

Метод электронного охлаждения – статус и перспективы

В.Б. Рева, ИЯФ СО РАН, г. Новосибирск

17 февраля 2025



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

17 – 21 февраля 2025

Москва, Президиум Российской академии наук



- научная программа
- ★ Астрофизика частиц и космические лучи
 - ★ Гравитация и космология
 - ★ Детекторы, методика эксперимента и ядерно-физические методы
 - ★ Физика за пределами Стандартной модели
 - ★ Физика и техника ускорителей
 - ★ Физика нейтрино
 - ★ Физика фундаментальных взаимодействий
 - ★ Фундаментальная ядерная физика

Электронное охлаждение: основы метода

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

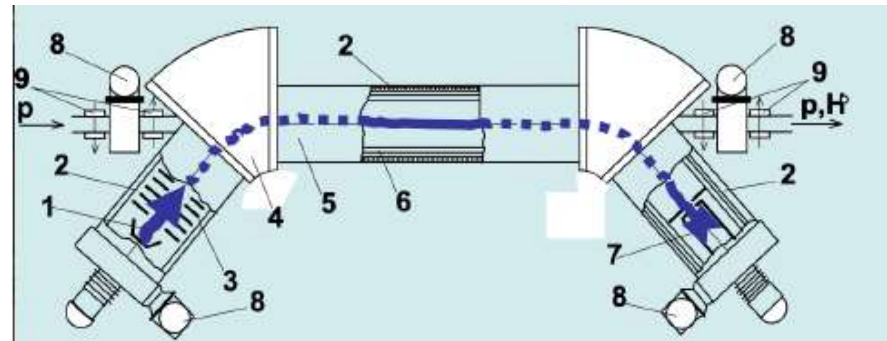
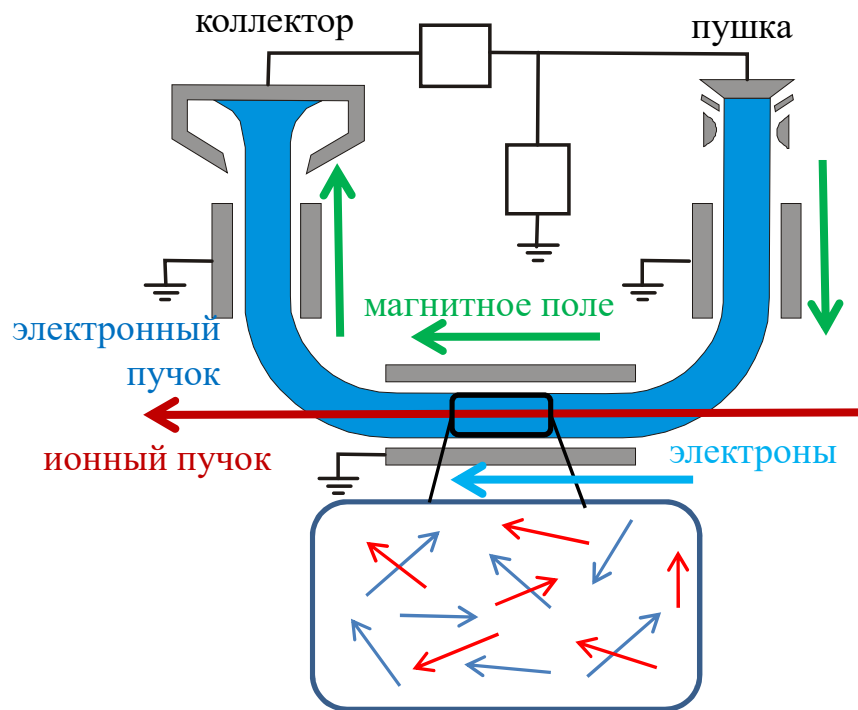
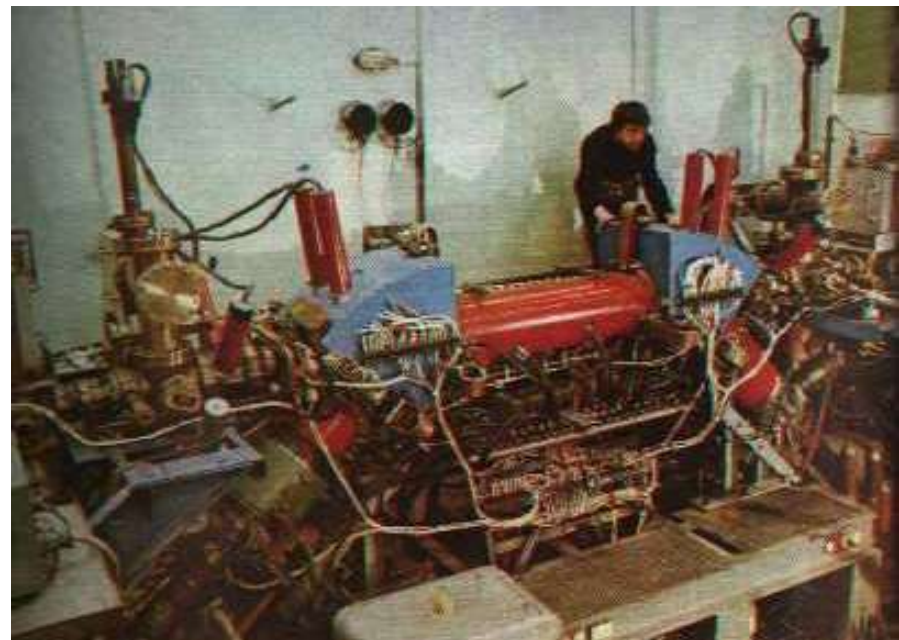


Схема установки: 1- электронная пушка, 2 – соленоид, 3 – аноды электронной пушки, 4 – тороидальные магниты, 5 – вакуумная камера, 7 – коллектор электронного пучка, 8 – вакуумные насосы, 9 – корректоры ионной орбиты

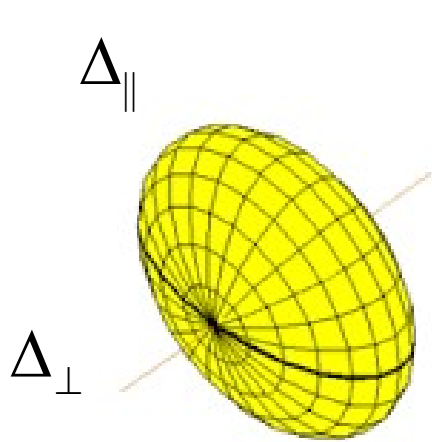


НАП-М первая в мире установка для изучения электронного охлаждения ионов.

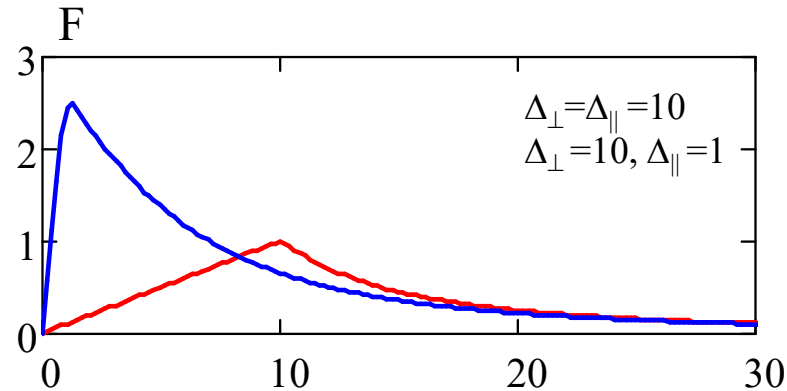


Установка электронного охлаждения – “ЭПОХА”

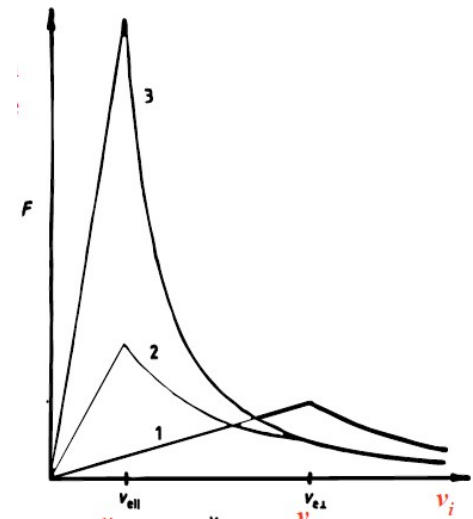
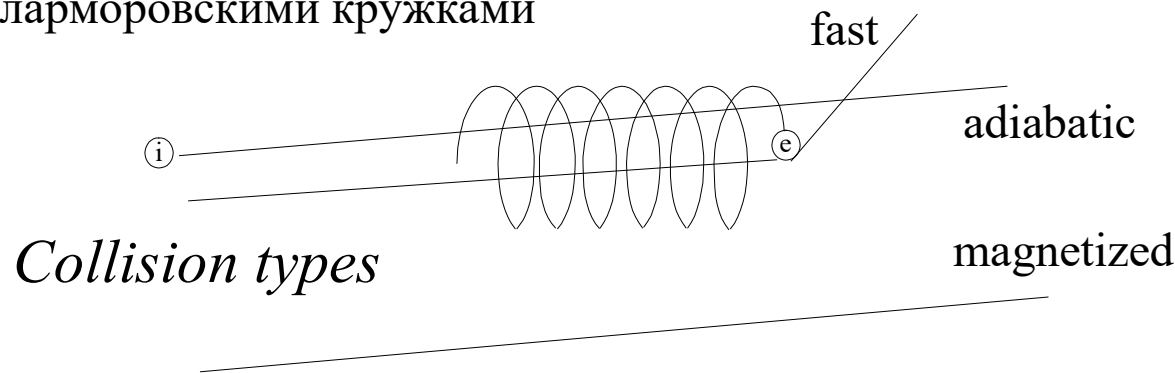
Электронное охлаждение: основы физики охлаждения



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



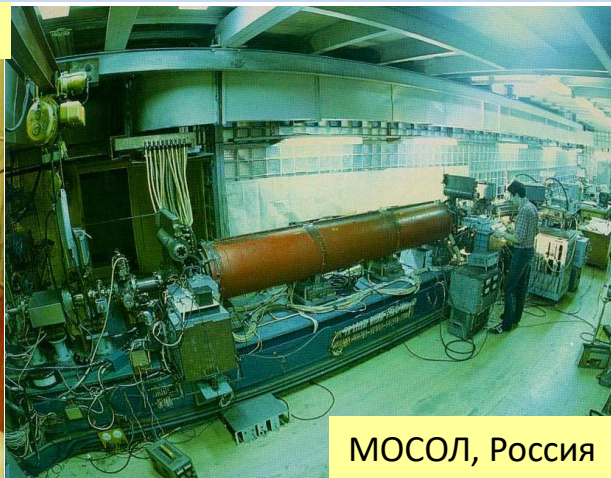
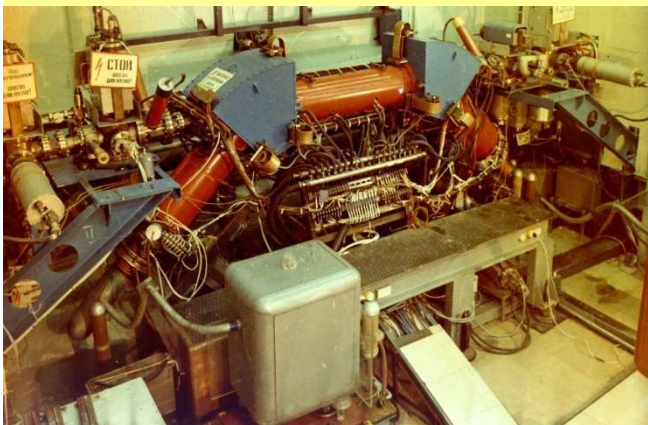
Появляются столкновения для которых прицельный параметр ρ много больше ρ_L ларморовского радиуса электронов и ионы эффективно взаимодействуют не со свободными электронами, а с ларморовскими кружками



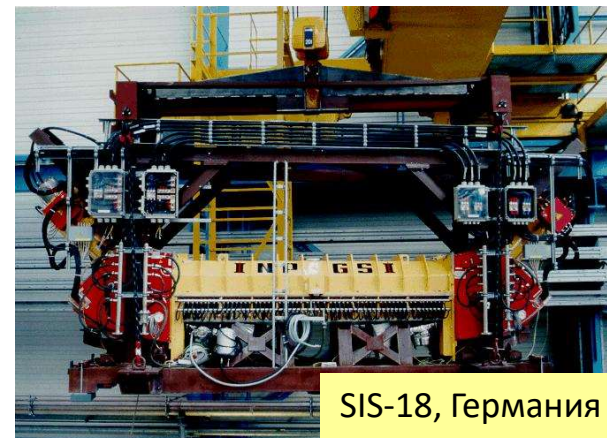
Появилось деление на установки с “замагниченными” столкновениями и без них.

