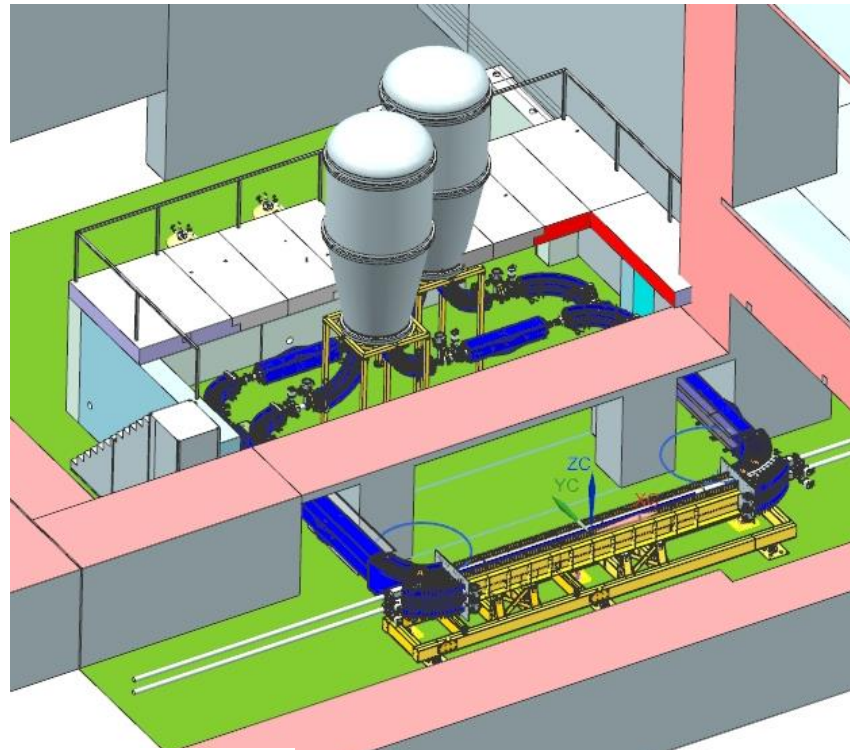


Электронное охлаждение

В.Б.Рева и команда ИЯФ СО РАН



COSY, Germany



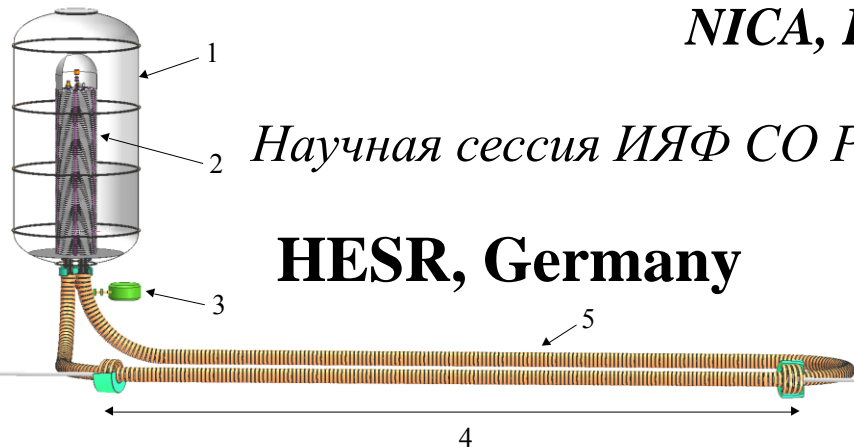
NICA, BINP&JINR, Russia



FERMILAB, USA

Научная сессия ИЯФ СО РАН, 22 февраля, 2019

HESR, Germany





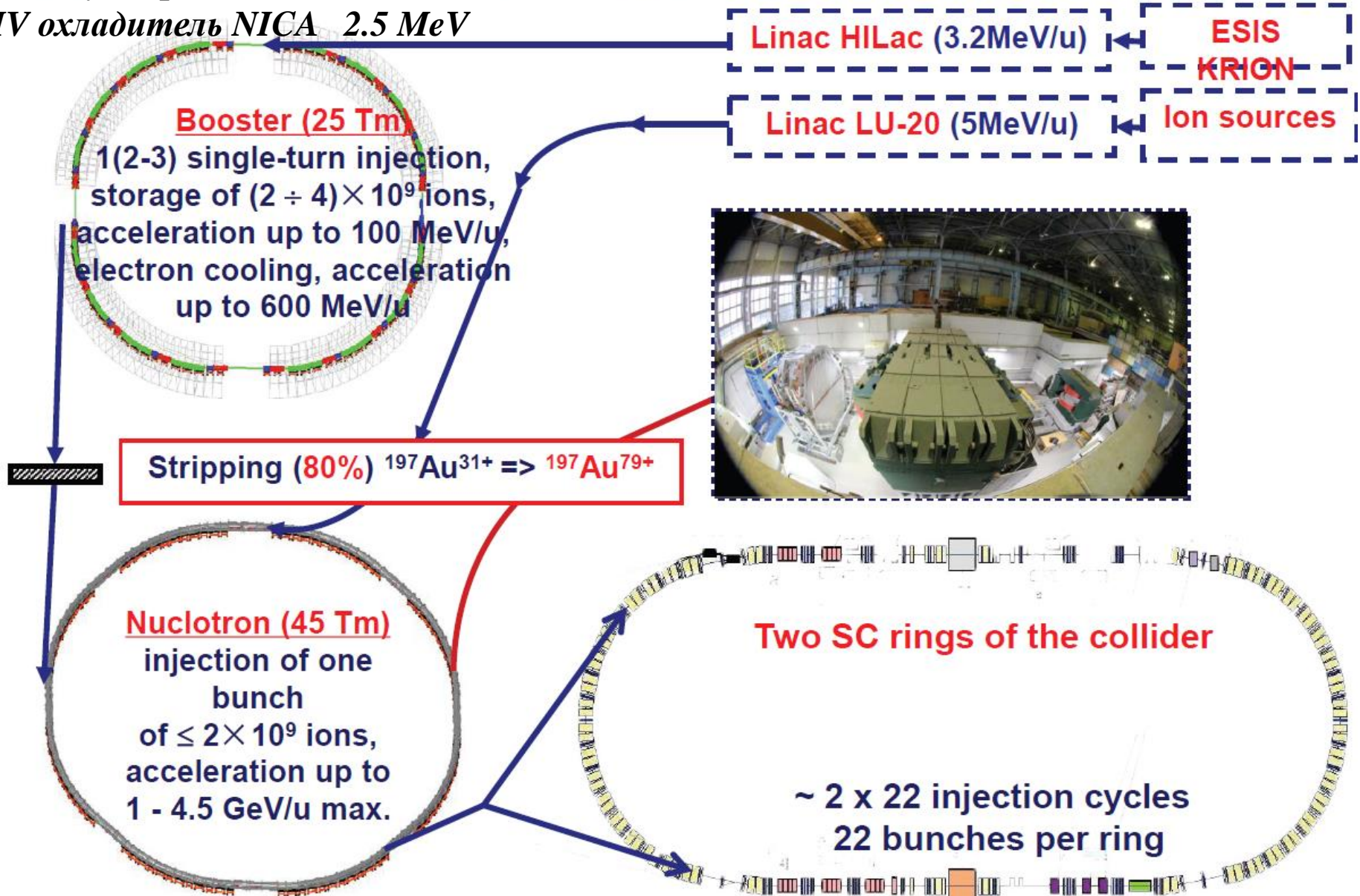
Новый ускорительный комплекс НИКА создаваемый в ОИЯИ г. Дубна предназначен для проведения экспериментов в области ион-ионных и протон-протонных столкновения в области энергий 1-4.5 ГэВ/н. Основные эксперименты направлены на поиск смешанной фазы, фазовых переходов и критических явлений в сильно взаимодействующей барионной материи в столкновениях встречных пучков тяжелых ионов, вплоть до золота при энергии в центре масс до 11 ГэВ/нуклон. Планируемое значение светимости в режиме столкновений пучков $^{197}\text{Au}^{79+}$ составляет $10^{27} \text{ см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$. Достижение такой светимости требует формирования очень коротких сгустков с малыми поперечными эмиттантами. Для этого планируется использовать методы электронного и стохастического охлаждения непосредственно на энергии эксперимента, что соответствует энергии электронов до 2.5 МэВ.

NICA @ Heavy Ion mode

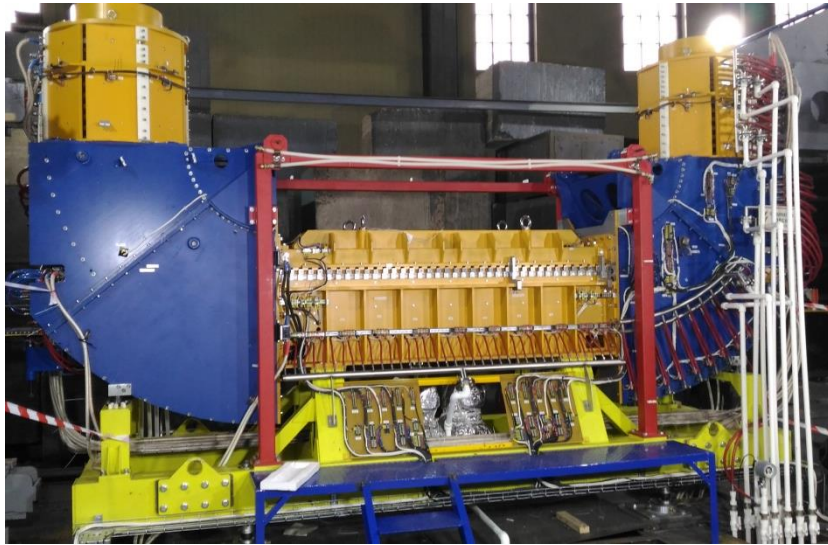
2 электронных охладителя:

NICA бустер 50 кэВ

HV охладитель NICA 2.5 MeV



Установка электронного охлаждения на 50 кэВ в настоящее время находится на кольце бустера и мы надеемся, что она будет также полезна для накопления ионов по примеру аналогичных установок CSR, LEIR, SIS и др.

