



Эксперимент μ Sun 2008-2013 гг.

Планы 2008 года:

Декабрь 2008 г. – создание в ПИЯФ криогенной время-проекционной ионизационной камеры (Cryo_TPC) и испытание при азотных температурах.

Май 2009 г. – создание и испытание в ПИЯФ системы охлаждения и полная сборка криогенной системы.

Июнь-сентябрь 2009 г. – испытания в ПИЯФ, подготовка к пучку.

Ноябрь-декабрь 2009 г. – первый тестовый пучок в PSI.

2010 г. – 2013 г. – набор статистики.

Действительность:

Май 2010 г. – первый тестовый пучок в PSI.

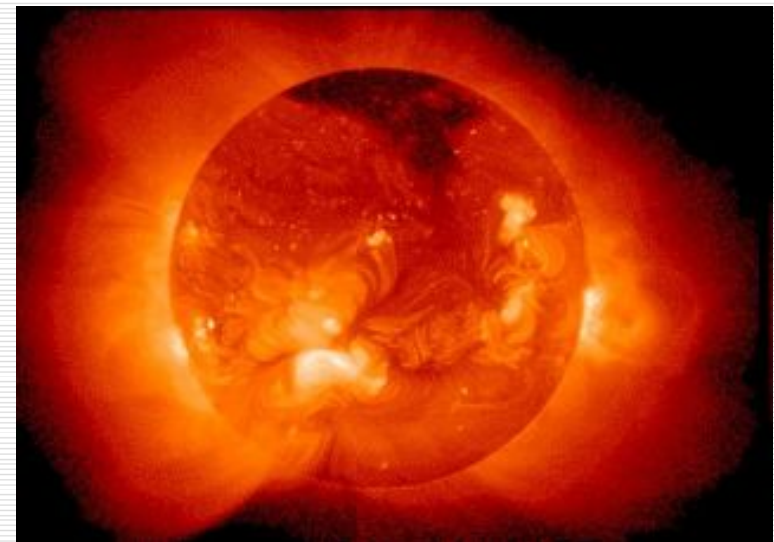
Октябрь-декабрь 2010 г. – набор 10% статистики.

Май-август 2011 г. – пучок в PSI, набор 50% статистики.

Планы:

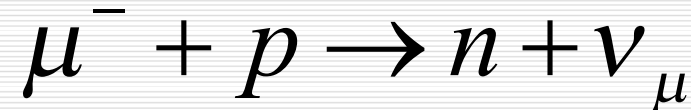
2012 год – переезд на новый пучок, модернизация системы.

2013 год – окончательный набор статистики.





Эксперимент μ Сар закончен в 2007



Набранная статистика $2 \cdot 10^{10}$ событий
остановок мюона

На сегодняшний день обработано
10% событий

Псевдоскалярный форм-фактор нуклона

$$g_p = 7.3 \pm 1.1$$

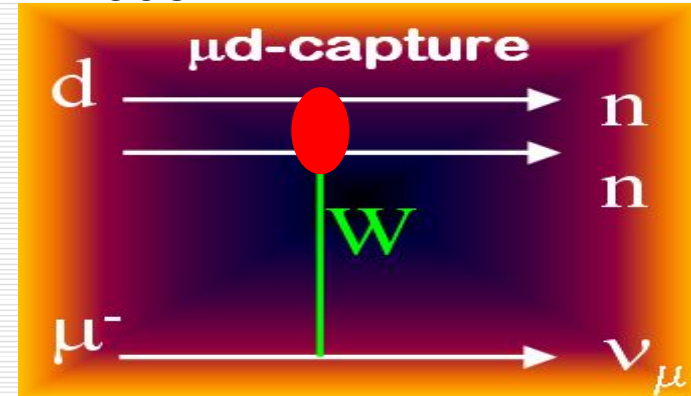
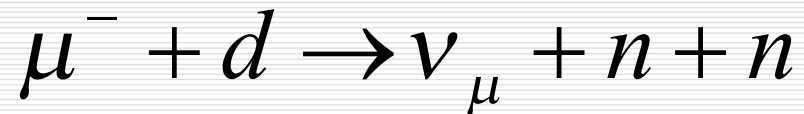
V. A. Andreev et al., Phys. Rev. Lett., 99, 032002 (2007)

Окончательная обработка всех данных
ожидается в начале 2012 года ! (?)



Изучаемая реакция

Эксперимент μ Sun начался в 2008

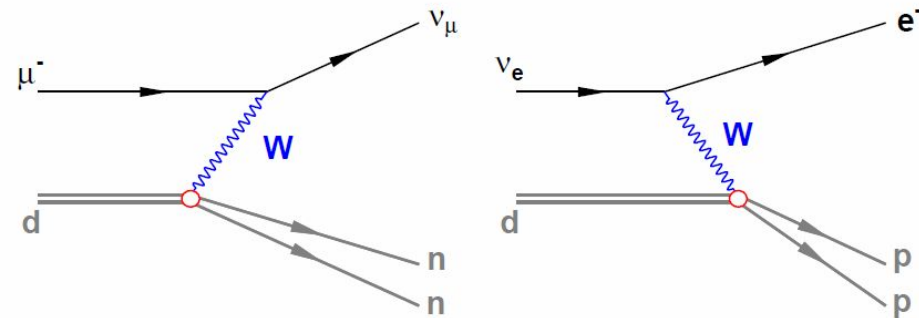


Измерение скорости захвата мюона с точностью 1% необходимо для уточнения современной теории слабого взаимодействия, Effective Field Theory, EFT

Структурная связь с реакцией

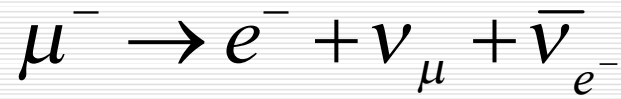


первичного нуклеосинтеза на Солнце

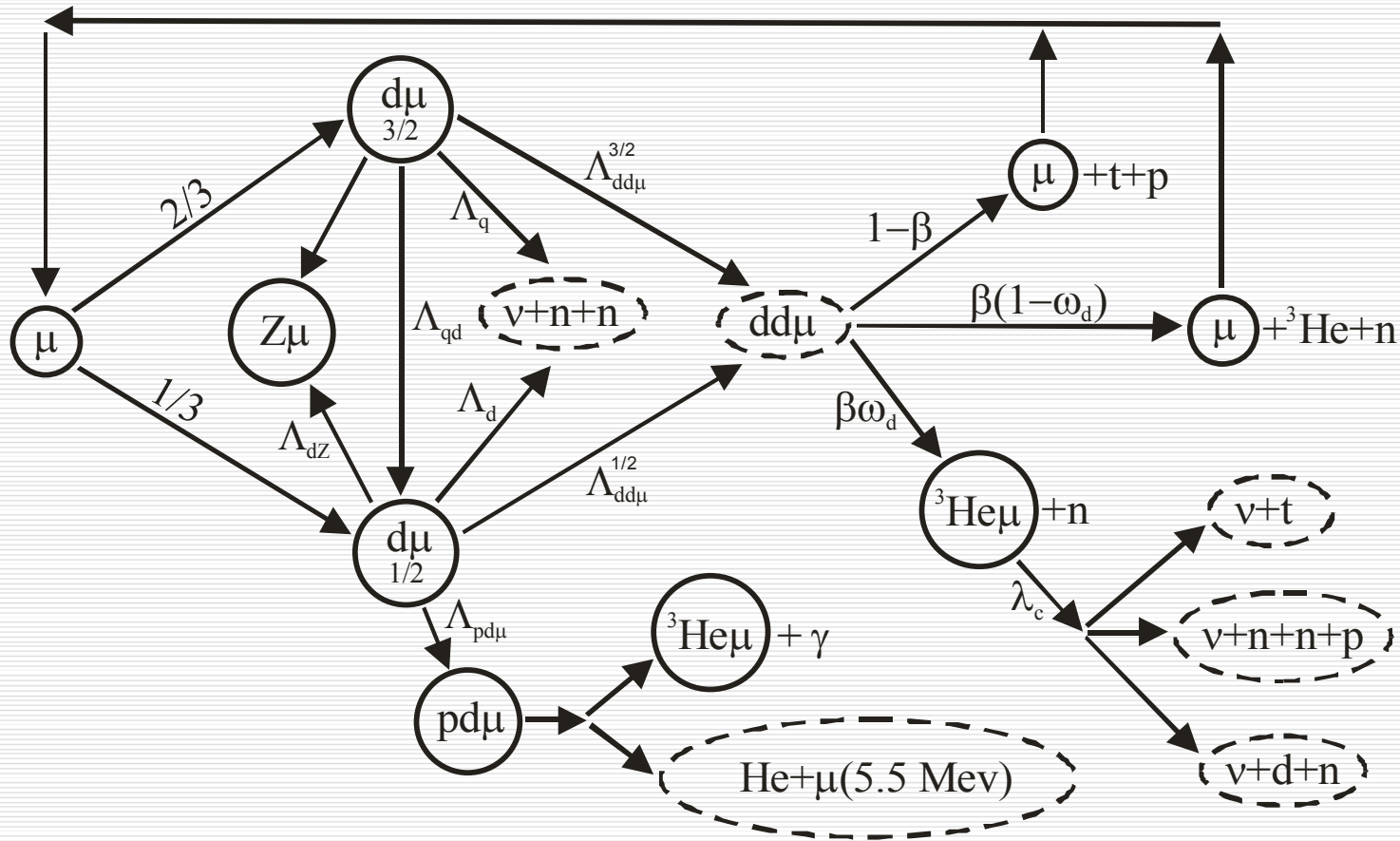




Кинетическая схема взаимодействия μ^- с дейтерием

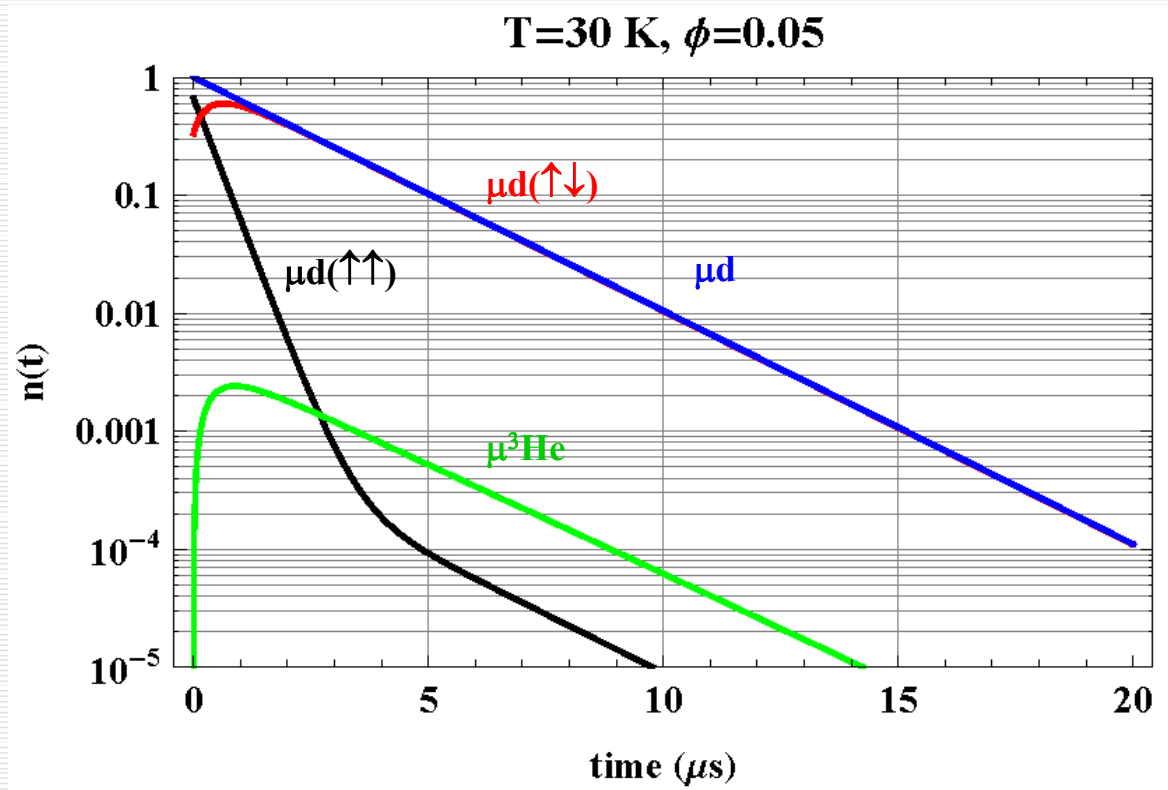
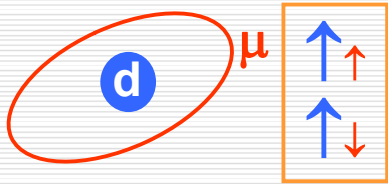


