

ITEP-TWAC FACILITY PROGRESS REPORT

N.N.Alexeev, D.G.Koshkarev, B.Yu.Sharkov

Institute for Theoretical and Experimental Physics,

Moscow, Russia

RuPAC 2006

Содержание доклада

- *Проект ИТЭФ-ТВН*
- *Достигнутые и планируемые параметры*
- *Модернизация лазерного источника ионов и переход на тяжелые ионы*
- *Перспективы повышения интенсивности ускорителя-накопителя У-10*
- *Эксплуатация комплекса и направления исследований на пучках протонов и ионов*
- *Заключение*

Ускорительный комплекс ИТЭФ-ТВН

Цель проекта

1) Создание накопителя тяжелых ионов тераваттного уровня мощности для экспериментов по физике высокой плотности энергии в веществе

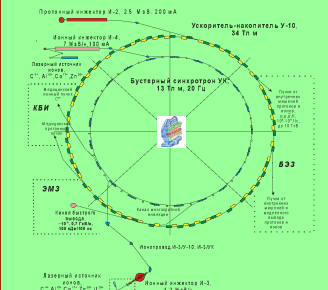
2) Создание ускорителя ионов с макс. энергией до ~4 ГэВ на нуклон для экспериментов по релятивистской ядерной физике

3) Расширение прикладных исследований на пучках протонов и ионов



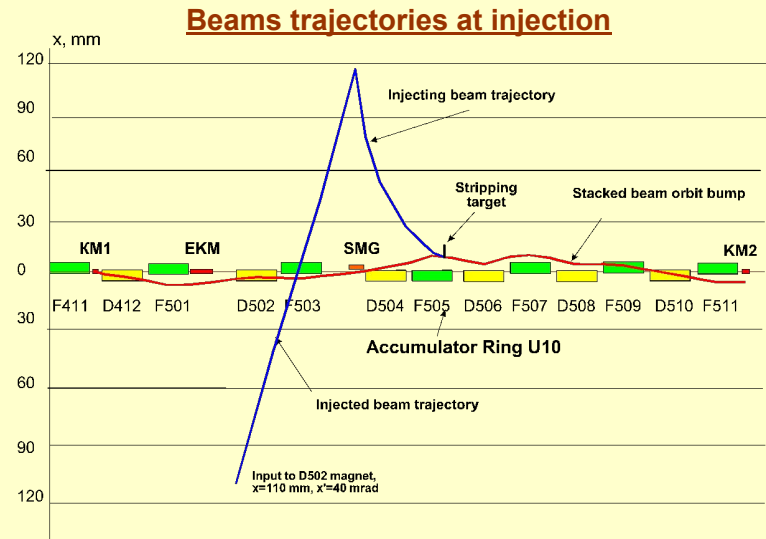
Ускоритель протонов	Энергия, ГэВ	10
	Интенсивность, р/с	~10 ¹¹
Накопитель ионов на основе перезарядной инжекции	Ионы	до Zn
	Энергия частиц, МэВ/а.е.м.	до 1000
	Энергия пучка, кДж	до 100
	Мощность пучка на мишени, ТВт	до 1
Ускоритель ионов до релятивистских энергий	Ионы	до U
	Энергия, ГэВ/а.е.м.	2-4
	Интенсивность, н/с	~10 ¹¹

Этапы реконструкции

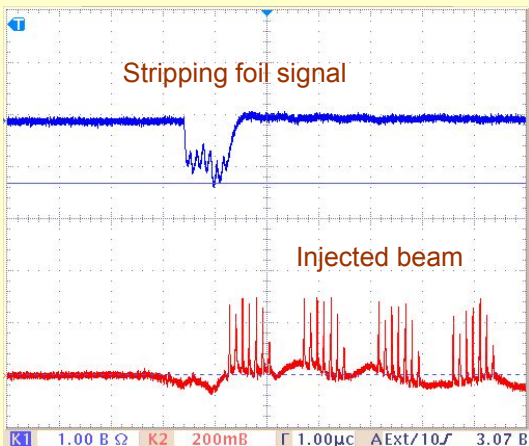
<p>Создание ионного инжектора И-3</p> <p>Создание канала транспортировки и системы инжекции И-3/УК</p> <p>Создание бустерного синхротрона УК</p> <p>Создание системы быстрого вывода пучка из УК</p> <p>Создание переводного ионопровода и системы многократной перезарядной инжекции УК/У-10</p>	<p>1997-2002</p>  <p>The diagram illustrates the layout of the U-10 ion accelerator complex. It features a central 'Буcтерный синхротрон УК' (Boosting Synchrotron UK) with a radius of 10 meters and a length of 20 meters. Surrounding it are several other components: 'Протонный инжектор И-3' (Proton injector I-3) with a current of 2.5 nA and 100 nA; 'Ускоритель-накопитель У-10' (Accelerator-storage U-10) with a length of 34 meters; 'Ионный инжектор И-4' (Ion injector I-4) with a current of 100 nA; 'Лазерный резонатор' (Laser resonator) with a length of 20 meters; 'КБИ' (KBK); 'ЭМЗ'; 'Воздушный резонатор' (Air resonator) with a length of 20 meters; and 'Ионный инжектор И-2' (Ion injector I-2) with a current of 100 nA. The diagram also shows various other components like 'Система транспортировки' (Transportation system), 'Система инжекции' (Injection system), 'Система быстрого вывода пучка' (Fast beam extraction system), 'Система перевода' (Transfer system), 'Система многократной перезарядки' (Multiple recharging system), 'Система диагностики' (Diagnosis system), 'Система управления' (Control system), 'Система безопасности' (Safety system), 'Система вентиляции' (Ventilation system), 'Система охлаждения' (Cooling system), 'Система питания' (Power system), 'Система защиты' (Protection system), 'Система мониторинга' (Monitoring system), 'Система архивирования' (Archiving system), 'Система отчетности' (Reporting system), 'Система документирования' (Documentation system), 'Система обслуживания' (Maintenance system), 'Система ремонта' (Repair system), 'Система замены' (Replacement system), 'Система сборки' (Assembly system), 'Система распаковки' (Unpacking system), 'Система хранения' (Storage system), 'Система транспортировки' (Transportation system), 'Система инжекции' (Injection system), 'Система быстрого вывода пучка' (Fast beam extraction system), 'Система перевода' (Transfer system), 'Система многократной перезарядки' (Multiple recharging system), 'Система диагностики' (Diagnosis system), 'Система управления' (Control system), 'Система безопасности' (Safety system), 'Система вентиляции' (Ventilation system), 'Система охлаждения' (Cooling system), 'Система питания' (Power system), 'Система защиты' (Protection system), 'Система мониторинга' (Monitoring system), 'Система архивирования' (Archiving system), 'Система отчетности' (Reporting system), 'Система документирования' (Documentation system), 'Система обслуживания' (Maintenance system), 'Система ремонта' (Repair system), 'Система замены' (Replacement system), 'Система сборки' (Assembly system), 'Система распаковки' (Unpacking system), 'Система хранения' (Storage system).</p>
<p>Физический пуск бустера УК</p>	<p>май 2000</p>
<p>Физический пуск накопителя ионов У-10</p>	<p>март 2002</p>
<p>Ускорения C^{6+} до энергии 4,0 ГэВ/н</p>	<p>ноябрь 2002</p>
<p>Создание систем группировки и быстрого вывода пучка</p>	<p>2003</p>
<p>Начало физ-экспериментов с ядрами углерода</p>	<p>2003</p>
<p>Улучшение технологии накопления ионов параллельно с эксплуатацией комплекса в режимах ускорения протонов и ионов.</p>	<p>2004-200x</p>

