

# 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

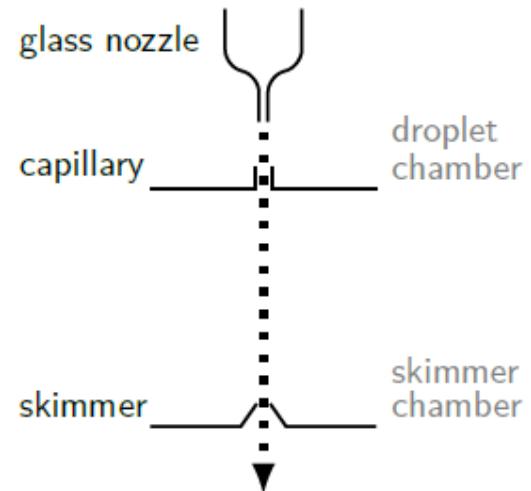
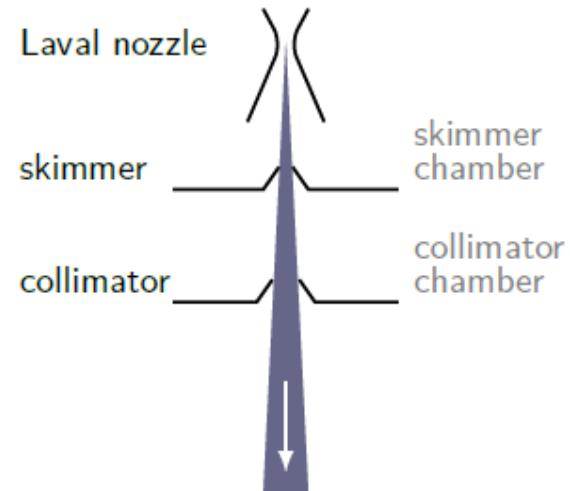
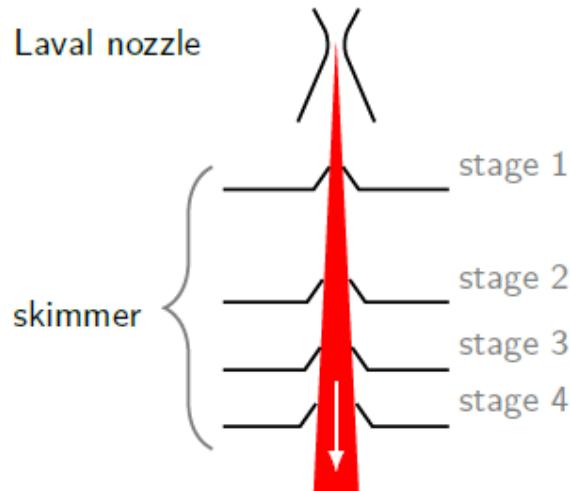
# Электронные накопительные кольца

|                 | <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><br>$H_2$ $H_2O$ $NH_3$ $C_2H_2$<br><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><br>$\uparrow H$ $\uparrow D$ $\uparrow ^3He$                      | <b>Hamburg</b>            |
| » <b>SHR</b>    | <b>1.0</b>     | <b>storage cell</b><br>$\uparrow H$ $\uparrow D$ $\uparrow ^3He$                      | <b>MIT-Bates</b>          |
| » <b>AmPS</b>   | <b>0.9</b>     | <b>storage cell</b><br>$\uparrow H$ $\uparrow D$ $\uparrow ^3He$                      | <b>Amsterdam</b>          |
| » <b>MESA</b>   | <b>0.105</b>   | <b><math>H_2</math></b>   | <b>Mainz</b>              |

# Протонные и ионные кольца

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

# Типы газовых мишеней

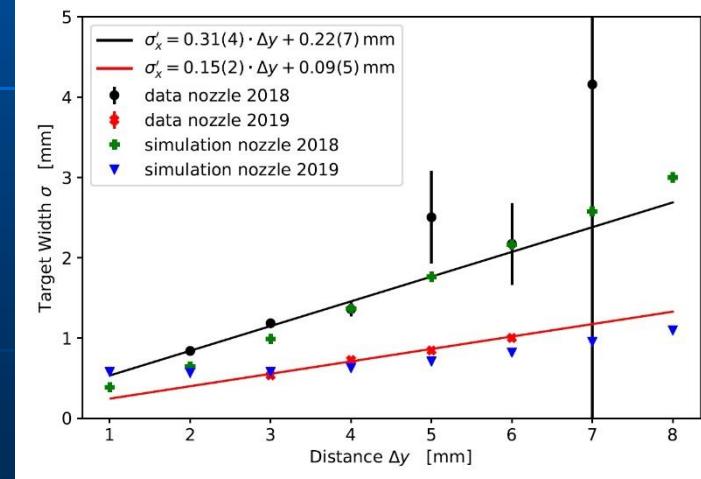
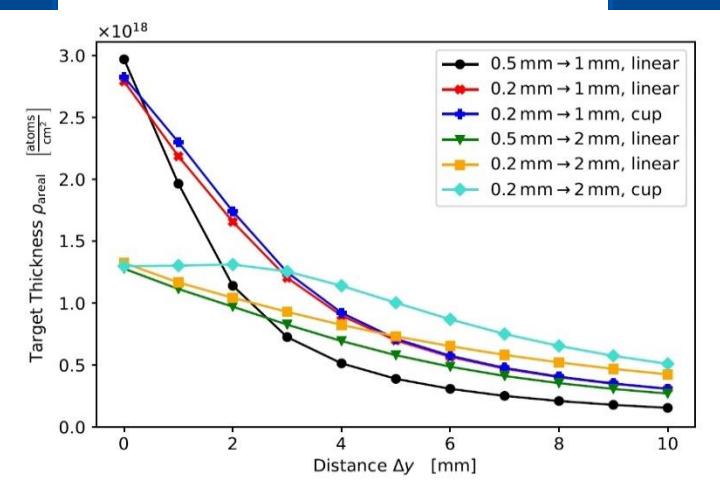
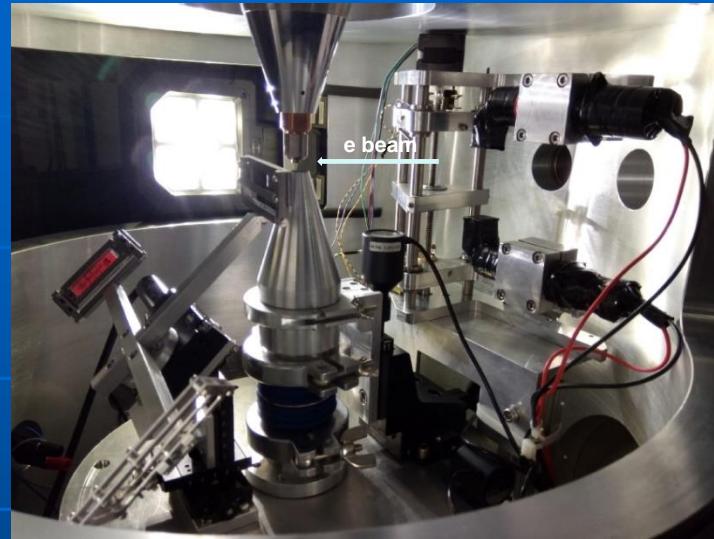
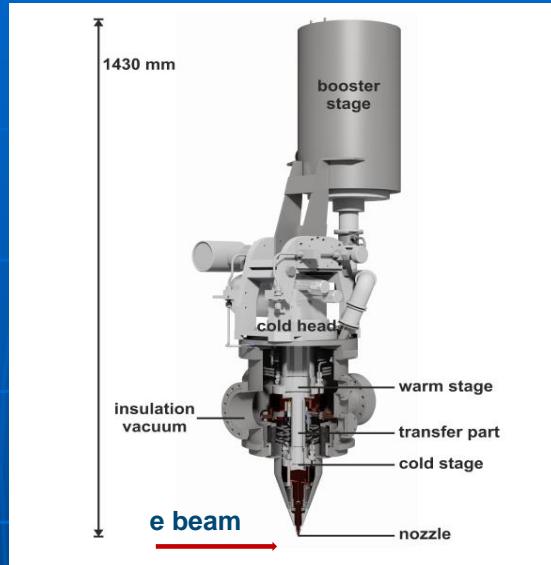


**Молекулярная струйная**

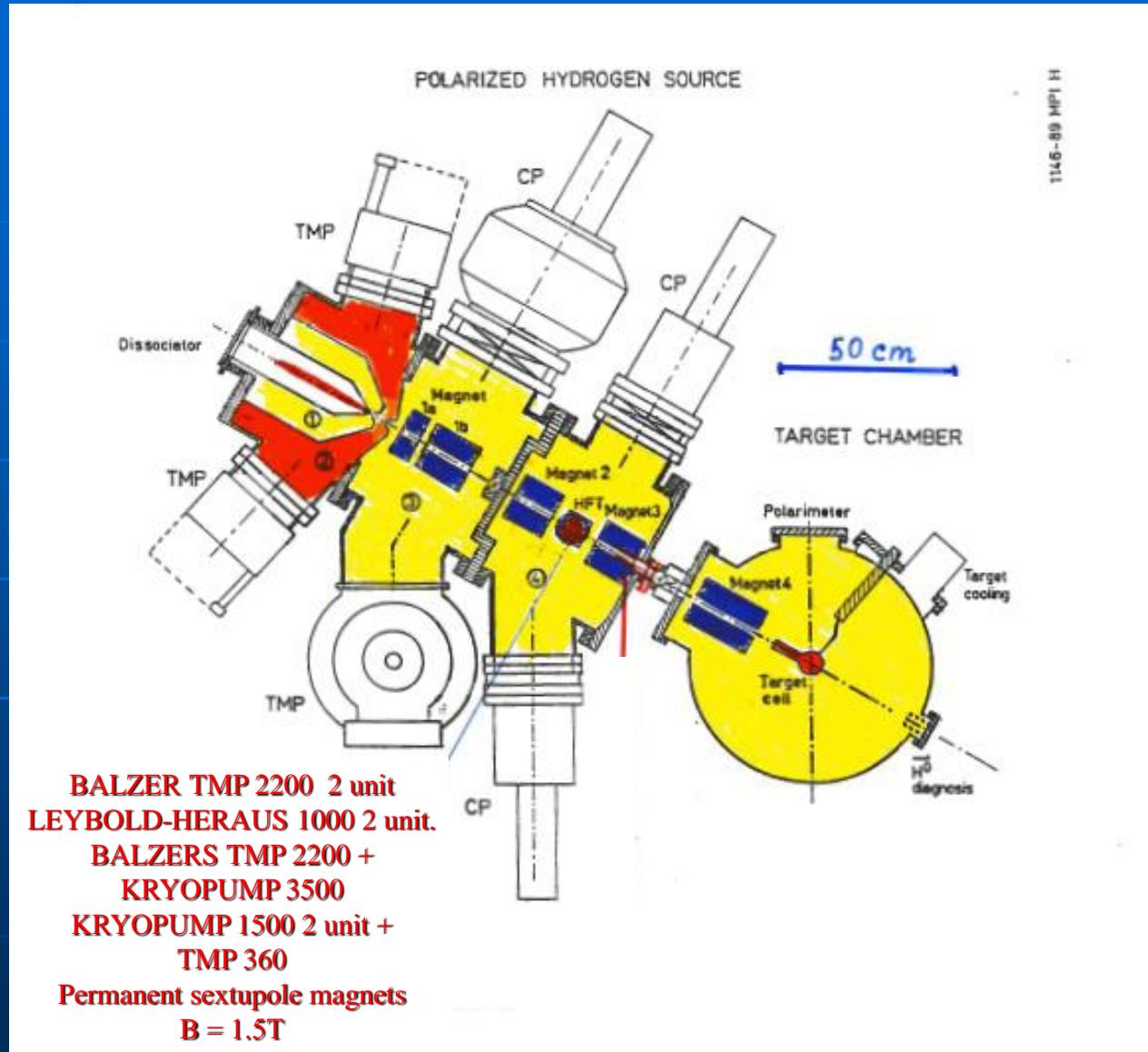
**Кластерная струйная**

**Капельная**

**Supersonic gas jet target at MESA. Diameter of the beam ~ 2 mm, H<sub>2</sub> target thickness ~ 10<sup>18</sup> at/cm<sup>2</sup>. Gas flow ~ 2000 Ln/h. B.S. Schlimme et al., NIMA 1013 (2021) 165668.**

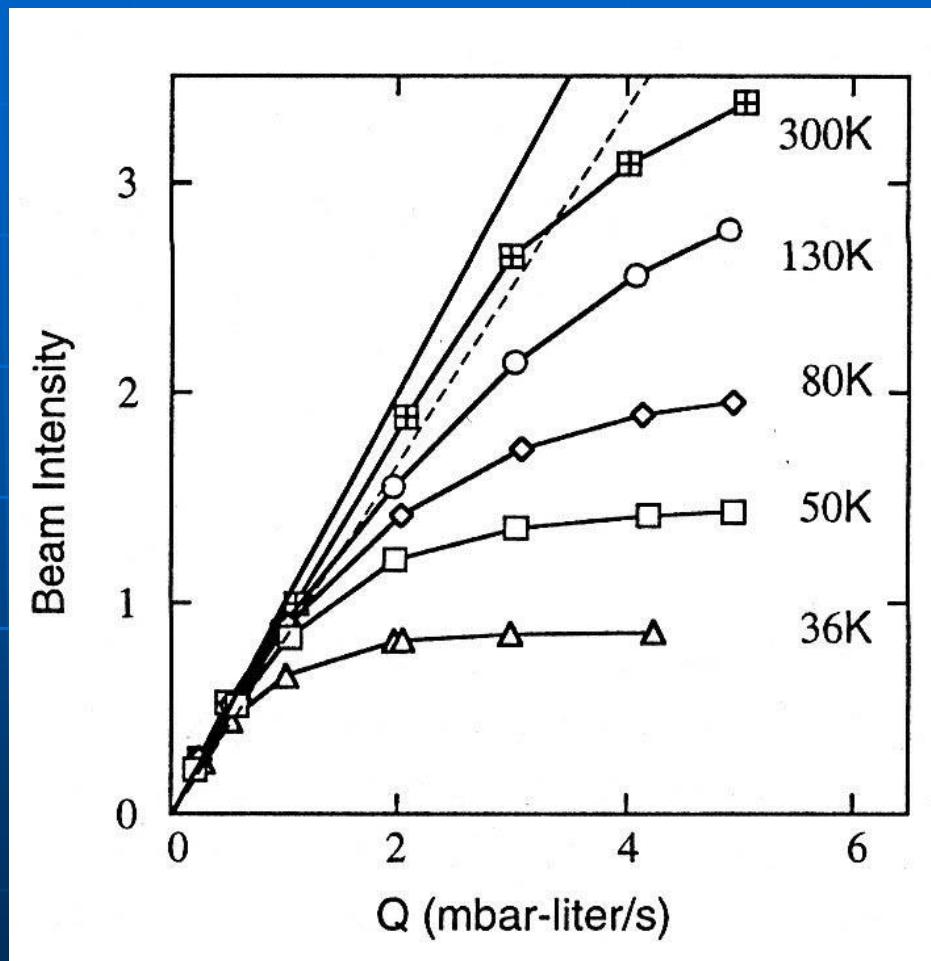
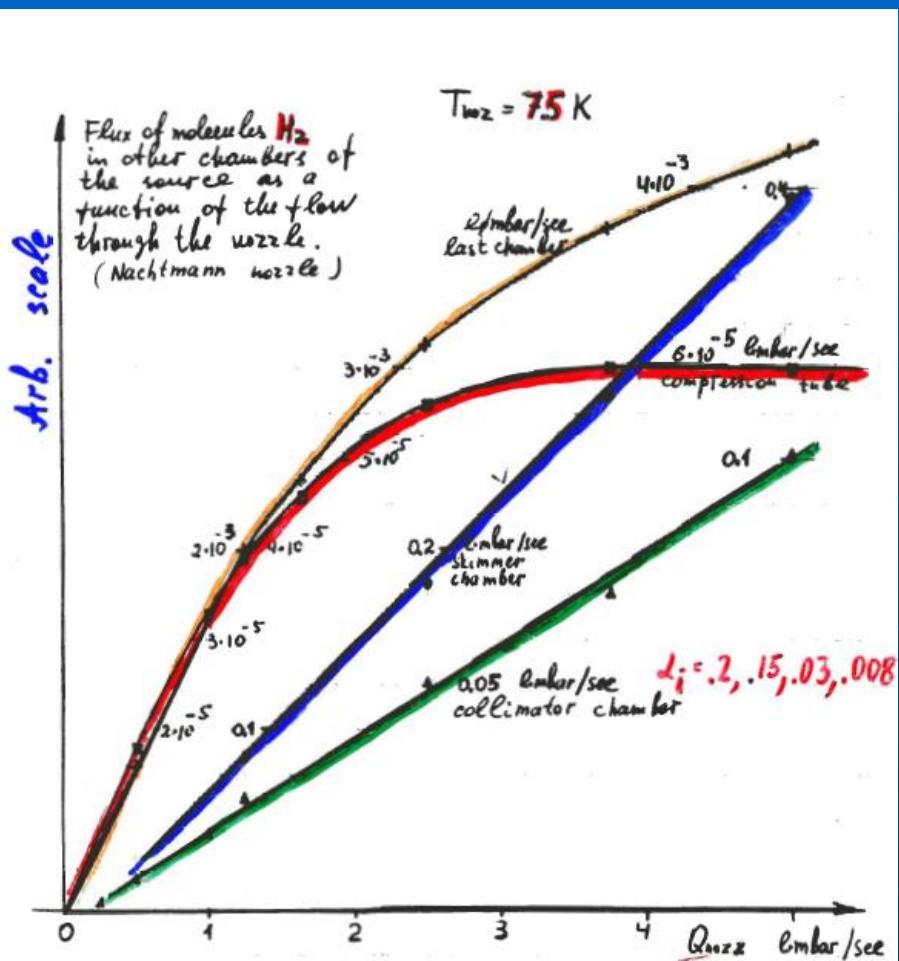


