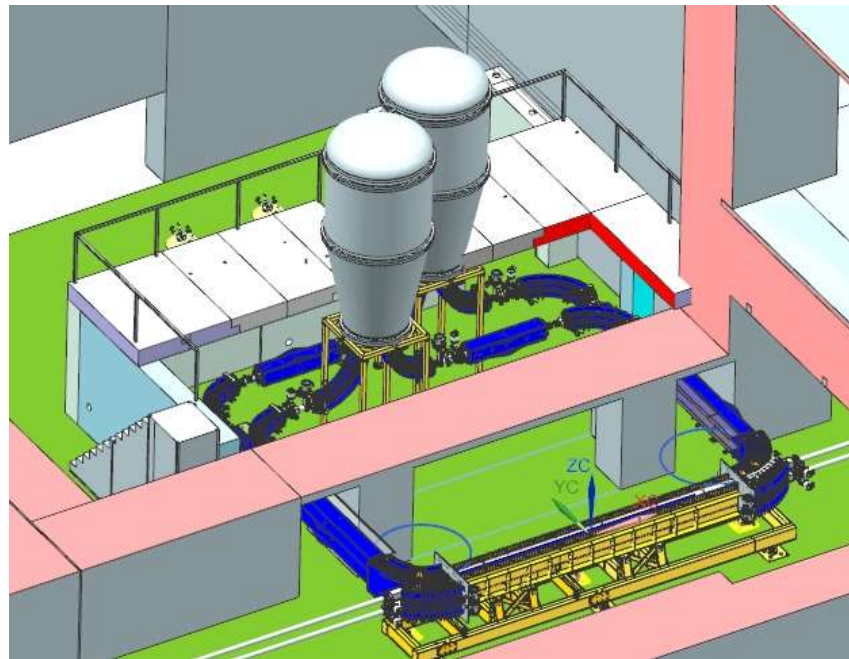


# Электронное охлаждение

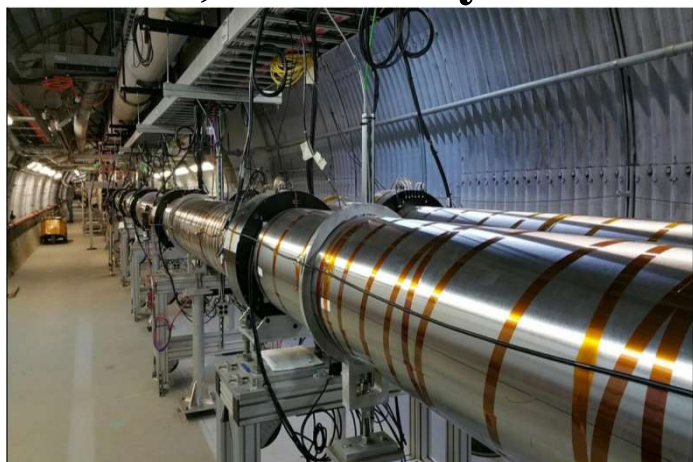
*В.Б.Рева и команда ИЯФ СО РАН*



**COSY, Germany**



***NICA, BINP&JINR, Russia***



**LERec, cooling section, BNL**

*Научная сессия  
ИЯФ СО РАН,  
4 февраля, 2021*

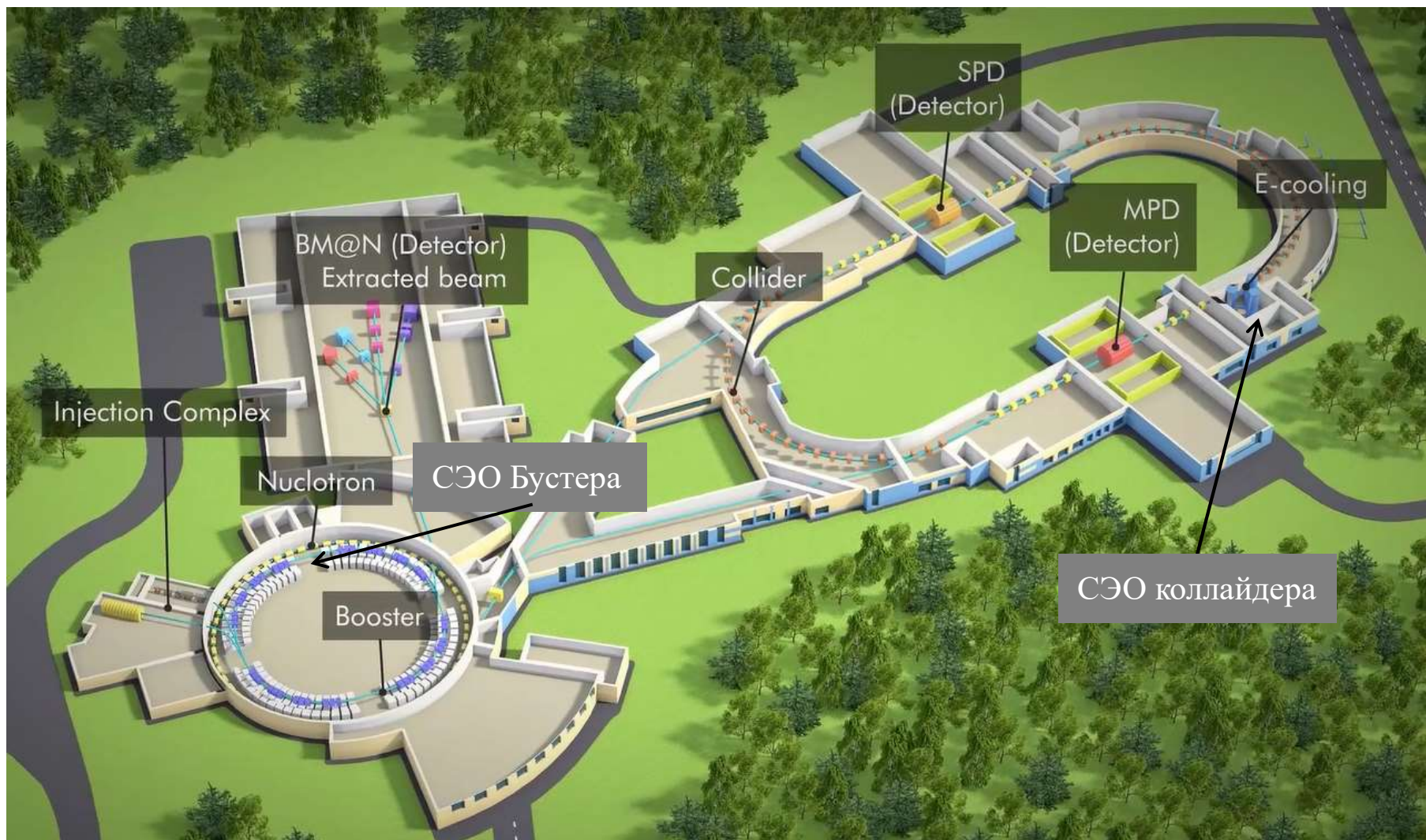


**FERMILAB, USA**

# Проект НИКА

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



# Electron Cooling System (ECS) for NICA Booster commissioning (MAC-2020)

**A.Kobets, JINR, Dubna**

The electron cooler for NICA Booster was designed, fabricated, mounted and commissioned preliminary by BINP group of Prof. V. Parkhomchuk in 2015 – 2017.

Since 2019 July the ECS commissioning was continued by the JINR personnel.

The ECS was working more than 100 hour during this time.

Parameters of operating modes were obtained for different energies.

