

I rivelatori a semiconduttore

Giorgio Chiarelli

INFN Pisa

Corso di tecniche sperimentali della Fisica Nucleare e Subnucleare

Dottorato Roma 2 , 19-20 Aprile 2011

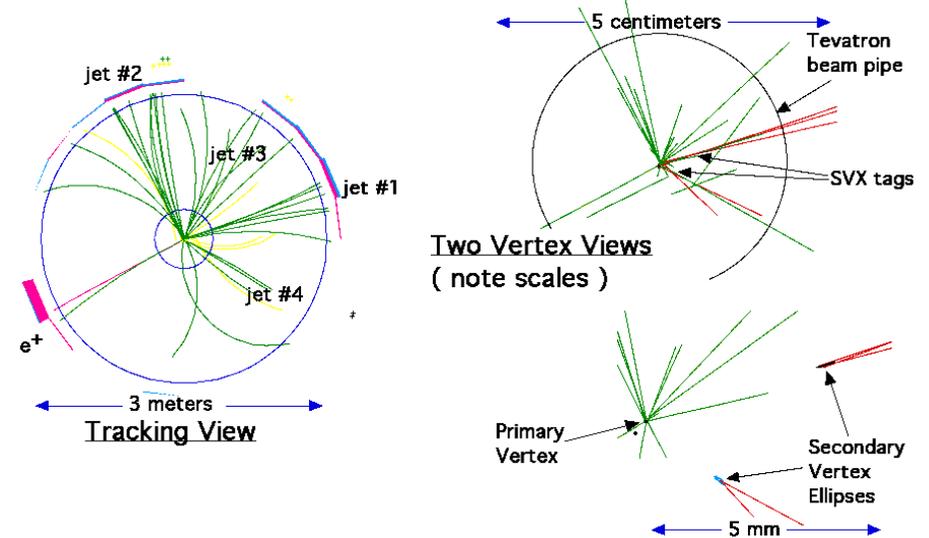
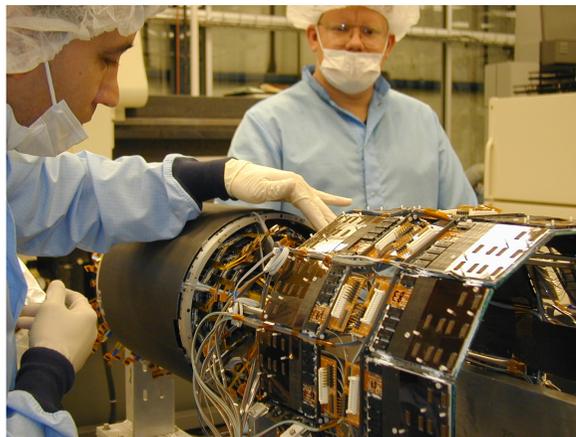
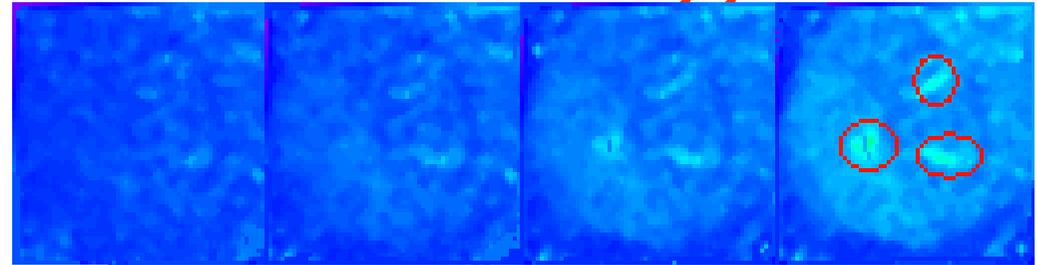
<http://www.pi.infn.it/~giorgio/didattica/Roma2-2011.pdf>

- ☛ Silicio e particelle
 - ☛ diodi, giunzioni etc
- ☛ dal diodo al rivelatore
 - ☛ tipi di rivelatori (CCD, Pixel, Microstrip)
- ☛ danno da radiazione
- ☛ Negli esperimenti ad acceleratori

I rivelatori a semiconduttore oggi

2

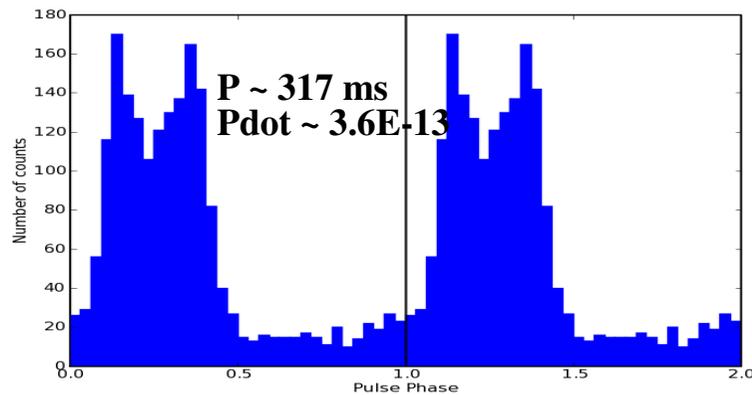
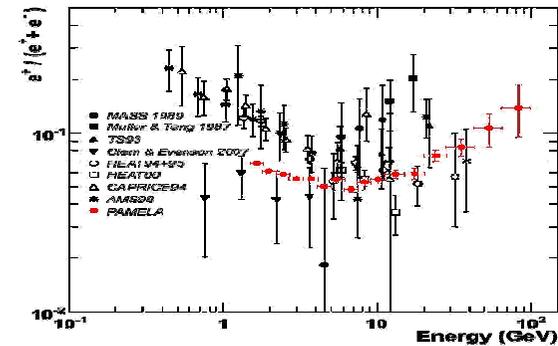
- Rivelatori di
 - ↳ fotoni
 - ↳ particelle cariche
- Dove?
 - ↳ nei laboratori
 - ↳ aereotrasportati (nello spazio)
- Per quali applicazioni ?
 - ↳ sistemi di tracciatura
 - ↳ identificazione di fotoni
 - ↳ misure di energia



Spazio...

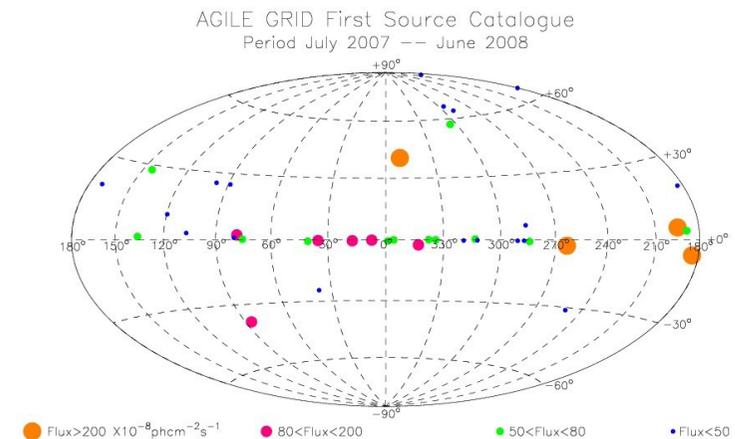
☛ Cosa hanno in comune?

- ↳ Pamela
- ↳ Fermi/GLAST
- ↳ Agile

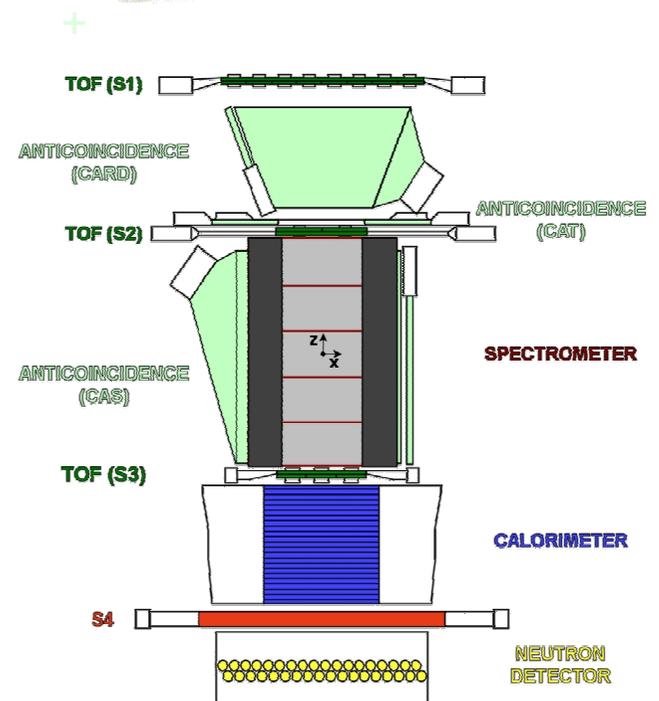
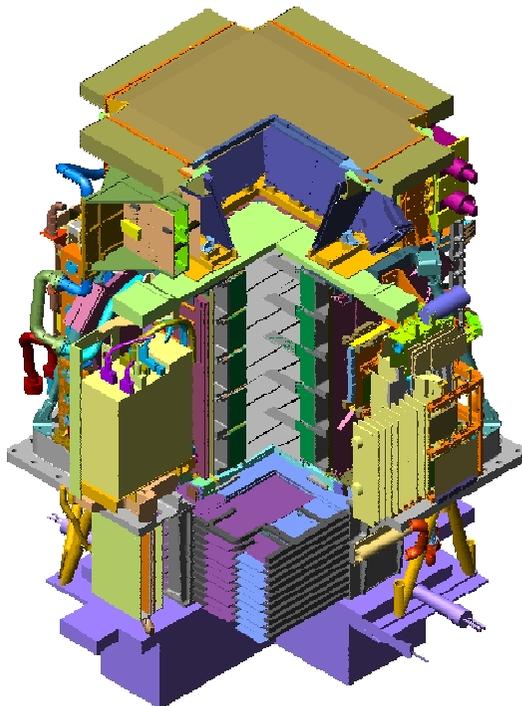
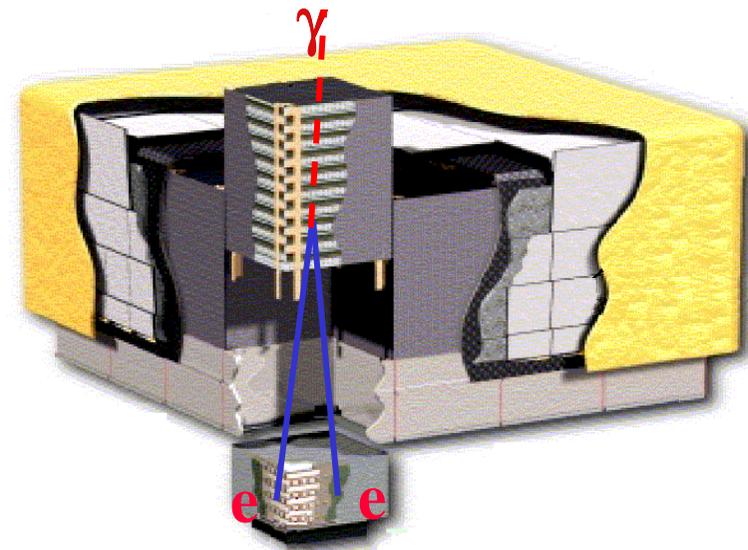
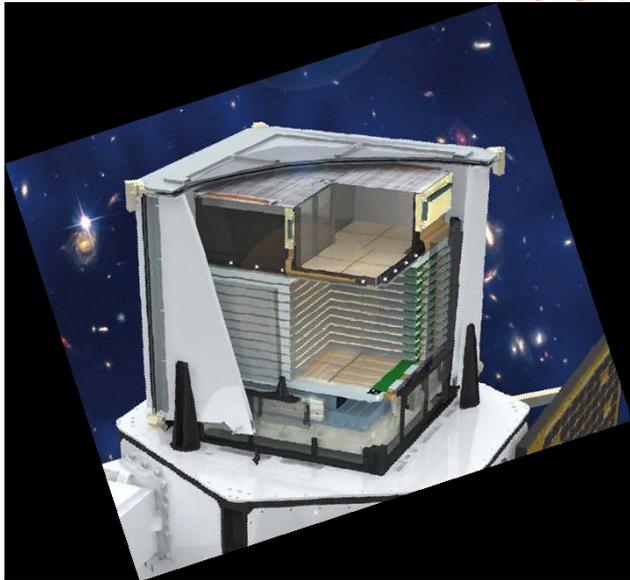


- Spin-down luminosity $\sim 10^{36}$ erg s $^{-1}$, sufficient to supply the PWN with magnetic fields and energetic electrons.

- The γ -ray flux from the CTA 1 pulsar corresponds to about 1-10% of \dot{E}_{rot} (depending on beam geometry)



Cosa hanno in comune?



Rivelatori a semiconduttore in HEP

5

Due gli usi

↳ Rivelatore di vertice

↳ I primi costruiti, e gran parte degli utilizzi fino ad oggi

↳ Sistemi di tracciatura

↳ Si espande il ruolo, stanno prendendo sopravvento

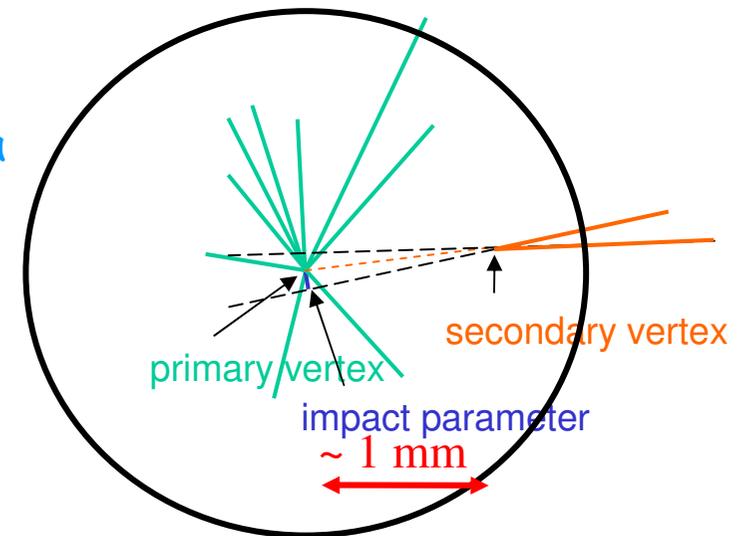
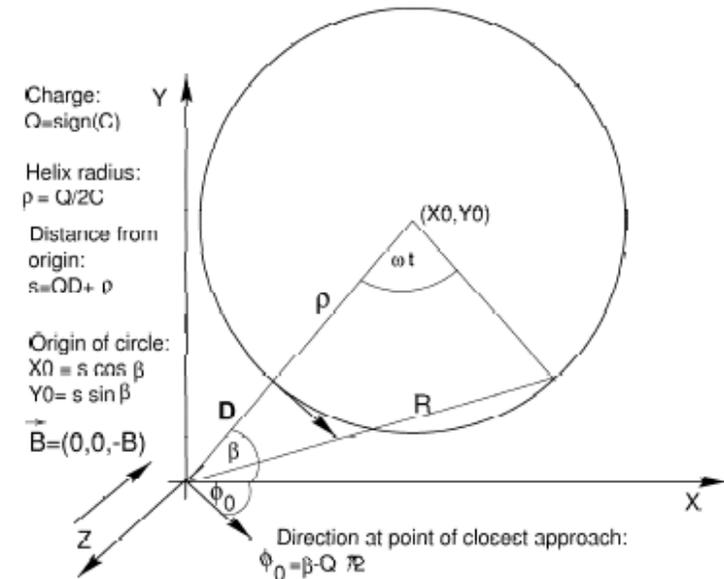
Due configurazioni diverse, diversi i problemi

Rivelatori di vertice:

↳ Utilizzati per ricostruire vertici generati da particelle con vita media dell'ordine dei picosecondi

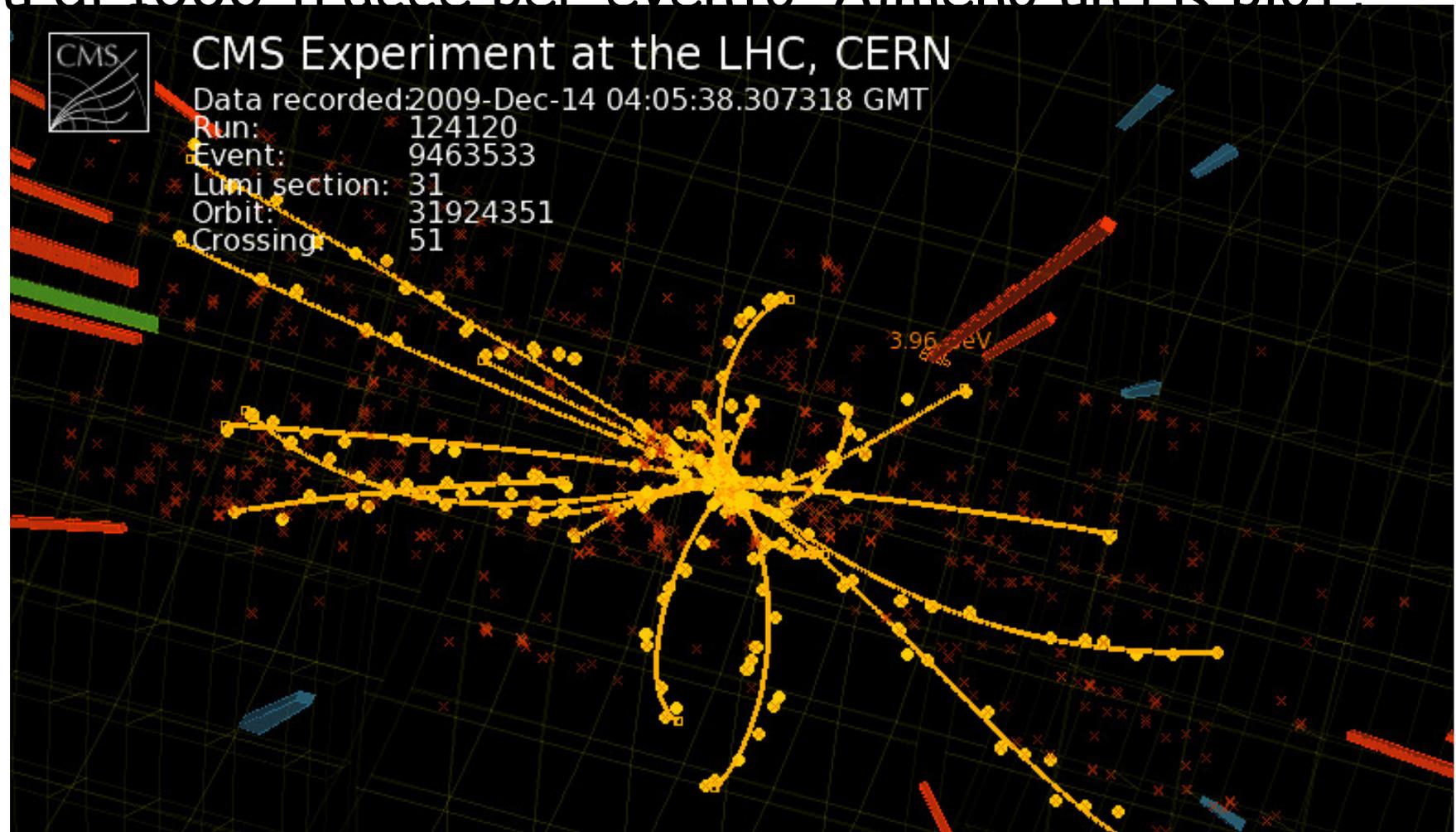
↳ Aggiungere pochi punti, estremamente precisi, a tracce i cui parametri sono misurati da un tracciatore diverso (spesso a gas)

↳ Importante minimizzare il Mult.scatt. e posizionare i rivelatori il più possibile vicini al punto di interazione



Cosa sono chiamati a risolvere?

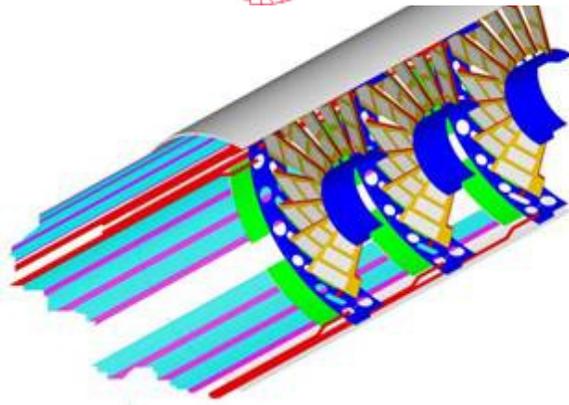
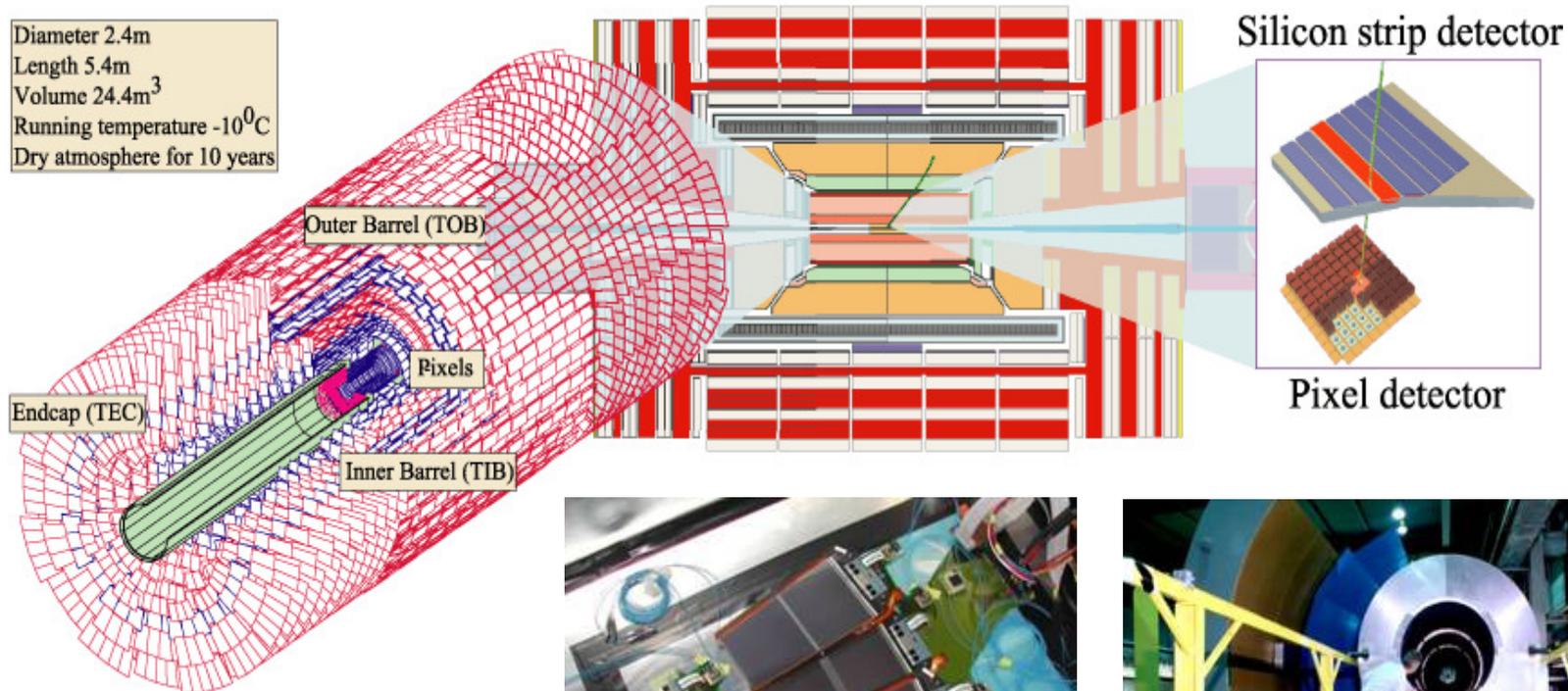
Più di 1000 tracce per evento. Almeno un PR plot?



