

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

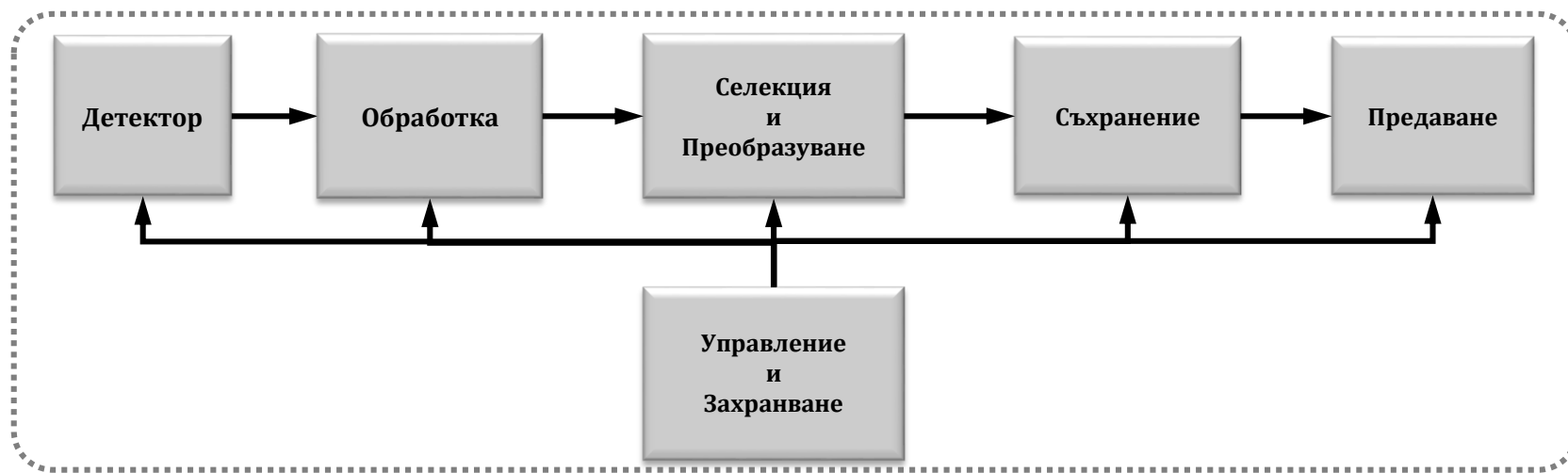
Освен ускорителите във физиката на високите енергии, две са основните групи от технически средства за провеждане на експериментални изследвания:

- *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*

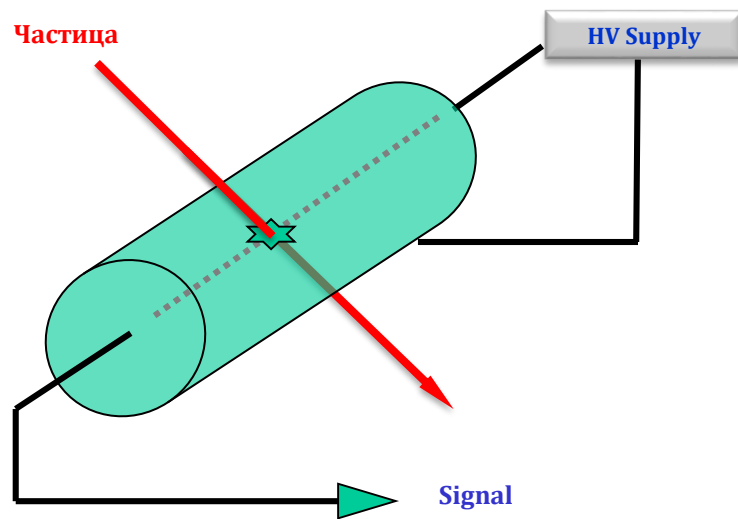
След множеството транзисторни устройства скок в развитието на електрониката се предизвика от напредъка на микроелектрониката. Широко се използват интегрални схеми, програмируеми устройства, микропроцесори и различни видове компютри.



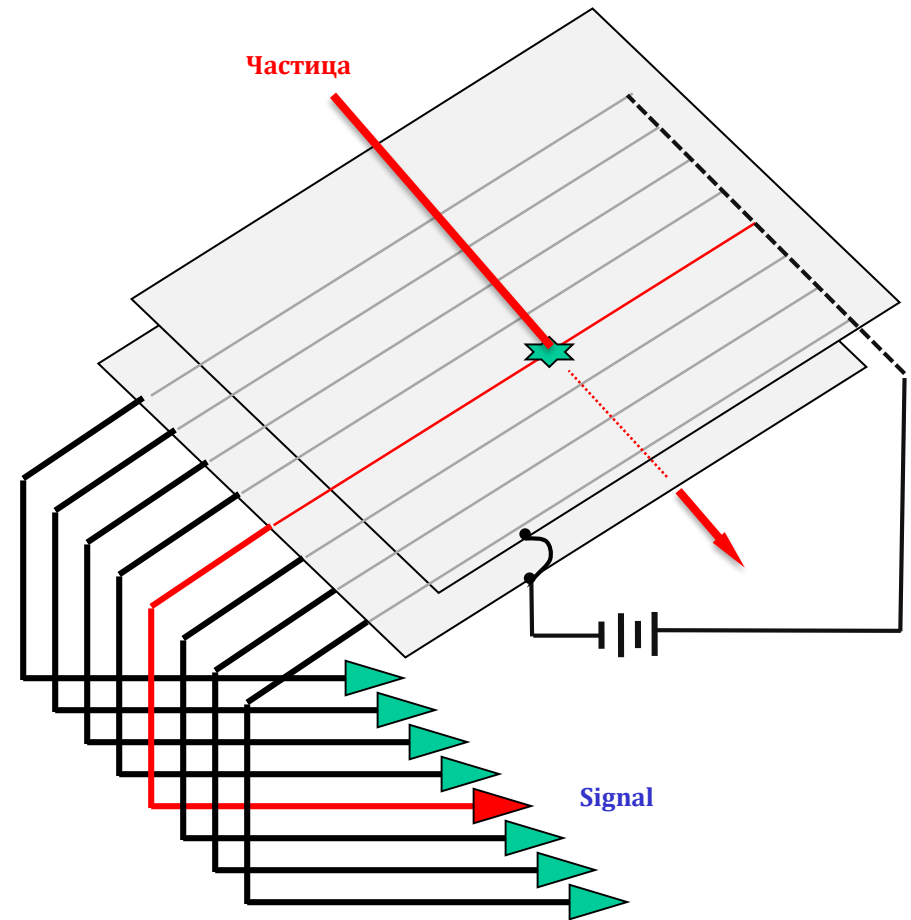
Общата структура съдържа следните основни блокове:

- 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

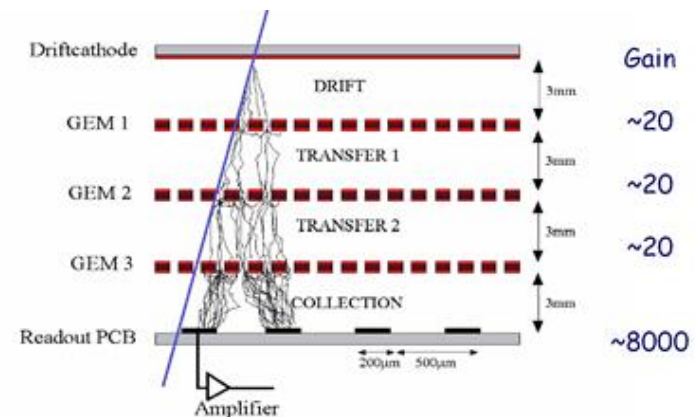
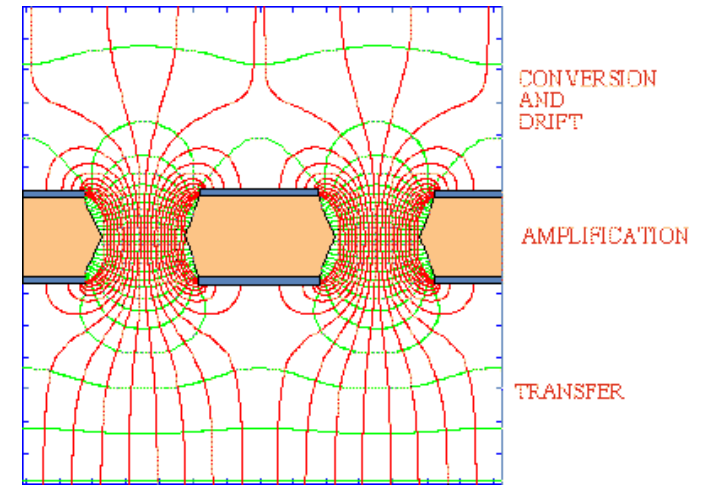
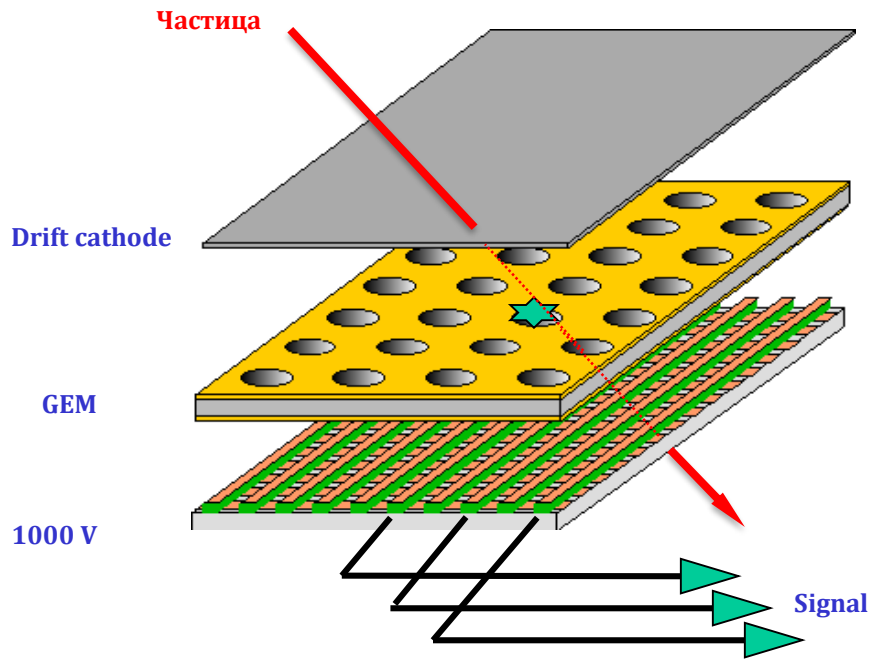
Единична газова камера



Многожична газова камера

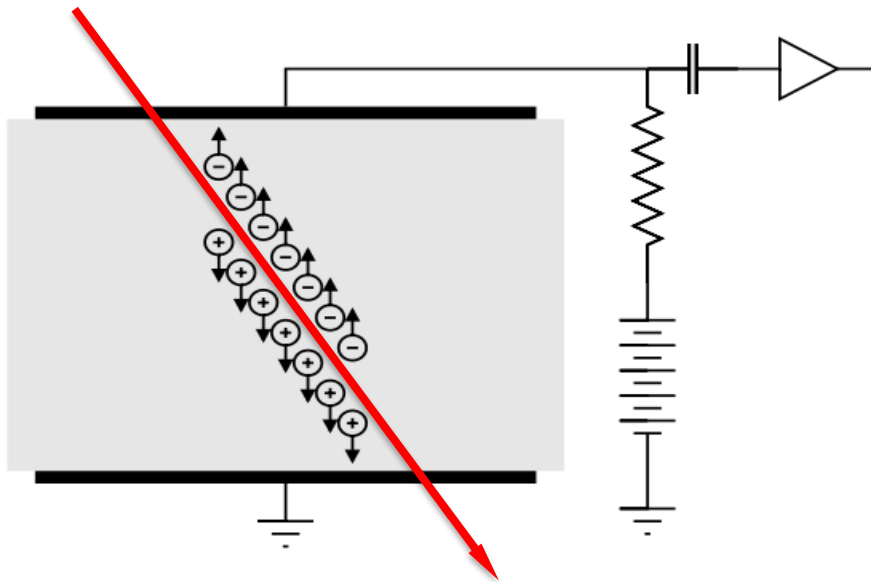


Йонизационна мултипликационна камера (GEM)

