



ITALIAN PHYSICAL SOCIETY
SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

107° Congresso Nazionale
13-17 Settembre 2021

I tracciatori al silicio nella fisica delle particelle elementari

Enrico Robutti
INFN Genova



enrico.robutti@ge.infn.it

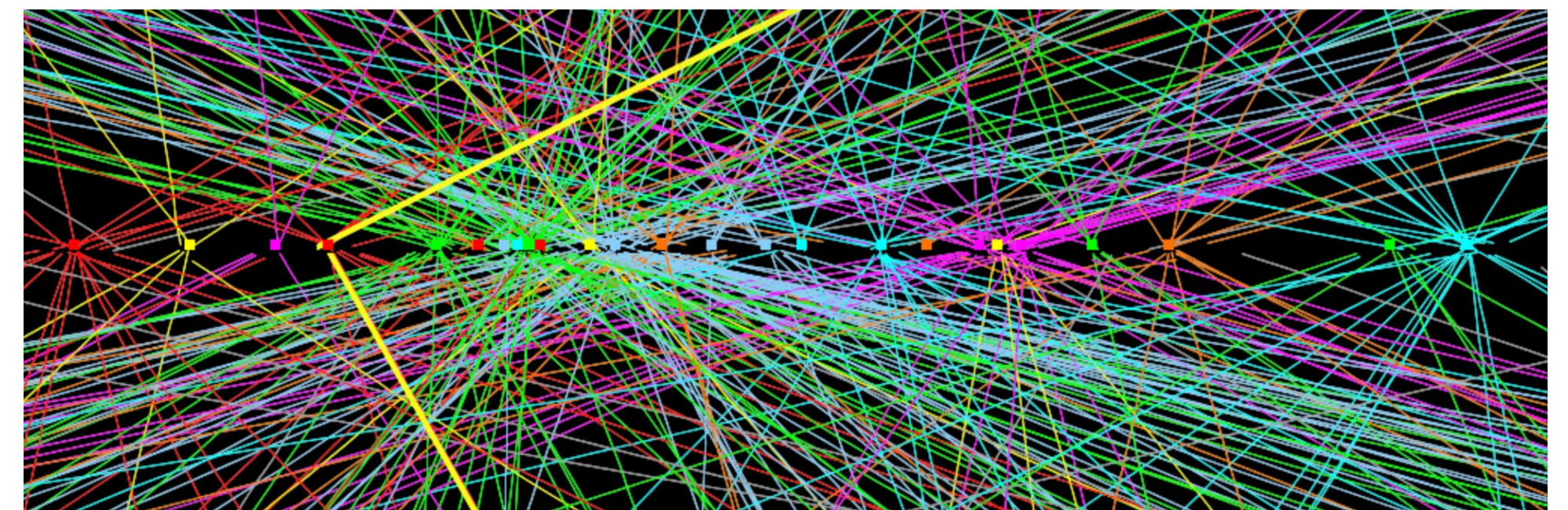
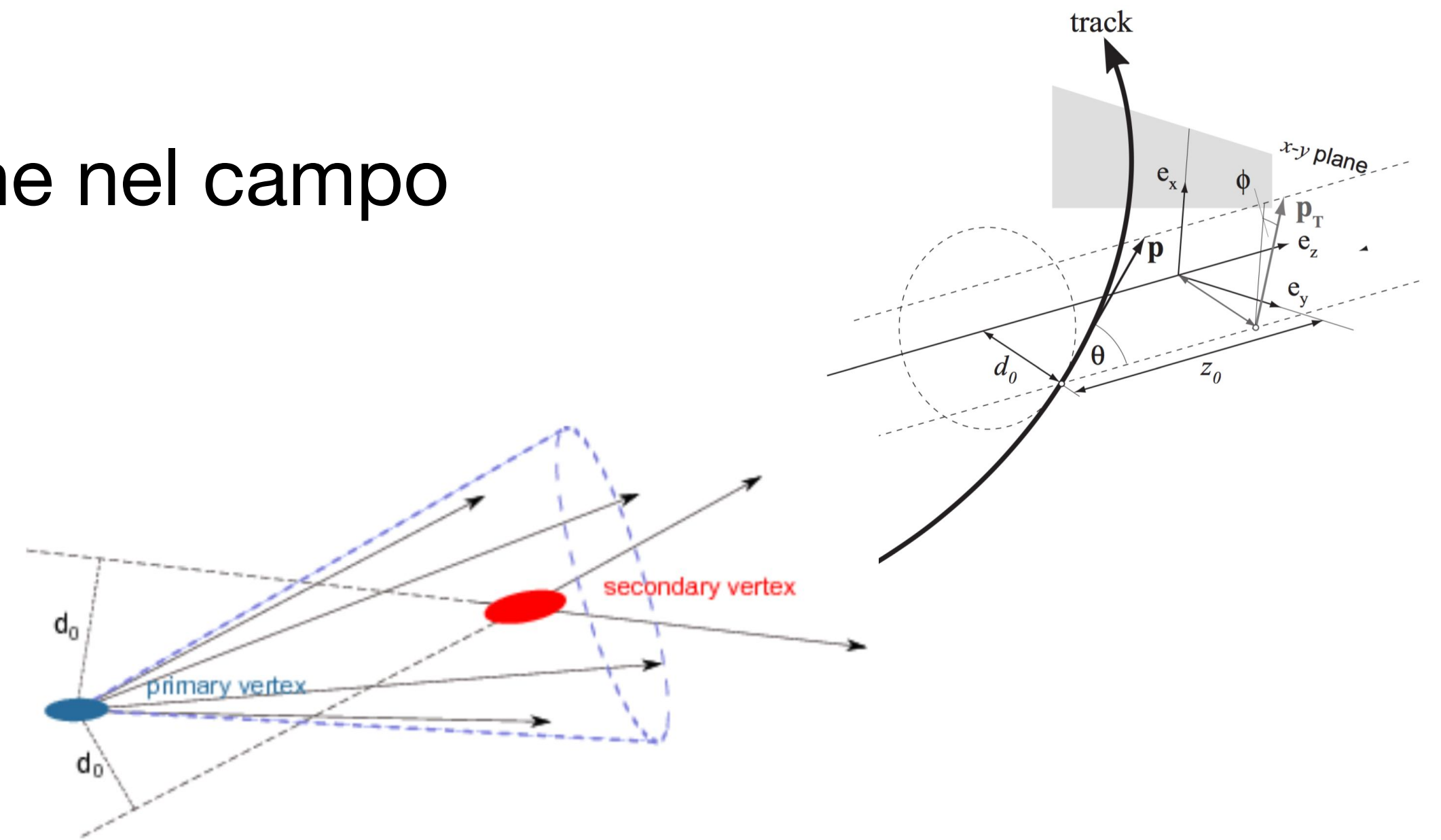


I tracciatori nella fisica delle particelle



I tracciatori sono uno degli elementi indispensabili negli esperimenti di fisica delle particelle:

- ricostruiscono la traiettoria delle particelle cariche nel campo magnetico
 - \implies carica, impulso
- ricostruiscono i vertici di decadimento
 - vertici secondari \implies particelle a vita media breve (essenziali p.es. per misure di oscillazioni)
- in contesti di alta luminosità e sezione d'urto (LHC) separano vertici primari dovuti a interazioni sovrapposte (pileup)

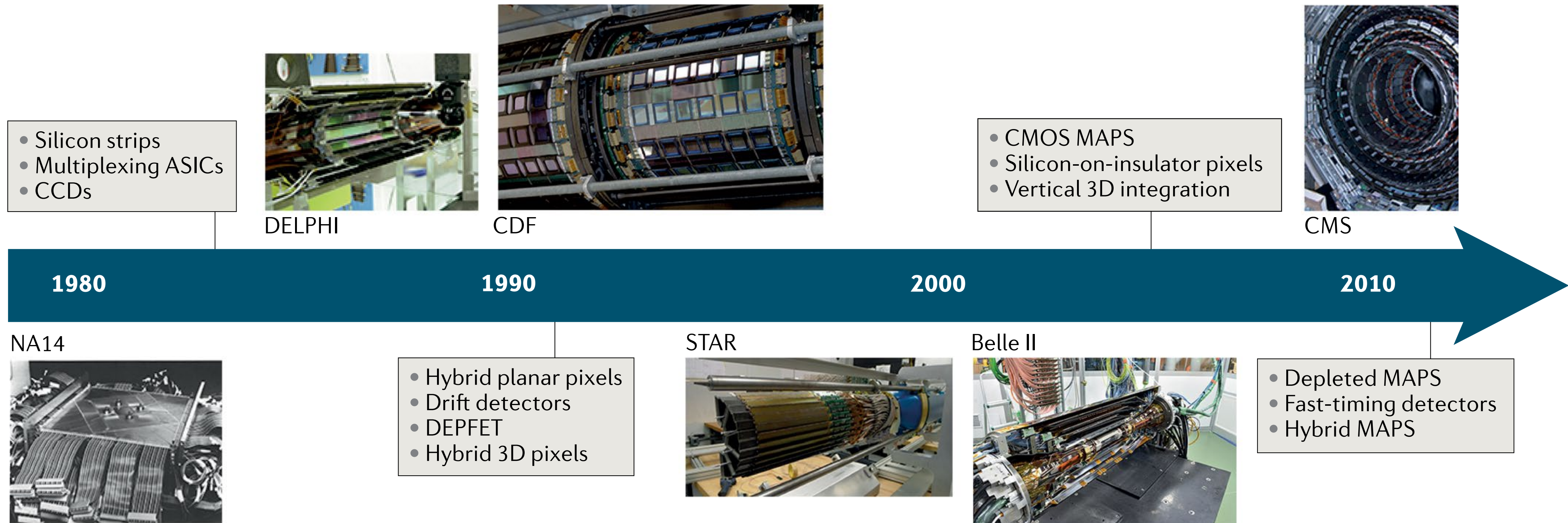




L'era dei tracciatori al silicio



A partire dagli anni '80, dispositivi a semiconduttore, principalmente silicio, hanno cominciato ad essere utilizzati come tracciatori



