Rivelatori a microstrip di silicio per il tracciamento negli esperimenti di fisica di alta energia

Lino Demaria

INFN Torino

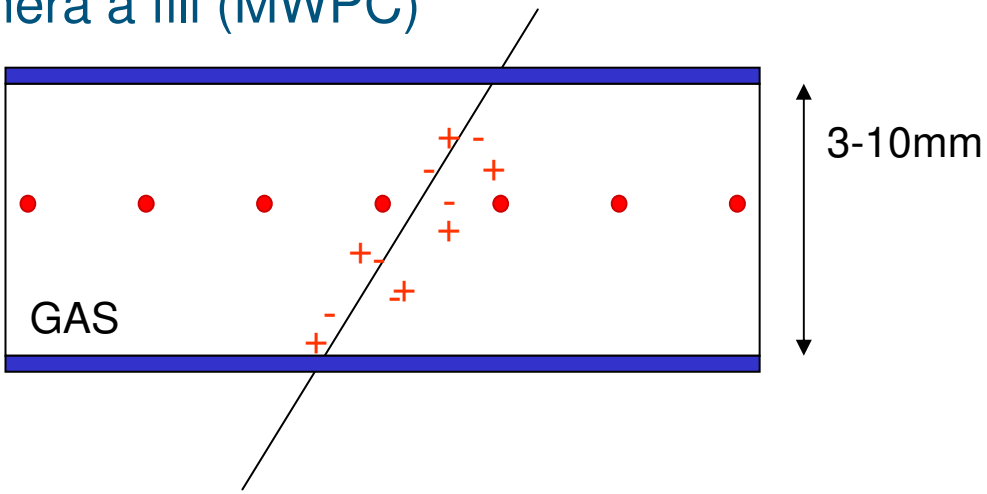
3 maggio 2004

- I rivelatori a microstrip di silicio
- Primi utilizzi ai collider
- Il tracciatore di CMS
- Peculiarita' dei rivelatori di CMSTK
- Elettronica (cenni)
- Aspetti costruttivi

Come migliorare i rivelatori di traccia ?

- I rivelatori di traccia sono sempre stati a gas (TPC, MWPC, camere a fili, ecc.).

Camera a fili (MWPC)



Guadagno di segnale=10^4

Tempo di raccolta= 50-100ns

Distanza fili = 2 mm

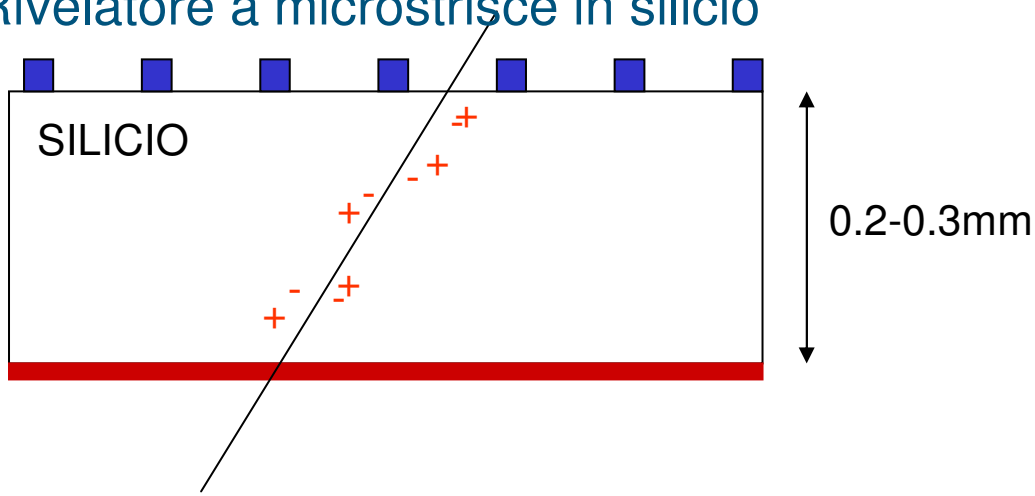
(repulsione fili…)

Precisione =100-200μm

Segnale(e-) = k * densita' / ΔE
ΔE ~ 30 eV per gas

Rivelatori a stato solido

Rivelatore a microstrisce in silicio



Silicio

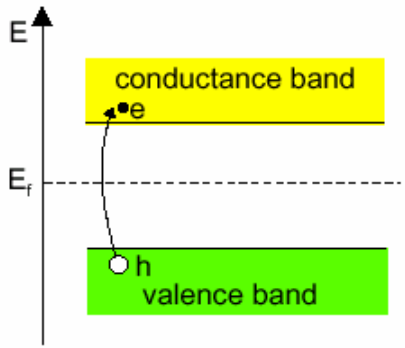
1. $\Delta E \sim 3.6$ eV
2. densita' molto maggiore (ma G = 1)
3. Rivelatore veloce → Tempo di raccolta= 10-20ns

Segmentazione a microstrip

Distanza strip = 50-200 μ Precisione =5-20μm

Problema: rumore "termico"

I semiconduttori sono scelti perche' hanno una ΔE inferiore agli isolanti



ΔE (isolanti) > 6 eV
ΔE (conduttori) ~ 0 eV
ΔE (semicond.) ~ 1 eV

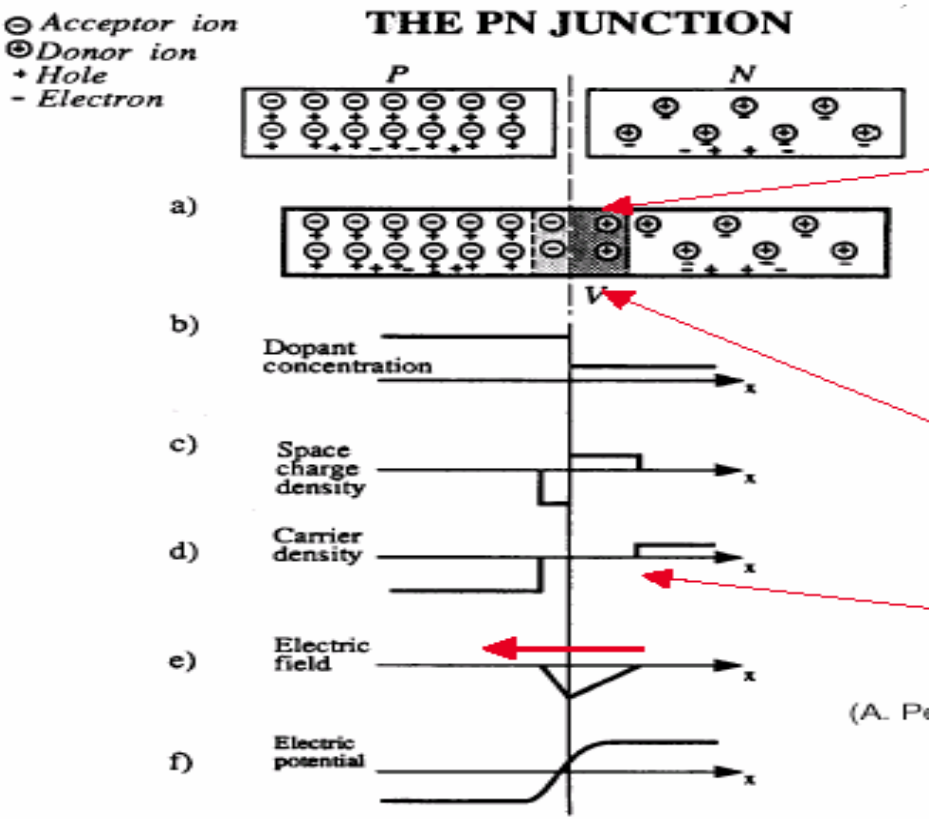
Densita' = 2.3 quella dell' acqua

Particella carica in 300 μm(Si) ➔ 32000 e- (+ lacune)

Ma a temperatura ambiente si formano in continuazione coppie e-h per calore

Es. : un rivelatore di 1cm x 1cm x 300 μm ➔ 4.5*10**8 (e-h)
(solo 1 e-h ogni 10**12 atomi, ma molti piu' di 32000 e-h !)

Giunzione



- Diffusione di e- nella zona p, lacune nella zona n
- Differenza di potenziale

Zona di svuotamento (Depletion zone)

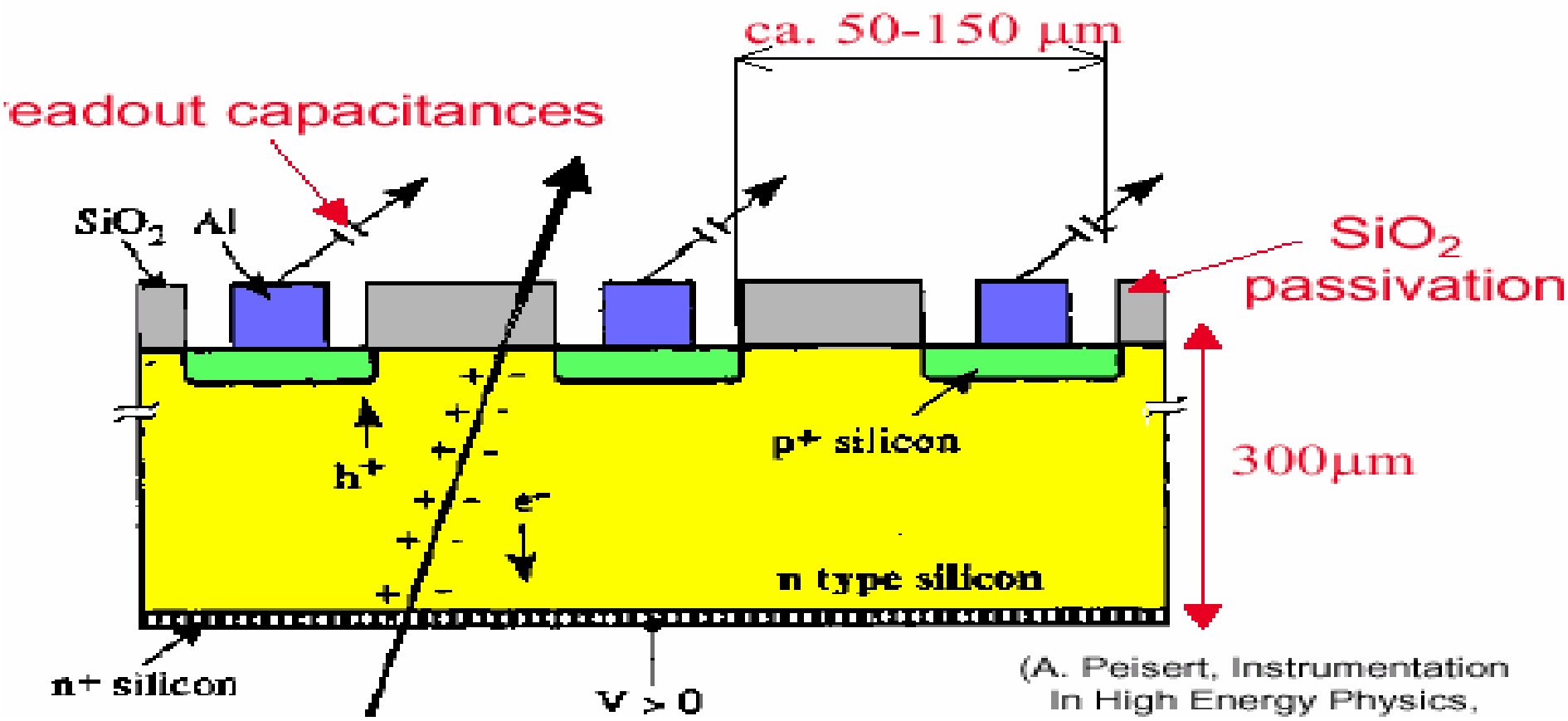
Assenza di portatori liberi nella zona di svuotamento

Applicazione di una tensione di polarizzazione inversa (50-300V secondo la resistività)

→la zona di svuotamento si estende a tutto il volume del rivelatore

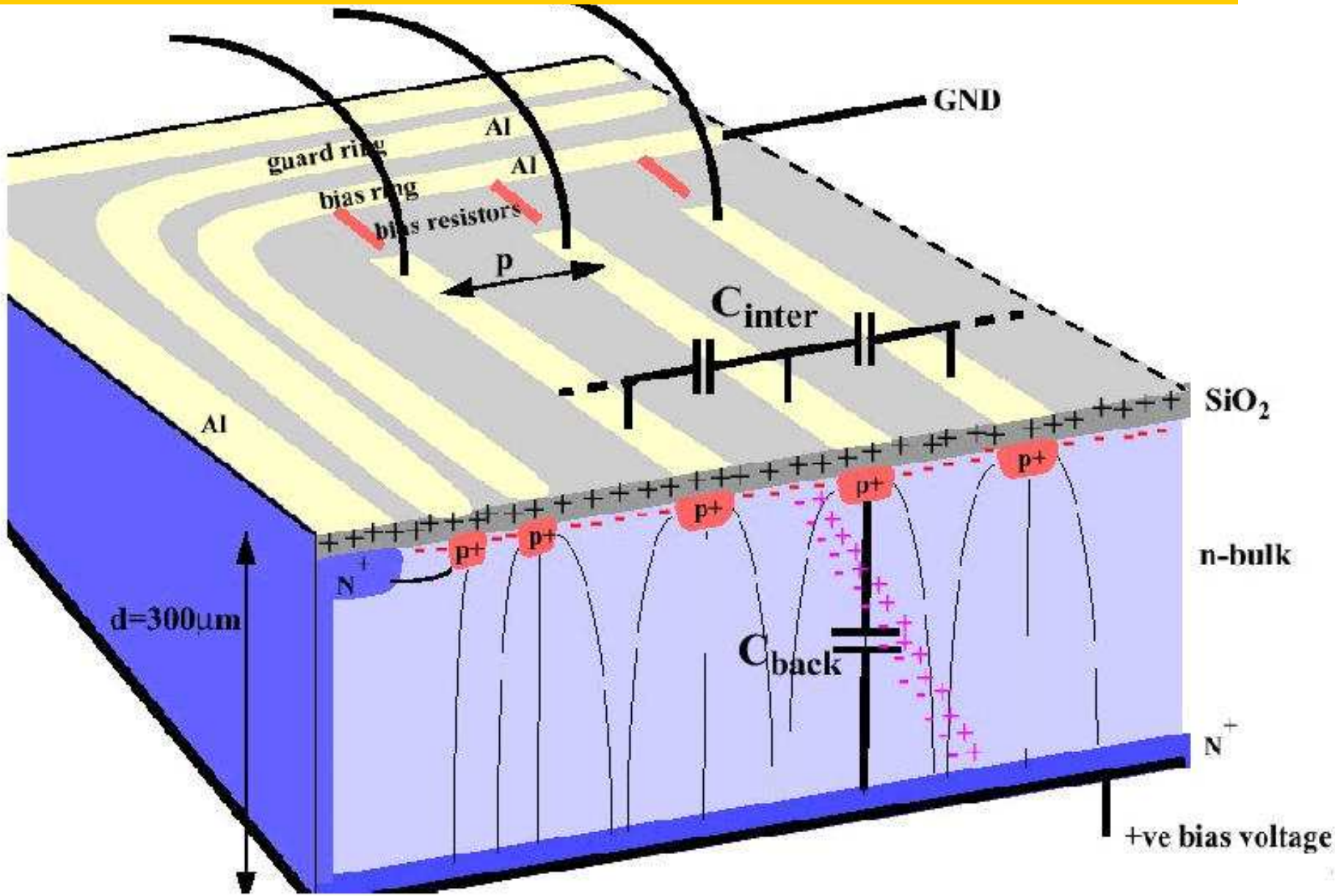
Sotto l'influenza del campo elettrico, gli elettroni prodotti dalla particella carica derivano verso il lato n, le lacune verso il lato p → corrente/carica rivelabile

