



# Источники Отрицательных ионов

Лекции для аспирантов ИЯФ - 2016

## Лекции 1-2

- Отрицательные ионы, их свойства и применения
- Механизмы образования ОИ
- Основные разновидности источников ОИ
- Процессы генерации ОИ на поверхности

## Лекции 3-4

- Поверхностно-плазменный механизм генерации ОИ
- ППИ для ускорителей
- Работы по источникам отрицательных ионов для УТС

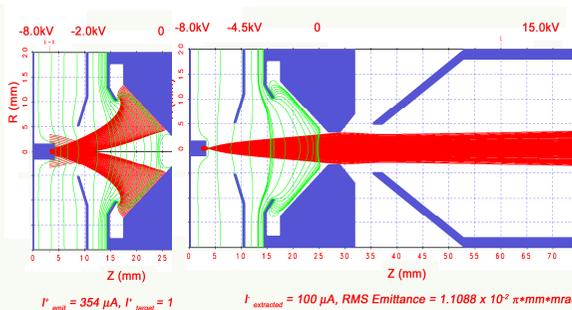
# 4. Поверхностно-плазменный механизм генерации отрицательных ионов

Кинетическая эмиссия ОИ с электродов газового разряда и при взаимодействии плазмы с поверхностями в разряде.

- Интенсивная бомбардировка электродов ионами и атомами
- **Ускорение положительных ионов из плазмы на электрод**
- Ускорение ОИ к эмиссионным отверстиям
- **Создание и поддержание эффективных покрытий электродов для интенсивной генерации ОИ в сильноточных разрядах**

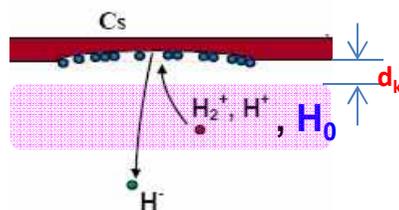
## В распылительных источниках

Поток Cs<sup>+</sup> на мишень 0,2 мА (10 мА/см<sup>2</sup>, 8 кВ)  
Поток C<sup>-</sup> от мишени 0,1 мА (1 мА/см<sup>2</sup>, 23 кВ)



## В поверхностно-плазменных источниках (планотрон)

Поток ионов H<sup>+</sup>, H<sub>2</sub><sup>+</sup>, H<sub>3</sub><sup>+</sup>, Cs<sup>+</sup> на катод 50 А (10 А/см<sup>2</sup>, 70 В)  
Плотность тока H<sup>-</sup> на катоде 0,3 А (3 А/см<sup>2</sup>, 100 В)



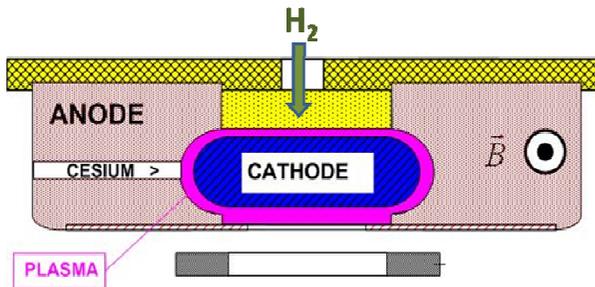
Импульсные тлеющие ЕхВ разряды обеспечивают большие токи ионов на катод благодаря тонким прикатодным слоям.

$$j \cong 0,17 \frac{U^{3/2}}{d^2} \rightarrow d_{\text{mm}} \cong 0,4 \frac{U^{3/4}}{j^{1/2}} \frac{[\text{kV}]}{[\text{A/cm}^2]} \approx 10^{-2} \text{ m m}$$

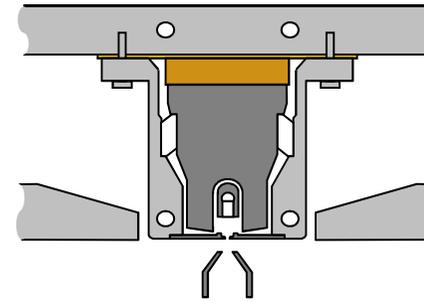
**Магнитное поле (разряда или магнитного фильтра) снижает плотность и температуру электронов, уменьшает выход сопутствующих электронов и выводит электроны из пучка**

# Поверхностно-плазменные источники ОИ

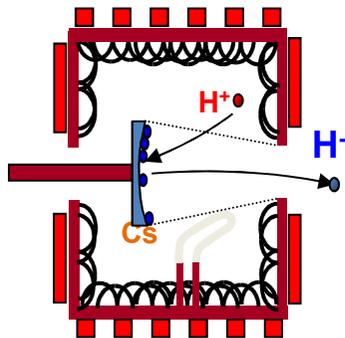
ИЯФ, 1971



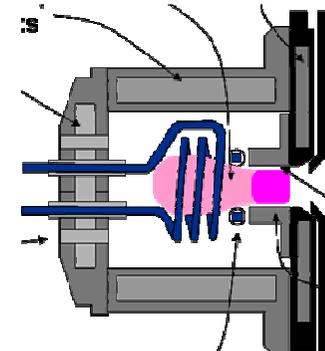
Генерация ОИ на катоде  
(импульсные источники для ускорителей)



Генерация ОИ на катоде и последующая  
перезарядка вблизи анода  
(импульсные источники для ускорителей)



Генерация ОИ на независимом электроде-  
конверторе  
(импульсные источники для ускорителей)



Генерация ОИ на аноде разряда  
(импульсные и dc источники для ускорителей,  
источники для инжекторов УТС)

# Импульсные ППИ на протонных ускорителях

From Doug Moeh, Fermilab, 2004

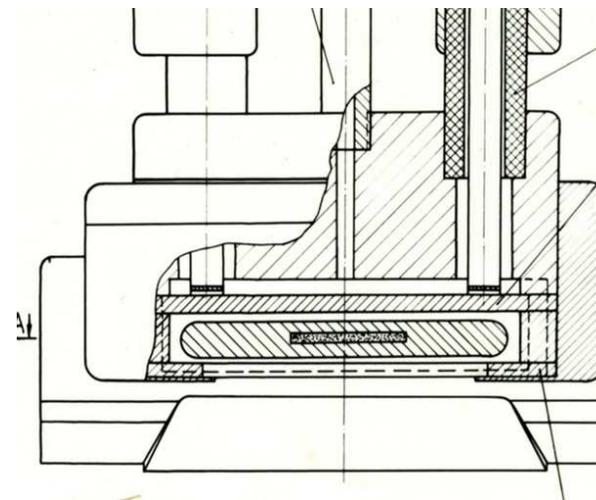
	Facility	Peak beam current	Rep. rate	Pulse length	Duty factor	Extraction potential	Maintaince interval	Emittance 90% x/y (norm)	Peak power efficiency
Magnetron	DESY-HERA	40 mA	5 Hz	100 us	0.05%	18 kV	38 weeks	1 $\pi$ mm mrad	~ 8 mA/kW
	BNL-AGS	35 mA	7.5 Hz	500 us	0.40%	35 kV	~ 26 weeks	1.1 $\pi$ mm mrad	~ 67 mA/kW
	ANL-IPNS	48 mA	30 Hz	70 us	0.20%	20 kV	~ 2 weeks	0.9 / 1.4 $\pi$ mm mrad	~ 9 mA/kW
	FNAL	60 mA	15 Hz	66 us	0.10%	18 kV	~ 12 weeks	0.9 / 1.5 $\pi$ mm mrad	~ 2.5 mA/kW
Penning	RAL-ISIS	35 mA	50 Hz	500 us	2.50%	18 kV	~ 4 weeks	0.7 / 0.9 $\pi$ mm mrad	~ 6 mA/kW
	INR-MMF	80 mA	100 Hz	250 us	2.50%	20 kV	~ 2 weeks	0.4 / 0.7 $\pi$ mm mrad	~ 8 mA/kW
Multicusp surface converter	KEK-KENS	18 mA	20 Hz	200 us	0.40%	into 750 kV col	~ 14 weeks	2 $\pi$ mm mrad	~ 4.5 mA/kW
	LANL-LANSCE	20 mA	120 Hz	1000 us	12.00%	80 kV	~ 4 weeks	0.6 $\pi$ mm mrad	~ 1.6 mA/kW
Multicusp RF	DESY-HERA	40 mA	5 Hz	100 us	0.05%	18 kV	~ 41 weeks (?)	0.4 $\pi$ mm mrad	~ 1 mA/kW
	SNS	50 mA	60 Hz	1000 us	6.00%	65 kV	~ 6 weeks	0.8 $\pi$ mm mrad (after l	

# Магнетронные ППИ с катодной генерацией ОИ

- Тонкий прикатодный слой падения напряжения в разряде обеспечивает **геометрическую фокусировку** ОИ на эмиссионные отверстия
- Поток ионов Cs<sup>+</sup> поддерживает **оптимальное цезиевое покрытие** на катоде
- Магнитное поле фильтрует электроны и уменьшает их вынос из разряда
- **Образуемые на катоде ОИ имеют повышенную энергию и угловой разброс!**



1971 г. Первый импульсный планотрон  
Cs таблетки положили на катод



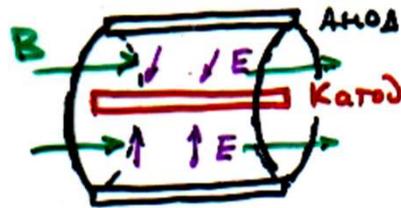
1973 г. Импульсный планотрон с  
эмиссионной щелью 1x30 mm<sup>2</sup>

Пучок Н- 880 мА / 20 кВ.  
Плотность тока эмиссии Н- до 3.7 А/см<sup>2</sup>

# Магнетронный разряд

Сильноточный тлеющий разряд в скрещенных  $E \times B$  полях с замкнутым дрейфом электронов

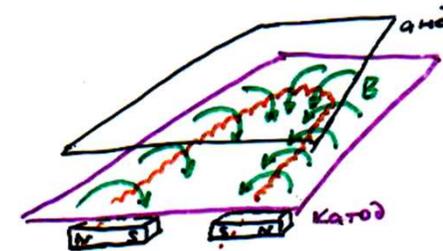
Геометрия разряда с замкнутым дрейфом электронов



магнетрон



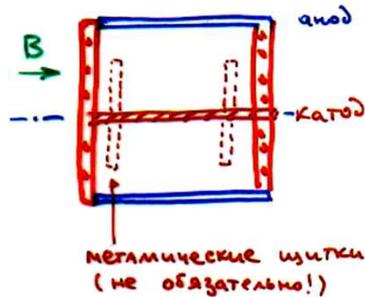
планотрон



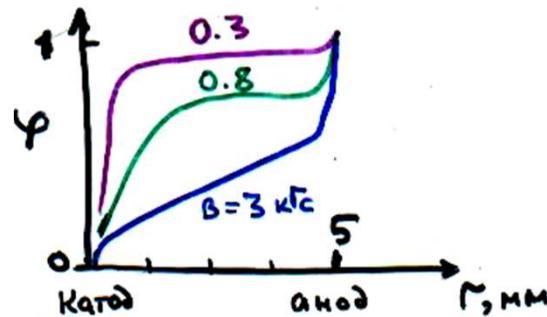
Планарный магнетрон с арочным магнитным полем

Полезные свойства магнетронного разряда:

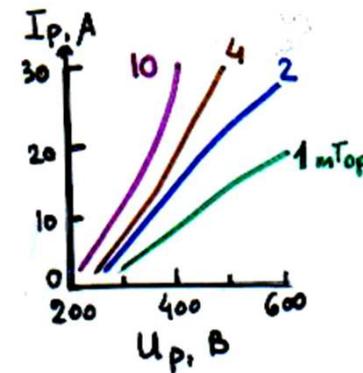
большие электрические поля в приэлектродных слоях и тонкой плазме, широкий диапазон токов и напряжений, низкие рабочие давления газа



Цилиндрический магнетрон с катодными щитками

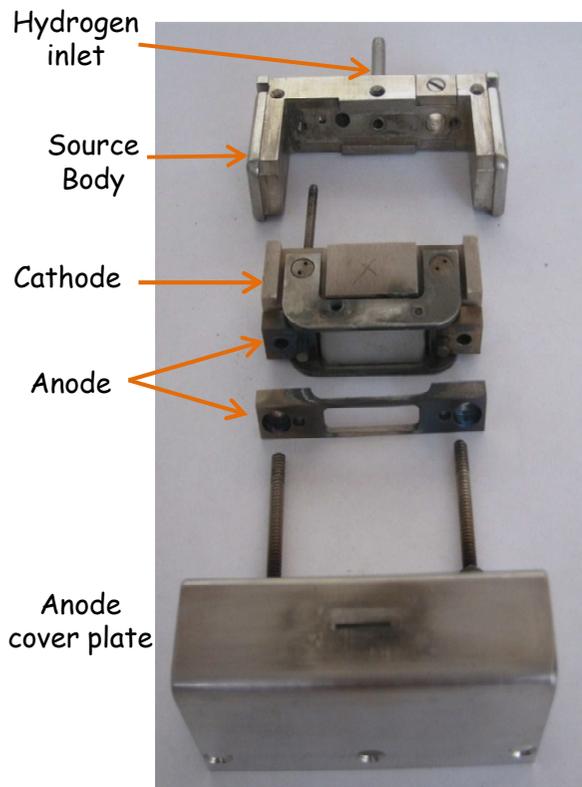


Распределение поля по радиусу. Цилиндрический магнетрон

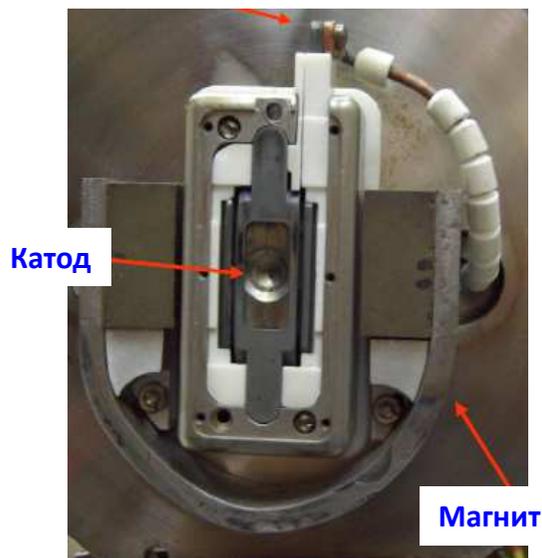


ВАХ планарного магнетрона vs давление аргона.  $B = 30 \text{ mT}$

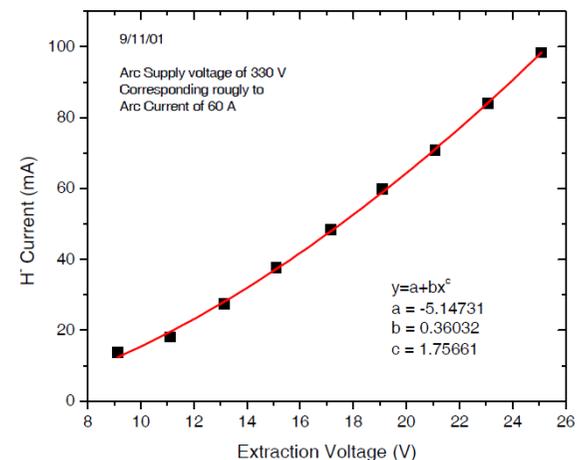
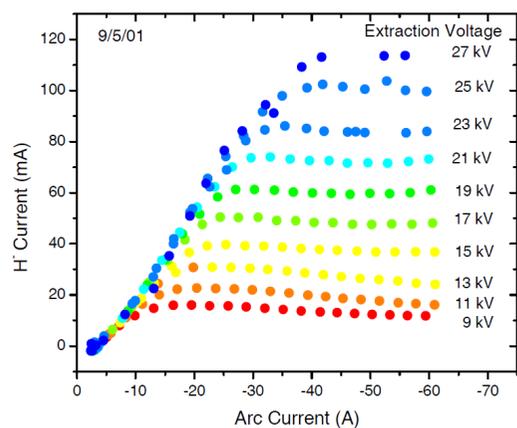
# Свойства Магнетронных ППИ



Конструкция импульсного магнетрона (планотрона) с эмиссионной щелью  $1 \times 10 \text{ mm}^2$  (FNAL)



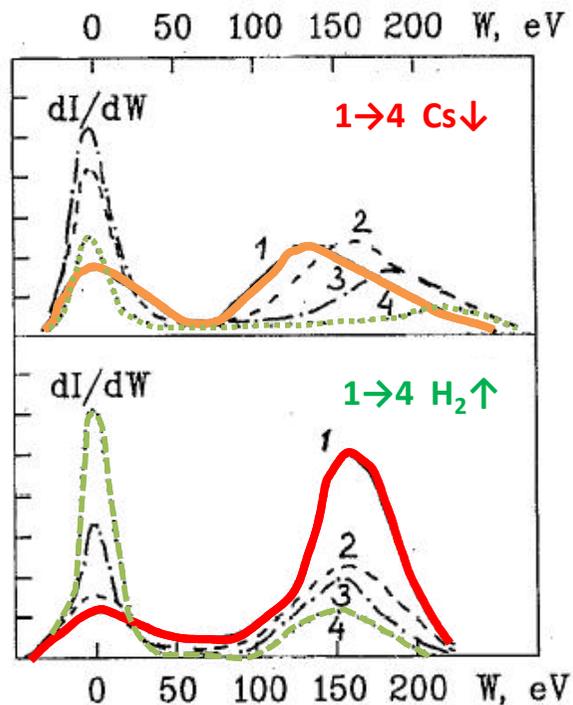
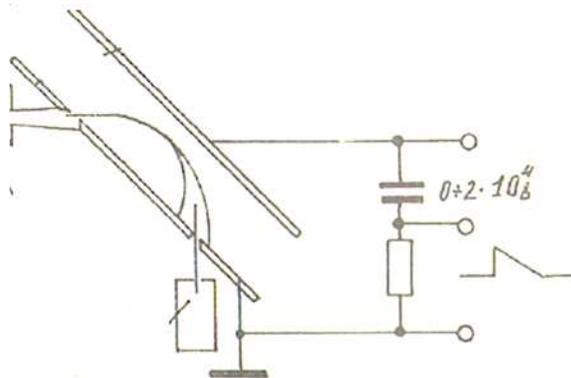
H- current	90 - 100 mA ( $1.5 \text{ A/cm}^2$ )
Extraction	35 kV
e/H	0.5 - 1.0
Arc voltage	140-160 V
Arc current	8-18 A
Rep rate	7.5 Hz
Pulse width	700 $\mu\text{s}$
Duty factor	0.5%
RMS emittance	$\sim 0.4 \pi \text{ mm mrad}$ (normalized)
Cs consumption	$< 0.5 \text{ mg/hr}$ ( $T_{Cs} = 90 - 100 \text{ C}$ ;
Gas flow	$\sim 2.5 \times 10^{-2} \text{ T-l/s}$ (2 sccm)



**0.1 A ионов H- при токе разряда 18 A.  
Энергетическая эффективность до 67 мА/кВт**

# Исследования механизма генерации ОИ в ППИ

## Энергетический спектр ОИ в планотронном ППИ

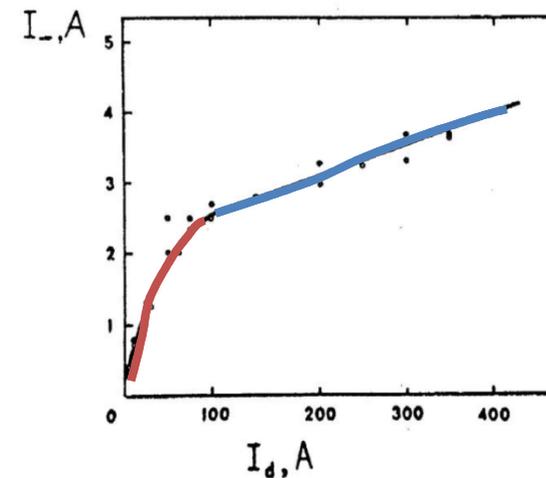


### Анализатор по энергиям

90° поворот - фокусировка 1 порядка.  
 Разрешение  $\delta/L = 5 \text{ эВ} / 10 \text{ кВ}$   
 Щели  $5 \cdot 10^{-2} \text{ мм}$ , База 20 см.  
 Регистрация с помощью ВЭУ

Изменение катодной и анодной групп ОИ в планотроне при снижении Cs или увеличении  $\text{H}_2$

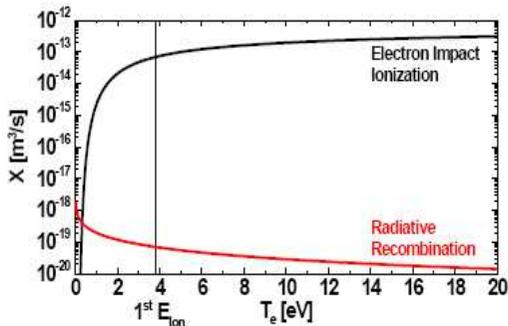
## Вклад катодной и анодной групп в полупланотроне



Катодная группа : 1 А пучка на 35 А разряда. Энергетическая эффективность  $\sim 150 \text{ мА/кВт}$

Анодная группа : 1 А прирост пучка при увеличении тока разряда на 200 А

# Цезий в сильноточных разрядах ППИ



Коэффициенты ионизации Cs электронами и рекомбинации ионов Cs<sup>+</sup>

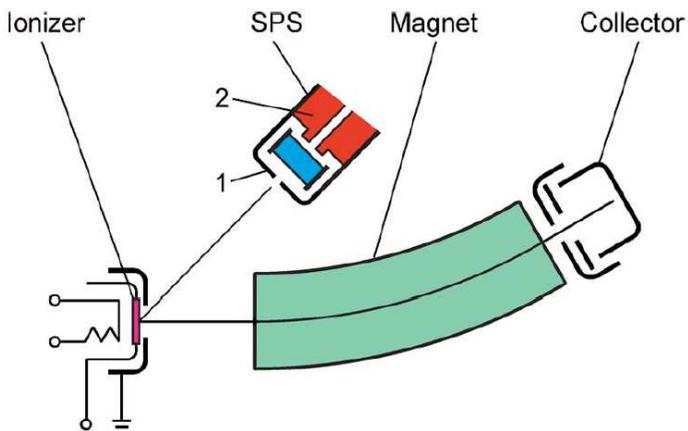
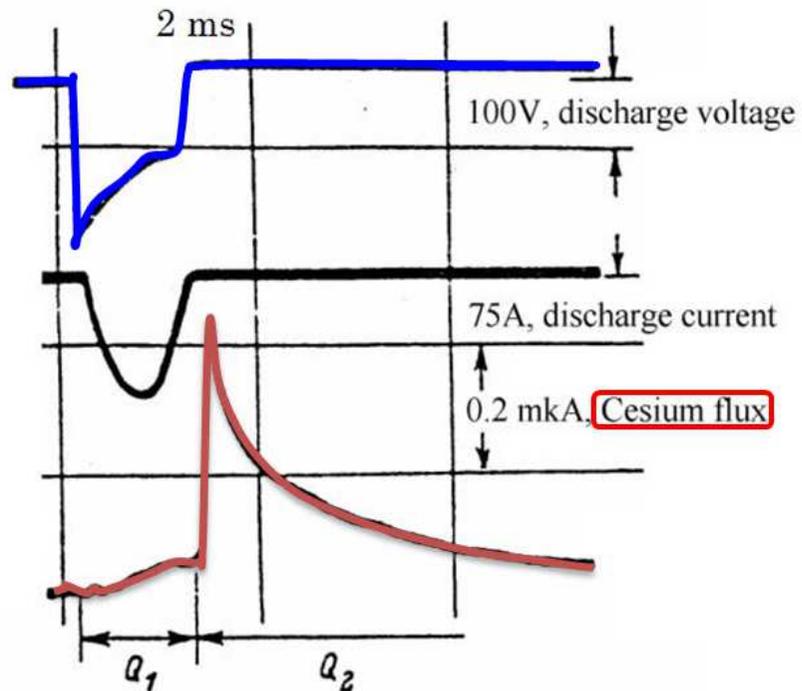


