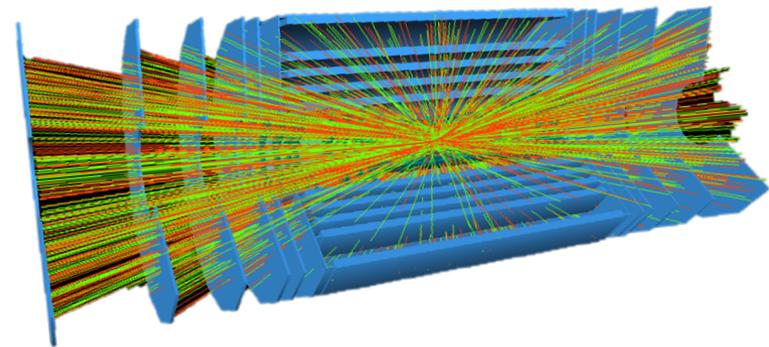


# ***ATLAS ITk E NUOVE TECNOLOGIE DI SENSORI A PIXEL***



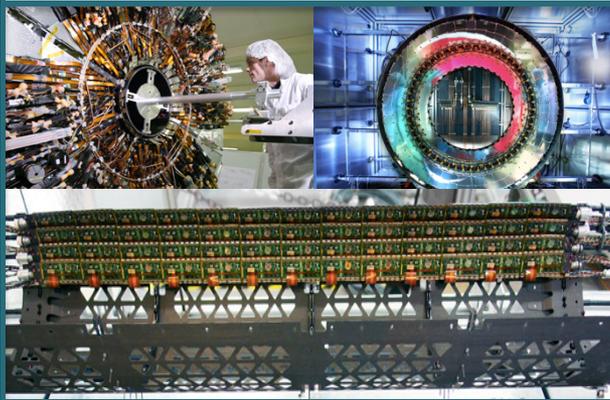
**A. GAUDIELLO**

INFN e Università degli Studi di Genova  
a nome della **COLLABORAZIONE ATLAS**

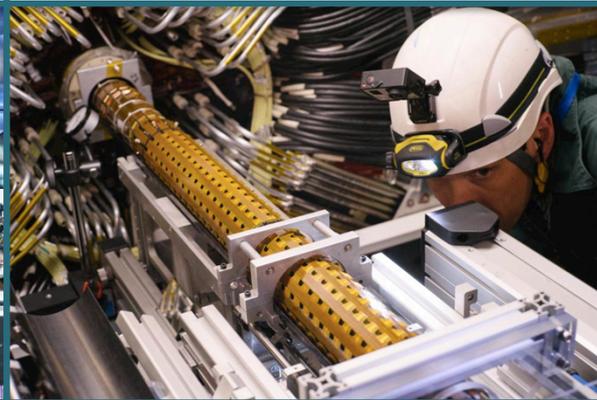
# OUTLINE

- High-Luminosity LHC e Upgrade di *ATLAS* di Fase II
- *ATLAS* Inner Tracker (ITk)
  - Panoramica e Performance
  - Layout in Studio
- Nuovi Sensori in Sviluppo per il Rivelatore a Pixel

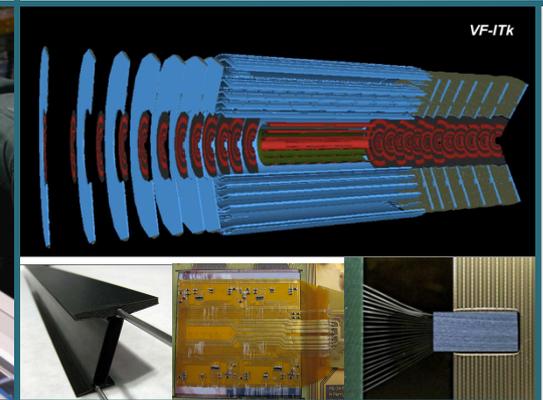
2007: *ATLAS* INNER DETECTOR



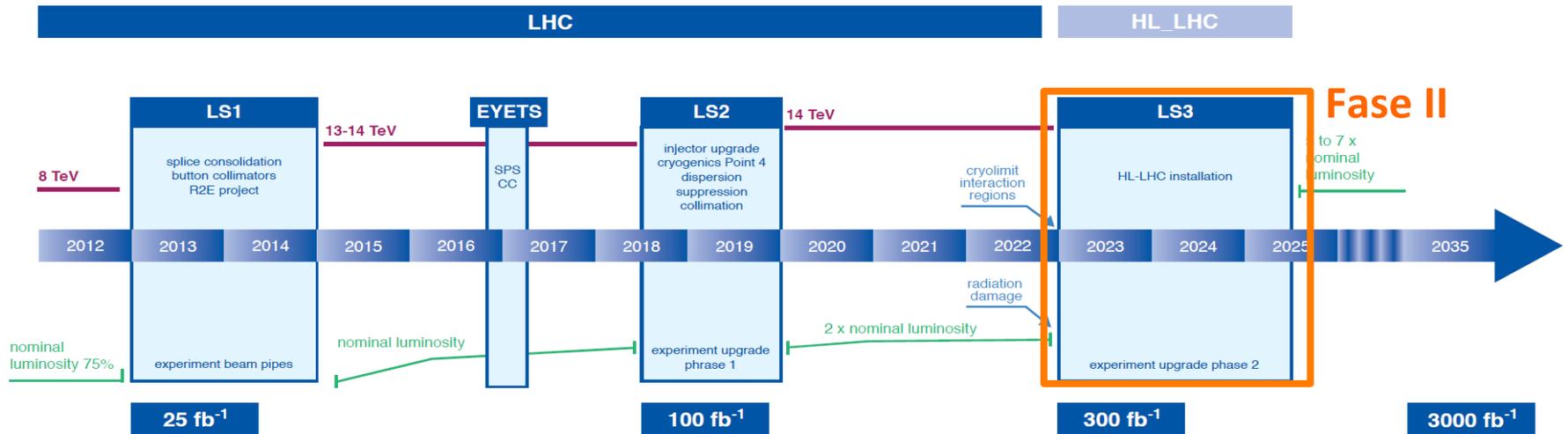
2014: INSERTABLE B-LAYER



2024: INNER TRACKER



# HIGH-LUMINOSITY LHC



HL-LHC inizierà ad operare nel 2025 con l'obiettivo di raccogliere una luminosità integrata di 3000 fb<sup>-1</sup>

Tra le principali motivazioni di fisica troviamo:

- *Avere misure più precise sul bosone di Higgs*  
Ad esempio: Massa, Ampiezza, Numeri Quantici, Accoppiamenti con i fermioni, decadimenti rari SM, ...
- *Investigare la simmetria elettrodebole*
- *Ricerche dirette di SUSY o altre particelle oltre SM*
- ...
- *Magneti dei dipoli a 11 T*
- *Cavità risonanti rinnovate*
- ...

Si prevede una luminosità istantanea fino a  $7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

- Fino a 200 collisioni protone-protone per Bunch Crossing (BC)

# ATLAS FASE II E ITk (INNER TRACKER)

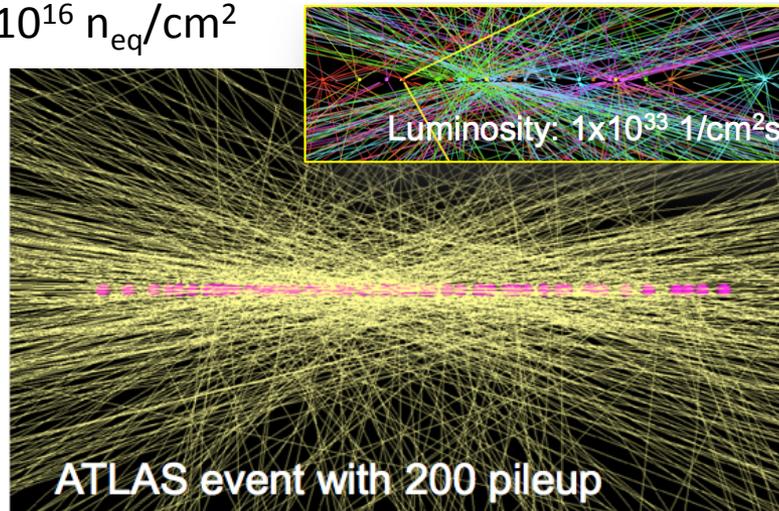
Per fronteggiare l'alta luminosità istantanea ed integrata e per avere le stesse performance dell'attuale rivelatore fino a  $\langle\mu\rangle = 200$ , diversi sottosistemi di ATLAS dovranno essere aggiornati.