Charge-exchange injection technique applied for heavy ions

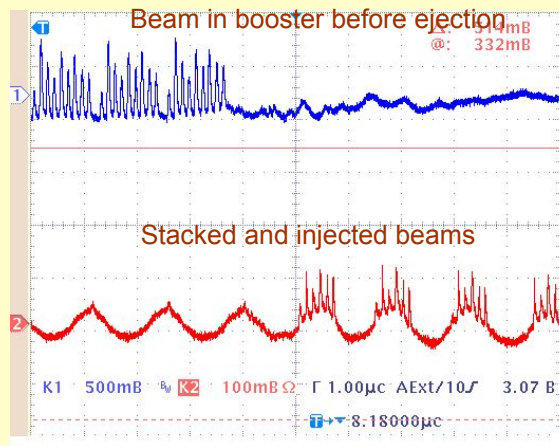
The ion accumulation is based on the charge-exchange injection with using a fast bump system for minimising the stacked beam perturbation over penetrating through the stripping foil material. Schematic layout of the beam trajectory at injection are shown in Fig. The deflection of the beam in the septum magnet SMG at injection is 98 mrad, the maximum field is 1.2 T. This magnet steers the injected beam to the centre of the stripping foil of 5x10 mm size, which is placed in the vacuum chamber of the F505 with a displacement of 20 mm from the ring equilibrium orbit. The fast bump system matching of both injected and circulating beams includes three kicker magnets installed in the short straight sections after of the magnets F411, F511 and F711. The first kicker magnet gives the kick of 3 mrad deflecting the stacked beam to the stripping foil at a moment when the injected beam is passing through the transfer line. The two beams, becoming one after passing through the stripping foil, are set to the ring closed orbit downwards by the kicker magnets in straight sections of F511 and F711. The foil material is mylar with the thickness of 5 mg/cm², that yields >90% of bare carbon ions with projectile energy of >50 MeV/amu.



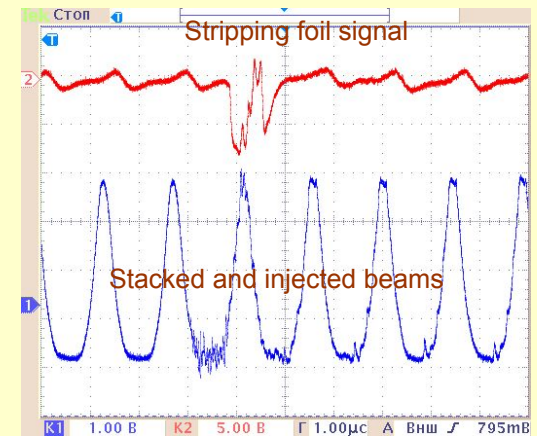
Injecting beam crosses stripping foil



Accelerated and stacked beams



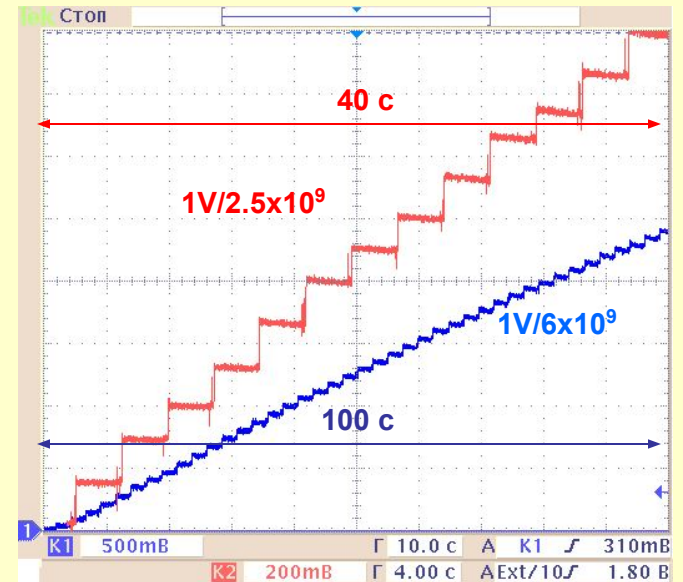
Two beams meeting in stripping foil



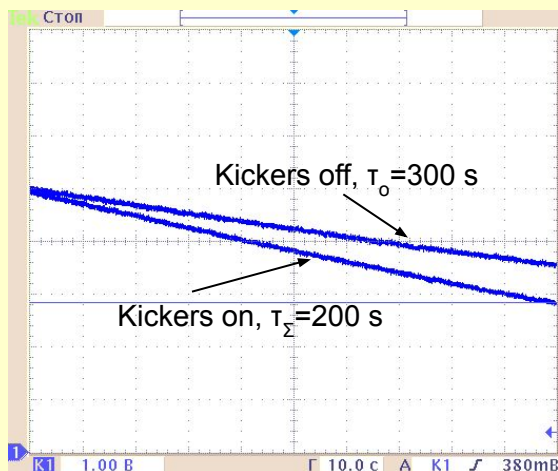
Accumulation process optimization

The injection efficiency is now limited by the rise time of the pulse in the UK ejection kicker magnet and some particle losses (~10%) in beam transfer line between booster and accumulator rings. The efficiency of beam stacking is near to absolute for particles crossing stripping foil. The process of the beam accumulation is shown on Fig. The efficiency of accumulation process is characterized by lifetime of the stacked beam with fast bump system on (τ_{Σ}) and off (τ_o) [6]. Using equality $\tau_o = 25 \cdot A_{x,z}$, we get estimation of the accumulator ring dynamic acceptance as $A_{x,z} \sim 12 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. Designating δA as acceptance reduction from the orbit displacement by the fast bump at injection, and considering equality $(\tau_o \tau_{\Sigma}) / (\tau_o - \tau_{\Sigma}) = 20(A_{x,z} - \delta A)$, it gets estimation of $\delta A \sim 2 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$. The factor of stacked beam losses at injection of a new portion of particles is calculated as $\delta = (\tau_o - \tau_{\Sigma}) / (f_{inj} \tau_o \tau_{\Sigma}) = 0.005$, and the factor of stacking intensity increase is equal to $k_{oc} = (f_{inj} \tau_{\Sigma}) \sim 70$. The maximum intensity achieved last time in the booster synchrotron has not yet been used in the mode of beam accumulation so we have possibility to increase the stacked beam intensity in the next accumulator run by factor of two.

