

# *Ионный источник «КРИОН» и его развитие*

*Е. Д. Донец*

*ОИЯИ, Лаборатория высоких энергий  
им. В. И. Векслера и А. М. Балдина*

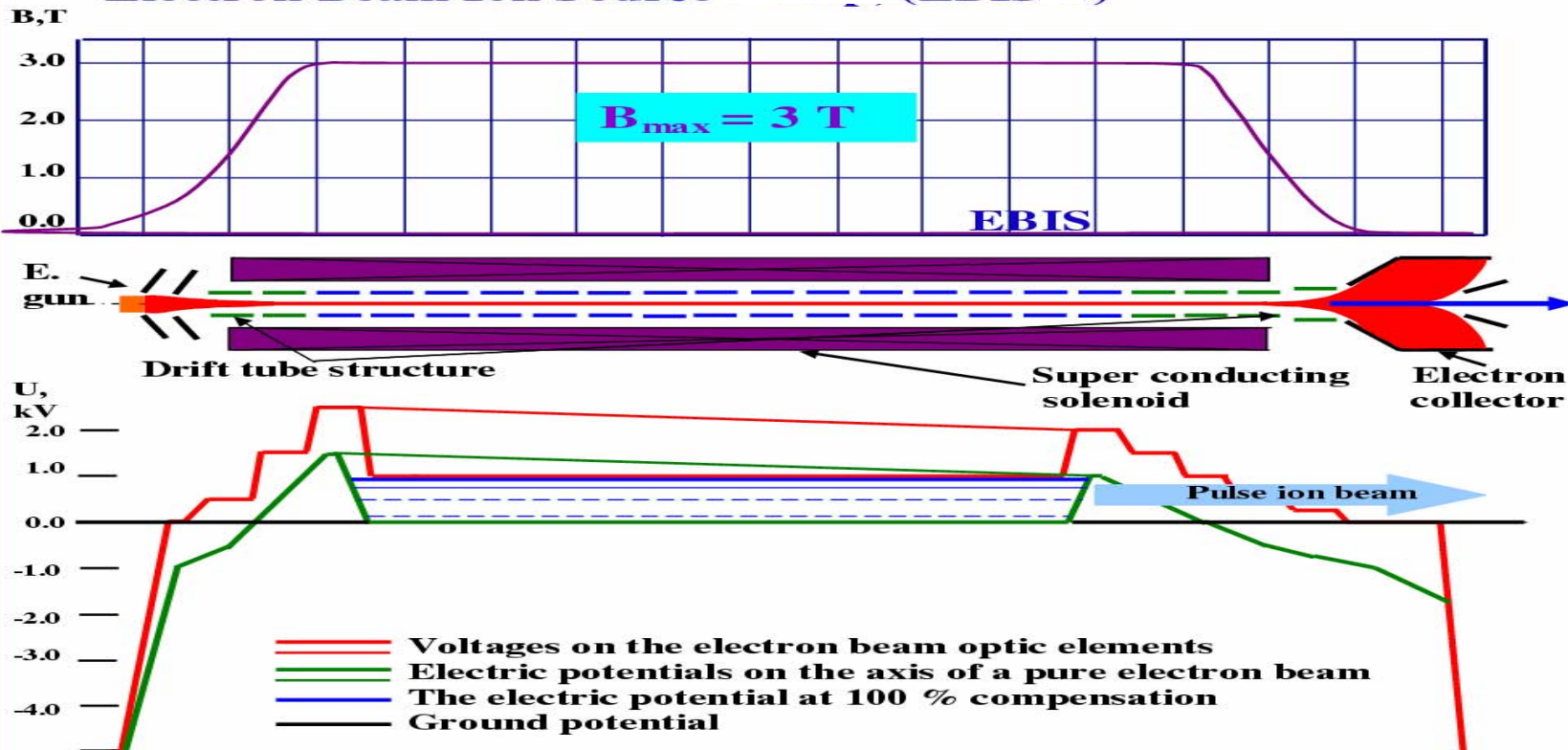
# План изложения

- 1. Краткое введение
- 2. Немного истории
- 3. Состояние дел на сегодня
- 4. Возможные направления развития
- 5. Заключение

## Непосредственные участники работ

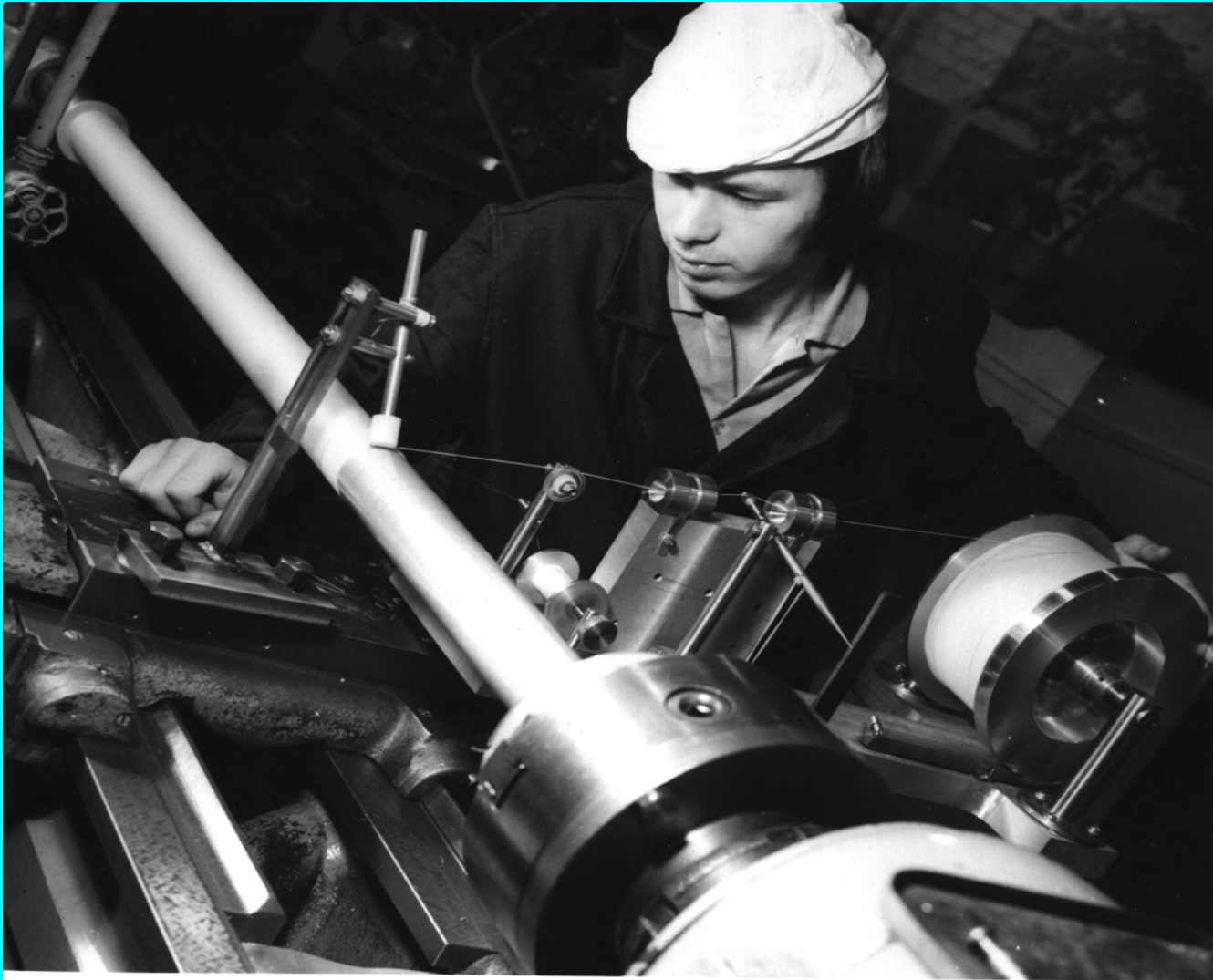
Аксенов В.Г., Альперт В.А., Вадеев В.П.,  
Горская Е.Г., Гудков С.В., Донец Д.Е.,  
Донец Е.Е., Илющенко В.И., Карташев  
С.В., Кутузова Л.В., Маляренко А.С.,  
Мончинская Н.В., Овсянников В.П.,  
Пикин А.И., Сальников В.В., Соловьев  
В.Н., Степанюк В.Л., Суслов А.П.,  
Туманова Ю.А., Тутин Г.А.(РИАН),  
Чернышов Н.И., Шишов Ю.А., Шутов  
В.Б.

# Electron Beam Ion Source (EBIS)



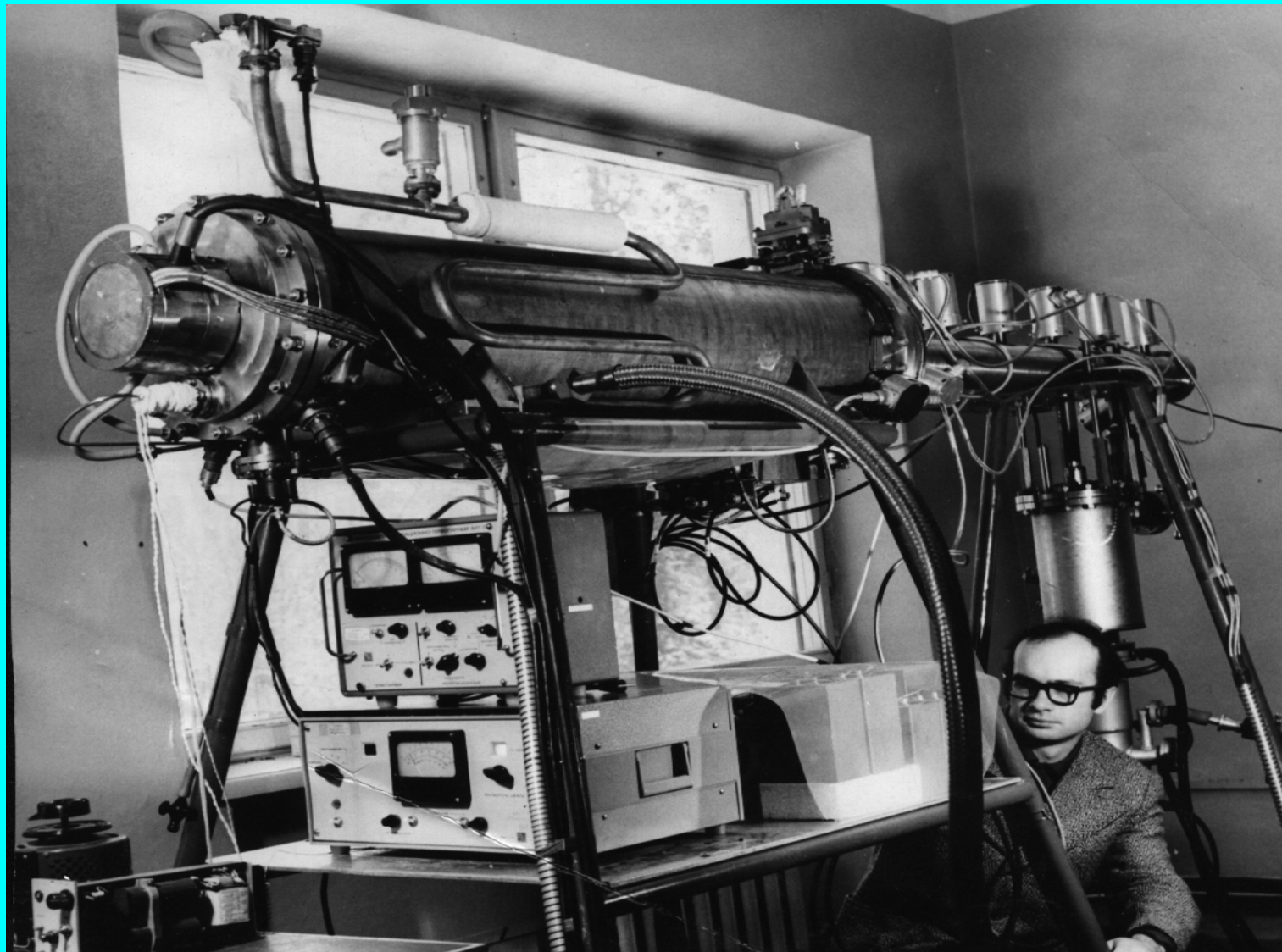
*Крион- Криогенный  
ионизатор*

*1971. Изготовление одного из первых в мире (возможно первого) сверхпроводящего соленоида для работы в составе ускорительного комплекса.*



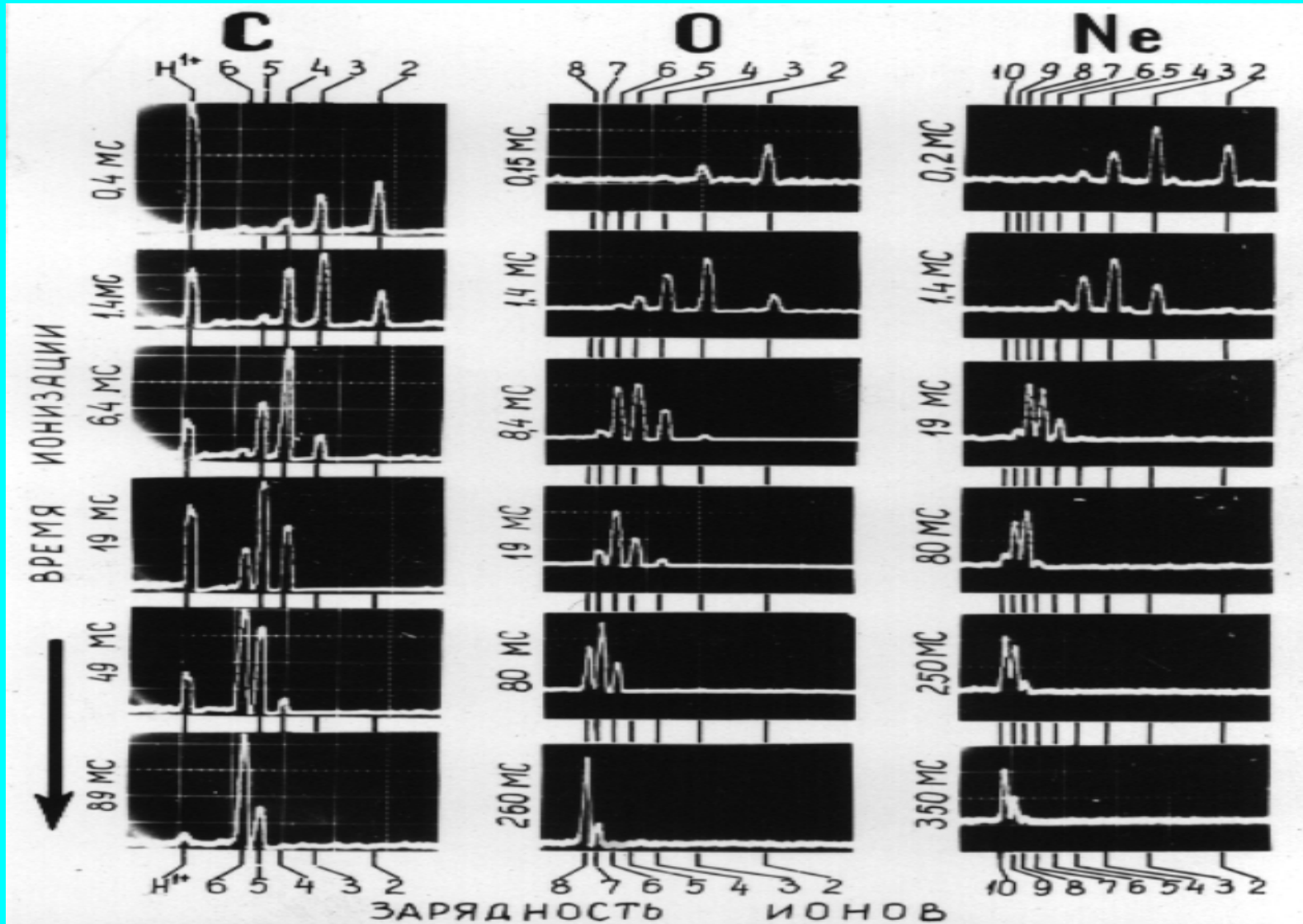
1972

*На источнике Крион получен ионный пучок*



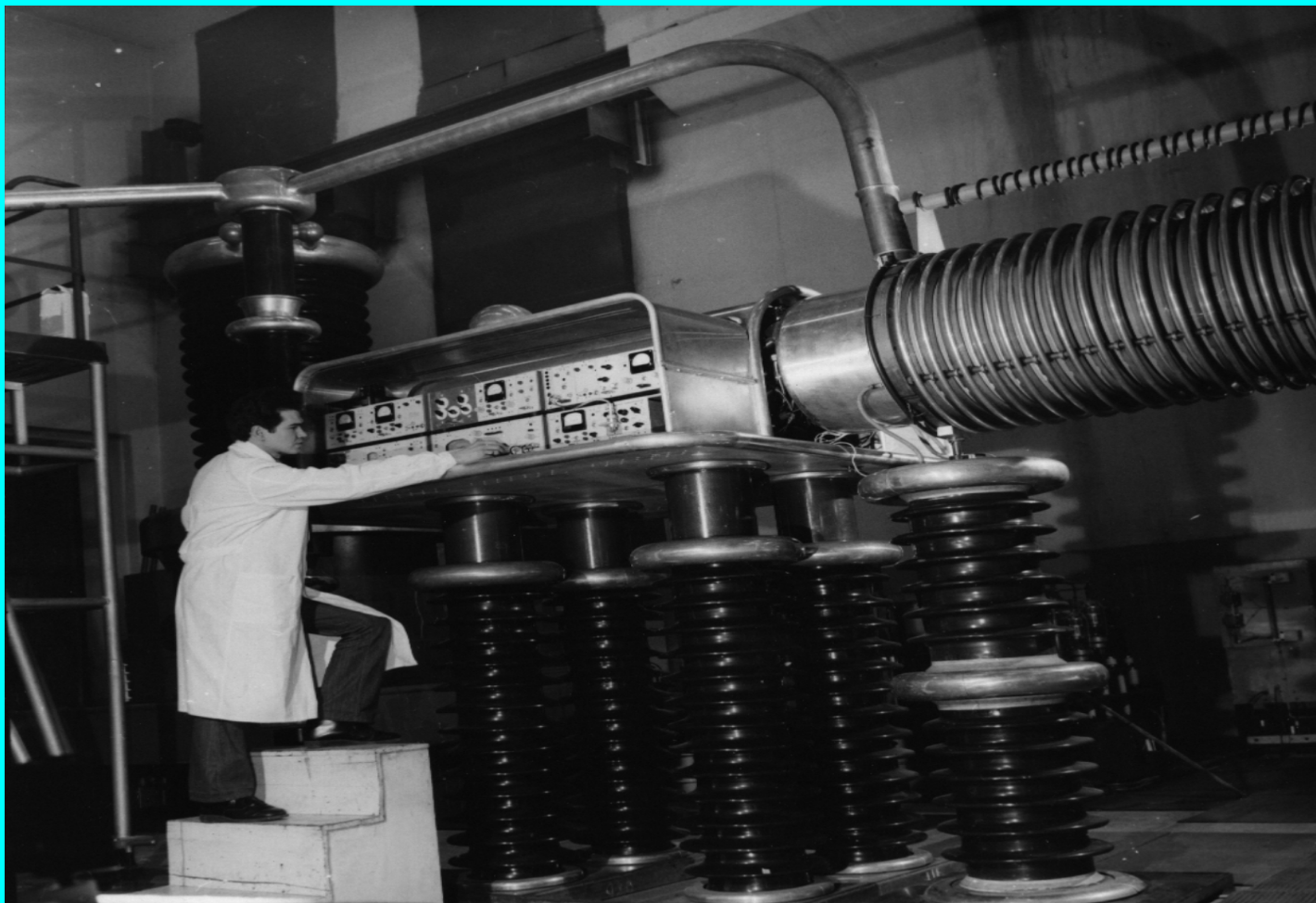
1975

Эволюции спектров зарядностей углерода, кислорода и неона



*1976 (март)*

*Начало использования источника Крион на синхрофазотроне для ускорения ядер C, N, O и Ne*





# Модель последовательной ионизации

$$P_{q \rightarrow q+1} = 1 = \sigma_{q \rightarrow q+1} \cdot j \tau,$$

$P_{q \rightarrow q+1}$  - вероятность ионизации

$j$  - плотность потока ионизирующих электронов  $1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$

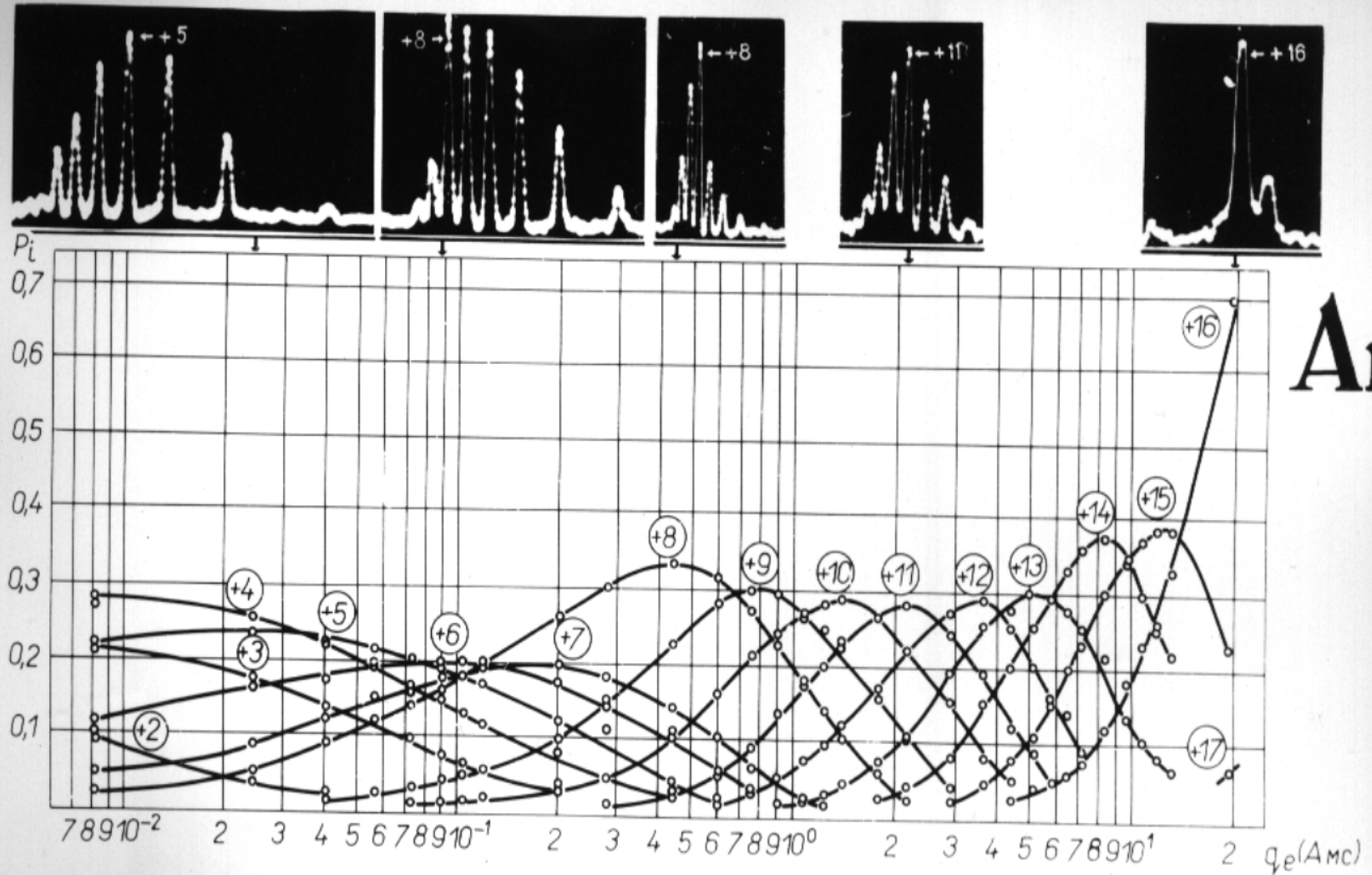
$\tau$  - время взаимодействия электрона с ионом

$$(j\tau)_{1 \rightarrow k} = \sum_{q=1}^{k-1} \sigma_{q \rightarrow q+1}^{-1}$$

$j\tau$  - фактор ионизации в  $\text{см}^{-2}$ .