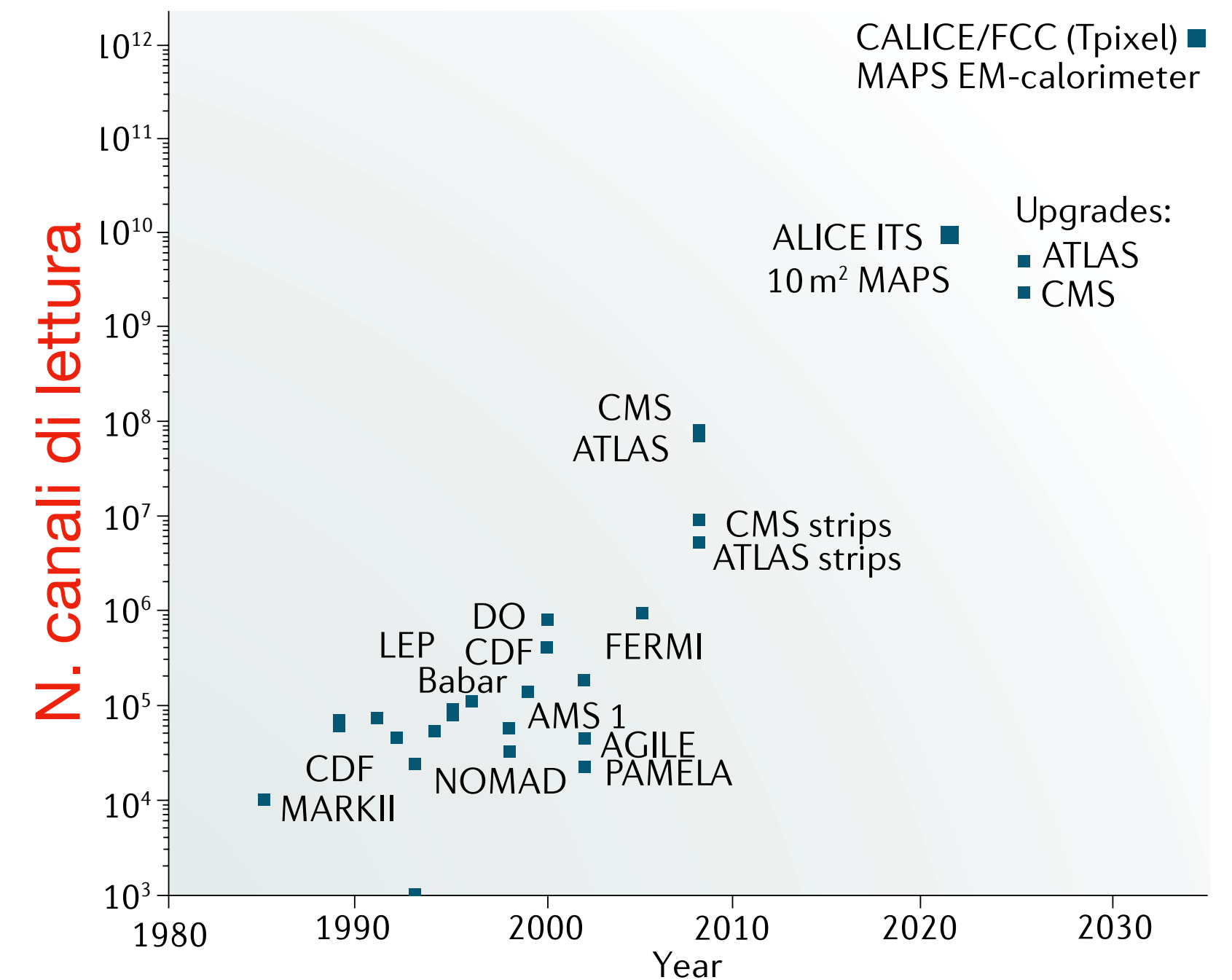
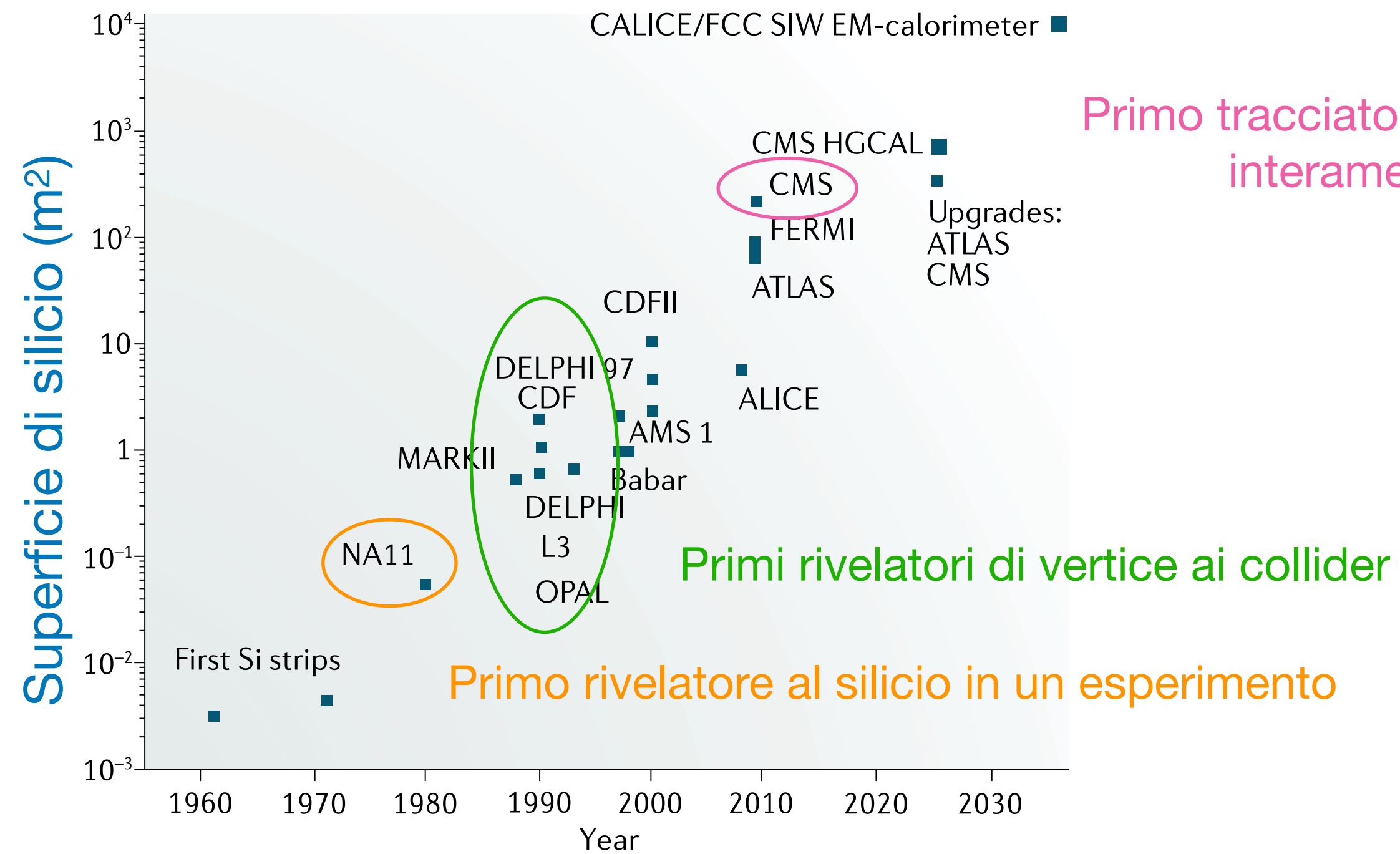
Gran numero di diverse tecnologie sviluppate negli anni per soddisfare diverse esigenze degli esperimenti



L'era dei tracciatori al silicio



Negli anni, il silicio sempre più spesso si è affiancato nei tracciatori ad altre tecnologie (principalmente a gas), in alcuni casi rimpiazzandole completamente



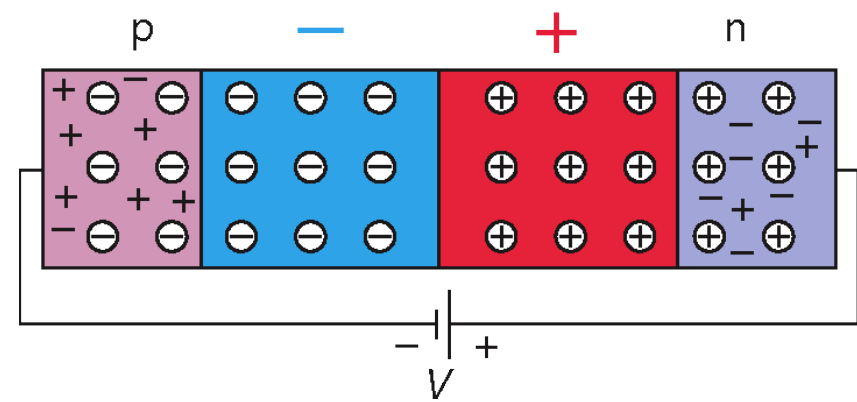
La tendenza all'aumento della superficie equipaggiata da sensori al silicio, e del numero di canali di lettura, continua



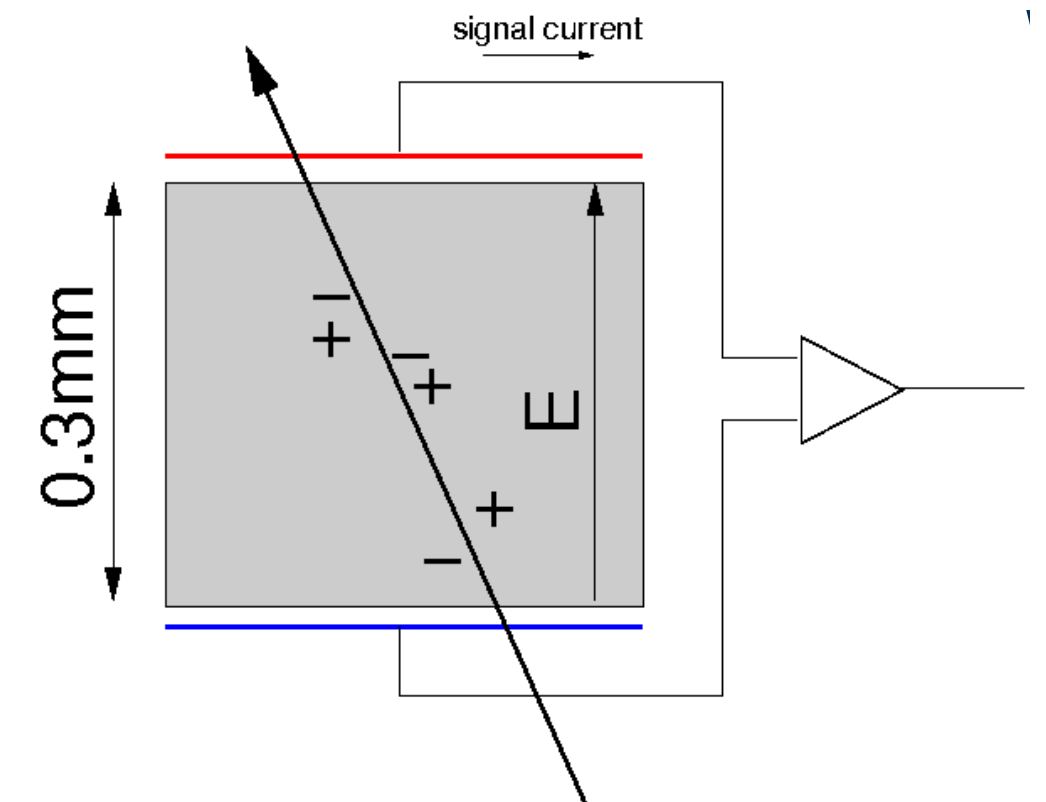
Le basi



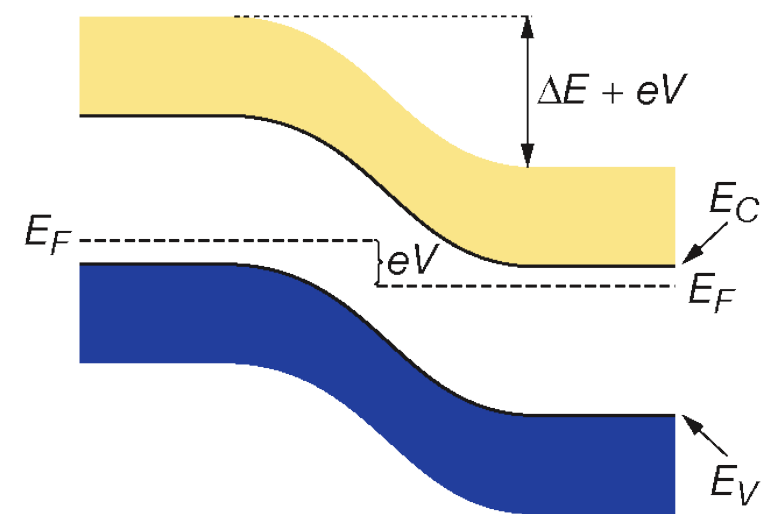
Rivelatori a ionizzazione: gli ioni (elettroni, lacune) prodotte dal passaggio delle particelle cariche vengono raccolti dagli elettrodi



