



Эксперимент μ 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

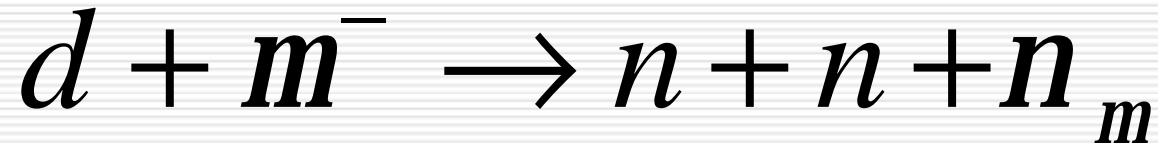
Regis University, University of South Carolina

Universit e Catholique de Louvain

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



История сеансов в эксперименте MuSun с 2008 года

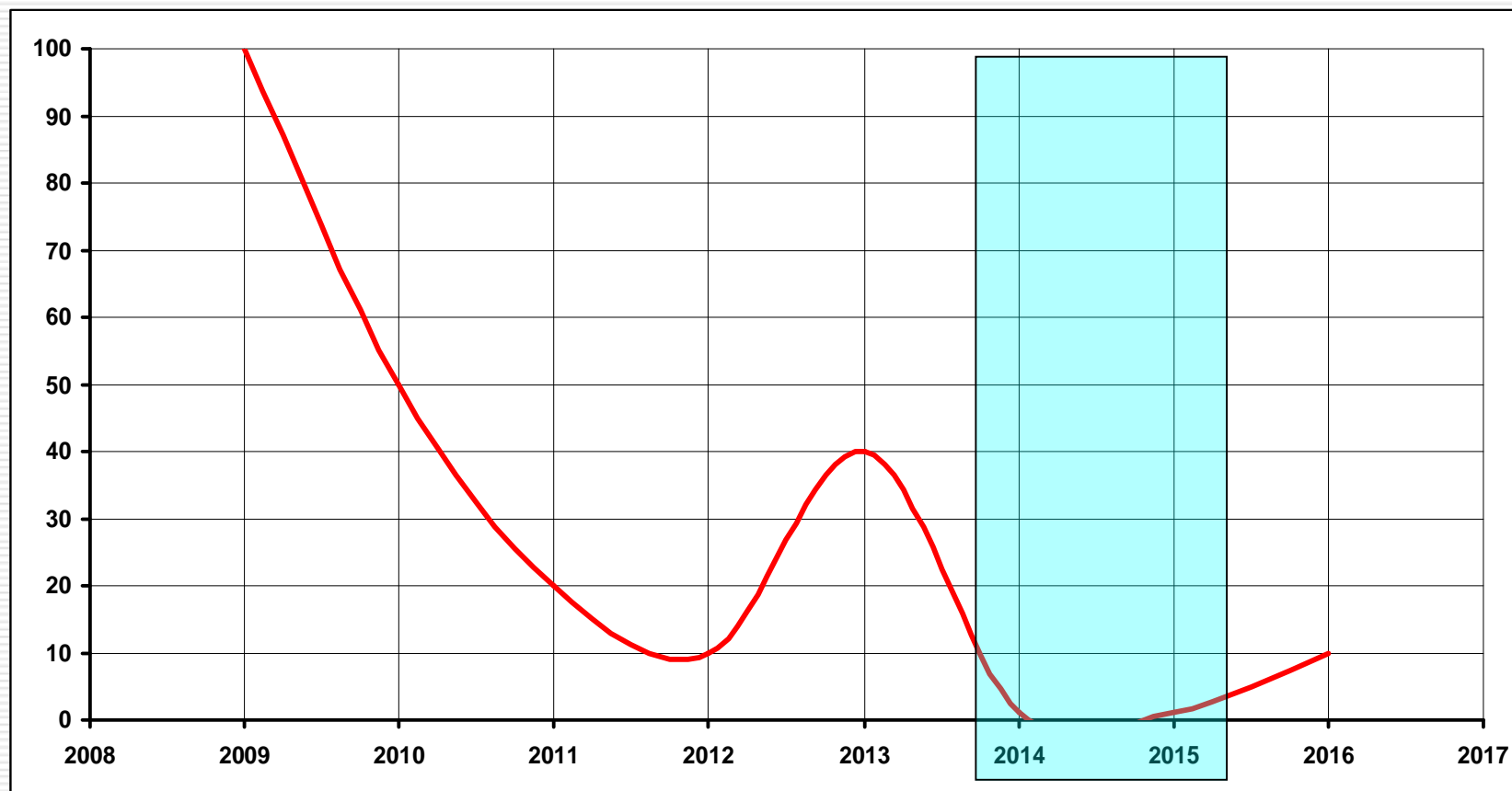


| | | |
|-------|----------|--|
| Run_1 | 2008 год | Тестовый сеанс на TPC из эксперимента MuCAP. Первый сеанс с дейтерием, как рабочим газом. |
| Run_2 | 2009 год | Первая сборка конструкции криогенной TPC |
| Run_3 | 2010 год | Технический сеанс с первым выходом на пучок. Акустические шумы, высоковольтные 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. |



История сеансов в эксперименте MuSun

Распределение технических проблем по годам. Экспертная оценка.



**Основной набор
статистики**

Всего ускорительного времени ~ 11 месяцев

Из них:

Пропало из-за технических проблем (+отладка)

