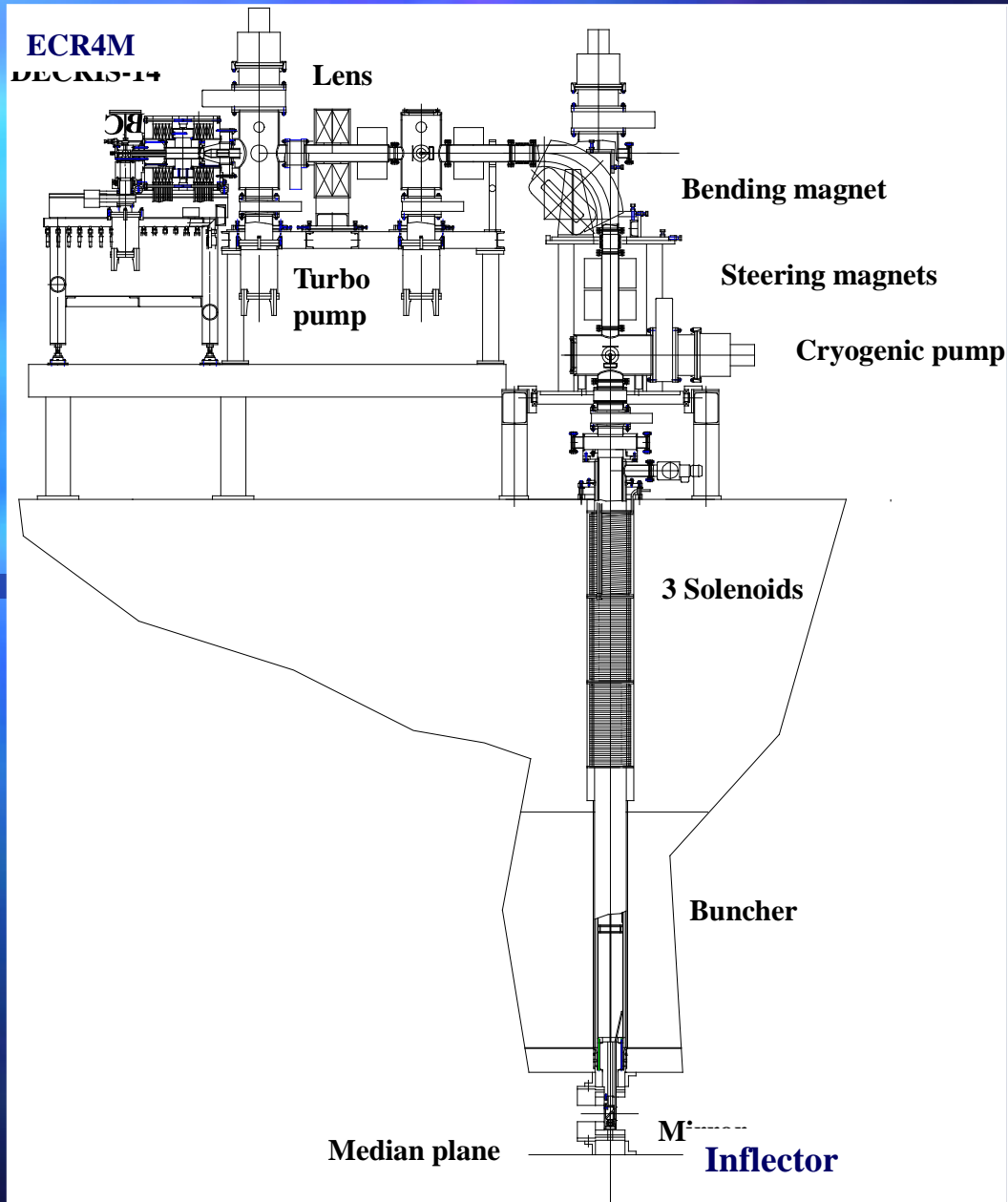
Монтаж
ускорителя У-400



U400 Cyclotron (1978)



Axial injection system of U-400 Cyclotron (1996)





U400 CYCLOTRON

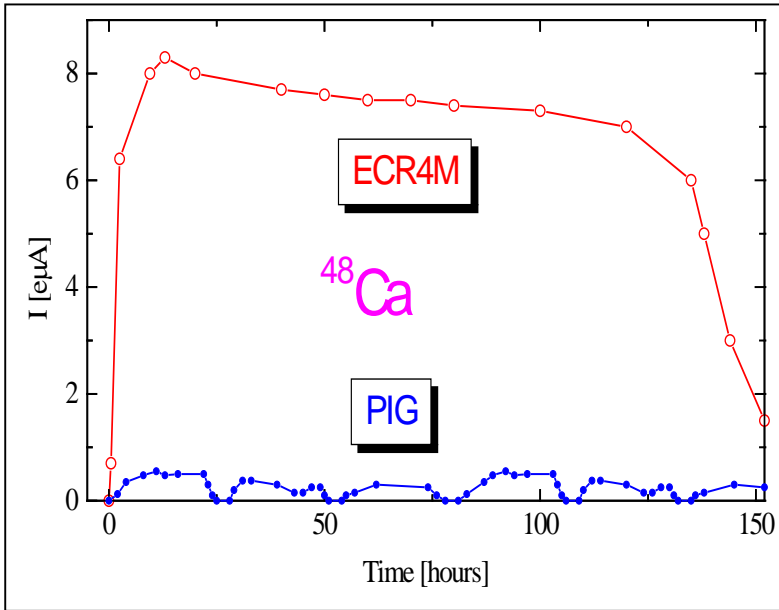
stand-alone & post-accelerator

| Ion | Ion energy [MeV/A] | Output intensity |
|-------------------------|--------------------|--------------------|
| $^4\text{He}^{1+}$ | - | - |
| $^6\text{He}^{1+}$ | 11 | $3 \cdot 10^7$ pps |
| $^8\text{He}^{1+}$ | 7.9 | - |
| $^{16}\text{O}^{2+}$ | 5.7; 7.9 | 5 μA |
| $^{18}\text{O}^{3+}$ | 7.8; 10.5; 15.8 | 4.4 μA |
| $^{40}\text{Ar}^{4+}$ | 3.8; 5.1 * | 1.7 μA |
| $^{48}\text{Ca}^{5+}$ | 3.7; 5.3 * | 1.2 μA |
| $^{48}\text{Ca}^{9+}$ | 8.9; 11; 17.7 * | 1 μA |
| $^{50}\text{Ti}^{5+}$ | 3.6; 5.1 * | 0.4 μA |
| $^{58}\text{Fe}^{6+}$ | 3.8; 5.4 * | 0.7 μA |
| $^{84}\text{Kr}^{8+}$ | 3.1; 4.4 * | 0.3 μA |
| $^{136}\text{Xe}^{14+}$ | 3.3; 4.6; 6.9 * | 0.08 μA |
| $^{160}\text{Gd}^{19+}$ | 5.5 | 0.01 μA |
| $^{209}\text{Bi}^{19+}$ | 3.4 | 0.01 μA |

- New heavy isotopes
- Fusion-fission
- Nuclear spectroscopy
- SHE chemistry
- Multi nucleon transfer reactions;
- Reactions with exotic nuclei
- Structure of light exotic nuclei;

Cyclotron U-400. $^{48}\text{Ca}^{5+}$

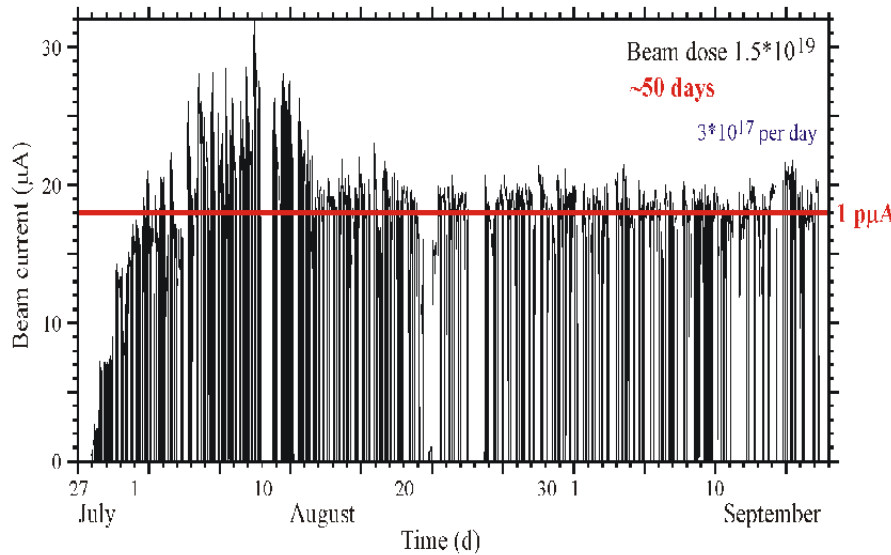
1996



PIG: $I \sim 0.4 \mu\text{A}$,
48Ca consumption: $4 \div 15 \text{ mg/h}$

ECR: $I \sim 8 \mu\text{A}$,
48Ca consumption $0.4 \div 0.5 \text{ mg/h}$

2010



$I \sim 18 \mu\text{A}$ (1 p μA)

Transformation of ^{48}Ca working substance into the ^{48}Ca beam on the target is about 1% in the routine operation.