Normalmente costituiti da una giunzione p-n polarizzata inversamente

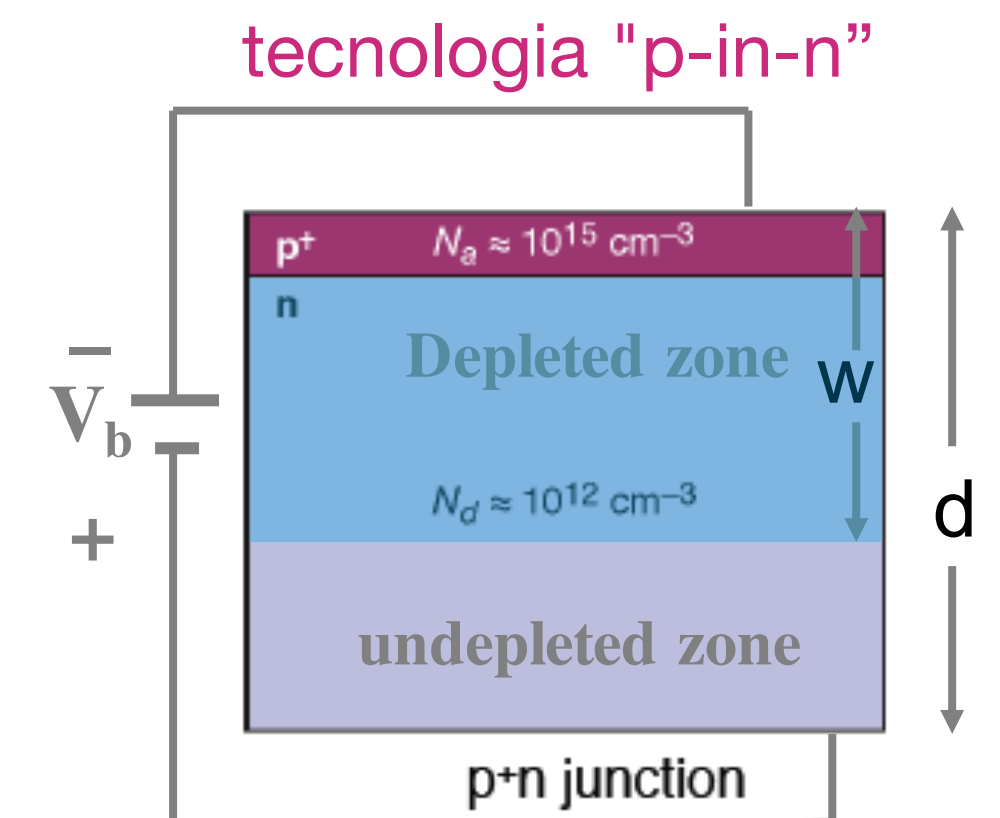


- \implies regione di svuotamento senza portatori di carica intrinseci
- l'alto campo elettrico fa migrare rapidamente le cariche verso gli elettrodi



In pratica realizzati a partire da un volume (bulk) a modesto drogaggio (\implies alta resistività, $\sim 5 \text{ k}\Omega \text{ cm}$), con impianti a drogaggi più elevati per realizzare la giunzione, i contatti ohmici e altre strutture specializzate

- P.es., substrato tipo n, $N_d = 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, impianto p^+ , $N_a = 10^{15} \text{ cm}^{-3}$





Pro e contro



Pro

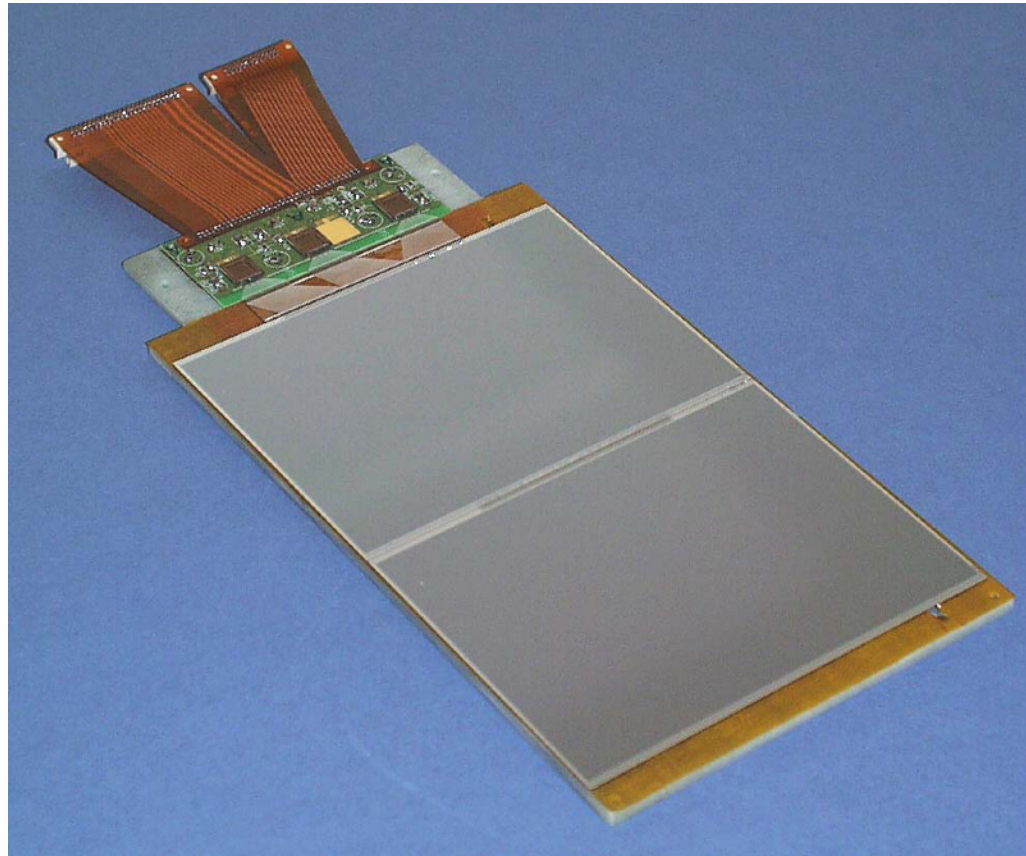
- Bassa energia di ionizzazione: ~ 3 eV/coppia (contro 20-40 eV nei gas)
 \implies strati sottili
- Diffusione delle cariche limitata \implies ottima risoluzione $\approx 10 \mu\text{m}$
- Possibile segmentazione molto fine
- Tempi di raccolta segnale rapidi \implies ottima risoluzione temporale (≈ 30 ps) in disegni ottimizzati
- Possibilità di integrare l'elettronica di lettura

Contro

- Alto numero di canali di lettura
- Costo
- Potenza dissipata \implies circuiti di raffreddamento complessi



Rivelatori a microstrip

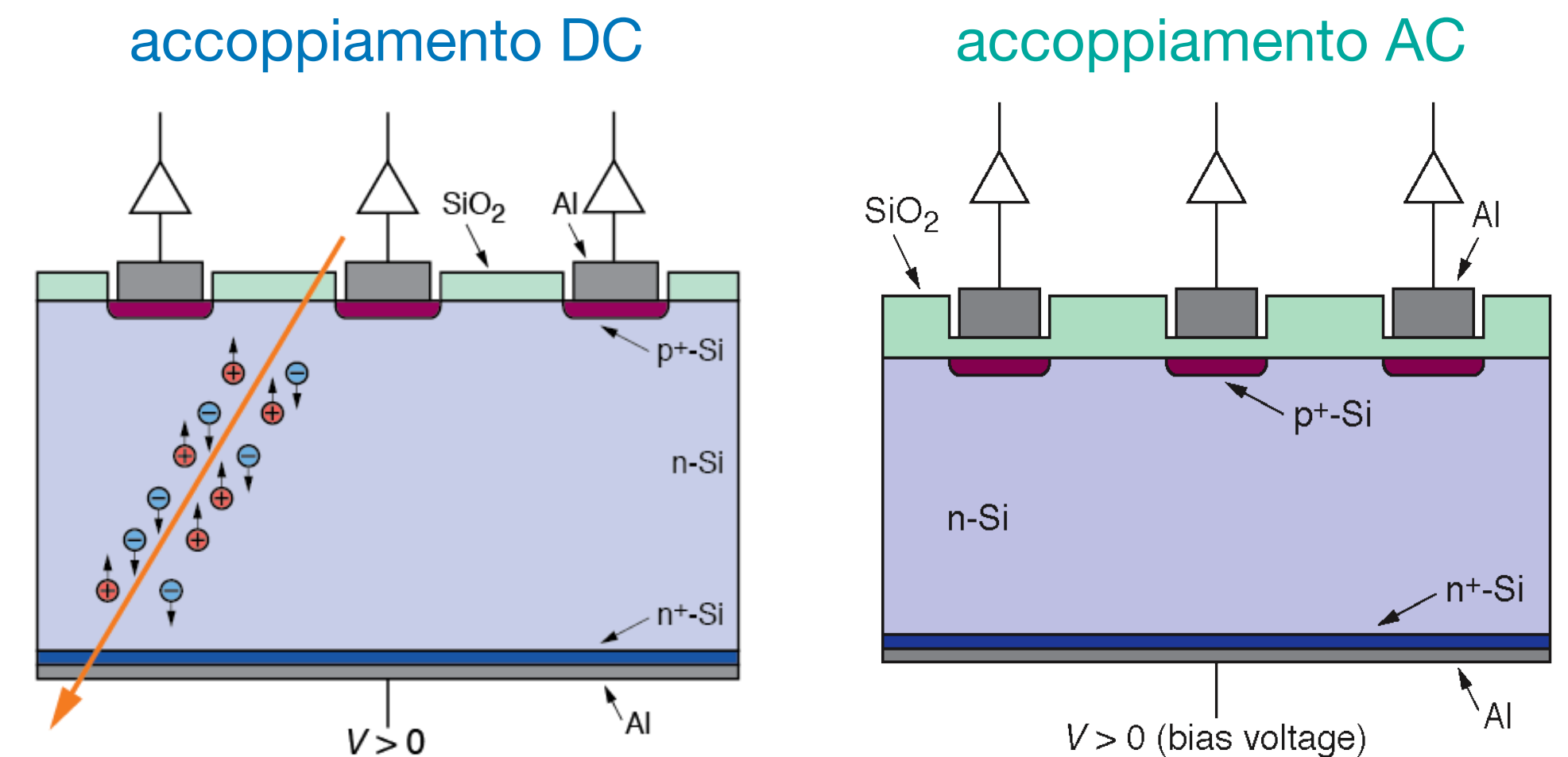


Nei rivelatori a microstrip, la lettura è segmentata su strisce metalliche (passo tipico 50 - 250 μm), che forniscono la misura di una coordinata

- I segnali letti dalle strip adiacenti vengono combinati per determinare la coordinata della particella incidente

L'elettronica di lettura (amplificatori) può essere collegata direttamente alla giunzione (DC), oppure accoppiata capacitivamente (AC), isolando la corrente di perdita degli amplificatori

Tutti gli attuali tracciatori al silicio a grande volume utilizzano tecnologia a microstrip





