

# **Кластерная внутренняя мишень для поляриметрии на NICA**

**Дмитрий Топорков**

**Институт ядерной физики СО РАН**

**12 ноября 2025**

- Содержание доклада
  - Немного истории
  - Молекулярный и кластерный пучок
  - Кластерная мишень для IMP, Китай
  - Кластерная мишень для PANDA, Германия

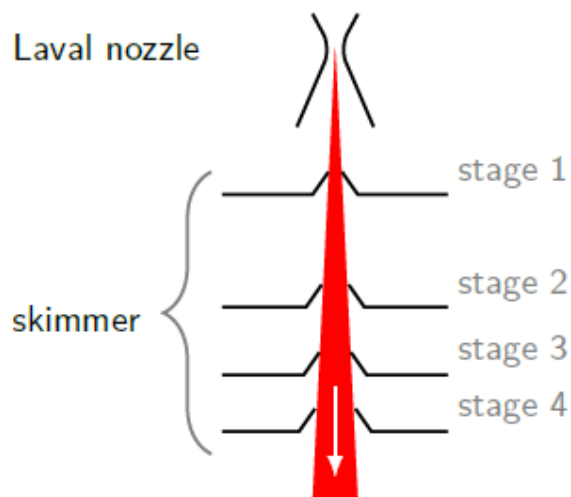
# Электронные накопительные кольца

	<i>E (GeV)</i>	<i>target</i>	
└ <b>VEP-1</b>	<b>0.16</b>	<b>quartz wire</b>	<b>Novosibirsk (1967)</b>
└ <b>VEPP-2</b>	<b>0.65</b>	<b>clusters jet</b> $H_2$ $H_2O$ $NH_3$ $C_2H_2$ <b>powder</b> $Ni$ , $\uparrow D$	
└ <b>VEPP-3</b>	<b>2.0</b>	<b>storage cell</b> $\uparrow D$	
└ <b>ADONA</b>	<b>1.5</b>	<b>clusters jet</b>	<b>Frascati</b>
└ <b>HERA</b>	<b>30.0</b>	<b>storage cell</b> $\uparrow H$ $\uparrow D$ $\uparrow {}^3He$	<b>Hamburg</b>
└ <b>SHR</b>	<b>1.0</b>	<b>storage cell</b> $\uparrow H$ $\uparrow D$ $\uparrow {}^3He$	<b>MIT-Bates</b>
└ <b>AmPS</b>	<b>0.9</b>	<b>storage cell</b> $\uparrow H$ $\uparrow D$ $\uparrow {}^3He$	<b>Amsterdam</b>
└ <b>MESA</b>	<b>0.105</b>	$H_2$	<b>Mainz</b>

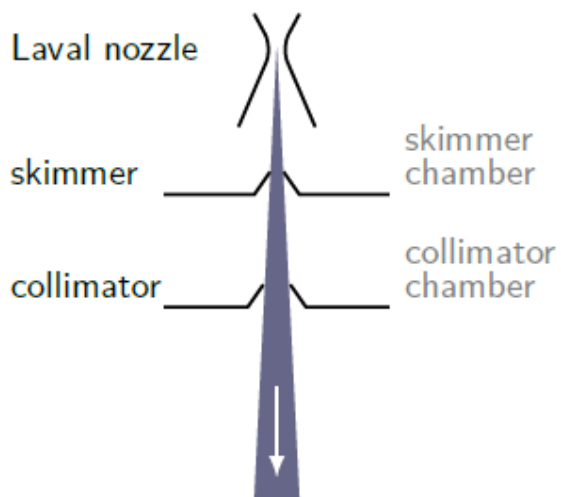
# Протонные и ионные кольца

	$E \text{ (GeV/u)}$	target	
┌ <b>TSR</b>	<b>0.4</b>	<b>storage cell</b>	<b>Heidelberg</b>
		↑H H <sub>2</sub>	
┌ <b>IUCF</b>	<b>0.45</b>	<b>storage cell</b>	<b>Bloomington</b>
		↑H ↑D	
┌ <b>GSI (ESR)</b>	<b>1.0</b>	<b>cluster jets</b>	<b>Darmstadt</b>
┌ <b>COSY</b>	<b>3.0</b>	<b>jet + storage cell</b>	<b>Julich</b>
		pellet H <sub>2</sub> ↑H ↑D	
┌ <b>CELSIUS</b>	<b>0.40</b>	<b>pellet H<sub>2</sub></b>	<b>Uppsala</b>
┌ <b>RHIC</b>	<b>100.0</b>	<b>jet ↑H</b>	<b>Brookhaven</b>
┌ <b>CSR</b>	<b>0.40</b>	<b>cluster jets</b>	<b>Lanzhou</b>
┌ <b>GSI (HESR)</b>	<b>8.0</b>	<b>jet or pellet H<sub>2</sub></b>	<b>Darmstadt</b>
<b>FAIR (PANDA) <math>\overline{p}</math></b>	<b>15 GeV/c</b>	<b>cluster jet H<sub>2</sub></b>	<b>Darmstadt</b>

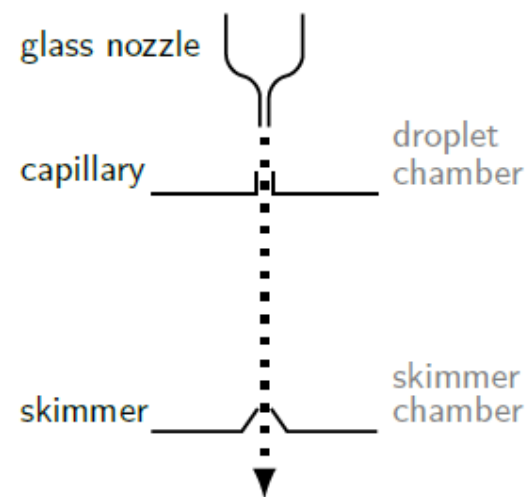
# Типы газовых мишеней



**Молекулярная струйная**

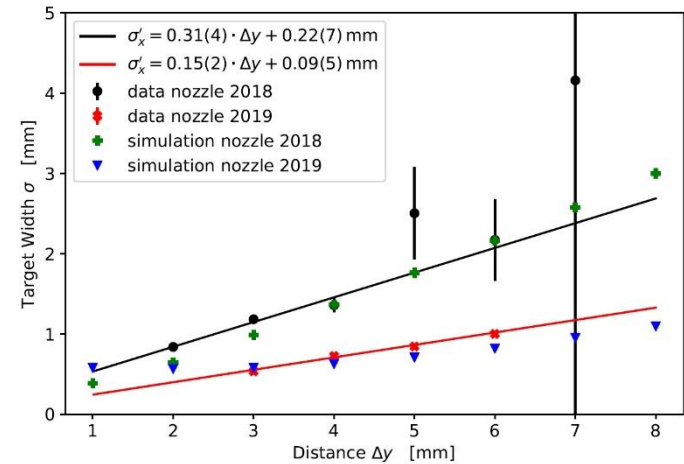
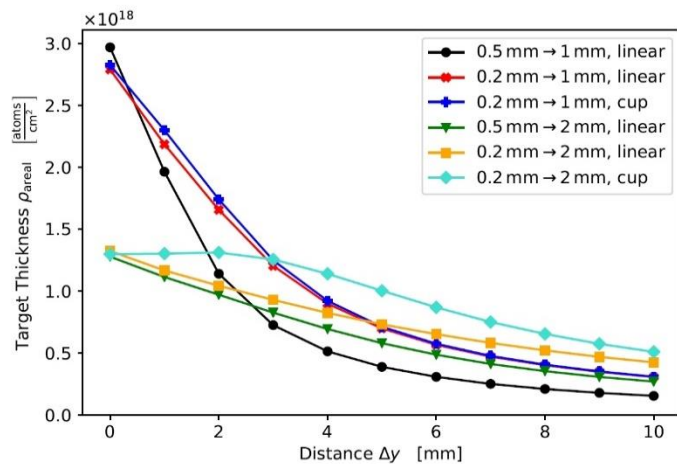
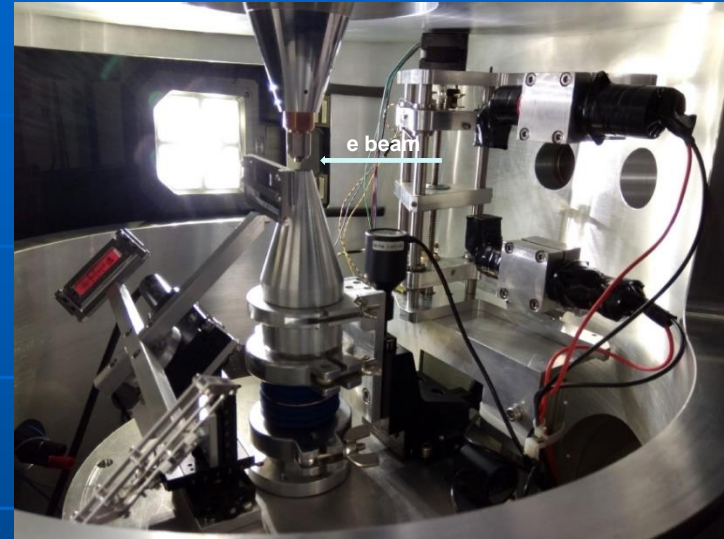
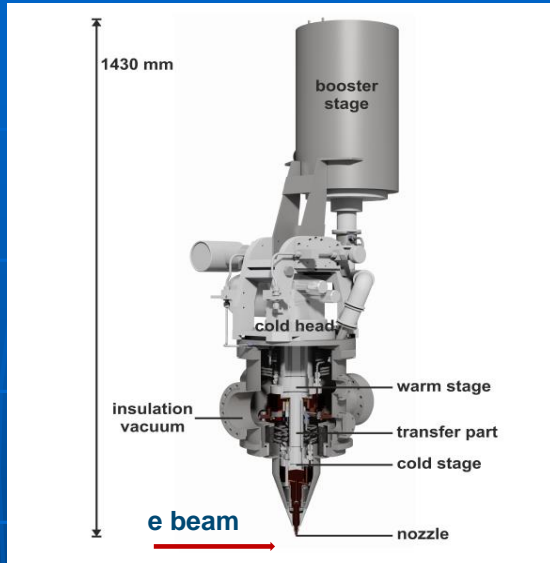


**Кластерная струйная**

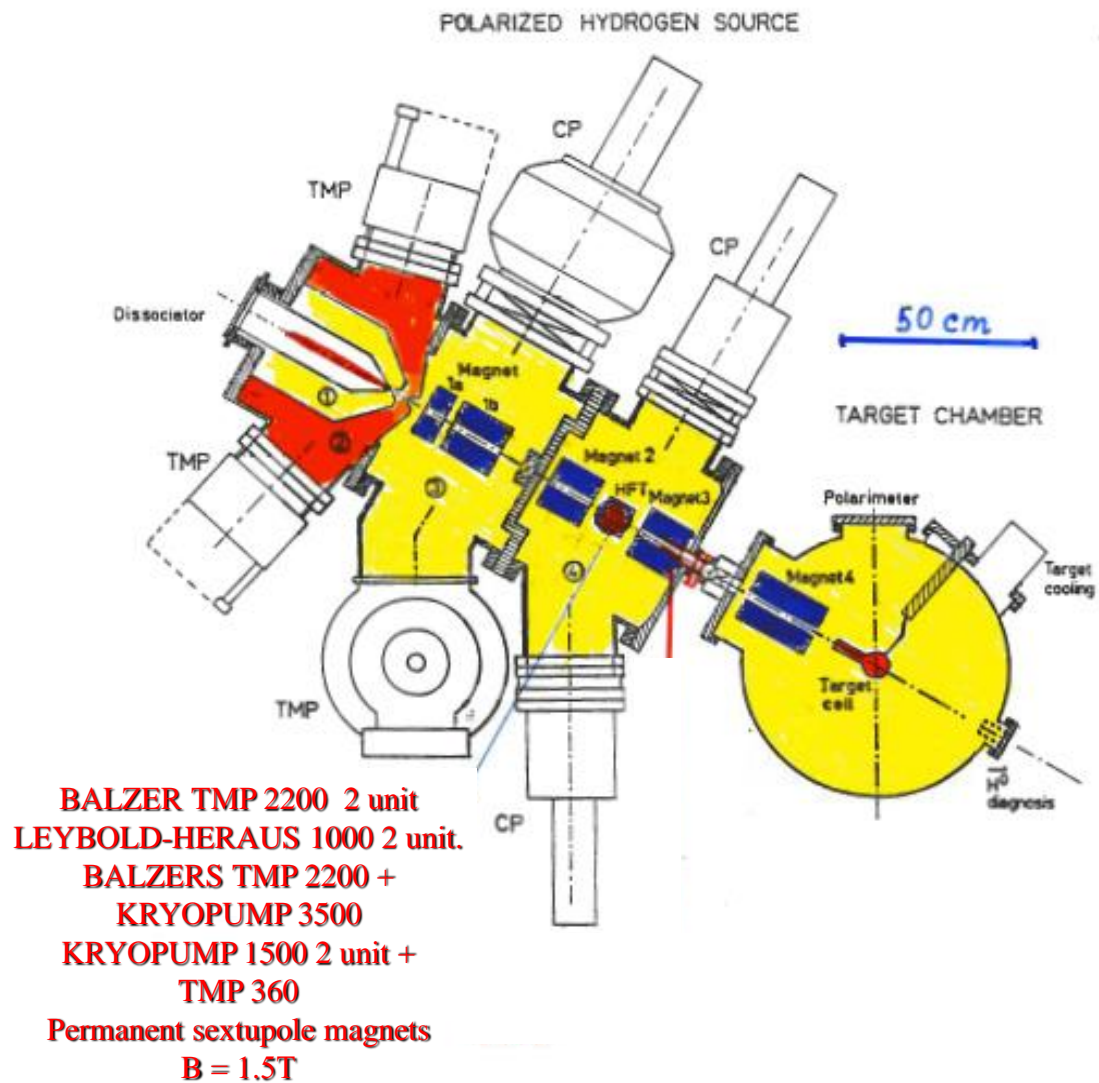


**Капельная**

**Supersonic gas jet target at MESA. Diameter of the beam  $\sim 2$  mm,  $H_2$  target thickness  $\sim 10^{18}$  at/cm<sup>2</sup>. Gas flow  $\sim 2000$  Ln/h. B.S. Schlimme et al., NIMA 1013 (2021) 165668.**



