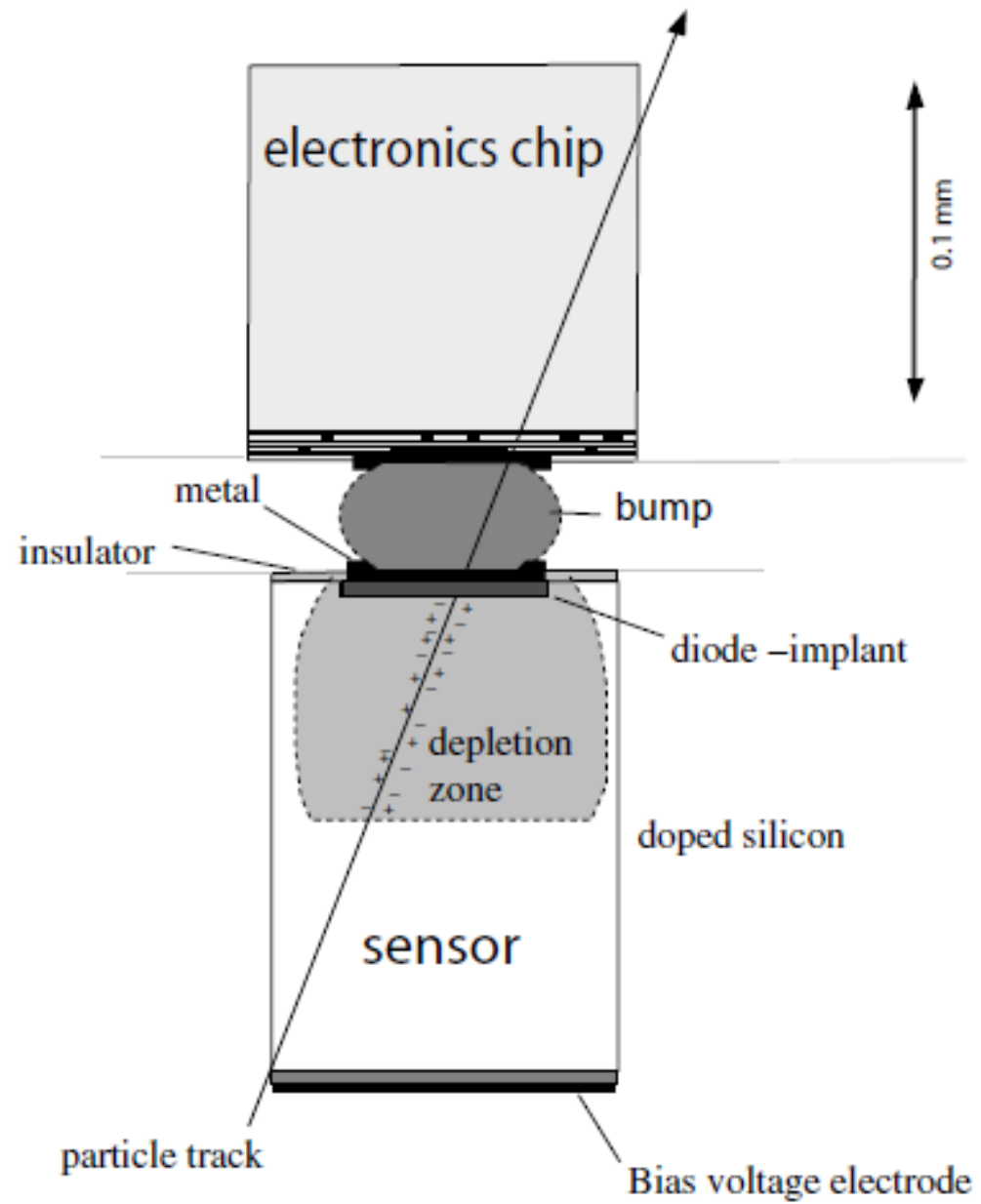


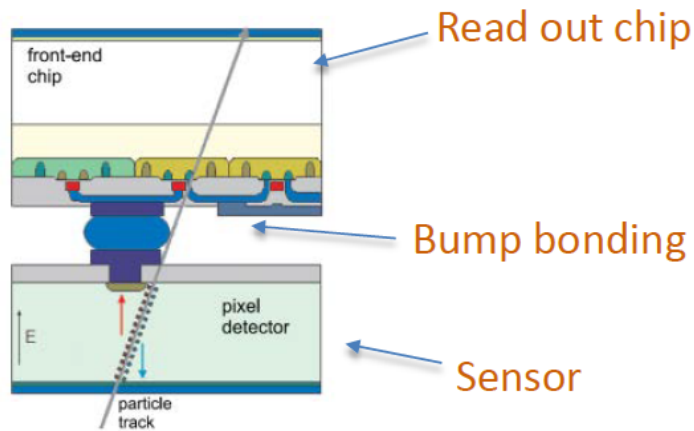
# Rivelatori e Apparati

Slides\_8 – Pixel, immagini ed esempi

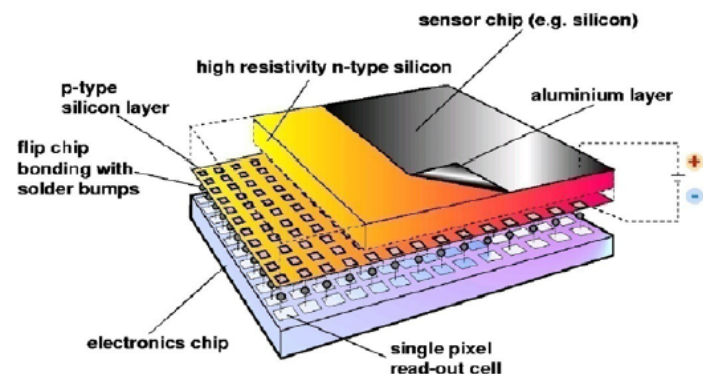


## Pixel detectors

- usually **inner layers** of trackers
- **Hybrid pixel detectors** instrument all major LHC detectors



Hemperek (U. Bonn)



## Hybrid pixel detectors

### Separate sensor and ASIC

- each pixel connected to a readout channel in the ASIC → flip chip + bump bonding and wire bonding

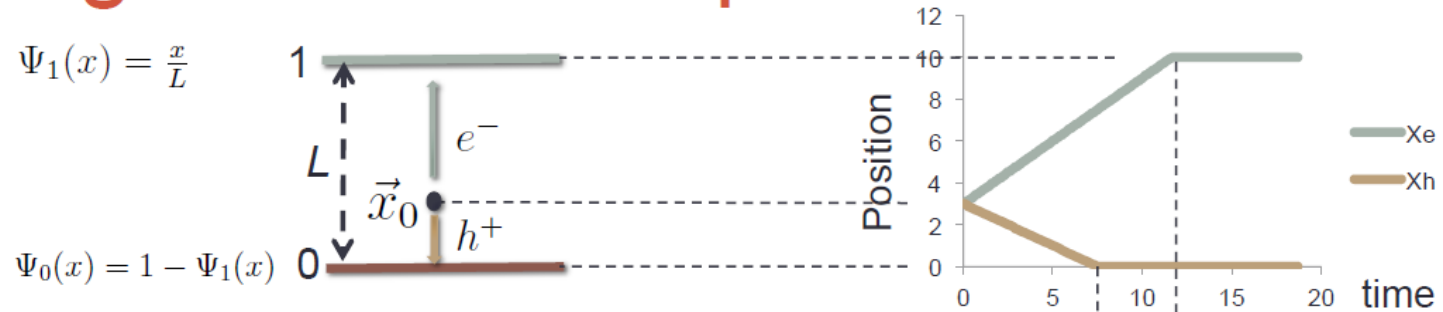
### Pros

- Fast
- radiation hard (full depletion, high voltage)
- high S/N
- fully depleted sensor
- complex read out electronics possible (zero suppression)
- **optimize sensor and read-out chip independently**

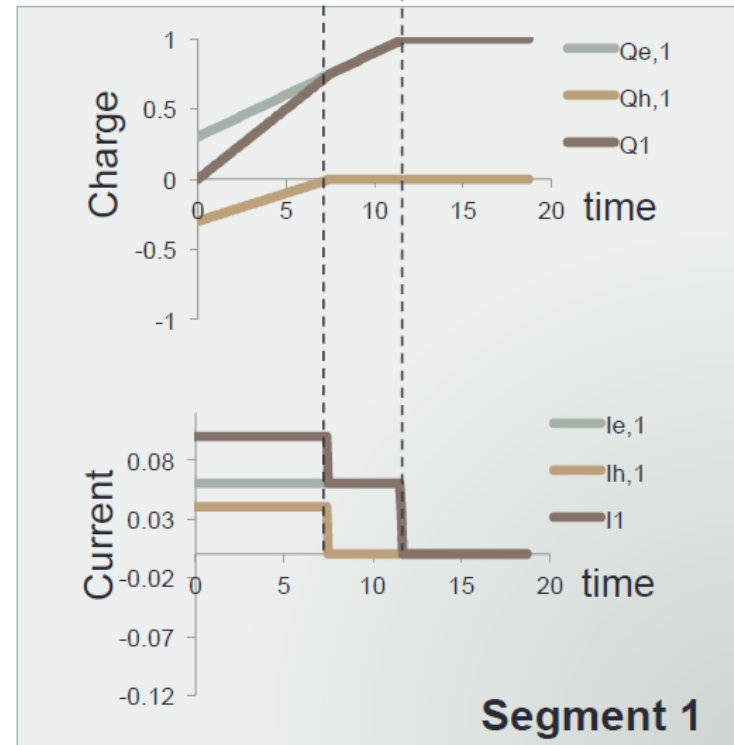
### Cons

- complex assembly
- 'thick'
- granularity and power limitations
- costly

# Signal formation: planar detector



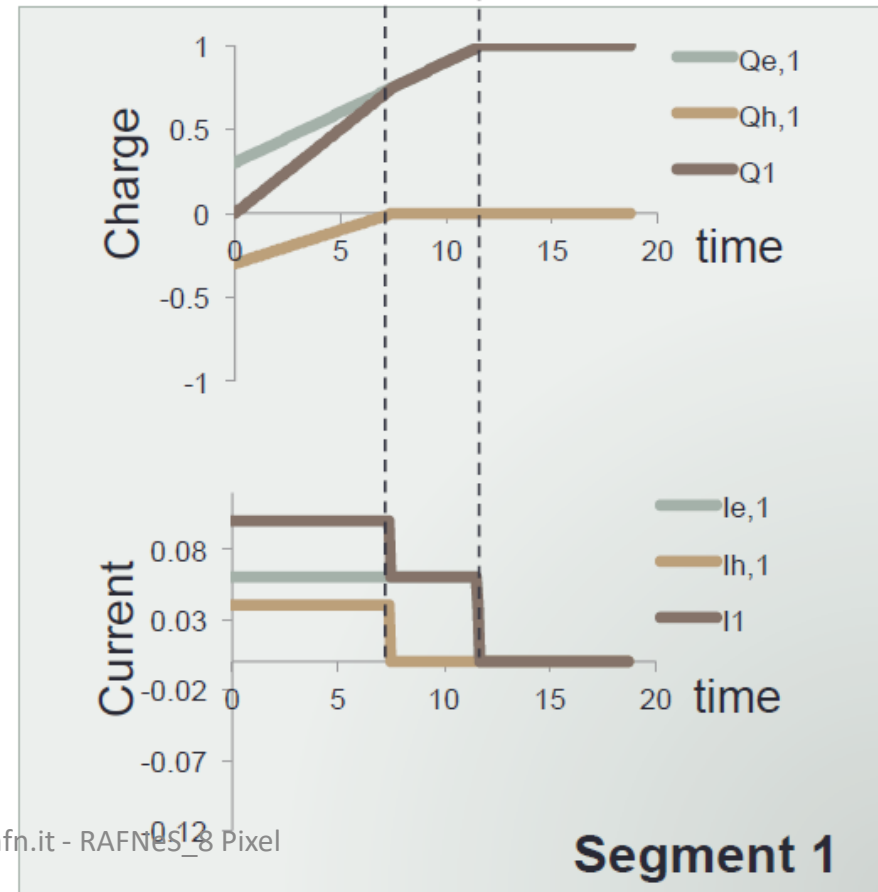
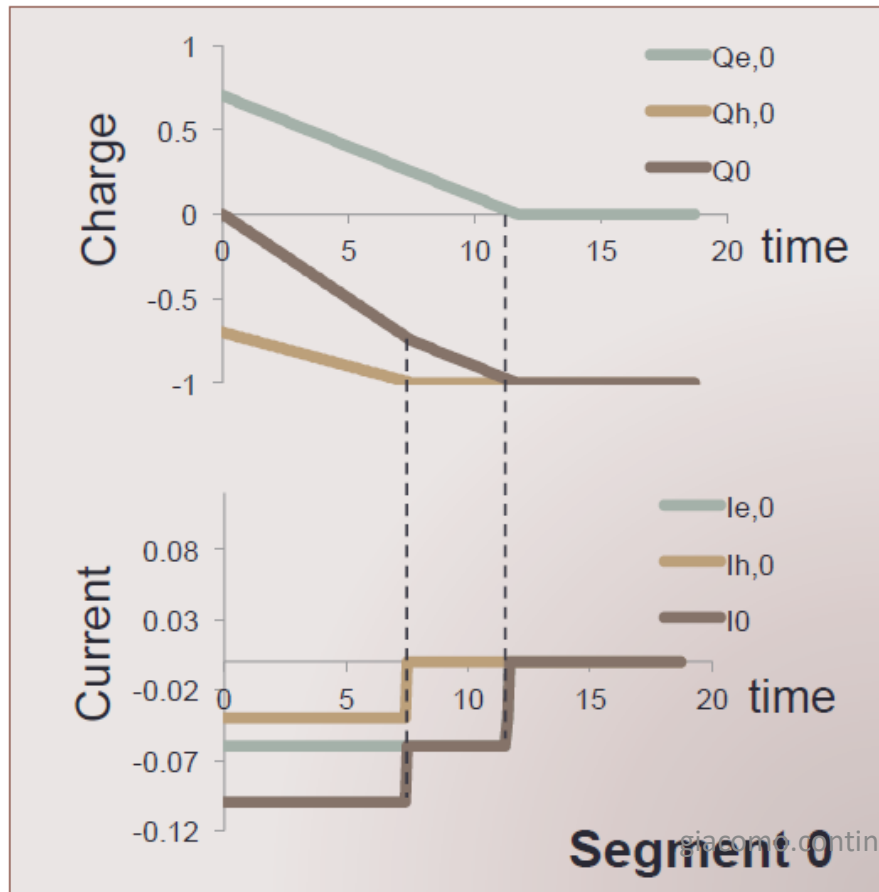
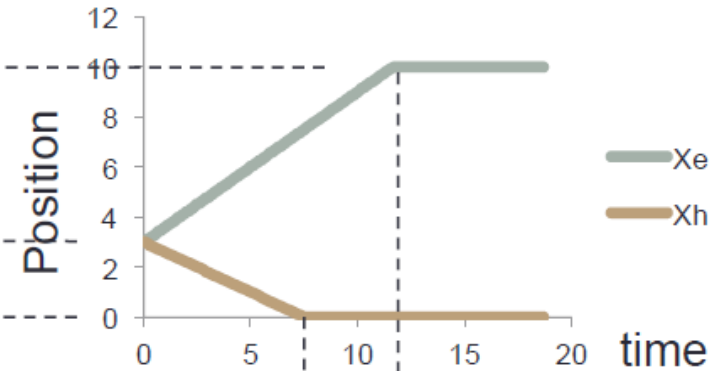
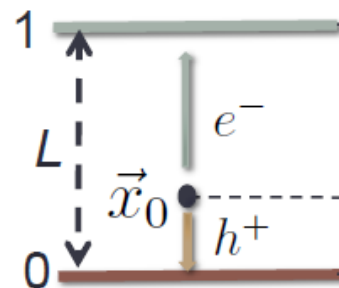
- (Assumed constant drift velocities)
- Electrons and holes are created in equal amounts, at equal positions: Charge signals always start from 0.
- When all charges are collected, the charge signal has the amplitude equal to the collected charge, but with opposite sign of the collected charge (but it is not a collection process)
- Steepest slope method:  
The change in slope can be used to calculate the collection time and thus the initial starting position



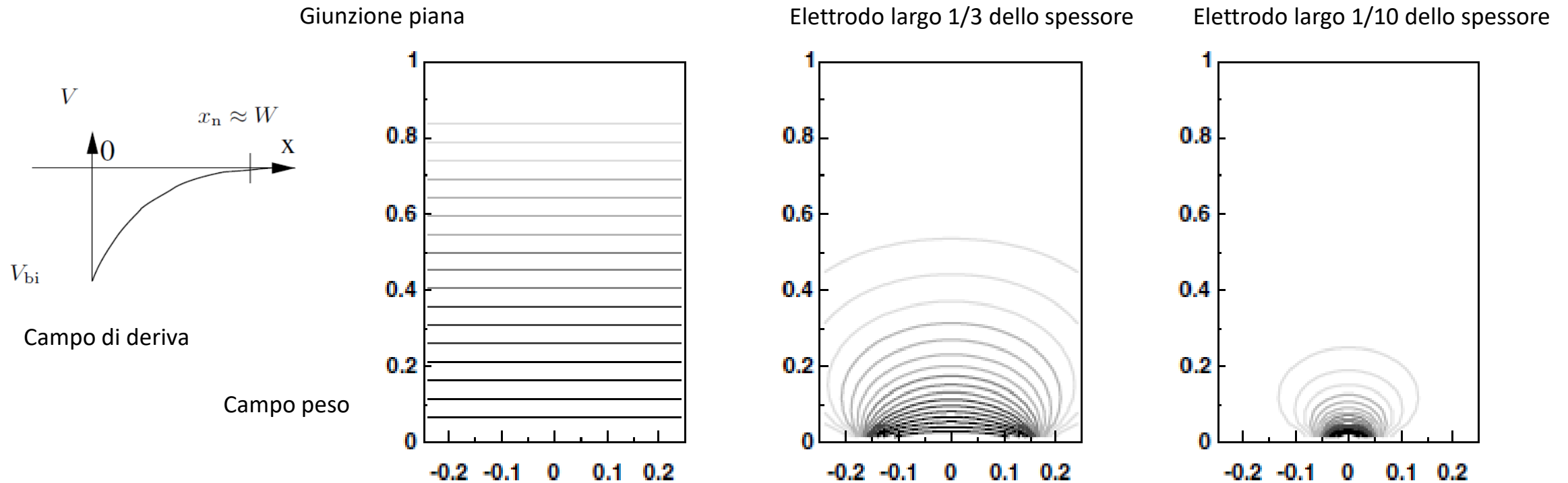
# Signal formation: planar detector

$$\Psi_1(x) = \frac{x}{L}$$

$$\Psi_0(x) = 1 - \Psi_1(x)$$



# Potenziale peso (weighting potential)



Il potenziale peso e' lineare con la profondita (distanza linee indica gradiente);  
 Il potenziale di deriva ha forma parabolica (cambia velocita' di raccolta)

Tutto il percorso contribuisce allo stesso modo alla carica indotta (anche se con velocita' diverse, ovvero con diversa corrente):