Системы электронного охлаждения созданный в ИЯФ СО РАН

ЭПОХА, Россия



МОСОЛ, Россия



SIS-18, Германия

CSRm, Китай



COSY

LEIR, ЦЕРН



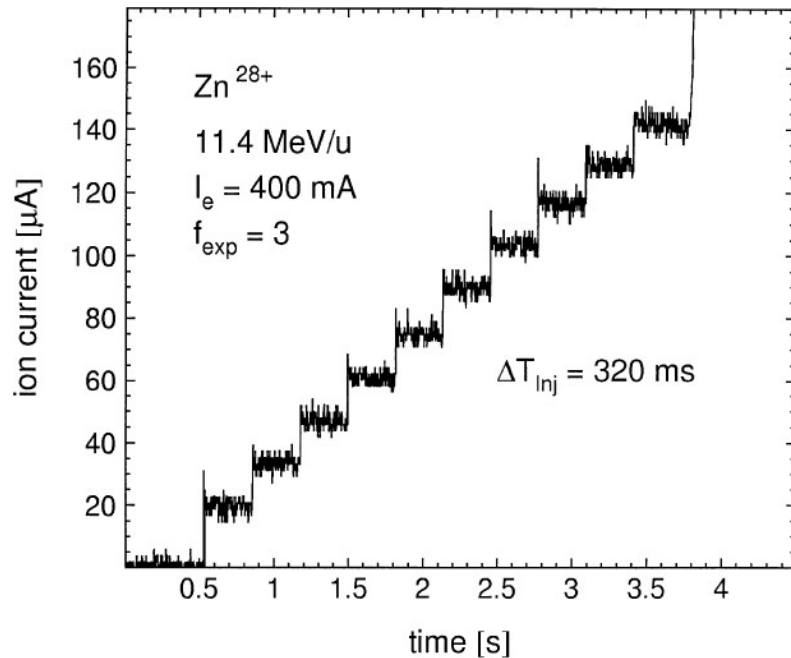
CSRe, Китай

Бустер, Дубна



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

Демонстрация процессов электронного охлаждения (накопление)

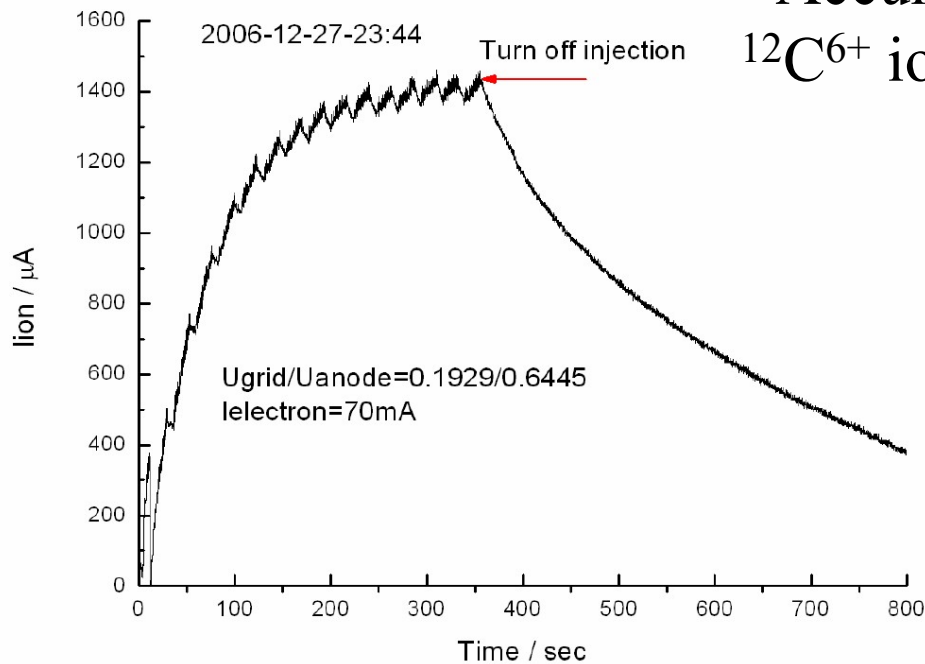


Электронное охлаждение позволяет проводить многократную инжекцию в ускоритель

Accumulation of Zn ions at SIS-18

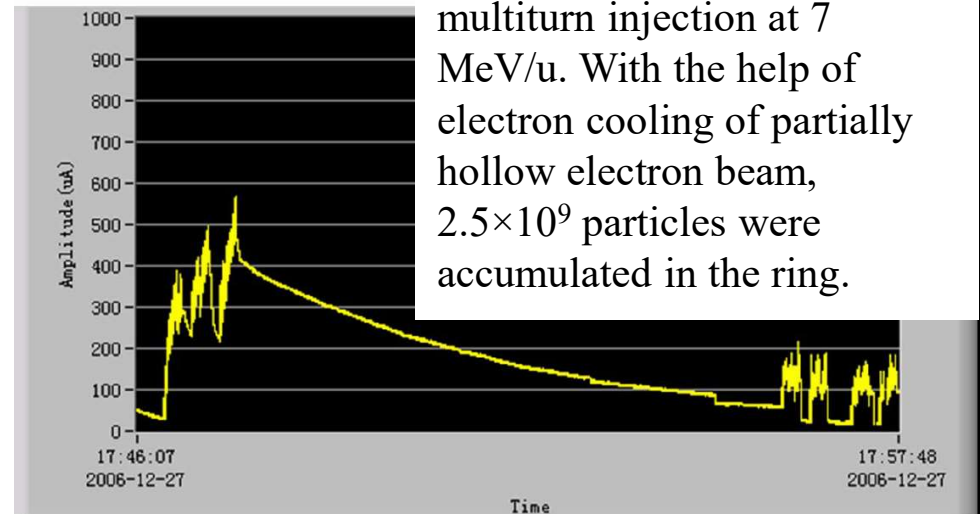
M. Steck, L.Groening, V.Parkhomchuk et al. NIM A 441 (2000), p.175-182.

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



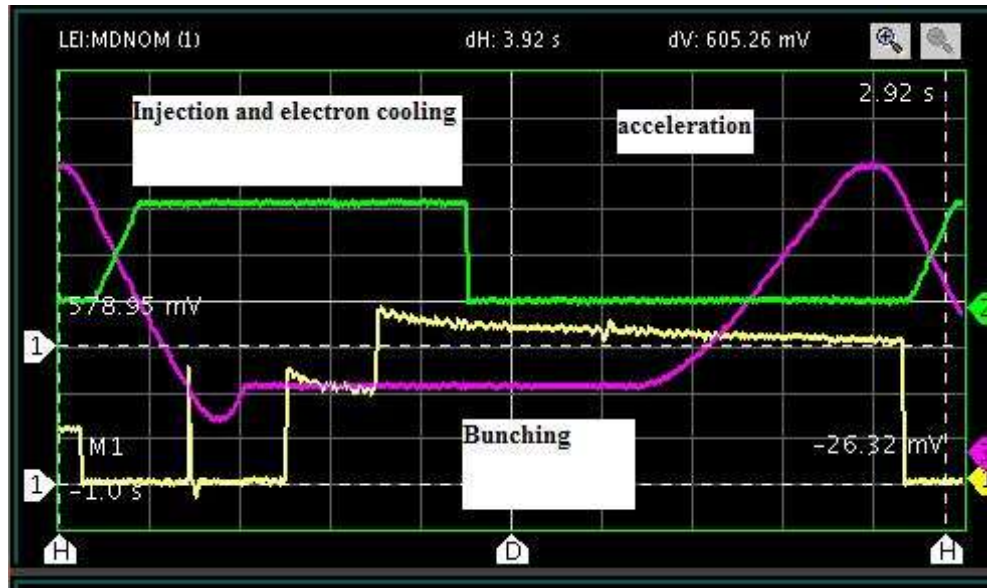
Accumulation of $^{12}C^{6+}$ ions at CSRm

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

Накопление пучков LEIR и LEAR (часть LHC)



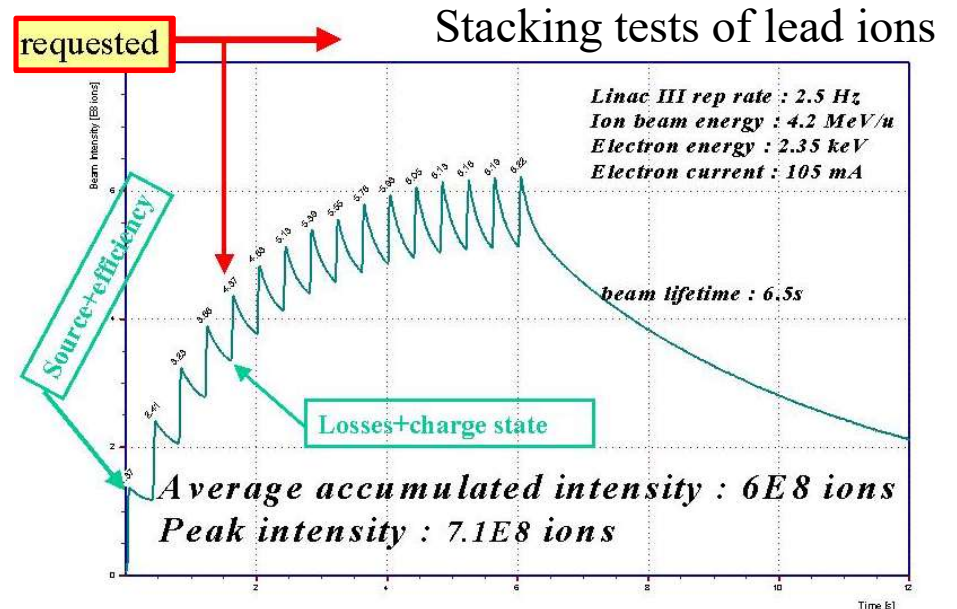
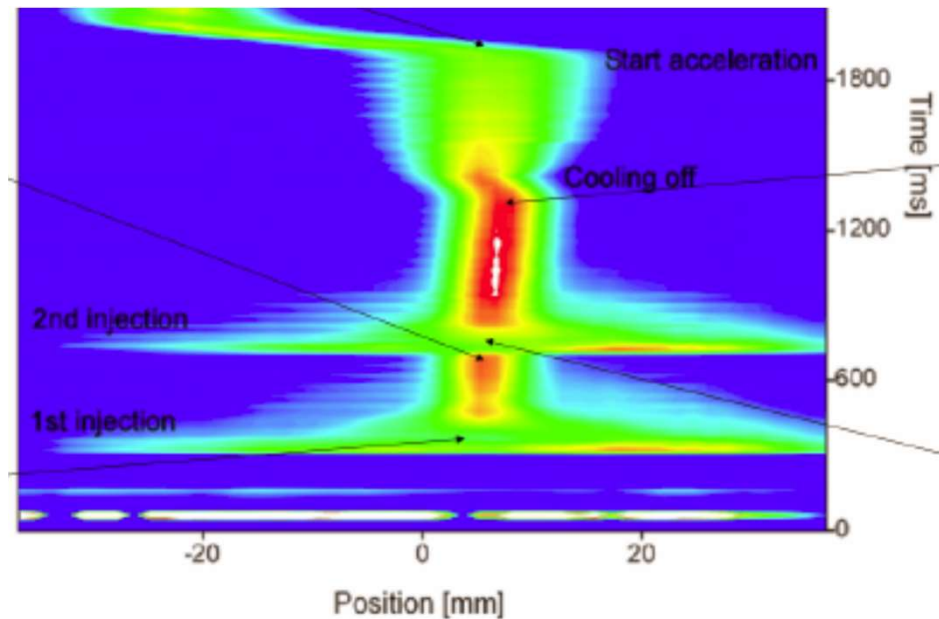
LEIR Охлаждение, накопление и ускорение пучка свинца