# Формирование атомного или молекулярного пучка



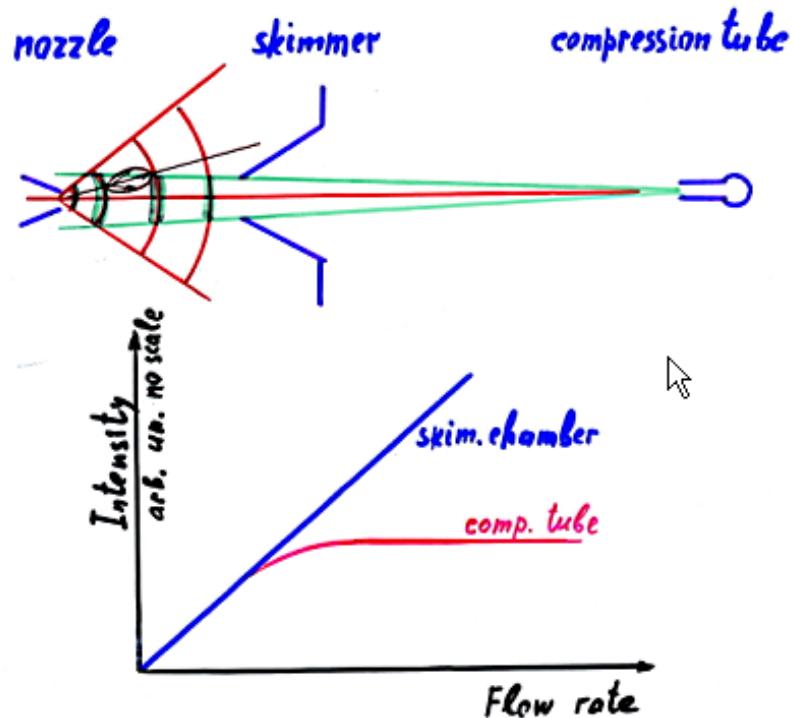
# Интенсивность $\text{H}_2$ молекулярного пучка

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*



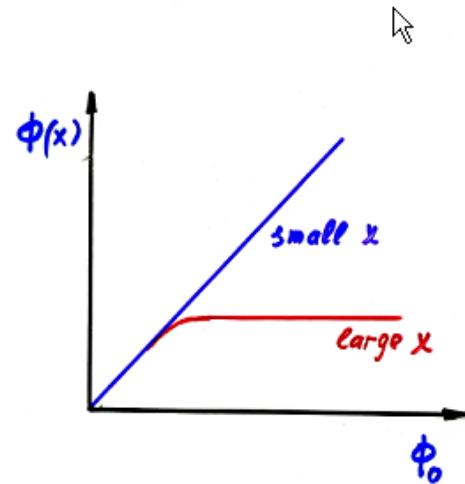
Экранировка скиммером

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

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

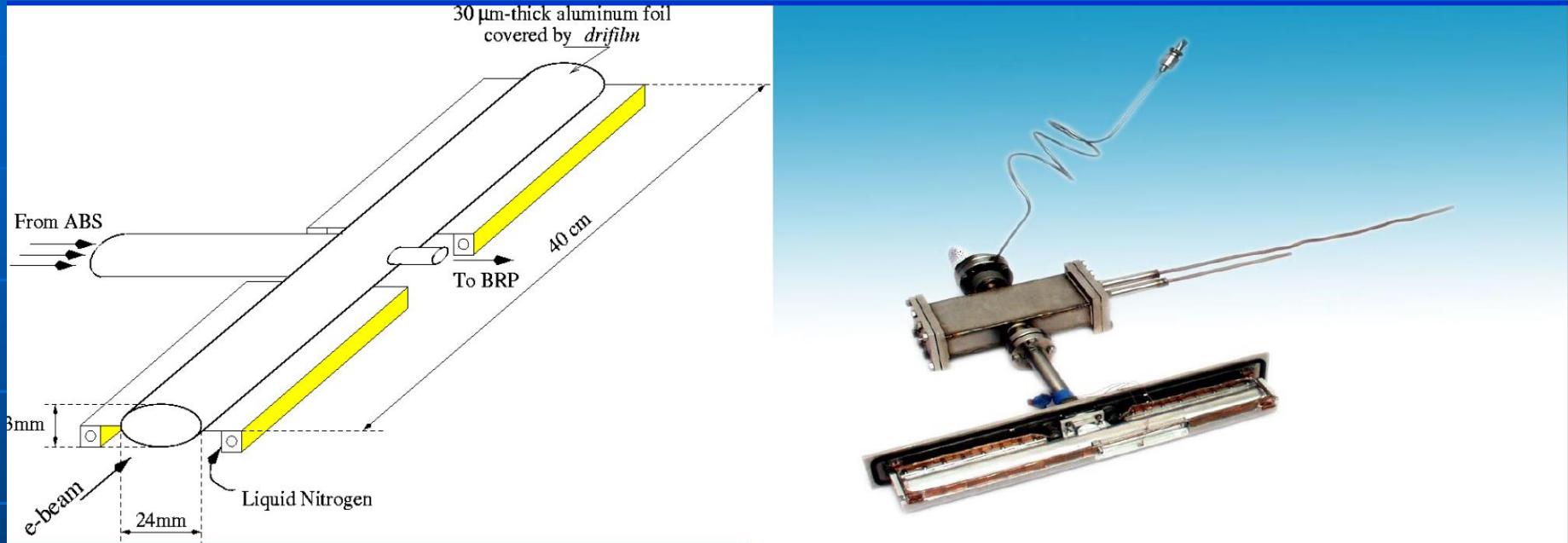
$$\alpha \approx \frac{\Delta v \cdot \sigma}{v_{max}^2}$$

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



Внутрипучковое рассеяние

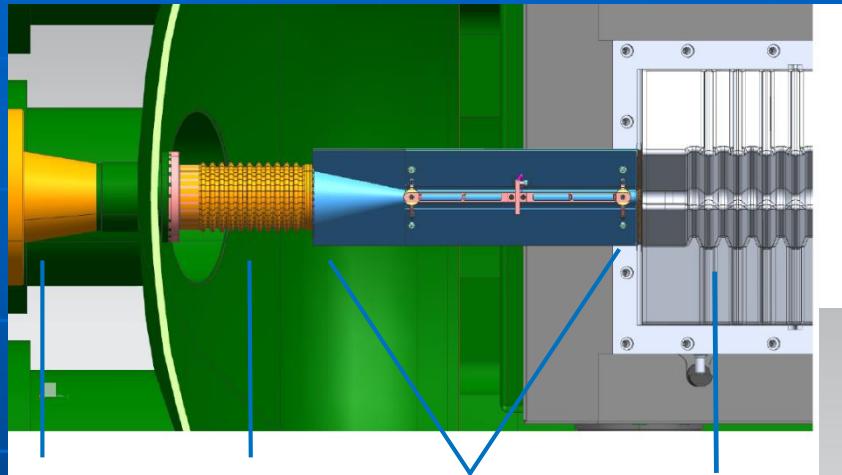
# Накопительная ячейка для поляризованных атомов



Выигрыш в толщине мишени  $\sim 100 !!!$

# Внутренняя мишень на LHC

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



Beam tube

Flexible part of WFS

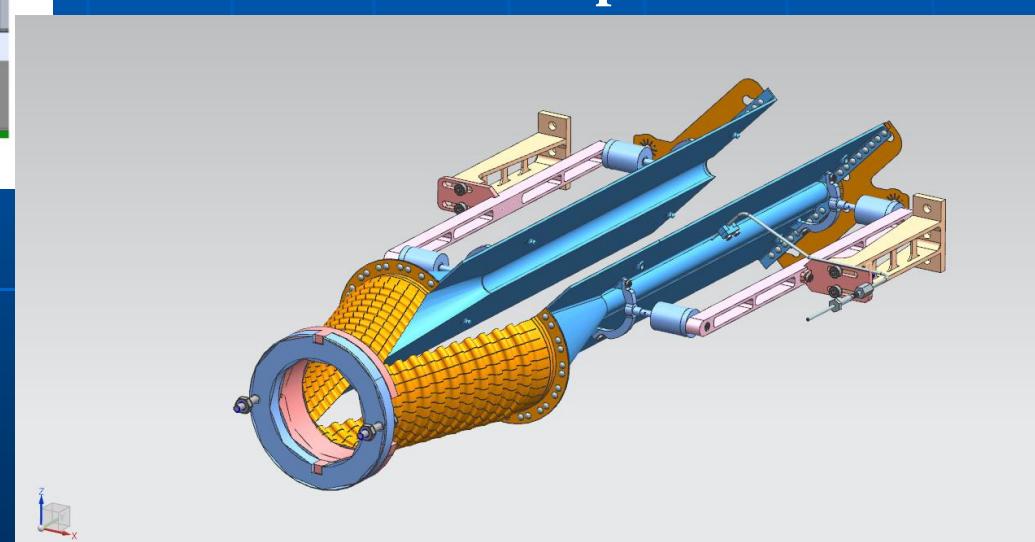
Cell and conical WFS

RF foil and detector box

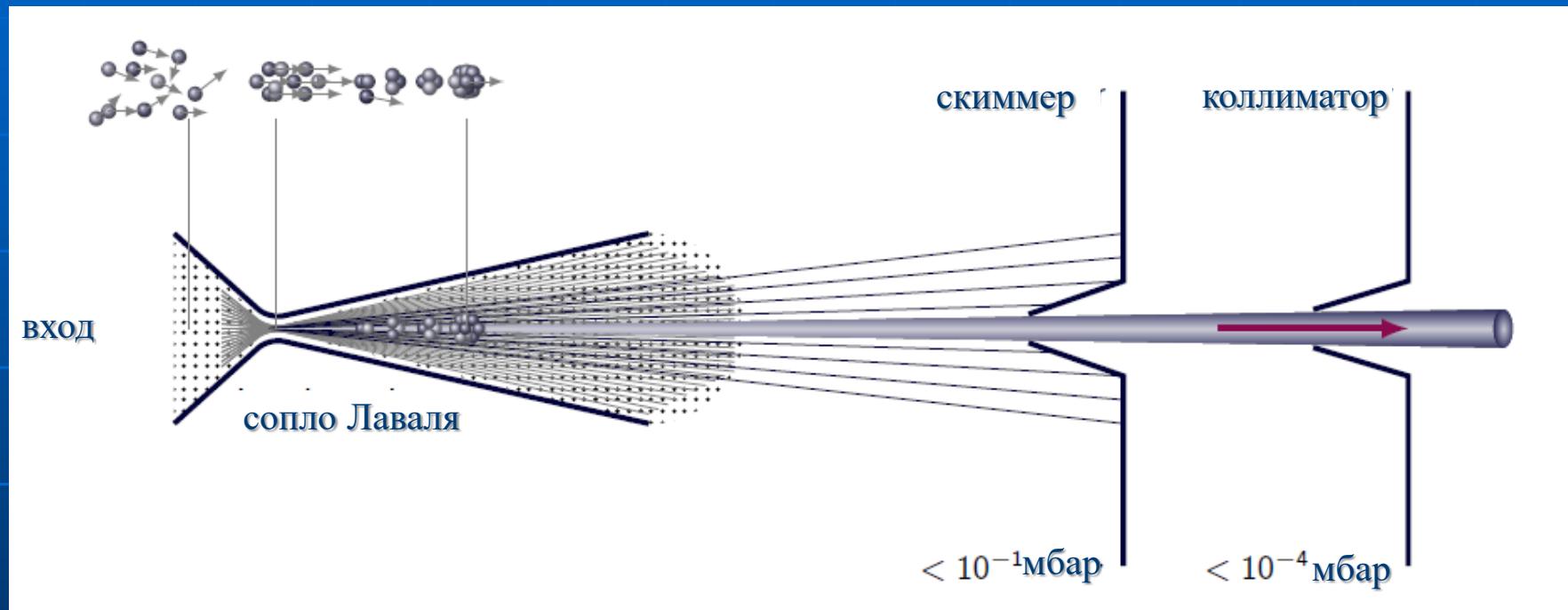
Ячейка  $L=20$  см, диам. = 1 см в рабочем состоянии.  $Q \sim 10^{15} - 10^{17}$  ат/сек  
 $t \sim 10^{13}$  ат/см $^2$

$\tau$  мишень ~ 1000 часов,

$\tau$  перепуска ~ 10 - 15 часов

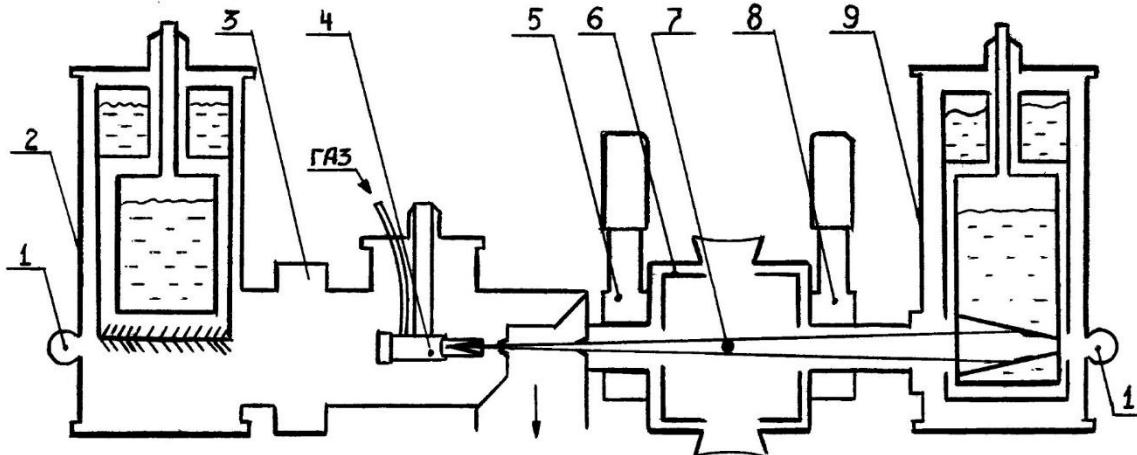


# Формирование кластерной струи



# Внутренняя мишень на накопителе ВЭПП-2

ЖТФ т. XLVI, стр.637, 1976



При изменении расхода газа, соответствующего изменившемуся объему клапанами ДУ<sub>38</sub>. На рис. 2 приведено распределение интенсивности в струе из паров воды на расстояние 5 см от сопла. Для аммиака, углекислого ацетилена распределения аналогичны, что струя хорошо сформирована, разбрызг 15 мм. Это соответствует размеру

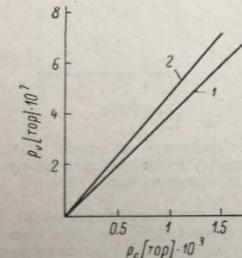


Рис. 5. Зависимость давления в объеме от давления в струе.  
1 — пары  $\text{H}_2\text{O}$ , 2 — углекислый газ  $\text{CO}_2$ .