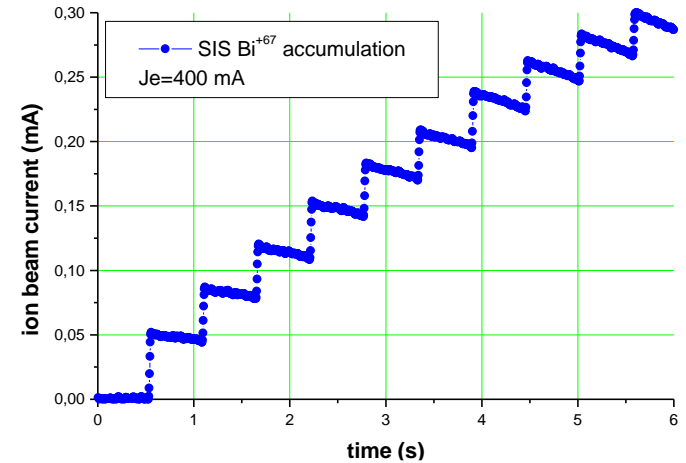
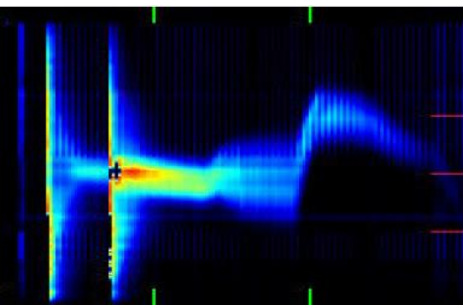


Сборка NICA Booster Cooler в ОИЯИ

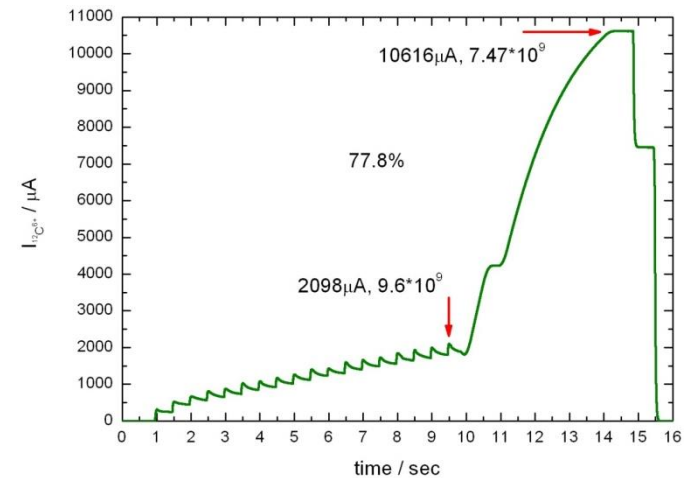


Уровень вакуума измеренный двумя независимыми приборами 10^{-11}

LEIR Охлаждение ионов свинца, накопление и ускорение, время охлаждения около 0.1 с



Накопление ионов висмута Bi в SIS-18



Накопление ионов углерода при энергии
7 МэВ/н в CSRm

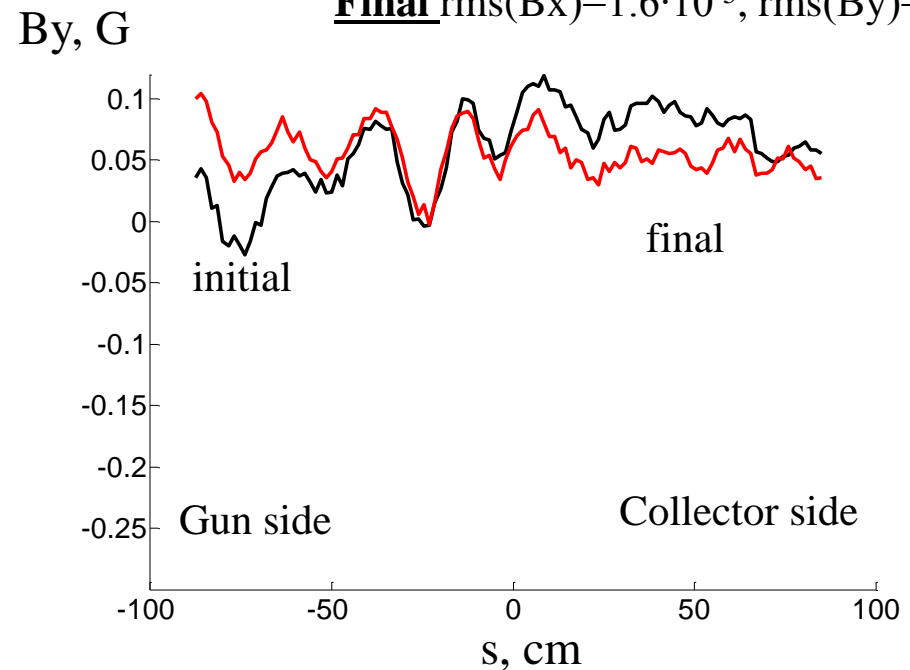
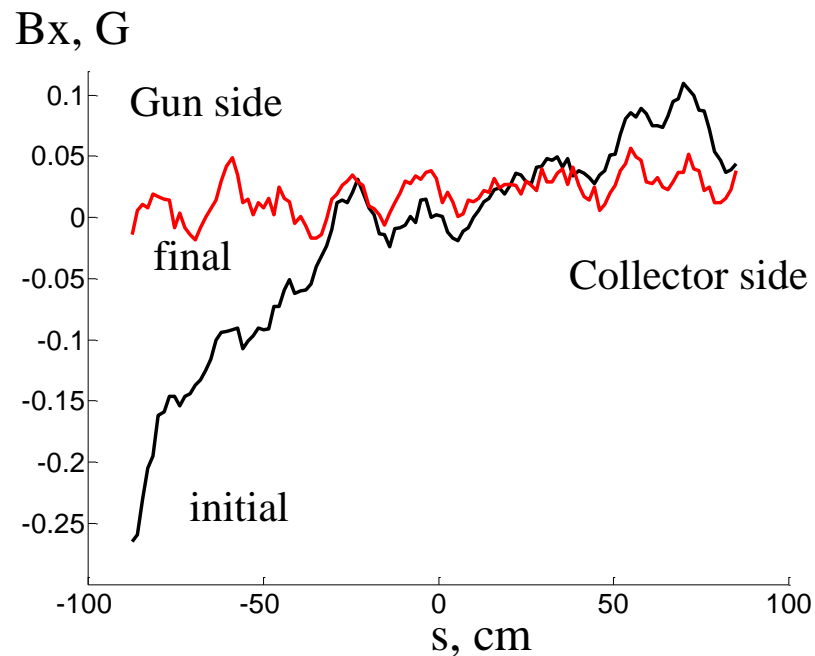
Настройка силовой линии на установке электронного охлаждения

*Первоначальная настройка была сделана
к Новосибирске в процессе запуска, после
перевозки магнитное поле испортилось не
очень сильно, но повторная настройка
все-равно потребовалась*

*Черная линия – состояние перед
коррекцией, красная после*



Initial rms(B_x)= $8 \cdot 10^{-5}$, rms(B_y)= $3.5 \cdot 10^{-5}$
Final rms(B_x)= $1.6 \cdot 10^{-5}$, rms(B_y)= $2.0 \cdot 10^{-5}$