Stacking of the $C^{4+} \Rightarrow C^{6+}$ beam in U-10 Ring

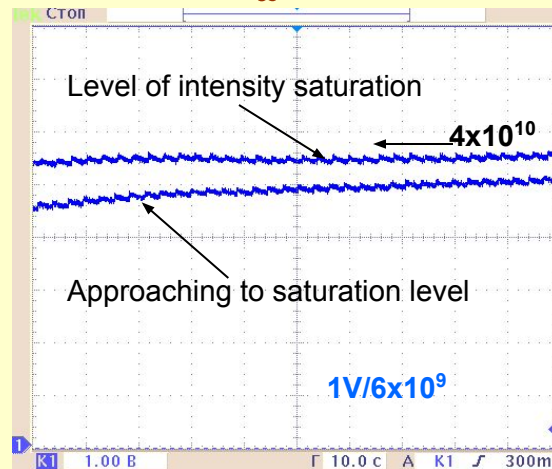


Stacked beam life time in the U-10 Ring

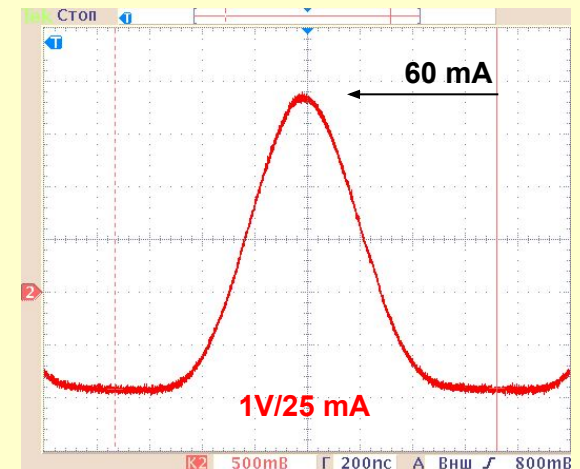


Maximal intensity of stacked beam

$$k_{oc} \Rightarrow 70$$



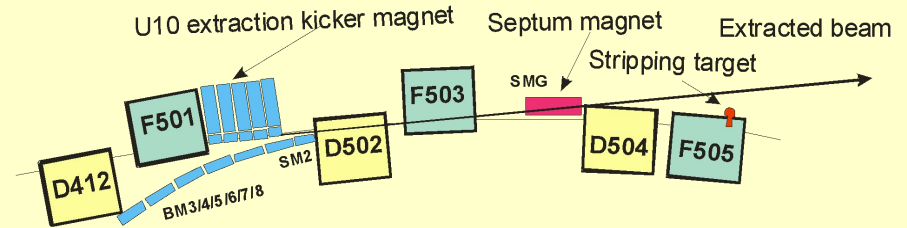
Stacked beam current



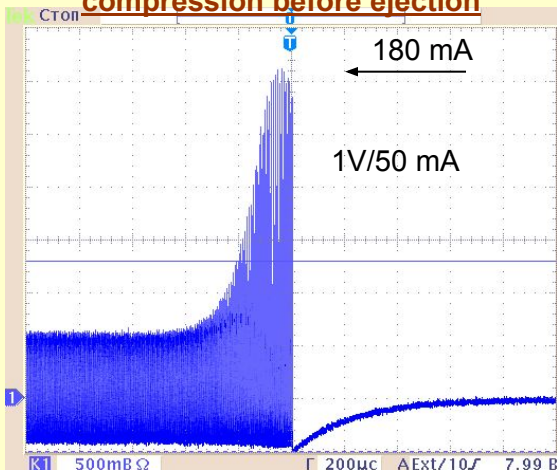
Longitudinal compression and ejection of stacked beam

The stacked beam longitudinal compression is fulfilled with the 10 kV accelerating resonator which is used also with low voltage (~ 1 kV) for the beam keeping at the process of its accumulation. Due to the Non-Liouvillian saving of the longitudinal phase space for the stacking beam at multiple charge exchange injection, the particle density seems to be maximal after compression and the grade of compression depends on a beam forming in the booster synchrotron at its acceleration and ejection. Result of beam compression up to the pulse width of 150 ns is illustrated on Fig.

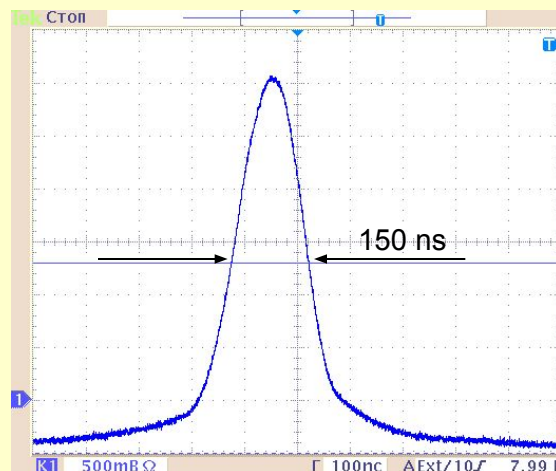
Fast extraction system of U-10 Ring



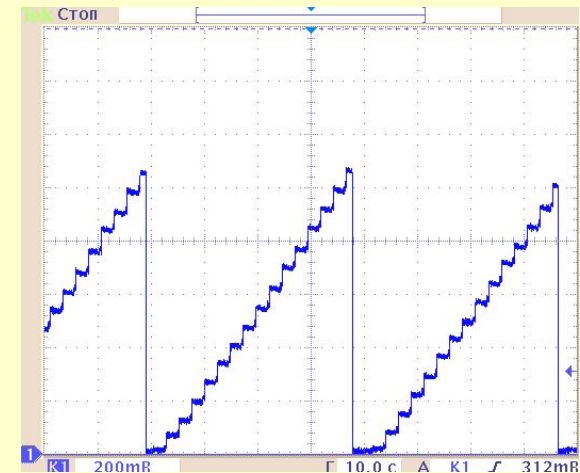
Stacked bunch envelope at compression before ejection