2016

DC-280

Intensity ^{48}Ca 1 $\mu\text{A} \rightarrow 10 \mu\text{A}$

Циклотрон ДЦ-280

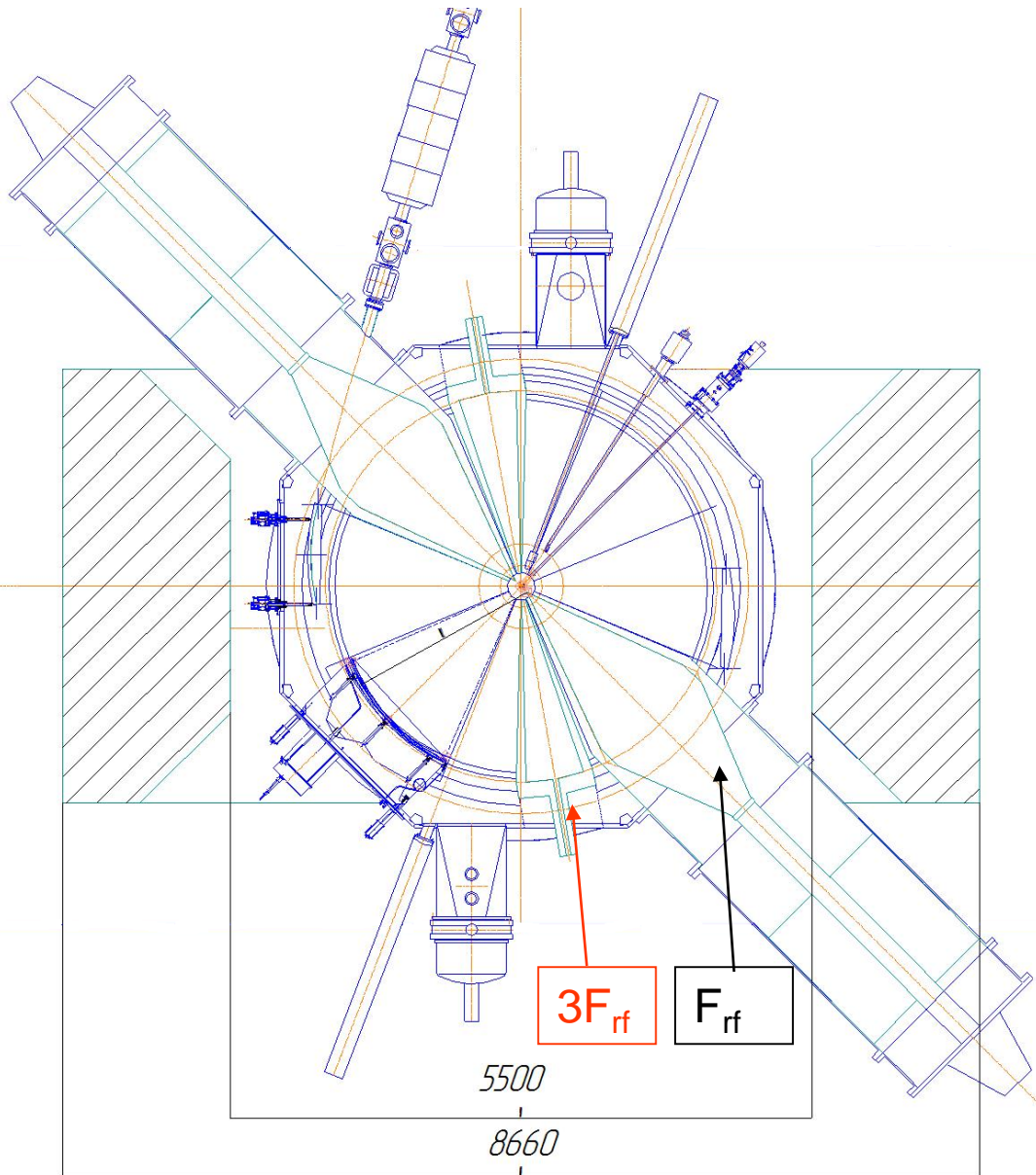
- Цель проекта: получение высокоинтенсивных до 10 μA пучков ионов средних масс (Ca-48, Ti-50, Cr-54 и др.) для экспериментов по синтезу и изучению свойств сверхтяжёлых элементов.

Главные задачи в проекте циклотрона тяжелых ионов ДЦ-280

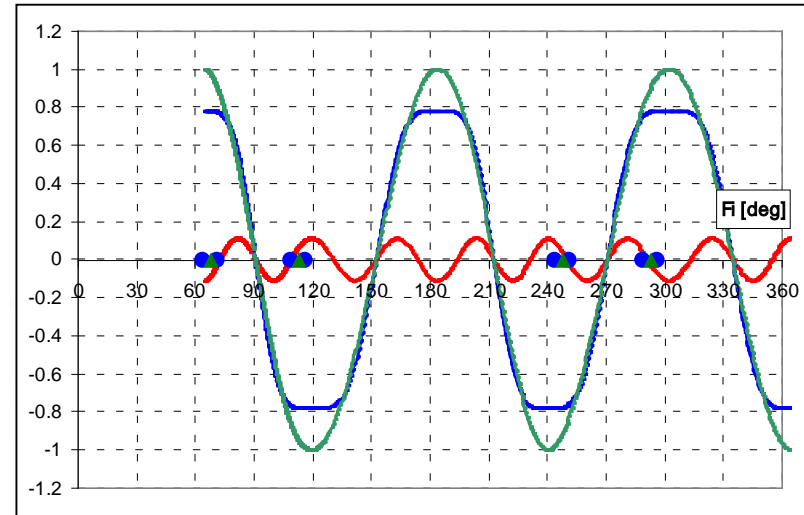
- ❖ Увеличение коэффициента захвата инжектируемого пучка высокой интенсивности ($\sim 100 \mu\text{A}$) в ускорение.
 - Создание высоковольтной инжекции из внешнего ионного источника в циклотрон.
- ❖ Увеличение коэффициента вывода пучка из циклотрона до 70%.
 - Дефлекторный вывод пучка с высокой эффективностью.
 - Использование Flat-Top системы для улучшения разделения орбит на выводном радиусе и снижения потерь в процессе ускорения.



DC-280 Cyclotron

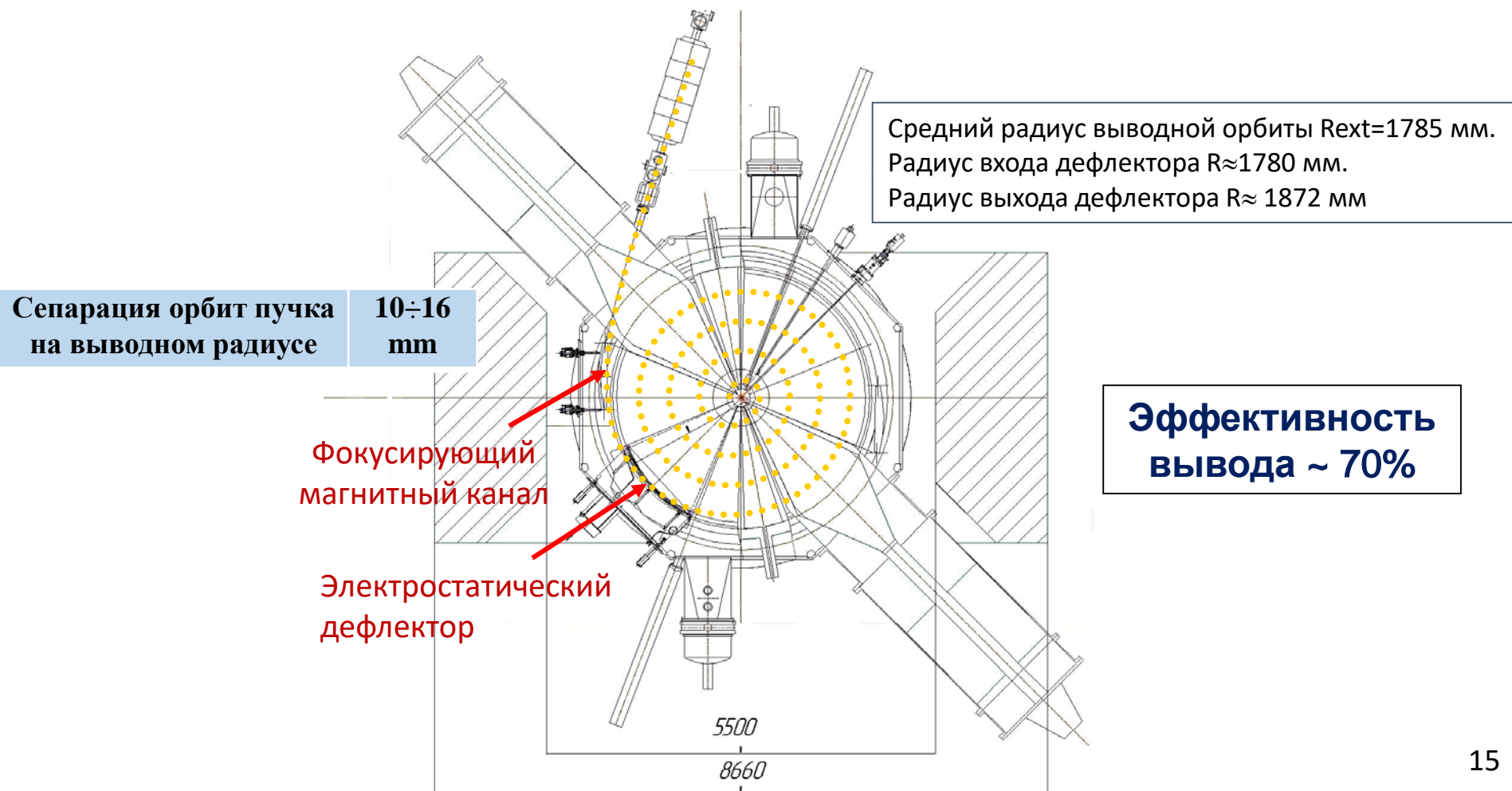


Flat-Top system



Net effect $A_1 \sin(\omega_{rf} t) + A_2 \sin(3\omega_{rf} t)$
 $A_2 \approx 0.1 \cdot A_1$

Система вывода пучка из ДЦ-280 ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР



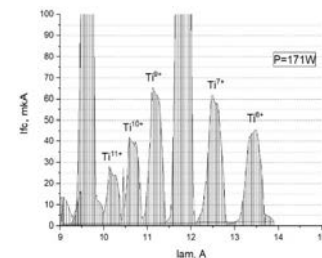
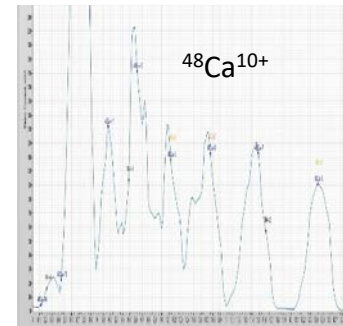
Main parameters of DC-280 cyclotron

The accelerator was put in operation in 2019.

