



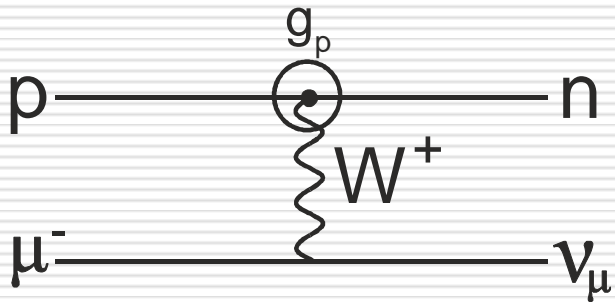
# Разработка и создание экспериментальной установки прецизионного измерения скорости захвата мюона дейтроном (Эксперимент MuSun)

Ившин К.А.

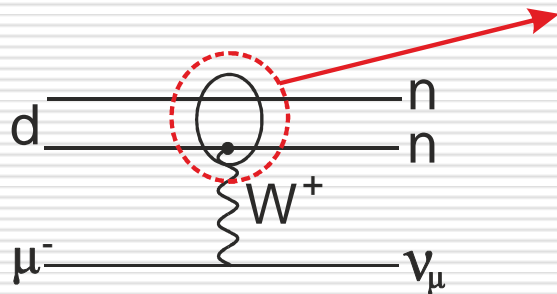
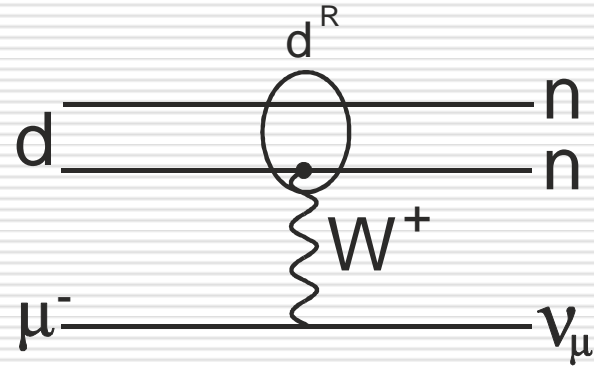
01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики

Научный руководители: к.х.н. Взнуздаев М.Е.  
Научный консультант: к.ф.-м.н. Воропаев Н.И.

Реакция захвата мюона  
протоном рассмотренная  
в эксперименте MuCap

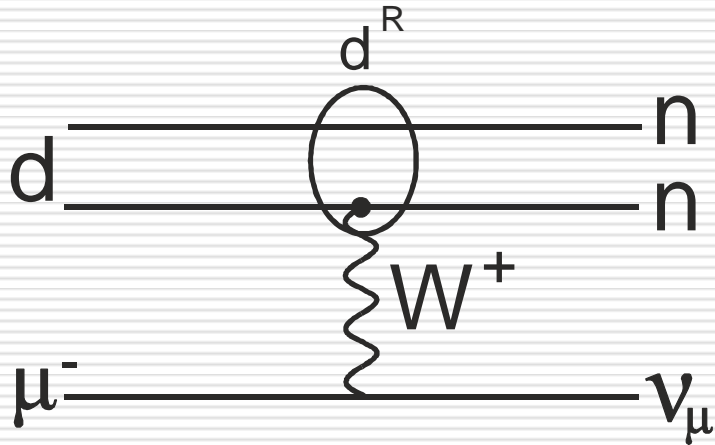


Реакция захвата мюона  
дейтроном исследуемая  
в эксперименте MuSun



Киральная теория возмущений (ChPT)

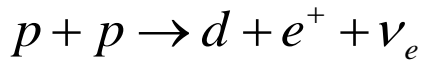
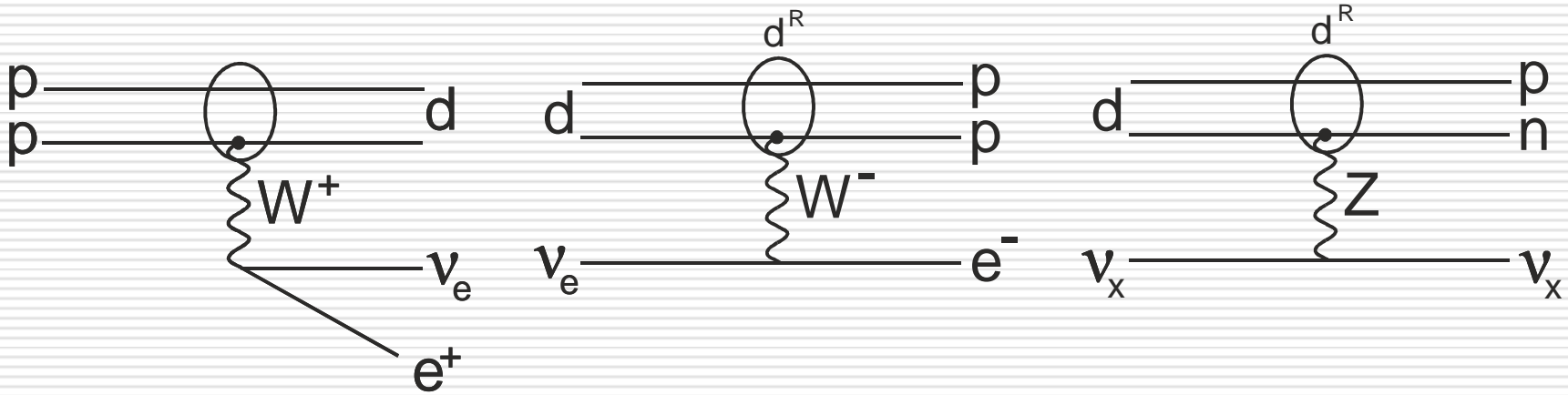
$$= \text{[Crossed lines with } d^R \text{]} + \text{[Deuteron with } \pi \text{]} + \dots$$



Процесс описывается ChPT при помощи константы  $d^R$ .