Rivelatori a pixel

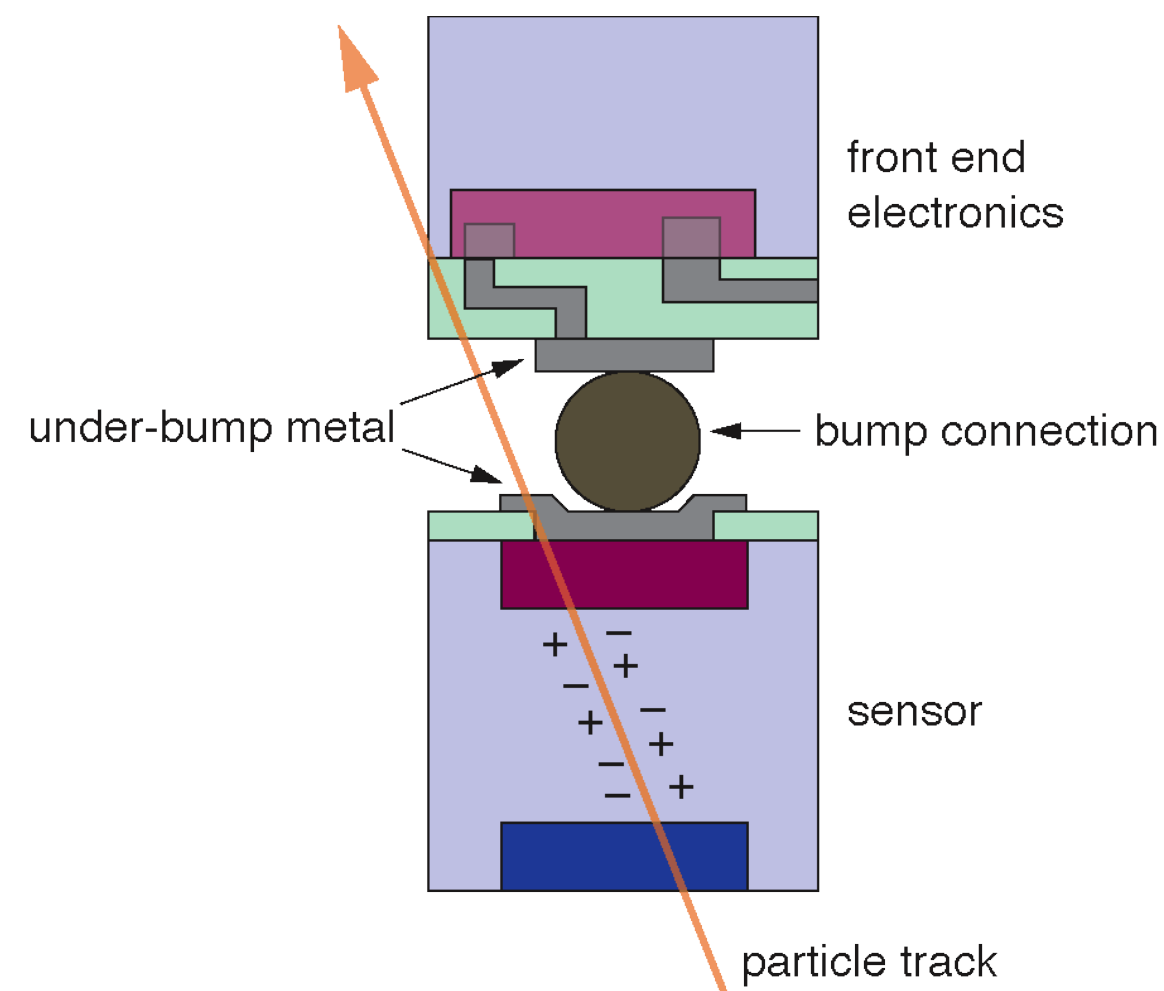
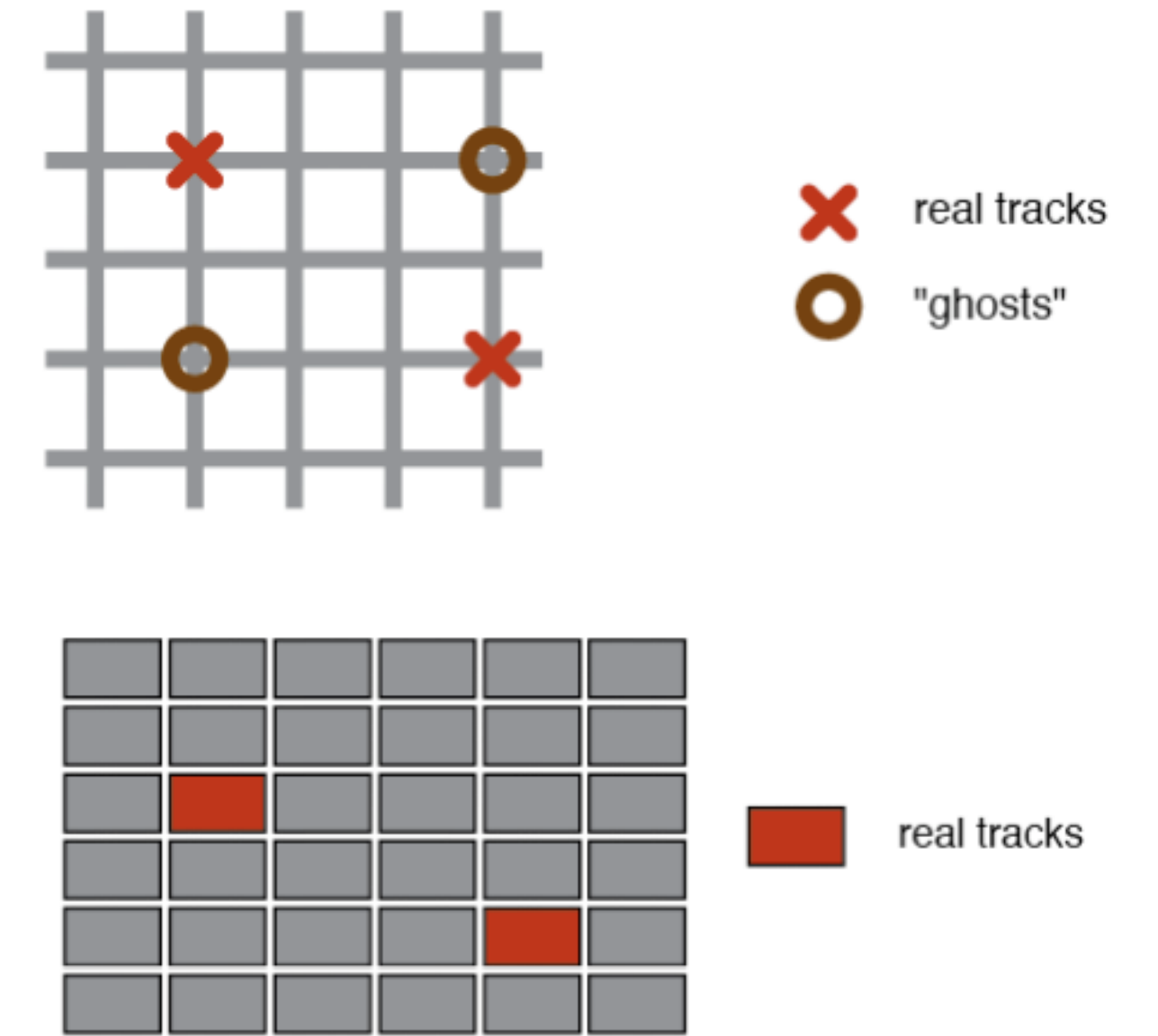


Nei rivelatori a microstrip, la misura di una coordinata su un piano può essere combinata con quella di un piano con strip orientate diversamente, per fornire un punto 2D

- In caso di alta occupazione, si possono creare combinazioni false (“ghost”)

Nei rivelatori a pixel, l’ambiguità viene eliminata

- Il numero di canali aumenta significativamente



La connessione con l’elettronica di lettura è effettuata con una matrice di microsaldature metalliche (bump bonding)

⇒ rivelatori “ibridi”

I tracciatori moderni in regioni ad altissima occupazione sono realizzati a pixel

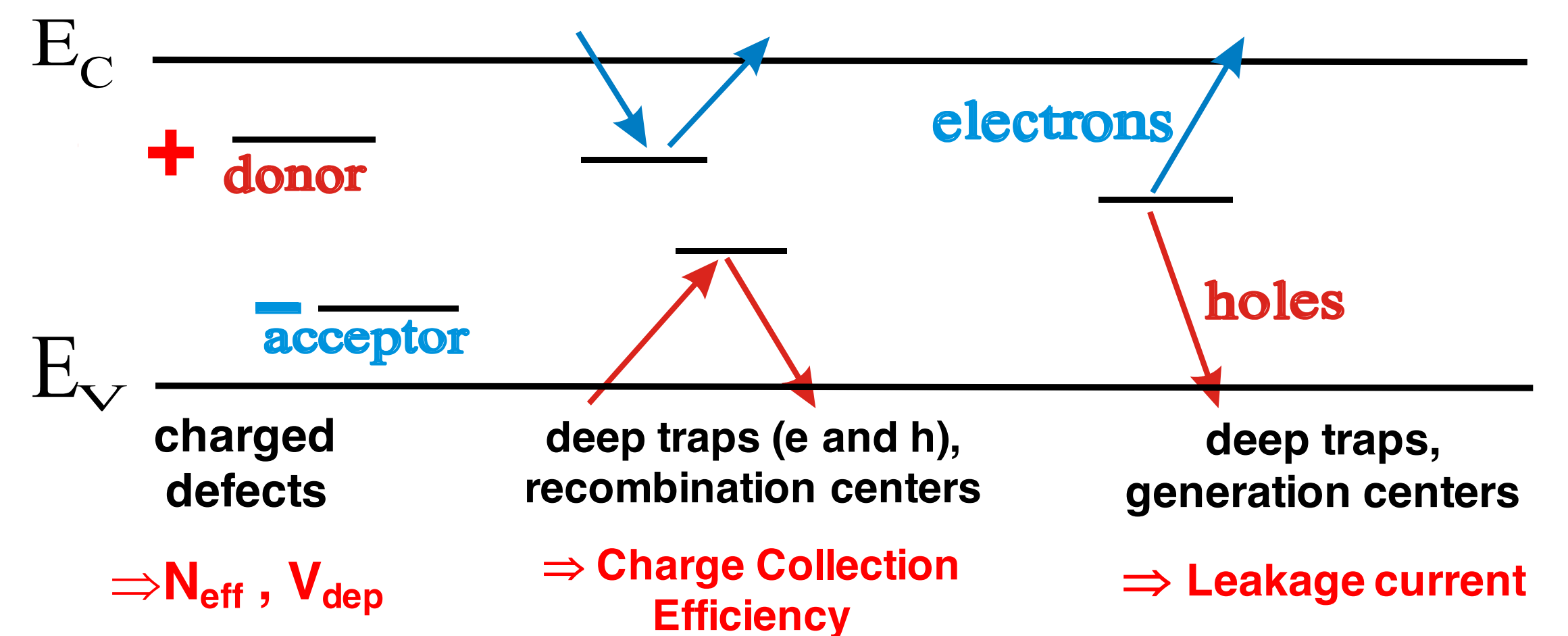
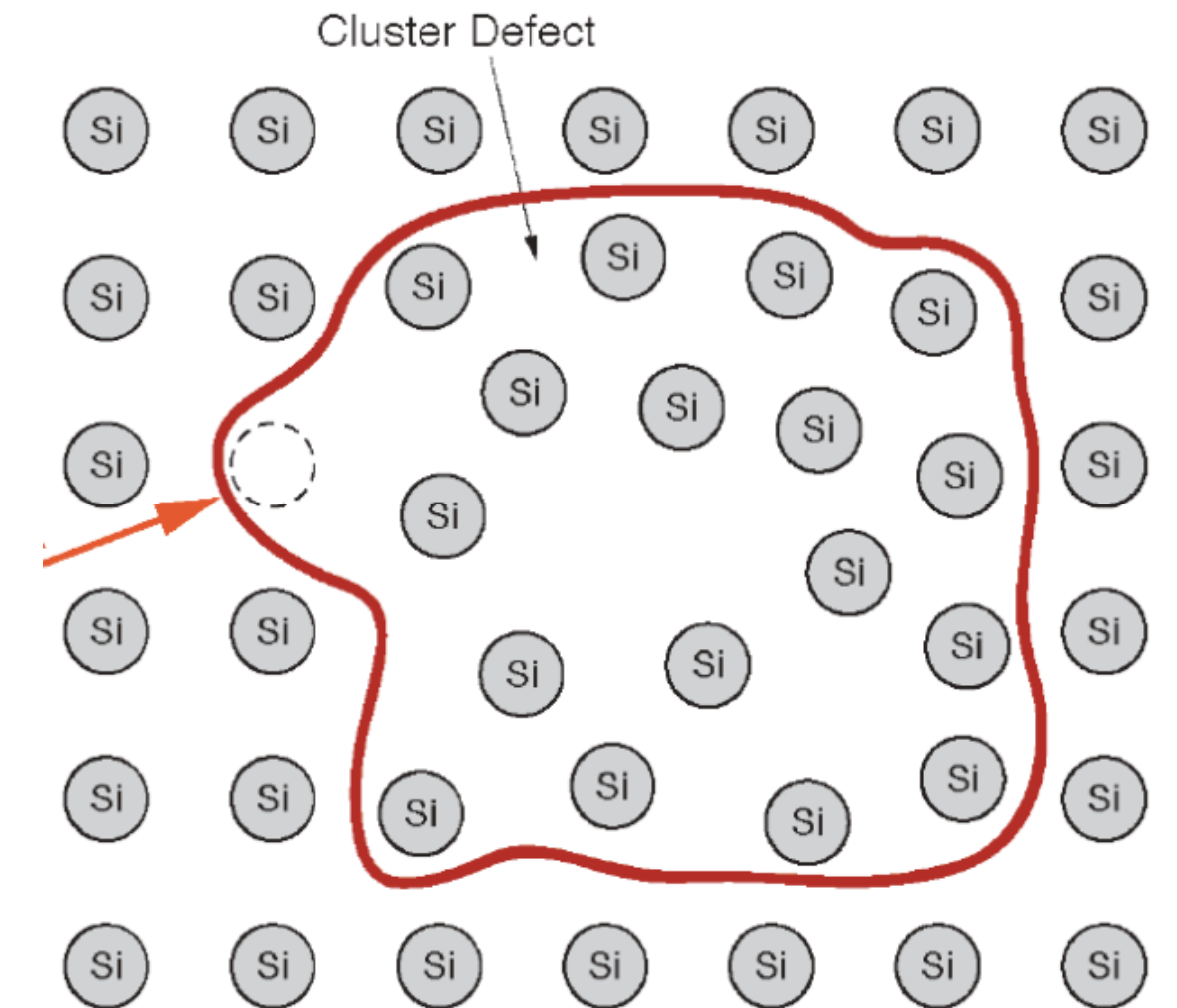