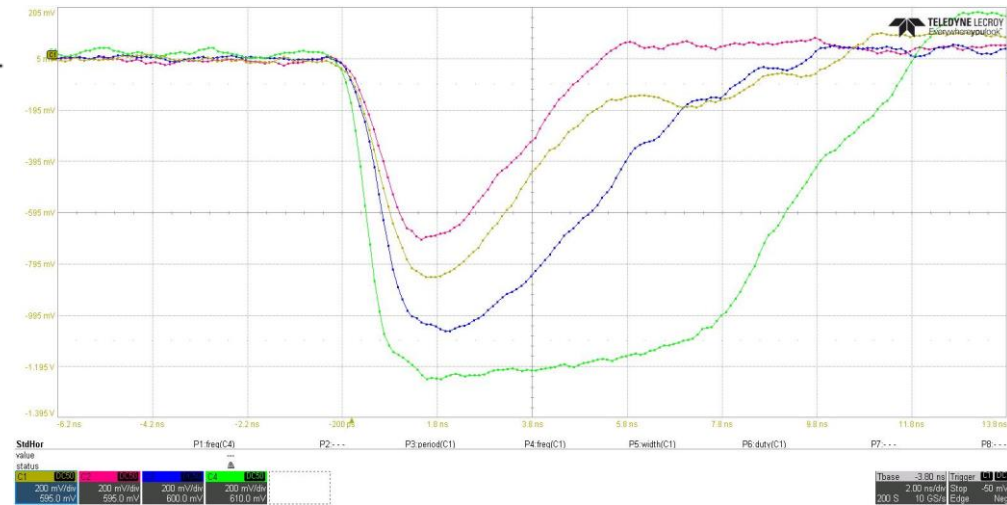


Диамантен детектор

Частица

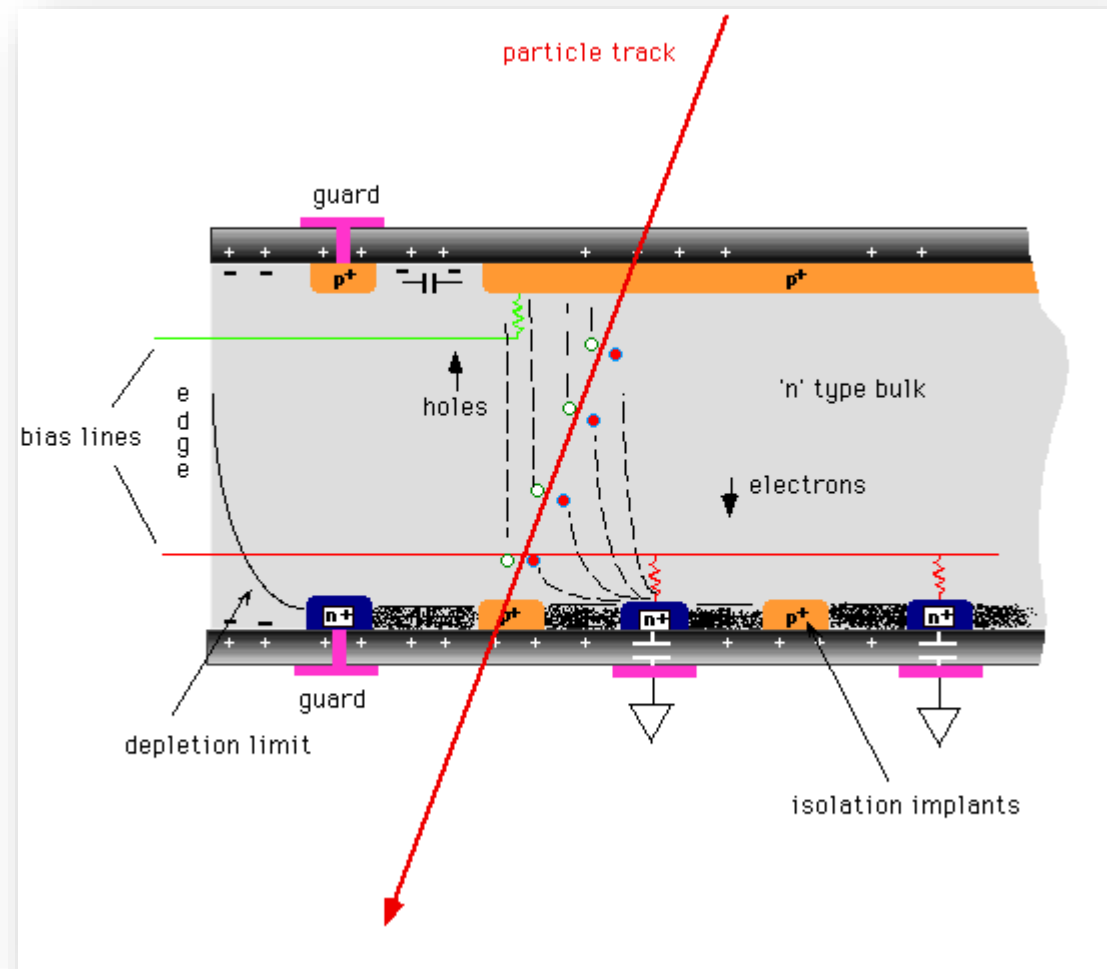


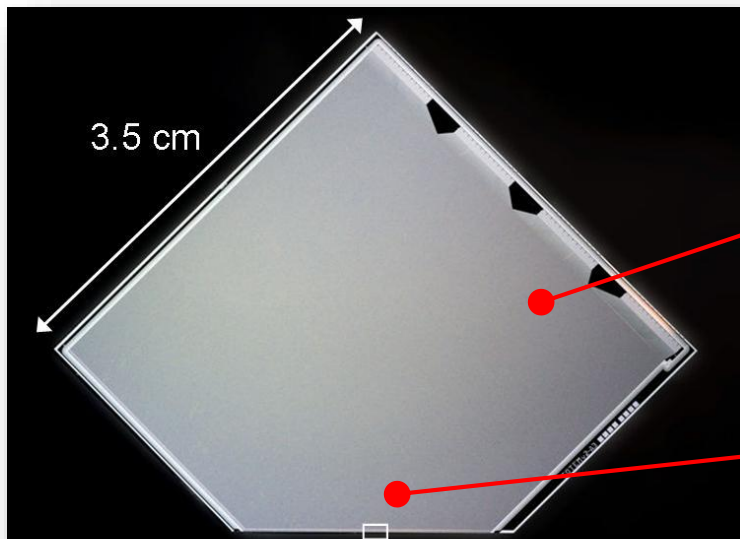
Signal



Предимства и приложение: бързодействие, за времеви детектори

Силициев детектор



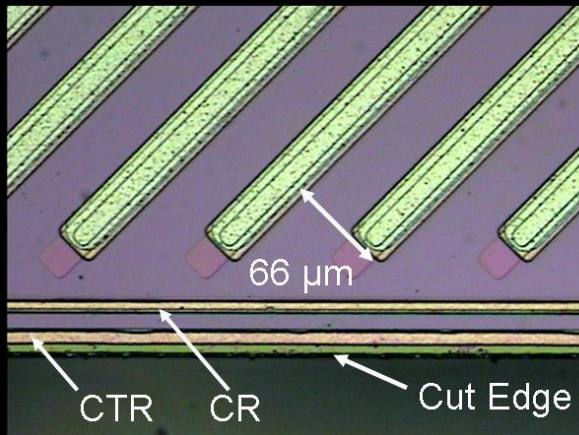


Технология

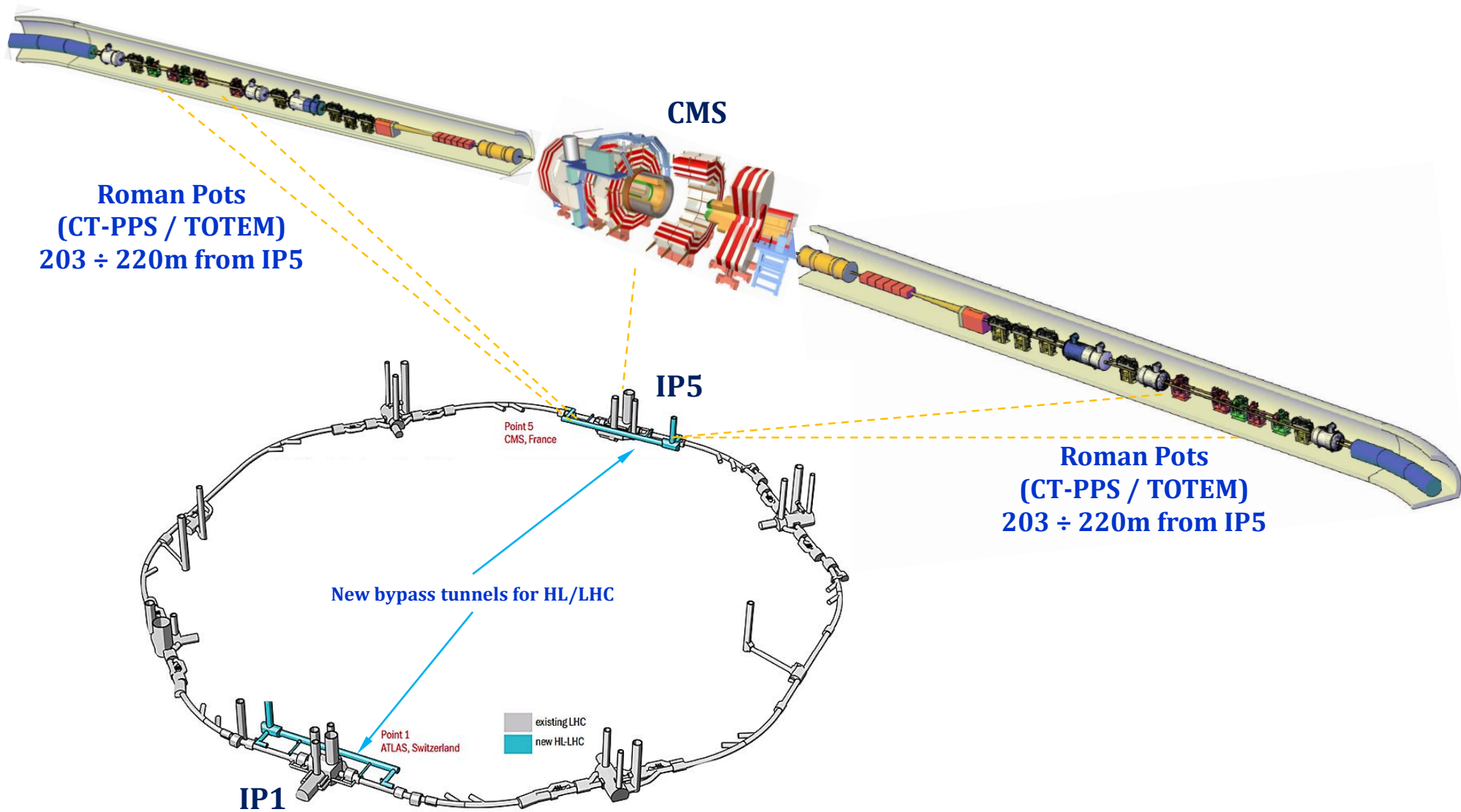
- Si n-тип, с дебелина 300 μ m
- Стандартна планарна технология

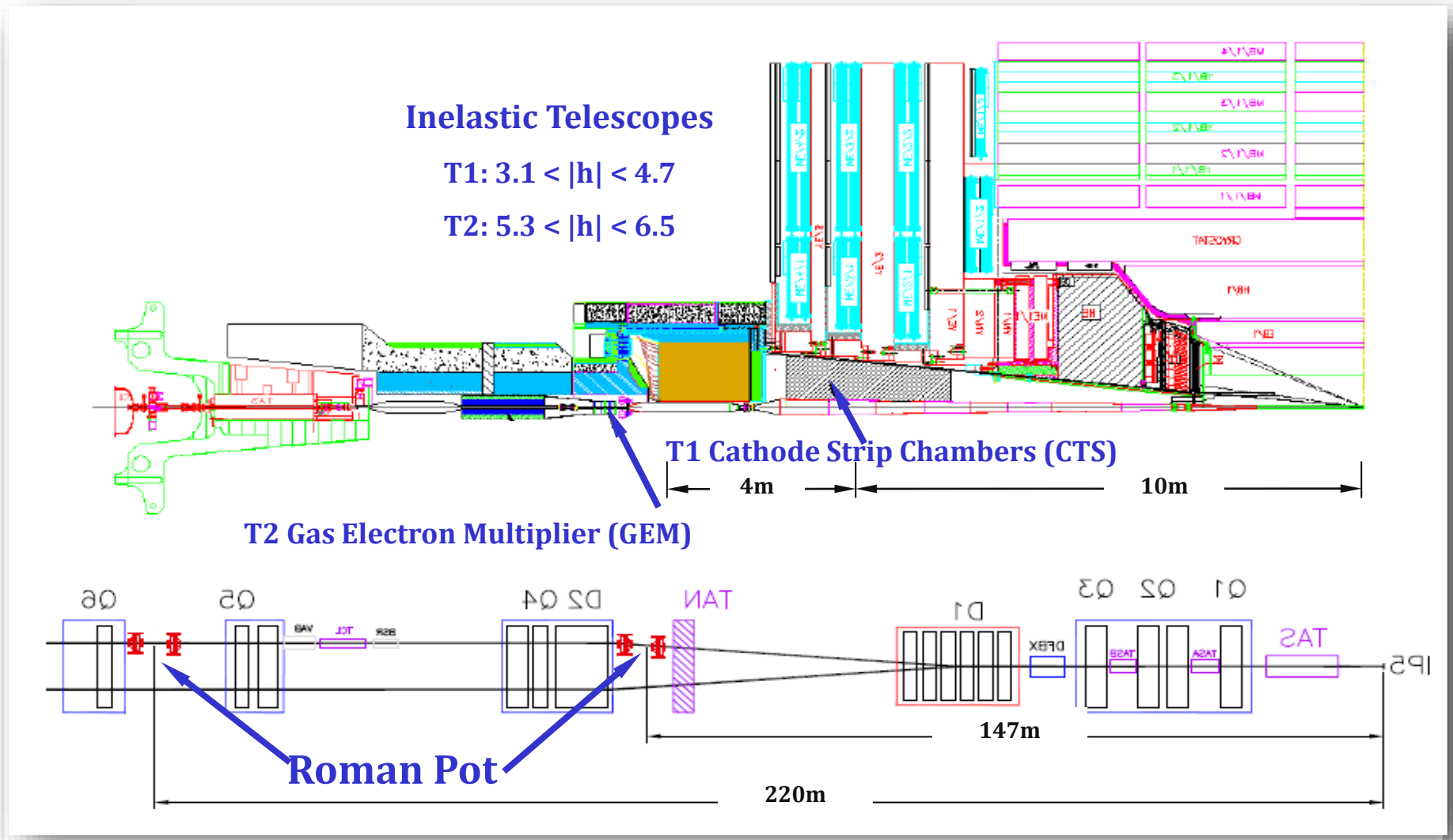
Дизайн

- 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)



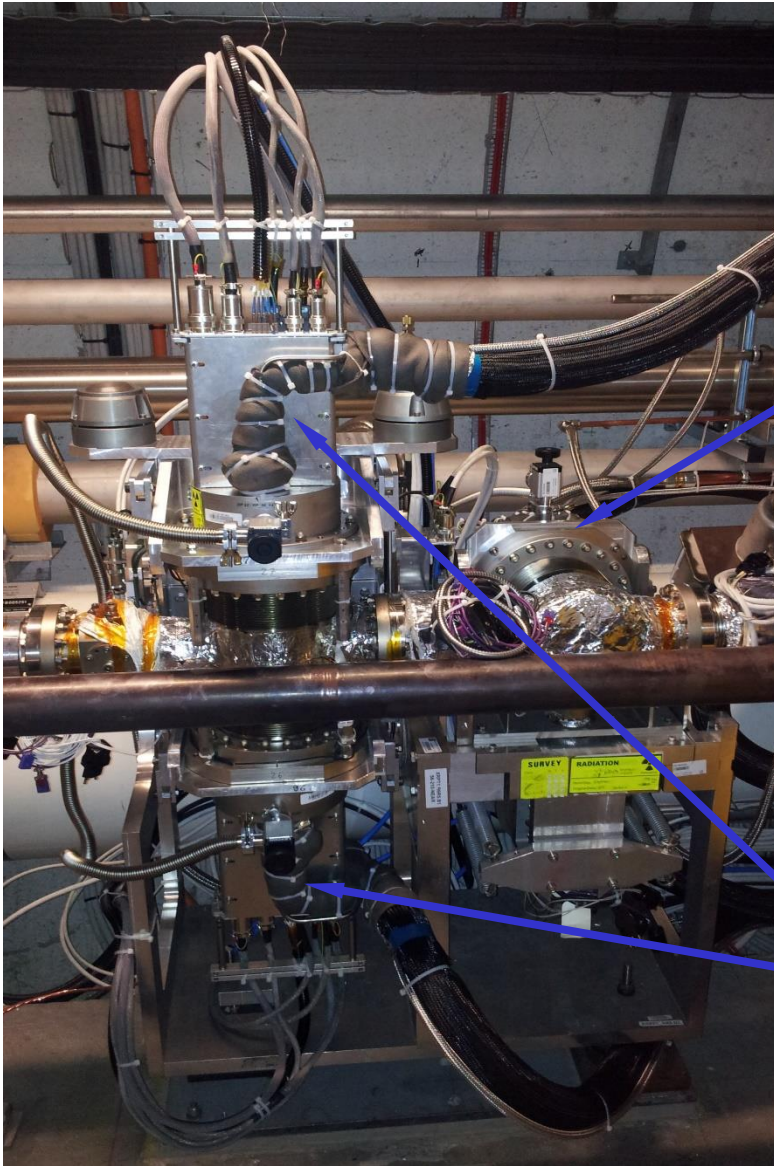
Само 50 μ m от края на пистата до края на детектора!