$d^R$  – константа низкоэнергетического взаимодействия

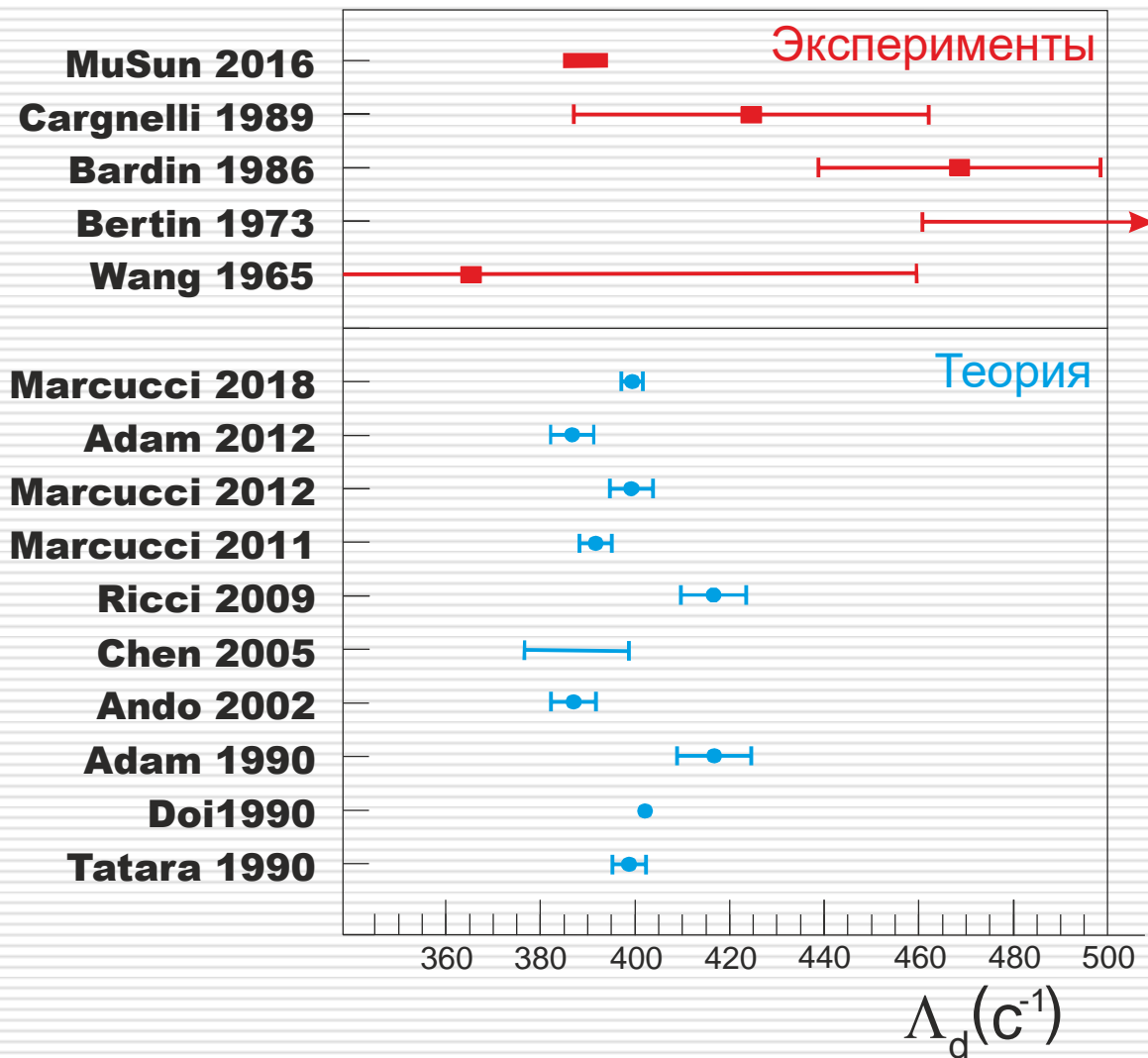
ChPT – Киральная теория возмущений

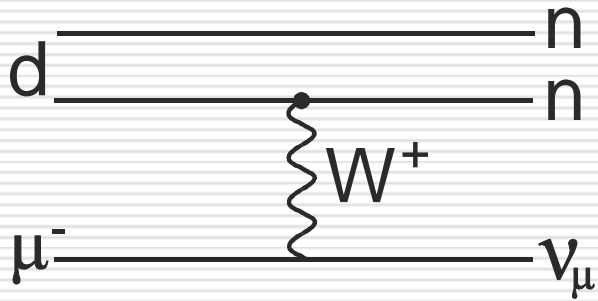


Реакция синтеза дейтрона

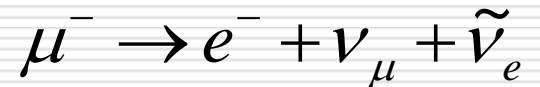
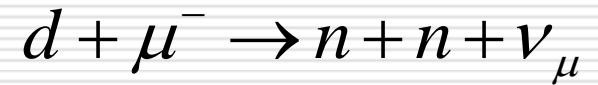
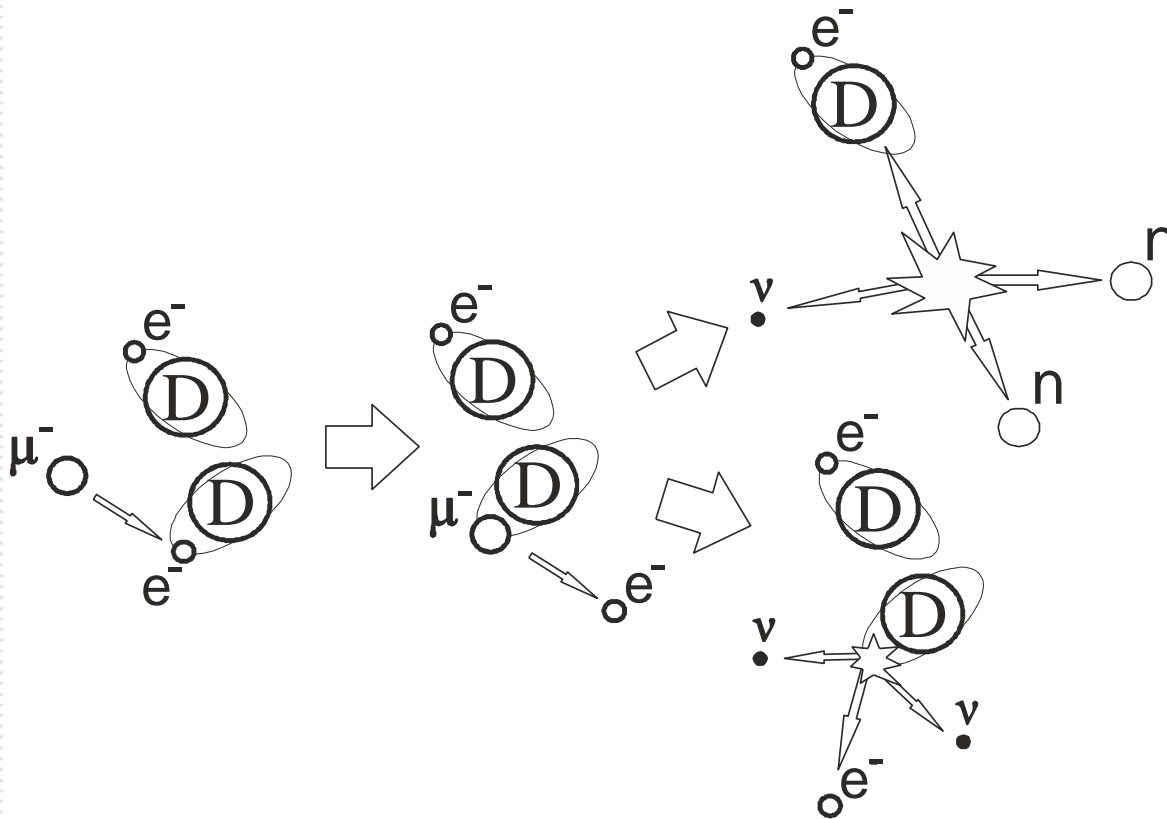


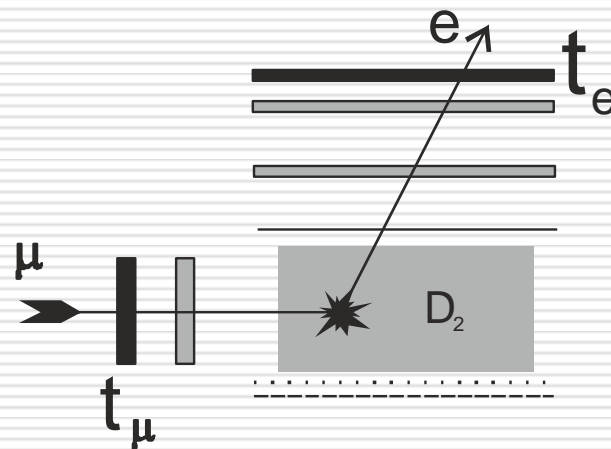
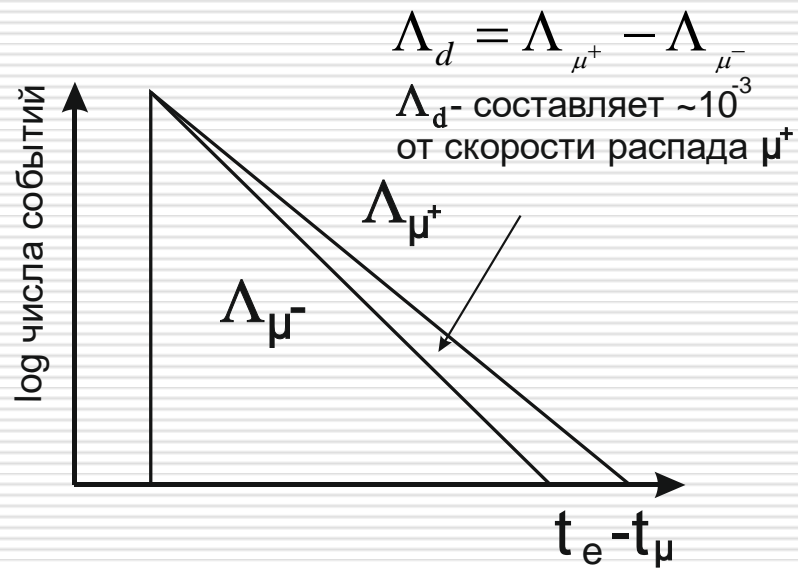
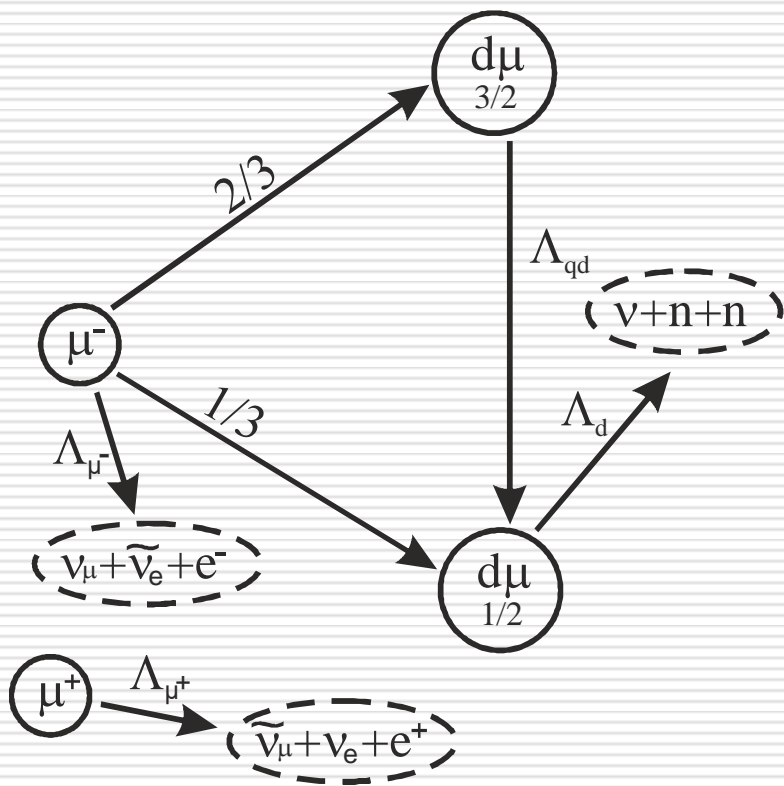
Реакции связанные осцилляцией нейтрино