Желтая линия – интенсивность ионного пучка (число ионов)

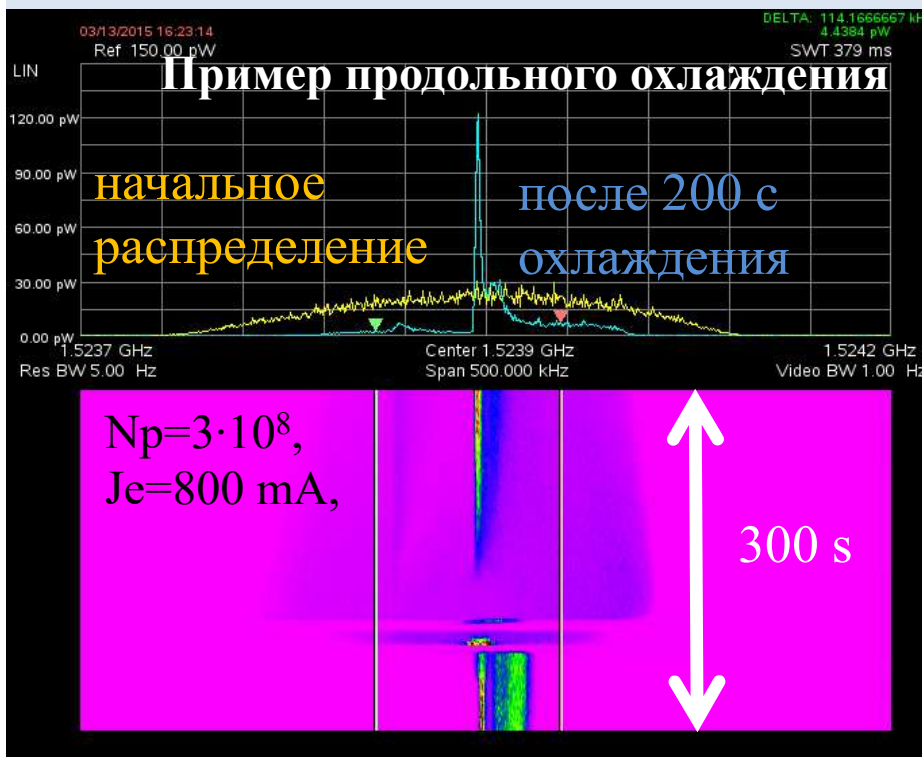
Розовая линия – значение магнитного поля

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

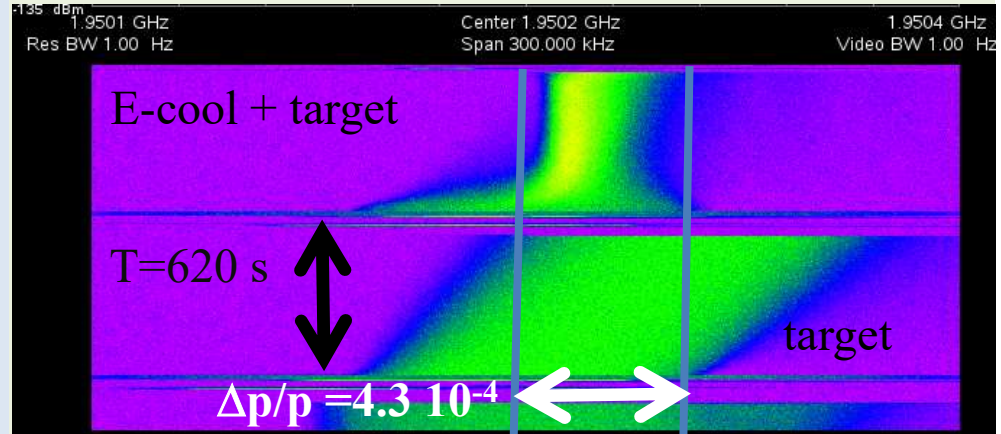
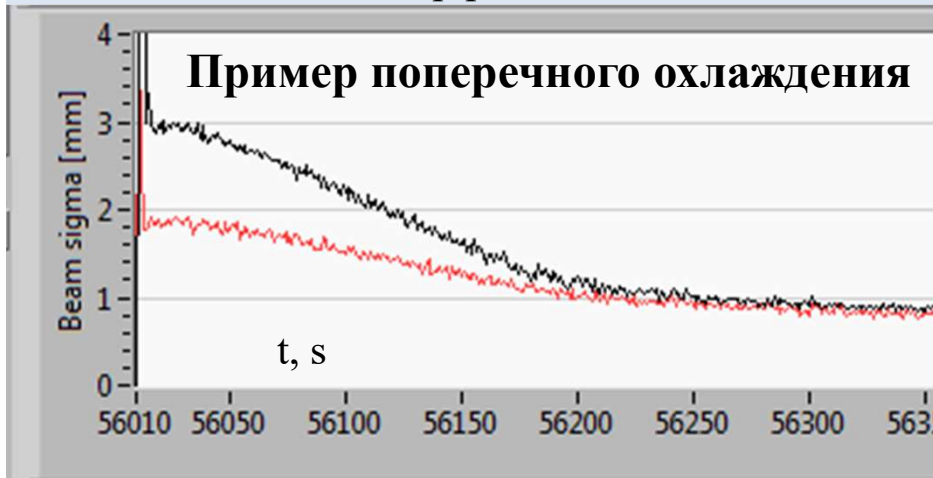
LEAR Pb ion experiments 1997-2000



Демонстрация процессов электронного охлаждения (улучшение параметров)



$\Delta p/p = 5.5 \cdot 10^{-3}$



Experiments with the cluster jet target at $E_e = 1.257$ MeV

Electron cooling suppressed the longitudinal effect of the target with density $n_a = 2 \cdot 10^{14}$ cm⁻² without the help of the RF system.

Electron energy 1.257 MeV, $I_e = 0.5$ A

Система электронного охлаждения (ИЯФ) для синхротрона COSY (Германия)

$N_p = 7 \cdot 10^8$, $I_e = 400$ mA, $\eta = -0.066$,
 $E_e = 909$ kV, $\gamma = 2.77$, $\gamma_{tr} = 2.25$, $\gamma > \gamma_{tr}$

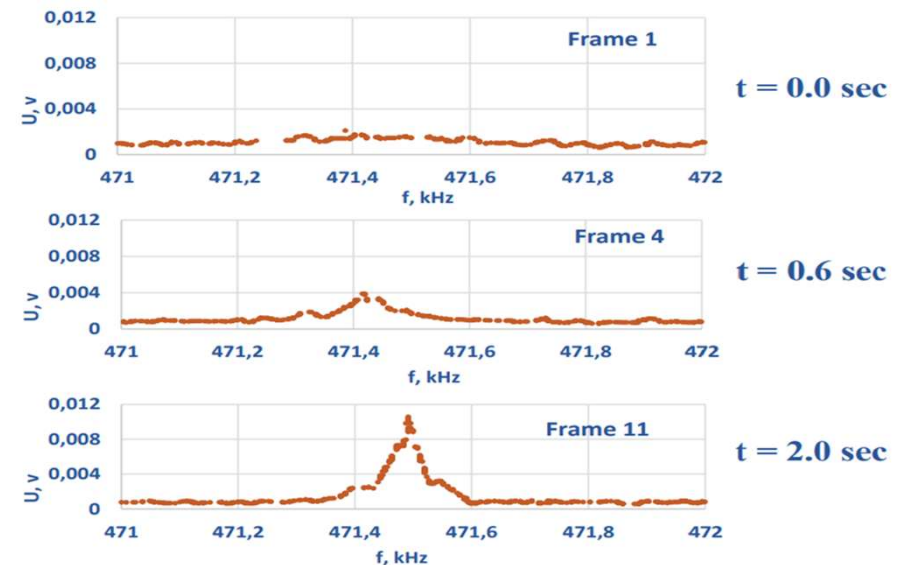
Электронное охлаждение в бустере NICA



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

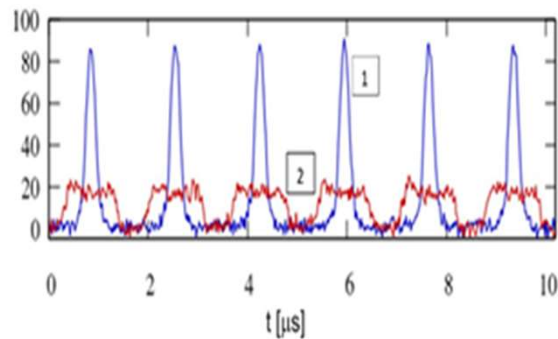
В сеансе 2021 году СЭО было получено первое охлаждение на ионах железа. Ниже показан сигнал Шоттки спектрометра на 4-гармонике частоты обращения пропорциональный разбросу продольного импульса в ионном пучке. Видно, что за достаточно непродолжительное время ионный пучок охлаждается в продольном направлении.