Energy: 1.3 – 30.0 keV

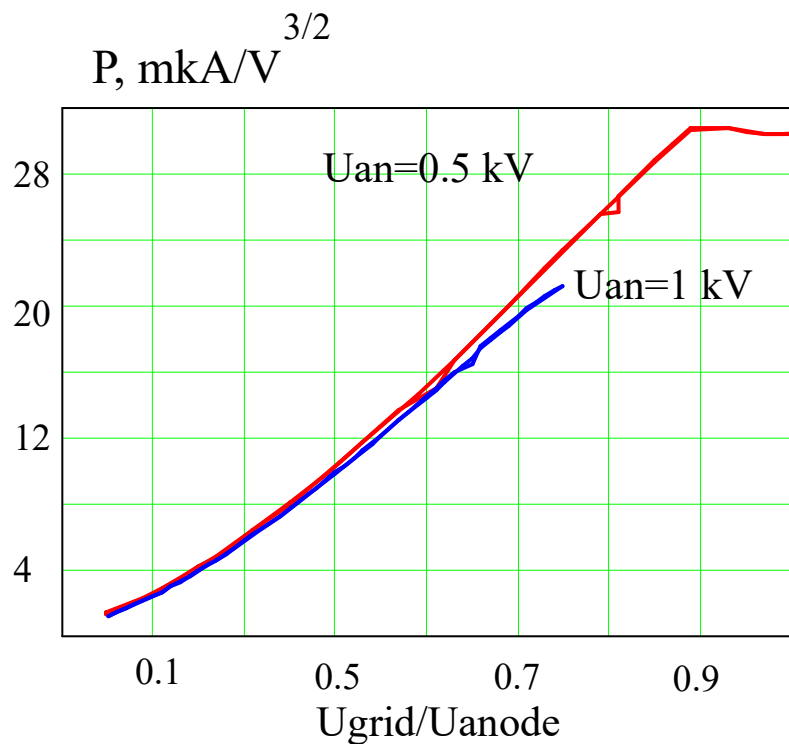
Maximum current:

(not for all energy values) > 900 mA



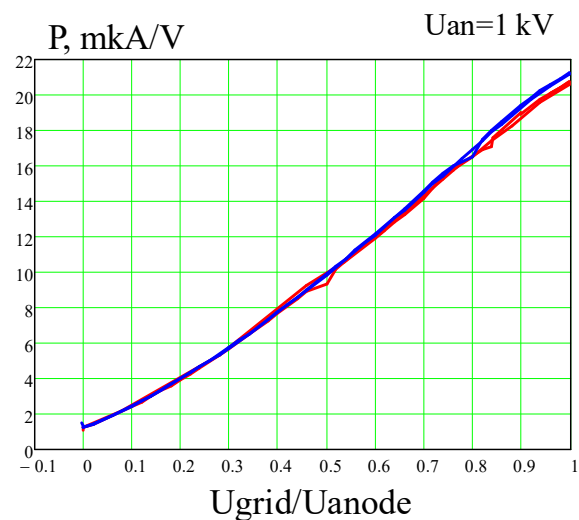
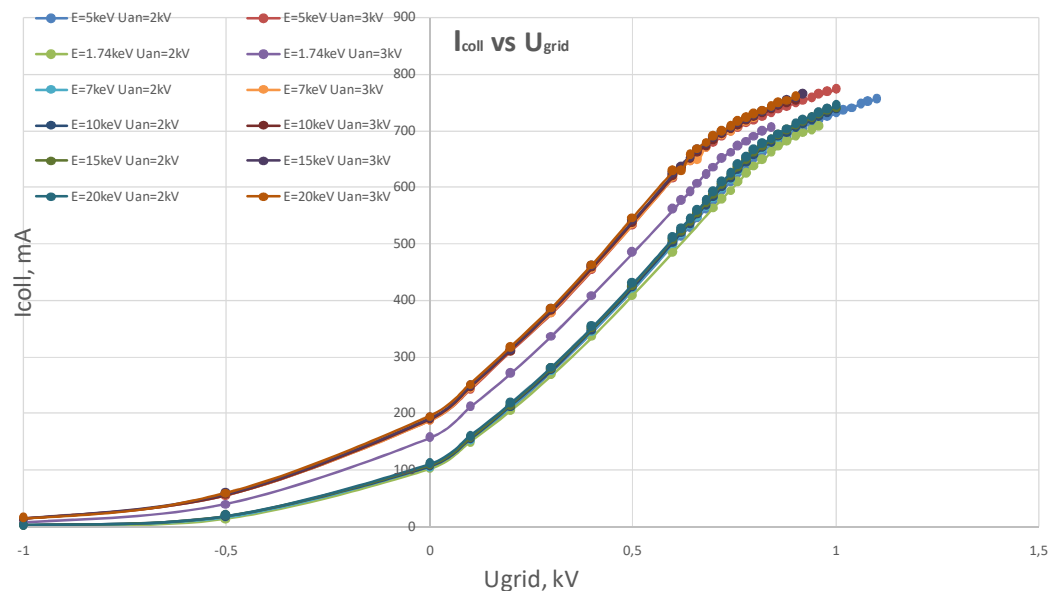
# Electron Cooling System commissioning

Зависимость тока электронного пучка от напряжения на управляющем электроде



Зависимость первеанса пушки от соотношения напряжений управляющий электрод/анод

*Зависимость первеанса пушки от соотношения напряжений управляющий электрод/анод при различных накалах*



В эксперименте по электронному охлаждению ионов  $\text{He}^{1+}$  единственными диагностическими приборами, позволявшими наблюдать эффект охлаждения, были *ионизационный профилометр А.А.Балдина* и *параметрический измеритель тока ионного пучка («трансформатор тока»)*.

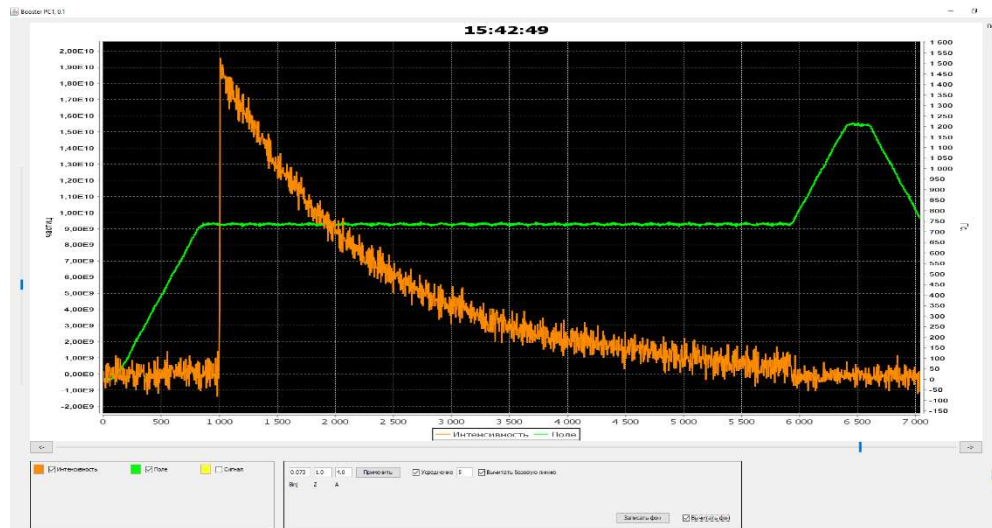
### 1. Параметры эксперимента:

|                                |                  |
|--------------------------------|------------------|
| Тип ионов                      | $\text{He}^{1+}$ |
| Энергия ионов, Мев/и           | 3.2              |
| Энергия электронов, кэВ        | 1.73 – 1.8       |
| Ток электронного пучка, А      | 0.1 – 0.2        |
| Диаметр электронного пучка, мм | 28               |
| Магнитное поле СЭО, Гс         | 100 - 200        |