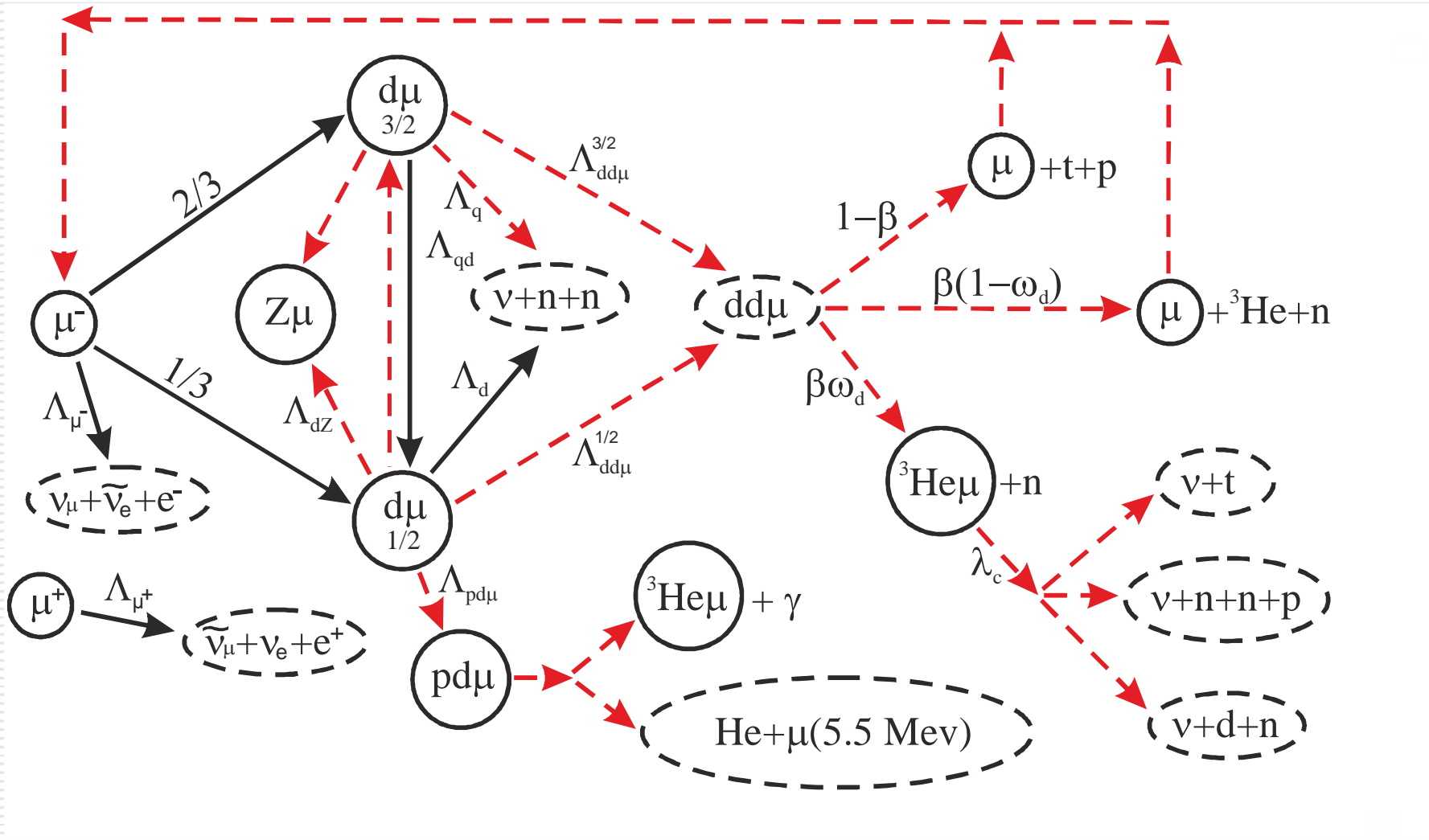


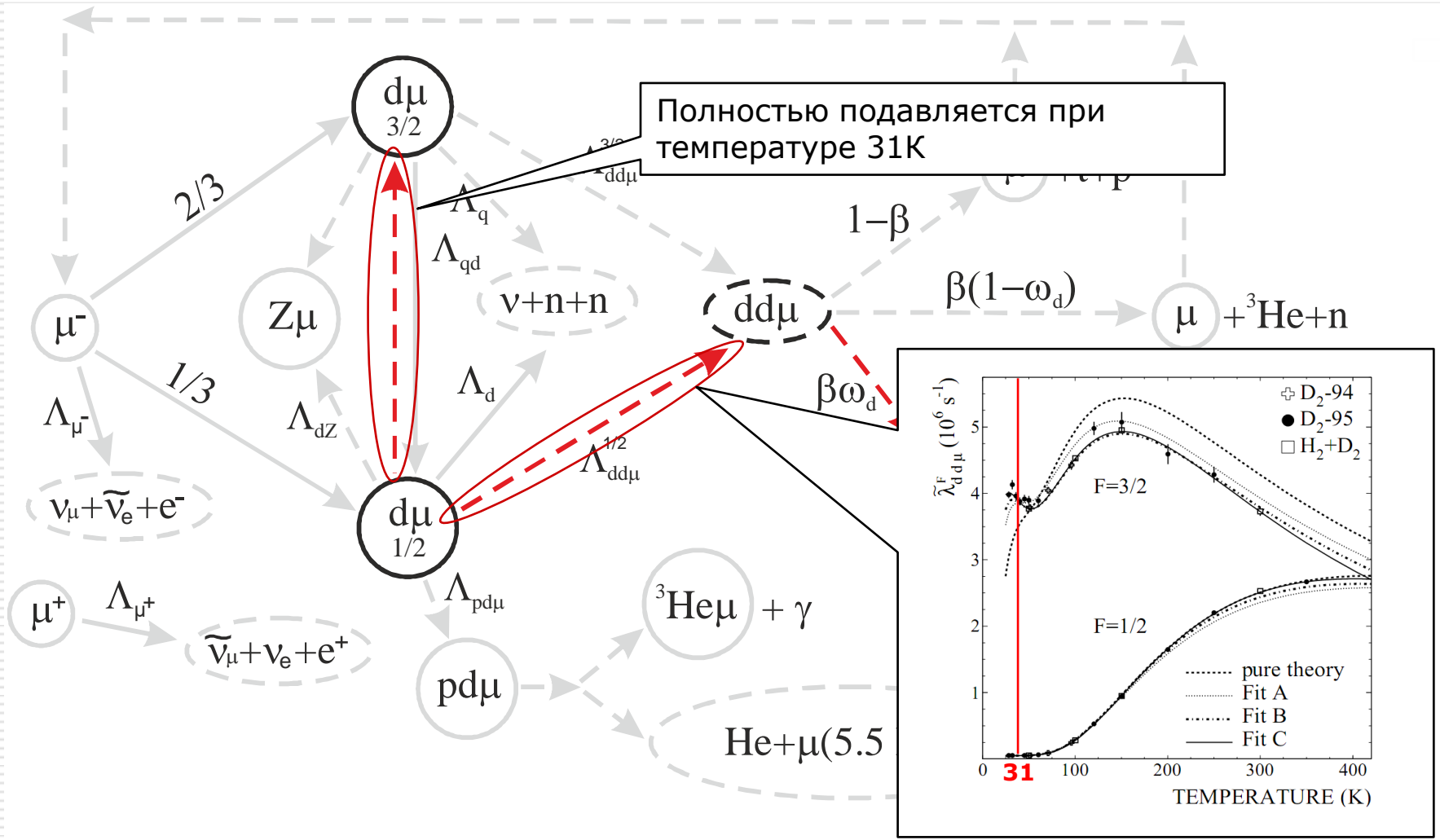


$\Lambda_d$  - Скорость реакции захвата мюона дейтроном. Количество мюонов, захваченных дейтронами, в единицу времени.  
 Скорость реакции ( $s^{-1}$ ) является обратной величиной к времени жизни



