

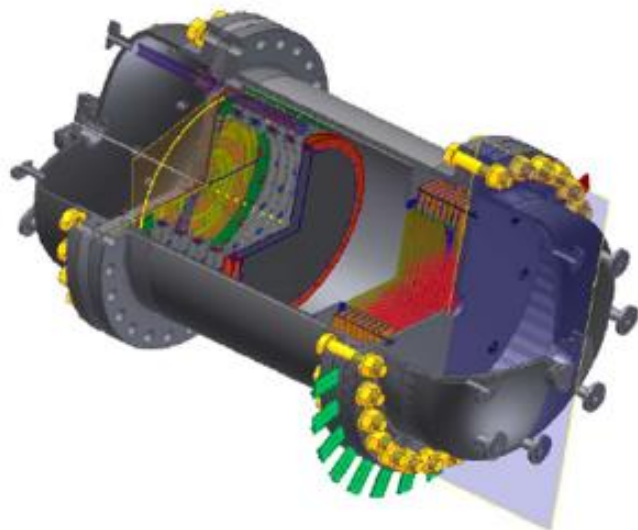


## LXXIV International conference Nucleus-2024: Fundamental problems and applications

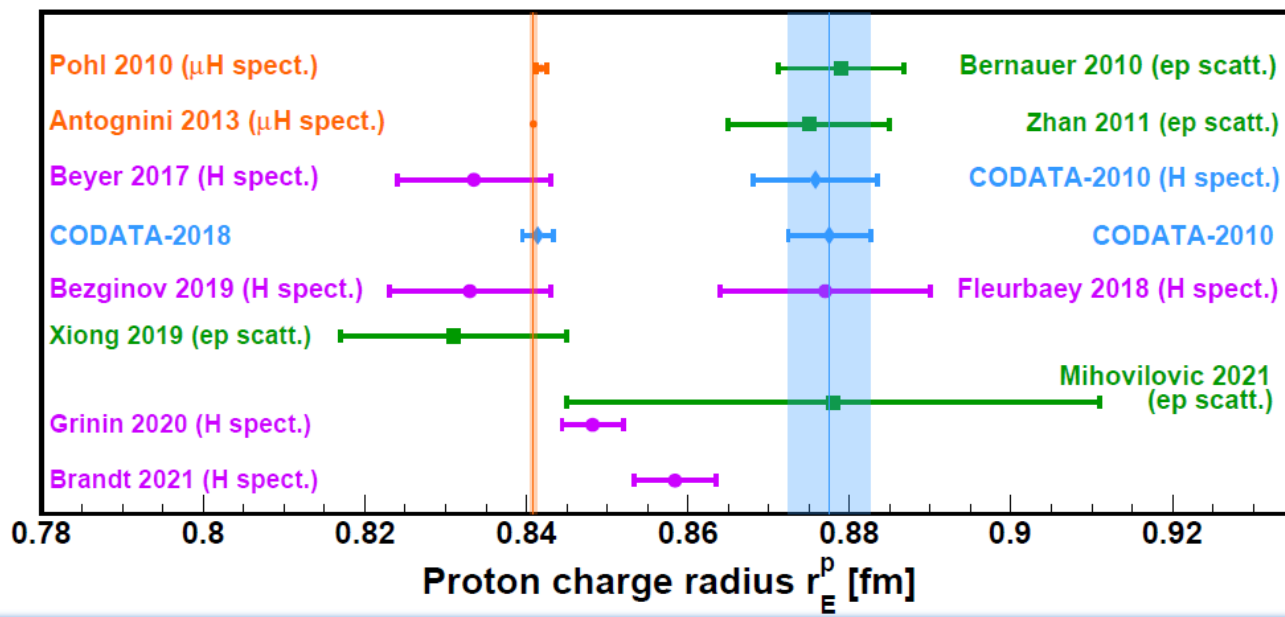
1-5 July, 2024  
Dubna

# Экспериментальная установка для прецизионного измерения зарядового радиуса протона

*Г.Гаврилов, Б.Бочин, А.Васильев, М.Взнуздаев, Н.Грузинский,  
А. Дзюба, Л.Коченда, П.Кравцов, П.Кравченко,  
П.Неустроев, Е.Маев, В.Трофимов, В.Фотьев*





- Мотивация
- Методика эксперимента
- Экспериментальная установка
- Тестовые измерения
- Заключение





Citation: Xiong, W.; Peng, C. Proton Electric Charge Radius from Lepton Scattering. *Preprints* 2022, 1, 0. <https://doi.org/>

Радиус заряда протона определенный на основе ер-упругого рассеяния, экспериментов по спектроскопии водорода, а также компиляции мировых данных CODATA с 2010 года.

Мюонная спектроскопия - оранжевые точки 

Обычная водородная спектроскопия - фиолетовые точки 

ер-рассеяние электронов - зеленые квадраты 

компиляция CODATA – голубые ромбы 

“It is highly unlikely that muonic hydrogen theory, and Lamb shift theory, could provide explanations for the proton radius puzzle, since they are well under control. From the experimental side, the situation regarding the proton radius may be less clear than commonly thought. **Electron versus muon scattering experiments could shed light.**”

**Измерения сечения рассеяния при условиях:**

область более низких значений

измерение абсолютного сечения в единых экспериментальных условиях

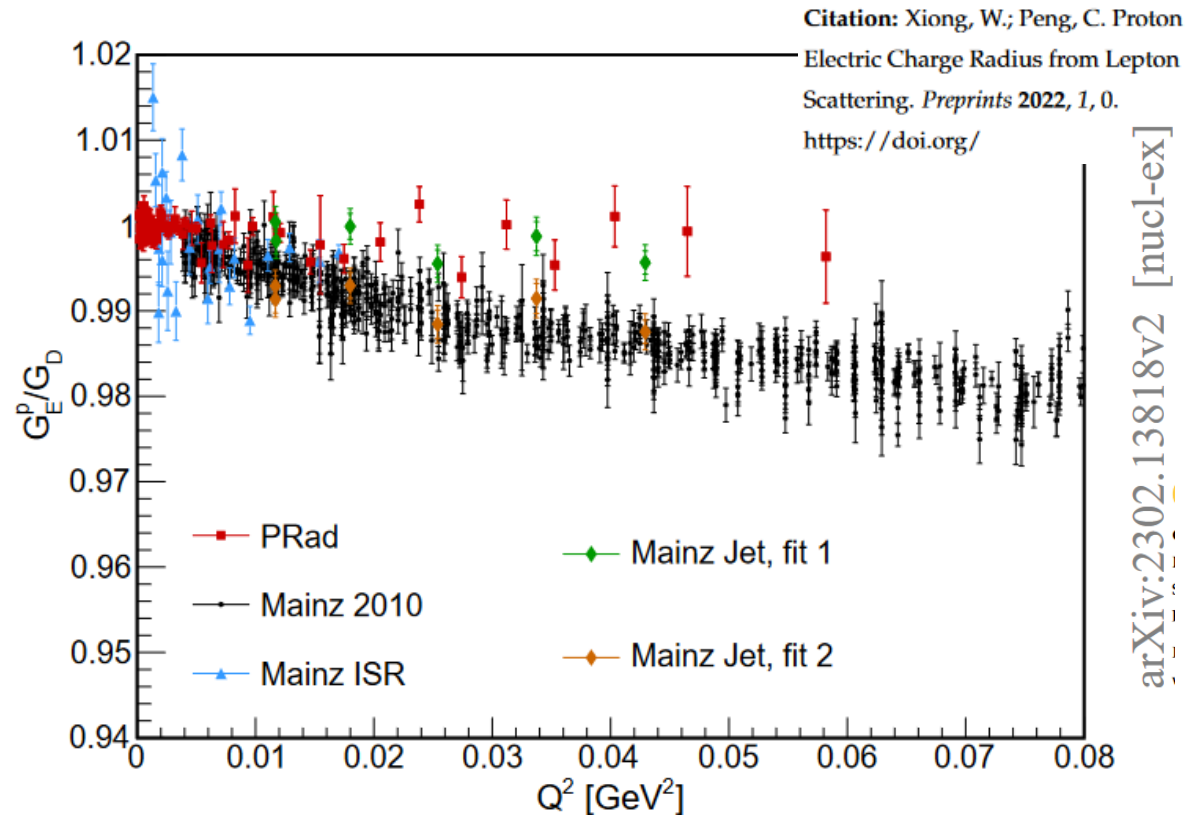
30.06.2024

ЯДРО 2024, Дубна, Г.Е. Гаврилов

Proton Radius: A Puzzle or a Solution!  
Ulrich D. Jentschura *Journal of Physics: Conference Series* 2391 (2022) 012017

Результаты коллаборации PRad (Jlab, 2019г) продемонстрировали радиус 0.84. Однако поведение электрического форм-фактора  $G_E^p$  (Фурье-образа распределения заряда внутри протона,  $\blacksquare$ ) сильно отличается от измерений, выполненных в Майнце (MAMI)

В области малых квадратов переданных импульсов эти два измерения противоречат друг другу. На рисунке отношение измеренных значений форм-фактора к дипольной параметризации.



**Во-первых**, требуется измерить зарядовый радиус протона в экспериментах по рассеянию электронов, увеличив точность измерения. При этом надо уменьшить влияние так называемых радиационных поправок на неопределенность измерения.

**Во-вторых**, критически важно измерить поведение электрического форм-фактора в районе малых  $Q^2$ .

Цель эксперимента PRES – измерение дифференциального сечения упругого ер-рассеяния с высоким разрешением в области малой передачи импульса:

$$0.002 < Q^2 < 0.04 \text{ ГэВ}^2$$

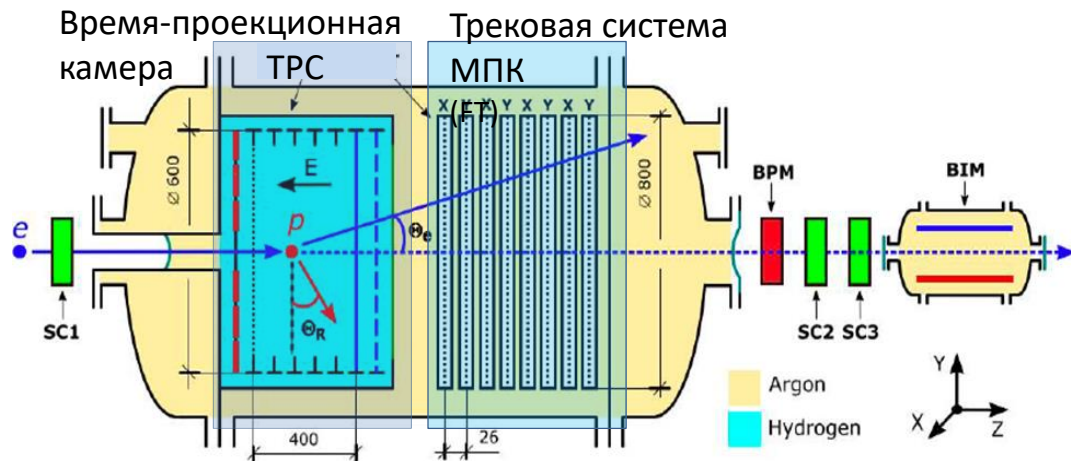
$\geq 100$  экспериментальных точек в этом диапазоне обеспечат абсолютную точность  $d\sigma/dt$  на уровне 0.2%. Это позволит извлечь радиус протона с точностью 0.6%.

