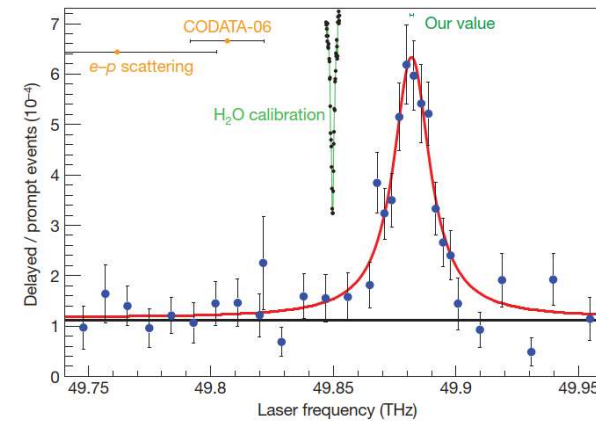
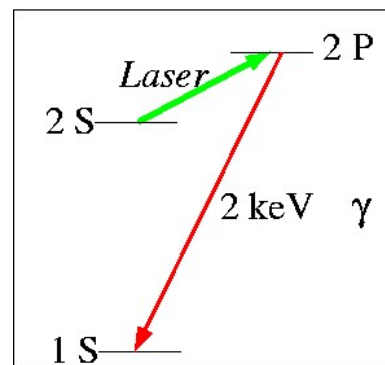
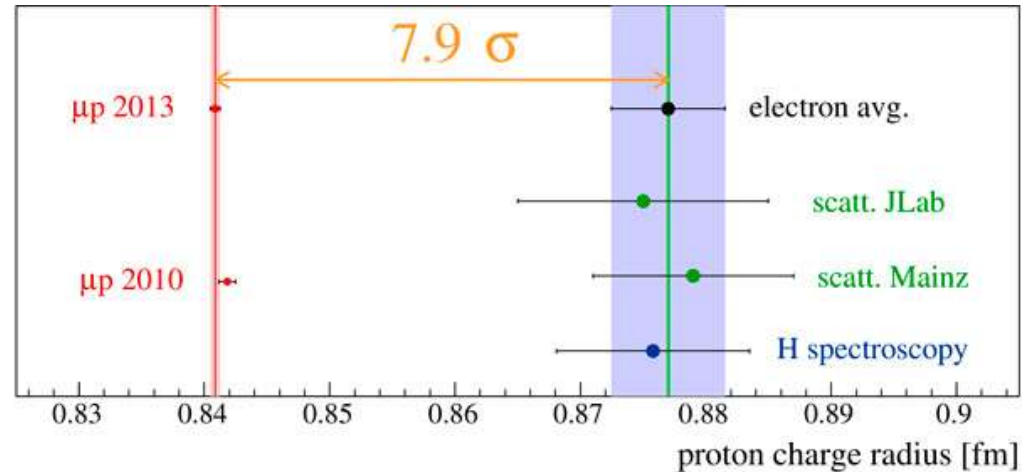


Измерение зарядового радиуса протона.
Эксперименты PRES и AMBER.
Технические особенности и статус

М. Е. Взнуздаев (ЛКСТ ОФВЭ)

Семинар ОФВЭ 15.03.2022

“Загадка” радиуса протона. Коллаборация PREMA

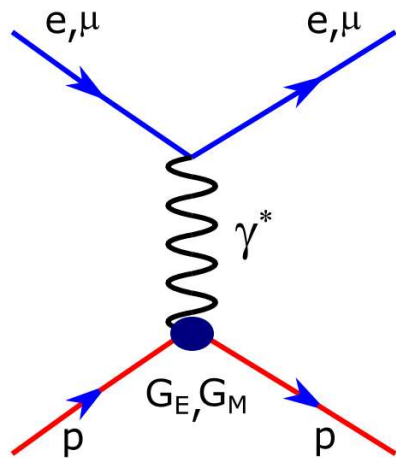


CODATA: 0.8751(61) фм

R. Pohl *et al.*, *Nature* 466 (2010) 213.

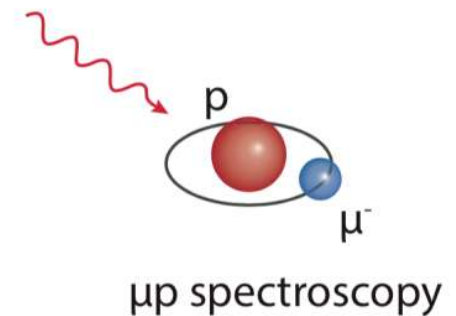
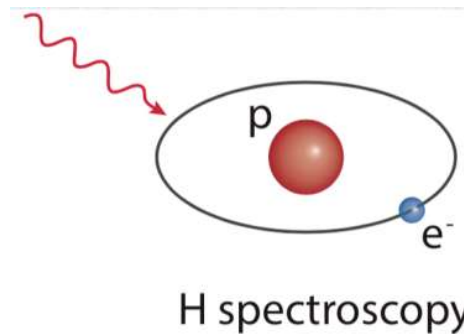
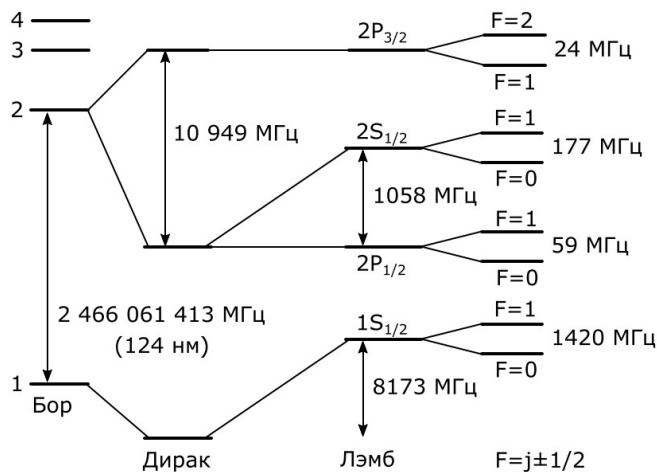
A. Antognini *et al.*, *Science* 399 (2013) 417.

Методы измерения зарядового радиуса R_p

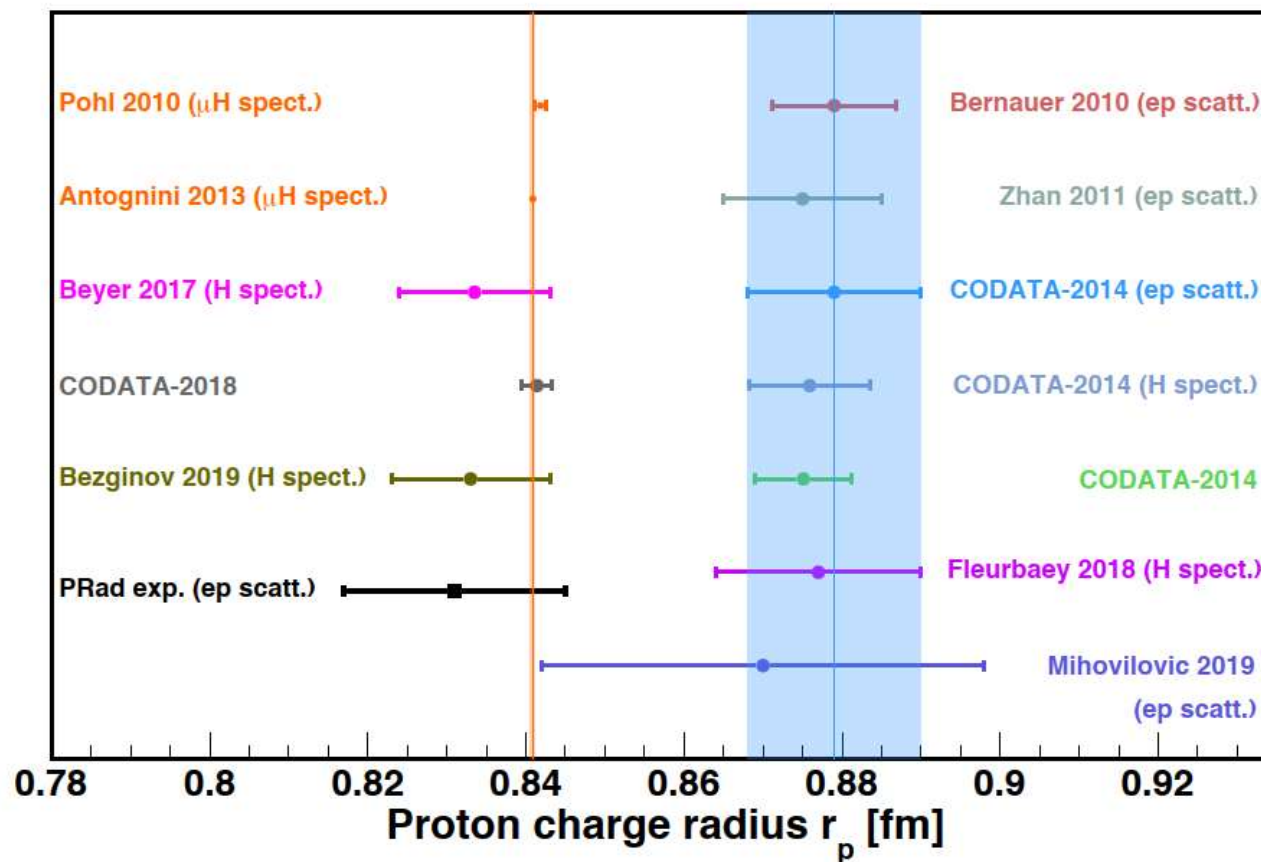


- Спектроскопия водорода (“нормальный” водород, мюонный водород)
- Лептон-протонное упругое рассеяние (e p или μp)

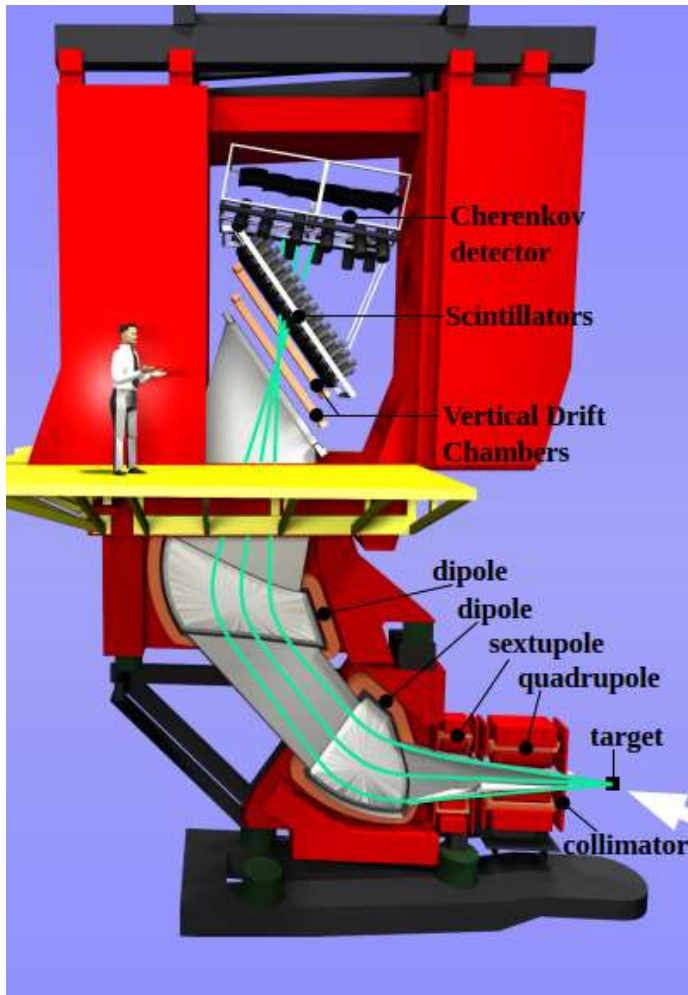
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Mott}} \left(\frac{E'}{E} \right) \frac{1}{1+\tau} \left(G_E^{p2}(Q^2) + \frac{\tau}{\varepsilon} G_M^{p2}(Q^2) \right)$$



Результаты измерений зарядового радиуса R_p в различных экспериментах



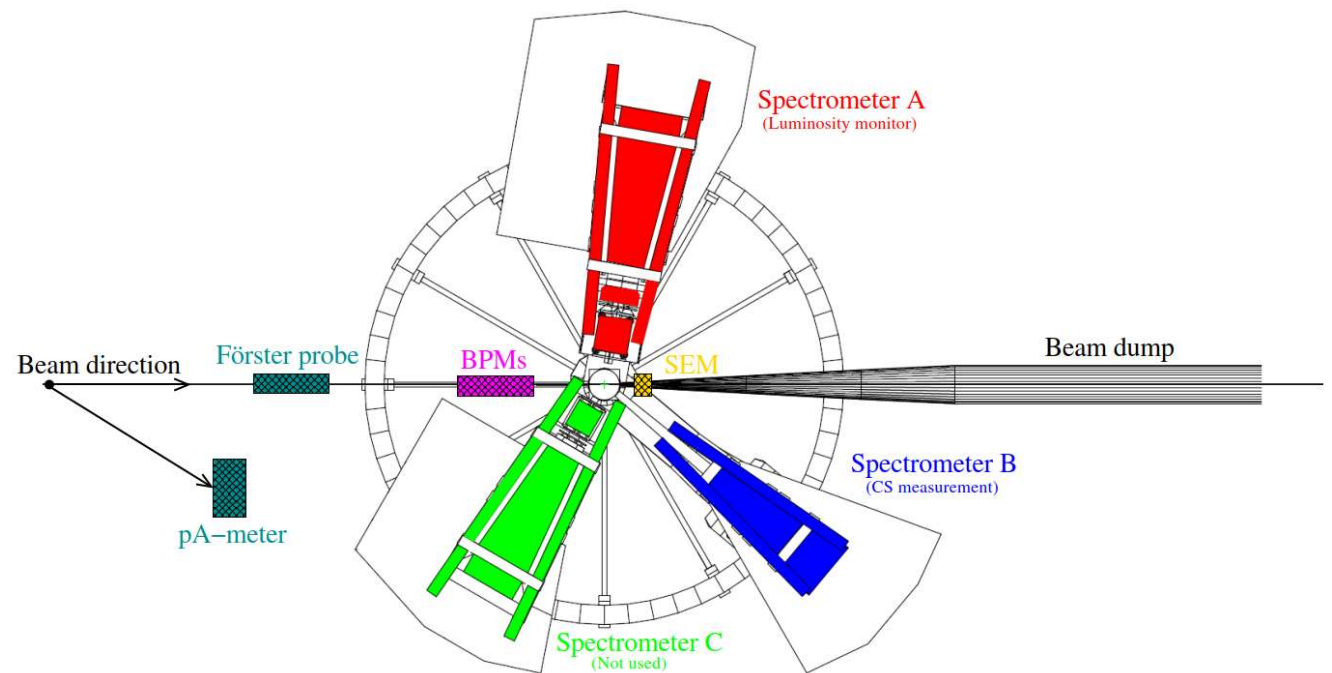
Эксперимент A1 (MAMI, Mainz)



Промежуточный результат:

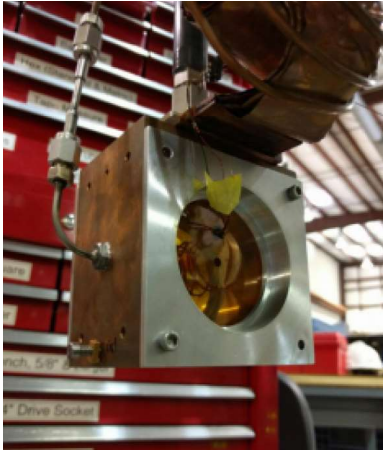
$$R_{pe} = 0.810 \pm 0.035 \text{ (stat)} \pm 0.074 \text{ (syst) fm}$$

(M. Mihovilovič et al., Phys.Lett. B771, 194 (2017))

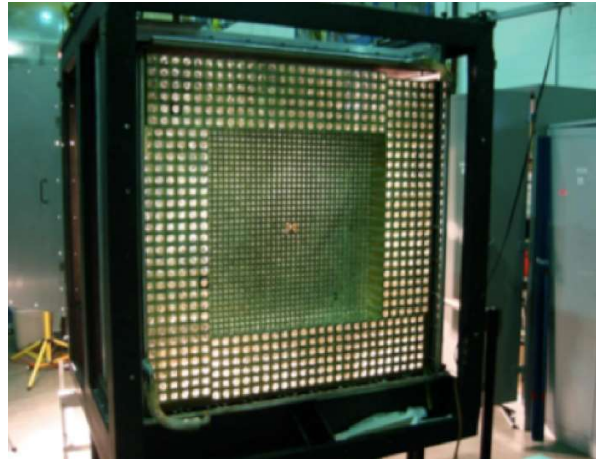


Эксперимент PRad (Jefferson lab)

Струйная газовая мишень



PbWO₄ HyCal калориметр

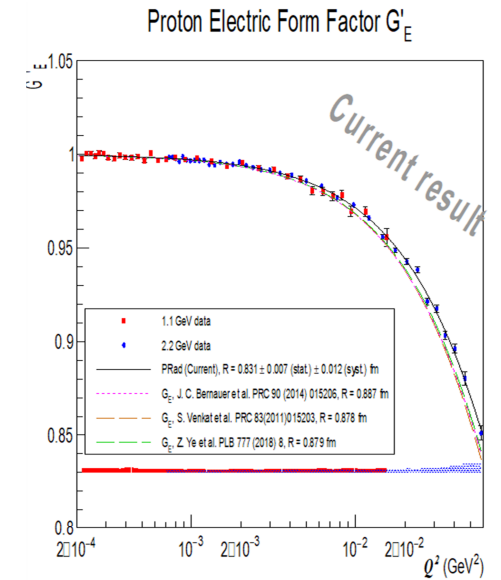
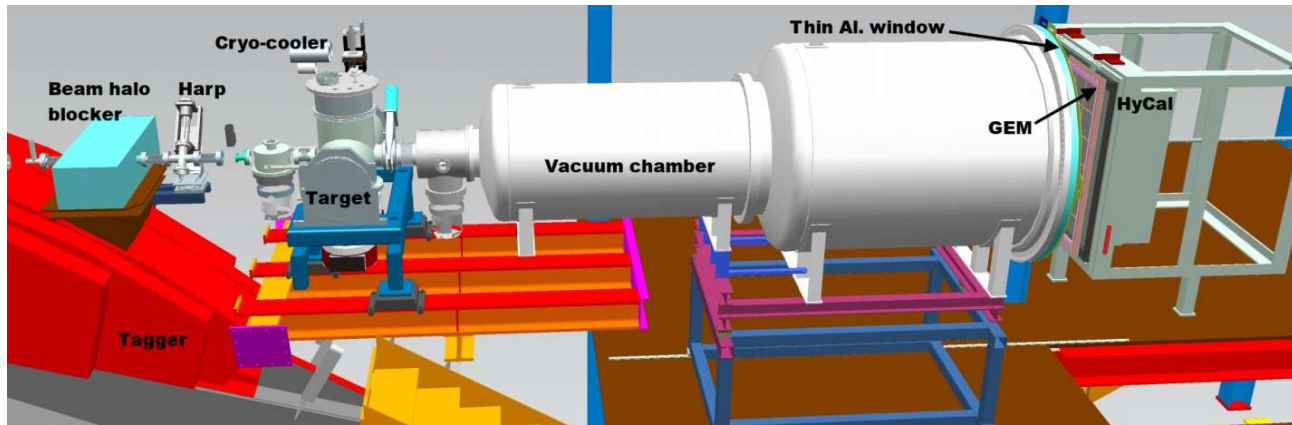


XY-GEM детектор

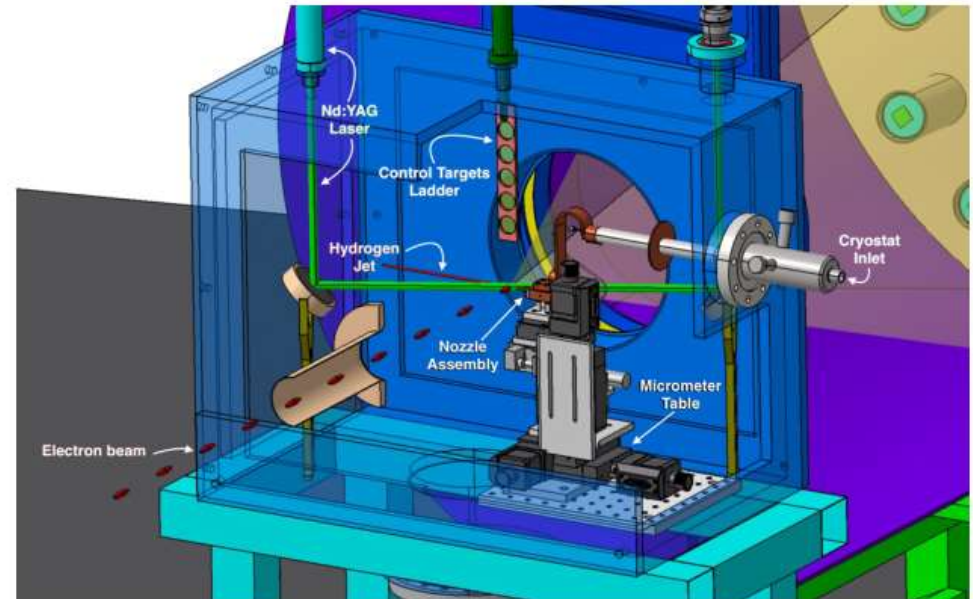
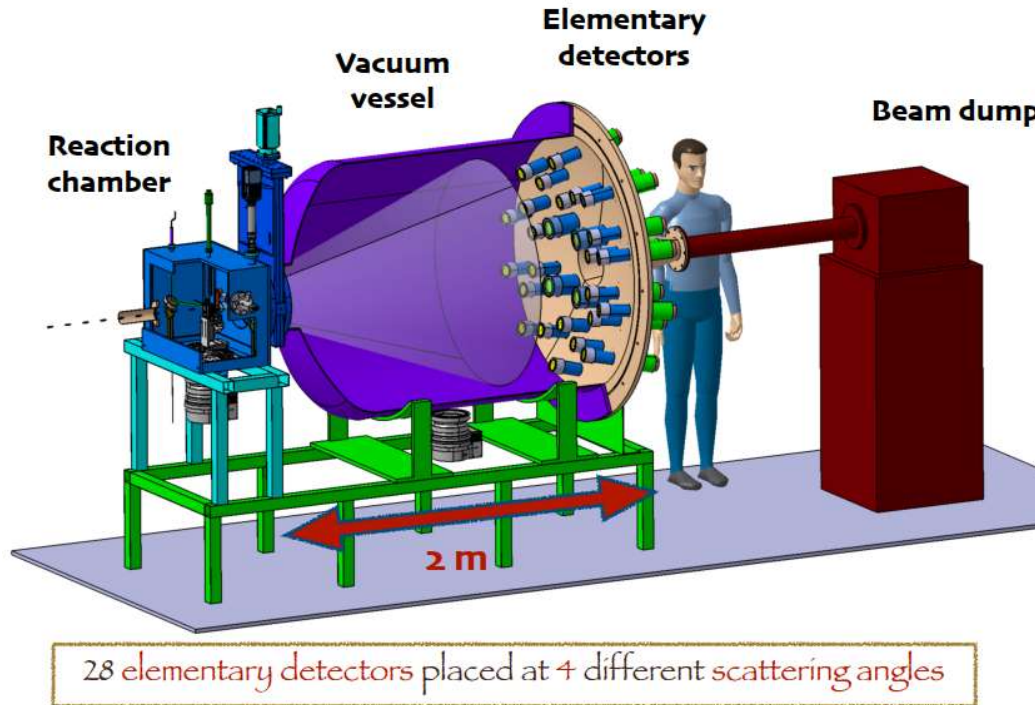


