



## Эксперимент $\mu$ Sun

### Muon Capture on the Deuteron *The MuSun Experiment*

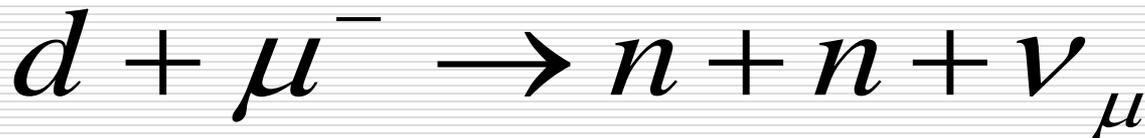
PSI Experiment R-08-01,

spokespersons P. Kammel, C. Petitjean, A. Vasilyev

MuSun Collaboration

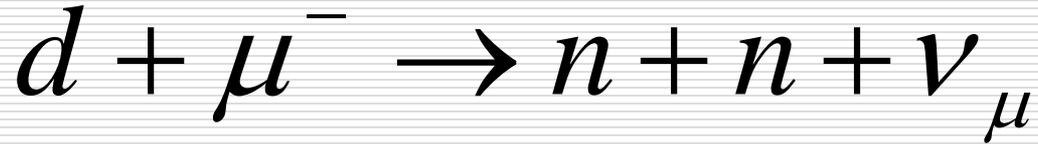
Petersburg Nuclear Physics Institute, University of Washington Seattle  
Paul Scherrer Institut, University of Kentucky, Boston University  
Regis University, University of South Carolina  
Universit e Catholique de Louvain

<http://muon.npl.washington.edu/exp/MuSun>

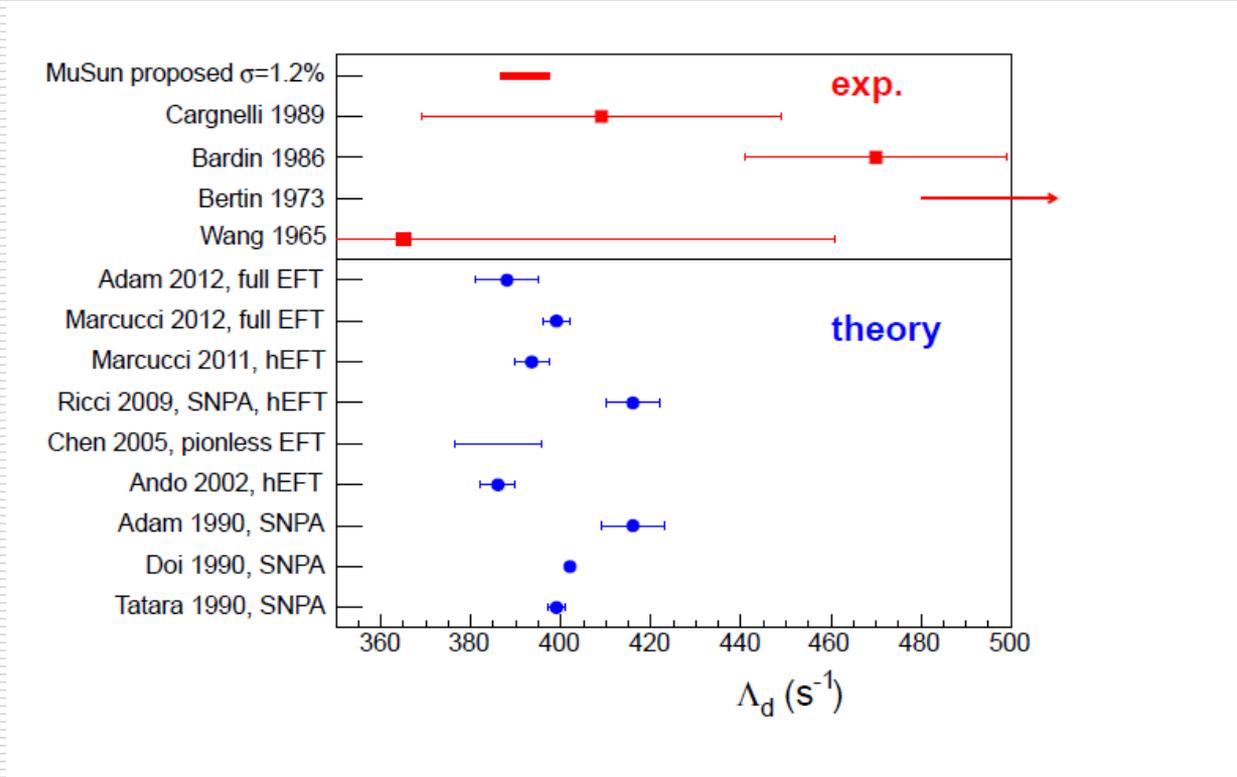


Run_1	2008 год	Тестовый сеанс на TPC из эксперимента MuCAP. Первый сеанс с дейтерием, как рабочим газом.
Run_2	2009 год	Первая сборка конструкции криогенной TPC
Run_3	2010 год	Технический сеанс с первым выходом на пучок. Акустические шумы, высоковольтные проблемы.
Run_4	2011 год	Технический сеанс с набором данных.
Run_5	2012 год	Переезд на новый пучковый канал $\pi E1$ , тесты криогенных предусилителей, устранение технических проблем
Run_6	2013 год	Модернизация элементов TPC. Сетка на основе вольфрамовой рамки. Установка криогенных предусилителей, подключение линии автоматической подачи азота. Набор данных, отладка элементов.
Run_7	2014 год	Набор данных $\sim 0.5 \cdot 10^{10}$ остановок мюонов.
Run_8	2015 год	Набор данных $\sim 0.5 \cdot 10^{10}$ остановок мюонов.
Run_9	2016 год	Набор данных для уменьшения систематических ошибок. Эксперимент на ${}^3\text{He}$
Run_10	2017 год	Калибровочный эксперимент на ${}^3\text{He}$

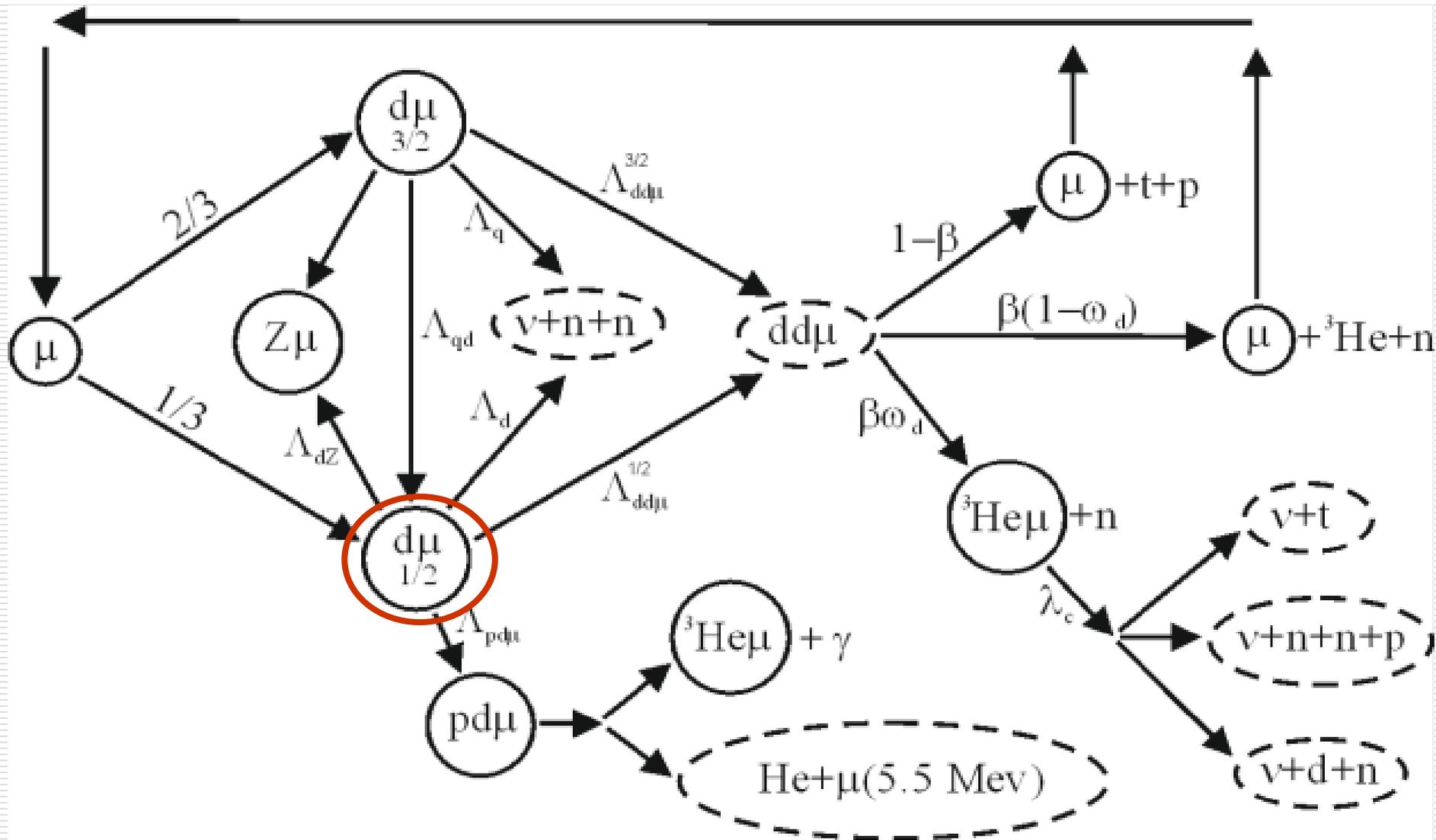
2018 обработка данных, публикация результатов, завершение программы  
Защита кандидатской диссертации Ившиным К.А.



Измерение скорости захвата  $\Lambda_d$  в  $\mu d(\uparrow\downarrow)$  атоме с точностью  $< 1.5\%$

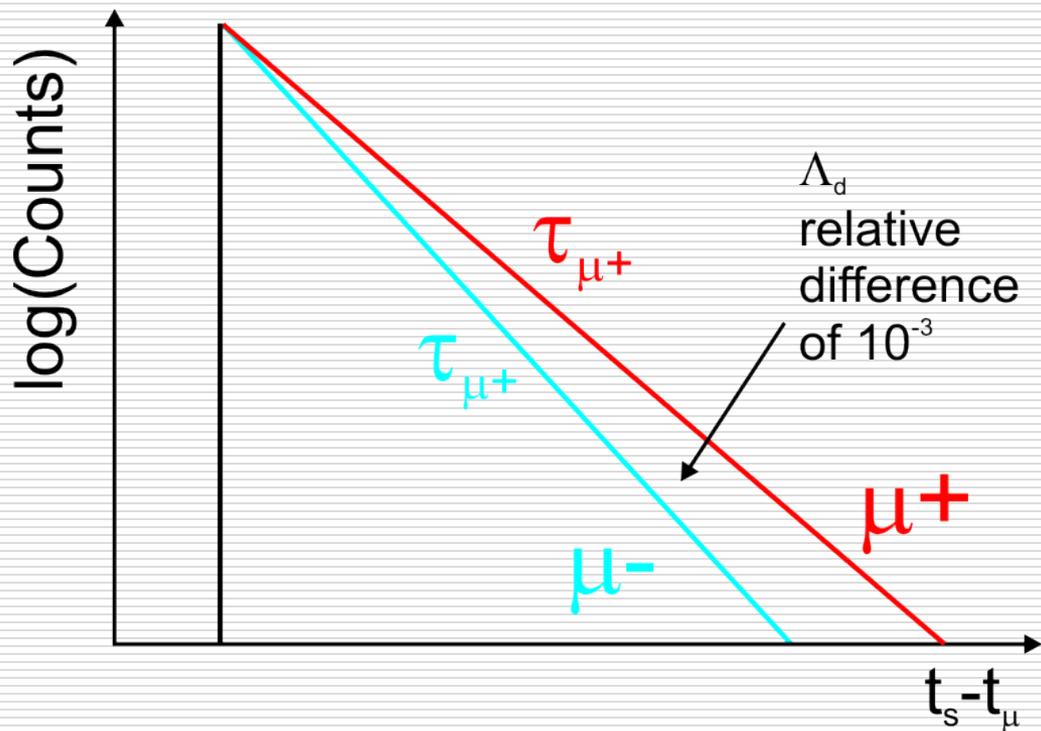


EFT - Effective Field Theory  
SNPA -potential model calculation



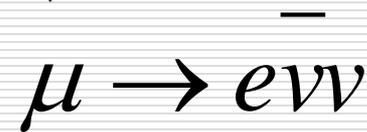


# Методика измерения скорости захвата мюона



Для измерения времени жизни необходимо  $10^{10}$  событий

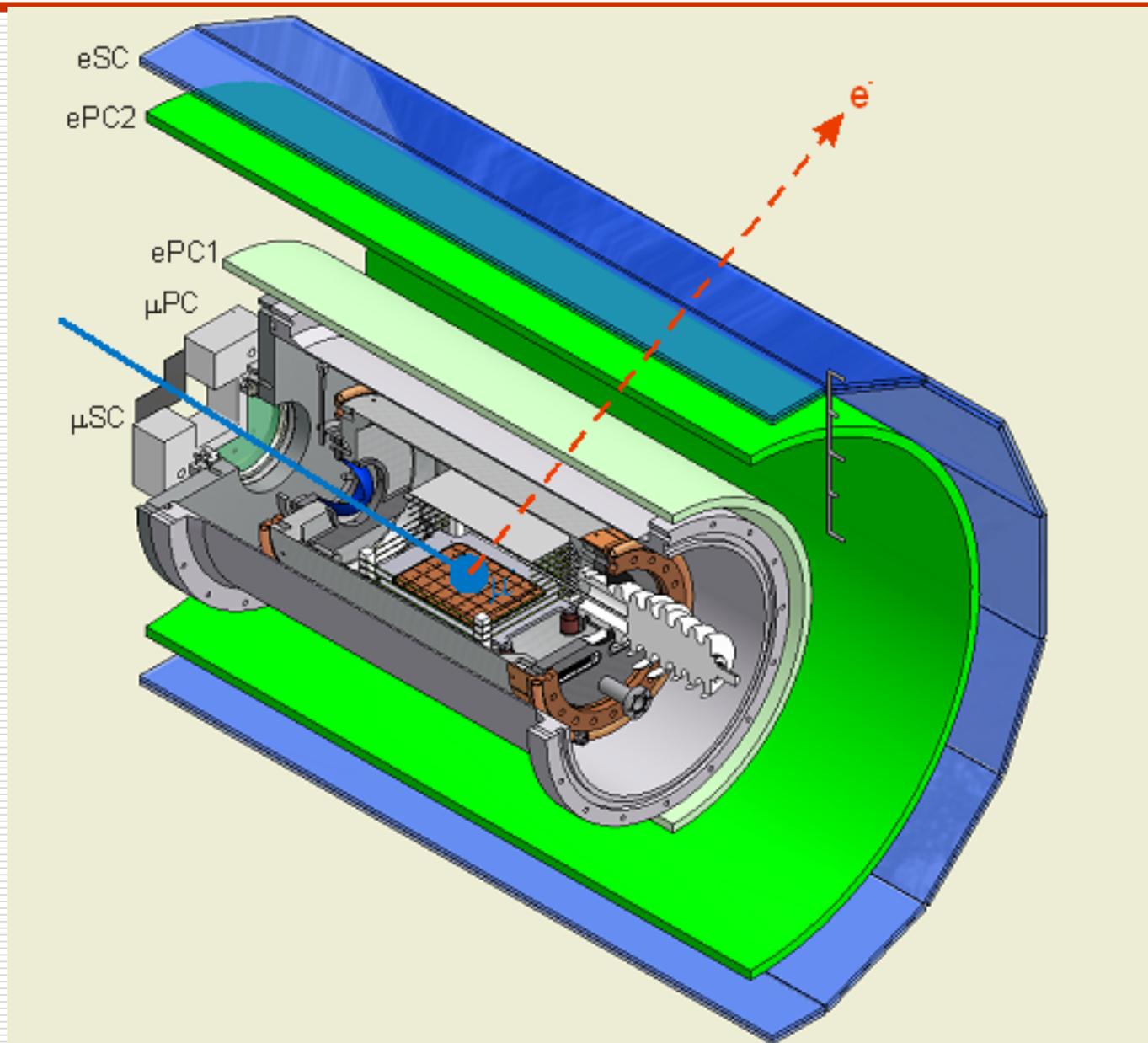
для  $\mu^-$  и  $\mu^+$



$$\Lambda_d = \frac{1}{\tau_{\mu^-}} - \frac{1}{\tau_{\mu^+}}$$



# Сryo\_ТРС как активная мишень





System	responsible institutions						
	PNPI	UIUC	PSI	UKY	BU	UCL	RU
Detectors		○		○		○	
TPC	○	○					
Cryogenic system	○		○				
Gas and purification system	○		○				
Front end electronics	○	○	○		○	○	
DAQ + computers				○			○



