



Эксперимент POLFUSION

А. Васильев

коллаборация PolFusion



Институты-участники



Петербургский институт ядерной физики, Россия



Forschungszentrum Jülich, Germany



Ferrara University, Italy



Cologne University, Germany

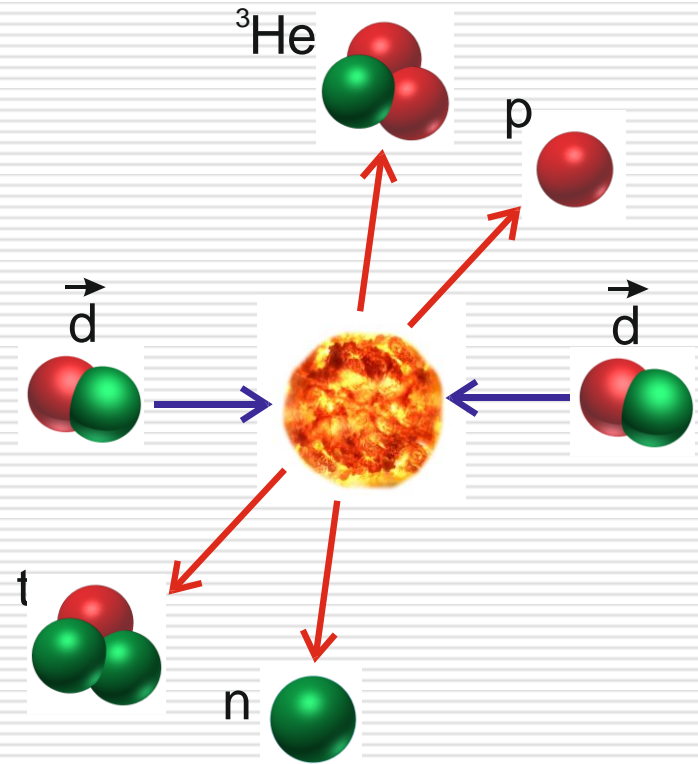
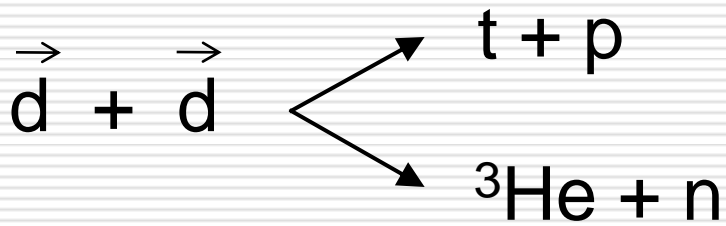


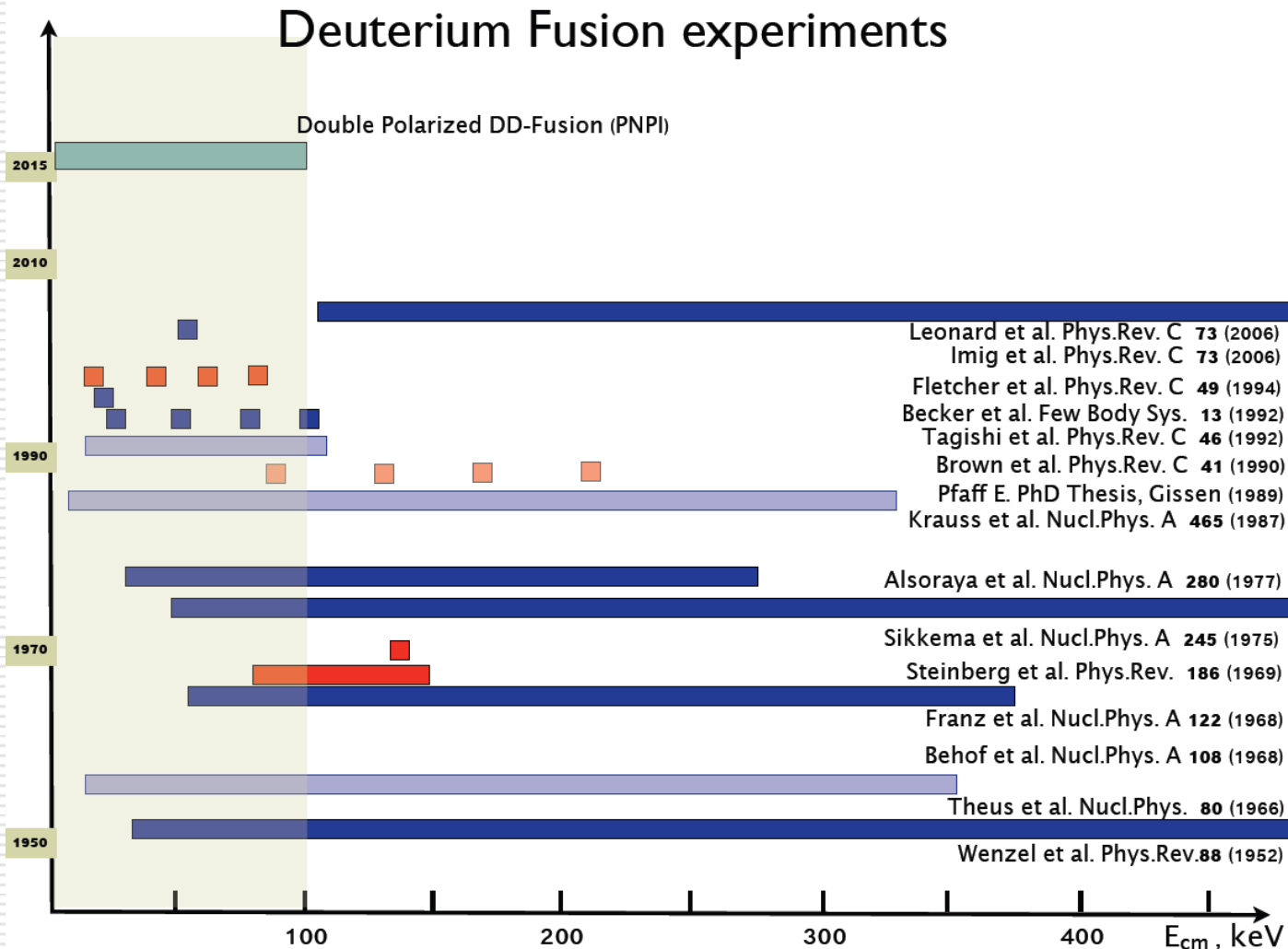
KVI, Groningen, Netherlands

Финансовая поддержка: Грант [РНФ 5 млн. руб./год 2014-2016](#)



Исследование основной 4-нуклонной реакции с поляризацией **обеих** исходных частиц при энергиях до 10-100кэВ.





- Неполяризованная реакция с твердотельной мишенью
- Неполяризованная реакция с газовой мишенью
- Поляризованный пучок и неполяризованная твердотельная мишень
- Поляризованный пучок и неполяризованная газовая мишень



100 keV deuterons

Carbon target

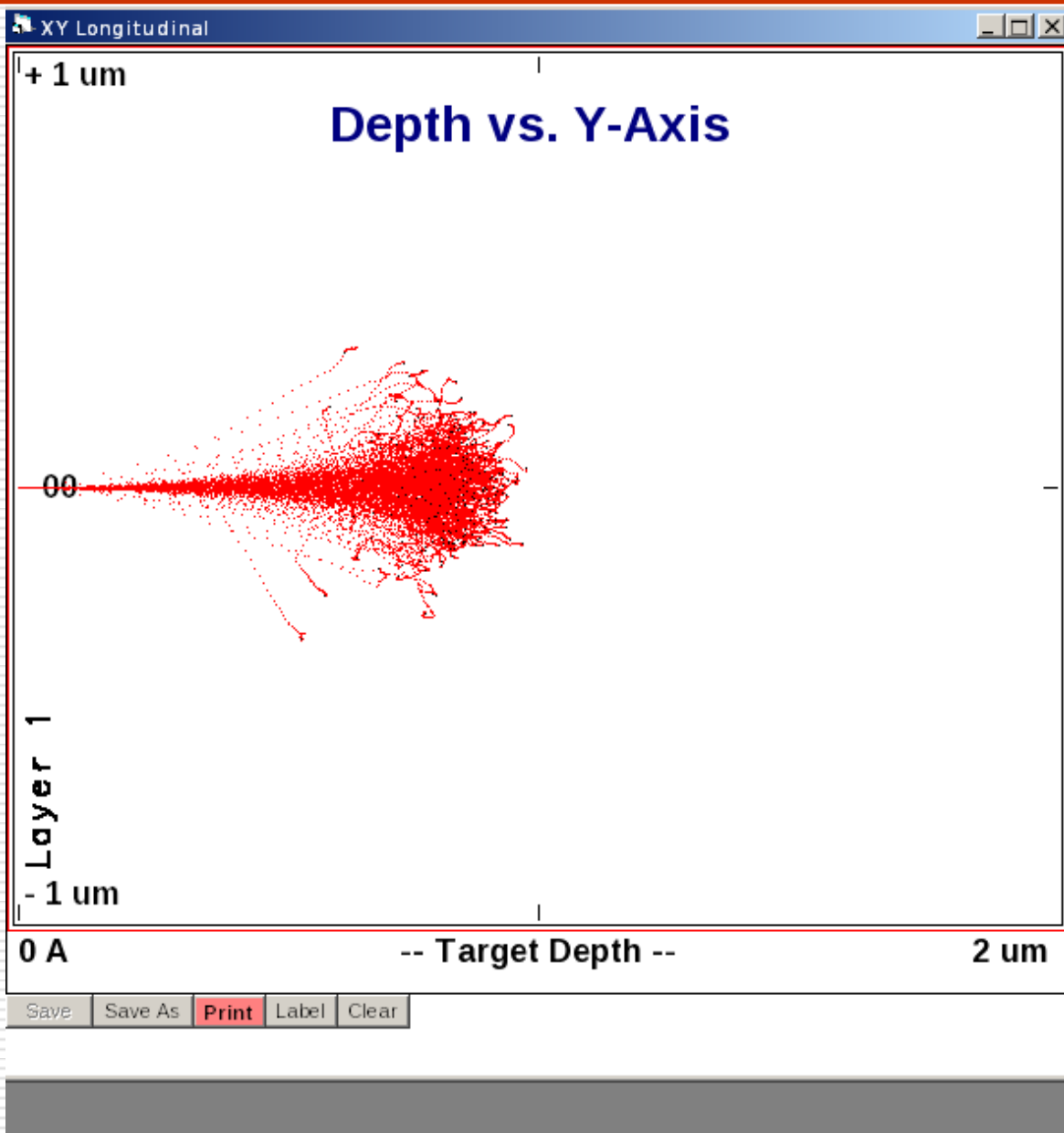




Схема эксперимента

${}^3\text{He}^{2+}$ (0.8 MeV),
 ${}^3\text{H}^+$ (1.0 MeV)

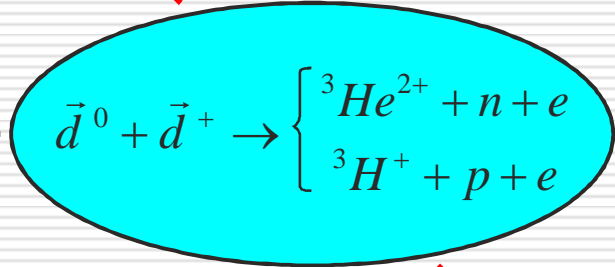
ABS

Ferrara (IUCF) ABS
 $I \sim 4 \cdot 10^{16}$ at/s
Target density $\sim 2.7 \cdot 10^{11}$ at/cm²
Vector polarization: ± 0.7

\vec{d}^0 (0.1 eV)

dd-polarimeter
or LSP

\vec{d}^+



\vec{d}^+ (1-32 keV)

Ion source

Polarized Ion Source
Ion beam: $I = 20 \mu\text{A}$
($1.3 \cdot 10^{14}$ d/s)
 $E_{\text{beam}} = 32 \text{ keV}$
Vector polarization: ± 0.7

\vec{d}^0 (0.1 eV)

LSP

Lamb-Shift Polarimeter

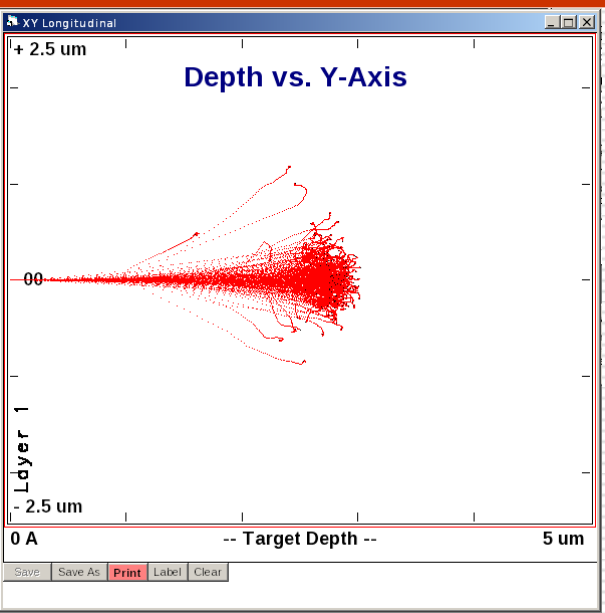
~~n (2.4 MeV),
 p (3.0 MeV)~~

Luminosity: $3.3 \cdot 10^{25}$ 1/cm² s
count rate: $\sim 120/\text{h}$ (30keV)
3 week beam time