Время жизни 2.2 μs



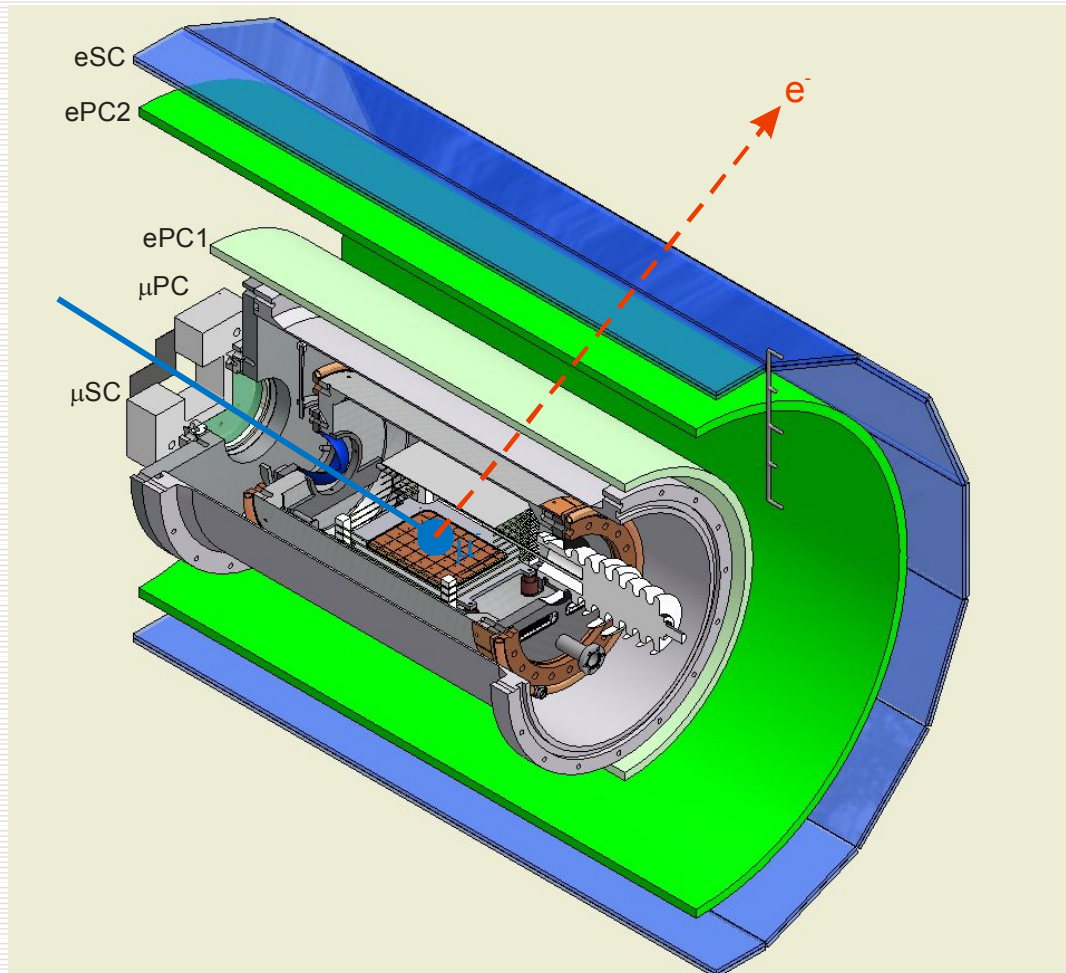
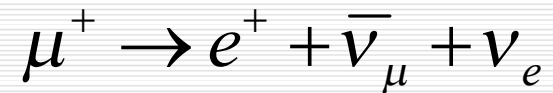
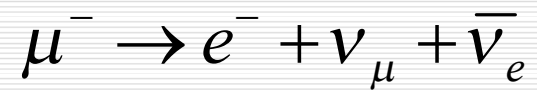


Процессы захвата мюона





Измерительная схема

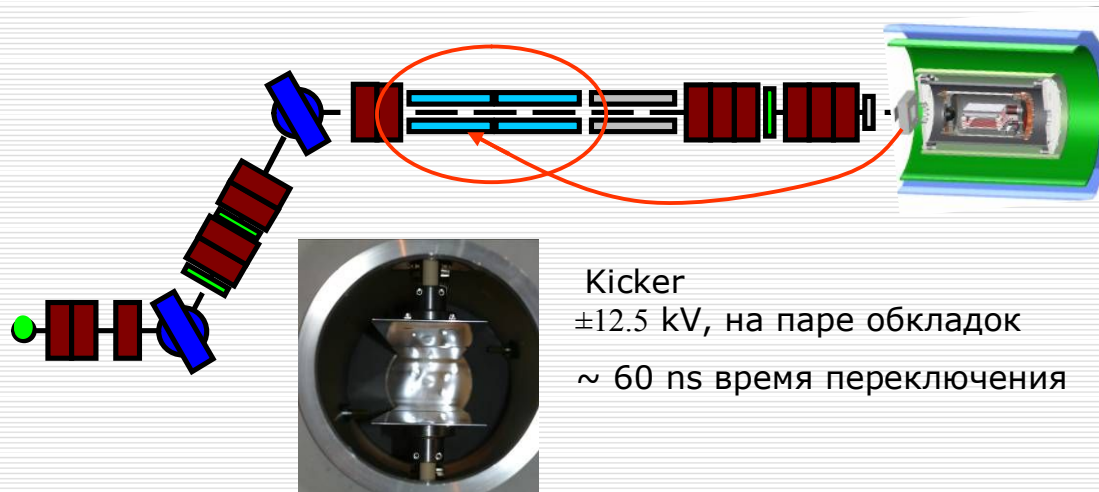
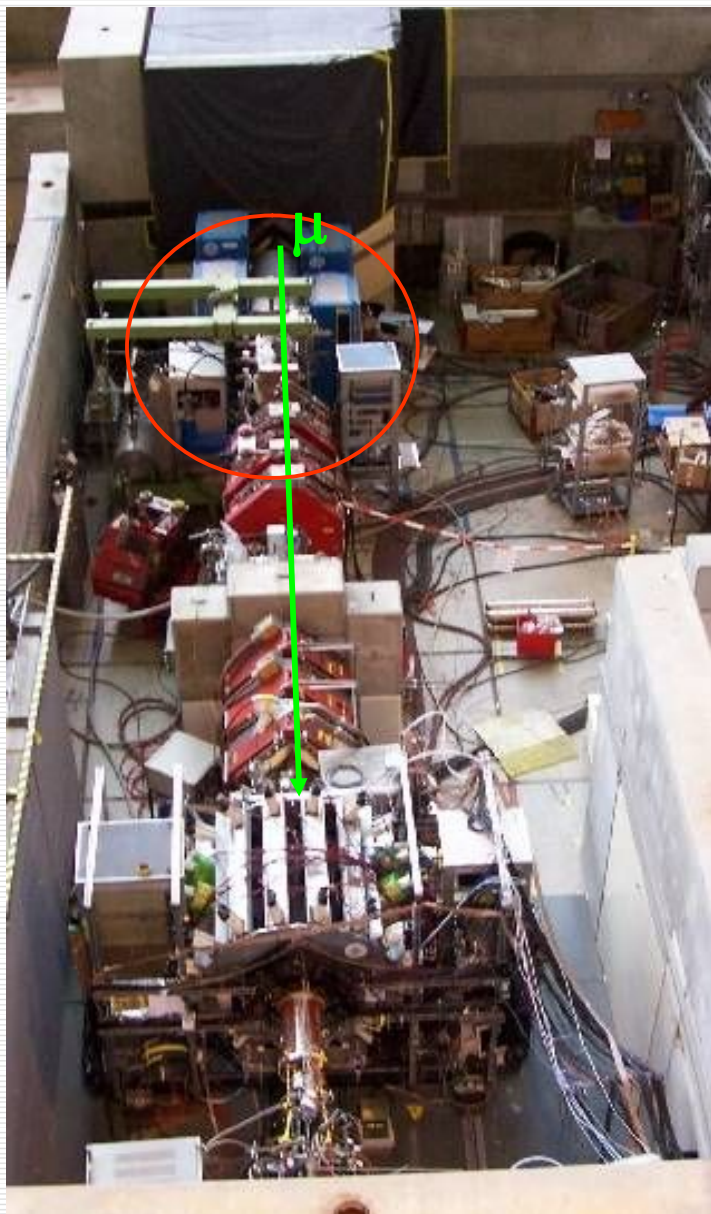


μ SC – время входа мюона (t_μ)
CryoTPC – остановка мюона
ePC1, ePC2 – траектория электрона
eSC – время вылета электрона (t_s)

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



«Мюон по запросу» «Muon-on-Request»



