Исследование эффекта старения катодно-стриповых камер детектора CSC на установке GIF++ (ЦЕРН).

В. Перелыгин, В. Пальчик

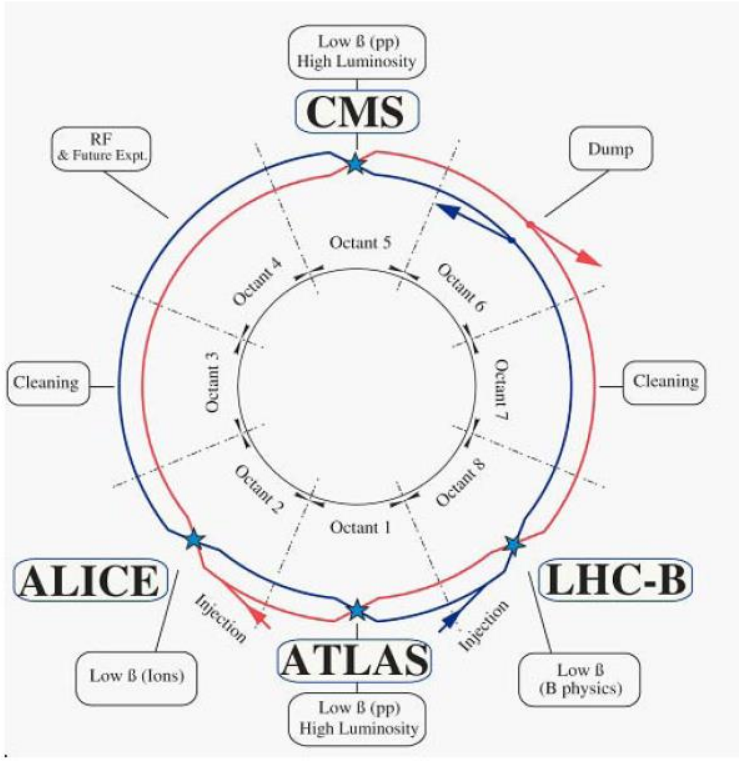
(ОИЯИ, Дубна)

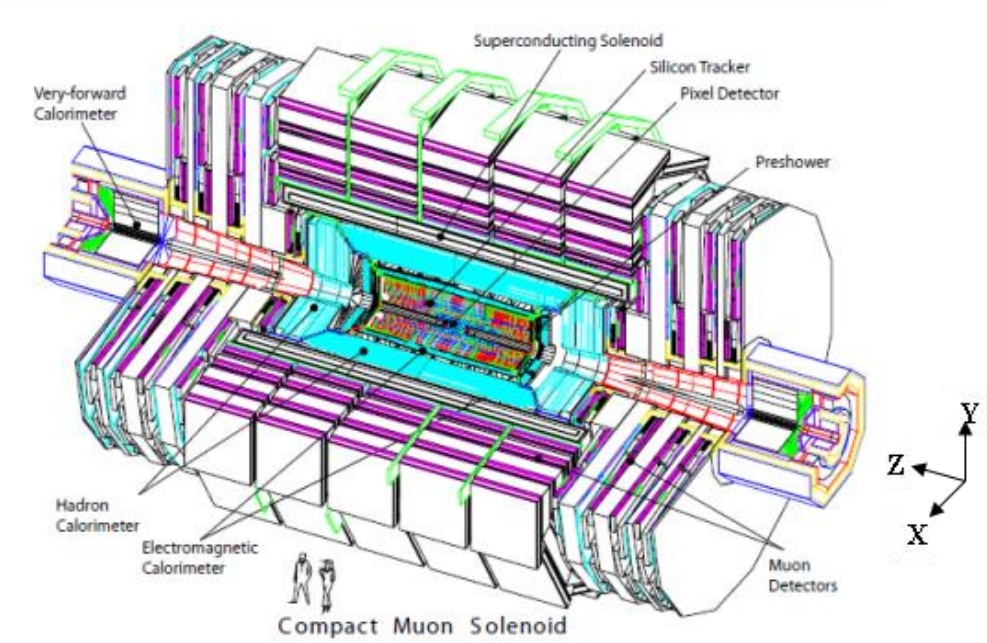
Научная сессия секции ядерной физики ОФН РАН
1-5 апр. 2024 г., г. Дубна, ОИЯИ

Содержание

1. Мюонная система детектора CMS.
2. КСК как часть торцевой мюонной системы CMS.
3. Модернизация LHC в HL-LHC и тесты на радиационное старение газовых детекторов.
4. Исследование эффекта старения КСК детектора CSC на установке GIF++.
5. Заключение.

CMS на БАК





CMS состоит из 11 частей:

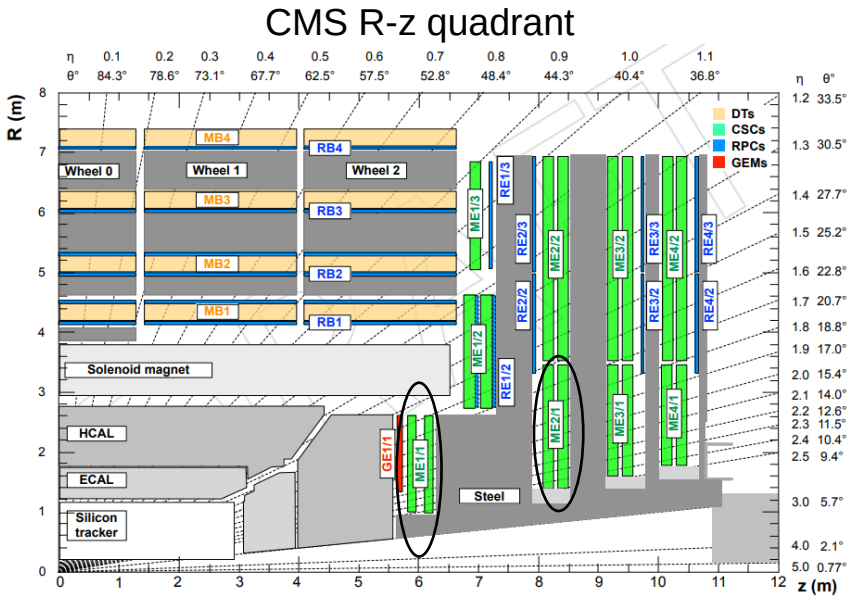
- пять «колец» центральной части, включающих в себя сам соленоид (B=4Тл), внутренний трекер, электромагнитный и адронный калориметры, а также моюнную систему центральной части

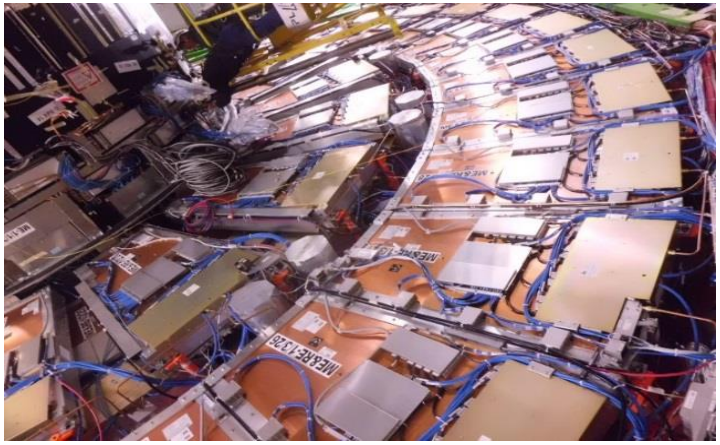
- шесть «дисков» торцевой части (по три с каждой стороны от центральной части), содержащих моюнную систему торцевой части и торцевые электромагнитный и адронный калориметры.

Две секции калориметра малых углов расположены за торцевыми частями детектора.

КСК в мюонной системе CMS

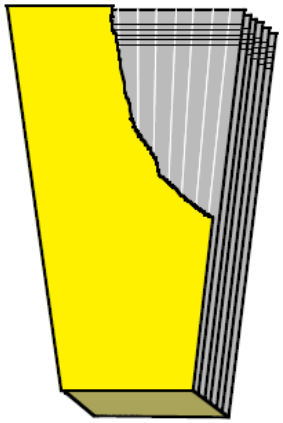
The 6-layer Cathode Strip Chambers are the part of the CMS Endcap muon system. There are 540 CSCs of different types and sizes composing 4 ME stations (green) dividing in turn into 9 “rings” in each Endcap.
The system covers $0.9 < |\eta| < 2.4$. The sensitive area: 6,300 m^2, number of r/o channels: 477K

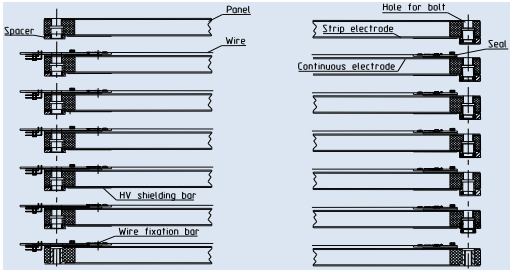


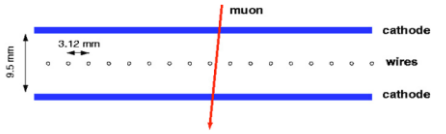


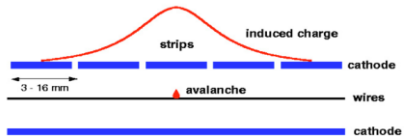
Muon system provides:

- Muon identification and momentum measurement
- Muon trigger
- Rejection of background by matching of muon tracks with the inner Tracker
- $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\mu$ (“golden mode”)





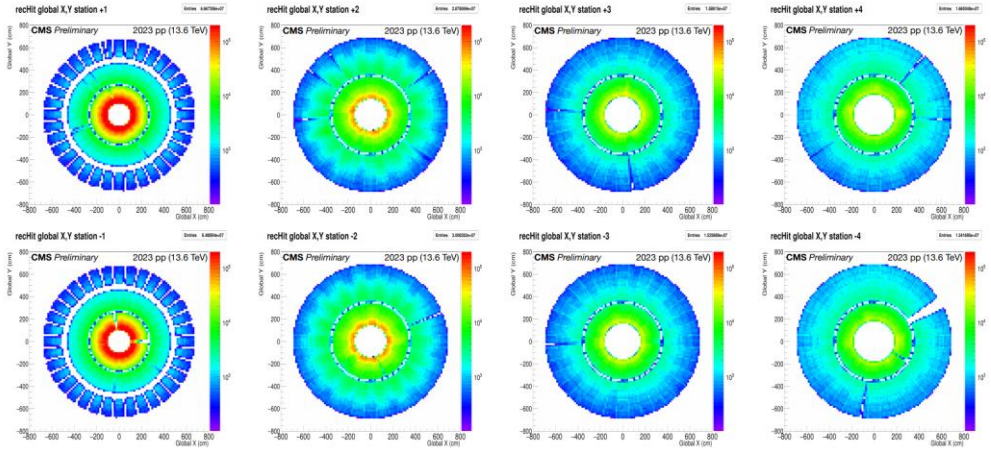




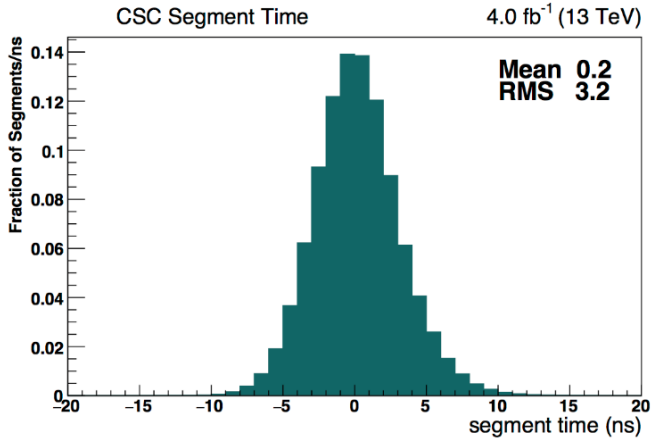
G.L. Bayatian et al. [CMS collaboration] “The Muon Project”, Technical Design Report, CERN/LHCC 97-32, CMS TDR 3, 15 December 1997.
S. Chatrchyan et al. [CMS Collaboration], “The CMS experiment at the CERN LHC”, JINST 3 (2008) S08004.

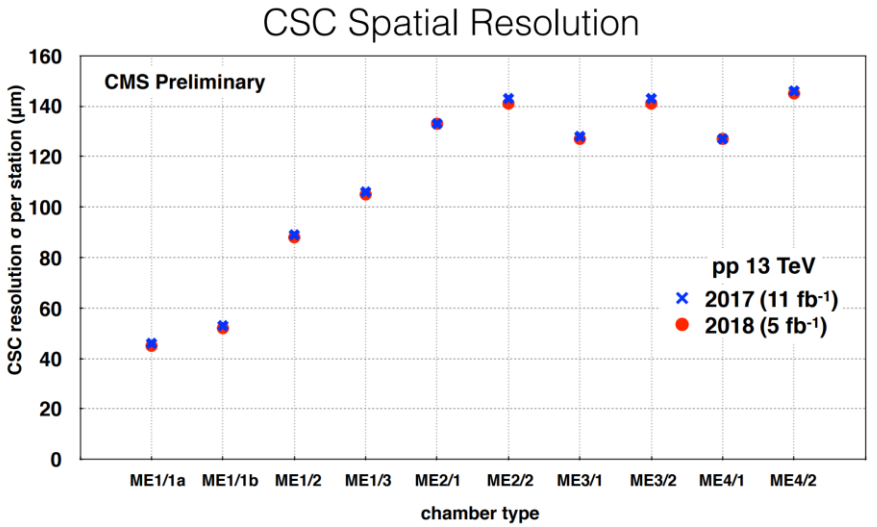
Мюонная система торцевой части CMS в сеансах набора данных в p-p столкновениях

CSC reconstructed hit positions from one run of a muon-triggered dataset



The global x and y position of reconstructed CSC hits in the four stations of the +z and -z endcaps of the CMS endcap muon system from one run (166 pb^{-1}) of a muon-triggered dataset





CSC muon system operation :

- High Spatial resolution 45÷ 150 μm
- Timing resolution ~ 3 ns

S. Chatrchyan et al., The performance of the CMS muon detector in proton-proton collisions at √s = 7 TeV at the LHC, CMS-MUO-11-001, CERN-PH-EP-2013-072, JINST 8 (2013) P11002. DOI: 10.1088/1748-0221/8/11/P11002.

S. Chatrchyan et al., Performance of the CMS muon detector and muon reconstruction with proton-proton collisions at √s = 13 TeV, JINST 13 (2018) P06015.

Эффект радиационного старения и парниковые газы

The luminosity increase with LHC upgrade to HL-LHC will cause a significant rise of the particle background rate.
Therefore, the study of possible aging effects of detector materials and gases is of great importance.

CSC working gas mixture:

$$\mathbf{40\%Ar+50\%CO_2+10\%CF_4}$$

CF_4 prevents aging and ensures the reliable operation of CSCs as a quencher.

but

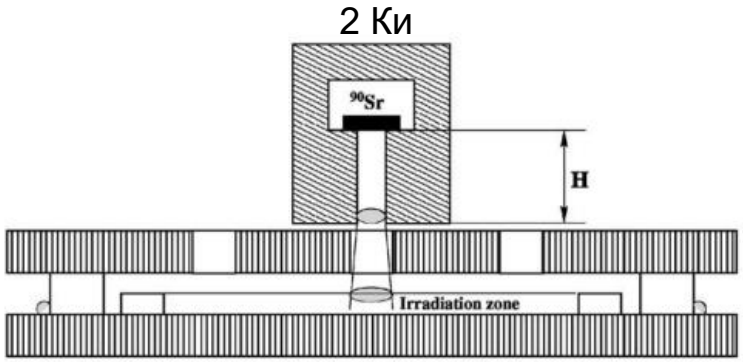
CF_4 is a greenhouse gas with the GWP=7390 (величина ПГП)

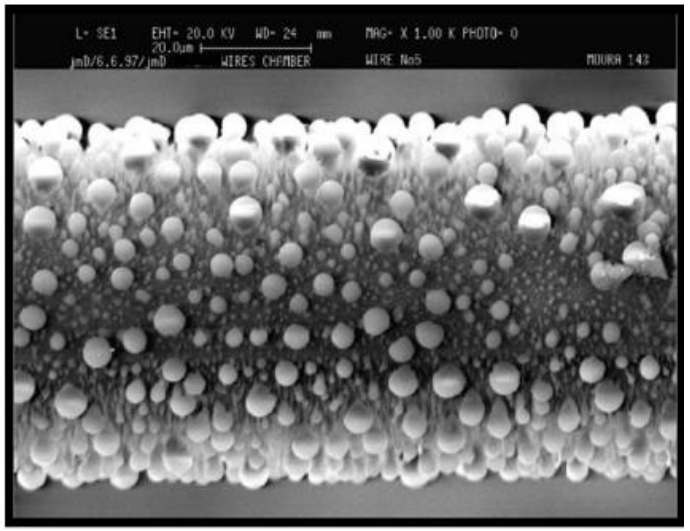
The use of F-gases should be limited.

1. Investigate of the possibility to operate with reduced CF_4 amount
2. Search for a CF_4 eco-friendly replacement (HFO1234ze, $C_3H_2F_4$, GWP < 1 for 100 year)

Тесты на старение с различными прототипами КСК CMS-1

I. Авторами статьи ***T. Ferguson et al. Aging studies of CMS muon chamber prototypes. NIMA 488 (2002) pp. 240–257*** проводились тесты с изучением эффекта старения для газовых смесей 30%Ar+50%CO_2+20%CF_4, 30%Ar+70%CO_2 и 40%Ar+50%CO_2+10%CF_4 при облучении источником ^{90}Sr прототипов КСК.