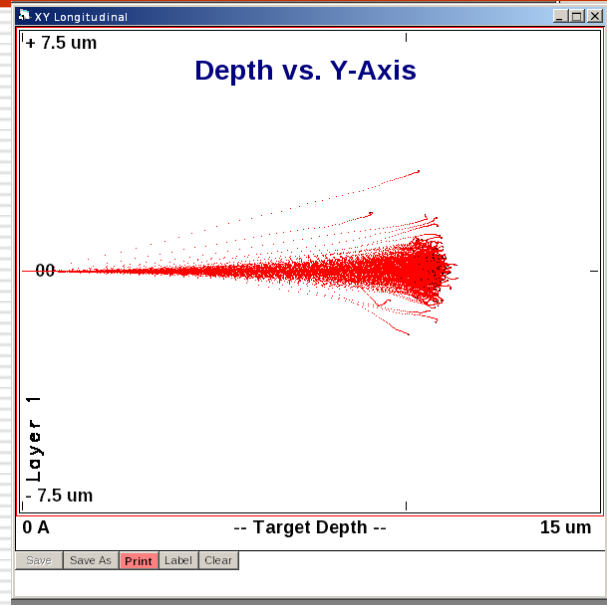
(60000 events)



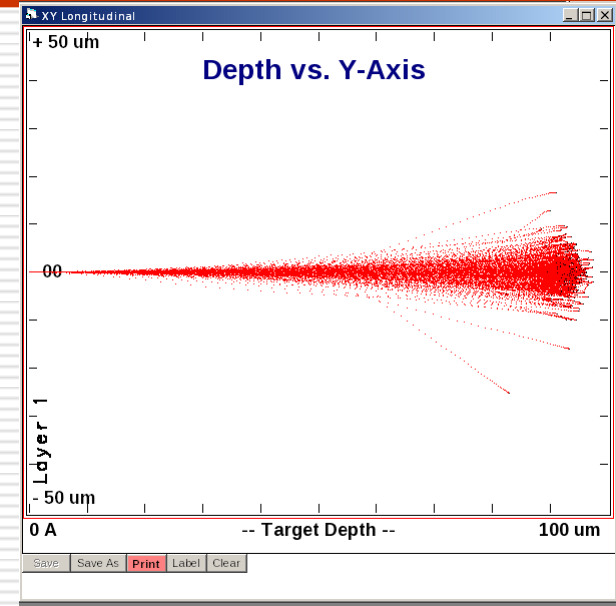
Пробег вторичных частиц в кремнии



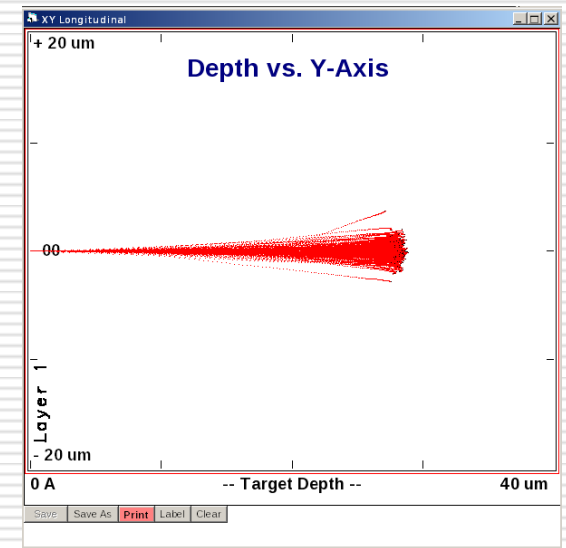
$^3\text{He}^{2+}$ (0.8 MeV)



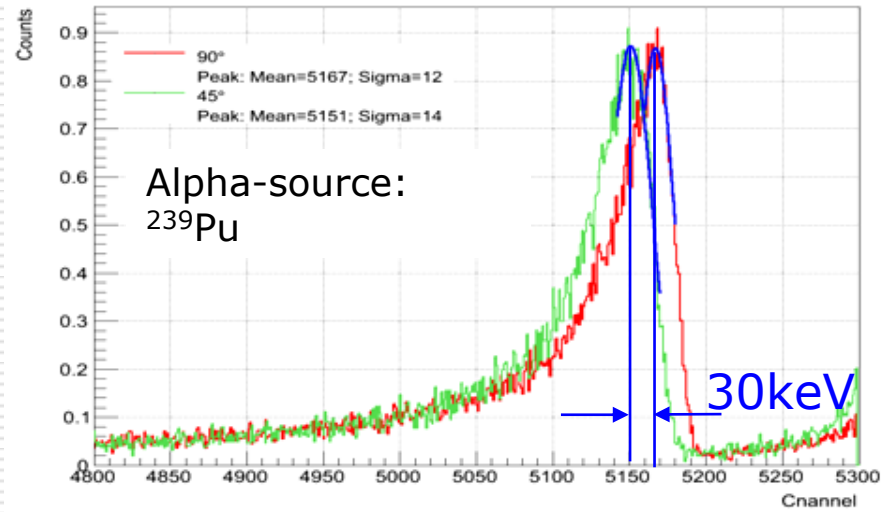
$^3\text{H}^+$ (1.0 MeV)

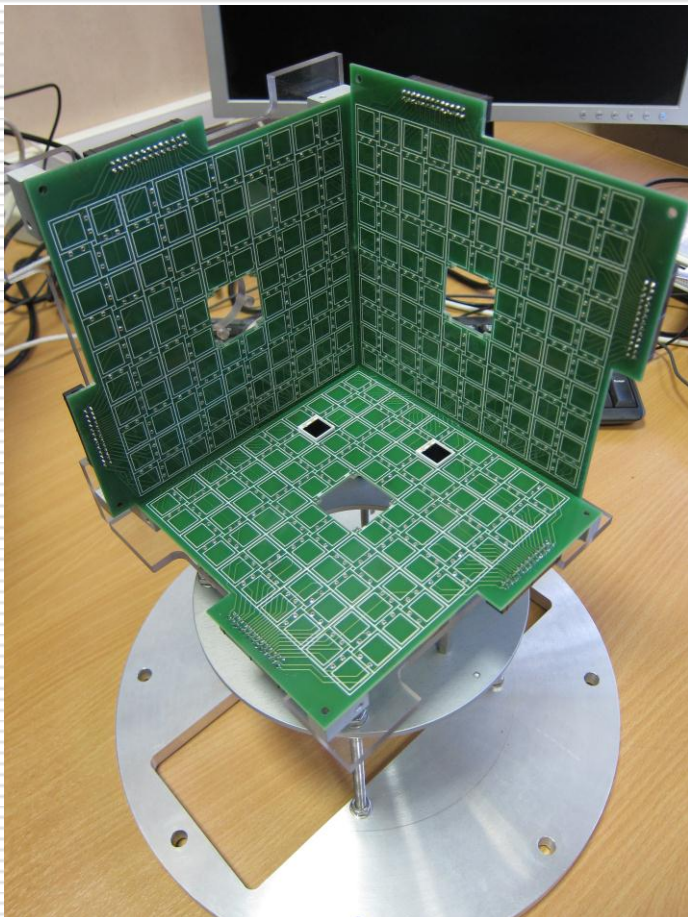


p (3.0 MeV)

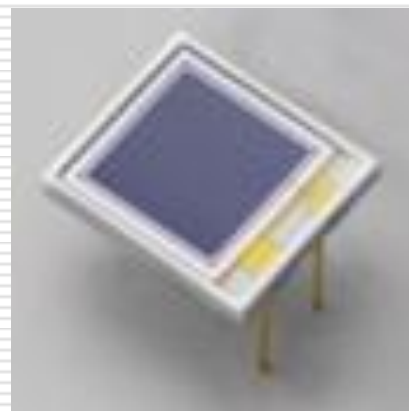


$^4\text{He}^{2+}$ (5.157 MeV)
Поверхностный
слой Au < 0.1 um





- 4-π детектор с заполнением 51%
- 576 Hamamatsu PIN фотодиодов (S3590-09)
- активная область диода: 1 cm^2
- толщина обедненного слоя: 300 um
- хорошее разрешение (17 keV для 1 MeV ионов углерода: RHIC)
- низкое обратное напряжение (до 50 V)

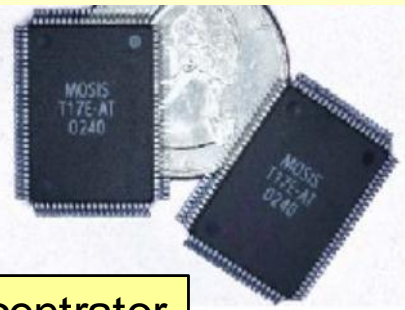


130 Eur/peice

Угловое разрешение детектора $10\text{-}15^\circ$

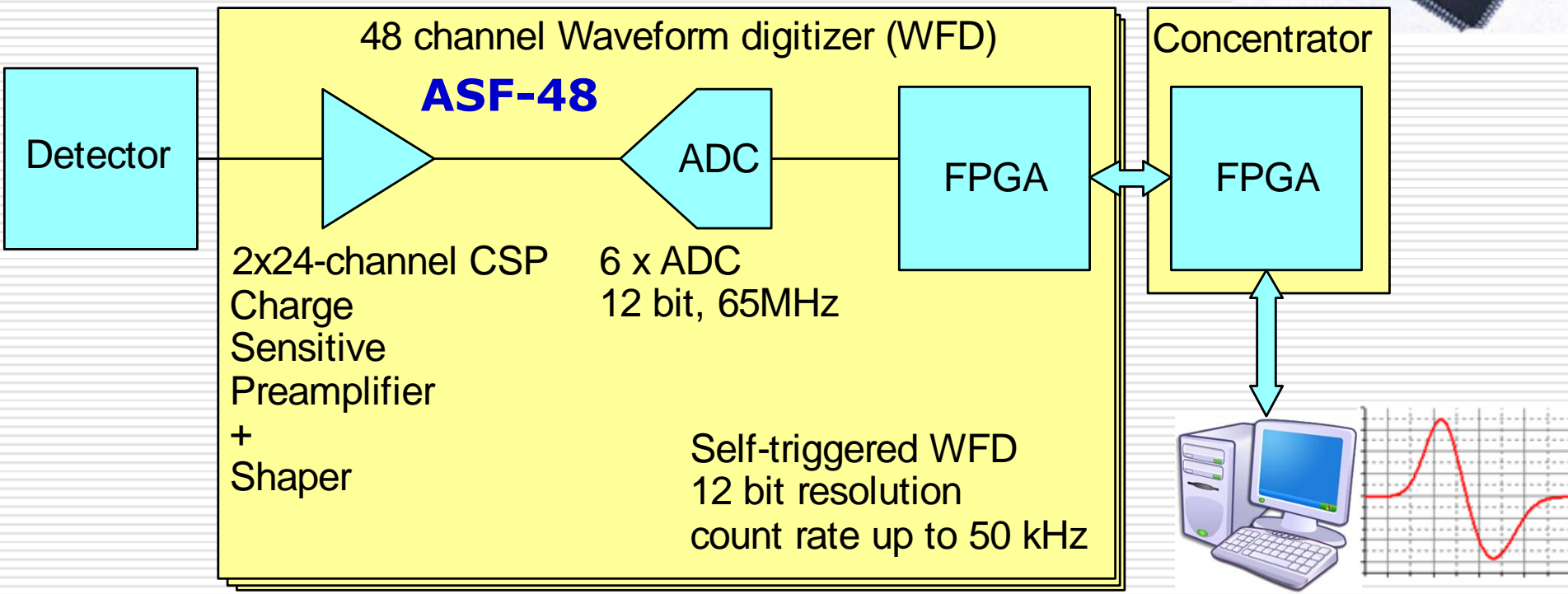
CSP from ATLAS CSC [BNL]

Junnarkar et al. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (2005)



Требования:

- ❑ 600 каналов
- ❑ Полная скорость счета $\leq 1\text{kHz}$
- ❑ Стандартный интерфейс с ПК (Ethernet?)
- ❑ Self-trigger
- ❑ Синхронизация для анализа совпадений



