

Первое в России накопление тяжелых ионов в продольном фазовом пространстве с использованием электронного охлаждения



В.Б. Рева
и команды ИЯФ и ОИЯИ



Введение

Развитие физики элементарных частиц, ядра и атомной физики происходит не только на рубеже достижения максимальной энергии. Большое число неисследованных фундаментальных вопросов остается в области более низкой энергии, поэтому в настоящее время во многих мировых центрах проектируются и строятся многофункциональные ускорительные комплексы на энергию ГэВ-го диапазона, позволяющие работать как с протонами, так и различными ионами. Метод электронного охлаждения, предложенный Г.И. Будкером в 1966 г в настоящее время является одним из основных способов повышения качества пучков тяжелых заряженных частиц в ускорителях и достижения требуемых параметров.



**Научная сессия Объединенного ученого совета по физическим наукам СО РАН
22 апреля 2026**

Электронное охлаждение: основы метода

Предложено Г.И. Будкером в 1966 . Впервые экспериментально проверено в ИЯФ СО РАН в 1974 (НАП-М)

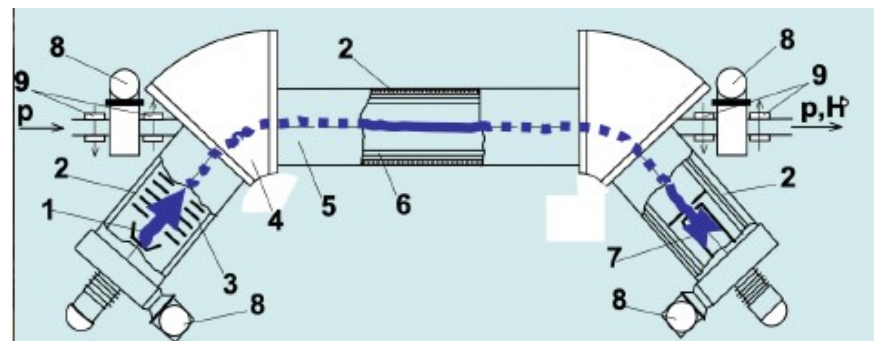
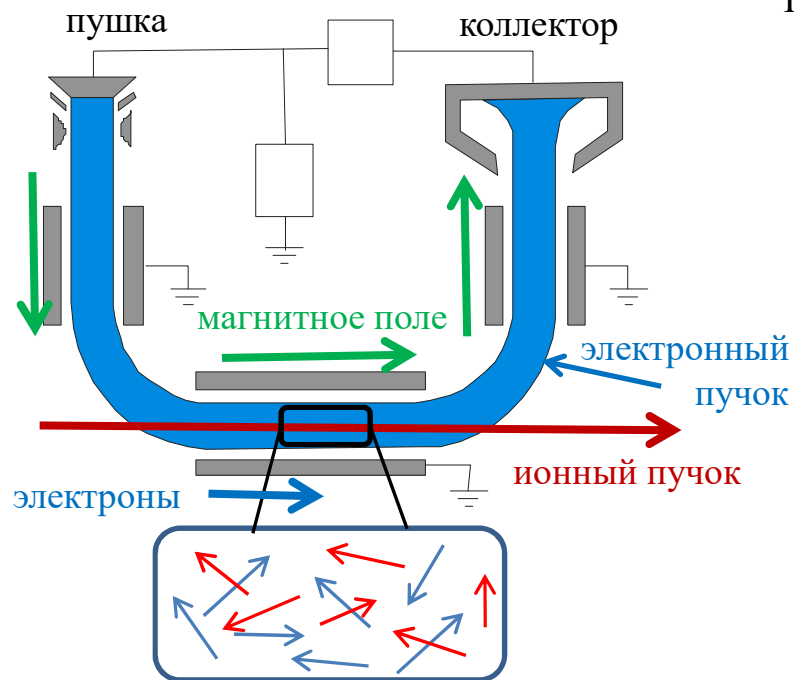
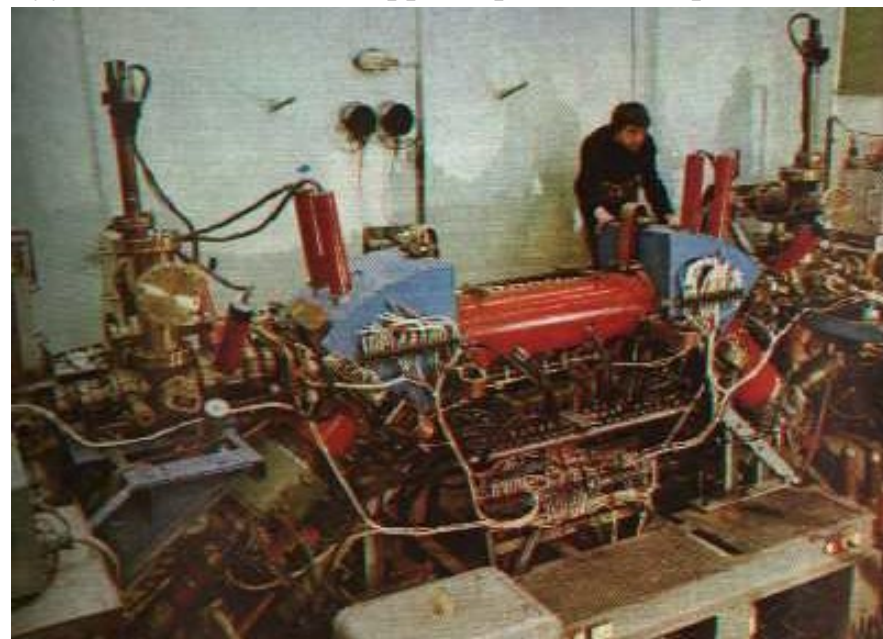


Схема установки: 1- электронная пушка, 2 – соленоид, 3 – аноды электронной пушки, 4 – тороидальные магниты, 5 – вакуумная камера, 7 – коллектор электронного пучка, 8 – вакуумные насосы, 9 – корректоры ионной орбиты

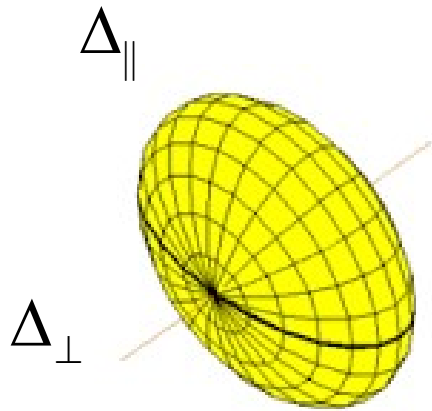


НАП-М первая в мире установка для изучения электронного охлаждения ионов.



Установка электронного охлаждения – “ЭПОХА”

Электронное охлаждение: основы физики охлаждения



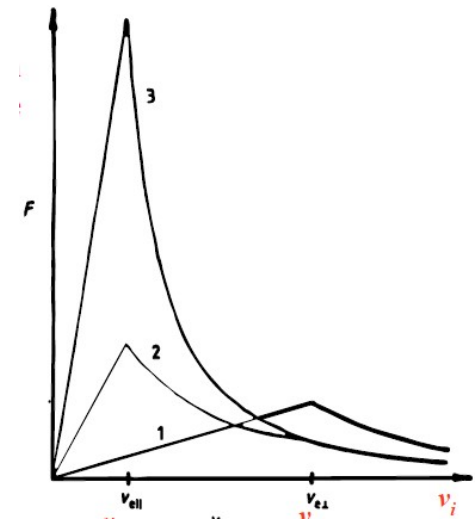
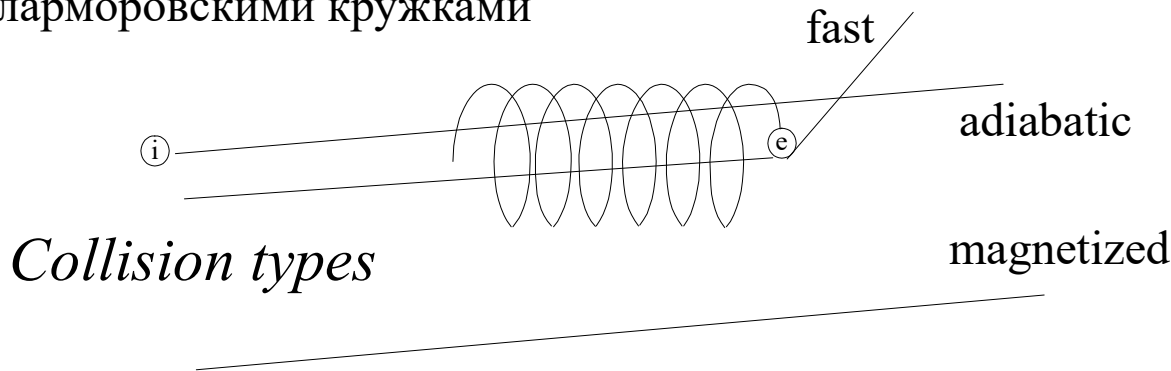
$$\vec{F} = -\frac{4\pi n_e e^4}{m_e} L_C \int \frac{\vec{u}}{u^3} f(v_e) d^3 v_e \quad u = \vec{v}_i - \vec{v}_e$$