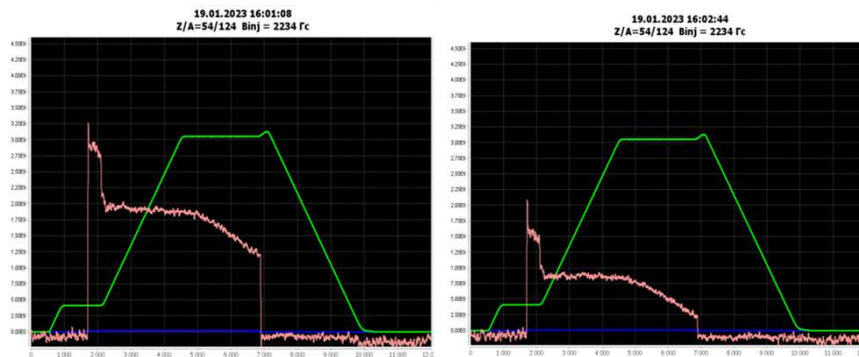
Первое в России электронное охлаждение тяжелых ионов, которое было использовано для увеличения эффективности экспериментов в области физики барионной материи

ОИЯИ г. Дубна: А.В. Бутенко, В.А. Лебедев, И.Н. Мешков, К.Г. Осипов, Ю. В. Прокофьевичев, С.В. Семенов, А.С. Сергеев, Е.М. Сыресин, Р.В. Тимонин, Г. В. Трубников, В.С. Шпаков

ИЯФ СО РАН г. Новосибирск: А.М. Батраков, Е.А. Бехтенов, М. И. Брызгунов, А.В. Бублей, А.Д. Гончаров, К.М. Горчаков, И.А. Гусев, А.П. Денисов, 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, М.Г. Федотов, В.А. Чекавинский



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



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

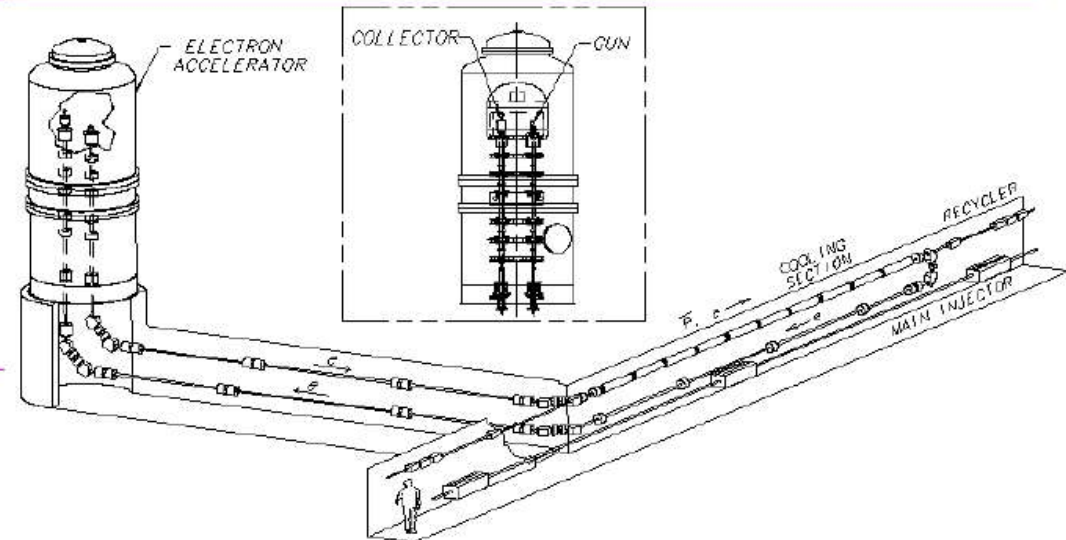
Система электронного охлаждения “Бустера” НИКА предназначена для накопления пучка ионов при инжекции (на энергии ионов 3,2 МэВ/н), а также для его подготовки к выпуску в кольцо «Нуклотрон» на промежуточной энергии (≈ 65 МэВ/н). В результате совместной работы ИЯФ и ОИЯИ во время сеанса 2023 было получено 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

**Одна из основных тенденций СЭО
будущего – стремление к более
высокой энергии охлажденного пучка**

The Fermilab Electron Cooling System

Design parameters

Energy	4.3 MeV
Beam current (DC)	0.5 Amps
Angular spread	0.2 mrad
Effective energy spread	300 eV



• Electron beam:

- $4 \text{ MeV} \times 0.5 \text{ A} = 2 \text{ MW DC}$
 - Energy recovery scheme
 - Very low beam losses are required
 - High voltage discharges need to be avoided
 - Interaction length – 20 m (of 3320 m Recycler circumference)

• Beam quality:

- Transverse electron beam temperature (in the rest frame) should be comparable to the cathode temperature $\sim 1400\text{K}$

• Development: 1996-2004

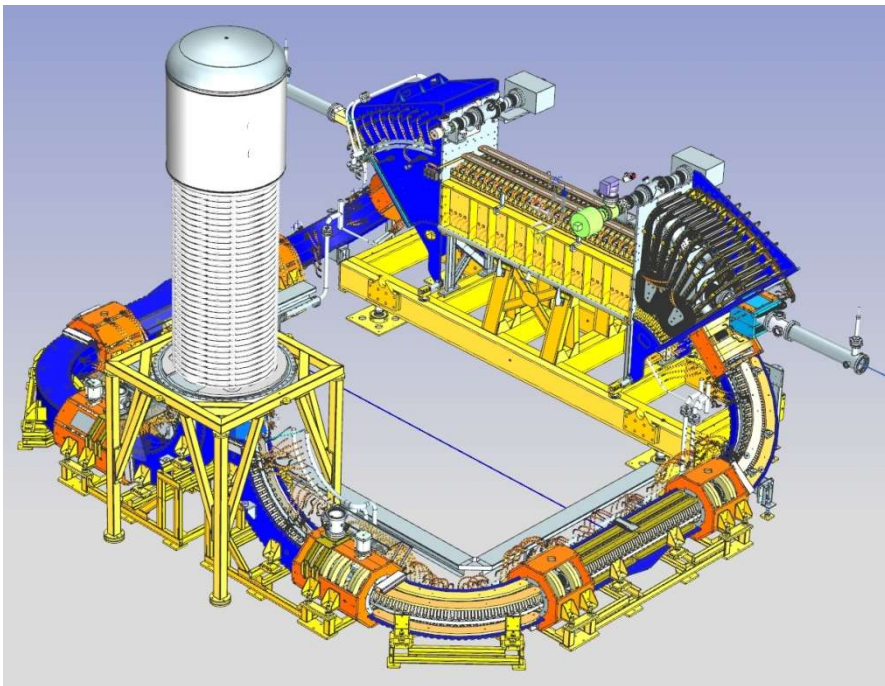
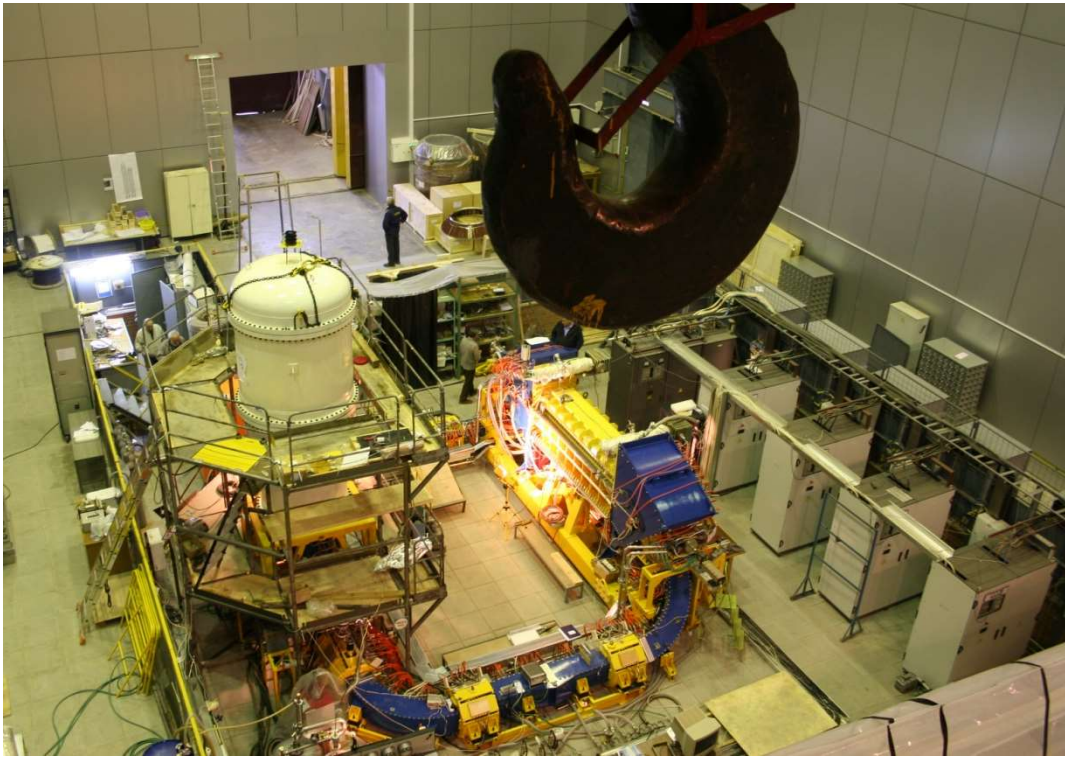
S. Nagaitsev, et al. "Experimental Demonstration of Relativistic Electron Cooling", Phys. Rev. Lett. 96, 044801 (2006)

– Operations: 2005 – 2011

S. Nagaitsev, L. Prost and A. Shemyakin, "Fermilab 4.3-MeV electron cooler," 2015 JINST 10 T01001.

Hadron beam cooling status and challenges

Sergei NAGAITSEV (Fermilab/U.Chicago)

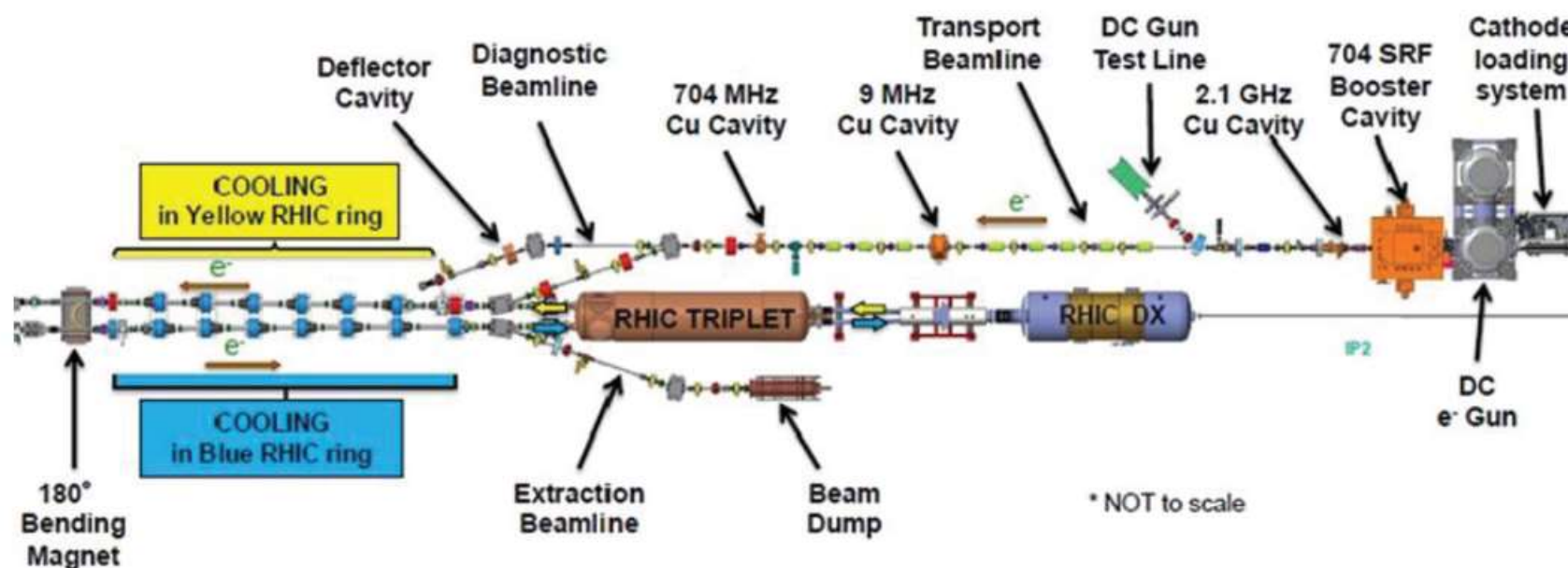


Система электронного охлаждения (ИЯФ) для синхротрона COSY (Германия)

1. Использование продольного магнитного поля для транспортировки пучка по транспортным каналам и в секции охлаждения (“замагниченная” оптика электронного пучка);
- *очень широкий диапазон по перестройки по энергии от 25 кВ до 1.5 МэВ*
2. Использование универсальных секций для создания электростатического ускорителя;
- *каждая секция содержит высоковольтный источник и электронику для создания магнитного поля;*
3. Каскадный трансформатор для передачи энергии каждой высоковольтной секции
4. Фильтр Вина для получения минимальных токов потерь и достижения стабильной работы в режиме рекуперации энергии пучка

