

Електроника за експериментите в CERN

(CMS / TOTEM)

д-р инж. Георги Анчев

ИЯИЯЕ - БАН София / CERN Geneva

Gueorgui.Antchev@cern.ch

- **Въведение**
- **Електроника при детектора**
- **Електроника в залата за обработка**
- **Видове системи**
- **Заклучение**

- **Въведение**
- Електроника при детектора
- Електроника в залата за обработка
- Видове системи
- Заключение

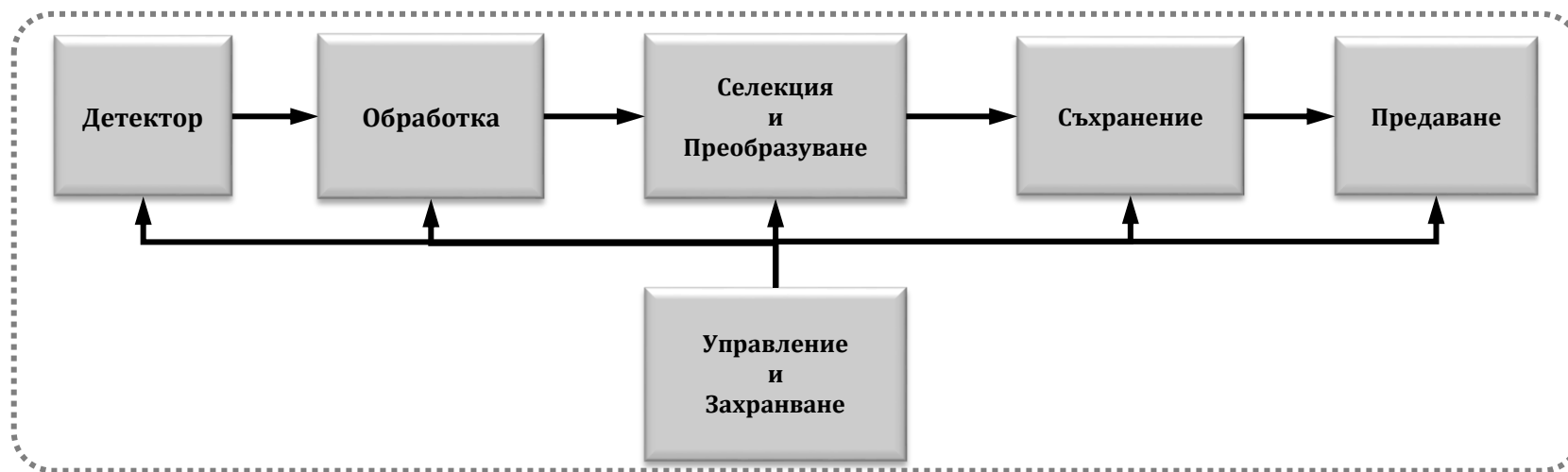
Освен ускорителите във физиката на високите енергии, две са основните групи от технически средства за провеждане на експериментални изследвания:

- *Детектори на ядрени лъчения*

Устройствата превръщащи измерваните параметри в електрически сигнали (сцинтилатори, газови броячи и йонизационни камери, полупроводникови детектори и т.н.).

- *Електроника и системи*

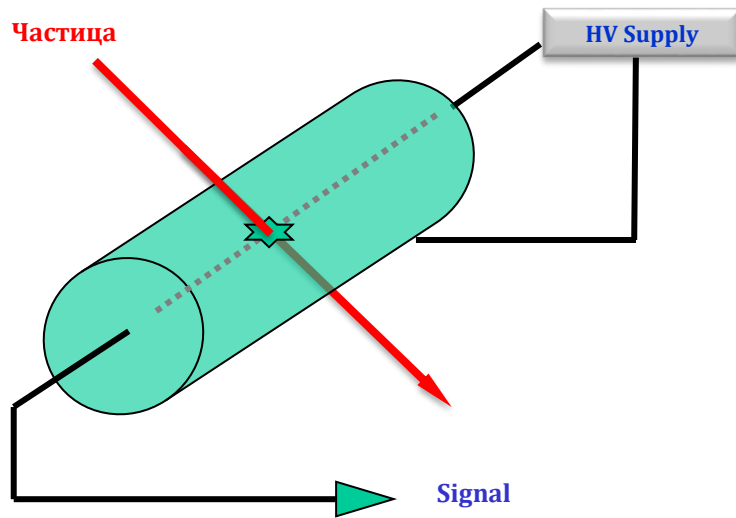
След множеството транзисторни устройства скок в развитието на електрониката се предизвика от напредъка на микроелектрониката. Широко се използват интегрални схеми, програмируеми устройства, микропроцесори и различни видове компютри.



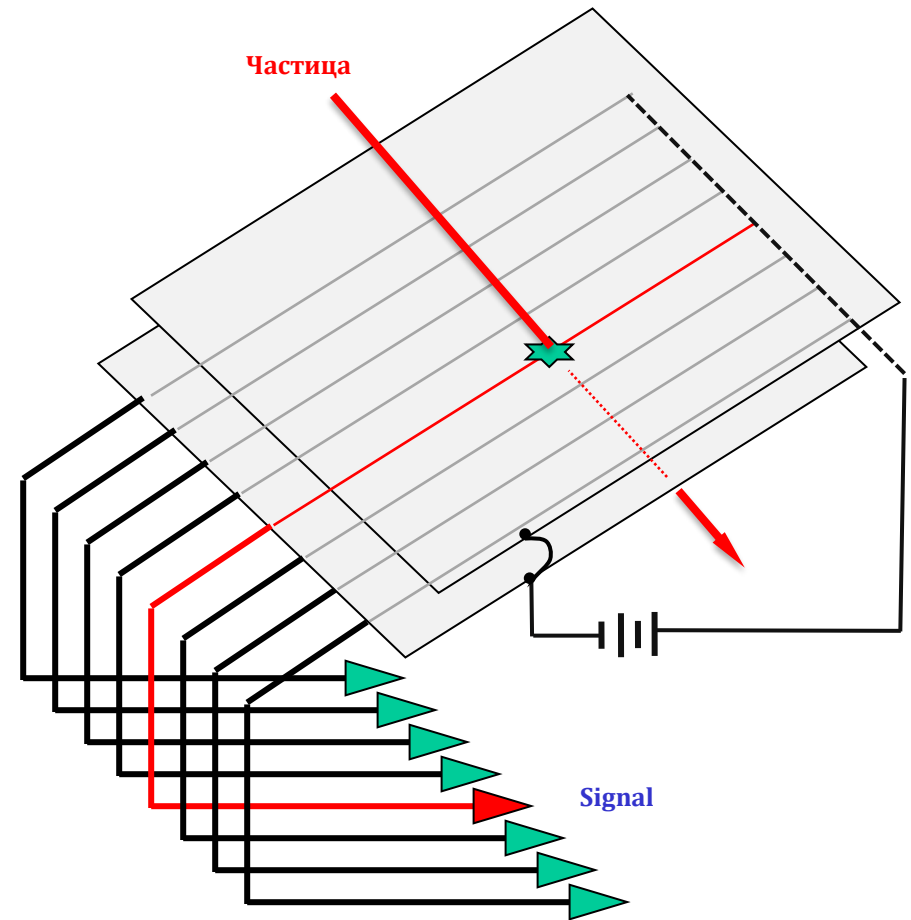
Общата структура съдържа следните основни блокове:

- Детектор – преобразува енергията на лъчението най-често в електрическа
- Блок за обработка – приема сигнала от детектора и променя формата му
- Селекция и преобразуване – сигналите от детектора се групират по параметри и често се преобразуват в цифров вид
- Съхранение – запомня се информацията за следващ етап
- Предаване – блок за форматиране на информацията, представяне във вид за предаване към друго устройство
- Управление и захранване – програмира параметри и задава начало и край на измерването

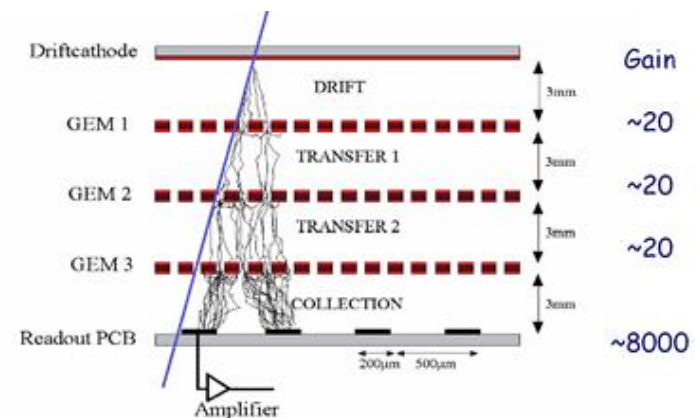
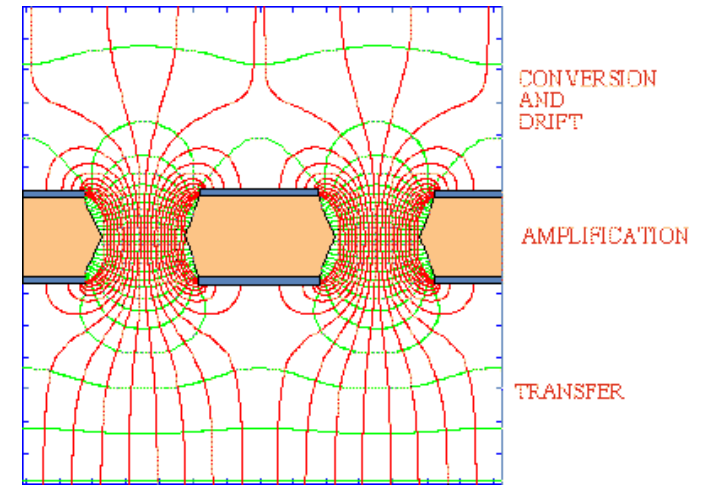
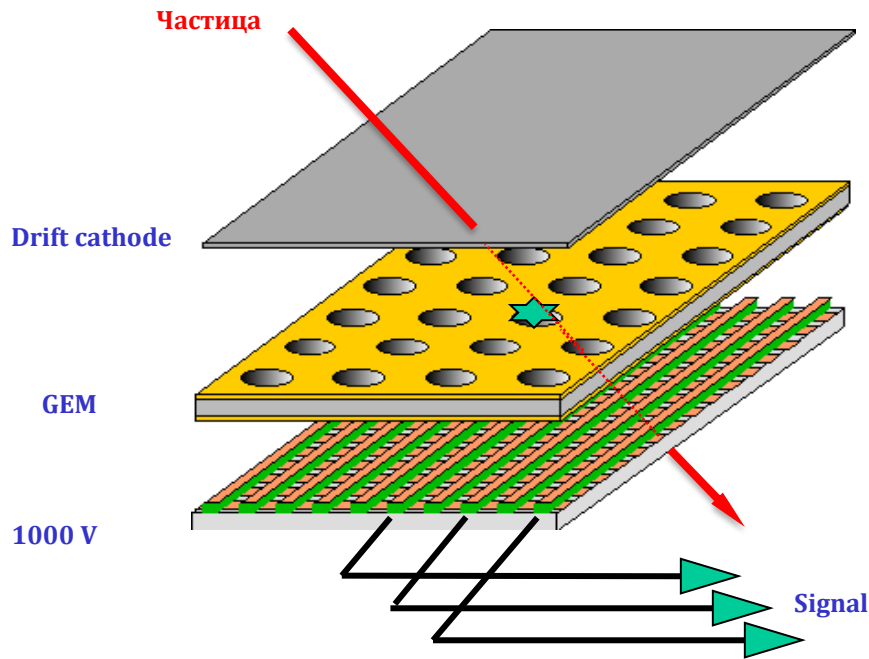
Единична газова камера



Многожична газова камера

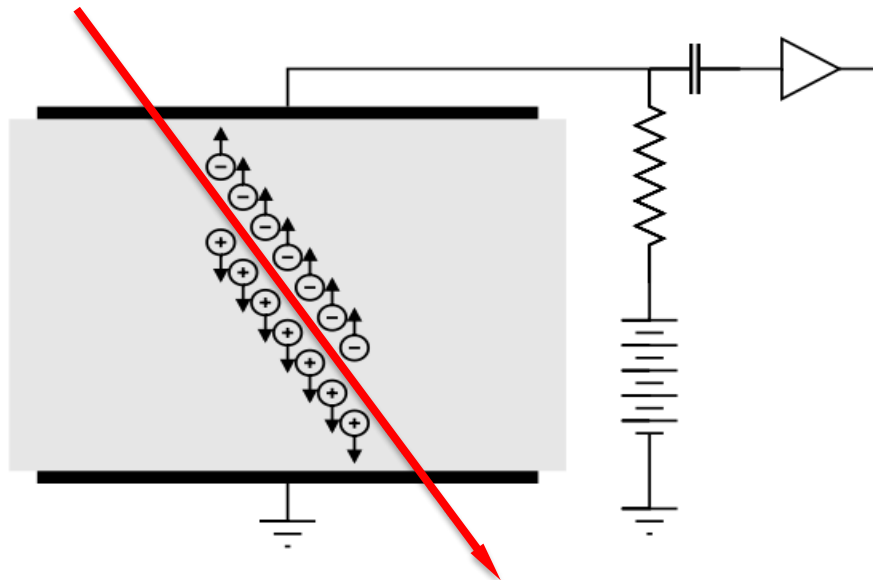


Йонизационна мултипликационна камера (GEM)

