

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**

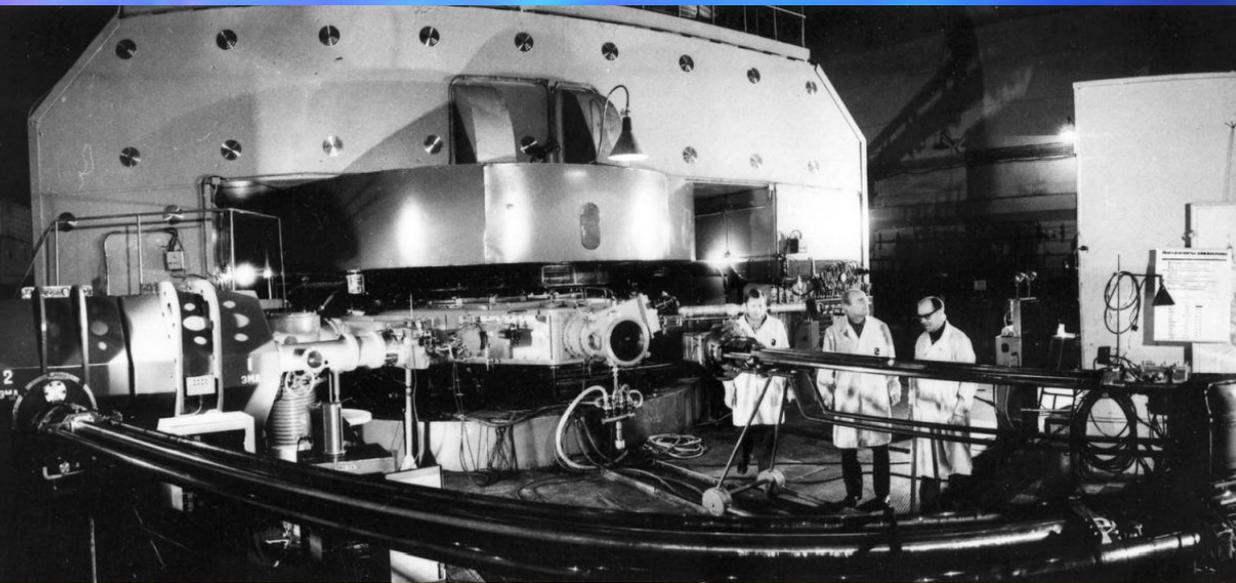
Большой вклад в создание ускорителя внесли специалисты ОКБ и завода "Электросила" Ленинград



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.

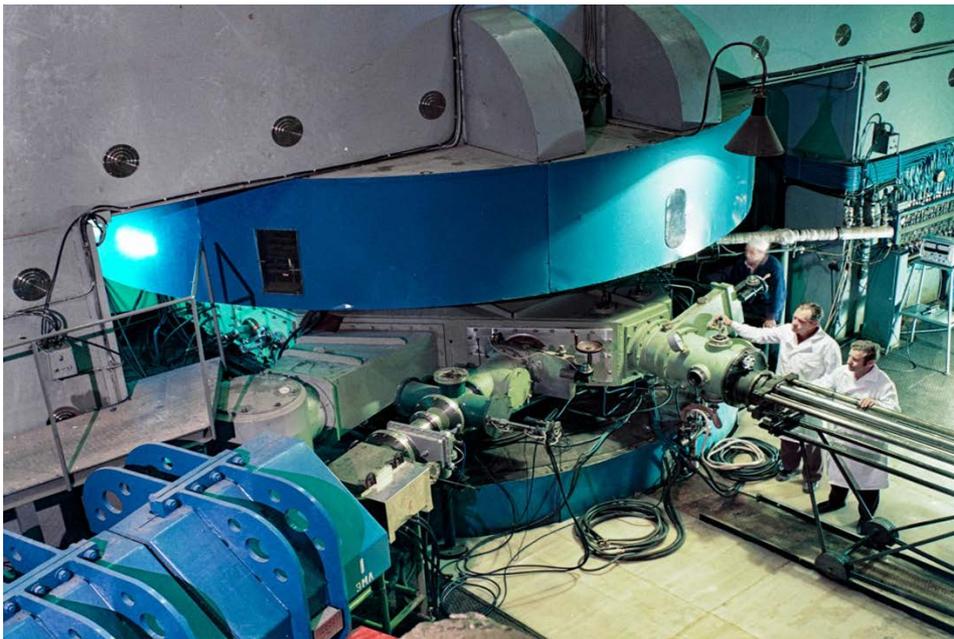


ЦИКЛОТРОН У-300

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



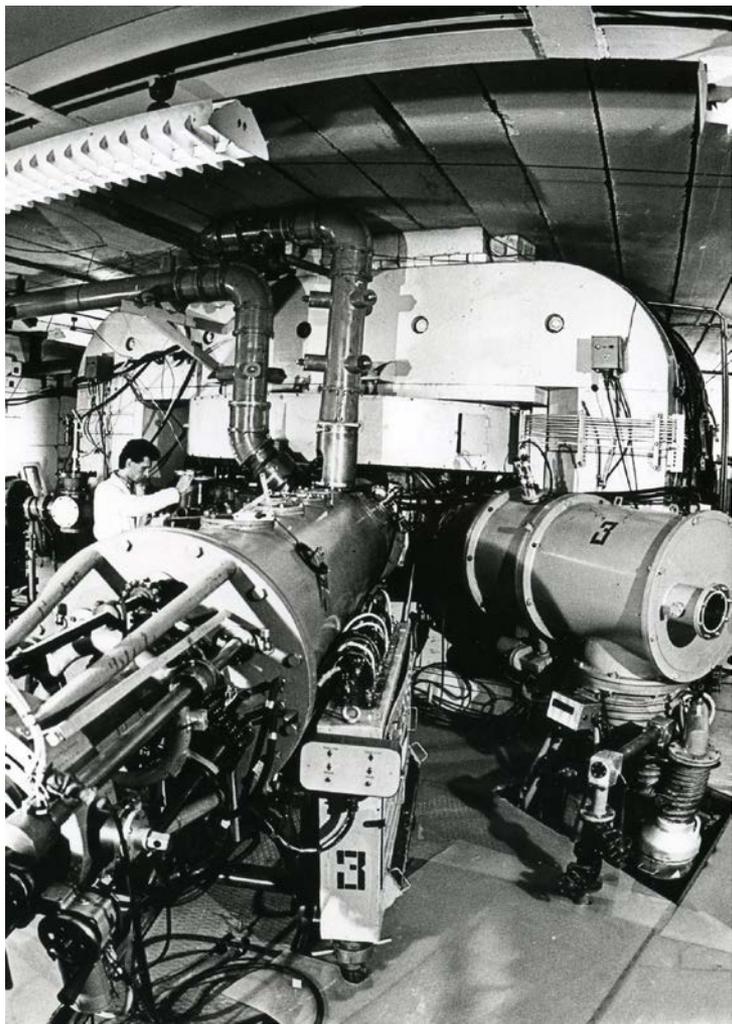
Электромагнит	
Диаметр полюса	3,1м
Вес магнита	1900 т
Средний воздушный зазор	540 мм
Среднее магнитное поле	1,67 Тл
Число корректирующих катушек	4
ВЧ-система	
Число дуантов	2
Азимутальная протяжённость	180°
Напряжение на дуанте	150 кВ
Диапазон частот	3-6 МГц
Давление в вакуумной камере	$6 \cdot 10^{-6}$ 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.



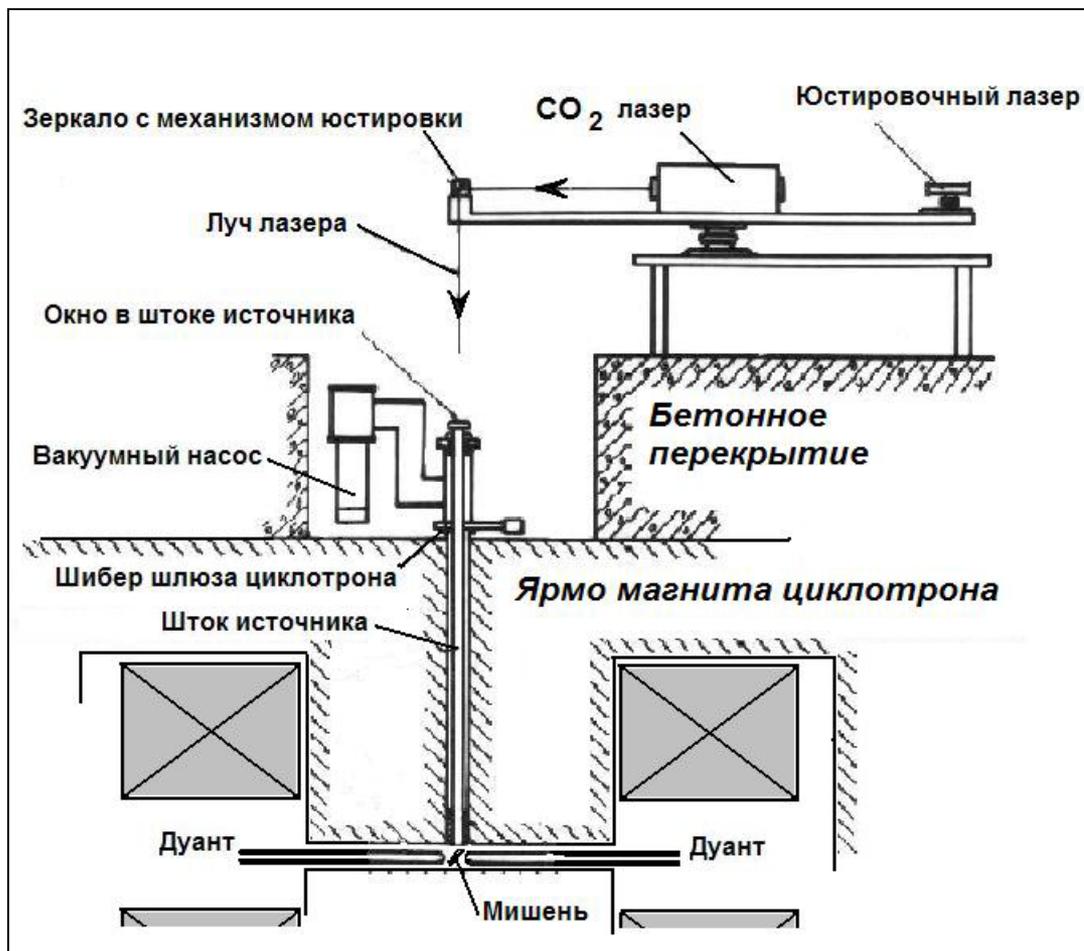
Ион	Е/А [МэВ/нук]	І Выв [мкА]
He ₃ ¹⁺	16	5*
(DH) ¹⁺	16	1*
He ₄ ¹⁺	9	330*
(D) ₂ ¹⁺	9	10*
C ₁₂ ²⁺ , C ₁₂ ³⁺ , C ₁₂ ⁴⁺	4 - 16	10 - 30
N ₁₄ ²⁺ , N ₁₄ ³⁺ , N ₁₄ ⁴⁺ , N ₁₄ ⁵⁺	3 - 18	6 - 30
O ₁₆ ³⁺ , O ₁₆ ⁴⁺ , O ₁₆ ⁵⁺	5 - 14	6 - 13
Ne ₂₀ ⁴⁺ - Ne ₂₀ ⁵⁺	5 - 9	0,5 - 6
Ar ₄₀ ⁷⁺ , Ar ₄₀ ⁸⁺	4,5 - 5,8	0,07