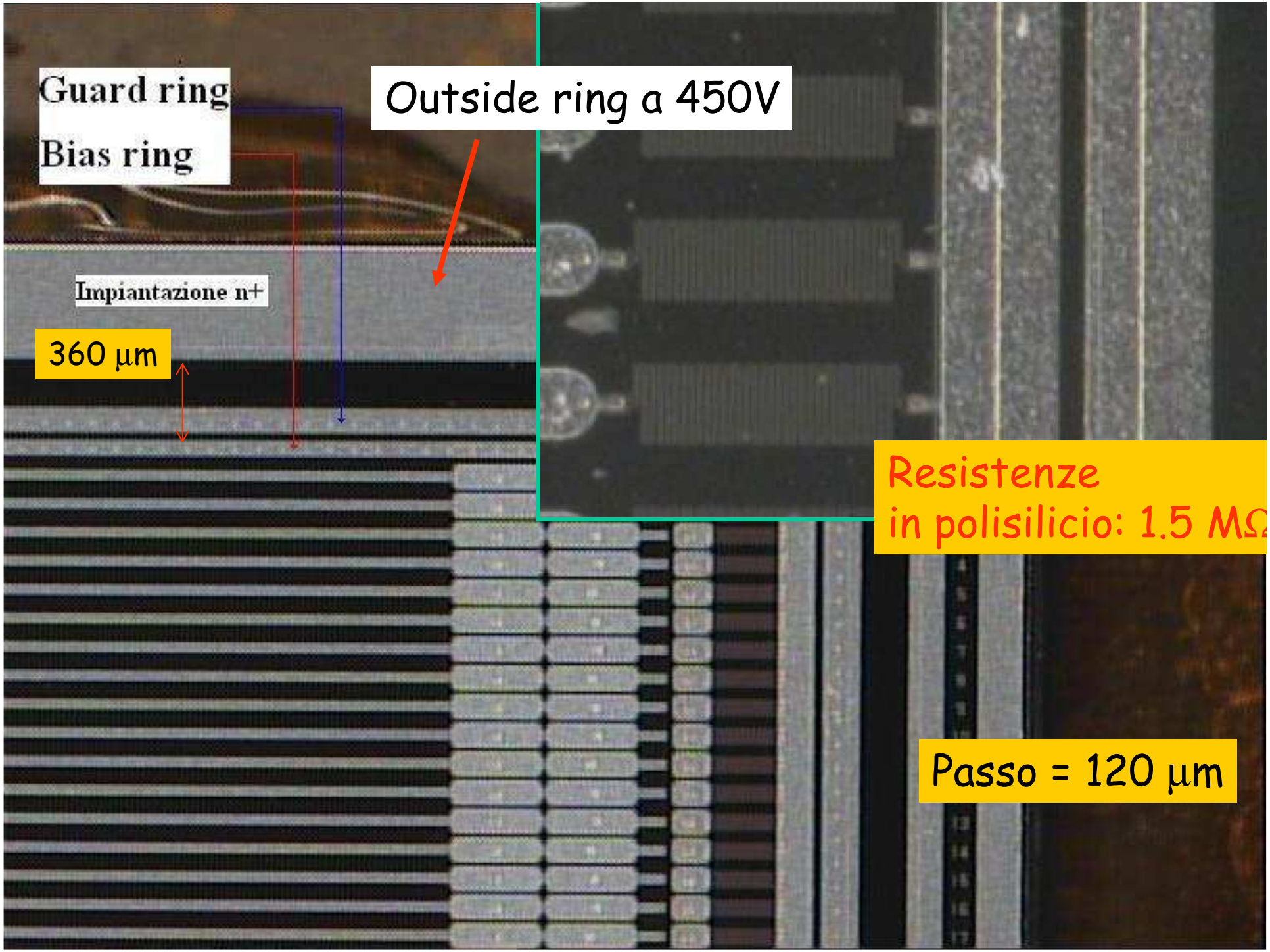
Schema 2D rivelatore a microstrip



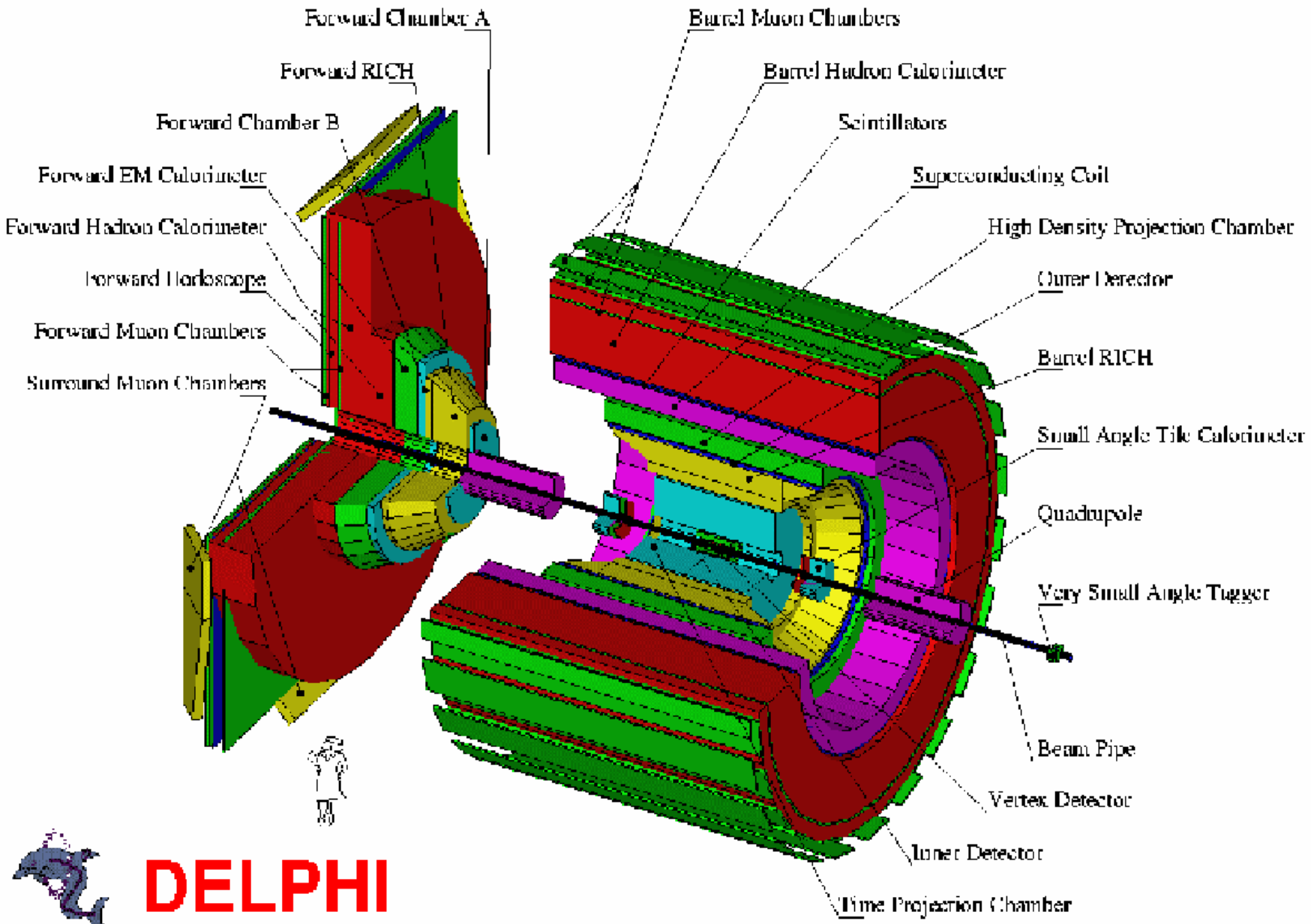
Strip p+ a GND; lato n+ ad alta tensione (50-300V)

Schema del disegno di base di un rivelatore a microstrip



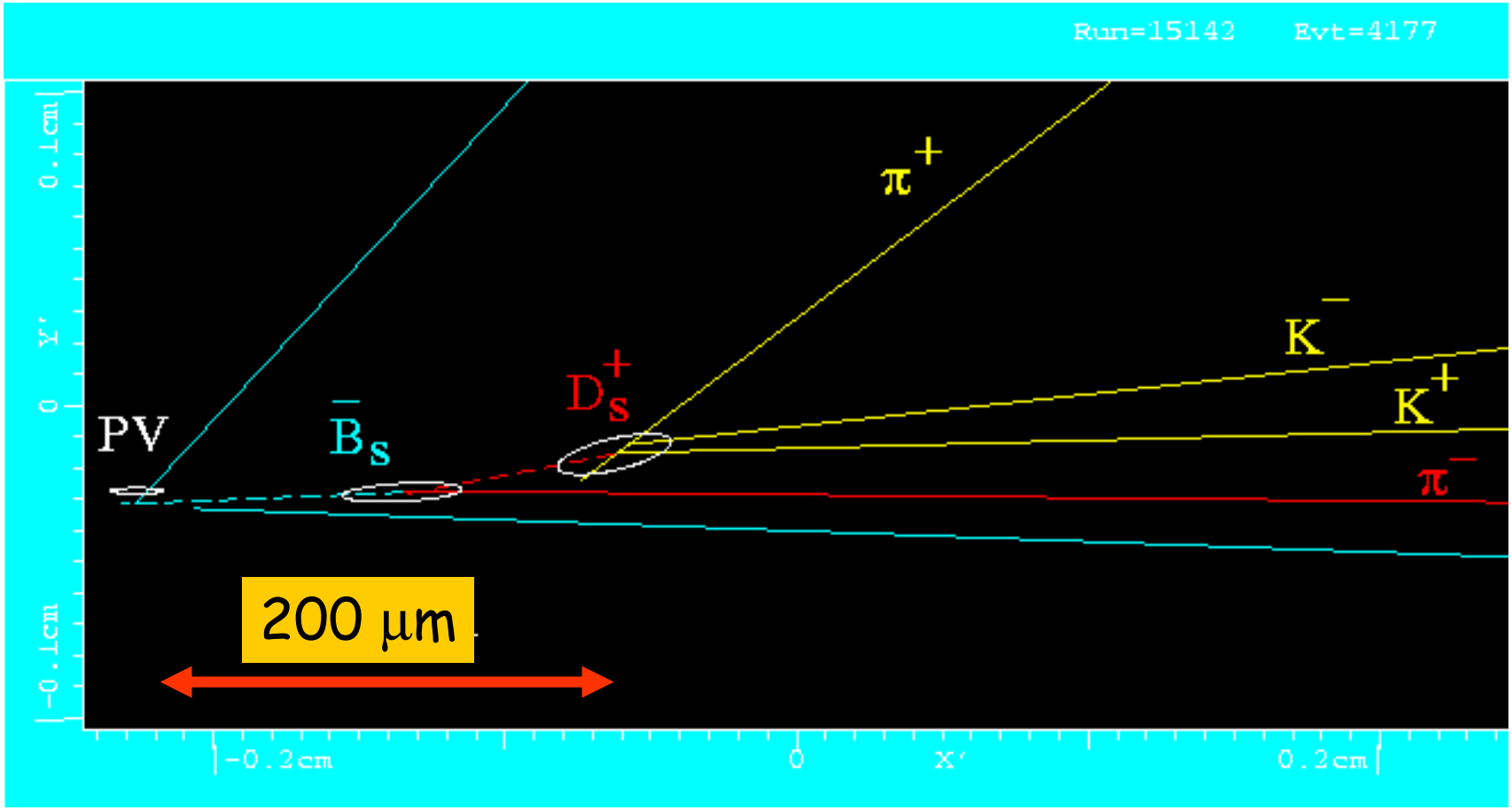

Guard ring
Bias ring
Outside ring a 450V
Impiantazione n+
360 μm
Resistenze
in polisilicio: 1.5 MΩ
Passo = 120 μm

Prime Applicazioni agli esperimenti a collider dei rivelatori di silicio a microstrip


Forward Chamber A
Forward RICH
Forward Chamber B
Forward EM Calorimeter
Forward Hadron Calorimeter
Forward Hodoscope
Forward Muon Chambers
Surround Muon Chambers
Barrel Muon Chambers
Barrel Hadron Calorimeter
Scintillators
Superconducting Coil
High Density Projection Chamber
Outer Detector
Barrel RICH
Small Angle Tile Calorimeter
Quadrupole
Very Small Angle Tagger
Beam Pipe
Vertex Detector
Inner Detector
Time Projection Chamber

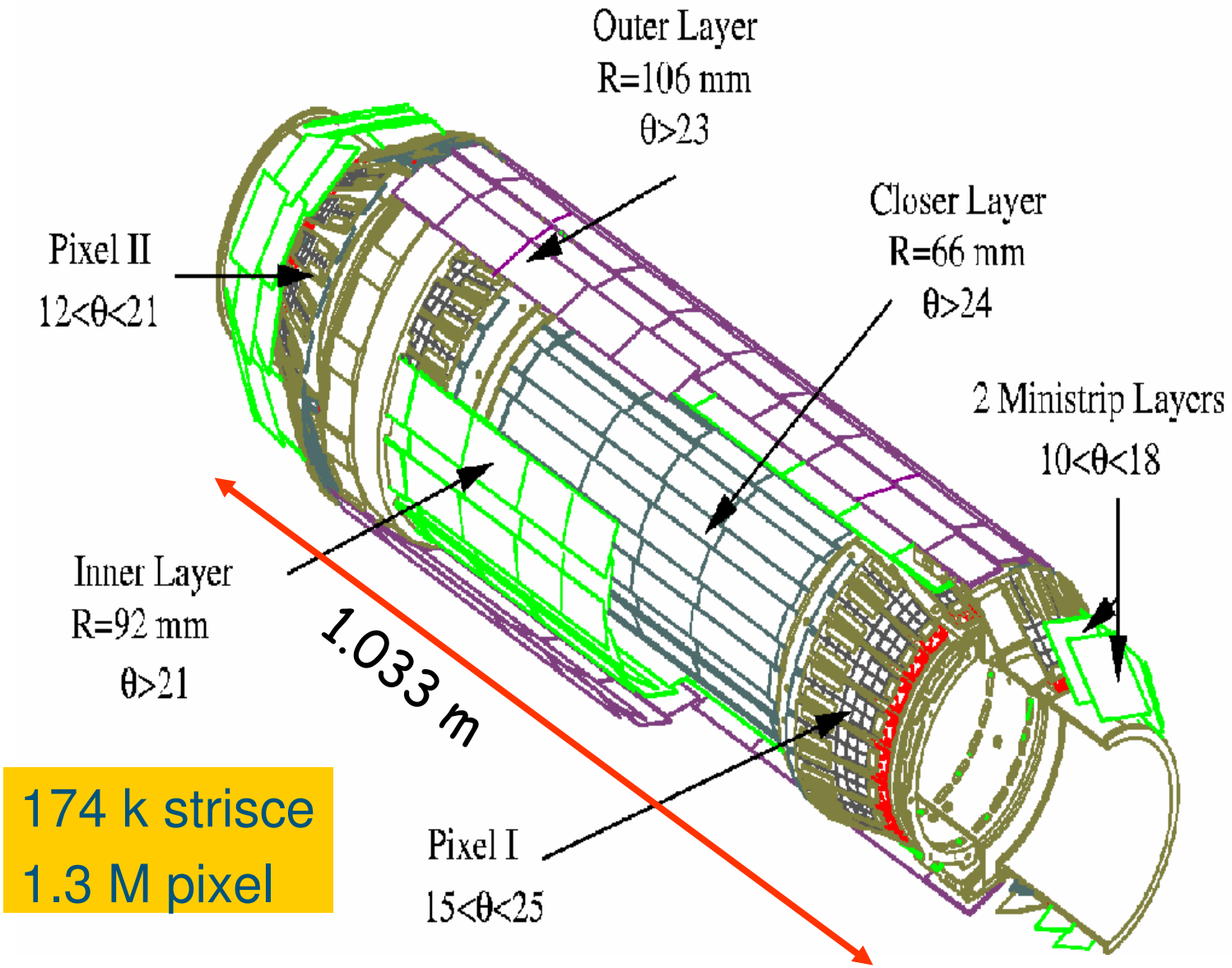
DELPHI

Rivelatori di microvertice



- Lunghezze di decadimento comprese fra 30μm<cτ<300μm

SILICON Tracker for LEP200



Barrel upgraded

from the old VD: extended Inner and new Outer layer DOWN to 25 degrees with b-tagging

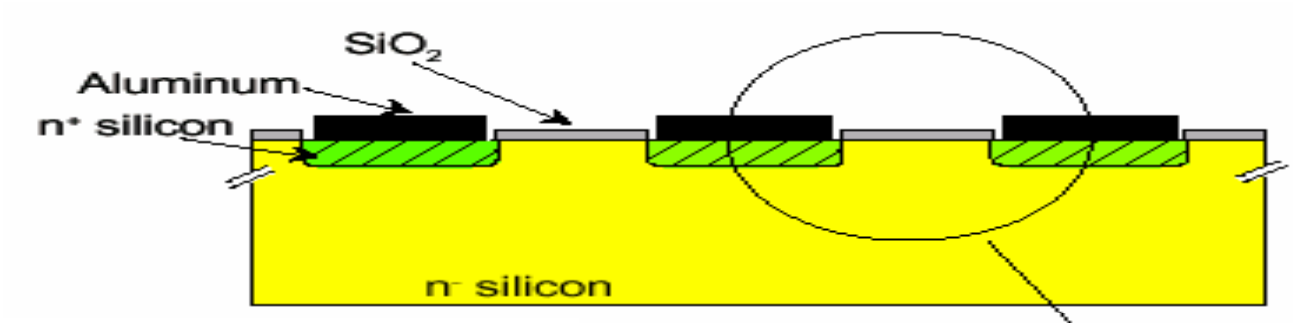
Very Forward Tracker

made out of a Pixel Detector and a Ministrip detector, DOWN to 10 degrees

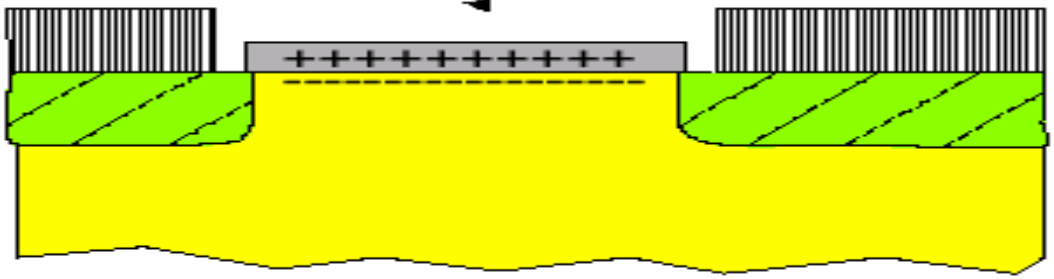
174 k strisce
1.3 M pixel

Rivelatori doppia faccia

- Segmentando anche lo strato drogato di tipo n si ottengono rivelatori doppia faccia.... ma



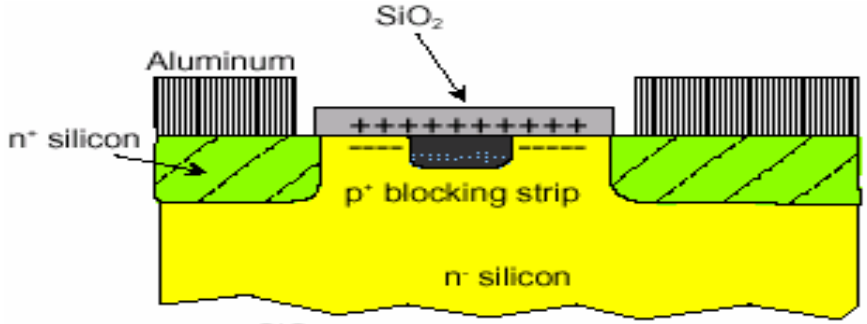
Le cariche positive nel SiO_2 attraggono elettroni nello strato n → corto circuito tra le strisce n^+ (strato di accumulazione)



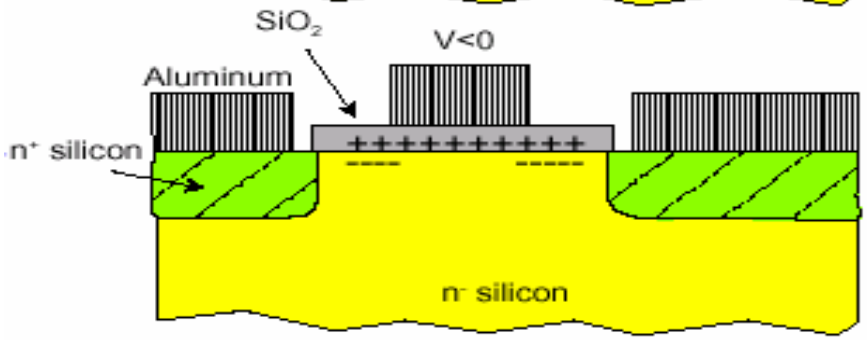
Isolamento tra strisce n^+

- Due possibili soluzioni:

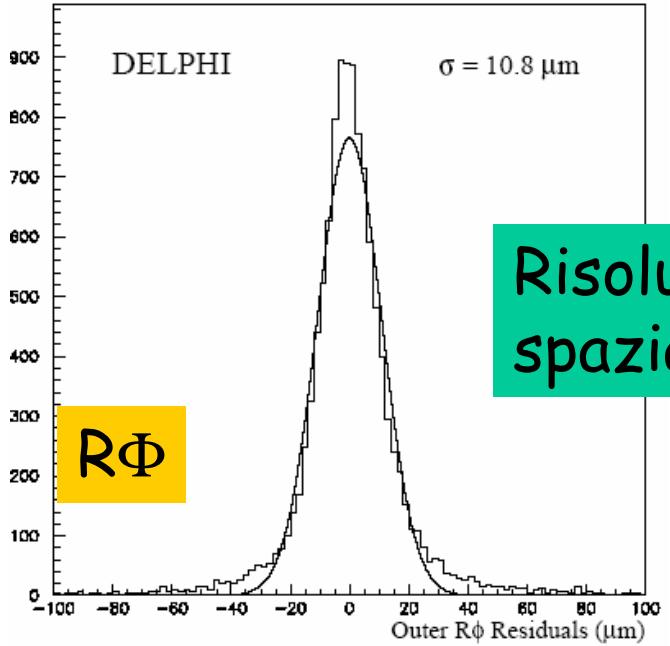
Aggiunta di blocking strips p^+



Aggiunta di uno strato di Al sul SiO_2 (struttura MOS che respinge e^-)