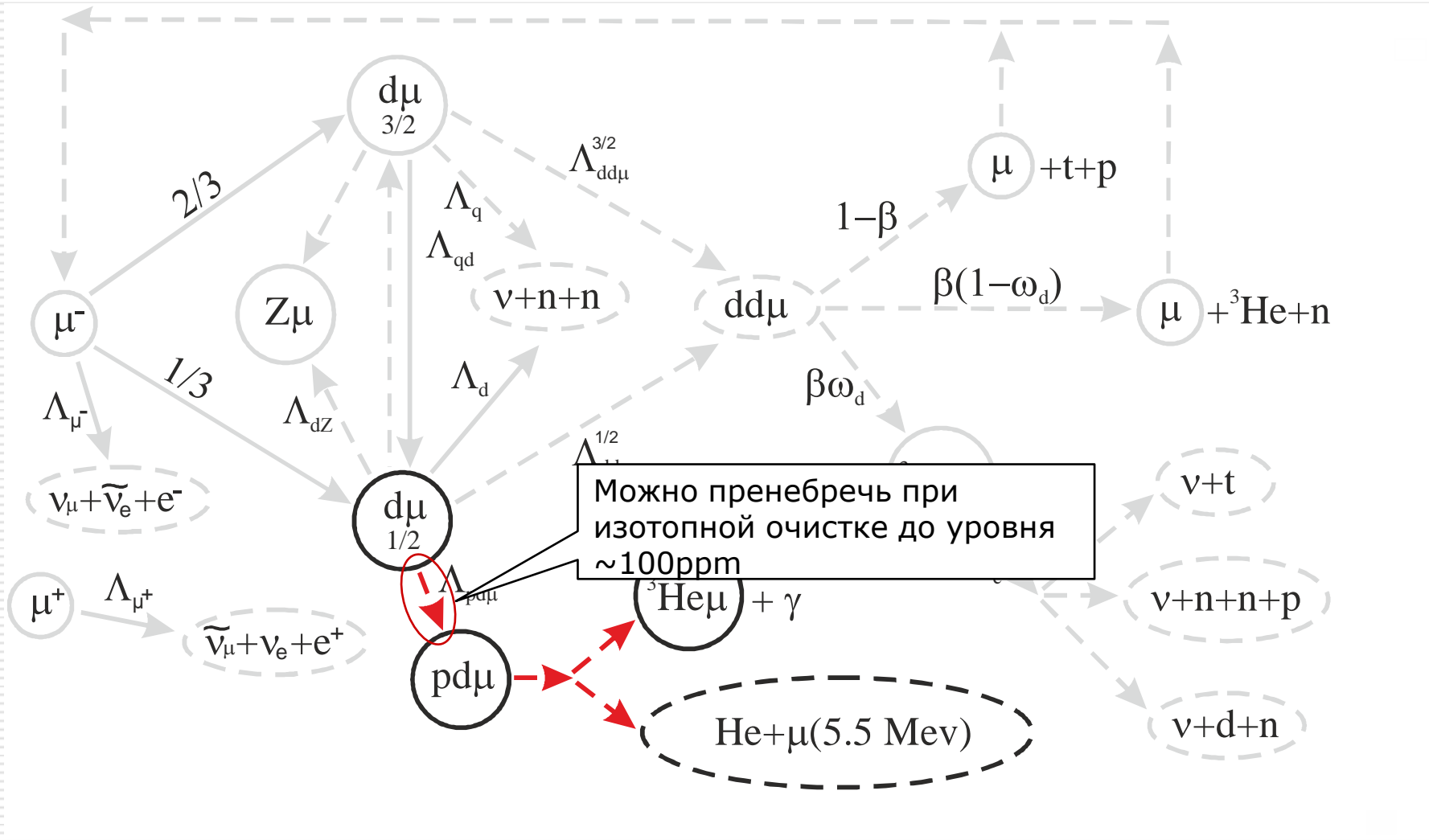




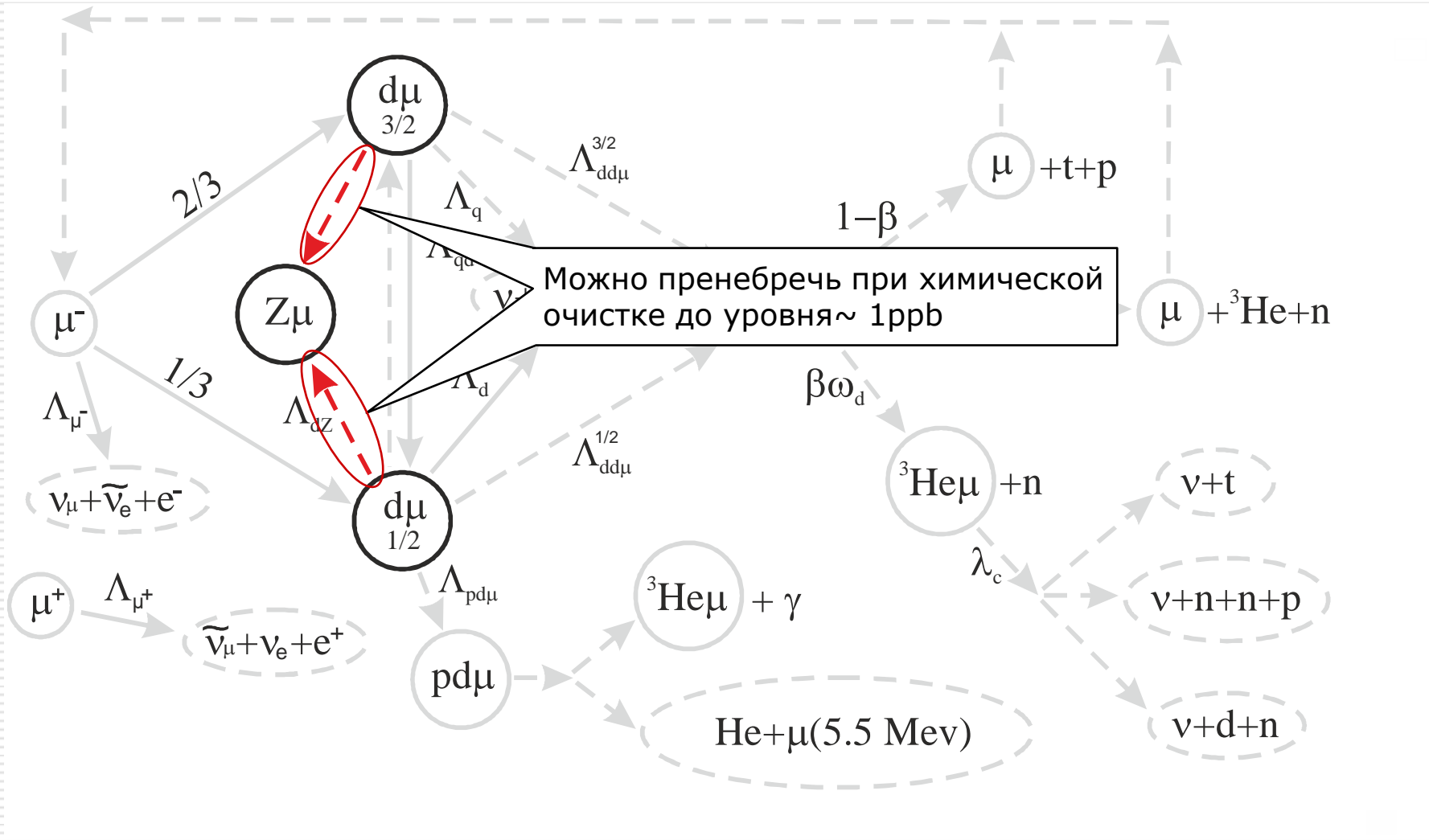


Требуется поддержание криогенных условий на уровне 31 К





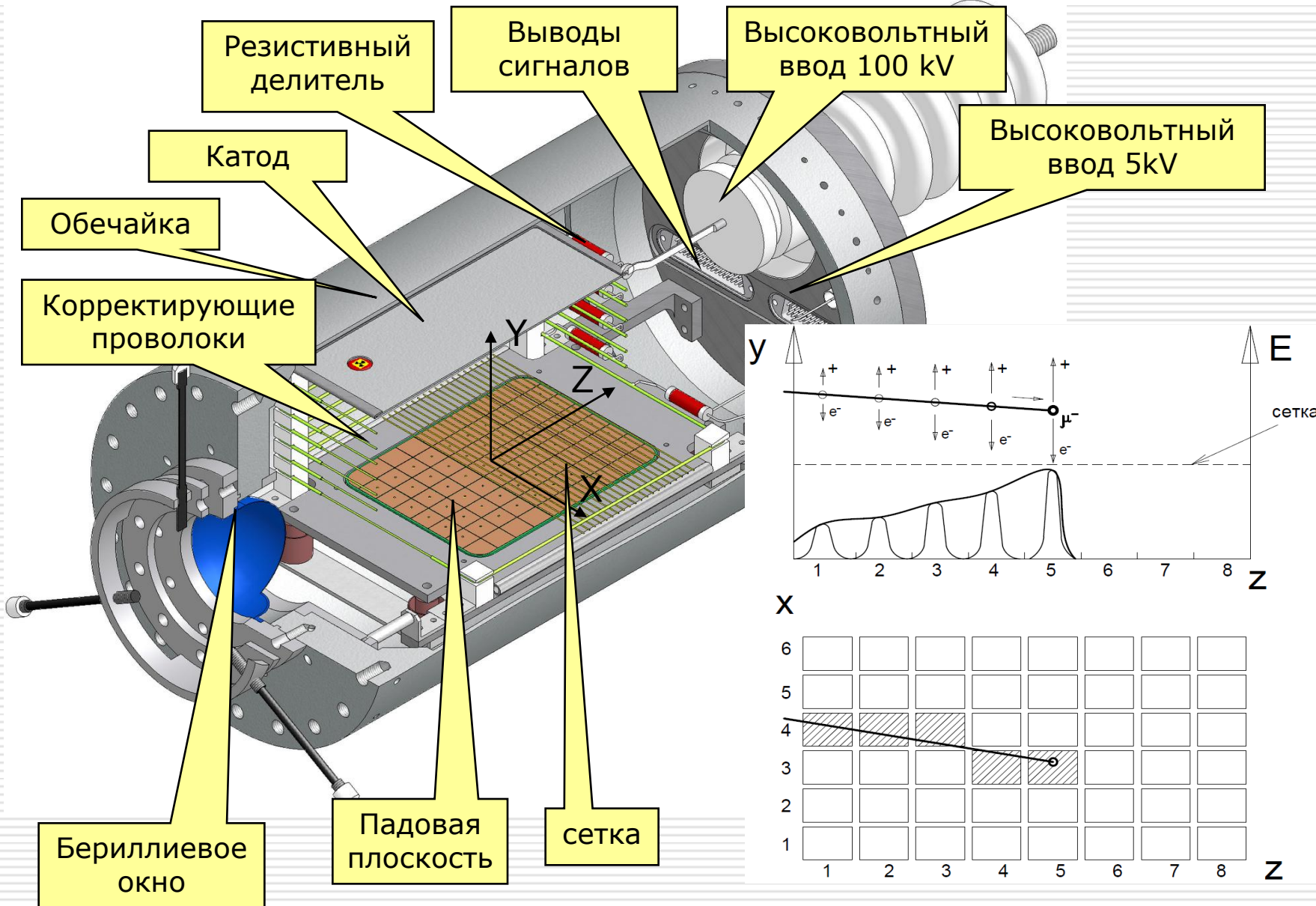
Требуется изотопная очистка дейтерия на уровне 100ppm ( $10^{-4}$ )