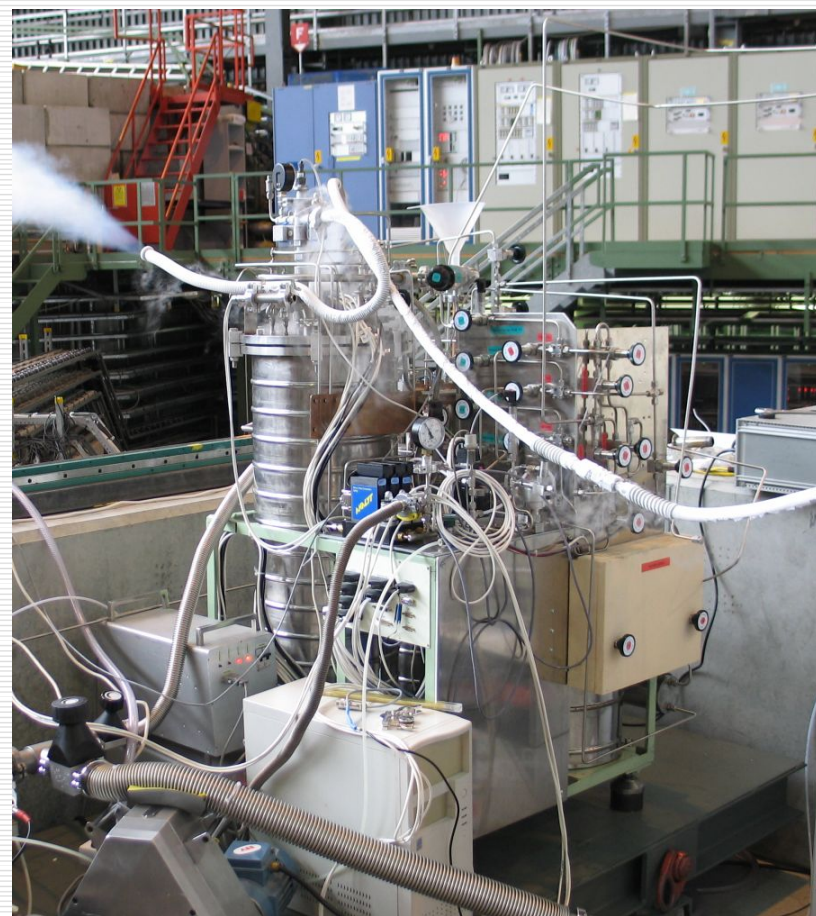
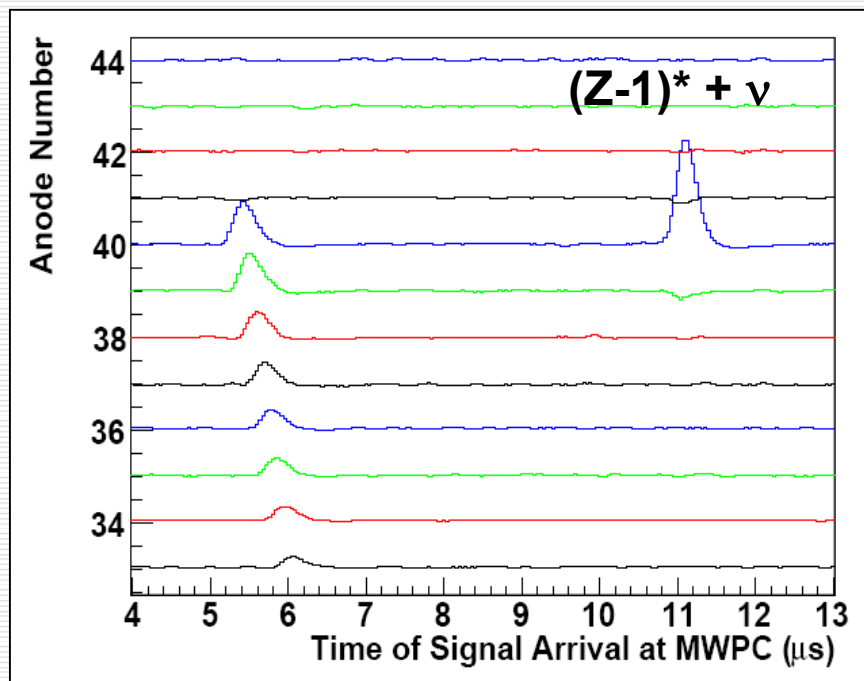
Kicker
 ± 12.5 kV, на паре обкладок
 ~ 60 ns время переключения

Требуется попадание в камеру только одного мюона за период измерения - $25\mu\text{s}$

Pile-up мюоны существенно подавлены
(средняя частота следования мюонов в пучке ~ 100 kHz)



«Тяжелые» примеси



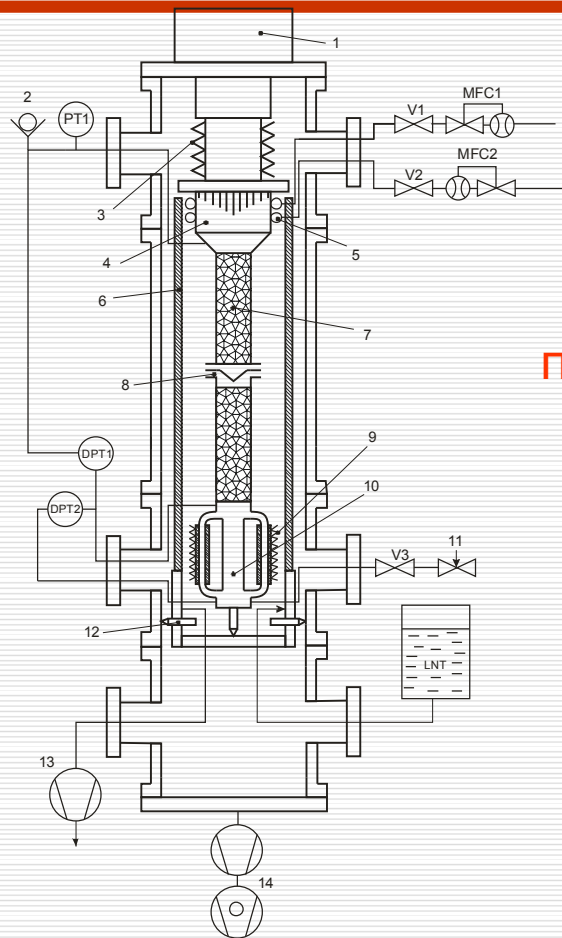
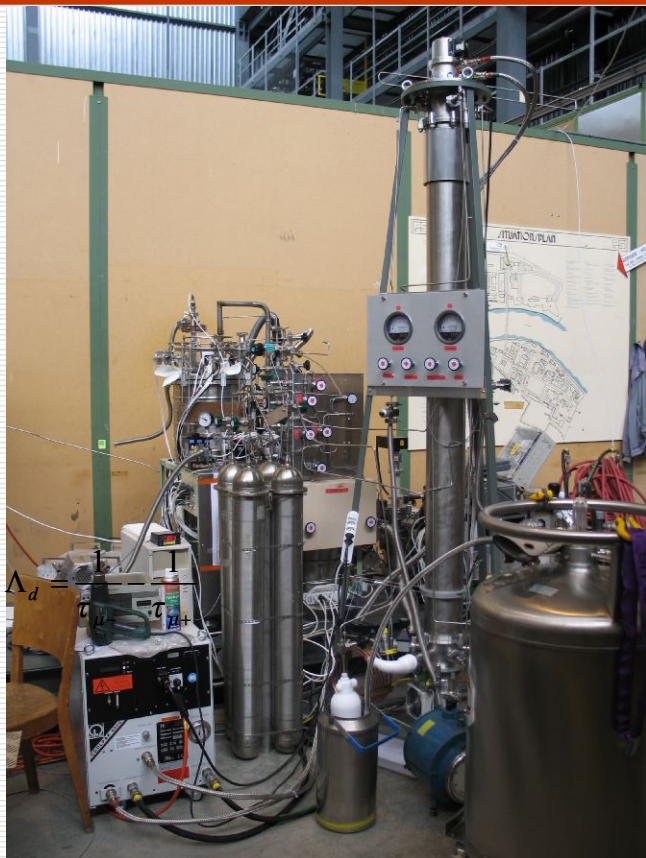
Nucl. Instrum. Meth., A578:485–497, 2007.

Требования к чистоте:
Все «тяжелые» примеси менее 1 ppb

Система создана в 2003 году. Ресурс ПОЛНОСТЬЮ выработан!



«Легкие» примеси.



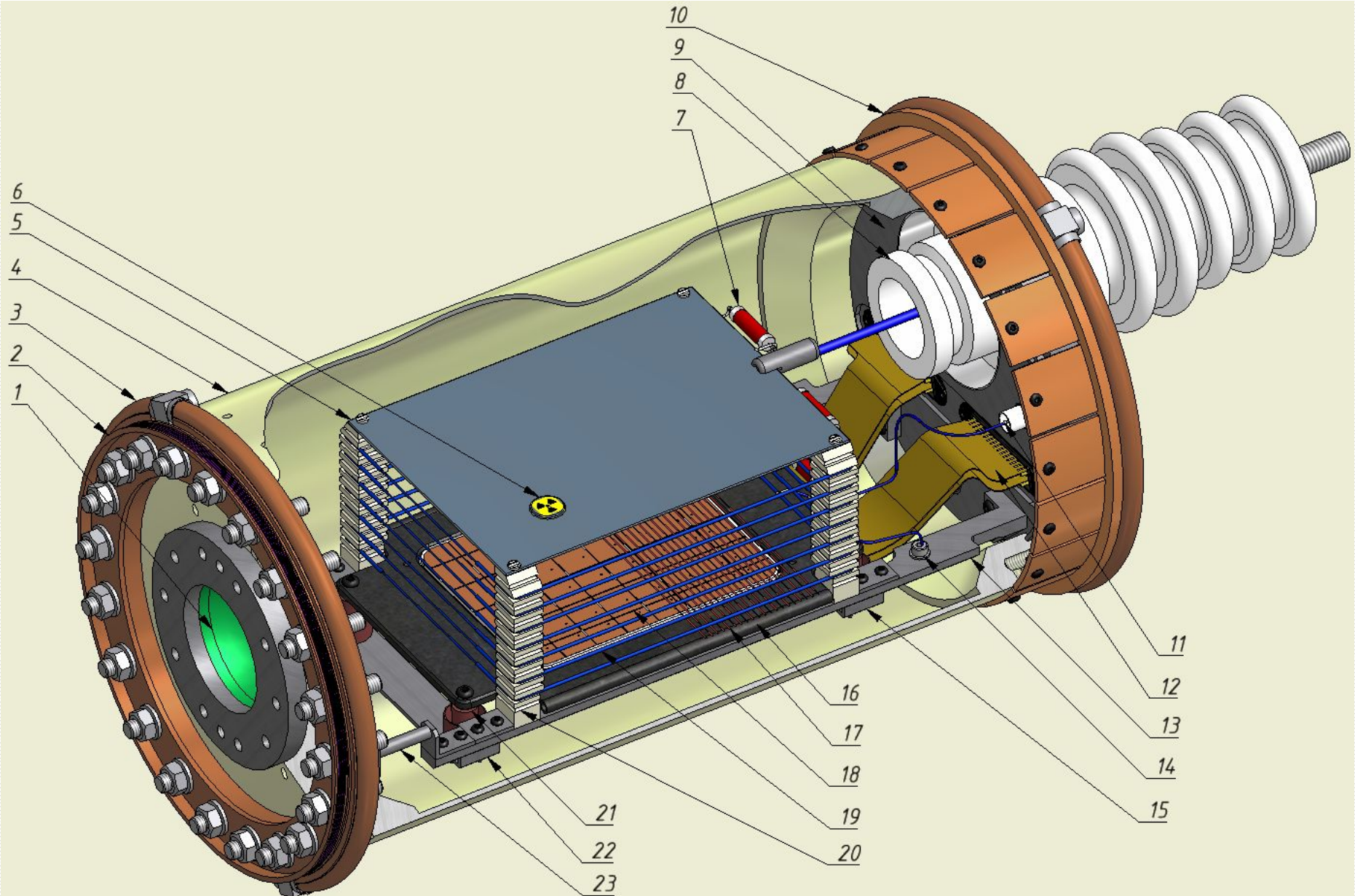
Требования к изотопной чистоте:
примесь протия – не более 100 ppb

В эксперименте MuCap
получен САМЫЙ изотопно
Чистый в мире водород!
< 6 ppb

Дейтерий, произведенный в 2008 году (уровень HD – десятки ppb) и сохраненный в гидридах, в 2011 содержал 0.15% протия!