Промежуточный результат:
 $R_p = 0.831 \pm 0.007(\text{stat.}) \pm 0.01(\text{syst.}) \text{ fm}$

Установка PRad

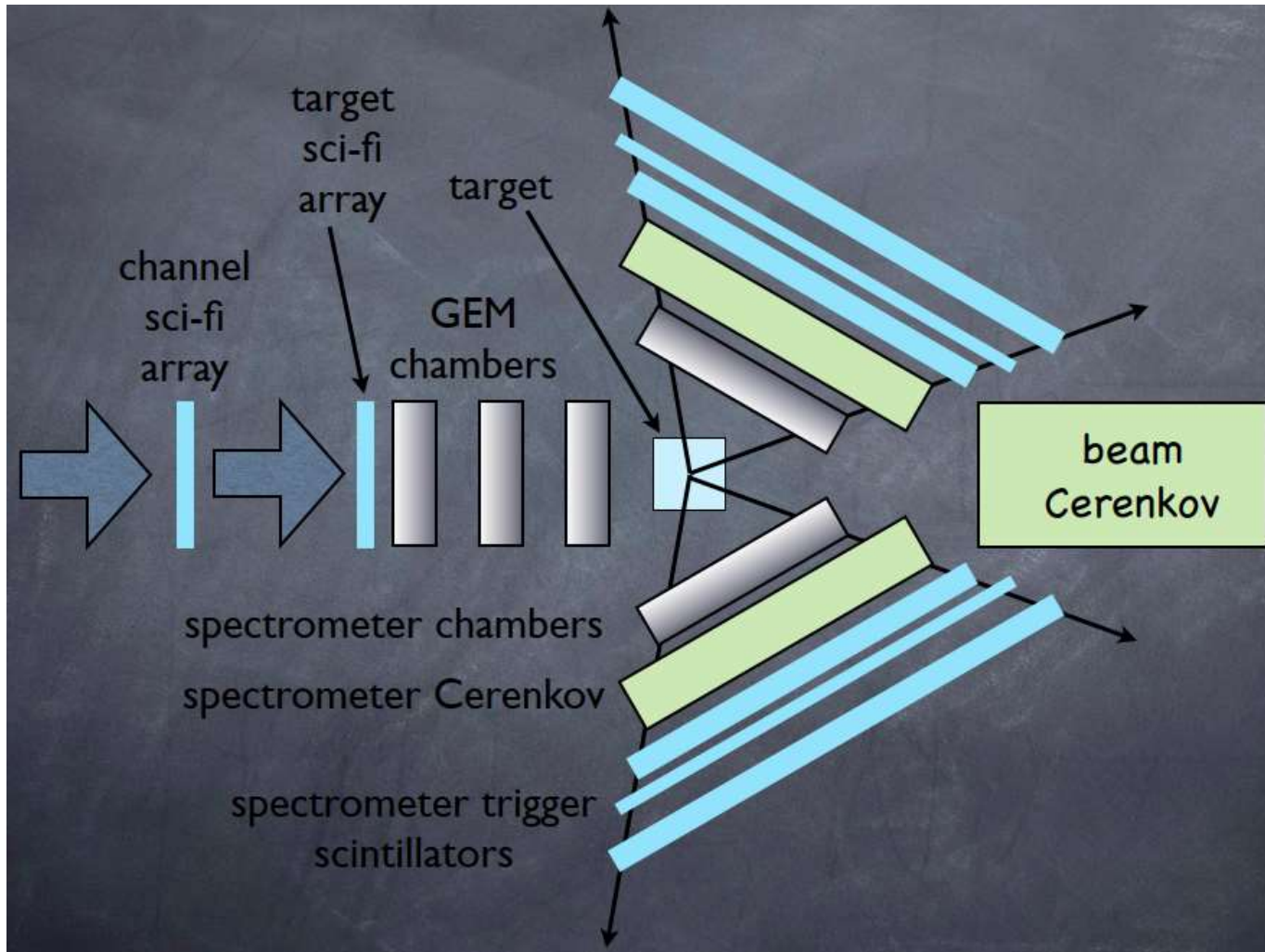


Эксперимент ProRad, PRAE (Orsay)



Cryogenic jet target, 280 BGO crystal detectors,
Electron scattering at $Q^2 = 10^{-5} - 3 \times 10^{-4} \text{ GeV}^2$, detectors made of scintillating fiber planes and BGO crystals.

Эксперимент MUSE (PSI)



... The PSI π M1 beam line provides a mixed muon / pion / electron beam with a ≈ 50 MHz time structure

The three beam momenta selected, $p_{in} \approx 115$ MeV/c, 153 MeV/c, and 210 MeV/c

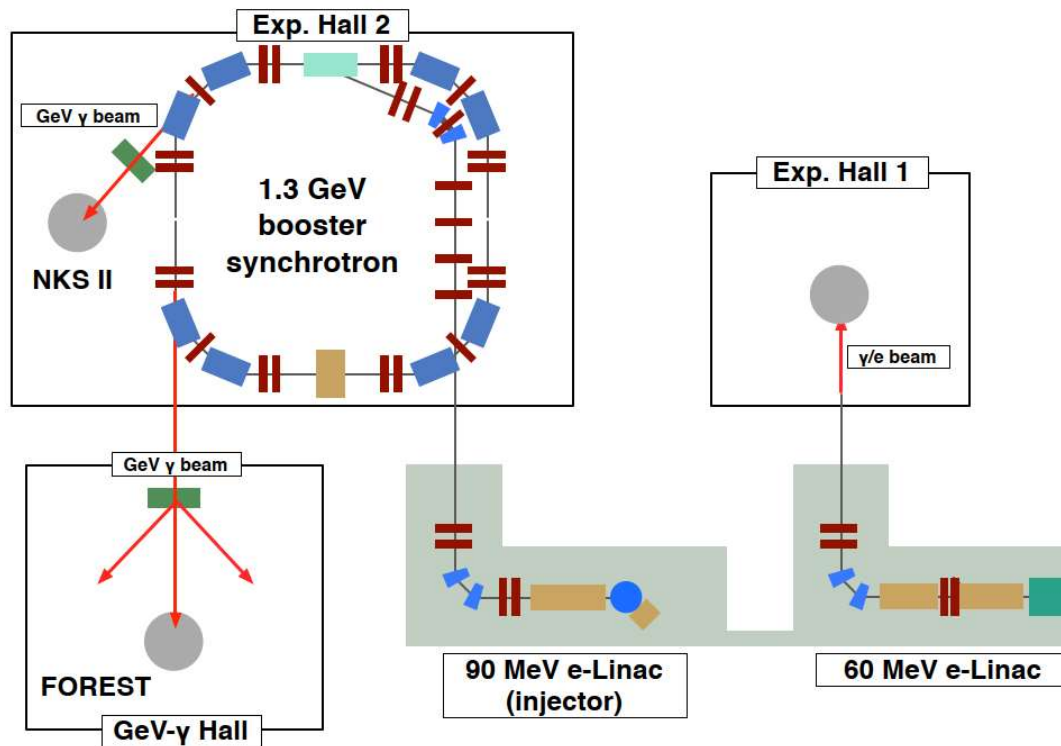
The MUSE approach to resolving the Proton Radius Puzzle is to measure simultaneously elastic $\mu \pm p$ scattering and $e \pm p$ scattering ...

R. Gilman, E.J. Downie, G. Ronet et al.

Studying the Proton "Radius" Puzzle with μp Elastic Scattering. arXiv:1303.2160

Эксперимент ULQ₂ (Ultra-Low Q₂), Research Center for Electron Photon Science Tohoku University

GE(Q₂) measurements at $0.0003 \leq Q_2 \leq 0.008$ (GeV/c)²



Все перечисленные эксперименты не регистрируют
протон отдачи!

А. А. Воробьевым предложена методика
эксперимента с **регистрацией**
протона отдачи, основанная на использовании
активной мишени

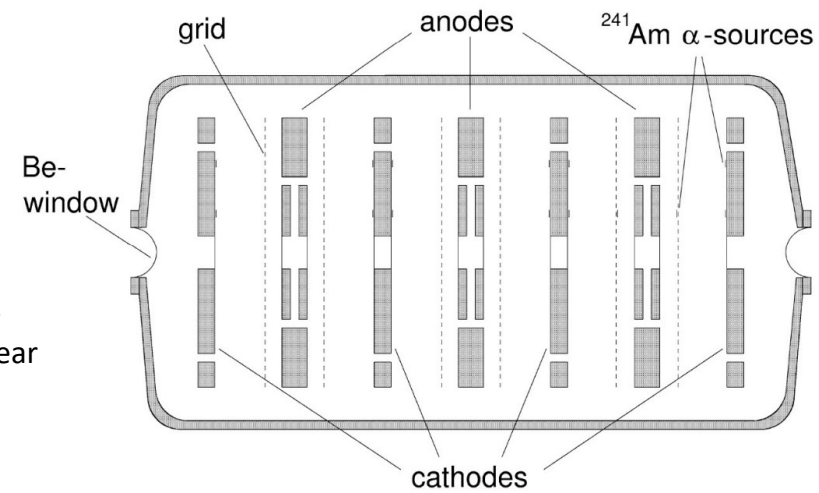
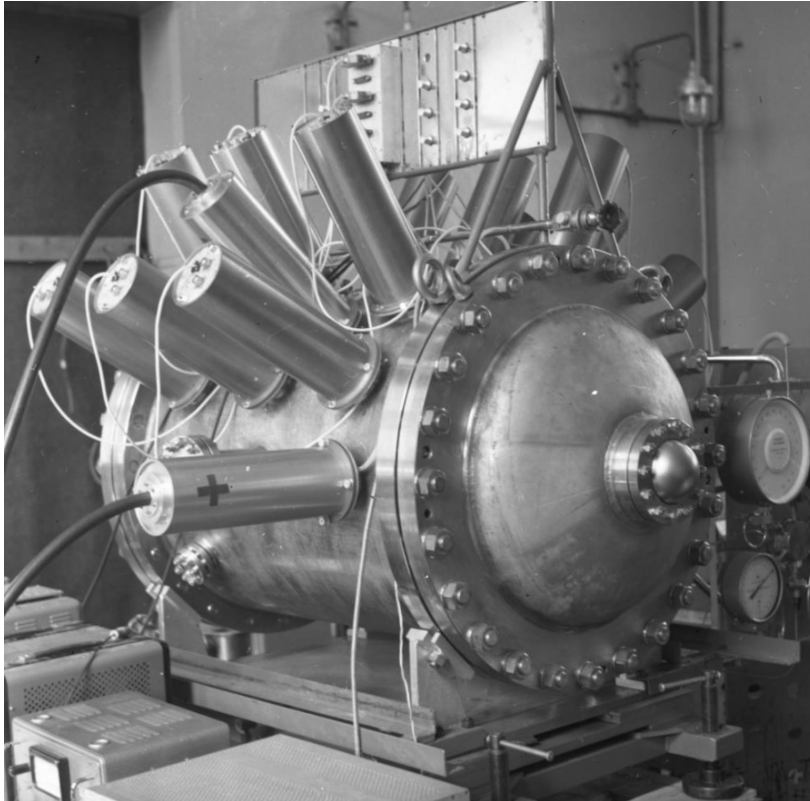
Эта схема будет применена как
в установке PRES, так и AMBER

Центральные детекторы экспериментов PRES и AMBER представляют собой развитие концепции **“активной мишени”**.

Концепция была успешно применена в семействе экспериментов, осуществленных под руководством

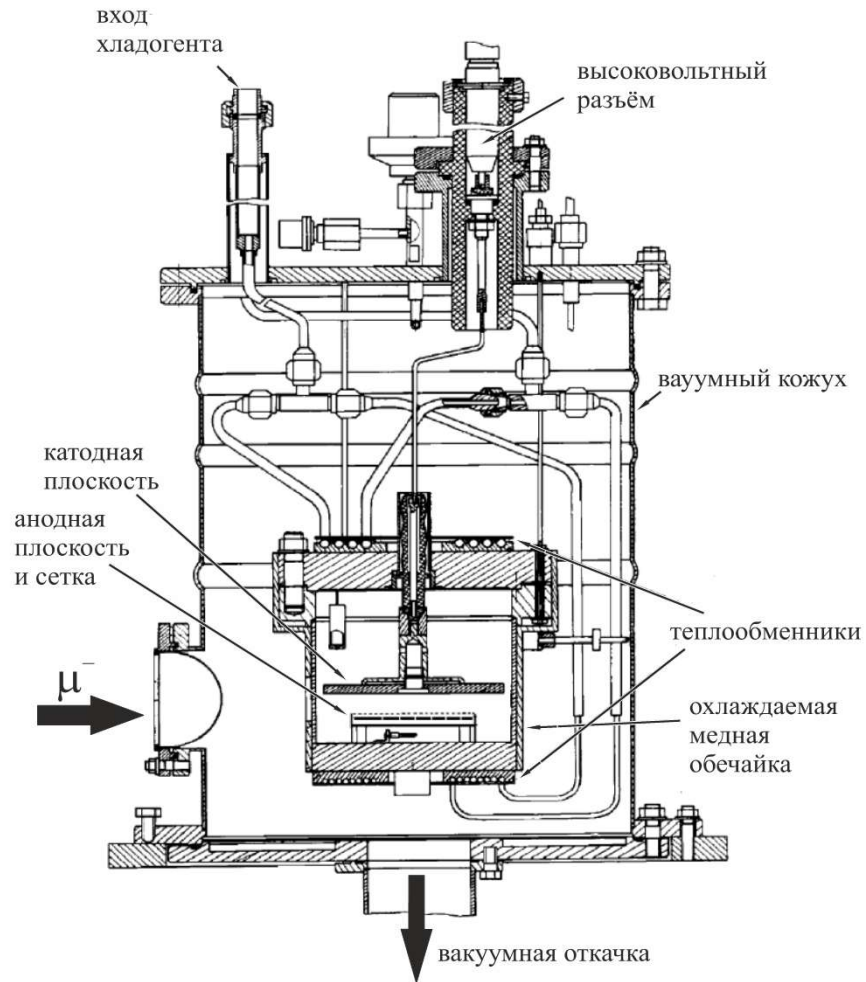
А. А. Воробьева

ИКАР

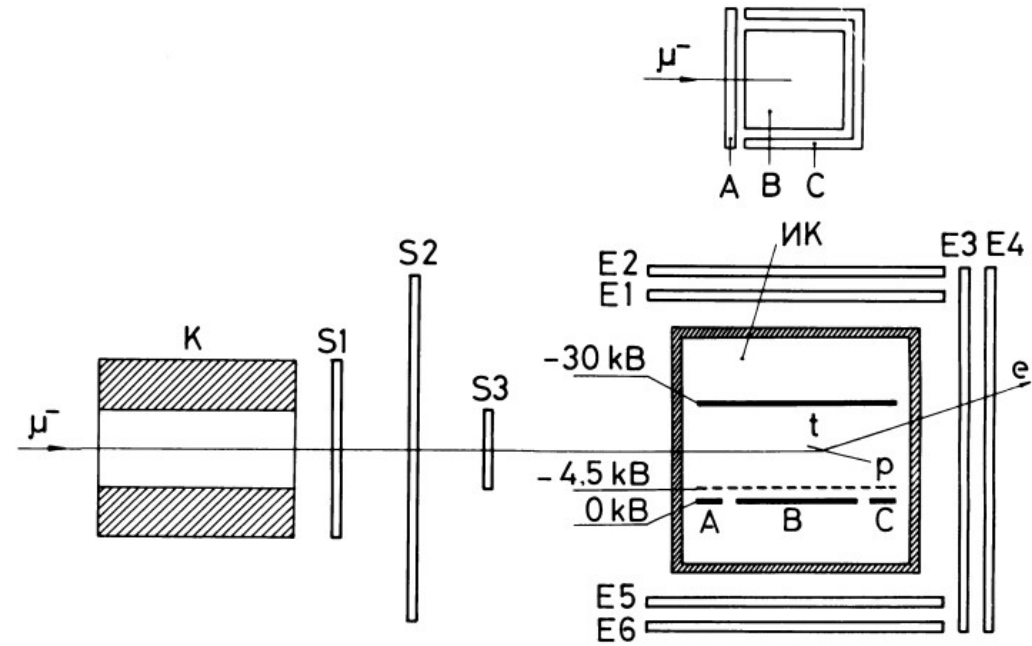


A.A. Vorobyov, G.A. Korolev, V.A. Schegelsky, G.Ye. Solyakin, G.L. Sokolov, Yu.K. Zalite, A. Method for studies of small-angle hadron-proton elastic scattering in the coulomb interference region, Nuclear Instruments and Methods, 119, 1974, pp 509-519,

Исследования μ -катализа



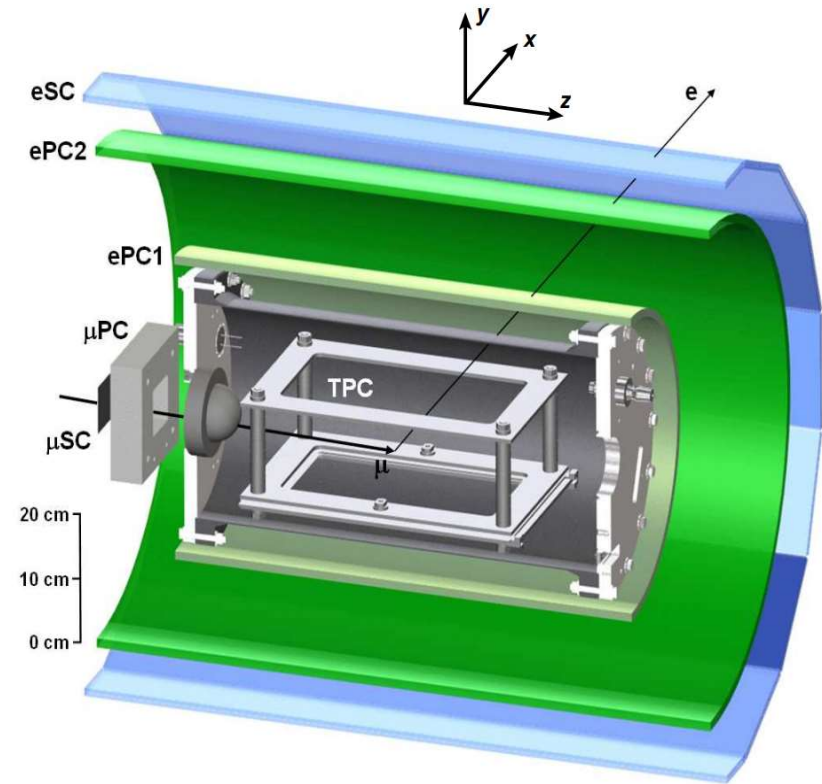
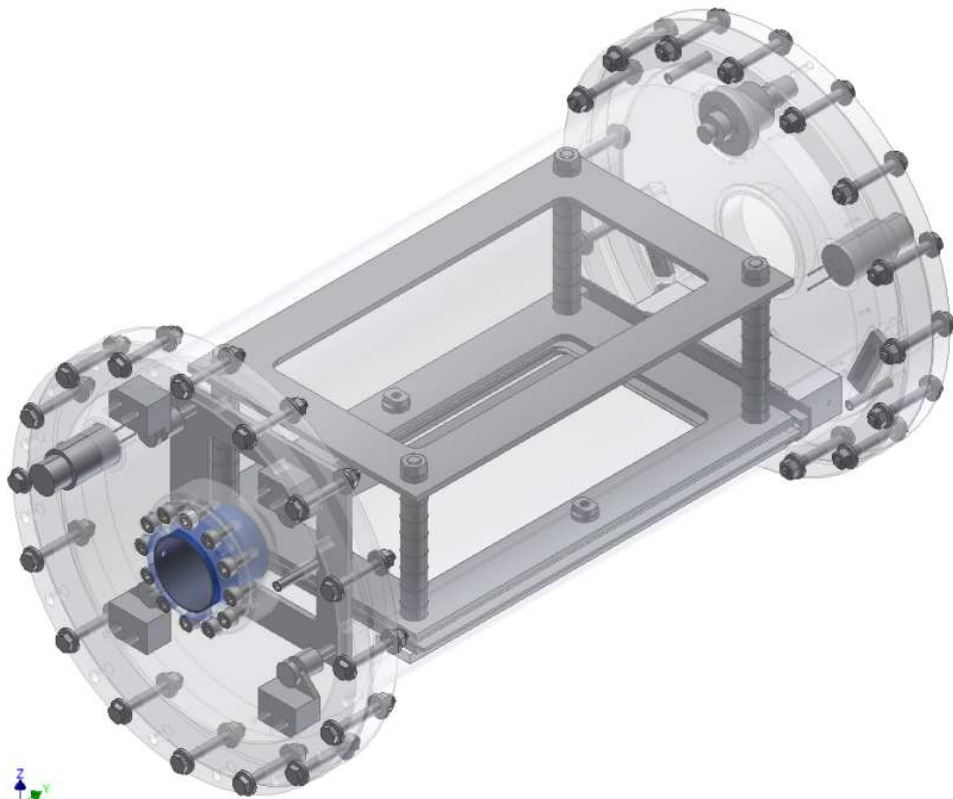
Cryogenic ionization chamber (CIC)



High-pressure ionization chamber

Balin, D.V., Ganzha, V.A., Kozlov, S.M. *et al.* High precision study of muon catalyzed fusion in D_2 and HD gas. *Phys. Part. Nuclei* **42**, 185–214 (2011)

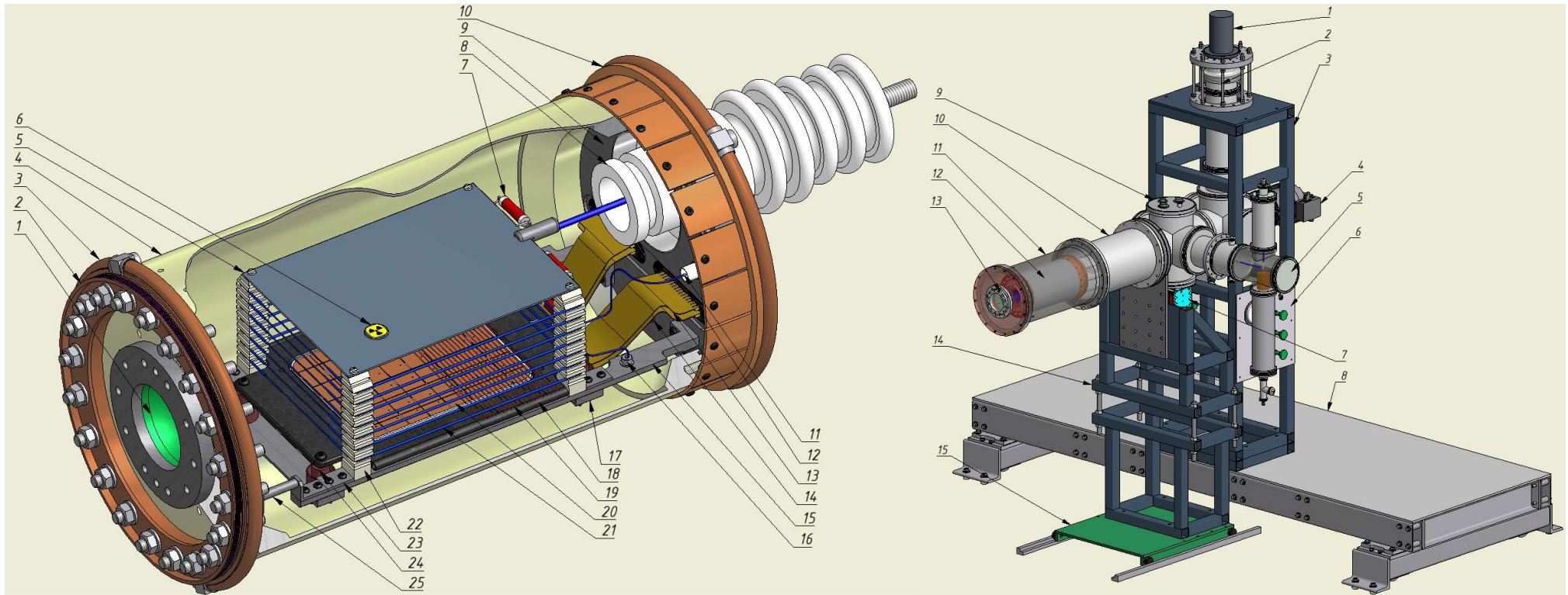
Эксперимент MuCap (Muon Capture on the Proton)



Andreev V.A. et al. (MuCap Coll.) Measurement of Muon Capture on the Proton to 1 % Precision and Determination of the Pseudoscalar Coupling g_p // Phys. Rev. Lett. 2013. V. 110. P. 022504.