Danni da radiazione



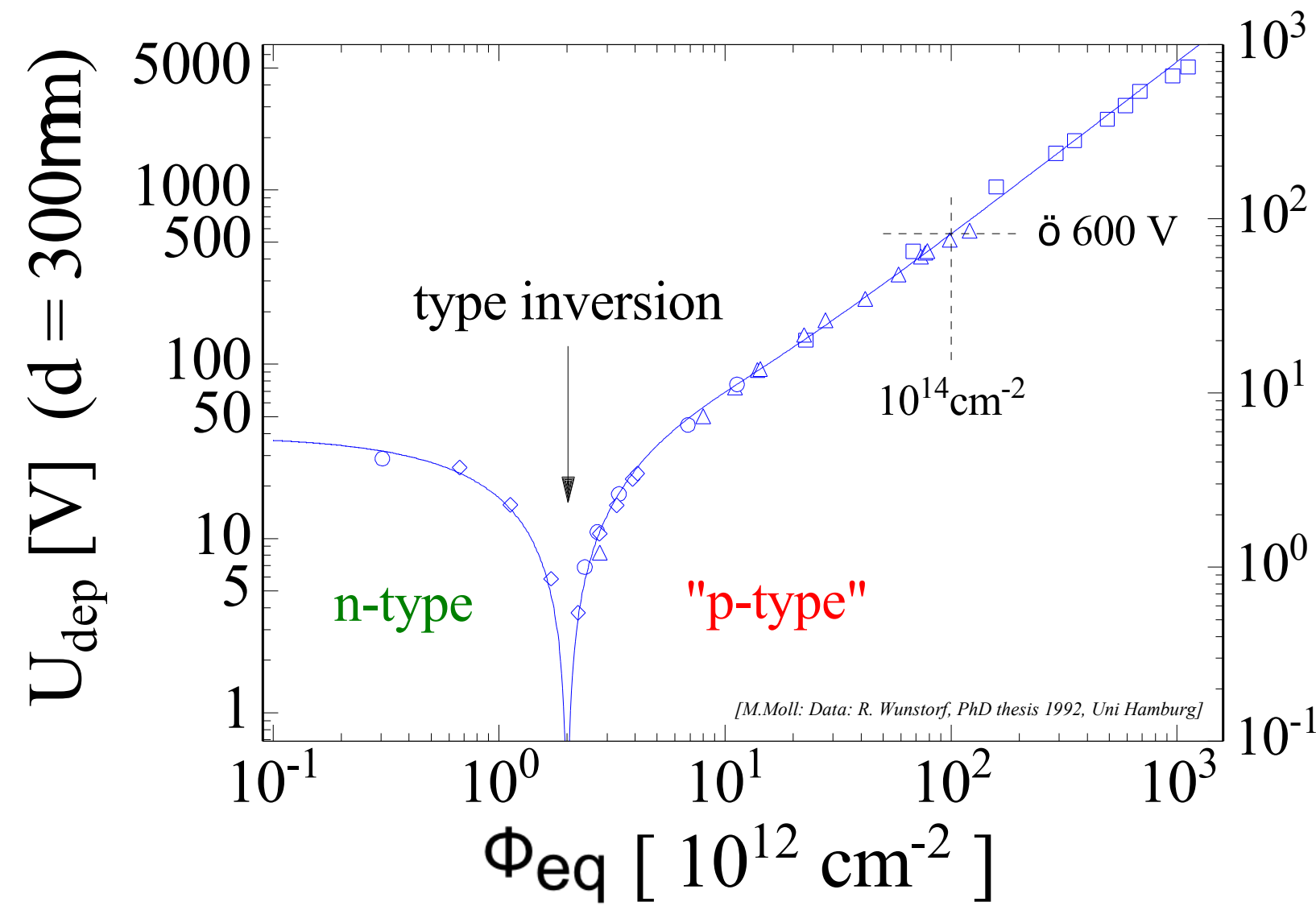
L'interazione nucleare delle particelle incidenti con gli atomi del reticolo può causare vari tipi di difetti, dislocando gli atomi di silicio e interagendo con quelli dei droganti e delle impurità. Si formano "cluster" di difetti che alterano le proprietà del cristallo:

- variazioni nel drogaggio \implies aumento della tensione di svuotamento;
- centri di ricombinazione \implies diminuzione dell'efficienza di collezione di carica;
- centri di generazione \implies aumento della corrente di perdita

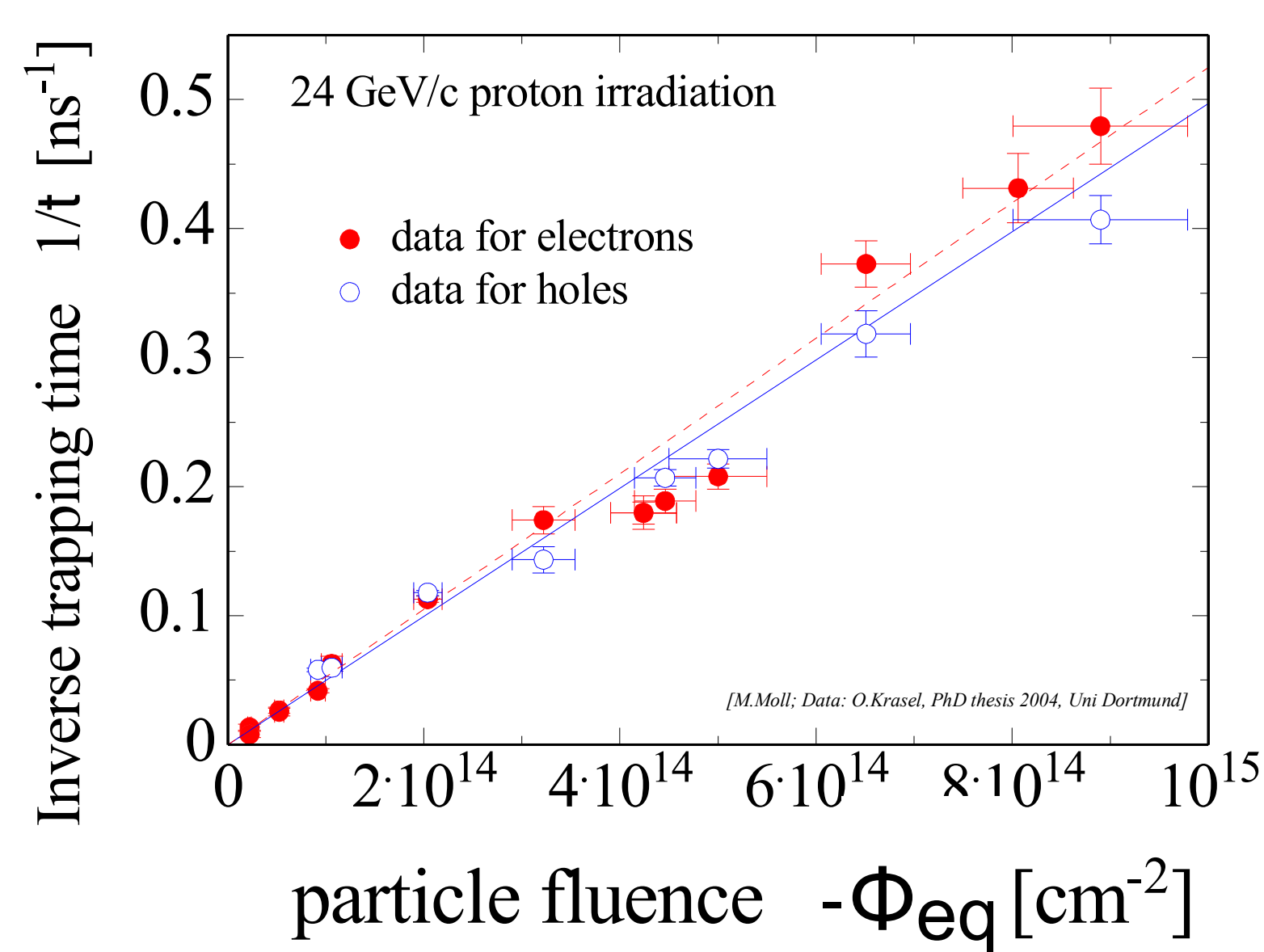




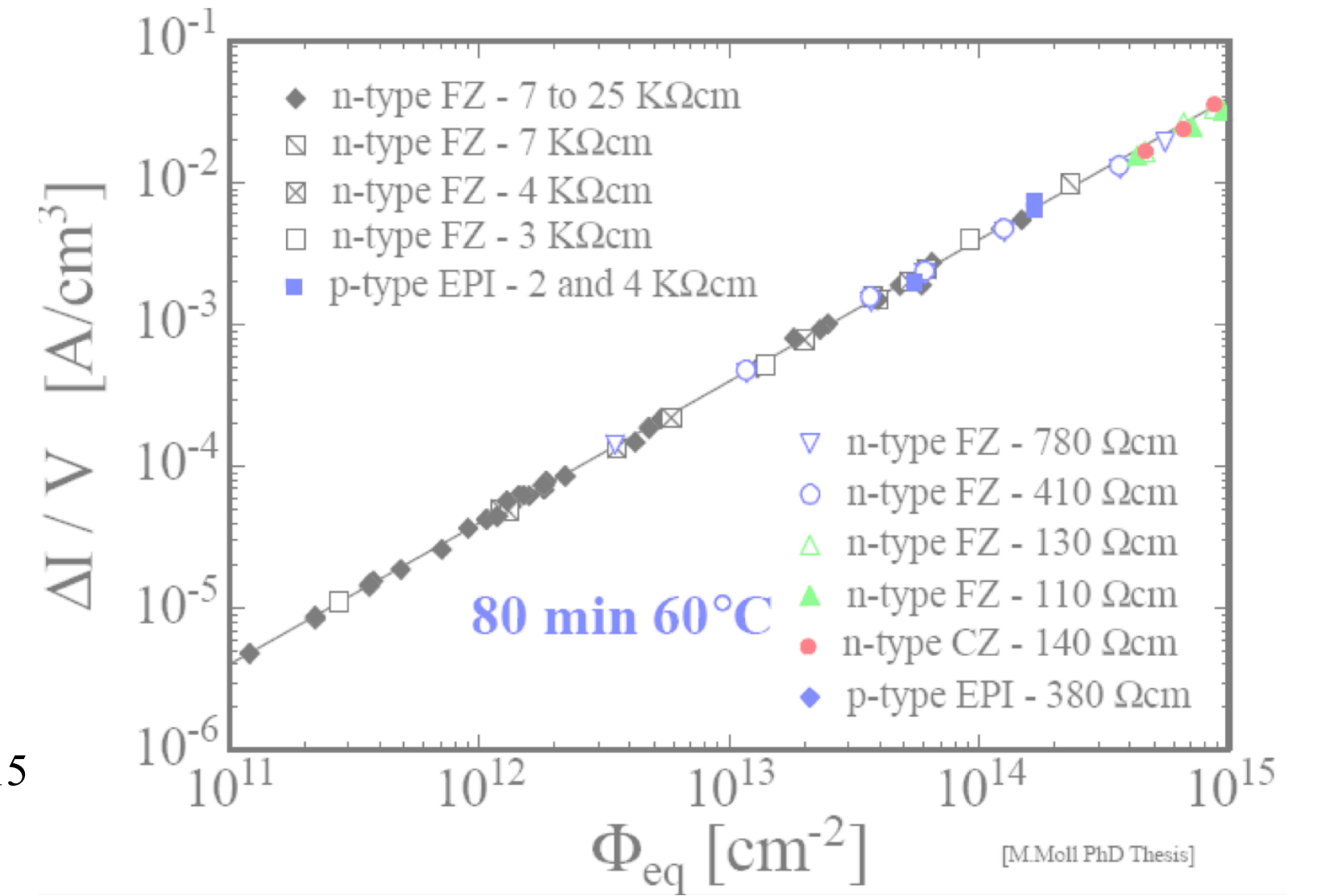
Danni da radiazione



inversione del substrato: ridotta o assente nei substrati di tipo p



gli elettroni migrano più velocemente
 ⇒ meno ricombinazioni



Alcuni effetti sono parzialmente reversibili con opportuni cicli termici (annealing)

