



JOINT INSTITUTE  
FOR NUCLEAR RESEARCH

ОБЪЕДИНЁННЫЙ ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

# Фрагмент-сепараторы ЛЯР: КОМБАС, АКУЛИНА-1 и АКУЛИНА-2



МЕЖДУНАРОДНАЯ ШКОЛА  
УСКОРИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ:  
ЦИКЛОТРОНЫ

Крупко Сергей Анатольевич  
Группа АКУЛИНА  
ЛЯР ОИЯИ  
[krupko@jinr.ru](mailto:krupko@jinr.ru)

25 – 30 АВГУСТА 2024





DRIBS

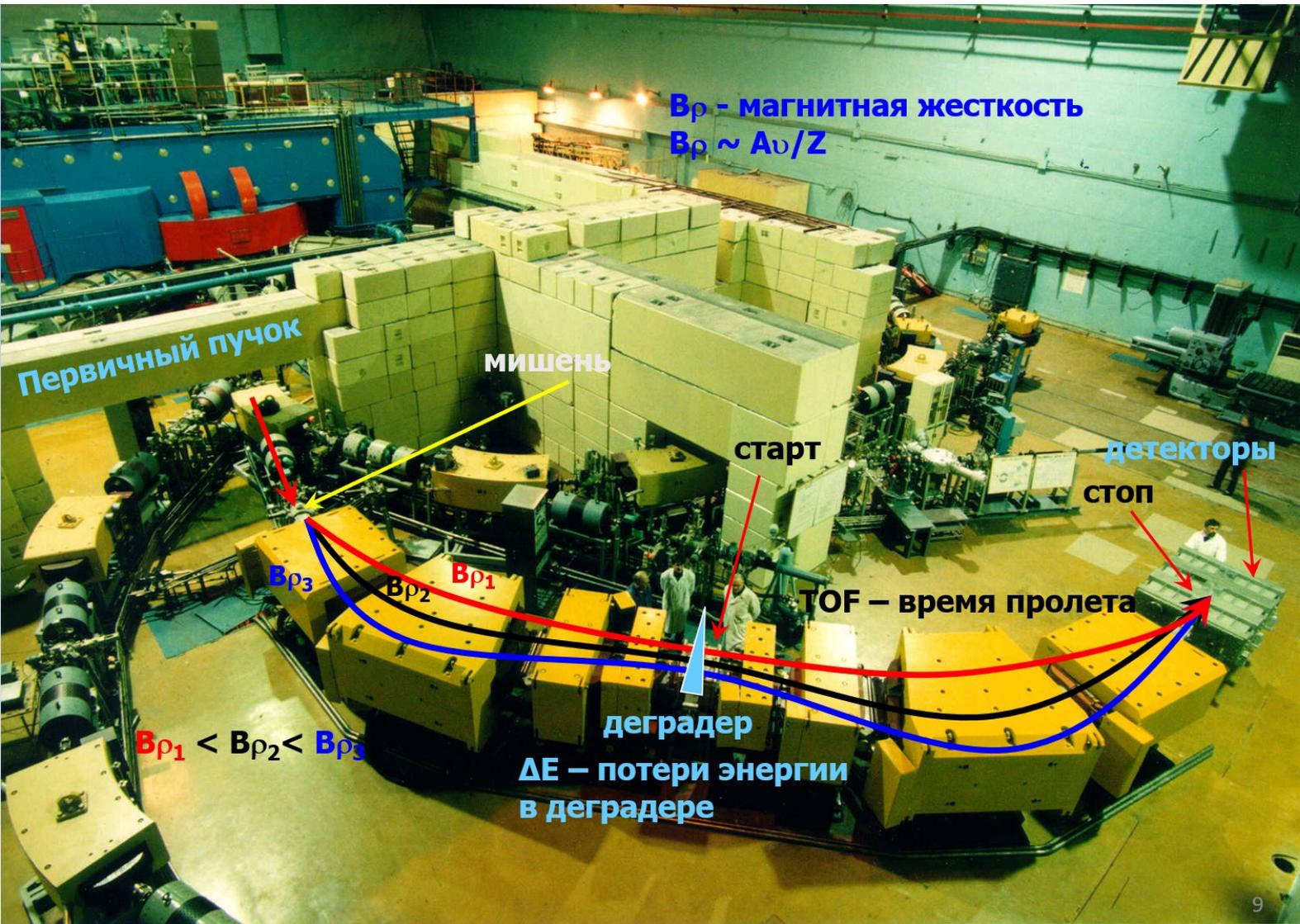
У-400М 30-50  
МэВ/нуклон  
От Li До Ar  
Модернизация  
2020-2024 гг

АКУЛИНА-2  
2014-2017 гг

АКУЛИНА-1  
1996-2000

КОМБАС  
1991-2003

# Самый короткий фрагмент-сепаратор КОМБАС (COMBAS)



Задумывался как  
поисковая машина с  
максимальным  
захватом

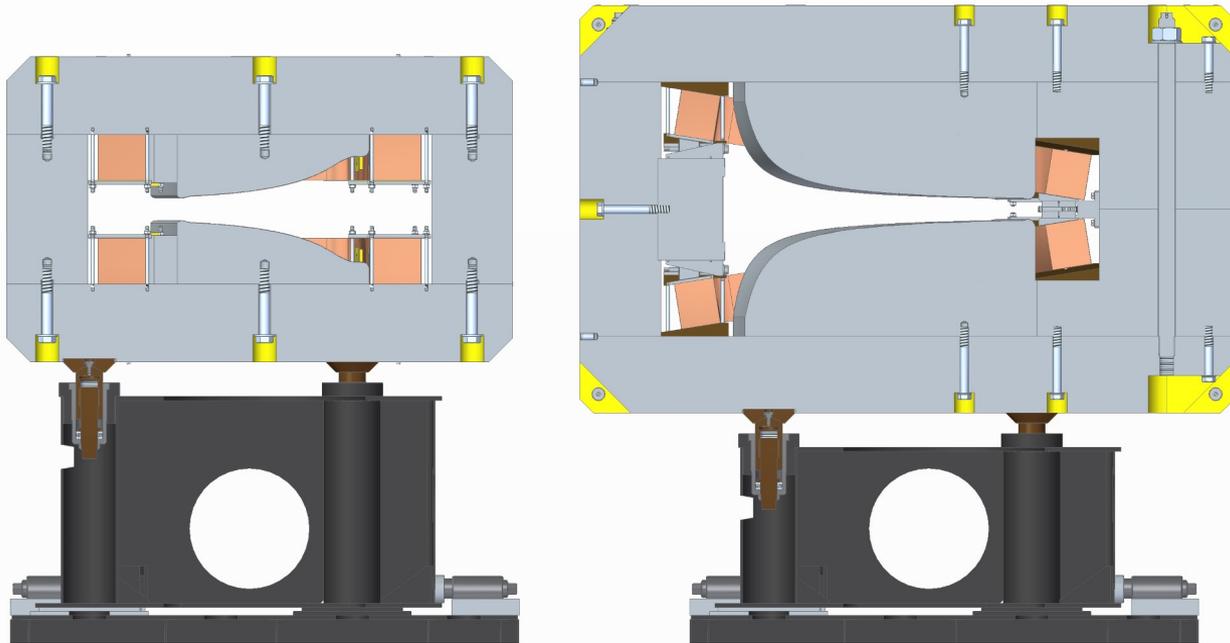
Симметричный  
ахромат с мягкой  
фокусировкой

Изготовитель:  
**НИИЭФА**  
им. Д.В. Ефремова

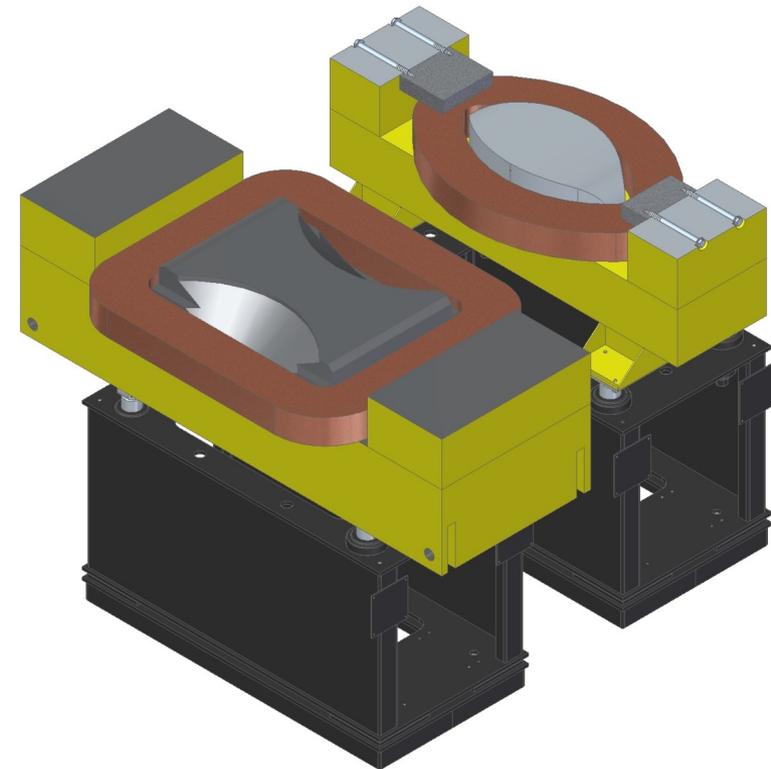
Реализация  
1991-1999  
Официальный  
запуск 2003