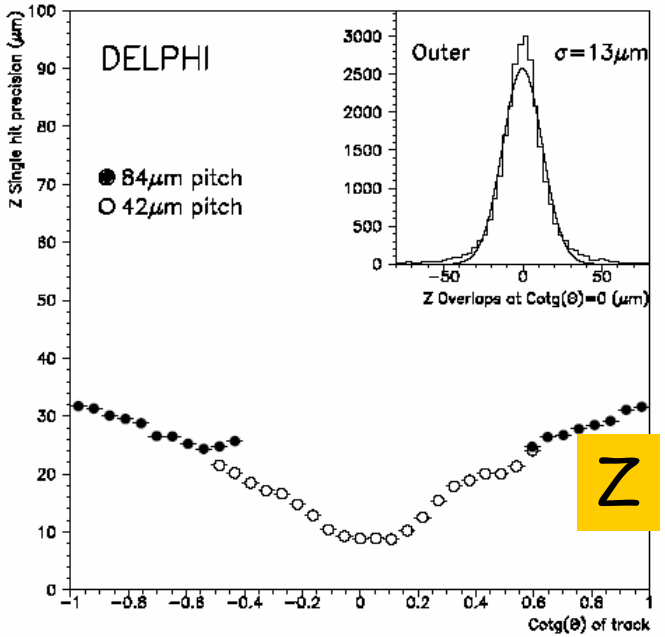


Microvertice di Delphi



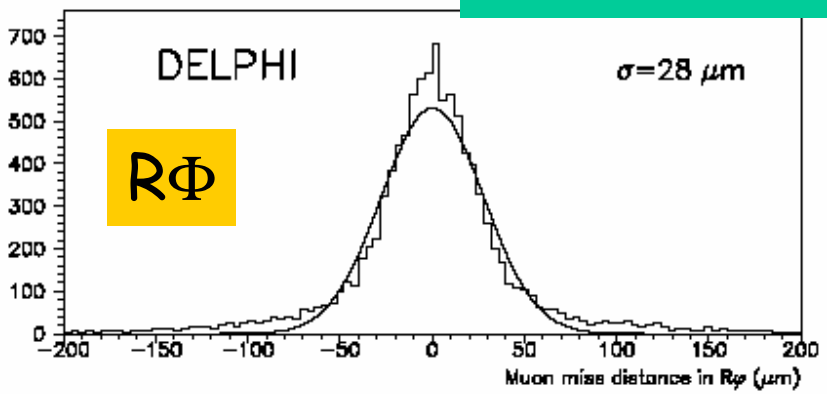
Risoluzione spaziale

RΦ

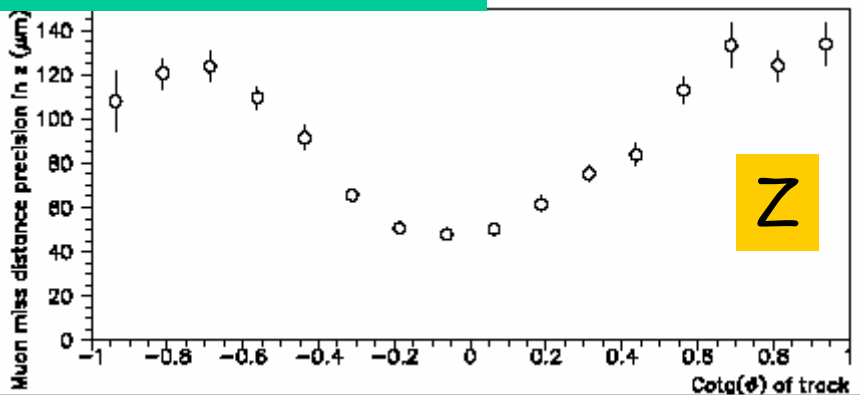


Z

Precisione traccia al vertice



RΦ

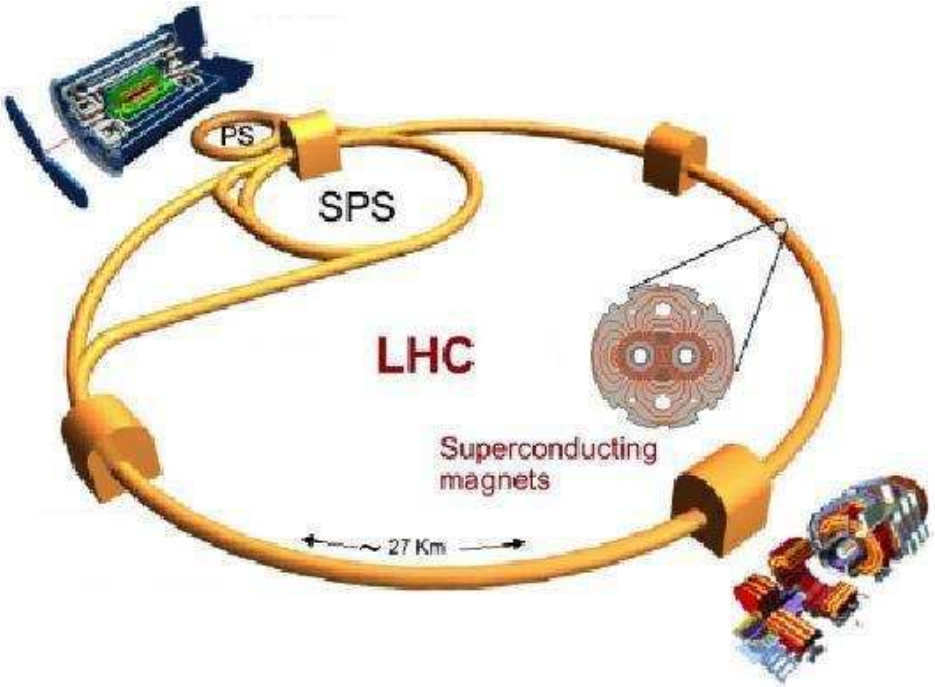


Z

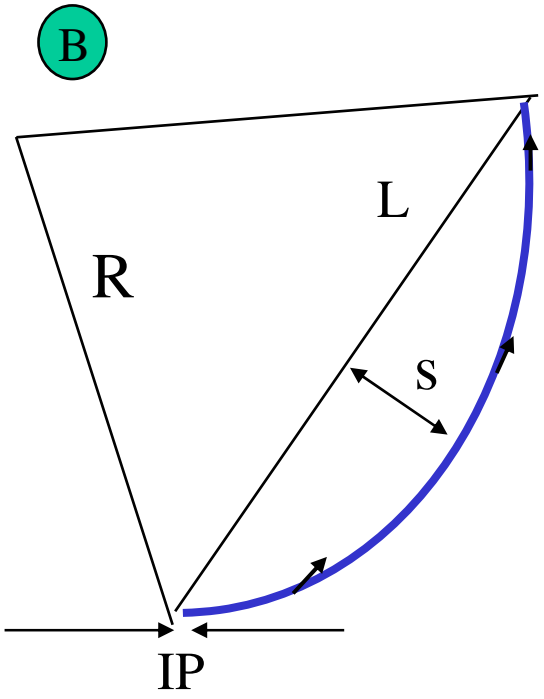
Tracciamento ad LHC

LHC

Urti protone – protone
$E_{c.m}$ = 14 TeV
Luminosità = 2 x 10^{33} $cm^{-2}s^{-1}$ (bassa) → 10^{34} cm^{-2} s^{-1} (alta)
Frequenza di bunch crossing = 40 MHz → T_{BX} = 25 ns
Protoni per pacchetto (alla massima lum.) = 1.1 x 10^{11}



Misura dell'impulso trasverso



p(GeV) = 0.3 q B(T) R(m)

s = L²/8R

- La risoluzione sull'impulso cresce con il quadrato del braccio di leva L e solo linearmente con B
- La risoluzione decresce con l'impulso (leggi energia)

$$\frac{\Delta p}{p} = \left(\frac{a_n \cdot \sigma}{0.3 \cdot B \cdot L^2} \right)$$

Per B=1T, L=1m, σ=100μm

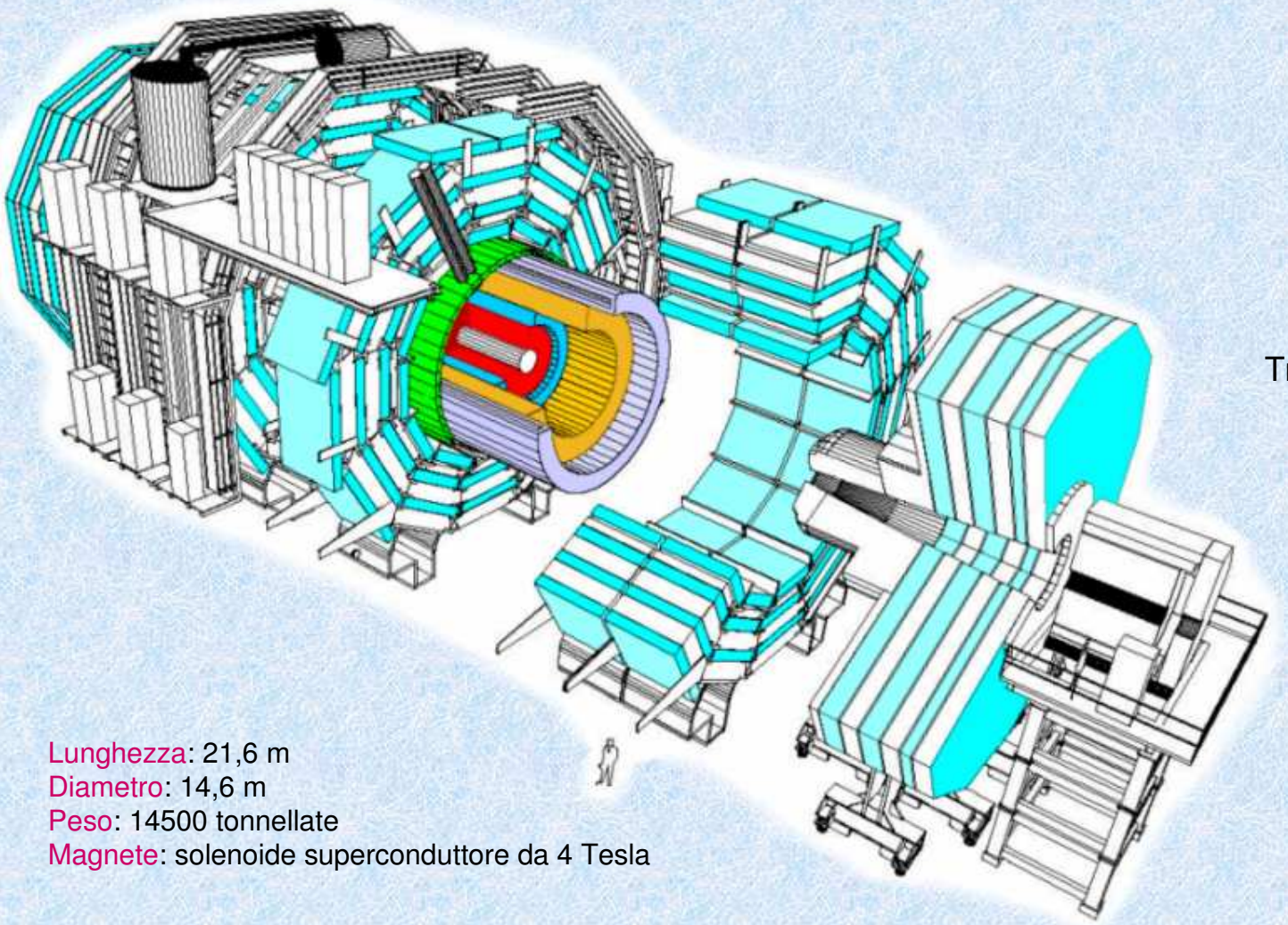
10 GeV/c ➔ R= 30m, s= 4000 μm, $\frac{\Delta p}{p} = 2\ \%$

100 GeV/c ➔ R= 300m, s= 400 μm $\frac{\Delta p}{p} = 20\ \%$

1000 GeV/c ➔ R=3000m, s= 40 μm $\frac{\Delta p}{p} = 200\ \%$

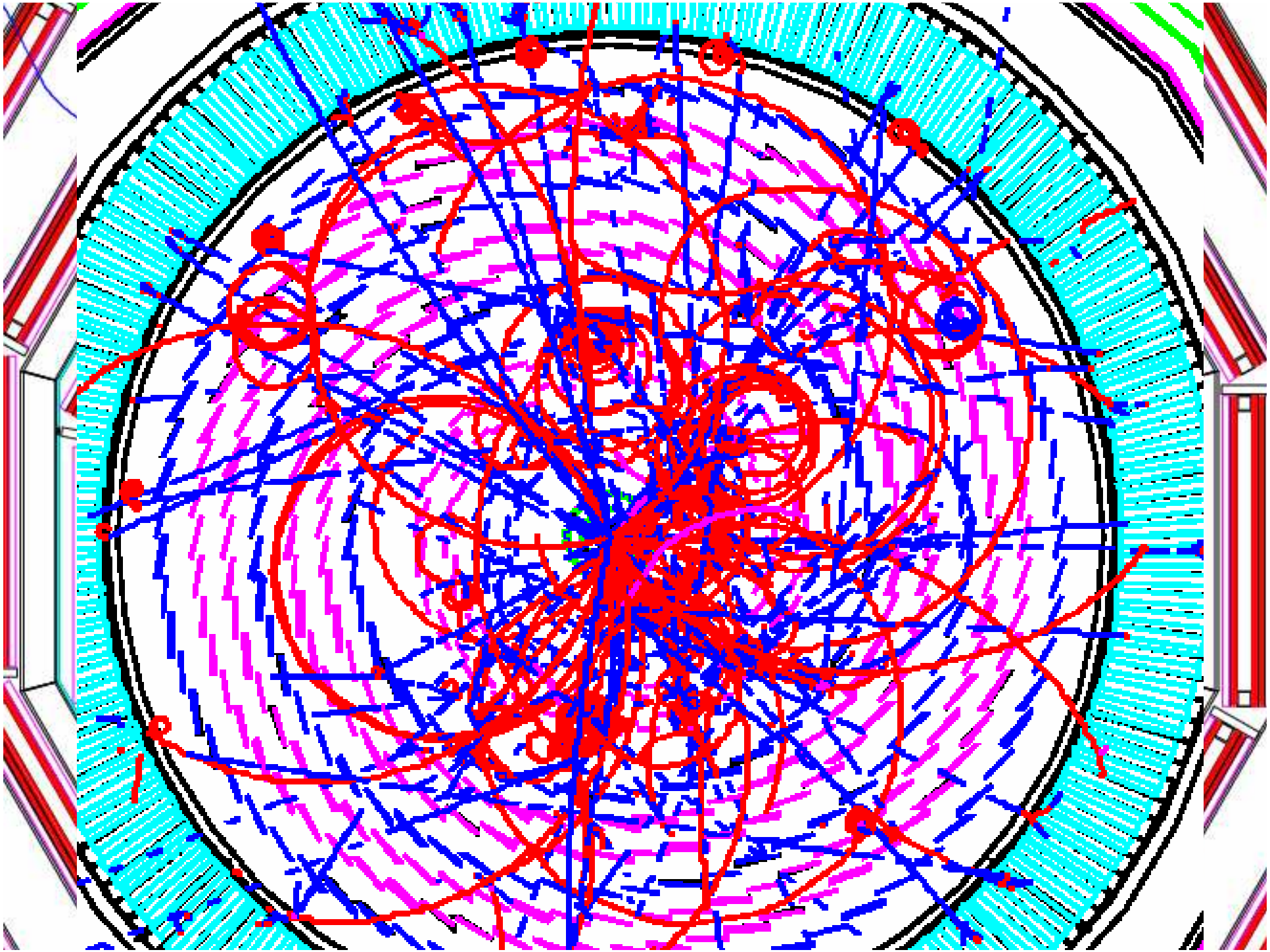
➔ I tracciatori per LHC hanno almeno una parte in Silicio

Il Compact Muon Solenoid



Tracciatore interno
ECAL
HCAL
Magnete
Camere a muoni

Lunghezza: 21,6 m
Diametro: 14,6 m
Peso: 14500 tonnellate
Magnete: solenoide superconduttore da 4 Tesla



TRACCIATORE

Prestazioni:

- Efficienza di ricostruzione di traccia (98% per μ, 95% per π)
- Risoluzione misura impulso (10% @ p=1TeV)
- Risoluzione vertice: σ_t = 35 μm; σ_z = 75 μm
- Occupanza <1%

.... Richiesti rivelatori in silicio

I rivelatori in silicio hanno una buona resistenza alle radiazioni (Φ_{eq} = 1.6 10^{14} cm^{-2})

ad esempio dp/p = 10%
=> rivelatori con risoluzione spaziale σ ~ 20 μm

Occupanza 0.01 e 1000 tracce comportano:
(Area = 4 π r^2 / 10^5)

r ~ 5 cm -> A ~ 0.3 mm^2
r ~ 30 cm -> 10 mm^2

pixel (~10^4 μm^2)
occ. ~ 10^{-4}

strip (~10 mm^2)
occ. ~ 1 %

Sfide Sperimentali

Alto numero di eventi (10^9)

- ~100 eventi (su 40 10^6) possono essere registrati per sec.

  trigger sofisticato
- incrocio dei fasci ogni 25 ns,

  rivelatori con buona risoluzione temporale
- ... ma decisione di trigger richiede almeno ~2-3 μs

  l'elettronica deve memorizzare i dati localmente (pipelining)

- circa <17> eventi sovrapposti in ogni crossing, da cui ...

  circa 1000 tracce nei rivelatori ogni 25 ns
- occorre una buona granularita' (per avere bassa occupanza)

  elevato numero di canali

Alti livelli di radiazione (4 Mrad/yr @ 10 cm)

- Rivelatori ed elettronica radiation hard

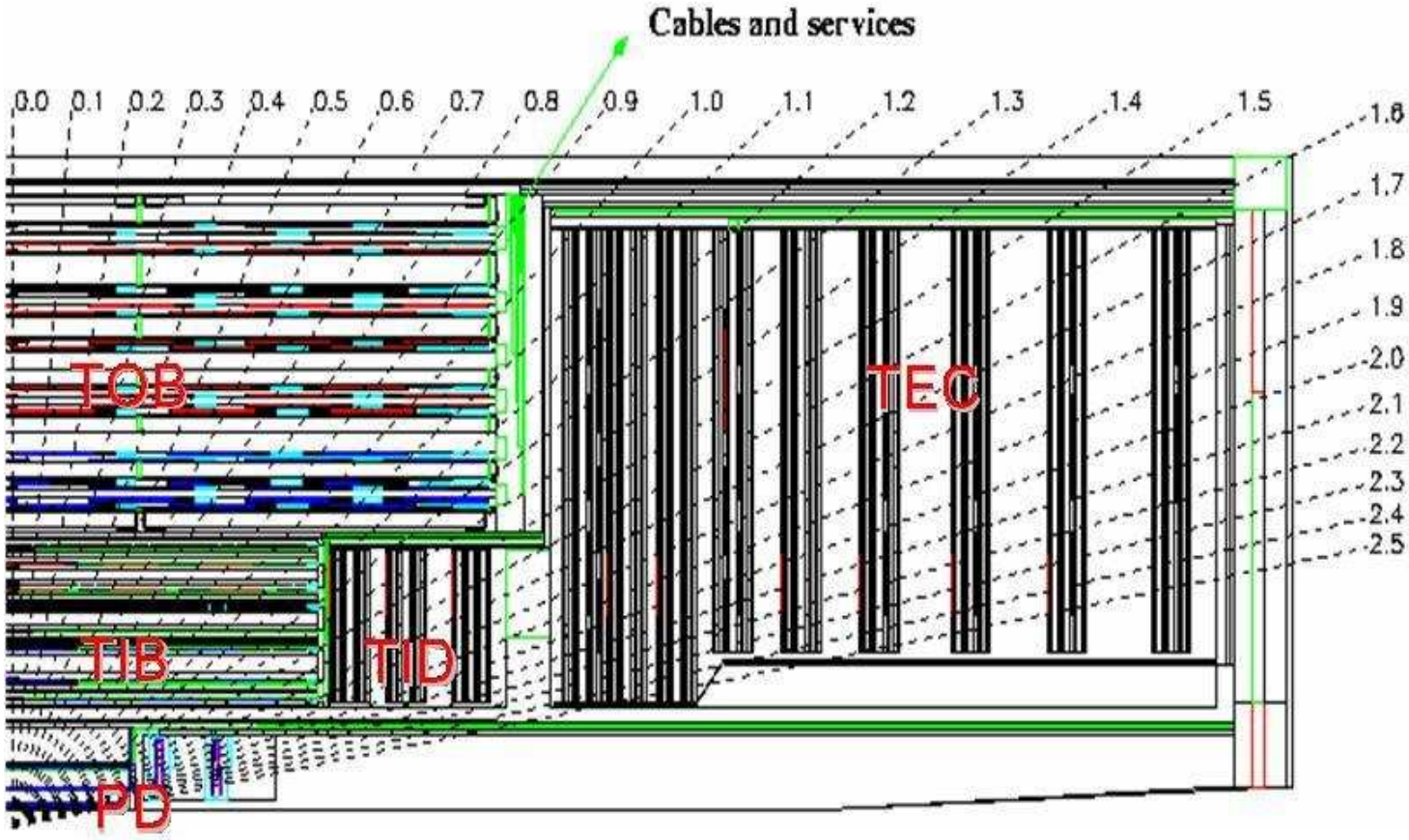
Il rivelatore di tracciamento di CMS

- 6,136 Thin sensors
- 18,192 Thick sensors
- 3112 + 1512
  Thin modules (ss +ds)
- 5496 + 1800
  Thick modules (ss +ds)