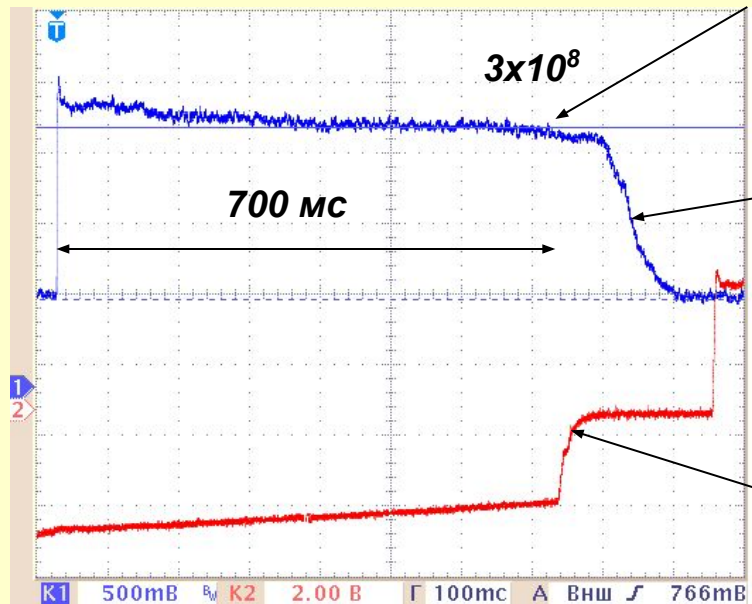
Compressed bunch width



Beam stacking and fast ejection



Ускорение ядер C^{6+} до энергии 4 ГэВ/н по трехступенчатой схеме И-3/УК/У-10



*Интенсивность
ускоренного пучка*

*Сброс пучка на
внутреннюю мишень*

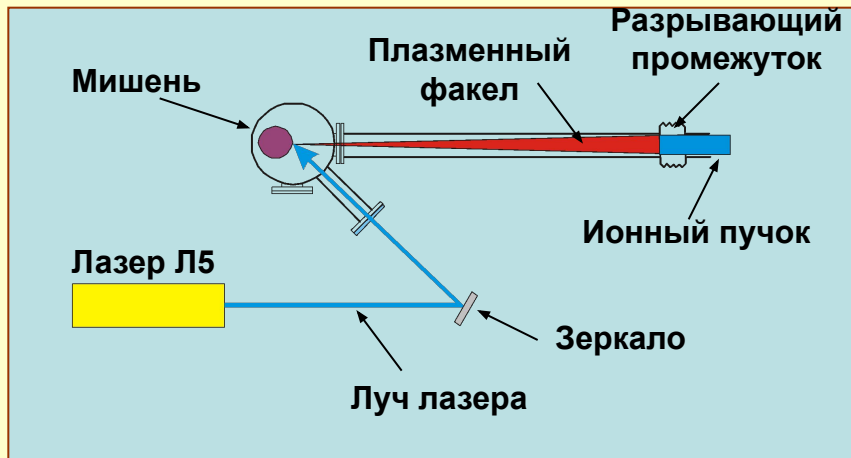
*Производная
магнитного цикла У-10*

Достигнутые параметры комплекса в режиме накопления ионов

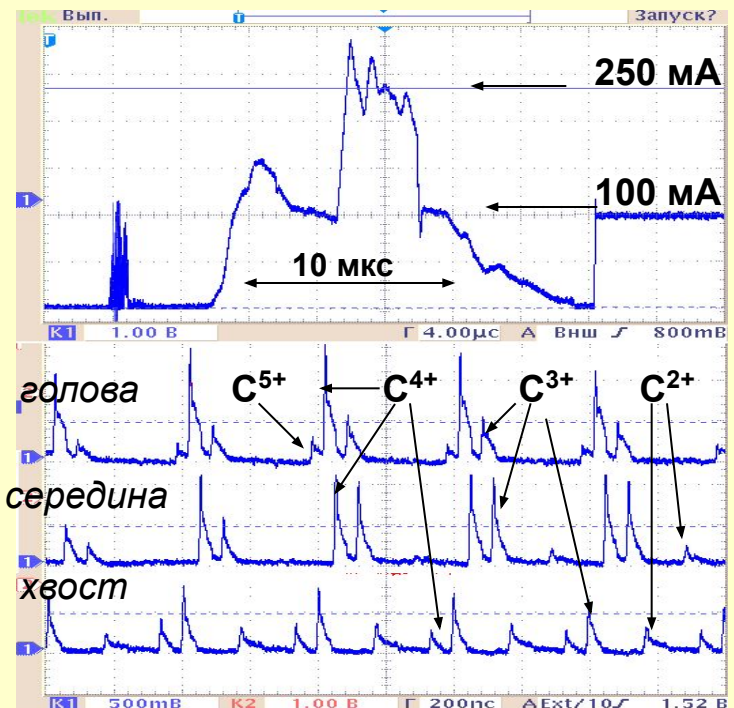
	2004	Достигнутые к 2006 г.	Ожидаемые в 2007 г	Планируемые
Ускоряемые частицы		C^{4+}	Al^{11+}, Fe^{16+}	до U^{29+} (2008)
Накапливаемые частицы		C^{6+}	Al^{13+}, Fe^{26+}	до Zn^{30} (2008)
Энергия накопления, МэВ/н	200	300	400	1000 (2009)
Частота циклов накопления, Гц		0.3	0.5	1 (2008) 20 (2010)
Интенсивность бустера УК, C^{4+} за цикл		10^9	3×10^9	$\sim 10^{10}$ (2008)
Разброс частиц по импульсам, %	0.05	0.04	0.03	<0.03
Эффективность перезарядной инъекции, %	~40	~50	~80	~100
Эффективный аксептанс, π мм мрад	7	10	15-20	50
Эффективность накопления, %	~ 80	>90	>95	~100
Время жизни накопленного пучка, с	140	200	>250	>500
Коэффициент увеличения интенсивности в накопителе	50	70	100	>100
Интенсивность накопленного пучка (C^{6+})	2×10^{10}	4×10^{10}	$>10^{11}$	$>10^{12}$ (2009) $\sim 10^{13}$ (2010-11)
Мощность накопленного пучка, Вт	5×10^7	2×10^8	$\sim 10^9$	$>10^{10}$ (2009) $\sim 10^{12}$ (2010-11)

Лазерный ионный источник

Оптическая схема



Ток пучка и зарядовый состав



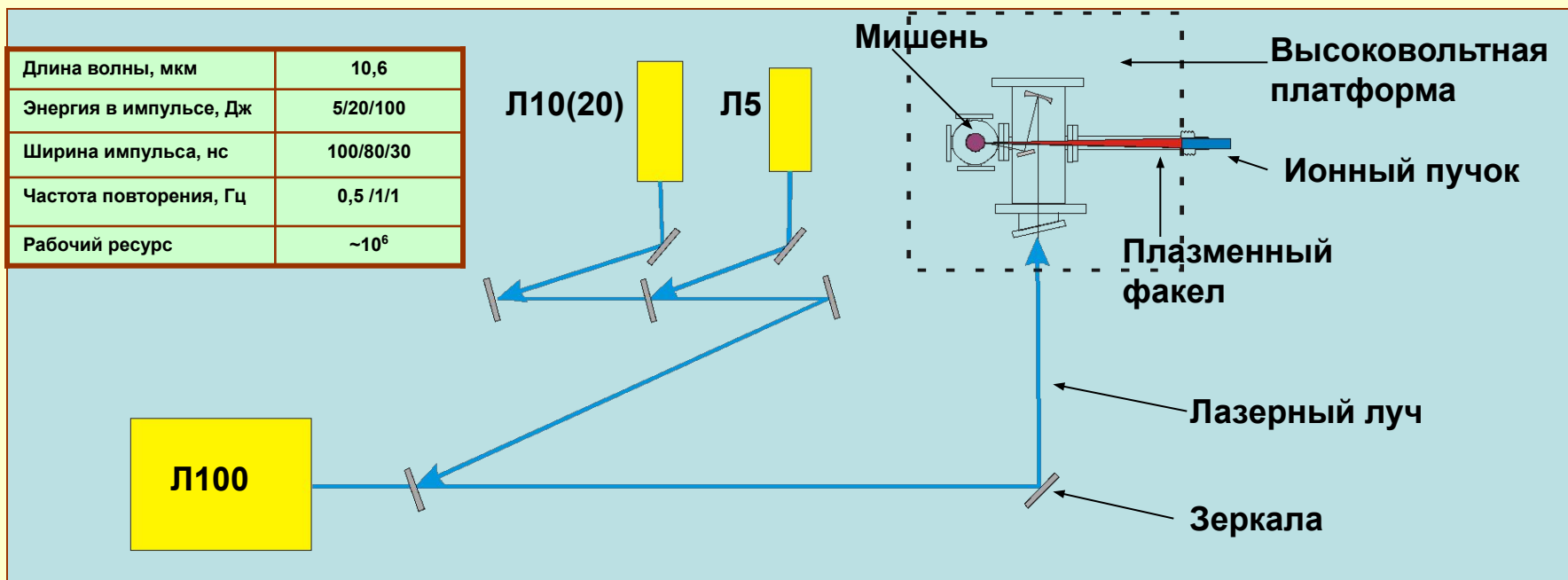
Параметры CO₂ - лазера

Длина волны	10,6 мкм
Энергия в импульсе	5 Дж
Ширина импульса	100 нс/1,5 мкс
Частота повторения импульсов	0,5 Гц
Рабочий ресурс	~10 ⁶

Модернизация ионного источника

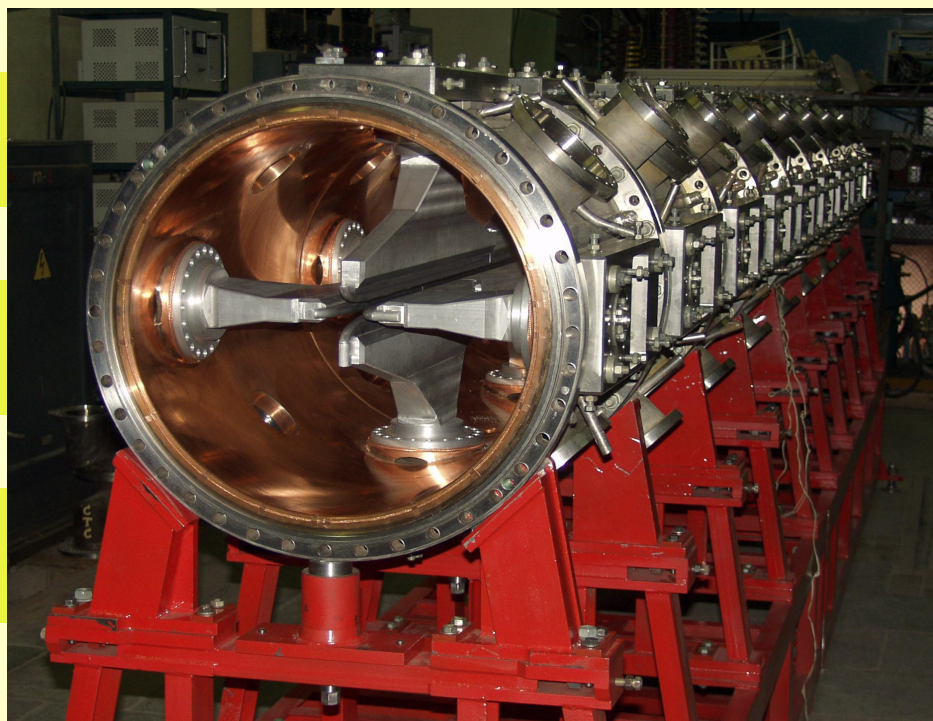
1. *Повышение энергии лазера для увеличения потенциала ионизации тяжелых элементов.*
2. *Модернизация конструкции мишенной камеры для повышения ресурса источника.*
3. *Обеспечение оперативной смены типа ускоряемых ионов.*