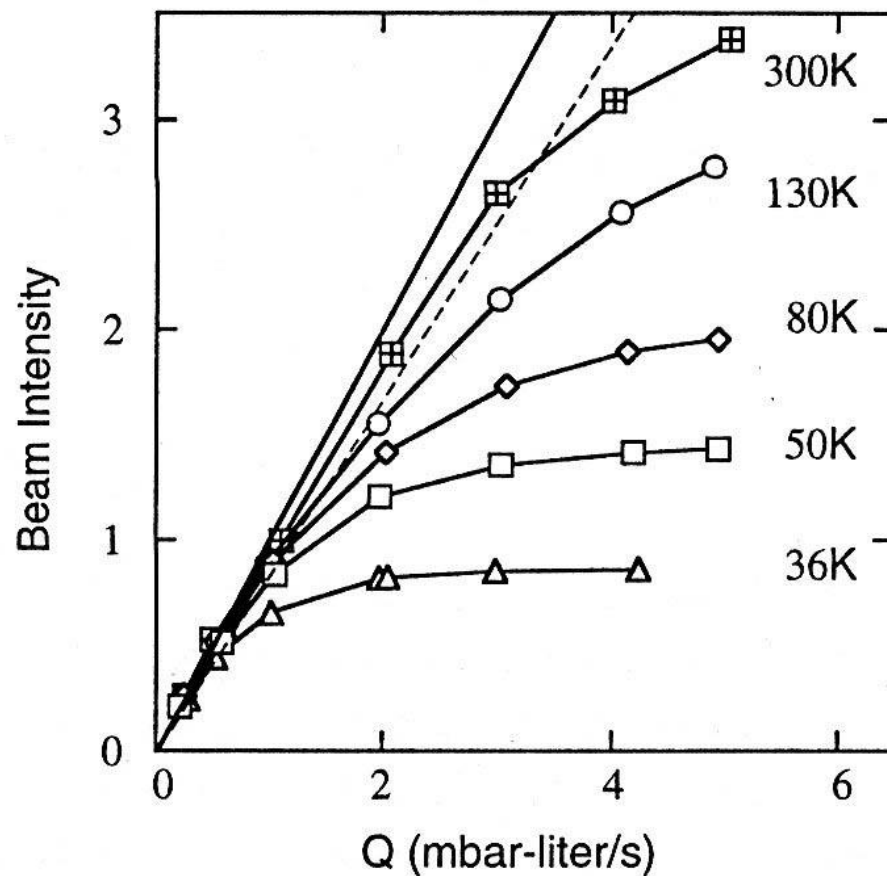
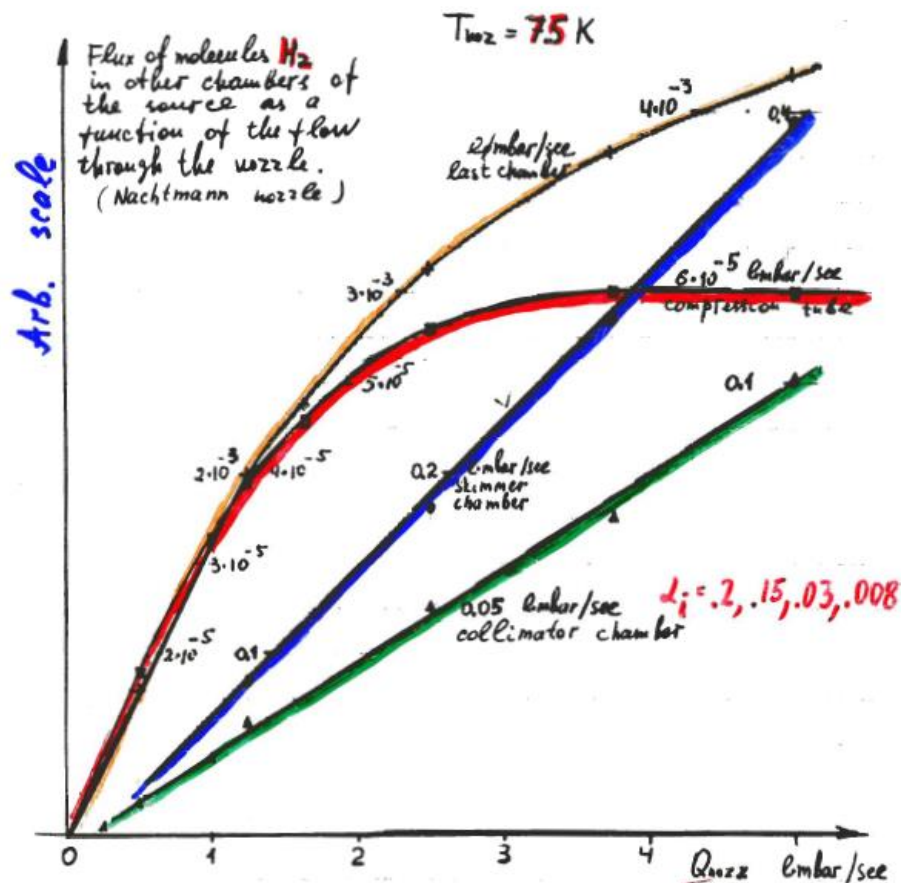
# Формирование атомного или молекулярного пучка





# Интенсивность $H_2$ молекулярного пучка

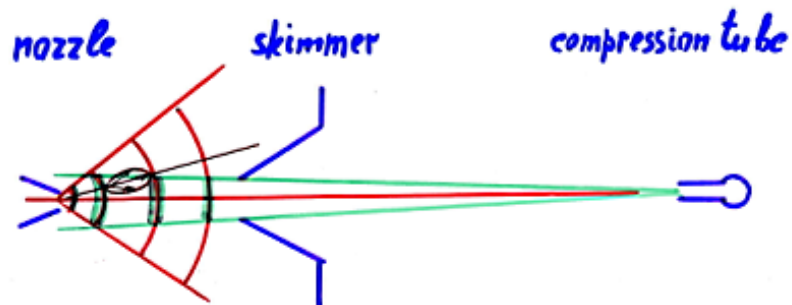
*T. Wise et al. NIMA 336(1993) 410*





## Два эффекта, приводящие к ограничению интенсивности в зависимости от расхода газа

*Saturation of the intensity at large distance*



**Экранировка скиммером**

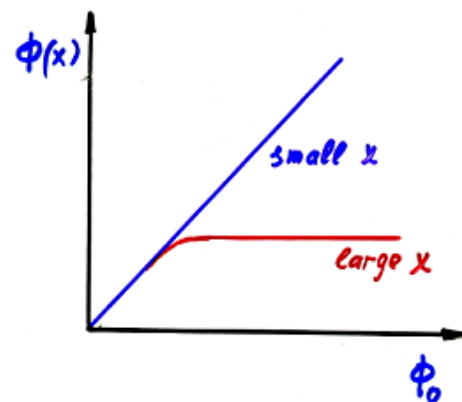
### INTRA BEAM SCATTERING

Zankel K. 1972 J.Phys. B: Atom.Molec.phys. 5,74-9.

$$d\Phi = -\alpha\Phi^2 dx$$

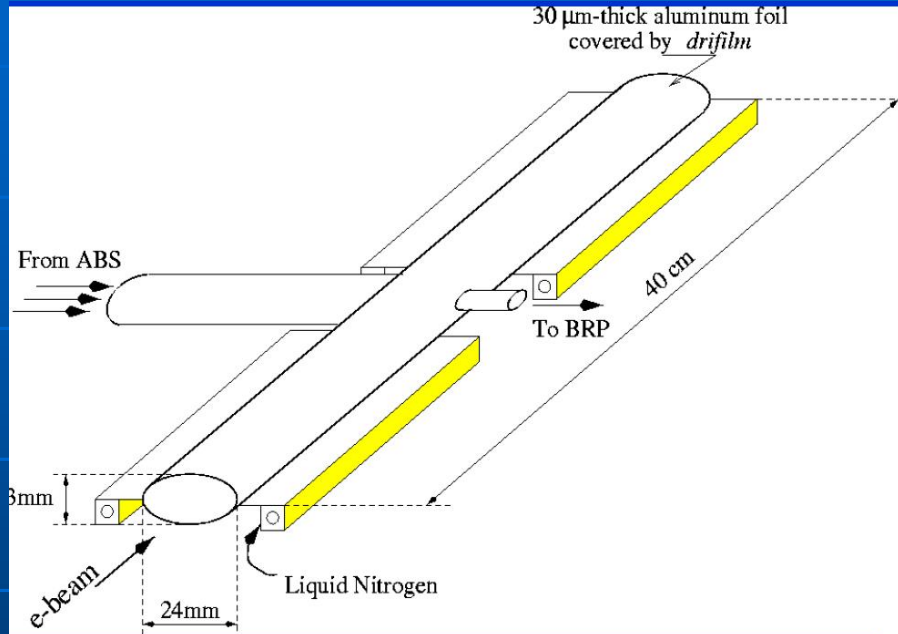
$$\alpha \approx \frac{\Delta v \cdot \sigma}{v_{max}^2}$$

$$\Phi(x) = \frac{\Phi_0}{1 + \alpha \cdot \Phi_0 \cdot x}$$



**Внутрипучковое рассеяние**

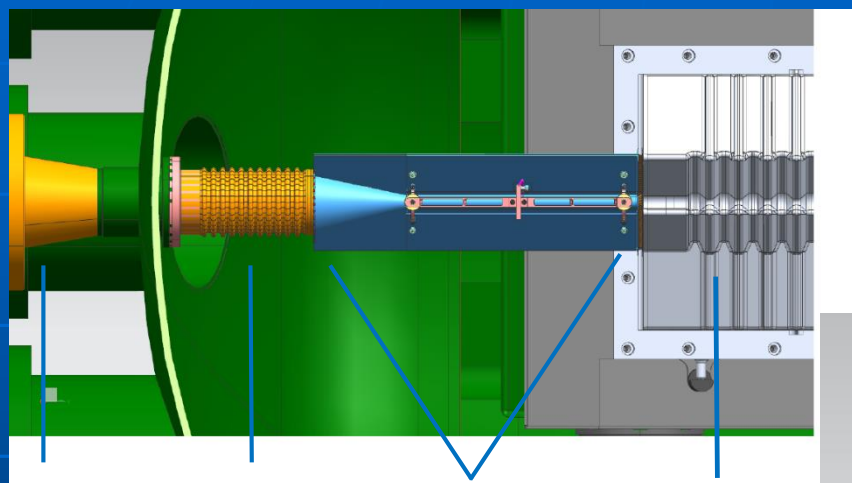
# Накопительная ячейка для поляризованных атомов



Выигрыш в толщине мишени ~ 100 !!!

# Внутренняя мишень на LHC

## Design of the SMOG2 cell V. Carassiti et al, INFN Ferrara



Beam tube      Flexible part of WFS      Cell and conical WFS      RF foil and detector box

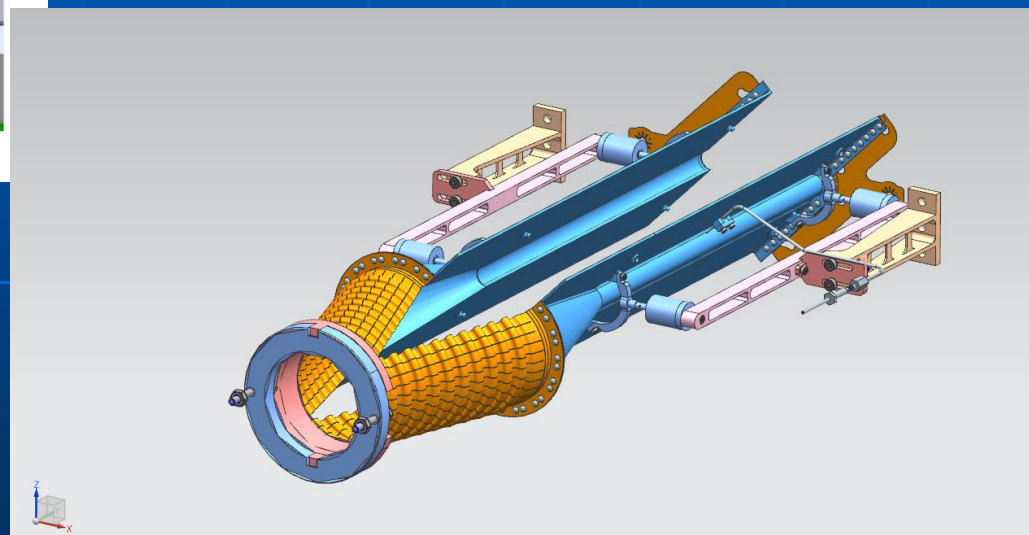
Ячейка  $L=20$  см, диам. = 1 см в рабочем состоянии.  $Q \sim 10^{15} - 10^{17}$  ат/сек  
 $t \sim 10^{13}$  ат/см<sup>2</sup>

$\tau_{\text{мишень}} \sim 1000$  часов,

$\tau_{\text{перепуска}} \sim 10 - 15$  часов

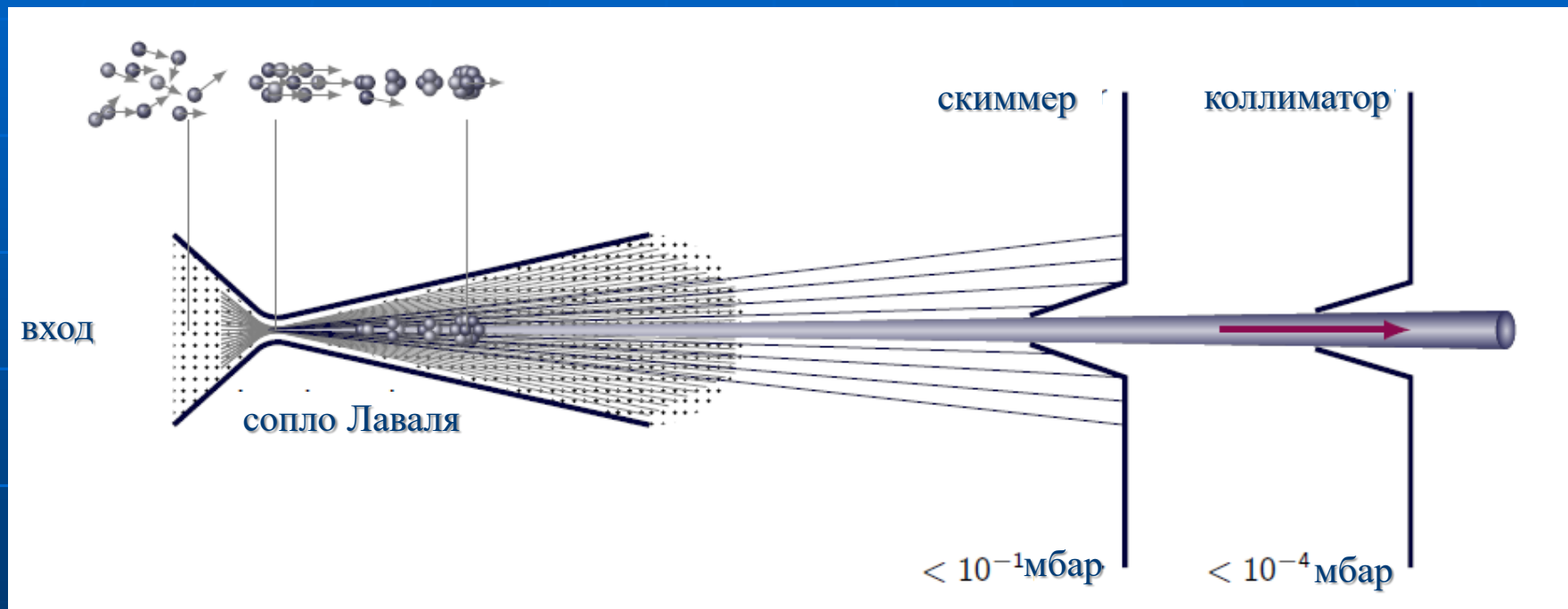
12.11.2025 ОИЯИ. Топорков

Cell open



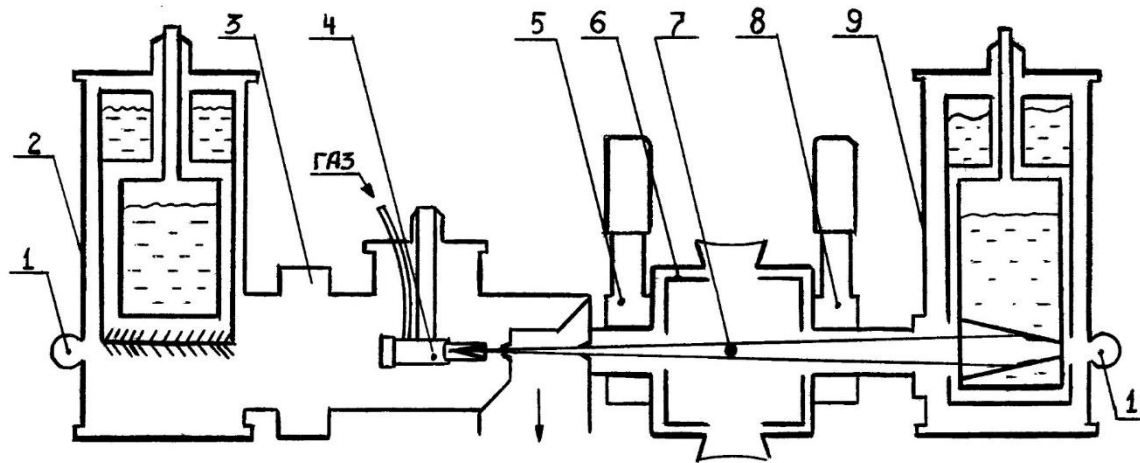
Кластерная мишень

# Формирование кластерной струи



# Внутренняя мишень на накопителе ВЭПП-2

ЖТФ т. XLVI, стр.637, 1976



ментального объема клапанами ДУ<sub>35</sub>.  
на рис. 2 приведено распределение ин-  
тенсивности в струе из паров воды на расстоя-  
нии 3 см от сопла. Для аммиака, углекислого  
ацетилена распределения аналогичны.  
то, что струя хорошо сформирована, раз-  
меру 15 мм. Это соответствует размеру

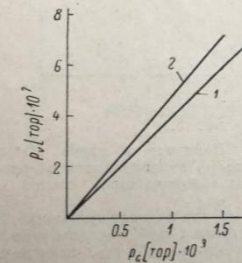


Рис. 5. Зависимость давления в объеме от давления в струе.  
1 — пары  $H_2O$ , 2 — углекислый газ  $CO_2$ .

