



# 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 prob. saltano 4 e 5 Dicembre → prepariamoci a recuperarle!
  - 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 aggiunto su moodle durante il corso
  
- Orario: Lun 14-16, Mar 14-16
  
- *Contattatemi qui:* [giacomo.contin@units.it](mailto:giacomo.contin@units.it) – stanza 122

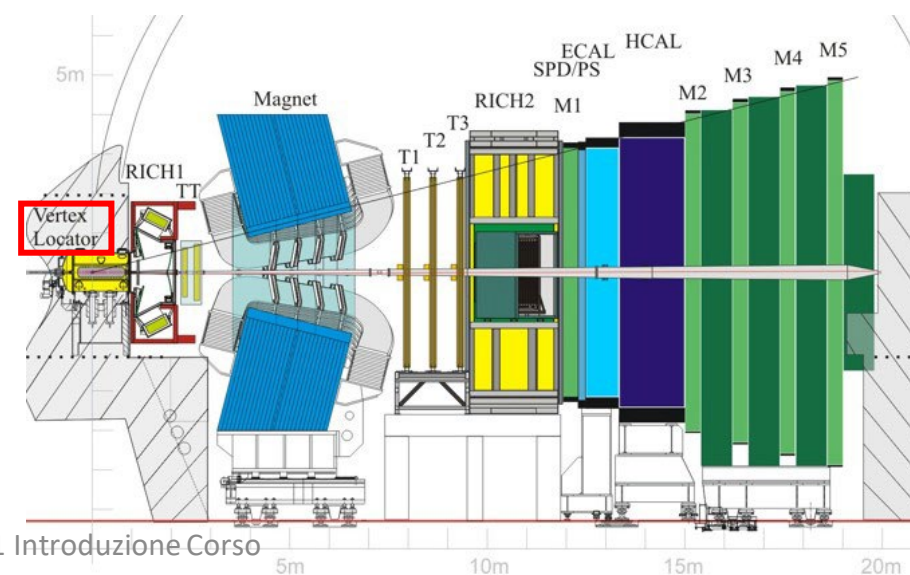
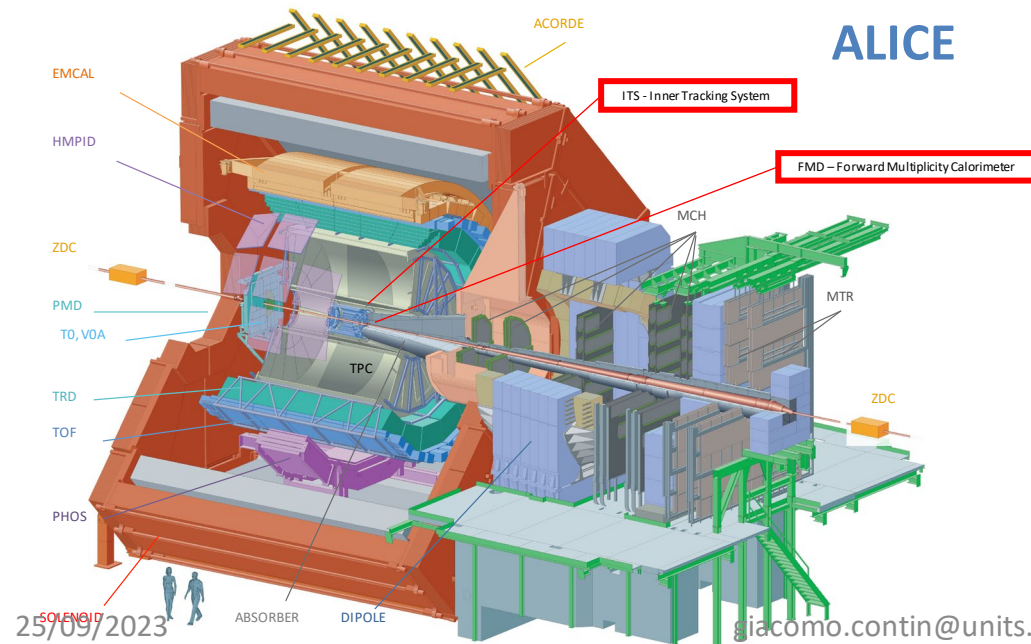
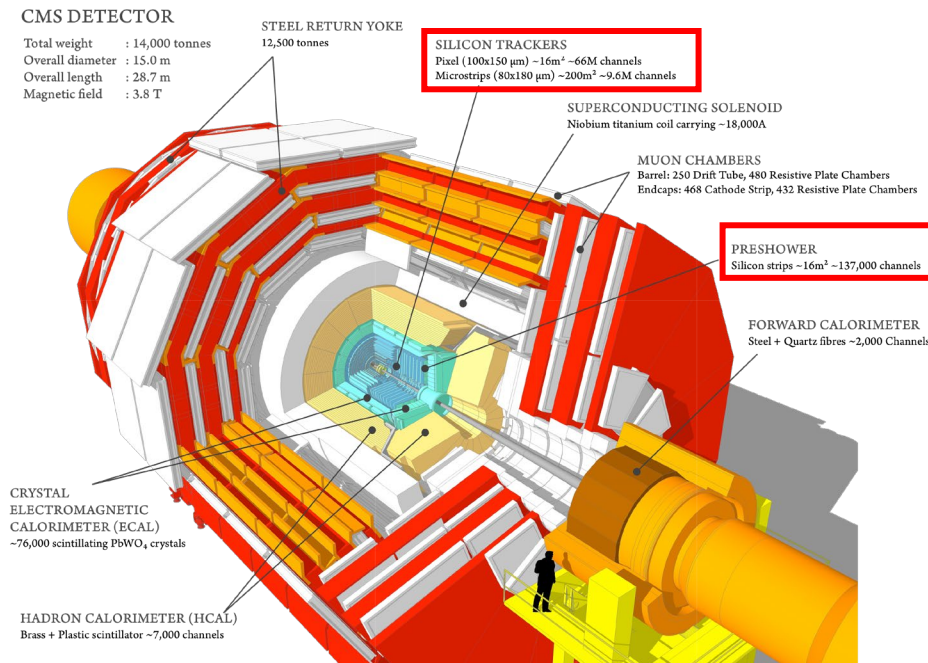
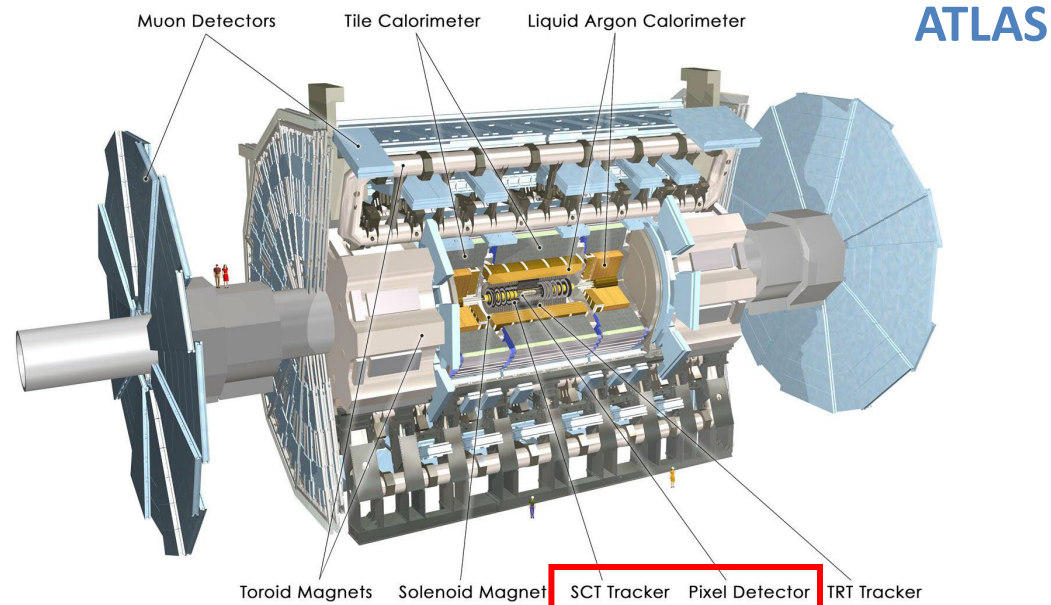
# Programma del corso (in sintesi)

- 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

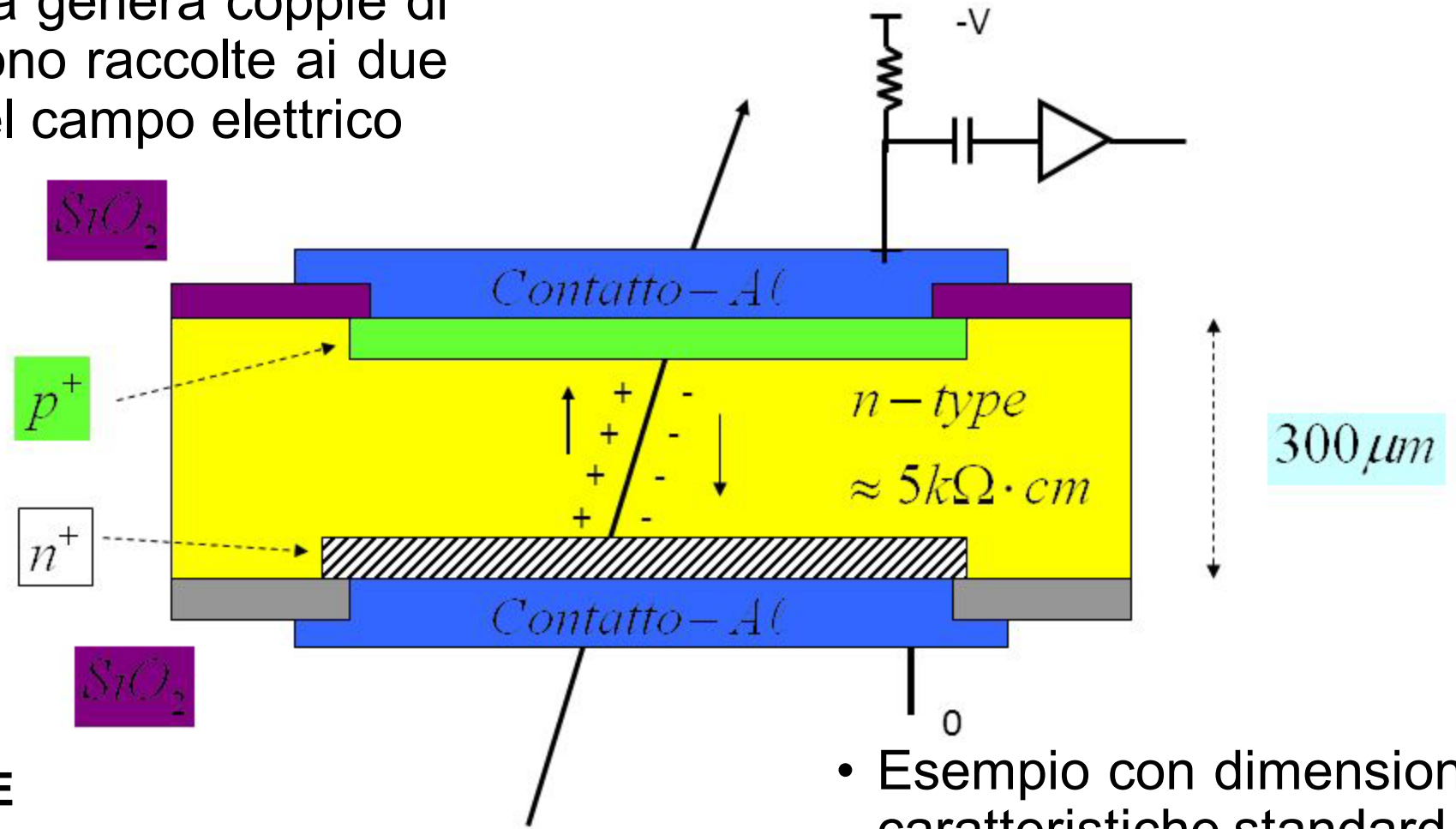
- H. Spieler, “Semiconductor Detector Systems”
- L. Rossi, P. Fischer, T. Rohe, N. Wermes, "Pixel Detectors. From Fundamentals to Applications”
- W.R.Leo, “Techniques for nuclear and particle physics experiments”
- C. Leroy, P.-G. Rancoita, “Principles of Radiation Interaction in Matter and Detection”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

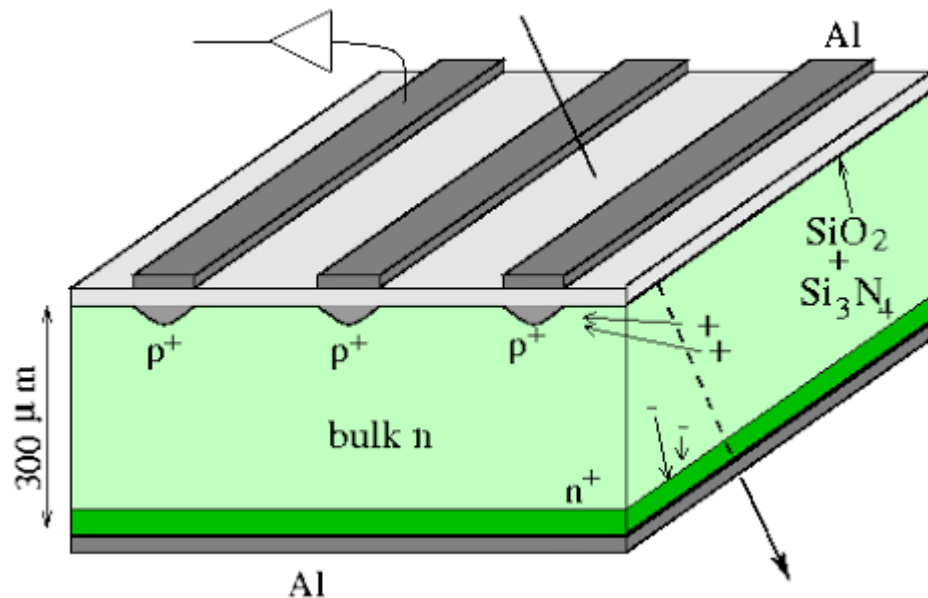
- La particella carica genera coppie di cariche che vengono raccolte ai due capi per **deriva** nel campo elettrico



GIUNZIONE SEMPLICE

- Esempio con dimensioni e caratteristiche standard

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

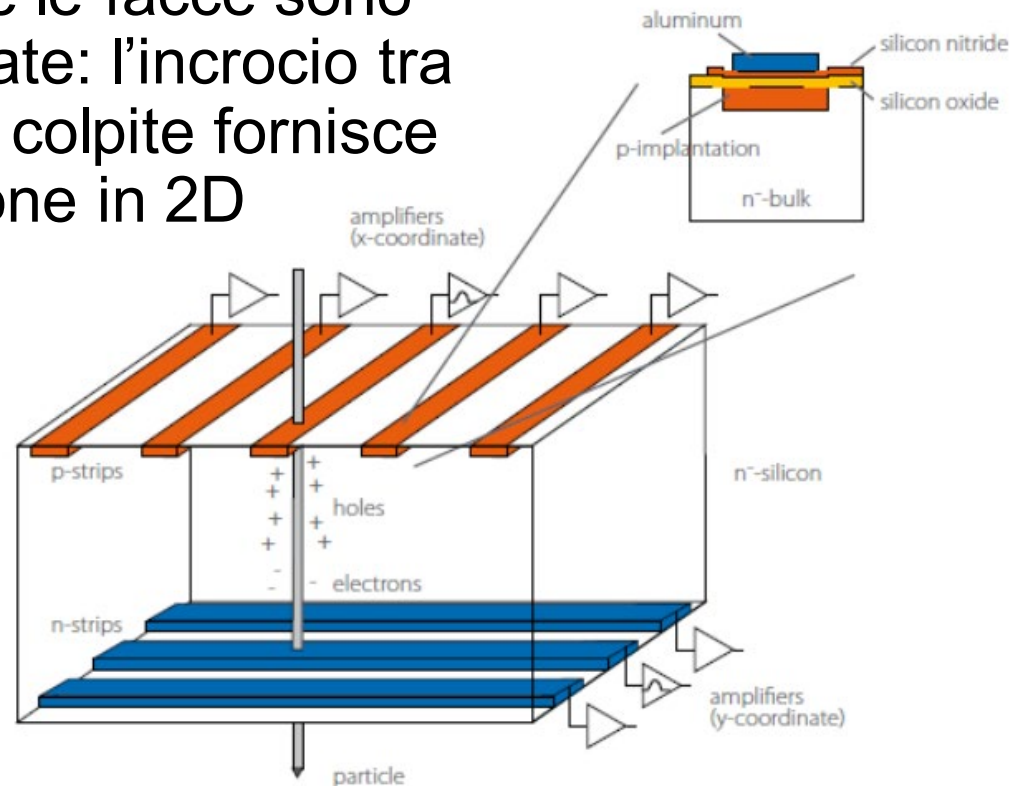


- La superficie del sensore e' segmentata in strisce parallele lungo una direzione: la posizione dei contatti che raccolgono e trasmettono le cariche corrisponde alla coordinata della particella
- La risoluzione spaziale e' data dal passo tra strisce, e puo' essere migliorata misurando l'ampiezza dei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