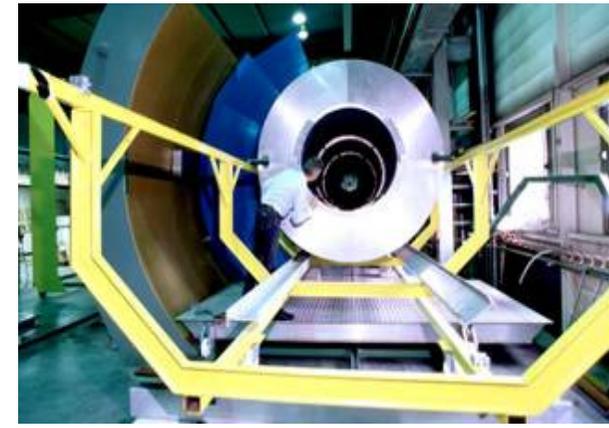
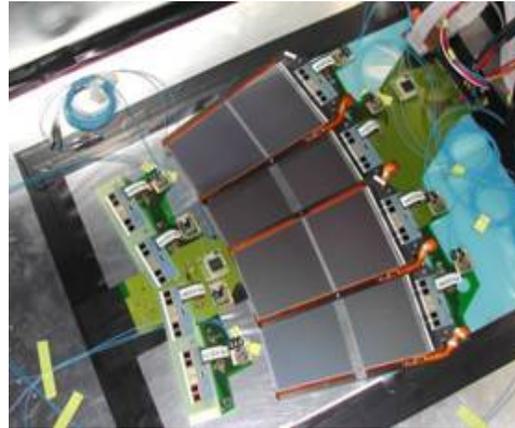
Make a "cut" on the transverse momentum of the tracks:
 $p_T > 2 \text{ GeV}$ (the only interesting to reconstruct)

Il tracker di CMS

Diameter 2.4m
Length 5.4m
Volume 24.4m³
Running temperature -10⁰C
Dry atmosphere for 10 years



Pixel endcap disks

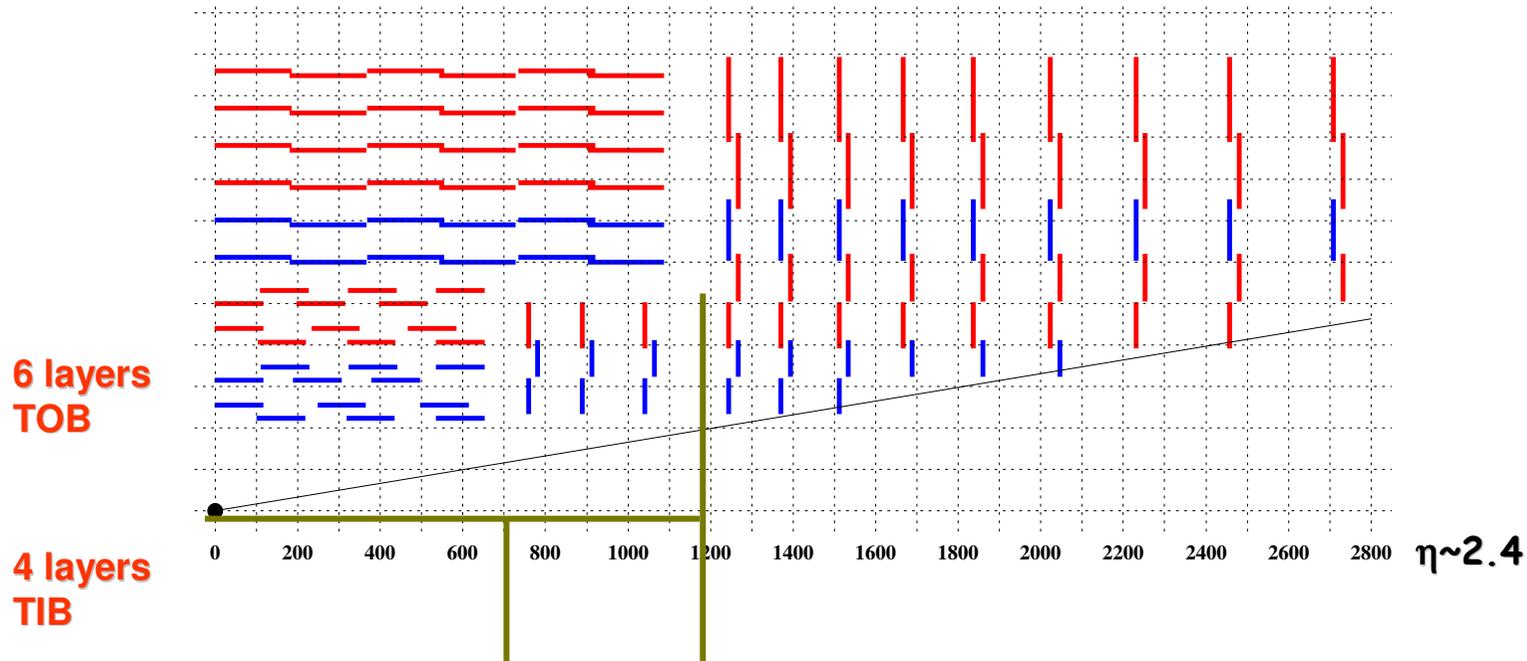


207m² sensori di silicio
10.6 milioni di strips di silicio
65.9 milioni di pixels nella configurazione finale

Segmentati nella parte longitudinale

8

Radius ~ 110cm, Length ~ 270cm



Silicio ad alta granularità
Rivelatori a Microstrip e Pixel

Ruolo: Vertexing e tracking

- ☛ In un sistema in cui il rivelatore di vertice partecipa alla tracciatura (CMS, CDF ad $|\eta| > 1$), bisogna avere un numero sufficiente di punti a garantire ridondanza e capacità di effettuare il pattern recognition:
 - ↳ Non c'è più un sistema indipendente che ricostruisce la traccia
 - ↳ Particolarmente delicato il material budget complessivo (conversioni di fotoni che generano coppie)
 - ↳ Delicato il danno da radiazione
 - ↳ noise genera hit spuri il cui combinatorio può annullare le capacità di pattern recognition
 - ↳ Cambiamento in efficienza di un singolo strato può incidere sull'efficienza di ricostruzione complessiva
- ☛ Ricordarsi sempre che una traccia è definita da 5 parametri

L'allineamento innanzitutto

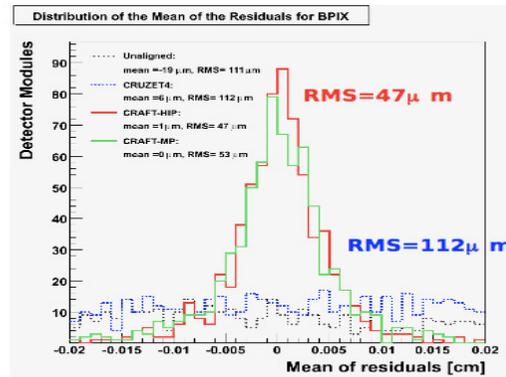
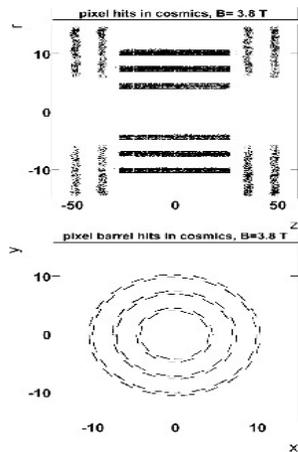
Il primo problema è allineare i rivelatori

↳ Localmente grande precisione nella misura di posizione

↳ Bisogna però sapere dove si è nello spazio!

Tracce (possibilmente isolate)

- Use 4M tracks for alignment and 1M for validation
- The second update on alignment constants delivered 1 day after CRAFT ended

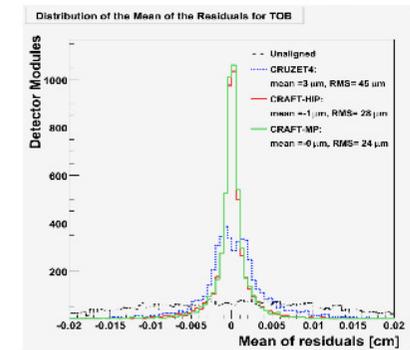
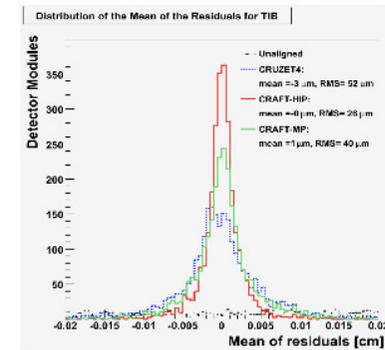


- ~75K tracks yielding 200-300 hits per module in Barrel
- Barrel aligned at module level and endcap at disk level

Mean of residual distributions (cm), sensitive to module displacements

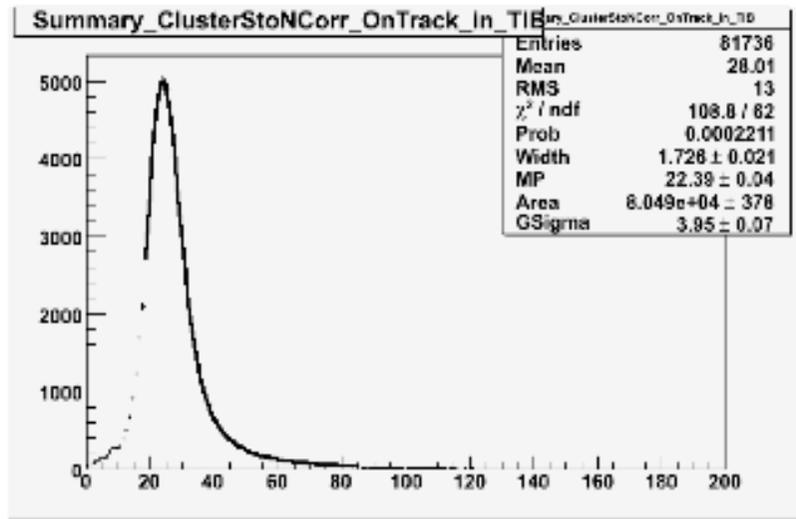
- Only modules with >30 hits considered
- Tracker Inner Barrel RMS = 26 μm

Tracker Outer Barrel RMS = 28 μm



Esempio: CMS, pixel e tracciatore

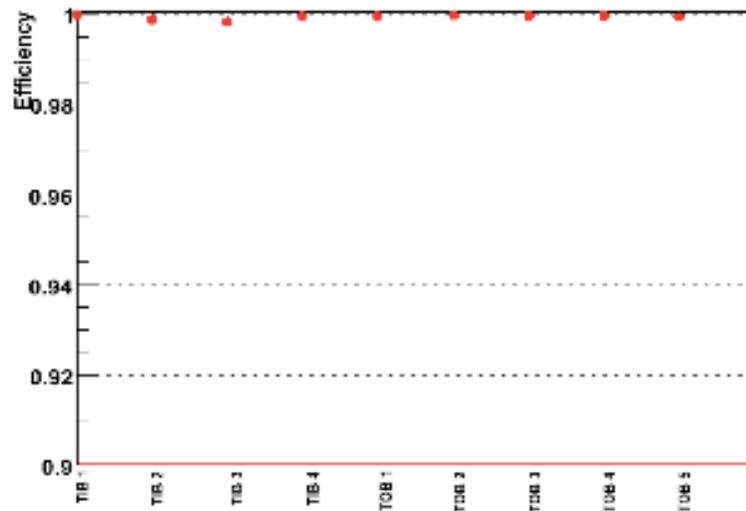
Efficienza



On track Strip clusters S/N ratio in peak mode of the read-out chip, corrected for the track angle

- TOB thick sensors : S/N = 32
- TIB/TID thin sensors : S/N = 27/25
- TEC (mixed thickness) : S/N = 30

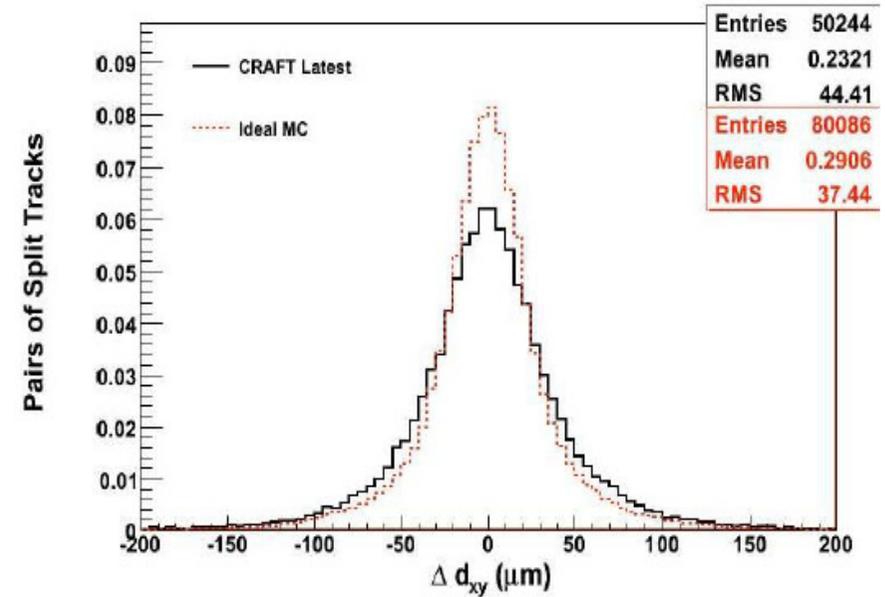
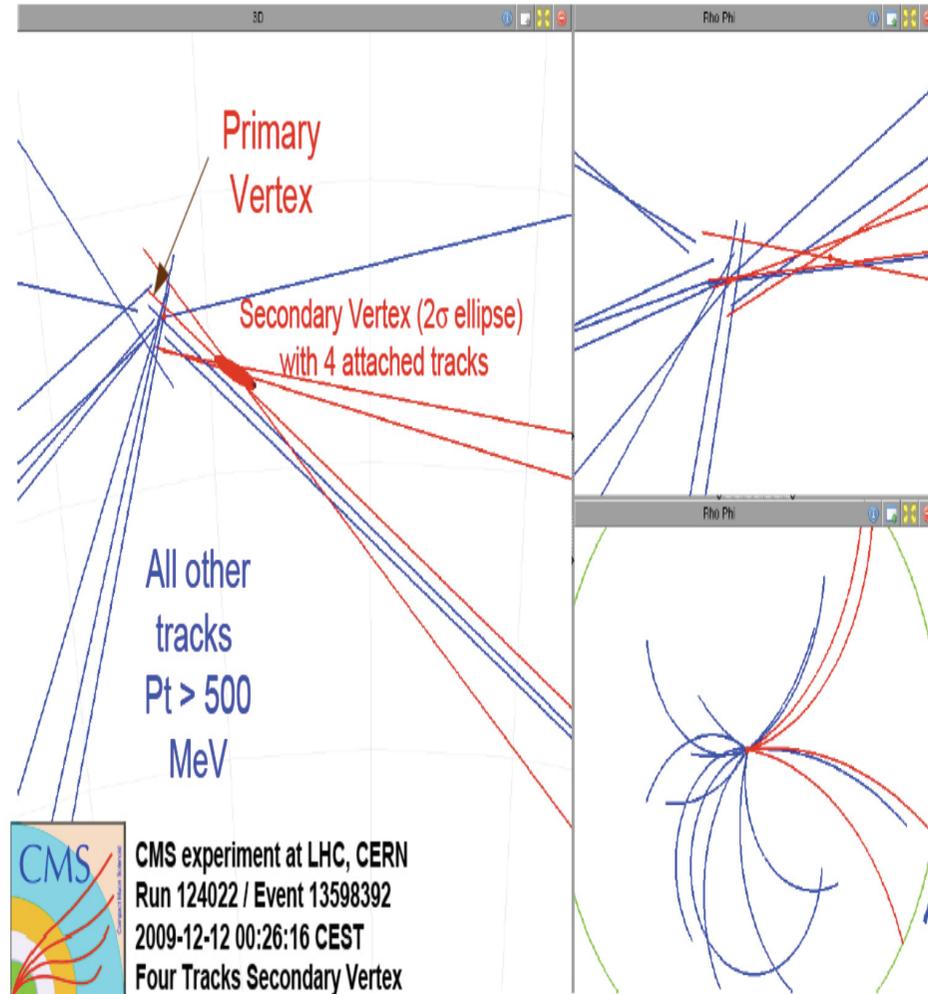
Hit Efficiency by Layer CRAFT Data Run 69902



Track hit finding efficiency of TIB and TOB layers, excluding modules not in operation



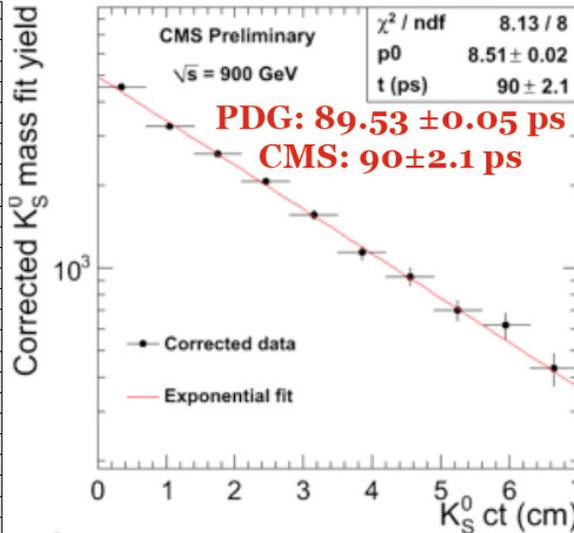
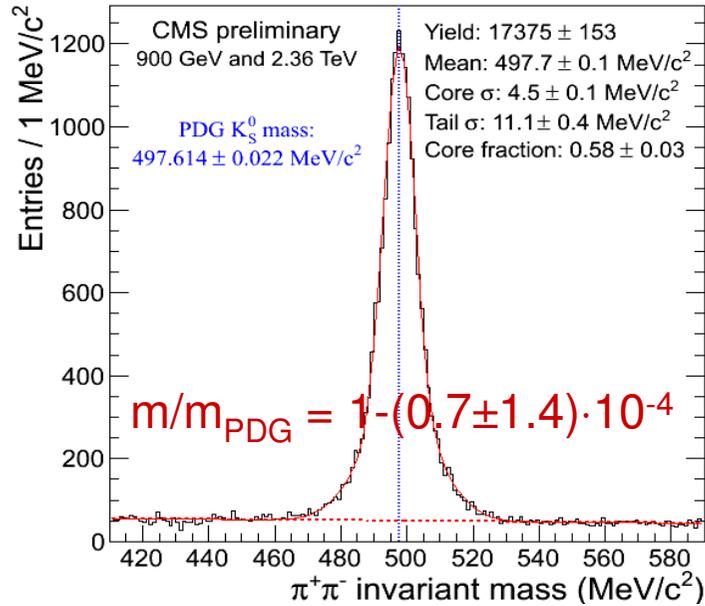
Funzionano!



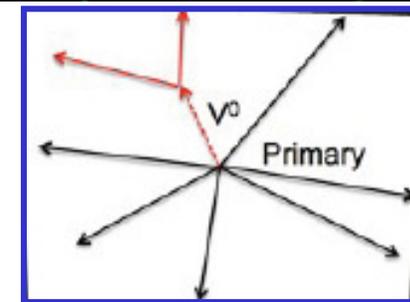
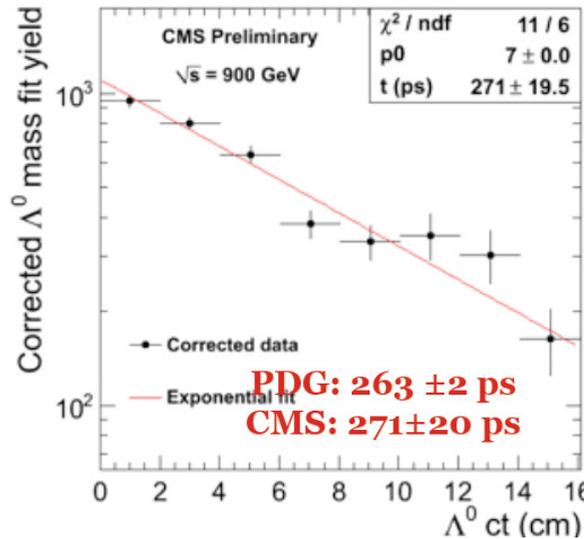
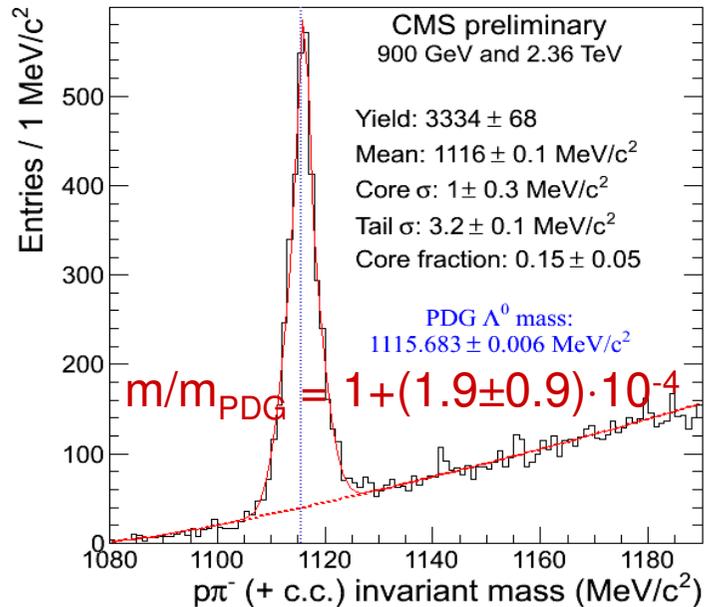
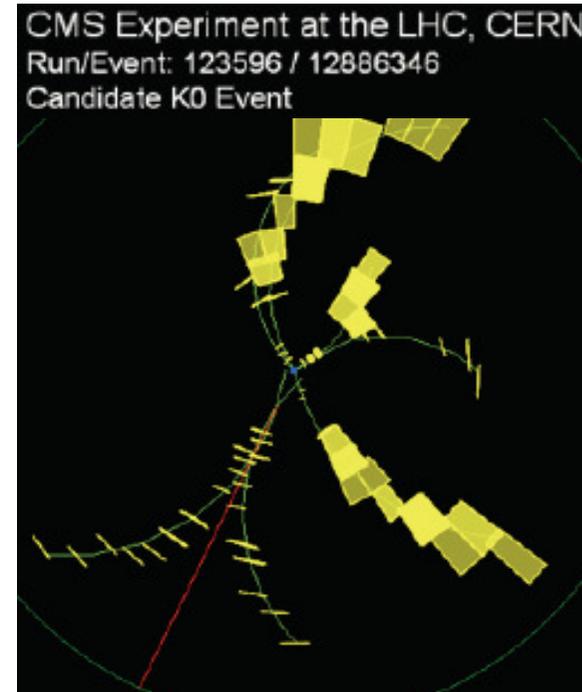
B-tagging algorithm found a secondary vertex made of 4 tracks

- 3D Decay length 2.6mm (significance 7.02), mass = 1.64 GeV

Tracciatore, LHC beam 2009-2010



Scala di momento corretta a 0.1%



**2 tracce alta qualità e carica opposta
Vertice V^0 15σ ($r\phi$) da VP**

Linee guida

☛ Vedremo che i rivelatori al silicio sono *intrinsecamente semplici*

↳ soddisfano alla richiesta di uno dei maggiori architetti del XX secolo (Mies van der Rohe):