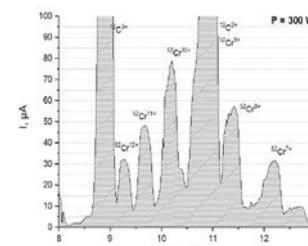
| Parameter | design | realized |
|-------------------------|--|---|
| Power consumption | 550 kW | |
| Ion source | DECRIS-PM – 14 GHz on HV platform ($U_{\max}=70\text{kV}$) | |
| Injection energy | to 100 keV \times Z | to 76 keV \times Z |
| A/Z | 4 \div 7.5 | 4,44 \div 6.86 |
| Energy range | 4 \div 8 MeV/nucleon | 3,81\div7,46 MeV/nucleon |
| Ions (for DECRIS-PM) | 4-136 | 12($^{12}\text{C}^{2+}$) - 84($^{84}\text{Kr}^{14+}$) |
| Intensities | >10 μA (for A \sim 50) | 10.4 μA($^{40}\text{Ar}^{7+}$); 8.73 μA ($^{48}\text{Ca}^{10+}$) |
| Magnetic field level | 0.6 \div 1.3 T | 0.8 \div 1.23 T |
| Dee voltage | 130 kV | 130 kV |
| flat-top dee voltage | 13 kV | 13 kV |
| Acceleration efficiency | >50% | 52,17% (^{48}Ca 3.3 μA) |
| Emittance | Less than 30 π mm \cdot mrad | |

Efficiency of acceleration on DC-280

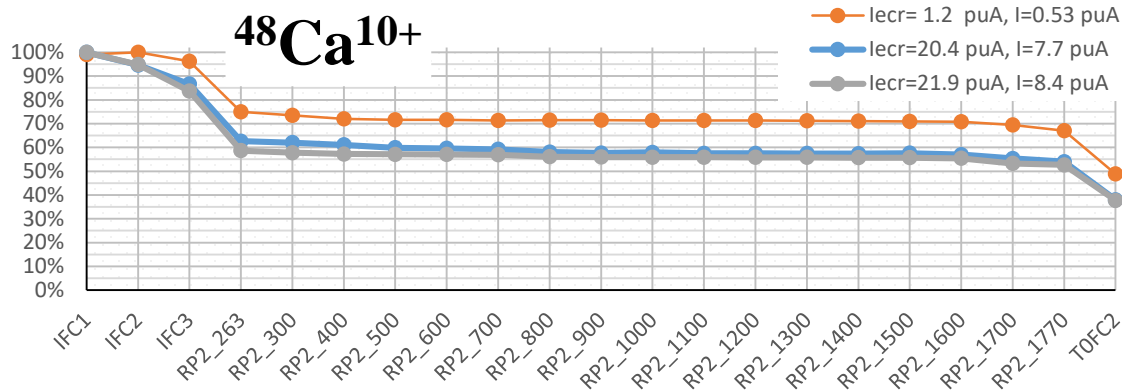
| Ion | Energy (MeV) | Intensity (μA) | | | | | Efficiency (%) | | | | |
|------------------------|--------------|-----------------------------|------------------|-----------|------------|-------------------|------------------------|---------|-----------|------------|-------|
| | | Axial injection system | | Cyclotron | | Transport Channel | Axial injection system | capture | Cyclotron | Extraction | Total |
| | | after separation | before injection | R=400 mm | R= 1770 mm | | | | | | |
| $^{48}\text{Ca}^{10+}$ | 240 | 1,2 | 1,15 | 0,86 | 0,80 | 0,53 | 96% | 75% | 93% | 67% | 45% |
| $^{48}\text{Ca}^{+10}$ | 240 | 9 | 8,07 | 5,58 | 5,1 | 4,7 | 90% | 69% | 91% | 91% | 50% |
| $^{48}\text{Ca}^{10+}$ | 240 | 20 | 17,6 | 12,4 | 11 | 7,7 | 87% | 70% | 88% | 71% | 38% |
| $^{48}\text{Ca}^{10+}$ | 238 | 21,3 | 17,8 | 12,1 | 11 | 8,4 | 84% | 68% | 91% | 76% | 39% |
| $^{48}\text{Ti}^{9+}$ | 265 | 4,83 | 3,93 | 2,79 | 2,47 | 2,13 | 81% | 71% | 88% | 86% | 44% |
| $^{52}\text{Cr}^{10+}$ | 250 | 6,3 | 5,2 | 3,56 | 3,23 | 2,62 | 83% | 69% | 91% | 81% | 42% |
| $^{54}\text{Cr}^{10+}$ | 270 | 5,9 | 5 | 3,7 | 3,2 | 2,54 | 85% | 73% | 87% | 79% | 43% |
| $^{56}\text{Fe}^{10+}$ | 270 | 5,0 | 4,5 | 3,5 | 3,4 | 2,8 | 90% | 77% | 97% | 82% | 55% |



$^{48}\text{Ti}^{9+}$ from $(\text{CH}_3)_5\text{C}_5\text{Ti}(\text{CH}_3)_3$



$^{52}\text{Cr}^{10+}$ from $\text{Cr}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$



Spectrum from DECRIS-PM in optimal regime

Проект реконструкции циклотрона У-400 → У-400Р

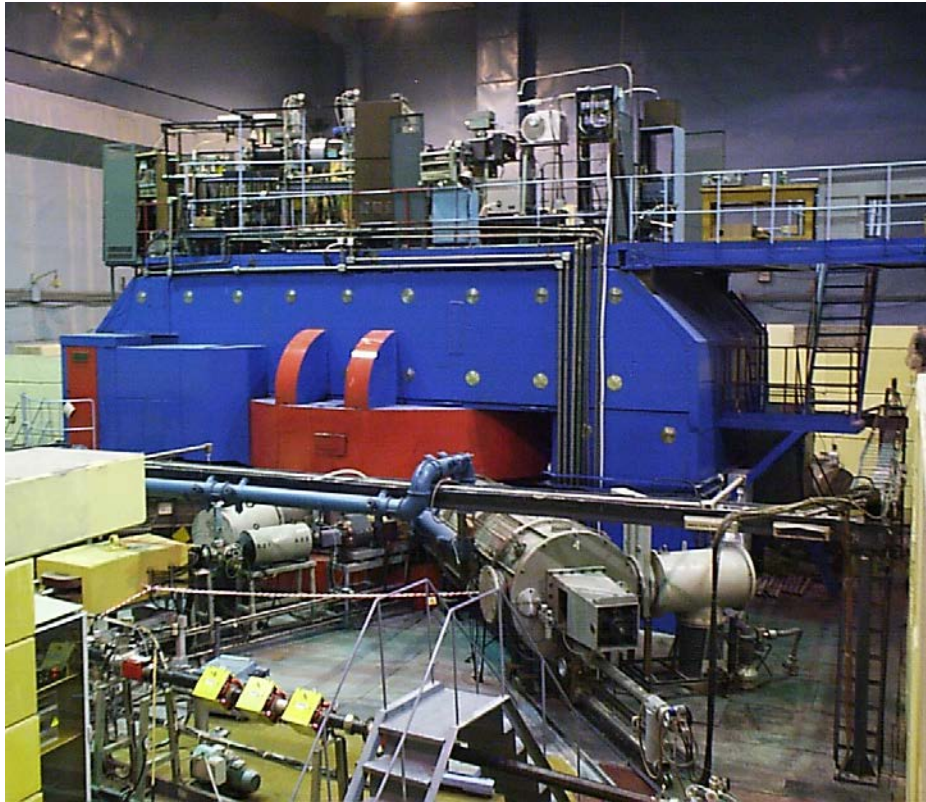
Цели реконструкции У-400:

1. Увеличение интенсивности пучков ионов с массой $A \approx 50$ и энергией ≈ 6 МэВ/нукл. до 2,5 рμА.
2. Обеспечение вариации энергии ионов в 5 раз, с точностью $\Delta E/E = 5 \cdot 10^{-3}$.
3. Снижение среднего магнитного поля с 1,9 ÷ 2,1 Тл до 0,8 ÷ 1,8 Тл.
4. Обновление вакуумной системы. Улучшение вакуума.
5. Обеспечение энергетического разброса пучка на мишени - 10^{-3} .
6. Обеспечение эмиттанса пучка на мишени – 10 п мм · мрад.

Comparative parameters of U400 and U400R

| Parameters | U400 | U400R |
|---------------------|------------|----------------------|
| A/z range | 5÷12 | 4÷12 |
| Magnetic field | 1.93÷2.1 T | 0.8÷1.8 T |
| K factor | 530÷625 | 100÷500 |
| RF modes | 2 | 2, 3, 4, 5, 6 |
| Injection potential | 10÷20 kV | 10÷50 kV |
| Ion energy range | 3÷20 MeV/n | 0.8÷27 MeV/n |
| Number of sectors | 4 | 4 |
| Number of dees | 2 | 2 |
| Beam extraction | stripping | Stripping, deflector |
| Power consumption | ~1 MW | ~0.4 MW |

U-400M (MC-400) Cyclotron



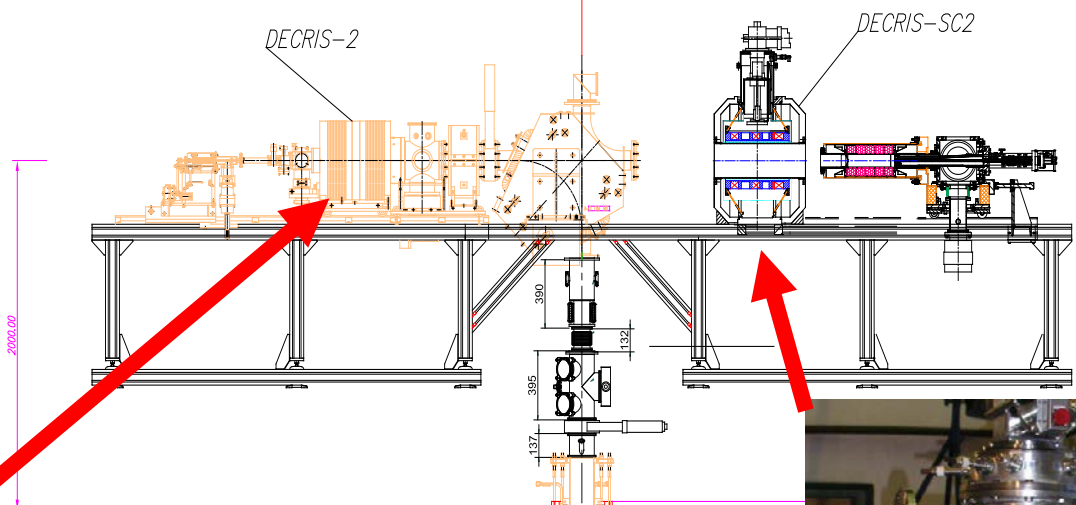
- Properties and structure of light exotic nuclei;
- Astrophysics;
- Reactions with exotic nuclei;
- Light neutron-rich nuclei;
- Deep inelastic scattering;
- Production of RIBs.