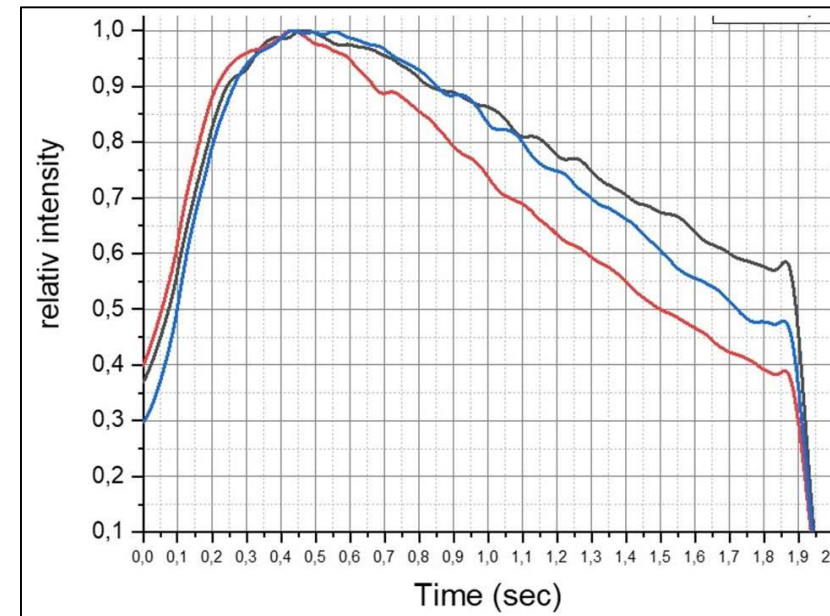
## Первые эксперименты с участием ионного и электронного пучков

### 2. Регистрация тока пучка ионизационным профилометром.

Суммировалась скорость счёта всех каналов МКП, регистрирующих распределение плотности пучка по вертикали (*relativecounts* – RC), и измерялась зависимость RC(t). Горизонтальные каналы, к сожалению, не работали. Затем производилось суммирование результатов по нескольким циклам инжекции  $\langle \text{RC}(t) \rangle$



Сигнал РСТ при циркуляции на столе МП на энергии инжекции. Потери пучка  $\text{He}^{1+}$ , 3,2МэВ/нуклон в течение 6 секунд позволяют сделать оценки интегрального давления в пучковой камере на уровне  $2-3 \cdot 10^{-10}$ Торр



$\langle \text{RC}(t) \rangle$  для различных значений энергии электронов (кэВ) Кривые: чёрная – 1.82кэВ, красная – 1.76 кэВ, синяя – 1.72 кэВ

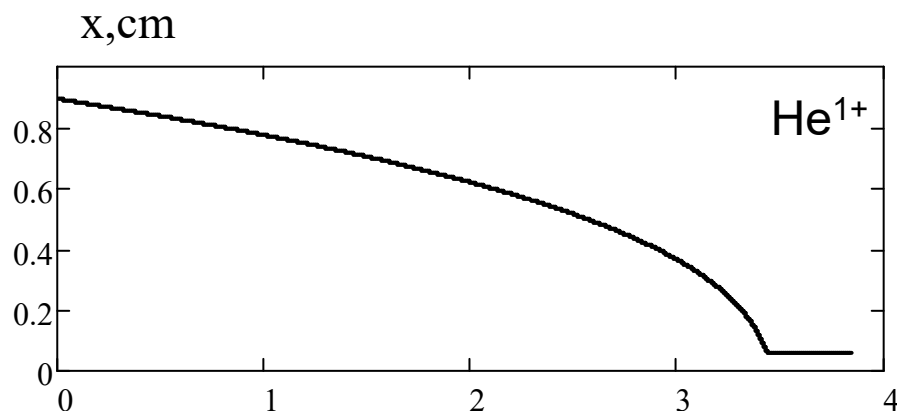
| Энергия<br>MeV/u | частица 0        | частица 1        | вещество                   | $\sigma$<br>$10^{-16} \text{ cm}^{-2}$ | Энергия<br>MeV/u | $\sigma$<br>$10^{-16} \text{ cm}^{-2}$ |
|------------------|------------------|------------------|----------------------------|--|------------------|--|
|                  | He <sup>1+</sup> | He <sup>2+</sup> | H ( $Z_t=1$ )              |  | 3.2              | 0.01                                   |
| 2.1              | He <sup>1+</sup> | He <sup>2+</sup> | He ( $Z_t=2$ )             | 0.044                                  | 3.2              | 0.03                                   |
| 2.1              | He <sup>1+</sup> | He <sup>2+</sup> | N <sub>2</sub> ( $Z_t=7$ ) | 0.21                                   | 3.2              | 0.14                                   |
| 2.1              | He <sup>1+</sup> | He <sup>2+</sup> | Ar ( $Z_t=18$ )            | 0.48                                   | 3.2              | 0.32                                   |
|                  |                  |                  |                            |  |                  |  |
| 0.334            | He <sup>1+</sup> | He <sup>0</sup>  | He ( $Z_t=2$ )             | 0.018                                  |                  |  |
| 0.334            | He <sup>1+</sup> | He <sup>0</sup>  | N <sub>2</sub> ( $Z_t=7$ ) | 0.017                                  |                  |  |
| 0.334            | He <sup>1+</sup> | He <sup>0</sup>  | Ar ( $Z_t=18$ )            | 0.018                                  |                  |  |

Оценка времени жизни 5-100 с (в зависимости от сорта ионов) при вакууме  $10^{-10}$  мбар

И.С.Дмитриев, Я.А. Теплова, Ю.А. Белкова, Н.В. Новиков, Ю.А. Файнберг  
 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СЕЧЕНИЯ ПОТЕРИ И ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ В ИОН –  
 АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЯХ, Препринт НИИЯФ МГУ No 2008-2/838

Видно, что для однозарядного гелия наиболее вероятно погибнуть потеряв свой второй электрон. Сечение перезарядки в нейтральный атом мало при энергии 0.33 МэВ и, из общих соображений, будет падать с ростом энергии.