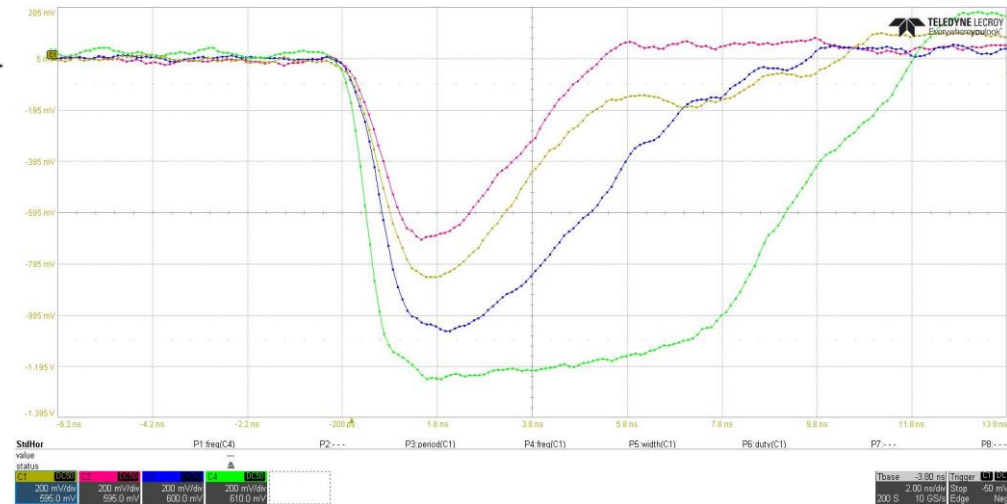


Диамантен детектор

Частица

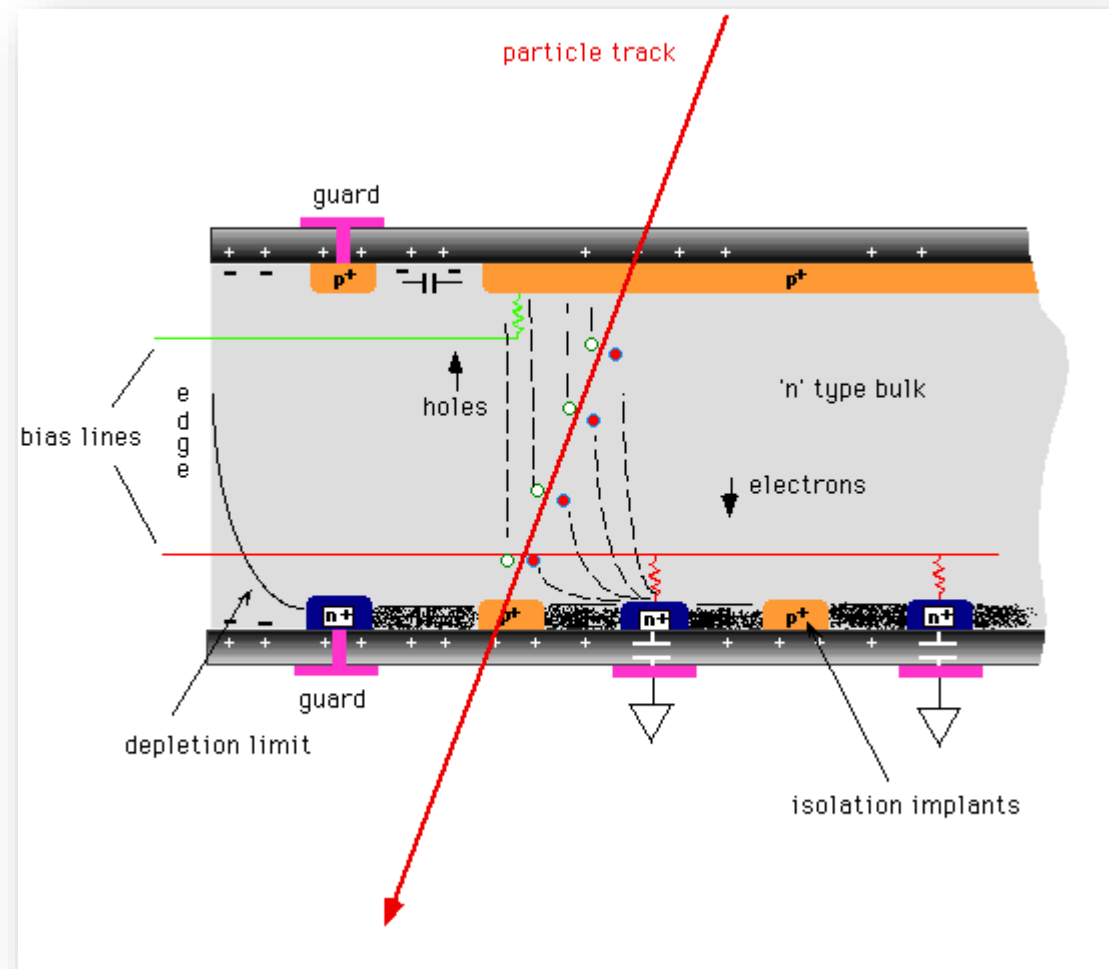


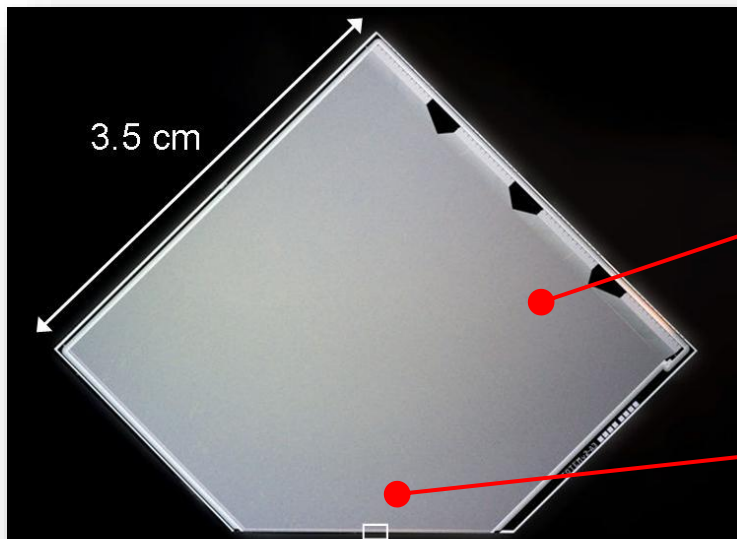
Signal



Предимства и приложение: бързодействие, за времеви детектори

Силициев детектор



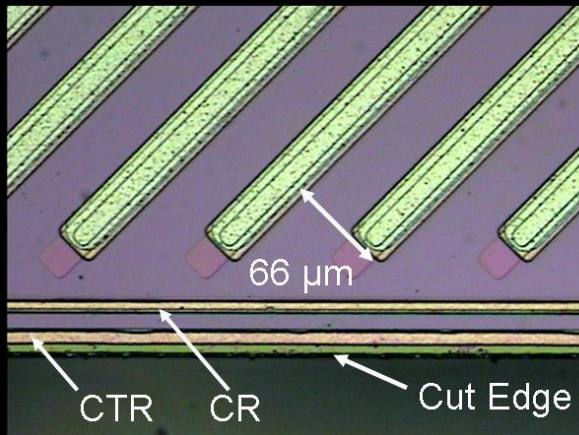


Технология

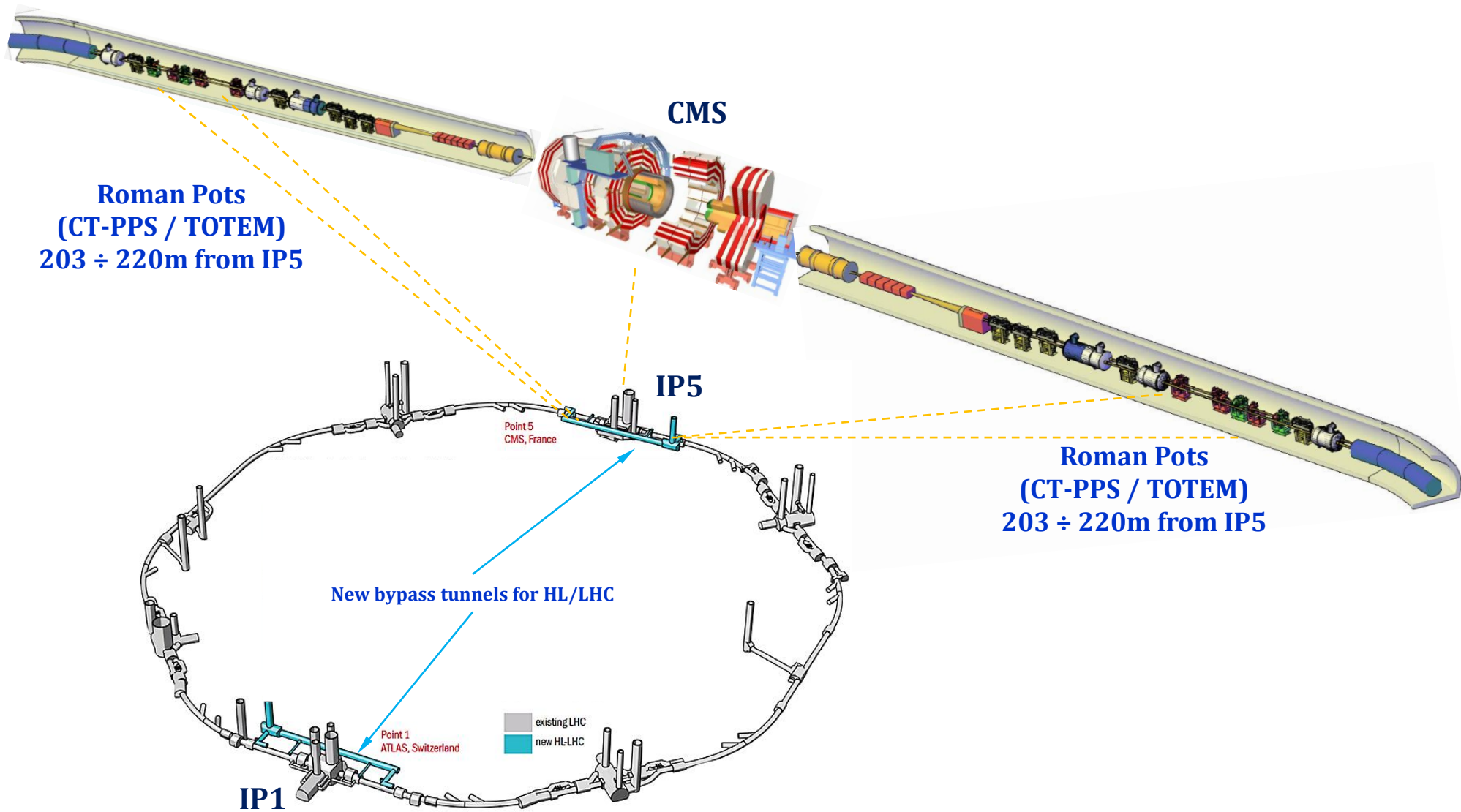
- Si n-тип, с дебелина 300 μ m
- Стандартна планарна технология

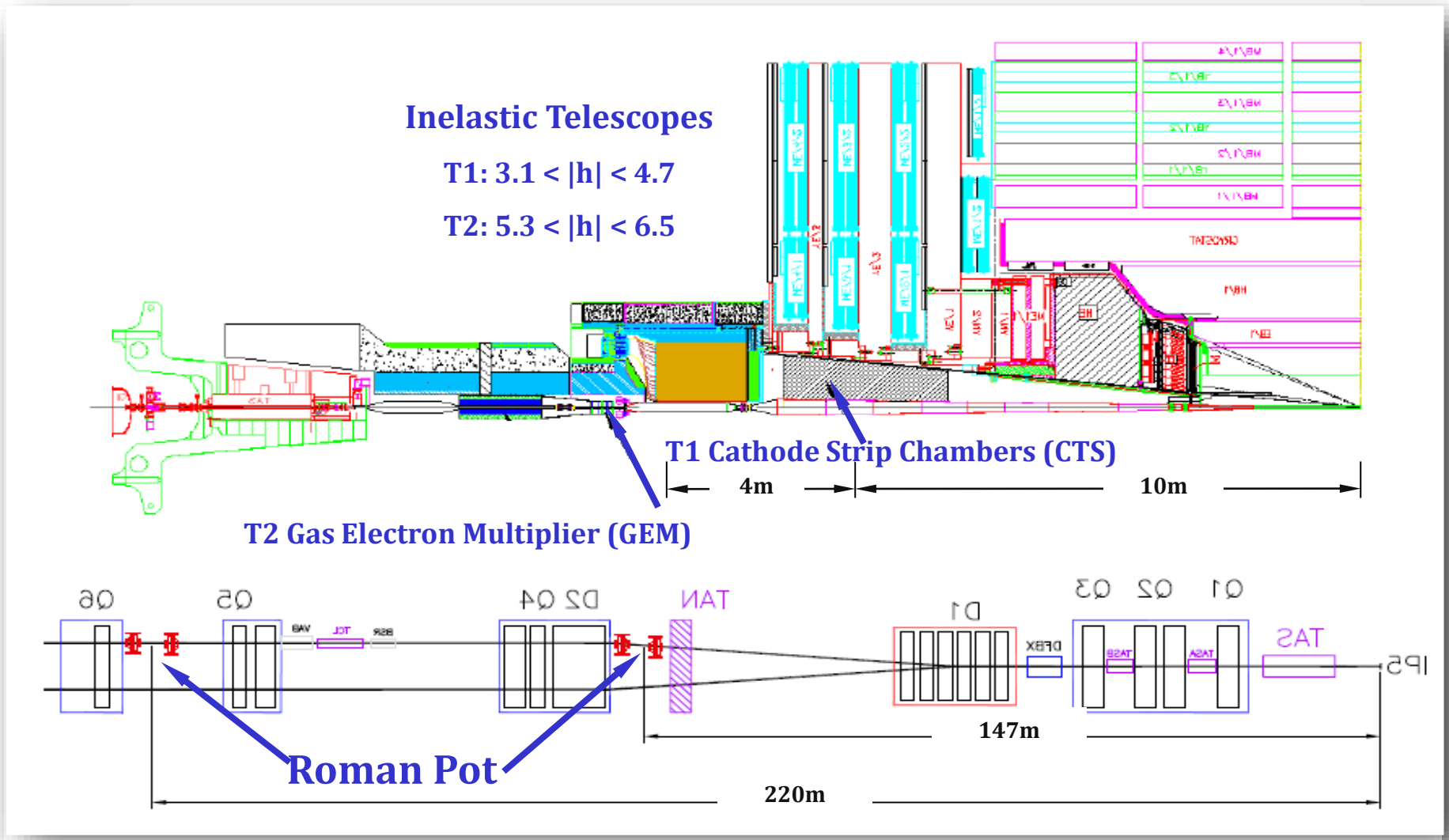
Дизайн

- Едностранен детектор, 512 писти на 66 μ m и под 45° спрямо края на детектора
- Специални структури в края за по-голяма точност, намаляване на загубите и увеличаване на чувствителността (VTS), (CTS), (CTR) и (CR)



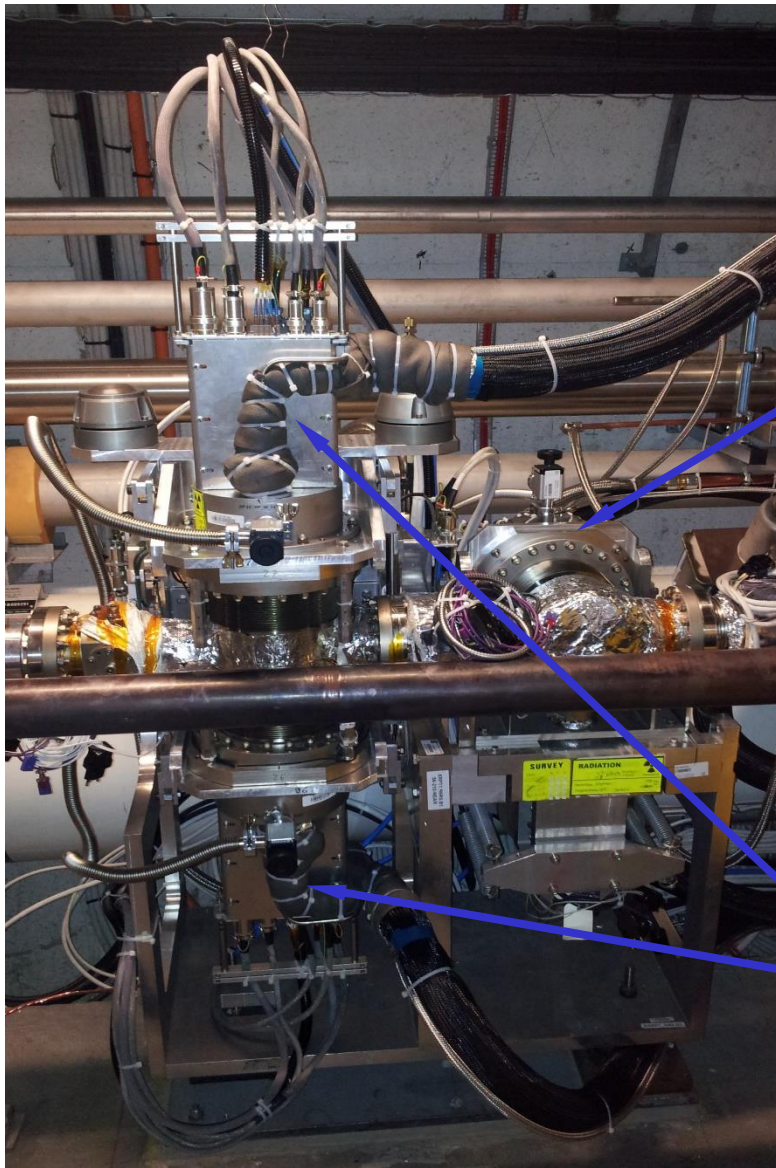
Само 50 μ m от края на пистата до края на детектора!





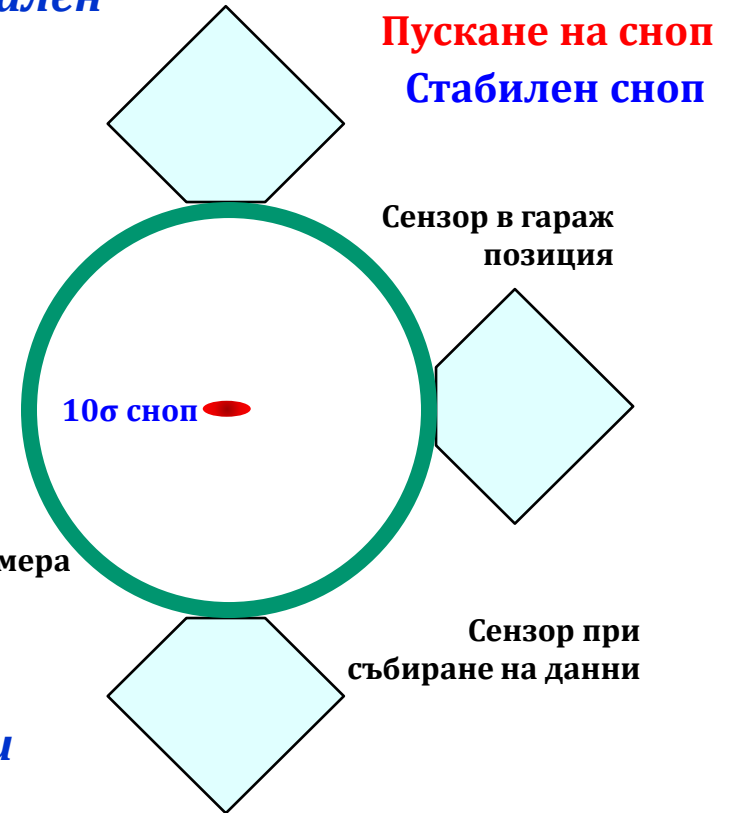
Същите детектори от другата страна на IP5