# Магнитная система COMBAS имеет только дипольные магниты

Магниты M1 и M2

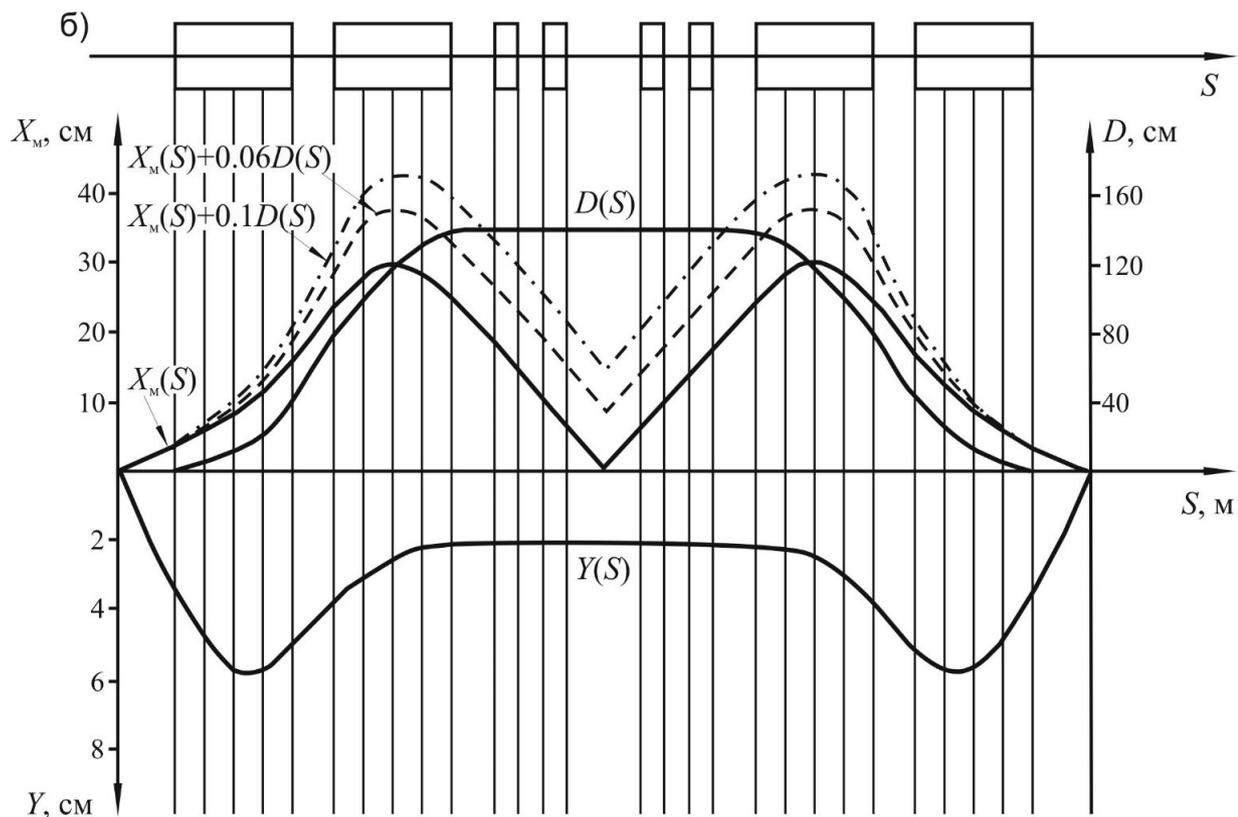
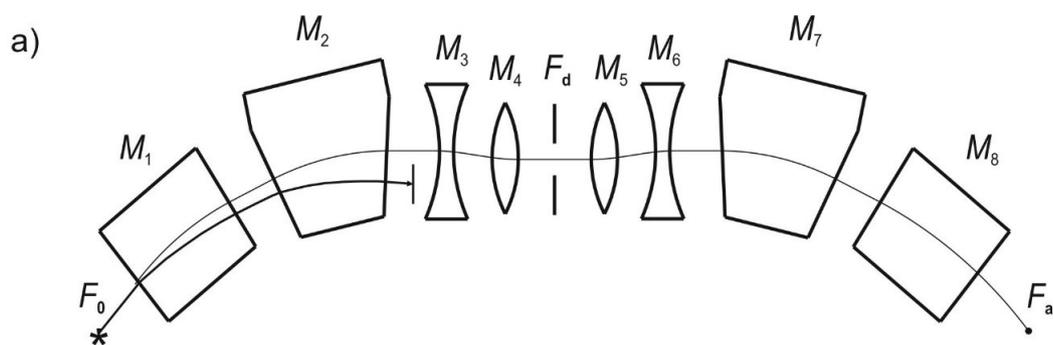


Магниты M3 и M4



# Ионно-оптическая схема COMBAS

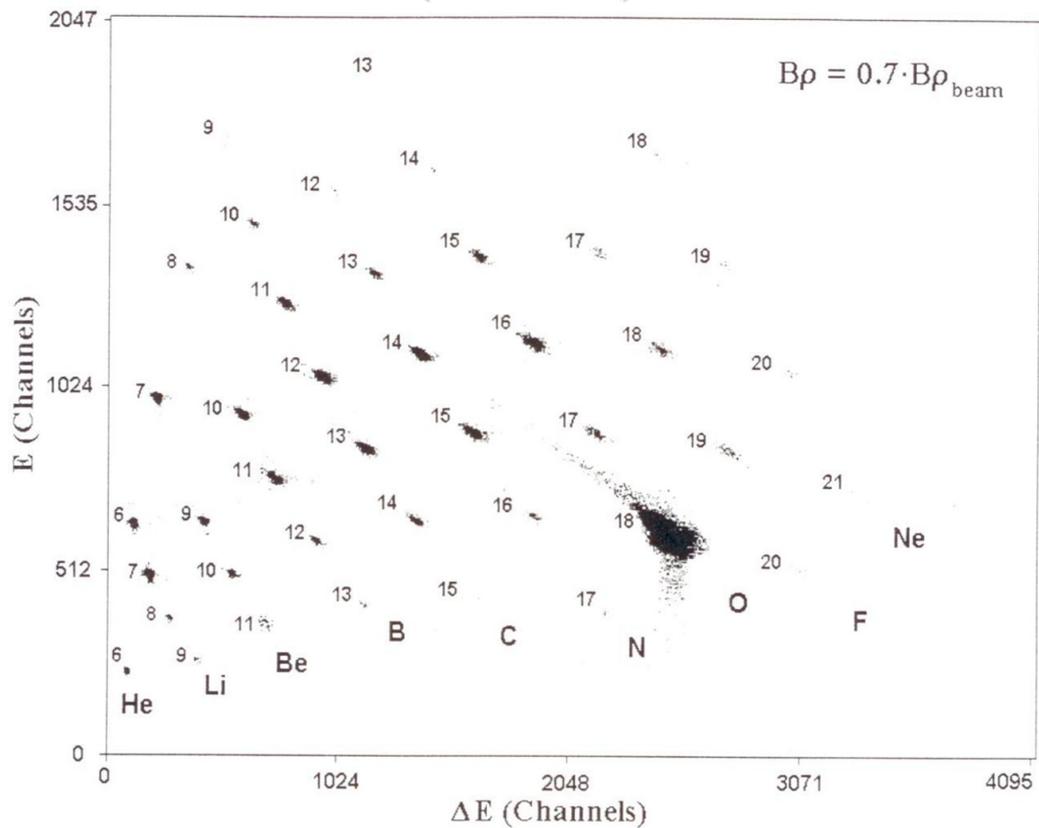
**Нет поглотителя  
первичного пучка →  
ограничение по  
ИНТЕНСИВНОСТИ**



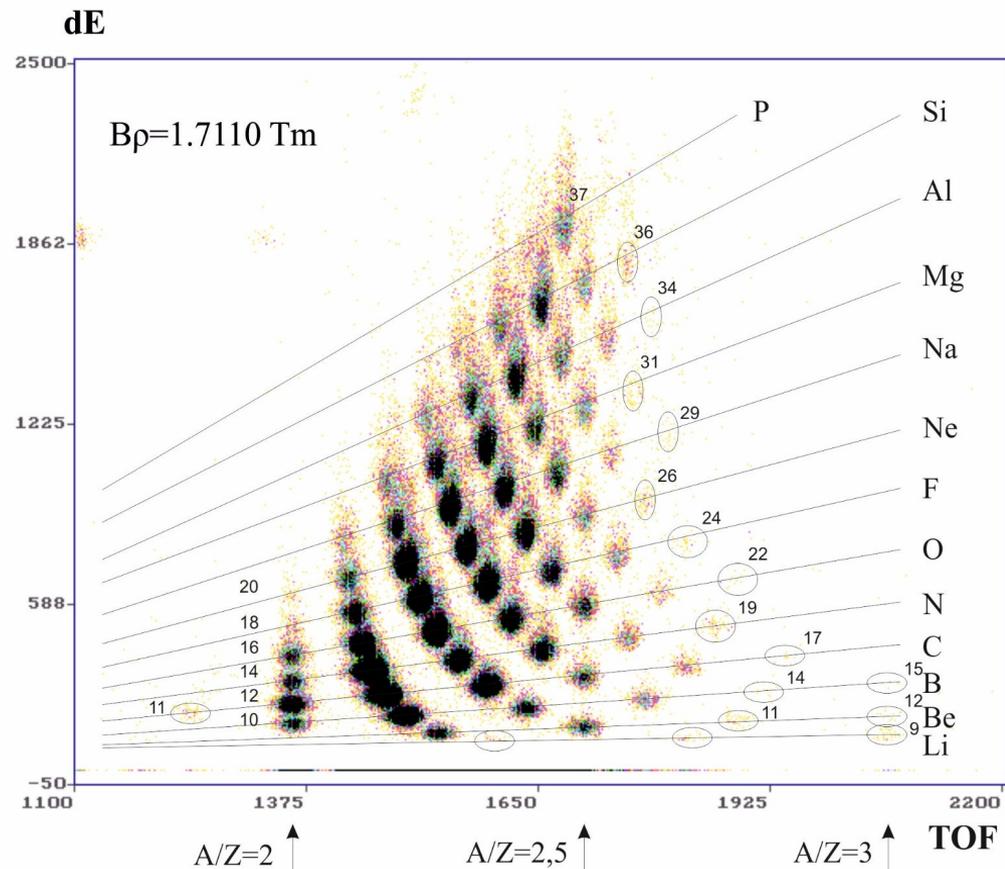
	ACC / ACC-2 FLNR	COMBAS FLNR
• $\Delta\Omega$ , msr	0.9 / 5.8	6.4
• $\Delta p/p$ , %	□ 2.5 / □ 3.0	□ 6.0 (□ 10.0)
• $R_p/\Delta p$	1000 / 2000	4360
• $V_p$ , Tm	3.2 / 3.9	4.5
• Length, m	21 / 38	14.5

# Изучение механизмов ядерных реакции в области энергии Ферми

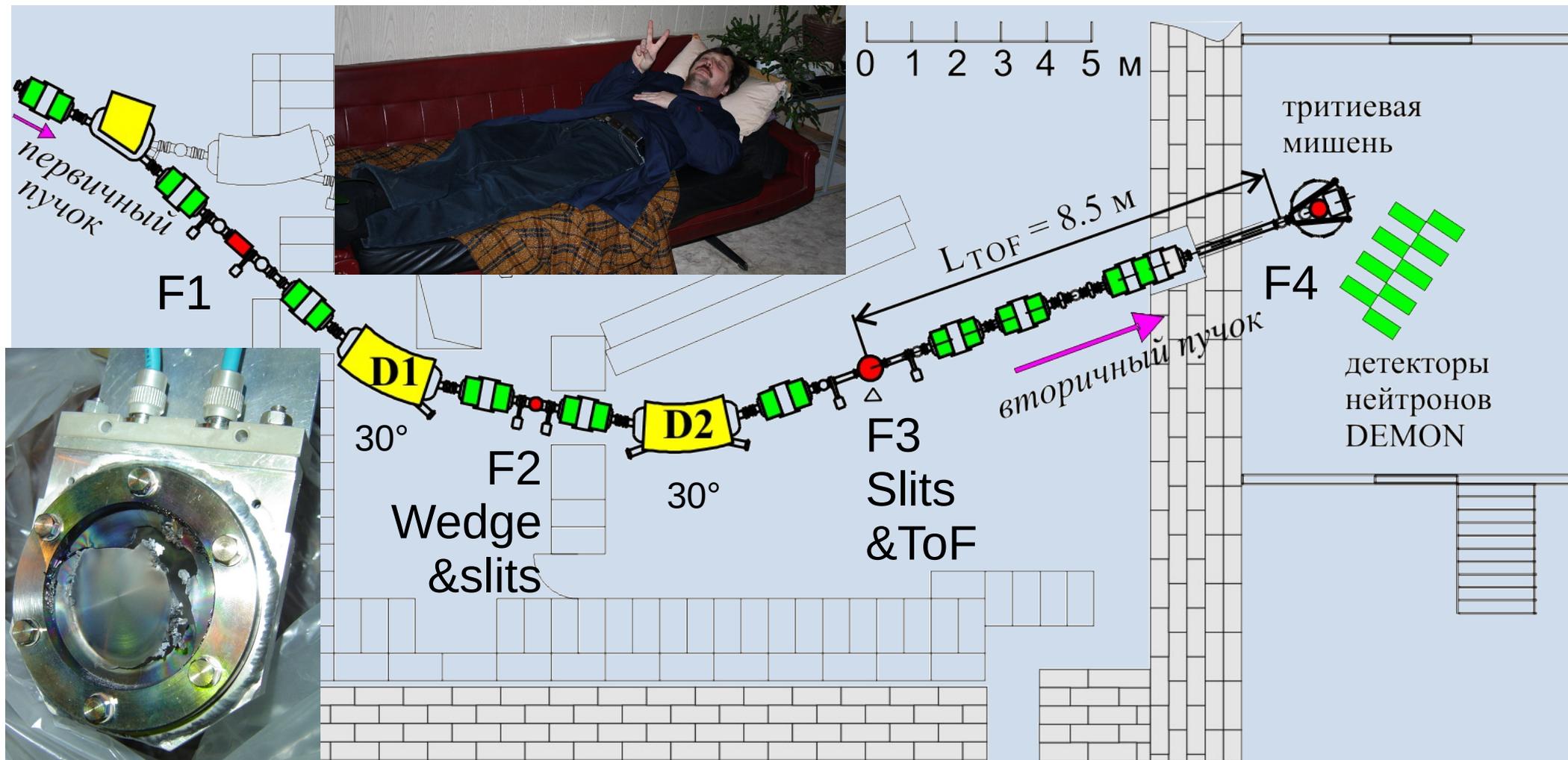
$^{18}\text{O}(35\text{A МэВ}) + ^9\text{Be}$