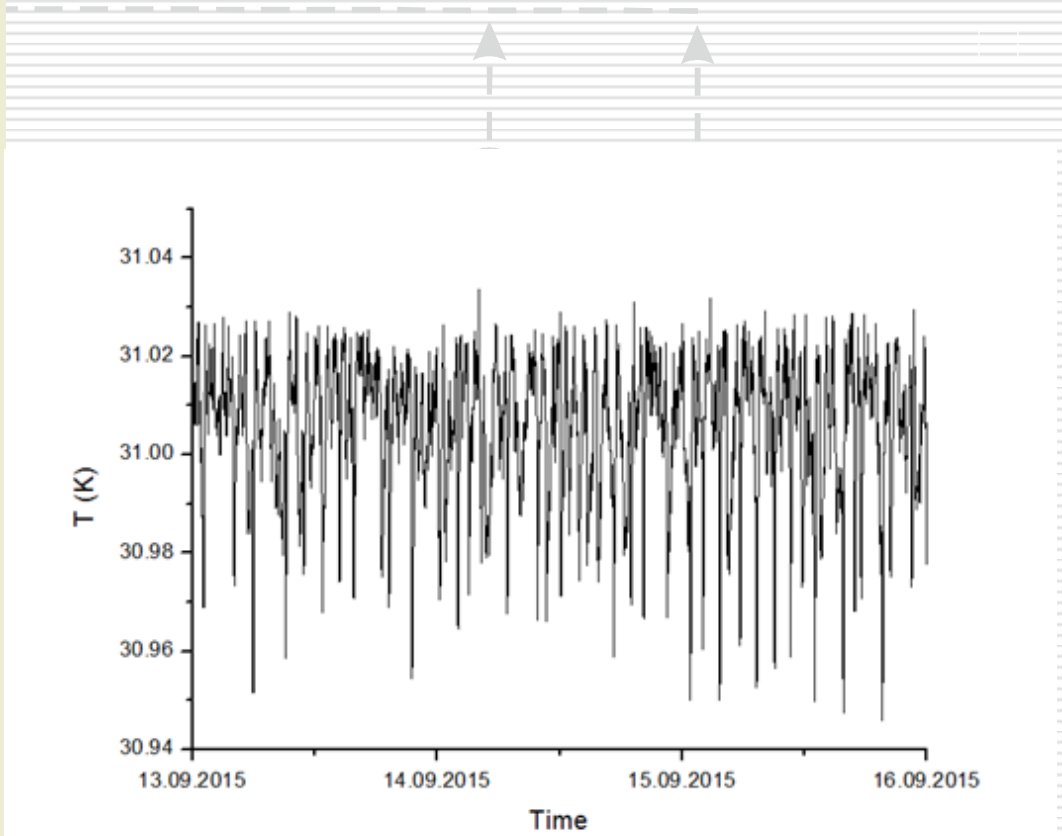
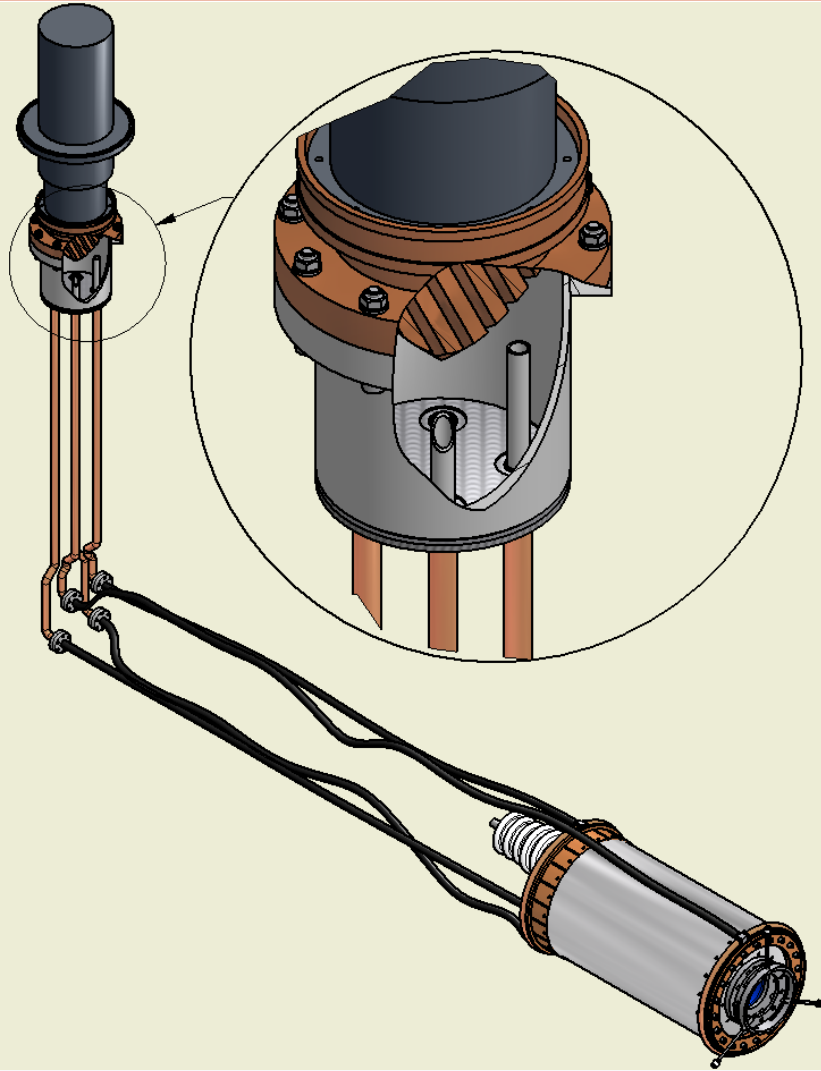


Необходимо поддерживать химическую чистоту газа на уровне 1ppb ( $10^{-9}$ )



# Схема центрального детектора

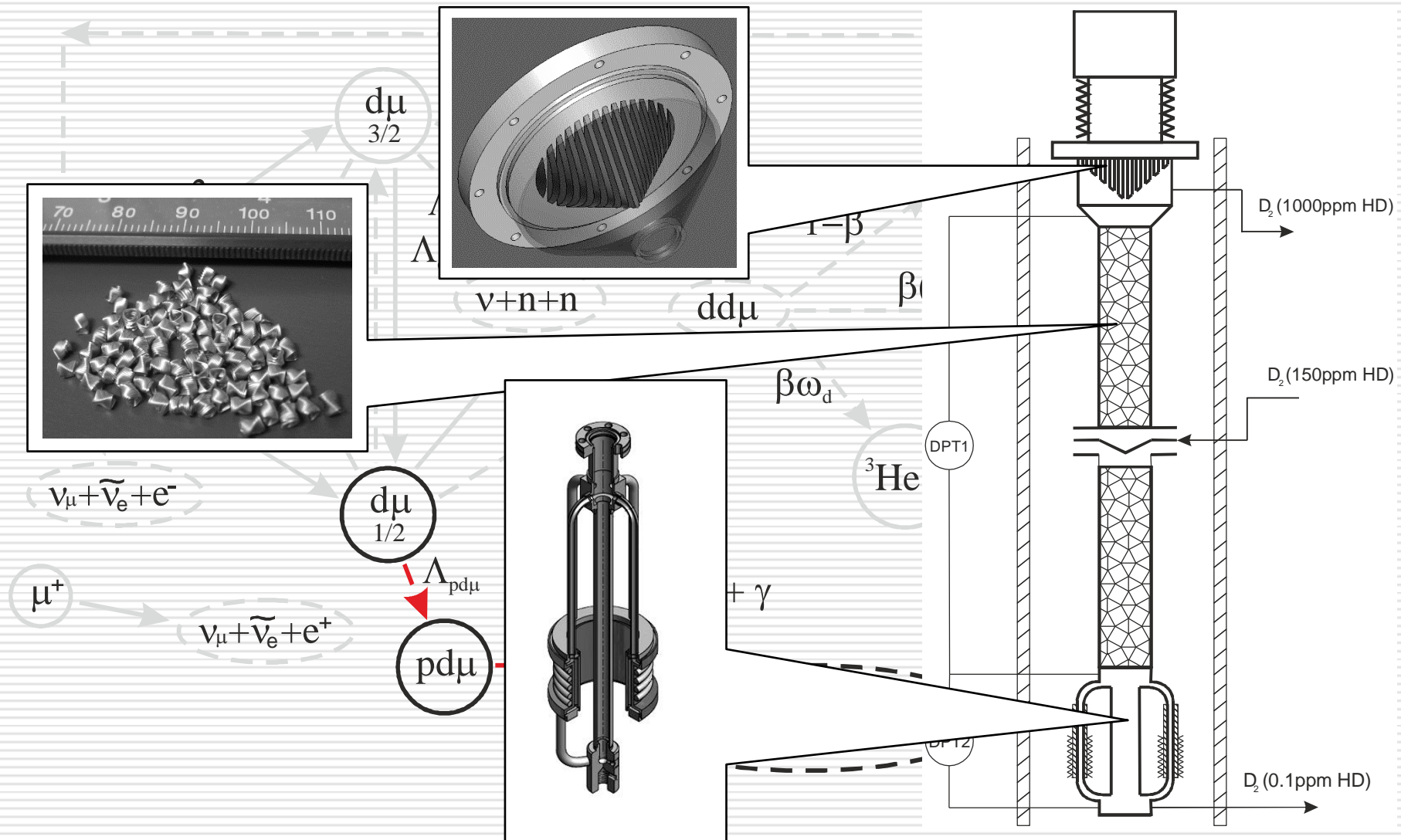




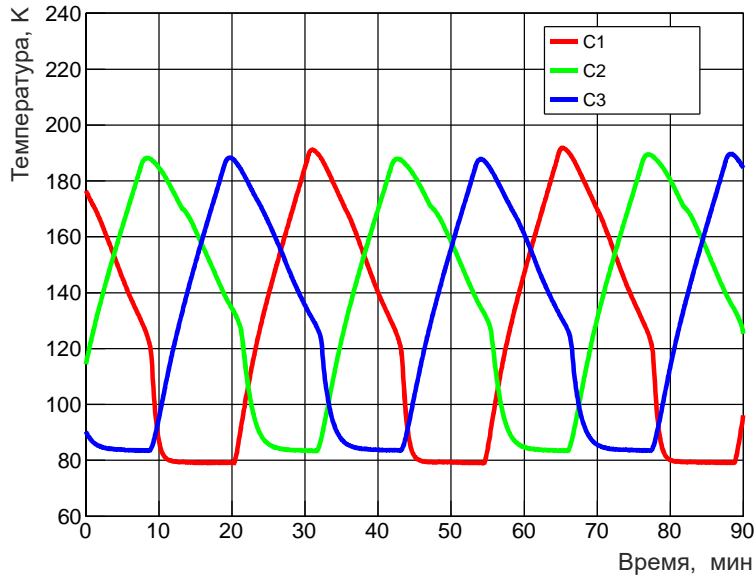
He+ $\mu$ (5.5 Mev)

( $\nu$ +d+n)

Поддержание криогенных условий в CryoTPC на уровне 31[K] позволило подавить канал реакции связанный с образованием  $dd\mu$  молекулы  $\sim 50$  раз