## ТРЕБОВАНИЯ:

Стабилизация всех экспериментальных условий:

- ❑ давление, температура, примеси газов;
- ❑ однородность и стабильность электрического поля TPC, точность  $v_{\text{drift}}$  0.01%;
- ❑ стабильность цепи формирования и усиления сигналов; разброс коэффициента усиления электроники  $\leq 1\%$ .
- ❑ прецизионное расположение анодных и катодных проволок: абсолютная линейная шкала с точностью 0.02%

- ❑ **Активная мишень (TPC):** водородная время-проекционная камера высокого давления (20 бар)
- ❑ **Главное преимущество:** независимое от энергии  $e^-$  определение величины квадрата переданного импульса -  $Q^2$
- ❑ **Измеряемые параметры:** энергия и угол вылета протона отдачи



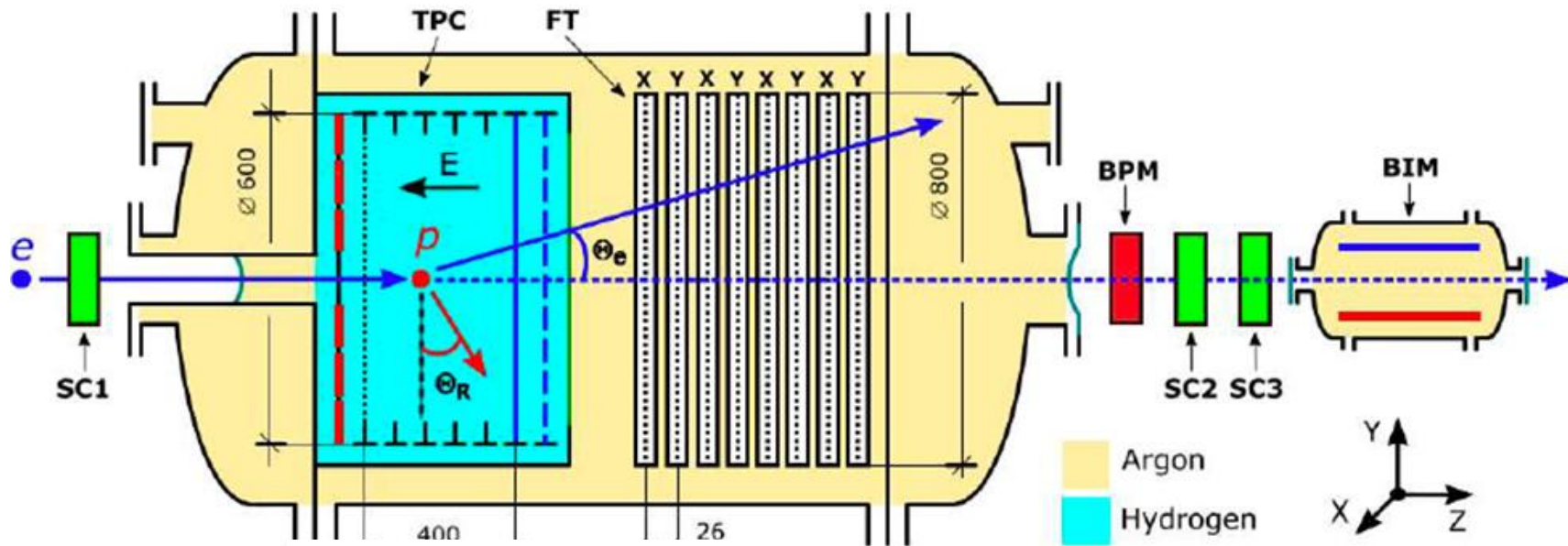
### Modules:

- TPC** - Time Projection Chamber
- FT** - Forward Tracker
- BPM** - Beam Position Monitor
- SC** - Scintillation Counter
- BIM** - Beam Intensity Monitor

### Measured quantities:

- Recoil energy  $T_R$
- Recoil angle  $\theta_R$
- Scattering angle  $\theta_e$
- Vertex coordinate  $Z$

- ❑ **Трековая система (FT):** 8 МПК с катодным съемом информации
- ❑ **Назначение:** восстановление трека рассеянного электрона для энергетической калибровки TPC
- ❑ **Измеряемые параметры:** угол рассеянного электрона



$$\langle r_E^{p^2} \rangle = -\frac{6}{G_E^p(0)} \frac{dG_E^p(Q^2)}{dQ^2} \Big|_{Q^2=0}$$

measured quantities:

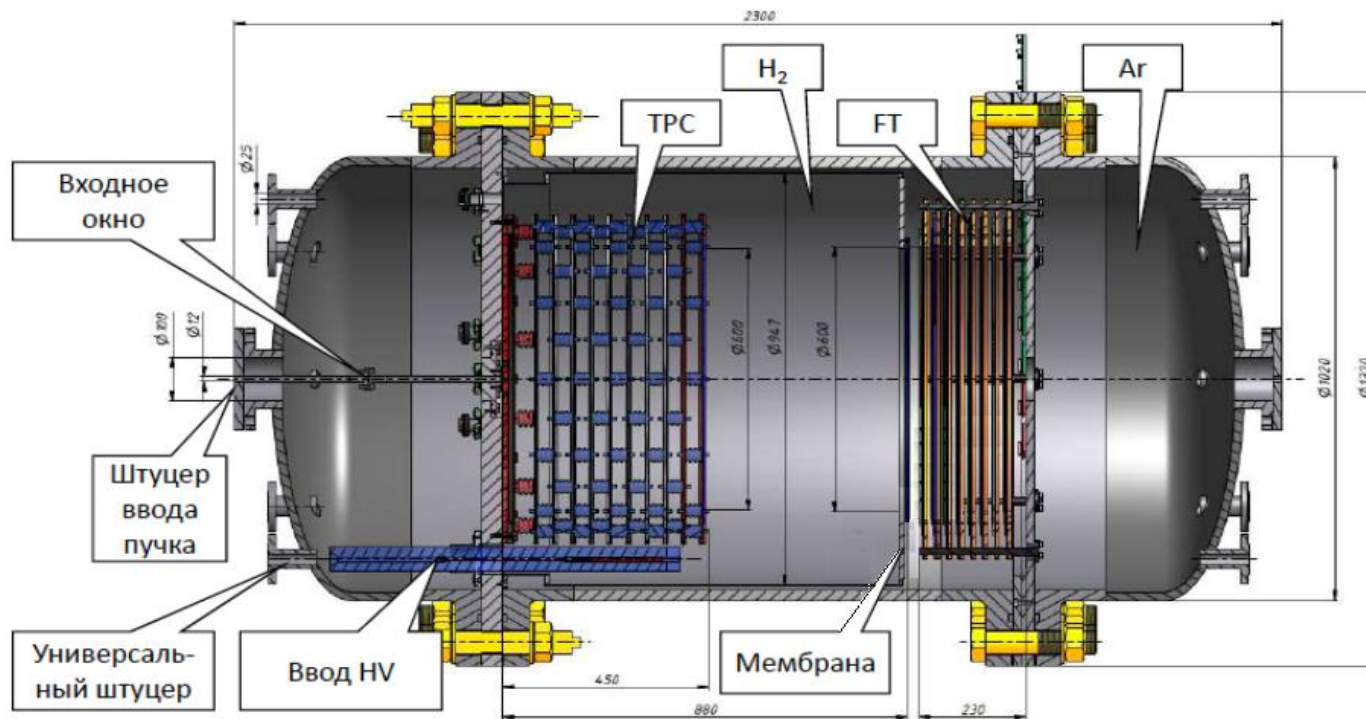
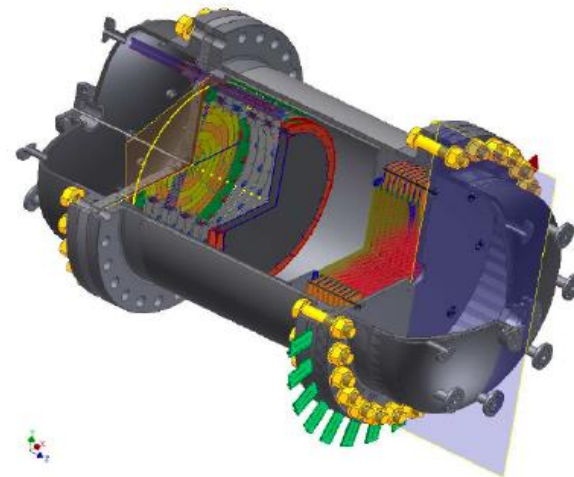
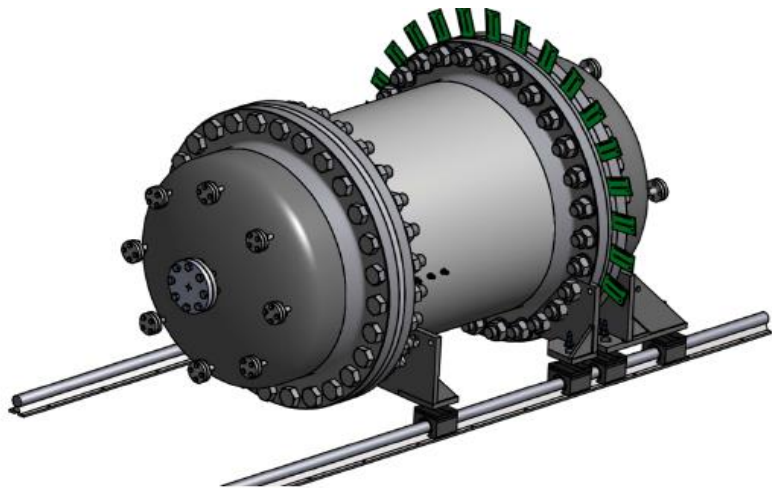
- TPC** - Time
- FT** - Forward Tracker
- BPM** - Beam Position Monitor
- SC** - Scintillation Counter
- BIM** - Beam Intensity Monitor
- coil energy  $T_R$
- Recoil angle  $\Theta_R$
- Scattering angle  $\Theta_e$
- Vertex coordinate  $Z$

Пучок:  
 E=750 МэВ,

МАМИ, Майнц / РФ?

Чтобы извлечь радиус, необходимо измерить с высокой точностью соответствующий форм-фактор –  $F(Q^2)$ , в области квадрата переданного импульса –  $Q^2$ , который асимптотически стремится к  $Q^2 = 0$ , потому что для системы, где  $F(0) \neq 0$ , величину радиуса можно вычислить по формуле:

$$r^2 = -6 \cdot \frac{d \ln F(Q^2)}{dQ^2} \Big|_{Q^2=0}$$

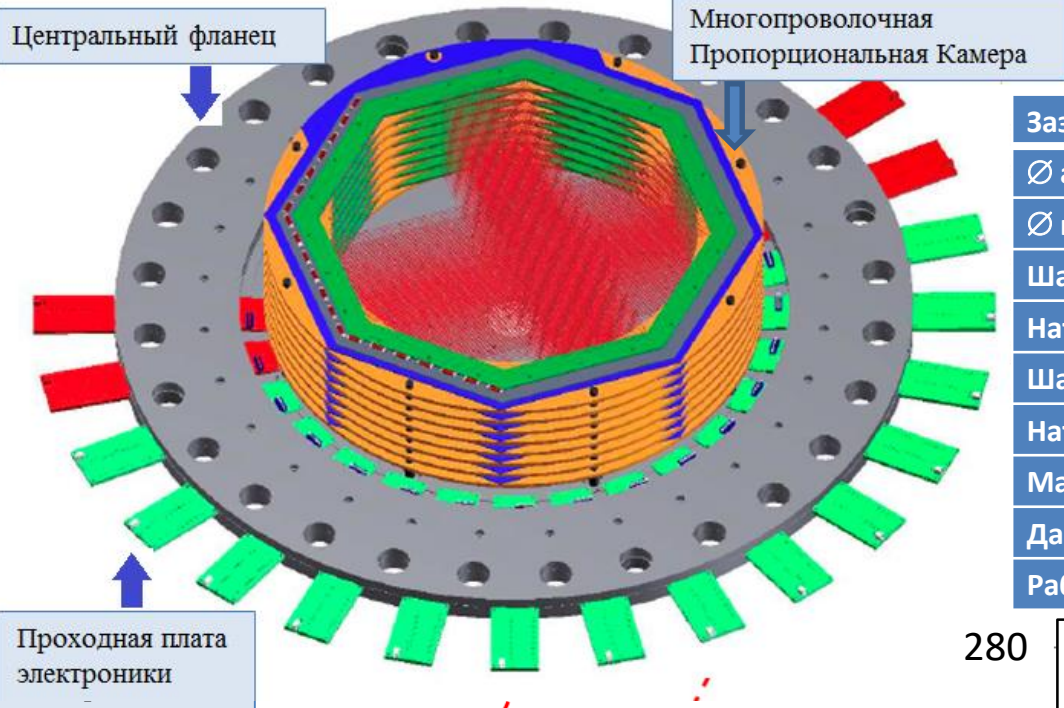




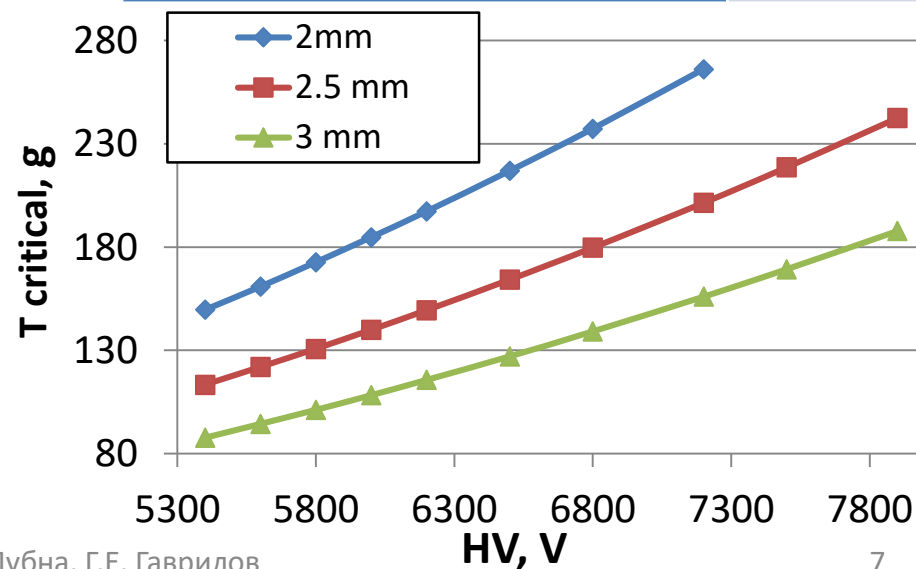
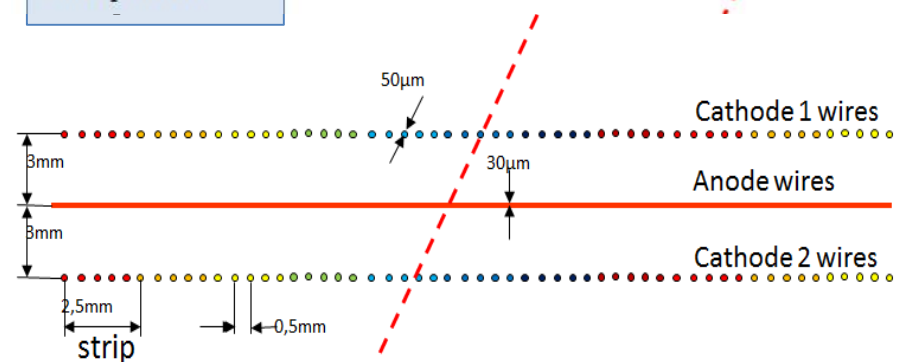
## Экспериментальная установка: Трекер рассеянных электронов

8 МПК с катодным съемом информации

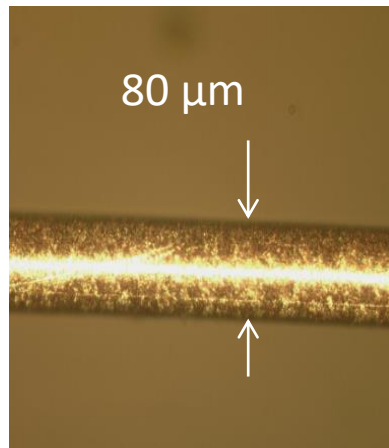
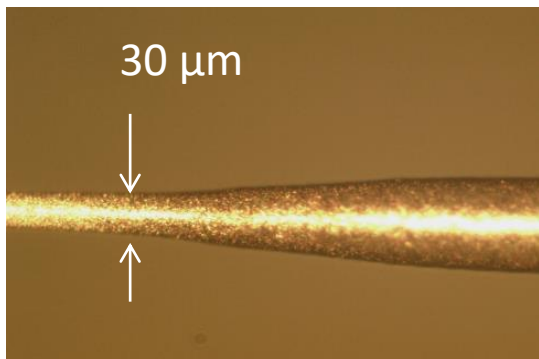
### Forward Tracker



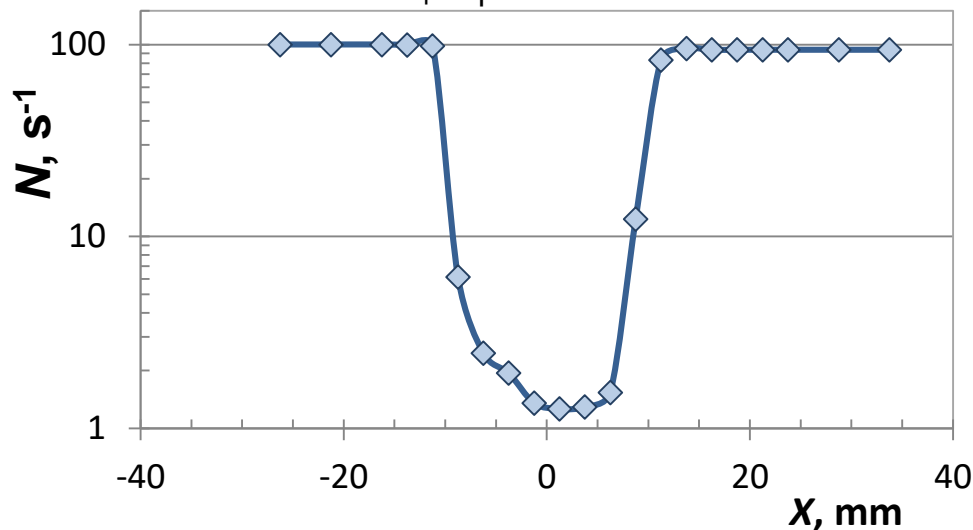
Зазор анод-катод – L	3.0 mm
$\varnothing$ анодной проволоки Au+W – $2r_a$	30 $\mu\text{m}$
$\varnothing$ катодной проволоки Au+W – $2r_k$	50 $\mu\text{m}$
Шаг анодных проволочек – s	3.0 mm
Натяжение анодных проволочек – $T_a$	~110 g
Шаг катодных проволочек – $s_{\text{cath}}$	0.5 mm
Натяжение катодных проволочек – $T_{\text{cath}}$	~120 g
Максимальная длина проволочек – $\ell$	600 mm
Давление рабочей газовой смеси	20 bar
Рабочая газовая смесь	96%Ar + 4%CH4



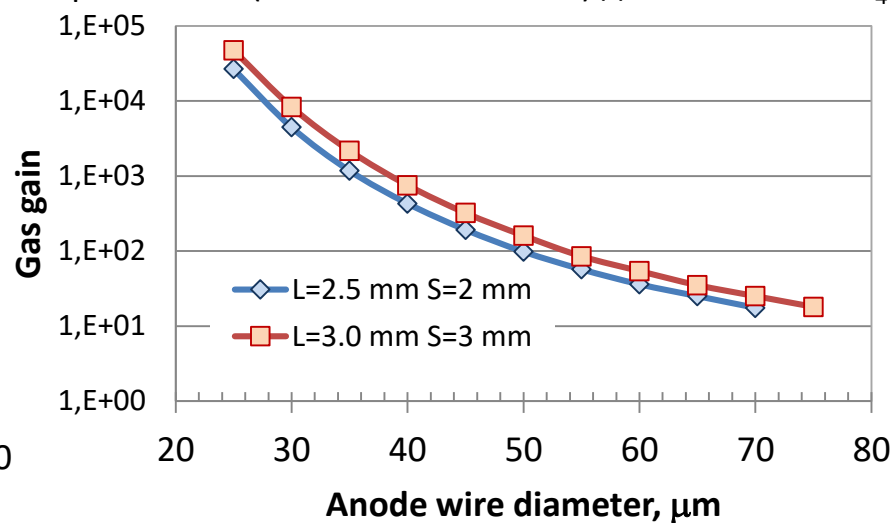
Подавление КГУ в МПК в зоне ( $\varnothing$  2 см) прохождения пучка  $\bar{e}$  путем увеличения диаметра анодных проволок



$N$  – скорость счета от  $^{55}\text{Fe}$  вдоль анодной проволоочки ( $X$ ) в центре МПК



КГУ (Gas gain) в зависимости от диаметра анодной проволоочки (Anode wire diameter) для 96%Ar+4%CH<sub>4</sub>

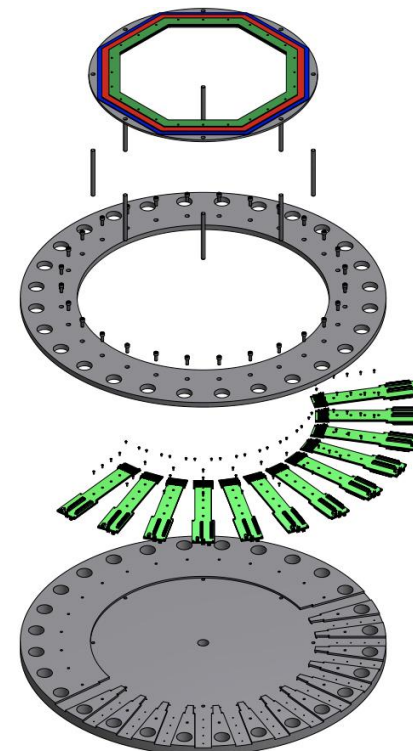
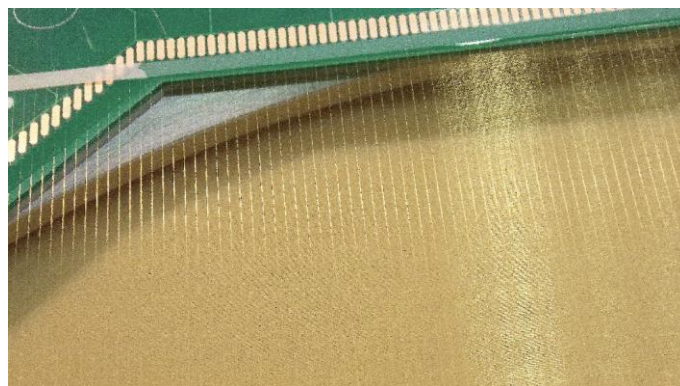
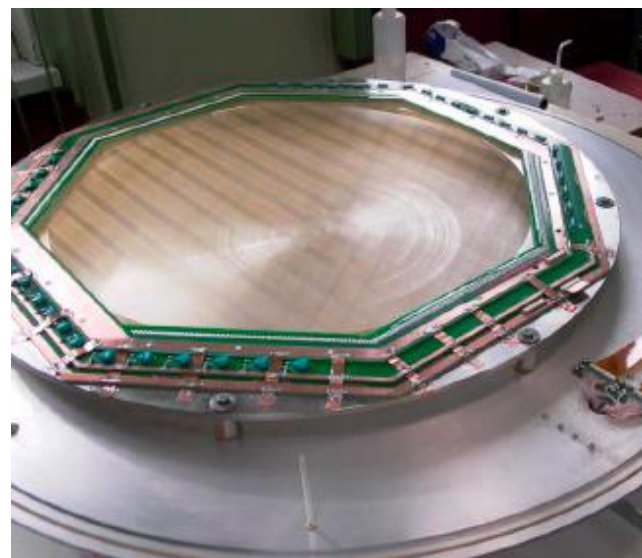


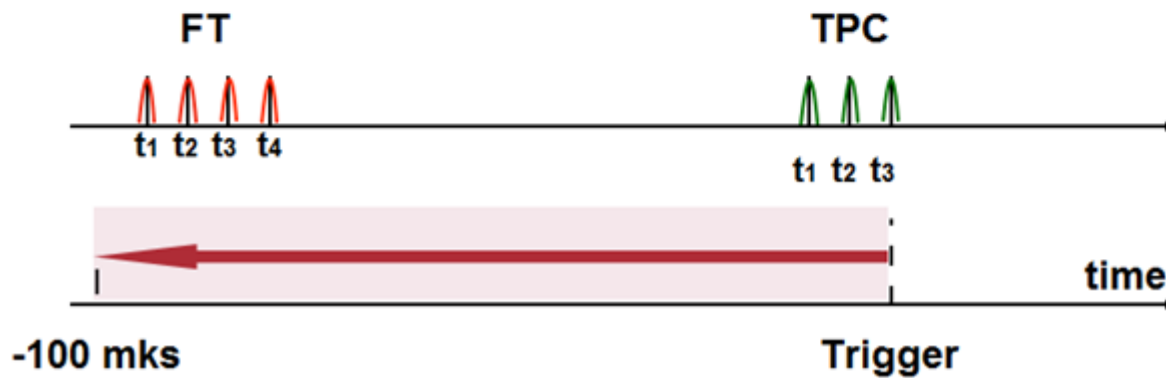
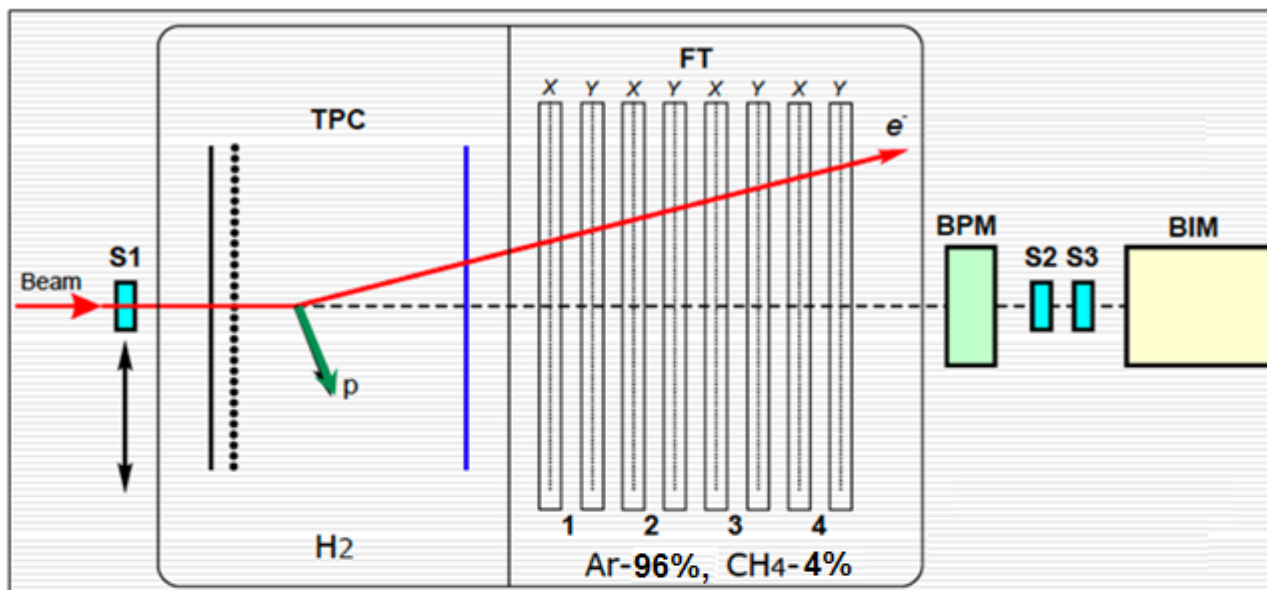