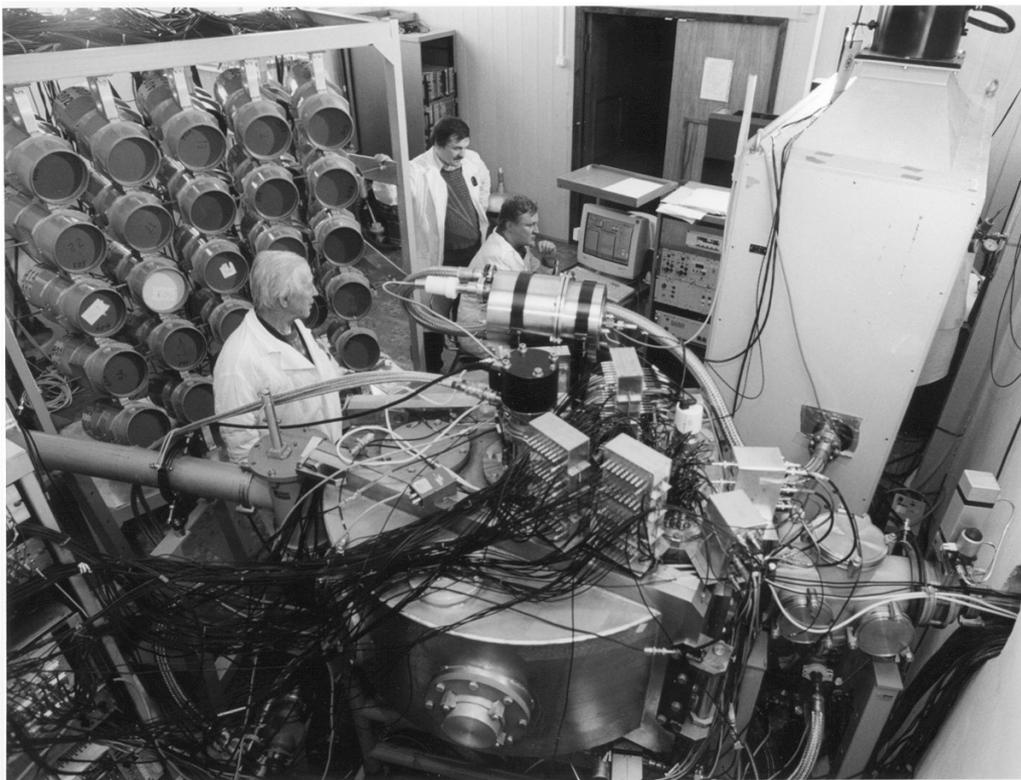
Реакция  $^{40}\text{Ar}(35.25\text{A МэВ}) + ^9\text{Be}(173 \text{ мг/см}^2)$



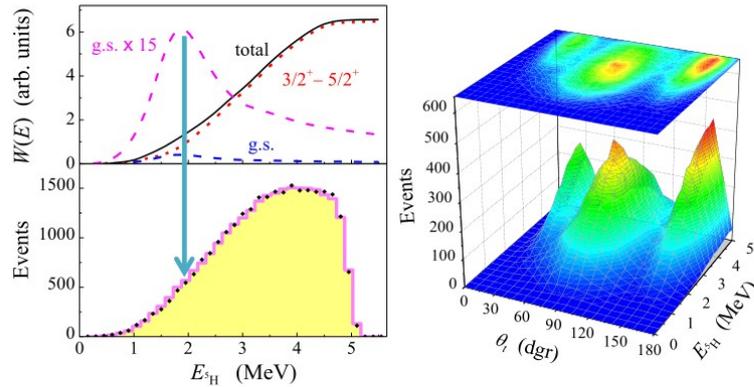
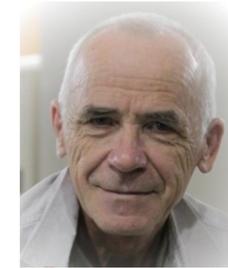
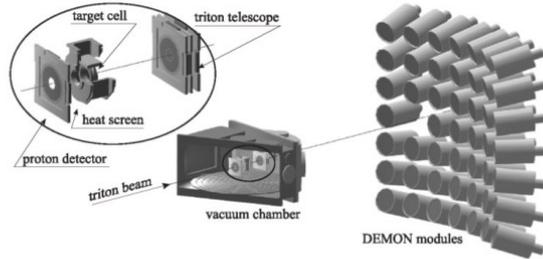
# Фрагмент-сепаратор АКУЛИНА (ACCU LINNA-1) 1996 г. постройка, 2000 вывод пучка из зала



# Наполнение экспериментальной зоны: нейтронная стенка, тритиевая мишень (единственная в мире), телескопы заряженных частиц



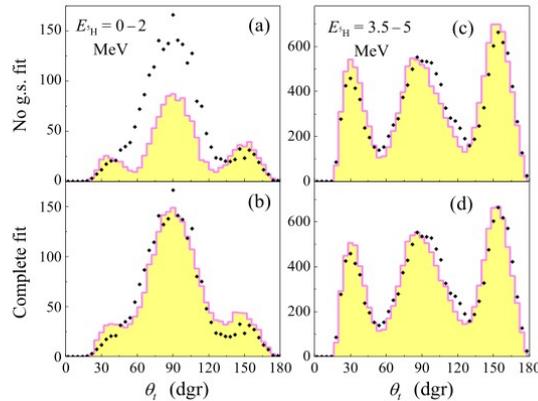
# Example 1: ${}^5\text{H}$ studied in the ${}^3\text{H}(t,p){}^5\text{H}$ reaction



A.A. Korshennikov,  
2001,  ${}^6\text{He}(p,2p){}^5\text{H}$   
Discovery of  ${}^5\text{H}$  at FLNR

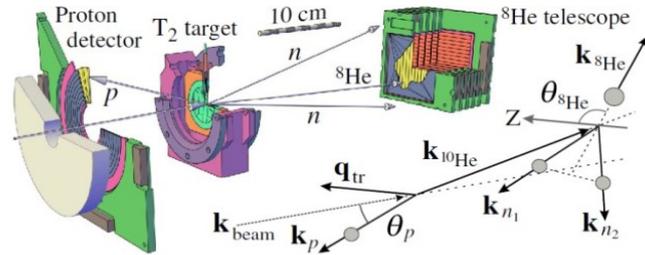
M.S. Golovkov, 2004,  
Pioneering correlation  
studies

A.A. Korshennikov et al., PRL **87** (2001) 92501.  
M.S. Golovkov et al., PLB **566** (2003) 70.  
M.S. Golovkov et al., PRL **93** (2004) 262501.  
S.V. Stepantsov et al., NPA **738** (2004) 436.  
M.S. Golovkov et al., PRC **72** (2005) 064612.



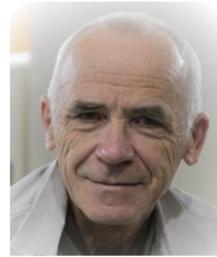
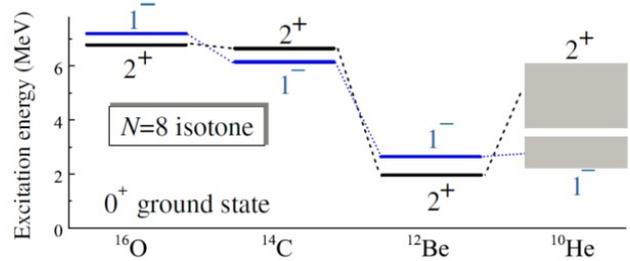
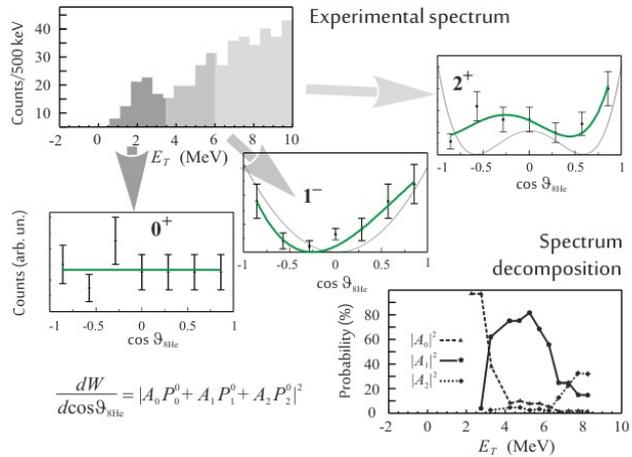
- Poor population of ground state. However, correlations provide enough selectivity: quantum amplification
- ${}^5\text{H}$  ground state position is finally established; the excited state is established as  $3/2^+ - 5/2^+$  degenerate mixture

# Example 2: $^{10}\text{He}$ studied in the $^8\text{He}(t,p)^{10}\text{He}$ reaction



**“Conundrum nuclei” second double magic in nuclide chart**

**Discovered by Korshennikov et al. in 1994 in RIKEN giving  $E_T=1.2$  MeV**



**M.S. Golovkov et al., PLB 672 (2009) 22**  
**S.I. Sidorchuk et al., PRL 108 (2012) 202502**

➤ Three-body correlations were studied in  $^5\text{H}$  basing on outstanding statistics. Can be something useful done with really exotic systems and limited statistics?

**New ground state energy for  $^{10}\text{He}$ :  $E_T=2.0-2.5$  MeV**

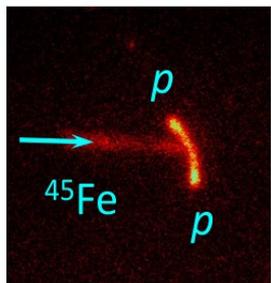
**Shell structure breakdown in  $^{10}\text{He}$**

# Другие режимы работы, пониженная интенсивность, чоппер

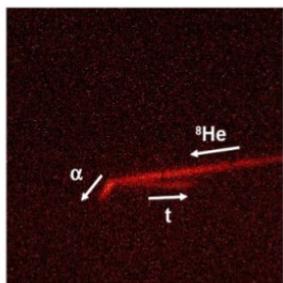
## Competitive light nuclei RIB program at FLNR.

