



Rivelatori e Apparati

Lezione 1 – Introduzione corso

“Rivelatori a Semiconduttore e Apparati per la Fisica Nucleare e Subnucleare”

- Insegnamento *a scelta*
- 1° anno Magistrale (aperto anche agli studenti del 2° anno M.)
- 4h a settimana per un totale di 52h = 13 settimane
 - Ce ne sono 13 prima di Natale, ma salteremo 8 Ottobre → prepariamoci a recuperarla!
 - Completamento del Corso previsto entro Natale
- Lezioni frontali + dimostrazioni di laboratorio & discussione articoli
 - Alcune esperienze saranno svolte in lab. 225
- Esame orale su contenuti insegnamento e applicazioni
 - Data da concordare individualmente
- Materiale (note e presentazioni) aggiornato su moodle durante il corso

- Orario: Lun 9-11, Mar 14-16

- *Contattatemi qui:* giacomo.contin@units.it – stanza 122

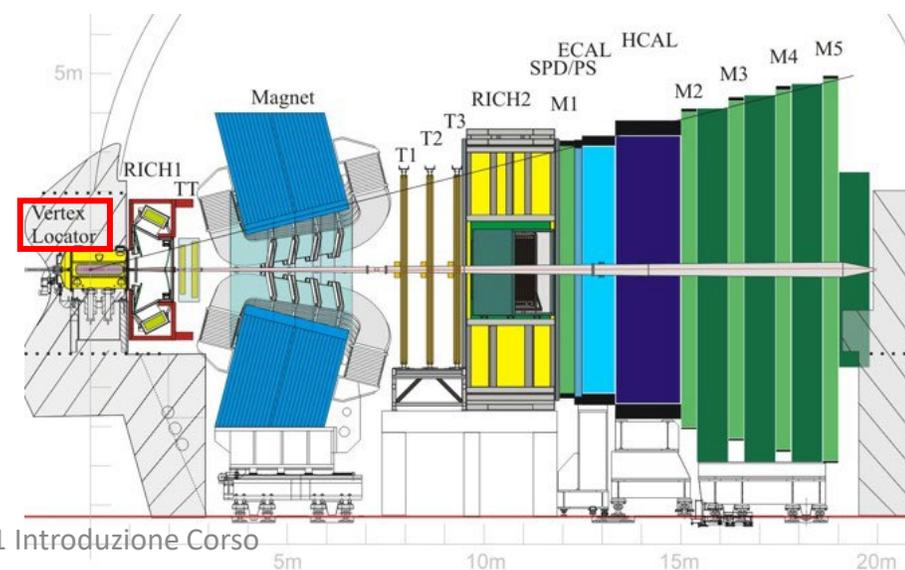
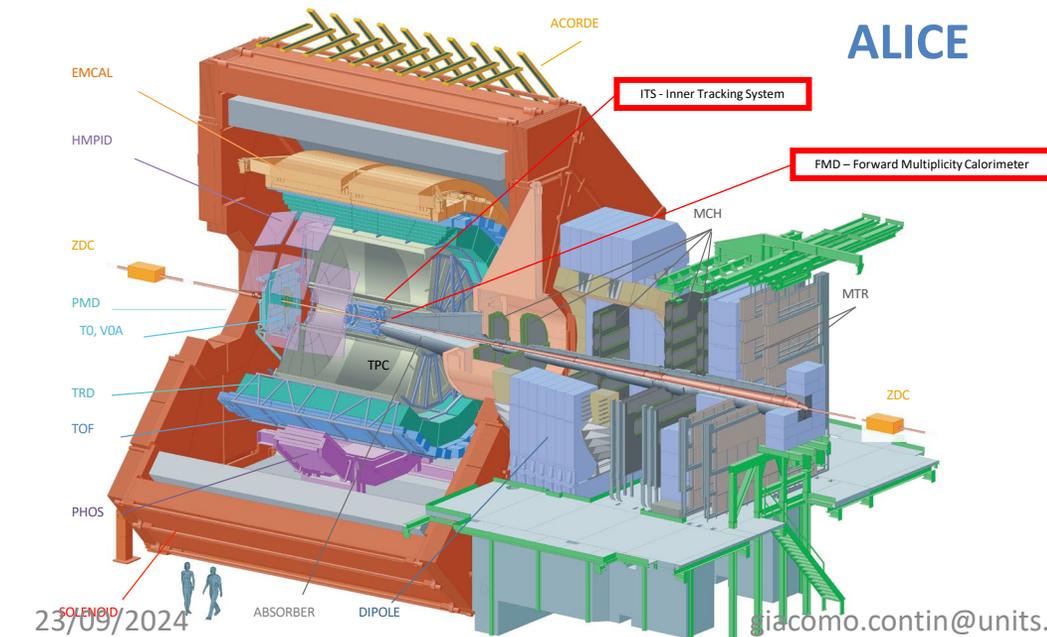
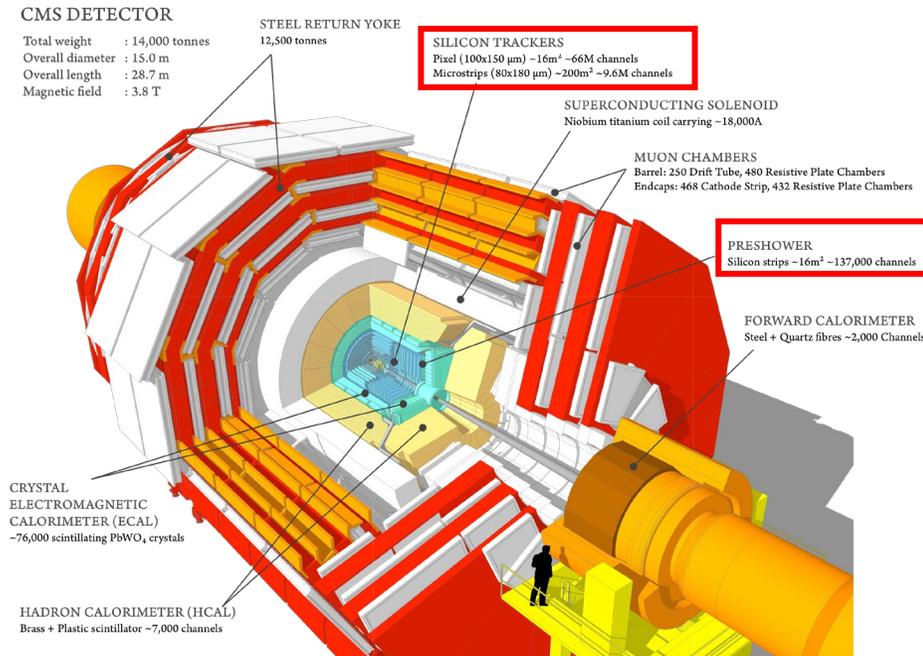
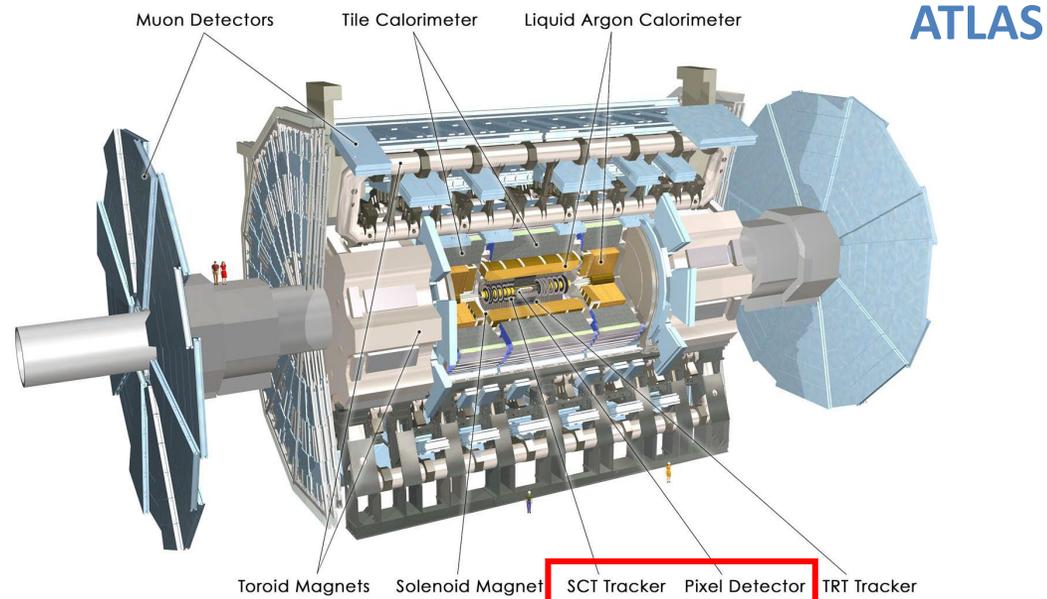
Programma del corso (in sintesi)

- Perdita di energia e Scattering Coulombiano
- Semiconduttori intrinseci e drogati
- Giunzione pn inversamente polarizzata
- Raccolta della carica
- Corrente di perdita o leakage
- Il rumore nei rivelatori a semiconduttore
- Preamplificatori e formatori del segnale
- Contatto Schottky e struttura MOS
- Transistor Bipolari e Unipolari
- Rivelatori ad accoppiamento di carica
- Rivelatori a microstrisce di silicio
- Rivelatori a deriva di silicio
- Pixel Ibridi e Monolitici
- Rivelatori di silicio per misure di tempo
- Semiconduttori nei calorimetri
- Fabbricazione sensori
- Danni da radiazione
- Apparati di rivelazione e sistemi di servizio

Testi consigliati corso Rivelatori e Apparati

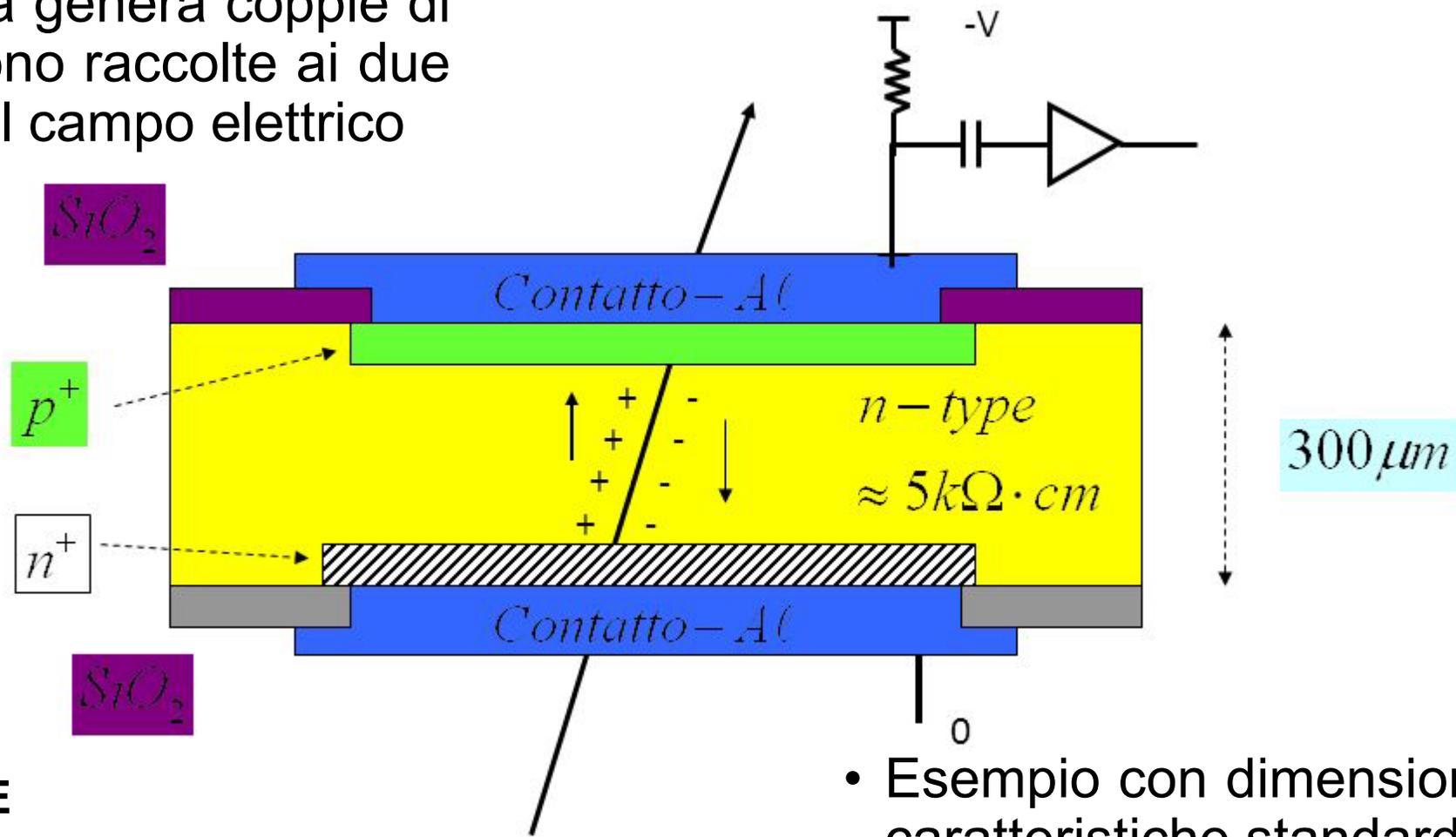
- H. Spieler, “Semiconductor Detector Systems”
- L. Rossi, P. Fischer, T. Rohe, N. Wermes, "Pixel Detectors. From Fundamentals to Applications”
- W.R.Leo, “Techniques for nuclear and particle physics experiments”
- C. Leroy, P.-G. Rancoita, “Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection”
- G. Lutz, “Semiconductor Radiation Detectors”
- C. Grupen, B. Shwartz, “Particle detectors”