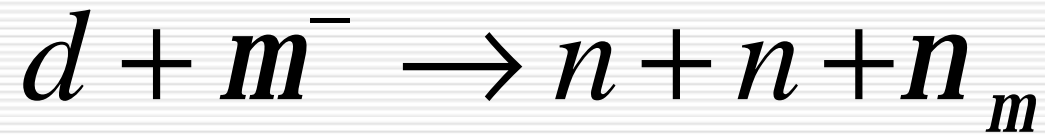
3 месяца

Проблемные данные

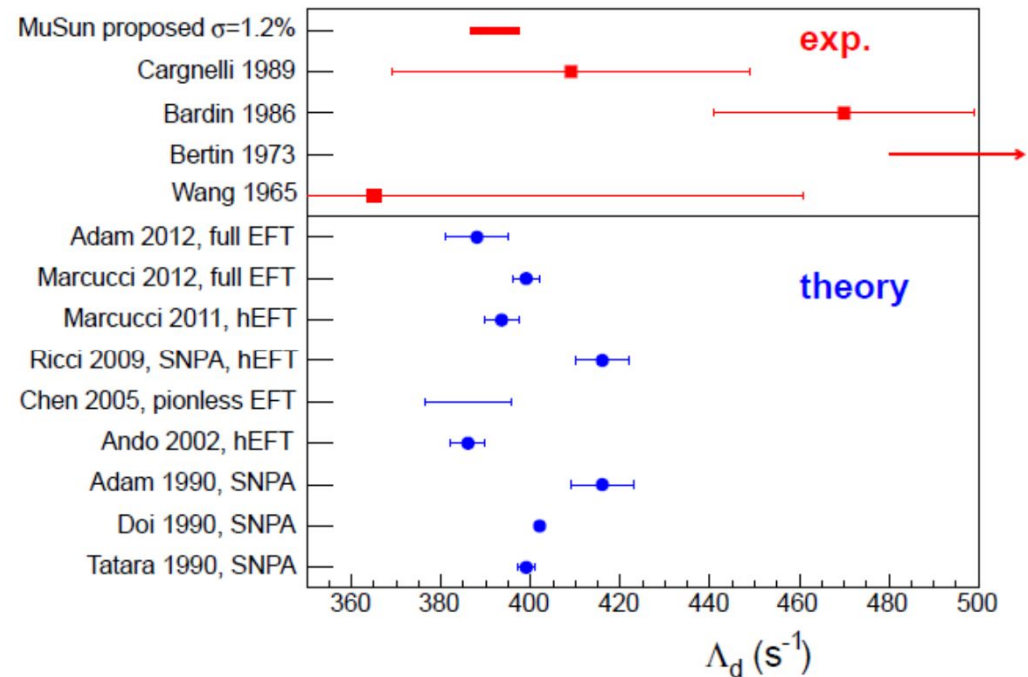
2 месяца

Данные высокого качества

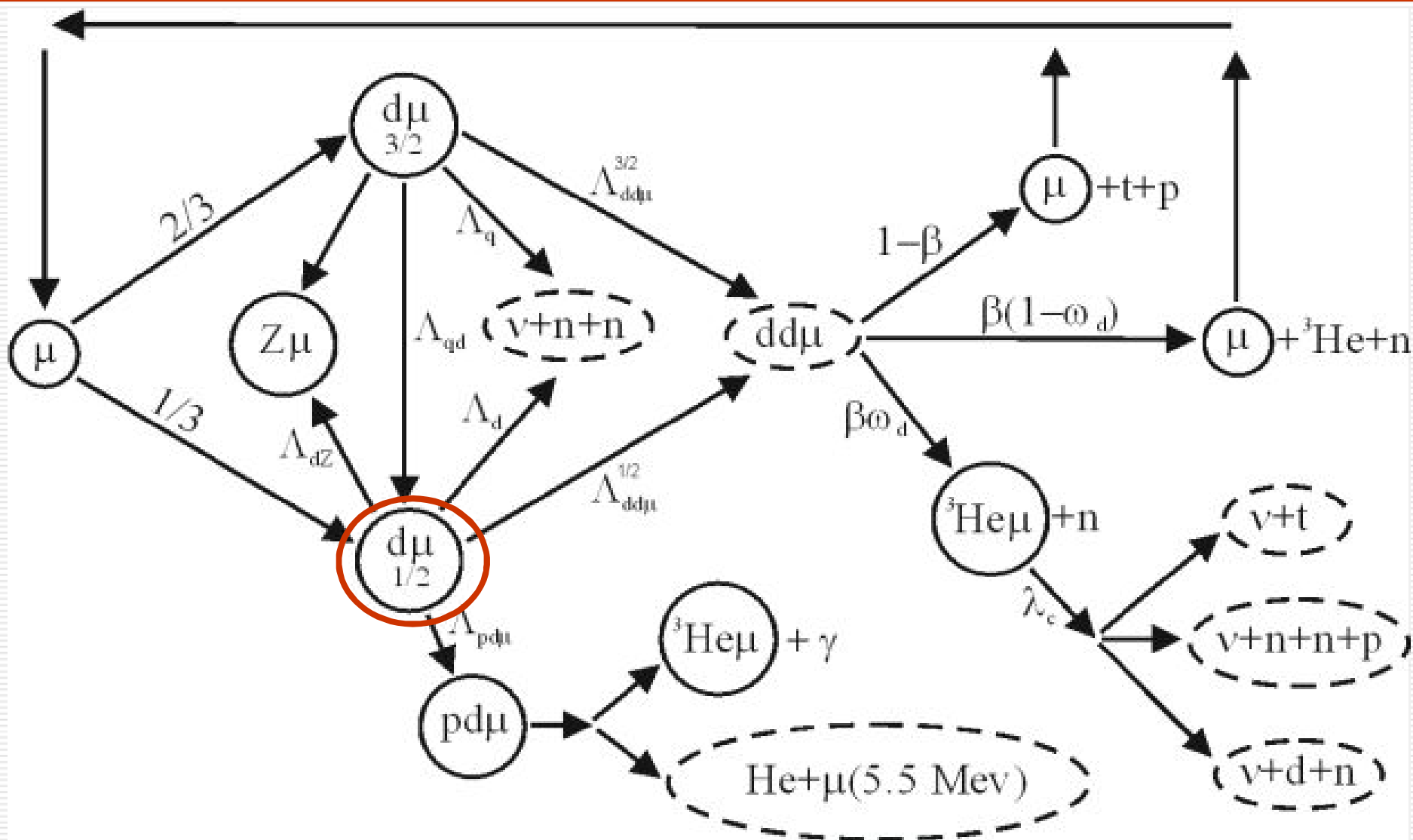
6 месяцев



Измерение скорости захвата Λ_d в $\mu d(-)$ атоме с точностью $< 1.5\%$

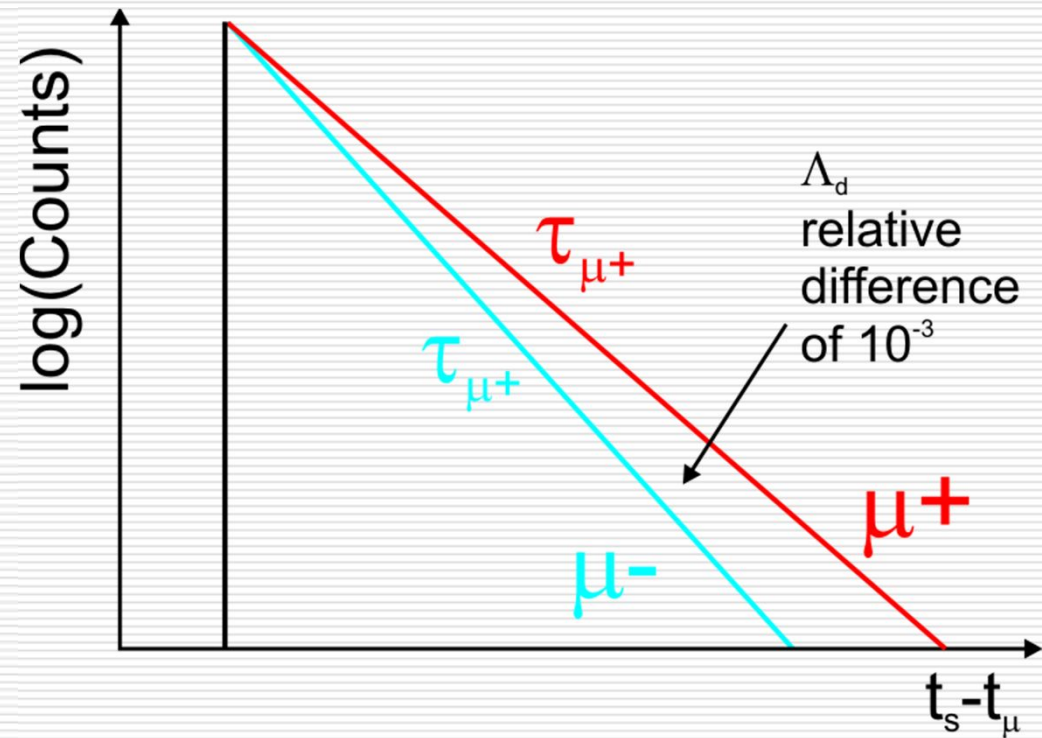