### Specific equipment development

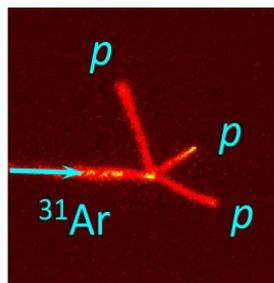
Warsaw OTPC (optical time-projection chamber)



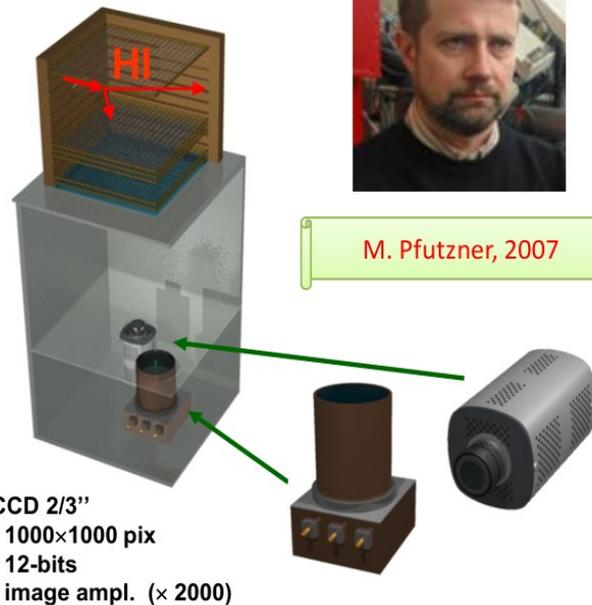
MSU 2007:  $^{45}\text{Fe}$ ,  
2p-radioactivity



ACCULINNA 2011:  
 $^8\text{He}$ ,  $\beta$ -delayed  $\alpha$ -t-n

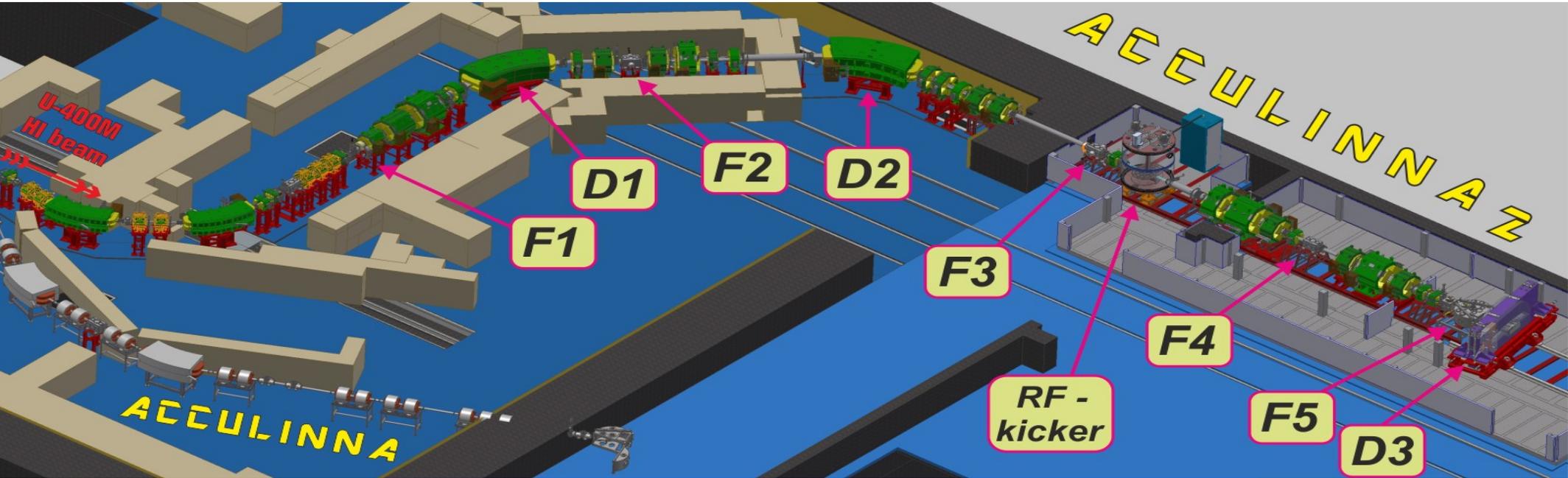


GSI 2012: S388,  $^{31}\text{Ar}$ ,  
 $\beta$ -delayed 3p



- Оптическая время-проекционная камера
- Установка Мульти на Акулина-1
- Измерение радиационной стойкости детекторов

# Устройство фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2



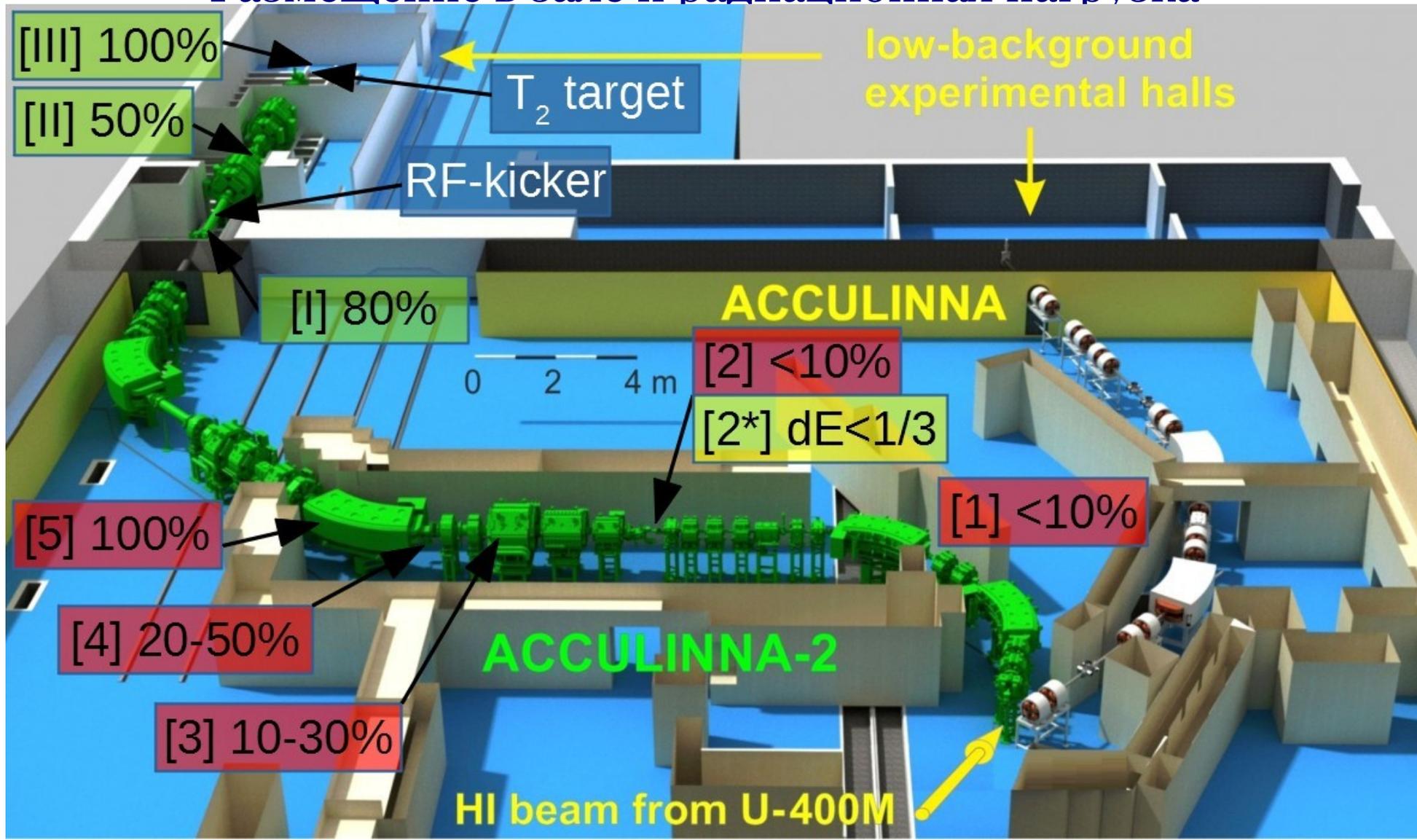
## Преимущества АКУЛИНЫ-2 перед АКУЛИНОЙ-1:

- Угловой захват  $\Delta\Omega$  0.9 → 5.8 msr
- Импульсный захват  $\delta p$  2.5 → 6 %
- Диполи 30° → 45°
- Времяпролетная база 8 m → 12.5 m
- Мультипольная оптика
- RF-kicker

До 7 кВт мощности пучка

- RIV интенсивность  $A_{acc2}/A_{acc} > 20$ 
  - Выше очистка
  - Новое качество экспериментов

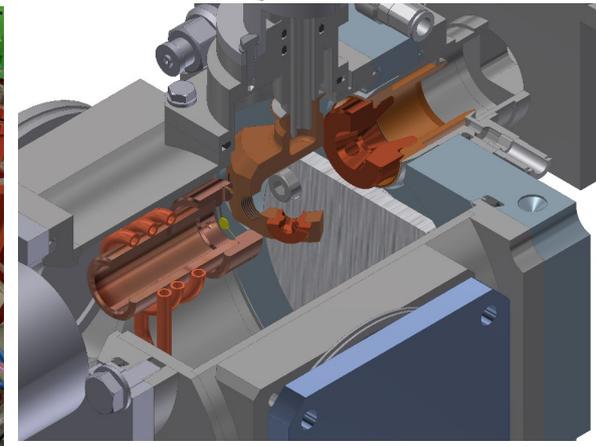
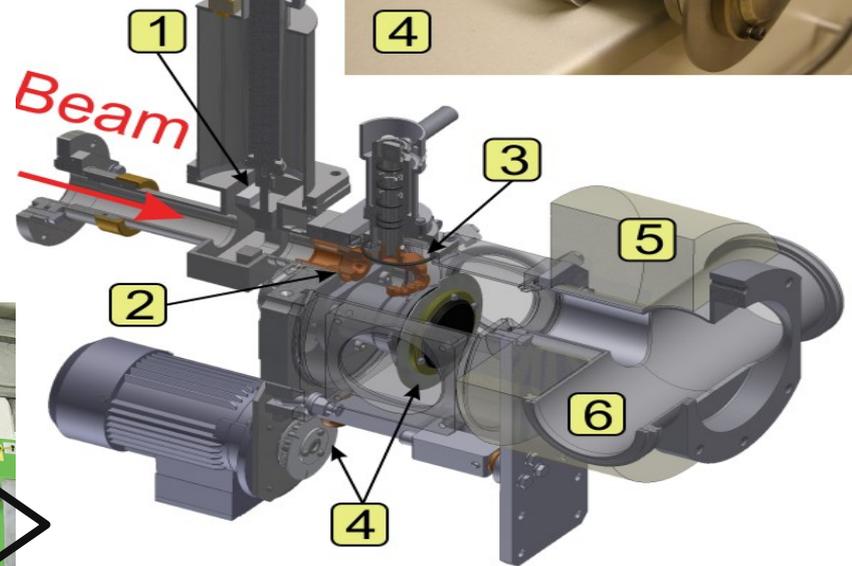
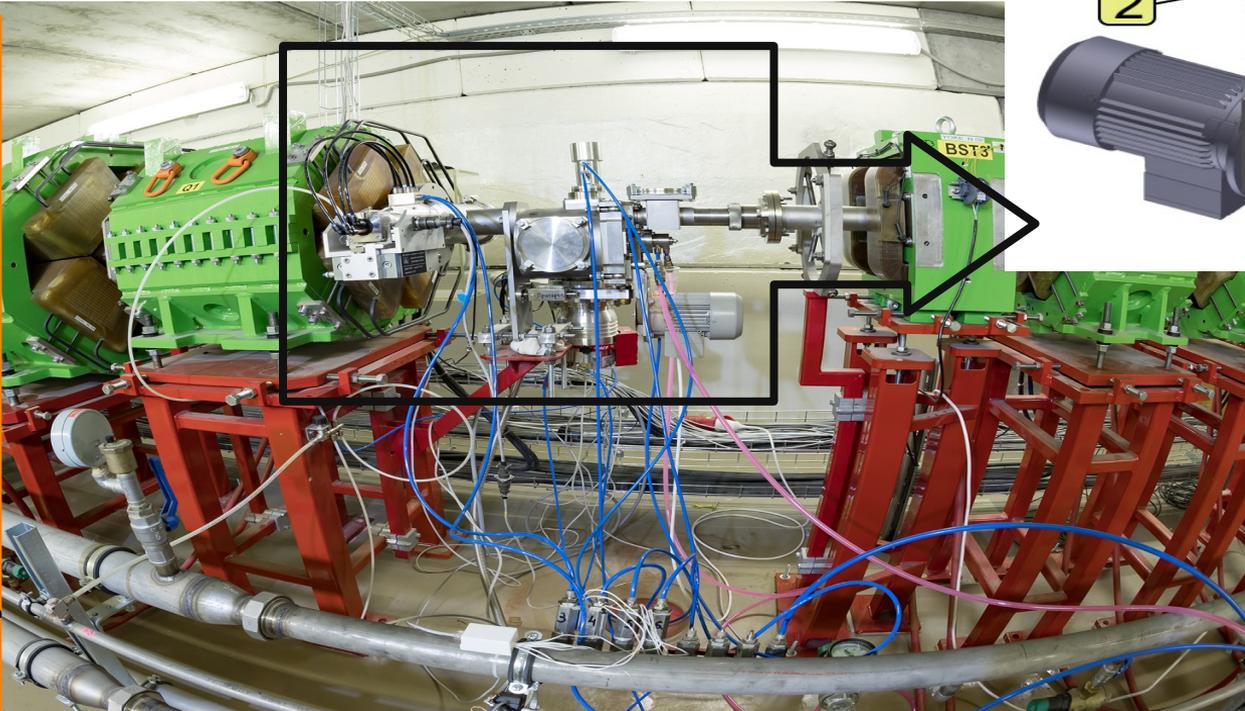
# Размещение в зале и радиационная нагрузка