Схема измерений Cs потоков с помощью поверхностной ионизации атомов Cs

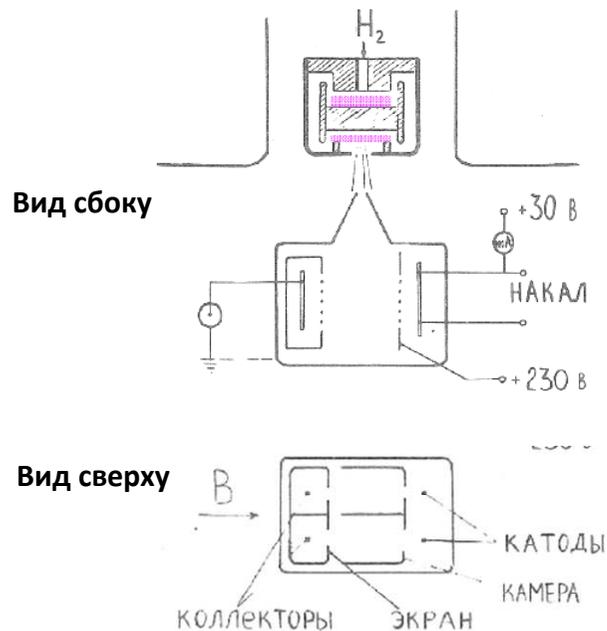


## Вынос атомов Cs из планотрона

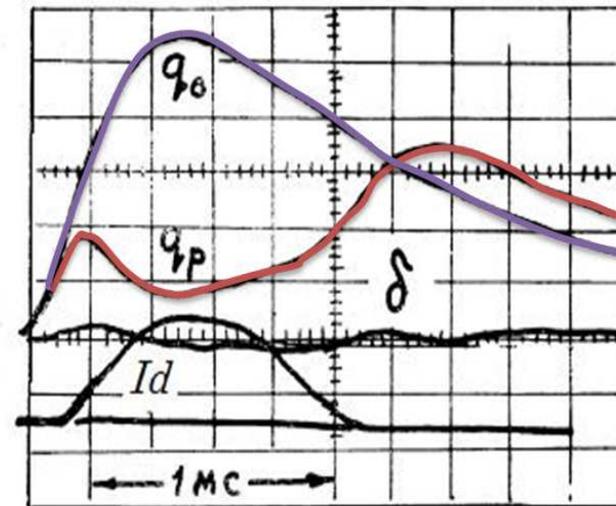
В течение разряда Cs ионизован и запирается в разряде. После выключения разряда Cs рекомбинирует на стенках и переносится на холодные участки ГРК, Часть Cs выходит через эмиссионную щель. Расход Cs ~ мг/час

Ионы цезия могут составлять до 10% от тока ионов на катод и поддерживать оптимальное покрытие катода

# Запирание водорода в сильноточных разрядах ППИ



Измерения потоков газа из ППИ  
дифференциальным ионизационным  
датчиком



Поток водорода из эмиссионной щели планотрона

В течение разряда водород удерживается давлением плазмы.  
По мере уменьшения тока разряда "плазменный" клапан  
открывается и накопленный водород выходит через  
эмиссионную щель

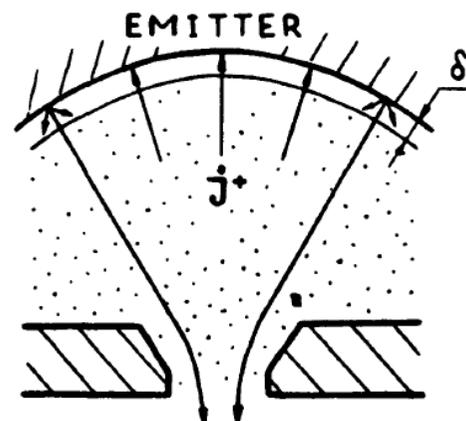
Давление водорода в эмиссионной зоне может уменьшаться в  
~ 5-10 раз по сравнению с давлением зажигания разряда

Пониженное давление водорода в эмиссионной зоне и области  
формирования пучка необходимо для вытягивания ионов H-

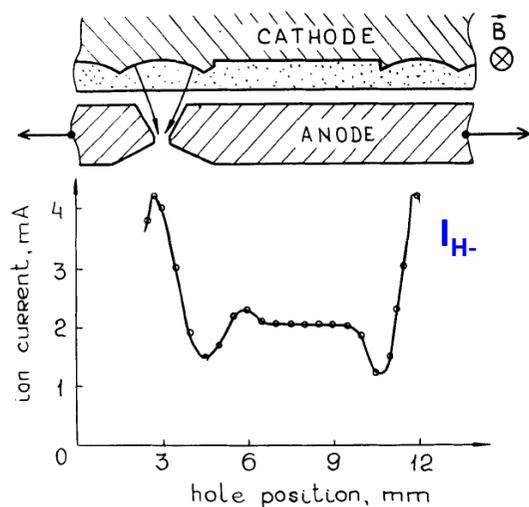
# Геометрическая фокусировка ОИ в ППИ

Отрицательные ионы с вогнутых лунок на поверхности катода собираются в эмиссионные отверстия малого диаметра

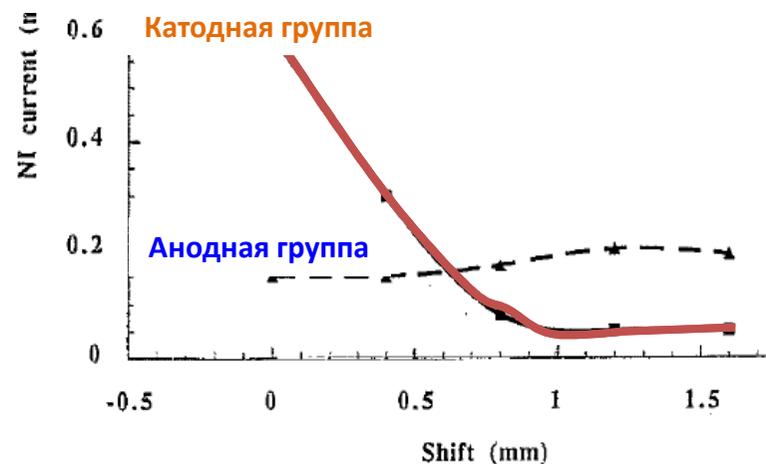
Газовая и энергетическая эффективность повышаются



Выход ОИ при различных положениях эмиссионного отверстия относительно катода



В точке ГФ выход ОИ в 4 раза больше, чем между лунками



- В точке ГФ катодная группа ОИ в 4 раза больше анодной
- При сдвиге на 1.5 мм от точки ГФ катодная группа ОИ уменьшается на порядок

# Геометрическая фокусировка в магнетроне Fermilab

Без фокусировки



цилиндрическая ГФ

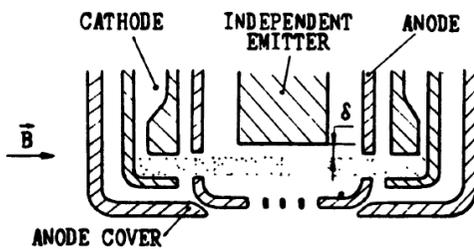


сферическая ГФ

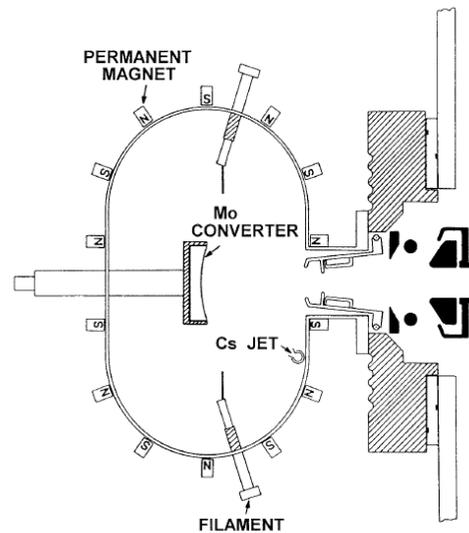


# Источник с генерацией ОИ на независимом электроде-конверторе

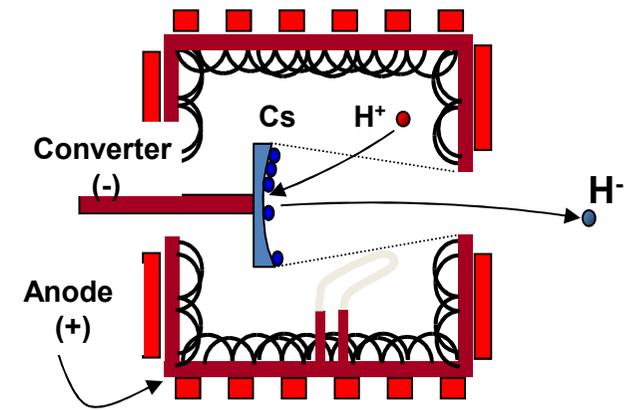
С “самовытягиванием” отрицательных ионов



ИЯФ 1977

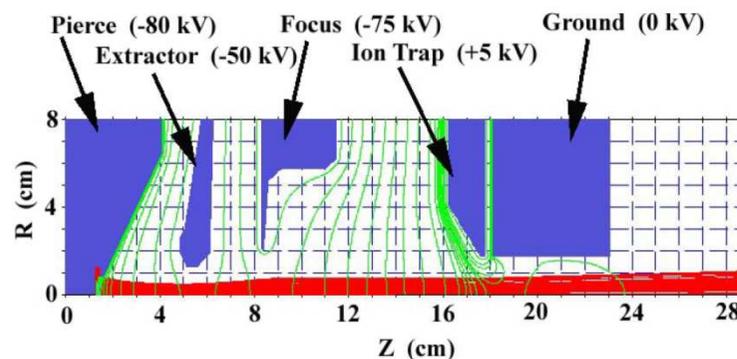
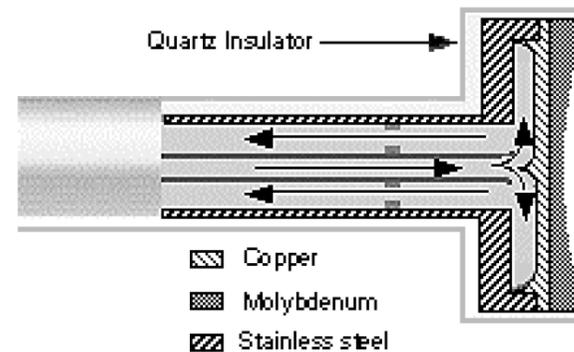
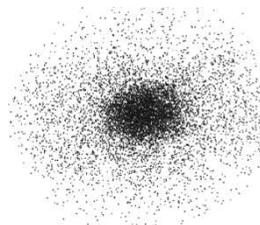
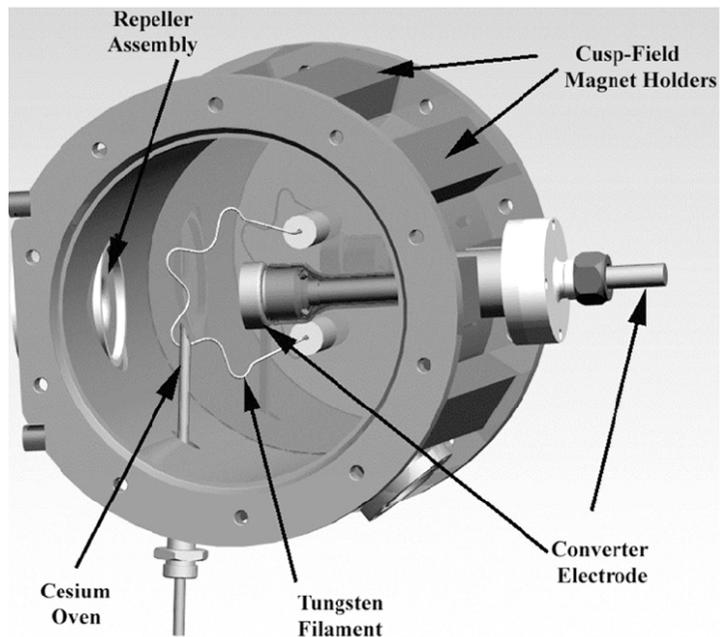


LBL 1986



LANSCE 1998

# Источник LANSCE с генерацией ОИ на конверторе



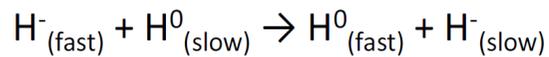
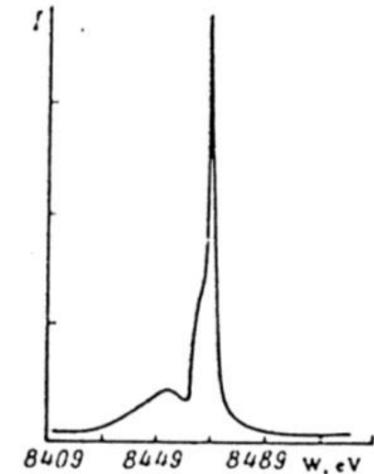
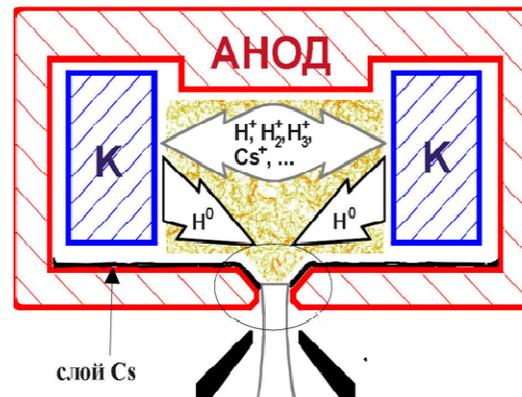
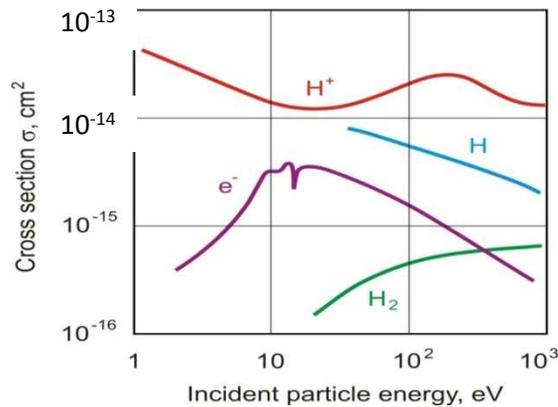
Beam current	18 mA/80 keV
Emittance, rms, norm.	0.2 p mm mrad
Converter bias	300 V
Duty factor	<b>12 %</b> (1 ms/120 Hz)

- **Main issues**

- Beam current limit 18 mA
- Filament lifetime up to 35 days
- Clogging of cesium pipe during start-up
- Long time for Filament & Discharge conditioning

# ППИ с перезарядкой ОИ в плазме

Ускоренные отрицательные ионы, образованные на катоде, перезаряжаются на атомах в плотной плазме импульсных ППИ.



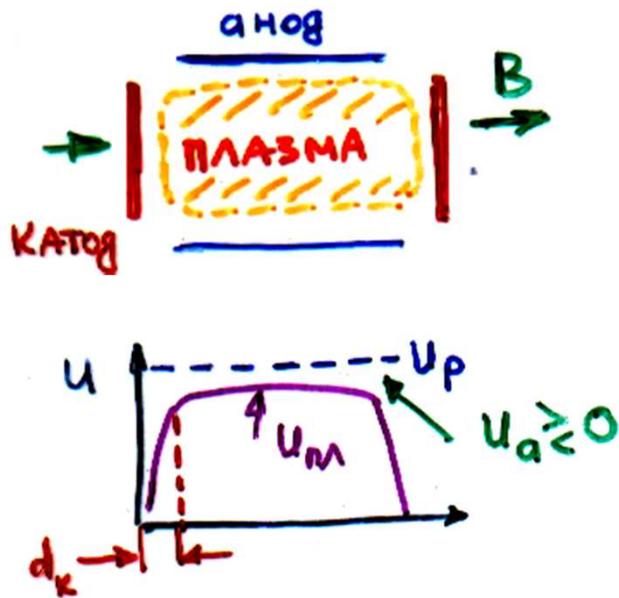
В пеннинговских ППИ образуемые на катоде ОИ в эмиссионную щель практически не попадают

Перезарядная группа ОИ накладывается на анодную группу ОИ

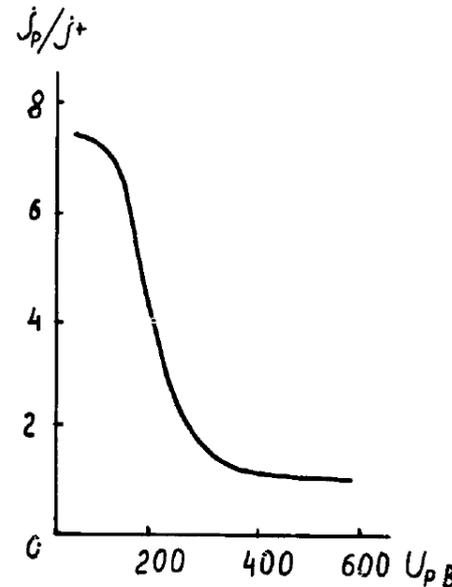
# Свойства пеннинговского разряда

$p = 10^{-6} - 1$  Тор,  $V = 0,3 - 2$  кГц,  $I_p \sim p^n$ , ( $n = 0.9 \div 1.1$ )

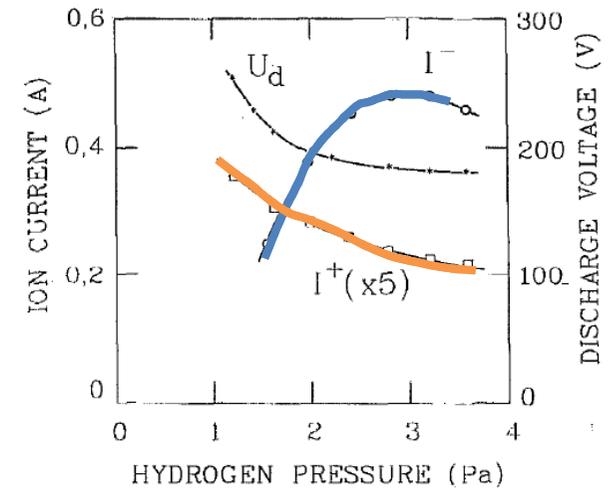
Флуктуации разряда  $\sim 100\%$



Распределение потенциала благоприятствует образованию ОИ



Ток ионов на катод 10-15% от тока разряда



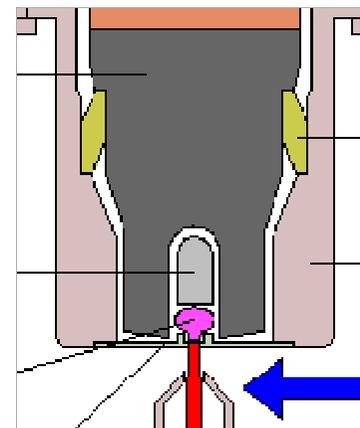
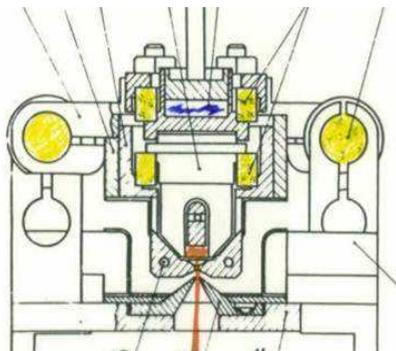
поток ОИ через отверстие в аноде на порядок больше, чем поток положительных ионов

## В пеннинговских разрядах ППИ

$n_{H_2} \sim 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ ,  $n_e$  до  $10^{14} \text{ cm}^{-3}$   $T_e \sim 1-5 \text{ eV}$

# Пеннинговские ППИ для ускорителей

ИЯФ -1972 г, Los-Alamos, RAL-ISIS



## ИЯФ

100 mA, 22 kV, 0,25 ms/100 Hz

0.015 x 0.2 π mm mrad (для 40 mA)

100 V / 120 A  
300 hs (20 days)

## Los -Alamos

100 mA, 27 kV, 1 ms/5 Hz

$E_{n,90\%} \sim 0.05 \pi \text{ mm mrad}$  ( $\varnothing 2.5 \text{ mm}$ )

120 V / 100 A  
H<sub>2</sub> feed 1.3 L·Tor/s

## RAL

35 mA, 35 kV, 0,3 ms/50 Hz

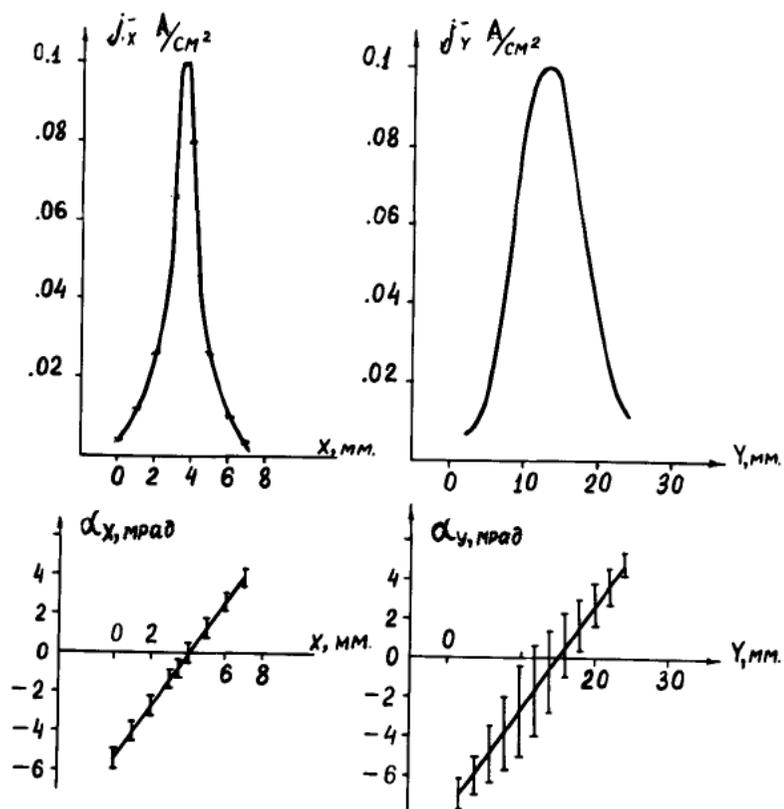
$E_{n,90\%} \sim 0.4 \text{ p mm mrad}$

150 V / 40 A  
H<sub>2</sub> 0.3 L·Tor/s, Cs 3 G/month  
24 x 7 operation, 20 day

# Эмиттанс пучка Н- из Пеннинговского ППИ

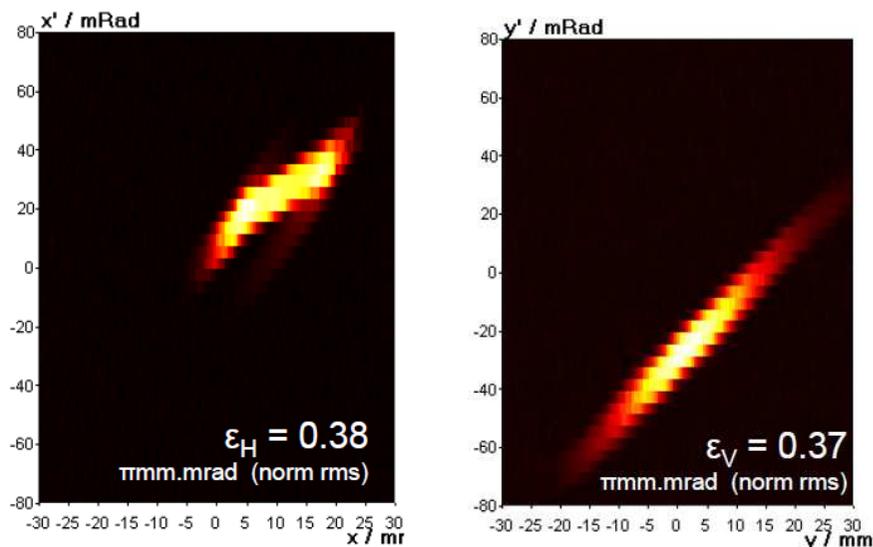
С эмиссионной щелью 0.6 x 10 мм

Г.Деревянкин, В.Дудников 1984



Эмиттанс 40 mA, 22 kV пучка  
 $0.015 \times 0.2$  ( $\pi \cdot \text{mm mrad}$ )<sup>2</sup>,  
(второй эллипс 30mm x 5mrad,  $\beta=4.6 \cdot 10^{-3}$ )