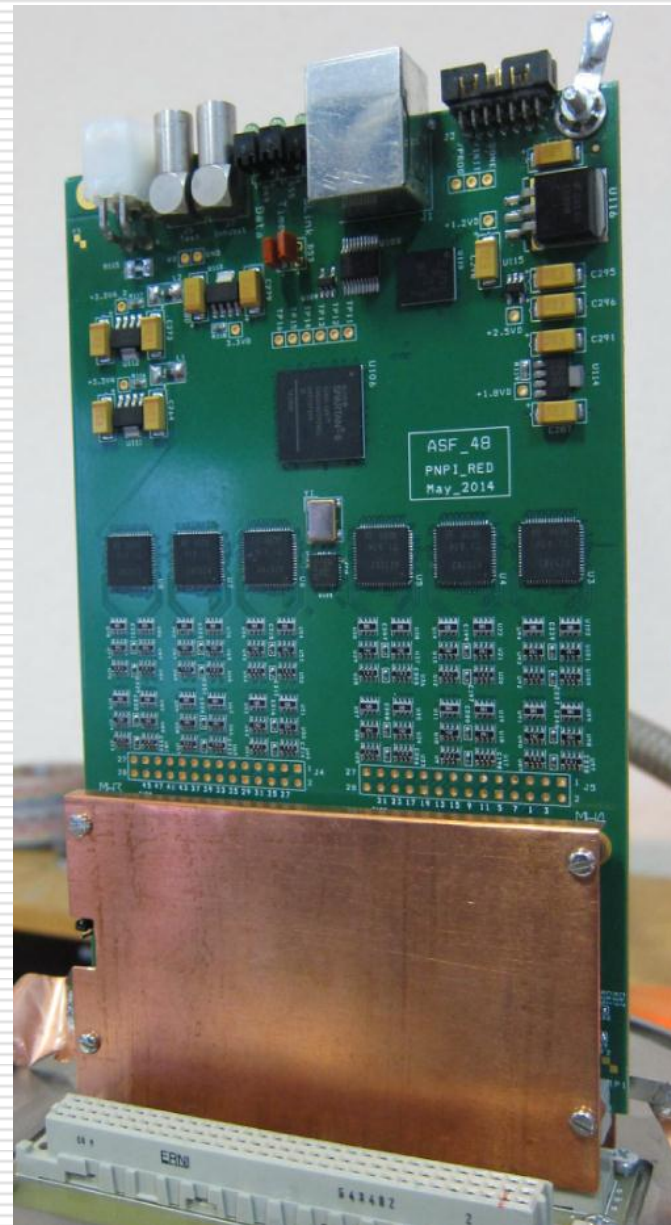
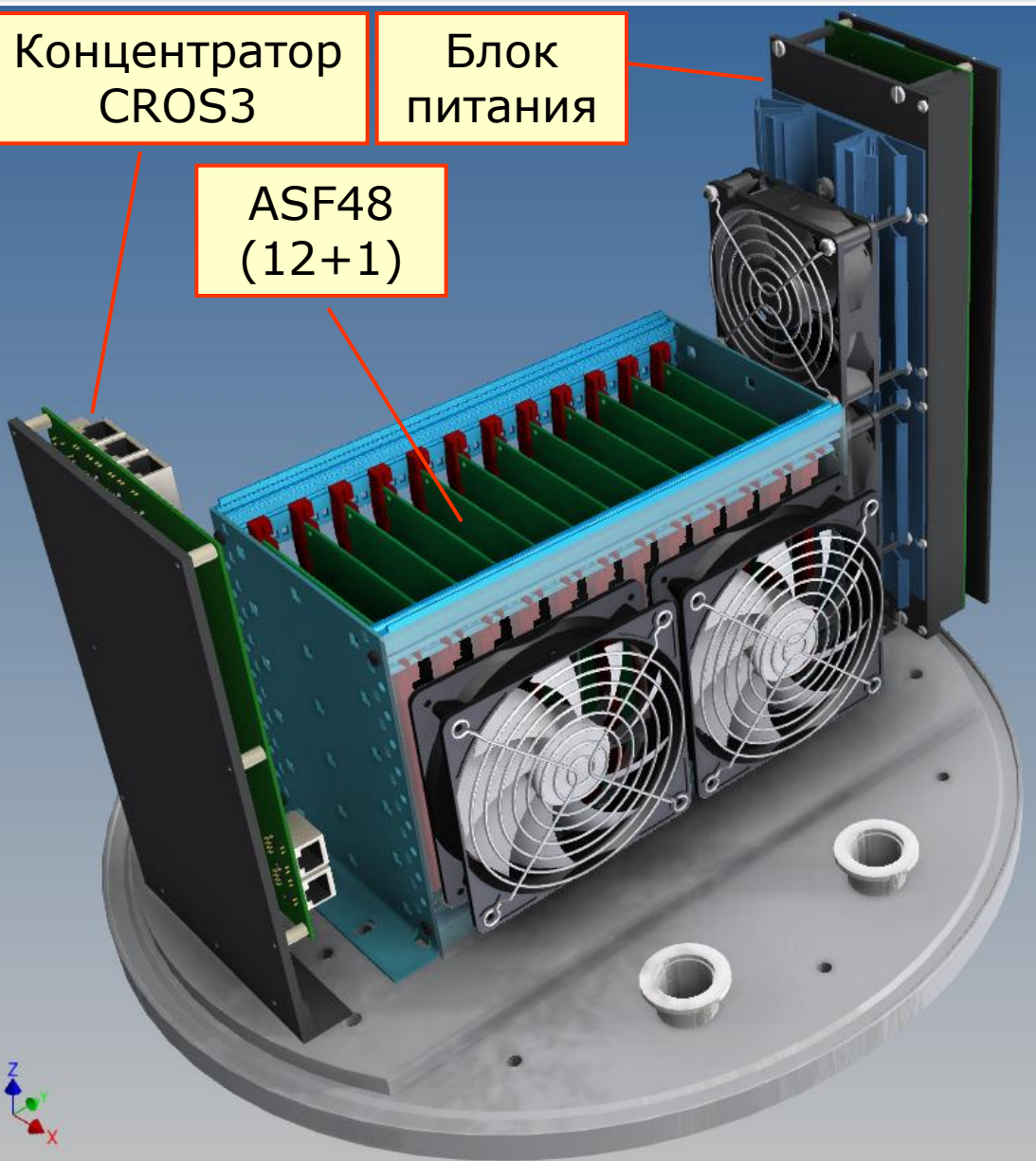


Модуль АЦП ASF-48

Концентратор
CROS3

Блок
питания

ASF48
(12+1)





Магнитное поле в области взаимодействия ?

$$\vec{F} = \vec{I} + \vec{S}$$

$$I = 1 \quad S = \frac{1}{2} \quad F = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$$

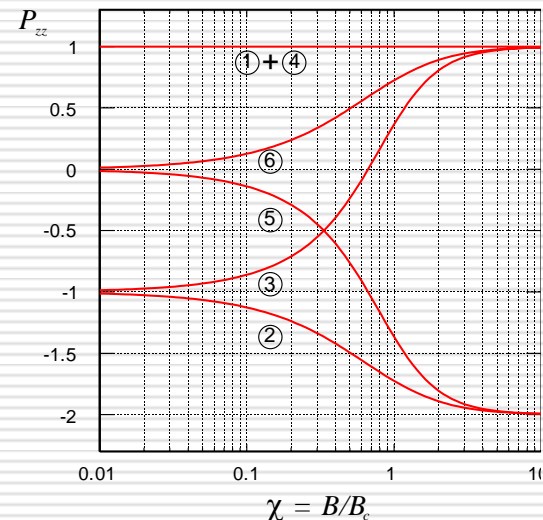
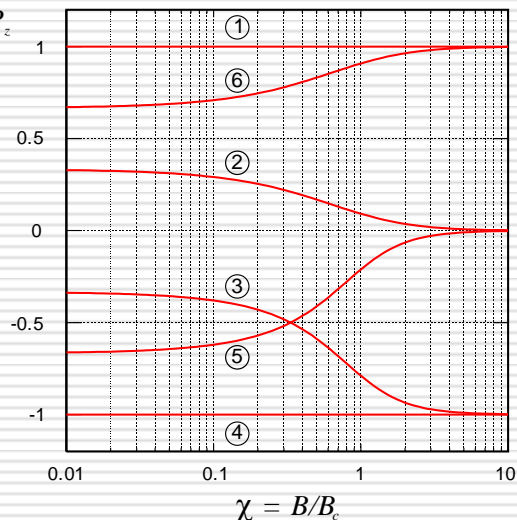
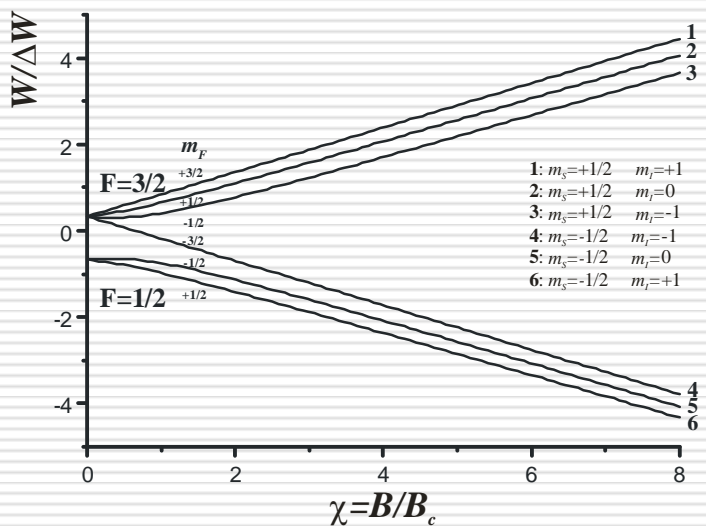
$$m_I = 0, \pm 1 \quad m_S = \pm \frac{1}{2} \quad m_F = \pm \frac{1}{2} \text{ or } \pm \frac{1}{2}, \pm \frac{3}{2} P_z$$

Vector polarization

$$P_z = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\rightarrow} + N_{\downarrow}}$$

Tensor polarization

$$P_{zz} = \frac{N_{\uparrow} - 2N_{\rightarrow} + N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\rightarrow} + N_{\downarrow}}$$

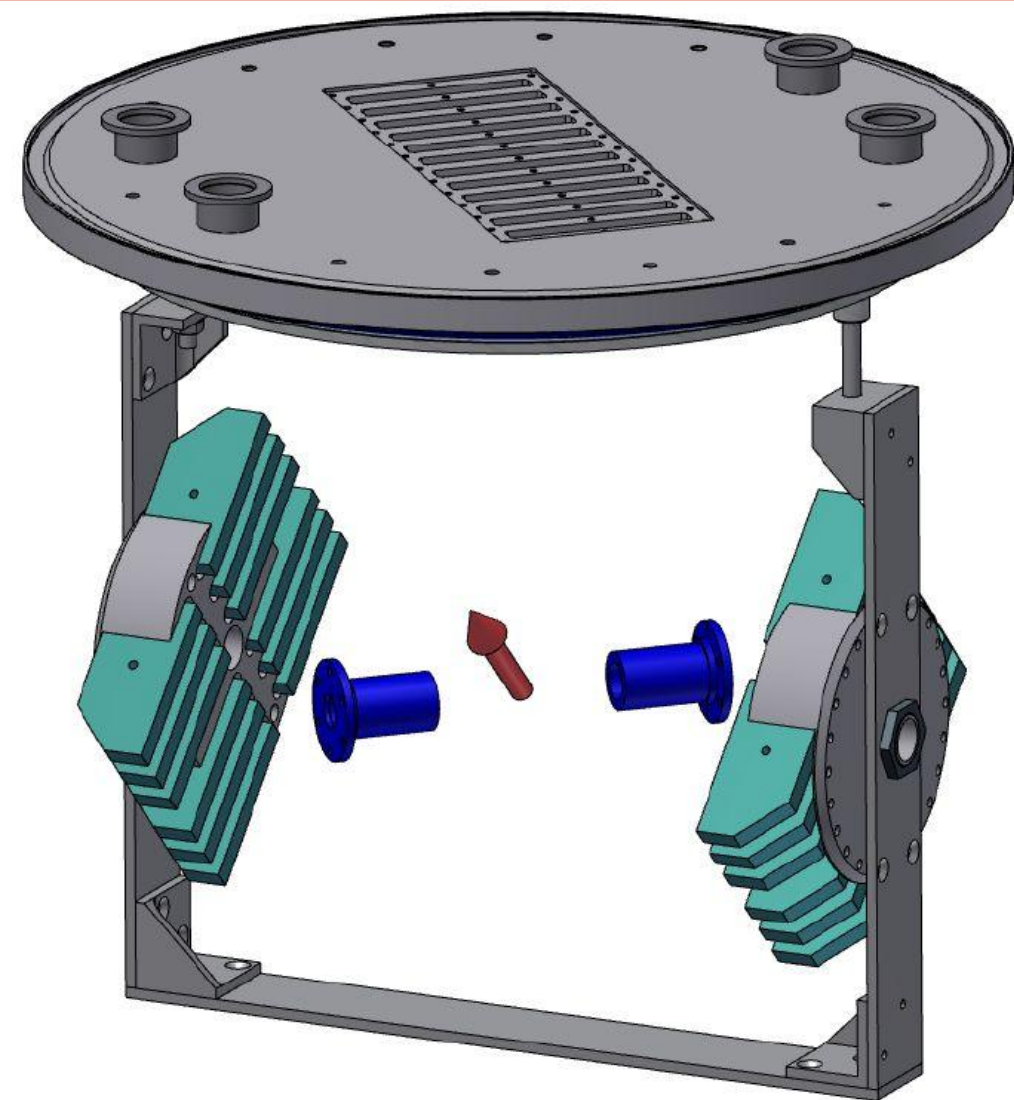


$B_c = 117 \text{ G}$
 $\Delta W = 1.4 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$

- Магнитное поле должно обеспечивать поляризацию атомов в области взаимодействия
- Магнитное поле не должно отклонять ионы от области взаимодействия
- Магнитное поле не должно приводить к существенному повороту спина ионного пучка

$B = 300 \text{ G} = 2.5 B_c$

Область магнитного поля вдоль ионного пучка должна быть минимизирована



$$B = 300 \text{ G} = 2.5 \text{ Вс}$$

Магнитное поле сконструировано из 24-х постоянных магнитов $80 \times 40 \times 10 \text{ мм}^3$ с магнитным полем на поверхности 1.25 Т (N40) -NdFeB

Проблемы:

- Нестабильность пучка;
- Выходы из строя вакуумных элементов
- Необходимость нового ионизатора на 100 kV
- Генератор 13.6 MHz с matchbox+рефлектометр