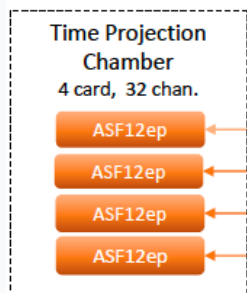
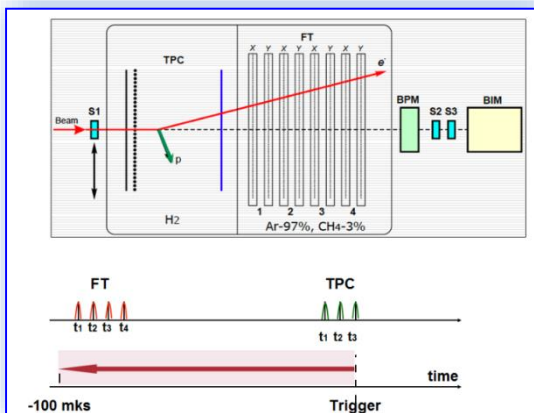
### Главный фланец и вклейка проходных плат



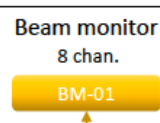
Общий вид камеры







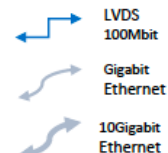
-> Trigger Request, Data, AFLevel  
-< Clock, Trigger, Command, Reset



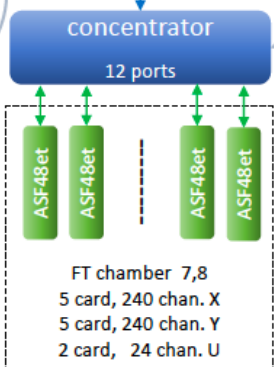
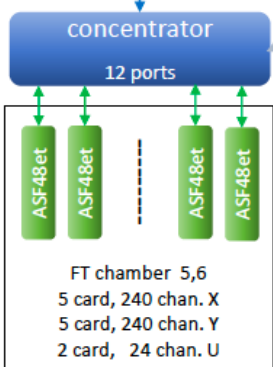
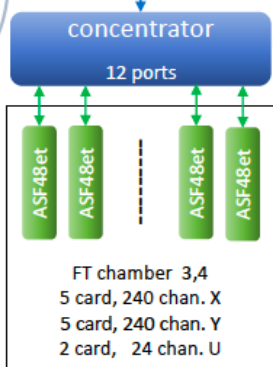
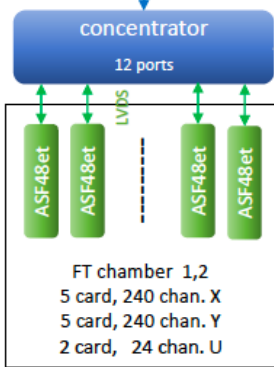
-> Clock, Trigger, Command, Reset  
-< Data

LVDS  
TCP/IP

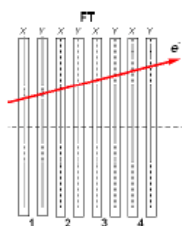
Gigabit Ethernet  
-< Command, Reset  
-> Data

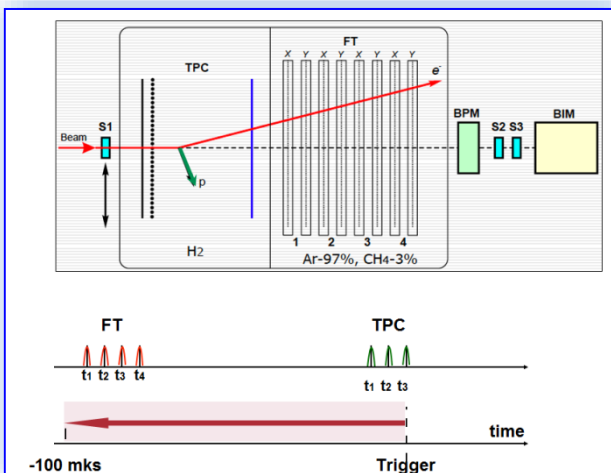
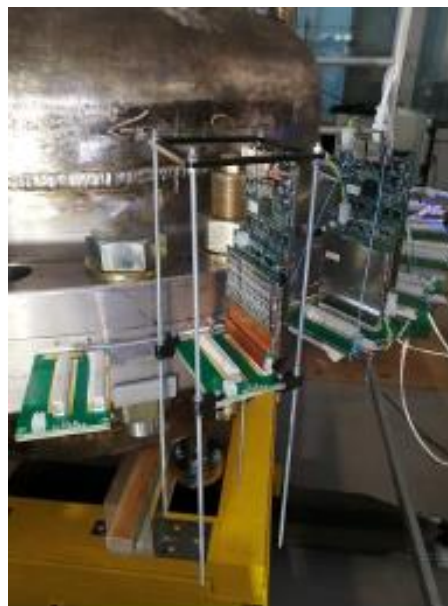
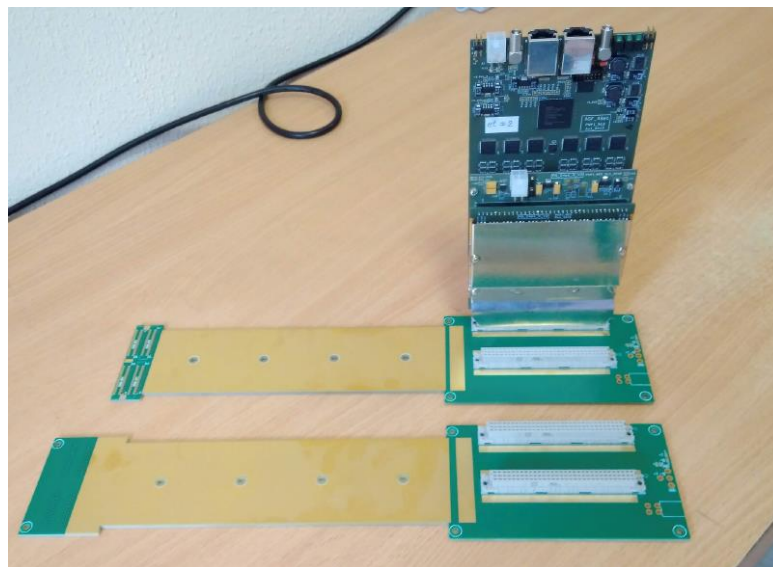
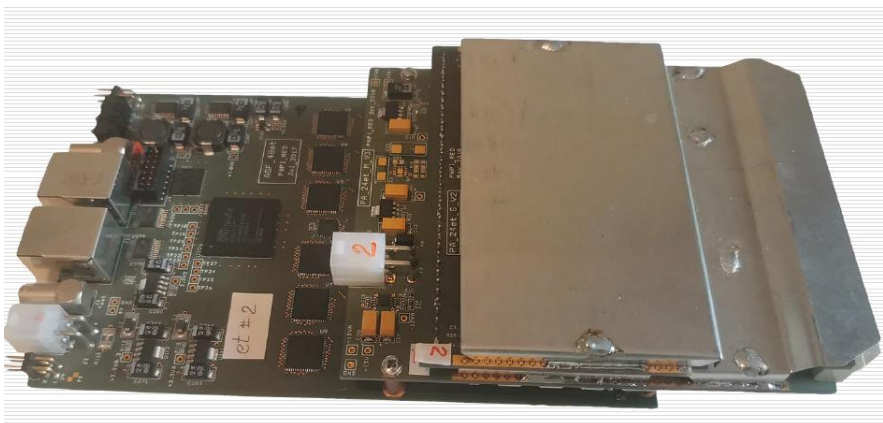


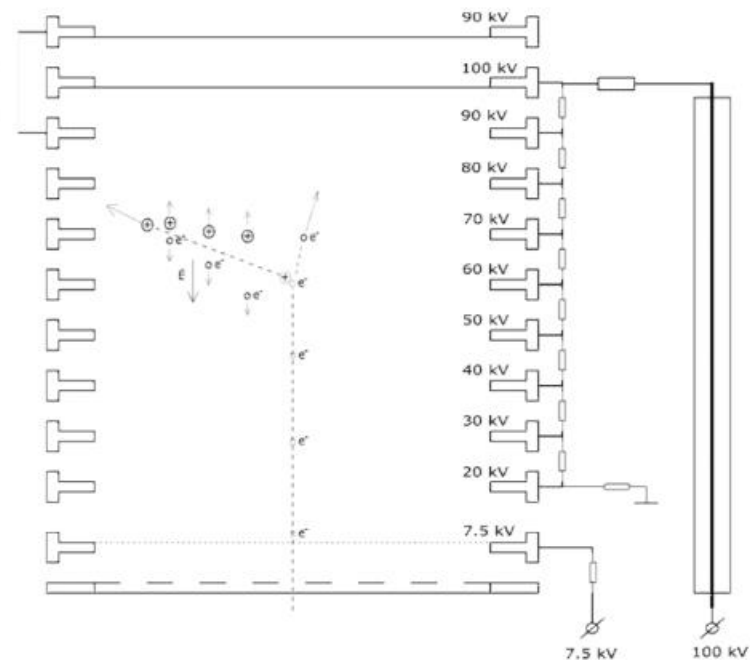
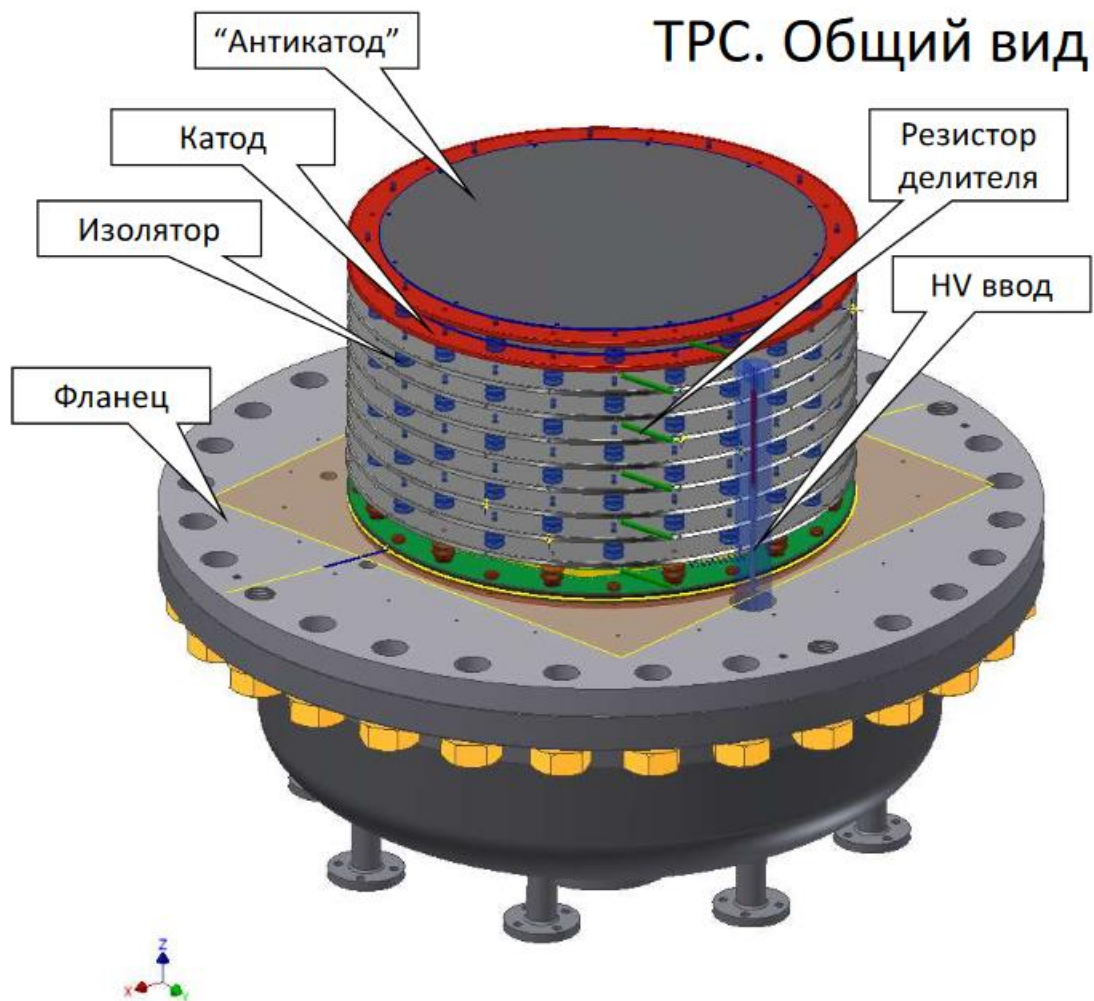
-< Clock, Trigger, Command, Reset  
-> Data, AFLevel