- **9,648,128** strips
  ≡ electr. channels

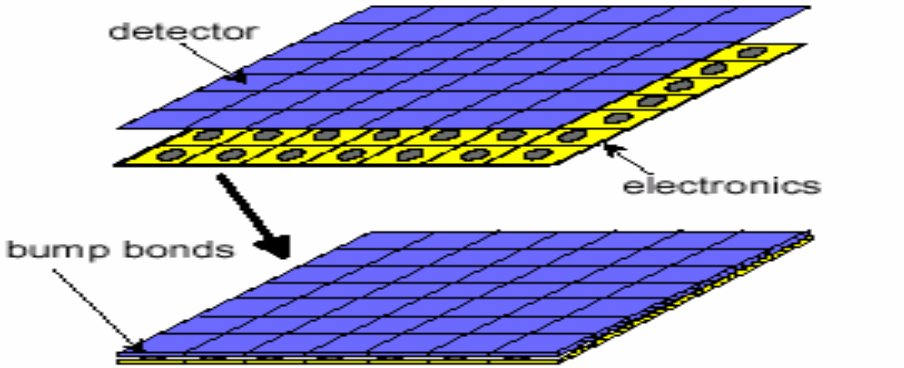
- 75,376 APV chips
-
- 25,000,000 Bonds

- 440 m^2 of silicon wafers
- **210 m^2** of silicon sensors
  ($162m^2 + 48m^2$)

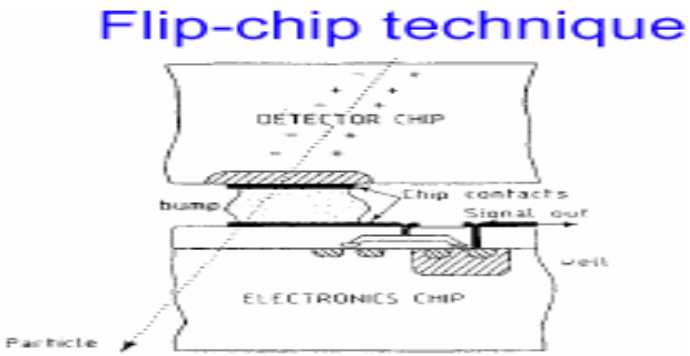


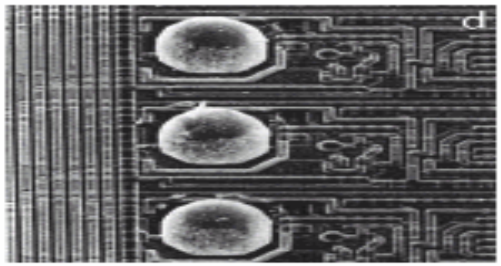
Barrel Interno **TIB = 4 strati cilindrici di dischi**
Barrel Esterno **TOB = 6 strati cilindrici di dischi**
Mini-endcap Int. **TID = 3 dischi di 3 anelli ciascuno**
Endcap Esterno **TEC = 9 dischi**

Rivelatori a pixel



RD 19, E. Heijne et al., NIM A 384 (1994) 399





Segmentazione a matrice di diodi

Elettronica di lettura con la stessa geometria

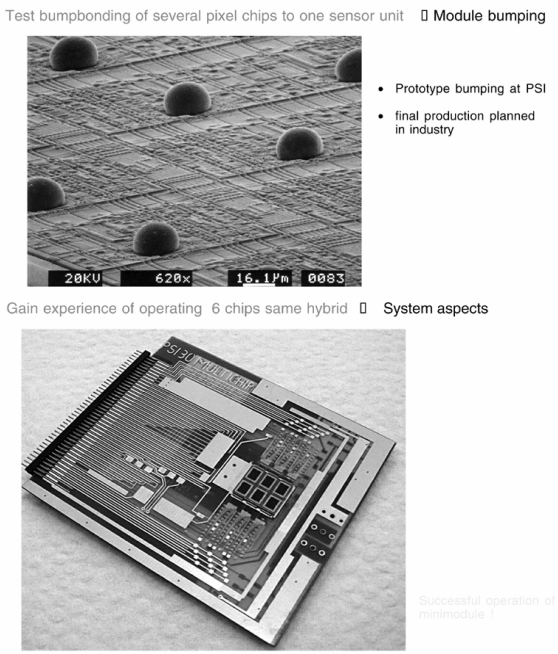
Collegamenti con la tecnica bump bonding

Rivelatore a PIXEL

3 strati di pixel a 5, 7, 11 cm di distanza dalla beam line e due dischi. Sensori saldati con bumps all'elettronica di lettura. Il ROC legge il contenuto di una colonna ed immagazzina l'informazione in attesa del trigger di livello 1. Dimensioni del pixel100x150μm; divisione della carica e non compensazione dell'angolo di Lorentz.

Risoluzione **σ (z) ~ σ (rφ) ~ 15 μm**

52x53 pixel of 150μmx150μm
430K transistors



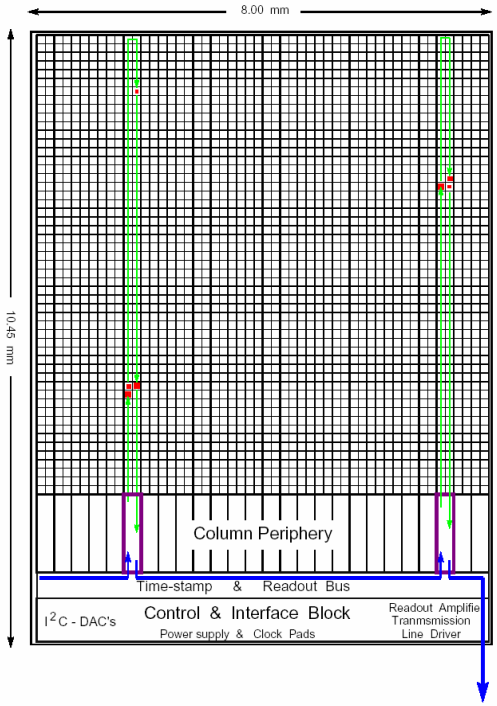
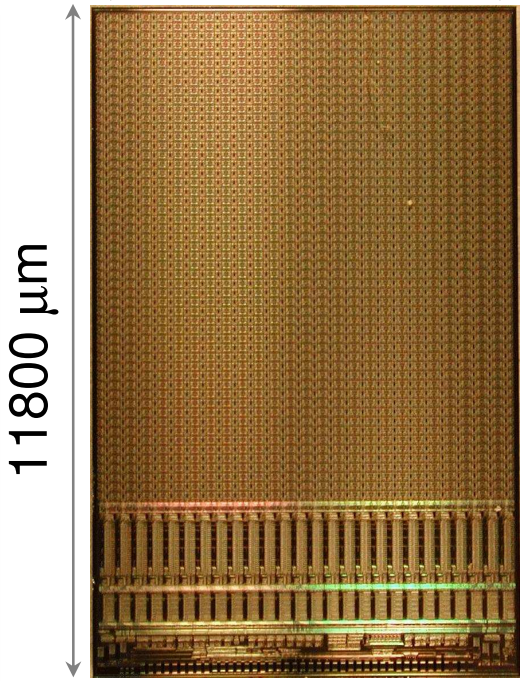
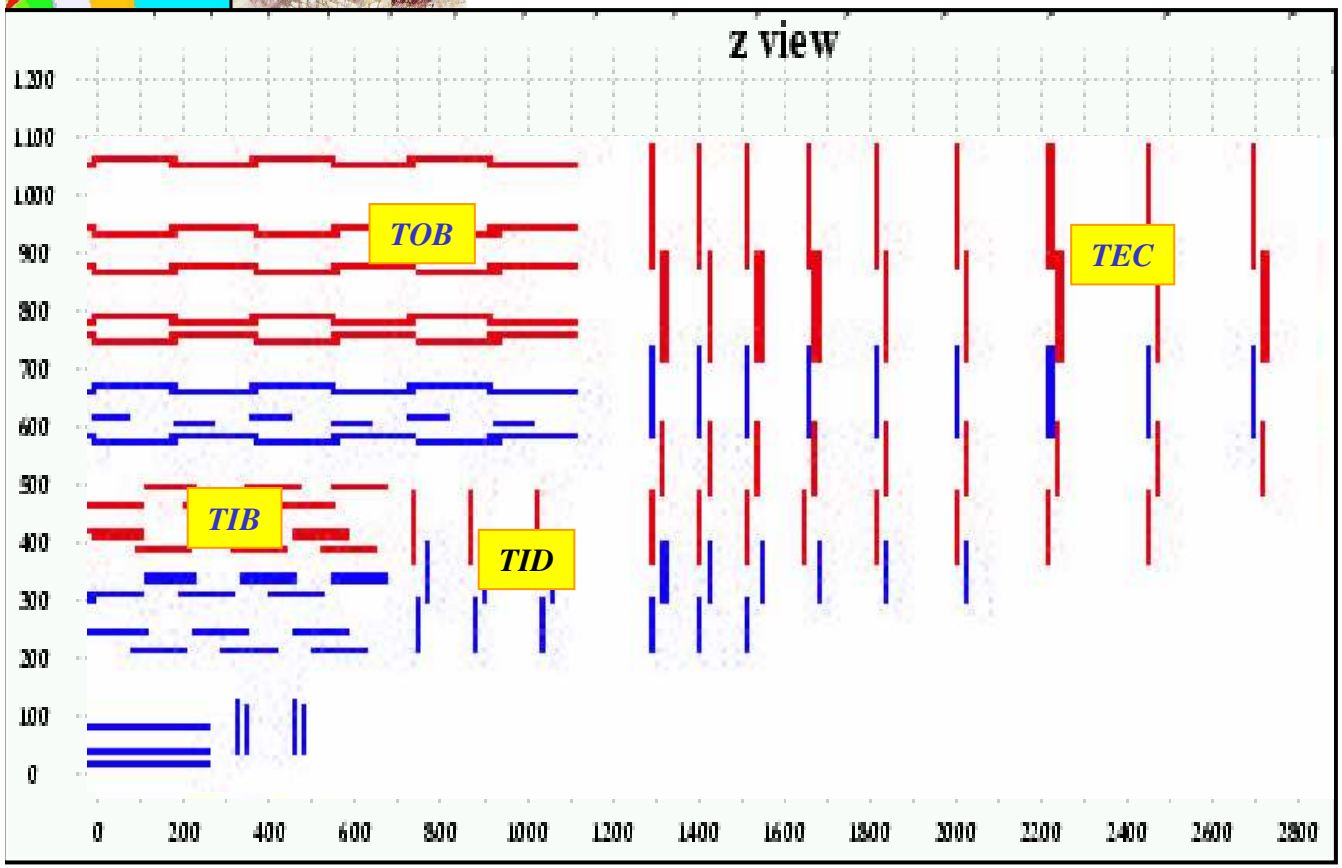


Figure 1: Conceptual layout of the pixel readout chip



7980 μm

Silicon Strip Tk



- 6,136 Thin sensors
- 18,192 Thick sensors

- **6,136** Thin detectors (1 sensor)
- **9,096** Thick detectors (2 sensors)

- 3112 + 1512 Thin modules (ss +ds)
- 5496 + 1800 Thick modules (ss +ds)

- **9,648,128** strips ≡ electr. channels

- 75,376 APV chips
-
- 25,000,000 Bonds

- 440 m^2 of silicon wafers
- **210 m^2** of silicon sensors (162m^2 + 48m^2)

Tracker Inner Barrel (TIB): 4 layers, 2 ss, 2 ds

Tracker Inner Disks (TID): 3*2 disks, 2 rings ds, 1 ss

Tracker Outer Barrel (TOB): 6 layers, 4 ss, 2 ds

Tracker EndCap (TEC): 9*2 disks, 3 rings ds, 4 ss

~1500 km di Strip a silicio

SST Collaboration

TEC

Vienna

Brussels_UVB
Brussels_ULB
Antwerpen
Louvain Mons

Lyon
Mulhouse
Strasbourg

Aachen_I
Aachen _III
Karlsruhe

ETH

TIB/TID

Bari,
Catania,
Firenze,
Padova,
Perugia,
Pisa,
Torino

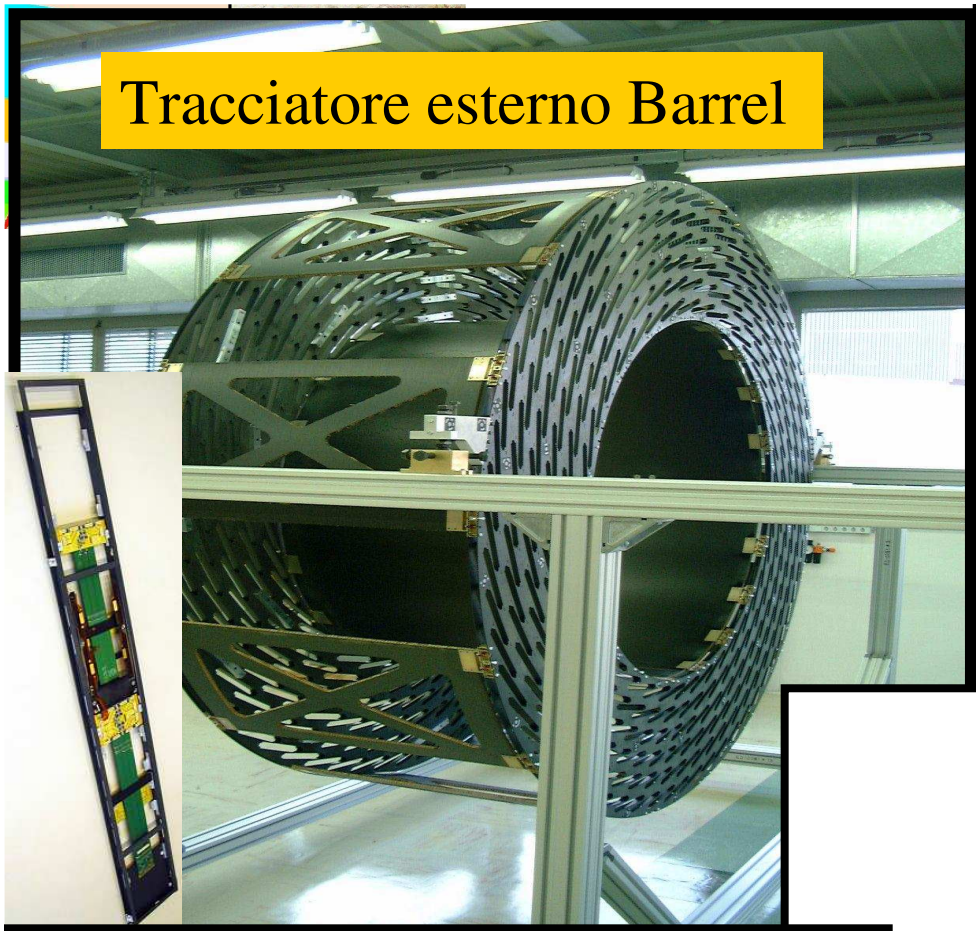
TOB

Helsinki
Oulu

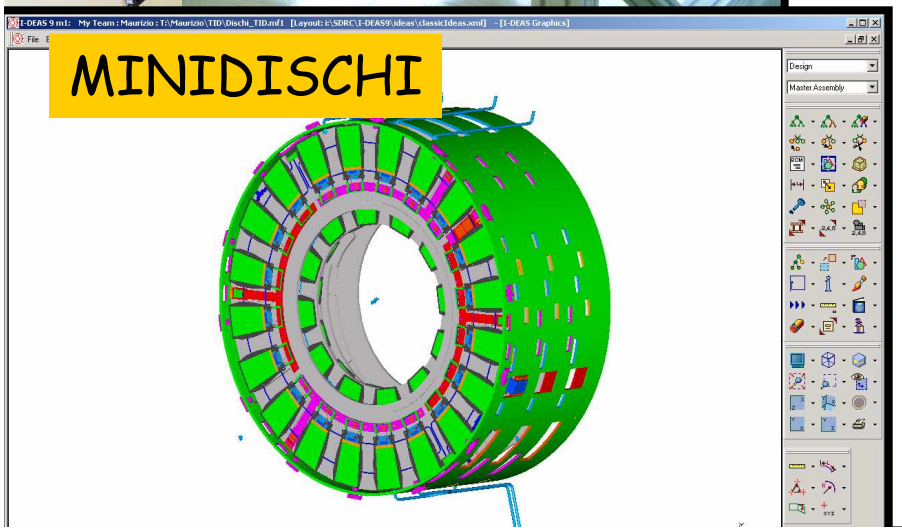
Fermilab
Illinois
Kansas
Kansas State
Purdue,
Rochester
Northwestern
St Barbara