Новая оптическая схема лазерного ионного источника с тремя лазерами



Проблемы повышение интенсивности накопителя

1. Увеличение интенсивности бустера УК :
с инжектором И-3 (1,3 МэВ/н) - в 10 раз
с инжектором И-4 (7 МэВ/н) - в 100 раз

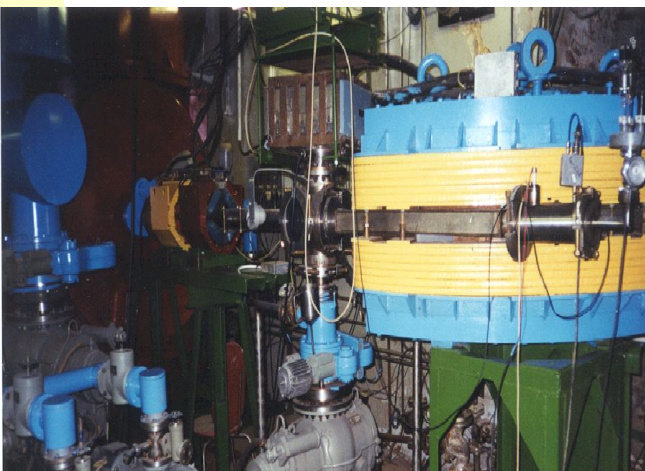
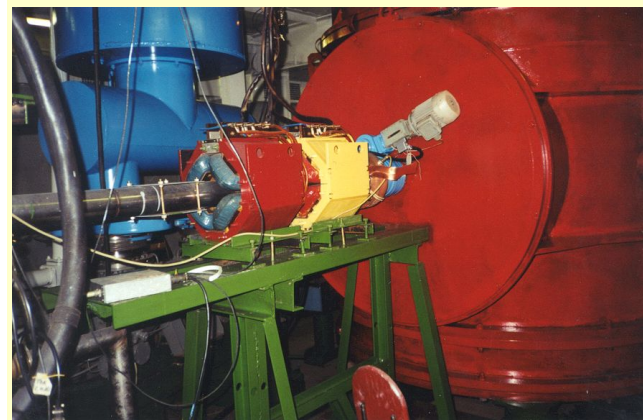
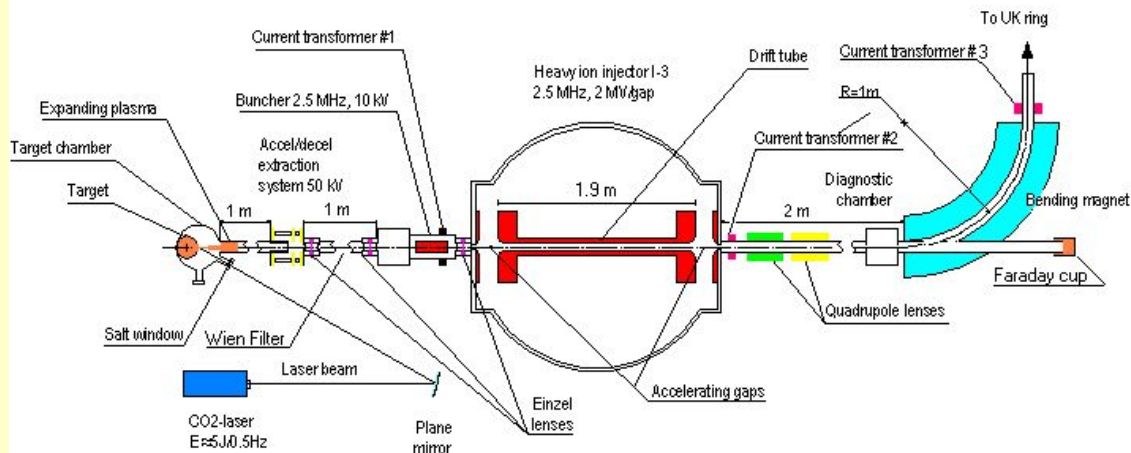


2. ...оде ...из
в 2 раза

3. Параметры И-4
ВЧ-линак (~80 МГц) накопителя
энергия - 7 МэВ/а.е.м.,
Z/A ~ 0,3 ,
I_{max} ~ 100 мА
4. ...ния для минимизации

Резонатор RFQ на энергию 1,6 МэВ/н
с макетными электродами

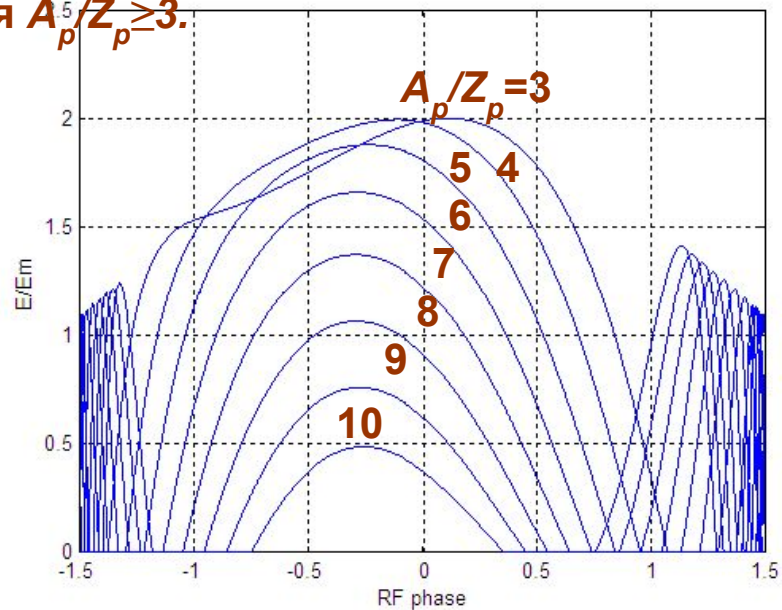
Ионный инжектор И-3



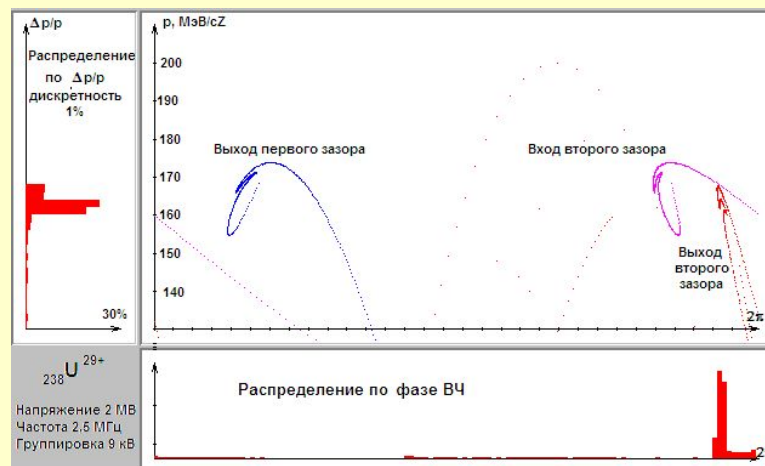
Ускоряющая частота	2,504 МГц
Амплитуда ускоряющего напряжения	до 2 МВ на зазор
Амплитуда напряжения группирователя	до 10 кВ
Ускоряемые ионы	любые
Входная энергия пучка	50 кВ
Энергия ионов с $Z/A=0,2\div 0,5$	0,8-1,9 МэВ/н
Поперечный аксептанс	до 2000
Максимальный выходной ток пучка	$\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$ 7 МА (С ⁺)