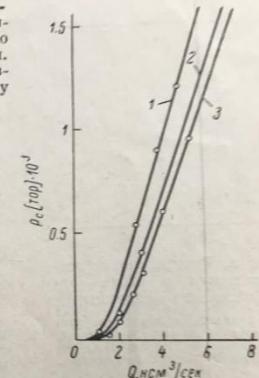
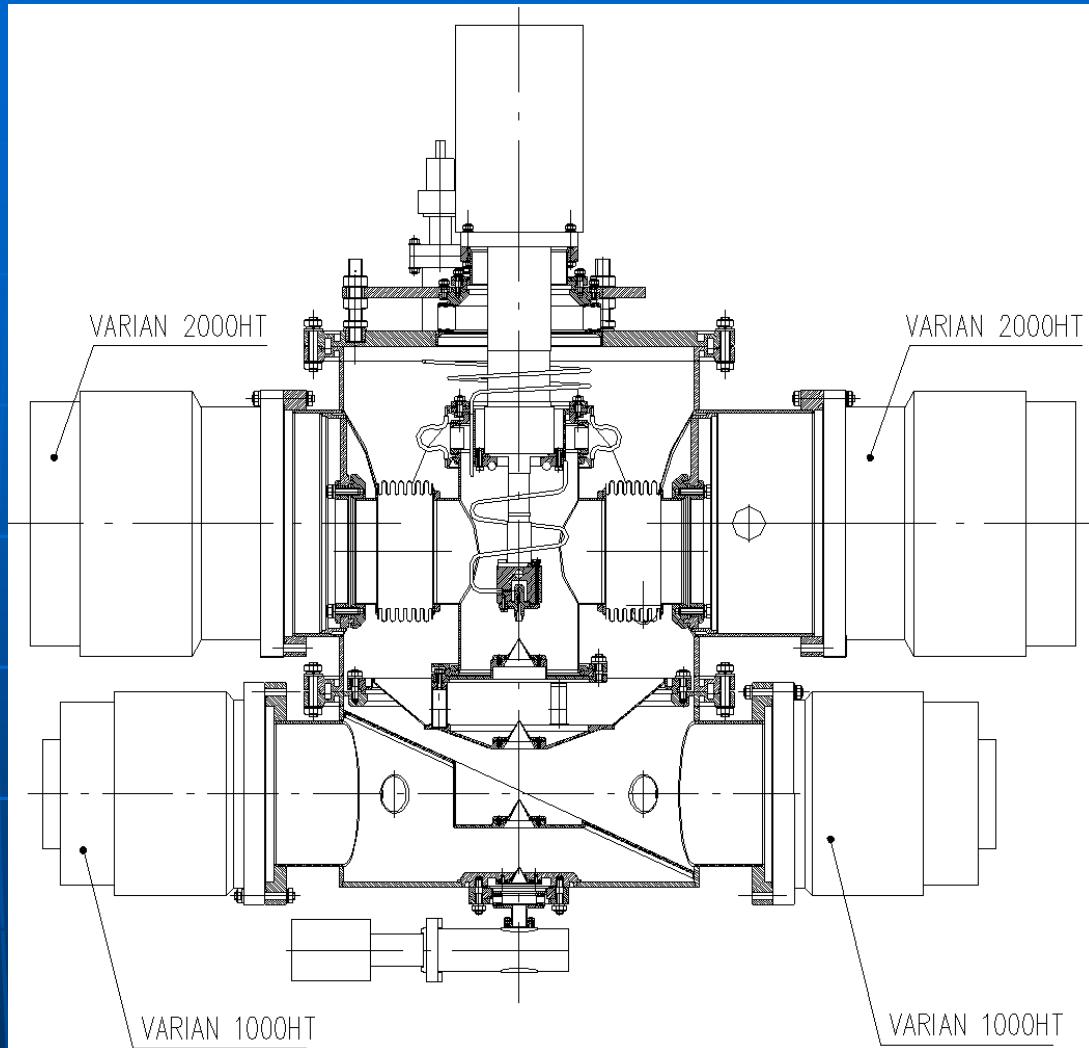
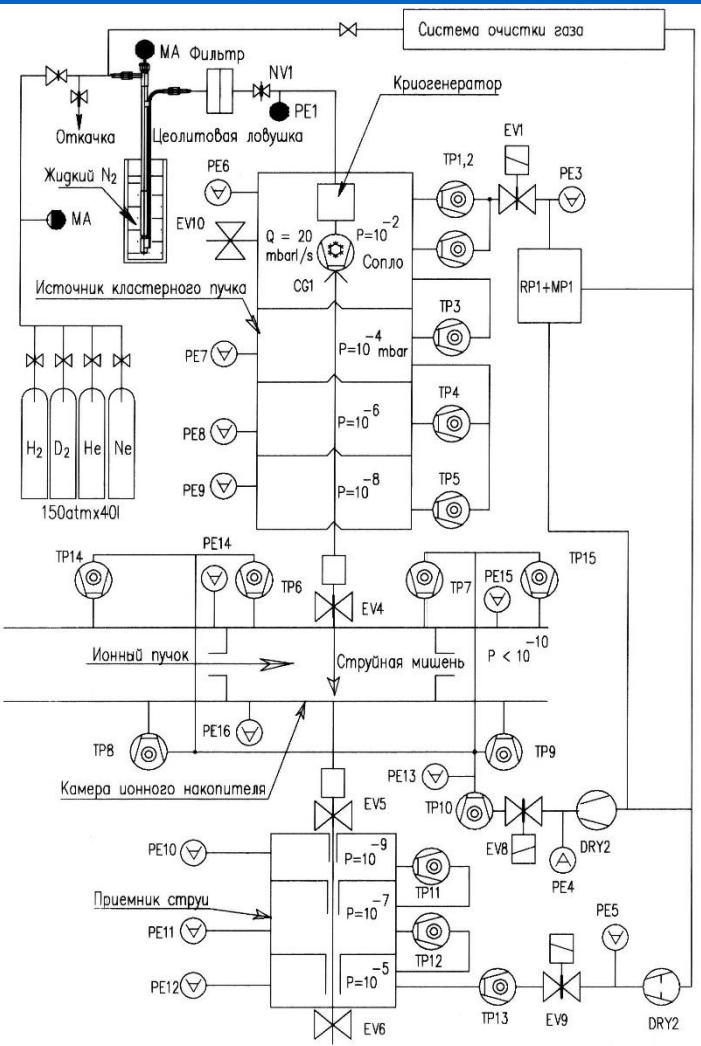


Рис. 6. Давление в струе на расстоянии 23 см от среза сопла в зависимости от расхода газа через сопло.  
1 — ацетилен  $\text{C}_2\text{H}_2$ , 2 — углекислый газ  $\text{CO}_2$ , 3 — аммиак  $\text{NH}_3$ .

Кластерные мишени  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{C}_2\text{H}_2$   
Плотность газа в струе  $\sim 10^{14}$  ат/см<sup>3</sup>

# Кластерная мишень для ионного накопителя IMP, Ланьджеу 2004

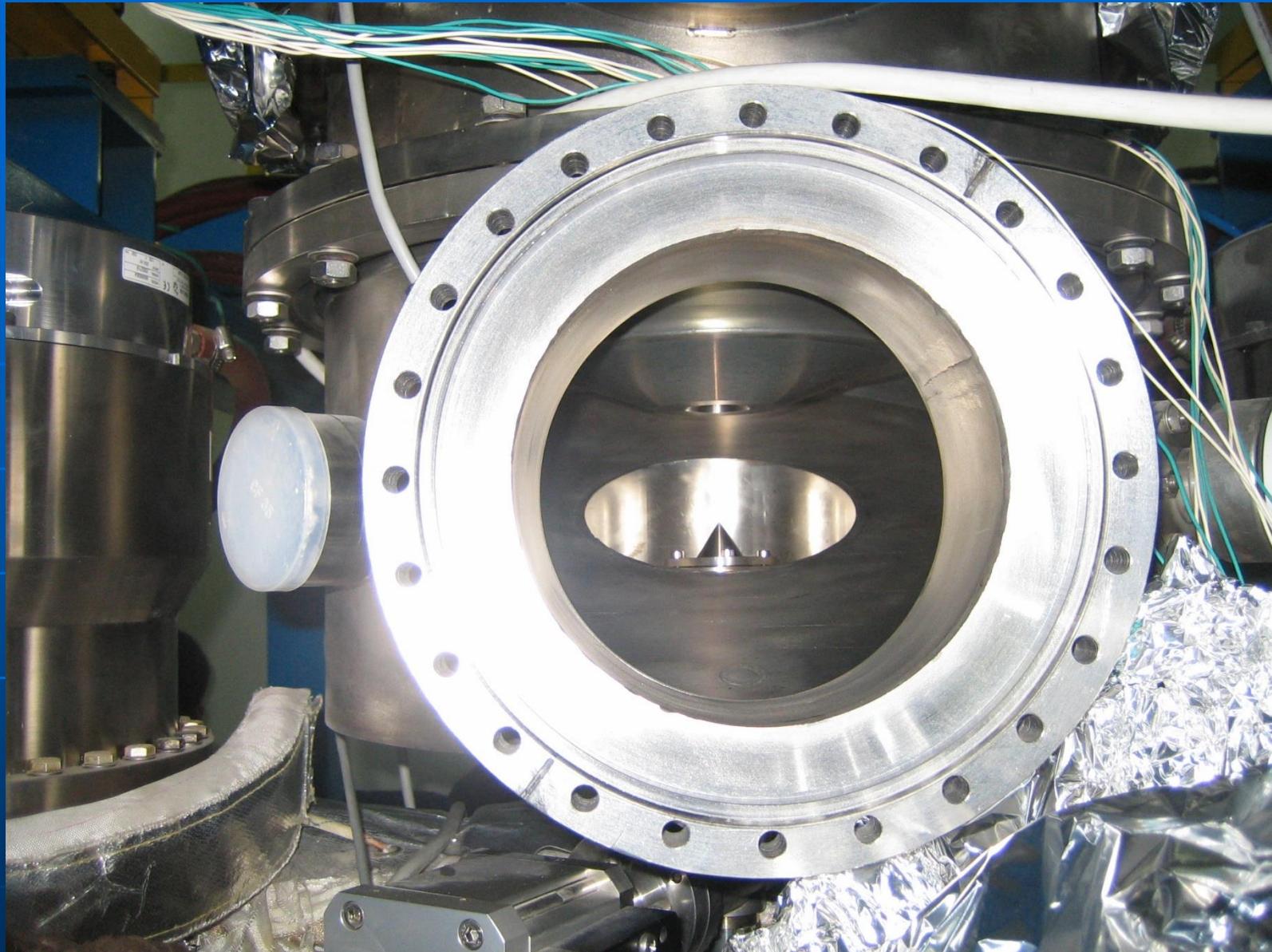


Принципиальная схема кластерной мишени

Конструкция источника мишени.



Фотография экспериментального промежутка без вакуумного оборудования.

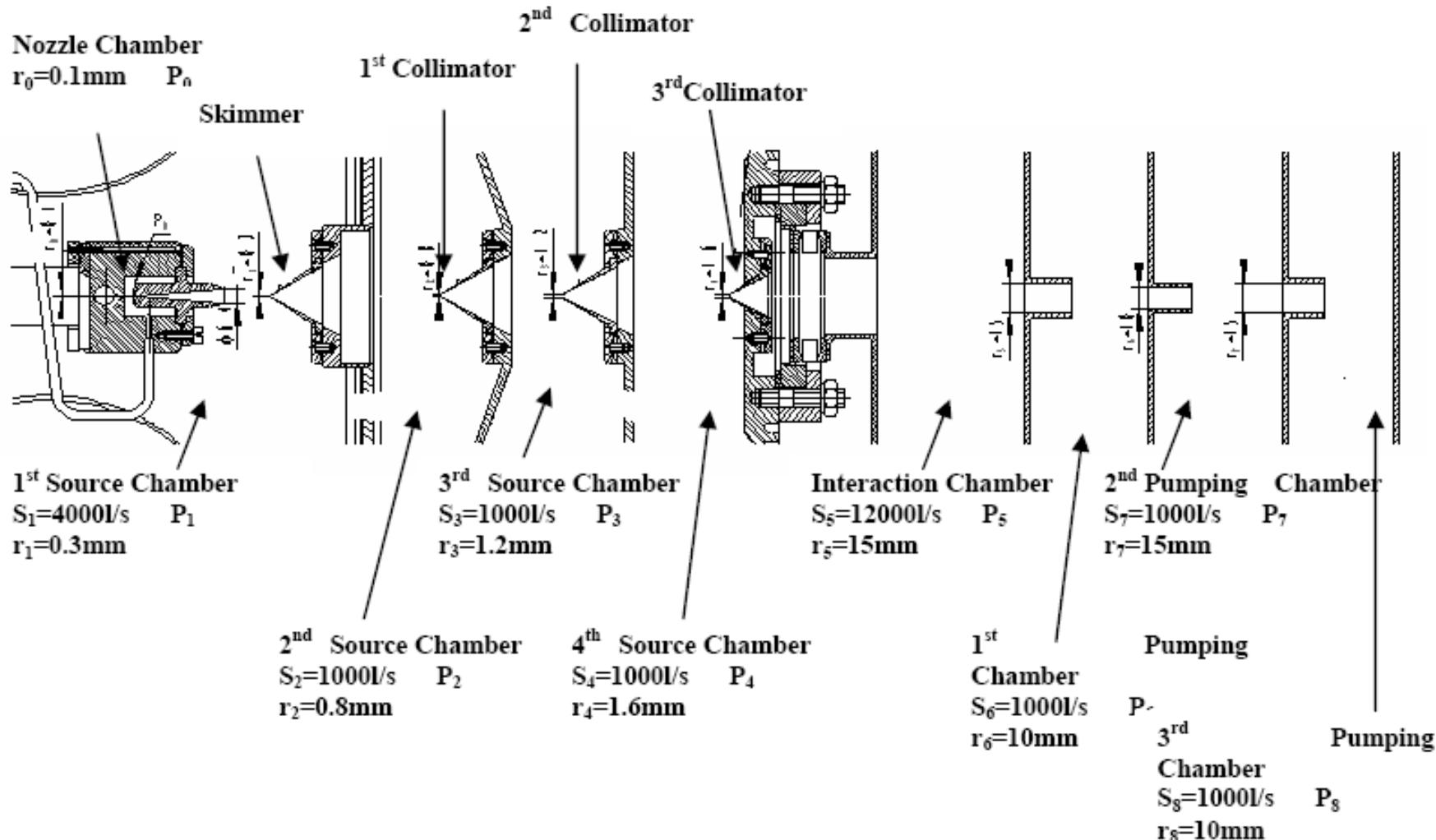


12.11.2025 ОИЯИ. Топорков

Кластерная мишень

16

# Общая схема кластерной мишени

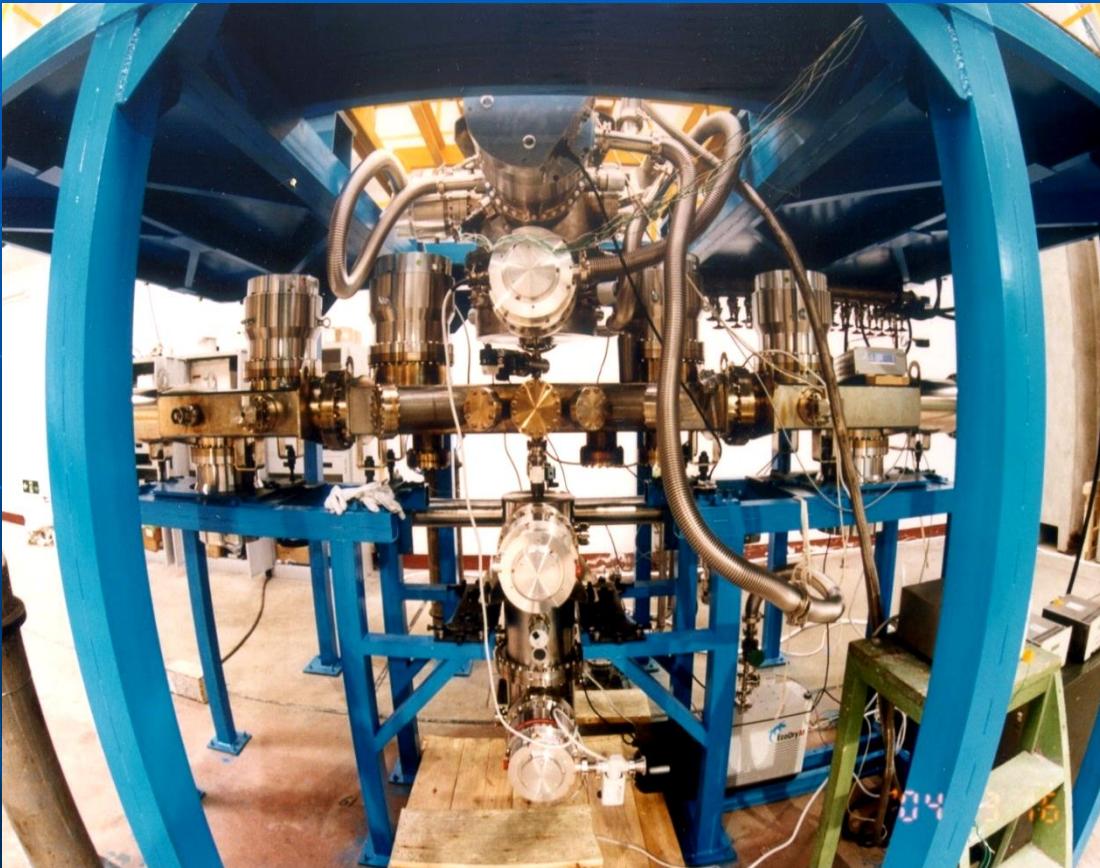


# Кластерная струйная газовая мишень, установленная на экспериментальном промежутке накопителя тяжелых ионов HIRFL. 03.2004, Ланьчжоу, Китай.