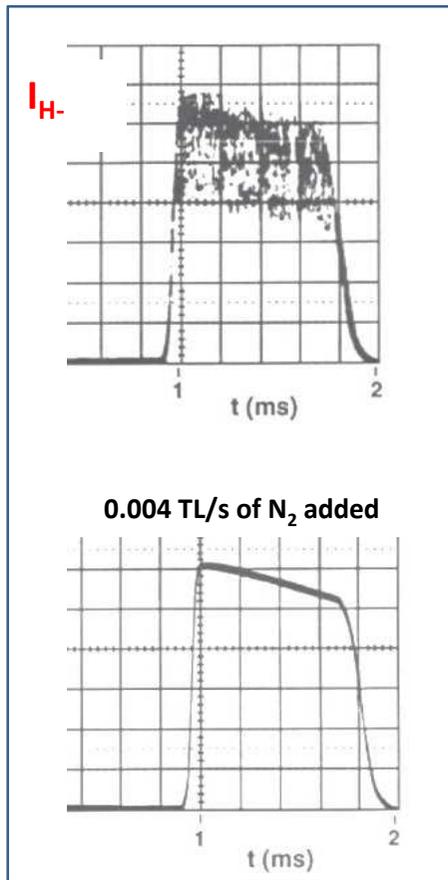
D.Faircloth, 2008



Эмиттанс 35 mA, 35 kV пучка  
 $0.38 \times 0.37$  ( $\pi \cdot \text{mm mrad}$ )<sup>2</sup> rms,  
(второй эллипс 50mm x 15mrad,  $\beta=6 \cdot 10^{-3}$ , rms)

# Температура ионов Н- в Пеннинговском ППИ

J.Sherman et al ( Los-Alamos, 1991)

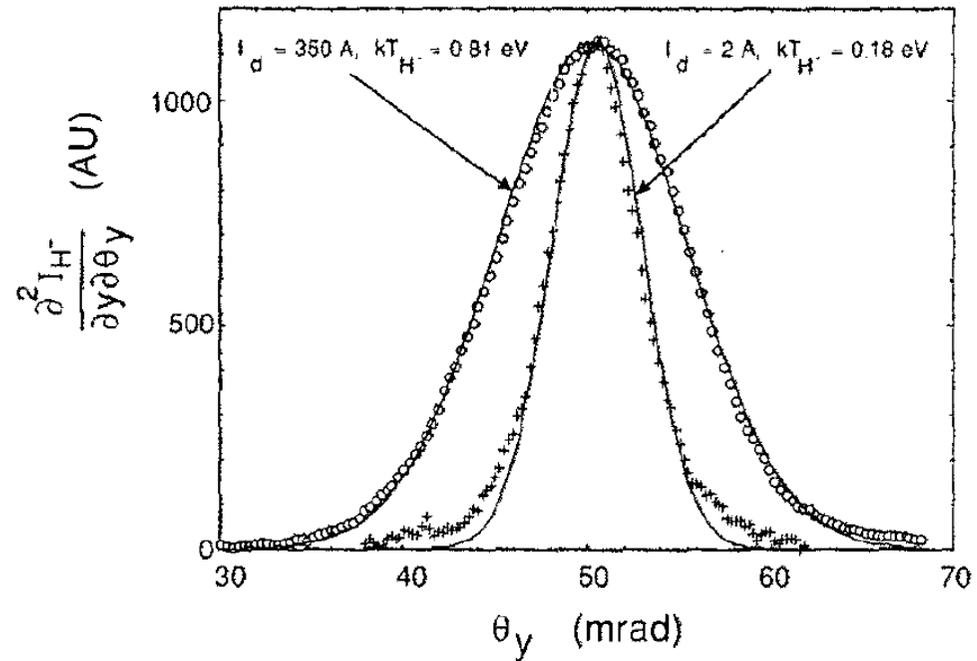


Флуктуации тока пучка уменьшаются при добавлении N<sub>2</sub>

$$f(\theta) = \bar{I}_{H^-} \exp(-\theta^2 \phi_b / kT_{H^-})$$

$$kT_{H^-} = 0.361 \phi_b (\theta_{FWHM})^2$$

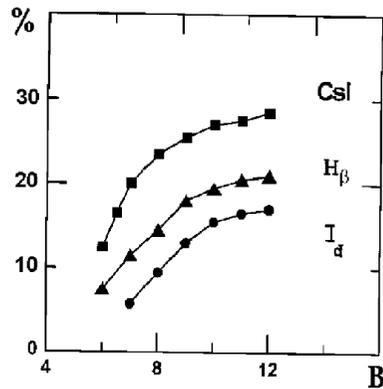
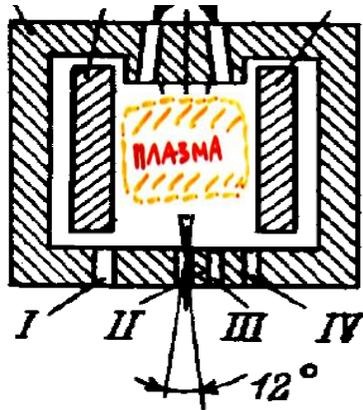
$\phi_b$  - beam energy



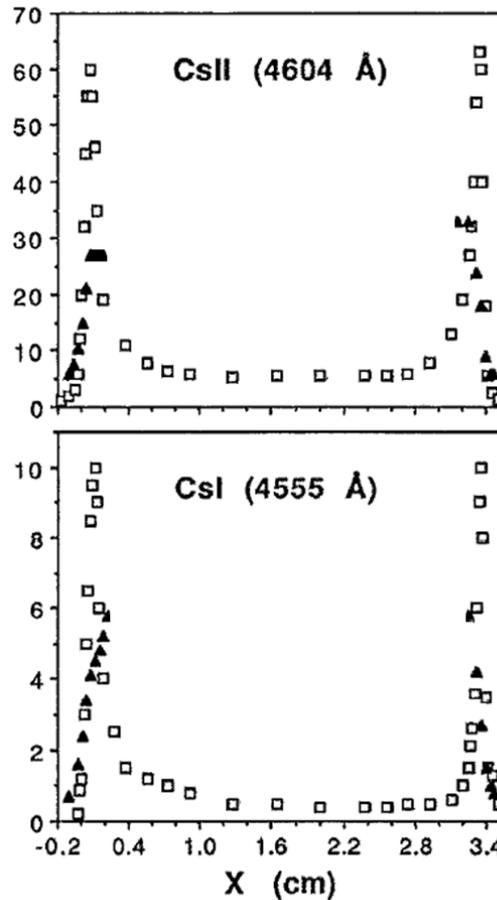
Определение температуры ионов Н- по угловому разбросу вырезаемой струйки пучка (центр щели)

# Спектроскопия Пеннинговских ППИ

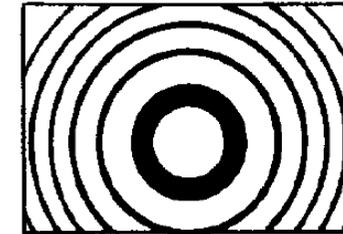
Анциферов В.В. и др. (СФТИ + ИЯФ, 1990) и Vernon Smith et al (Los-Alamos, 1991)



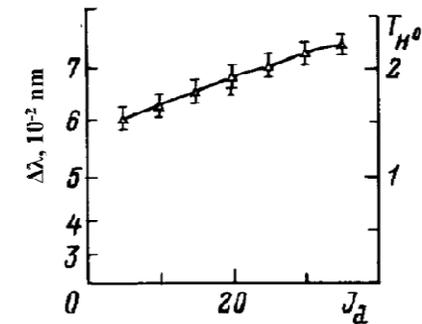
Относительные флуктуации  $I_d$  и интенсивности линий vs магнитное поле



Интенсивность линий атомов и ионов цезия из различных зон разряда



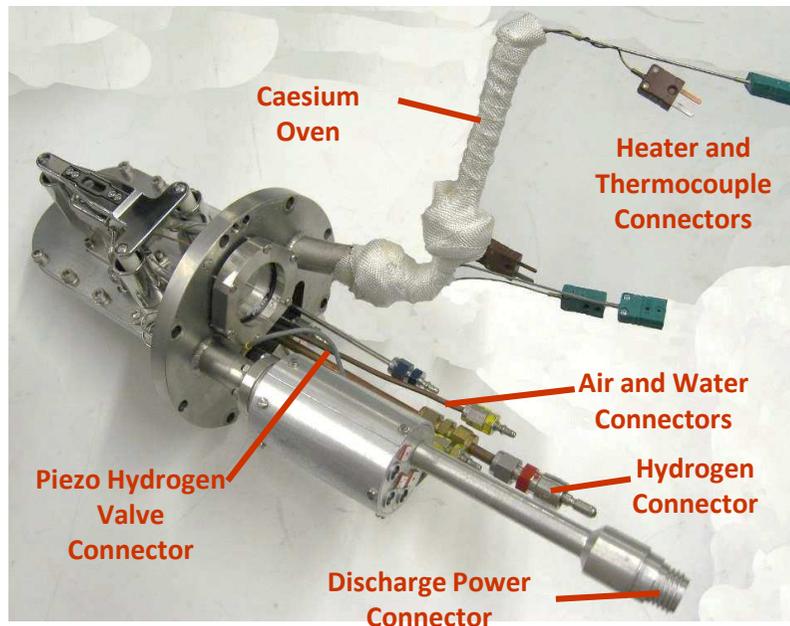
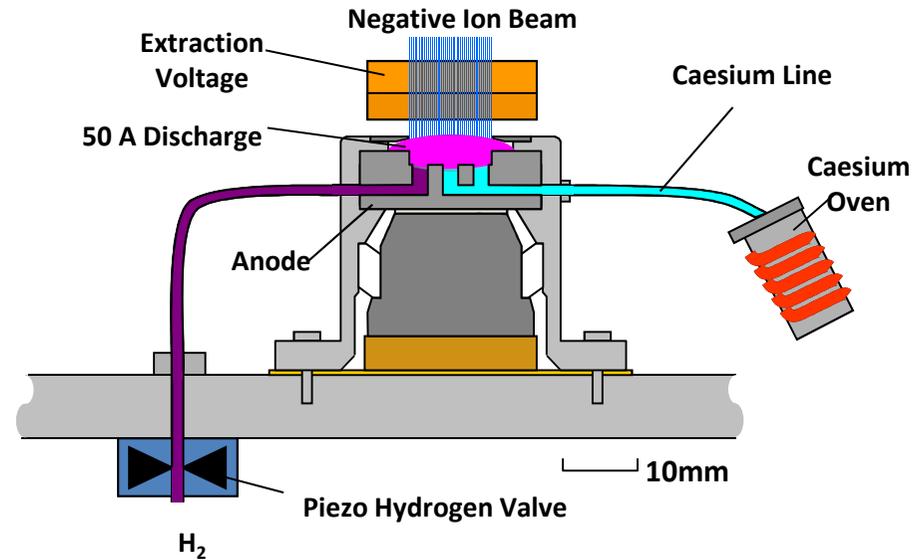
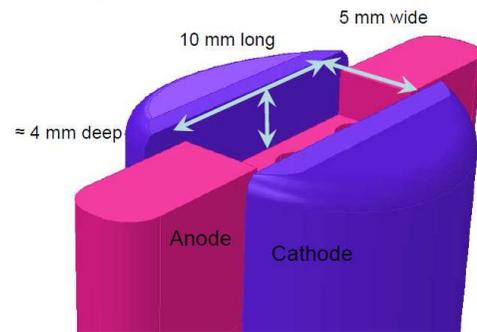
Интерферограмма спектра H $\alpha$



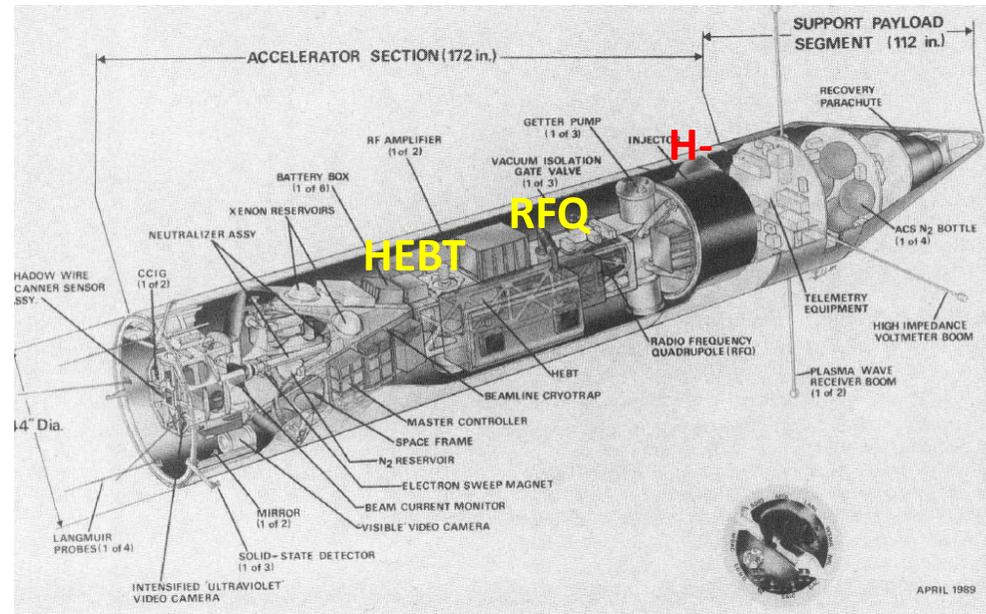
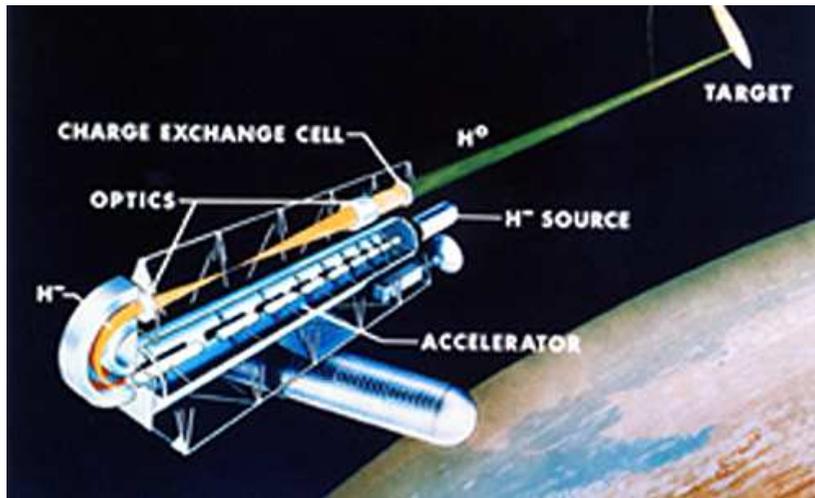
Температура атомов выше, чем температура ОИ

# Импульсный пеннинговский ППИ в RAL

Discharge Volume  
≈ 0.2 cm<sup>2</sup>



# Beam experiment abroad rocket

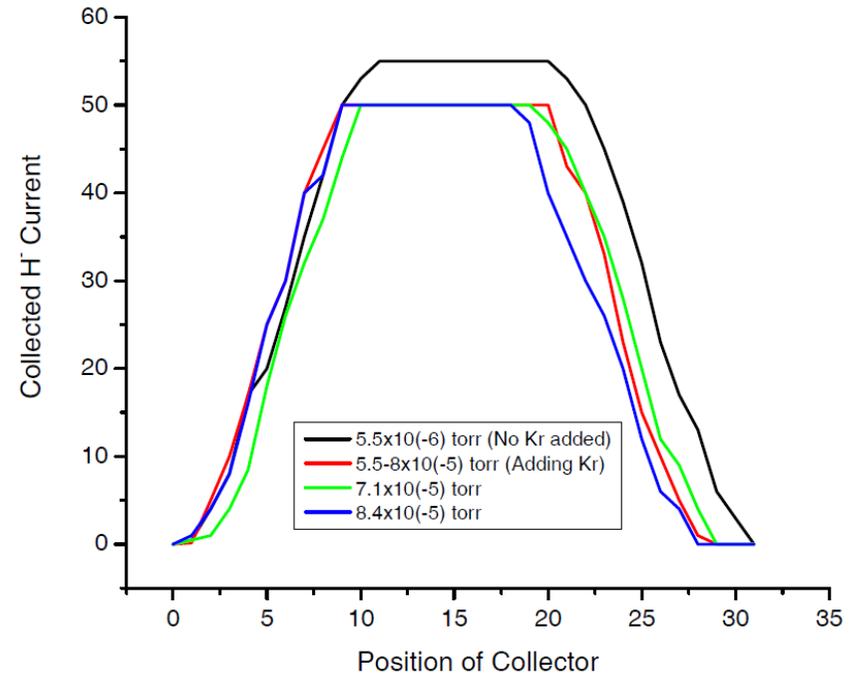
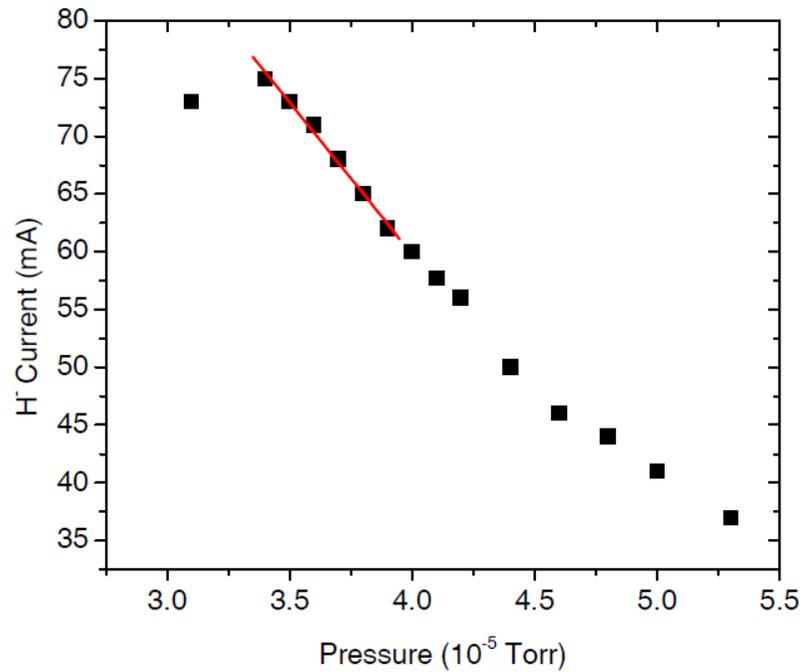


13 июля 1989 – ускоритель ионов H- на ракете

10 кВт пучок нейтралов (10 мА, 1 MeV, 50 мкс, 5 Hz), проведен на расстояние 1 км  
Beam divergence  $\pm 1$  mrad, rms, beam diameter 10 mm, rms

Эмиттанс 40 мА пучка после LEBT  $\epsilon = 0.07 \times 0.14 \pi$  mm mrad,  
Компенсация пространственного заряда ксеноном

# Транспортировка пучка ОИ



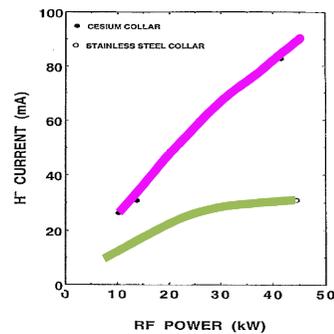
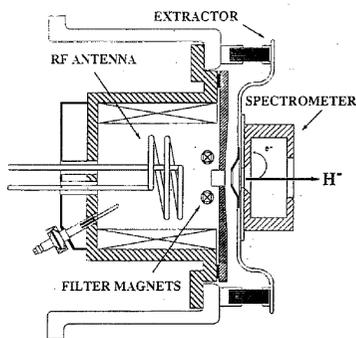
$$I_c = I_{ex} e^{-(n\sigma l)}$$

$$I_c = 27\% I_{ex}$$

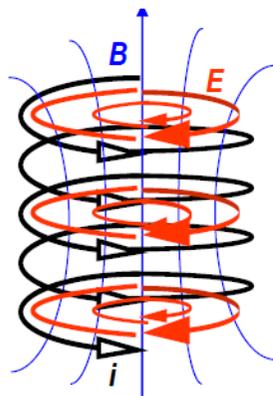
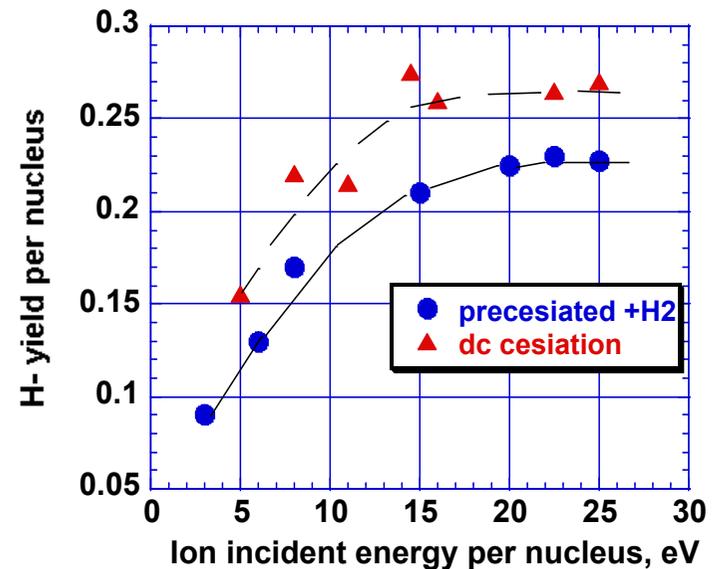
**Компенсация пространственного заряда пучка добавлением криптона**

# Импульсные ППИ с ВЧ разрядом и “анодной” генерацией ОИ

K. N. Leung, D. A. Bachman, and D. S. McDonald  
Review of Scientific Instruments **64**, 970 (1993)



3-5 кратное увеличение выхода ионов H- в ВЧ источнике

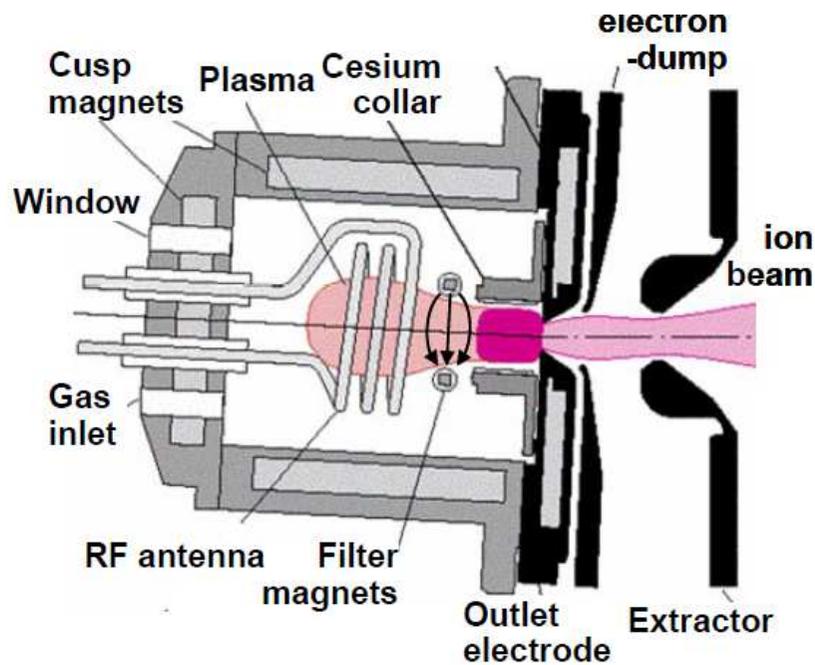


В индукционных ВЧ разрядах нет электродов

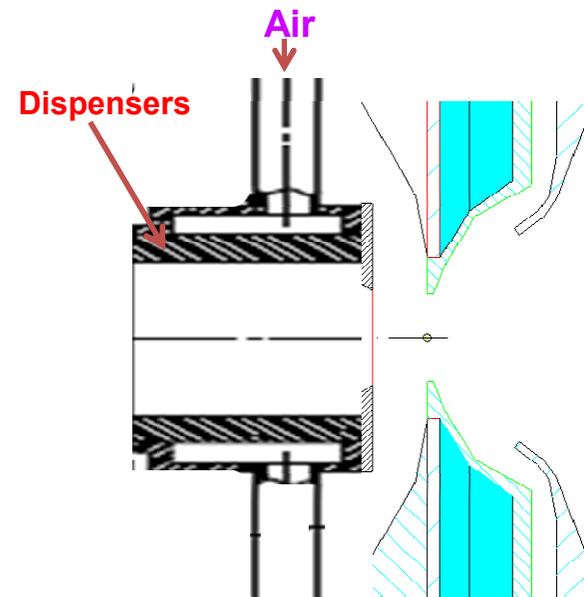
Плазма индукционных ВЧ разрядов заряжена положительно от-но стенок, ПИ ускоряются к “плазменному” электроду.  
Генерация ОИ идет преимущественно за счет конверсии франк-кондоновских атомов