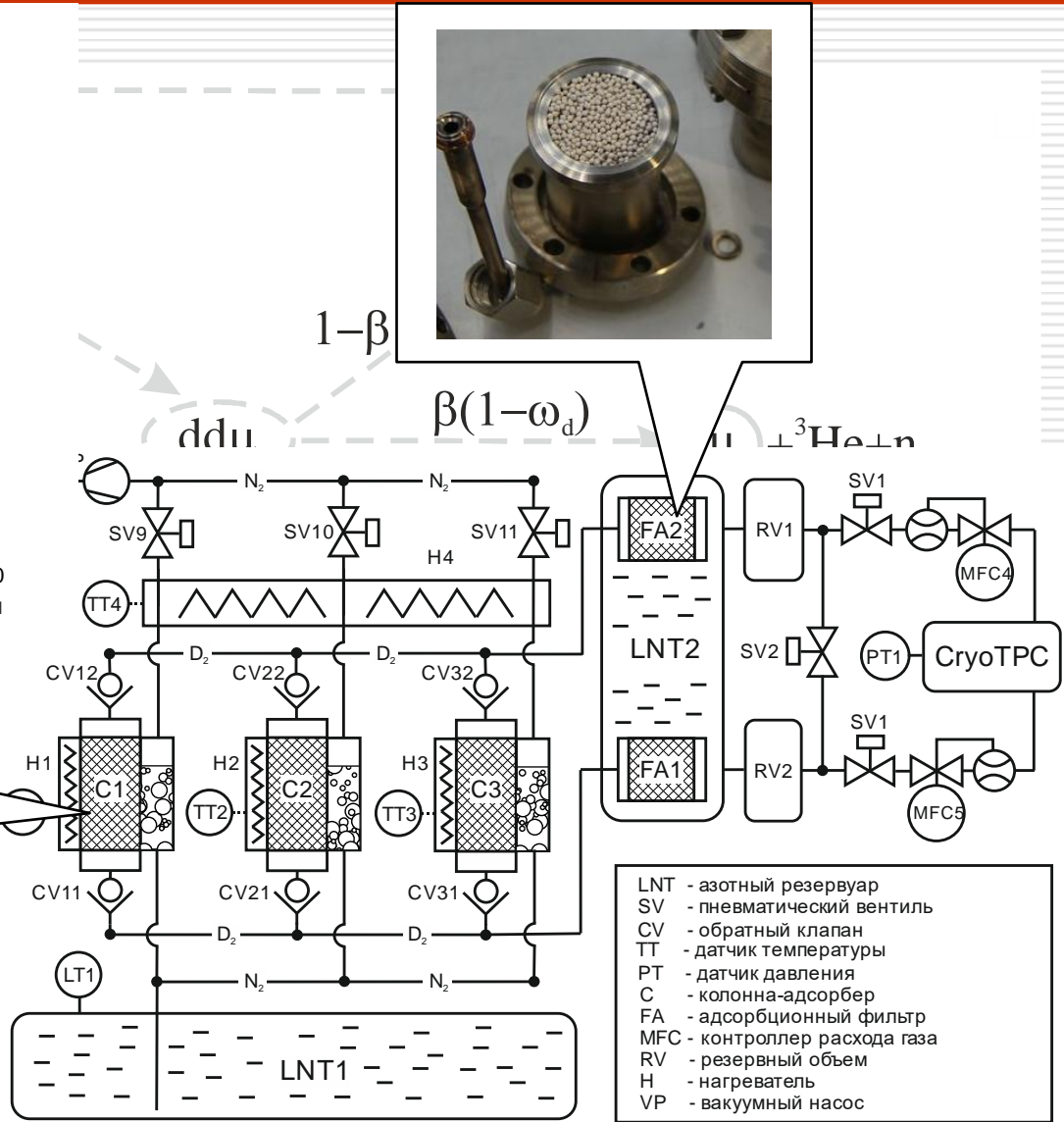


Изотопная очистка газа до уровня  $\sim 100\text{ppb}$  позволила полностью подавить влияния канала реакции образования  $pd\mu$  молекулы.

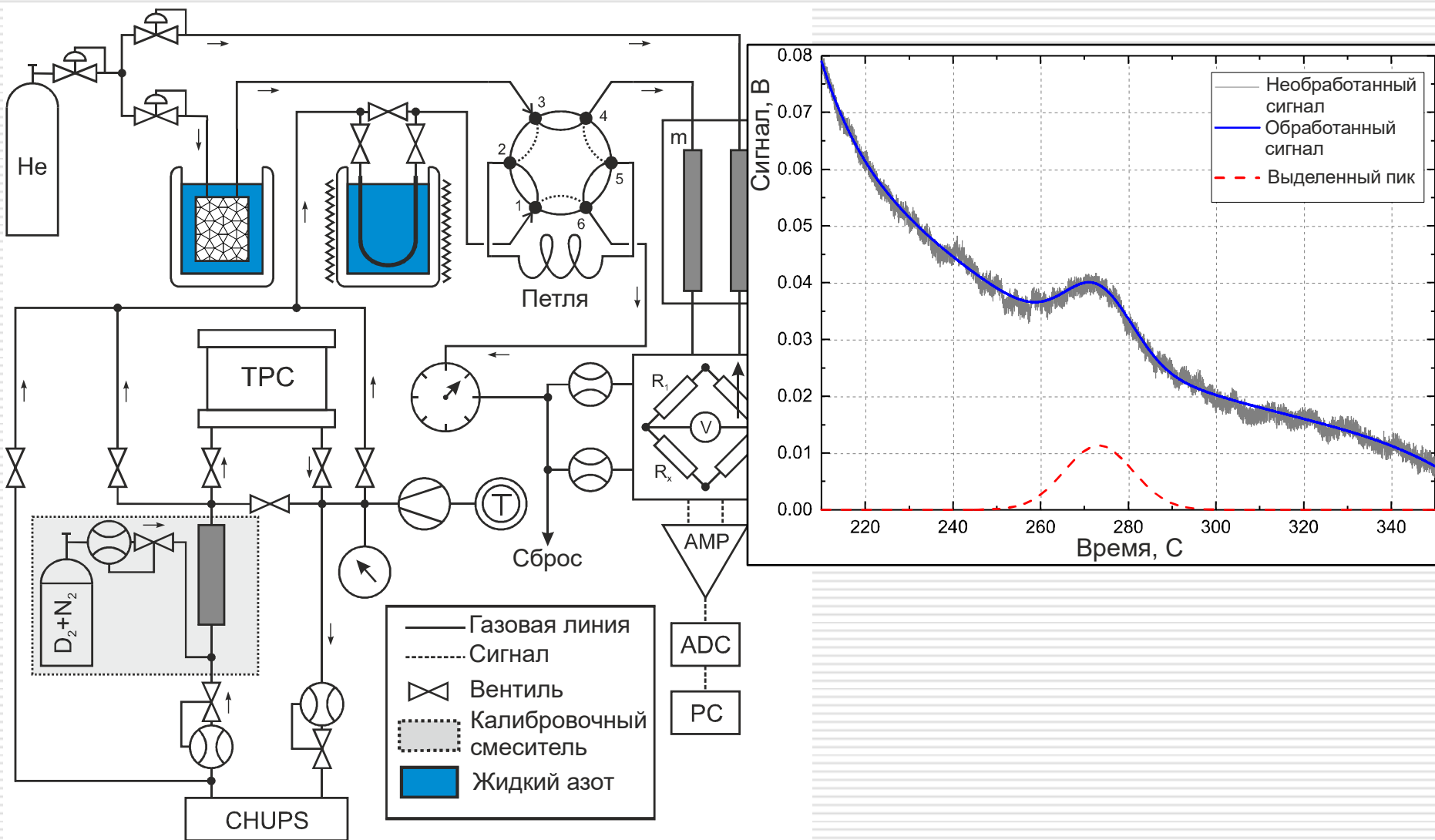


$\mu$

$p d \mu$



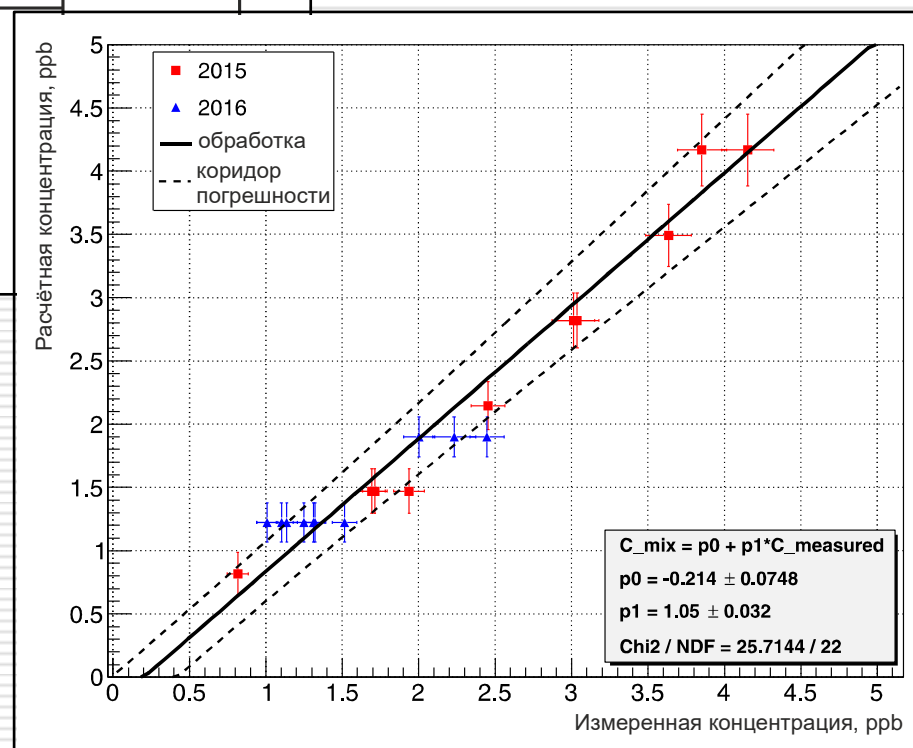
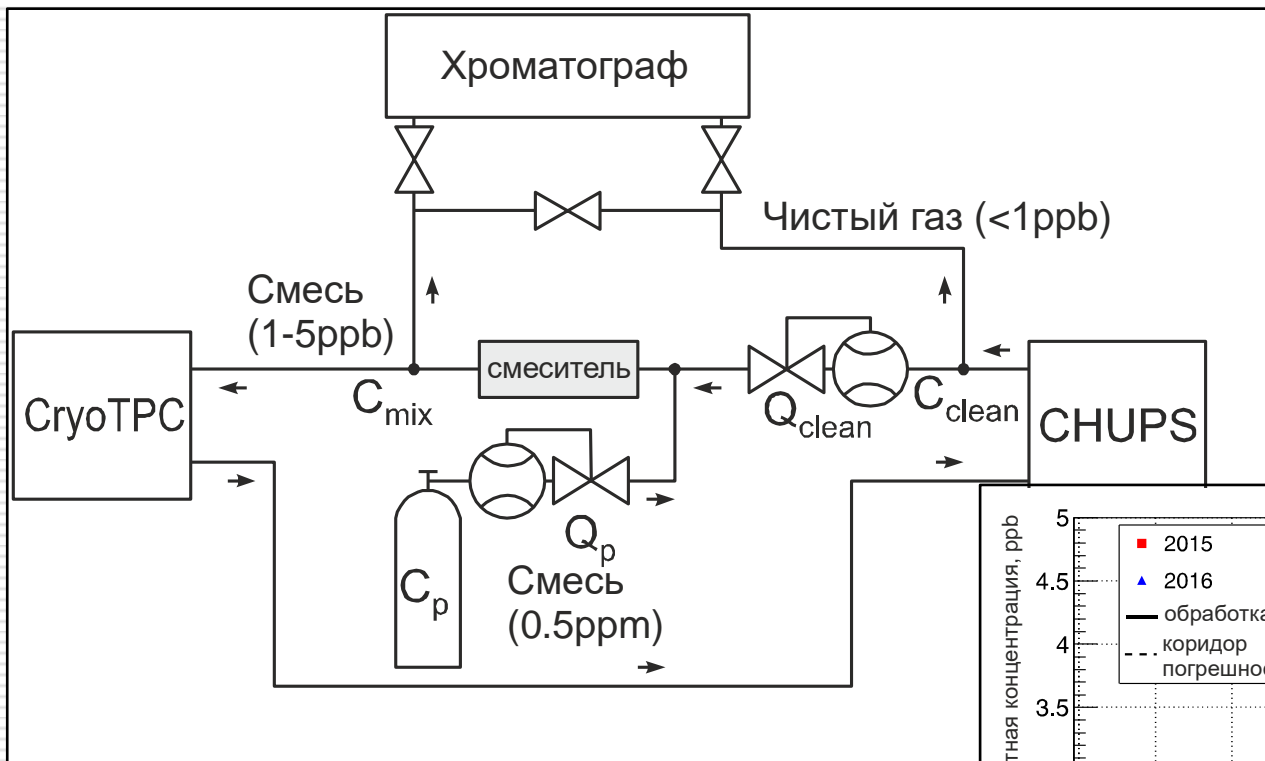
Поддержание химической чистоты газа на уровне  $\sim 1 \text{ppb}$  полностью исключило влияние канала реакции перехвата мюона на примесь с высоким зарядовым числом