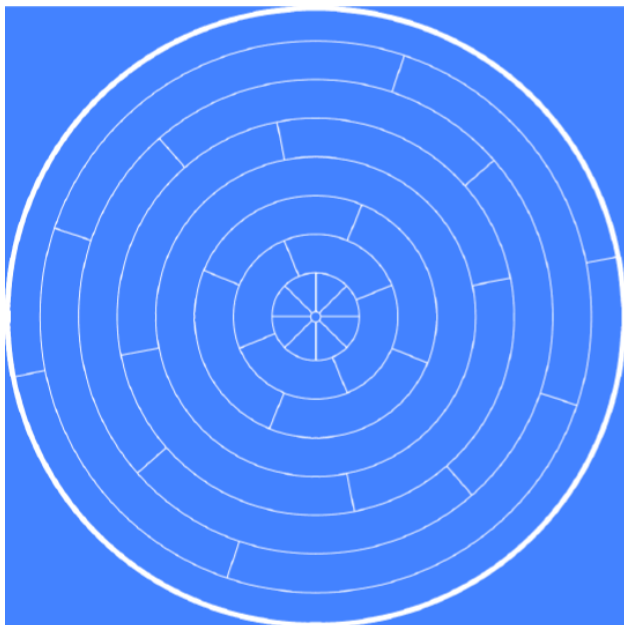


**Forward tracker, 8 MWPC chambers, 4 XY- layers**  
48 boards, 2016 chan.



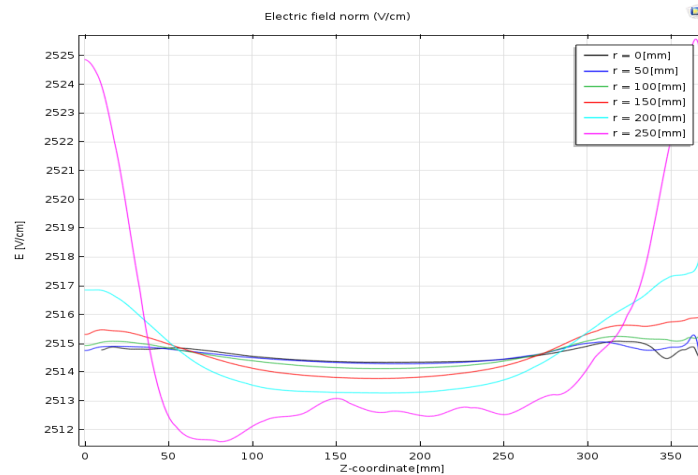
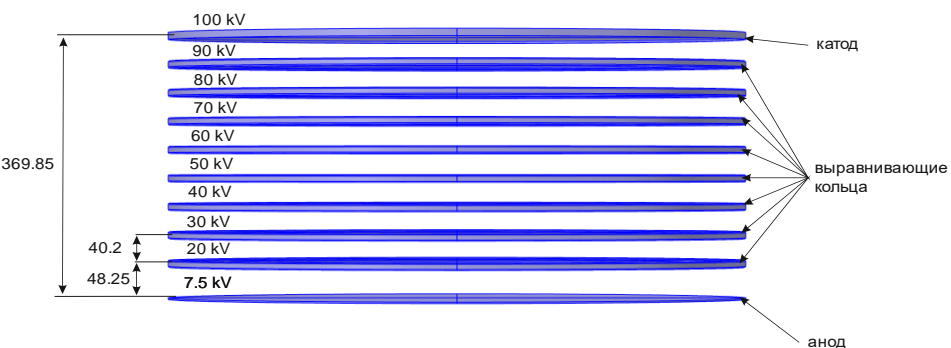
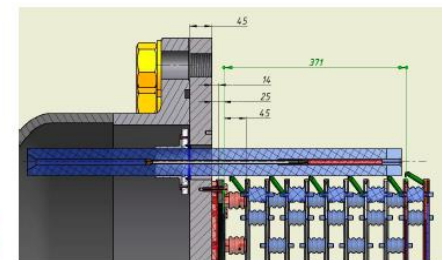
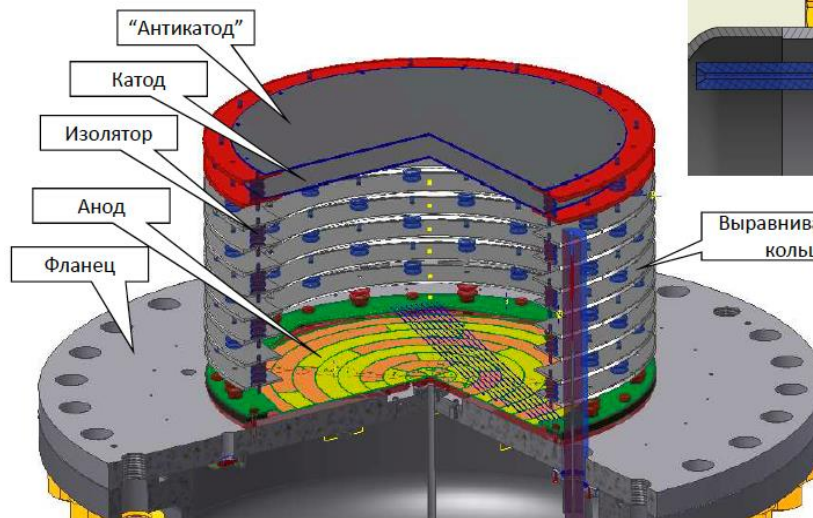


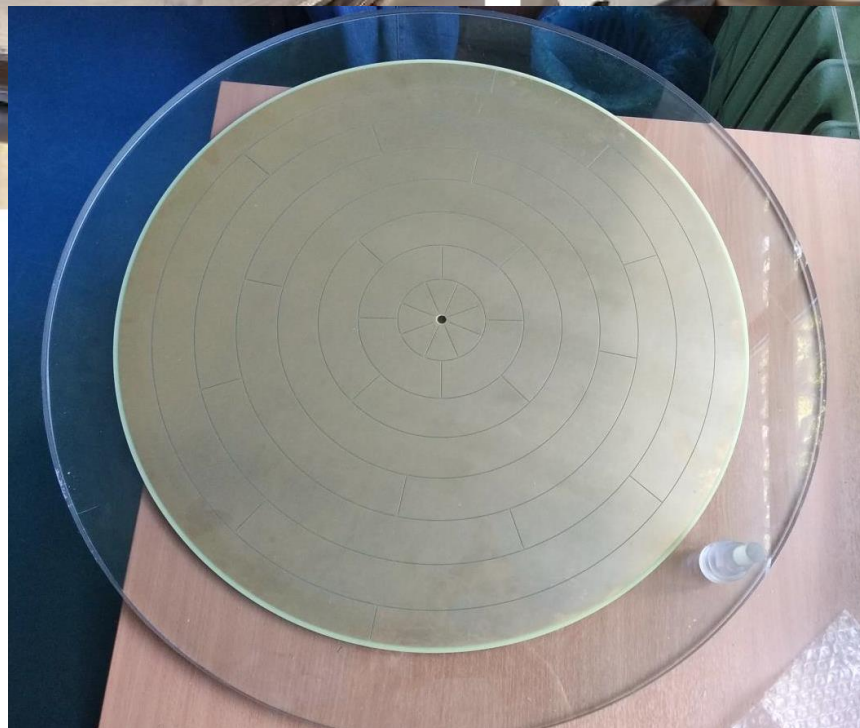
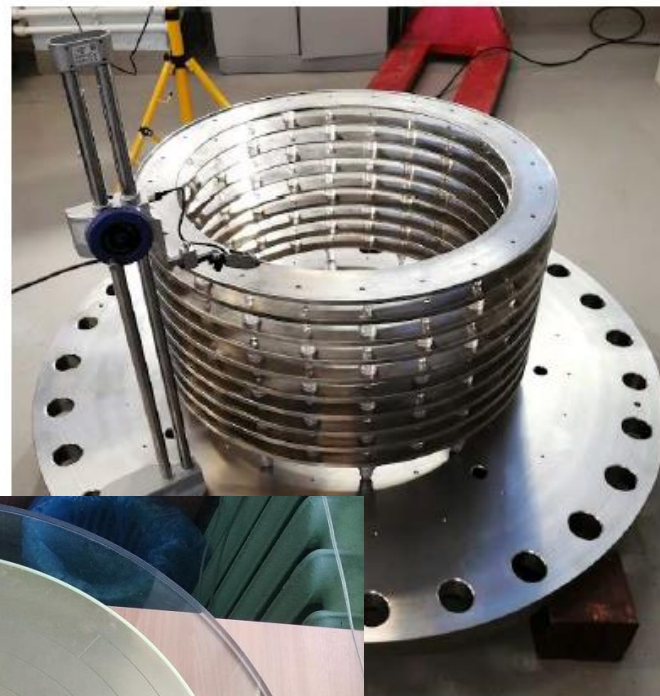
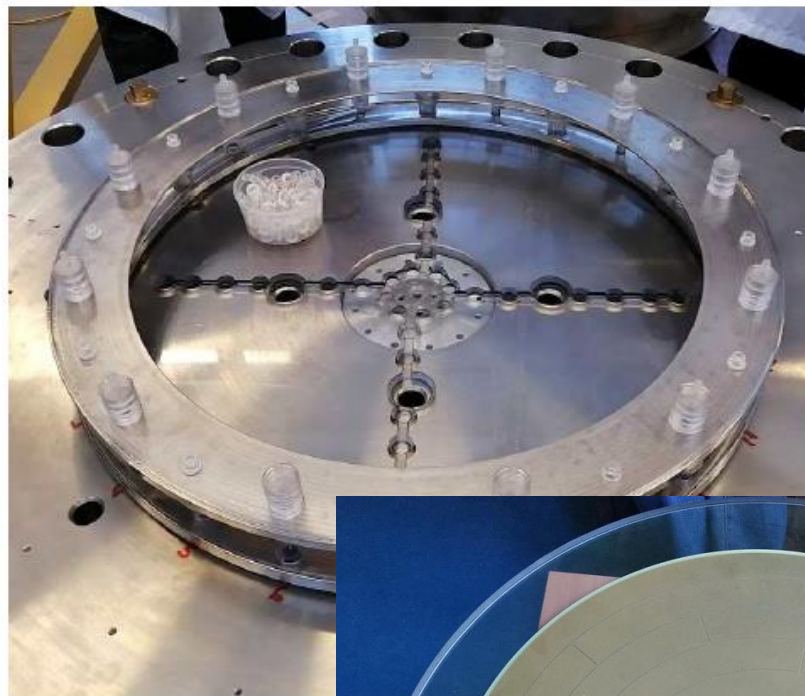