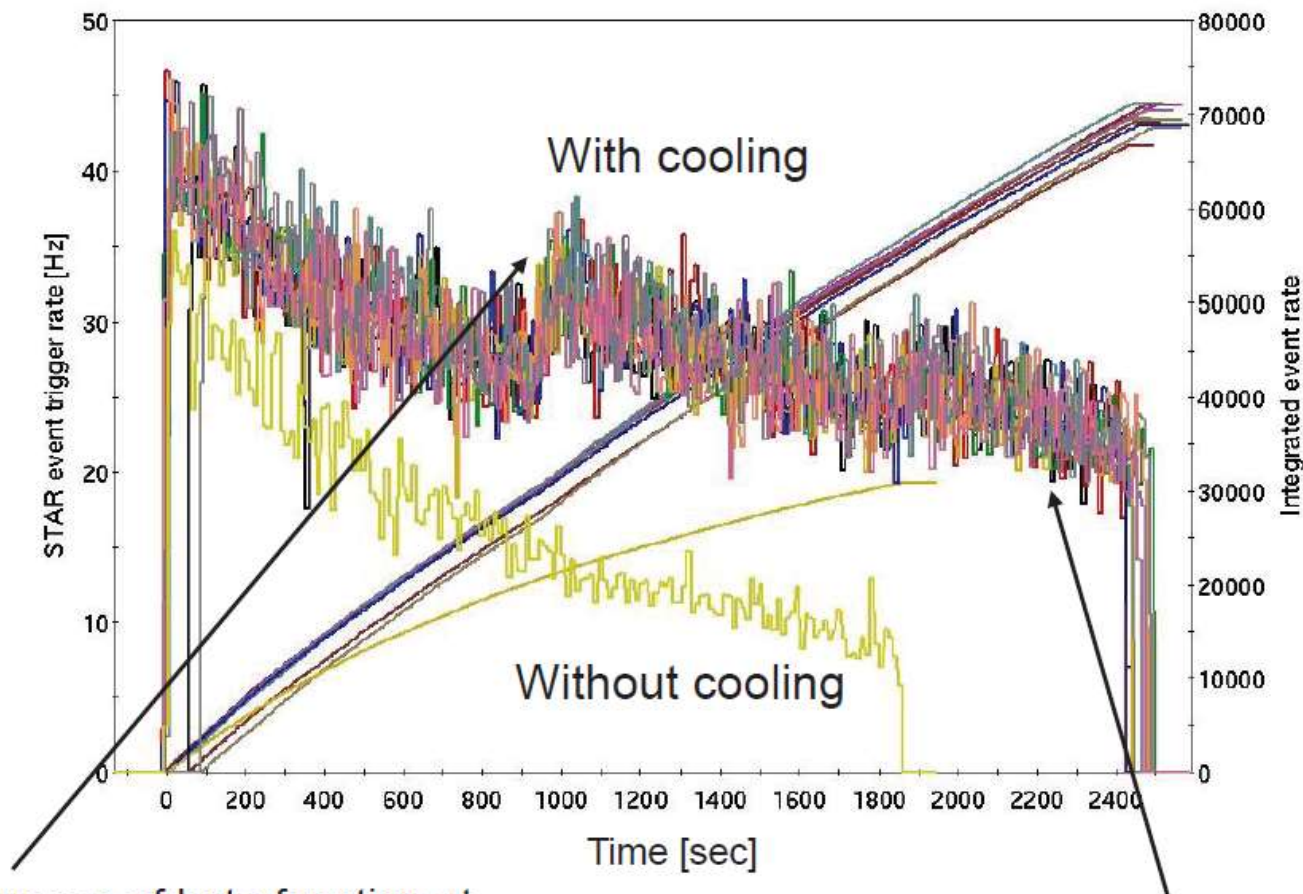
2 MeV Electron Cooler	Parameter
Energy Range	0.025 ... 2 MeV
Maximum Electron Current	1-3 A
Cathode Diameter	30 mm
Cooling section length	2.69 m
Toroid Radius	1.00 m
Magnetic field in the cooling section	0.5 ... 2 kG
Vacuum at Cooler	10^{-9} ... 10^{-10} mbar
Available Overall Length	6.39 m

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%

**Но не только высокой энергией “живо”
электронное охлаждение**

Очень низкая энергия электронов

Low energy electron-cooling Cryogenic Storage Ring (CSR)

Cold chemistry:

Fundamental reaction quantum dynamics
Astrochemistry

Circumference: **35 m**

Beam energy: **20 keV × q ...
300 keV × q**

Temperature: **3 ... 300 K**

Res. gas dens. $\sim 1000 \text{ cm}^{-3}$
(RTE pressure): $(\sim 10^{-14} \text{ mbar})$

Storage times: $\tau > 1000 \text{ s}$

m/q range: **unlimited**

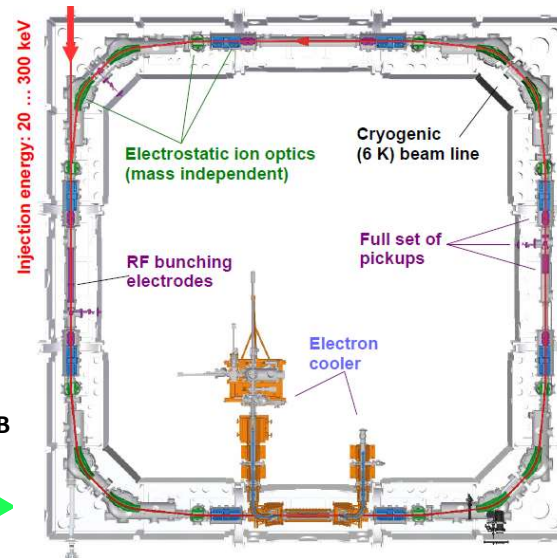
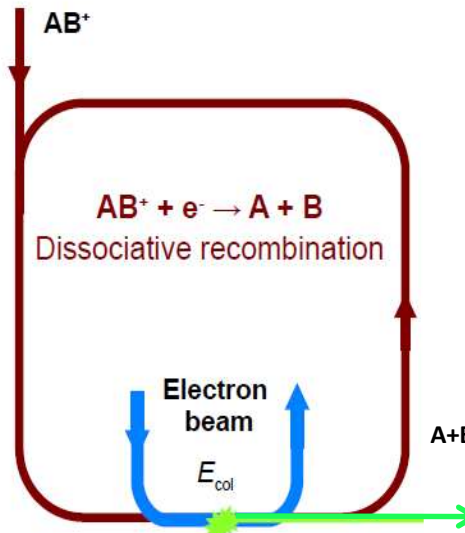
Cryogenic operation: **since 2015**

HeH⁺ ions at 250 keV, RF bunched
 $E_{\text{cool}} = 27.3 \text{ eV}$, $n_e = 3.7 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$, $N_i = 2 \times 10^7$

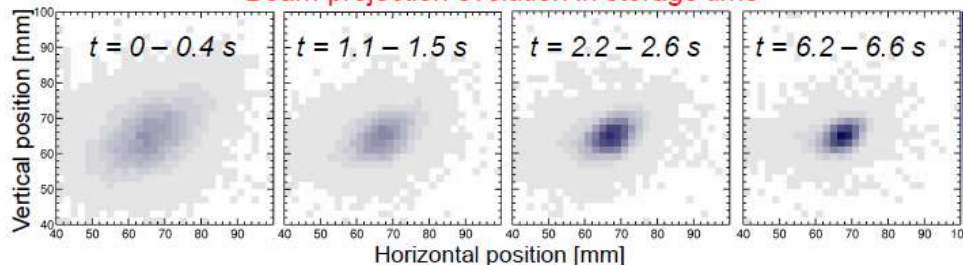
COOL23

Oldřich Novotný
for the CSR team

Montreux, October 9th, 2023

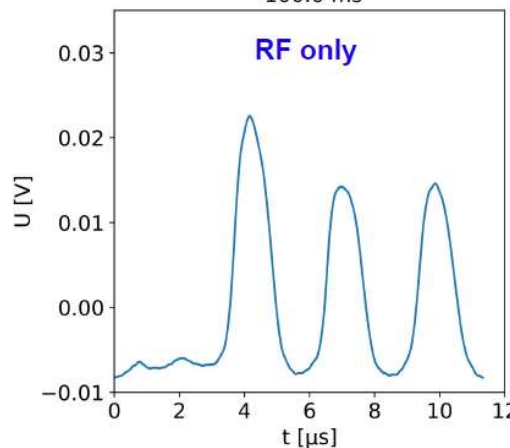


Beam-projection evolution in storage time



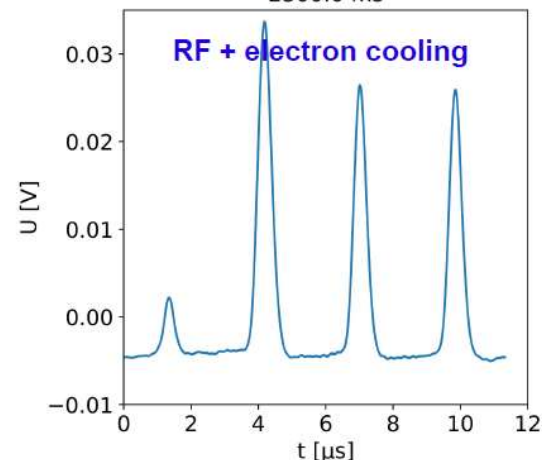
Beam charge pickup

-100.0 ms



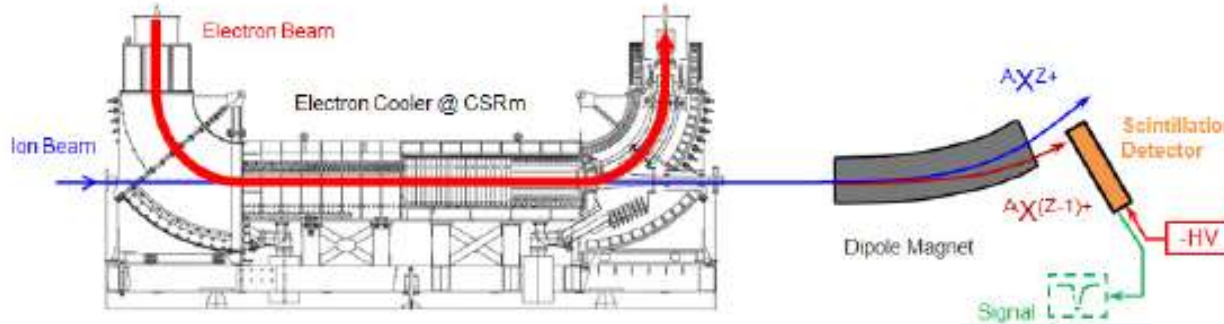
Beam charge pickup

2300.0 ms

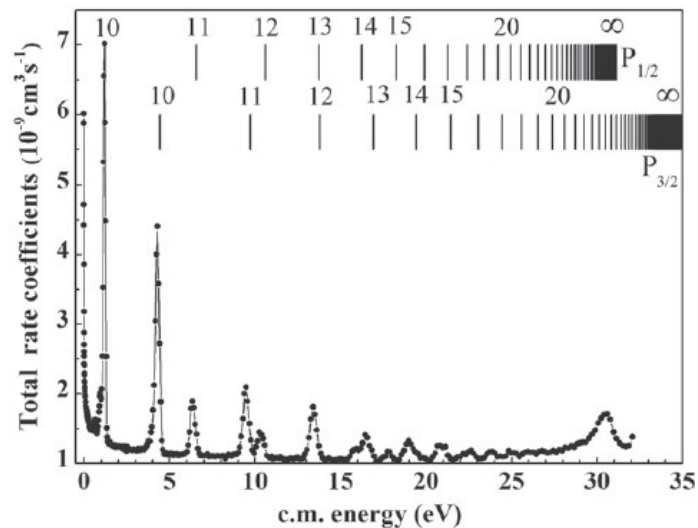


Не только электронное охлаждение, но и электронная мишень

HIRFL-CSRm-CSRe complex



Эскиз экспериментальной установки, показывающий секцию электронного охлаждения и детектор рекомбинировавших ионов.