# Time Projection Chamber (TPC)

Диапазон рабочих температур  
 $T = 25\text{K} - 350\text{K}$



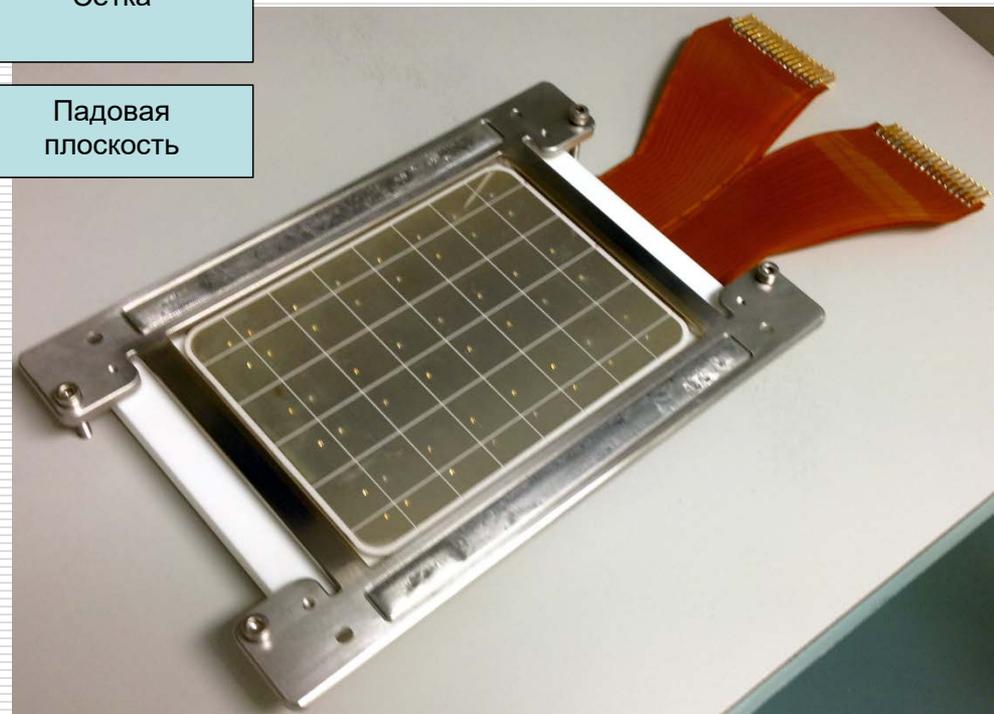
Катод

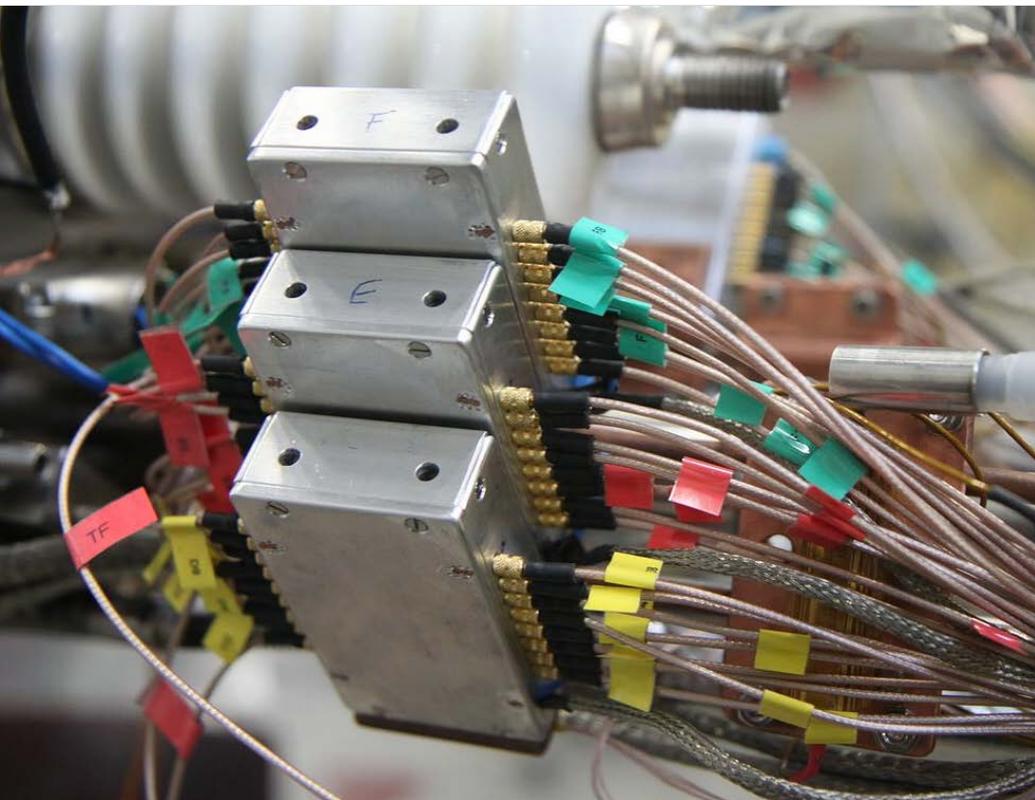
Стойка

Выравнивающая  
проволока

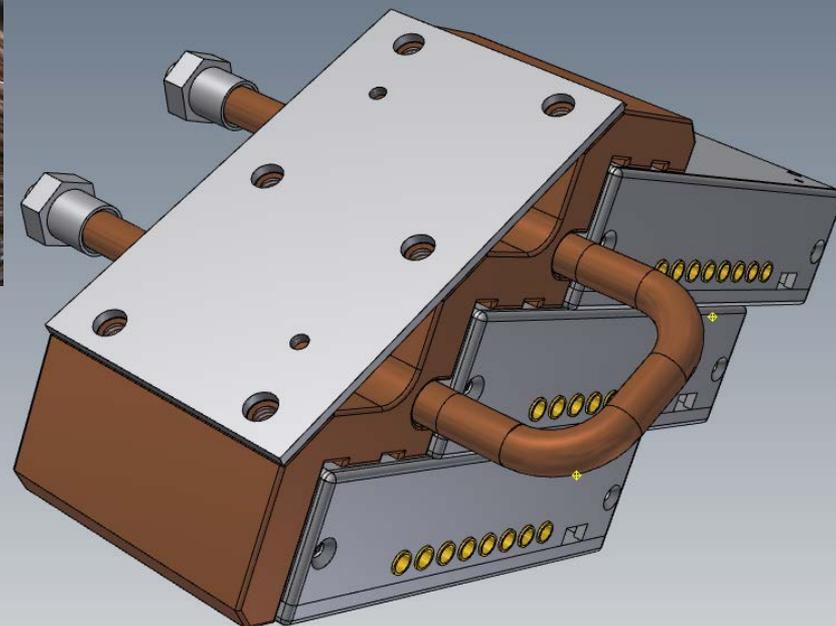
Сетка

Падовая  
плоскость



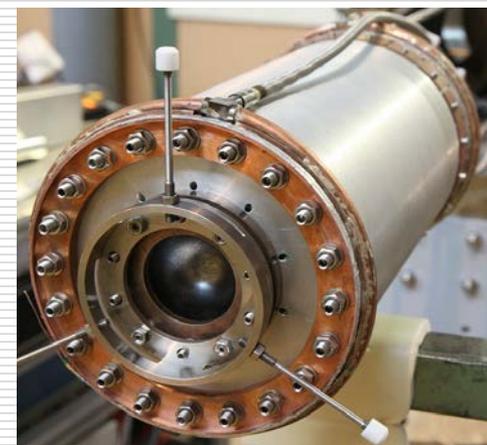
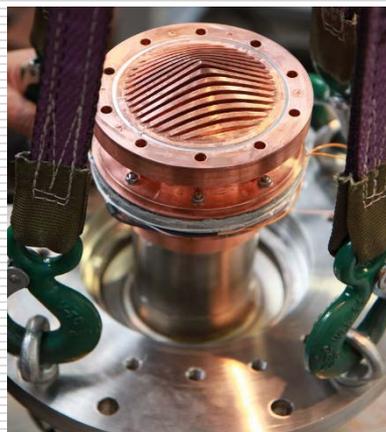
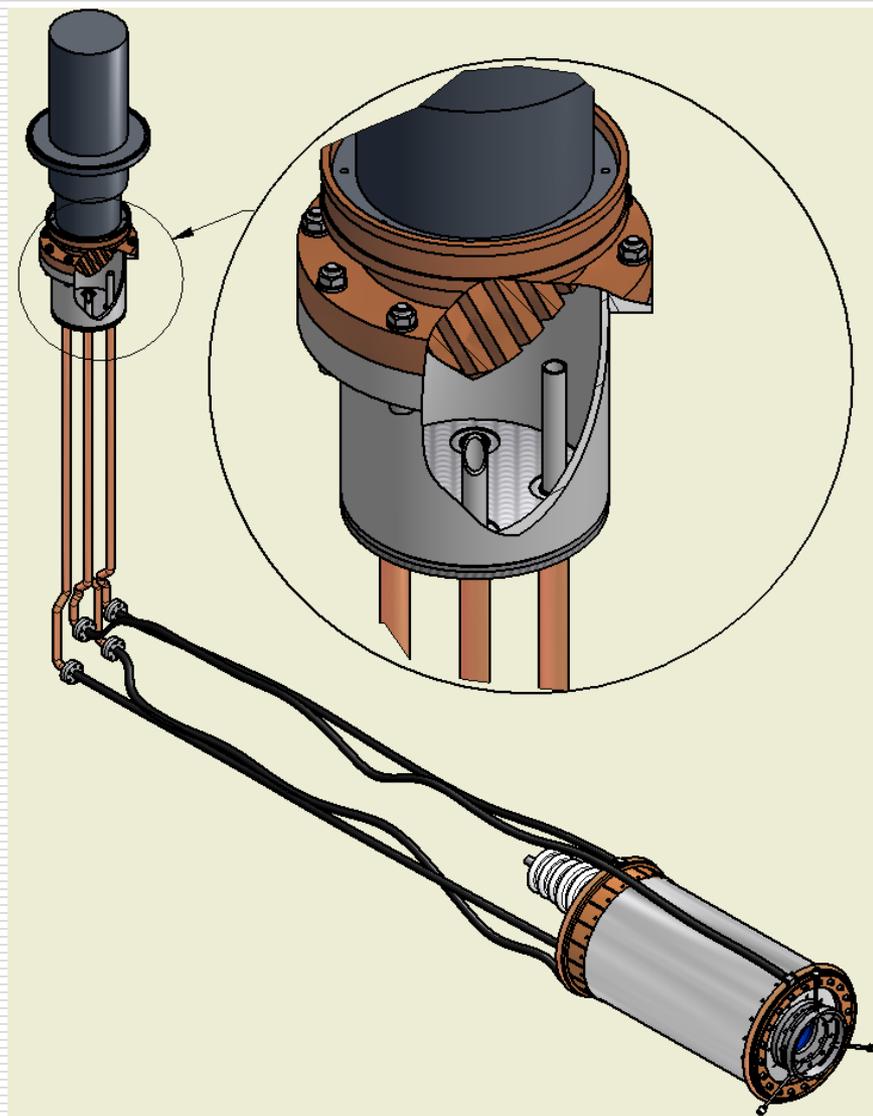