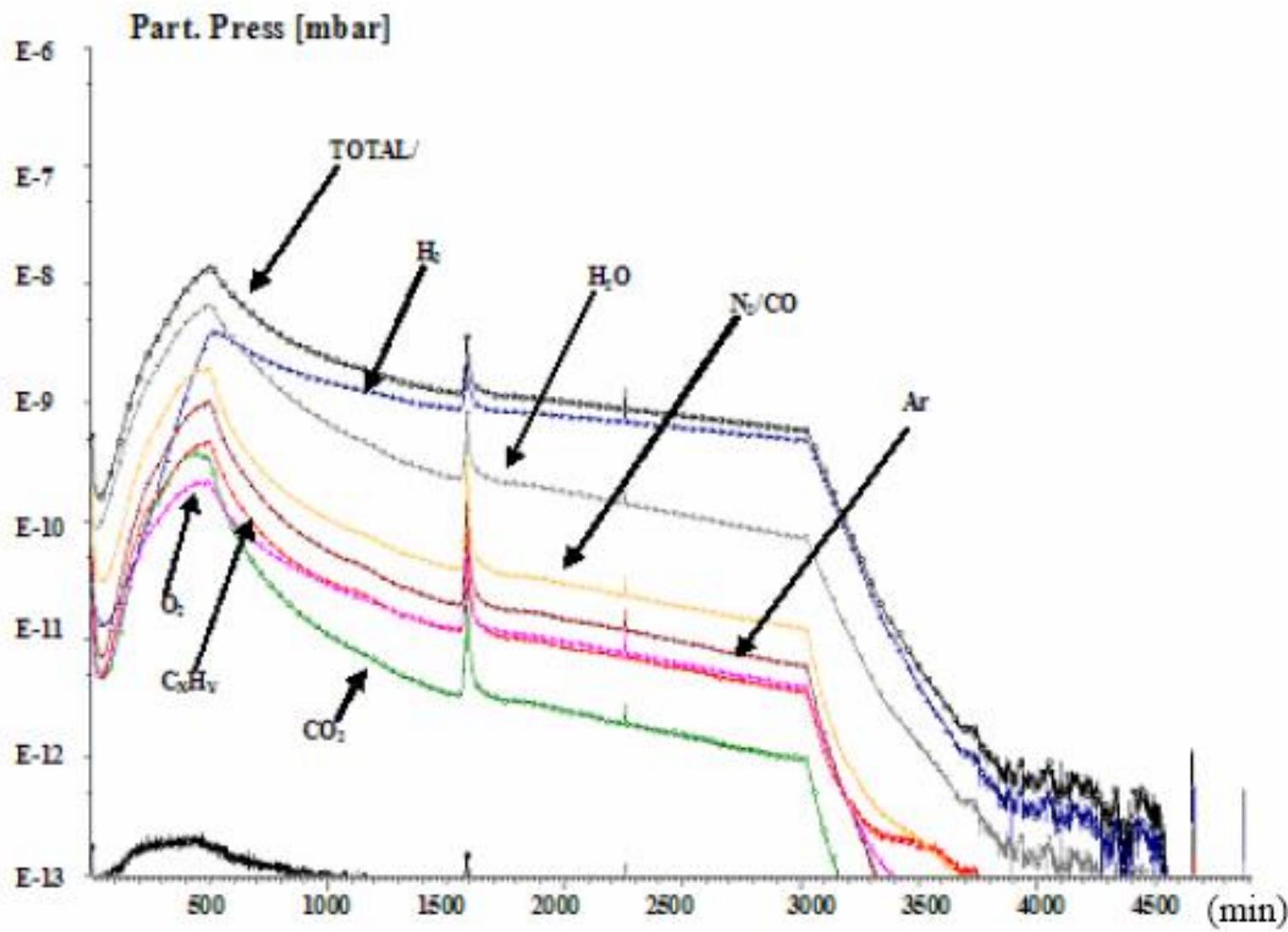
## Измеренные параметры мишени:

- 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

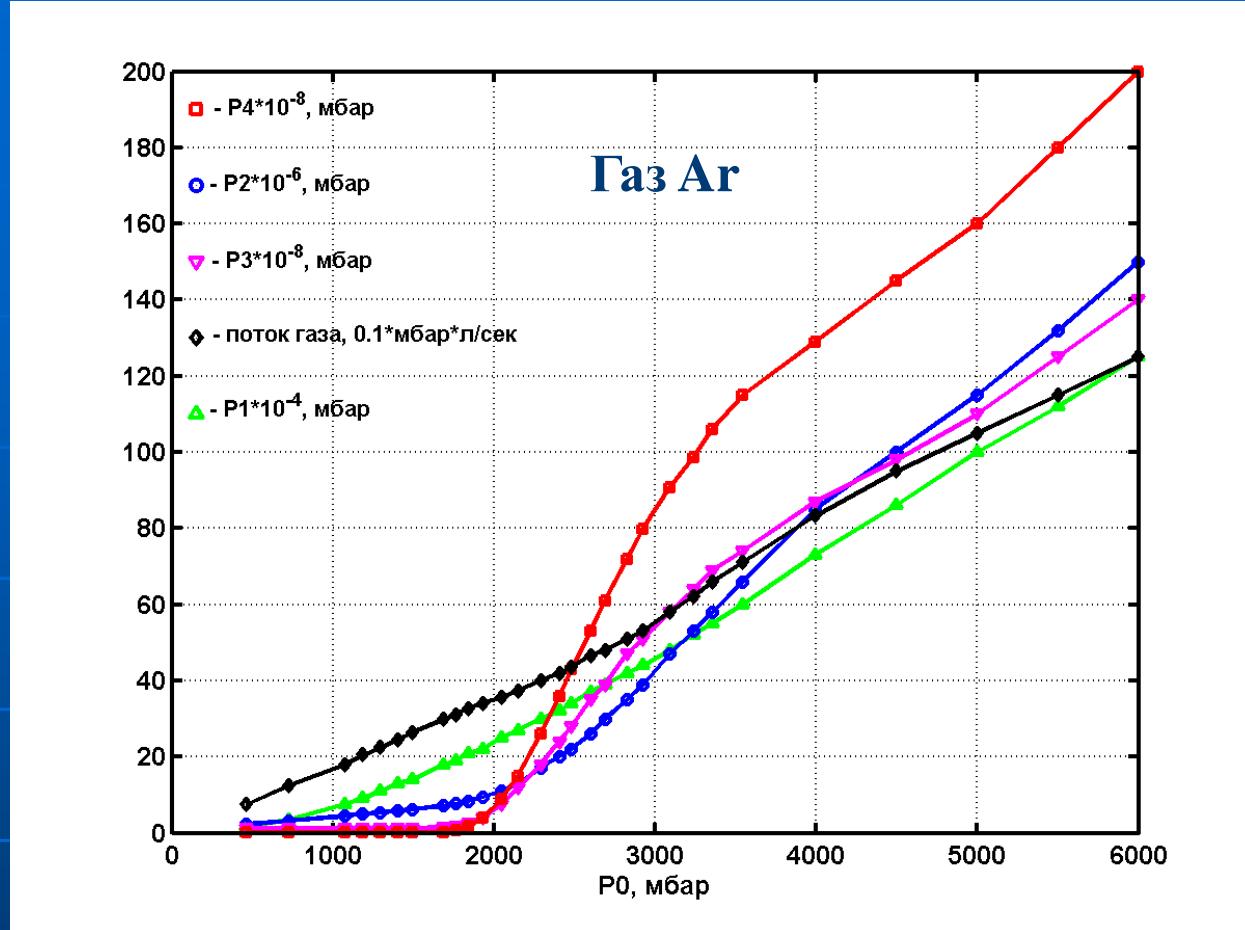
14 турбомолекулярных насосов  
1 насос Roots  
2 форвакуумных насоса



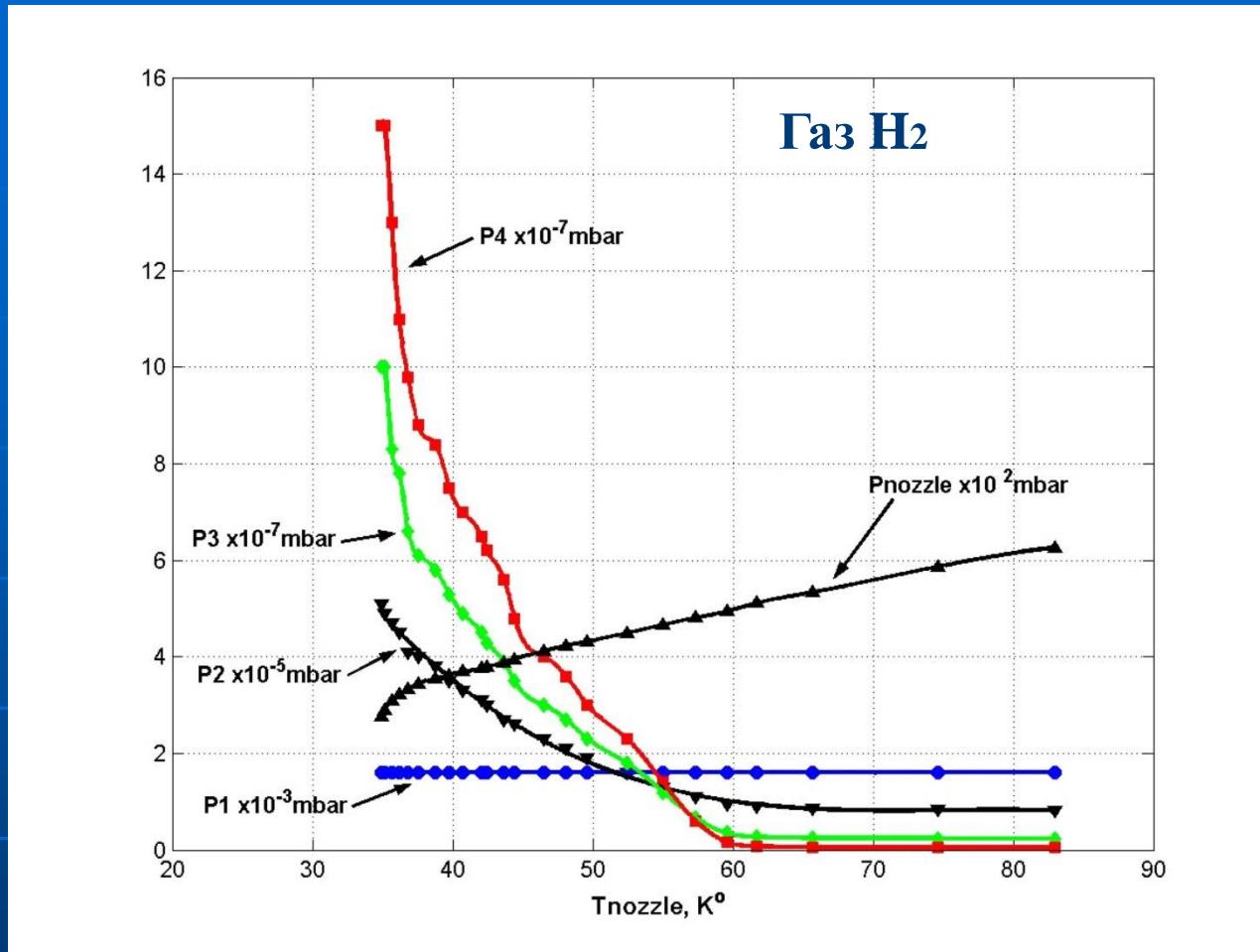
Кластерная мишень



Динамика давления в промежутке при прогреве.



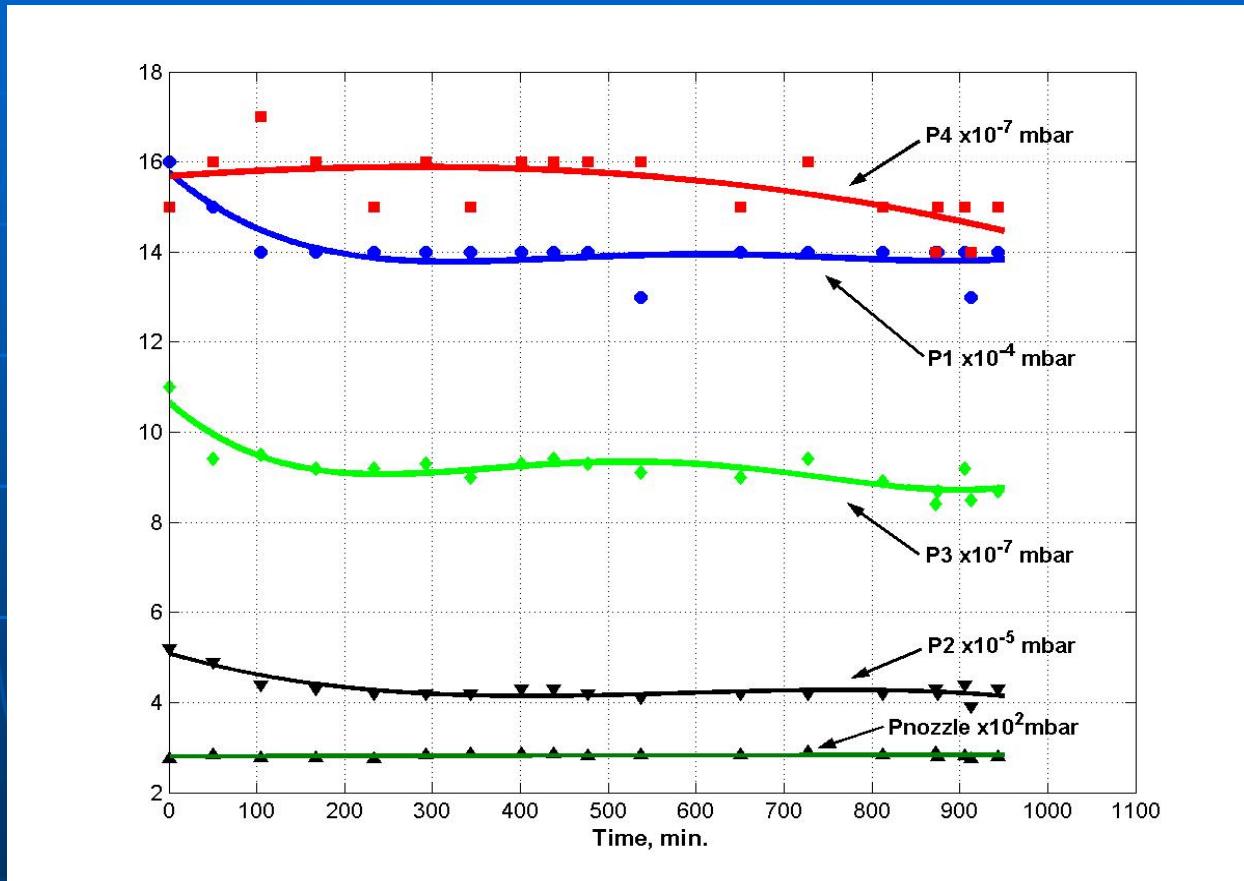
Распределение давления по ступеням мишени и расход газа  
через сопло в зависимости от давления аргона перед  
соплом. Температура сопла комнатная.