1977

*Создан метод измерения сечений ионизации  
положительных ионов электронным ударом*



1985

*Обнаружение сверхвозбужденных атомов и ионов.  
Создан метод измерения энергии связи электронов в  
высокозарядных ионах*

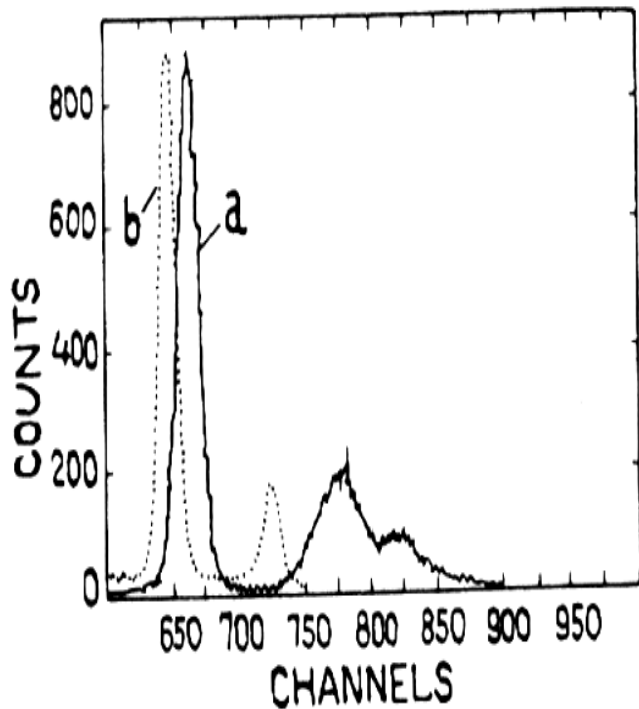


Fig.1. Spectrum of KX-rays of  $\text{Kr}^{35+}$ -at-surface (a) and spectrum of diagram KX-rays of neutral krypton (b).

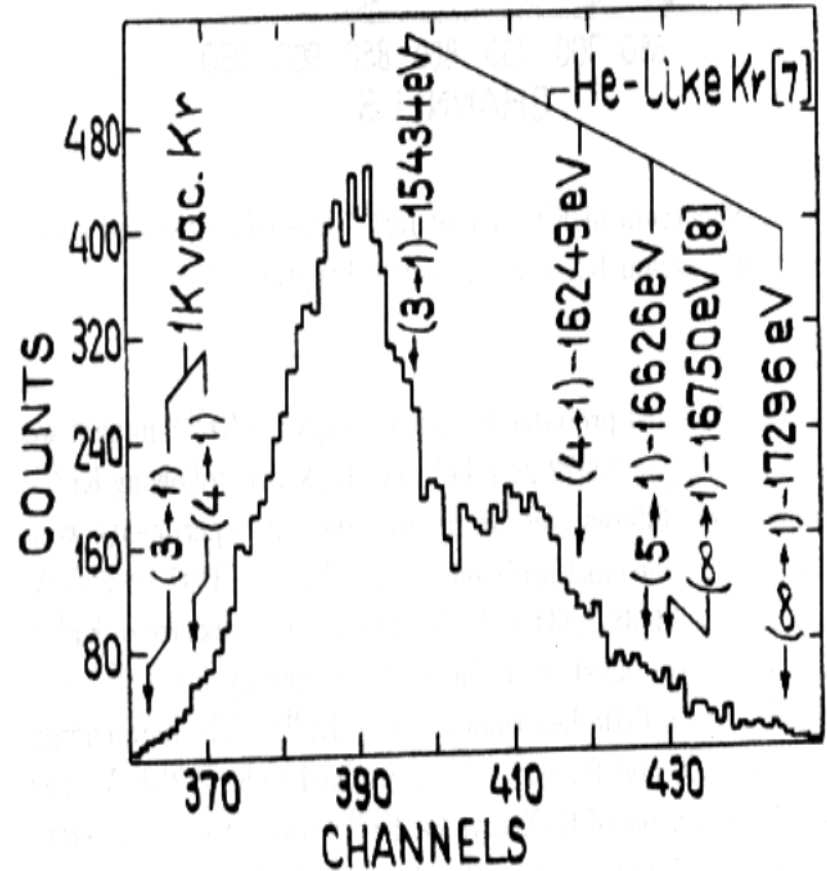


Fig.2. Spectrum of  $K_{\beta}$ X-rays of  $\text{Kr}^{35+}$ -at-surface.

# *Источник Крион сегодня*



## *EBIS*

$$Q^- = Q^+ = 10^{13} I_e L / E_e^{1/2},$$

**Q** in elementary charges,

**I<sub>e</sub>** in A,

**L** in m,

**E<sub>e</sub>** in V.

For example: **I=1 A, L=1 m, E<sub>e</sub>=10000 V,**

$$**P = 10 kW.**$$

$$**Q = 10^{11} \text{ el.ch.} = 15 \text{ nC.}**$$

**Q<sup>-</sup>(e-зар.)**

**Грубая сила**

**Другой подход**

**$10^{11}$**

**10 KW**

**?**

**$10^{12}$**

**200 KW**

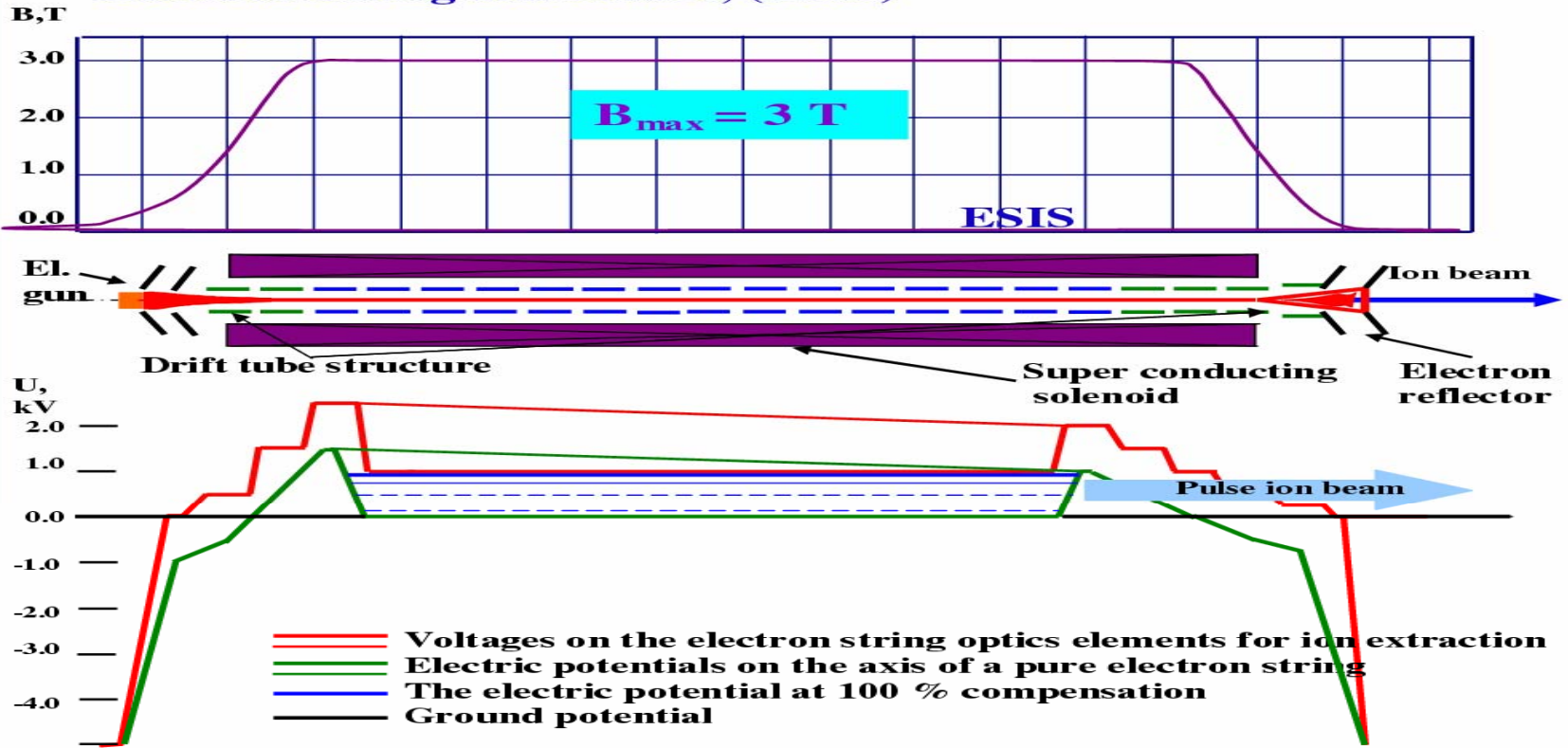
**$10^{13}$**

**5000 KW**



1994

### Electron String Ion Source, (ESIS)

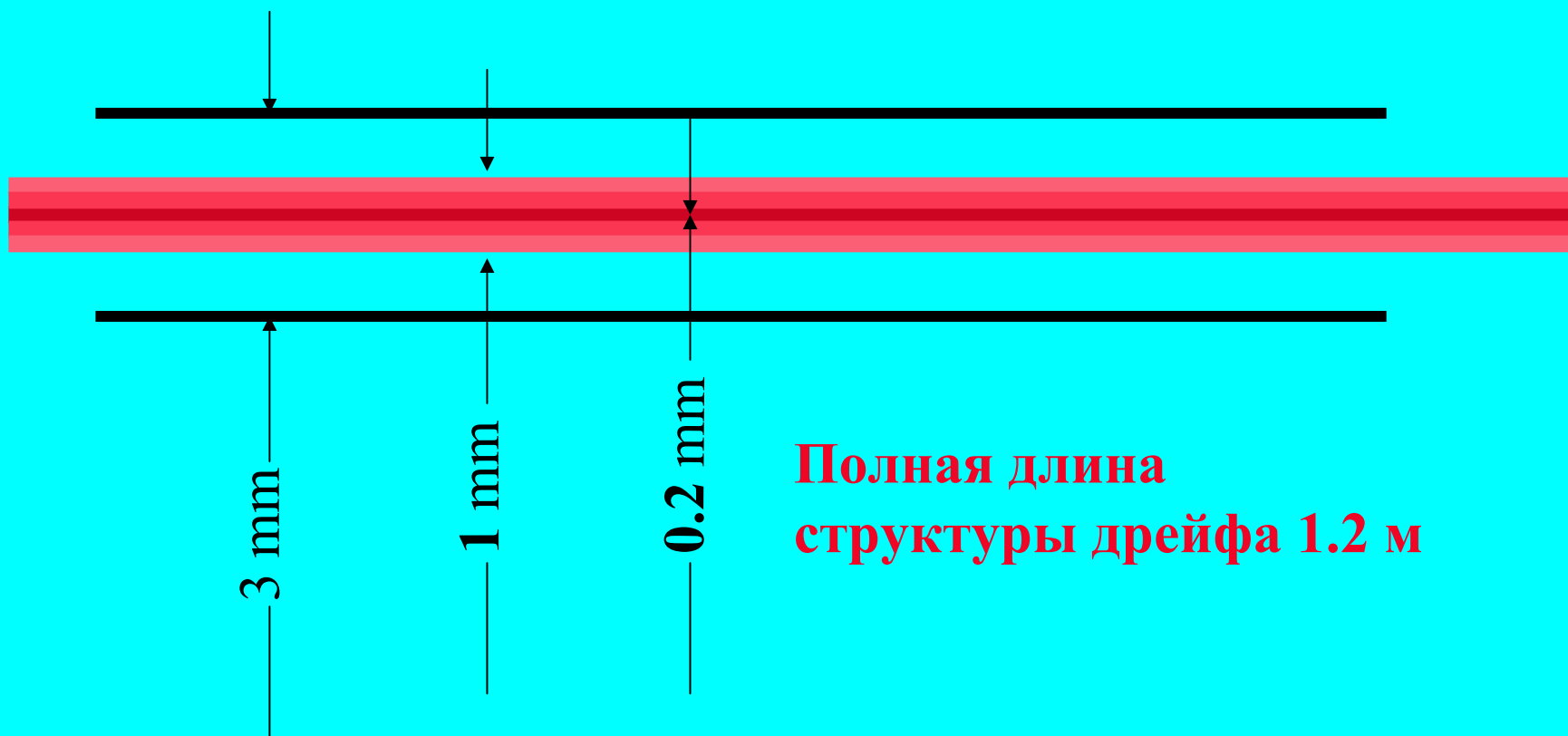


*EBIS in the electron reflex mode of operation*

Экспериментальные условия:  $B_{\max} = 3.3 \text{ Т}$ ;

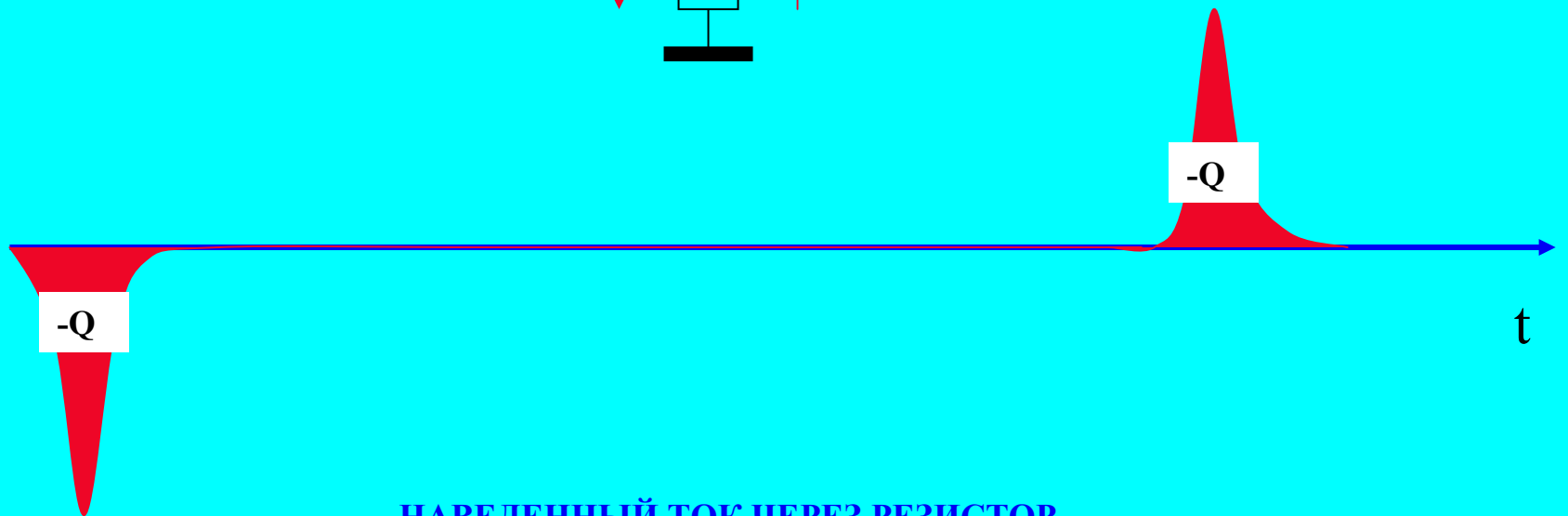
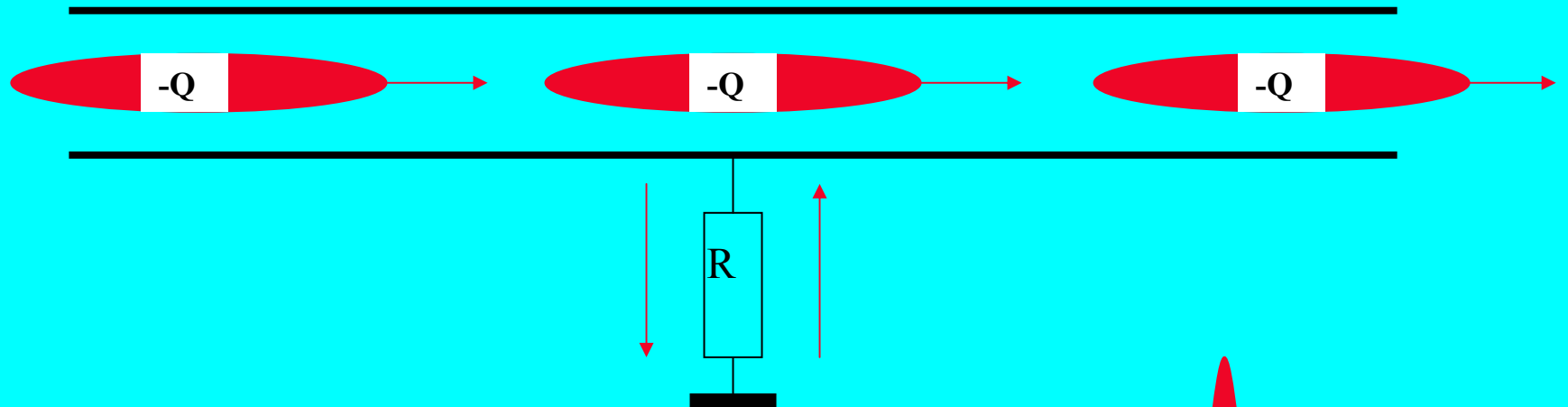
Вакуум  $P < 10^{-12} \text{ Тор}$ .

Температура трубки дрейфа  $4.2 \text{ К}$



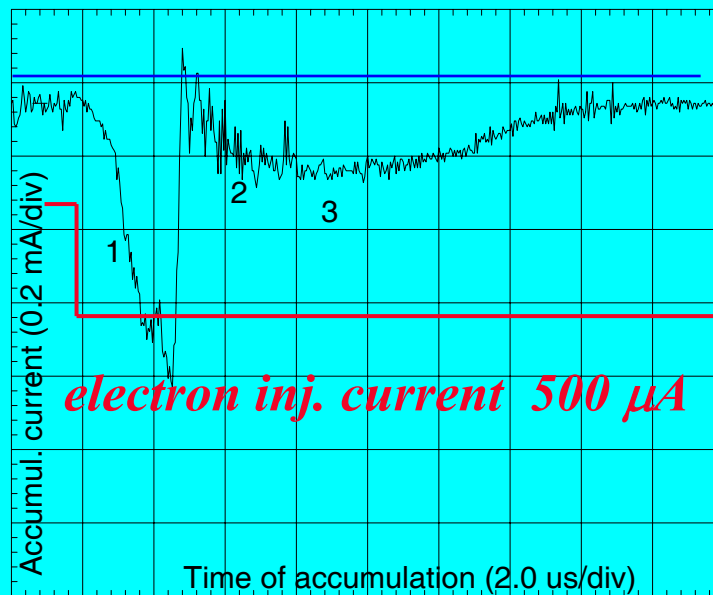
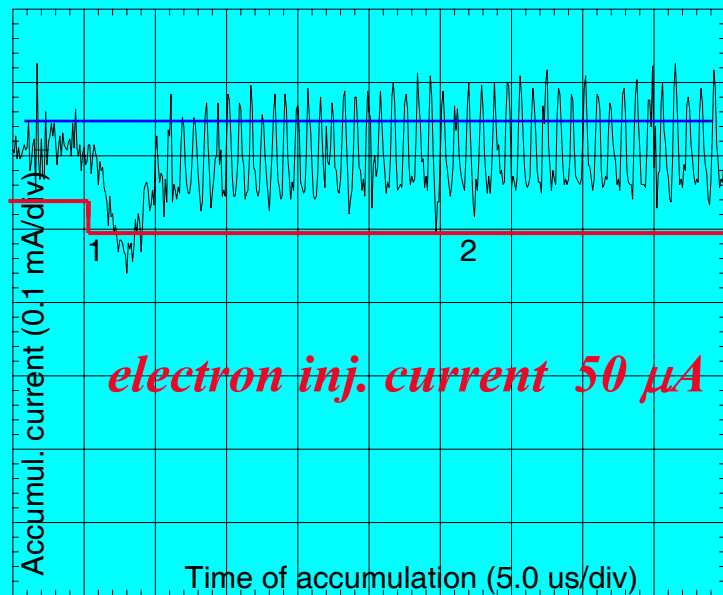
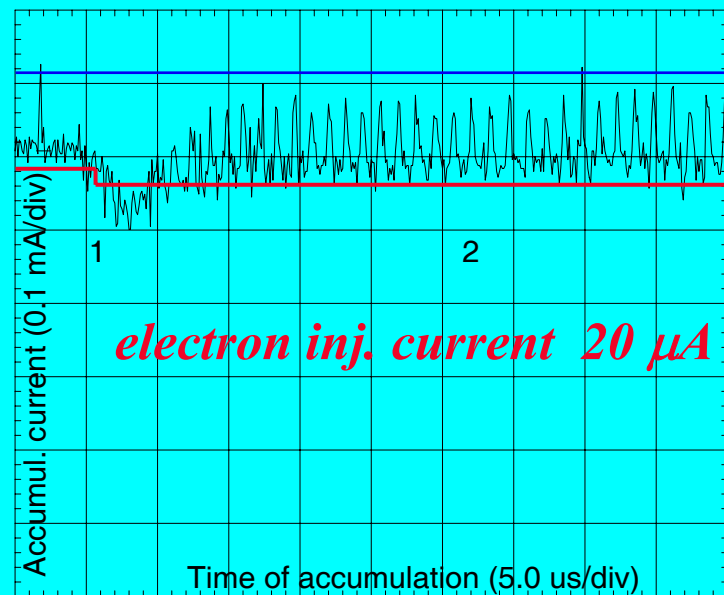
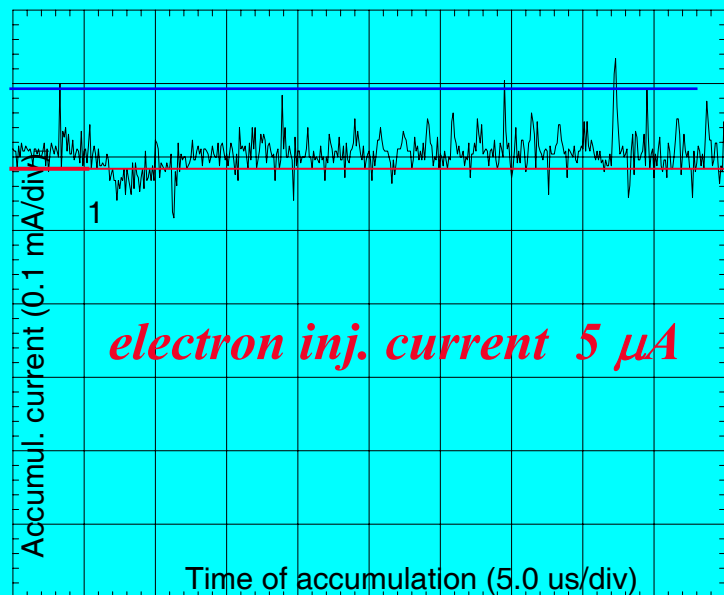