Коэффициенты рекомбинации для ионов Ar^{15+} включая RR и DR процессы в системе центра масс ионов



		CSRm
Ion Energy/MeV/u		8-50
Electron Energy/keV		4.39-27.43
Ring Length/m		161.0
Cooling section Length/m		4.0
β Function/m	Horizontal β_h	10.0
	Vertical β_v	17.0
Dispersion/m		0
Magnetic Strength/T		<0.15
Max Electron Current/A		3
Initial Emittance (μmmrad)	Horizontal ϵ_h	150
	Vertical ϵ_v	20
Initial Momentum Spread $\Delta P/P$		$\pm 5 \times 10^{-3}$
Final Emittance (μmmrad)	Horizontal ϵ_h	20
	Vertical ϵ_v	20
Final Momentum Spread $\Delta P/P$		$\pm 5 \times 10^{-4}$

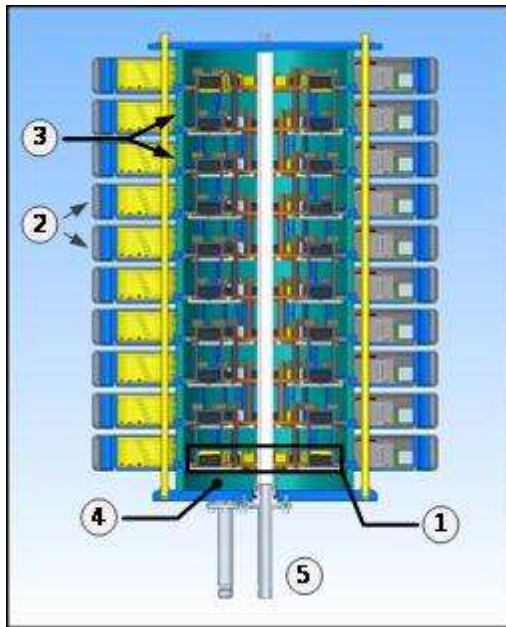
ИЯФ-Китай

Вперед к экспериментам по рекомбинации

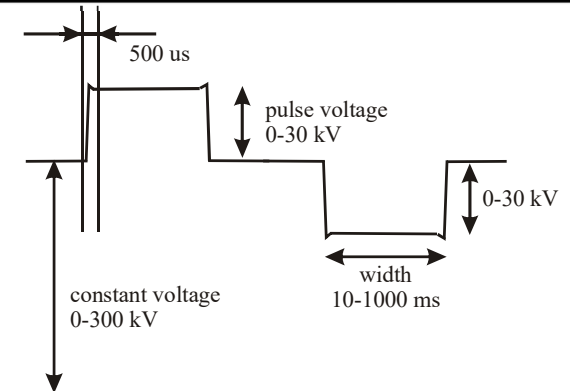


Previous high-voltage system before disassembling. Parts 1 – 6 were disassembled and assembled again. Collector is 1, high-voltage terminal is 2, collector PS is 3, gun is 4, high-voltage feeder is 5, high-voltage vessel is 6.

		CSRe
Ion Energy/MeV/u		10-450
Electron Energy/keV		5.5-247.87
Ring Length/m		128.8
Cooling section Length/m		4.0
β Function/m	Horizontal β_h	12.5
	Vertical β_h	16.0
Dispersion/m		0
Magnetic Strength/T		<0.15
Max Electron Current/A		3
Initial Emittance (π mmrad)	Horizontal ϵ_h	30
	Vertical ϵ_v	30
Initial Momentum Spread $\Delta P/P$		$\pm 5 \times 10^{-3}$
Final Emittance (π mmrad)	Horizontal ϵ_h	1
	Vertical ϵ_v	1
Final Momentum Spread $\Delta P/P$		$\pm 1 \times 10^{-6}$

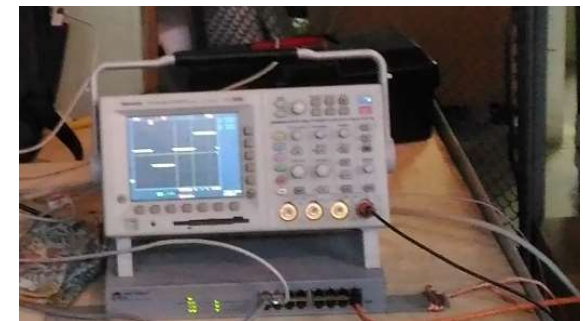


Конструкция источника питания с быстрой перестройкой: 1 – секция трансформатора, 2 – секции высоковольтной электроники, 3 – корпус каскадного трансформатора, 4 – масляный объем, 5 – вход и выход потока масла.



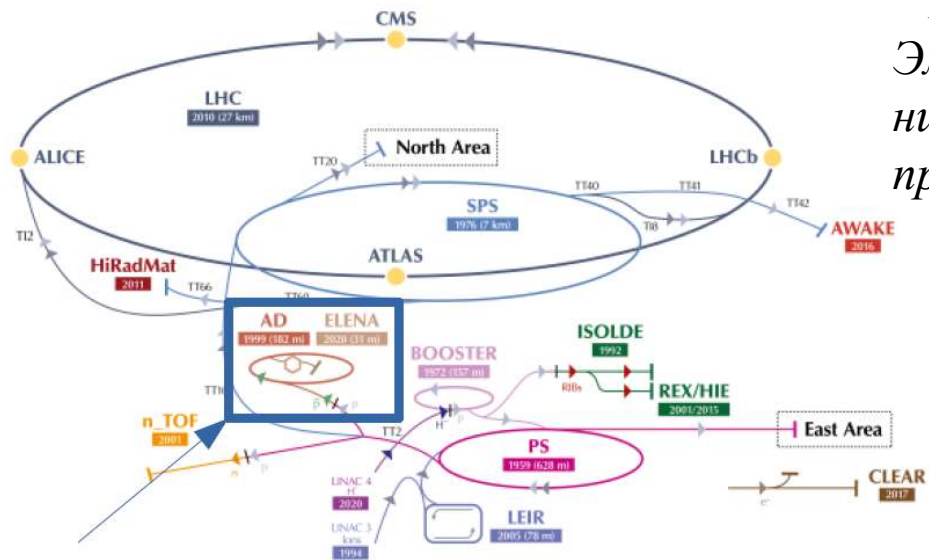
HIRFL-CSRm-CSR complex

ИЯФ-Китай



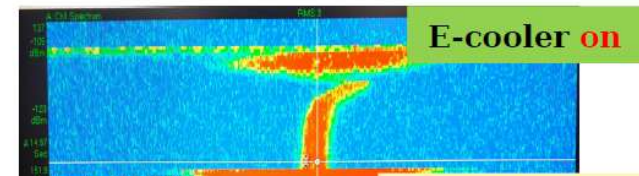
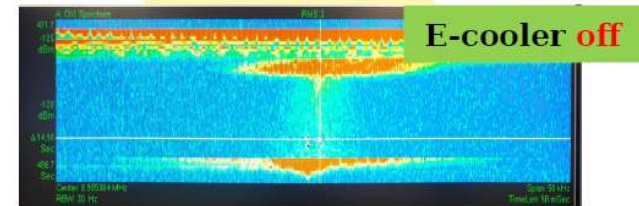
ELENA: Extra Low ENergy Antiproton

Электронное охлаждение обеспечивает низкий поперечный и продольный эмиттанс в процессе замедления

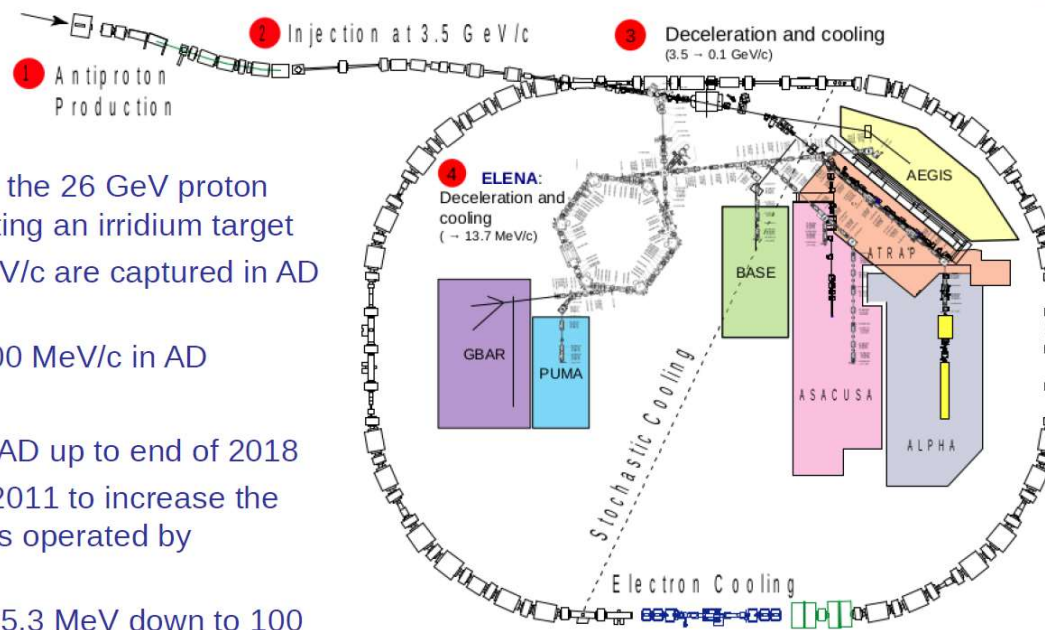


The CERN accelerator complex

Schottky signal



Courtesy G. Tranquille



- Antiprotons are produced by the 26 GeV proton beam from CERN PS impacting an irridium target
- $3.5 \cdot 10^7$ antiprotons at 3.5 GeV/c are captured in AD (Antiproton Decelerator)
- Antiproton deceleration to 100 MeV/c in AD
- 5 experiments connected to AD up to end of 2018
- ELENA project approved in 2011 to increase the capture efficiency of the traps operated by experiments
 - further deceleration from 5.3 MeV down to 100 keV kinetic energy