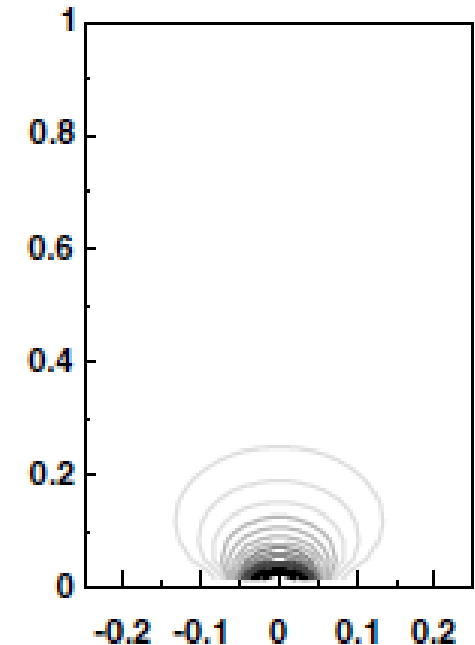
- Se la carica e' generata a meta' percorso, l'elettrodo che si avvicina all'elettrodo induce  $Q/2$ , la buca che si allontana da esso altrettanto

Il potenziale peso non e' lineare, si concentra vicino al pixel, spec. se piccolo

- La carica e' indotta solo vicino all'elettrodo ed equivale all'integrale sul percorso
- Le cariche verso l'elettrodo opposto non contano molto
  - I pixel vicini inizialmente vedono un segnale indotto, che poi cambia segno → integrale nullo

# Effetto di piccolo pixel (*small pixel effect*)

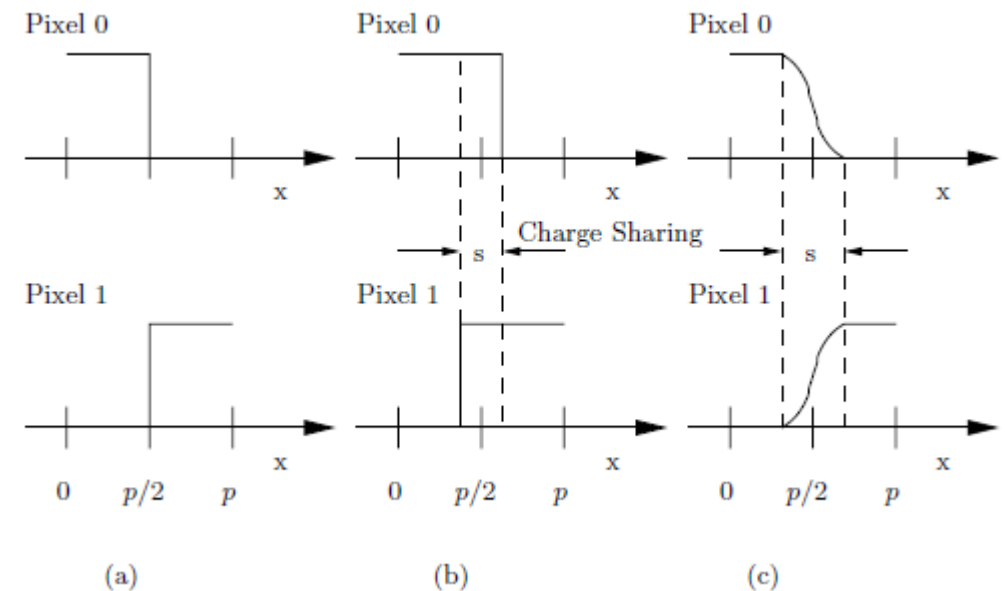
- Le differenze piu' grande tra un sensore a pixel molto segmentato e un pad detector a grande area sono:
  - La maggior parte del segnale e' indotto nell'ultima parte del cammino di deriva della carica
  - I portatori di carica che derivano verso il piano opposto non contribuiscono al segnale in maniera significativa
- Effetto importante in caso di sensori irraggiati quando una parte importante della carica rimane intrappolata e non deriva piu':
  - Se la probabilita' di intrappolamento e' uniforme sul sensore, vuol dire che la maggior parte della carica si ferma prima di riuscire a indurre qualunque segnale sull'elettrodo di raccolta
  - I sensori a pixel piccolo quindi e' molto piu' sensibile all'**intrappolamento di carica** dei rivelatori a grandi pads



# Risoluzione con lettura binaria (a soglia) e analogica

- Binaria: il segnale viene registrato solo quando passa una certa soglia
  - Soglia abbastanza alta da eliminare il rumore
  - Soglia abbastanza bassa da prendere anche frazioni di segnale
- Cluster in funzione del punto di impatto  $x$  della particella:

- Senza divisione di carica
  - Tra  $-p/2$  e  $p/2$  si accende il pixel0, tra  $p/2$  e  $3/2p$  si accende pixel1
- Con divisione di carica
  - Tra  $p/2-s/2$  e  $p/2+s/2$  si accendono pixel0 e pixel1
- Con lettura analogica
  - L'ampiezza indica dove ha impattato la particella

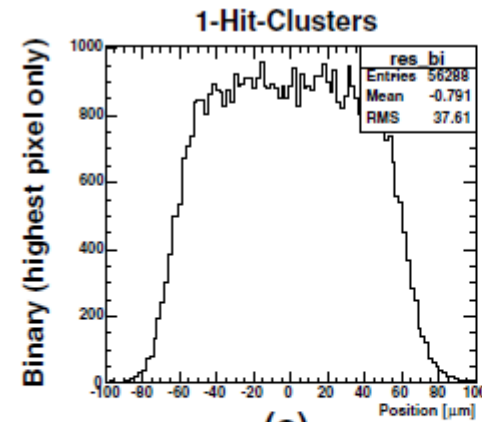


- Condizione ottimale: condivisione  $s=p/2$   
 → risoluzione raddoppiata in maniera uniforme

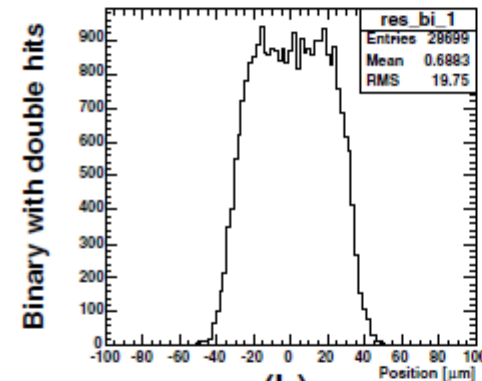


# Effetto sulla risoluzione

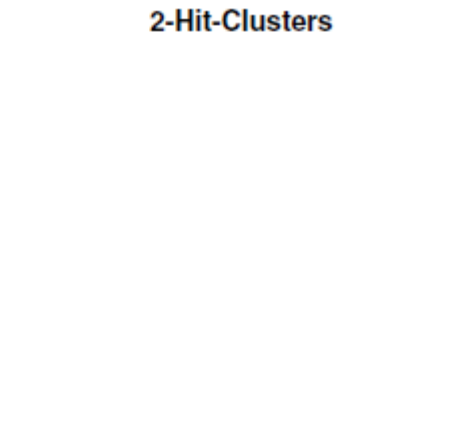
- Residuo: distanza tra punto effettivo di impatto e posizione ricostruita
- Equiprobabile sul passo (solo 1 pix)
  - Equiprobabile sul passo (2 pix)
  - o sulla zona di condivisione
  - Analogico pesato su uno
  - e due pixel



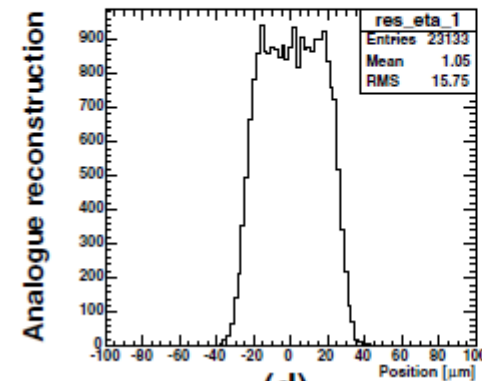
(a)



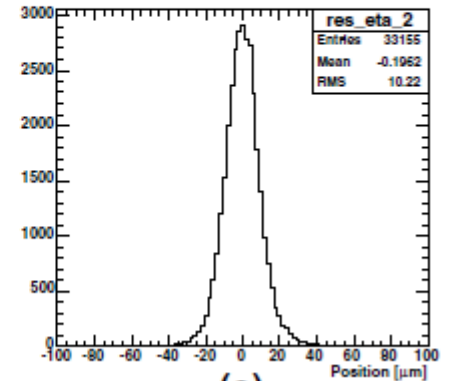
(b)



(c)



(d)



(e)

# Effetto del campo magnetico

Almost all High Energy Physics (HEP) experiments with accelerators make use of magnetic spectrometers to determine the momentum of charged particles

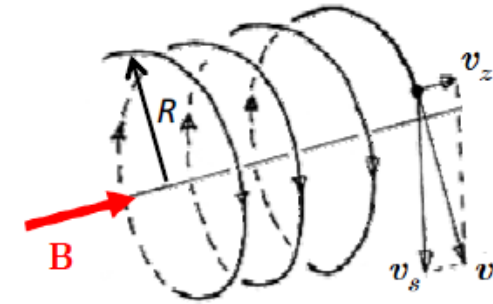
If a particle with mass  $m_0$  and charge  $q$  traverses a magnetic field  $\mathbf{B}$  with velocity  $\mathbf{v}$

$$\frac{mv^2}{R} = qvB \quad \boxed{R = \frac{mv}{qB}}$$

Lorentz force

$$\boxed{\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}}$$

In case of homogeneous magnetic field the trajectory is given by an helix



In experiments at hadronic colliders the emphasis is on the measurement of the transverse momentum  $p_T$

$$\boxed{p_T [GeV/c] = 0.3B[T] \cdot R[m]}$$

Use layers of position sensitive detectors before and after or inside a magnetic field to measure the trajectory and determine the bending radius  $R$

$$\boxed{\frac{\delta p}{p} = \frac{p}{0.3BL^2} \sigma \cdot \sqrt{C_N}}$$

The relative error on the momentum is:

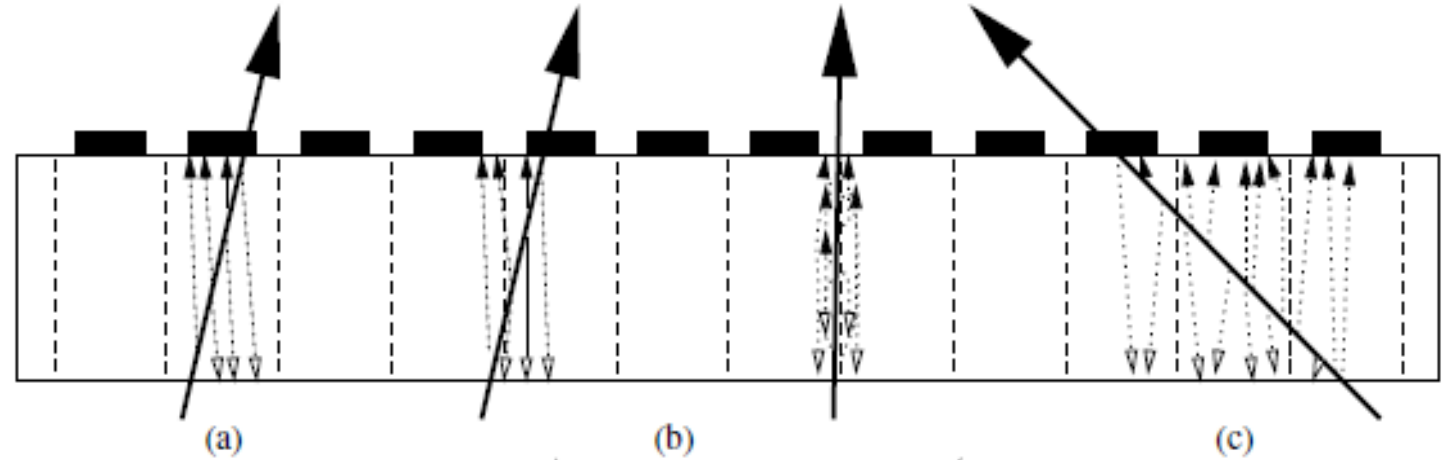
- proportional to  $p$
- inversely proportional to  $L^2$
- inversely proportional to  $B$
- proportional to the detector spatial resolution  $\sigma$

$$\boxed{BL^2 = \text{bending power}}$$

# Cluster: gruppo di pixel adiacenti «accesi» da una particella

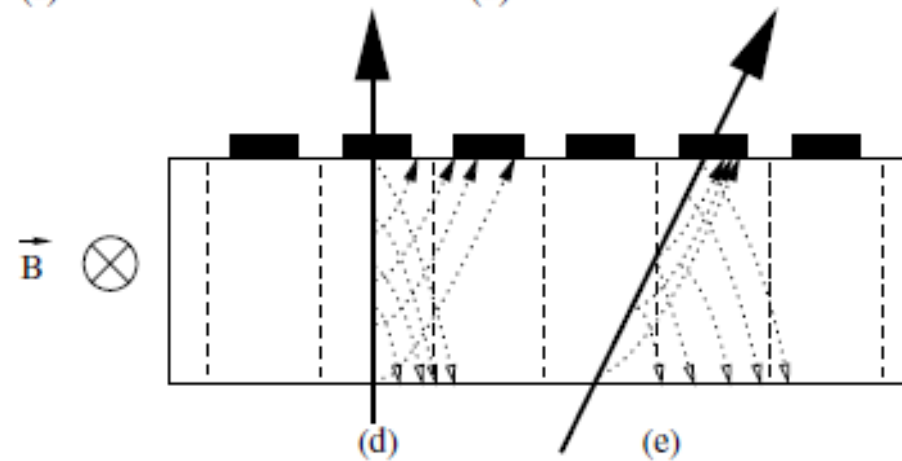
- Senza campo magnetico

- a) Cluster da 1 pixel – traccia obliqua
- b) Cluster da 2 pixel – traccia obliqua/perp.
- c) Cluster da 3 pixel – traccia molto obliqua



- Con campo magnetico

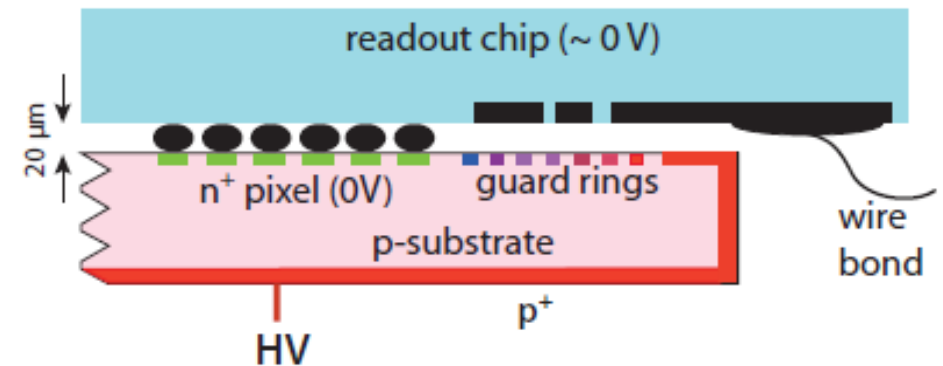
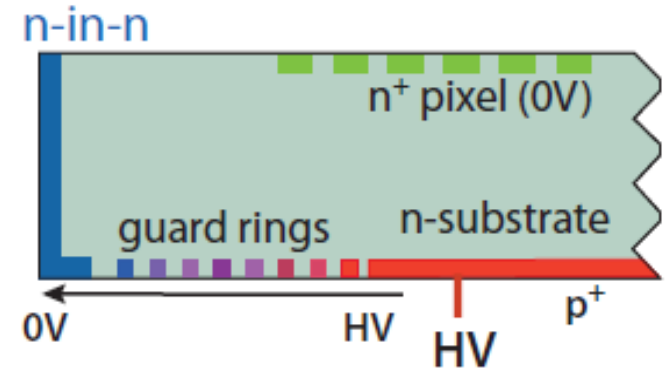
- a) Traccia perpendicolare – cluster allargato
- b) Traccia obliqua – cluster ristretto



Si puo' sfruttare il campo magnetico per ottimizzare la dimensione del cluster in base all'obiettivo (risoluzione spaziale)

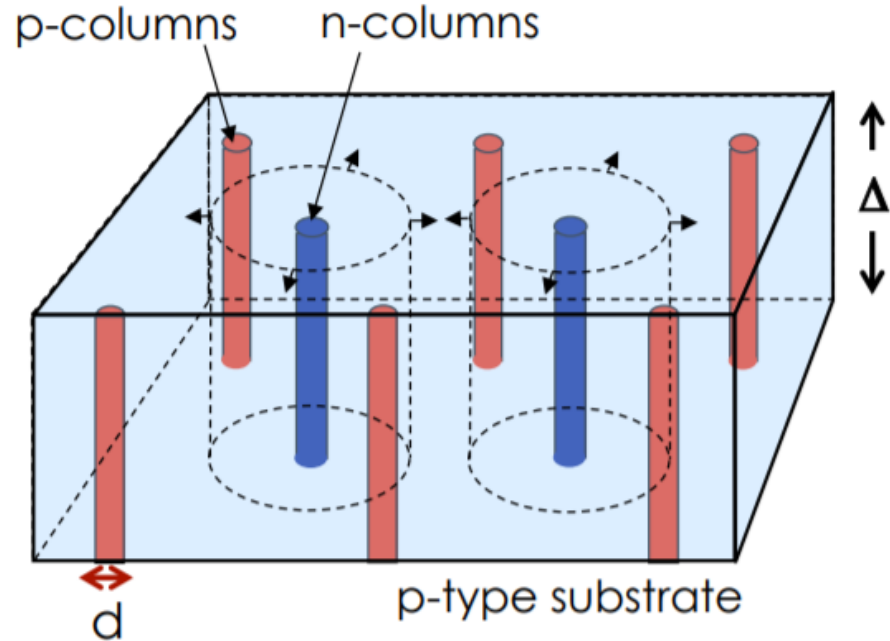
# Pixel Planari (simili alle giunzioni viste)

- **n<sup>+</sup>-in-n** richiede:
  - processamento di entrambi i lati (giunzione tra n e p<sup>+</sup>)
  - guard rings sul lato opposto
  - leggero drogaggio p tra gli impianti n<sup>+</sup>
  - inversione substrato
- **n-in-p** ha:
  - solo un lato processato
  - guard rings sul lato degli impianti
  - raccolta della carica (e<sup>-</sup>) più veloce
  - maggiore resistenza alle radiazioni
- **possono essere assottigliati**
  - aumenta tolleranza a radiazioni
  - perdita carica generate e segnale



# Sensori a pixel 3D

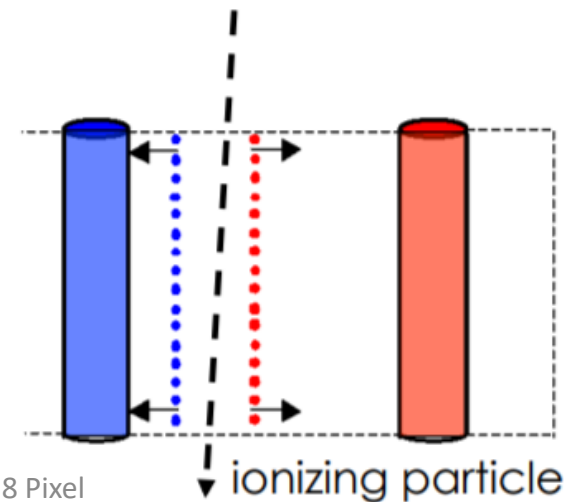
- Tecnologia innovativa ma già ben radicata
- Sfrutta processi di microlavorazione moderni usati per sistemi micro-elettromeccanici (MEMS) come il DRIE
- Realizzazione di elettrodi verticali a colonna che penetrano il substrato di silicio