## Alta Luminosità Istantanea:

- Aumento dell'occupanza degli attuali rivelatori e conseguente saturazione della bandapassante
  - Fino a  $10^4$  tracce per evento
  - Necessaria maggiore granularità dei sensori nel tracciatore
- Essenziale ridefinire il trigger (hardware e software) per mantenere sensibilità nella fisica

## Alta Luminosità Integrata:

- Aumento del danno da radiazione in particolar modo vicino alla beam pipe
  - Fluenze fino a  $10^{16}$  n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup>



# ATLAS FASE II E ITk (INNER TRACKER)

Per fronteggiare l'alta luminosità istantanea ed integrata e per avere le stesse performance dell'attuale rivelatore fino a  $\langle\mu\rangle = 200$ , diversi sottosistemi di ATLAS dovranno essere aggiornati.

- **Inner Detector completamente rinnovato**
  - ↳ **Inner Tracker (ITk)**
- Nuovi calorimetri in avanti
- Aggiornamento dei sistemi di Trigger e DAQ
- Nuova elettronica per il calorimetro ad Argon Liquido
- Possibile aggiornamento del sistema dei Muoni

## INNER TRACKER (ITK)

### Sostituzione completa di tutto l'Inner Detector

Il layout preliminare proposto nella Letter of Intent prevede un Inner Detector completamente in silicio con 14 punti/traccia e una copertura fino  $|\eta| < 2.7$

~10 m<sup>2</sup> di Pixel, ~200 m<sup>2</sup> di Strip

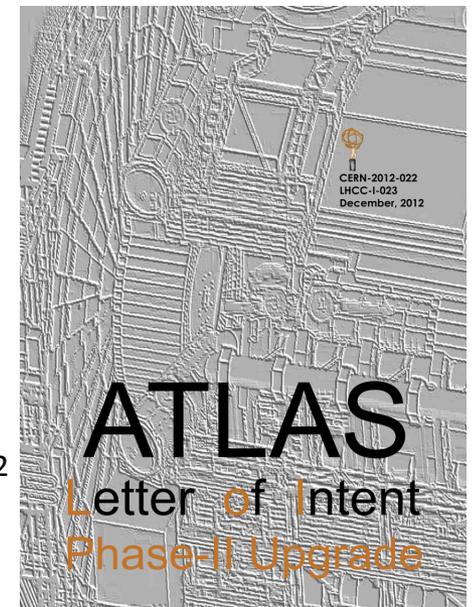
650 Milioni di canali (Pixel), 75 Milioni canali (Strip)

3200 10 Gb/s connessioni di readout.

**Sistema a Pixel:** 4 layer + 5 dischi, 25x150 (in)/ 50x150 (out)  $\mu\text{m}^2$

↳ **Eventuale 5° layer di pixel ed estensione ad alto  $\eta$**

**Sistema a Strip:** 5 layer + 7 dischi stereo



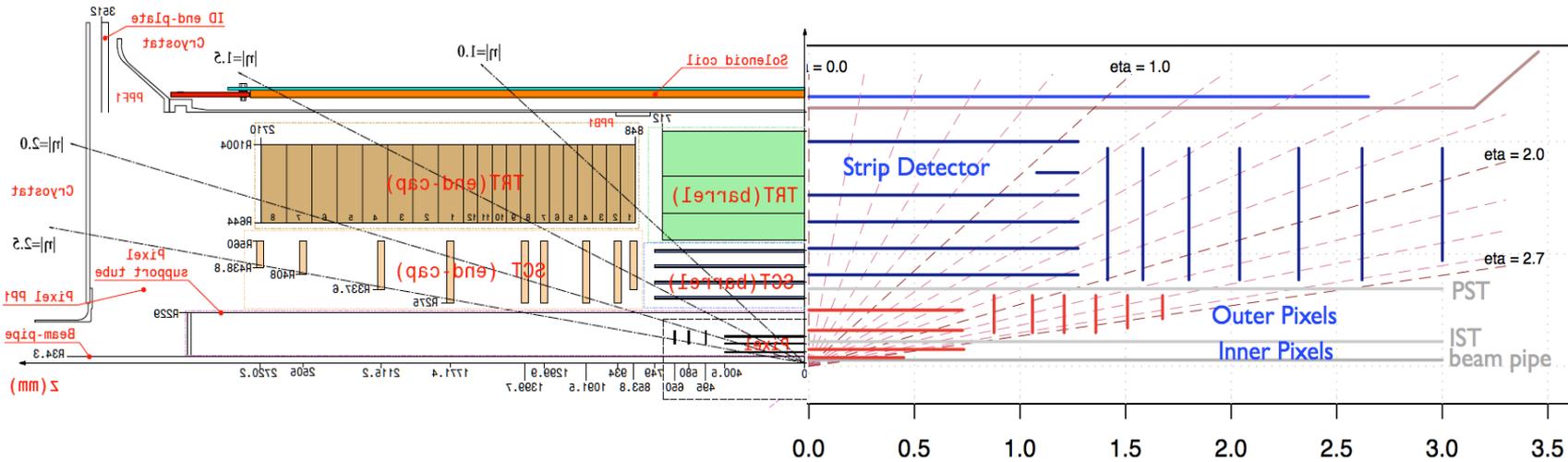
Gennaio 2013, LHCC-I-023

# ATLAS FASE II E ITk (INNER TRACKER)

Per fronteggiare l'alta luminosità istantanea ed integrata e per avere le stesse performance dell'attuale rivelatore fino a  $\langle\mu\rangle = 200$ , diversi sottosistemi di ATLAS dovranno essere aggiornati.

- Inner Detector completamente rinnovato
  - ↳ Inner Tracker (ITk)
- Nuovi calorimetri in avanti
- Aggiornamento dei sistemi di Trigger e DAQ
- Nuova elettronica per il calorimetro ad Argon Liquido
- Possibile aggiornamento del sistema dei Muoni

## INNER DETECTOR E ITK



ATLAS IN RUN 1

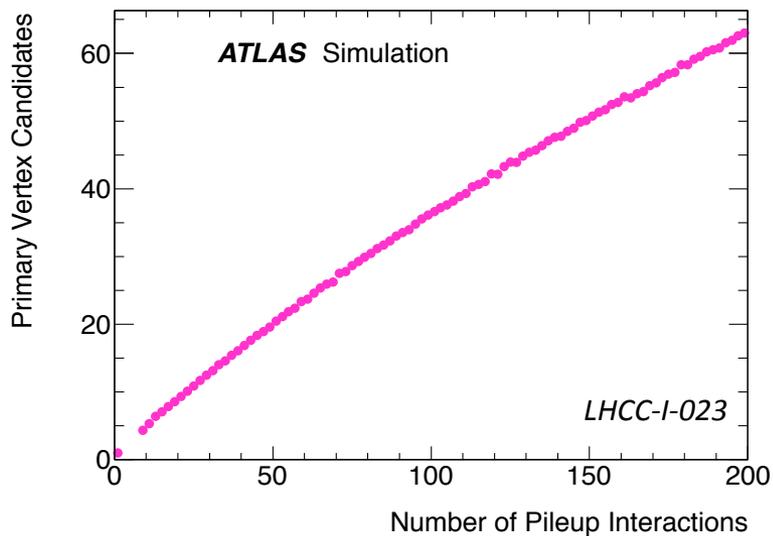
POSSIBLE TRACKER IN HL-LHC

# ATLAS FASE II E ITk (INNER TRACKER)

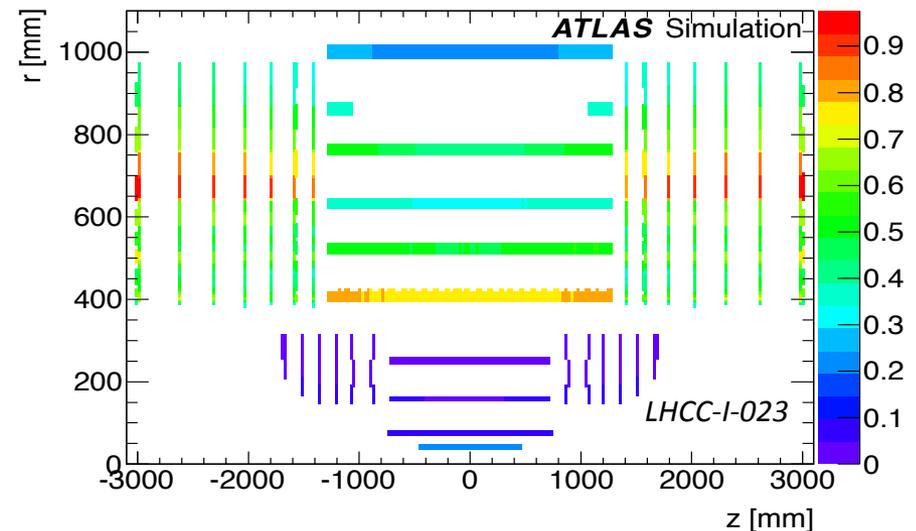
Per fronteggiare l'alta luminosità istantanea ed integrata e per avere le stesse performance dell'attuale rivelatore fino a  $\langle\mu\rangle = 200$ , diversi sottosistemi di ATLAS dovranno essere aggiornati.