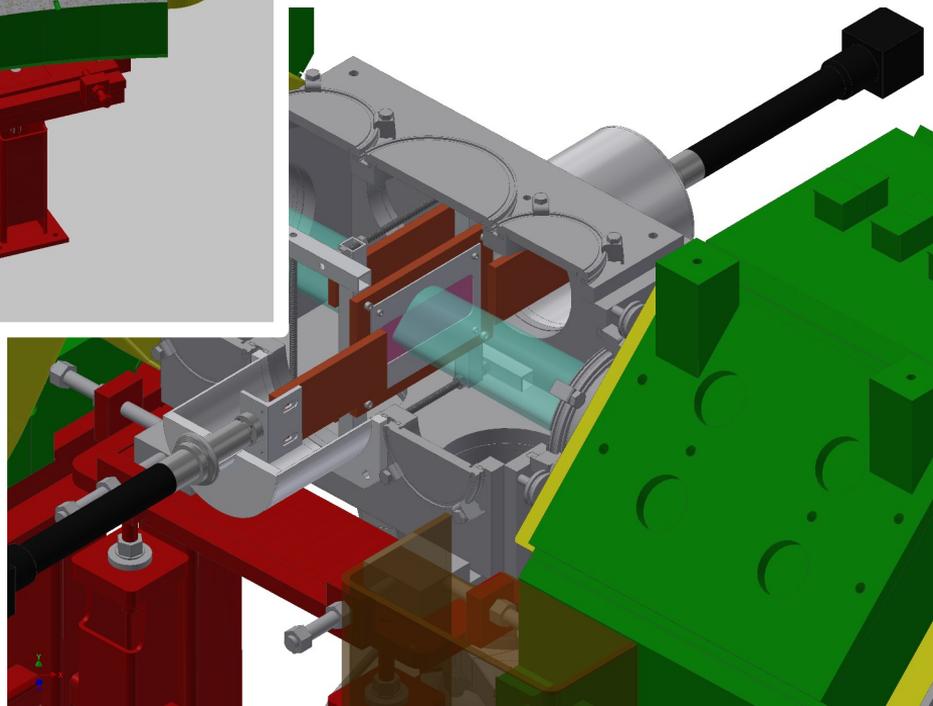
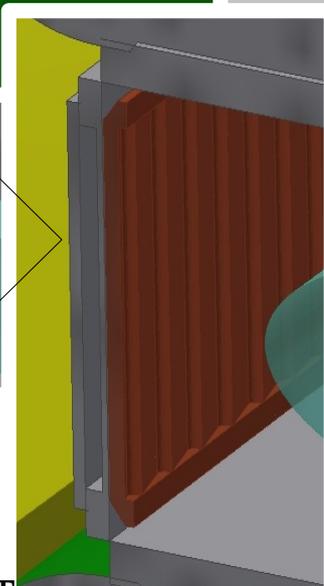
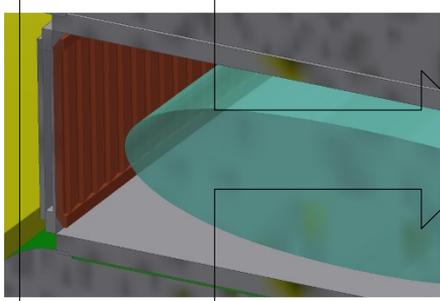
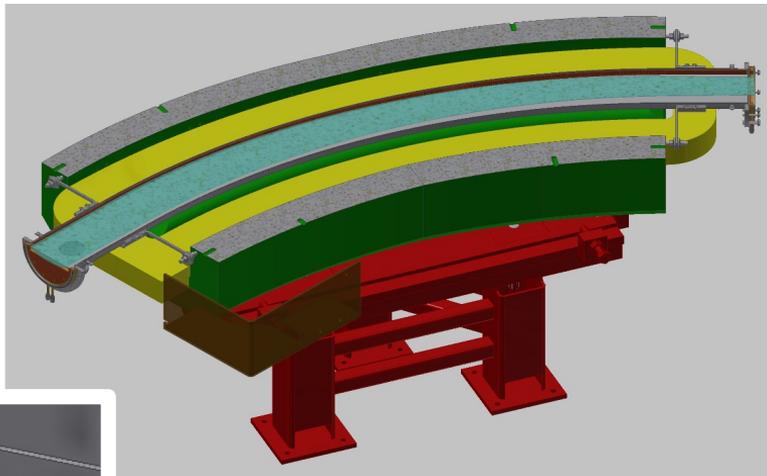
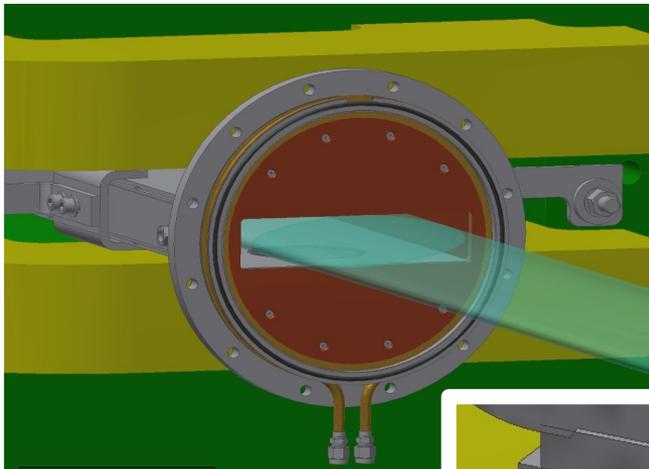
# Производящая мишень

- ✓ Узел для вращения (5-25Hz) берилиевого диска с жидкостным охлаждением через теплообменник
- ✓ До 2 кВт на узел (<30% полной мощности)
- ✓ Система диафрагмирования
- ✓ Камера быстрого доступа
- ✓ Порт для профилометра пучка

**Результаты работы на пучках 2017-2020**  
**Мах 500 Вт (предел пучка)**  
**~6000 часов в сумме на 2 узла**



# Поглотитель первичного пучка. диафрагмовые блоки

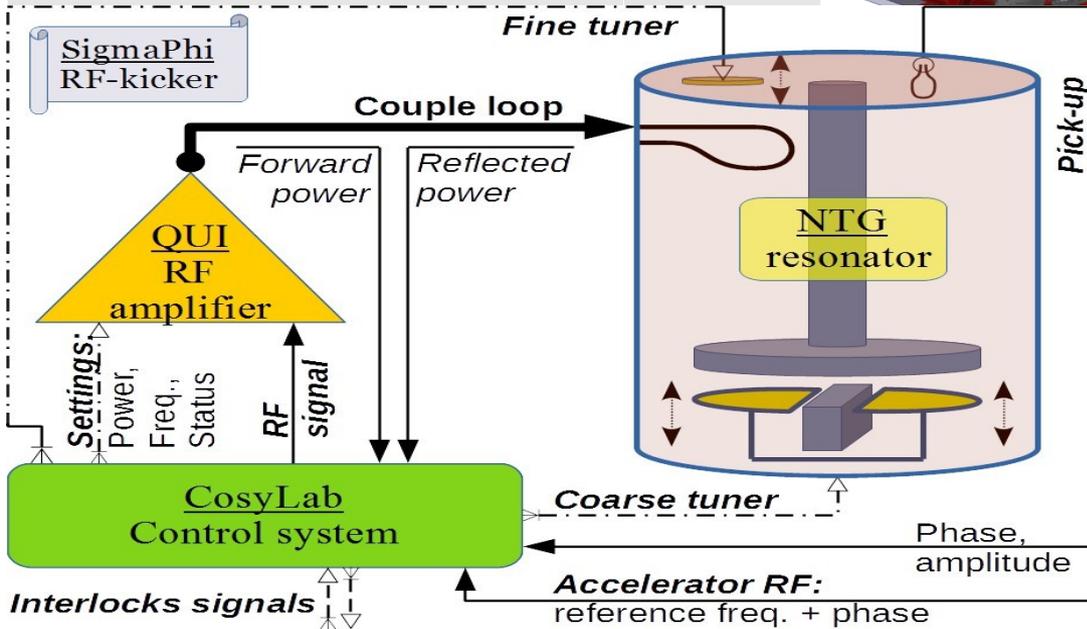
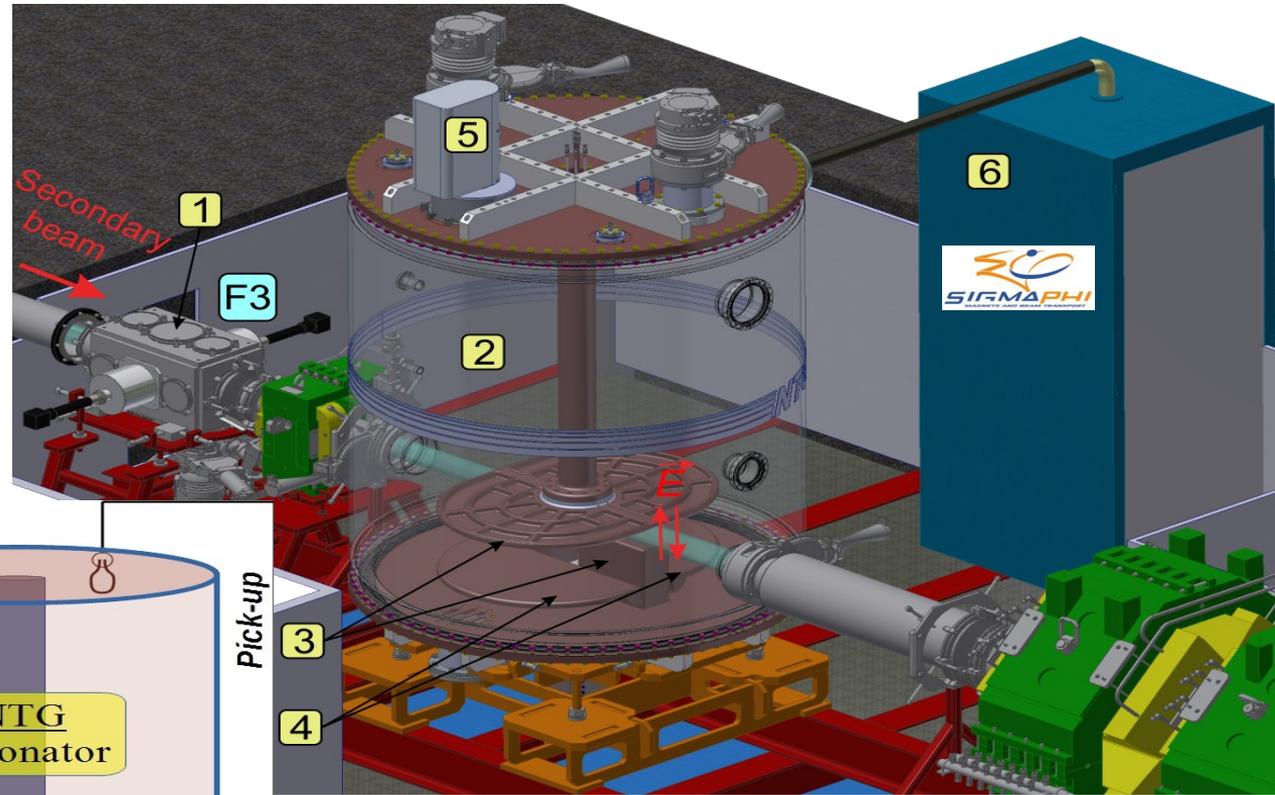