Schottky Mass Spectrometry

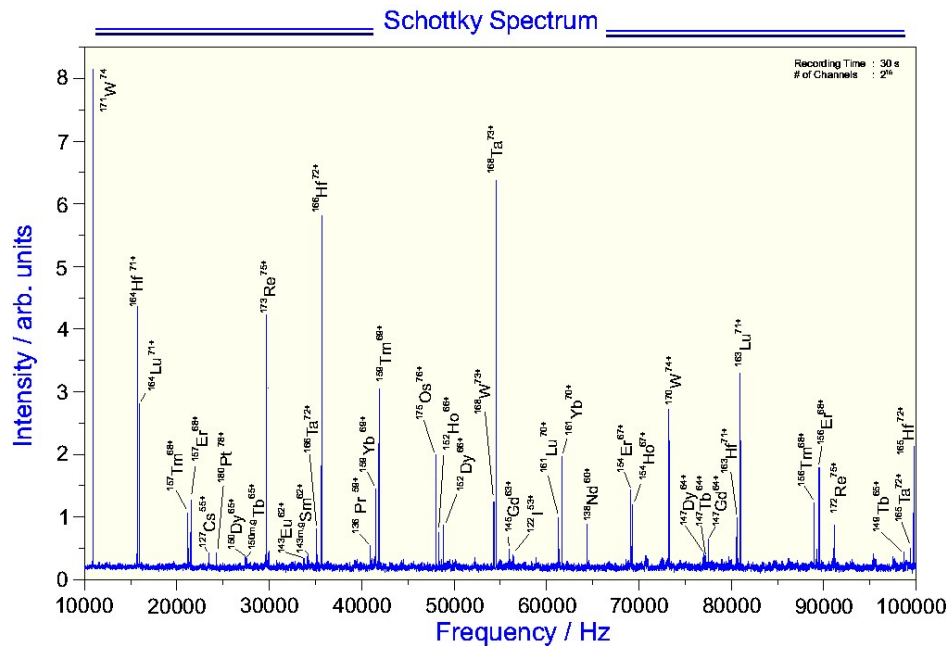
ESR storage ring

Injection of cocktail rare isotope beam from fragment separator FRS

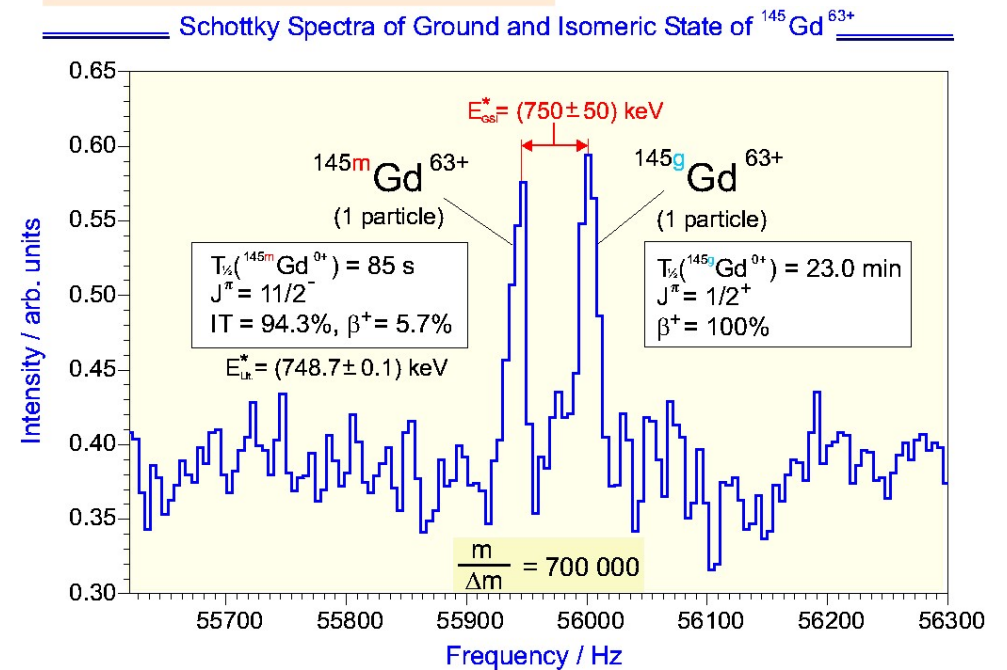
Cooling (stochastic pre-cooling + final electron cooling)

Achieved momentum spread ($\delta p/p = 5 \times 10^{-7}$, $\delta f/f = 2 \times 10^{-7}$)

broad band spectrum



narrow band spectrum (zoom)



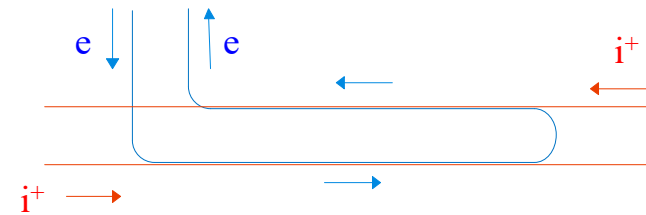
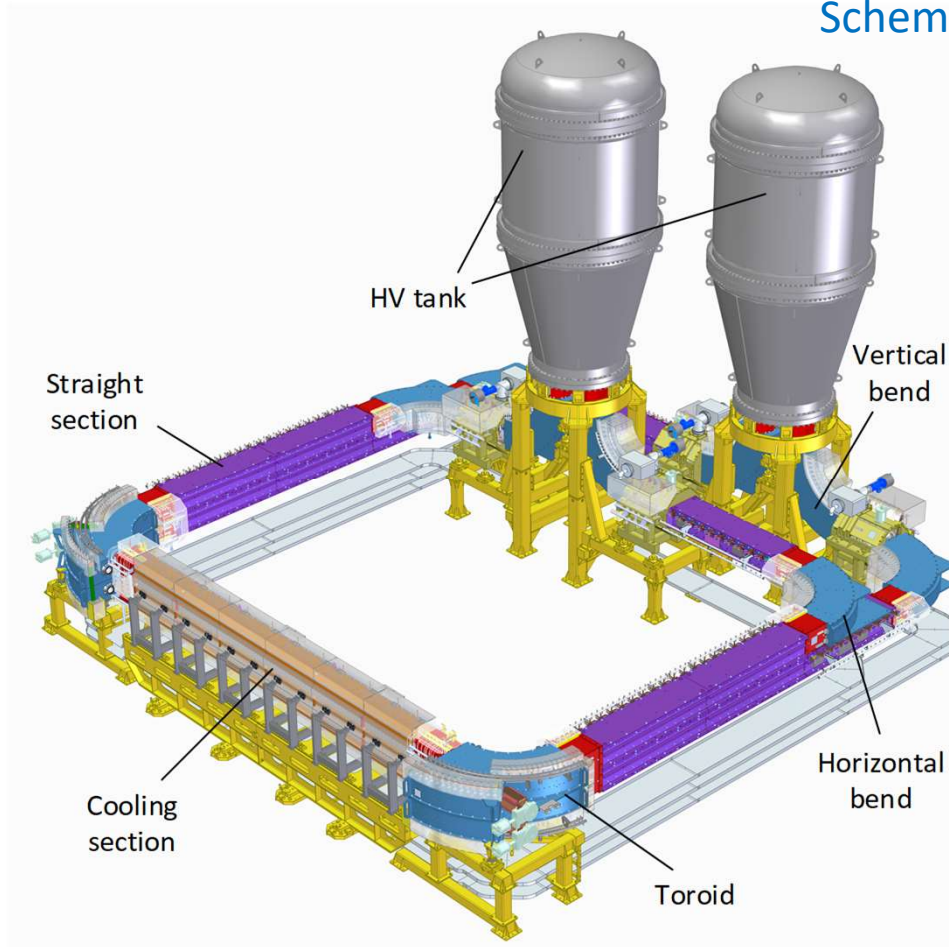
$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{1}{\gamma_t^2} \cdot \frac{\Delta(m/q)}{m/q} + \left(1 - \frac{\gamma^2}{\gamma_t^2}\right) \frac{\Delta v}{v}$$

Detection of single ions !

Будущие проекты

High voltage electron cooling in the NICA collider

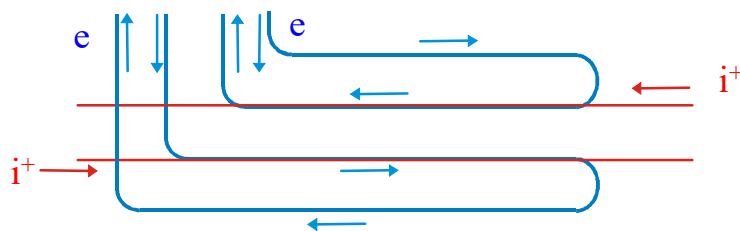
The HV ECS for NICA consists of two almost independent coolers. Scheme with one electron beam looks very complicated



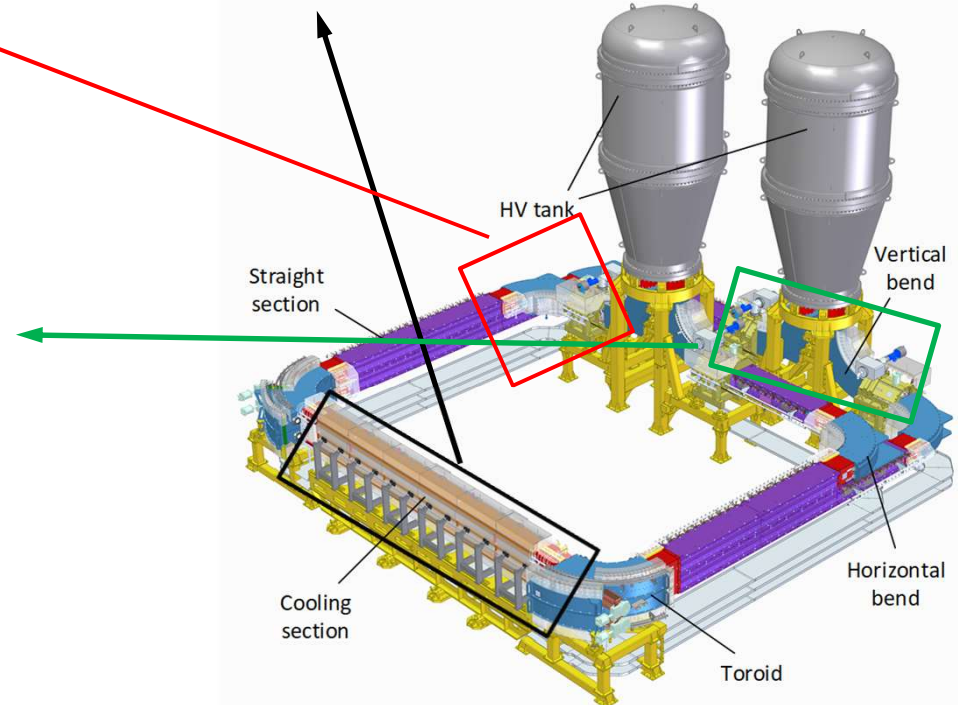
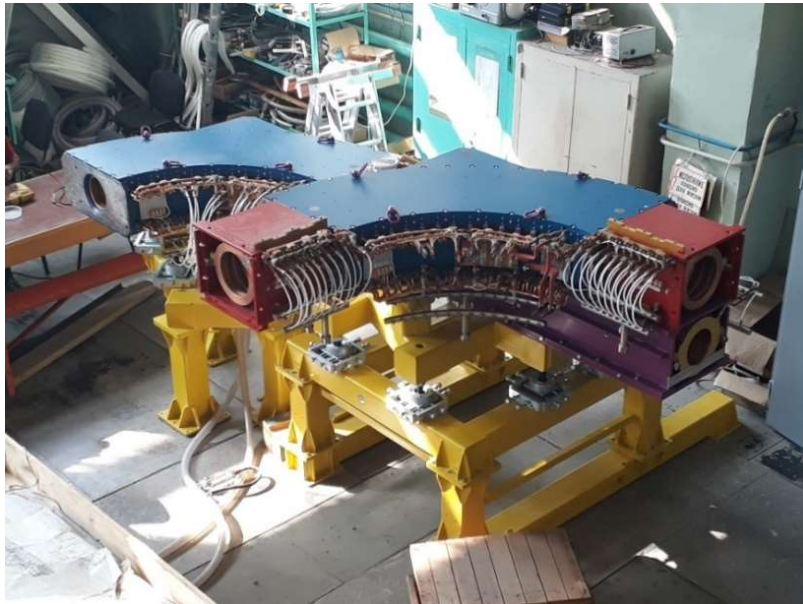
Electron energy	0.2 - 2.5 MeV
Energy stability ($\Delta U/U$)	$<10^{-4}$
Electron current	0.1 - 1 A
Cooling section length	6 m
Magnetic field in cooling section	0.5 - 2 kG
Vacuum	10^{-11} mbar

Main problems:

- High energy (up to 2.5 MeV);
- Small distance between beams (320 mm);
- Limited power consumption of the system (not more than 700 kW).



