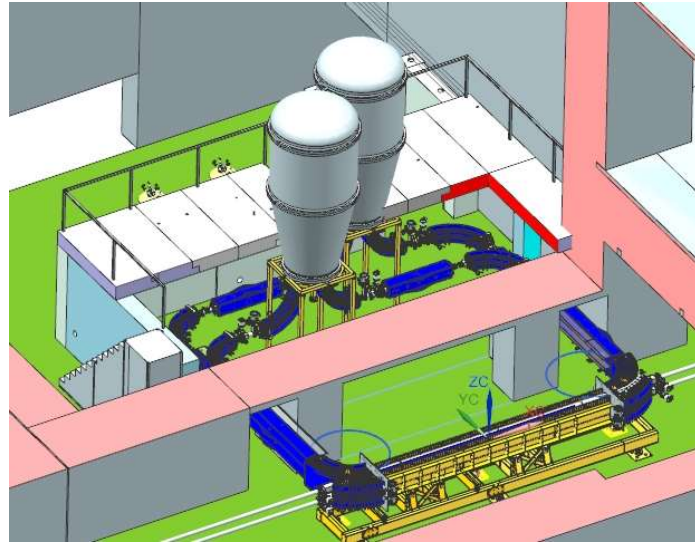


Электронное охлаждение

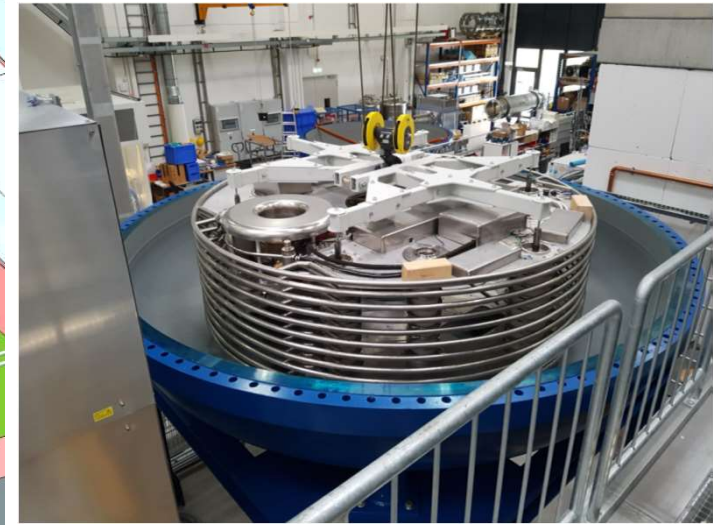
В.Б.Рева и команда ИЯФ СО РАН



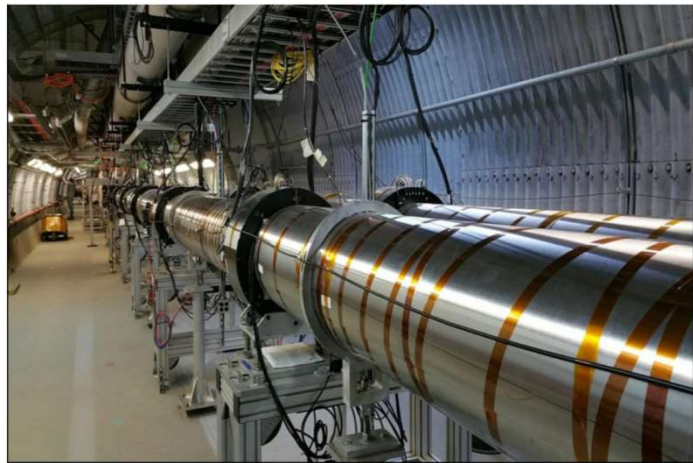
COSY, Germany



NICA, BINP&JINR, Russia



"BIG Blue Bubble" HV Tank



LERec, cooling section, BNL



HIAF construction, China

Научная сессия

ИЯФ СО РАН, 10 марта, 2022

Проект НИКА

Электронное охлаждение на высокую и низкую энергию для коллайдера



Для достижения проектной светимости комплекс НИКА оборудуется тремя системами охлаждения: две электронные и одна стохастическая.

1. Электронное охлаждение (СЭО) Бустера NICA
2. СЭО коллайдера NICA

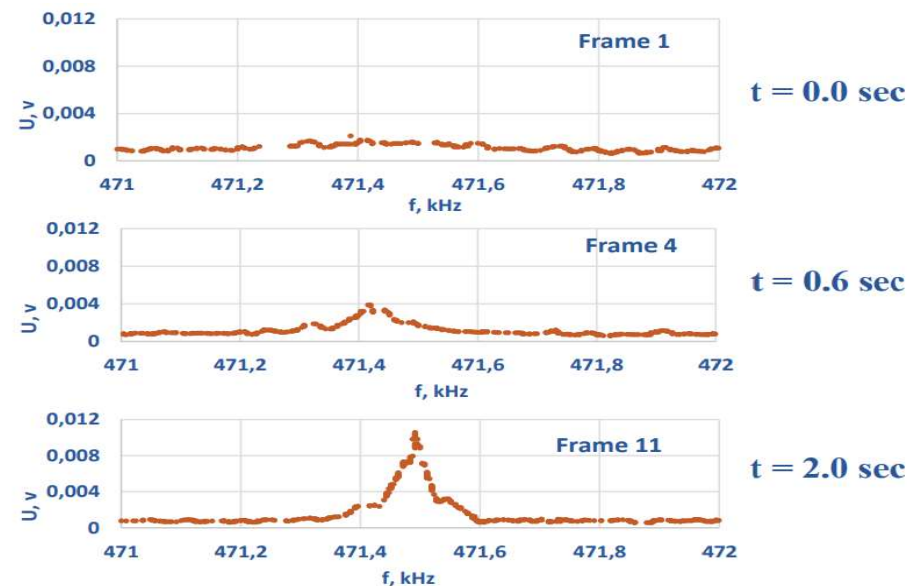
NICA Synchrotrons and their cooling systems

Evgeny Syresin on behalf of team (ESCOOL-2021)

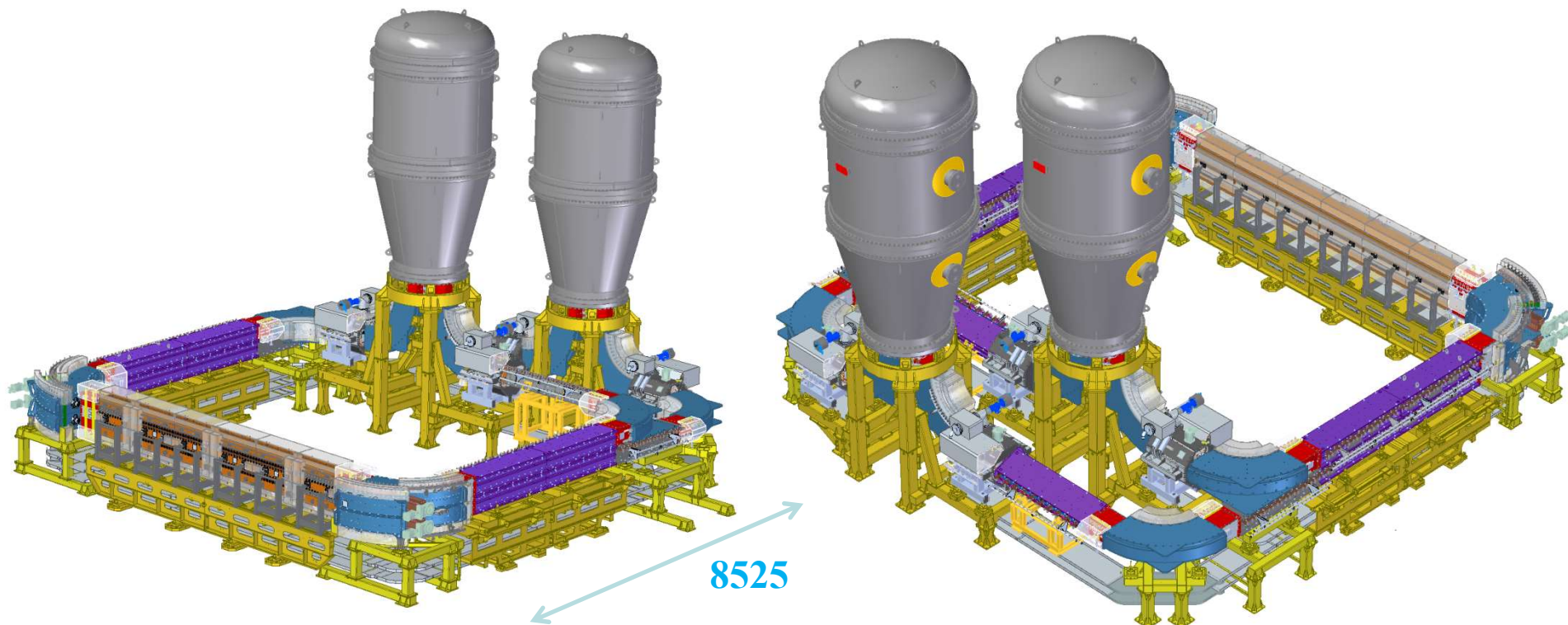
ИЯФ СО РАН в рамках сотрудничества уже изготовил и поставил в Дубну систему электронного охлаждения для бустера NICA с параметрами энергии до 50 киловольт. В 2021 году сотрудники ОИЯИ активно осваивали работу на СЭО и получили первое охлаждение на ионах железа. Ниже показан сигнал Шоттки спектрометра на 4-гармонике частоты обращения пропорциональный разбросу продольного импульса в ионном пучке. Видно, что за достаточно непродолжительное время ионный пучок охлаждается в продольном направлении.

