



ПОЛЯРИЗОВАННЫЙ DD-СИНТЕЗ (POLFUSION)

Петербургский институт ядерной физики

Forschungszentrum Jülich, Germany

Cologne University, Germany

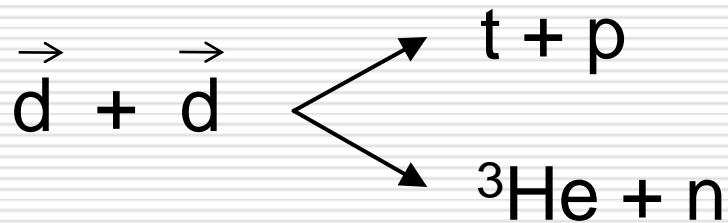
Ferrara University, Italy

Финансовая поддержка:
МНТЦ (проект #3881)
DFG

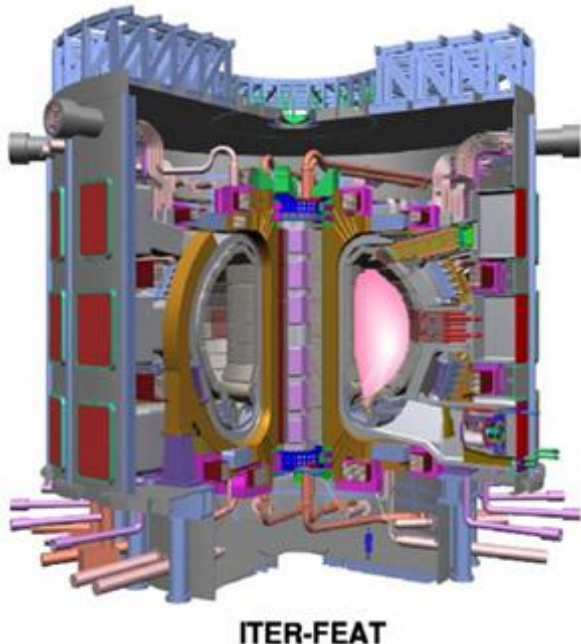


Цели и задачи эксперимента

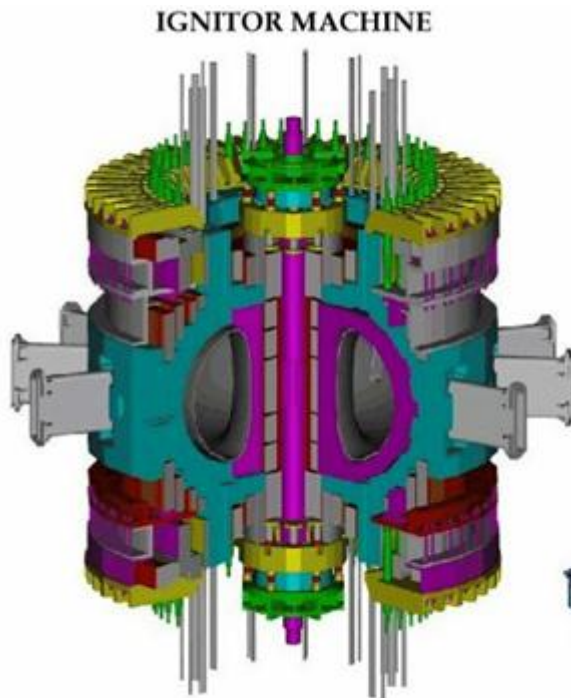
Исследование основной 4-нуклонной реакции с поляризацией **обеих** исходных частиц при низких энергиях (до 100кэВ).



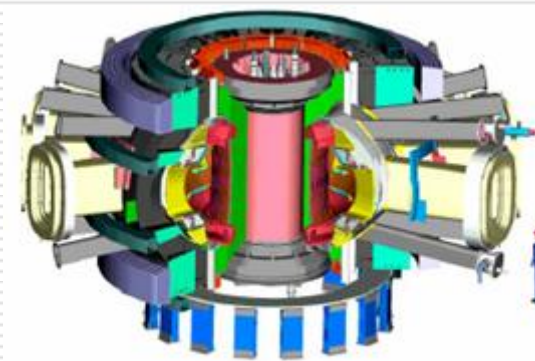
- Систематические измерения спин-корреляционных коэффициентов
- Измерение сечения реакции поляризованного синтеза
[R.M. Kulsrud *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1248 (1982)]
 ${}^3\text{He} + d \rightarrow {}^4\text{He} + p$: Factor ~ 1.5 at 430 keV
[Ch. Leemann *et al.*, *Annals of Phys.* **66**, 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)]



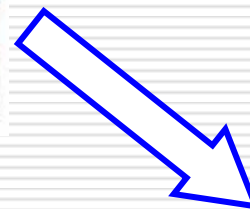
ITER-FEAT



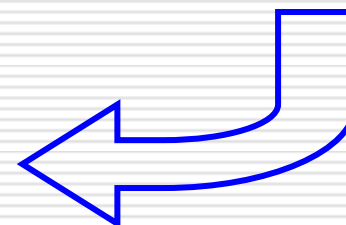
IGNITOR MACHINE



FIRE

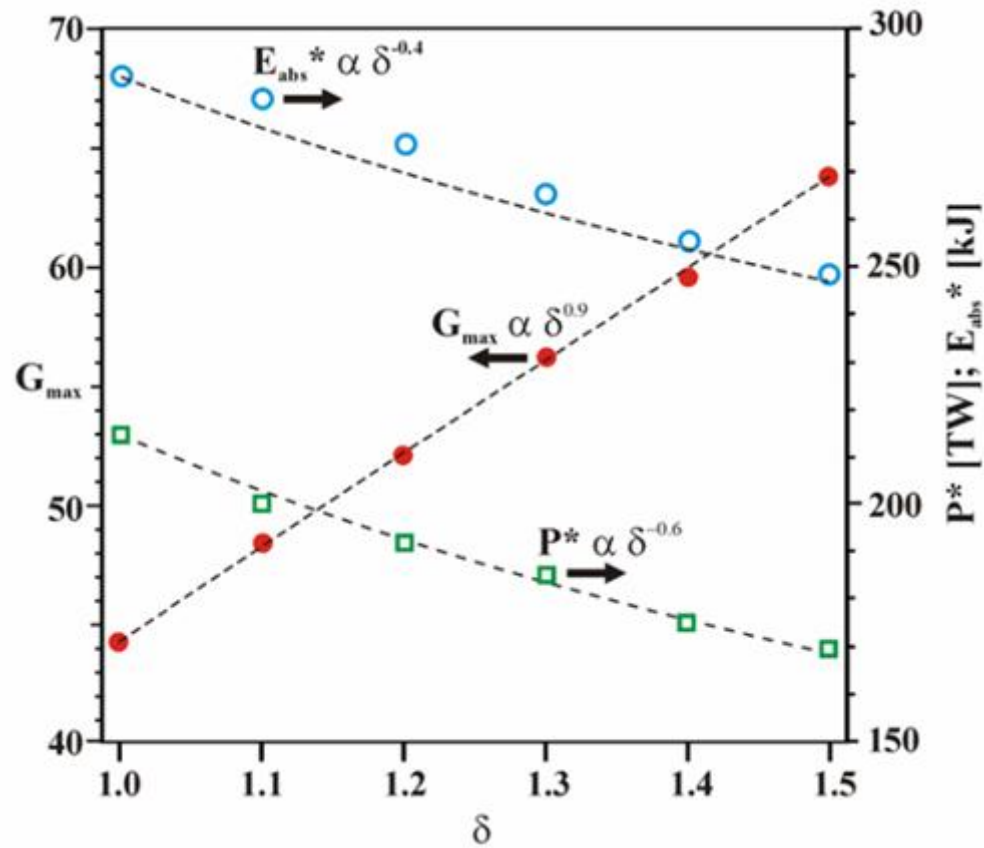
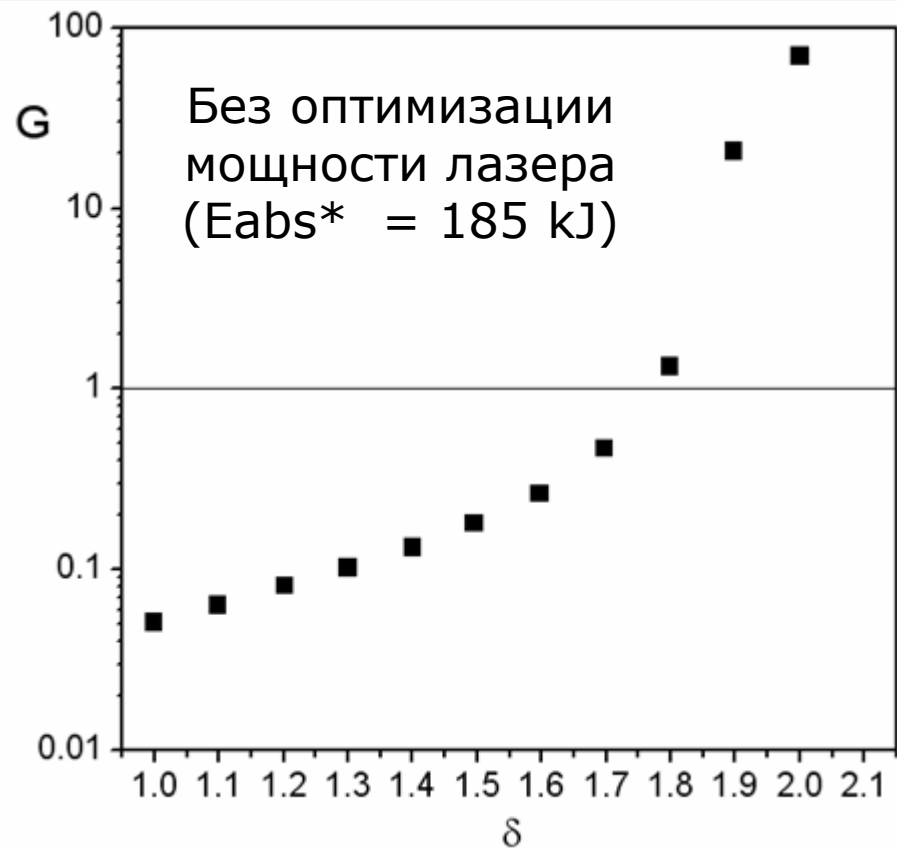


Россия (НИЦ КИ) + Италия



“Nuclear Fusion with Polarized Nucleons”
 September 2013 Meeting
 Organizers:
P. Lenisa (Univ. Ferrara) - Coordinator
R. Engels (FZ-Juelich)
A. Vasiliev (PNPI)
 R. Milner and **B. Coppi** (MIT, Boston)

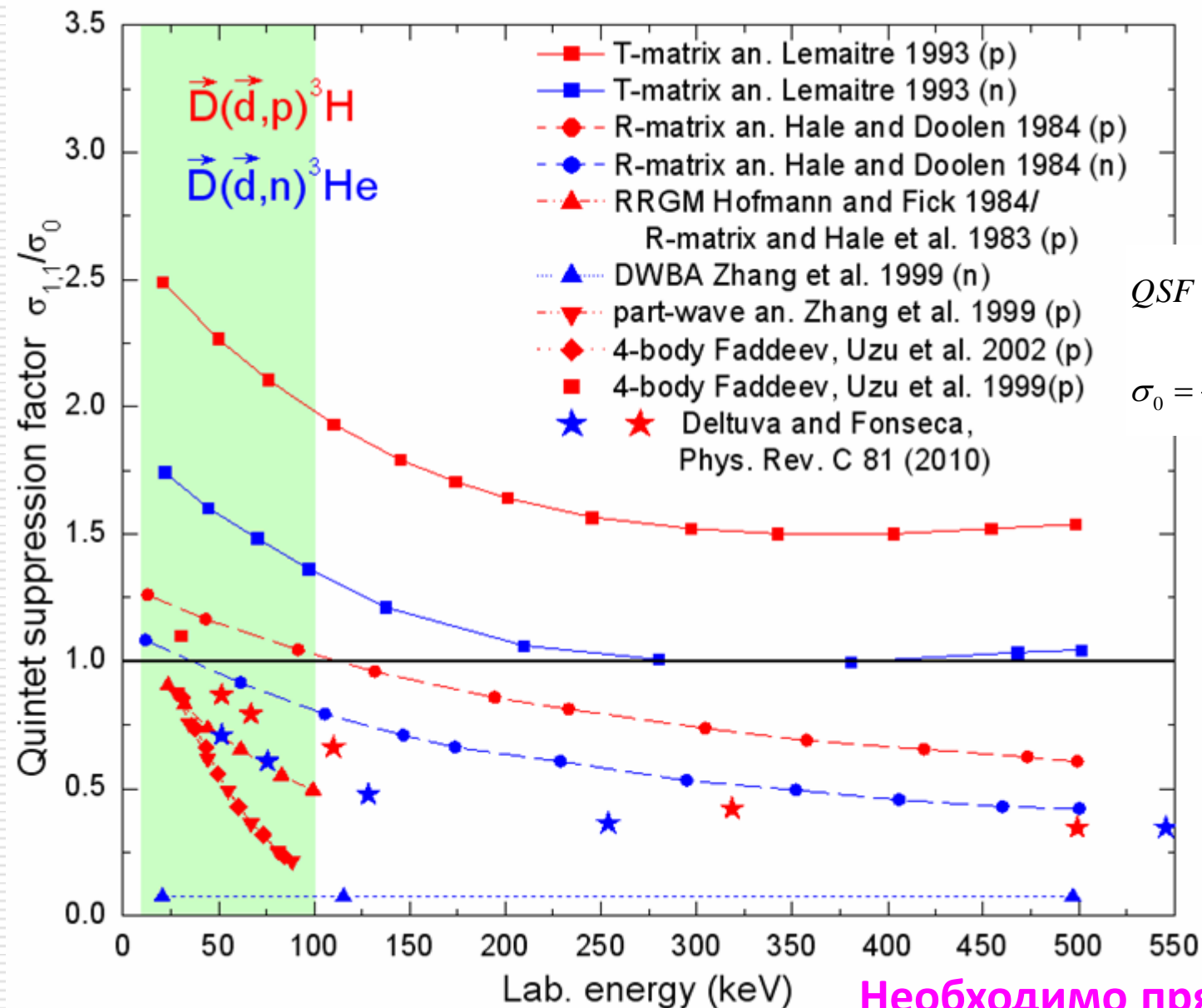
Импульсный реактор с инерционным удержанием плазмы (D+T)



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

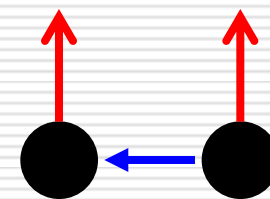


The Quintet suppression factor



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

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



Необходимо прямое измерение!