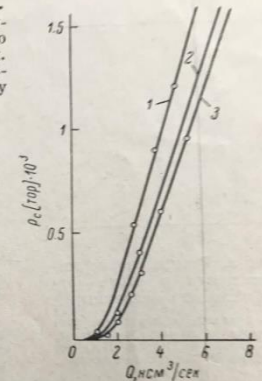
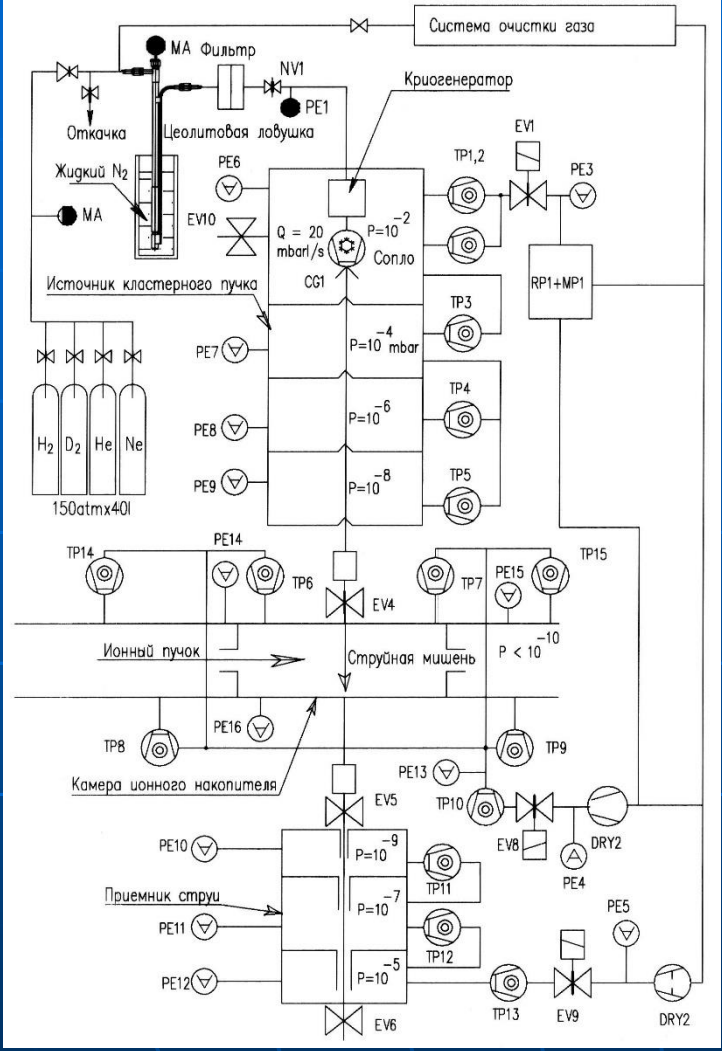


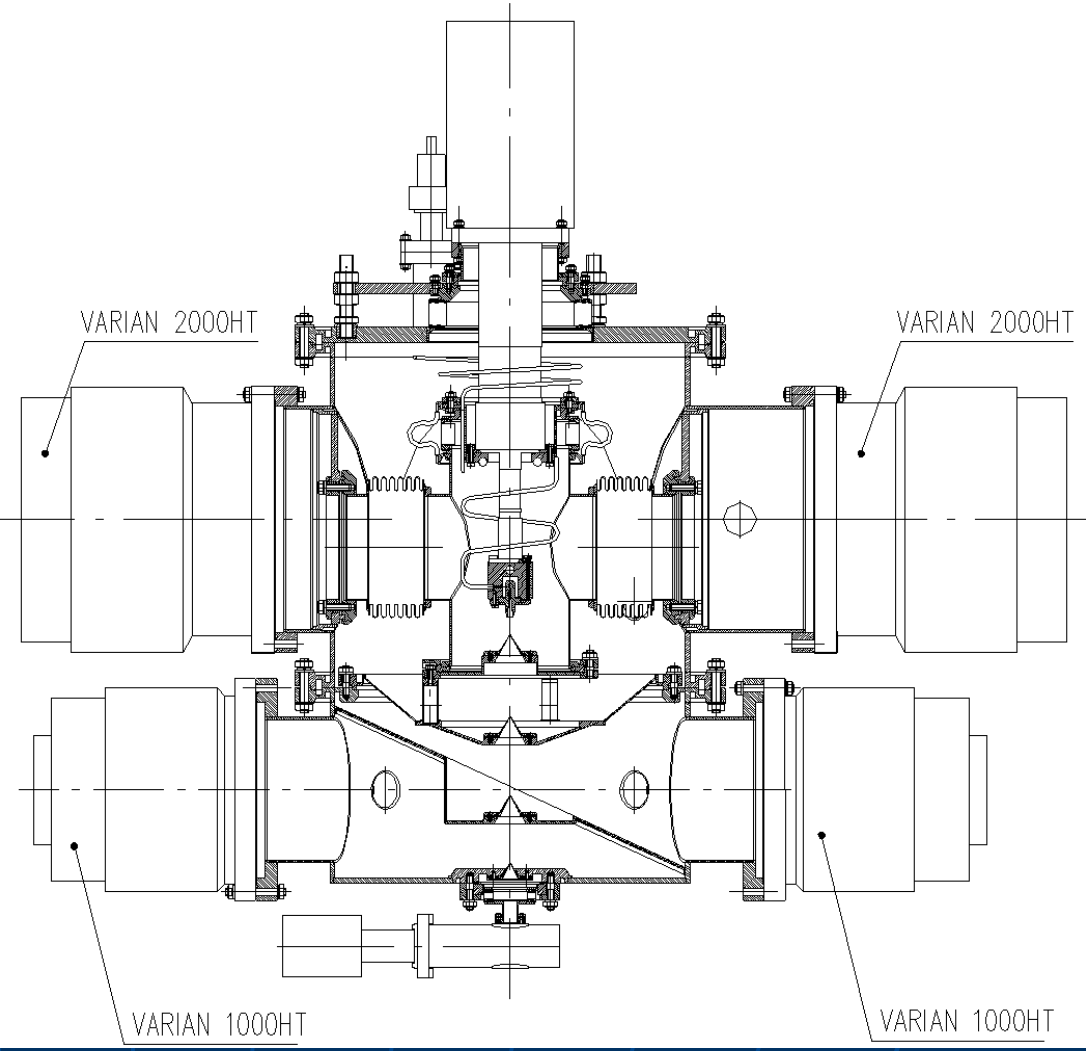
Рис. 6. Давление в струе на расстоянии 23 см от среза сопла в зависимости от расхода газа через сопло.  
1 — ацетилен  $C_2H_2$ , 2 — углекислый газ  $CO_2$ , 3 — аммиак  $NH_3$ .

Кластерные мишени  $H_2O$ ,  $NH_3$ ,  $C_2H_2$   
Плотность газа в струе  $\sim 10^{14}$  ат/см<sup>3</sup>

# Кластерная мишень для ионного накопителя IMP, Ланьджоу 2004

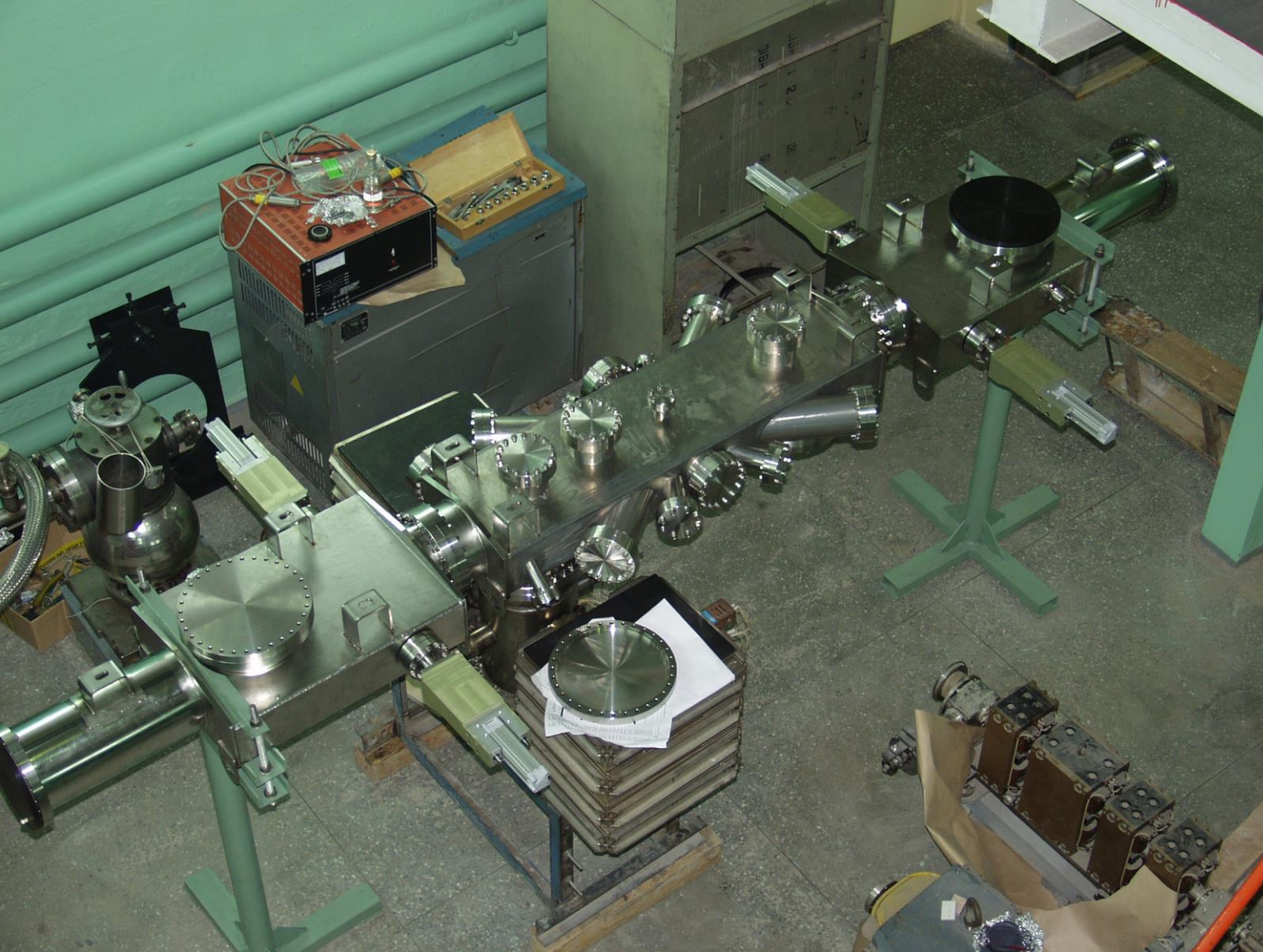


**Принципиальная схема кластерной мишени**



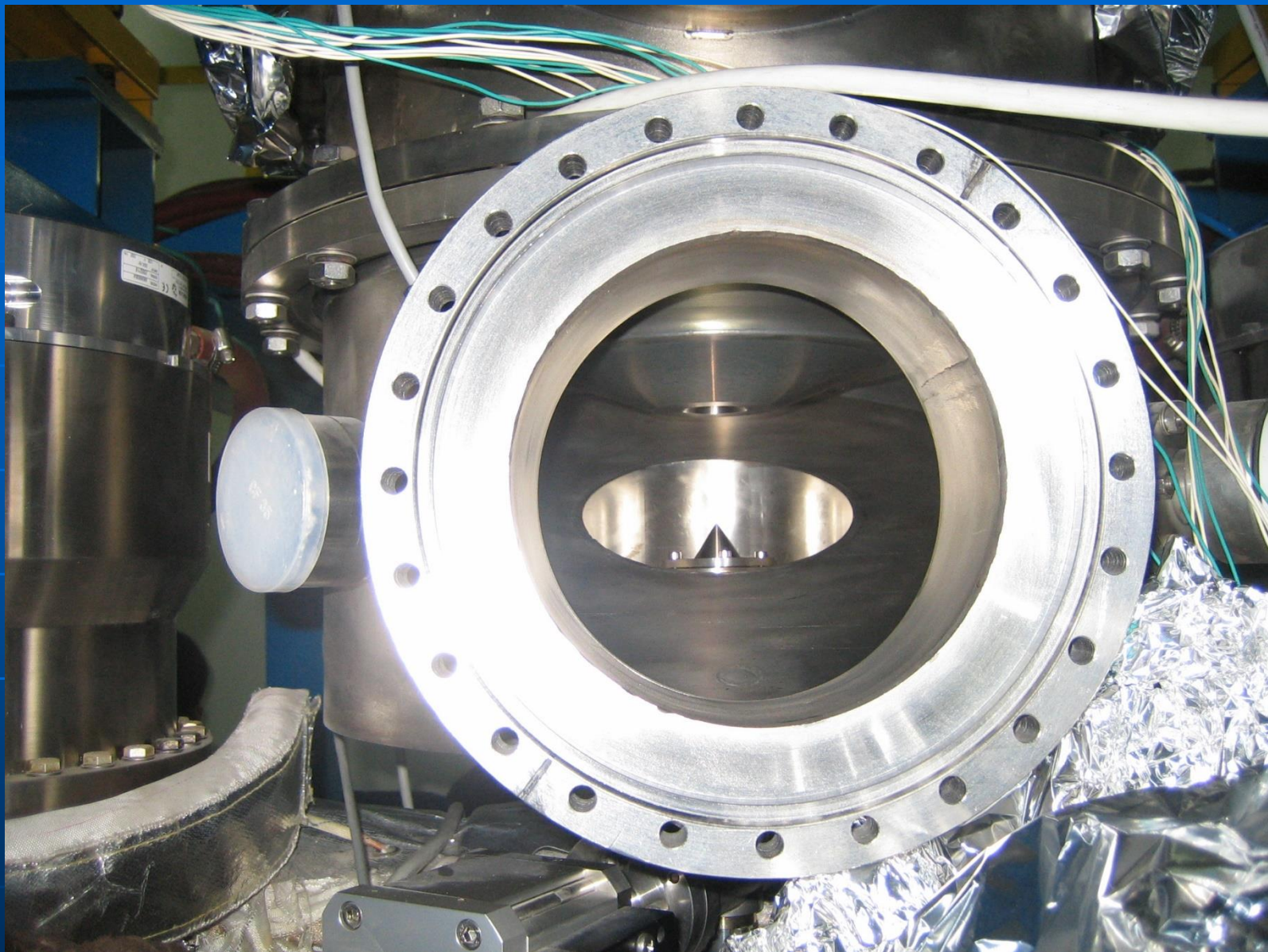
**Конструкция источника мишени.**



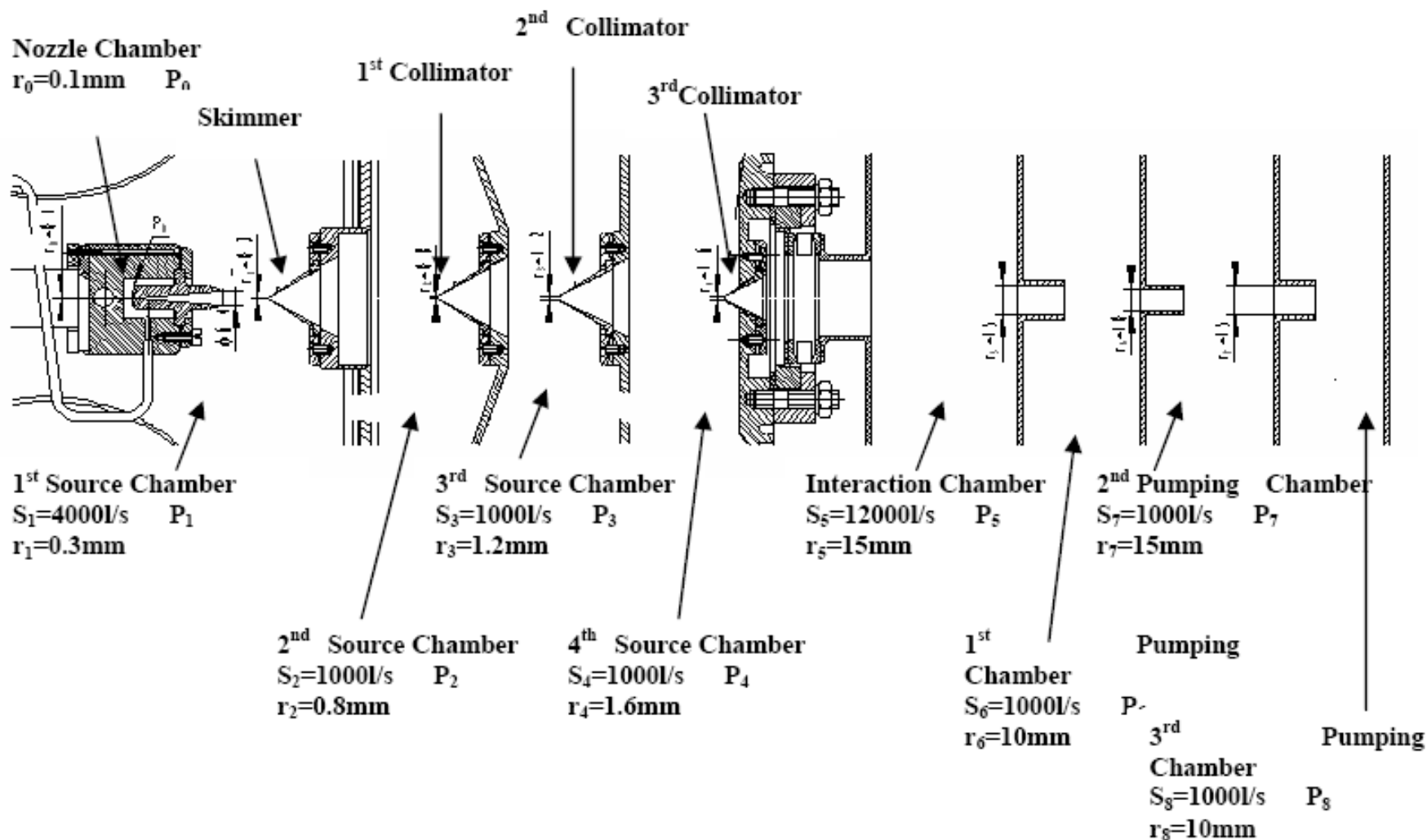


Фотография экспериментального промежутка без вакуумного оборудования.