Формула В.В. Пархомчука

$$\vec{F} = -\frac{4 n_e e^4}{m_e} \frac{\vec{v}_i}{(v_i^2 + v_{eff}^2)^{3/2}} L_N \left(\frac{\rho_{max} + \rho_{min} + \rho_L}{\rho_{min} + \rho_L} \right)$$

v_{eff} - все “вредные” скорости движения электронного пучка относительно ионов

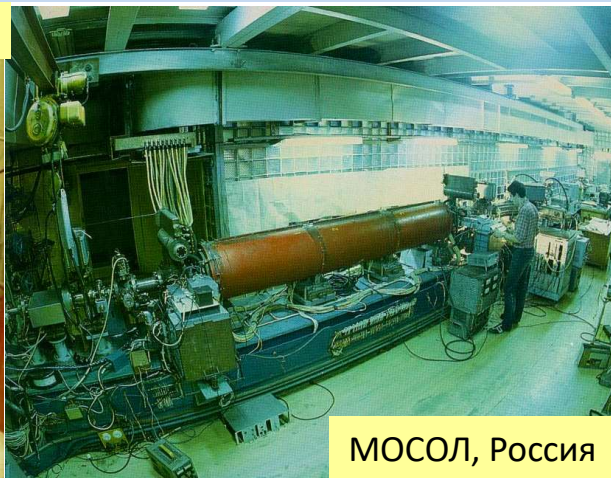
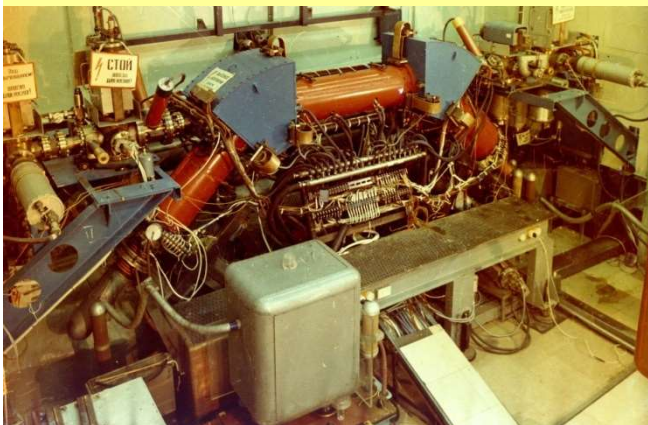
Появляются столкновения для которых прицельный параметр ρ много больше ρ_L ларморовского радиуса электронов и ионы эффективно взаимодействуют не со свободными электронами, а с ларморовскими кружками



Появилось деление на установки с “замагниченными” столкновениями и без них.

Системы электронного охлаждения созданный в ИЯФ СО РАН

ЭПОХА, Россия



МОСОЛ, Россия



SIS-18, Германия

CSRm, Китай



COSY

LEIR, ЦЕРН



CSRe, Китай

Бустер, Дубна



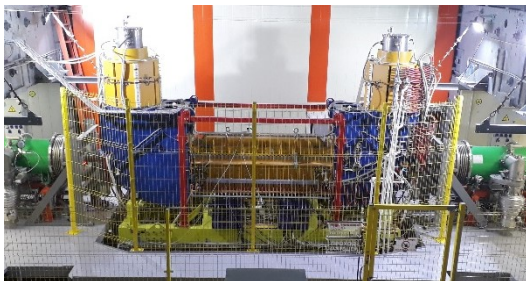
В мире, в то или иное время, эксплуатировалось порядка 20 установок электронного охлаждения

Электронное охлаждение в комплексе NICA

Система электронного охлаждения «Бустера» НИКА предназначена для накопления пучка ионов при инъекции (на энергии ионов 3.2 МэВ/н), а также для его подготовки к выпуску в кольцо «Нуклотрон». Данная система была разработана и испытана в ИЯФ СО РАН после чего поставлена в ОИЯИ.



Система электронного охлаждения в бустере

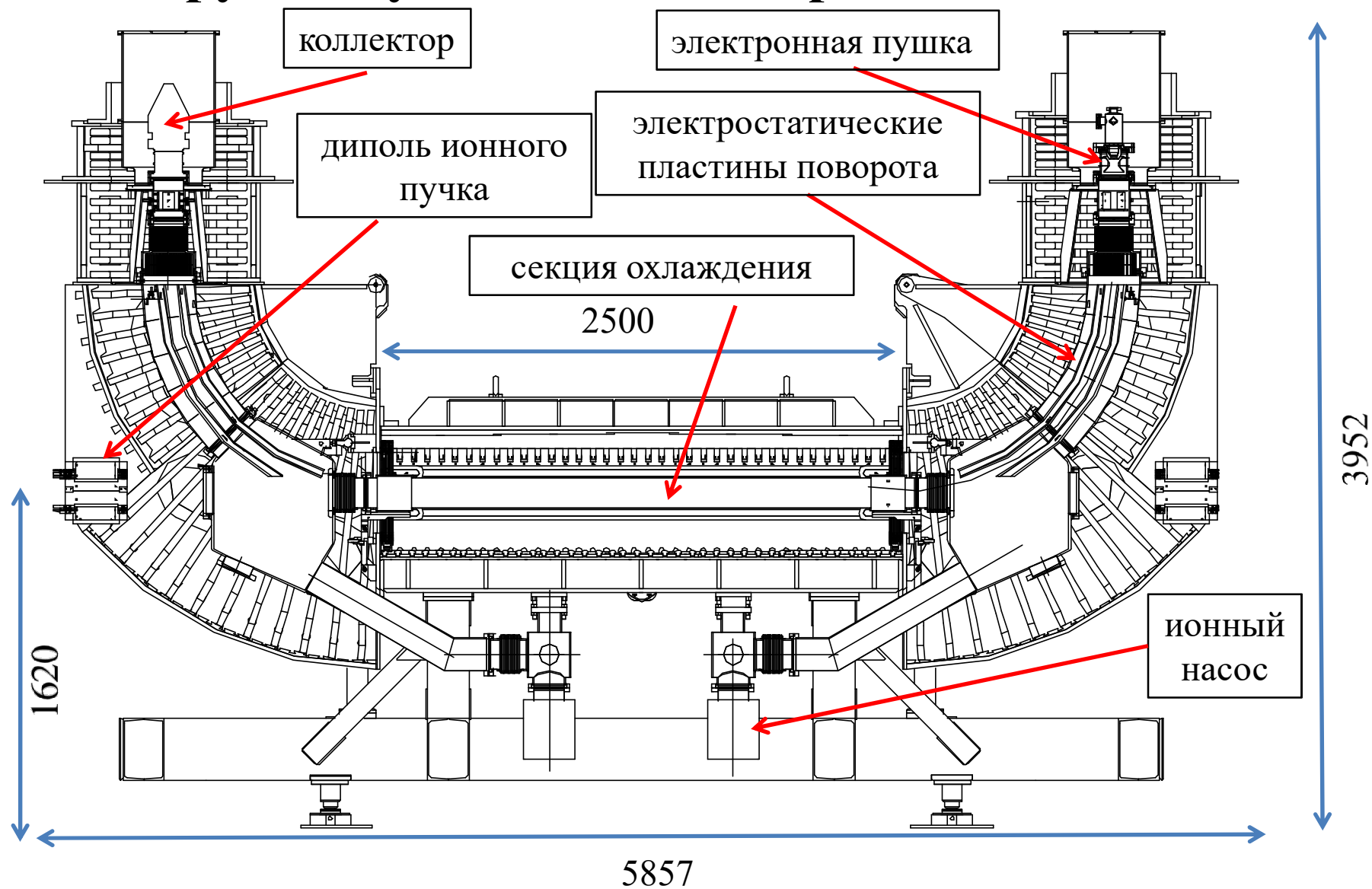


Система электронного охлаждения для коллайдера

В коллайдере две системы охлаждения (электронного и стохастического) будут работать при накоплении и во время эксперимента



Конструкция установки электронного охлаждения



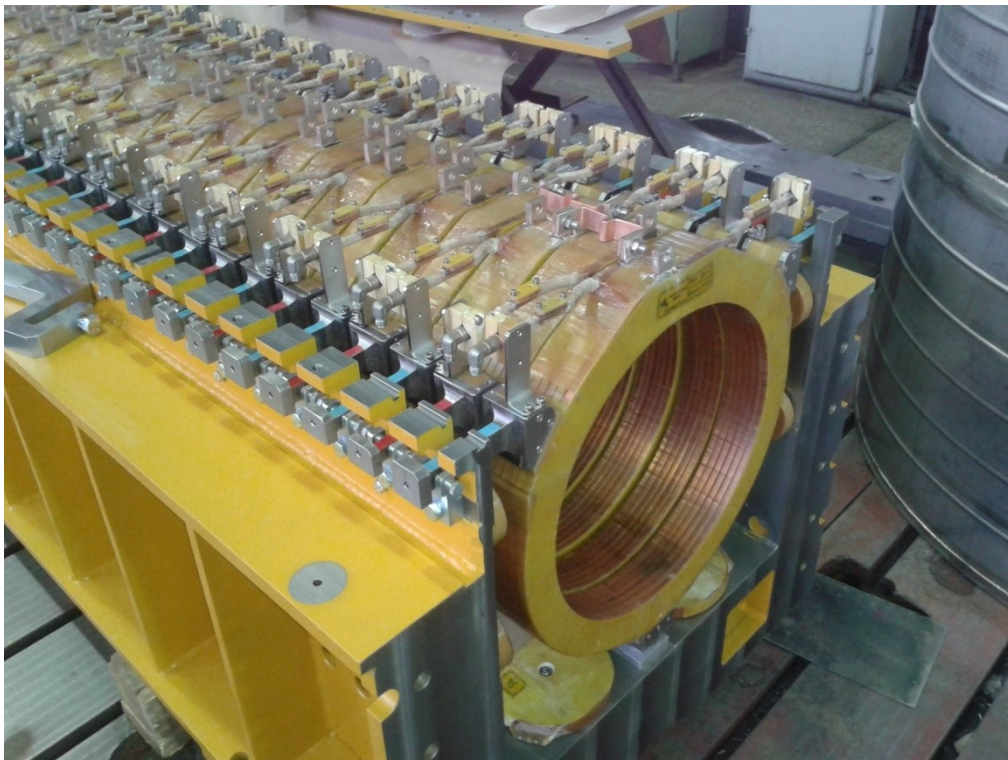
- рекуперация
- высокое качество продольного магнитного поля