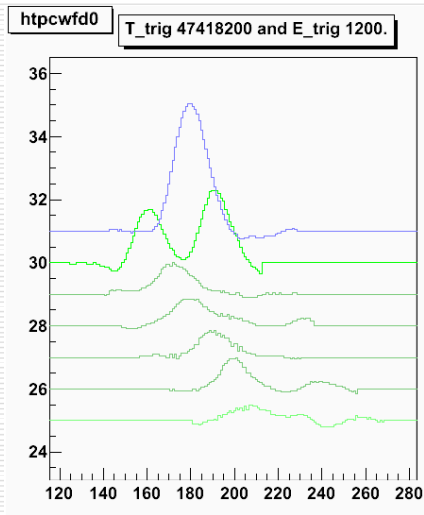
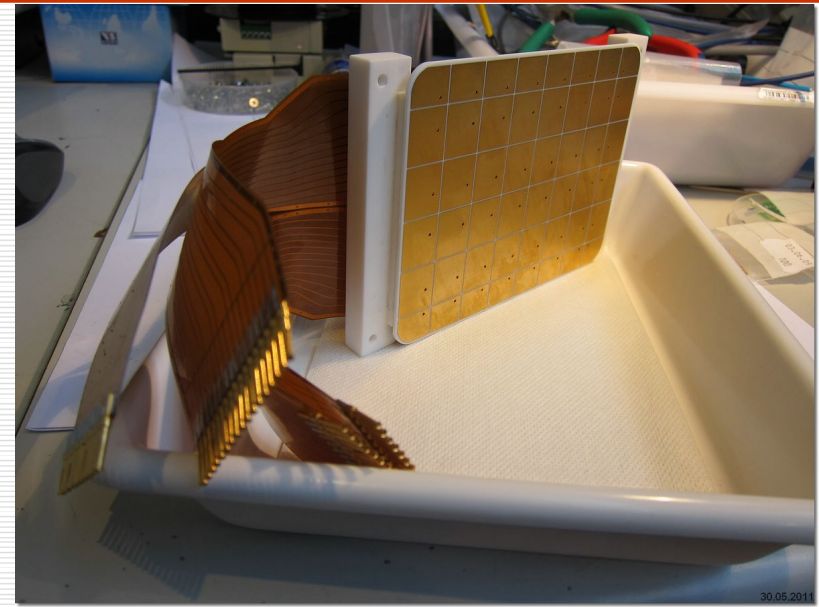
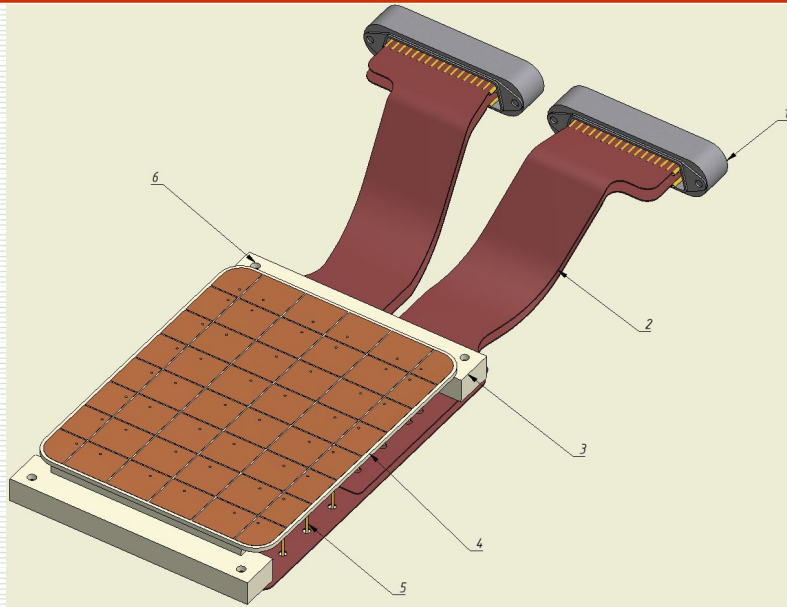
Дейтерий, произведенный в 2011 году перед началом эксперимента, к концу эксперимента (4 месяца) содержал ≈ 100 ppb протия!







Pad plane (Анод)



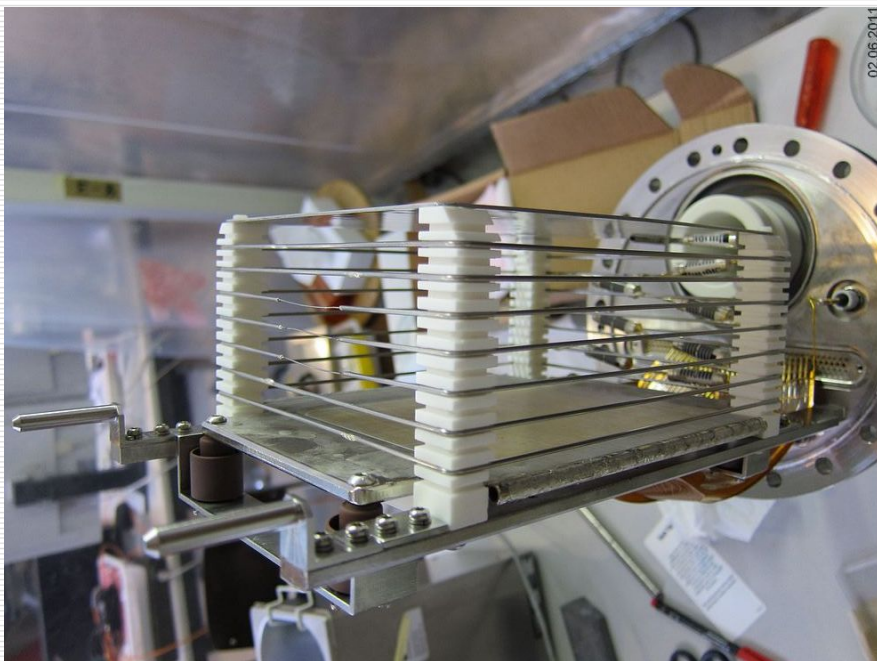
41	42	43	44	45	46	47	48
33	34	35	36	37	38	39	40
25	26	27	28	29	30	31	32
17	18	19	20	21	22	23	24
9	10	11	12	13	14	15	16
1	2	3	4	5	6	7	8
29	30	31	32	33	34	35	36
A: 10	A: 20	A: 17	A: 17	A: 20	E: 316	A: 81	32
E: 316	E: 382	E: 382	E: 382	E: 382	E: 316	E: 1557	
17	18	19	20	21	22	23	24
9	10	11	12	13	14	15	16
1	2	3	4	5	6	7	8

6x8 pads 17.5x15.25 mm²

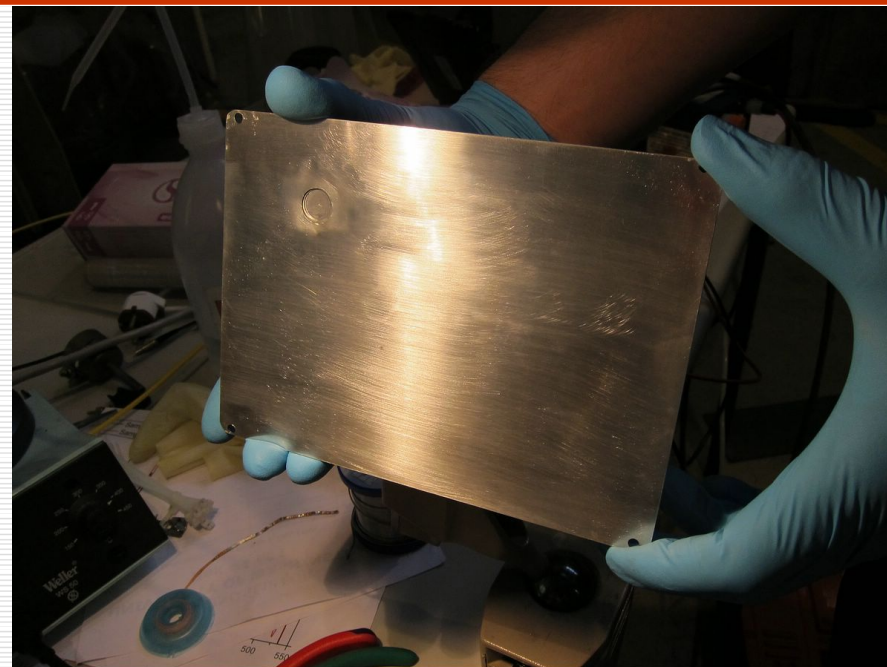




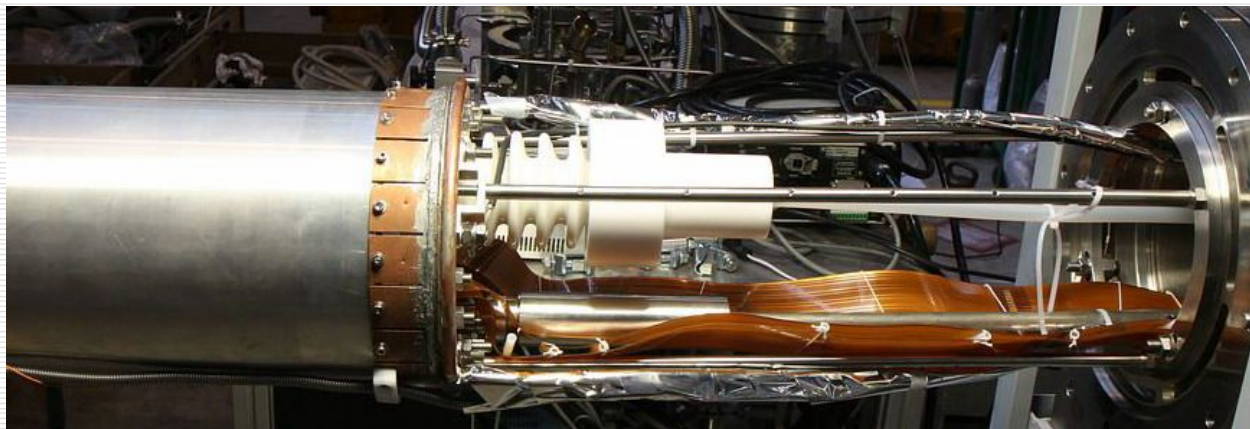
Катодная плоскость и дрейфовый промежуток



Потенциал катода -80...-90 kV
Напряженность поля $80 \text{ kV} / 7.3 \text{ cm} = 11 \text{ kV/cm}$
Однородность (по абсолютной величине) напряженности поля 4-5%



Катод с 100 μm серебряной фольгой



Проблемы высоковольтной системы:

- Большие диэлектрические поверхности
- При утечках и пробоях вспышки рентгеновского излучения



Экранирующая сетка

Задача сетки – экранировка положительного объёмного заряда в области прохождения или остановки мюона.

- Сетка должна быть прозрачна для электронов.
- Сетка должна экранировать электрическое поле положительного объёмного заряда.
- Материалы рамки должны быть слабо-магнитными при криогенных температурах.