# Импульсный ВЧ источник SNS

35-60mA, 65 keV, duty factor 6%

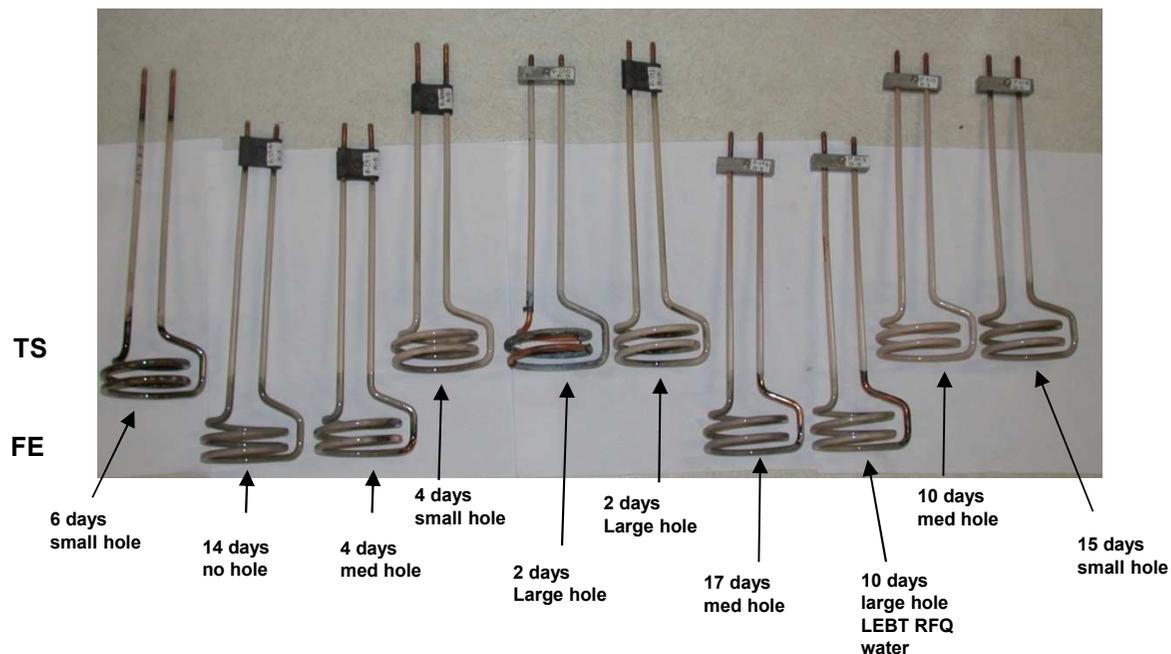


С внутренней антенной



Collar с 8 диспенсерами

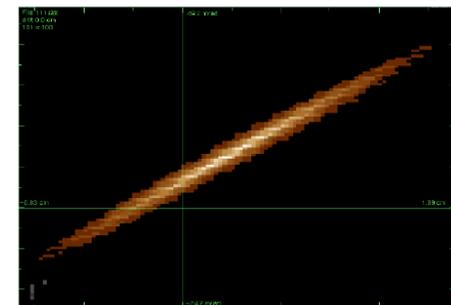
# Импульсный ВЧ источник SNS



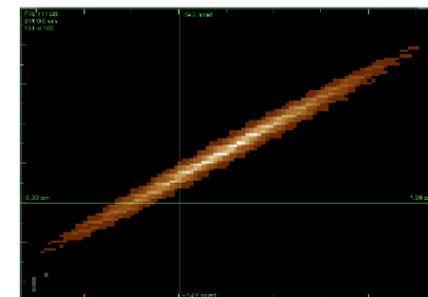
Износ внутренней антенны

Collar Configuration	Type	Ionization surface	Maximum beam current / RF power	Sustained beam current / RF power / days of operation
Elemental collar	ii	304 SS	60mA/ 50kW	>40mA / ~35kW / ~3 weeks
Elemental collar	ii	Mo	81mA/ 48 kW	>50mA / ~45kW / ~3 days
Chromate collar	i	Mo	55mA/ 56 kW	>40mA / ~35kW / ~3 days
Elemental collar	ii	Ni	95mA/ 52 kW	>60mA / ~35kW / ~3 days
Chromate collar	iii	Ni	87mA / 60kW	>60mA / ~45kW / ~1 week

Эксперименты с материалом ионизатора



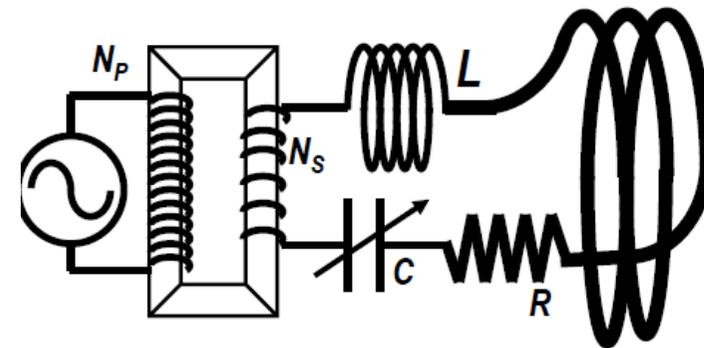
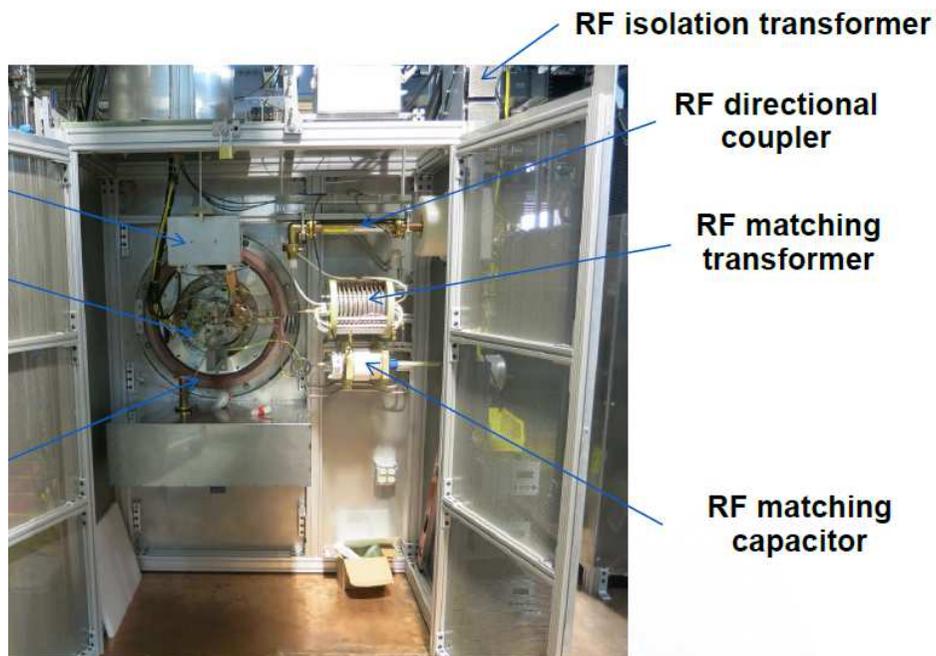
Horiz.:  $0.27 \pi$  mm mrad rms



Vertical:  $0.29 \pi$  mm mrad

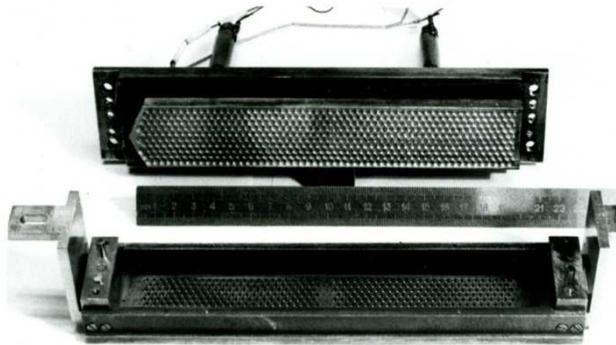
Эмиттанс пучка

# ВЧ системы требуют более сложных ВЧ систем питания и согласования с плазмой

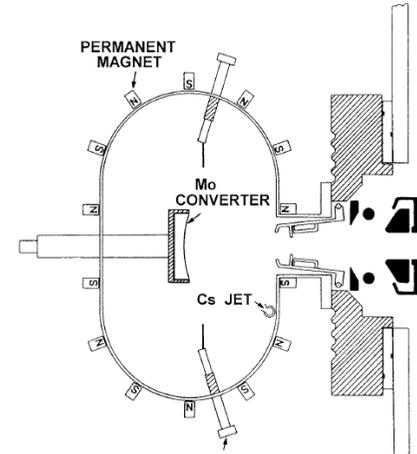


Стенд ВЧ источника в Оак-Ридже

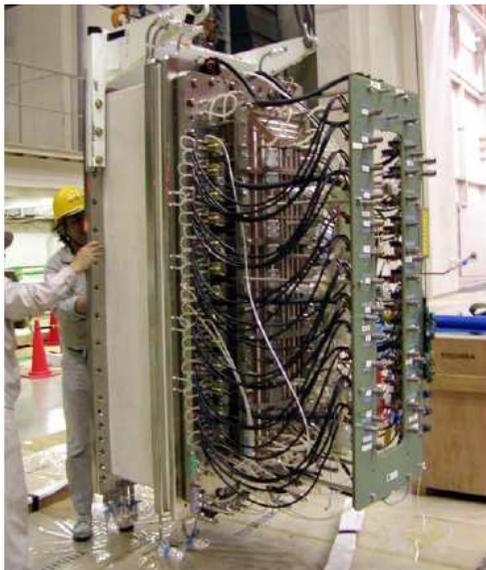
# 6. Многоамперные ППИ



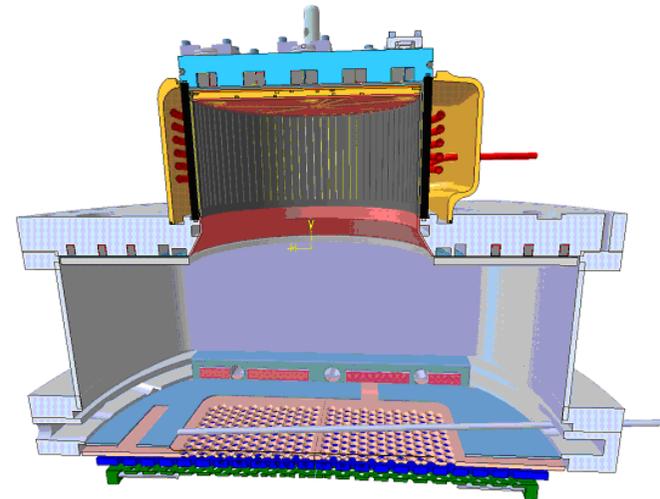
Планотронные с генерацией ОИ на катоде  
(ИЯФ, 1982 г.)



Дуговые с генерацией ОИ на конверторе  
(LBL 1986)



Дуговые источники с генерацией ОИ  
на аноде. JAERI, NIFS, 1982- .....г.



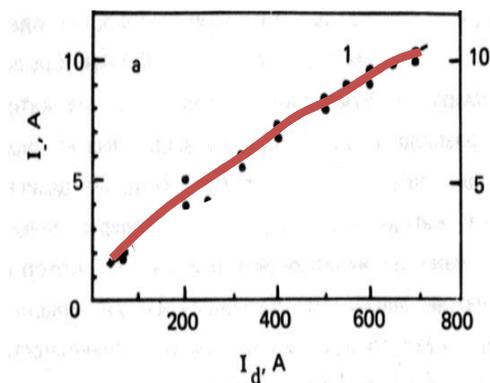
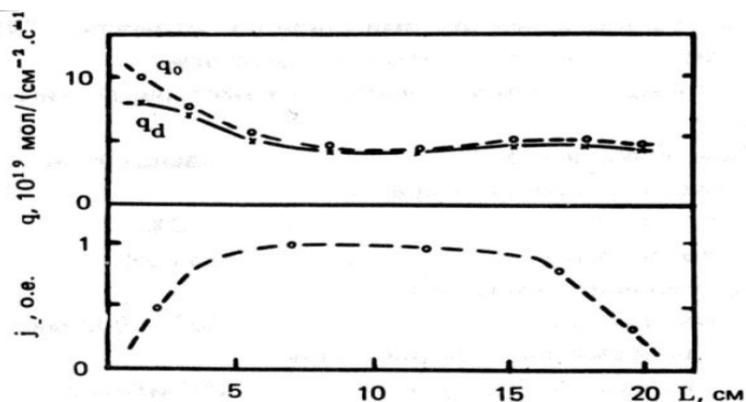
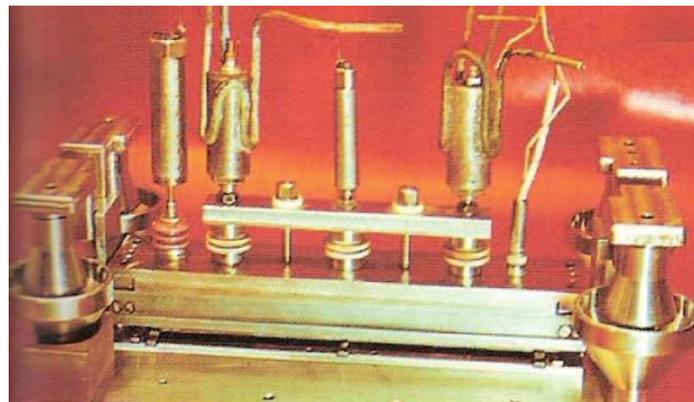
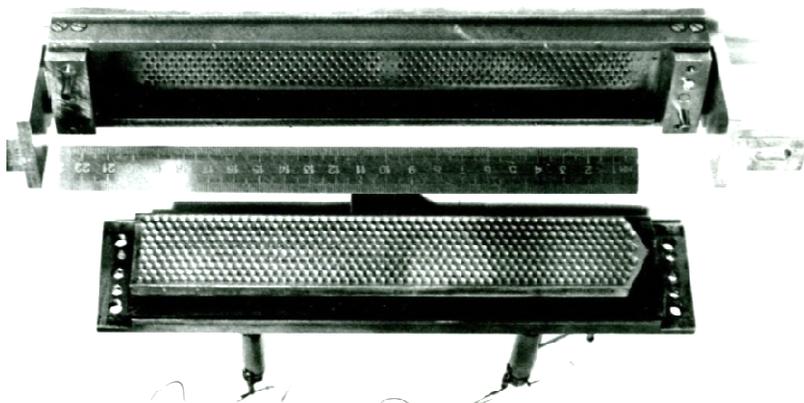
ВЧ источники с генерацией ОИ на  
плазменном электроде IPP, 2000-.....г.

# Основные проблемы больших ИСТОЧНИКОВ

- Однородность плазмы в области образования ОИ и вытягивания пучка
- Однородность эмиссии ОИ на большой поверхности – поддержание цезиевого покрытия на большой поверхности в течение длинных импульсов
- ВВ прочность на зазорах большой площади в течение длинных импульсов
- Подавление сопутствующих электронов на зазорах большой площади

# Импульсный Сотовый ППИ

ИЯФ, 1982 г.



**ExB разряд 150 В, 700 А, 0.8 мс. Ток пучка Н- до 11 А / 25 kV.**

Катод с эмиттирующей поверхностью 64 см<sup>2</sup>,

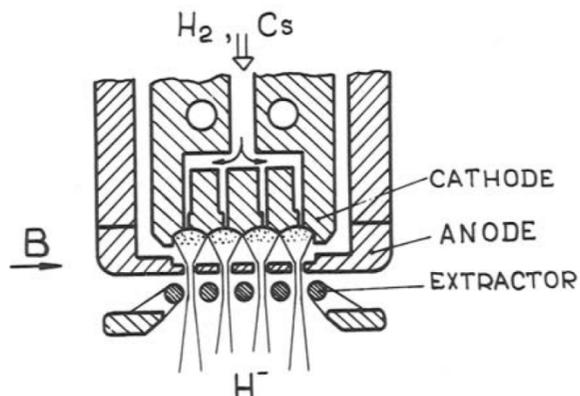
Сферическая Геометрическая Фокусировка (600 лунок на катоде и 600 эмиссионных отверстий  $\varnothing$  0,9 mm).

Эмиссионная плотность тока **до 2.8 А/см<sup>2</sup>**, в пучке 280 mA/cm<sup>2</sup>.

Газовая эффективность > 20 %, тепловая мощность на катоде < 1 кВт/см<sup>2</sup>

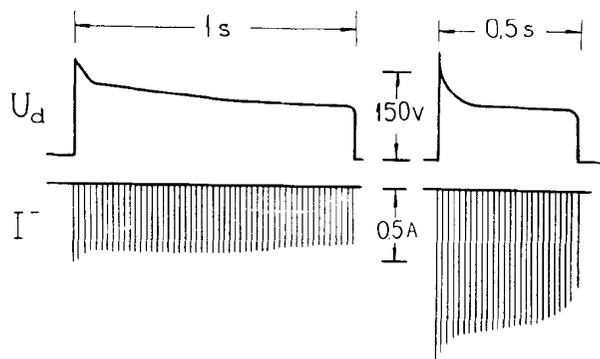
# Сотовый ППИ с импульсами до 1 сек

ИЯФ, 1990 г.

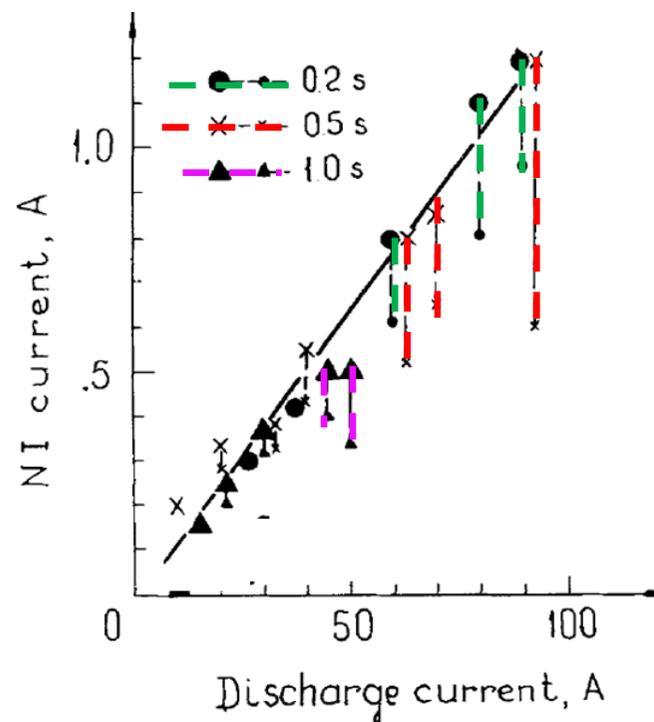


Массивный катод с охлаждением воздухом

120 лунок на катоде площадью 10 см<sup>2</sup>  
120 эм. отверстий  $\varnothing$  0,8 мм.



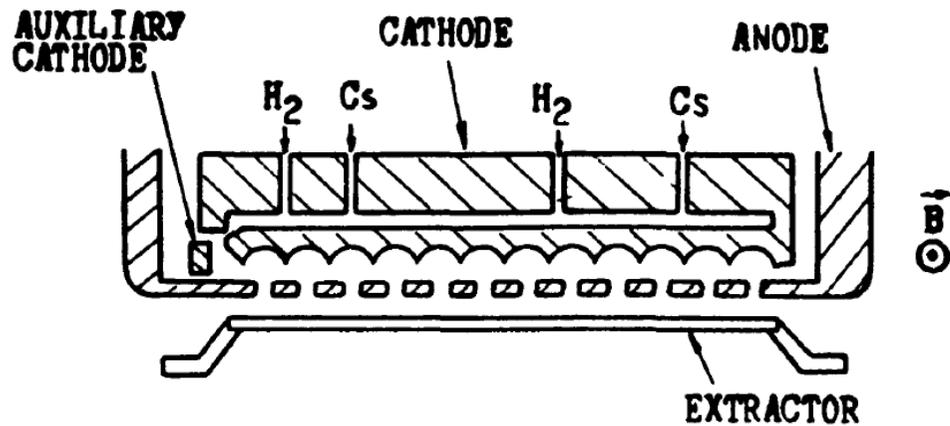
Вытягивание пакетом коротких 18 кВ импульсов  
(1мс x100 Гц)



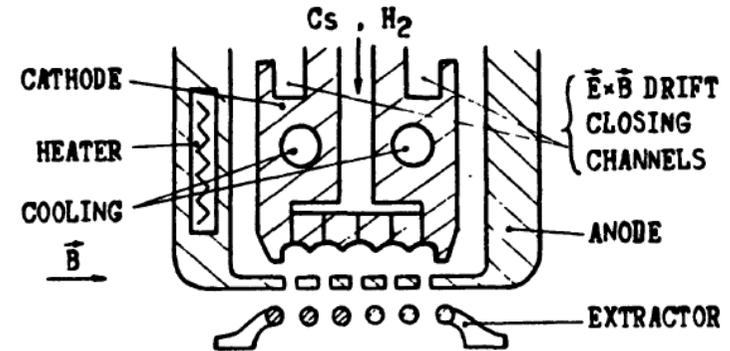
Ток пучка H- 1.2 – 0.9 А в импульсе 0.2 с.  
1.2 - 0.6 А в импульсе 0.5 с  
0.5 - 0.3 А в импульсе 1 с

Эмиссионная плотность тока до 2 А/см<sup>2</sup>, в пучке 60 mA/см<sup>2</sup>.  
тепловая мощность на катоде < 1 кВт/см<sup>2</sup>  
Перегрев поверхности катода до 800 С

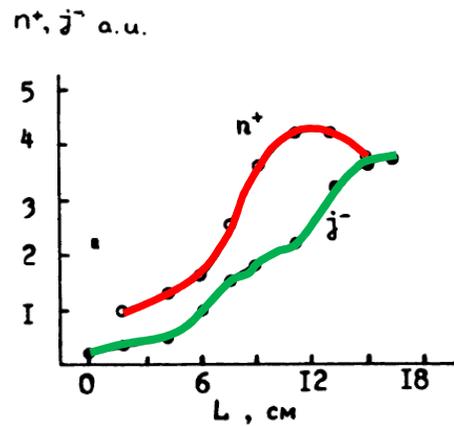
# Особенности сотовых ППИ



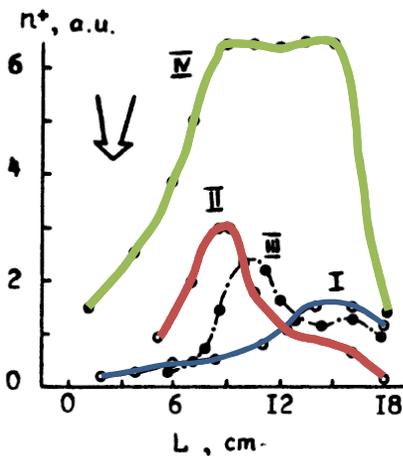
С ExB разрядом без замкнутого дрейфа электронов