Схема эксперимента

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

ABS

Polarized Atomic Beam Source

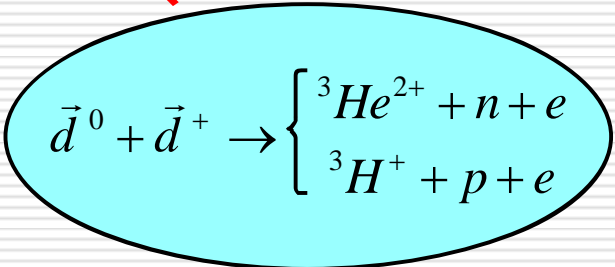
$I \sim 1 \cdot 10^{16}$ at/s

Target density $\sim 7 \cdot 10^{10}$ 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: $I \leq 20 \mu\text{A}$

$(1.3 \cdot 10^{14}$ d/s)

$E_{\text{beam}} \leq 32$ keV

Vector polarization: ± 0.7

\vec{d}^0 (0.1 eV)

LSP

Lamb-Shift Polarimeter

n (2.4 MeV),
 p (3.0 MeV)

Luminosity: $1.3 \cdot 10^{25}$ 1/cm² s

→ count rate: ~ 54 /h (30keV)

→ 2 month beam time



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

~~$\sim 1 \cdot 10^{16}$ at/s~~

Target density $\sim 2.8 \cdot 10^{11}$ at/cm²

~~Target density $\sim 7 \cdot 10^{10}$ at/cm²~~

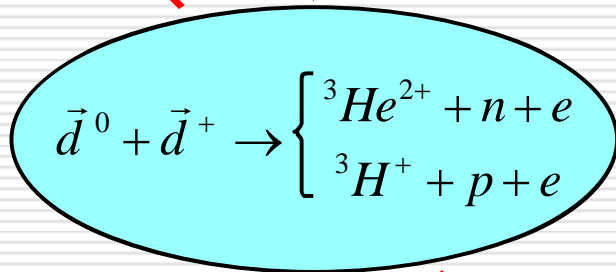
Vector polarization: ± 0.7

\vec{d}^0 (0.1 eV)



dd-polarimeter
or LSP

\vec{d}^+



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

Ion
source

Polarized Ion Source

Ion beam: $I \leq 20 \mu\text{A}$

$(1.3 \cdot 10^{14}$ d/s)

$E_{\text{beam}} \leq 32$ keV

Vector polarization: ± 0.7

\vec{d}^0 (0.1 eV)



LSP

Lamb-Shift Polarimeter

n (2.4 MeV),
 p (3.0 MeV)

Luminosity: $5.2 \cdot 10^{25}$ 1/cm² s

Luminosity: $1.3 \cdot 10^{25}$ 1/cm² s

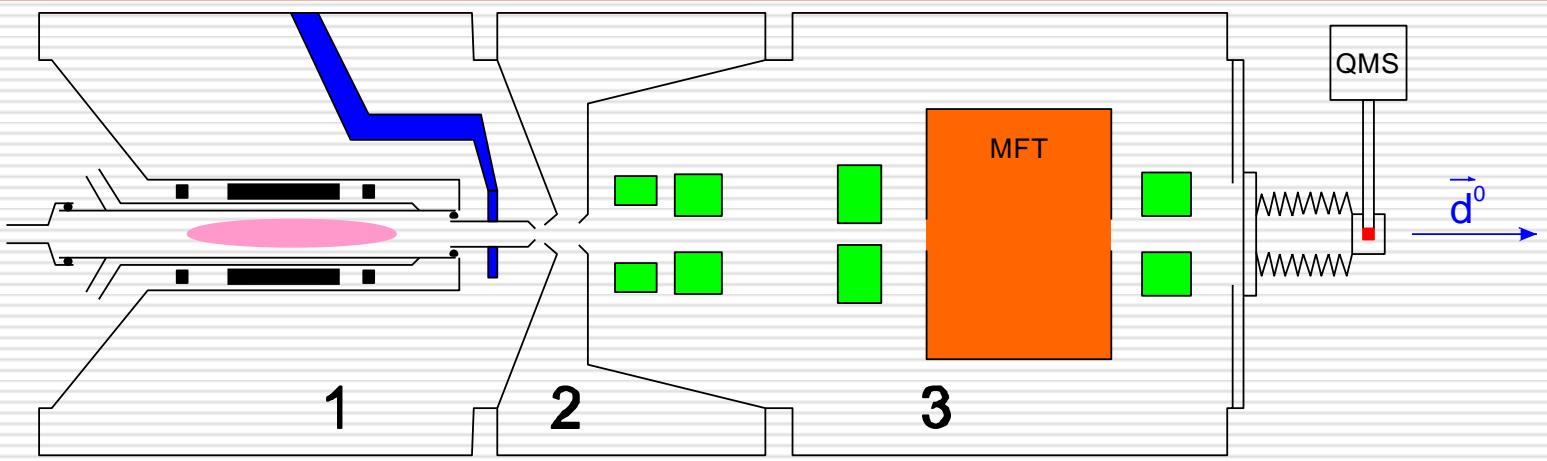
→ count rate: $\sim 216/\text{h}$ (30keV)

→ count rate: $\sim 54/\text{h}$ (30keV)

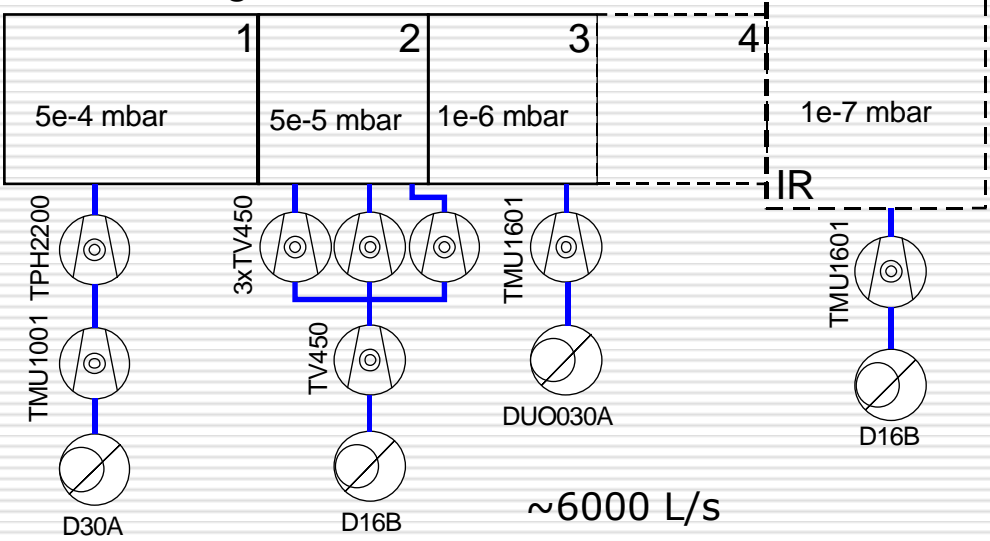
→ 3 week beam time

→ 2 month beam time

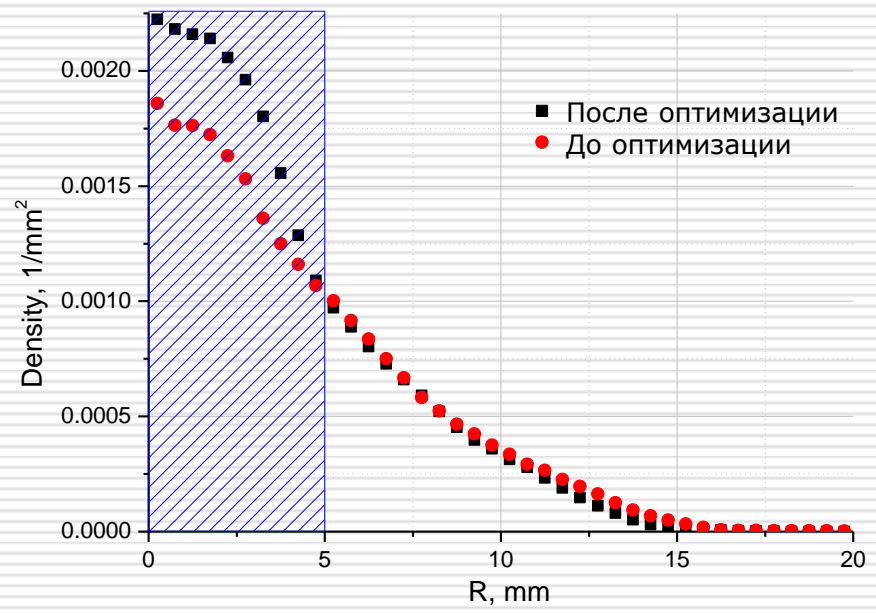
Источник поляризованных атомов (ABS)