- ✓ Фокусированная
- ✓ Мощность  $>2$  кВт
- ✓ Медные детали для контакта с пучком

- ✓ Вход и выход может быть коллимирован
- ✓ Боковая стенка с зубчатой структурой для уменьшения рассеяния
- ✓ Водяное охлаждение входа/выхода и боковых стенок

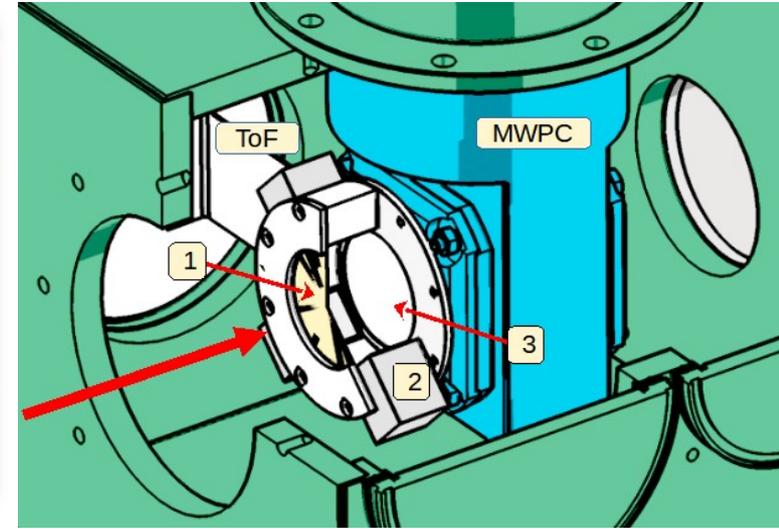
# RF-kicker, 25 м от мишени

Frequency range (MHz)	15 – 22,5
Peak voltage (KV)/ Gap (mm)	120/ 70
Length(mm)/Width (mm) of electrodes	700/120
Cylinder Internal diameter (mm)	1400
Stem diameter (mm)	120
Length of coaxial line from beam axis (mm)	1370
Current at junction (A)	990
Current in short-cut (A)	1200
RF power (Watts)	15 000
Reactance Q	>12000
Df dV=1% (Hz)	80-110

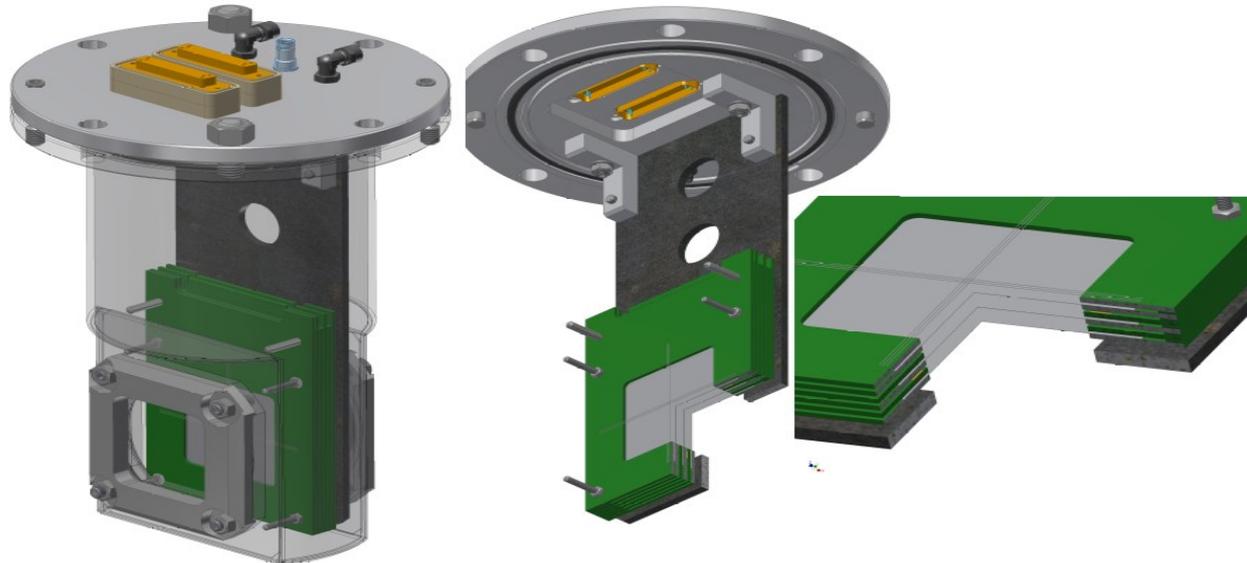


# Детекторы вторичного пучка от H до Ar

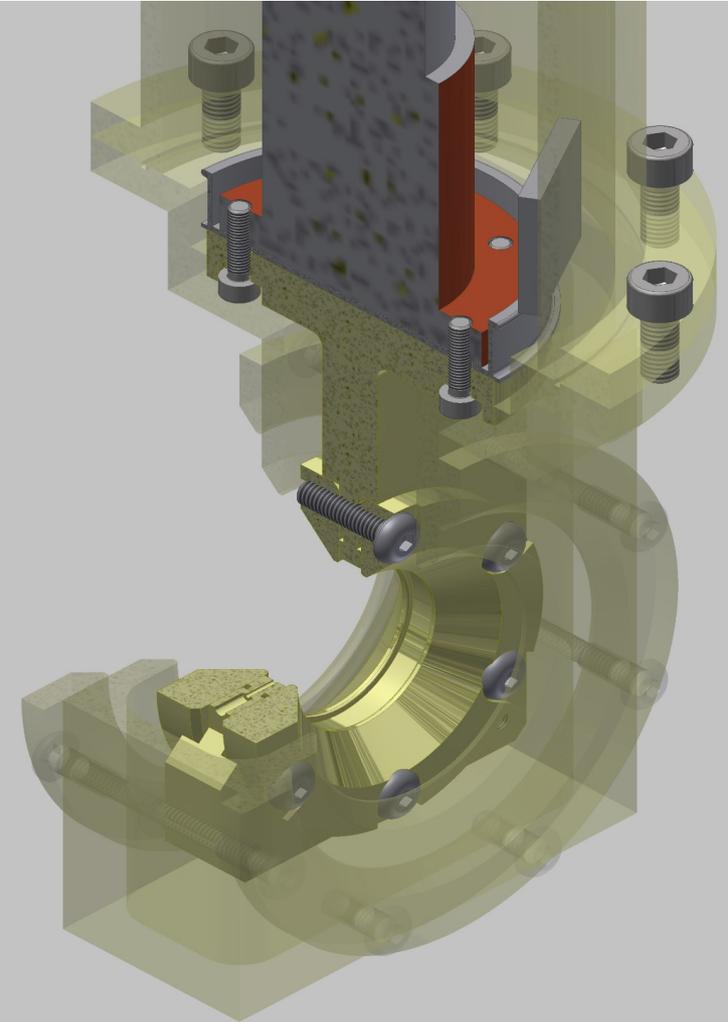
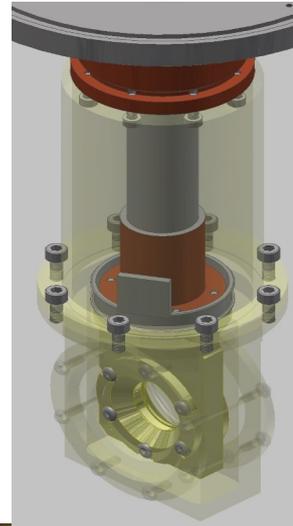
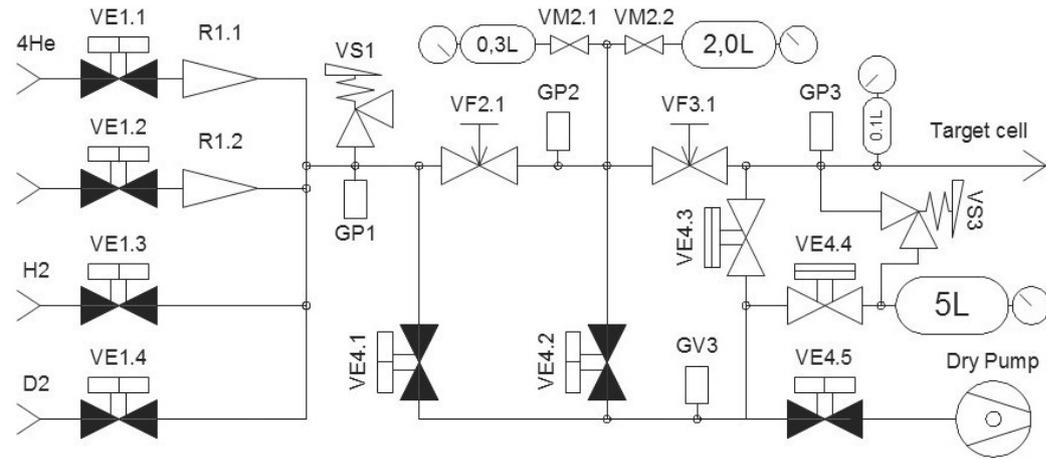
- ✓ ТоF 25 – 250 мкм,  
 $\sigma \sim 120$  пс  
база 12.3 м
- ✓ Абсолютная  
калибровка ТоF



- ✓ MWPC позиция  $\sim 2$  мм на мишени,  $P = 0.2 - 1$  атм.
- ✓ РРАС позиция  $\sim 1.6$  мм на мишени,  $P < 0.02$  атм.