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



Первые признаки электронного охлаждения в СЭО для бустера НИКА.

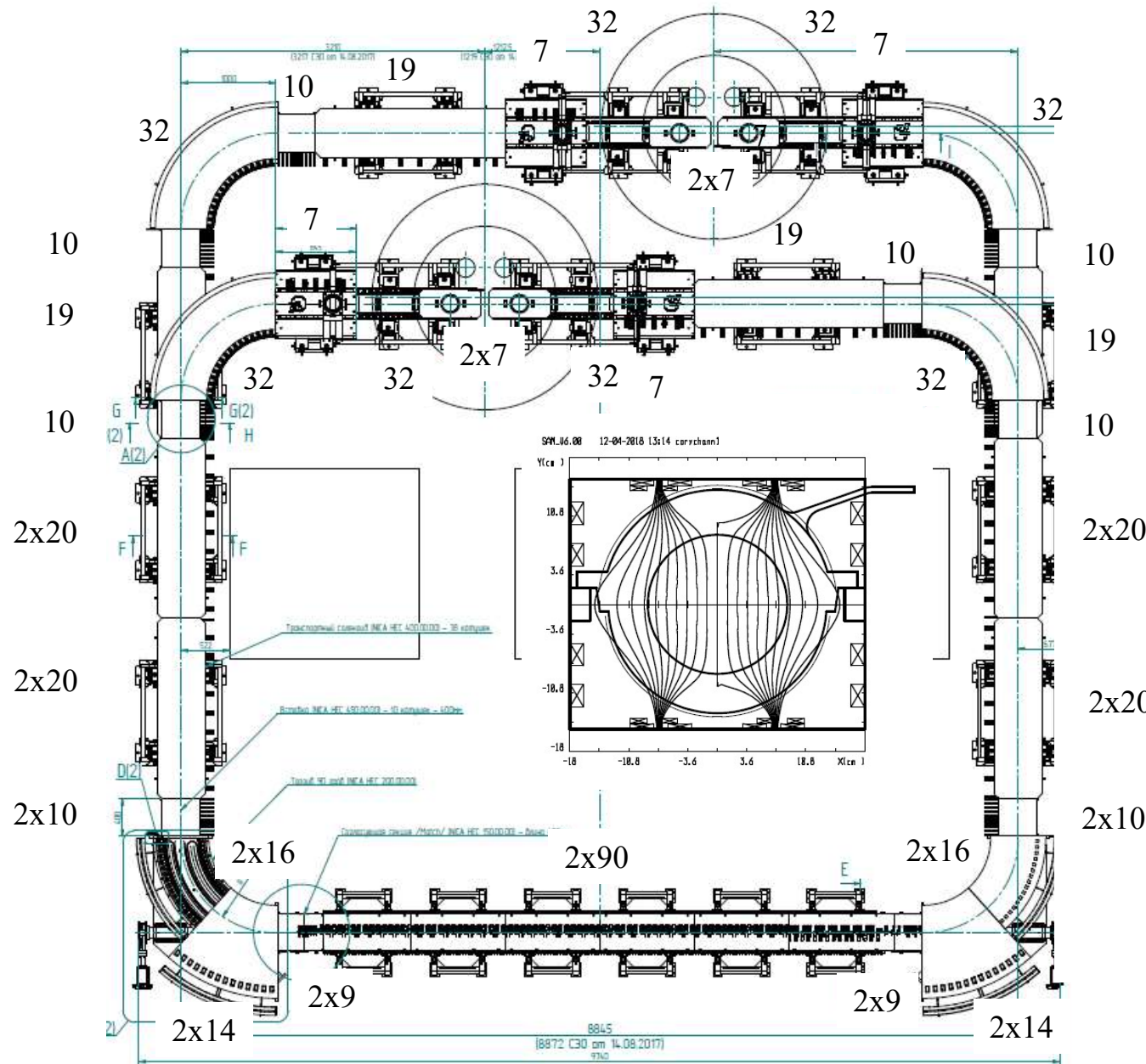


Parameter	Value
Область энергии	0.2÷2.5 МэВ
Число секций охлаждения	2
Стабильность энергии ($\Delta U/U$)	$\leq 10^{-4}$
Электронный ток	до 1 А
Размер элект. пучка в секции охлаждения	5÷20 мм
Длина секции охлаждения	6 м
Радиус поворота транспортных каналов	1 м
Магнитное поле в секции охлаждения	0.5÷2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

СЭО НИКА

Электронное охлаждение на высокую энергию для коллайдера

Концепция замагниченного движения требует продольного магнитного поля вдоль всей траектории электронного пучка



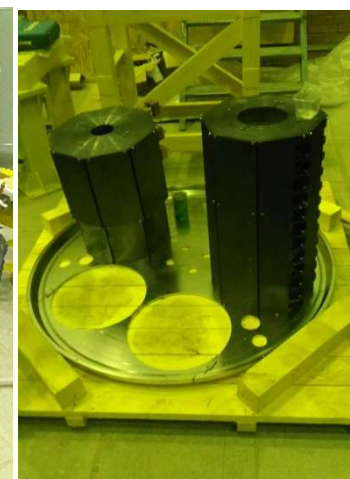
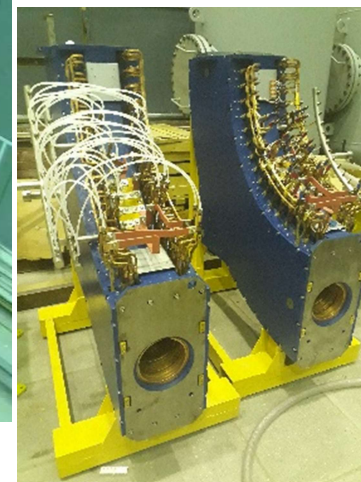
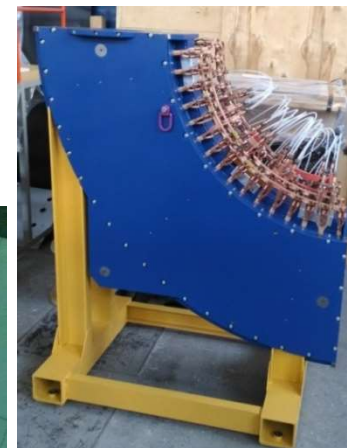
Продольное магнитное поле	
Cooling section –	180
Small toroids coils –	66
Large toroids coils –	60
Match sections –	48
Insert section –	110
Line transport section –	250
Bend section –	260
Line08 –	30
Hmatch section –	28
High Voltage Section –	180
HV Terminal –	46