## MICROSTRISCE MONOFACCIA

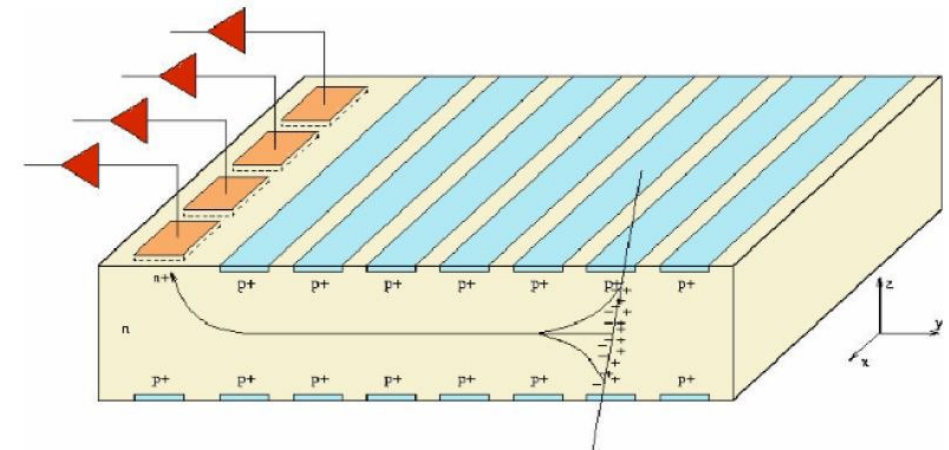
# Per cosa li usiamo: misurare la posizione (2D)

- 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

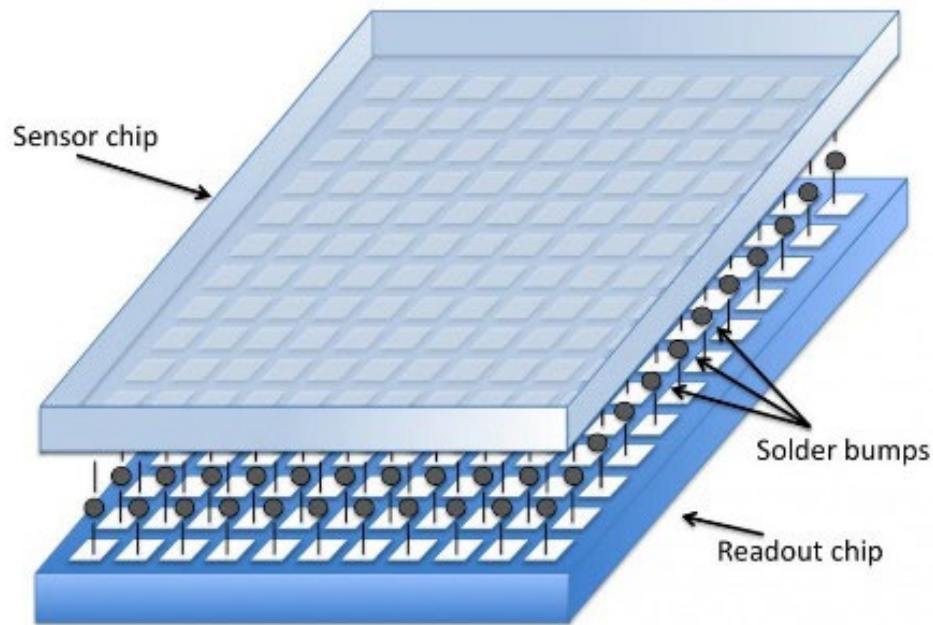


**CAMERA A DERIVA DI SILICIO**

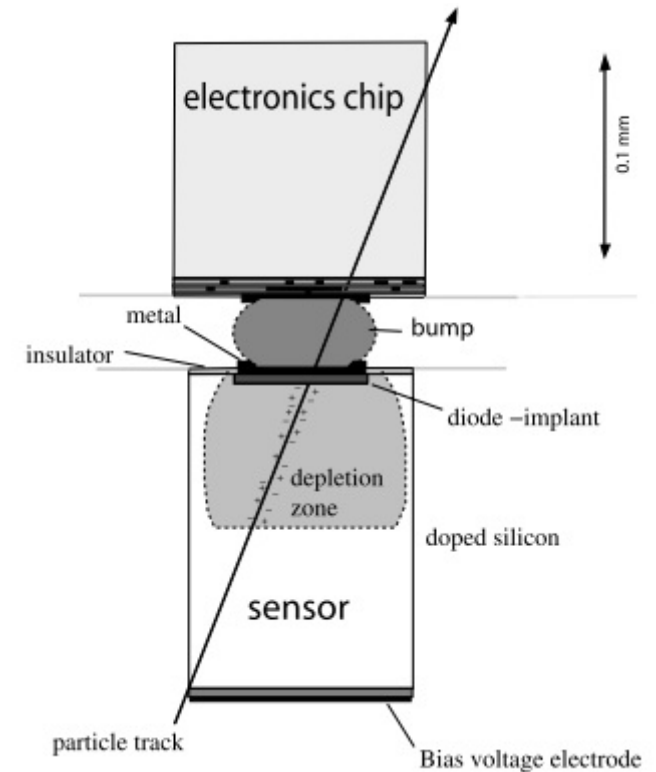


# Per cosa li usiamo: misurare la posizione (2D)

- 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

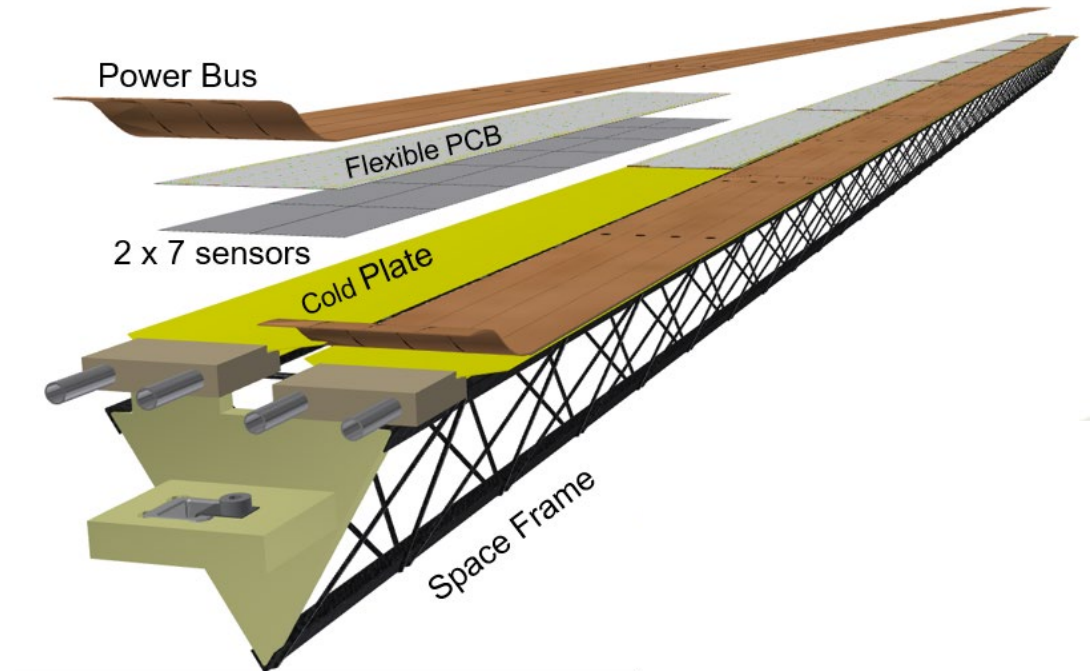


## PIXEL IBRIDI

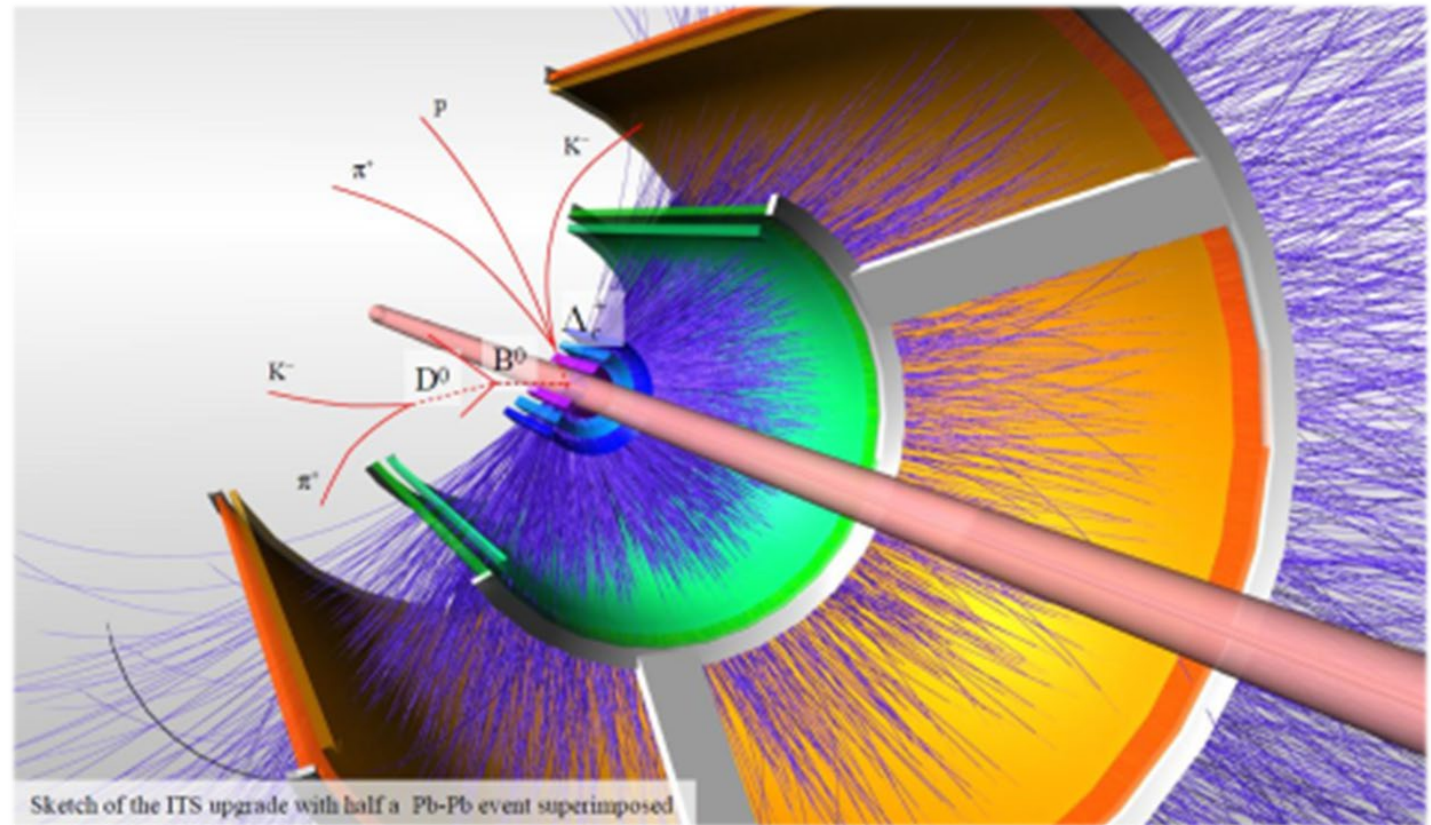
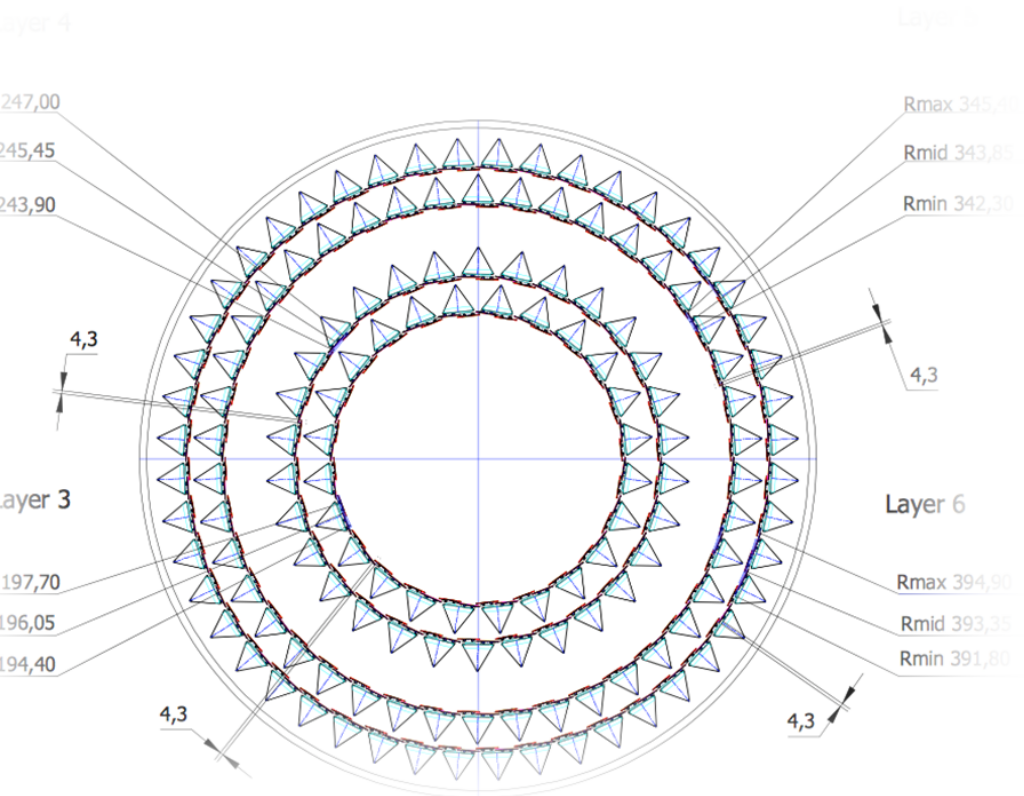


# Il 'sistema' rivelatore

- Oltre al sensore:
  - Elettronica di lettura
  - Interconnessioni elettriche
  - Supporti meccanici
  - Apparatati 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 ...