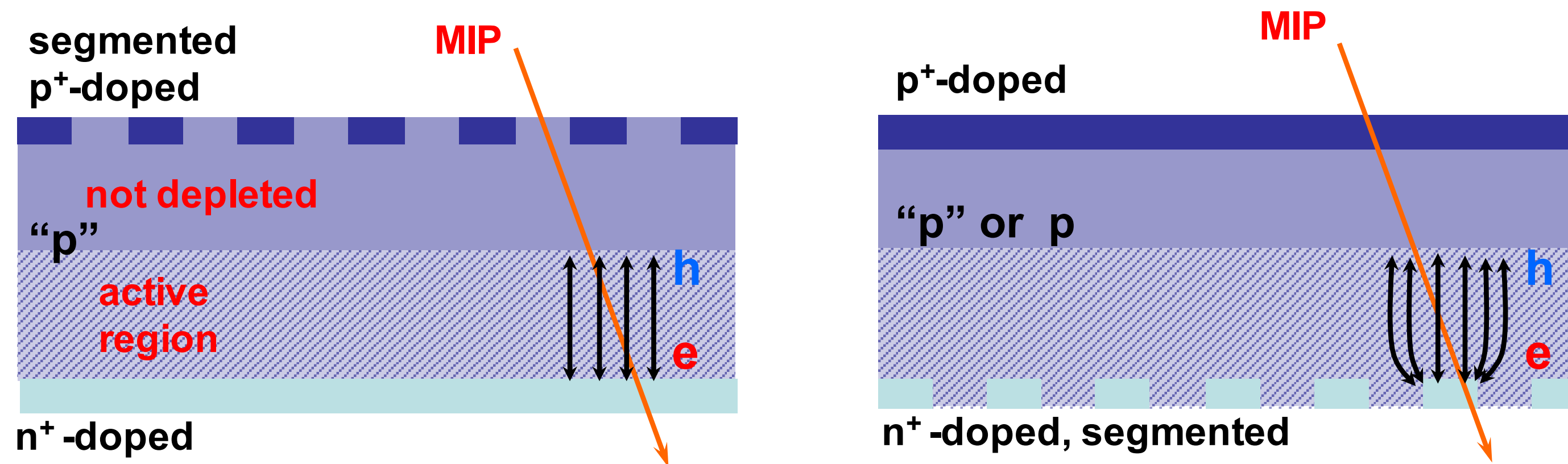


Schemi di drogaggio alternativi



L'utilizzo di un substrato di tipo p con impianti n^+ (n-in-p) mitiga alcuni degli effetti del danno da radiazione

La lettura dal lato n^+ (segmentato) permette di raccogliere gli elettroni, più mobili



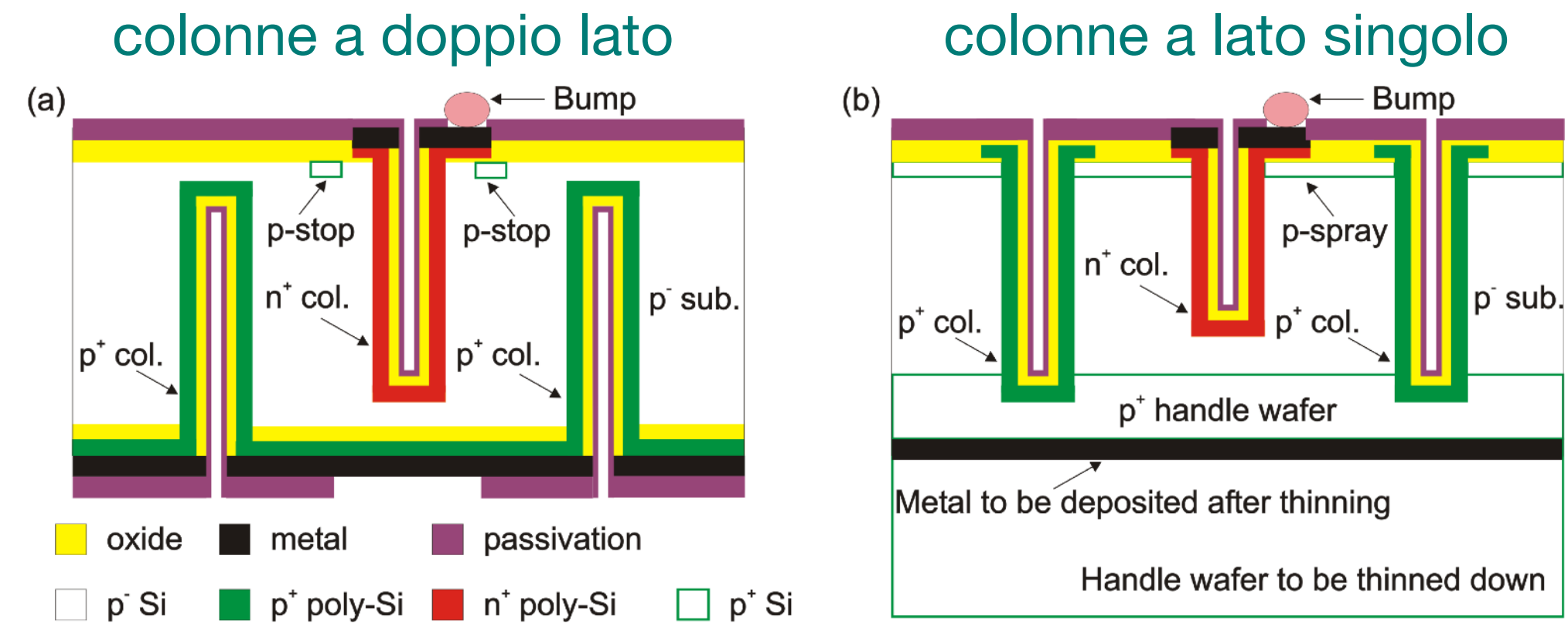
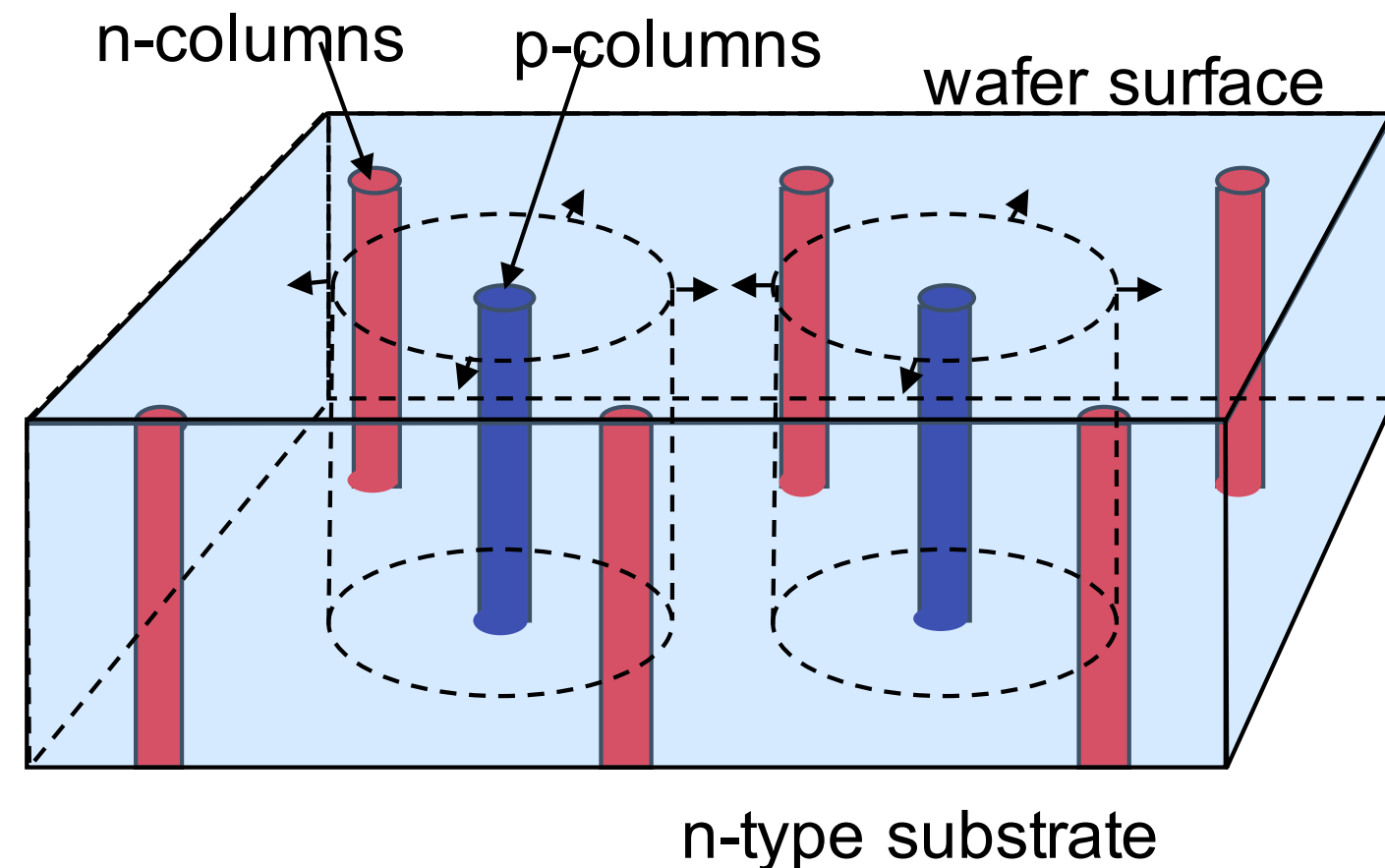
I tracciatori di ATLAS e CMS per High-Luminosity HLC (HL-LHC) saranno basati su tecnologia n-in-p



Pixel con tecnologia 3D



Nei sensori con tecnologia 3D, gli elettrodi sono perpendicolari al piano del sensore
⇒ distanza di migrazione della carica disaccoppiata da spessore sensore



- migliore resistenza alla radiazione
- tempi di raccolta più rapidi ⇒ ottima risoluzione temporale possibile (e ottimizzabile con geometrie dedicate)

Tecnologia utilizzata per strato più interno tracciatore di ATLAS e Precision Proton Spectrometer di CMS. Possibile utilizzo in upgrade per HL-LHC