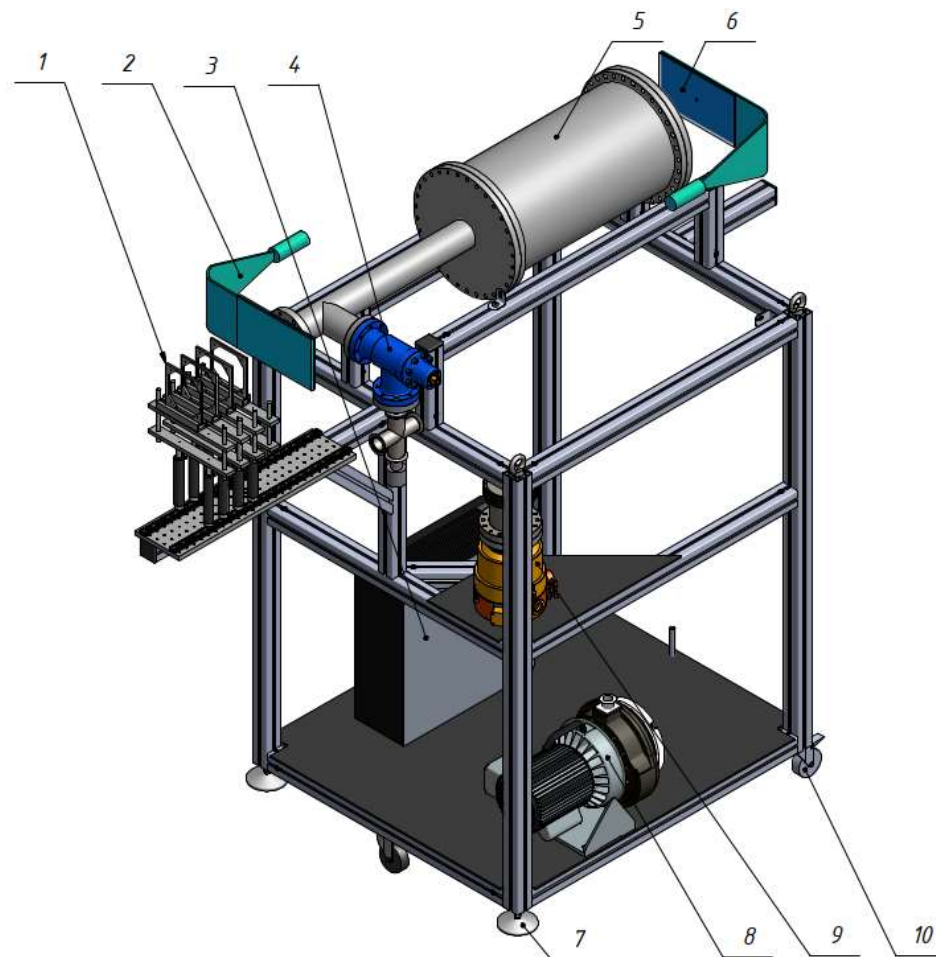
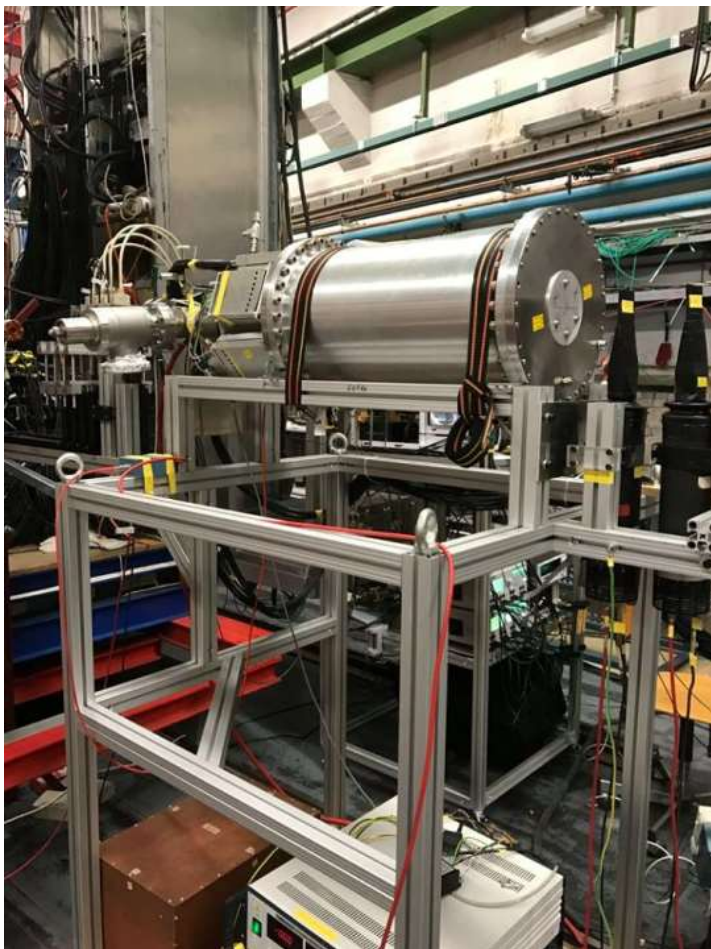


Эксперимент MuSun (Muon Capture on the Deuteron)



Ivshin K.A. et al. (MuSun Coll.) Cryogenic Time-Projection Chamber for Measurement of Muon Capture Rate on the Deuteron // Book of Abstracts of the LXIV Int. Conf. NUCLEUS 2014 (Fundamental Problems of Nuclear Physics, Atomic Power Engineering and Nuclear Technologies), Minsk, Belarus, July 2014. P. 218.

Прототип АСТАФ2 (GSI)

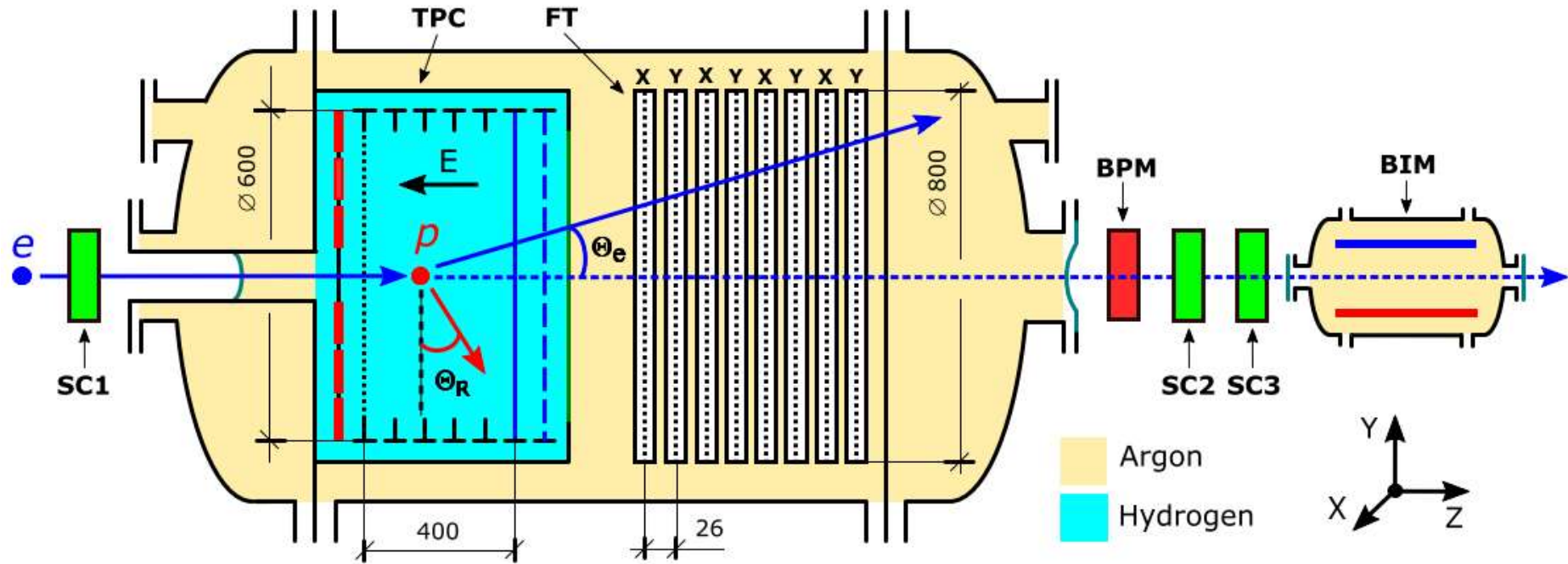


Абсолютные измерения сечения eP взаимодействия с точностью 0,2%

Точность основана на следующих параметрах измерительной установки:

- Измерение стабильности (интенсивности) пучка с точностью 0,1 %;
- Абсолютная точность построения и измерения геометрии мишени с точностью 100 мкм;
- Обеспечение стабильности и знание с точностью 0,01 % скорости дрейфа, температуры и давления рабочего газа
- Калибровка Q^2 с точностью 0,1 %
- Эффективность, близкая к 100 %

Схема установки PRES



Modules:

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

Measured quantities:

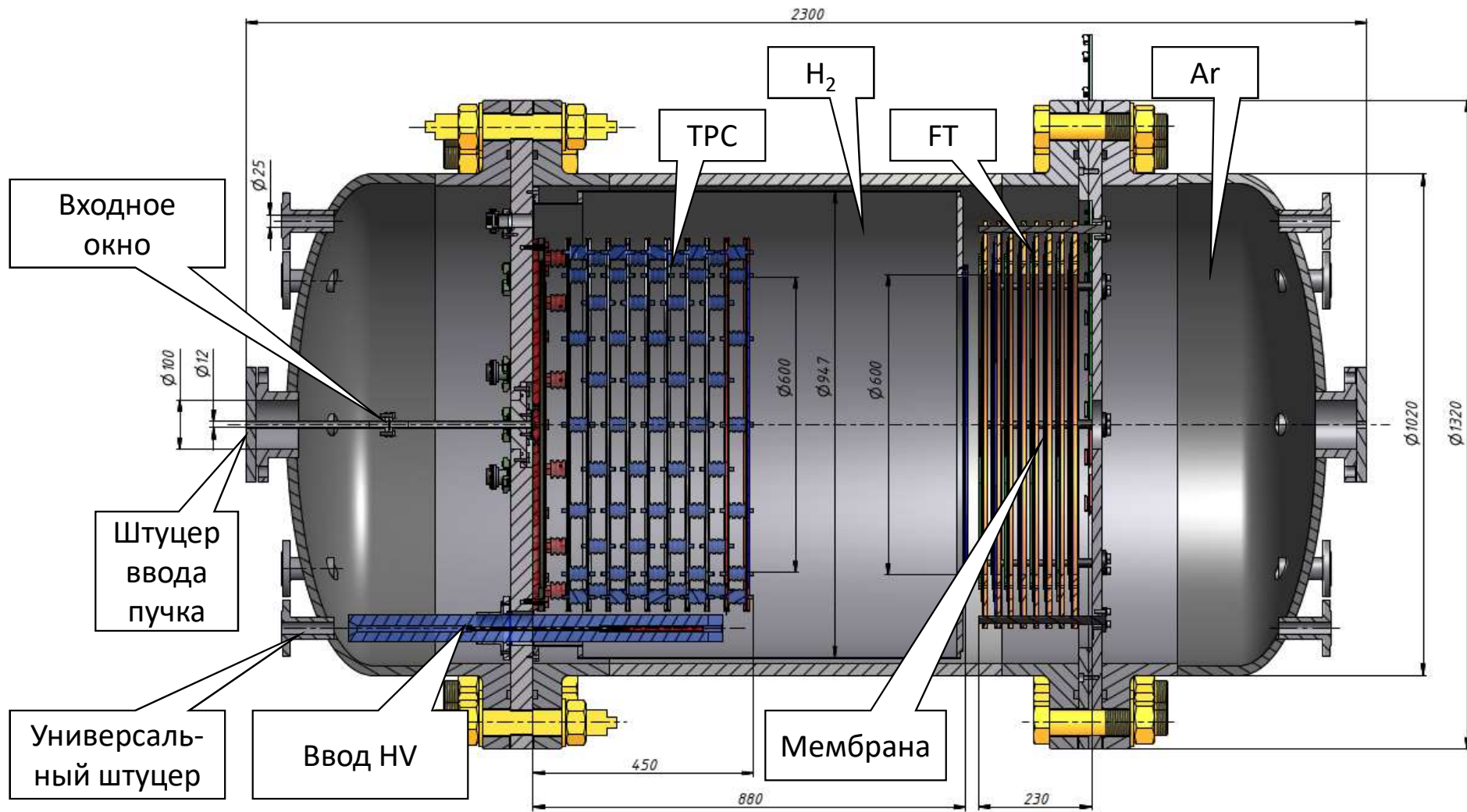
- Recoil energy T_R
- Recoil angle Θ_R
- Scattering angle Θ_e
- Vertex coordinate Z

Пучок:

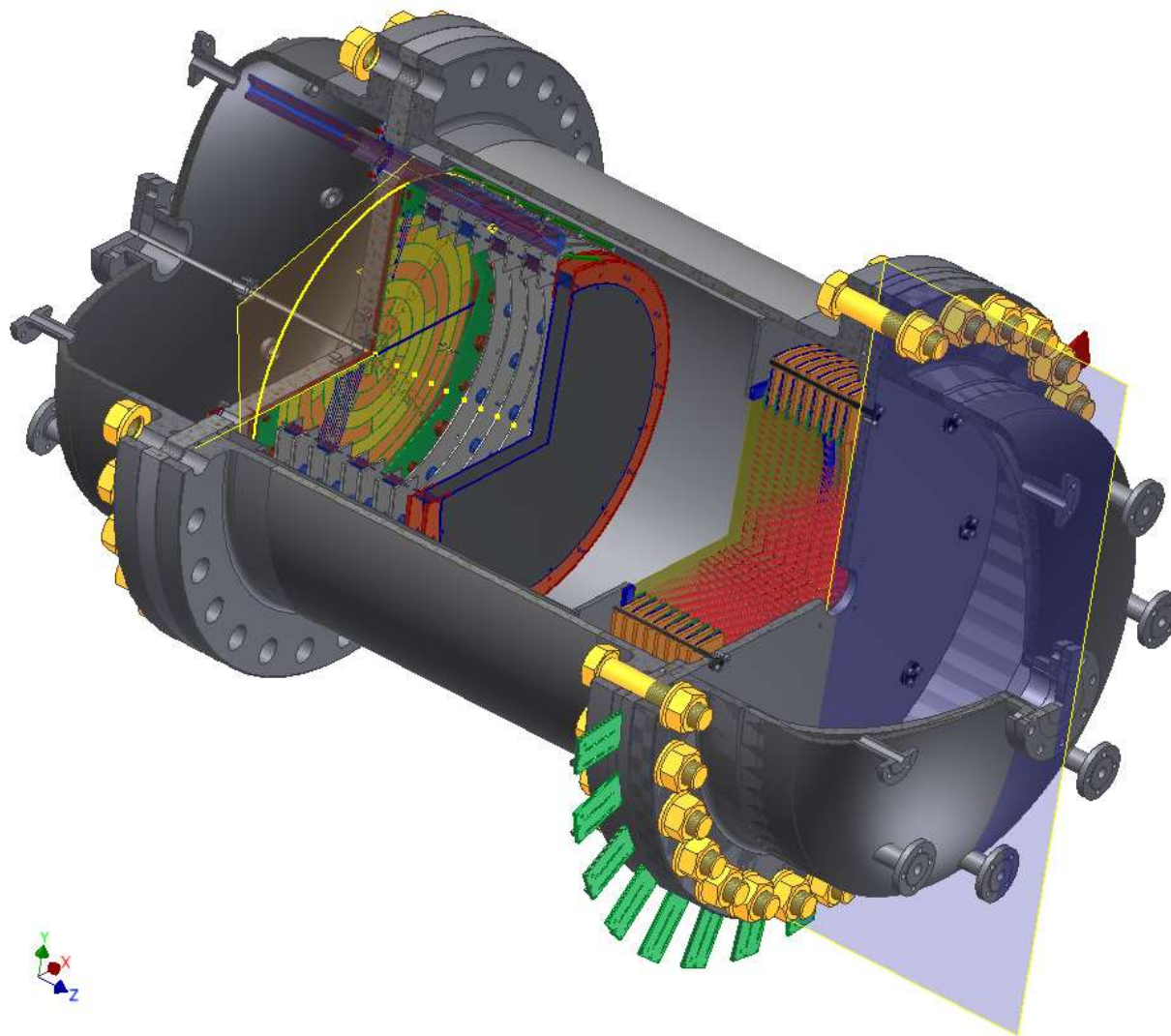
$E=750$ МэВ,

МАМИ, Майнц

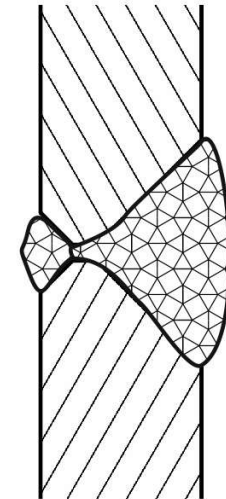
Центральный детектор PRES



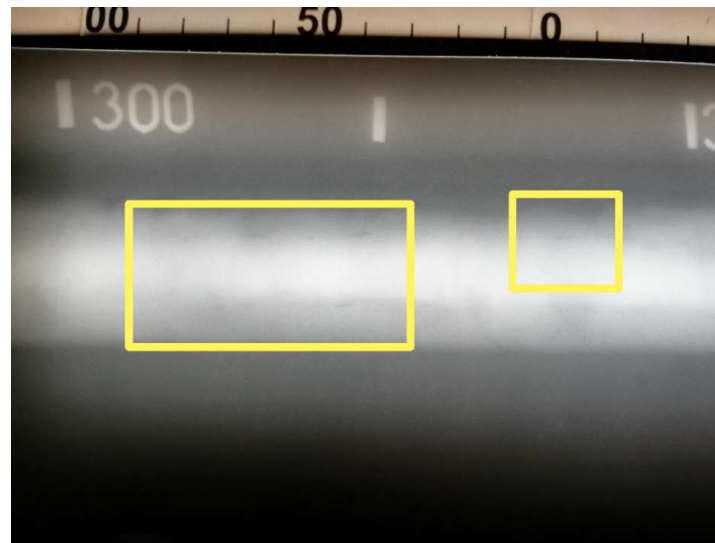
Центральный детектор PRES



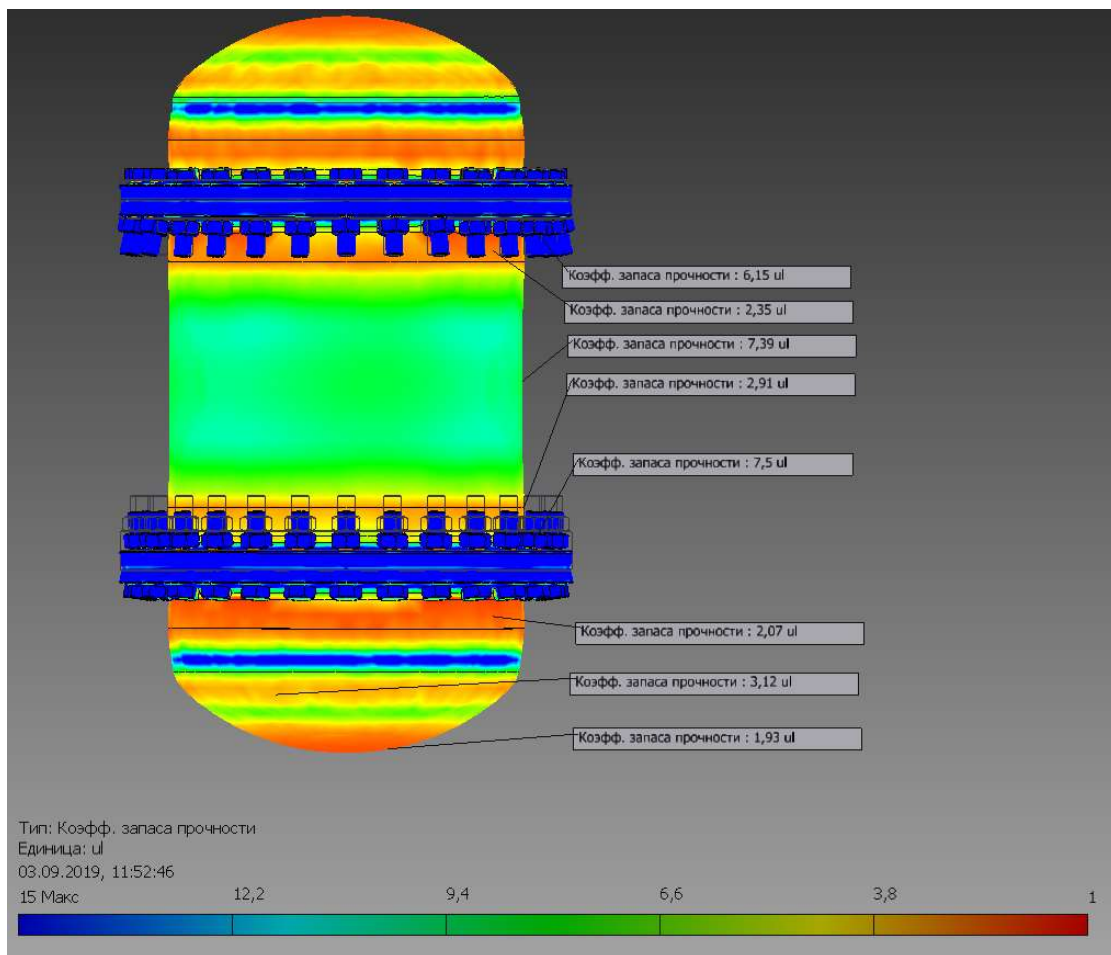
Изготовление газового объема



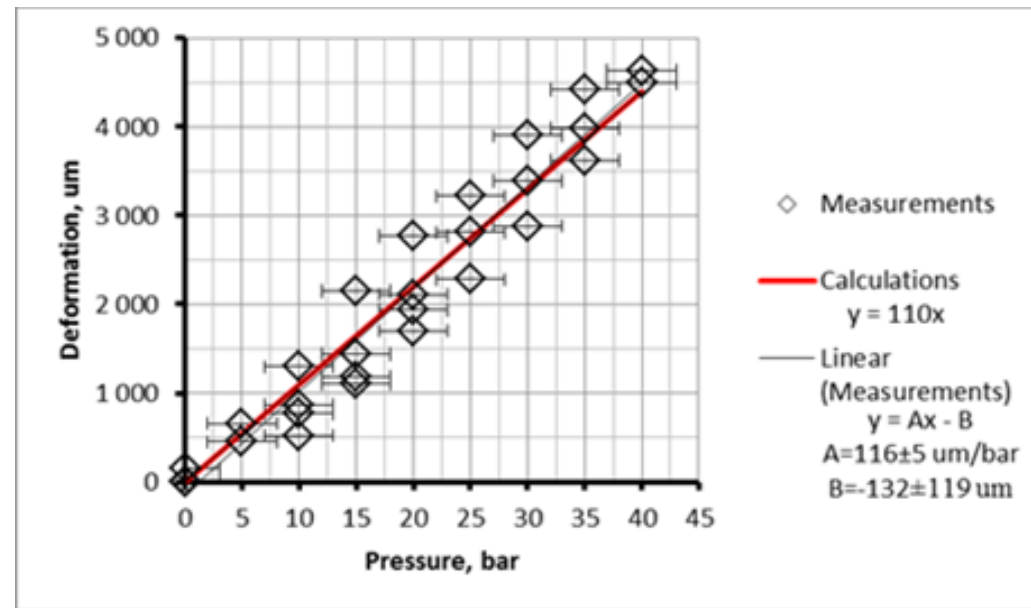
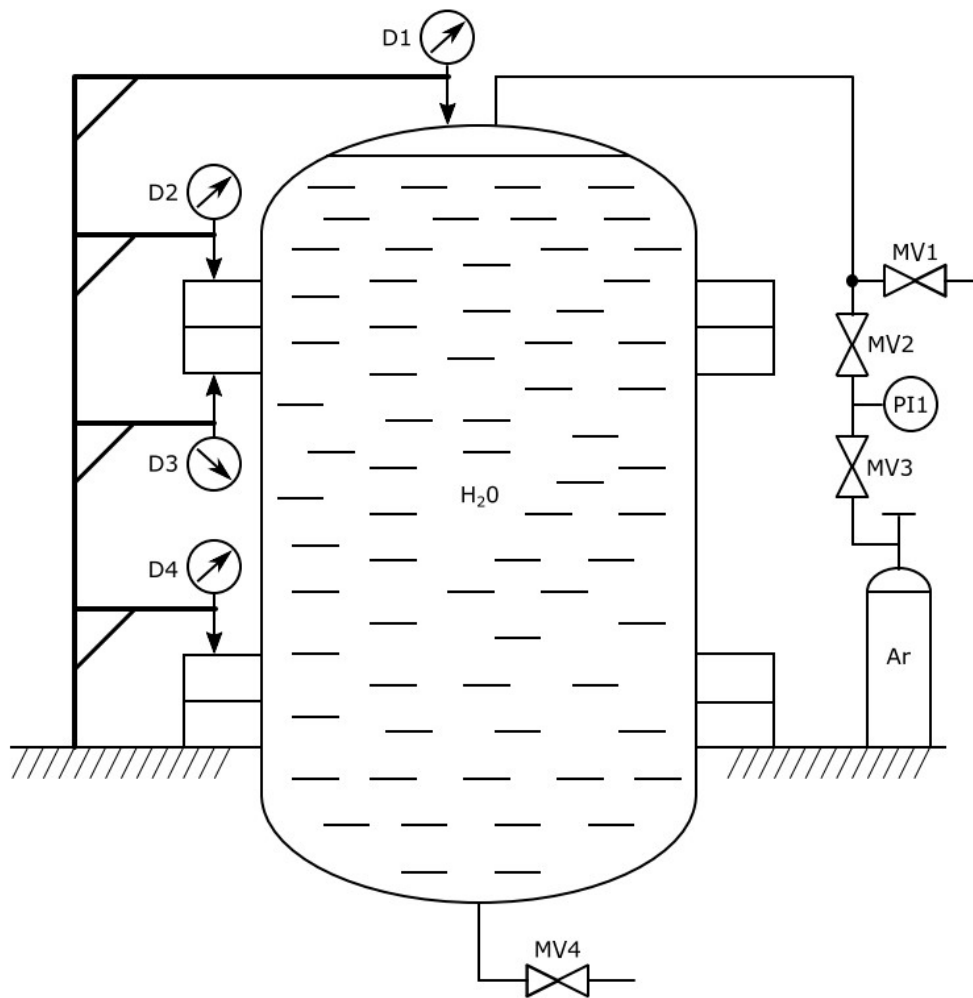
Атмосфера



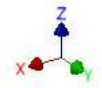
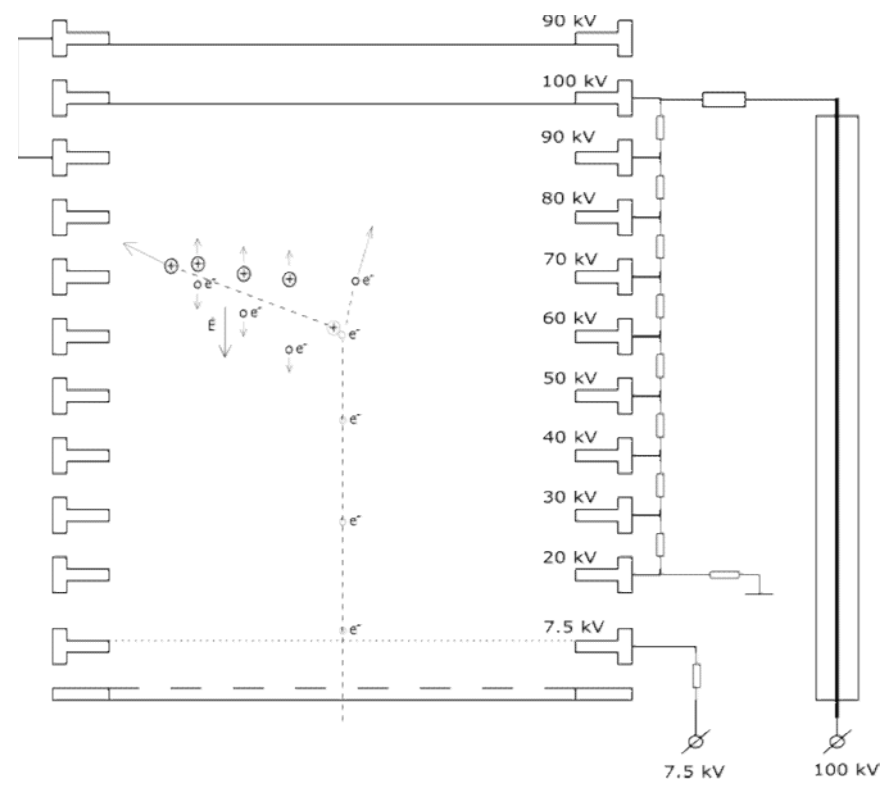
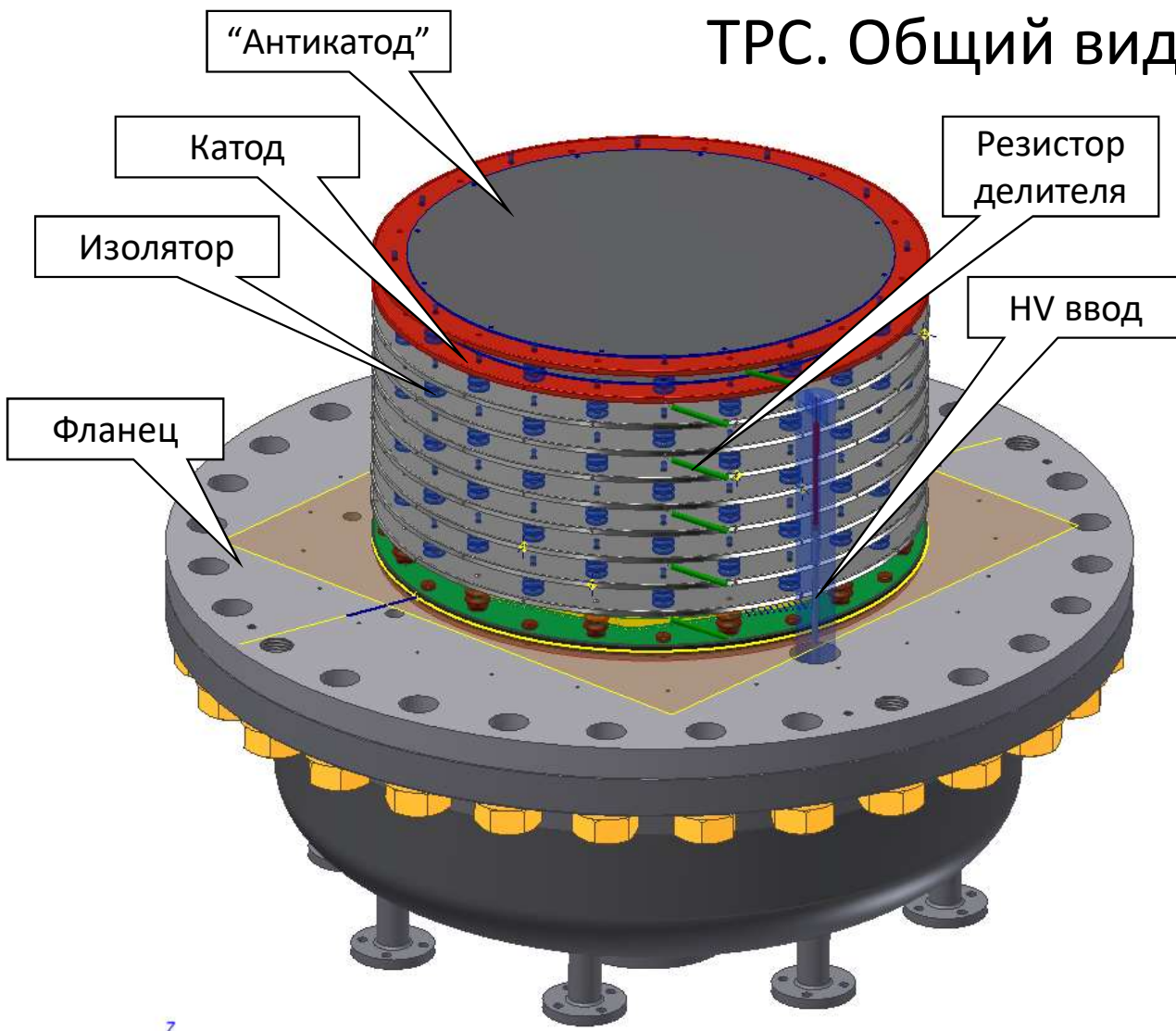
Газовый объем. Прочностной расчет



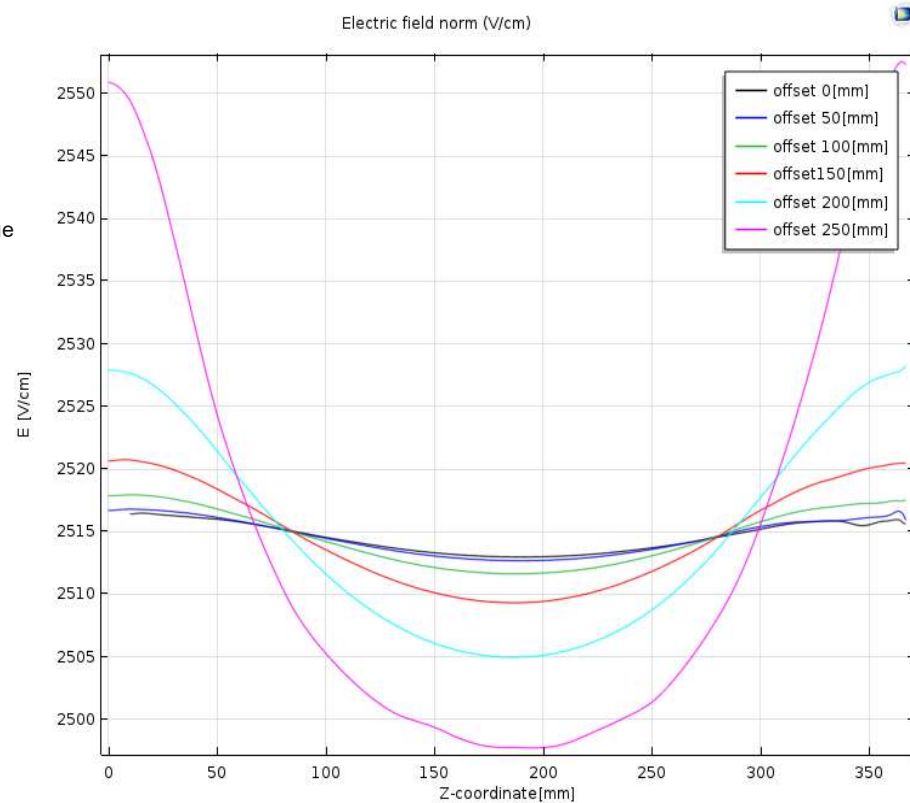
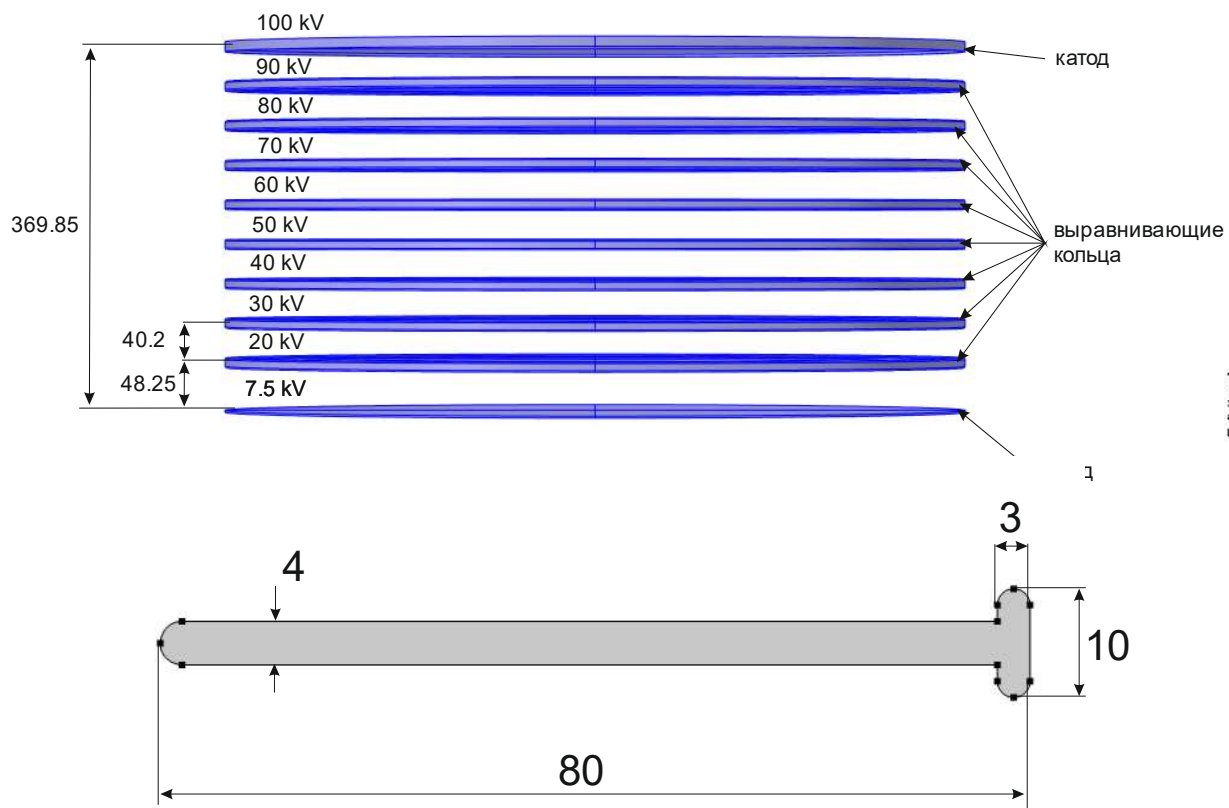
Газовый объем. Гидравлические испытания



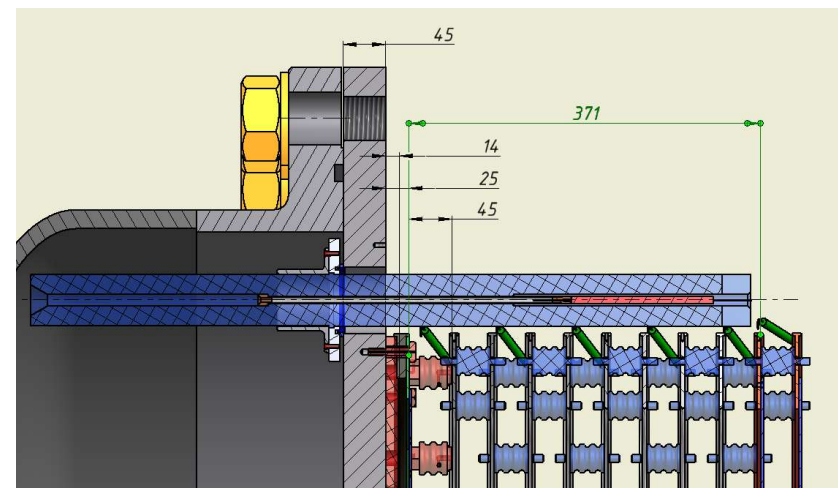
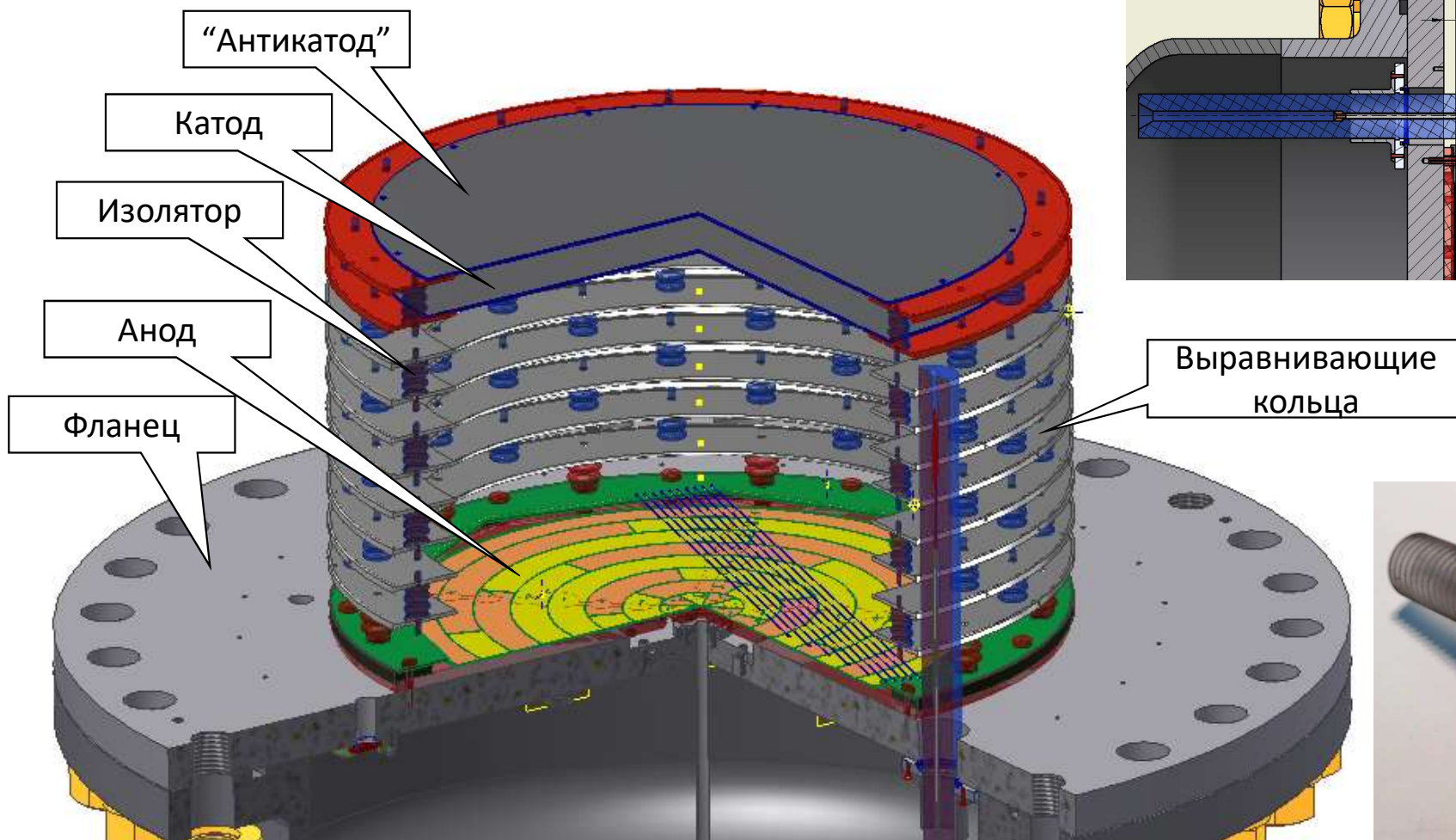
ТРС. ОБЩИЙ ВИД