↳ *less is more*

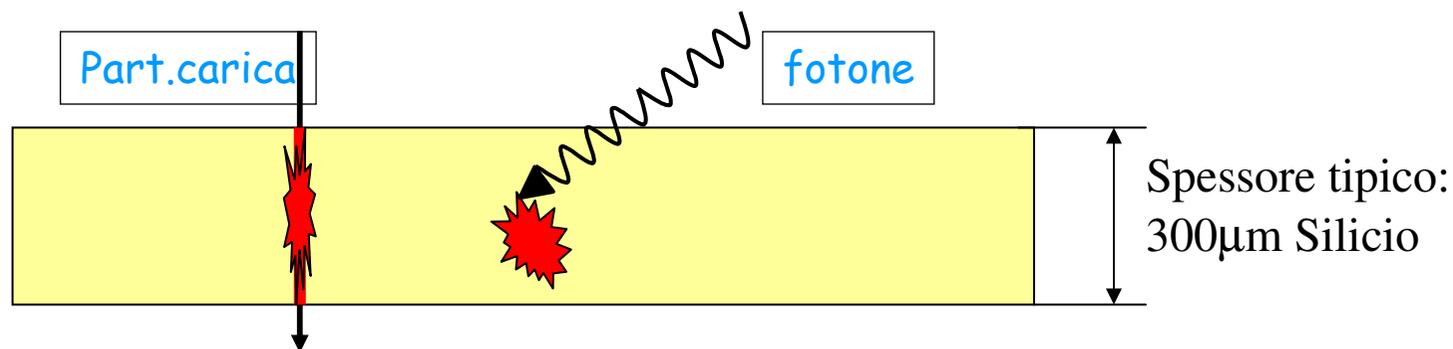
☛ Questa semplicità ha un'altra faccia: la larga diffusione di questi rivelatori implica la risoluzione di problemi tecnologici tutt'altro che banali ed una attenzione esasperata ai dettagli

↳ stesso architetto:

↳ *God is in the details*



RIVELATORI al SILICIO per FISICA delle ALTE ENERGIE



MOTIVAZIONI: Misurare posizione (centroide del luogo del rilascio di energia) e perdita di energia per particelle cariche e fotoni

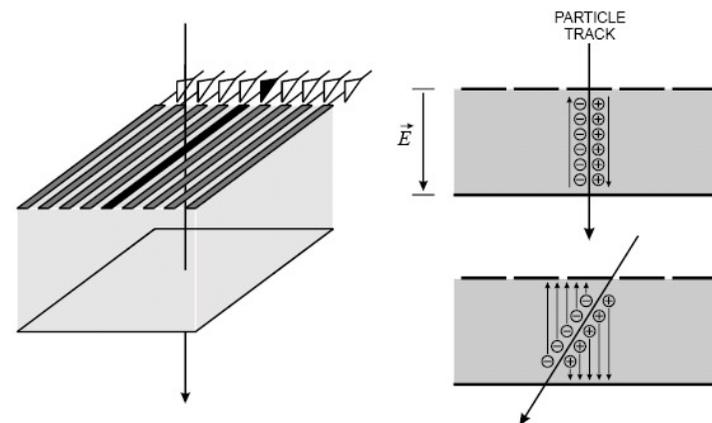
Vedremo:

i) il diodo a giunzione:

- principio di funzionamento ed effetti rilevanti
- elettronica
- misure dE/dx

ii) rivelatori a strip (e pixels)

- la segmentazione degli elettrodi
- misure di posizione



Le basi del funzionamento

- ☛ Come funziona
- ☛ Quali sono i problemi da tenere presenti per le nostre applicazioni

Passaggio di particelle cariche nella materia: perdita di energia per ionizzazione ¹⁸

$$\langle dE/dx \rangle = k \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2mc^2 \beta^2 \gamma^2 T_{Max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right)$$

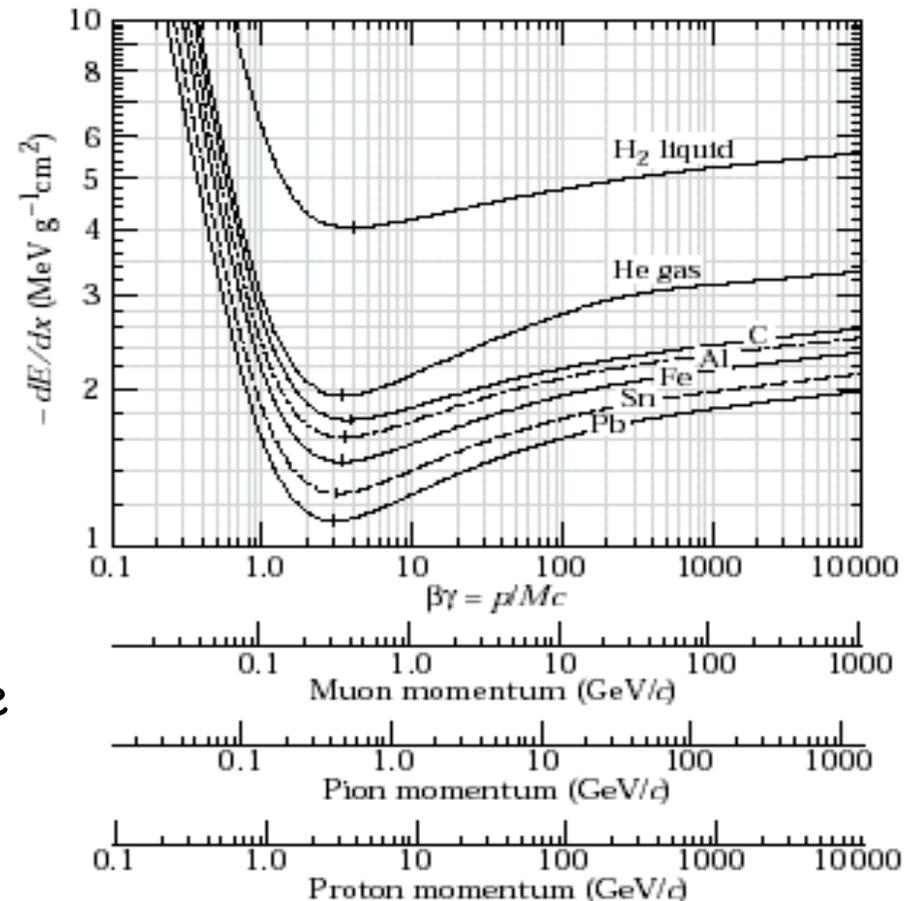
Perdita di energia per ionizzazione (interazione coulombiana fra la particella e gli elettroni atomici) data dalla formula di Bethe-Bloch

$K = 0.307 \text{ MeV/cm}^2$

I = energia media di eccitazione

δ = correzione di densita'

T_{max} = energia massima trasferibile all'elettrone



Passaggio di particelle cariche nella materia: tasso di ionizzazione

Il numero di cariche elettriche *generate* per unità di lunghezza è proporzionale alla perdita di energia. La costante di proporzionalità si dice "energia media di ionizzazione":

$$\frac{\# \text{cariche prodotte}}{\text{materiale attrav.}} = \frac{dE / dx}{\langle E_{\text{ionizz}} \rangle}$$

Nei semiconduttori le coppie prodotte sono elettroni-lacune.

Il valore di $\langle E_{\text{ionizz}} \rangle$ nel Silicio (il semiconduttore più comune): 3.6 eV

Una trattazione più rigorosa ha bisogno di prendere in considerazione effetti quantistici, e l'interazione tra i fotoni e gli elettroni

Silicon	Gas
3.6 eV/pair	10-30eV/pair
2.33g/cm ³	1.5 10 ⁻³ g/cm ³
<10 μm	≈100 μm
10 ⁵ pairs/mm	15 pairs/mm

La tabella a sx mostra la comparazione di alcuni parametri che differenziano il silicio dal gas e quindi i rivelatori al silicio da quelli a gas

Passaggio di particelle cariche nella materia: fluttuazioni della perdita di energia per ionizzazione

La perdita di energia per ionizzazione fluttua attorno al valor medio (dato da Bethe-Bloch) → distribuzione di Landau.

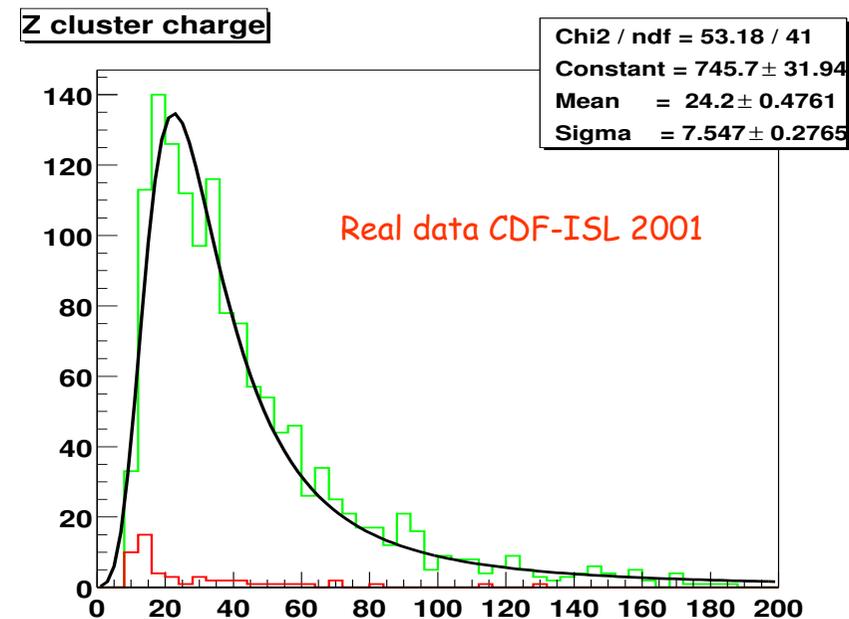
La distribuzione di Landau non è simmetrica attorno al valor medio, a causa degli elettroni energetici che si possono produrre.

È tuttavia approssimabile con una gaussiana per grossi spessori (nel silicio $\approx 100 \mu\text{m}$):

$$(dE/dx)\Delta x \gg T_{\text{max}}$$

Una possibile parametrizzazione della distribuzione di Landau è:

$$f(\Delta E) = \text{cost} \exp\left[-(\Delta E - m)/s - \exp(-(\Delta E - m)/s)\right]$$



Trattamento più dettagliato del rilascio di carica

La perdita di energia è un processo quantistico.

Buoni risultati si ottengono a partire dalla sezione d'urto di foto-assorbimento (utile sia per fotoni reali che per particelle cariche utilizzando il metodo dei fotoni virtuali).

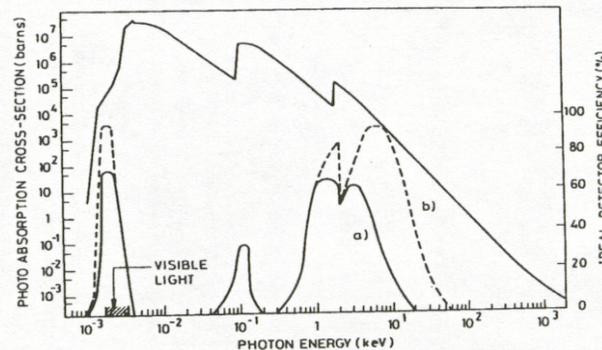


Figure 9 Experimental photoabsorption cross-section for silicon, indicating the energy ranges of use for the detection of real photons.

Un trattamento esatto e' necessario nel caso si considerino spessori molto sottili:

- *in media*, si ottengono ~ 80 coppie $e-h/\mu\text{m}$ di silicio
la statistica di Poission del processo *primario* è di appena 3.8 collisioni/ μm e quindi c'è una probabilita' del 2.2% che non ci sia rilascio di carica in $1 \mu\text{m}$.

Problematiche:

Delta rays e risoluzione spaziale

- ☛ C'è una probabilità non zero per un elettrone di essere espulso con un'energia cinetica sufficiente a lasciare un segnale *rilevante*.
 - ↳ cioè un segnale sufficiente a modificare la nostra misura
- ☛ Es. la probabilità per un π di alta energia, attraversando $100 \mu\text{m}$ di silicio, di estrarre un e^- di $E_{\text{cin}} > 10 \text{ KeV}$ è superiore al 10%. In un caso del genere il centroide di carica si sposta di $\sim 5 \mu\text{m}$.
 - ↳ Tipico spessore: $300 \mu\text{m}$ la probabilità di spostare il centroide è elevata
 - ↳ $P \approx 8\%$ di generare un δ ray tale che il centroide di carica si sposti di $5 \mu\text{m}$ per un rivelatore (incidenza normale) da $300 \mu\text{m}$. Precisioni tipiche di un rivelatore del genere sono facilmente inferiori ai $15 \mu\text{m}$

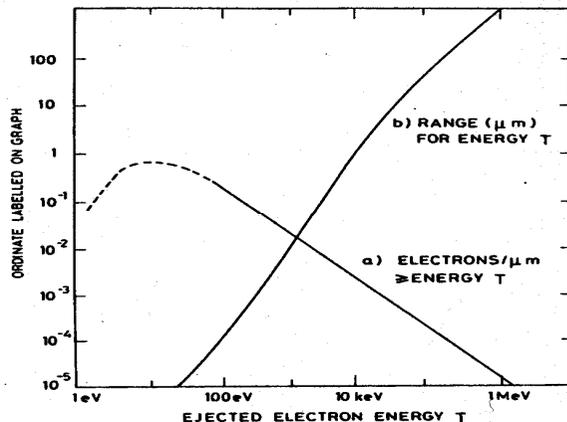


Figure 10 (a) The number of electrons ejected by a min-I particle per μm of path with energy $> T$.
(b) The range vs. T .

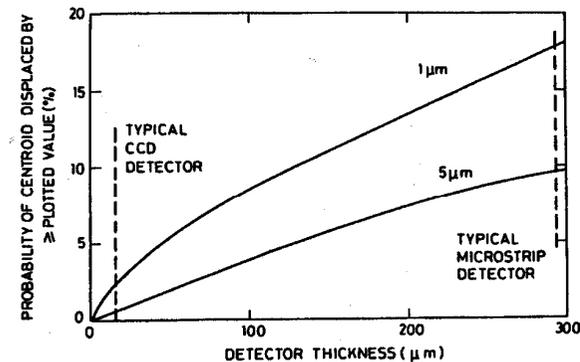
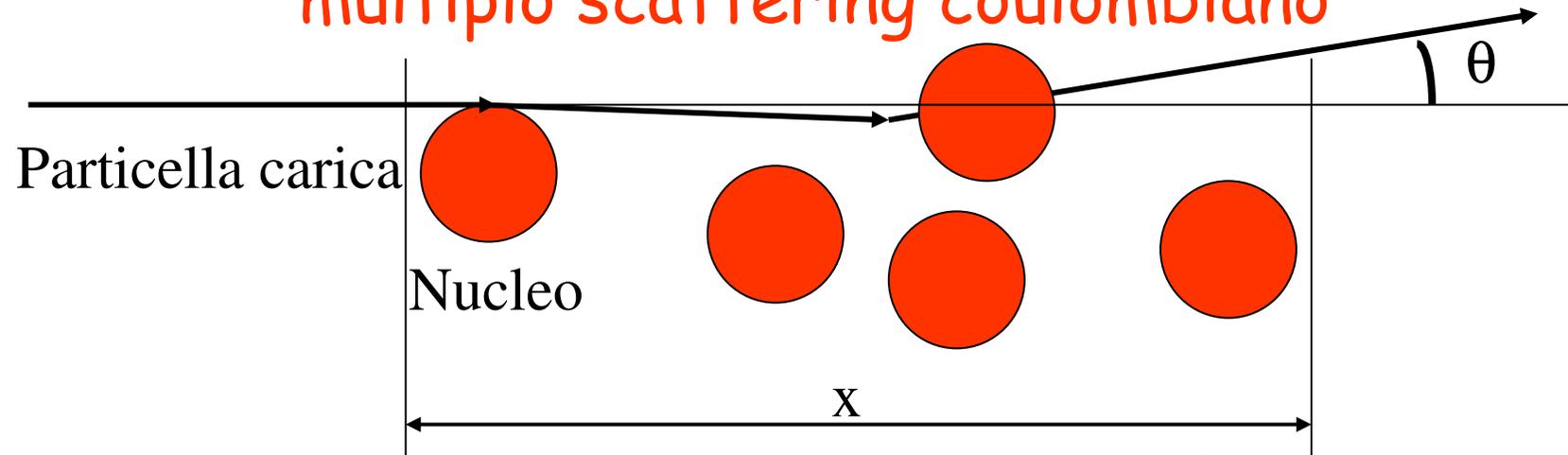


Figure 11 Detector precision limitations from δ -electrons for tracks at normal incidence as a function of detector thickness.

Problematiche: Passaggio di particelle cariche nella materia: multiplo scattering coulombiano



Secondo il trattamento di Molière. Per piccoli angoli (98% dei casi) la deflessione può essere parametrizzata da una gaussiana con rms:

$$\theta_0 = \theta_{\text{rms(piano)}} = \theta_{\text{rms(spazio)}} / \sqrt{2} \quad \theta_0 = \frac{13.6 \text{ MeV}}{\beta c P} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right]$$

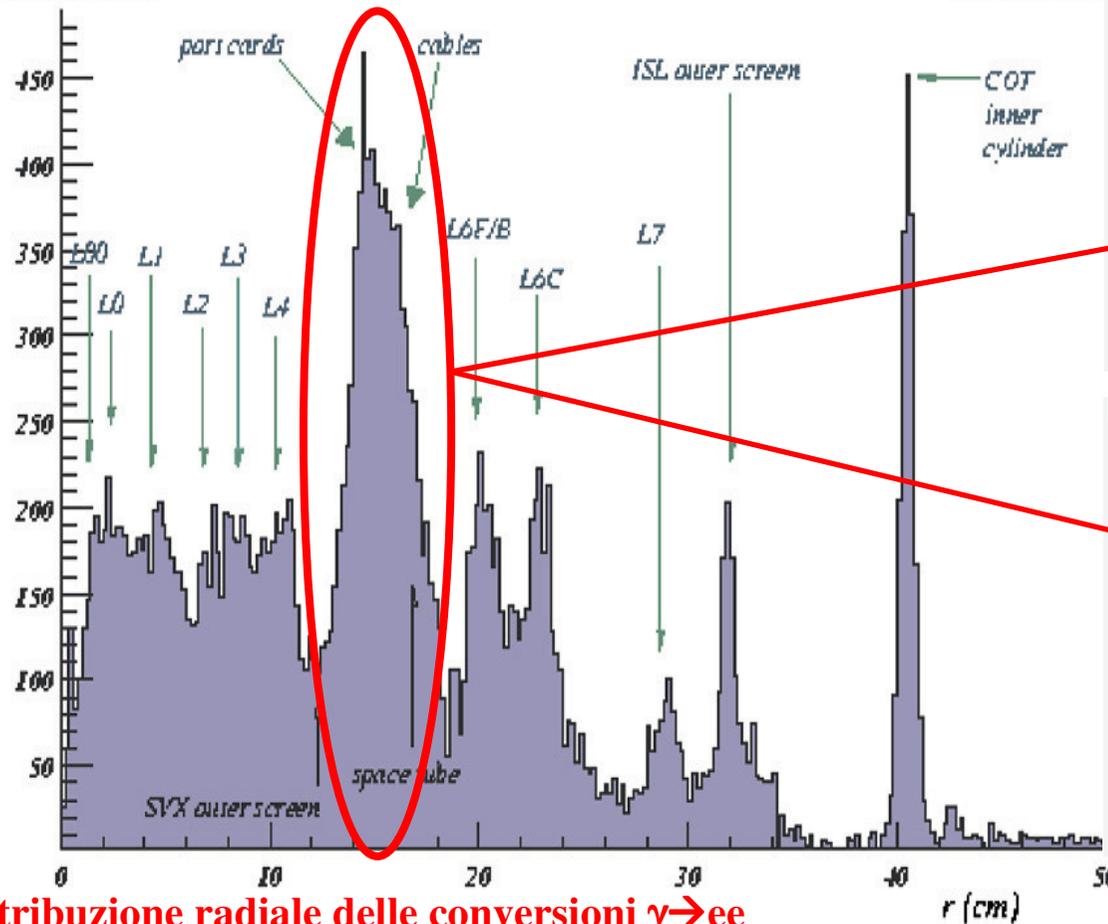
Tenete però sempre presente che questa è un'approssimazione. Grandi angoli di deflessione e code non gaussiane possono assumere un ruolo importante. Questo ha implicazioni in simulazioni, studi di risoluzione, etc.