# Общая схема кластерной мишени





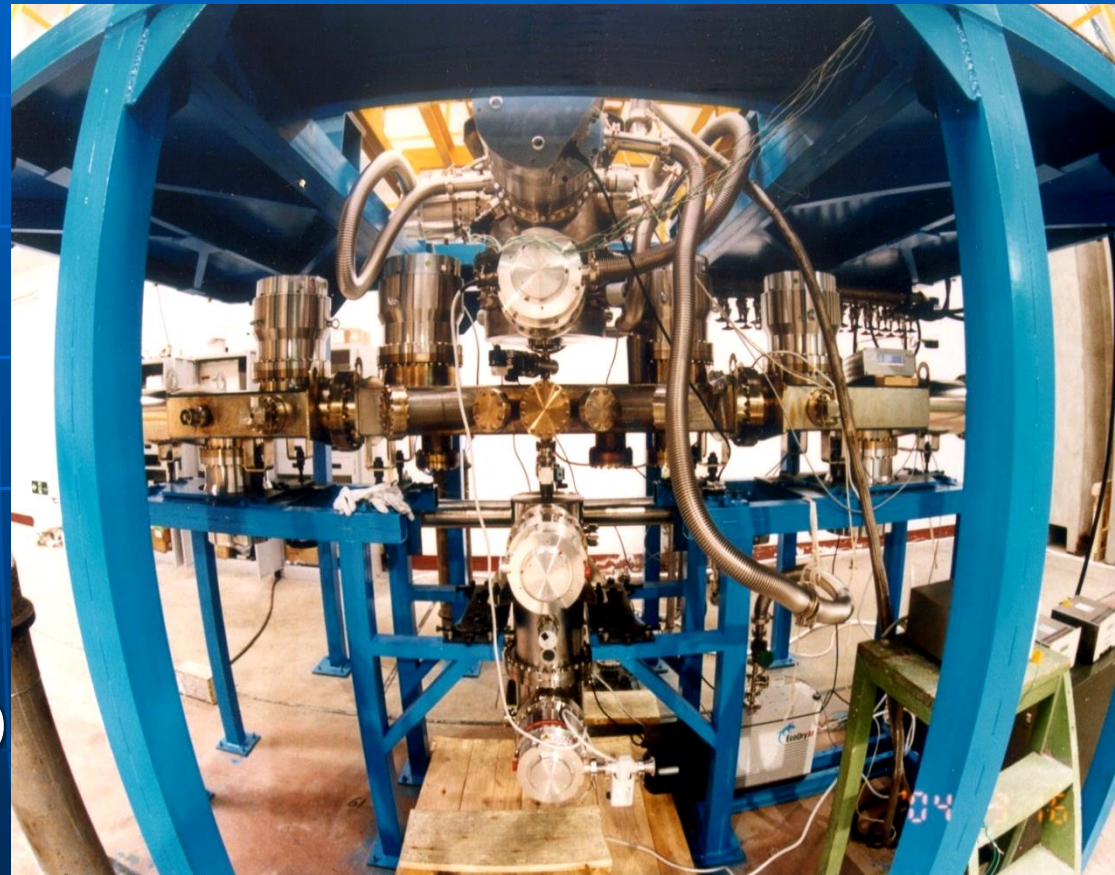
# Кластерная струйная газовая мишень, установленная на экспериментальном промежутке накопителя тяжелых ионов HIRFL.

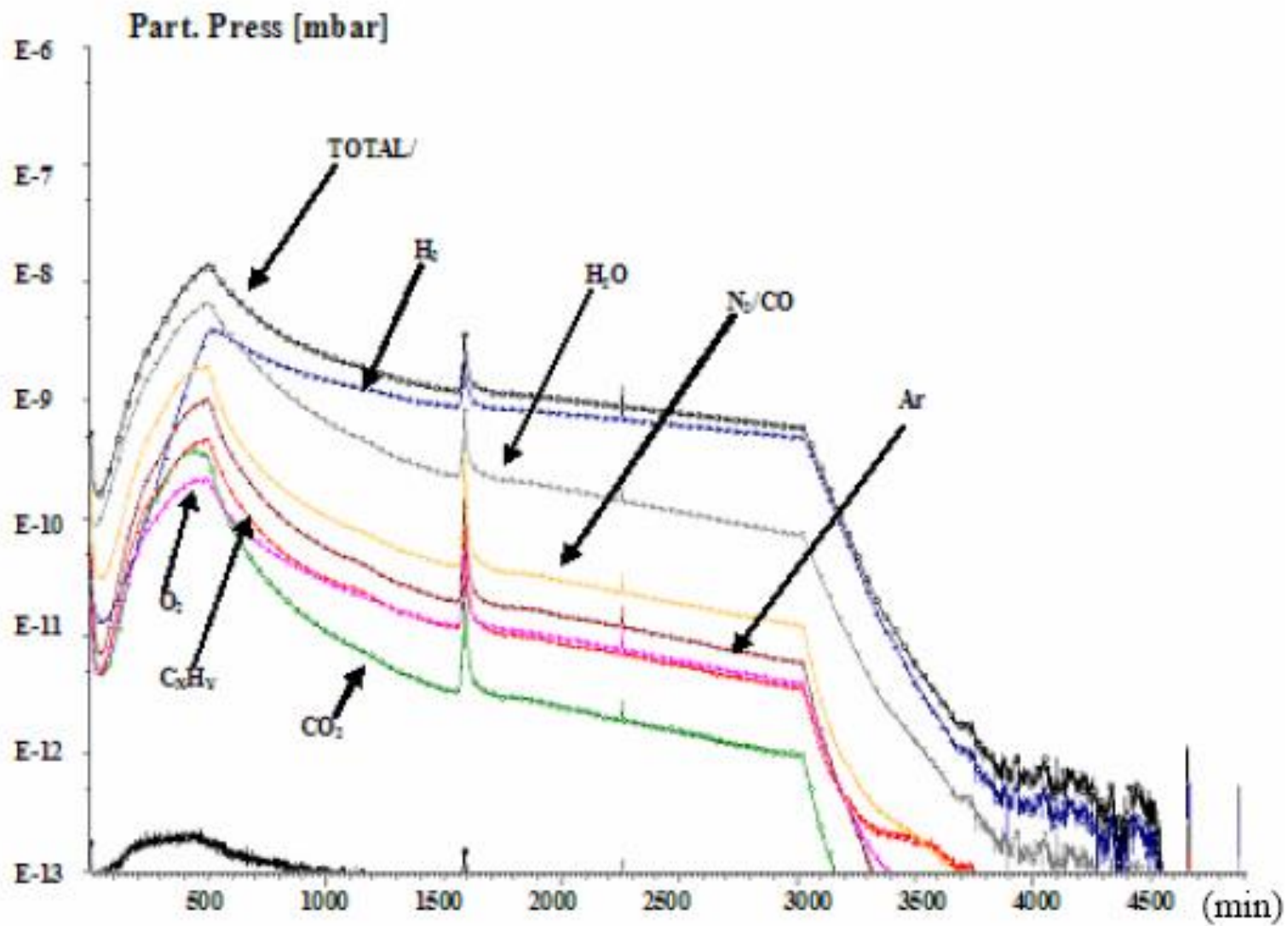
03.2004, Ланьджоу, Китай.

14 турбомолекулярных насосов  
1 насос Roots  
2 форвакуумных насоса

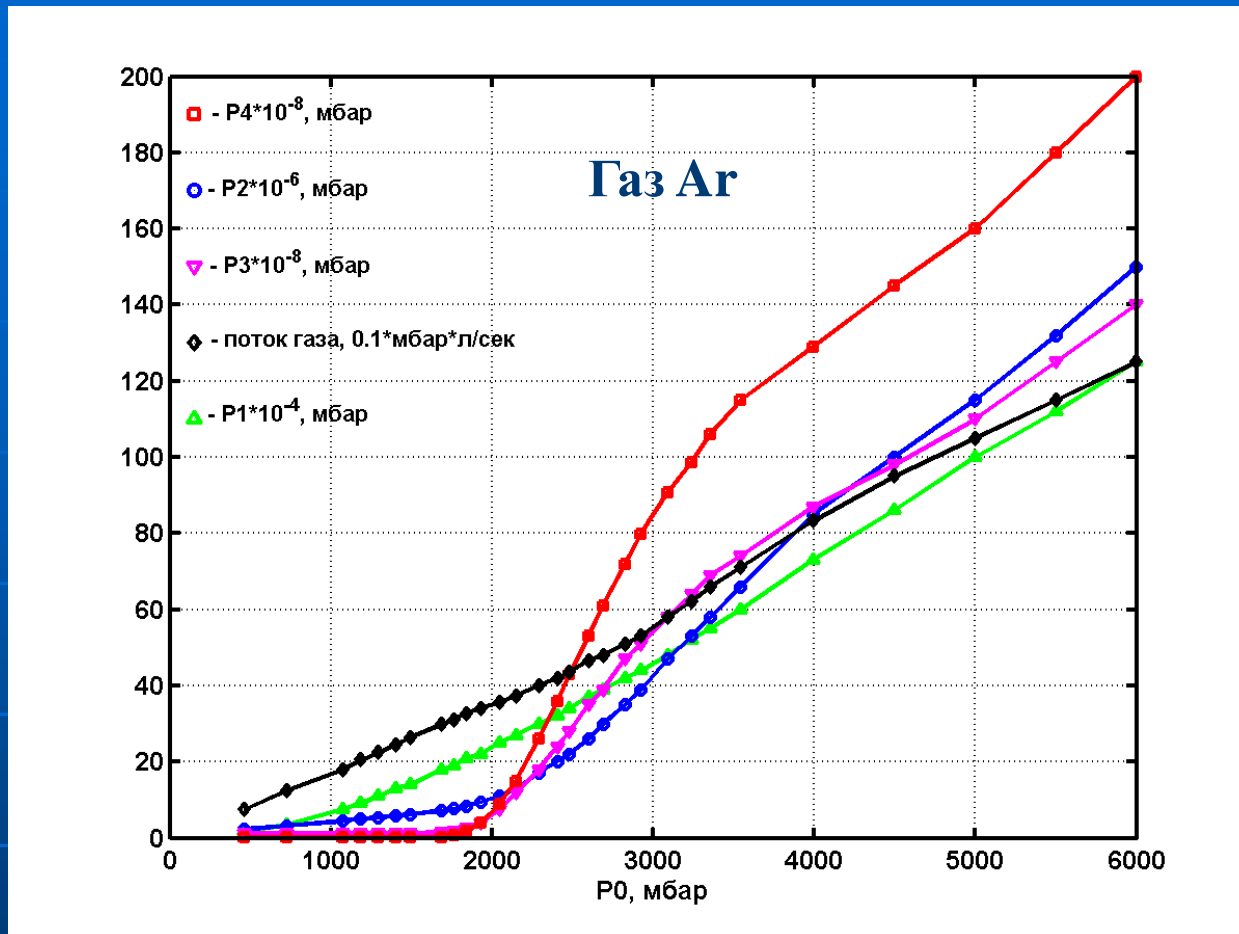
## Измеренные параметры мишени:

- Предельный вакуум  
 $P_{\text{пред.}} \quad 9 \cdot 10^{-12} \text{ мбар}$
- Давление в струе аргона  
 $P_{\text{стр.}} \quad 1 \cdot 10^{-3} \text{ мбар}$
- Давление в промежутке  
при струе  
 $P_{\text{пром.}} \quad 2 \cdot 10^{-10} \text{ мбар}$
- Размер струи в точке  
взаимодействия (диаметр)  
 $3 \text{ мм}$
- Рабочий газ — *любой*

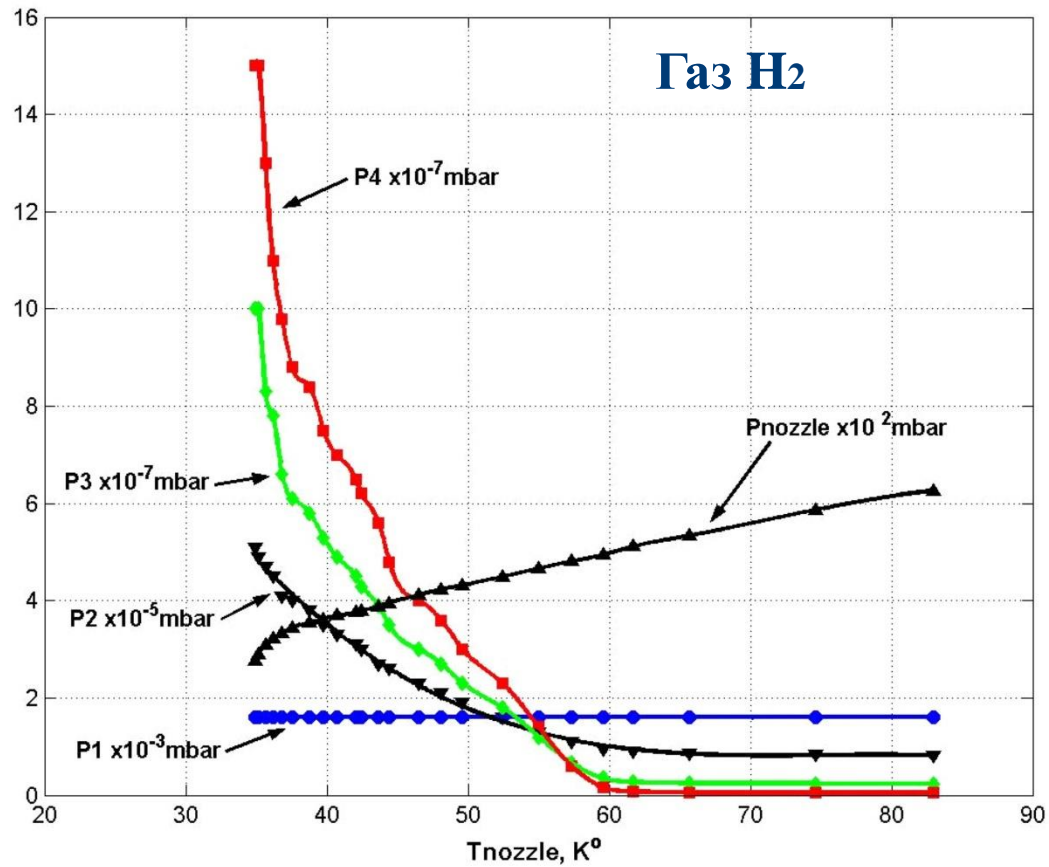




**Динамика давления в промежутке при прогреве.**



**Распределение давления по ступеням мишени и расход газа через сопло в зависимости от давления аргона перед соплом. Температура сопла комнатная.**