1989- 1991:

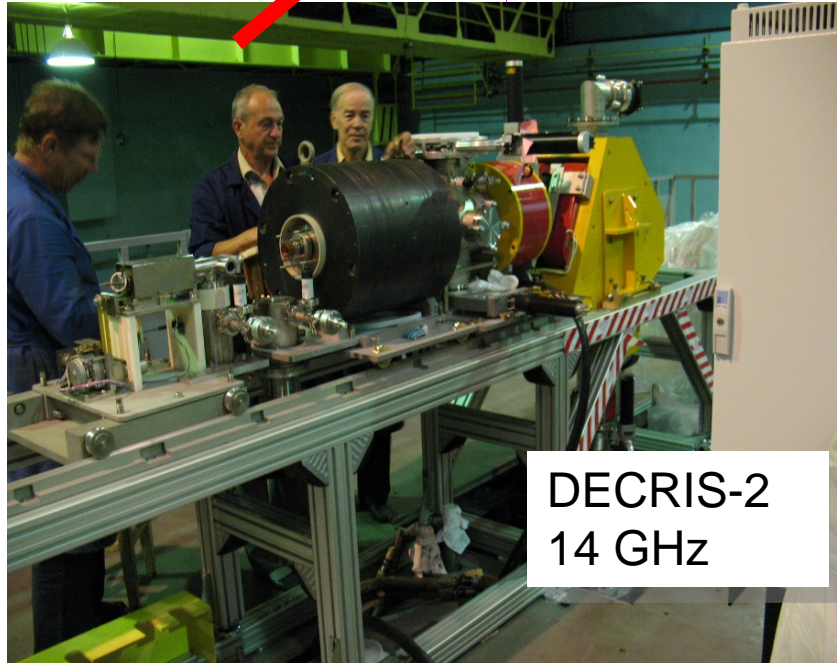
Reconstruction U-300→U-400M

| Technical parameters | U-400M |
|-----------------------------|---------------------------------|
| magnetic poles diameter [m] | 4.0 |
| Magnetic induction [T] | 1.5 ÷ 1.95 |
| Weight of magnet [t] | 2300 |
| Injection potential [kV] | Up 25 |
| N sectors/ angle | 4/42°; Spiral 43° |
| N dee | 4 |
| Dee voltage [kV] | Up 120 |
| Frequency [MHz] | 11.5 ÷ 24 |
| Harmonic | 2; 4 |
| A/Z | 7-10; 2,5-6 |
| Extraction type | Recharge foil, Two direction |
| Ion energy MeV/nucleon | 4-11 15-60 |

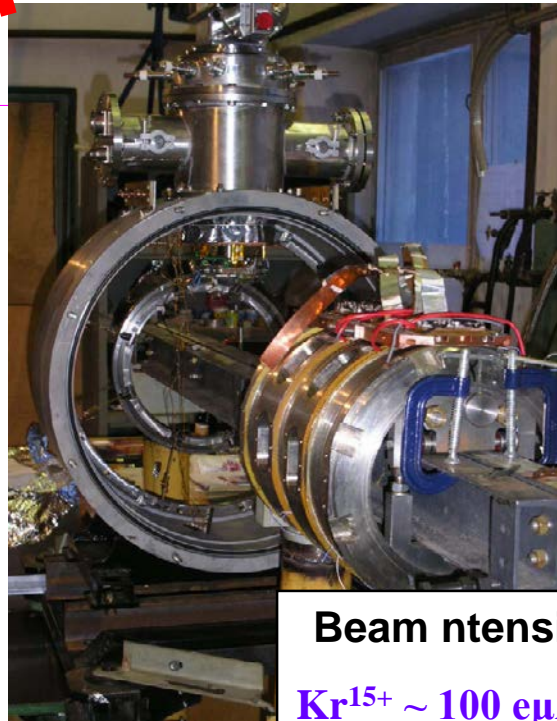
U400M. New ion sources and axial injection system (1995)



DECRIS-SC2
18 GHz



DECRIS-2
14 GHz

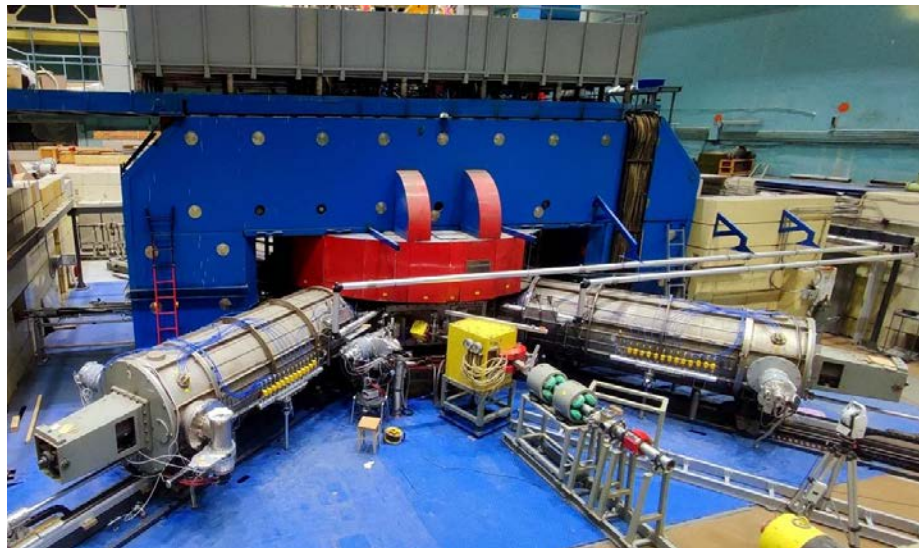
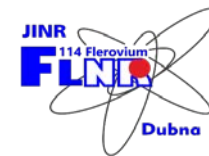


Beam intensity:
 $Kr^{15+} \sim 100 \mu A,$
 $Kr^{20+} \sim 10 \mu A,$
 $Xe^{30+} \sim 5 \mu A$

Циклотрон У-400М

| На циклотроне У-400М предусмотрены 3 режима ускорения | Ион | Энергия [МэВ/А] | Интенсивность выведенного пучка |
|---|-------------------------|--------------------|------------------------------------|
| <i>Режим ускорения ионов низкой энергии</i> | | | |
| $E=4.5 \div 11 \text{ MeV/A}$ $A/Z=6-10$ Гармоника ускорения - 4 Вывод перезарядкой: $Z_{\text{уск}}/Z_{\text{выв}} = 2,0-4,0$ | $^{12}\text{C}^{2+}$ | 11 | 3×10^{12} |
| | $^{48}\text{Ca}^{6+}$ | 6,6 | 3×10^{12} |
| | $^{136}\text{Xe}^{17+}$ | 6,3 | 2×10^{10} |
| | $^{238}\text{U}^{30+}$ | 5 | |
| <i>Режим ускорения ионов высокой энергии (основной)</i> | | | |
| $E=30 \div 55 \text{ MeV/A}$ $A/Z=2,8-5$ Гармоника ускорения - 2 Вывод перезарядкой: $Z_{\text{уск}}/Z_{\text{выв}} = 1,4-1,7$ | $^7\text{Li}^{2+}$ | 35 | 6×10^{13} |
| | $^{18}\text{O}^{5+}$ | 33 | 1×10^{13} |
| | $^{40}\text{Ar}^{12+}$ | 40 | 1×10^{12} |
| <i>Режим ускорения ионов высокой энергии (дополнительный)</i> | | | |
| $E=55 \div 100 \text{ MeV/A}$ $A/Z=2,0-2,8$ Гармоника ускорения - 2 Ускоритель в таком режиме не работал (Существующая система вывода не позволяет выводить пучок из циклотрона) | $^{11}\text{B}^{5+}$ | 86 | |
| | $^{32}\text{S}^{14+}$ | 80 | |
| | $^{22}\text{Ne}^{9+}$ | 70 | |
| | $^{48}\text{Ca}^{18+}$ | 59 | |

Модернизация У-400М (МЦ-400)