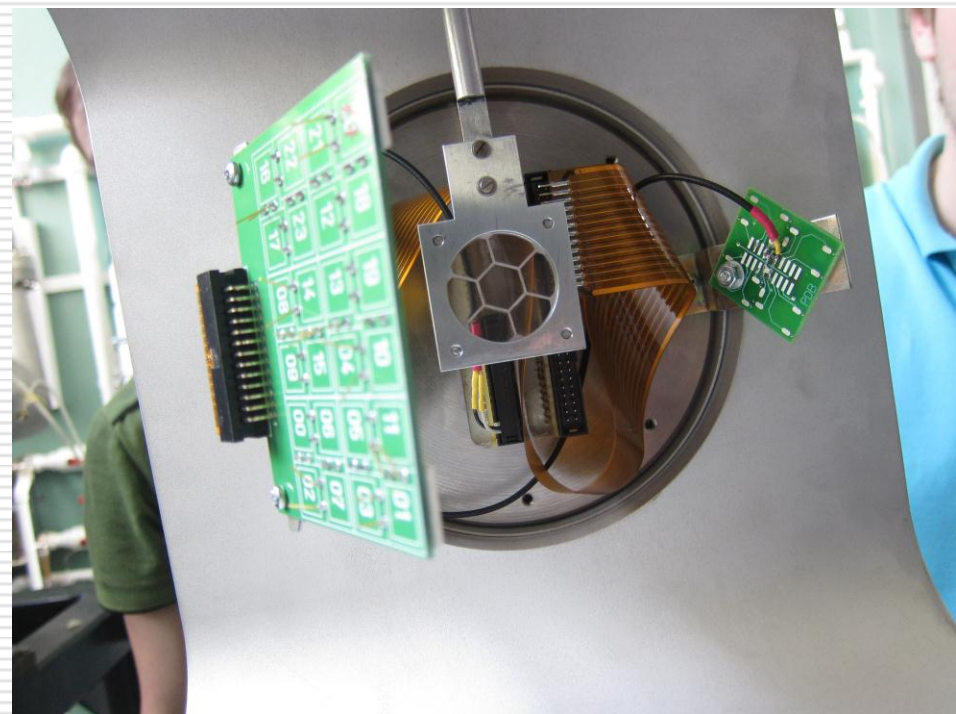
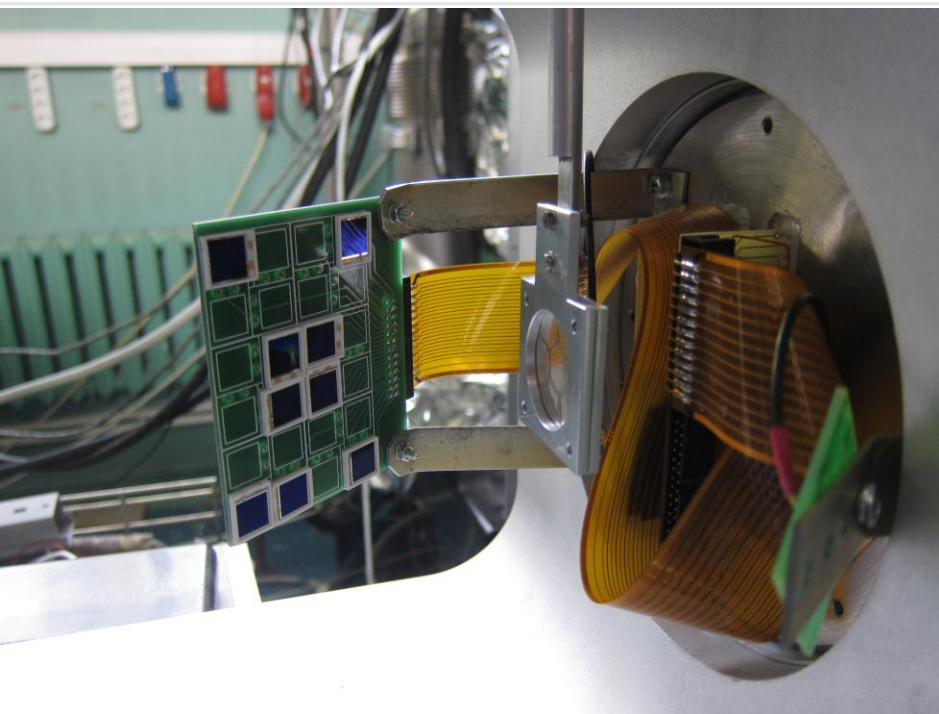
Достижения

- Получен неполяризованный ионный пучок 10 μ A. Требуется 20 μ A.





Испытание ионного источника на твердотельной мишени

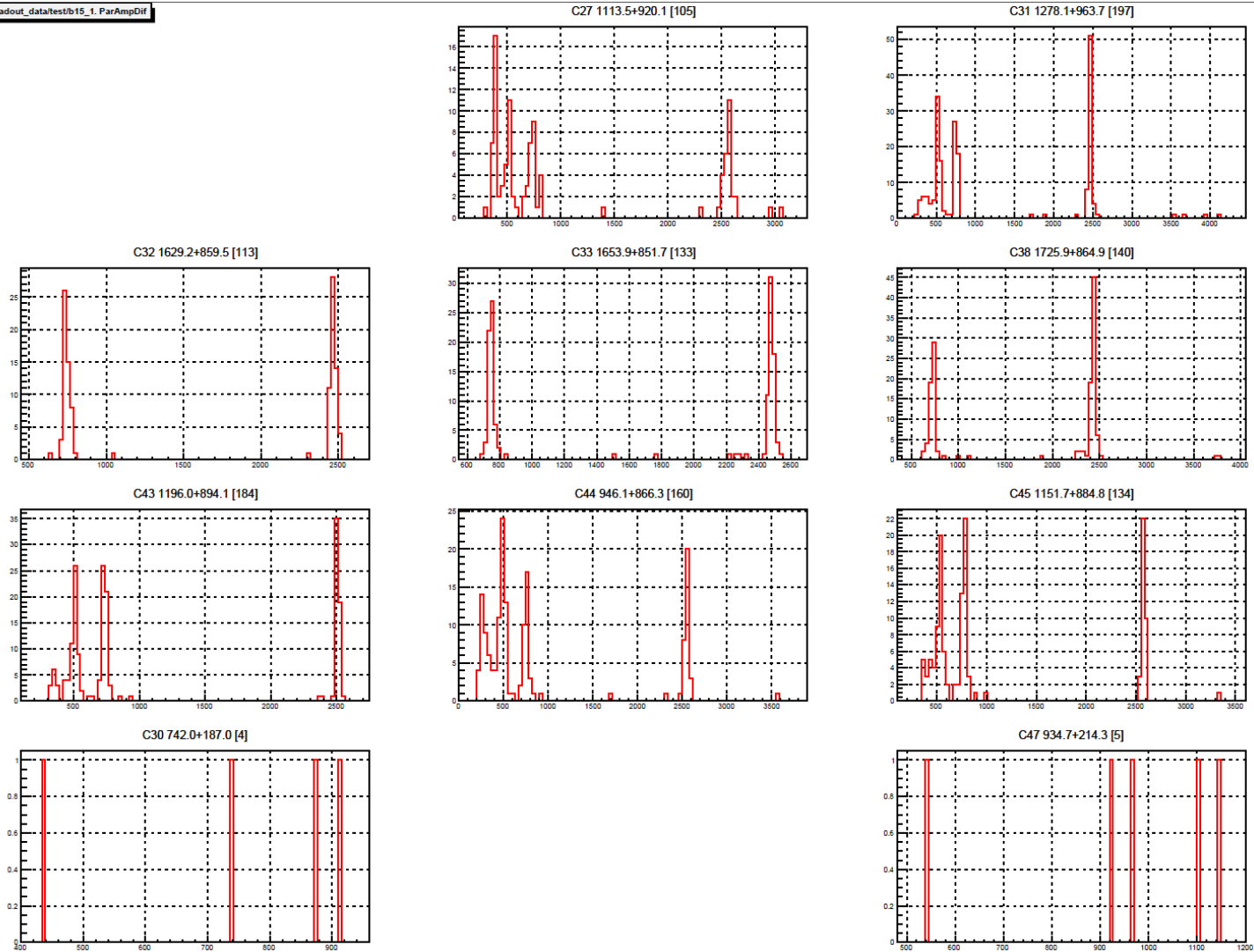




Тест на твердотельной мишени (дейтерированное оргстекло)

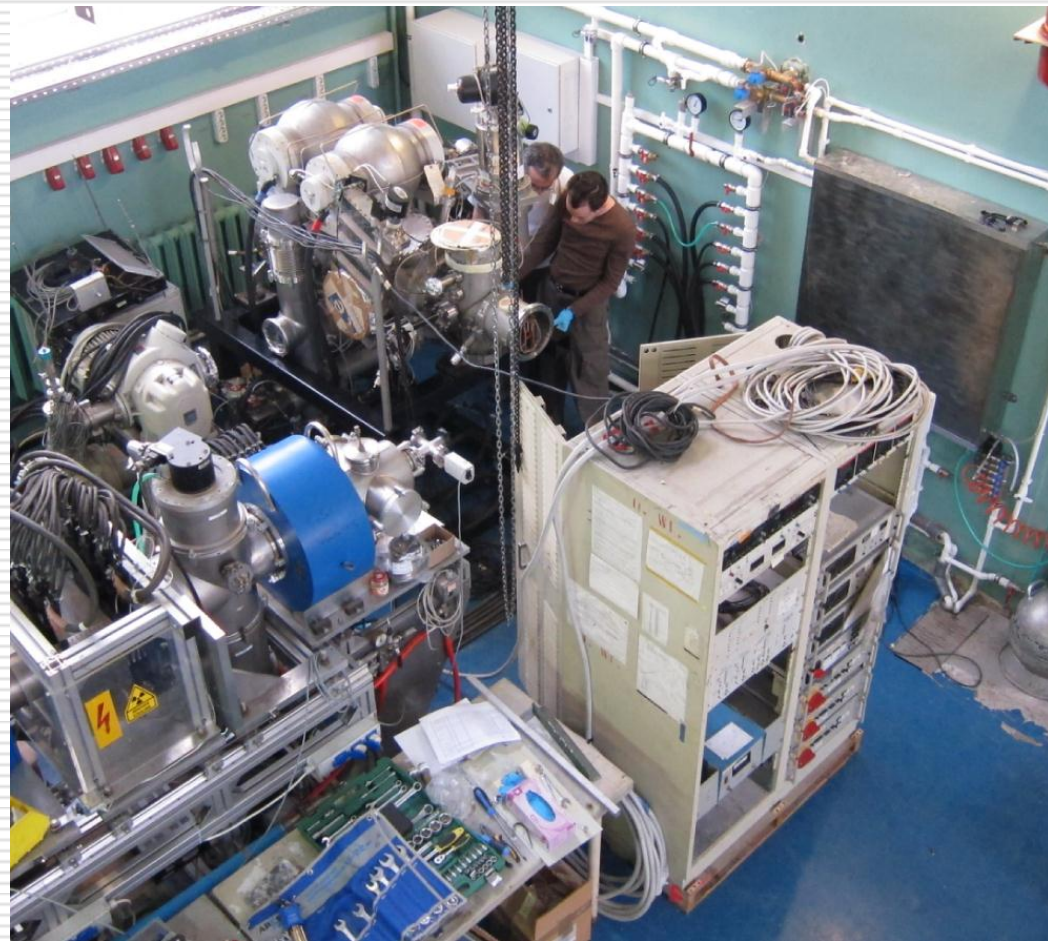
15 keV deuteron beam

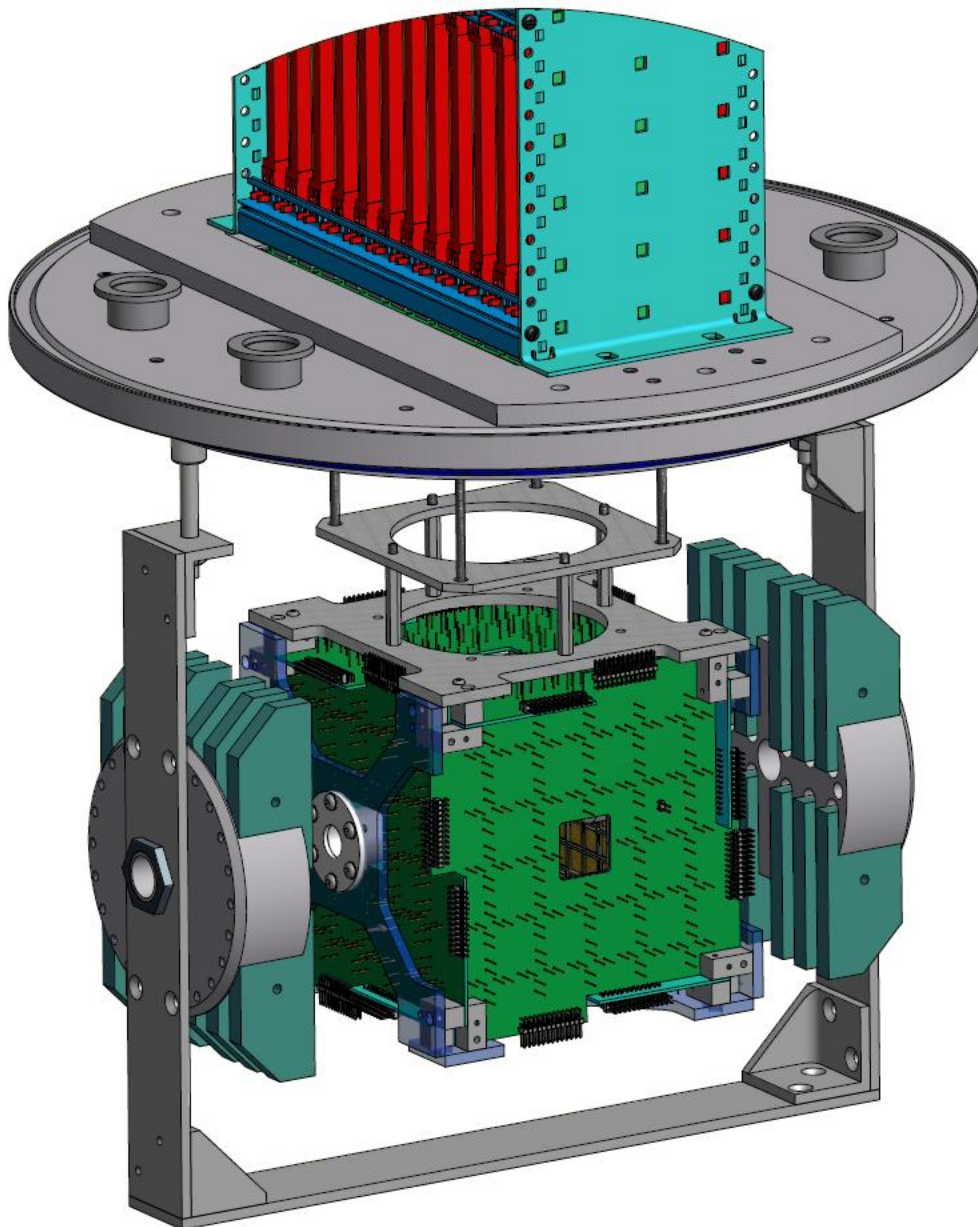
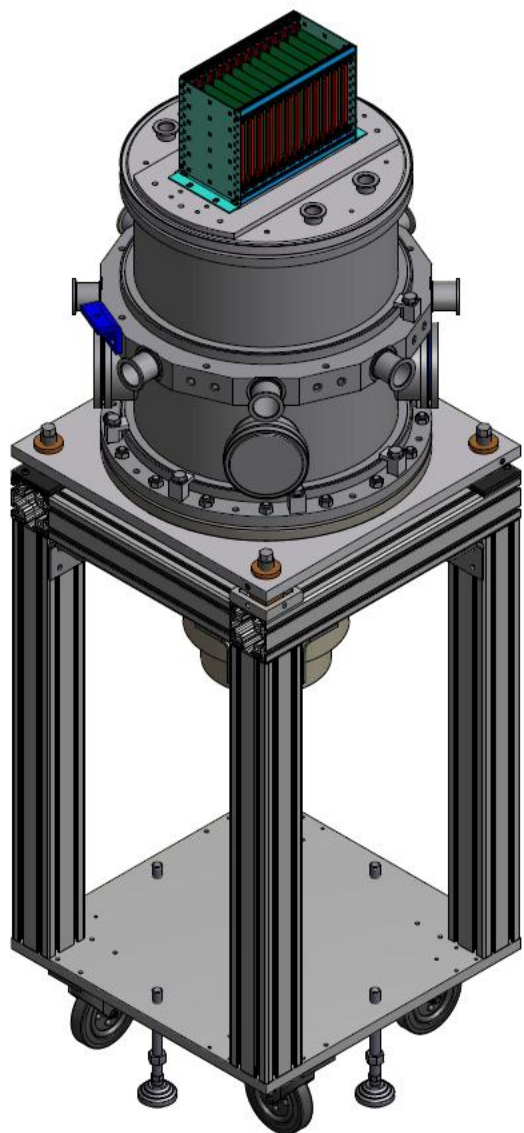
/readout_data/test/b15_1_ParAmpDif