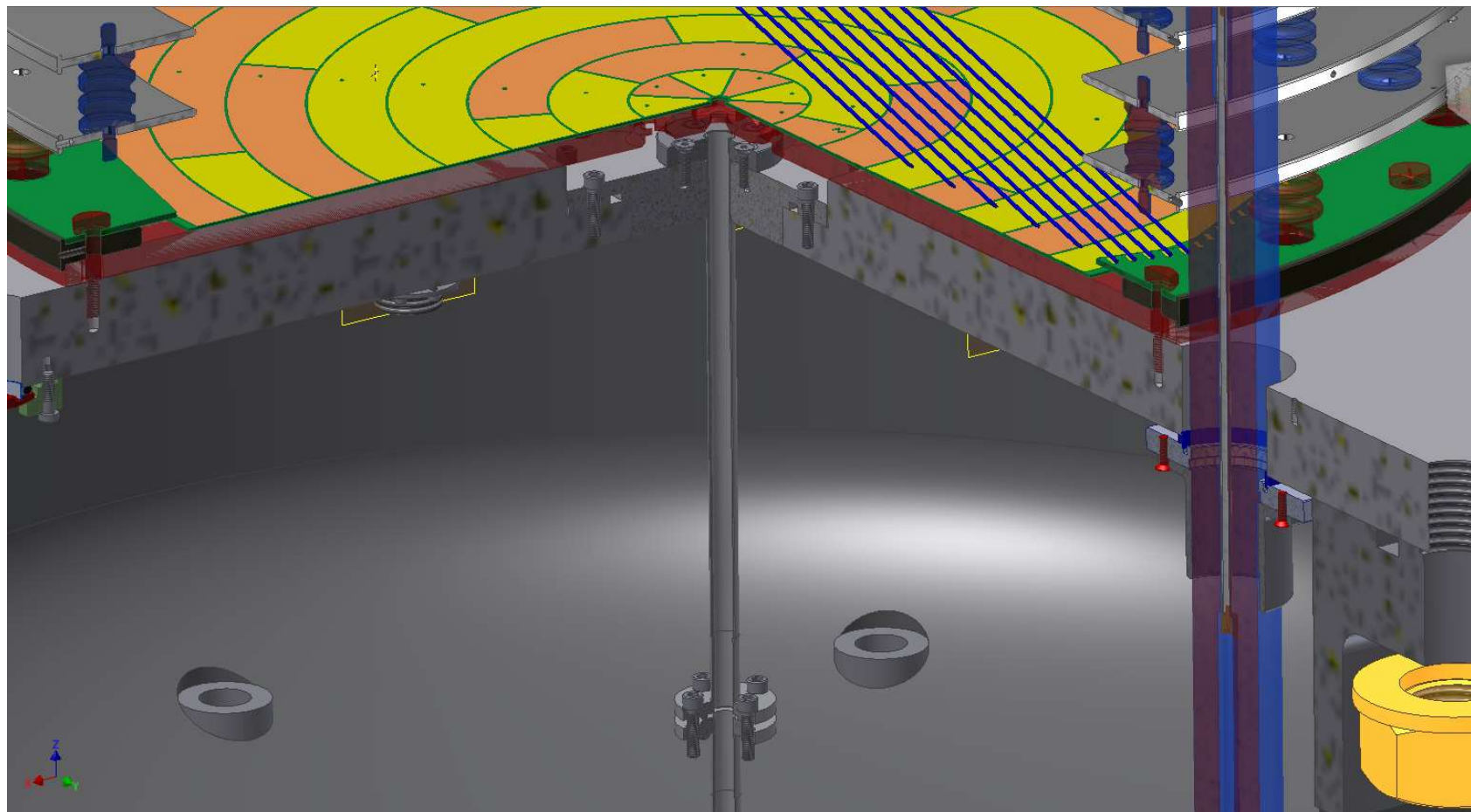
Моделирование электростатического поля



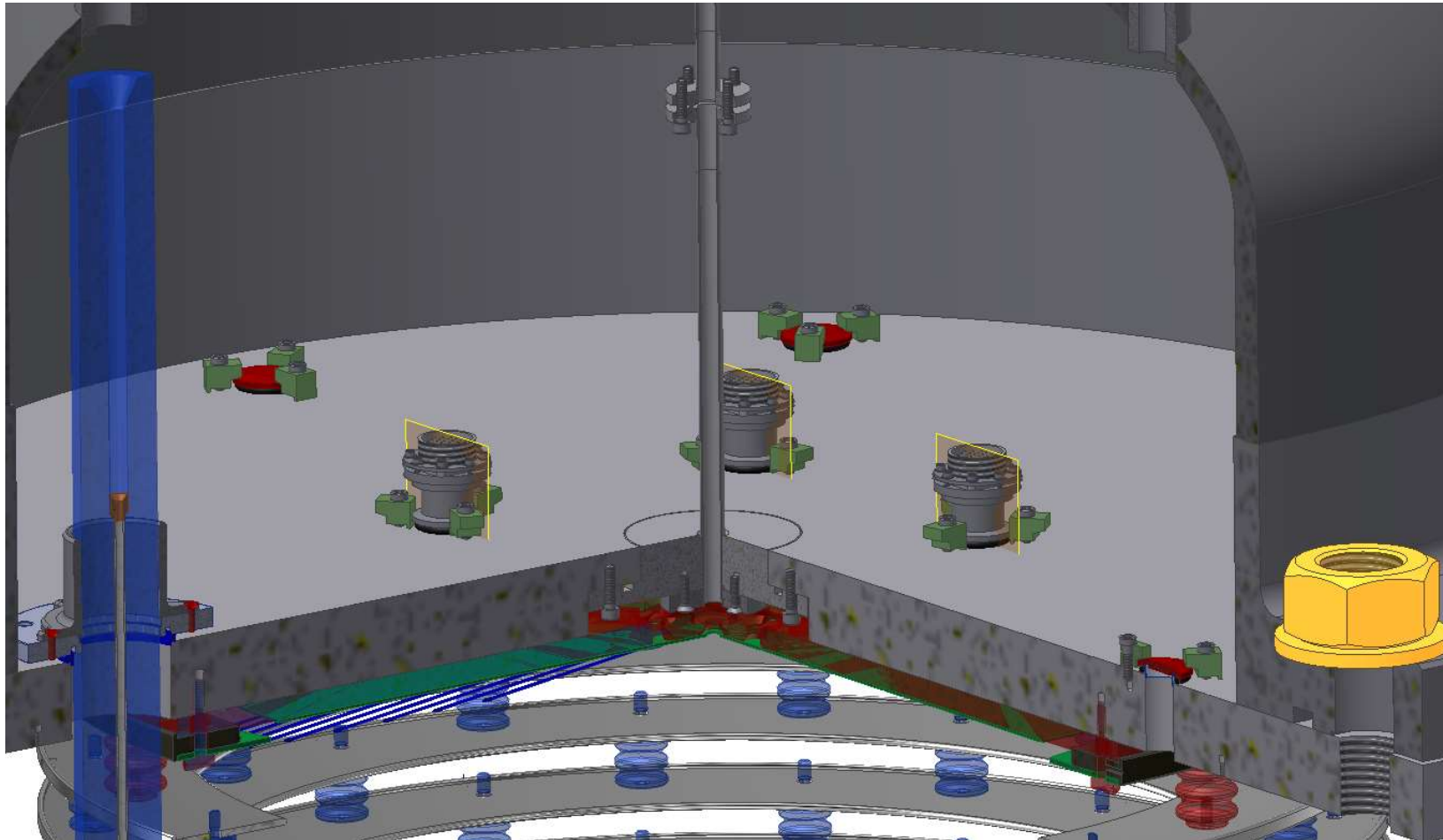
ТРС. Конструкция



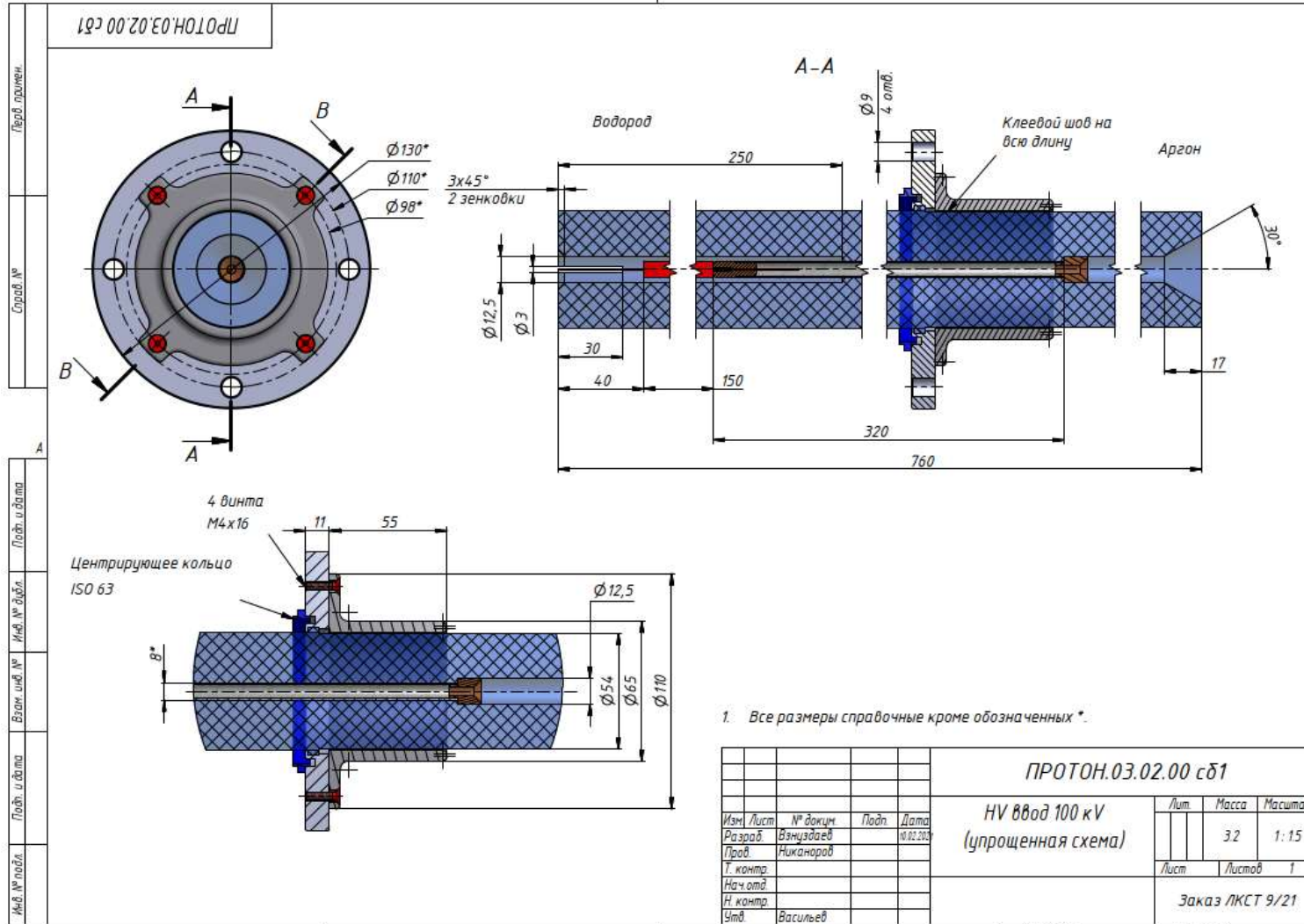
ТРС. Конструкция



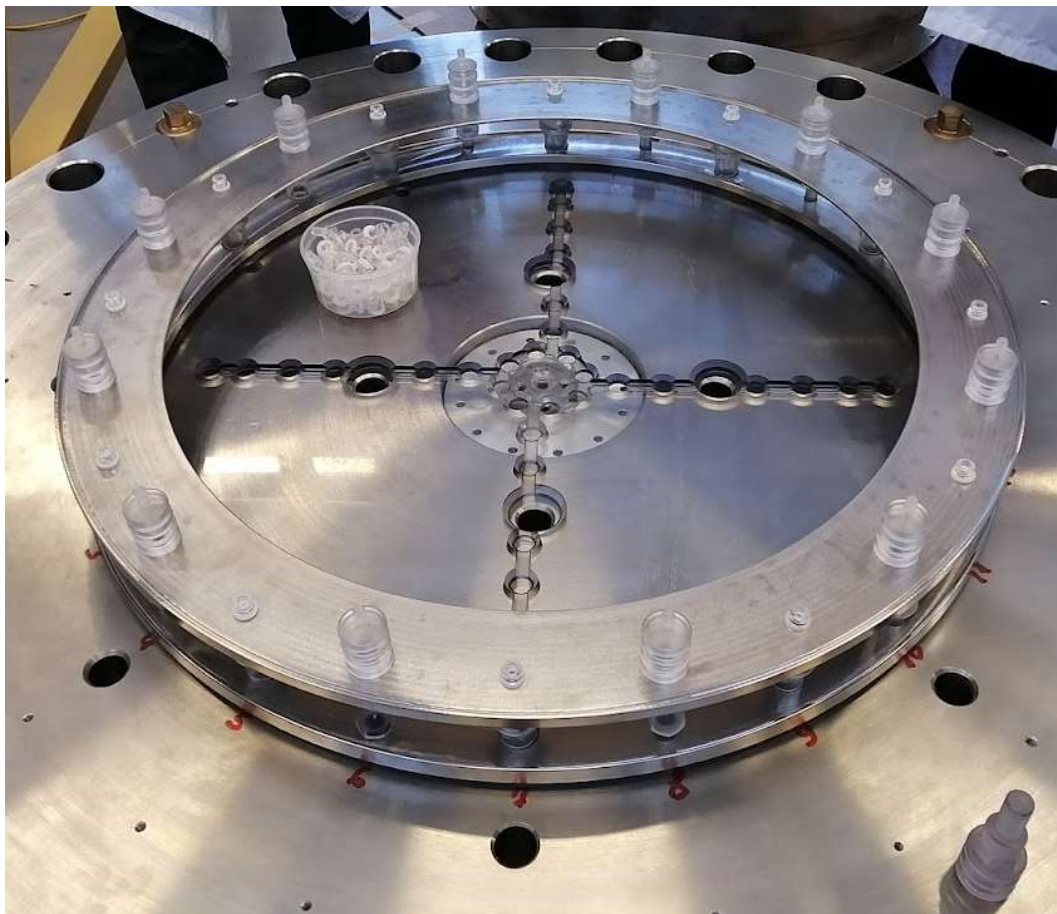
ТРС. Общий вид



Высоковольтный ввод



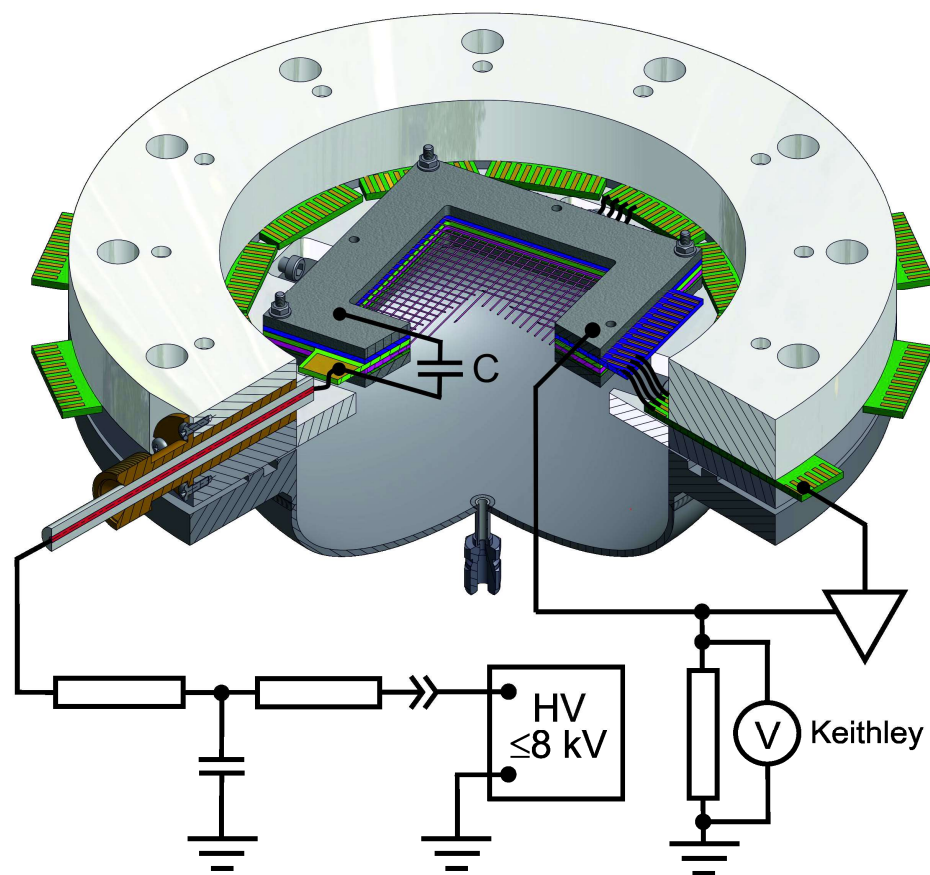
TPC. Тестовая сборка



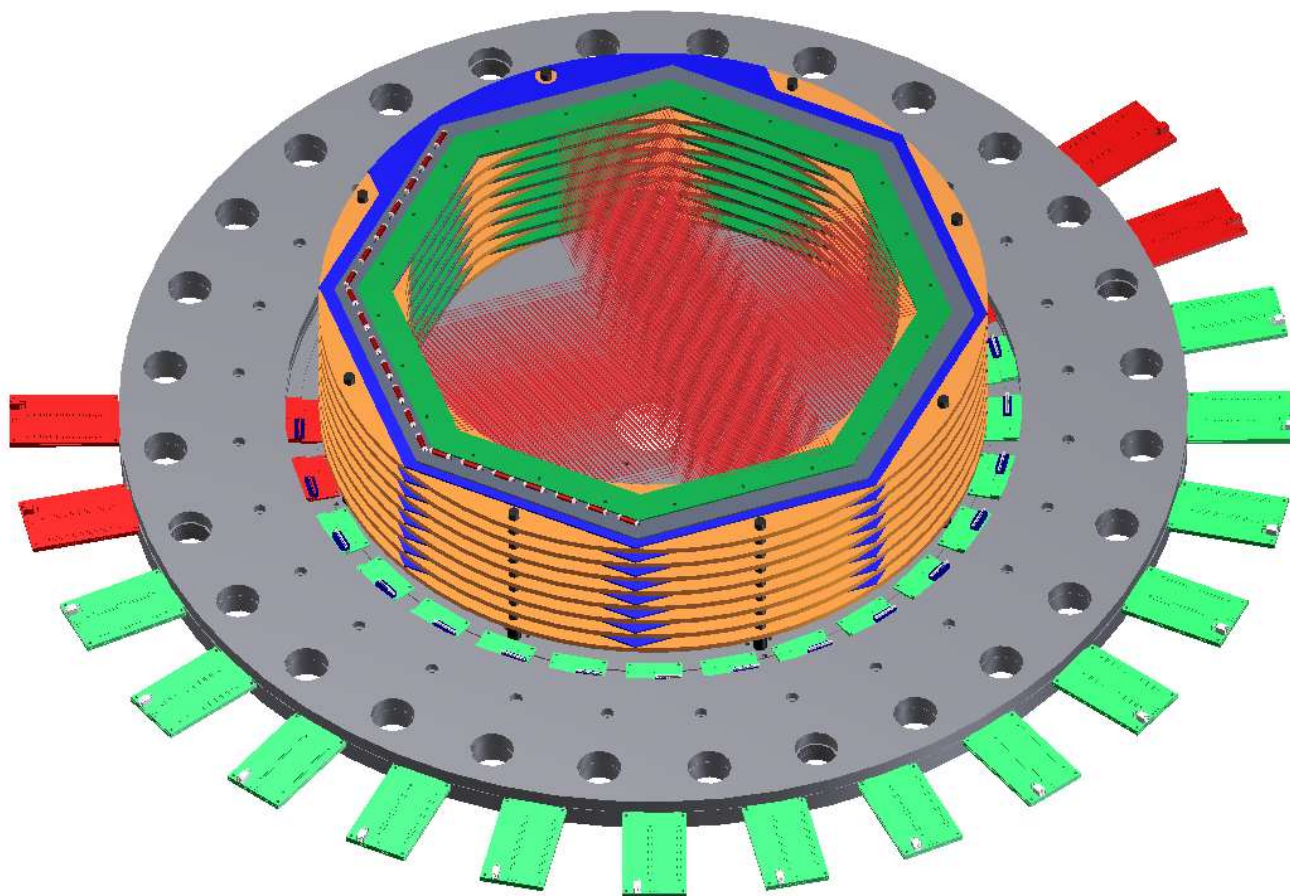
ТРС. Кессон (водородный объем)