Всего 1258

Типов катушек для создания продольного магнитного поля ~ 20

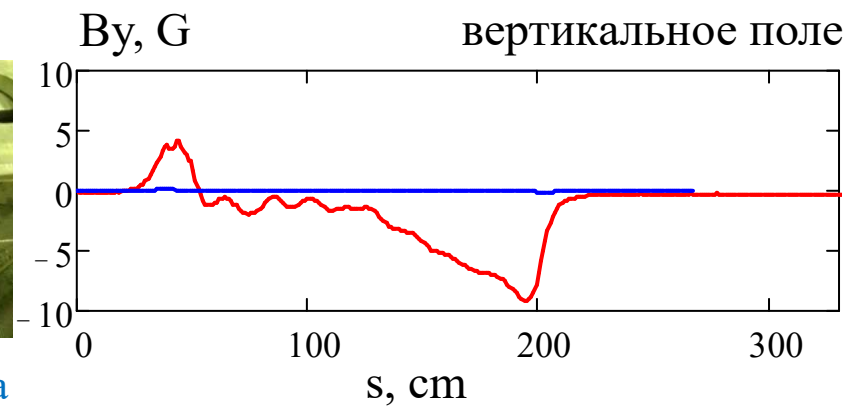
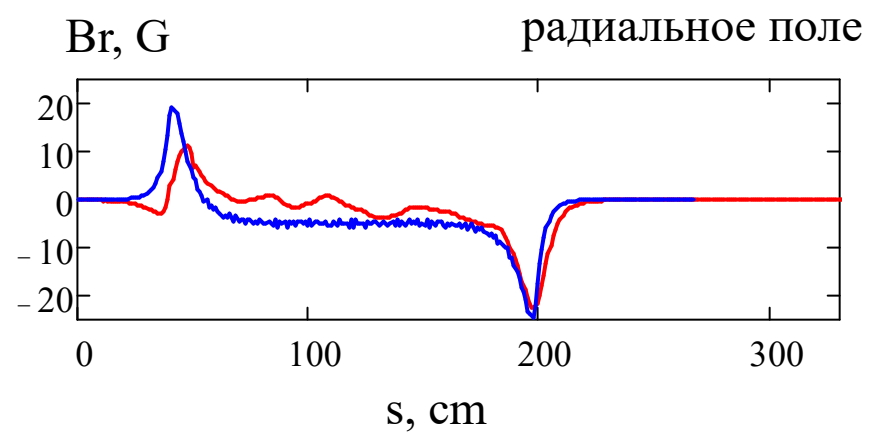
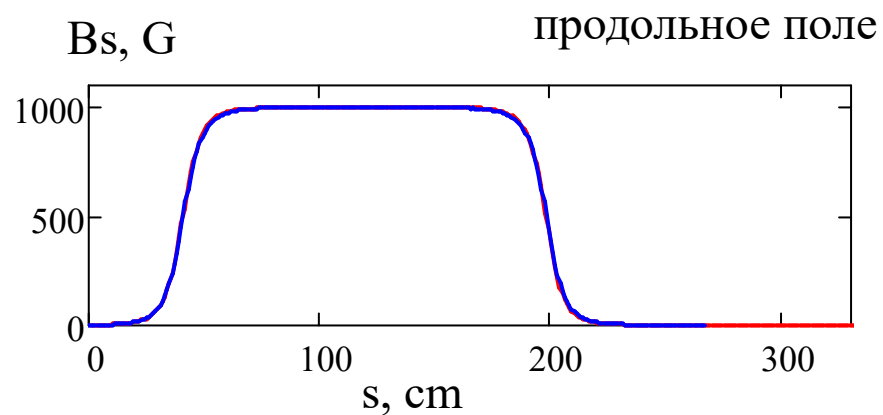
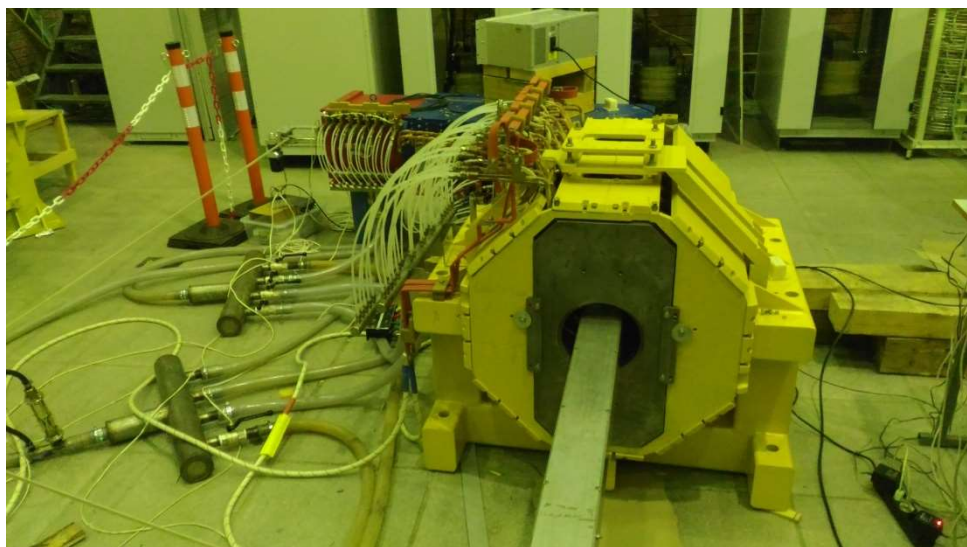
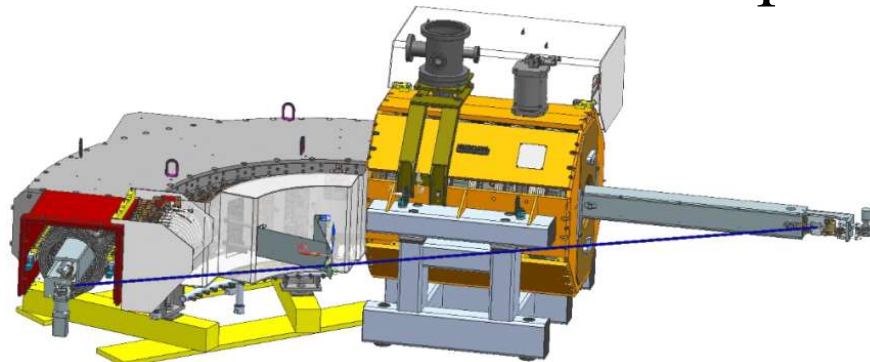
И дополнительно большое количество корректоров вертикального и горизонтального магнитных полей