- высокий вакуум 10^{-10} - 10^{-11} мбар
- электронная пушка с управляемым профилем пучка

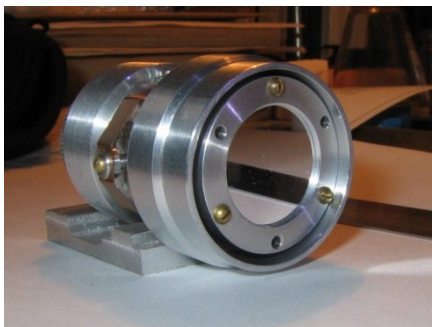
Основные параметры установки электронного охлаждения “Бустера”

Parameter	Value
Ion type	$^{197}\text{Au}^{31+}$
Electron energy, E	1.5÷60 keV
Electron beam current, I	0.2÷1.0 A
Energy stability, $\Delta E/E$	$<10^{-5}$
Electron current stability, $\Delta I/I$	$<10^{-4}$
Longitudinal magnetic field, B	0.1÷0.2 T
Electron current losses, I_{leak}/I	$<3 \cdot 10^{-5}$
Inhomogeneity of magnetic field, $\Delta B/B$	$<3 \cdot 10^{-5}$
Transverse electron temperature, T	<0.3 eV
Vacuum pressure, P	$\approx 10^{-11}$ mbar

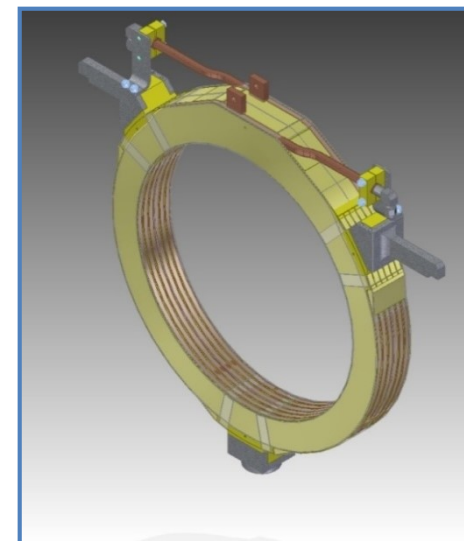
Секция охлаждения



Прямолинейность силовой линии важна для получения максимальной силы трения

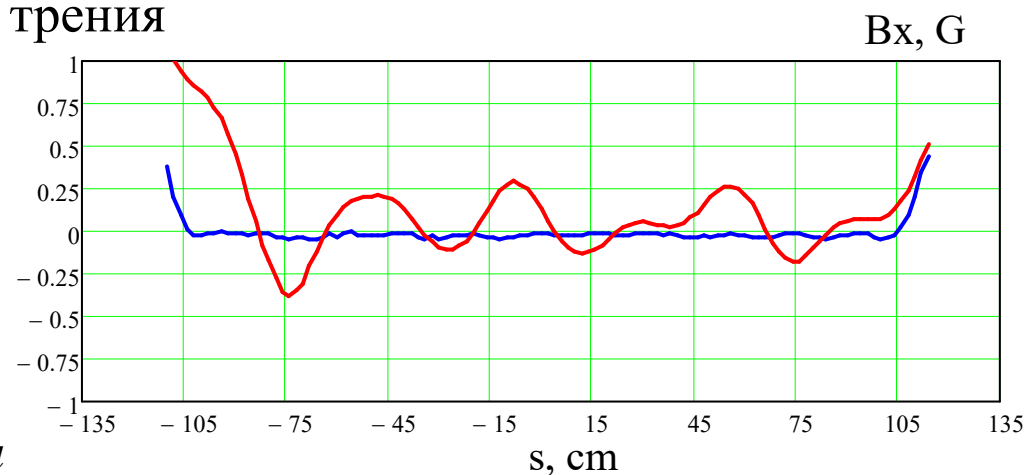


Компас для измерения поперечного поля

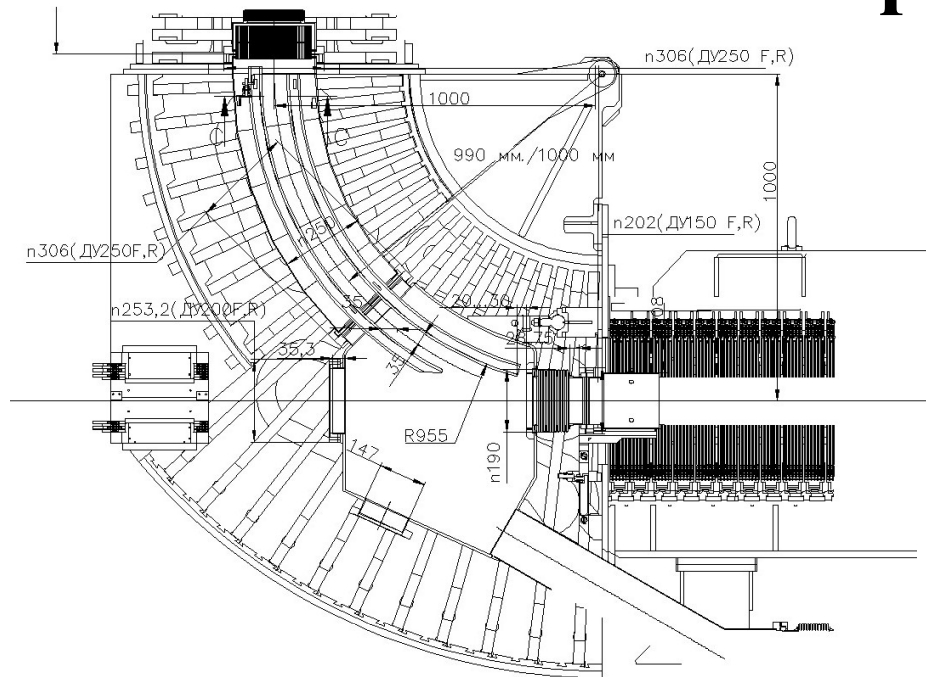


Соленоид состоит из отдельных катушек. Каждая катушка может вращаться в двух направлениях.

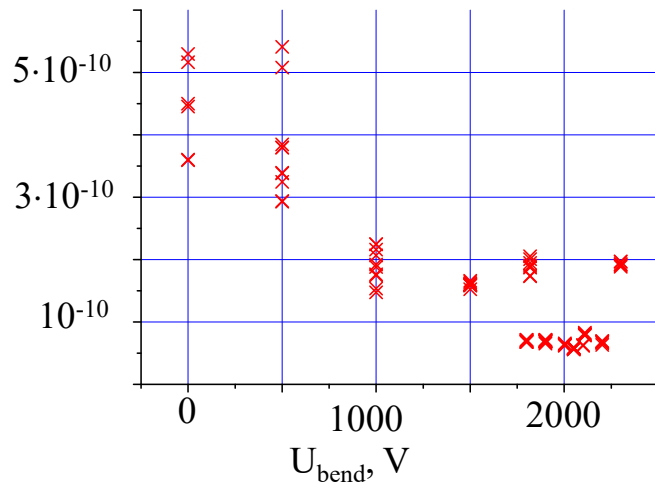
Среднеквадратичное значение поперечного поля в секции охлаждения на уровне $\Delta B/B \approx 10^{-5}$.