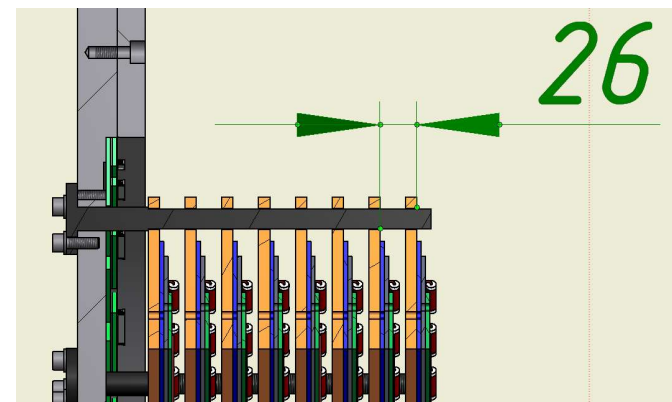
Прототип пропорциональной камеры



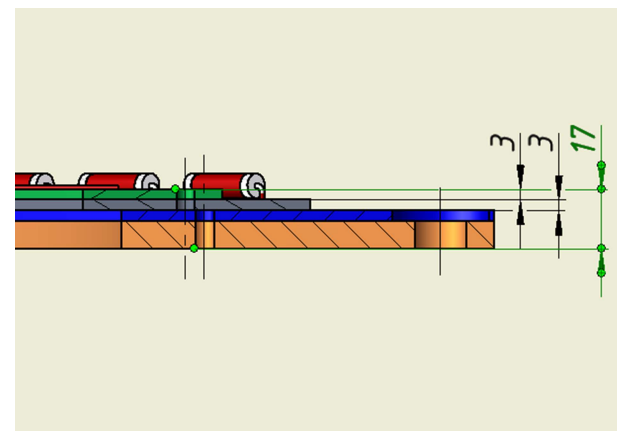
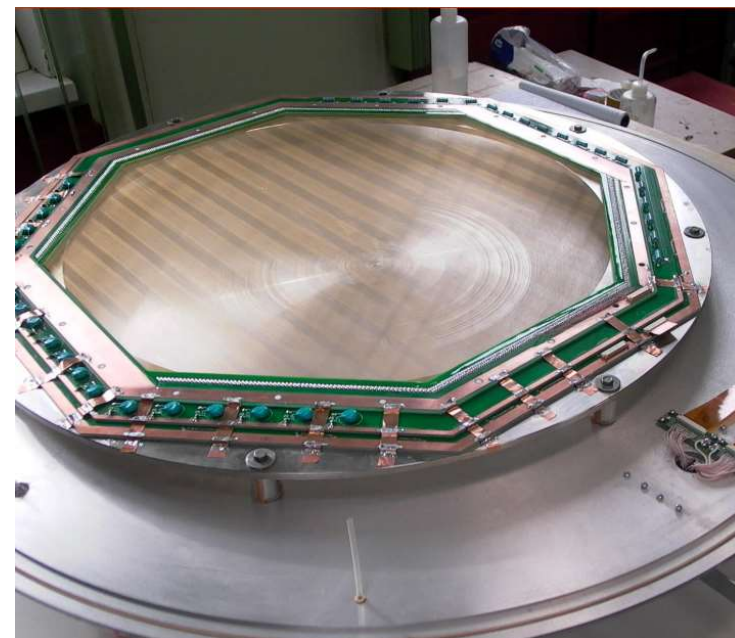
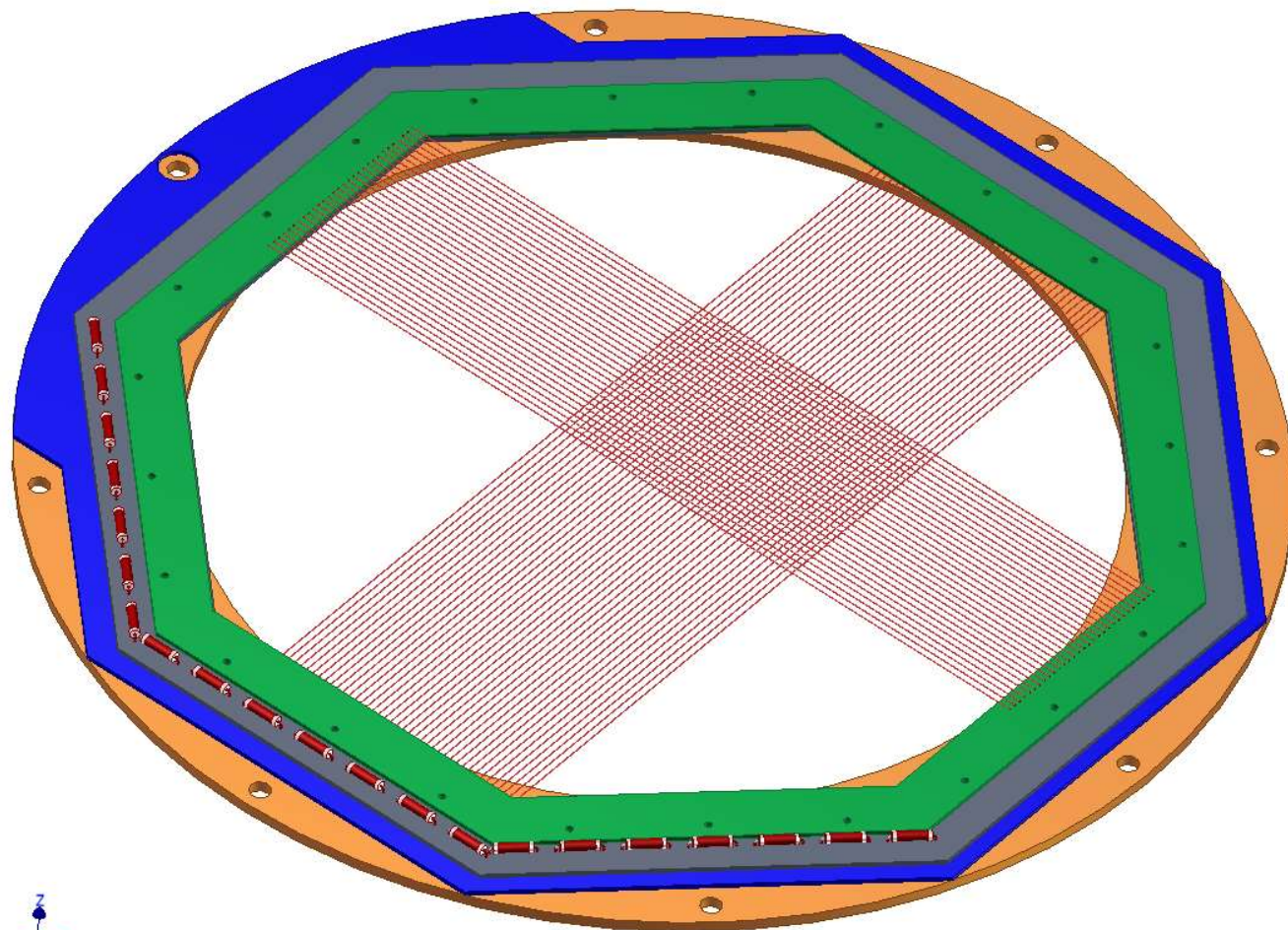
Forward Tracker



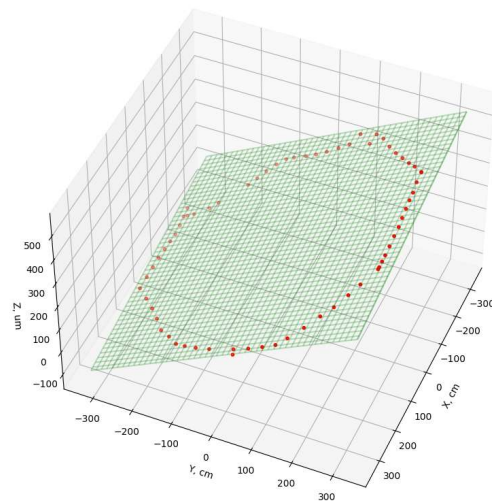
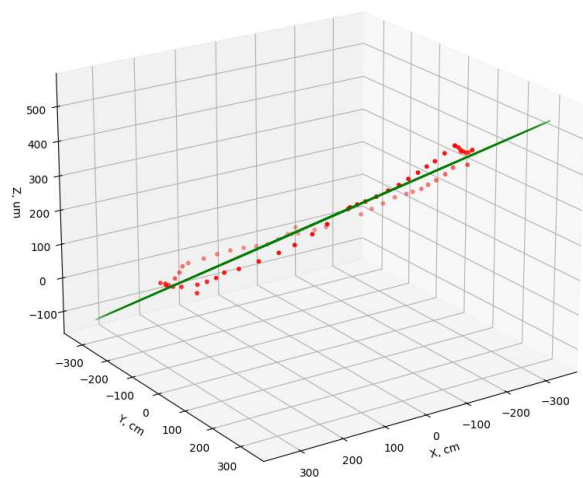
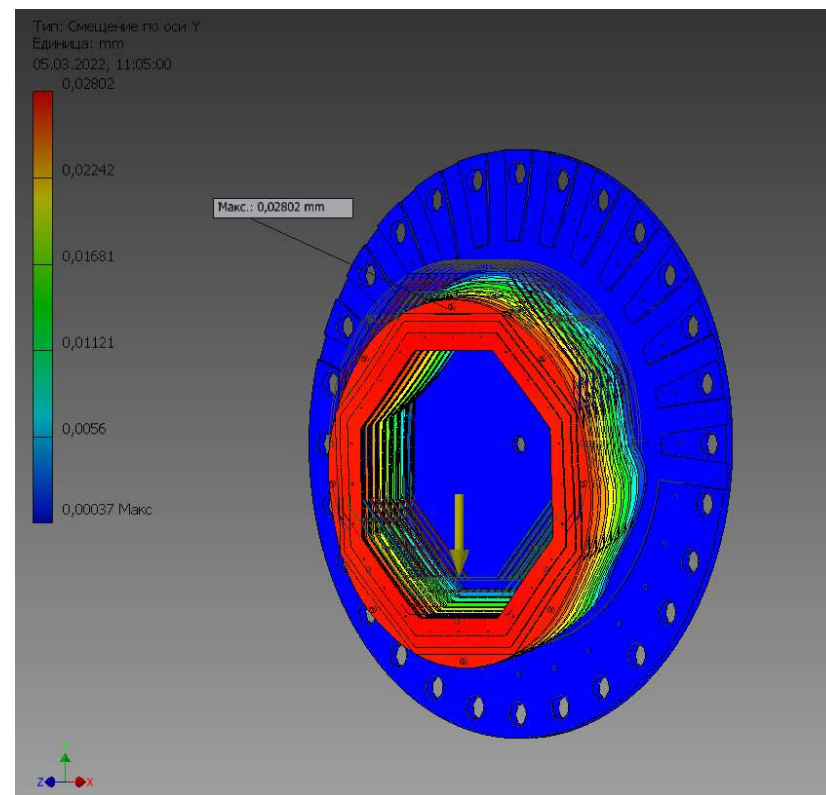
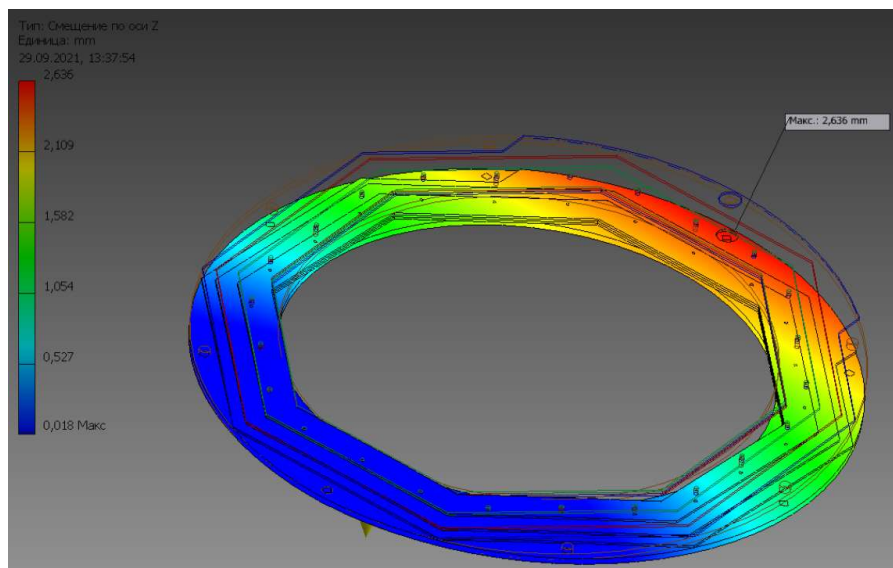
- 8 однотипных станций (камер) с катодным съемом
- Чувствительная область камеры – восьмиугольник с просветом 600 мм
 - Зазор катод-анод 3 мм
 - Съем с точного и неточного катода
 - Анод – 30 мкм проволоки с шагом 3 мм
 - Катоды: 50 мкм проволоки с шагом 3 мм, объединены в стрипы по 5 проволок

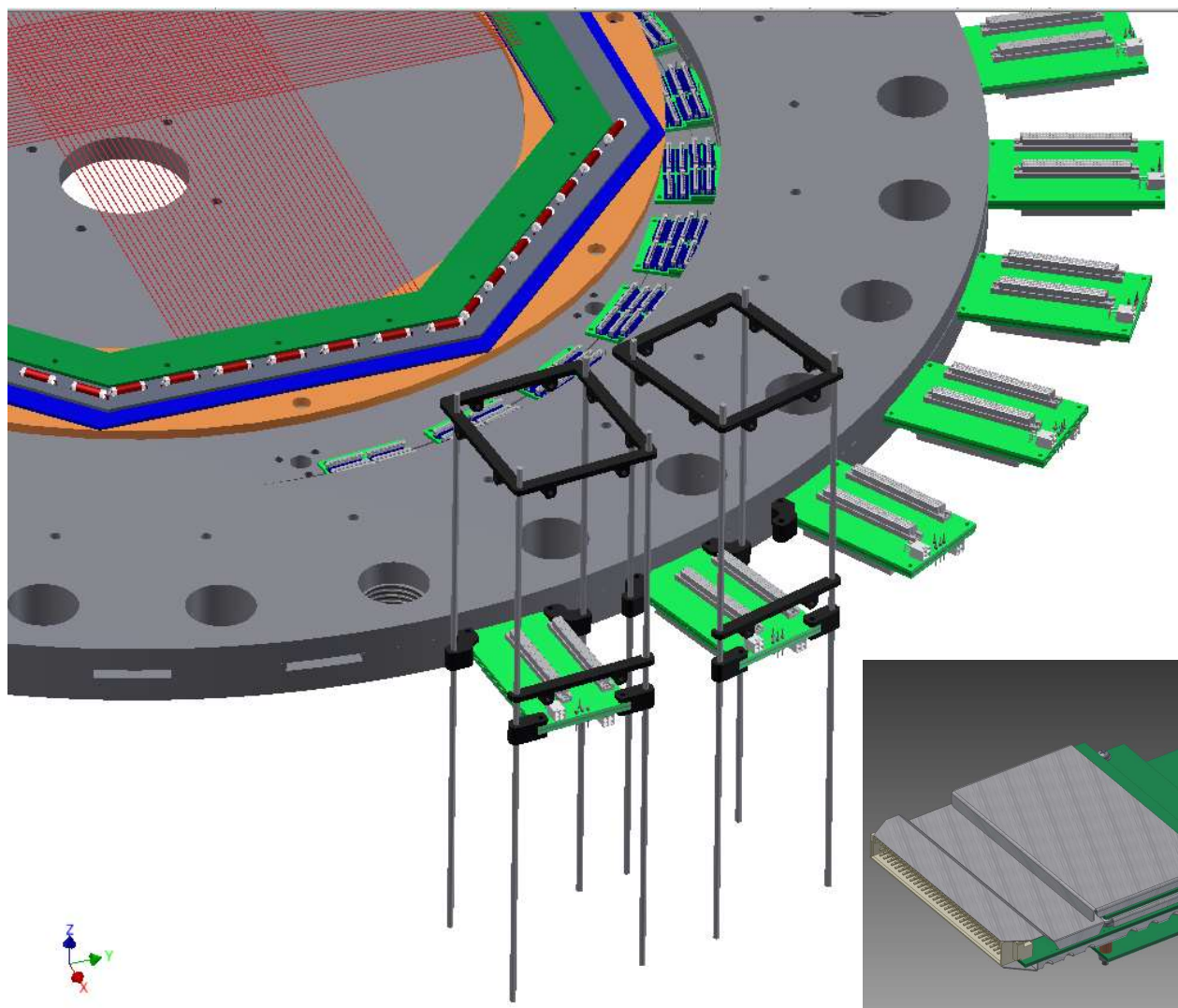


Станция РС



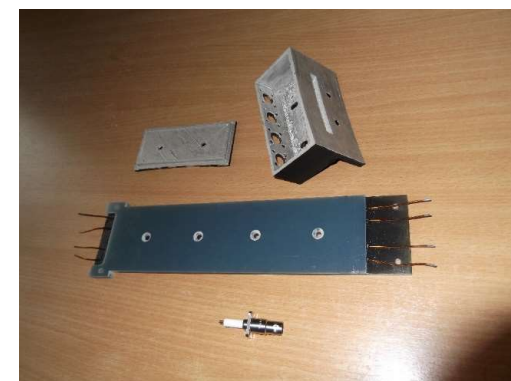
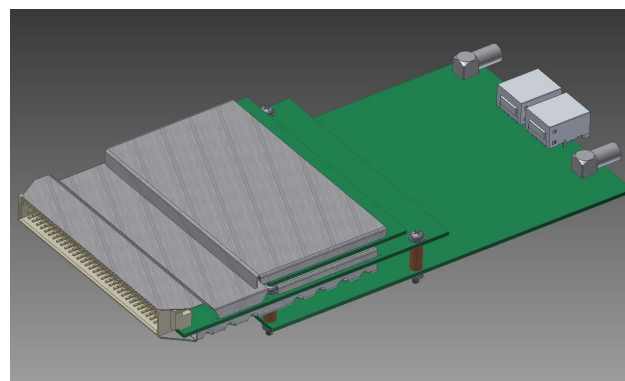
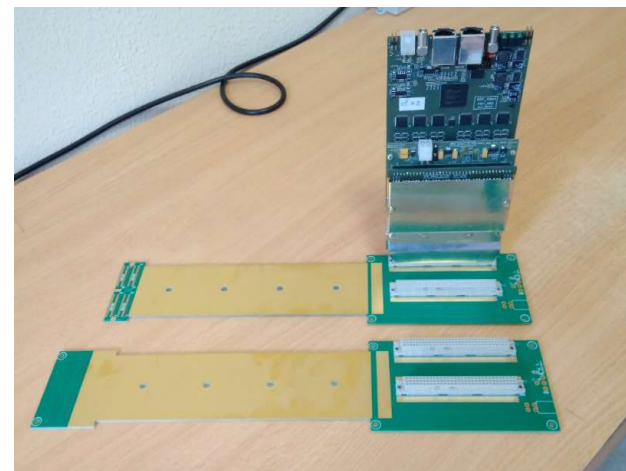
Деформационные расчеты для FT

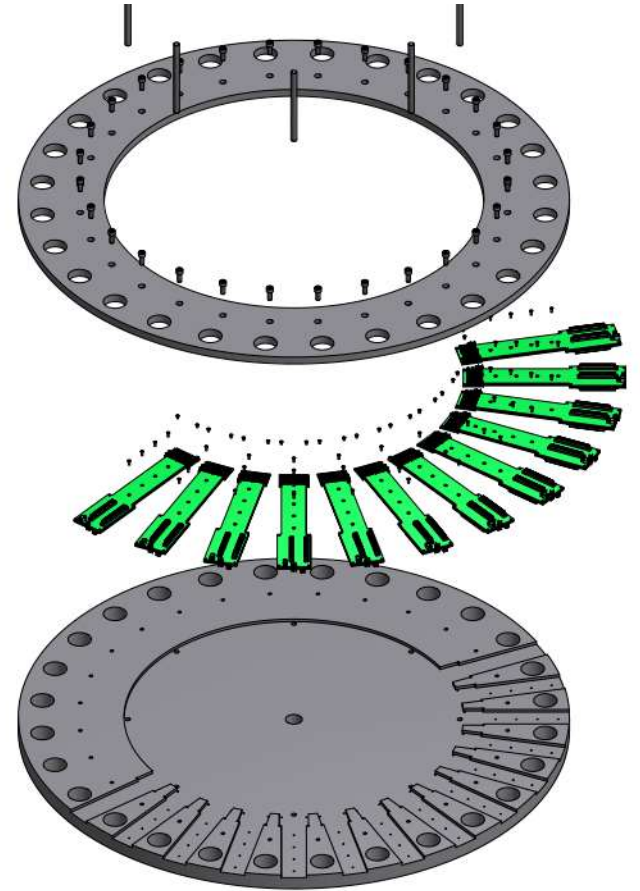




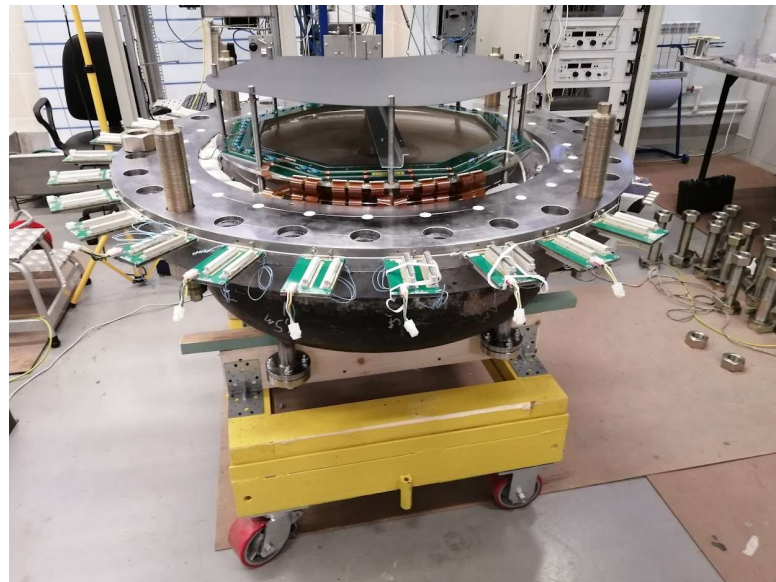
12 модулей, 2304 канала

4 ввода высокого напряжения (до 15 кВ)