Магнитные элементы СЭО



Система магнитных измерений

Сравнение расчетного и измеренного магнитных полей



Лента

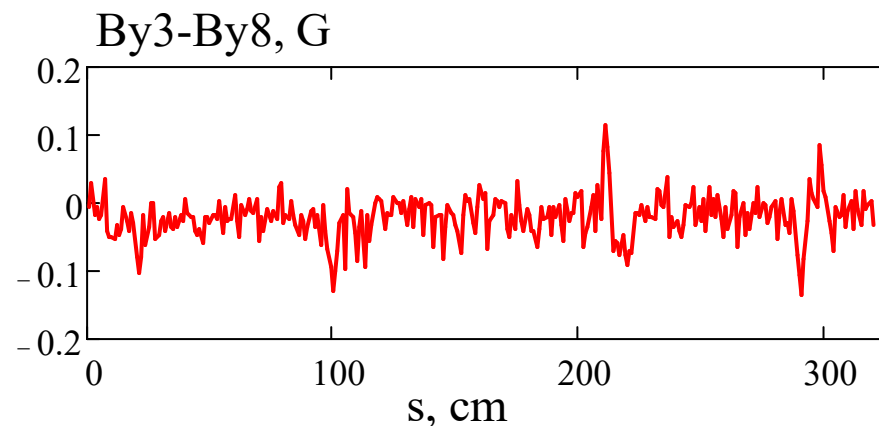
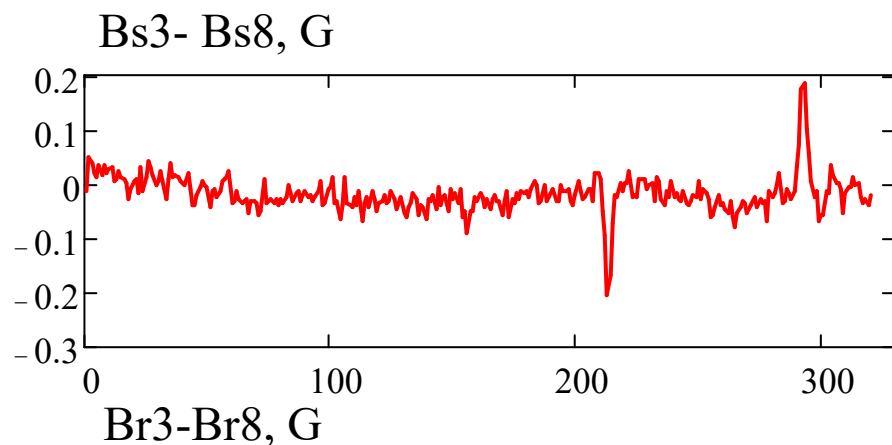
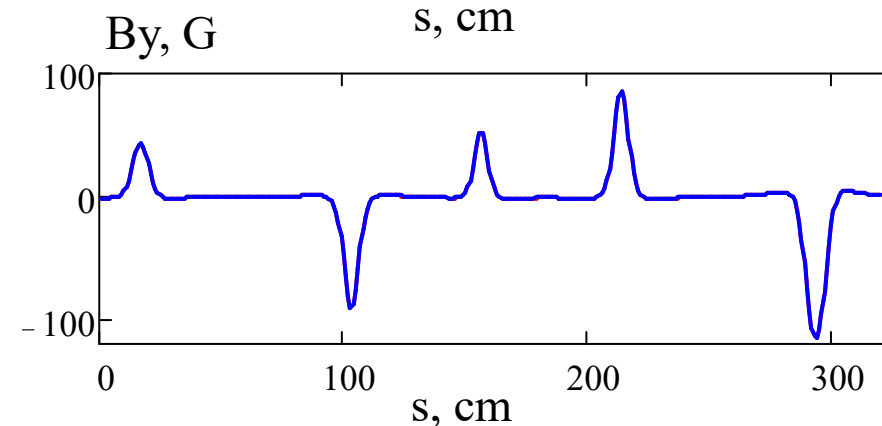
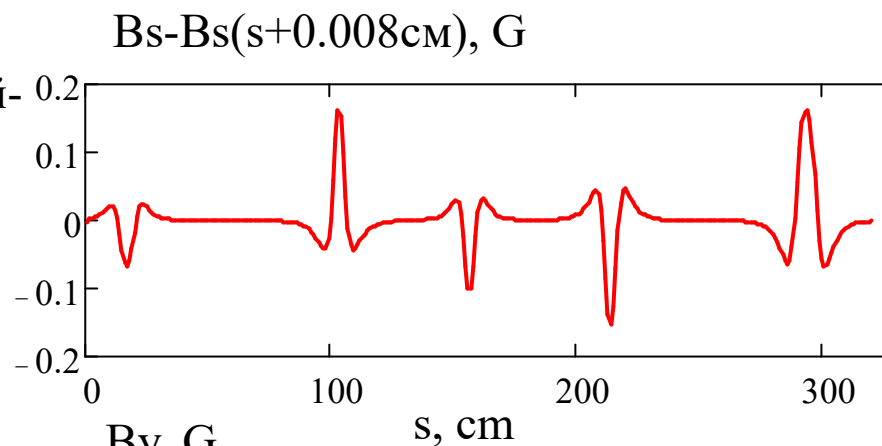
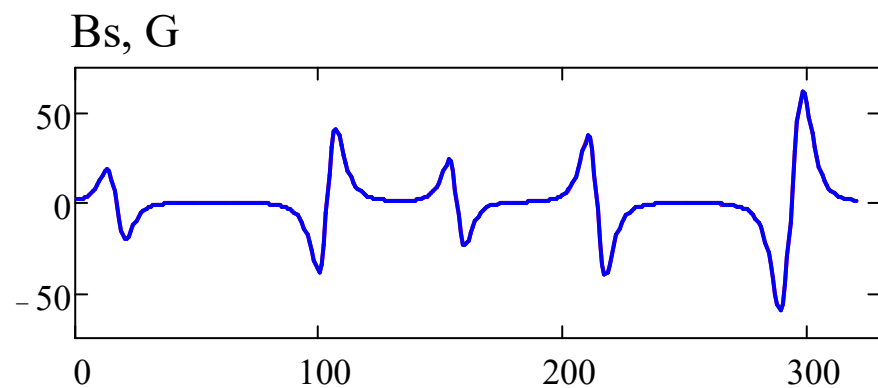


Каретка для датчика Холла

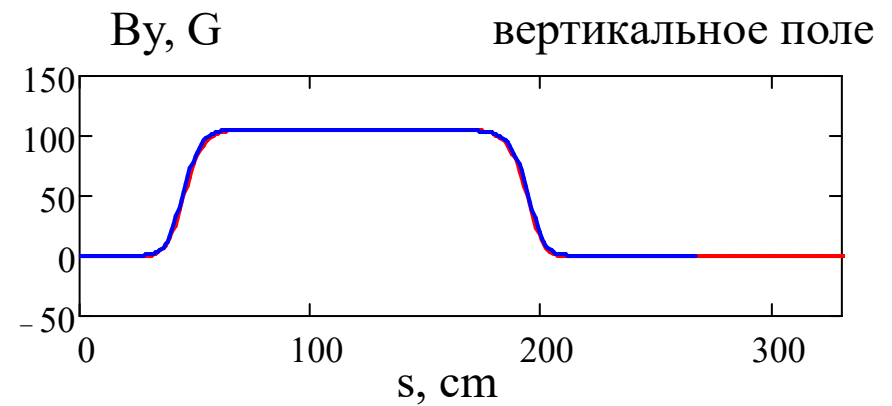
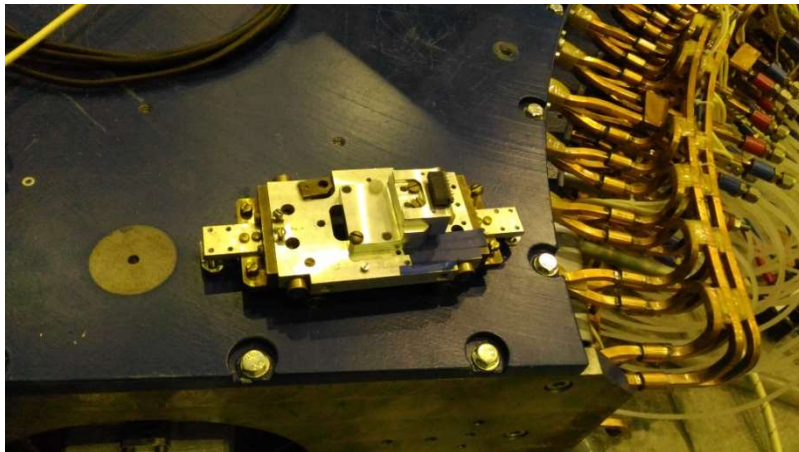
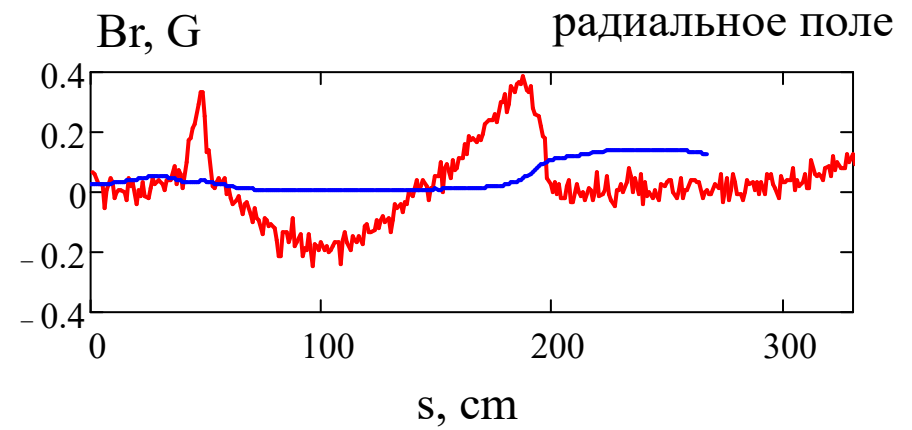
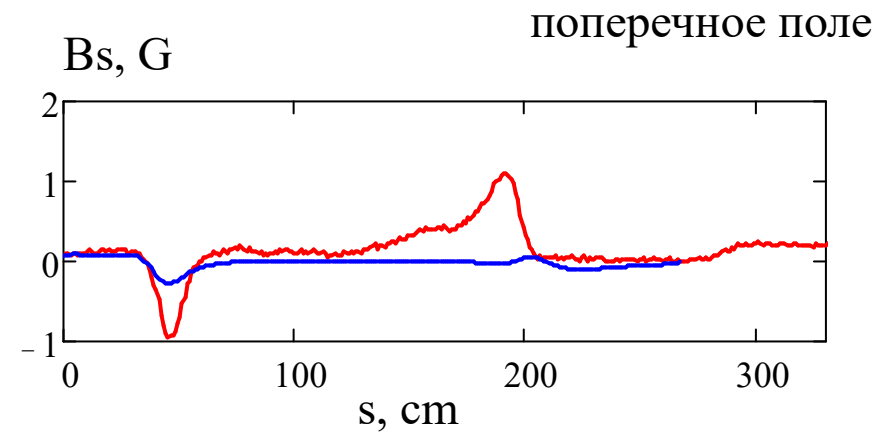
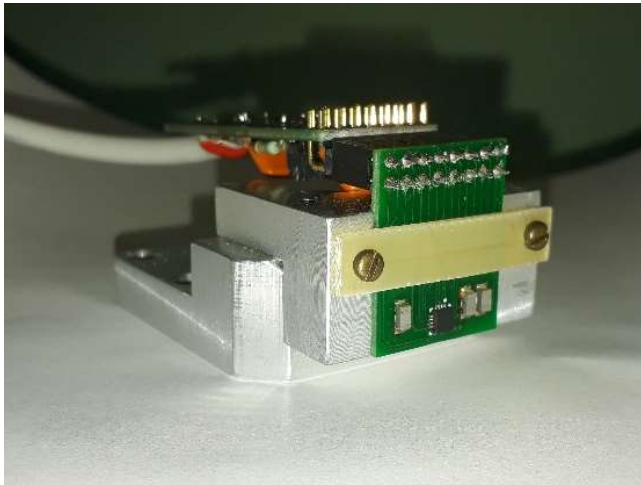
Не хуже 80 мкм

Точность позиционирования

Для определения точности позиционирования каретки с датчиками Холла производилось многократное измерение по заданной криволинейной траектории магнитного поля от постоянных магнитов положение которых не менялось. Неточность в позиционировании приводит к возникновению сигнала при вычислении разности между различными измерениями.