30%Ar+70%CO_2 gas mixture: Si deposits on the anode wire in the irradiated zone

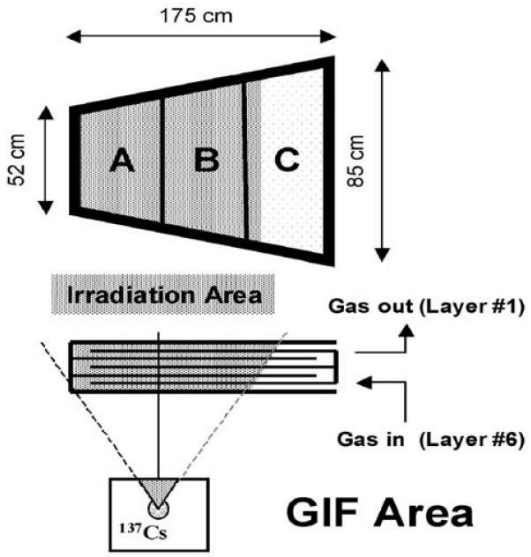
В прототипах в качестве уплотнения использовался силиконвый герметик RTV, который проникал в газовый объем камеры.
Газовое усиление в смеси без CF_4 упало в 2 раза после дозы в 0.25 Кл/см. Наблюдались Si отложения на проволоках.
Для CF_4 – содержащих смесей данный эффект был незначителен вплоть до 13 Кл/cm

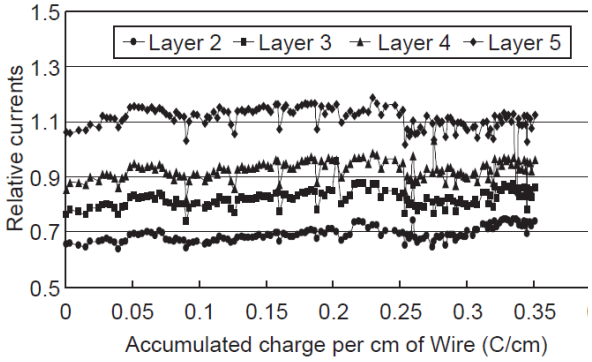
Использование Si герметиков внутри газвового объема каиер недопустимо.
Наличие в газовой смеси CF_4 предотвращает образование отложений Si на проволоках:
$4F\bullet + Si = SiF_4 \uparrow$

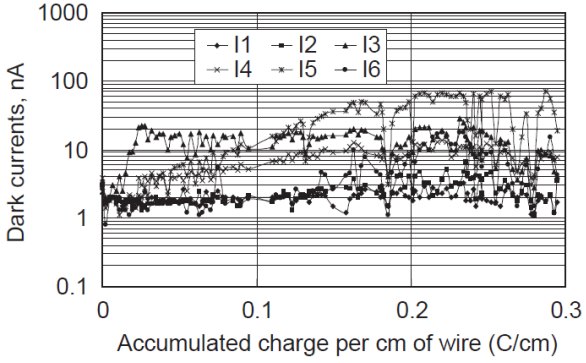
Тесты на старение с различными прототипами КСК CMS-2

II. В 2000-2001 годах **две полномасштабных КСК** были протестированы на установке гамма-облучения (GIF) с использованием источника гамма-излучения ^{137}Cs активностью 740 ГБк .
Acosta D. et al. Aging Tests of Full-Scale CMS Muon Cathode Strip Cham-bers. Nucl. Instr. Meth. A. 2003. V. 515. pp. 226–233.

Использовалась газовая смесь 40%Ar+50%CO_2+10%CF_4. Одна камера работала с открытой газовой системой, а другая - с прототипом газовой стстемы КСК CMS, работающей в режиме «замкнутой петли» имеющей ввод свежей смеси в количестве 5% от величины потока газа.





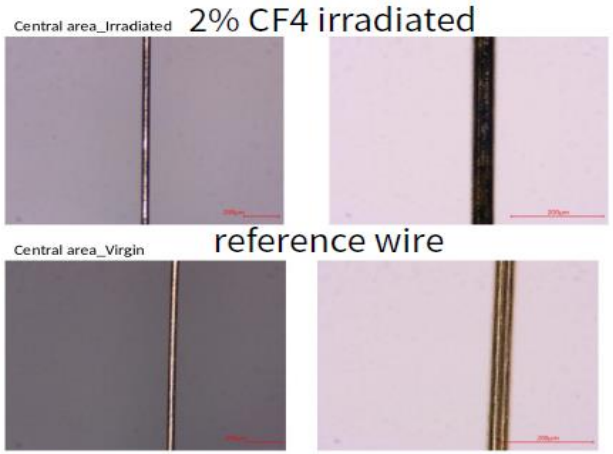


Накопленные заряды составили 0,3 и 0,4 Кл/см.
Эффектов старения не наблюдалось.

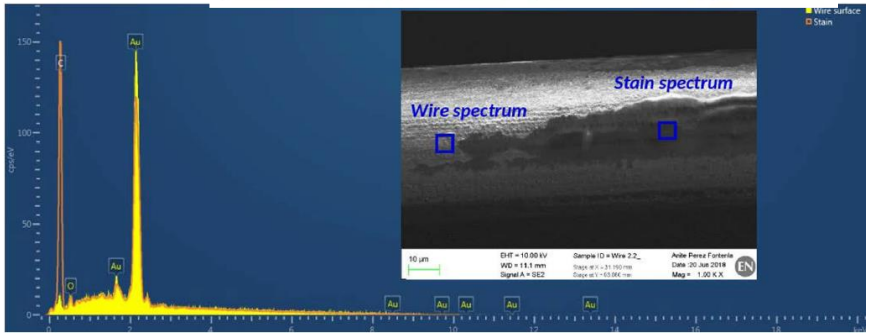
Тесты на старение с различными прототипами КСК CMS-3

III. ***E. Barberis et al. Longevity studies of CSC prototypes operating with Ar+CO2 gas mixture and different fractions of CF4 Eur. Phys. J. Plus 139, 166, (2024).***

Исследовался эффект старения на прототипах КСК малого размера при облучении лабораторным источником ^{90}Sr с использованием различных газовых смесей на осноые Ar+CO2, с включением 5%, 2% и 0% добавок CF_4.



Small 30x30cm^2 2- layer CSC Prototype

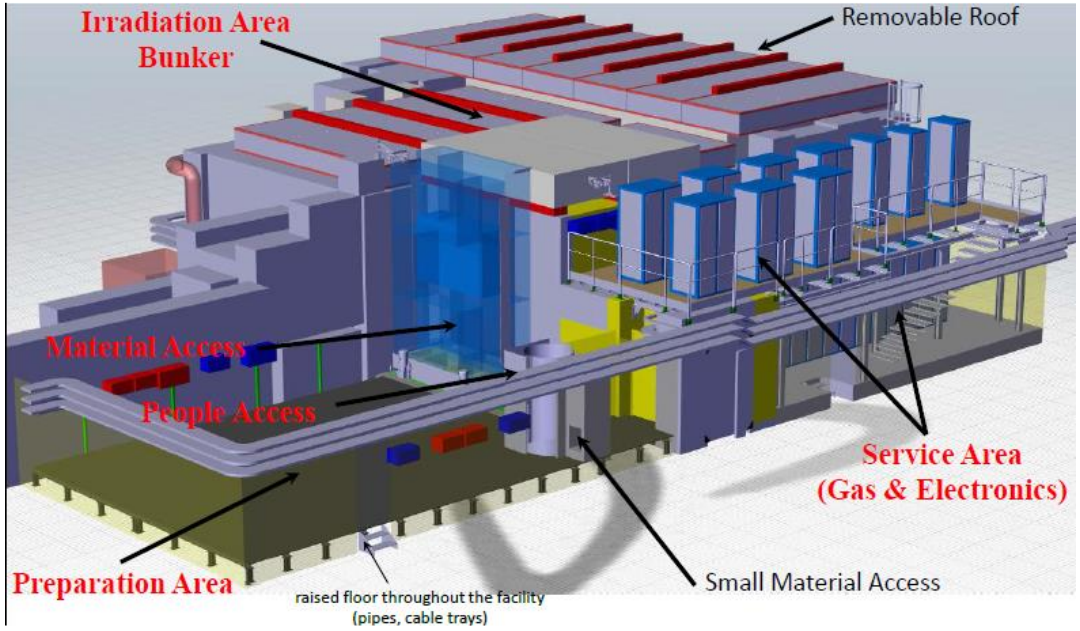


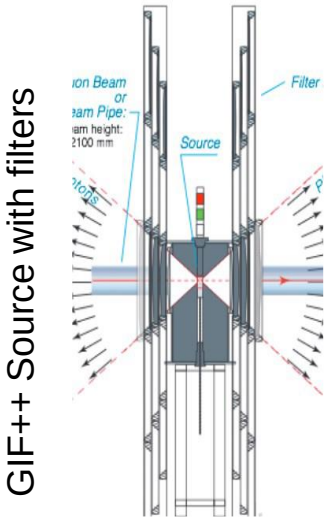
В тестах с содержанием в смеси 2% и 0% CF4 наблюдался темный, видимый глазом осадок на проволоках в зоне облучения при накопленном заряде 300 мКл/см. Спектрометрический анализ подтвердил наличие углерода на проволоках. При этом ухудшения характеристик камер (темновой ток, газовое усиление) не наблюдалось.

Газовые смеси, содержащие менее или равные 2% CF_4, потенциально опасны для долгосрочной работы CSC из-за осаждения **углерода** на анодных проводах.
LHCb Muon Gas System: MWPC работают с 40% Ar + 55% CO_2 + 5% CF_4 газ. смесью.