# Криогенные физические мишени H<sub>2</sub>, D<sub>2</sub>



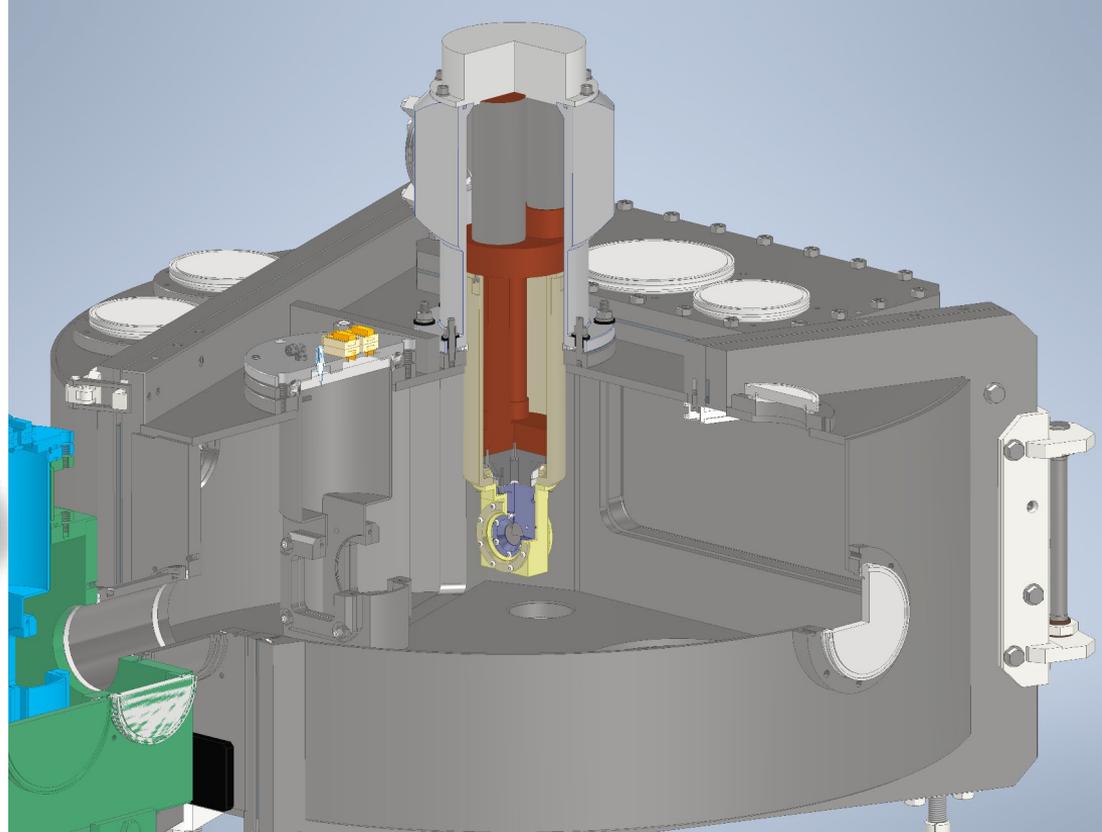
- ✓ Газ, жидкий или твердый водород при 15-30 К с рекуперацией вещества.
- ✓ Ячейки 0,4 — 6 мм номин. толщины.
- ✓ Кол-во вещ-ва  $>10^{21}$  ат/см<sup>2</sup>.
- ✓ Тонкие 6 - 25 мкм SS окна Ø20-30 мм.
- ✓ Сборная конструкция

# Жидкая $^3\text{He}$ (передача 2р), $^4\text{He}$ (QFS) мишень <3.5 K

- ✓ Sumitomo RP-182B2S 4K Pulse Tube Cryocooler
- ✓ Power Consumption 12-14 kW
- ✓ Dimensions 1.4 x 0.5 x 0.5 m
- ✓ Weight 250 kg



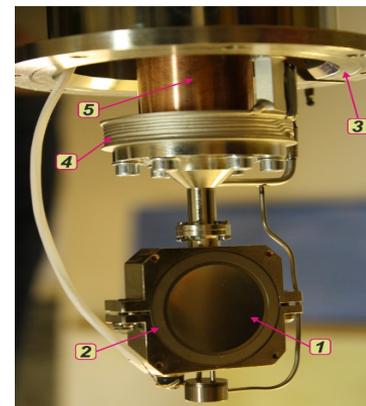
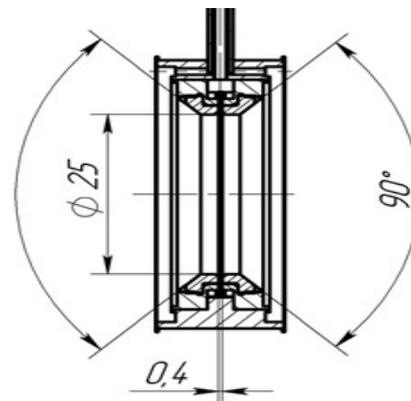
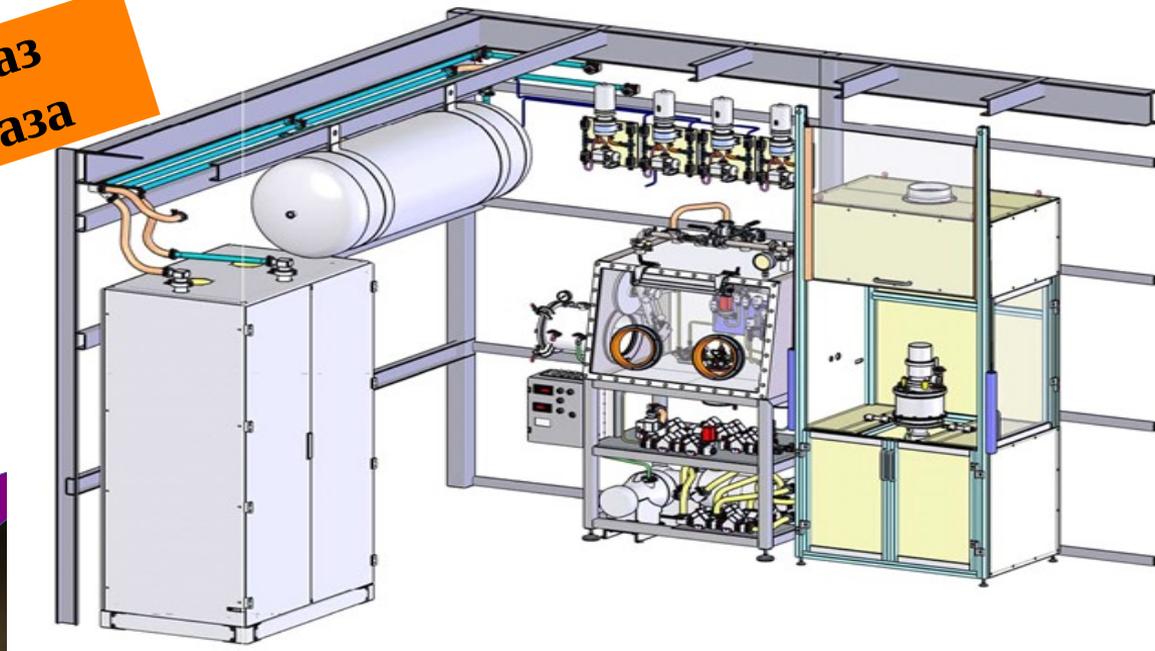
- ✓ 2nd Stage Capacity 1.5 W @ 4.2 K
- ✓ 1st Stage Capacity 36 W @ 48 K
- ✓ Minimum Temperature <2.8 K



# Тритиевая мишень (РФЯЦ ВНИИЭФ г.Саров) 2022

- ✓  $10^{14}$  Бк ( $1000 \text{ cm}^3$ )  $T_2$
- ✓ До  $2 \cdot 10^{21}$  ат/см<sup>2</sup>
- ✓ 30 К для газа
- ✓ 10 К для твердой фазы
- ✓ Отсутствие выбросов  $T_2$
- ✓  $\varnothing 25$  мм, 0.8-4 мм ячейки
- ✓ Окна из 8-10 мкм SS фольги с двойным объемом

**$A2/A1=5$  раз  
Ж/Т фаза**



# Компоновка детекторных систем вокруг F5

Beam  
detectors

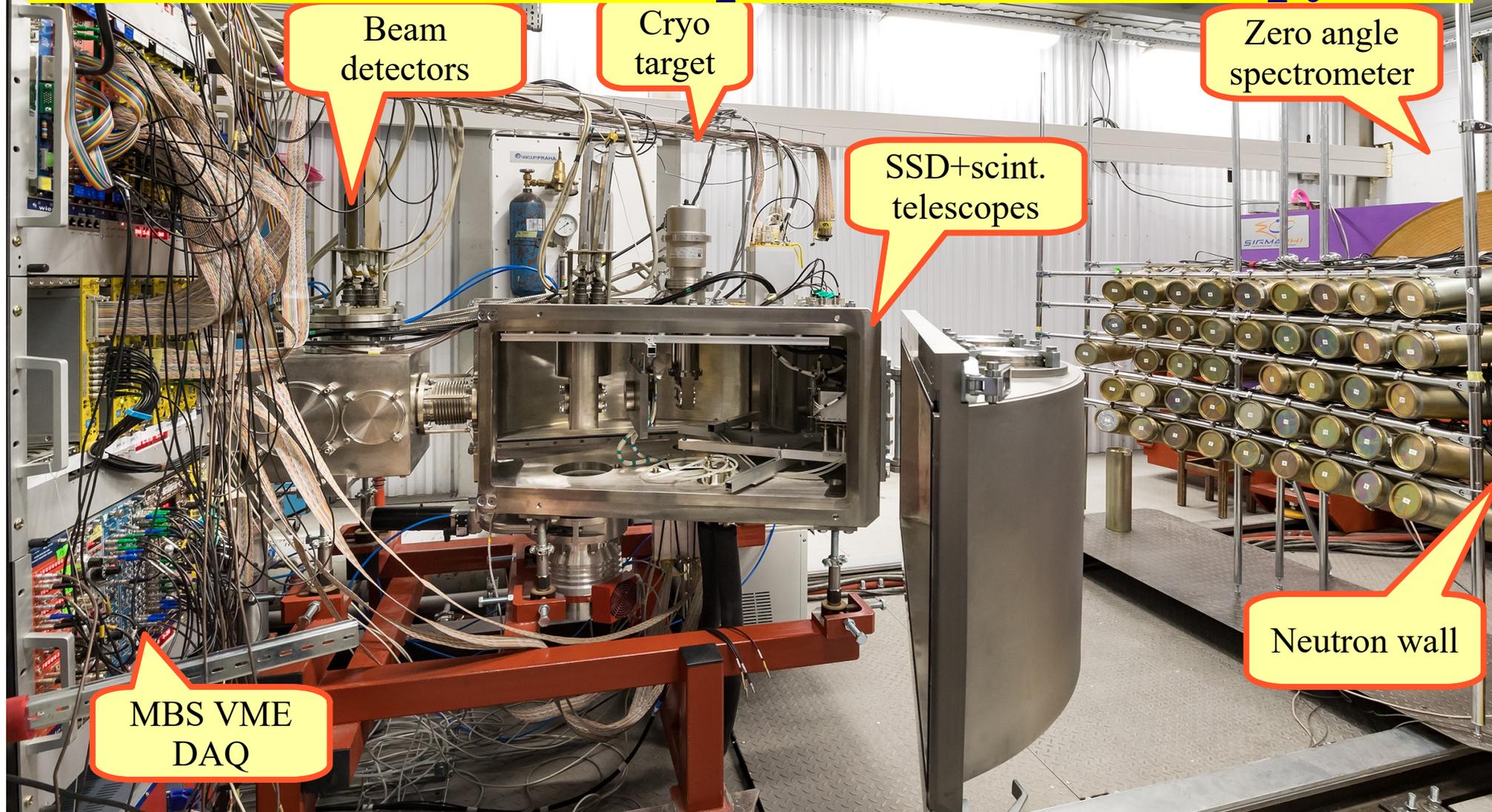
Cryo  
target

Zero angle  
spectrometer

SSD+scint.  
telescopes

MBS VME  
DAQ

Neutron wall



# Zero-degree spectrometer: 3 planes XY + ToF

X,Y

X,Y+X,Y; dE+ToF

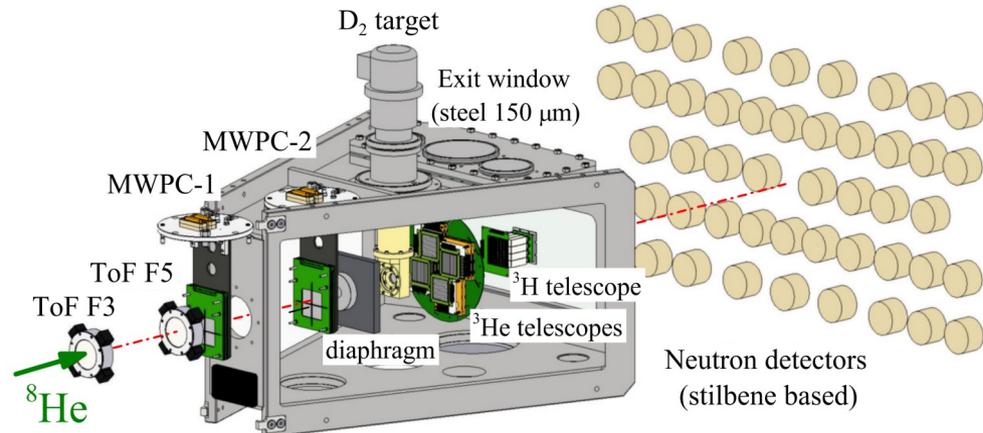
- *Weight ~17 t*
- *“Open frame” design*
- *Max 1.38 T*

