

IFAE 2023 - Catania

Aggiornamento del Tracciatore per la Fase ad Alta Luminosità dell'Esperimento CMS ad LHC



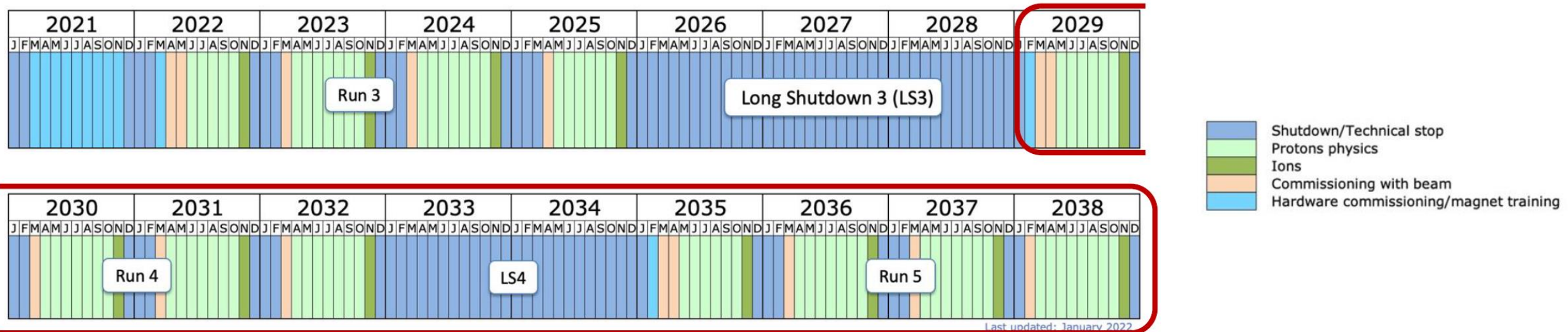
Rudy Ceccarelli
A Nome della Collaborazione CMS

13/04/2023



LHC ad Alta Luminosità

- Il programma High Luminosity LHC (HL-LHC) è previsto iniziare nel 2029
 - La luminosità istantanea raggiungerà $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ durante il Run-5
 - Luminosità integrata fino a 4000 fb^{-1} in 10 anni
- Tutti i rivelatori di CMS saranno aggiornati per poter operare nelle nuove condizioni
 - 'Pile-up' medio fino a ~ 200 in CMS
- Il **tracciatore** di CMS sarà completamente sostituito
 - Necessaria alta **granularità** ed alta **resistenza alle radiazioni**
- Nello **strato** più **interno** del futuro tracciatore
 - Elevata frequenza di passaggio di particelle: 3.2 GHz cm^{-2}
 - Elevato danneggiamento da radiazione: $1.8 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ (0.93 Grad) per i Run-4+5

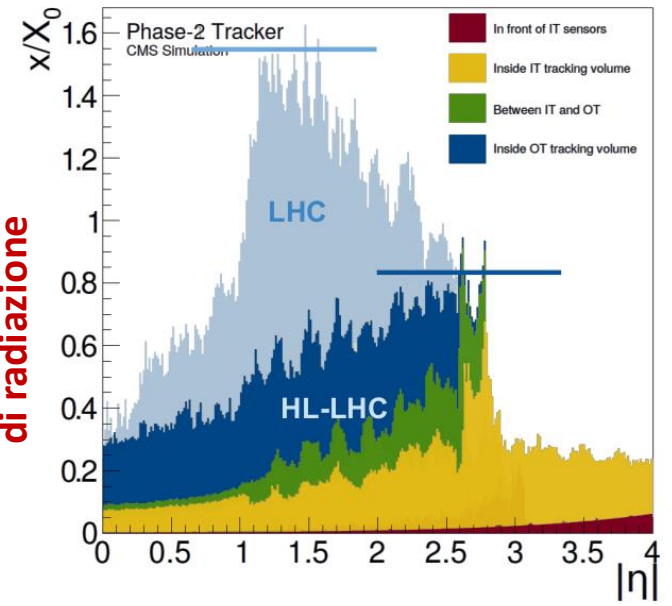


Il Futuro Tracciatore

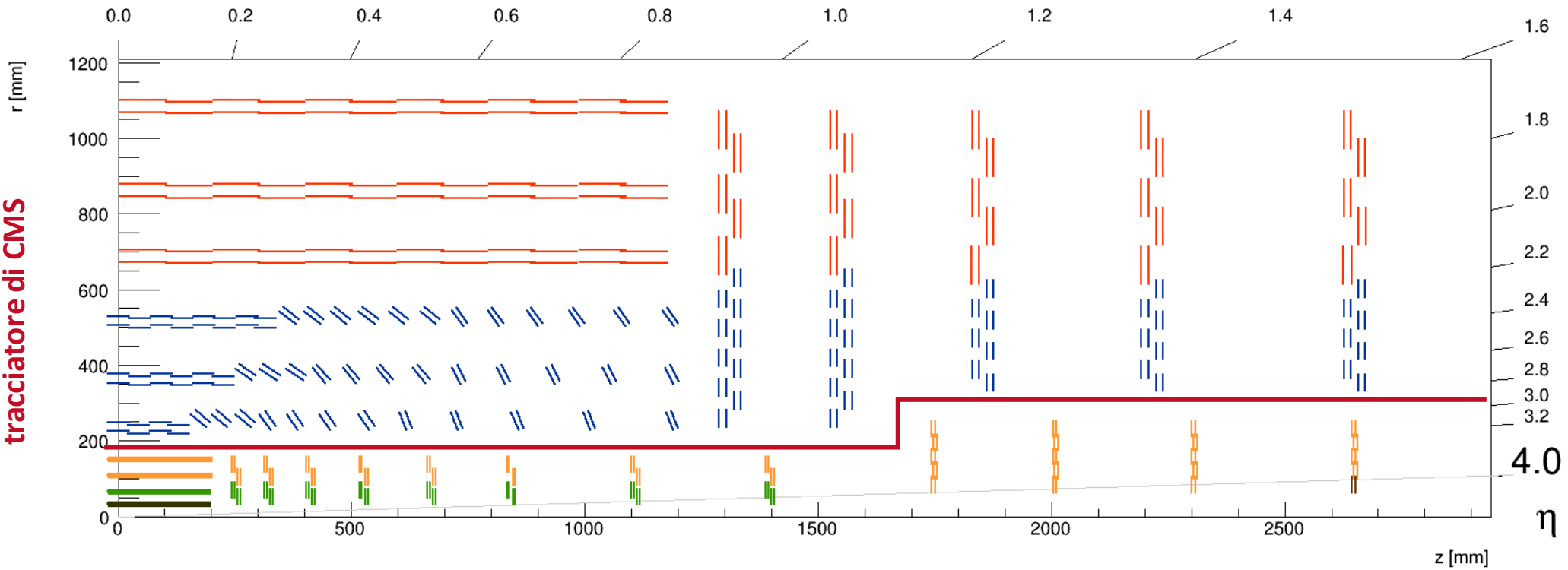
- Il futuro tracciatore di CMS sarà composto da due sezioni:
 - Inner** (rivelatori a pixel)
 - Outer** (rivelatori a strip and macro-pixel)
- Accettanza fino a $\eta \sim 4$
- 2×10^9 pixel
- 43×10^6 strip
- 170×10^6 macro-pixel