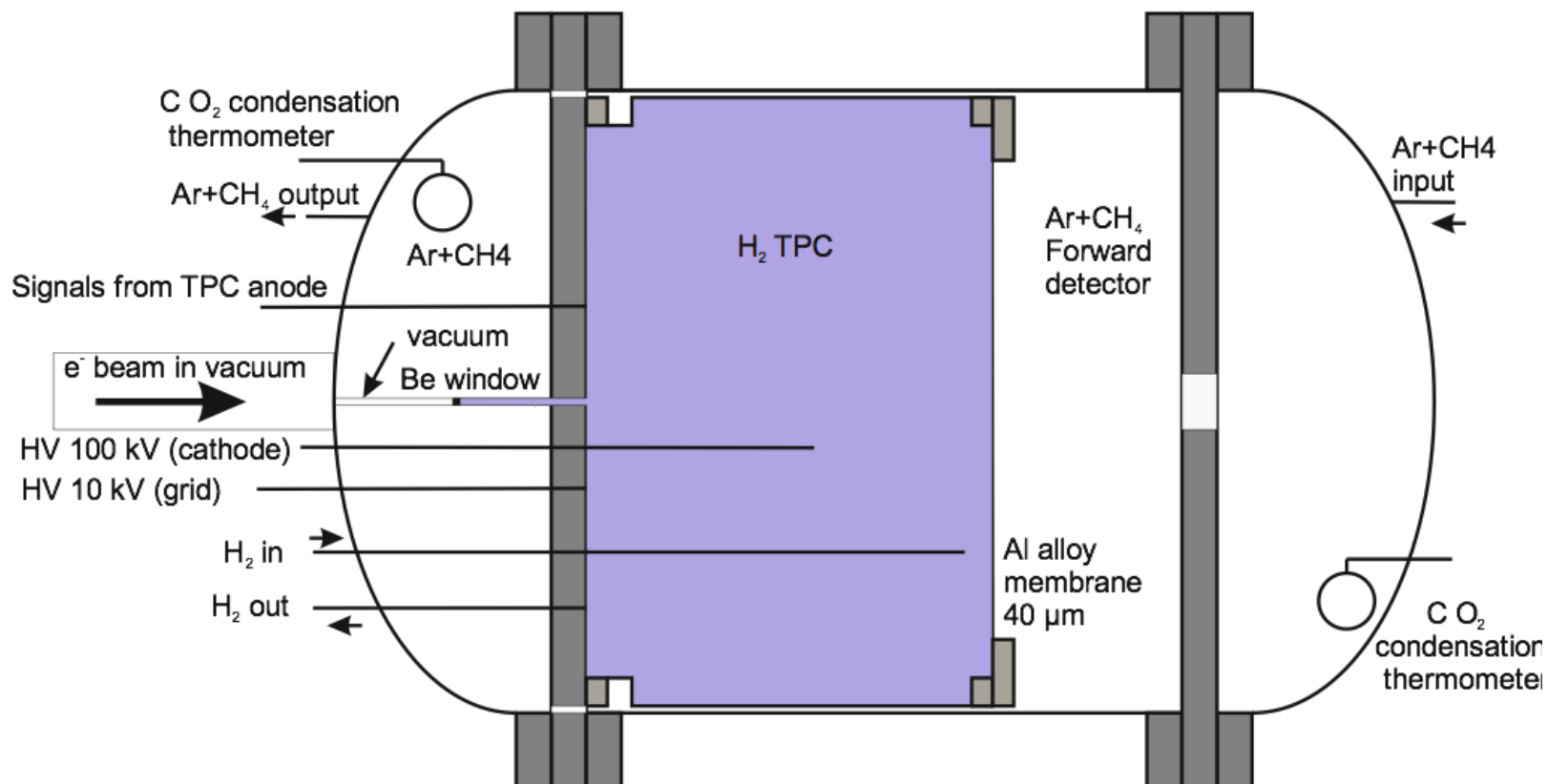
Падовая плоскость  
8 колец/32 элемента

### ТРС. Конструкция





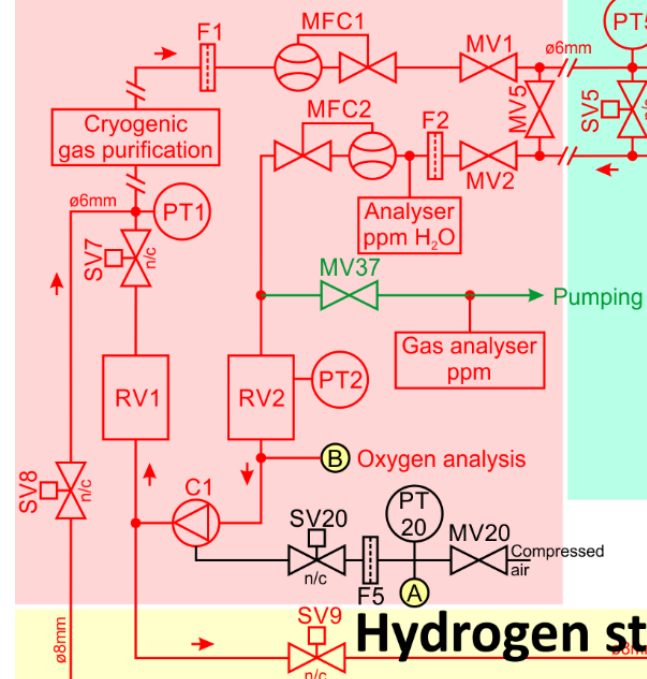
## Концепция “окруженного” водородного объема



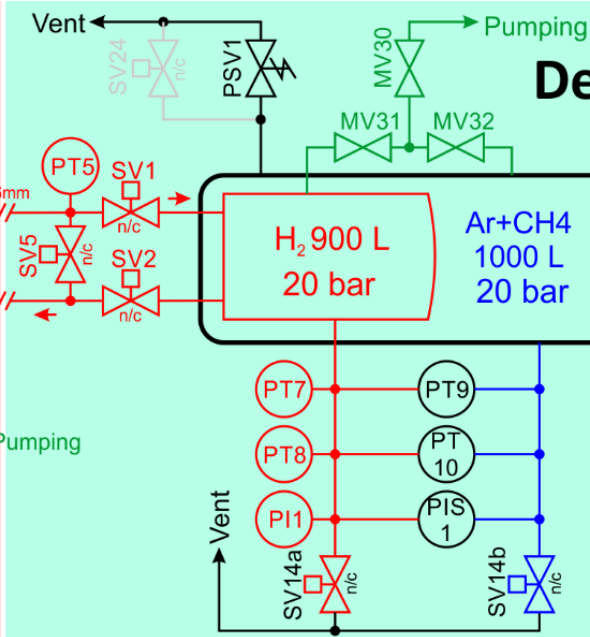




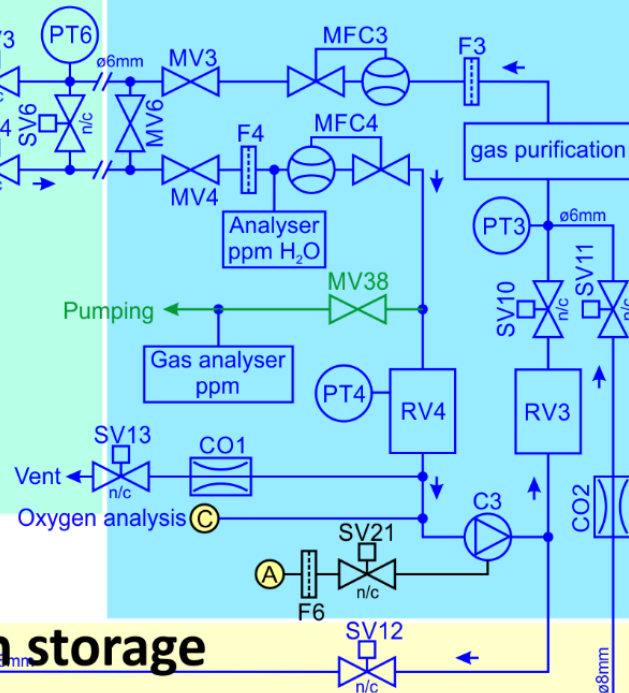
## Hydrogen circuit



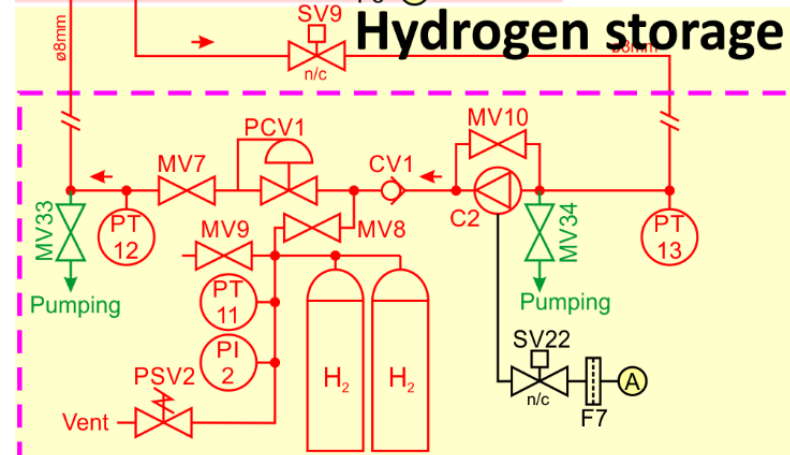
## Detector



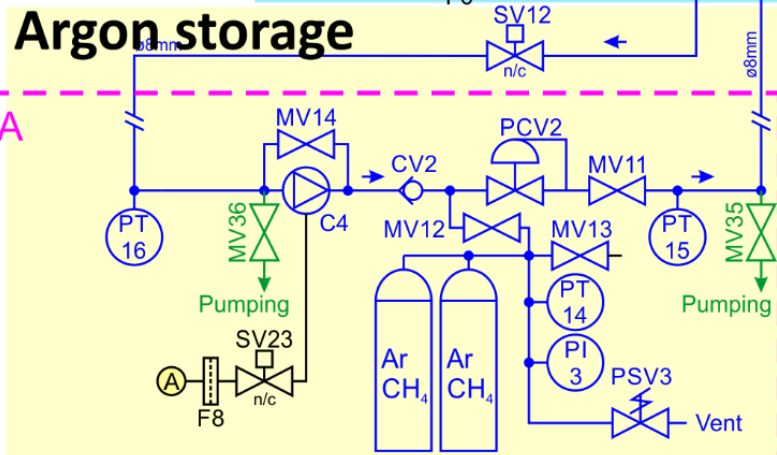
## Argon circuit



## Hydrogen storage



## Argon storage

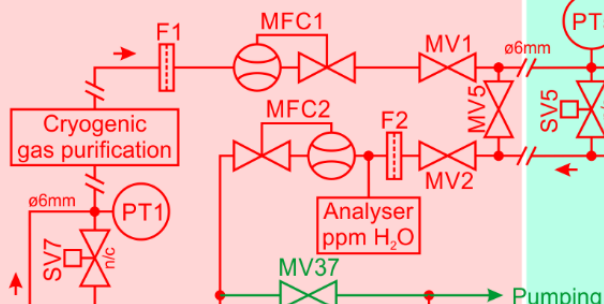


## OUTDOOR AREA

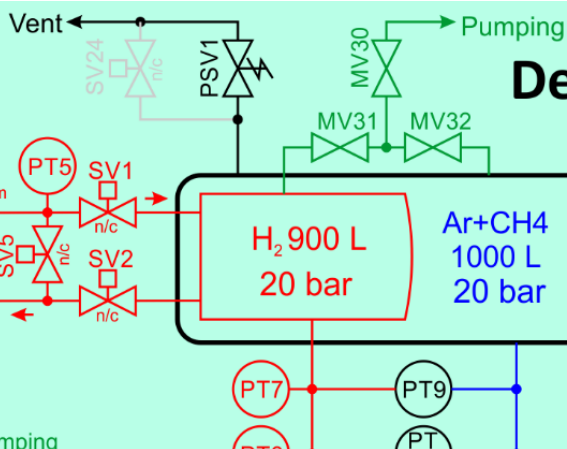
- Legend:**
- SV - solenoid valve
  - MV - manual valve
  - PCV - pressure control valve
  - PSV - pressure safety valve
  - PT - pressure transmitter
  - PI - pressure indicator
  - PIS - pressure indicating switch
  - MFC - mass flow controller
  - CO - calibrated orifice
  - C - compressor
  - F - filter