«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»

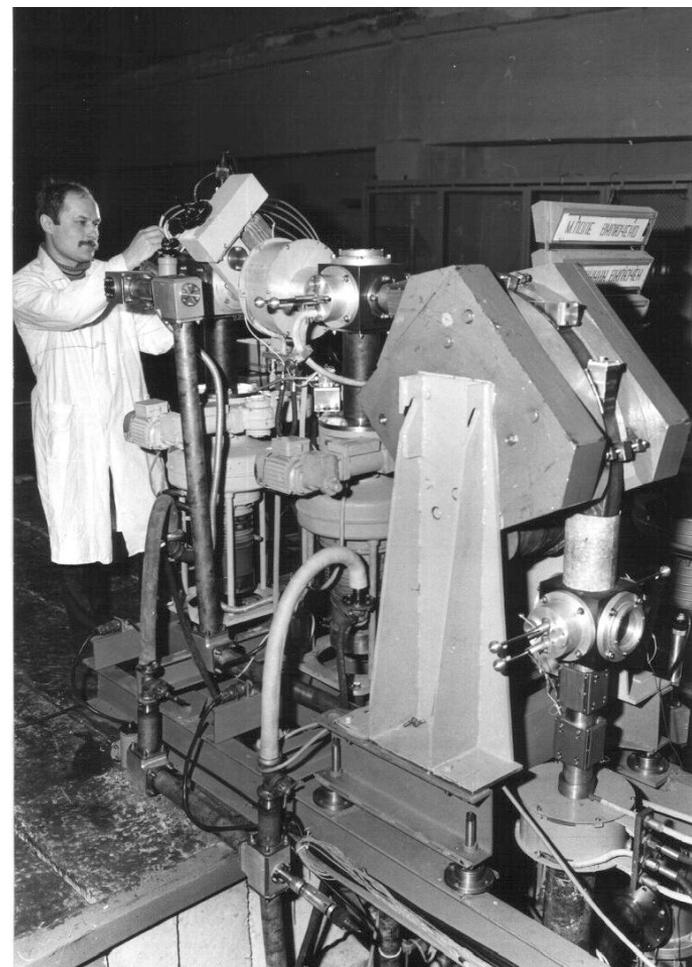
Ю.Ц. Оганесян. Наука и Жизнь №4 1980 год.

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 $^4\text{He}^{1+}$

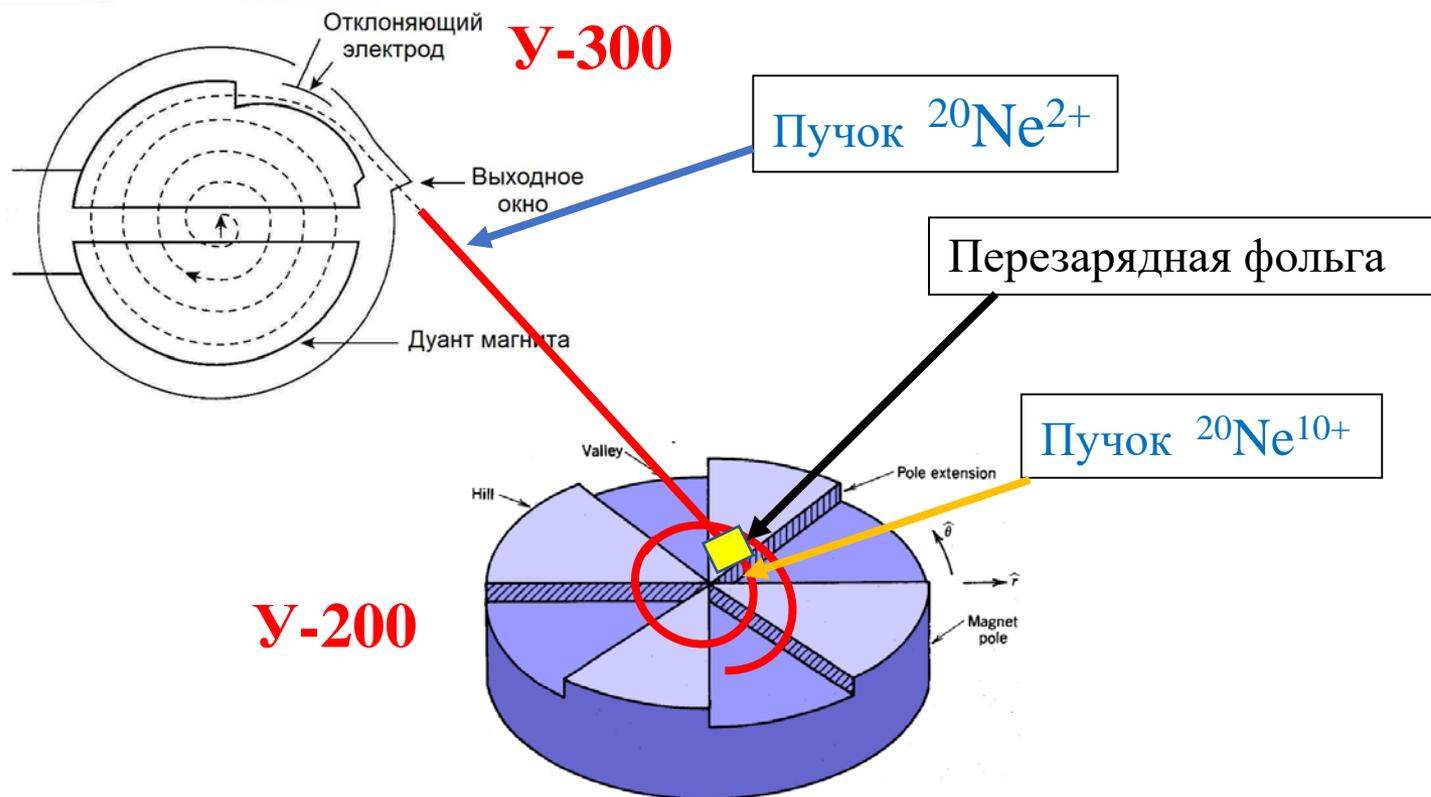


Тендем циклотронов У-300 и У-200

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.

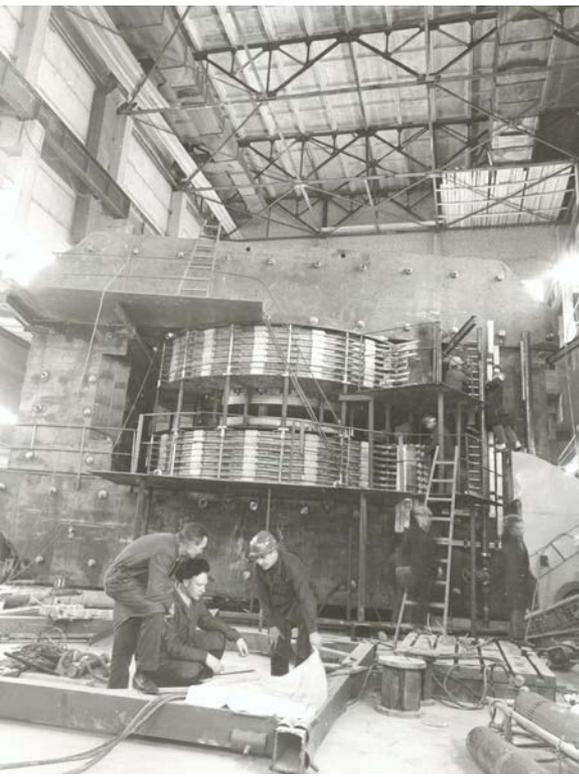
Впервые были получены пучки ионов Хе с энергией ≈ 1 ГэВ и интенсивностью 10^{10} ион/сек.