I rivelatori degli esperimenti di LHC – Ruolo dei rivelatori al silicio è fondamentale



Per cosa li usiamo: rivelare il passaggio

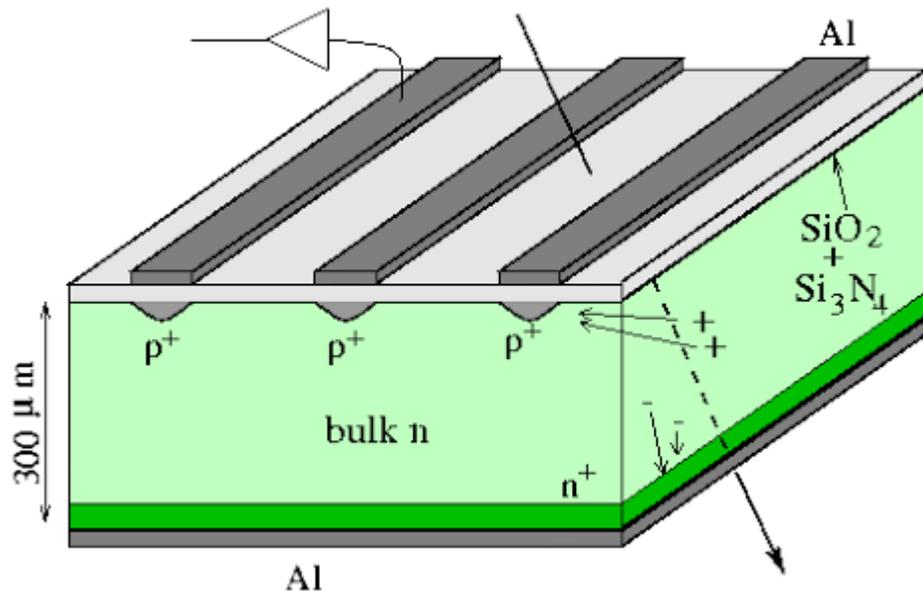
- La particella carica genera coppie di cariche che vengono raccolte ai due capi per **deriva** nel campo elettrico



GIUNZIONE SEMPLICE

- Esempio con dimensioni e caratteristiche standard

Per cosa li usiamo: misurare la posizione (1D)

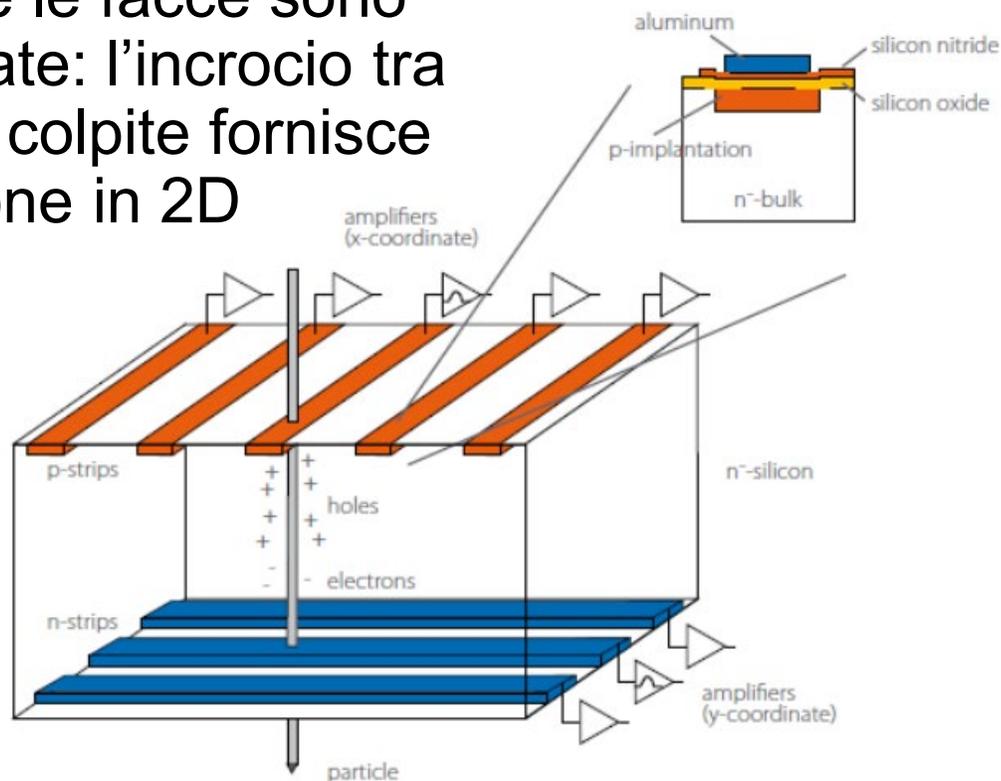


- La superficie del sensore e' segmentata in strisce parallele lungo una direzione: la posizione dei contatti che raccolgono e trasmettono le cariche corrisponde alla coordinata della particella
- La risoluzione spaziale e' data dal passo tra strisce, e puo' essere migliorata misurando l'ampiezza dei segnali

MICROSTRISCE MONOFACCIA

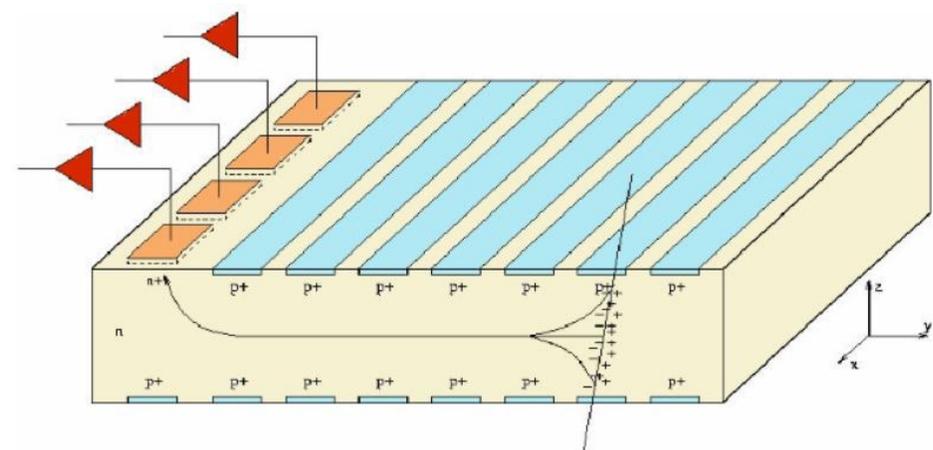
Per cosa li usiamo: misurare la posizione (2D)

- Entrambe le facce sono segmentate: l'incrocio tra le strisce colpite fornisce la posizione in 2D



MICROSTRISCE A DOPPIA FACCIA

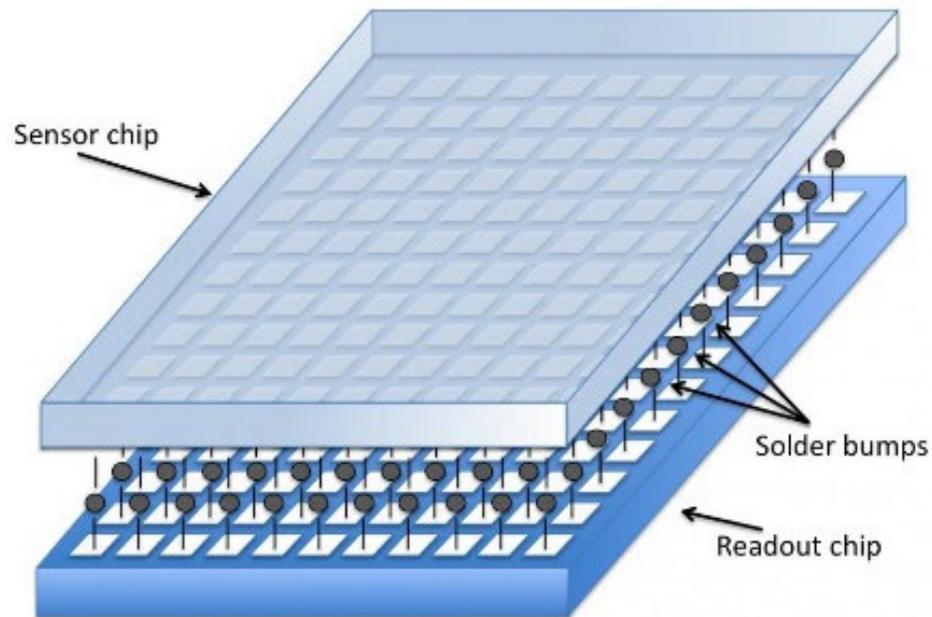
- La seconda coordinata può essere ricavata dal tempo di deriva delle cariche fino al secondo elettrodo



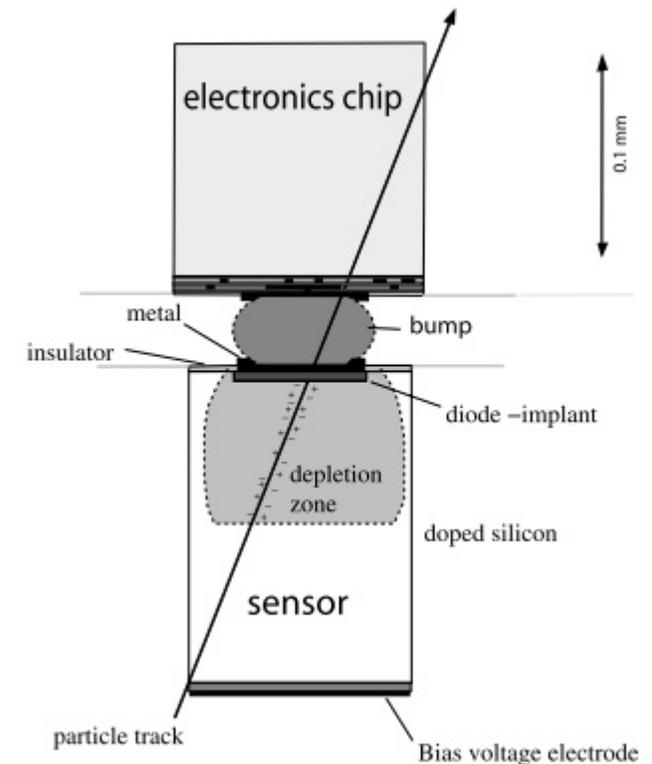
CAMERA A DERIVA DI SILICIO

Per cosa li usiamo: misurare la posizione (2D)