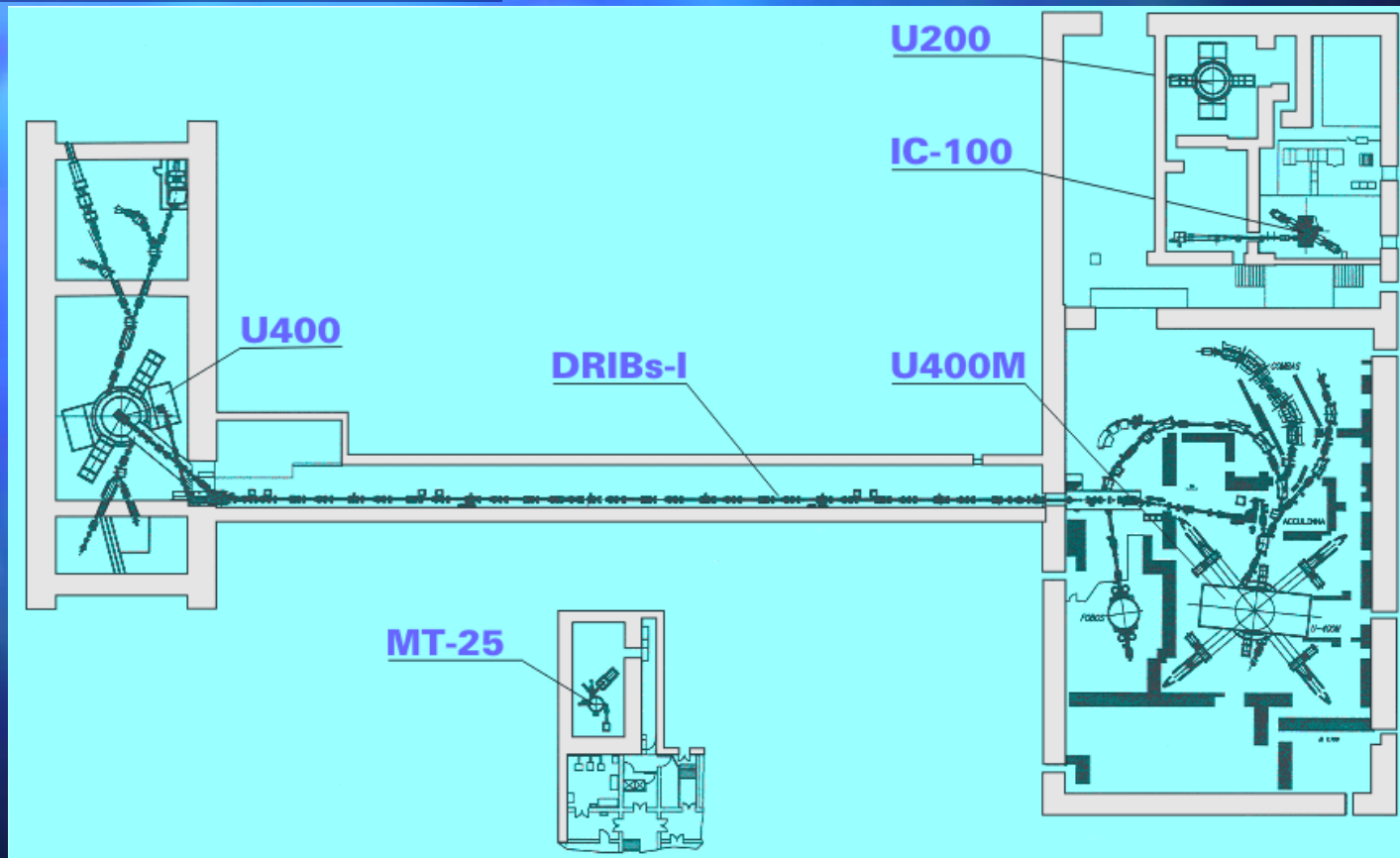
2020-2024

Техническая модернизация

**Intensity and energy of type ions
after modernization U-400M (MC-400)**

| Ion | 2019 | | Expected | |
|--------------------------|-----------|--------|-----------|--------|
| | E (MeV/u) | I(pμA) | E (MeV/u) | I(pμA) |
| ${}^7\text{Li}$ | 35 | 5 | 39 | 10 |
| ${}^{11}\text{B}$ | 30 | 3 | 33 | 6 |
| ${}^{15}\text{N}$ | 47 | 0.5 | 51 | 2 |
| ${}^{18}\text{O}$ | 36 | 0.5 | 40 | 1.5 |
| ${}^{22}\text{Ne}$ | 45 | 0.3 | 50 | 1 |
| ${}^{36}\text{S}$ | 40 | 0.12 | 44 | 0.2 |
| ${}^{48}\text{Ca}$ | 34 | - | 38 | 0.1 |
| ${}^{56}\text{Fe}^{15+}$ | 36 | 0.01 | 40 | 0.1 |

Пучки ускоренных ионов радиоактивных элементов



Ускорители ЛЯР

DRIBs Accelerated Complex

RIB facilities: ${}^6\text{He}$, ${}^8\text{He}$ beam intensities

| | | DRIBS |
|---------------------------|------------------------|--|
| ${}^6\text{He}$ 808 ms | RIB | 10^7 pps (<i>experiment</i>) 13÷8 MeV/n |
| | Primary beam Target | ${}^7\text{Li}$; 10 pμA 32 MeV/n Be |
| ${}^8\text{He}$ 119 ms | RIB | $1,5 \cdot 10^5$ pps (<i>project</i>) 6÷8 MeV/n |
| | Primary beam Target | ${}^{11}\text{B}$; 10 pμA 34 MeV/n Be |

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ
ЦИКЛОТРОНЫ
ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ
для производства трековых
мембран и промышленного
использования в области
нанотехнологий**

ПЕРВЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ТЯЖЕЛЫХ ИОНОВ ИСПОЛЬЗОВАННЫЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТРЕКОВЫХ МЕМБРАН И МОДИФИКАЦИИ ПОЛИМЕРОВ - ЦИКЛОТРОН У-300



Циклотрон У-300 (1960-1989)

- Создан в НИИЭФА им. Д.В.Ефремова
- Работал в ЛЯР ОИЯИ с 1960 по 1989 г.

- ❖ Специализированный канал для облучения полимерных пленок на ускорителе был создан в середине 70-х годов.
- ❖ Для производства трековых мембран и исследовательских задач использовались пучки ионов Хе с энергией 1 МэВ/н.

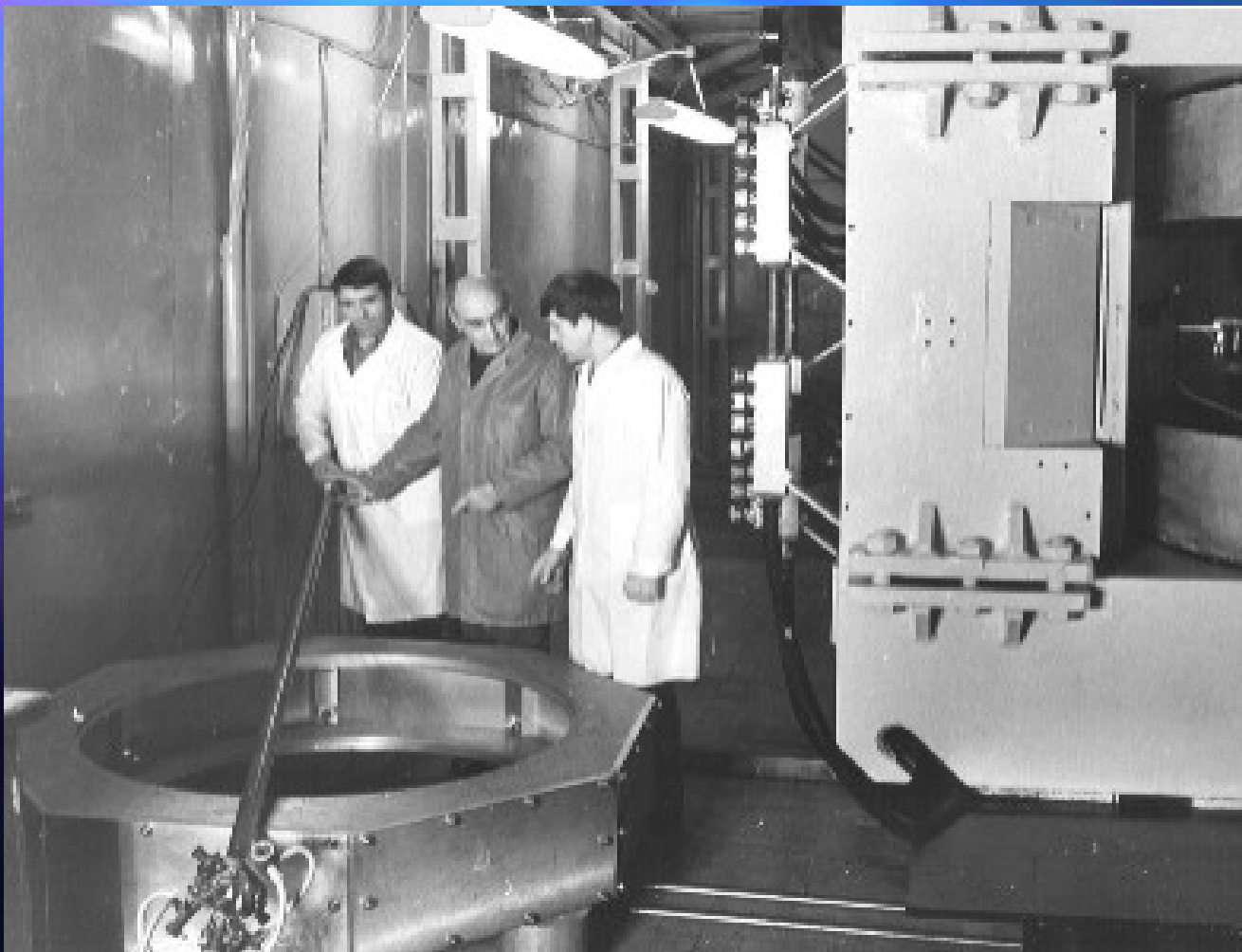
Технология производства трековых мембран разработана на основе метода регистрации тяжелых частиц с помощью пластиковых детекторов.

1. Флеров Г.Н., Барашенков В.С. Практическое применение пучков тяжелых ионов. УФН, 1974, 114, №2, 351

2. Агапьев Г.Н., Барашенков В.С., Самойлова Л.И., Третьякова С.П., Щеголев В.А. К методике изготовления ядерных фильтров. Деп. Публикация ОИЯИ, Дубна, 1074, Б1-14-8214.

IMPLANTING CYCLOTRON IC-100

History pages 1985



Первый целевой
циклотрон для
производства
трековых мембран
(ядерных фильтров)

Энергия ионов:
~ 1,2 МэВ/нукл.

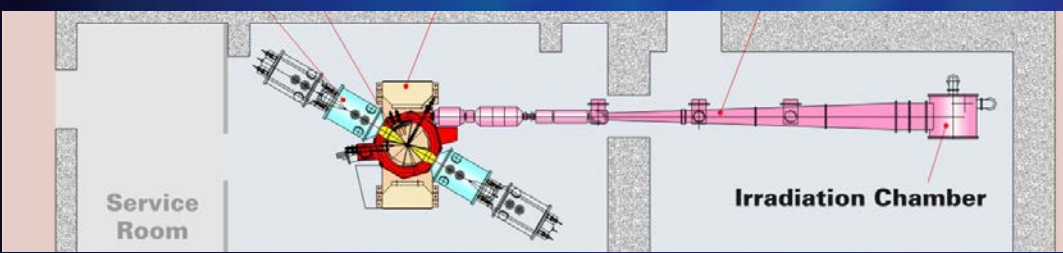
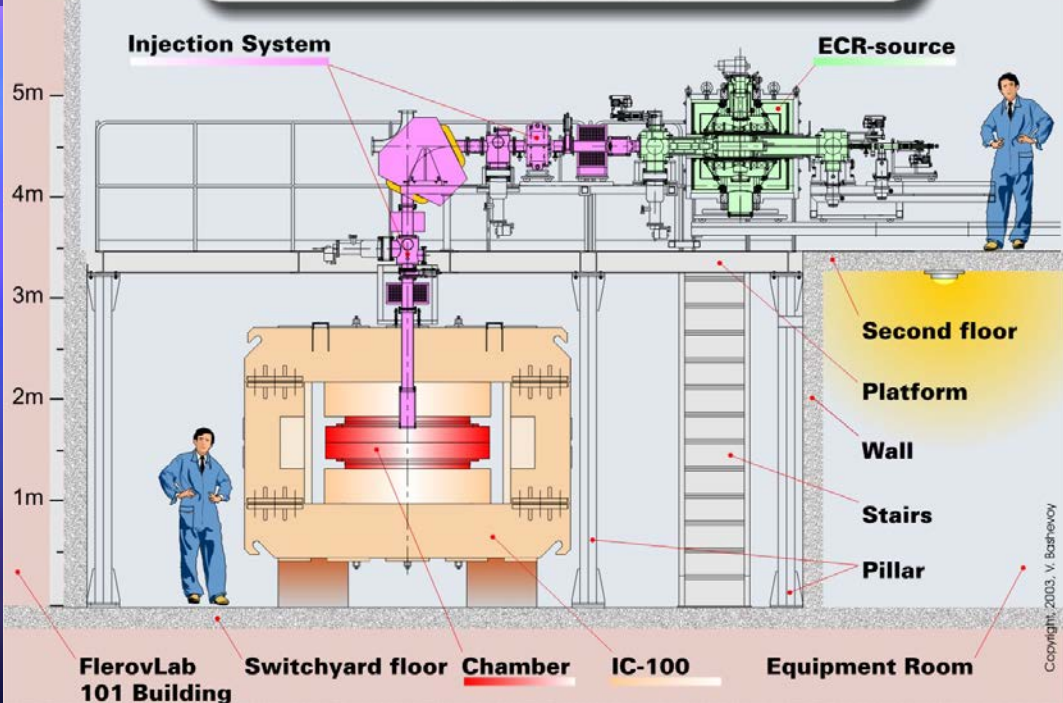
Внутренний источник
ионов - PIG

Ускоряемые ионы:
C – Ar ($A/Z = 5.7-6$)

Интенсивность
пучка Ar - 1^{28} мкА

Реконструкция циклотрона ИЦ-100 (2001-2002 г.)