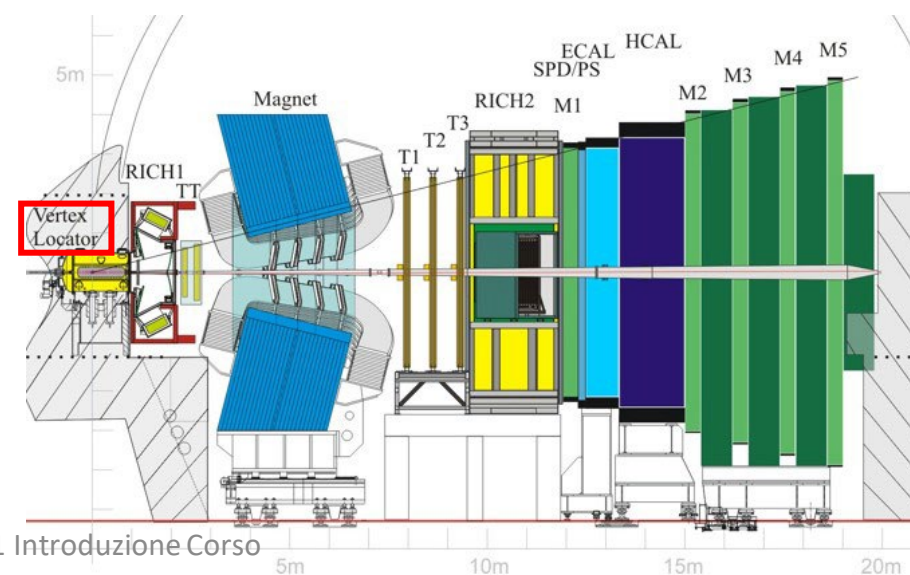
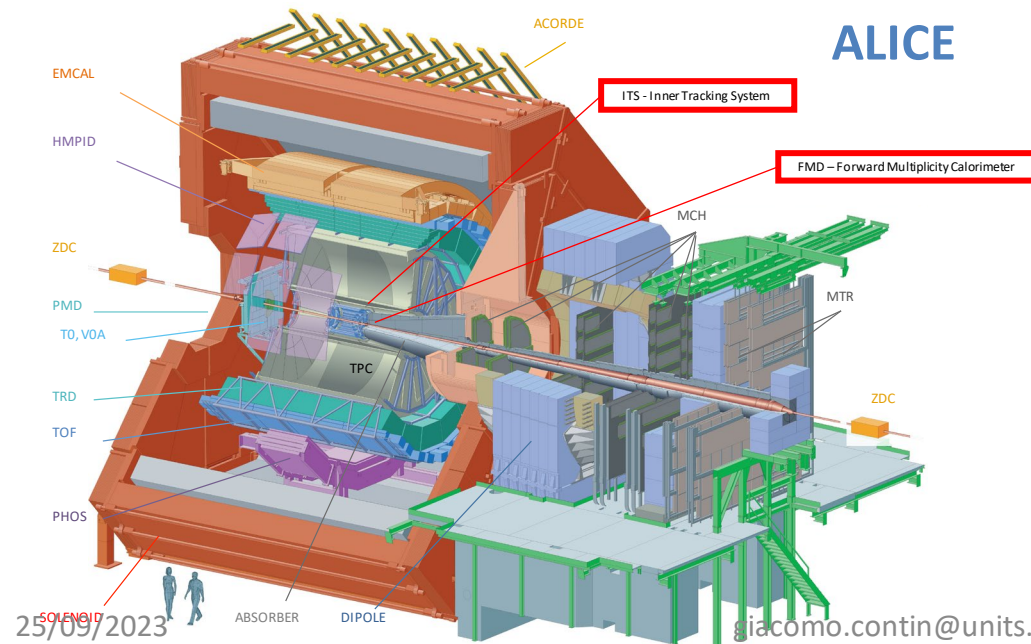
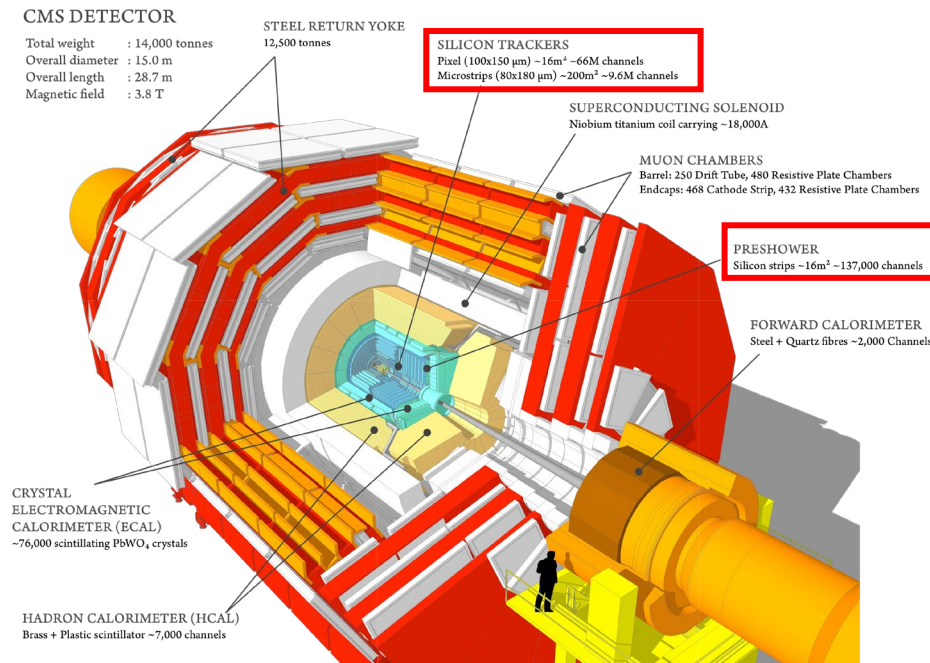
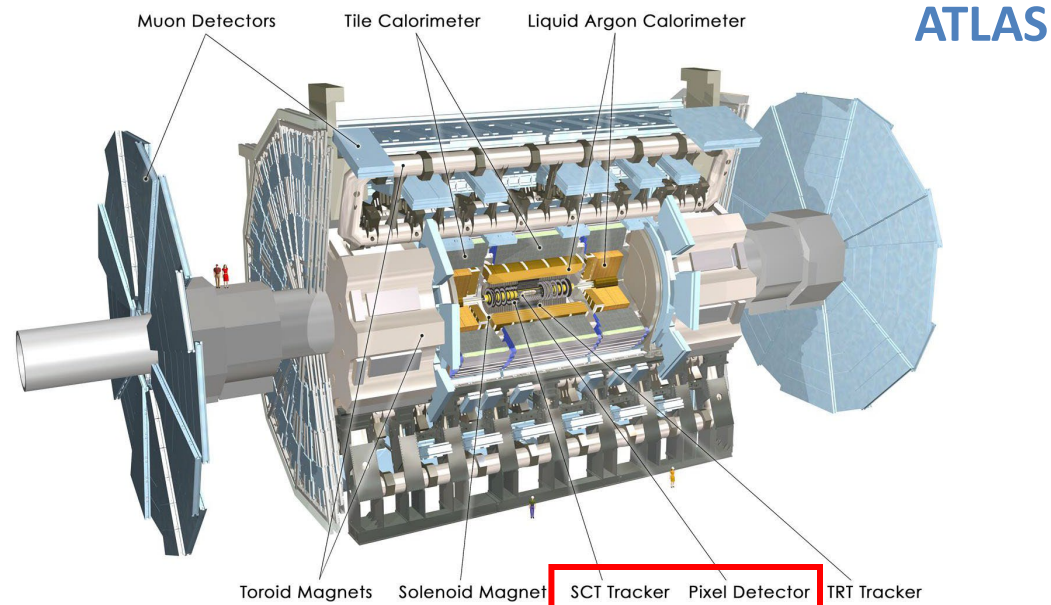


# Per cosa li usiamo: seguire la traiettoria...



- 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 <sup>2</sup> ]	m <sup>2</sup> /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

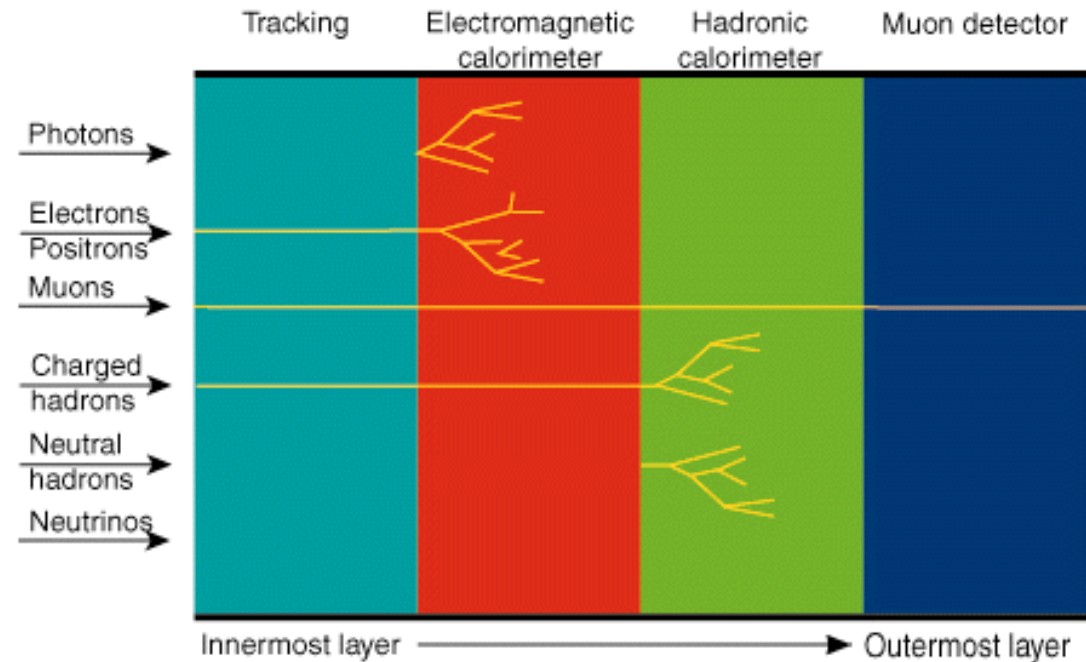
Rivelatori di tracciamento al silicio a LHC per Run1, Run2, Run3

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)

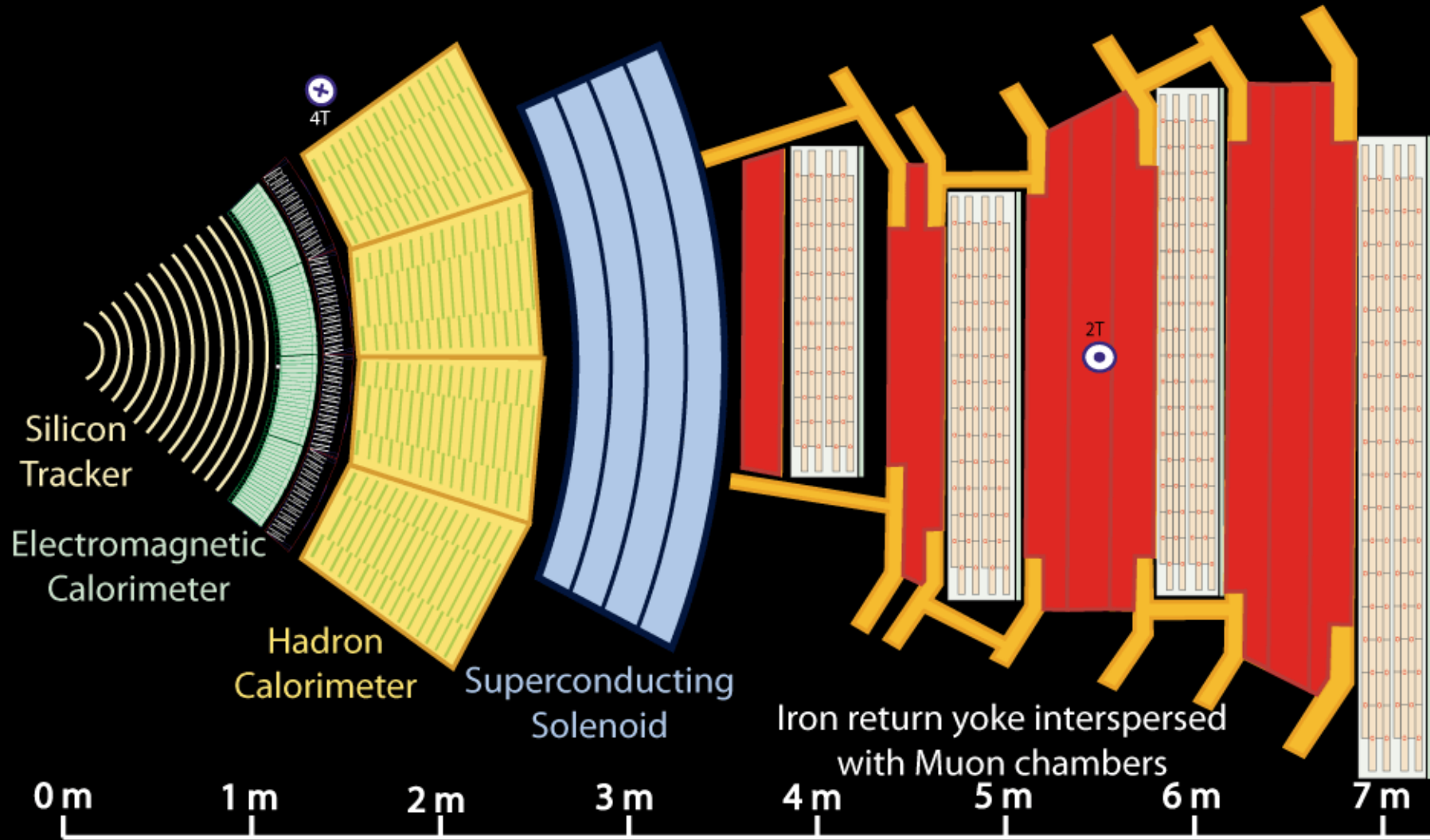
# Interazione di particelle diverse con rivelatori diversi

- 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

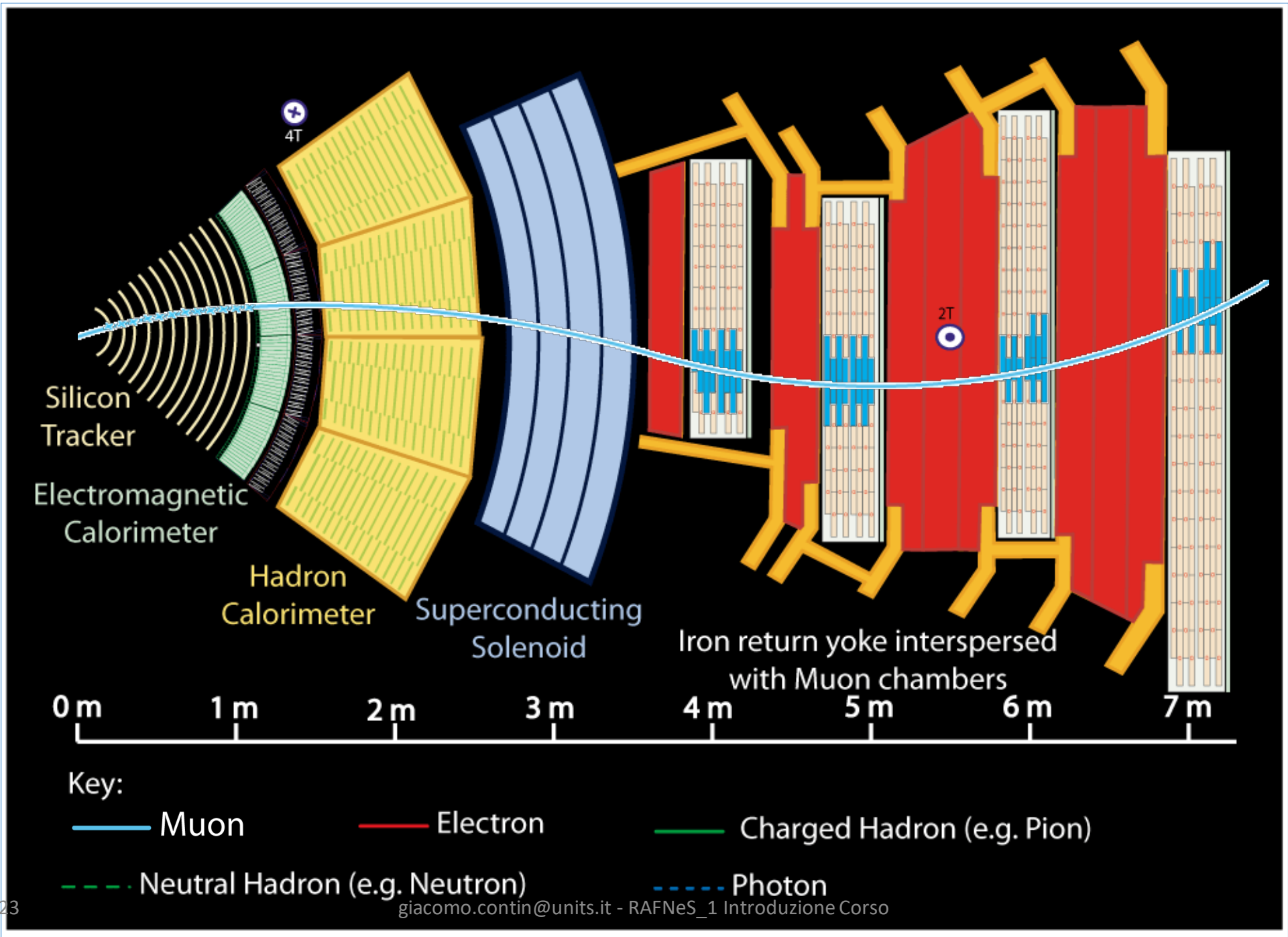
— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