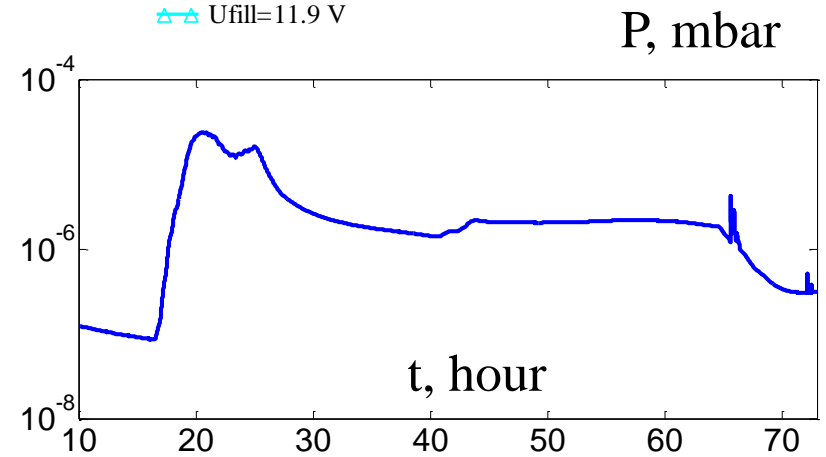
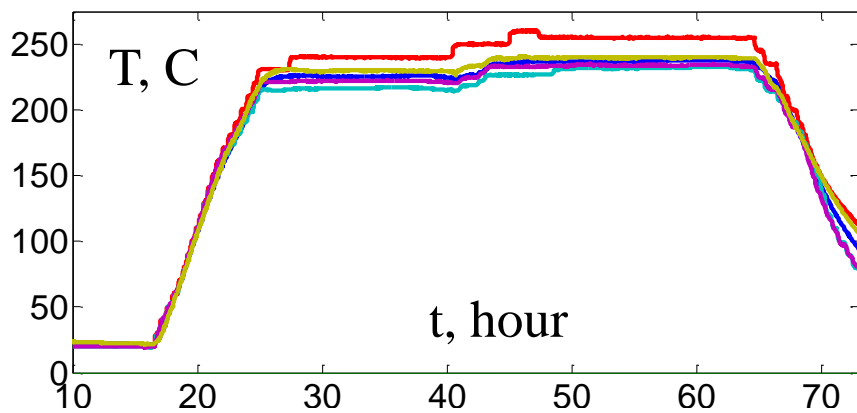
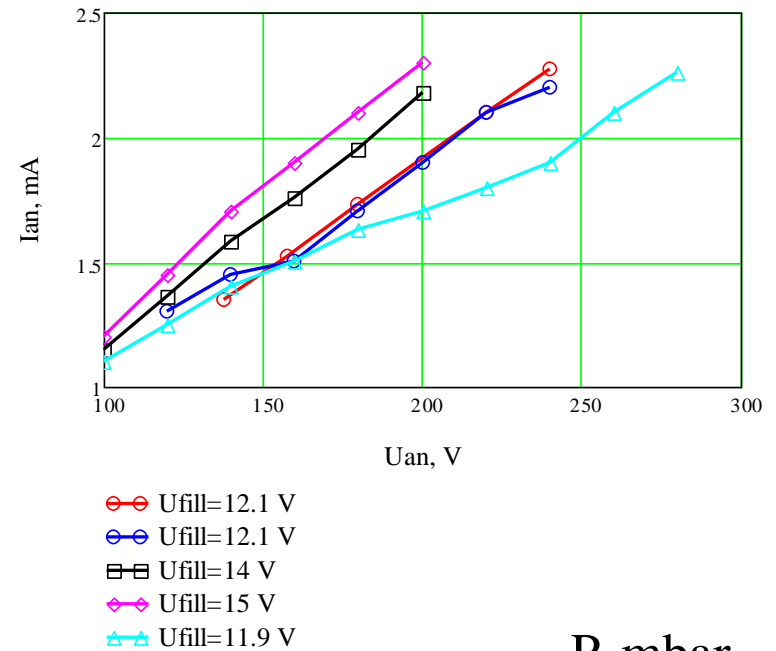


Вакуумный прогрев в ОИЯИ

Сборка вакуумной камеры



Активация катода



Текущее состояние

SGFC main panel

Options Adjustment

Right Click - set increment

GUN			EST U,kV	U	I (uA)	
Usupp,kV	Usupp,kV	Isupp, mA	1 0.080	0.07	0.67	ON ●
0.000	-0.000	0.000	2 0.080	-0.10	0.01	ON ●
Uan,kV	Uan,kV	Ian, mA	3 0.100	-0.10	2.53	ON ●
4.800	4.801	-0.069	Delay 1 Delay 1 Delay 1			
Ufil,V	Ufil,V	Ifil,A	1	2	3	EST No <input type="checkbox"/> Strob
15.00	12.87	2.95	Collector U(kV) I(mA)			
Ugrid,kV	U,kV	I,mA	5 kV	Disabled	3.24	150.16
0.140	0.139	0.000	T1	I leaks(mkA)	Реле (R_FLT) <input type="checkbox"/>	
Delay 1 Delay 2 Delay 3	HV		67.98	0.60	Реле запер (PROTC) <input type="checkbox"/>	
2	3	4	I leaks trigger (TLEAK) <input type="checkbox"/>			
No	Strob		Clear I leaks trigger			

WIP				
HV	U out(kV)	U out(kV)	I out(A)	Error
■	1.740	1.740	0.0	<input type="checkbox"/>
Starter	Ready ●			
Ping to WIP ●				

HVD U0 1.7396 HVD U1 1.7380

Ping to canbus gateway ●

State Error list ErrLog

SGFC main panel

Options Adjustment

Right Click - set increment

GUN			EST U,kV	U	I (uA)	
Usupp,kV	Usupp,kV	Isupp, mA	1 1.180	1.16	0.55	ON ●
0.340	0.335	0.001	2 1.180	-1.18	0.60	ON ●
Uan,kV	Uan,kV	Ian, mA	3 1.180	-1.17	2.66	ON ●
4.100	4.101	-0.041	Delay 1 Delay 1 Delay 1			
Ufil,V	Ufil,V	Ifil,A	1	2	3	EST No <input type="checkbox"/> Strob
15.00	12.86	2.95	Collector U(kV) I(mA)			
Ugrid,kV	U,kV	I,mA	5 kV	Disabled	3.23	150.27
0.000	-0.000	-0.000	T1	I leaks(mkA)	Реле (R_FLT) <input type="checkbox"/>	
Delay 1 Delay 2 Delay 3	HV		67.87	2.29	Реле запер (PROTC) <input type="checkbox"/>	
2	3	4	I leaks trigger (TLEAK) <input type="checkbox"/>			
No	Strob		Clear I leaks trigger			

WIP				
HV	U out(kV)	U out(kV)	I out(A)	Error
■	17.500	17.500	0.1	<input type="checkbox"/>
Starter	Ready ●			
Ping to WIP ●				

HVD U0 17.5010 HVD U1 17.4741

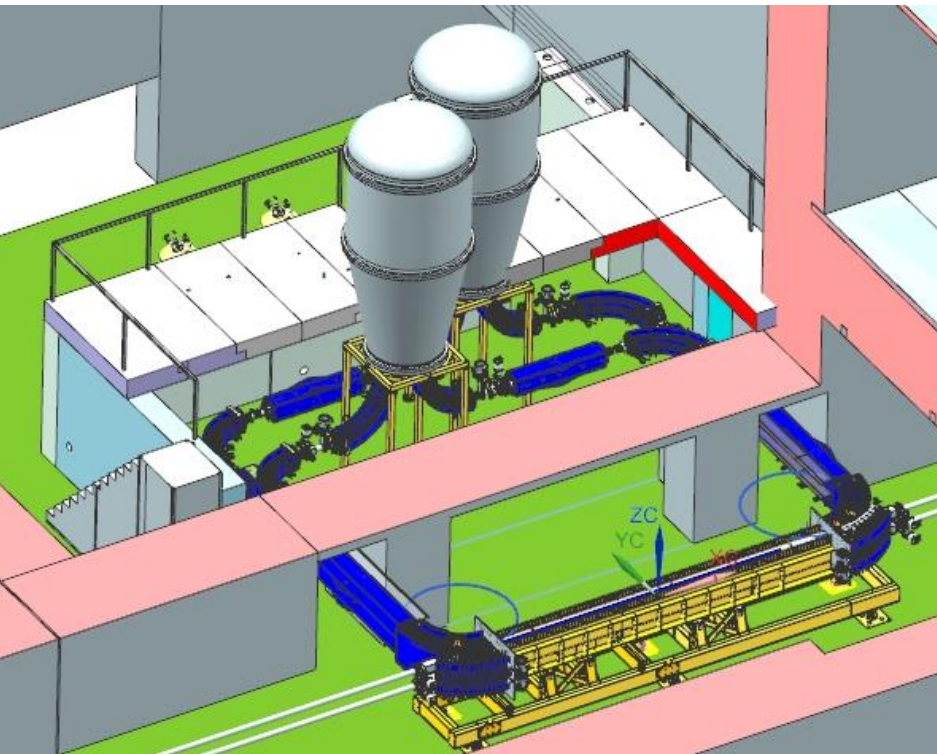
Ping to canbus gateway ●

State Error list ErrLog

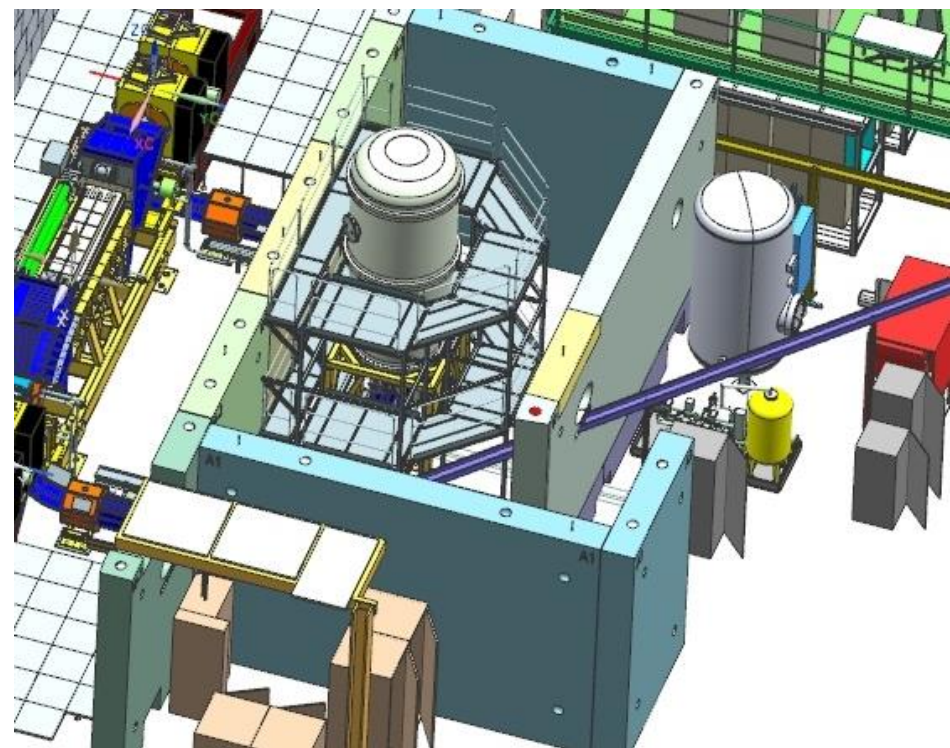
*150 мА при энергии
инжекции 1.74 кВ, 300
мА при 5 кВ*