Электростатический поворот

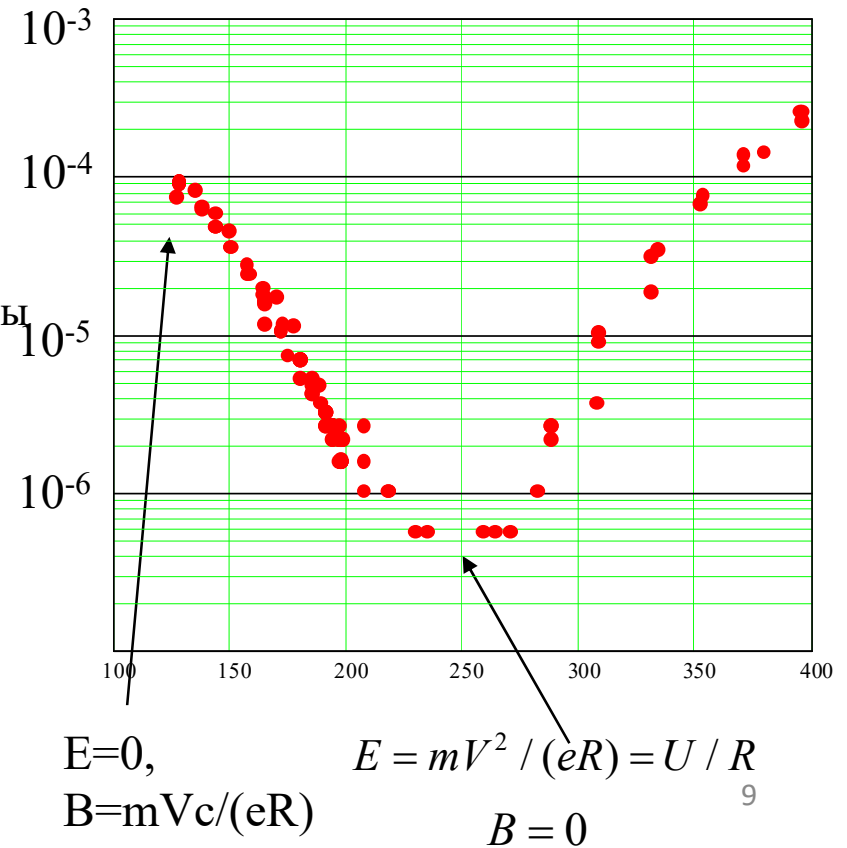


один ион Pb^{+54} 1 “выбивает” из стенок вакуумной камеры за счет десорбции порядка 10^4 молекул газа, один электрон освобождает $0.1\text{--}10^{-7}$ молекул.



$$F = \frac{mV^2}{R} = eE + e \frac{[V \times B_{\perp}]}{c} = \text{const}$$

Коэффициент рекуперации $I_{\text{leak}}/I \sim 10^{-6}$



Этапы большого пути пусконаладка (commissioning) в ИЯФ и ОИЯИ



SGFC main panel

Options Adjustment

Right Click - set increment

GUN			Right Click - set increment		
Usupp,kV	Uan,kV	I _{supp} , mA	EST U,kV	U	I (μA)
0.900	4.800	0.886	0.750	0.73	0.52
4.800	4.294	-1.002	0.750	-0.75	0.26
15.00	13.85	3.07	0.750	-0.74	2.92

Delay 1 Delay 1 Delay 1

1	2	3	EST	No	Strob

Collector U(kV) I(mA)

5 kV	Disabled	3.14	514.47
------	----------	------	--------

T1 I leaks(mkA) Pene (B_FLT)

61.18	30.71	
-------	-------	--

Pene sampler (PROTC) I leaks trigger (TLEAK)

Clear I leaks trigger

52.66 U input
24.09 24V Anode
24.11 24V Suppressor
23.97 24V Grid
5.01 5 V U 5B
24.07 24V U relays&mod

Ping to canbus gateway

State Error list ErrLow

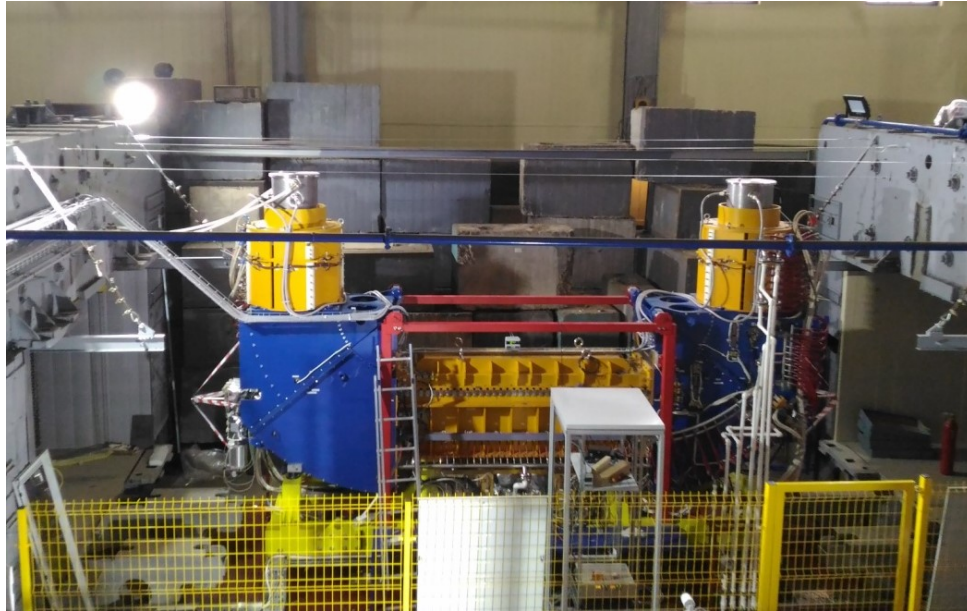
WIP

HV	U out(kV)	U out(kV)	I out(A)	Error
Starter	10.000	10.000	0.1	Ready

Ping to WIP

HVD U0 0.0000 HVD U1 0.0000

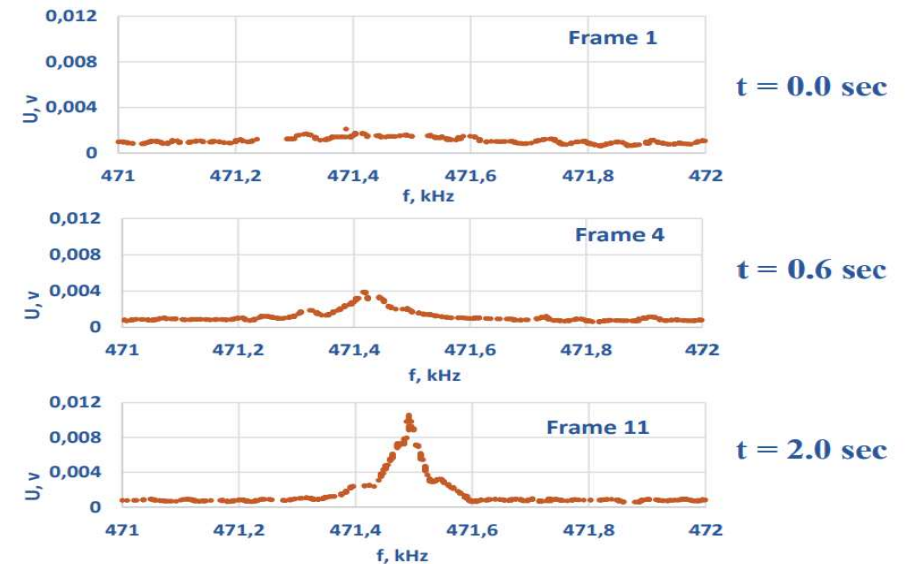
Электронное охлаждение в бустере NICA



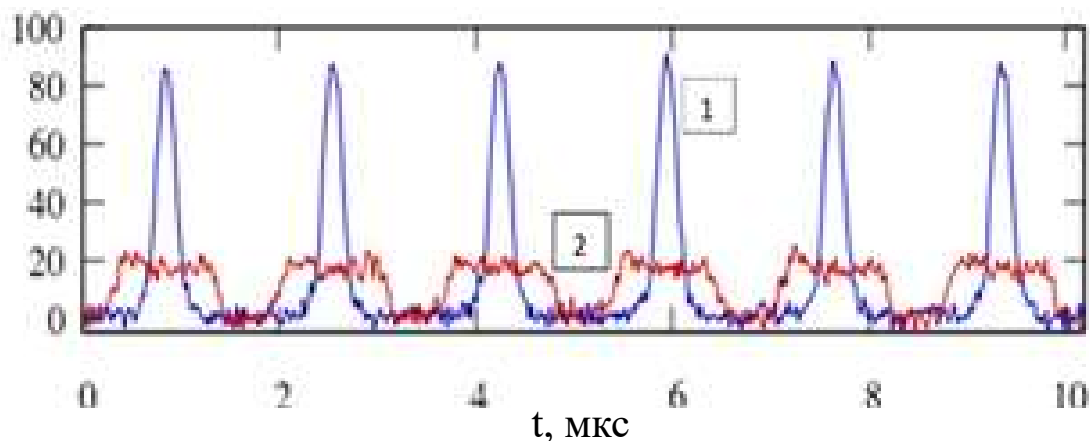
Параметры эксперимента:

Тип ионов	$^{56}\text{Fe}^{14+}$
Энергия ионов	3.2 Mev/u
Энергия электронов	1.73 – 1.93 кэВ
Ток электронного пучка	0.02 – 0.13 А
Диаметр электронного пучка	28 мм
Магнитное поле	700 Гс

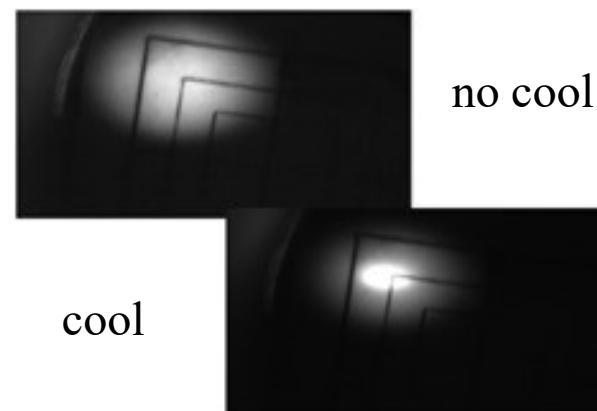
В сеансе 2021 году СЭО было получено первое охлаждение на ионах железа. Ниже показан сигнал Шоттки спектрометра на 4-гармонике частоты обращения пропорциональный разбросу продольного импульса в ионном пучке. Видно, что за достаточно непродолжительное время ионный пучок охлаждается в продольном направлении.