$\Delta \sim 200 \mu\text{m}$   
 $d \sim 10 \mu\text{m}$

Modo per avvicinare l'elettrodo senza diminuire spessore attivo

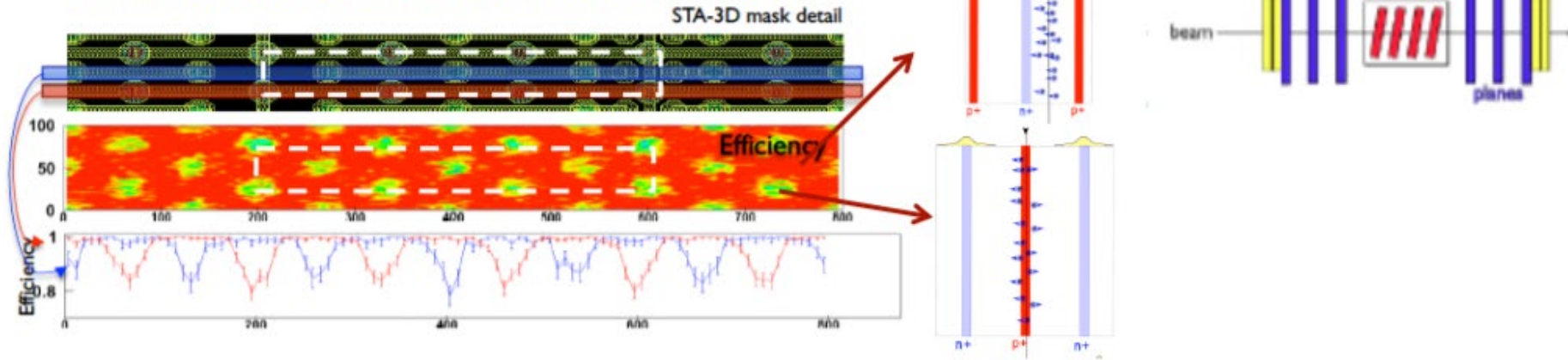
- Veloce raccolta
- Segnale più grande



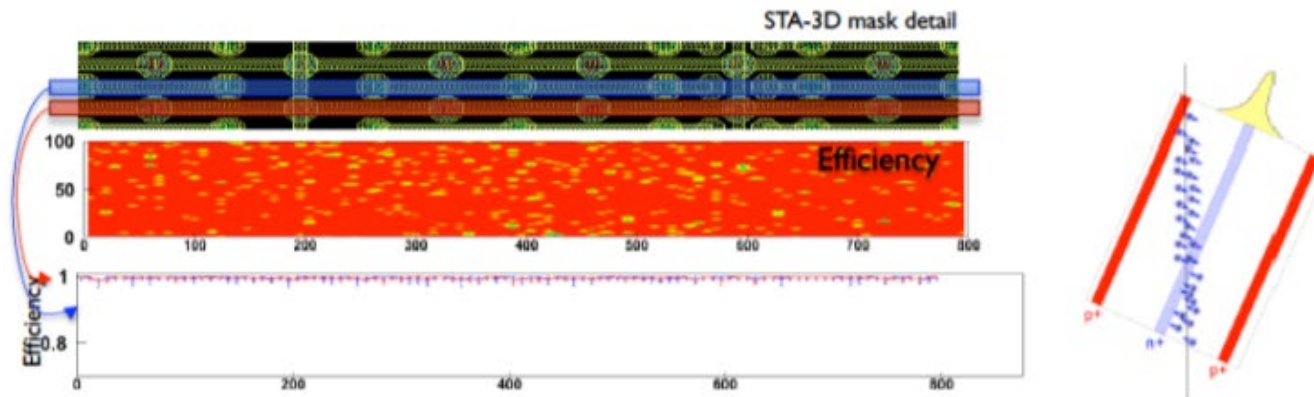
- **Non uniform spatial response**
  - Electrodes are inefficient regions

P. Grenier et. al. NIMA 638 (2011) 33

**Efficiency of ATLAS IBL sensor: test beam results**



Efficiency recovered by tilting sensors  
 → Efficiency >99.8% with ~10° angle



# Pixel 3D

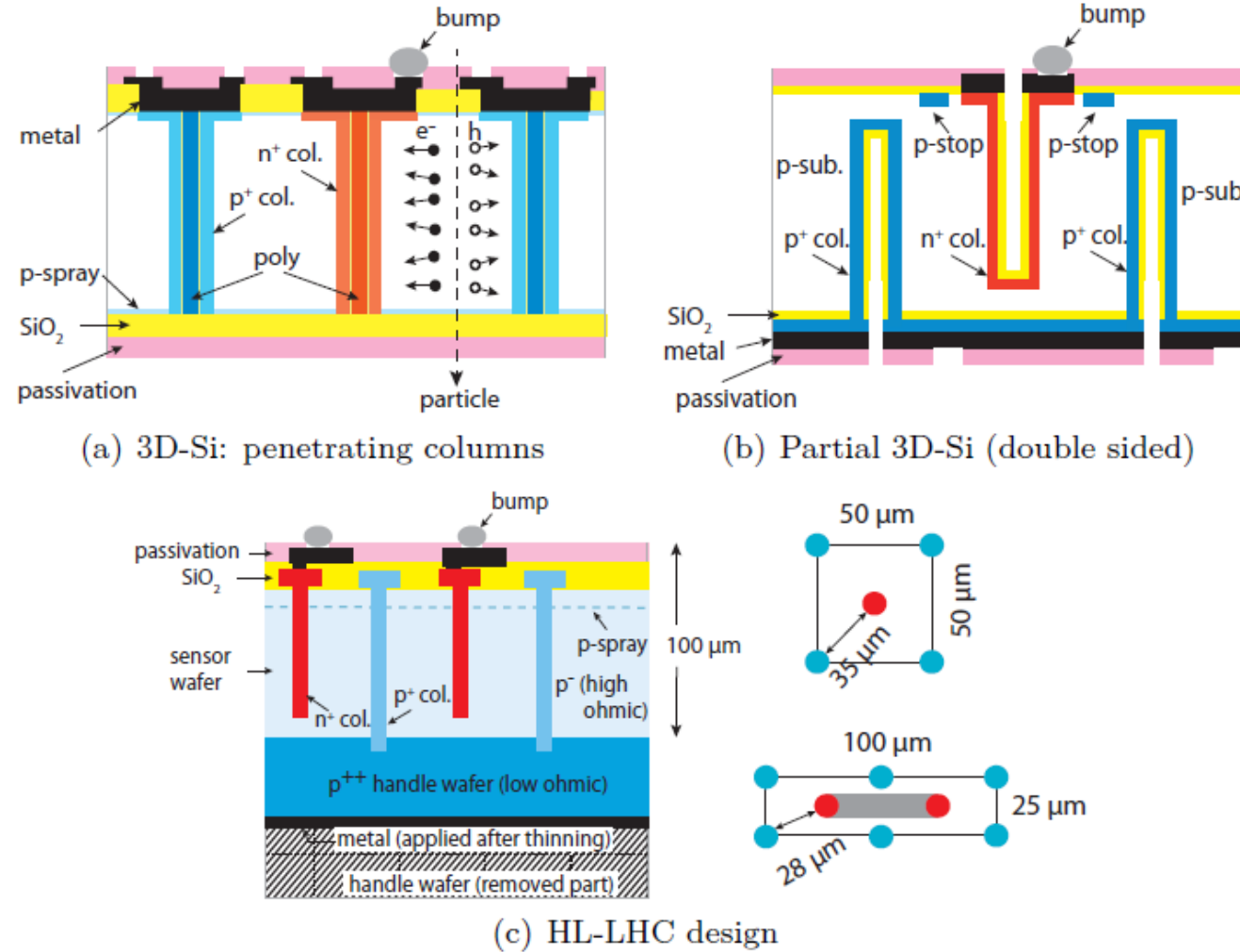
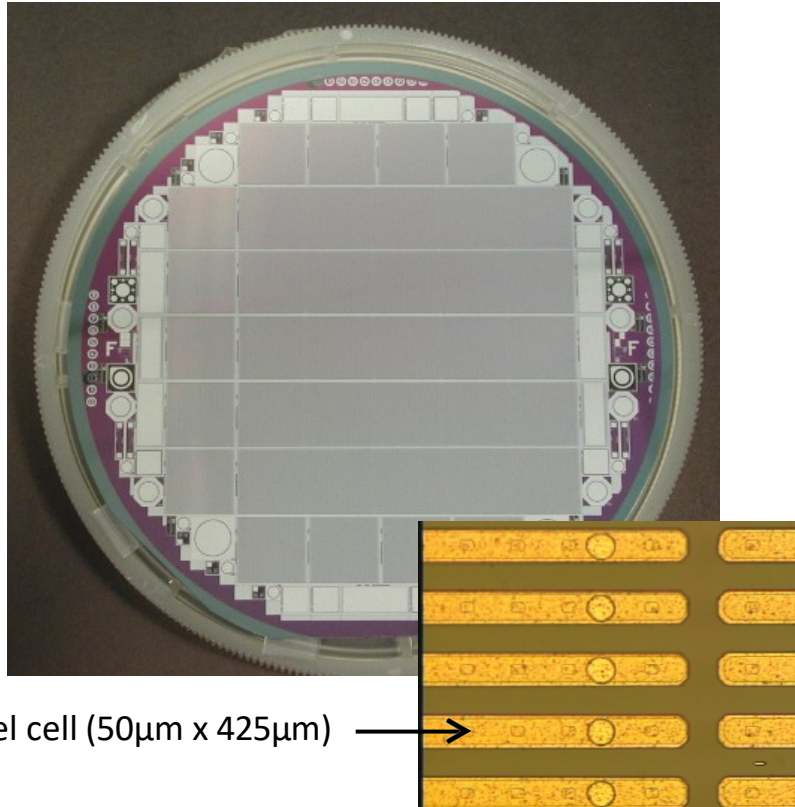


Figure 11: 3D-Si sensors: (a) Design (single sided) with columns going completely through the sensor bulk [59]; (b) double sided design with columns entering from both sides, but not reaching through (adapted from [63]); (c) thin design optimized for HL-LHC (adapted from [64]) with two top view sketches for  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  and  $25 \times 100 \mu\text{m}^2$  pixel sizes, respectively [65].

# Hybrid Pixel Detectors



## 1. Pixel Sensor

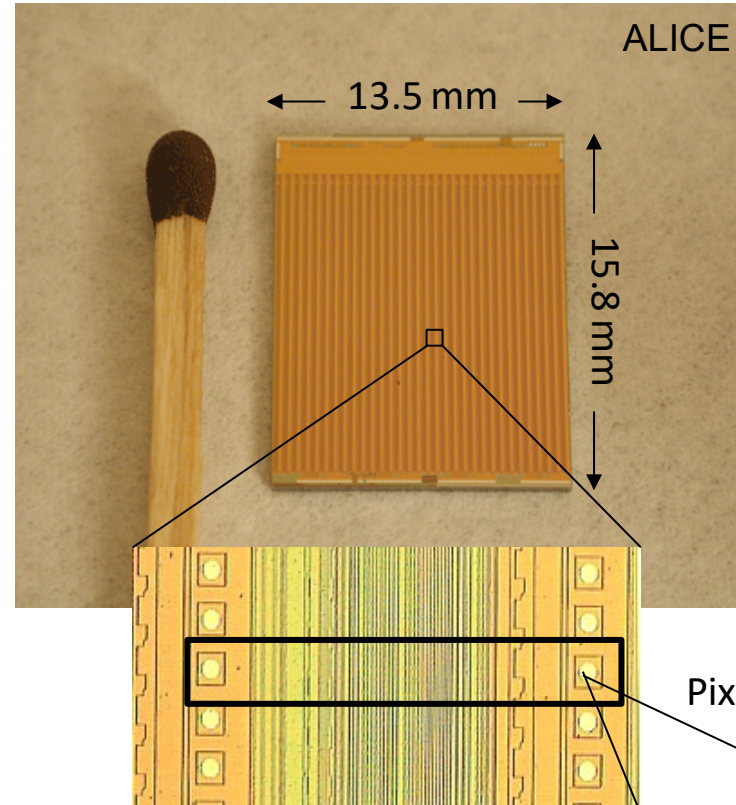


Pixel cell ( $50\mu\text{m} \times 425\mu\text{m}$ )

Each pixel cell in the sensor is connected to a pixel cell in the readout chip via a bump bond

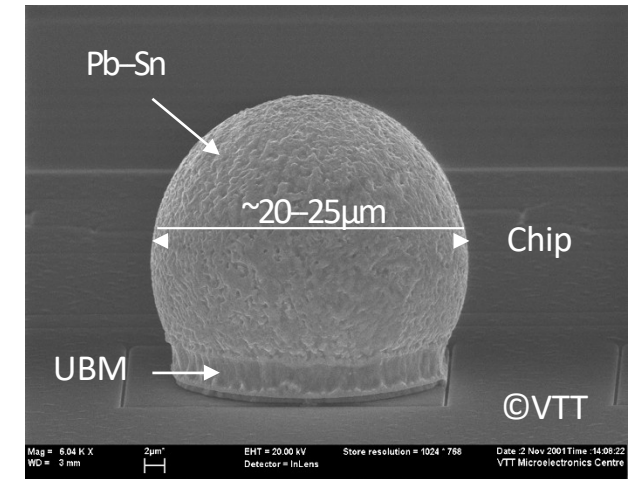
Usually several readout chips are connected to a single sensors

## 2. Readout Chip (ASIC)

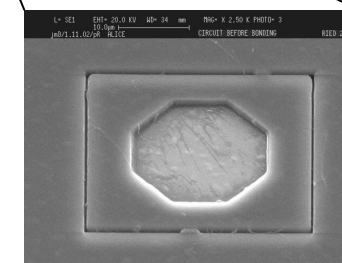


Pixel cell (e.g.  $50\mu\text{m} \times 425\mu\text{m}$ )

## 3. Bump Bond



SEM picture of one bump bond

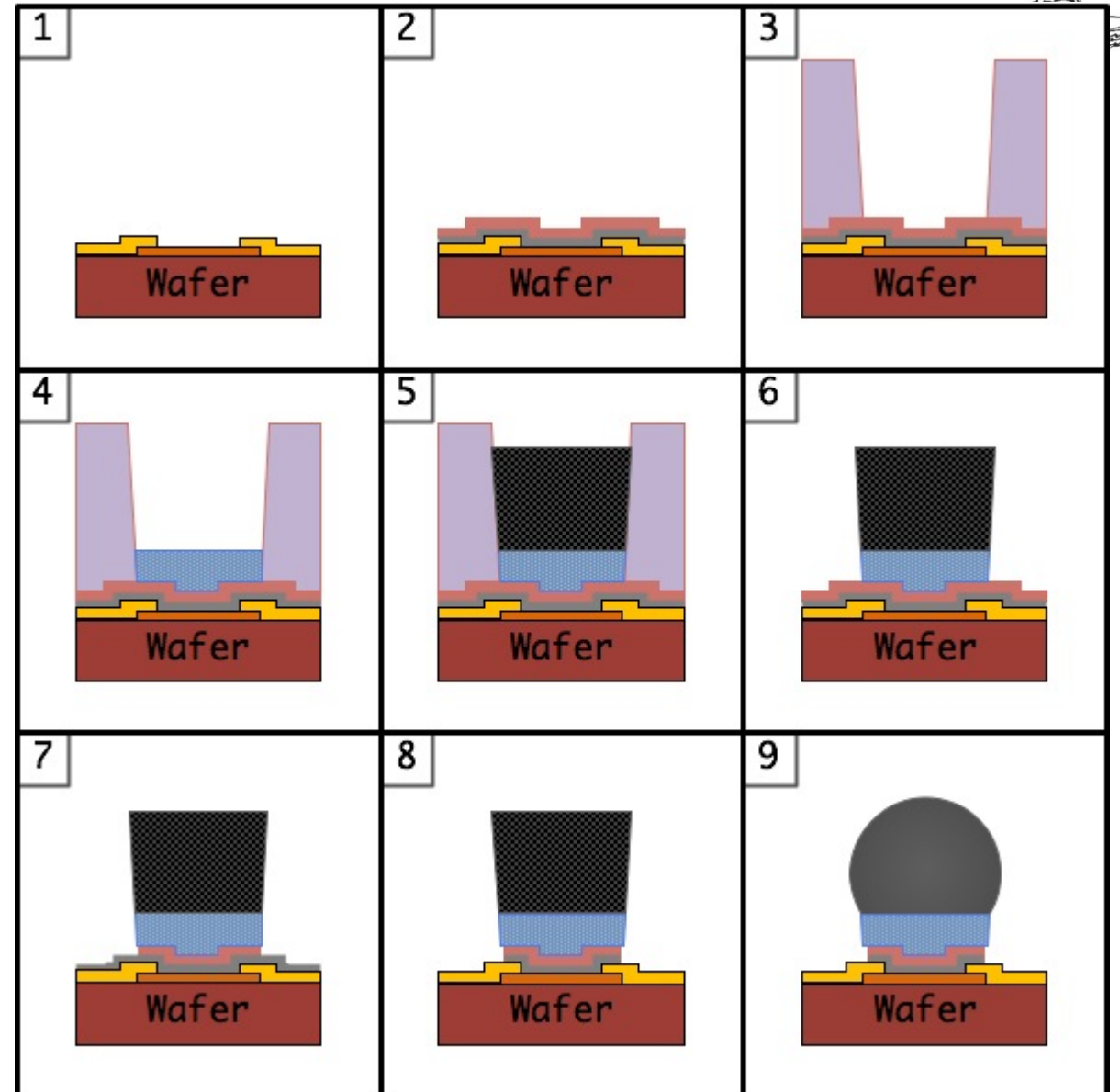


Bump bonding pad



# Processo Bump bonding

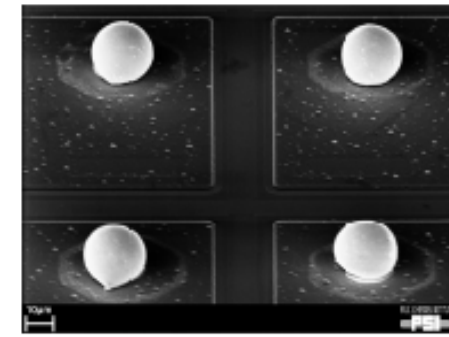
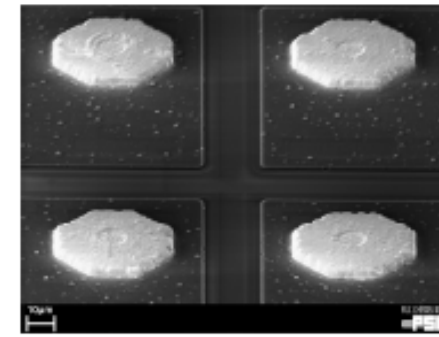
1. Pulitura wafer
2. Deposito degli strati adesivo (Ti:W) o iniziale
  - Adesivo Ti:W, anche barriera per atomi rame
  - Iniziale: base Cu o Au depositata elettrochim.
3. Applicazione spesso fotoresist
4. Deposizione elettrolitica UBM
  - Underbump metallization
5. Deposizione elettrolitica materiale saldante
6. Rimozione meccanica fotoresist
7. Rimozione eccesso strato iniziale (etching)
8. Rimozione eccesso strato adesivo (etching)
9. Riflussaggio materiale saldante
  - Assume forma sferica
  - Facilita riallineamento dei sensori