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>





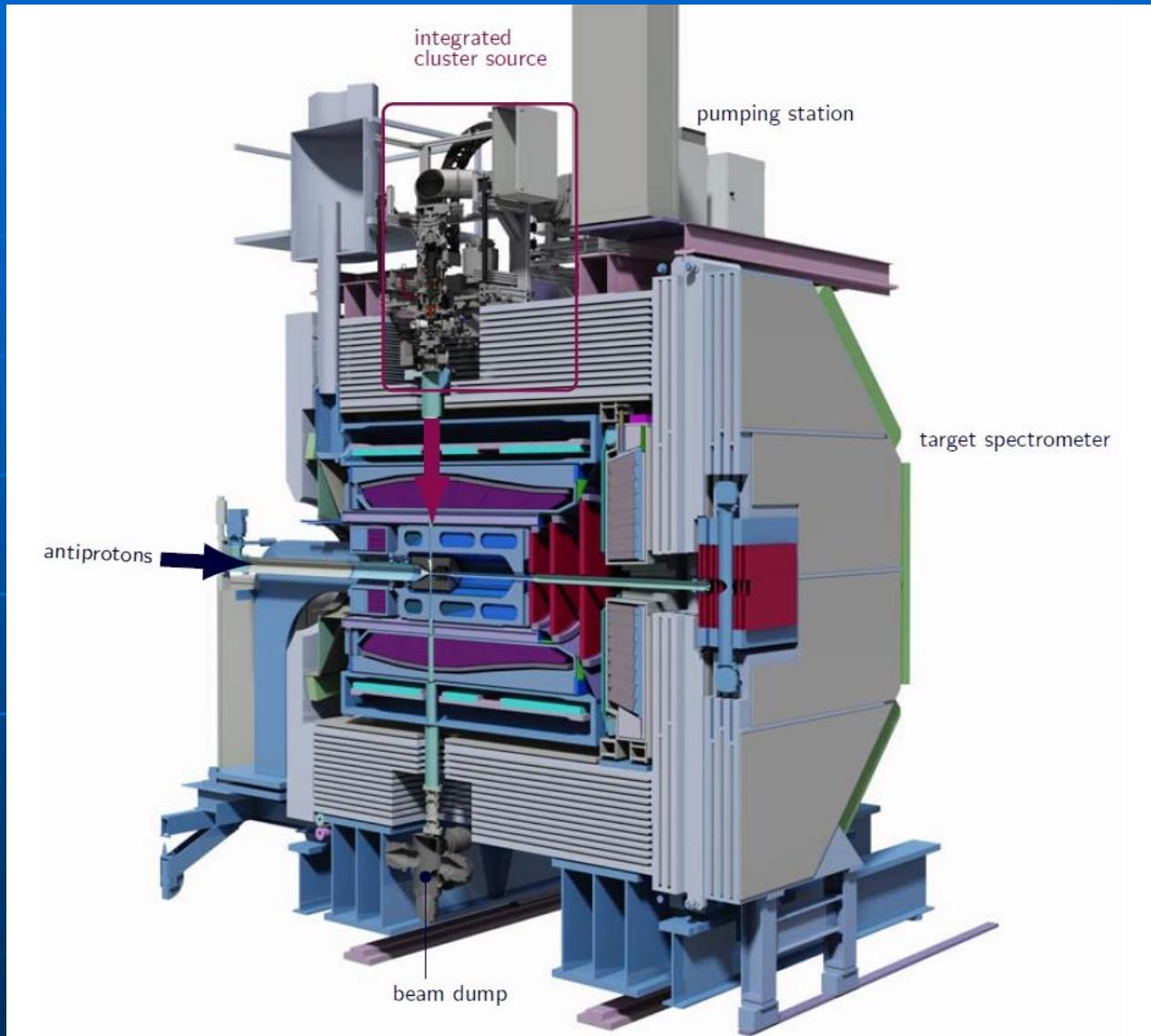
**PANDA collaboration Meeting**  
**GSI Darmstadt**  
**June 1-3, 2004**



## **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

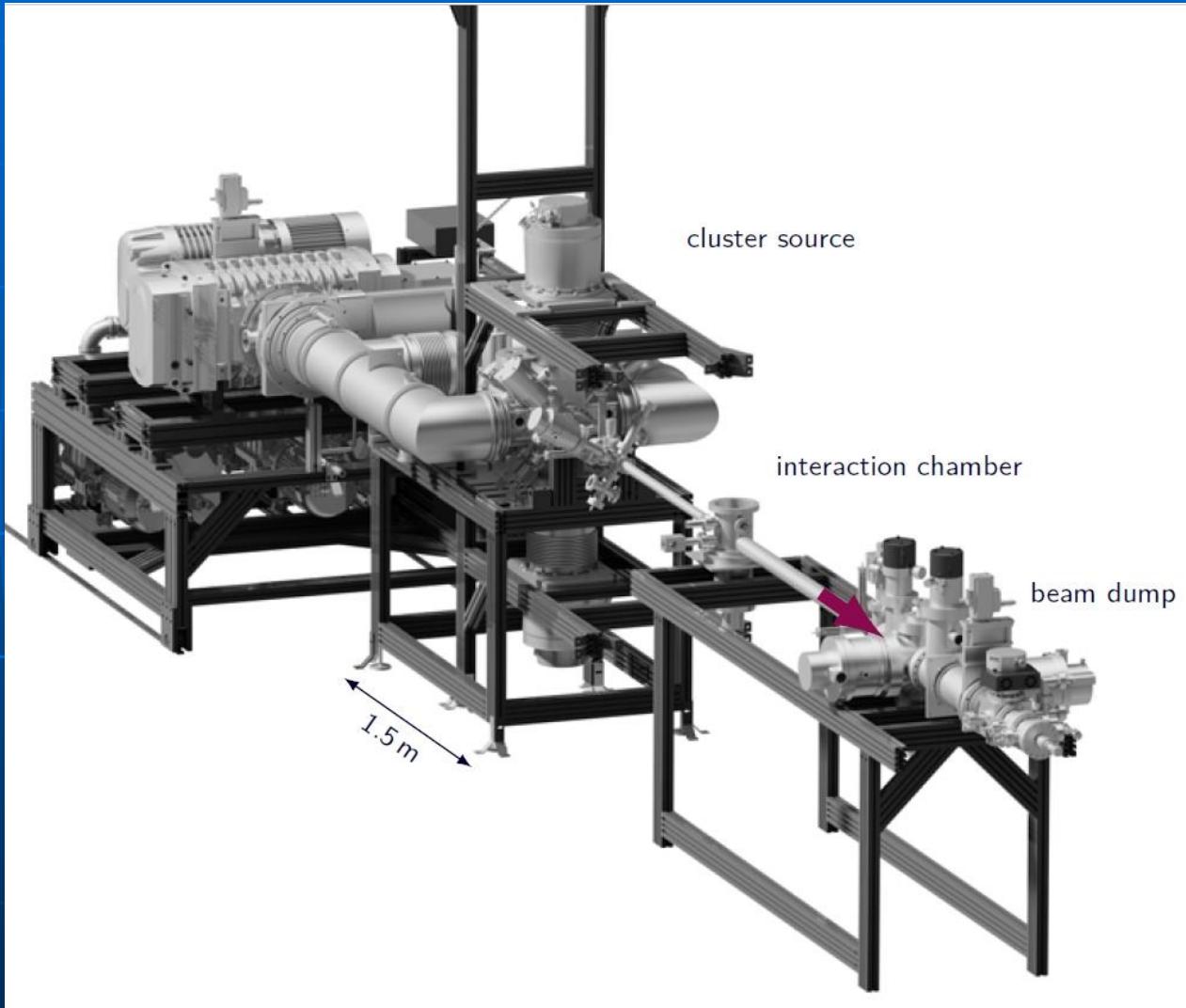
# Кластерная мишень для детектора PANDA, GSI, Дармштадт

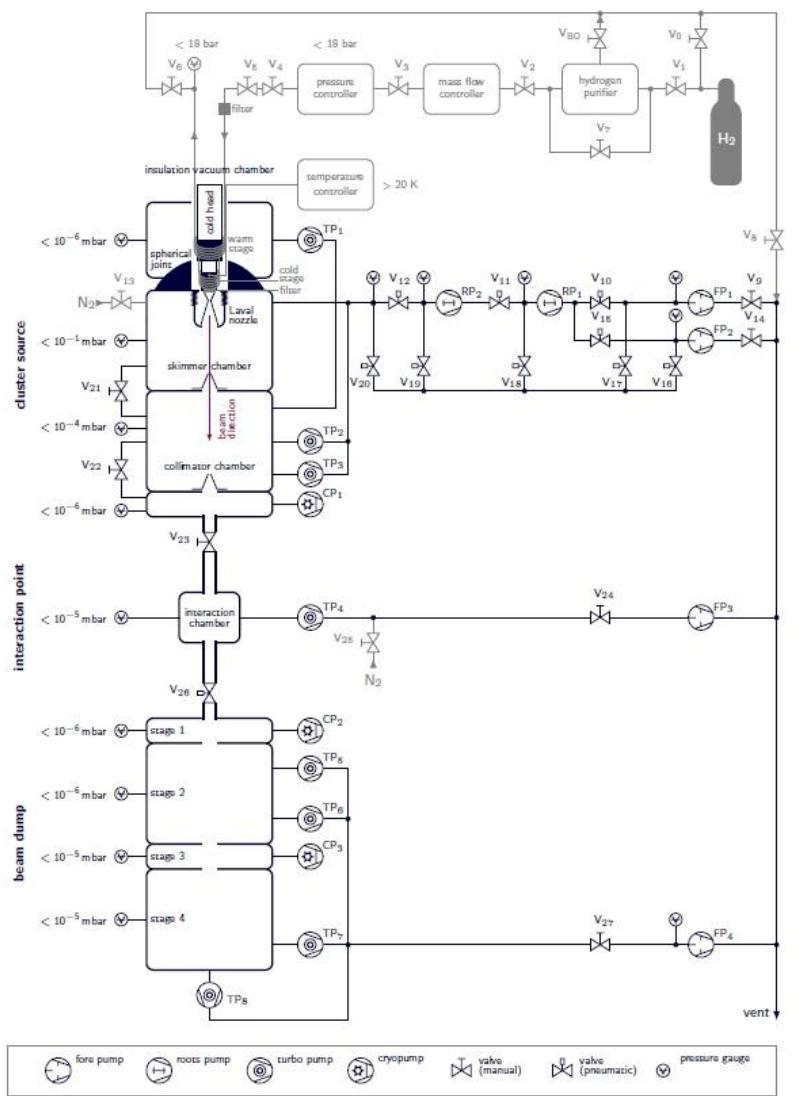


По материалам  
диссертации  
E.D. Kohler, 2015



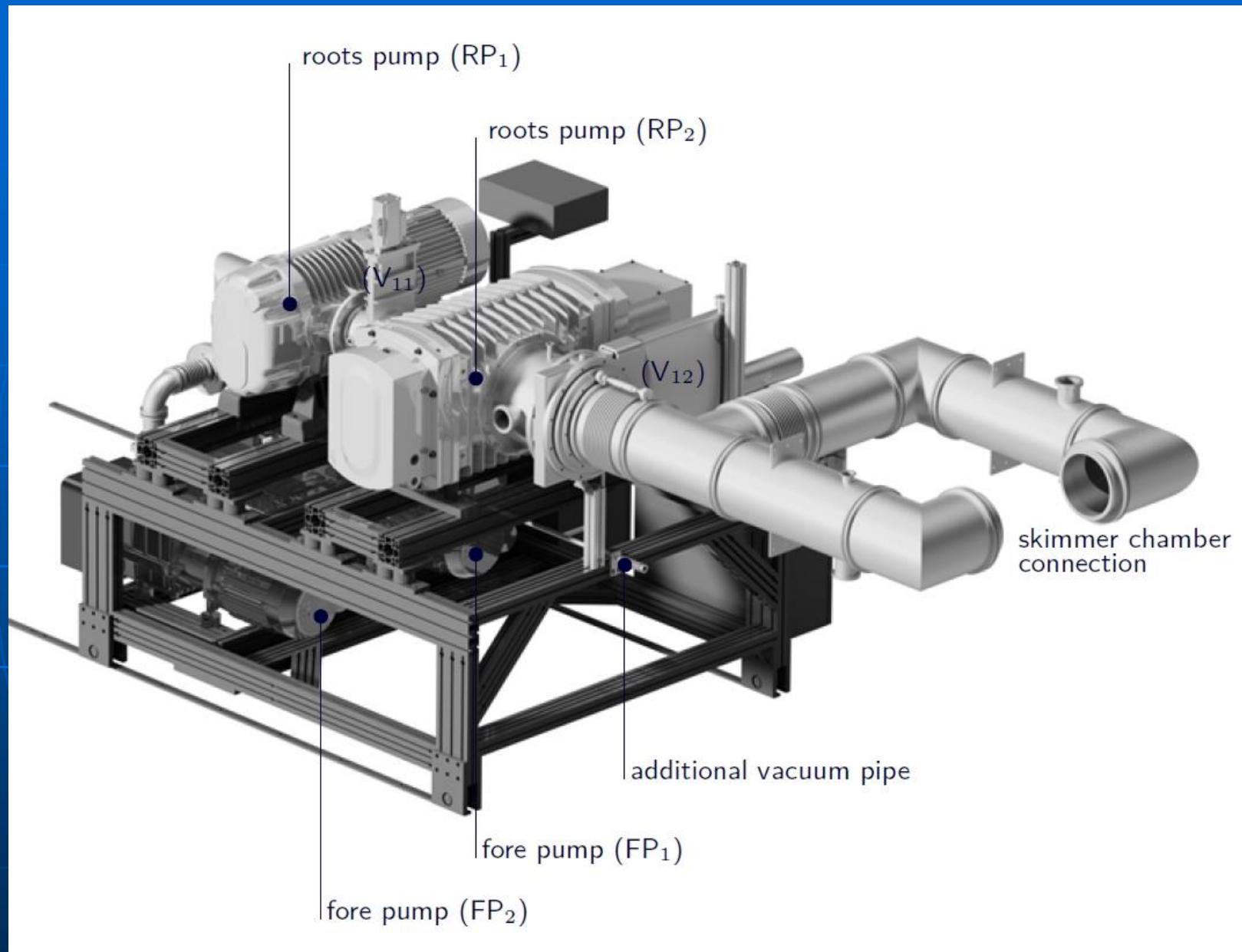
# Внешний вид прототипа мишени для PANDA