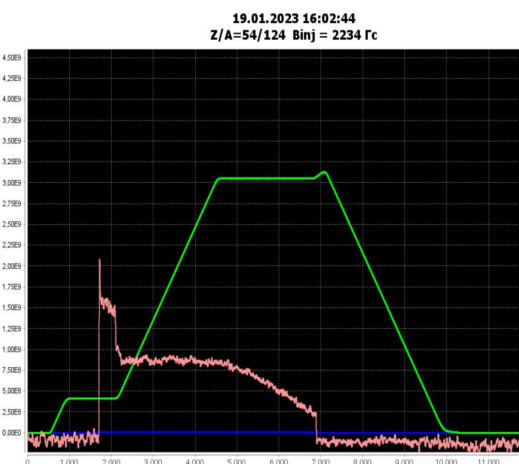
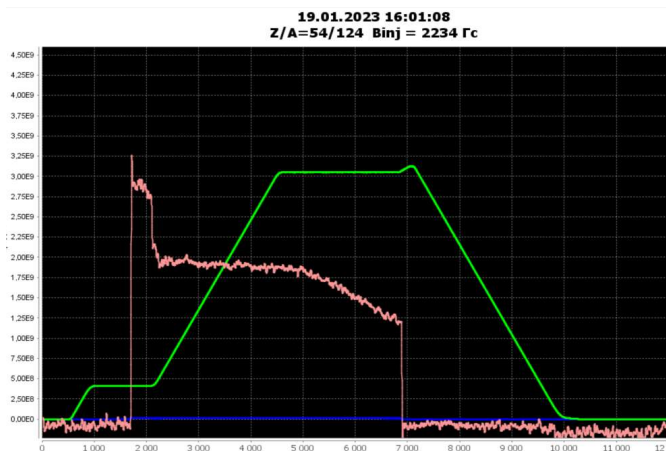
Электронное охлаждение тяжелых ионов было использовано для увеличения эффективности экспериментов в области физики барионной материи



Распределение ионов в сгустках в продольном направлении при наличии электронного охлаждения (1) и при его отсутствии (2).



Поперечные профили ионного пучка на люминоформном экране без и с охлаждением (люминофор расположен на входе канала “Бустер”-“Нуклотрон”).



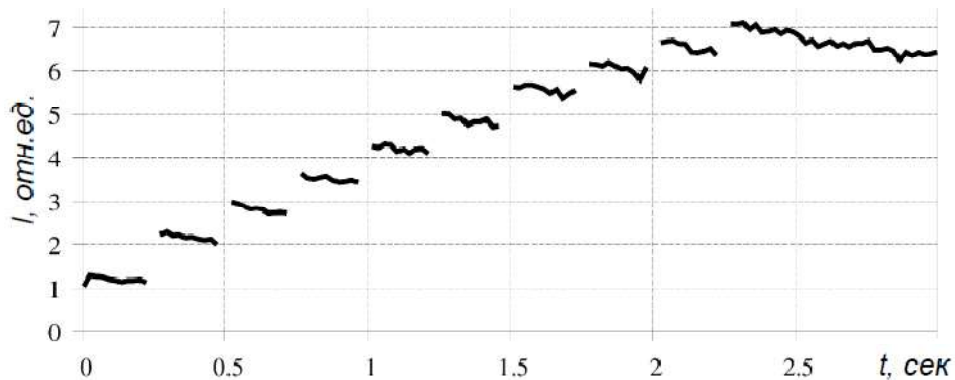
Магнитный цикл (зеленый) и интенсивность пучка в Нуклотроне (розовый) при наличии электронного охлаждения в синхротроне бустера (слева) и без него (справа).

В результате совместной работы ИЯФ и ОИЯИ во время сеанса 2023 было получено время охлаждения ионов $^{124}\text{Xe}^{+28}$ порядка 70 мсек. За счет использования охлаждения была увеличена скорость набора событий в ~2 раза на эксперименте **BARION MATER**

Первое в России (а возможно и в мире) накопление тяжелых ионов в продольном фазовом пространстве с использованием электронного охлаждения

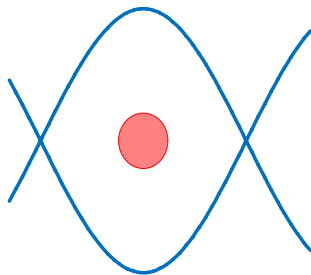
Авторы: ИЯФ СО РАН г. Новосибирск: Е.А. Бехтенов, М. И. Брызгунов, А.В. Бублей, А.Д. Гончаров, К.М. Горчаков, И.А. Гусев, Б.А. Довженко, А.А. Жариков, Г.В. Карпов, М.Н. Кондауров, Н.С. Кремнев, В.М. Панасюк, В.В. Пархомчук, В.А. Полухин, А.А. Путьмаков, В.Б. Рева, Д.В. Сеньков, В.А. Чекавинский, Э.Р. Уразов

ОИЯИ г. Дубна: А.В. Бутенко, Е.В. Горбачев, В.А. Лебедев, И.Н. Мешков, И.Ю. Николайчук, К.Г. Осипов, Ю. В. Прокофьевичев, В.С. Шпаков, С.В. Семенов, А.С. Сергеев, А.О. Сидорин, В.Л. Смирнов, Е.М. Сыресин, Р.В. Тимонин, Г.В. Трубников, П.Р. Харьюзов



Десять инъекций $^{124}\text{Xe}^{+26}$ пучка в Бустер с периодом 250 мс с использованием электронного охлаждения.

Инъекции в устойчивую фазу



Инъекции в неустойчивую фазу

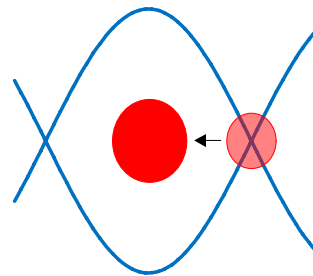
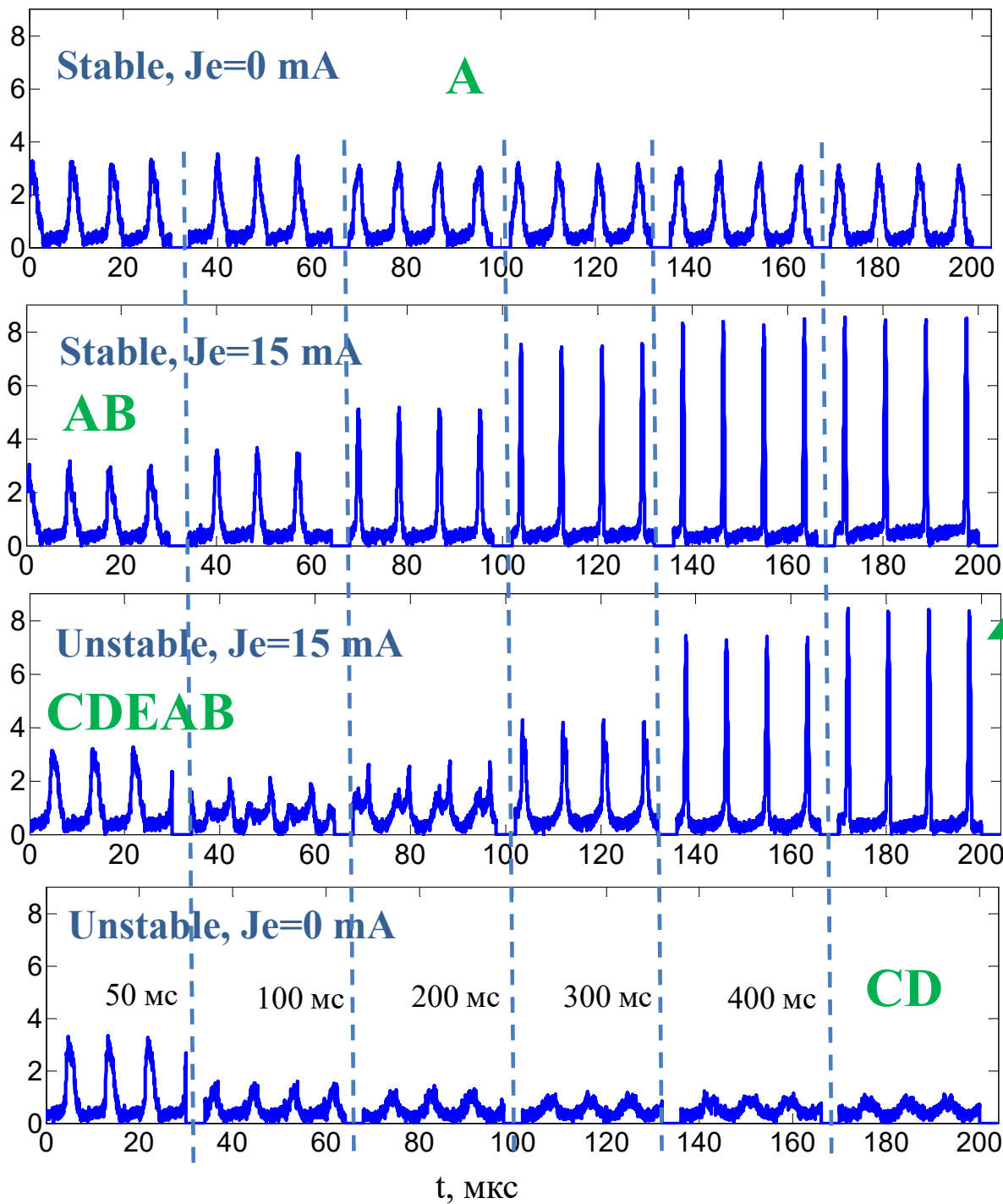
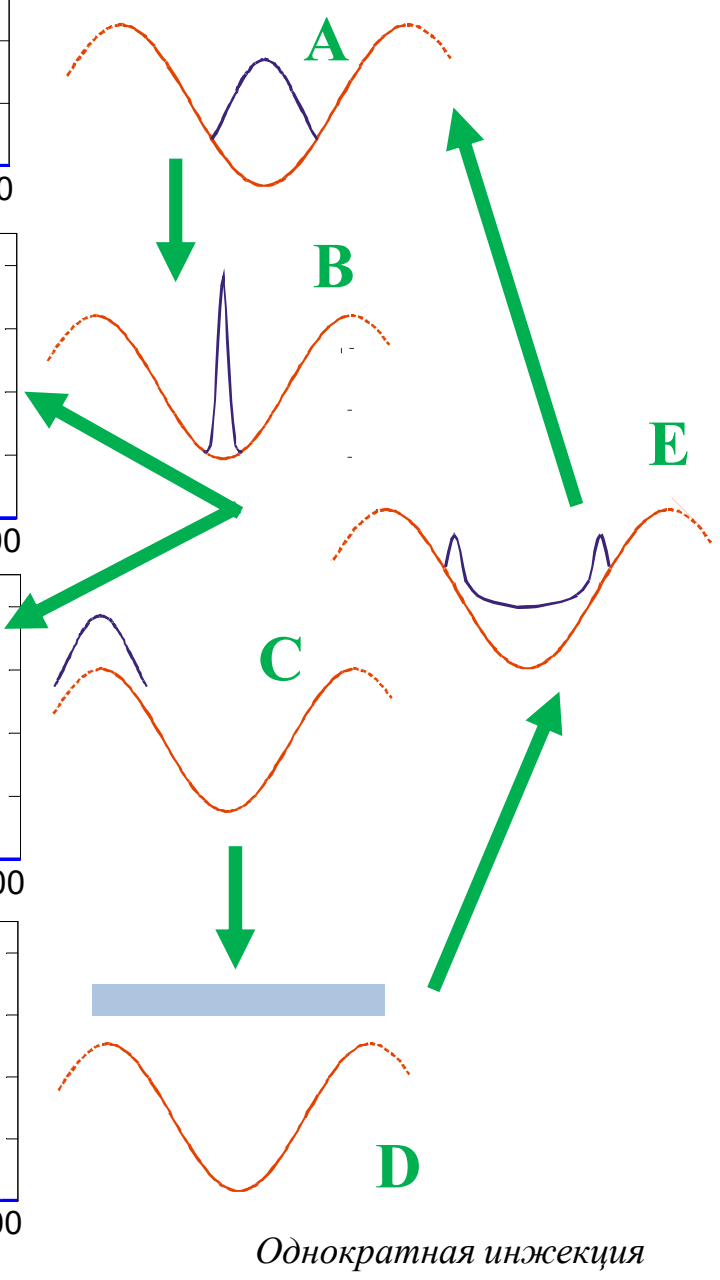