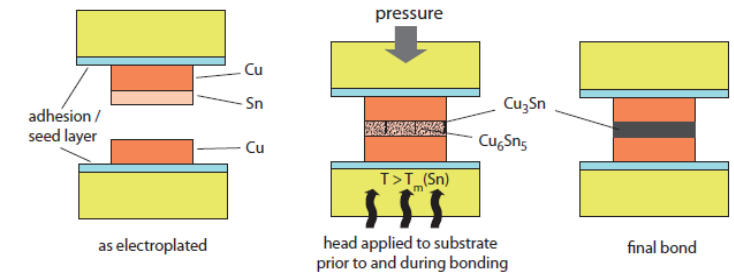
\*etching = incisione

# Altri Bump Bonding

*In-In bonding*

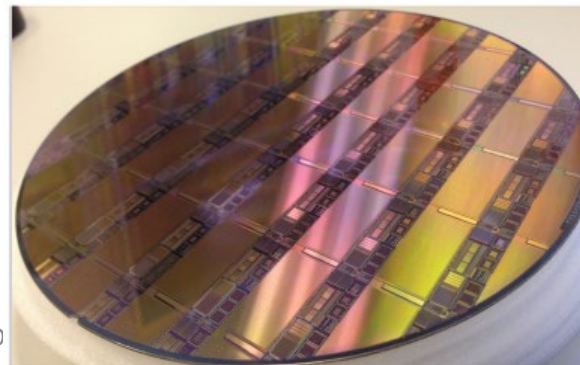


- Indio-Indio bonding
  - Deposito di vapore di indio attraverso finestre
  - Bump piatti e sottili, Saldato via termocompressione a 100C
  - Vantaggi: bassa temperature e facile da implementare-Svantaggi: bond fragile e resa bassa (90%)
  - Può essere riflussato per fare assumere forma sferica ai bump
- Bonding adesivo
  - Strato di materiale adesivo e accoppiamento capacitivo tra pads dei due sensori
  - Richiede ottimo allineamento e planarita', economico, connettivita' non provata
- Bonding diretto Cu-Cu
  - Le pad vengono messe in contatto con forze adesive. Atomi di Cu si diffondono tra le pad
  - Termocompressione e' semplice ma richiede troppo alte temperature
  - Attivazione di superficie a temperature ambiente con trattamento chimico
  - Vantaggi: passo molto piccolo e' possibile 4um
  - Svantaggi: richiede livelli di pulizia e planarita' elevatissimi

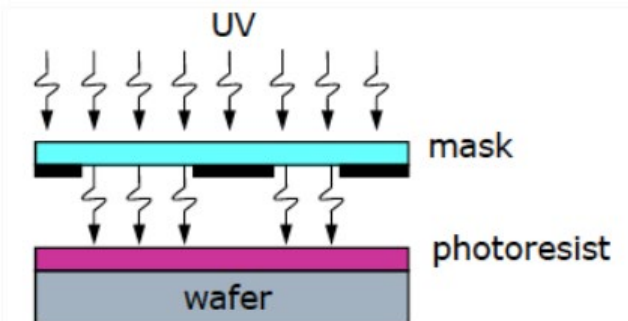


# Connessione, assottigliamento, cucitura

- Bonding Ossido-Ossido
  - A temperatura ambiente i wafer sono rivestiti con strato di ossido che si lega all'acqua.
  - Richiede estrema pulizia e connessioni elettriche aggiuntive (tipo "through silicon vias"-TSV)
- SLID: Interdiffusione solido-liquido di Stagno e Rame
  - Si legano a 240-320C, non reversibile
- Assottigliamento (thinning)
  - Wafer partono da spessori piu' spessi (700-250um) per arrivare allo spessore desiderato (300-150um)
  - Substrato sul lato inattivo viene grattato via per sfregamento con dischi con superficie a grana via via piu' sottile, da 20-80um a 1-8um
  - Il lato attivo e' protetto da adesivo che viene poi lavato via
  - Resistenza alle rotture, deformazione, incurvamento da tenere sotto controllo
- Cucitura (stitching)
  - Esposizione allineata della stessa maschera ripetuta sul reticolo (25mm\*25mm) per coprire grandi superfici



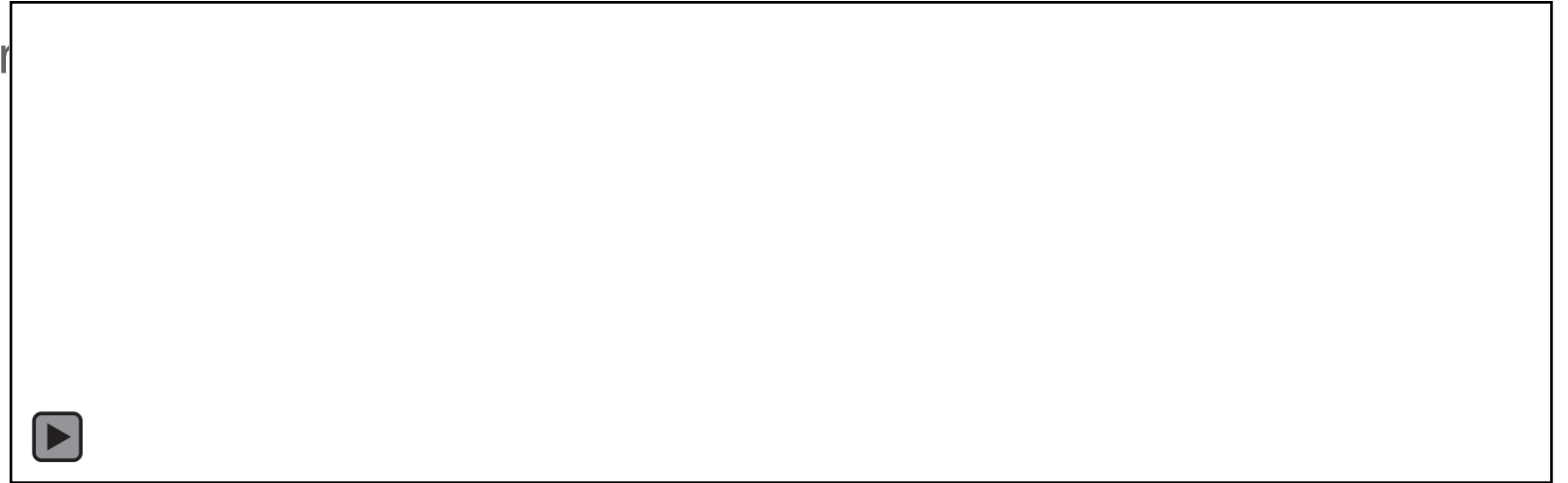
giacomo.contin@



# Stitching – Cucitura di strutture ripetute

## Processo

- Suddividere la maschera
- Esporre ripetutamente il wafer alla sezione desiderata per raggiungere le dimensioni desiderate



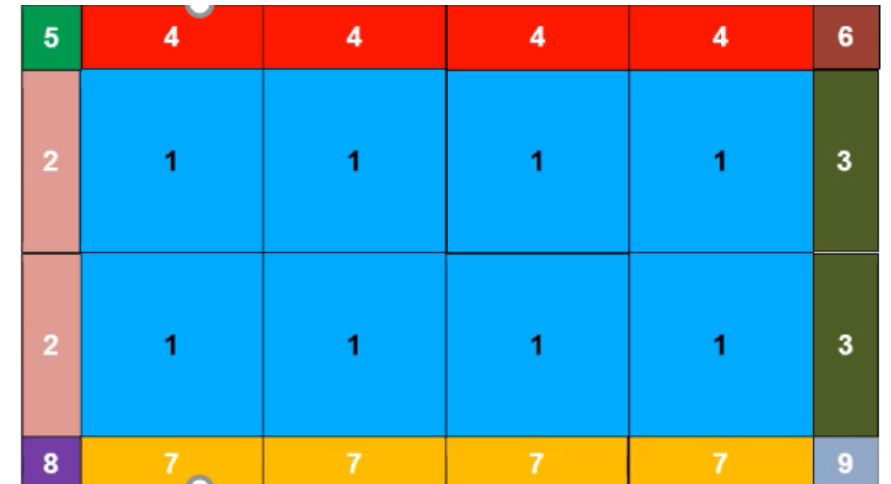
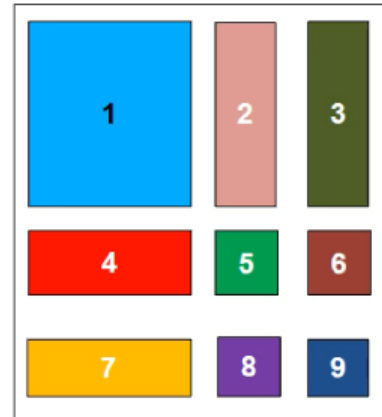
## Implicazioni

- Limiti aggiuntivi
- Poca flessibilità
- Come indirizzare il giusto elemento ripetuto
- Resa di produzione per grandi aree

# Stitching – Cucitura di strutture ripetute

## Processo

- Suddividere la maschera
- Esporre ripetutamente il wafer alla sezione desiderata per raggiungere le dimensioni desiderate



## Implicazioni

- Limiti aggiuntivi
- Poca flessibilita'
- Come indirizzare il giusto elemento ripetuto
- Resa di produzione per grandi aree

# Primi rivelatori a pixel

- 1984 IEEE Nuclear Science Symposium: circuito integrato per sensori per imaging a piano focale (Hughes Aircraft Co.)
- Accoppiato con bump bonding a matrice di diodi semiconduttori per la rivelazione e localizzazione di raggi X
- 4 MOSFETs per pixel
  - Piccole dimensioni di pixel
  - Carica integrate per centinaia di  $\mu\text{s}$  su un condensatore per minimizzare il rumore seriale dell'elettronica
  - Lettura multiplex di ogni pixel a turno, a un tempo prefissato.
- Funziona a condizione che:
  - Ogni pixel tira una corrente molto bassa per non saturare l'amplificatore di lettura e non contribuire al rumore parallelo dell'elettronica
  - La frequenza dei dati e' mantenuta a 1 kHz al massimo
  - Il dispositivo viene interrogato in continuo e non con trigger esterno

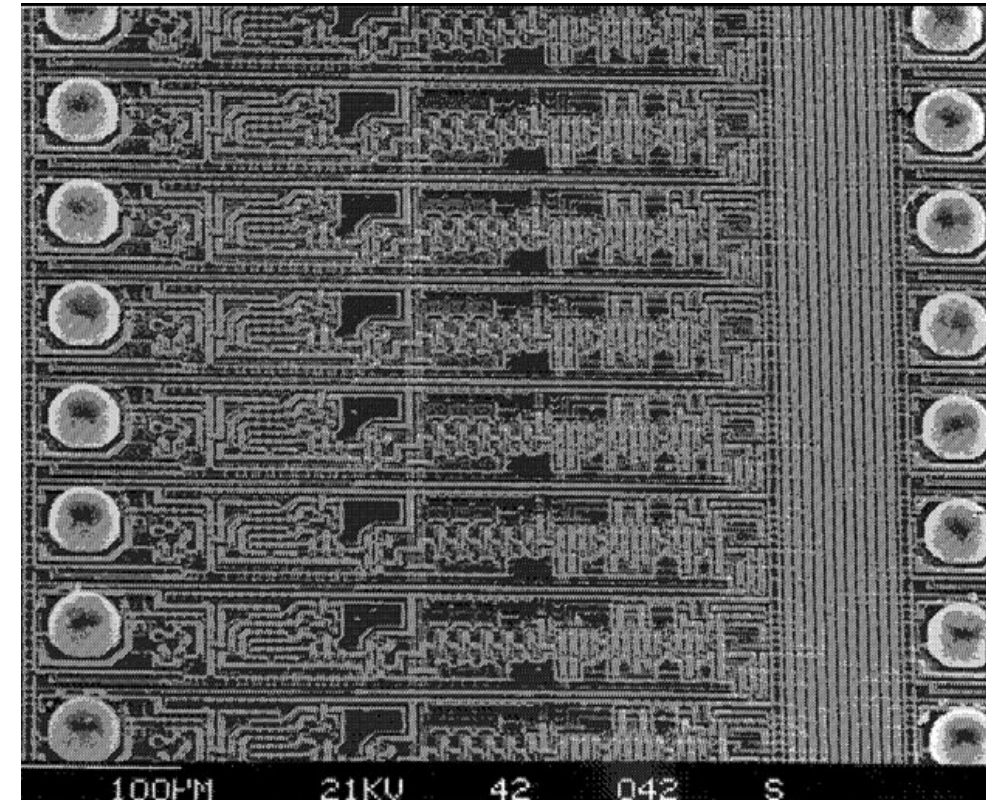
# Primi rivelatori a pixel

- Limitazioni compatibili con applicazione imaging ma non per particelle cariche
- Evoluzioni seguenti negli anni '90 in sviluppi per SSC e LHC
- Applicazioni a esperimenti a bersaglio fisso
  - Grazie al boost di Lorenz la maggior parte delle tracce si concentra in un cono, basta una piccola superficie coperta dal sensore
  - Tutti i servizi (cavi e raffreddamento) possono essere posti fuori dal volume sensibile
  - Si può accedere al rivelatore frequentemente e facilmente, vista la configurazione degli esperimenti a b.f.
- Prime applicazioni sono state le collisioni tra ioni pesanti
  - L'alta molteplicità di particelle prodotte può essere gestita bene da questi rivelatori ad alta granularità e con informazione 3D
- R&D specifico per rivelatori per raggiungere prestazioni estreme in vista di LHC
  - OMEGA Pixel Detectors

# OMEGA pixel detector

Foto SEM di OmegaD chip

- Matrice del sensore attivo
  - Pixel size  $75 \times 500 \mu\text{m}^2$
  - 1024 pixel (16 colonne e 64 righe)
- Solder bump bonding
- CMOS readout chip in  $3\mu\text{m}$  feature size
  - Preamplificatore sempre attivo
  - seguito da comparatore asincrono
  - ritardo digitale in attesa di trigger esterno:
  - quando il trigger arriva, tutti i pixel con un segnale sulla linea di ritardo vengono letti.
- Prestazioni prima versione
  - $30 \mu\text{W}$  per pixel (i.e.  $\approx 1\text{mW}/\text{mm}^2$ );
  - Rumore elettronico circa  $100 e^-$  rms
  - Variabilita' soglia tra canali attorno a  $500 e^-$  rms
  - Disuniformita' da pixel a pixel
  - Limitazioni tecniche (variazioni lungo l'area)
  - Scelte di design (sensibilita' a cadute di potenziale)



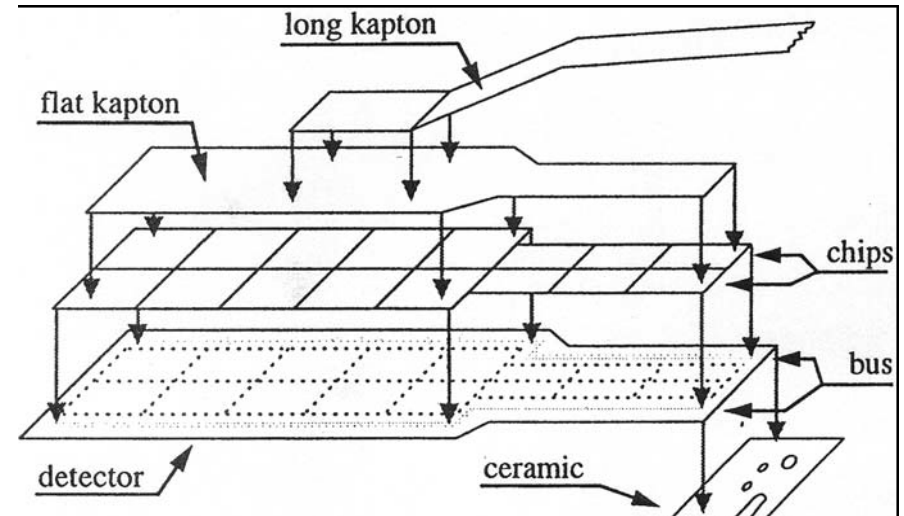
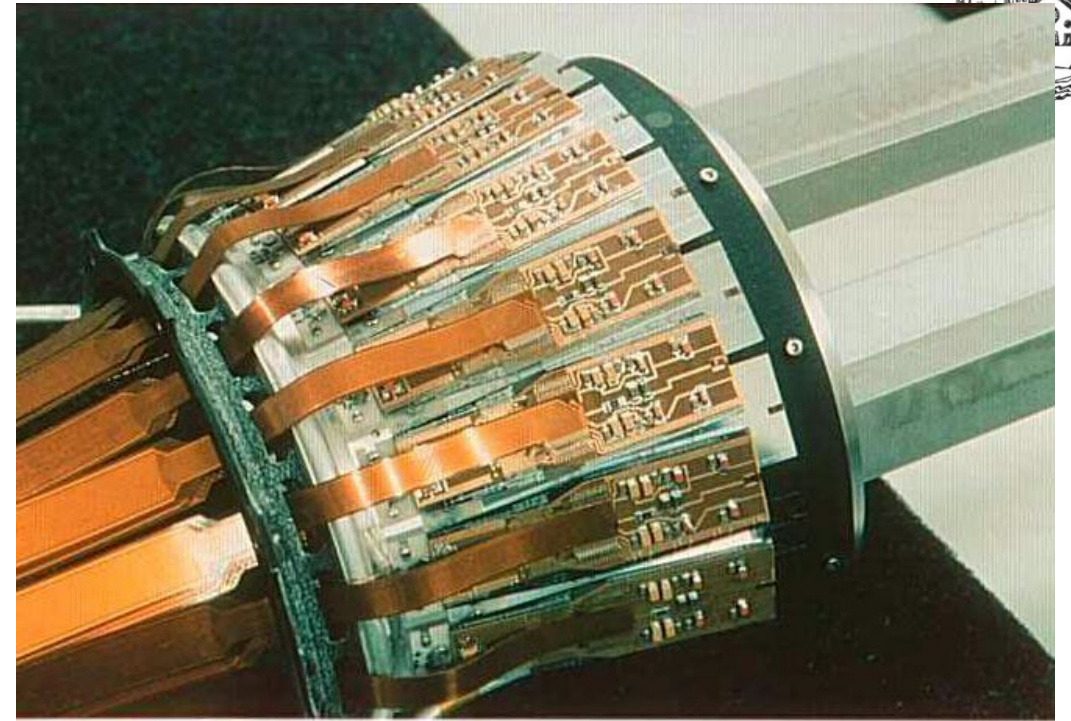


# OMEGA – versioni successive

- Feature size da 3 a 0.25  $\mu\text{m}$ 
  - da 80 a 500 MOSFET per pixel
  - Strati di ossido piu' sottili
  - Meno danni da radiazione (tollera 300 kGy, fattore 1000)
- Dimensioni wafer cresciuto da 4 a 8 pollici
- Da 3 chip singoli a 84 ladders con un sensore e 6 chip ciascuno
  - 73k pixels per ladder, 29  $\text{cm}^2$  di area
  - Yield basso: 35%
- Ultima versione: ALICE1 per l'esperimento ALICE

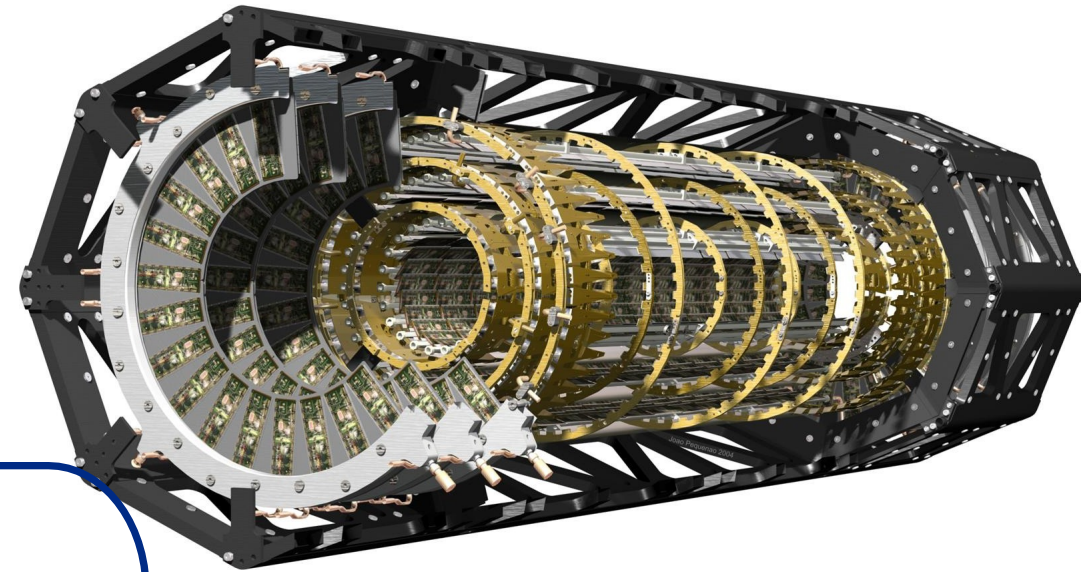
# PIXEL di DELPHI (LEP)