# ТРУБКА ДРЕЙФА



НАВЕДЕННЫЙ ТОК ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР

# 1994. Обнаружен феномен электронной струны



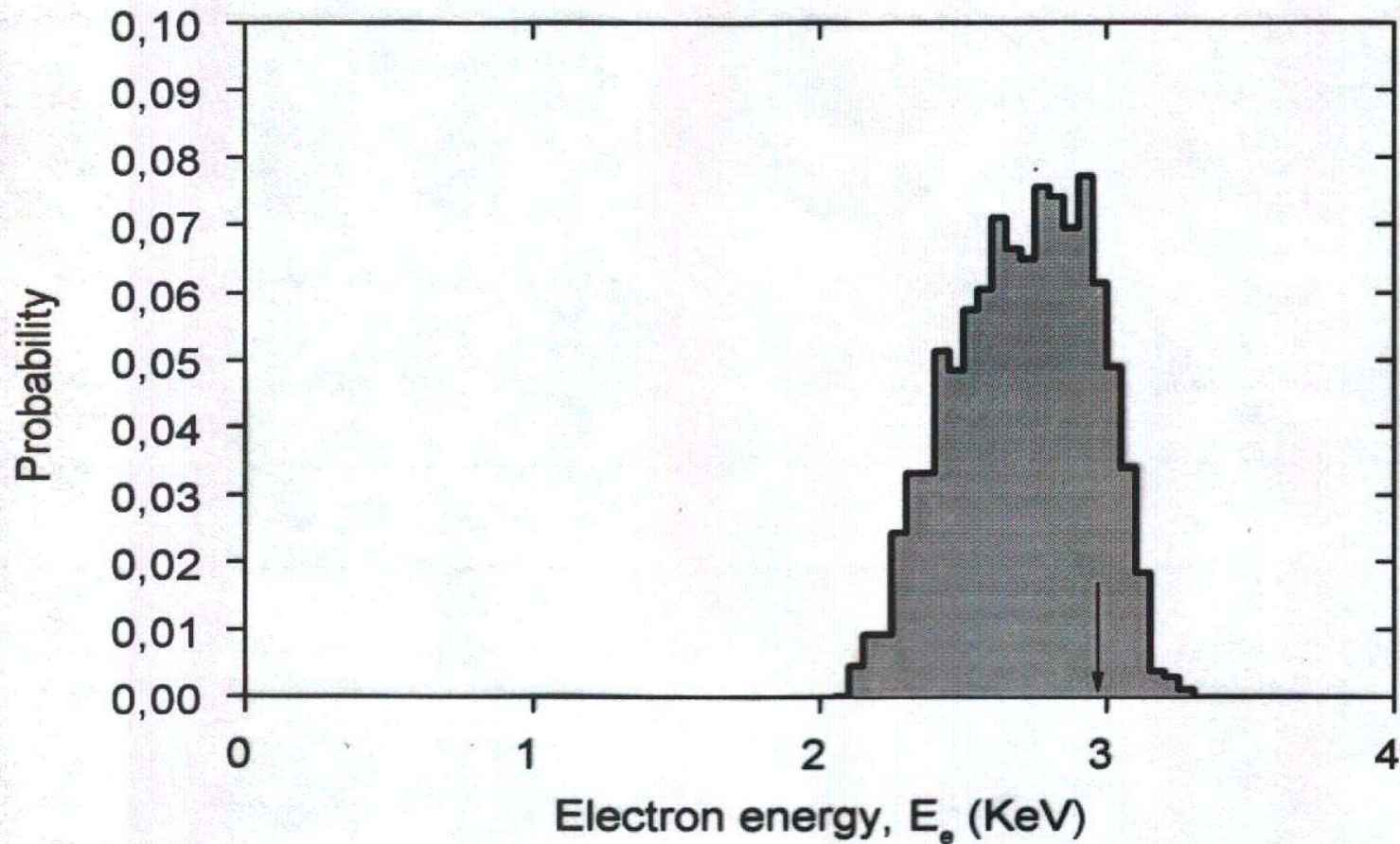
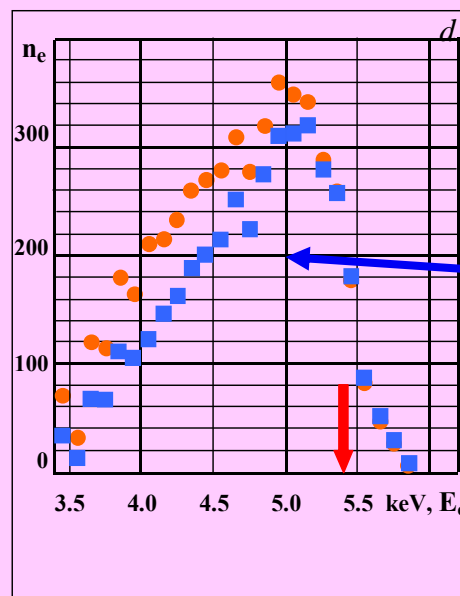
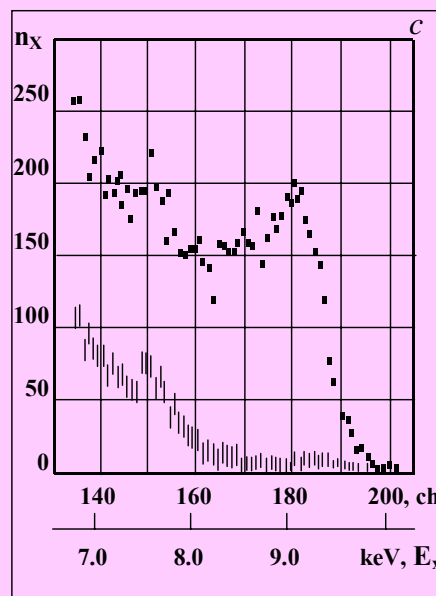
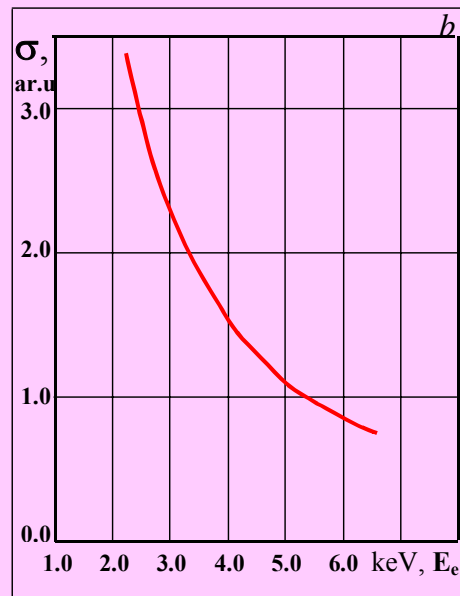
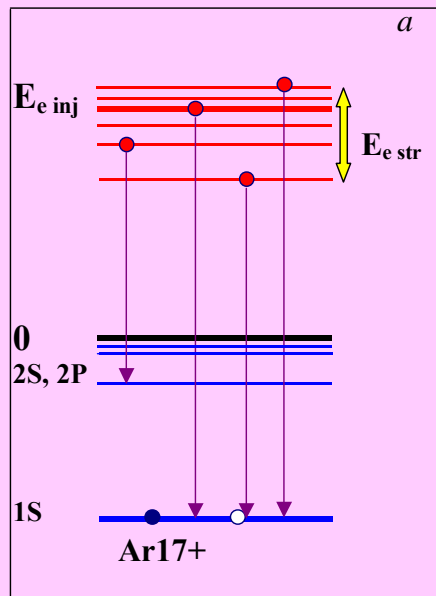


Fig. 8. Electron energy distribution in the string with a feeding electron energy equal to 2.99 KeV.

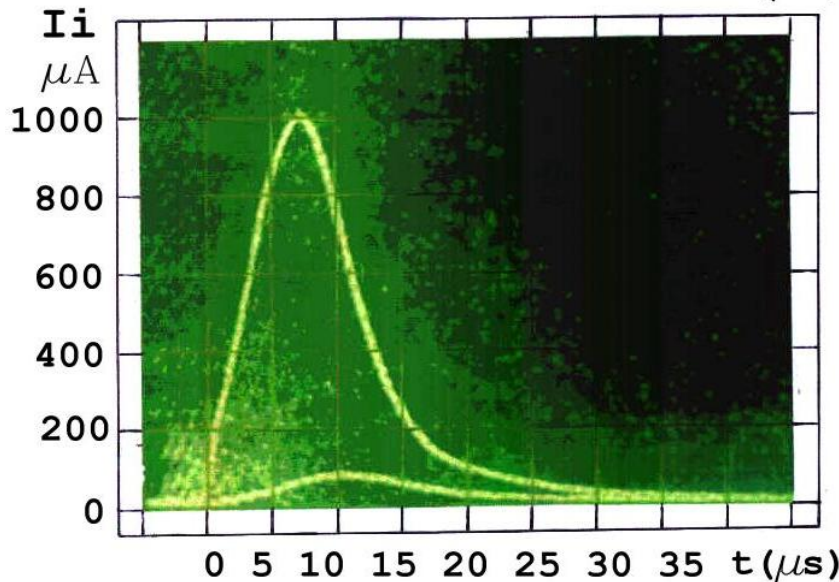
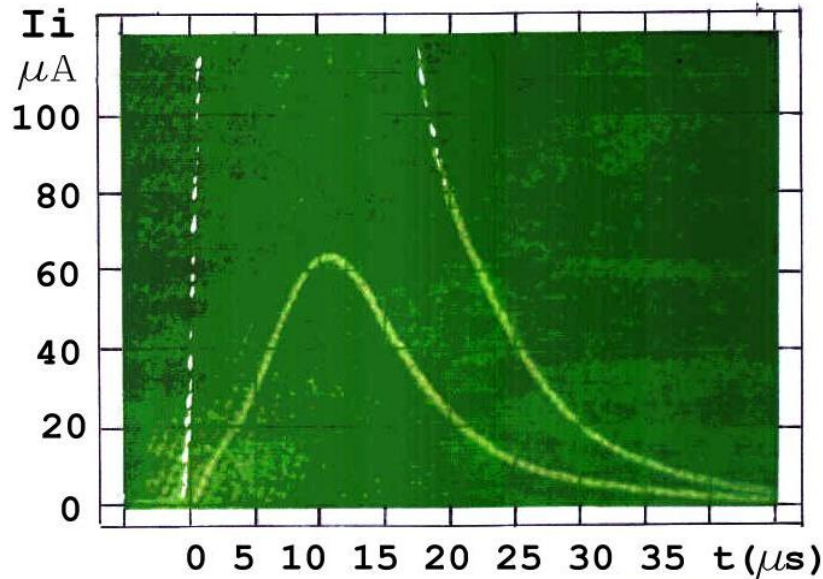
**Измерено методом контролируемого распада эл. струны**

# Метод радиационного захвата эл-нов струны



Распределение  
кинетической  
энергии эл-нов  
струны при  
энергии инжекции  
5.4 KeV

- 1. Электронная струна – это обнаруженное в ЛВЭ ОИЯИ стационарное состояние высокотемпературной однокомпонентной электронной плазмы, удерживаемой сильным магнитным и слабым электрическим полями.*
- 2. Состояние электронной струны квазистабильное и спокойное в достаточно широких пределах параметров, так что она может использоваться для удержания положительных ионов и доведения их до высоких зарядовых состояний за счет обдирки орбитальных электронов электронами струны.*
- 3. Электронно-струнный ионный источник был разработан в ЛВЭ и применен на нуклотроне для ускорения  $Ar^{16+}$  и  $Fe^{24+}$ .*

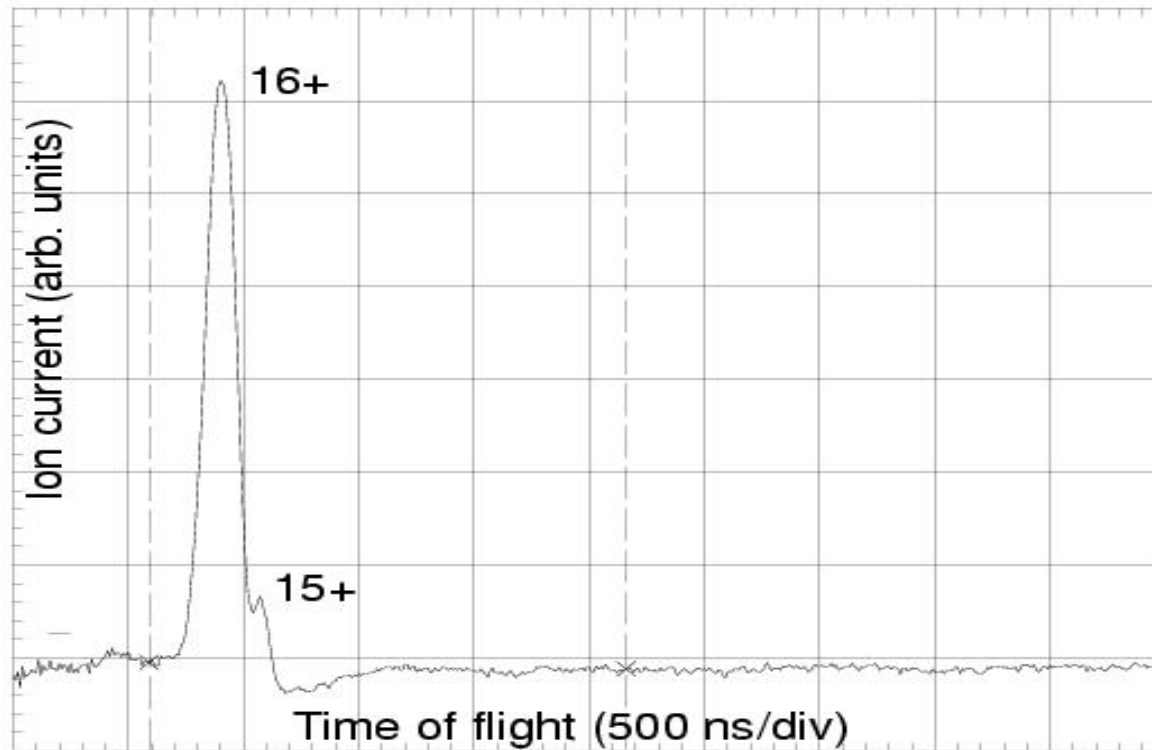


Transition to the electron string state, detected by means of observation of the change in the pulse ion current produced.

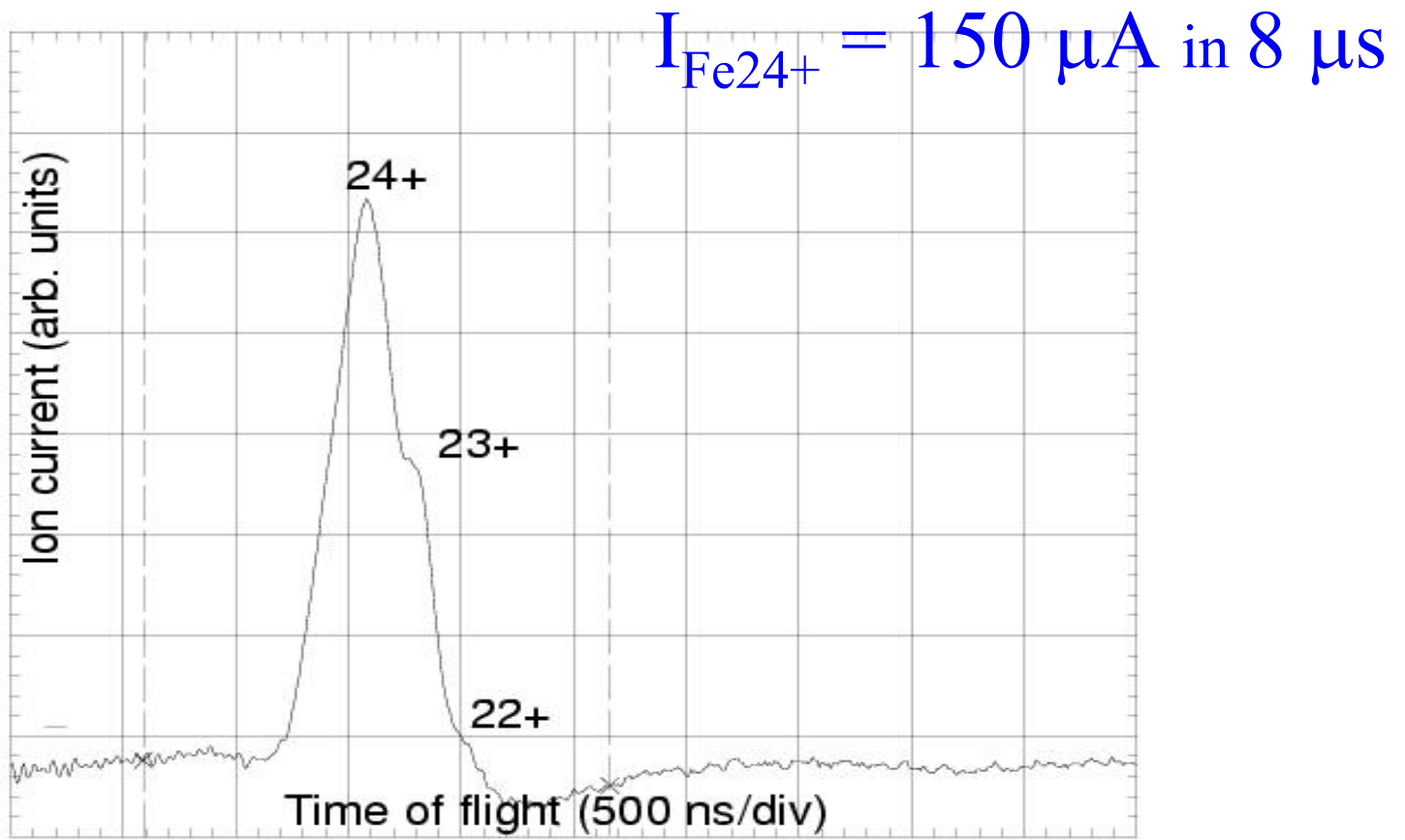
(1996)

# Charge state distribution of Ar ions after 500 ms confinement in an electron string space.

$$I_{\text{Ar}16+} = 200 \mu\text{A in } 8 \mu\text{s}$$



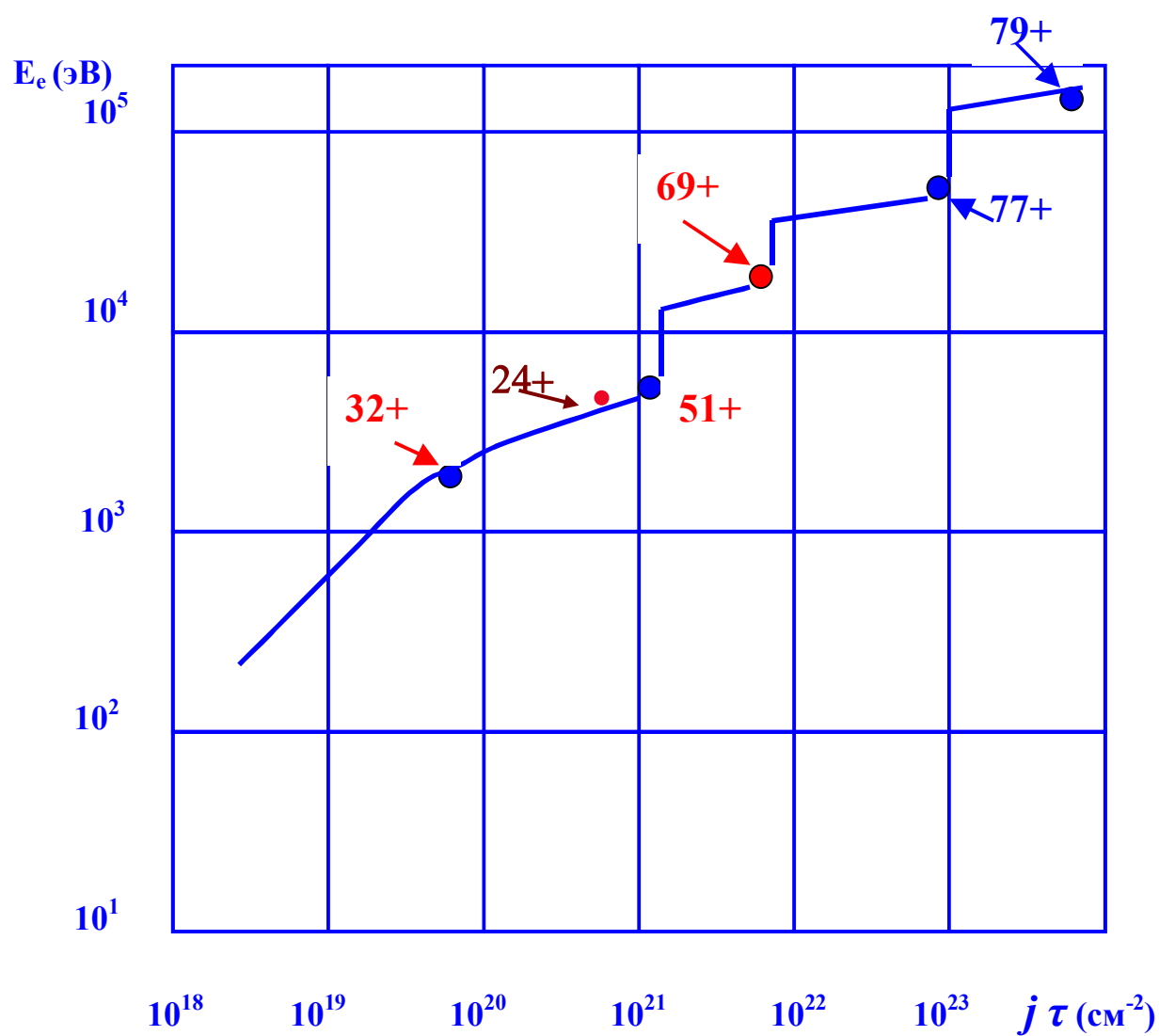
# Charge state distribution of Fe ions after 1100 ms confinement in space of an electron string.