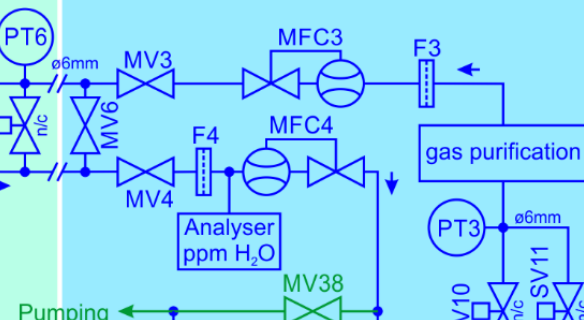
## Hydrogen circuit



## Detector



## Argon circuit



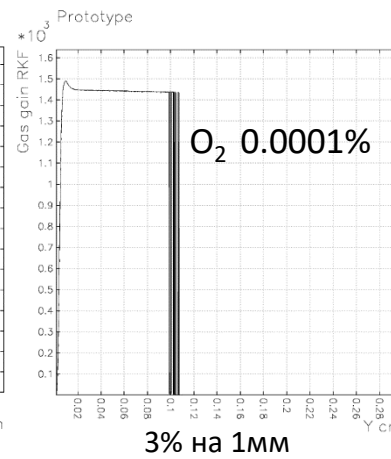
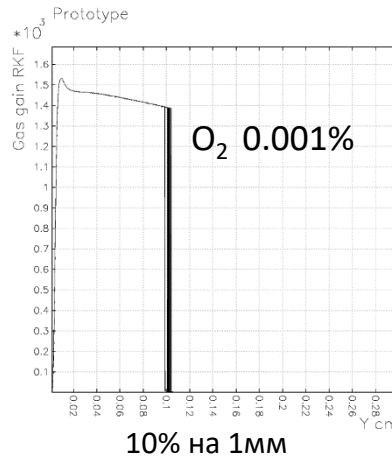
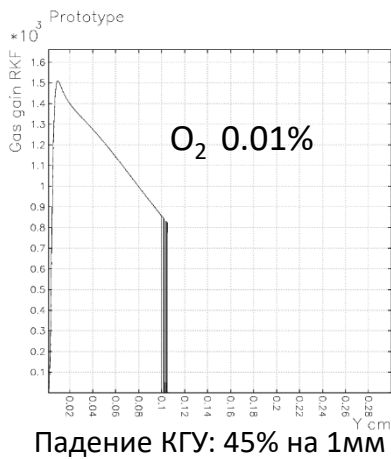
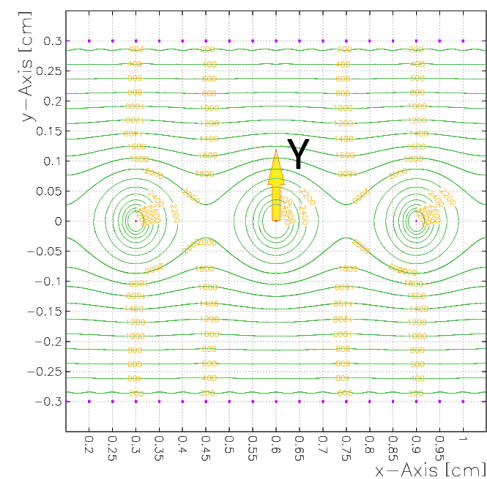
### Parameter

Parameter	Value
Detector volume (TPC chamber)	1000 L
Detector volume (PC chamber)	1000 L
Absolute pressure in the detector	2 – 20 bar
Absolute pressure stability	±5 mbar
Absolute pressure uncertainty	0.01% (2.5mbar)
Maximum differential pressure between TPC and PC chambers	20 mbar
Working differential pressure between TPC and PC chambers	5-10 mbar
Impurity concentration in hydrogen (TPC chamber)	< 100 ppb
Impurity concentration in Ar+CH <sub>4</sub> mixture (PC chamber)	< 10 ppm
Circulation flowrate for each chamber	10-15 slpm
Filling / evacuation flowrate for each chamber	10-15 slpm

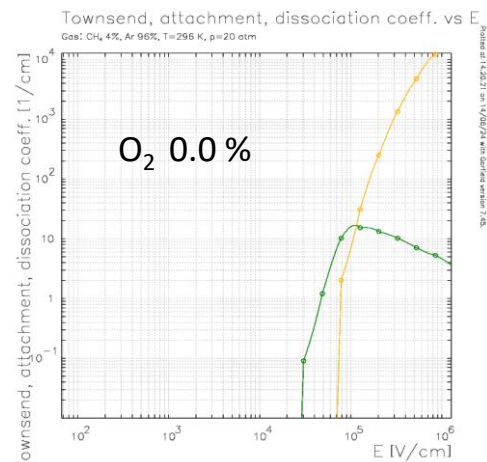
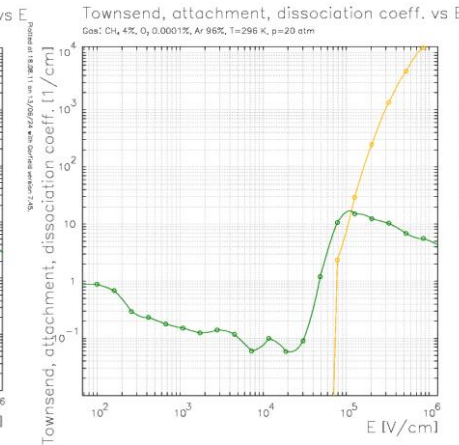
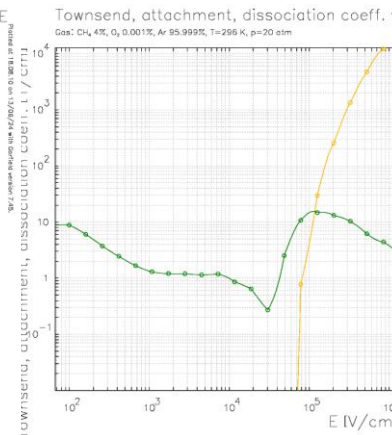
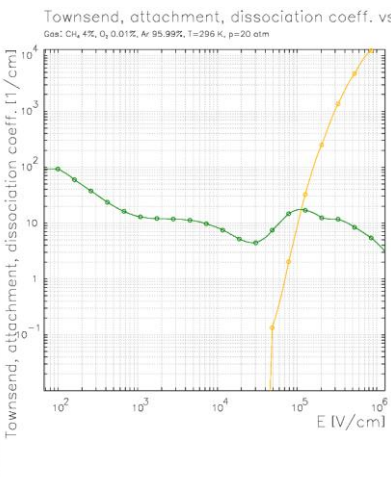


Contours of V

Cell: PROTO-Cell



Коэффициенты Таунсенда и прилипания в зависимости от напряженности поля E при разном содержании O<sub>2</sub> : 0.01%, 0.001% и 0.0001% (1 ppm)

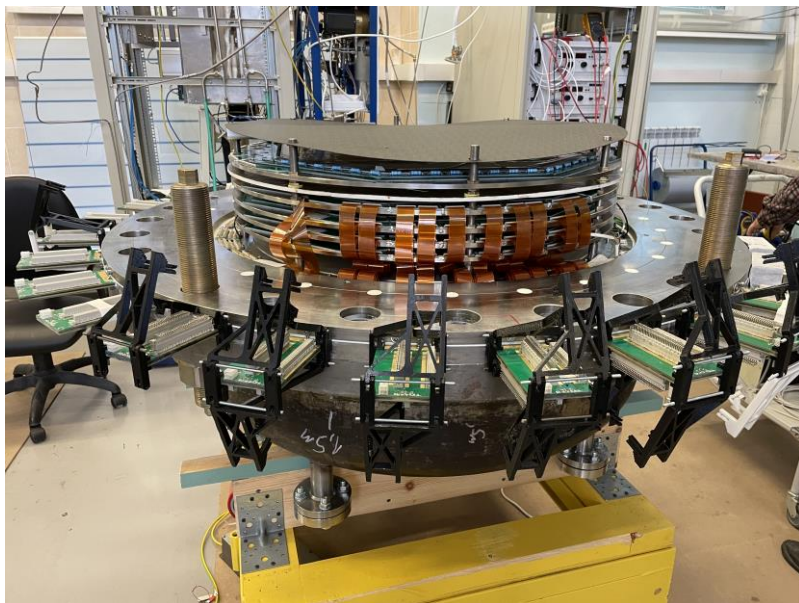


96%Ar + 4% CH<sub>4</sub> 20 bar  
HV = 5350 V

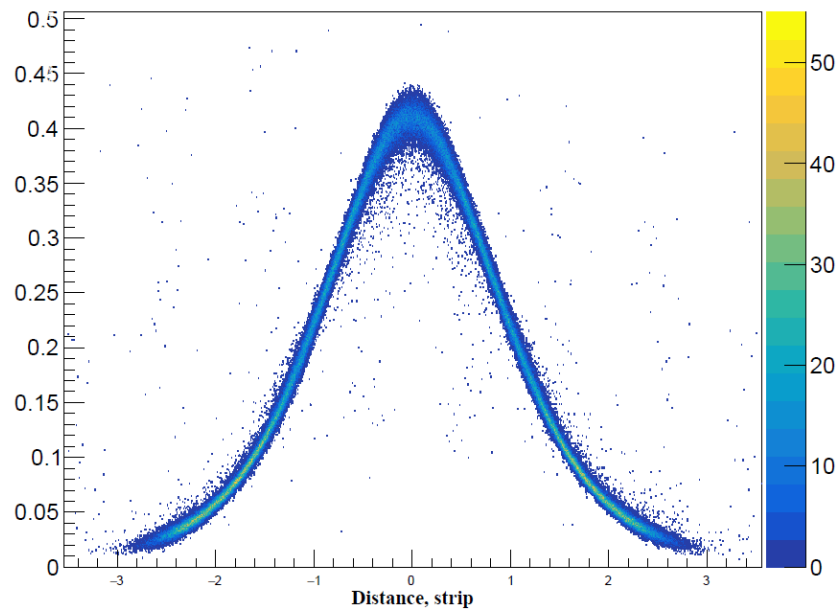
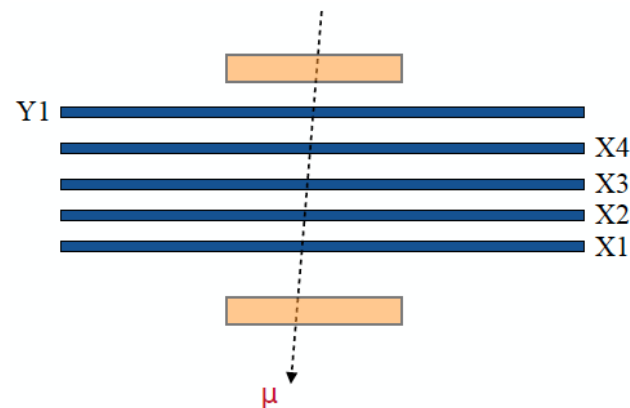