- Posso segmentare la superficie del sensore nelle due direzioni formando una matrice di pixel
- L'elettronica deve essere connessa direttamente sopra ogni pixel: serve un secondo chip, accoppiato

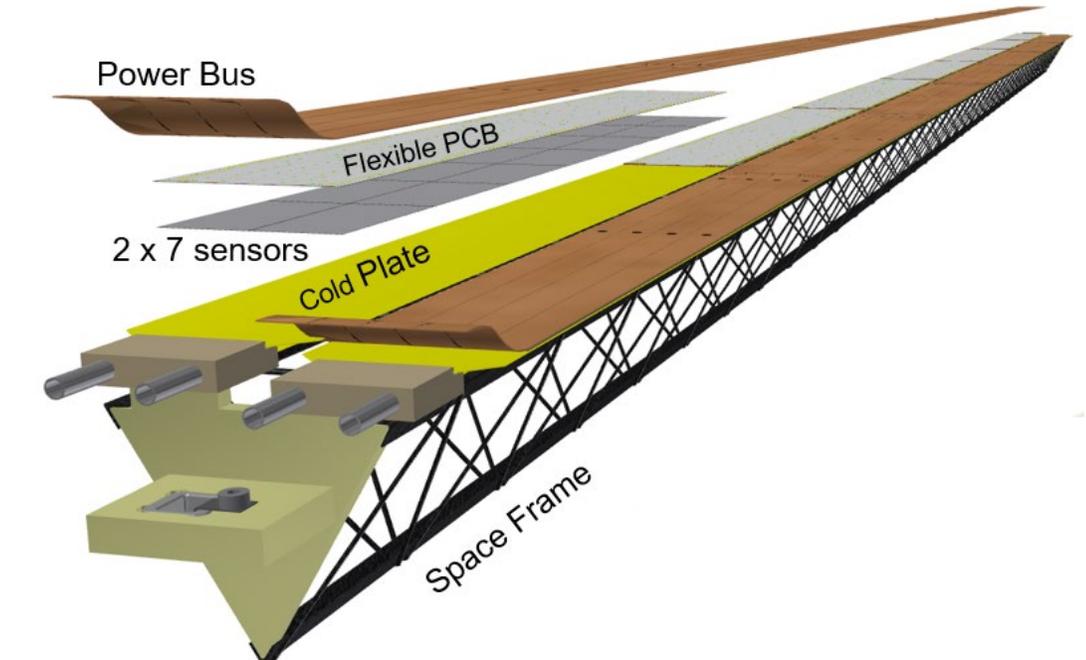


PIXEL IBRIDI

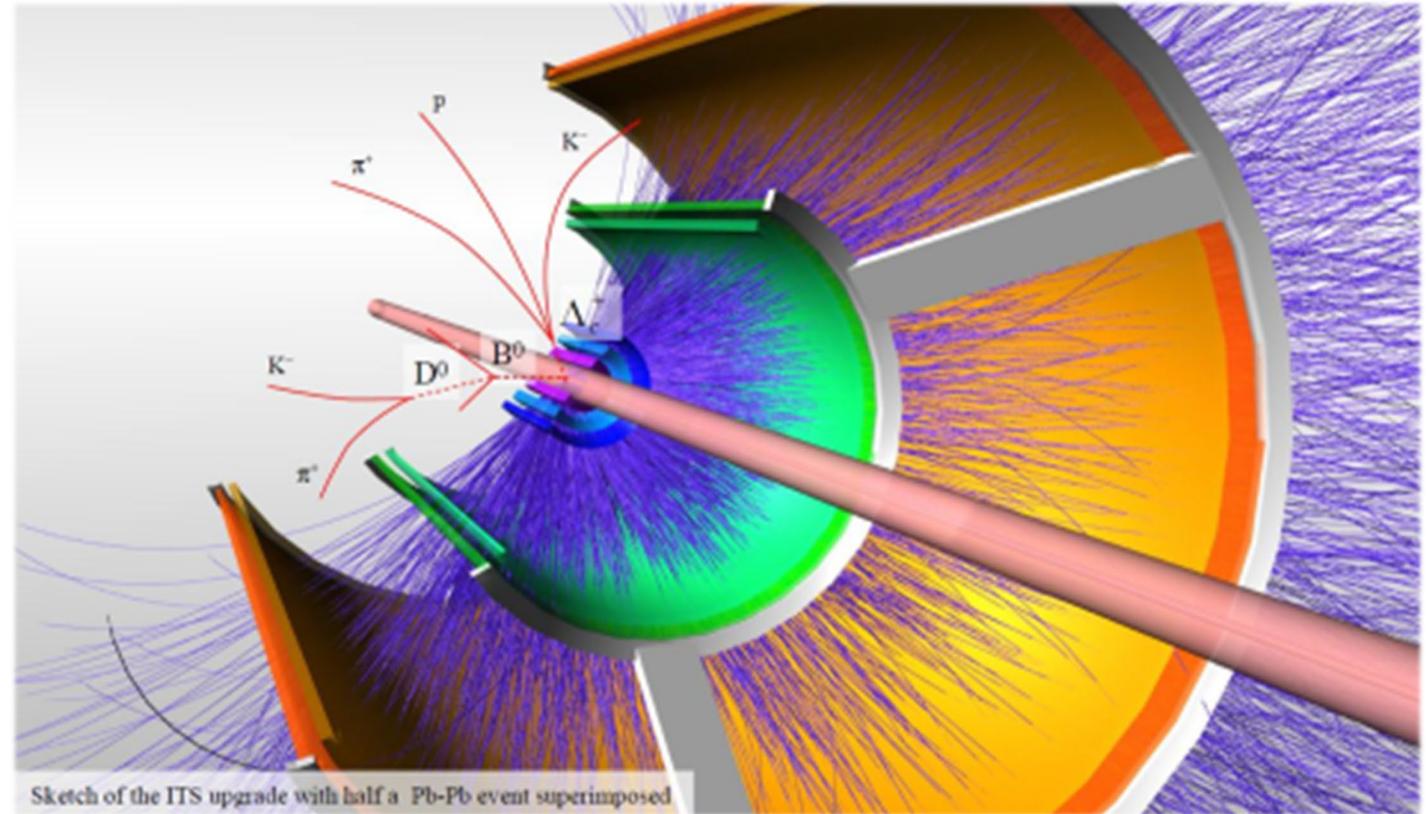
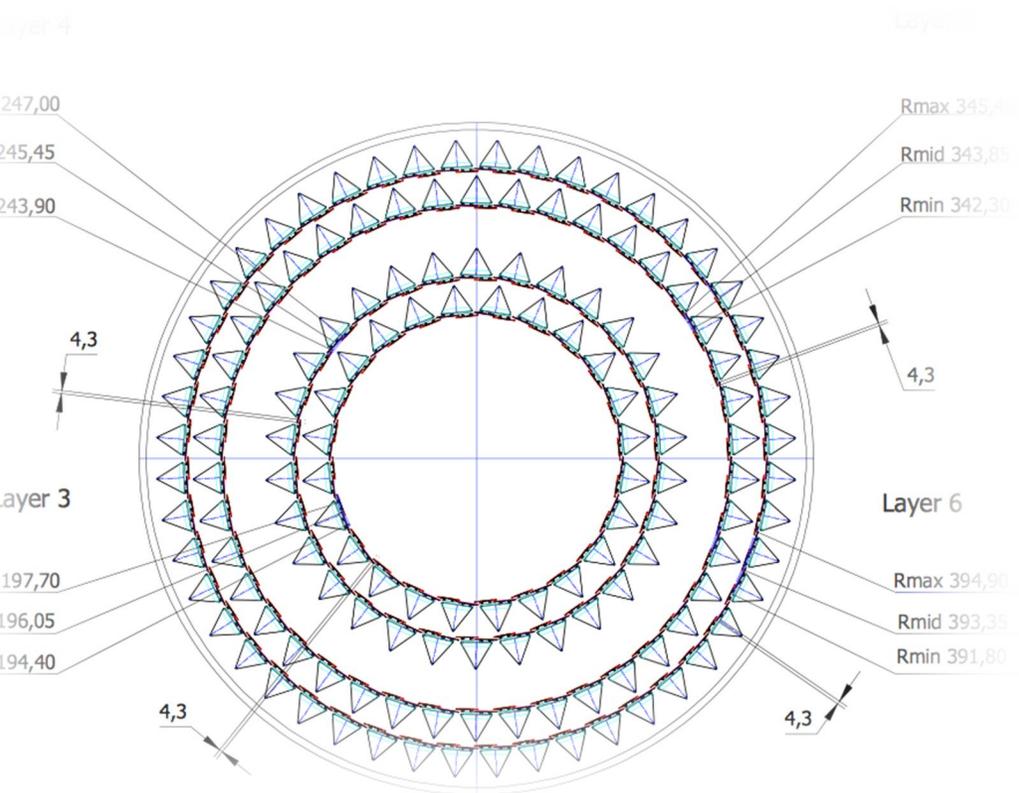


Il 'sistema' rivelatore

- Oltre al sensore:
 - Elettronica di lettura
 - Interconnessioni elettriche
 - Supporti meccanici
 - Apparati di raffreddamento
 - Propagazione dati
 - Sistemi di protezione
- ... con effetti annessi e connessi:
 - Rumore, potenza assorbita, materiale aggiuntivo, aspettativa di vita, costi, difficoltà di assemblaggio, livello qualitativo ...