Ускорение супертяжелых ионов

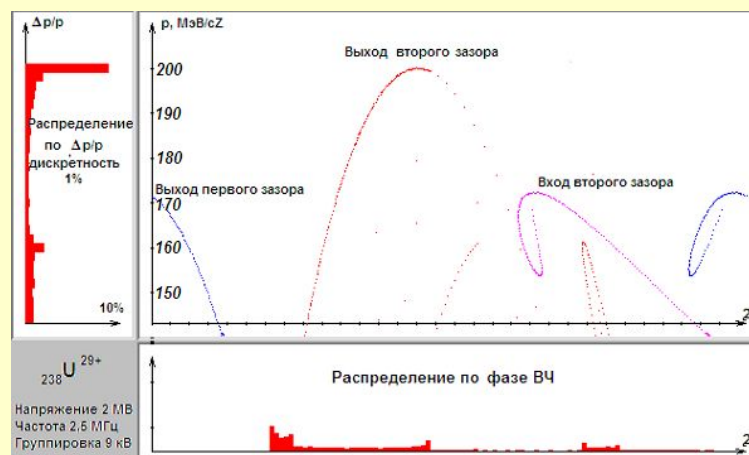
Зависимость энергии частицы на выходе И-3 от фазы группирующего напряжения для $A_p^5/Z_p \geq 3$.



Ускорение U^{29+} с наибольшей интенсивностью

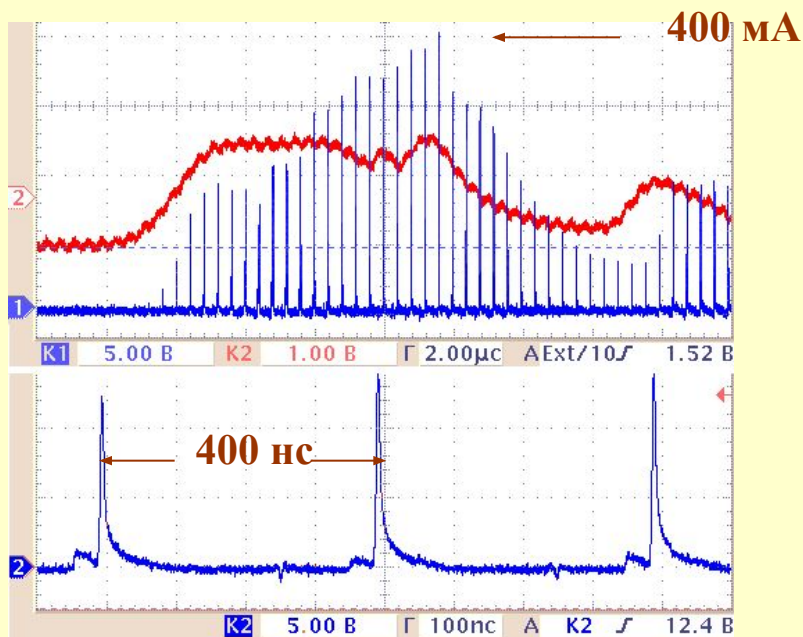


Ускорение U^{29+} до максимальной энергии



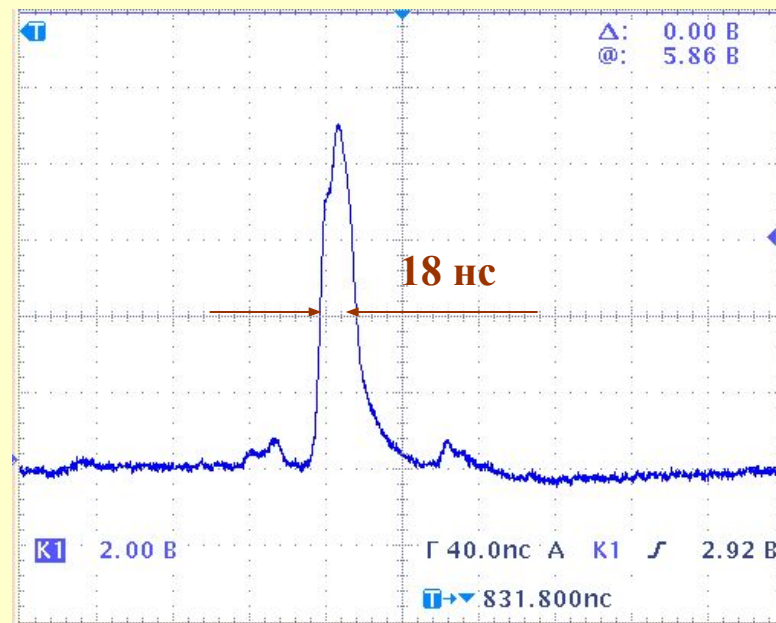
Режим ускорения ионов U^{29+}	$K_u, \%$	$E_K, \text{кэВ/а.е.м.}$
Макс. интенсивность	27	315
Макс. энергия	9	204

Структура пучка ионов C^{4+} на выходе И-3



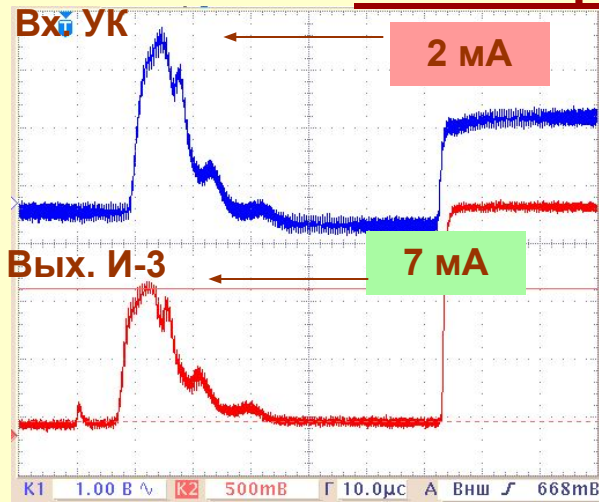
Банчи пучка на выходе И-3 1В/20 мА

Ток пучка на входе (1В/50 мА) и банчевая структура на вых. И-3 (1В/20 мА).

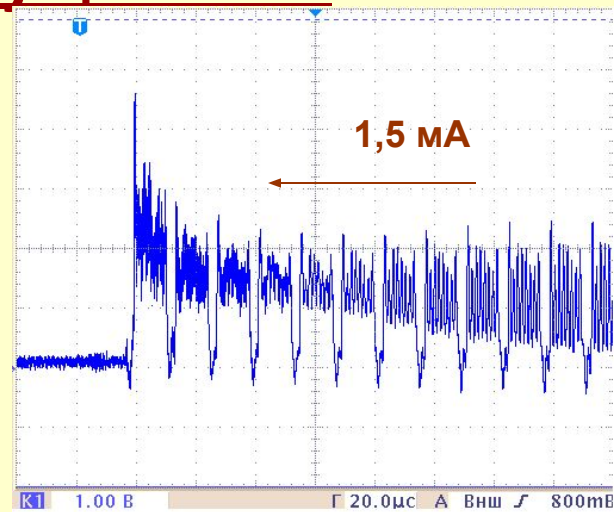


Форма банча на выходе И-3, 1В/20 мА

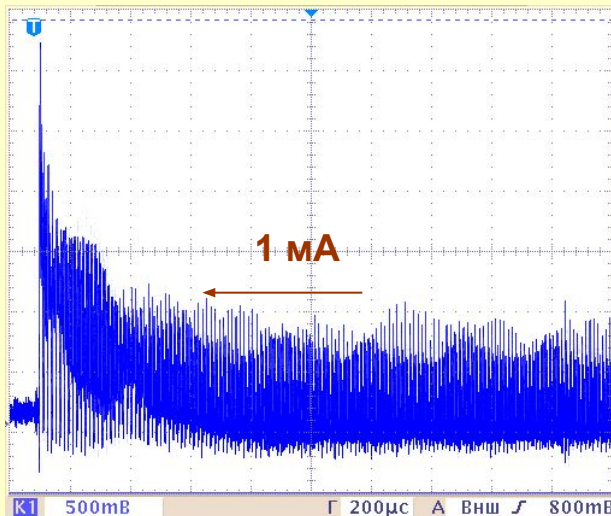
Ускорение пучка в бустерном синхротроне УК при инъекции на растущее поле