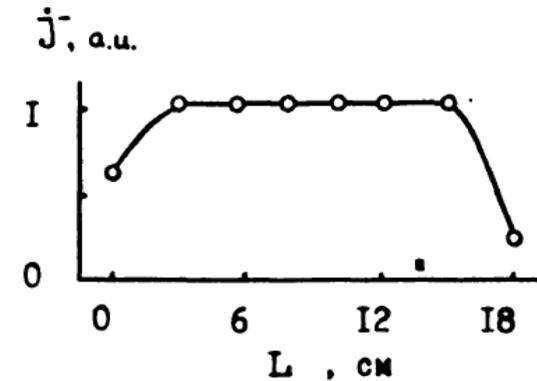
С термостабилизацией электродов и замкнутым ExB дрейфом электронов



Самоактивация катода разрядом (перенос Cs<sup>+</sup> в направлении ExB)



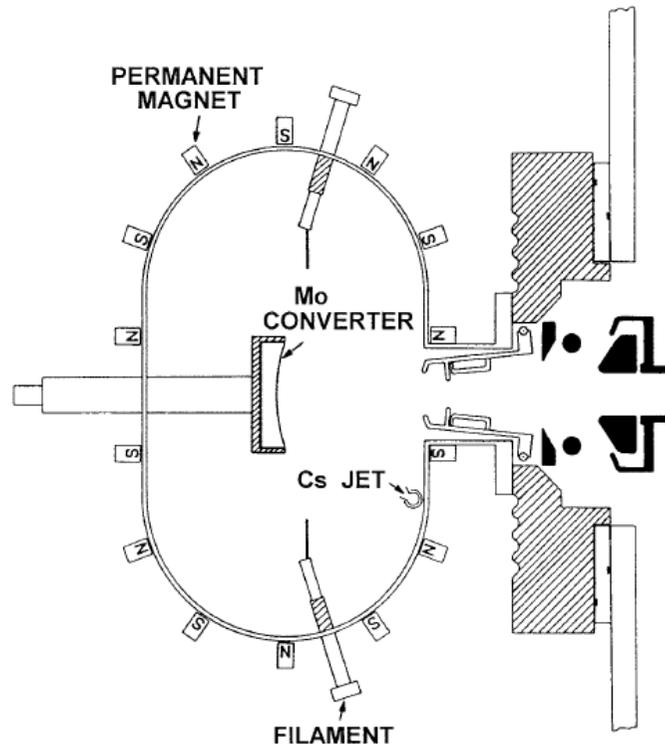
С распределенной подачей H<sub>2</sub> и Cs



С дополнительным разрядом

# Стационарный источник с конвертором

Self-extraction NI source , LBL 1986



$H^-$  ion beam output  
 $H^-$  ion current density at  
 entrance to accelerator  
 Electron content in ion beam  
 $H^-$  ion temperature  
 Beam divergence

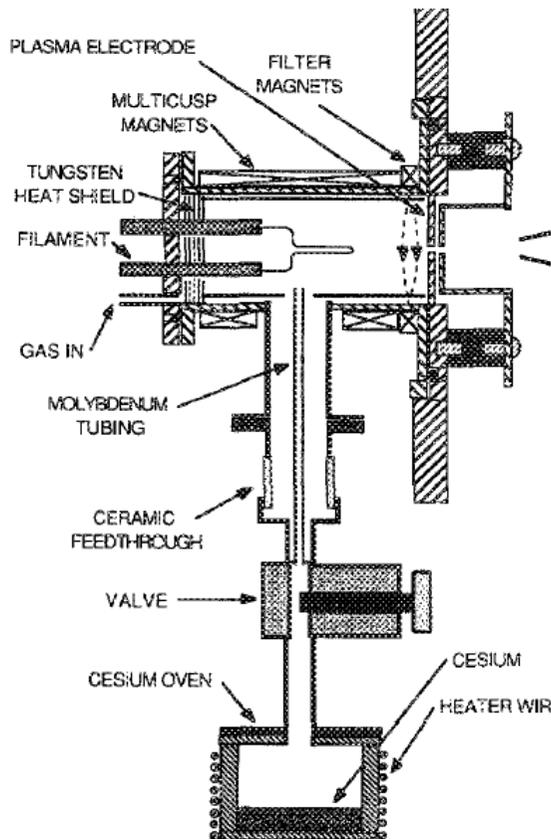
$> 1 \text{ A}$   
 $> 10 \text{ mA/cm}^2$   
 $12\%$   
 $5 \text{ eV}$   
 $2^\circ$

$H_2$  gas flow rate  
 Source filling pressure  
 Gas efficiency  
 Arc voltage  
 Arc current  
 Total filament current  
 Filament life time  
 Converter voltage  
 Converter current

$2 \text{ Torr l/s}$   
 $1.5 \text{ mTorr}$   
 $4.5\%$   
 $- 100 \text{ V}$   
 $100 \text{ A}$   
 $760 \text{ A}$   
 $> 300 \text{ h}$   
 $- 130 \text{ V}$   
 $25 \text{ A}$

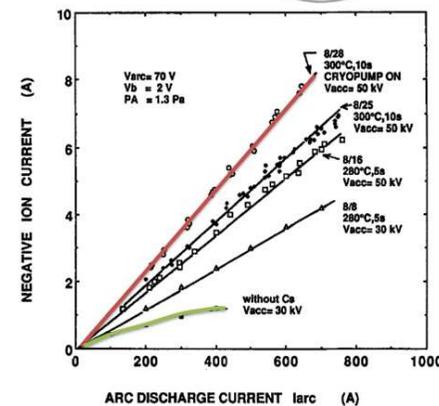
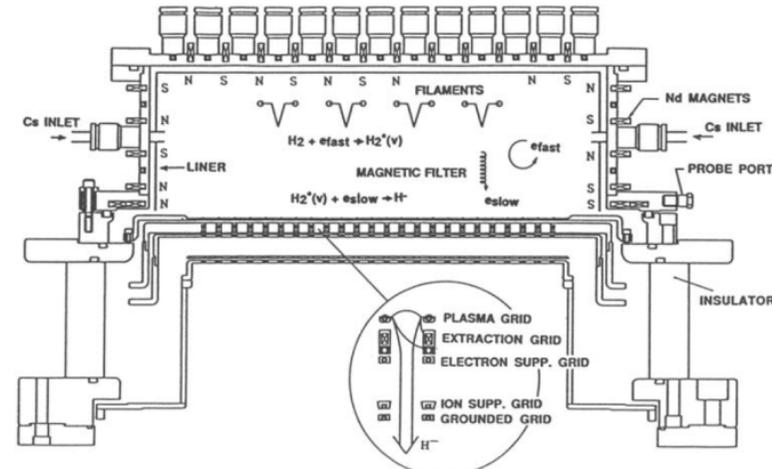
# Добавление Cs в мультипольные источники – ППИ с анодной генерацией

S. R. Walther, K. N. Leung, and W. B. Kunkel  
(LBL,1988)



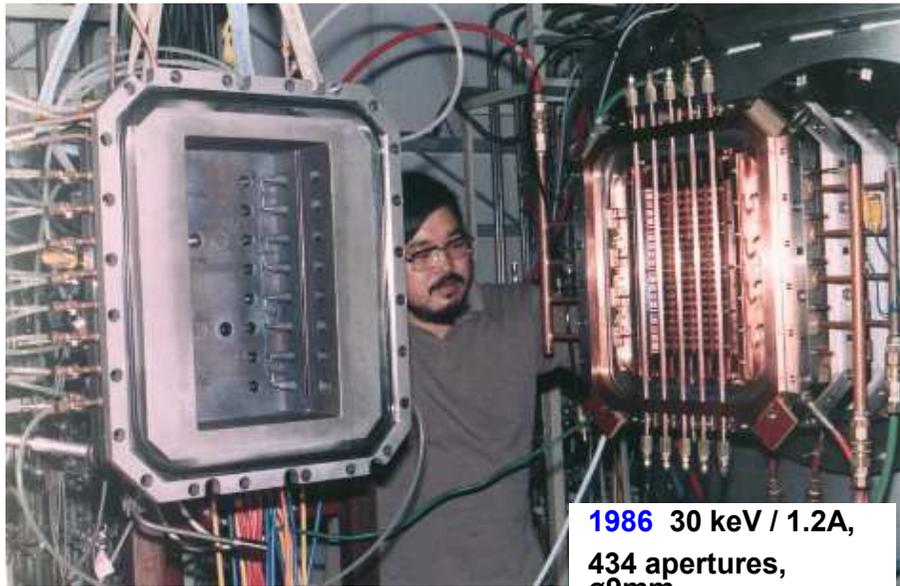
5- кратное увеличение выхода ионов H- в небольшом мультипольном источнике

Y. Okumura, M. Hanada, T. Inoue, H. Kojima et al, JAERI,(1990)

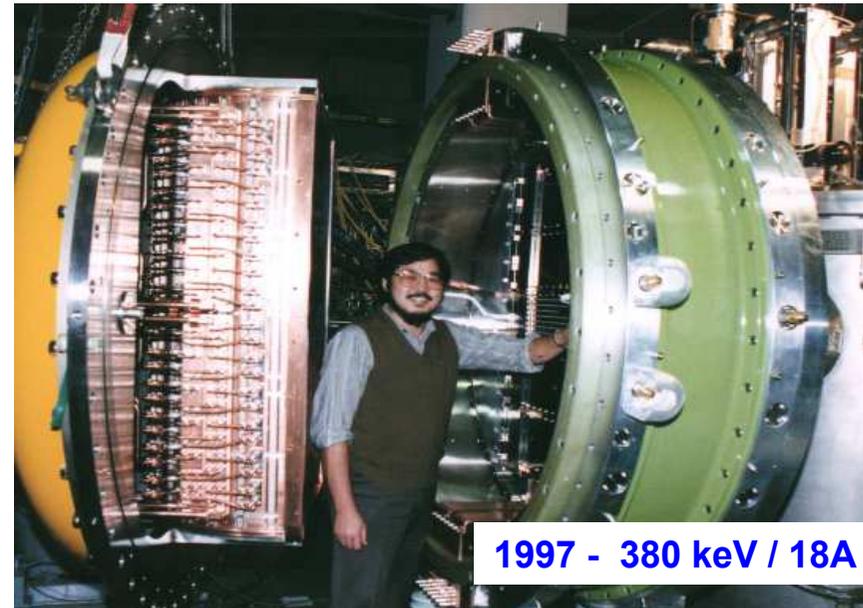


3-5 кратное увеличение выхода H- в дуговом многоапертурном источнике

# Negative Ion Source for JT-60



1986 30 keV / 1.2A,  
434 apertures,  
ø9mm

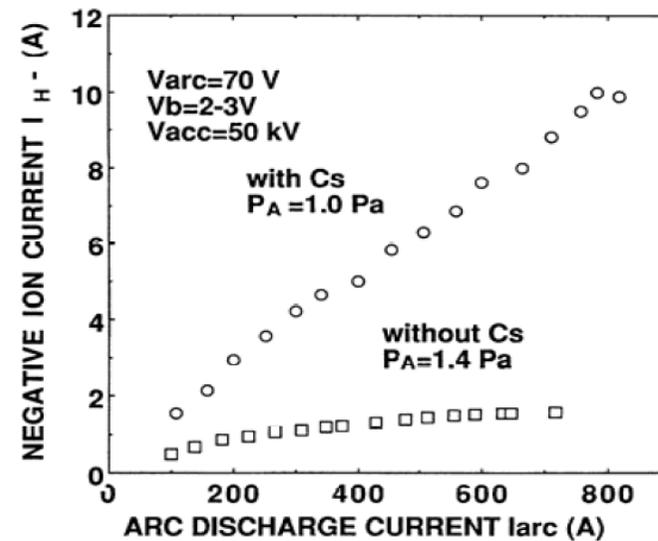


1997 - 380 keV / 18A

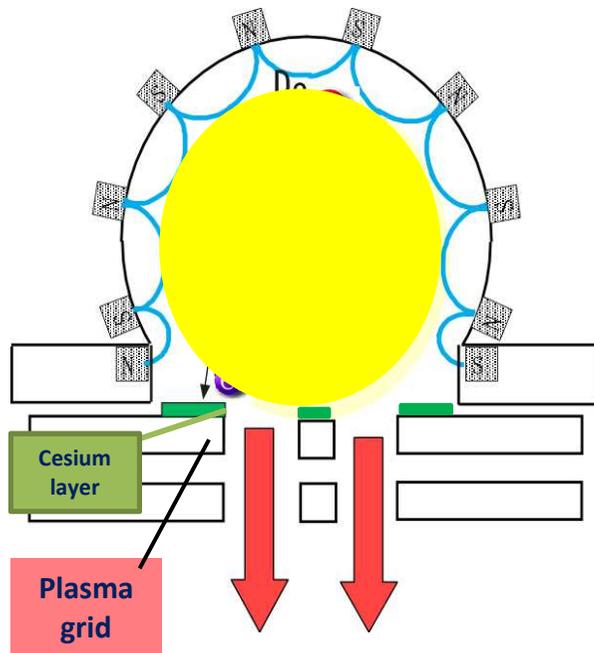
1990 – добавление Cs

1. 3 кратное увеличение выхода H-
2. Уменьшение тока электронов
3. Снижение давления водорода
4. Нет насыщения при увеличении тока разряда

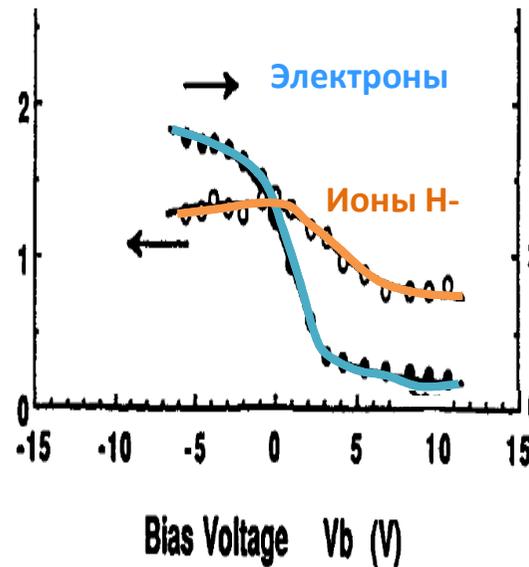
	With Cs	Without Cs
H- Ion Current (A)	7.8	3.1
Arc Current (A)	650	1180
Extraction Current (A)	14.2	26.6
Bias Voltage (V)	2	3.3
Gas Pressure (Pa)	1.3	2.1



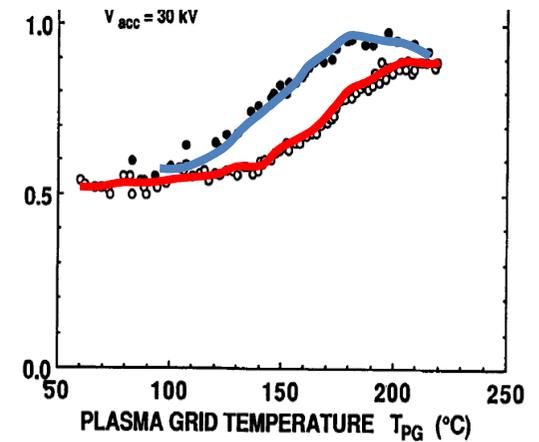
# Камабоко Negative Ion Source for JT-60



Large ratio volume/surface  
Stable arc discharge without arcing

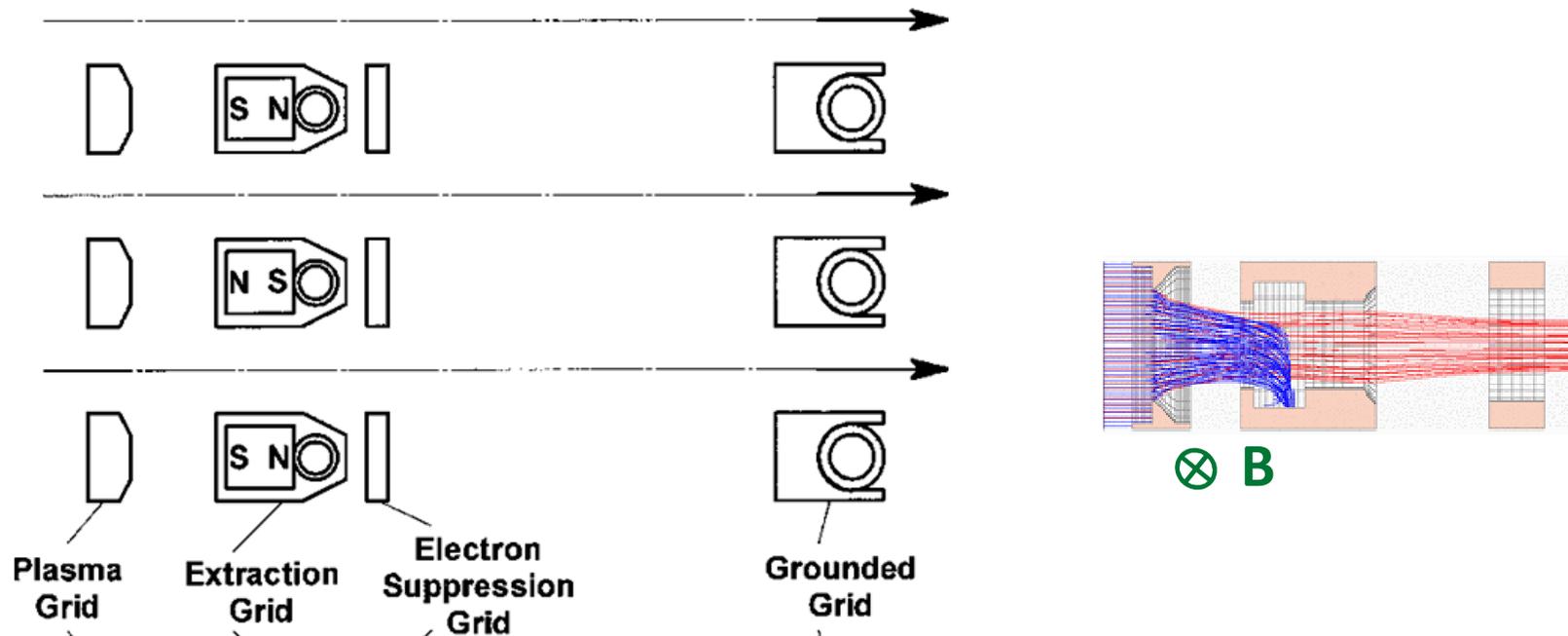


Подавление электронов  
~ 3 В потенциалом на PG



Optimum thickness of Cs layer  
by control of PG temperature  
(200 °C).

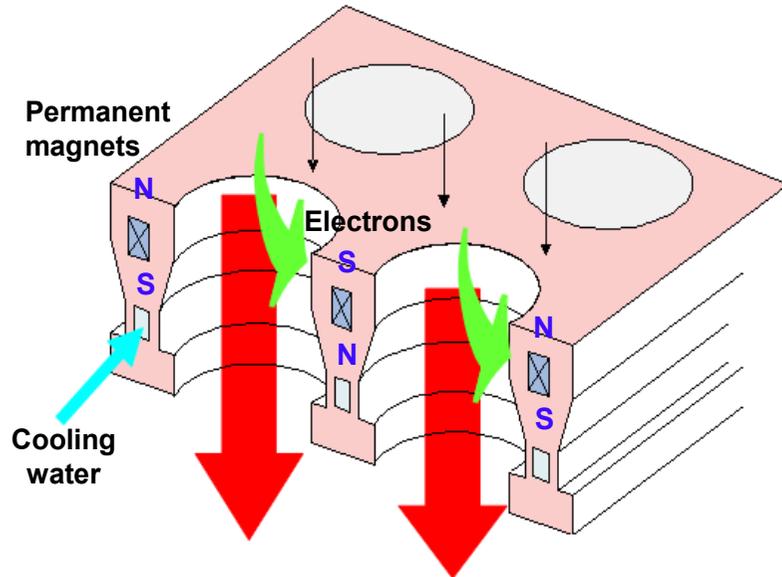
# Многоапертурные 4-электродные ИОС



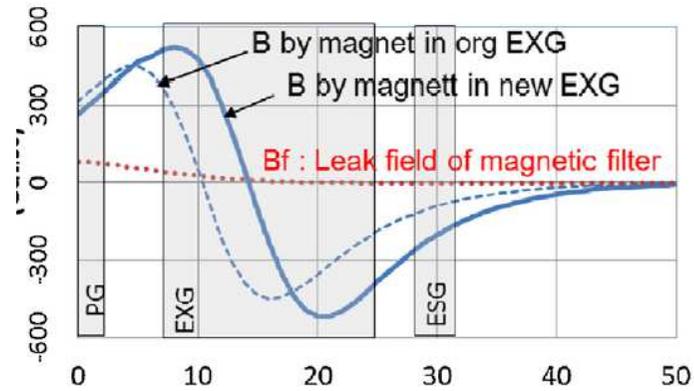
Уменьшение потока и перехват **сопутствующих электронов** достигается

- Магнитным фильтром
- Полем постоянных магнитов, встроенных в EG
- профилем стенок на выходе вытягивающего электрода
- дополнительным электродом ESG, запирающим электроны

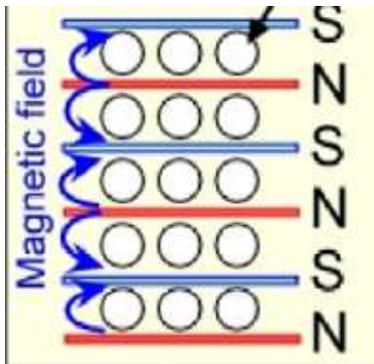
# Отклонение и перехват электронов на потенциал вытягивающей сетки



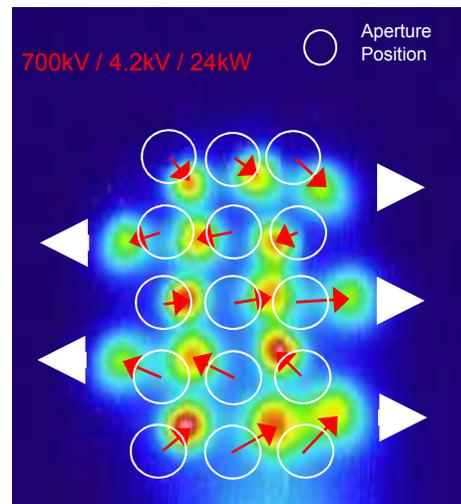
Магниты встроены в EXG



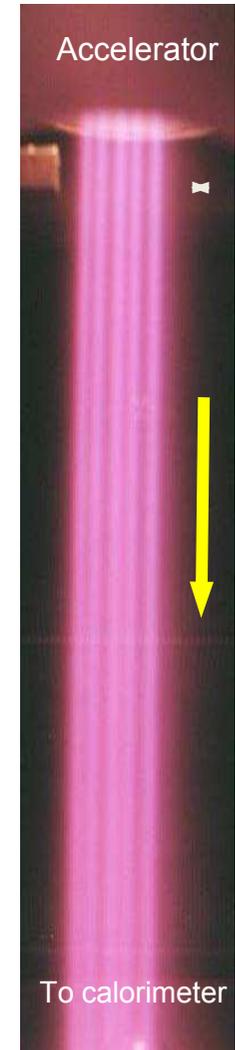
Знакопеременное магнитное поле в каналах EXG