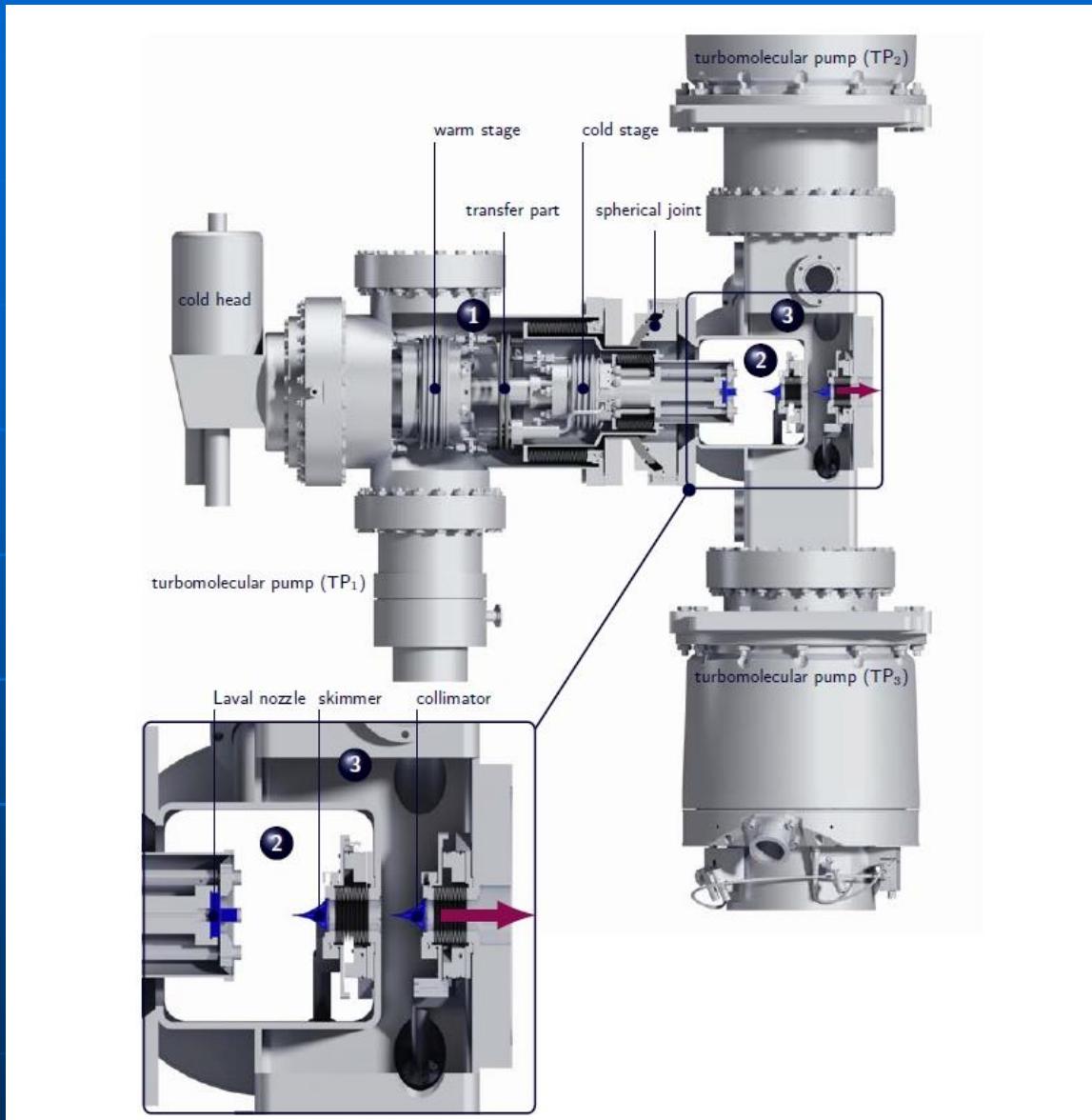




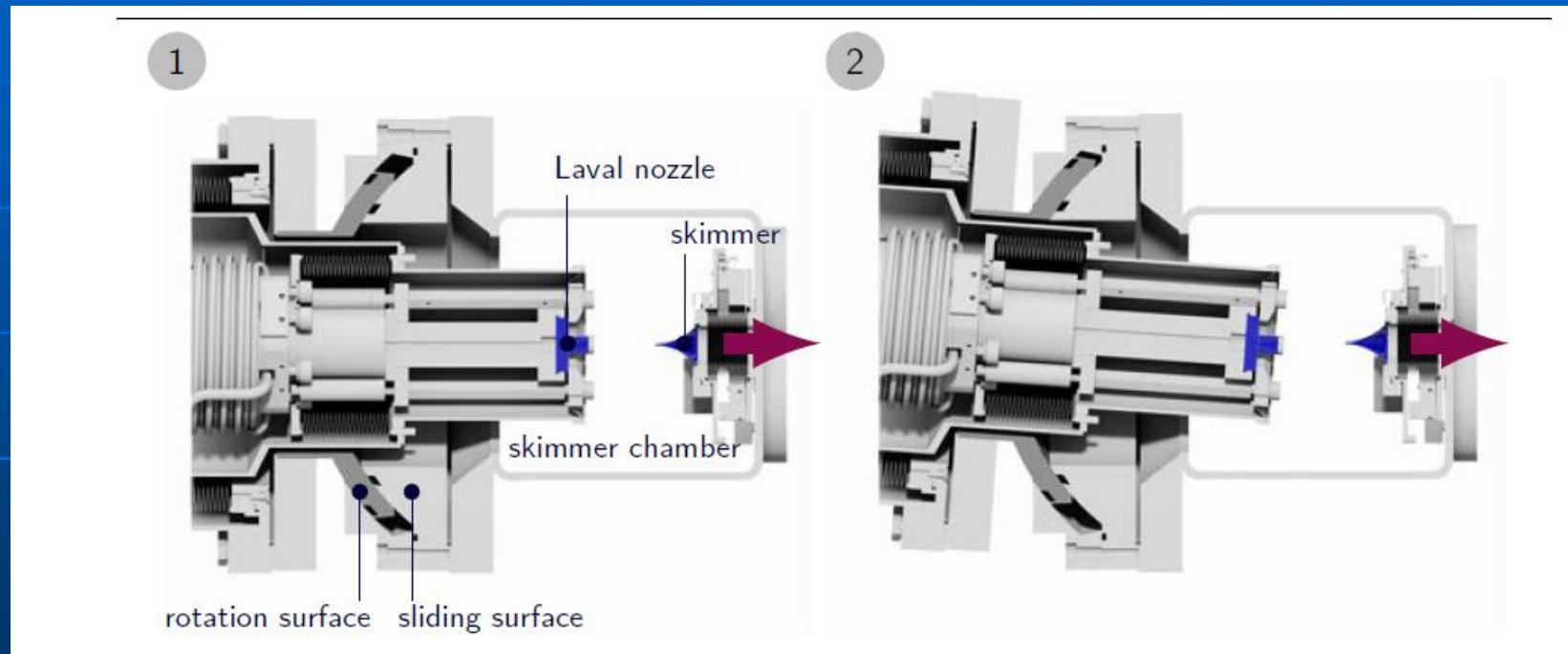
| no. | fore pump FP <sub>no.</sub><br>in m <sup>3</sup> /h | roots pump RP <sub>no.</sub><br>in m <sup>3</sup> /h | turbo pump TP <sub>no.</sub><br>in l/s |
|-----|---|--|--|
| 1   | 300   | 2000   | 360                                    |
| 2   | 300   | 7000   | 2000                             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

Давление в камере скиммера  $\sim 0.1$  мбар  
Скорость откачки камеры скиммера  
 $7000 \text{ м}^3/\text{час} \sim 2000 \text{ л/сек}$   
Расход газа  $\sim 0.2$  н.л./сек  
9 турбомолекулярных насосов  
2 мощных насоса Roots  
4 форвакумных насоса





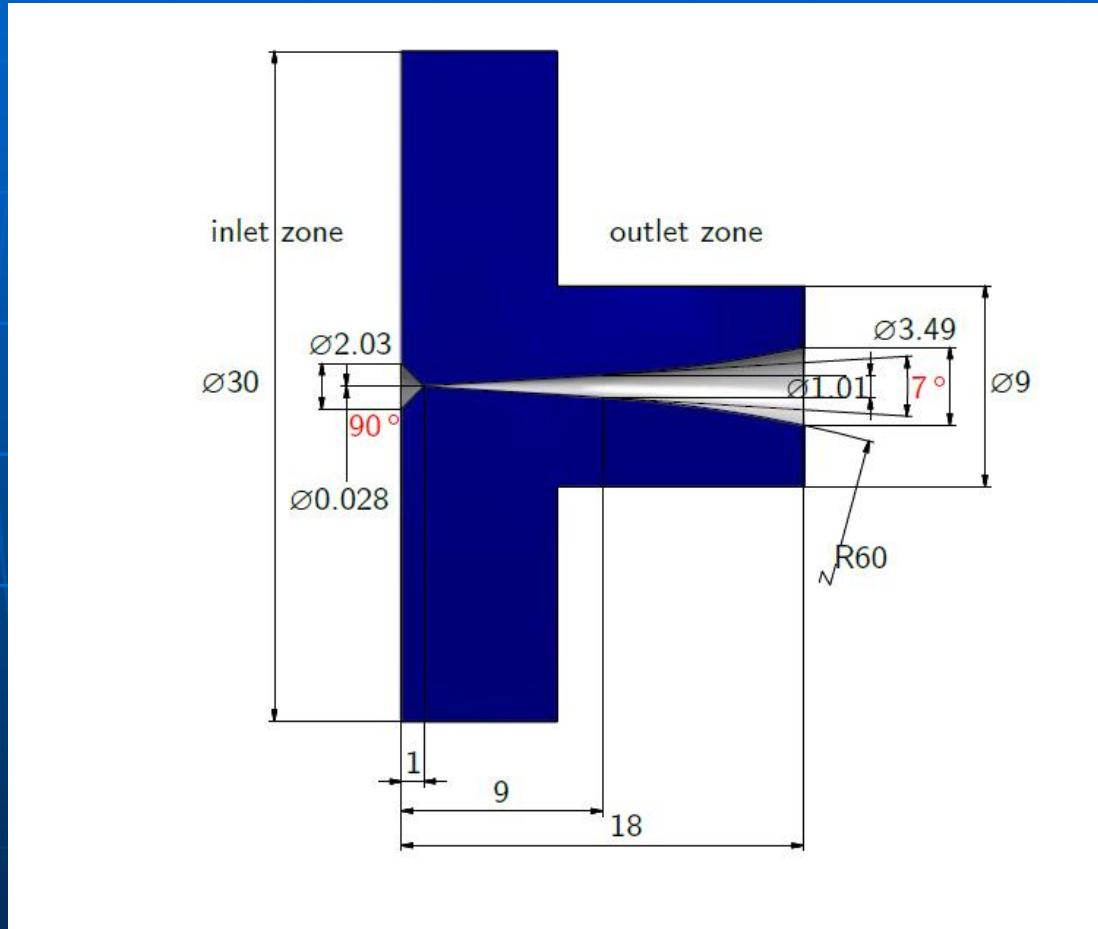
## Выставка сопла относительно скиммера

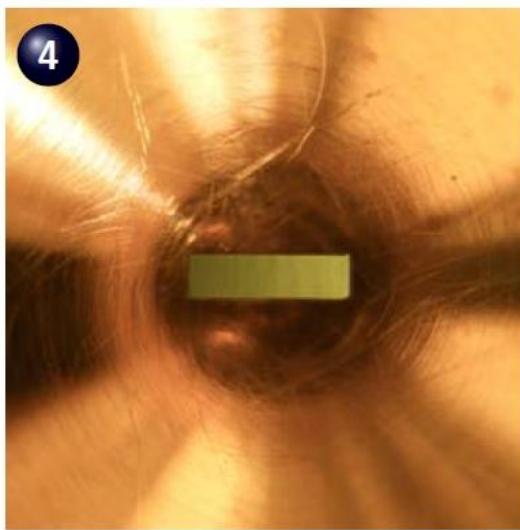
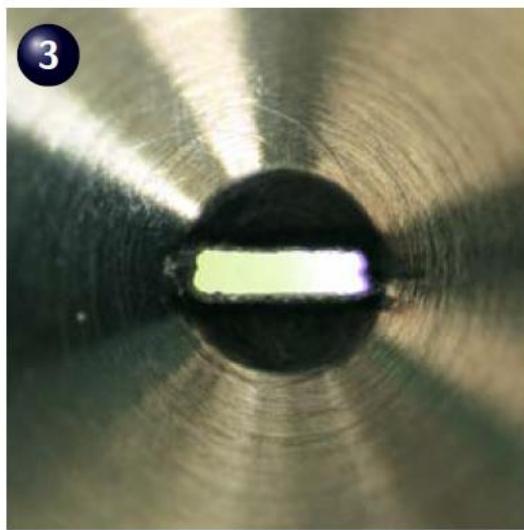
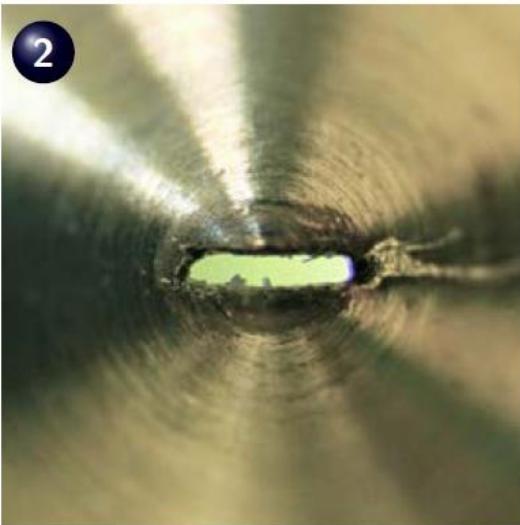
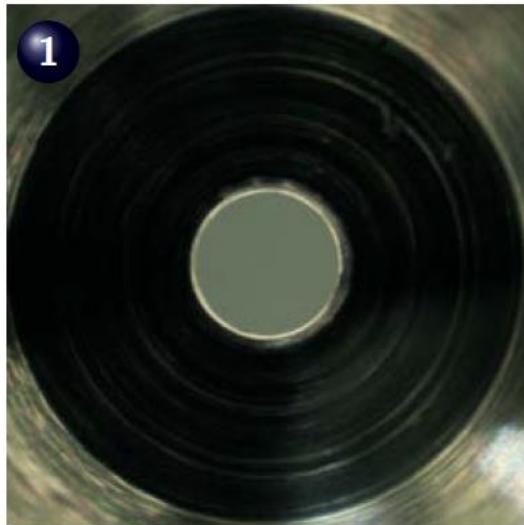


## Этапы изготовления сопла

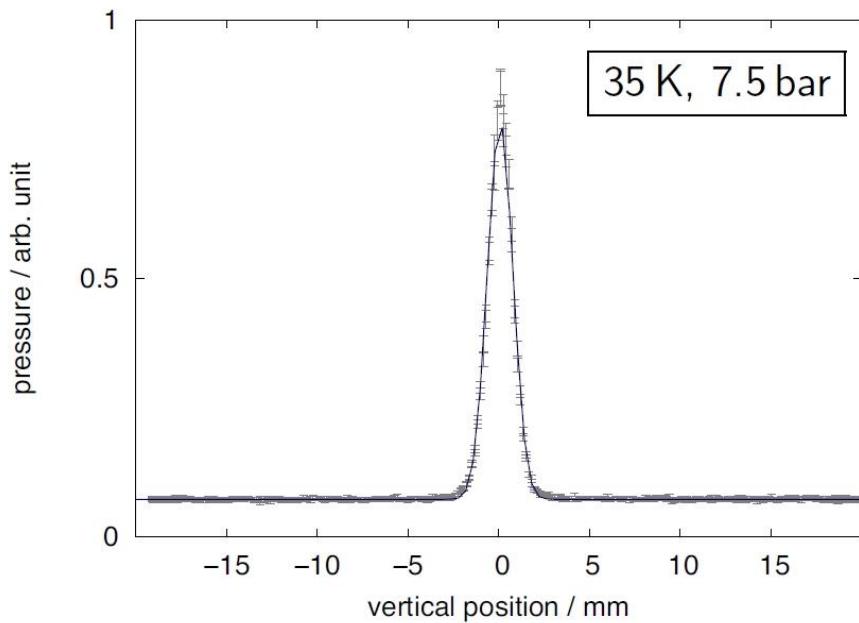
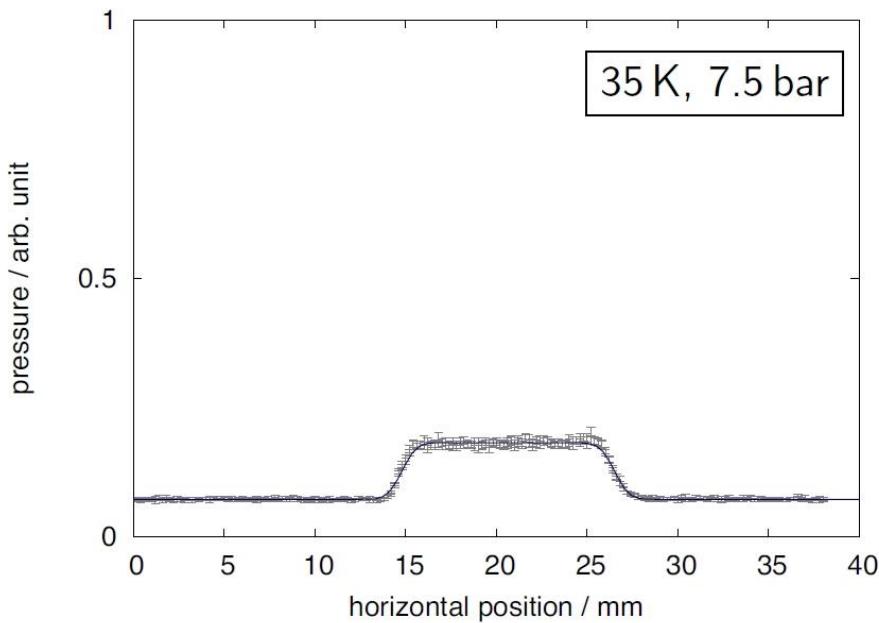