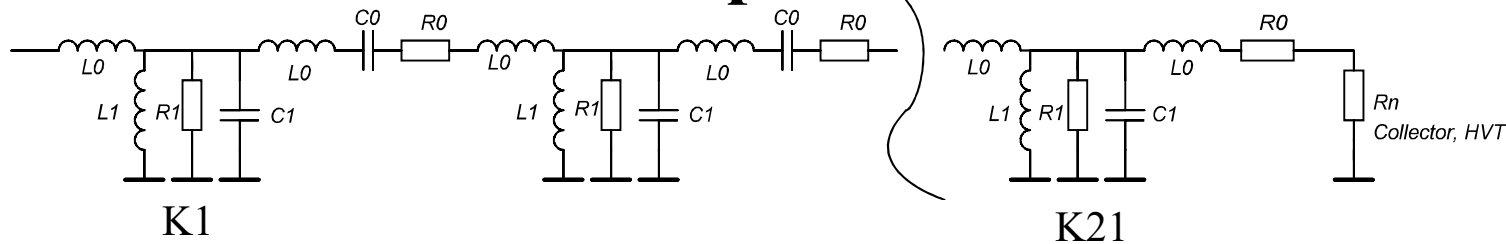


Сравнение расчетного и измеренного магнитных полей



Новые каскадные трансформаторы

передачи мощности



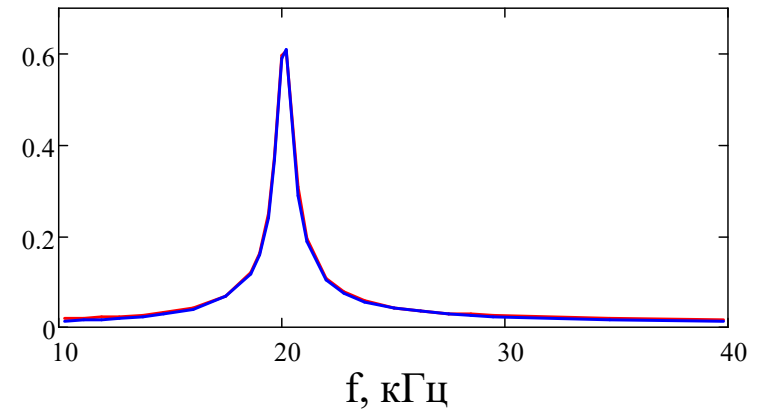
$R0=0.09 \text{ Ом}$
 $L0=33 \text{ мкГн}$
 $C0=940 \text{ нФ}$
 $Rn=3.3 \text{ Ом}$
 $R_{coll}=15 \text{ Ом}$
 K – коэффициент передачи при 15 Ом



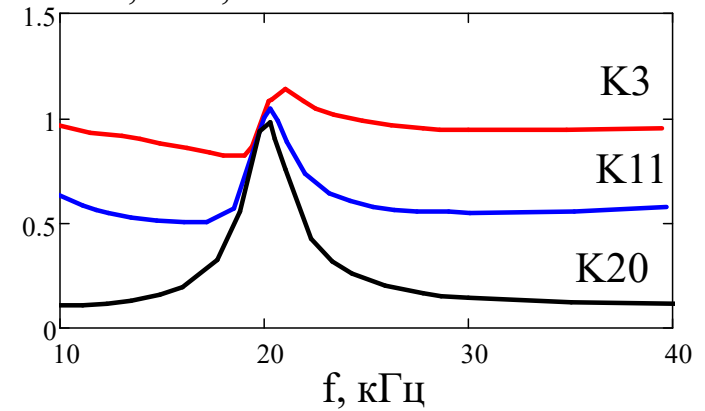
Всего 21 секция



U_{out}/U_{in}

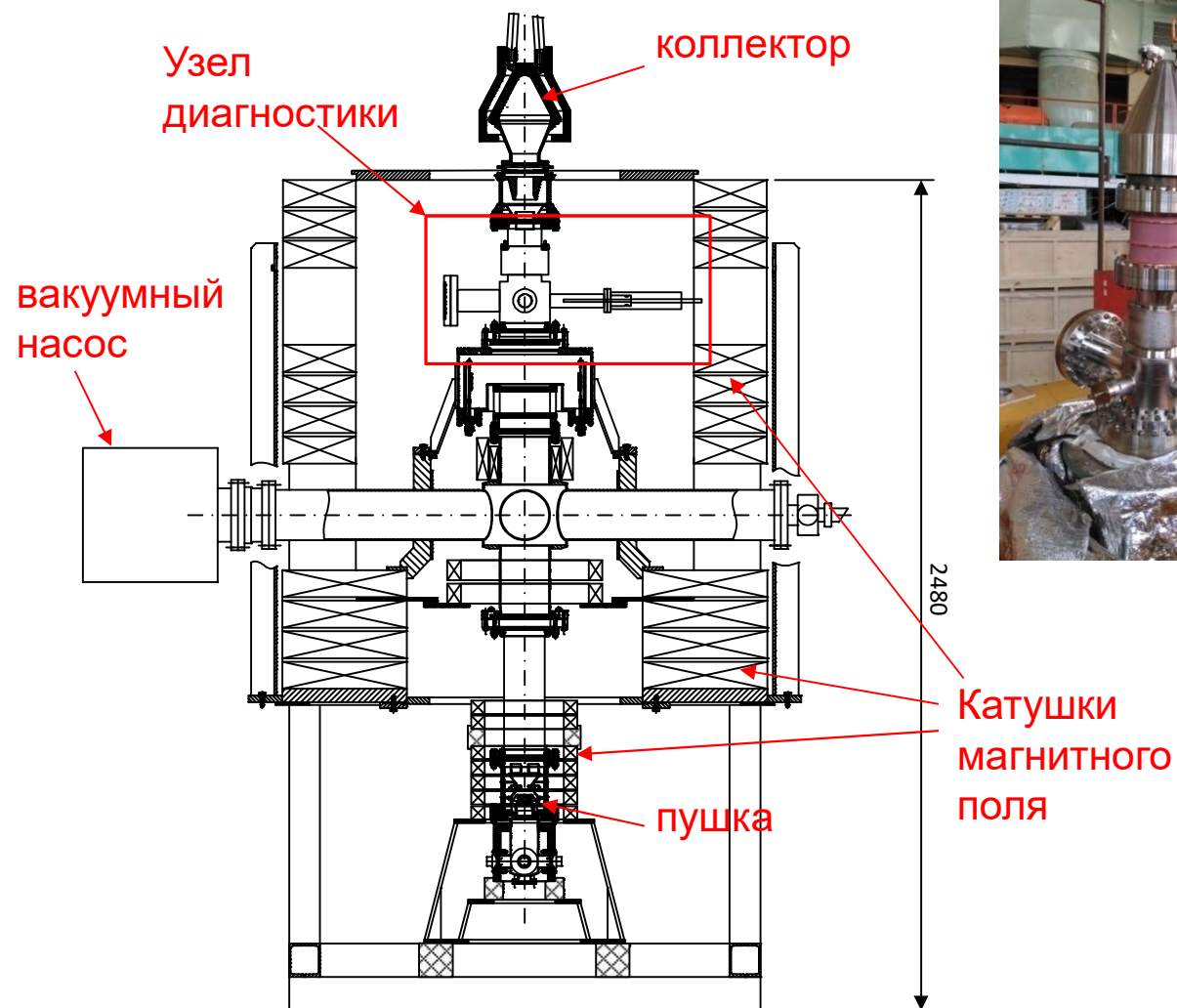
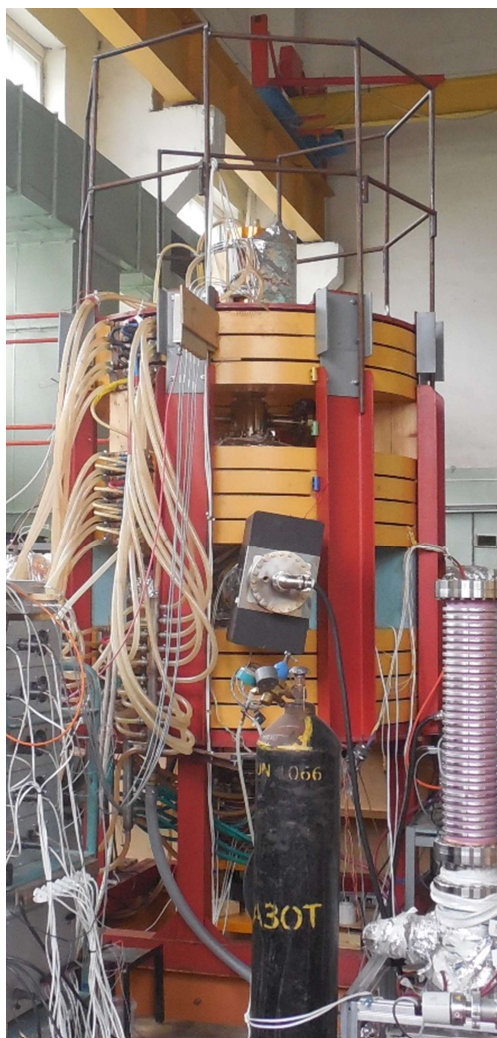