Problematiche: Material budget: il silicio conta poco

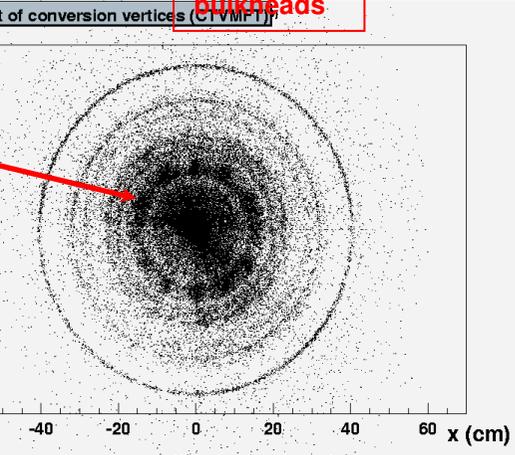
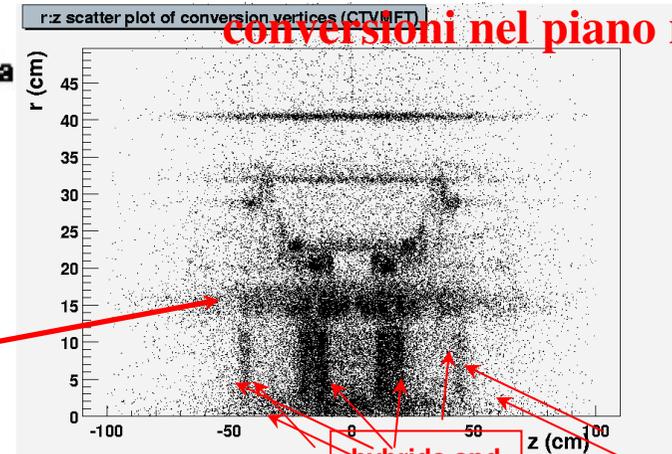
Distribuzione delle conversioni nel piano r-z

r (CTVMFT) after sideband subtraction

(zero binsupressed)



Distribuzione radiale delle conversioni $\gamma \rightarrow ee$

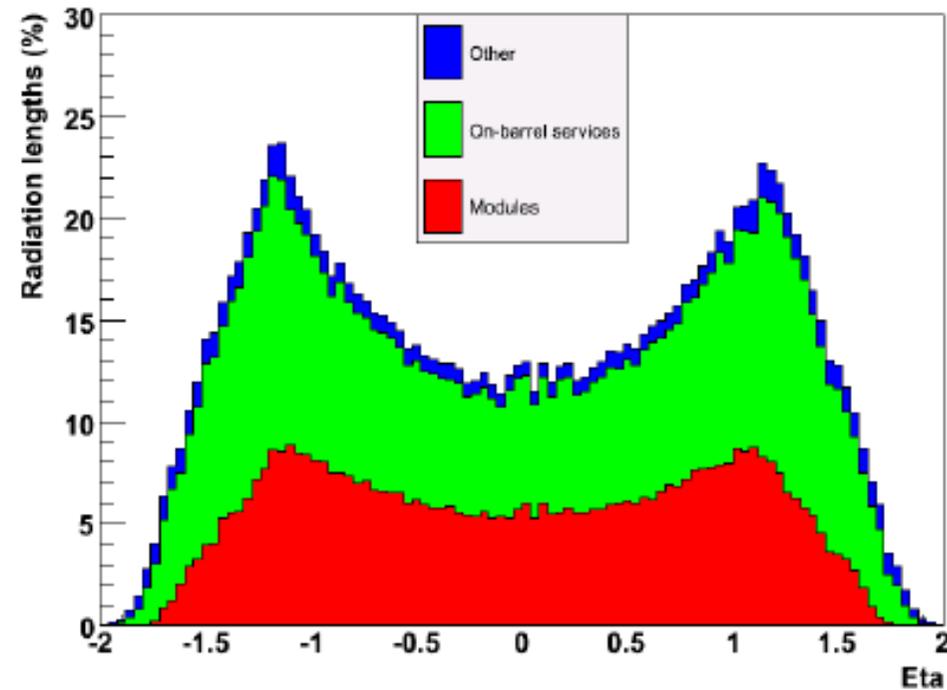


Distribuzione delle conversioni nel piano x-y

L'elettronica costituisce una fonte di *noise* per il patrec

Anche nei rivelatori più moderni

- ☛ Lunghezza di radiazione nel tracker di ATLAS:



(see <http://www.hep.phy.cam.ac.uk/~cpw1/atlas.html>)

Alcune letture

☛ Discussioni approfondite sulla perdita di energia nei materiali e nel silicio si trovano in:

↳ Ugo Fano, *Ann. Review Nucl. Science* 13,1 (1963)

↳ Hans Bichsel, *Rev. Modern Physics*, Vol. 60,N. 3 (1988)

↳ G. Fraser et al., *NIM A* 350 (1994), 368

↳ A. Owens et al., *NIM A* 382 (1996), 503

↳ P. Lechner, L. Struder, *NIM A* 354 (1995), 464

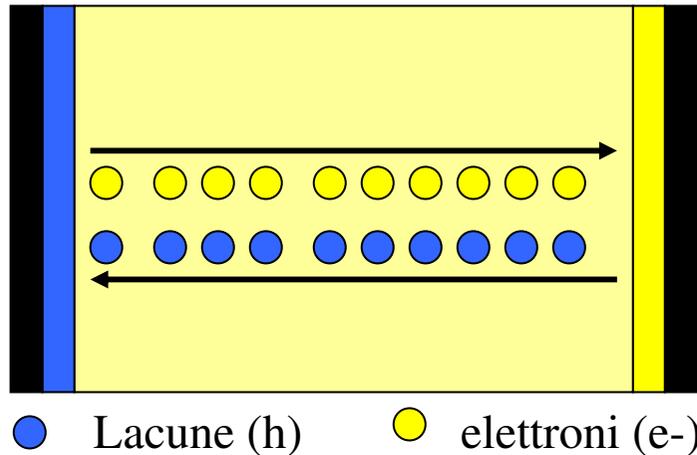
- Rivelatori a semiconduttore sono basati sulla seguente osservazione :
 - ↳ particelle cariche che passano nel silicio rilasciano energia che crea 80 coppie e-buca per μm (3.6 eV)
 - ↳ il contatto tra due semiconduttori di tipo p ed n genera una giunzione (e^- diffondono verso il lato p e le lacune viceversa). Si crea una regione svuotata da portatori di carica
 - ↳ si può raccogliere la carica creata nella regione dal rilascio di energia che avviene a causa dell'interazione di una particella con il silicio
 - ↳ si può allargare questa regione applicando un campo elettrico esterno
 - ↳ Ridotto all'essenza un rivelatore e' semplicemente un diodo
 - ↳ Il resto è "solo" elettronica, segmentazione ...dettagli

Ricordiamoci di van der Rohe

DAL SILICIO AL RIVELATORE: IL DIODO POLARIZZATO INVERSAMENTE

Date le proprietà ottimali del silicio, in termini di energia rilasciata, come si fa a rivelarla ?

Energia persa da 1 m.i.p. in Silicio: $290\text{eV}/\mu\text{m} \Rightarrow 80$ coppie e-h/ μm



corrente di pochi μA da confrontarsi con la corrente di diffusione. In un silicio intrinseco $n = p \cong 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

Se utilizziamo silicio drogato (es: n-type 10^{16} cm^{-3}) le cariche rimanenti sono portatori maggioritari.

Come ridurre la corrente (di *leakage*) da essi generata ?

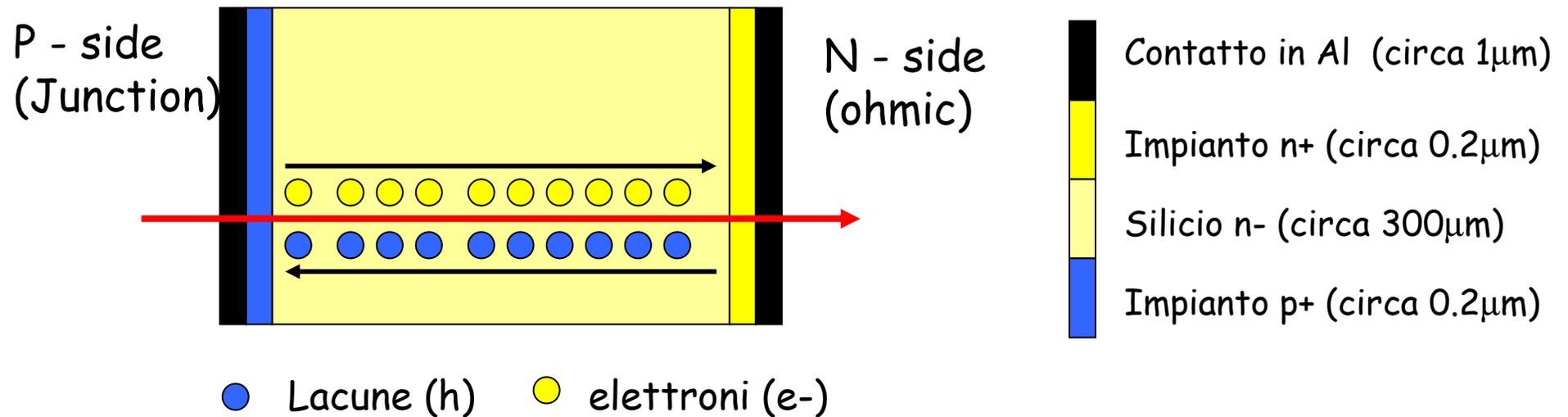
La corrente di *leakage* che passa in un diodo polarizzato inversamente è molto piccola e costituisce un livello costante, con fluttuazioni. Il rilascio di carica di una particella ionizzante che passa attraverso uno strato di silicio può essere rivelato.

Dal silicio non drogato ai rivelatori

- ☛ Le proprietà del silicio erano ben note ed utilizzate da tempo in fisica nucleare. La svolta si ebbe alla fine degli anni '70 quando la scoperta di particelle a vita media lunga (*c* e poi *b*) avviò una vera e propria rivoluzione. Furono sviluppati diodi (come rivelatori) utilizzando sia la giunzione Schottky (metallo-semiconduttore) (Heijne, NIM 1980), sia la giunzione p-n.
 - ↳ La seconda strada (giunzione p-n) conobbe rapidamente il successo, grazie soprattutto al lavoro di Kemmer (NIM 169, 499, 1980) che riuscì a passivare una superficie ampia grazie ad uno strato di SiO_2 . Divenne realistico applicare ai rivelatori tecniche sviluppate per IC (*planar technique*). Vedi:
 - ↳ Bosisio NIM 176,457 (1980); Weilhammer NIM 185,43 (1981); Lutz Batavia 1981.

- ☛ Tipicamente i rivelatori sono costruiti utilizzando silicio di tipo n, per motivi legati alla facilità di fabbricazione
 - ↳ Nel trattamento (semplificato) assumeremo che -all'interfaccia p-n- la densità di cariche nel silicio faccia un salto: da $\rho = -qN_D$ a $\rho = +qN_A$. L'interfaccia è nota come "zona svuotata". Inoltre assumeremo che, in presenza di campo elettrico, nella zona svuotata siano presenti solo cariche dovute al drogante

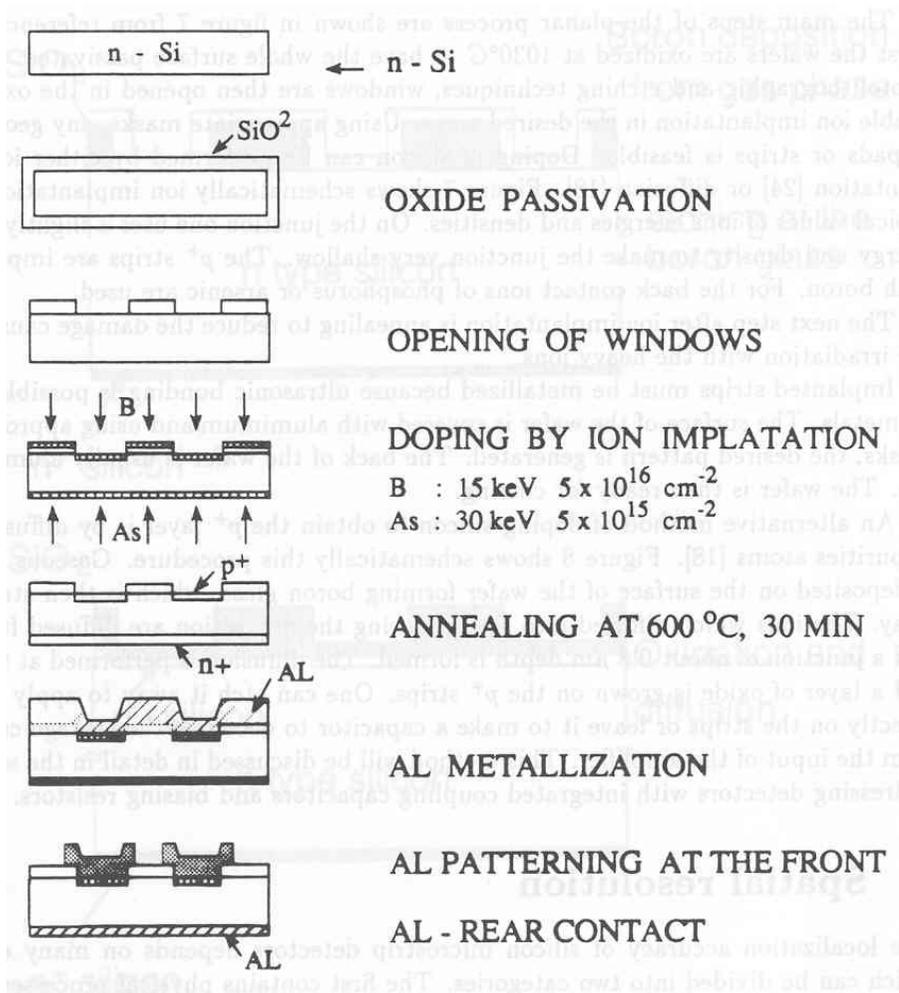
PRINCIPIO di FUNZIONAMENTO:
DIODO p⁺n⁻n⁺
 POLARIZZATO INVERSAMENTE



Drogaggi e valori tipici:

- p+ (eg: Boro) $N_A^+ \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$, profilo tipico gaussiano
- n+ (eg: Fosforo) $N_D^+ \sim 10^{19} \text{cm}^{-3}$, profilo tipico gaussiano
- n- (eg: Fosforo) $N_D \sim (2-15)10^{11} \text{cm}^{-3}$, profilo circa uniforme

Come si costruisce un rivelatore...



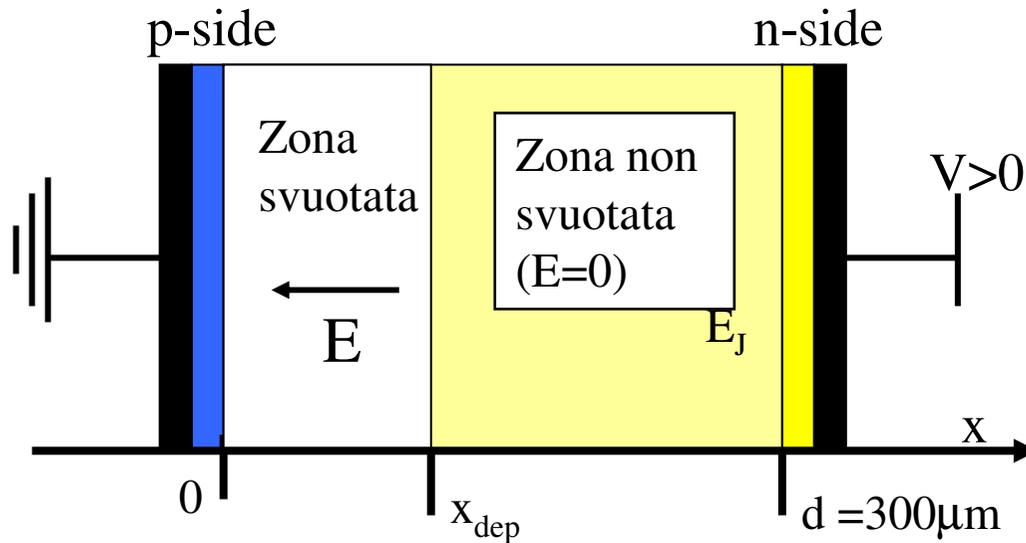
☛ Dal silicio drogato al rivelatore:
(Kemmer 1981):

- ↳ si ricopre il silicio di ossido
- ↳ si aprono delle finestre nell'ossido con tecniche di etching
- ↳ per impiantazione ionica si crea la giunzione (silicio di tipo p a contatto con silicio n)
- ↳ *annealing*
 - ↳ qui cambiamento...oggi
- ↳ metallizzazione degli impianti
- ↳ creazione del pattern dal lato giunzione e dei contatti dal lato ohmico

☛ nella sua struttura basilare la procedura non è cambiata

RIVELATORI di SILICIO

CAMPO ELETTRICO ALL'INTERNO di UN DIODO - 1



$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 = 11.7 \times 8.85 \text{ pF/m}$$

$$\epsilon = 1.03 \text{ pF/cm}$$

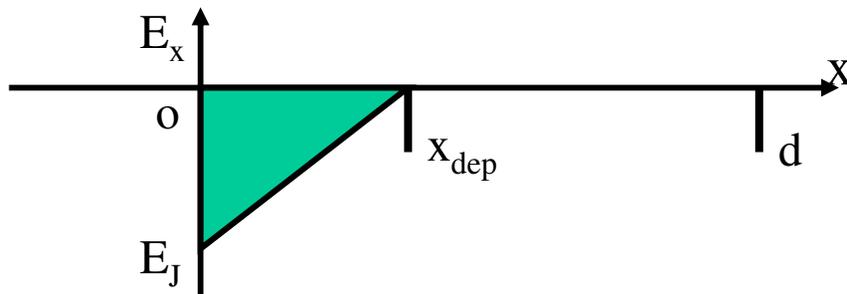
$$\begin{aligned} dE_x/dx &= \\ &= \rho/\epsilon \text{ (zona svuotata)} = qN_D/\epsilon \\ &= 0 \text{ (zona non svuotata)} \end{aligned}$$

3 situazioni:

(a) $x_{\text{dep}} < d$

(b) $x_{\text{dep}} = d$

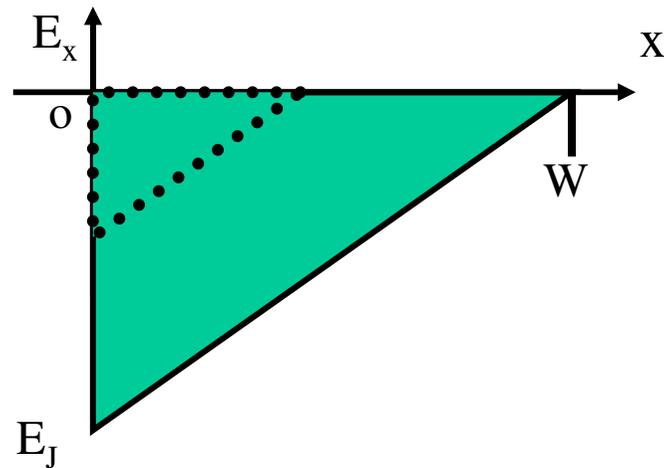
(c) $x_{\text{dep}} > d$



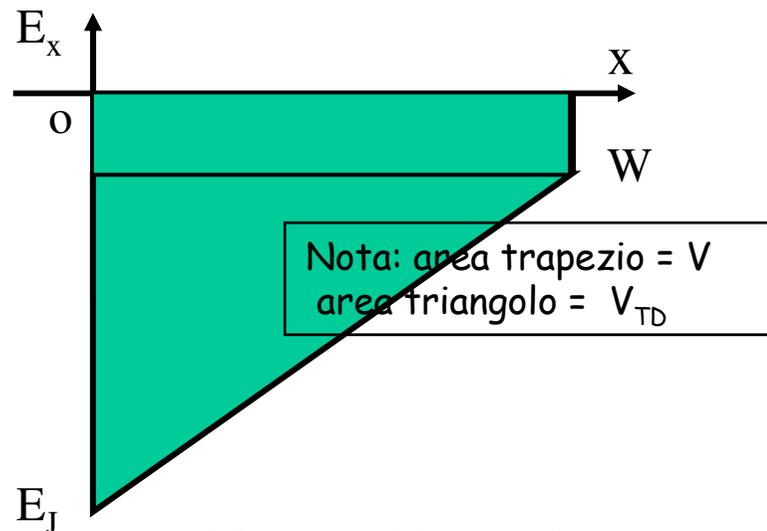
Prima situazione: $x_{\text{dep}} < d$
 $E_x = 0$ nella zona non svuotata ($x > x_{\text{dep}}$).
 Per $x < x_{\text{dep}}$ si ha: $E_x = -E_J + qN_D x / \epsilon$
 con $x_{\text{dep}} = (2\epsilon V / qN_D)^{1/2}$
 e con $E_J = 2V / x_{\text{dep}} = (2qN_D V / \epsilon)^{1/2}$

RIVELATORI di SILICIO

CAMPO ELETTRICO ALL'INTERNO di UN DIODO - 2



Seconda situazione: $x_{dep} = W$
 (svuotamento totale)
 Si ha: $E_x = -E_J + qN_D x / \epsilon$
 con $W = (2\epsilon V / qN_D)^{1/2}$ che è vera per
 $V = V_{TD} = qN_D W^2 / 2\epsilon \rightarrow E_J = 2V_{TD} / W$
 Caso numerico: per $N_D = 5 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$
 si ha $V_{TD} = 35\text{V}$ ed $E_J = 2.3\text{KV/cm}$



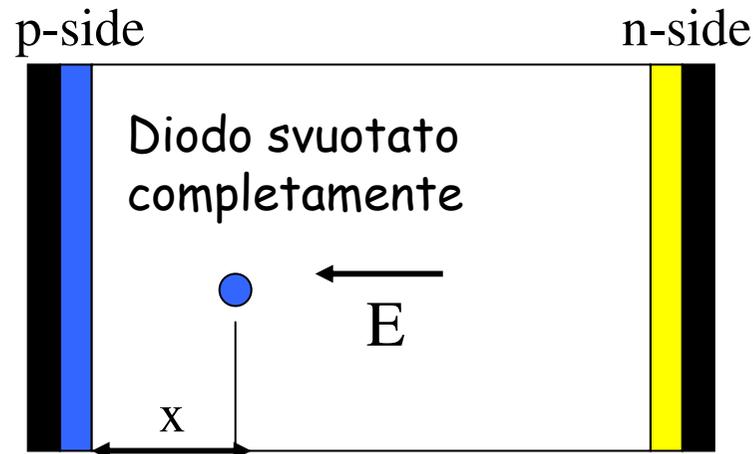
Nota: area trapezio = V
 area triangolo = V_{TD}

Terza situazione: per $V > V_{TD}$
 Si ha (come sopra): $E_x = -E_J + qN_D x / \epsilon$
 con V_{TD} definito sopra, mentre:
 $E_J = (V + V_{TD}) / W$
 2 casi numerici:
 • $V_{TD} = 35\text{V}, V = 45\text{V} \rightarrow E_J = 2.7\text{KV/cm}$
 • $V_{TD} = 100\text{V}, V = 300\text{V} \rightarrow E_J = 13.3\text{KV/cm}$

$$C \equiv \frac{dQ}{dV} = \frac{d(qN_D W)}{d[(qN_D / 2\epsilon)W^2]} = \frac{\epsilon}{W}$$

Nota: per $V \gg V_{TD}$ $|E_x| \sim V/W$

RIVELATORI al SILICIO TEMPI DI SVILUPPO DEL SEGNALE



$$|E| = (V + V_{TD})/W - 2 \times V_{TD} / W^2$$

Per campi elettrici sotto il limite di saturazione (dell'ordine di 10KV/cm) la mobilità è costante:

$$\mu_e = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs} \quad \mu_h = 450 \text{ cm}^2/\text{Vs} \quad @T=300\text{K}$$

Il tempo t impiegato dalla carica a raggiungere l'elettrodo è:

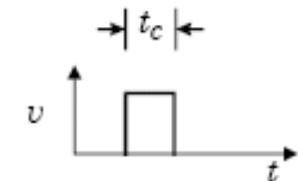
$$t = \int dt = \int dx / v = \int_0^W \frac{dx}{\mu E} = \frac{W^2}{2\mu V_{TD}} \ln\left(\frac{V + V_{TD}}{V - V_{TD}}\right)$$

2 casi numerici:

- $V_{TD} = 40\text{V}, V = 60\text{V} \rightarrow t_h = 16 \text{ ns}, t_e = 5 \text{ ns}$
- $V_{TD} = 100\text{V}, V = 200\text{V} \rightarrow t_h = 9. \text{ ns}, t_e = 3. \text{ ns}$

per $V \gg V_{TD} \quad t = W^2 / \mu V$

VELOCITY OF
CHARGE CARRIERS



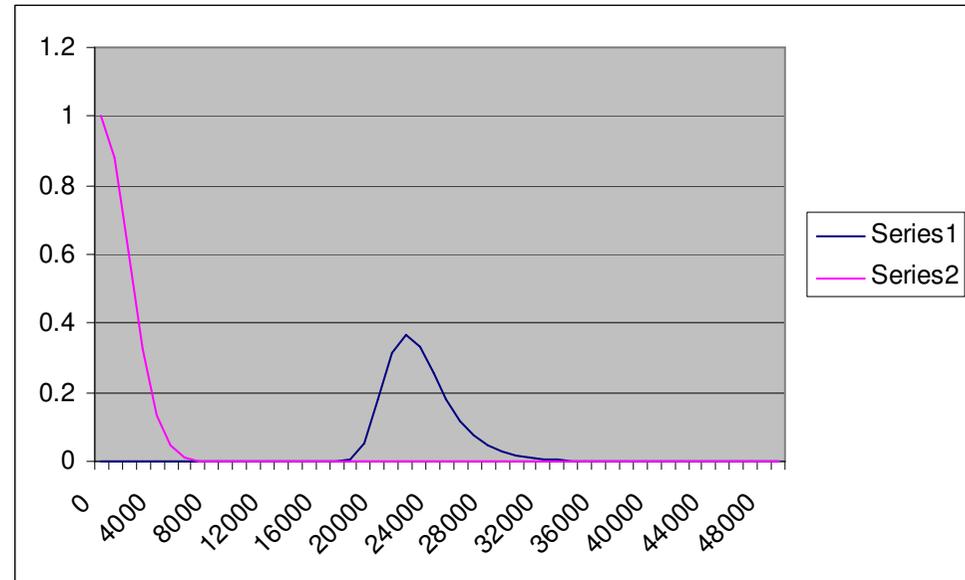
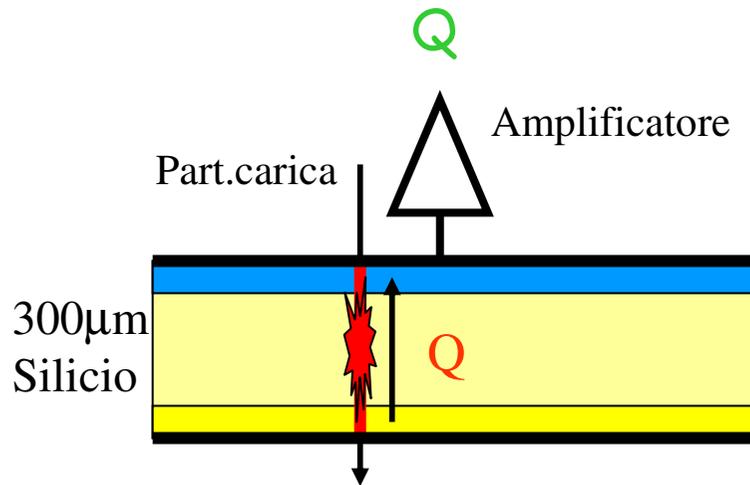
RATE OF INDUCED
CHARGE ON SENSOR
ELECTRODES



SIGNAL CHARGE



RIVELATORI al SILICIO MISURA del RILASCIO di Energia



Carica generata dal rilascio di energia : $Q = Q_0 + \delta Q_{Land}$ con $Q_0 \sim 24,000 e^-$ e $\delta Q_{Landau} \sim 2,000 e^-$ Parametro importante è la corrente di leakage.