## Оценки времени охлаждения для однозарядных ионов гелия



$$E_i = 3.2 \text{ MeV/u}$$

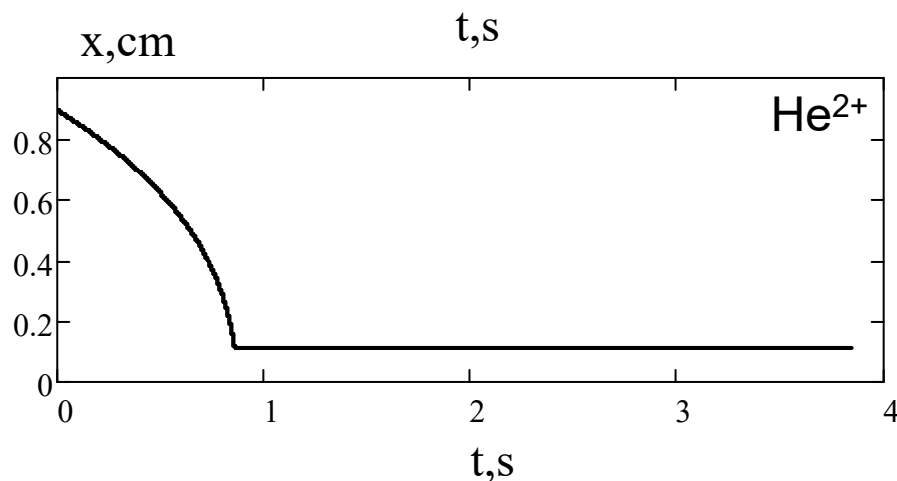
$$E_e = 1.74 \text{ keV}$$

$$J_e = 150 \text{ mA}$$

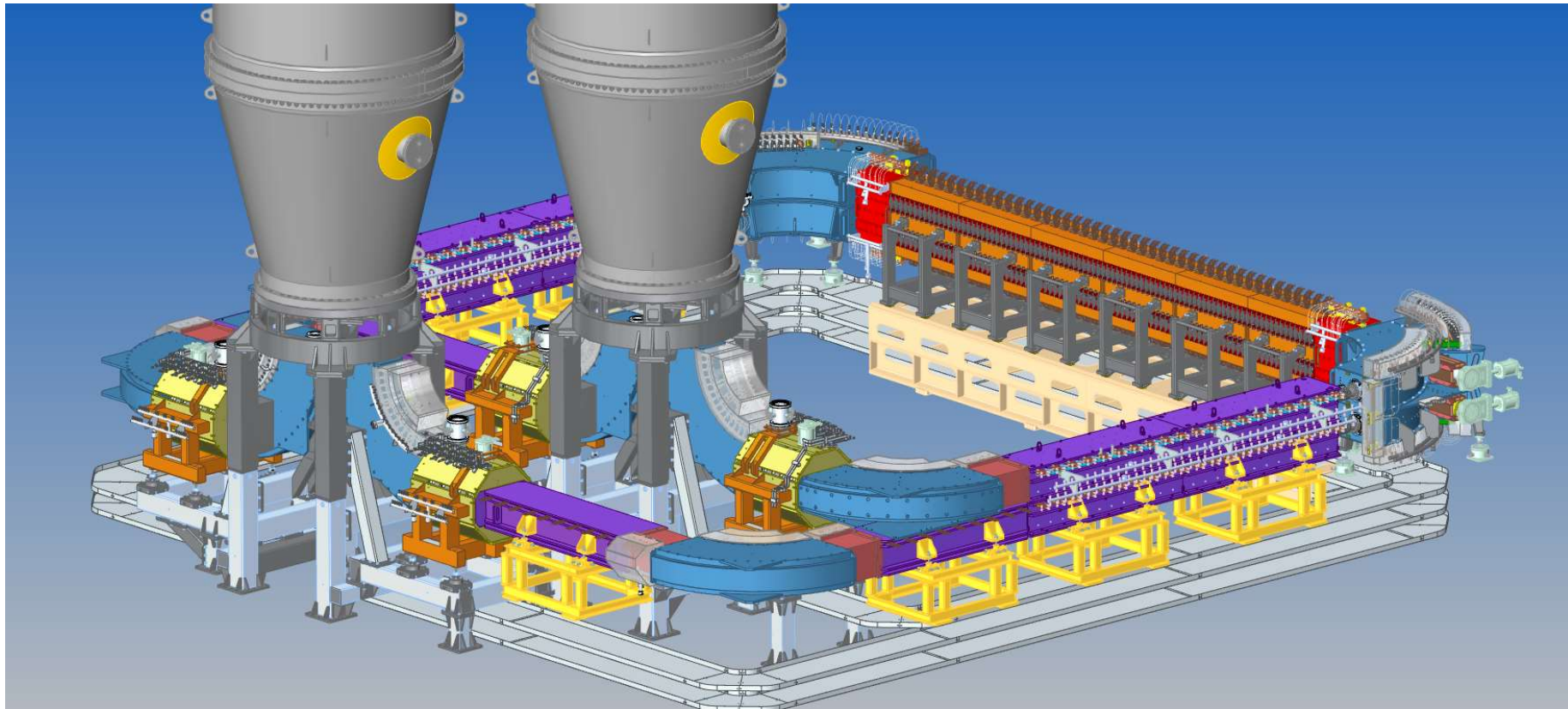
$$B = 1000 \text{ G}$$

$$L_{\text{cool}} = 200 \text{ cm}$$

$$a_e = 1.5 \text{ cm}$$



Если считать, что вакуумные условия определяют время жизни, то, наверно, для экспериментов по охлаждению  $\text{He}^{2+}$  - был бы предпочтительнее, так как время жизни связанное с потерей электронов исчезнет (нечего терять). Появится время жизни по перезарядке, но скорей всего существенно что-то оно не испортит. А сила трения существенно возрастет.

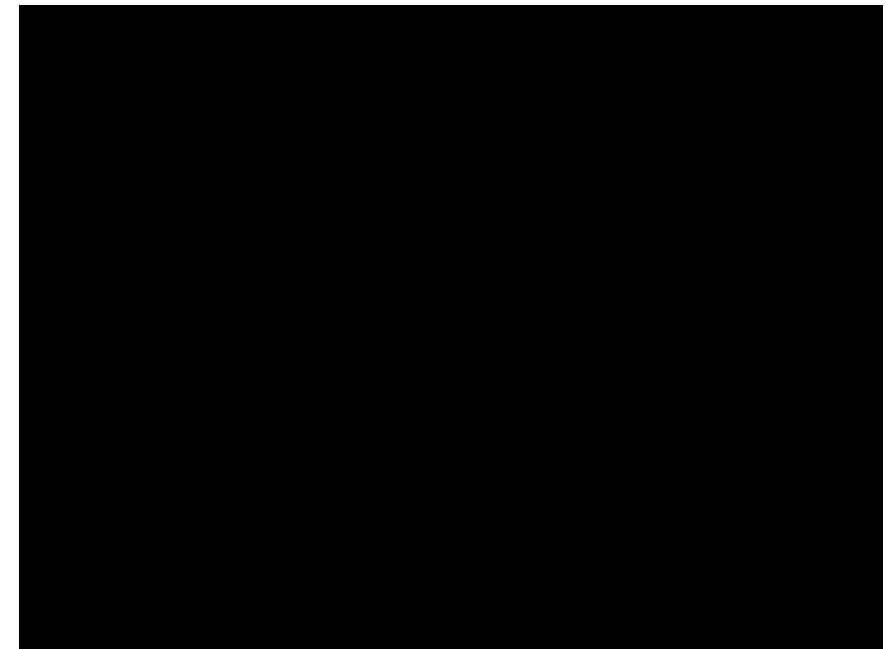
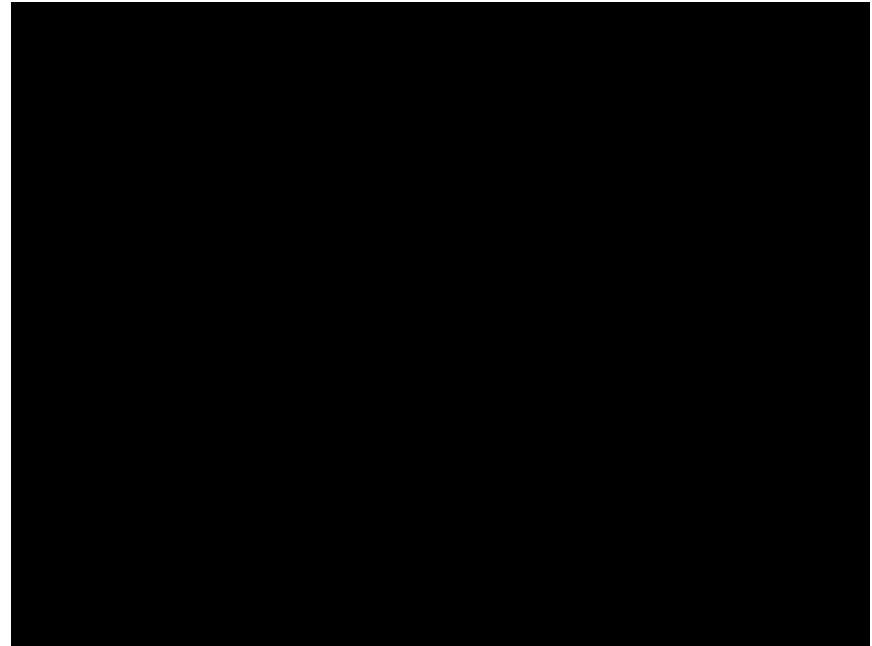


| Parameter                               | Value           |
|---|-----------------|
| Область энергии                         | 0.2÷2.5 МэВ     |
| Число секций охлаждения                 | 2               |
| Стабильность энергии ( $\Delta U/U$ )   | $\leq 10^{-4}$  |
| Электронный ток                         | 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     |