} $\sim 120 \text{ m}^2$ di silicio

Spessore del tracciatore
in unità di lunghezze
di radiazione



Vista laterale di un quarto del tracciatore di CMS



Outer Tracker

Inner Tracker



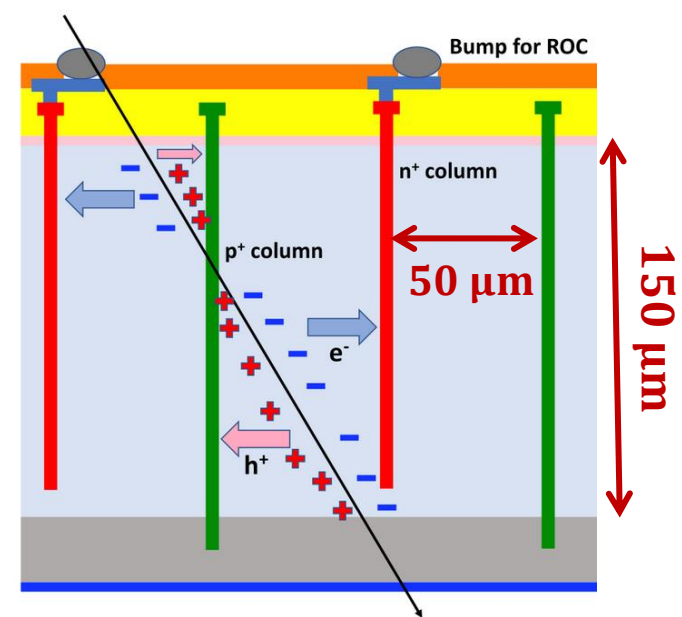
Parte I

Inner Tracker

Sensori a Pixel



- Due tipologie di sensori saranno installate nel futuro tracciatore
 - Sensori a pixel planari: impianti superficiali
 - Sensori **a pixel 3D**: impianti colonnari
 - Minore tensione di polarizzazione necessaria a svuotarli
 - Distanza di **deriva ridotta** rispetto a sensori planari (50 μm vs. 150 μm)
 - Minore probabilità di intrappolamento dei portatori di carica in sensori irraggiati



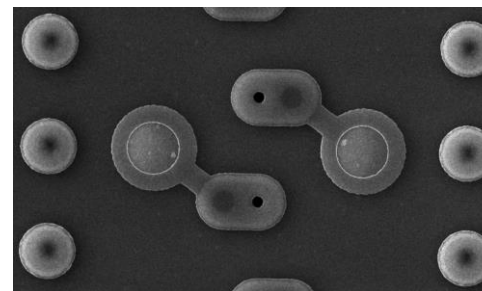
- Sensori 3D saranno installati nello strato più interno del tracciatore (a 30 mm dalla linea di fascio)
- **Geometria** (sia per planari che per 3D): pixel $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ e spessore attivo di 150 μm
- I sensori 3D sono stati testati prima e dopo essere stati irraggiati fino a $1.5 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

- Ottima risoluzione ed efficienza anche dopo irraggiamento
- Prevista la sostituzione dopo $\sim 1 \times 10^{16} \text{ n}_{\text{eq}}/\text{cm}^2$

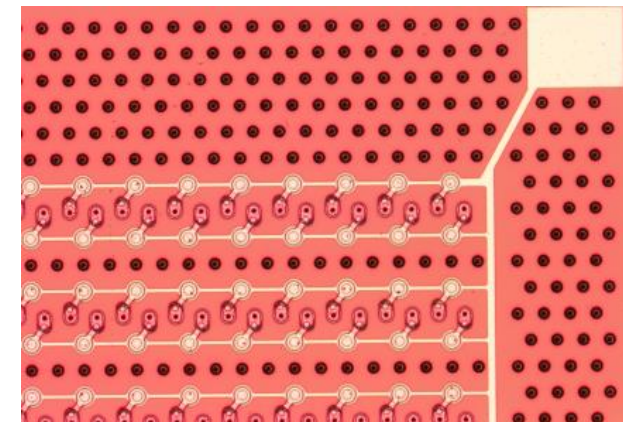
Poster di Martina Manoni:

Caratterizzazione dei rivelatori a pixel ultra-resistenti alle radiazioni per la fase ad alta luminosità dell'esperimento CMS a LHC