Per referenza futura vediamo l'andamento con la temperatura:

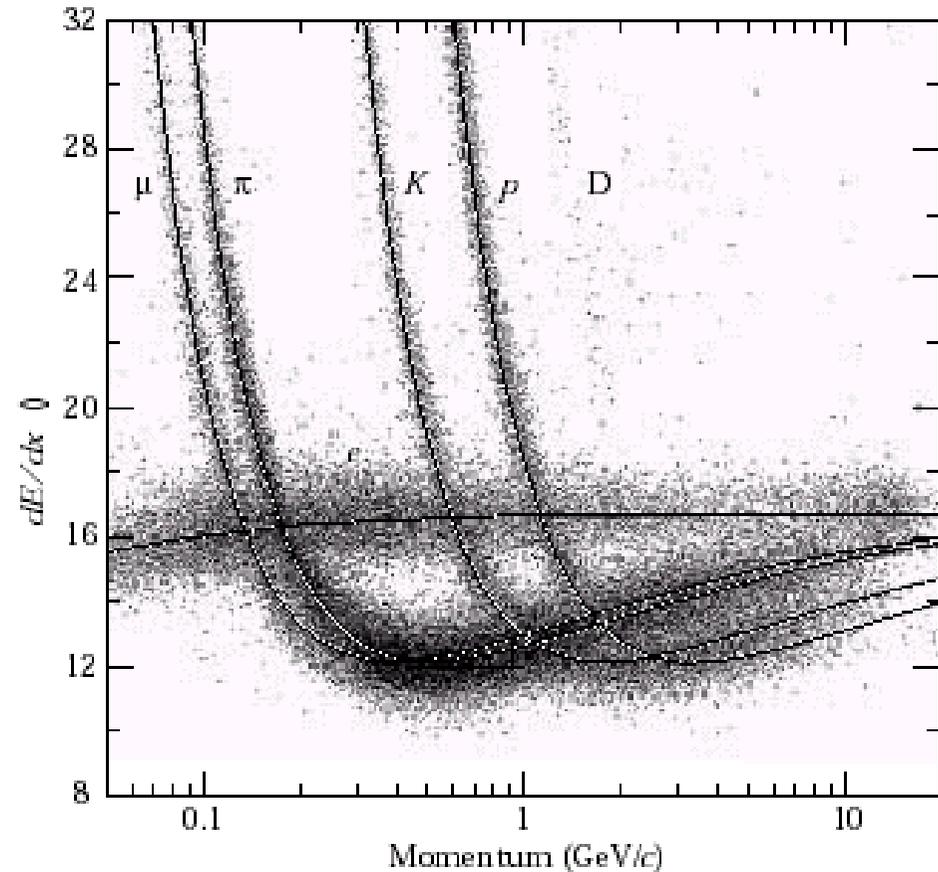
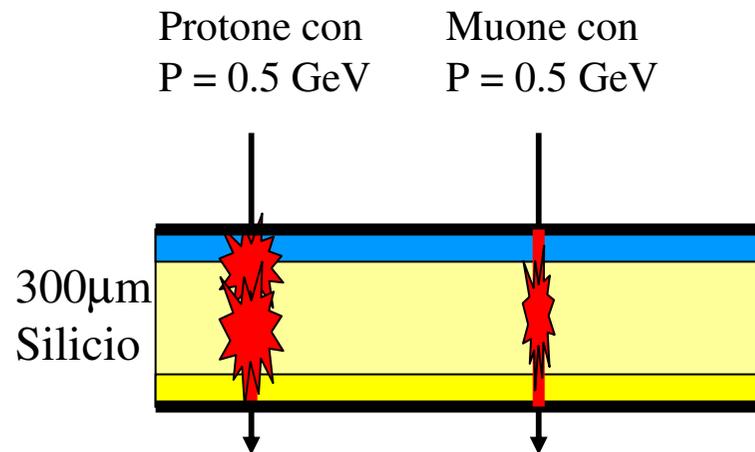
$$I(T) = K T^2 \cdot \exp(-E_g / (2 \cdot k_B \cdot T))$$

Carica misurata: $Q = Q_0 + \delta Q_{Land} + \delta Q_{noise}$ con δQ_{noise} fluttuazione dovuta al rumore (shot noise, termico nei resistori, e nell'amplificatore)

Noise tipico (in ENC) 400-2,000 e^-

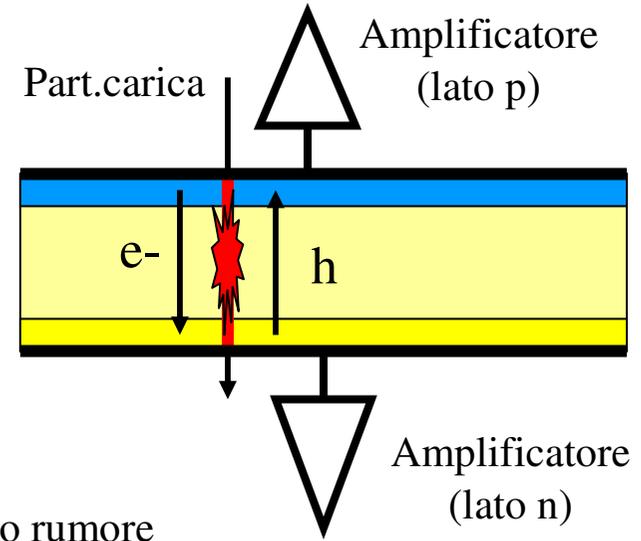
RIVELATORI di SILICIO MISURA del RILASCIO di ENERGIA

Per particelle cariche si può ricostruire la perdita di energia e determinare il tipo di particella, se è noto il suo impulso.
 → Utilizzo come rivelatori di dE/dx



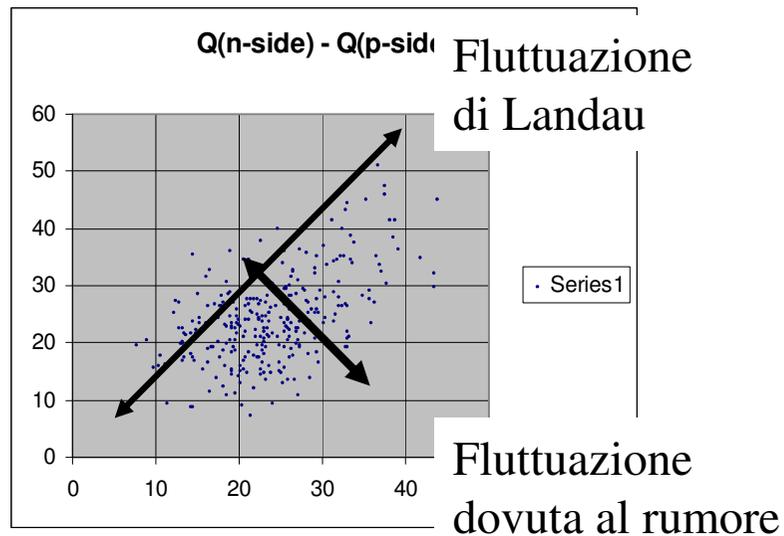
MISURA della CARICA su ENTRAMBI i LATI

E' possibile misurare la carica raccolta su entrambi i lati del rivelatore



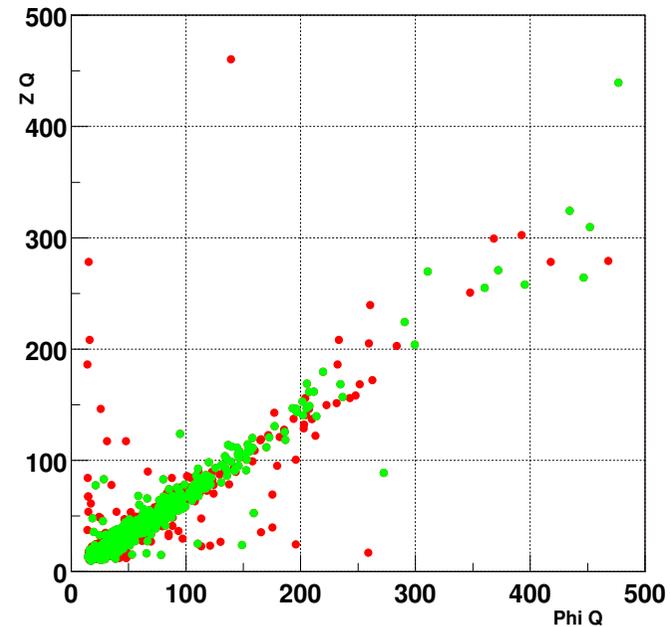
Alto rumore

Dati simulati

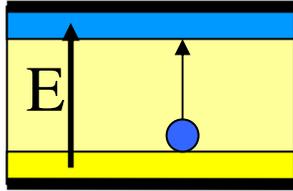


Basso rumore

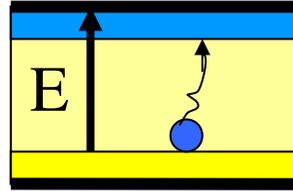
Real data -CDF-ISL 2001



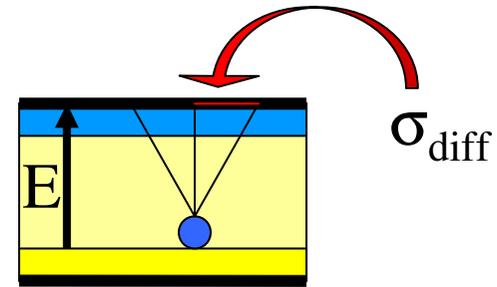
RIVELATORI al SILICIO: EFFETTI della DIFFUSIONE



Senza la diffusione,
le cariche seguono le
linee di forza di E



Con la diffusione,
le cariche non seguono
le linee di forza di E



Con la diffusione, una carica che impiega
un tempo t per raggiungere l'elettrodo
avrà una fluttuazione sulla posizione con
rms σ_{diff}

$$\sigma_{diff}^2 = 2 Dt$$

$$D_e = 34.6 \text{ cm}^2/\text{s}$$

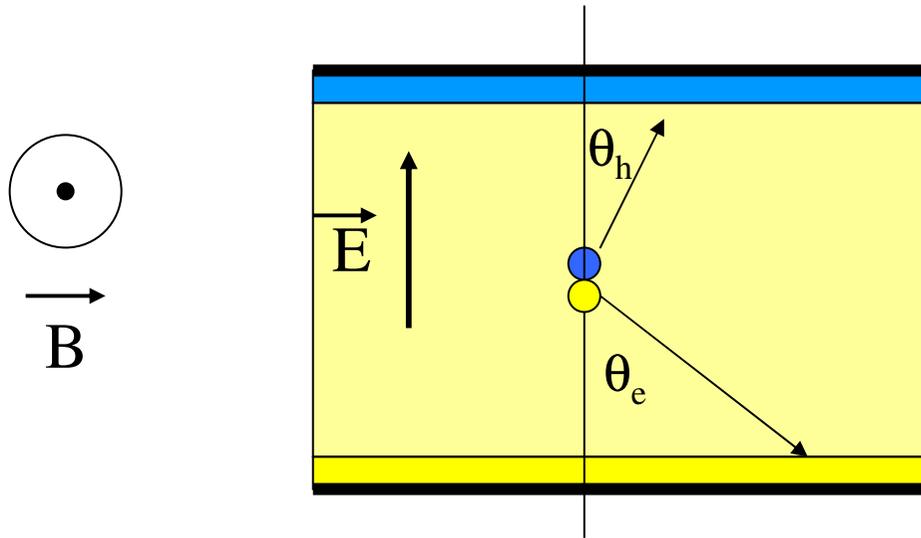
$$D = (kT/q)\mu \quad (\text{coefficiente di diffusione nel modello di Einstein})$$

$$D_h = 12.3 \text{ cm}^2/\text{s} \quad (\text{a temp. ambiente})$$

Esempio: $V=100V \gg V_{TD}$ $W=300\mu\text{m}$ $\rightarrow \sigma_{diff} = (2Dt)^{1/2} = W(2kT/qV)^{1/2} = 6\mu\text{m}$,
non dipende dalla natura della carica (elettroni o lacune)!

per $V \gg V_{TD}$ $t = W^2 / \mu V$... pagina 29

RIVELATORI al SILICIO: EFFETTI del CAMPO MAGNETICO



generalmente è un effetto non trascurabile in applicazioni in cui si misura la posizione spaziale!

Esempio: drift di e^- ,
 $d=300\mu\text{m}$, $B=1.5\text{T}$
 $\rightarrow d \tan\theta = 66\mu\text{m}$

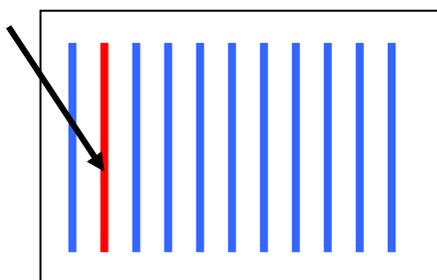
Il campo magnetico (qui ipotizzato perpendicolare al campo elettrico interno al rivelatore) inclina la direzione del moto delle cariche di in un angolo θ : $\tan\theta = \mu B$

- l'effetto può rivelarsi critico se $\mu B \sim 1$
- può essere compensato inclinando il rivelatore
- si noti che $\mu_e=1350\text{cm}^2/\text{Vs} = 0.135\text{T}^{-1}$, $\mu_h=0.045\text{T}^{-1}$
- CMS ha un campo magnetico da 4 T e spessori di 500 μm

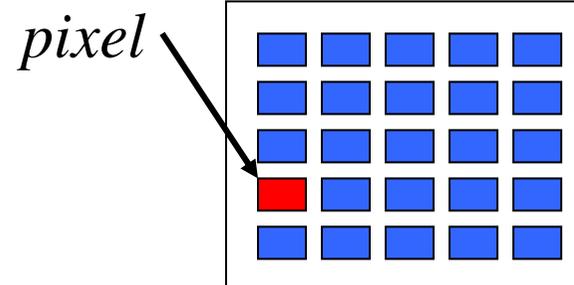
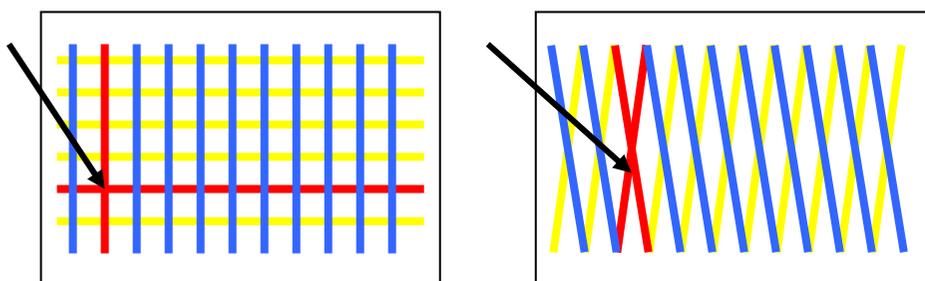
Come misurare la posizione?

SEGMENTAZIONI degli ELETTRODI

Strip single-sided:
misura 1 coordinata



Strip double-sided (ortogonali o stereo):
misura 2 coordinate



Misurano 2 coordinate:

- **Pixel** (veloci)

Elevato numero di canali
difficoltà di readout

- **CCD** (Charge Couple Devices)
lenti ma senza grossi problemi
di readout

Esistono anche sensori noti
come *silicon drift chamber*

in questo caso si usufruisce anche di una correlazione di carica tra i due lati. Si può usare per risolvere le ambiguità.

Rivelatori a microstrip-I

☛ Dato un diodo con una superficie sufficiente

↳ si può dividere una delle facce in elettrodi tra loro separati

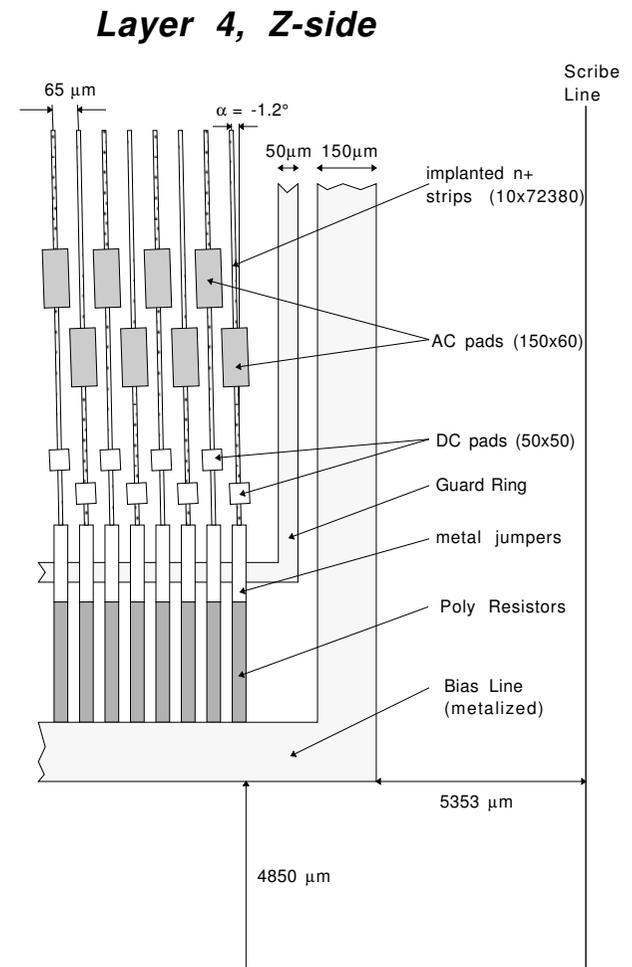
↳ di fatto ciascuno è un **diodo** separato

↳ nella maniera più semplice i rivelatori a singola faccia sono composti da un bulk (n type) sul quale sono stati impiantati elettrodi p type (p+) (per creare la giunzione).

↳ Ciascuno di questi deve agire come un elettrodo completamente separato quindi

↳ bias applicato individualmente

↳ lettura del segnale fatta individualmente



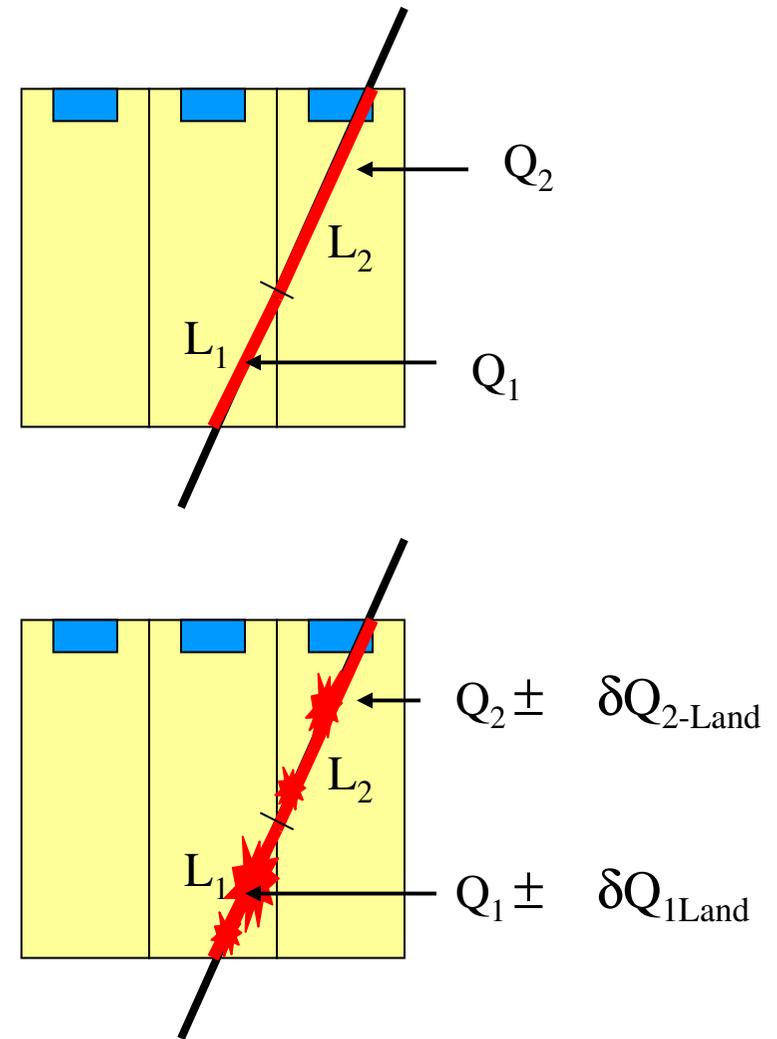
RIPARTIZIONE di CARICA su DUE ELETTRODI ADIACENTI

In prima approssimazione la carica raccolta su un elettrodo è proporzionale al percorso della traccia nella cella: $Q_i = \text{cost} * L_i$

Le fluttuazioni di Landau alterano la proporzionalità fra carica e lunghezza percorsa: δQ_i circa $2000e^-$.

Questo peggiora la risoluzione spaziale.

Inoltre, data la struttura elettrica dei sensori, si crea un accoppiamento capacitivo tra due elettrodi adiacenti (C_{int}), con conseguente divisione di carica.