Sensori monolitici

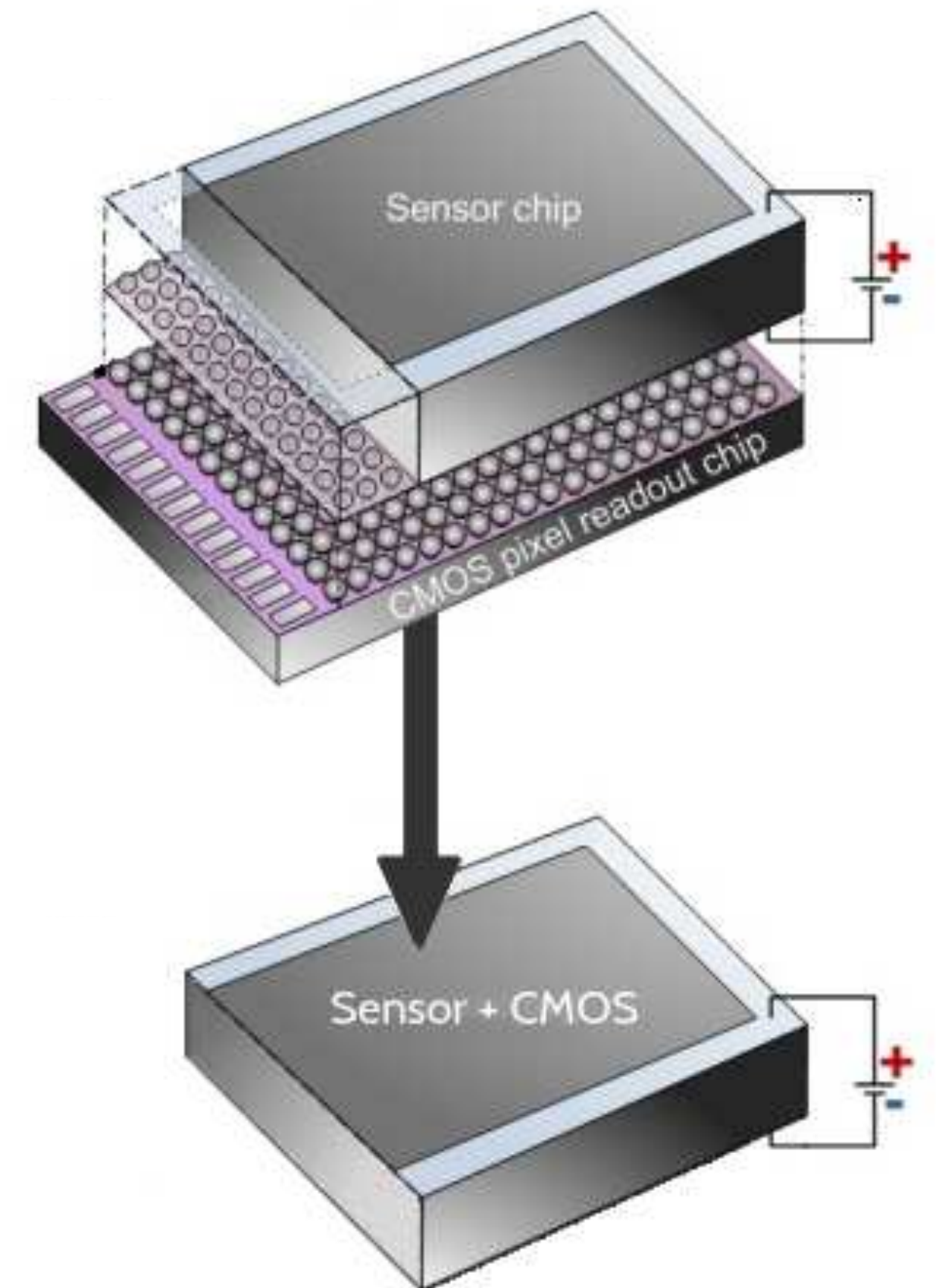


L'integrazione del sensore e dell'elettronica di lettura CMOS su un unico cristallo di silicio (Monolithic Active Pixels Sensor, **MAPS**) presenta numerosi vantaggi:

- eliminazione della fase di ibridizzazione, delicata e costosa
- sfruttamento dei processi di fabbricazione industriale su vasta scala \implies riduzione di costi e tempi di produzione
- sensori sottili ($\sim 50 \mu\text{m}$)
- pixel molto piccoli ($\sim 20 \times 20 \mu\text{m}^2$) facilmente realizzabili
- consumi ridotti

Tecnologia oggi largamente utilizzata per la rivelazione di luce visibile (fotocamere)

Sensori MAPS già utilizzati di recente in esperimenti di fisica delle particelle (STAR al RHIC, Brookhaven, ALICE a LHC)

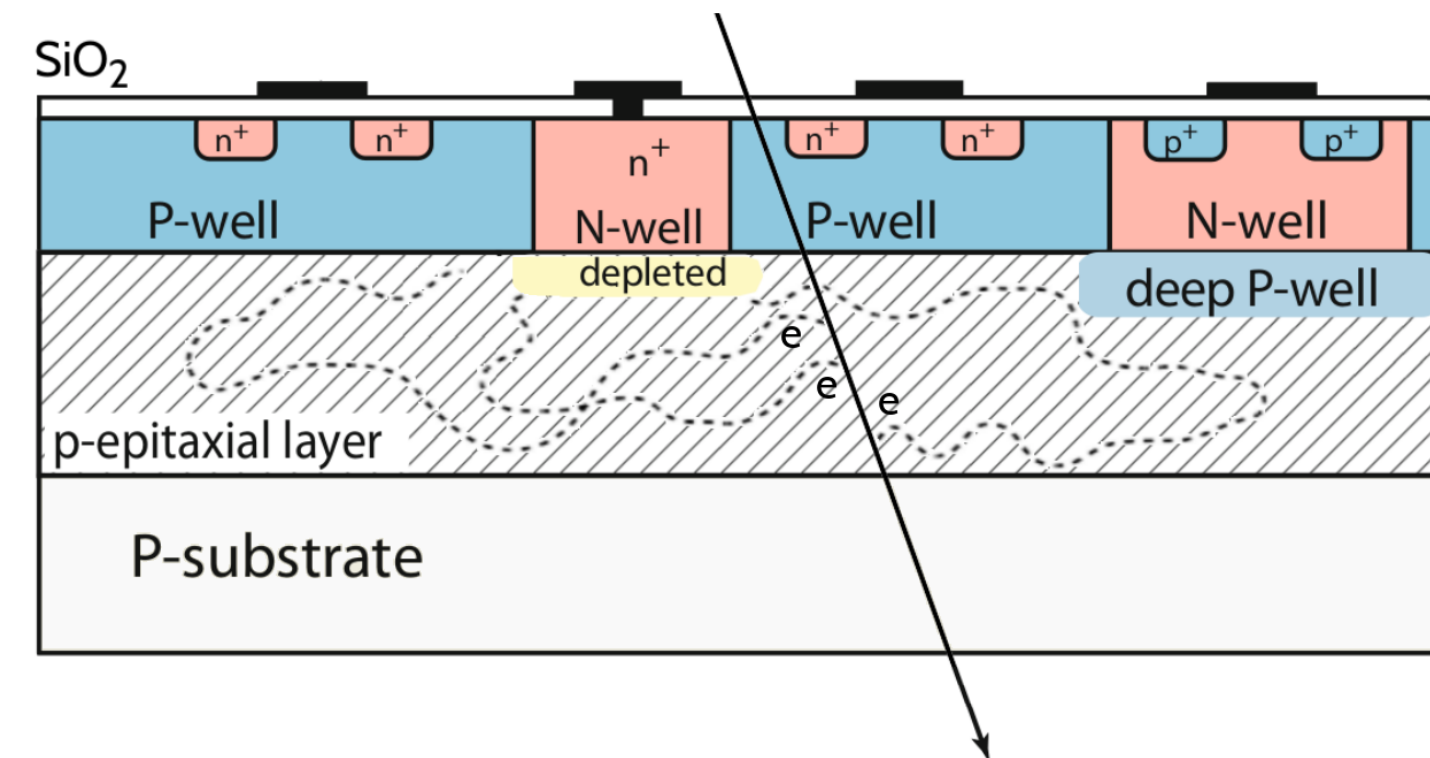




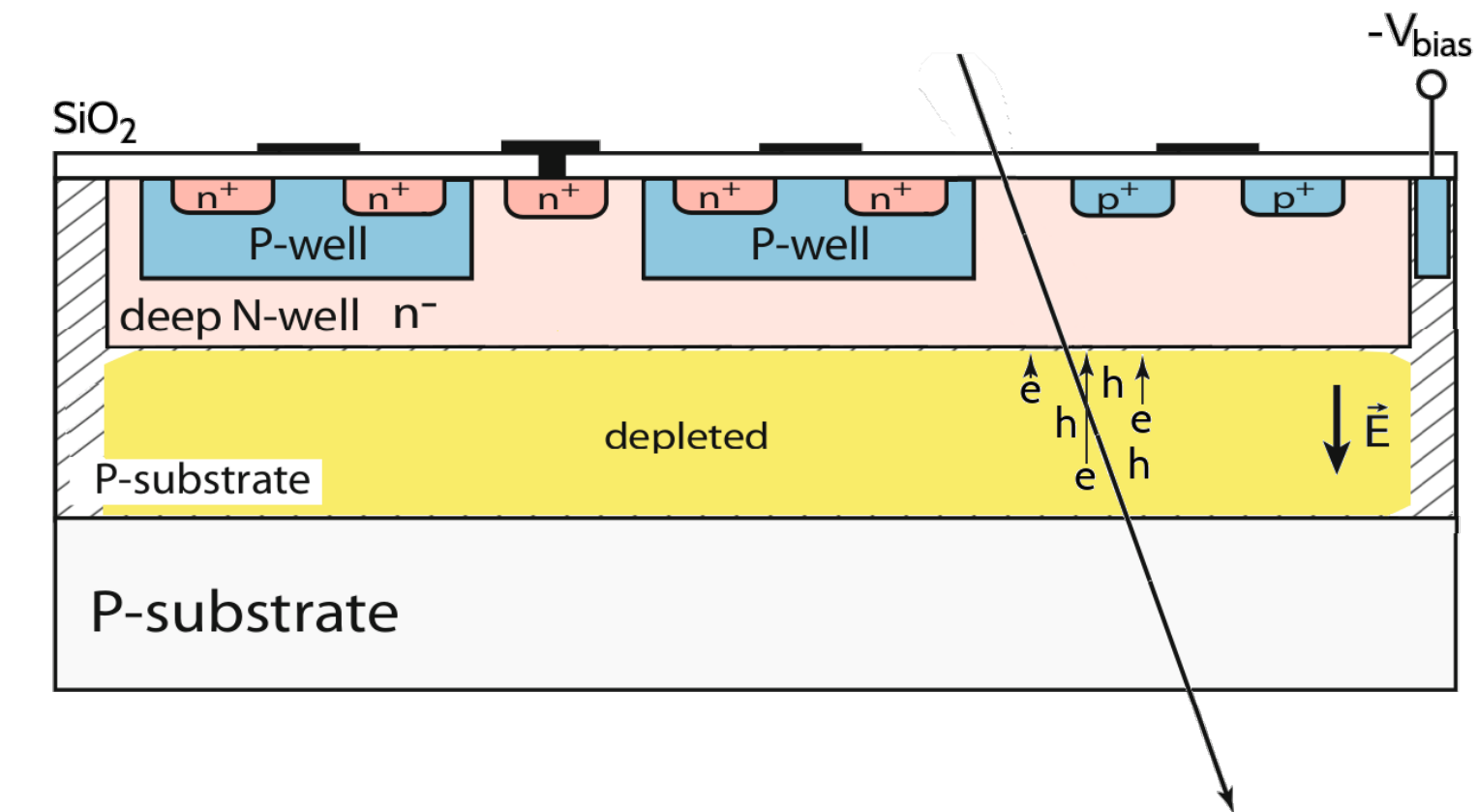
Sensori monolitici



MAPS



HV-MAPS



- No HV
 - ⇒ piccola regione di svuotamento
 - ⇒ raccolta carica per diffusione
 - ⇒ segnali piccoli e lenti
- Scarsa resistenza alla radiazione ($\approx 10^{13} n_{eq}/cm^3$)

- Tecnologia HV-CMOS
 - ⇒ zona sensibile svuotata
 - ⇒ raccolta di carica per migrazione
 - ⇒ segnali più grandi e veloci
- Buona resistenza alla radiazione ($\approx 10^{15} n_{eq}/cm^3$)