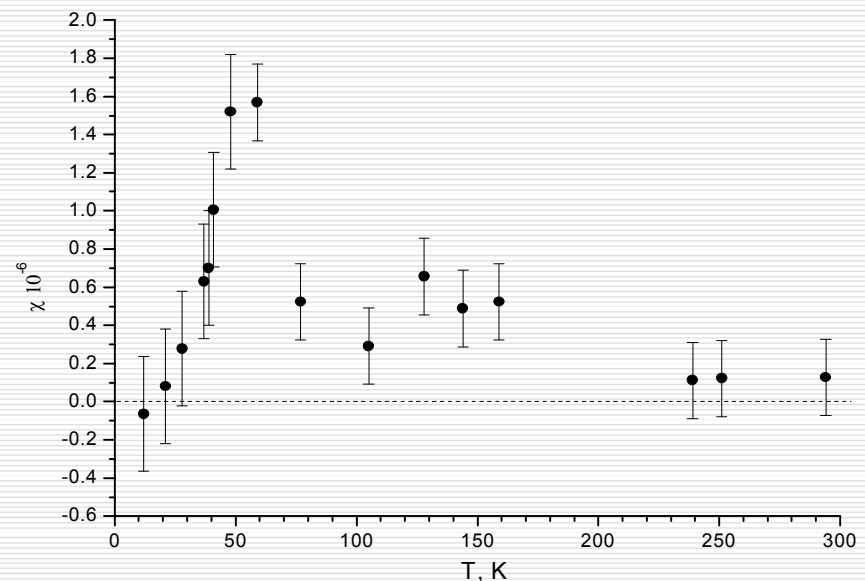
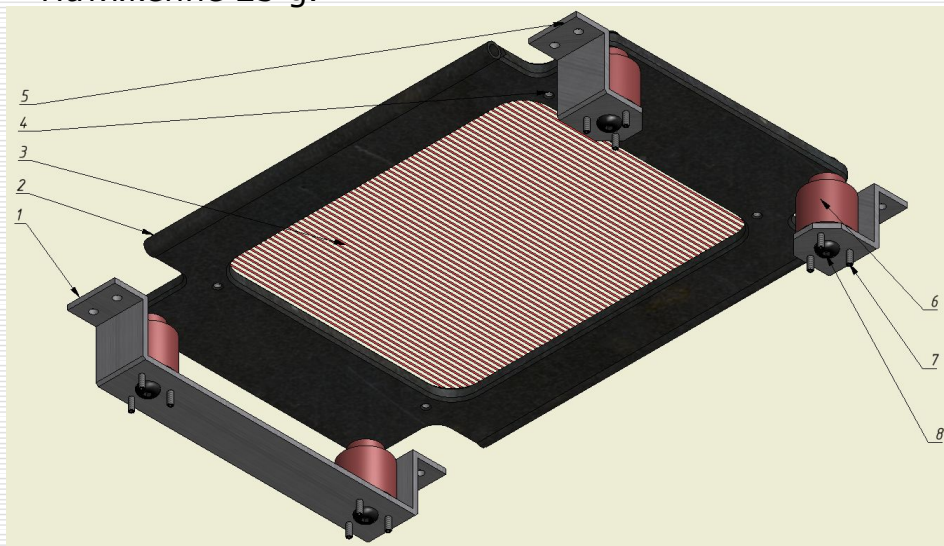
Зазор сетка-анод – 0.15 см

Потенциал сетки - 3.5 kV

Напряженность поля – $3.5 \text{ kV}/0.15 \text{ см} = 23.3 \text{ kV}/\text{см}$ (11 kV/см катод сетка)

Проволочки диаметром 30 $\mu\text{м}$, шаг 250 $\mu\text{м}$, Нихром.

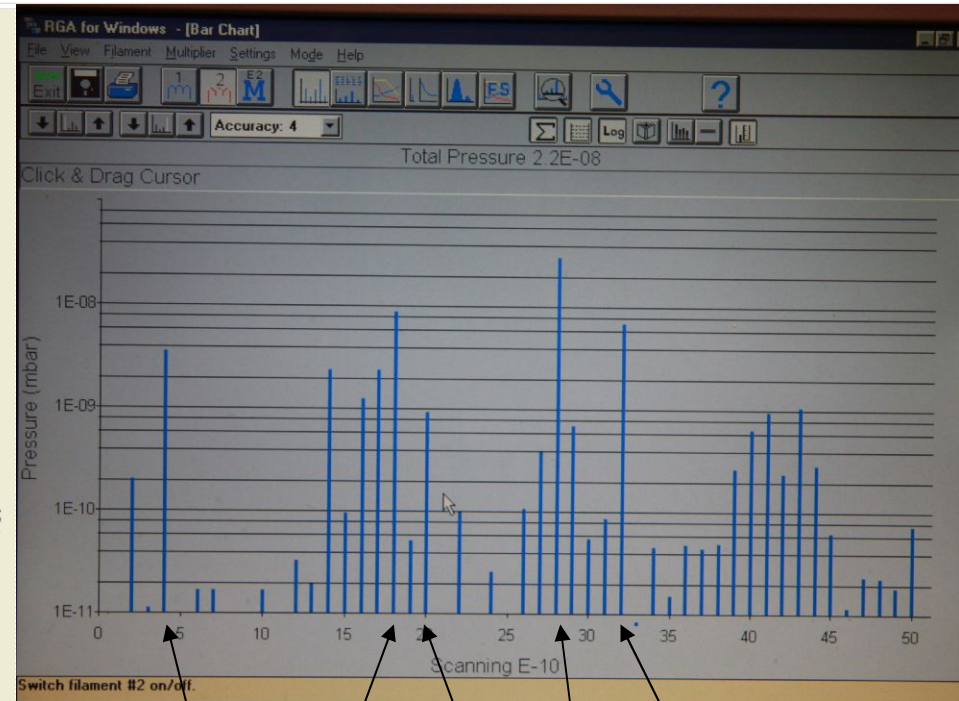
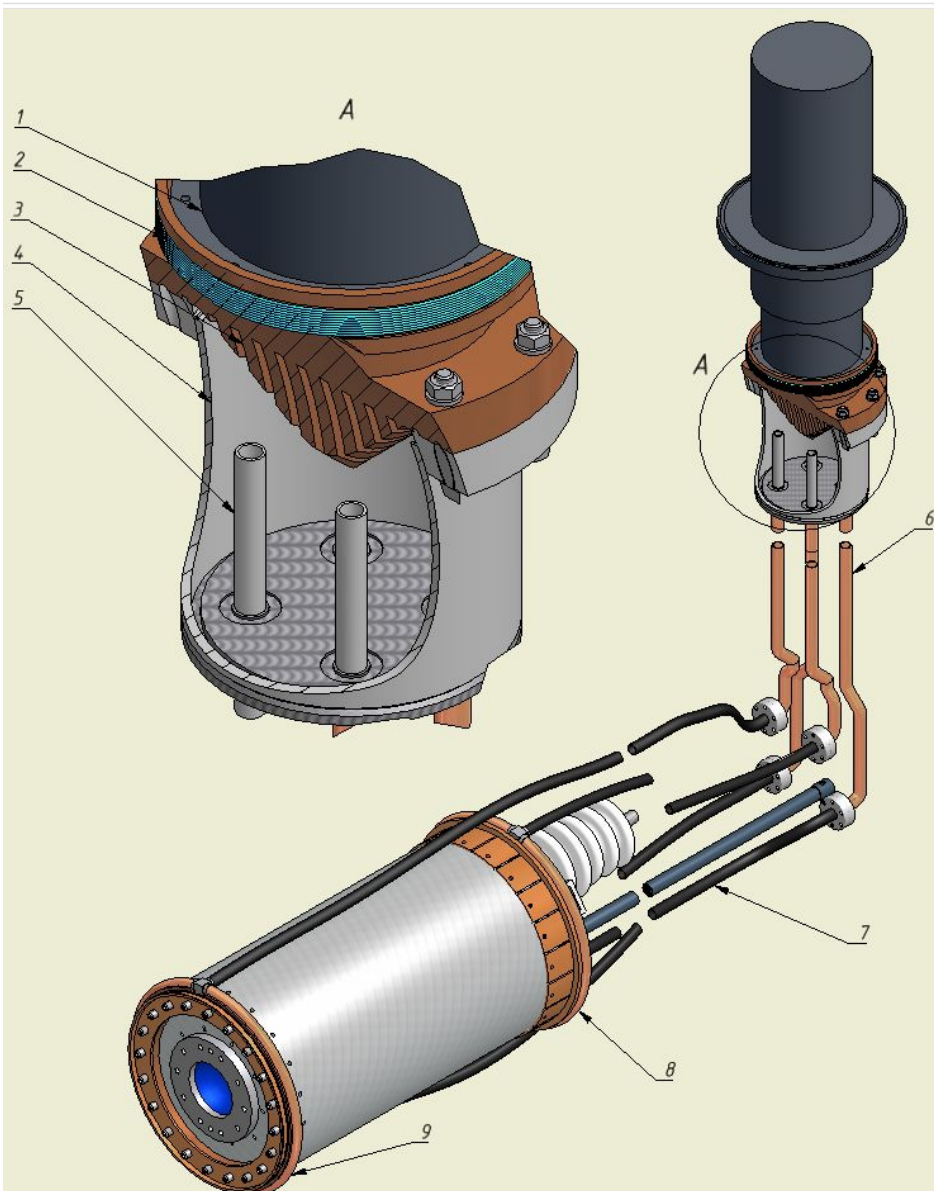
Натяжение 25 г.



температурная зависимость магнитной восприимчивости образца стали марки DIN 1.4429. 50 К переход из парамагнитного состояния в состояние спинового стекла. Динамическая магнитная восприимчивость, Коптев В.П. и К^о



Система охлаждения

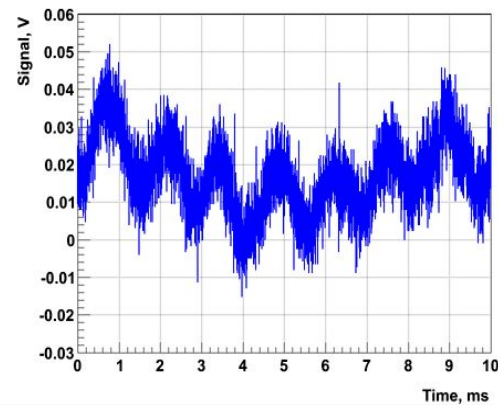
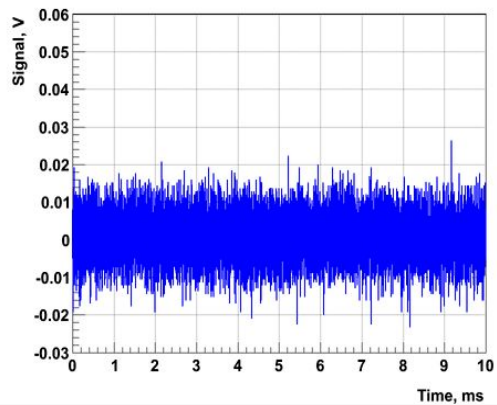
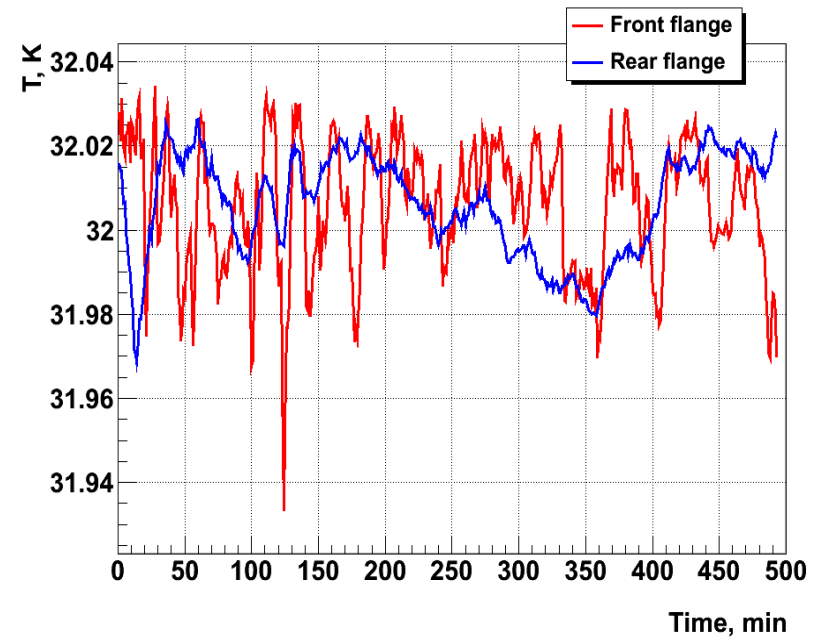
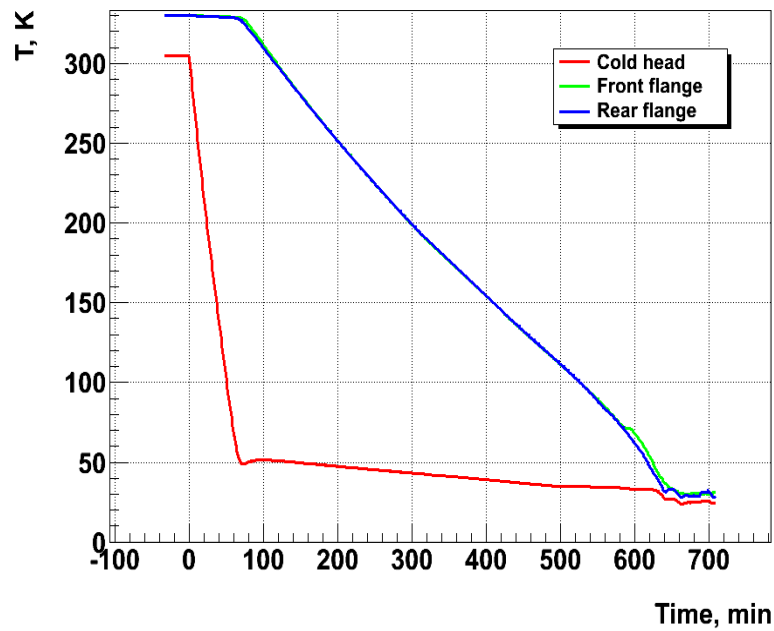