**Энергетическое разрешение 25 keV**  
**Рабочая температура  $140 \pm 5$  K**

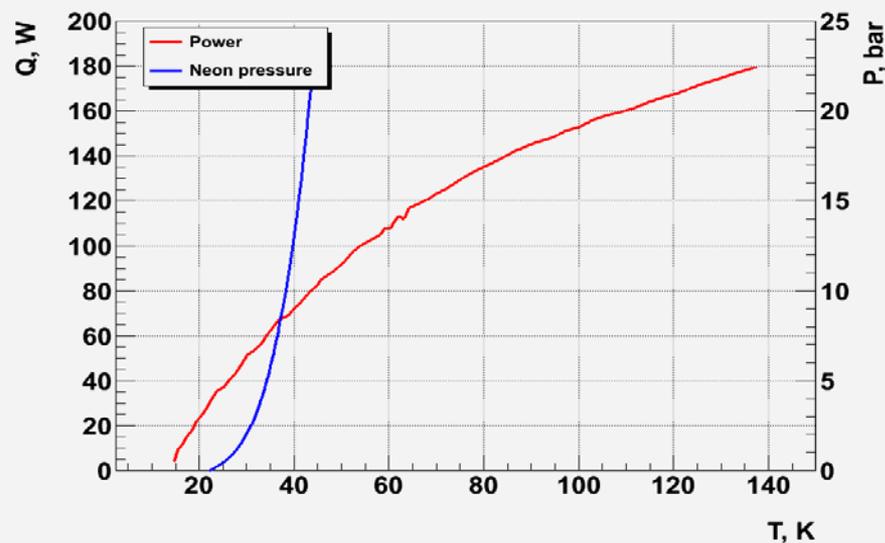


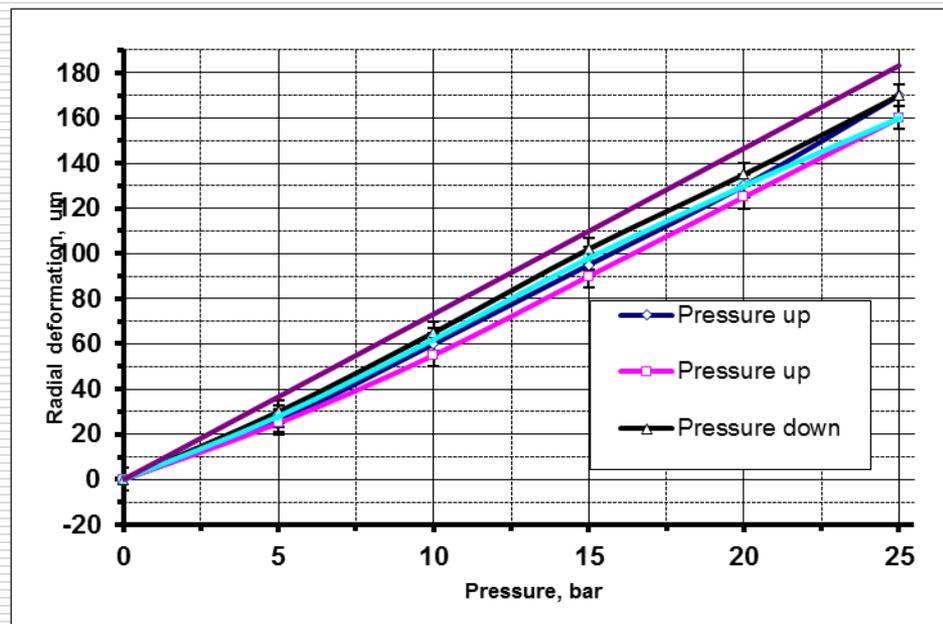
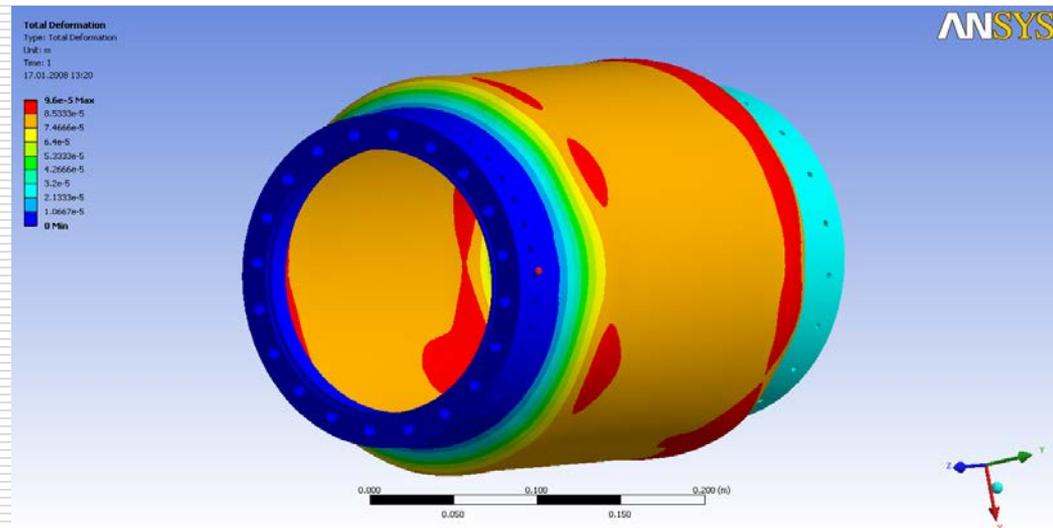
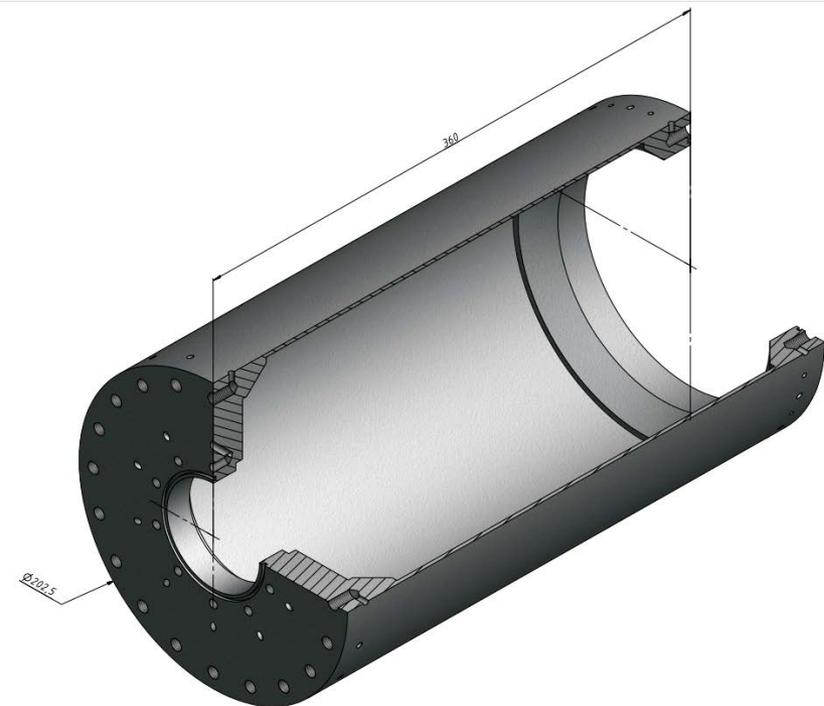


# Система охлаждения



Cold head power and neon pressure

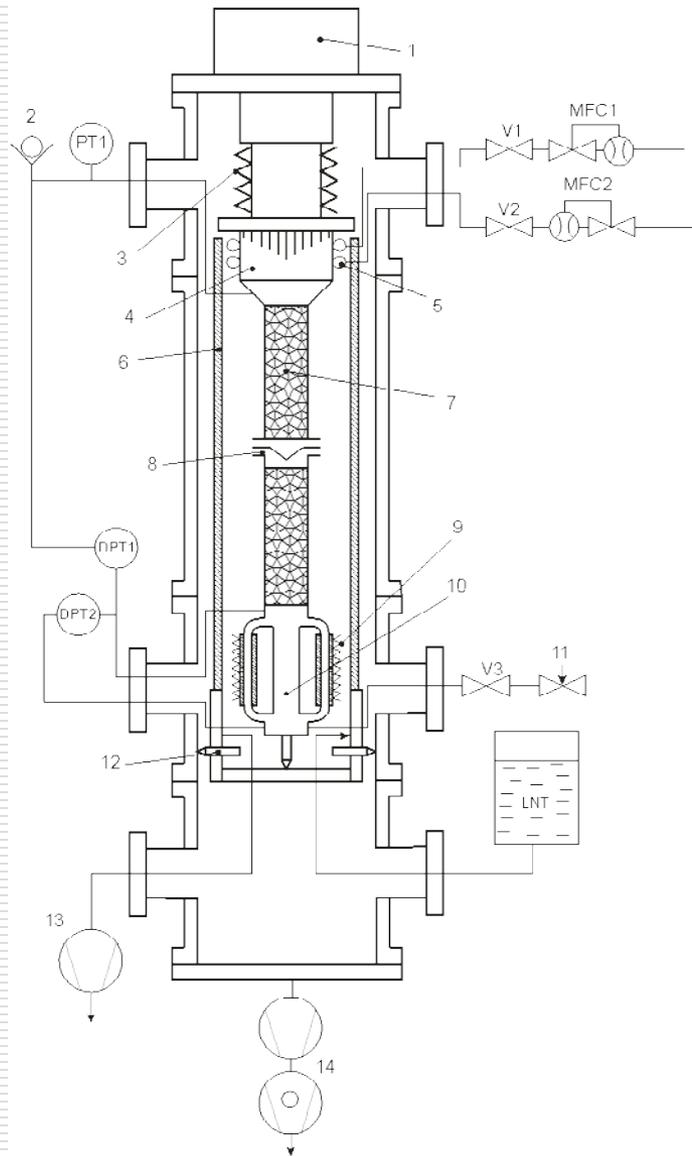
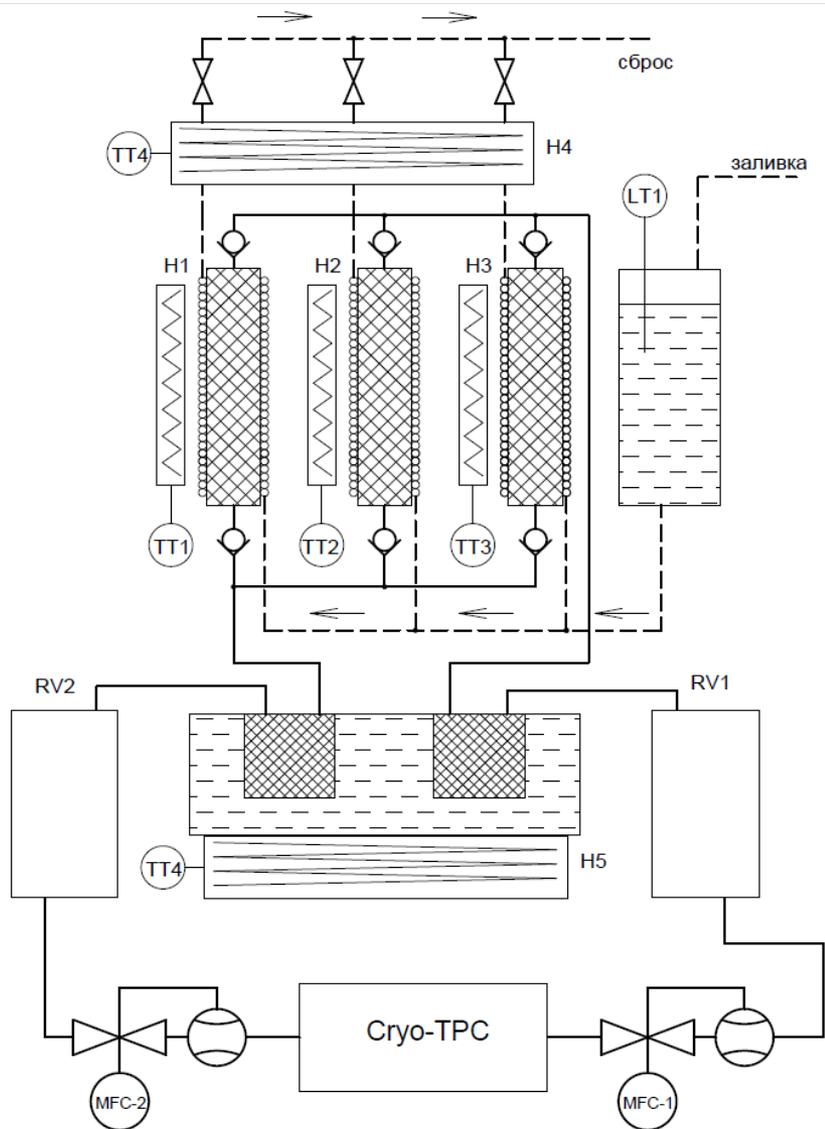






# Изотопная и химическая очистка дейтерия в системе

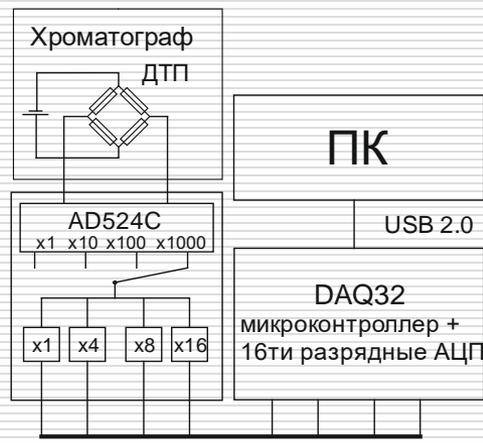
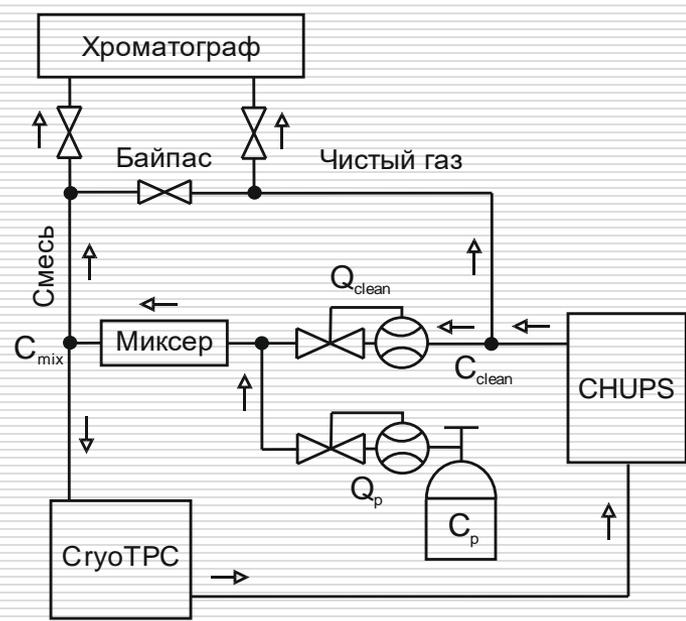
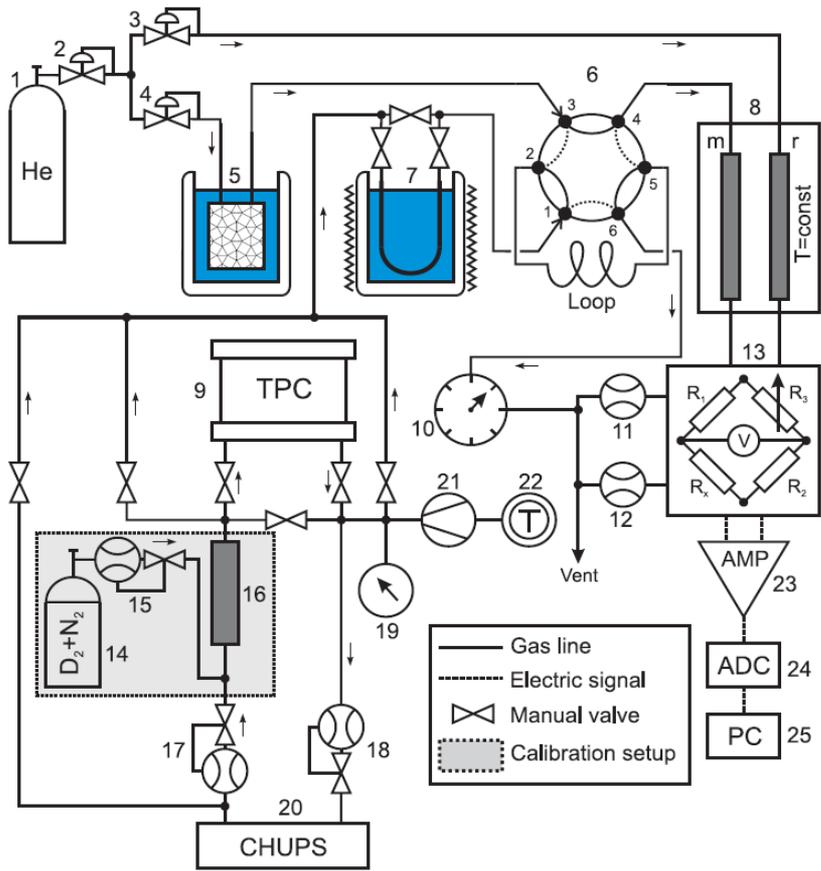
Начало работы CHUPS в PSI - 2004 год