EFT - Effective Field Theory
SNPA -potential model calculation





Методика измерения скорости захвата мюона



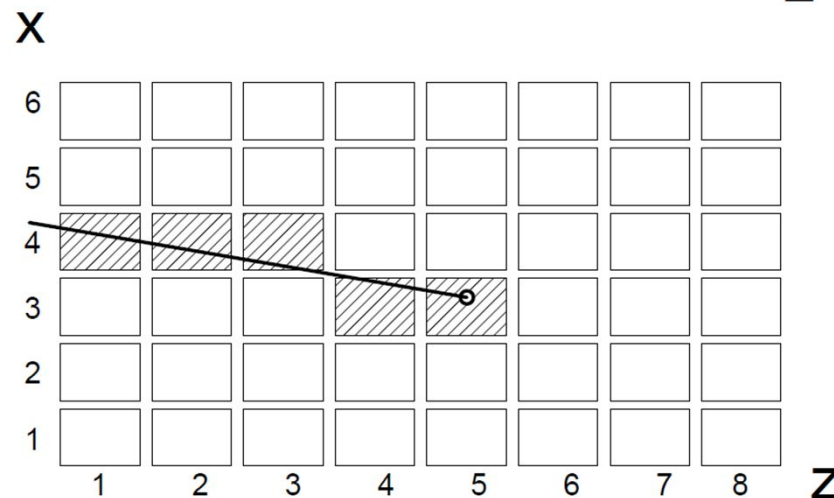
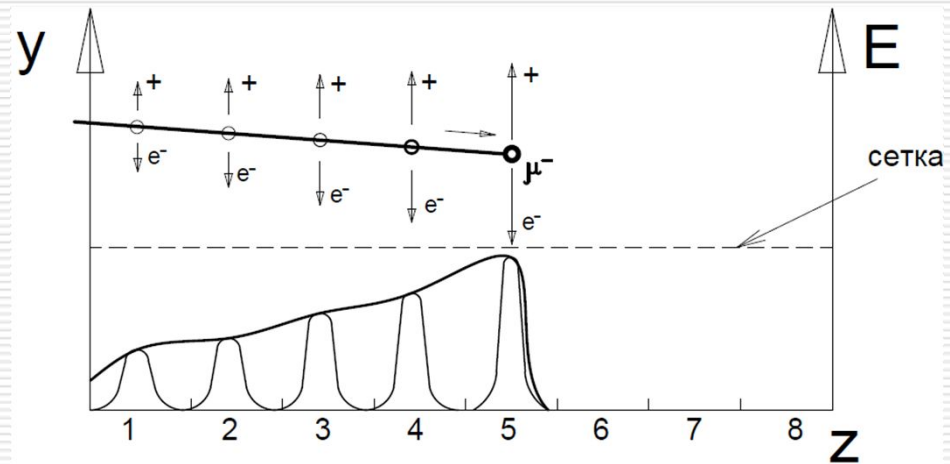
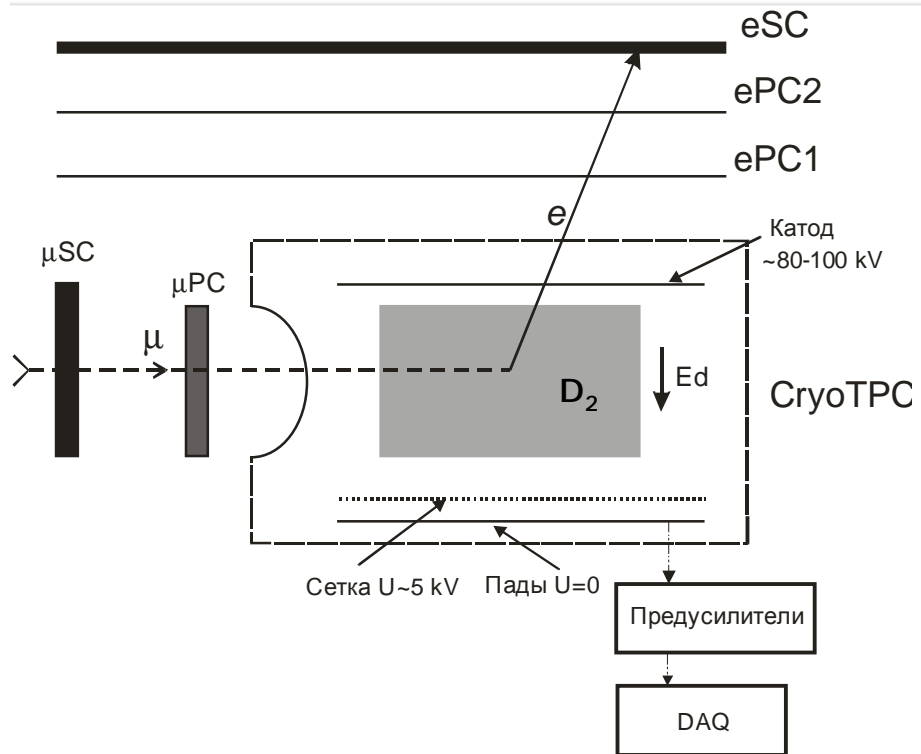
Для измерения времени жизни необходимо 10^{10} событий $m \rightarrow e \bar{\nu} \nu$