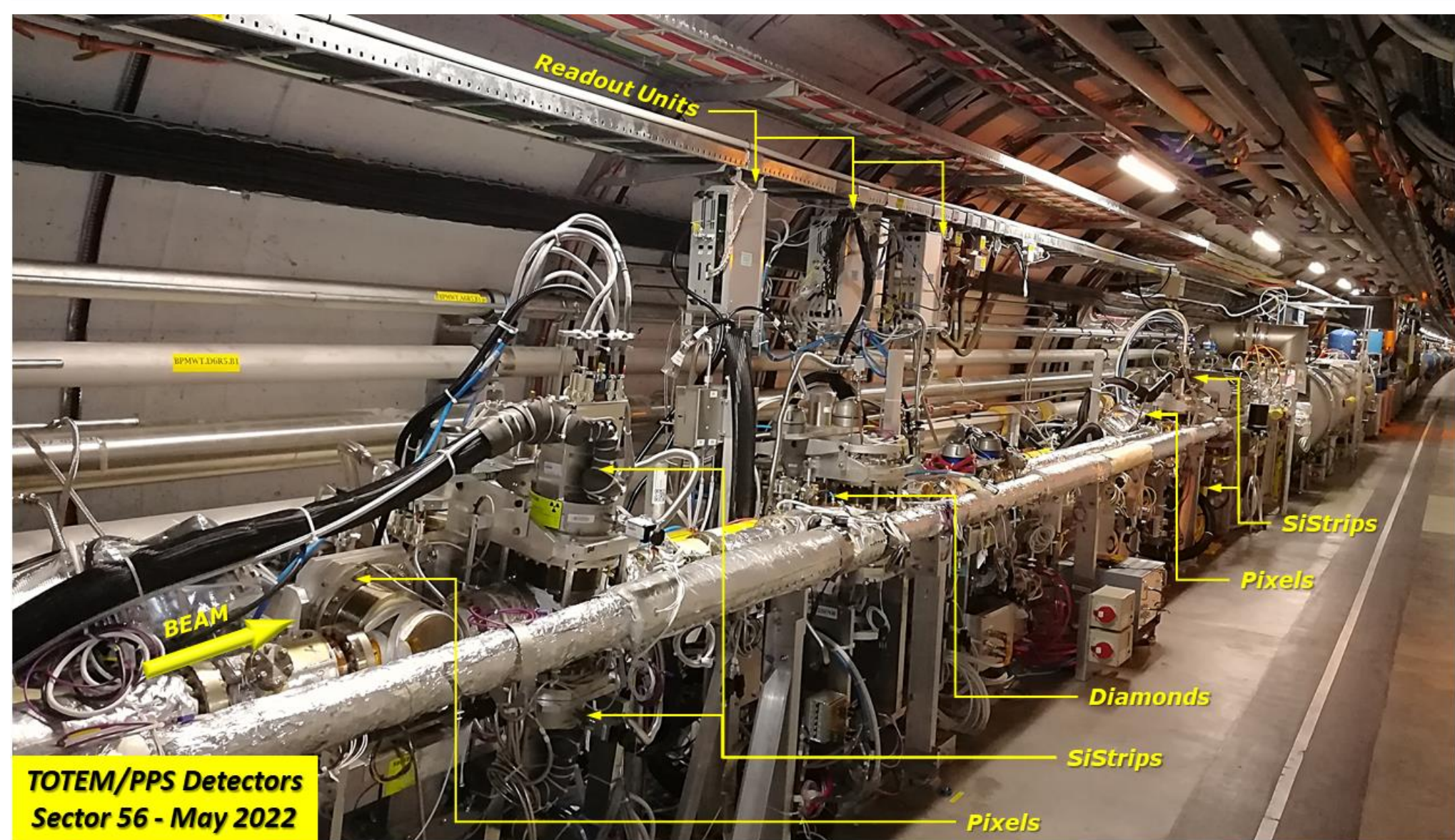
Снимка от сектор 56-220м



Хоризонтален

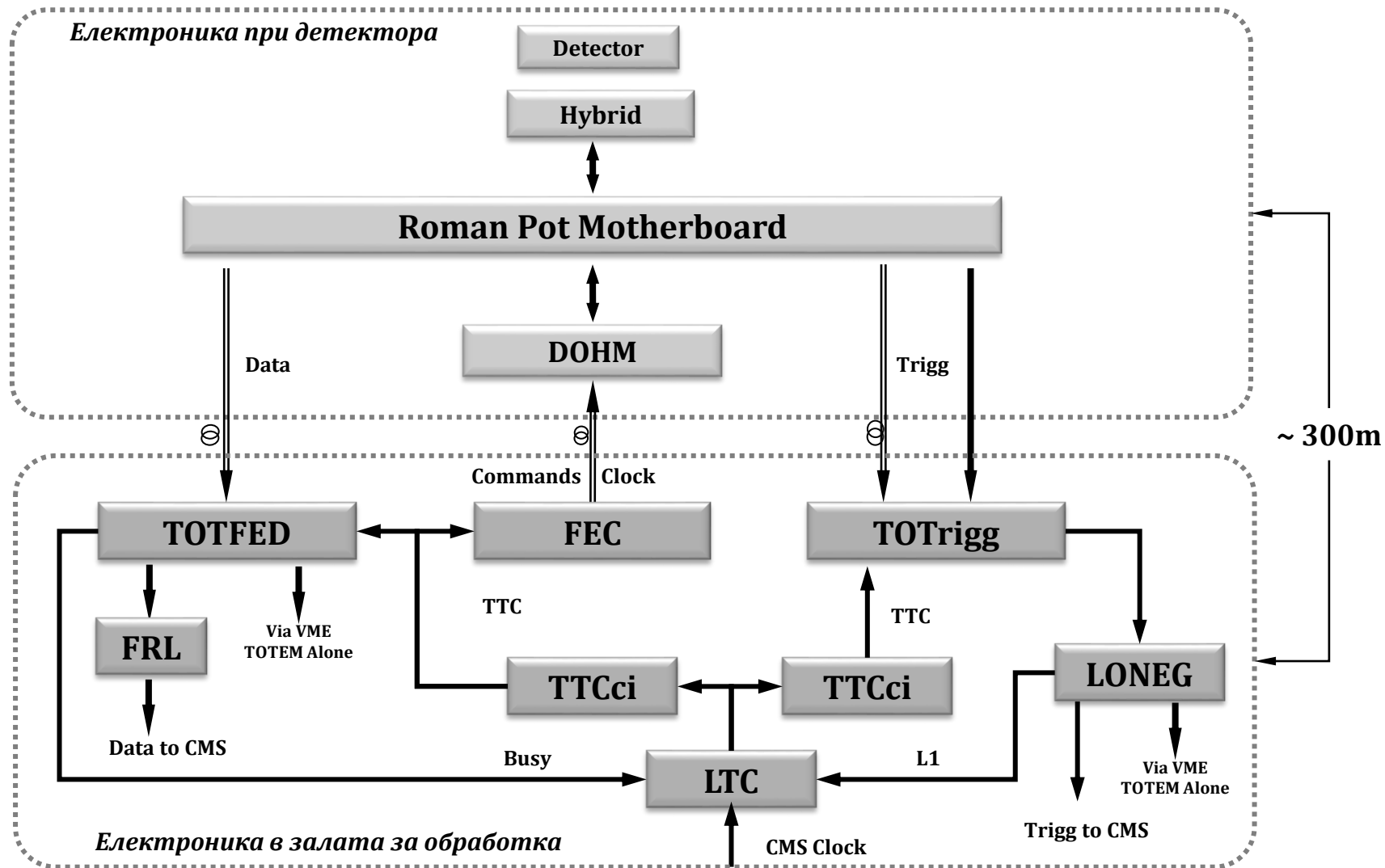
Вертикални



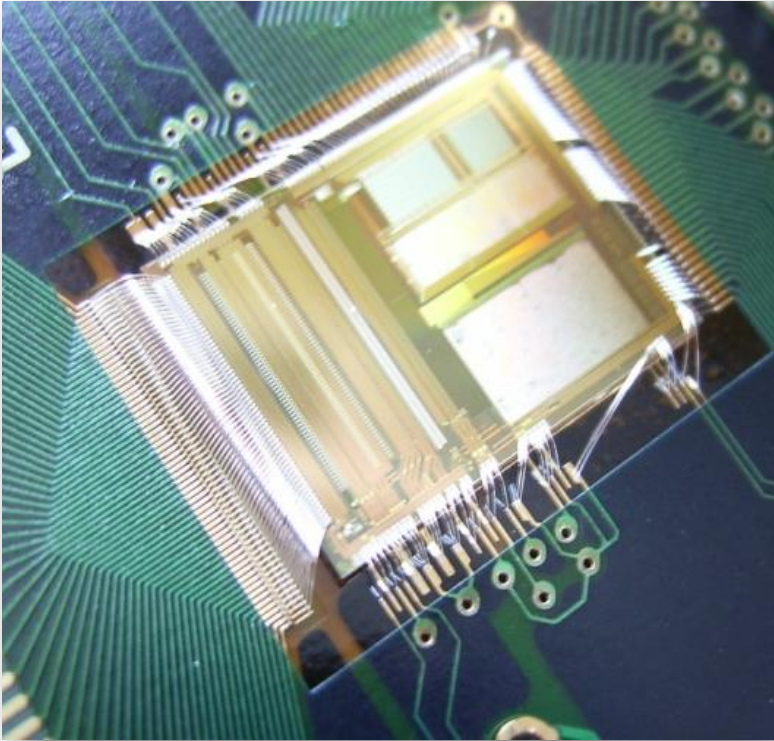


**TOTEM/PPS Detectors
Sector 56 - May 2022**

Основни блокове

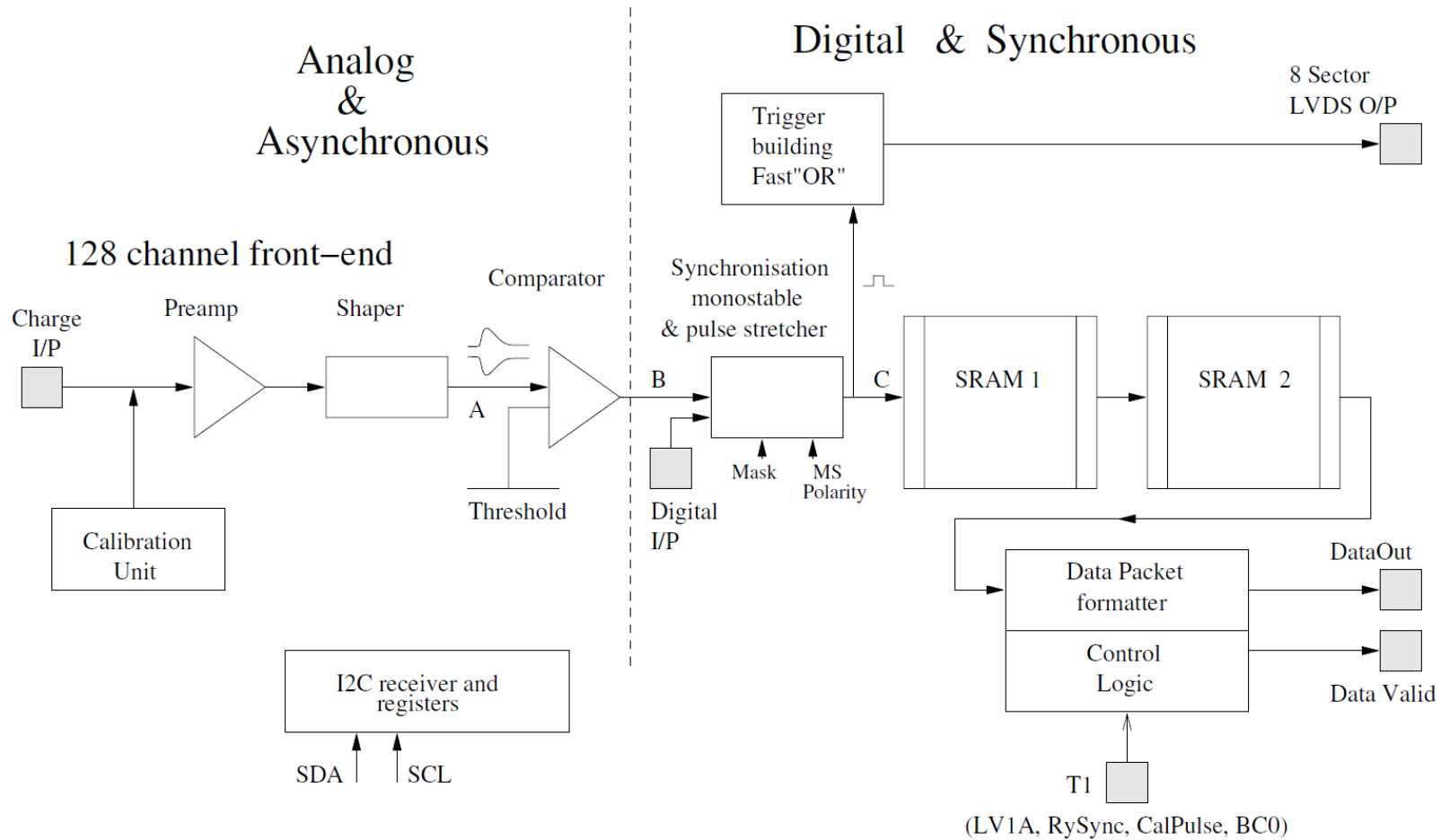


- Въведение
- **Електроника при детектора**
- Електроника в залата за обработка
- Видове системи
- Заключение



- 128 канала, цифрово записване и предаване на информацията
- 8 програмируеми изхода за тригер
- Устойчив на радиация
- ~160 / 8 битови регистри с възможност за външно програмиране чрез I2C интерфейс
- Разработен в CERN
- Има нова версия вече VFAT 3

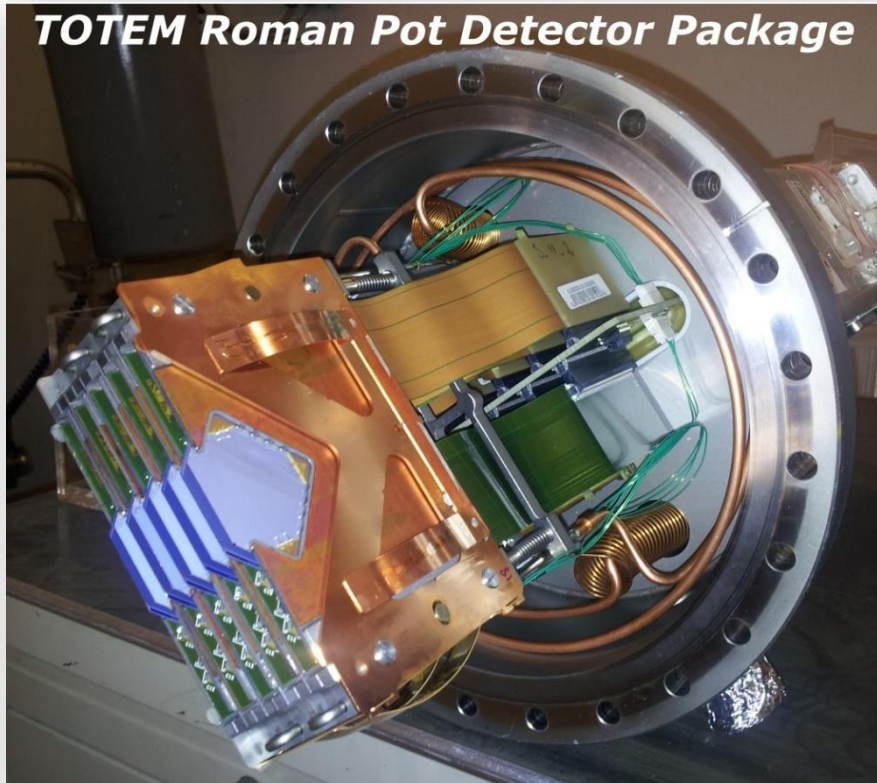
Снимка на VFAT 2 чип монтиран на хибриден модул



Снимка



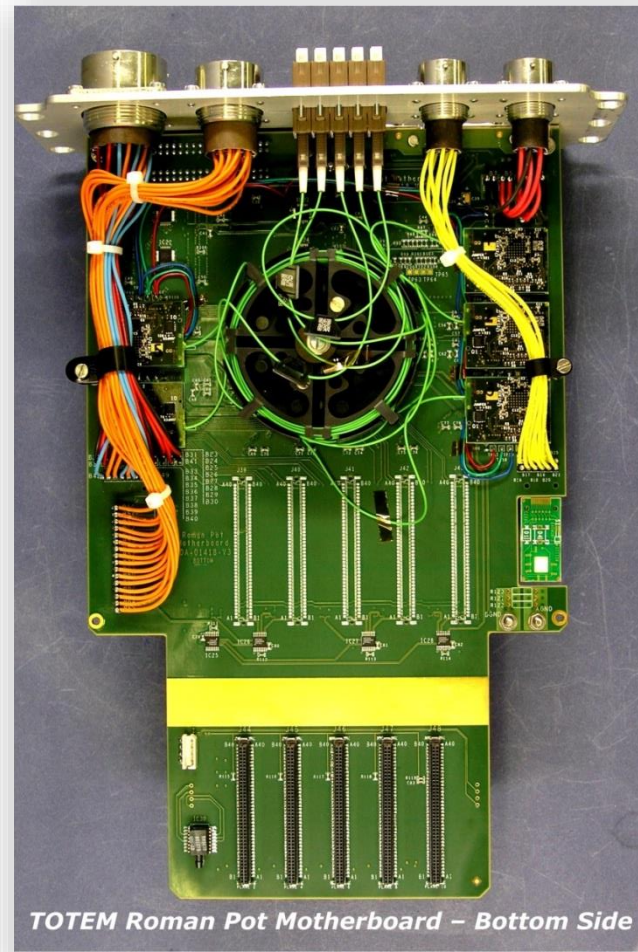
- Съдържа 4 чипа и устройство за контрол
- Свързва се към другата електроника с 80 пинов куплунг и плосък кабел
- По същия куплунг се подава ниско и високо напрежение, синхронизираща честота и се получават данните и тригерните сигнали
- Към 128-те писти на силициевия детектор се свързват директно входовете на чипа



- Съвкупност от 10 хибридни модула
- Фиксирани един срещу друг за да се образуват 2 координати от писти под 45°
- Електронните компоненти са монтирани от една страна за да се намали разстоянието между хибридите

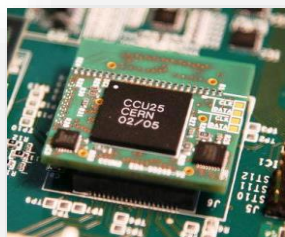


TOTEM Roman Pot Motherboard – Top Side



TOTEM Roman Pot Motherboard – Bottom Side

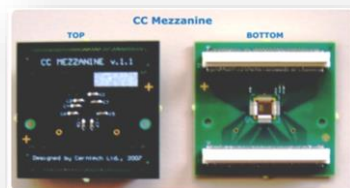
- Свързва детекторния пакет към системите за контрол, тригер и събиране на данни
- Използват се електрически и оптични интерфейси



→ **Контролен модул** – служи за управление на всички компоненти чрез I2C интерфейс



→ **Тригерен модул**– получава тригерна информация, дефинира как да бъде използвана и я предава на следващо ниво