Sensore a pixel 3D
Fotografia dal wafer

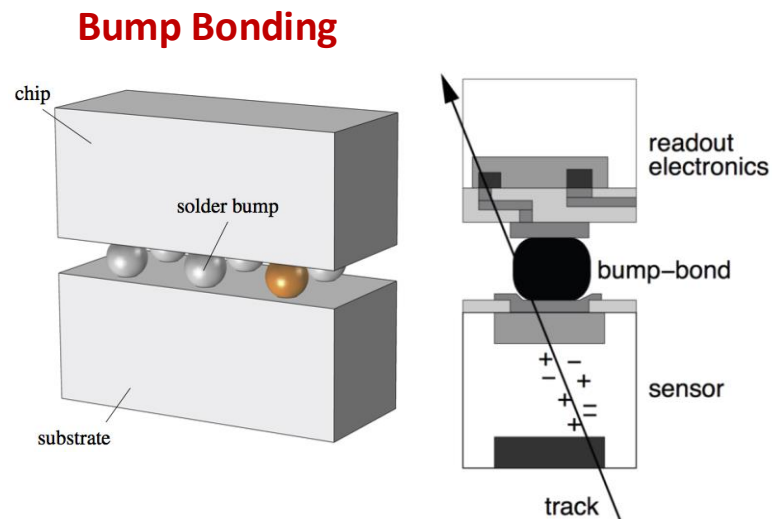


Due celle $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ di un sensore a pixel 3D

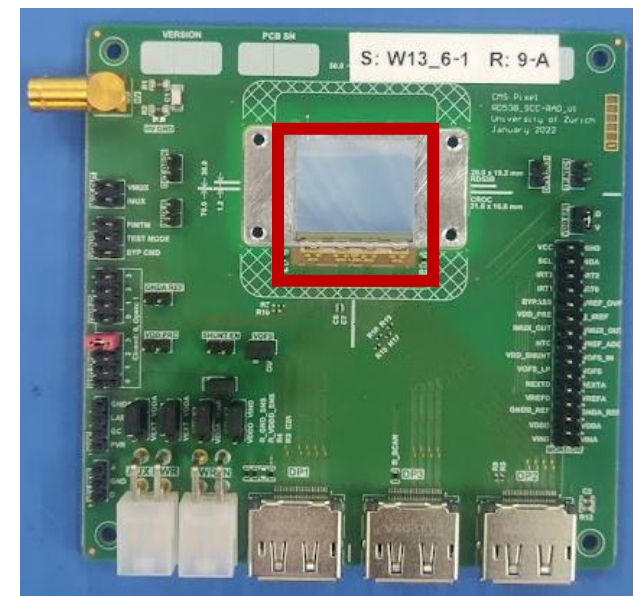


Il Chip di Lettura: CROC

- Il chip di lettura è accoppiato al sensore tramite ‘bump-bonding’
 - Sensore + chip → Modulo a pixel
- Il **CROC** (CMS-Read-Out-Chip) è sviluppato dalla collaborazione RD53
 - Collaborazione ATLAS-CMS per sviluppare chip di lettura per HL-LHC
- Il CROC ha 145152 canali (336 righe e 432 colonne)
 - Passo di $50 \times 50 \mu\text{m}^2$
 - Dimensione totale: 18.6 mm \times 21.6 mm
 - Tecnologia **CMOS** a **65 nm**
 - Resistente alla radiazioni fino a **1 Grad**
 - ~ la dose attesa nello strato più interno per i Run-4+5
 - Soglie $< 1000 e^-$ e fino a $4 \times 1.28 \text{ Gb/s}$ in uscita
 - Può essere alimentato **serialmente** tramite regolatori Shunt-LDO installati sul chip



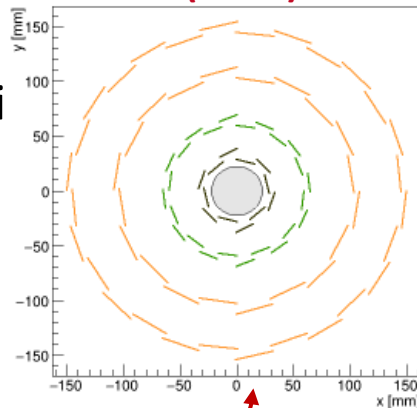
Modulo CROC montato su una single-chip-card



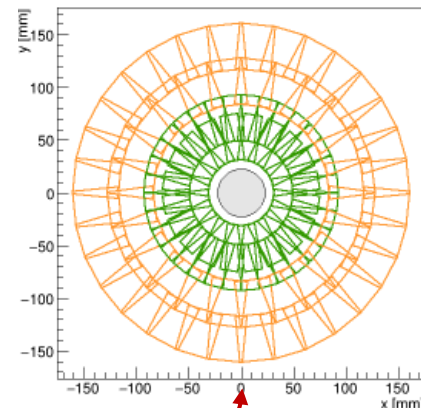
Configurazione

- **TBPX:** quattro strati cilindrici divisi in due parti
 - Separazione in $z \sim 0$ (ma $z \neq 0$)
- **TFPX:** otto doppi dischi piatti per estremità
 - Quattro anelli per disco
- **TEPX:** quattro doppi dischi piatti per estremità
 - Cinque anelli per disco

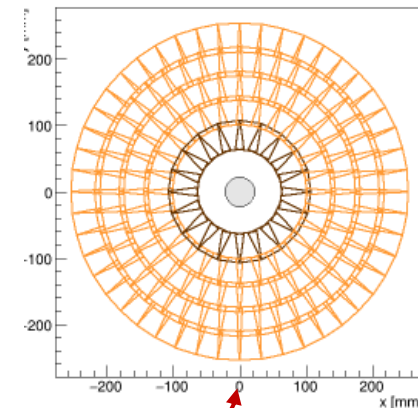
Tracker Barrel Pixel (TBPX)