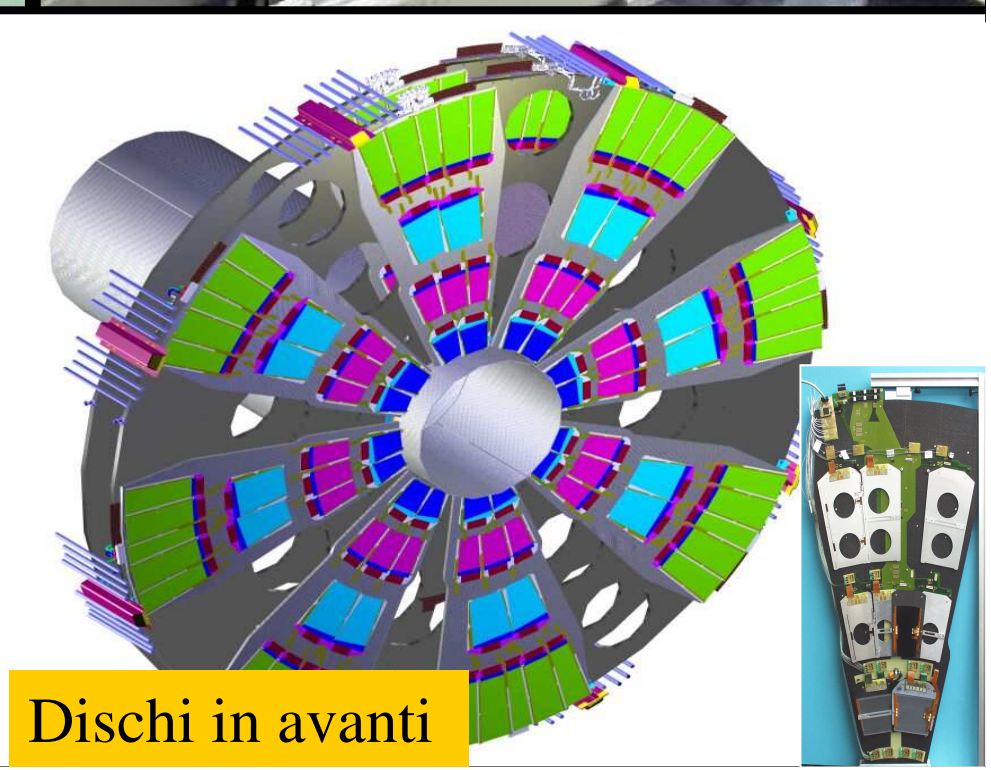
ELECTRONICS

Imperial College
Rutherford
Brunel

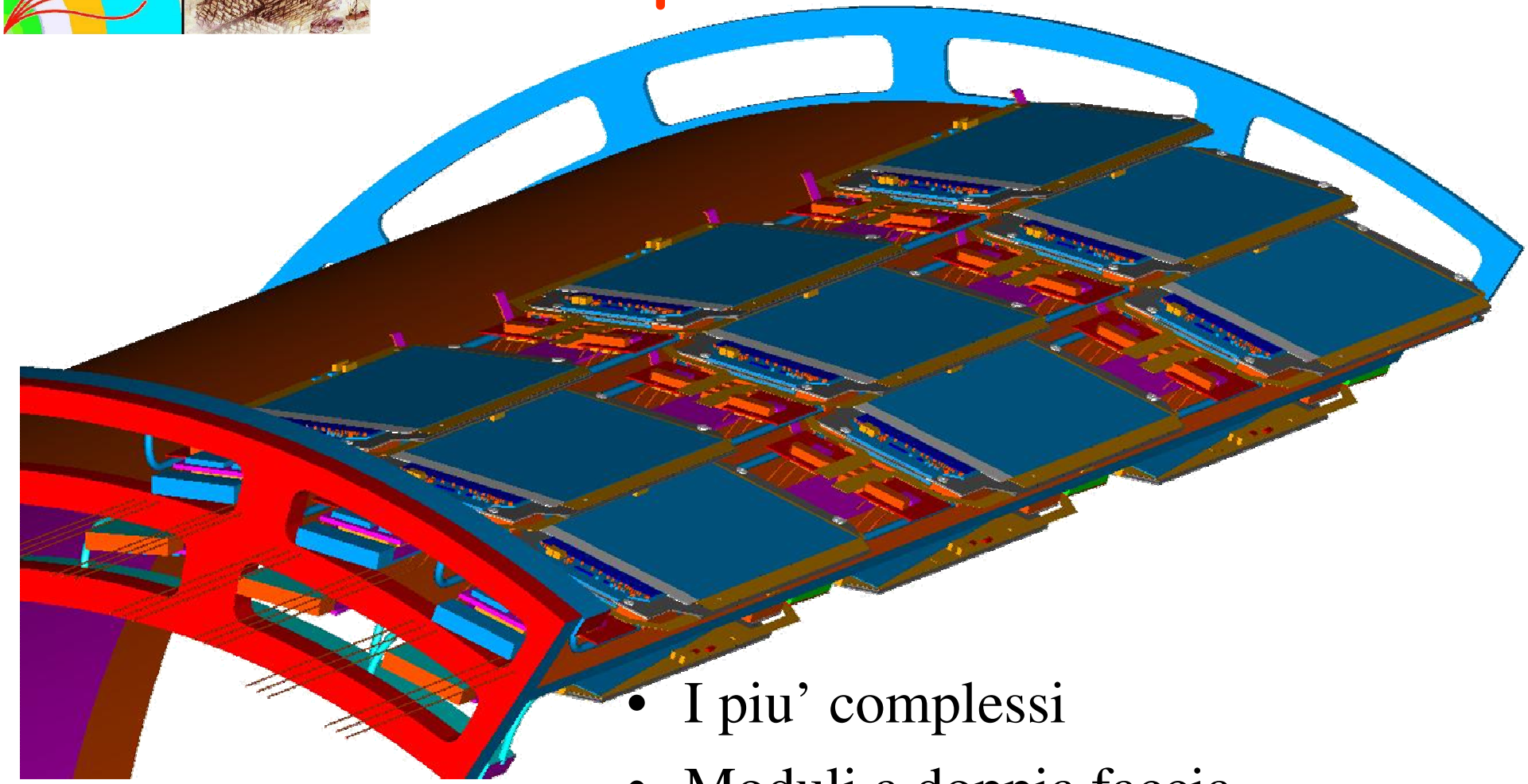

Tracciatore esterno Barrel

Tracciatore interno

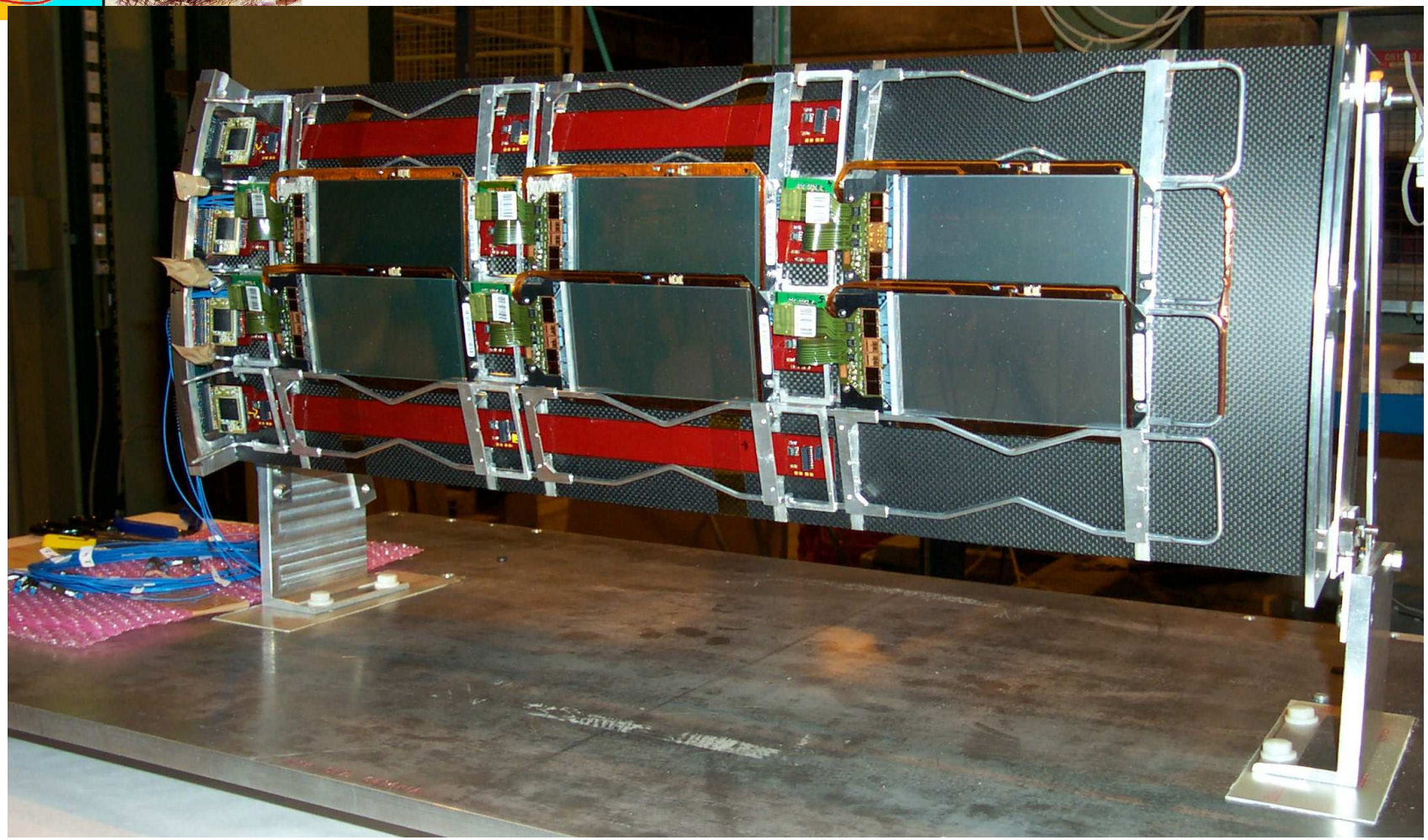

MINIDISCHI


Dischi in avanti

Strati piu' interni

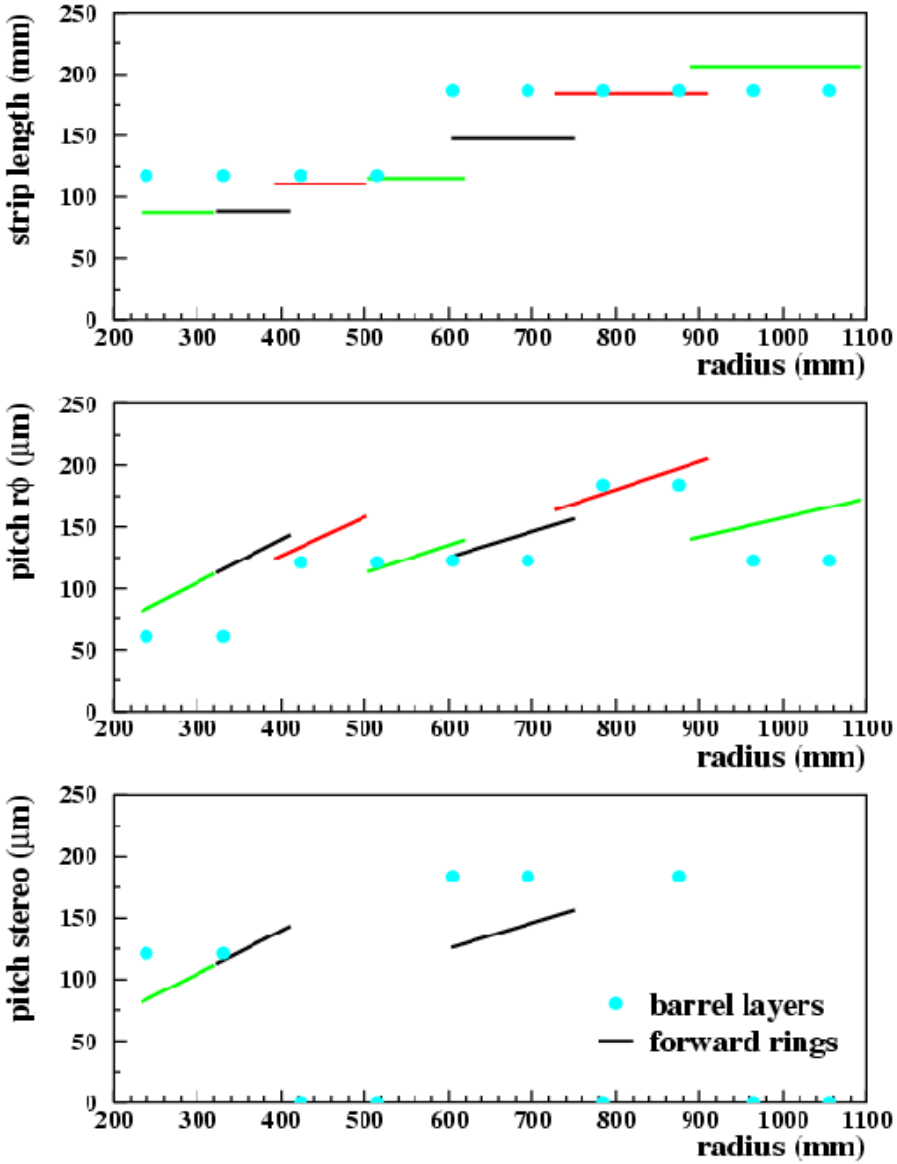


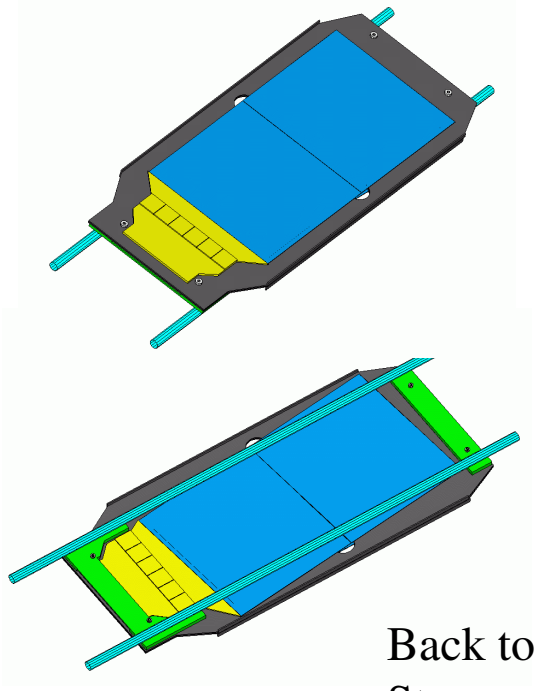
- I piu' complessi
- Moduli a doppia faccia
- Densita' di componenti molto alta
- Accesso molto complesso



Parte del TIB portato al test beam

Le geometrie dei moduli





Single sided module

Double sided module

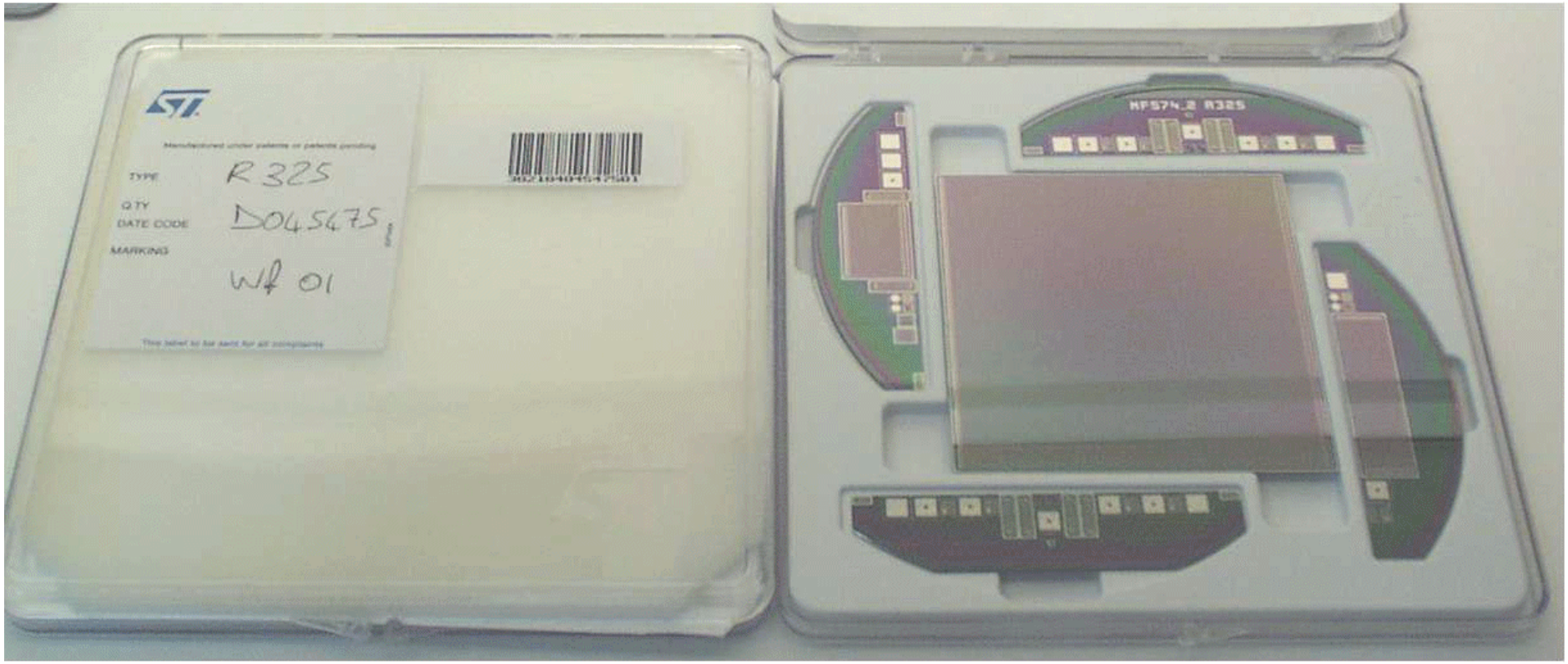
Back to back,
Stereo angle: 50 mrad

TIB : 1 ss, 1 ds
TID : 3 ss, 2 ds wedge geometry
TOB: 2 ss , 2 ds
TEC: 4 ss, 2 ds wedge geometry

21 geometrie diverse

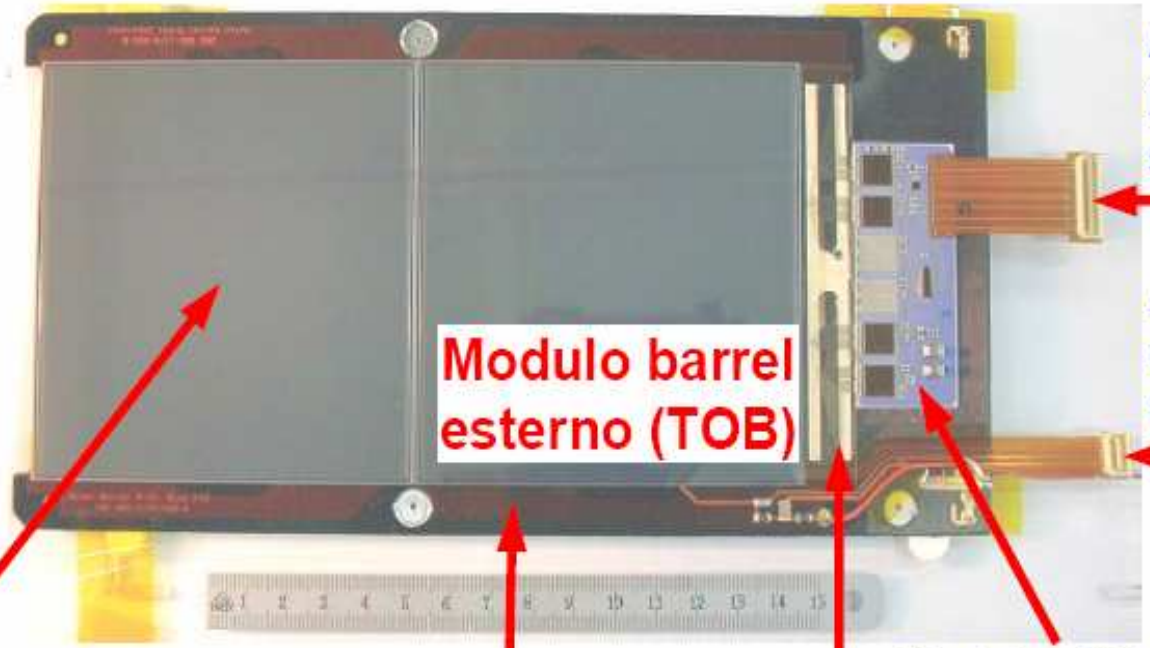
Tecnologia a 6"

Ditte fornitrici: HPK e ST



Wafer da 6" (6x12 cm2; 9x9 cm2)
Prima del 2000 erano da 4" (6x6 cm2)

MODULI



Alimentazione ibrido e lettura strip.