Установка GIF++ B. 887 (CERN), 3D view

- The Gamma Irradiation Facility (GIF++) was designed and built at the CERN SPS North Area (EHN1) in 2015.
- With this facility, the detectors could simultaneously be exposed to the photons from a ^{137}Cs source and to a high-energy H4 SPS muon beam.





Att.Fact. 1÷46.4k

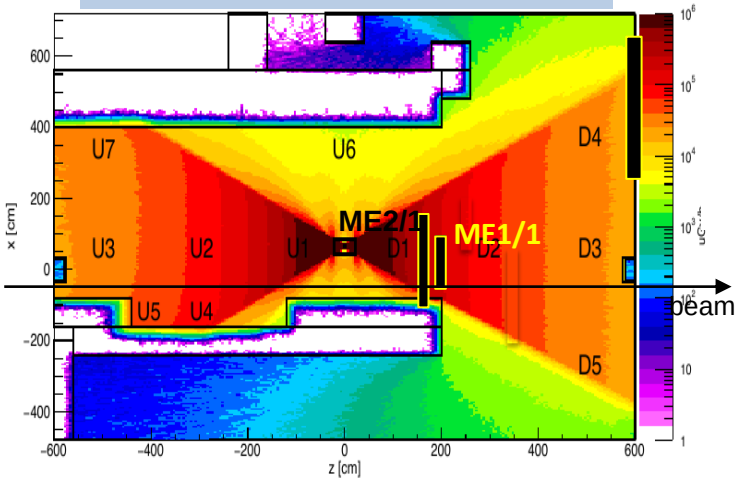
- **14 TBq (2015) ^{137}Cs source (Eγ = 662 keV)**
- **H4 SPS beam line**
- **A set of filters: Attenuation Factor: (1 ÷ 46000)**
- **Upstream + Downstream ± 37° irradiation cone**

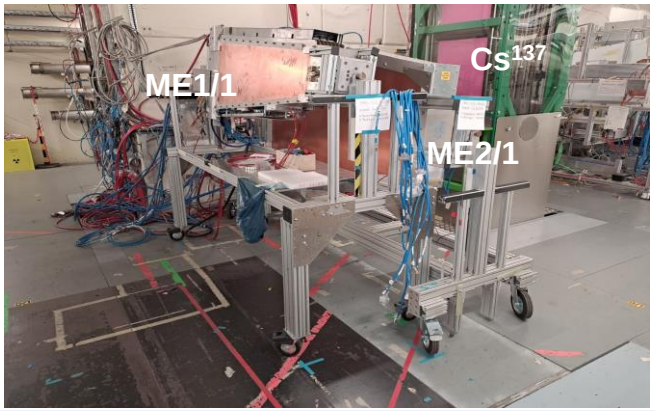
Plane :	A	B	C
Pos. 1	1	1	1
Pos. 2	10	1.47	2.15
Pos. 3	100	100	4.64

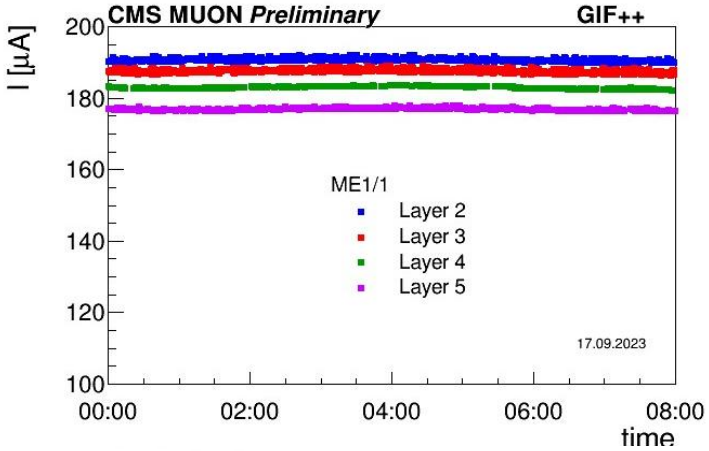
M.R. Jäkel et al.CERN GIF++ : A new irradiation facility to test large-area particle detectors for the high-luminosity LHC program. PoS (TIPP2014) 102.
D. Pfeiffer et al. "The radiation field in the Gamma Irradiation Facility GIF++ at CERN", Nucl. Instr. Meth. A 866 (2017) 91–103

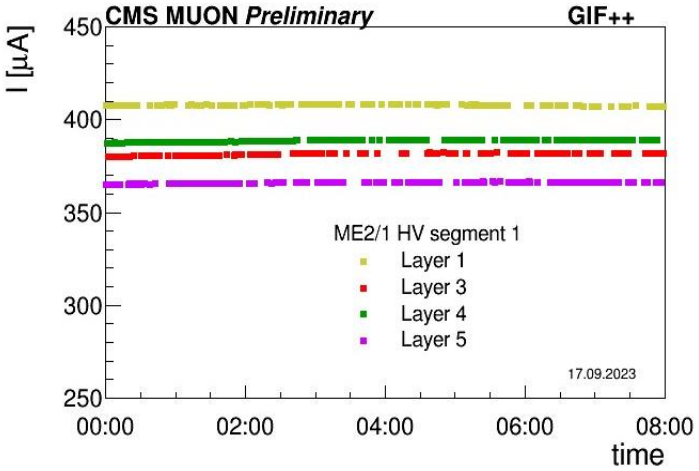
КСК в позиции облучения на GIF++ и токи в субкамерах

GIF++ irradiation intensity map





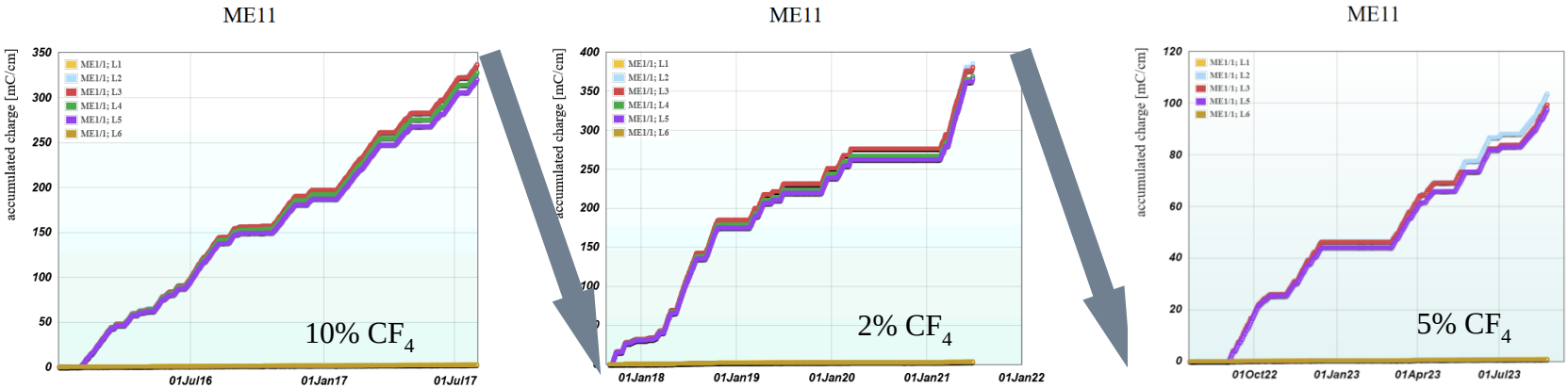




- ME2/1 and ME1/1 CSCs are chosen for the test because in CMS they took positions with the highest background. In the irradiation position at GIF++ ME2/1 is in front of ME1/1 and ~1.8m from the ^{137}Cs source.
- During the irradiation high voltage has been applied to 4 layers while 2 others were off (reference layers).
- Each layer of ME2/1 active area is divided by 3 independent high voltage zones – HV segments.
- The current of ME1/1 irradiated layers is ~ 190 μA, while for ME2/1 segment1 it is ~ 390μA.

The CSC operation conditions at GIF++ are like those in the CMS: closed loop gas supply with nominal gas flow and 10% fresh gas injection, sensors for O_2 and H_2O control, same services and DAQ.