Следующий шаг – высоковольтный охладитель для коллайдера NICA



**2.5 МэВ охладитель –
интеграция в NICA**



**2 МэВ охладитель –
интеграция в COSY**

Основные параметры

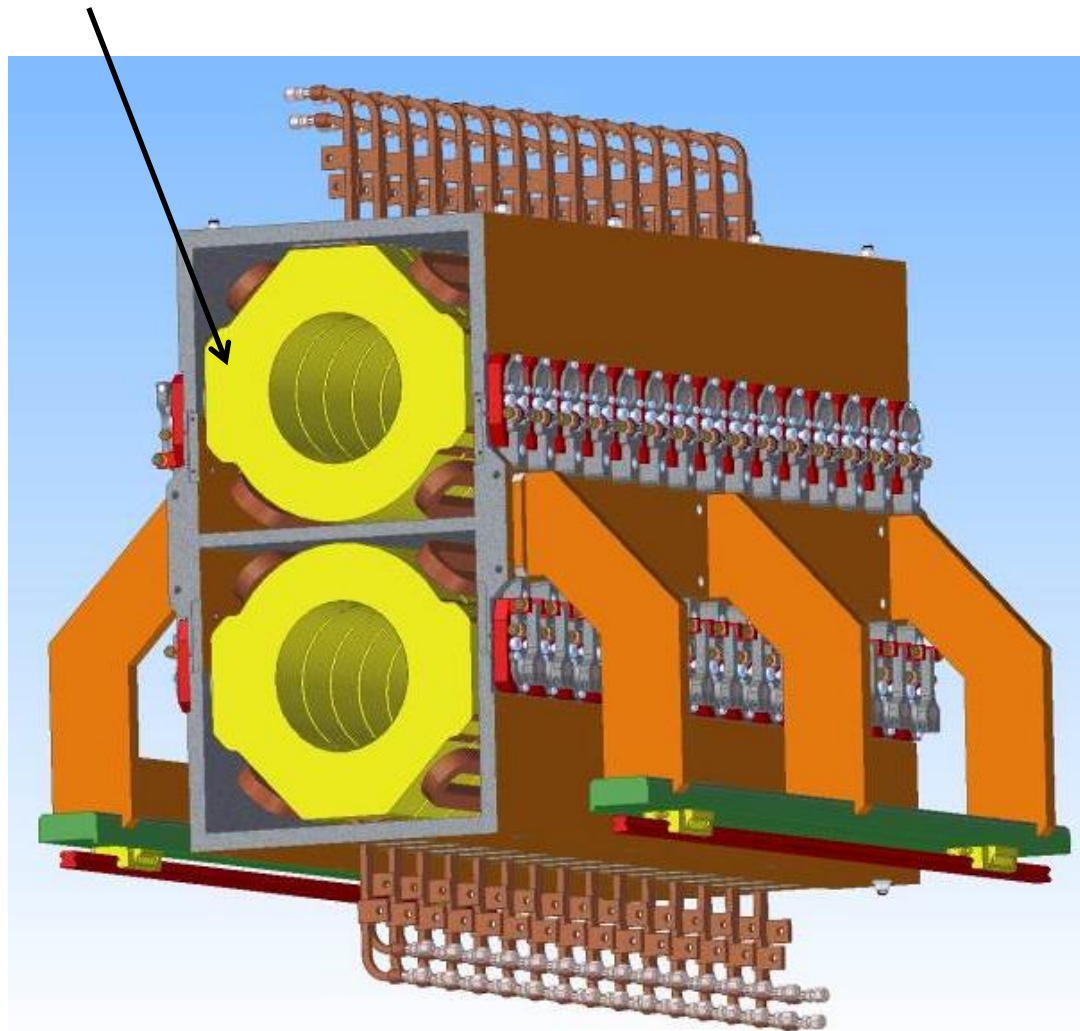
Parameter	Value
Область энергии	0.2÷2.5 МэВ
Число секций охлаждения	2
Стабильность энергии ($\Delta U/U$)	$\leq 10^{-4}$
Электронный ток	до 1 А
Размер элект. пучка в секции охлаждения	5÷20 мм
Длина секции охлаждения	6 м
Радиус поворота транспортных каналов	1 м
Магнитное поле в секции охлаждения	0.5÷2 кГс
Вакуум в секции охлаждения	10^{-11} мбар
Высота пучков от пола	1340/1660 мм
Полная потребляемая мощность	500-700 кВт

Сравнение установок охлаждения COSY и NICA

1. Обе системы имеют классическую компоновку с продольным магнитным полем, но NICA имеет две секции для охлаждения встречных пучков с малым расстоянием между собой (32 см), что сильно осложнило техническое проектирование
2. Обе системы реализуют модульный принцип в построении ускорительной колонны
3. NICA кулер реализует модульный принцип построения секции охлаждения (like Fermilab), но с непрерывным магнитным полем. COSY кулер был спроектирован с одной целостной (не дефрагментированной) секцией охлаждения
4. В NICA кулер закладывается настройка магнитного поля на основе BPM метода. COSY кулер был оборудован системой измерения прямолинейности магнитного поля в вакууме
5. Для обеих установок реализована система передачи мощности на основе каскадного трансформатора;
6. Фильтр Вина для обеих установок для уменьшения потока вторичных электронов из коллектора
7. “4-секторная” электронная пушка для диагностики электронного пучка для обеих систем

Секция охлаждения

Катушки продольного магнитного поля

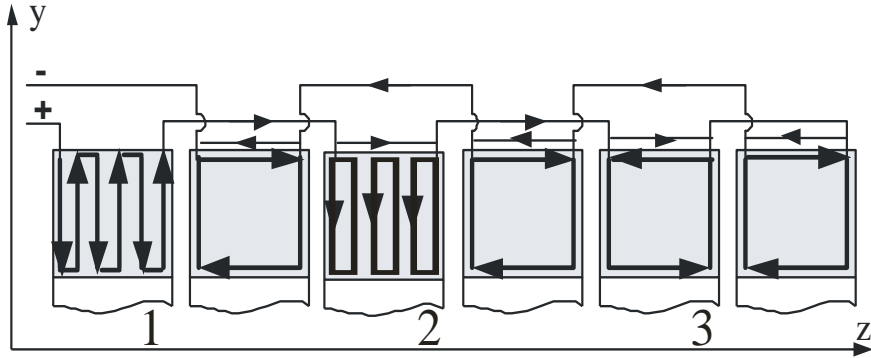


Каждая секция содержит датчик положения пучка ВРМ и корректор поперечного магнитного поля. Таким образом грубое выравнивание магнитной силовой линии возможно как результат измерения положения электронного пучка относительно ионного. Последний считается сохраняет прямолинейную траекторию в силу своей большой массы.

Требование на прямолинейность магнитной силовой линии достаточно высокое – 10^{-5} , что приводит к необходимости регулировки отдельных магнитных элементов на уровне точности 10 мкм.

Секция охлаждения состоит из 6 стандартных секция длиной 1 м

Секция охлаждения



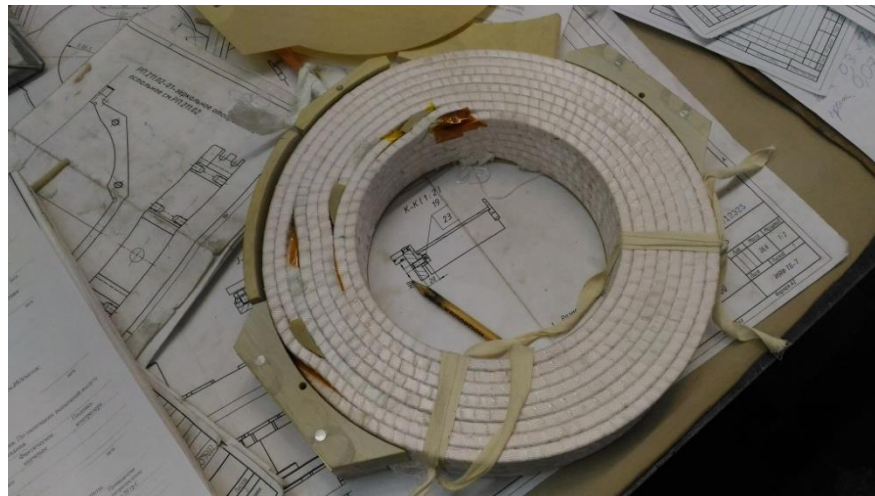
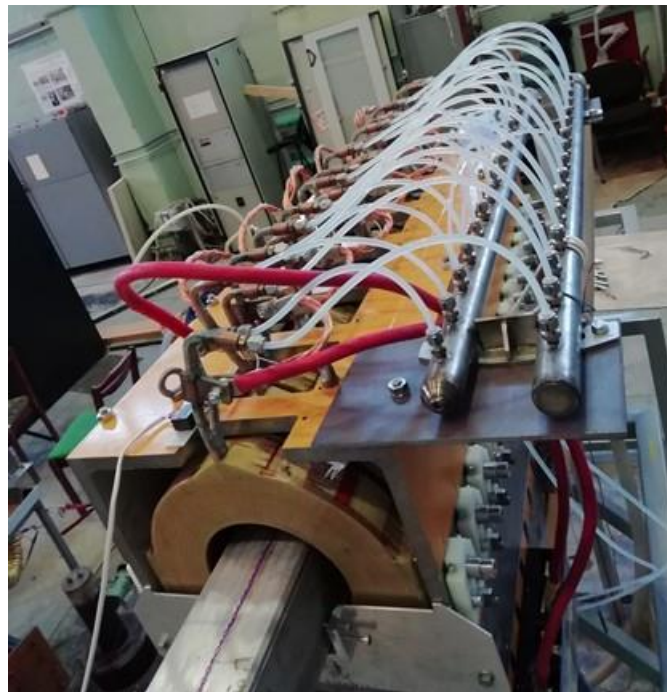
Для увеличения однородности магнитного поля в секции охлаждения и уменьшение влияния токов коммутации катушки соленоида разбиты на два типа: с правой и левой намоткой.