D_2 H_2O Ne N_2 O_2

Спектр с квадрупольного масс-спектрометра



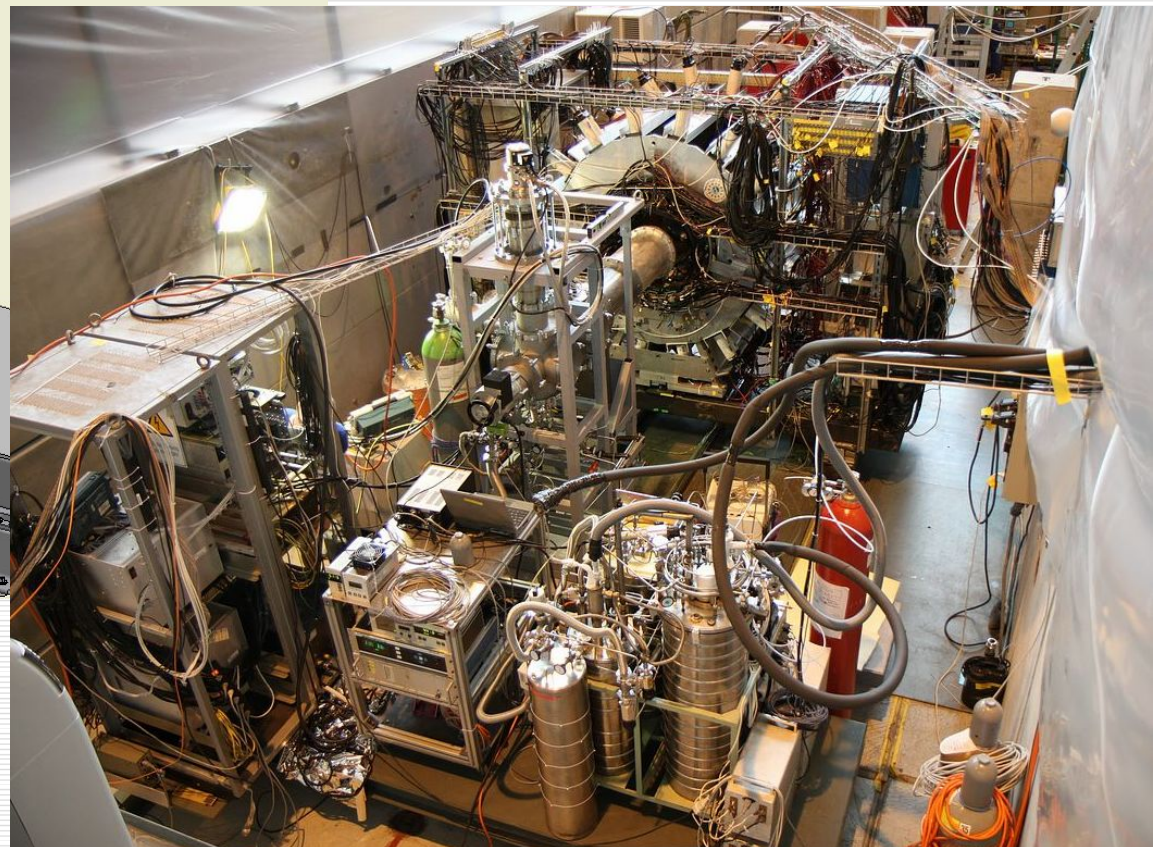
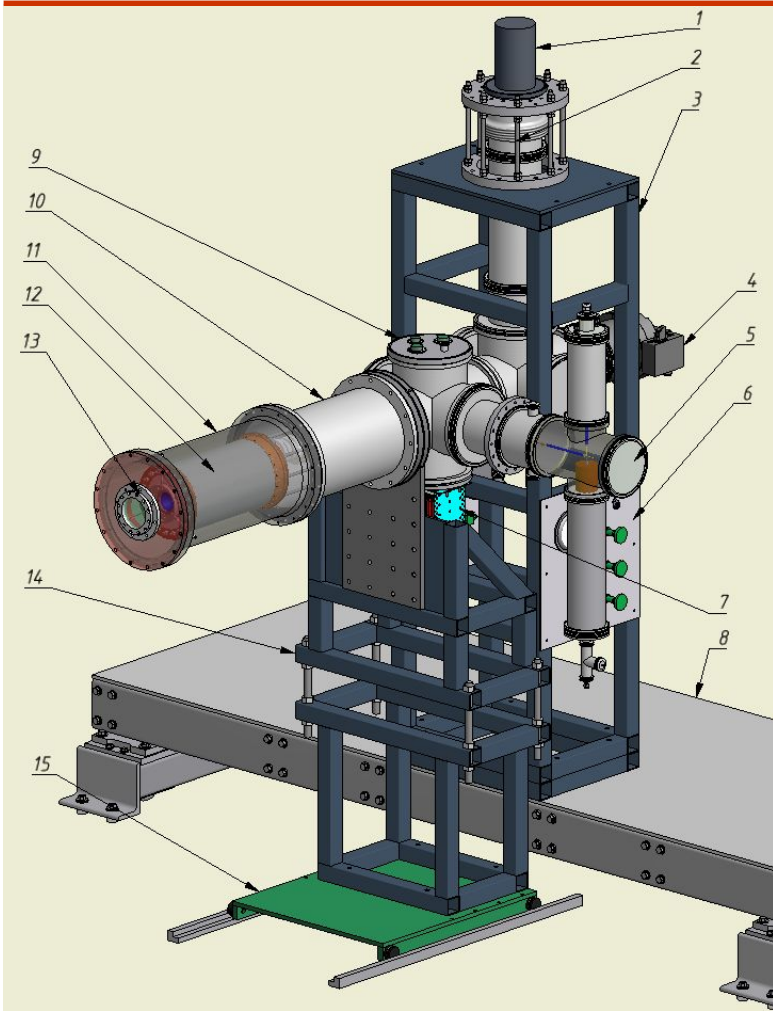
Работа системы охлаждения



Сигнал от акустического шума, снятый со включенной системой электронного подавления шумов (слева) и без нее (справа). Надточий А.