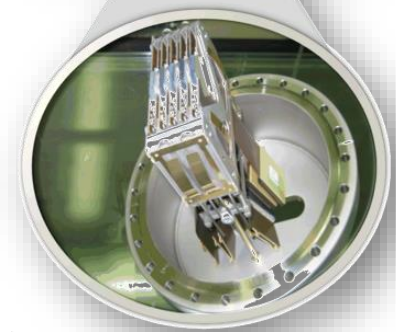
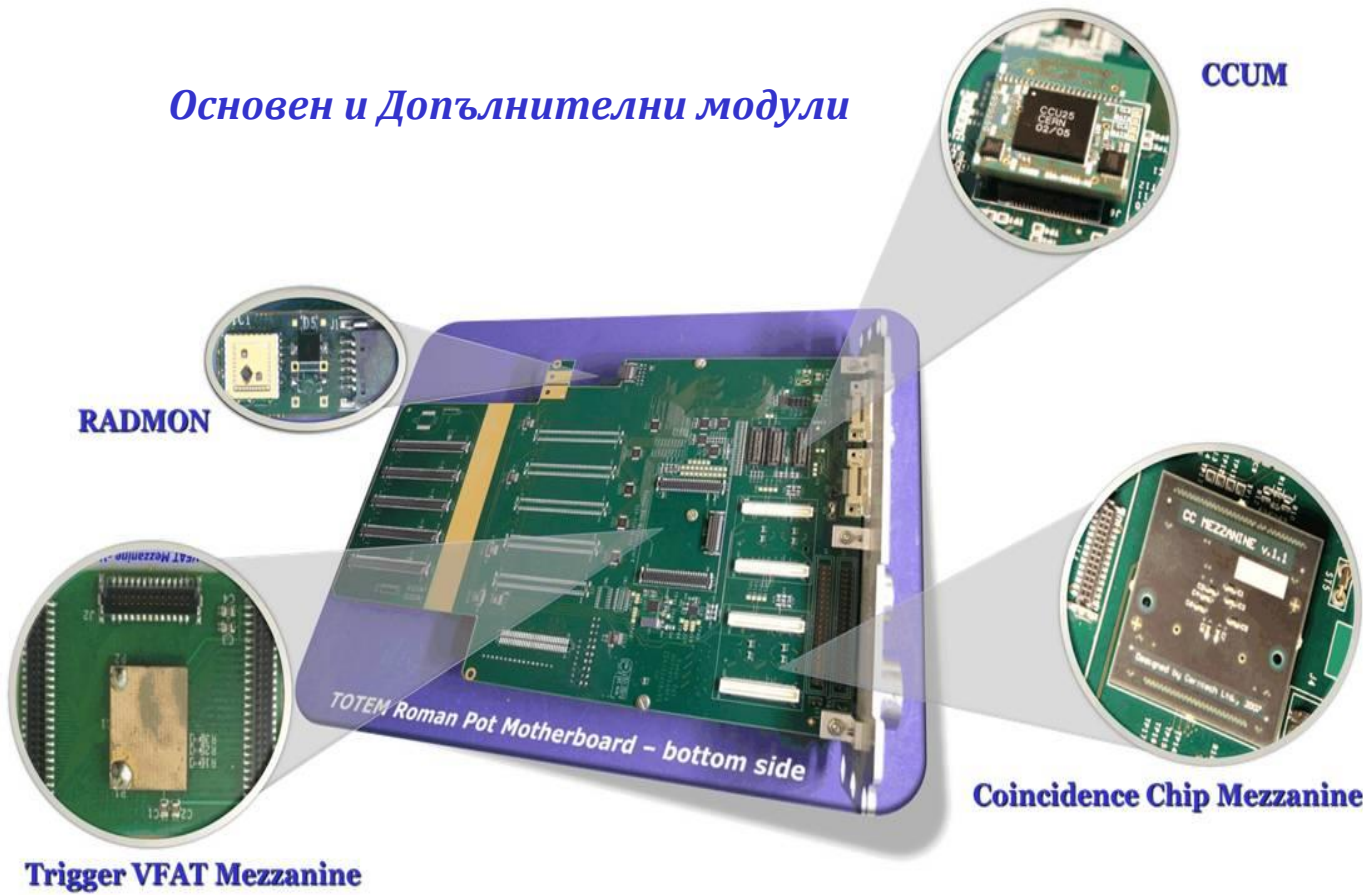
→ **Модул за съвпадение** – прави съвпадение между информацията от две координати U и V

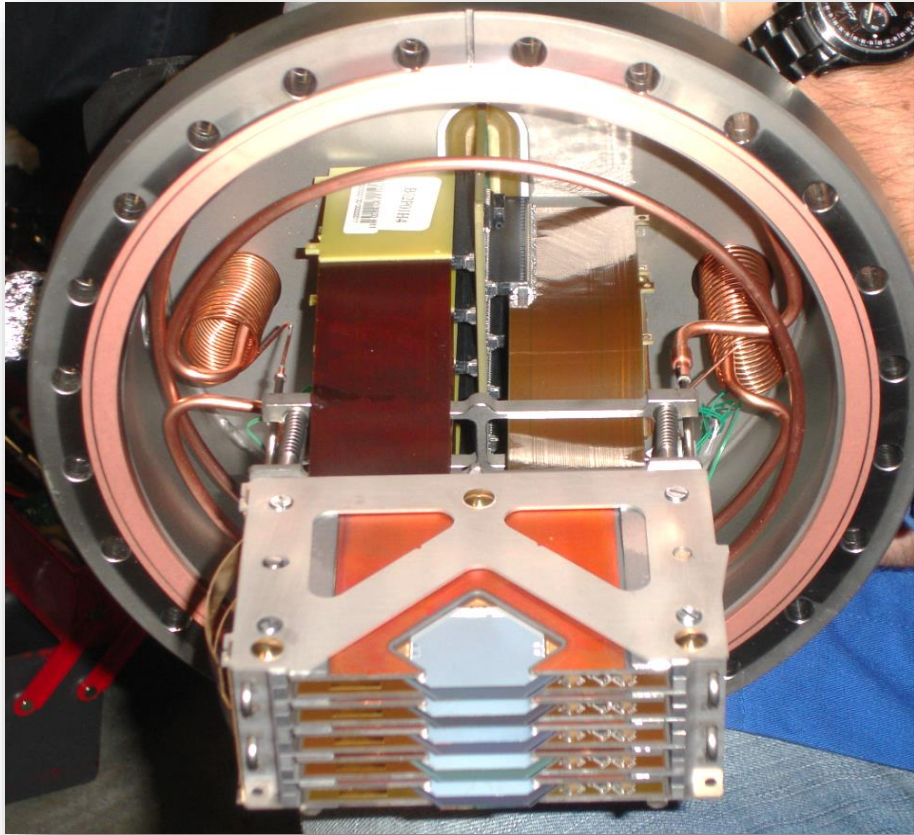


→ **Модул за радиационно измерване** – съдържа датчици за измерване на дозата, чиято информация се предава към компютър

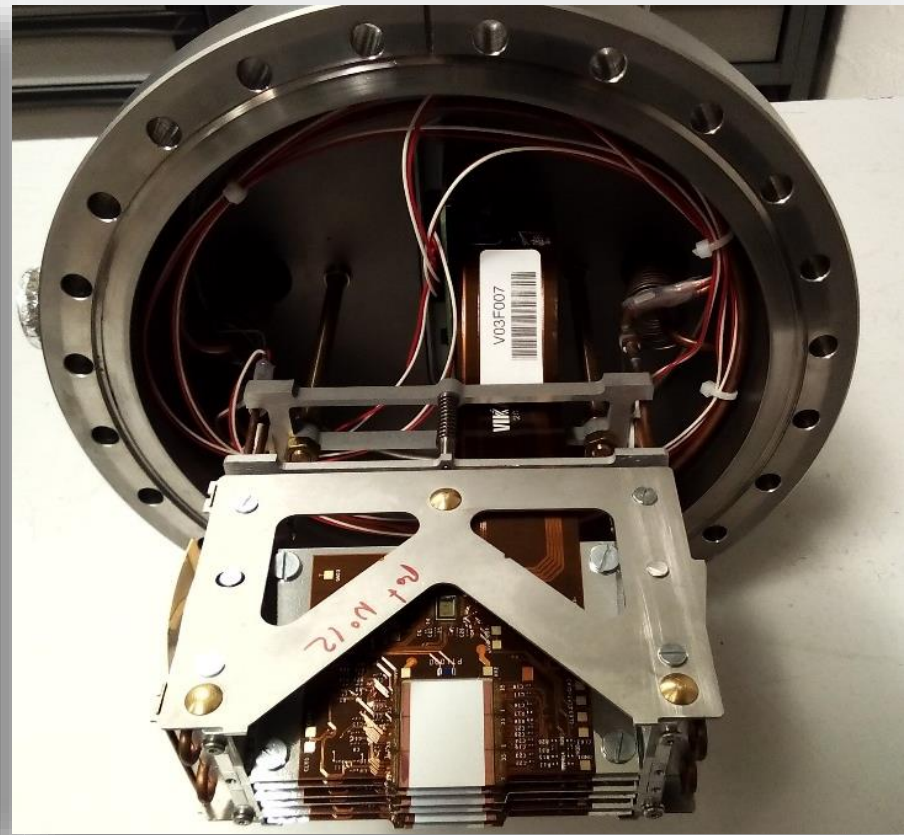
Основен модул и Детекторен пакет

Основен и Допълнителни модули

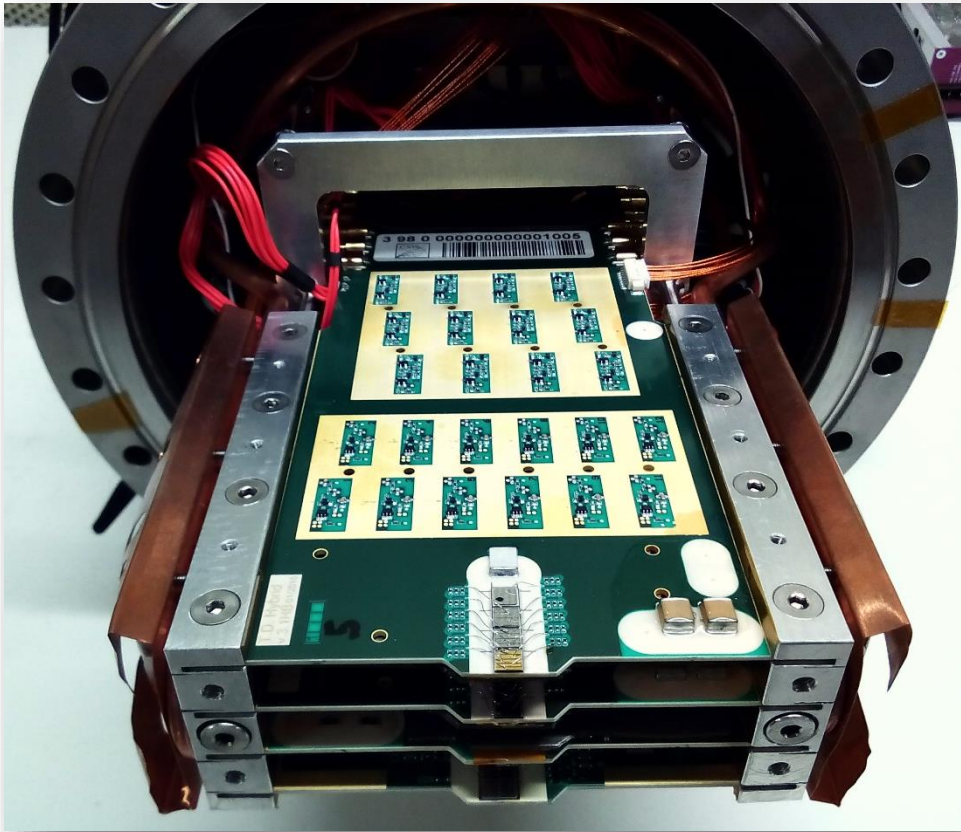




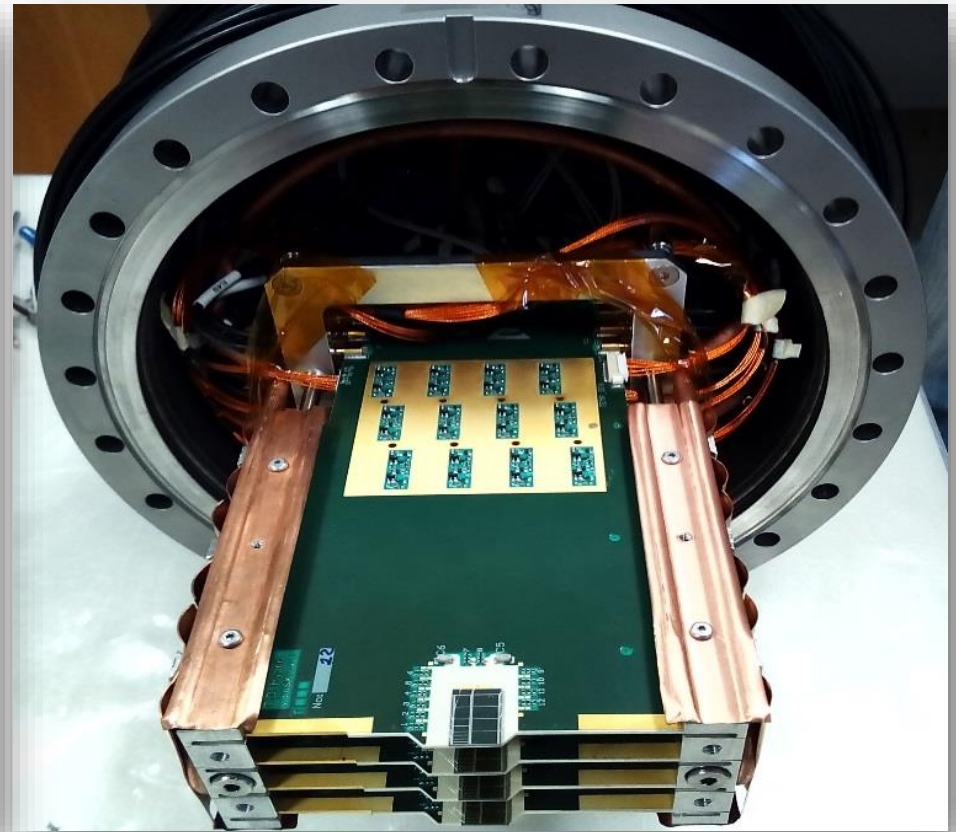
1) **Si-strip**: 10 layers of silicon microstrip plates; space resolution - $10\ \mu\text{m}$, angle resolution - $1\ \mu\text{rad}$; “edgeless” on the beam side; expected lifetime $\sim 10\text{fb}^{-1}$; $t = -25 \div -32\ \text{°C}$, $p = 10 \div 25\ \text{mbar}$; installed on LHC in 2008



2) **RPIX (3D-Si)**: 6 layers; CNM 3D pixel sensor ($230\ \mu\text{m}$ thickness); pixel size $100 \times 150\ \mu\text{m}$; ROC (psi46dig), each module has 160×156 pixels; expected lifetime $\sim 15\text{fb}^{-1}$ ($3 \times 10^{15}\ n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$); spatial resolution $10\ (30)\ \mu\text{m}$ along $x\ (y)$ direction; “edgeless” - $200\ \mu\text{m}$; installed in 2017



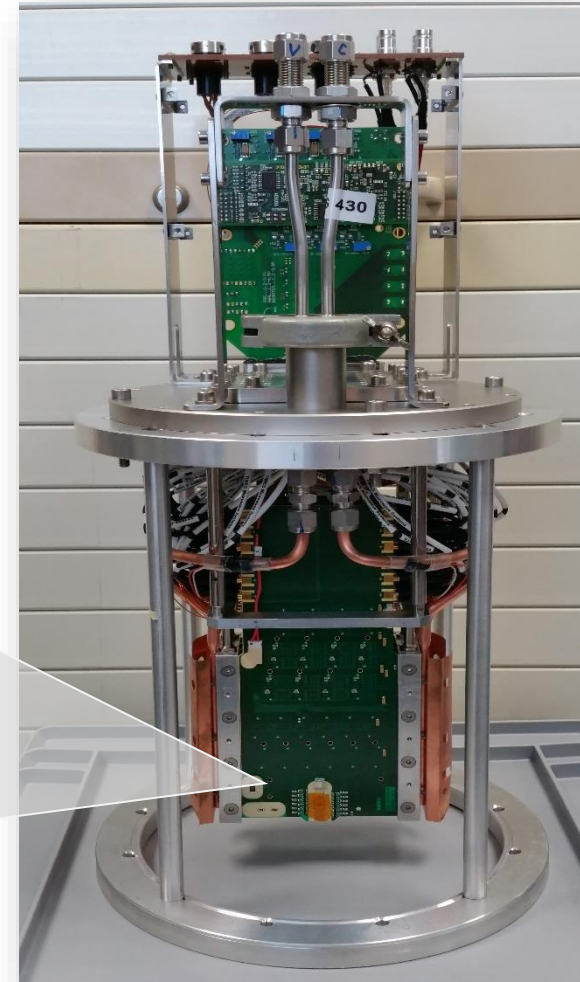
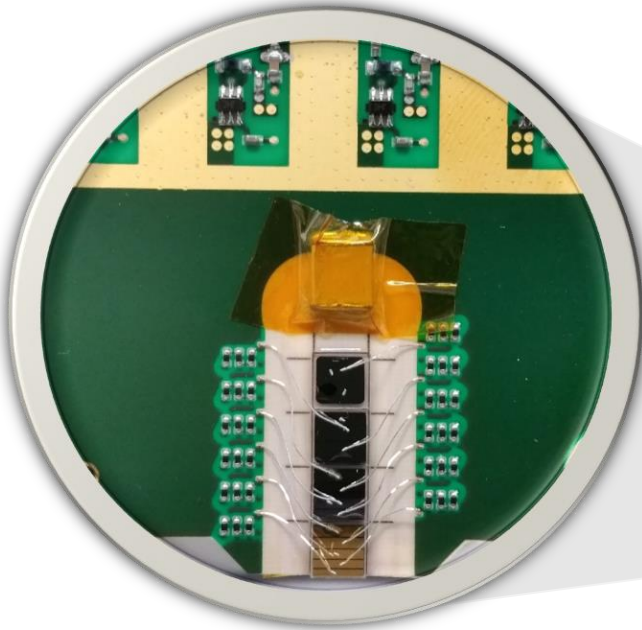
3) Diamond: 4 layers; time resolution up to 50ps per layer; high efficiency on the edge; irradiation limit up to $5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$; $t = 0 \div +10^\circ\text{C}$, $p = 50 \div 115 \text{ mbar}$; installed on LHC in 2016