Удалось добиться чувствительности хроматографического метода на уровне 0,6ppb содержания азота в дейтерии

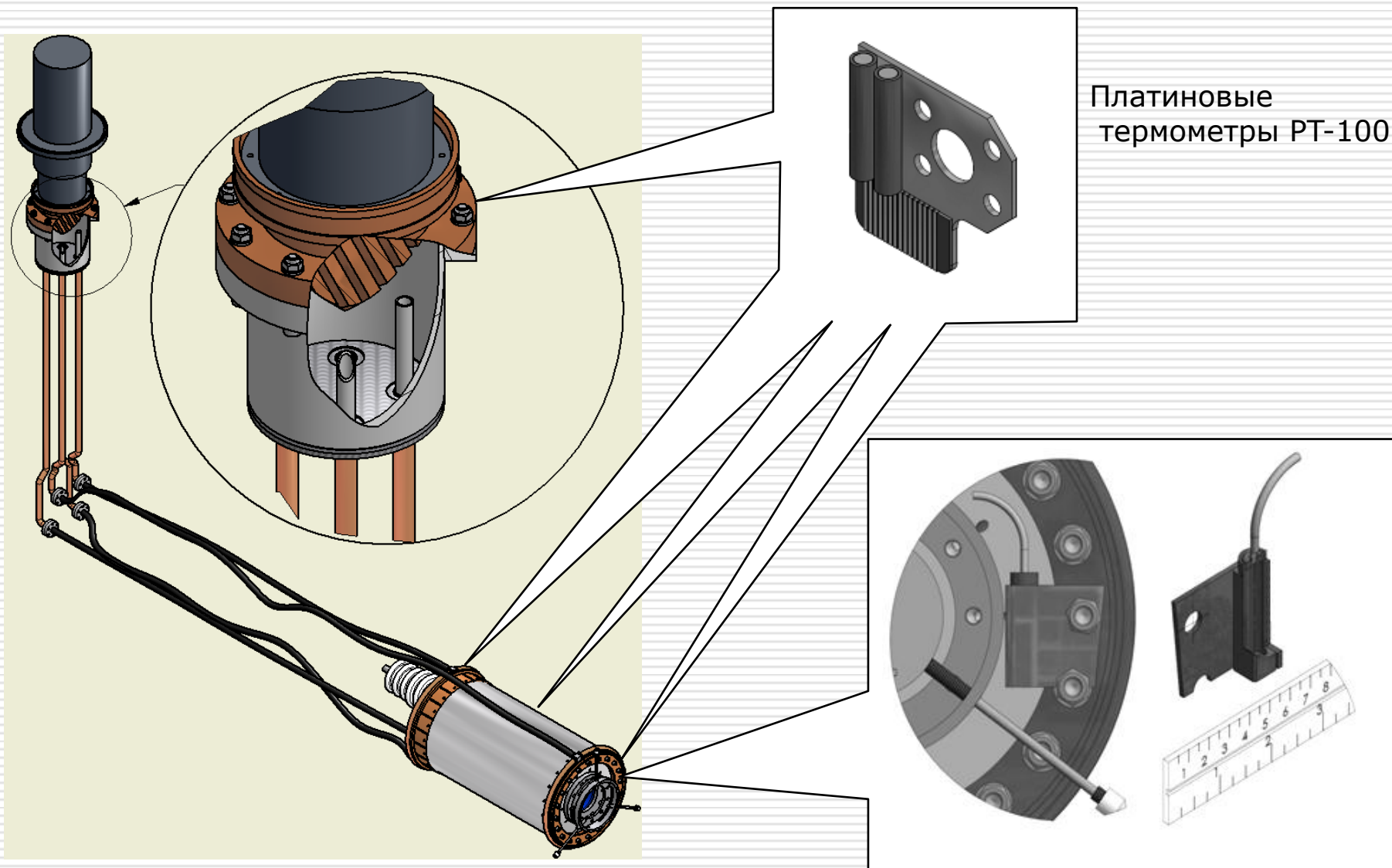


# Калибровка хроматографической установки



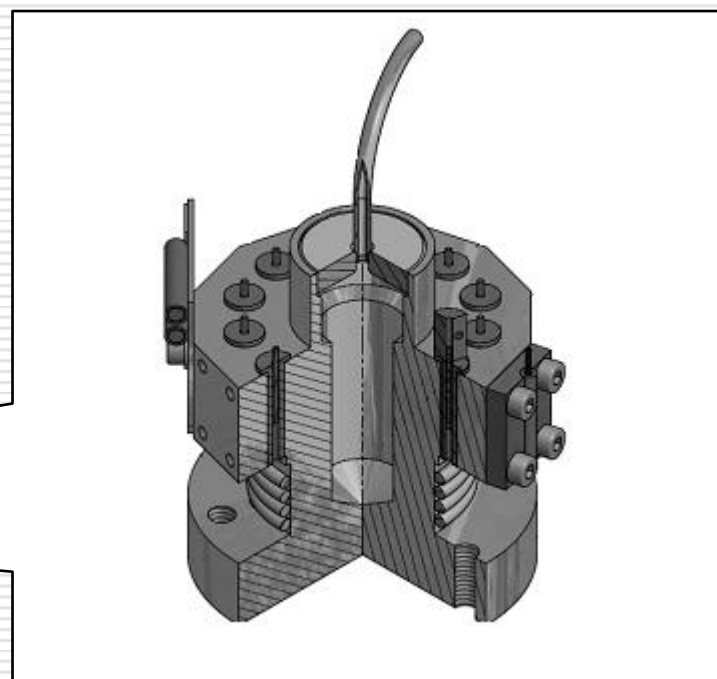
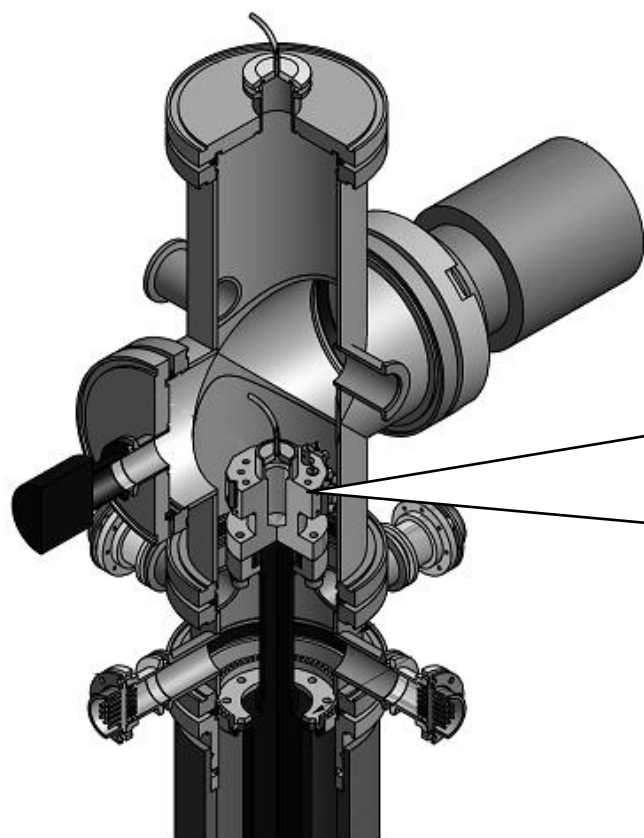
Произведена абсолютная калибровка метода с погрешностью  $\pm 0,5$  ppb