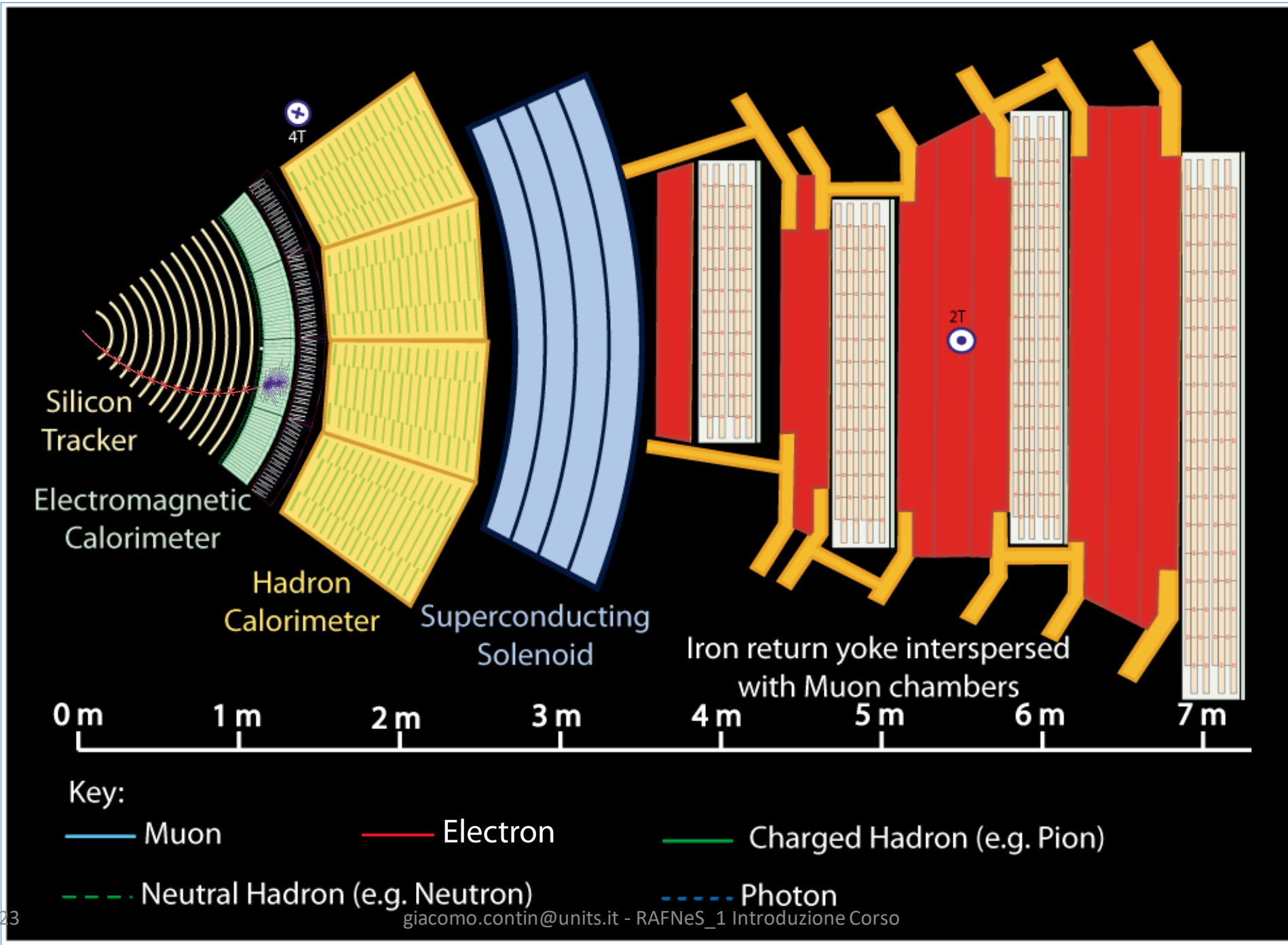
- - - Photon

# CMS slice

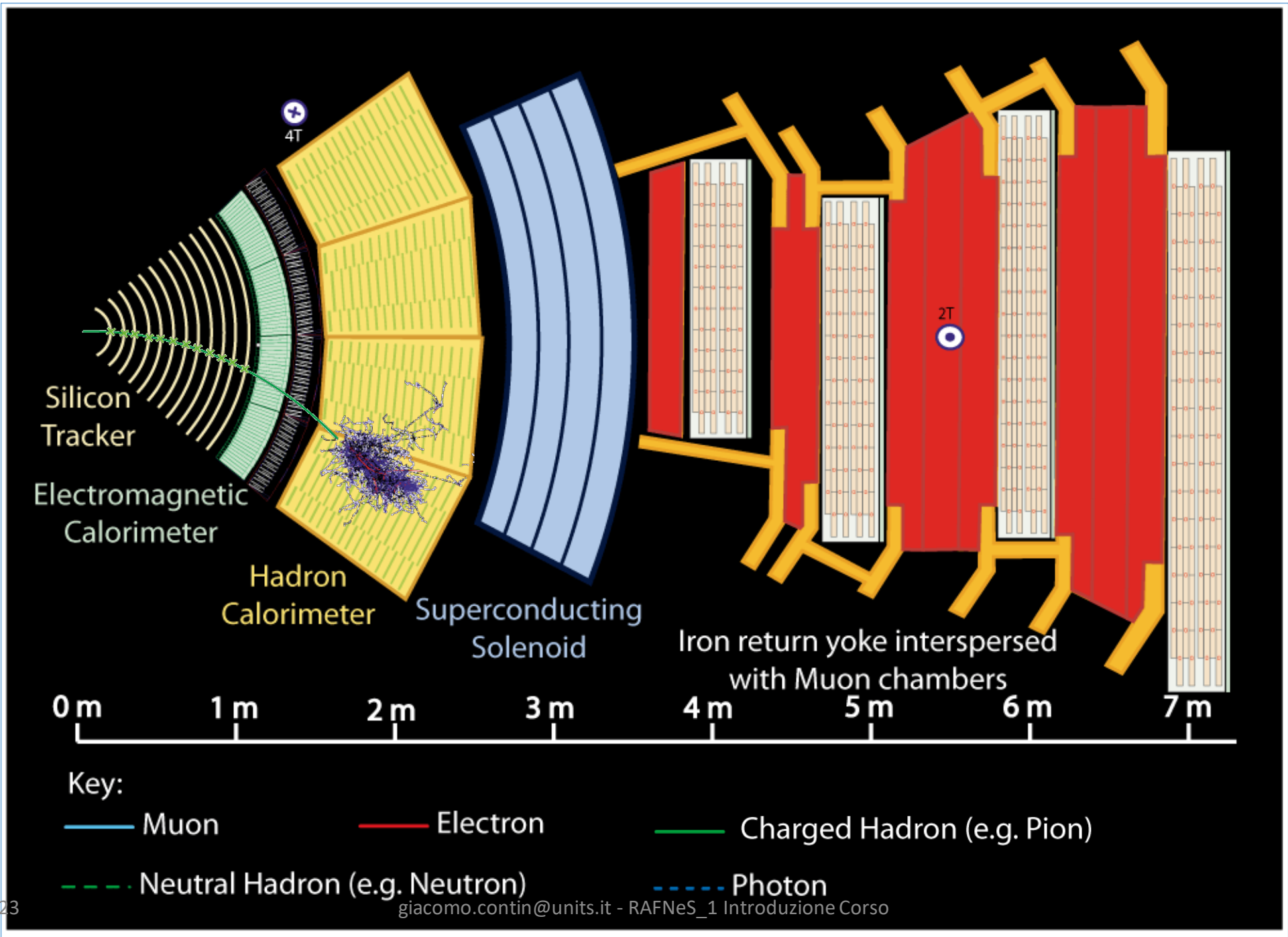




# CMS slice



# CMS slice



Silicon Tracker

Electromagnetic Calorimeter

Hadron Calorimeter

Superconducting Solenoid

Iron return yoke interspersed with Muon chambers

0 m 1 m 2 m 3 m 4 m 5 m 6 m 7 m

Key:

— Muon

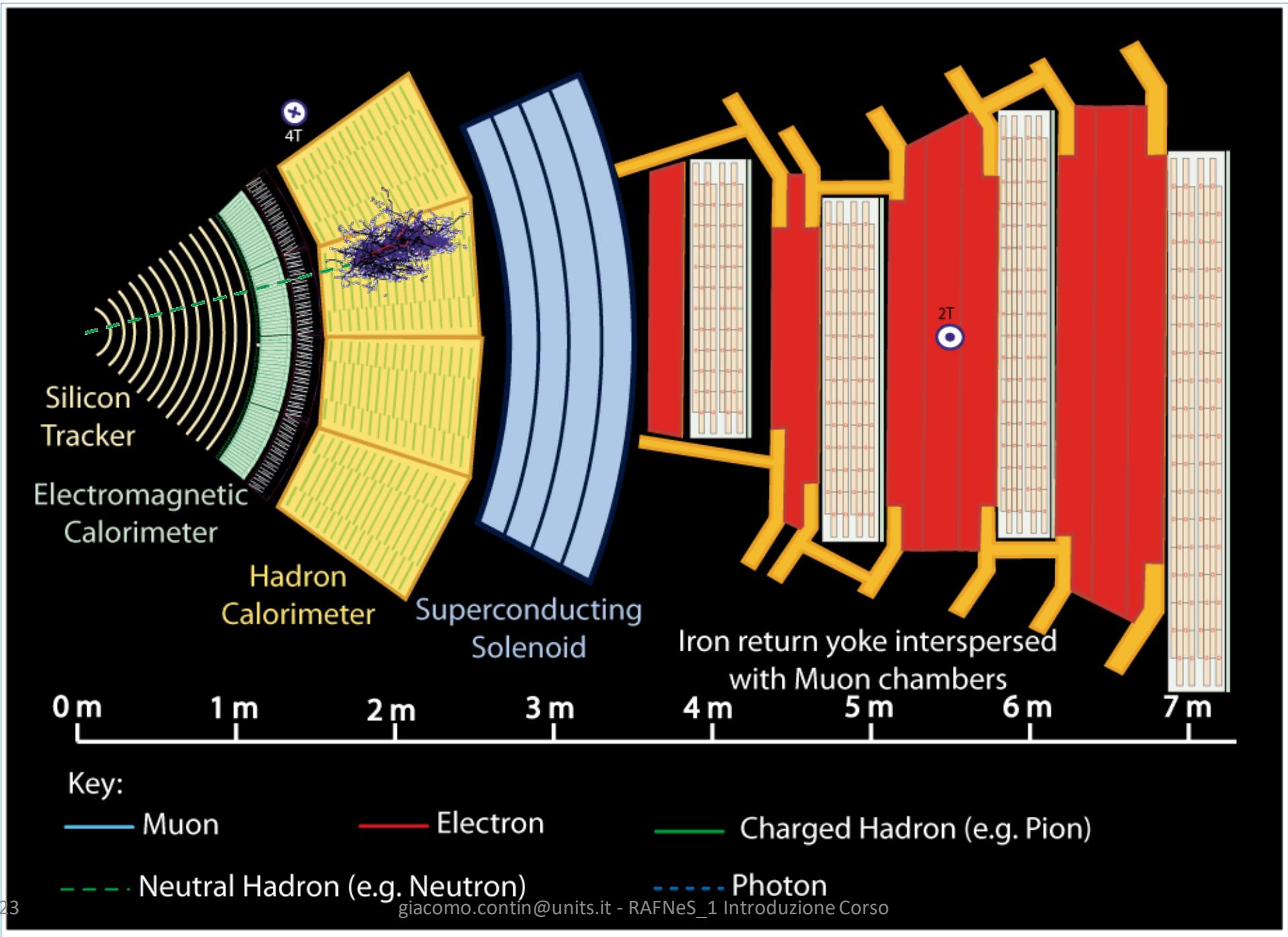
— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

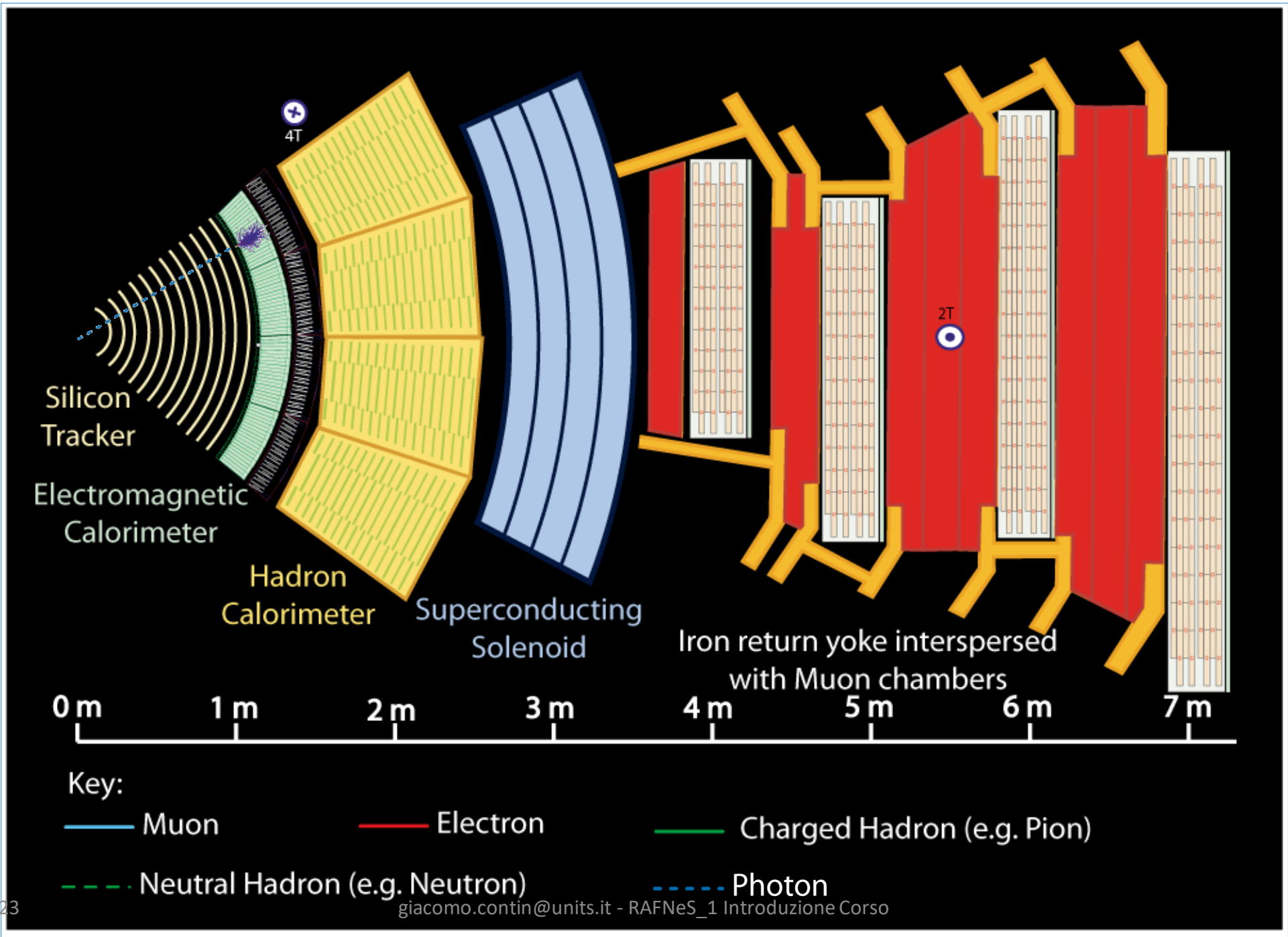
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon

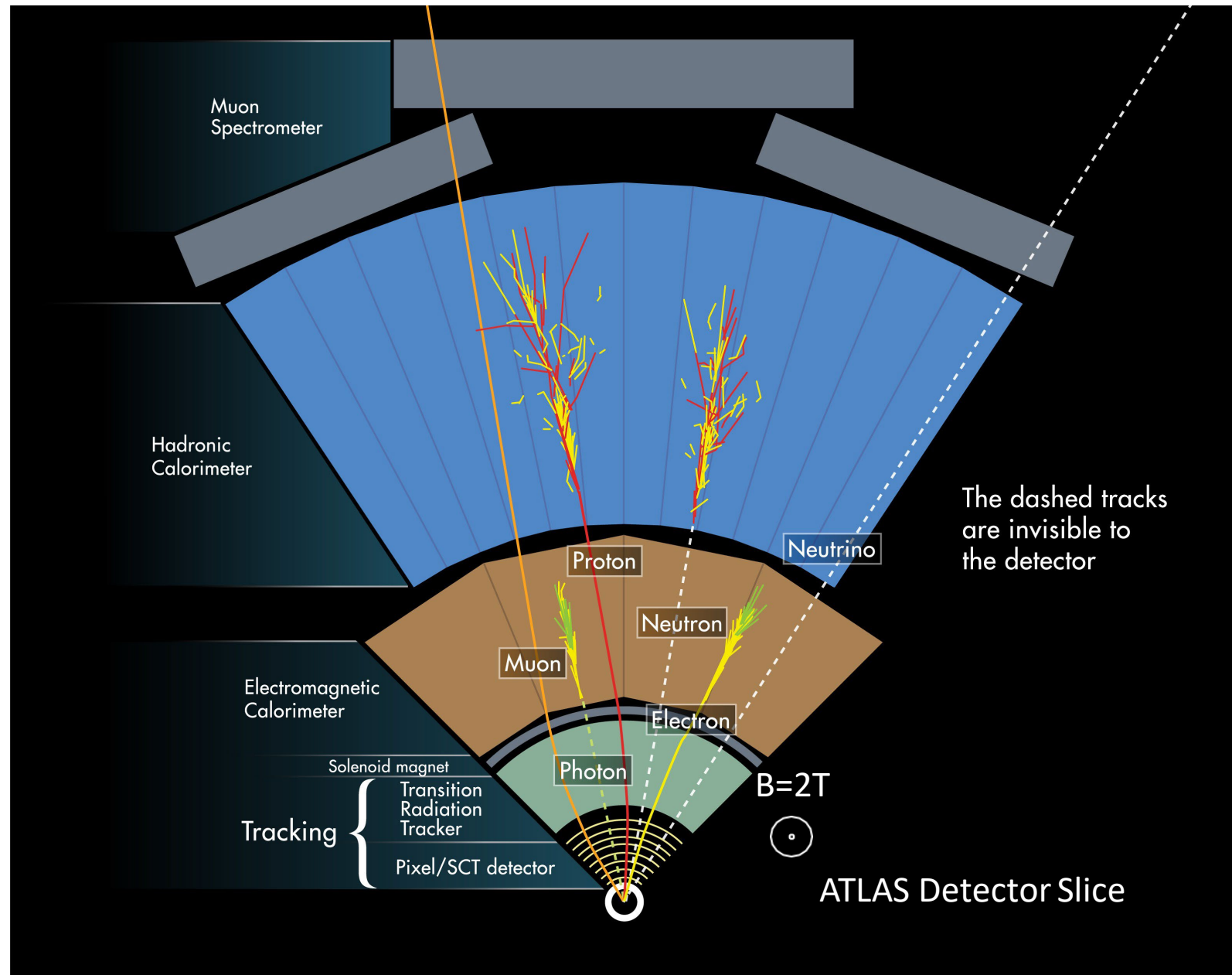
# CMS slice



# CMS slice

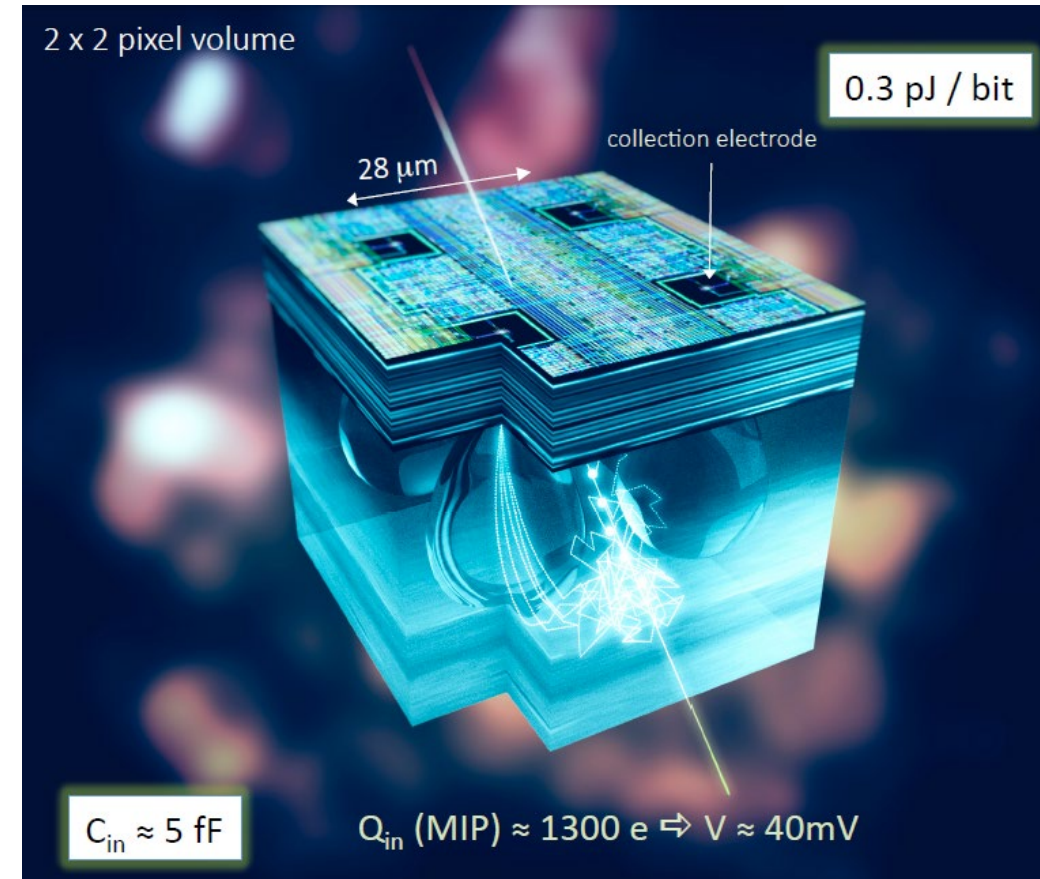


# ATLAS slice



# 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

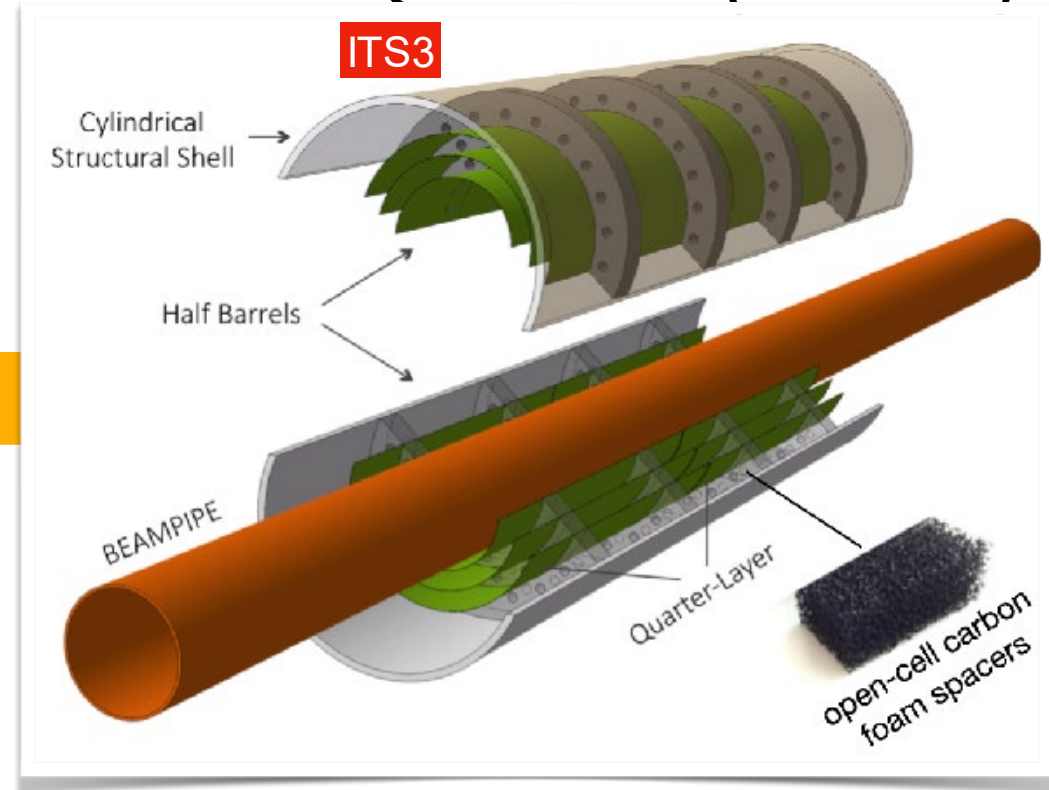


# Apparati del futuro: ALICE-ITS3 @ LHC (2027)

replace



by



in LS3

## key improvements:

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

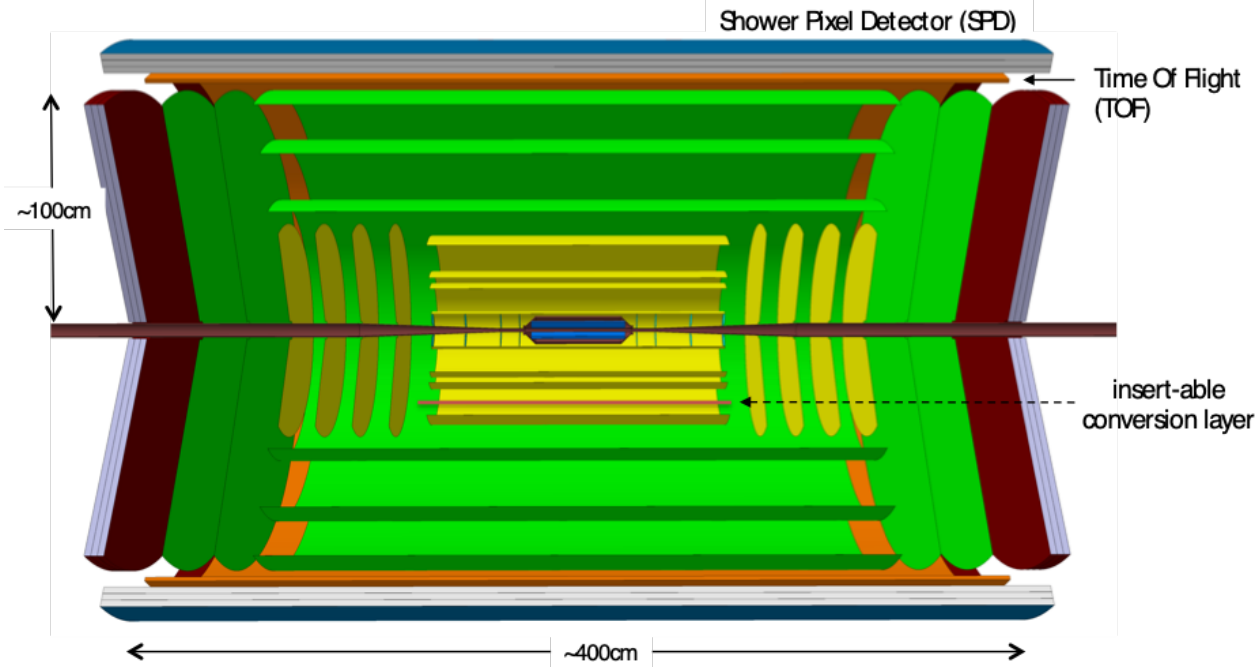
## main benefit:

- ▶ better tracking performance
- ▶ especially at low  $p_T$

## based on:

- ▶ wafer-scale (up to ~28x10 cm),
  - ▶ ultra-thin (20-40  $\mu\text{m}$ ),
  - ▶ 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
  - $\sigma \sim 20\ \text{ps}$

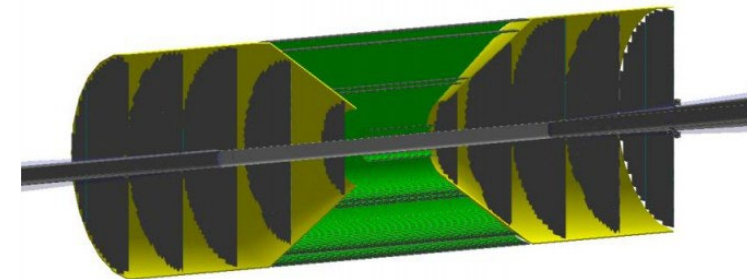
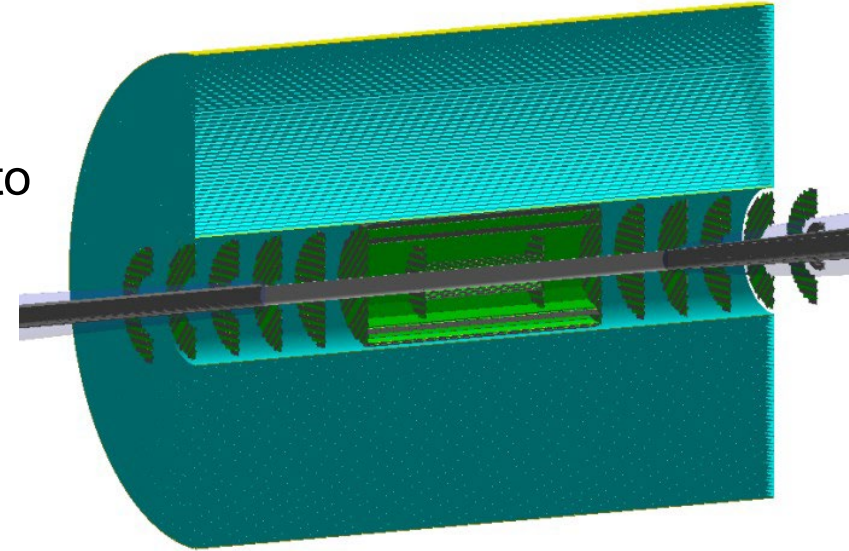


# Apparati del futuro: Electron Ion Collider (2030 - 2035)

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).

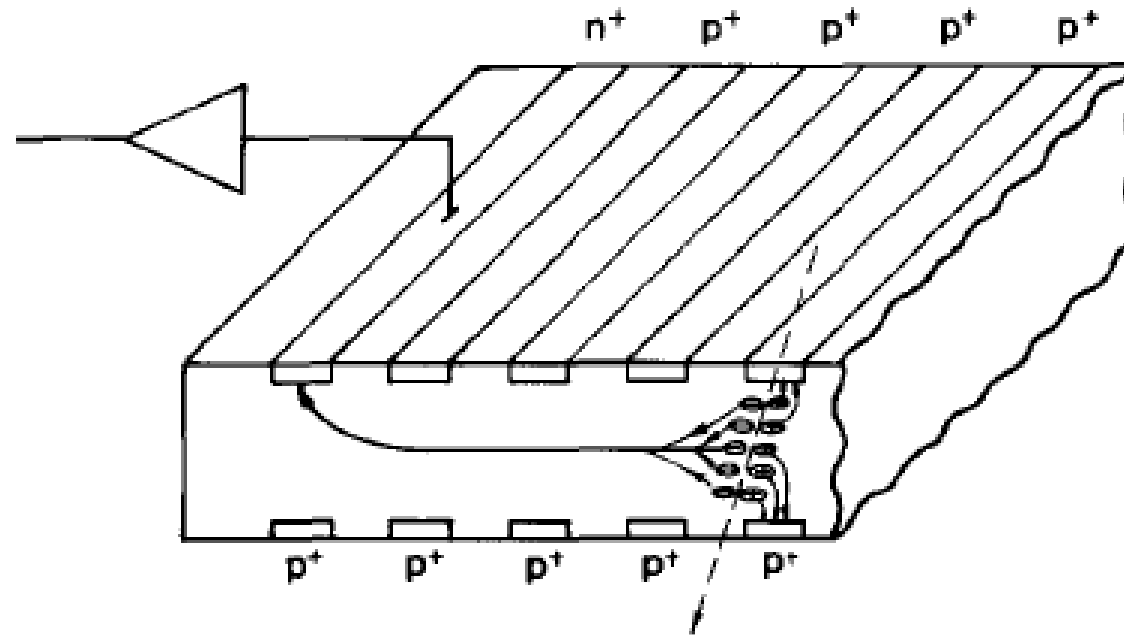
Hybrid tracker



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 $\Omega$  cm  $\rightarrow$  9 k $\Omega$  cm