Периоды облучения КСК на GIF++

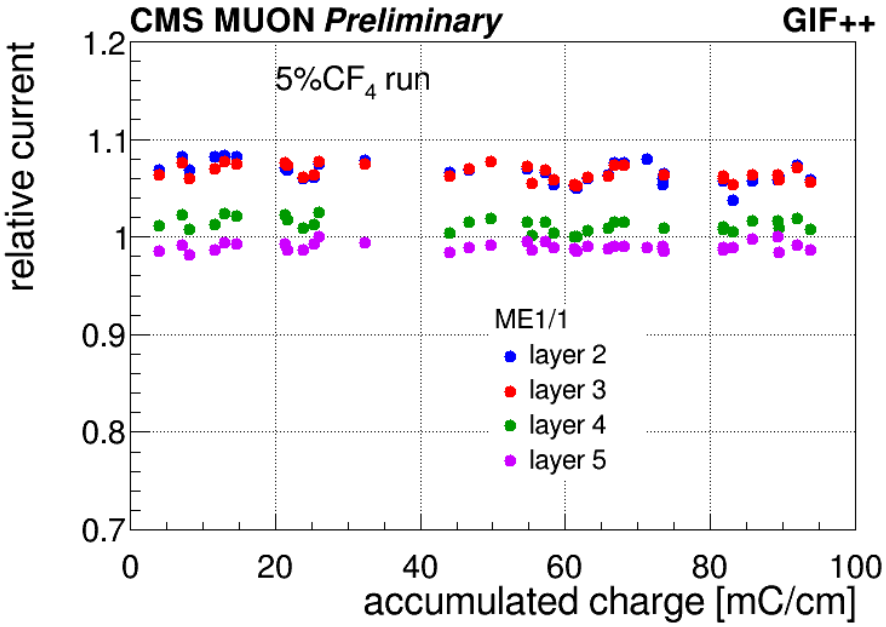


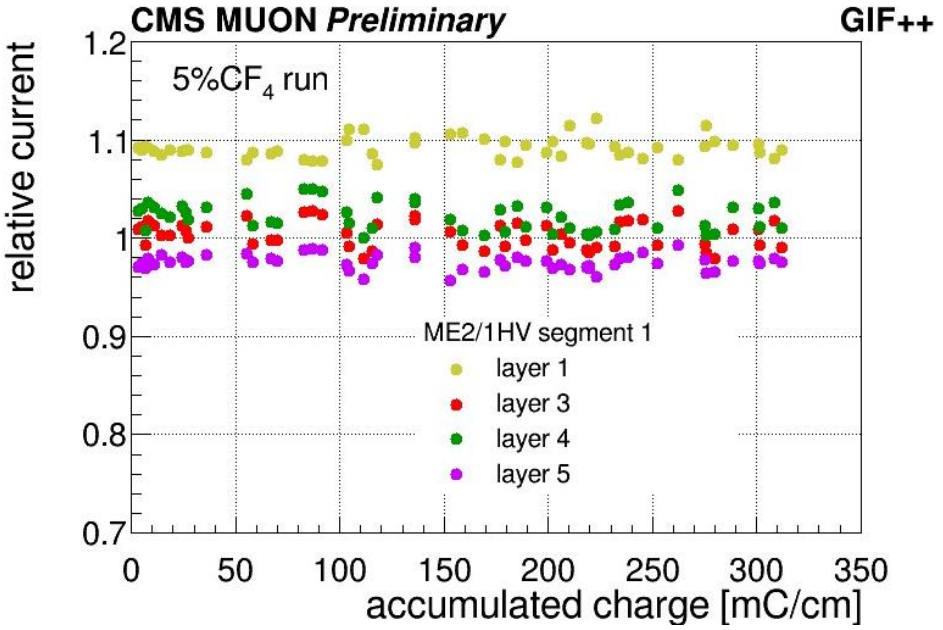
CSC	HL-LHC Expected * (3000 fb-1)	Accumulated charge Q (mC/cm)					
		before 2018	Nov.-2021	Oct.-2022	May-2023	19.07.23	25.08.23
ME1/1	200 mC/cm	330 (10% CF_4)	700 (2% CF_4)	725 (5% CF_4)	770	790	800
ME2/1, S1	130 mC/cm	340 (10% CF_4)		460 (5% CF_4)	575	625	670
ME2/1, S2, S3		300 (10% CF_4)		400 (5% CF_4)	510	550	600
<ME2/1>		310 (10% CF_4)		420 (5% CF_4)	530	570	610

- ME1/1 plots showing accumulated charge per 1cm of anode wire length during CSC irradiation at GIF++ (^{137}Cs) with different gas components of $Ar+CO_2+CF_4$ gas mixture: (40/50/10 – period I, 40/58/2 – period II and 40/55/5 – period III).
- ME1/1 and ME2/1 table of the accumulated charge.

(*) Accumulated charge estimated at end of HL-LHC running assuming Run 2 currents and background occupancies, corrected using FLUKA simulation including HGCAL. To be updated with Run 3 currents.

Величины относительных токов в субкамерах в зависимосит от накопленного заряда на единицу длины анодной проволочки (смесь с 5% CF_4)

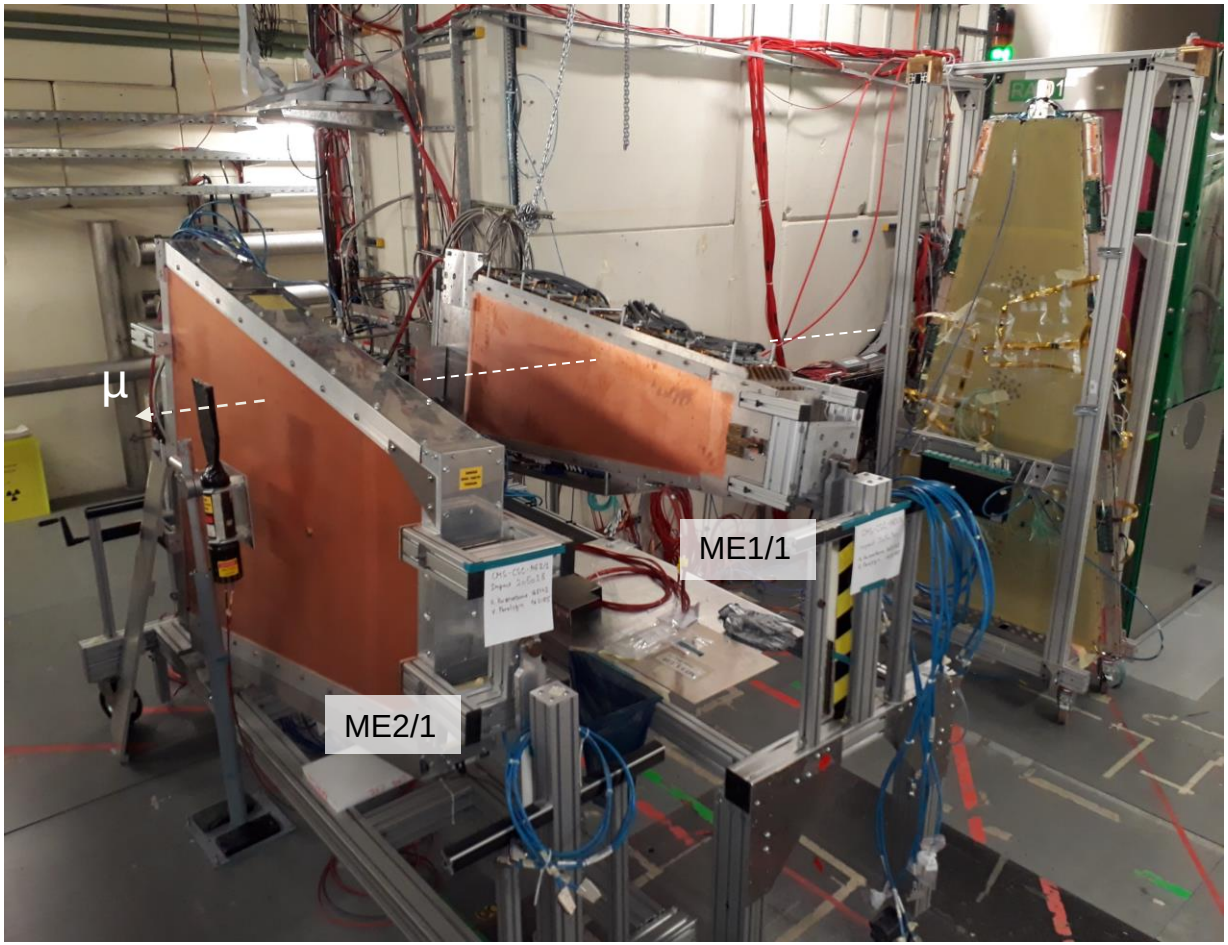




ME1/1 (left) and ME2/1 (right) plots of the **relative currents** in irradiated layers vs accumulated charge.

- Plots for the period of irradiation with 40%Ar+55%CO_2+5%CF_4 gas mixture.
- Values are normalized to the averaged current of the two reference layers (HV=0 during irradiation).
- **No ageing effects observed and same for dark current**

КСК при проведении тестов в мюонном пучке



Measurements with the muon test beam:

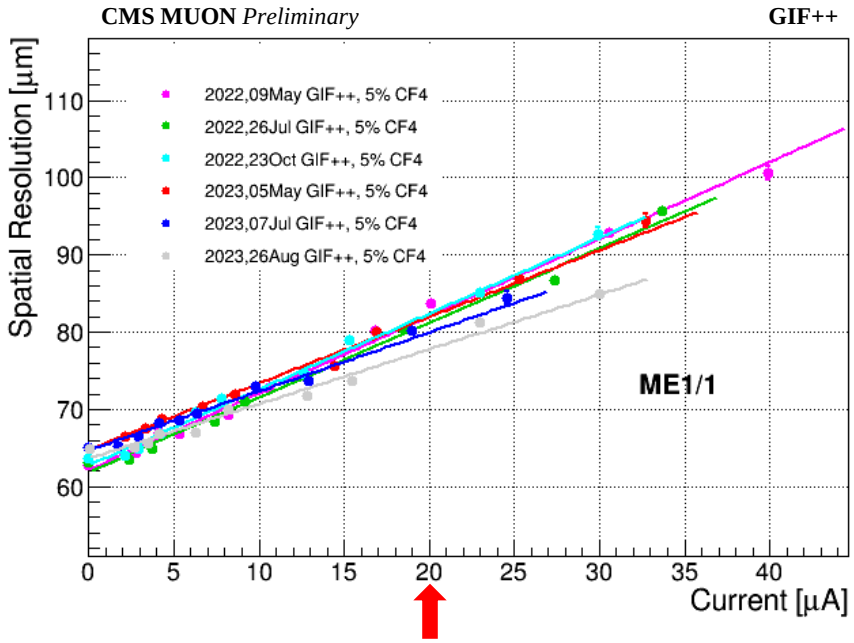
1. Scintillator trigger,15x15cm^2 acceptance