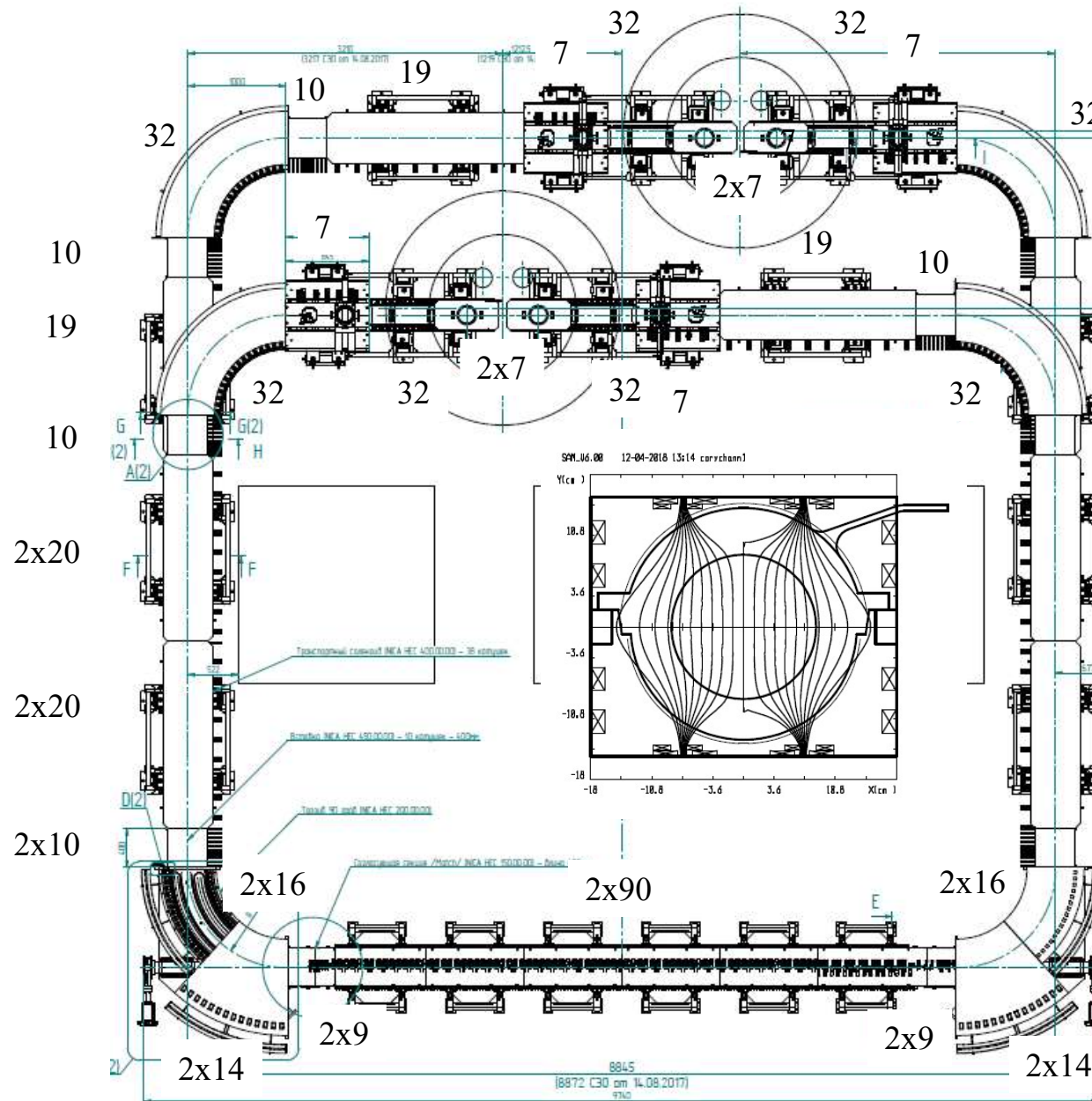
## Электронное охлаждение на высокую энергию для коллайдера



<http://nucloweb.jinr.ru/nucloserv/205corp.htm>



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



|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| Longitudinal magnetic field |     |
| 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 –      | 90  |
| HV Terminal –               | 23  |

**Total 1145**

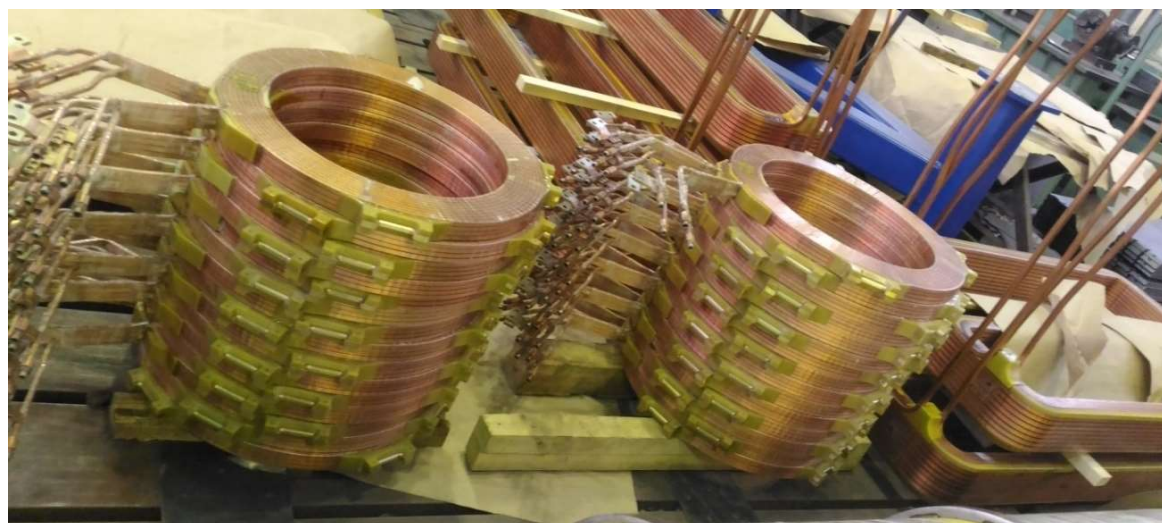
**Type of coil types for longitudinal magnetic field is about 20**