Проблемы:

- Система охлаждения сопла;
- Выходы из строя вакуумных элементов
- Стандарты фланцевых соединений

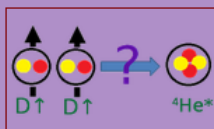








PolFusion Ferrara



[Home](#)

[Program](#)

[Register](#)

[Participants](#)

[Accommodation](#)

[Travel/Maps](#)

[Latex template](#)

Organized by:

-Markus Büscher

(PGI - FZJ - Jülich)

-Giuseppe Ciullo

(INFN / Univ. of Ferrara)

-Ralf Engels

(IKP - FZJ - Jülich)

-Alexander Vasilyev

(PNPI-Gatchina)

Agenda

under construction

The program will not be strictly binding on time, to leave plenty of space for discussions. Therefore we present an agenda, which sets only the timing of breaks.

09:00 - Morning presentations and discussions
10:30 - Coffee Break
12:30 - Lunch
14:30 - Afternoon presentations and discussions
16:30 - Coffee Break
18:30 - End

The following sequence of presentations is planned:

Morning session: Presentation of PolFusion Project

Ciullo Giuseppe (INFN and Unife):

"Polarized Fusion and perspectives - Welcome, summary of the project" [PDF](#)

Alexander Vasilyev (PNPI-Gatchina Saint Petersburg):

"The double-polarized DD-fusion experiment at PNPI" [PDF](#)

Ralf Engels (FZJ - Juelich):

"Hyper-polarized deuterium molecules: An option to produce and store polarized fuel for nuclear fusion?" [PDF](#)

Markus Bücher (FZJ - Juelich):

"Will nuclear polarization survive in laser-induced plasmas?" [PDF](#)

Afternoon Session: Related topics

Francesca Bombarda (CR ENEA - Frascati):

"Relevant spatial and time scale in tokamaks (+ Ignitor news)" [PDF](#)

Renato Gatto (Sapienza University of Rome):

"De-polarization effects in tokamak plasmas" [PDF](#)

Sergio Bartalucci (LNF-INFN Research Division):

Ion polarization in magnetic fields [PDF](#)



Создание экспериментальной установки координатор Кравцов П.А.

Источник поляризованных ионов и атомов Соловьев А.Н. (дис. тема)
Поляриметрия Соловьев И.Н. (дис. тема)

Электроника для детектора Неустроев П.В.
 Надточий А.В.

Участники все сотрудники ЛКСТ

Обработка данных и получение
физического результата координатор Кравченко П.В.

Шерман С.Г.
Комаров Е.Н.
Величко Г.Н.



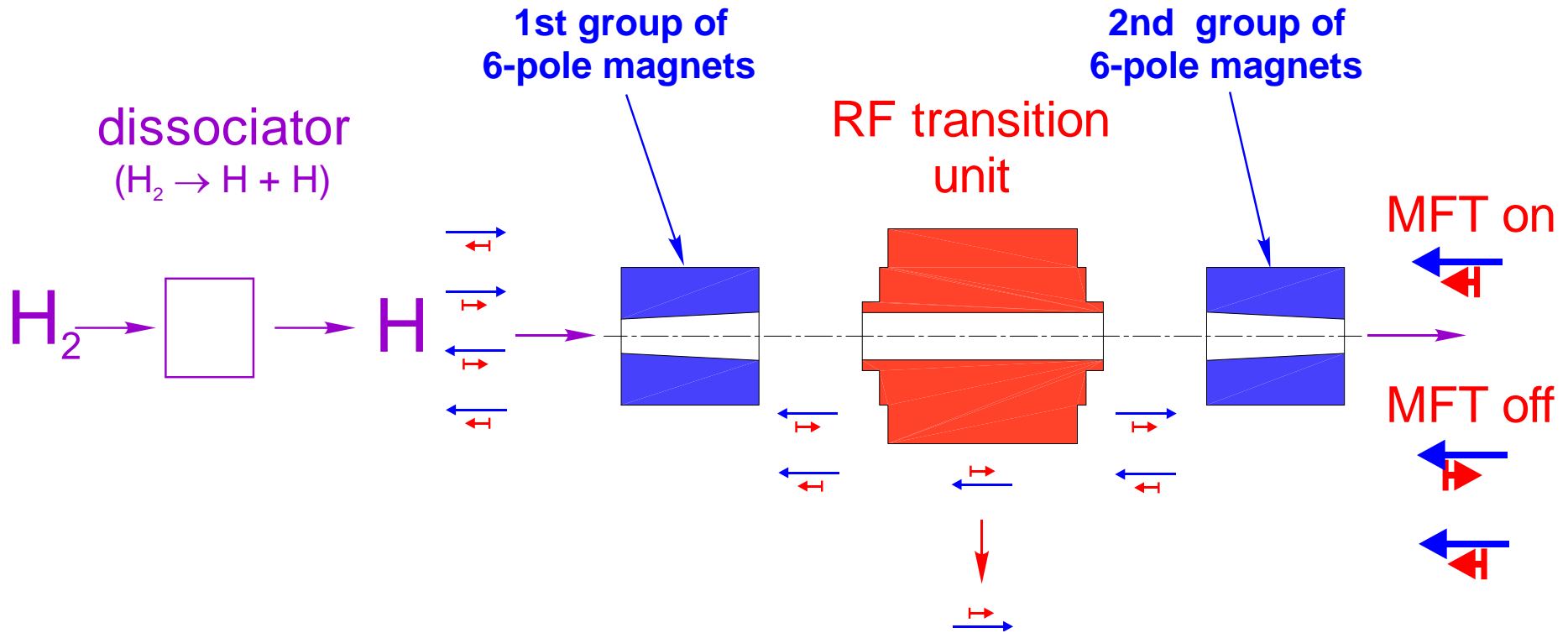
Статус элементов системы

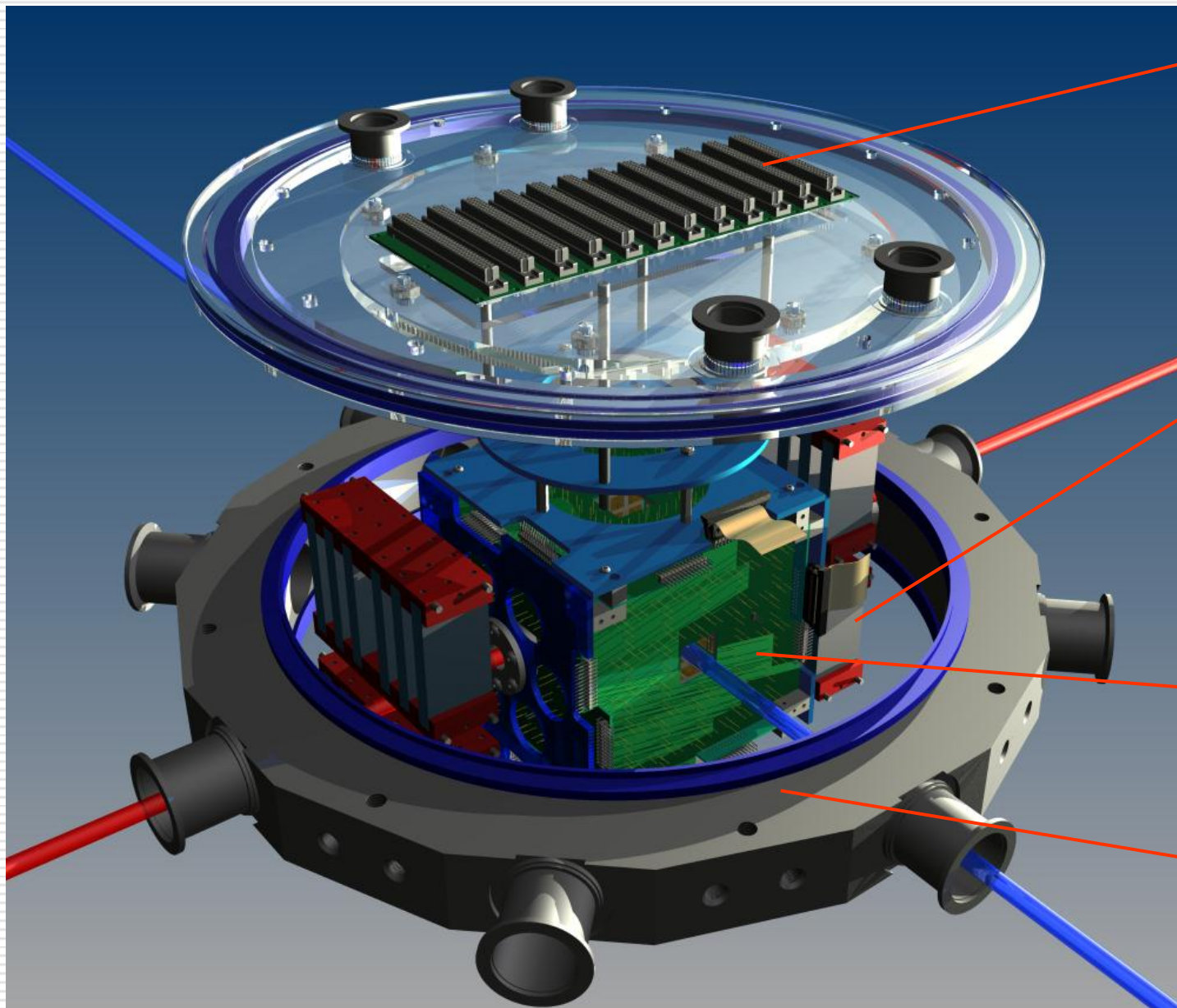
1. Источник ионов. Получен неполяризованный пучок 10 μA энергией до 30 keV. Требуется поляризованный пучок 20 μA до 100 keV
2. Запущены основные элементы источника поляризованных атомов. Создана новая система охлаждения сопла. Требуется получить поляризованный пучок 10^{16} атомов/s
3. Детекторная камера и магнитные элементы детектора. Прошли все вакуумные тесты. Камера готова.
4. Детекторная система. Все элементы готовы и прошли тесты. Окончательная сборка.
5. Программное обеспечение readout системы. В процессе разработки.
6. Системы поляриметрии. В процессе работы.

Плановая цель 2016 года:

При полной конфигурации системы зарегистрировать реакции dd синтеза при столкновении пучков неполяризованных (поляризованных?) дейтронов.