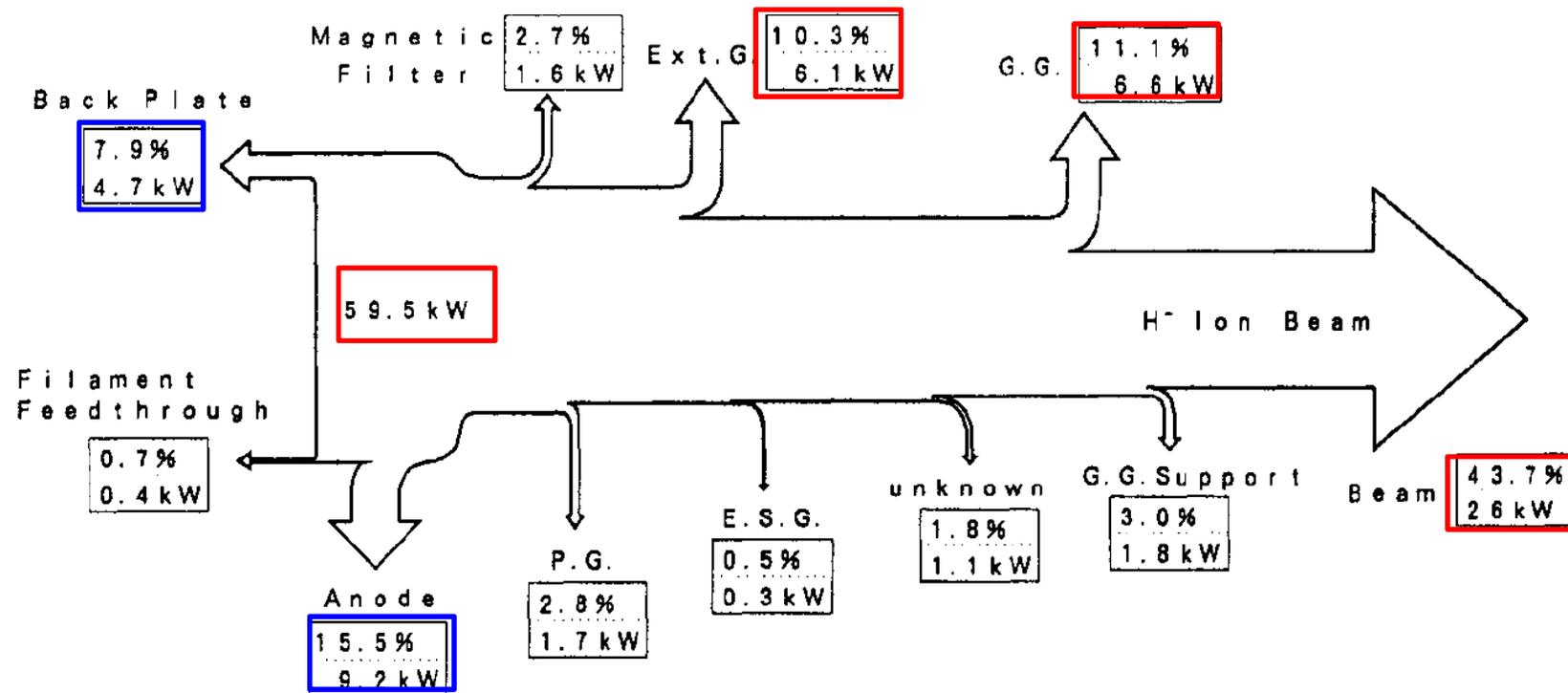
Порядок расположения магнитов в EXG



Сдвиг beamlets магнитным полем EXG



# DC Камабоко Negative Ion Source



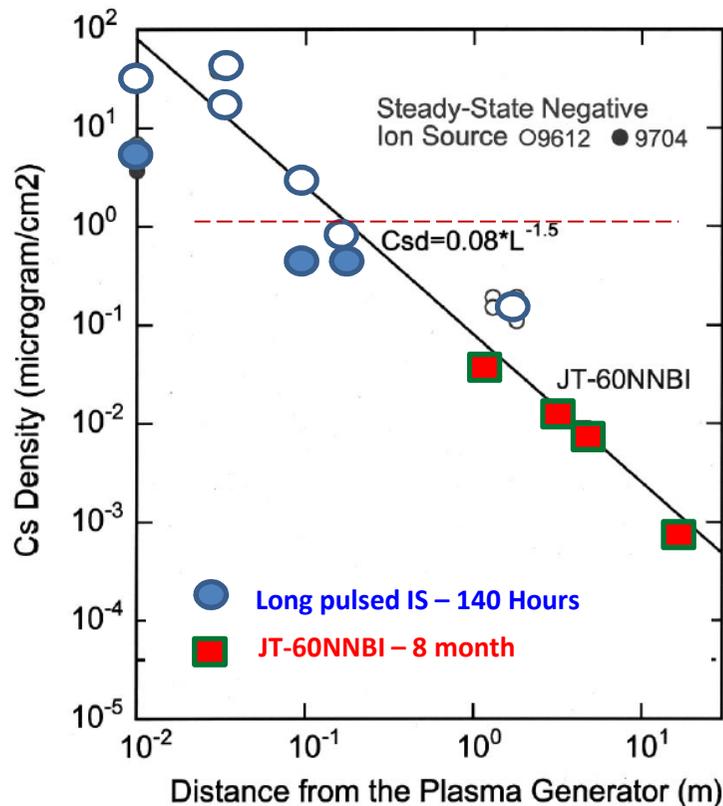
Баланс мощности в 0.52A, 50 кВ, 1000 с источнике ионов H- (1992)

Из приложенных 60 кВт в пучке остается 26 кВт (~44%)

15% - на аноде, 10% - на EG, 11% - на AG, 8% - на задней крышке (backstreaming)

# Накопление Cs на электродах ИОС и в ускорителе мультипольных источников

1 микрограмм =  $5 \cdot 10^{15}$  ат ~ 15 монослоев/см<sup>2</sup>

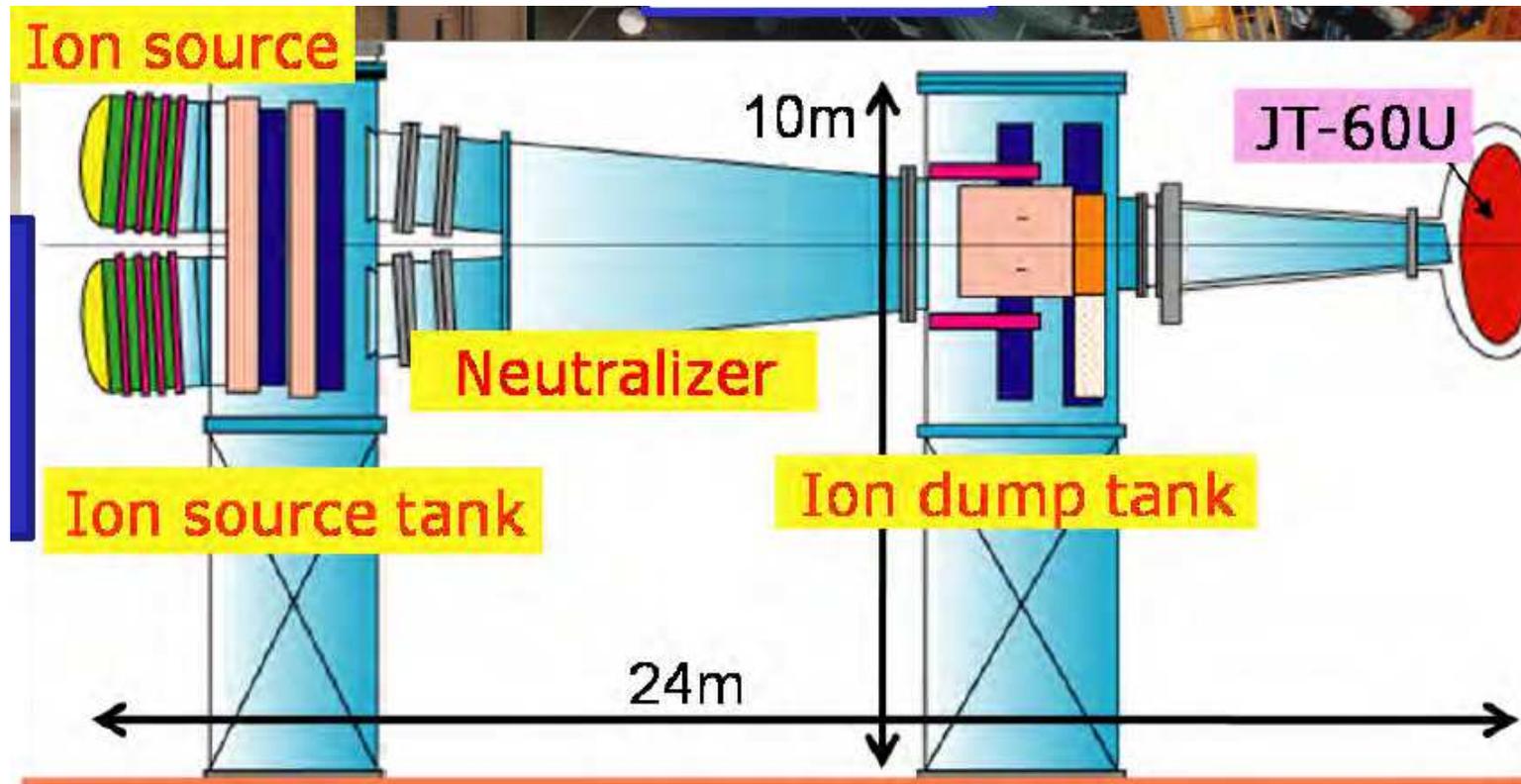


deterioration of the voltage holding capability

**occurs at**

density of more than tens of microgram/cm<sup>2</sup>,

# Первый N-NBI на JT-60 (1996 г.)



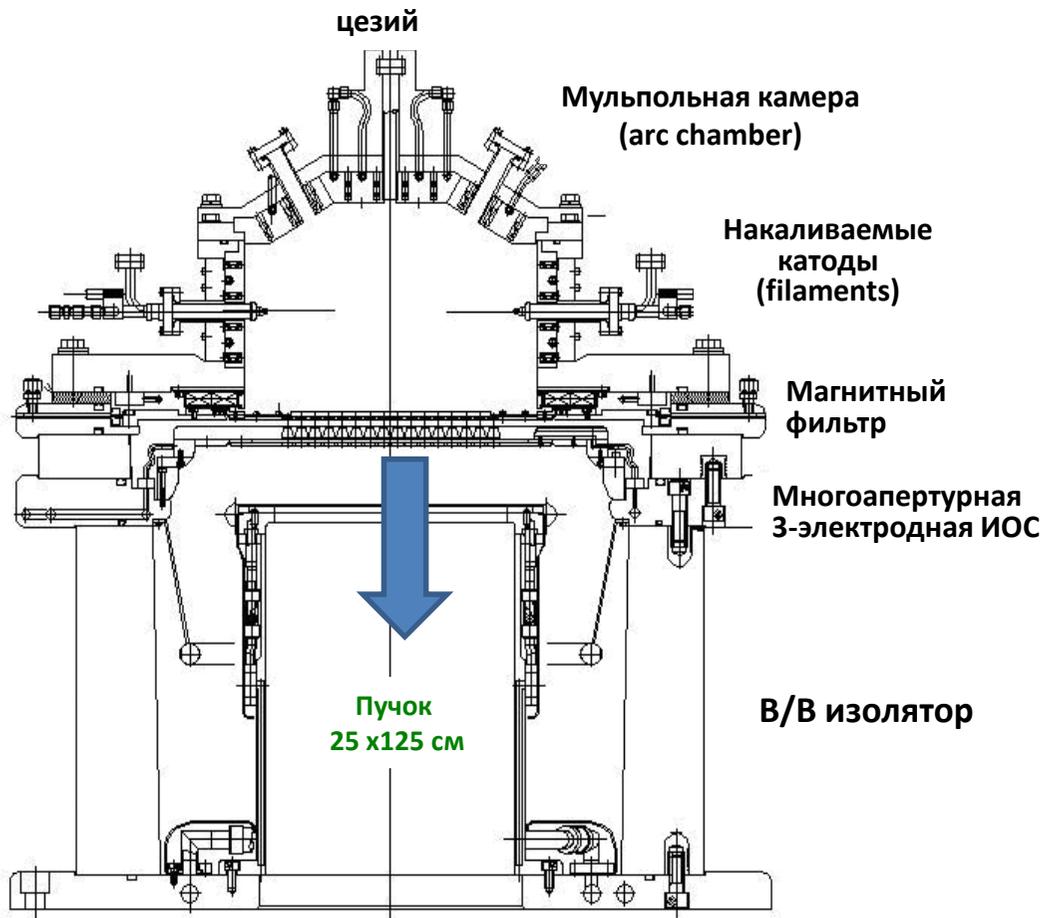
Design (Achievements)

Energy : 500keV (400keV)

Power : 10MW (6MW)

Pulse : 10s (30s at 3MW)

# Источники Н- для LHD

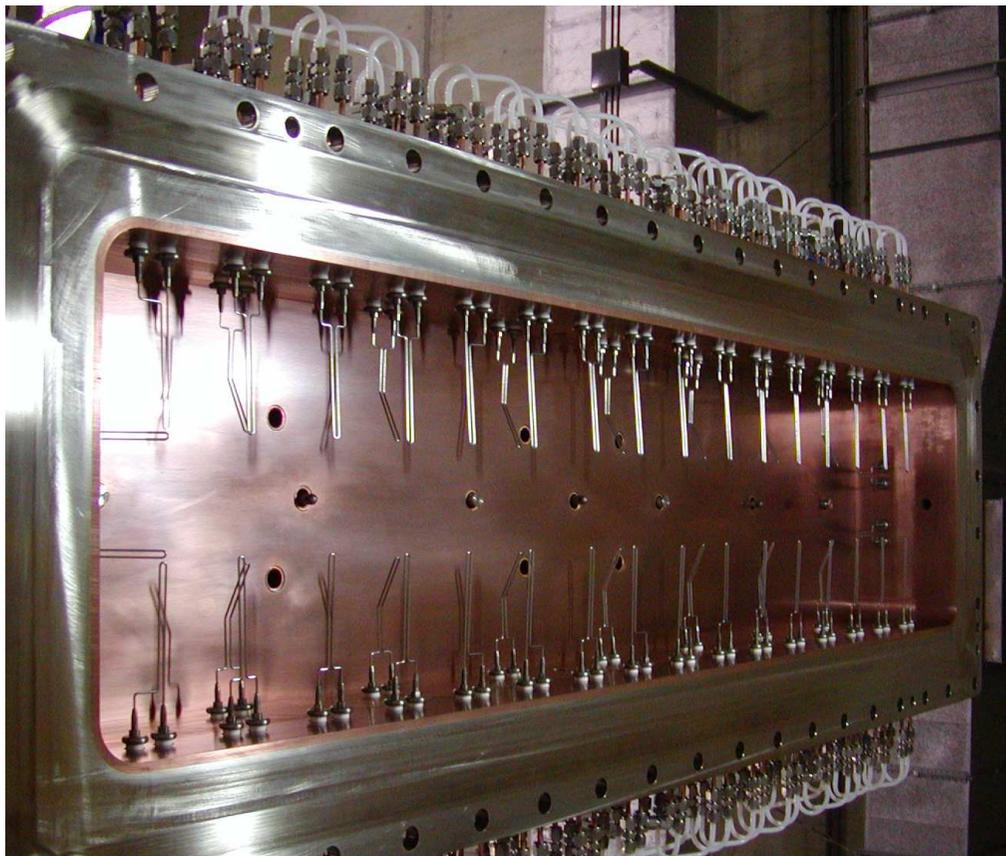


Поперечное сечение

Энергия	180 кэВ - 10 с 81 кэВ - 110с
Ток пучка Н-	25 - 40 А - 10 с 2 А - 110 с
Размер пучка в ускорителе	25 x 125 см
Расходимость (без учета ГФ)	10 x 13 мрад 8 x 15 мрад
Прозрачность ИОС	33 - 38 %
Эмиссионные отверстия	~10 <sup>3</sup> отв Ø1.2 - 1.4 см
Режим работы	1 имп каждые 3 мин 6 месяцев (22 тыс импульсов)

# Дуговой генератор плазмы в источниках LHD

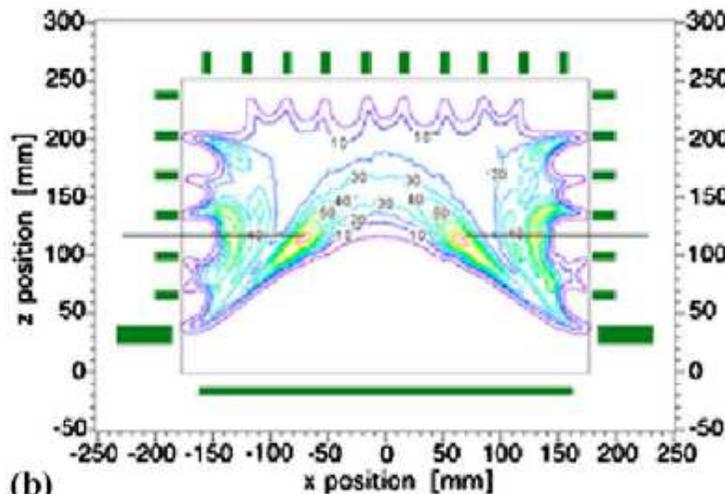
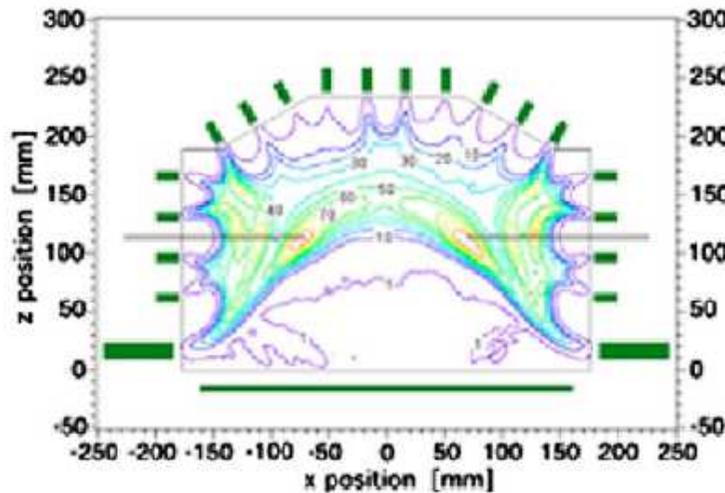
Источники LHD имеют **line-cusp azimuthal Bucket** с внутренними размерами 35<sub>ширина</sub> x 145<sub>длина</sub> x 21<sub>высота</sub> см



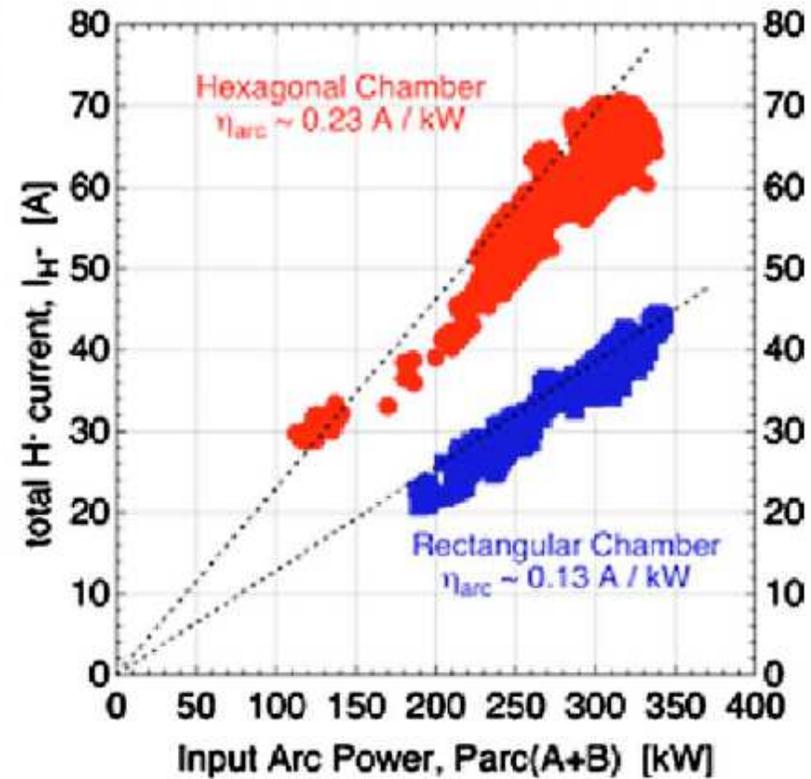
Ток разряда	3 кА
Напряжение разряда	50 - 80 В
Объем плазмы	~ 100 л
Давление водорода	0.3-0.4 Па
Накал одного катода	120 А x 17 сек
Включено катодов	24-26 шт
Материал катодов	W, Ø 1.8 мм
Срок службы	10 <sup>4</sup> импульсов
Замена	1-3 месяца
Мультиполь	SmCo <sub>5</sub>

Анодный корпус газоразрядной камеры охлаждается водой  
Установлено 72 термокатода

# Гексагональная ГРК в источнике LHD



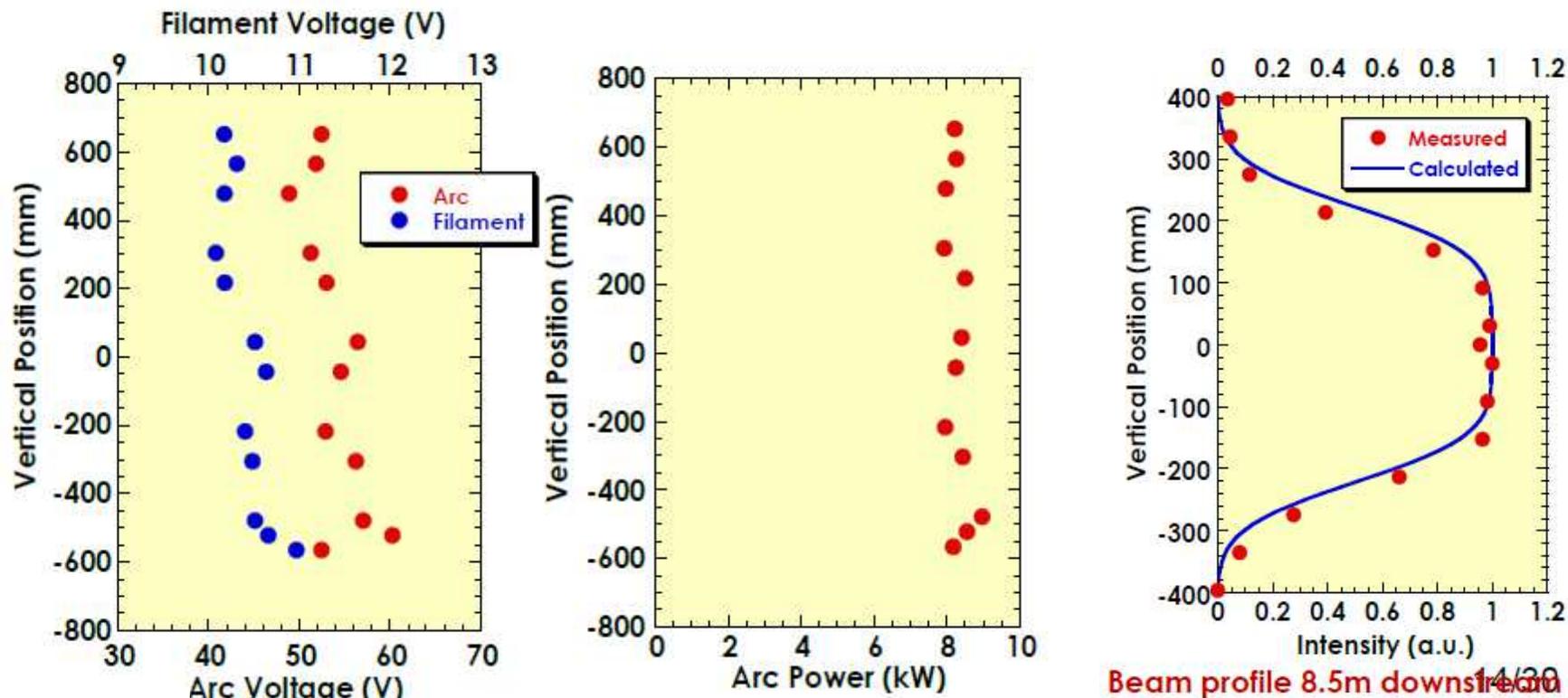
(b)



(c)

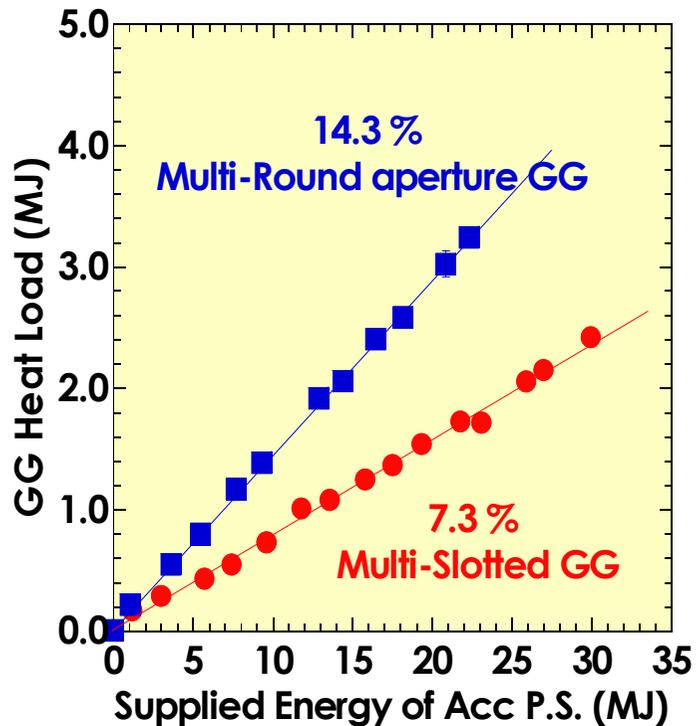
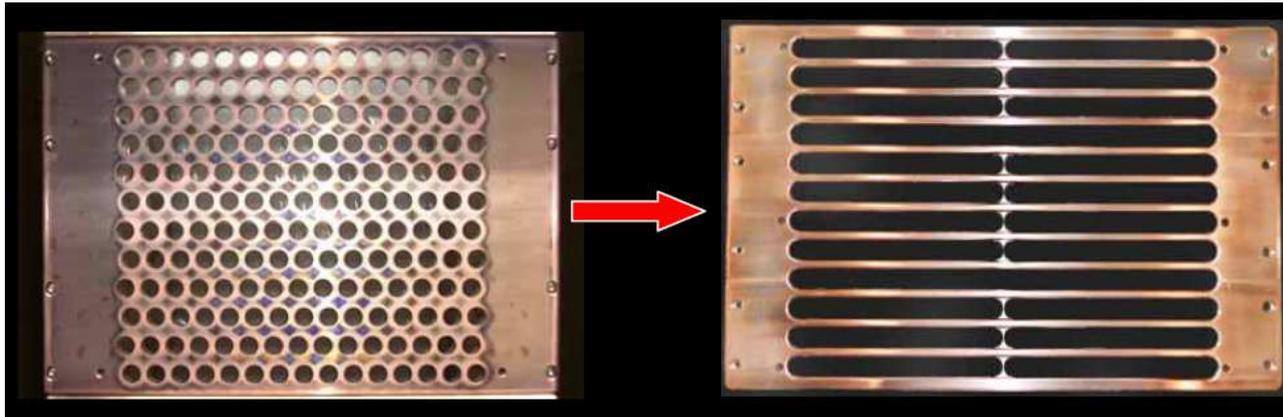
75% увеличение эффективности в гексагональной ГРК  
("камабоко")

# Индивидуальный контроль катодов в источнике LHD



Управление накалами и токами разряда отдельных катодов  
для достижения однородного распределения плазмы по длине ГРК 0.4 x 1.6 м

# GG с щелевыми апертурами



- Transparency is increased by a factor 2 - the electron and ion beam intersection is much reduced.
- Gas pressure in the acceleration gap is lowered by a factor of about 2.5 - the stripping loss is reduced by a factor 2
- Heat load of the GG is reduced by a factor 2
- Reduction of heat load improves the voltage holding ability.