# Ускорительные комплексы ионов тяжелых элементов высоких энергий

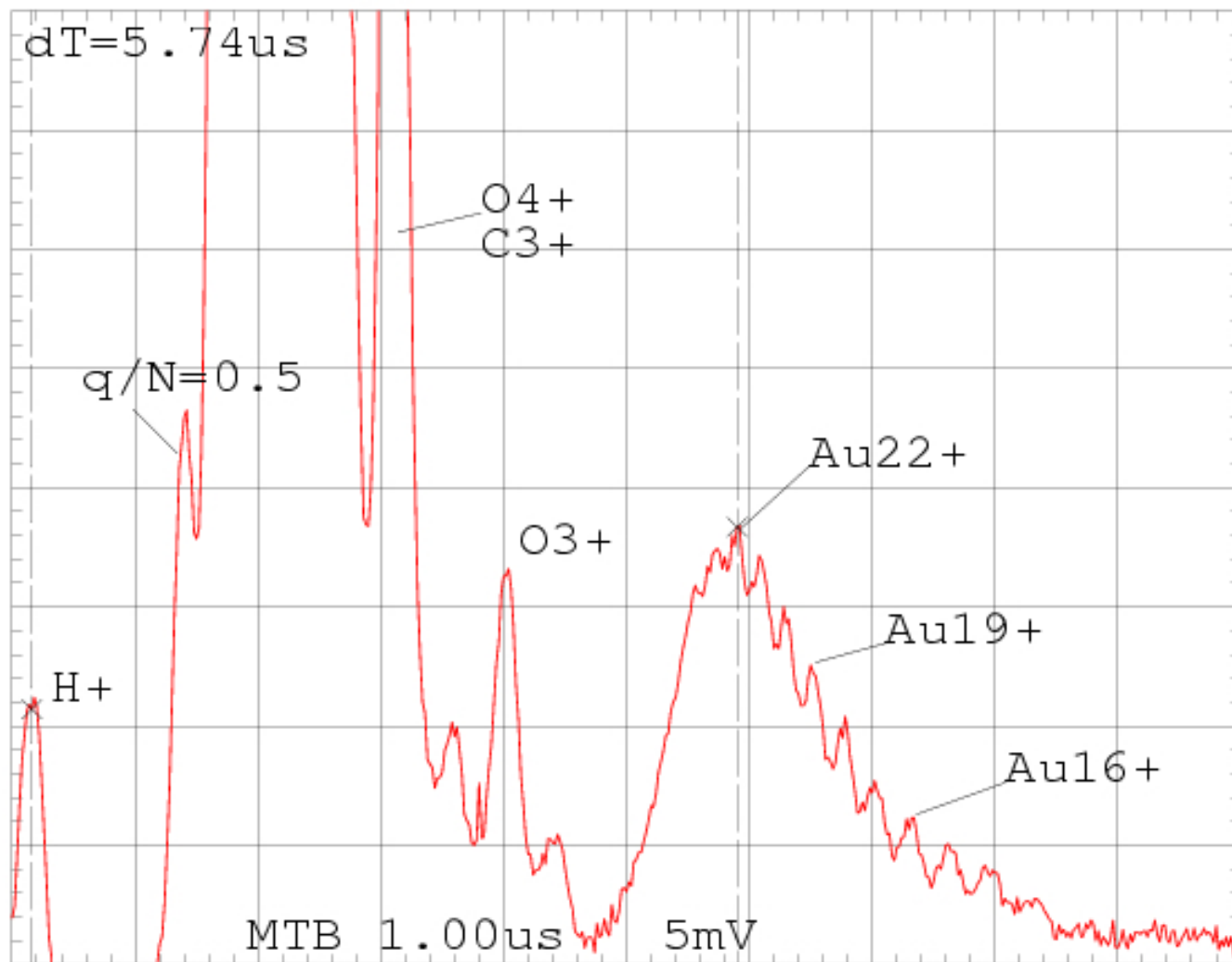
1. RHIC (BNL): a) Au<sup>1+</sup>- б) Au<sup>32+</sup>
2. LHC (CERN) Pb<sup>28+</sup>
3. Нуклотрон (ОИЯИ) Au<sup>65+</sup>, 69+
4. NICA (ОИЯИ) a) Au<sup>30+,32+</sup> б) Au<sup>51+</sup>
5. GSI
6. RIKEN