# Геометрия сверхзвукового спла



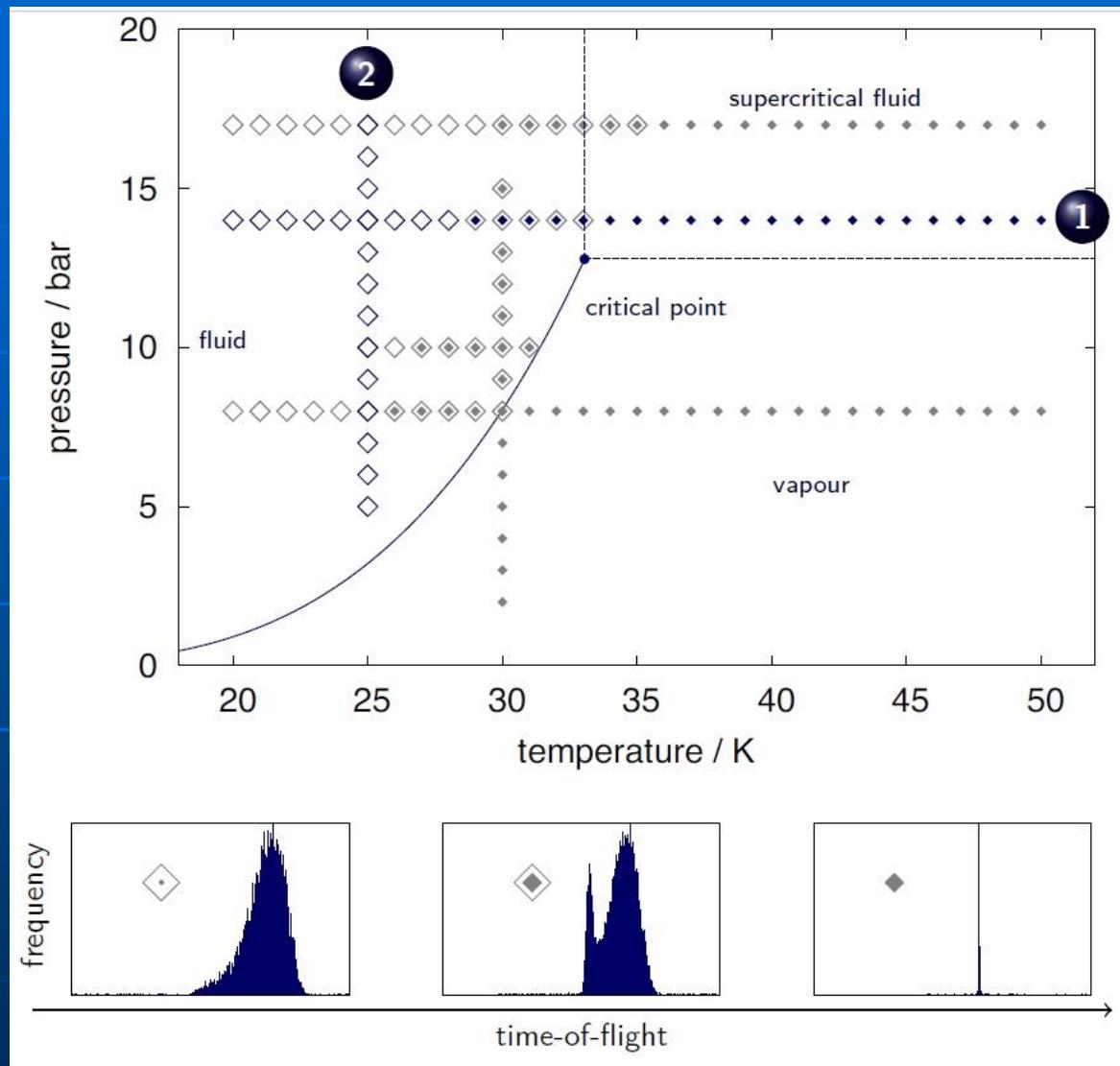


Различные виды коллиматоров: 1- цилиндрическое с диаметром отверстия  $700 \mu$ , 2 – 4 различные с прямоугольными отверстиями  $890 \times 170$ ,  $780 \times 190$ ,  $800 \times 220 \mu^2$



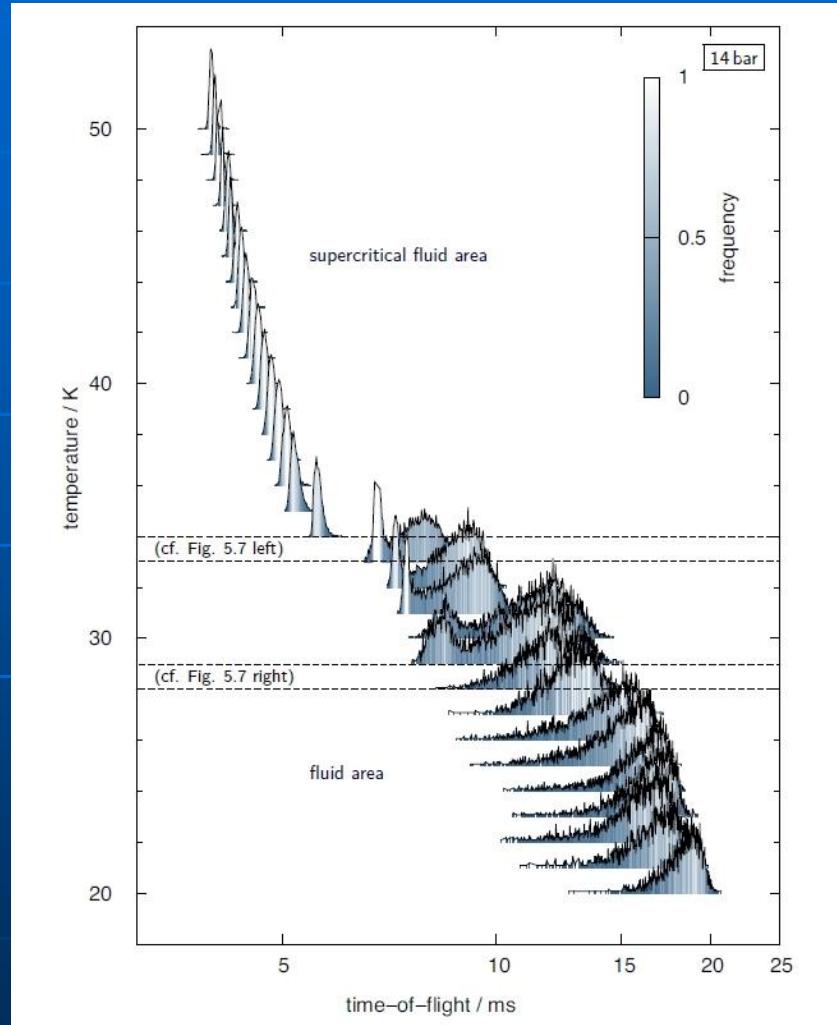
Измеренный профиль пучка при прямоугольной форме коллиматора

## Фазовая диаграмма водорода

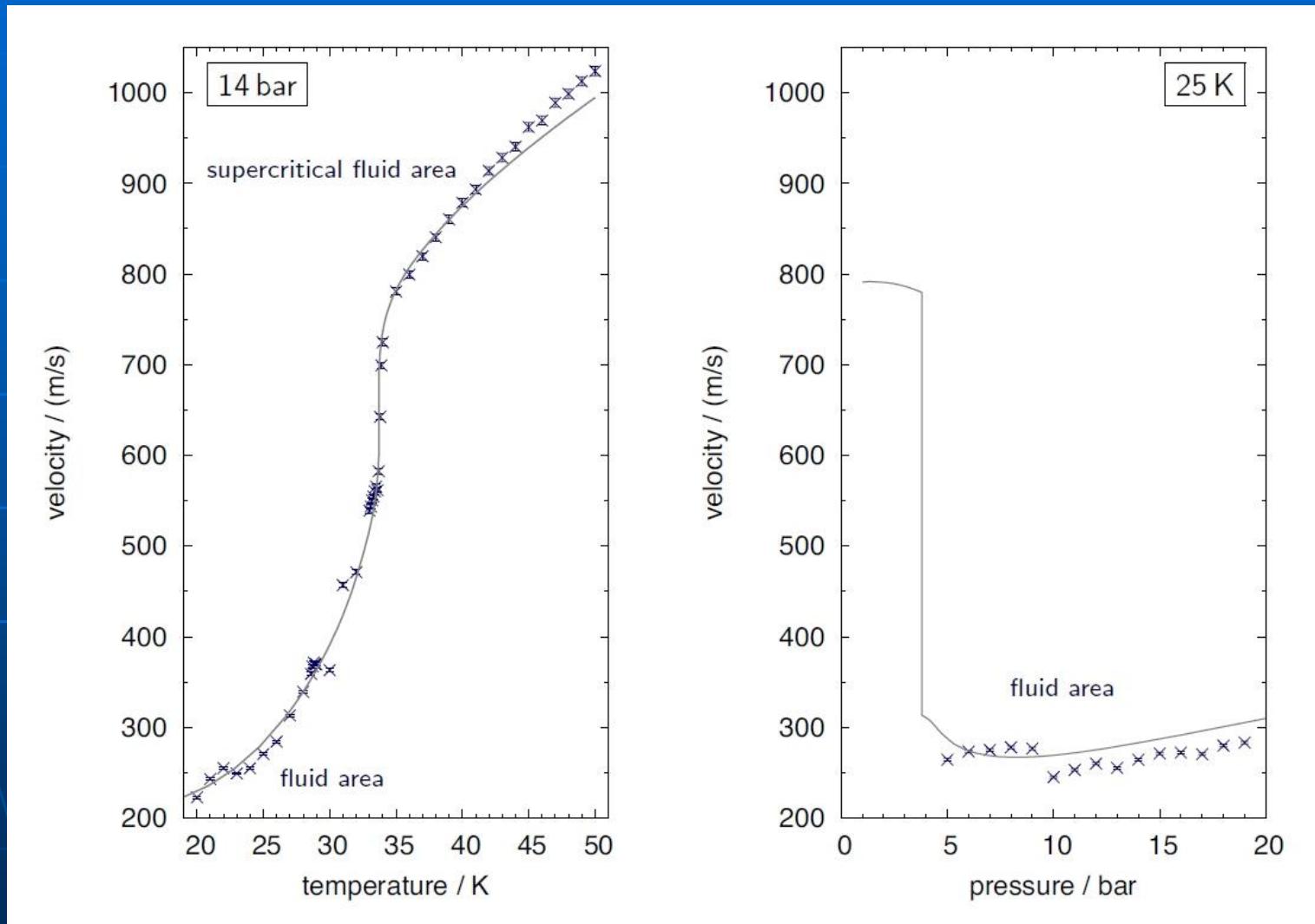


Критическая точка  
33.145 К, 12.964 бар

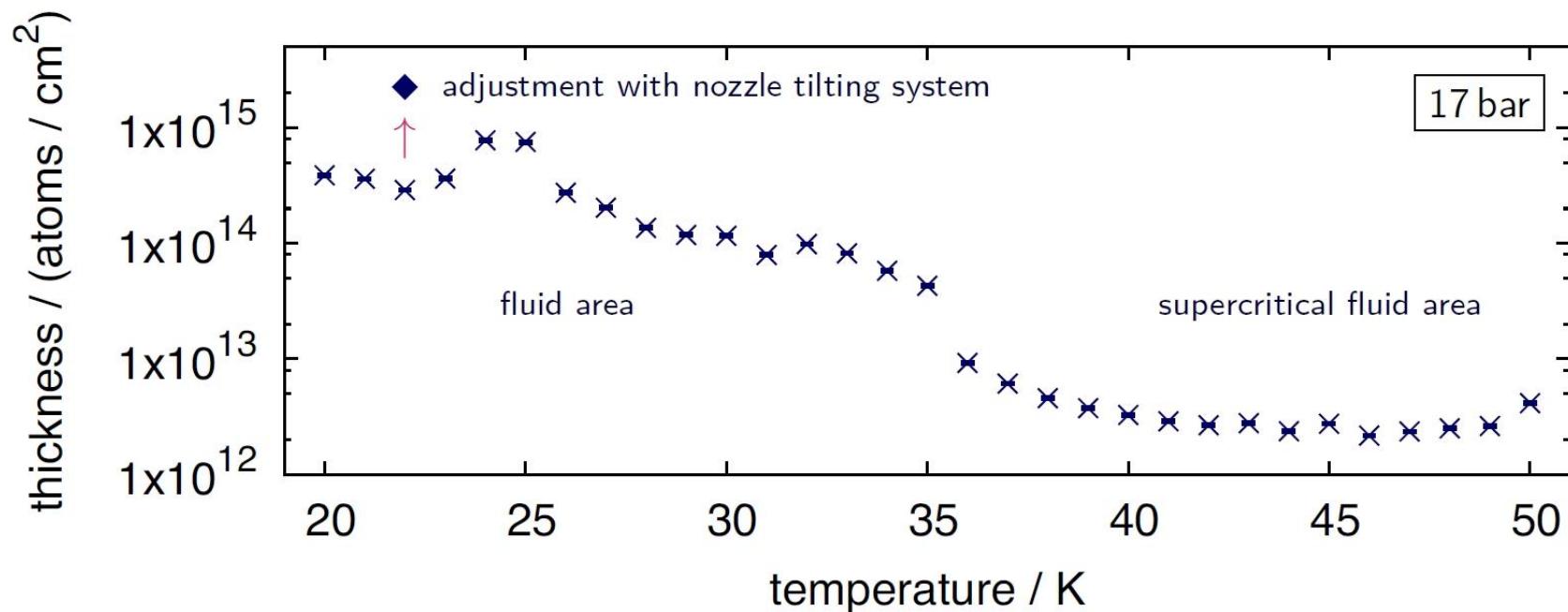
# Времяпролетный спектр струи кластеров в зависимости от температуры