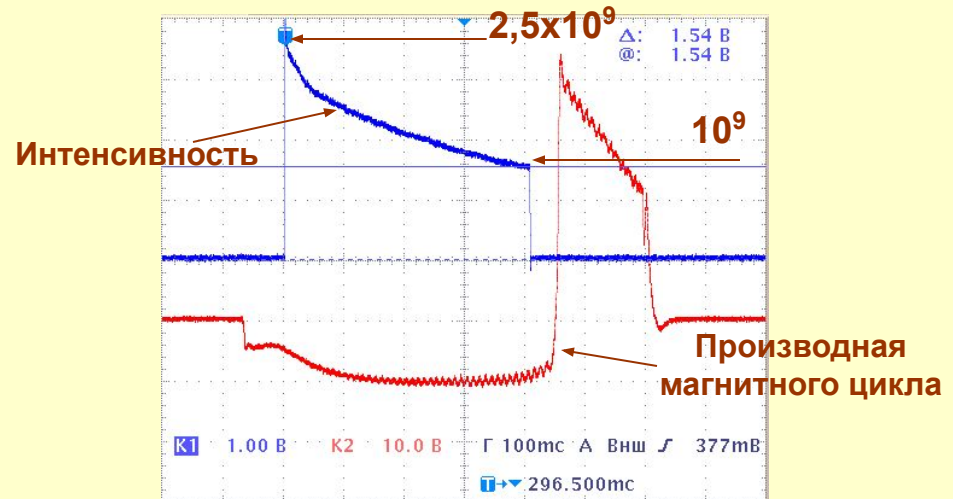
Ток пучка ионов C^{4+} на выходе И-3 и в конце ионпровода.



Циркуляция пучка в УК после инъекции по датчику в конце первого оборота (2В/1 мА)



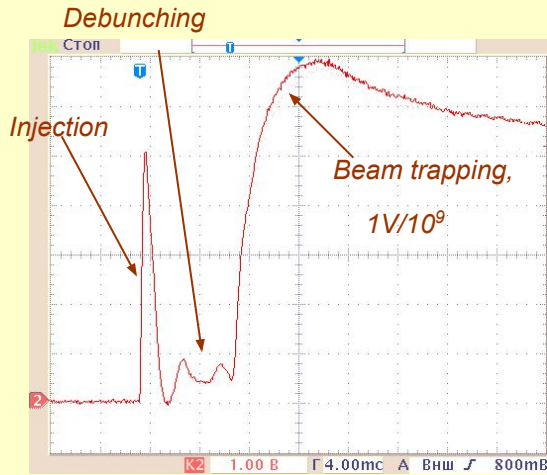
Осциллограмма захвата пучка в УК в режим ускорения (2В/1 мА)



Осциллограмма ускорения ионов C^{4+} в УК до энергии 300 МэВ/а.е.м.

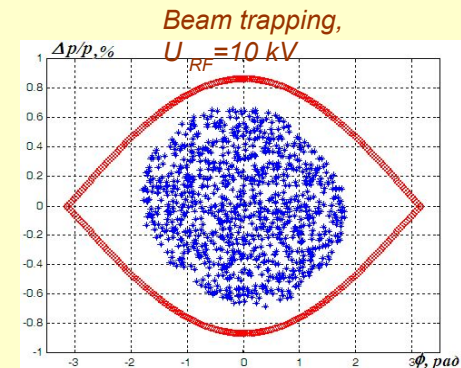
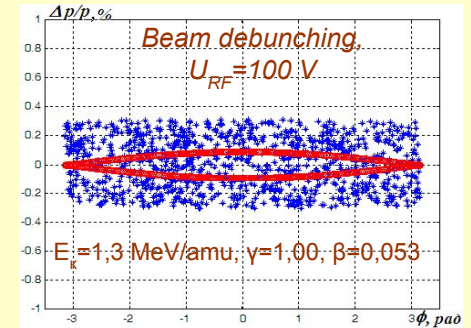
Адиабатический захват пучка в режим ускорения в БС УК

Oscillograms

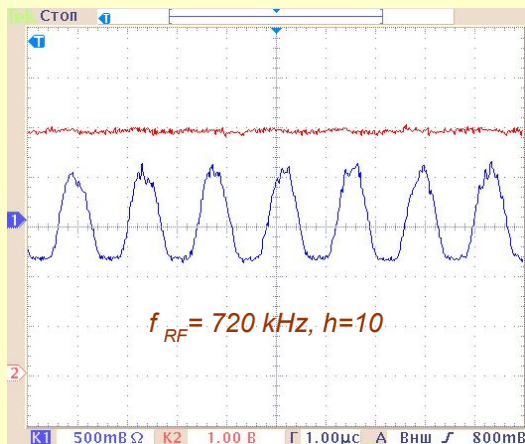


- Injection – for one turn
- Time of beam debunching – 7 ms
- Time of RF amplitude ramp – 10 ms
- Time of transition to acceleration – 20 ms
- Factor of beam capture – >90%
- Factor of beam loss at transition to acceleration – 20%

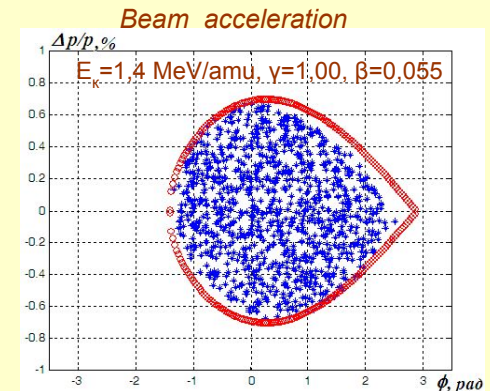
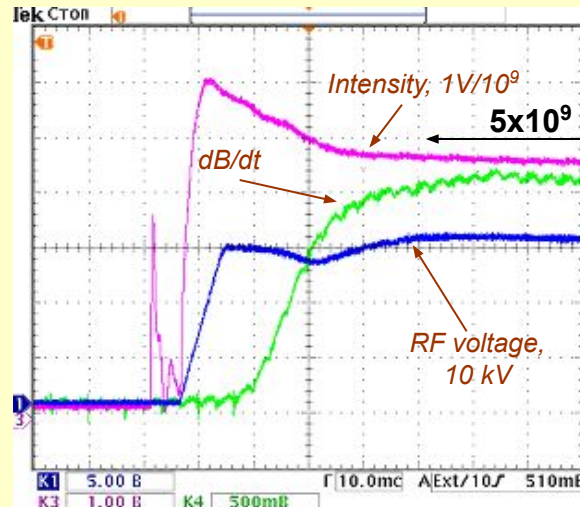
Longitudinal beam dynamics