**Энергии электронов и значения фактора ионизации, необходимые для получения ионов Au указанных зарядностей**

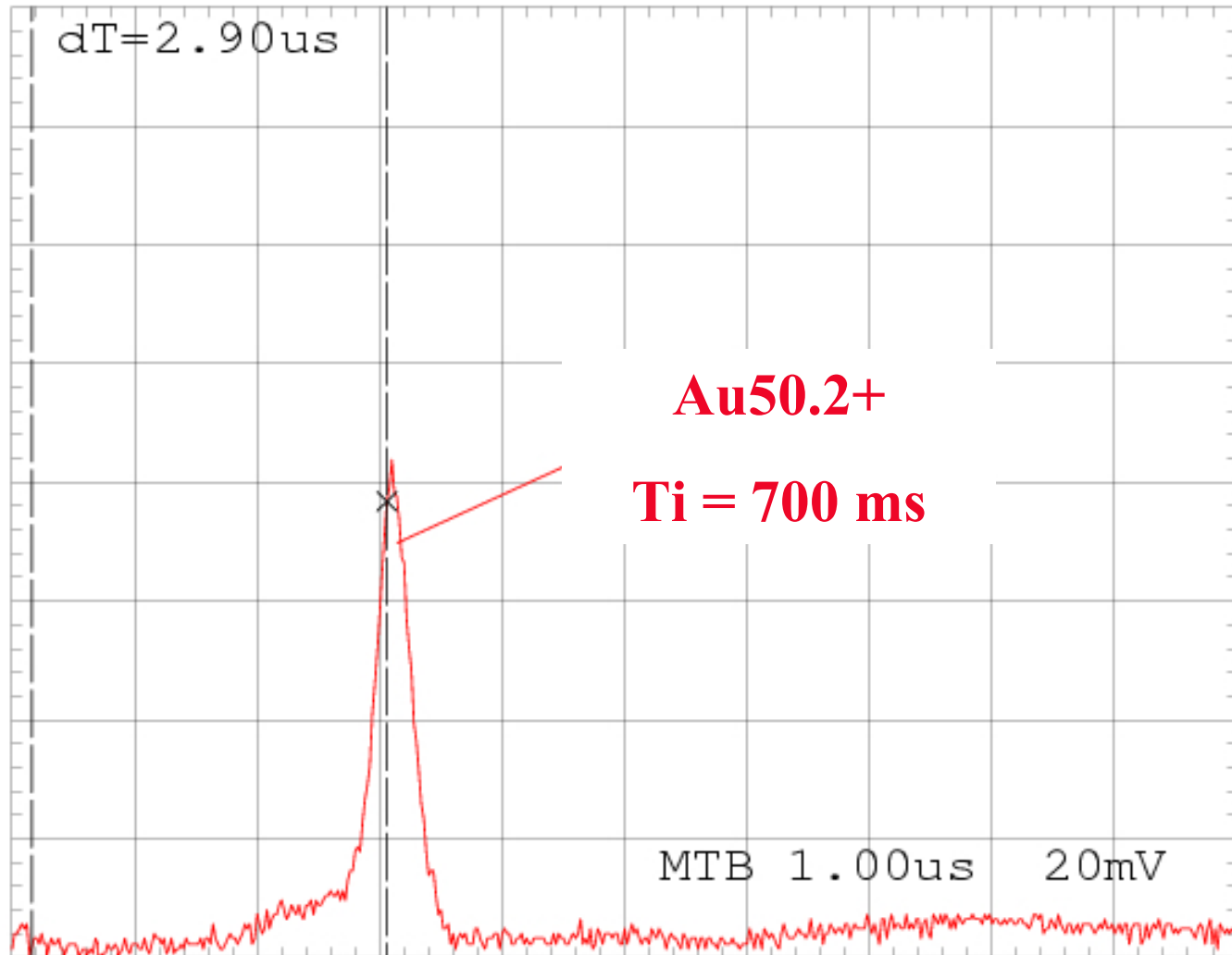
# TOF spectra just after Au injection

*Jul 18 2007*

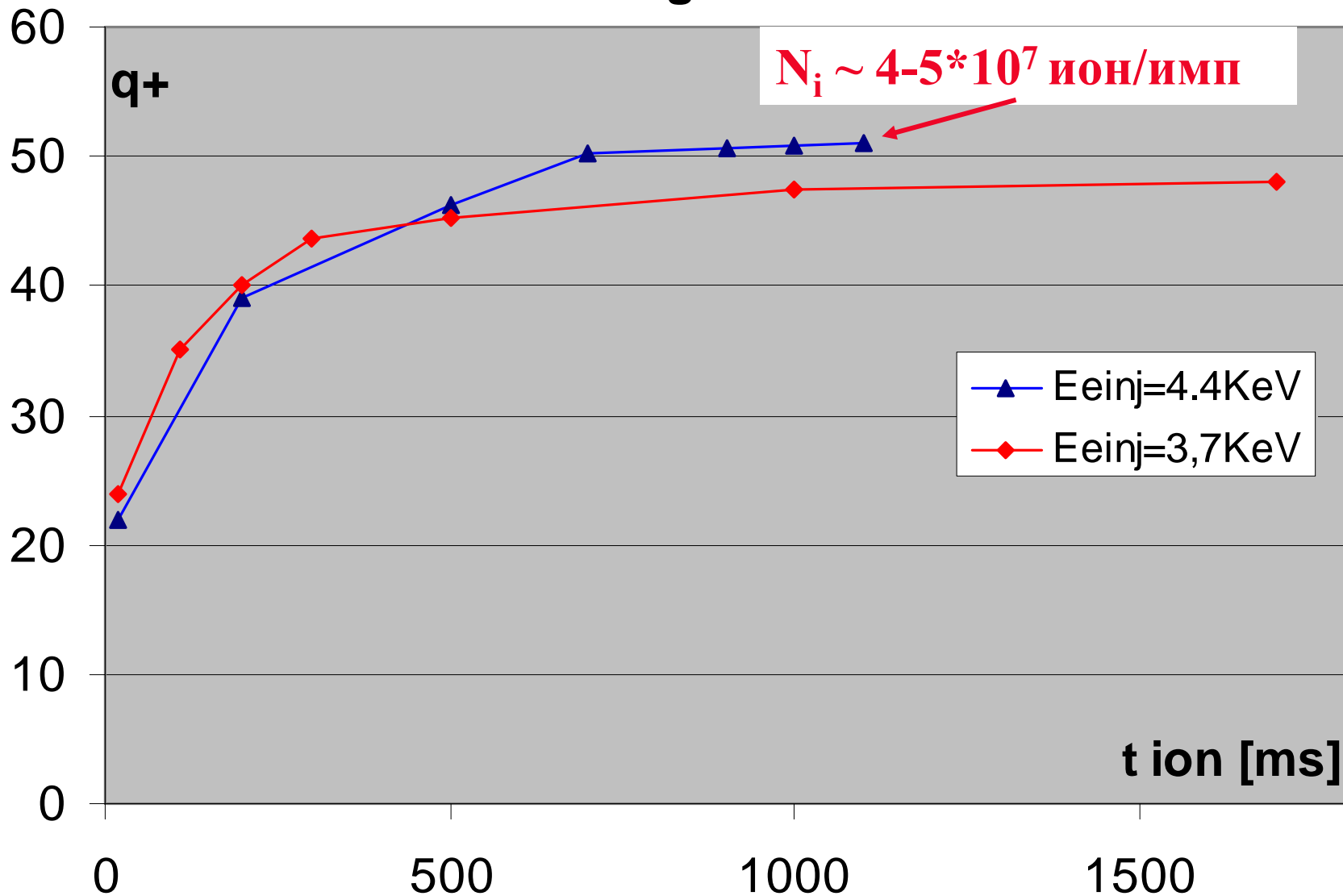


Au TOF spectra, mean q Au = 50.2+

*Jul 19 2007*

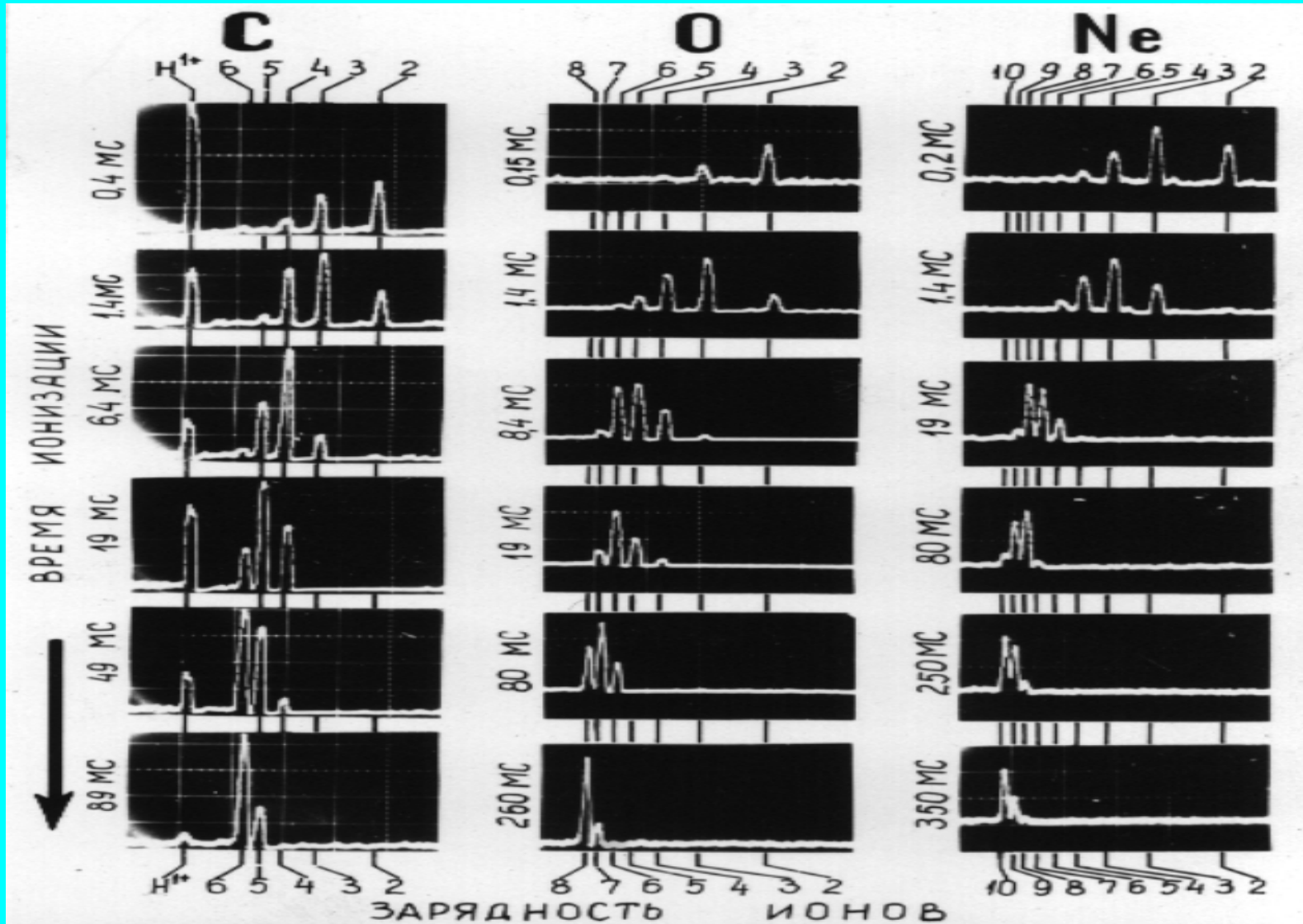


# Mean Au ion charge vs ionization time



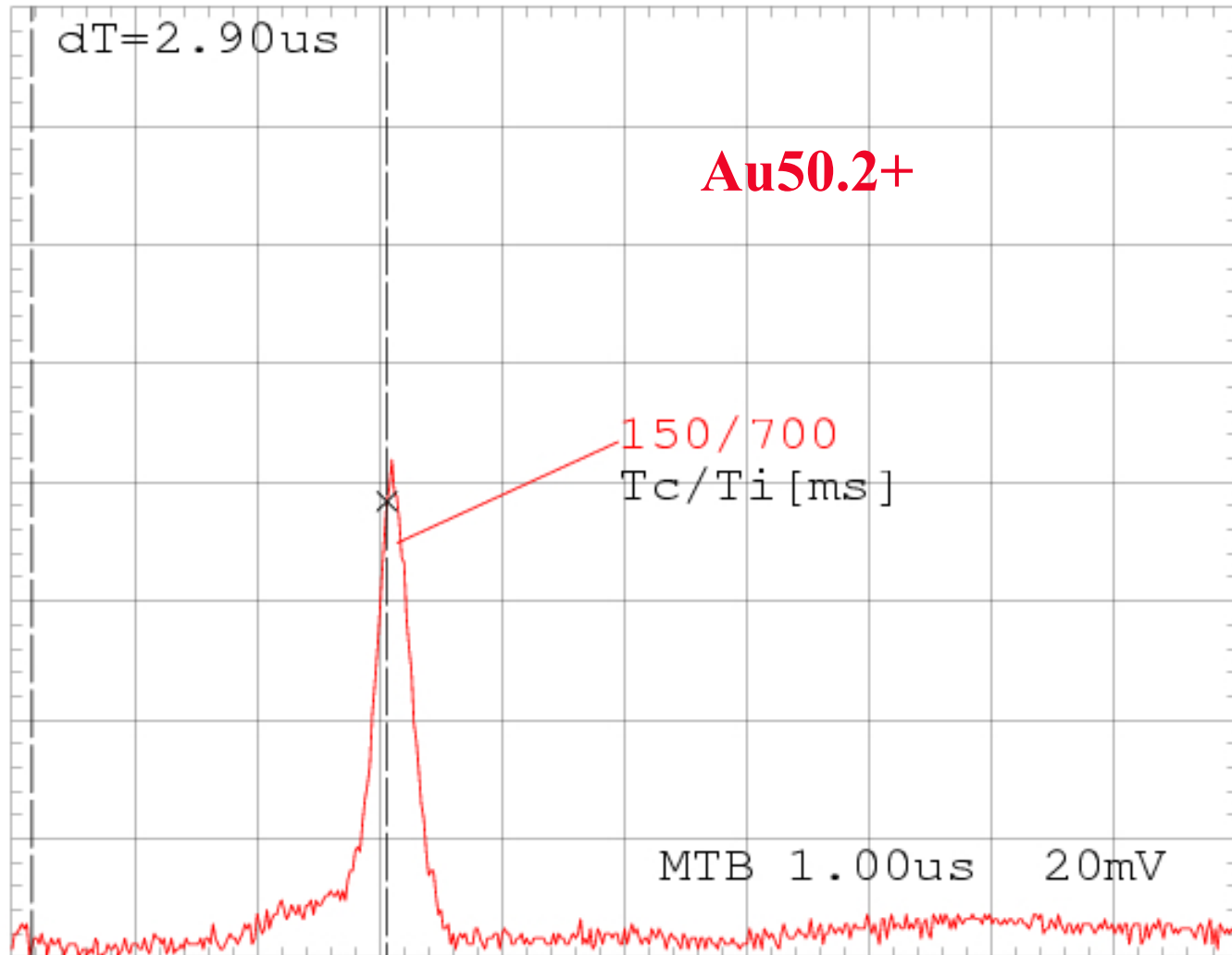
1975

Эволюции спектров зарядностей углерода, кислорода и неона



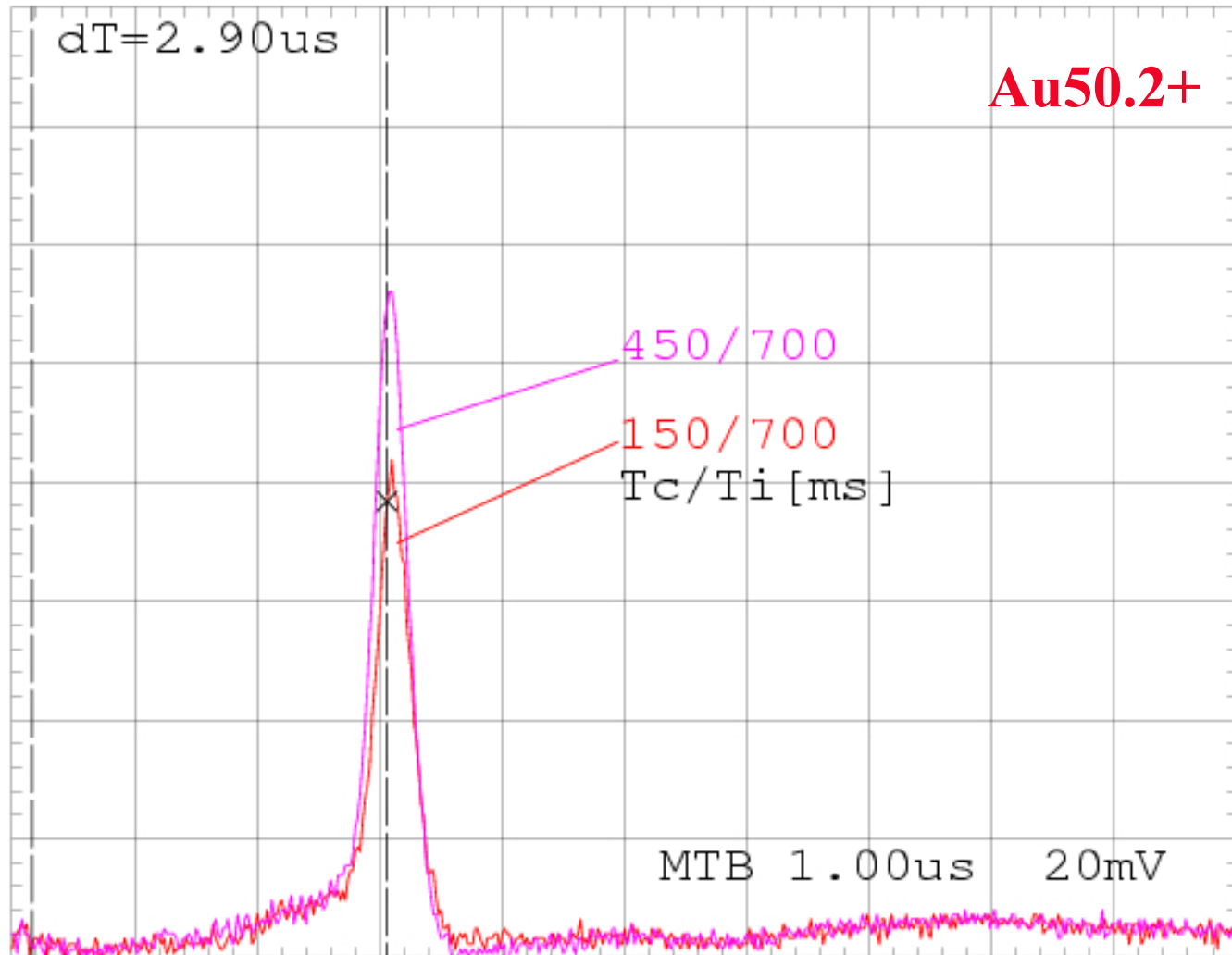
Au TOF spectra, mean q Au = 50.2+

*Jul 19 2007*



Au TOF spectra, mean q Au = 50.2+

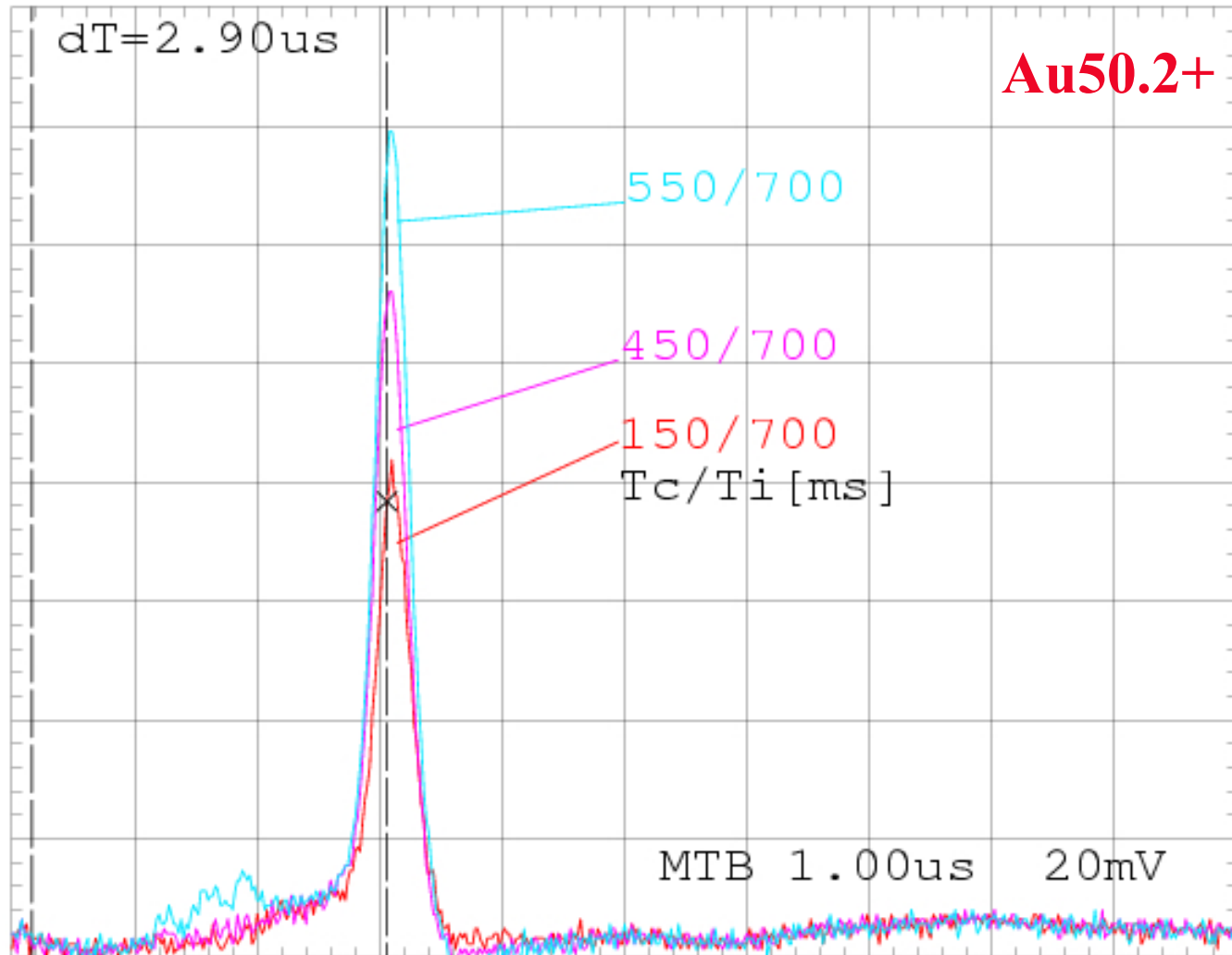
*Jul 19 2007*





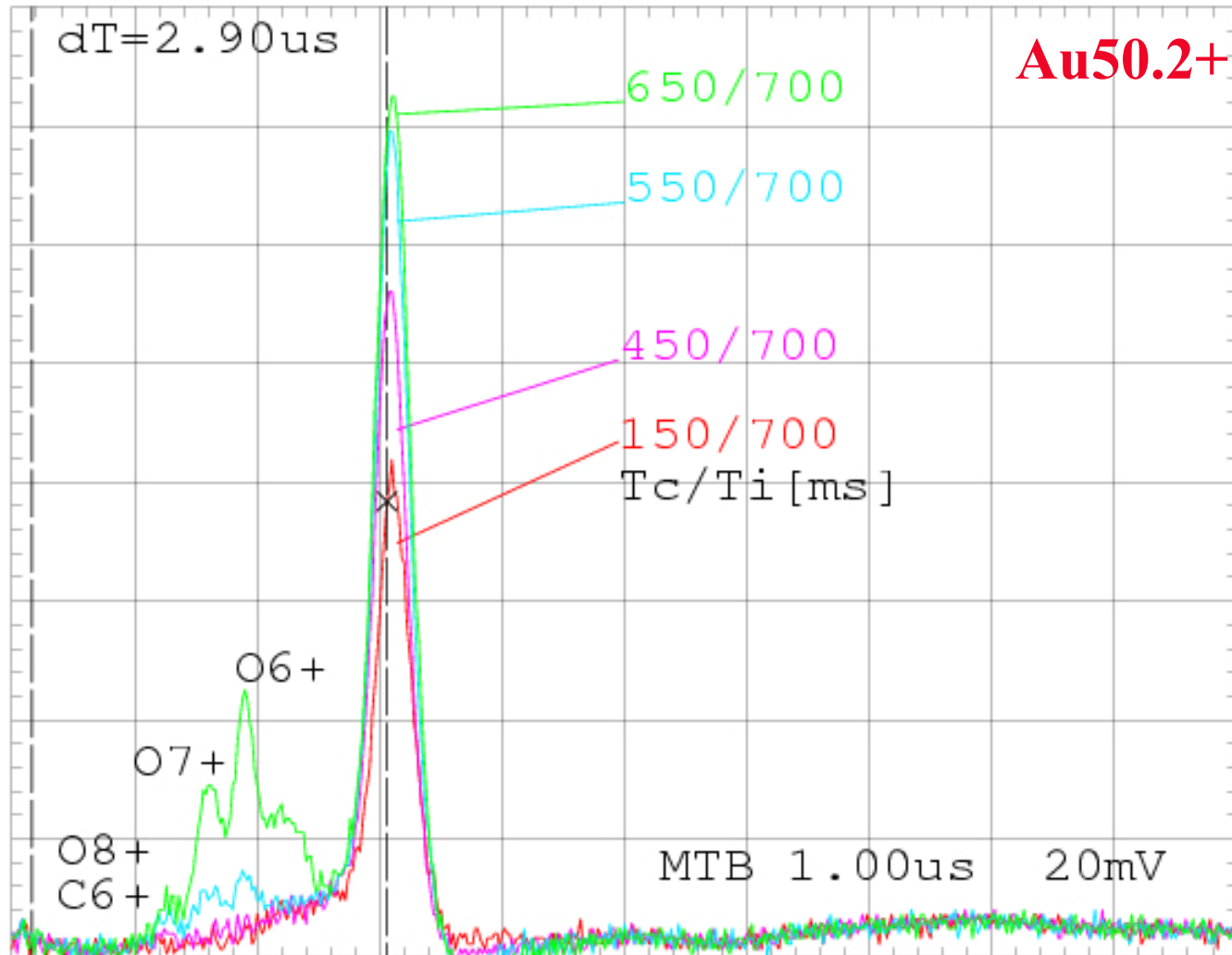
# Au TOF spectra, mean q Au = 50.2+

Jul 19 2007

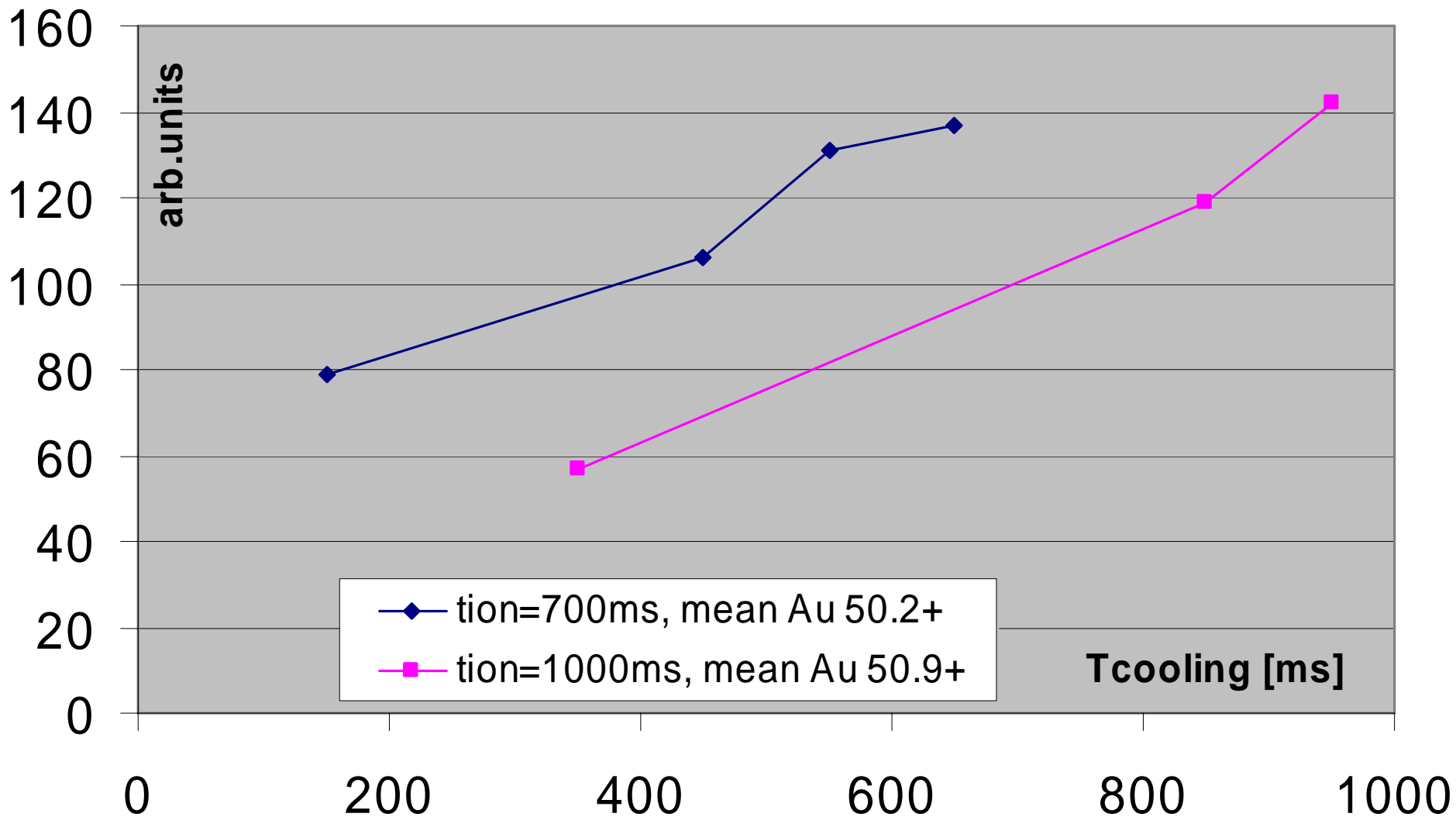


# Au TOF spectra, mean q Au = 50.2+

Jul 19 2007



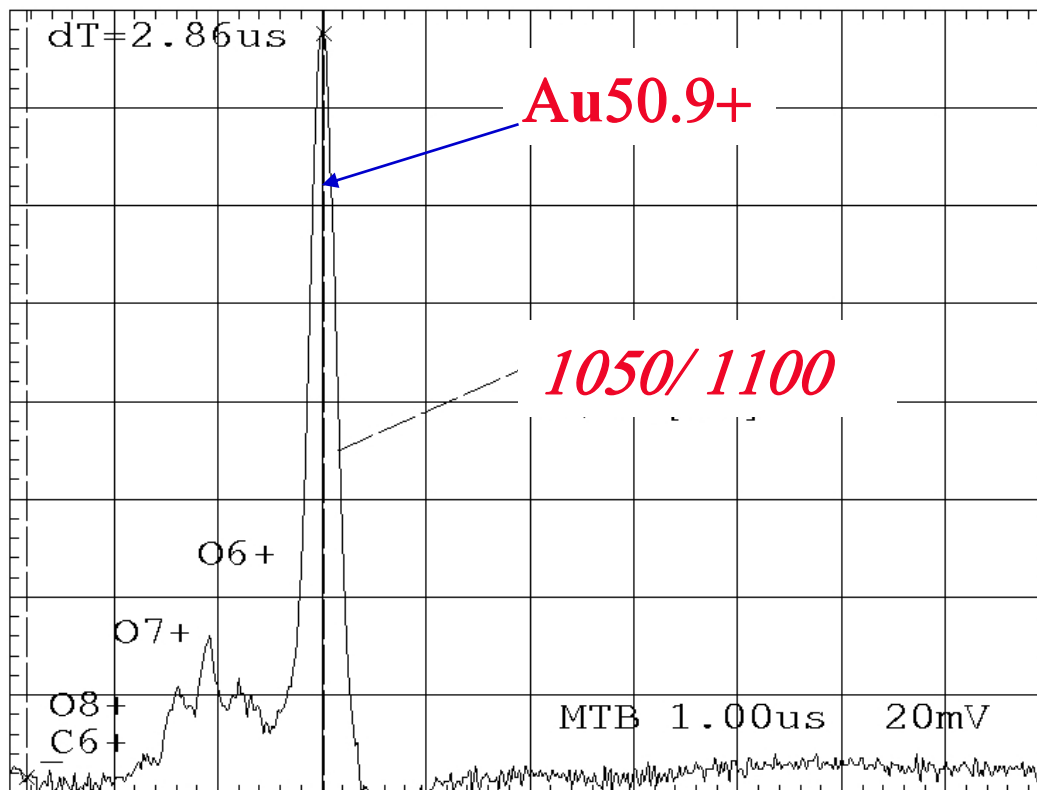
# Au ions yield vs ion cooling time

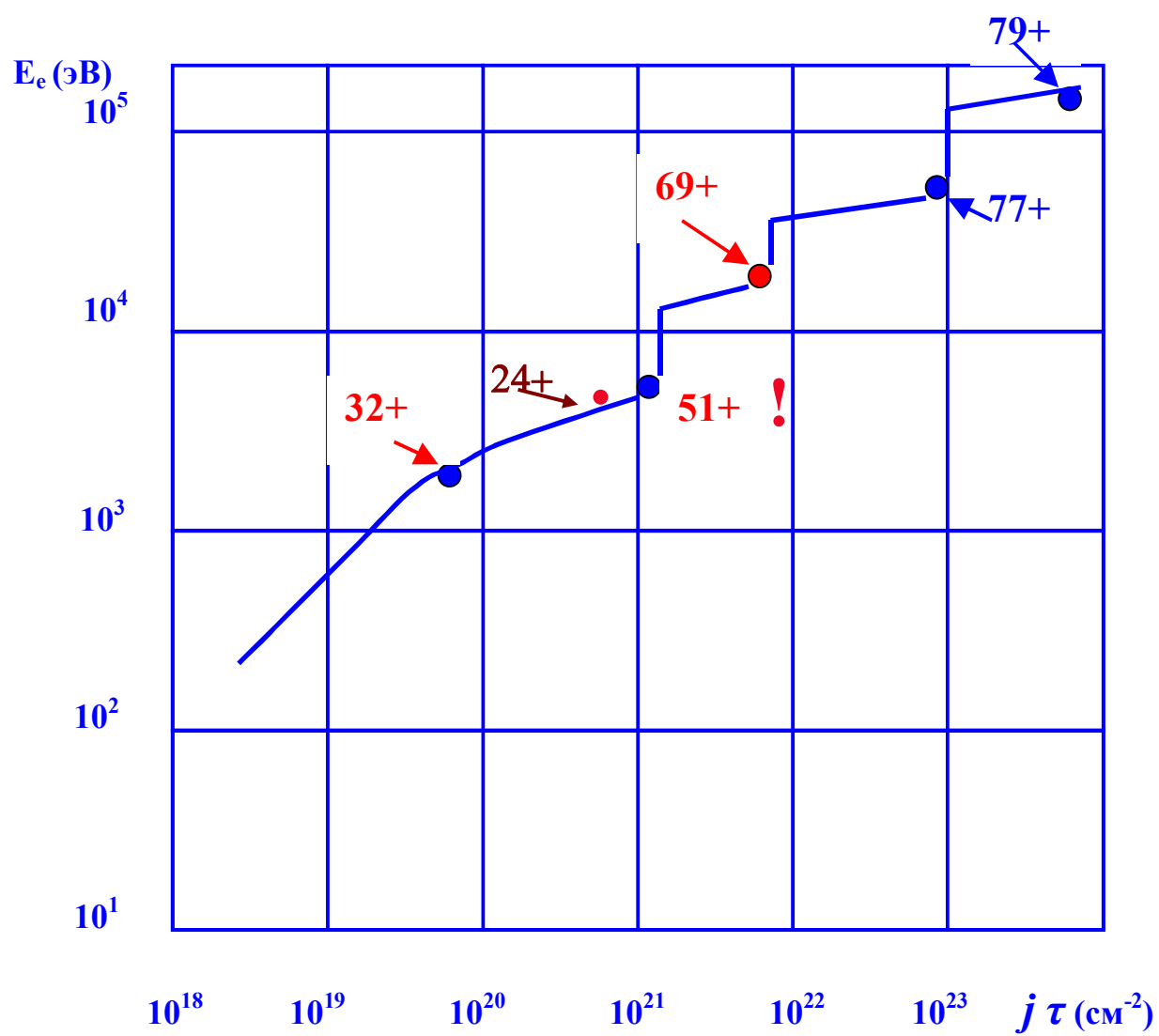


**Спектр зарядностей ионов золота при времени удержания 1100 мс в электронной струне при включенном ион-ионном охлаждении.**

$N_i \sim 2-3 \cdot 10^8$  ион/имп

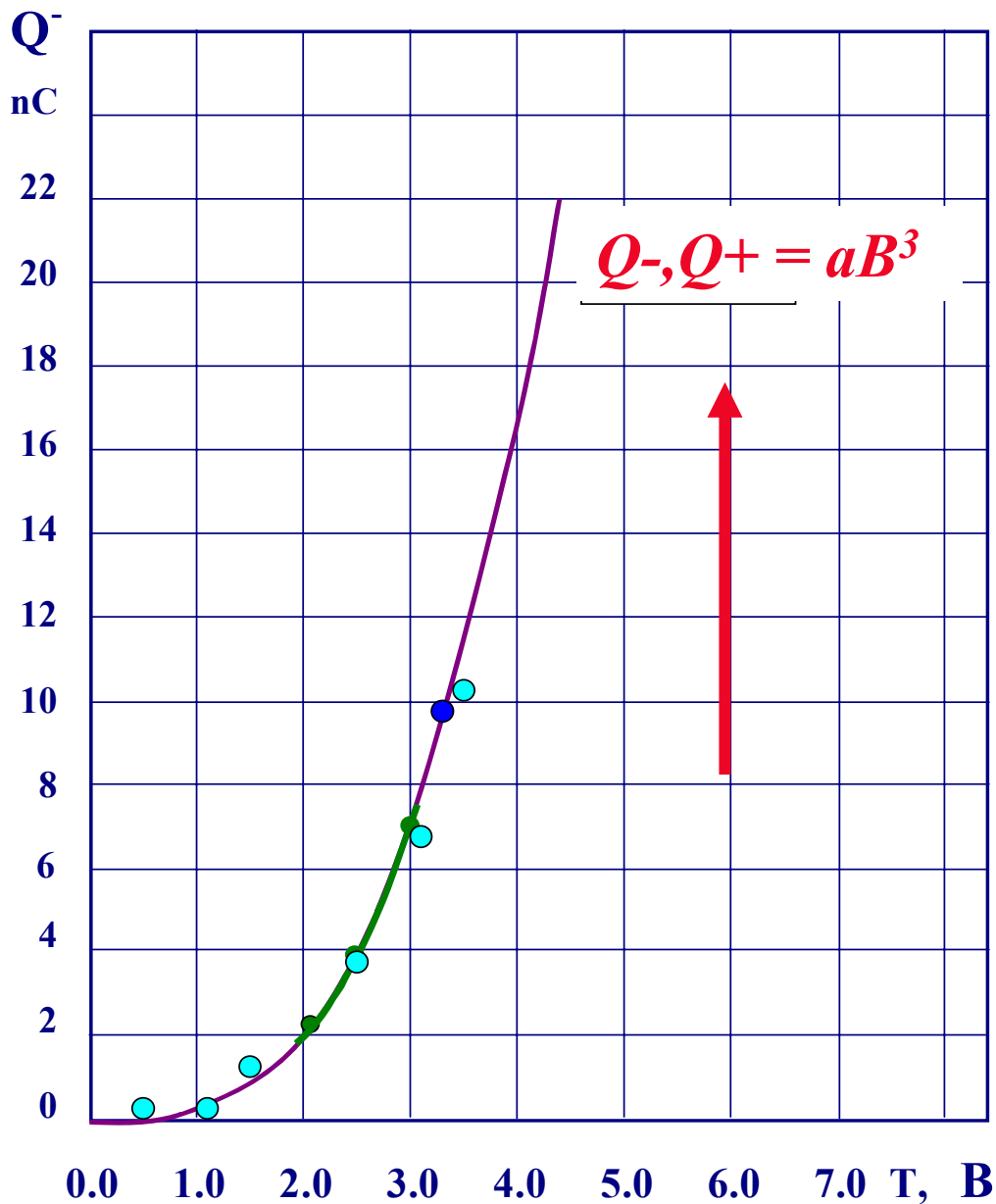
Jul 19 2007





**Энергии электронов и значения фактора ионизации, необходимые для получения ионов Au указанных зарядностей**

2002



$B = 3.3 \text{ T}$     $Q^- = 10 \text{ nC}$

$B = 6.0 \text{ T}$     $Q^- = 50 \text{ nC}$   
 $= 3.0 \cdot 10^{11} \text{ e.ch.}$

$B = 9.0 \text{ T}$     $Q^- = 150 \text{ nC}$

$B = 12.0 \text{ T}$     $Q^- = 450 \text{ nC}$   
 $= 2.8 \cdot 10^{12} \text{ e.ch.}$

Dependency of a number of string electrons on solenoid magnetic field ( 1 m string )