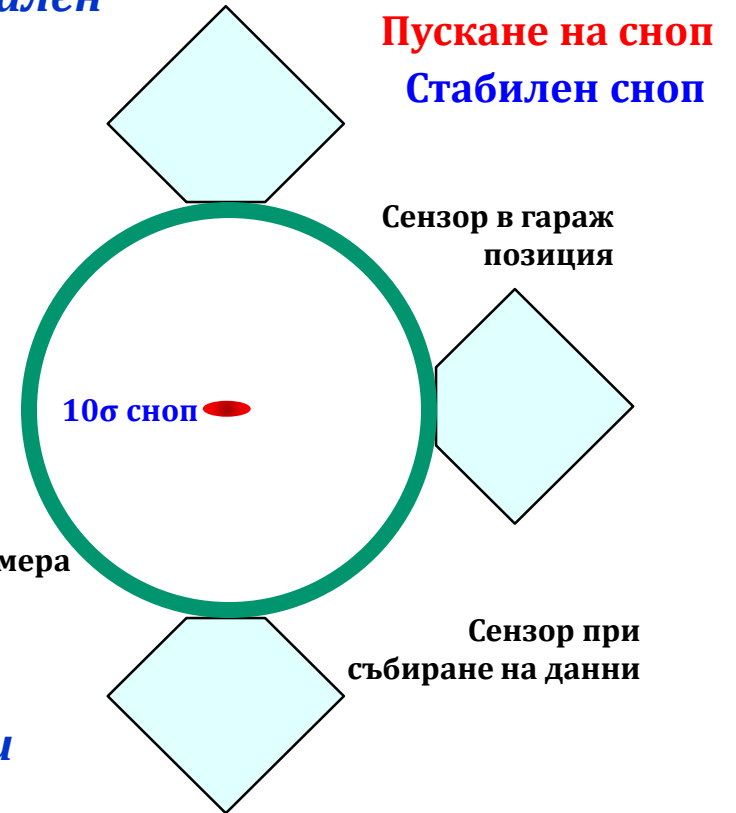
Същите детектори от другата страна на IP5

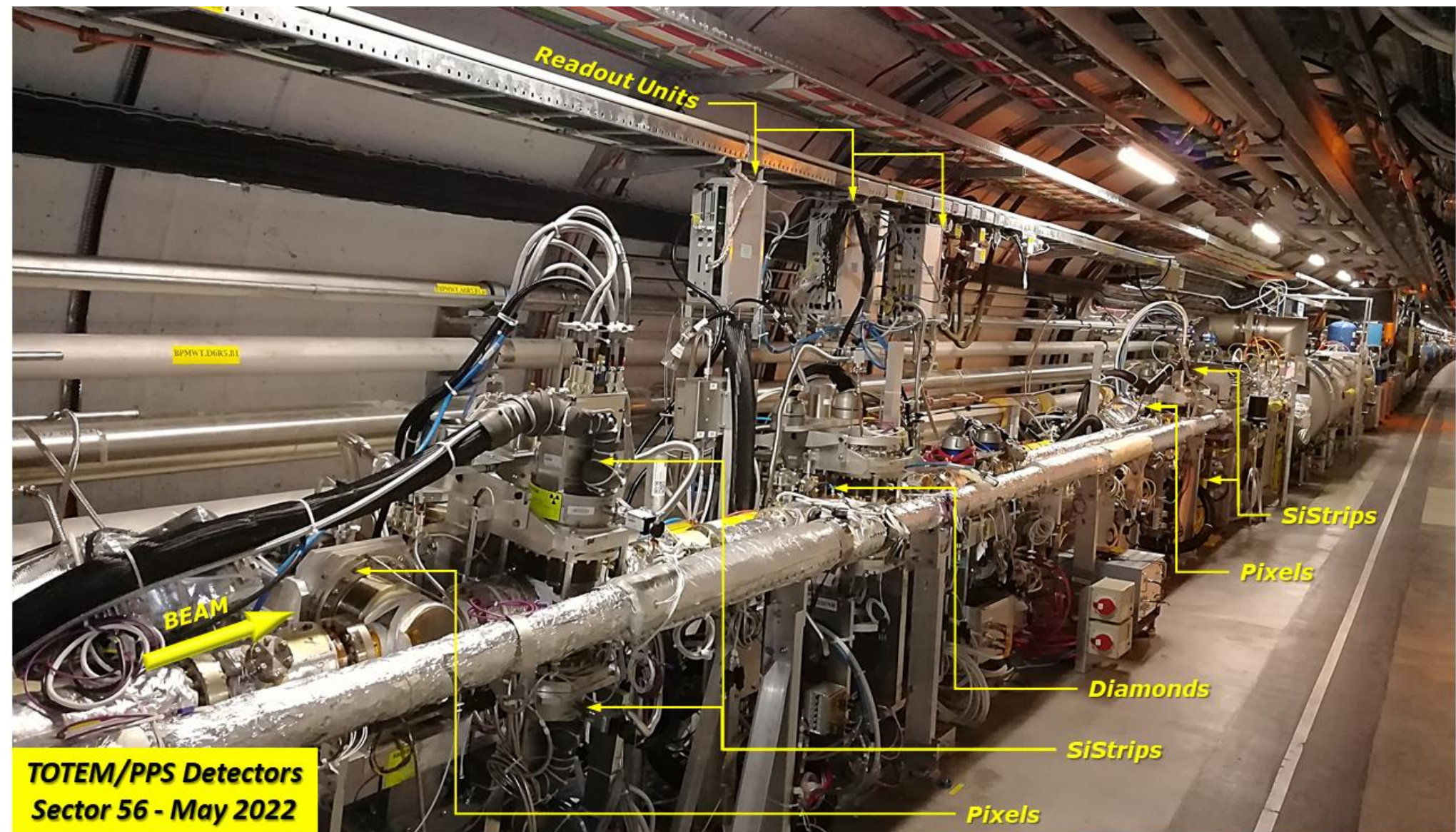
Снимка от сектор 56-220м



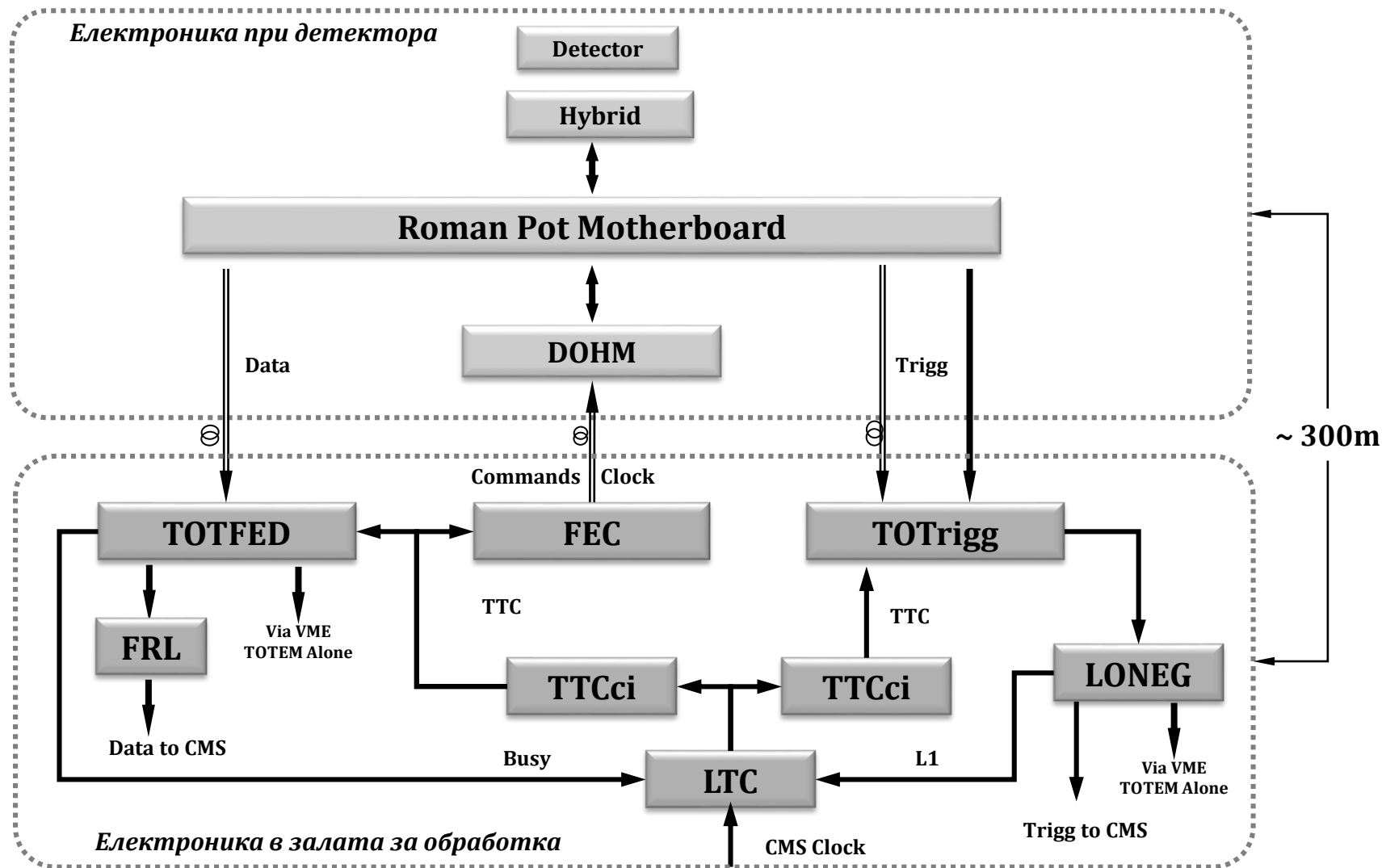
Хоризонтален

Вертикални

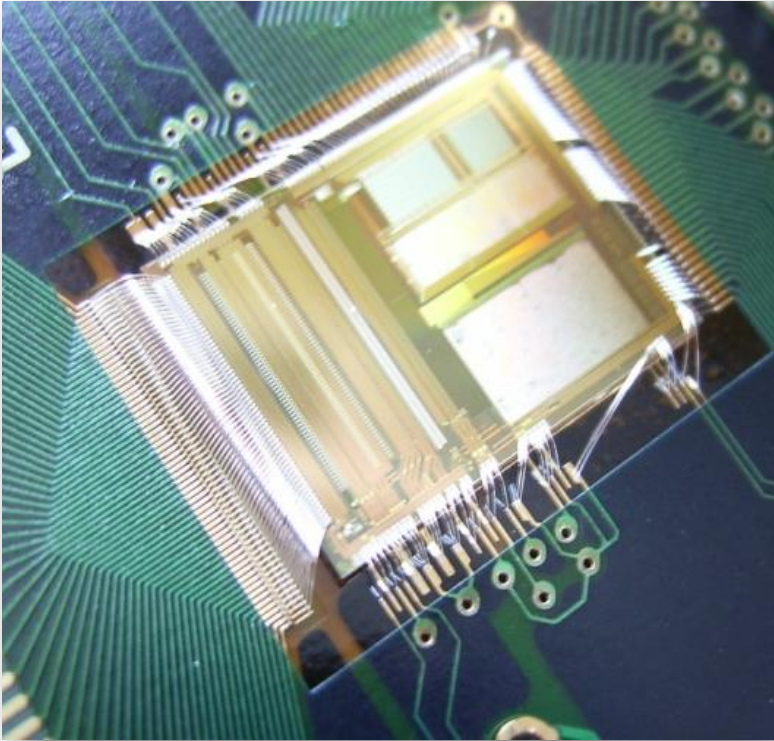




Основни блокове

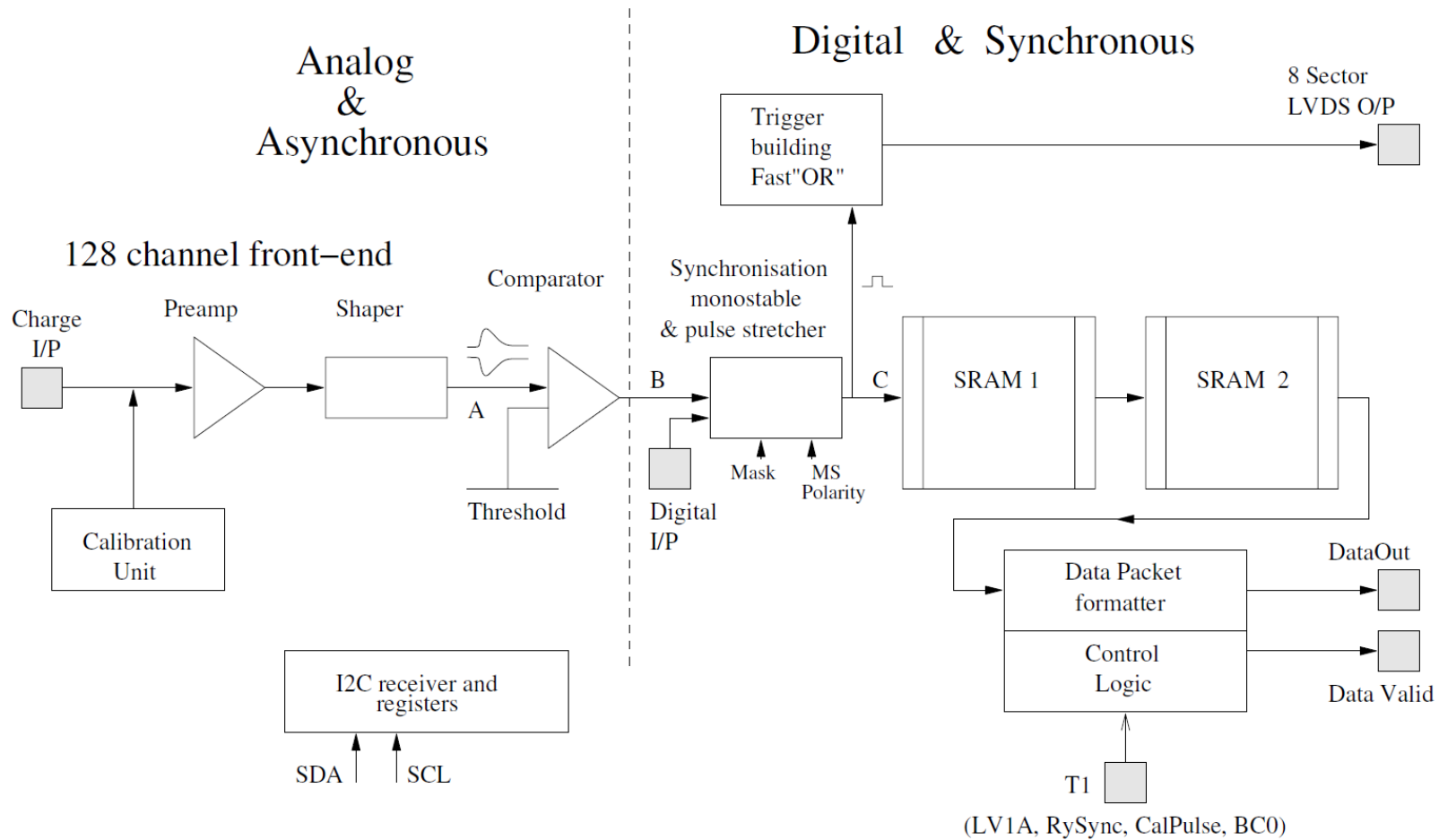


- Въведение
- **Електроника при детектора**
- Електроника в залата за обработка
- Видове системи
- Заключение