Согласующая секция максимально приближена к секции охлаждения. Это техническое решение позволяет уменьшить поле в тороиде и сильно сэкономить на полной потребляемой мощности. Также уменьшается поперечный “удар” в тороиде действующий на ионный пучок, что сильно упрощает оптику ионного пучка. Платой за это является эффективное уменьшение секции охлаждения по сравнению с максимально возможным значением.

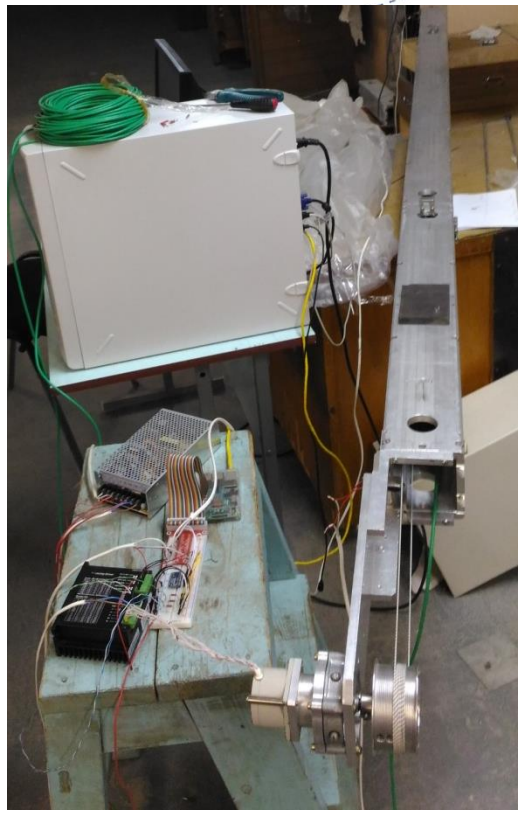
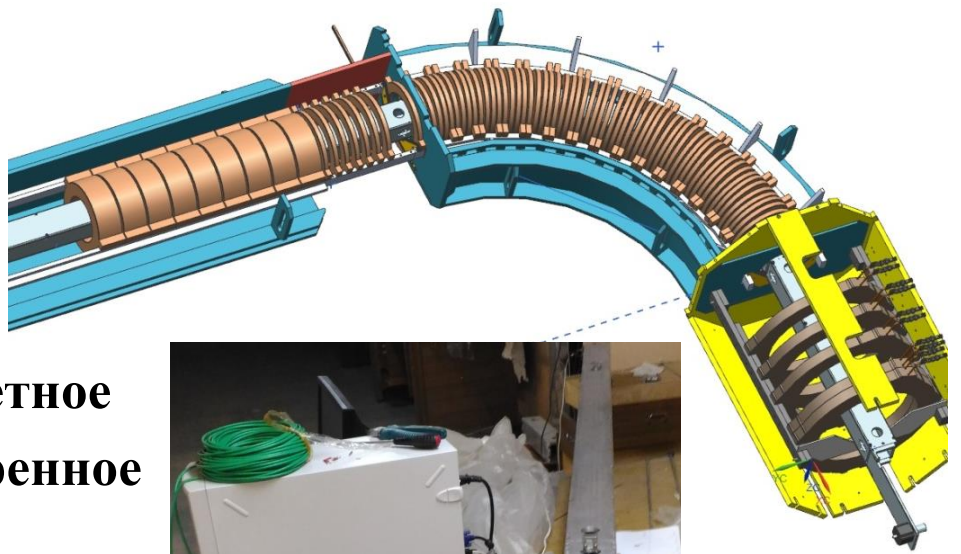
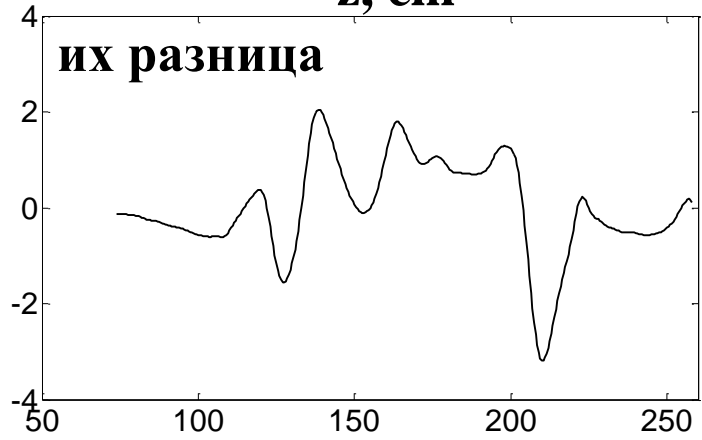
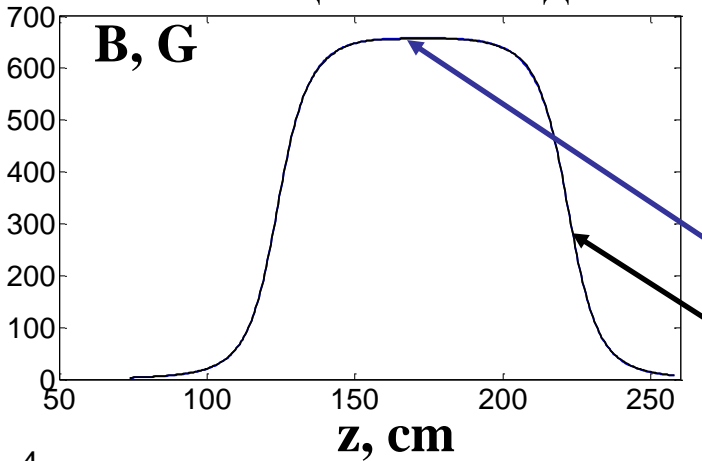


**И.Н. Мешков и первая
секция охлаждения для
NICA в ИЯФ**



**Первая катушка секции охлаждения в
процессе намотки**

Распределение продольного поля в секции охлаждения

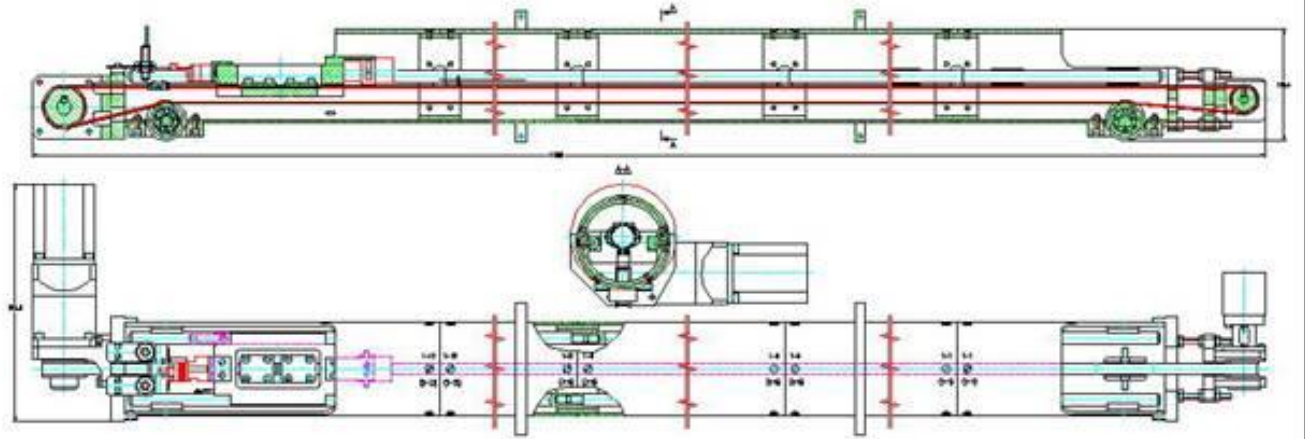
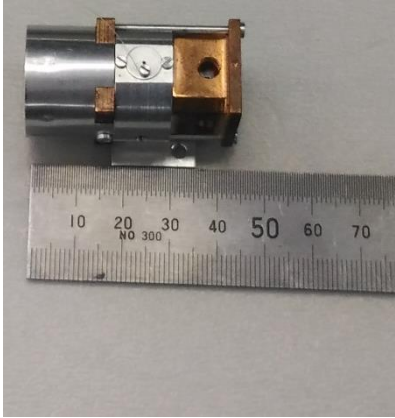