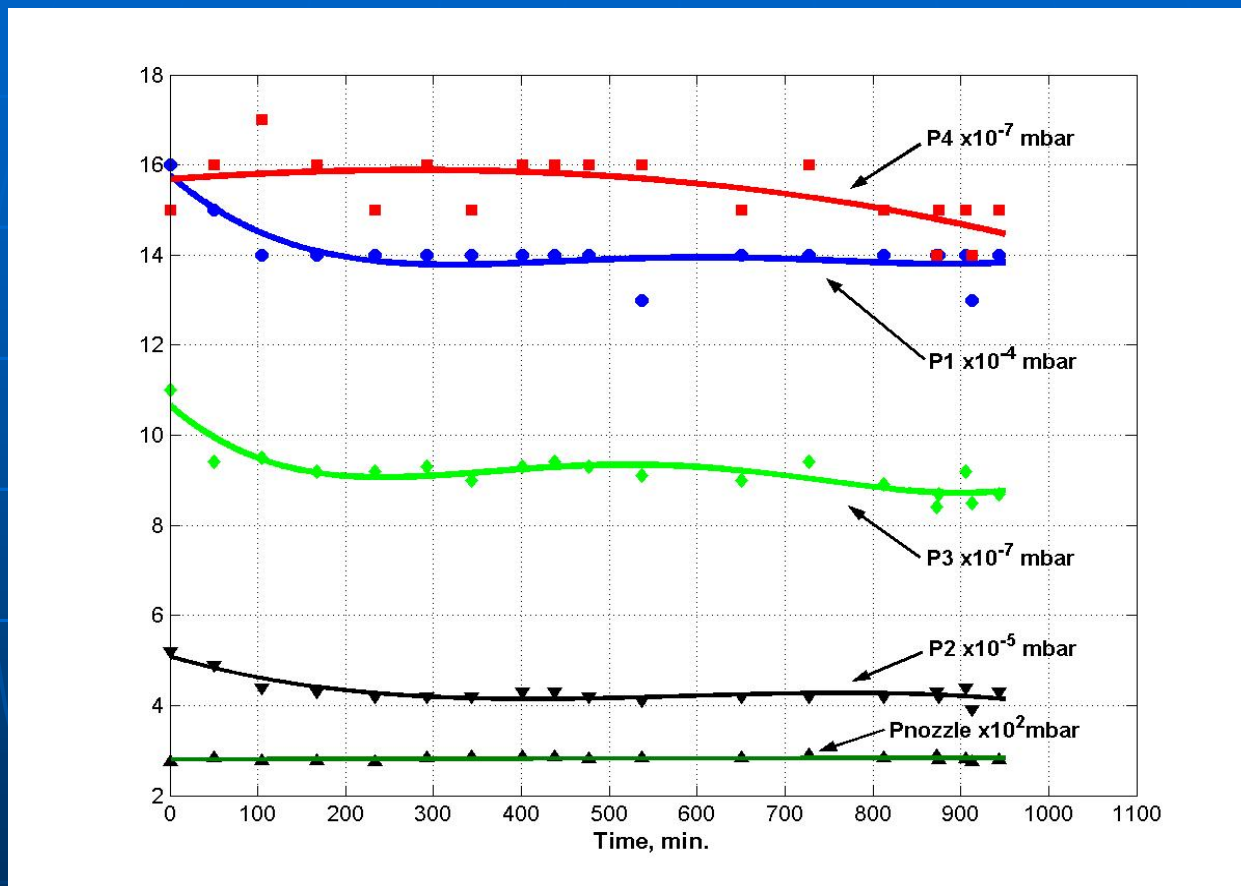


**Распределение давлений по ступеням и в камере сопла в зависимости от температуры сопла для водорода при постоянном расходе газа.**



# Стабильность работы источника, рабочий газ $\text{H}_2$

Плотность струи в месте взаимодействия  $1.75 \cdot 10^{13}$  ат/см<sup>3</sup>







**PANDA collaboration Meeting**  
**GSI Darmstadt**  
**June 1-3, 2004**

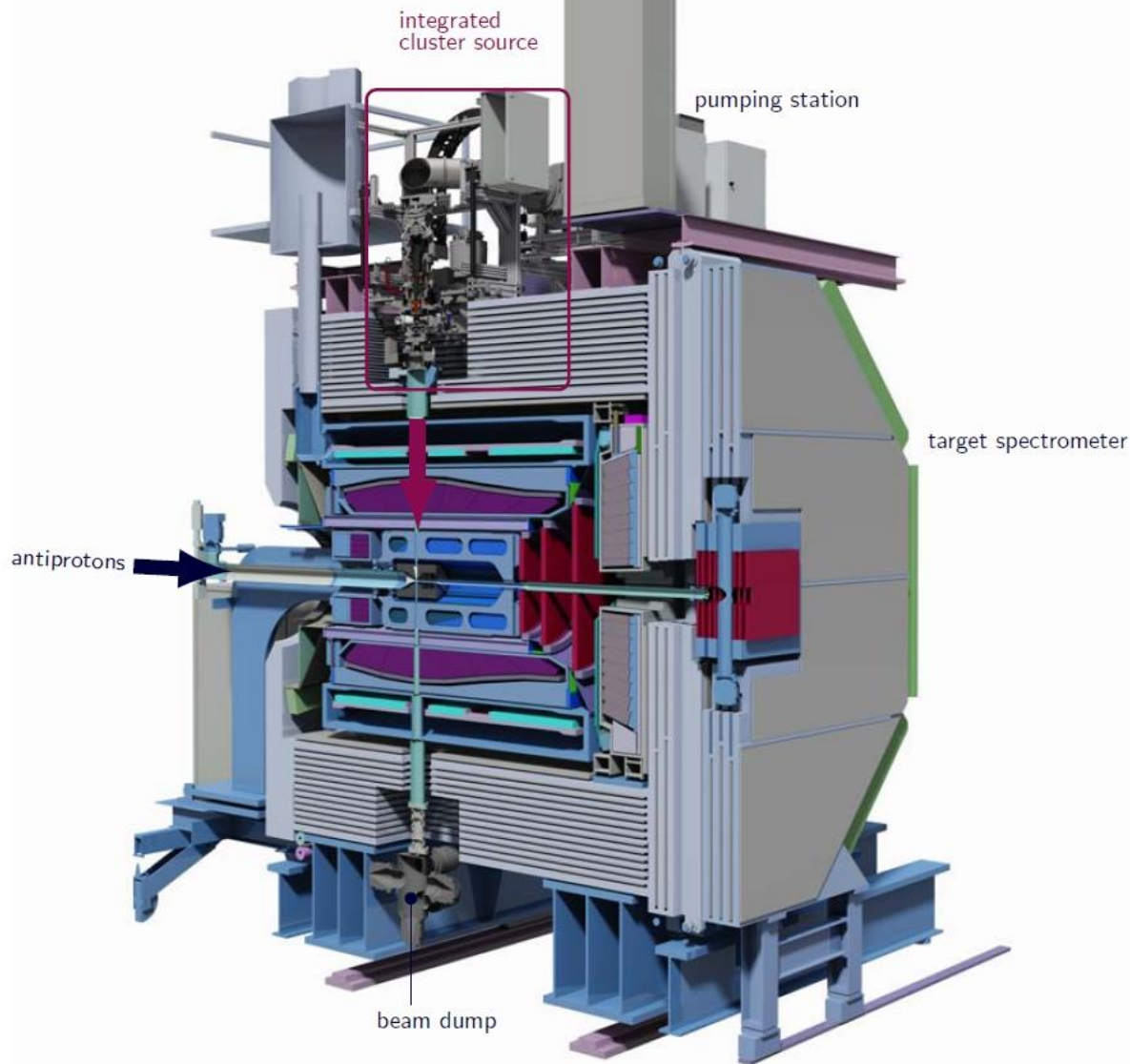


## **Status report internal cluster-jet targets**

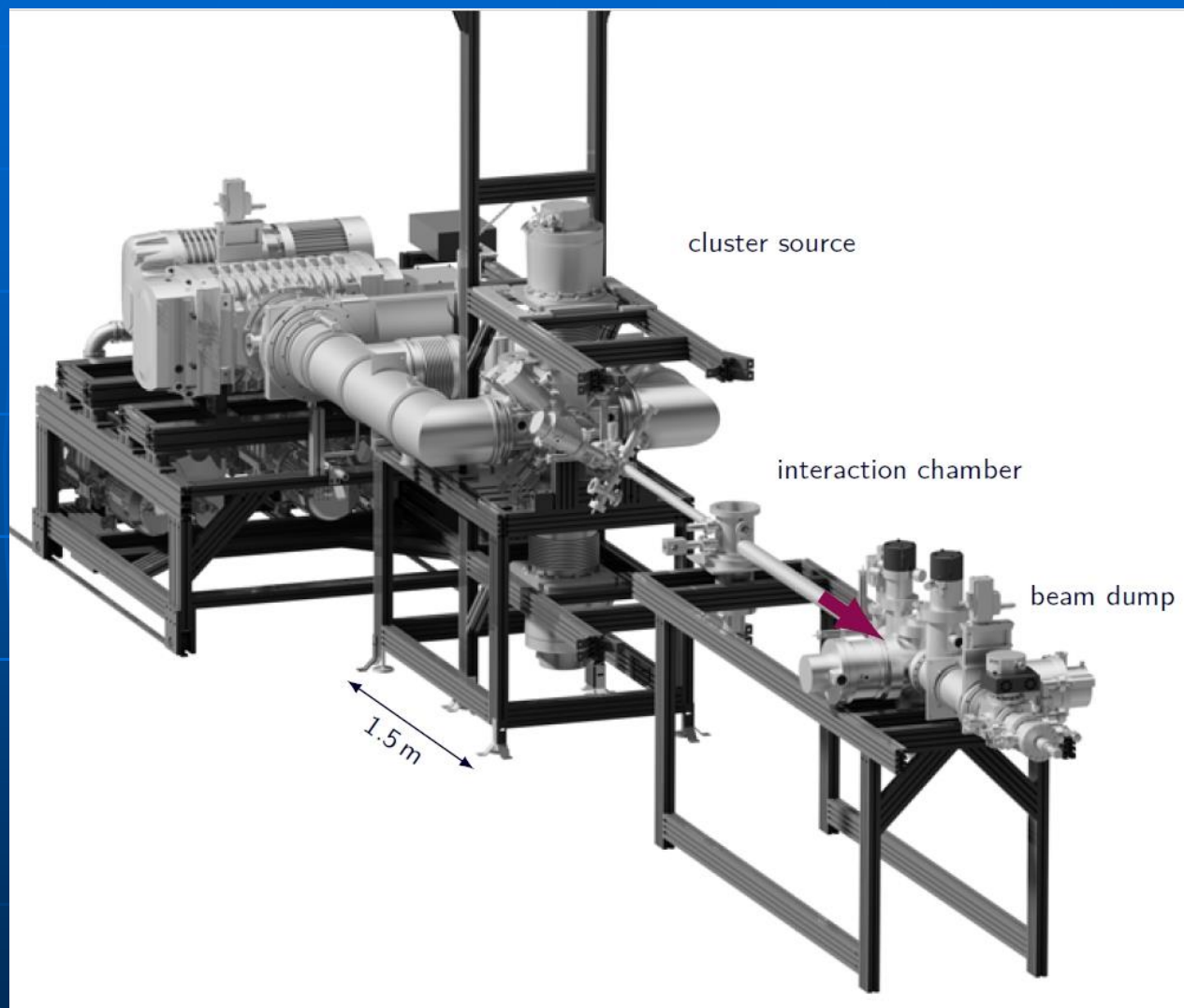
- Activities and Plans with the Münster Cluster-Jet Target
- Status of the GSI, IMEP and INFN activities
- JRPA-7 meeting in Genova on July 28 and 29, 2004

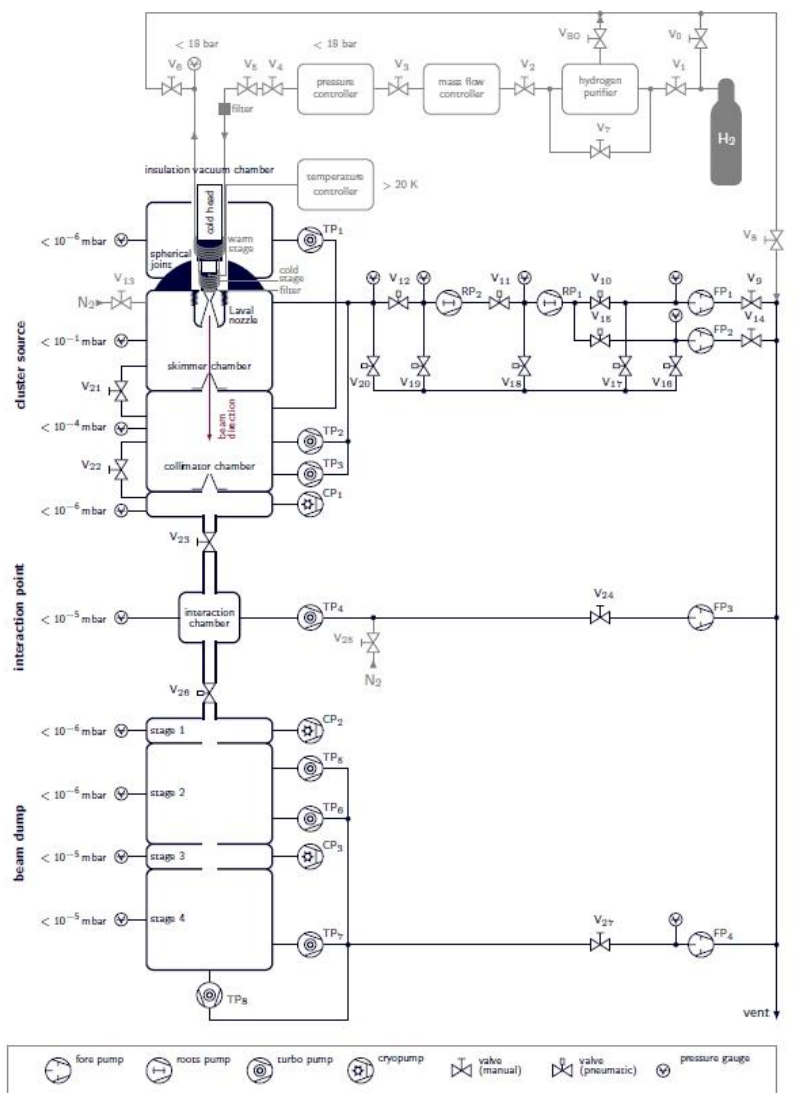
# Кластерная мишень для детектора PANDA, GSI, Дармштадт

По материалам  
диссертации  
E.D. Kohler, 2015



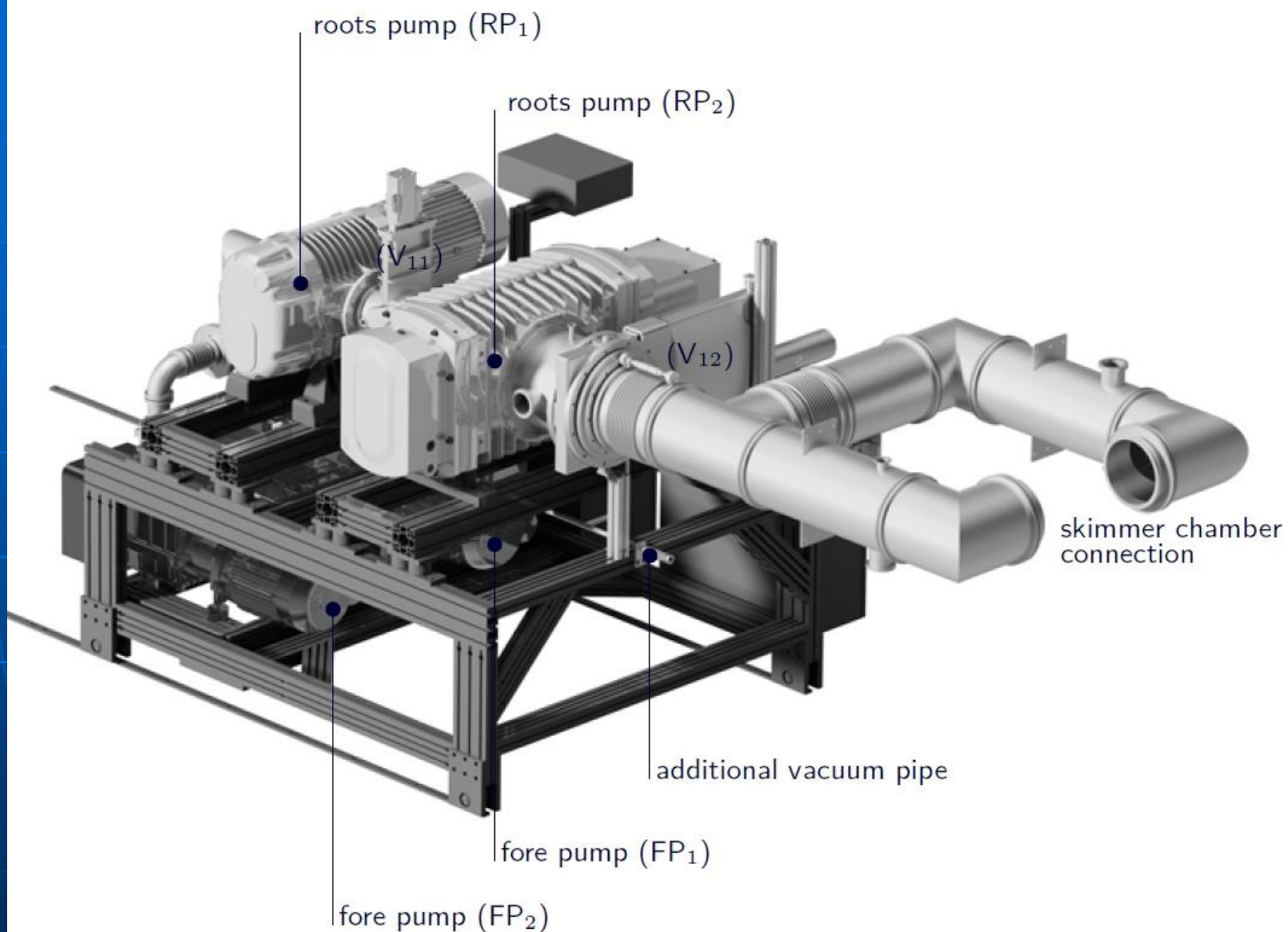
# Внешний вид прототипа мишени для PANDA