Разъемы для подключения электроники

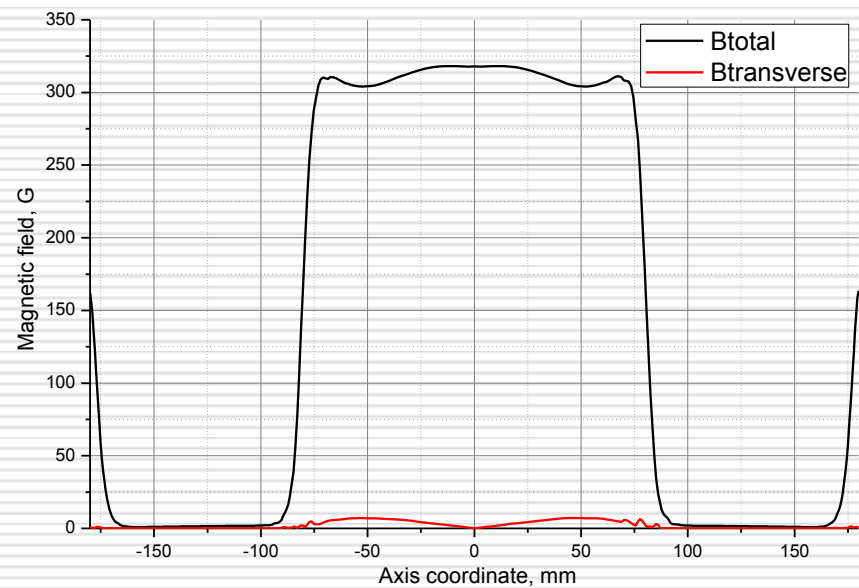
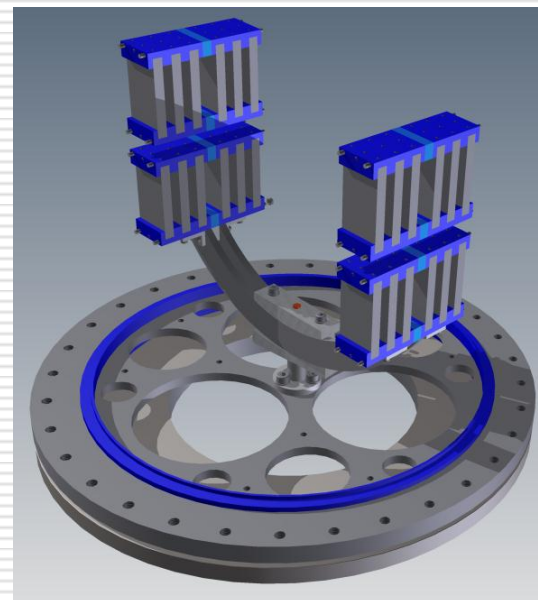
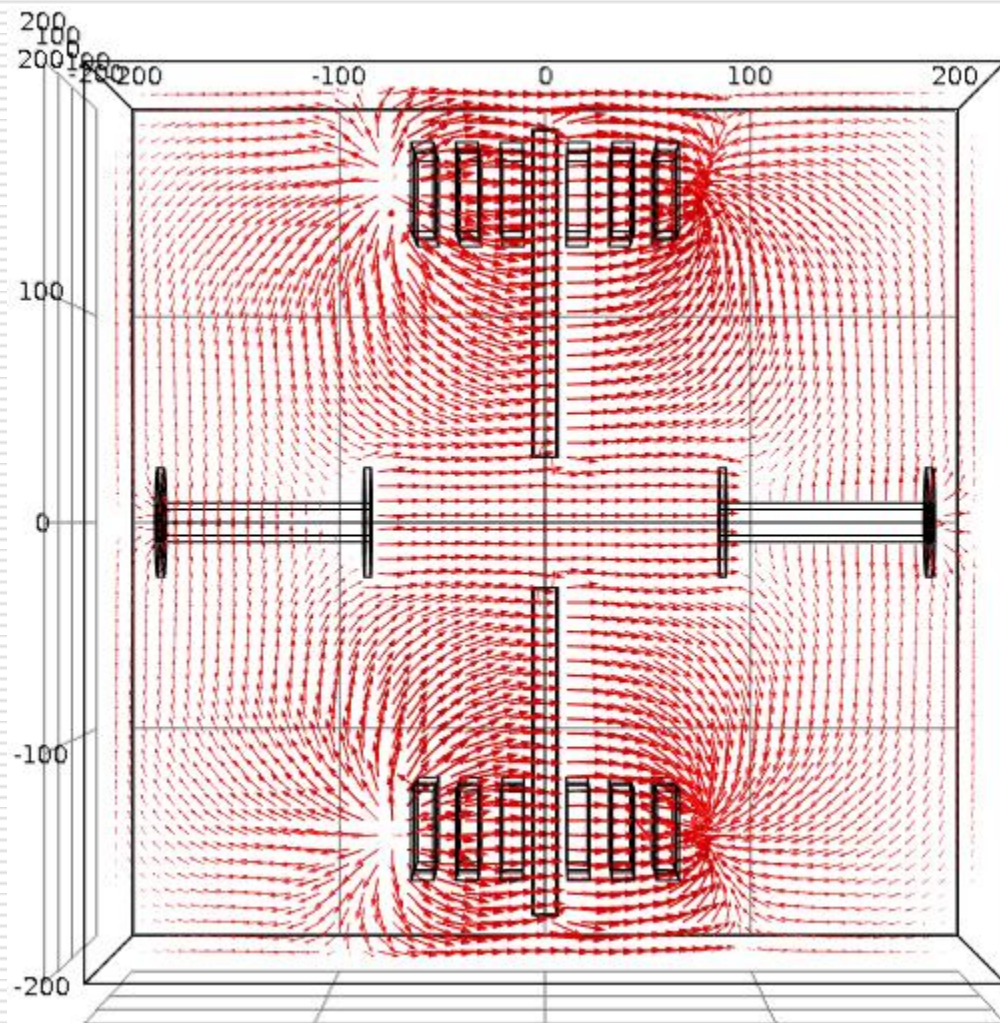
Постоянные NdFeB магниты

Детекторная система

Детекторная камера



Магнитная система детектора





$$\begin{aligned} \sigma(\Theta, \Phi) = \sigma_0(\Theta) \{ & 1 + \frac{3}{2} [A_y^{(b)}(\Theta)p_y + A_y^{(t)}q_y] + \frac{1}{2} [A_{zz}^{(b)}(\Theta)p_{zz} + A_{zz}^{(t)}(\Theta)q_{zz}] \\ & + \frac{1}{6} [A_{xx-yy}^{(b)}(\Theta)p_{xx-yy} + A_{xx-yy}^{(t)}(\Theta)q_{xx-yy}] \\ & + \frac{2}{3} [A_{xz}^{(b)}(\Theta)p_{xz} + A_{xz}^{(t)}(\Theta)q_{xz}] \\ & + \frac{9}{4} [C_{y,y}(\Theta)p_yq_y + C_{x,x}(\Theta)p_xq_x + C_{x,z}(\Theta)p_xq_z \\ & + C_{z,x}(\Theta)p_zq_x + C_{z,z}(\Theta)p_zq_z] \\ & + \frac{3}{4} [C_{y,zz}(\Theta)p_yq_{zz} + C_{zz,y}(\Theta)p_{zz}q_y] \\ & + C_{y,xz}(\Theta)p_yq_{xz} + C_{xz,y}(\Theta)p_{xz}q_y + C_{x,yz}(\Theta)p_xq_{yz} \\ & + C_{yz,x}(\Theta)p_{yz}q_x + C_{z,yz}(\Theta)p_zq_{yz} + C_{yz,z}(\Theta)p_{yz}q_z \\ & + \frac{1}{4} [C_{y,xx-yy}(\Theta)p_yq_{xx-yy} + C_{xx-yy,y}(\Theta)p_{xx-yy}q_y \\ & + C_{zz,zz}(\Theta)p_{zz}q_{zz}] \\ & + \frac{1}{3} [C_{zz,xz}(\Theta)p_{zz}q_{xz} + C_{xz,zz}(\Theta)p_{xz}q_{zz}] \\ & + \frac{1}{12} [C_{zz,xx-yy}(\Theta)p_{zz}q_{xx-yy} + C_{xx-yy,zz}(\Theta)p_{xx-yy}q_{zz}] \\ & + \frac{4}{9} [C_{xz,xz}(\Theta)p_{xz}q_{xz} + C_{yz,yz}(\Theta)p_{yz}q_{yz}] \\ & + \frac{8}{9} [C_{xy,yz}(\Theta)p_{xy}q_{yz} + C_{yz,xy}(\Theta)p_{yz}q_{xy}] \\ & + \frac{16}{9} C_{xy,xy}(\Theta)p_{xy}q_{xy} \\ & + \frac{1}{9} [C_{xz,xx-yy}(\Theta)p_{xz}q_{xx-yy} + C_{xx-yy,xz}(\Theta)p_{xx-yy}q_{xz}] \\ & + \frac{1}{36} C_{xx-yy,xx-yy}(\Theta)p_{xx-yy}q_{xx-yy} \\ & + \frac{1}{2} [C_{x,xy}(\Theta)p_xq_{xy} + C_{xy,x}(\Theta)p_{xy}q_x + C_{z,xy}(\Theta)p_zq_{xy} \\ & + C_{xy,z}(\Theta)p_{xy}q_z] \} \end{aligned}$$

Для описания наблюдаемых необходимо знать 36 параметров

При пучках с цилиндрической симметрией:

только $p_z(q_z)$ and $p_{zz}(q_{zz}) \neq 0$

$$\sigma(\Theta, \Phi) = \sigma_0(\Theta) \left\{ 1 + \frac{3}{2} [A_{zz}^{(b)}(\Theta)p_{zz} + A_{zz}^{(t)}(\Theta)q_{zz}] + \frac{9}{4} C_{z,z}(\Theta)p_zq_z + \frac{1}{4} C_{zz,zz}(\Theta)p_{zz}q_{zz} \right\}$$

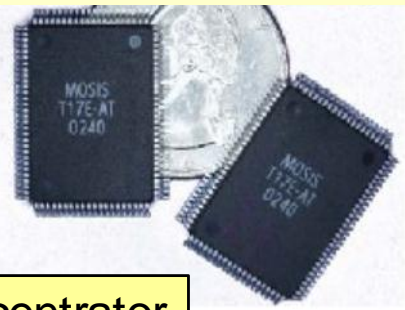
Поляризован только один дейтрон:

$(p_{i,j} \neq 0, q_{i,j} = 0)$

$$\begin{aligned} \sigma(\Theta, \Phi) = \sigma_0(\Theta) \cdot \{ & 1 + 3/2 A_y(\Theta) p_y \\ & + 1/2 A_{xz}(\Theta) p_{zz} \\ & + 1/6 A_{xx-yy}(\Theta) p_{xx-yy} \\ & + 2/3 A_{zz}(\Theta) p_{xz} \} \end{aligned}$$

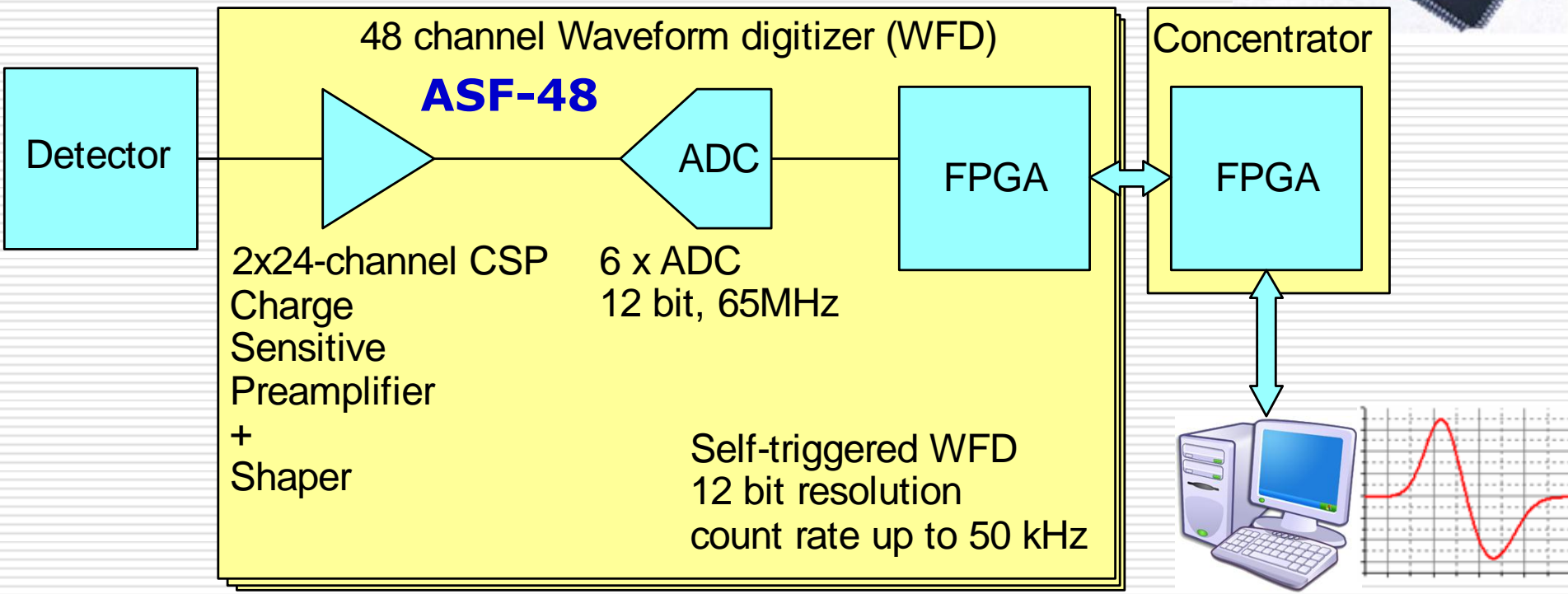
CSP from ATLAS CSC [BNL]

Junnarkar et al. IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record (2005)



Требования:

- ❑ 600 каналов
- ❑ Полная скорость счета $\leq 1\text{kHz}$
- ❑ Стандартный интерфейс с ПК (Ethernet?)
- ❑ Self-trigger
- ❑ Синхронизация для анализа совпадений