- Inner Detector completamente rinnovato
  - ↳ Inner Tracker (ITk)
- Nuovi calorimetri in avanti
- Aggiornamento dei sistemi di Trigger e DAQ
- Nuova elettronica per il calorimetro ad Argon Liquido
- Possibile aggiornamento del sistema dei Muoni

## ITk PERFORMANCE



VERTICI PRIMARI RICOSTRUITI VS PILE UP

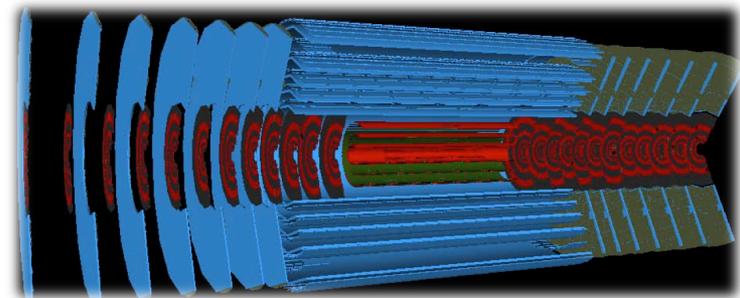


OCCUPANZA DEI CANALI PER  $\langle\mu\rangle = 200$

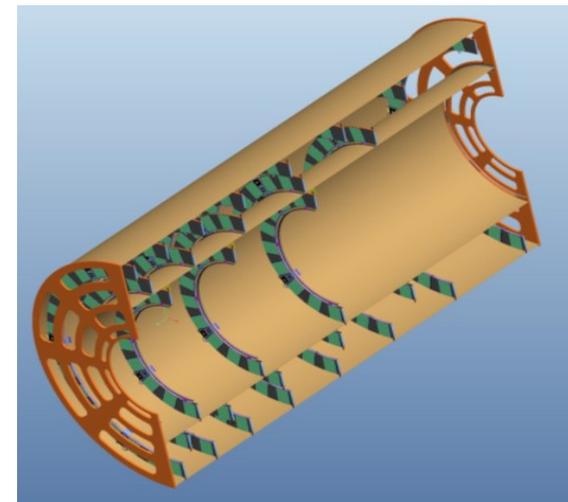
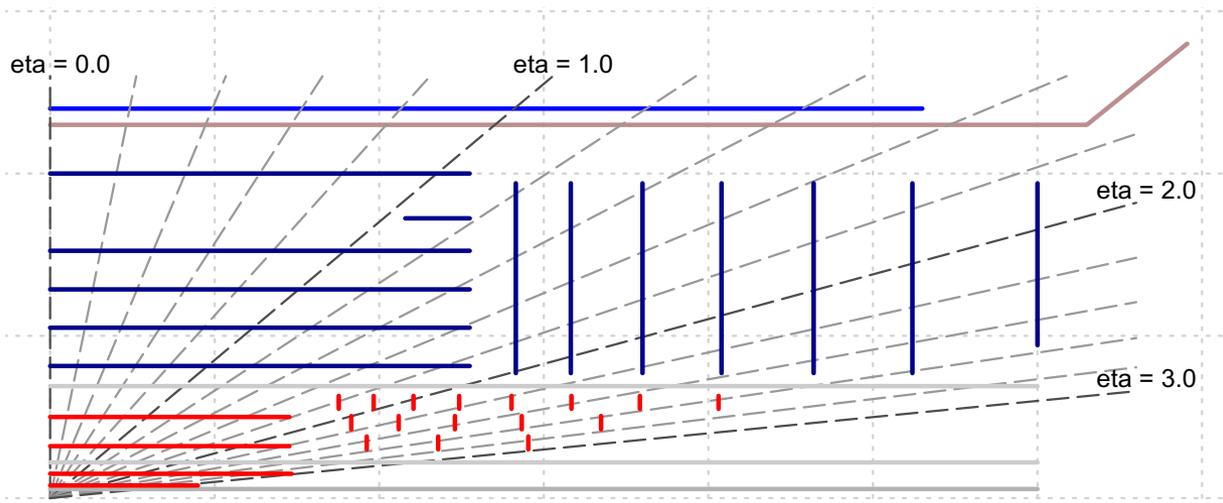
# *INNER TRACKER LAYOUT IN STUDIO*

**Il design ottimale per ITk sarà un compromesso tra performance di tracking, ottimizzazione dei costi, semplicità di costruzione e installazione**

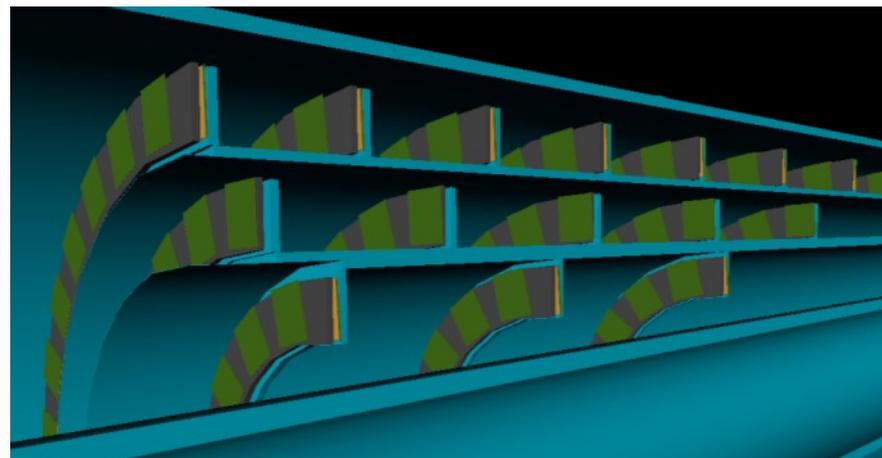
- Attualmente sono in studio diverse tipologie di layout
  - Aumento volume dei pixel
  - Transizione Barrel-EndCap ridotta
  - Estensione alto  $\eta$
- I layout possono essere tra loro combinati.
- Il layout dovrà essere pronto prima del TDR delle Strip (2016).



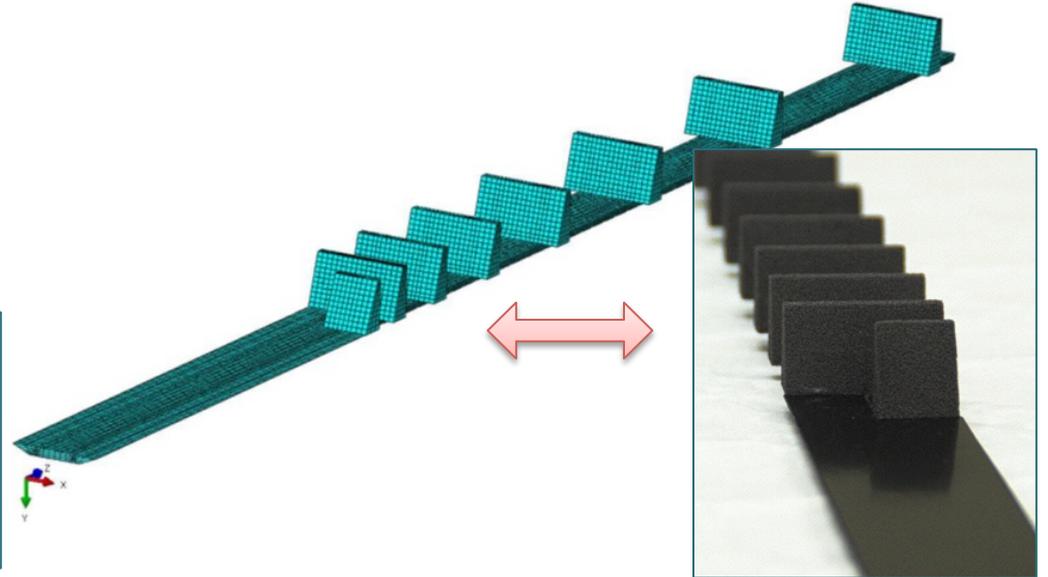
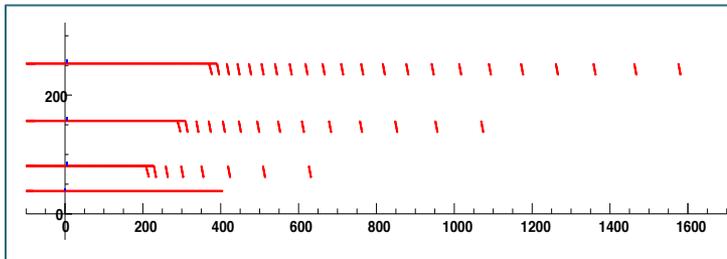
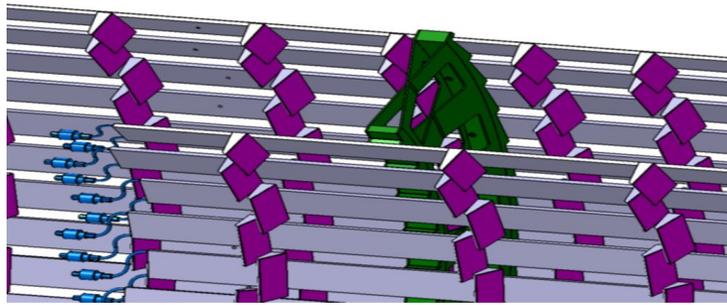
# ENDCAP RING LAYOUT