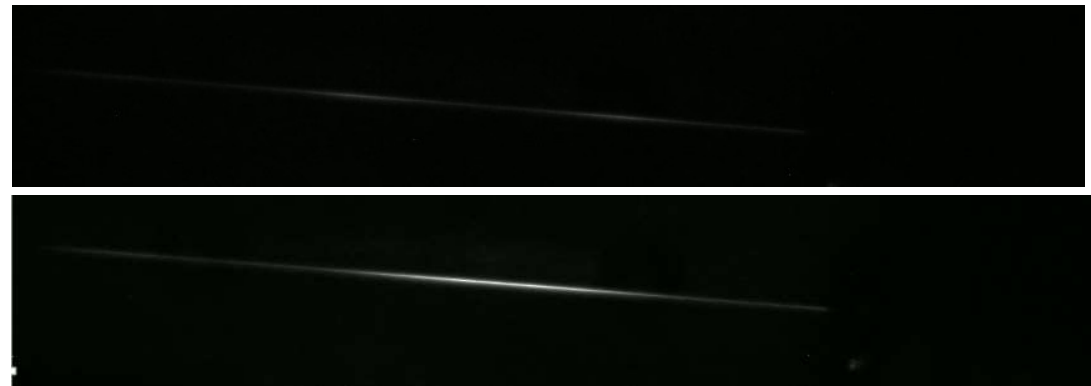
$K3, K11, K20$



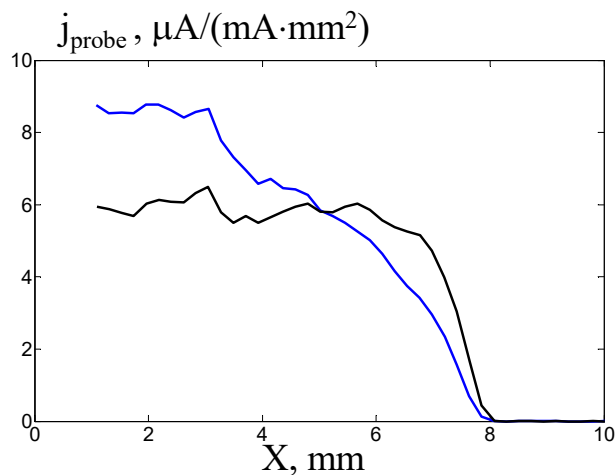


Стенд пушка-коллектор

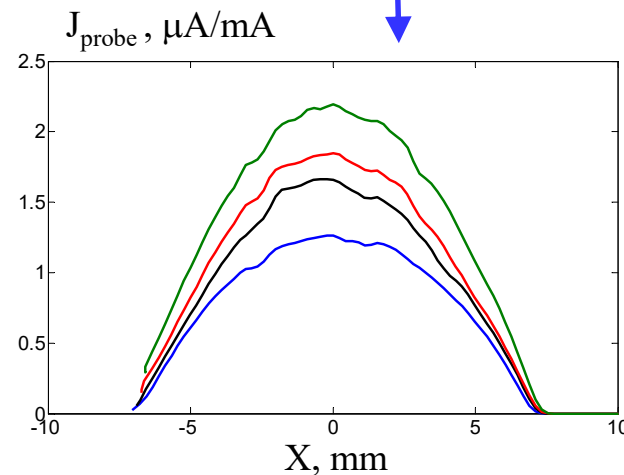




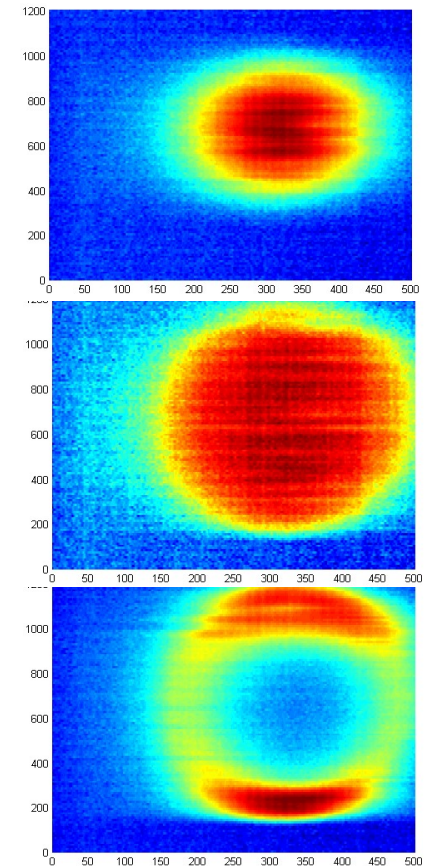
С помощью проволочного датчика для восстановления профиля пучка можно измерять как токооседание с помощью АЦП, так и свечение в инфракрасном диапазоне проволоочки с помощью ПЗС-камеры



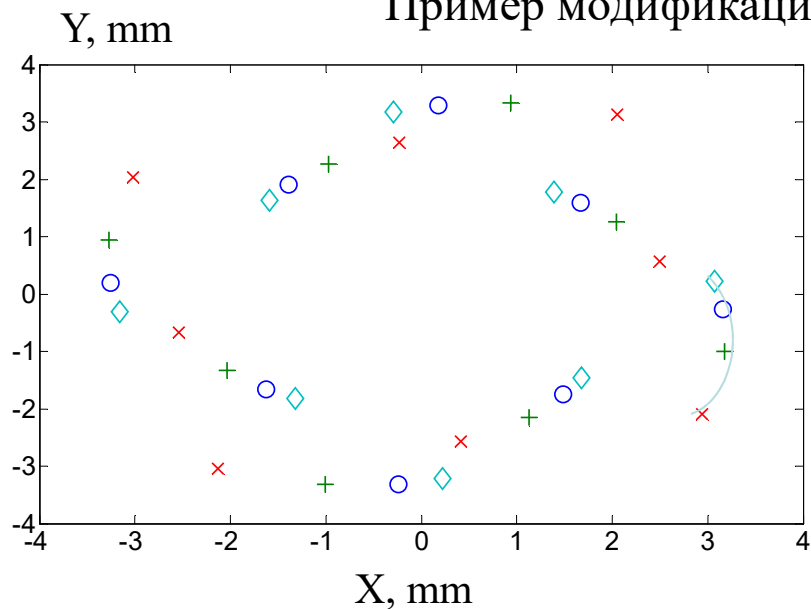
Профили плотности тока пучка для различных режимов работы пушки



Сигнал (μA) в зависимости от положения пучка нормированный на ток пучка (mA)



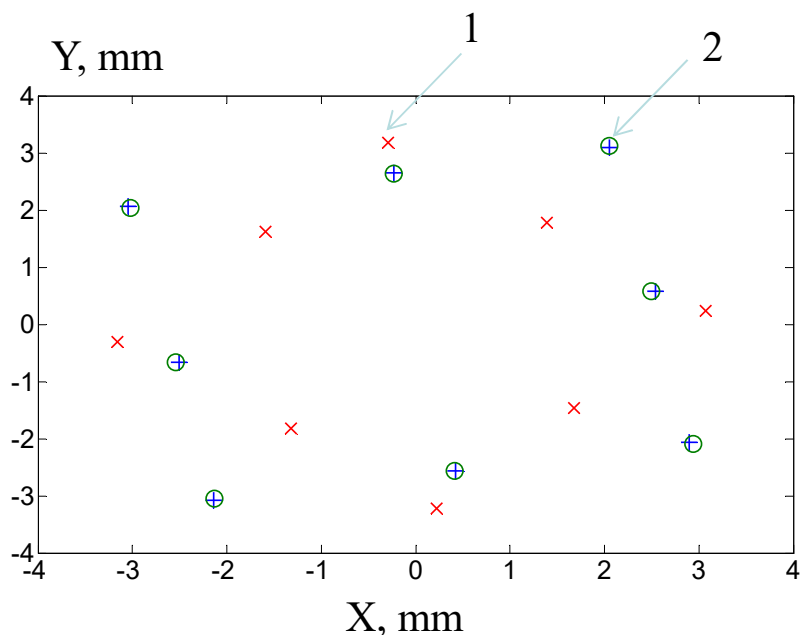
Пример модификации формы при увеличении тока пучка.