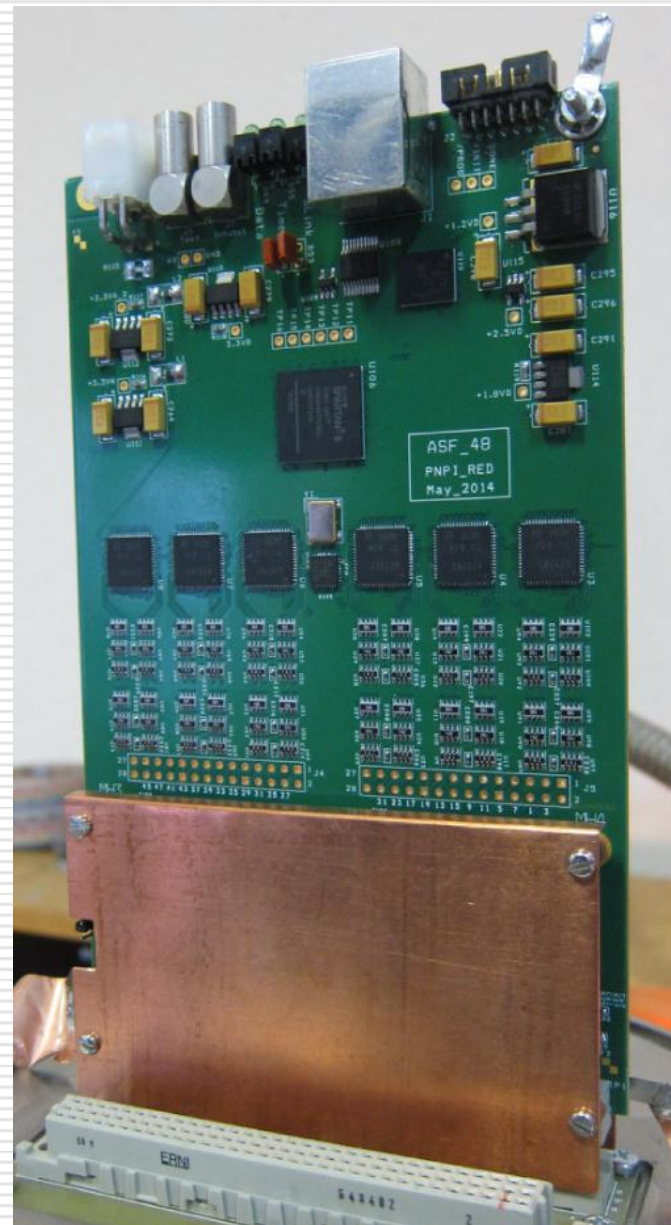
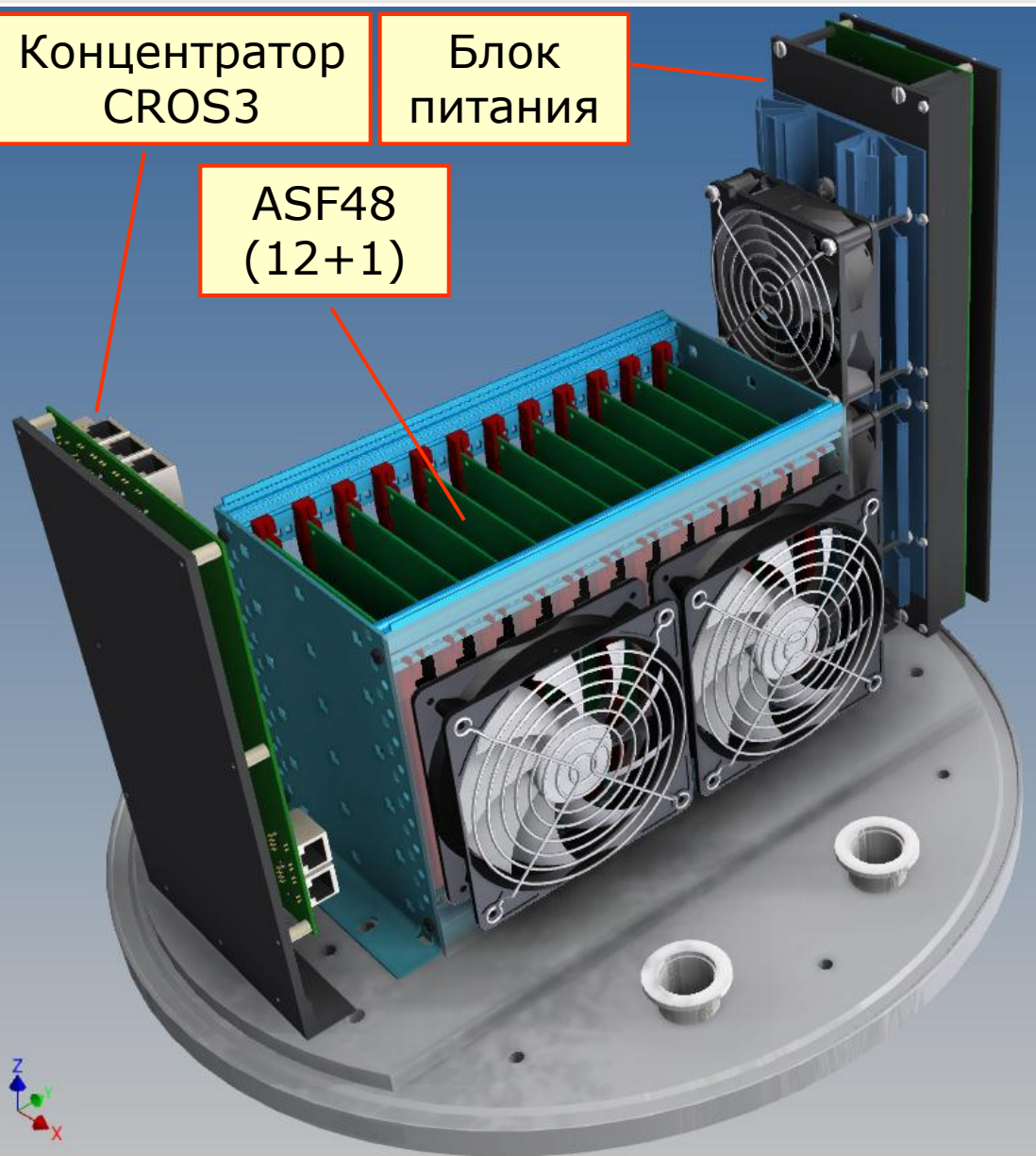


Модуль АЦП ASF-48

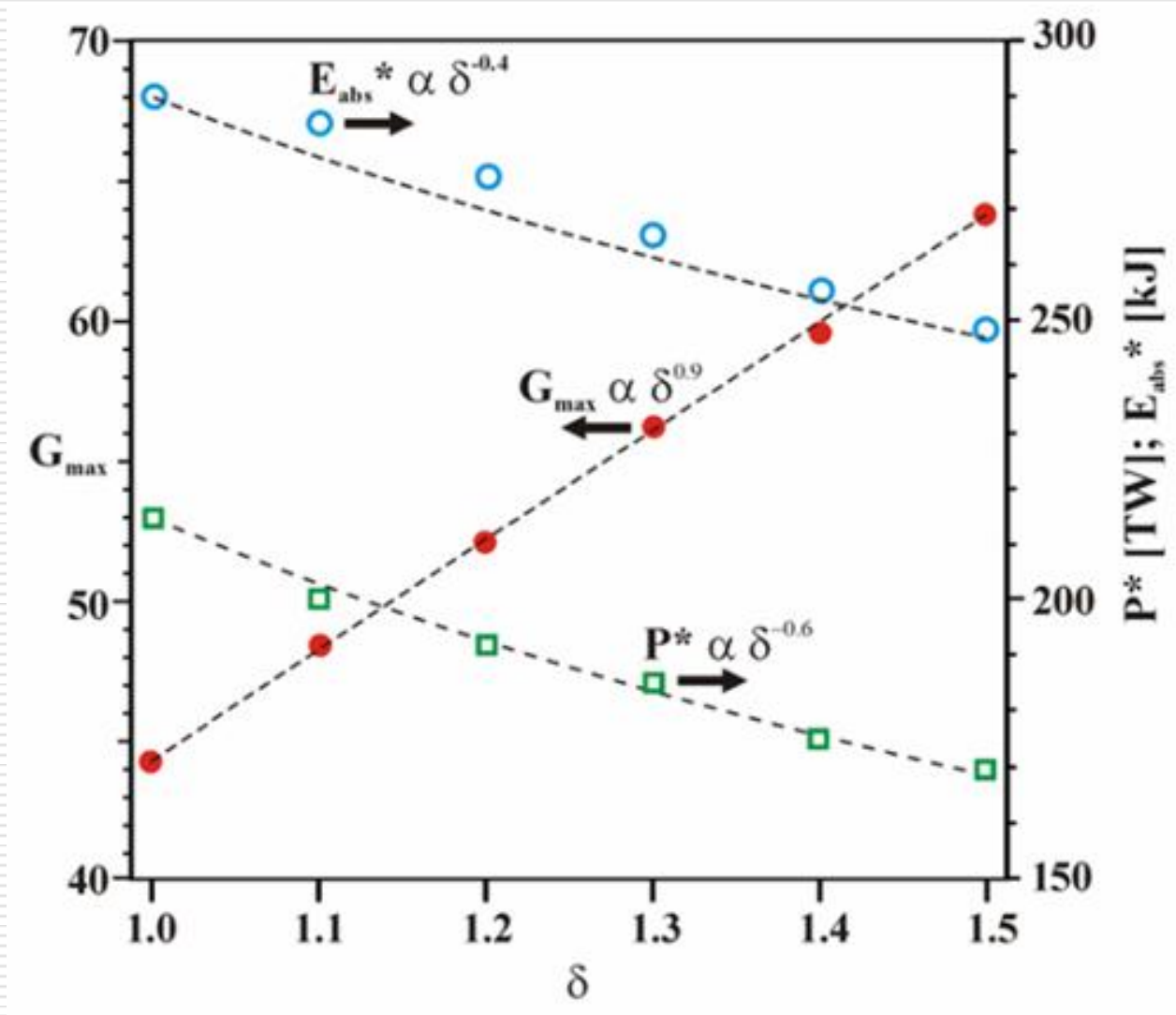
Концентратор
CROS3

Блок
питания

ASF48
(12+1)



Импульсный реактор с инерционным удержанием плазмы (D+T)



M. Temporal et al. Nucl. Fusion **52** (2012)



- ❑ K. Grigoryev et al., Double polarized dd-fusion experiment. **SPIN-2010**. Journal of Physics: Conference Series 295 (2011) 012168
- ❑ P. Kravtsov et al., Double polarized dd-fusion. **PSTP-2011**, St.-Petersburg, Russia.
- ❑ R. Engels et al., Polarized Fusion. **SPIN-2012**. Physics of Particles and Nuclei, Vol. 45, No. 1, pp. 341–343 (2014).
- ❑ P. Kravchenko, Current status of physics analysis and data analysis software for PolFusion experiment in PNPI, Gatchina. Nuclear fusion with polarized nucleons. International meeting, Trento (**2013**).
- ❑ P. Kravtsov, Status of the double-polarized DD-Fusion Experiment. Nuclear fusion with polarized nucleons. International meeting, Trento (**2013**).
- ❑ R. Engels et al., Polarized Fusion: Can Polarization Help to Increase the Energy Output of Fusion Reactors? **SPIN-2014**.



BACKUP



Ордена Ленина

ИАЭ-2704

Институт атомной энергии
им. И. В. Курчатова

Б. П. Адьяевич, В. Г. Антоненко

Измерение коэффициентов
корреляции поляризаций
в реакциях ${}^2\text{H}(\vec{d}, p){}^3\text{H}$ и ${}^2\text{H}(\vec{d}, n){}^3\text{He}$