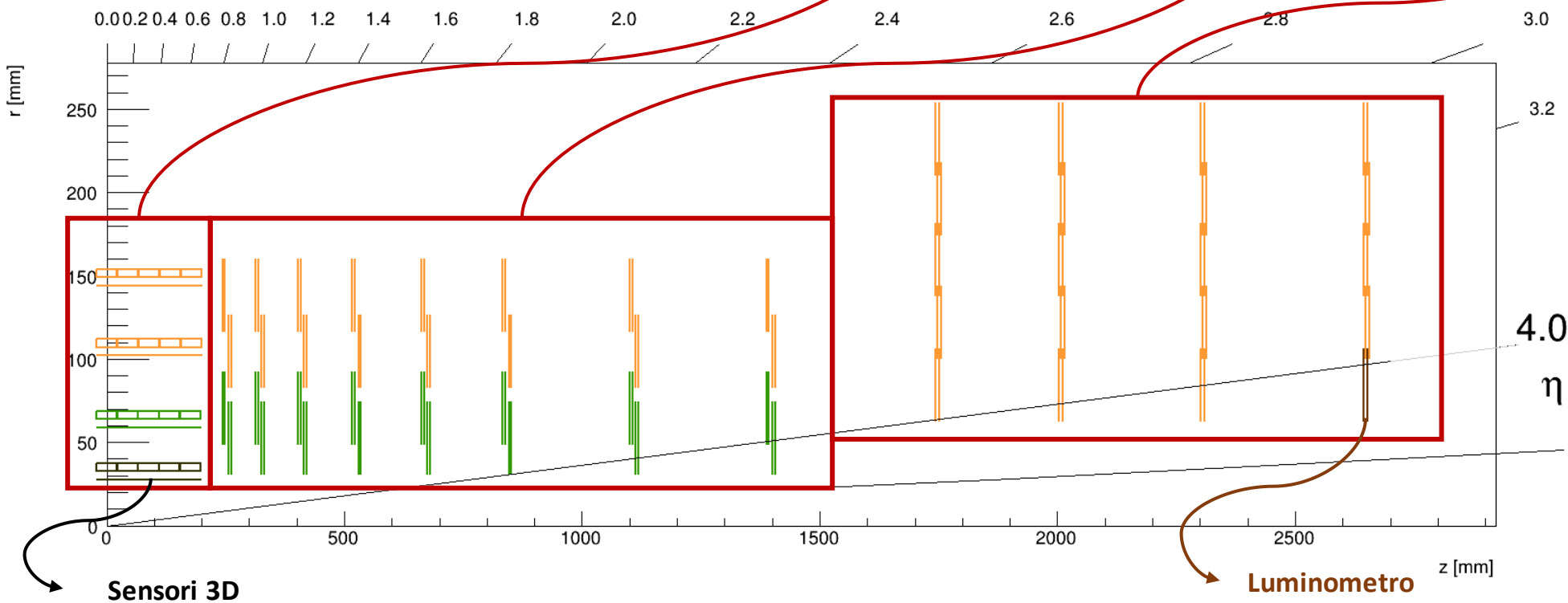
Tracker Forward Pixel (TFPX)



Tracker Endcap Pixel (TEPX)



Inner Tracker:
Vista laterale di un
quarto del tracciatore



Inner Tracker:
Vista frontale
delle tre sezioni

2736
Moduli 2×2

1156
Moduli 2×1

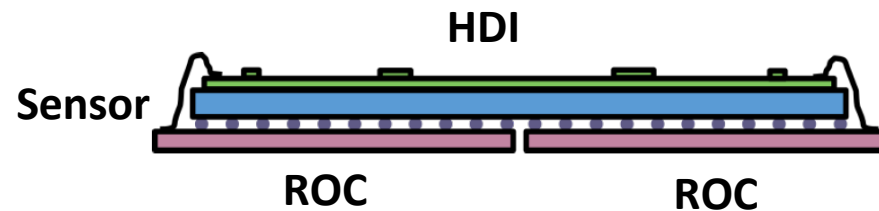
4.0
 η

Sensori 3D

Luminometro

Moduli

- I moduli sono costituiti da un singolo sensore accoppiato a quattro (2×2) chip (strati esterni)...
- ...o due (2×1) chip (strati interni)
 - I moduli sono incollati ad un HDI, sul quale viene eseguito il wire-bonding



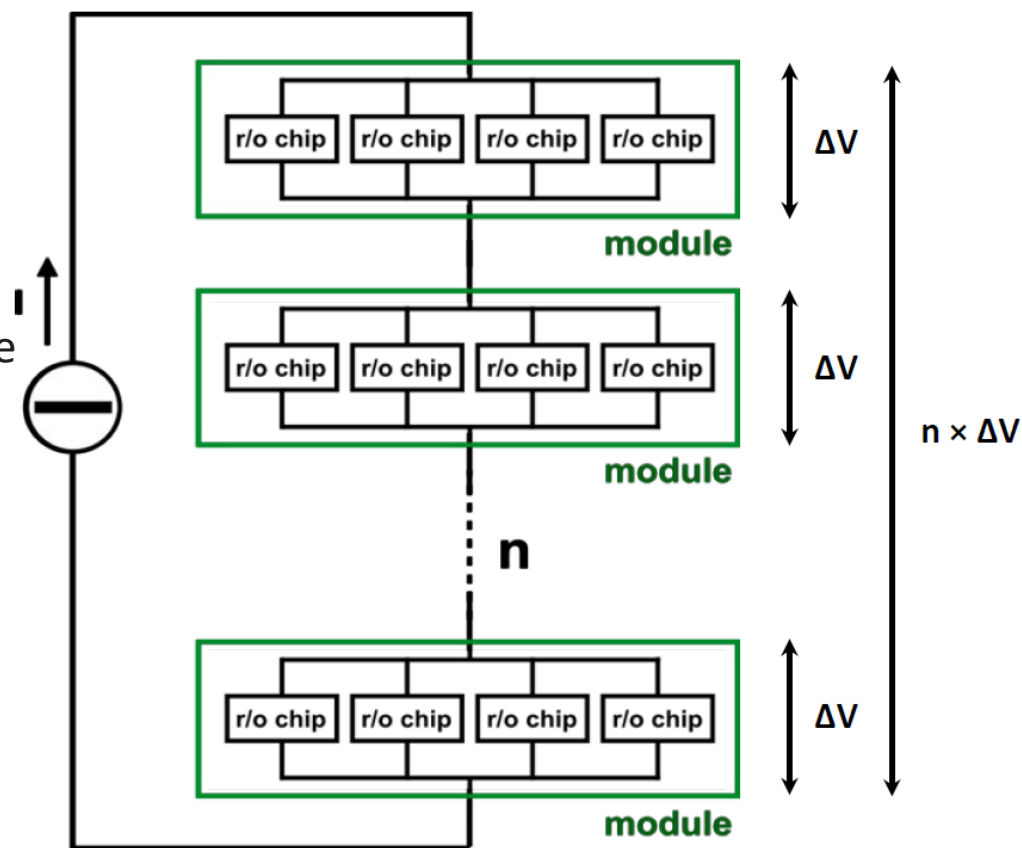
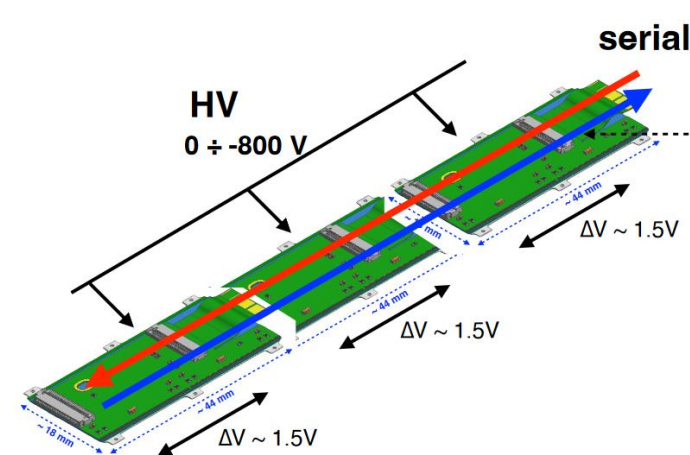
Modulo CROC 2×2
"digitale" (senza sensore)