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

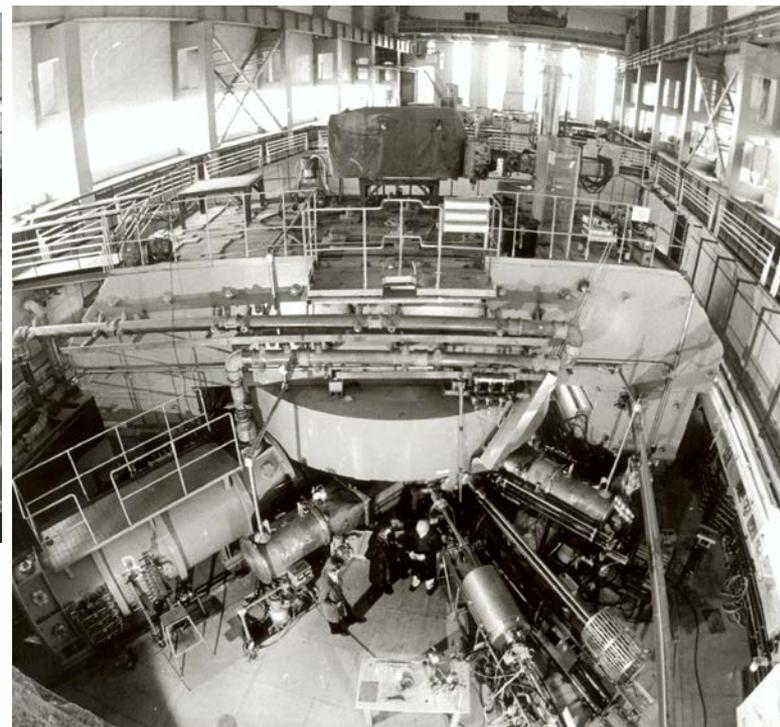


Циклотрон У-400 Лаборатории ядерных реакций ОИЯИ

- 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 $Z=112\div 118$.**



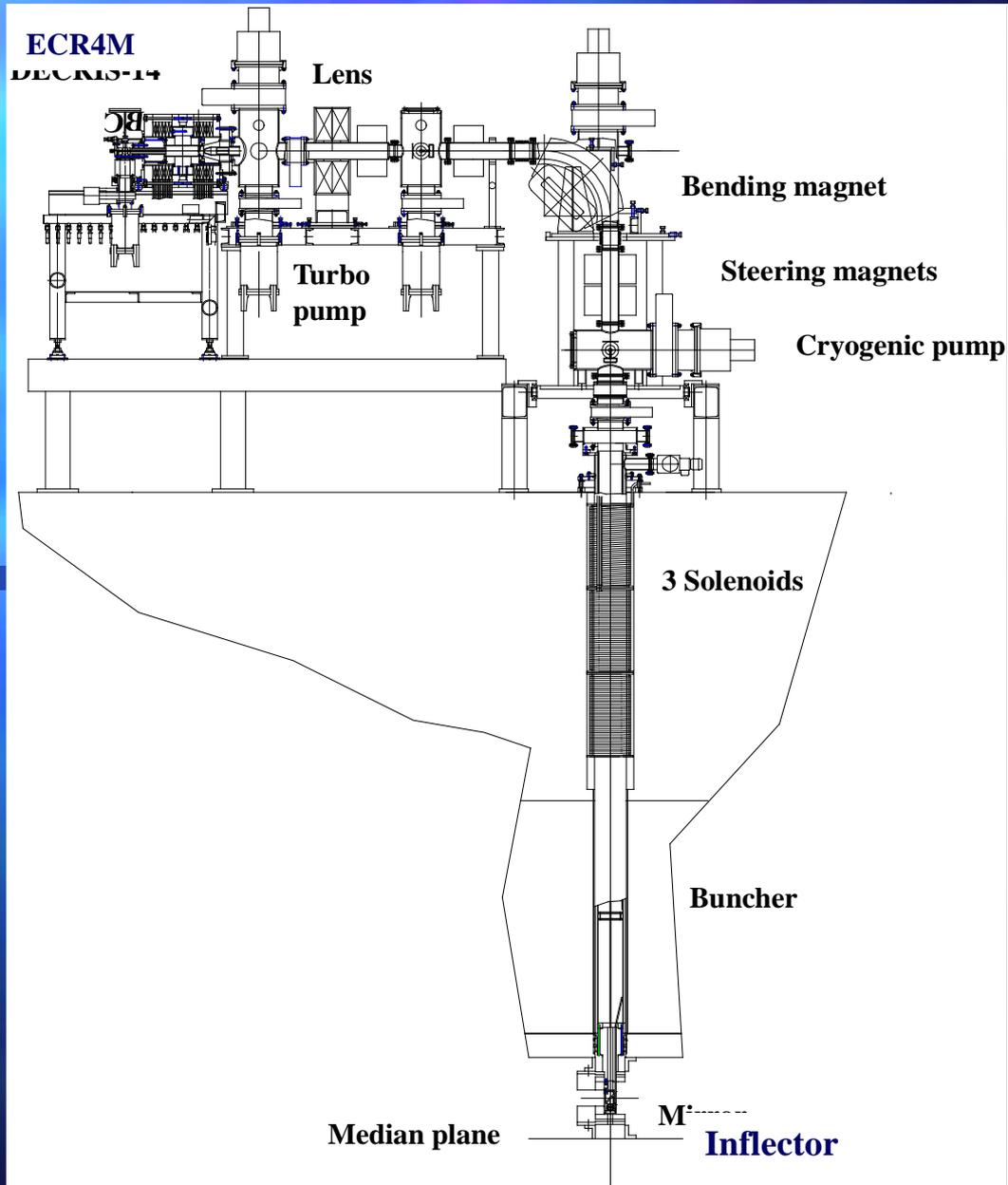
Монтаж
ускорителя У-400



U400 Cyclotron (1978)



Axial injection system of U-400 Cyclotron (1996)