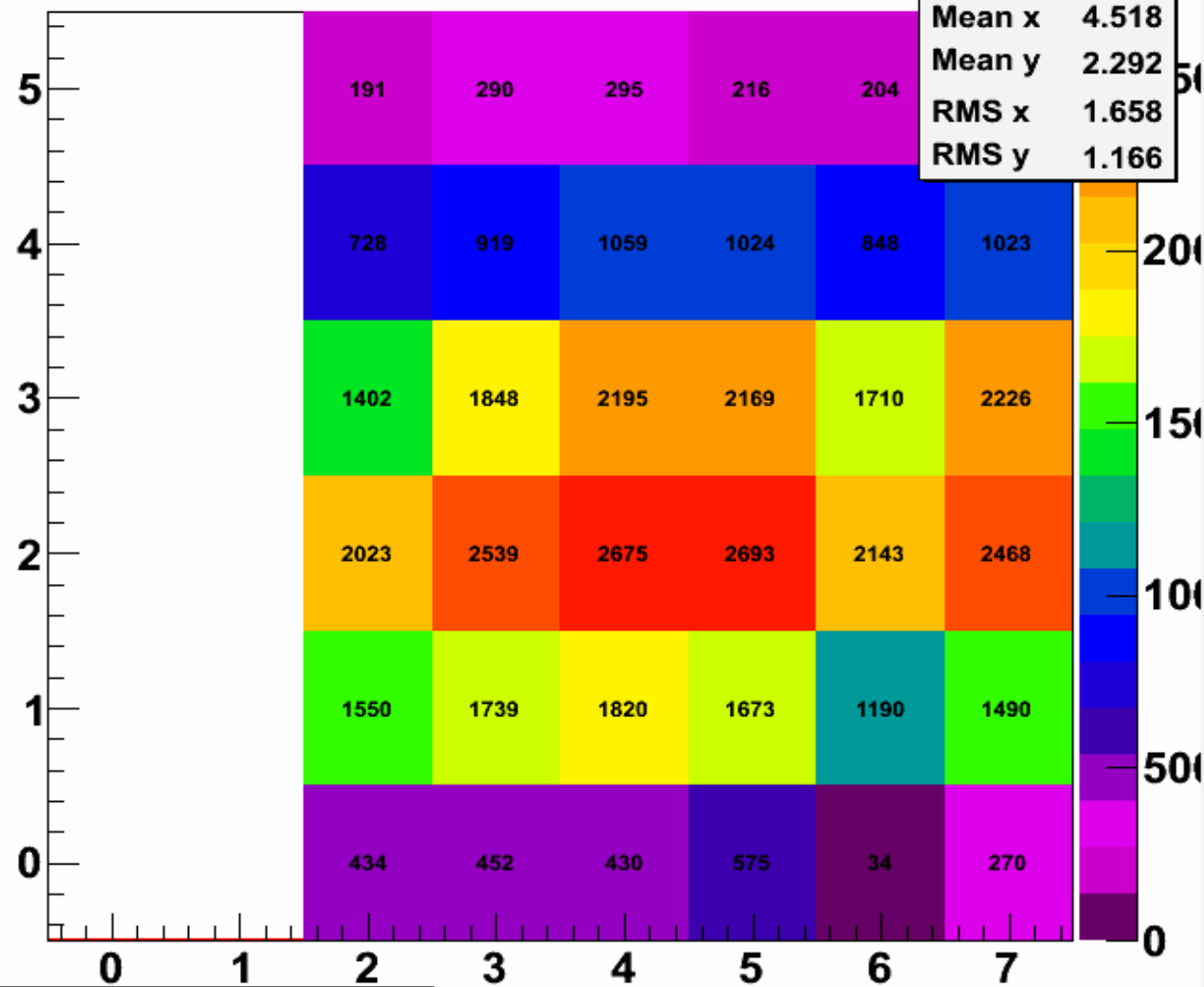
Вакуумная система, сложности юстировки



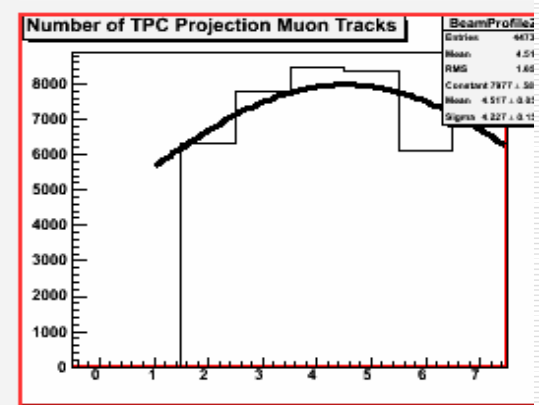
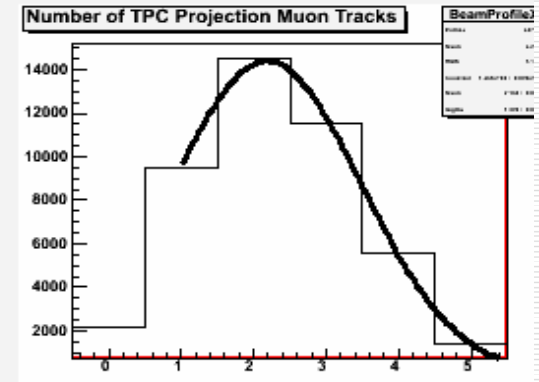
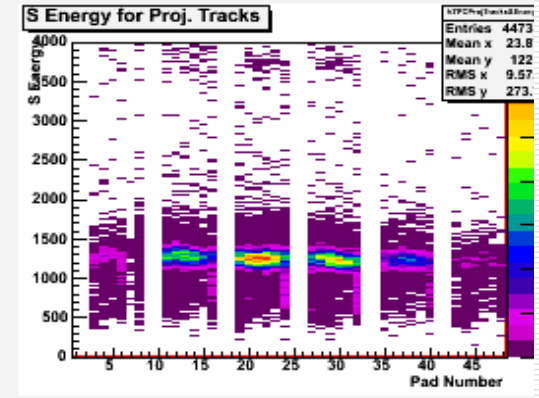


Остановки мюонов в Cryo_TPC в плоскости анода

Number of TPC Projection Muon Tracks



hTPCNProjTracks2D	
Entries	44734
Mean x	4.518
Mean y	2.292
RMS x	1.658
RMS y	1.166



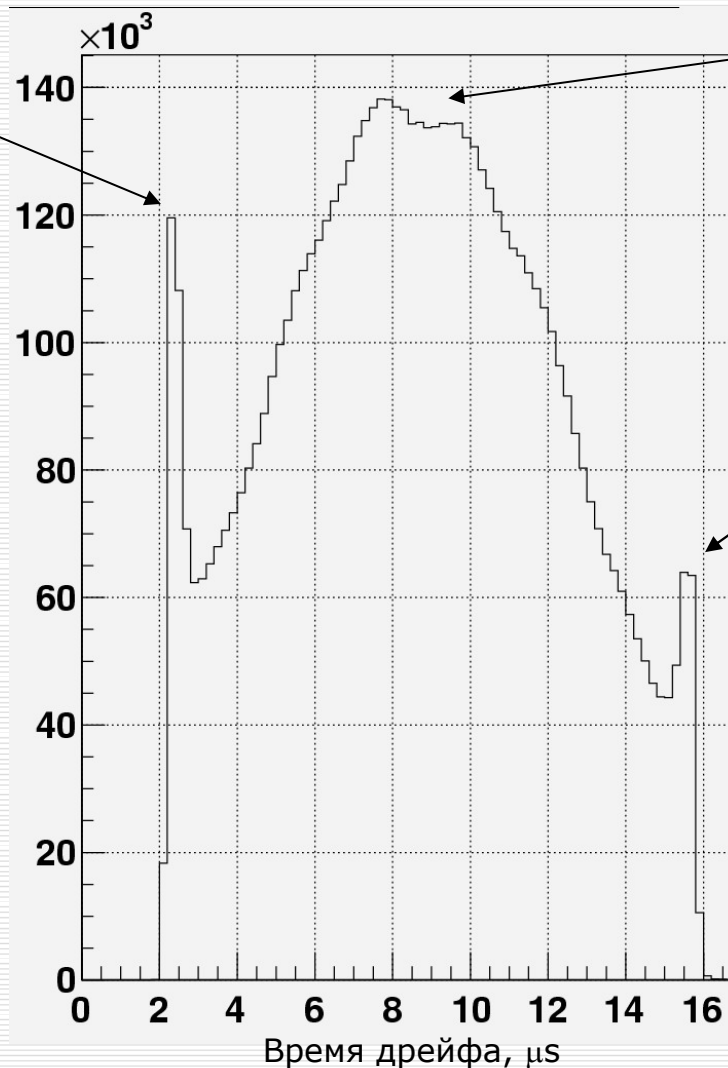
$N_{\text{tpcPP}} / N_{\text{muSCPP}}: 0.486 \ 1.000$



Распределение остановок мюонов в дрейфовом промежутке по вертикали

Сетка (1.5 мм от анода)

34 K, 5 bar, 80 kV



Середина дрейфового Промежутка, максимум пучка

Катод (73 мм от анода)

Сумма по всем радс, за исключением крайних



Набор экспериментальных данных

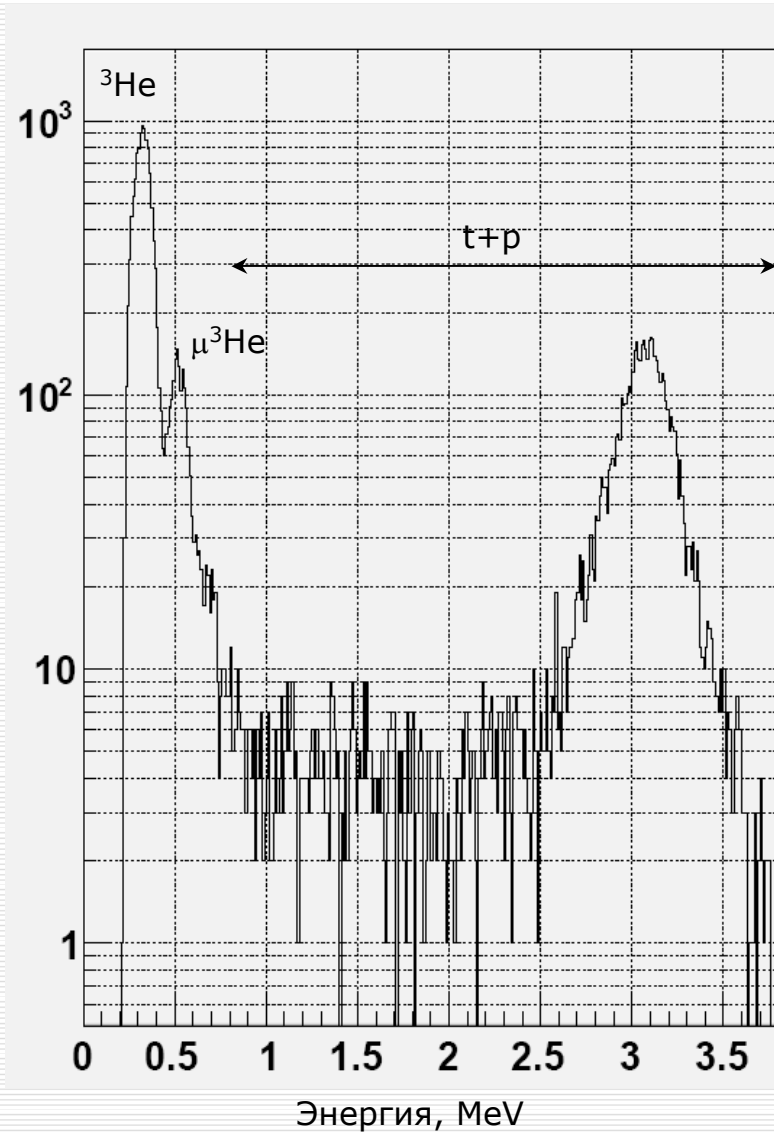
Относительная доля событий для каждого шага отбора и суммарная скорость набора этих событий на пучке.

Критерий отбора	Эффективность, %	Скорость, кГц
Сработал μ SC, кикер выключен		25
Сработал μ SC, кикер включен		25/80
Совпадение срабатывания μ SC и μ PC1	75	19
Остановка в чувствительной области TPC	56	10
Полностью реконструированный трек электрона	61	6

$$10^{10} \text{ событий} / 6000 \text{ Hz} = 1.6 \cdot 10^6 \text{ s} = 20 \text{ days}$$



Энергетический спектр

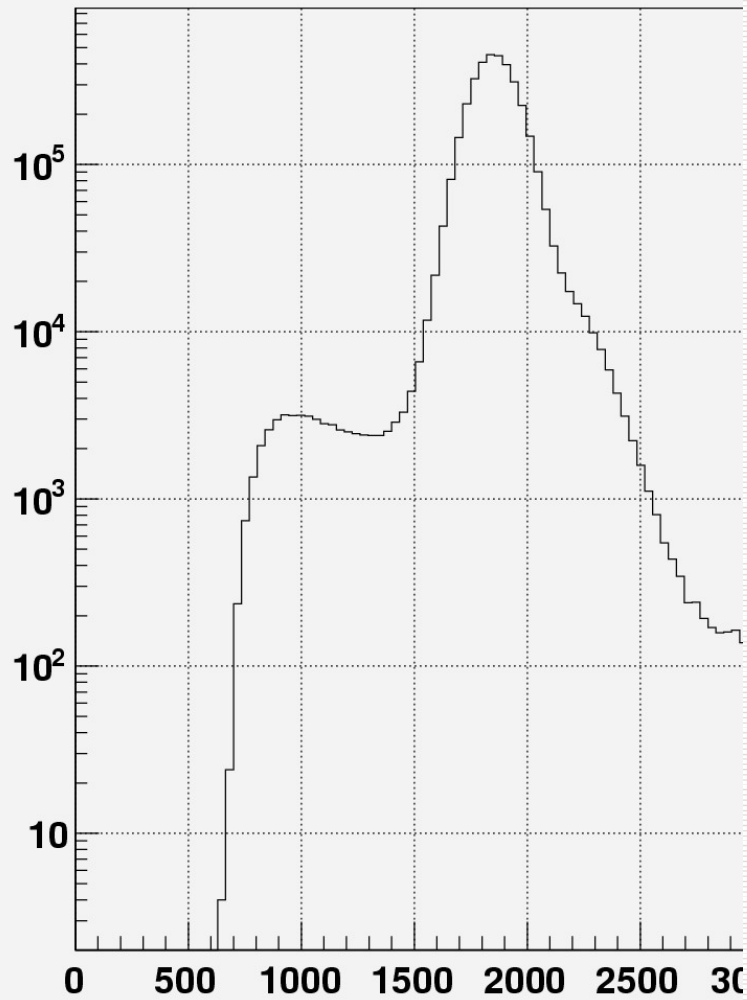


На спектре энергия ${}^3\text{He} = 0.35 \text{ MeV}$

- Рекombинации электронов;
- Потери на сетке.