- Corona per estendere accettazione in avanti e indietro
- 1.2 M pixel su 0.15 m<sup>2</sup>
- 0.03 W/cm<sup>2</sup> electronics
- Poco materiale inattivo
  - singolo condotto di raffreddamento dentro la corona (gradiente 10C)
  - Scelta di materiali leggeri
- Matrici 24x24 e 16x24 per superficie che si restringe
- 330 × 330 μm<sup>2</sup>
- Primo tentativo di implementare readout bus sul sensore (ma alta caduta di V richiede aggiunta)
- Rumore: qualche 100e<sup>-</sup>
- TH: 10 ke<sup>-</sup> → efficienza > 99%
- 0.3% pixel troppo rumorosi e mascherati
- Raddoppia l'efficienza di ricostruzione di traccia in quella accettazione
- Resa moduli: 36%



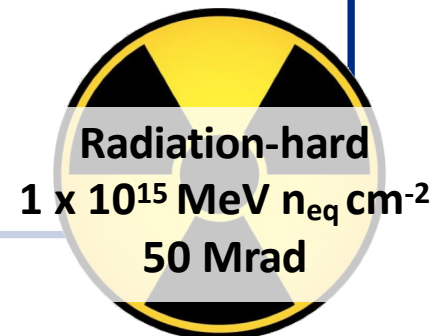
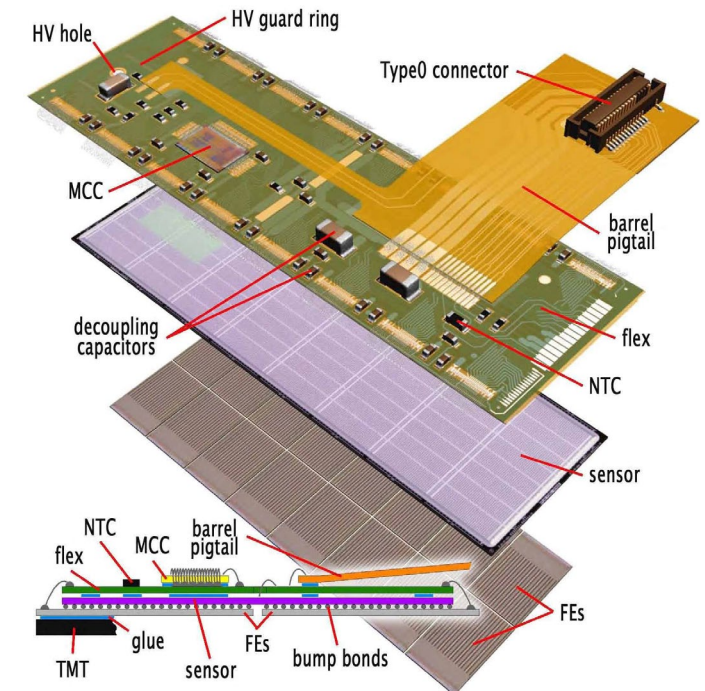
# The ATLAS Pixel Detector

- 3 hit system up to angular coverage of  $|\eta| < 2.5$
- 3 barrels and 2 x 3 endcap disks
- $C_3F_8$  evaporative cooling (10kW/m<sup>2</sup>, serve T=0C contro rad)
- 1.7 m<sup>2</sup> of silicon
- 1744 pixel modules (tutti uguali)

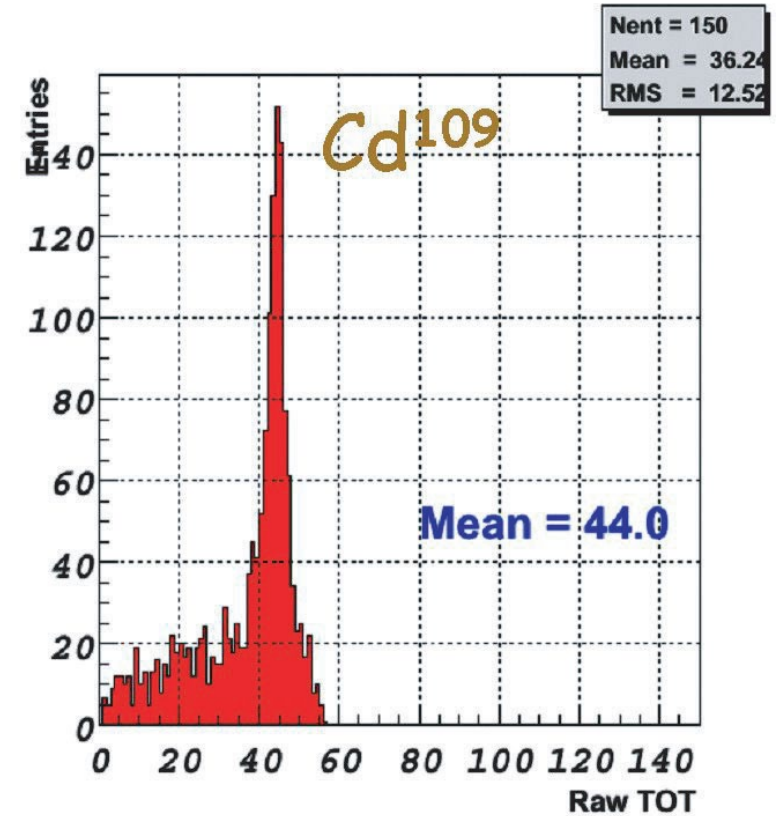
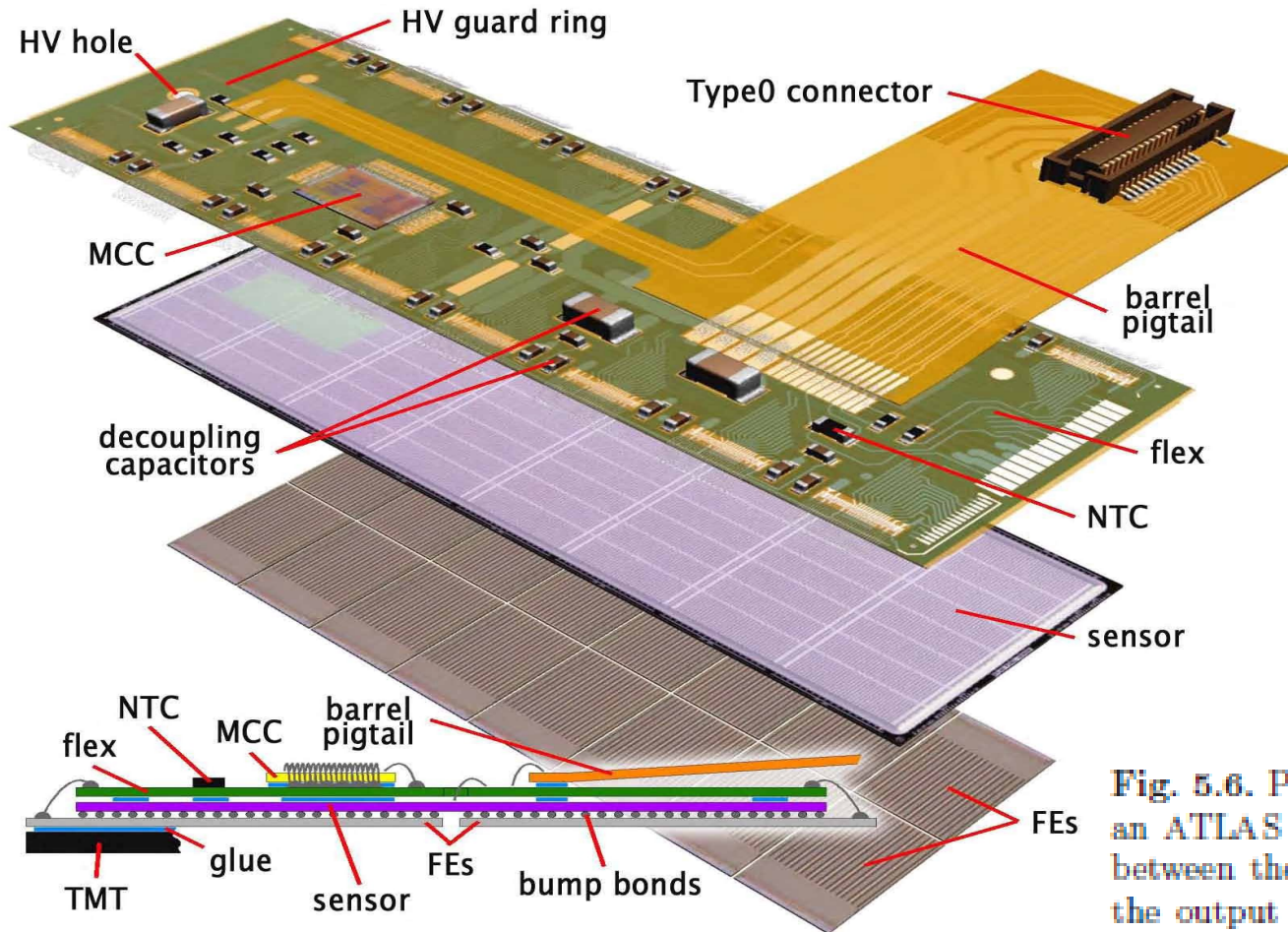


Each pixel module consists of:

- 1 planar n+-on-n (per poter operare parzialmente svuotato dopo inversione da radiazione) sensor 60.8 x 16.4 mm active area, 250  $\mu$ m thick, 46080 pixels
- 16 guard rings per operare ad alto V
- 50x400 area, rettangolari per migliore risoluzione nella direzione di curvatura (per misurare momento)
- 16 FEI3 front-end chips plus one controller (0.25  $\mu$ m CMOS)
  - Front-ends are bump-bonded to the sensor.
  - Charge measurement using 8-bit **ToT** information.
- 1 flex that provides electrical connections
- Data rate per module: 80-160 Mbps



# Time over threshold calibration Module sketch

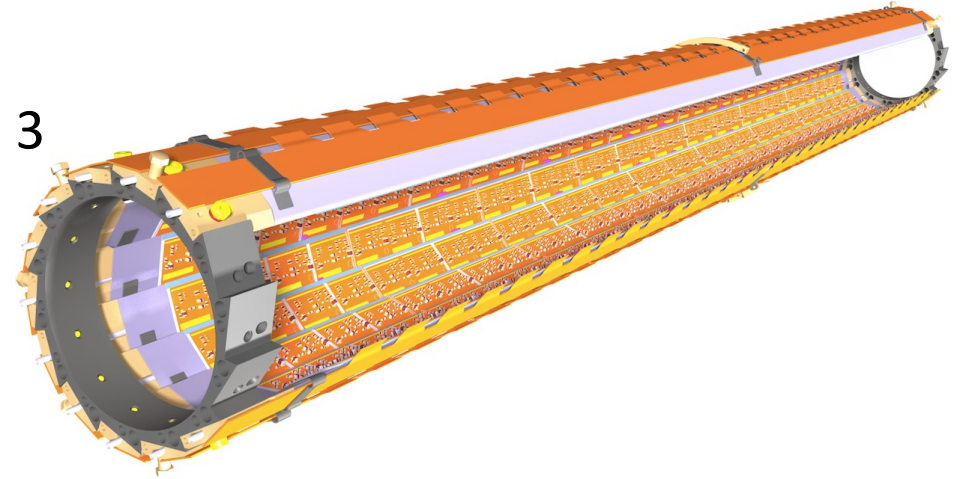


TOT: con una risoluzione di 25ns, il tempo di salita e di discesa del segnale sopra soglia vengono misurati. Più grande è l'impulso più tempo resta sopra soglia (registro a 7 bits)

Fig. 5.6. Pulse height distribution resulting from  $^{109}\text{Cd}$  photon conversions inside an ATLAS pixel assembly. The measurement is performed using the correlation between the charge collected by one pixel and the time-over-threshold (TOT) of the output of its amplifier. The 22.3 keV  $^{109}\text{Cd}$  photopeak is measured with an energy resolution of  $\approx 5\%$ .

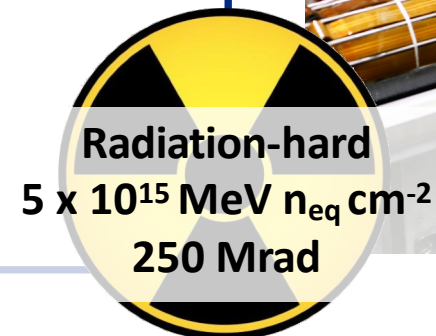
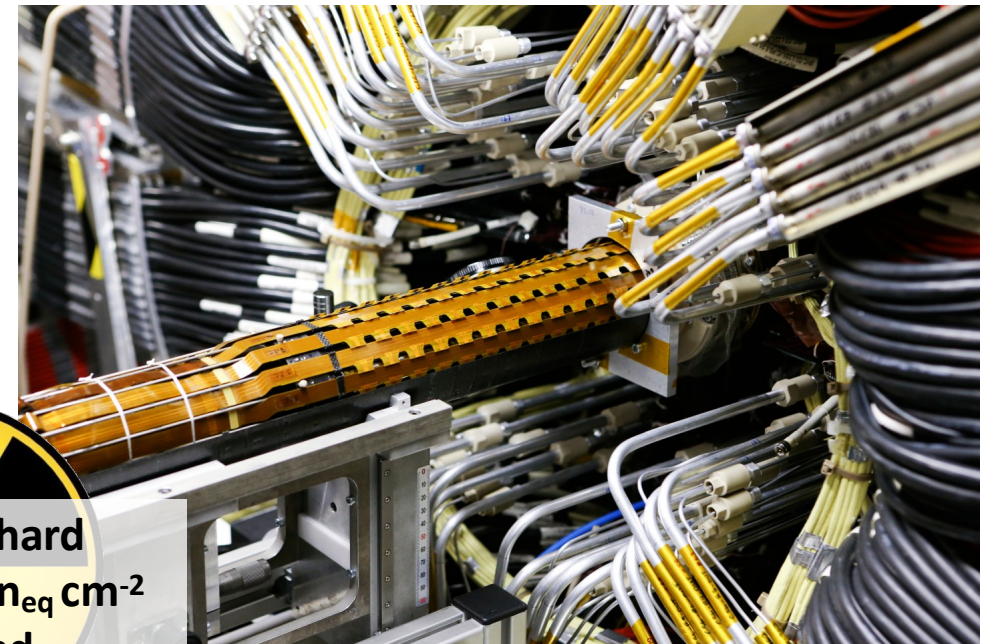
# IBL – Ininsertable B-Layer

- Innermost layer of the pixel detector, coverage of  $|\eta| < 3$
- New in LHC Run 2, installed in 2014
- 14 staves, 0.2 m<sup>2</sup> of silicon
- CO<sub>2</sub> evaporative cooling
- 280 IBL modules
- Planar sensors (central) and 3D sensors (forward)



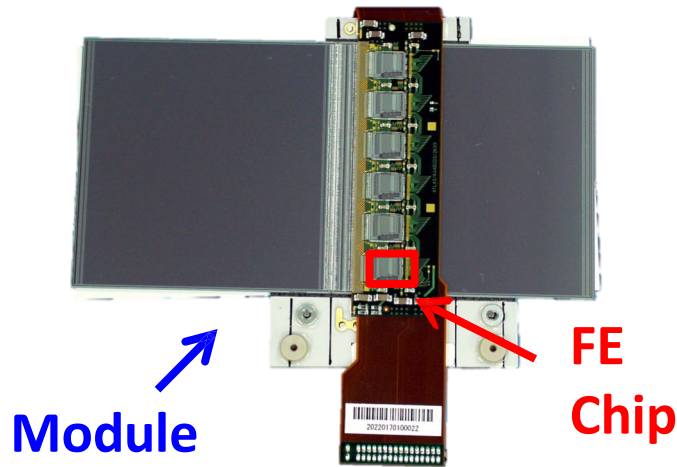
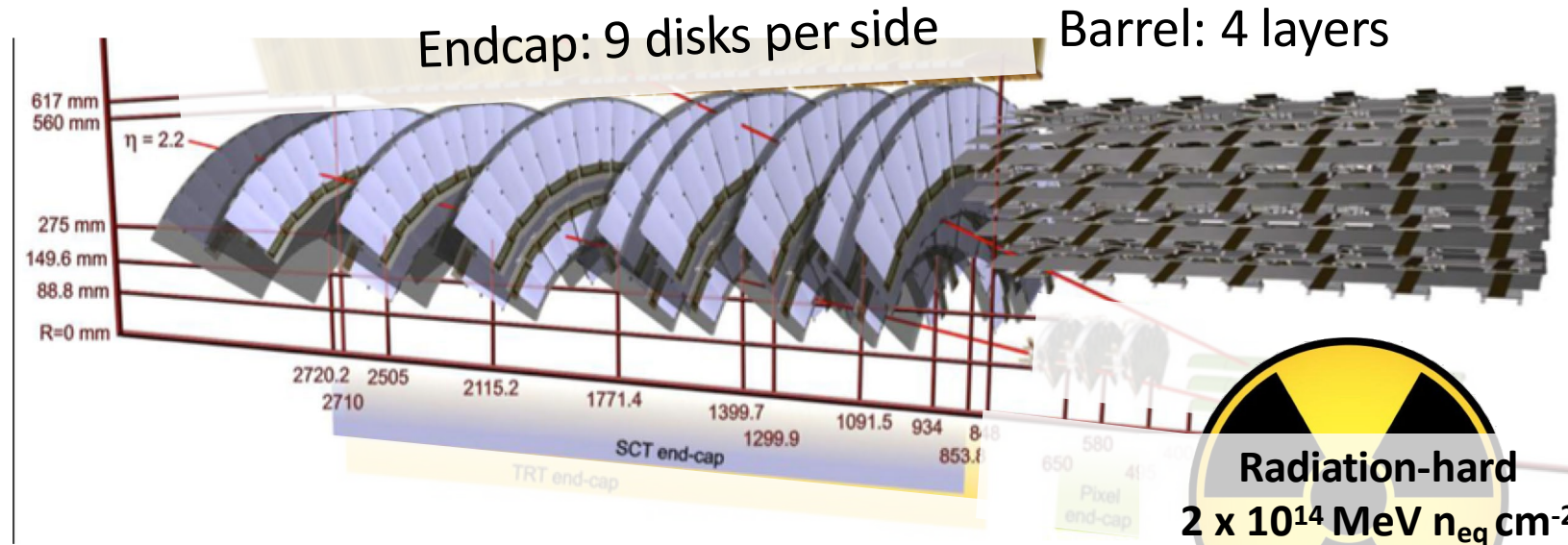
Each IBL module consists of:

- Sensor:
  - Planar slim edge n-on-n sensor, 200 μm thick
  - 3D n-on-p sensor with 2 electrodes per pixel, 230 μm thick
- 2 or 1 FEI4 front-end chips (0.13 μm CMOS)
  - Front-ends are bump-bonded to the sensor.
  - Charge measurement using 4-bit ToT information
- 1 flex that provides electrical connections
- Data rate: 160 Mbps



# SCT- Semi Conductor Tracker

- 8 hit system
- Angular coverage:  $|\eta| < 2.5$
- $C_3F_8$  evaporative cooling
- 61 m<sup>2</sup> of silicon
- 4088 modules