4) UFSD (Si-ultrafast): 4 layers; CNM 50 μm sensors; time resolution $\sim 30 \text{ ps}$ per layer; “edgeless “ on the beam side; irradiation limit up to $3 \times 10^{14} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$; installed on LHC in 2017

Основен модул с Детекторен пакет

Детектори монтирани на хибридният модул



- Въведение
- Електроника при детектора
- **Електроника в залата за обработка**
- Видове системи
- Заключение

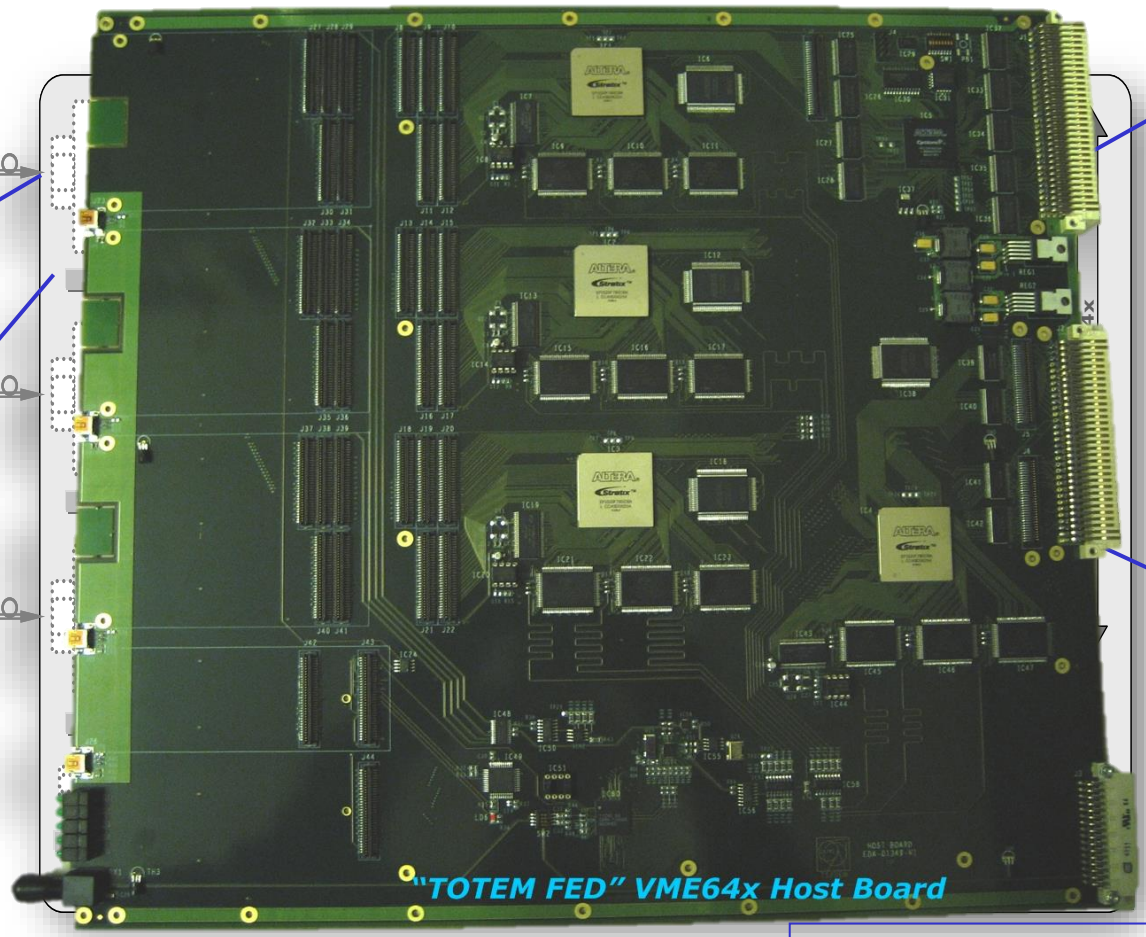
Gigabit Optical INPUT
640Mb/s/fiber x 12 = 7.68Gb/s

S-Link64 OUTPUT
480MB/s 64bit@60MHz

USB2.0 OUTPUT
480Mb/s - high
12Mb/s - full
320Mb/s - effective

VME64x OUTPUT
40MB/s BLT

S Link64 OUTPUT
480MB/s 64bit@60MHz



"TOTEM FED" VME64x Host Board

Data Bandwidth

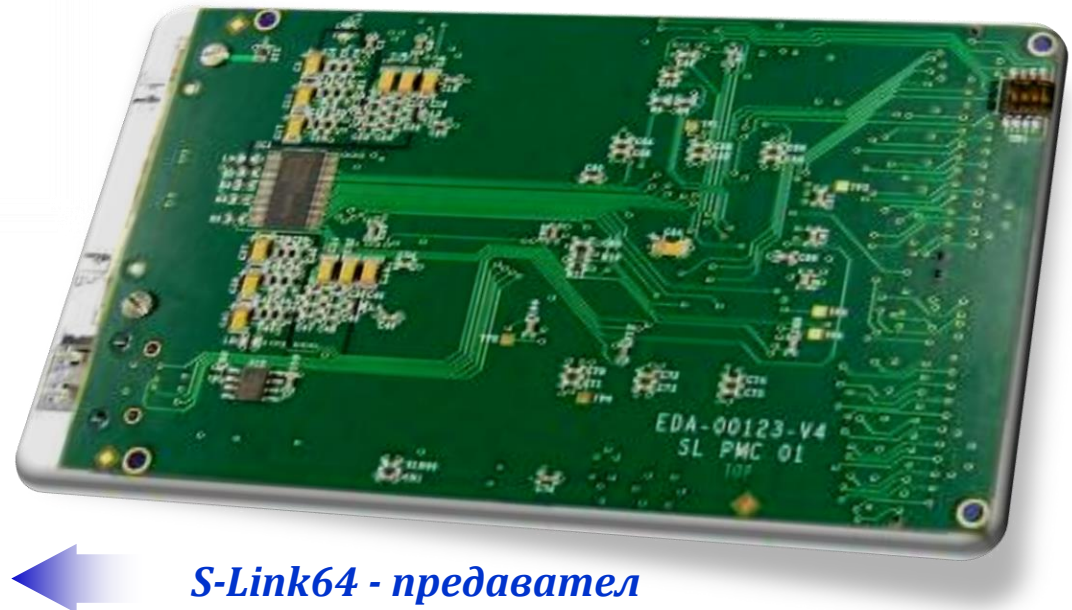
TOTEM Experiment
Trigger Rate - 1 kHz
Event Size - 40 kBytes

TOTFED has:
INPUT - 3 x OptoRX -> 3 x 7.68Gb/s
OUTPUTS - 4 x S_Link64 -> 4 x 480MB/s
- 4 x USB2.0 -> 4 x 320Mb/s
- 1 x VME64x -> 40MB/s

OptoRX12 – оптичен приемник

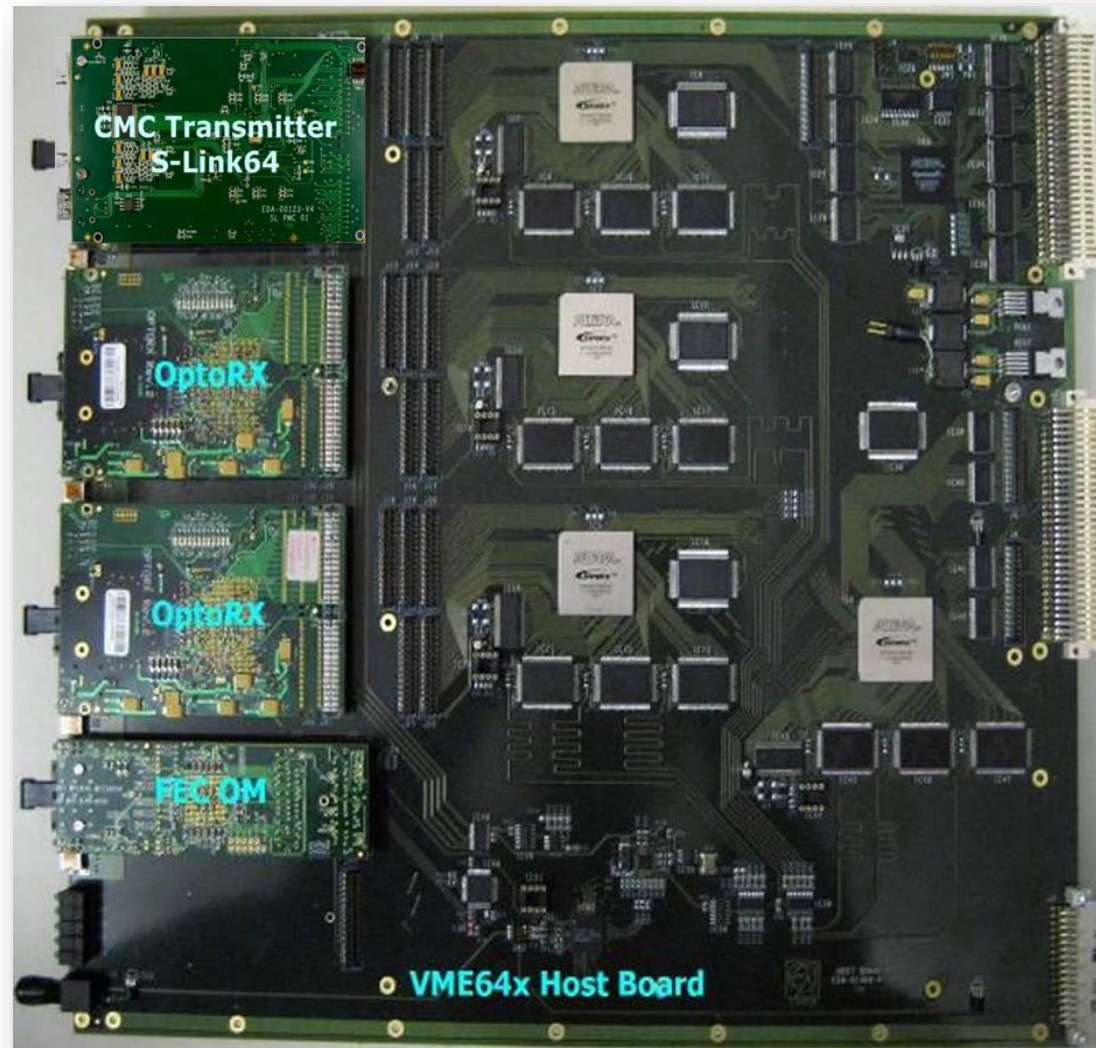


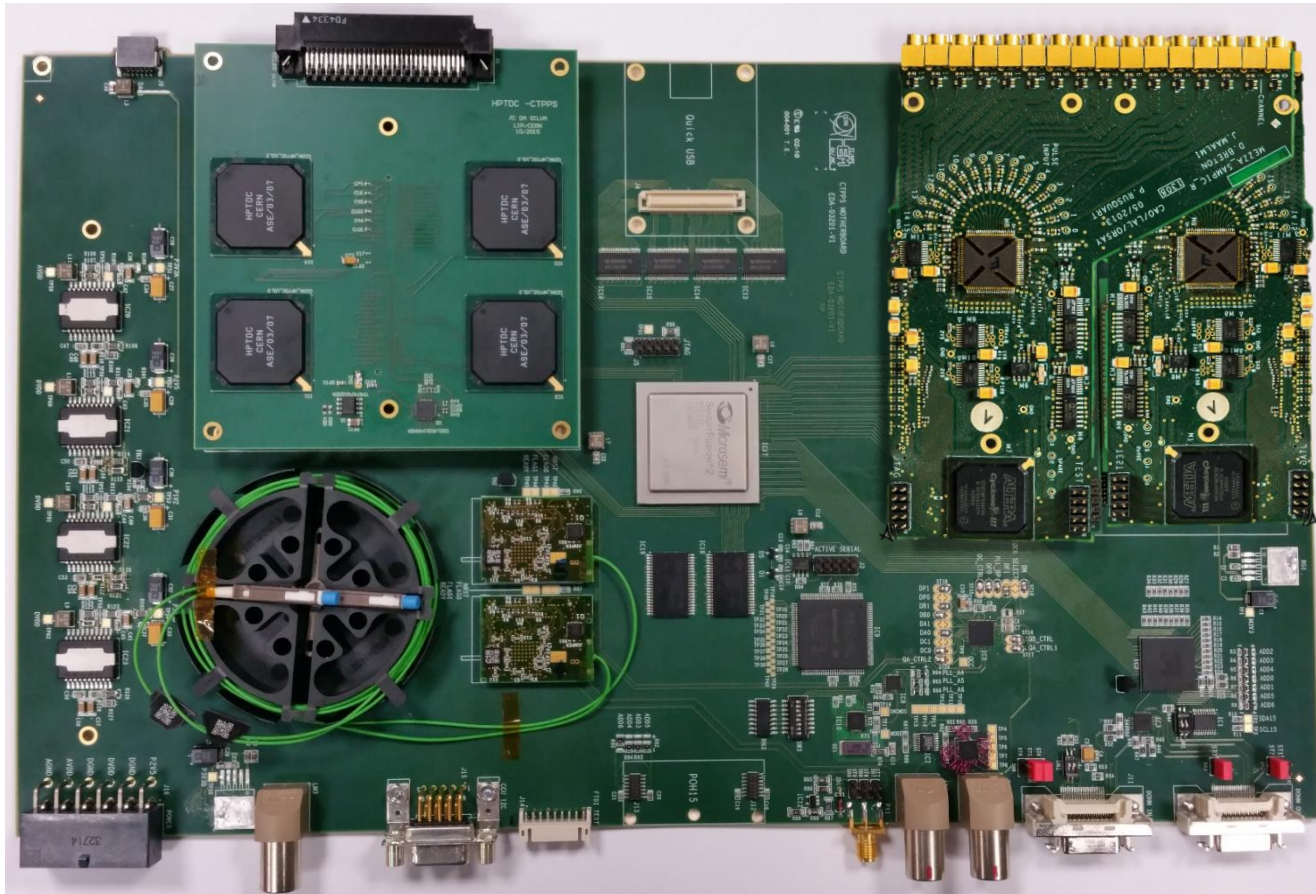
- Получава данните от 36 оптични интерфейса
- Преобразува информацията в цифров вид
- Пакетира и предава на следващото ниво



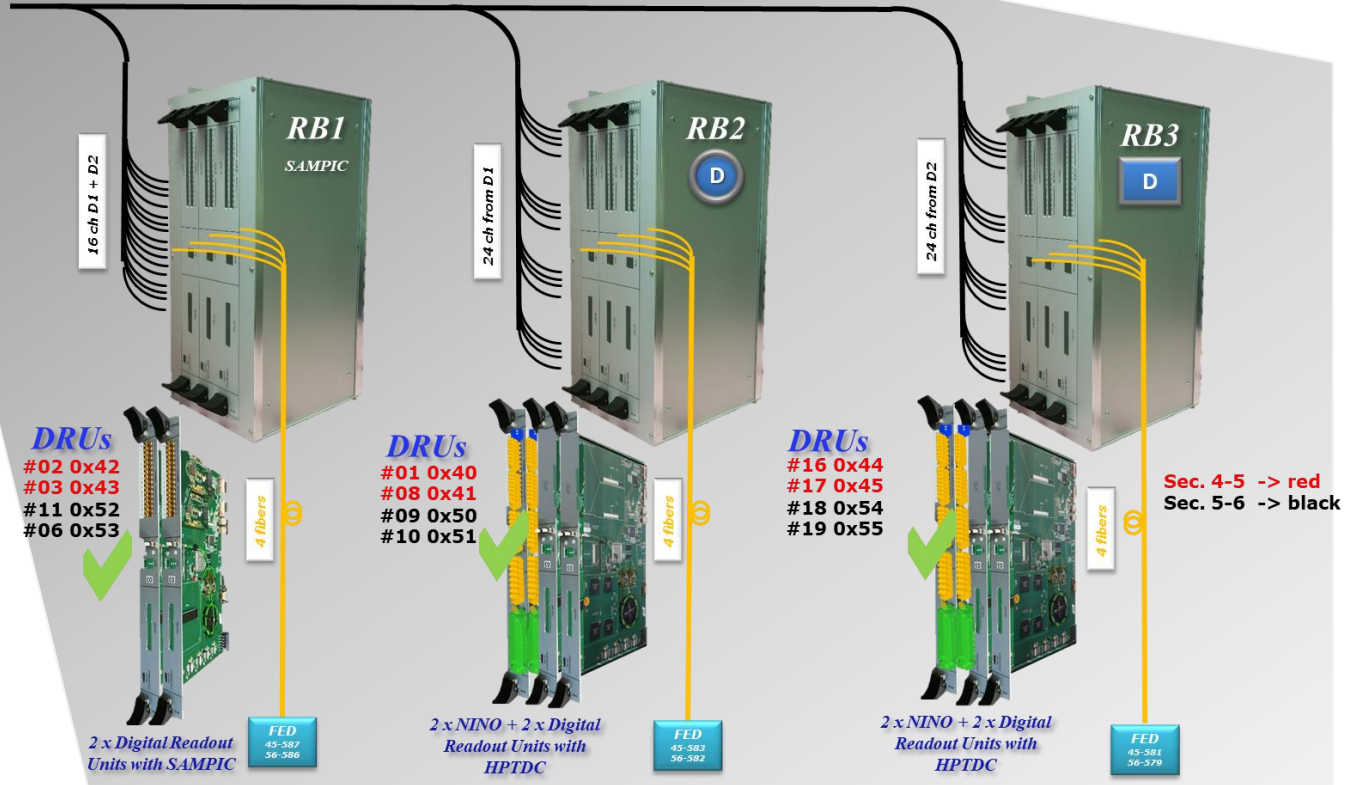
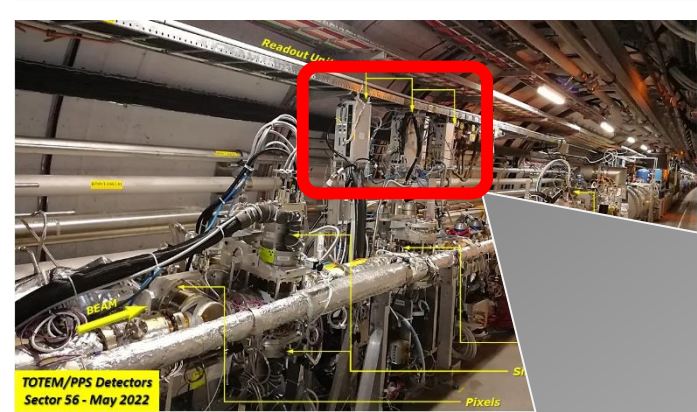
- Предава пакетите от данни към системата за събиране и обработка (DAQ) по определен протокол