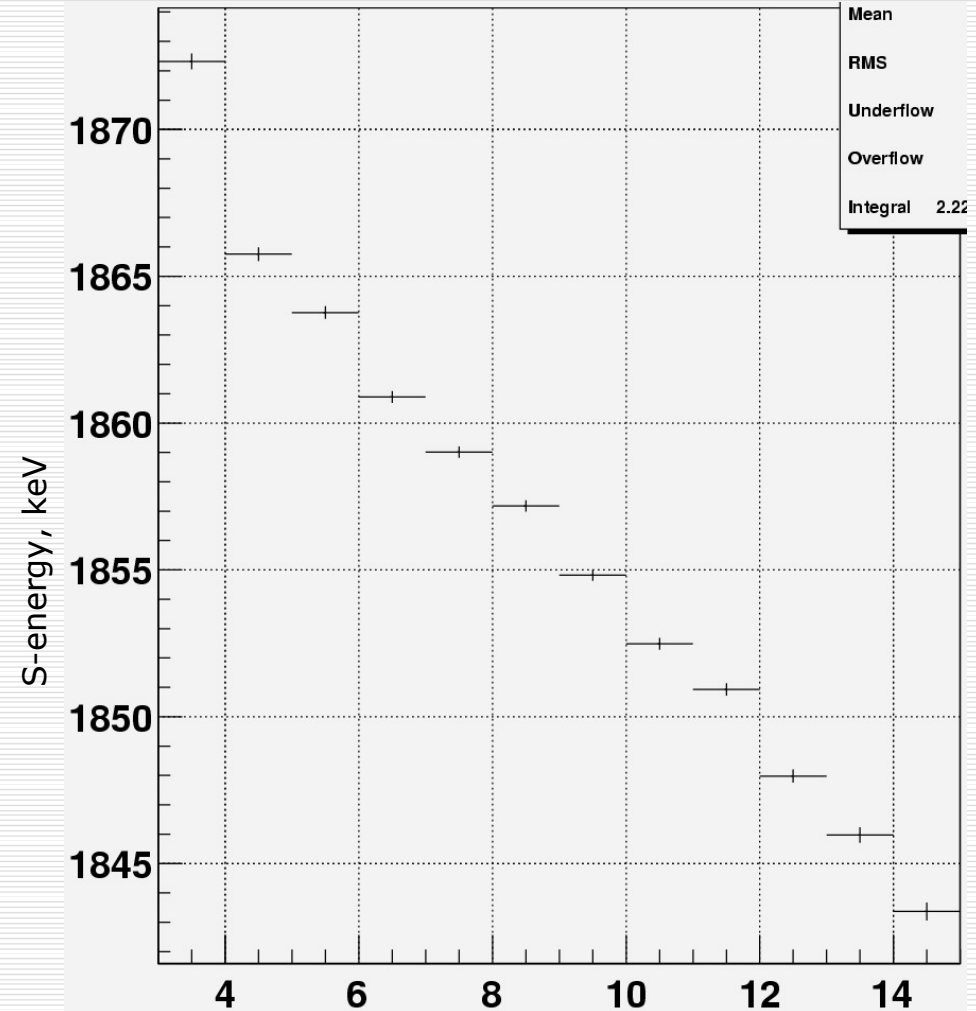


S-energy



S-energy, keV

$$E_s = E_{\text{stopping pad}} + 2 \cdot E_{\text{previous pad}}$$

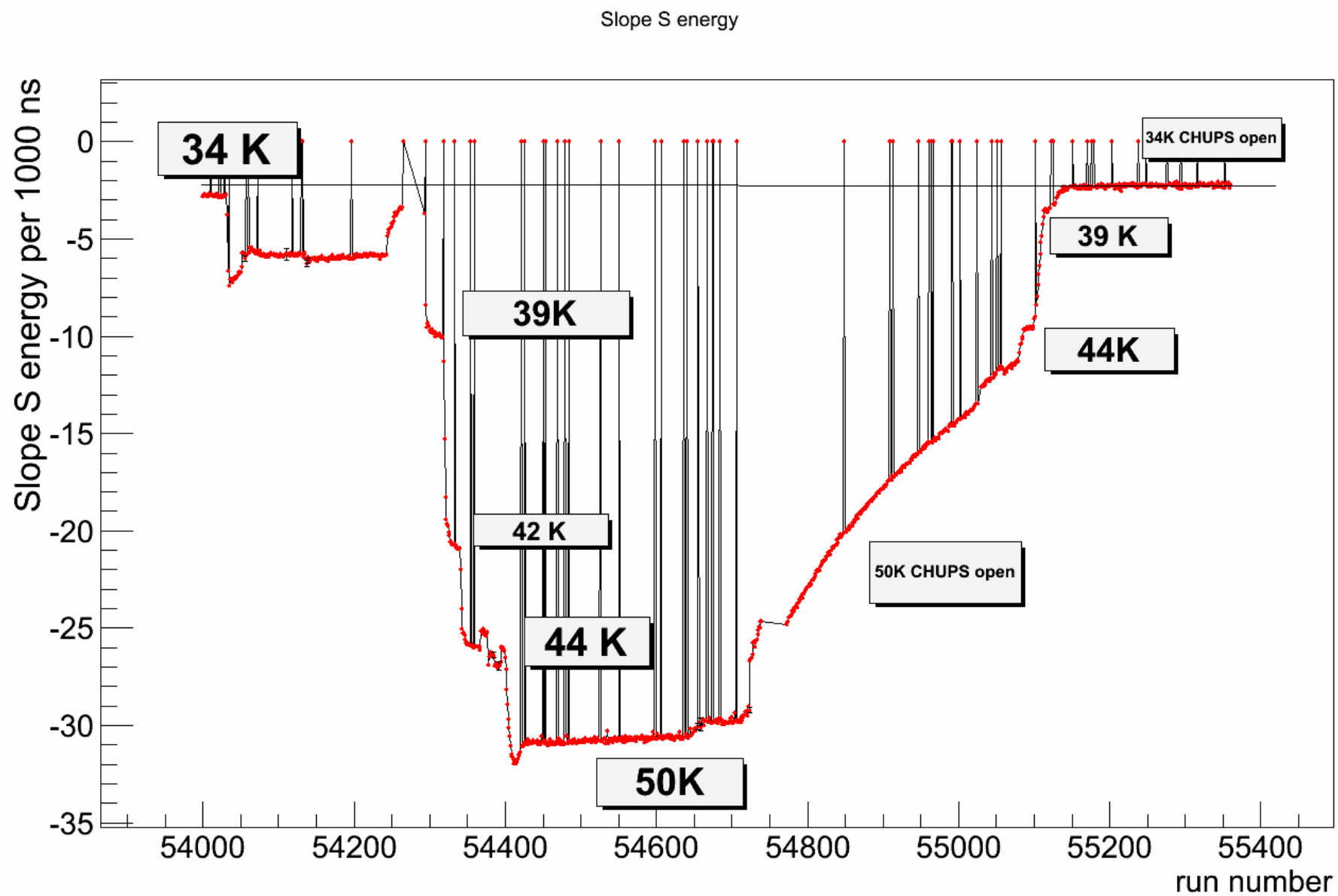


Drift time, μs

34 K, 5 bar, 80 kV

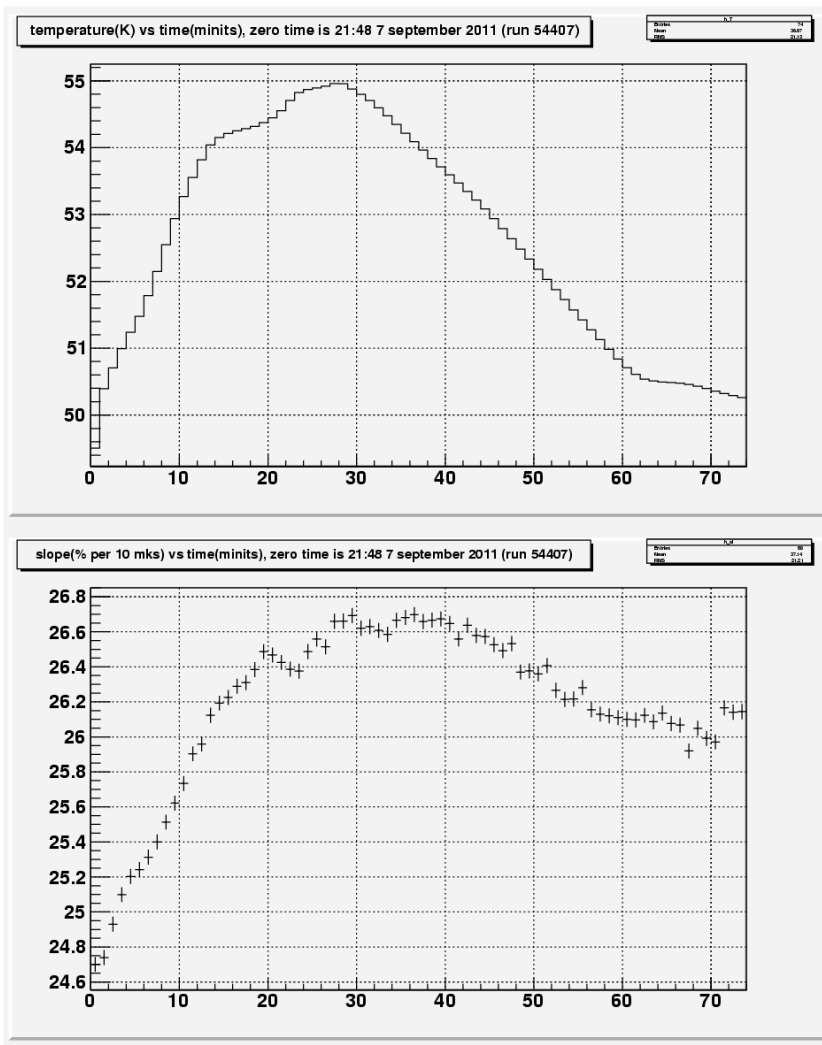


Эффект «прилипания»

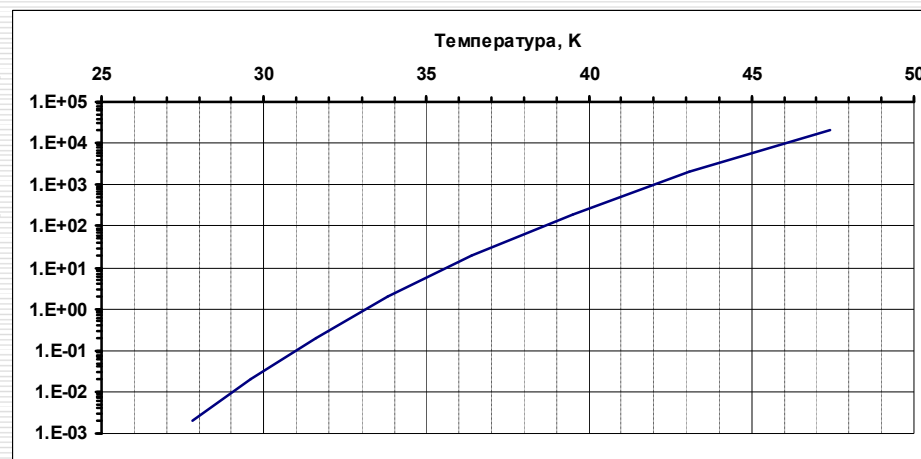




Эффект «прилипания»



Давление насыщенных паров кислорода, ppb





Заключение

За время сеанса в период с 15 июня по 10 сентября 2011 года была набран следующий массив данных

Пучок	Количество набранных файлов	Количество остановок мюона в TPC	Количество электронов от распада мюона
μ^-	13122	1.0×10^{10}	0.7×10^{10}
μ^+	1540	1.1×10^9	0.8×10^9

Набранная статистика позволяет получить точность определения скорости захвата мюона дейтроном на уровне 10 с^{-1} .

Планы:

2012 год – переезд на новый пучок $\pi E3$, модернизация системы.

2013 год – окончательный набор статистики.