для m^- и m^+

$$\Lambda_d = \frac{1}{t_{m^-}} - \frac{1}{t_{m^+}}$$

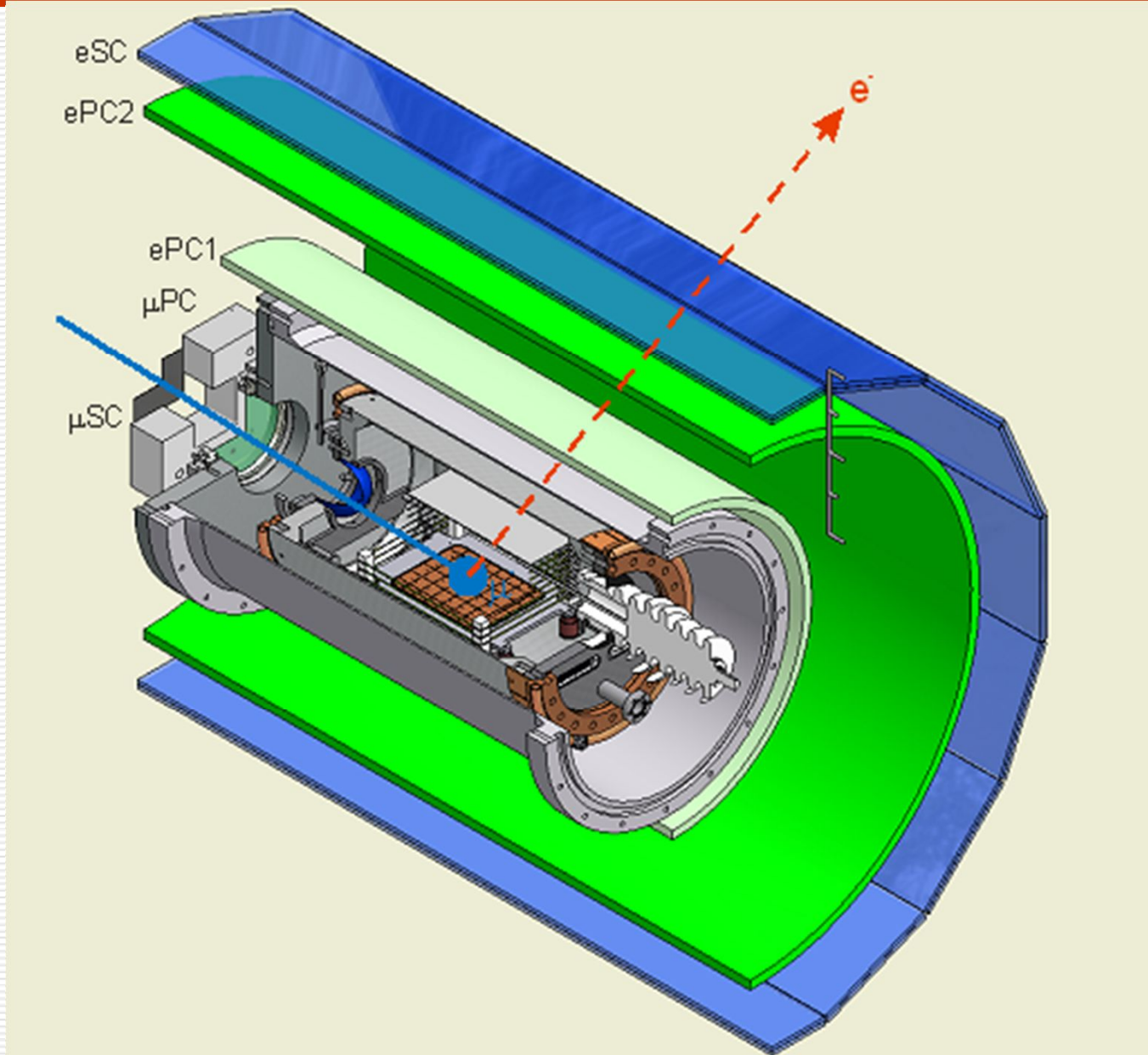


Принцип работы время-проекционной камеры



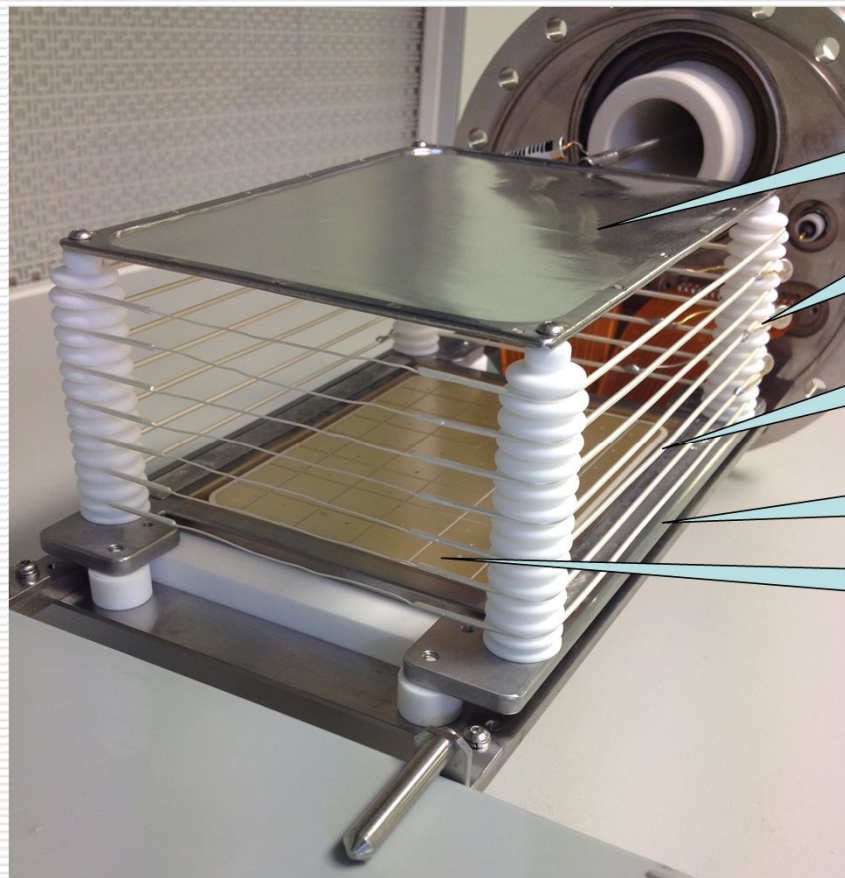


Сryo_ТРС как активная мишень





Time Projection Chamber (TPC)