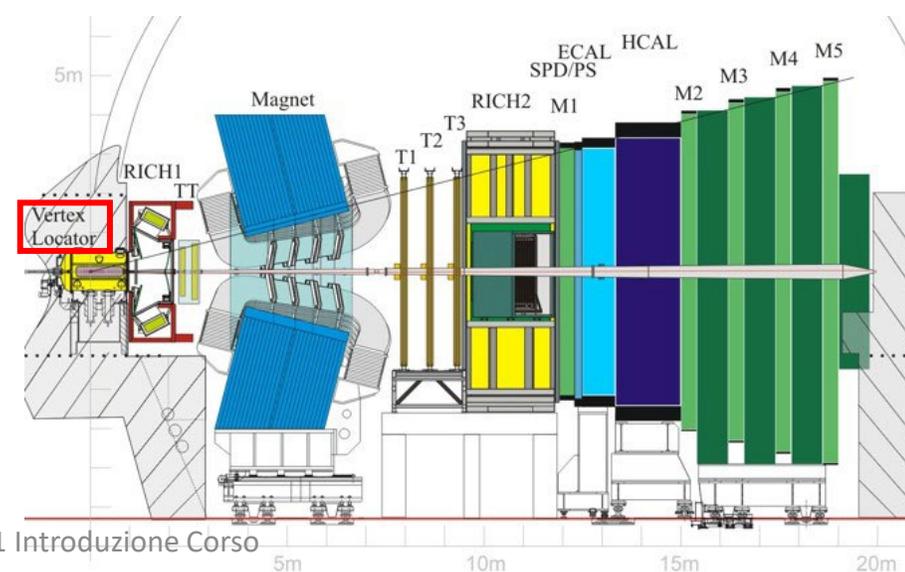
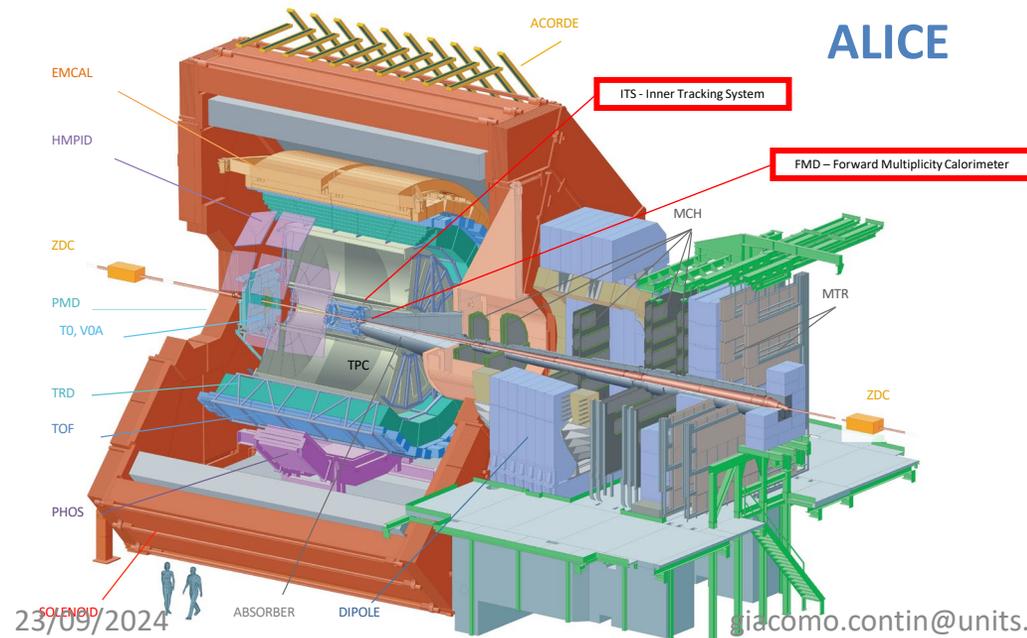
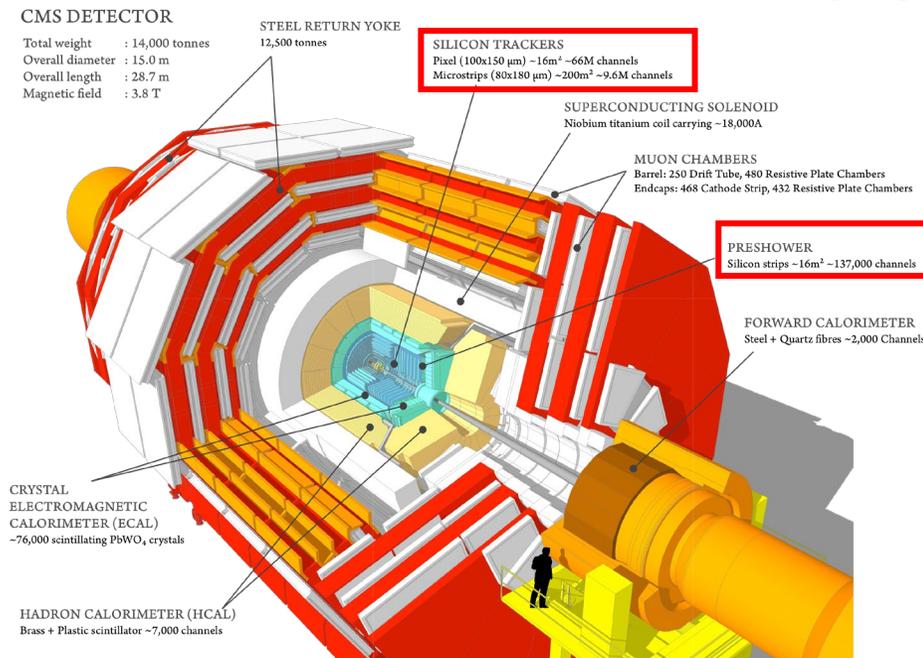
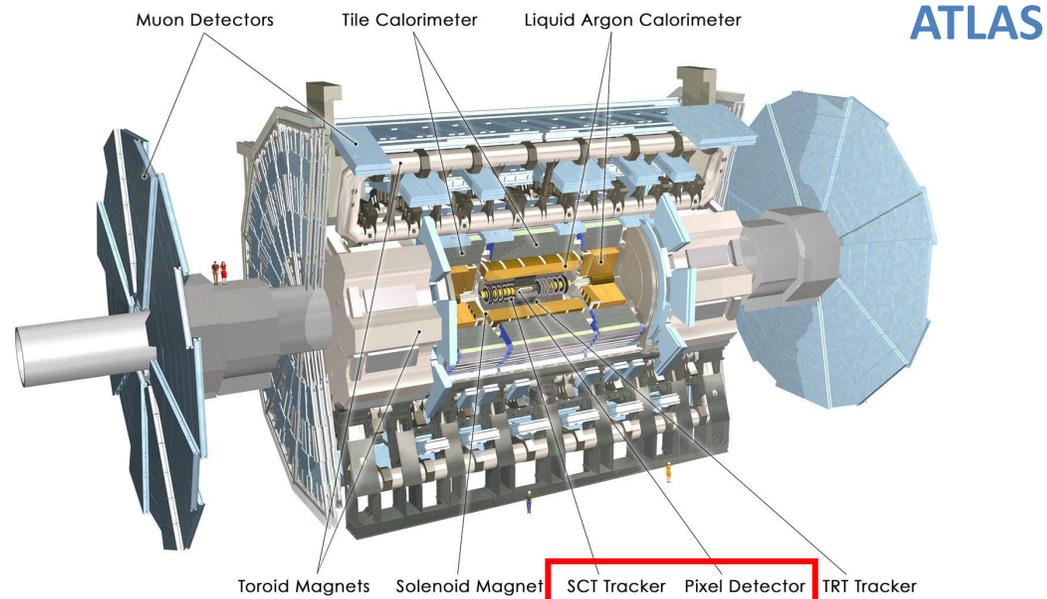


Per cosa li usiamo: seguire la traiettoria...



- Disponendo i rivelatori in modo da formare cilindri concentrici attorno alla linea del fascio possiamo “seguire” la traccia mentre si allontana

I rivelatori degli esperimenti di LHC – Ruolo dei rivelatori al silicio e' fondamentale



Esempi di rivelatori al silicio: canali e superficie

Esperimento	Tecnologia usata	Canali [M]	Superficie [m ²]	m ² /Mch
ATLAS	Pixel ibridi	80	1.7	0.021
	+ Pixel ibridi (Insertable B-Layer)	12	2	0.170
	Micro-strip	6	60	10.000
CMS	Pixel ibridi	66	1	0.015
	Micro-strip	10	200	20.000
ALICE	Pixel ibridi	10	0.3	0.030
	Silicon Drift	0.1	1.3	13.000
	Micro-strip	2.6	5.2	2.000
	→ Rimpiazzati da Pixel Monolitici (ITS)	1260	10	0.008
LHCb	Micro-strip	0.2	0.22	1.100
	→ Rimpiazzate da Pixel Ibridi (VELO Upgr.)	41	0.12	0.003

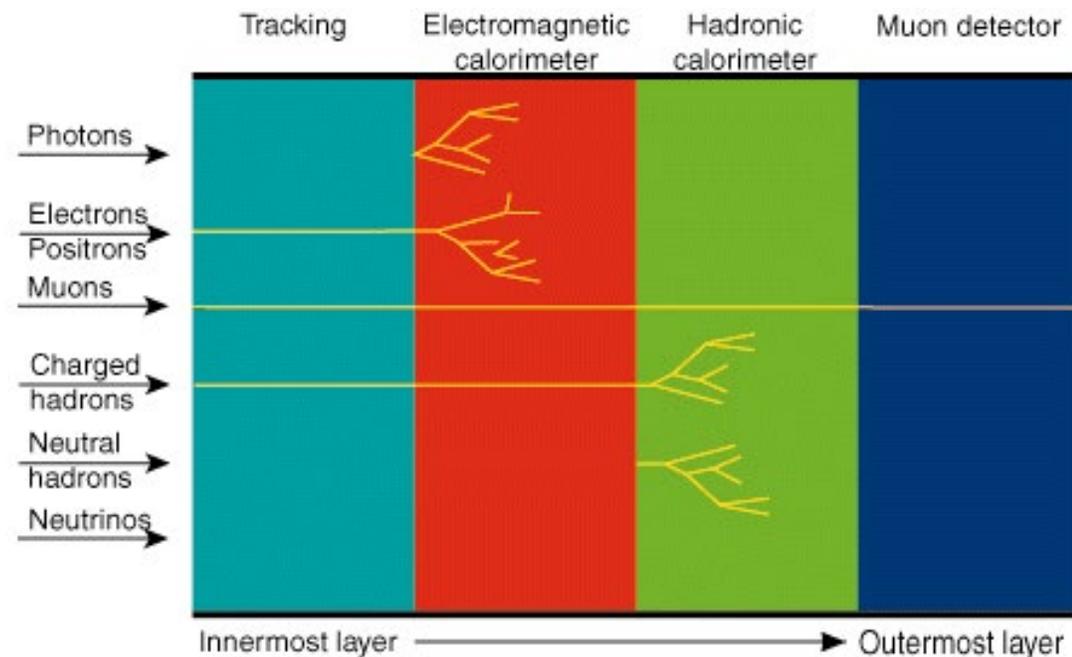
Rivelatori di tracciamento al silicio a LHC per Run1, Run2, Run3

Notare il rapporto canali/superficie per le diverse tecnologie usate

Tutti i pixel elencati sono ibridi, eccetto per il caso dell'ALICE ITS Upgrade (monolitici)

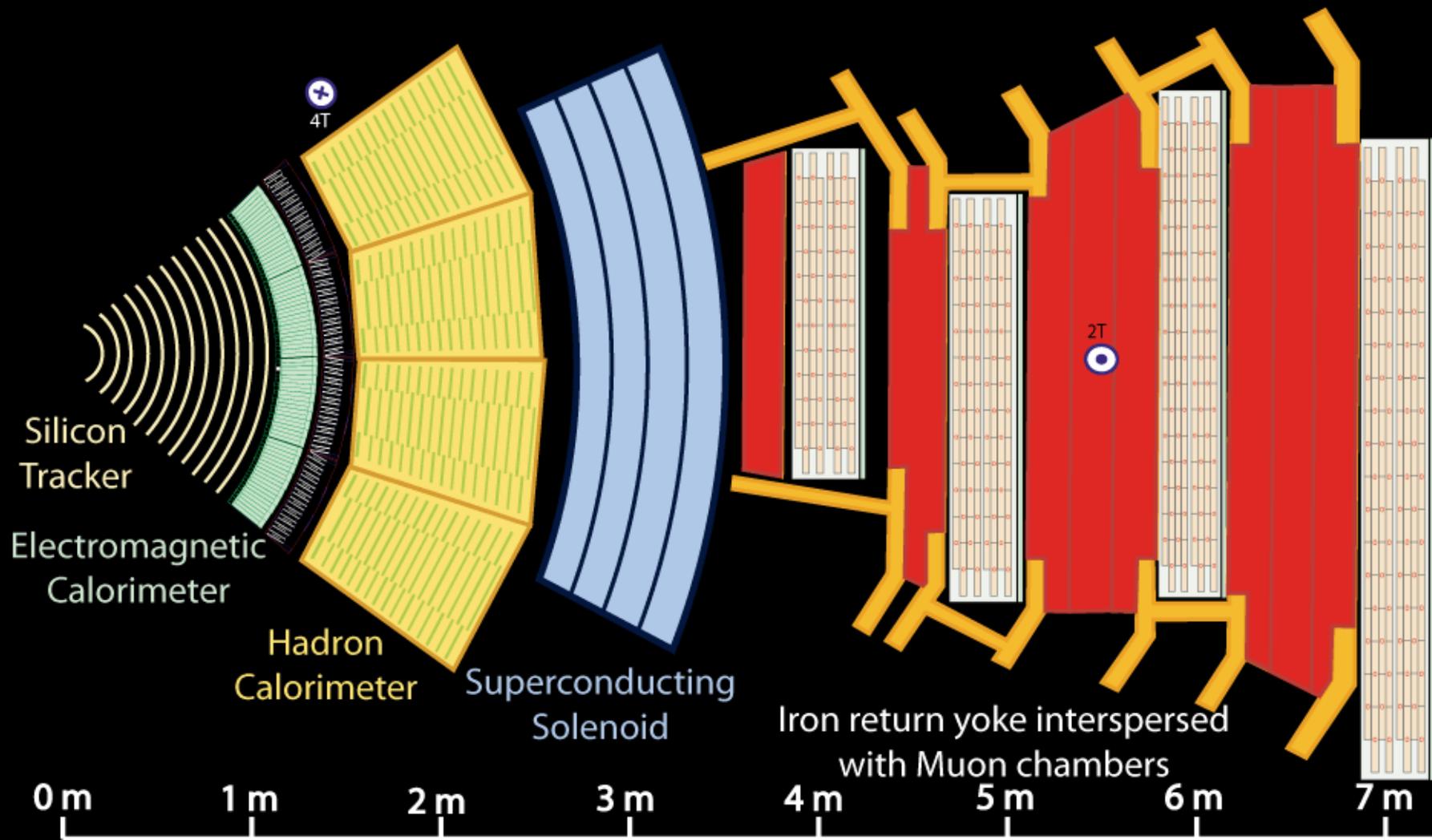
Interazione di particelle diverse con rivelatori diversi