- ✓ Upto  $10^6$  ions/s
- ✓ Concentrated flux
- ✓ ~ 4000 channels

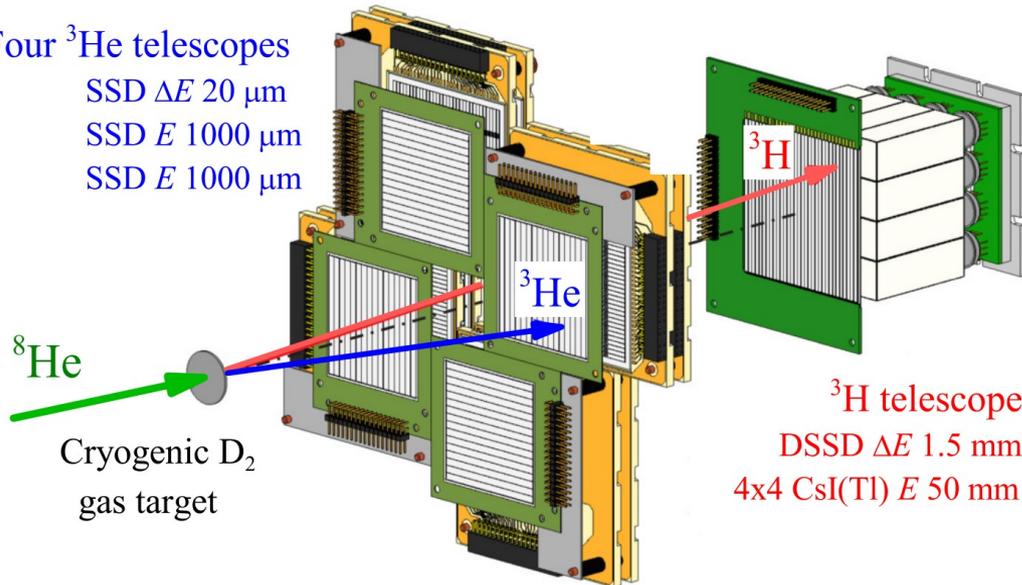
- *Gap 180 mm x 580 mm*
- *Yoke length 330 mm*



# Новые данные по спектрам сверхтяжелых изотопов водорода ${}^7\text{H}$ , ${}^6\text{H}$ и обнаружение моды спонтанного распада с испусканием 4-х нейтронов



Four  ${}^3\text{He}$  telescopes  
 SSD  $\Delta E$  20  $\mu\text{m}$   
 SSD  $E$  1000  $\mu\text{m}$   
 SSD  $E$  1000  $\mu\text{m}$



${}^3\text{H}$  telescope  
 DSSD  $\Delta E$  1.5 mm  
 4x4 CsI(Tl)  $E$  50 mm

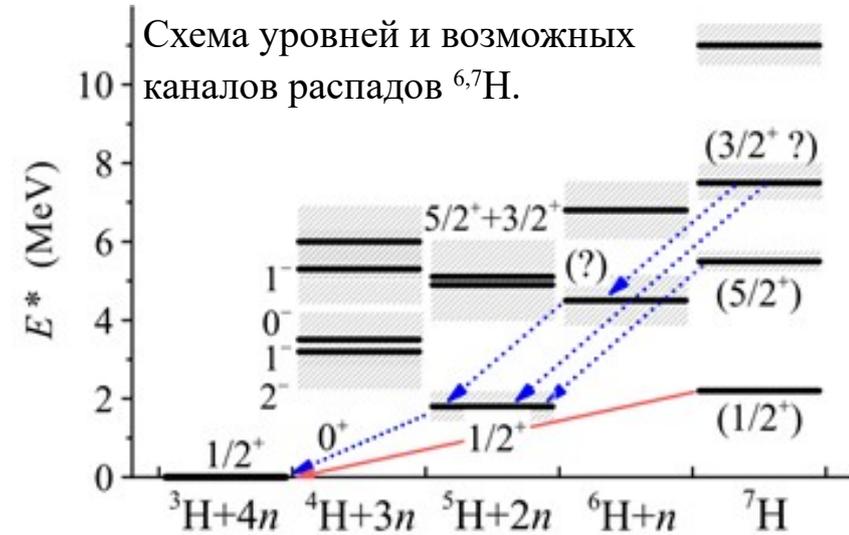


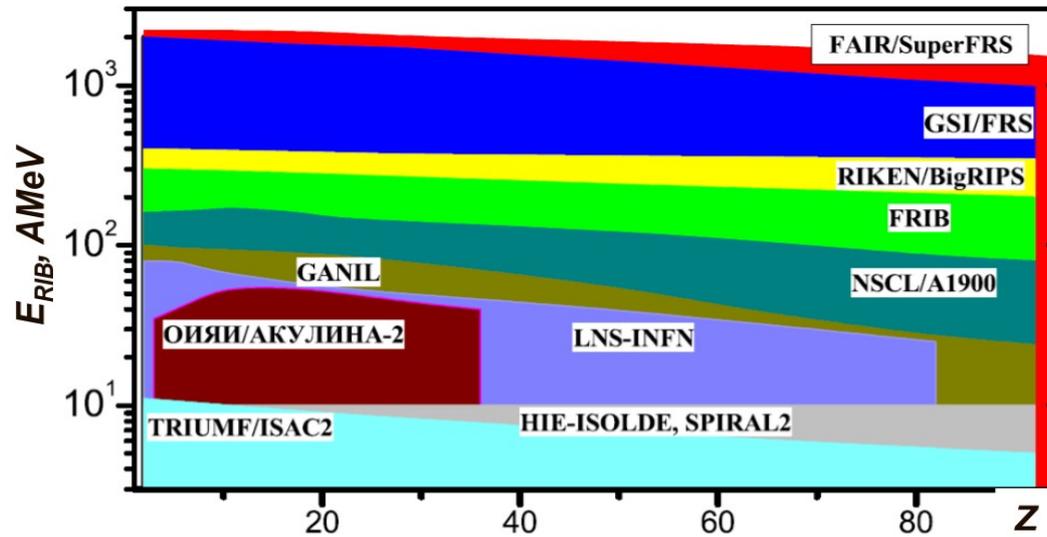
Схема уровней и возможных каналов распадов  ${}^6, {}^7\text{H}$ .

В первых экспериментах (2018-2020 гг) на АКУЛИНЕ-2 удалось разрешить одну из давно стоящих знаковых проблем экспериментальной ядерной физики - обнаружение изотопов  ${}^6\text{H}$  и  ${}^7\text{H}$ , а также продвинуться на пути изучения новой моды спонтанного ядерного распада с одновременным испусканием  $4n$ .

## Экспериментальные границы применения ФС АКУЛИНА-2

- ✓ Максимальная жесткость ПРИ до 4 Тл.м.
- ✓ Тепловыделение на ПМ ограничено 2 кВт в существующем узле. Представляется возможным увеличение до 4–5 кВт путем пересмотра конструкции узла вращения ПМ.
- ✓ Для изотопов близких по жесткости к ПП может возникнуть ограничение, вызванное локальной тепловой перегрузкой, по причине нежелательной фокусировки. Общая оценка данного фактора не имеет смысла.
- ✓ Установка имеет возможность принять до 7 кВт ПП в существующем виде и до 14 кВт в случае модернизации ПМ.
- ✓ Общая интенсивность ПРИ в ФЗ ограничена возможностями пучковых детекторов не более  $2 * 10^6$ .

# Сравнение с другими установками



**ACC-2 @ U400M advantages:**  
*Room temperature operating*  
*Relatively low cost beam time*  
*Runs during 3 – 5 weeks*

*Cryogenic targets  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$   
 and all hydrogen isotopes  
 (including tritium since 2020)*

*ToF length ~15 m*

Установка Институт	ACC	ACC-2	COMBAS	LISE	A1900	RIPS	BigRIPS	FRS	SFRS
		FLNR, JINR		GANIL	MSU	RIKEN		GSI	
$\Delta\Omega$ , msr	0.9	5.8	6.4	1.0	8.0	5.0	8.0	0.32	5.0
$\delta_P$ , %	2.5	6.0	20	5.0	5.5	6.0	6.0	2.0	5.0
$p/\Delta p$ , a.u.	1000	2000	4360	2200	2915	1500	3300	8600	3050
$B_{pmax}$ , Tm	3.2	3.9	4.5	4.3	6.0	5.76	9.0	18	18
Length, m	21	38	14.5	42	35	21	77	74	140
$E_{min}$ , AMeV	10	5	20	40	110	50		220	
$E_{max}$ , AMeV	40	50	80	80	160	90	350	1000	1500

# Наше место в мире

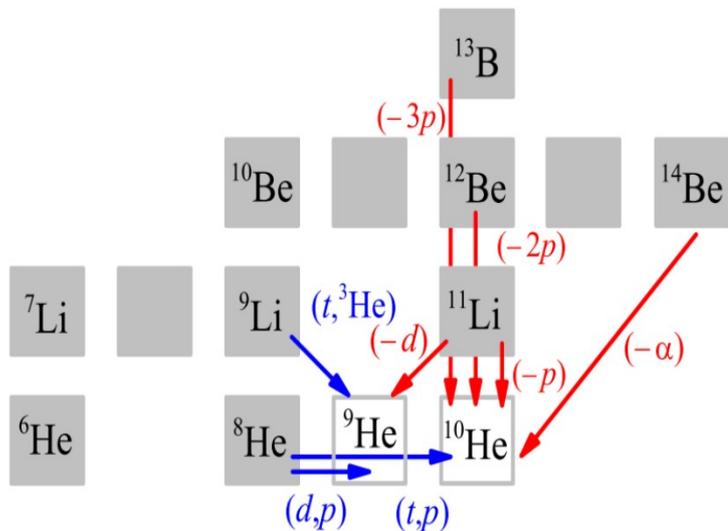
- ✓ В мире действует всего несколько центров, где можно получить вторичные пучки: GSI/FAIR(Германия), RIKEN(Япония), MSU(США), GANIL(Франция), CERN(Швейцария), LNS-INFN(Италия), TRIUMF(Канада) и ЛЯР

Intermediate energy reactions  
(20-70 MeV/nucleon)

High energy reactions  
(>70-100 MeV/nucleon)

Transfer reactions

Knockout reactions



Наши преимущества:

- Своя экологическая ниша
- Приемлемые интенсивности
- Наши невысокие энергии отлично подходят для реакций передач
- Криогенные изотопные мишени
- Значительное пучковое время

<http://aculina.jinr.ru>

**Спасибо за внимание!**

Крупко Сергей  
[krupko@jinr.ru](mailto:krupko@jinr.ru)