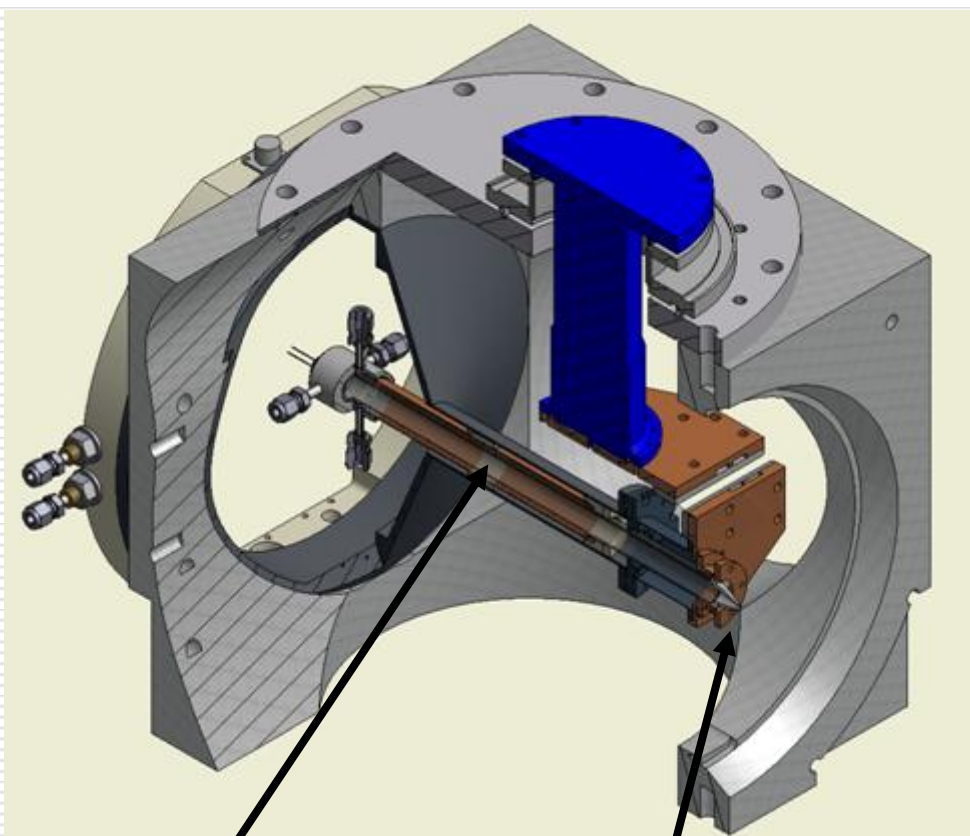


ABS stages



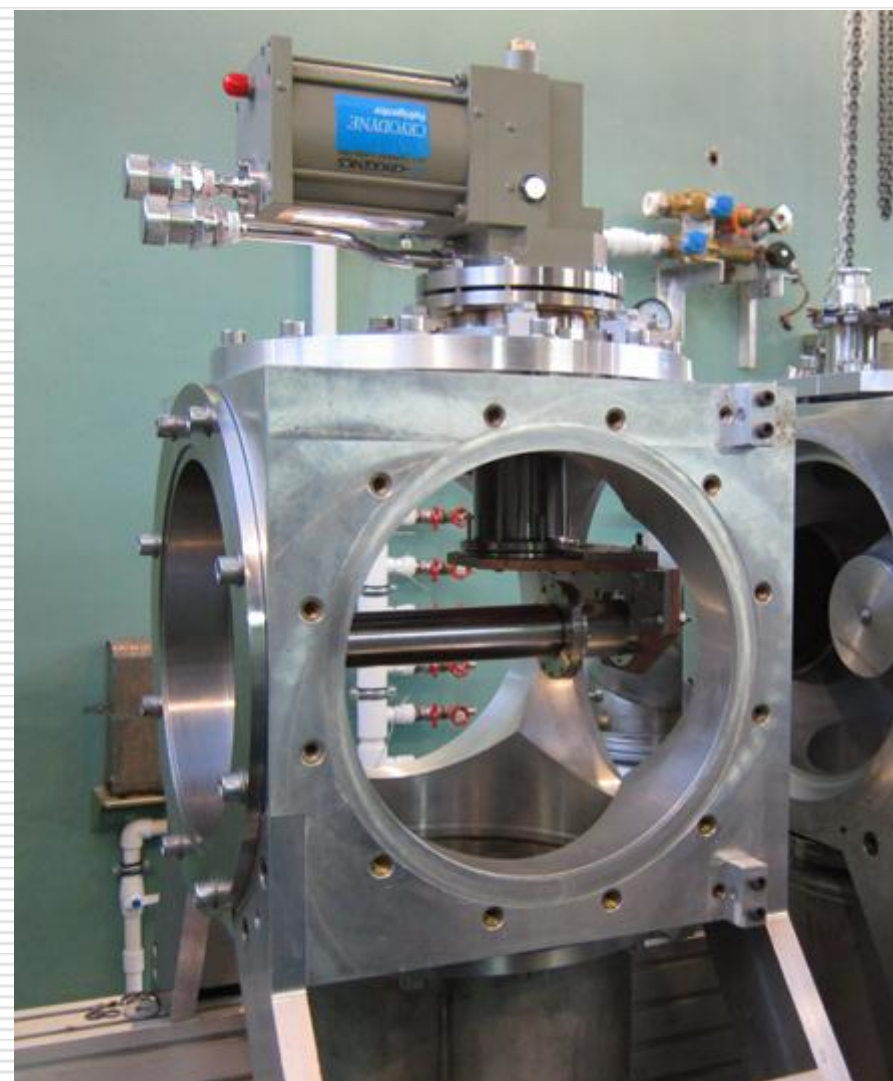
Оптимизация магнитной системы





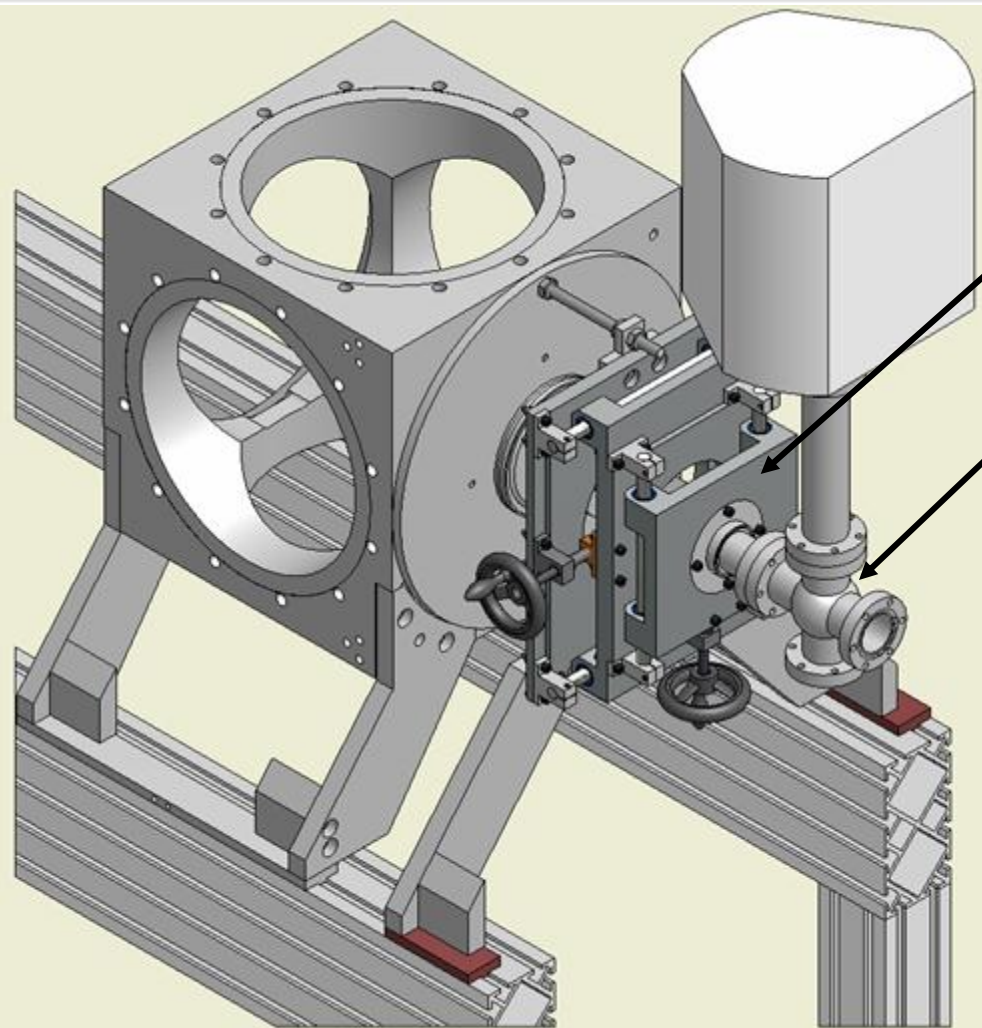
Плазма

Охлаждаемое сопло
(70-300К)





Измерение интенсивности и степени диссоциации



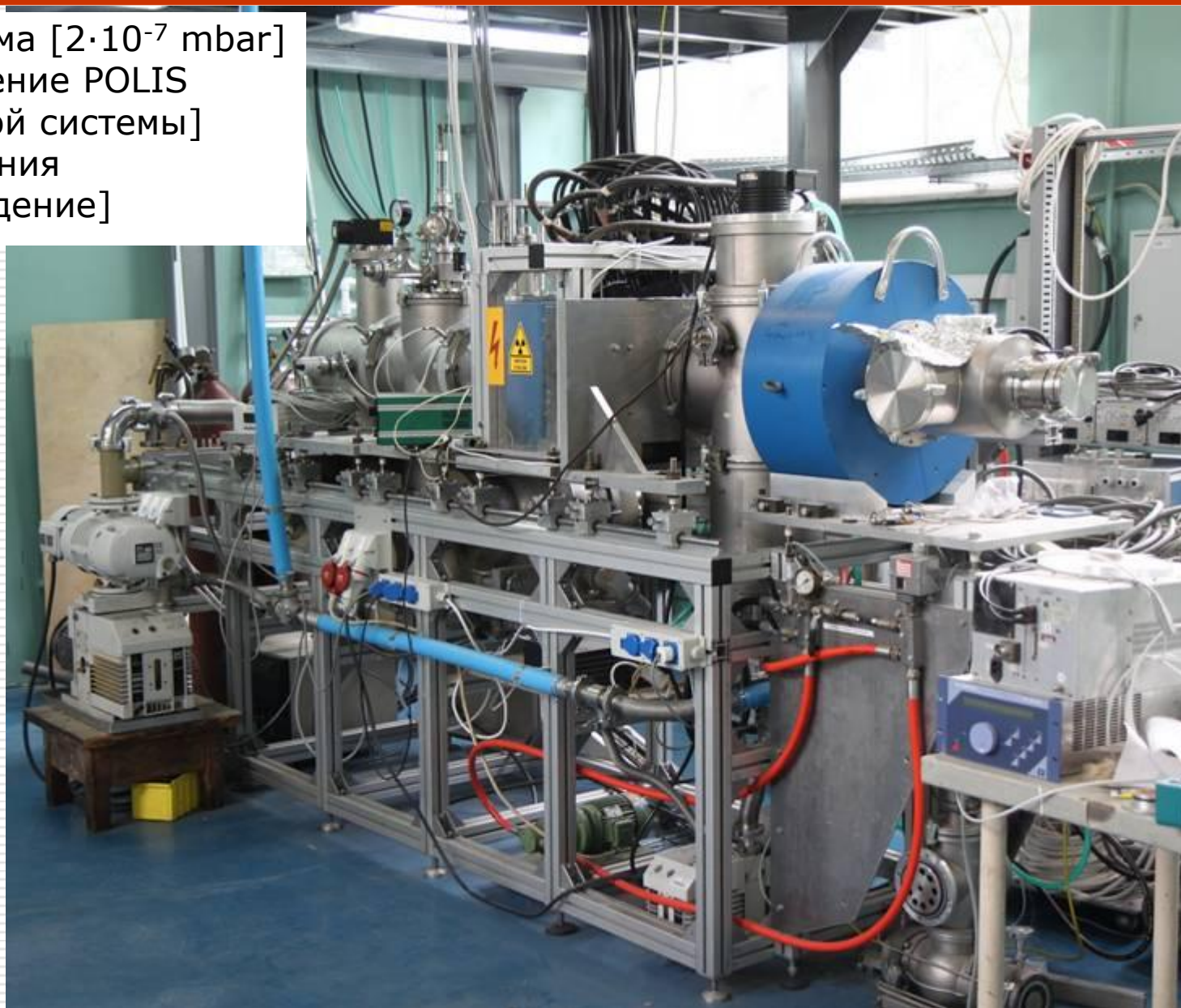
Двухкоординатный стол

- QMS
- компрессионная трубка
- Faraday cup



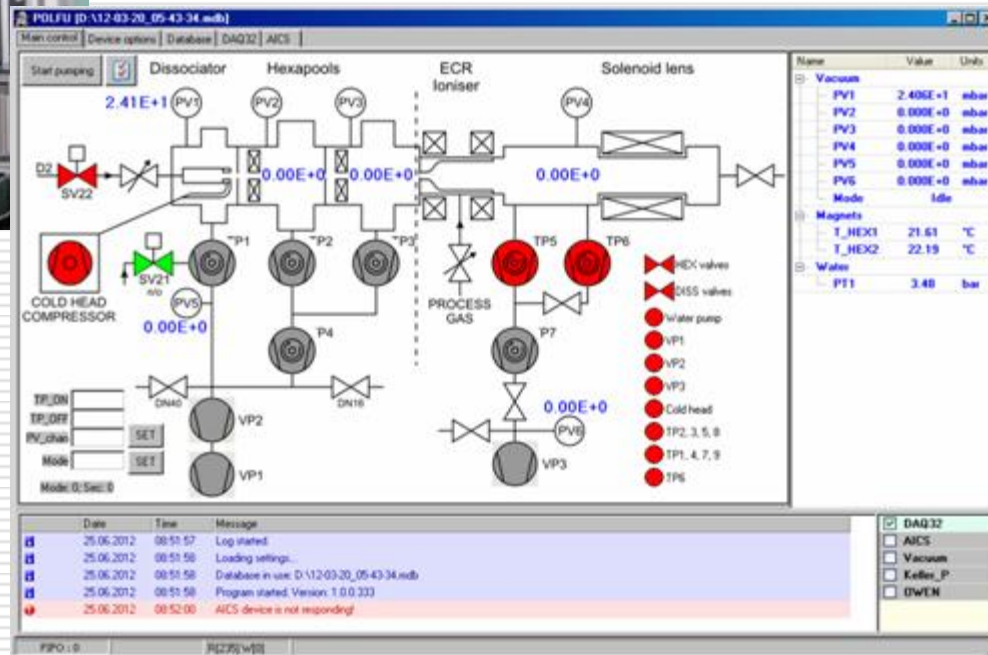
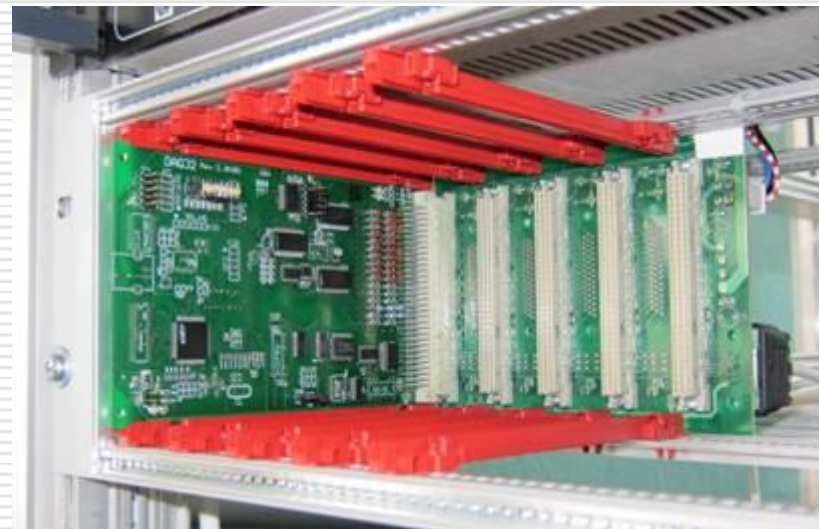