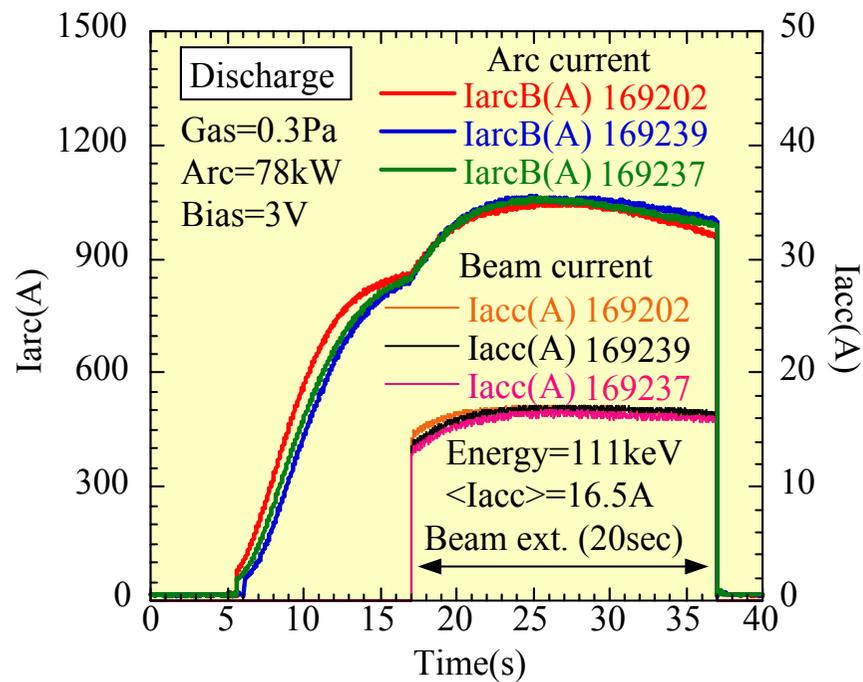
# Достижения больших источников

- **1 MA** neutral beam driven current have been demonstrated on the JT-60U by injection of deuterium beam (400 keV , 5.8 MW, 2 sec)
- **16 MW** hydrogen beam (180 keV, 2 sec) was injected to LHD for plasma heating

	Current (A)	Current density (A/m <sup>2</sup> )	Pulse length (s)	Energy (keV)
LHD (one source)	37	340	1.6	190
JT-60U (one source)	17.4	130	0.73	400
	10	100	25	360
(BATMAN)	2.3	330	4	20
RF source (MANITU)	2.5	120	3600	20
MeV Facility	0.323	140	0.2	796

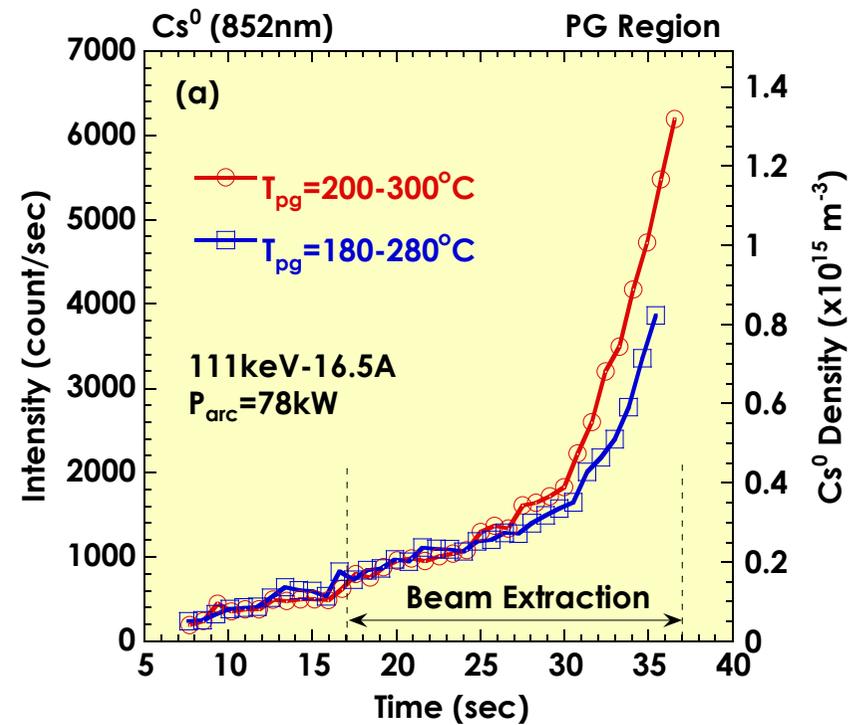
# Работы по улучшению источников LHD

## 20 сек импульсы



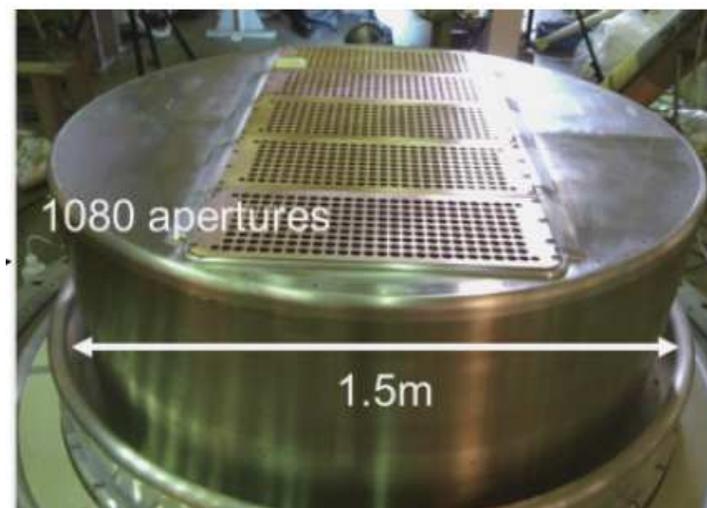
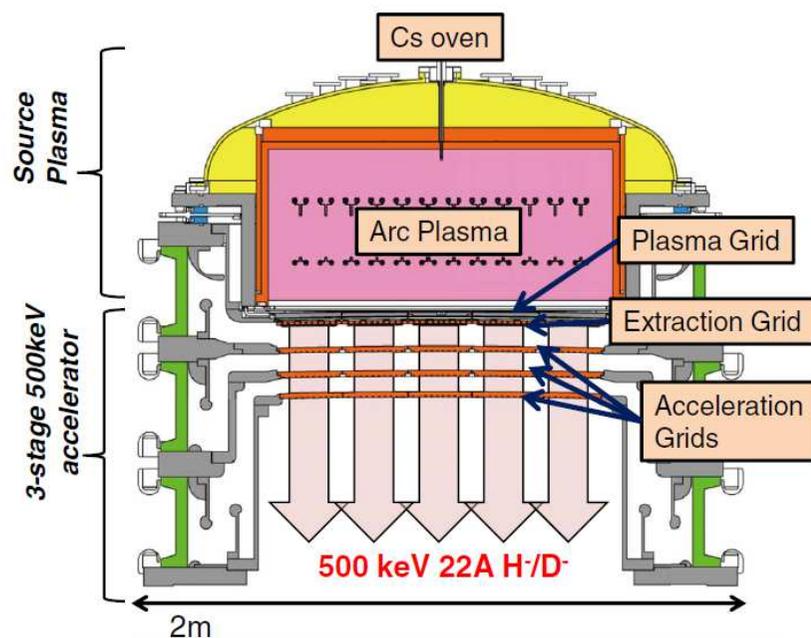
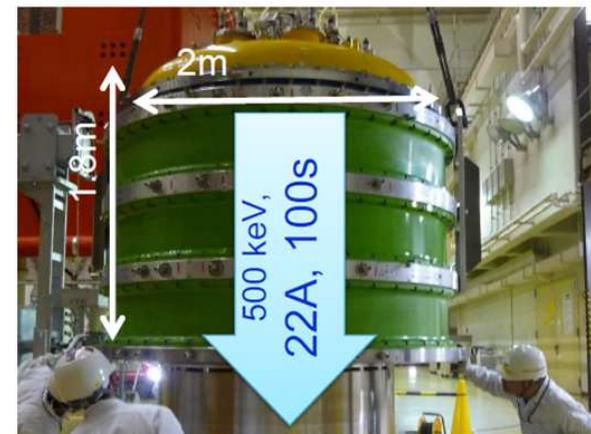
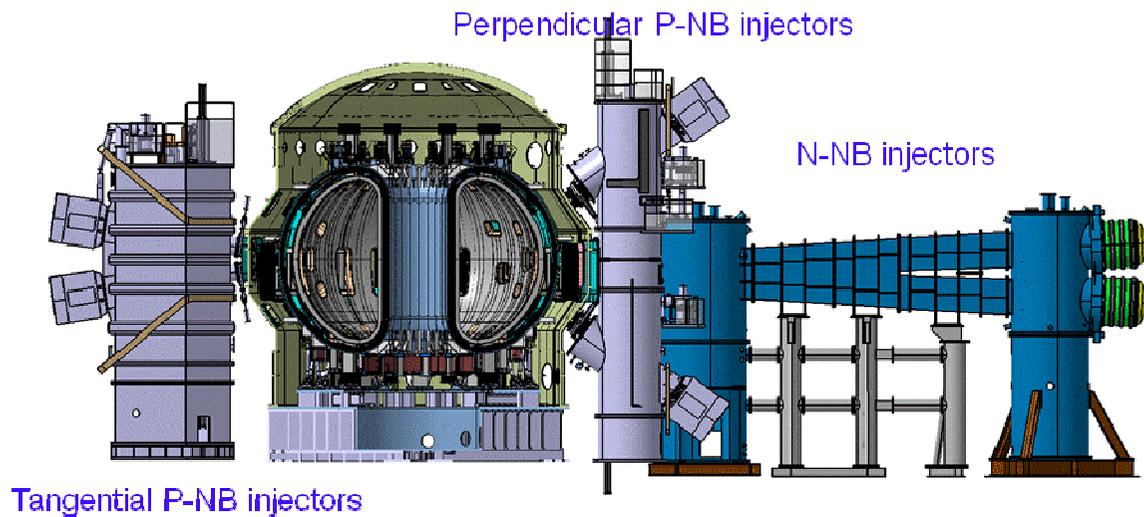
**Discharge 78kW ,  
 beam current 16.5 A – 111 keV, 20s**

## Ограничение длительности импульса накоплением цезия



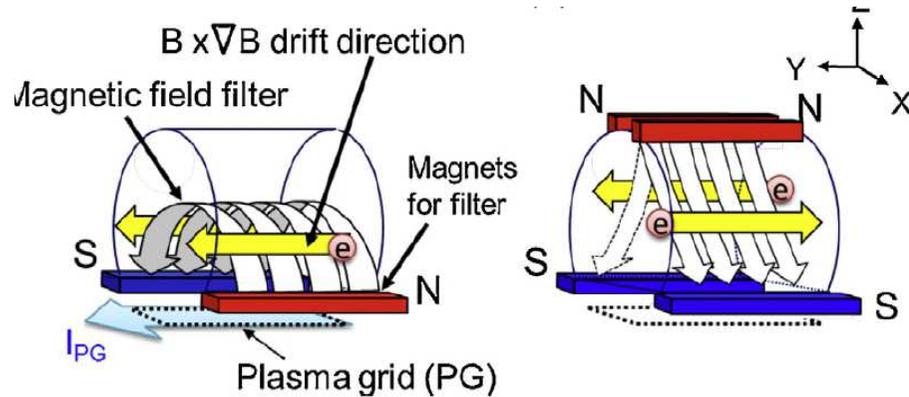
**Нарастание плотности Cs в области PG**

# Инжекторы для JT-60SA

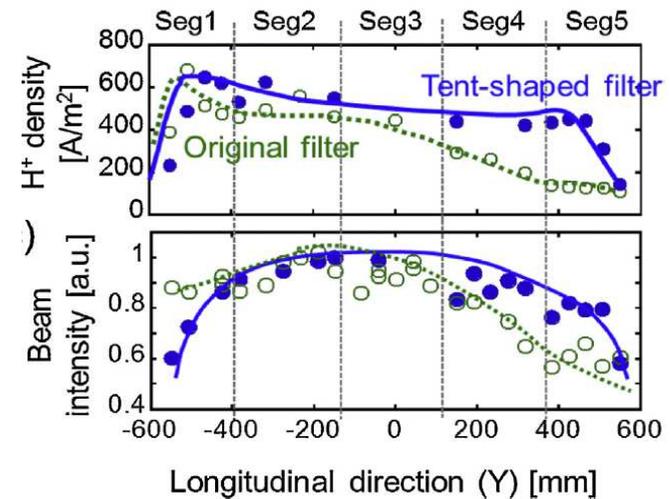


22 А источник ОИ и ускоритель инжектора JT-60SA

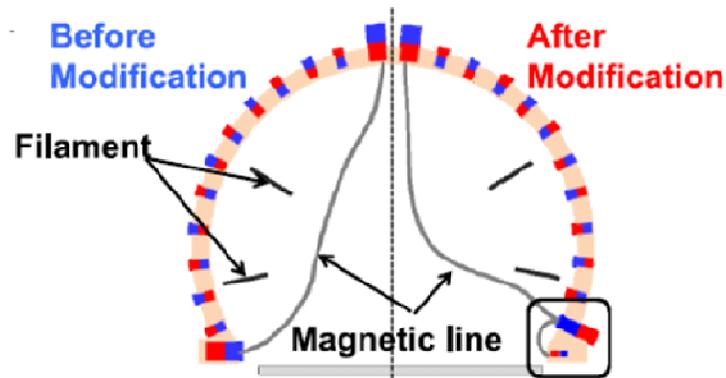
# Инжекторы для JT-60SA



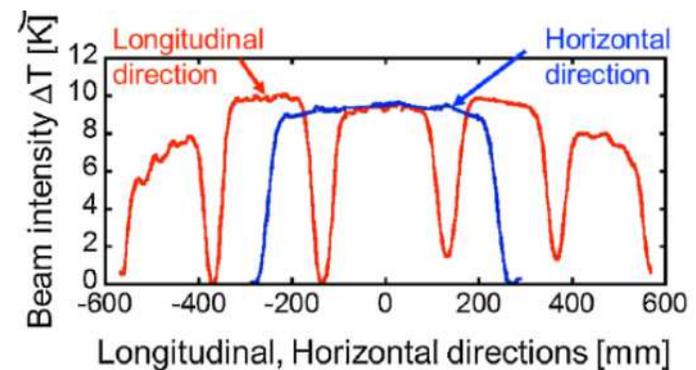
Геометрия токового и tent фильтров



Распределение плотности тока ПИ и ОИ для токового и tent фильтров

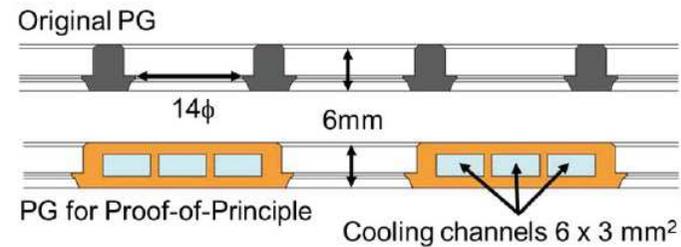
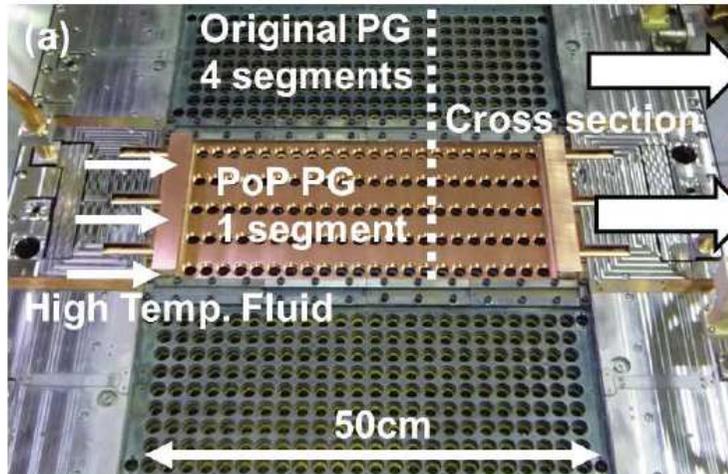


Модификация tent- фильтра для увеличения однородности плазмы и вытягиваемого пучка

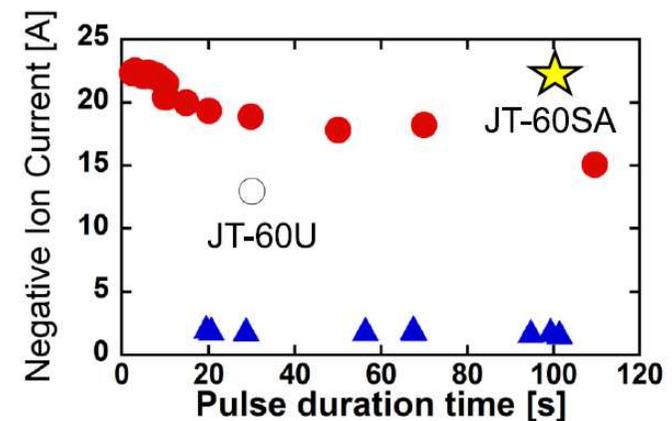
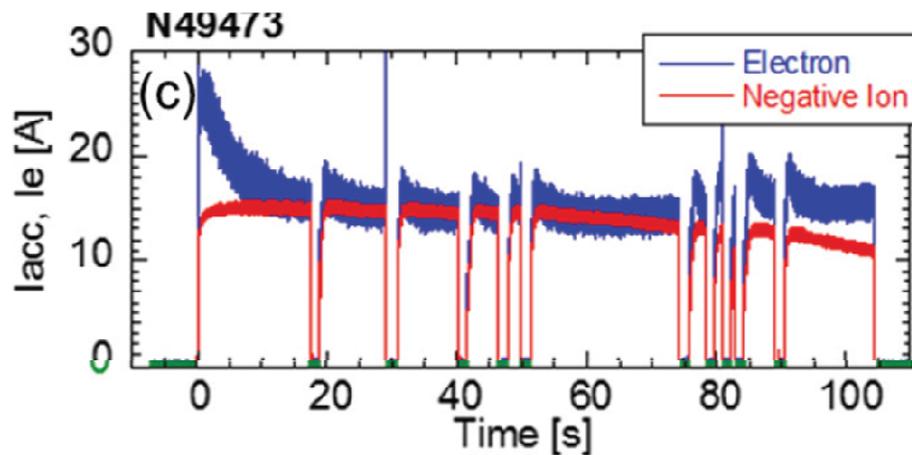


# Инжекторы для JT-60SA

Сделана термостабилизация PG горячей жидкостью GALDEN



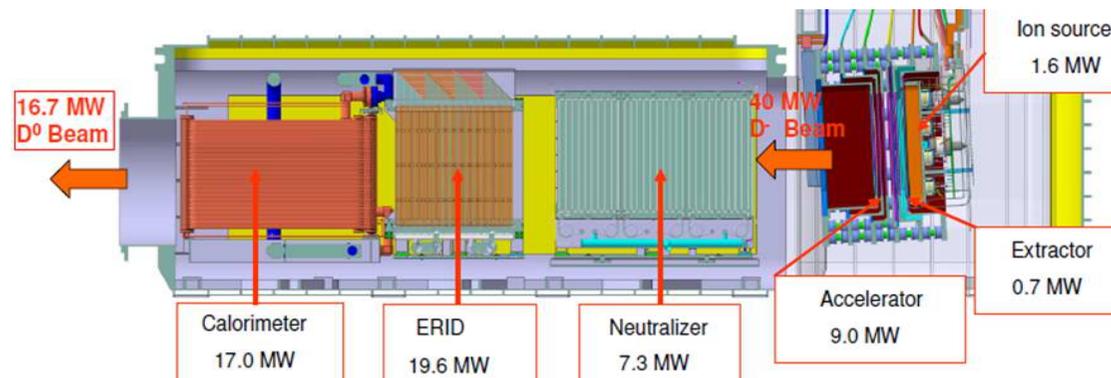
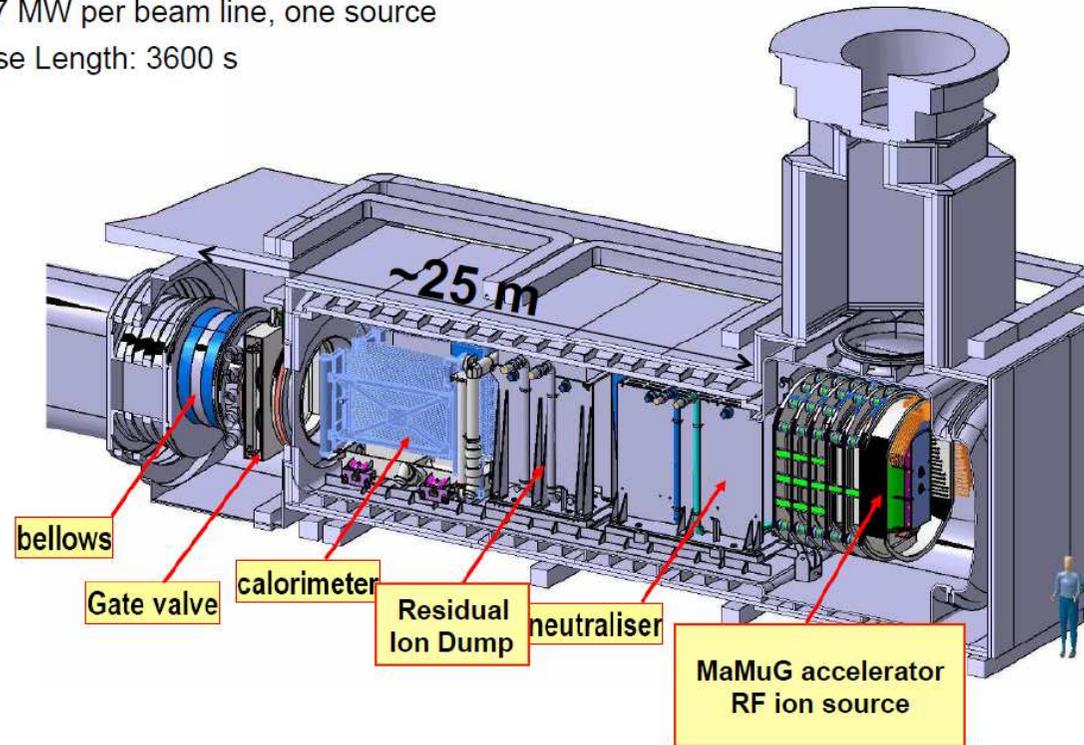
Модификация сегмента ускоряющей сетки