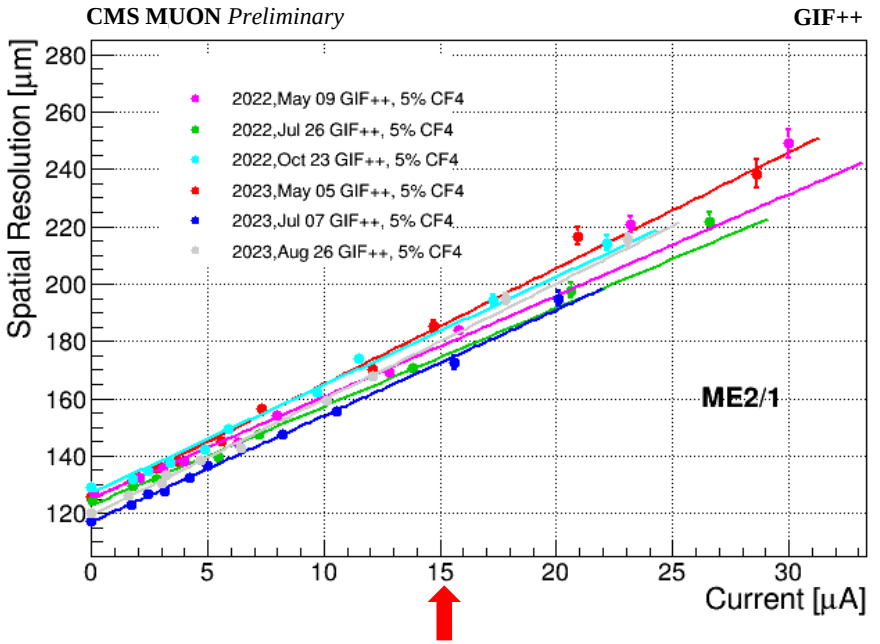
a). Spatial resolution vs Source intensity

2. Large statistics CSC in self-trigger mode, Source off

ME2/1 and ME1/1 in TB position-2023
Irradiation position differs from the Test Beam one.

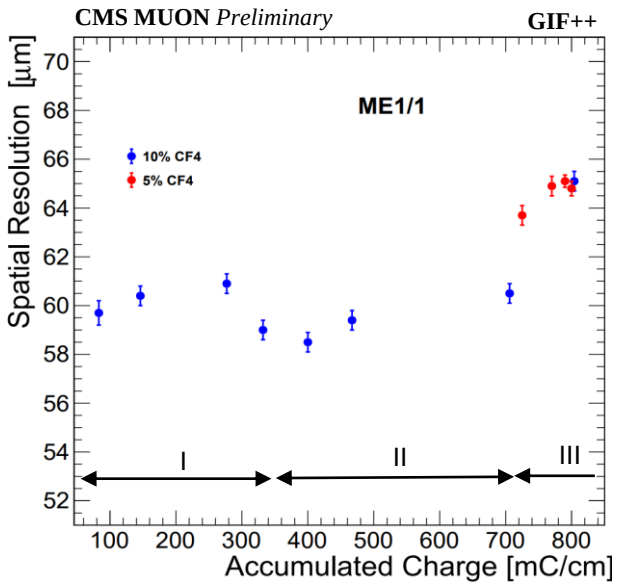
Пространственное разрешение КСК в мюонном пучке с различными комбинациями фильтров ^{137}Cs

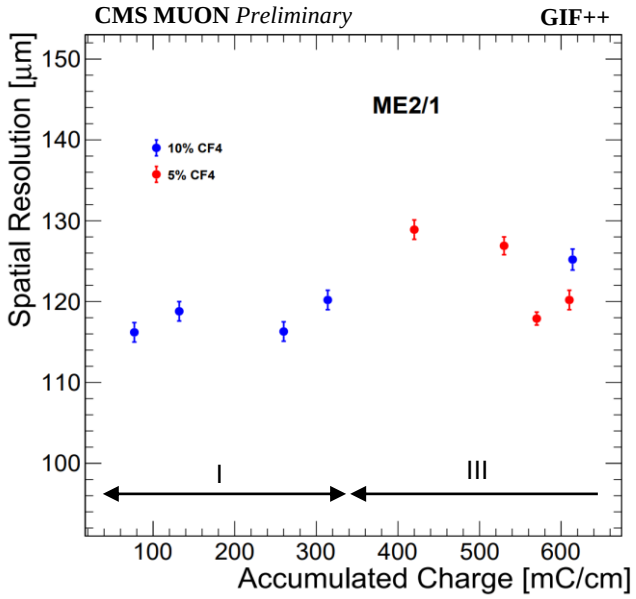




- Spatial resolution of ME1/1 (left) and ME2/1 (right) vs mean CSC layer current with 5%CF_4 gas mixture.
- The measurements are performed with a muon beam and varying ^{137}Cs source intensity.
- The results are corrected for atmospheric pressure variation.
- The spatial resolution degrades linearly with the layer current increase.
- The HL-LHC background condition for L=5*10^{34}Hz/cm^2 corresponds to ME1/1 layer current of 20 μA, while for ME2/1s1 - 15 μA.

Пространственное разрешение КСК в мюонном пучке в зависимости от накопленного заряда.





Spatial resolution of the ME1/1 (left) and ME2/1 (right) chambers measured with a muon beam as a function of the accumulated charge.

- The first 330 mC/cm of charge (period I) was accumulated with the nominal 40%Ar+50%CO_2+10%CF_4 gas mixture, then irradiation was continued for ME1/1 only with the reduced CF_4 content (40%Ar+58%CO_2+2%CF_4 – period II) and finally the irradiation continued with intermediate CF_4 for both the CSCs (40%Ar+55%CO_2+5%CF_4 mixture – period III).
- **Blue points represent measurements with 10% CF_4 gas mixture while the red points represent the measurements with 5% CF_4 gas mixture**.
- No significant degradation of the spatial resolution was observed for the whole irradiation period up to the charge of 700 mC/cm for ME1/1 and 670 mC/cm for ME2/1.
- Systematic errors not included. Work on the evaluation of the systematic uncertainties ongoing.
- The slight degradation of the ME1/1 resolution in period III (2023) while we don’t see any significant variation in the gas gain is to be understood.

Заключение

Исследования эффектов старения проводятся на прототипах КСК CMS малого размера и на полномасштабных камерах как с лабораторными источниками, так и на установках с промышленными ИИИ (GIF++). Изучается возможность минимизации использования парниковых газов в координатных детесторах или замены их на газы с малым ПГП.

Исследования эффектов старения в КСК CMS ME1/1 и ME2/1, проводимые на установке GIF++ (ЦЕРН) с 2016 года, не выявили признаков старения камер.

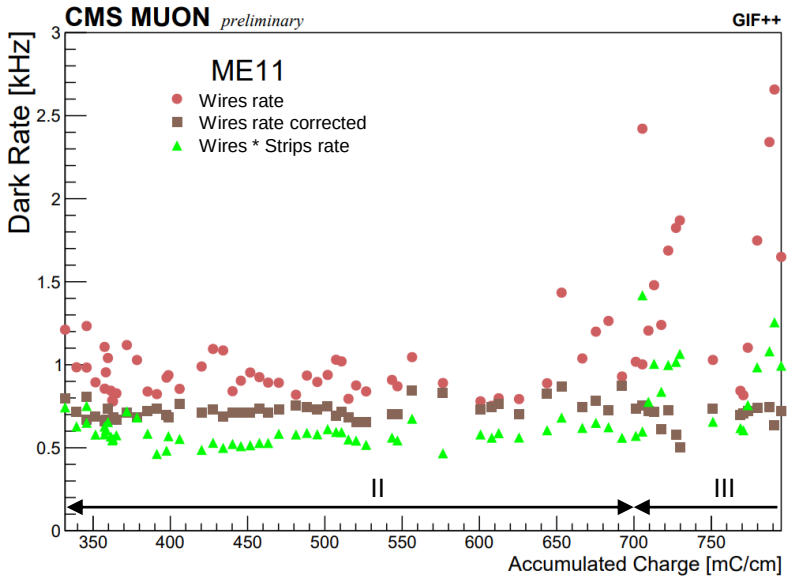
- Использались три рабочих газовых смеси с различным содержанием CF_4 :