THICKNESS (QE): 300  $\mu$ m  $\rightarrow$  450  $\mu$ m

## DESIGN OPTIMIZATION FOR X-RAY DETECTION AND SPACE APP.

VOTLAGE DIVIDER: reduced power

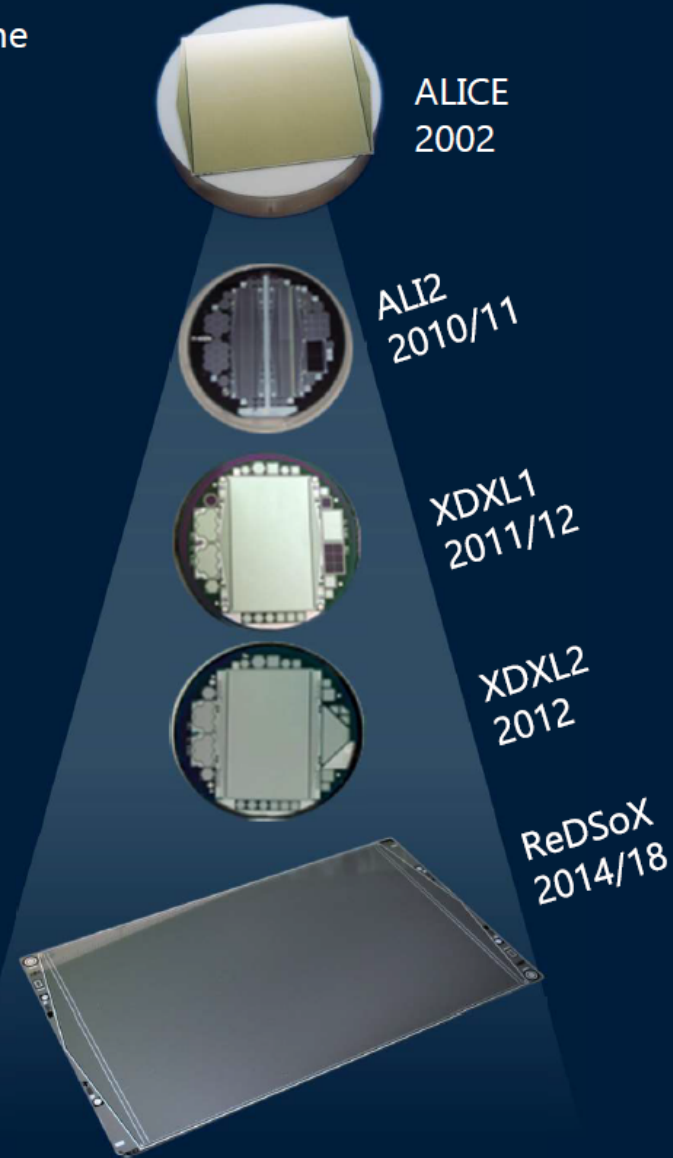
SURFACE CURRENT: minimization

Si-SiO<sub>2</sub> INTERFACE GAP: minimization

FIELD PLATE: optimization for minimal surface current

QUANTUM EFFICIENCY: optimization for low  $E_{ph}$

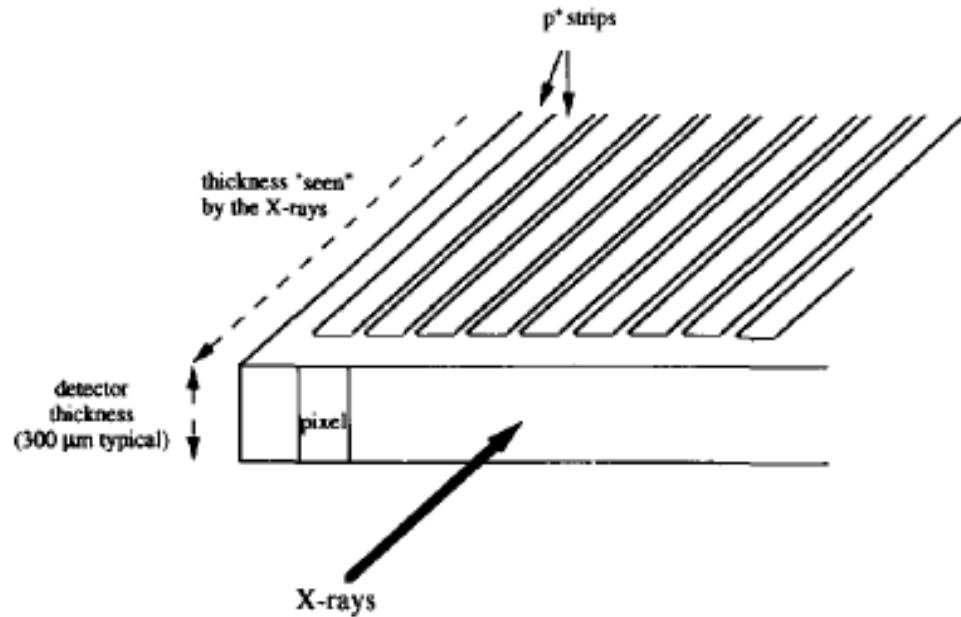
ANODE PITCH: opt. for spectral-timing & imaging



# Altre applicazioni delle Silicon Drift Detector

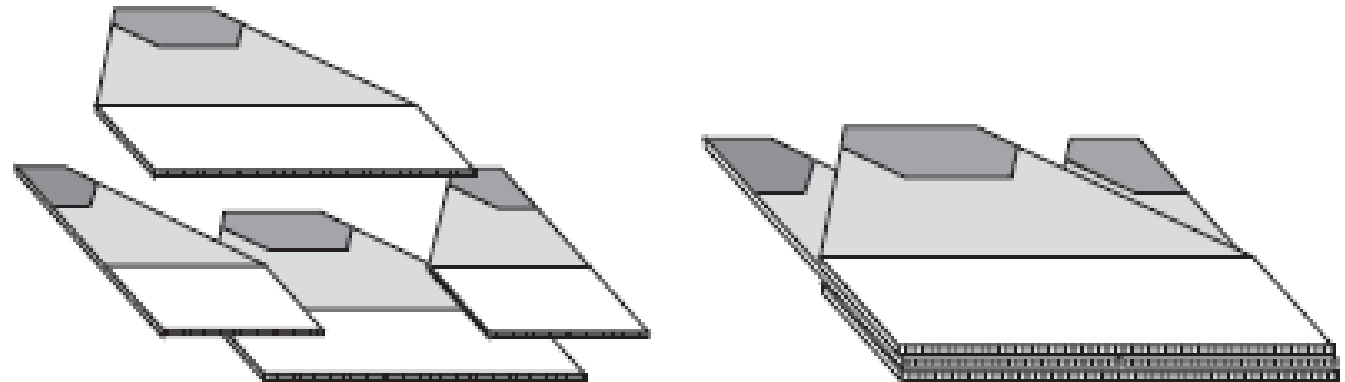
- Spettroscopia + ricostruzione posizione 2D
    - Risoluzione all'anodo di decine di  $\mu\text{m}$  per X-rays con 2 keV
    - Lunghezza di deriva piu' grossolana: non c'e' rivelazione di tempo zero (6 mm per  $E > 3.5$  keV)
- ⇒ Medical field: Compton camera
- ⇒ Nuclear physics precision spectroscopy
- ⇒ 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

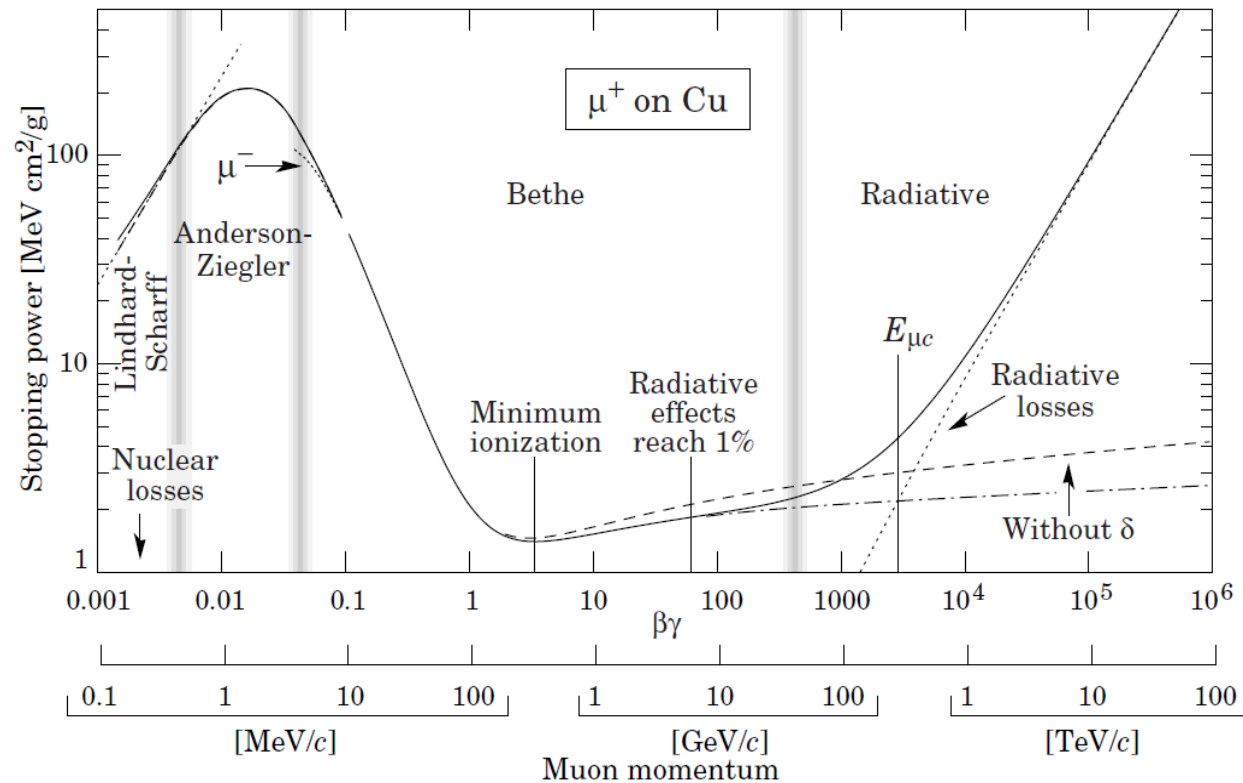


# Riassumendo...

- 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!

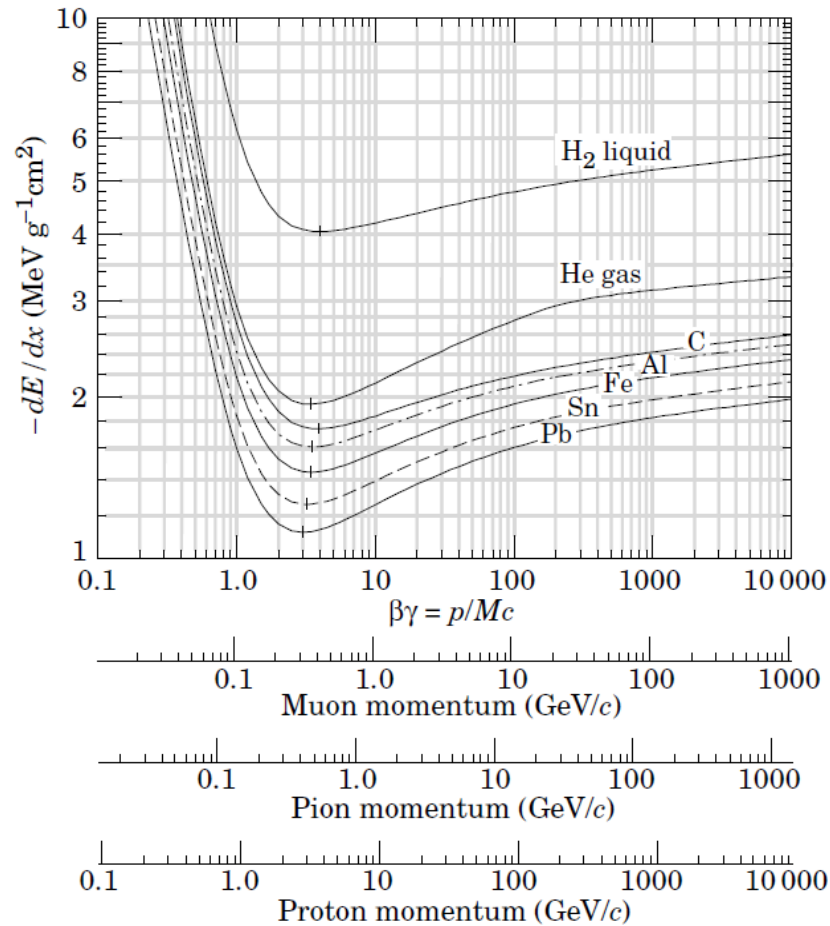


Grazie dell'attenzione!



**Fig. 27.1:** Stopping power ( $= \langle -dE/dx \rangle$ ) for positive muons in copper as a function of  $\beta\gamma = p/Mc$  over nine orders of magnitude in momentum (12 orders of magnitude in kinetic energy). Solid curves indicate the total stopping power. Data below the break at  $\beta\gamma \approx 0.1$  are taken from ICRU 49 [4], and data at higher energies are from Ref. 5. Vertical bands indicate boundaries between different approximations discussed in the text. The short dotted lines labeled “ $\mu^-$ ” illustrate the “Barkas effect,” the dependence of stopping power on projectile charge at very low energies [6].





**Figure 27.2:** Mean energy loss rate in liquid (bubble chamber) hydrogen, gaseous helium, carbon, aluminum, iron, tin, and lead. Radiative effects, relevant for muons and pions, are not included. These become significant for muons in iron for  $\beta\gamma \gtrsim 1000$ , and at lower momenta for muons in higher- $Z$  absorbers. See Fig. 27.23.

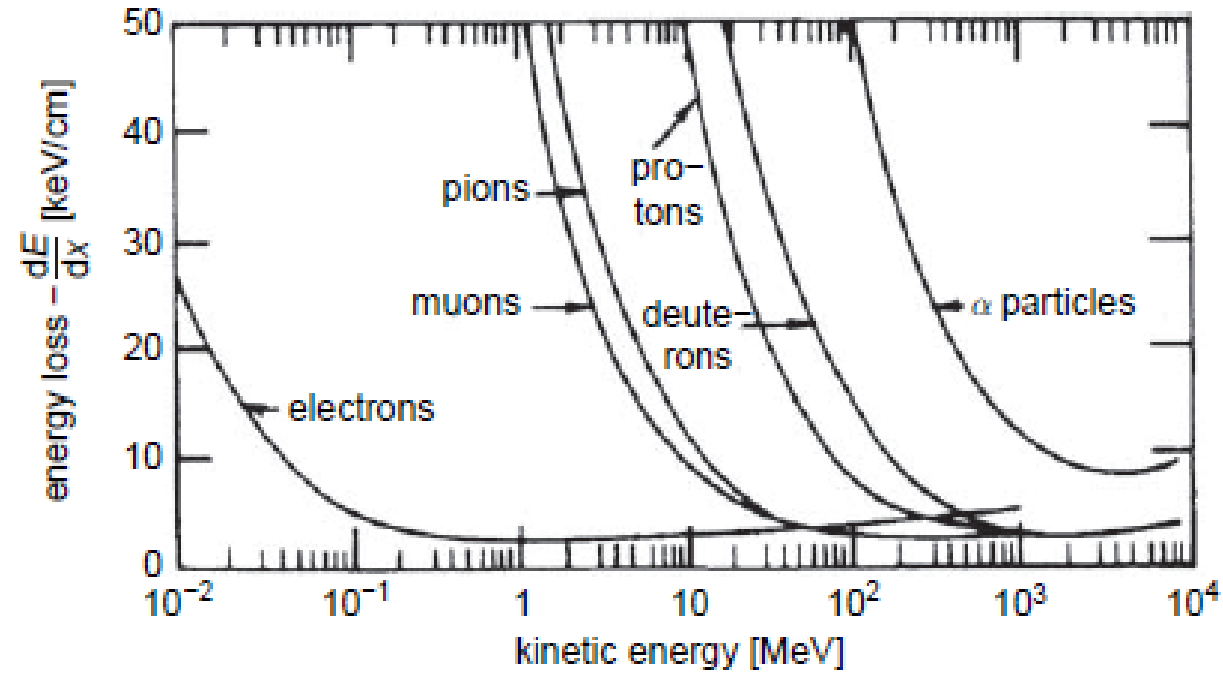


Fig. 1.2. Energy loss for electrons, muons, pions, protons, deuterons and  $\alpha$  particles in air [14].