U400 CYCLOTRON

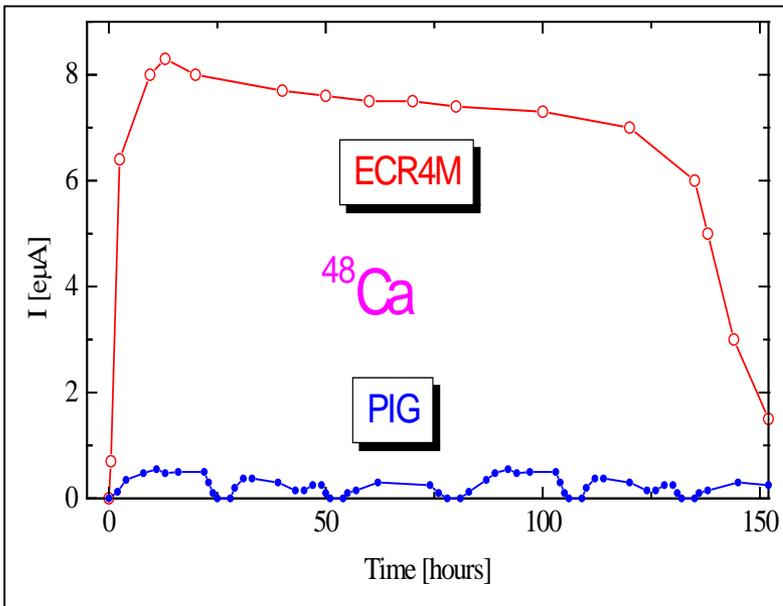
stand-alone & post-accelerator

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. $^{48}\text{Ca}^{5+}$

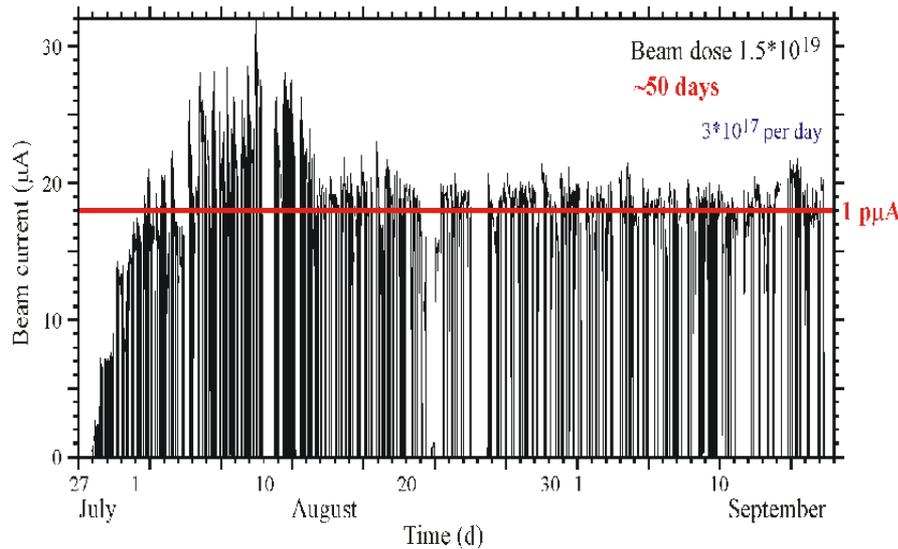
1996



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

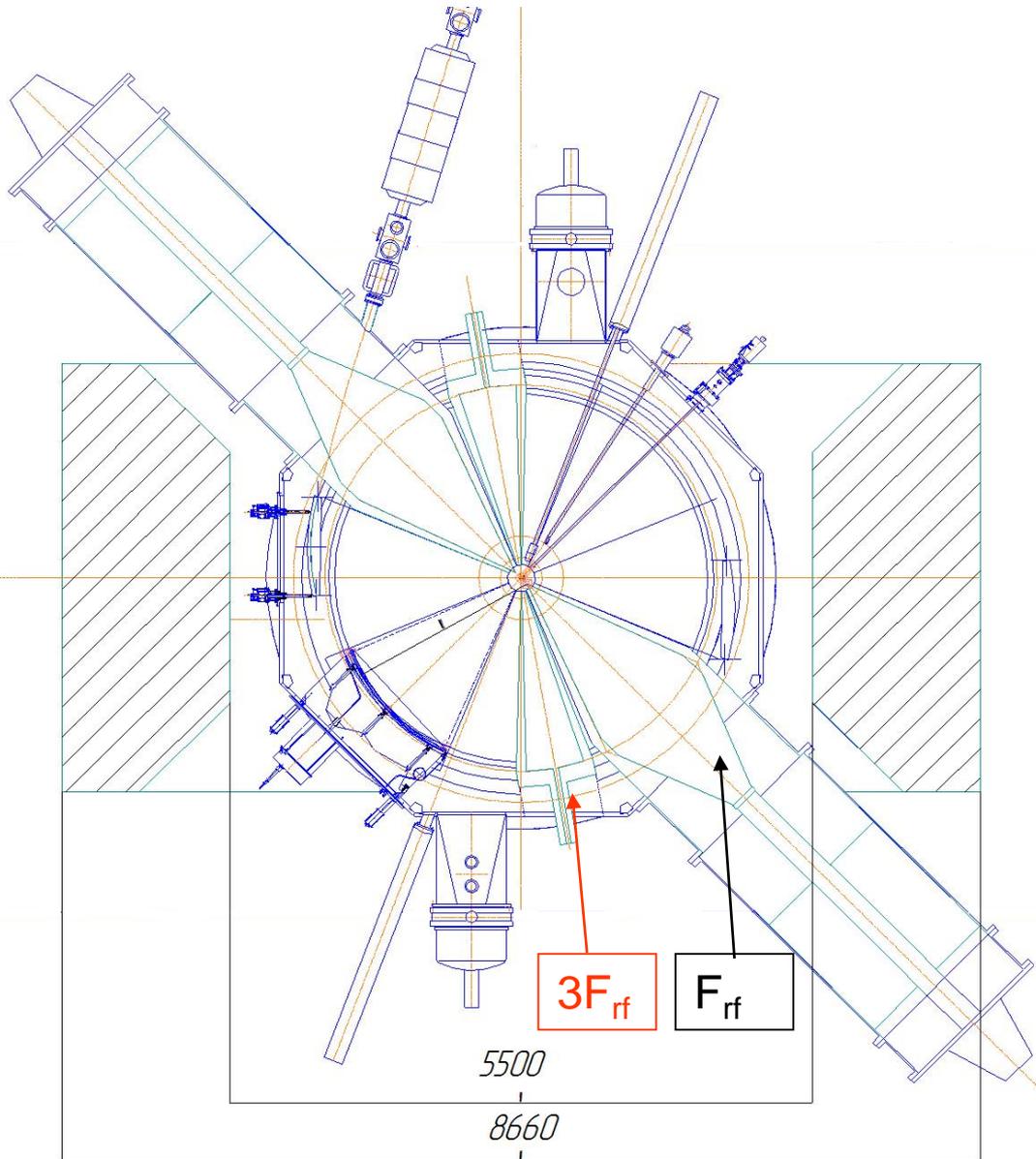
- Цель проекта: получение высокоинтенсивных до 10 ррА пучков ионов средних масс (Ca-48, Ti-50, Cr-54 и др.) для экспериментов по синтезу и изучению свойств сверхтяжёлых элементов.

Главные задачи в проекте циклотрона тяжелых ионов ДЦ-280

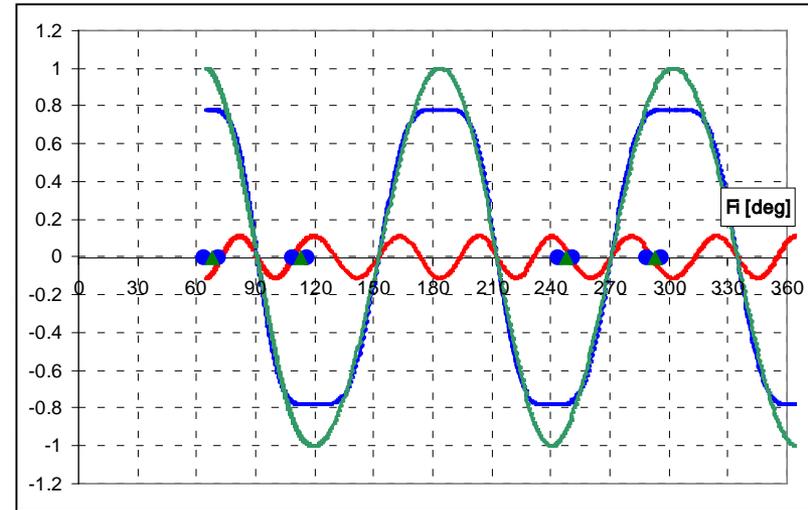
- ❖ Увеличение коэффициента захвата инжектируемого пучка высокой интенсивности (~ 100 мкА) в ускорение.
 - Создание высоковольтной инжекции из внешнего ионного источника в циклотрон.
- ❖ Увеличение коэффициента вывода пучка из циклотрона до 70%.
 - Дефлекторный вывод пучка с высокой эффективностью.
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



DC-280 Cyclotron

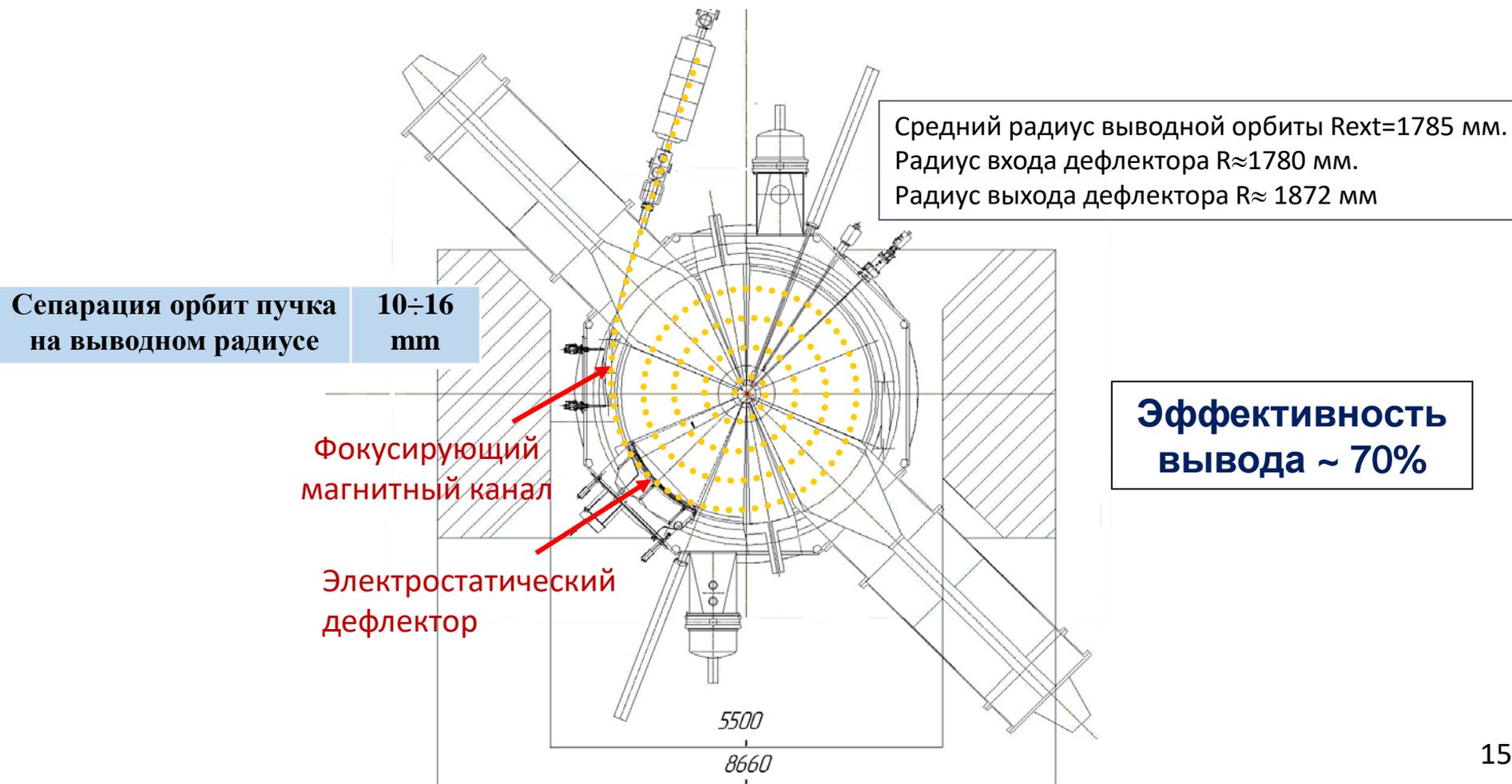


Flat-Top system



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



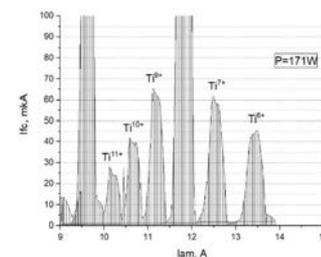
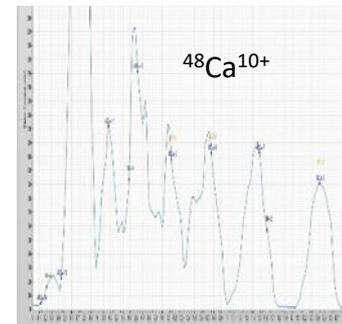
Main parameters of DC-280 cyclotron

The accelerator was put in operation in 2019.