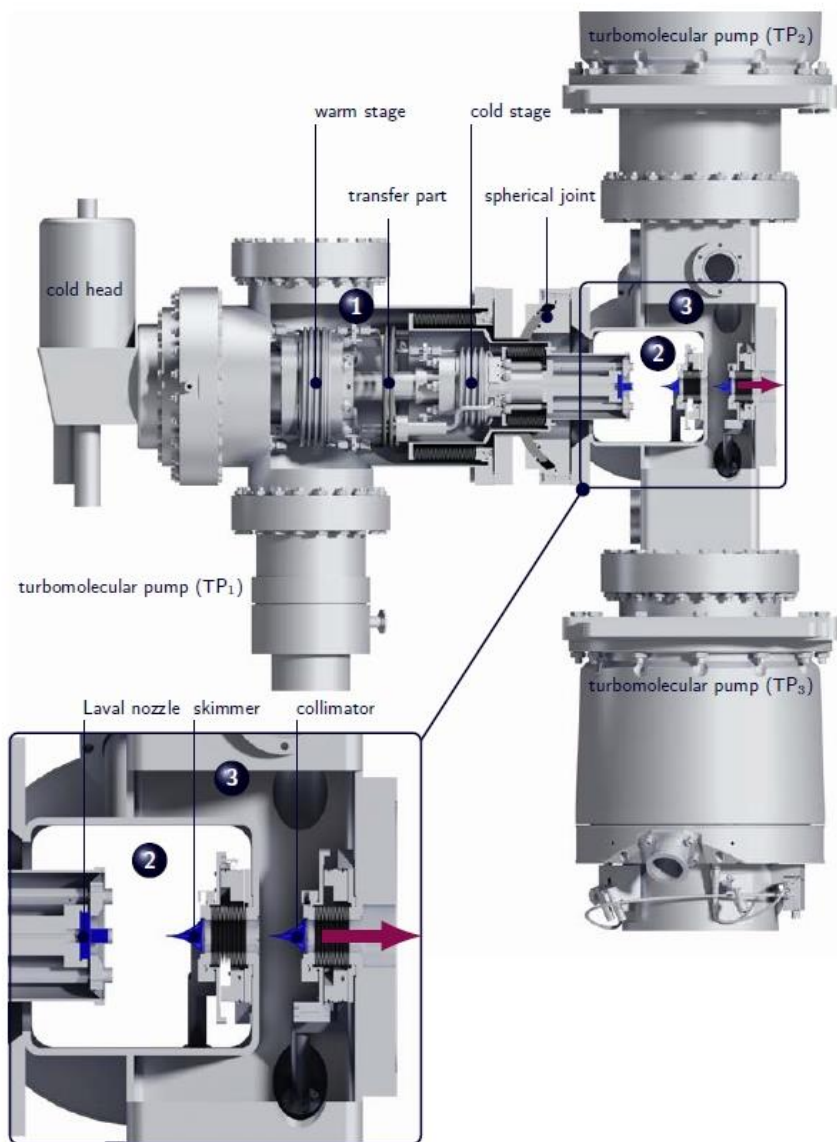


no.	fore pump FP <sub>no.</sub> in m <sup>3</sup> /h	roots pump RP <sub>no.</sub> in m <sup>3</sup> /h	turbo pump TP <sub>no.</sub> in l/s
1	300	2000	360
2	300	7000	2000
3	25	—	2000
4	200	—	360
5	—	—	1000
6	—	—	360
7	—	—	1000
8	—	—	1000
9	—	—	300

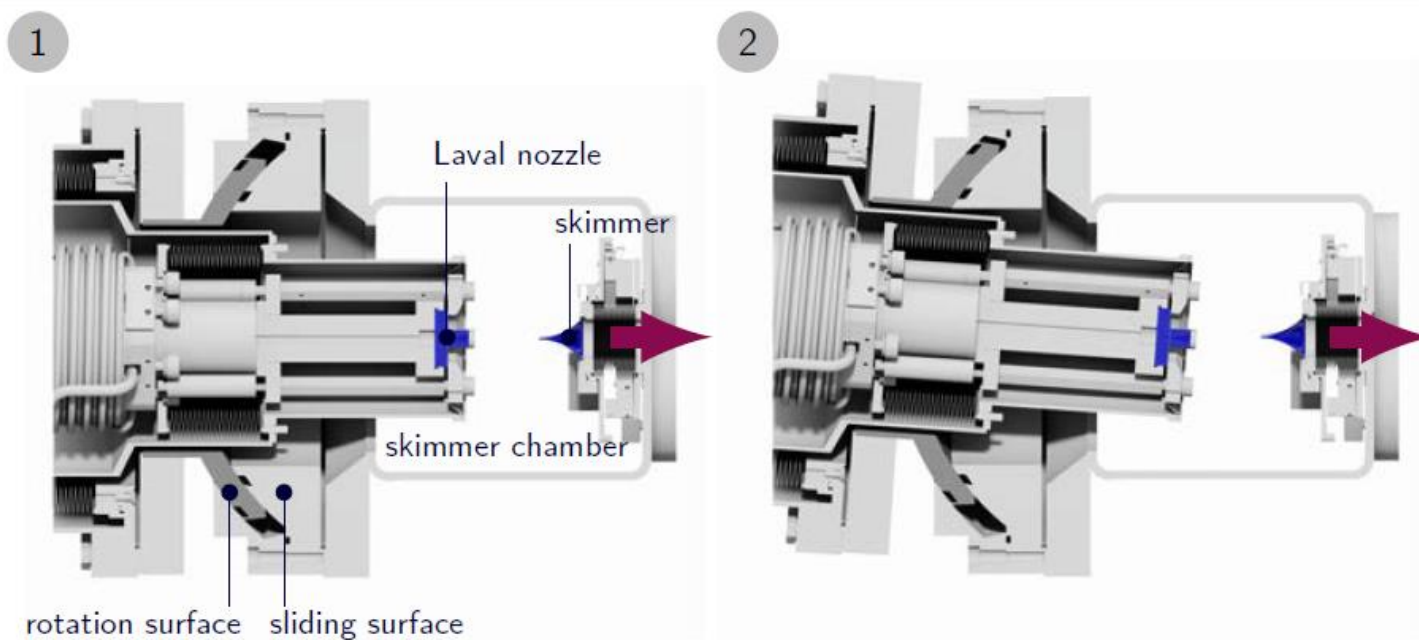
Давление в камере скиммера ~ 0.1 мбар  
 Скорость откачки камеры скиммера  
 7000 м<sup>3</sup>/час ~ 2000 л/сек  
 Расход газа ~ 0.2 н.л./сек  
 9 турбомолекулярных насосов  
 2 мощных насоса Roots  
 4 форвакуумных насоса







# Выставка сопла относительно скиммера

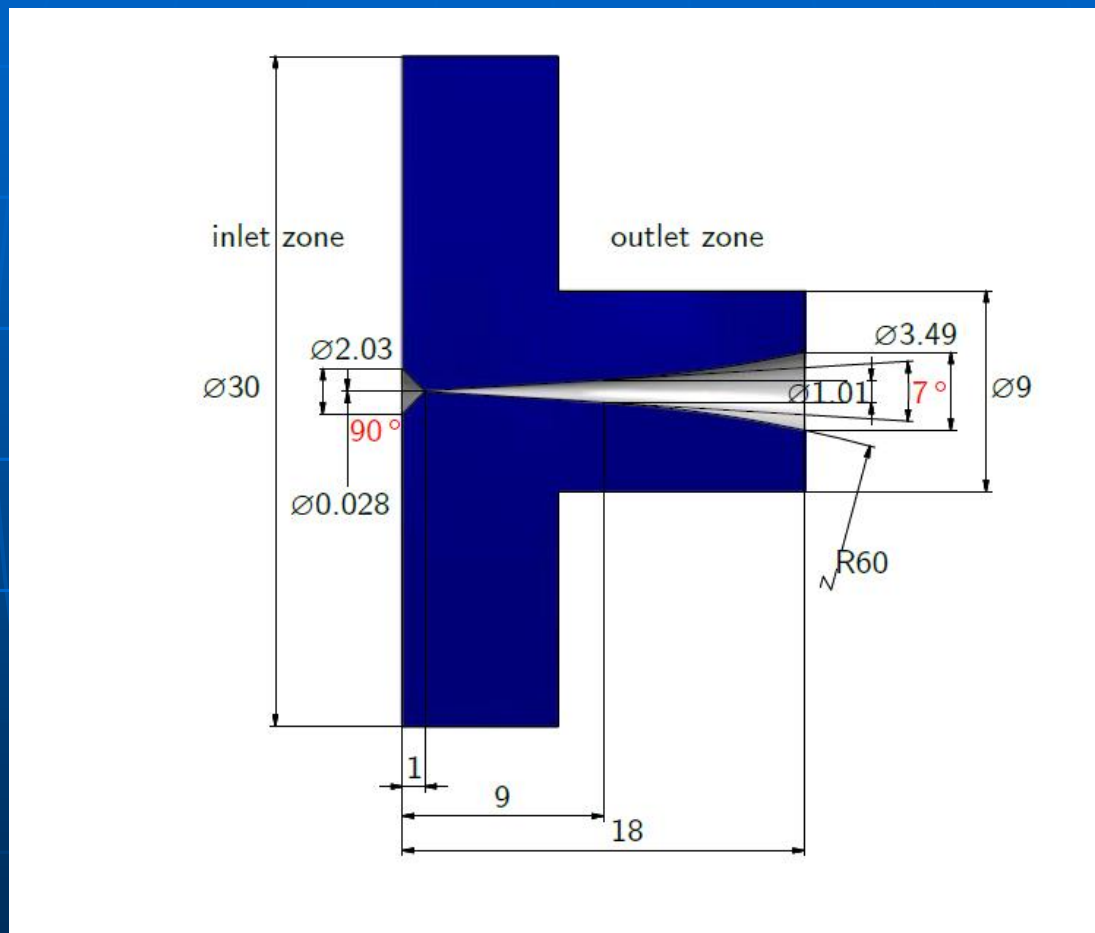


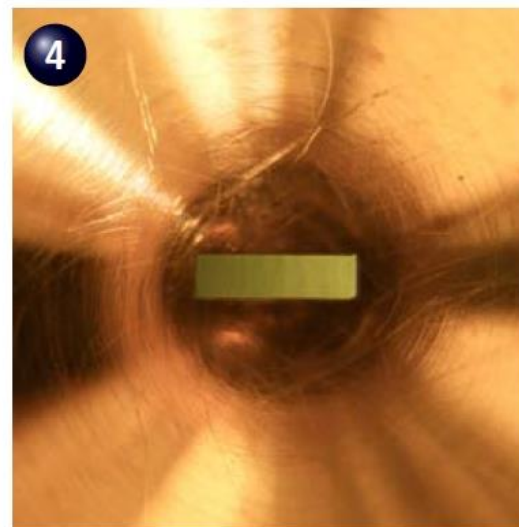
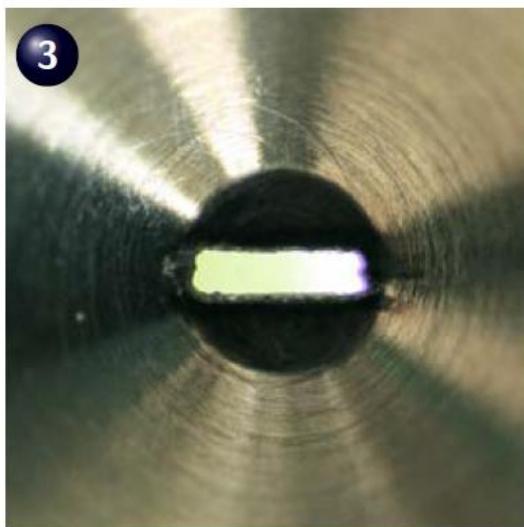
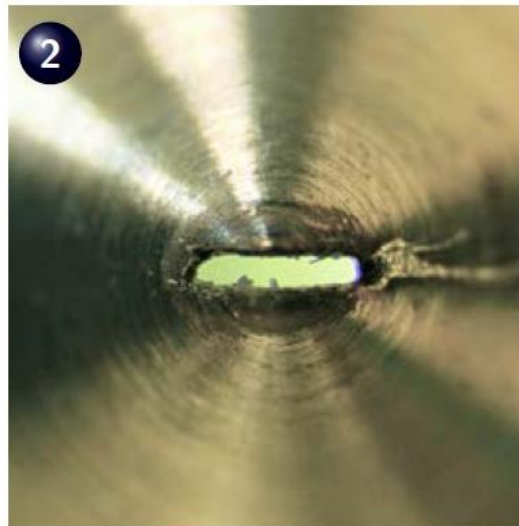
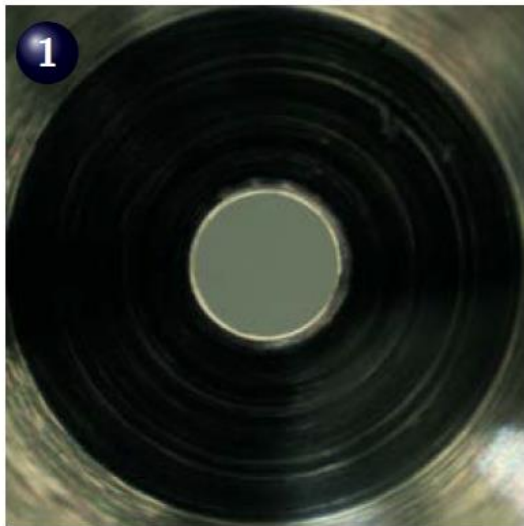