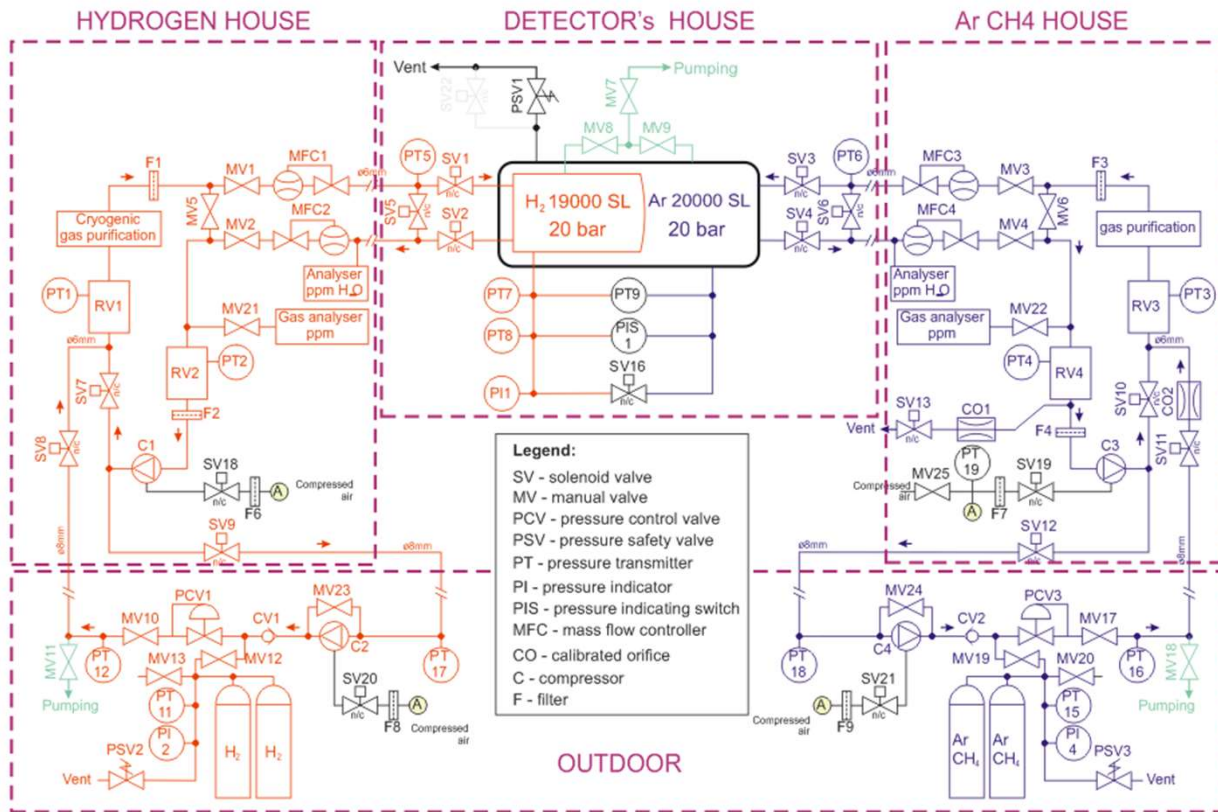


Тестовый сеанс

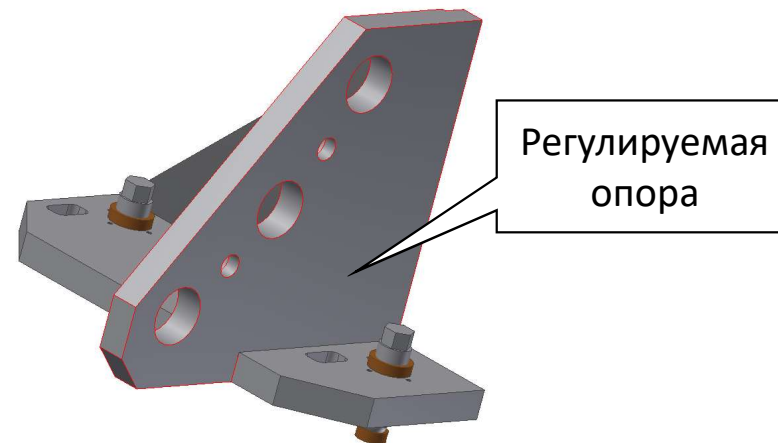
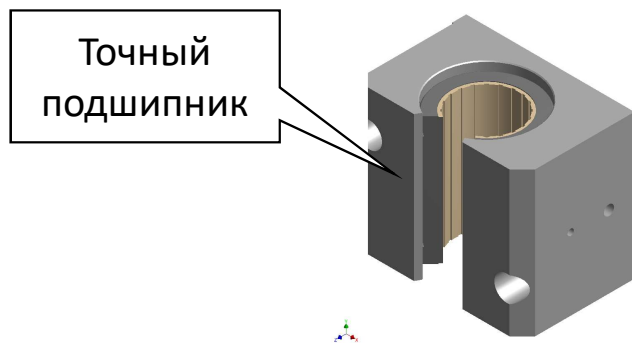
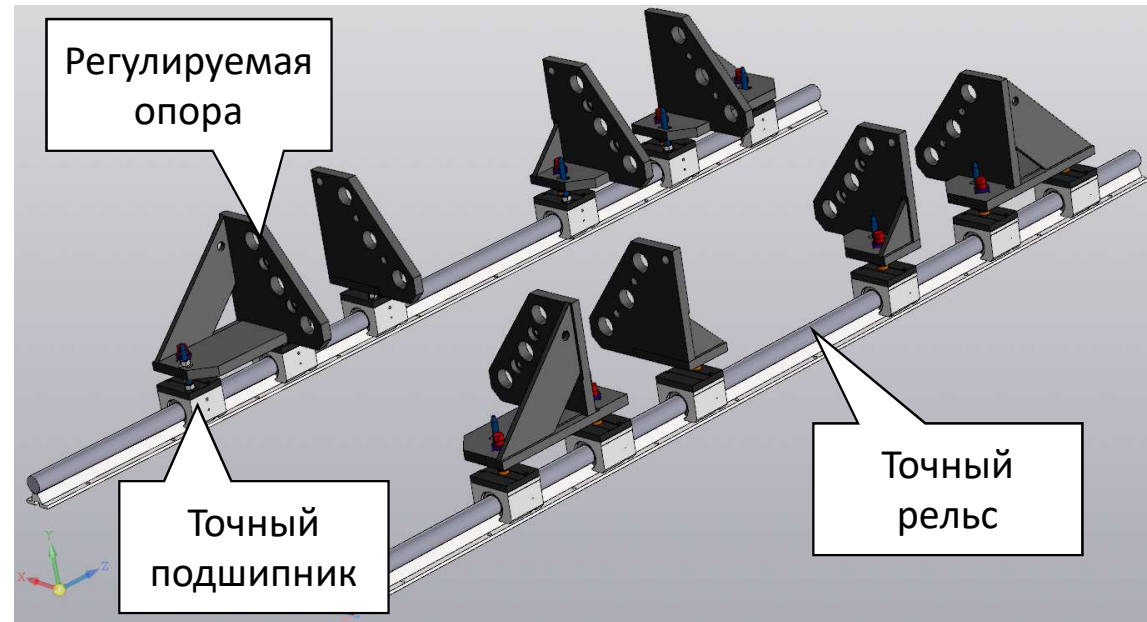
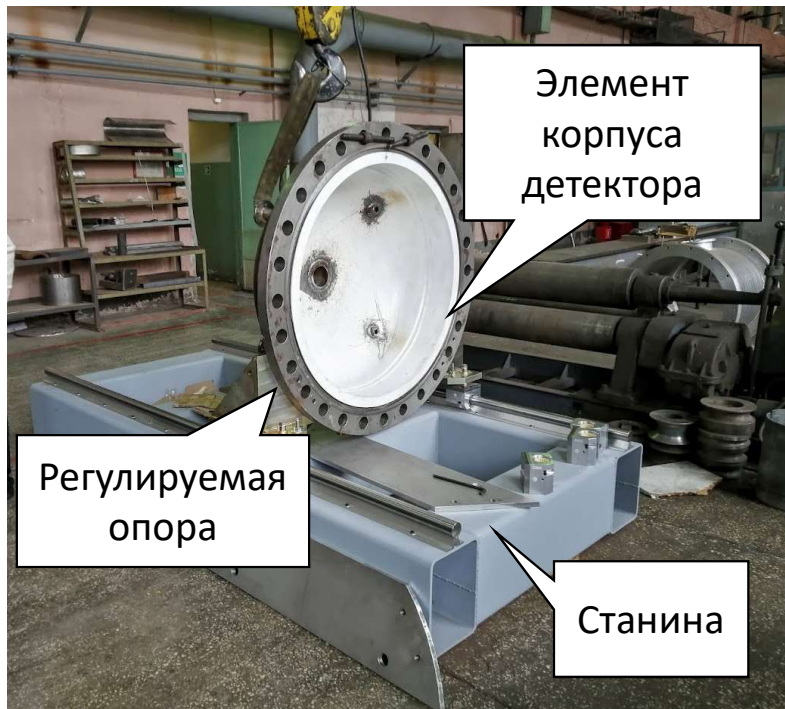


Конфигурация: три станции в частичной сборке рабочего объема,
2 сцинтилляционных счетчика, газовая система для работы в диапазоне давлений
1-20 бар (97% Ar + 3% CH₄), HV до 6 кВ, 6 модулей (288 каналов) электроники, тестовый
источник ⁵⁵Fe

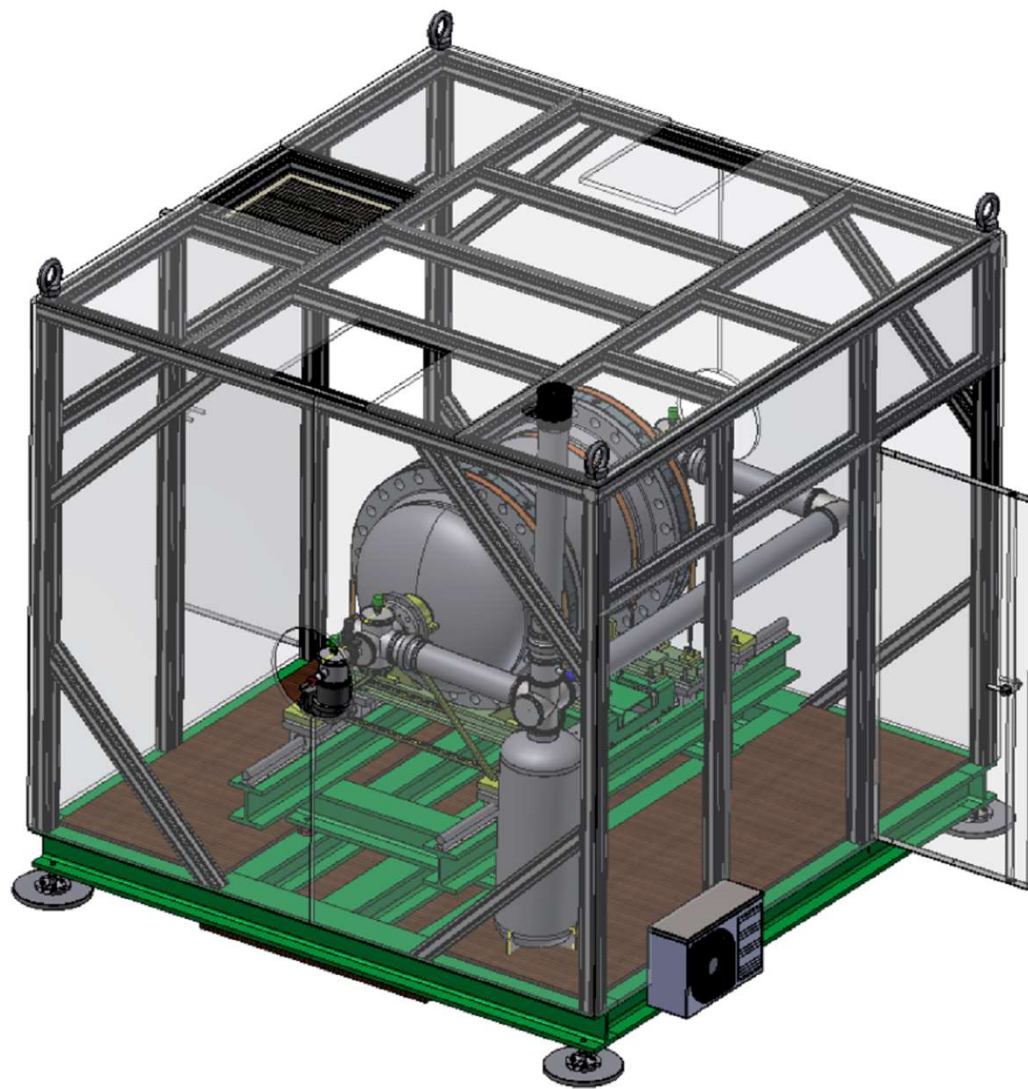
Газовая система



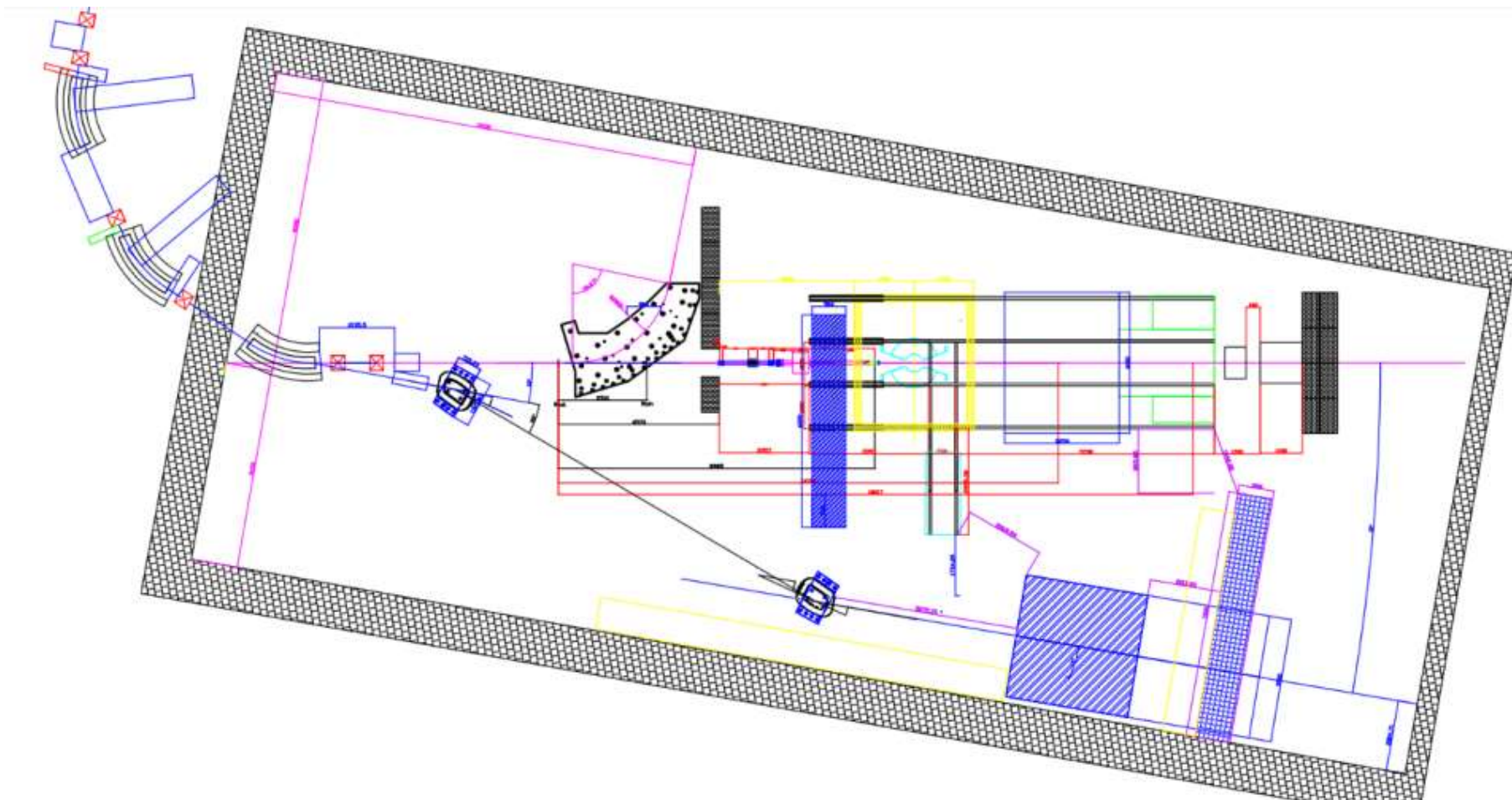
Несущая система детектора PRES



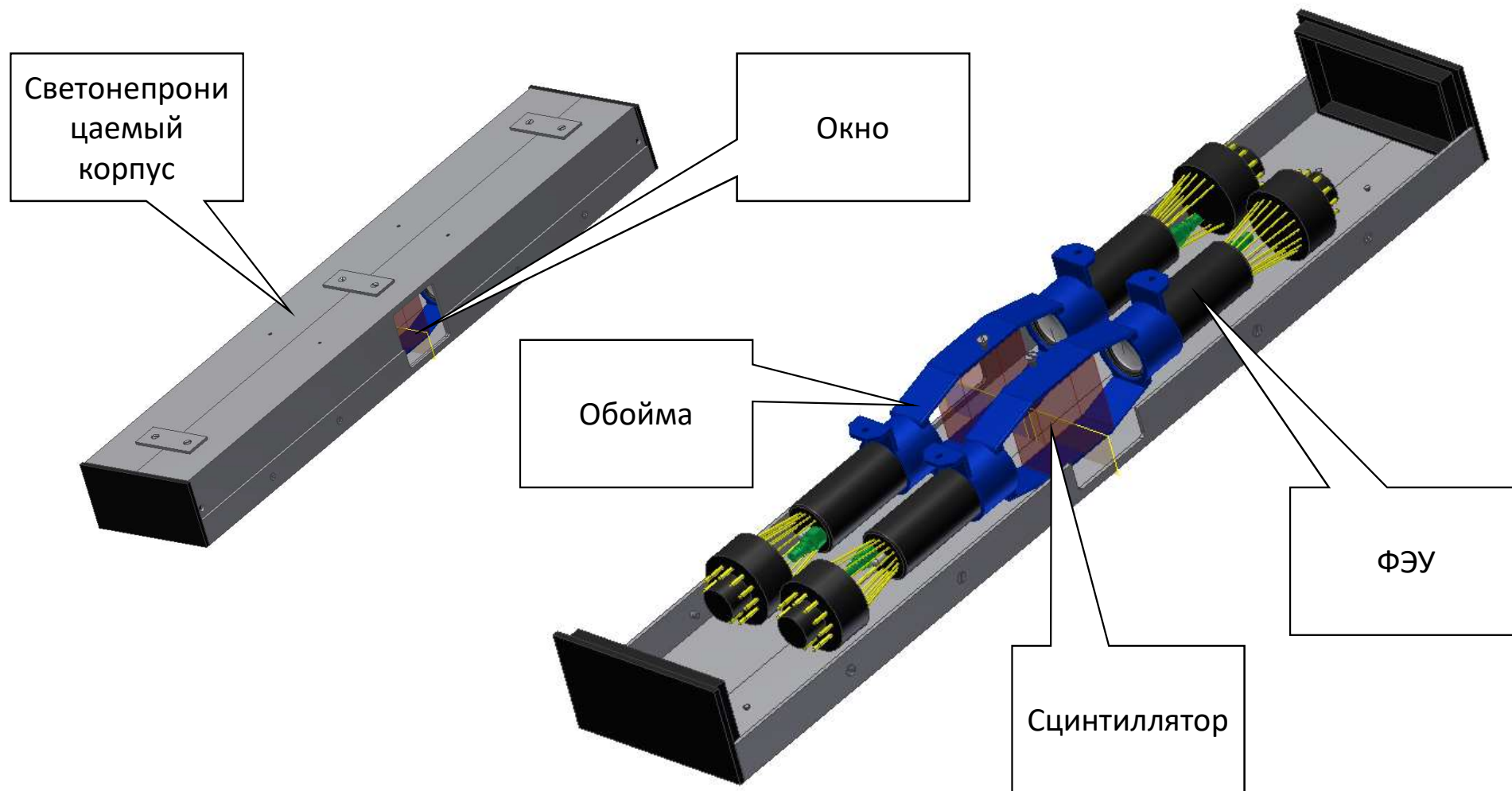
Размещение центрального детектора



Размещение установки в зале МАМІ А2



Сборка сцинтилляционных счетчиков

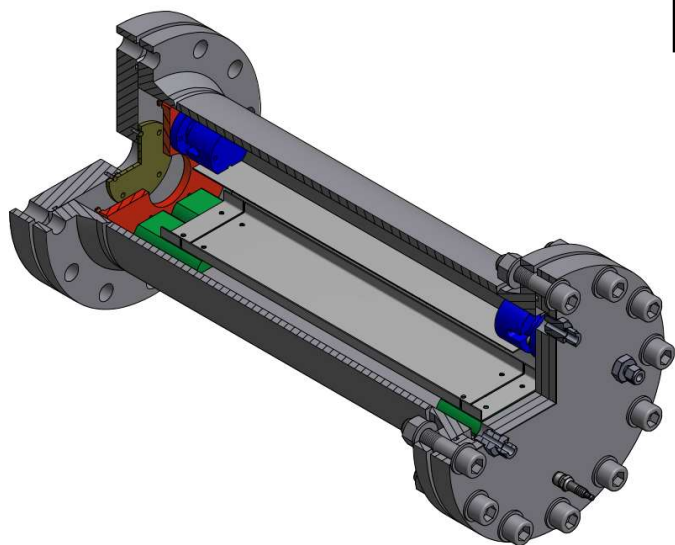
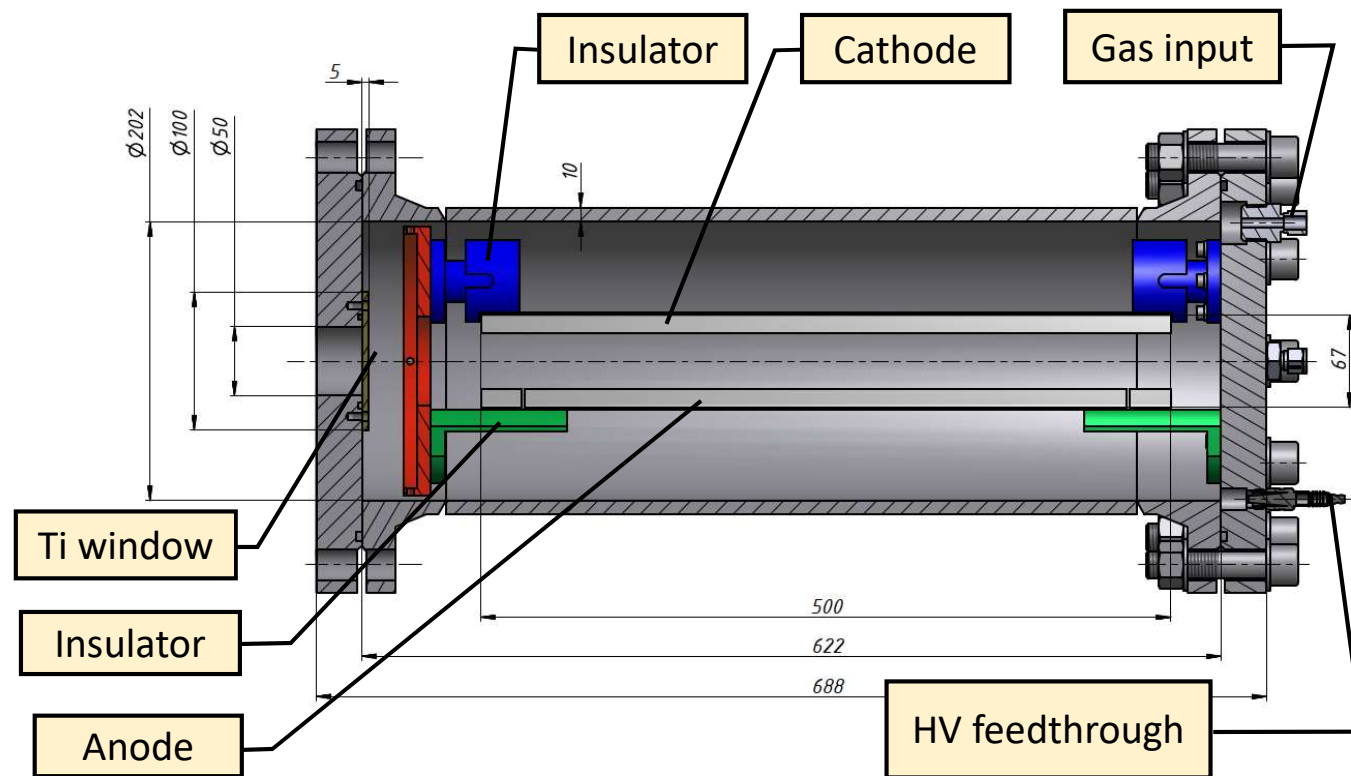