- Nel strato più interno di TBPX si avranno moduli 2×1 con sensori 3D
 - Lo strato sarà sostituito tra il Run-4 e il Run-5 a causa dell'elevato danneggiamento da radiazione
- I moduli saranno ricoperti di 'parylene-n' per mitigare gli effetti di scariche elettriche ad alto voltaggio
- I moduli saranno montati su un supporto in fibra di carbonio e raffreddati da un sistema a CO_2 a -35°C
 - 168 anelli di raffreddamento con tubi in acciaio dal diametro di 1.8 mm

Alimentazione Seriale

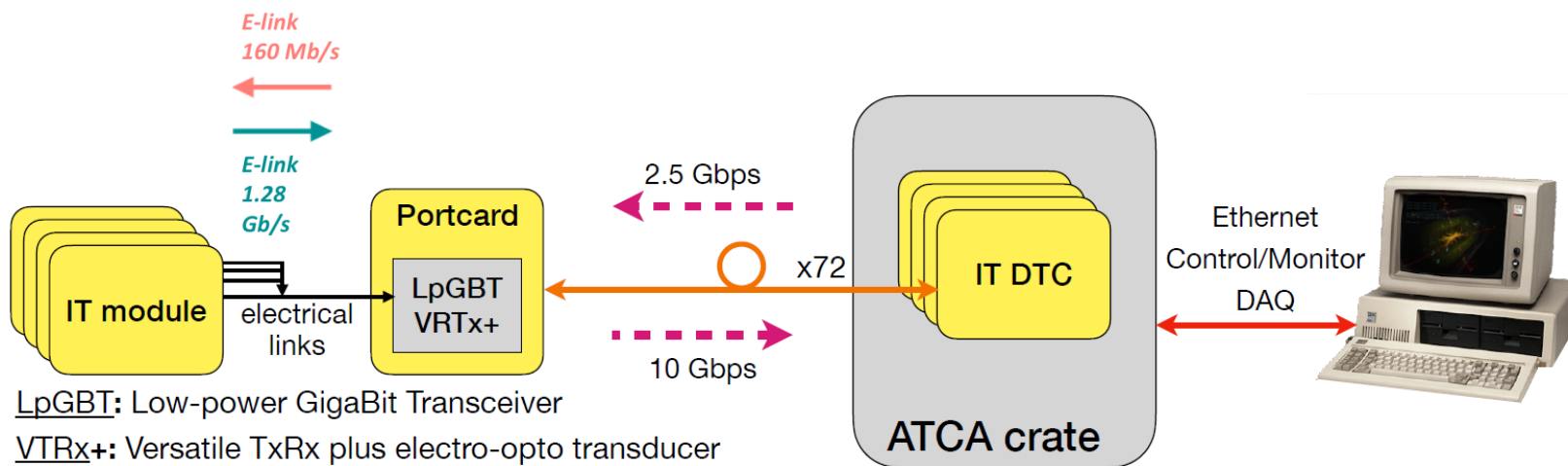


- **50 kW** sono necessari per alimentare i moduli a pixel
- Una alimentazione diretta richiederebbe troppo materiale
 - Convertitori DC/DC sono ingombranti e poco resistenti alle radiazioni
- Soluzione: **alimentazione** seriale in **corrente**
 - Nessuna massa aggiuntiva ed alta resistenza alle radiazioni
- I moduli sono organizzati in catene alimentate serialmente
 - La corrente è condivisa in parallelo tra i 2 o 4 chip di un modulo
 - A sua volta, in ogni chip la corrente è divisa tra digitale e analogico
 - Due **shunt-LDO**, presenti sui chip, di occupano di **regolare** la tensione
- **576 catene seriali**
 - 8 A per moduli 2×2
 - 4 A per moduli 2×1
- La **tensione di polarizzazione** per i sensori è fornita in **parallelo**