- 3 tipologie di anelli con differenti raggi, ciascuno dei quali monta un anello di moduli con 4 Front-End (Quad).
- Almeno 16 ring per EndCap sono necessari per ottenere una copertura fino a  $\eta = 2.7$



# ALPINE LAYOUT

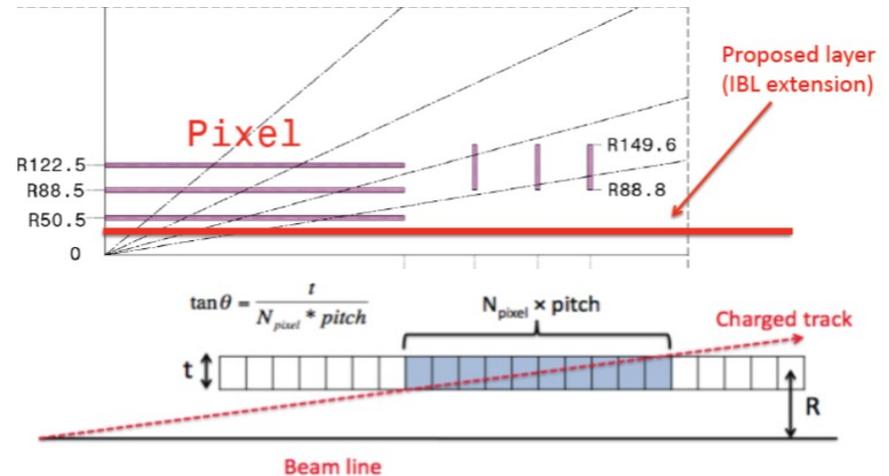
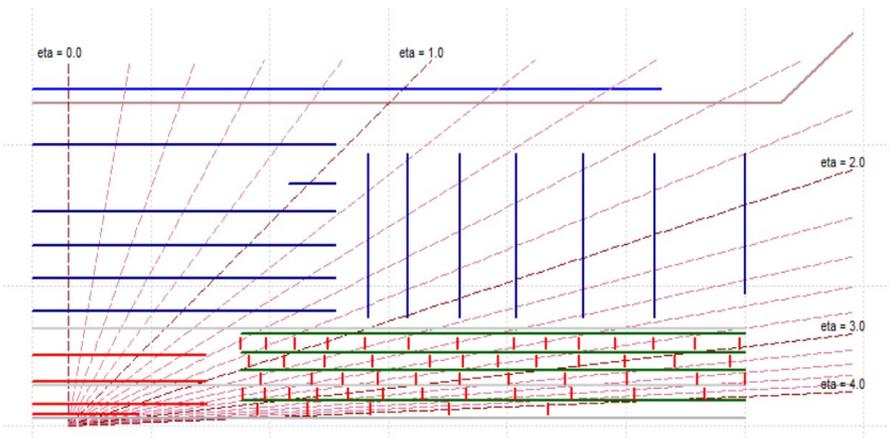


L'alpine layout parte con l'idea che i sensori dovrebbero essere idealmente perpendicolari alla traccia che arriva dal centro del fascio.

- Non ci sono gap tra Barrel ed EndCap, quindi nessun materiale, questo riduce l'eventuale perdita di hits
- I sensori sono orientati in modo ottimale rispetto al fascio
  - **Pro:** L'orientazione dei moduli è ottimizzata per ciascun layer
  - **Contro:** Raffreddamento problematico e accesso ai sensori difficoltoso in caso di problemi durante il montaggio degli stave

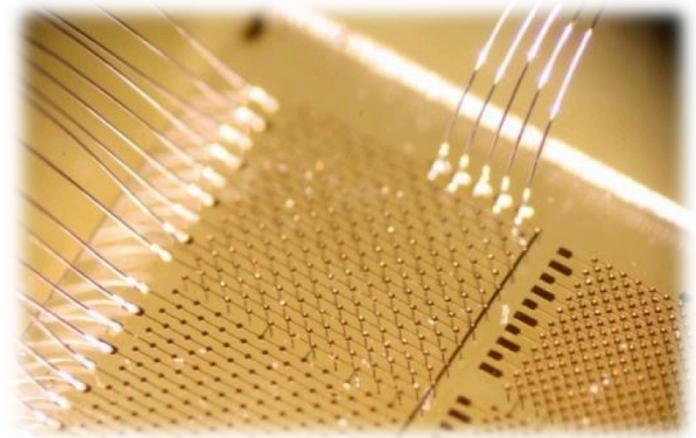
# LAYOUT AD ALTO $\eta$

- Attualmente in corso diversi studi per l'estensione del tracker ad alti valori di  $\eta$  (fino a 3-4).
- Questo porterebbe beneficio ad alcuni canali di fisica in avanti (ad esempio la produzione di Higgs per Vector Boson Fusion).
  - Questo potrebbe essere fatto con più dischi che coprono le regioni ad alta rapidità o con un lungo layer molto vicino alla beam pipe.



# ***RIVELATORE A PIXEL***

***SENSORI, ELETTRONICA DI FRONT-END E MODULI IN SVILUPPO***



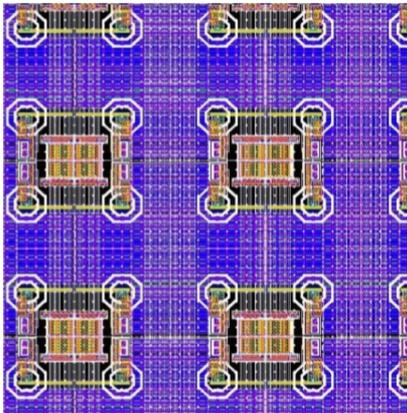
# ELETTRONICA DI FRONT-END

Quando e' stata scritta la Letter of Intent nel 2013 lo schema di trigger previsto era di 500 kHz a L0, seguito da 200 kHz a L1

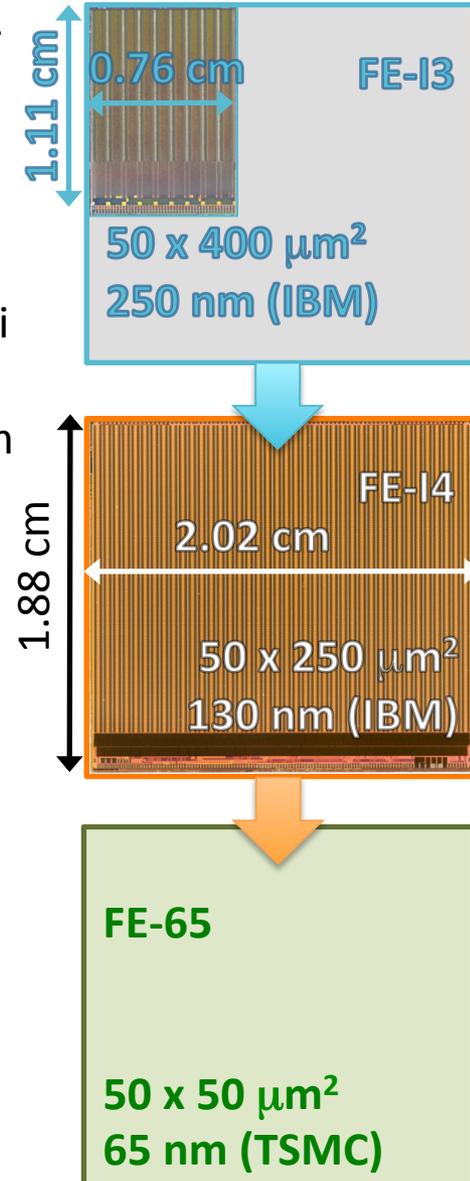
- In questo contesto l'esistente chip di Front-End (FE-I4 a 130 nm) usato per l'Insertable B-Layer (4° strato di pixel installato in ATLAS nel 2014) poteva essere una buona soluzione per i layer piu esterni
  - Attualmente si sta considerando un nuovo readout a 1 MHz supportato anche dal futuro non chiaro del processo a 130 nm fatto da IBM