**And plus many correctors coils of the vertical and horizontal magnetic fields**

# Больше катушек хороших и разных



# И снова катушки, катушки, катушки ....



# Первые магнитные элементы



# Элементы электростатического ускорителя в работе



# Мощные источники питания магнитного поля

| Источники | Элементы магнит. системы       | Число элем-ов | I (A) | U* (B) |  |  | P* (кВт) |
|-----------|--------------------------------|---------------|-------|--------|--|--|----------|
| IST-1up   | Cool (up)                      | 1             | 221   | 275    |  |  | 61       |
| IST-2a-up | Tor90-1 (up)                   | 1             | 710   | 27.9   |  |  | 19.8     |
| IST-2b-up | Tor90-2 (up)                   | 1             | 710   | 27.9   |  |  | 19.8     |
| IST-3up   | $\sum$ SBend (up)              | 4             | 195   | 161    |  |  | 31.5     |
| IST-4up   | $\sum$ Line08 (up)             | 2             | 250   | 77.2   |  |  | 19.3     |
| IST-7up   | $\sum$ Line2 (up)              | 5             | 135   | 223    |  |  | 30.1     |
| IST-5up   | $\sum$ BBend (up)              | 4             | 295   | 25.2   |  |  | 7.45     |
| IST-9up   | $\sum$ BTor90 (up)             | 2             | 295   | 12.6   |  |  | 3.72     |
| IST-6up   | $\sum$ Ins+ $\sum$ InsMat (up) | 5+2           | 320   | 68.4   |  |  | 21.9     |
| IST-8up   | $\sum$ Match (up)              | 2             | 440   | 17.2   |  |  | 7.56     |
| IST-10up  | Idip-1 (up)                    | 1             | 440   | 11.2   |  |  | 4.93     |
| IST-11up  | Idip-2 (up)                    | 1             | 440   | 11.2   |  |  | 4.93     |



| Источники | Элементы магнит. системы       | Число элем-ов | I (A) | U* (B) |  |  | P* (кВт) |
|-----------|--------------------------------|---------------|-------|--------|--|--|----------|
| IST-1dn   | Cool (dn)                      | 1             | 221   | 275    |  |  | 61       |
| IST-2a-dn | Tor90-1 (dn)                   | 1             | 710   | 27.9   |  |  | 19.8     |
| IST-2b-dn | Tor90-2 (dn)                   | 1             | 710   | 27.9   |  |  | 19.8     |
| IST-3dn   | $\sum$ SBend (dn)              | 4             | 195   | 161    |  |  | 31.5     |
| IST-4dn   | $\sum$ Line08 (dn)             | 2             | 250   | 77.2   |  |  | 19.3     |
| IST-7dn   | $\sum$ Line2 (dn)              | 5+2           | 135   | 303.3  |  |  | 41.0     |
| IST-5dn   | $\sum$ BBend (dn)              | 4             | 295   | 25.2   |  |  | 7.45     |
| IST-9dn   | $\sum$ BTor90 (dn)             | 2             | 295   | 12.6   |  |  | 3.72     |
| IST-6dn   | $\sum$ Ins+ $\sum$ InsMat (dn) | 5+2           | 320   | 68.4   |  |  | 21.9     |
| IST-8dn   | $\sum$ Match (dn)              | 2             | 440   | 17.2   |  |  | 7.56     |
| IST-10dn  | Idip-1 (dn)                    | 1             | 440   | 11.2   |  |  | 4.93     |
| IST-11dn  | Idip-2 (dn)                    | 1             | 440   | 11.2   |  |  | 4.93     |



# Источники питания корректоров

Корректоры:

| № | Корректоры:   |  | G, kg | Число катушек и их номер            | Положение            | I <sub>corr</sub> , А | R <sub>corr</sub> , ? | R <sub>route</sub> , ? | U <sub>corr</sub> , V | U <sub>route</sub> , V | U <sub>tot</sub> , V | P <sub>tot</sub> , W | Источники питания            | Число корр-в |
|---|---|--|-------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------|----------------------|------------------------------|--------------|
|   | Обозначение   | Название   |       |                                     |                      |                       |                       |                        |                       |                        |                      |                      |                              |              |
| 1 | Coolhor1-u ÷ Coolhor6-u<br>Coolhor1-d ÷ Coolhor6-d                        | метровый корректор горизонтального поля соленоида охлаждения | 17.7  | 1а, 1в по две; 1б, 1г по четыре     | Cool (up и down)     | 6                     | 6,0                   | 1,4                    | 36                    | 8,4                    | 44,4                 | 266                  | MPS-6-60<br>2 Crate × 1,8 kW | 2×6=12       |
| 2 | Coolver1-u ÷ Coolver6-u<br>Coolver1-d ÷ Coolver6-d                        | метровый корректор вертикального поля соленоида охлаждения   | 14.4  | 2а, 2б по две; 2в, 2г, 2д по четыре | Cool (up и down)     | 6                     | 4,8                   | 1,4                    | 29                    | 8,4                    | 37,4                 | 224                  | MPS-6-60<br>2 Crate × 1,8 kW | 2×6=12       |
| 3 | Match1 hor-u,<br>Match2hor -u<br>Match1 hor -d,<br>Match2hor -d           | корректор 1 горизонтального поля Match1-2                    | 3.9   | 3а, 3б по две;                      | Match (up и down)    | 6                     | 1,3                   | 1,4                    | 8                     | 8,4                    | 16,4                 | 98                   | MPS-6-24<br>½ Crate × 1 kW   | 2×2=4        |
| 4 | InsMatch1 hor-u<br>InsMatch2hor -u<br>InsMatch1 hor -d<br>InsMatch2hor -d | корректор 2 горизонтального поля Match1-2                    | 3.3   | 4а, 4б по две;                      | InsMatch (up и down) | 6                     | 1,1                   | 1,4                    | 6,5                   | 8,4                    | 14,9                 | 89                   | MPS-6-24<br>½ Crate × 1 kW   | 2×2=4        |
| 5 | Match1 ver-u,<br>Match2ver -u<br>Match1 ver -d,<br>Match2ver -d           | корректор 1 вертикального поля Match1-2                      | 3.2   | 5а, 5б по две; 5в по четыре         | Match (up и down)    | 6                     | 1,1                   | 1,4                    | 6,5                   | 8,4                    | 14,9                 | 89                   | MPS-6-24<br>½ Crate × 1 kW   | 2×2=4        |



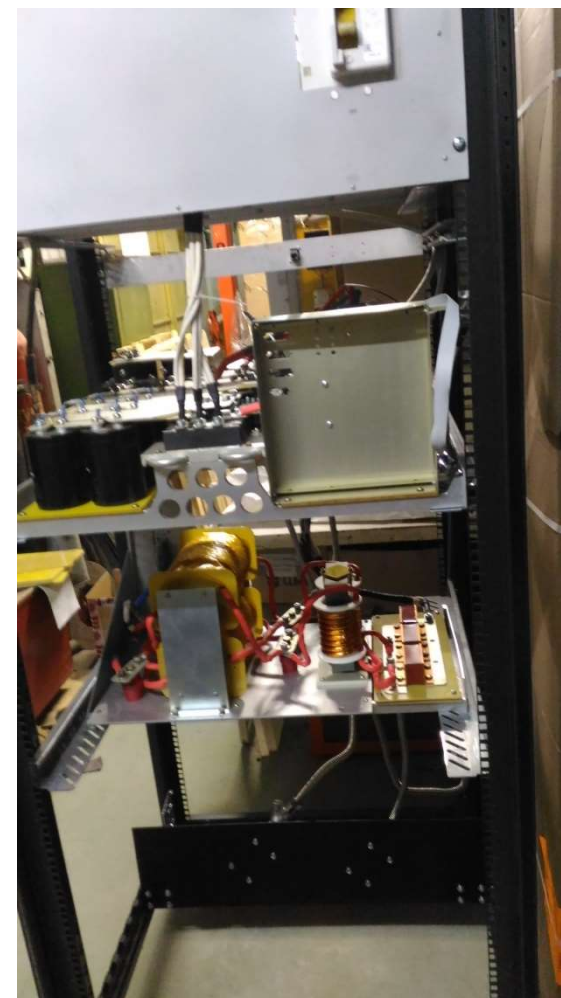
1. Модульная вставка MPS-6 ..... 112 + 12 = 124 pcs
2. Крейт MPS-6-24..... 4 + 1 = 5 pcs
3. Крейт MPS-6-60..... 5 + 1 = 6 pcs
4. Крейт MPS-6-140..... 9 + 1 = 10 pcs
5. Модуль MPS-20-50 ..... 48 + 5 = 53 pcs