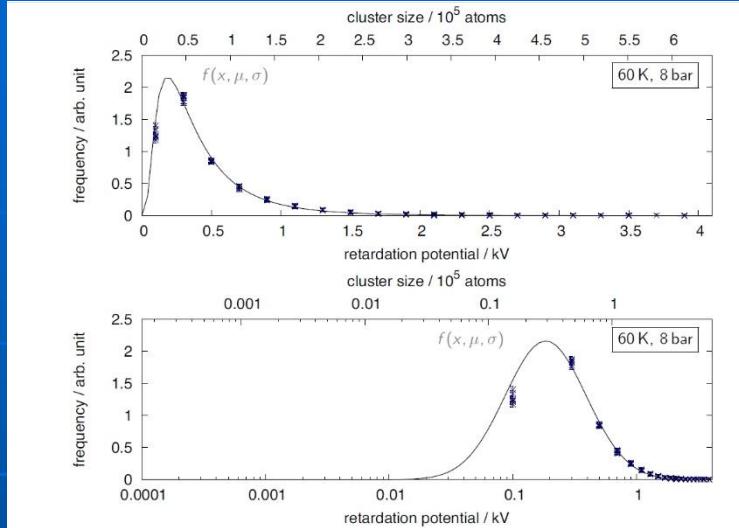
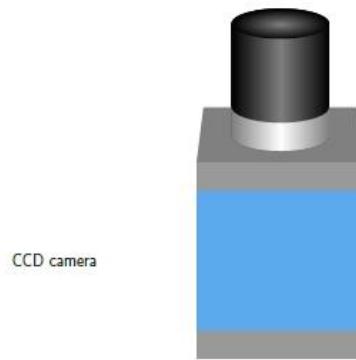
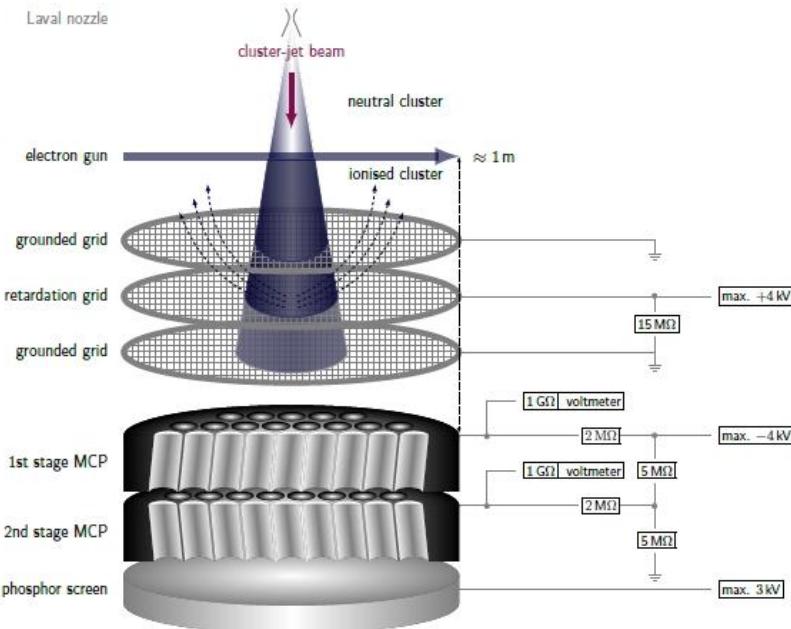
## Зависимость скорости кластеров от температуры и давления



Толщина мишени (размер  $\sim 1\text{см}$ ) в зависимости от температуры при давлении 17 бар на расстоянии 2.1м от сопла



# Определение массы кластера



$$mV^2/2 = ZU$$

## Параметр Хагены

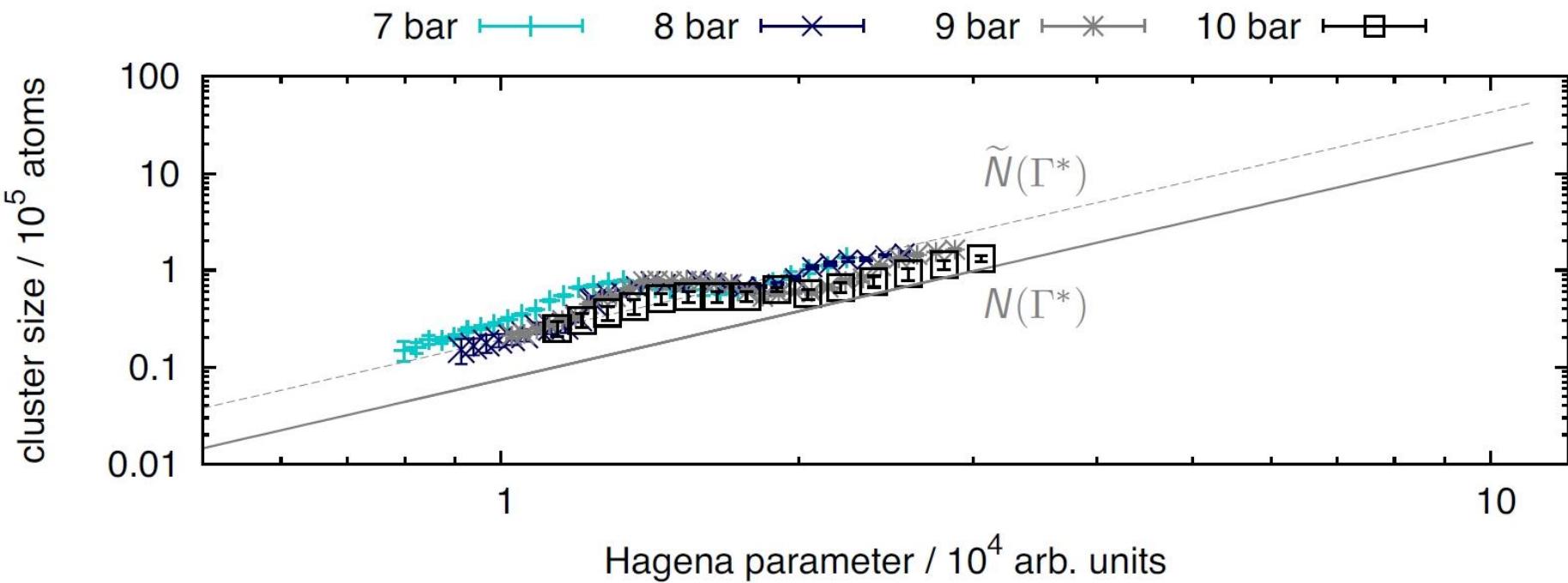
$$\Gamma^* = \frac{\hat{k} p_0 \left( \frac{0.74 d_n}{\tan \alpha_{1/2}} \right)^{0.85}}{T_0^{2.29}}$$

К - константа газа ( 184 for H<sub>2</sub> ), Т<sub>0</sub> – температура, р<sub>0</sub> – давление (мбар), d<sub>h</sub> – диаметр сопла (μ), α – раствор сопла (град)

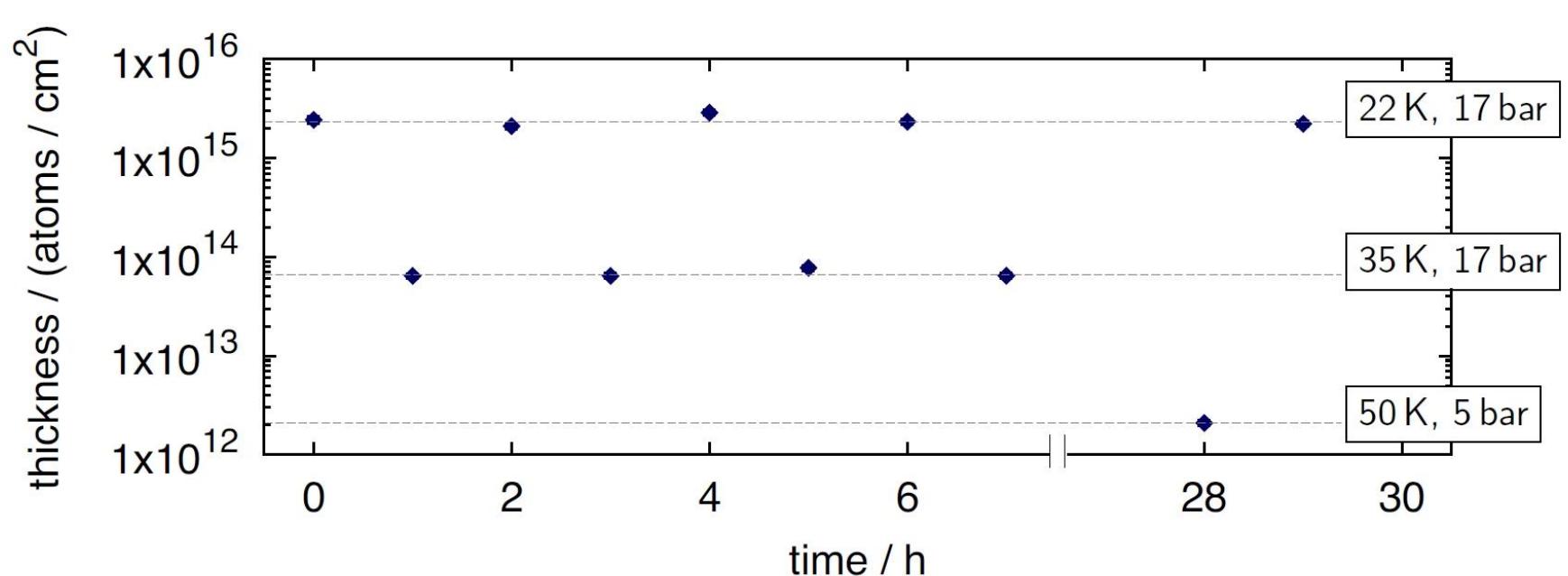
Средний размер кластера

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

# 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**

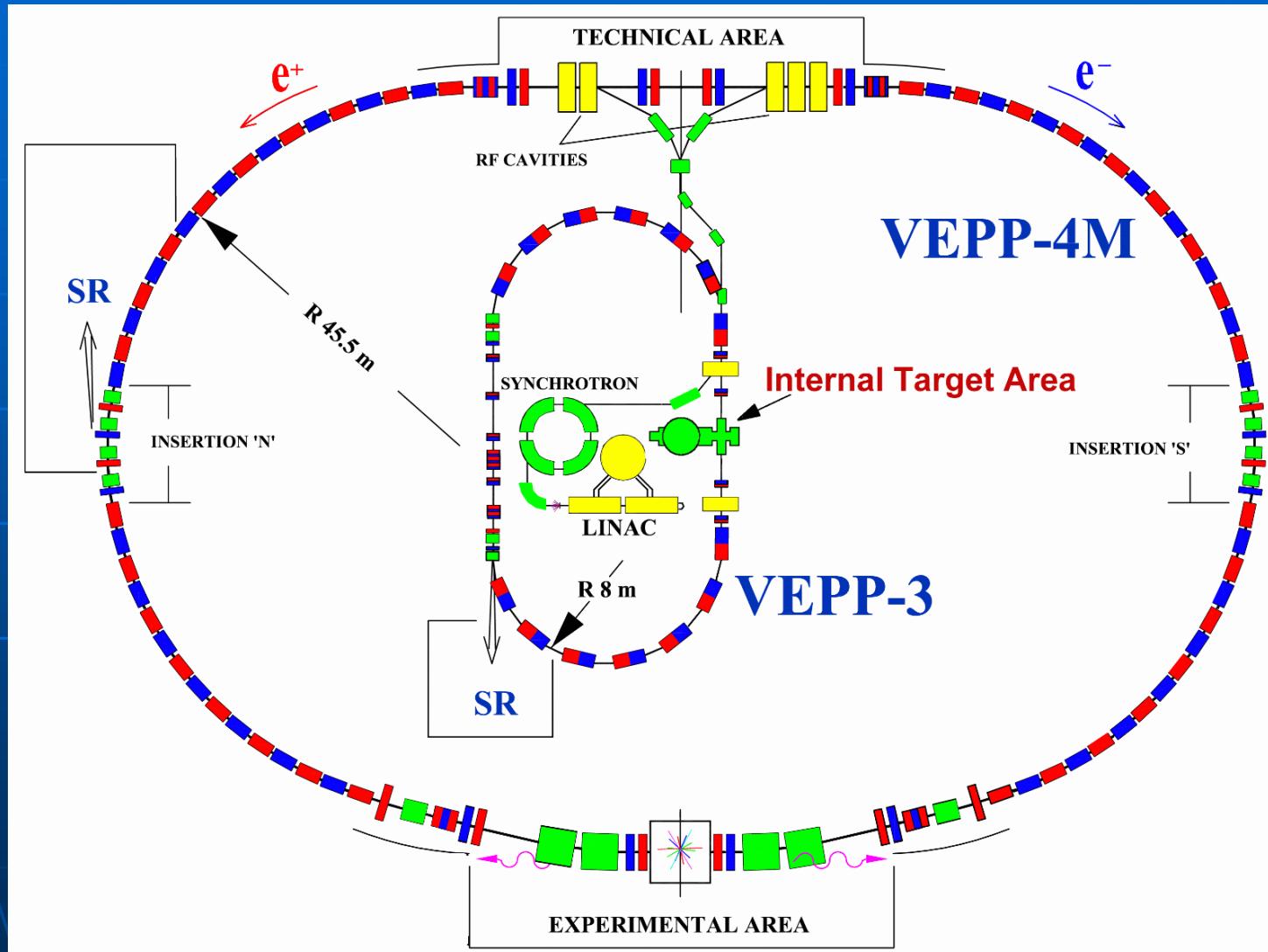
**Система очистки газа, техника безопасности - горючий газ**

**Система управления и контроля параметрами мишени**

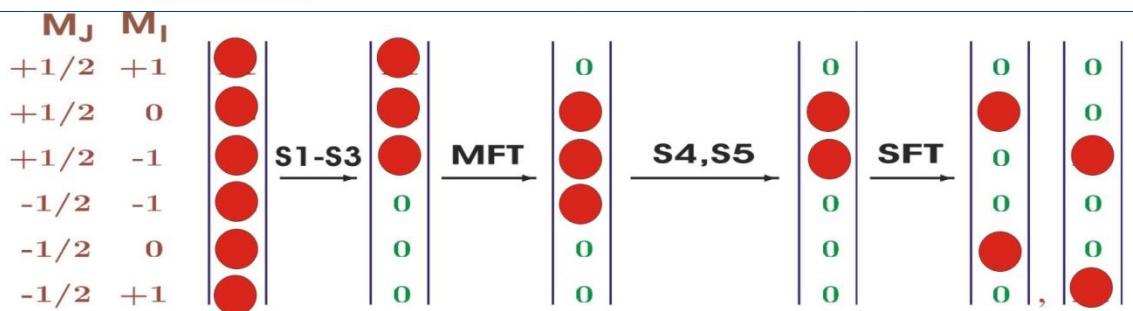
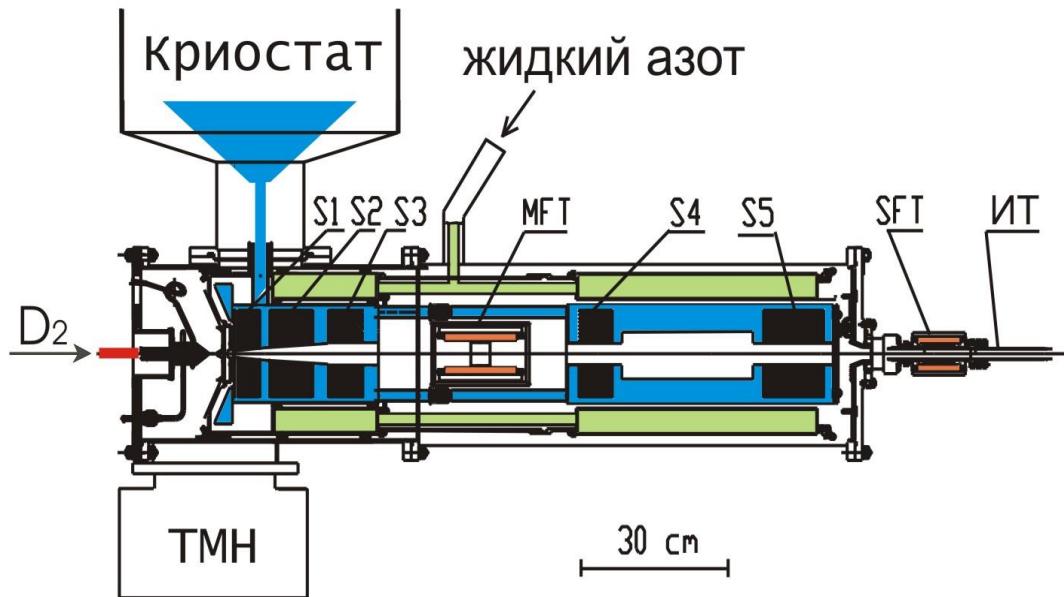
**Выбор программного обеспечения**

# Спасибо за внимание!

# Ускорительный комплекс ВЭПП-3, ВЭПП-4



# Поляризованная дейтериевая мишень, ВЭПП-3.



Тензорная поляризация  $P_{zz}=1-3n_0= -2, +1.$   
 Векторная поляризация  $P_z=n_+-n_- = 0.$

# Индикация параметров поляризованной дейtronной мишени на мониторе