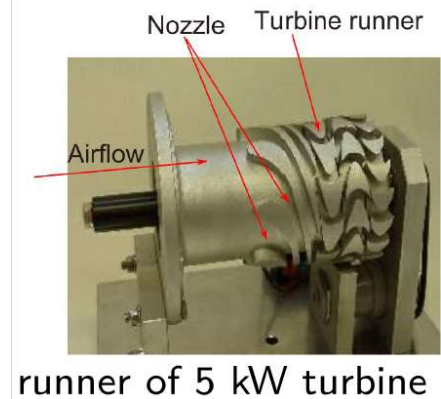
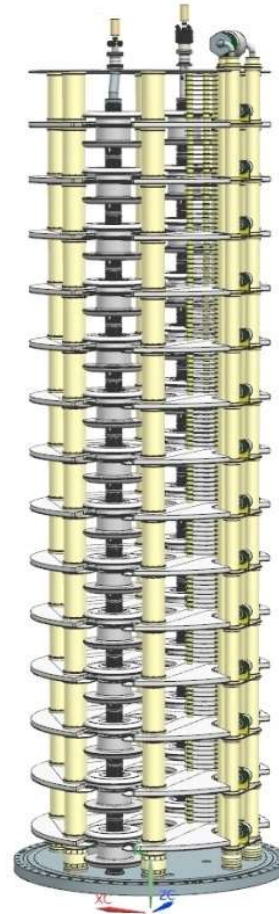
Электронное охлаждение для NICA коллайдера



Вперед на турбинах к 4-8 МэВ



ИЯФ – Германия

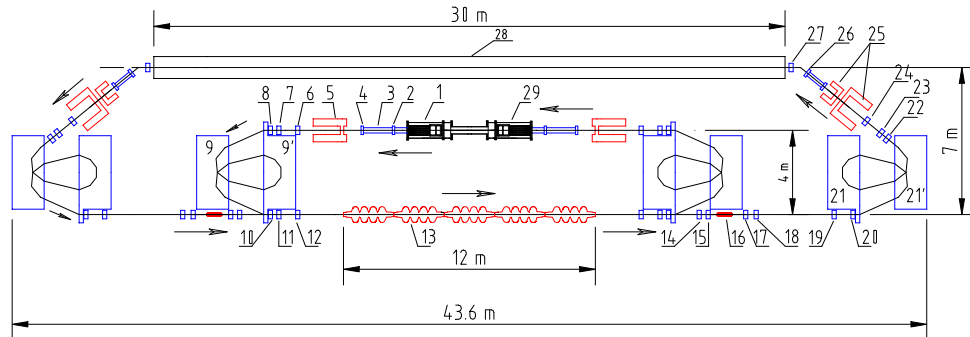


Возрождение идей на основе использования накопительного кольца для реализации электронного охлаждения

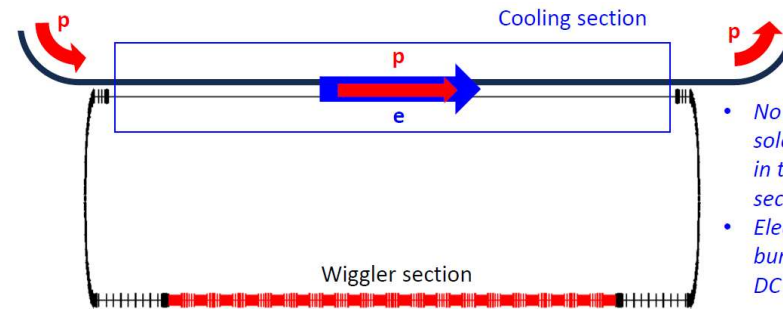
V. Lebedev et al. CDR: A ring-based electron cooling system for the EIC, 2020

EIC Ring Electron Cooler (EIC REC)

- The EIC REC is a non-magnetized, bunched electron cooler based on an electron storage ring, which utilizes damping wigglers to provide needed radiation damping for the electrons.
- REC must counteract the IBS-driven emittance growth of the proton bunches at 275 GeV ($\tau_{IBS(x,z)} = 2, 3$ hours)
- The bunched, non-magnetized cooling was successfully employed in RHIC runs 2020-2021 to cool colliding Au ions.**

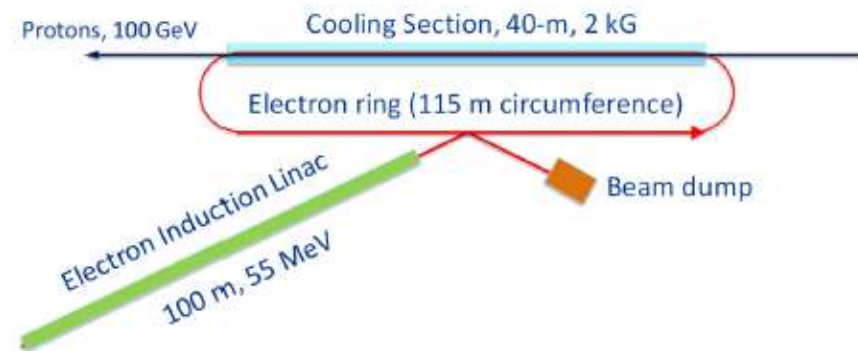


Parkhomchuk V.V., Ben-Zvi I "Electron cooling for RHIC", BNL C-A/AP/47 (2001)

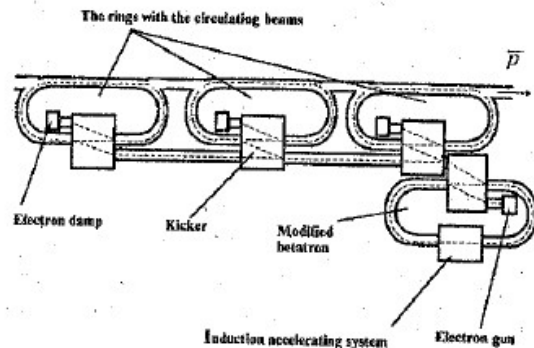


- No continuous solenoidal field in the cooling section
- Electron bunches, not a DC beam

S. Seletskiy, A.Fedotov, J.Kewish. Parameters optimization for EIC Ring cooler. Ecool-2023.



Schematic of a ring-based electron cooler. Note that the cooling section length may be extended in the final



I. Meshkov. A. Sidorin. The electron cooling with circulating electron beam. Proceedings Workshop on the Medium Electron Cooling, Novosibirsk, p.183-188 (1997).

Проект HIAF для исследований в области атомной и ядерной физики

■ High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (**HIAF**)

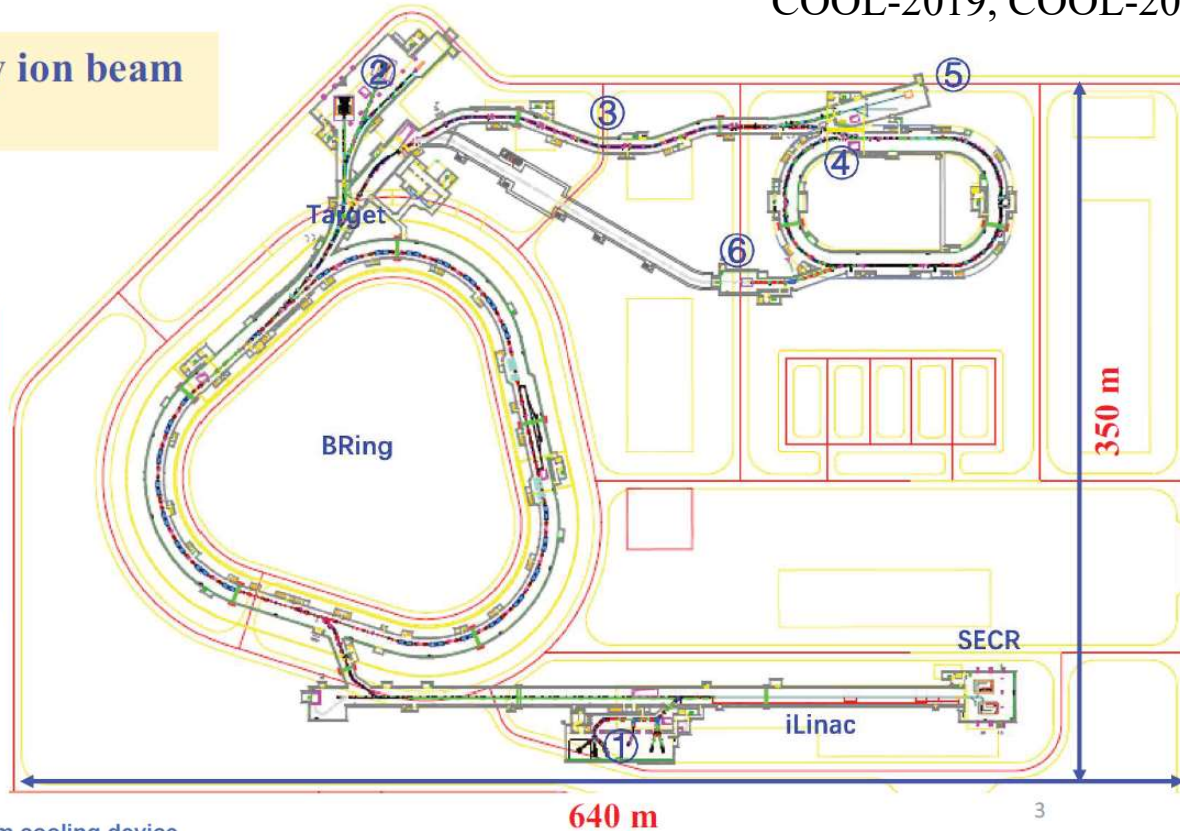
Lijun Mao, Institute of Modern Physics, China
COOL-2019, COOL-2021

To provide highest intensity heavy ion beam for nuclear and atomic physics

● Experimental terminals

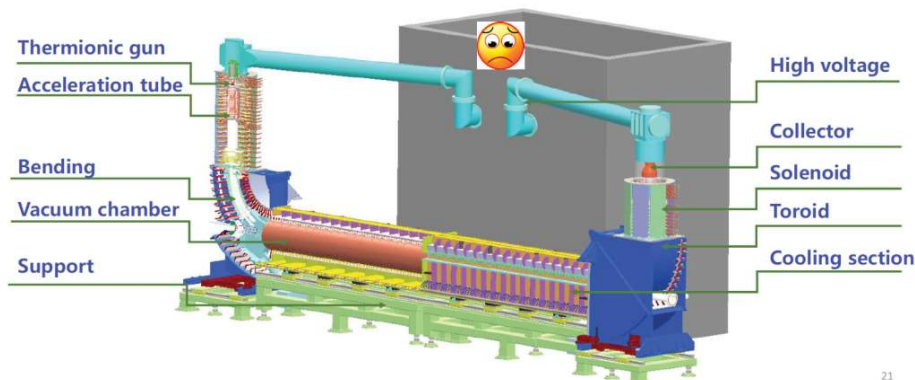
- ① Low energy nuclear structure terminal
- ② Multi-function terminal
- ③ High energy fragment separator HFRS
- ④ **High precision spectrometer ring SRing**
- ⑤ Radioactive isotope beam terminal
- ⑥ High energy density physics terminal

The 450 keV electron cooler (DC, magnetized) will be installed in SRing



A classical DC magnetized electron beam cooling device

Based on the present 300 keV coolers designed by BINP at CSR



Maximum electron energy	450 keV
Total length of the straight section	16.0m
Total length of the cooler	11.2 m
Height of the cooler	5.0 m
Effective cooling length	7.4 m (2.6% of circumference)
Cathode radius	15 mm
Cathode temperature	0.1 eV
High voltage ripple(pp max. @ 450 kV)	5.0×10^{-5} (???)
Magnetic field homogeneity	1.0×10^{-4}
Maximum electron current	2.0 A
Vacuum condition	$< 2.0 \times 10^{-11}$ mbar

Заключение

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

Спасибо за внимание