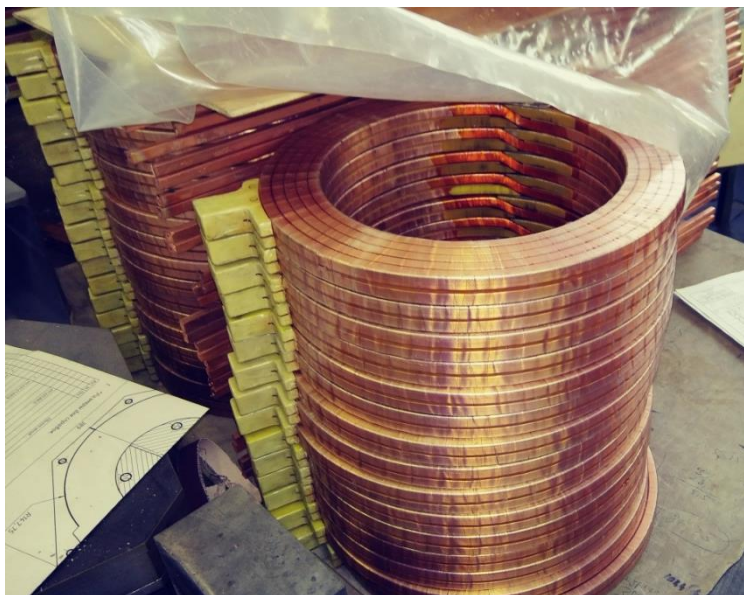
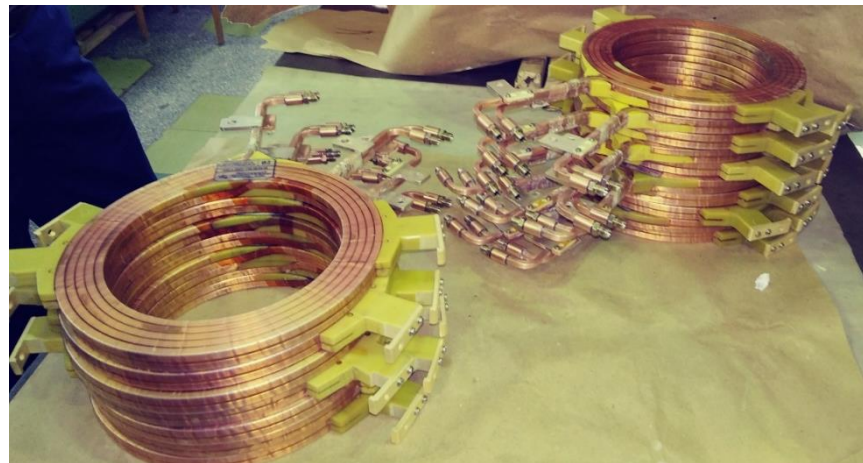
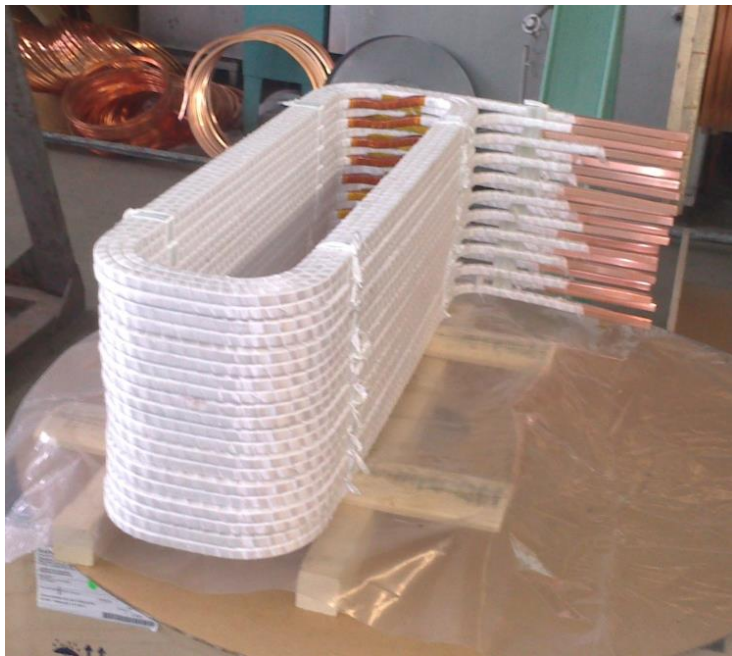
**Система
магнитных
измерений
на основе
датчиков
Холла**

Элементы



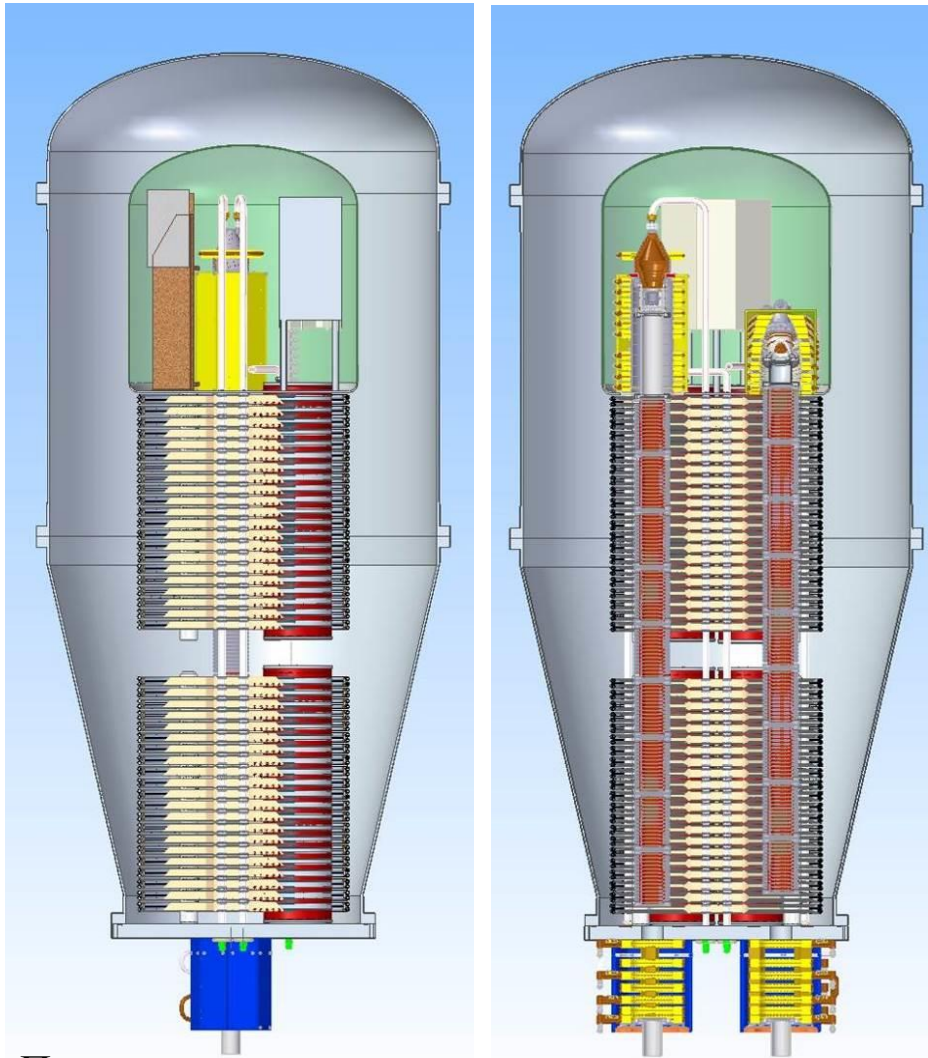
Компас



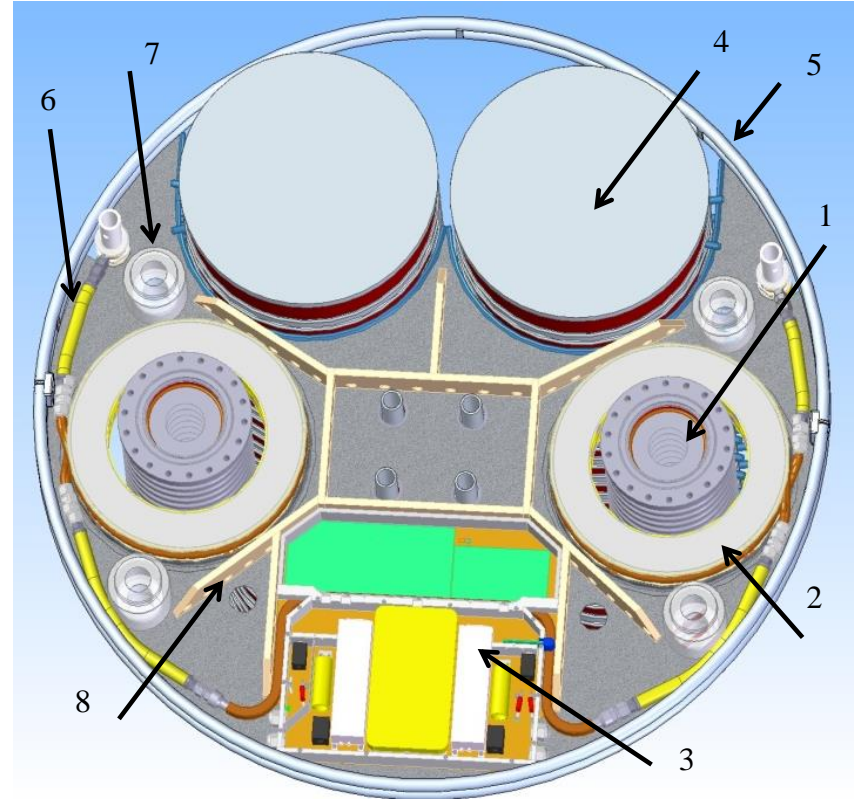


Больше катушек хороших и разных

3D вид электростатического ускорителя



Проект электростатического ускорителя для NICA. В технических целях колонна разделена на две части. Средняя часть содержит элементы вакуумной откачки, ВРМ и механическое основание для сборки верхней секции.



Высоковольтная секция.