- 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

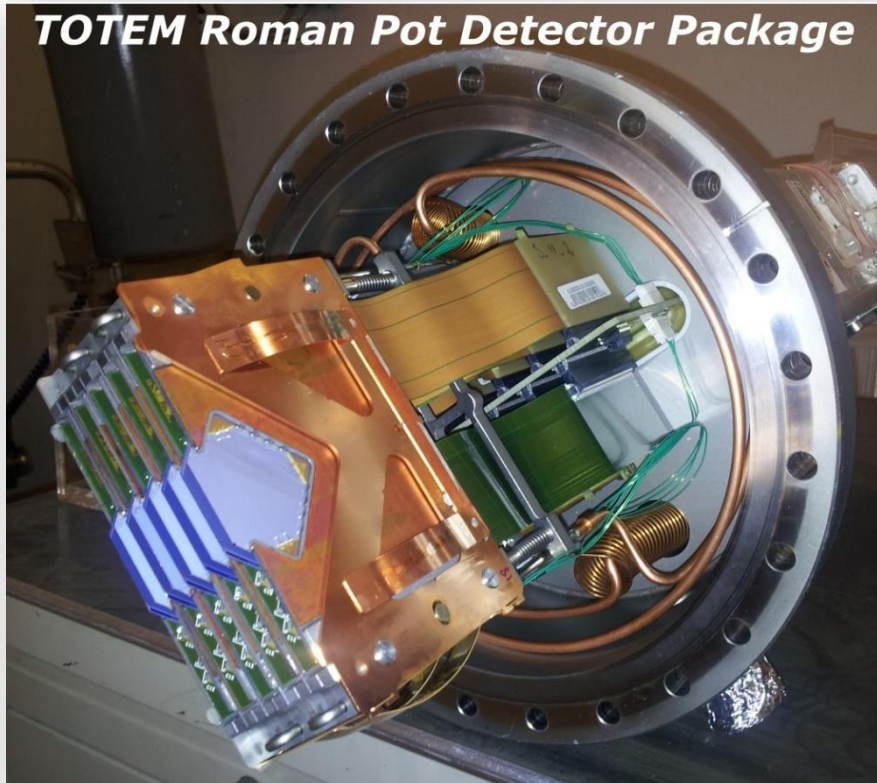
Снимка на VFAT 2 чип монтиран на хибриден модул



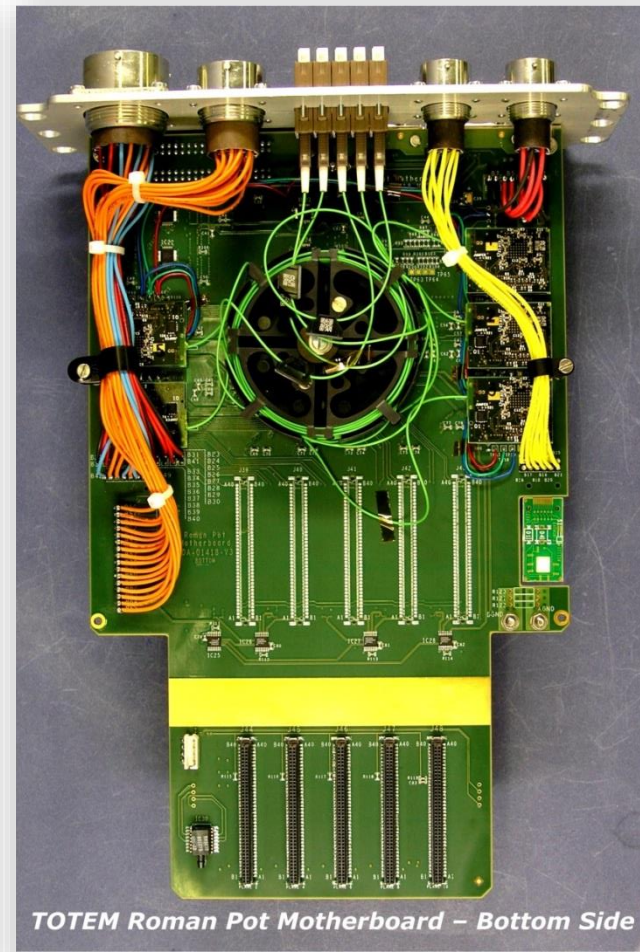
Снимка



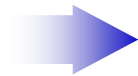
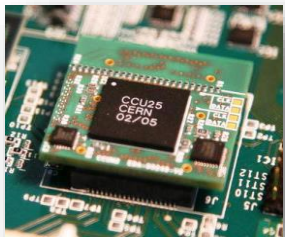
- Съдържа 4 чипа и устройство за контрол
- Свързва се към другата електроника с 80 пинов куплунг и плосък кабел
- По същия куплунг се подава ниско и високо напрежение, синхронизираща честота и се получават данните и тригерните сигнали
- Към 128-те писти на силициевия детектор се свързват директно входовете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



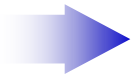
- Съвкупност от 10 хибридни модула
- Фиксирани един срещу друг за да се образуват 2 координати от писти под 45°
- Електронните компоненти са монтирани от една страна за да се намали разстоянието между хибридите



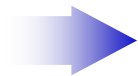
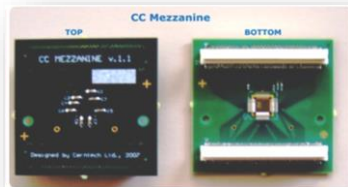
- Свързва детекторния пакет към системите за контрол, тригер и събиране на данни
- Използват се електрически и оптични интерфейси



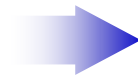
Контролен модул – служи за управление на всички компоненти чрез I2C интерфейс



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



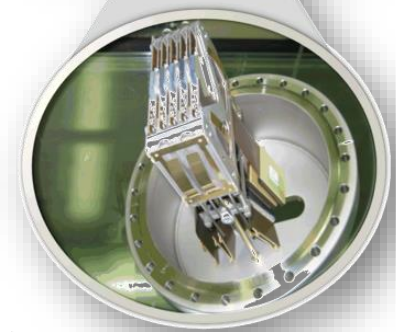
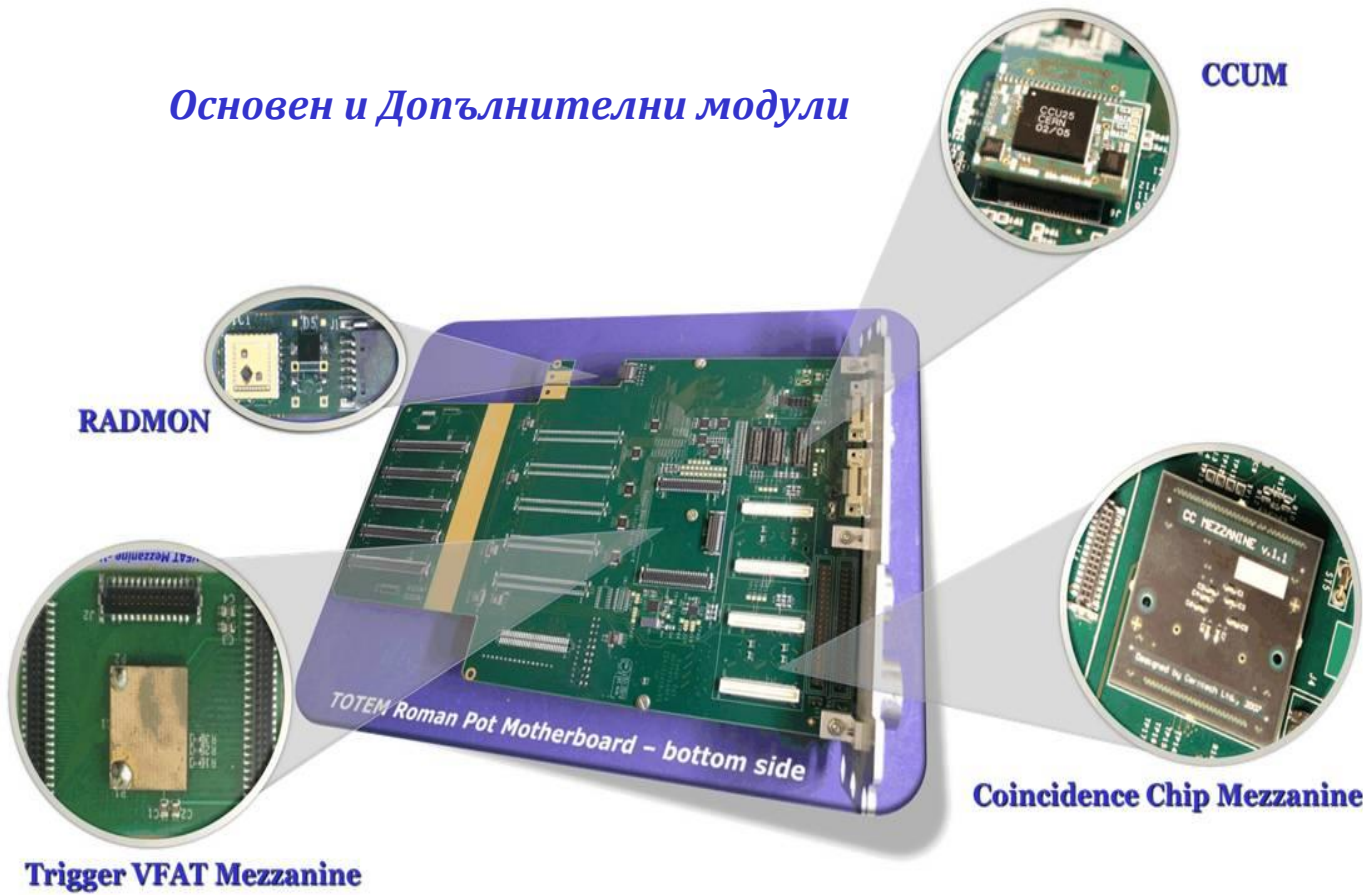
Модул за съвпадение – прави съвпадение между информацията от две координати U и V

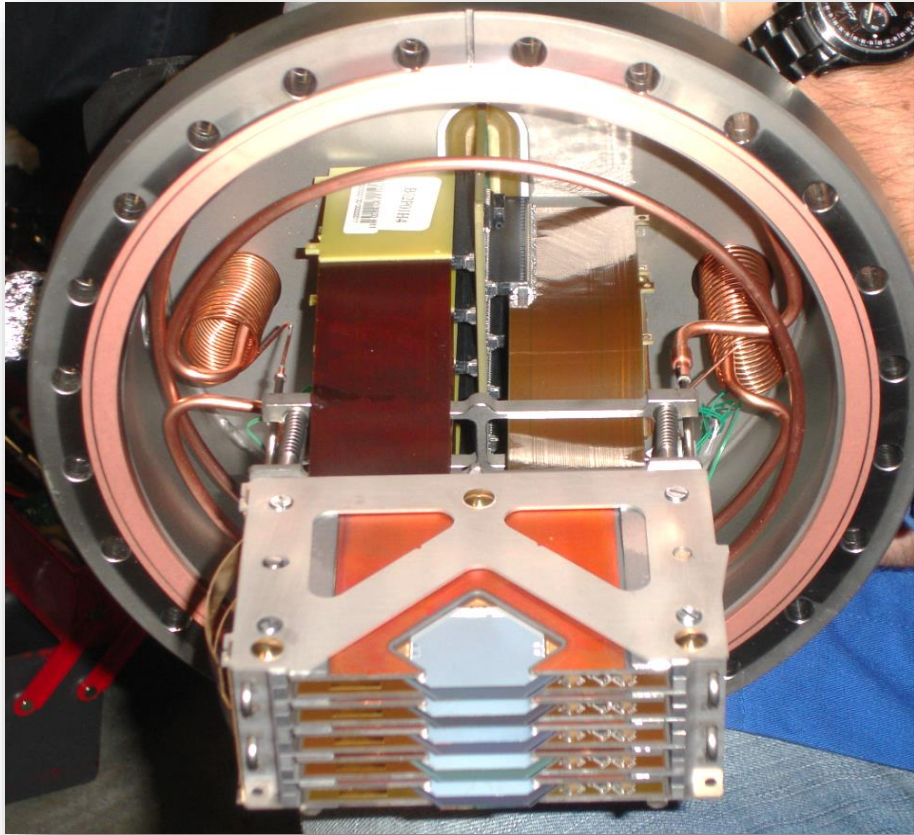


Модул за радиационно измерване – съдържа датчици за измерване на дозата, чиято информация се предава към компютър