И НЕ ТОЛЬКО



коллекторный источник питания



Стойка питания каскадного трансформатора

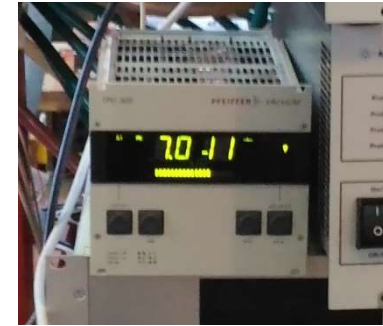


шлюз TCP-CAN



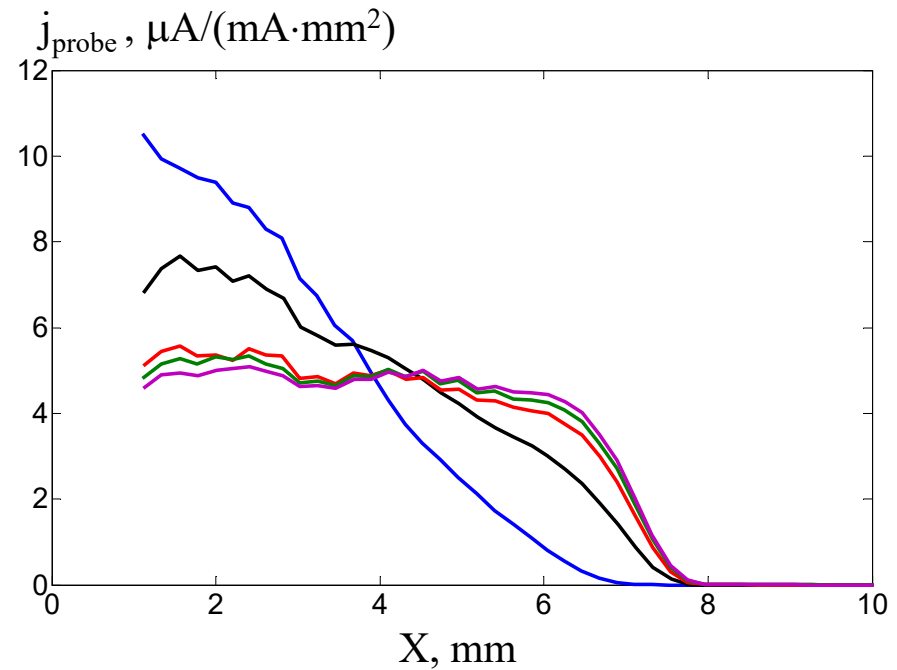
блоки ВРМ

# Первые профили пучка на прототипе электронной пушки для коллайдера СЭО



## Параметры режимов

|                          |                       |               |
|--------------------------|-----------------------|---------------|
| 1. $U_{grid} = -0.17$ kV | $U_{anode} = 1.47$ kV | $J = 2.51$ mA |
| 2. $U_{grid} = 0.0$ kV   | $U_{anode} = 0.78$ kV | $J = 4.68$ mA |
| 3. $U_{grid} = 0.11$ kV  | $U_{anode} = 0.23$ kV | $J = 5.0$ mA  |
| 4. $U_{grid} = 0.14$ kV  | $U_{anode} = 0.13$ kV | $J = 5.5$ mA  |
| 5. $U_{grid} = 0.16$ kV  | $U_{anode} = 0.06$ kV | $J = 5.5$ mA  |