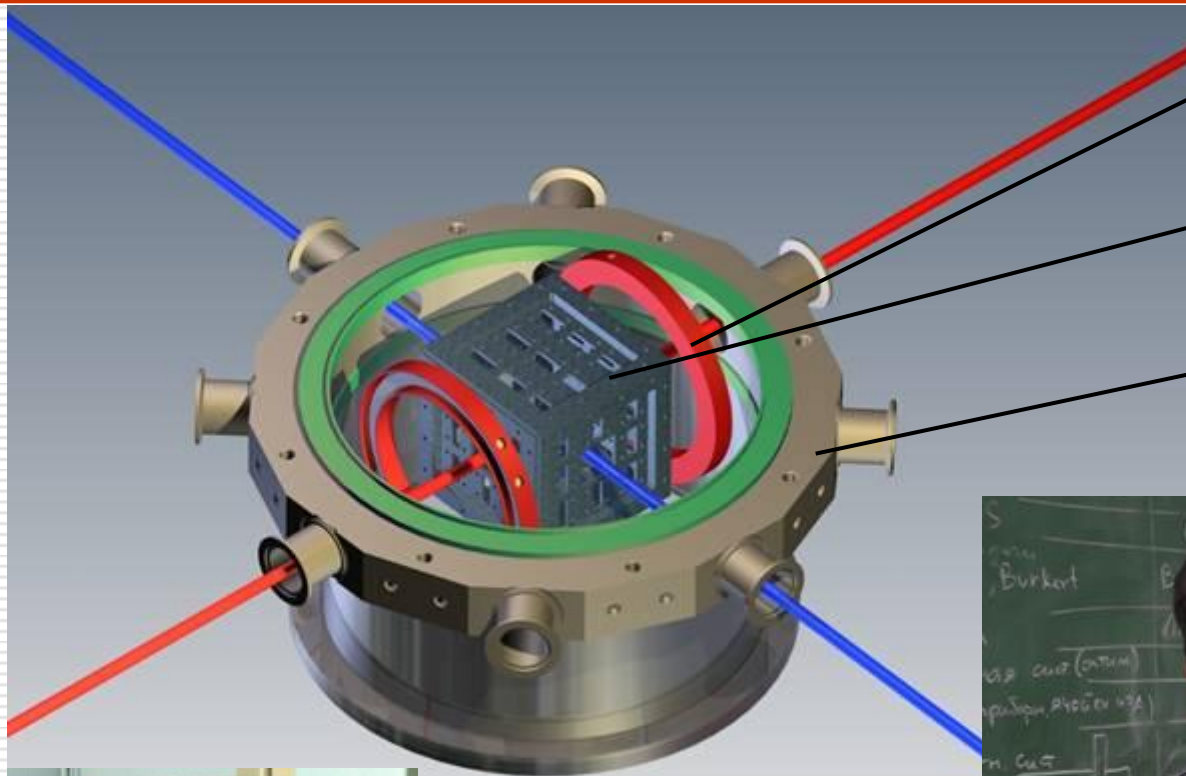
- ✓ Вакуумная система [$2 \cdot 10^{-7}$ mbar]
- ✓ Водяное охлаждение POLIS [без центральной системы]
- ✓ Система управления [вакуум+охлаждение]
- Dissociator
- Magnets
- RF units





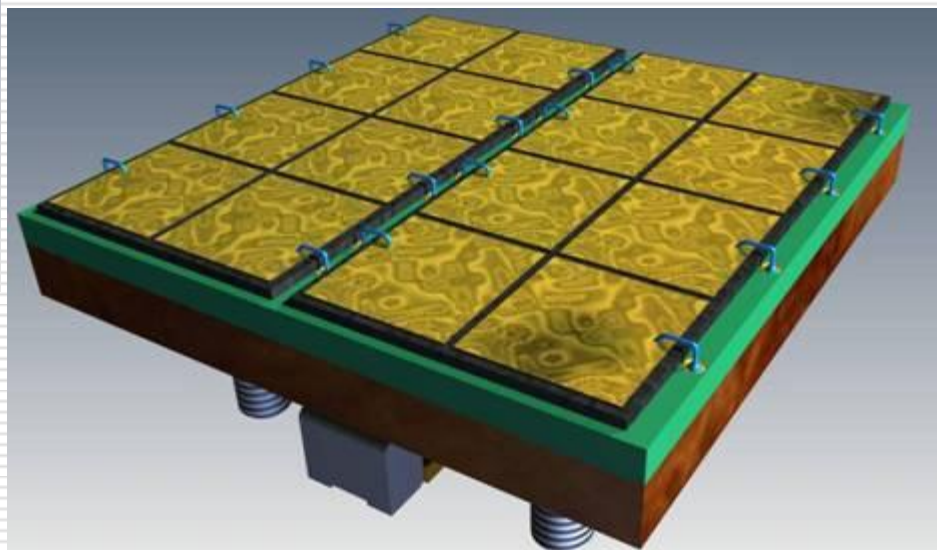
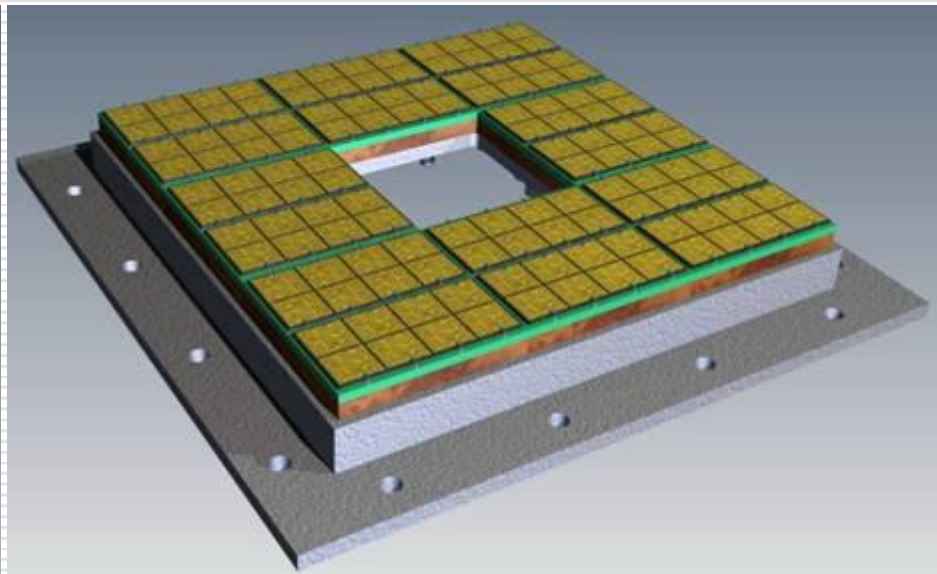
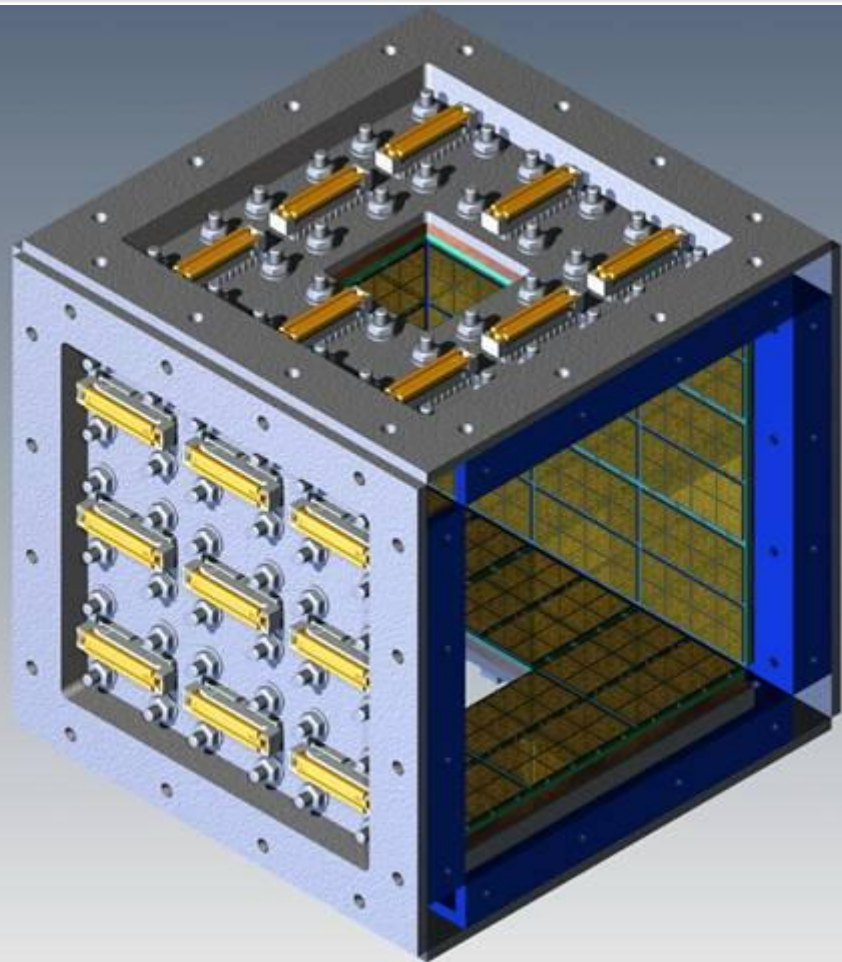
POLIS. Система управления.





- Катушки Гельмгольца
- Детекторная система
- Камера взаимодействия



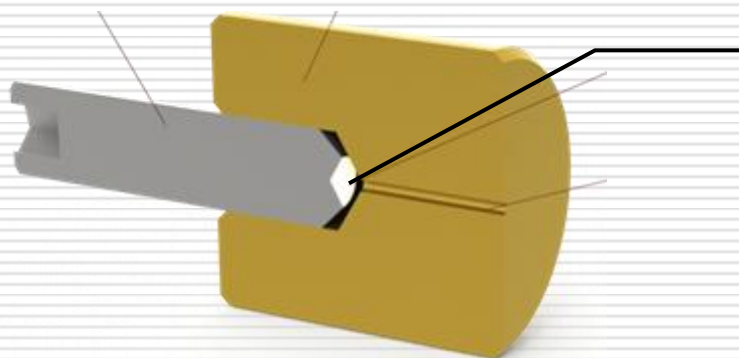
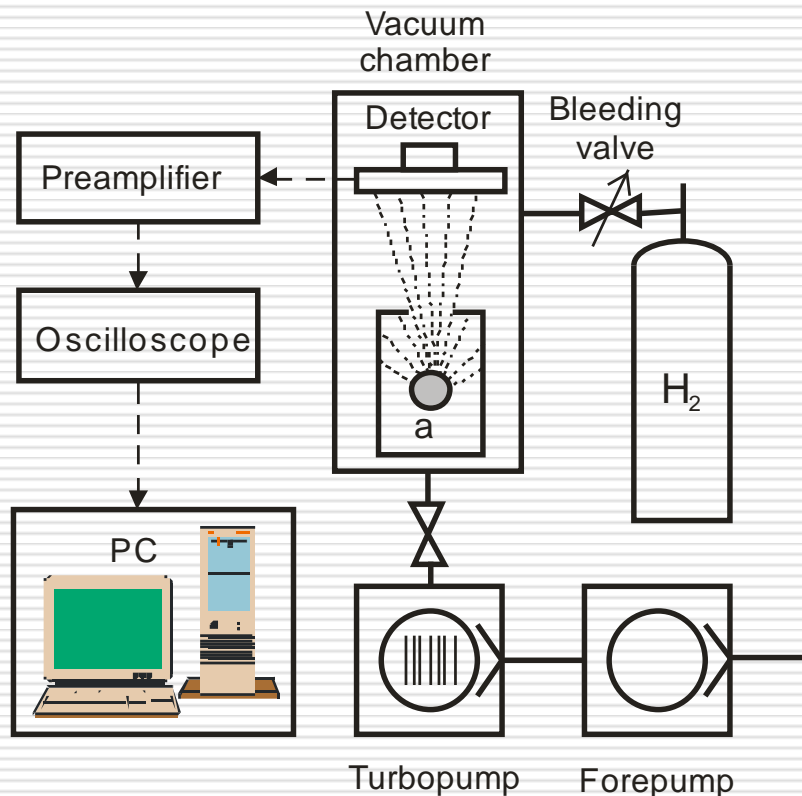