- Particelle cariche sono visibili nei tracciatori
- Fotoni, elettroni, positroni vengono fermati nel calorimetro elettromagnetico, permettendone la misura di energia
- Gli adroni carichi vengono solo visti dal calorimetro elettromagnetico
- Gli adroni (carichi e neutri) vengono fermati nel calorimetro adronico, permettendone la misura di energia
- Solo i muoni sono visibili in tutti i 4 tipi di rivelatori



Per queste ragioni viene rispettato questo ordine nella sequenza dei diversi sistemi di rivelazione

CMS slice



Key:

— Muon

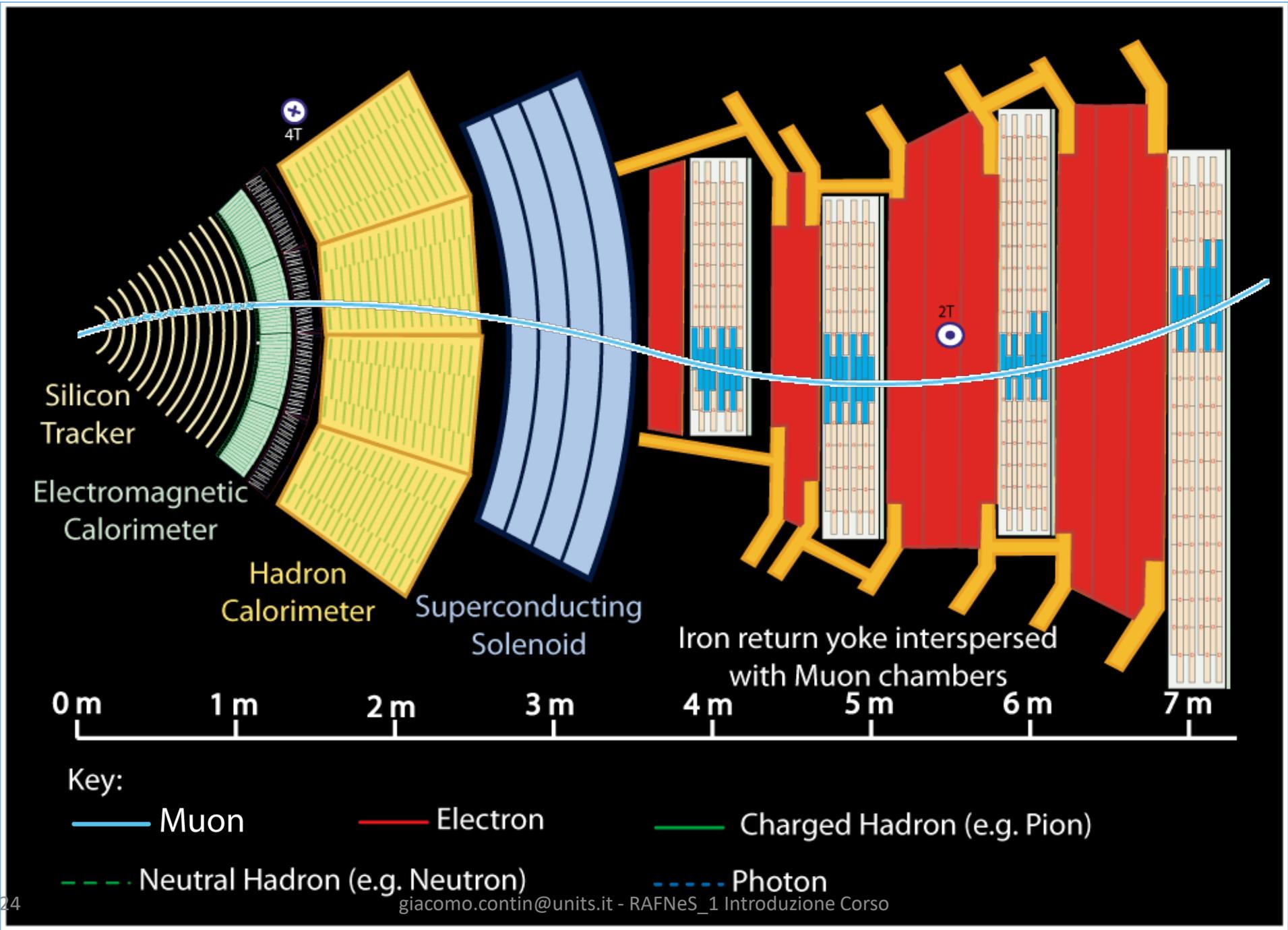
— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

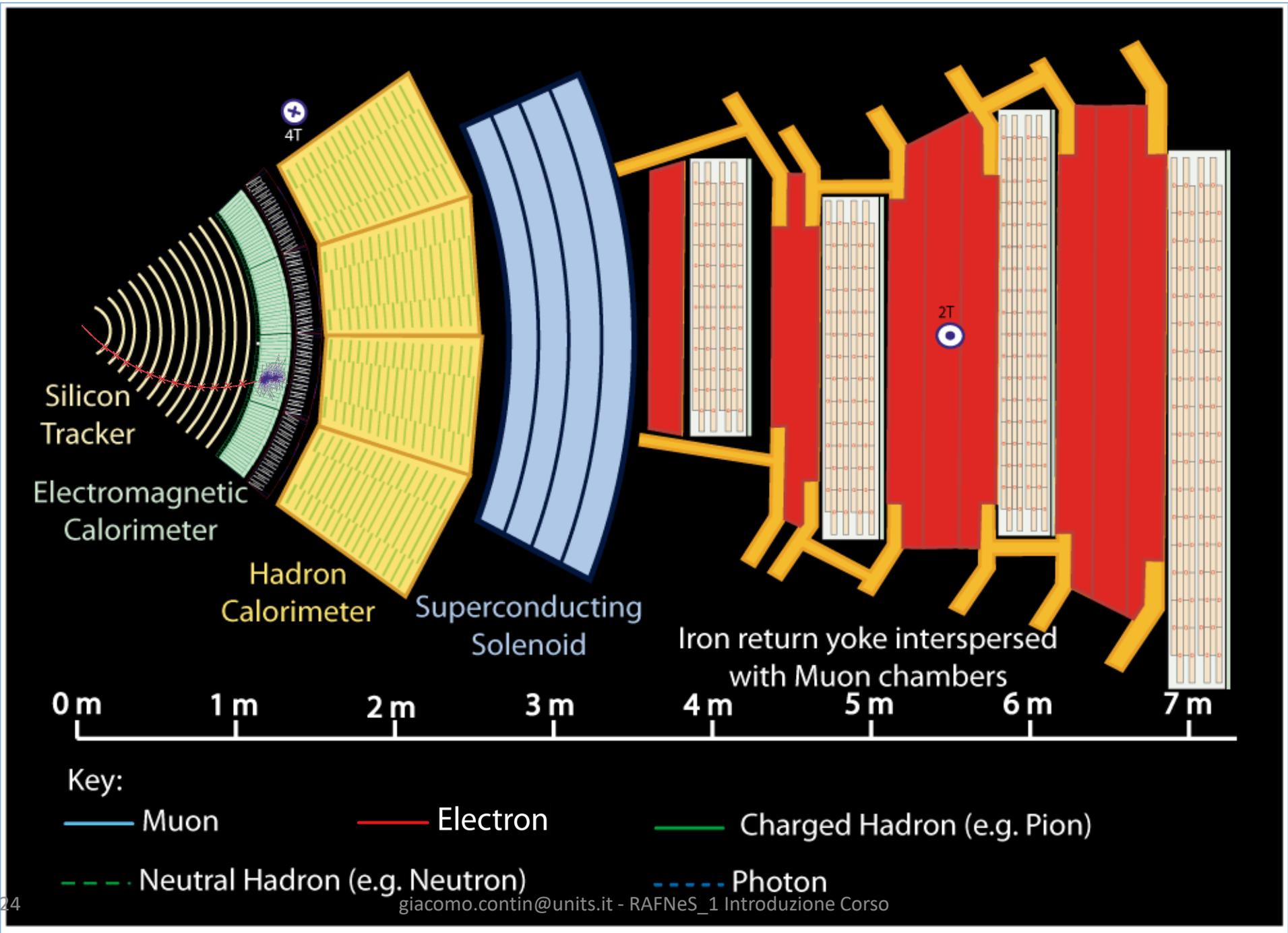
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon

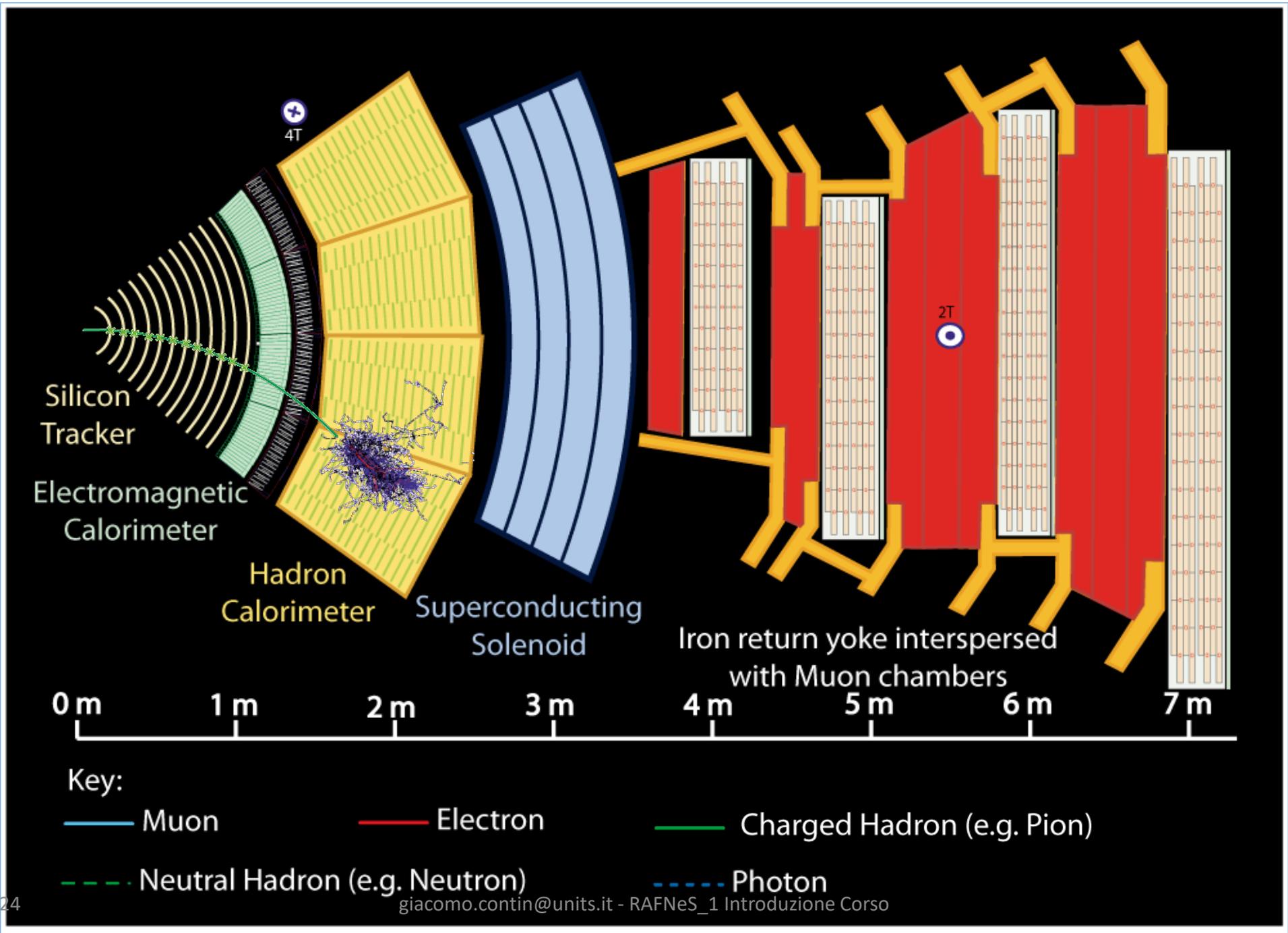
CMS
slice



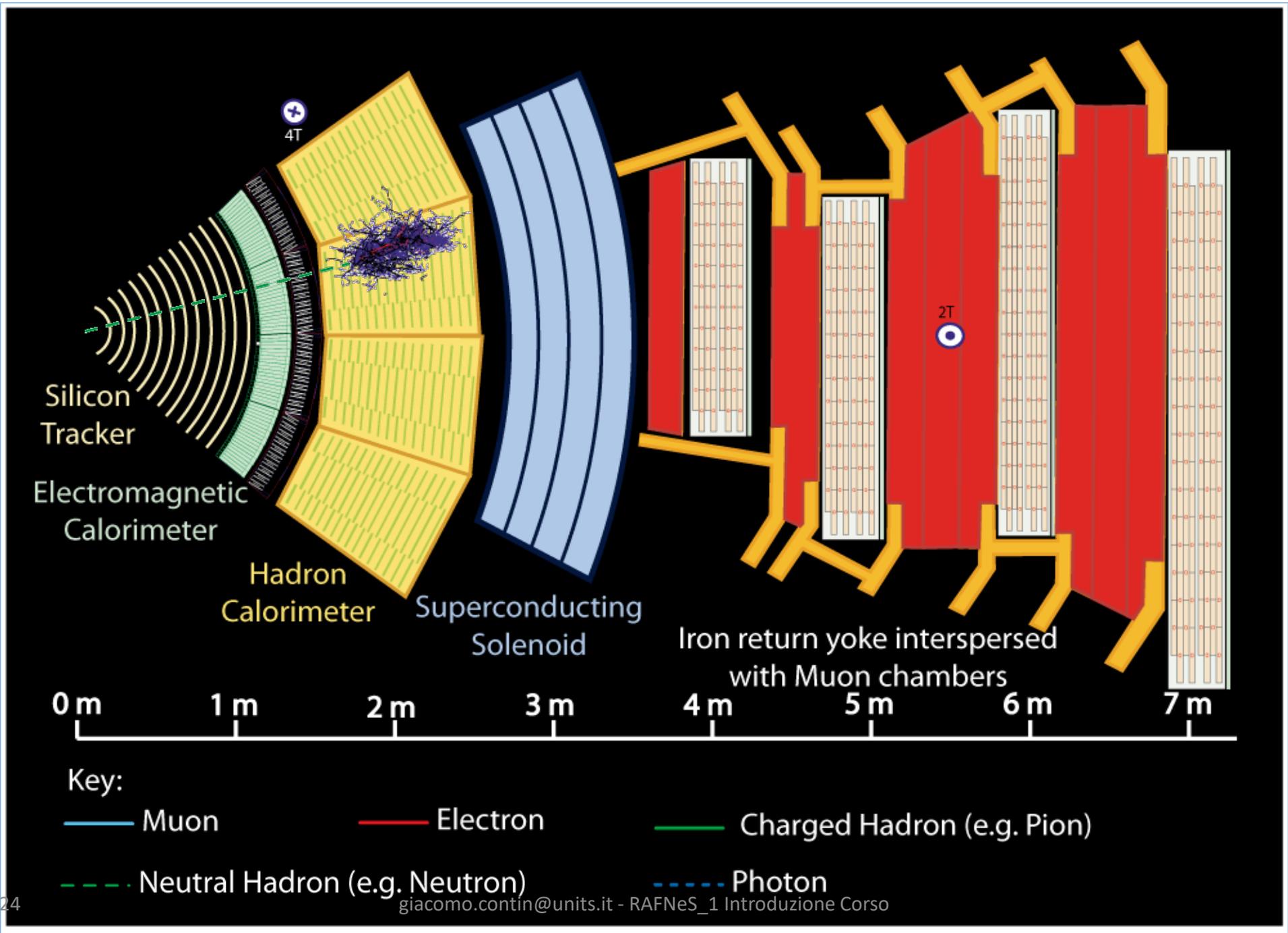
CMS slice



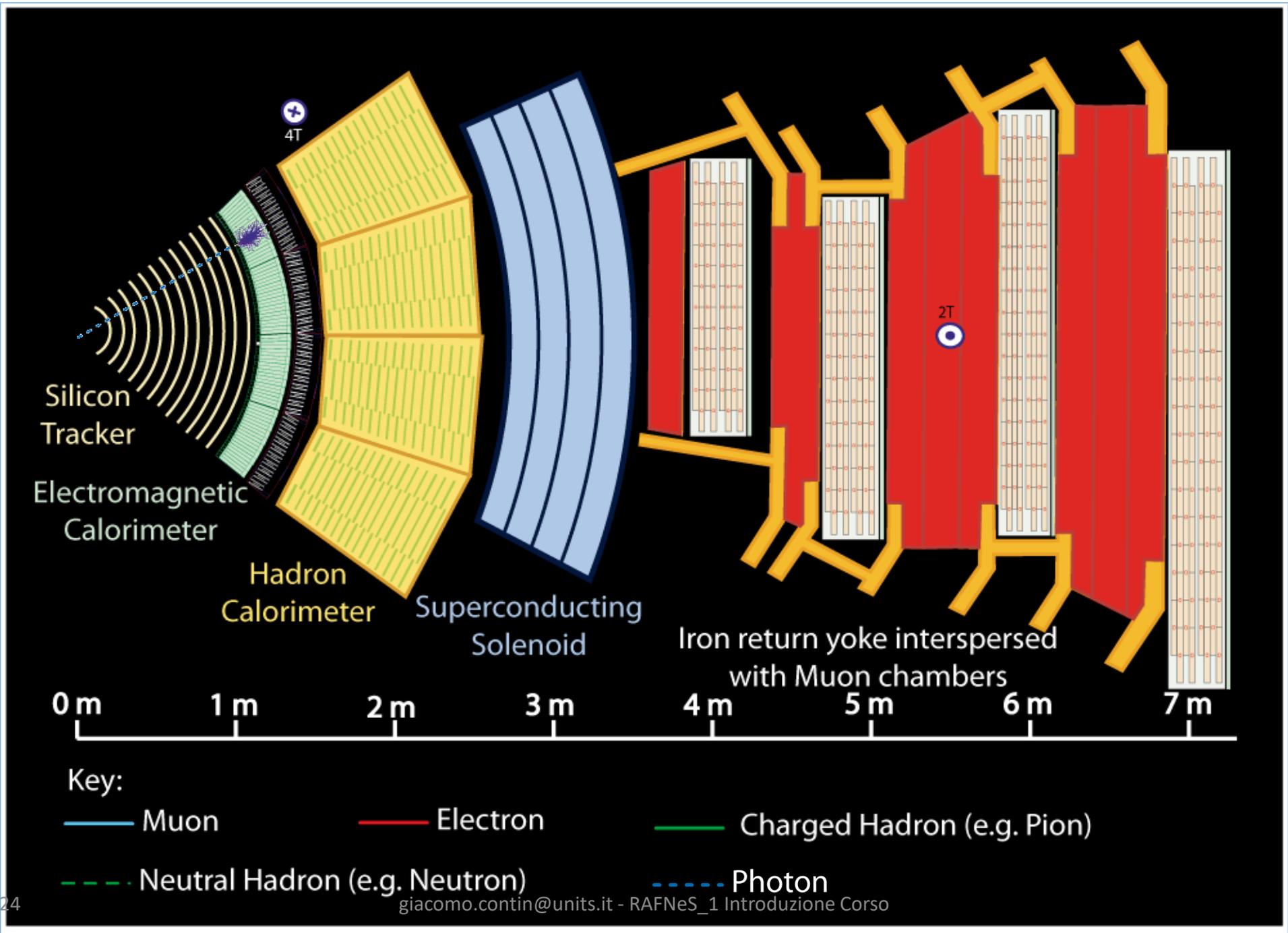
CMS
slice



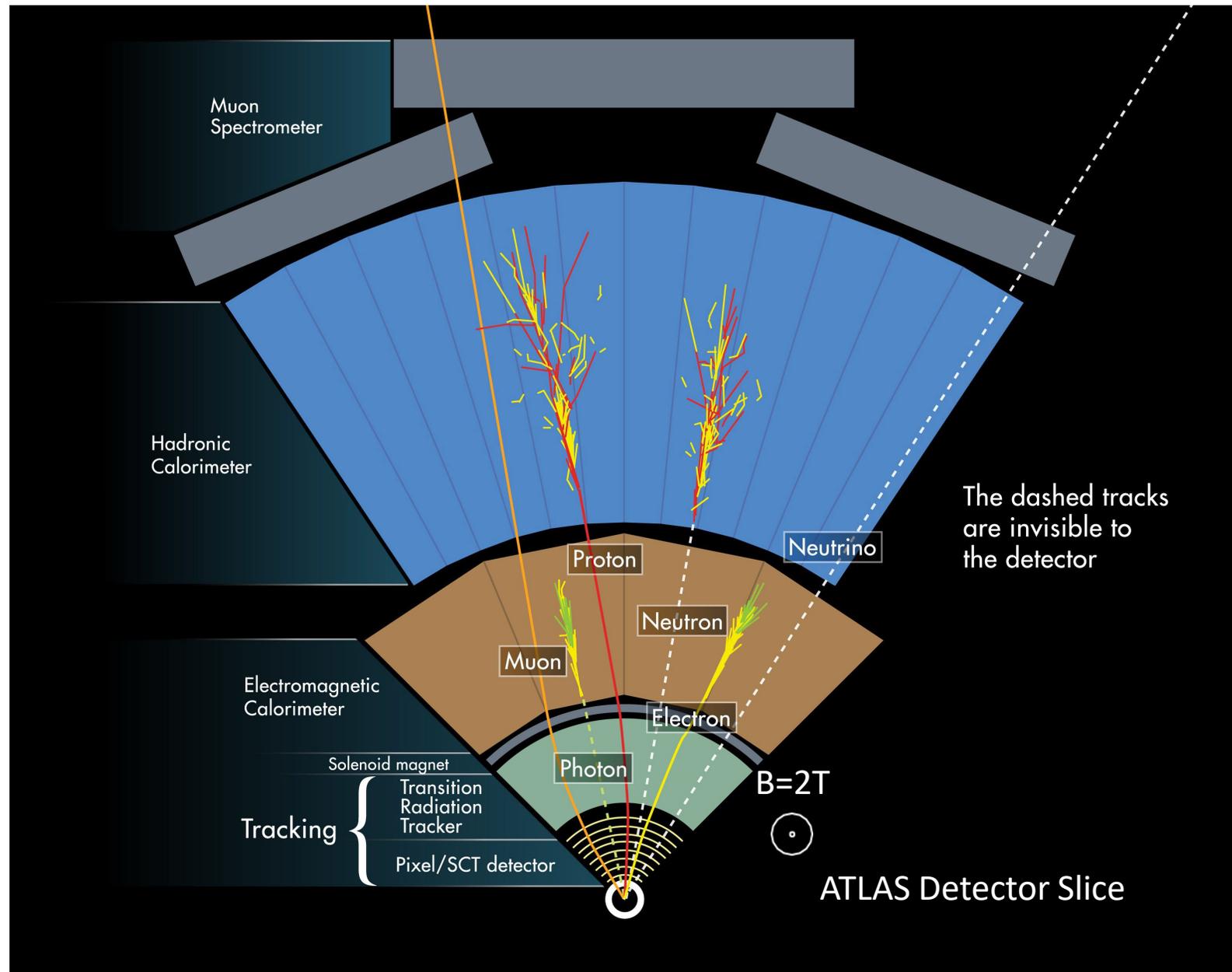
CMS slice



CMS slice

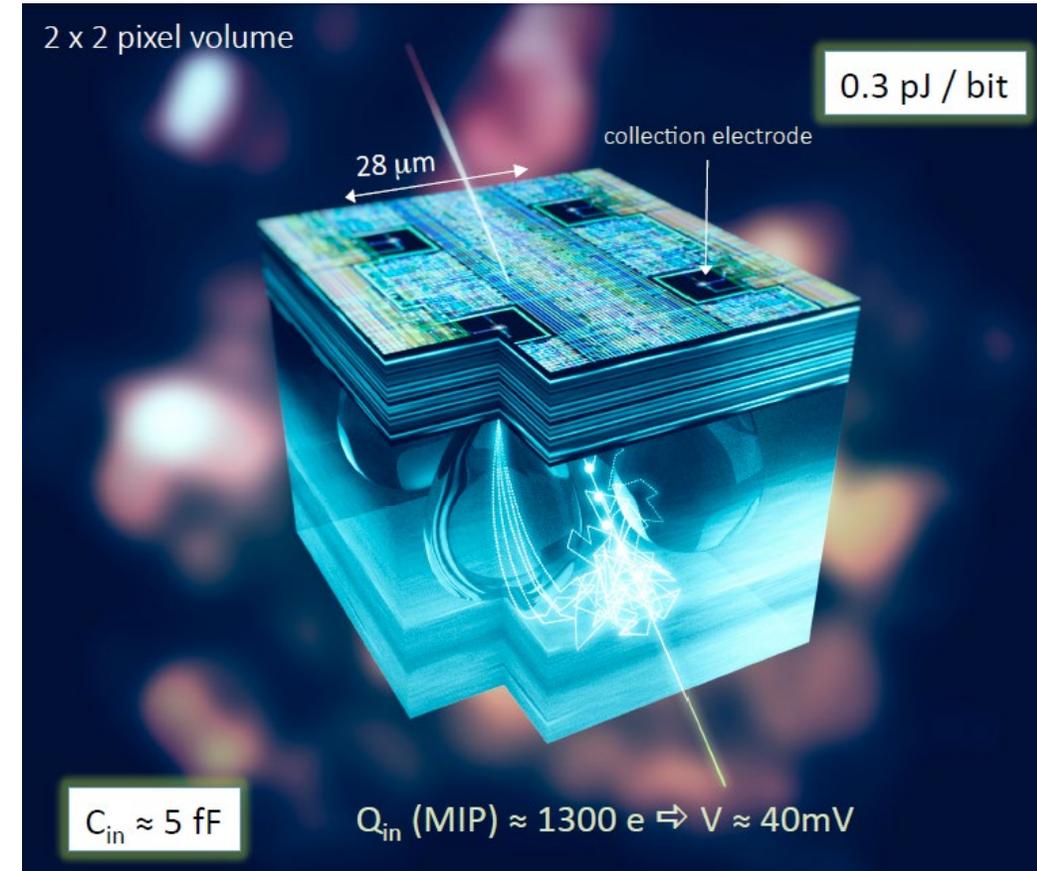


ATLAS slice



Caso esemplare: Sensore a Pixel Monolitici di Silicio

- Nello stesso blocco di silicio:
 - Volume sensibile per la raccolta del segnale
 - +
 - Logica di trattamento del segnale
- Rivela il passaggio di particelle cariche
- Può essere realizzato in uno spessore minimo, dell'ordine di $50 \mu\text{m}$
- Sviluppato per soddisfare la necessità di ridurre la quantità di materiale attraversata dalla particella:
 - Non perturbare la traiettoria della particella
 - Misurare la traiettoria delle particelle con bassa quantità di moto