Включен отсос ионов путем подачи -200 В на проволочный датчик

Энергия электронов	0.5 кВ
Напряжение сетки	0.01 кВ
Ток менялся за счет изменения напряжения анода	
Значения масок секторов для измерения 1111=0xF=15	
одинарные	1,2,4,8
двойные	3,6,12,9
все сектора включены	15

Je	1.0	4.4	7.5	11.7 мА
Uan	0.24	0.76	1.26	2.0 кВ



Для измерения угла находилась матрица преобразования от измеренных положений секторов при маленьком токе (1 мА, действие пространственного заряда несущественно априори) и при произвольном значении.

1 – начальное положение сектора
2 – конечное и плюс пересчет конечной при помощи матрицы фазового поворота

0.7682 0.6279

-0.6398 0.7788

phi= - 0.69

beta=0.99

alpha=-0.0084

$$M = \begin{bmatrix} \cos(\varphi) - \alpha \sin(\varphi) & \beta \sin(\varphi) \\ \gamma \sin(\varphi) & \cos(\varphi) + \alpha \sin(\varphi) \end{bmatrix}$$

Перед вычислениями параметров поворота (phi, beta, alpha) матрица нормируется на единичный детерминант

COOL'21



Количество участников: **138**

- 118 Foreign (Россия, Китай, Германия, США, Швейцария, Япония, Англия, Индия, Иран, Сербия, Корея, Франция, Испания, Швеция, Турция, Украина и Бразилия)

Number of presentations:

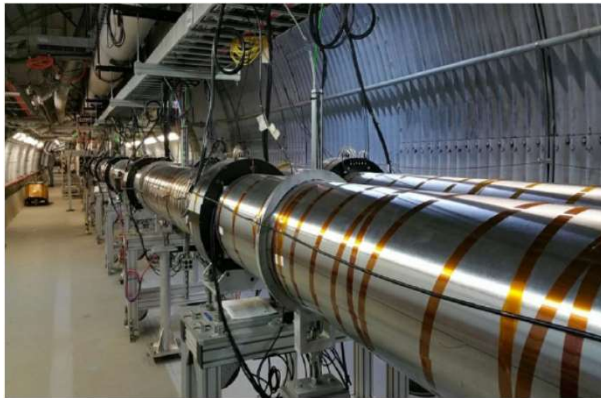
- **24 oral talks**
- **19 posters**
- **Result of conference is published in**
<https://www.jacow.org/>



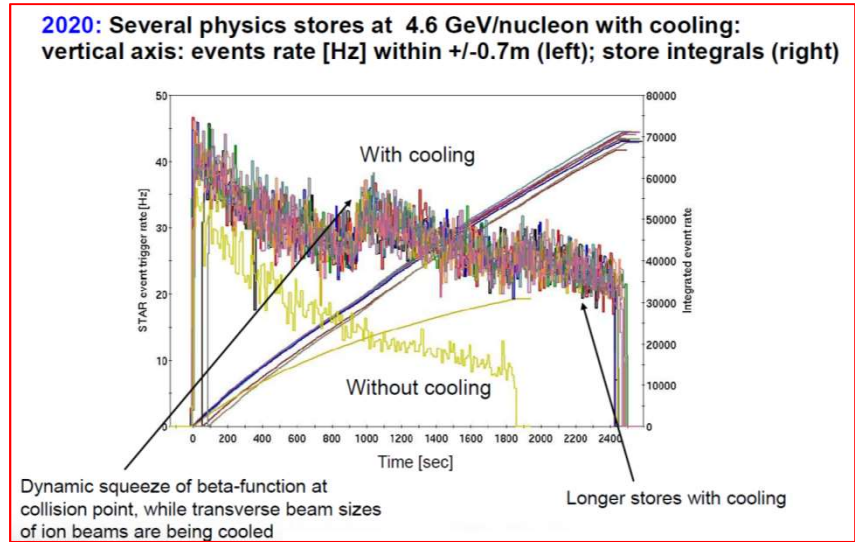
First electron cooling experience in collider

From: A. Fedotov et al., Electron Cooling of Colliding

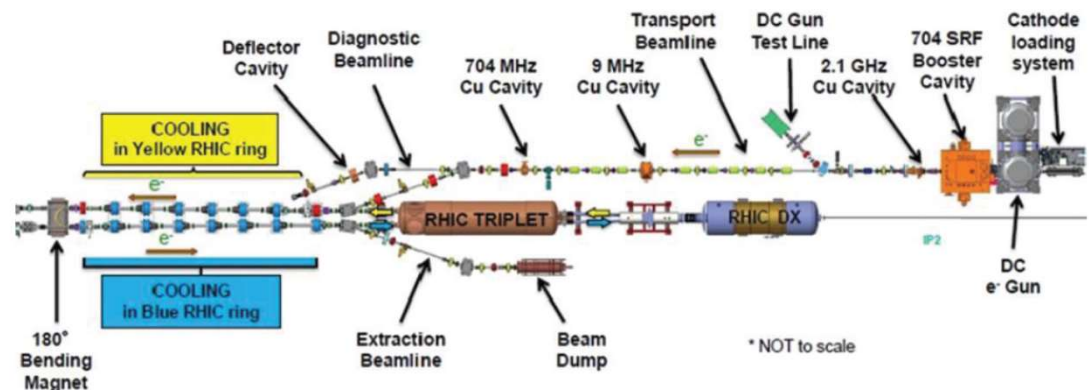
Ion Beams in RHIC: status and perspectives, ECOOL'21, Novosibirsk, October 1-5 2021



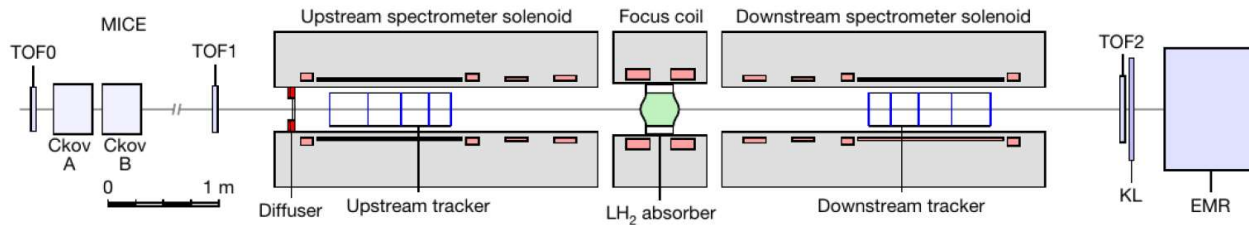
Electron cooler LEReC operated for RHIC physics program using 1.6 MeV kinetic energy electron beam to cool Au ions at 3.85 GeV/nucleon total energy and using 2 MeV electron beam to cool ions at 4.6 GeV/nucleon.