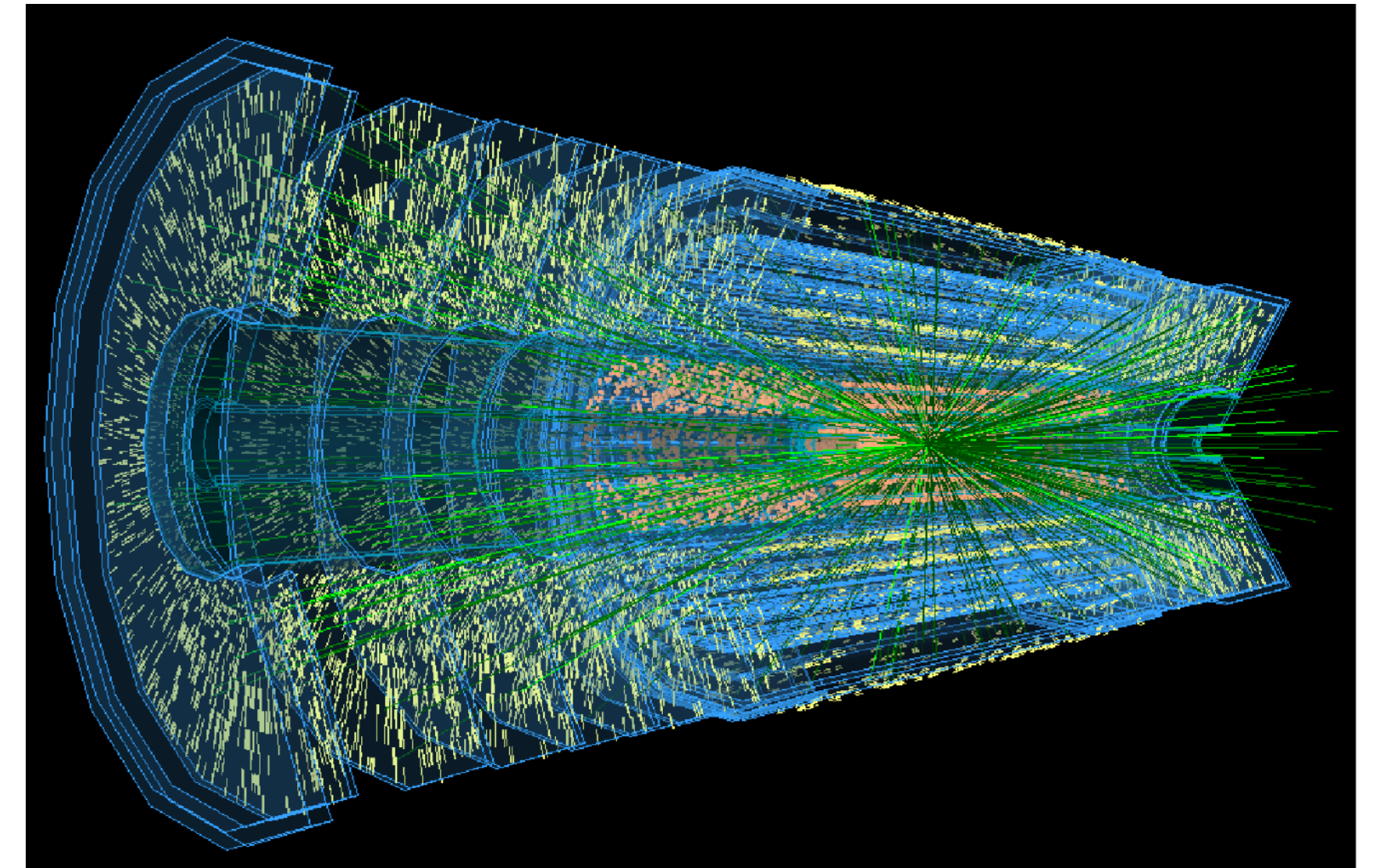


Le sfide dei prossimi anni



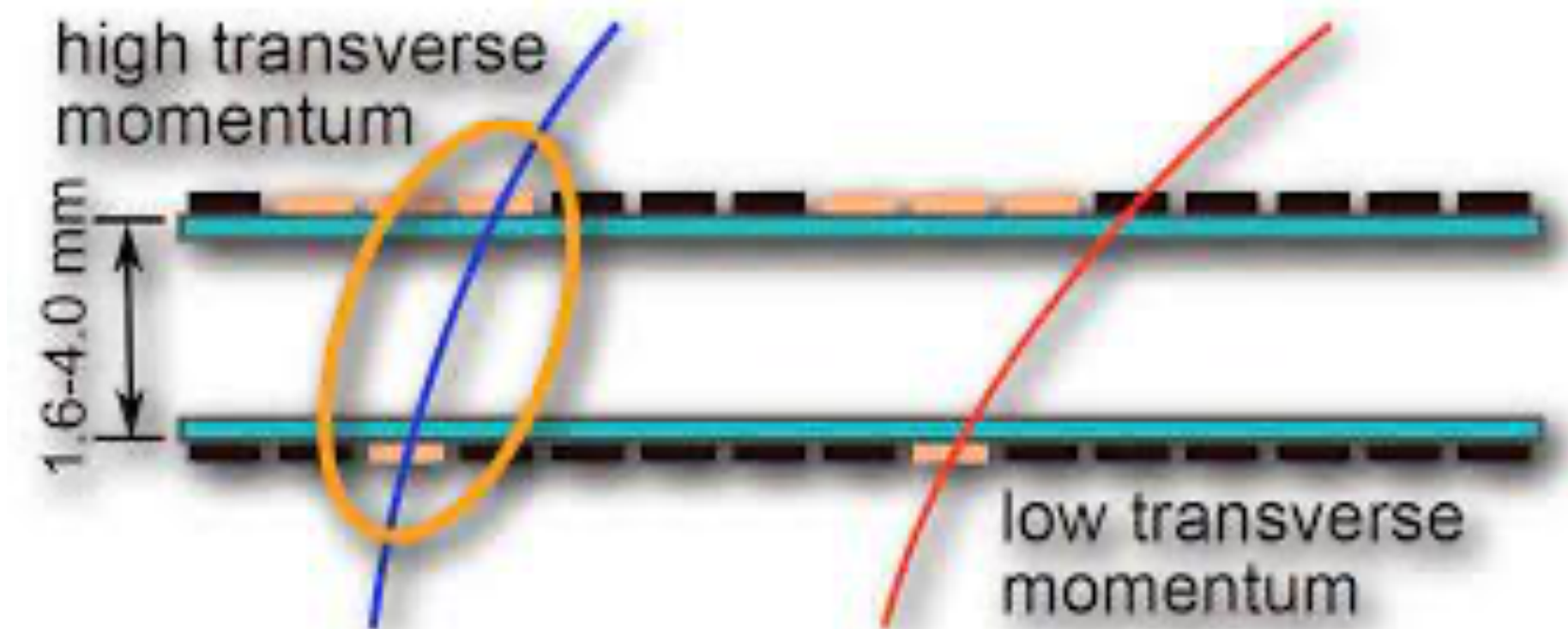
HL-LHC (dal 2027) spingerà in avanti le prestazioni richieste ai tracciatori:

- aumento della luminosità istantanea di un fattore ~ 4
 \implies aumento della densità di tracce, pileup fino a 200
- aumento della luminosità integrata di un fattore ~ 10
 \implies fluenza oltre $2 \times 10^{16} n_{eq}/cm^3$ nelle zone più vicine al punto di interazione



Evoluzione dei tracciatori di ATLAS/CMS:

- aumento ($\sim 300 m^2$) della superficie di silicio, copertura in avanti fino a 2°
- pixel più piccoli ($25 \times 100 \mu m^2$), strip più corte
- utilizzo delle tracce negli algoritmi di trigger





Le sfide dei prossimi anni



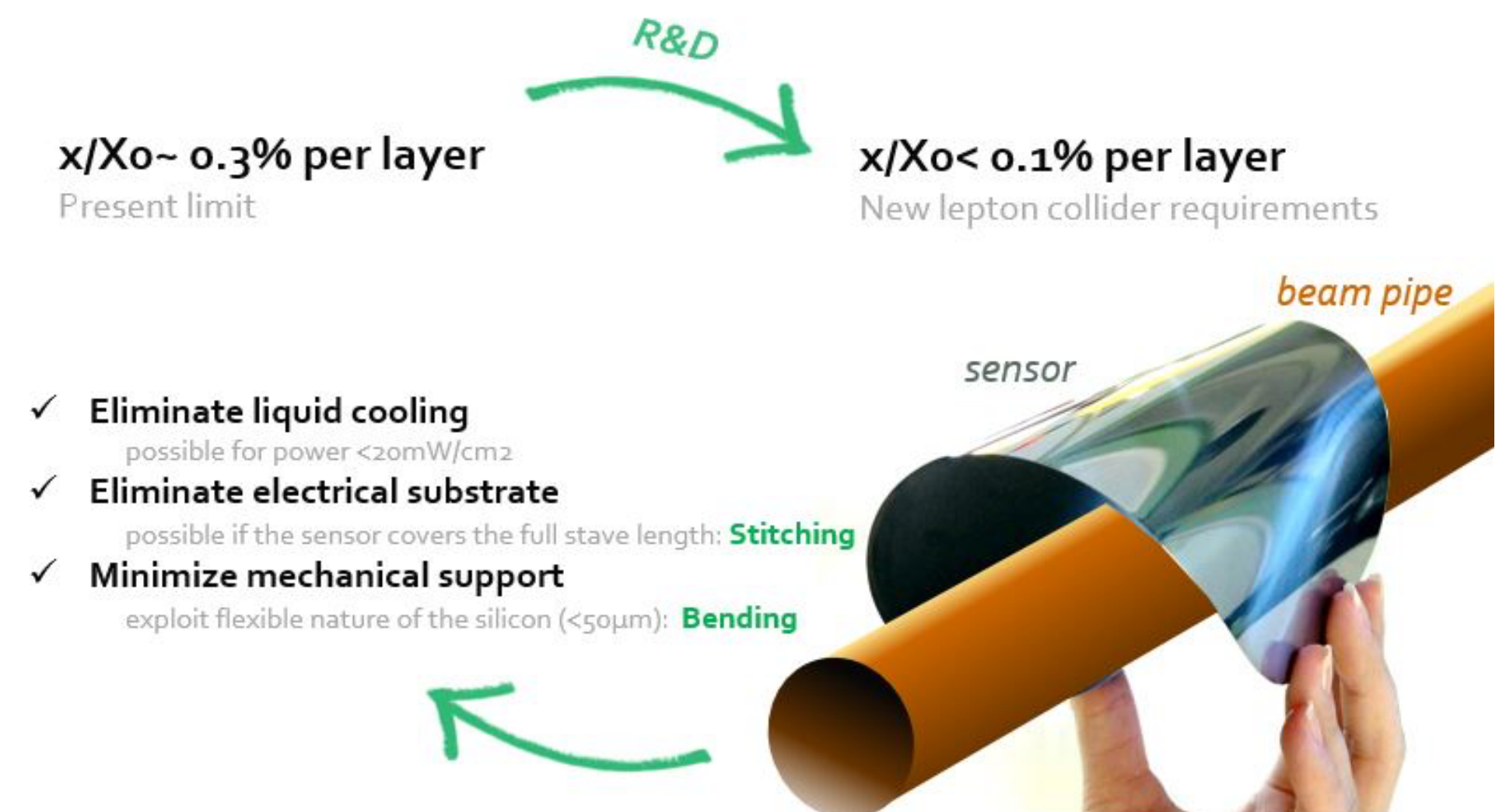
LHCb considera l'opzione di realizzare un tracciatore "4D", con misura di tempo (precisione fino a 20 ps) integrata

Per il futuro collisore adronico FCC-hh, il volume richiesto al tracciatore potrebbe aumentare di un fattore 10, e la dose di radiazione di un fattore 50

- grande sforzo di R&D necessario (HV-MAPS?)

I prossimi collisori elettronici (FCC-ee, ILC,...) e ione-elettrone (EIC) non avranno densità di tracce e dosi integrate così elevate, ma richiederanno tracciatori "leggeri", con materiale inferiore a 0.1% X_0 per strato

- sensori estremamente sottili ($\sim 50 \mu\text{m}$)
- raffreddamento ad aria \implies potenza molto limitata
- HV-MAPS, depleted FET?





Sempre più silicio?



L'uso del silicio per i tracciatori interni appare in questo momento una scelta obbligata per la gran parte degli esperimenti di fisica delle particelle, e lo sarà probabilmente nel prossimo futuro

Una grande varietà di nuove tecnologie è in studio per far fronte alle diverse esigenze degli esperimenti di prossima generazione

- necessariamente accompagnato dallo sviluppo di adeguati sistemi di lettura e di ricostruzione

I tracciatori al silicio del futuro potranno vedere estese le loro funzionalità (misure di tempo; forse energia?) ed essere integrati in altri sistemi (calorimetri)