## Этапы изготовления сопла

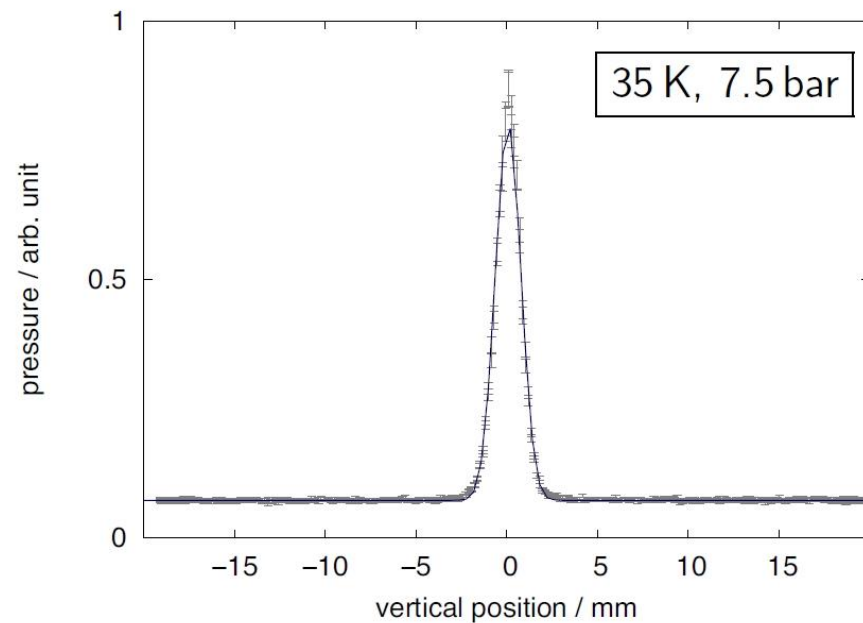
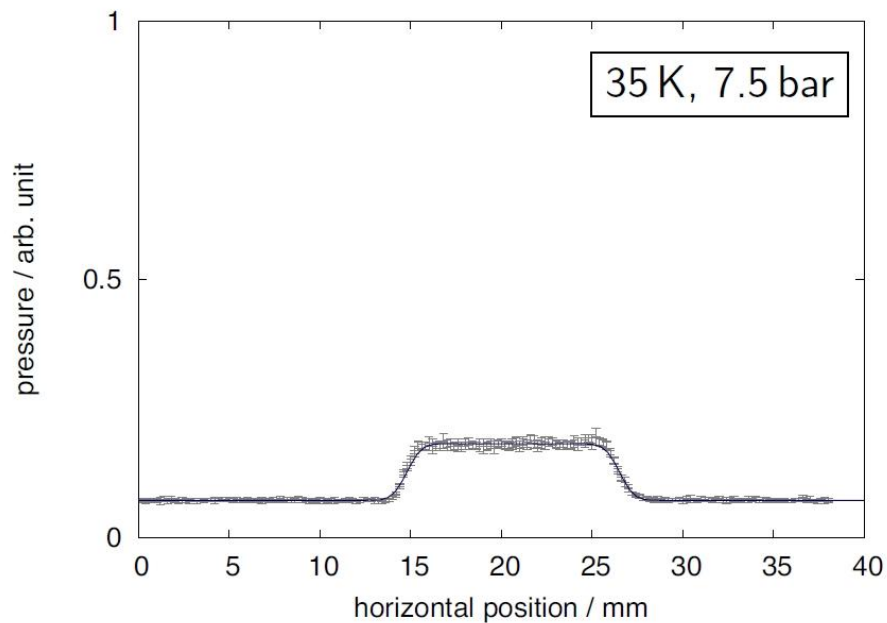


# Геометрия сверхзвукового спла



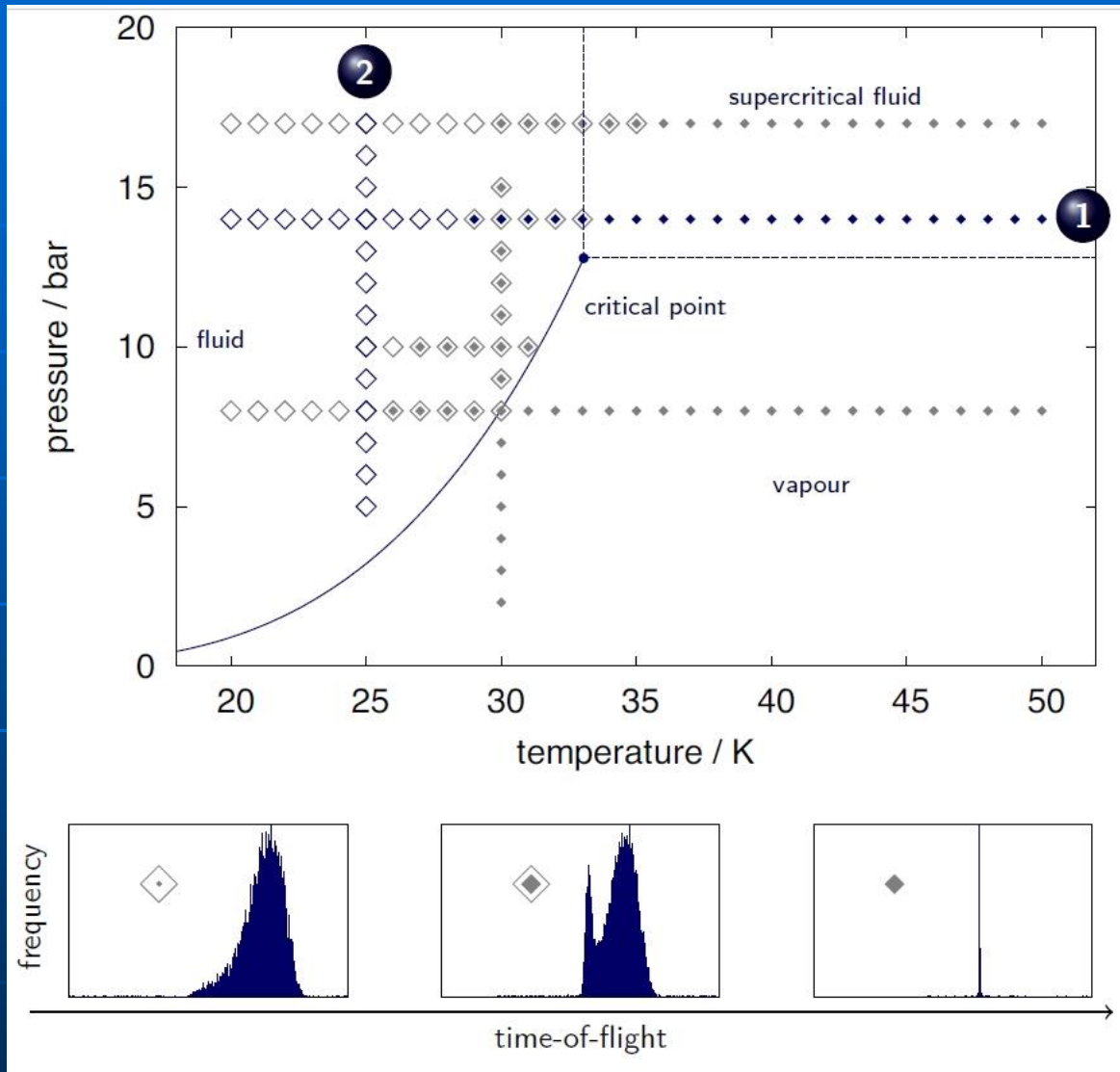


**Различные виды коллиматоров: 1- цилиндрическое с диаметром отверстия 700  $\mu$ , 2 – 4 различные с прямоугольными отверстиями 890x170, 780x190, 800x220  $\mu^2$**



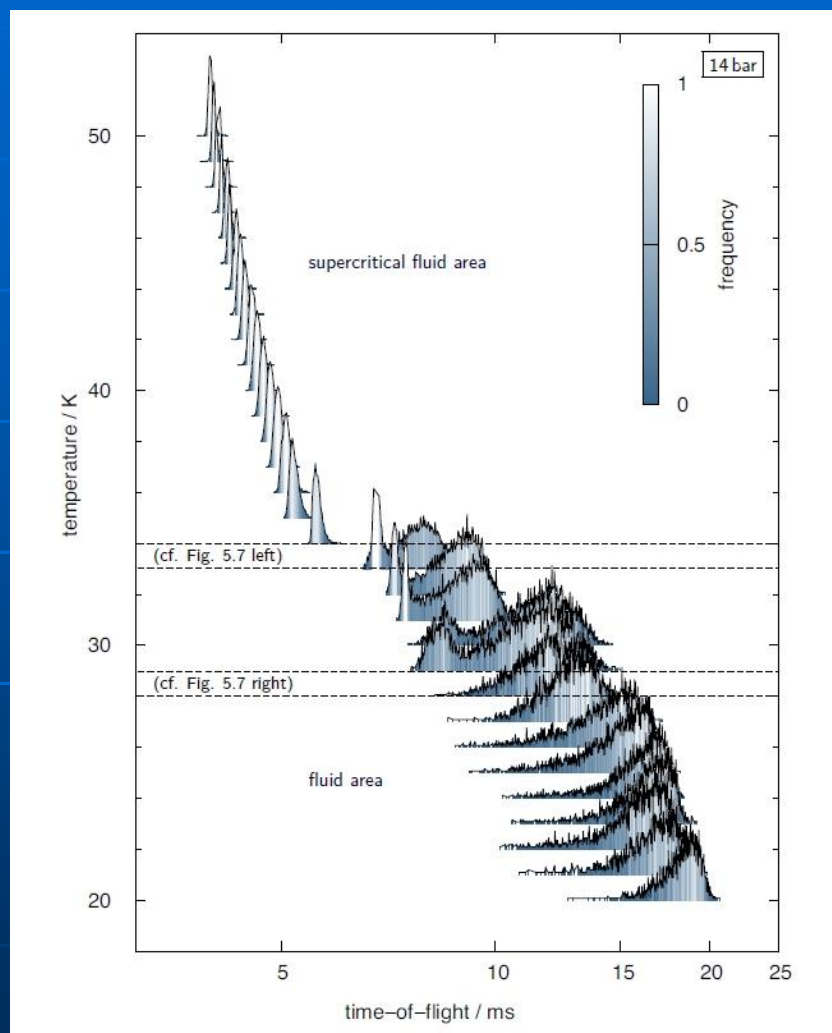
**Измеренный профиль пучка при прямоугольной форме коллиматора**

## Фазовая диаграмма водорода

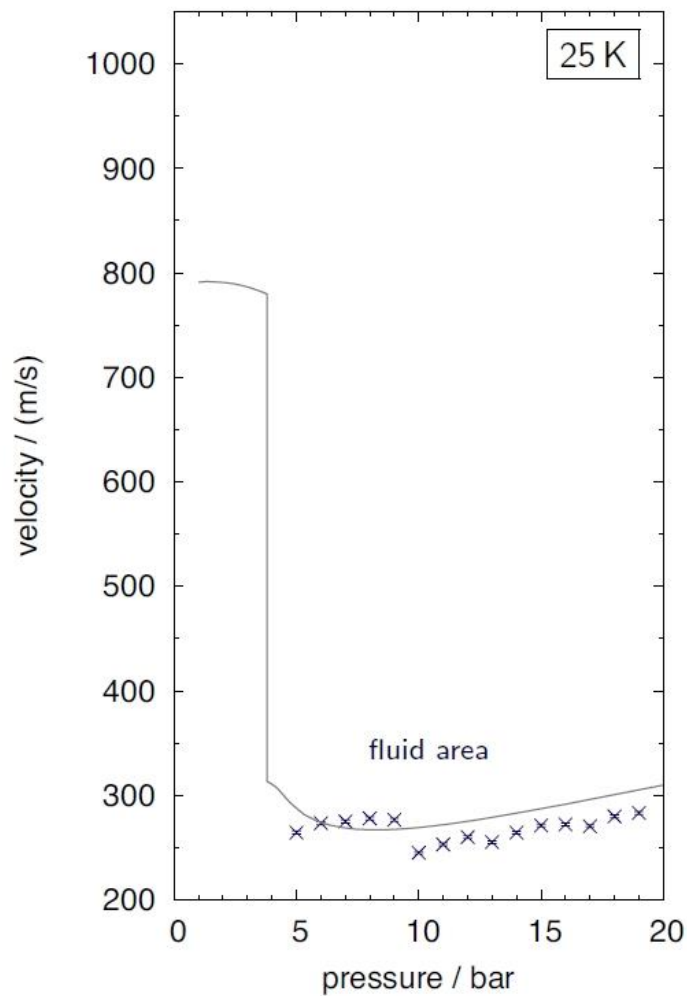
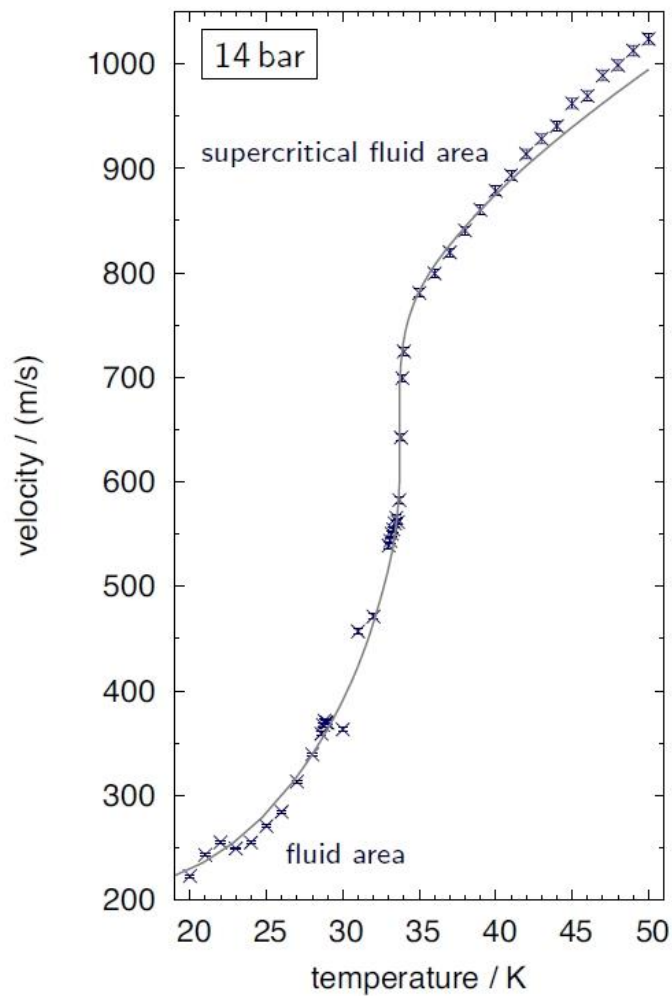


Критическая точка  
33.145 К, 12.964 бар

# Времяпролетный спектр струи кластеров в зависимости от температуры

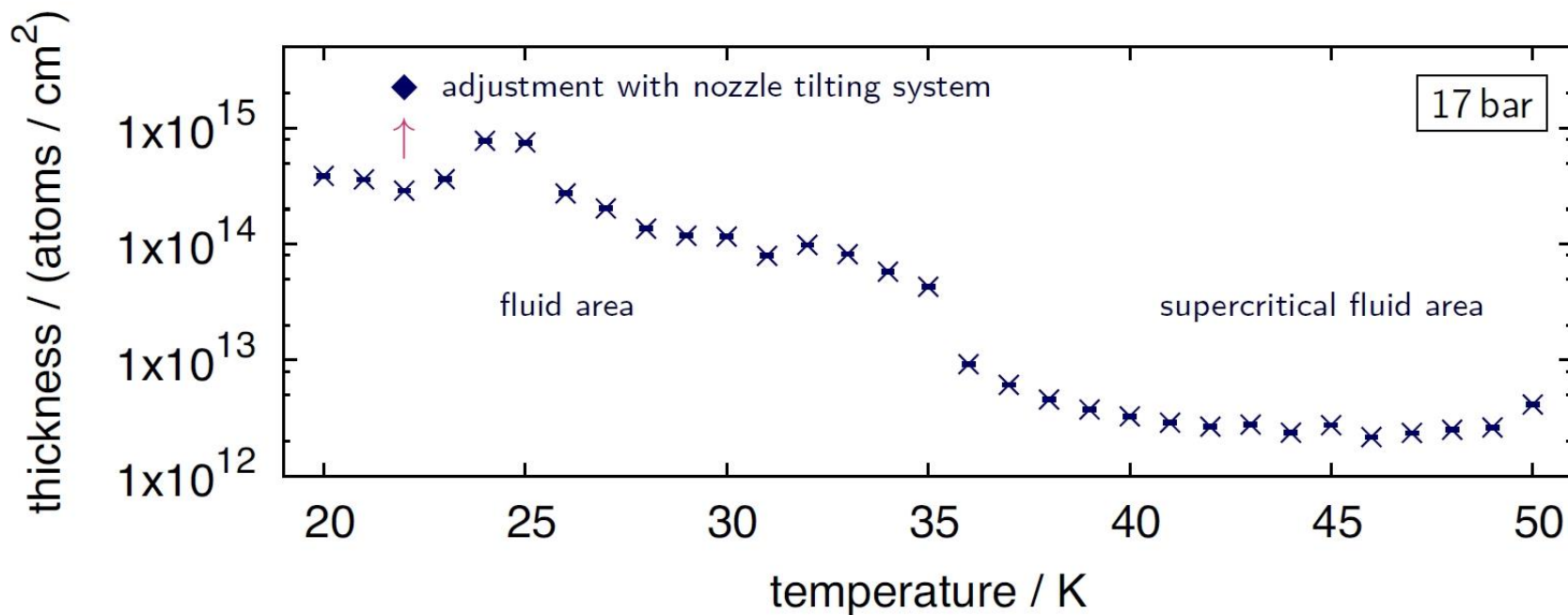


## Зависимость скорости кластеров от температуры и давления

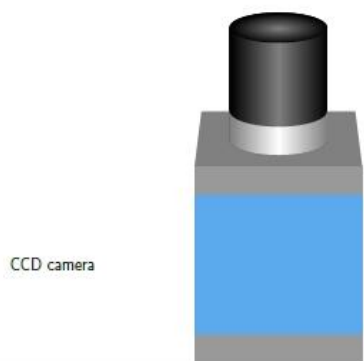
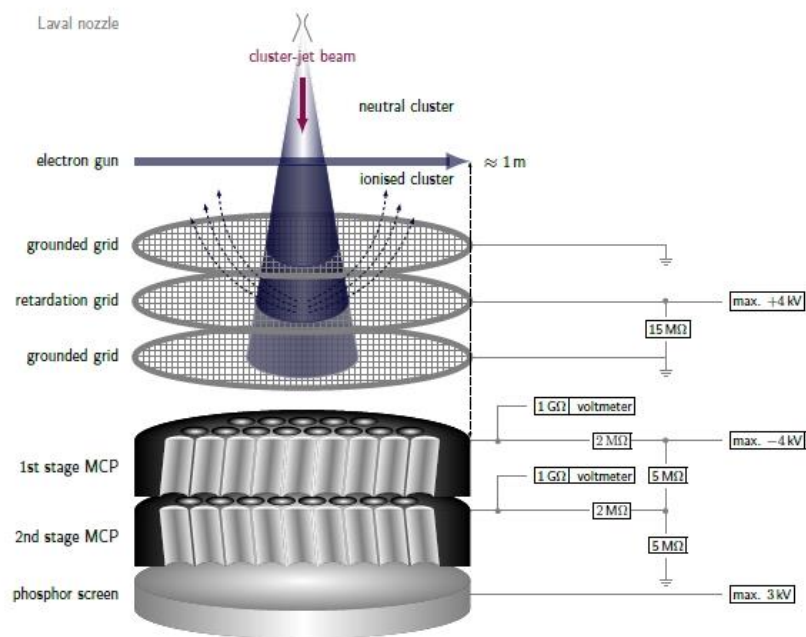