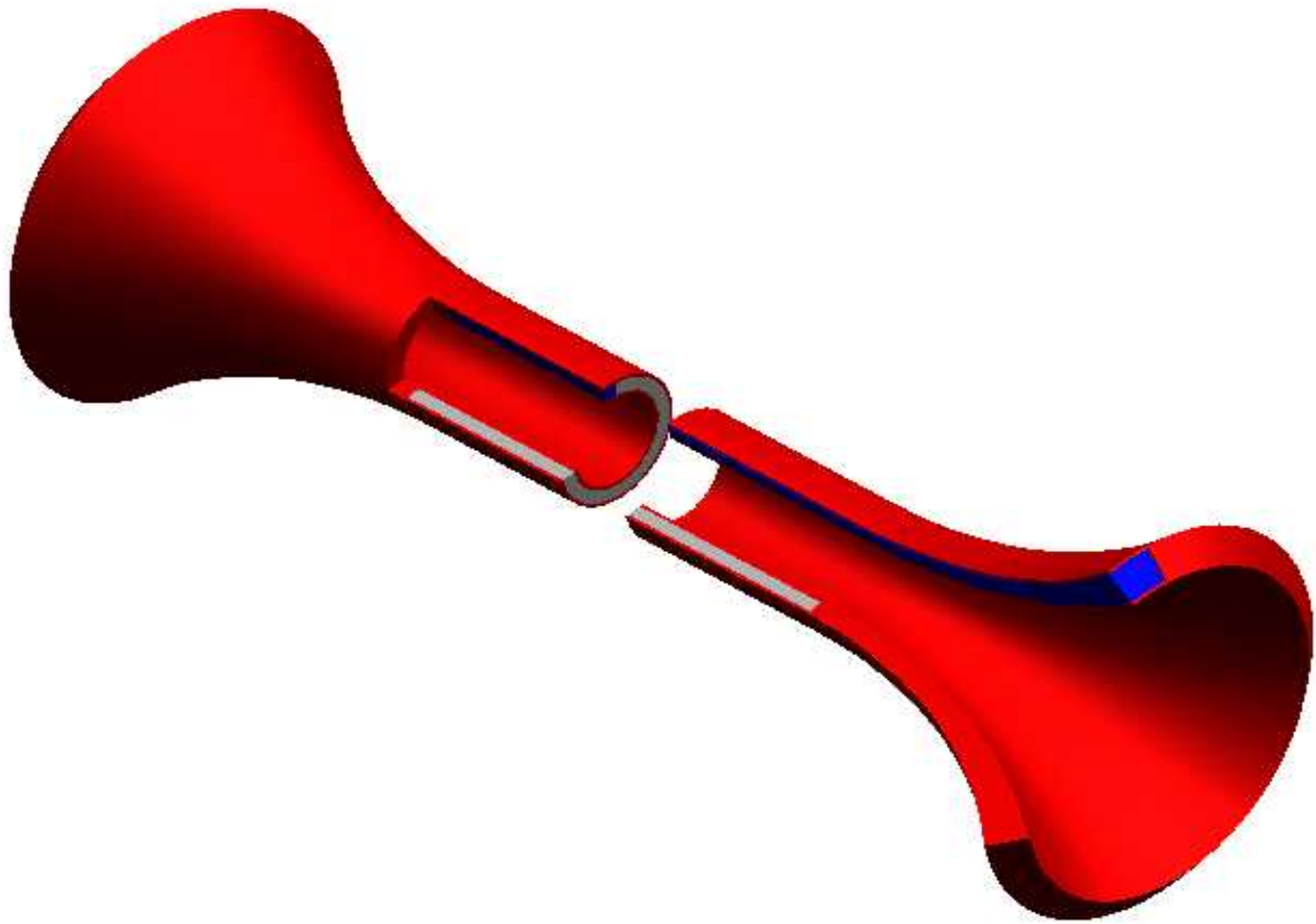
*В настоящее время разрабатывается идея формирования трубчатой электронной струны.*

*В случае успеха для трубчатого электронно-струнного ионного источника увеличение эффективности ионизации и выхода высокозарядных ионов может составить 100-1000 раз по сравнению с ионным источником, основанным на линейной электронной струне.*



Tubular electron string (painting)

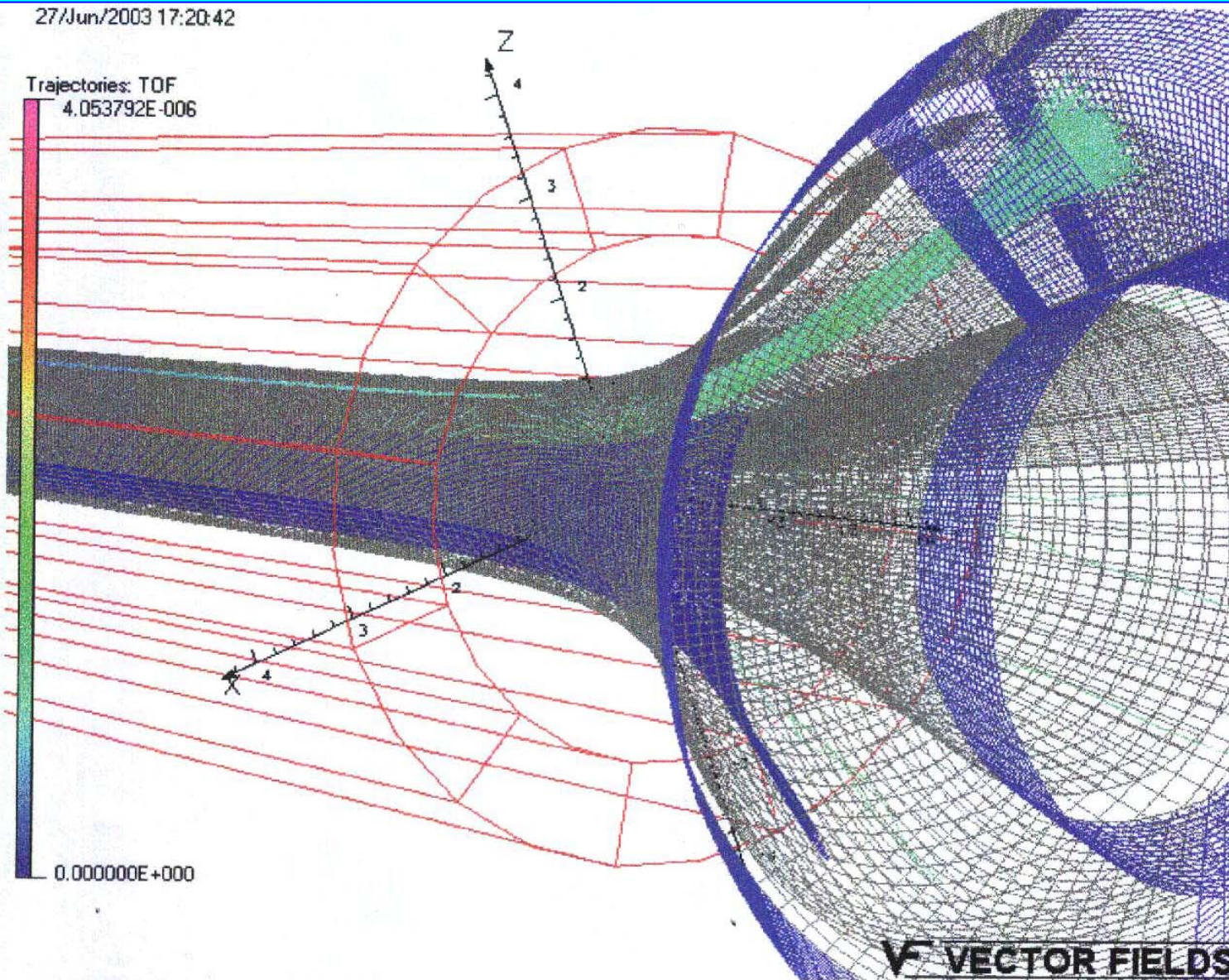




Off-axis ion extraction from tubular electron string (painting)

27/Jun/2003 17:20:42

Trajectories: TOF  
4.053792E-006



UNITS	
Length	cm
Magn Flux	gauss
Density	
Magn Field	oersted
Magn Scalar	oersted-cm
Pot	
Magn Vector	gauss-cm
Pot	
Elec Flux	C/cm <sup>2</sup>
Density	
Elec Field	V/cm
Conductivity	S/cm
Current Density	A/cm <sup>2</sup>
Power	W
Force	N
Energy	J

**PROBLEM DATA**  
offax5.op3  
SCALA Space charge  
No solution available  
Simulation No 1 of 1  
880000 elements  
928620 nodes  
1 conductor  
Nodally interpolated fields