Катод

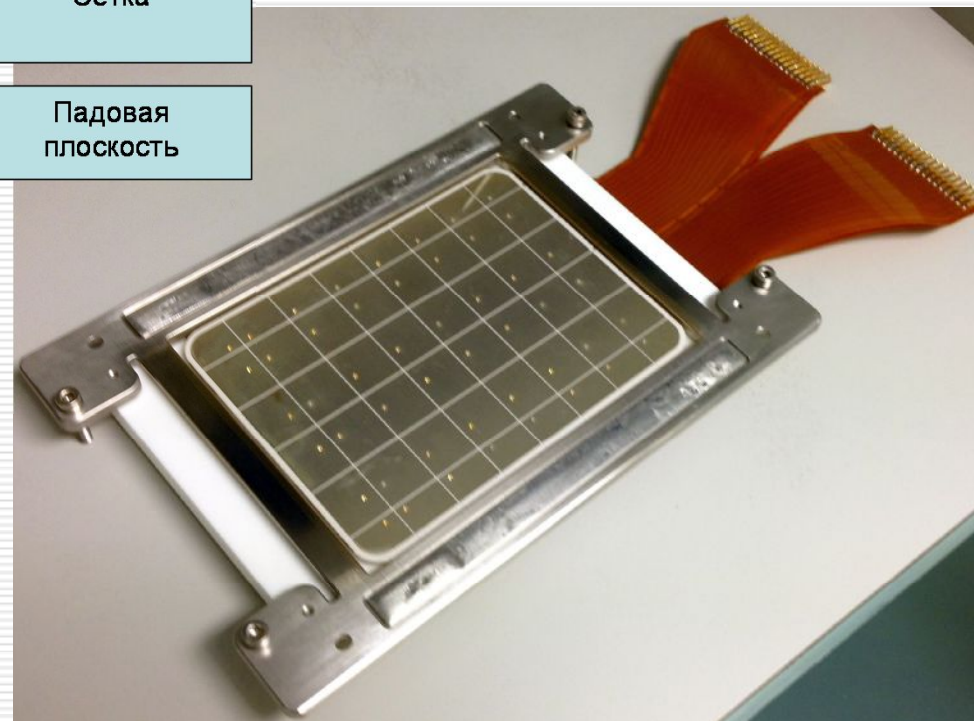
Стойка

Выравнивающая
проволока

Сетка

Падовая
плоскость

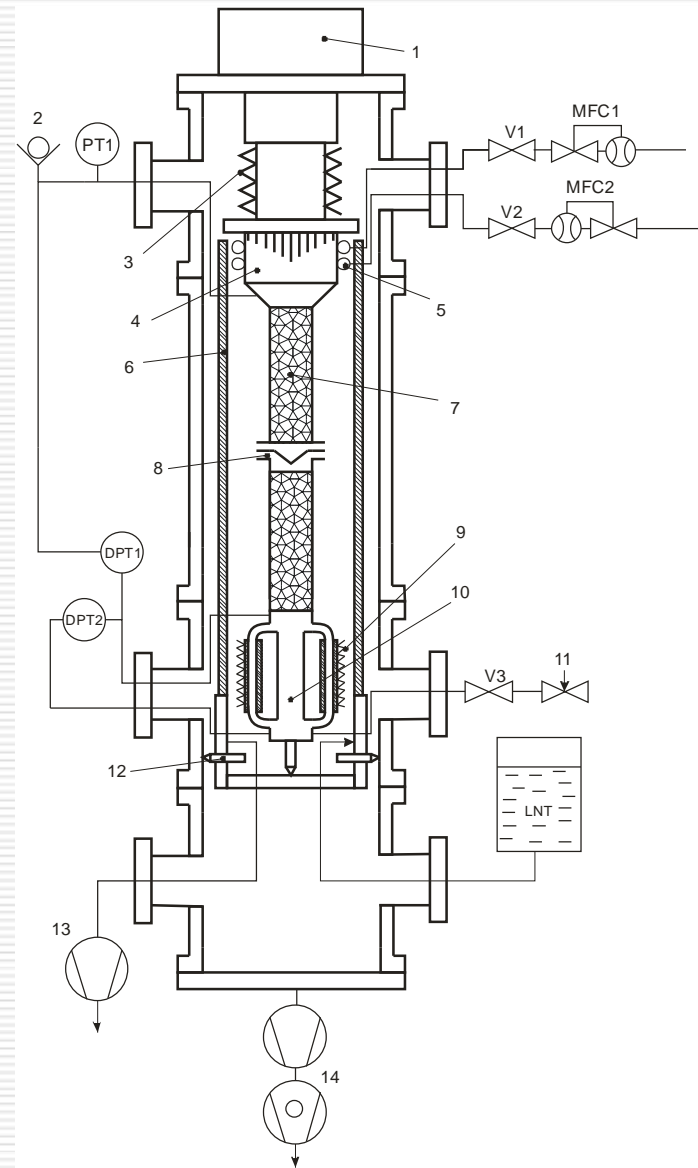
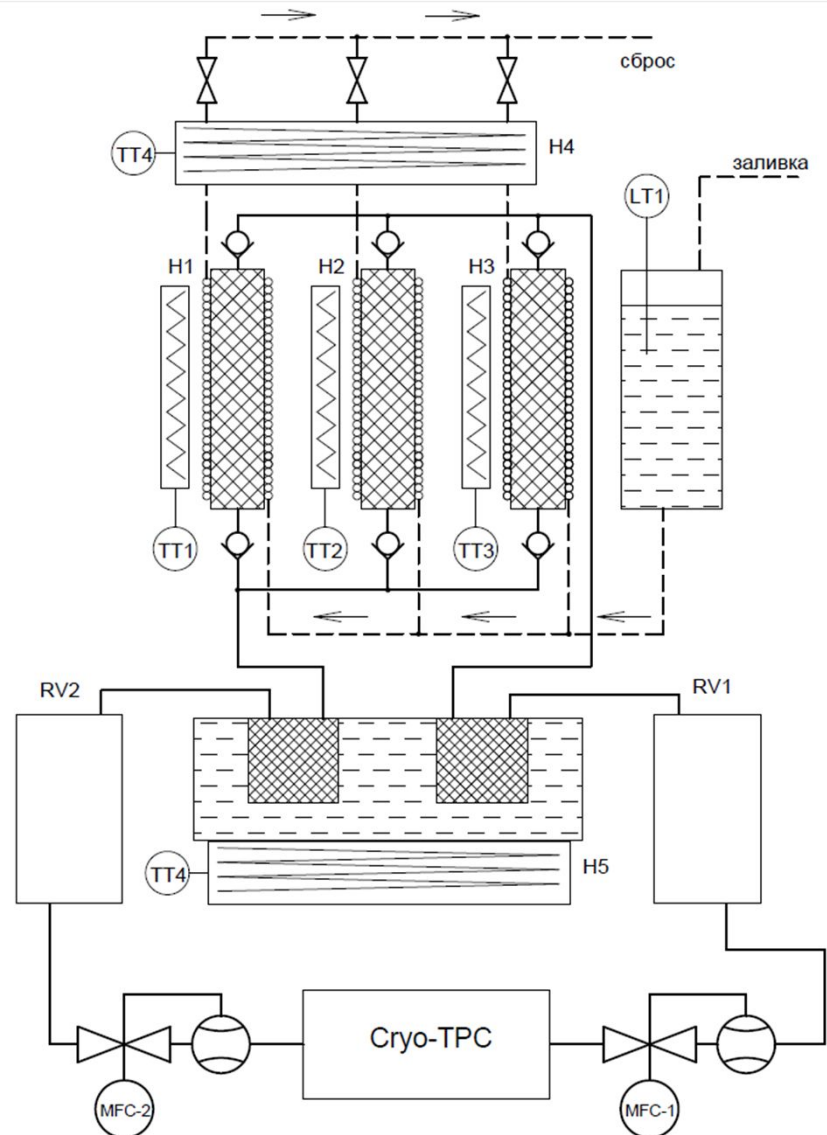
Диапазон рабочих температур
 $T = 25\text{K} - 350\text{K}$