Поверхностно-барьерные детекторы
4-п детектор с заполнением 65%
50 детекторных элементов (33x33mm)
800 элементарных ячеек (7x7mm)

[А.Х.Хусаинов](#)



Тестовая система для детекторов

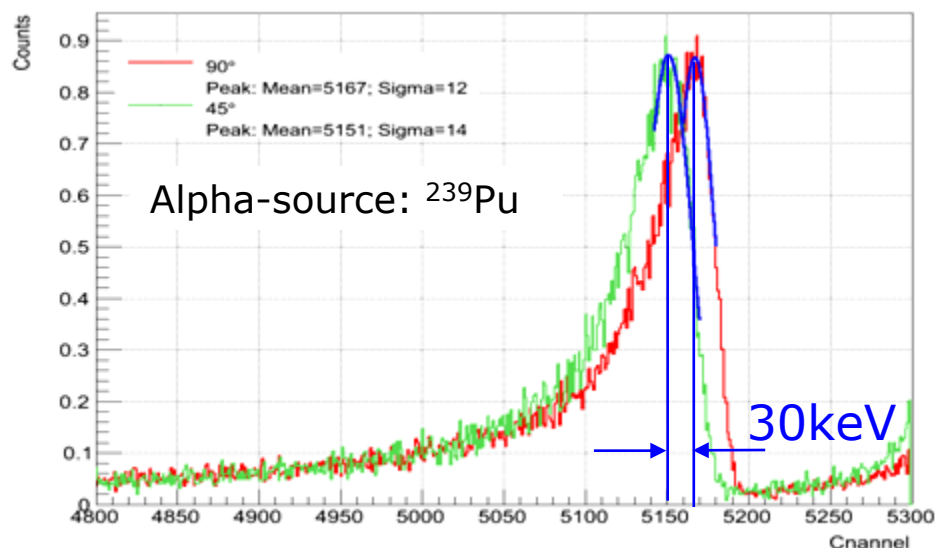
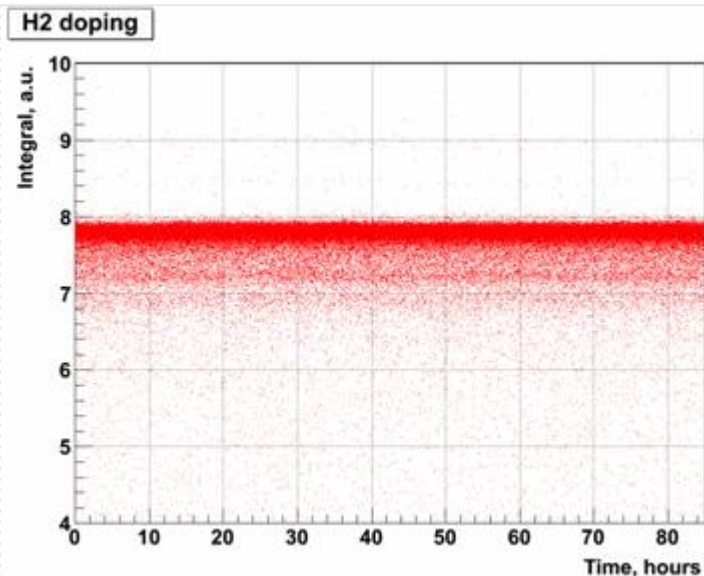
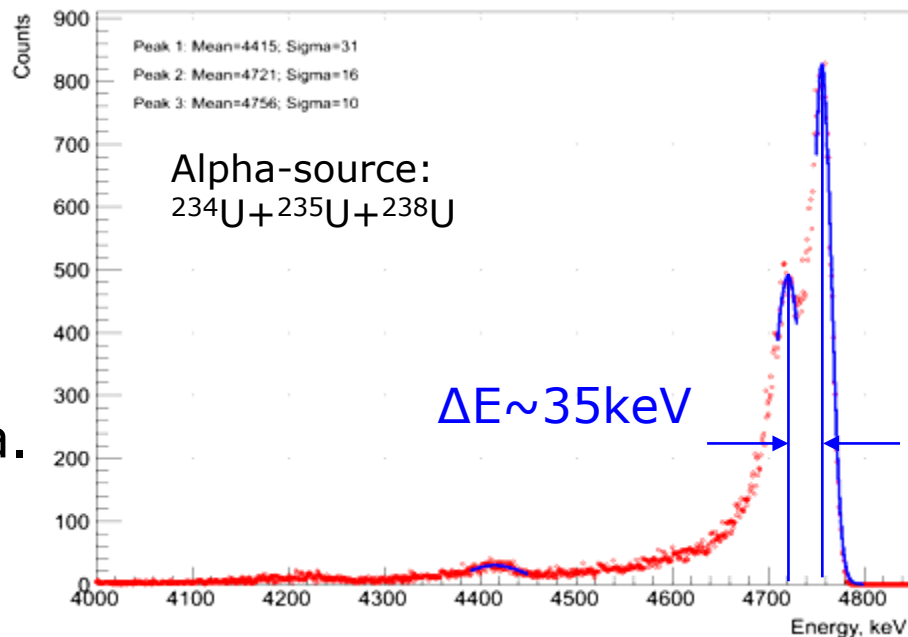


Alpha-source:
$^{239}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu} = 80.4\%$
$^{238}\text{Pu} + ^{241}\text{Am} = 19.6\%$
$^{234}\text{U} + ^{235}\text{U} + ^{238}\text{U}$
^{241}Am



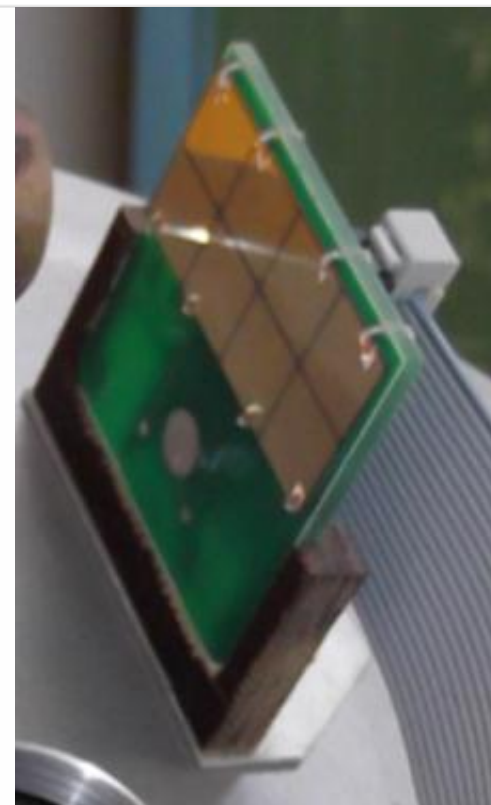
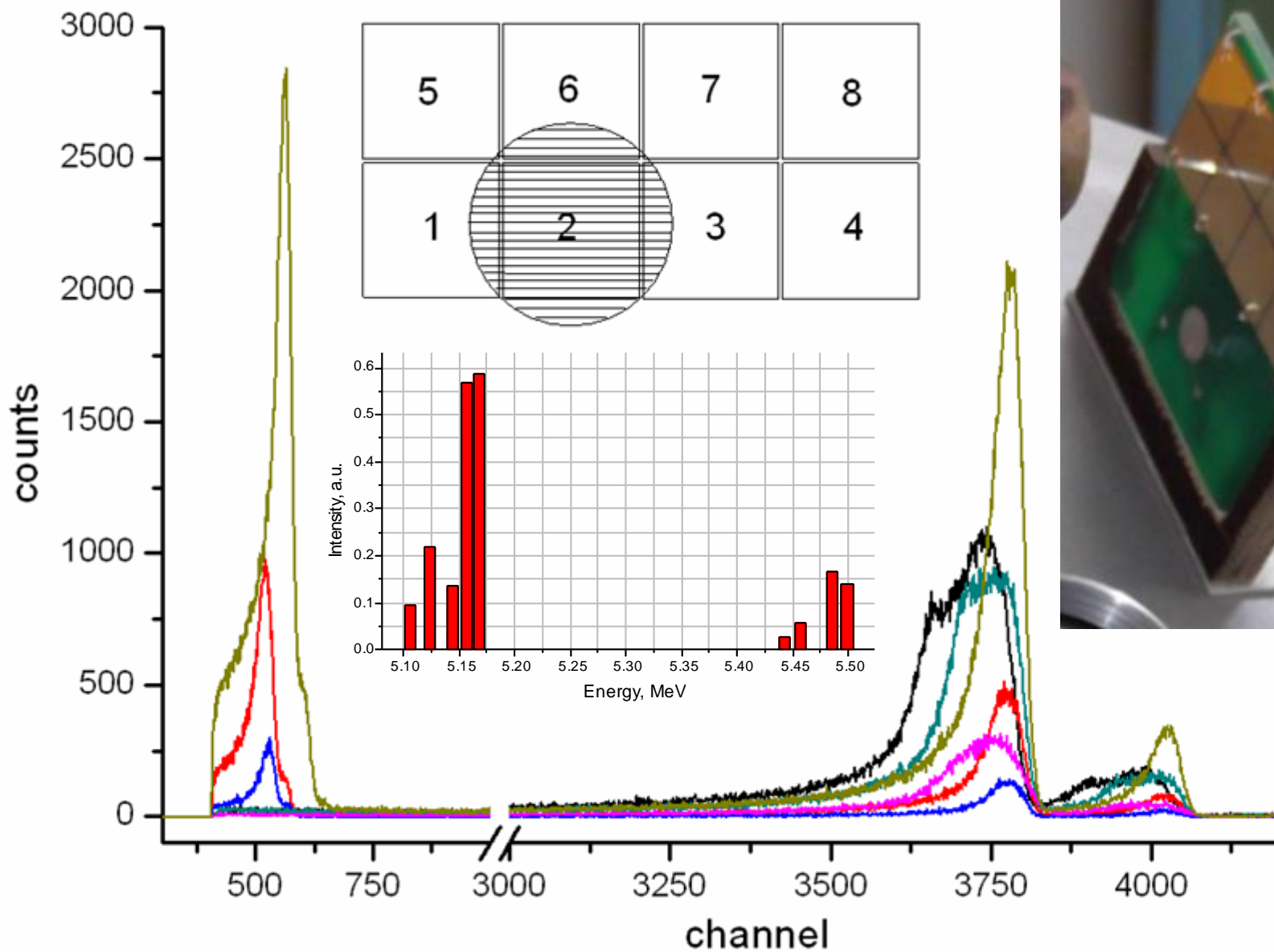
Измерение характеристик ПБД

- Энергетическое разрешение $\Delta E \sim 35 \text{ keV}$
- Толщина мертвого слоя $\Delta x \sim 100 \text{ nm}$
- Влияние водородного вакуума. Нет эффекта при 10^{-3} mbar





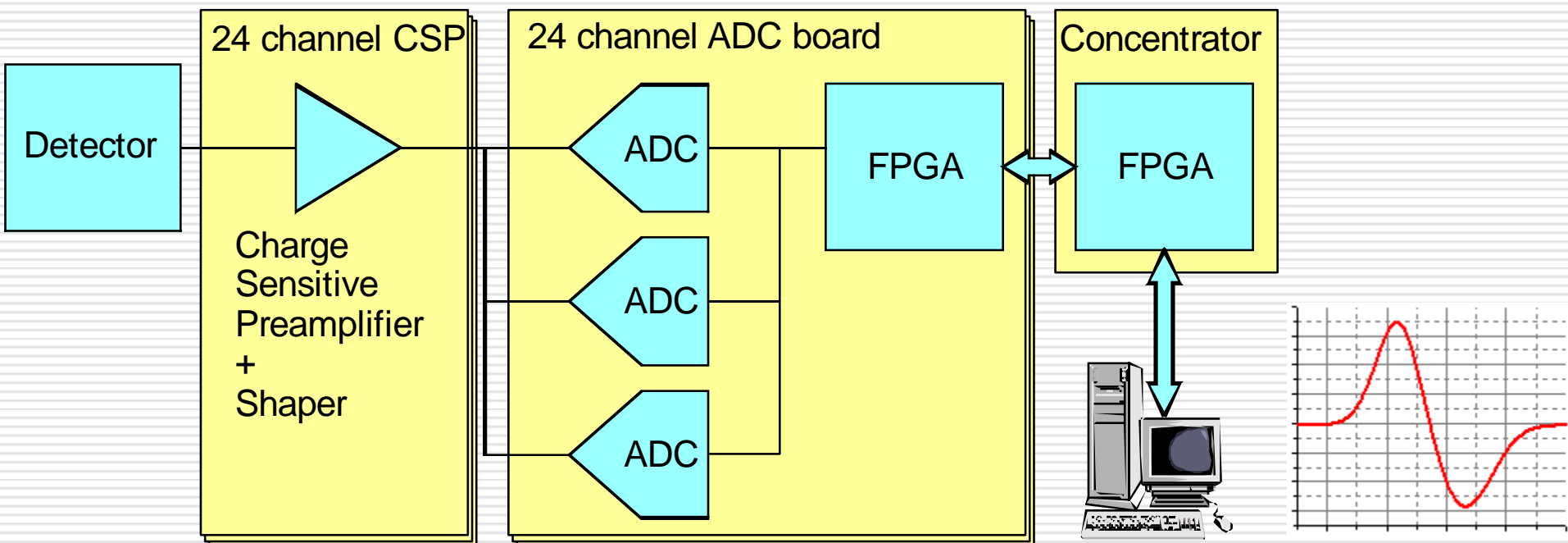
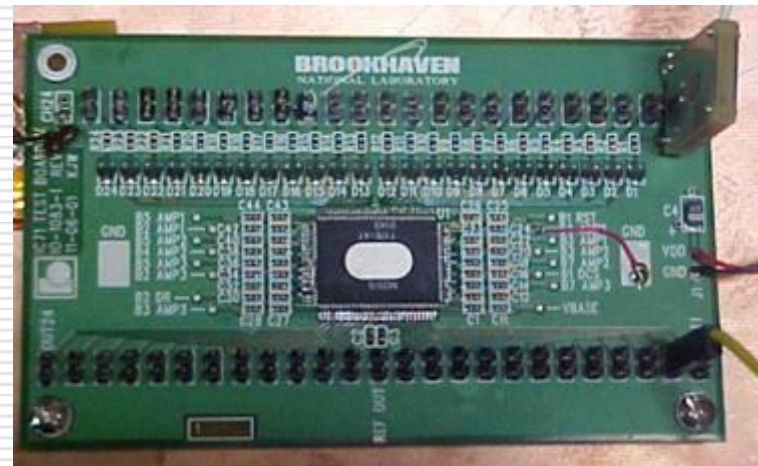
8-канальный ПБД