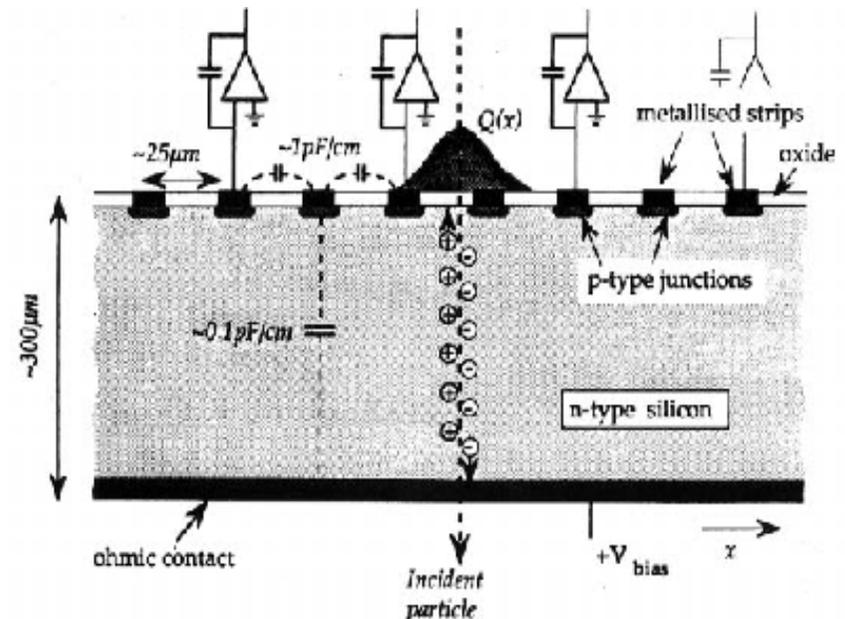
Sommario (Intermedio)

☛ i rivelatori sono costituiti da un "bulk" su cui sono state impresse per mezzo di tecniche litografiche le strutture appropriate

↳ schematicamente impianto *p* su *bulk n*; V_{bias} va fornito individualmente a ciascuna struttura (pixel, strip). il segnale e^- raccolto su elettrodi di metallo e l'elettronica di F.E. è direttamente connessa agli elettrodi

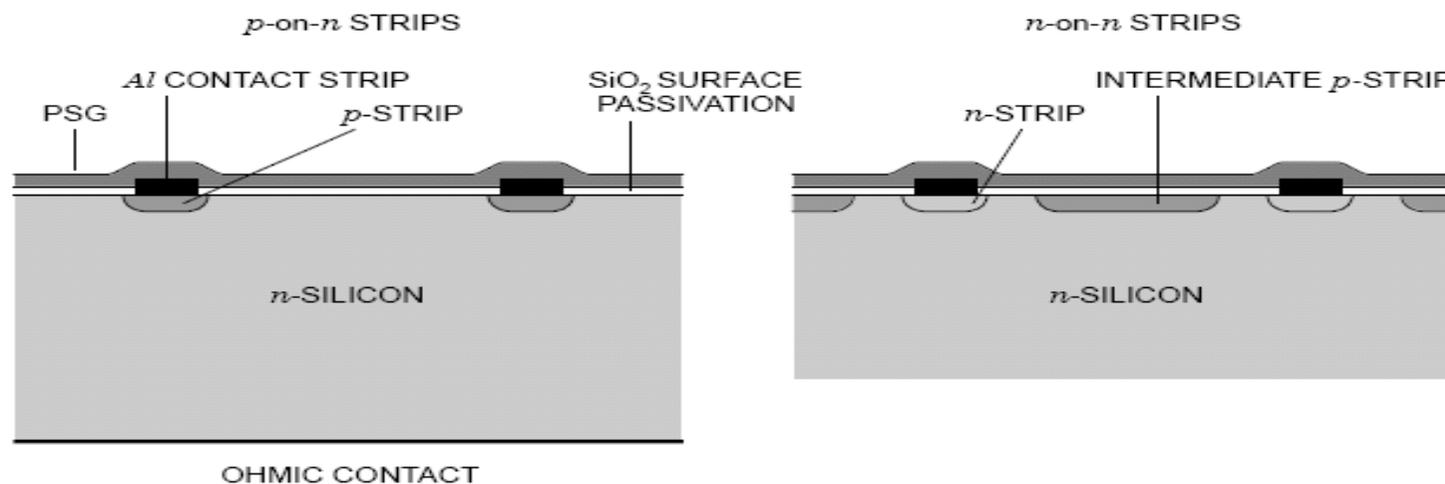
↳ in questo caso si parla di accoppiamento in DC

↳ Oppure connessa all'elettronica attraverso un condensatore di disaccoppiamento (AC)

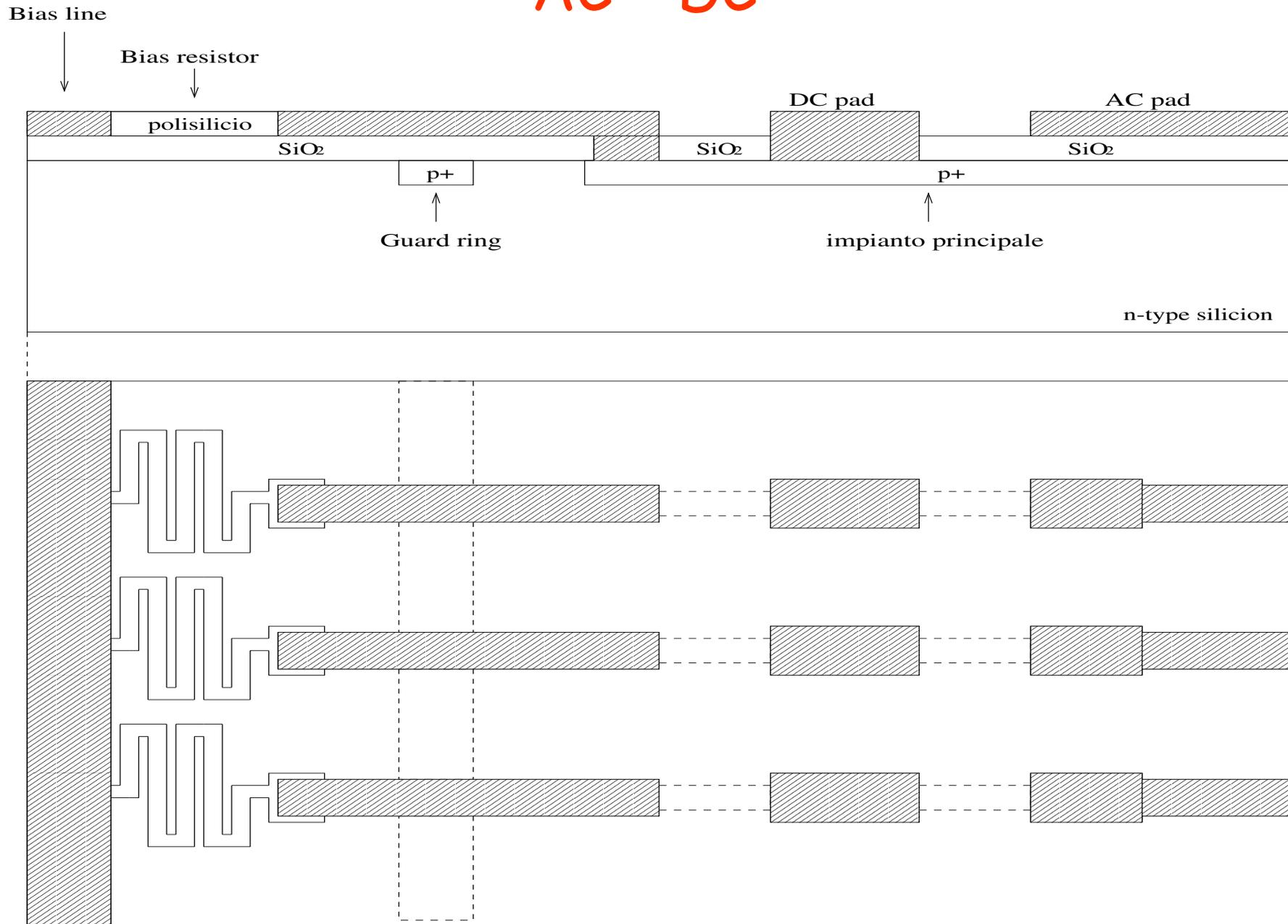


AC - DC

- ↳ Abbiamo introdotto il concetto di accoppiamento in DC
 - ↳ il rumore risente direttamente della corrente di leakage di una singola strip e l'elettronica di lettura la integra
- ↳ In un rivelatore normalmente il preamp viene disaccoppiato a mezzo di un condensatore.
 - ↳ Nel caso dei rivelatori a microstrip è ovvio includere i condensatori nel disegno e fabbricarli sul silicio stesso
 - ↳ in questo caso si dice che è accoppiato in AC e il condensatore e' ottenuto inserendo un certo spessore di dielettrico (SiO_2) tra la strip e la metallizzazione
- ↳ Vedi figura prossima slide



AC - DC



Rivelatori a microstrip II

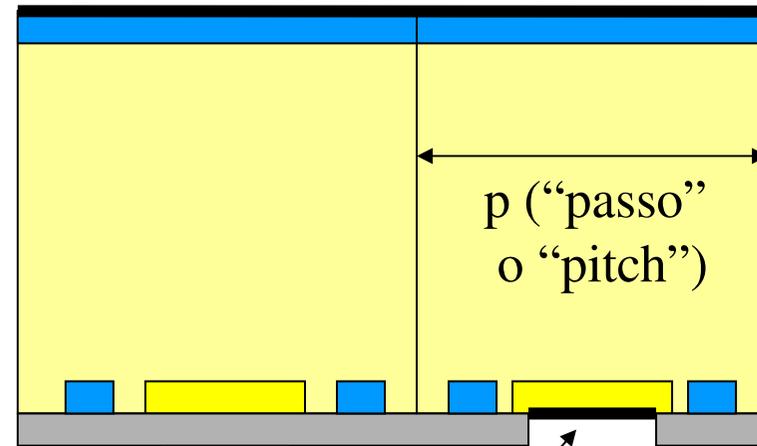
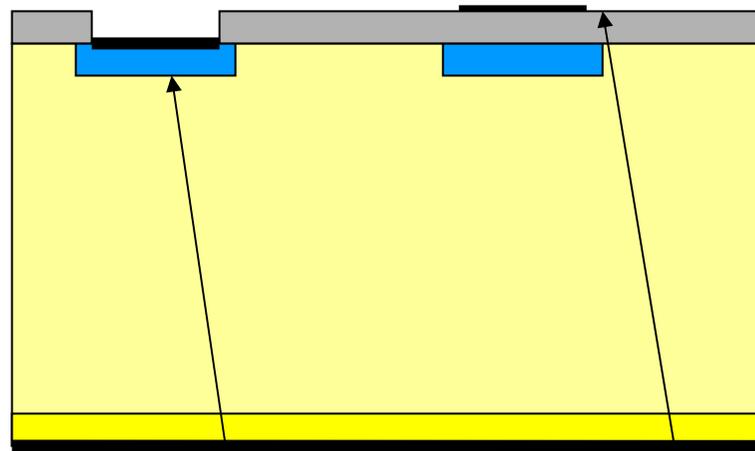
- ☛ Ogni strip (p+) agisce come un elettrodo: rivelatore single sided
- ☛ e se si dividesse anche il lato ohmico in strip?
 - ↳ Qui possiamo impiantare delle strip (n+). Sono isolate tra loro una volta che il silicio è svuotato?
 - ↳ Bisogna considerare che ci sono cariche positive intrappolate nell'interfaccia Si-SiO₂. L'attrazione tra queste e gli elettroni nel bulk di tipo n crea un layer di accumulazione vicino la superficie. Le striscie sono cortocircuitate ed è impossibile estendere il campo elettrico fino ad isolare le striscie n+.
 - ↳ Per ottenere l'isolamento vengono circondate da impianti (abbastanza profondi) di tipo p+.
 - ↳ Le strip così ottenute sono isolate !
- ☛ rivelatore double sided (vero!)

RIVELATORI al SILICIO

SEGMENTAZIONI degli Elettrodi - METODO

Lato p: sufficiente dividere l'impiantazione p+

Lato n: dividere l'impiantazione n+ ed inserire un p-stop fra gli elettrodi n+



Accoppiamento AC

Accoppiamento DC



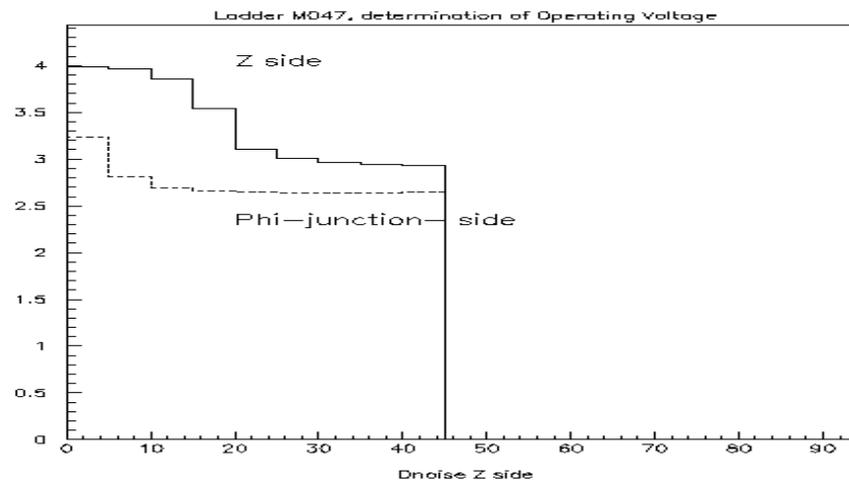
Sommario dei principali parametri

- ☛ Carica raccolta è \propto allo spessore svuotato (W)
- ☛ I risultati seguenti si ottengono risolvendo le eq. Poisson nella giunzione
 - ↳ $W = (2 \varepsilon_r \varepsilon_0 V_{bias} (N_A + N_D) / (q N_A N_D))^{1/2}$
 - ↳ nel caso di una giunzione p^+n^- $N_A \gg N_D$: $W = (2 \varepsilon V_{bias} \rho \mu_e)^{1/2}$
 - ↳ $\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0$ e μ_e è la mobilità degli elettroni: $1350 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$
- ☛ Il rumore dipende dalla capacità che si presenta al preamp
 - ↳ la capacità di un diodo planare (bulk) per unità di area è $C = dQ_{ch} / dV = \varepsilon / W$ dove Q è la carica per unità di area nella giunzione, quindi C è \propto a $V_{bia}^{-1/2}$
 - ↳ In un rivelatore a microstrip è rilevante la capacità tra strip e strip
 - ↳ In un rivelatore a microstrip C_{bulk} è una piccola parte della capacità totale: $C = C_{bulk} + C_{int}$
- ☛ $S \propto$ a W , noise in parte \propto a $1/W$
 - ↳ un tipico valore della C_{int} è $1 \div 1.2 \text{ pF/cm}$

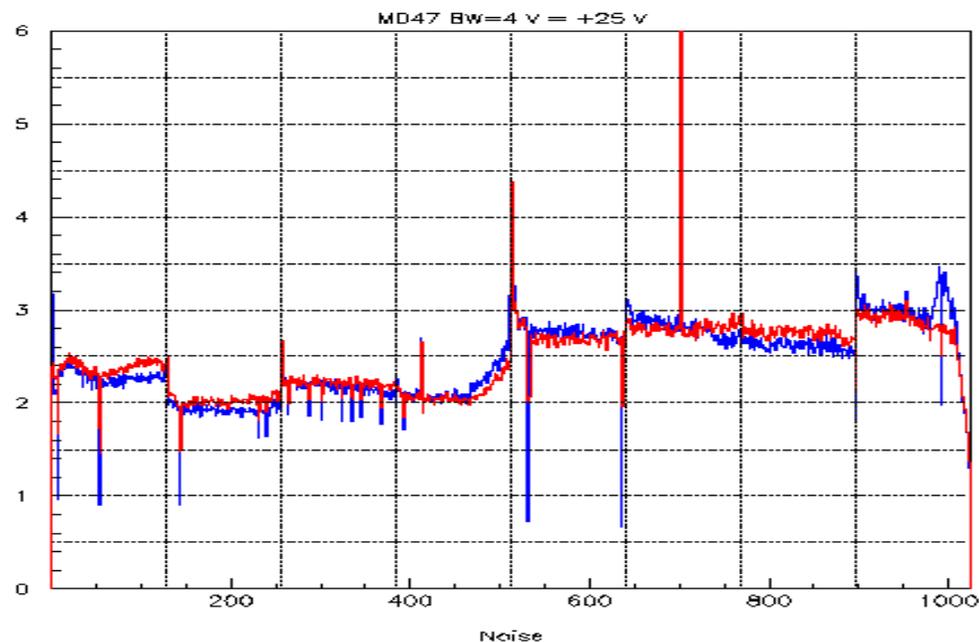
Rumore e tensione di svuotamento in un rivelatore Double sided

49

- Al variare della tensione di svuotamento il *noise* deve **diminuire**
 - ↳ Sul lato della giunzione quasi immediatamente poiché domina la componente interstrip
 - ↳ Sul lato ohmico perchè entrano in funzione i p-stop e le strip n+ sono progressivamente isolate dalle vicine, rimanendo solo l'accoppiamento capacitivo tra di esse. Questo avviene quando il campo elettrico raggiunge i p-stop (e quindi il lato n).
 - ↳ a destra un caso (preso a caso tra 156 rivelatori composti ciascuno da tre sensori microsaldati tra loro)



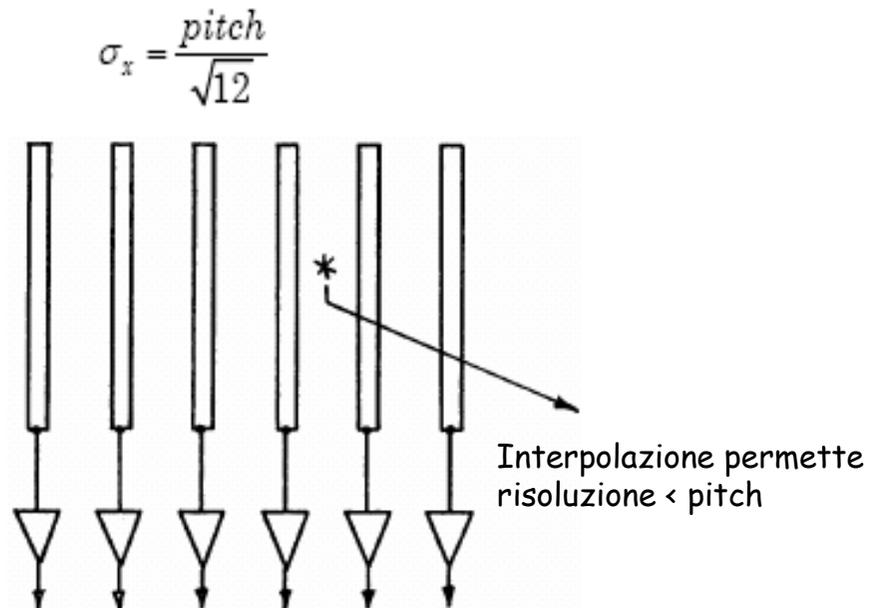
z0/05/10 1



Risoluzione spaziale- due opzioni

Readout digitale

↳ Binary readout (yes/no)

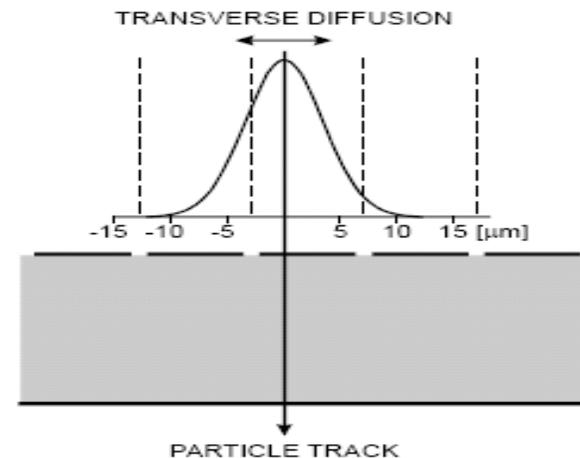


↳ Risoluzione in posizione
deriva direttamente dal
pitch

Readout analogico

↳ Si basa sulla diffusione
(allargamento della nuvola di
carica)

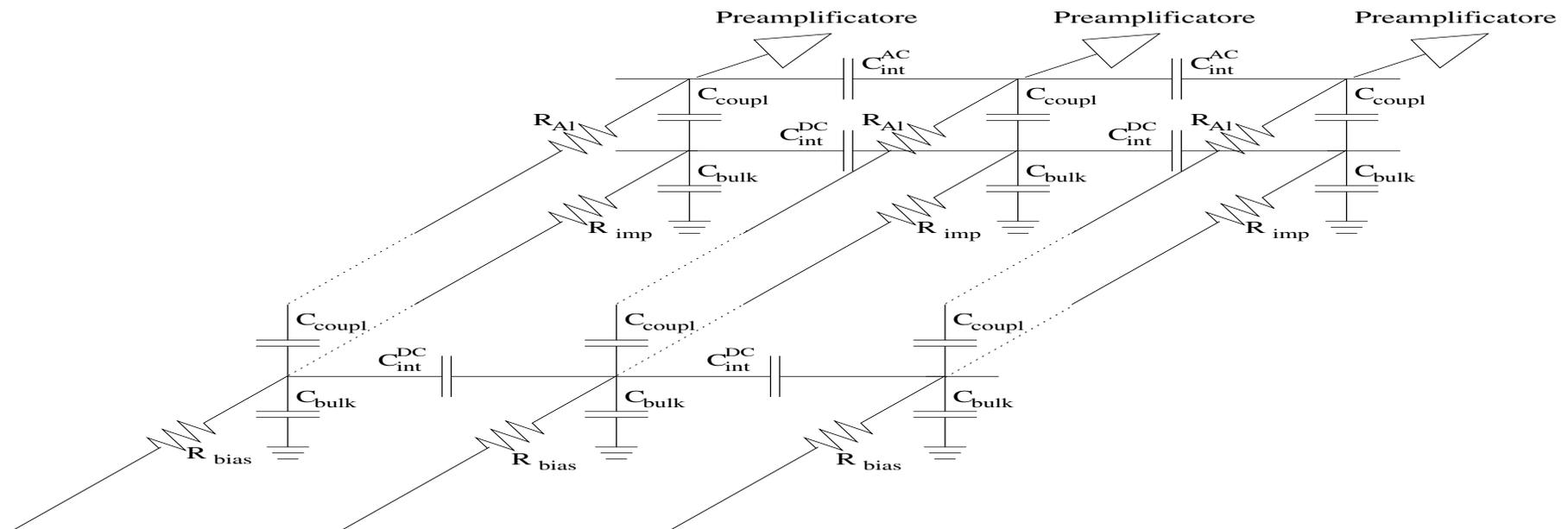
$$\sigma_x \propto \sqrt{t_{\text{coll}}}$$



↳ Risoluzione dell'interpolazione
dipende dal pitch e da S/N

Problematica del rumore

- Abbiamo già visto che il rumore dipende dalla capacità di input. Senza entrare nei dettagli, teniamo presente che quella in basso e' la rete equivalente per un rivelatore:
 - ↳ riduzione della C_{inp} ,(disegno del rivelatore, C_{int}) tenere la corrente di leakage bassa (cooling) e stabile, evitare pick-up ambientali (supporti)...
- la maggior parte dello sforzo di fabbricazione di un rivelatore e tanto più di un sistema complesso con $O(10^5-10^6)$ canali è nel controllare il rumore (sia la baseline che le sue fluttuazioni)



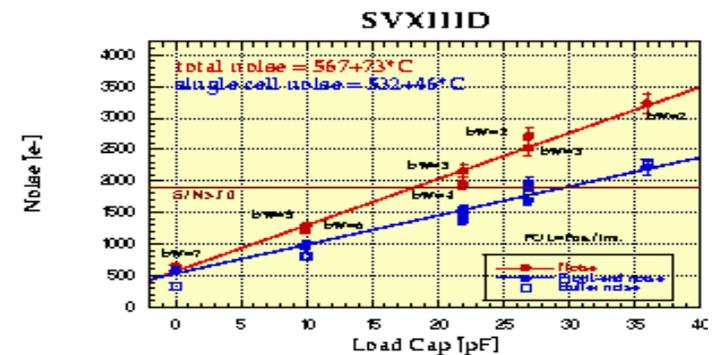
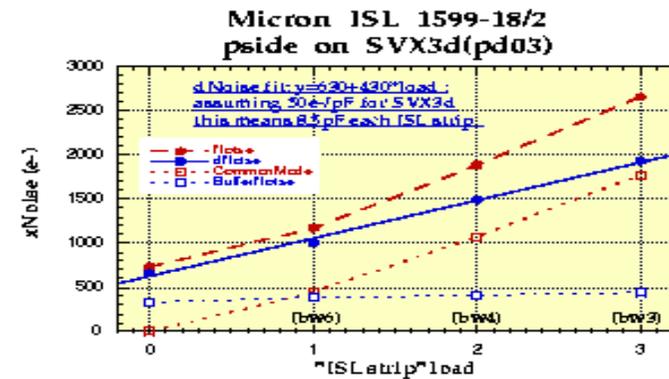
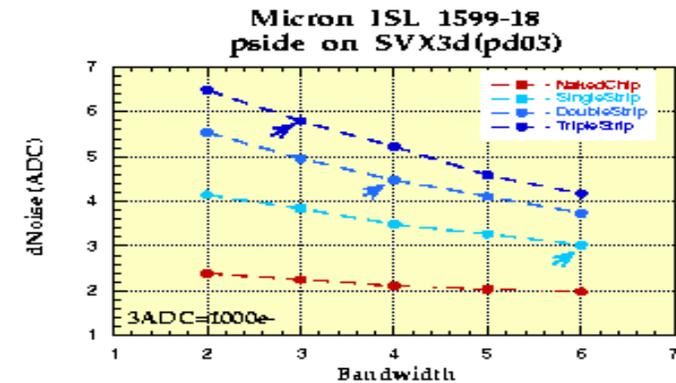
Noise ed utilizzo dei rivelatori: Parametri importanti

risoluzione spaziale

- ↳ normalmente non è un problema (almeno in linea teorica). limitazioni:
 - ↳ numero canali (\$,Euro, materiale etc)
 - ↳ Risoluzione 12 μm NIM: 214;253,1983

rapporto S/N

- ↳ è un parametro con un ruolo nella risoluzione, ma soprattutto
 - ↳ nell'identificazione degli hit (pattern recognition)
- ↳ ha due aspetti:
 - ↳ Segnale : $O(30,000) e^-$ per part.carica
 - ↳ Rumore: $ENC 300-500e^- + K * C_{inp} (pF)$
 - ↳ tipica capacita' di input $\approx 1.1-1.2 pF/cm$
- ↳ Un "buon" valore per S/N stabilito dalla pratica. Ad esempio, in un sistema di microvertice assumiamo che
 - ↳ $S/N = 7:1$ sia marginale per effettuare **pattern recognition**
 - ↳ ("hit/cluster" linking)