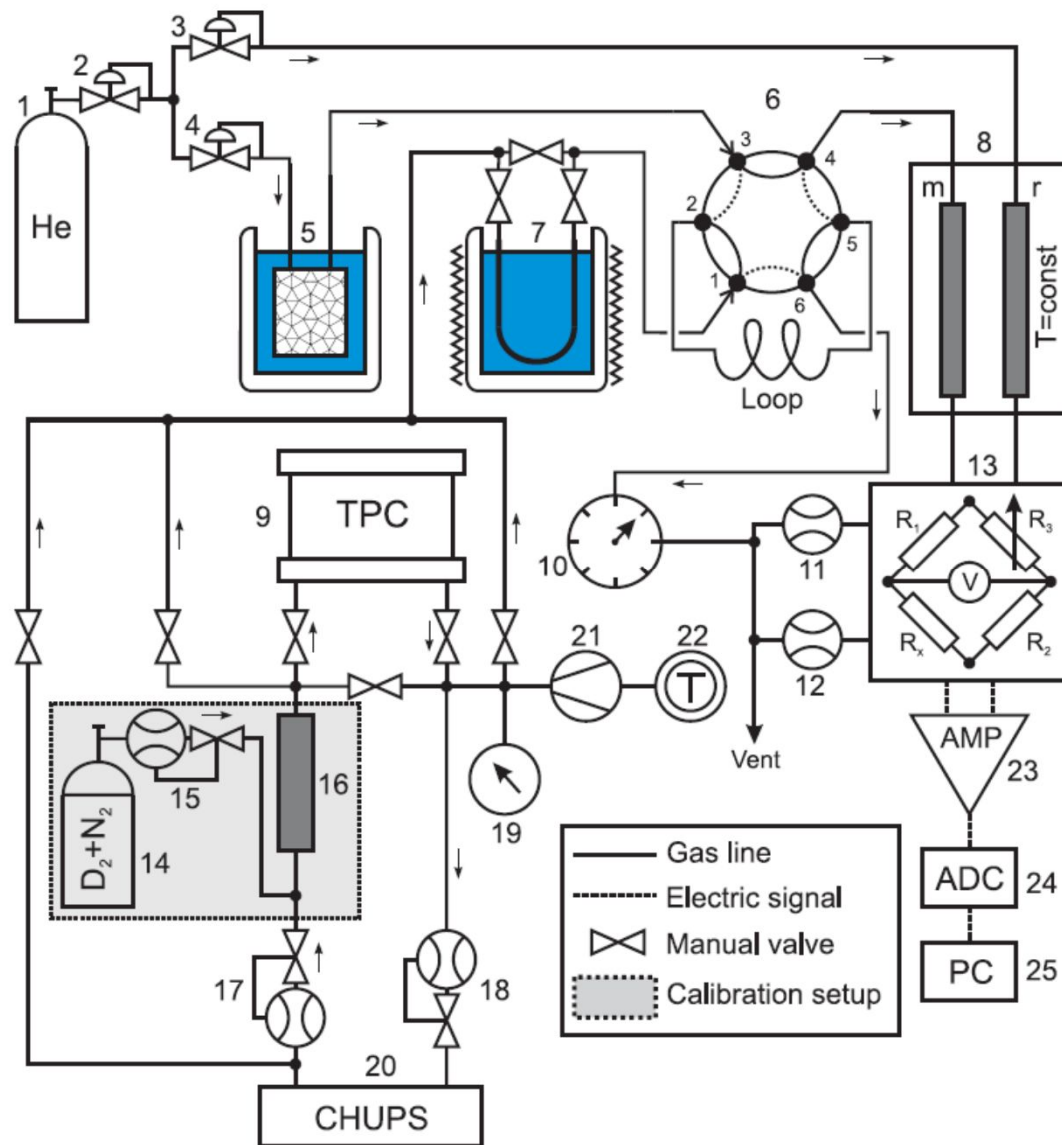


Изотопная и химическая очистка дейтерия в системе

Начало работы CHUPS в PSI - 2004 год

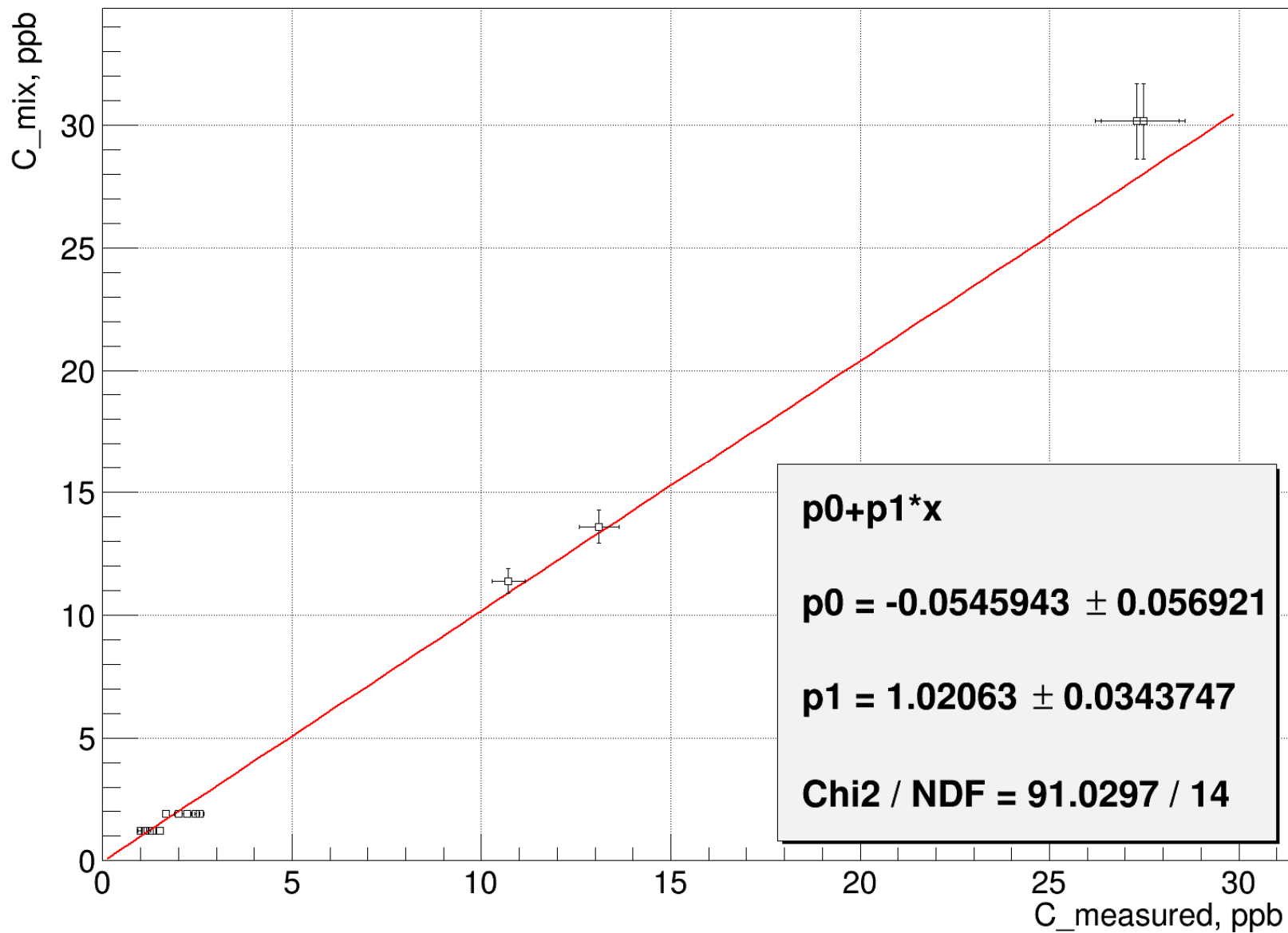


Начало работы в PSI - 2006 год



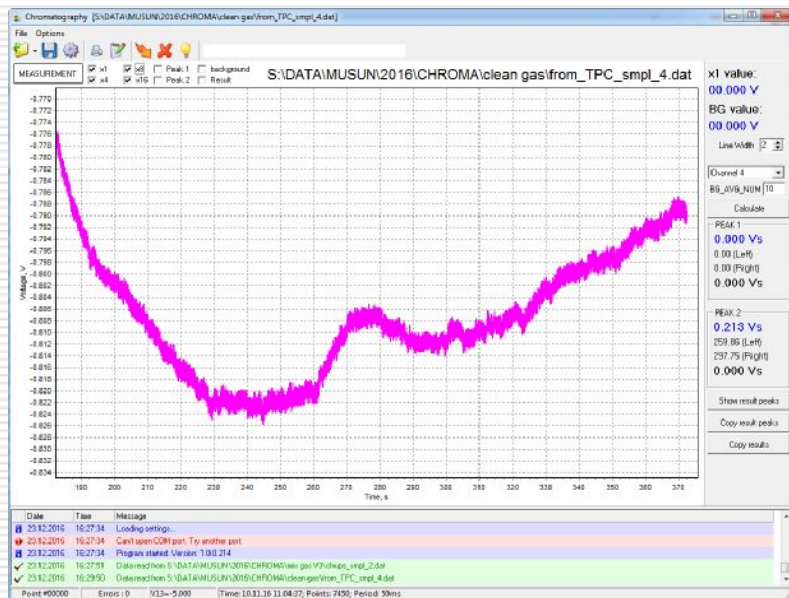


Создание смеси газа с ИЗВЕСТНОЙ концентрацией азота

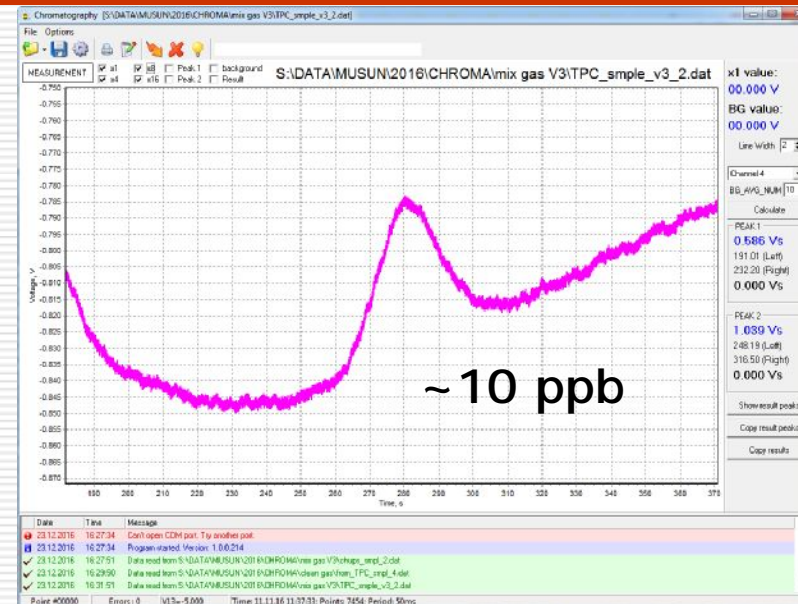




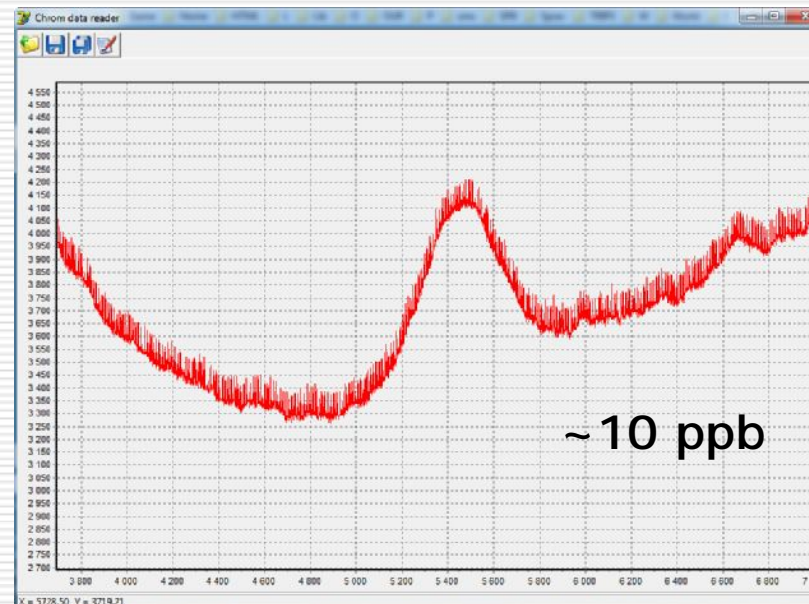
Хроматограммы (10 литров пробы)