Требования:

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

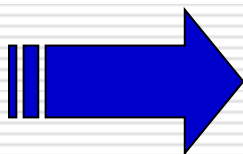
ATLAS CSC CSP





Experimental hall

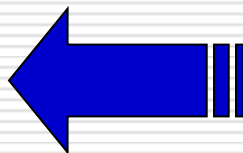
2009



2010



2011



2012

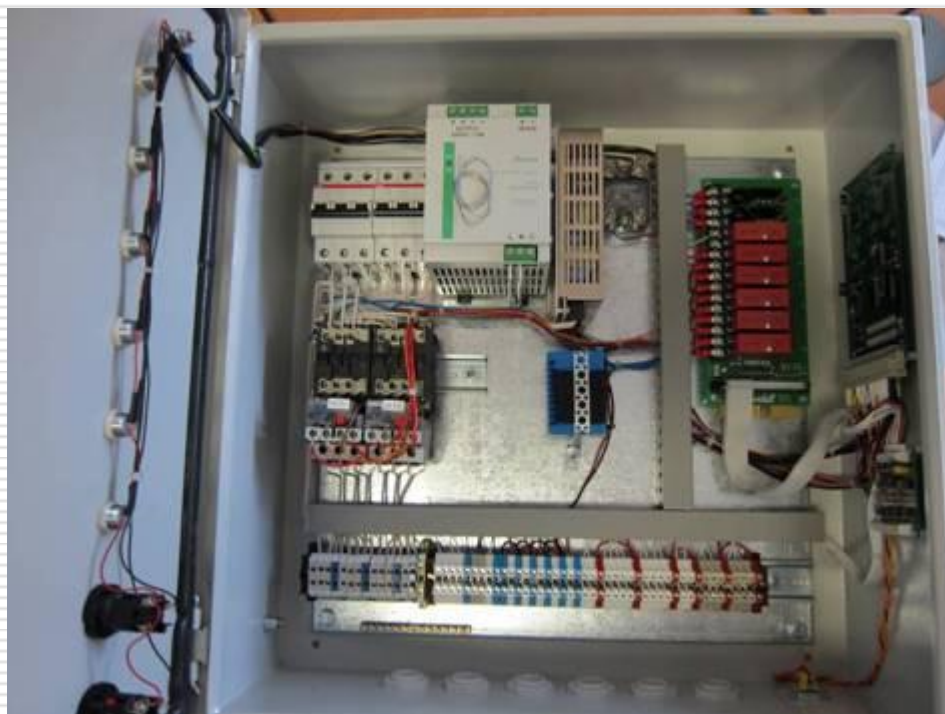




Система водяного охлаждения

Параметры системы:

- Воздушный теплообменник
- Холодильная мощность: 100kW
- Жидкость: вода + 10% этанол
- Рабочий поток: 1.4 l/s
- Перепад температуры: 30-50°C





- **Инфраструктура**
 - Подготовка экспериментального зала ✓ март 2011
 - Платформа для электроники ✓ май 2011
 - Система охлаждения 🔄 март 2013
- **Сборка и запуск ионного источника**
 - Вакуумная и водяная система ✓ декабрь 2011
 - Система управления ✓ март 2012
 - Пуско-наладка 🔄 весна 2013
 - Эксперимент с твердотельной мишенью осень 2013
- **Создание атомарного источника** осень 2013
 - Вакуумная система 🔄 весна 2013
 - Разработка магнитной системы 🔄 март 2013
 - Разработка диссоциатора ✓ декабрь 2012
 - Конструкция ВЧ блоков перехода 🔄 февраль 2013
 - Пуско-наладка источника осень 2013
- **Детекторная система** конец 2012
 - Детекторная камера ✓ апрель 2011
 - Разработка механики ДС ✓ весна 2012
 - Разработка электроники 🔄 февраль 2013
 - Производство электроники июнь 2013
 - Производство и тестирование ПБД 🔄 июнь 2014



Финансирование 2012:

- ❑ МНТЦ проект #3881
- ❑ Deutsche Forschungsgemeinschaft
- ❑ НИЦ КИ (~ 0.6 млн.р.)

Финансирование 2013:

- ❑ ~~МНТЦ проект #3881~~
- ❑ ~~Deutsche Forschungsgemeinschaft~~
- ❑ НИЦ КИ (~ 8 млн.р.)

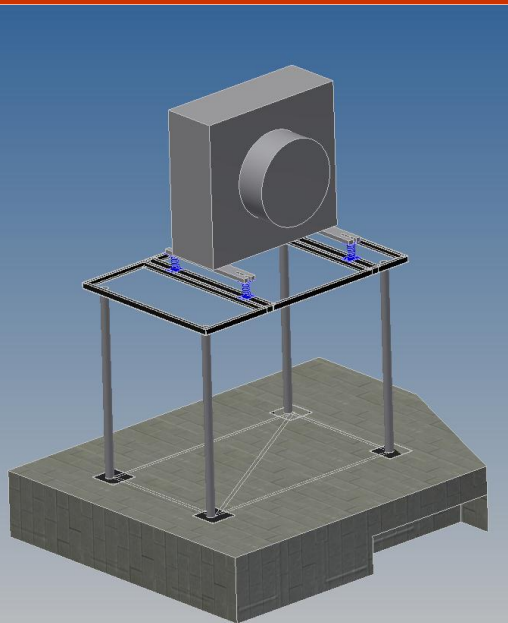
Заявки на гранты РФФИ:

- ❑ Разработка и создание многоканальной 4pi-детекторной системы для регистрации продуктов реакций ядерного синтеза легких элементов в рамках эксперимента PolFusion.
- ❑ Разработка и создание источника ионов с энергией до 100 кэВ с использованием плазменного разряда в поле высокотемпературного сверхпроводника и криогенного источника высокого напряжения.
- ❑ Математическое моделирование ядерных реакций дейтронов при низких (10-100 кэВ) энергиях с учетом спиновых состояний.



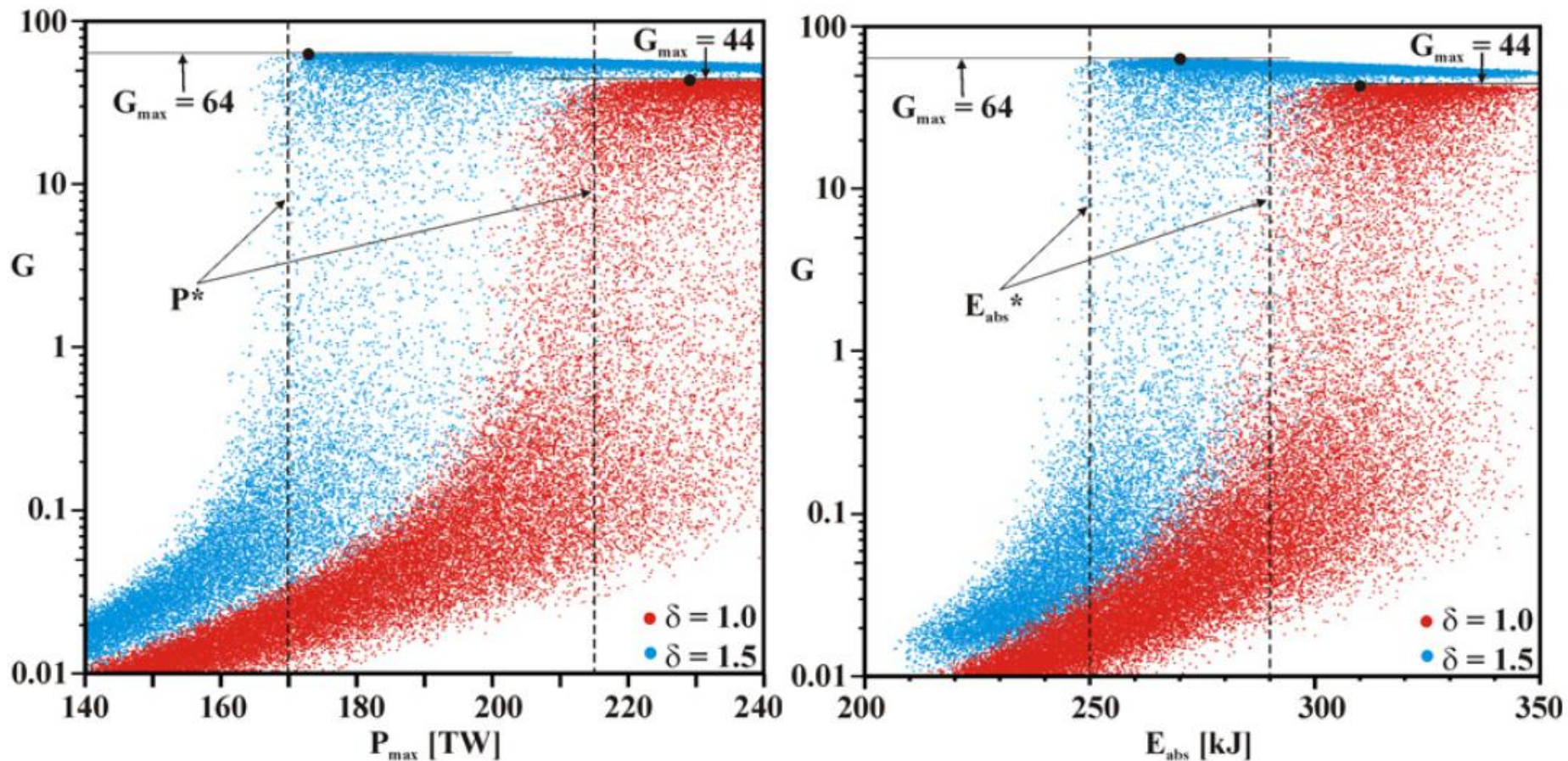


Воздушный теплообменник





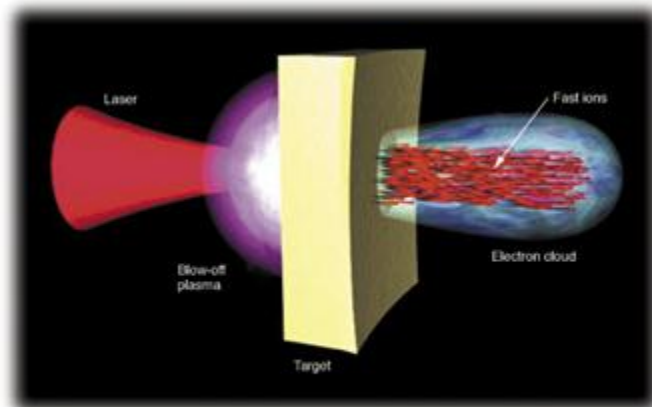
Импульсный реактор с инерционным удержанием плазмы (D+T)



M. Temporal et al. Nucl. Fusion **52** (2012) 103011



Persistence of the Polarization in a Fusion Process.
J.-P. Didelez and C. Deutsch. Few-Body Conference, Bonn (2009).



In laboratory experiments, the Petawatt laser's tremendous power produced intense beams of protons, proving the laser to be a powerful ion accelerator.

Basic study on polarized D-D fusion.
N. Horikawa. International Symposium on Polarized Target and its Application (2008).