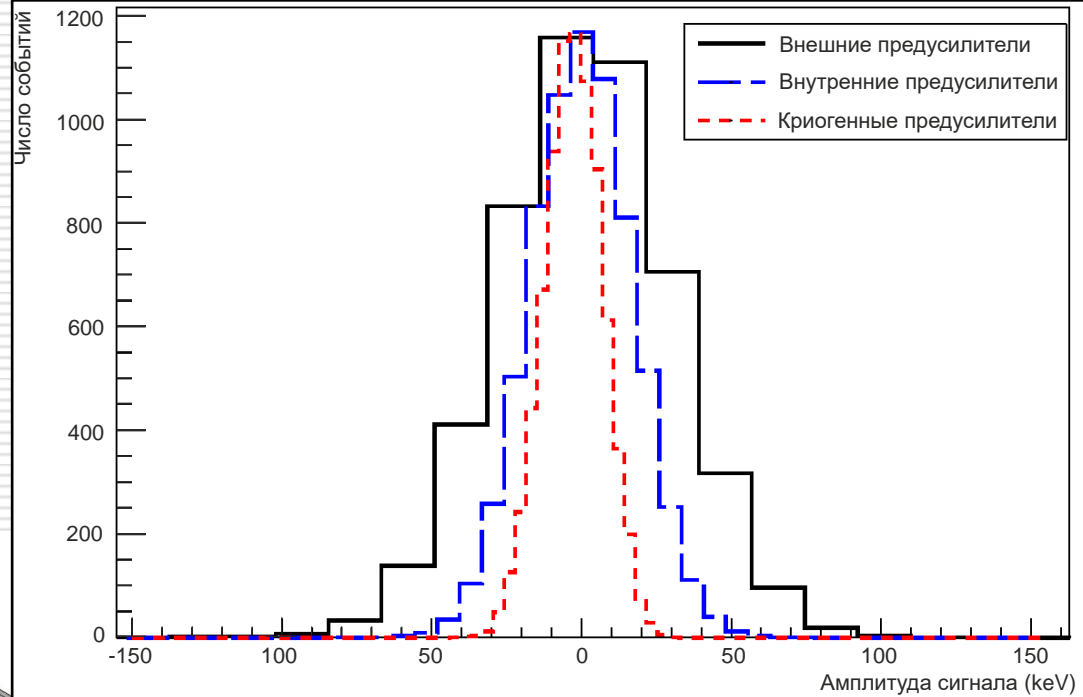
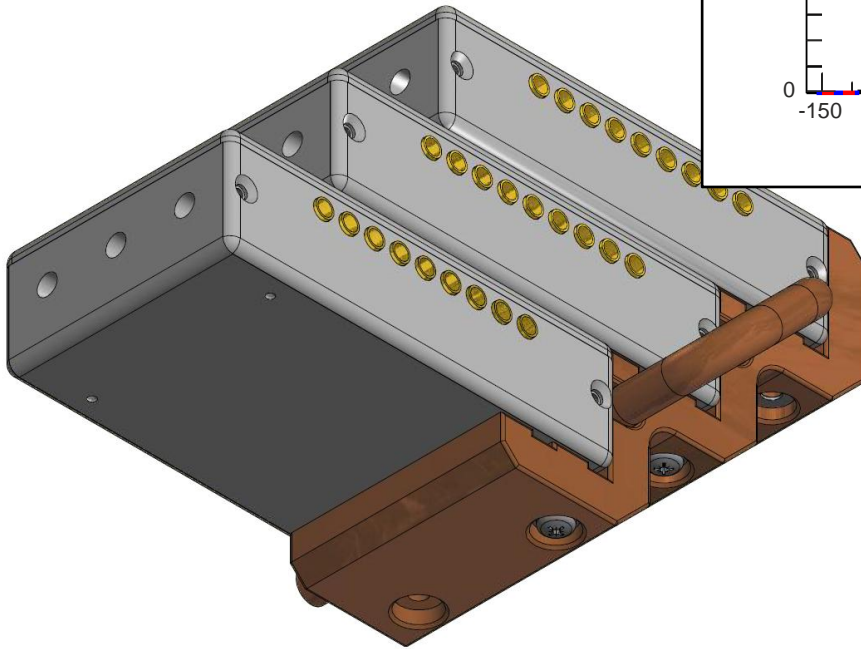
Платиновые  
термометры PT-100

Конденсационный термометр  
наполненный неоном



Калибровочный газ	Диапазон температур
Водород (H <sub>2</sub> )	20–30 К
Неон (Ne)	25–36 К
Аргон (Ar)	81–104 К
Ксенон (Xe)	164–212 К

Произведена калибровка термометров РТ-100 в диапазоне рабочих температур 20-212К



Благодаря поддержанию температурного режима работы предусилителей на уровне 140K удалось повысить чувствительность до  $\sim 25\text{keV}$ , а так же понизить паразитный теплоприток  $\sim$  на 3 Вт



- ❑ Разработана и создана система поддержания термодинамических условий криогенной время-проекционной камеры при температуре 31К и давлении 5бар со стабильностью  $\pm 0.1$  К и  $\pm 0.01$  бар, соответственно.
- ❑ Разработана и создана система поддержания криогенных условий работы преусилителей при стабильной температуре 140К
- ❑ Разработана и создана установка метрологического обеспечения термометрии эксперимента в диапазоне 20-212 К.
- ❑ Создание криогенной ректификационной колонны для получения изотопно-чистого дейтерия с содержанием HD  $\sim 100$  ppb..
- ❑ Создание криогенной циркуляционной системы для непрерывной очистки рабочего газа центрального детектора (дейтерия) от химических примесей на уровне  $\sim 1$  ppb.
- ❑ Создание программно-аппаратного комплекса на базе микроконтроллера для чтения и анализа хроматографических данных.
- ❑ Создание системы калибровки хроматографических измерений химической чистоты дейтерия в диапазоне  $\sim 1$  ppb.

Использование представленных в работе систем позволило произвести набор статистических данных в размере  $10^{10}$  событий.



- ❑ Cryogenic Distillation Facility for Isotopic Purification of Protium and Deuterium; Rev. Sci. Instrum. 86, 125102 (2015)
- ❑ Труды 64 международной конференции «ЯДРО-2014» (Фундаментальные проблемы ядерной физики, атомной энергетики и ядерных технологий), июль 2014, Республика Белоруссия, Минск.
- ❑ Криогенная установка для прецизионной калибровки датчиков температуры; Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. Т16 №5.
- ❑ Труды конференции 1st IIR international Conference Cryogenics and Refrigeration Technology, june 2016, Romania, Bucharest.
- ❑ Measurement of trace impurities in ultra pure hydrogen and deuterium at the parts-per-billion level using gas chromatography; NIM A 880 (2018) pp 181-187
- ❑ Программно-аппаратный комплекс хроматографического детектора теплопроводности для эксперимента MuSun; Изв. Вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60, № 11 с. 1088-1091.



Petersburg Nuclear Physics Institute, Russia



University of Illinois at Urbana-Champaign, USA



Paul Scherrer Institute, Switzerland



University of Kentucky, Lexington, USA



Boston University, Boston, USA



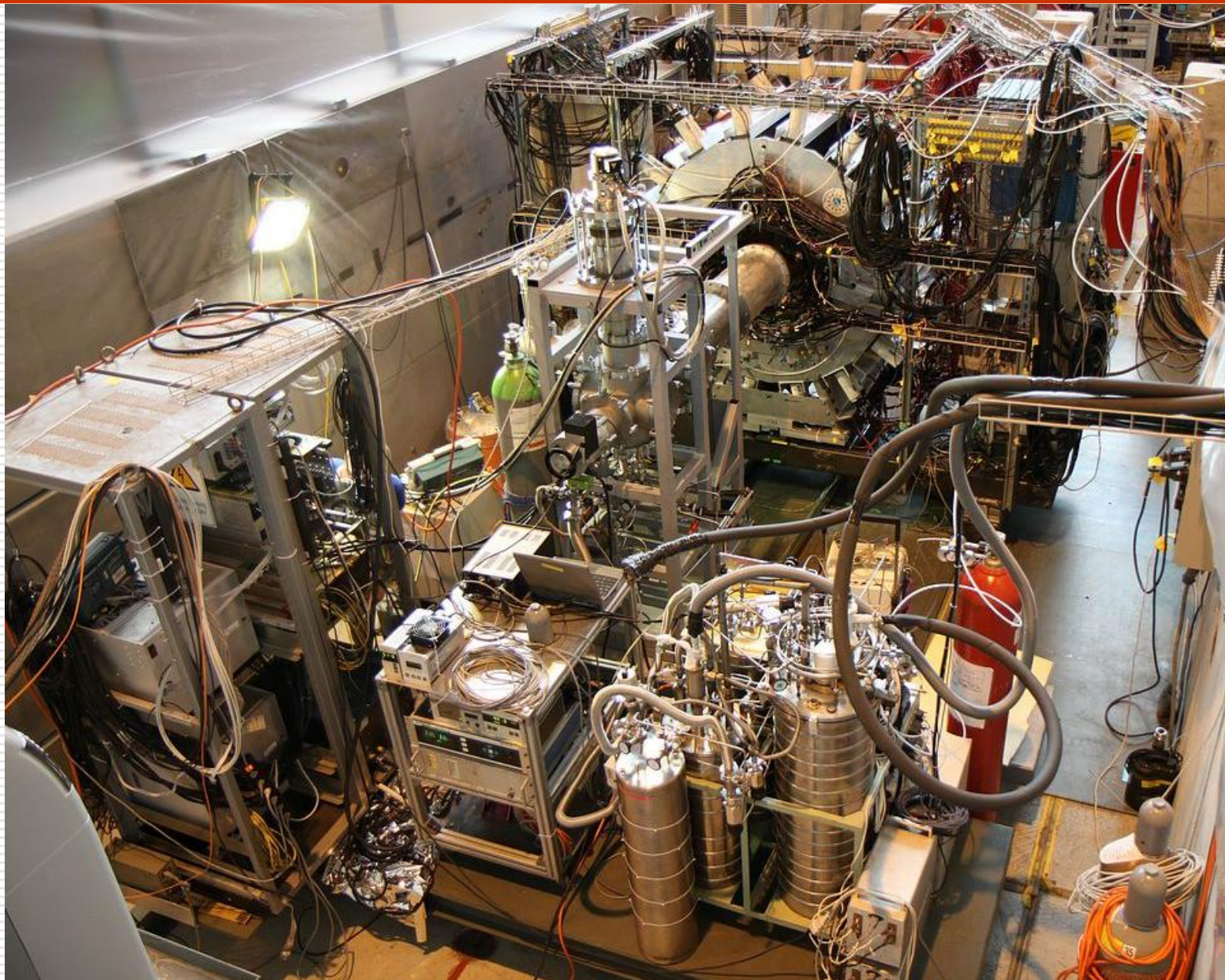
Universite Catholique de Louvain, Belgium



Regis University, Denver, USA



University of South Carolina, Columbia, USA





Спасибо за внимание.