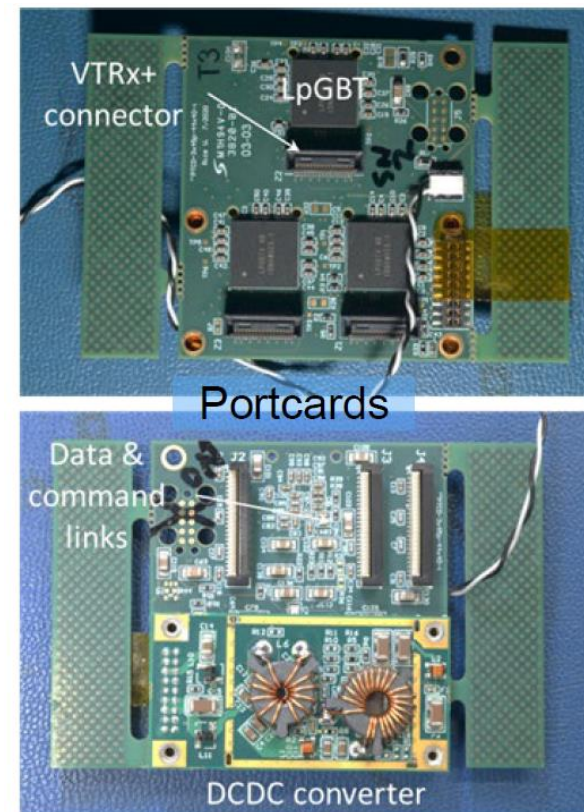
Sistema di Acquisizione

- L'elettronica di comunicazione è contenuta in apposite **'portcard'** poste nel cilindro di servizio
 - Circa 700 'portcard' che contengono tre chip LpGBT e tre link VTRX+ per la conversione optoelettronica
- Link **elettrici** tra modulo e portcard mediante 'flex cables' o 'twisted pairs'
 - Fino a sei link elettrici in uscita 1.28 Gb/s (dai moduli alle 'portcard')
 - 3.84 Gb/s per chip nello strato più interno del tracciatore
 - Un link elettrico in entrata a 160 Mb/s (dalle 'portcard' ai moduli)
 - Clock, trigger, comandi e configurazioni dei chip
- Segnali **ottici** da/per custom board per Data, Trigger, Control (DTC)
 - 10 Gb/s dalle portcard per le DTC e 2.5 Gb/s dalle DTC alle portcard