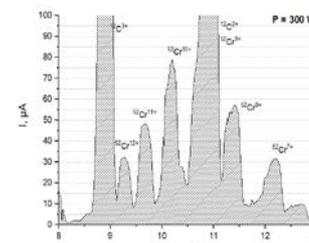
Parameter	design	realized
Power consumption	550 kW	
Ion source	DECRIS-PM – 14 GHz on HV platform ($U_{\max}=70\text{kV}$)	
Injection energy	to 100 keV \times Z	to 76 keV \times Z
A/Z	4 \div 7.5	4,44 \div 6.86
Energy range	4 \div 8 MeV/nucleon	3,81\div7,46 MeV/nucleon
Ions (for DECRIS-PM)	4-136	12($^{12}\text{C}^{2+}$) - 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

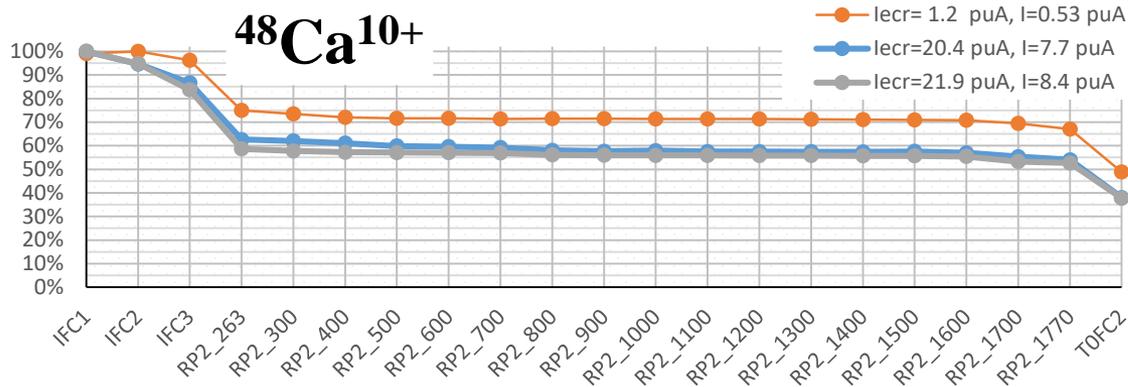
Ion	Energy (MeV)	Intensity (pμA)					Efficiency (%)				
		Axial injection system		Cyclotron		Transport Channel	Axial injection system	capture	Cyclotron	Extraction	Total
		after separation	before injection	R=400 mm	R= 1770 mm						
$^{48}\text{Ca}^{10+}$	240	1,2	1,15	0,86	0,80	0,53	96%	75%	93%	67%	45%
$^{48}\text{Ca}^{+10}$	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

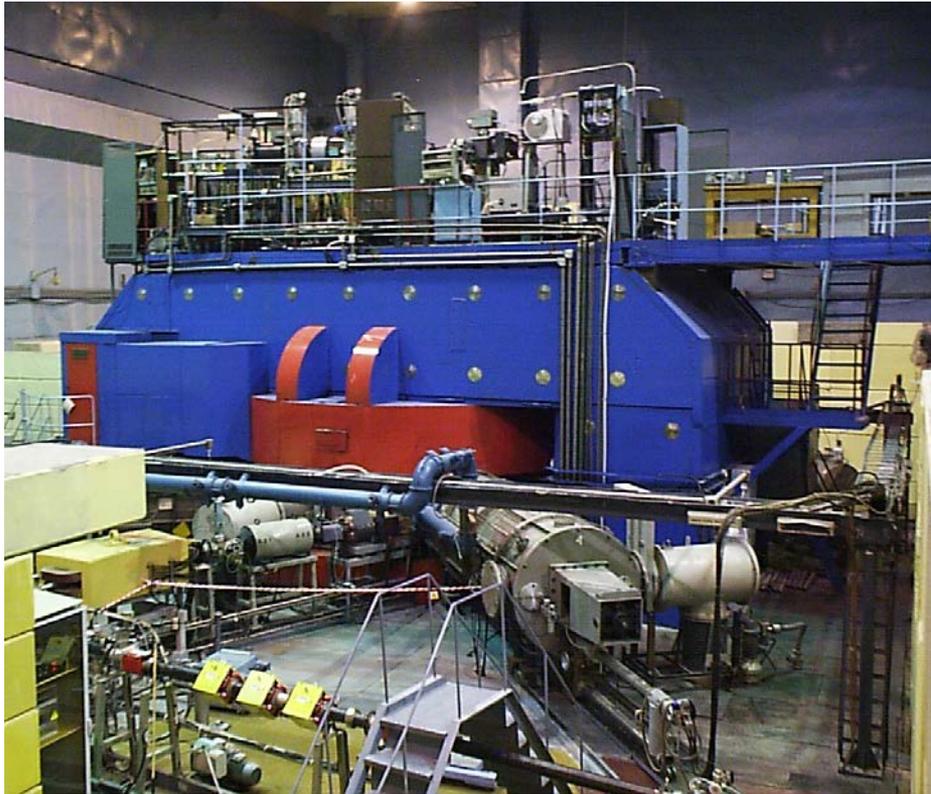
Цели реконструкции У-400:

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



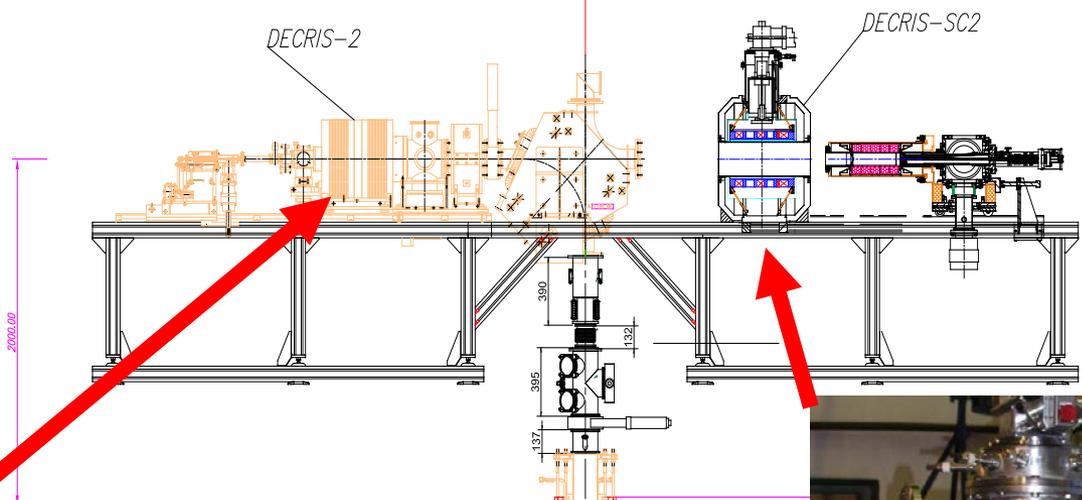
- Properties and structure of light exotic nuclei;
- Astrophysics;
- Reactions with exotic nuclei;
- Light neutron-rich nuclei;
- Deep inelastic scattering;
- Production of RIBs.

1989- 1991:

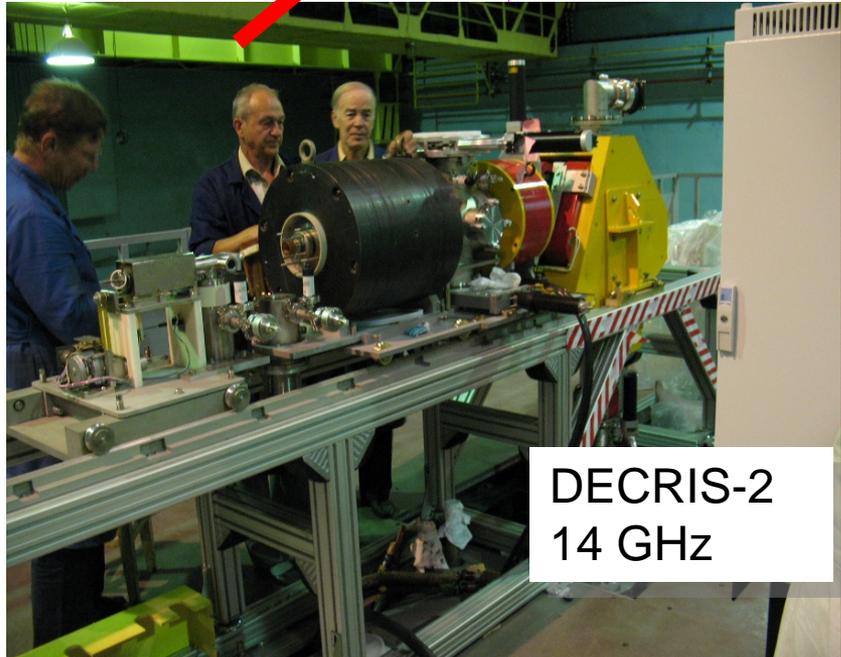
Reconstruction U-300→U-400M

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

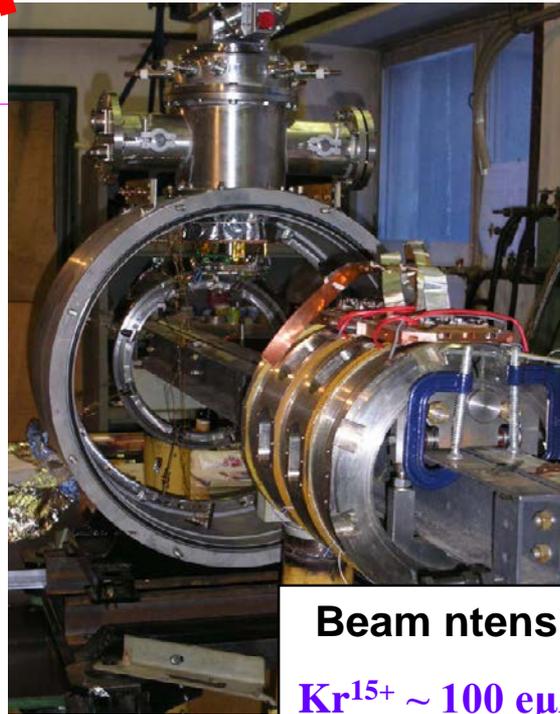
U400M. New ion sources and axial injection system (1995)