Alimentazione sensore (alta tensione)

Sensori
(1 o 2, a seconda del modulo).
Area da ~ 6x12 a 9x18 cm^2

Telaio in fibra di carbonio
supporto meccanico e dissipatore termico

Ibrido di lettura
(chip APV. 4 opp. 6 chip, a seconda del modulo).

Adattatore di passo
(pitch adapter) per adattare p_{APV} = 44 μm ai $p_{sensori}$

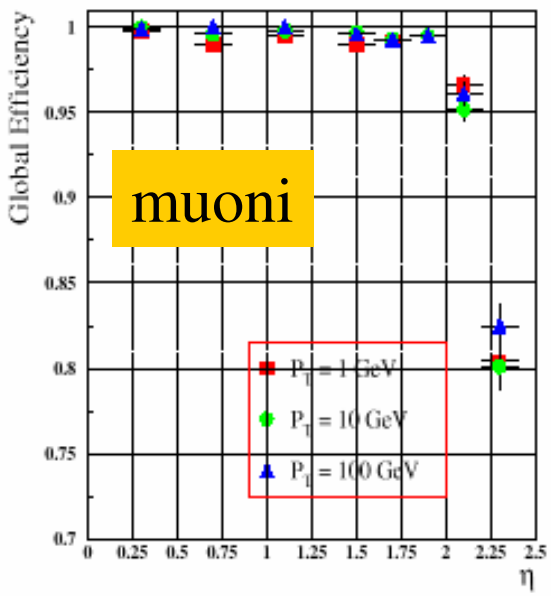
Esempi di moduli

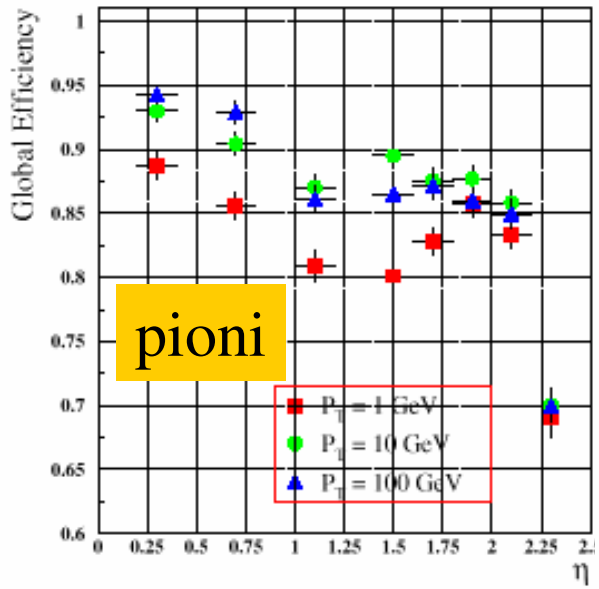
TOB1
(25 made)

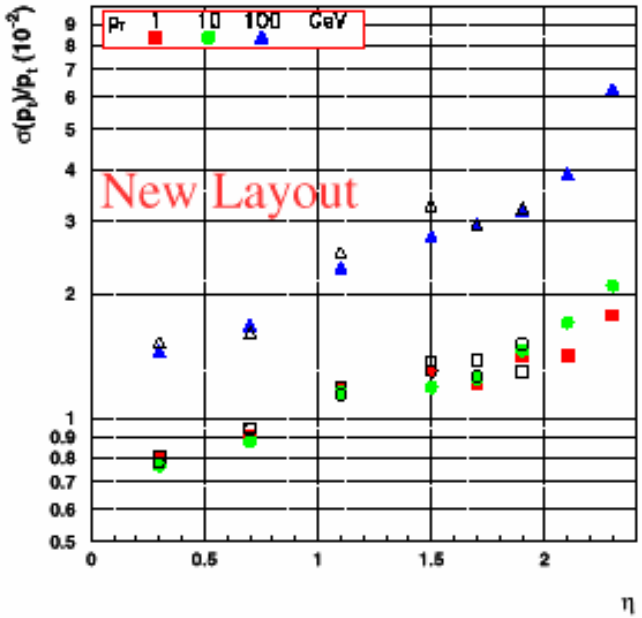
TEC6
(13 made)

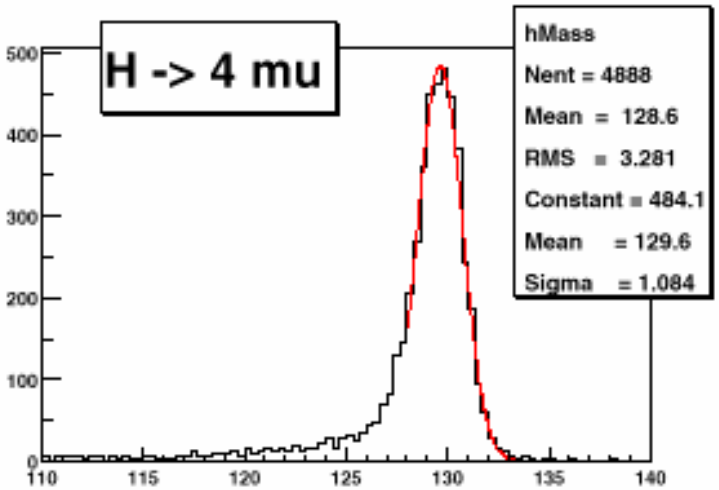
TIB3
(11 made)

TK performances









Sample of H –> 4 μ

Higgs mass = 130 GeV

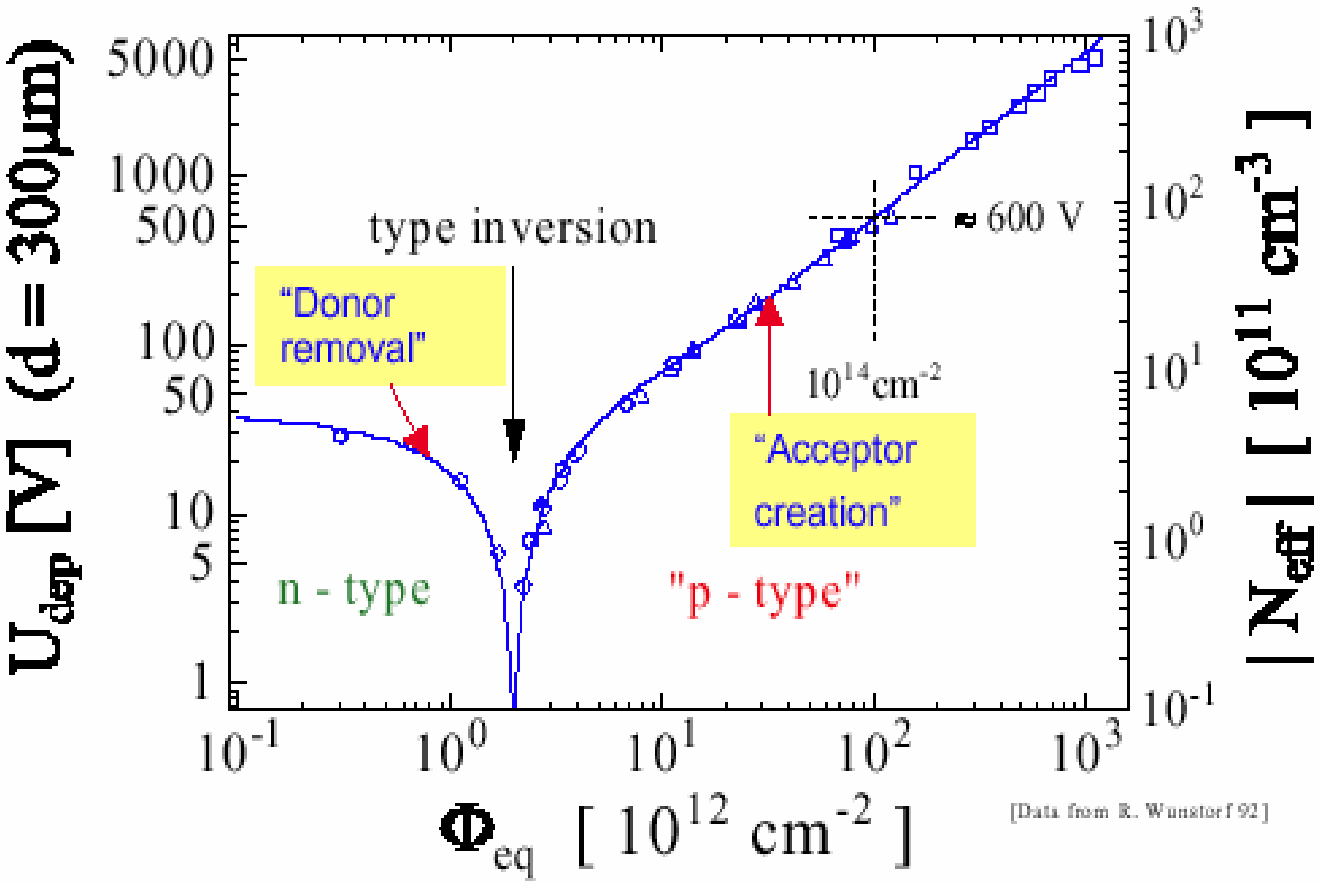
Reconstructed Higgs mass:
- **peak = 129.6 GeV**
- **resolution = 1.1 GeV**

Reconstruction efficiency:

(97.8 ± 0.2) %

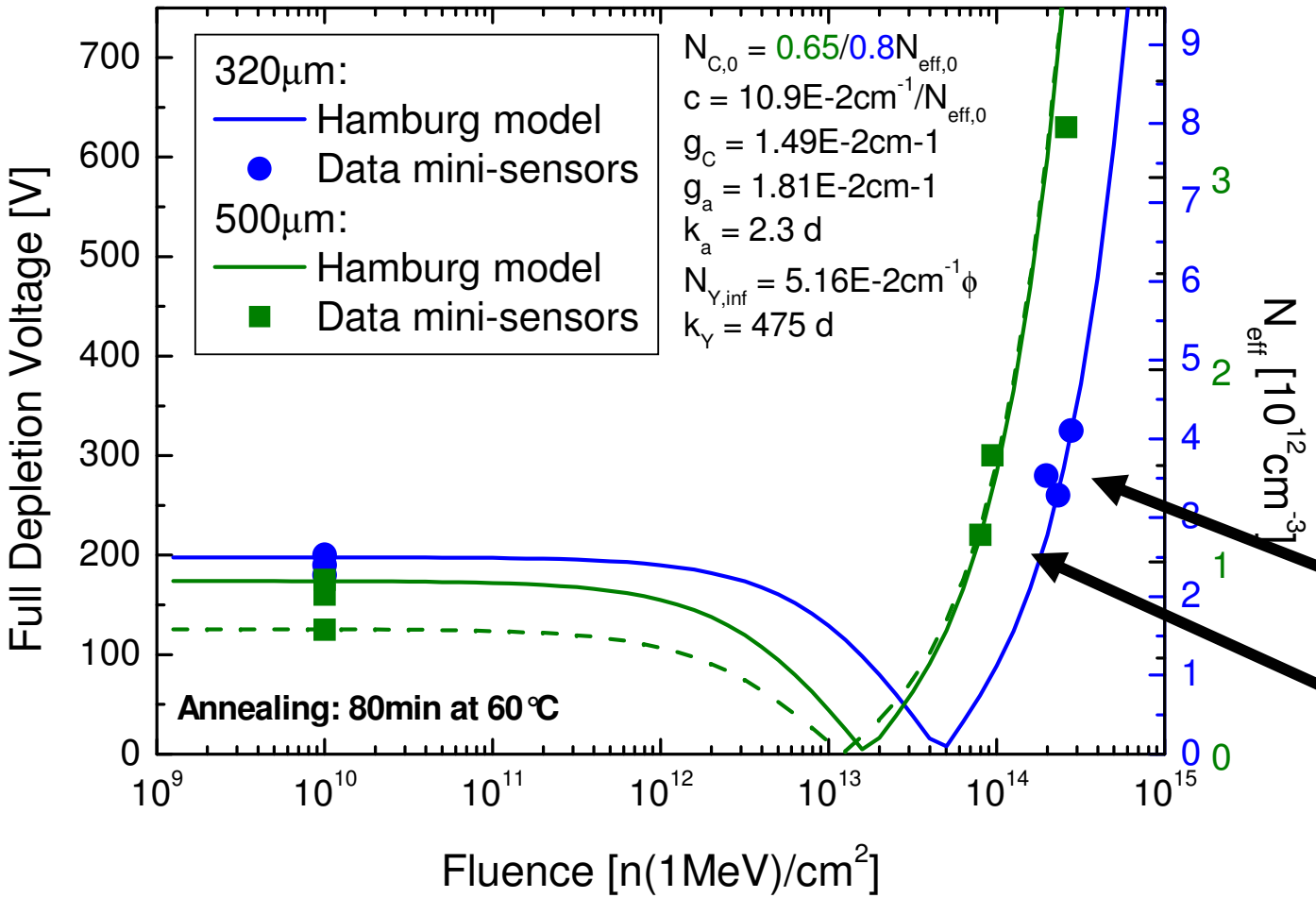
Alcune peculiarita' dei rivelatori a microstrip di CMS

Bulk effects (danneggiamento del reticolo)



Cambiamento della tensione di svuotamento

p-Irradiation and Hamburg model



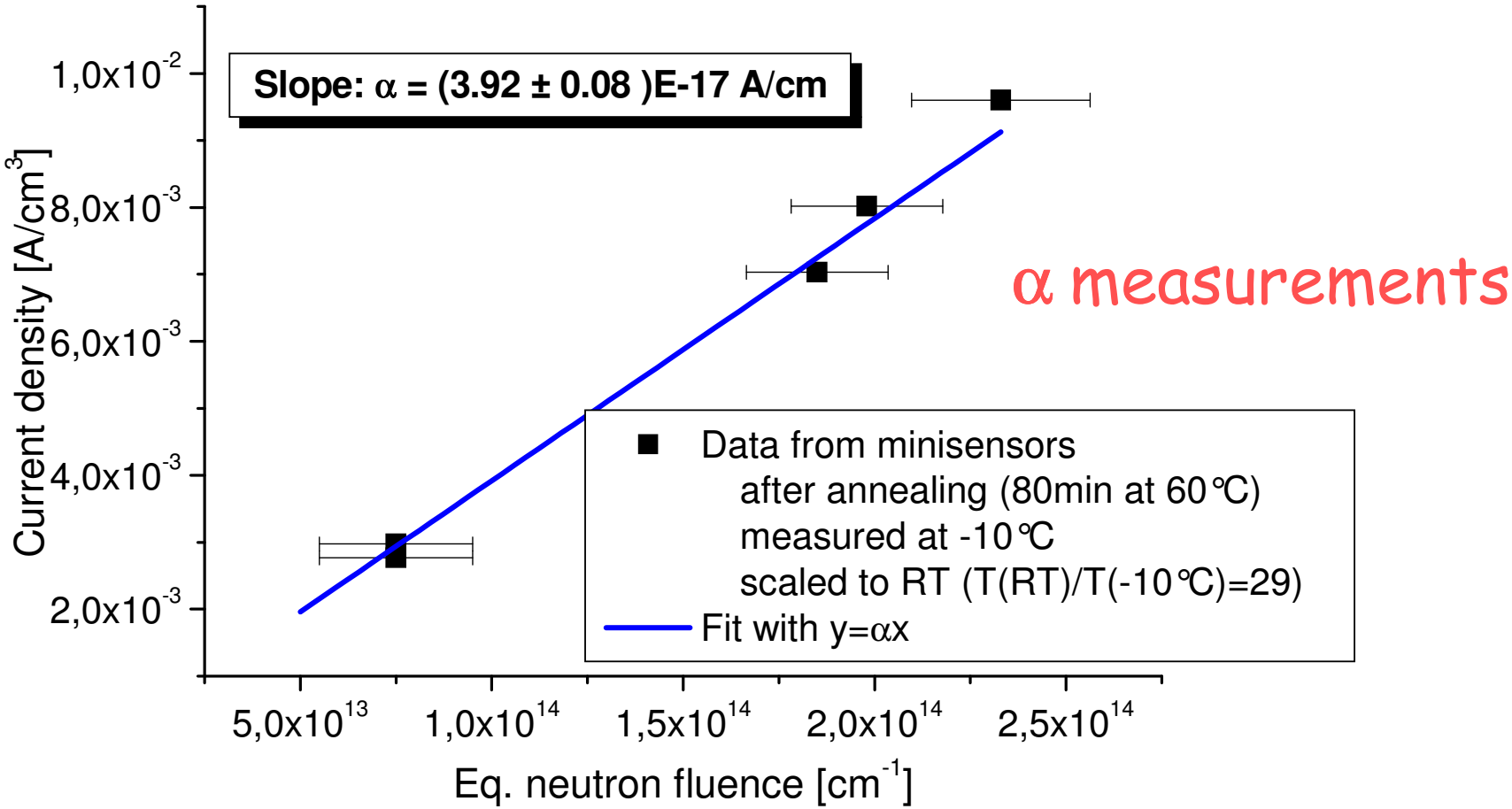
P irradiation on test structures: minisensors

300 μm bassa res.

500 μm media res.

Cambiamento della tensione di svuotamento

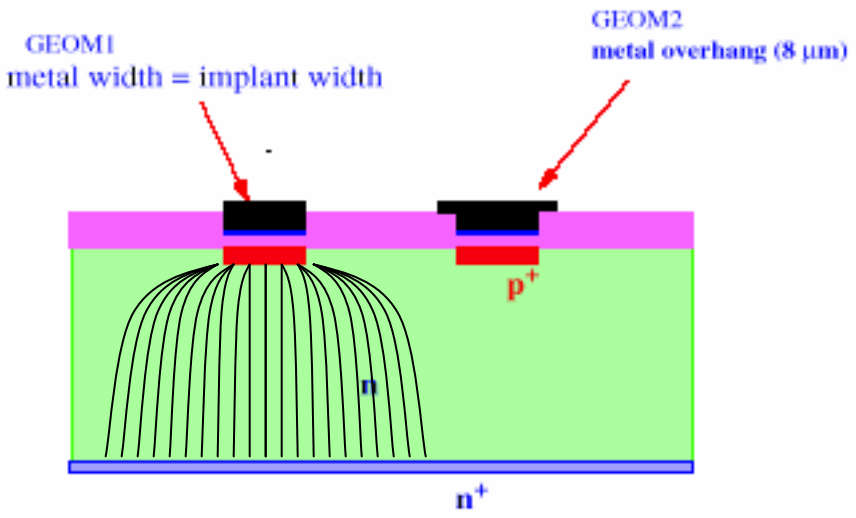
Aumento corrente di buio

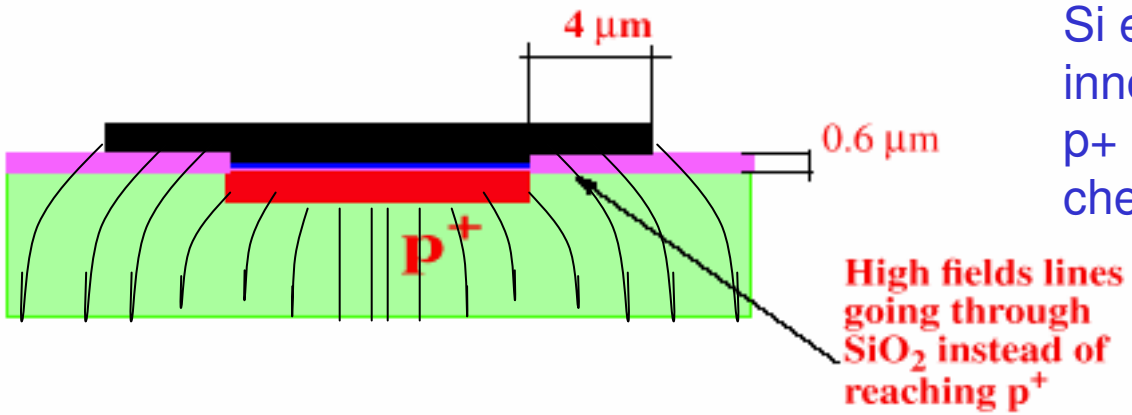


α measurements

Da 0.2 nA/strip → 1 μA/strip

Disegno particolare Al-strip





I rivelatori di CMS-TK devono essere stabili a tensioni di bias molto alte rispetto al passato 450V rispetto a 100V.