FRONT VIEW OF IMPLANTING CYCLOTRON IC-100
Flerov laboratory of nuclear reactions



Интенсивности пучков ионов на циклотроне ИЦ-100 (февраль 2007).

Энергия ускоренных ионов 1-1,2 МэВ/нуклон

| Элемент | Ион | A/Z | $F_{вч}$ МГц | Ток пучка на мишени в проведенных экспериментах | Максимальный полученный ток пучка |
|----------|-------------------------|--------|-----------------|--|---|
| Неон | $^{22}\text{Ne}^{+4}$ | 5.5 | 20.160 | 0.7 мкА | |
| Аргон | $^{40}\text{Ar}^{+7}$ | 5.714 | 20.200 | 2.5 мкА | |
| Железо | $^{56}\text{Fe}^{+10}$ | 5.6 | 20.240 | 0.5 мкА | |
| Криптон | $^{86}\text{Kr}^{+15}$ | 5.733 | 20.200 | 3.5 мкА | 3.5 мкА (0,23 рμА) |
| Йод | $^{127}\text{I}^{+22}$ | 5.773 | 20.200 | 0.25 мкА | |
| Ксенон | $^{132}\text{Xe}^{+23}$ | 5.739 | 20.180 | 3.7 мкА | 3.7 мкА (0,16 рμА) |
| Ксенон | $^{132}\text{Xe}^{+24}$ | 5.5 | 20.180 | 0.6 мкА | |
| Вольфрам | $^{182}\text{W}^{+32}$ | 5.6875 | 20.142 | 0.015 мкА | 15 нА (0,5 рнА) |
| Вольфрам | $^{184}\text{W}^{+31}$ | 5.9355 | 20.142 | 0.035 мкА | 35 нА (1 рнА) |
| Вольфрам | $^{184}\text{W}^{+32}$ | 5.75 | 20.142 | 0.017 мкА | 17 нА (0,5 рнА) |

ЦИКЛОТРОН ДЦ-60

Разработан и создан в ЛЯР ОИЯИ (2004 – 2006) для Междисциплинарного научно-исследовательского комплекса (МНИК) (Астана, Казахстан)

НАЗНАЧЕНИЕ ЦИКЛОТРОНА:

- Фундаментальные и прикладные исследования на пучках тяжелых ионов низких и средних энергий
- Трековые мембраны и их применение
- Модификация поверхности материалов
- Ионно-имплантационная нанотехнология
- Подготовка студентов и аспирантов (в 2008 г. создана международная¹ кафедра в Евразийском национальном университете им. Л.Н.Гумилева)



DC-60 CYCLOTRON



DC-60 CYCLOTRON

Параметры пучков ионов низкой энергии из ЭЦР источника

| | |
|------------------------------------|---|
| Тип ионов | Li ÷ Xe |
| Отношение массы к заряду (A/Z) | 2 ÷ 20 |
| Энергия ионов ECR источника | 10 ÷ 20 кэВ/заряд |
| Энергетический разброс | 0,1 % |
| Дискретное изменение энергии ионов | за счет изменения заряда иона (A/Z) |
| Плавная вариация энергии ионов | за счет вариации потенциала ECR источника |

DC-60 CYCLOTRON

Параметры пучков ускоренных ионов

| | |
|---|--|
| Тип ионов | Li ÷ Xe |
| Отношение массы к заряду (A/Z) | 6 ÷ 12 |
| Энергия ускоренных ионов | 0,35 ÷ 1,77 МэВ/нукл. |
| Энергетический разброс | 2 % |
| Дискретное изменение энергии ионов | за счет изменения заряда иона (A/Z) |
| Плавная вариация энергии ионов от номинальной | -25 % / +25% за счет вариации магнитного поля |

ЦИКЛОТРОН DC-60

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

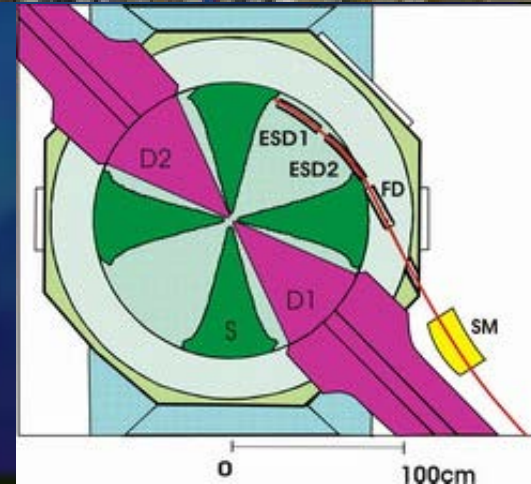
Пучки ионов, ускоренных в ходе пусконаладочных работ
(декабрь 2006 г.)

| Ион | A/Z | Энергия иона МэВ/нукл | Магнитное поле в центре, Тл | Ток пучка, мкА, на внутреннем радиусе R=120мм | Ток пучка, мкА, на радиусе вывода R=680мм |
|------------------------|------|--------------------------|--------------------------------------|--|--|
| $^{14}\text{N}^{2+}$ | 7 | 1 | 1.42 | 10.5 | 10 |
| $^{14}\text{N}^{2+}$ | 7 | 1.05 | 1.47 | 1.86 | 1.7 |
| $^{14}\text{N}^{2+}$ | 7 | 1.32 | 1.64 | 1.62 | 1.46 |
| $^{20}\text{Ne}^{3+}$ | 6.67 | 1.03 | 1.4 | 2.2 | 2 |
| $^{22}\text{Ne}^{2+}$ | 11 | 0.38 | 1.4 | 1.85 | 1.77 |
| $^{40}\text{Ar}^{4+}$ | 10 | 0.65 | 1.64 | 1.5 | 1.4 |
| $^{40}\text{Ar}^{5+}$ | 8 | 0.58 | 1.25 | 0.98 | 0.64 |
| $^{40}\text{Ar}^{5+}$ | 8 | 0.98 | 1.63 | 0.61 | 0.52 |
| $^{40}\text{Ar}^{6+}$ | 6.67 | 1.06 | 1.4 | 2 | 1.85 |
| $^{40}\text{Ar}^{7+}$ | 5.71 | 1.14 | 1.25 | 1.92 | 1.83 |
| $^{84}\text{Kr}^{+12}$ | 7 | 1 | 1.42 | 2.72 | 2.48 |

Облучательный комплекс «Альфа» г.Дубна на базе циклотрона ЦИТРЕК (2002г.) (проект Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ)

Дубна.

- ❖ Промышленный комплекс АЛЬФА, построенный для производства плазморизаторов крови.
- ❖ Базовая установка - циклотрон ЦИТРЕК (запуск август 2002), разработан в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.
- ❖ Ускоряемые ионы - Ar с фиксированной энергией 2,4 МэВ/нуклон



Циклотронный комплекс тяжелых ионов DC-110 для Научно-производственный комплекса «Бета» для производства трековых мембран г.Дубна, Московская область (2012г.)

Объединенный институт ядерных исследований
Лаборатория ядерных реакций им. Г.Н.Флёрова

- Производство трековых мембран на основе полимерных пленок толщиной до 30 мкм.
- Циклотрон должен ускорять пучки ионов *Ar, Kr, Xe*
 - с фиксированной энергией 2,5 МэВ/нукл.,
 - с интенсивностью $\sim 1 \text{ рмА}$ ($6 \cdot 10^{12}$ частиц/сек.)
- Оборудование должно быть простым и надежным.
- Время работы в режиме облучения пленки – 7000 час./год.³⁷
- Начало проекта август 2009. Срок создания – 2,5 года

Циклотрон ДЦ-110

май 2012 г.



Основные параметры циклотрона DC-110.

| УСКОРЯЕМЫЕ ИОНЫ | $^{86}\text{Kr}^{13+}$ | $^{132}\text{Xe}^{20+}$ | $^{40}\text{Ar}^{6+}$ |
|--|------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Отношение массы к заряду, A/Z | 6.615 | 6.60 | 6.667 |
| Энергия ионов, [МэВ/нуклон] | 2.5 | 2.5 | 2.5 |
| МАГНИТНАЯ СИСТЕМА | | | |
| Диаметр полюса магнита циклотрона, м | 2 | | |
| Среднее магнитное поле B_0 , [Тл] | 1.670 | 1.666 | 1.6830 |
| Рост среднего магнитного поля по радиусу ΔB , [Гс] | 45 | 45 | 45 |
| ВЫСОЧАСТОТНАЯ СИСТЕМА | | | |
| Частота обращения ионов $F_{\text{ион}}$, [МГц] | 3.877 | 3.877 | 3.877 |
| Гармоника ускорения | 2 | 2 | 2 |
| Частота высокочастотной системы $F_{\text{ВЧ}}$, [МГц] | 7.75 | 7.75 | 7.75 |
| ИОННЫЙ ИСТОЧНИК | ECR, 18 ГГц | | |
| СИСТЕМА ВЫВОДА | Электростатический дефлектор | | |

Основные параметры пучков циклотрона DC-110 (проект)