DECRIS-SC2
18 GHz



DECRIS-2
14 GHz



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

Median plane

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)



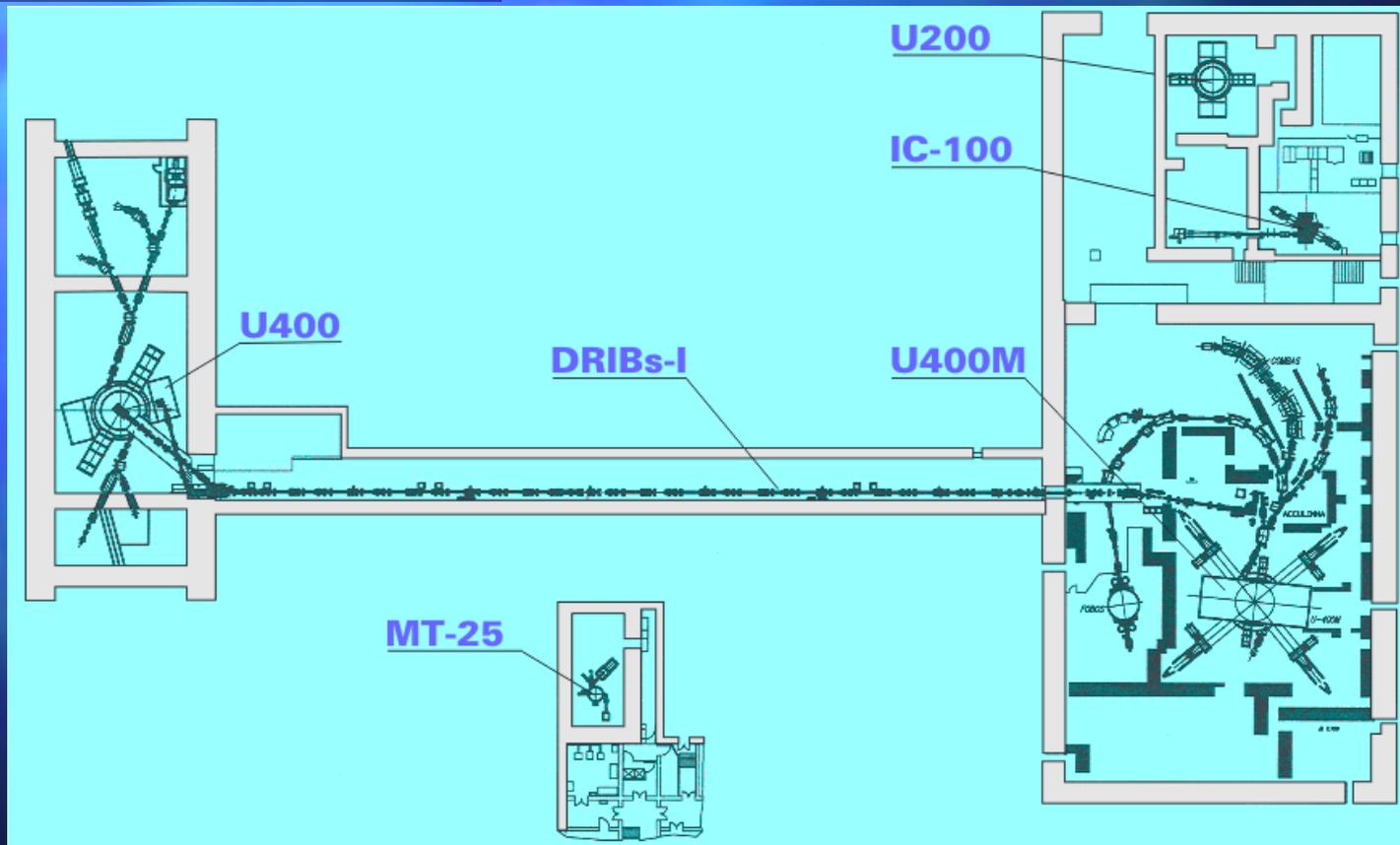
2020-2024

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.

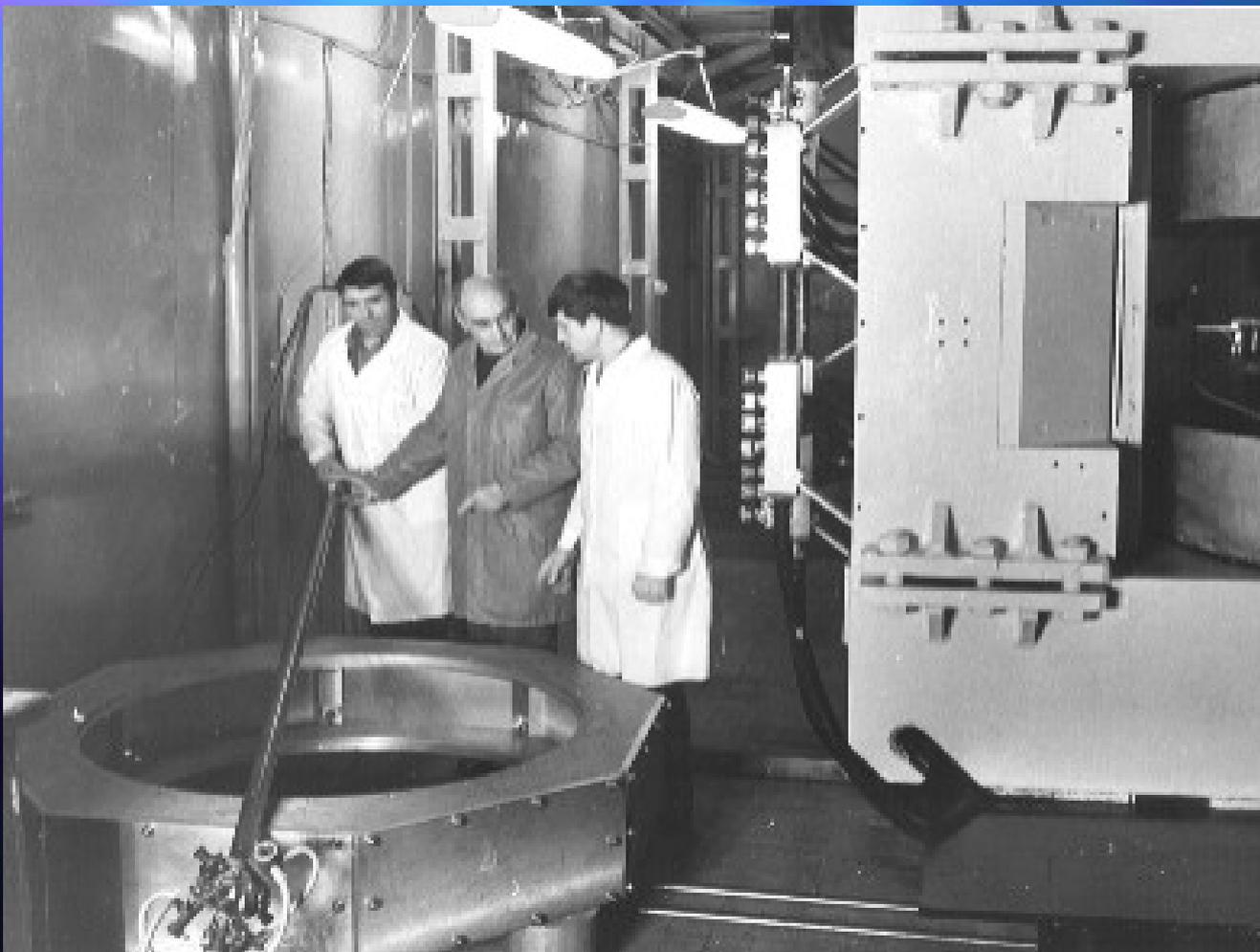
Технология производства трековых мембран разработана на основе метода регистрации тяжелых частиц с помощью пластиковых детекторов.

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.