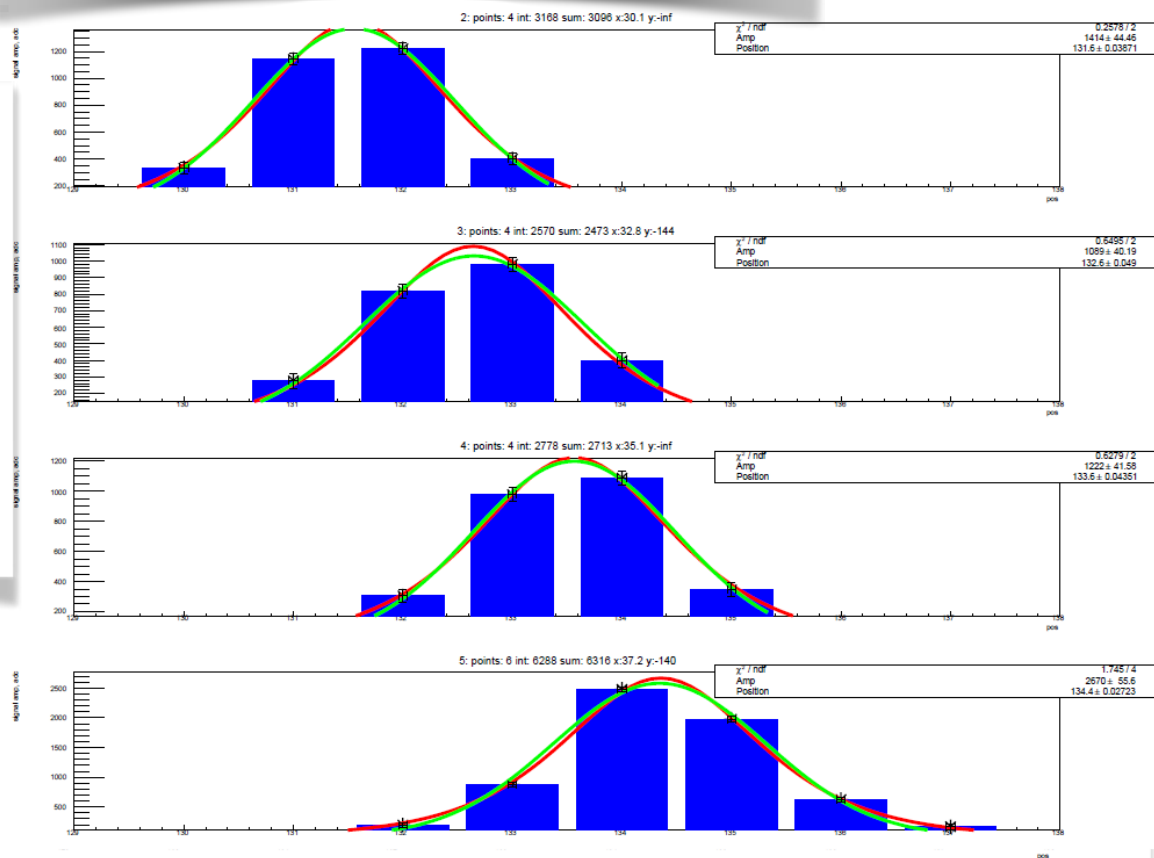
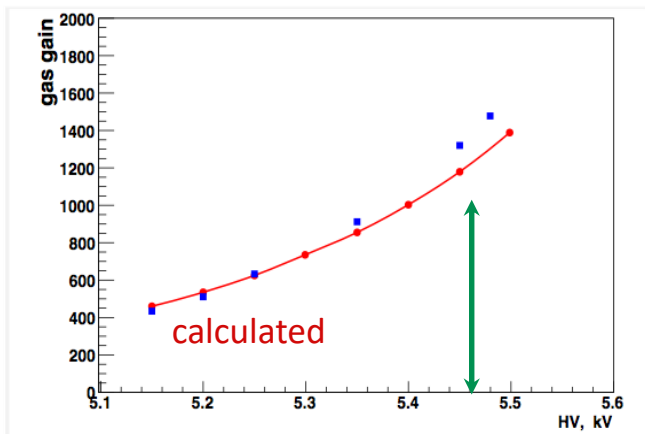
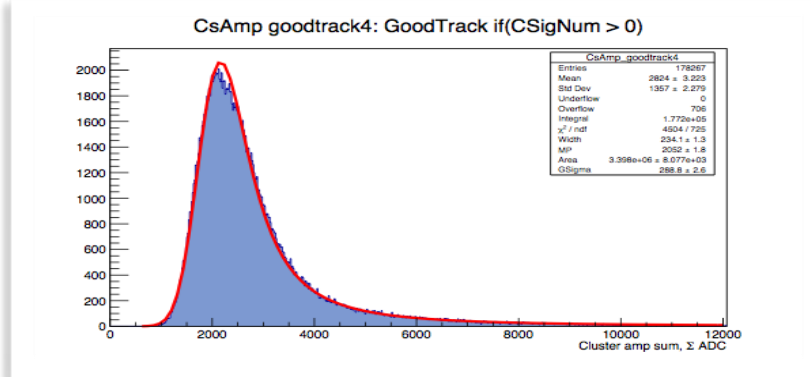
# Тестовые измерения

## Испытание трекера на космике



Космический триггер



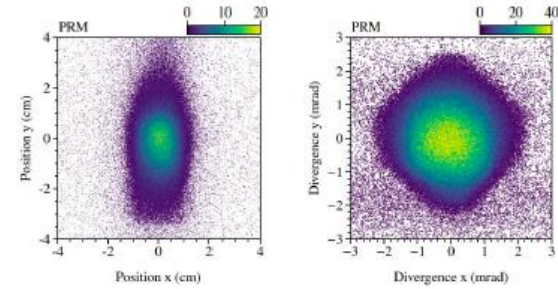
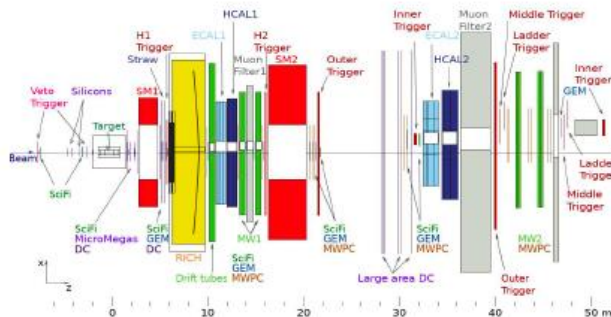
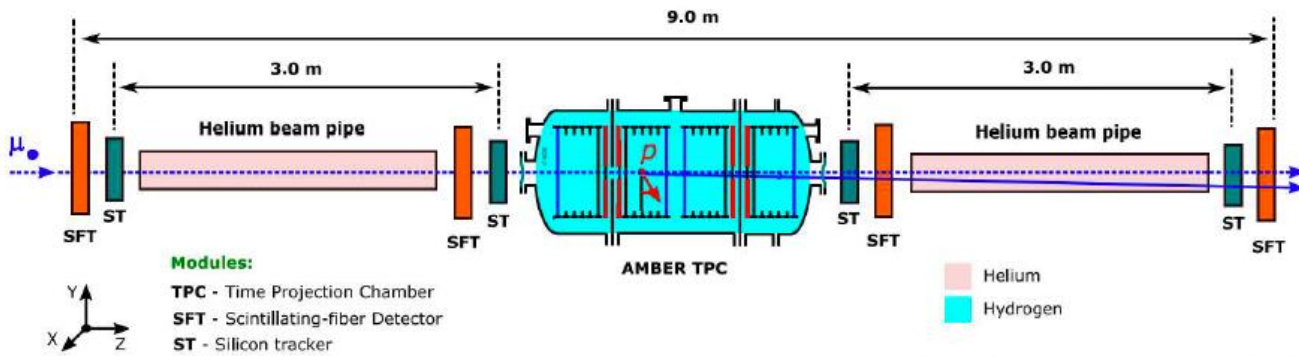


## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- ❑ Разработана и находится в стадии тестирования уникальная установка для измерения радиуса протона методом упругого ер-рассеяния. В установке при давлении 20 атм одновременно измеряется угол вылета и энергии протона отдачи в водородной время-проекционной камере, трекер из пропорциональных камер с рабочей газовой смесью Ar(96%)/CH<sub>4</sub>(4%) измеряет угол рассеяния рассеянного электрона.
- ❑ Изготовленная конструкция, стабильность газовой смеси и регистрирующая электроника должны обеспечить точность измерения радиуса протона 0.2%.
- ❑ Тестовые измерения трекера пропорциональных камер на космике продемонстрировали координатное разрешение на 4х плоскостях МПК на уровне  $\sigma = 70$  мкм

# Back Up

## AMBER (Apparatus for Meson and Baryon Experimental research)



Beam properties at the target, location, momentum 100 GeV/c

Протон - составная протяженная (неточечная) частица. Распределение заряда внутри протона в первом приближении характеризуется т.н. зарядовым радиусом. Эта величина может быть извлечена двумя способами:

- путем измерением сечения упругого рассеяния заряженного лептона (электрона или мюона),
- измерения сдвига уровней в атомах (обычном или мюонном водороде).

До 2010 года измерения упругого ер-рассеяния и спектроскопия обычного водорода давали значение зарядового радиуса протона на уровне 0,88 фм. Однако в 2010 году появились результаты спектроскопических измерений с использованием мюонного водорода, которые давали существенно меньшие значения 0,84 фм. При этом погрешность измерения с использованием мюонного водорода крайне низка и новое измерение оказалось статистически несовместным с предыдущими. Повторное измерение 2013 года подтвердило первоначальные значения.

С тех пор был выполнен еще ряд измерений. Во-первых, спектроскопия обычного водорода шагнула вперед, существенно уменьшив погрешности, однако консенсуса тут достичь не удалось и результаты разбросаны в диапазоне 0,83--0,88 фм.

Во-вторых, появились результаты коллаборации PRad (JLab). Эти результаты свидетельствовали о радиусе 0,84, однако поведение электрического форм-фактора (Фурье-образа распределения заряда внутри протона) сильно отличалась от измерений, выполненных в Майнце (MAMI).

В области малых квадратов переданных импульсов два измерения противоречат друг другу. Это видно из рисунка, показывающего отношение измеренных значений форм-фактора к дипольной параметризации.

Таким образом, во-первых, требуется измерить зарядовый радиус протона в экспериментах по рассеянию электронов, увеличив точность измерения. При этом желательно уменьшить влияние так называемых радиационных поправок на неопределенность измерения. Во-вторых, критически важно измерить поведение электрического форм-фактора в районе малых  $Q^2$ .



Table I. Ожидаемые систематические ошибки от различных источников

№	Параметр	Ошибка, %	Комментарий
1.	Скорость дрейфа электронов (W1)	0.01	
2.	Стабильность значения высокого напряжения	0.01	
3.	Стабильность температуры газа в ВВПК	0.015	
4.	Стабильность давления газа в ВВПК	0.01	
5.	Плотность водорода	0.025	Линейная сумма 3 и 4
6.	Длина мишени	0.02	
7.	Число протонов в мишени	0.045	Линейная сумма 5 и 6
8.	Число электронов	0.05	Корр. эффектов наложения
9.	Эффективность регистрации	0.05	
10.	Энергия электронов пучка	0.02	
11.	Восстановление угла рассеянного электрона	0.02	
12.	Калибровка Q2-шкалы	0.04	Линейная сумма 10 и 11

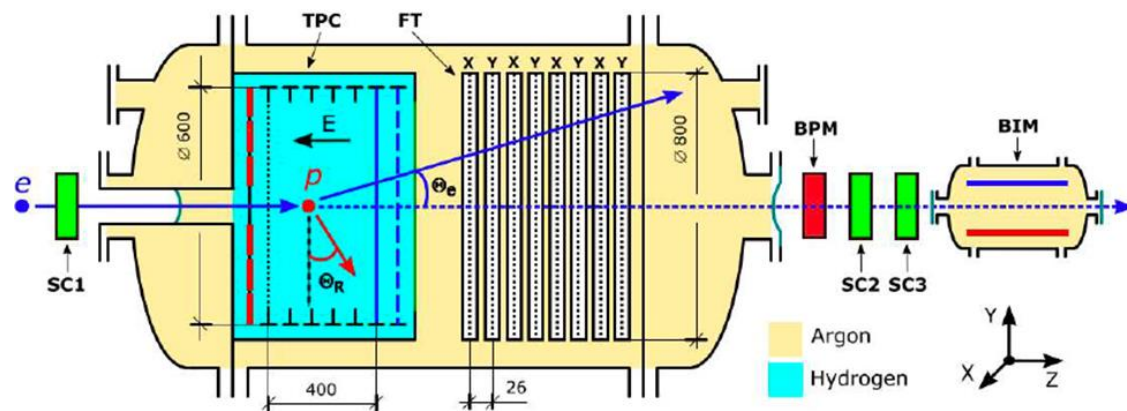


Table II. Параметры электронного пучка необходимого для достижения точности измерения зарядового радиуса с точностью &lt; 1%.

Энергия пучка	450 ÷ 900 МэВ
Энергетическое разрешение пучка	< 20 кэВ (1σ)
Абсолютная точность энергии пучка	±150 кэВ (1σ)
Интенсивность пучка	2 · 10 <sup>6</sup> част/с
Интенсивность пучка для калибровок	10 <sup>3</sup> ÷ 10 <sup>4</sup> част/с
Расходимость пучка	≤ 0.5 мрад (1σ)
Размер пучка на мишени	≤ 0.2 мм (1σ)

**Modules:**

**TPC** - Time Projection Chamber  
**FT** - Forward Tracker  
**BPM** - Beam Position Monitor  
**SC** - Scintillation Counter  
**BIM** - Beam Intensity Monitor

**Measured quantities:**

Recoil energy  $T_R$   
 Recoil angle  $\Theta_R$   
 Scattering angle  $\Theta_e$   
 Vertex coordinate  $Z$

**Пучок:**

$E=750$  МэВ,  
 МАМИ, Майнц