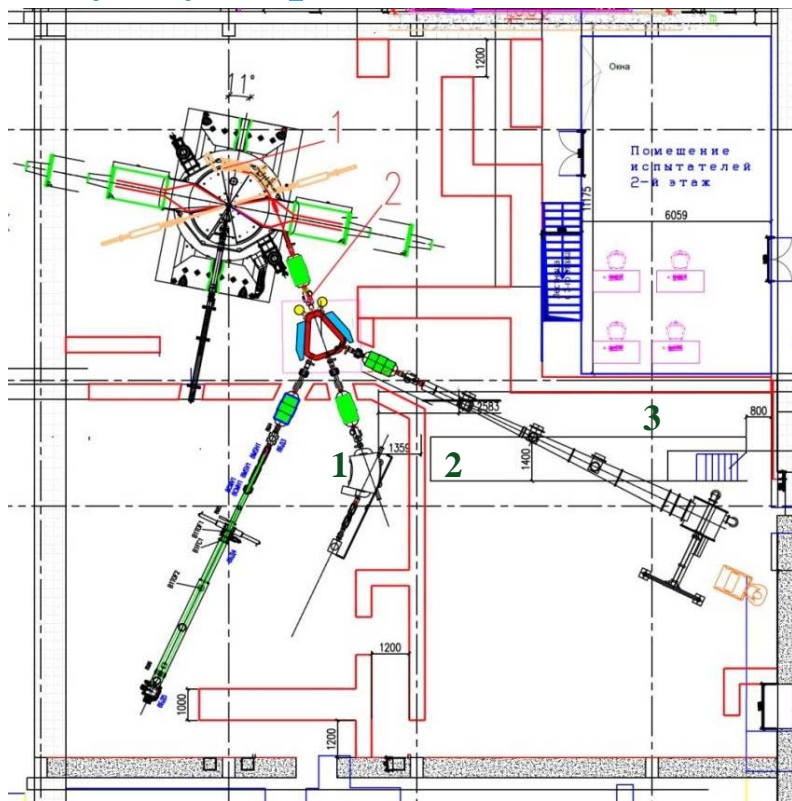
| | | | |
|--|--|------------------------|-------------------------------|
| ИСТОЧНИК ИОНОВ | «теплый» ECR, 18 ГГц (потреб. мощность 150 кВт) | | |
| УСКОРЯЕМЫЕ ИОНЫ | $^{40}\text{Ar}^{6+}$ | $^{86}\text{Kr}^{13+}$ | $^{132}\text{Xe}^{20+}$ |
| Энергия ионов | 2,5 МэВ/нукл | | |
| Интенсивность пучка в рутинном облучении пленки (1 рμА ≈ 6·10 ¹² част/сек) | <u>ECR</u> | | <u>на мишени</u> |
| | Ar | 10 * рμА | 1* рμА (6* μА) |
| | Kr | 10 * рμА | 1* рμА (13* μА) |
| | Xe | 5 рμА | 0,5 рμА (10 μА) |

*) - интенсивность пучка может быть получена больше, чем указана в таблице

Циклотрон ДЦ-140

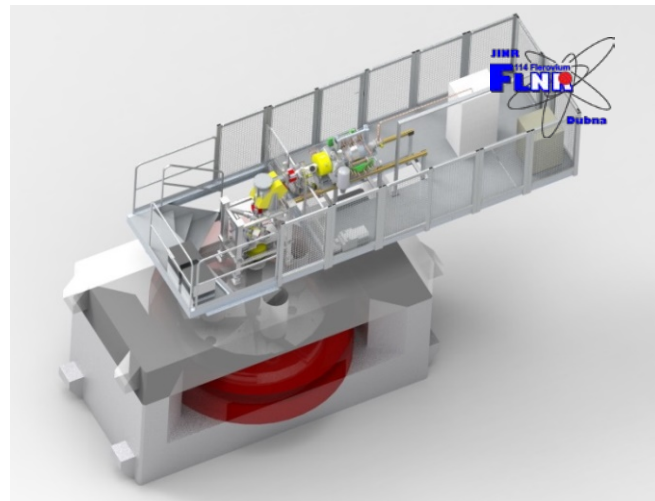
В ЛЯР ОИЯИ создается ускорительный комплекс для прикладного использования ионных пучков на базе циклотрона ДЦ-140.

Запуск ускорителя ДЦ-140 – 2025г.



Планируемое использование пучков ДЦ-140:

1. Канал тестирования электронных компонентов ~3000 час/год.
2. Канал радиационного материаловедения ~1500 час/год;
3. Канал облучения полимерных пленок ~1500 час/год;



Технические параметры ДЦ-140:

Магнитное поле в центре 1.377 - 1.554 Тл;

Частота ускорения ионов: 8.452 МГц;

Ускоряемые ионы элементов: O – Bi;

Инжекция ионов от ЭЦР- источника;

Энергии ионов:

2.124 МэВ/нукл. (A/Z=7.35 – 8.25)

4.8 МэВ/нукл. (A/Z=4.9 - 5.5)

Интенсивность пучка:

$10^5 \div 10^{12}$ ионов/с

Циклотрон ДЦ-140



Таблица 1. Ионы, ускоряемые в циклотроне ДЦ-140

(- уровень среднего магнитного поля, A/Z – отношение массы к заряду ионов)

Частота ВЧ- генератора **8.632 МГц**

Энергия ускоренных ионов **4.8 МэВ/нукл - ускорение на 2-й гармонике**

| Ион | $^{209}\text{Bi}^{38+}$ $^{22}\text{Ne}^{4+}$ | $^{197}\text{Au}^{36+}$ | $^{86}\text{Kr}^{16+}$ | $^{132}\text{Xe}^{25+}$ | $^{84}\text{Kr}^{16+}$ | $^{56}\text{Fe}^{11+}$ | $^{40}\text{Ar}^{8+}$ $^{20}\text{Ne}^{4+}$ | $^{16}\text{O}^{3+}$ |
|---------|--|-------------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|--|----------------------|
| A/Z | 5.50 | 5.472 | 5.375 | 5.280 | 5.250 | 5.091 | 5.00 | 5.333 |
| , Тл | 1.554 | 1.546 | 1.518 | 1.492 | 1.483 | 1.438 | 1.413 | 1.507 |

Энергия ускоренных ионов **2.124 МэВ/нукл - ускорение на 3-й гармонике**

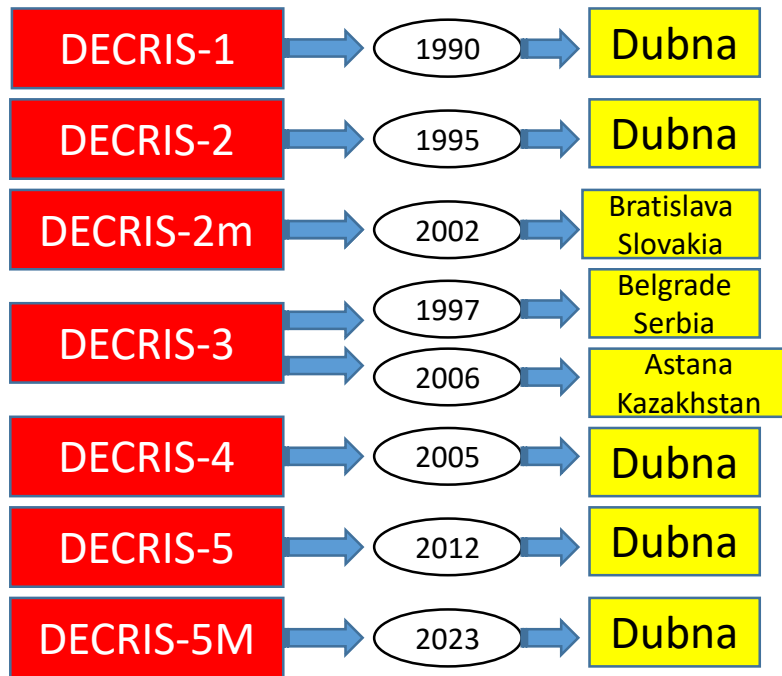
| Ион | $^{132}\text{Xe}^{16+}$ | $^{197}\text{Au}^{24+}$ | $^{209}\text{Bi}^{26+}$ | $^{16}\text{O}^{2+}$ | $^{86}\text{Kr}^{11+}$ | $^{115}\text{In}^{14+}$ | $^{90}\text{Zr}^{11+}$ | $^{98}\text{Mo}^{12+}$ |
|---------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| A/Z | 8.250 | 8.208 | 8.038 | 8.000 | 7.818 | 8.214 | 8.182 | 8.167 |
| , Тл | 1.549 | 1.541 | 1.509 | 1.502 | 1.468 | 1.542 | 1.536 | 1.534 |

| Ион | $^{114}\text{Cd}^{14}$ | $^{130}\text{Te}^{16+}$ | $^{138}\text{Ba}^{17+}$ | $^{121}\text{Sb}^{15+}$ | $^{127}\text{In}^{16+}$ | $^{158}\text{Gd}^{20+}$ | $^{142}\text{Nd}^{18+}$ | $^{102}\text{Ru}^{13+}$ |
|---------|------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| A/Z | 8.143 | 8.125 | 8.118 | 8.067 | 7.938 | 7.900 | 7.889 | 7.846 |
| , Тл | 1.529 | 1.526 | 1.524 | 1.515 | 1.491 | 1.484 | 1.481 | 1.473 |

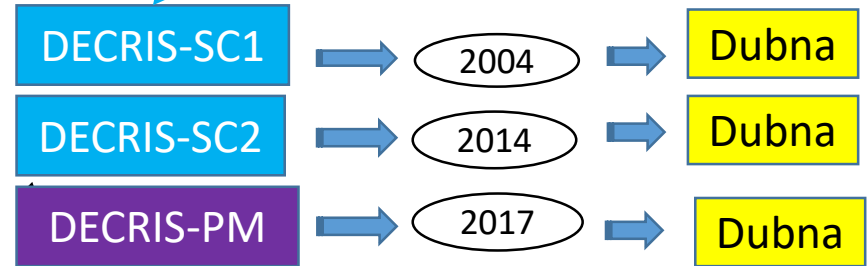
Развитие источников ионов электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) в ОИЯИ

DECRIS - Dubna ECR Ion Sources

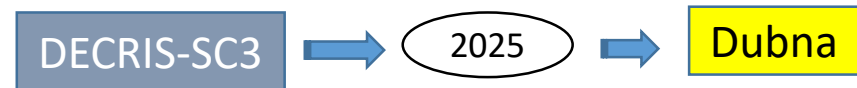
“Room temperature” coils
(14/18 GHz)



Superconducting coils
(14/18 GHz)