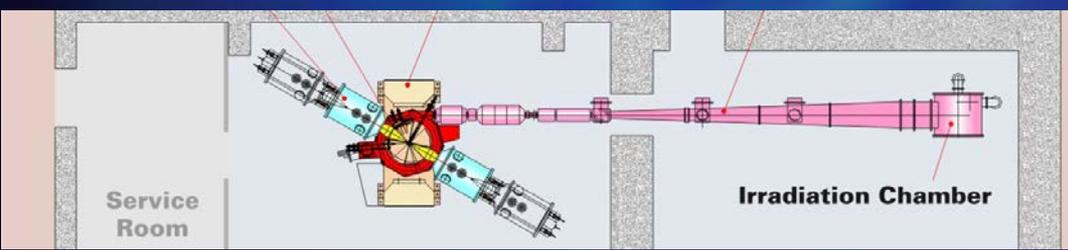
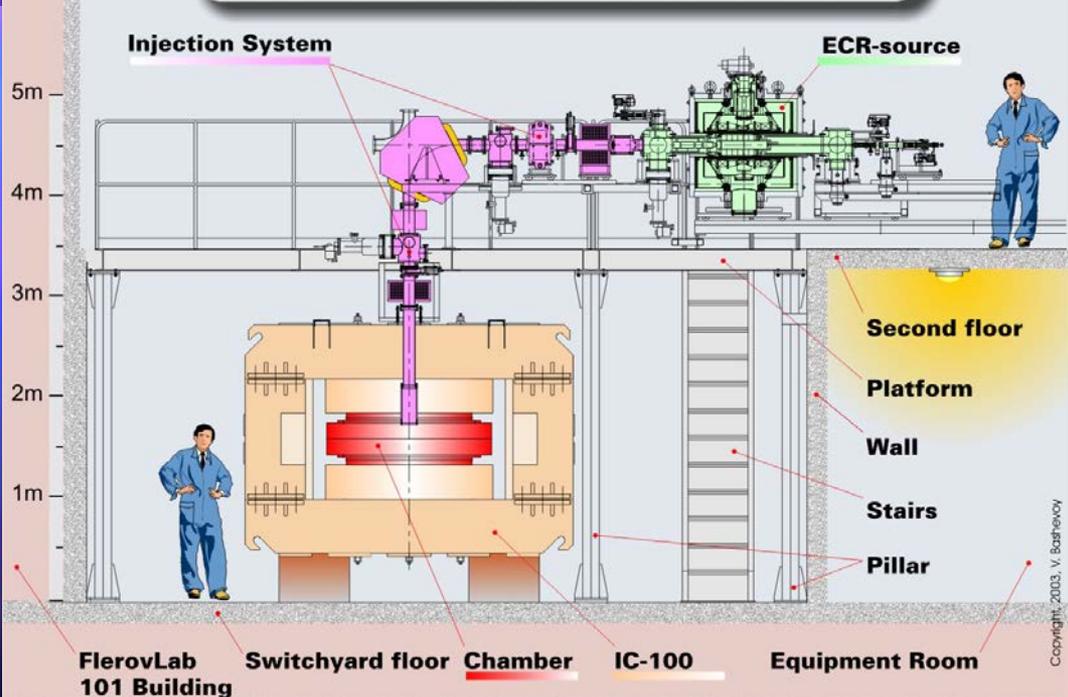
Внутренний источник
ионов - PIG

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

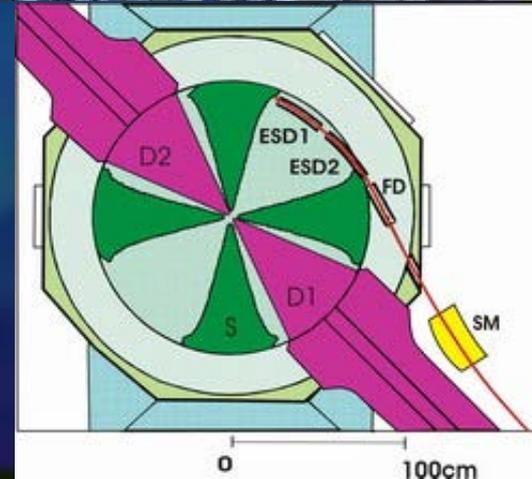
Пучки ионов, ускоренных в ходе пусконаладочных работ
(декабрь 2006 г.)

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 ~ 1 рµА ($6 \cdot 10^{12}$ 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)

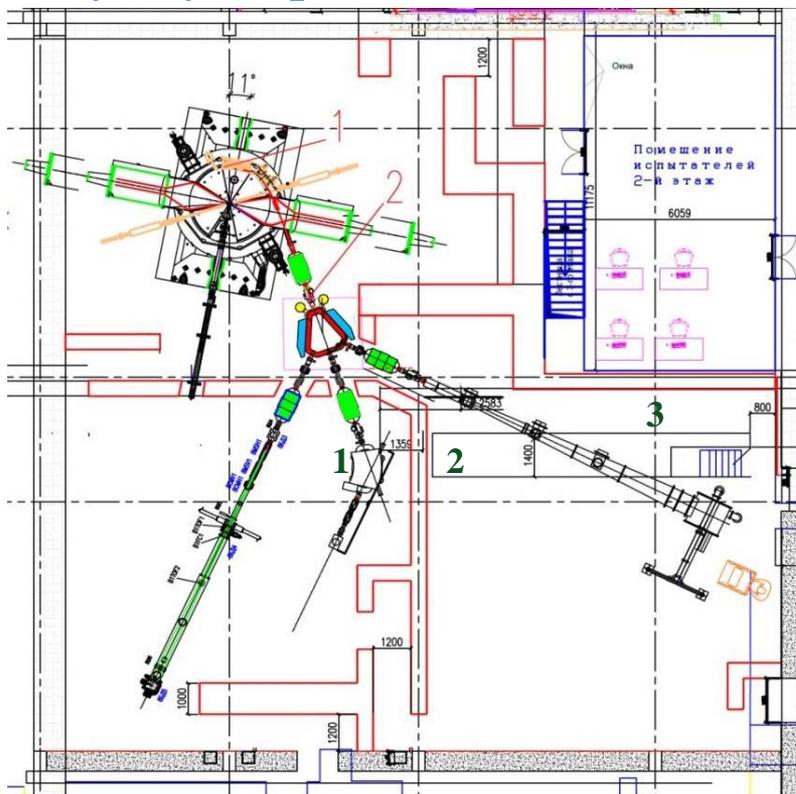
ИСТОЧНИК ИОНОВ	«теплый» ECR, 18 ГГц (потреб. мощность 150 кВт)		
УСКОРЯЕМЫЕ ИОНЫ	$^{40}\text{Ar}^{6+}$	$^{86}\text{Kr}^{13+}$	$^{132}\text{Xe}^{20+}$
Энергия ионов	2,5 МэВ/нукл		
Интенсивность пучка в рутинном облучении пленки (1 рμА ≈ 6·10 ¹² част/сек)		<u>ECR</u>	<u>на мишени</u>
	Ar	10 * рμА	1* рμА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

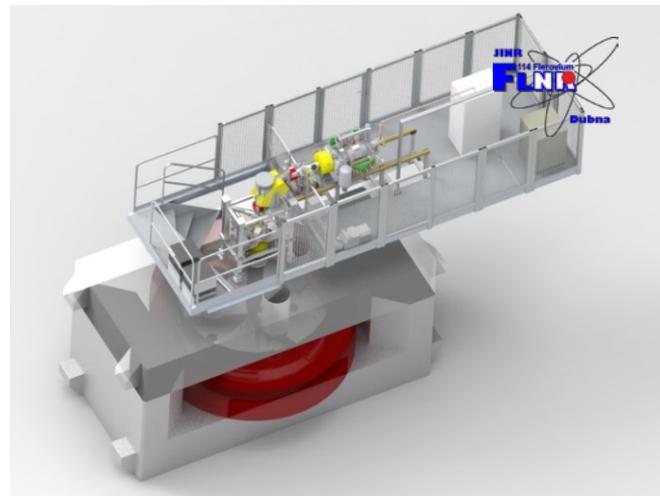
В ЛЯР ОИЯИ создается ускорительный комплекс для прикладного использования ионных пучков на базе циклотрона ДЦ-140.

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**

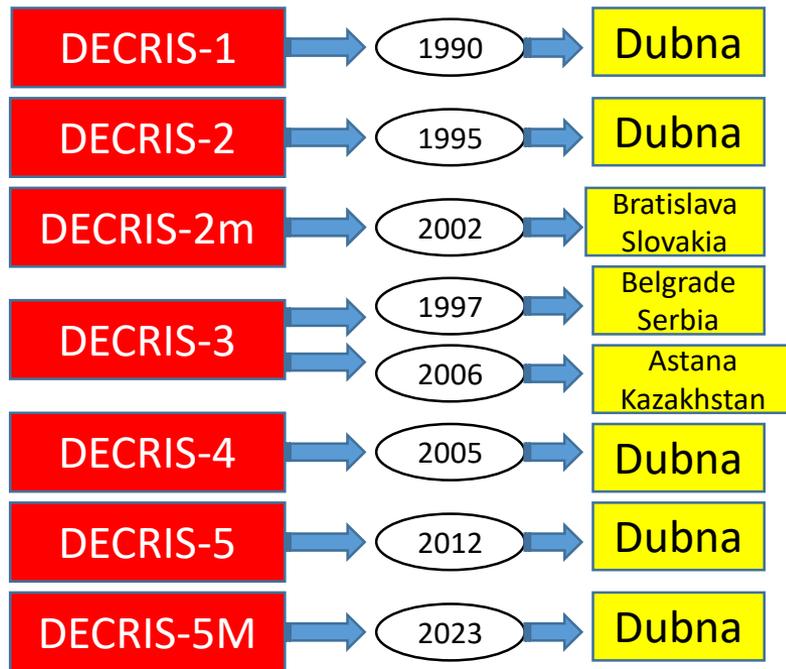
Ион	$^{132}\text{Xe}^{16+}$	$^{197}\text{Au}^{24+}$	$^{209}\text{Bi}^{26+}$	$^{16}\text{O}^{2+}$	$^{86}\text{Kr}^{11+}$	$^{115}\text{In}^{14+}$	$^{90}\text{Zr}^{11+}$	$^{98}\text{Mo}^{12+}$
A/Z	8.250	8.208	8.038	8.000	7.818	8.214	8.182	8.167
, Тл	1.549	1.541	1.509	1.502	1.468	1.542	1.536	1.534