# Grafici dE/dx

continuation of Eq. (1.04)

Material	$Z$	$A$	$X_0$ [g/cm <sup>2</sup> ]	$X_0$ [cm]	$E_c$ [MeV]
Hydrogen	1	1.01	61.3	731 000	350
Helium	2	4.00	94	530 000	250
Lithium	3	6.94	83	156	180
Carbon	6	12.01	43	18.8	90
Nitrogen	7	14.01	38	30 500	85
Oxygen	8	16.00	34	24 000	75
Aluminium	13	26.98	24	8.9	40
Silicon	14	28.09	22	9.4	39
Iron	26	55.85	13.9	1.76	20.7
Copper	29	63.55	12.9	1.43	18.8
Silver	47	109.9	9.3	0.89	11.9
Tungsten	74	183.9	6.8	0.35	8.0
Lead	82	207.2	6.4	0.56	7.40
Air	7.3	14.4	37	30 000	84
SiO <sub>2</sub>	11.2	21.7	27	12	57
Water	7.5	14.2	36	36	83

Table 1.1. Average energy loss of minimum-ionising particles in various materials [10–12]; gases for standard pressure and temperature

Absorber	$\frac{dE}{dx} \Big _{\min}$ [ $\frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$ ]	$\frac{dE}{dx} \Big _{\min}$ [ $\frac{\text{MeV}}{\text{cm}}$ ]
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	4.10	$0.37 \cdot 10^{-3}$
Helium	1.94	$0.35 \cdot 10^{-3}$
Lithium	1.64	0.87
Beryllium	1.59	2.94
Carbon (Graphite)	1.75	3.96
Nitrogen	1.82	$2.28 \cdot 10^{-3}$
Oxygen	1.80	$2.57 \cdot 10^{-3}$
Air	1.82	$2.35 \cdot 10^{-3}$
Carbon dioxide	1.82	$3.60 \cdot 10^{-3}$
Neon	1.73	$1.56 \cdot 10^{-3}$
Aluminium	1.62	4.37
Silicon	1.66	3.87
Argon	1.52	$2.71 \cdot 10^{-3}$
Titanium	1.48	6.72
Iron	1.45	11.41
Copper	1.40	12.54
Germanium	1.37	7.29
Tin	1.26	9.21
Xenon	1.25	$7.32 \cdot 10^{-3}$
Tungsten	1.15	22.20
Platinum	1.13	24.24
Lead	1.13	12.83
Uranium	1.09	20.66
Water	1.99	1.99
Lucite	1.95	2.30
Shielding concrete	1.70	4.25
Quartz (SiO <sub>2</sub> )	1.70	3.74

Table 2.1 Values of  $Z$ ,  $Z/A$ ,  $I$ ,  $\rho$ ,  $h\nu_p$  and density-effect parameters  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $a$ ,  $md$ , and  $\delta_0$  for some elemental substances.

El.	$Z$	$Z/A$	$I$ eV	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$h\nu_p$ eV	$S_0$	$S_1$	$a$	$md$	$\delta_0$
He	2	0.500	41.8	$1.66 \times 10^{-4}$	0.26	2.202	3.612	0.134	5.835	0.00
Li	3	0.432	40.0	0.53	13.84	0.130	1.640	0.951	2.500	0.14
O	8	0.500	95.0	$1.33 \times 10^{-3}$	0.74	1.754	4.321	0.118	3.291	0.00
Ne	10	0.496	137.0	$8.36 \times 10^{-4}$	0.59	2.074	4.642	0.081	3.577	0.00
Al	13	0.482	166.0	2.70	32.86	0.171	3.013	0.080	3.635	0.12
Si	14	0.498	173.0	2.33	31.06	0.201	2.872	0.149	3.255	0.14
Ar	18	0.451	188.0	$1.66 \times 10^{-3}$	0.79	1.764	4.486	0.197	2.962	0.00
Fe	26	0.466	286.0	7.87	55.17	-0.001	3.153	0.147	2.963	0.12
Cu	29	0.456	322.0	8.96	58.27	-0.025	3.279	0.143	2.904	0.08
Ge	32	0.441	350.0	5.32	44.14	0.338	3.610	0.072	3.331	0.14
Kr	36	0.430	352.0	$3.48 \times 10^{-3}$	1.11	1.716	5.075	0.074	3.405	0.00
Ag	47	0.436	470.0	10.50	61.64	0.066	3.107	0.246	2.690	0.14
Xe	54	0.411	482.0	$5.49 \times 10^{-3}$	1.37	1.563	4.737	0.233	2.741	0.0
Ta	73	0.403	718.0	16.65	74.69	0.212	3.481	0.178	2.762	0.14
W	74	0.403	727.0	19.30	80.32	0.217	3.496	0.155	2.845	0.14
Au	79	0.401	790.0	19.32	80.22	0.202	3.698	0.098	3.110	0.14
Pb	82	0.396	823.0	11.35	61.07	0.378	3.807	0.094	3.161	0.14
U	92	0.387	890.0	18.95	77.99	0.226	3.372	0.197	2.817	0.14

Data are from [Sternheimer, Berger and Seltzer (1984)]

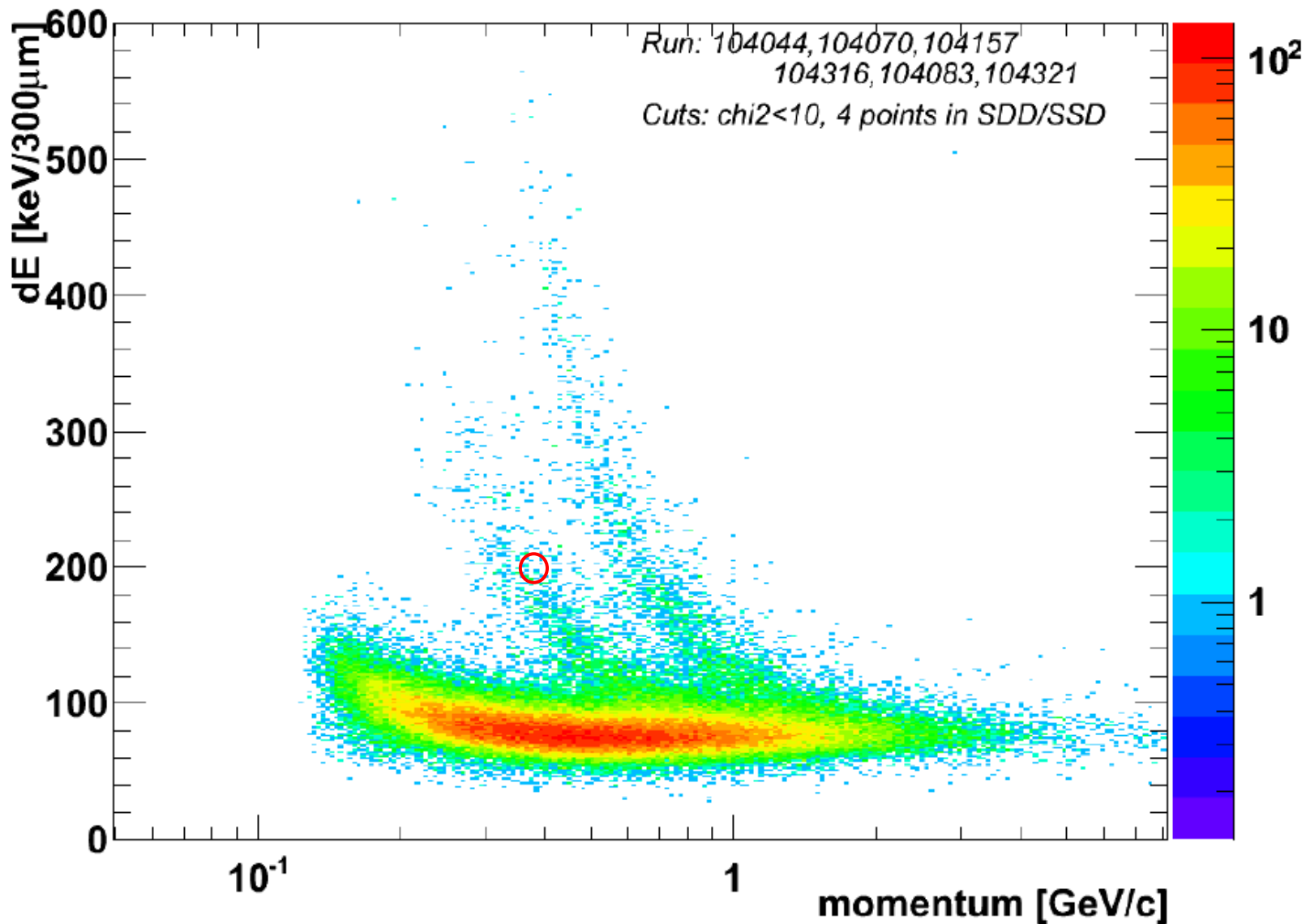
Table 2.2 Values of  $Z/A$ ,  $I$ ,  $\rho$ ,  $h\nu_p$  and density-effect parameters  $S_0$ ,  $S_1$ ,  $a$ , and  $md$  for some compounds and mixtures.

Material	$Z/A$	$I$ eV	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	$h\nu_p$ eV	$S_0$	$S_1$	$a$	$md$
(dry) Air at sea level	0.499	85.7	$1.21 \times 10^{-3}$	0.71	1.742	4.276	0.109	3.399
Anthracene	0.527	69.5	1.28	23.70	0.115	2.521	0.147	3.283
Ethane	0.599	45.4	$1.25 \times 10^{-3}$	0.79	1.511	3.874	0.096	3.610
Ethyl Alcohol	0.564	62.9	0.79	19.23	0.222	2.705	0.099	3.483
Freon-12	0.480	143.0	1.12	21.12	0.304	3.266	0.080	3.463
(lead) Glass	0.421	526.4	6.22	46.63	0.061	3.815	0.095	3.074
Kapton, polyimide film	0.513	79.6	1.42	24.59	0.151	2.563	0.160	3.192
Lithium carbonate	0.487	87.9	2.11	29.22	0.055	2.660	0.099	3.542
Methane	0.623	41.7	$6.67 \times 10^{-4}$	0.59	1.626	3.972	0.093	3.626
Methanol	0.562	67.6	0.79	19.21	0.253	2.764	0.090	3.548
Plastic scint., vinyltoluene	0.541	64.7	1.03	21.54	0.146	2.486	0.161	3.239
Polyethylene	0.570	57.4	0.94	21.10	0.137	2.518	0.121	3.429
Propane	0.590	47.1	$1.88 \times 10^{-3}$	0.96	1.433	3.800	0.099	3.592
Lucite	0.539	74.0	1.19	23.09	0.182	2.668	0.114	3.384
Silicon dioxide	0.499	139.2	2.32	31.01	0.139	3.003	0.084	3.506
Tissue, soft (ICRP)	0.551	72.3	1.00	21.39	0.221	2.780	0.089	3.511
Tissue, soft (ICRP four-comp.)	0.550	74.9	1.00	21.37	0.238	2.791	0.096	3.437
Tissue-equiv., gas (methane base)	0.550	61.2	$1.06 \times 10^{-3}$	0.70	1.644	4.140	0.099	3.471
Tissue-equiv., gas (propane base)	0.550	59.5	$1.83 \times 10^{-3}$	0.91	1.514	3.992	0.098	3.516

Data are from [Sternheimer, Berger and Seltzer (1984)]

# dEdX distribution (ITS signal, truncated mean)

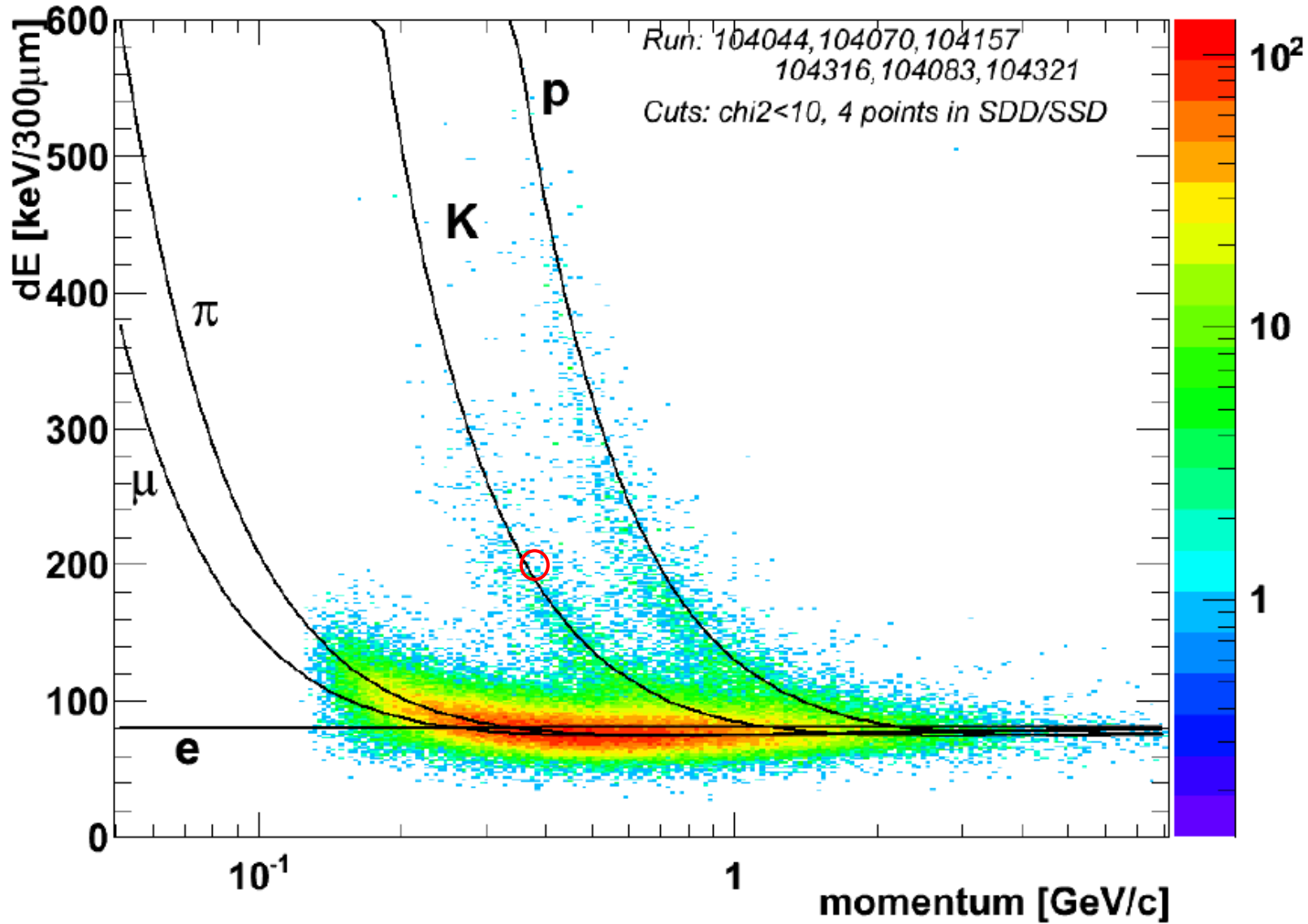
Entries 116536



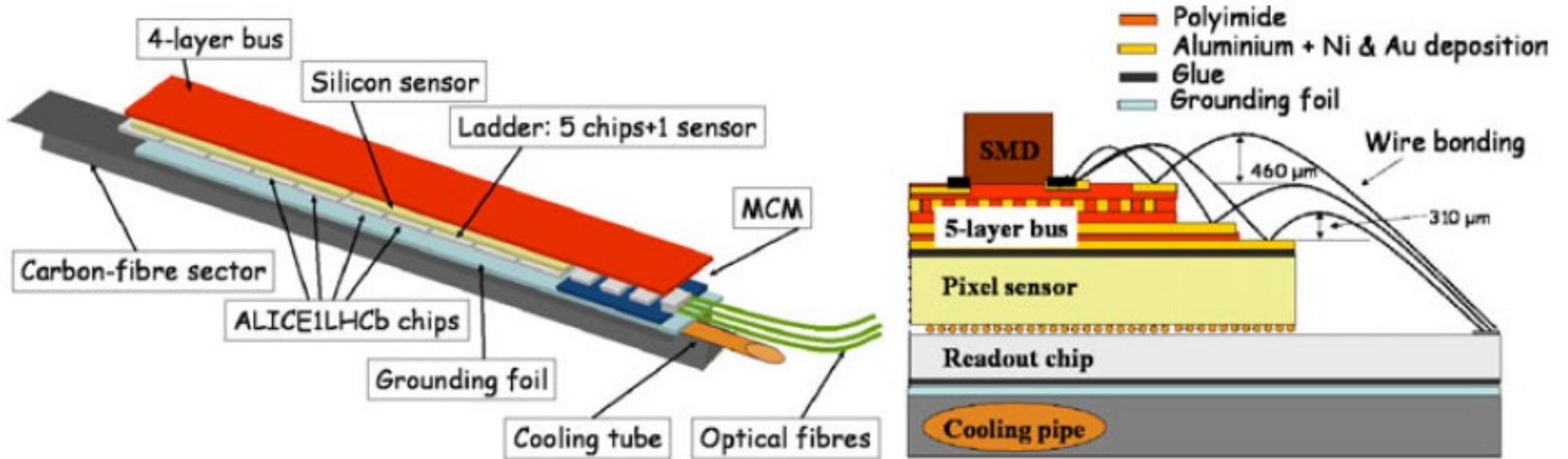
- Istogramma a dispersion carica ricostruita da 4 misure
- Esempio: 200 keV @ quantita' di moto p=400 MeV/c
- Che tipo di particella e'?