Proposal for Basic Study on Spin Polarized D-D Collision

1. Condition for the Pol. Beam

Beam Intensity : $I > 10^{16}$ particles/s
Beam Polarization : $P > 50\%$

2. Event Rate

$E = 10 \sim 100$ keV Region
About $n > 10^{-2}$ (events/s)

3. Data acquisition

Statistical Error $< 5\%$ → Confirmation of Effect of Spin Pol. Collision

Estimation of Cost and Time

1. Cost :

- Pol. Ion Source : ¥ 328,000,000 (for 2 stations)
 - Beam Channel : 28,000,000
 - Scattering Ch.+ Detectors : 40,000,000
 - Consumable materials : 51,000,000
 - Employment : 54,000,000
 - Travel Expenses : 11,000,000
- 512,000,000**

2. Time schedule :

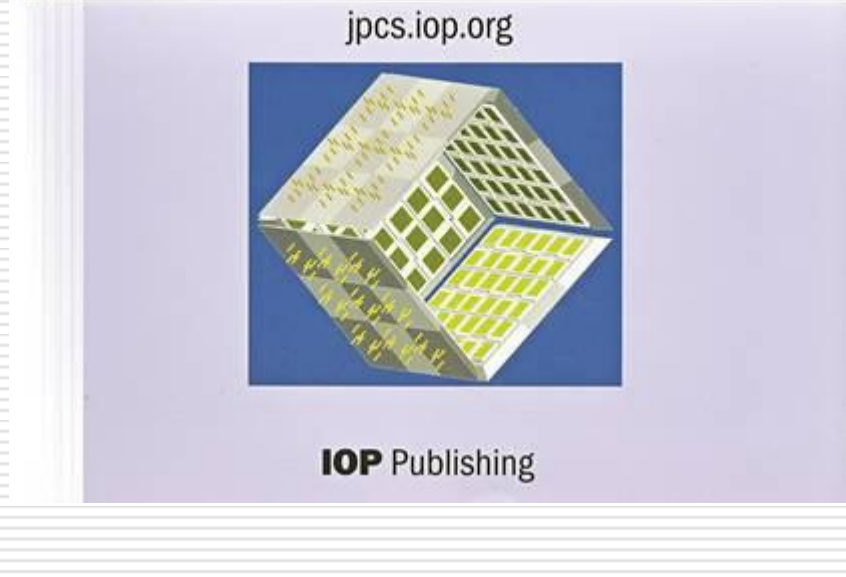
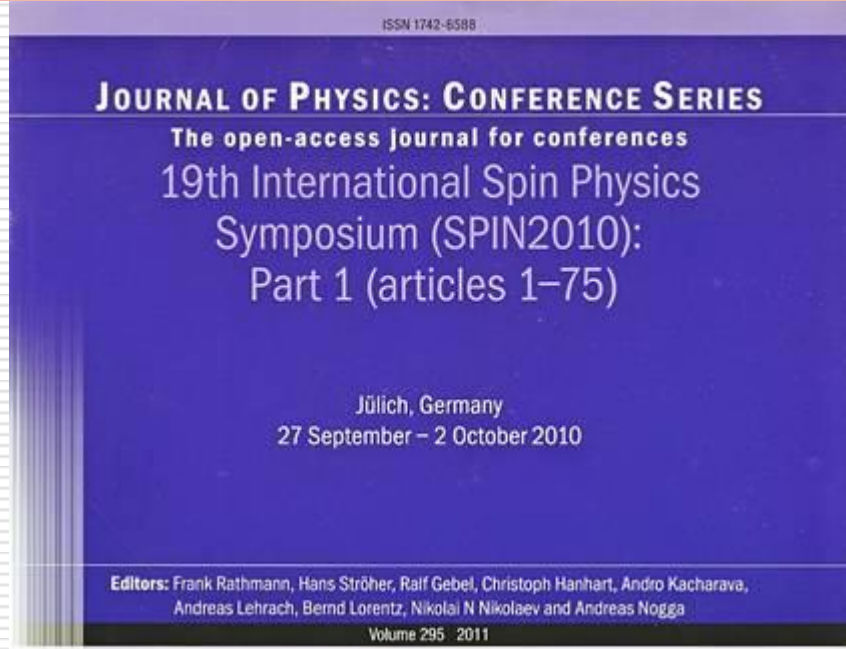
- 3 years : for Construction
- 1 year : for tuning
- 1 year : measurement



Формирование коллаборации

SPIN-2010. CERN Courier **51** N3 (2010).

PSTP-2011. St-Petersburg, September 2011.



XIVth International Workshop on Polarized Sources, Targets & Polarimetry 12-16 September 2011 St. Petersburg RUSSIA

TOPICS
 Polarized gas targets
 Polarized solid targets
 Polarized ion sources
 Polarized electron sources
 Polarimetry
 Applications and new techniques

Petersburg Nuclear Physics Institute
 National Research University ITMO

International SPIN Physics Committee
<http://www.spin-community.org>
 Stefania E. Ercegovic (Chair)
 Roger T. Bonn (Past Chair)
 Masaru H. O. MIT (Chair Elect)

Alexander M. Terehin
 Robert A.S. Bell
 Bronislawa P. Trzaska
 Giovanni E. D. S. BNL
 Charles D. G. Virginia
 Grah H. Duke

Evgeniy A. V. JINR
 Fedorova G. S. CLRF
 Hans-Joerg W. Wisconsin
 Masaru H. O. MIT
 K. W. Kiyohiko
 Kirilich A. D. Michigan
 Lennart A. Teräsvirta
 Malin G. CERN
 Masataka A. J. Kyoto
 Ken Orita W. FNRI
 Masataka Fischer M. SLAC

Prepared by: Woodcock
 Prepared by: Woodcock
 Tadashi K. KEK
 Sukeki H. Tokyo
 George W. Heidelberg
 Stefanos E. G. Trieste
 Shigeru H. COO
 Toshiro H. KEK
 * Honorary Members

Local Organizing Committee
 Alexander Vasilov
 Mariya Watanabe
 Evgeniya Rog
 Tatyana Kuznetsov
 Kirill Orlovskiy

Sponsors

Contact Address
 Konyushkova pr. 40, 197103,
 St. Petersburg, Russia
 Alexander Vasilov
 Phone: +7 (812) 233-59-52
 Fax: +7 (812) 495-19-75
 Alexander Vasilov
 Phone: +7 (812) 915-11-21
 E-mail: psp2011@iop.com
 WWW: www.psp2011.iop.com



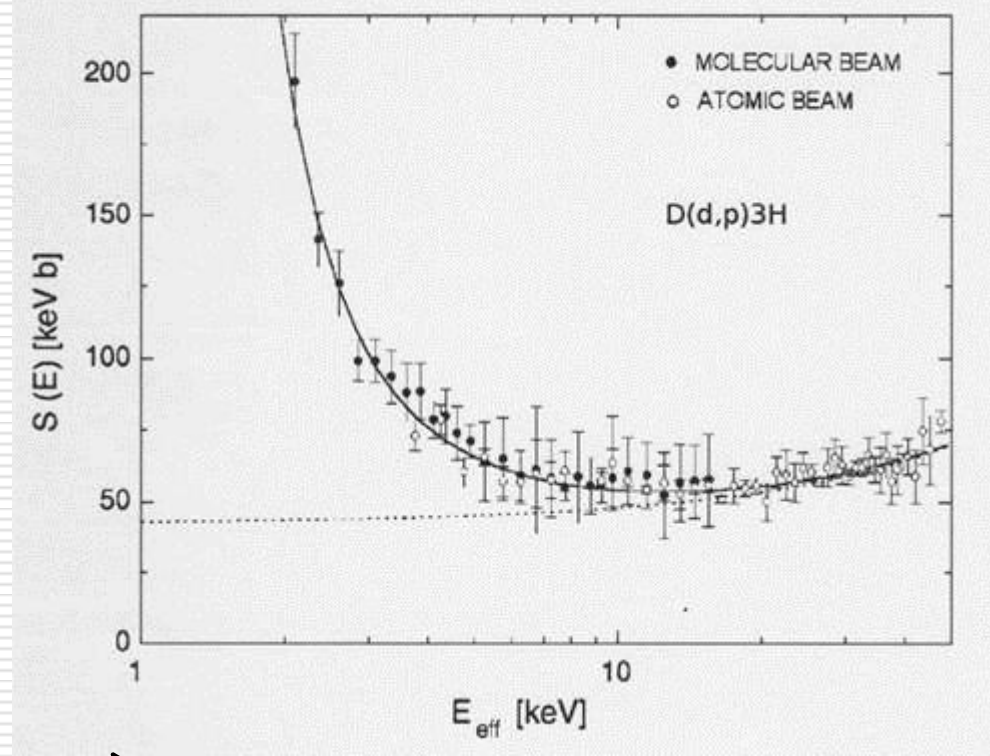
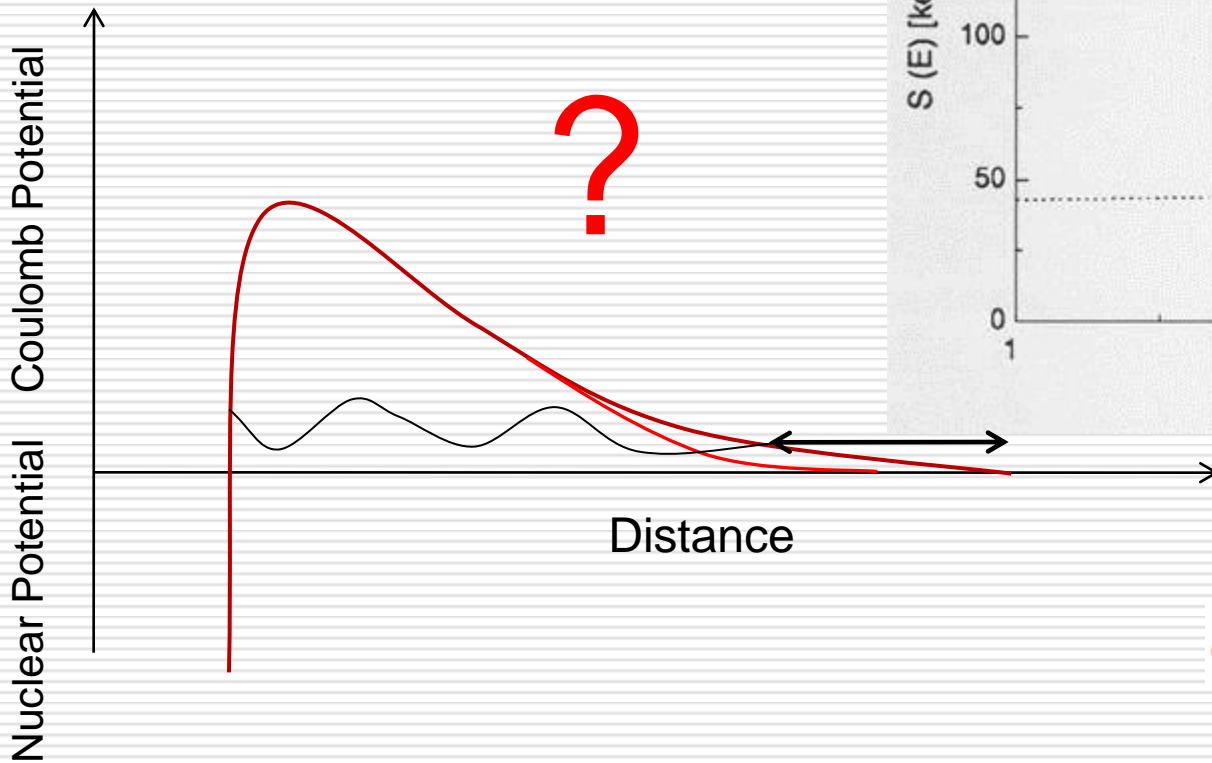
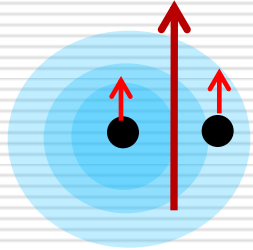
ABS								85% value		
HFS after Sextupole 1	MFT	HFS after Sextupole 2	SFT	WFT	HFS after ABS	Pz	Pzz	Pz	Pzz	Beam
1, 2, 3	---	1, 2, 3	---	---	1, 2, 3	+1/3	-1/3	0.272	-0.332	0
1, 2, 3	1-4	2, 3	---	---	2, 3	0	-1	-0.02	-0.85	1
1, 2, 3	3-4	1, 2	---	---	1, 2	+2/3	0	+0.561	-0.02	2
1, 2, 3	3-4	1, 2	---	on	3, 4	-2/3	0	-0.561	+0.02	3
1, 2, 3	3-4	1, 2	2-6	---	1, 6	+5/6	+0.5	+0.714	+0.434	4
1, 2, 3	1-4	2, 3	2-6	---	3, 6	+1/6	-0.5	+0.145	-0.391	5
1, 2, 3	1-4	2, 3	3-5	---	2, 5	-1/6	-0.5	-0.145	-0.459	6