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

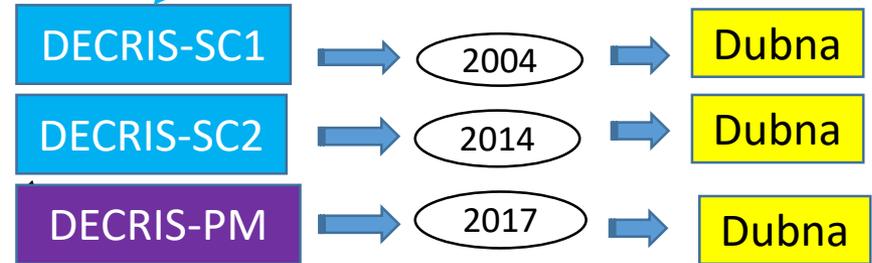
Развитие источников ионов электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) в ОИЯИ

DECRIS - Dubna ECR Ion Sources

“Room temperature” coils
(14/18 GHz)



Superconducting coils
(14/18 GHz)

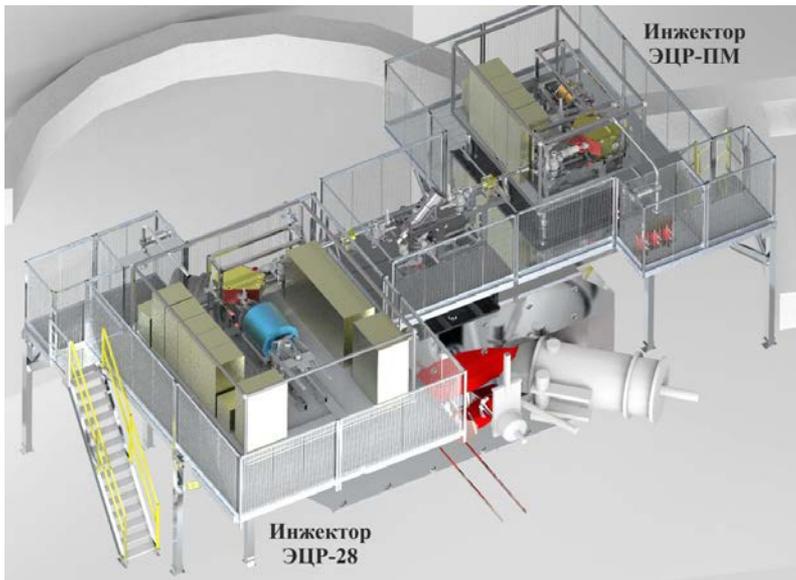
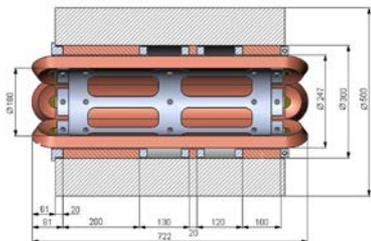
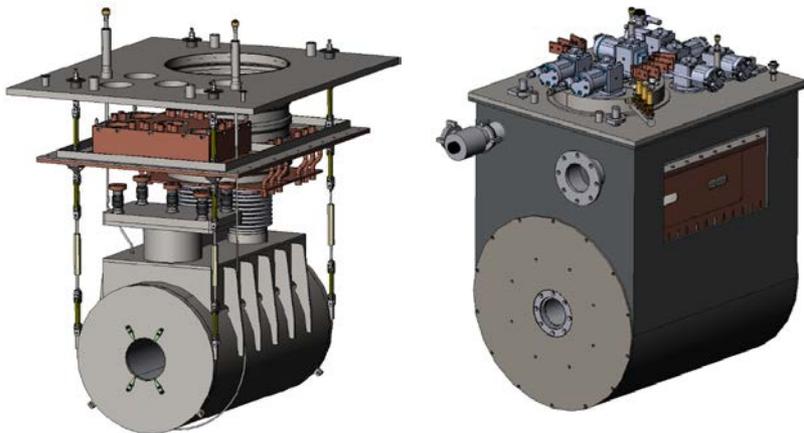


Permanent magnet rings
(14 GHz)



Superconducting ECRIS
(28 GHz)

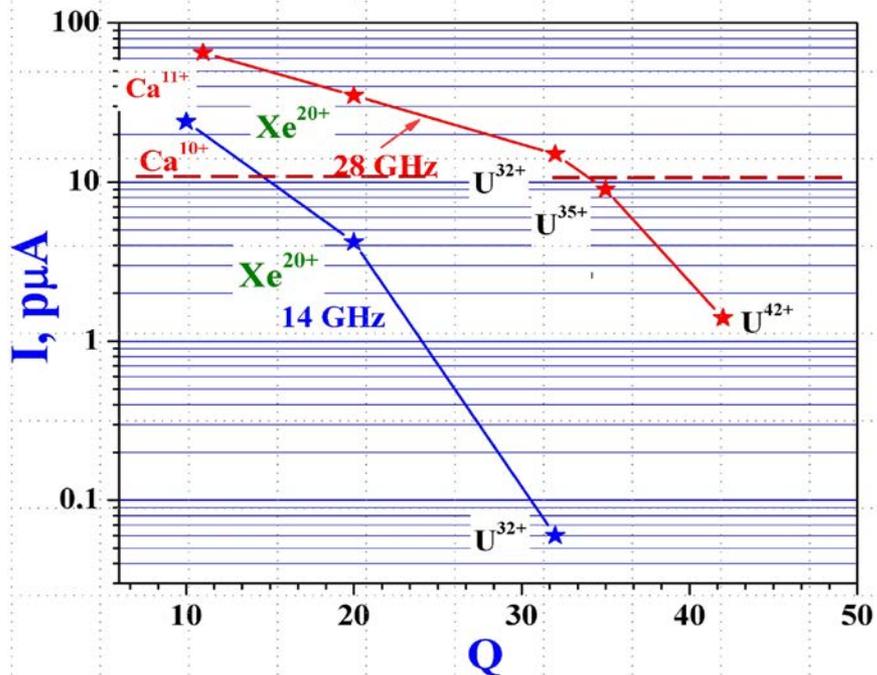
DECRIS-SC3 (28 GHz)



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

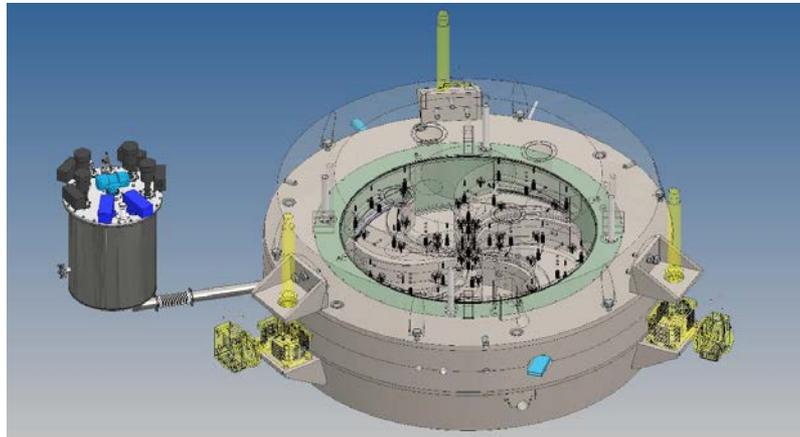
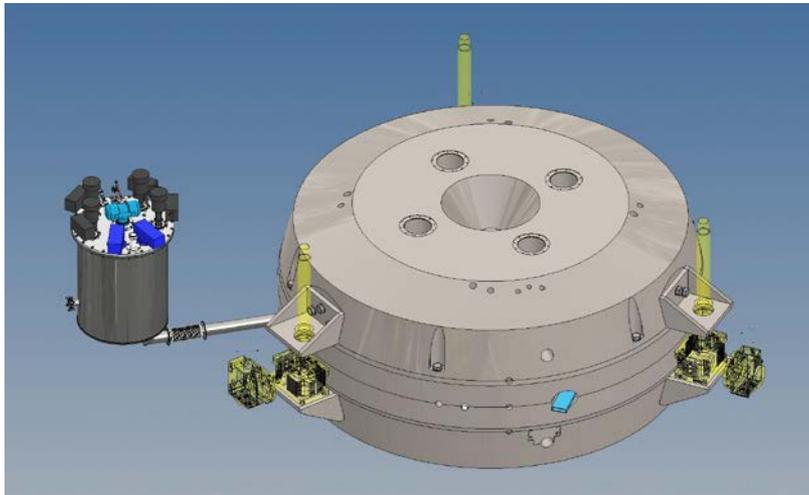
Beam intensity from 14 and 28 GHz ECRIS



Медицинский сверхпроводящий циклотрон МСЦ-230

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

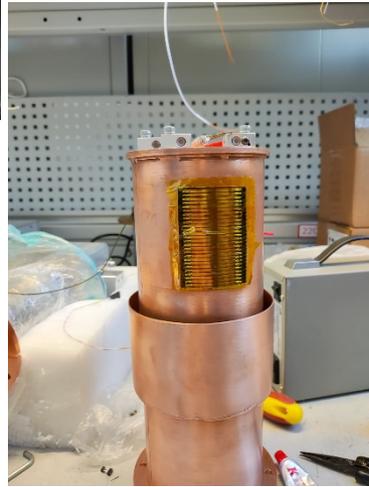
МСЦ-230 предназначен для проведения протонной лучевой терапии и медико-биологических исследований



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 !**

Flerov Laboratory of Nuclear Reactions (JINR)