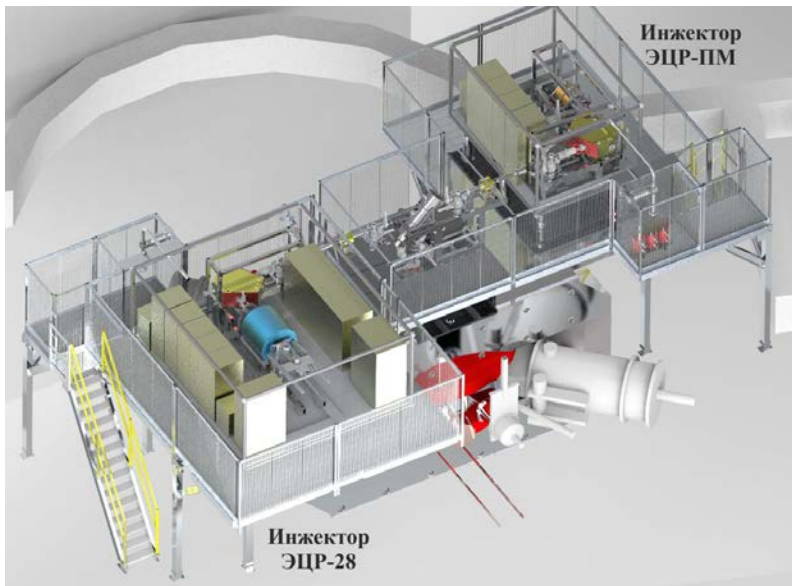
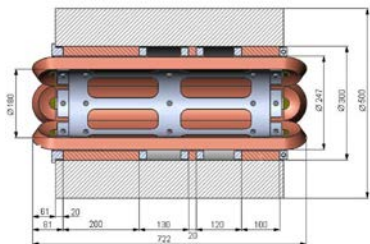
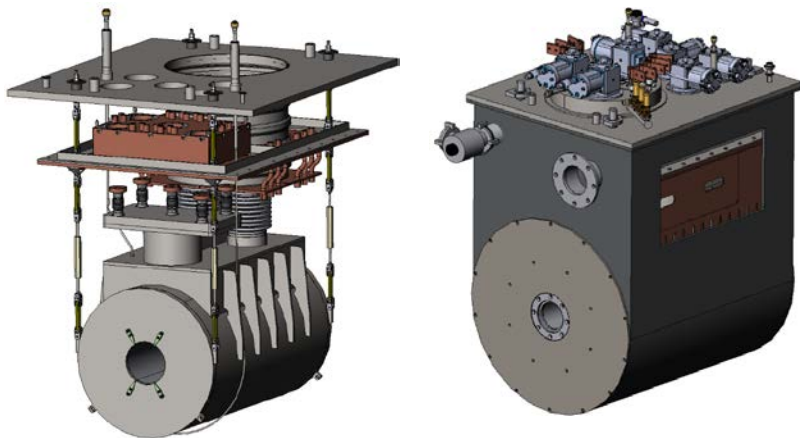


Permanent magnet rings
(14 GHz)



Superconducting ECRIS
(28 GHz)

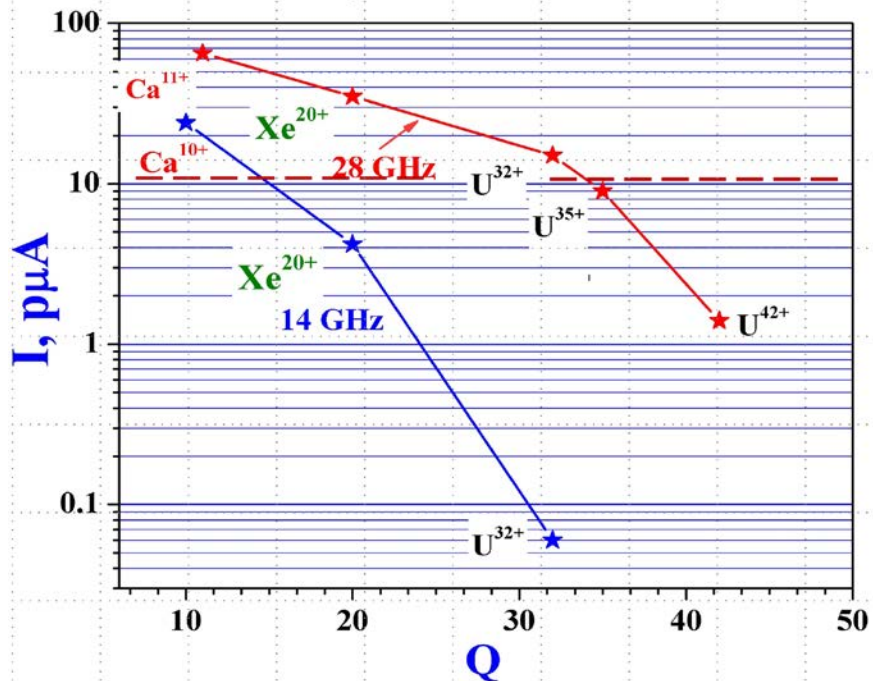
DECRIS-SC3 (28 GHz)



Key Parameters of the Magnetic System

| | |
|-----------------------------------|----------------|
| B_{inj} on axis | 4 T |
| B_{extr} on axis | 2÷2.5 T |
| Minimal axial field B_{min} | 0.5÷0.8 T |
| Field module $ B $ at $R = 62$ mm | 2.02 T |
| Field peak-to-peak axial distance | 420 mm |
| Conductor type (NbTi) | 1.24 × 1.51 mm |
| Solenoid working current | 400 A |
| Hexapole working current | 570 A |
| Warm bore diameter | 142 mm |
| Plasma chamber internal diameter | 125 mm |

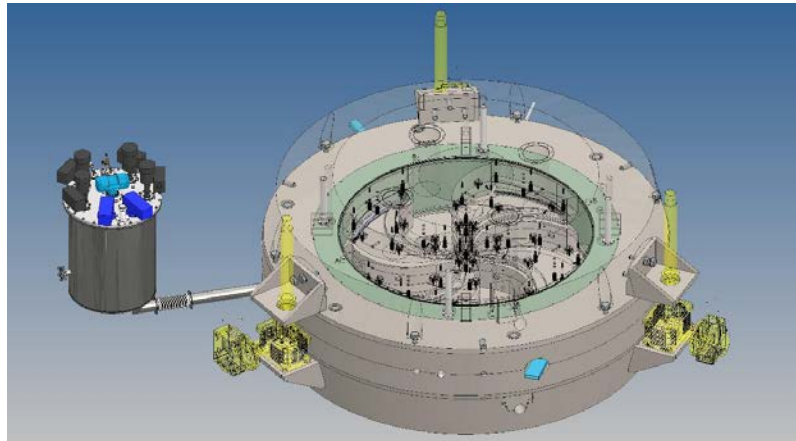
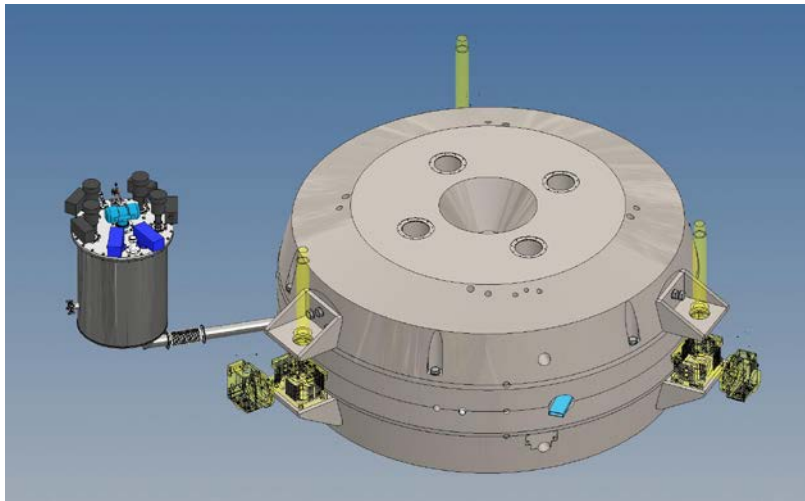
Beam intensity from 14 and 28 GHz ECRIS



Медицинский сверхпроводящий циклотрон МСЦ-230

- Проект Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.
- Ускоритель создаётся в сотрудничестве с НИИЭФА им. Д.В. Ефремова.

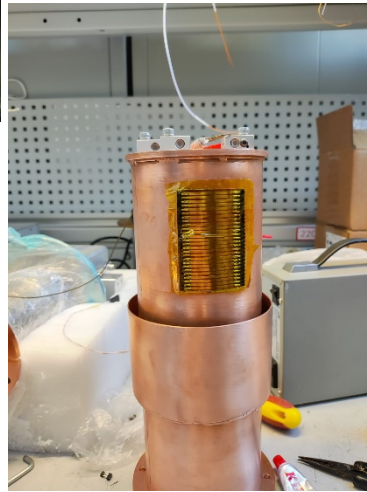
МСЦ-230 предназначен для проведения протонной лучевой терапии и медико-биологических исследований



Общие параметры

| Ускоряемые частицы | протоны |
|---|--|
| Тип магнита | сверхпроводящие катушки, «теплое» ярмо |
| Инжекция | Внутренний источник |
| Число оборотов | 500 |
| Параметры пучка | |
| Энергия частиц, МэВ | 230 |
| Ток выведенного пучка (непрерывный режим), мкА | 1 |
| Ток выведенного пучка импульсный режим (режим одиночного импульса), мкА | 10 |
| Длительность импульса, мс | 10-100 |
| Длительность фронта имп., мс | ≤ 1 |
| Частота повторения импульсов, Гц (режим одиночного импульса мин.) | 1-10 1 |
| Нестабильность тока | ±5% |
| Магнитная система | |
| Среднее магнитное поле (R_0/R_{ext}), Тл | 1.7 / 2.15 |
| Габариты (высота × диаметр), мм | 1700 × 3960 |
| Масса ярма, т | 130 |
| Радиус вывода пучка, мм | 1070 |
| Ток в обмотке возбуждения (на одну катушку), Ампер-витки | 265 000 |
| Ускоряющая система | |
| Частота, МГц | 106,5 |
| Число гармоник | 4 |
| Мощность, кВт | 60 |

Медицинский сверхпроводящий циклотрон МСЦ-230



Проведены расчеты характеристик электромагнита, резонансной системы, динамики пучка протонов в зоне ускорения и вывода циклотрона. Ведется техническое проектирование систем циклотрона. Завершено проектирование и изготовление гелиевого рефрижератора. Начато изготовление ярма циклотрона. Завершается подготовка инфраструктуры для проведения криогенных испытаний сверхпроводящего соленоида. Ведутся испытания криогенного оборудования



**THANK YOU
FOR YOUR
ATTENTION !**

Elerov Laboratory of Nuclear Reactions (JINR)