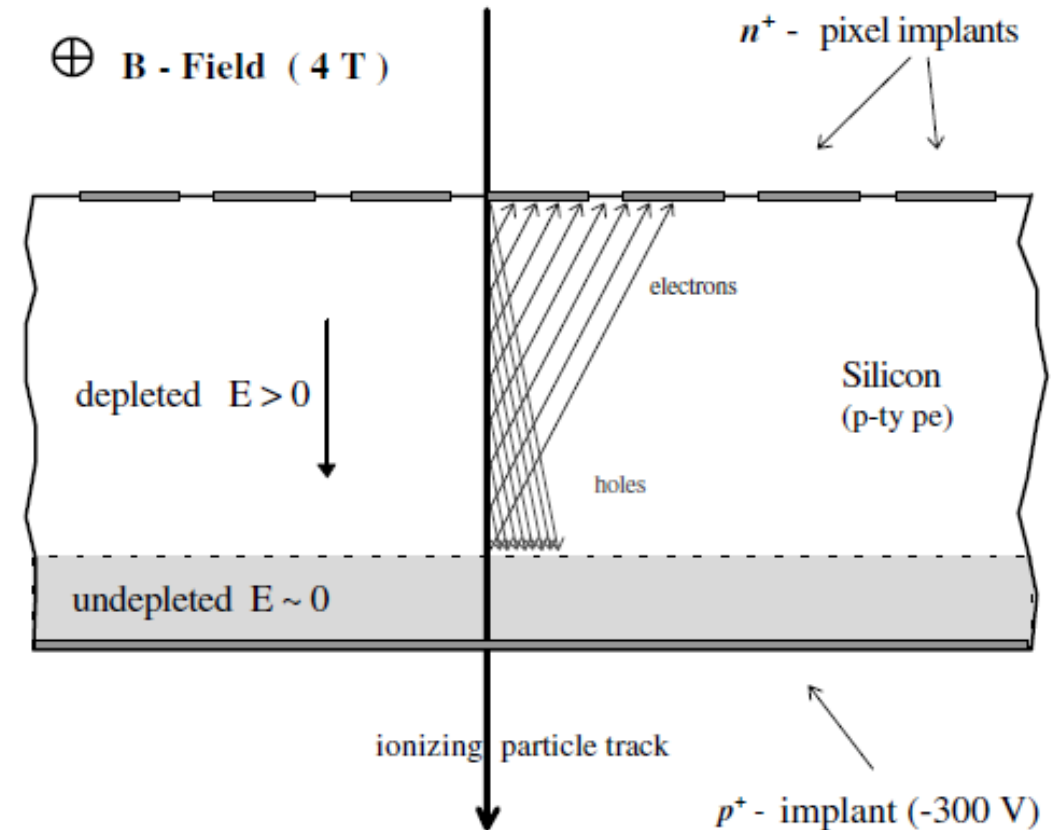


Each SCT module consists of:

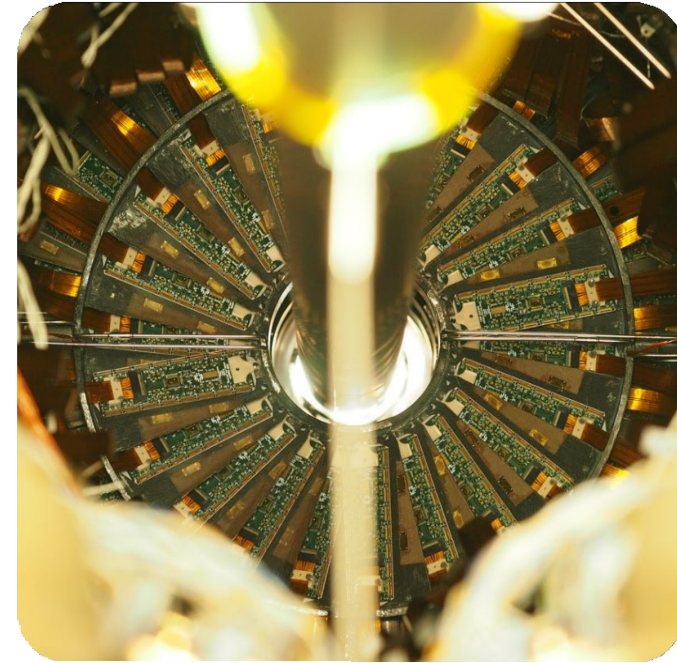
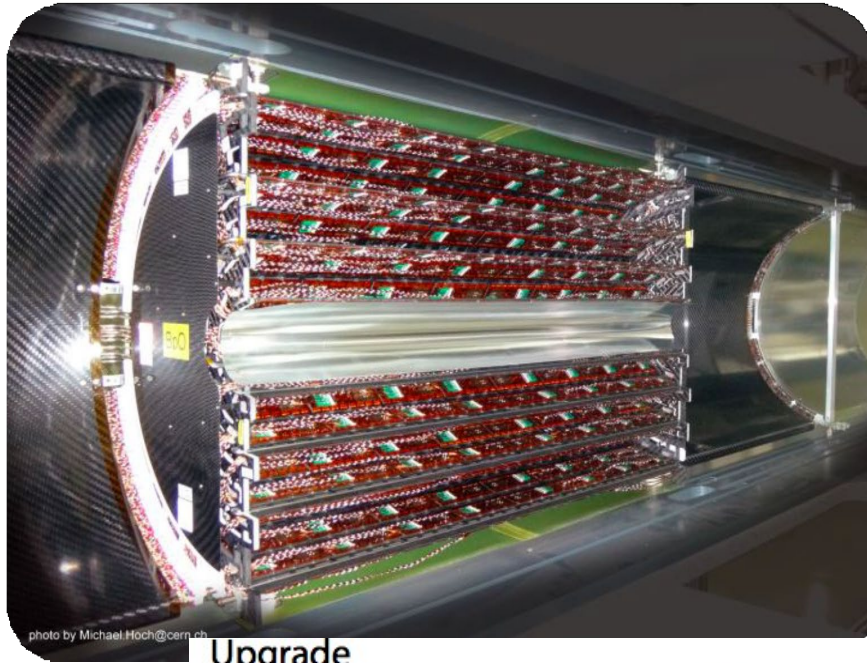
- Two strip sensors crossing at 40 mrad
- Single-sided p-in-n sensor, 285  $\mu\text{m}$  thick, 768 strips
- 2 x 6 ABCD front-end chips (0.8  $\mu\text{m}$  biCMOS)
  - Binary readout: hit = signal > threshold
  - 3 consecutive time bins sampled per trigger
- Data rate: 40 Mbps

# CMS Pixel

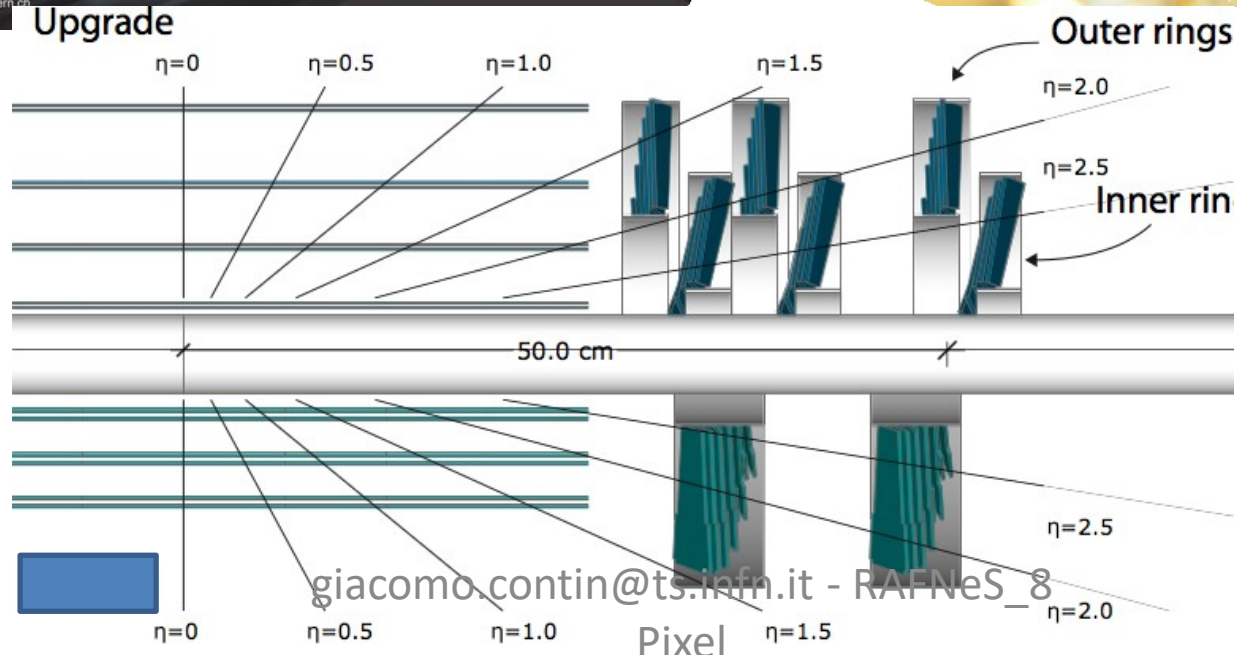
- 100umx150um per avere risoluzione spaziale simile in entrambe le direzioni; usa interpolazione di carica per trovare il centroide
- La carica deve essere sempre condivisa
  - Approfittare del forte campo magnetico
  - Non inclinati nel barile centrale, inclinati nell'endcap
- La risoluzione sulla carica deve essere alta
  - Lettura analogical della carica di ogni pixel
  - Salvata in condensatore in ogni pixel e nella periferia
  - Soglia bassa (2500e-)



# CMS Pixel phase-1 detector



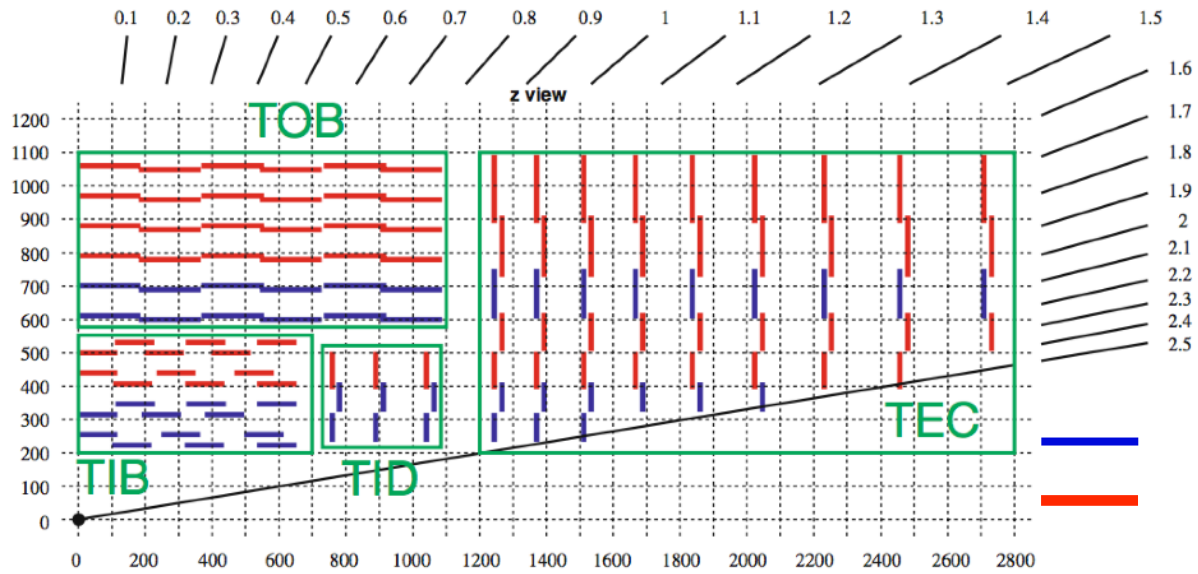
4 barrel layers  
(BPIX)



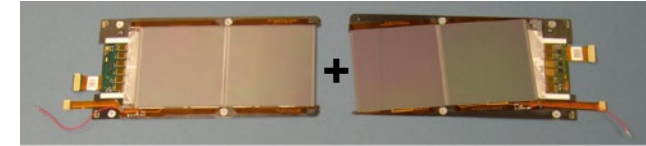
3 forward disks (FPIX)



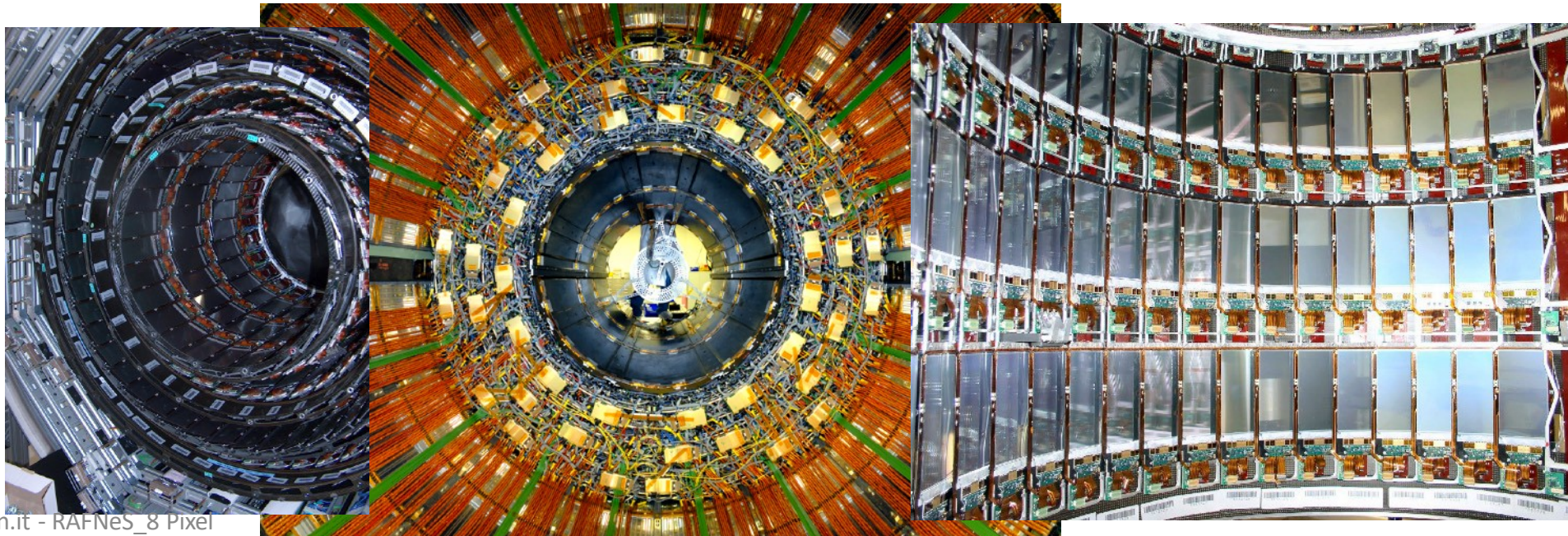
# CMS silicon strip detector



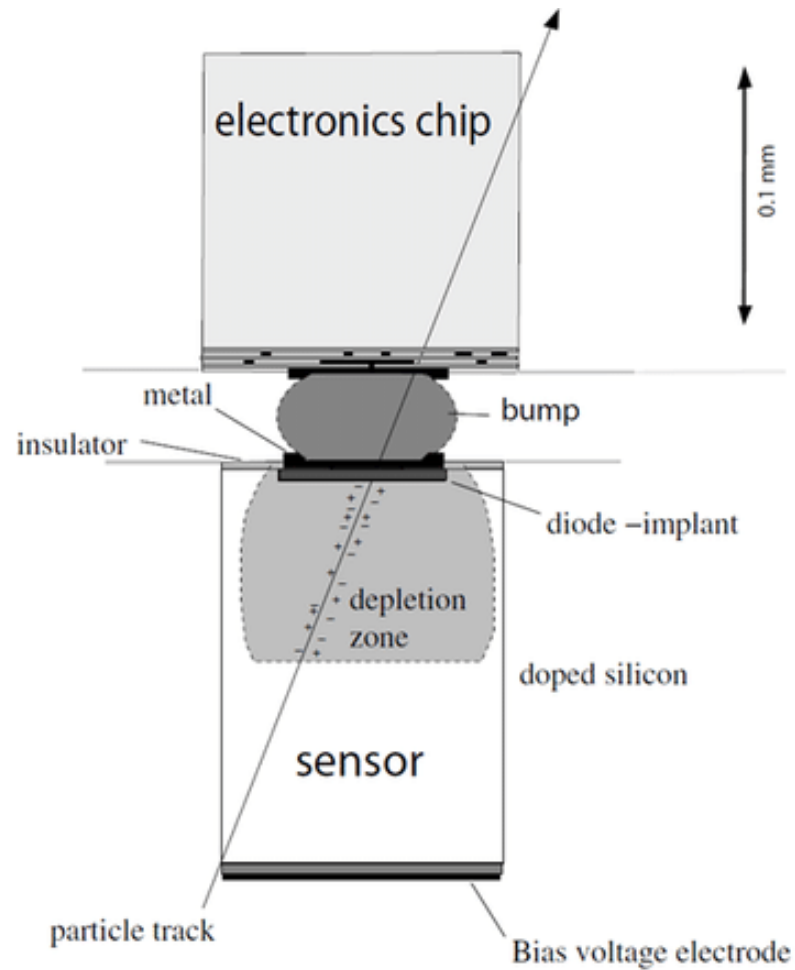
▲ double sided  
single sided



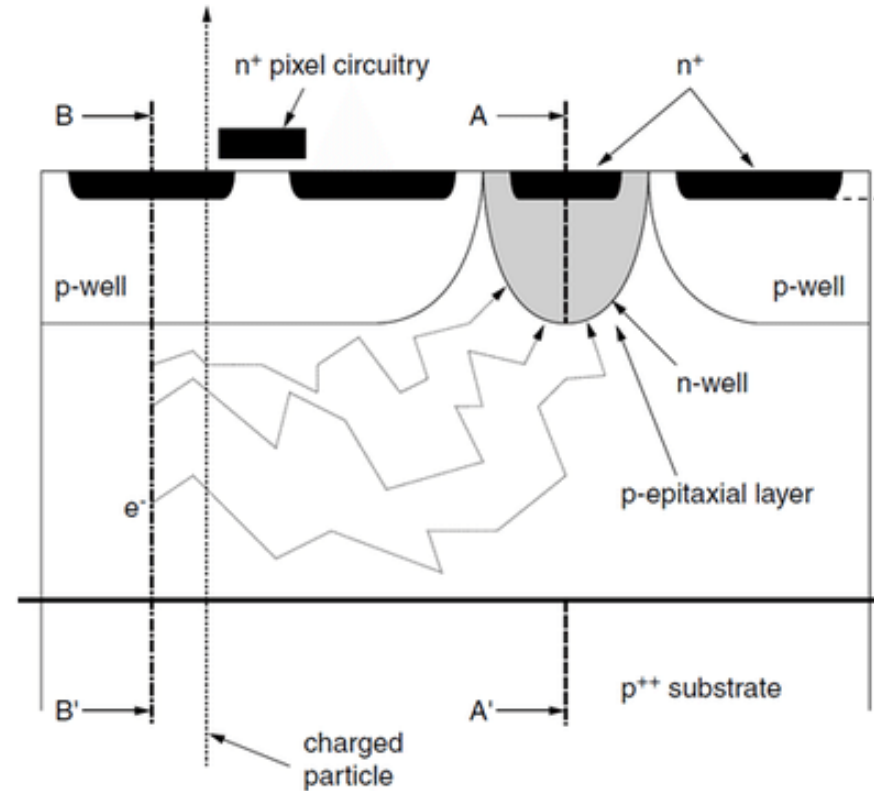
9.3 million strips, 198 m<sup>2</sup> active silicon area, 15148 modules 5 m long, 2.5 m diameter