S-Link64 - предавател



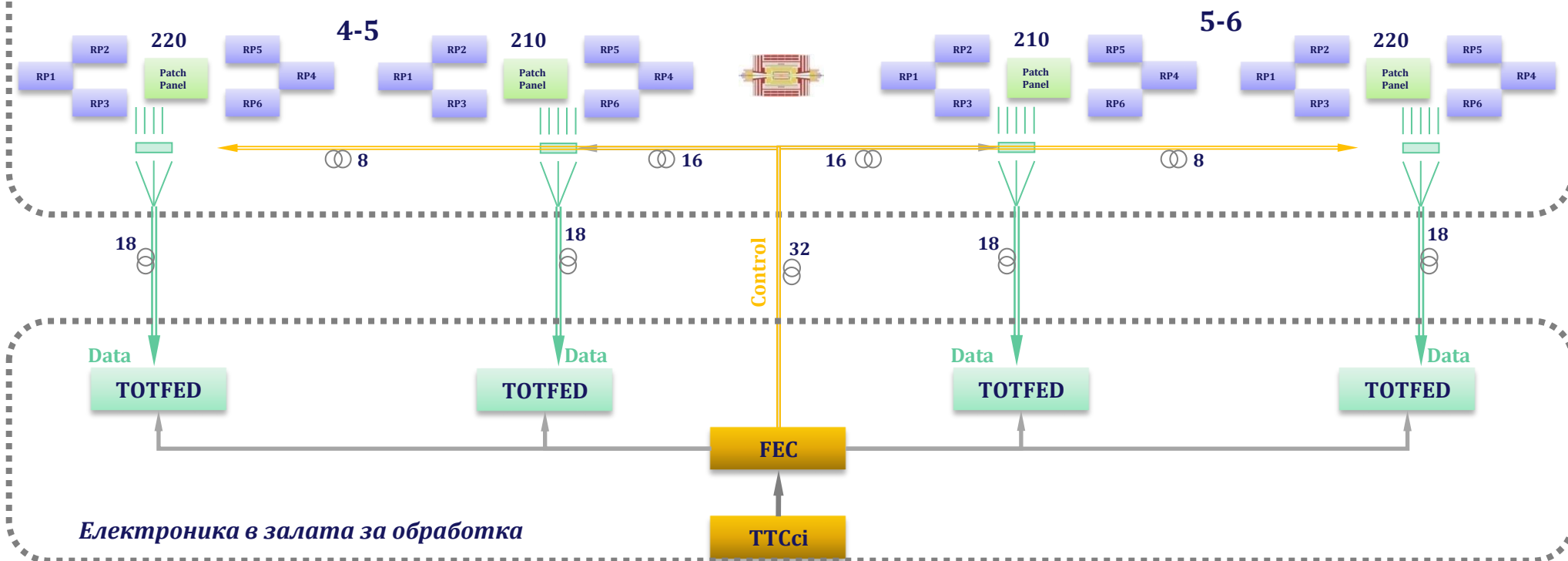
CMS TOTEM - Proton Precision Spectrometer

Приема информацията от детектора, преобразува я в цифров вид, обработва и предава на следващото ниво от системата за събиране на данни

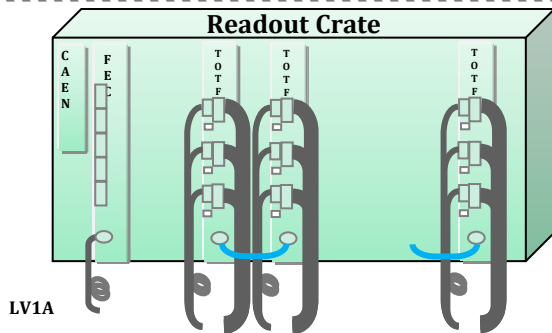


- Въведение
- Електроника при детектора
- Електроника в залата за обработка
- **Видове системи**
- Заключение

Електроника при детекторите



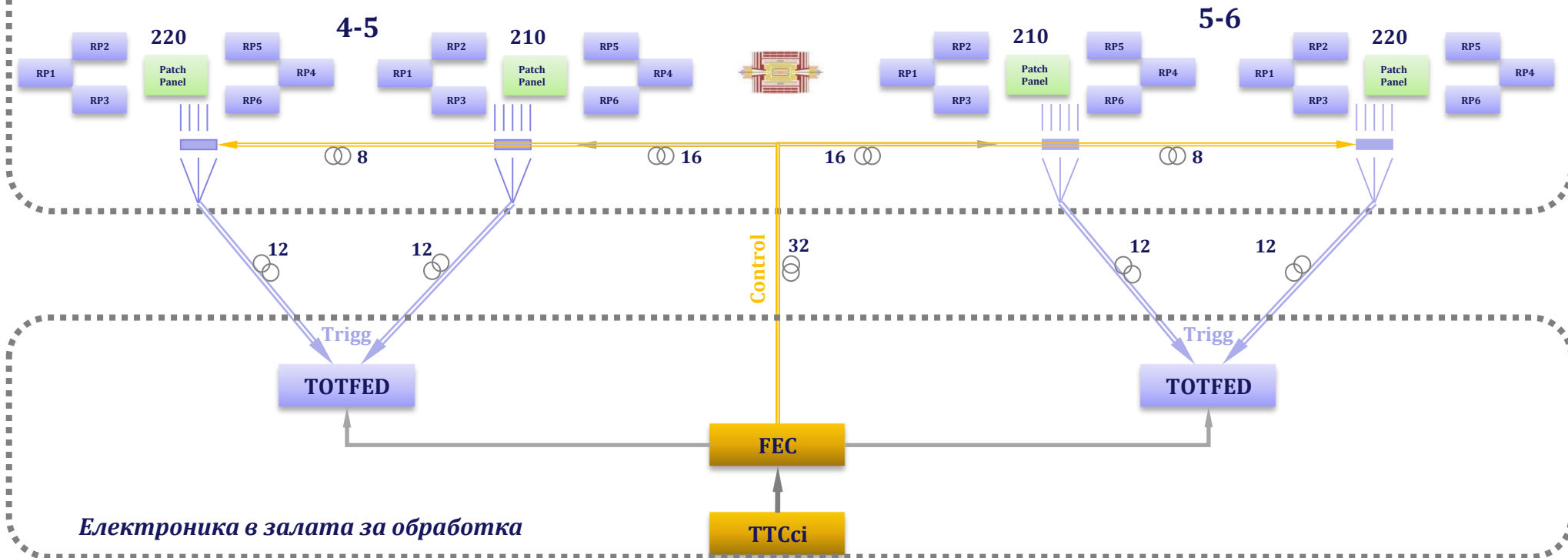
Електроника в залата за обработка



Система за събиране и обработка на данни

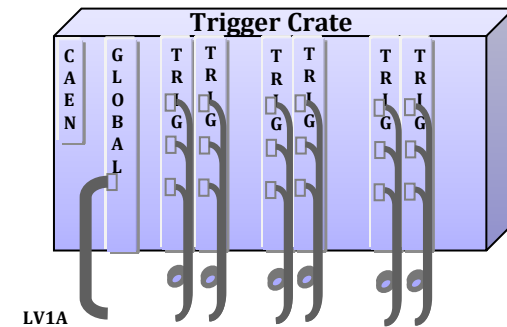
- Скорост до $\sim 1\text{kHz}$ през VME64x от $\sim 40\text{MB/s}$
- S-Link64 към CMS от $\sim 200\text{MB/s}$
- 240 Si детектора с 122880 канала общо се покриват от 960 VFAT2 чипа

Електроника при детекторите

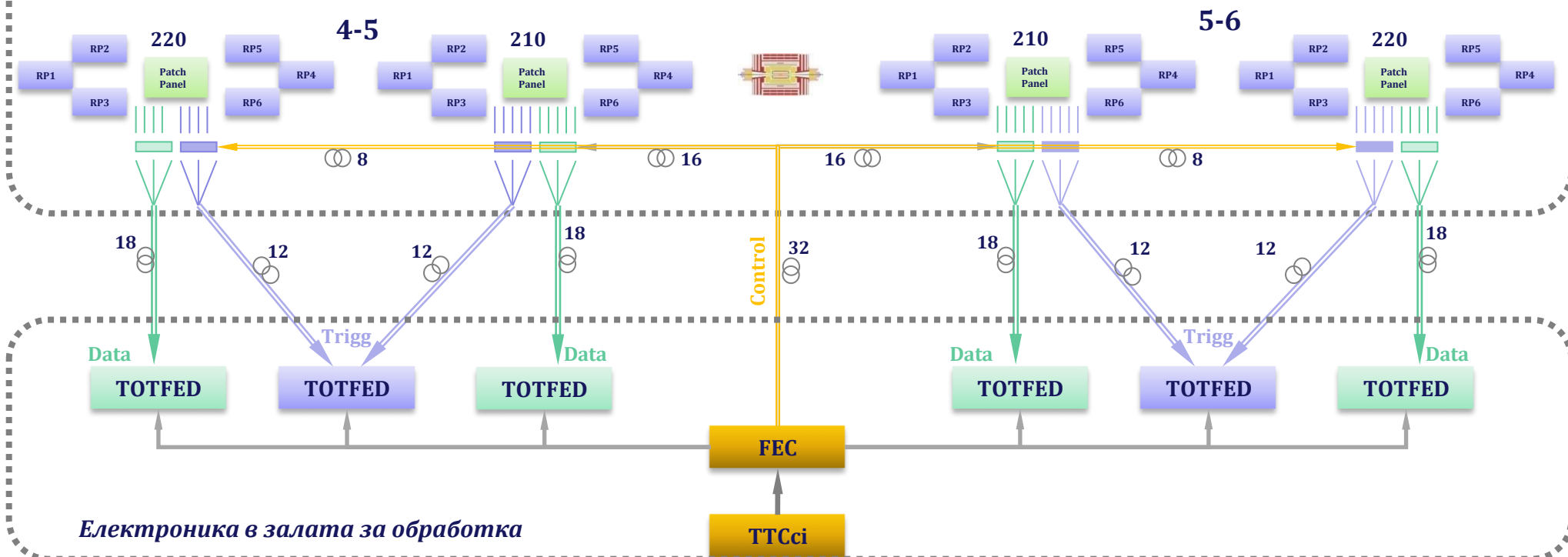


Тригерна Система

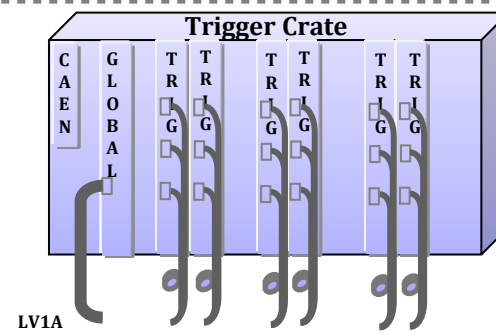
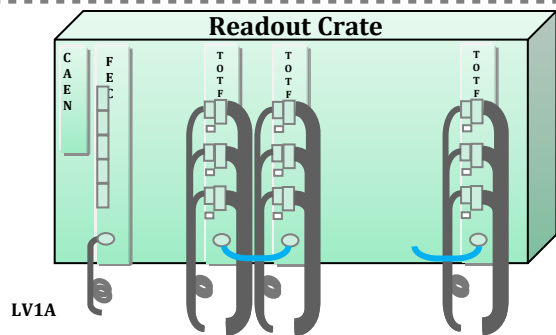
- 12 оптични интерфейса на станция за 2 основни модула TOTFED
- 2 електрически интерфейса на $\frac{1}{2}$ станция за 4 основни модула TOTFED