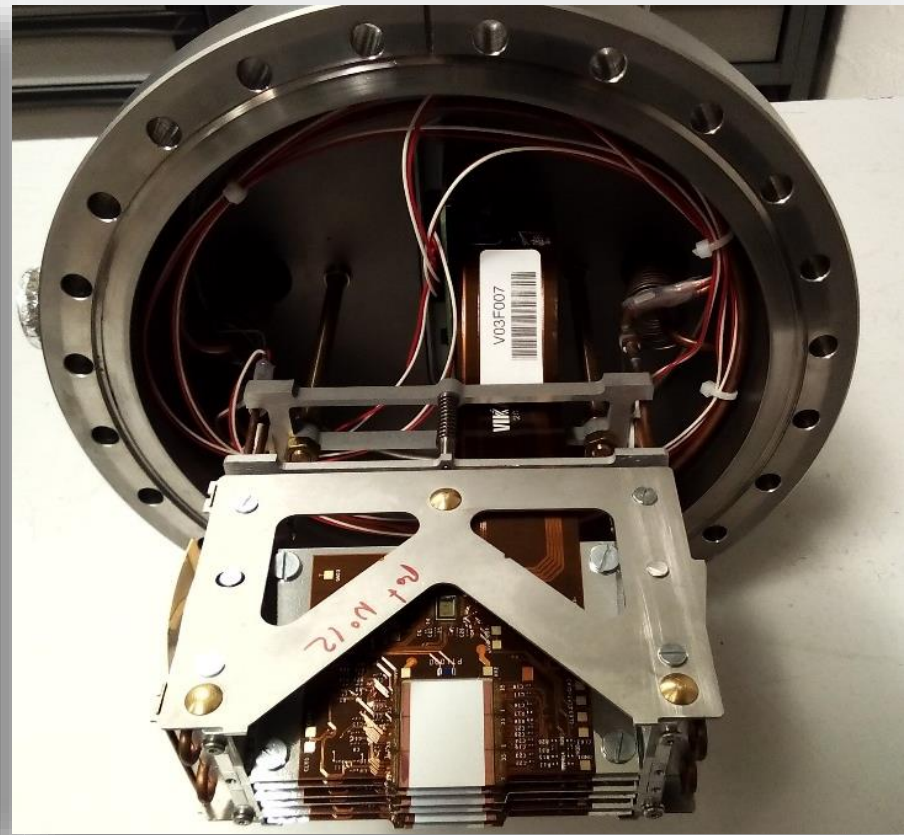
Основен модул и Детекторен пакет

Основен и Допълнителни модули

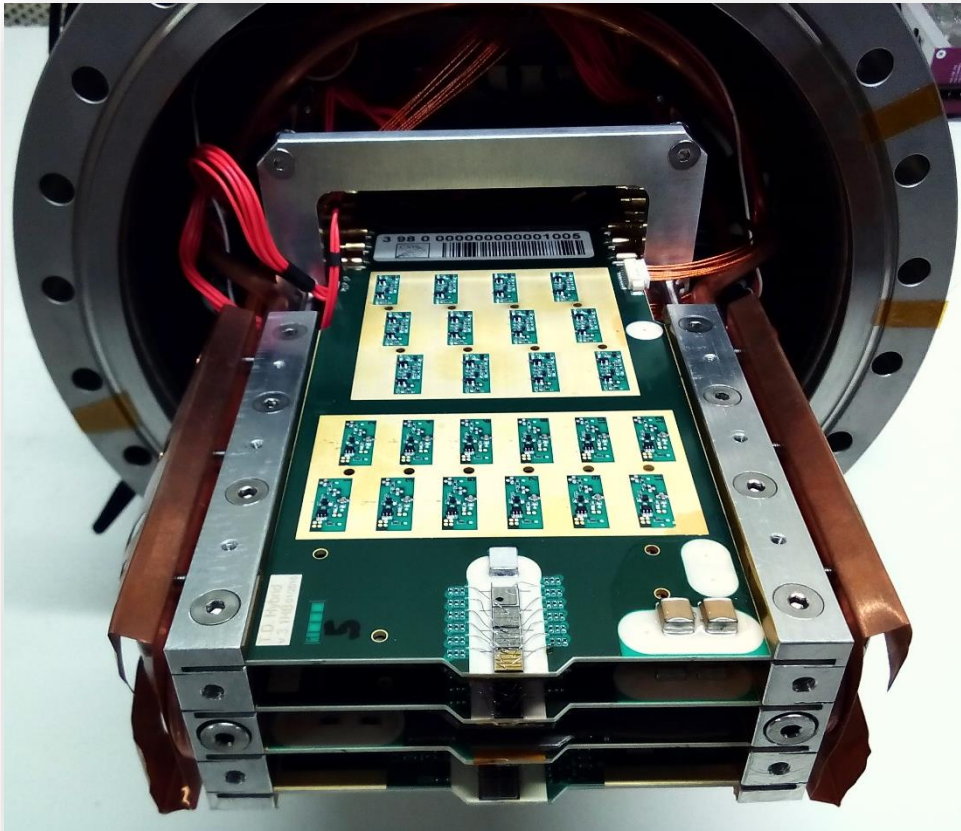




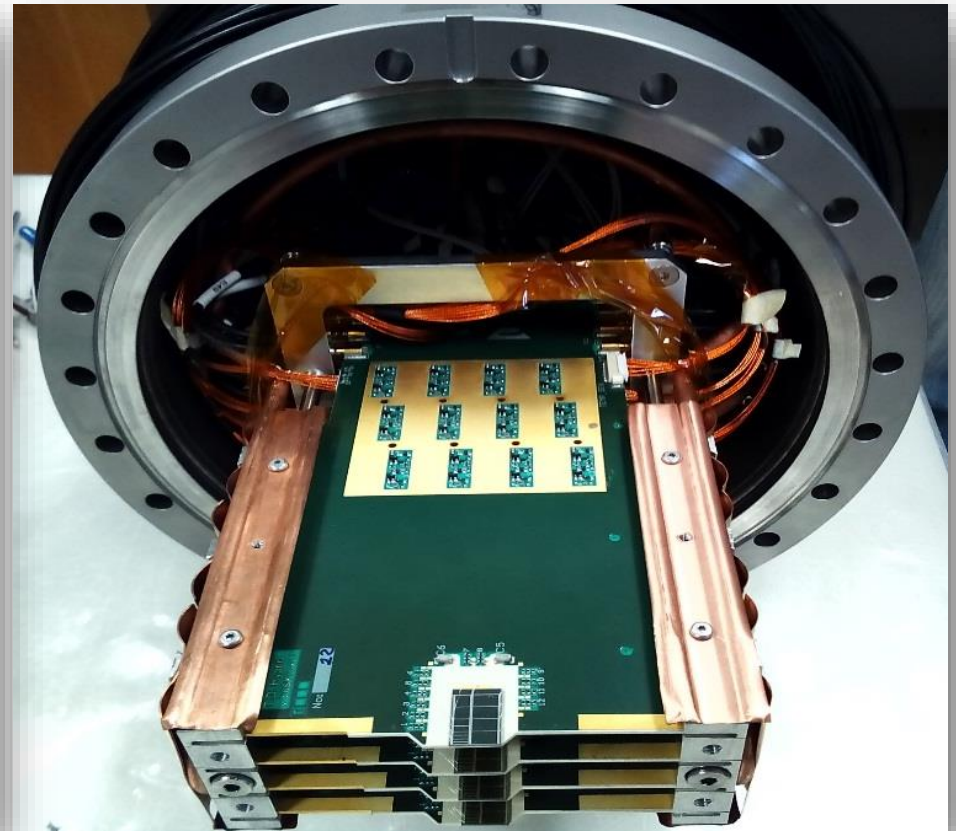
1) **Si-strip**: 10 layers of silicon microstrip plates; space resolution - $10\ \mu\text{m}$, angle resolution - $1\ \mu\text{rad}$; "edgeless" on the beam side; expected lifetime $\sim 10\text{fb}^{-1}$; $t = -25 \div -32\ \text{°C}$, $p = 10 \div 25\ \text{mbar}$; installed on LHC in 2008



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) μm along x (y) direction; "edgeless" - $200\ \mu\text{m}$; installed in 2017



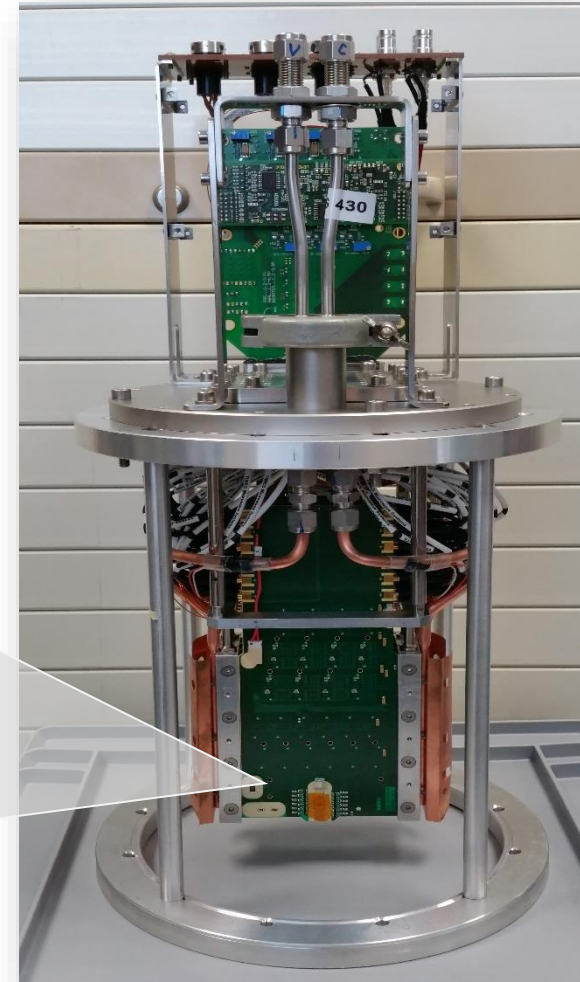
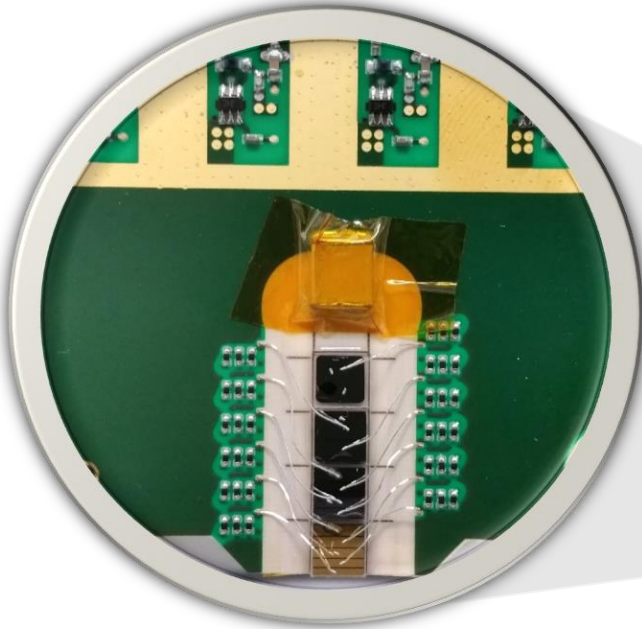
3) Diamond: 4 layers; time resolution up to 50ps per layer; high efficiency on the edge; irradiation limit up to $5 \times 10^{15} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$; $t = 0 \div +10^\circ\text{C}$, $p = 50 \div 115 \text{ mbar}$; installed on LHC in 2016



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

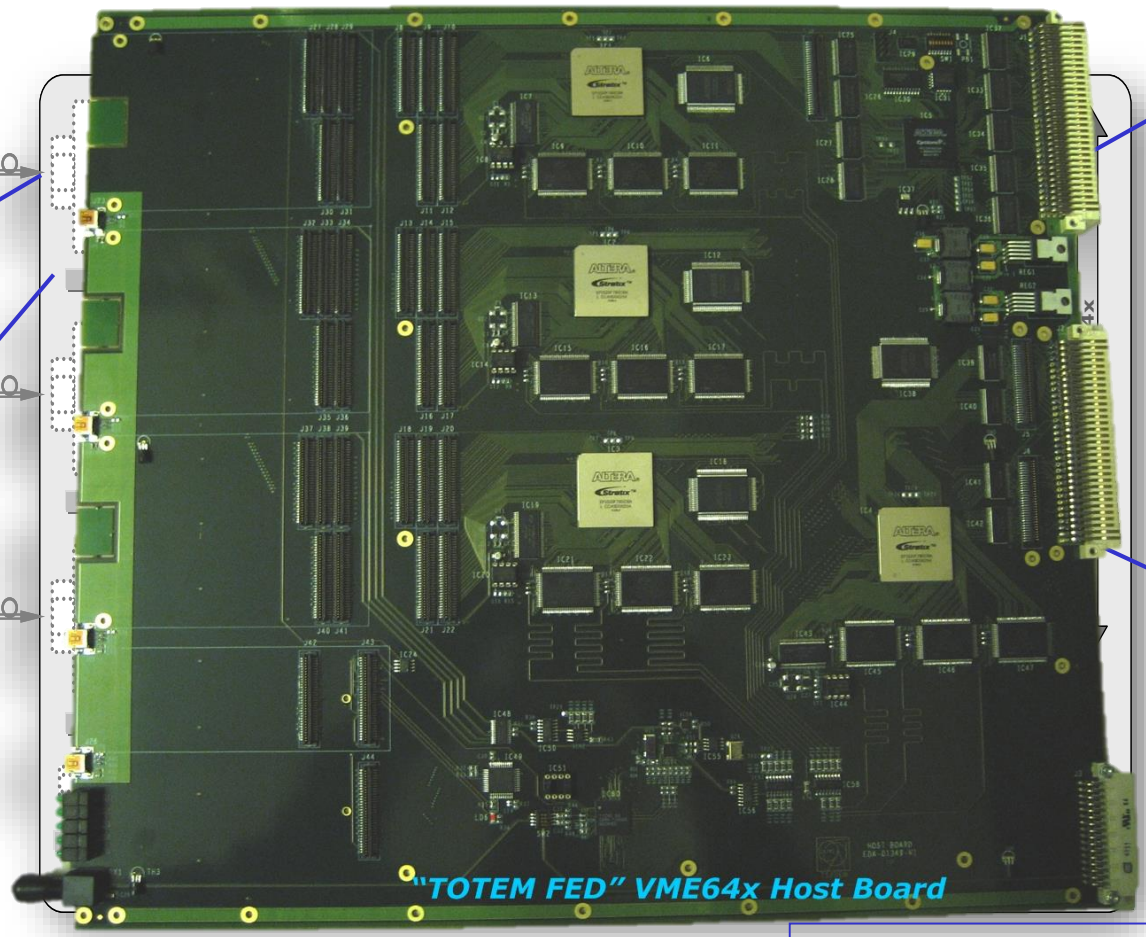
Gigabit Optical INPUT
640Mb/s/fiber x 12 = 7.68Gb/s

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

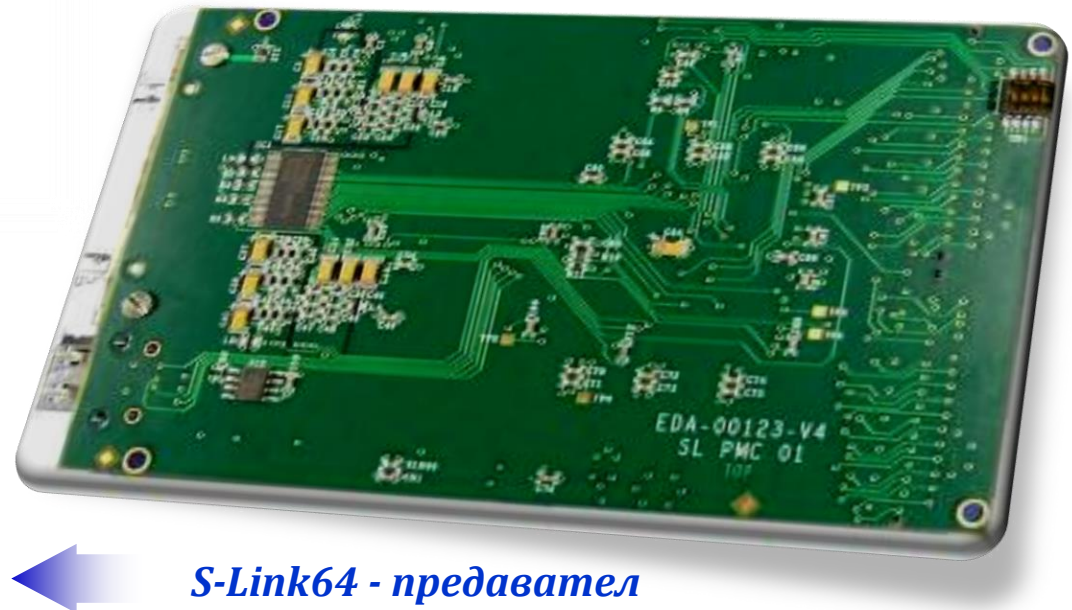
TOTEM Experiment
Trigger Rate - 1 kHz
Event Size - 40 kBytes