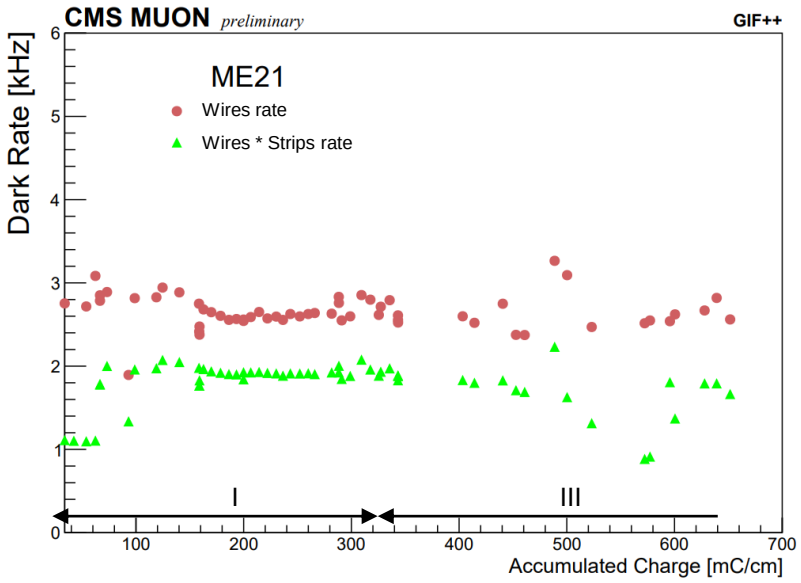
  $40\%Ar+50\%CO_2+10\%CF_4$, $40\%Ar+58\%CO_2+2\%CF_4$ and $40\%Ar+55\%CO_2+5\%CF_4$;
- Заряд на единицу длины анодной проволоки составил для ME1/1 800 мКл/cm, для ME2/1 - 670 мКл/cm;
- Относительный ток в субкамерах и скорость счета фоновых событий были стабильны в зависимости от накопленного заряда.
- Не наблюдается деградации пространственного разрешения КСК вплоть до величины накопленного заряда 700 мКл/cm для ME1/1 и 670 мКл/cm для ME2/1, в то время как выше 700 мКл/cm для ME1/1 ухудшение пространственного разрешения наблюдается (~ 8%);
- С ростом фоновой загрузки деградация пространственное разрешения КСК носит линейный характер и при работе HL-LHC в условиях максимальной светимости для станций ME1/1 и ME2/1 можно ожидать ухудшение величины пространственного разрешения на ~ 40%.

Спасибо за внимание !

Backup

КСК – темновой ток



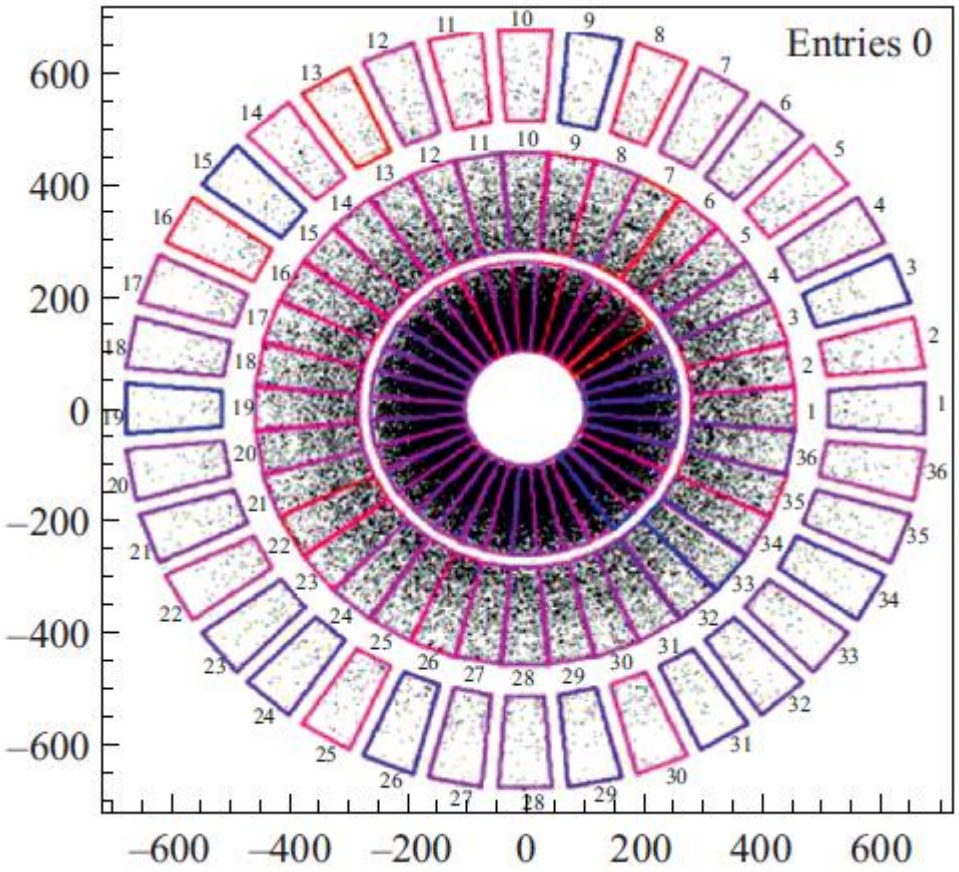


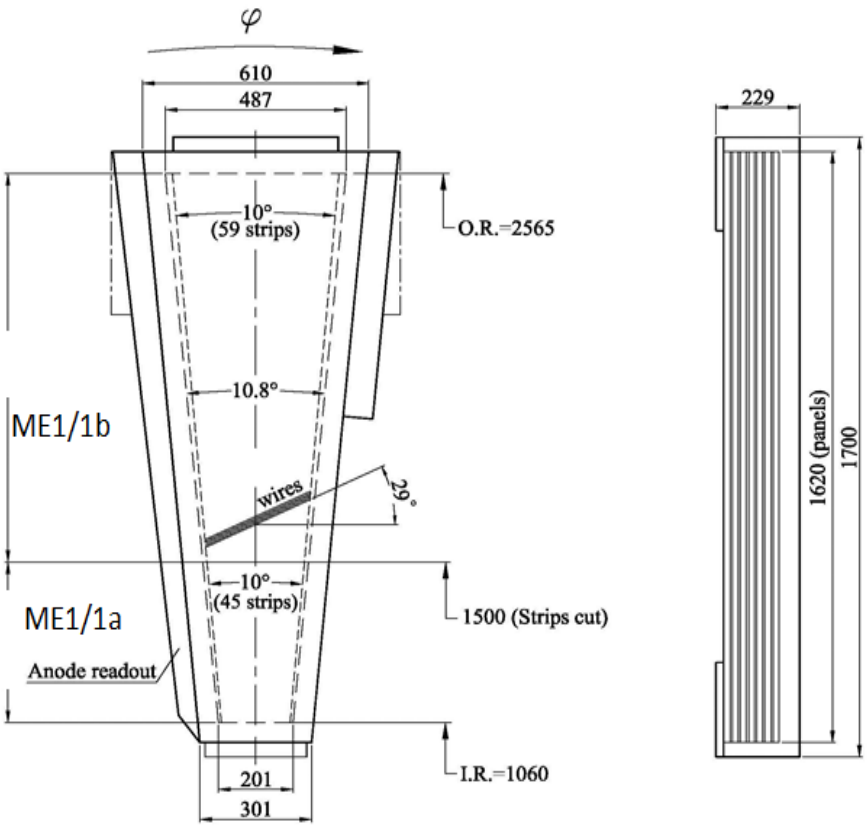
Measurements of the CSC dark rates with single layer mode trigger as a function of the accumulated charge.