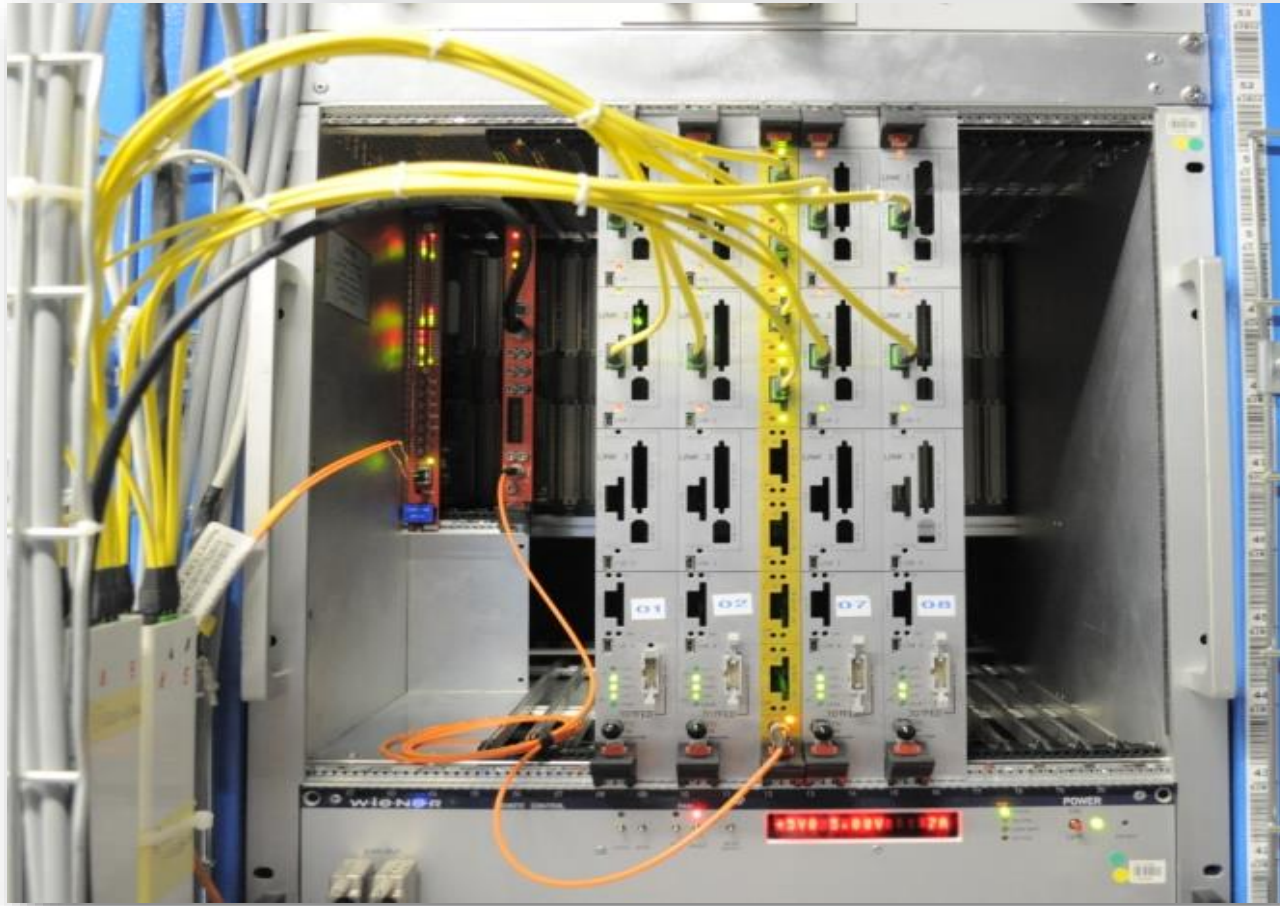


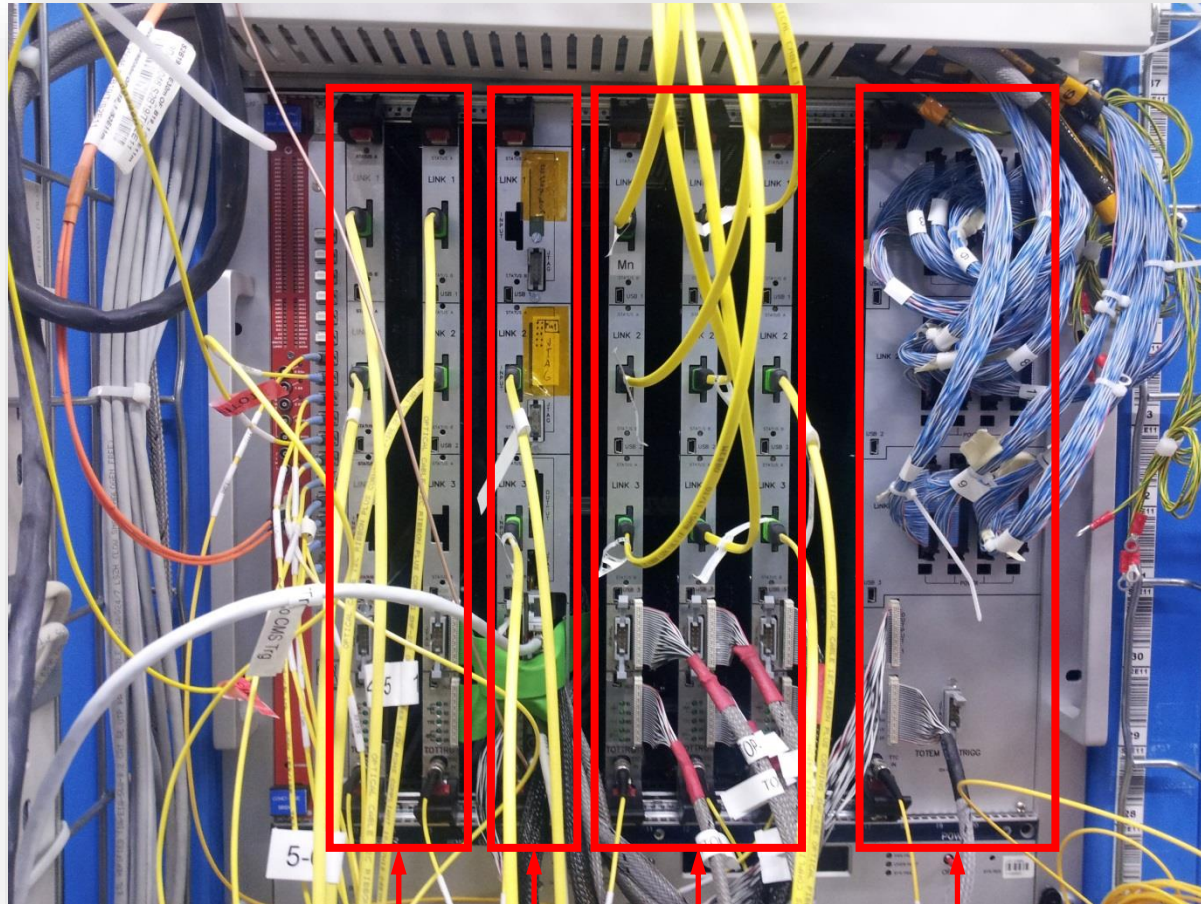
Електроника при детекторите



Електроника в зала за обработка







Roman Pot - optical

TOTEM GLOBAL Trigger Board

T1 and T2

Roman Pot - electrical

18/09/23
Mon 05:08:32

LHC: BEAM SETUP
Stable Beams [11:23]

DAQ State
Running

Run Number
373577 [00:38]

Lv1 Rate
33.374 kHz

Ev.Size
60.59 kB

Dead Time [AB]
1.79 [0.13] %

Stream N/A
N/A

Accepted [CPU]
N/A

Data Flow

LHC RAMPING OFF
Tracker HV N/A
Pixel HV N/A
Physics NOT declared
Clock Source LHC
TIER0 TRANSFER ON

#Lv1 7.8683E+7 Lv1 Rate 33.374 kHz

Ev.Size 60.59 kB BnW 1.98 GB/s

BU-HLT <#EvInBU> 4.6

Stored 3.283E+8 Accepted N/A

Stream	Tot.Events	Inst.Rate(Hz)

DAQ components

FMM	FED	FRL	EVM	RU	BU
-1	765	513	1	58	59

Sub-System	State	FRL	FED	IN
TCDS	Running	1	1	1
TRG	Running	14	14	1
PIXEL	Out	79	112	0
TRACKER	Out	249	436	0
ES	Out	26	40	0
ECAL	Out	54	54	0
HCAL	Running	42	42	7
GEM	Out	3	3	0
RPC	Out	3	3	0
DT	Out	9	9	0
CSC	Out	18	36	0
L1SCOUT	Running	0	0	0
DAQ	Running	0	0	0
DQM	Running	0	0	0
DCS	Connected	0	0	0
CTPPS	Running	2	2	2
CTPPS_TC	Running	13	13	4

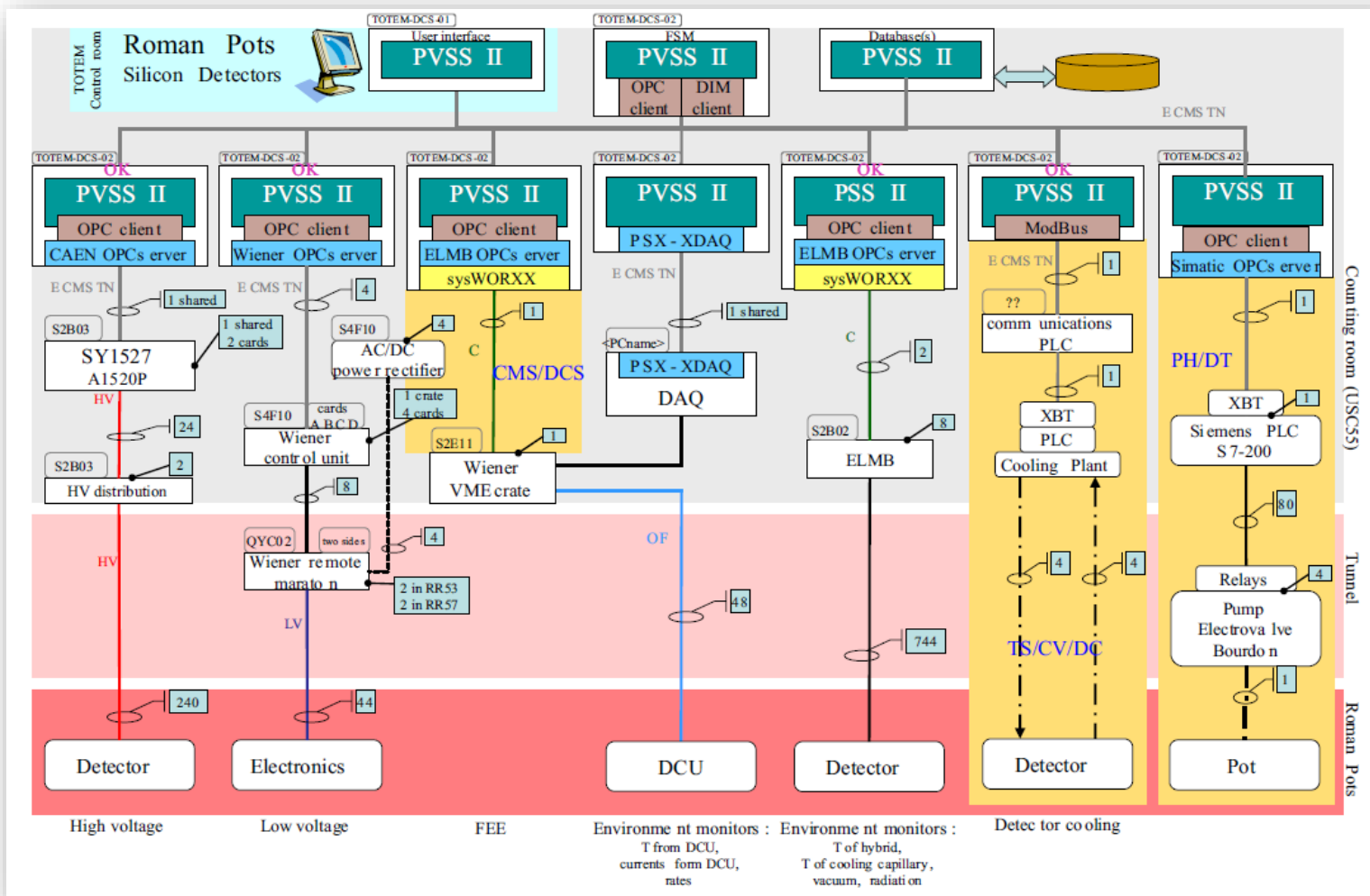
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon Sep 18 05:08:16 2023 CEST
Run/Event: 373577 / 72101534
Lumi section: 81

Beam & DCS states & DAQ history

LHC: BEAM SETUP, STABLE BEAMS

AlphaBatic Session 325788 <4.5 - 27.8 > sec. Started: 17/09/23 Sun 04:50. Machine: scx5scr33mac-cms.cern.ch - MEM 6256MB CPU95%

UTC time 18/09/23 03:08:31. Local time: Geneva 05:08, Los Angeles 20:08, Chicago 22:08, Moscow 07:08, Beijing 12:08



Предоставена от DCS екипа на TOTEM

Vision_1: TOP

05:07 18-09-23

gantchev
as:totem-dcs

DIST.1

TOTEMCMS
ERROR

FSM

- << TOTEMCMS >>
- TOTEM
- CMS_TOTEM
- LHC

TOTEM MAIN SUPERVISOR

run LOG

SECTOR 45 **CMS TOTEM-PPS** **SECTOR 56**

TOTEM Very High β^* RUN 18 Sep 2023

LHC

Heart Beat
PXIHeartBeat 71386
FESAHeartBeat85158024
DCSHeartBeat 70747

Stable Beam Energy[GeV]
Beam 1 PRESENT SAFE PROTON TRUE 56661
Beam 2 PRESENT SAFE PROTON TRUE 9159

Page 1
High beta fill with 3 nom. bunches

LHC Run Configuration	STATUS	LHC Run Configuration	STATUS
FILL_NO	9159	PARTICLE_TYPE_B1	PROTON
NO_BUNCHES	4	PARTICLE_TYPE_B2	PROTON
ACTIVE_INJECTION_SCHEME	Single_3b_3_0_0_highbeta	IP5-NO-COLLISIONS	3

totLHCControl

Machine Mode	Beam Present	Safe Beam	Particle Type	Stable Beam	Energy[GeV]
BEAM SETUP	Beam 1 PRESENT	SAFE	PROTON	TRUE	56661
STABLE BEAMS	Beam 2 PRESENT	SAFE	PROTON	TRUE	9159

Handshake

	LHC Message	TOTEM Message
INJECTION	STANDBY	VETO
ADJUST	STANDBY	VETO
DUMP	STANDBY	VETO
TOTEM Status		PHYSICS

beam 1 beam 2

InjectionPermit
UserPermit1

ControlKeys
BypassKey
MotorCoil

LHC BEAM SETUP
 STABLE BEAMS

Energy[GeV] 0.00

DCS self-test do not exists

S1E08 S2A02 S2A03 S2A04 S2A05 S2B02 S2B03 S2B04 S2B19

S2E11 S2F16 S4F05 X3L73 X3R73 X4E71 X4L71 X4R71 X4U71

FSM cms_seri_dcs_1 totem_dcs_1

CLOSE

TOTEM-PPS DCS экран (2)

CtppsParameters29217: "DiamondHvTrip"

Ctpps Parameters

	452frtp	452frhr	452frbt	Rb01	Rb02	Rb03	452c1hr	Clk1	452nrhr	451frtp	451frhr	451frbt	561frbt	561frhr	561frtp	562nrhr	Clk1	562c1hr	Rb03	Rb02	Rb01	562frbt	562frhr	562frtp	
LvA [V]	2.51	1.80	2.63	2.53	0.04	0.05	0.02	0.09	0.01	2.42	1.82	2.60	2.53	1.80	2.54	0.07	0.05	0.02	0.01	0.04	2.48	2.55	1.85	2.56	
LvD [A]	5.09	0.52	5.21	1.23	0.28	0.33	0.29	0.07	0.25	4.74	0.24	4.68	5.08	0.86	5.01	0.33	0.07	0.23	0.30	0.27	1.21	5.08	0.71	5.09	
LvV [V]	2.52	2.84	2.53	0.04	0.05	0.08		0.15		2.46	2.71	2.48	2.52	2.87	2.53		0.04		0.06	0.00	0.06	2.51	2.80	2.55	
Lv [A]	6.27	1.47	6.39	0.29	0.29	0.30		0.08		5.74	1.29	6.05	6.52	1.84	6.58		0.07		0.31	0.00	0.28	6.35	1.73	6.27	
Lv [V]	2.61	0.84	Rep	0.03	Con	0.03		0.04		2.88	Pix	0.06	Pix	0.05	Con		0.03		0.02	Rep	0.00	2.62	0.79	2.56	
Hv [A]	0.33	0.33	0.33		0.28	0.27		0.27		1.13	0.35	1.21		1.21			0.30		0.26		0.00	0.00	0.79		
Hv [V]	120.00	50.20	0.00	120.00						120.00	0.00	14.70	120.00	120.00	50.10	50.00	120.00	0.50	0.00	0.00	0.00	120.00	49.90	49.90	120.00
Hv [uA]	212.80	0.50	0.00	438.02						222.27	0.00	16.50	294.27	234.70	1.40	2.30	645.13	0.00	0.00	0.00	0.00	227.43	0.80	1.40	204.80
Hv [V]		49.90	0.10							0.00	0.00	0.00	0.00	49.90	49.90		0.00	0.00	0.25	0.25		49.90	49.90		
Hv [uA]		0.70	0.00							0.00	0.00	0.00	0.00	1.30	1.30		0.00	0.00	0.00	0.00		1.20	1.40		
Hv [V]		49.80	49.80							0.00	0.00	0.00	0.00	49.90	49.90		0.00	0.00	0.00	0.00		50.00	49.90		
Hv [uA]		0.60	0.40							0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	1.50		0.00	0.00	0.00	0.00		1.10	1.30		

Temp01 [°C] -22.68 -22.16 -16.61
 DssTemp [°C] -22.32 -21.61 -17.90
 CoolLeftIn [°C] -29.86 -24.57 -29.34
 CoolLeftOut [°C] -33.57 -31.73 -31.19
 CoolRightIn [°C] -32.45 -28.21 933.78
 CoolRightOut [°C] -30.20 -27.75 -33.58
 TempFlOut [°C] 19.37 18.47 19.89
 Vacu01 [mbar] 16.54 167.73 15.14
 Leak [ubar/s] 2.13 0.00 1.85
 Pressure [mbar] 15.30

RPIn
 RPHome
 RPOut
 RPMotorPowerOn
 RPBackHome
 RPAntiCollision
 PackOut
 PosSetting [um] +348 +2770 -401
 LVDT [um] +458 +2823 -429
 Motor [um] +343 +2769 -401
 Resolver [um] +348 +2769 -401
 InnWarning [um] -4900 -4900 +4900
 InnCritical [um] -5000 -5000 +5000
 InnLimit [um] -5000 -5000 +5000
 OutWarning [um] +45000 +45000 -45000
 OutCritical [um] +45000 +45000 -45000
 RPState 1 1 1
 RPWarning
 RPError

Color Legend: RED - ERROR, CRITICAL, TRIPPED; YELLOW - WARNING; ORANGE - RAMP_UP/DOWN; LIGHT GRAY - DEAD, DISABLED, MASKED; BLUE - OK, STANDBY; GREEN - OK, ON; MAGENTA - NO DATA POINT; 00.888 - INVALID

05:05 18-09-23

LHC BEAM SETUP
 STABLE BEAMS
 Energy[GeV] 0.00

EDIT LV LIMITS
 EDIT HV RECIPES
 HV RECIPE FSM STATE STBY
 tot_Rp Standby_Mode
 HV RECIPE FSM STATE ON
 tot_Rp Standby_Mode