1 – ускорительная трубка, 2 – катушка магнитного поля, 3 – электроника секции (катушка 3.2А, 500 Гс и HV PS +/- 30 кВ), 4 – секция каскадного трансформатора, 5 – охранные кольца, 6 – масляные трубы охлаждения, 7 – опорные изоляторы, 8 – ребра жесткости.

NICA – 42 секции (COSY – 33 секции)



**Сосуд для
электростатического
ускорителя в процессе
производства**



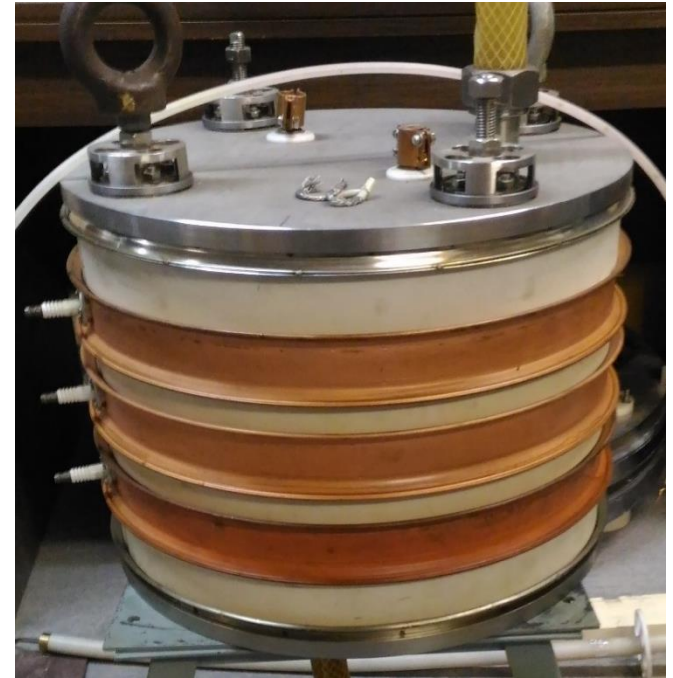
Секции электростатического ускорителя

**Дно сосуда
электростатичес
кого ускорителя**



**Ускорительная
трубка**

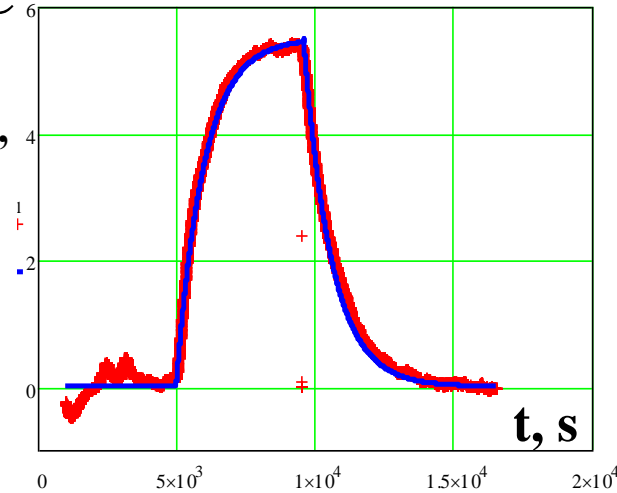
Новые секции каскадного трансформатора



$dT, ^\circ\text{C}$

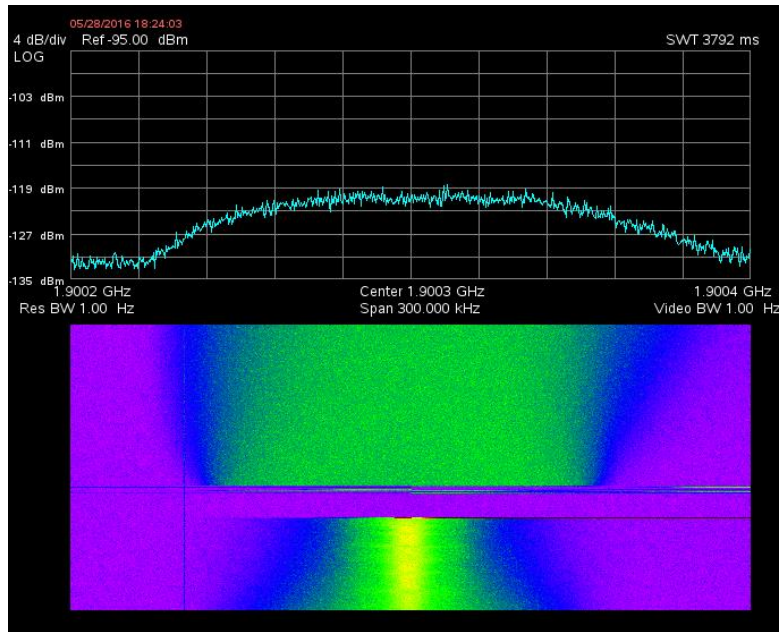
Тепловые испытания
каскадного трансформатора,
ток 45 А, напряжение 350 В

Расчетное проходное
сопротивление 0.1 Ом на
секцию

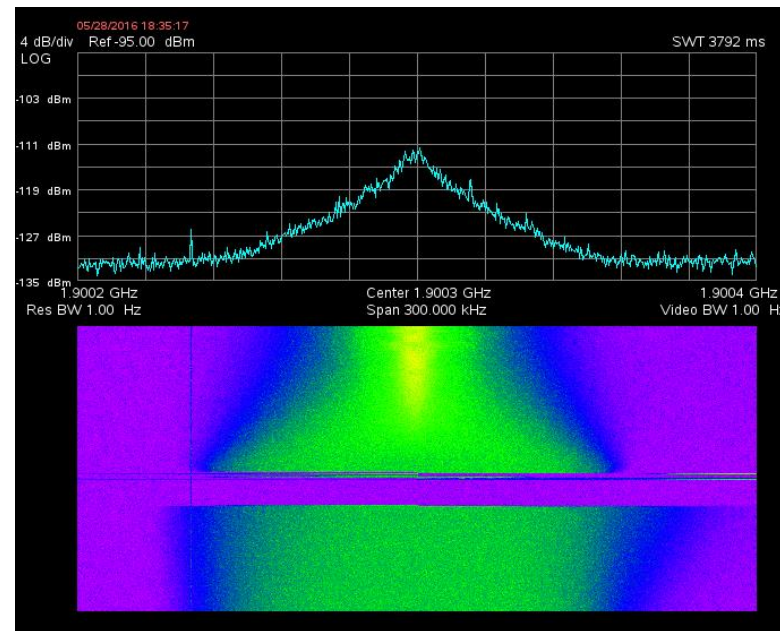
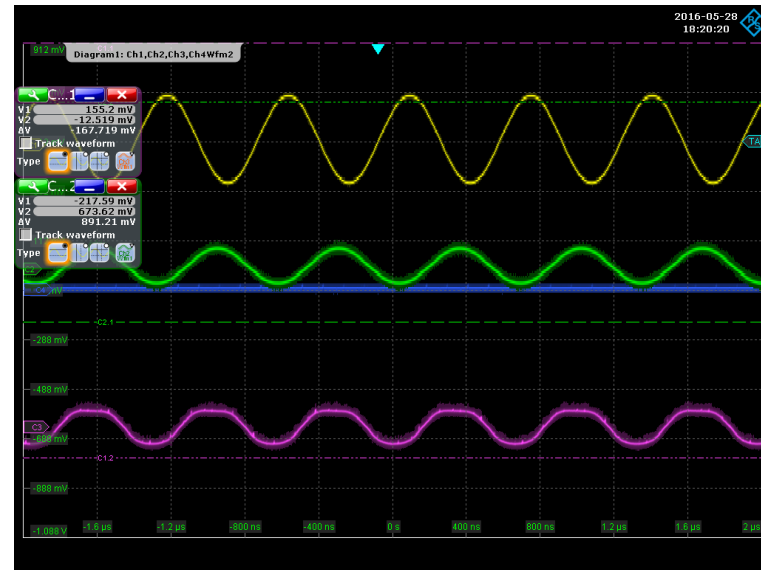