LpGBT: Low-power GigaBit Transceiver

VTRx+: Versatile TxRx plus electro-opto transducer

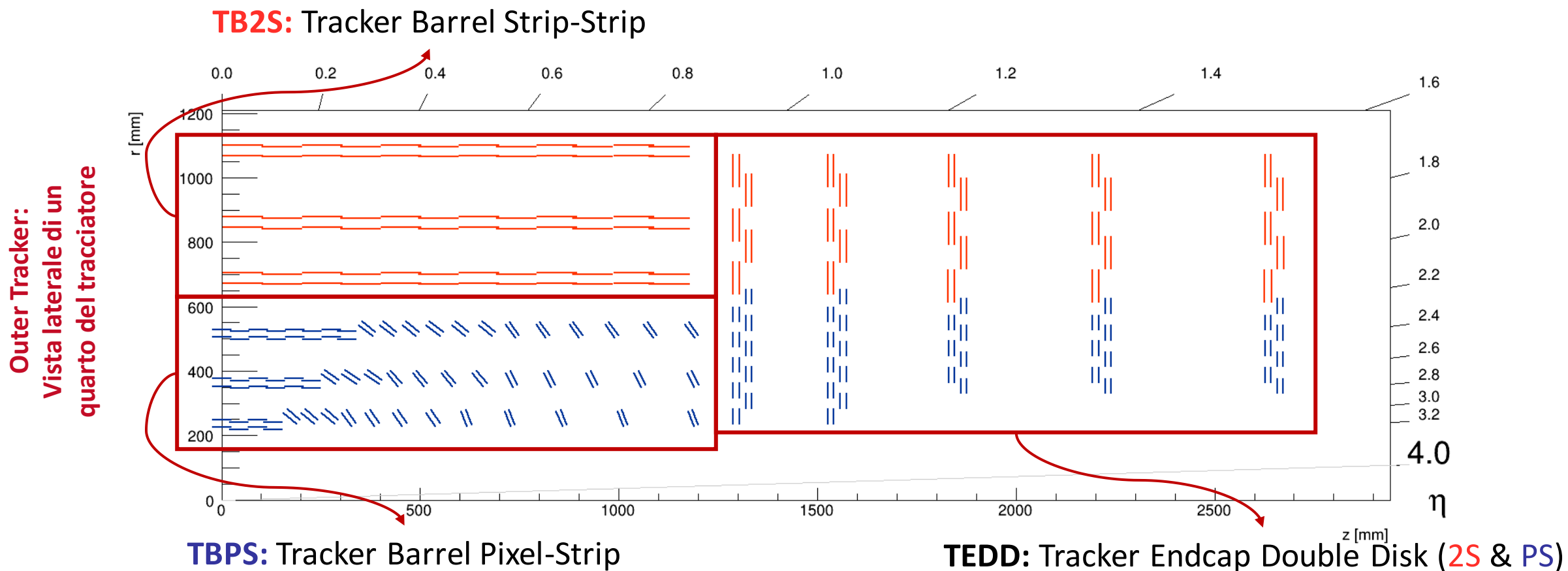


Parte II

Outer Tracker

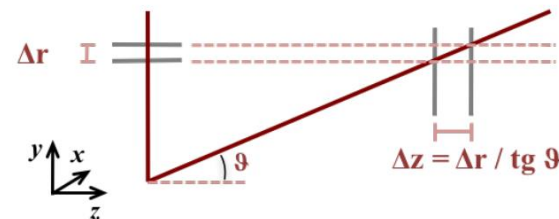
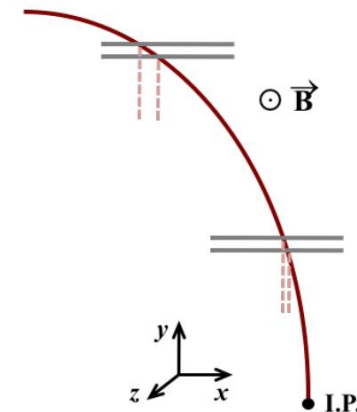
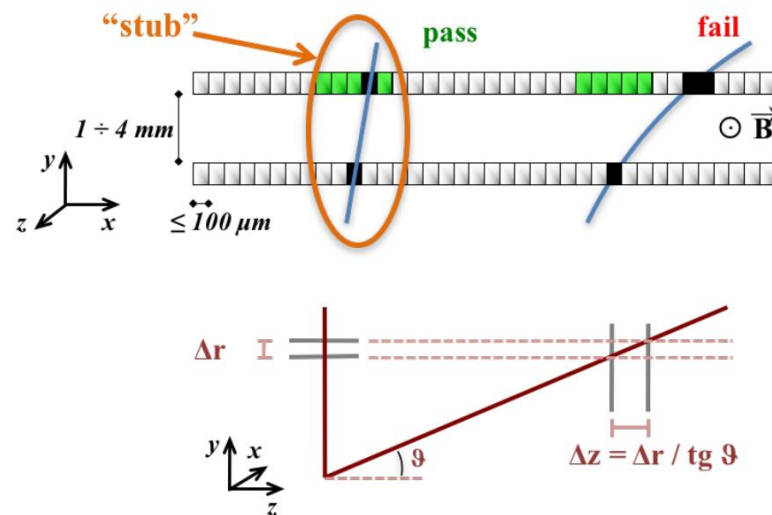
Configurazione

- Accettanza Outer Tracker fino a $\eta \sim 2.5$
- Due tipologie di moduli: **doppia strip (2S)** e **pixel-strip (PS)**



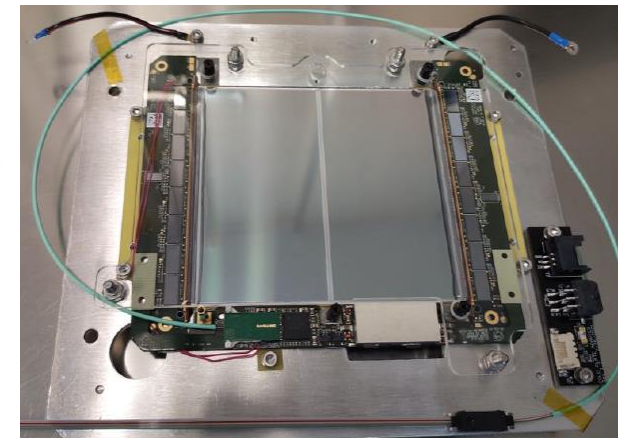
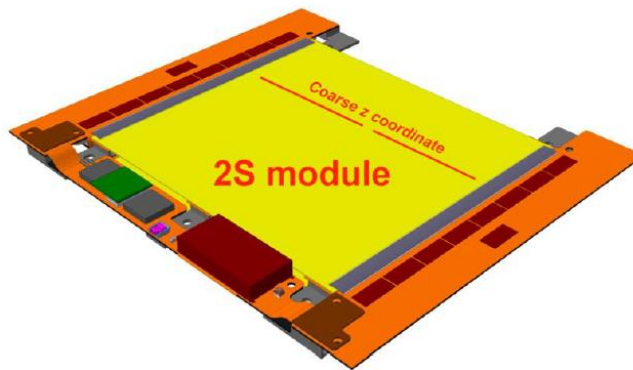
Contributo al Trigger

- A causa dell'alto 'pile-up' in HL-LHC, è necessario include le **tracce nel trigger di primo livello (L1)**
 - Miglior potere discriminatorio
- Per limitare i dati da inviare ad L1 ad ogni 'bunch-crossing', il tracciatore effettua una selezione...
 - ... rigettando le tracce che hanno un basso impulso trasverso p_T
- **Modulo p_T** : due sensori in silicio molto molto vicini e sovrapposti sullo stesso modulo
 - Elettronica di lettura in comune per i due sensori
- La curvatura della particella (dovuta al campo magnetico all'interno di CMS) dipende dal suo p_T
 - Le tracce che passano un certo taglio in p_T vengono inviate ad L1 ad ogni 'bunch-crossing'

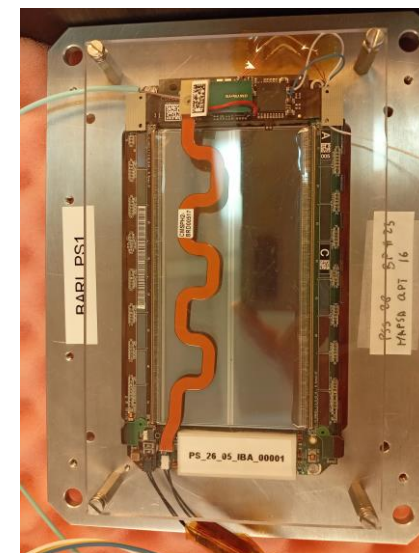
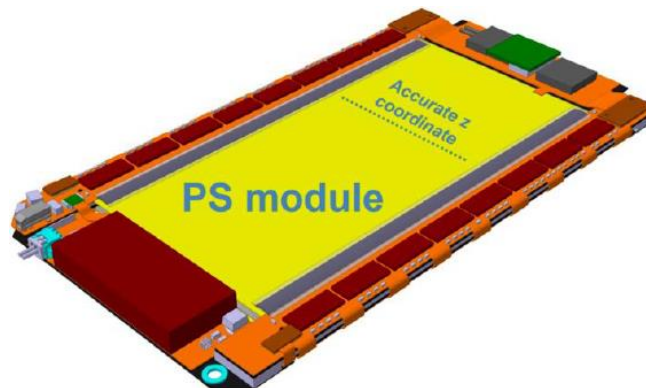