Misure di posizione spaziale

☛ Per ottenere in maniera semplice un punto spaziale ci sono due strade:

↳ microstrip ($Y \times O(10-50) \times 300 \mu\text{m}^3$)

↳ incrociando due vedute ($Y \approx 5000 \mu\text{m}$)

↳ double sided ($Y \approx 500 \mu\text{m}$)

☛ pixel

↳ CCD (Charge Coupled Device) ($20 \times 20 \times 20 \mu\text{m}^3$)

↳ APD (Active Pixel Device) ($150 \times 150 \times 250 \mu\text{m}^3$)

☛ Ci sono anche altri *rivelatori* interessanti:

↳ silicon drift chambers

↳ controlled drift detectors

Non tutti questi rivelatori hanno avuto grande successo a causa della situazione nella quale devono operare negli esperimenti HE

↳ Rivelatori 3D

Active Pixel Device (APD) I

- ☛ In questo caso il diodo è scomposto in tasselli, ciascuno
 - ↳ letto individualmente (approccio forza bruta) da elettronica che si trova *sopra* al rivelatore
- ☛ È chiaro che un ruolo fondamentale lo ha avuto il ridursi delle dimensioni dei transistor
- ☛ Cosa vuol dire *sopra*?
 - ↳ fisicamente separata ma elettricamente connessa
 - ↳ *hybrid detector*
 - ↳ fisicamente *integrata* nel rivelatore stesso
 - ↳ *monolithic detector*
- ☛ Rivelatori *ibridi* utilizzati ad ATLAS e CMS
 - ↳ superate una serie di difficoltà tecniche
 - ↳ enormi quantità di *bump bonding* (riprocessing)
 - ↳ abbisognano di raffreddamento (che introduce una quantità non trascurabile di materiale)

Active Pixel Device (APD) II

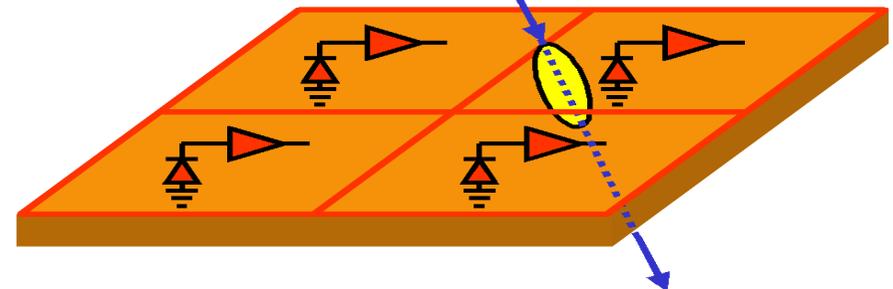
Punti a favore:

- ↳ Estremamente robusti alla radiazione
 - ↳ ci si aspetta sopravvivano in una zona di LHC (a pochi cm dal fascio) ove neppure i rivelatori a microstrip si avventurano:
 - ↳ dosi dell'ordine di 10^3 kGy a circa 4 cm dal fascio
- ↳ Estremamente veloci
 - ↳ c'è un accesso in parallelo ai segnali
- ↳ La risoluzione spaziale è ottima
- ↳ Assumono un ruolo fondamentale nel *pattern recognition*

Problemi (aggiuntivi)

- ↳ MAPS: area attiva coperta (tipicamente ~50%)
 - ↳ inaccettabile in applicazioni di tracciatura

Monolithic Active Pixel Sensors

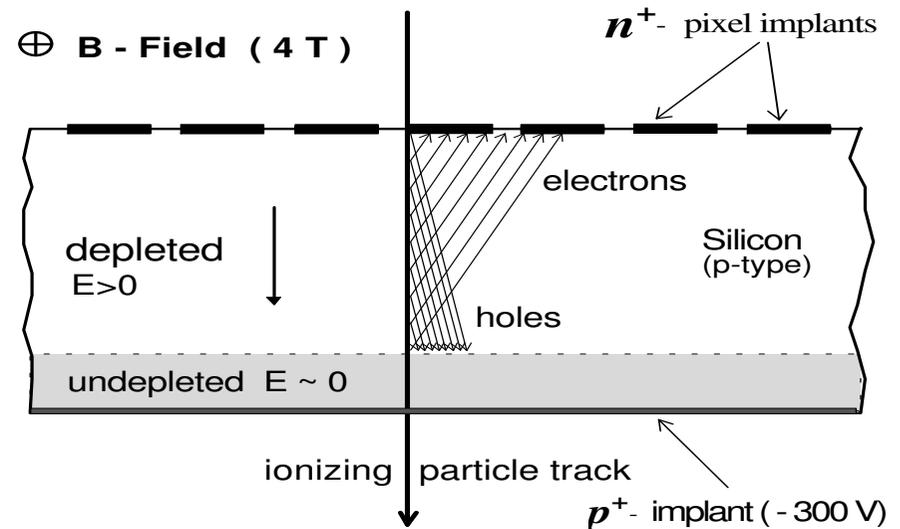
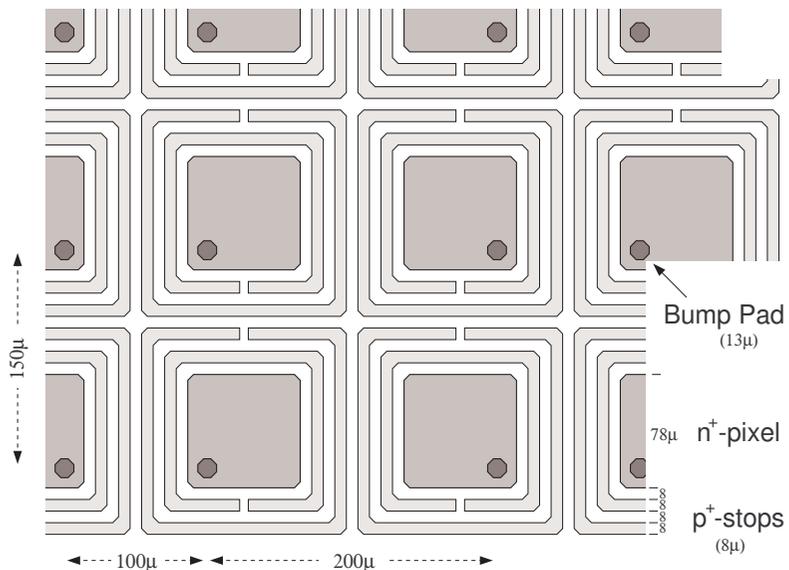
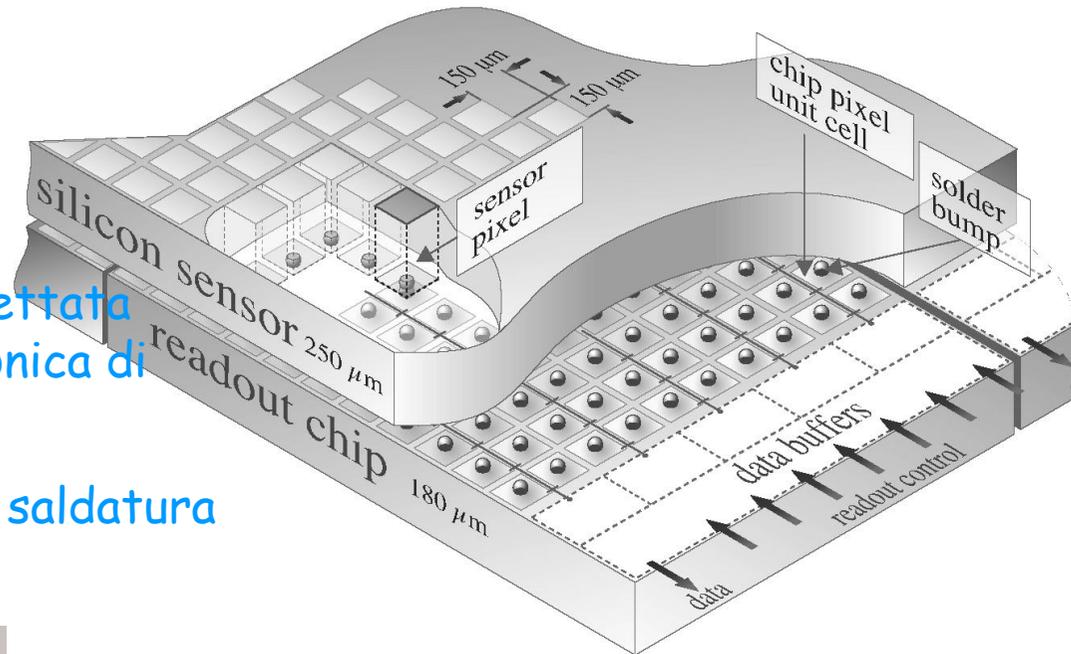


PIXEL

Guardiamo un rivelatore a pixel per il rivelatore CMS ad LHC:

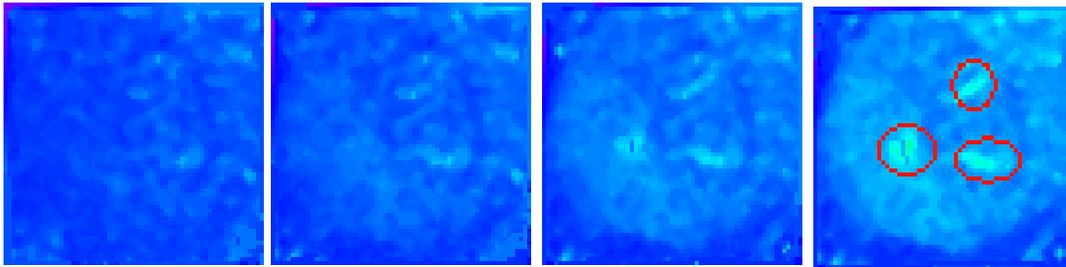
La granularità dei rivelatori è dettata dallo spazio richiesto all'elettronica di lettura.

L'affidabilità dei meccanismi di saldatura a freddo deve essere estrema



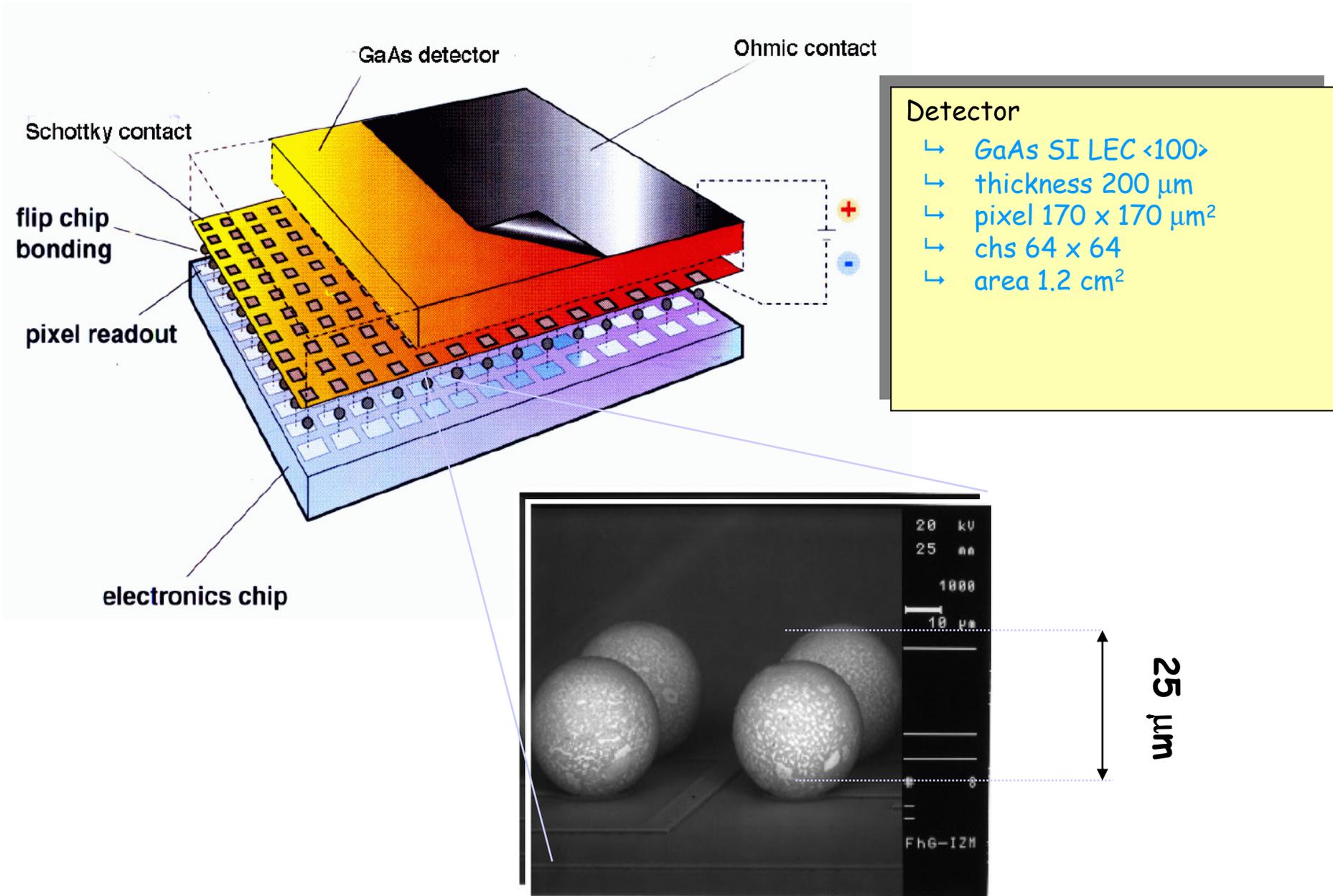
APD III

- ☛ A parte che in HEP (LHC, esperimenti a bersaglio fisso)
- ☛ Applicazioni di:
 - ↳ imaging in ambito biomedico
- ☛ Applicazioni nelle quali la resistenza alla radiazione sia necessaria



Applicazione medica: Medipix 4096 channels

58



Rivelatori MAPS

- Recenti sviluppi sui rivelatori dove l'elettronica è integrata sul silicio ad alta resistività
 - Ad esempio NIM A518 (2004), 354-356: phototransistor.
 - La struttura del transistor è costruita direttamente su silicio ad alta resistività, sensibile a luce visibile (superficie) ed X-ray coppie nel bulk)

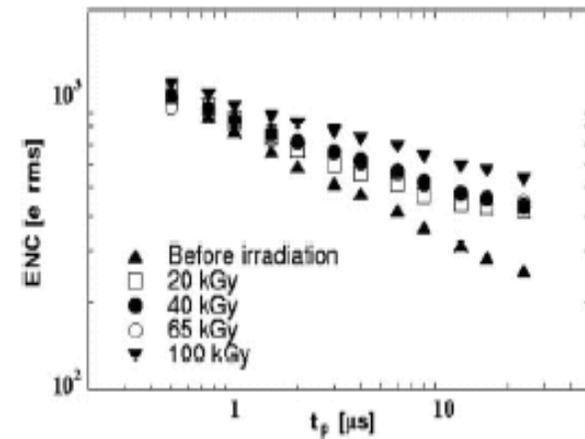
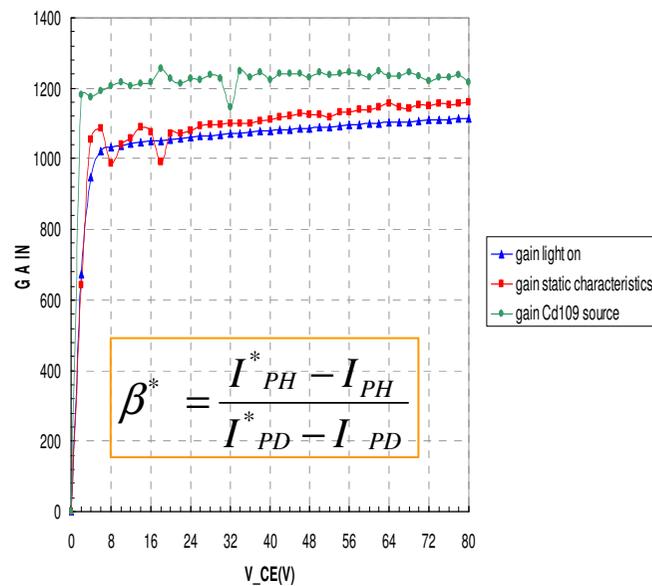
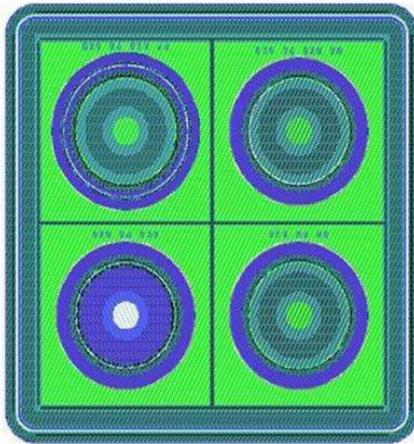


Fig. 1. ENC vs t_p before and after γ irradiation.

Problemi

- ☛ Accenneremo qui ad alcuni problemi fondamentali nelle operazioni dei rivelatori a semiconduttore:
 - ↳ Il danno da radiazione
 - ↳ Esposizione diretta ai fasci o a prodotti di collisioni (esperimenti agli acceleratori)
 - ↳ Esposizione prolungata a flussi di raggi cosmici non schermati dall'atmosfera (rivelatori su satelliti)
 - ↳ Utilizzo in vicinanza di sorgenti estremamente attive (es: centrali nucleari etc)
 - ↳ Le sorprese inattese (ed in genere non benvenute)
 - ↳ Problemi nelle operazioni

Riv.al silicio: danno da radiazione

principalmente due fenomeni:

☛ danneggiamento superficie

↳ generato dalla creazione di coppie $e-h$ nell'ossido. Le lacune sono lente e vengono facilmente intrappolate. C'è quindi:

↳ accumulo di cariche all'interfaccia Si-SiO₂ con conseguente creazione di fenomeni di correnti di superficie, fenomeni di punch-through etc.

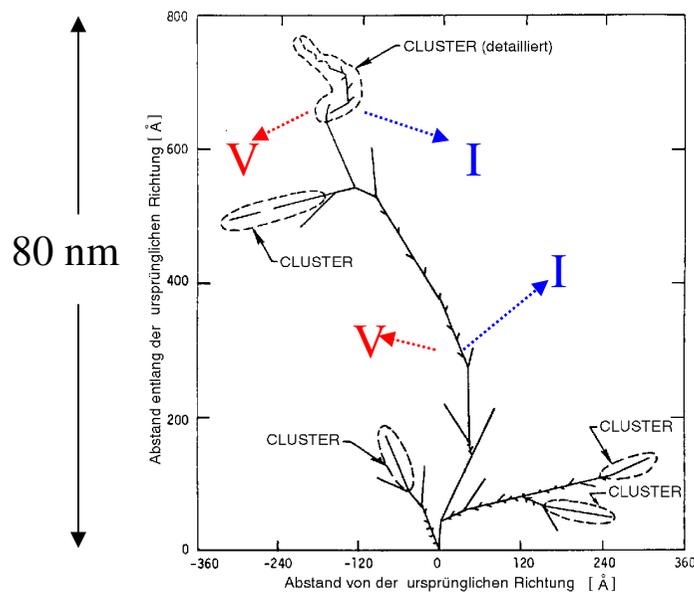
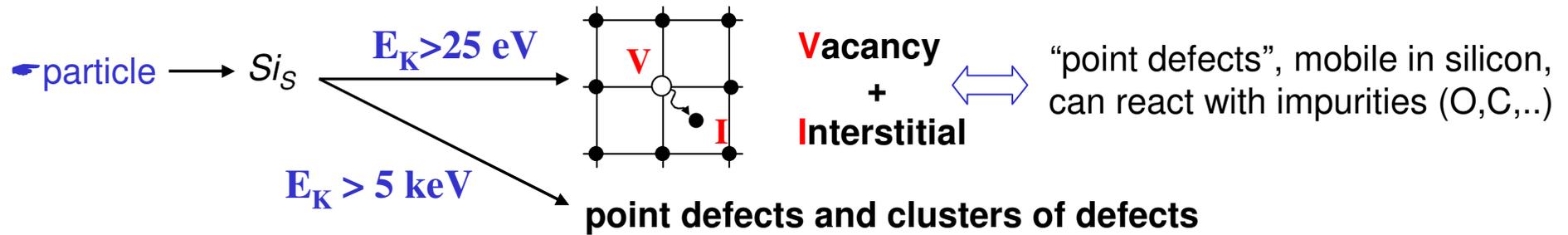
↳ Sterminata bibliografia e studi

☛ danni nel bulk

↳ danno nel *bulk* dovuto a particelle che creano difetti reticolari nella regione attiva espellendo atomi di silicio dalla loro localizzazione nel cristallo. Tipicamente ciò succede con trasferimenti energetici dell'ordine di 30÷40KeV , nel qual caso l'atomo che rincula ha un range di circa 10nm e crea, a sua volta, una certa quantità di difetti lungo il suo percorso (NIEL, Non Ionizing Energy Losses)

Difetti microscopici

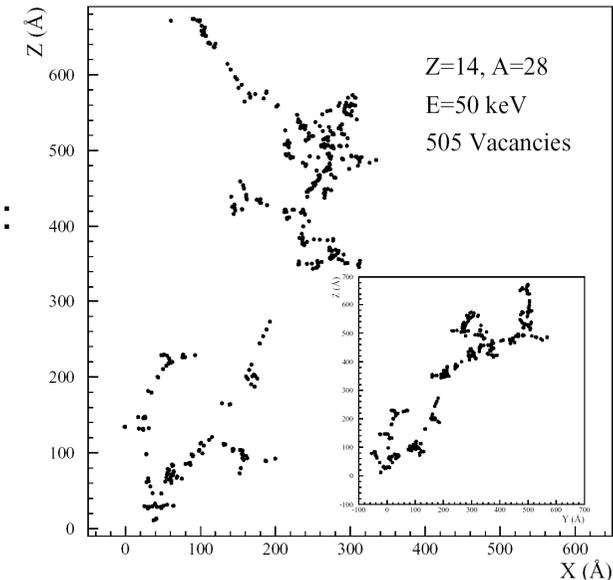
■ Damage to the silicon crystal: Displacement of lattice atoms