L'idea è quella di adottare chip a 65 nm in tutti layer

## NUOVO FE A 65 NM IN STUDIO DALLA COLLABORAZIONE RD53

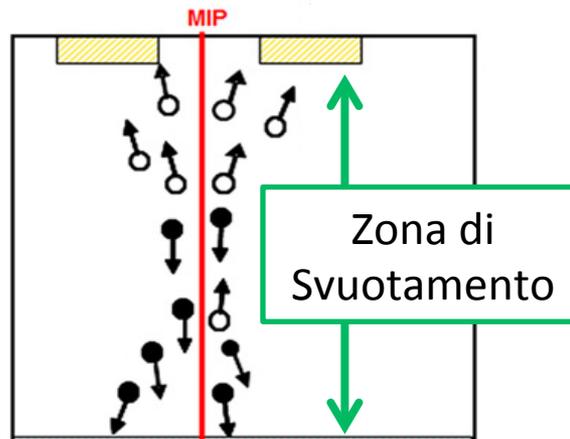


- Cell size:  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$
- Compatibile con sensore pixel di  $50 \times 50$  e  $25 \times 100 \mu\text{m}^2$
- Soglia a 1000 e-
- Alimentazione costante, può operare solo una frazione dei canali
- Algoritmi di clustering on-chip (per ridurre l'occupanza di banda passante)
- 2 Gb/s serial output
- Primo Prototipo in 2 anni



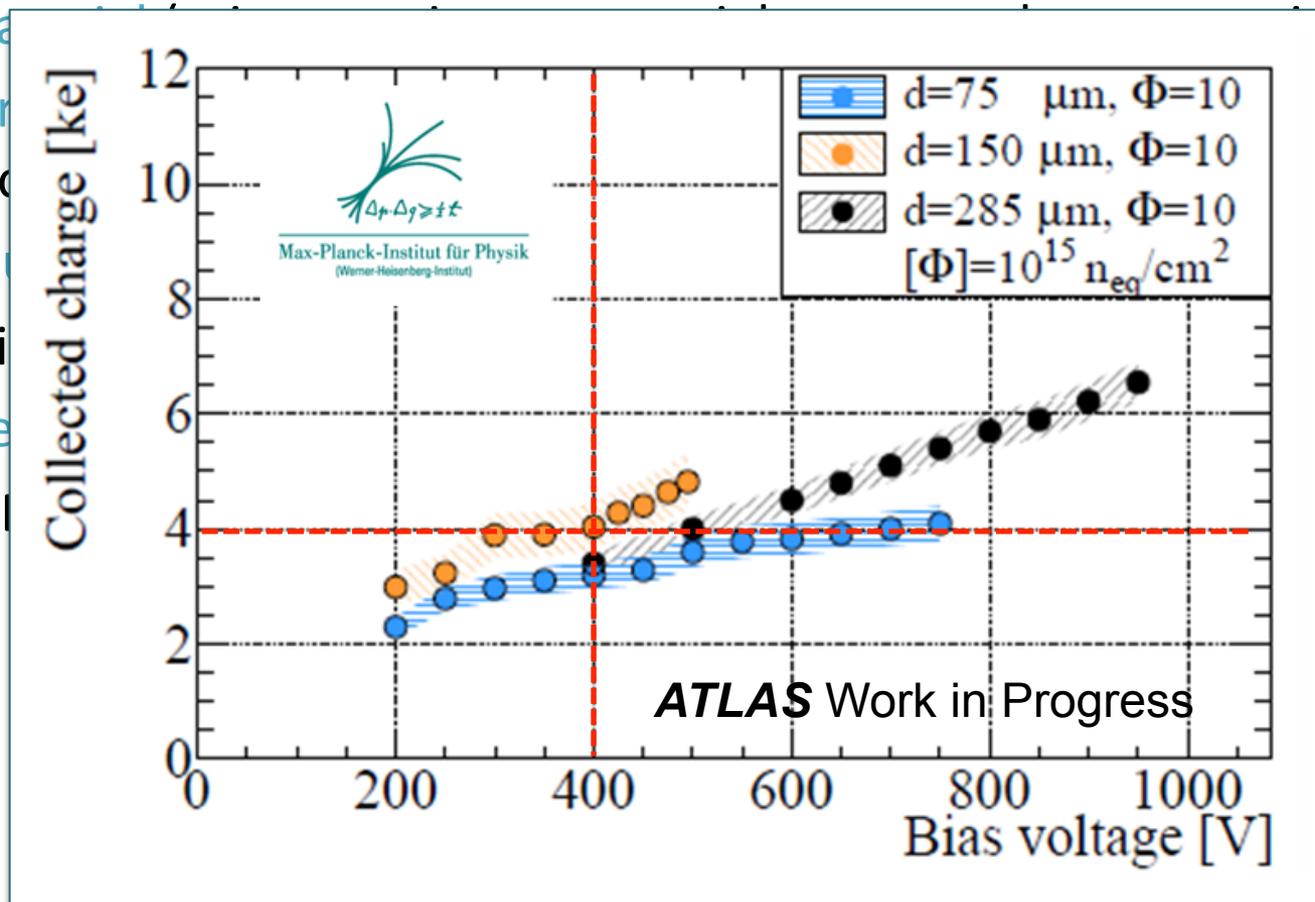
# SENSORI PLANARI

- Bulk material (n-in-n e n-in-p, potenzialmente economici)
- Spessore dei sensori (150, 100  $\mu\text{m}$  o meno): meno materiale, veloce e più efficiente raccolta di carica, dimensione dei cluster più piccola
- Pixel più piccoli (25 x 500  $\mu\text{m}^2$  invece degli attuali 50 x 250  $\mu\text{m}^2$ )
- In studio sensori con bordi sottili.
- Completa efficienza dopo irraggiamento.
  - Dimostrata fino a  $2 \times 10^{16} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$  a 1-1.5 kV.



# SENSORI PLANARI

- Bulk ma
- Spessori
- più effie
- Pixel pi
- In studi
- Comple



i)  
eloce e  
ola  
2)

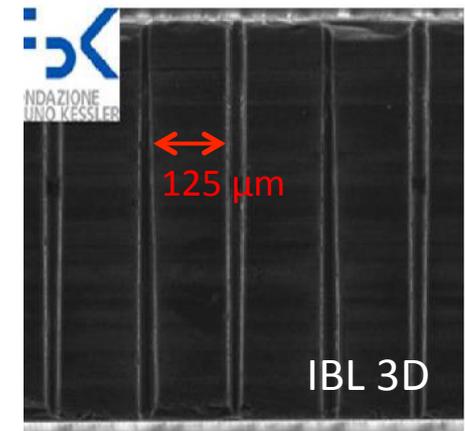
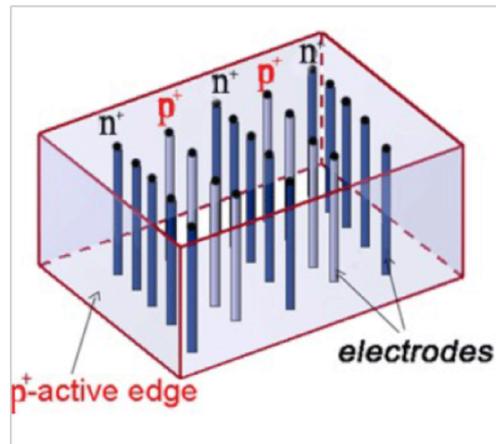
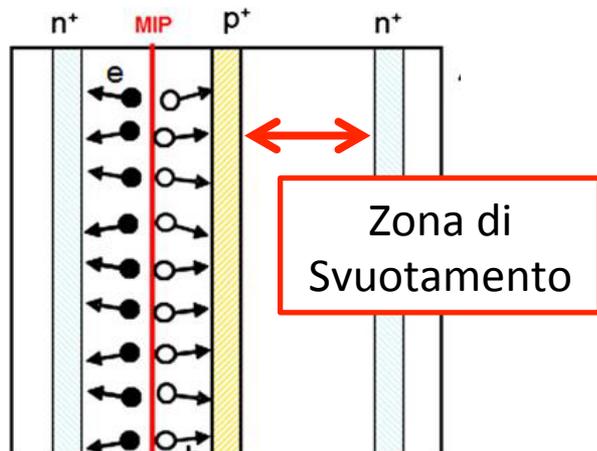
**A PARITÀ DI BIAS, MINORE CARICA RACCOLTA AL DIMINUIRE DELLO SPESSORE**

# SENSORI 3D

Sono costituiti da **un array di colonne** di entrambi i drogaggi che hanno la funzione di **elettrodi**. Quest'ultimi **attraversano il substrato di silicio** perpendicolarmente alla superficie.