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

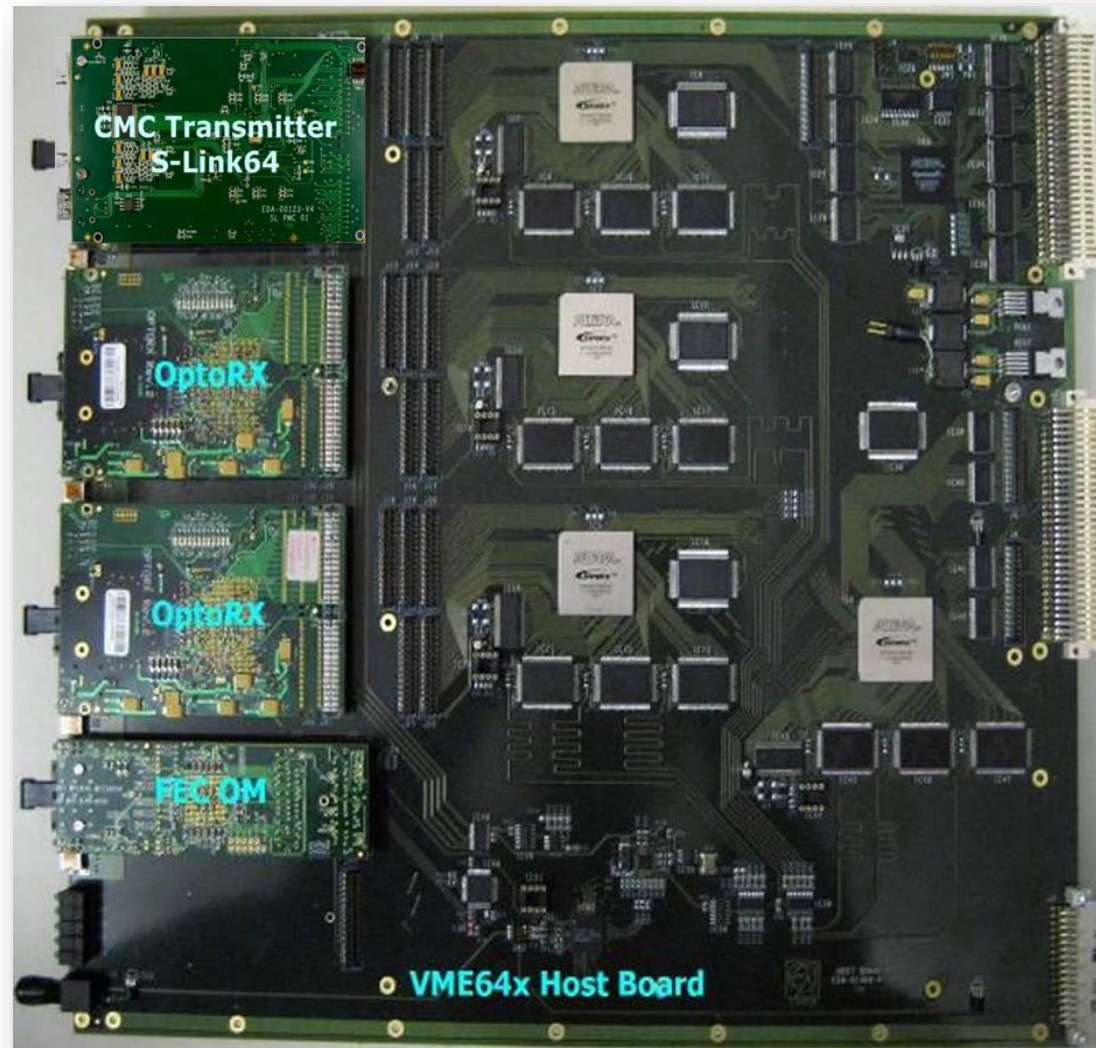
OptoRX12 – оптичен приемник

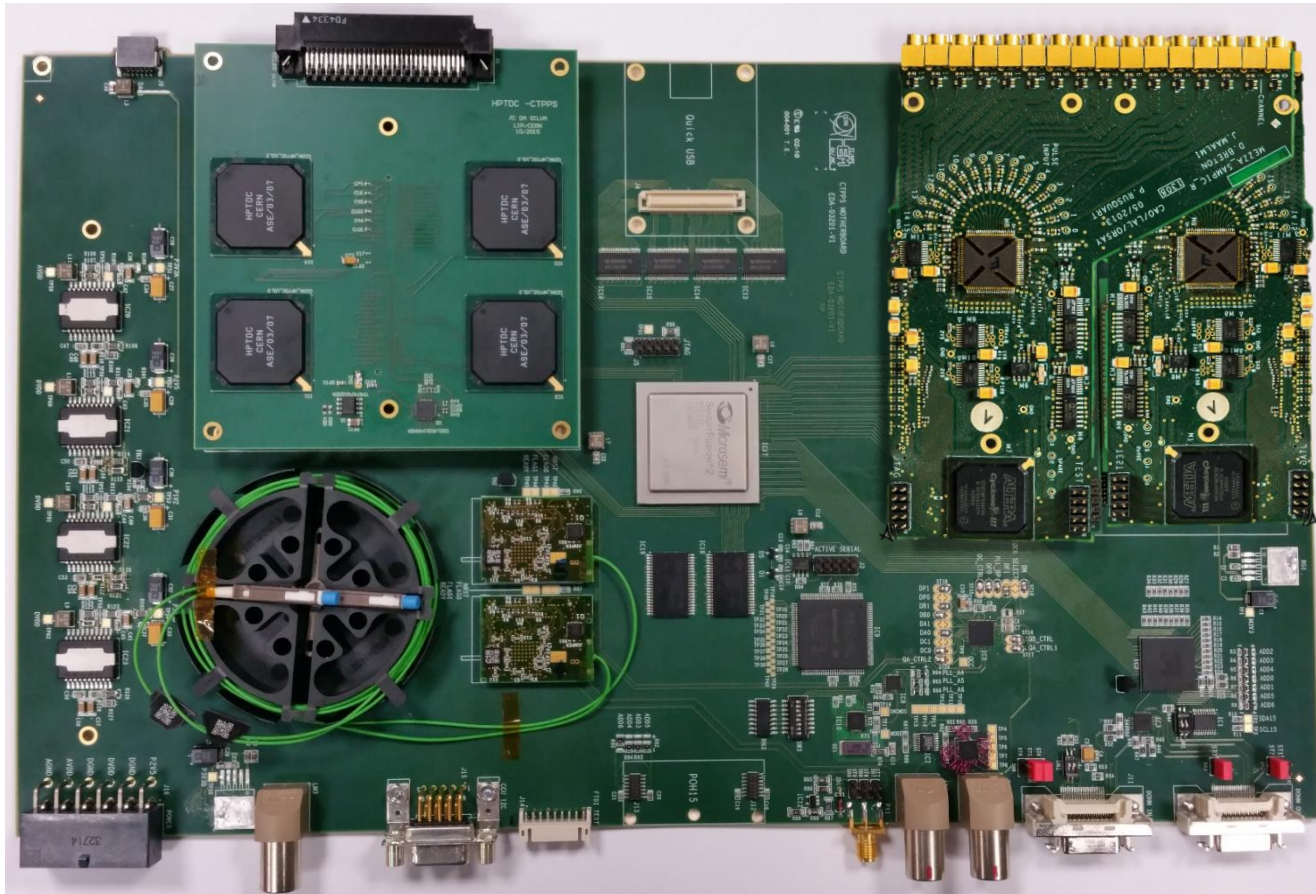


- Получава данните от 36 оптични интерфейса
- Преобразува информацията в цифров вид
- Пакетира и предава на следващото ниво



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

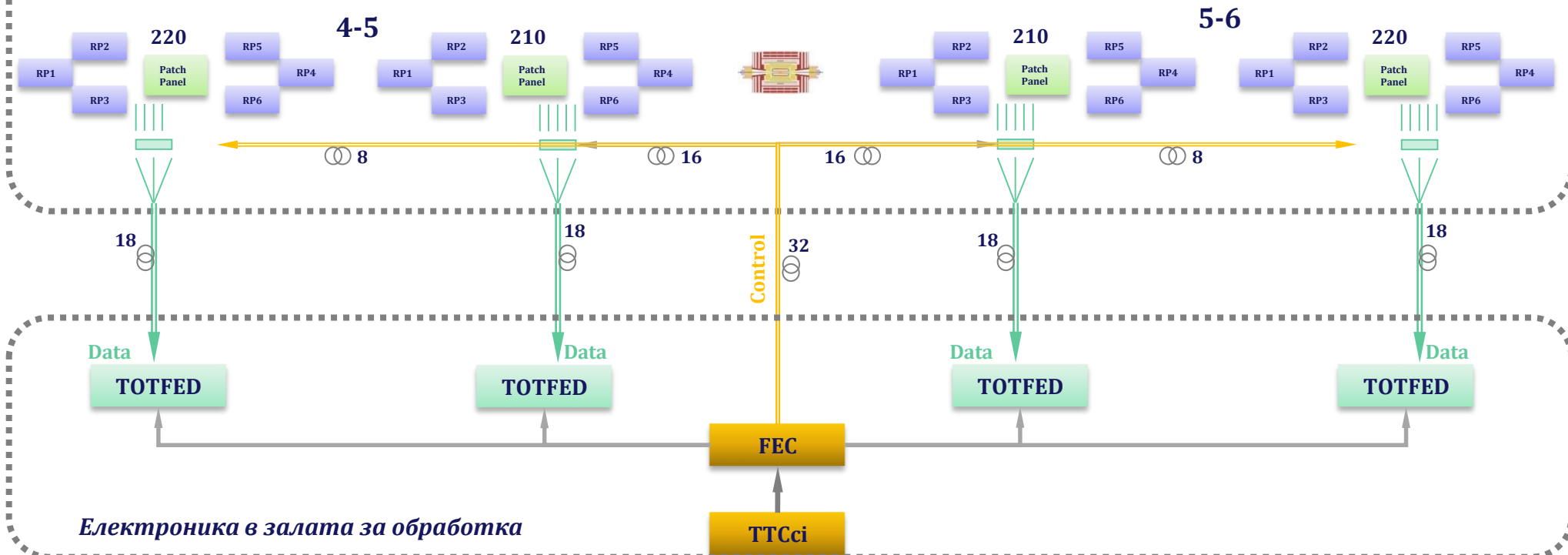


CMS TOTEM - Proton Precision Spectrometer

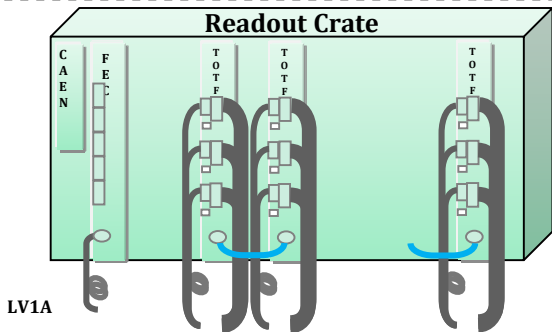
Приема информацията от детектора, преобразува я в цифров вид, обработва и предава на следващото ниво от системата за събиране на данни

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

Електроника при детекторите



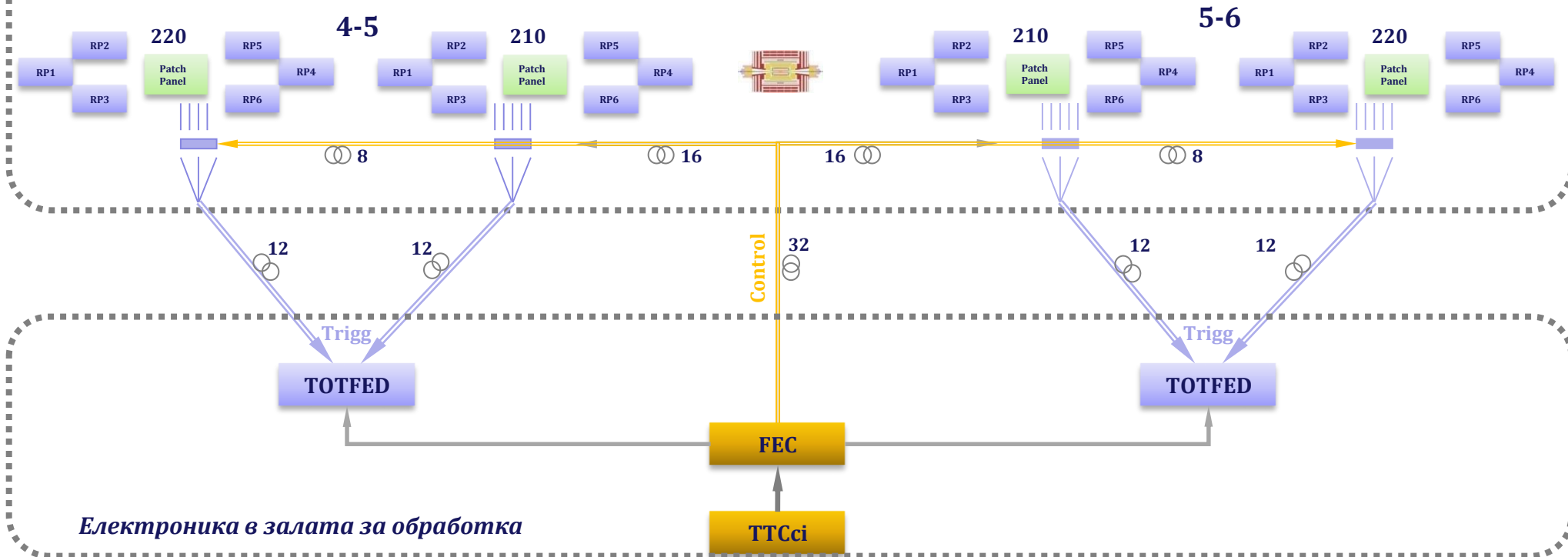
Електроника в залата за обработка



Система за събиране и обработка на данни

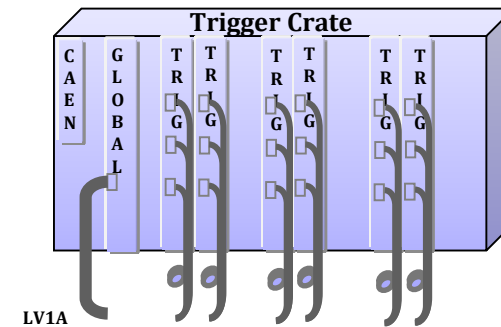
- Скорост до ~ 1KHz през VME64x от ~ 40MB/s
- S-Link64 към CMS от ~200MB/s
- 240 Si детектора с 122880 канала общо се покриват от 960 VFAT2 чипа