Un punto delicato e' l'impianto p+ dove il campo elettrico e' piu' alto e puo' raggiungere valori vicini ai 30 V/μm, dove il Si si "buca" ovvero scarica, ha un breakdown.

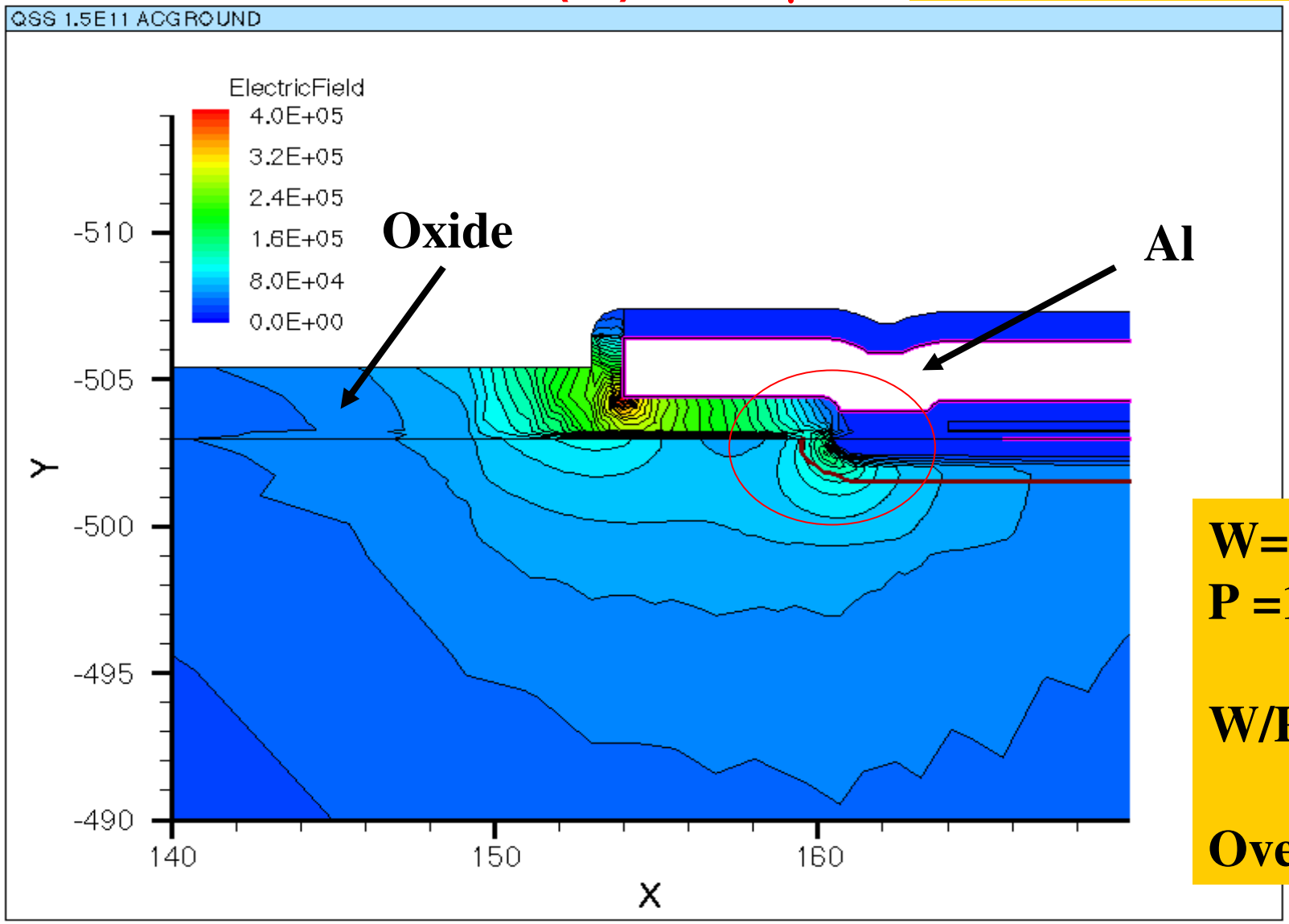
Si e' adottato un disegno nuovo, innovativo, con l'Al piu' grande del p+
che "spalma" il campo elettrico

METAL OVERHANG

C: Val=GND

E-max(Si)~16 V/μm

Q_{ox}=1.5·10^{11} e-/cm2

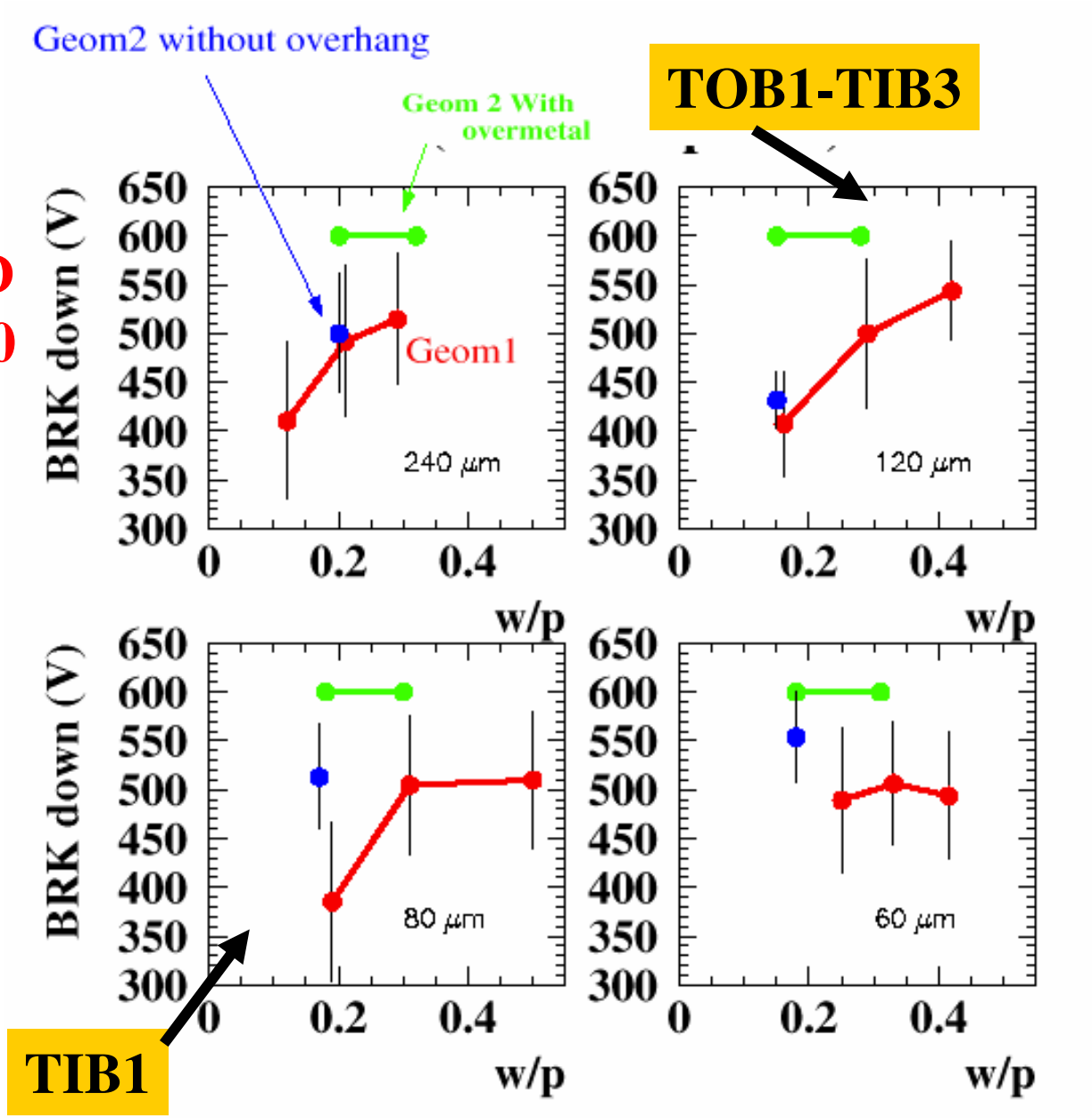


W= 40 μm
P =180 μm

W/P=0.22

Over=6 μm

Risultati dell'R&D fatto nel 1999-2000

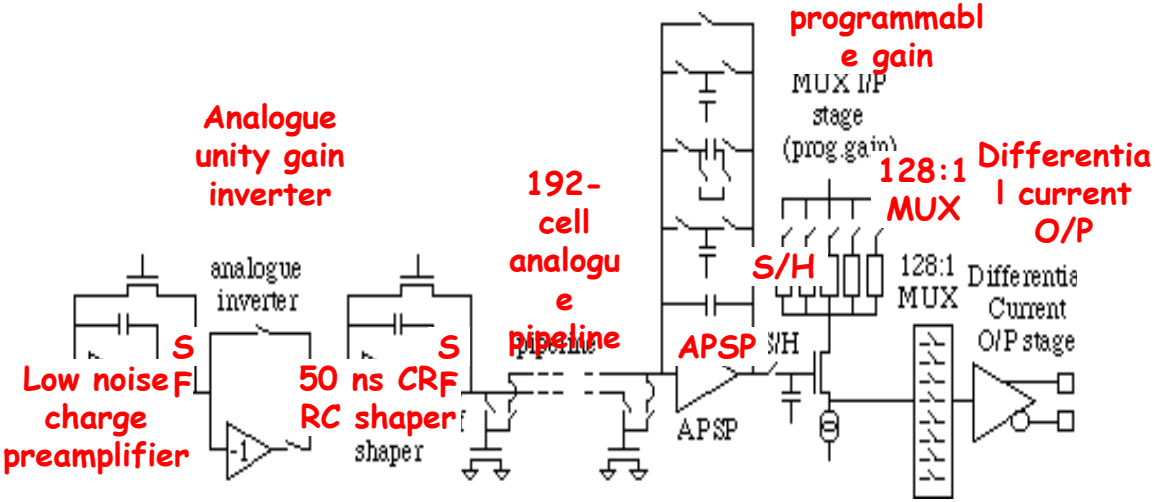


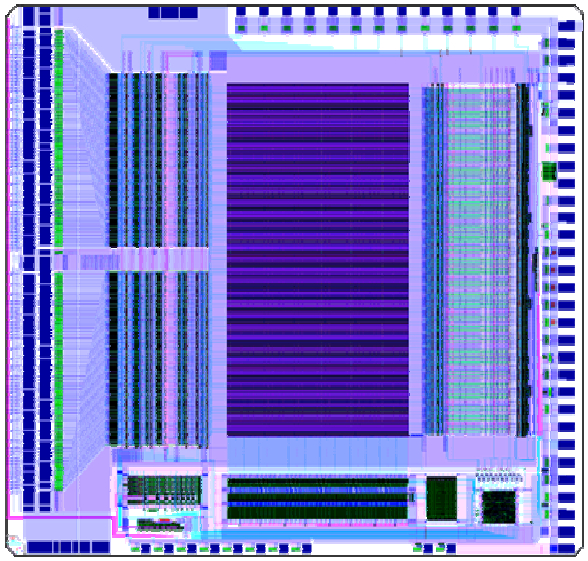
<111> High resistivity, Irradiated to 4 10^{14} p/cm^2

Elettronica del tracciatore di CMS

APV25: il chip di front -end

1 dei 128 canali





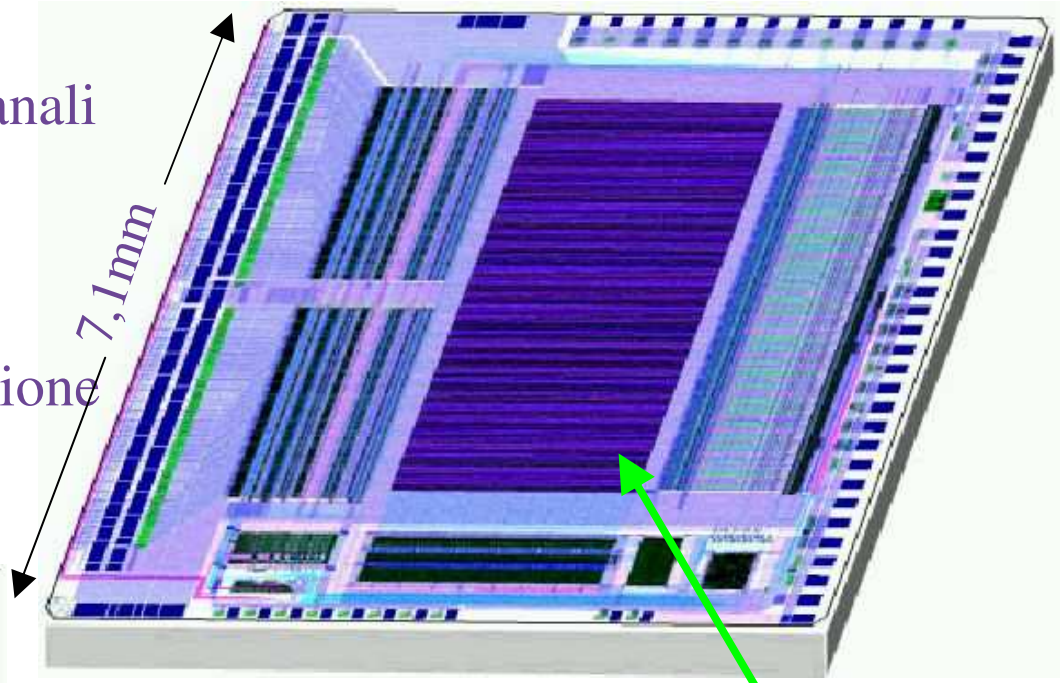
APV25-S1 (Agosto 2000)

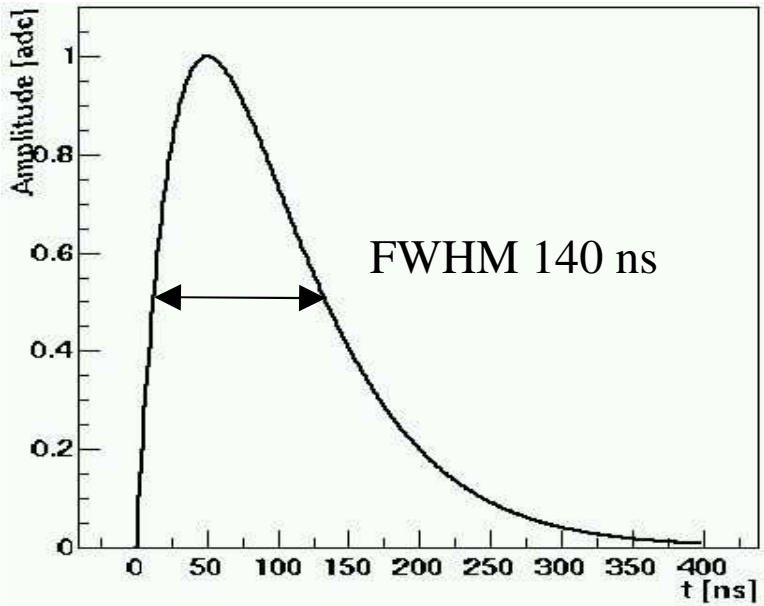
Dim. del chip 7.1 x 8.1 mm

Finale

Preamplificatore: APV25

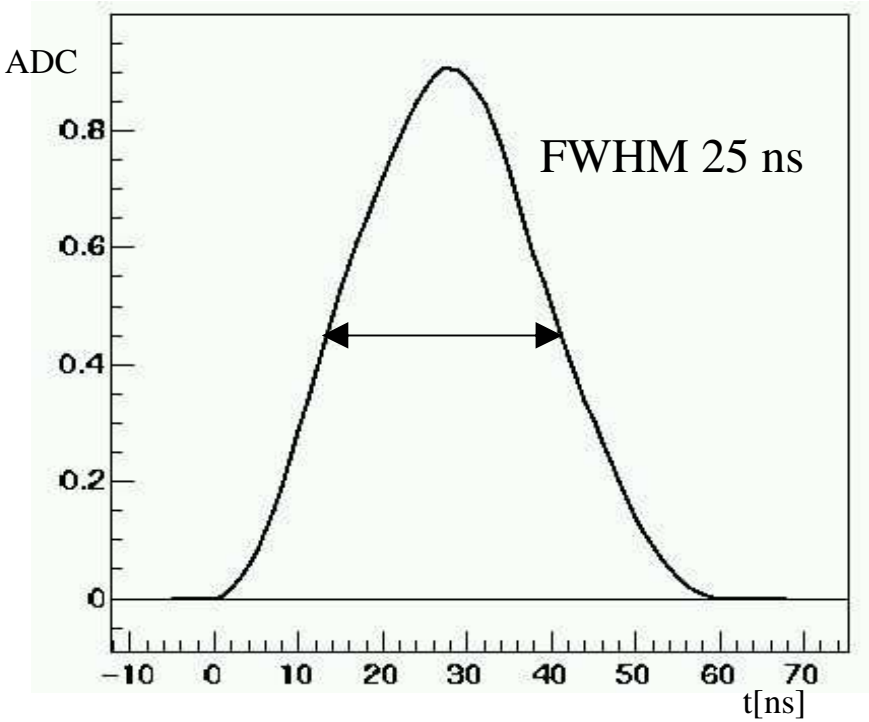
- Tecnologia a 0.25 µm,
- Uscita analogica, misura 128 canali
- Circuito di preamplificazione e di shaping con $\tau = 50$ns
- Ha un circuito di calibrazione
- Resistente ad alti tassi di radiazione
- Programmabile dall'esterno tramite protocollo I2C