Электронное охлаждение и ВЧ первой гармоники – опыт COSY

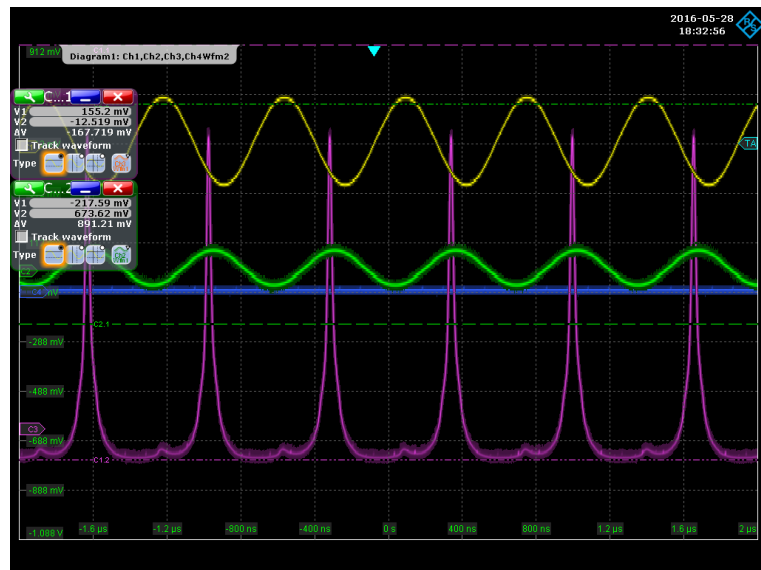
$E_e=909$ kV, $N_p=2 \cdot 10^9$



Без охлаждения



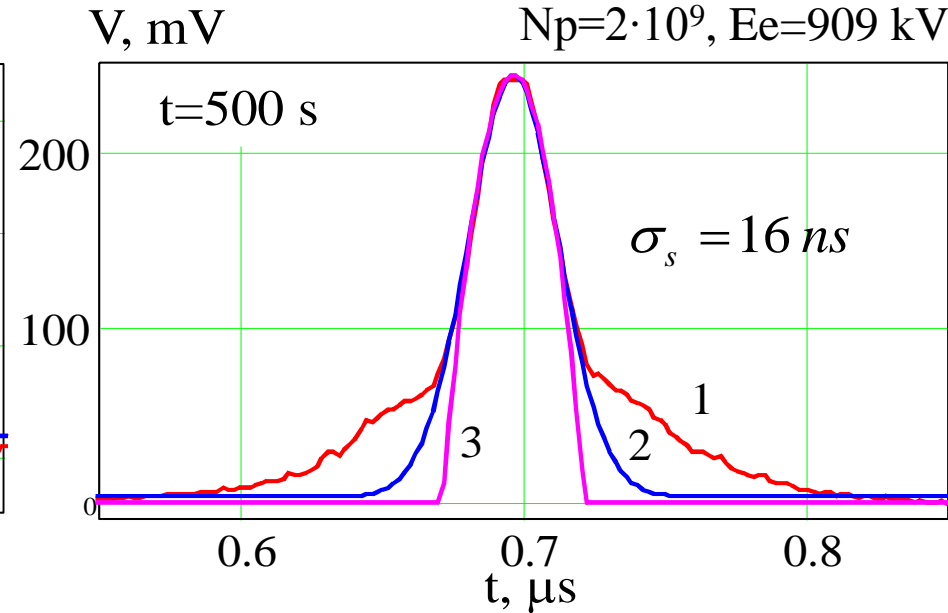
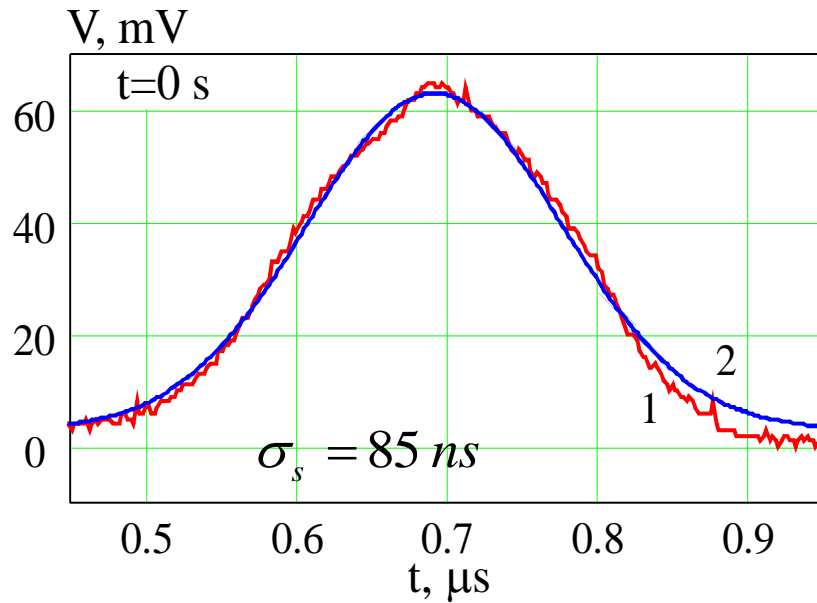
Охлаждение



Экспериментальные данные и аппроксимация продольного профиля сгустка после инжекции (слева) и в результате действия охлаждения электронным пучком (справа)

RF on, e-cooling с эл. током 570 mA,

$N_p = 2 \cdot 10^9$, $E_e = 909$ kV



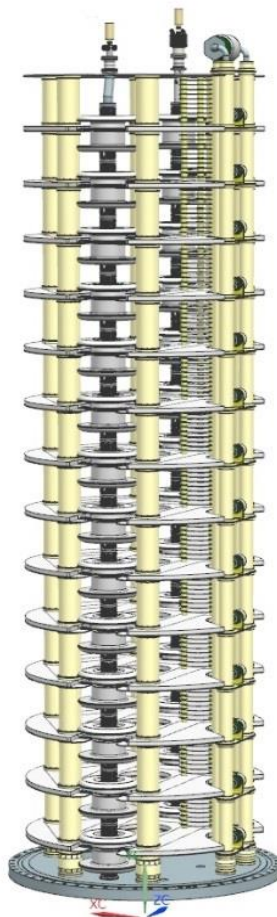
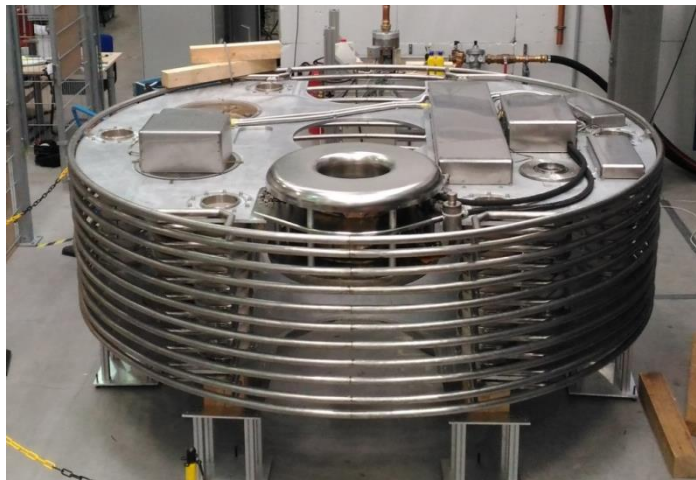
1 – экспериментальный профиль, 2 – гауссовский профиль, 3 – параболический профиль

Оценка экспериментально достигнутой длины сгустка составляет 14 нс, что очень близко к оценке полученной на основе равновесия между действием ВЧ поля и поля пространственного заряда.

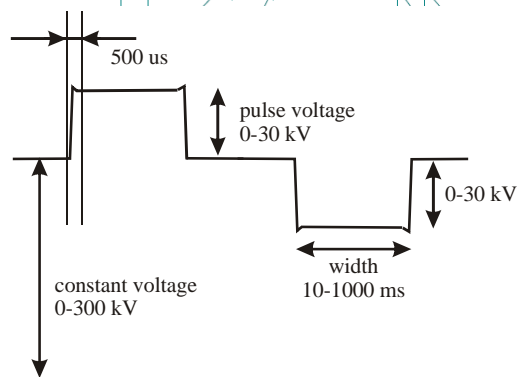
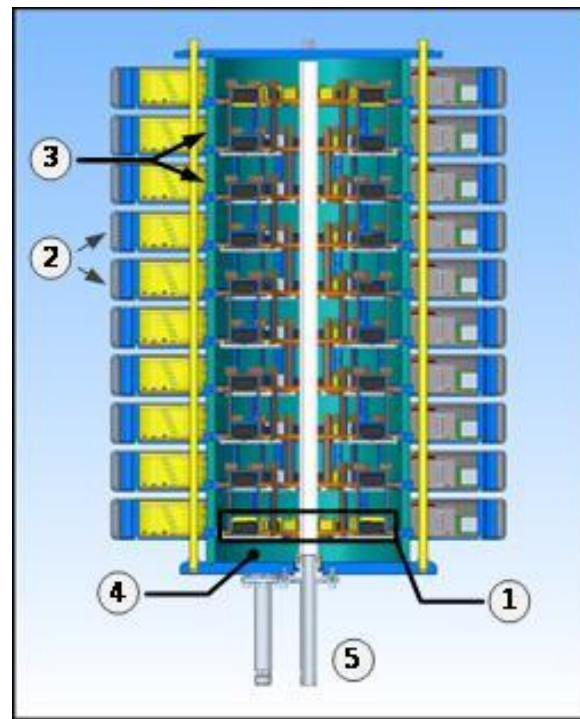
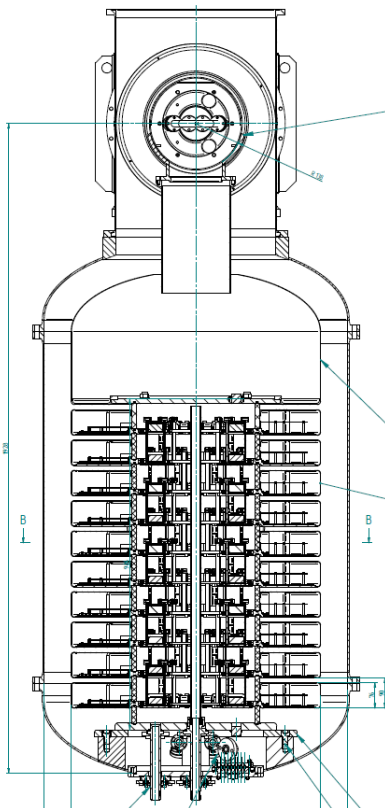
$$\sigma_s^3 = \frac{eN_p \left(2 \ln \left(\frac{b}{a} \right) + 1 \right)}{(2\pi)^{3/2} \gamma^2 U_{RF}} \Pi^2$$

e-cool позволяет сжимать пучок вплоть до достижения предела по пространственному заряду

Другие проекты электронного охлаждения вперед на турбинах к 4-8 МэВ



Другие проекты электронного охлаждения вперед к экспериментам по рекомбинации



Конструкция источника питания с быстрой перестройкой: 1 – секция трансформатора, 2 – секции высоковольтной электроники, 3 – корпус каскадного трансформатора, 4 – масляный объем, 5 – вход и выход потока масла.

**Спасибо всем участникам работ по
электронному охлаждению**