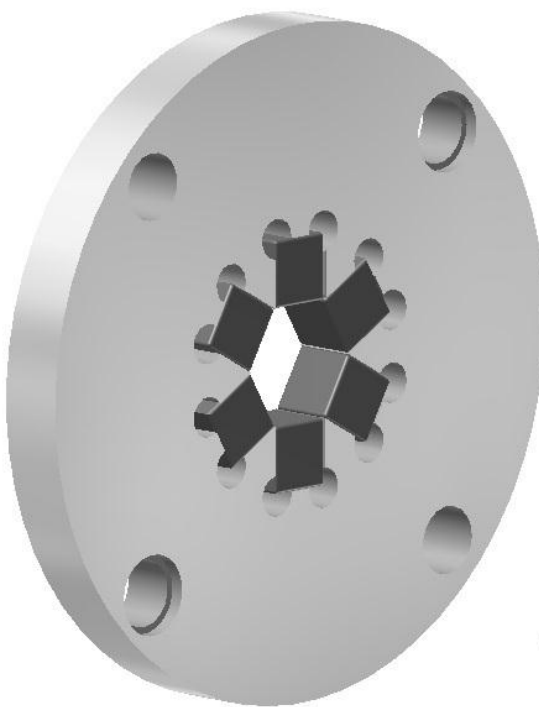
Москва 1976

Б.П. Адьяевич
В.Г. Антоненко

1976

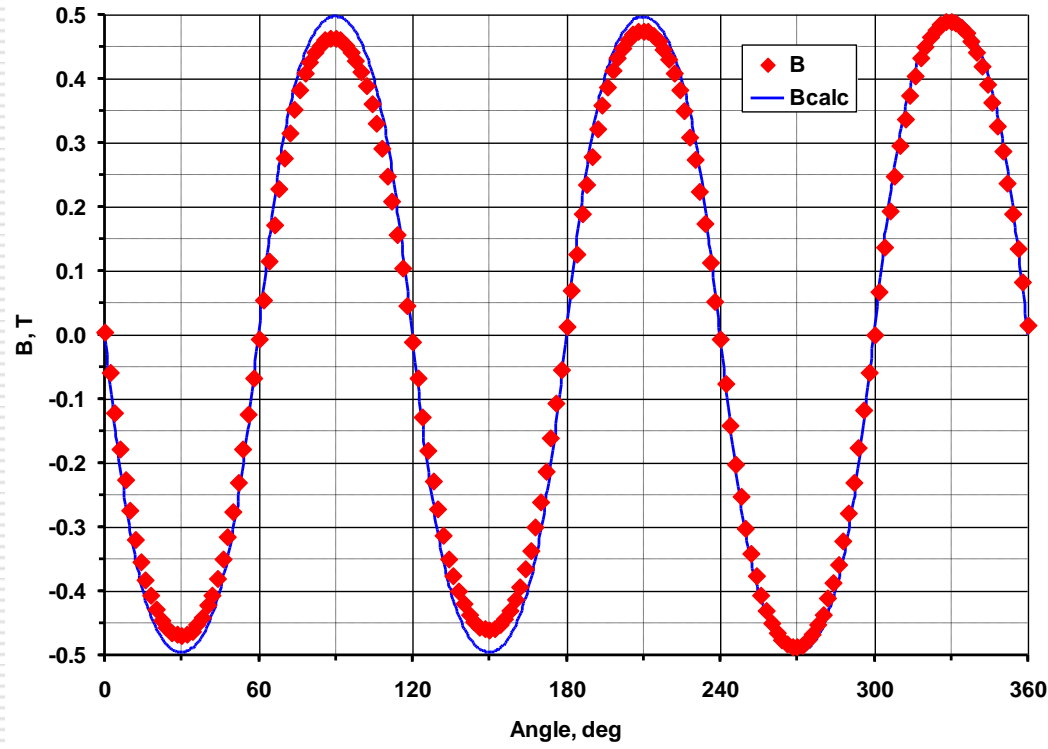
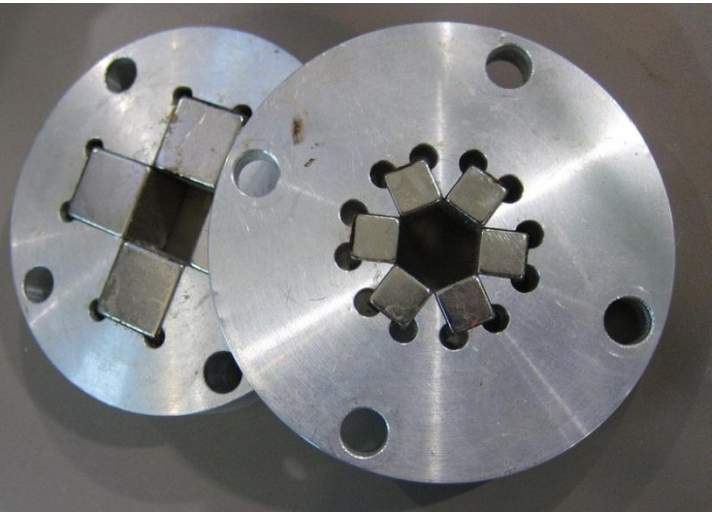
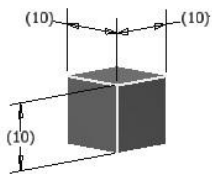
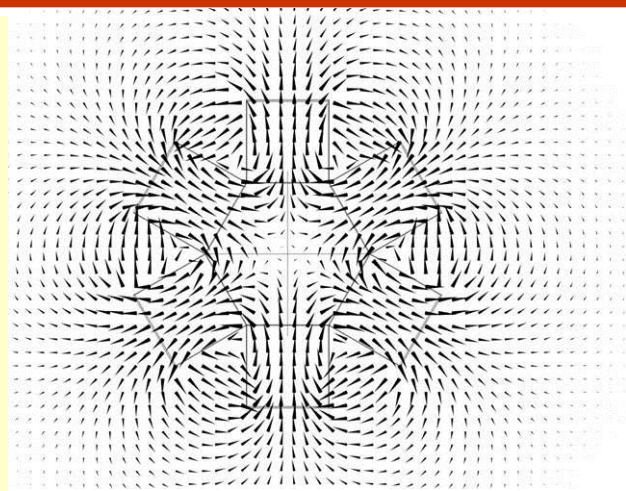


Постоянные многополюсные магниты



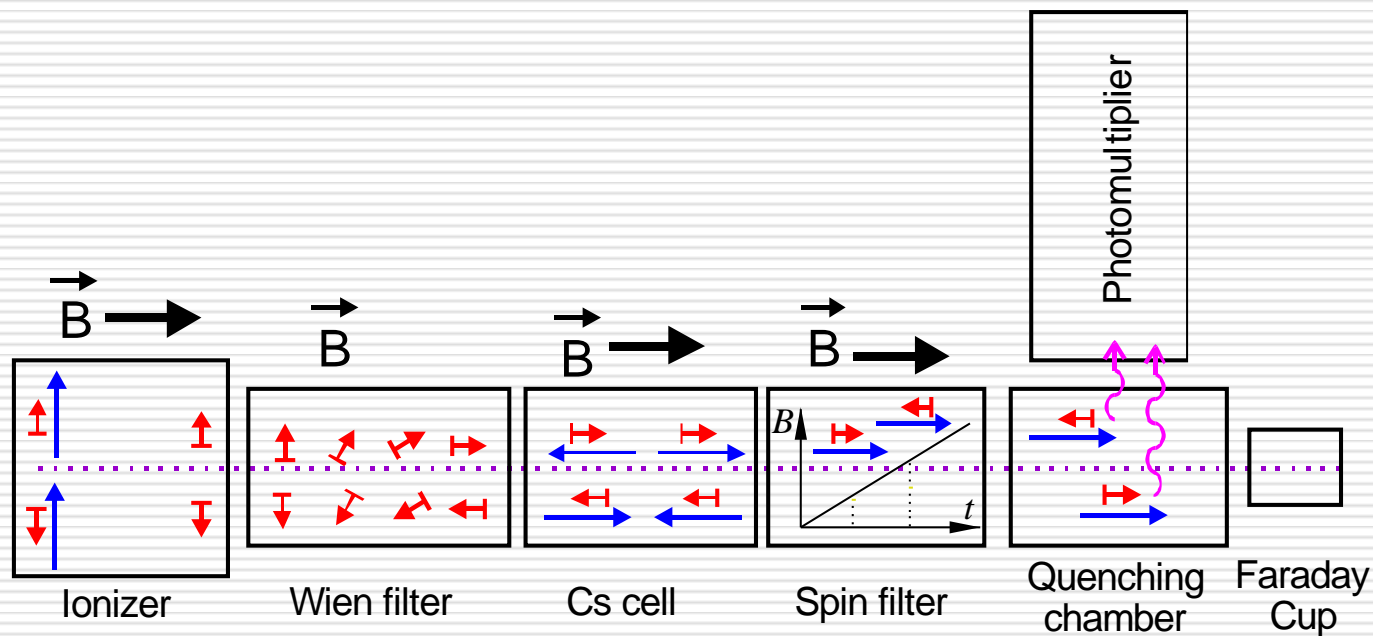
- Трехмерный расчет поля
- Бюджетные NdFeB магниты

Многополюсные неодимовые магниты для источника поляризованных атомов
К. Ившин и др.,
Препринт РНФИ-2925 (2013)

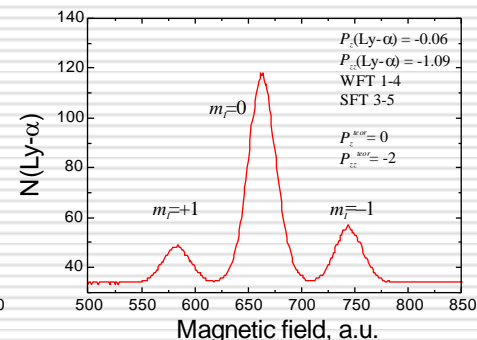
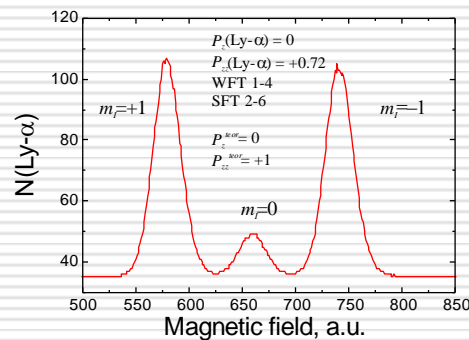
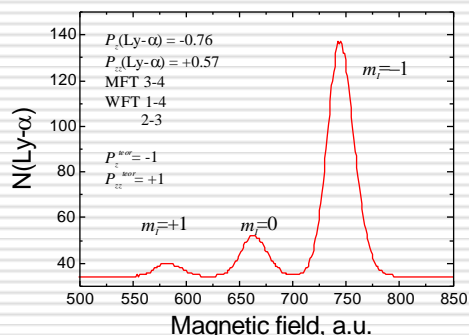
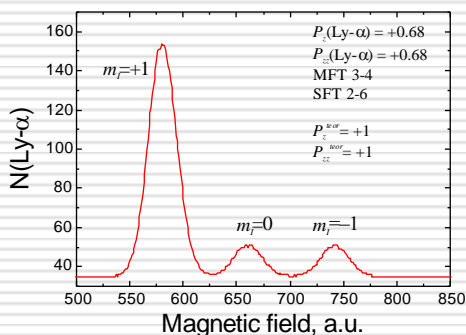




Polarization measurement



Atomic beam from the ABS → Ionization of atoms → Spin axis rotation → Ions to metastable atoms → Spin separation → Emission of photons → Ly- α spectrum

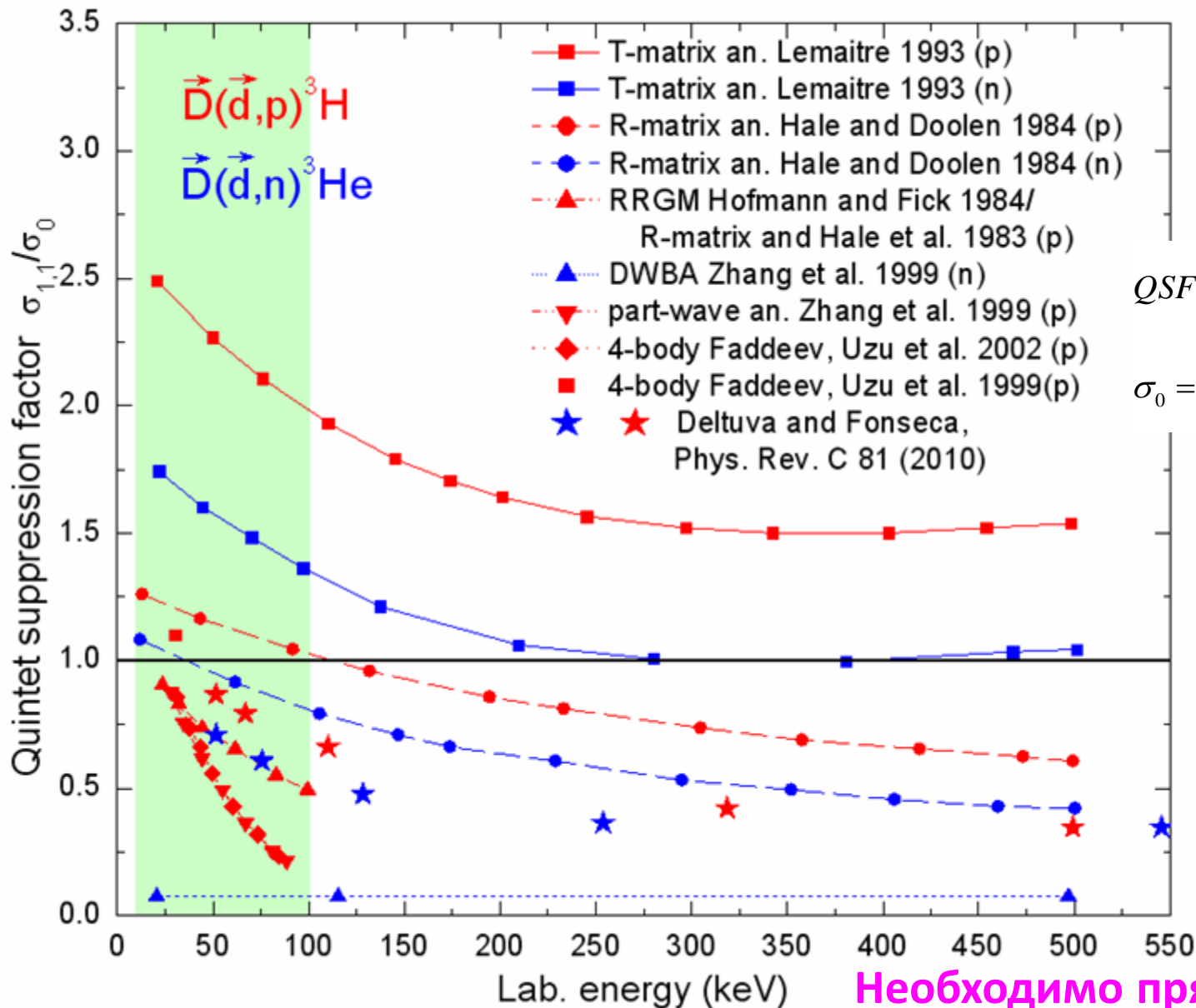




- Измерение сечения реакции поляризованного синтеза
- Систематические измерения спин-корреляционных коэффициентов
[R.M. Kulsrud *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1248 (1982)]
 ${}^3\text{He}+d \rightarrow {}^4\text{He}+p$: Factor ~ 1.5 at 430 keV
[Ch. Leemann *et al.*, *Annals of Phys.* **66**, 810 (1971)]
- Измерение подавления нейтронного канала реакции
Quintet suppression factor
[H. Paetz *gen. Schieck*, *Eur. Phys. J. A* **44**, 321–354 (2010)]
[Deltuva and Fonseca, *Phys. Rev. C* **81** (2010)]
- Измерение углового распределения продуктов реакции
- Исследование возможности практического использования поляризованного топлива
Persistence of the Polarization in a Fusion Process
[J.-P. Didelez and C. Deutsch. *Few-Body Conference, Bonn* (2009)]

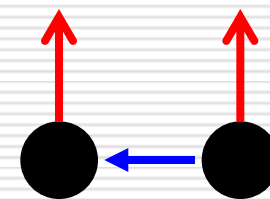


The Quintet suppression factor



$$QSF = \frac{\sigma_{1,1}}{\sigma_0}$$

$$\sigma_0 = \frac{1}{9} (2\sigma_{1,1} + 4\sigma_{1,0} + \sigma_{0,0} + 2\sigma_{1,-1})$$



Необходимо прямое измерение!