Електроника при детекторите

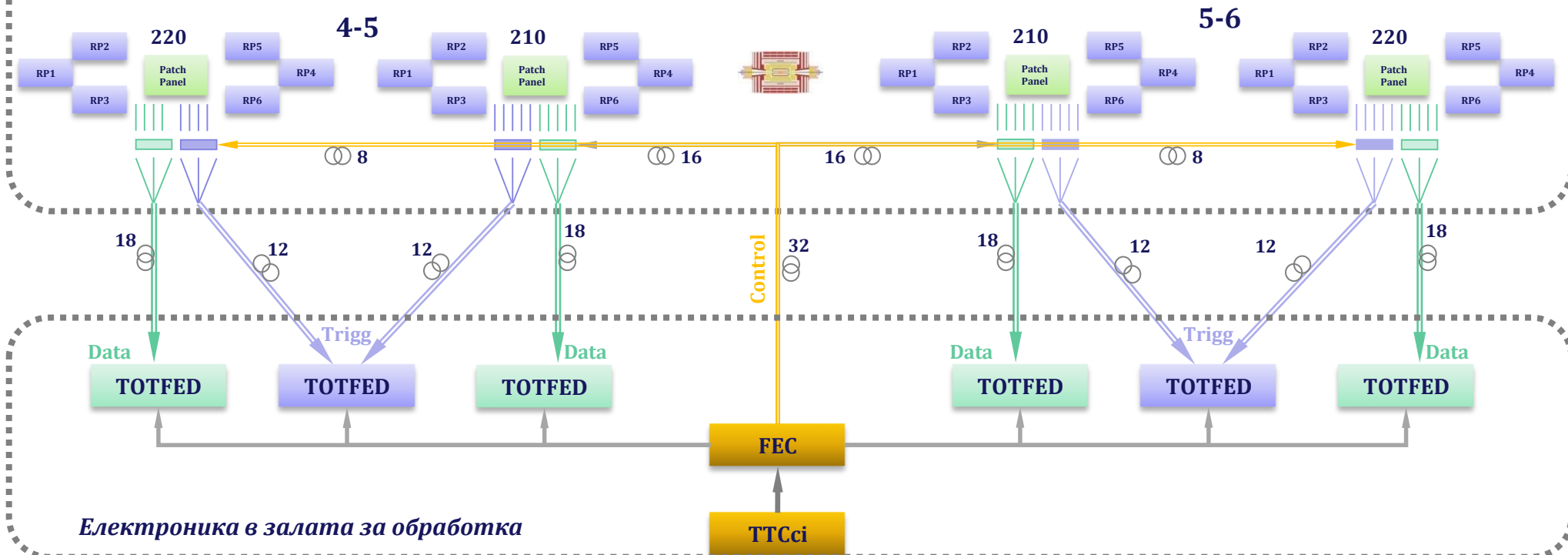


Тригерна Система

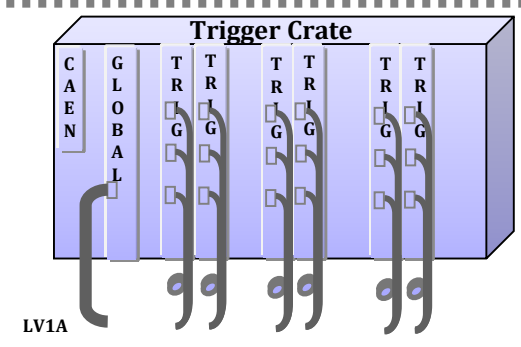
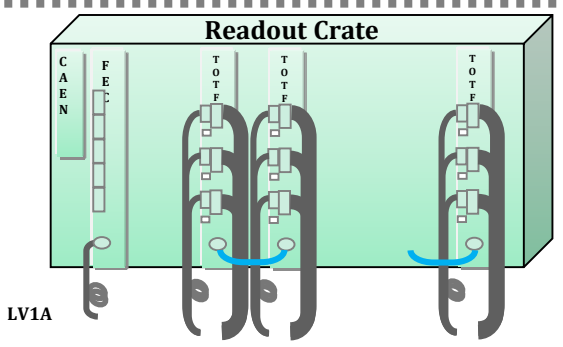
- 12 оптични интерфейса на станция за 2 основни модула TOTFED
- 2 електрически интерфейса на $\frac{1}{2}$ станция за 4 основни модула TOTFED

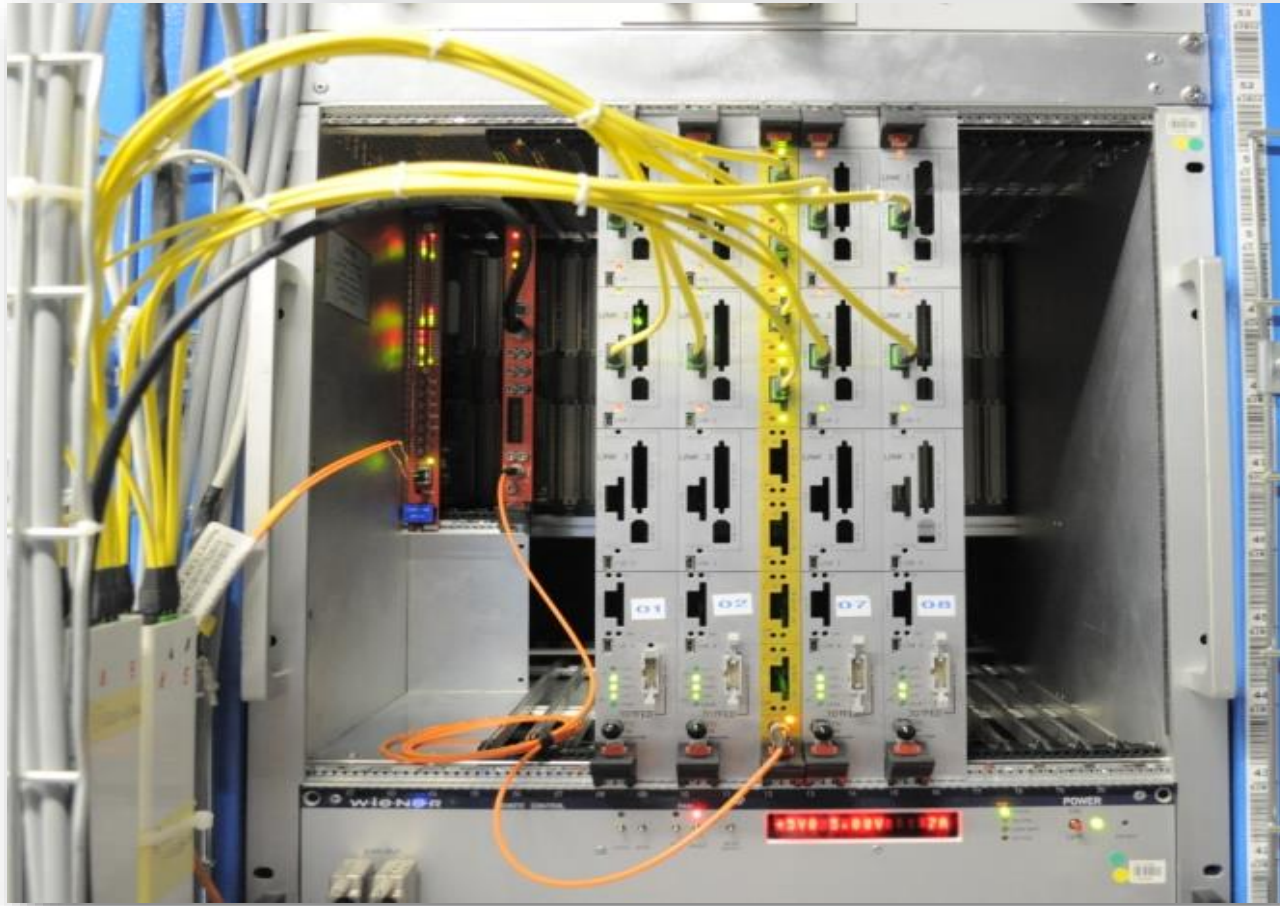


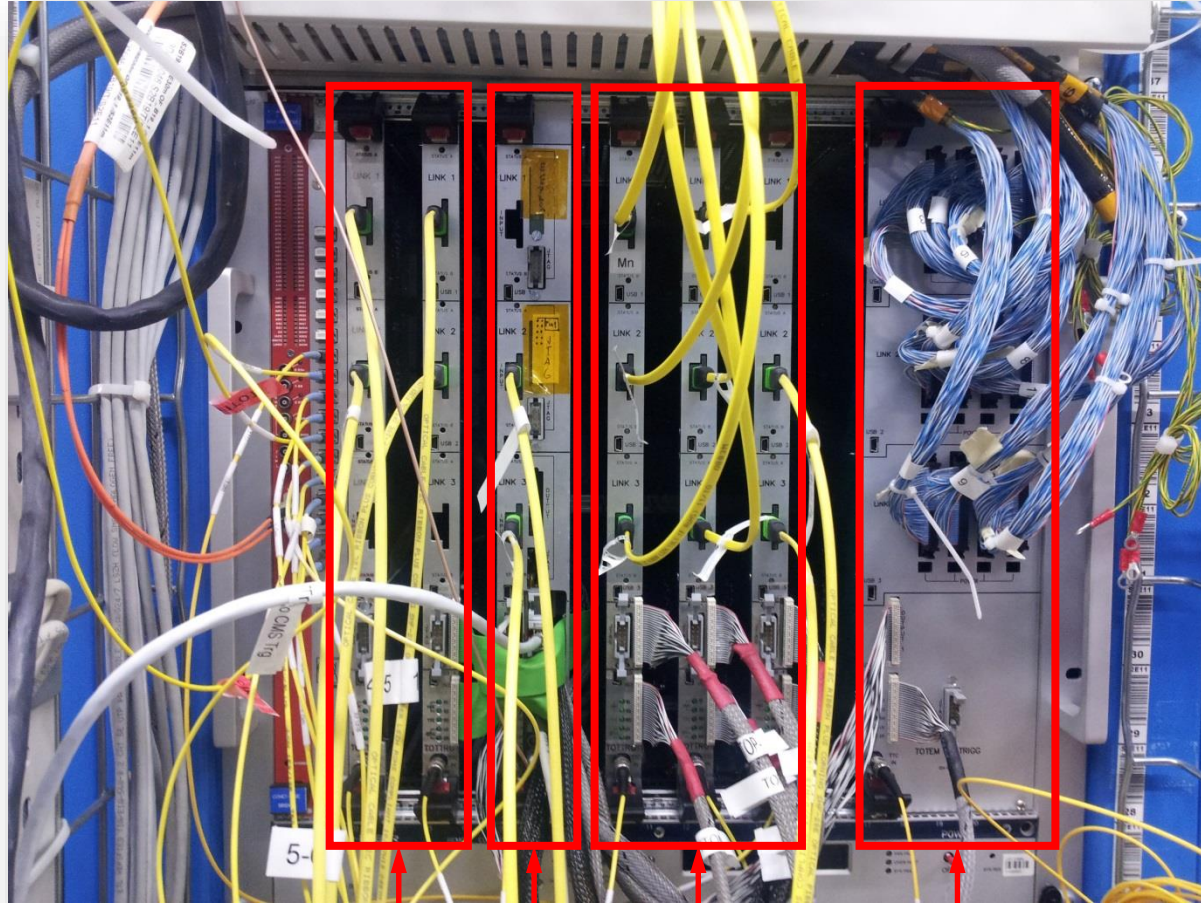
Електроника при детекторите



Електроника в залата за обработка







Roman Pot - optical

TOTEM GLOBAL Trigger Board

T1 and T2

Roman Pot - electrical

18/09/22 Sun 11:21:14

LHC: PROTON PHYSICS
NO BEAM

DAQ State: Running

Run Number: 358913 [01:05]

Lv1 Rate: 0.588 kHz

Ev.Size [Compact]: 575.76 [95.64] kB

Dead Time [AB]: 1.10 [0.00] %

Stream Physics: 87.81 Hz

Accepted [CPU]: 14.94 [0.05] %

Data Flow

#LV1 2.2239E+6 Lv1 Rate 0.588 kHz

Ev.Size 575.76 [95.64] kB BnW 335.77 MB/s

#EvinBU > 25.6

Stored 9.006E+6 Accepted 14.94 [0.05] %

DAQ components

	FMM	FED	FRL	EVM	RU	BU
	-1	759	507	1	59	60
Sub-System	State	FRL	FED	IN		
TCDS	IN Running	1	1	1		
TRG	IN Running	14	14	12		
PIXEL	IN Running	76	108	108		
TRACKER	IN Running	249	437	435		
ES	IN Running	26	40	40		
ECAL	IN Running	54	54	45		
HCAL	IN Running	41	41	41		
GEM	IN Running	3	3	1		
RPC	IN Running	3	3	3		
DT	IN Running	9	9	9		
CSC	Out	18	36	0		
L1SCOUT	Out	0	0	0		
DAQ	IN Running	0	0	0		
DQM	IN Running	0	0	0		
DCS	IN Connected	0	0	0		
CTPPS	Out	2	2	0		
CTPPS_TC	Out	11	11	0		

Stream

Stream	Tot.Events	Inst.Rate(Hz)
Physics	3.4218E+5	87.815
Calibration	3.8231E+5	98.403
DQM	3.1743E+5	81.546
DQMCalibration	3.8116E+4	9.437
DQMEvtDisplay	9.6496E+4	24.941
DQMGPUvsCPU	3.1700E+5	81.109
DQMHistograms	2.2060E+6	567.395
EcalCalibration	3.8232E+5	98.403
Error	0.0000E+0	0.000
ExpressCosmics	3.4010E+5	87.529
HLTRates	2.2060E+6	567.395
L1Rates	2.2061E+6	567.395
NanoDST	3.1731E+4	8.269
RPCMON	1.4130E+5	36.454

Beam state legend

- No Beam
- Setup
- Abort
- Injection Probe Beam
- Injection Setup Beam
- Injection Physics Beam
- Prepare Ramp
- Ramp
- Flat Top
- Squeeze
- Adjust
- Stable Beams
- Unstable Beams
- Beam Dump Warning
- Beam Dump
- Ramp Down
- Cycling
- Recovery
- Inject & Dump
- Circulate & Dump

Beam & DCS states & DAQ history

LHC: PROTON PHYSICS, NO BEAM

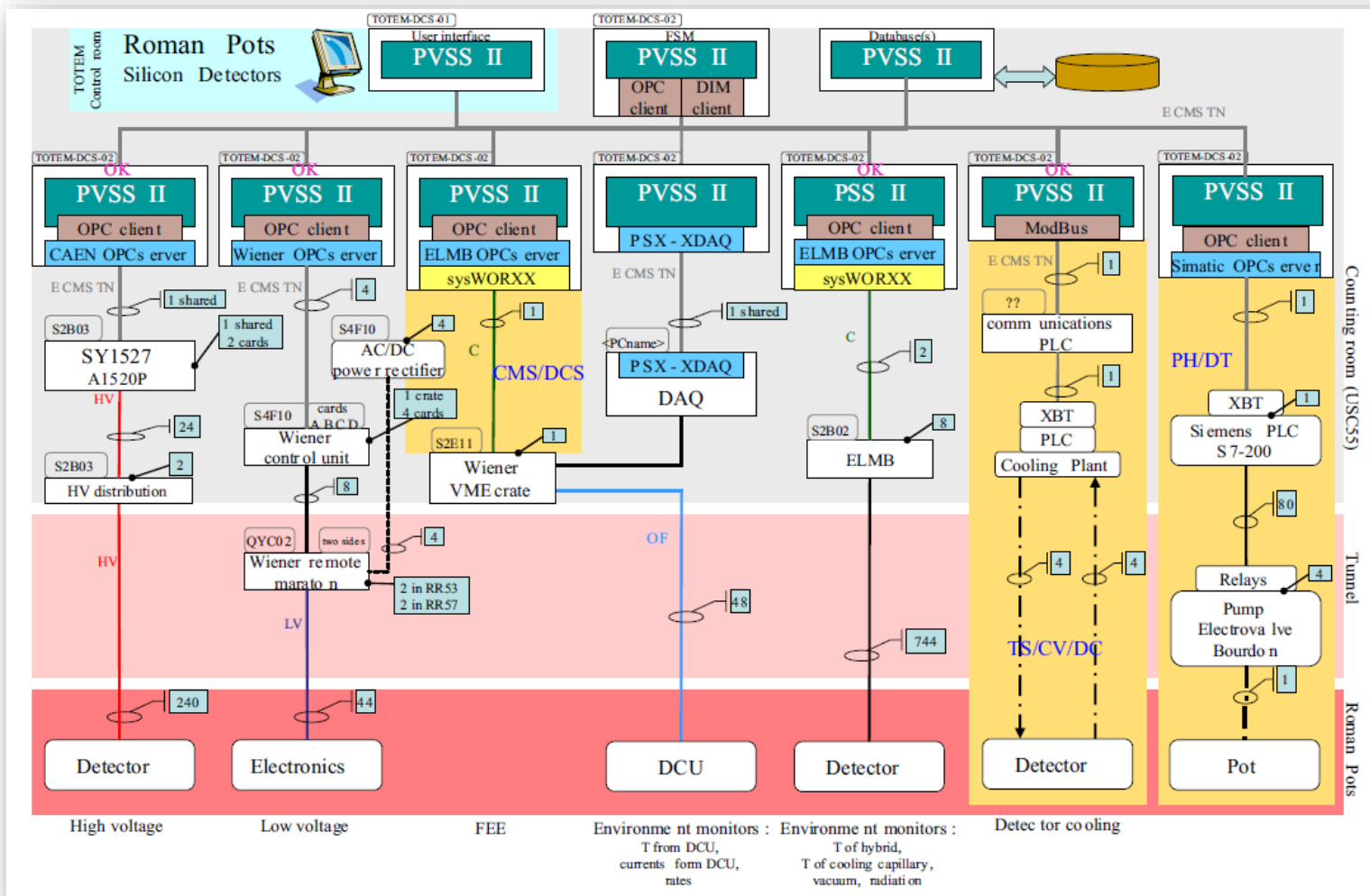
Session 319554 <3.2 - 26.6 > sec. Started: 16/09/22 Fri 05:45. Machine: scx5scr33mac.cms - MEM 17200MB CPU103%