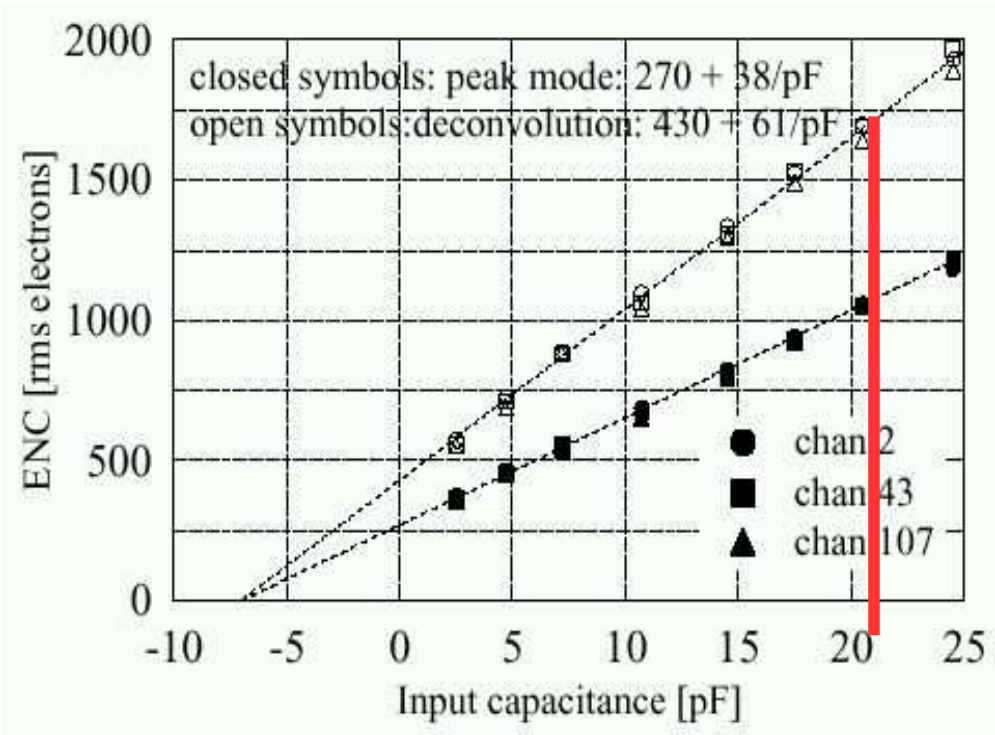
- Memoria analogica *pipeline*
  192 (192 x 25ns = 4,8 µs) celle per ogni canale

Deconvoluzione



Circuito di deconvoluzione

filtro numerico: somma pesata di tre campioni consecutivi

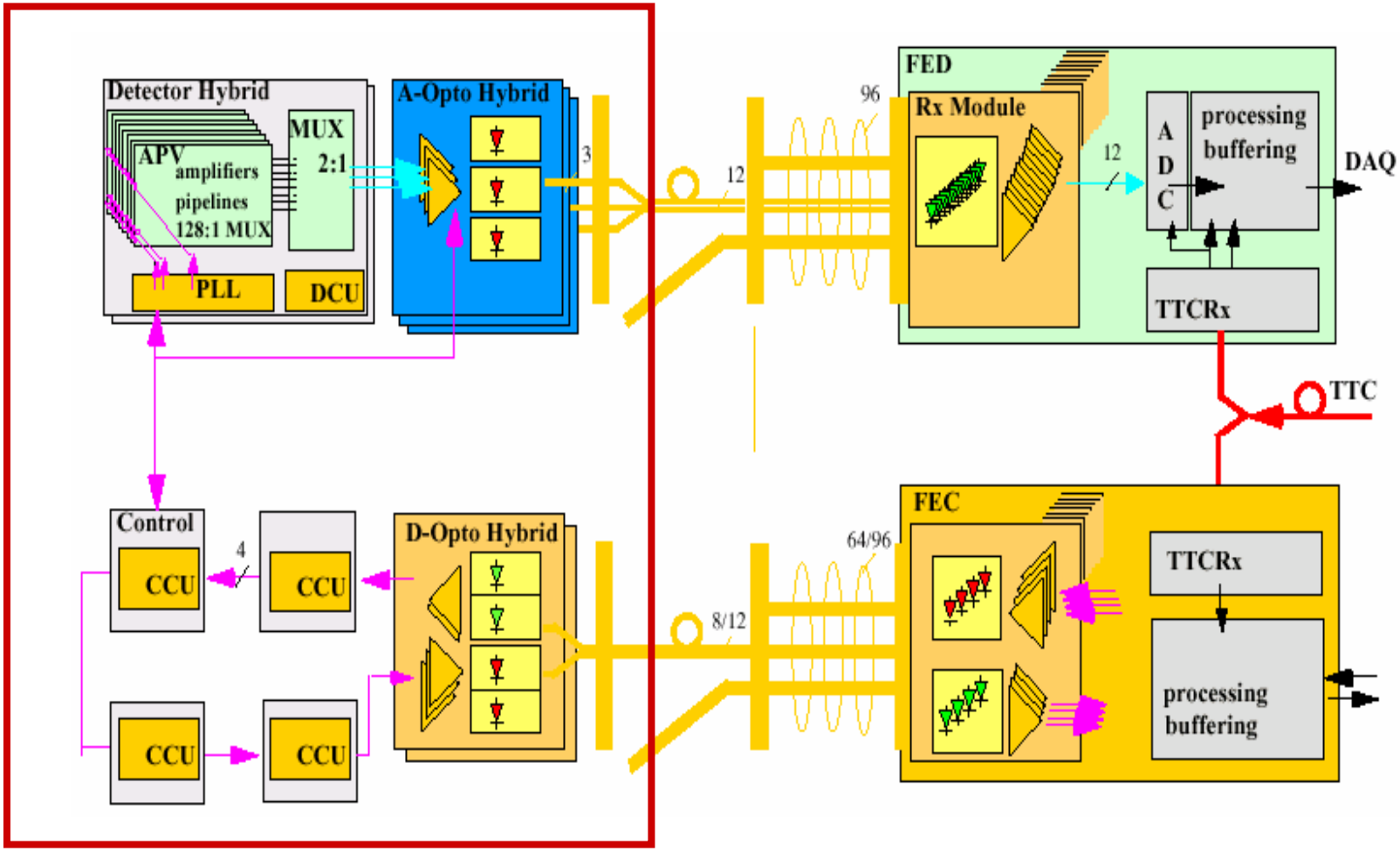


Picco: τ = 50ns, FWHM = 140 ns
S/N = 20

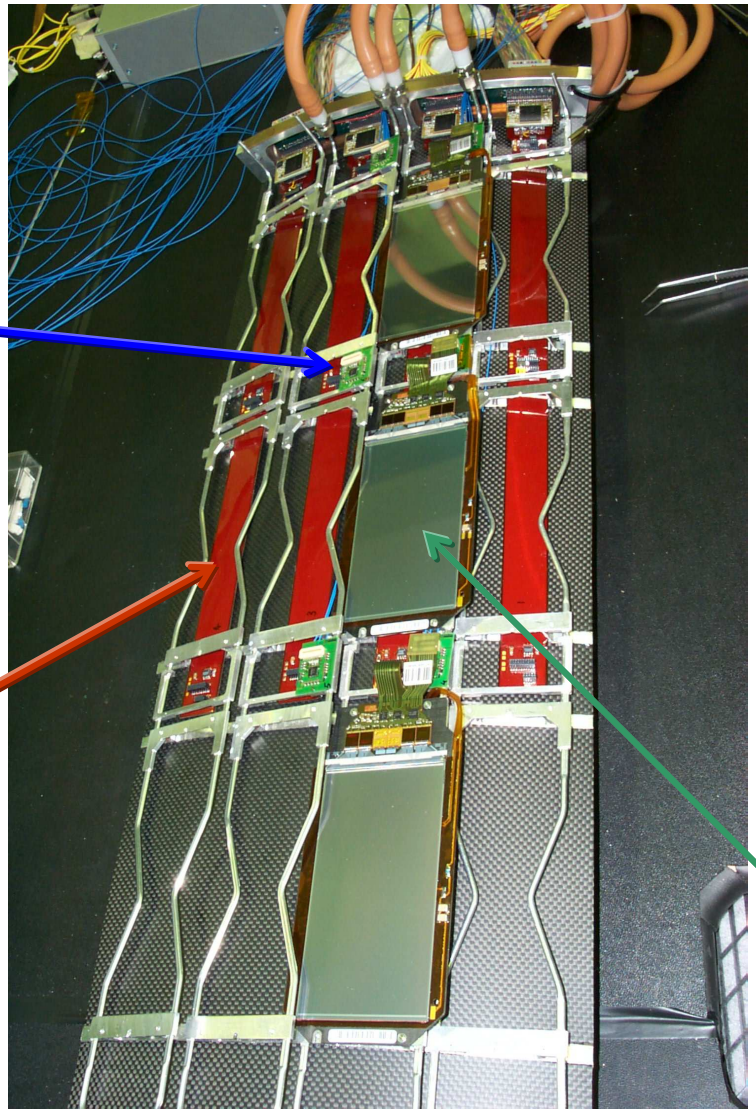
Deconvoluzione: FWHM = 25ns
S/N = 14

Elettronica di read-out del tracciatore

Tutti i componenti sul rivelatore devono essere rad-hard (10Mrad)



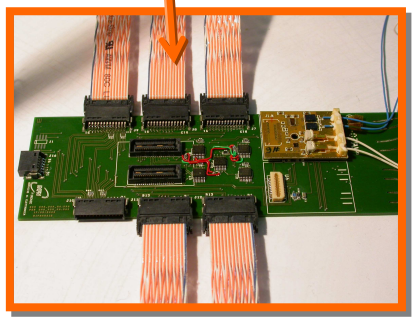
Catena elettronica



Fase 3: Analog OptoHybrid

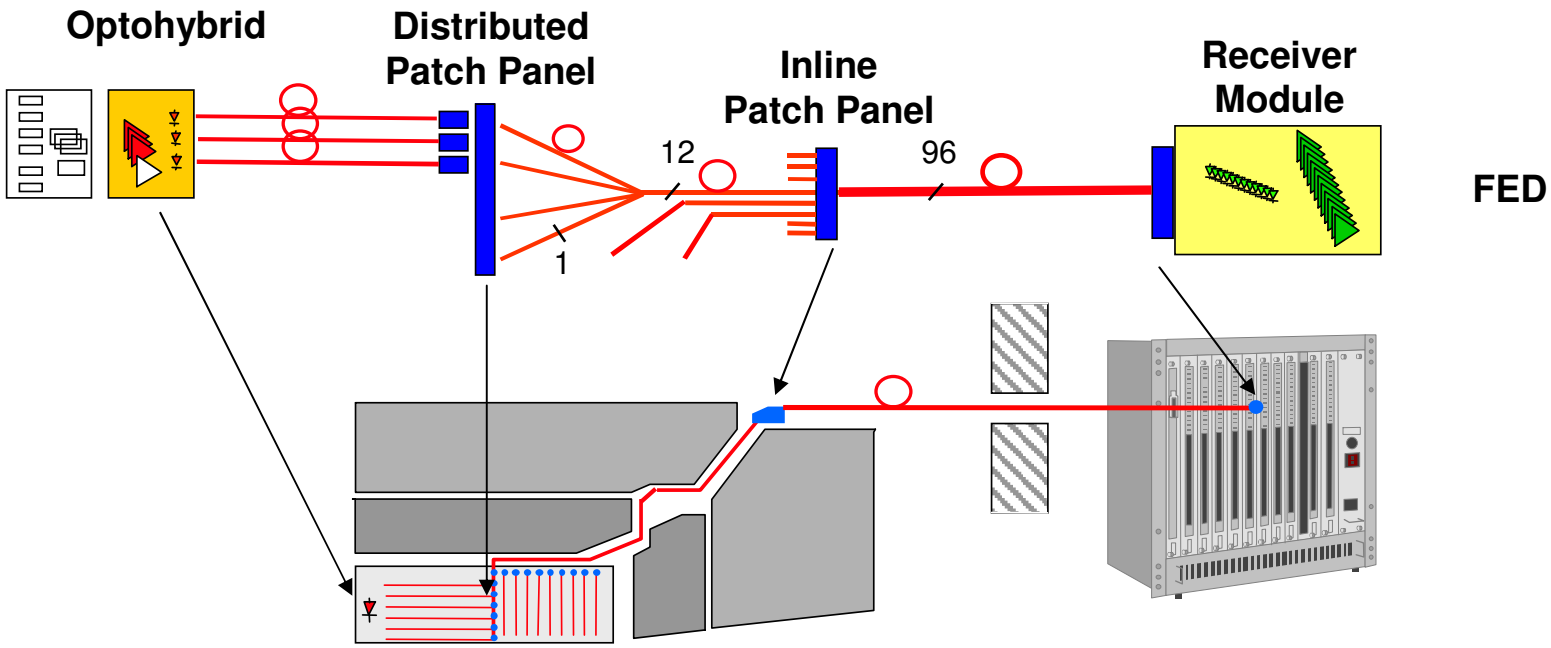
Fase 1: Mother cable e CCU

Fase 2: DOM

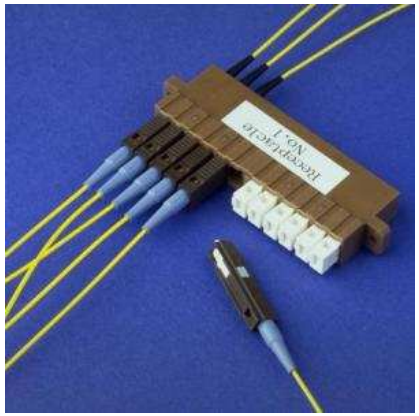


Fase 4: Moduli

Analog Optical link



Counting Room



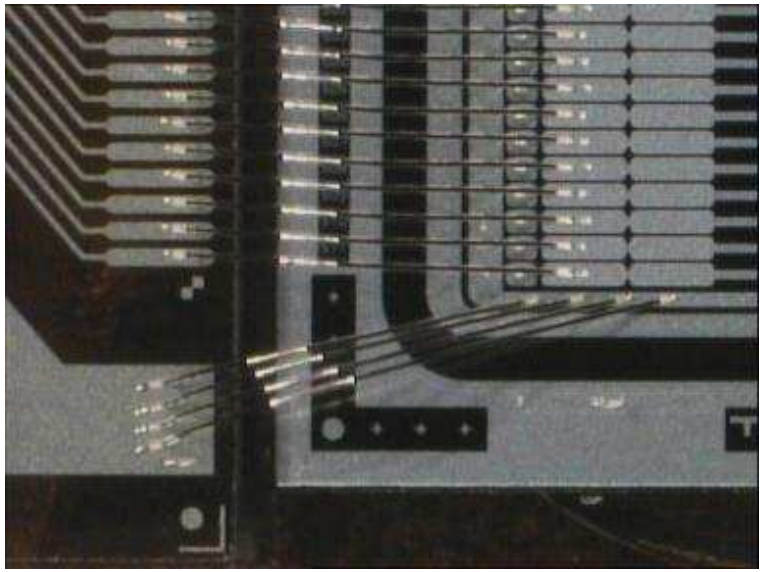
8 ribbon fiber cable

Alcuni aspetti costruttivi dei moduli di CMS Silicon Tracker

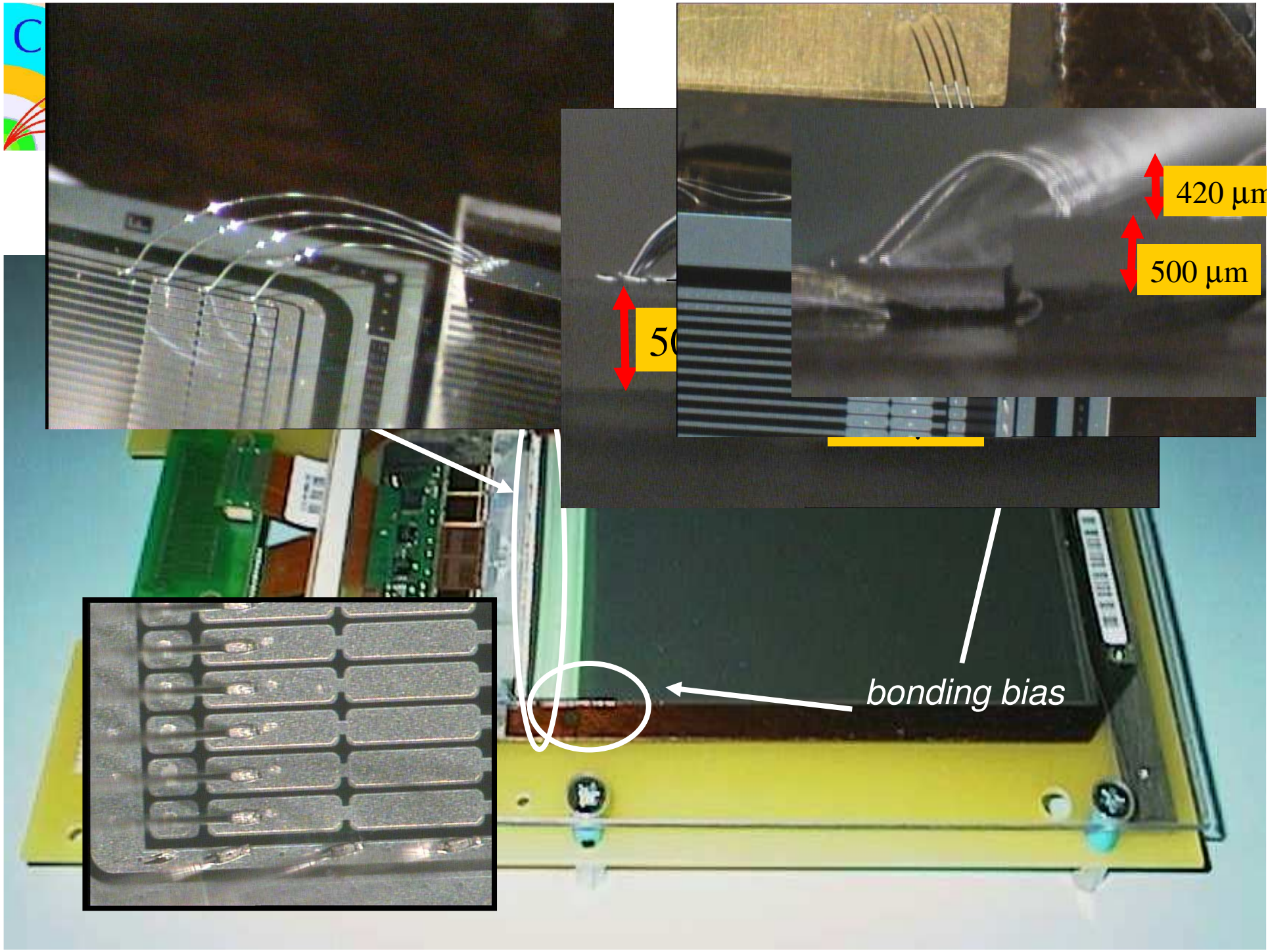
Assemblaggio moduli CMSTK

Il bonding dei moduli a microstrip di silicio

Microsaldatura (bonding):
fusione mediante ultrasuoni di un filo di alluminio dello spessore di 25 μm



- strips al pitch adapter
- pitch adapter all'elettronica di readout
- linea di bias


420 µm
500 µm
bonding bias

Conclusioni

- Rivelatori a silicio hanno permesso di migliorare di un fattore 5-10 la risoluzione spaziale rispetto alle tecniche precedenti ➔ microvertici

- Microstrip (2D, 3D con ambiguita'), pixel (3D), silicon drift (3D) [vedi R.W.]

- Il tracciamento ad LHC e' possibile grazie ai rivelatori a silicio

- Le prossime generazioni di esperimenti vedranno ancora una predominanza dei rivelatori a silicio nei tracciatori

- La tecnologia ha dei forti impatti su questi rivelatori