Utilizzati per la prima volta in un esperimento di fisica delle alte energie nell'Insertable B-Layer (IBL) che ha confermato con successo tutte le potenzialità di questa tecnologia.

**IBL 3D: PANORAMICA**



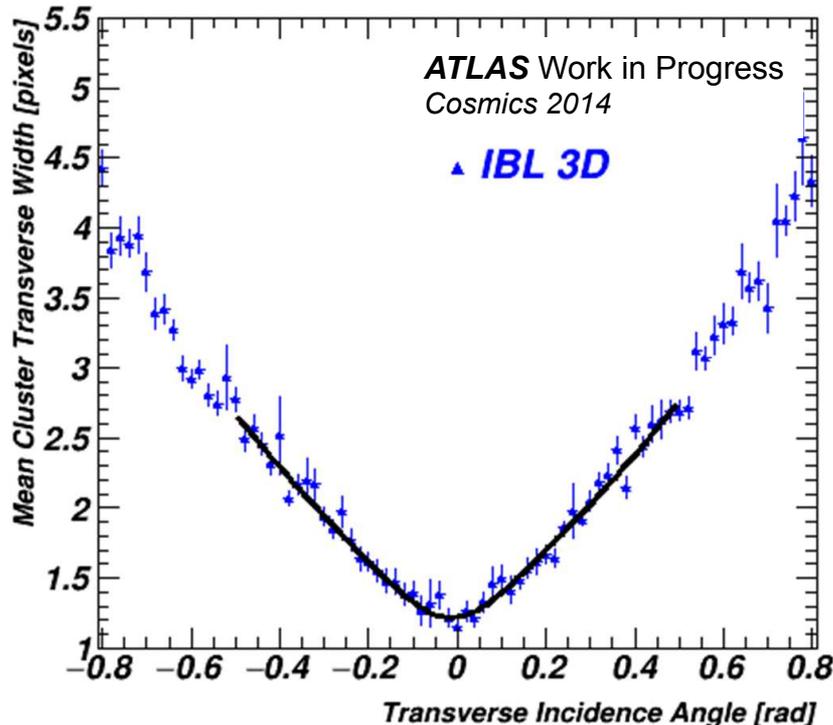
- Bassa tensione di svuotamento a fine vita
  - ↳ 150 V Vs 1000 V Planari
- Minore distanza tra gli elettrodi
  - ↳ Raccolta carica piu' efficiente e veloce (~1 ns Vs ~ 10 ns dei Planari)
- Il bordo e' un elettrodo: bordi attivi

# SENSORI 3D

Sono costituiti da **un array di colonne** di entrambi i drogaggi che hanno la funzione di **elettrodi**. Quest'ultimi **attraversano il substrato di silicio** perpendicolarmente alla superficie.

Utilizzati per la prima volta in un esperimento di fisica delle alte energie nell'Insertable B-Layer (IBL) che ha confermato con successo tutte le potenzialità di questa tecnologia.

**IBL 3D: ANGOLO DI LORENTZ**



## IBL OPERA IN UN CAMPO MAGNETICO COSTANTE DI 2 T GENERATO DAL MAGNETE SOLENOIDALE DI ATLAS

- Il percorso della carica all'interno del sensore è diretto lungo la direzione  $r - \phi$  del rivelatore per i planari e lungo le colonne per i sensori 3D
- Per i planari la dimensione minima dei cluster è raggiunta quando l'angolo d'incidenza della particella coincide con quello di drift
- Il valore dell'angolo di Lorentz dei sensori 3D di IBL è compatibile con 0 come aspettato

# SENSORI 3D

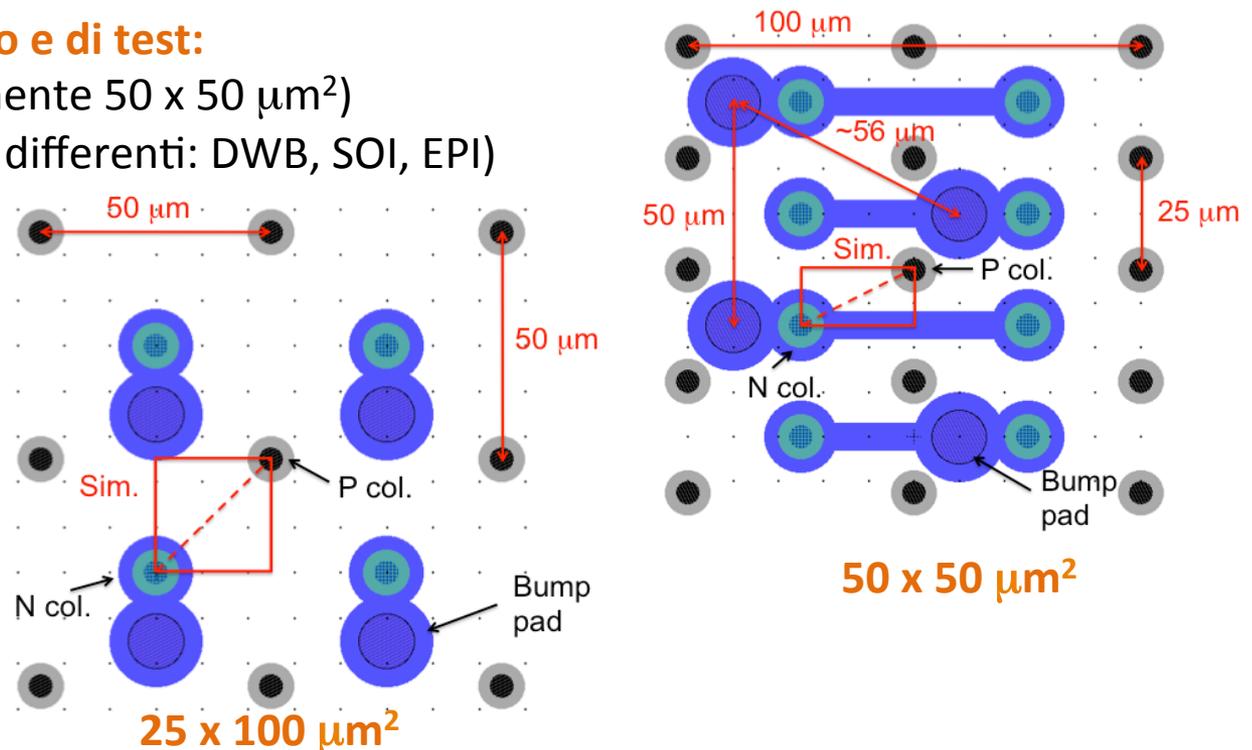
Sono costituiti da **un array di colonne** di entrambi i drogaggi che hanno la funzione di **elettrodi**. Quest'ultimi **attraversano il substrato di silicio** perpendicolarmente alla superficie.

Utilizzati per la prima volta in un esperimento di fisica delle alte energie nell'Insertable B-Layer (IBL) che ha confermato con successo tutte le potenzialità di questa tecnologia.