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



Эксперимент Proof-of-Principle в ионизационном охлаждении



- Equilibrium emittance where the effects balance



➤ Cooling Equation:
$$\frac{d\epsilon_{\perp}}{ds} \sim -\frac{1}{\beta^2} \left| \frac{dE_{\mu}}{dz} \right| \frac{\epsilon_{\perp}}{E_{\mu}} + \frac{\beta_{\perp} (13.6 \text{ MeV})^2}{2\beta^3 E_{\mu} m_{\mu} c^2 X_0}$$

Muon Ionization Cooling Experiment (MICE): Results & Prospects

D. Maletic, on behalf of the MICE collaboration

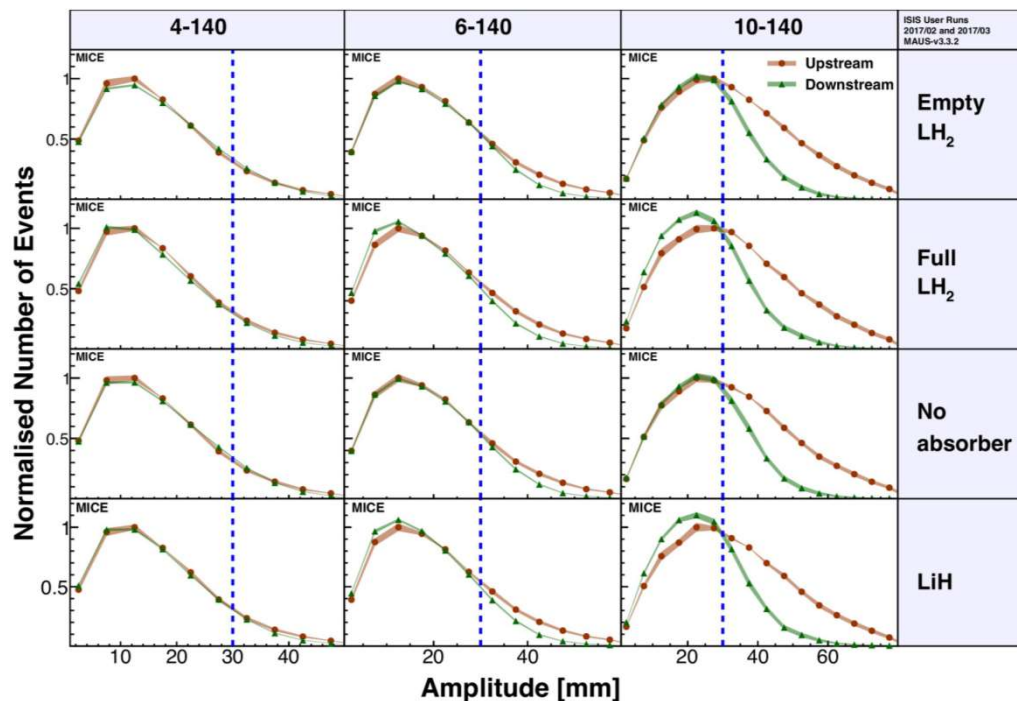
Ionisation cooling lattices share common principles

- Compact lattice
- Low-Z absorbers – LH₂ and LiH
- Superconducting solenoids

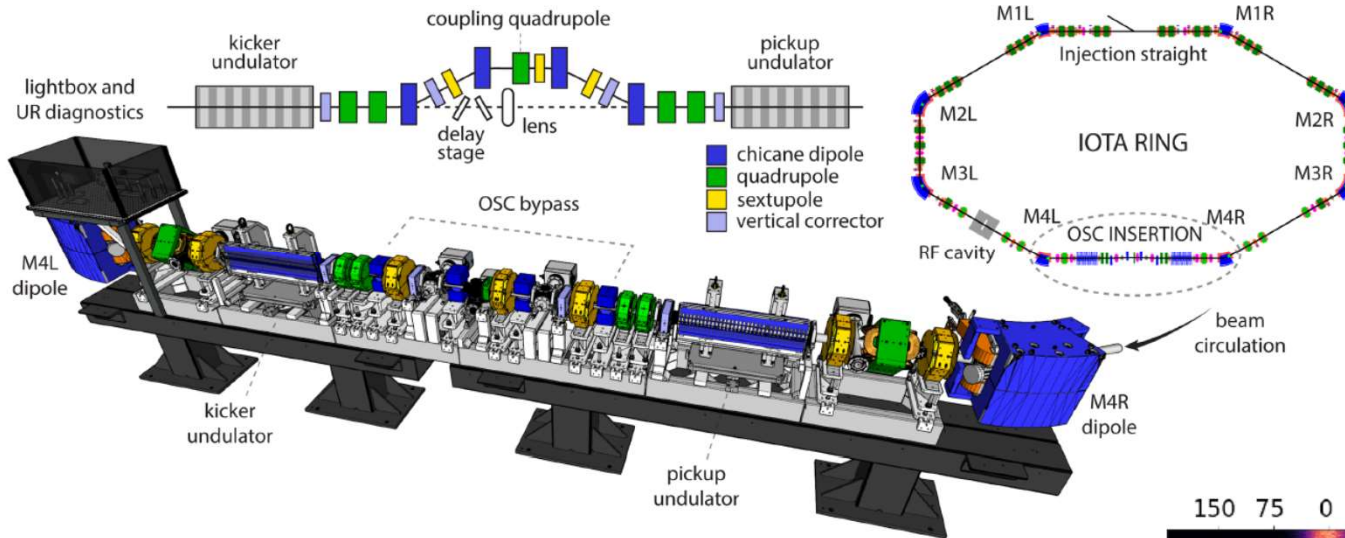
No absorber → slight decrease in number of core muons

With absorber → increase in number of core muons – Cooling signal

Results are shown for beams having nominal momentum of 140 MeV/c and incident RMS emittances of 4, 6 and 10 mm (4-140, 6-140 and 10 - 140 respectively).



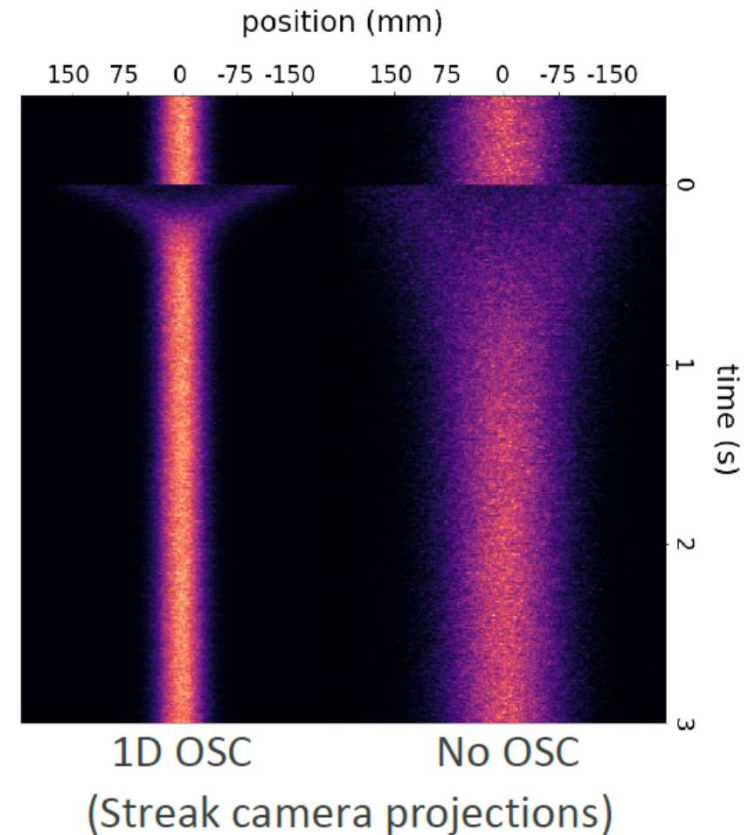
A staged approach for OSC at IOTA



Authors estimate that a single pass amplifier based on amplified spontaneous emission in Cr:ZnSe will only increase the cooling force by a factor of 1.65

- IOTA's OSC was designed to dominate SR damping by $\sim 10\times$ without any optical amplification ($\tau_{ES} \sim 50$ ms, $\tau_{ex/y} \sim 100$ ms)

Design wavelength, λ_r	0.95 μm	2.20 μm
Number of particles	10^3 - 10^6	
Beam kinetic energy	100 MeV	
Delay in the chicane, Δs	0.648 mm	2.00 mm
Offset in the chicane, h	20.0 mm	35.1 mm
Momentum spread (rms), σ_p	1.00×10^{-4}	1.06×10^{-4}
uncoupled x-emittance (rms); no OSC, e	1.02 nm	2.62 nm
Beta function in chicane center, β^*	0.25 m	0.12 m
Disp. in chicane center, D^*	0.27 m	0.48 m
Disp. invariant in chicane center, A^*	0.29 m	1.92 m
Undulator period, λ_u	47.77 cm	110.6 cm
Number of und. periods, N_u	7	16
On-axis undulator field, B_0	2.327 kG	1.005 kG
Maximum energy kick, ΔE	91.1 meV	19.6 meV
Cooling rates (λ_x, λ_s)	(66, 64) s^{-1}	(22, 19) s^{-1}
Cooling ranges (λ_x, λ_s)	(5.61, 4.73)	(3.97, 5.7)
Sync. rad. Damping rates (x, s)	(0.5, 1.02) s^{-1}	(0.53, 0.91) s^{-1}



Спасибо за внимание