Иллюстрация принципа инъекции ионов в неустойчивую фазу ВЧ-сепаратрисы).

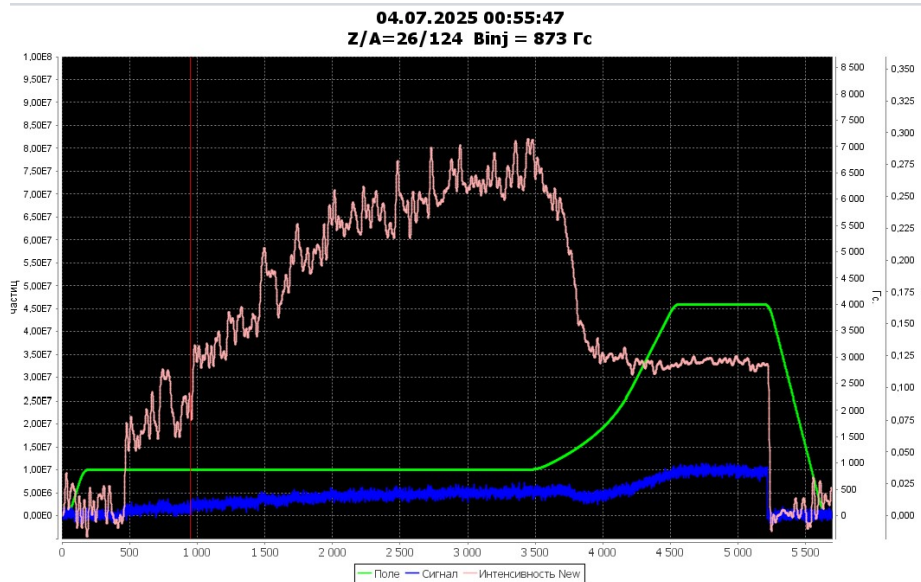
В 2025 г. в результате совместной работы ОИЯИ и ИЯФ продемонстрирована многократная инъекция в продольном фазовом пространстве с использованием электронного охлаждения. Инъекция происходила в неустойчивую фазу ВЧ, после чего ионы под действием электронного охлаждения захватывались внутри сепаратрисы. В результате многократной инъекции интенсивность пучка была увеличена в 6 раз



Инжекция в равновесную и неравновесную фазы

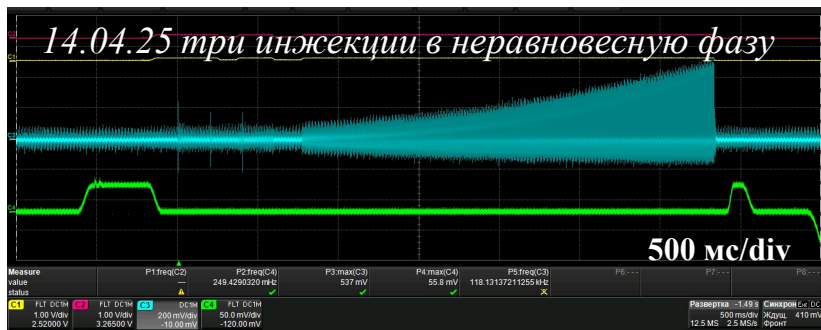


После охлаждения освободилось место для новой инъекции в продольном направлении, поэтому инъекцию можно повторять многократно



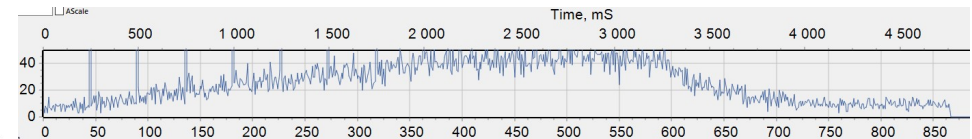
Сигнал с датчика постоянного тока

Но охлаждение надо “делать” максимально быстро

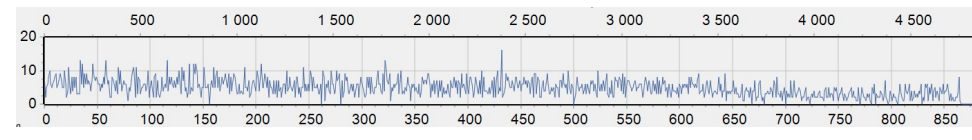


Не удалось добиться накопления

Сигнал с ионизационного профилометра, амплитуда сигнала – пропорциональна интенсивности пучка



многократная инъекция – 10 раз

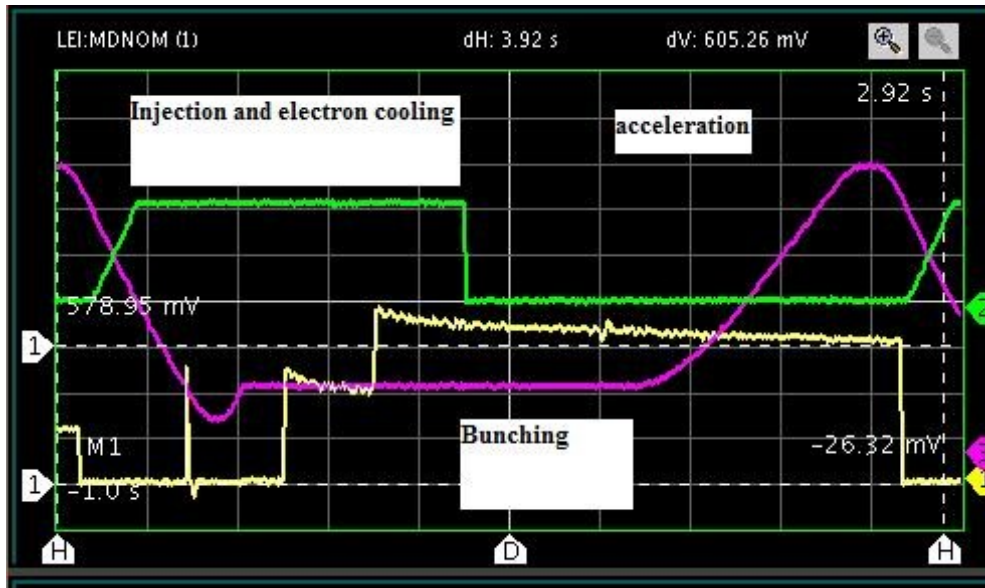


однократная инъекция – 1 раз



Суммовый сигнал с одного из пикап-станций бустера. Амплитуда сигнала пропорциональна dI_{ion}/dt , поэтому чем выше уровень сигнала, тем более “сбунчиванный” пучок. Усилитель достигает “насыщения”