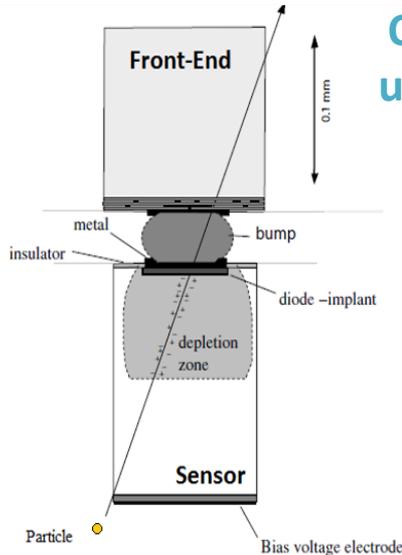
R&D

**Attualmente in fase di studio e di test:**

- Pixel più piccoli (preferibilmente  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ )
- Sensori più sottili (Tecniche differenti: DWB, SOI, EPI)
- Bordi sottili o attivi



# IBRIDIZZAZIONE



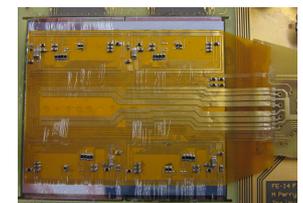
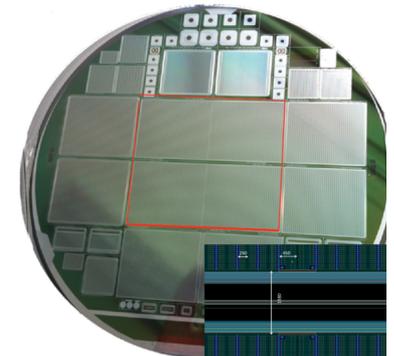
Quando una particella ionizzante attraversa il sensore, viene generata una carica che si muove nella zona di svuotamento del semiconduttore (giunzione P-N polarizzata) sotto l'azione del campo elettrico.

Per ogni pixel il segnale prodotto passa attraverso un connessione metallica (bump) all'elettronica di lettura (Front-End).

**Questo processo di unione tra sensore e Front End prende il nome «Bump-Bonding»**

## MODULI QUAD E HEX

- Per IBL sono stati usati moduli a singolo e doppio chip di FE
- Per abbattere i costi dovuti alle ampie superfici da coprire nei layer più esterni sono in sviluppo 4 (6) chip di FE collegati tramite bump ad un sensore di  $\sim 4 \times 4 \text{ cm}^2$  ( $6 \times 4 \text{ cm}^2$ ). Questi dovrebbero essere usati anche negli anelli (Ring Layout)
- Differenti soluzioni sono attualmente in studio per coprire le zone tra i chip (pixel lunghi) e il possibile bow generato dal processo di bump-bonding

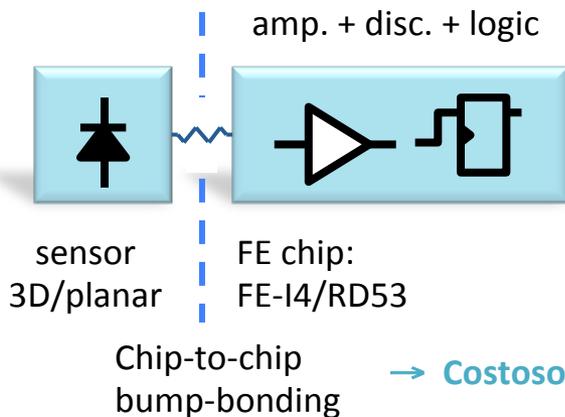


# VERSO NUOVE FORME D'IBRIDIZZAZIONE

## BUMP-BONDING

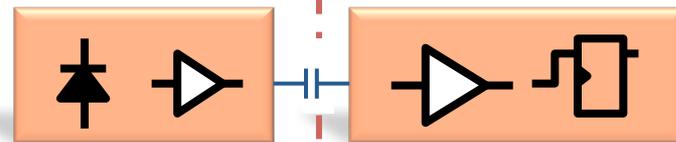
Vs

## ACCOPPIAMENTO CAPACITIVO



diodo + amp. + disc.  
+ ToT addr. encode

amp. + disc. + logic



### Pro

Tecnologia matura  
Radiation hard  
Moduli Multi chip  
(Ad Esempio Quad)

### Contro

Costo Sensore/bump  
4"÷6" wafer  
Risoluzione spaziale  
Costo/yield delf BB

### Pro

8" (or 12") HV-CMOS wafers  
"Standard" IC Processo  
BB piu economico  
(da dimostare)  
Pixel piu piccoli → Risoluzione

### Contro

Nuova tecnologia  
Minore carica (800÷1500 e)  
Chip singolo  
(multi-chip difficoltoso)

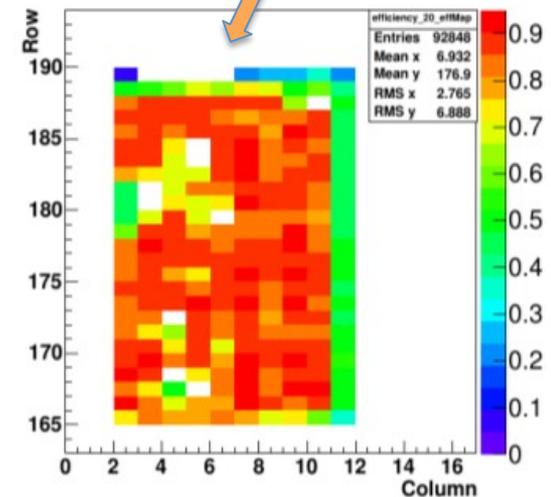
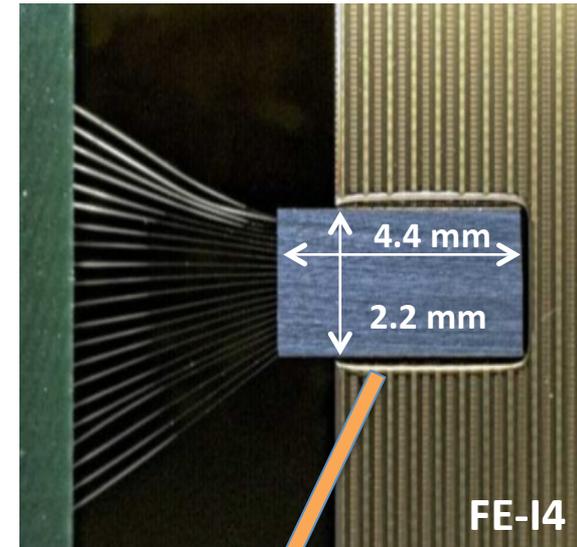
# HV-CMOS

## Idea:

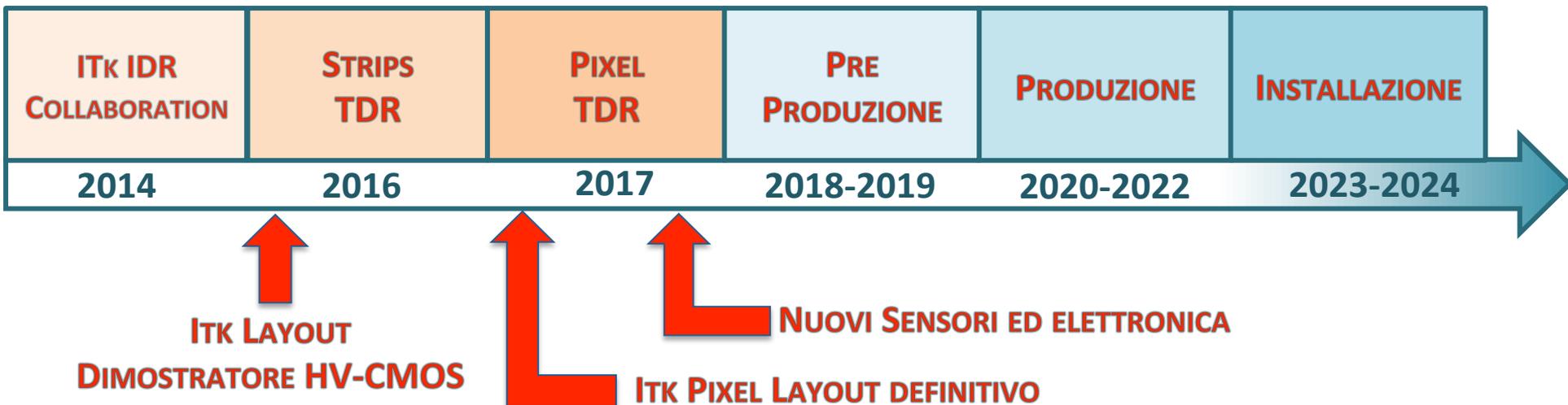
- Usare la tecnologia standard (HV-) CMOS per costruire rivelatori di particelle
- Alto voltaggio per svuotare il volume del sensore (50-100 V)
  - La carica è raccolta per drift
- **Diodo “Smart”**
  - **Pre-Amplificazione già a livello di sensore**
  - Gli HV-CMOS possono essere accoppiati capacitivamente al FE attraverso resine o colle
- **Radiation hard** fino a  $10^{15} n_{eq}/cm^2$