Начало работы в PSI - 2006 год



# Хроматография, калибровка и чтение сигналов





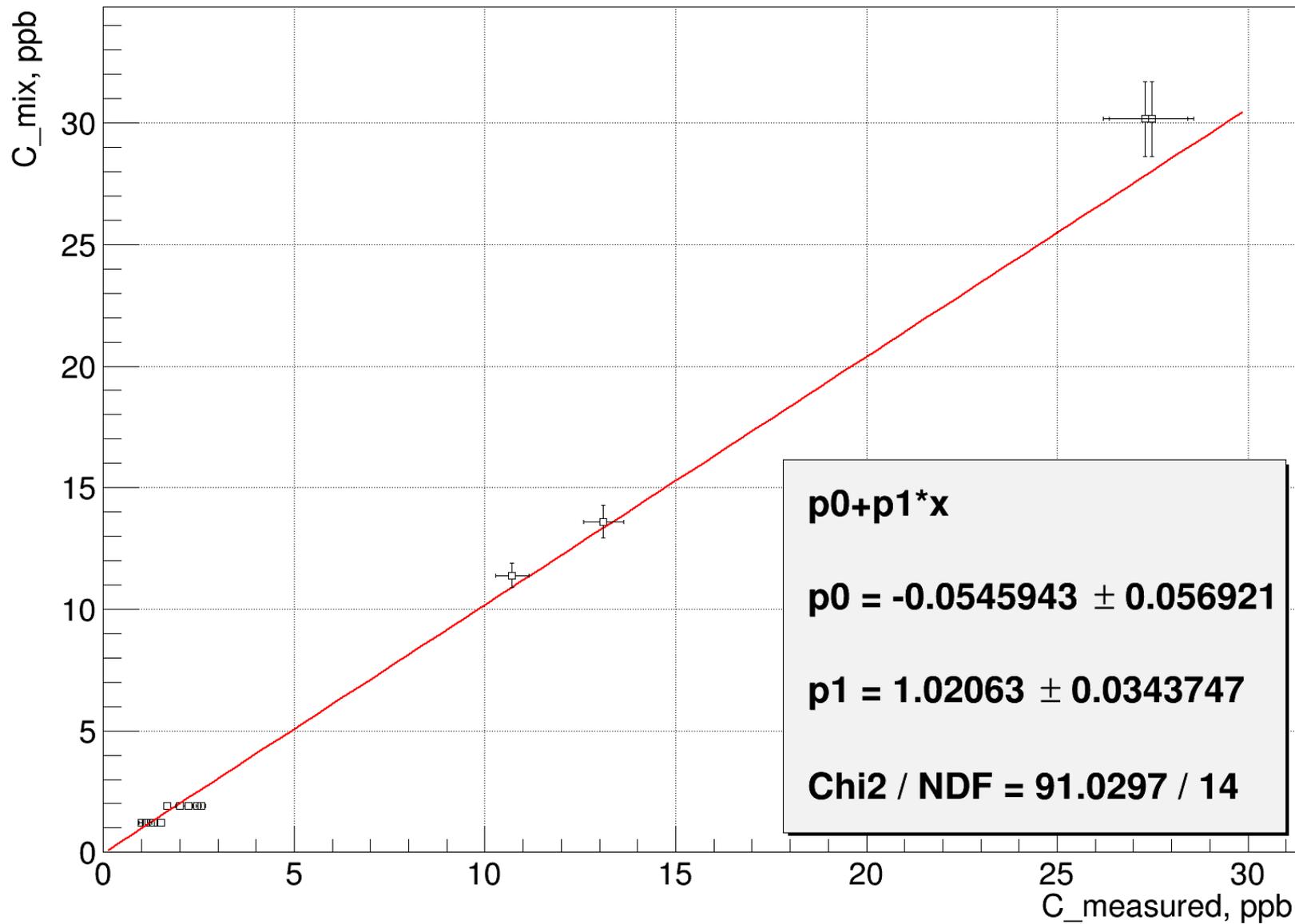
**Набор данных закончен!**

**Обработка и публикация результата?**



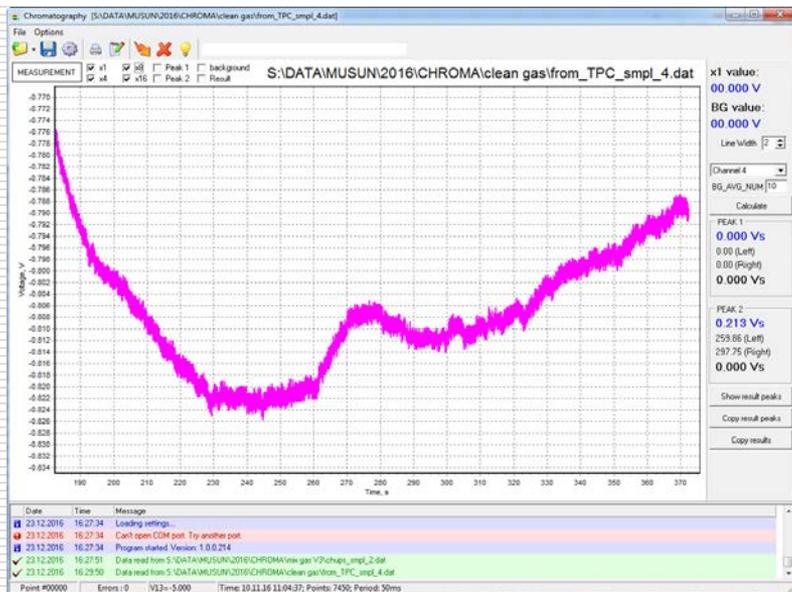


# Создание смеси газа с ИЗВЕСТНОЙ концентрацией азота

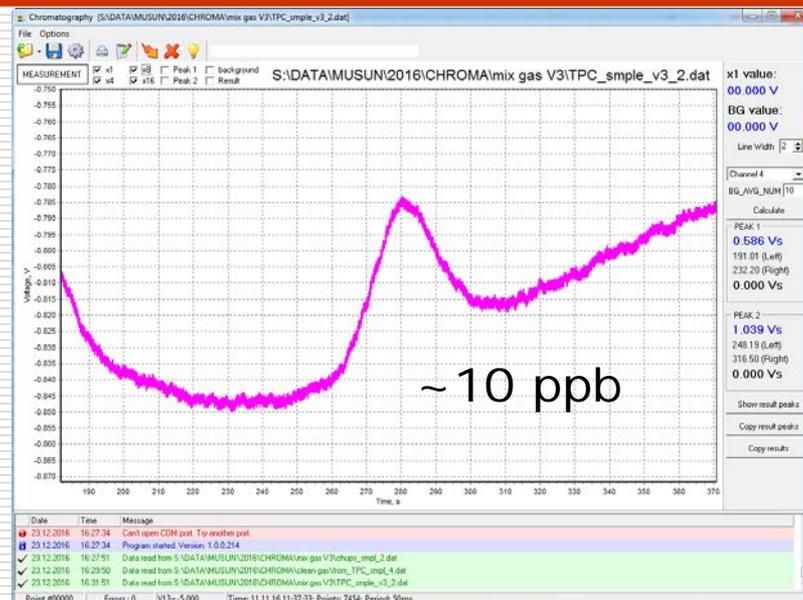




# Хроматограммы (10 литров пробы)

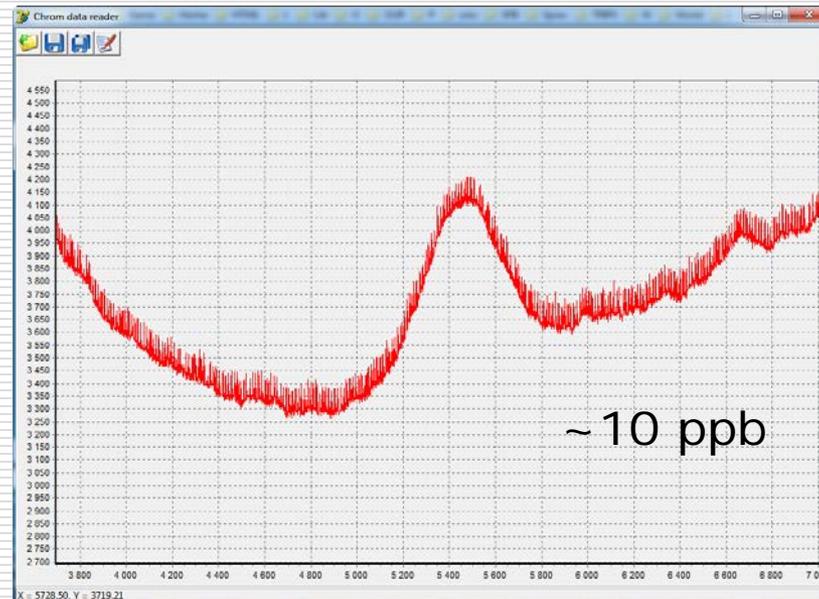


~1 ppb



~10 ppb

## Пики азота на хроматограммах



~10 ppb

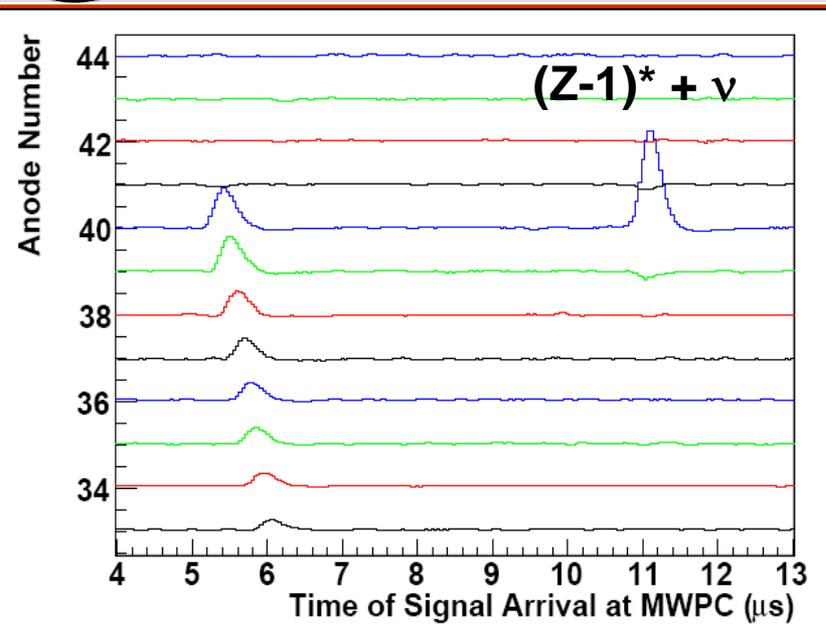


## Результаты работы с «грязным» дейтерием

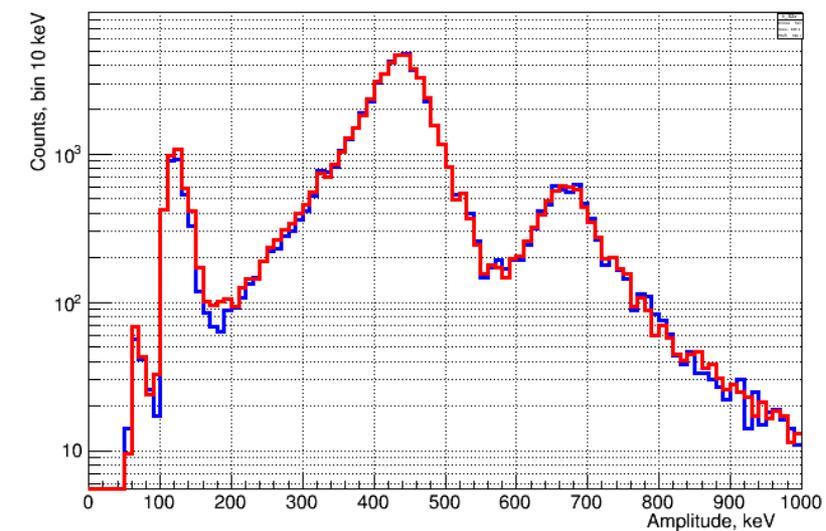
- подтверждена правильность измерения концентрации азота в дейтерии при концентрациях в ppb. Погрешность измерения  $0.5 \div 1.2$  ppb
- подтверждено соответствие концентрации азота , измеренной после ТРС, концентрации азота в самой ТРС
- получено подтверждение низкой адсорбционной емкости ТРС к азоту
- впервые динамически создана в ТРС известная стабильная концентрация азота



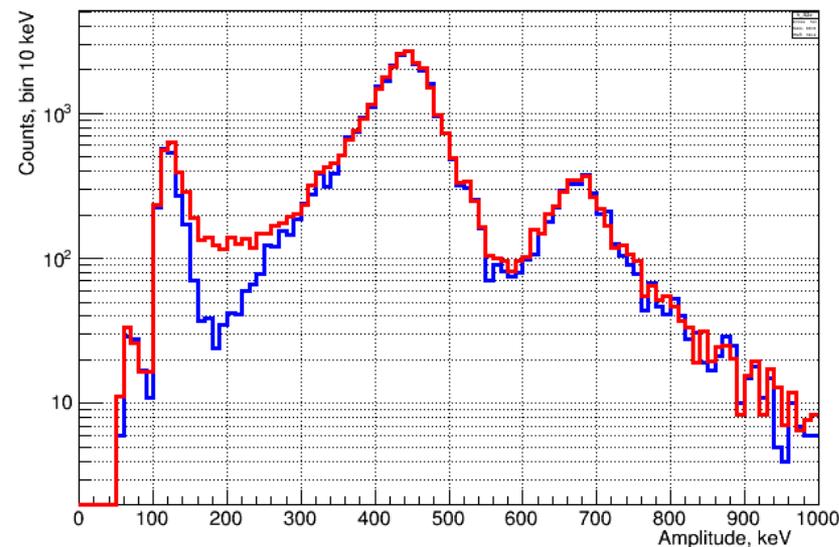
# Регистрация примесей с использованием «вторых» сигналов