**Local Coordinates**  
Origin: 0.0, 0.0, 0.0  
Local XYZ = Global XYZ

**V VECTOR FIELDS**

3D-simulation of the off-axis ion extraction from a tubular string

**Q<sup>-</sup>(e-ch./m)**

**EBIS**

**ESIS/TESIS**

**10<sup>11</sup>**

**10 KW**

**50 W**

**10<sup>12</sup>**

**200 KW**

**200 W**

**10<sup>13</sup>**

**5000 KW**

**2 KW**

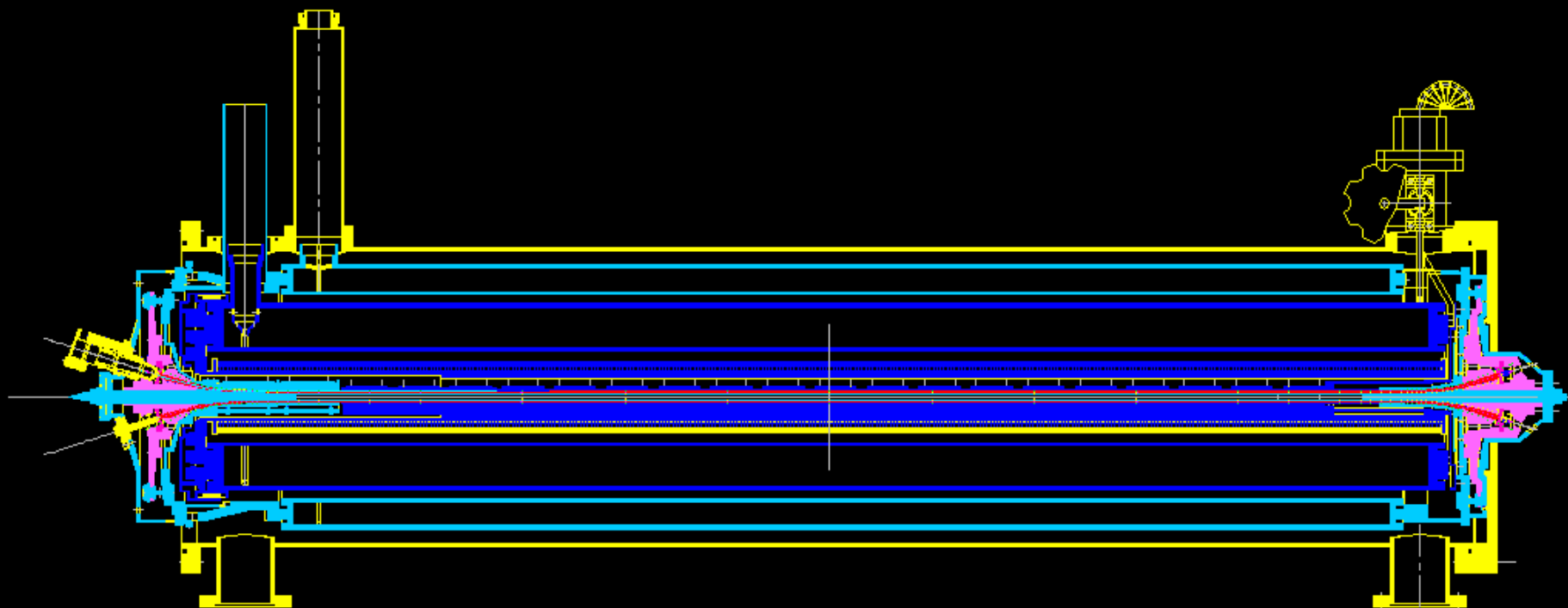
**10<sup>14</sup>**

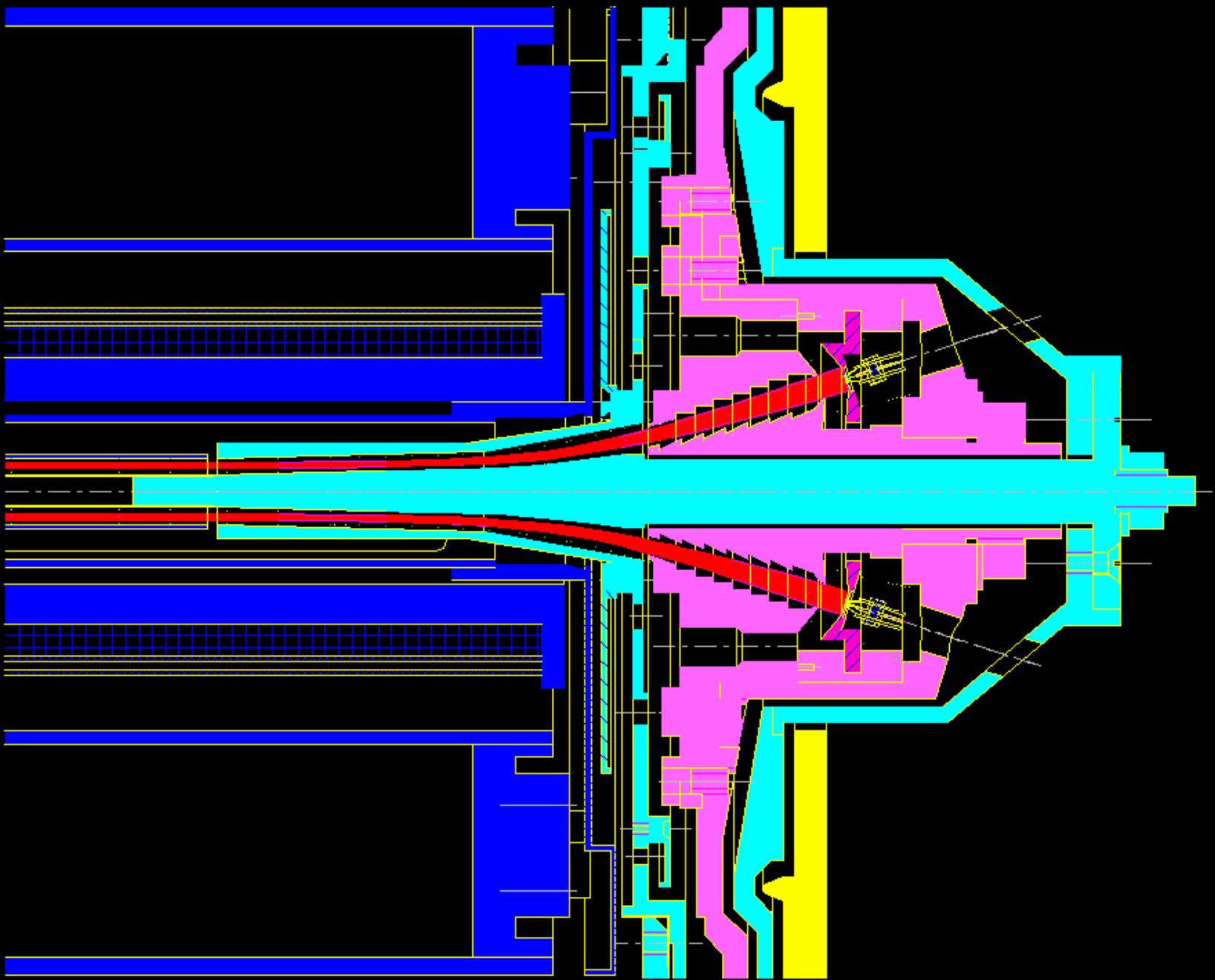
**20 KW**

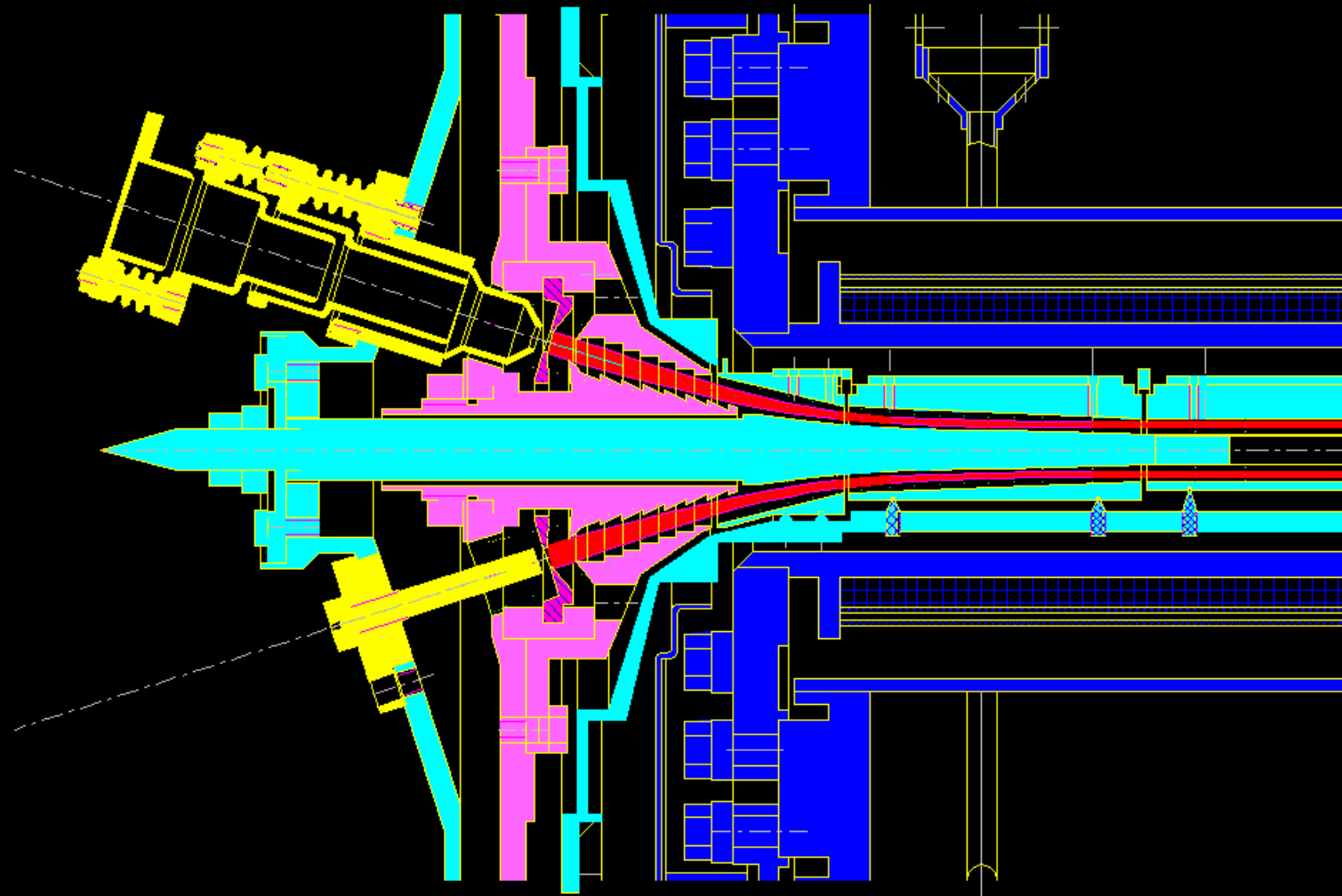
**10<sup>15</sup>**

**200 KW**

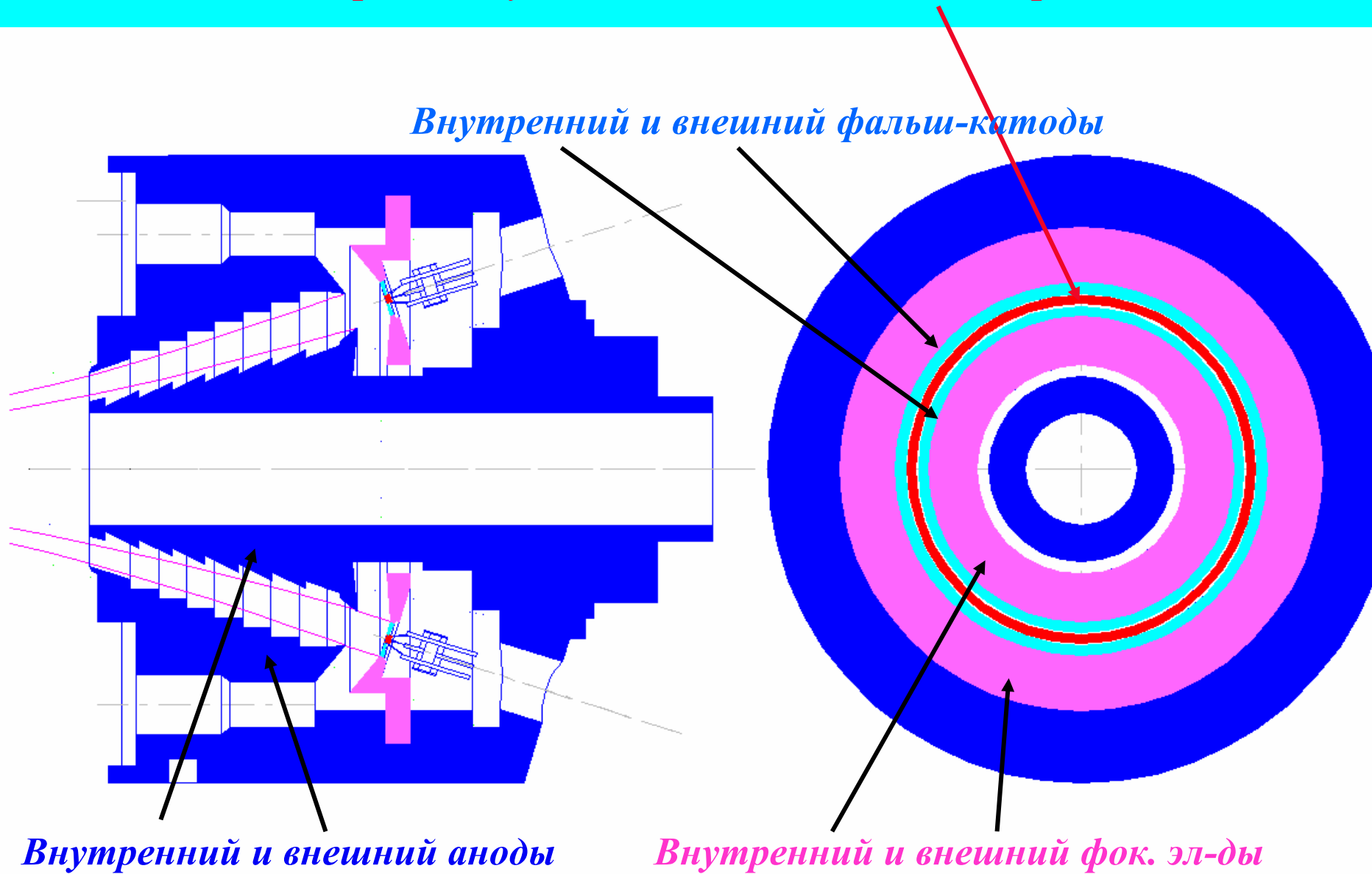




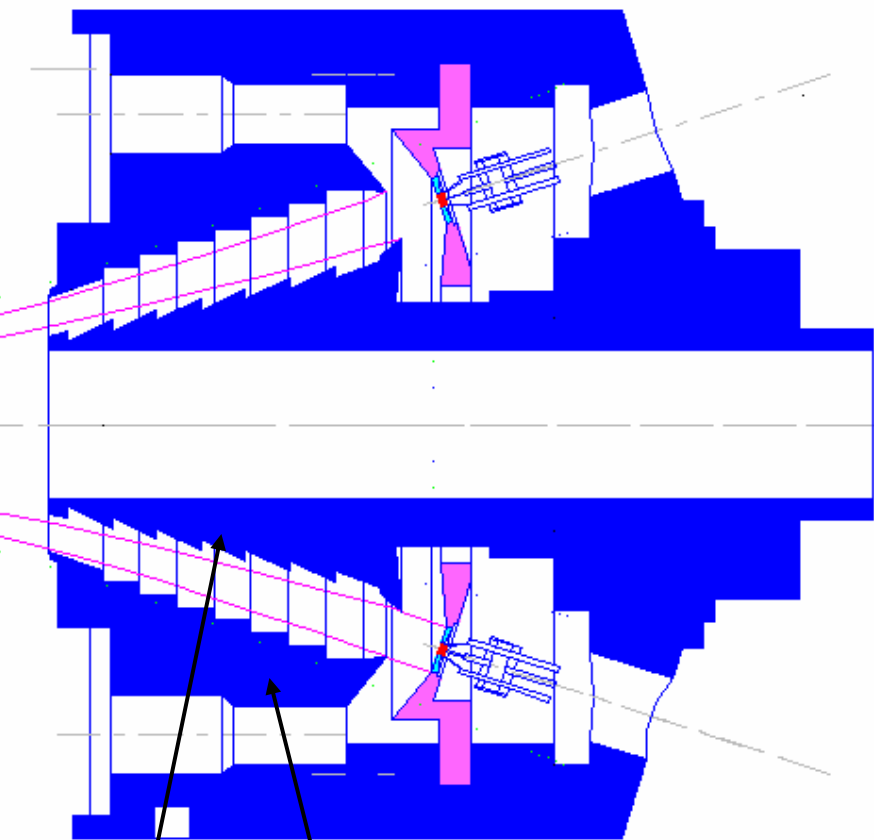




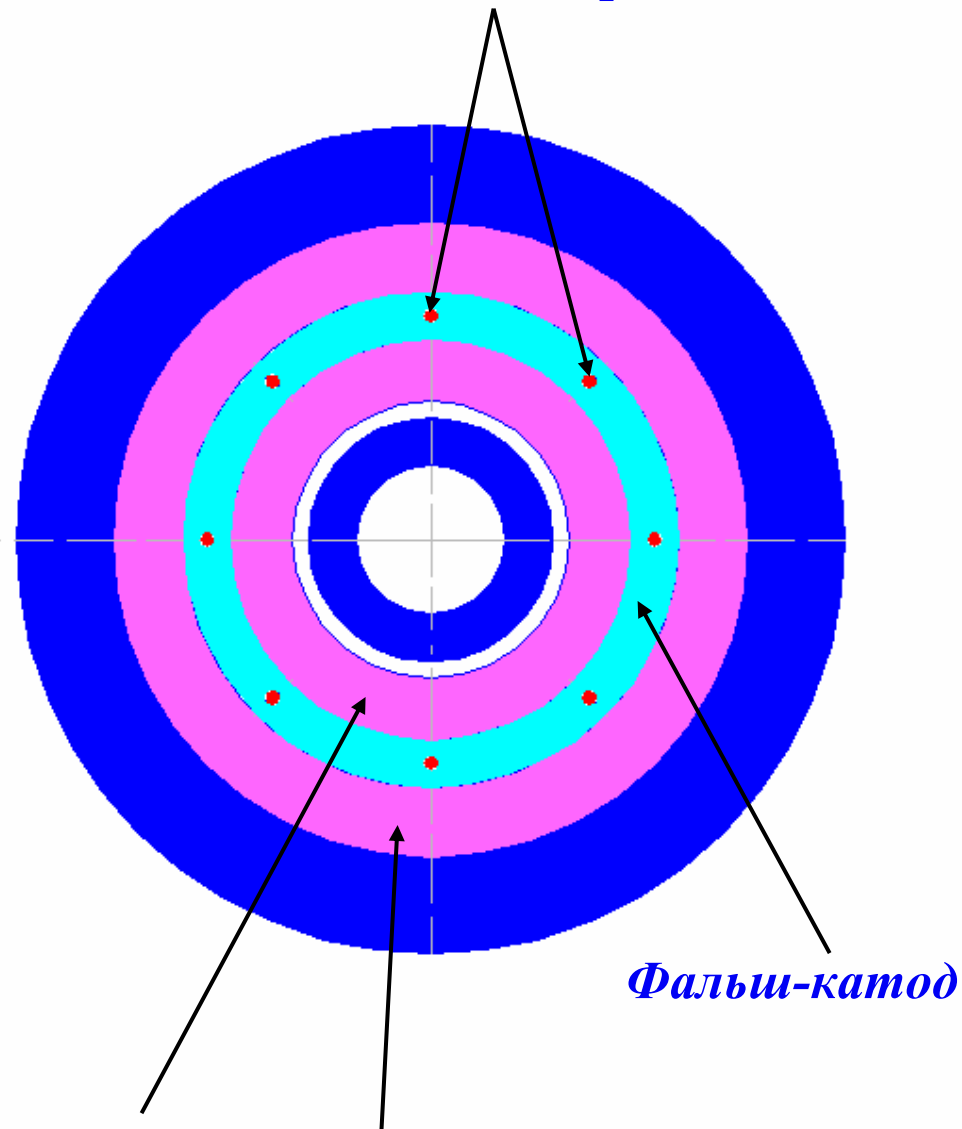
# Электронная пушка с кольцевым эл. эмиттером



# Электронная пушка с 8 точечными эмиттерами



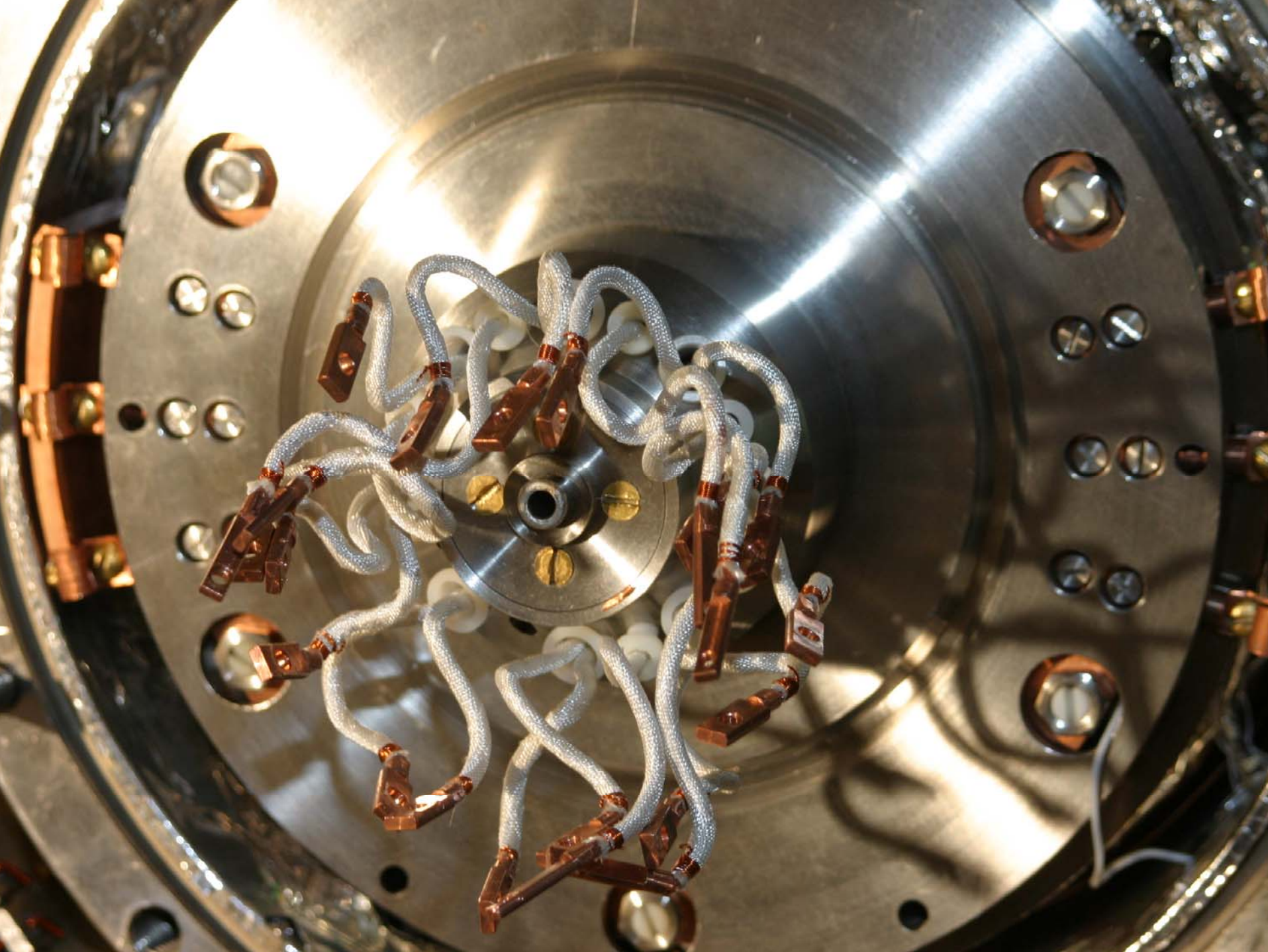
*Внутренний и внешний аноды*



*Внутренний и внешний фок. электроды*

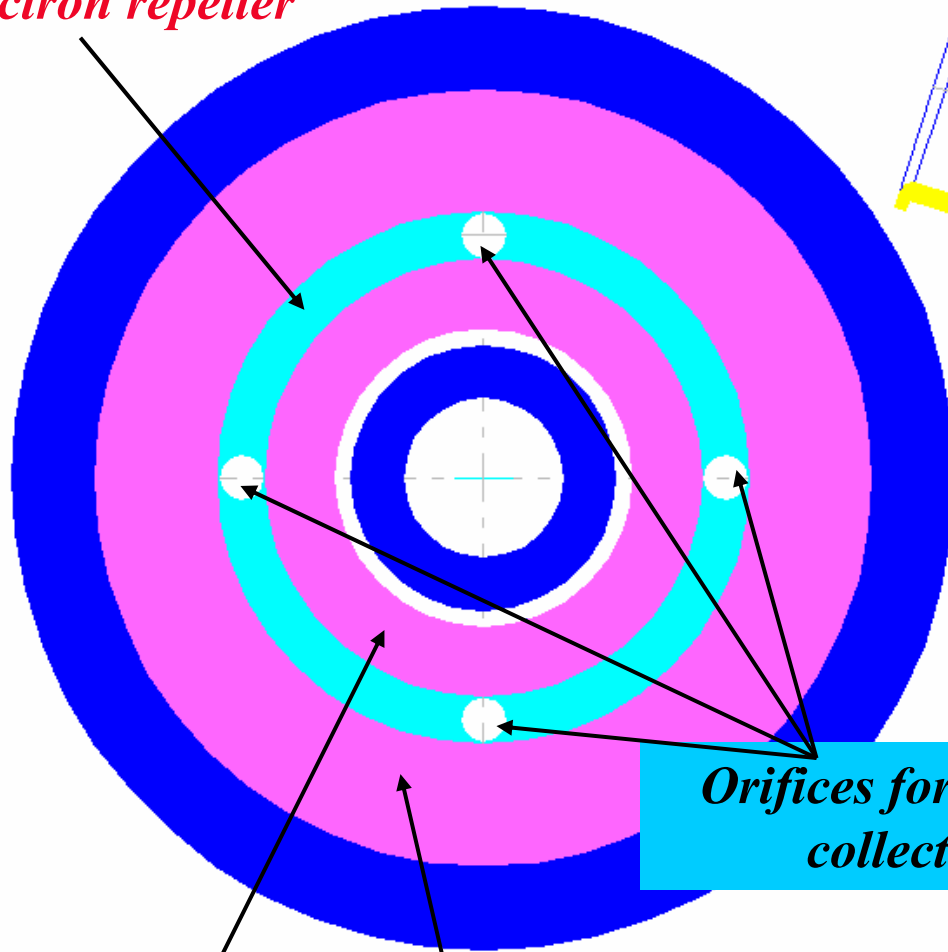
*Фальш-катод*





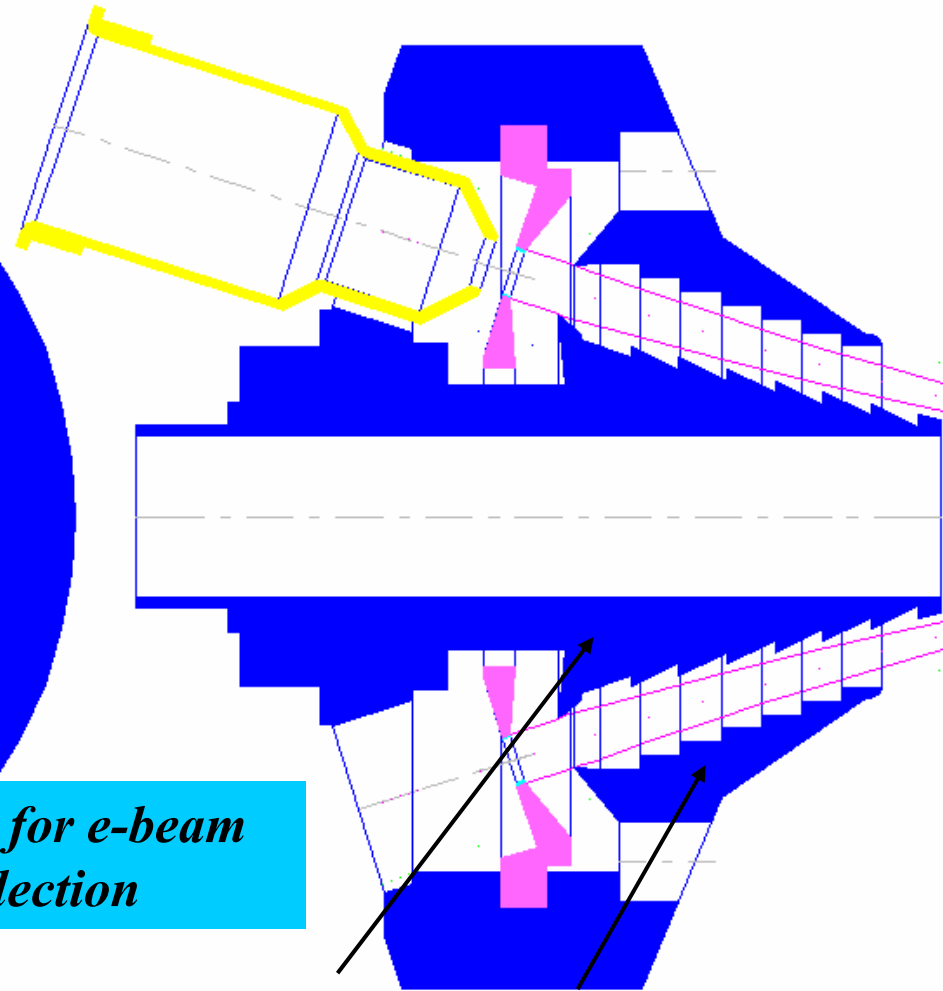
*Electron reflector for the case of the gun with 8 electron emitters*