POLIS								75% value		
HFS after Sextupole 1	MFT	HFS after Sextupole 2	SFT	WFT	HFS after ABS	Pz	Pzz	Pz	Pzz	Beam
1, 2, 3	---	1, 2, 3	---	---	1, 2, 3	0	0	0	0	0
1, 2, 3	1-4	2, 3	---	---	2, 3	-0.5	-0.5	-0.375	-0.375	1
1, 2, 3	3-4	1, 2	---	---	1, 2	+0.5	-0.5	+0.375	-0.375	2
1, 2, 3	3-4	1, 2	---	on	3, 4	-1	+1	-0.75	+0.75	3
1, 2, 3	3-4	1, 2	2-6	---	1, 6	+1	+1	+0.75	+0.75	4
1, 2, 3	1-4	2, 3	2-6	---	3, 6	0	+1	+0.02	+0.75	5
1, 2, 3	1-4	2, 3	3-5	---	2, 5	0	-2	-0.02	-1.5	6



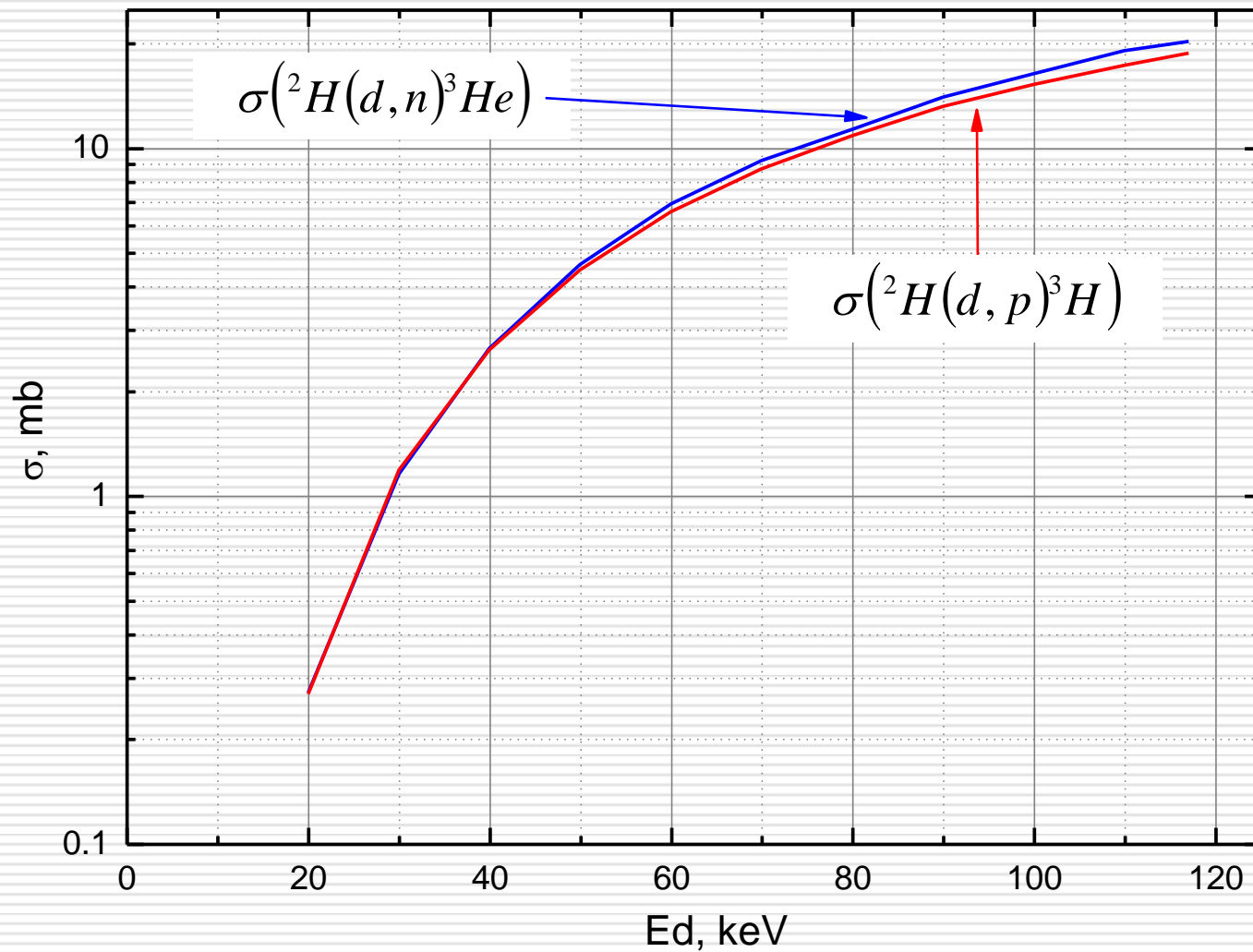
Astrophysical S-Factor:

F. Raiola et al.; Eur. Phys. J. A **13**, 377 (2002)



$$\sigma(E) = S(E)E^{-1} \exp(-2\pi\eta)$$

$$\eta = 2\pi Z_1 Z_2 e^2 / h v$$



R. E. Brown, N. Jarmie, Phys. Rev. C **41** N4 (1990)



Spins of both deuterons
are aligned:

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

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

Only beam is polarized:

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

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

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



Ордена Ленина

Институт атомной энергии

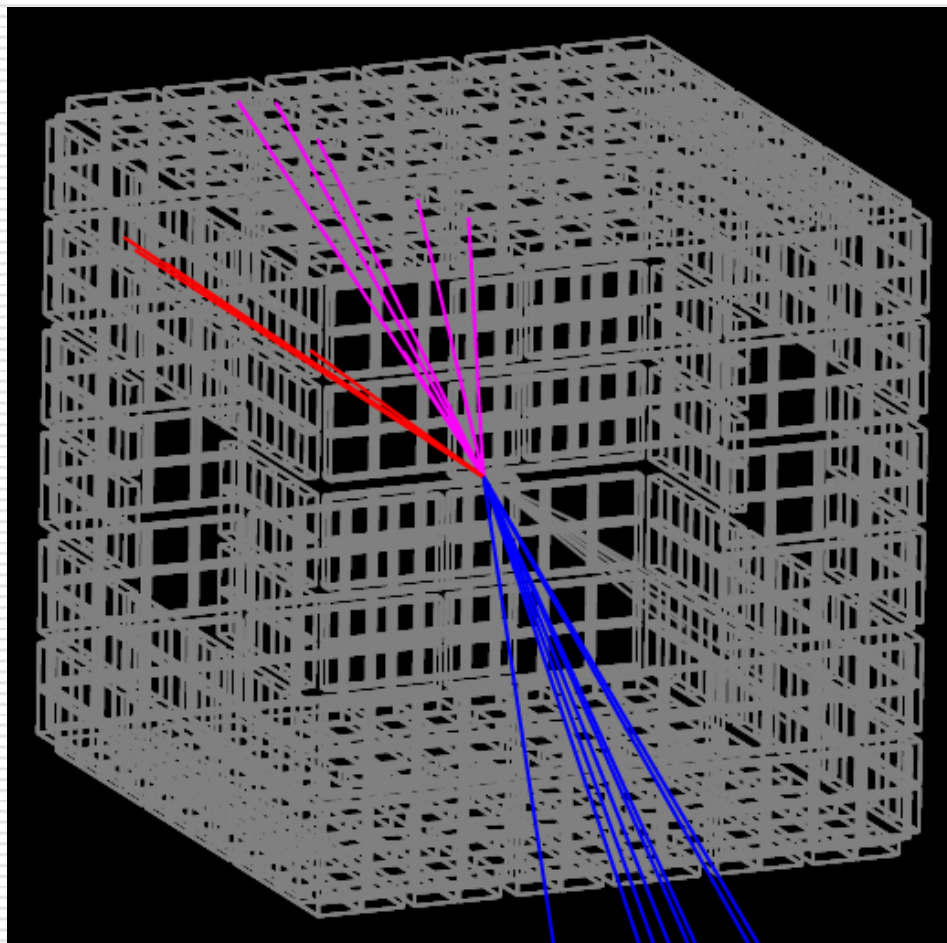
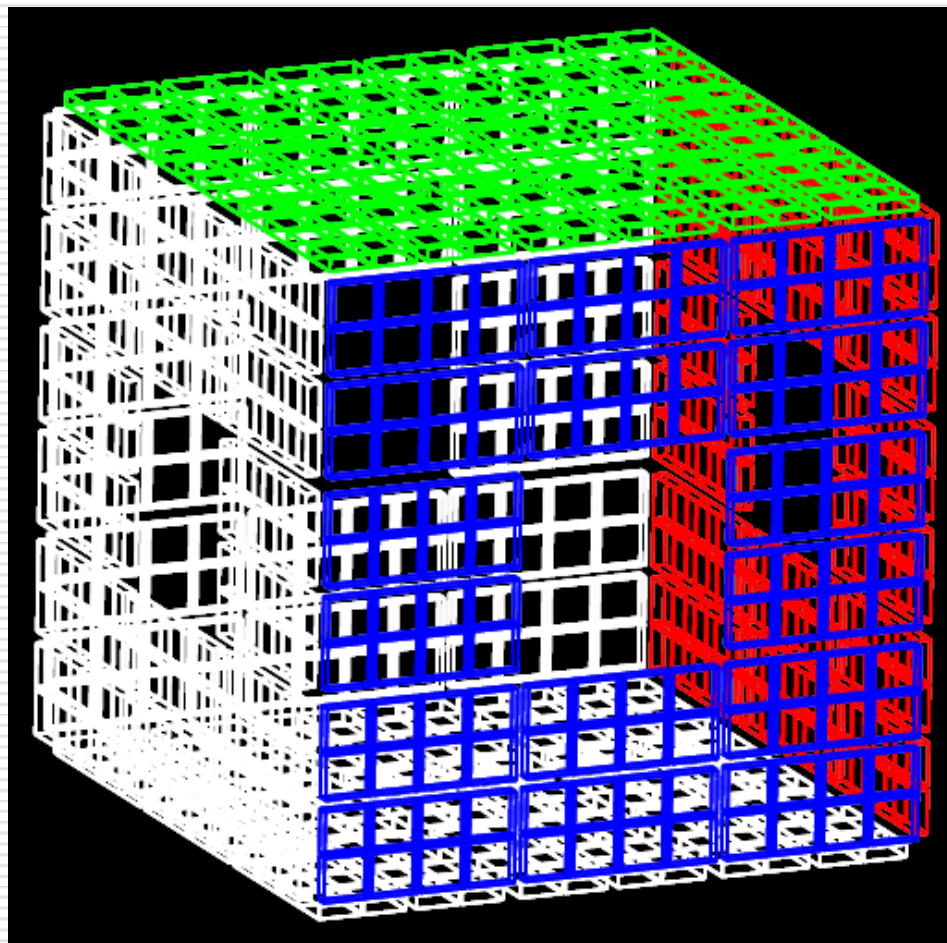
им. И. В. Курчатова

ИАЭ-2704

Б. П. Адьясевич, В. Г. Антоненко

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

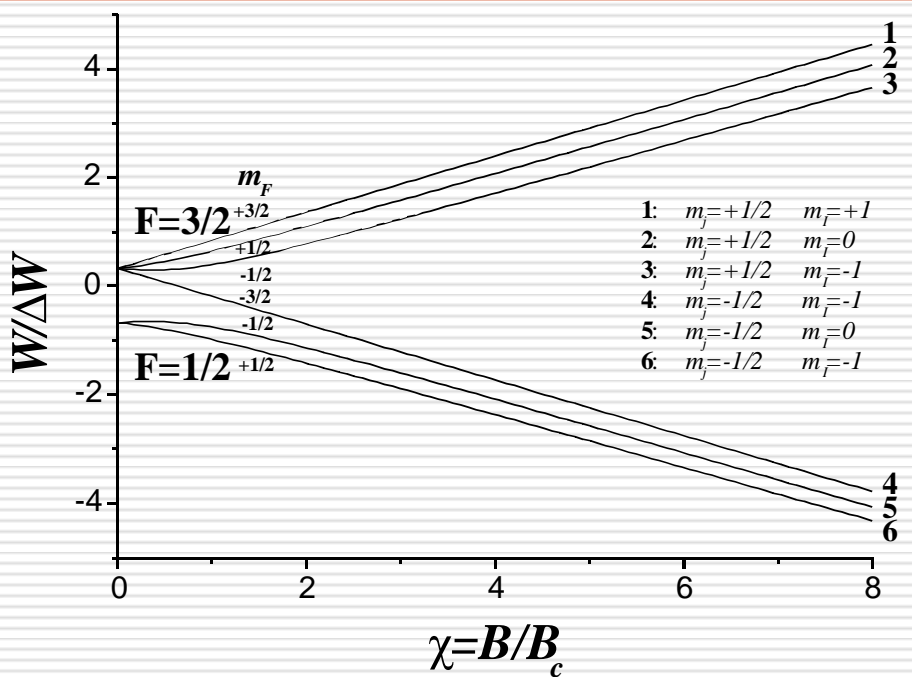
Москва 1976



- ❑ Модель детекторной системы
- ❑ Генератор событий
- ❑ Обработка данных
- ❑ Восстановление сечений генератора событий



Deuterium polarization



$$P_z = \frac{N_{m_j=+1} - N_{m_j=-1}}{N_{m_j=+1} + N_{m_j=0} + N_{m_j=-1}}$$

$$P_{zz} = \frac{1 - 3N_{m_j=0}}{N_{m_j=+1} + N_{m_j=0} + N_{m_j=-1}}$$