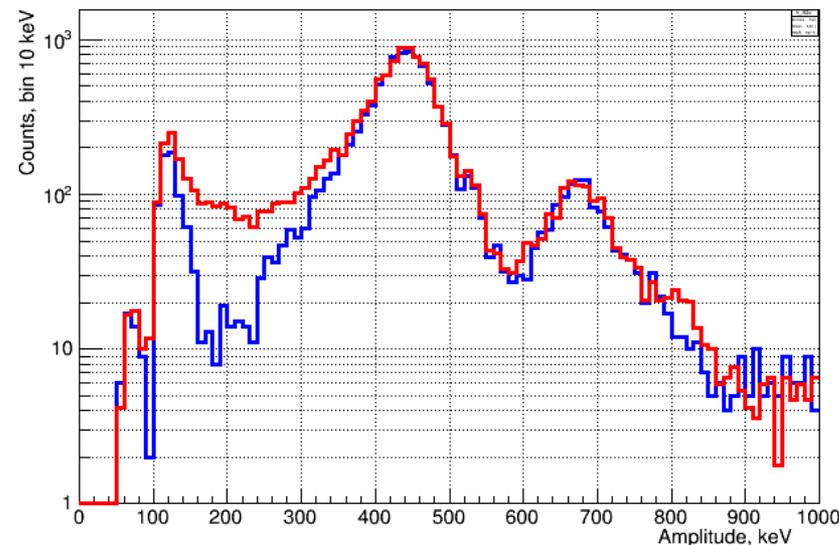
Second Pulse Amplitude, Pure Gas (129260-130099)



Second Pulse Amplitude, 10ppb of N2 (130100-130599)

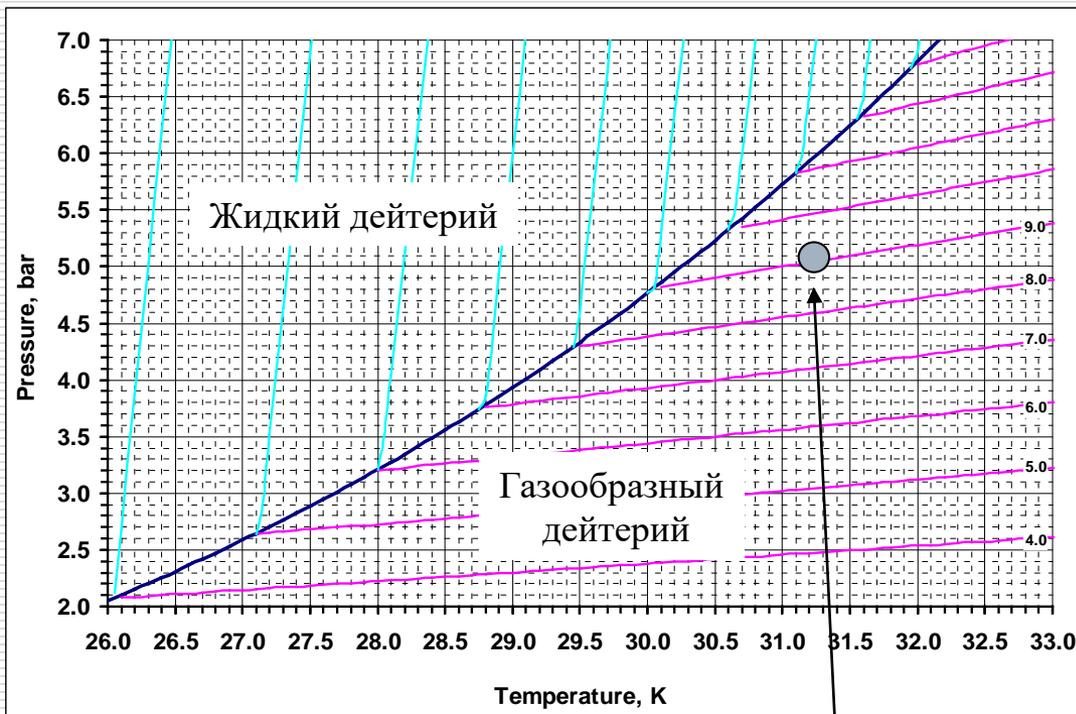


Second Pulse Amplitude, 30ppb of N2 (130650-130899)





# Концентрация примесей



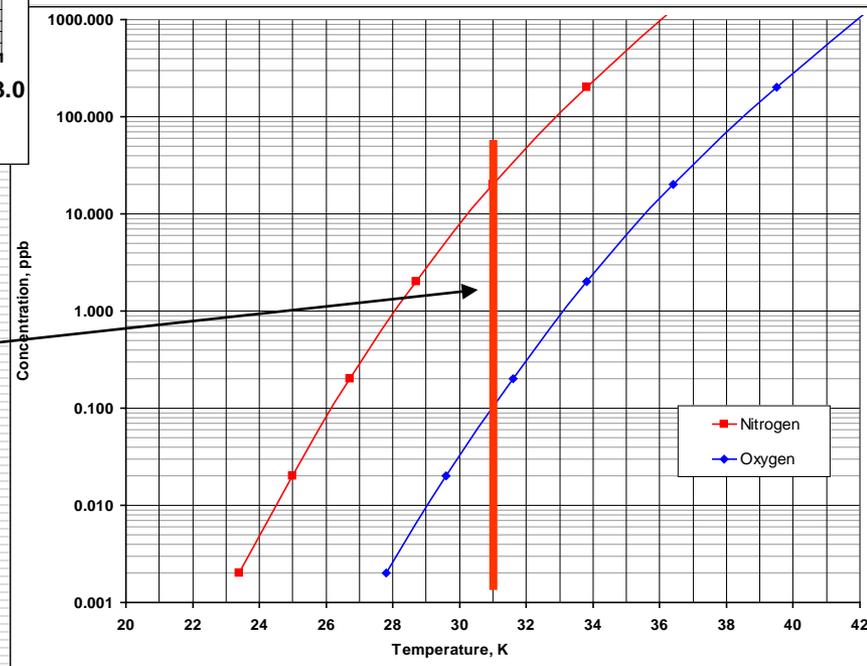
P-T диаграмма дейтерия (NIST)

Рабочая точка

Концентрация насыщенных паров азота в рабочей точке соответствует 20 ppb

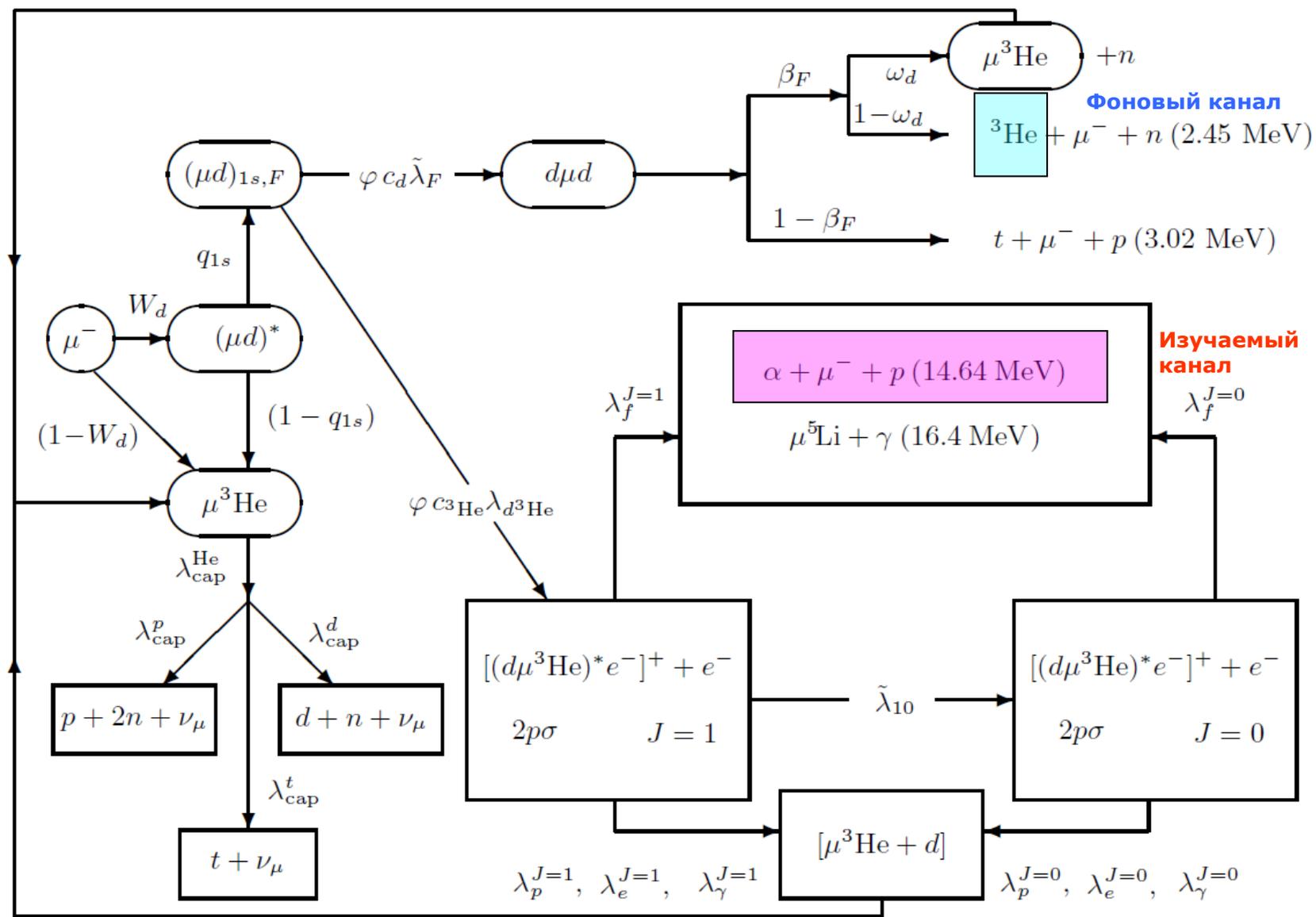
В динамике удалось получить 30 ppb!

Концентрация насыщенных паров азота и кислорода в дейтерии (5.1 bar) (NIST)





# Эксперимент с $^3\text{He}$





D<sub>2</sub>

The European Physical Journal D. January 2006

## Nuclear fusion in muonic deuterium-helium complex

V.M. Bystritsky,<sup>1,\*</sup> M. Filipowicz,<sup>2</sup> V.V. Gerasimov,<sup>1</sup> P.E. Knowles,<sup>3</sup>  
F. Mulhauser,<sup>4</sup> N.P. Popov,<sup>5,†</sup> V.A. Stolupin,<sup>1</sup> V.P. Volnykh,<sup>1</sup> and J. Woźniak<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia

<sup>2</sup>University of Science and Technology, Fac. of Fuels and Energy, PL-30059 Cracow, Poland

<sup>3</sup>Department of Physics, University of Fribourg, CH-1700 Fribourg, Switzerland

<sup>4</sup>University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois 61801, USA

<sup>5</sup>University of Science and Technology, Fac. Phys. Nucl. Techniques, PL-30059 Cracow, Poland

The  $J = 0$  nuclear fusion rate in  $d\mu^3\text{He}$  was derived:  $\lambda_f^{J=0} = (9.7_{-2.6}^{+5.7}) \times 10^5 \text{ s}^{-1}$  ( $\varphi = 0.0585$ );  
 $\lambda_f^{J=0} = (12.4_{-5.4}^{+6.5}) \times 10^5 \text{ s}^{-1}$  ( $\varphi = 0.168$ ).

$\sim 100 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$

Условия эксперимента:

31K, 5 bar, 5% ядерная концентрация <sup>3</sup>He

HD

Hyperfine Interactions 118 (1999) 171–176

## Search for muon catalyzed $d^3\text{He}$ -fusion

E.M. Maev<sup>a</sup>, D.V. Balin<sup>a</sup>, T. Case<sup>b</sup>, K.M. Crowe<sup>b</sup>, A. Del Rosso<sup>c</sup>, V.A. Ganzha<sup>a</sup>,  
F.J. Hartmann<sup>d</sup>, S.M. Kozlov<sup>a</sup>, B. Lauss<sup>e</sup>, O.E. Maev<sup>a</sup>, M. Mühlbauer<sup>d</sup>,  
F. Mulhauser<sup>c</sup>, C. Petitjean<sup>f</sup>, G.E. Petrov<sup>a</sup>, S.M. Sadetsky<sup>a</sup>, G.N. Schapkin<sup>a</sup>,  
W. Schott<sup>d</sup>, G.G. Semenchuk<sup>a</sup>, Yu.V. Smirenin<sup>a</sup>, M.A. Soroka<sup>a</sup>, A.A. Vasiliev<sup>a</sup>,  
A.A. Vorobyov<sup>a</sup>, N.I. Voropaev<sup>a</sup> and J. Zmeskal<sup>e</sup>

<sup>a</sup>Petersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina 188350, Russia

<sup>b</sup>University of California and LBNL, Berkeley, CA 94720, USA

<sup>c</sup>Institut de Physique de l'Université, Pèrolles, CH-1700 Fribourg, Switzerland

<sup>d</sup>Technical University of Munich (TUM), D-85747 Garching, Germany

<sup>e</sup>Austrian Academy of Sciences, A-1090 Vienna, Austria

<sup>f</sup>Paul Scherrer Institut (PSI), CH-5232 Villigen, Switzerland

muon stops have been selected. The analysis of the data was able to determine a new upper limit for the  $d^3\text{He}$ -fusion rate in the  $^3\text{He}\mu d$ -molecule ( $\lambda_f \leq 6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$ ), which is more than three orders of magnitude lower than the previously existed limit.