Получен пучок 32A, <1 s, и 15 A, 100 s

# Инжектор нейтралов для ИТЕР

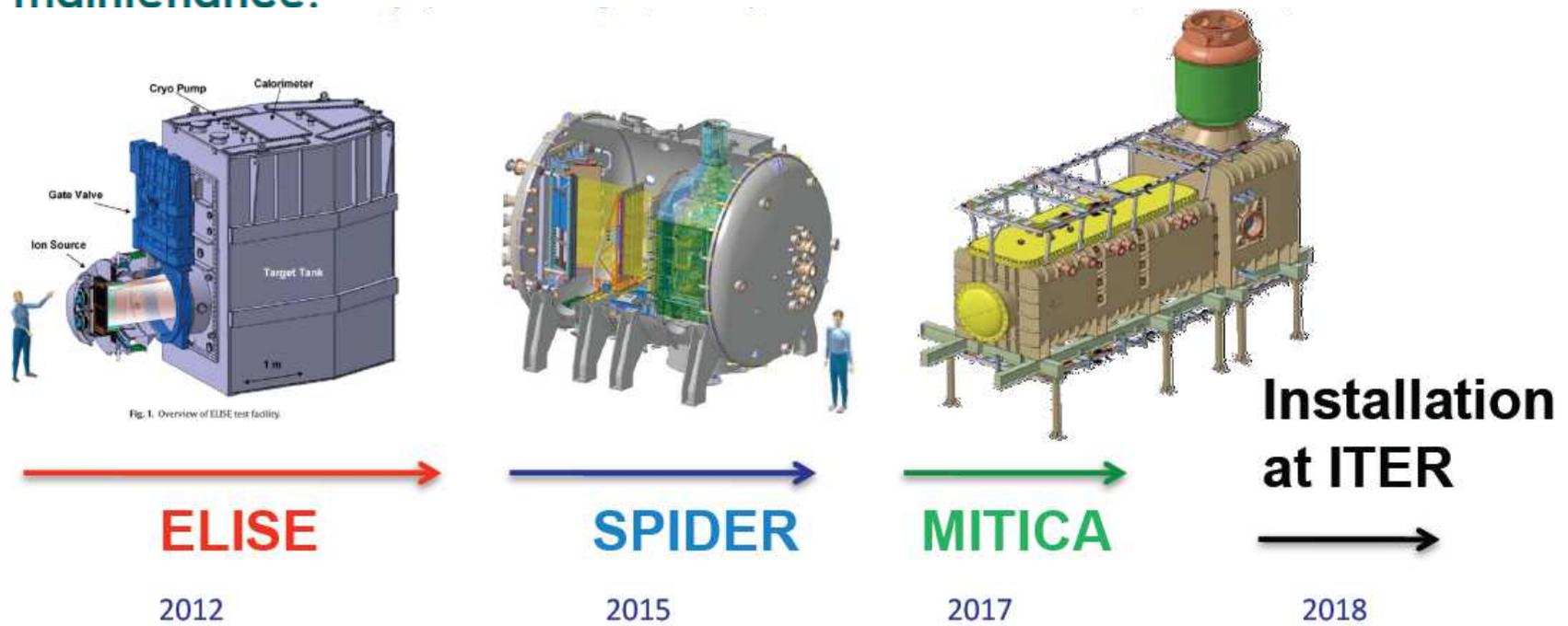
Two beam lines  
16.7 MW per beam line, one source  
Pulse Length: 3600 s



# ВЧ источники ОИ для инжекторов ИТЕР

July 2007: IPP RF source is now the reference source!

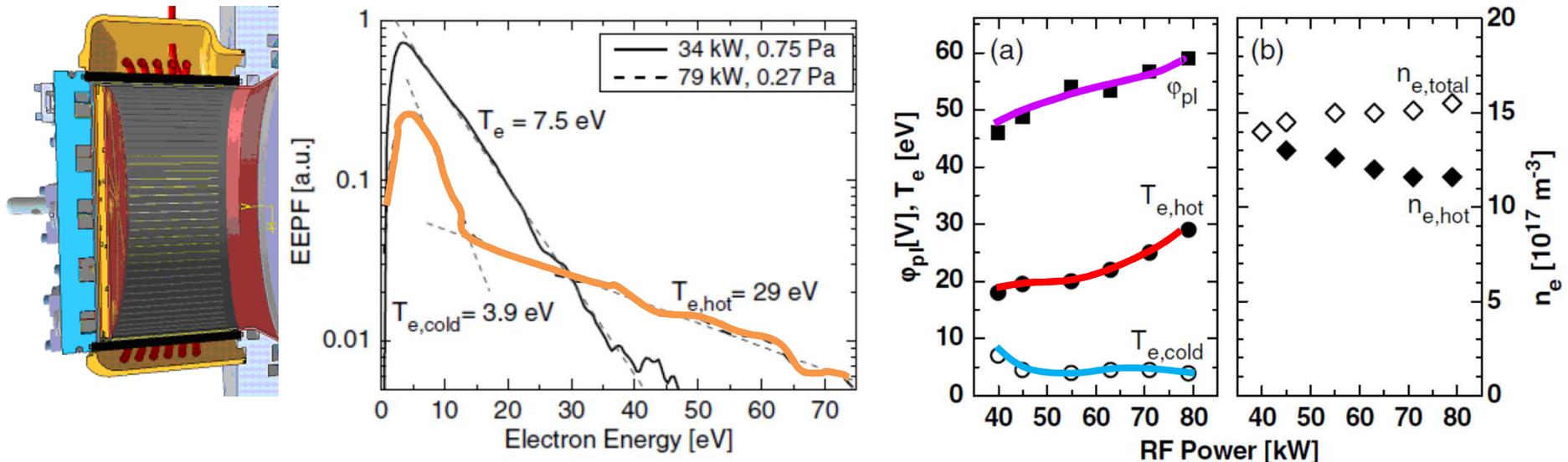
- ITER-NB injector is remotely handled, and the maintenance frequency should be low. Thus, the source opening for the filament replacement should be avoided.
- RF-driven source is developed for long-term operation without maintenance.



# ВЧ источники для УТС

BATMAN (IPP) - зондовые и спектроскопические исследования ВЧ источника

Температура электронов и потенциал плазмы в драйвере с FS



При низкой мощности 34 кВт и повышенной плотности  $\text{H}_2$  плазма максвелловская

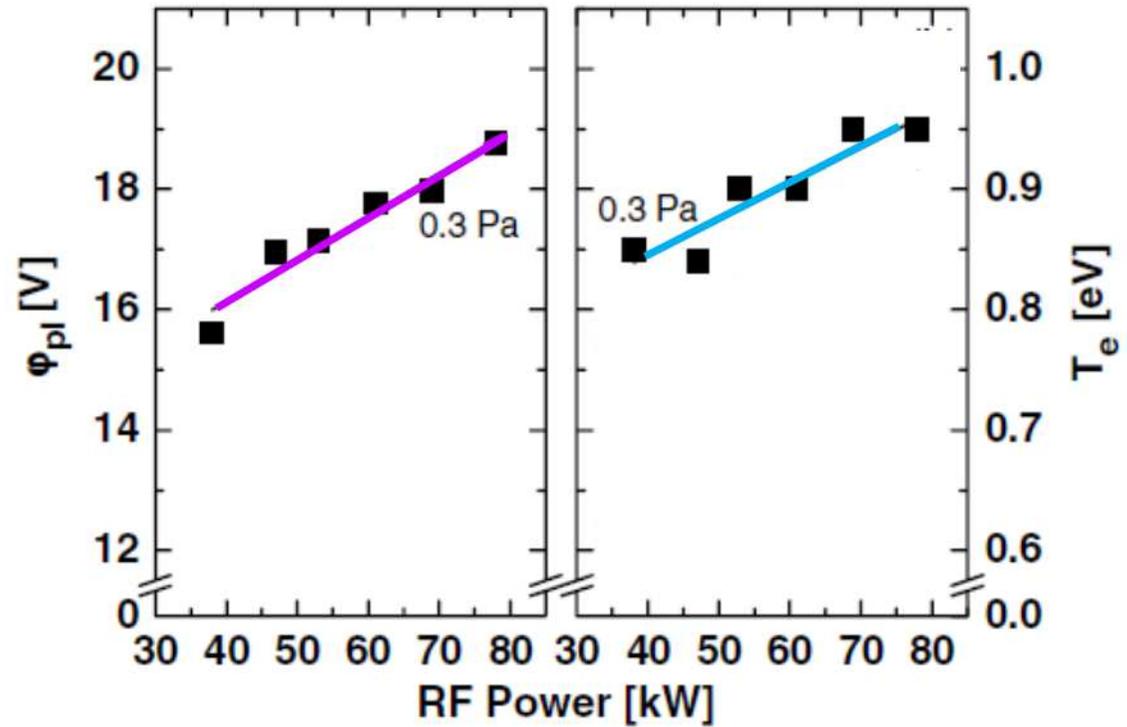
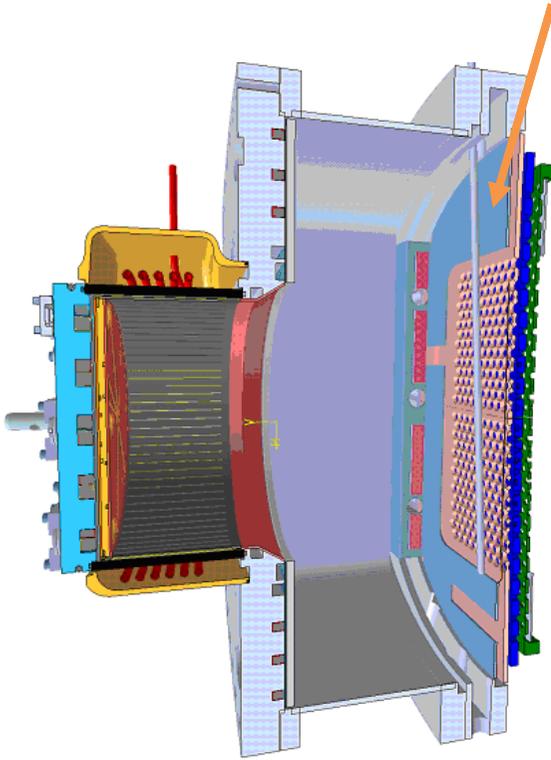
При высокой мощности и пониженной плотности  $\text{H}_2$  - би-максвелловская,

Температура горячих электронов растет с увеличением мощности разряда

Потенциал плазмы почти в двое превышает температуру горячих электронов

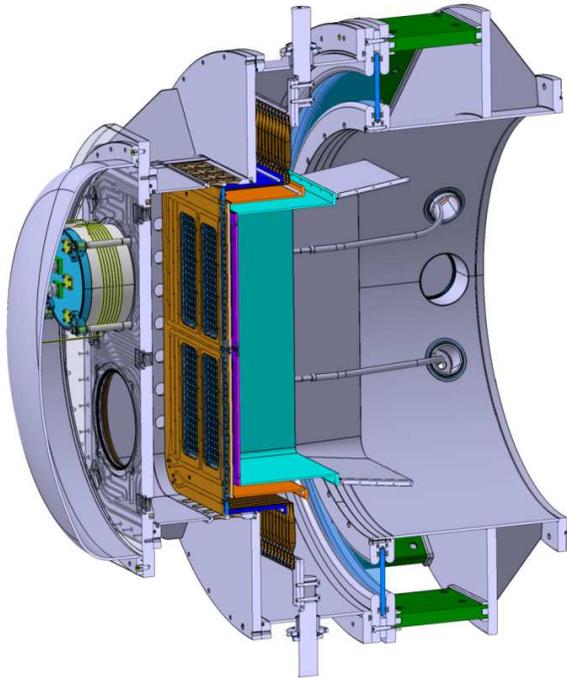
# ВЧ источники для УТС

Температура электронов и потенциал плазмы ВЧ источника  
вблизи Plasma Grid



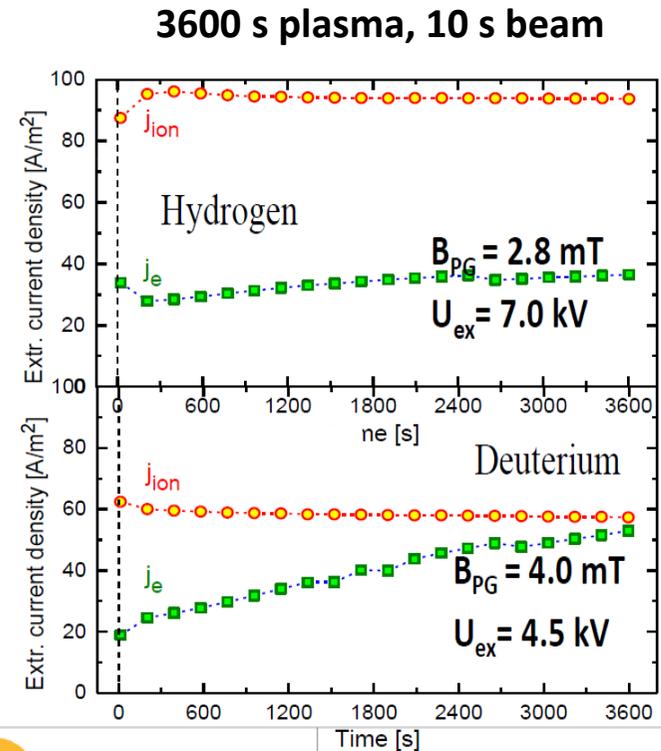
Потенциал плазмы и температура электронов вблизи PG намного ниже, чем в драйвере

# ELISE – Extraction from a Large Ion Source Experiment



## Основные задачи

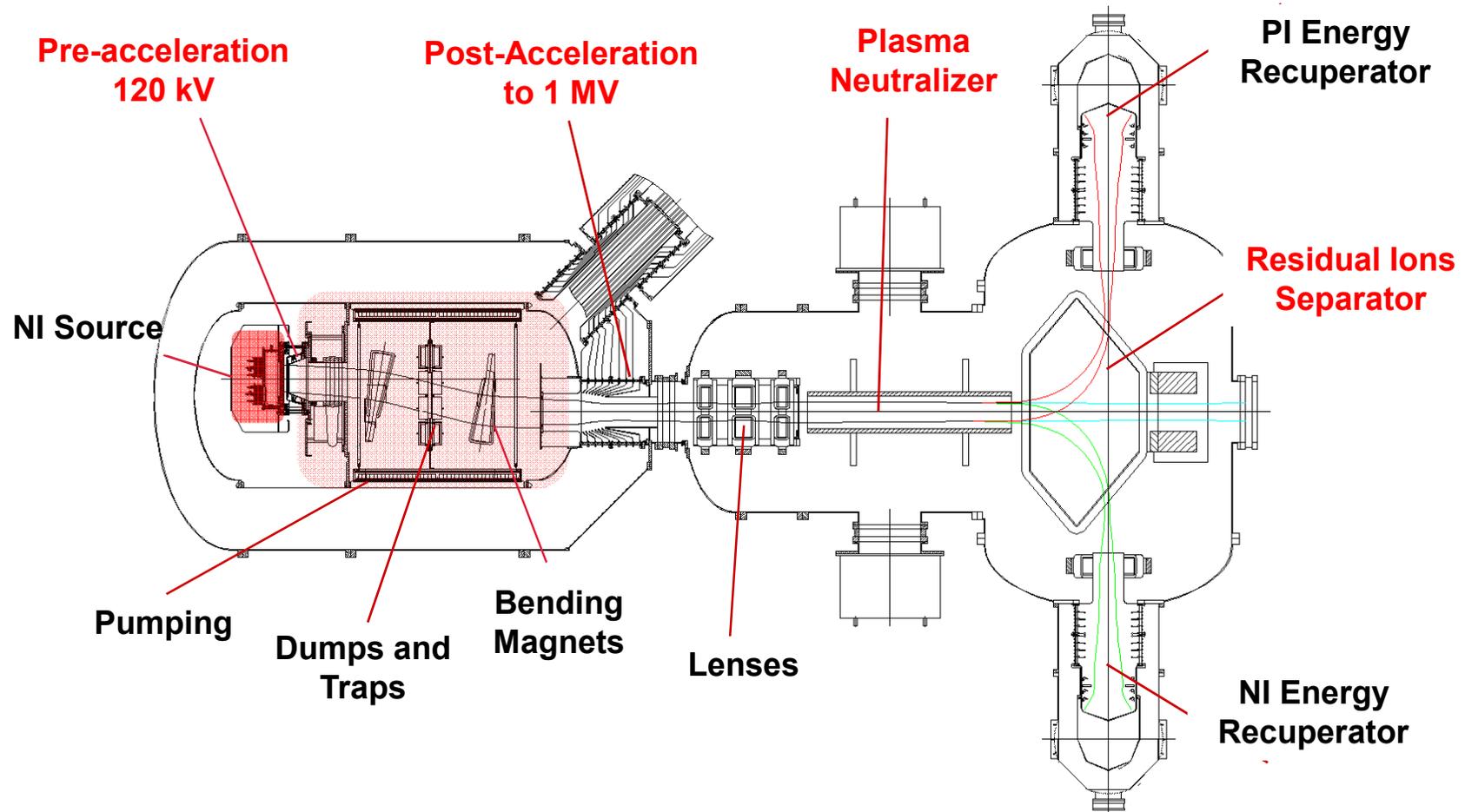
Однородность плазмы на  $1000 \text{ cm}^2$   
Работа в  $\text{D}_2$  (много электронов)  
20 A / 60 кВ, 10s (RF 3600 s)  
Угловая расходимость пучка  
Большая площадь вытягивания  
Токовый магнитный фильтр  
Плоский стеклянный изолятор  
Нагрев PG водой под давлением  
Диагностика (окна в ГРК)



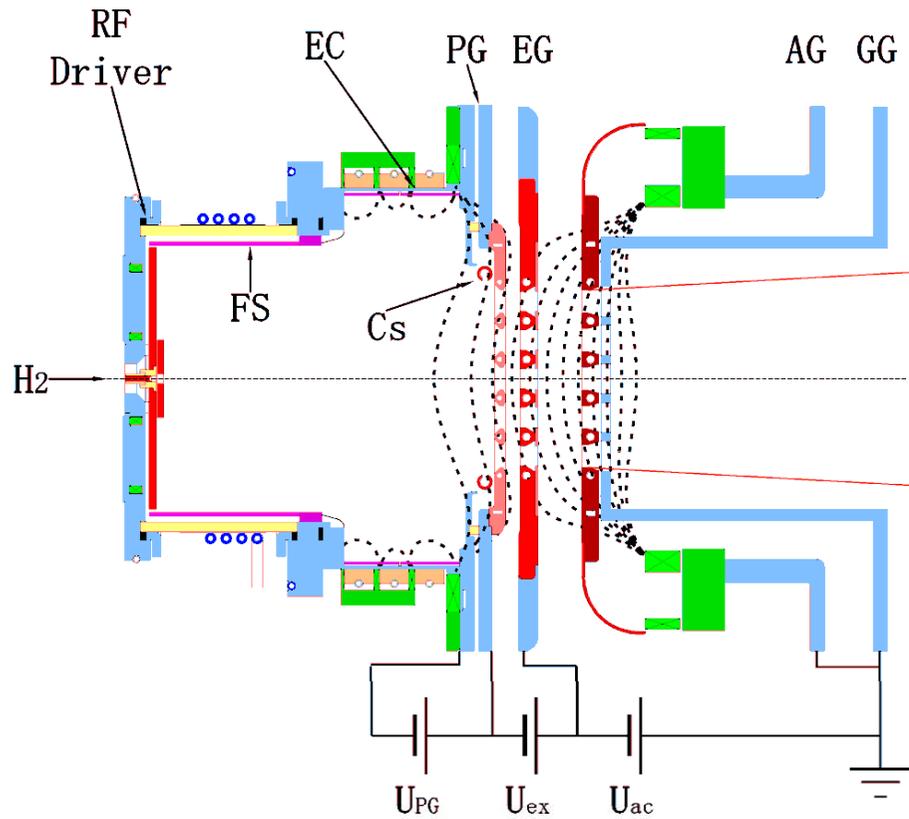
- Long pulse operation has been sustained
- Stable ion current densities maintained
- Increase of electrons observed in  $\text{D}_2$
- ion source RF power is only 20 kW (of 90 kW)

Необходимо строить новую установку NBTF

# New Injector Concept – 2-stage acceleration

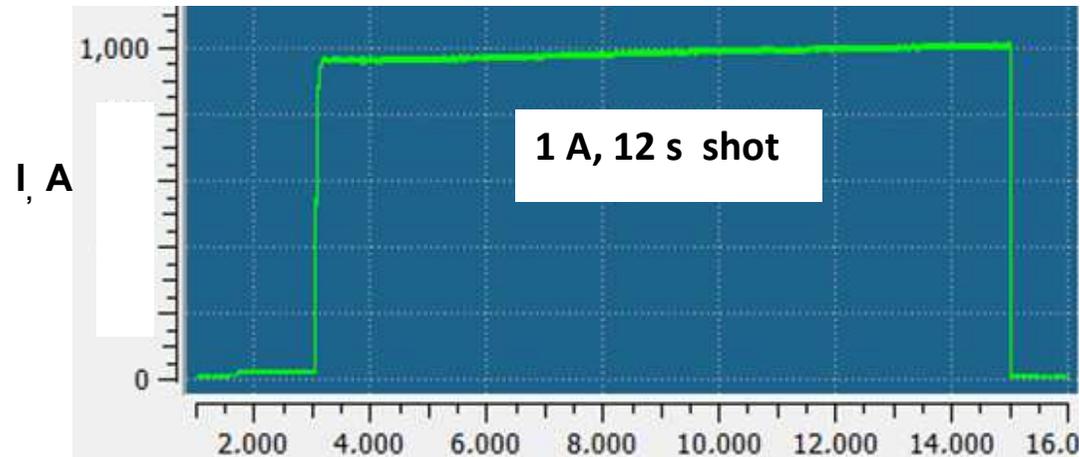


# RF BINP source



- 1. Active temperature control of extraction and plasma grids (heating/cooling by hot fluid)**
- 2. Cesium seed to PG periphery**
- 3. Concaved magnetic field in the IOS gaps**

# RF BINP source



- H- ion beams with current  $>1\text{A}$  and energy  $\geq 90\text{ keV}$  are regularly produced.
- Power efficiency of H- ion production is 28 kW/A
- H- ion beam was transported through the LEBT to distance 3.5 m