Tipologie di Moduli

- Saranno presenti due tipologie di moduli p_T
- **Moduli 2S:** due sensori con strip $5\text{ cm} \times 90\ \mu\text{m}$
 - Due differenti **spaziature:** 1.8 mm, 4 mm
 - Ottimizzate a seconda della regione del tracciatore
 - Dimensioni dei sensori: $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$
 - Due colonne di 1016 strip

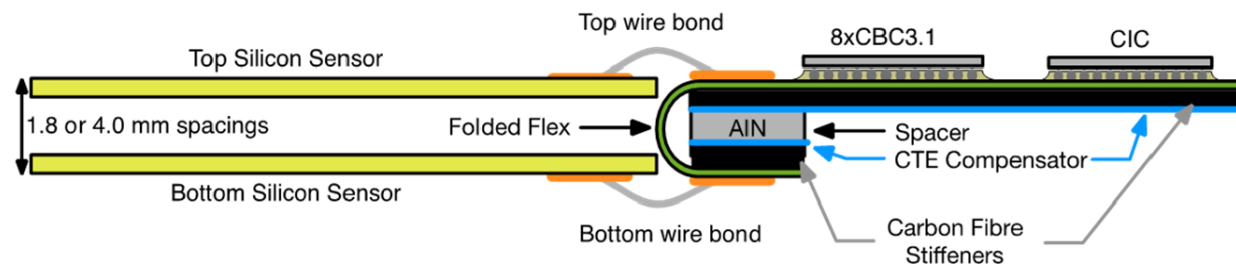


- **Moduli PS:** un sensore con strip $2.5\text{ cm} \times 100\ \mu\text{m}$ strips + un sensore con macro-pixel $1.5\text{ mm} \times 100\ \mu\text{m}$
 - Tre differenti spaziature: 1.6 mm, 2.6 mm, 4 mm
 - Dimensioni dei sensori: $5\text{ cm} \times 10\text{ cm}$
 - Due colonne di 960 strip e 960×32 pixel

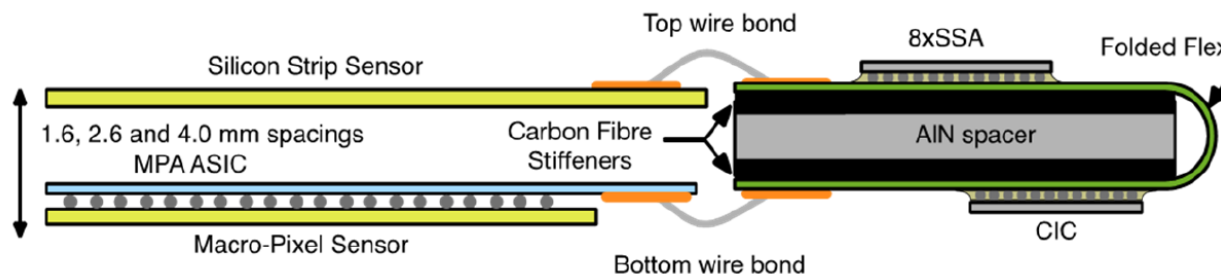


- Si stanno assemblando e testando entrambe le tipologie di moduli
 - 42 moduli 2S
 - 21 moduli PS

- I **moduli 2S** sono letti da otto chip CBC (CMS-Binary-Chip), in tecnologia a 120 nm
 - Sensori accoppiati ai chip tramite ‘wire-bonding’
 - I chip forniscono sia le primitive a L1 (a 40 MHz) che i dati al DAQ in caso di trigger confermato
 - Un singolo chip legge canali da entrambi i sensori
 - 254 canali per chip (127 per sensore)

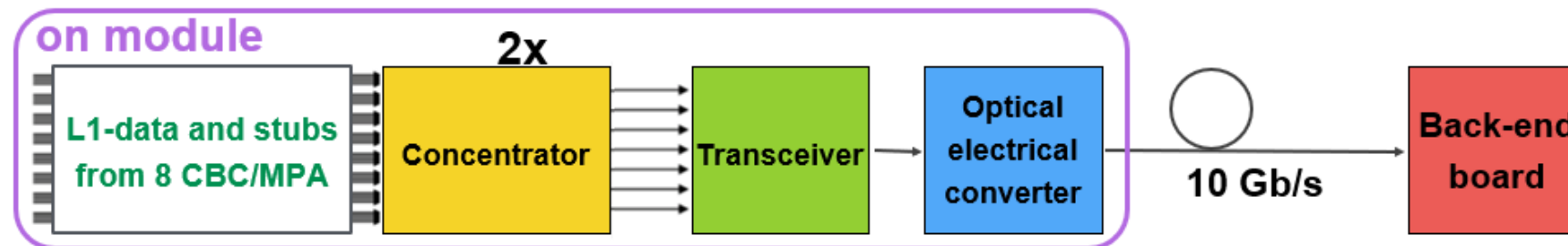


- I **moduli PS** sono letti da otto chip SSA (Short-Strip-ASIC)...
- ... e un chip per i macro-pixel MPA (Macro-Pixel-ASIC) accoppiato mediante ‘bump-bonding’
 - Le primitive a L1 sono inviate dal chip MPA, che esegue un abbinamento con le informazioni provenienti dai chip SSA
- Entrambe le tipologie di chip sono realizzate in tecnologia a 65 nm



Sistema di Acquisizione

- Sia sui moduli 2S che sui moduli PS sono presenti due chip CIC (Concentrator-Integrated-Circuit)
 - I dati vengono formattati, convertiti in ottico (chip LpGBT e link VTRX+) ed inviati alle DTC
- Segnali ottici a 5.12 Gb/s o 10.24 Gb/s dal modulo alla DTC (a seconda della posizione del modulo)
 - Primitive per L1 e dati per il DAQ
- Segnali ottici a 2.56 Gb/s dalla DTC al modulo
 - Clock, trigger, comandi e configurazioni
- Le informazioni per L1 sono forniti a **40 Mhz**, mentre i dati a **750 kHz** (dopo la decisione di L1)



Grazie per l'attenzione!