$< 6 \times 10^4 \text{ s}^{-1}$



## Планы 2015 года

- **2016** – систематические исследования на пучке (?) и обработка данных
- **2016(2017)** – публикация окончательного результата
  
- **Новые эксперименты (?)**

**Планы 2016 года не определены ...**





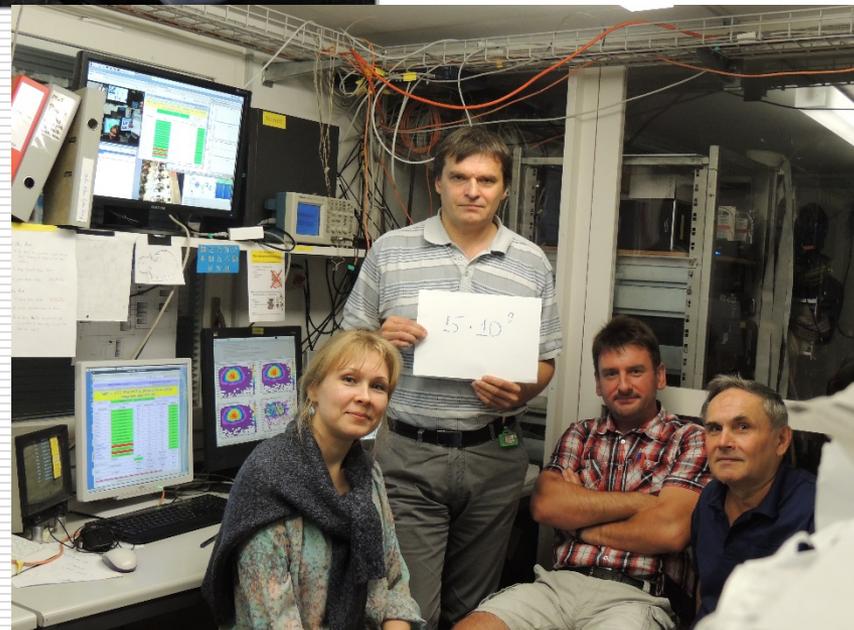
# История набора данных в картинках

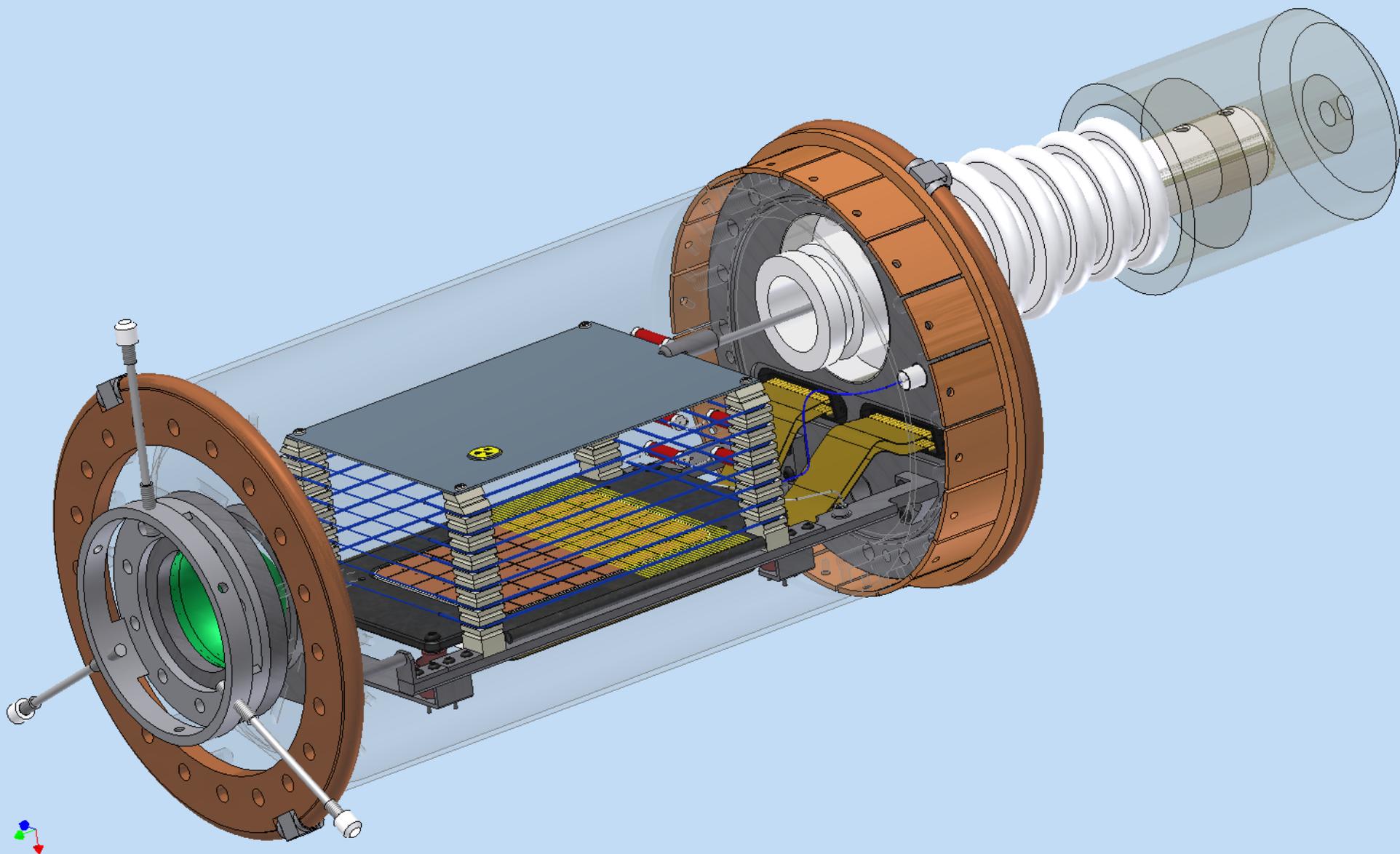


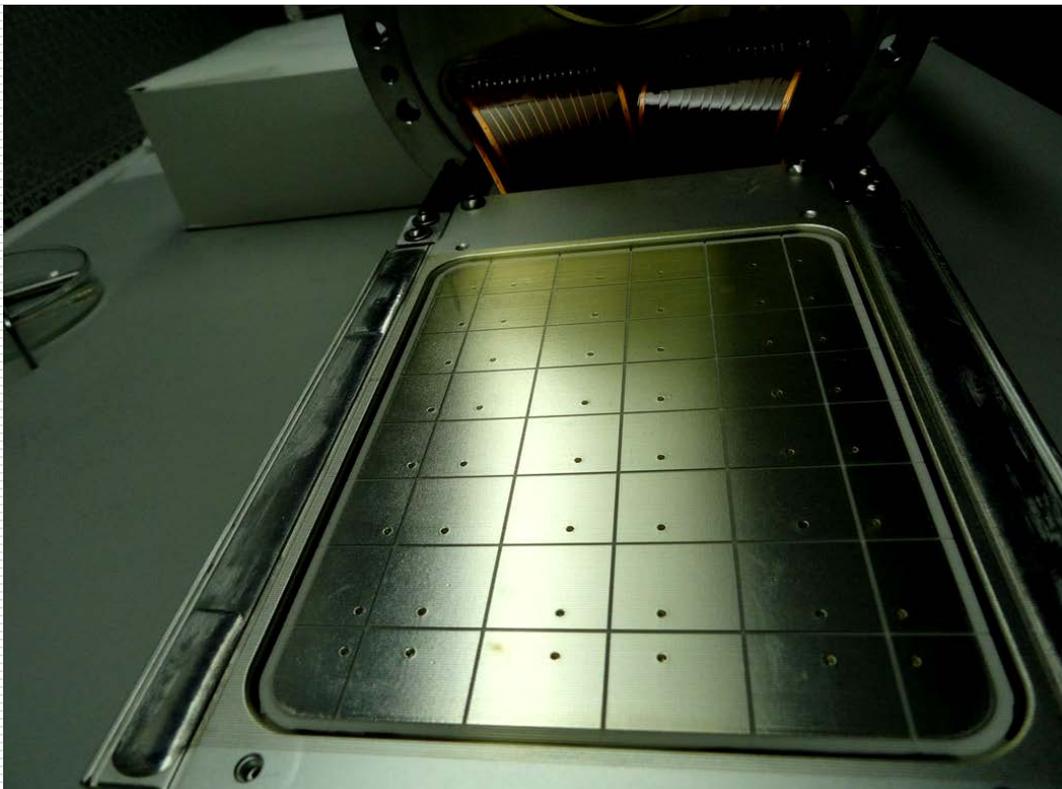
2013 год  
Обсуждение  
неудачного сеанса  
(воспитательная работа)

2014 год  
Первая половина  
статистики

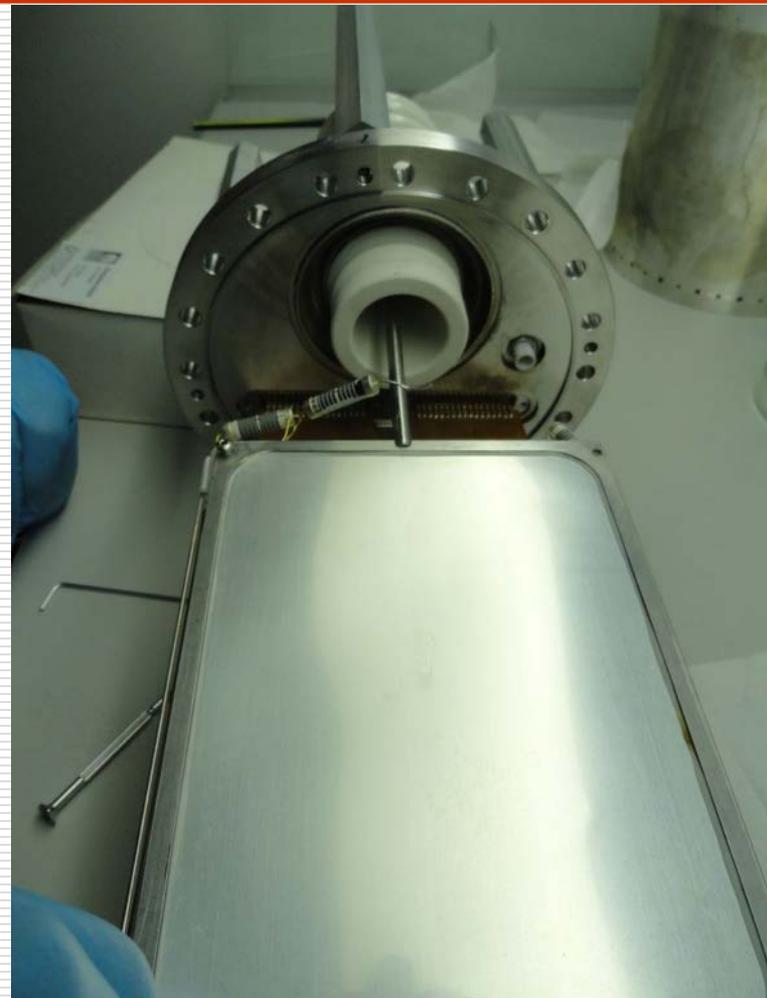
2015 год  
Вторая половина  
статистики







**Анодная плоскость с серебряными падами**



**Катодная плоскость из серебряной фольги**



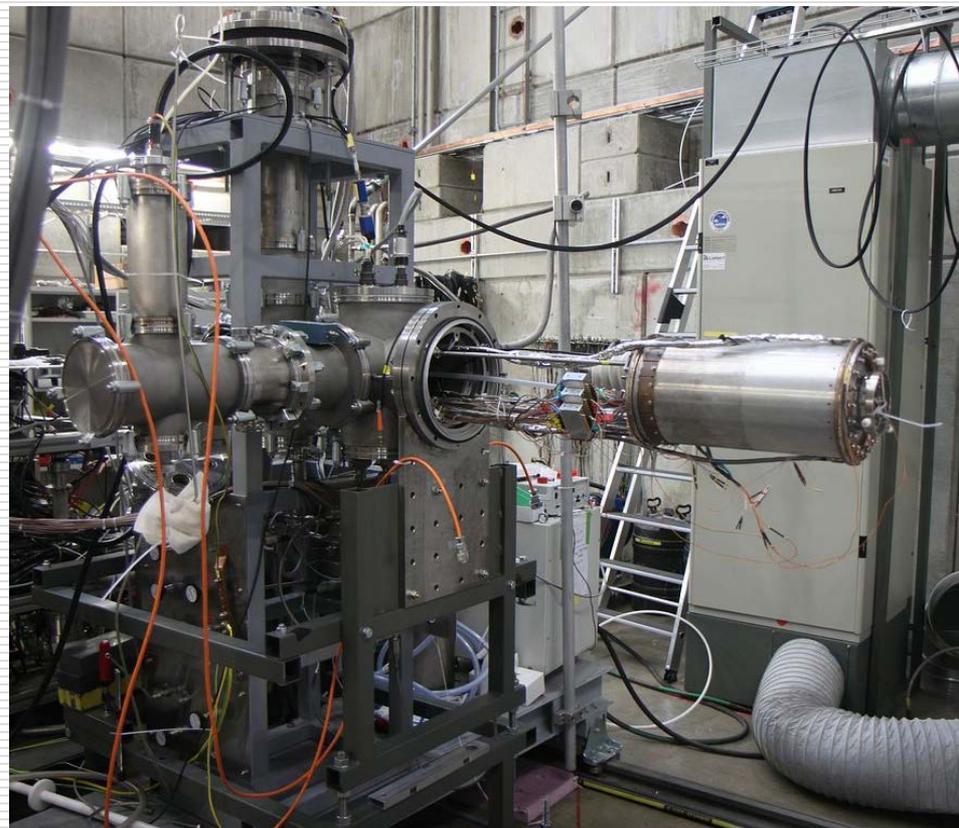
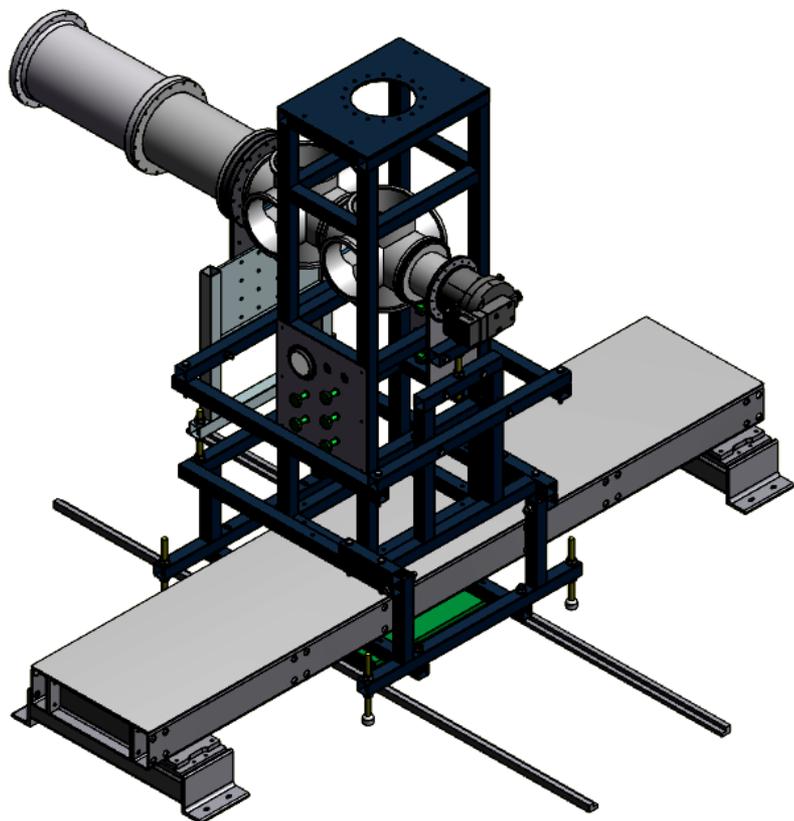
**Линия автоматической подачи азота  
в CHUPS и криогенные  
предусилители**