 - Mantenere una quantità di segnale necessaria per misurare il passaggio
- Inizialmente sviluppato per applicazioni alle alte energie, ora in fase di test per applicazioni in campo medico e spaziale

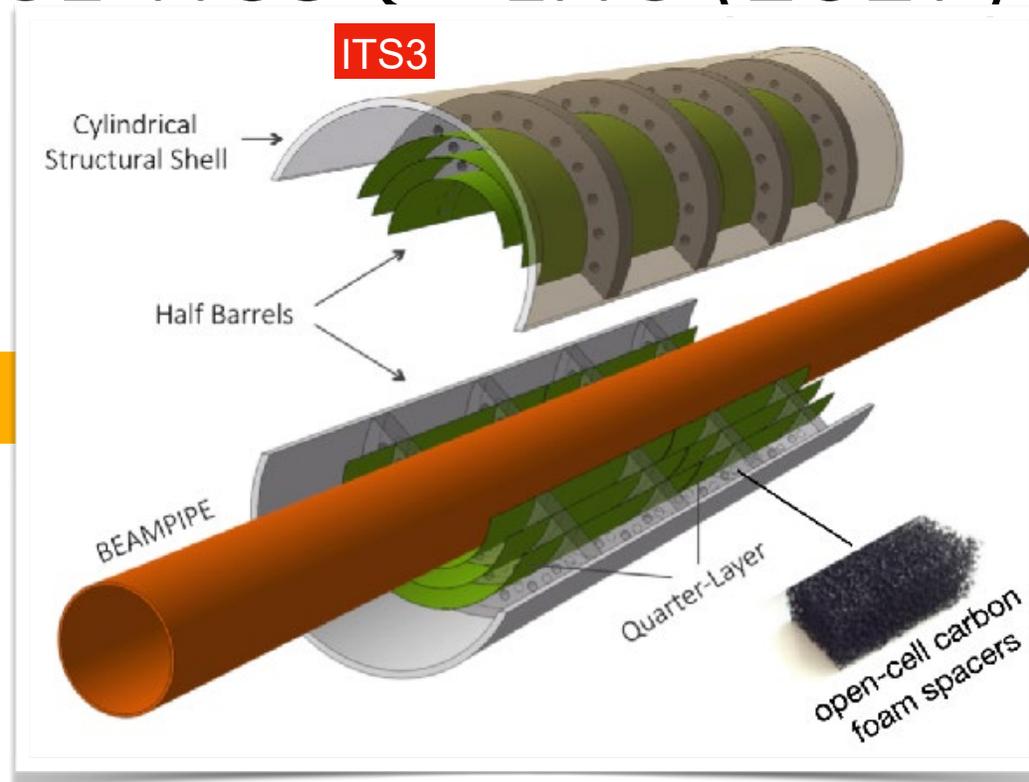


Apparati del futuro: ALICE-ITS3 @ LHC (2027)

replace



by



in LS3

key improvements:

- ▶ closer to beam pipe: 23 → 18 mm
- ▶ less material: 0.3 → ~0.03 % X_0

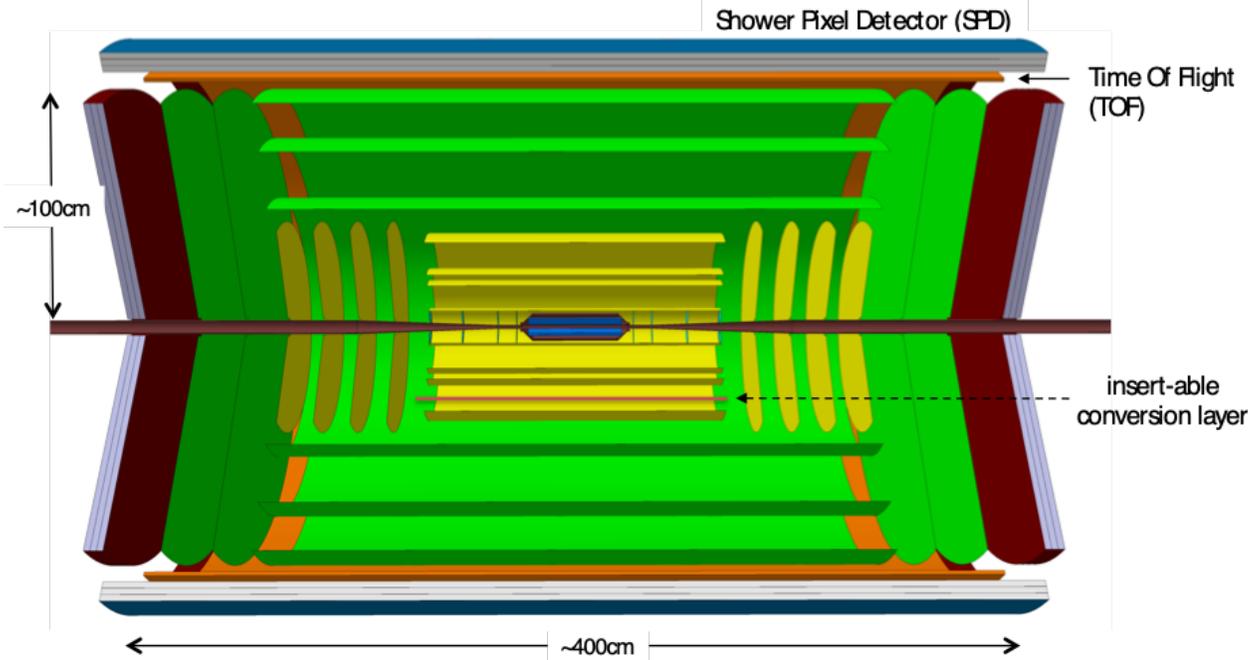
main benefit:

- ▶ better tracking performance
- ▶ especially at low p_T

based on:

- ▶ wafer-scale (up to ~28x10 cm),
 - ▶ ultra-thin (20-40 μm),
 - ▶ bent ($R=18, 24, 30$ mm)
- Si sensors (MAPS)**

Apparati del futuro: ALICE 3 @ LHC (2032)



• tracking

- ~10 layers (blue, yellow, green) of barrels and disks based on **monolithic pixel silicon sensors** (MAPS)