Beam bunches at acceleration with $\phi_s = 10^\circ$



C⁴⁺ beam adiabatic trapping

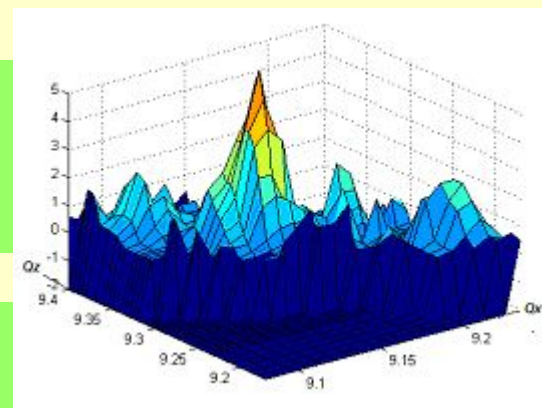
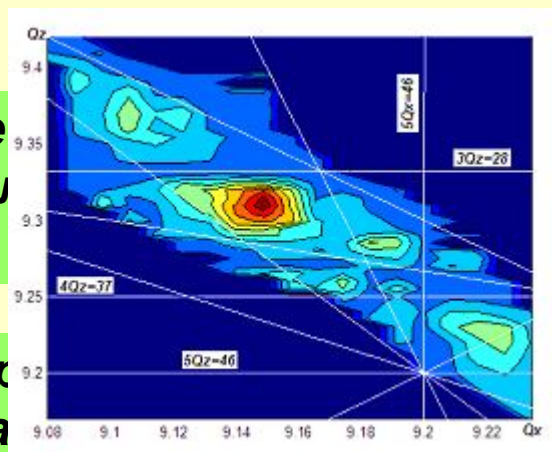


Состояние накопительного кольца У-10

1. **Динамическая апертура - $\sim 10 \pi$ мм мрад \Rightarrow 50π мм мрад**

Рабочая точка

Интенсивность накопленного пучка в зависимости от рабочей точки в клетке бетатронных резонансов



- **Симметрирование структуры магнитного кольца для компенсации нелинейных резонансов**
- **Коррекции хроматичности**
- **Коррекция равновесной орбиты**
- **Исследование клетки резонансов для выбора оптимальной рабочей точки**

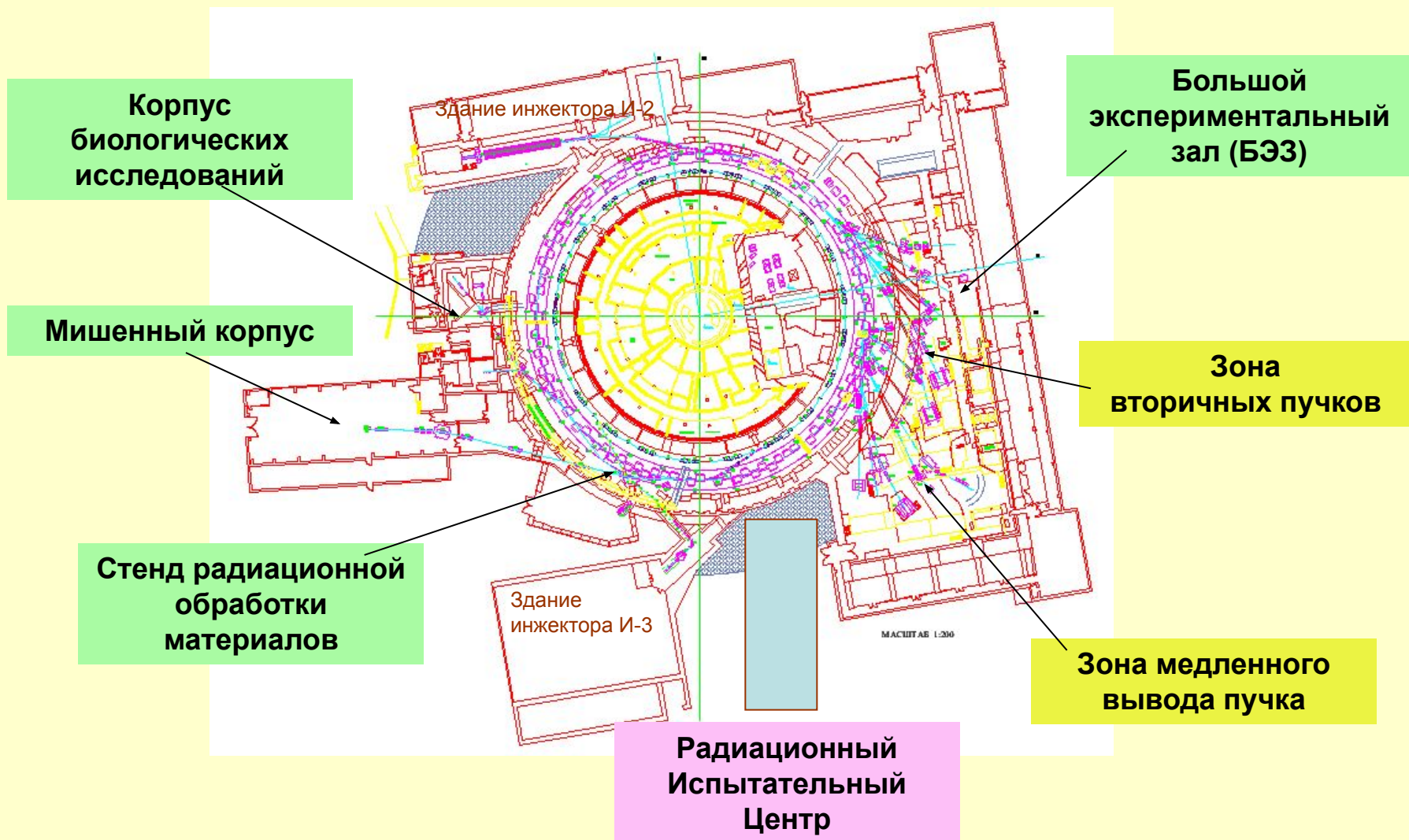
Эксплуатация комплекса ИТЭФ- ТВН

Режим работы	Схема ускорения	Энергия, МэВ/н	Режим вывода
Ускоритель протонов	И-2 И-2/У-10	25 до 230 до 3000 9300 100 - 9300	Импульс, 10 мкс/с Медицинский вывод, 200 нс, Быстрый вывод, 800 нс, Внутренняя мишень, 1с Медленный вывод, 1с
Ускоритель ионов, С, (Al, Fe, Pb, U)	И-3/УК И-3/УК/У-10	1,5 - 400 50 - 4000	Быстрый вывод, 800 нс Внутренняя мишень, 1с Медленный вывод, 1с
Накопитель ионов, С, (Al, Co, Zn)	И-3/УК/У-10	200-300	Быстрый вывод, 150 нс

Полное время работы комплекса в 2005 году составило 2808 часов, из которых:

1704 ч. - ускорение протонов (1152 ч. с энергией 2,5 ГэВ и 552 ч. с энергией 8 ГэВ),
828 часов – накопление ионов углерода с энергией 200 МэВ/н,
276 часов – ускорение ионов углерода до энергии 4 ГэВ/н.

Использование ускоренных пучков



Направления исследований **на пучках протонов и ионов комплекса ИТЭФ-ТВН**

- **релятивистская ядерная физика**
- **физика высокой плотности энергии в веществе**
- **физика и технология тяжелоионного термоядерного синтеза**
- **физика сильноточных ионных пучков**
- **радиобиология и медицинская физика**
- **протонная терапия**
- **ионная терапия**
- **радиационное материаловедение**
- **протонная радиография**
- **испытание радиационной стойкости образцов**

Заключение

1. За последние два года достигнут определенный прогресс в повышении эксплуатационных параметров комплекса ИТЭФ-ТВН:

- *улучшена технология перезарядной инжекции и накопления, что позволило увеличить вдвое интенсивность накапливаемого пучка,*
- *коэффициент накопления ионов повышен в 1,5 раза до величины ~70,*
- *комплекс выведен на эксплуатационный режим ускорения и накопления ионов в объеме ~1000 часов в год.*

2. Основная задача текущего года состоит в модернизации ионного источника для расширения массового состава ускоряемых и накапливаемых ионов .

3. Модернизация ряда систем инжекционного комплекса И-3/УК позволяет рассчитывать на повышение интенсивности накопителя до 10 раз. Дальнейшее увеличение интенсивности может быть достигнуто с новым ионным инжектором И-4.

4. В существующих условиях финансирования фундаментальных исследований необходимо расширение коммерческого использования ускоренных пучков протонов и ионов для получения дополнительных средств на содержание развитие комплекса.