Heart Beat
 PXIHeartBeat 71281
 FESAHeartBeat85156134
 DCSHeartBeat 70643

toRpInterlock
 beam 1 beam 2
 InjectionPermit

UserPermit1

DeviceAllowed

MovementPermit
 PXI

MovementOverride
 PXI
 DCS

ManualInjectionPermit
 PXI
 DCS

ControlKeys
 BypassKey
 MotorCoil

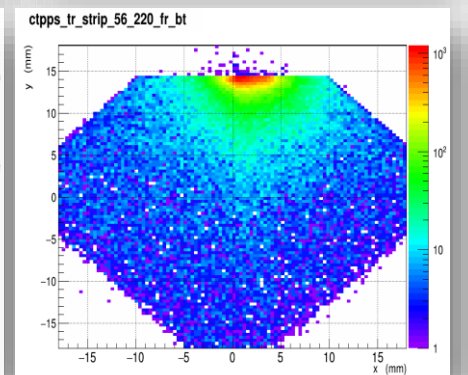
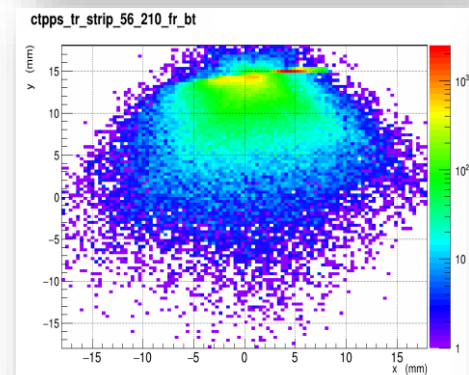
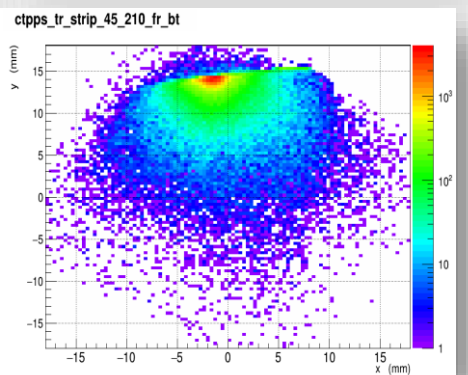
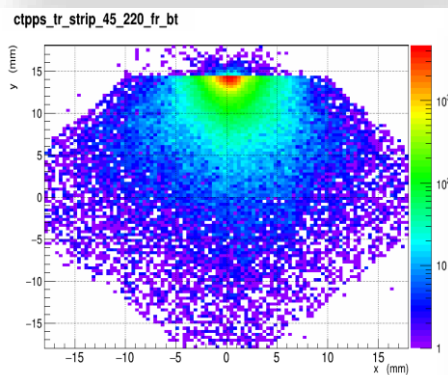
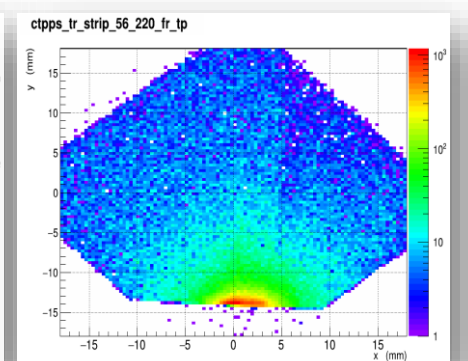
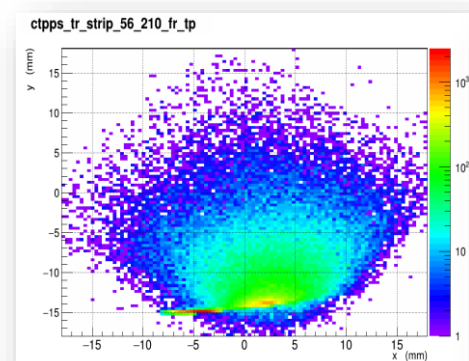
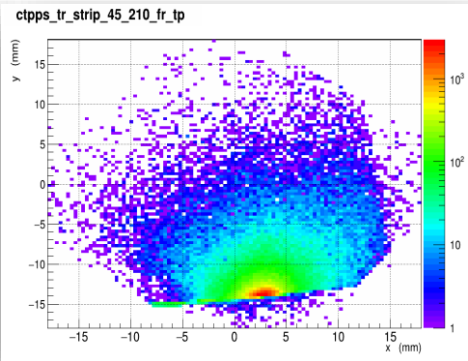
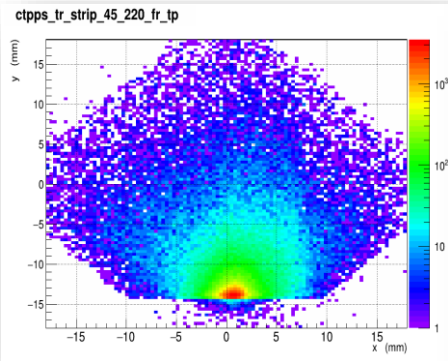
PXIStatus
 toPXIInfoID 0
 toPXIAlarmID 0

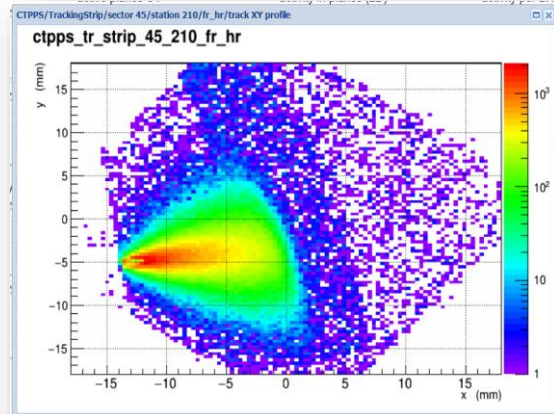
AlcoveTemp
 Sector45 [°C] 39.98
 Sector56 [°C] 0.00

TOTEM Very High β^* RUN 18 Sep 2023

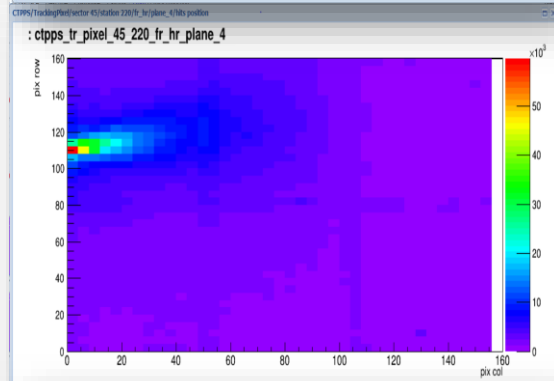
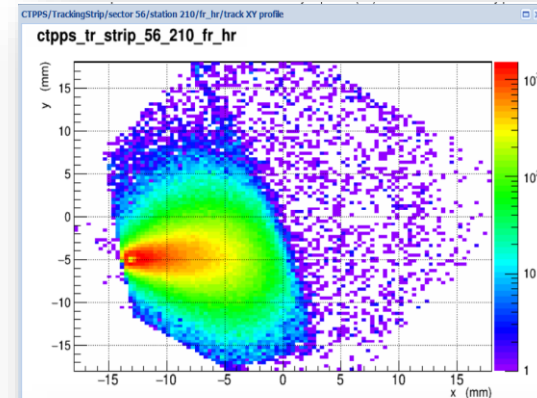


TOTEM Very High Beta * RUN 18 Sep 2023

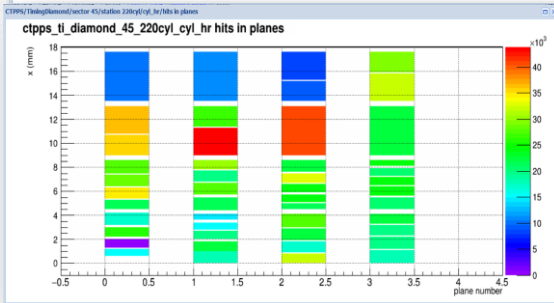
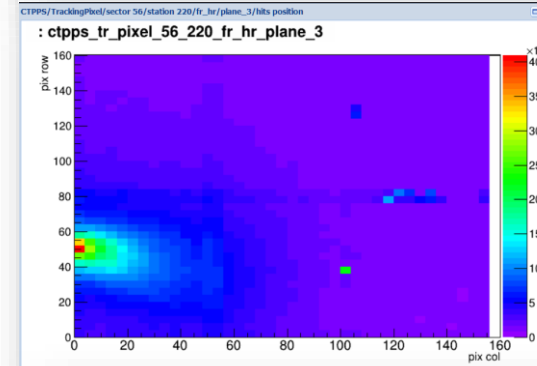




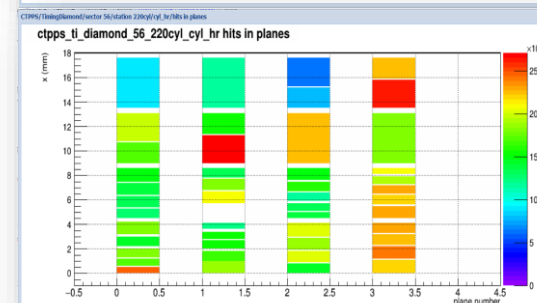
Силициеви
Детектори



Pixels
Детектори



Диамантни
Детектори



„Първо експериментално наблюдение на обмен на одерони при еластични протон-протонни и протон-антипротонни взаимодействия“.

През август 2021 г. учените от ТОТЕМ (CERN), съвместно с колаборацията D0 (Fermi Lab) публикуваха статия, с която потвърдиха съществуването на Одерона [1] - неуловимата досега квази-частица, предречена преди 50 години. Статистическата значимост на комбинираните данни от анализ на $p\bar{p}$ (протон-антипротон) (D0) и pp (протон-протонни) (ТОТЕМ) взаимодействия е по-голяма от 5 стандартни отклонения и се интерпретира като първото експериментално наблюдаване на обмен на фамилия от безцветни, зарядово нечетни комбинации от глюони – т.н. одерони. През септември 2021 статията е цитирана от публикация в Nature Reviews Physics [2].

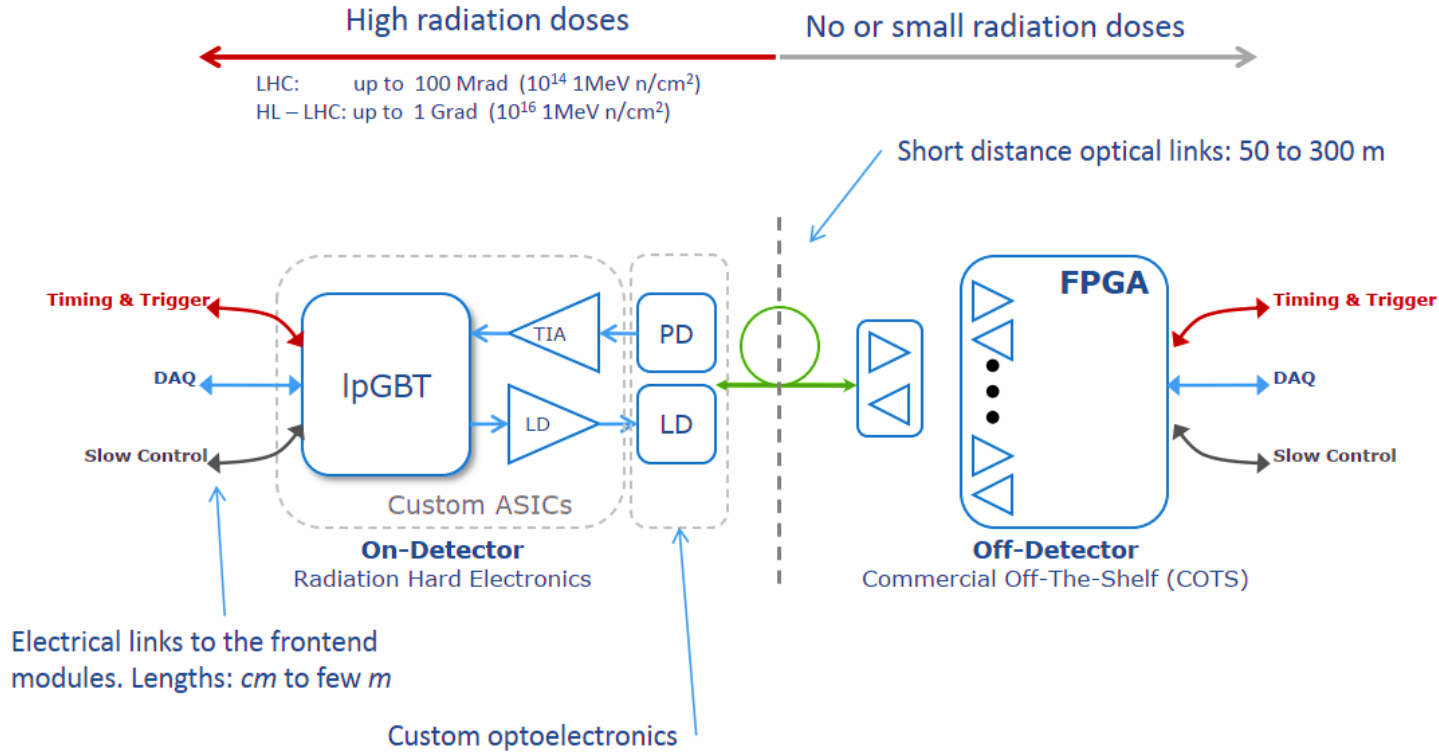
[1] Abazov, V. M., ... Antchev, G. Atanassov, I., ... et al. Odderon exchange from elastic scattering differences between pp and $p\bar{p}$ data at 1.96 TeV and from pp forward scattering measurements. [Phys. Rev. Lett. 127, 062003 \(2021\)](#)

[2] Leader, E. Discovery of the odderon. [Nat Rev Phys 3, 680 \(2021\)](#)

HL-LHC поставя нови изисквания и предизвикателства:

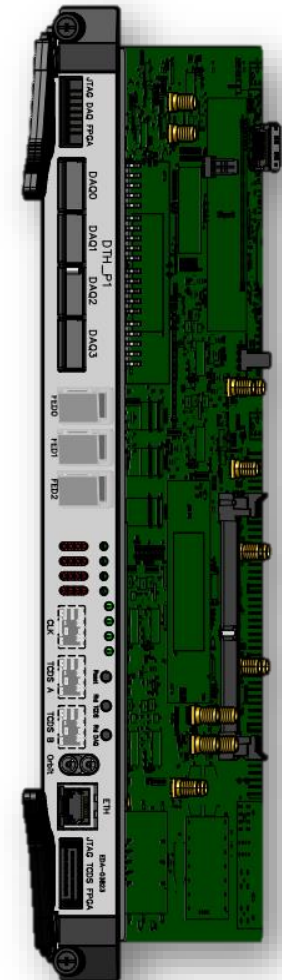
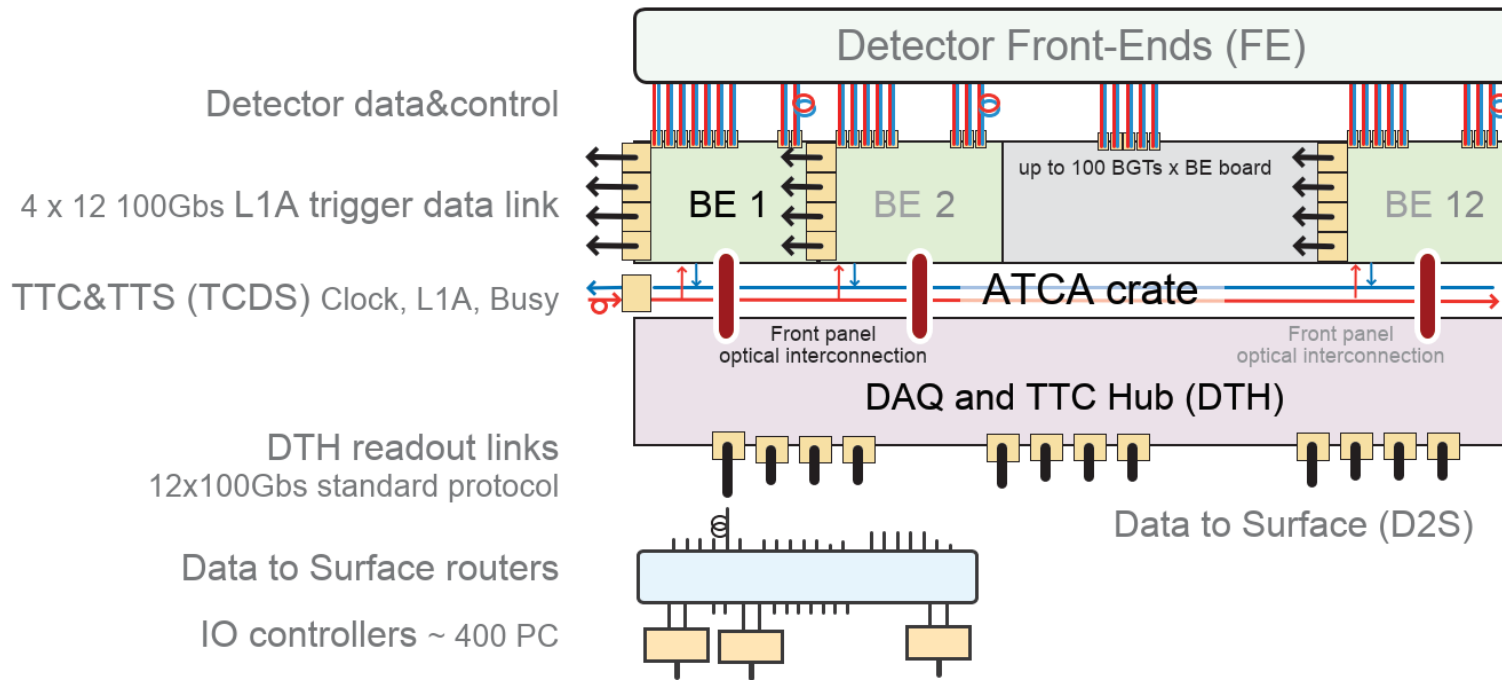
- По-голямо количество информация, скорост, бързодействие, устойчивост на радиация
- Детектори от нов тип с по-добри параметри и възможности
- CERN в колаборация с външни институти разработва специални ел. компоненти за това

IpGBT Link Architecture



Електроника при детекторите

Нова електроника в залата за събиране и обработка на данни, DAQ / Trigger системи



DTH module CMS DAQ

- **ATCA стандарт;**
- **контрол и данни по 100Gbs линкове;**
- **две нива на тригера;**
- **по-бързи оптични рутери и мощни PC станции**

- Въведение
- Електроника при детектора
- Електроника в залата за обработка
- Видове системи
- **Заключение**

- Развитието и усъвършенстването на технологиите в области като микроелектроника, електроника, измервателна техника, системите за събиране и обработка на данни, комуникациите и т.н. позволяват да се създават съвременни системи за физични експерименти.
- Увеличеното бързодействие на предаване на данни в съвкупност с програмируемите компоненти, създаде възможността за изграждането на многоканални устройства за събиране на данни от експеримента.
- Експеримента TOTEM с неговите силициеви детектори беше създаден за кратък период и успешно бяха събирани данни още през 2009 г.
- Създадената за Roman Pot електроника се използва успешно и за другите детектори на TOTEM а така също и за един от детекторите на CMS.
- Силициевите детектори за Roman Pot показват отлични качества и ще се използват за физическите измервания на TOTEM и след голямото спиране (LS2) на ускорителя.
- Усилия за създаването и изграждането на експеримента се отплащат с появата на първите физически резултати, публикувани в международни издания.

Благодаря за вниманието