# Monolithic Active Pixel Sensors (MAPS)



(a)



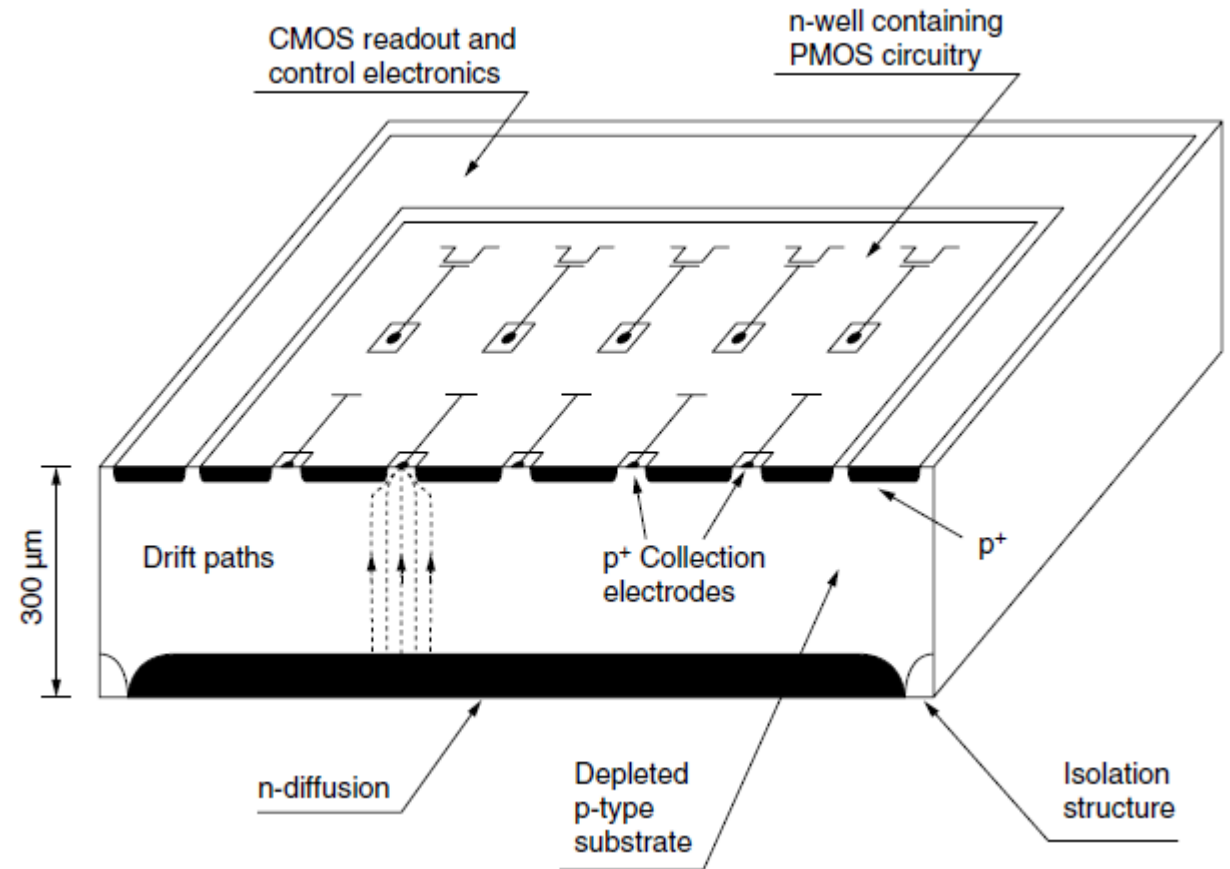
(b)

# Primi monolitici

- Silicio molto resistivo e puro
- Svuotamento completo
- Solo un n-well superficiale
  - Forma transistor pmos
  - Fa da schermo tra logica e substrato
- Logica basilare nella matrice
- Logica completa nella periferia
- Basso *fill factor*
- Giunzione si forma dal lato opposto
- Zona di raccolta e' a basso campo in svuotamento completo

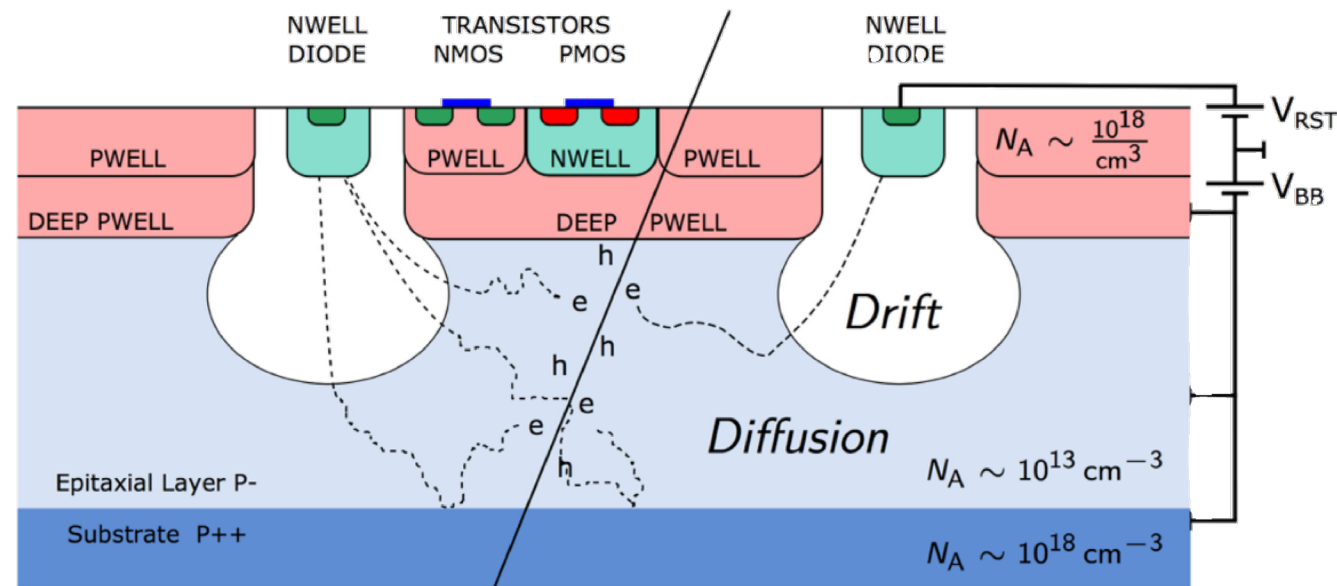
## Caratteristiche:

- 10 col. X 30 righe
- $A = 34 \mu\text{m} \times 125 \mu\text{m}$
- $S/N \sim 55$
- $\sigma_x \sim 2.2 \mu\text{m}$



# Introduzione deep p-well → CMOS

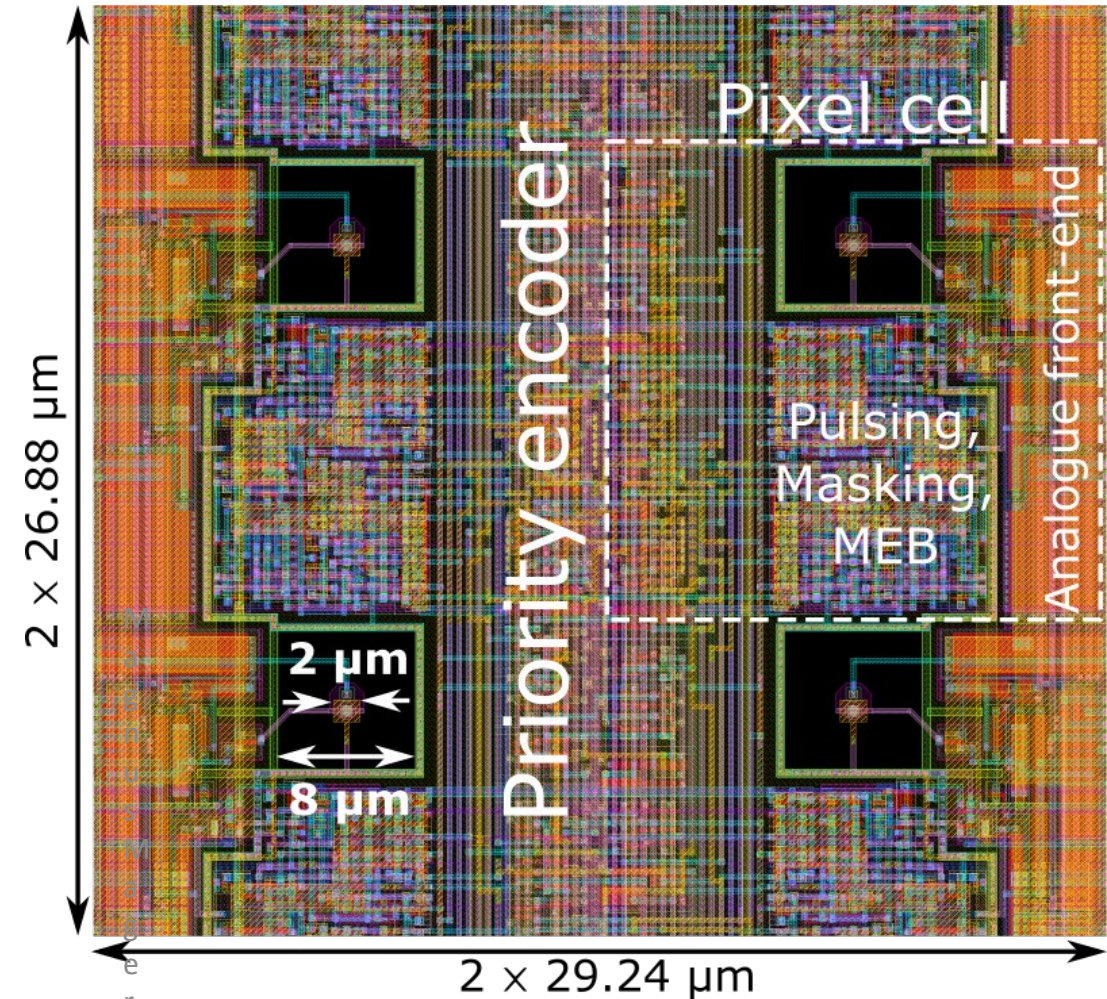
- Un secondo impianto profondo (deep p-well) permette di implementare transistor pmos schermandolo, evitando che il suo n-well entri in competizione con i diodi di raccolta.
- E' difficile svuotare l'epitassiale perche' deve essere a bassa resistivita' per permettere di utilizzare tecniche industriali di design e produzione della logica CMOS.
- La raccolta di carica e' lenta perche' parzialmente per diffusione



# MAPS working principle (3)

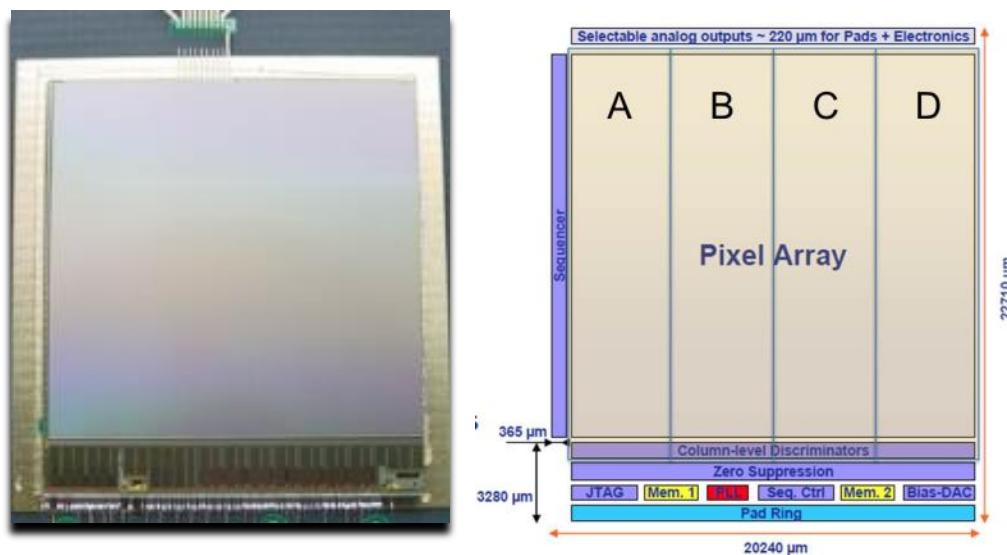
## example: ALPIDE pixel

- ▶ **Front-end:**  
(9 transistors, full-custom)
  - continuously active
  - shaping time:  $< 10 \mu\text{s}$
  - power consumption: 40 nW
- ▶ **Multiple-event memory:** 3 stages  
(62 transistors, full-custom)
- ▶ **Configuration:** pulsing & masking registers  
(31 transistors, full-custom)
- ▶ **Testing:** analogue and digital test pulse circuitry  
(17 transistors, full-custom)
- ▶ **Readout:** priority encoder, asynchronous, hit-driven

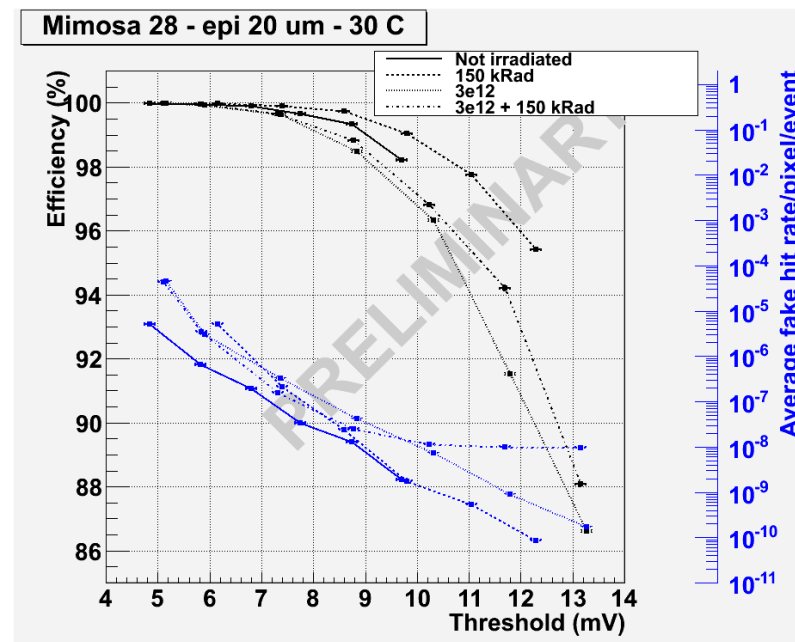


O(200) transistors / pixel

# MAPS *Ultimate-2* Sensor

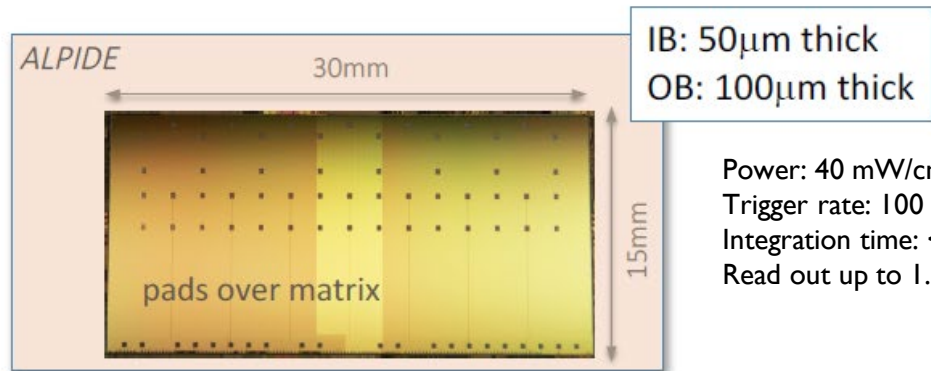
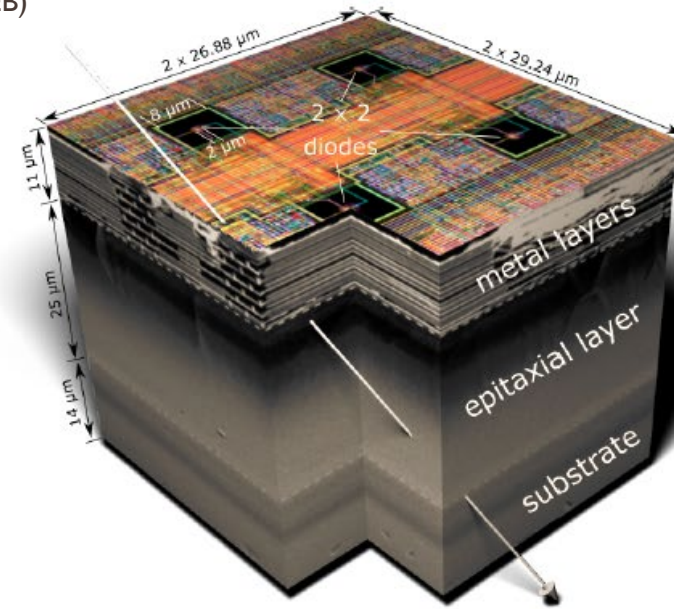
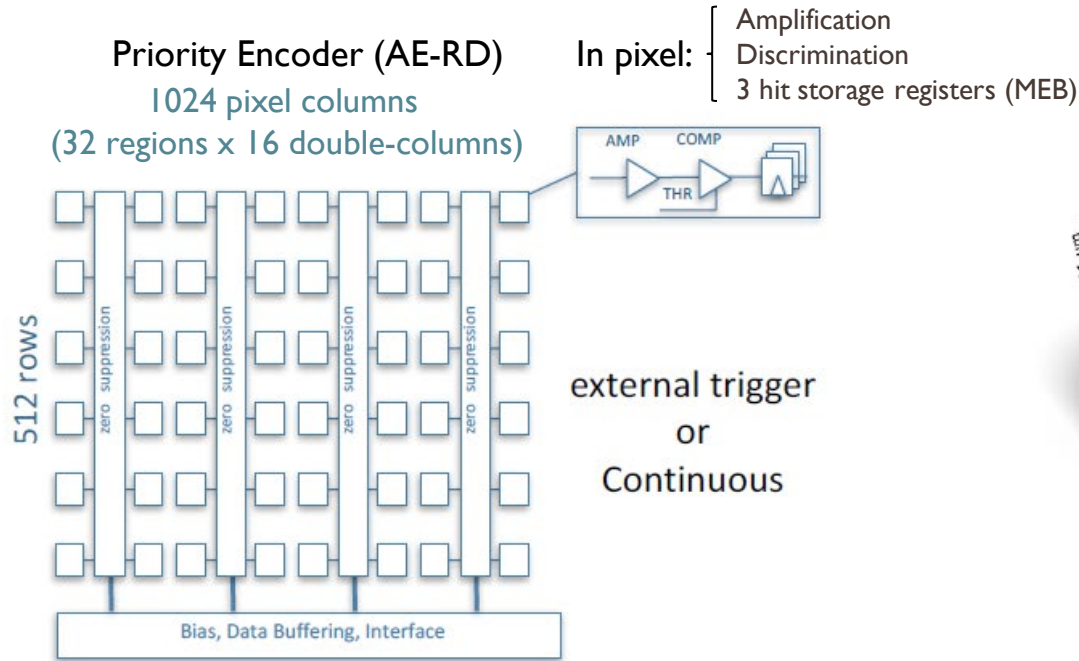


3rd generation sensor developed for the PXL detector by the PICSEL group of IPHC, Strasbourg, optimized for the STAR environment