UTC time 18/09/22 09:21:13. Local time: Geneva 11:21, Los Angeles 04:21, Chicago 04:21, Moscow 13:21, Beijing 18:21

Strips legend

Beam States

- LHC Ramping ON/OFF
- Transfer HV ON/OFF
- Pixel HV ON/OFF
- Physics declared
- Clock Source LHC
- TIBO Transfer ON/OFF



Предоставена от DCS екипа на TOTEM

Vision_1: TOP
 11:37 18-09-22
 gantchev
 as:totem-dcs
 DIST:1
 Mgr: #8

TOTEM MAIN SUPERVISOR

LHC PROTON PHYSICS
NO BEAM
 Energy[GeV] 0.00
 DCS self-test do not exists

TOTEMCMS NOT_READY

FSM

TOTEMCMS >>

- TOTEM
- CMS_TOTEM
- LHC

SECTOR 45

CMS TOTEM-PPS

SECTOR 56

nT2(Scin)

LHC

totLHCRCNControl

Machine Mode	PROTON PHYSICS	Beam Present	SAFE	PROTON	Stable Beam	FALSE	Energy[GeV]	65535
Beam Mode	NO BEAM	Beam 1	NOT PRESENT	SAFE	Mov D Allowed	FALSE	Fill Number	8152
Beam 2	NOT PRESENT	SAFE	PROTON	FALSE	8152			

Page1 RF conditioning, TS1 completed

Monday: cryo reconfiguration - NO ACCESS
Beam expected Tuesday
Next morning meeting on Monday

LHC Run Configuration	STATUS	LHC Run Configuration	STATUS
FILL_NO	8152	PARTICLE_TYPE_B1	PROTON
NO_BUNCHES	2748	PARTICLE_TYPE_B2	PROTON
ACTIVE_INJECTION_SCHEME	25ns_2748b_2740_2250_2	IP5-NO-COLLISIONS	2740
TARGET_ENERGY	99999	IP5-XING-H-MURAD	no_value

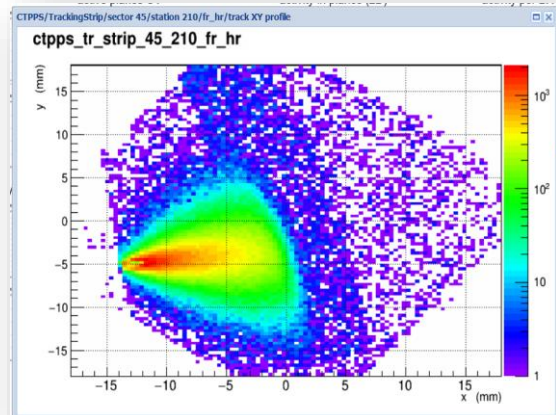
Handshake

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

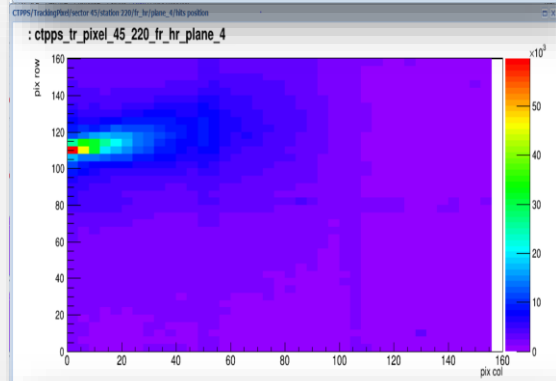
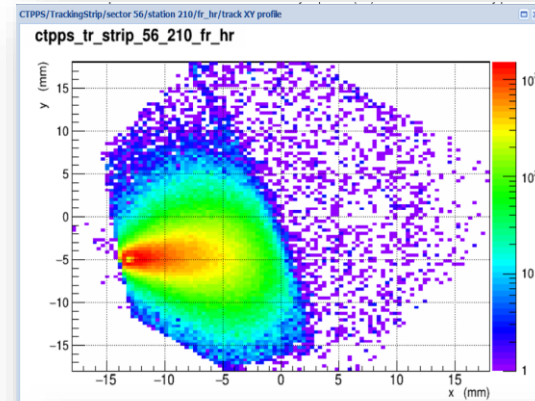
totInterlock

Device Allowed	beam 1	beam 2
PXI	InjectionPermit	
Movement Permit	UserPermit1	
Movement Override	ControlKeys	
PXI	BypassKey	
DCS	MotorCoil	
Manual Injection Permit		
PXI		
DCS		

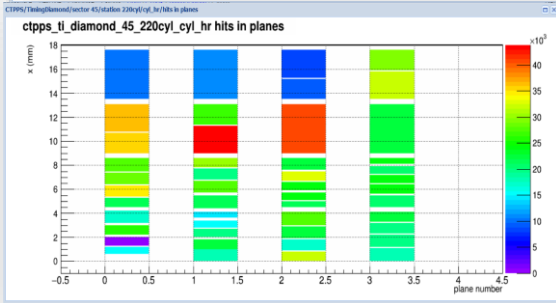
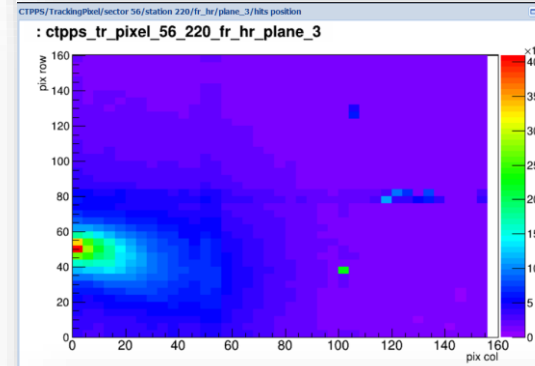
S1E08	S2A02	S2A03	S2A05	S2B02	S2B03	S2B04	S2B19	S2E11
S2F16	S4F05	S4F10	X3L73	X3R73	X4E71	X4L71	X4R71	X4U71



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].

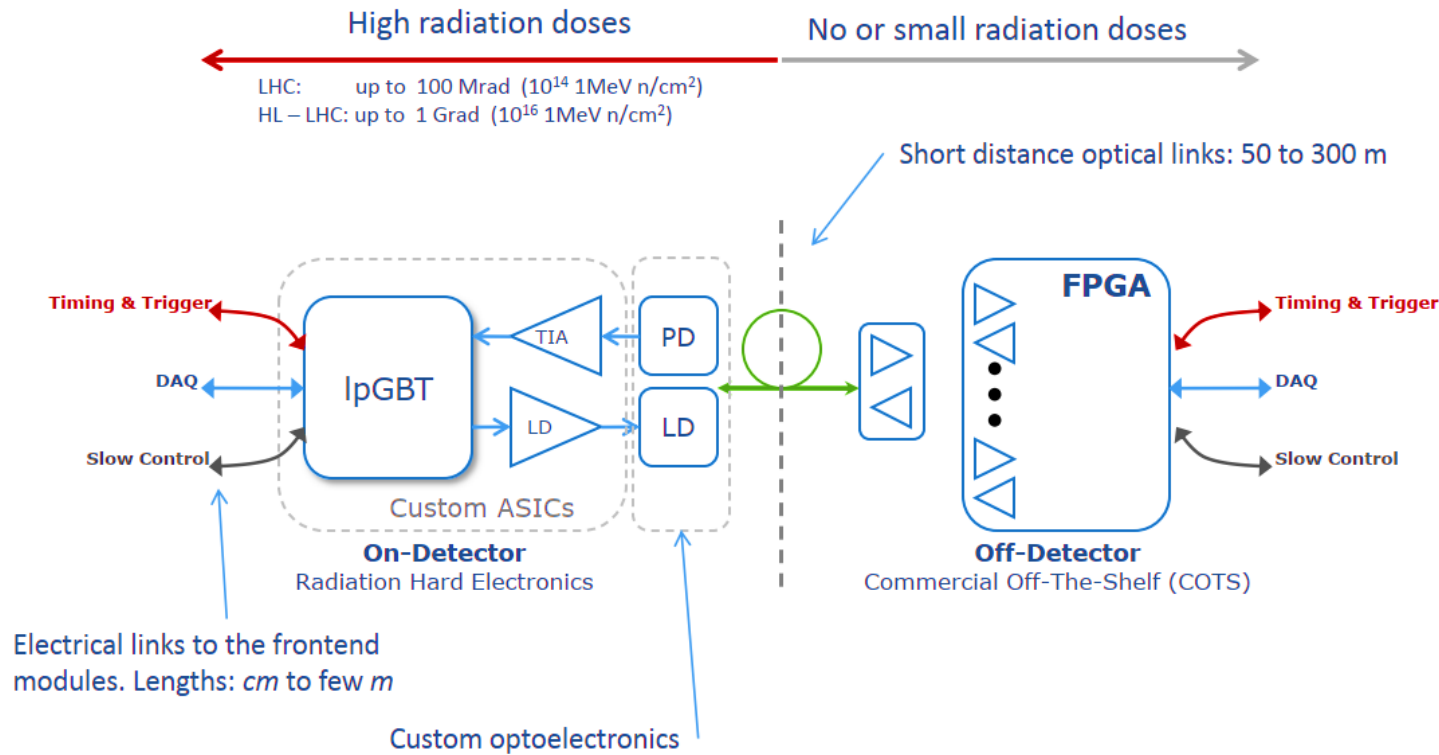
[1] Abazov, V. M., ... Antchev, G. Atanassov, I., ... et al. Odderon exchange from elastic scattering differences between pp and $p\bar{p}$ data at 1.96 TeV and from pp forward scattering measurements. [Phys. Rev. Lett. 127, 062003 \(2021\)](#)

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

HL-LHC поставя нови изисквания и предизвикателства:

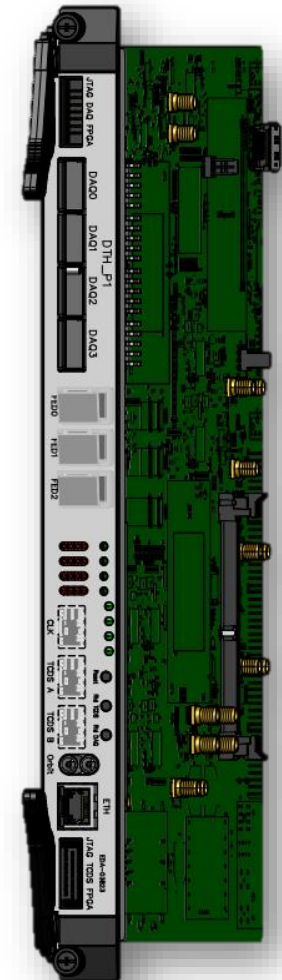
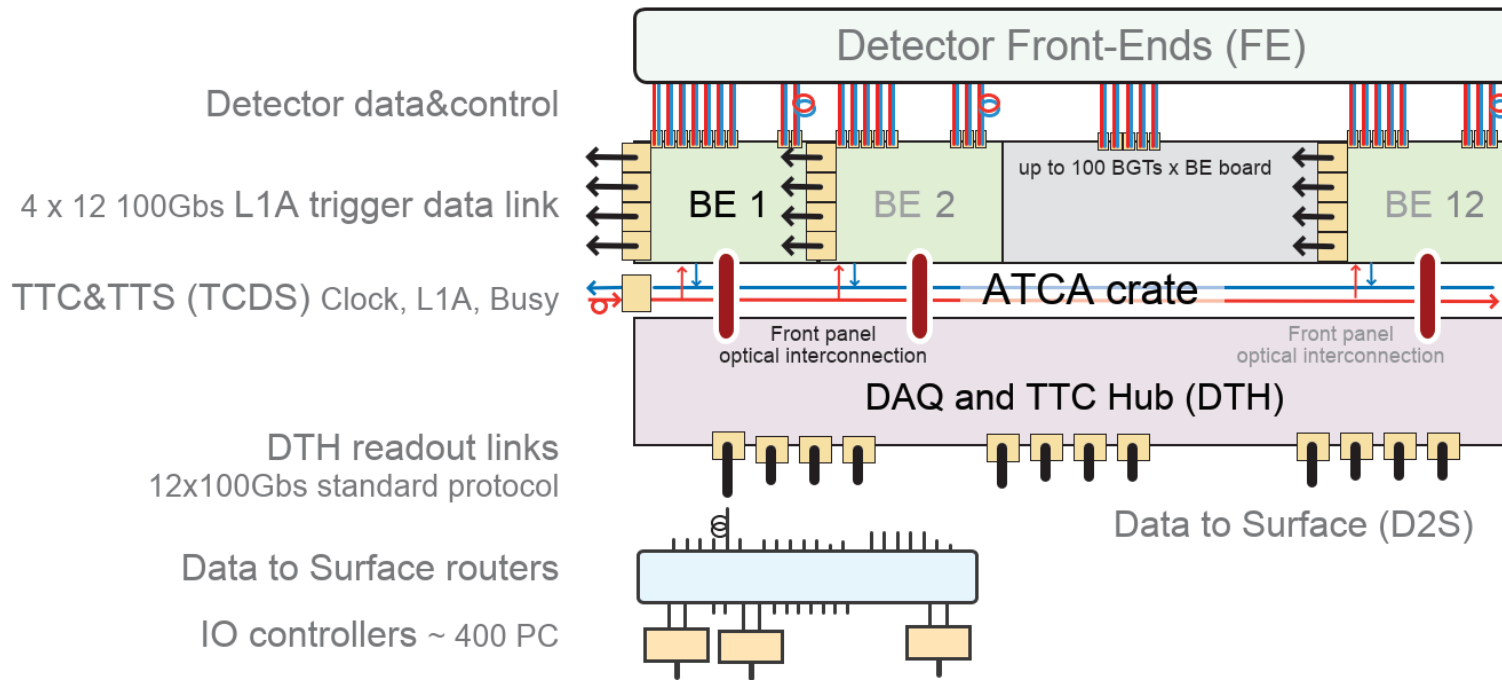
- По-голямо количество информация, скорост, бързодействие, устойчивост на радиация
- Детектори от нов тип с по-добри параметри и възможности
- CERN в колаборация с външни институти разработва специални ел. компоненти за това

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
- **Заклучение**

- 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