Детектор положения пучка

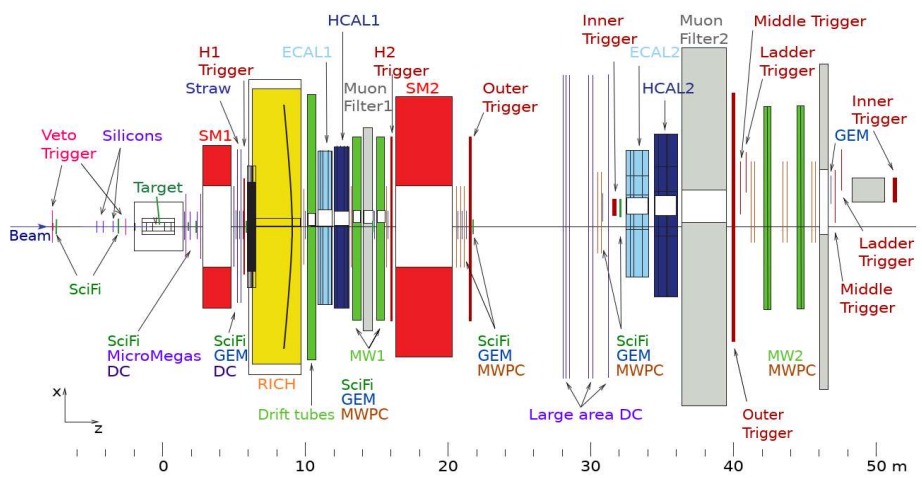
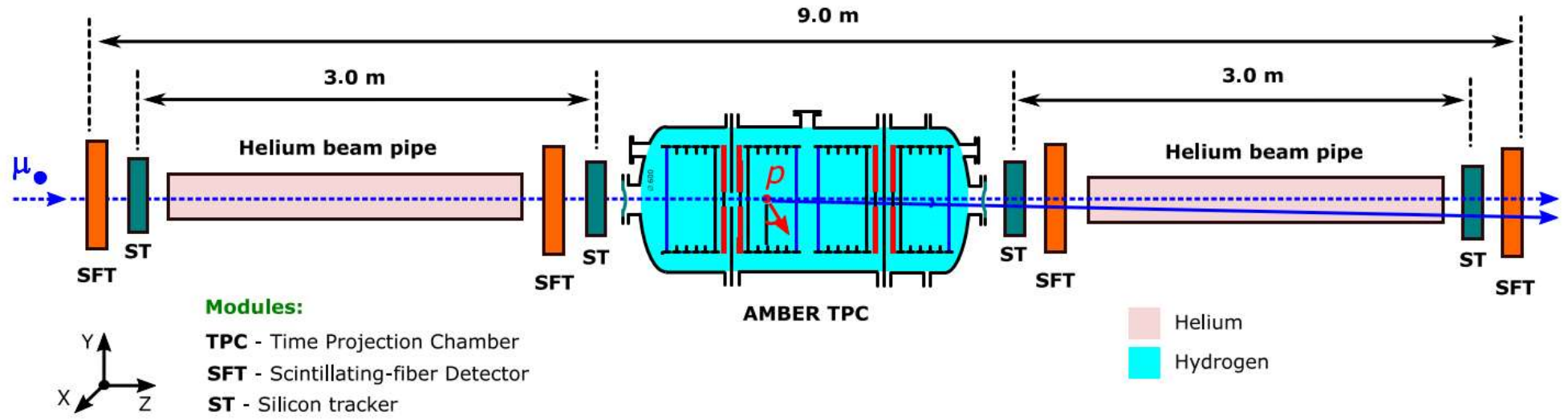


Устройство
разработано и
изготовлено под
руководством
В. Т. Грачева

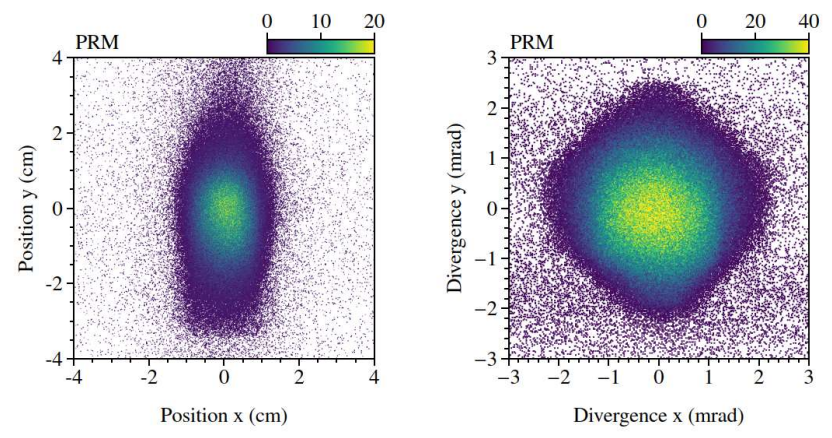
Монитор интенсивности пучка (Beam Intensity Monitor)



AMBER (Apparatus for Meson and Baryon Experimental research)

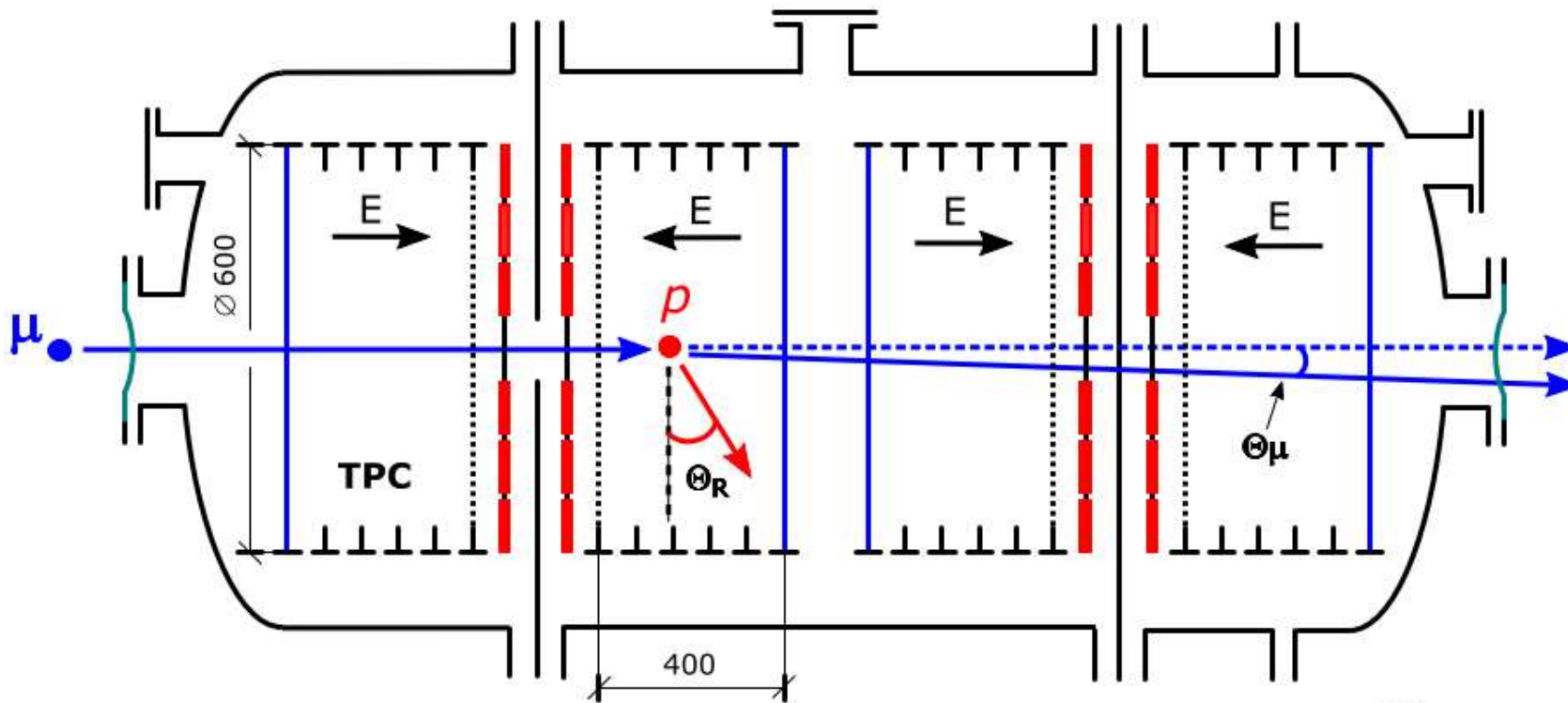


2021 COMPASS spectrometer setup



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

Схема детектора AMBER TPC



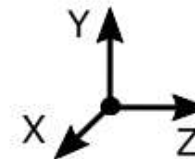
Measured quantities:

Recoil energy T_R

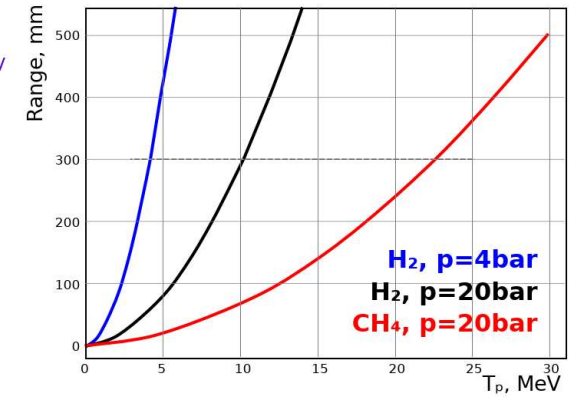
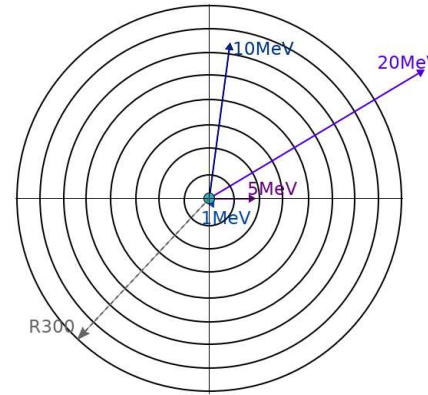
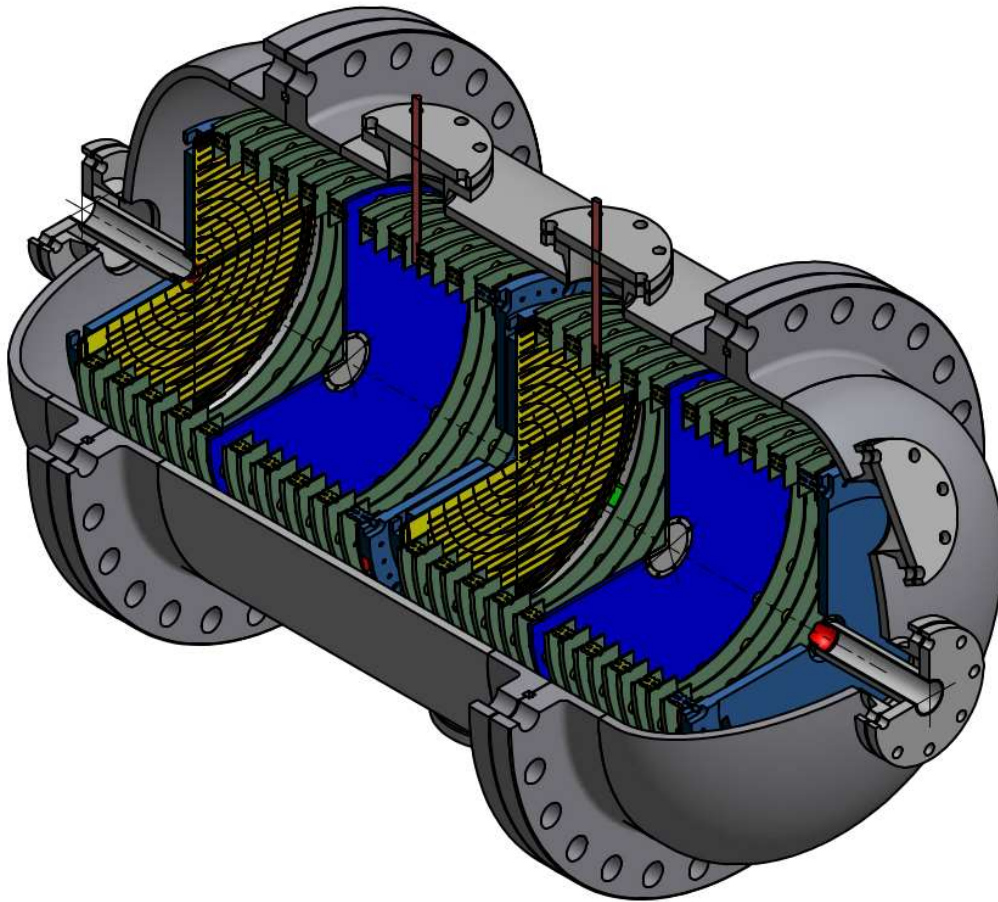
Recoil angle Θ_R

Scattering angle Θ_μ

Vertex coordinate Z

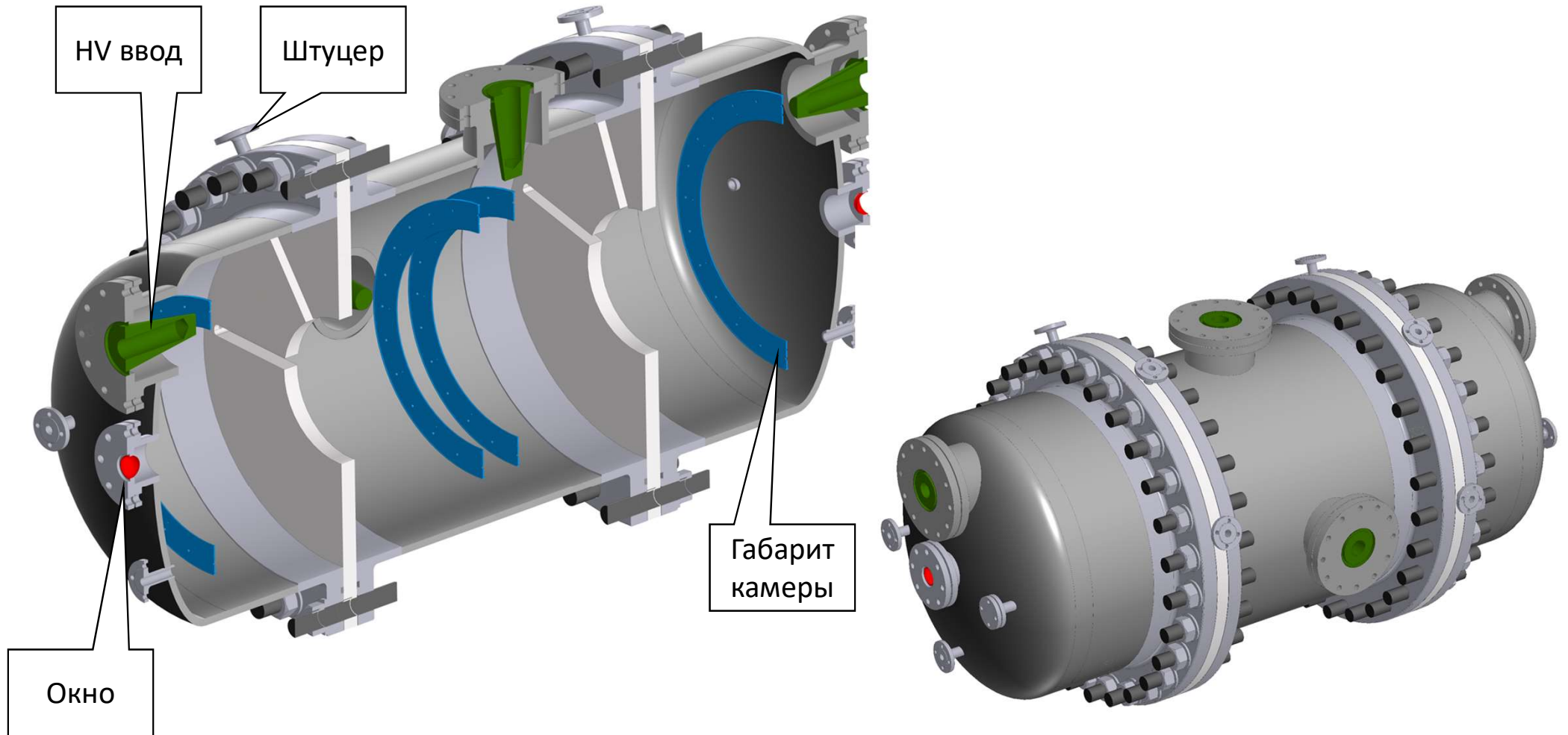


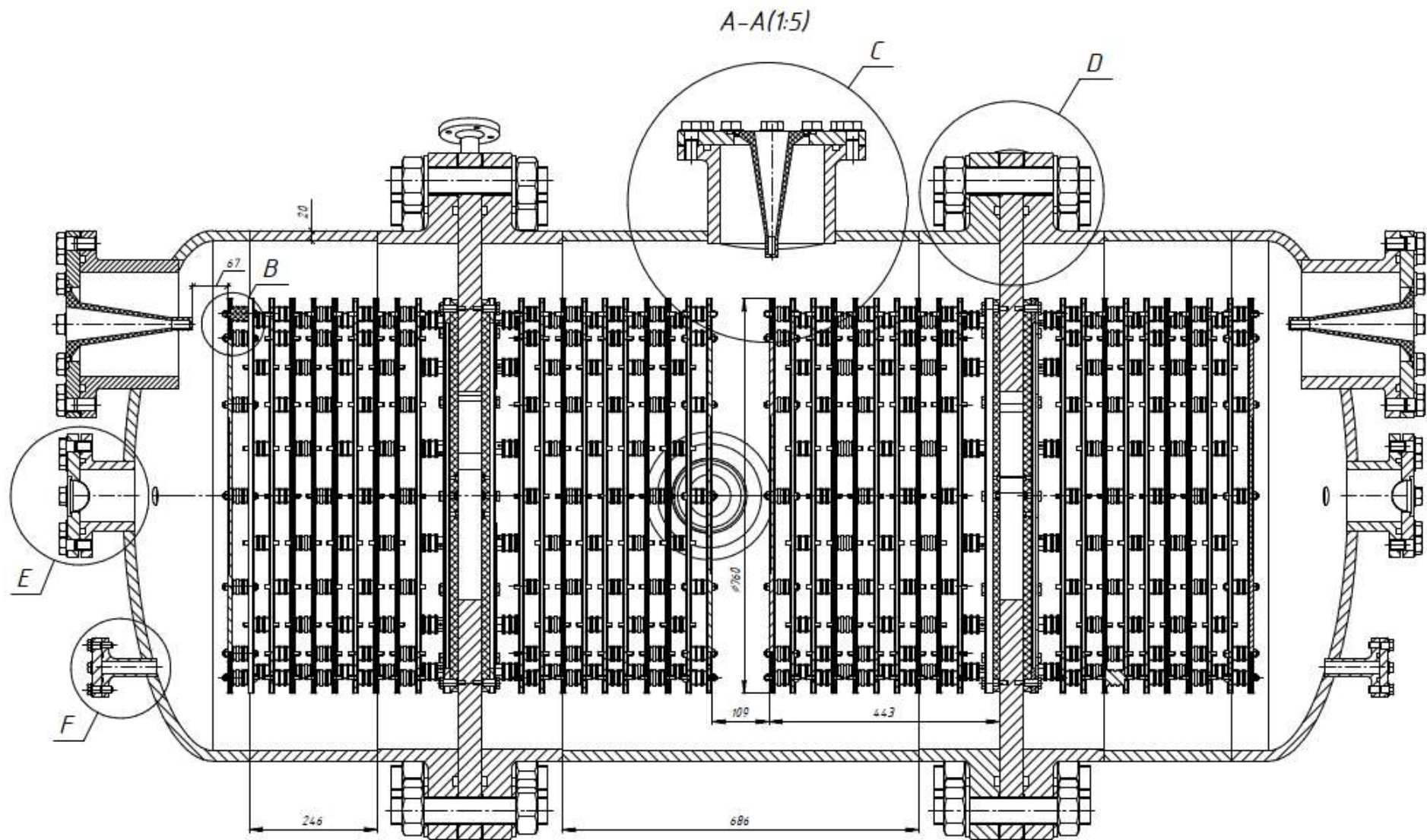
Вариант конструкции AMBER TPC



cathode-grid distance (drift zone)	400.0 mm
grid-anode distance	10.0 mm
grid wire diameter	0.1 mm
grid wire spacing	1.0 mm
grid transparency	1.8%
anode outer diameter	600 mm
hydrogen pressure	20 bar and 4 bar
electric field in drift space E/P	0.116 kV/(cm bar)
electric field in grid-anode zone E/P	0.340 kV/(cm bar)
electron drift velocity in the drift zone	0.41 cm/ μ s
electron drift velocity in the grid-anode space	0.70 cm/ μ s

Вариант конструкции корпуса AMBER TPC





Благодарю за внимание!