~ 1 ppb



Пики азота на хроматограммах



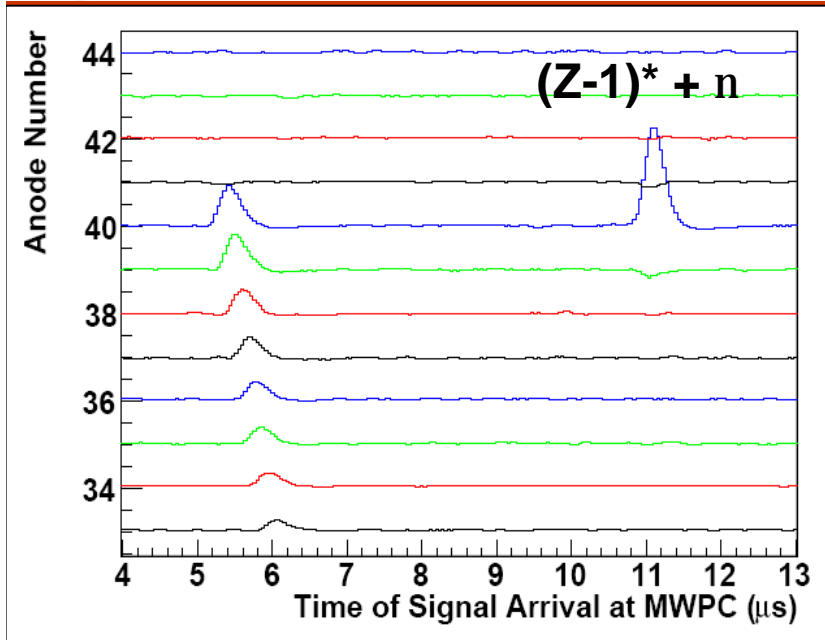


Результаты работы с «грязным» дейтерием

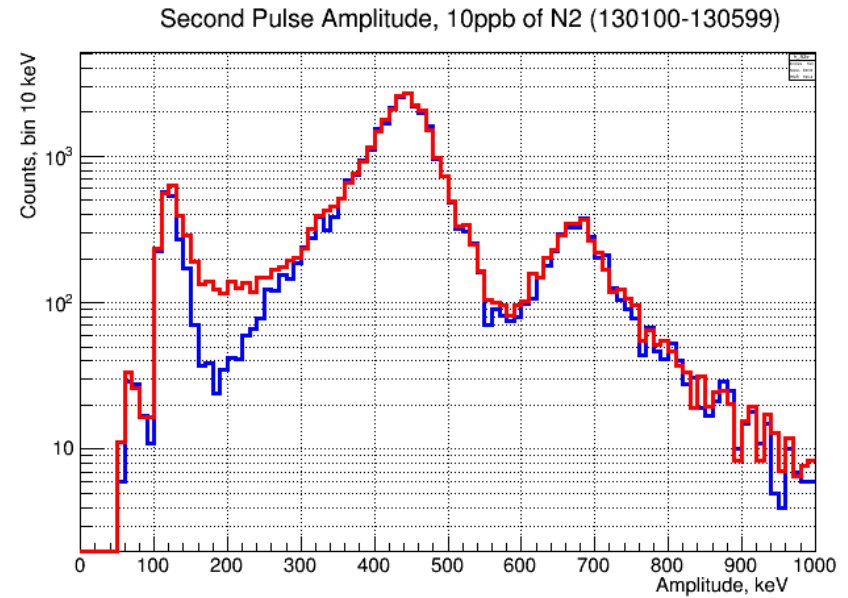
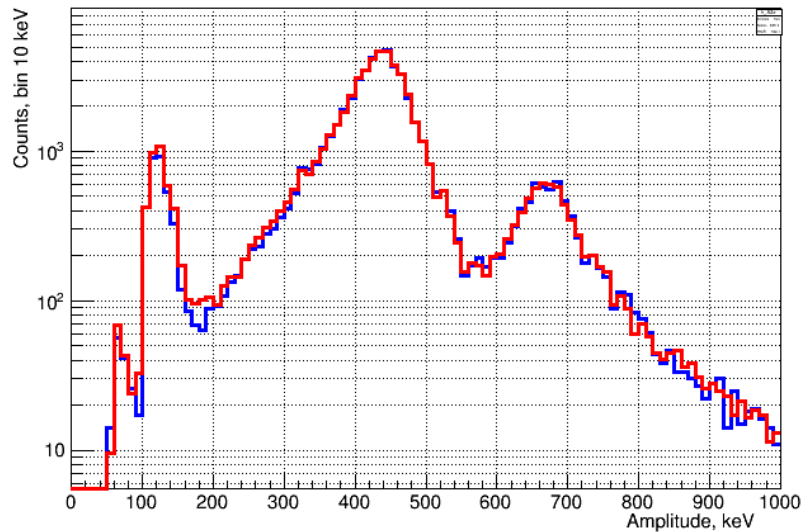
- подтверждена правильность измерения концентрации азота в дейтерии при концентрациях в ppb. Погрешность измерения $0.5 \div 1.2$ ppb
- подтверждено соответствие концентрации азота , измеренной после ТРС, концентрации азота в самой ТРС
- получено подтверждение низкой адсорбционной емкости ТРС к азоту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



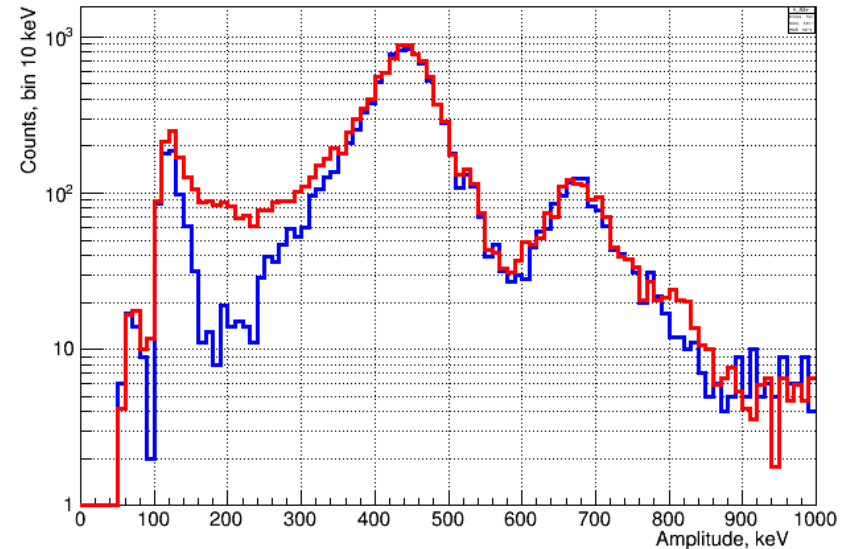
Регистрация примесей с использованием «вторых» сигналов



Second Pulse Amplitude, Pure Gas (129260-130099)

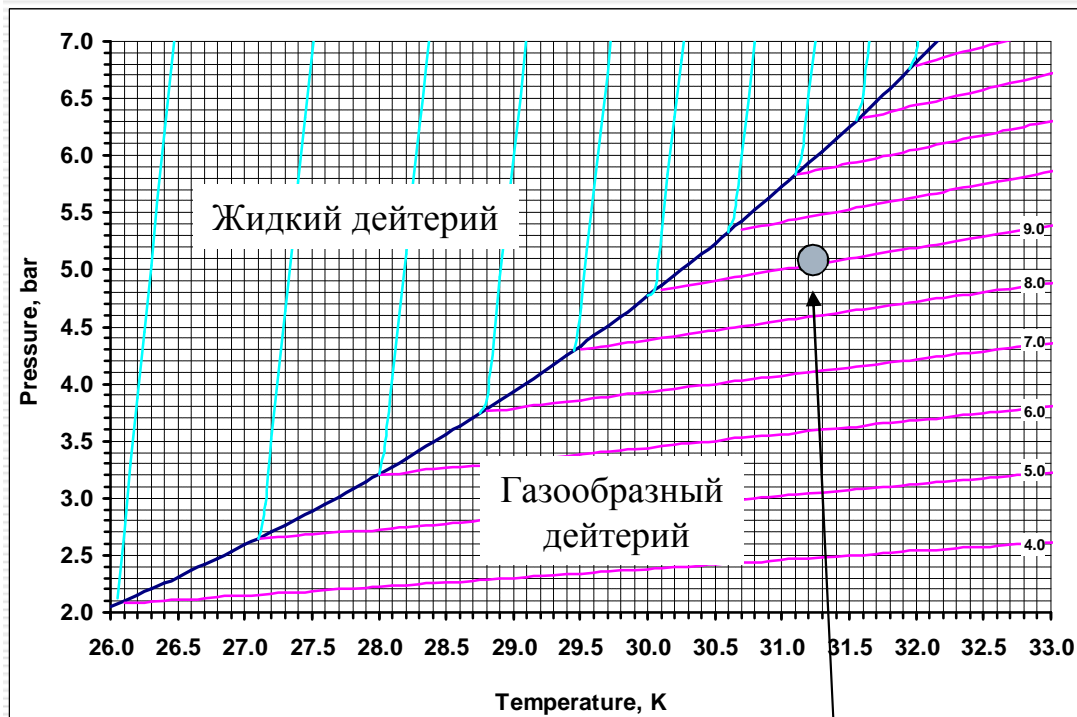


Second Pulse Amplitude, 30ppb of N2 (130650-130899)