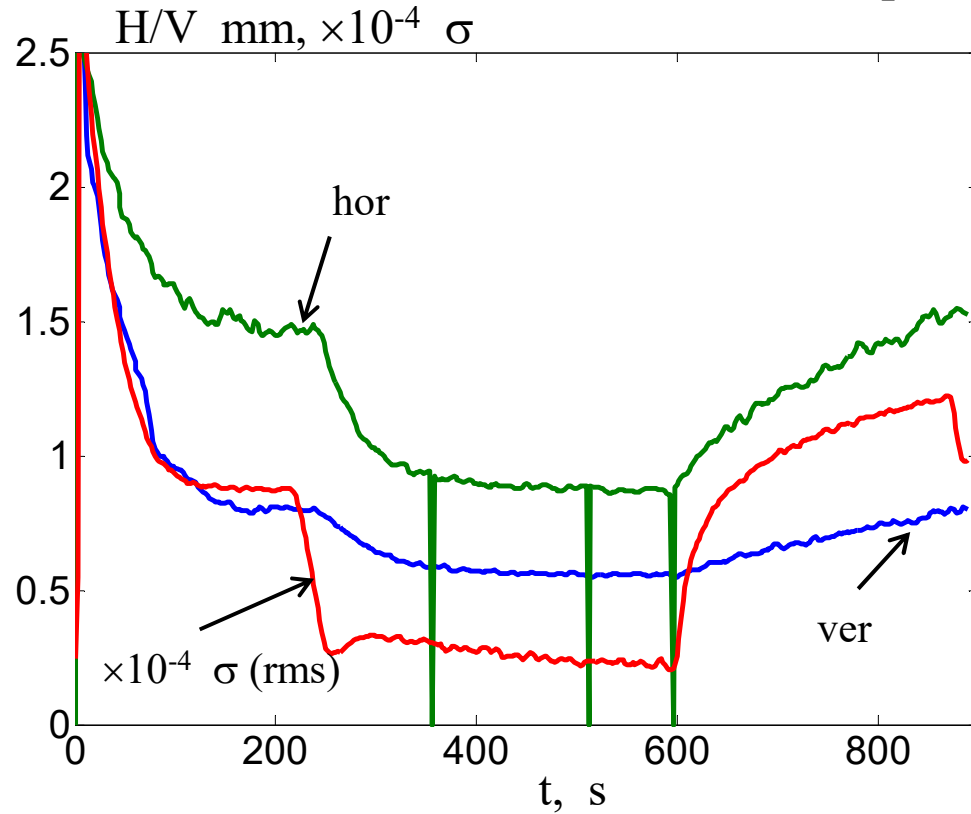


Профили плотности тока пучка для различных режимов работы пушки

# Совместная работа электронного и стохастического охлаждения

$J_e=600$  mA,  $E_e=907.9$  kV,  $N_p=3 \cdot 10^8$

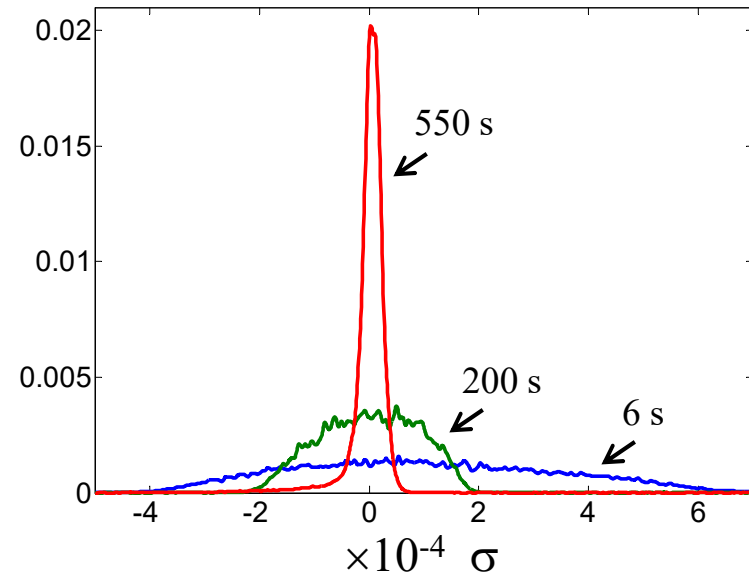
*COSY experience*



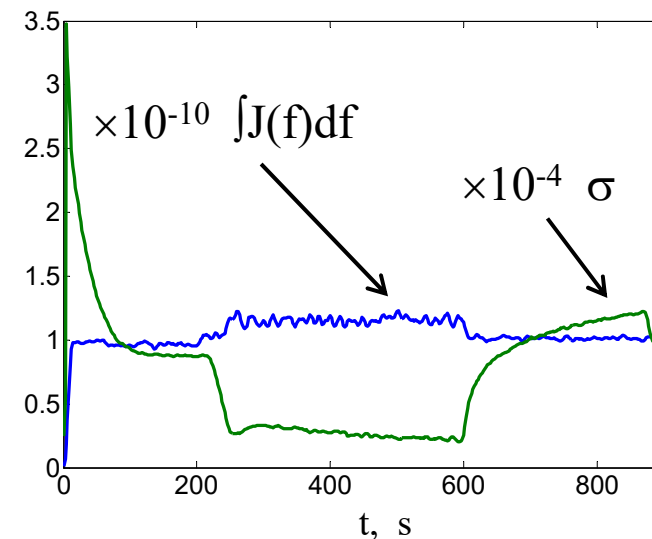
000 – вкл. поперечного и продольного стох. охлаждений  
 200 – начало электронного охлаждения с током 600 мА,  
 выкл. обоих типов стохастического охлаждений  
 600 – выкл. электронного тока

*Протонный пучок намного быстрее охлаждается будучи  
 предварительно охлажден стохастическим охлаждением*

$F(\sigma)$



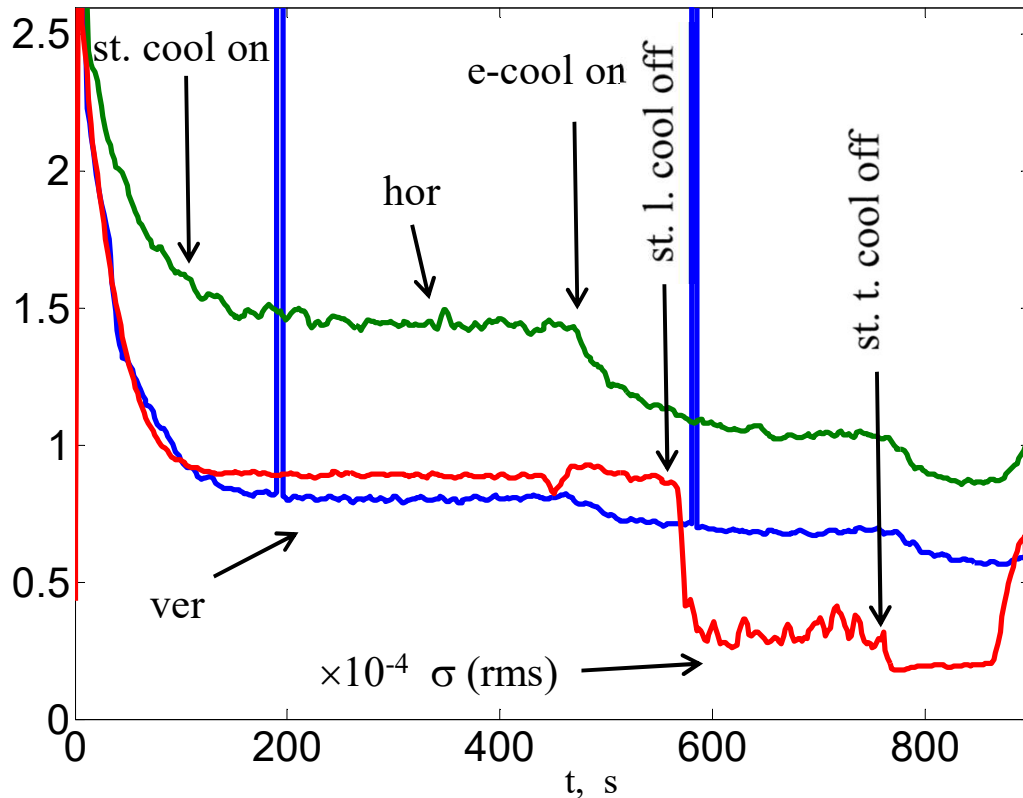
Функция распределения частиц по продольному импульсу, полученная с помощью спектроанализатора Шотки шумов в различные моменты времени



# Еще немного физики *COSY experience*

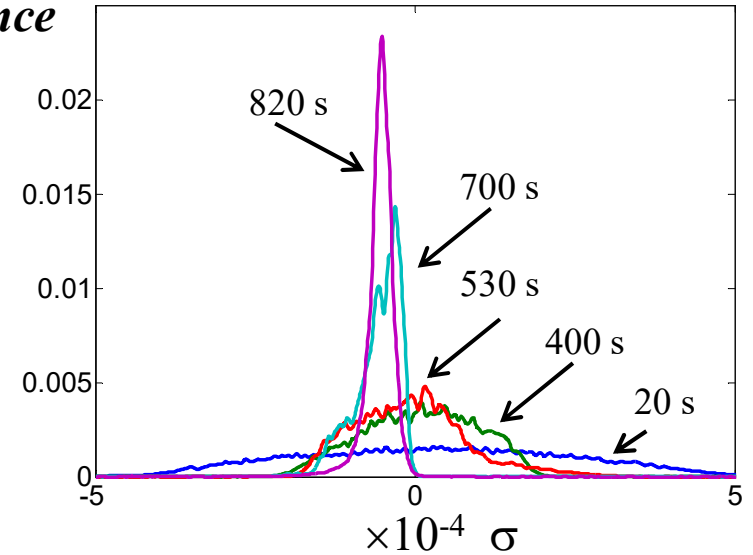
Совместное действие электронного и стохастического охладений  
 $I_e=600$  mA,  $E_e=907.9$  kV,  $U_{gr}=0.83$  kV,  $U_{an}=3.27$  kV,  $N_p=3 \cdot 10^8$

H/V mm,  $\times 10^{-4} \sigma$

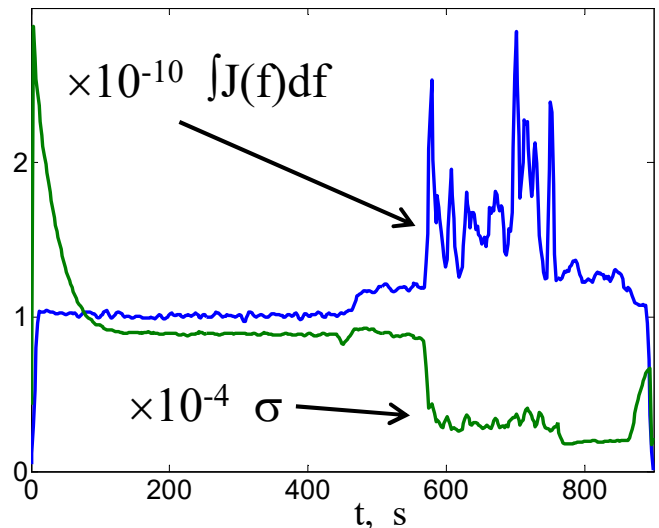


000 – вкл. поперечного и продольного стох. охладений,  
 450 – начало электронного охлаждения с током 600 мА,  
 570 – выкл. продольного стохастического охлаждения (e-cool on),  
 770 – выкл. поперечного стохастического охлаждения (e-cool on),  
 $\int J(f)df$  – интеграл интенсивности Шотки шумов по всей области частот.  
 В идеале – константа, так как он пропорционален числу заряженных частиц. А в случае присутствия коллективных колебаний может увеличивать свое значение.

$F(\sigma)$



Функция распределения частиц по продольному импульсу, полученная с помощью спектроанализатора Шотки шумов в различные моменты времени



**Спасибо за внимание**