*Electron repeller*



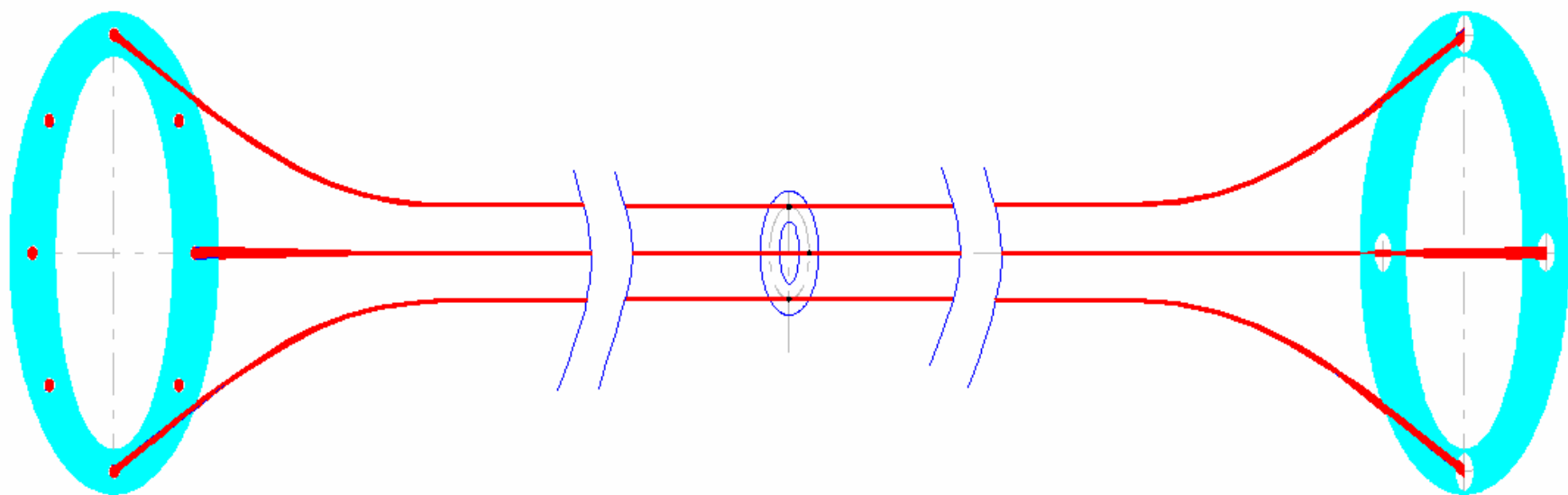
*Orifices for e-beam collection*

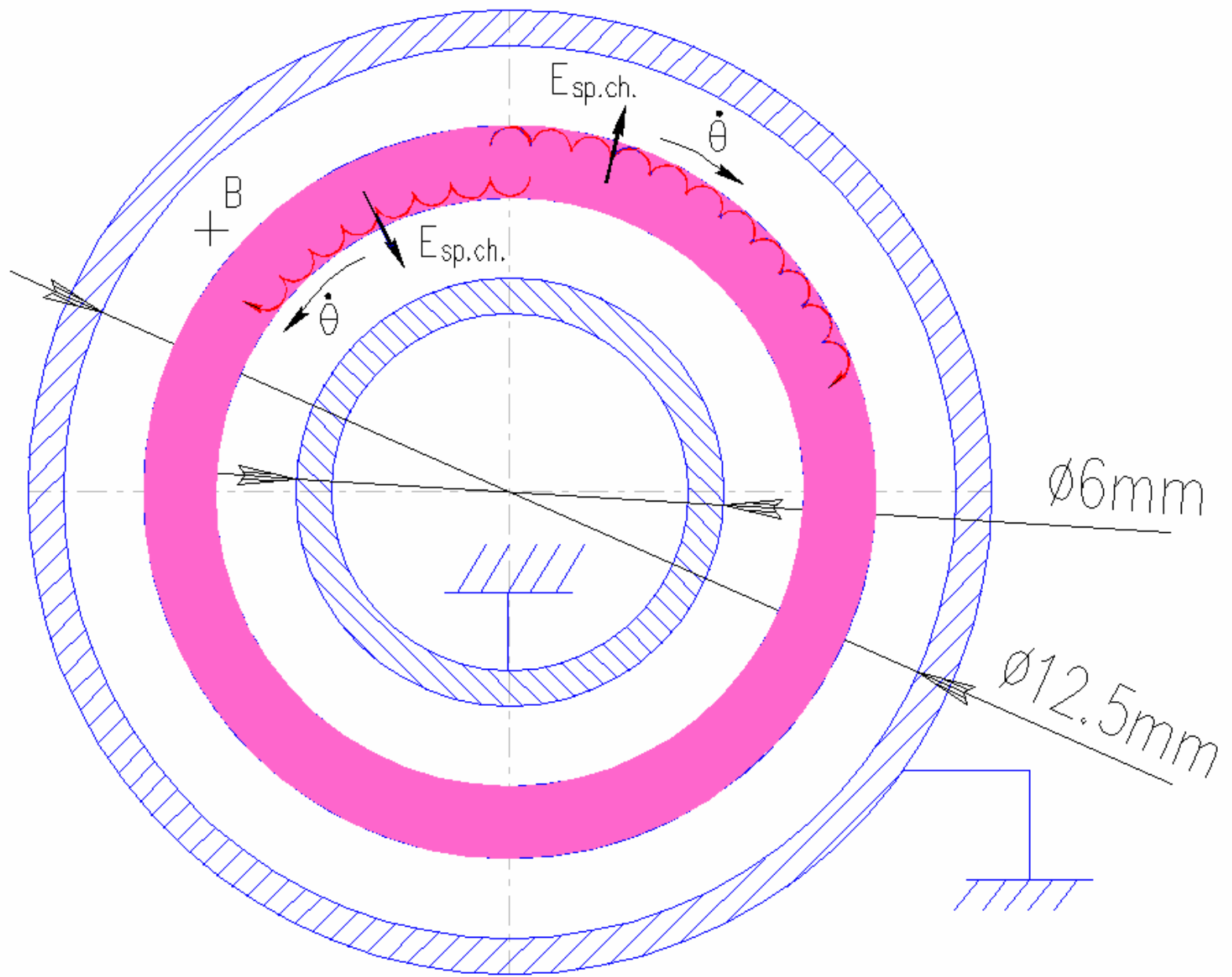
*Inner and outer focusing electrodes*

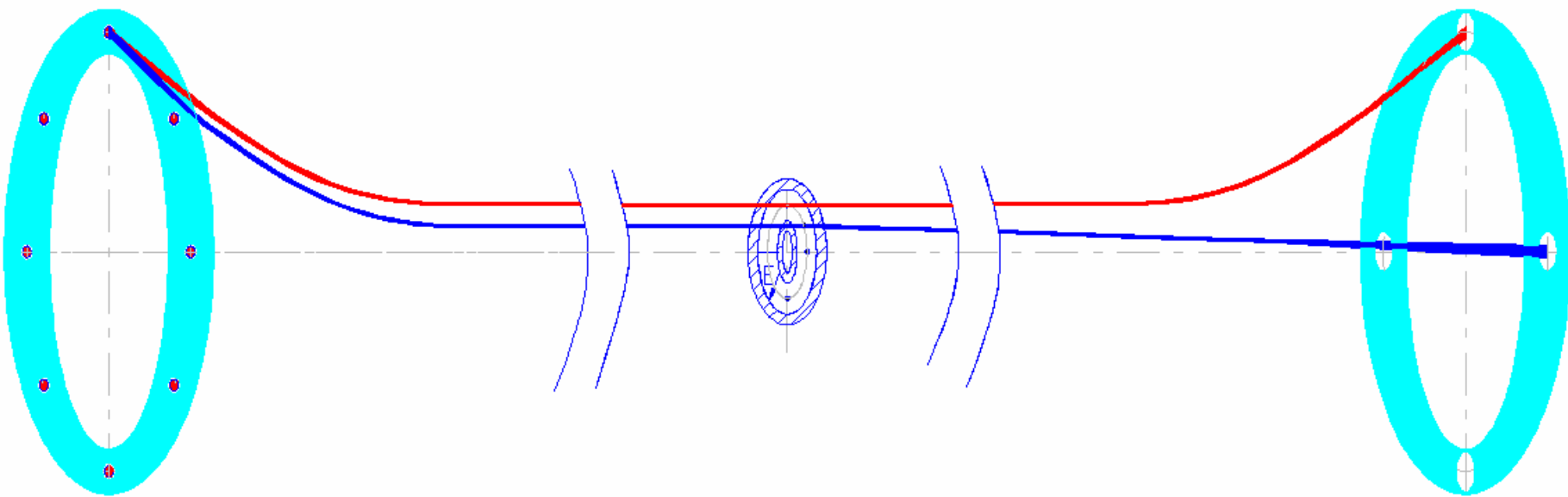


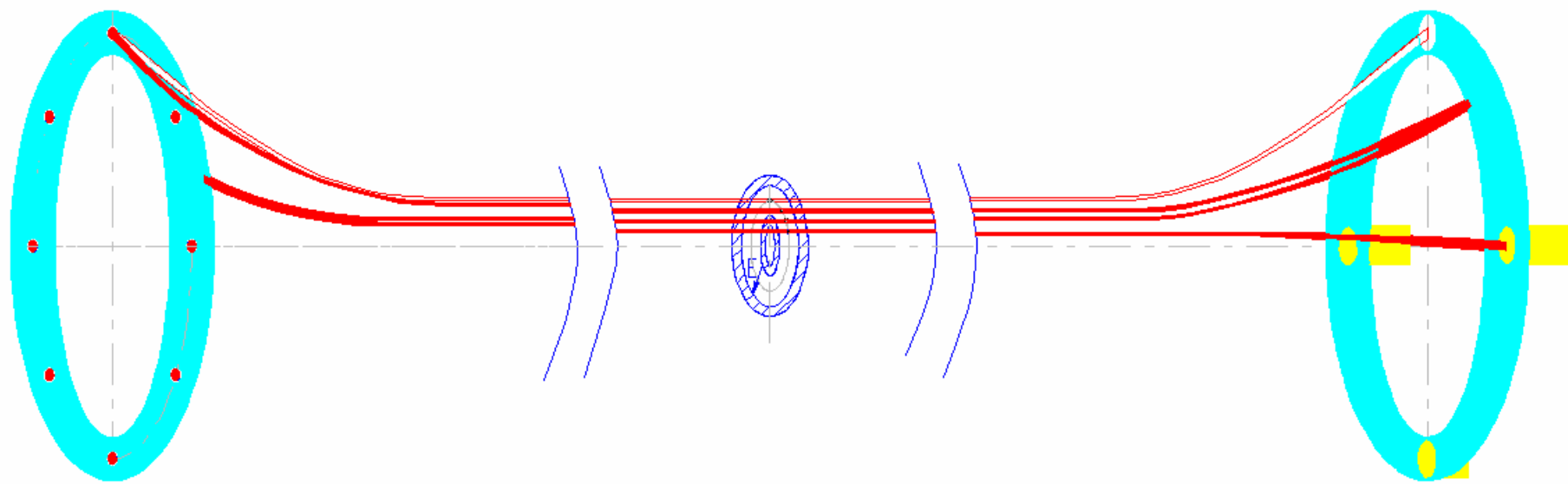
*Inner and outer anodes*



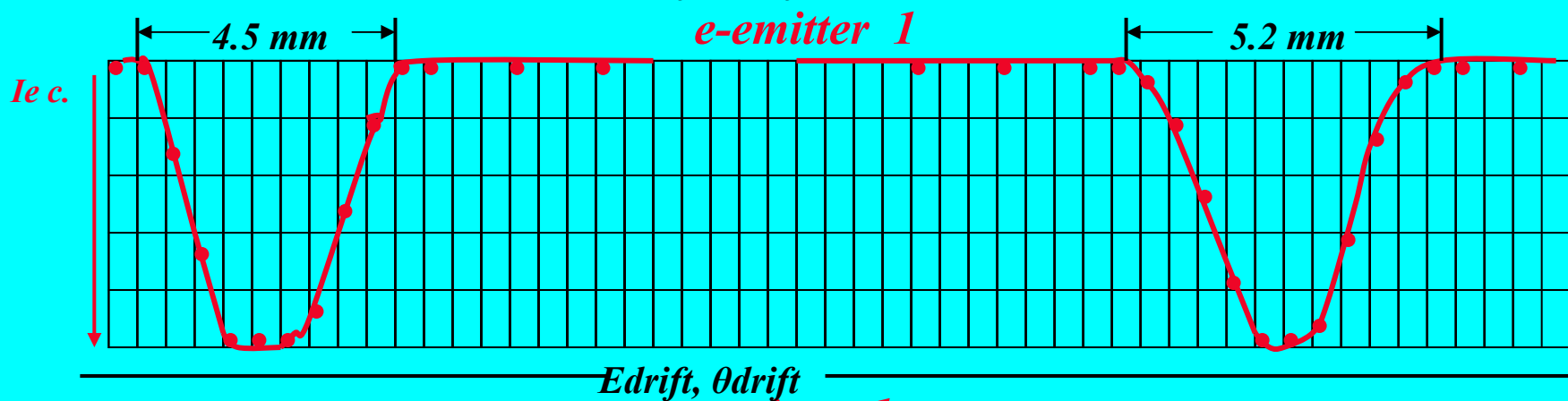
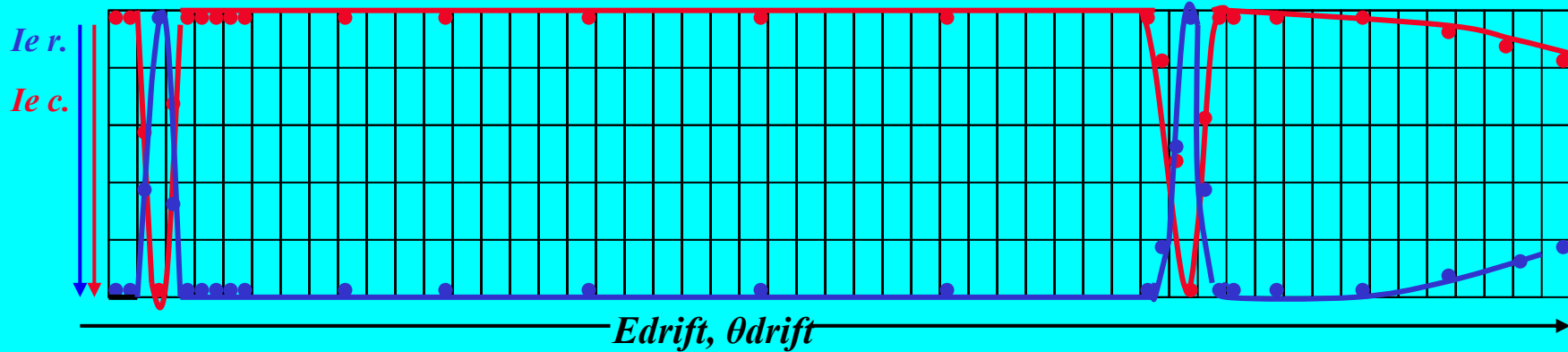








*e-emitter 1*





# Заключение

1. Источник высокозарядных ионов «Крион» представляет собой уникальный инструмент, с помощью которого в области атомной физики, физики заряженной плазмы и ускорительной техники получены и получаются результаты выше или значительно выше мирового уровня.
2. Для ускорения ионов золота на существующем ускорительном комплексе «Нуклотрон» необходимо обеспечить от ионного источника пучки ионов с зарядностью не менее  $65+$ . Если пытаться решать эту задачу с помощью источника типа «Крион», в начале необходимо выполнить программу R&D, включающую создание стендового «Крион-6Т», получения В-зависимости в области 3-6 Т и дальнейшие исследования феномена электронной струны.
3. Для проекта NICA необходимы пучки ионов золота  $Au_{30+}$  или  $Au_{51+}$ . Пучки таких ионов получаются на существующем источнике «Крион», однако их интенсивности существенно ниже требуемых. Возможность использования здесь источника типа «Крион», может быть определена лишь после выполнения программы R&D, включающей создание стендов «Крион-6Т» и «Крион-ТС», получения В-зависимости в области 3-6 Т и дальнейшие исследования феномена электронной струны.

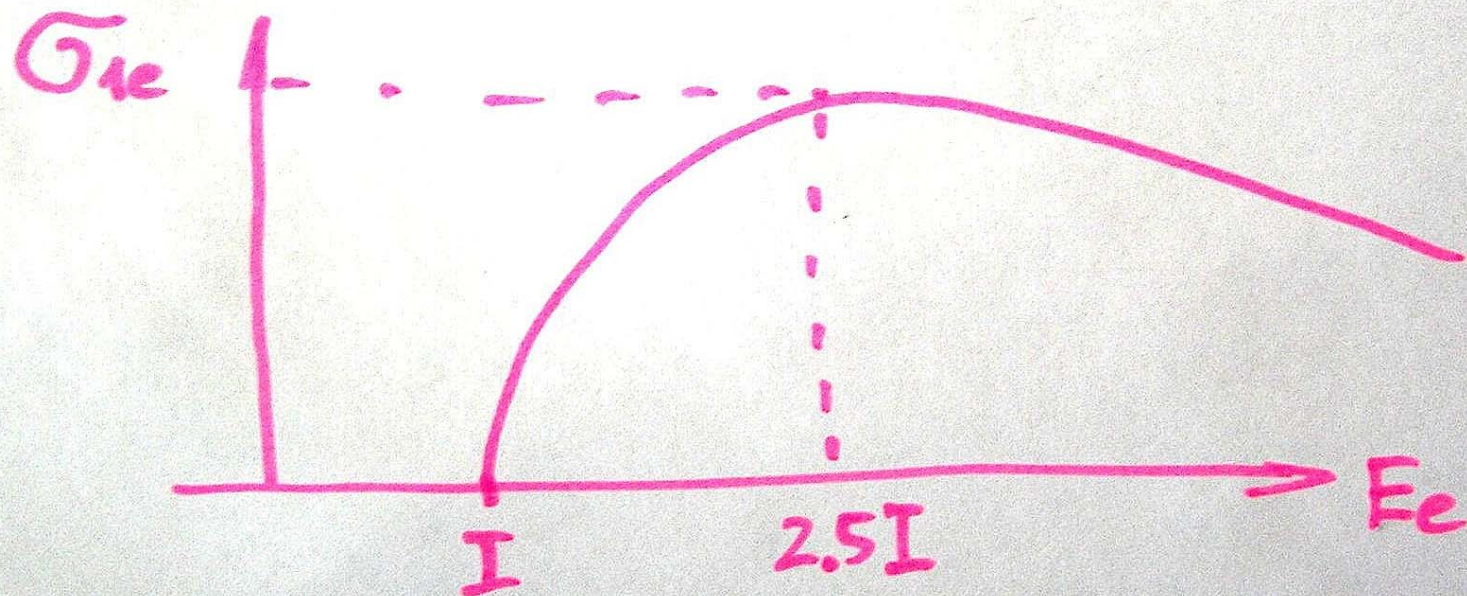
*Спасибо за  
внимание!*

# Ионизация положительных ионов электронным ударом

$$\sigma_{ie} \approx \frac{4.5 \cdot 10^{-14}}{I E_e} \ln \frac{E_e}{I} \text{ (см}^2\text{)}$$

$I$  - потенциал ионизации  
(энергия связи)    в эВ

$E_e$  - энергия электрона    в эВ



$$\sigma_{q \rightarrow q+1} = \sum_{n=n_q}^{n_{\min}} \frac{4.5 \cdot 10^{-14}}{I_{nl} E_e} K_{nl} \ln \frac{E_e}{I_{nl}}$$

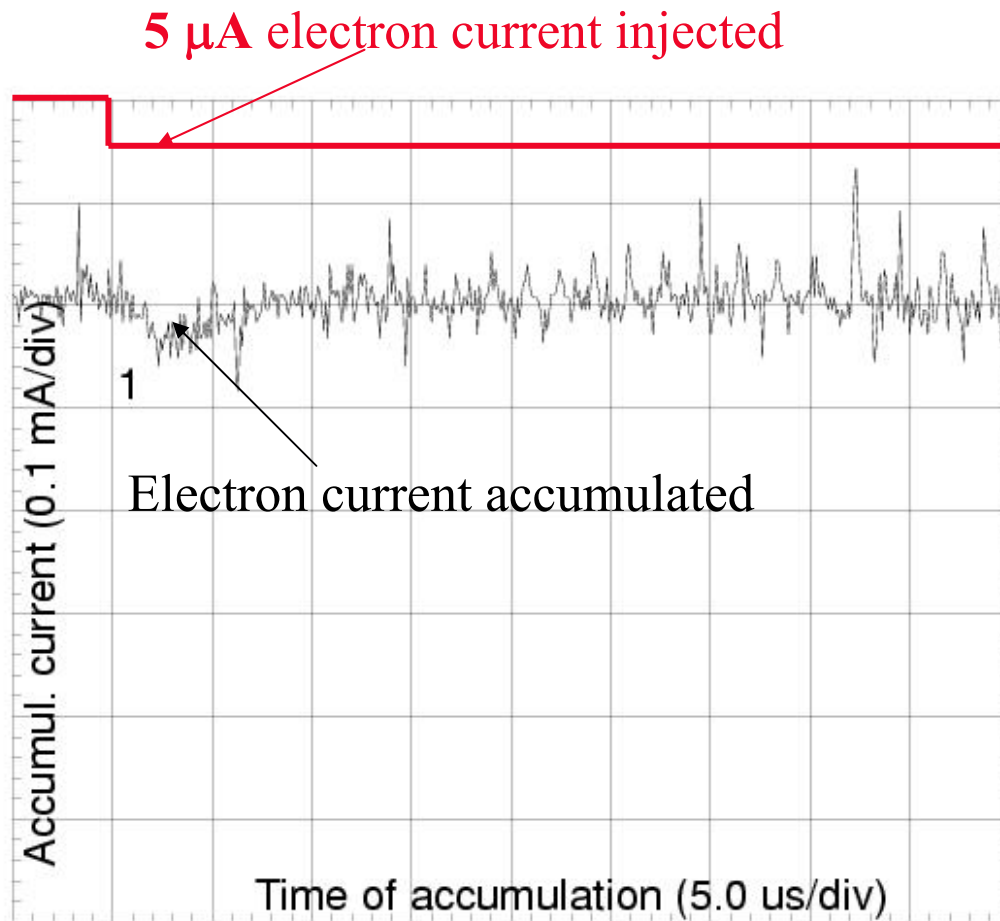
$n$  - главное квантовое число

$n_q$  - главное квантовое число внешней оболочки  
иона зарядности  $q$

$I_{nl}$  - потенциал ионизации  $nl$ -подоболочки  
иона зарядности  $q$

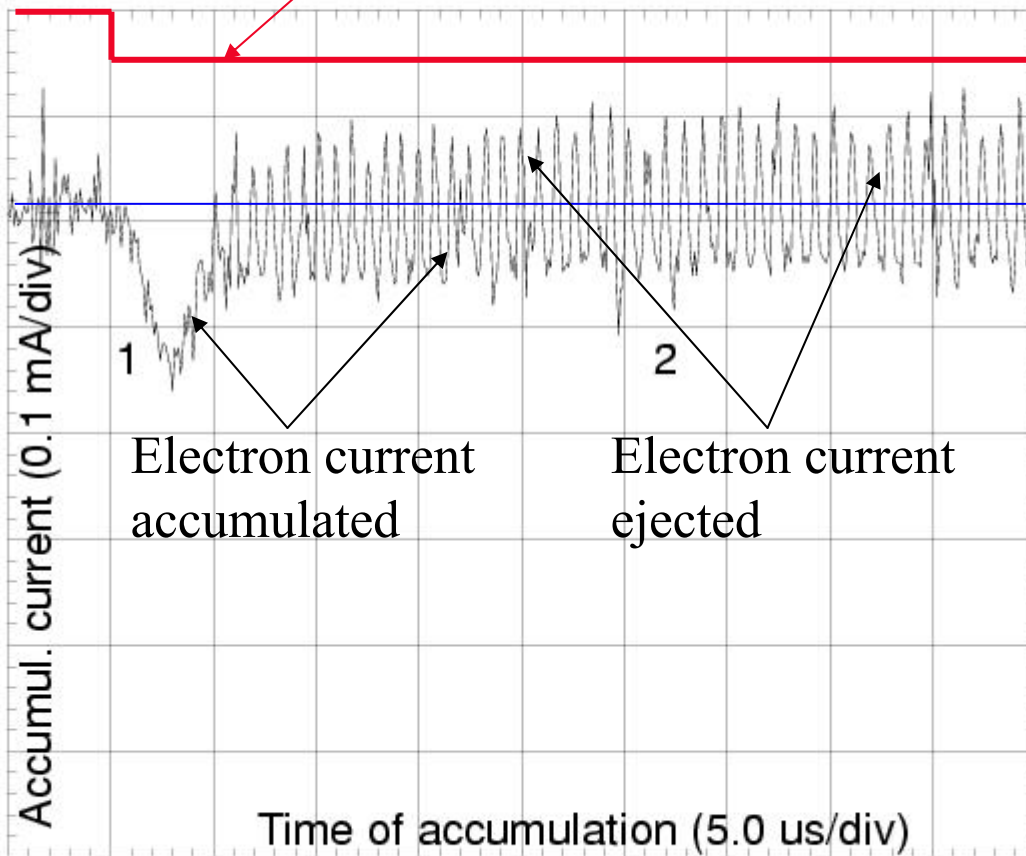
$K_{nl}$  - число эквивалентных электронов  
 $nl$ -подоболочки иона с зарядностью  $q$

$n_{\min}$  - минимальное значение  $n$  для кото-  
рого  $E_e/I_{nl}$  еще превышает 1.

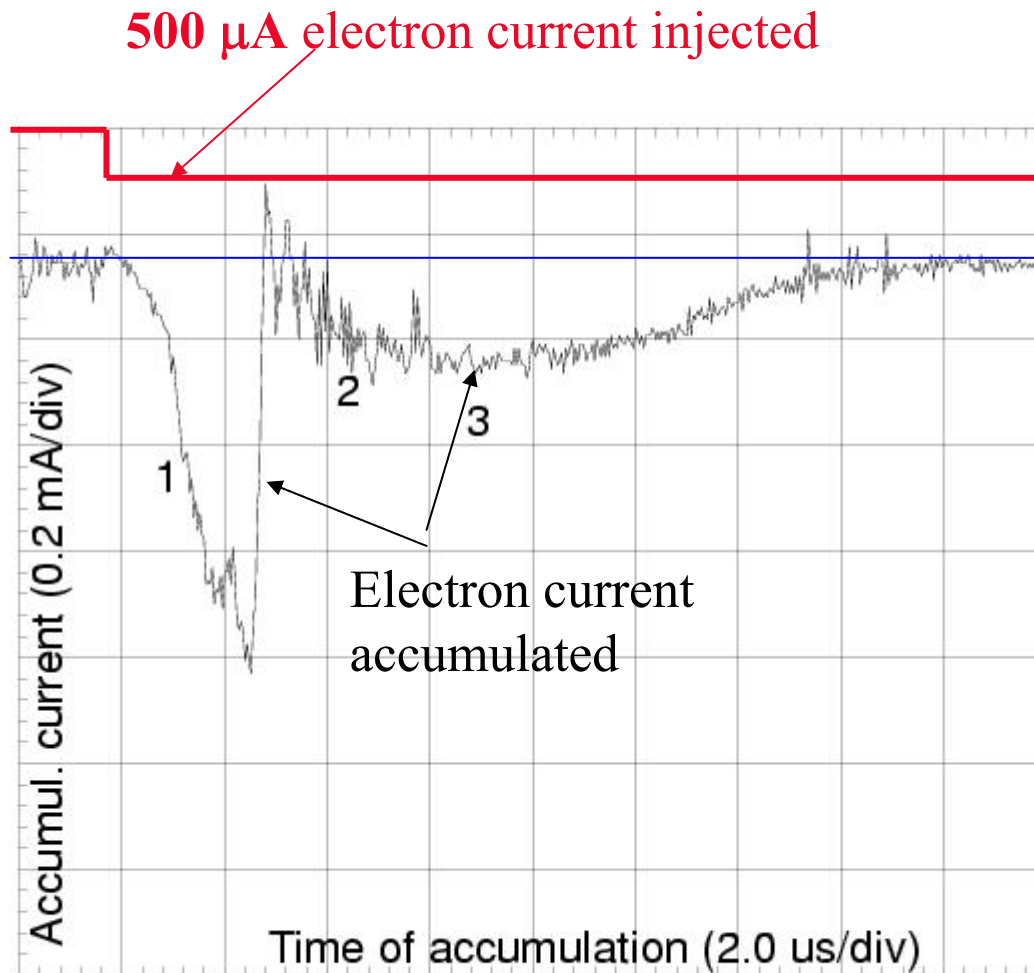


Injection electron current: **5  $\mu\text{A}$**

50  $\mu\text{A}$  electron current injected



Injection electron current: **50  $\mu\text{A}$**



Injection electron current: **500  $\mu\text{A}$**





**1. «Крион-2»:  $B \leq 3.3$  T, electron energy  $E_e \leq 8$  кэВ.**

<b>Ion beam</b>	<b>Au30+, (U30+)</b>	<b>Fe24+, experiment</b>	<b>Au51+, (ion-ion cooling ?).</b>
<b>Ion yeild/ pulse, <math>N_i</math></b>	<b><math>5 \times 10^8</math></b>	<b><math>1 \times 10^8</math></b>	<b><math>1 \times 10^8</math></b>

Ion yield depends on R&D results:

**2. New source «Krion-6T»:  $B \leq 6$  T,  $E_e = 2.5 \times 10^4$  эВ.**

<b>Ion beam</b>	<b>Au30+ (U30+)</b>			<b>Au51+ (ion-ion cooling ?)</b>			<b>Au65+ ÷ Au69+ (ion-ion cooling)</b>		
<b>Dependen.</b>	$N_{e/i} \propto B$	$N_{e/i} \propto B^2$	$N_{e/i} \propto B^3$	$N_{e/i} \propto B$	$N_{e/i} \propto B^2$	$N_{e/i} \propto B^3$	$N_{e/i} \propto B$	$N_{e/i} \propto B^2$	$N_{e/i} \propto B^3$
<b>N ver. B</b>									
<b>Ion yield/ pulse, <math>N_i</math></b>	<b><math>1 \times 10^9</math></b>	<b><math>2 \times 10^9</math></b>	<b><math>4 \times 10^9</math></b>	<b><math>2 \times 10^8</math></b>	<b><math>4 \times 10^8</math></b>	<b><math>8 \times 10^8</math></b>	<b><math>1.5 \times 10^8</math></b>	<b><math>3 \times 10^8</math></b>	<b><math>6 \times 10^8</math></b>

**3. New «Krion-12T»:  $B = 12.0$  T,  $E_e = 1.25 \times 10^5$  эВ.**

<b>Ion Beam</b>	<b>Au30+ (U30+)</b>			<b>Au51+ (ion-ion cooling ?)</b>			<b>Au65+ ÷ Au69+ (ion-ion cooling)</b>		
<b>N ver. B</b>	$N_{e/i} \propto B$	$N_{e/i} \propto B^2$	$N_{e/i} \propto B^3$	$N_{e/i} \propto B$	$N_{e/i} \propto B^2$	$N_{e/i} \propto B^3$	$N_{e/i} \propto B$	$N_{e/i} \propto B^2$	$N_{e/i} \propto B^3$
<b>Ion yield / pulse, <math>N_i</math></b>	<b><math>2 \times 10^9</math></b>	<b><math>8 \times 10^9</math></b>	<b><math>3.2 \times 10^{10}</math></b>	<b><math>4 \times 10^8</math></b>	<b><math>1.6 \times 10^9</math></b>	<b><math>6.4 \times 10^9</math></b>	<b><math>3 \times 10^8</math></b>	<b><math>1.2 \times 10^9</math></b>	<b><math>4.8 \times 10^9</math></b>