• particle identification

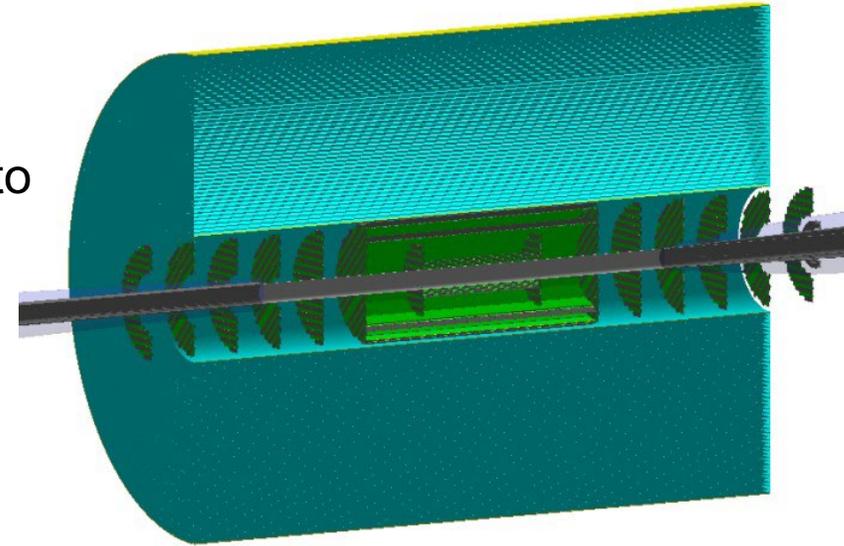
- time-of-flight layers (orange) in central barrel based on **silicon timing sensors**
- Pre-Shower Detector (outermost blue) based on dense material and **MAPS**

key requirements

- **ultra-low material budget** for low p_T tracking
 - $X/X_0 \sim 0.05\%$ / layer
- **fast** to sample large luminosity
 - 50 - 100x Run 3/4
- **large acceptance**
 - $|\eta| < 4 \Rightarrow \Delta\eta = 8$ (total)
 - $|\eta| < \sim 1.4$ (central barrel)
- **excellent spatial resolution** for tracking and vertexing
 - innermost layers: $\sigma < 3 \mu\text{m}$
 - outer layers: $\sigma \sim 5 \mu\text{m}$
- **precise time measurement** for particle identification
 - $\sigma \sim 20 \text{ ps}$

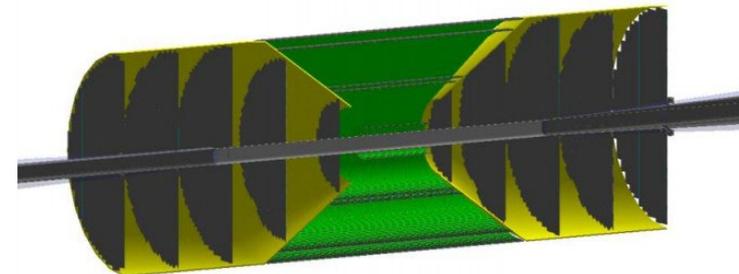
Apparati del futuro: Electron Ion Collider (2030 - 2035)

Hybrid tracker



Requirements for an EIC tracker according to the [EIC detector handbook](#):

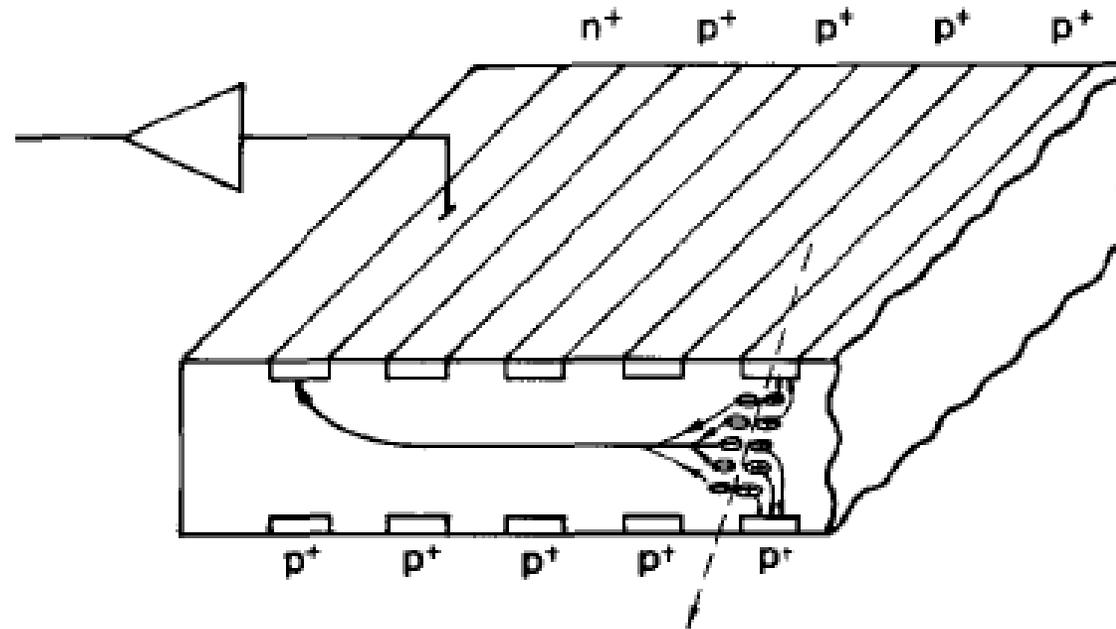
- Hermetic
 - * ($|\eta| < 4, 0 < \phi < 2\pi$ coverage)
- Compact
- Low-material-budget tracker
 - * (3-5% of X_0)
- Excellent momentum, angular, and vertex resolutions
 - * ($dp/p \sim \text{few } \%$)
- Aid in particle identification (PID).



All-Si tracker

Altro esempio: Rivelatori di silicio a deriva

- Inventato come rivelatore 2D per tracciamento in esperimenti di alta energia



- Presto adattato per applicazioni molto diverse

SDD DESIGN OPTIMIZATION FOR X-RAY SPECTROSCOPY AND IMAGING

Detector development activity performed in the framework of the XDXL and ReDSOX R&D INFN programs

Prototypes designed, manufactured and tested in collaboration between INFN, INAF and FBK.

(Rachevski et al., JINST, 2015)

SUBSTRATE OPTIMIZATION FOR X-RAY DETECTION

MATERIAL: NTD \rightarrow FZ

GEOMETRIC AREA (filling factor): 5" \rightarrow 6" wafer <100>

RESISTIVITY: 4 k Ω cm \rightarrow 9 k Ω cm

THICKNESS (QE): 300 μ m \rightarrow 450 μ m

DESIGN OPTIMIZATION FOR X-RAY DETECTION AND SPACE APP.

VOTLAGE DIVIDER: reduced power

SURFACE CURRENT: minimization

Si-SiO₂ INTERFACE GAP: minimization

FIELD PLATE: optimization for minimal surface current

QUANTUM EFFICIENCY: optimization for low E_{ph}

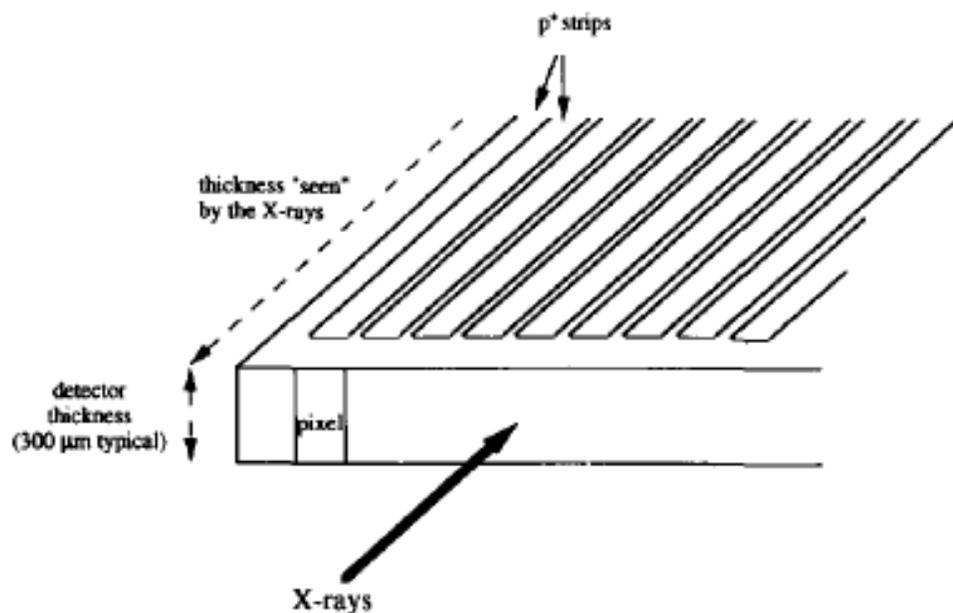
ANODE PITCH: opt. for spectral-timing & imaging



Altre applicazioni delle Silicon Drift Detector

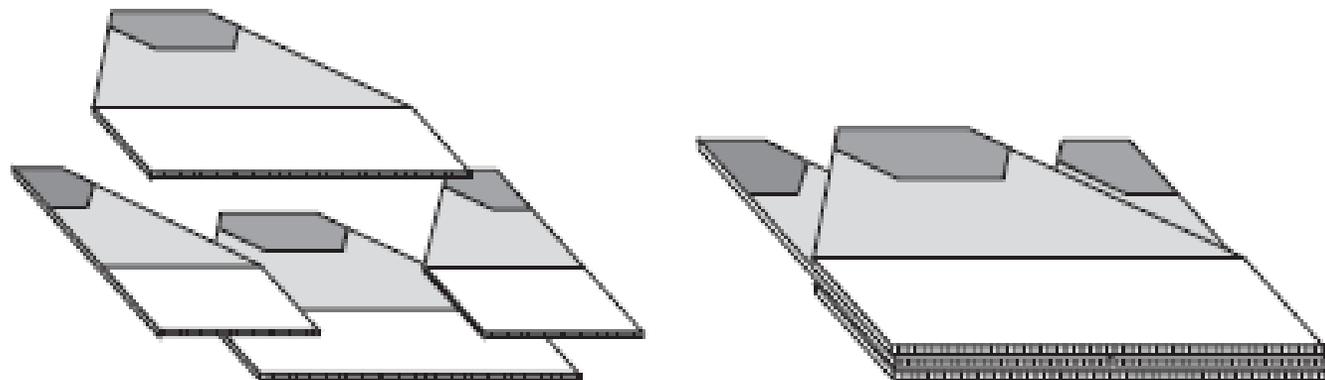
- Spettroscopia + ricostruzione posizione 2D
 - Risoluzione all'anodo di decine di μm per X-rays con 2 keV
 - Lunghezza di deriva piu' grossolana: non c'e' rivelazione di tempo zero (6 mm per $E > 3.5$ keV)
- ⇒ Medical field: Compton camera
- ⇒ Nuclear physics precision spectroscopy
- ⇒ X-ray astronomy/astrophysics
- ⇒ X-ray imaging for Advanced Light Sources (SR and FEL)

Applicazione medica delle Silicon Strip Detector: SYRMEP @ ELETTRA: mammografia digitale



- Orientazione edge-on

- Struttura che ammetta connessione di tutti i canali in 3D, ma anche eviti una spaccatura al centro del volume sensibile



Riassumendo...

- C'è una crescente richiesta ed espansione nel campo dei rivelatori a semiconduzione
- Applicazioni in tutti i campi della fisica
 - Sviluppo spesso trainato dalla fisica delle alte energie
 - Applicazioni negli altri campi con specifiche ottimizzazioni
- E' importante:
 - Capire la fisica che si vuole osservare
 - Definire i requisiti che i rivelatori devono soddisfare
 - Analizzare le proprietà e le prestazioni dei rivelatori esistenti
 - Sviluppare ulteriormente rivelatori e infrastrutture per soddisfare i requisiti
- Proviamoci!



Grazie dell'attenzione!