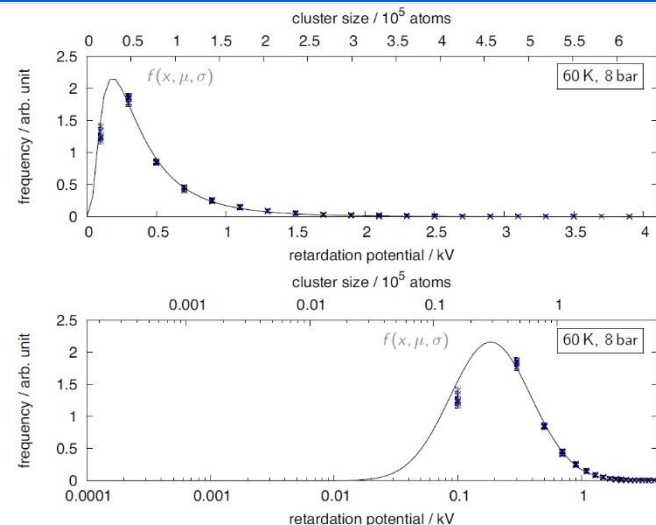
# Толщина мишени (размер ~ 1 см) в зависимости от температуры при давлении 17 бар на расстоянии 2.1 м от сопла



# Определение массы кластера



МРС – микроканальные  
пластины



$$mV^2/2 = ZU$$

# Параметр Хагены

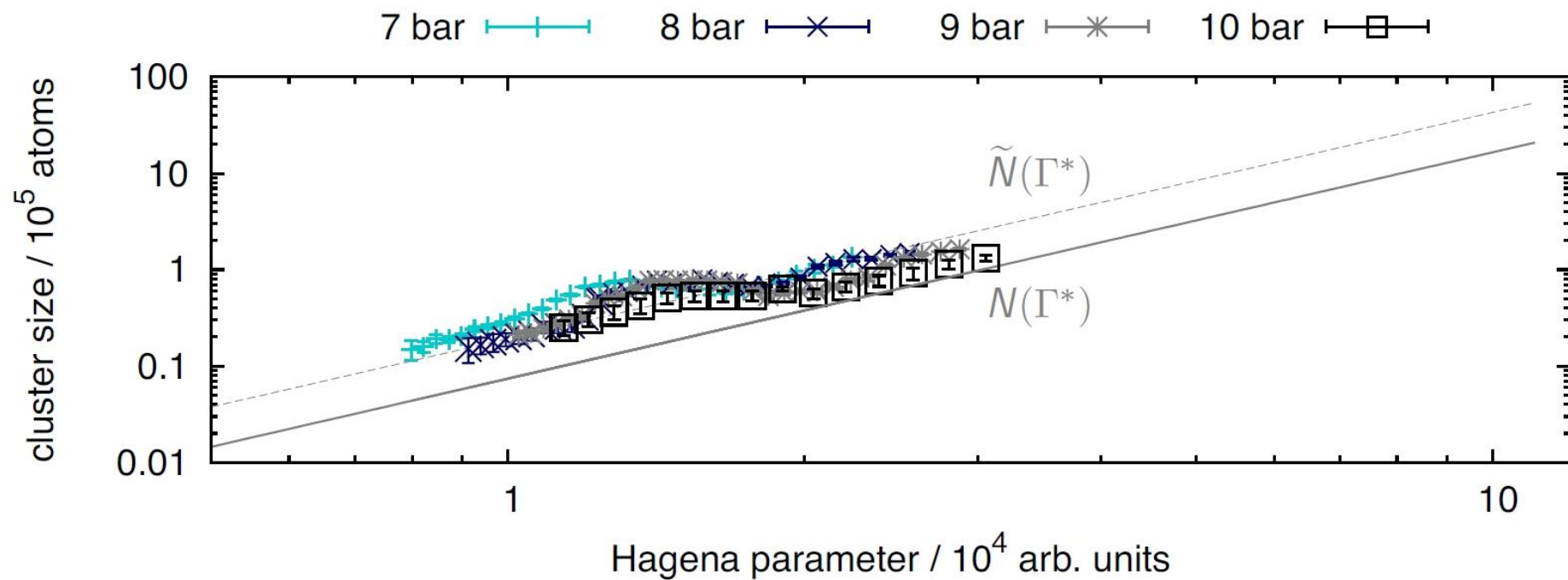
$$\Gamma^* = \frac{\hat{k} p_0 \left( \frac{0.74 d_n}{\tan \alpha_{1/2}} \right)^{0.85}}{T_0^{2.29}}$$

$K$  - константа газа ( 184 for  $H_2$ ),  $T_0$  – температура,  $p_0$  – давление (мбар),  $d_n$  – диаметр сопла ( $\mu$ ),  $\alpha$  – раствор сопла (град)

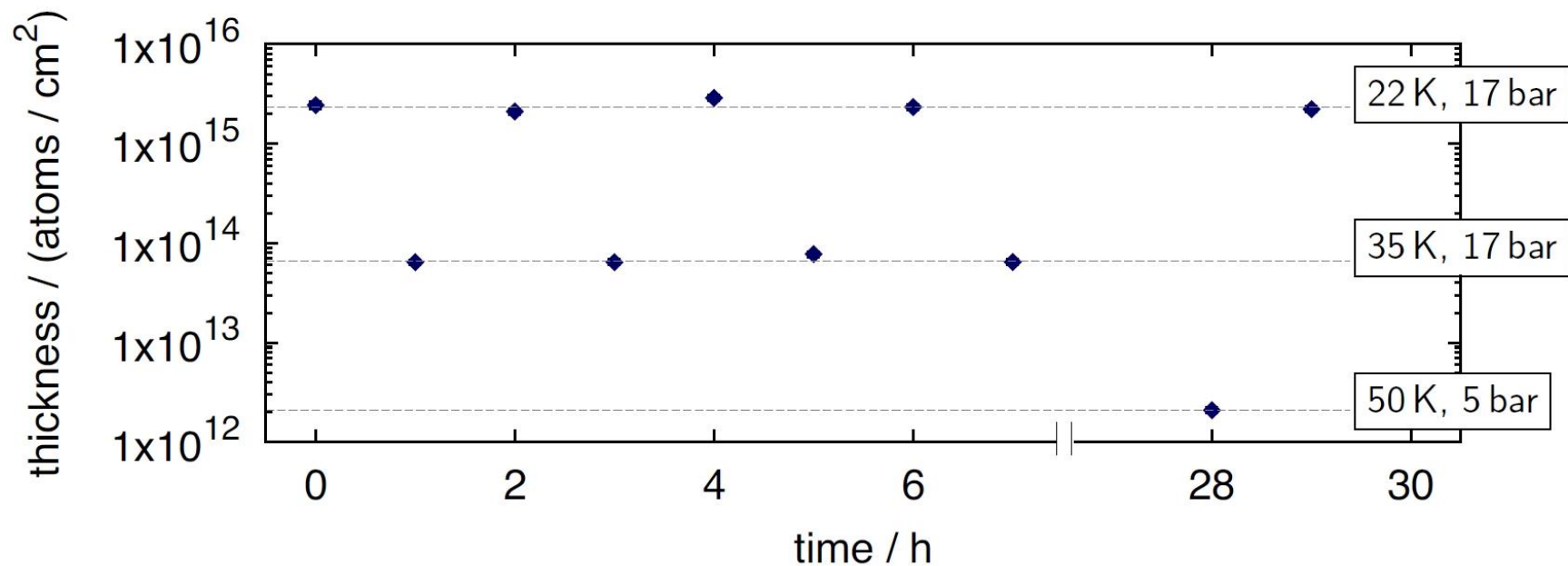
## Средний размер кластера

$$N = A_N \left( \frac{\Gamma^*}{1000} \right)^{\gamma_N} \quad A_N \sim 86, \gamma_N \sim 2.35$$

# Количество атомов в кластере в зависимости от параметра Хагены



# Стабильность работы источника



# **Кластерная газовая мишень для ОИЯИ**

**Выбор конструкции мишени**

**Требования к давлению в экспериментальном промежутке**

**Проектирование мишени, создание чертежей для**

**производства**

**Покупка вакуумного оборудования – насосы, вакуумметры, криокулеры, клапаны, манометры, регуляторы расхода газа, контроллеры температуры**

**Изготовление мишени**

**Система очистки газа, техника безопасности - горючий газ**

**Система управления и контроля параметрами мишени**

**Выбор программного обеспечения**

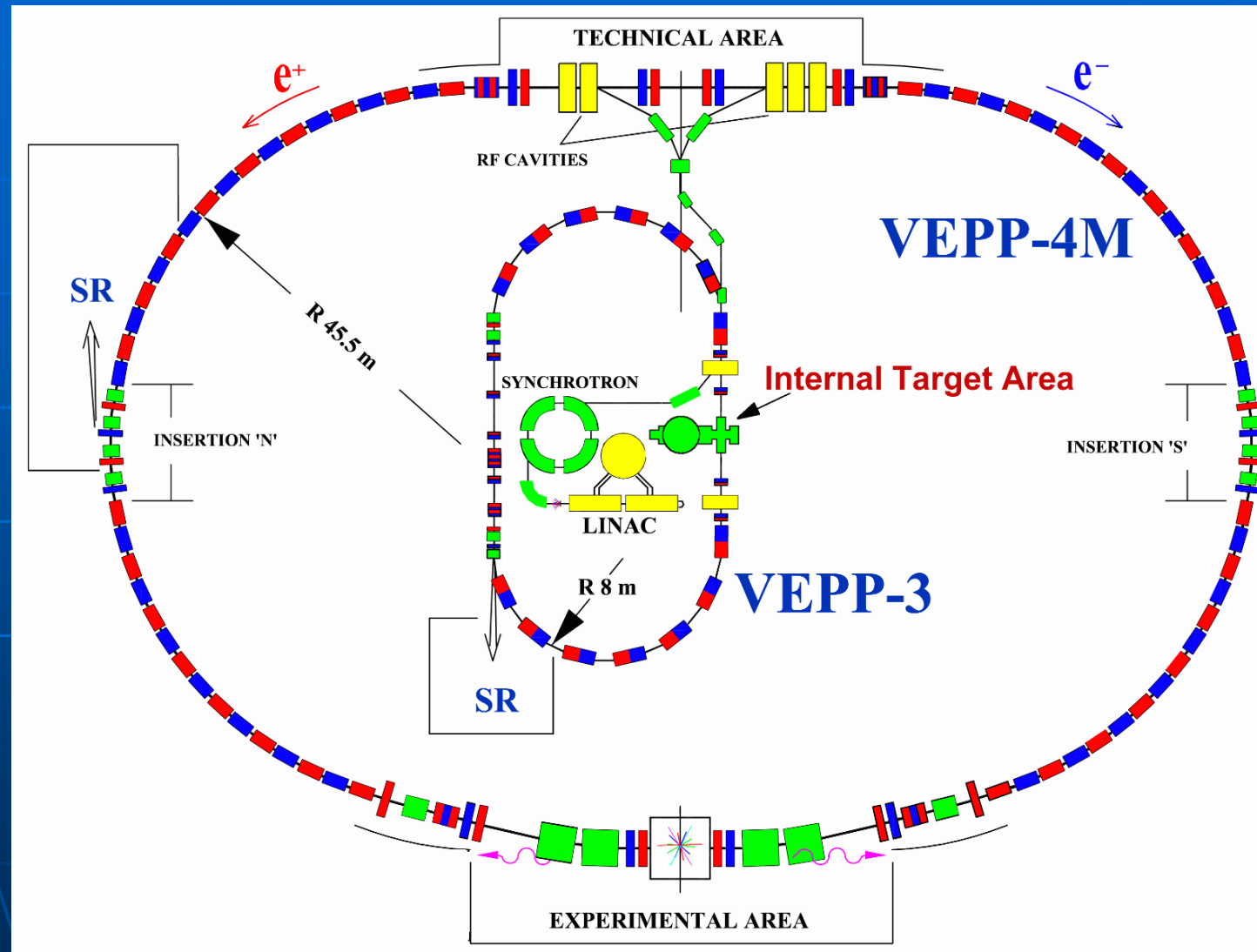


# Спасибо за внимание!

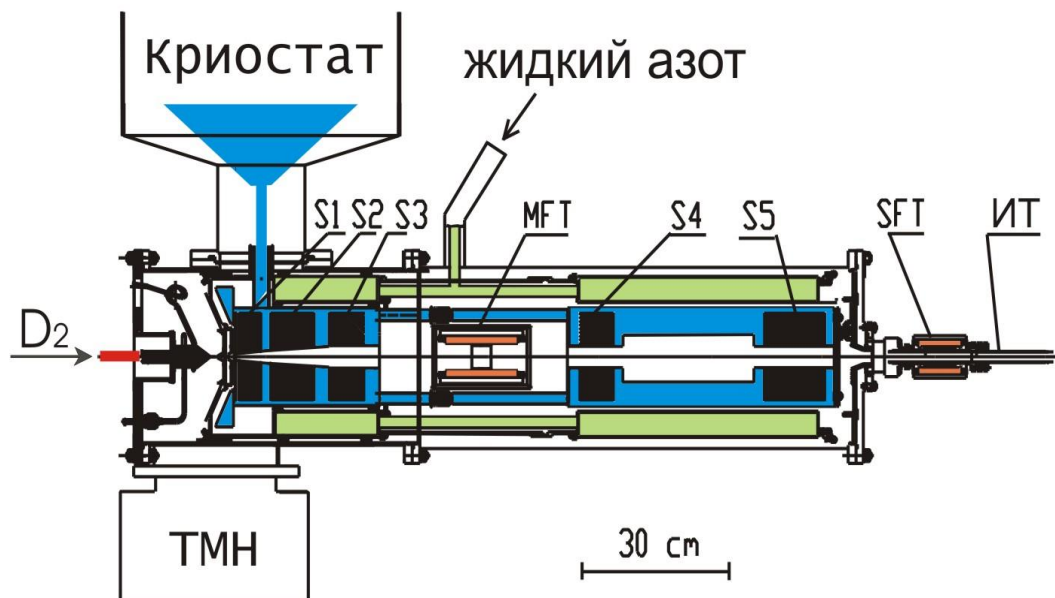
# Ускорительный комплекс ВЭПП-3, ВЭПП-4

## VEPP-3

Energy : 2000 MeV  
Lifetime : 20000 s  
Av. current : 100 mA  
Bunch : 0.7x0.3 mm



# Поляризованная дейтериевая мишень, ВЭПП-3.



$M_J$	$M_I$									
$+1/2$	$+1$	●	S1-S3	●	MFT	0	S4,S5	0	SFT	0
$+1/2$	0	●		●		●		●		●
$+1/2$	$-1$	●		●		●		●		●
$-1/2$	$-1$	●		0		●		0		0
$-1/2$	0	●		0		0		0		0
$-1/2$	$+1$	●		0		0		0		0

Тензорная поляризация  $P_{zz}=1-3n_0= -2, +1.$

Векторная поляризация  $P_z=n_+-n_-= 0.$

# Индикация параметров поляризованной дейтронной мишени на мониторе