**Нолвый блок системы неоновой  
тепловой трубы**

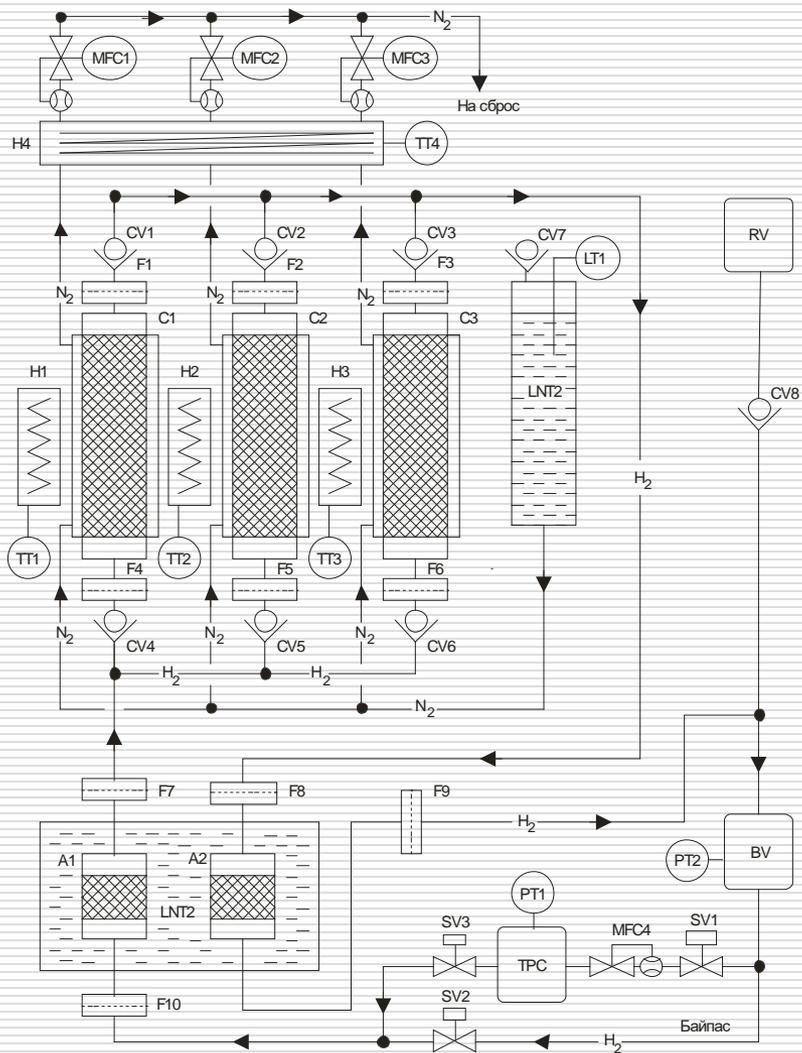


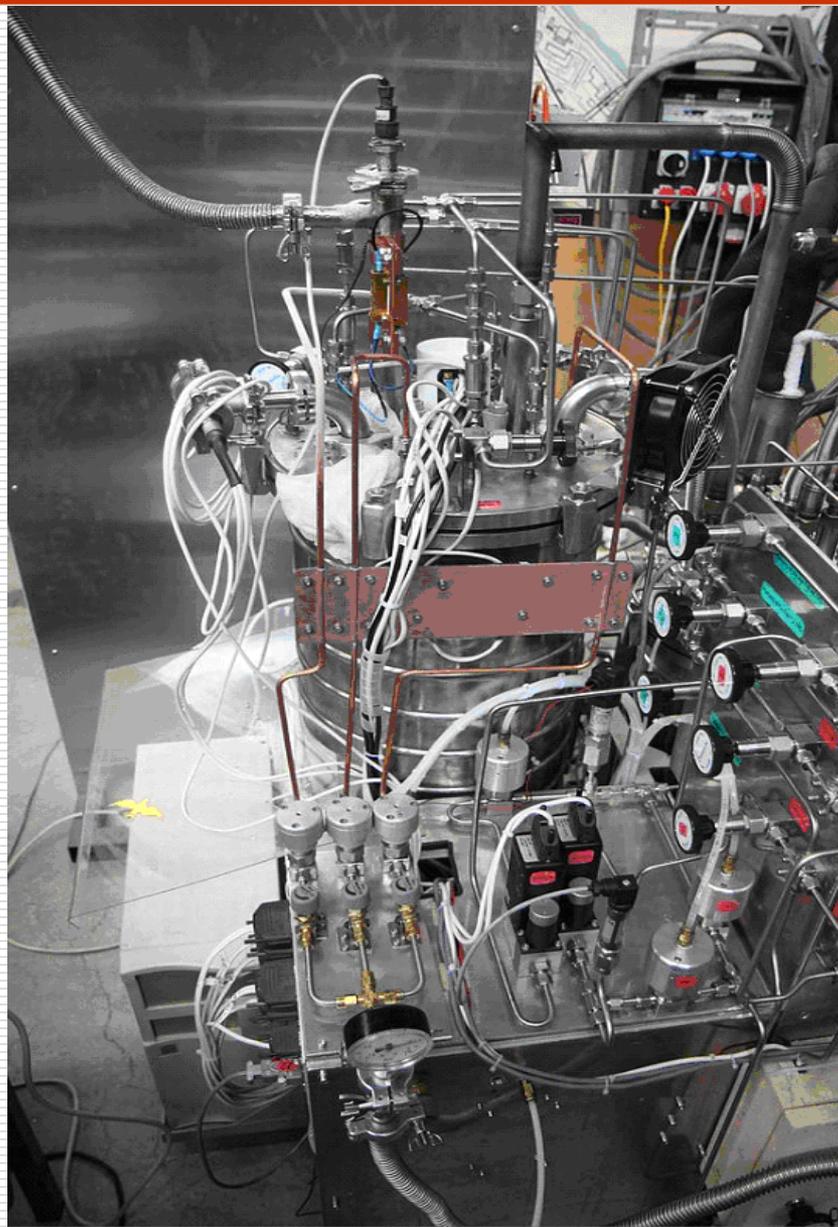
# Новая система поддержки камеры





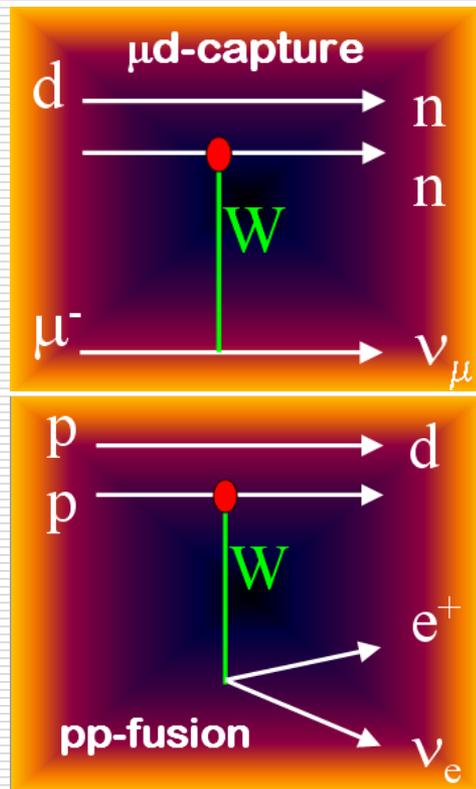
# Компрессоры CHUPS







## Цель и мотивация эксперимента



Сопоставив измеренную скорость  $\mu$ -захвата с вычисленной рамках EFT, можно будет определить параметры теории, что в свою очередь позволит вычислить с высокой точностью сечения фундаментальных астрофизических реакций:



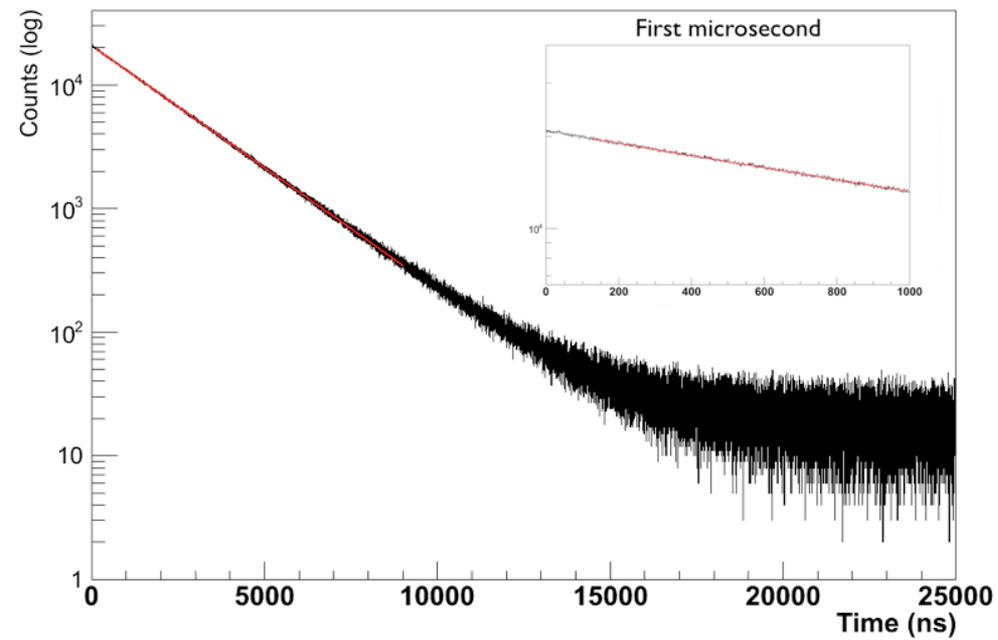
Ядерная реакция синтеза двух протонов идёт на Солнце и является основным источником солнечной энергии и электронных нейтрино.

Реакции используются для регистрации потоков нейтрино в нейтринных экспериментах.