Накопление пучков LEIR и LEAR (часть LHC)

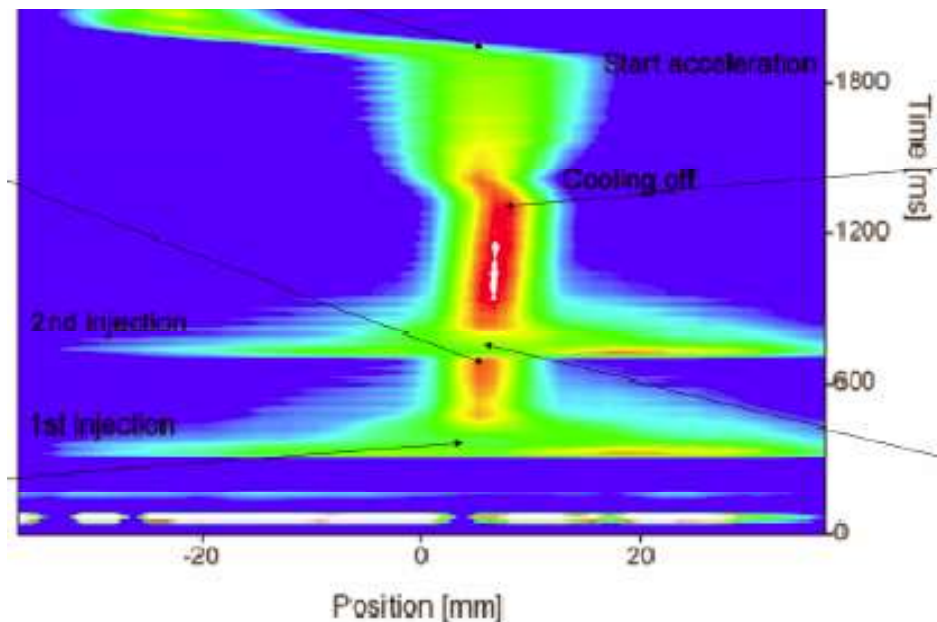


LEIR Охлаждение, накопление и ускорение пучка свинца

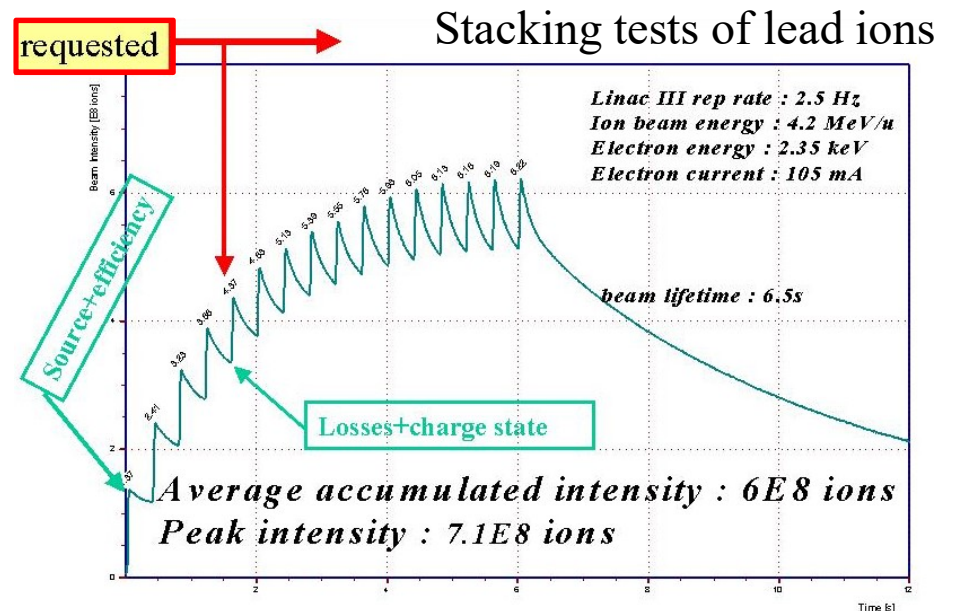
Желтая линия – интенсивность ионного пучка (число ионов)

Розовая линия – значение магнитного поля

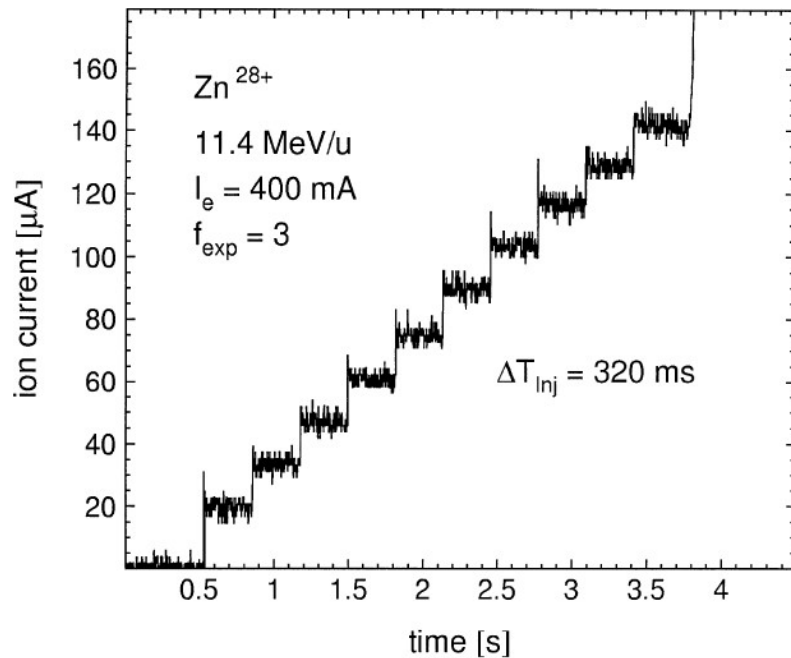
Green линия – анодное напряжение (электронный ток меняется в цикле: включен при инжекции, выключен в остальное время)



LEAR Pb ion experiments 1997-2000



Демонстрация процессов электронного охлаждения (накопление)

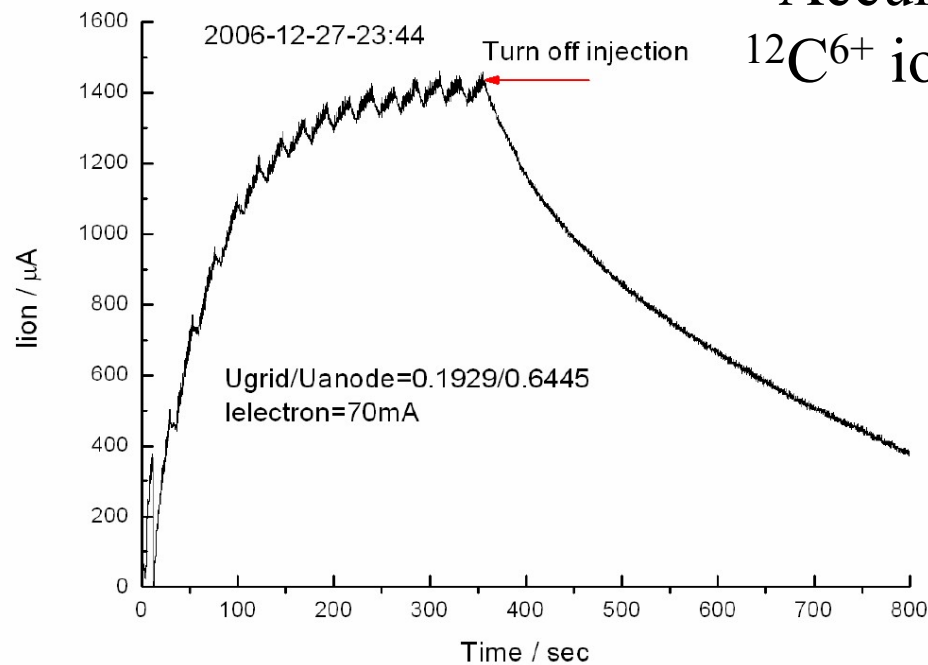


Электронное охлаждение позволяет проводить многократную инжекцию в ускоритель

Accumulation of Zn ions at SIS-18

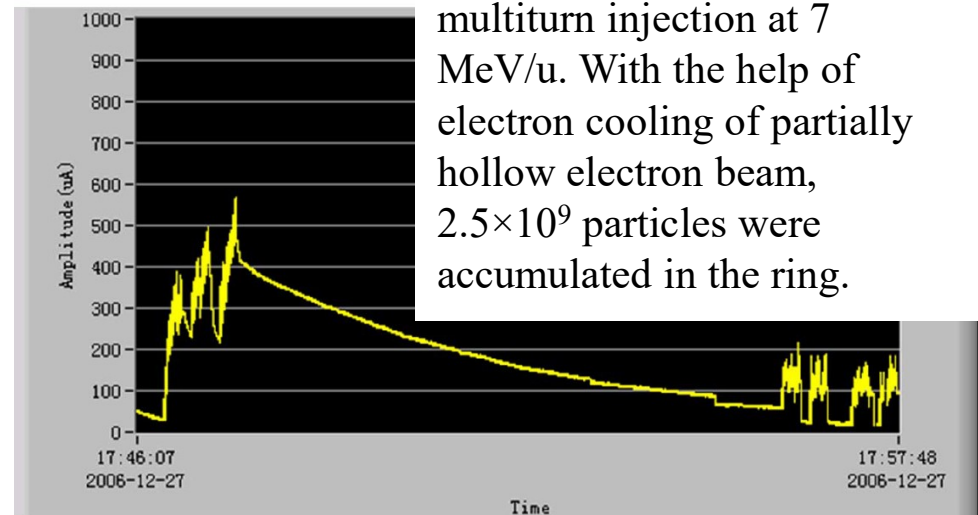
M. Steck, L.Groening, V.Parkhomchuk et al. NIM A 441 (2000), p.175-182.