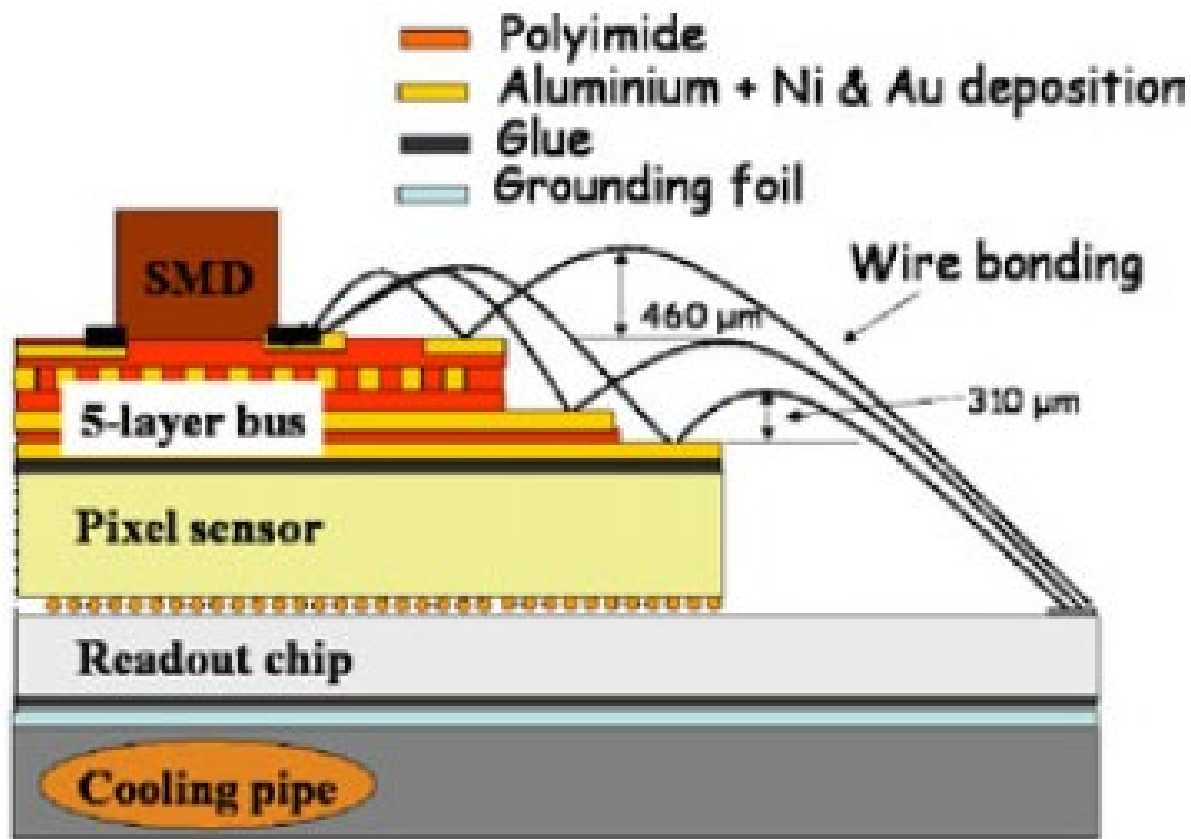
# dEdX distribution (ITS signal, truncated mean)

Entries 116536



# Silicon Pixel Detector – ALICE (2008 – 2019)



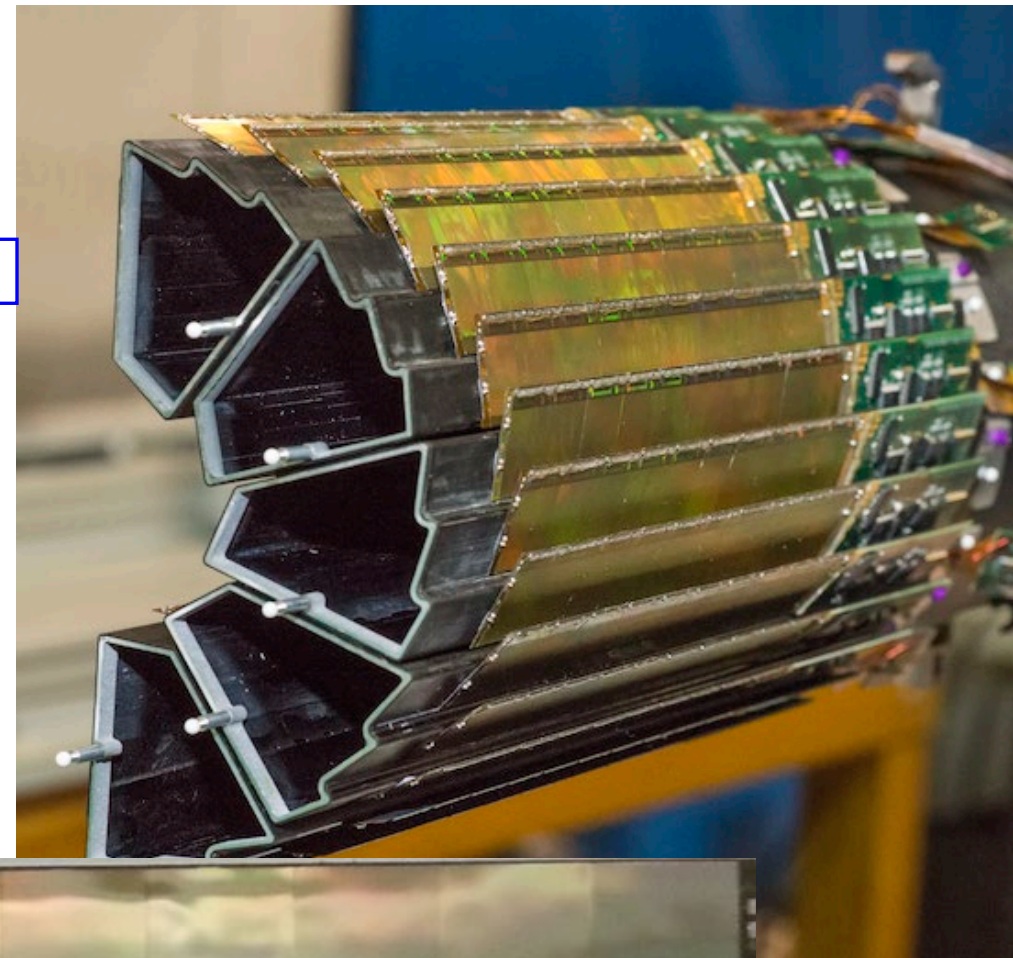
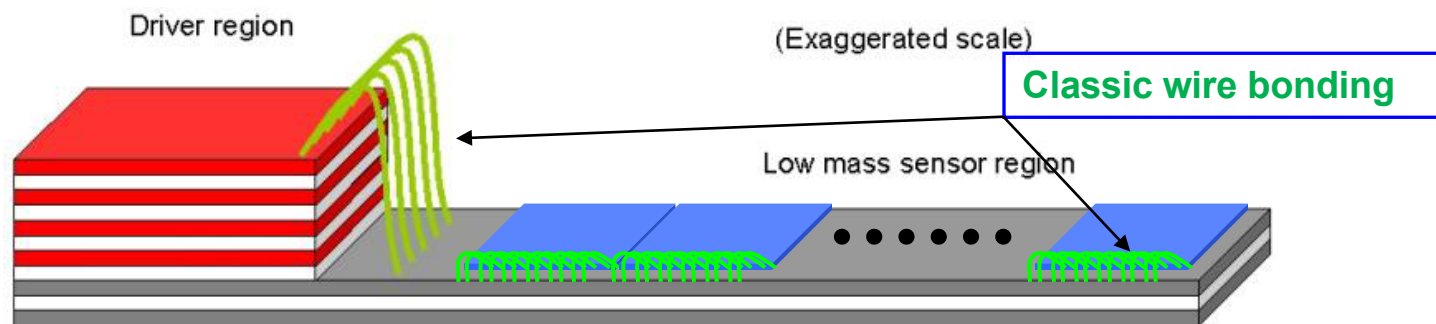


SPD Element	Thickness $\mu\text{m}$	% $X_0$
<b>Al Bus</b>		
Kapton	60	0.021
Al power	100	0.112
Al signals [50% of total surface]	17.5	0.020
Glue Epoxy	70	0.016
SMD components	16.4	0.173
<b>Total bus</b>		<b>0.341</b>
<b>Other Components</b>		
Pixel chip	150	0.160
Sensor	200	0.214
Bump bonds Sn 60%+Pb 40%	0.18+0.12	0.004
Grounding Foil-Kapton/Al	50+10	0.029
Glue Epoxy/thermal grease	200	0.049
Carbon fiber	200	0.106
<b>Total components</b>		<b>0.561</b>
<b>Total bus and components</b>		<b>0.903</b>

MATERIAL BUDGET OF ONE SPD LAYER



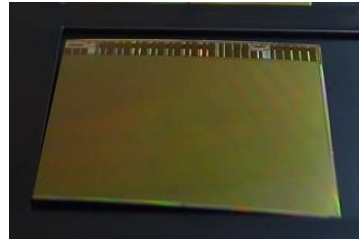
# HFT Pixel detector – STAR (BNL) – 2014-2016



# PXL Material Budget

- Thinned Sensor

- 50  $\mu\text{m}$
- 0.068%  $X_0$

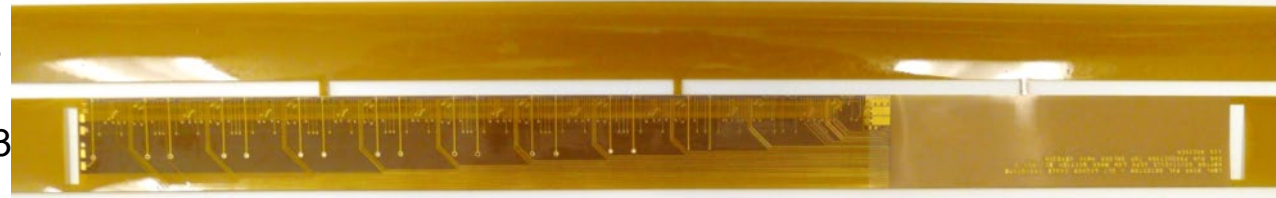


- ▶ Curved sensor
- ▶ 40-60% yield after thinning, dicing and probe testing
- ▶ Fully characterized before installation

- ▶ Power and signal lines
- ▶ Wire bond encapsulant largest contribution
- ▶ Acrylic adhesive to deal with different CTE

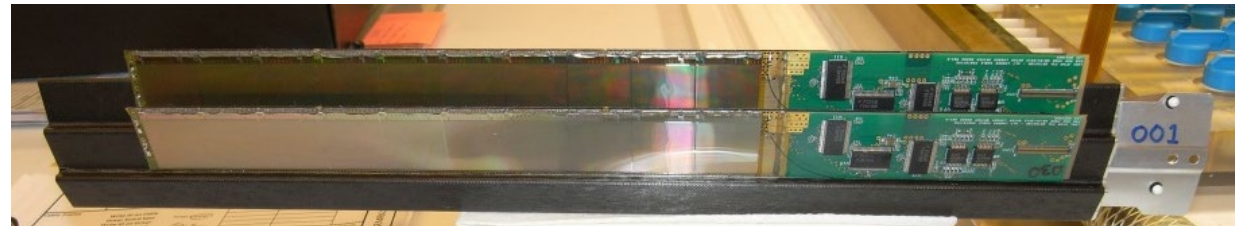
- Flex Cable

- Aluminum-Kapton
- two 32  $\mu\text{m}$ -thick Al layers
- 0.128%  $X_0$ 
  - Copper version  $\rightarrow$  0.23



- Carbon fiber supports

- 125  $\mu\text{m}$  stiffener
- 250  $\mu\text{m}$  sector tube
- 0.193%  $X_0$



- Cooling

- Air cooling: negligible contribution

- **Total material budget on inner layer: 0.388%  $X_0$**   
(0.492%  $X_0$  for the Cu conductor version)

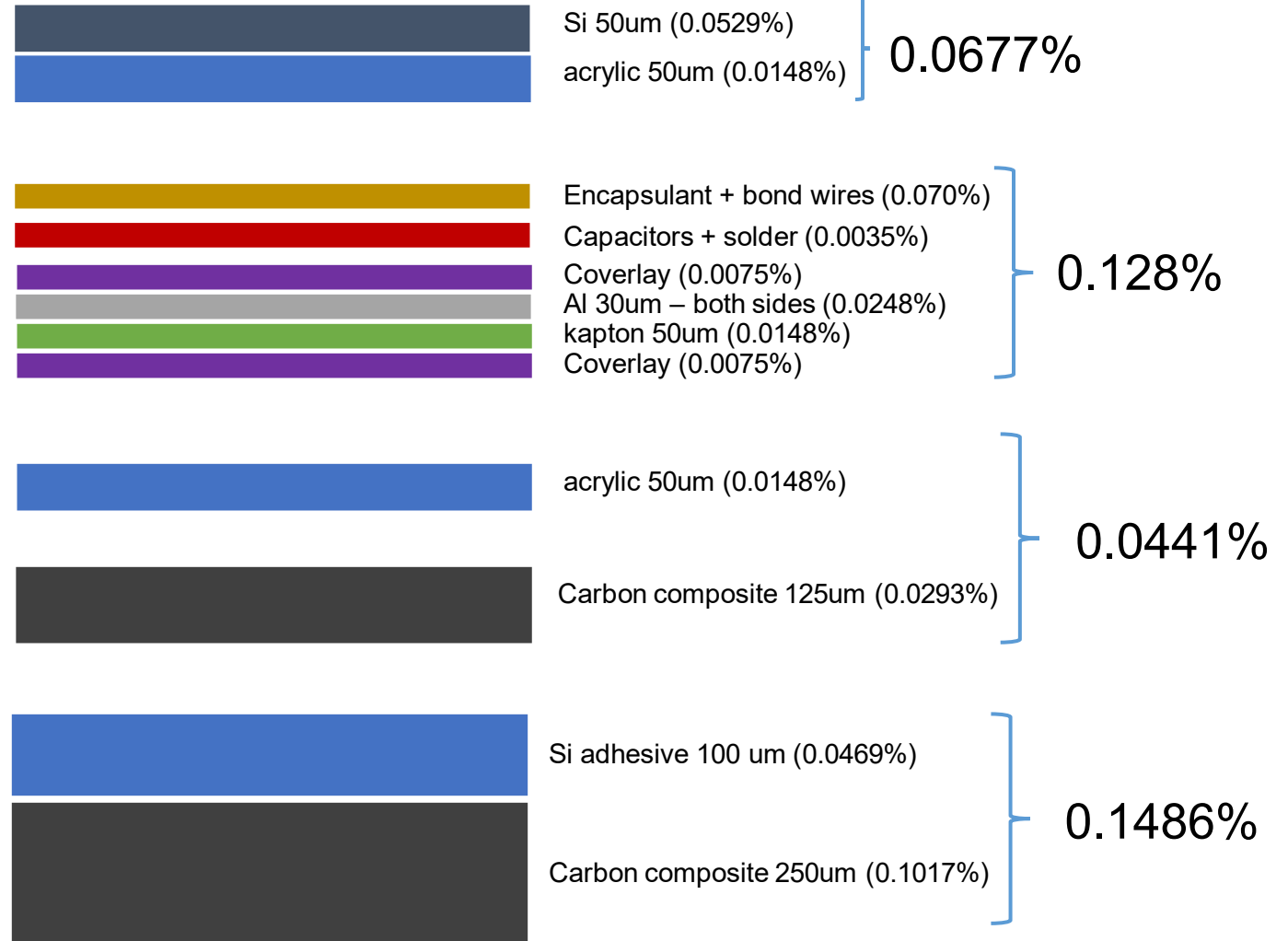
SPD

# Material budget comparison

HFT

SPD Element	Thickness $\mu\text{m}$	% $X_0$
<b>Al Bus</b>		
Kapton	60	0.021
Al power	100	0.112
Al signals [50% of total surface]	17.5	0.020
Glue Epoxy	70	0.016
SMD components	16.4	0.173
<b>Total bus</b>		<b>0.341</b>
<b>Other Components</b>		
Pixel chip	150	0.160
Sensor	200	0.214
Bump bonds Sn 60%+Pb 40%	0.18+0.12	0.004
Grounding Foil-Kapton/Al	50+10	0.029
Glue Epoxy/thermal grease	200	0.049
Carbon fiber	200	0.106
<b>Total components</b>		<b>0.561</b>
<b>Total bus and components</b>		<b>0.903</b>

MATERIAL BUDGET OF ONE SPD LAYER



**Total = 0.388%**