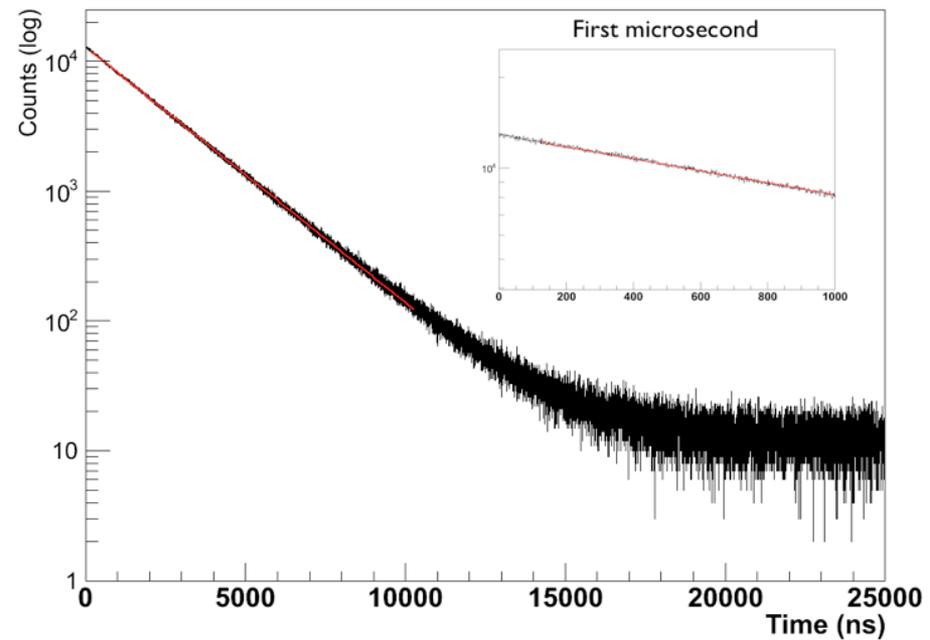


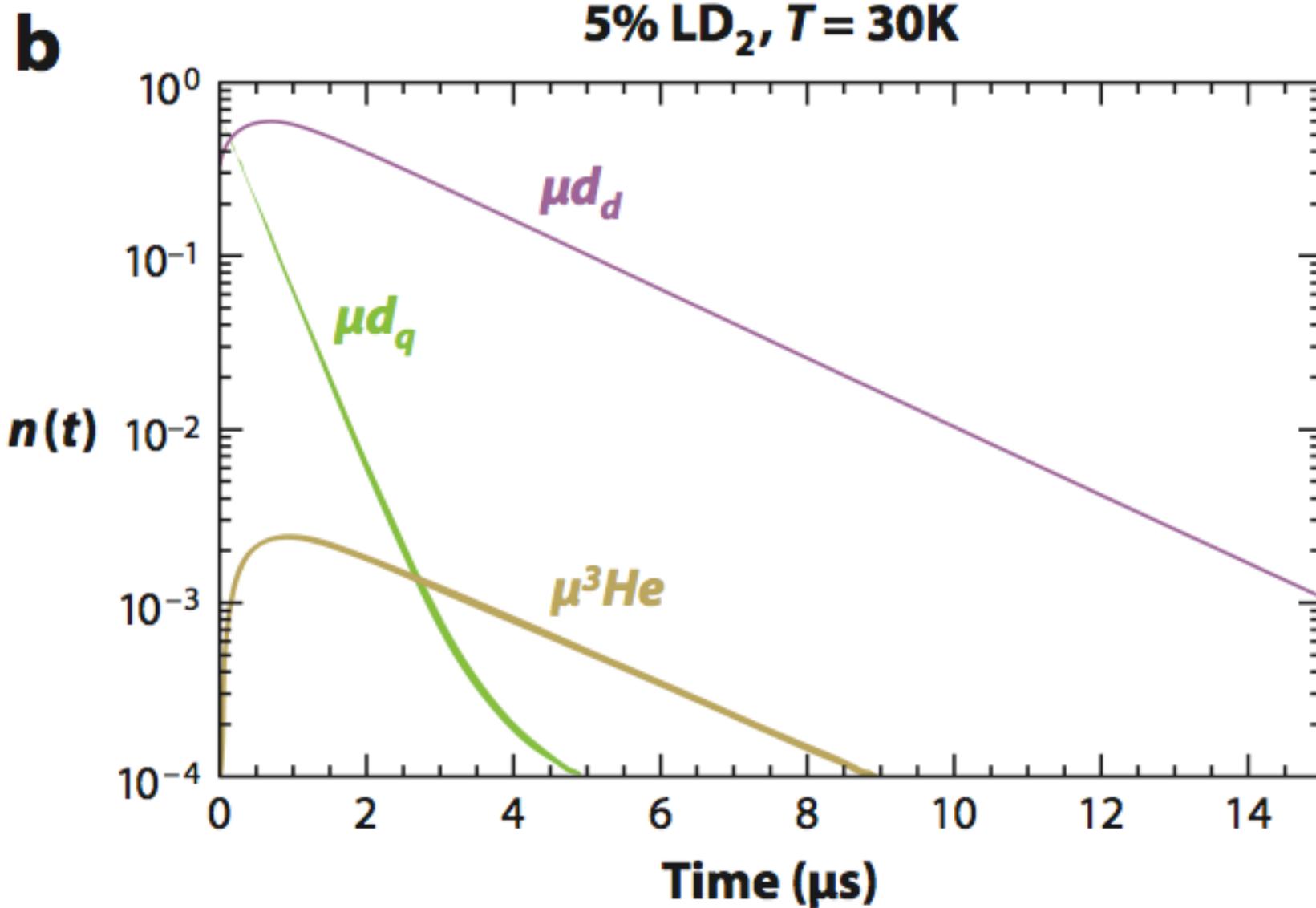


$\mu^-$  Lifetime



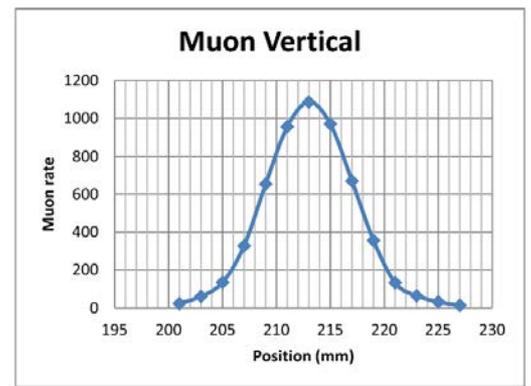
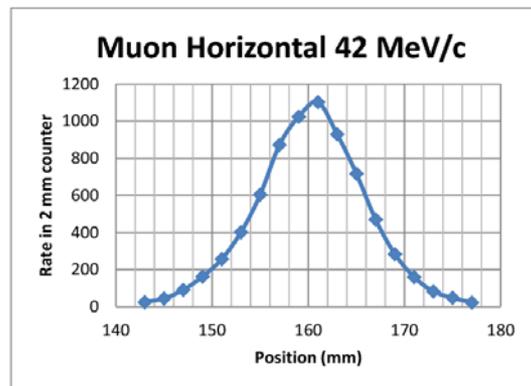
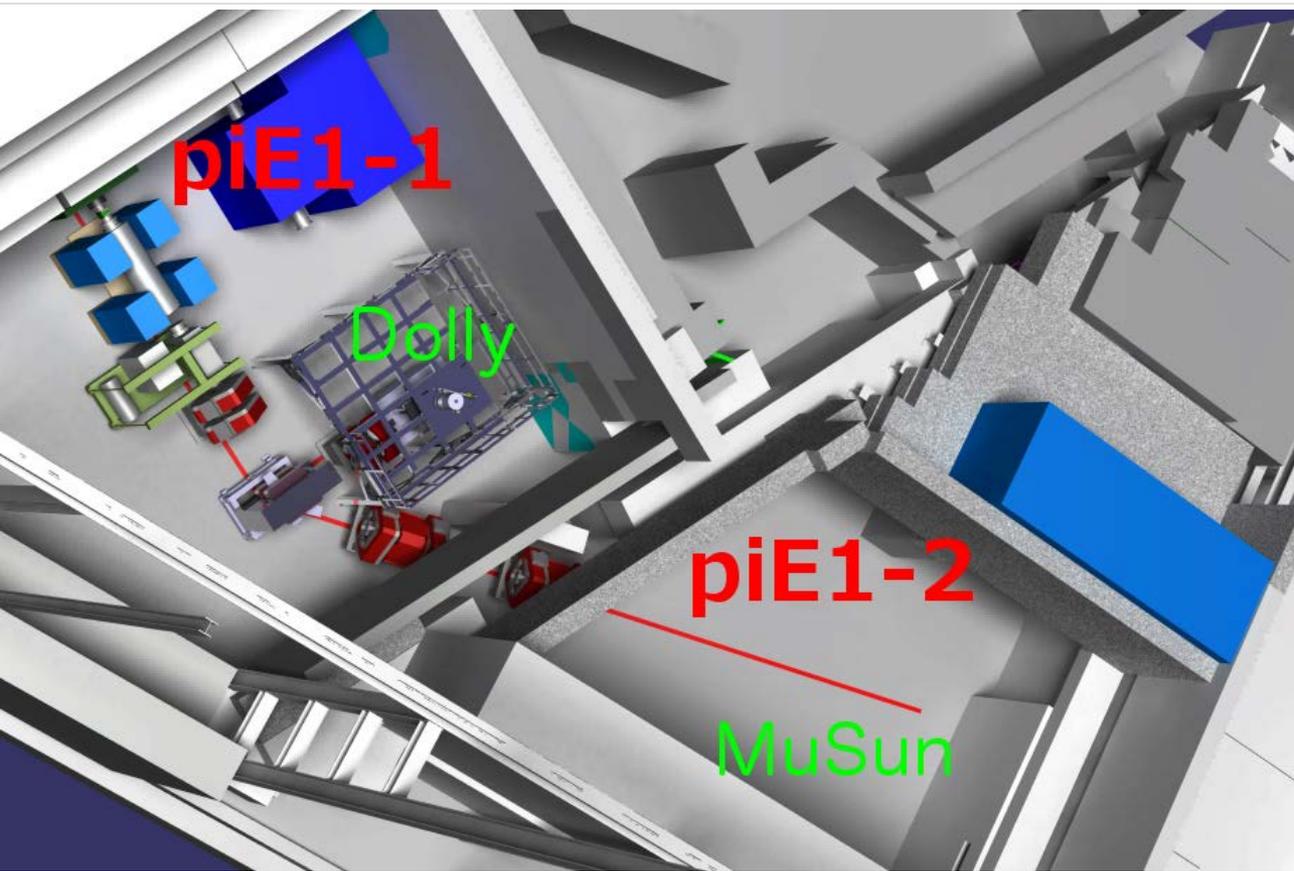
$\mu^+$  Lifetime



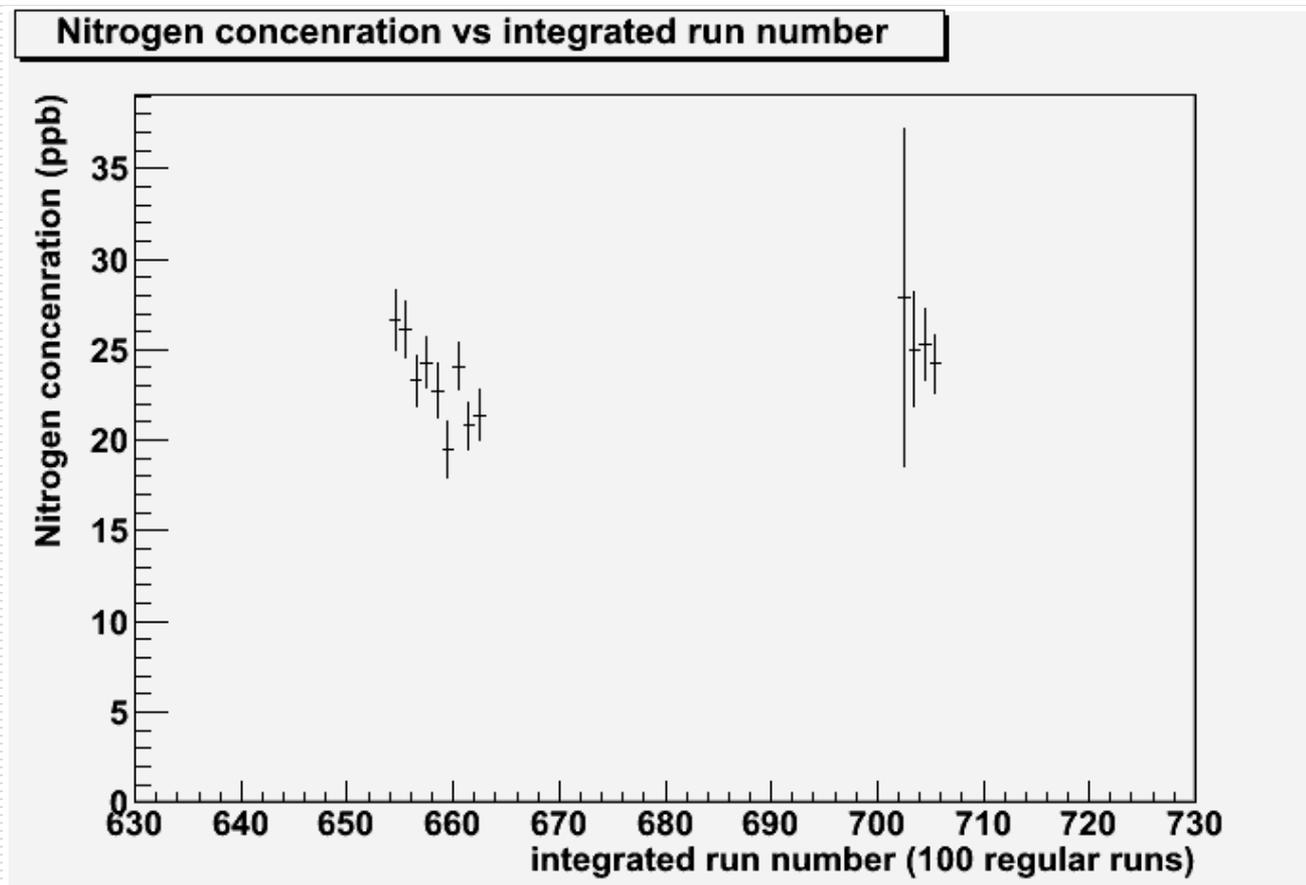




# Проводка пучка к экспериментальной установке



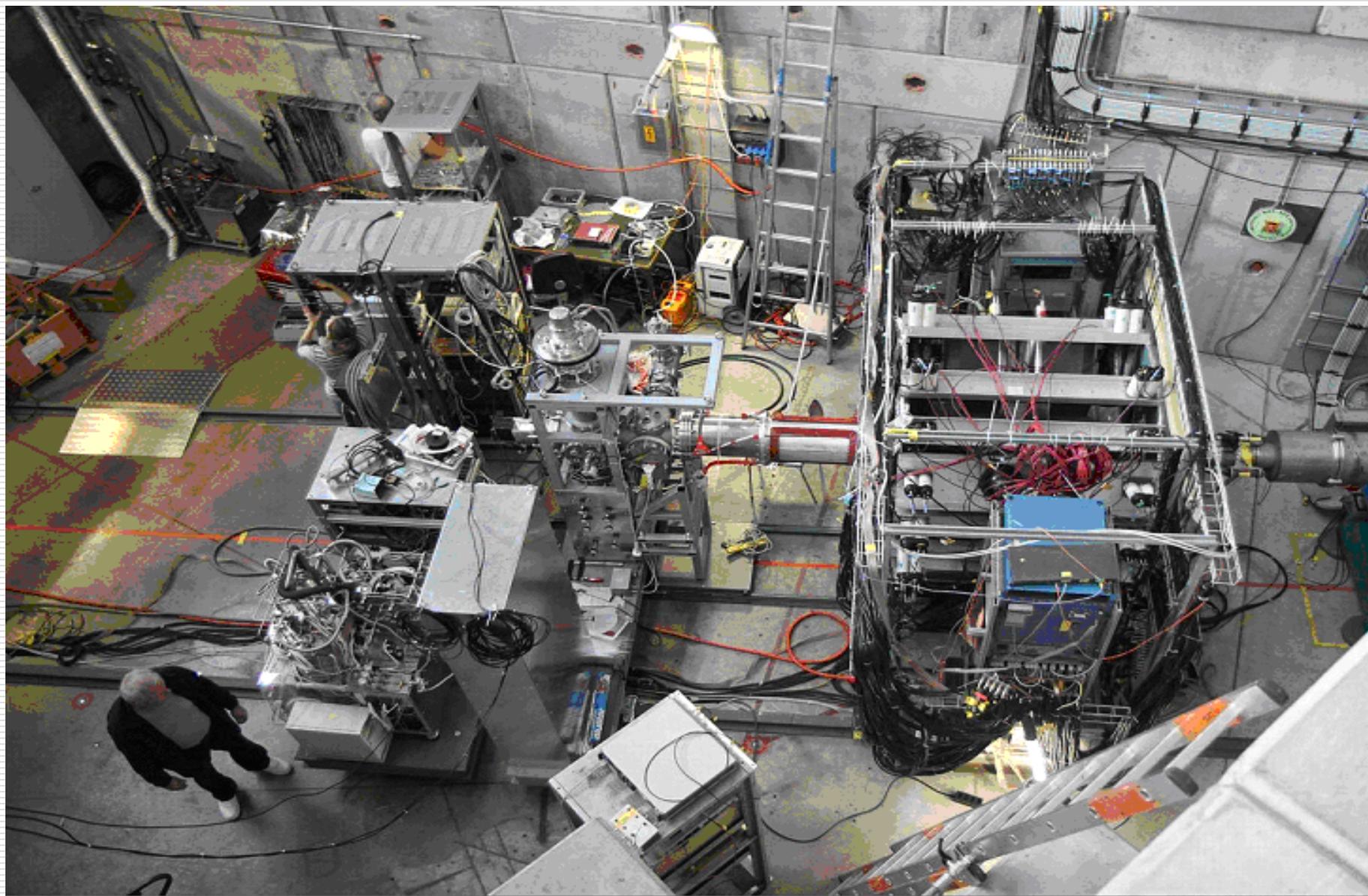
$\mu$ SC muon rate with kicker (kHz)	$\mu$ SC electron rate (kHz)	Stopping fraction in the TPC
23.3	3.5	48.0 %



Шаг шкалы - 10 соответствует 3-м дням

**Хроматографические измерения на этом же временном промежутке дали  $20 \pm 4$  ppb**

**Давление насыщенных паров азота (определяется температурой) =  $22 \pm 10$  ppb**







**Усредненные значения примеси азота за весь сеанс (3 месяца и 10 проб)**

**Концентрация азота на выходе системы охлаждения (CHUPS)  $0.92 \pm 0.08$  ppb**

**Концентрация азота на выходе детектора (TPC)  $1.31 \pm 0.09$  ppb**

**За весь сеанс (3 месяца) через систему очистки пропущено  $595 \text{ m}^3$  дейтерия.**

**В системе очистки ДОЛЖНО остаться**

$$595 \cdot 10^6 \cdot (1.31 \cdot 10^{-9} - 0.92 \cdot 10^{-9}) \text{ cm}^3 = 0.23 \text{ cm}^3 \text{ азота}$$

**После окончания сеанса ВЕСЬ собранный азот был выделен в  $50 \text{ l}$  дейтерия.**

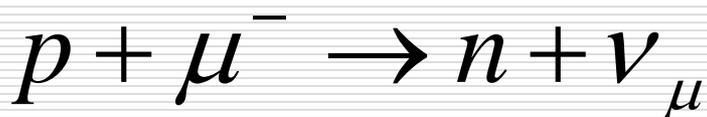
**Измеренная концентрация –  $6 \text{ ppm}$ , что соответствует**

$$50 \cdot 10^3 \cdot 6 \cdot 10^{-6} = 0.30 \text{ cm}^3 \text{ азота}$$



Прецизионное измерение скорости захвата мюона ядром гелия-3 ( $\lambda_\mu$ ) с точностью 0.3% на порядок лучше мирового значения, позволило надежно определить значение псевдоскалярного форм-фактора слабого заряженного тока  $F_P$  для изотопического дублета  ${}^3\text{He}$ – ${}^3\text{H}$ :  $F_P = 20.8 \pm 2.8$ .

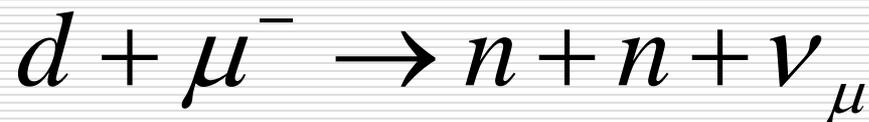
P. Ackerbauer et al., Phys. Lett. B 417, 224 (1998).



Эксперимент MuCAP. Впервые получено значение константы  $g_p$ , которое оказалось в точном соответствии с величиной, теоретически предсказанной из киральной теории возмущений тяжелых барионов (НВChPT).

Этот результат позволил дополнить картину электрослабых ядерных взаимодействий.

V.A.Andreev et al. MuCap collaboration, Phys.Rev.Lett.110,022504 (2013).



Работы по эксперименту MuSun были начаты в 2008 году и в настоящий момент находятся в стадии набора физических данных.



# Принцип работы время-проекционной камеры