- **Monolithic Active Pixel Sensors**
- Reticle size ( $\sim 4 \text{ cm}^2$ )
  - Pixel pitch  $20.7 \mu\text{m}$
  - $928 \times 960$  array
- Power dissipation  $\sim 170 \text{ mW/cm}^2$  @  $3.3\text{V}$  (air cooling)
- Short integration time  $185.6 \mu\text{s}$
- Sensors thinned to  $50 \mu\text{m}$
- In pixel CDS
- Discriminators at the end of each column
- Column-parallel readout
- 2 LVDS data outputs @  $160 \text{ MHz}$
- Integrated zero suppression (up to 9 hits/row)
- Ping-pong memory for frame readout ( $\sim 1500$  words)
- 4 sub-arrays to help with process variation
- JTAG configuration of many internal parameters

# MAPS – ALPIDE sensor



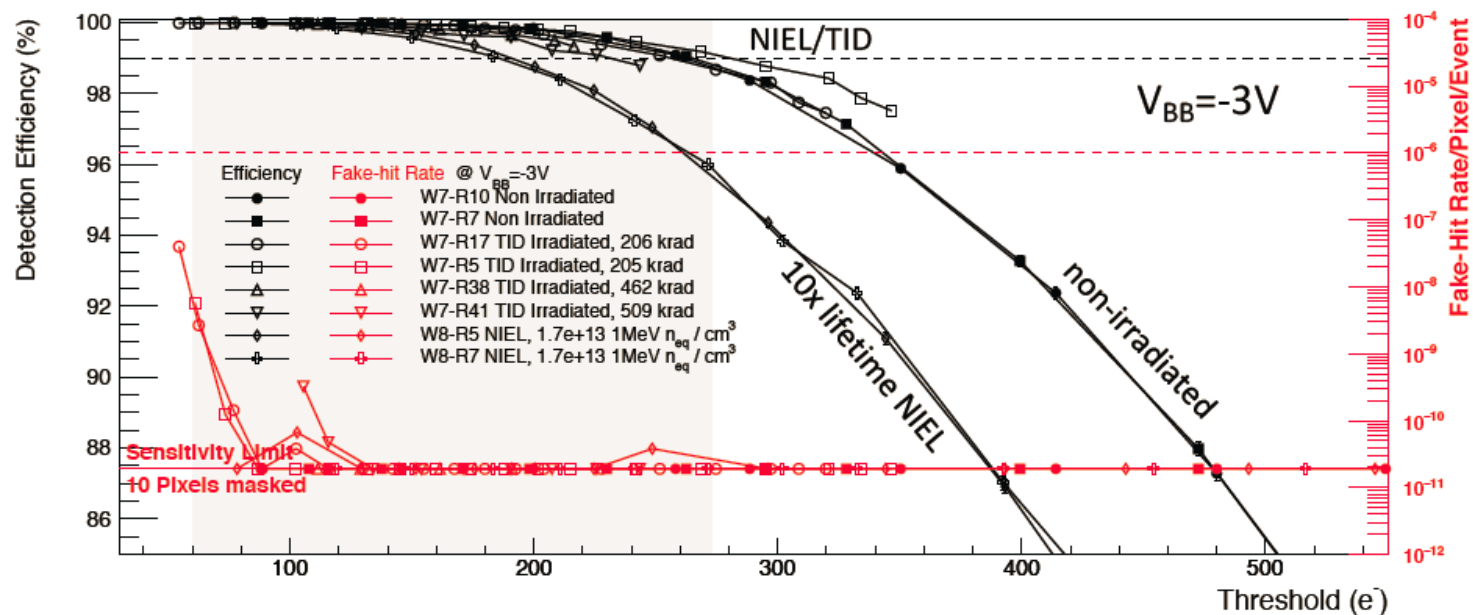
Power: 40 mW/cm<sup>2</sup>  
 Trigger rate: 100 kHz  
 Integration time: < 20 μs  
 Read out up to 1.2 Gbit/s.

130,000 pixels / cm<sup>2</sup> 27x29x25 μm<sup>3</sup>  
 spatial resolution: ~ 5 μm (3-D)  
 Max particle rate: 100 MHz / cm<sup>2</sup>  
 fake-hit rate: ~ 10<sup>-10</sup> pixel / event  
 power : ~ 300 nW / pixel

# ALPIDE performance



## Detection Efficiency and Fake-Hit Rate



- Big operational margin with only 10 masked pixels (0.002%)
- Chip-to-chip fluctuations negligible
- Non-irradiated and NIEL/TID chips show similar performance
- Sufficient operational margin after 10x lifetime NIEL dose

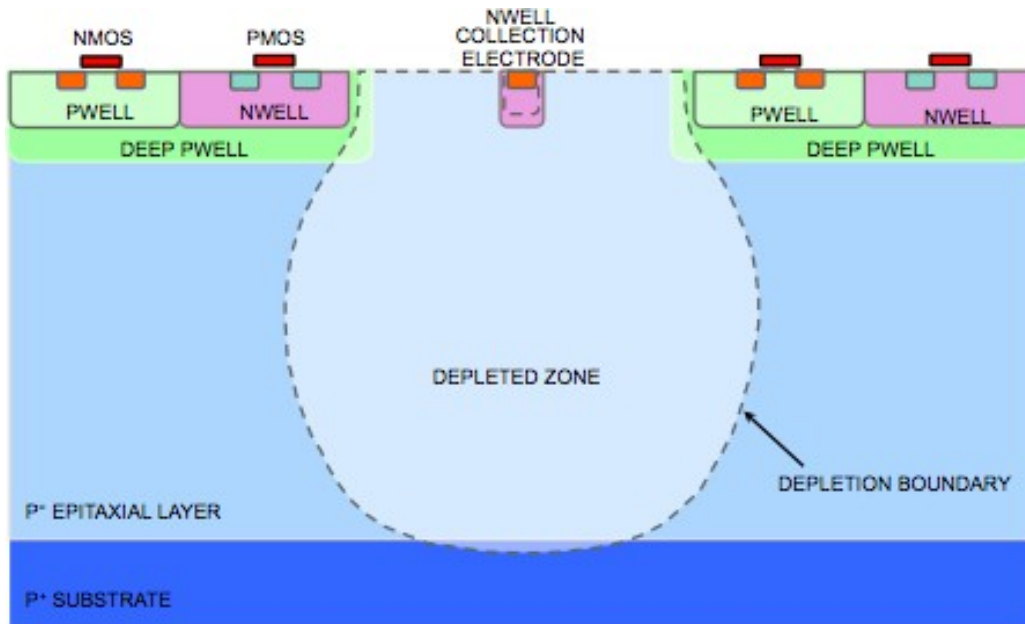
From ITS Upgrade Talk @ QuarkMatter 17, February '17



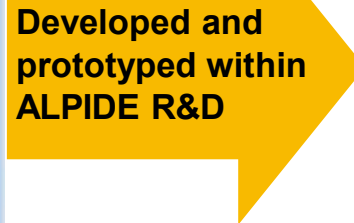


# Evoluzione verso lo svuotamento dell'epitassiale

### Foundry standard process

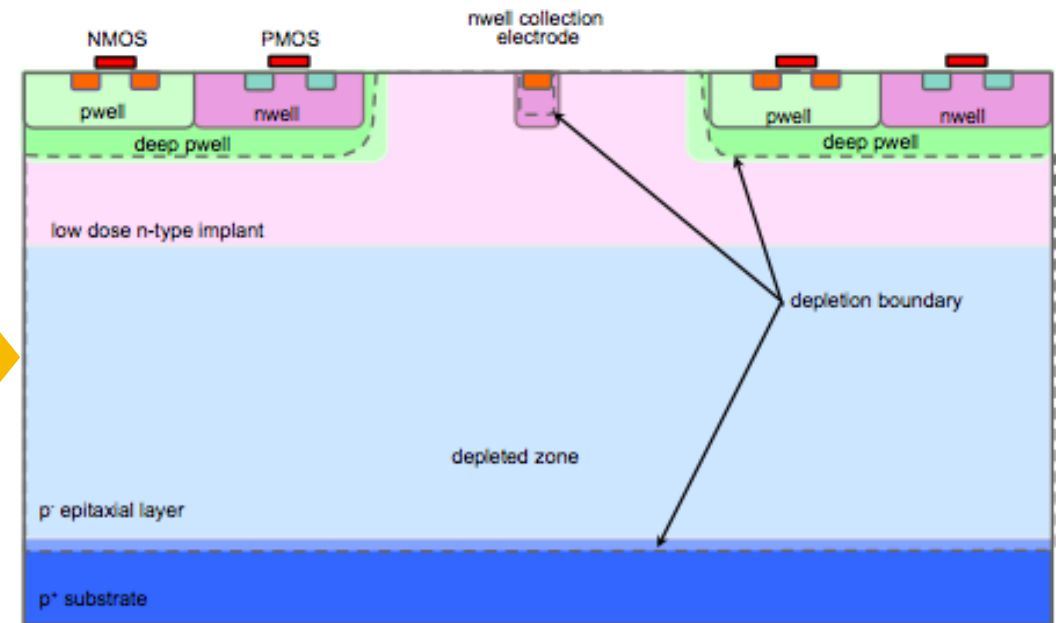


**Partially depleted epitaxial layer**  
**Charge collection time < 30 ns**  
**Operational up to  $10^{14}$  1 MeV  $n_{eq}/cm^2$**



**Developed and prototyped within ALPIDE R&D**

### Modified process CERN/Tower

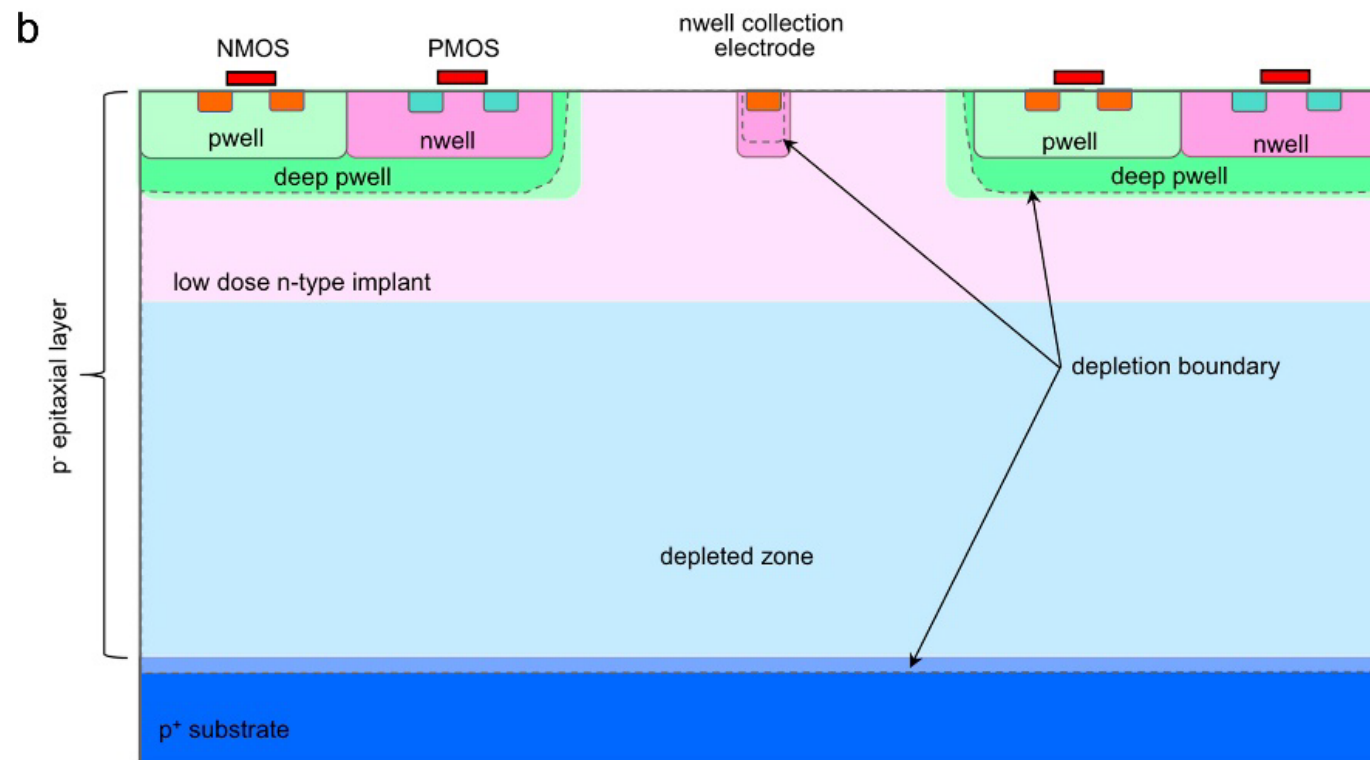


**Fully depleted epitaxial layer**  
**Charge collection time < 1 ns**  
**Operational up to  $10^{15}$  1 MeV  $n_{eq}/cm^2$**

**process modification for better timing and radiation hardness**

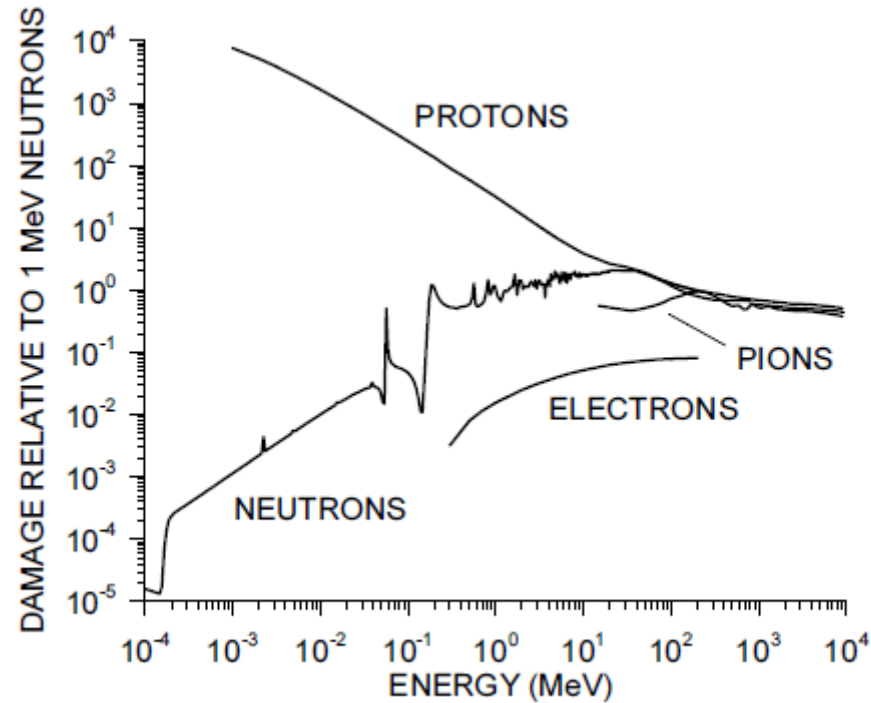


# Evoluzione verso lo svuotamento dell'epitassiale



# Danno da radiazione (grafici)

- Dislocazione (riferito a neutroni da 1Mev)



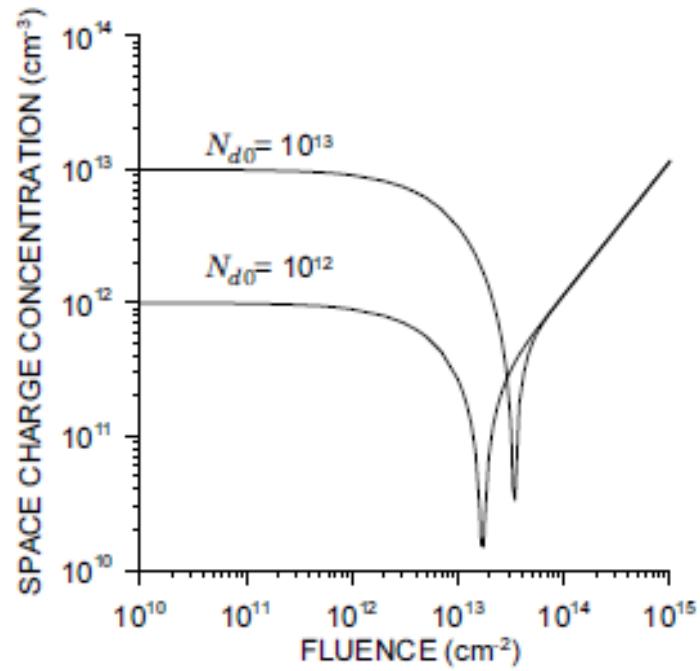


FIG. 7.4. Calculated space charge vs. high-energy proton fluence for silicon with initial donor concentrations  $N_{d0}$  of  $10^{12}$  and  $10^{13}$   $\text{cm}^{-3}$ . With an infinitely fine calculation grid both distributions would dip to zero.

## Annealing and anti-annealing

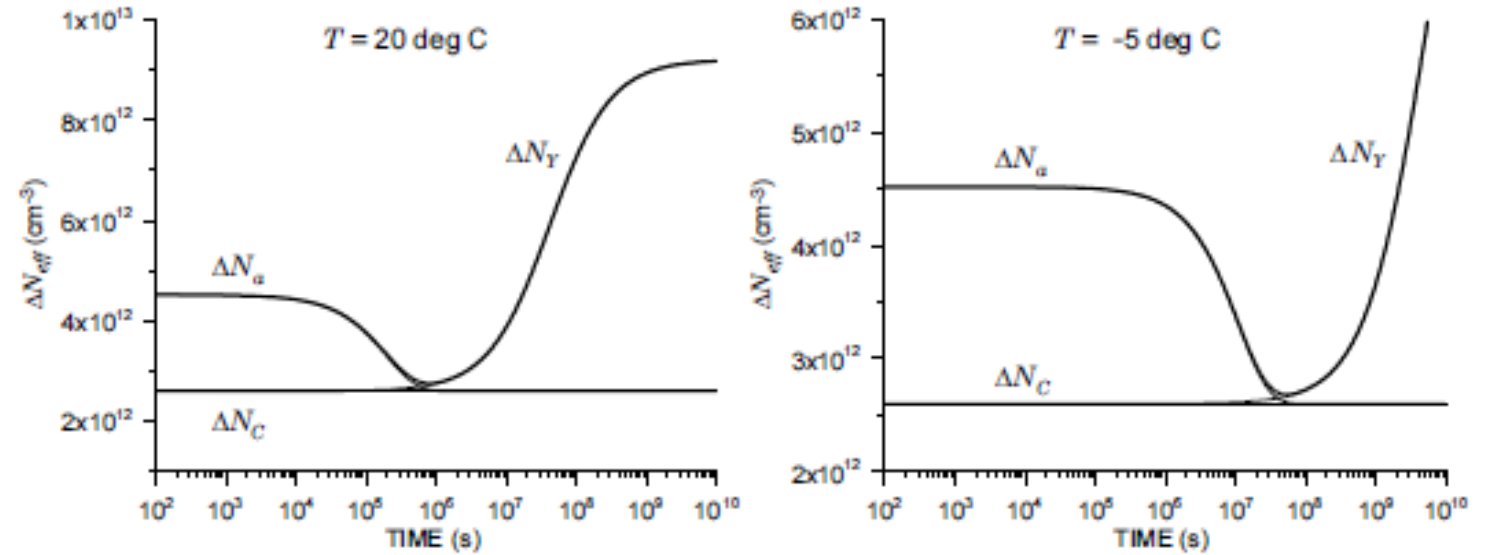


FIG. 7.5. Evolution of beneficial annealing  $\Delta N_a$  and anti-annealing  $\Delta N_Y$  vs time at  $20^\circ\text{C}$  and  $-5^\circ\text{C}$  after a proton fluence burst of  $10^{14}$   $\text{cm}^{-2}$ .