**PRIMI PROTOTIPI (864 PIXEL DI  $33 \times 125 \mu m^2$ ) IN TEST HANNO OTTENUTO RISULTATI INCORAGGIANTI.**

**PROTOTIPI FULL SCALE (FE-I4) IN 8-12 MESI**



# CONCLUSIONI



- ITk sarà una sfida tecnologica e produttiva
- **La comunità italiana ITk è molto attiva su diversi fronti:**
  - Sviluppo di sensori (CMOS e 3D)
  - Bump-Bonding (Selex)
  - Elettronica e DAQ
  - Meccanica
  - Simulazione



***SPARE***

---

# RIVELATORE ATLAS IN RUN 1

## Muon spectrometer

$\mu$  Tracking  
Toroid Magnets

### Precision Tracking:

- MDT (Monitored drift tubes)
- CSC (Cathode Strip Chambers)

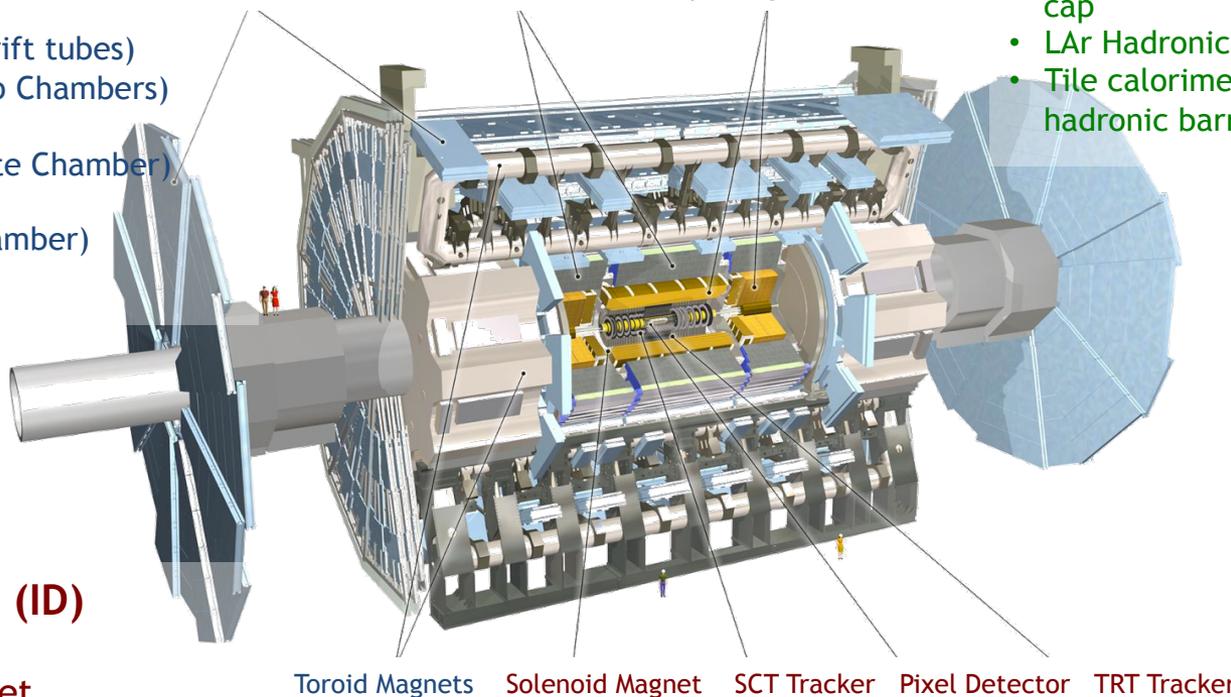
### Trigger:

- RPC (Resistive Plate Chamber) Trigger
- TGC (Thin Gas Chamber)

Muon detectors

Tile Calorimeter

Liquid Argon Calorimeter



Toroid Magnets

Solenoid Magnet

SCT Tracker

Pixel Detector

TRT Tracker

## Calorimeter system

EM and Hadronic energy

- Liquid Ar (LAr) EM barrel and end-cap
- LAr Hadronic end-cap
- Tile calorimeter (Fe-scintillator) hadronic barrel

## Inner Detector (ID)

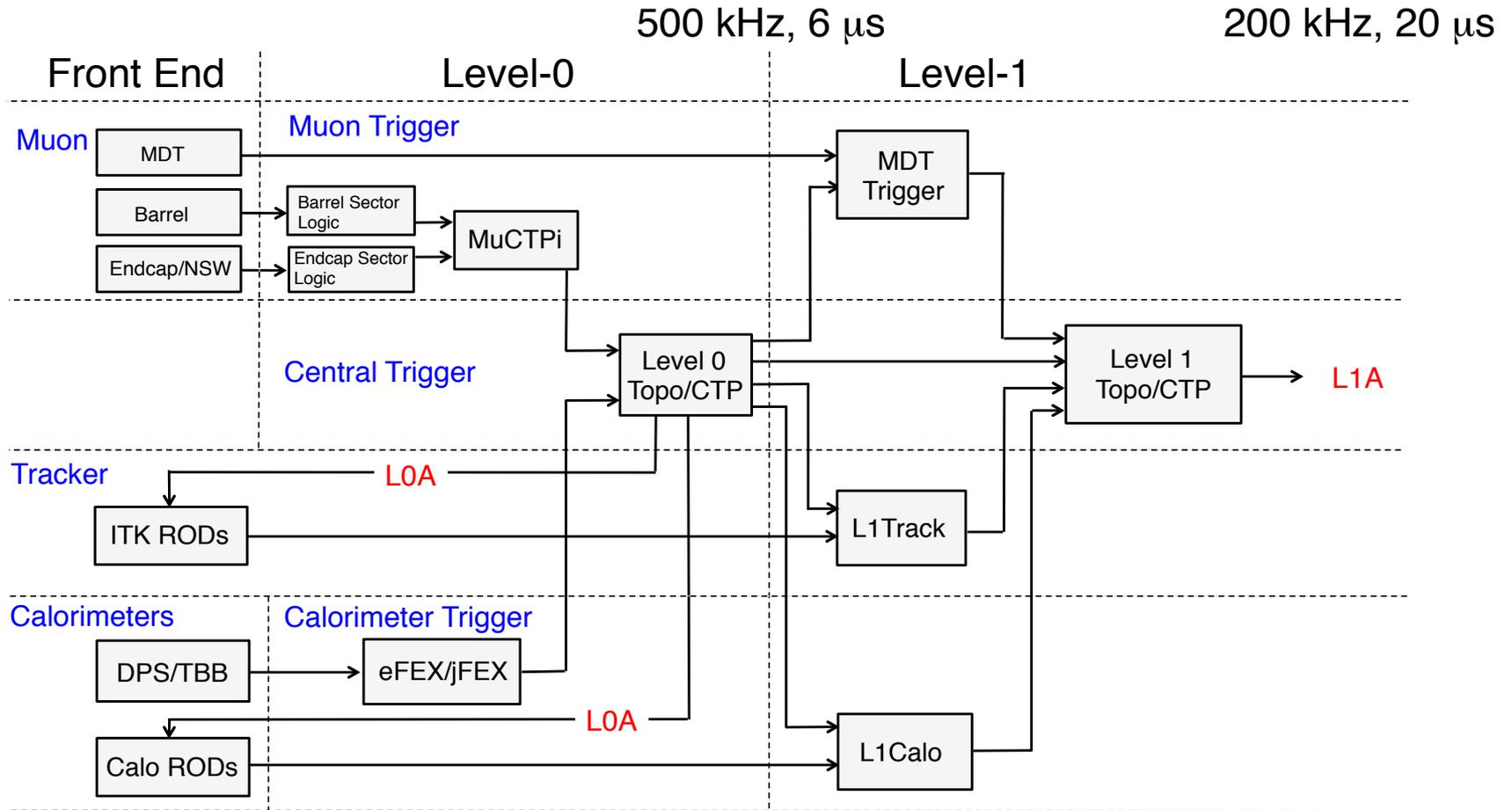
Tracking  
2T Solenoid Magnet

- Silicon Pixels  $50 \times 400 \mu\text{m}^2$
- Silicon Strips (SCT)  
80  $\mu\text{m}$  stereo
- Transition Radiation Tracker (TRT)  
up to 36 points/track

## Three Level Trigger system

- L1 - hardware: 70 kHz, 2.5  $\mu\text{s}$  latency
- L2 - software: 6.5 kHz, 10 ms latency
- EF - software: 600 Hz, 1-2 s latency

# TRIGGER IN LOI



# ESEMPI DI LAYOUT IN STUDIO