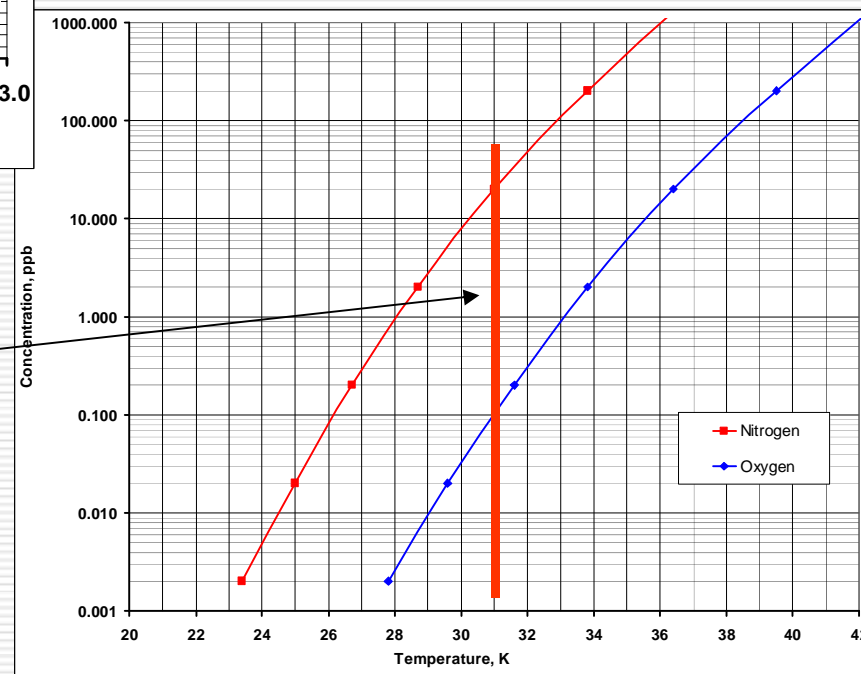


Концентрация примесей



P-T диаграмма дейтерия (NIST)

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

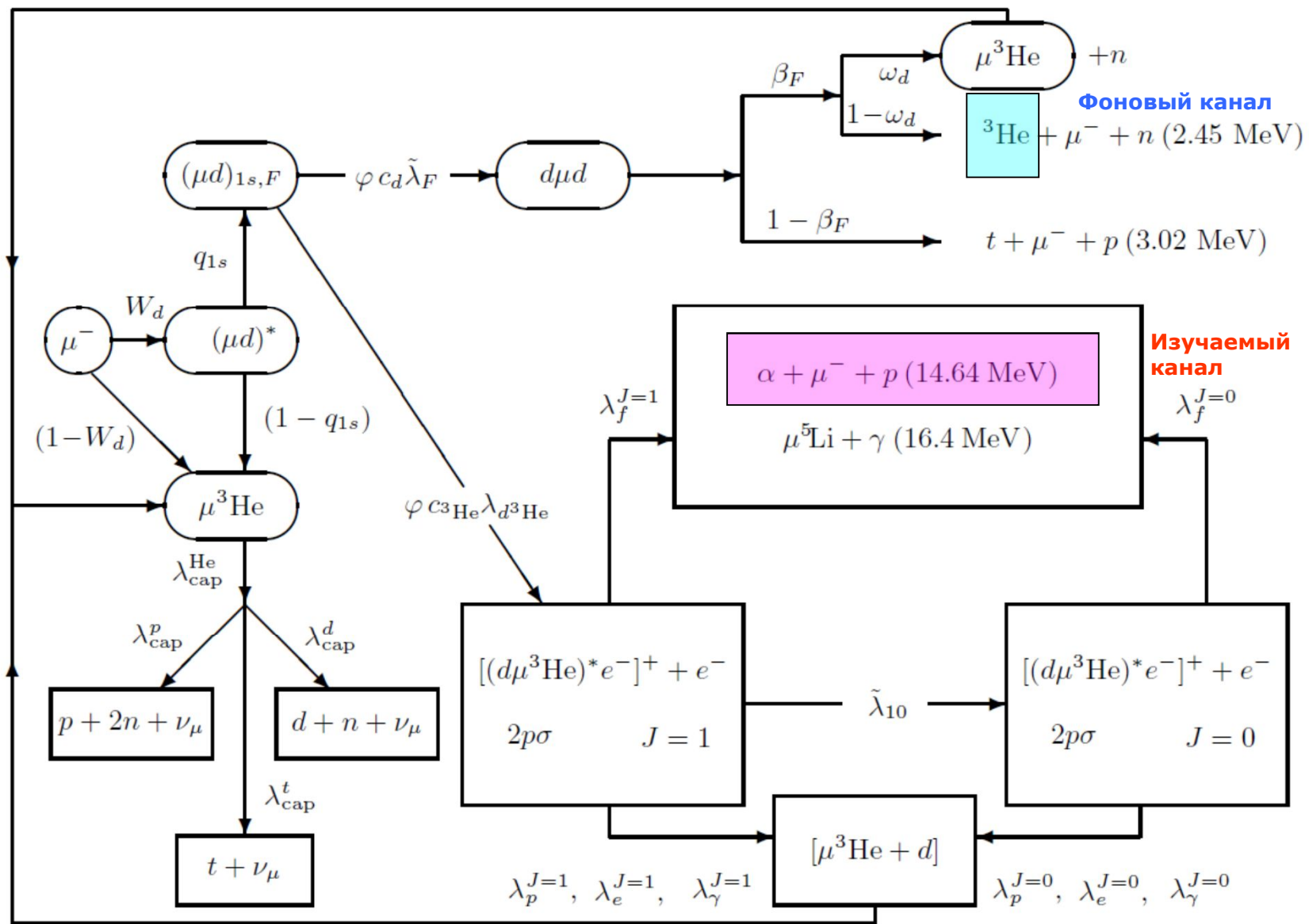


Концентрация насыщенных паров азота в рабочей точке соответствует 20 ppb

В динамике удалось получить 30 ppb!



Эксперимент с ${}^3\text{He}$





Измерение скорости реакции

D₂

The European Physical Journal D. January 2006

Nuclear fusion in muonic deuterium-helium complex

V.M. Bystritsky,^{1,*} M. Filipowicz,² V.V. Gerasimov,¹ P.E. Knowles,³
F. Mulhauser,⁴ N.P. Popov,^{5,†} V.A. Stolupin,¹ V.P. Volnykh,¹ and J. Woźniak⁵

¹Joint Institute for Nuclear Research, Dubna 141980, Russia

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

³Department of Physics, University of Fribourg, CH-1700 Fribourg, Switzerland

⁴University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois 61801, USA

⁵University 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:

31К, 5 bar, 5% ядерная концентрация ³He

HD

Hyperfine Interactions 118 (1999) 171–176

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

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

^aPetersburg Nuclear Physics Institute (PNPI), Gatchina 188350, Russia

^bUniversity of California and LBNL, Berkeley, CA 94720, USA

^cInstitut de Physique de l'Université, Pérolles, CH-1700 Fribourg, Switzerland

^dTechnical University of Munich (TUM), D-85747 Garching, Germany

^eAustrian Academy of Sciences, A-1090 Vienna, Austria

^fPaul 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.

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



Планирование в 2015 году

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

- **Новые эксперименты (?)**

Планы 2017 года не определены ...





Результаты хроматографических измерений

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

Концентрация азота на выходе системы охлаждения (CHUPS) 0.92 ± 0.08 ppb

Концентрация азота на выходе детектора (TPC) 1.31 ± 0.09 ppb

За весь сеанс (3 месяца) через систему очистки пропущено 595 m^3 дейтерия.

В системе очистки ДОЛЖНО остаться

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

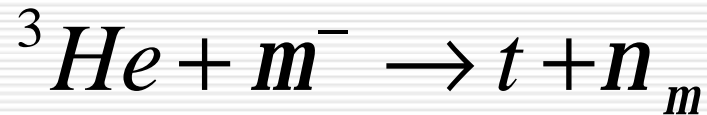
После окончания сеанса ВЕСЬ собранный азот был выделен в 50 l дейтерия.

Измеренная концентрация – 6 ppm , что соответствует

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

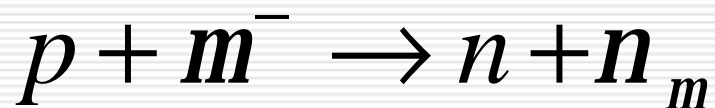


Захват мюона малонуклонными системами



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

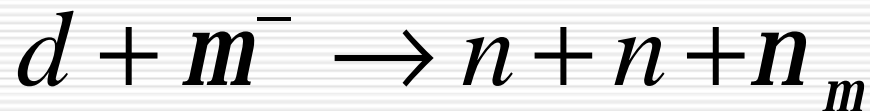
P. Ackerbauer et al., Phys. Lett. B 417, 224 (1998).



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

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.