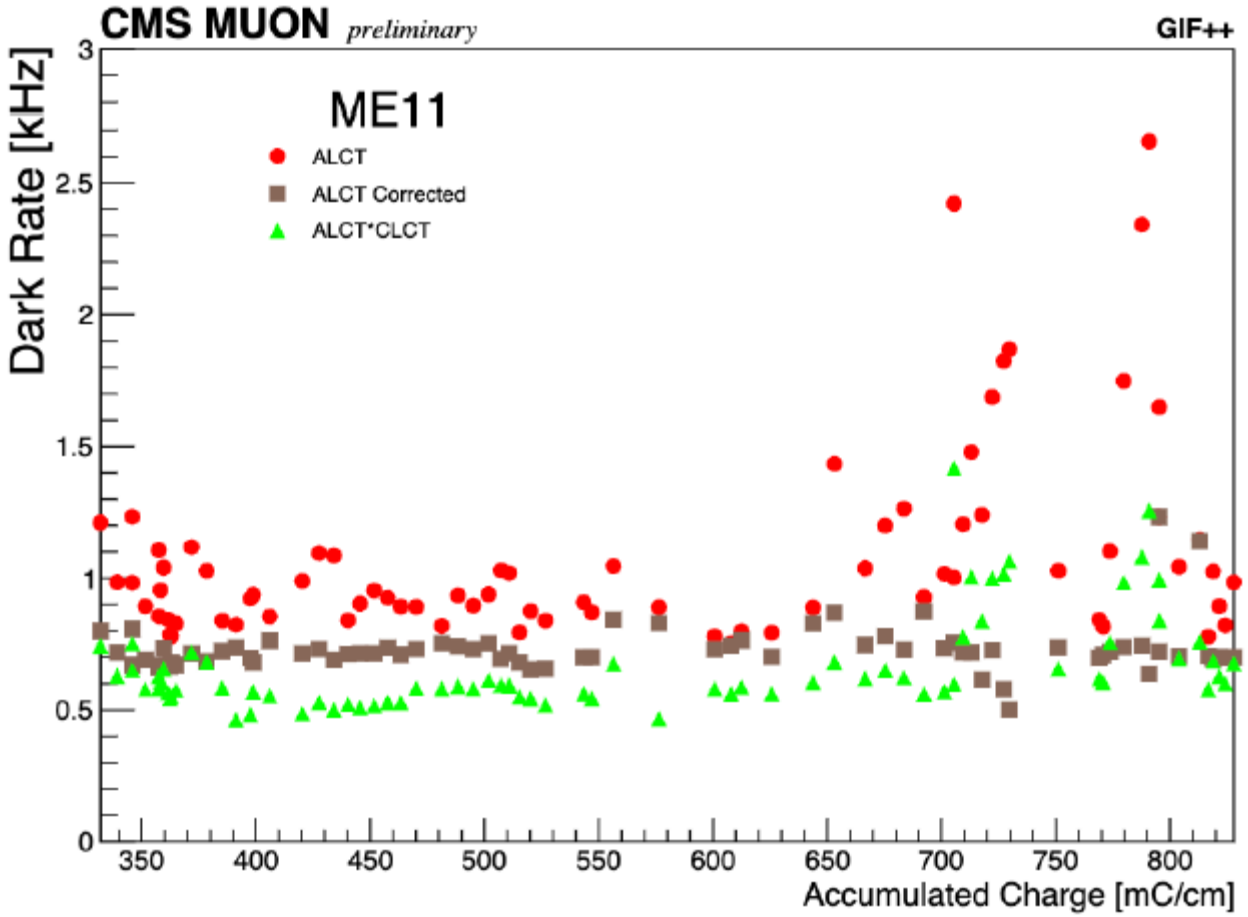
- The wires dark rates and the wires and strips signals coincidence rates are shown.
- The ME1/1 dark rate (left) is measured during irradiation with the 40%Ar+58%CO_2+2%CF_4 gas mixture up to 700 mC/cm (period II) then the gas mixture was changed to 40%Ar+55%CO_2+5%CF_4 (period III). First 330 mC/cm (period I not shown in this plot) were accumulated with the nominal 40%Ar+50%CO_2+10%CF_4 gas mixture.
- For ME1/1 the corrected wires rate excludes the contribution from a noisy wire group (left picture, brown squares).
- The ME2/1 dark rate (right) is measured during irradiation with the 40%Ar+50%CO_2+10%CF_4 gas mixture up to 330 mC/cm (period I) then the gas mixture was changed to 40% Ar+55%CO_2+5%CF_4 (period III) .
-The dark rate of few kHz includes the cosmic rate and is negligible because the CSC trigger requirement is Wires*Strips coincidence in 4 layers in the time window of 175ns.

No ageing effects observed.

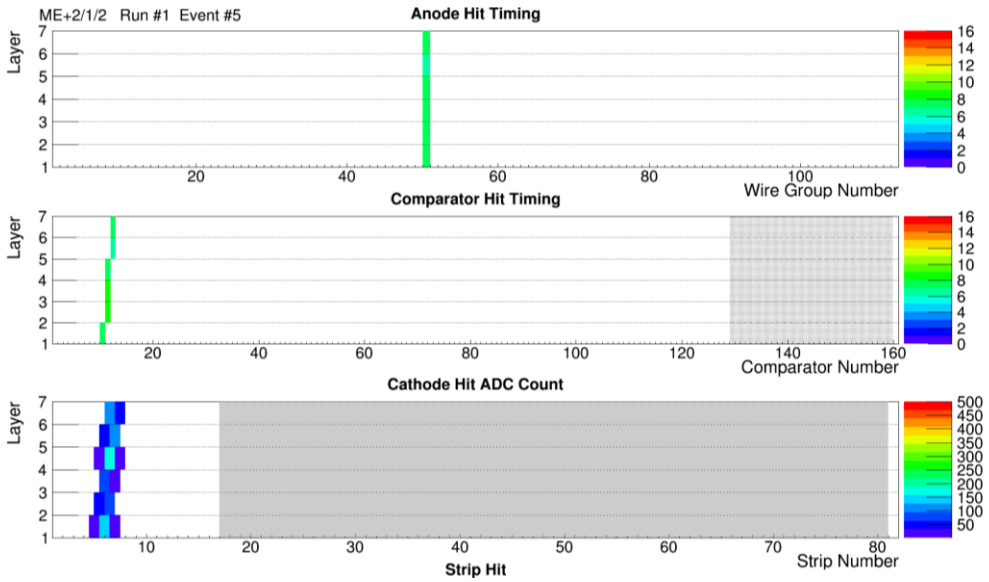
p-p collisions, track segments in ME1




φ
610
487
10°
(59 strips)
O.R.=2565
10.8°
ME1/1b
wires
29°
10°
(45 strips)
ME1/1a
1500 (Strips cut)
Anode readout
I.R.=1060
201
301
229
1620 (panels)
1700

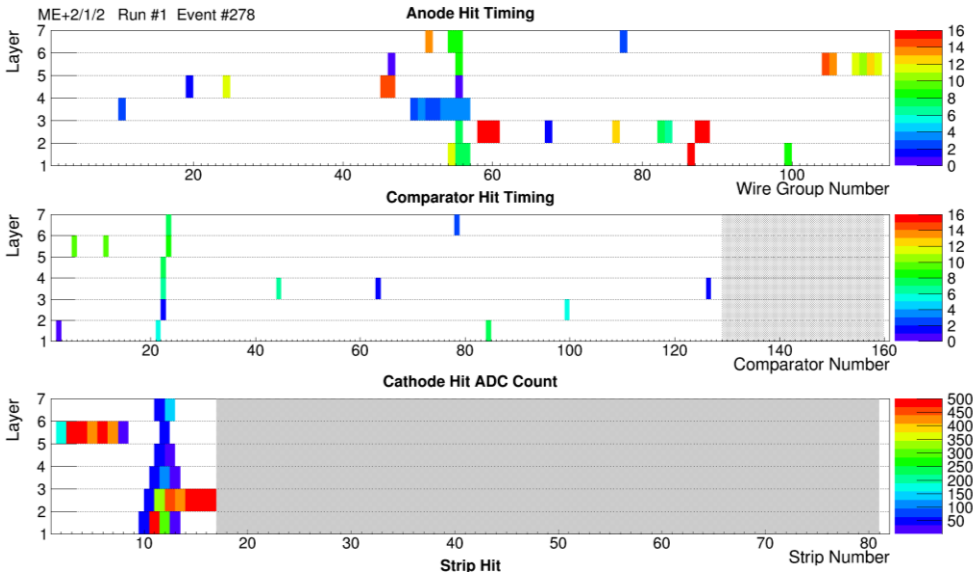

CMS MUON preliminary
GIF++
ME11
ALCT
ALCT Corrected
ALCT*CLCT
Dark Rate [kHz]
Accumulated Charge [mC/cm]
0
0.5
1
1.5
2
2.5
3
350
400
450
500
550
600
650
700
750
800

GIF++: ME2/1 event display with Source-off and on



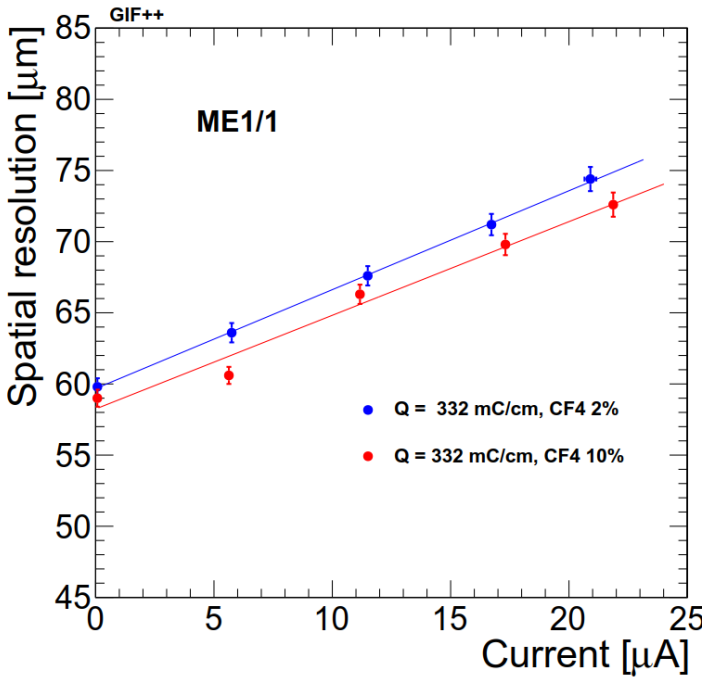
Source=off,
Single muon

Att. Factor=22*:
muon with background



Spatial resolution for ME1/1 chamber operated with 2% and 10% CF4

To study properties of a gas mixture with reduced CF4 content, the performance of CSC operated with 40%/50%/10% and 40%/58%/2% Ar/CO2/CF4 gas mixtures was compared.



ME1/1 spatial resolution obtained with a muon beam and uniform ^{137}Cs source background as a function of the background intensity in units of average ME1/1 current. The measurements are performed with 40%/50%/10% and 40%/58%/2% Ar/CO2/CF4 gas mixtures. The HL-LHC background condition for L=5*10^{34}Hz/cm^2 corresponds to the average currents of 20 uA. The results are corrected for atmospheric pressure variation.