Beam accumulation by repeating multiturn injection every 320 ms and simultaneous cooling.



Accumulation of $^{12}C^{6+}$ ions at CSRm

The average particle number of stored $^{12}C^{6+}$ was about 4.7×10^8 in one standard multiturn injection at 7 MeV/u. With the help of electron cooling of partially hollow electron beam, 2.5×10^9 particles were accumulated in the ring.

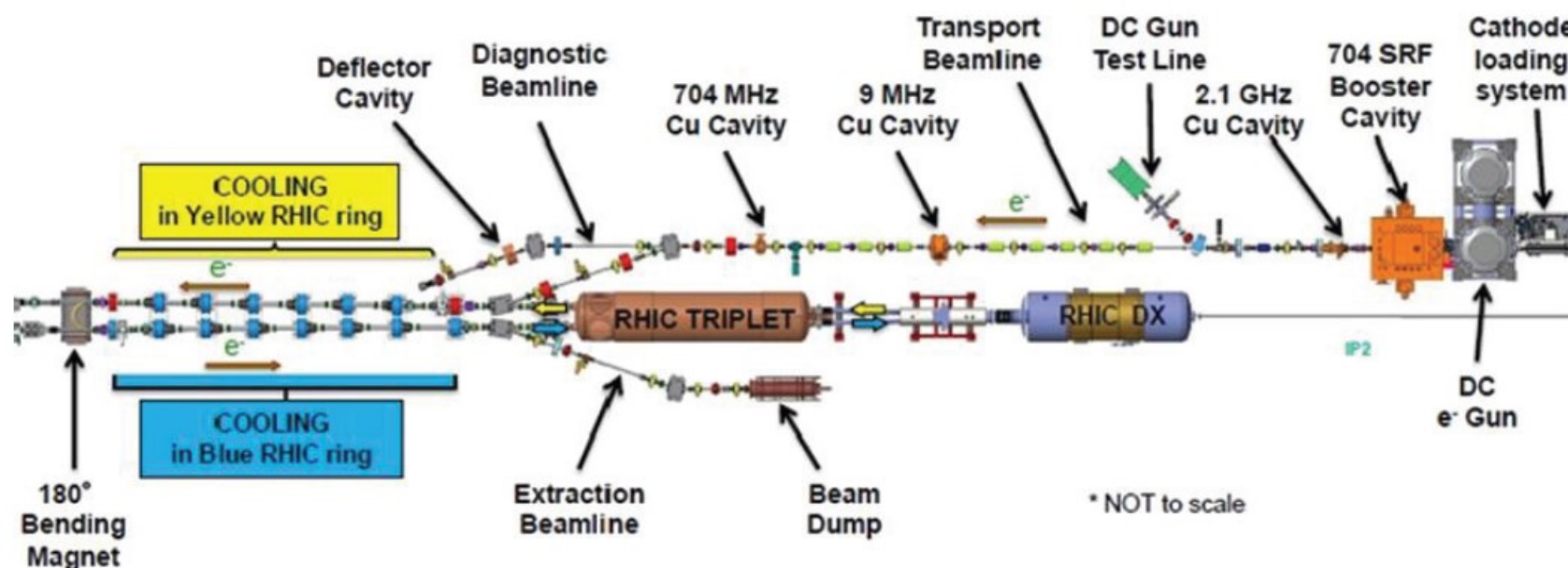


Decay after stopping injection, electron beam=0mA

Заключение

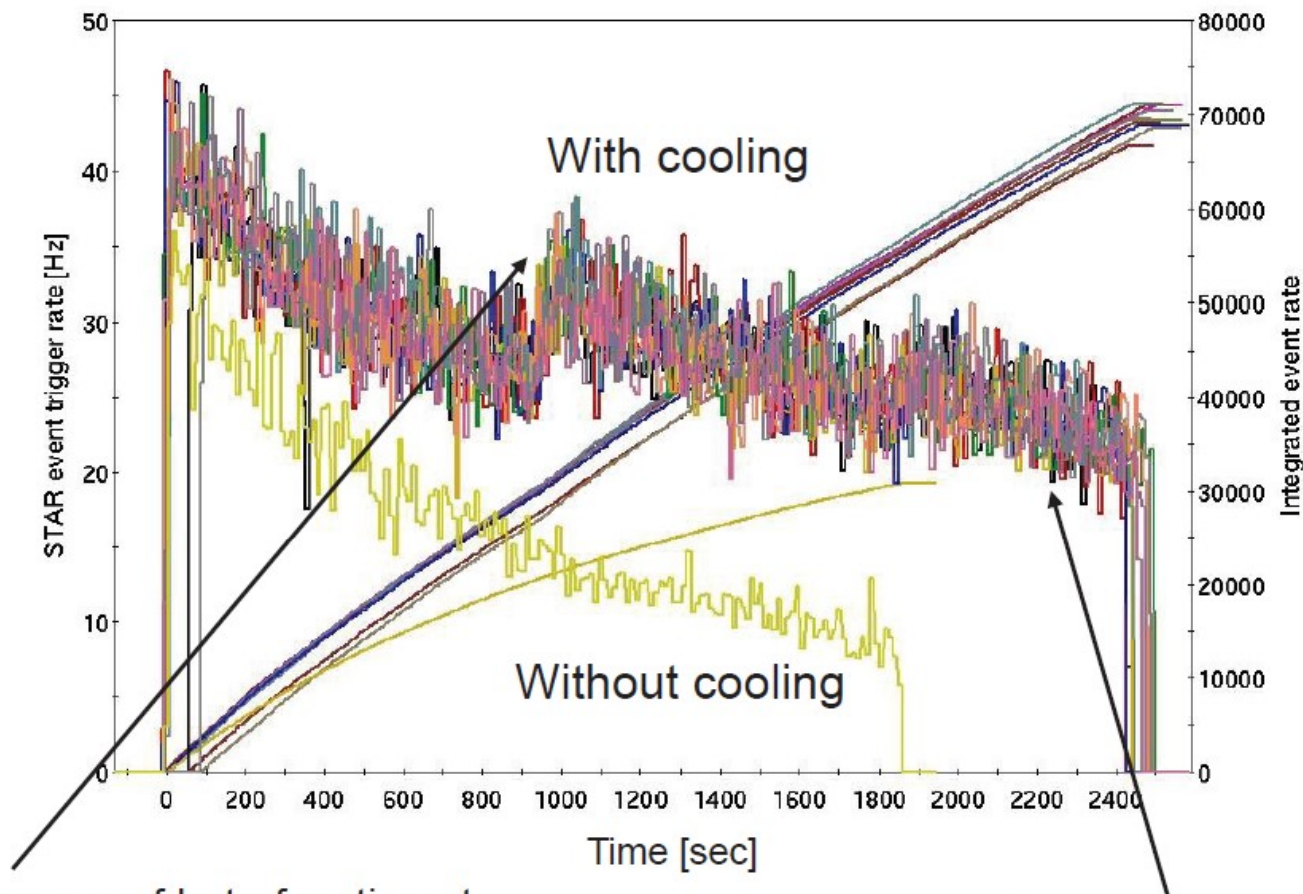
Тот факт, что многие ускорительные комплексы для легких и тяжелых ионов (прошлые, существующие и будущие) имеют в своем составе системы электронного охлаждения, говорит о том, что их использование критически важно для достижения проектных параметров. Поэтому электронное охлаждение по-прежнему остается одним из основных методов улучшения параметров заряженных частиц.

Distinctive features of LEReC



- LEReC is fully operational electron cooler which:
 - utilizes RF-accelerated electron bunches
 - uses non-magnetized electron beam (there is no magnetization at the cathode and no continuous solenoidal field in the cooling section)
 - after cooling ions in one RHIC ring (“Yellow”) the same electron beam is used one more time to cool ions in the other RHIC ring (“Blue”)
- **LEReC approach is directly scalable to high energies (10’s of MeV)**

Several physics stores at 4.6 GeV/nucleon with cooling (2MeV):
 vertical axis: events rate [Hz] within +/-0.7m (left); store integrals (right)



Dynamic squeeze of beta-function at collision point, while transverse beam sizes of ion beams are being cooled

Longer stores with cooling

Gains in integrated luminosity from cooling:
 2020 (4.6 GeV/n): about factor of 2
 2021 (3.85 GeV/n): 30-50%