Distribution of vacancies created by a 50 keV Si-ion in silicon (typical recoil energy for 1 MeV neutrons):

← **Schematic**
[Van Lint 1980]

Simulation →
[M.Huhtinen 2001]

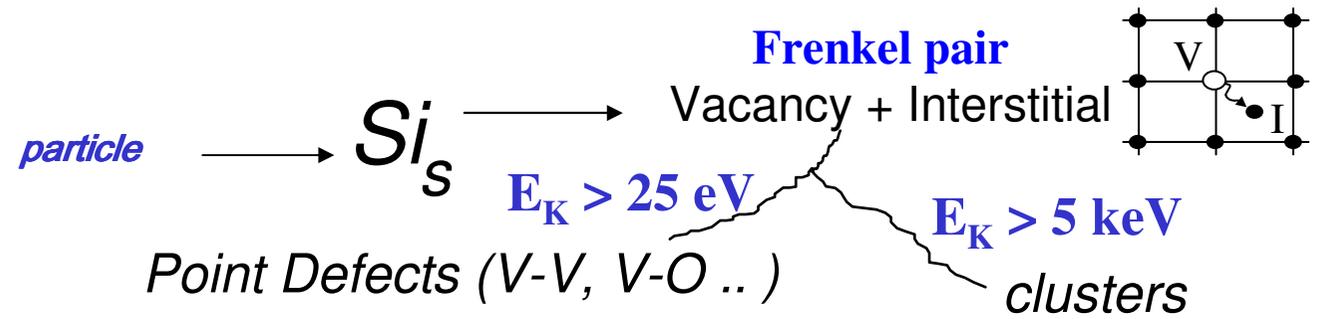


■ Defects can be electrically active (levels in the band gap)

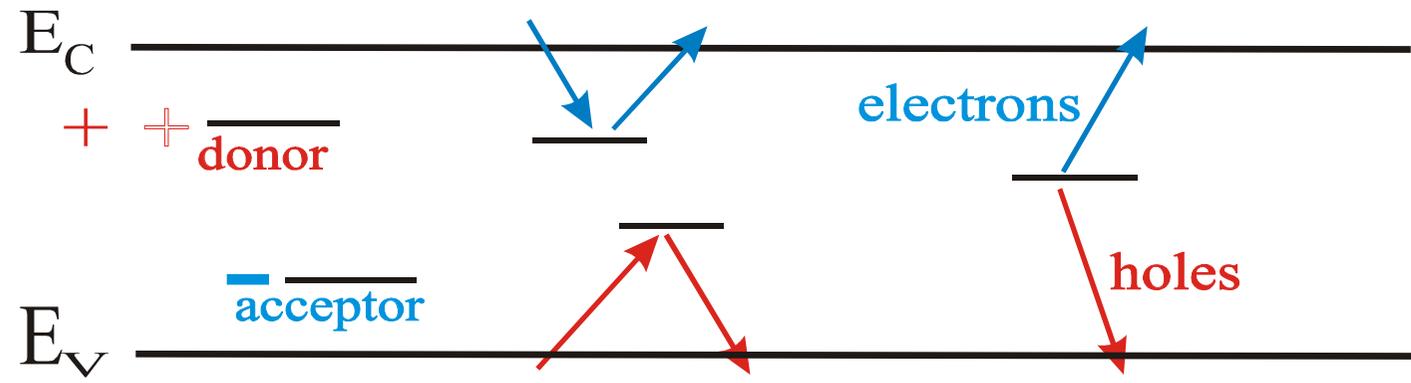
- capture and release electrons and holes from conduction and valence band

⇒ can be charged - can be generation/recombination centers - can be trapping centers

Danno Microscopico indotto da radiazione



Influence of defects on the material and device properties



charged defects
 $\Rightarrow N_{\text{eff}}, V_{\text{dep}}$
 e.g. donors in upper
 and acceptors in
 lower half of band
 gap

Trapping (e and h)
 $\Rightarrow \text{CCE}$
 shallow defects do not
 contribute at room
 temperature due to fast
 detrapping

generation
 \Rightarrow leakage current
 Levels close to
 midgap
 most effective

Riv.al silicio: danno da radiazione II

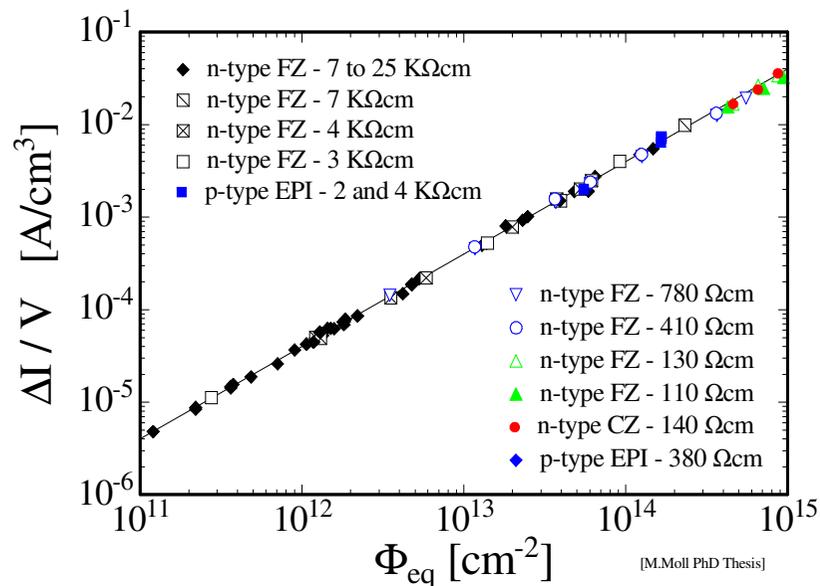
☛ danneggiamento del bulk (primi studi):

↳ difetti assumono il ruolo di centri di generazione-ricombinazione, il loro aumento porta ad un aumento della corrente di leakage:

$I(\Phi) = I_0 + \alpha \Phi$ dove I_0 è la corrente di leakage prima dell'irraggiamento (flusso Φ) ed α è una costante di proporzionalità che vale $0.3 \div 2.7 \cdot 10^7$ nA/cm. Spesso utilizzato il valore 3.

↳ Per ridurre la corrente una prima risposta è raffreddare il silicio:

$$I(T) \cong T^2 \cdot \exp(-E_g / (2 \cdot k_B \cdot T))$$



$$\alpha = \frac{\Delta I}{V \cdot \Phi_{eq}}$$

Abbassare la temperatura implica l'uso di sistemi di raffreddamento

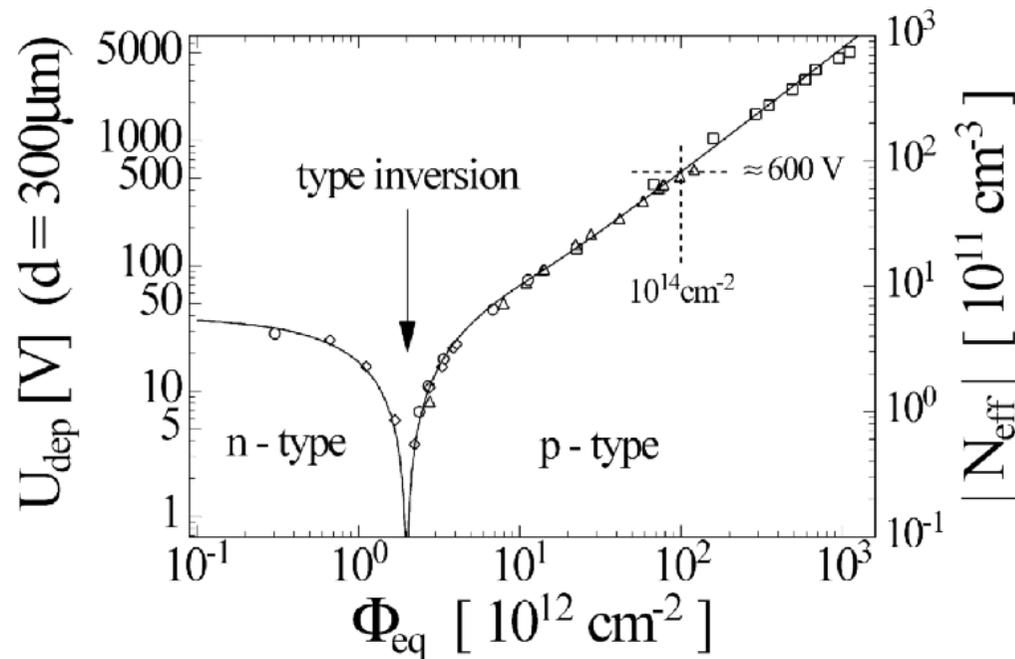
↳ materiale all'interno del volume di tracciatura.

Riv.al silicio: danno da radiazione II

Negli ultimi 10-15 anni si è visto che all'aumentare del flusso integrato diminuisce la concentrazione effettiva:

↳ $N_{\text{eff}}(\Phi) = N_0 e^{-c\Phi - \beta\Phi}$ quest'equazione implica che la concentrazione di dopante diminuisca e, per flussi integrati dell'ordine di 10^{13}cm^{-2} il *bulk* del silicio venga trasformato da un tipo (n) all'altro.

↳ studi in corso, in prospettiva, grazie al *defects engineering* ci si aspetta di essere in grado di estendere la resistenza del Silicio



In un collider adronico (CDF Run I):

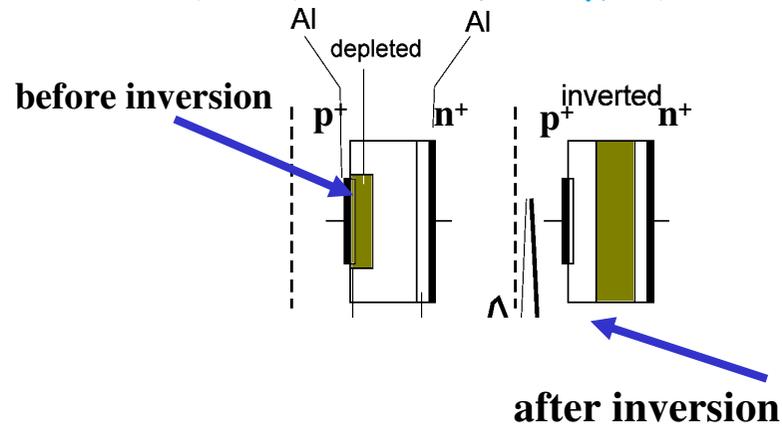
$$\Phi = \Phi_0 / r^{1.7}$$

Una prima risposta è di avere rivelatori in grado di sostenere V_{bias} elevati

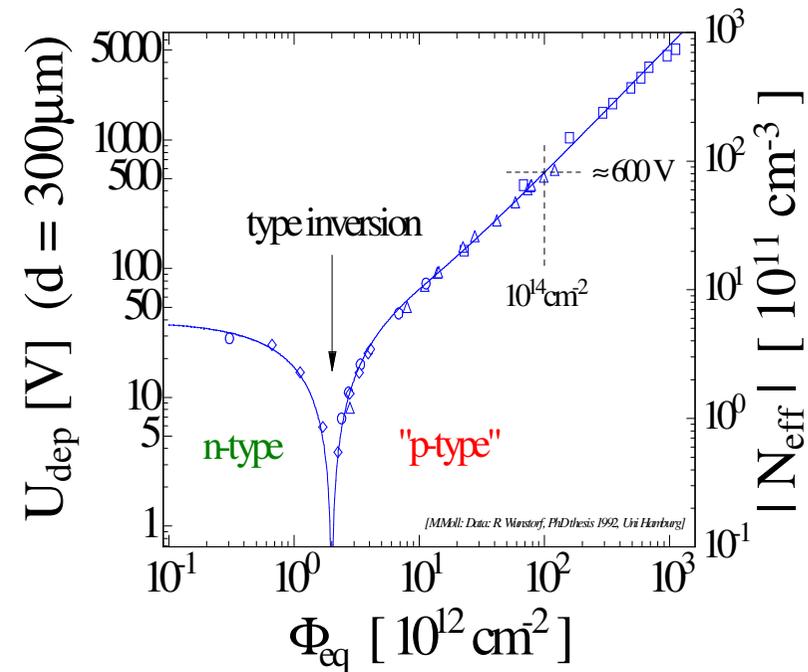
Inversione...

☛ Che succede dopo l'inversione ?

- ↳ un silicio di tipo n è diventato drogato p
- ↳ la giunzione è dal lato opposto a quello dal quale avevamo iniziato
- ↳ la tensione di svuotamento aumenta progressivamente



$$\rightarrow V_{dep} = qN_D W^2 / 2\epsilon$$



Inversione II

☛ Dopo l'inversione

- ↳ un silicio di tipo n è diventato drogato p
- ↳ la giunzione e' dal lato opposto a quello dal quale avevamo iniziato
- ↳ la tensione di svuotamento aumenta progressivamente

☛ che implicazioni ci sono per i vari tipi di rivelatore?

- ↳ per i rivelatori singola faccia, tipicamente bisogna controllare il campo elettrico perchè non ci siano effetti di (micro)breakdown
- ↳ per i rivelatori doppia faccia la situazione è più complicata
 - ↳ ricordiamoci che il campo elettrico è massimo alla giunzione
 - ↳ dovendo applicare un grande V_{bias} , ci saranno dei condensatori di disaccoppiamento dove la differenza di potenziale tra il lato connesso all'elettronica di readout (a ground virtuale, tipicamente pochi volts) e il lato dell'impianto, settato a V_{bias} , sarà molto grande con pericolo di rottura dei condensatori stessi. In questo caso spesso V_{bias} viene applicato in *splitting* (simmetrico o asimmetrico tra i due lati) in modo da ridurre questa d.di p.

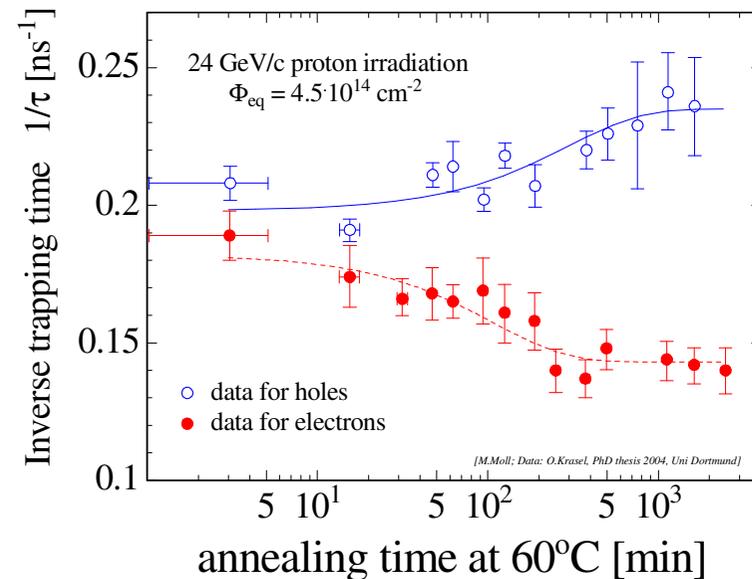
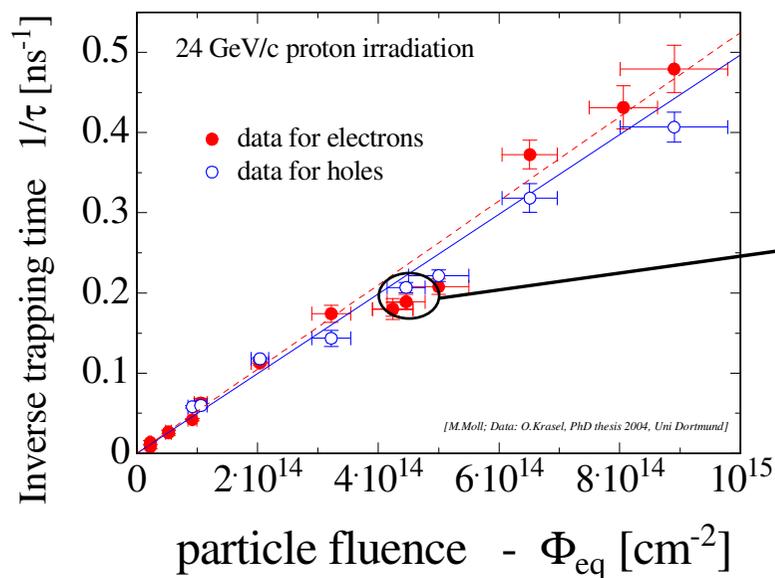
Danno da Radiazione - Trapping

- Deteriorarsi della Charge Collection Efficiency (CCE) a causa della presenza di centri di trapping

Trapping è caratterizzato da un “effective trapping time” τ_{eff} per elettroni e buche:

$$Q_{e,h}(t) = Q_{0e,h} \exp\left(-\frac{1}{\tau_{\text{eff } e,h}} \cdot t\right) \quad \text{where} \quad \frac{1}{\tau_{\text{eff } e,h}} \propto N_{\text{defects}}$$

Increase of inverse trapping time ($1/\tau$) with fluence and change with time (annealing):



Impatto sui rivelatori: decremento del CCE

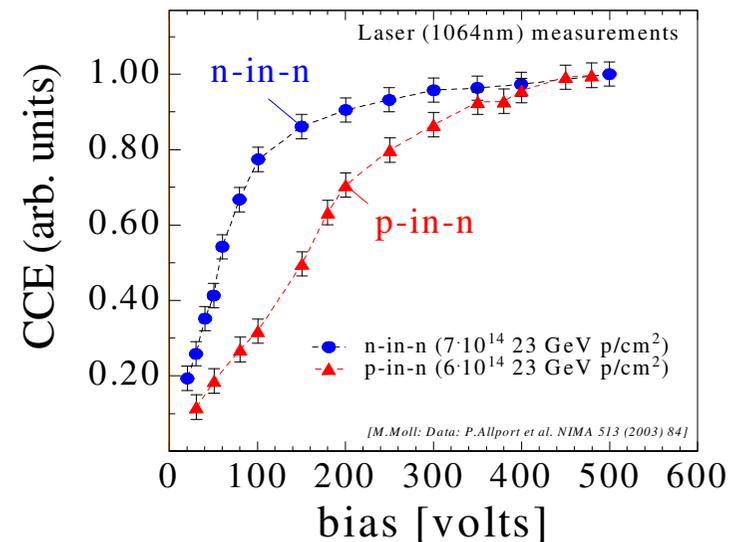
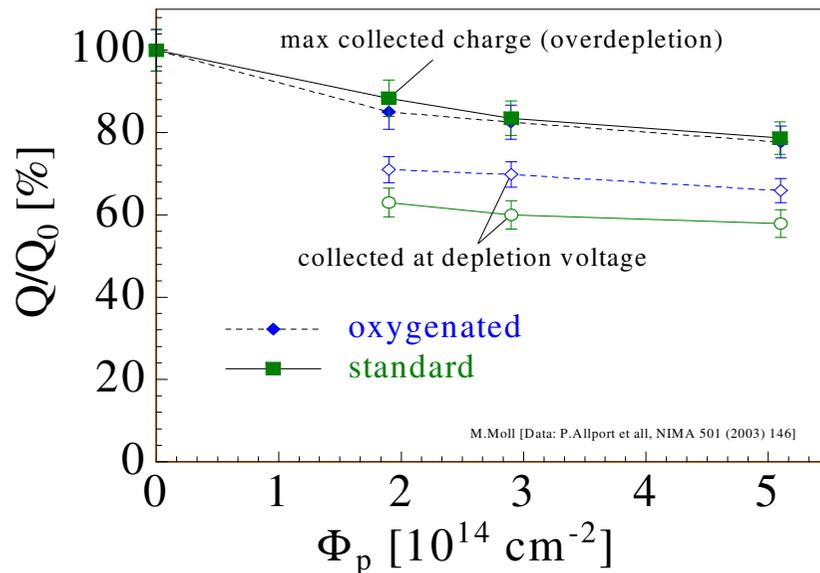
- perdita di segnale ed incremento rumore -

- Due meccanismi basilari riducono la raccolta di carica:
 - ↳ trapping di elettroni e buche → (dipende dal tempo di drift e dallo shaping time)
 - ↳ Sotto-svuotamento → (dipende dal disegno del rivelatore e dalla geometria)

Esempio: ATLAS microstrip detectors + fast electronics (25ns)

- p-in-n : oxygenated vs. standard FZ
 - beta source
 - 20% charge loss after 5×10^{14} p/cm² (23 GeV)

- n-in-n vs p-in-n
 - same material, ~ same fluence
 - over-depletion needed



Rivelatori a semiconduttore in HEP

70

Due gli usi

↳ Rivelatore di vertice

↳ I primi costruiti, e gran parte degli utilizzi fino ad oggi

↳ Sistemi di tracciatura

↳ Si espande il ruolo, stanno prendendo sopravvento

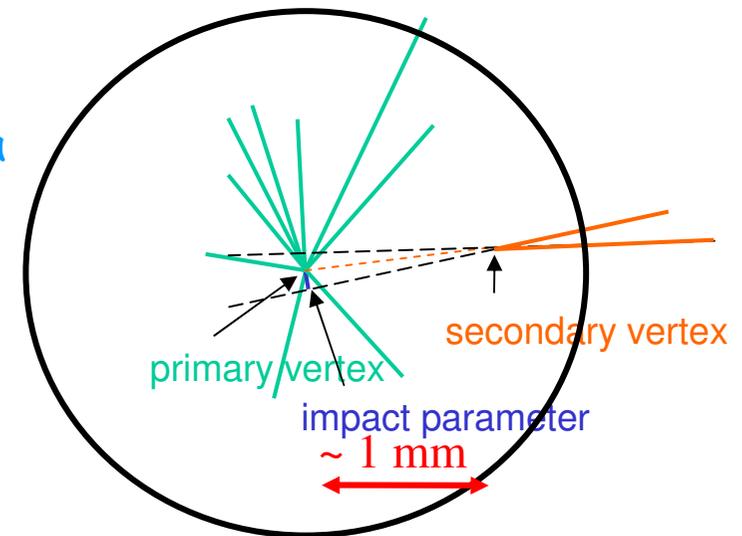
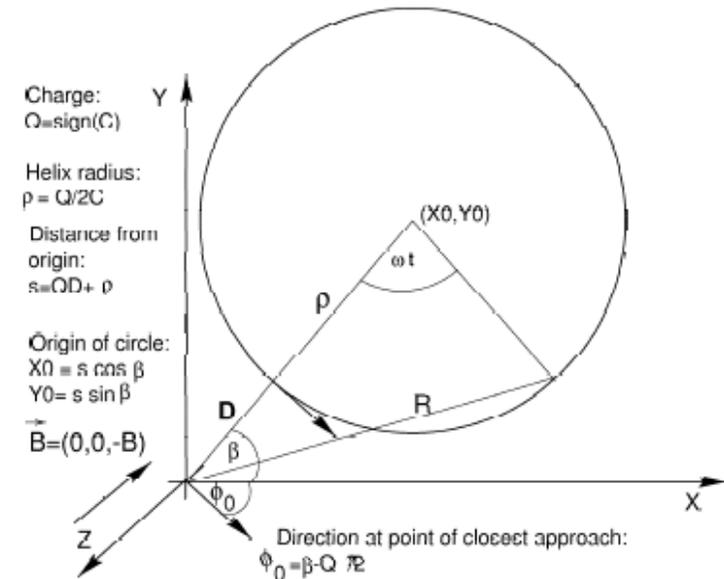
Due configurazioni diverse, diversi i problemi

Rivelatori di vertice:

↳ Utilizzati per ricostruire vertici generati da particelle con vita media dell'ordine dei picosecondi

↳ Aggiungere pochi punti, estremamente precisi, a tracce i cui parametri sono misurati da un tracciatore diverso (spesso a gas)

↳ Importante minimizzare il Mult.scatt. e posizionare i rivelatori il più possibile vicini al punto di interazione

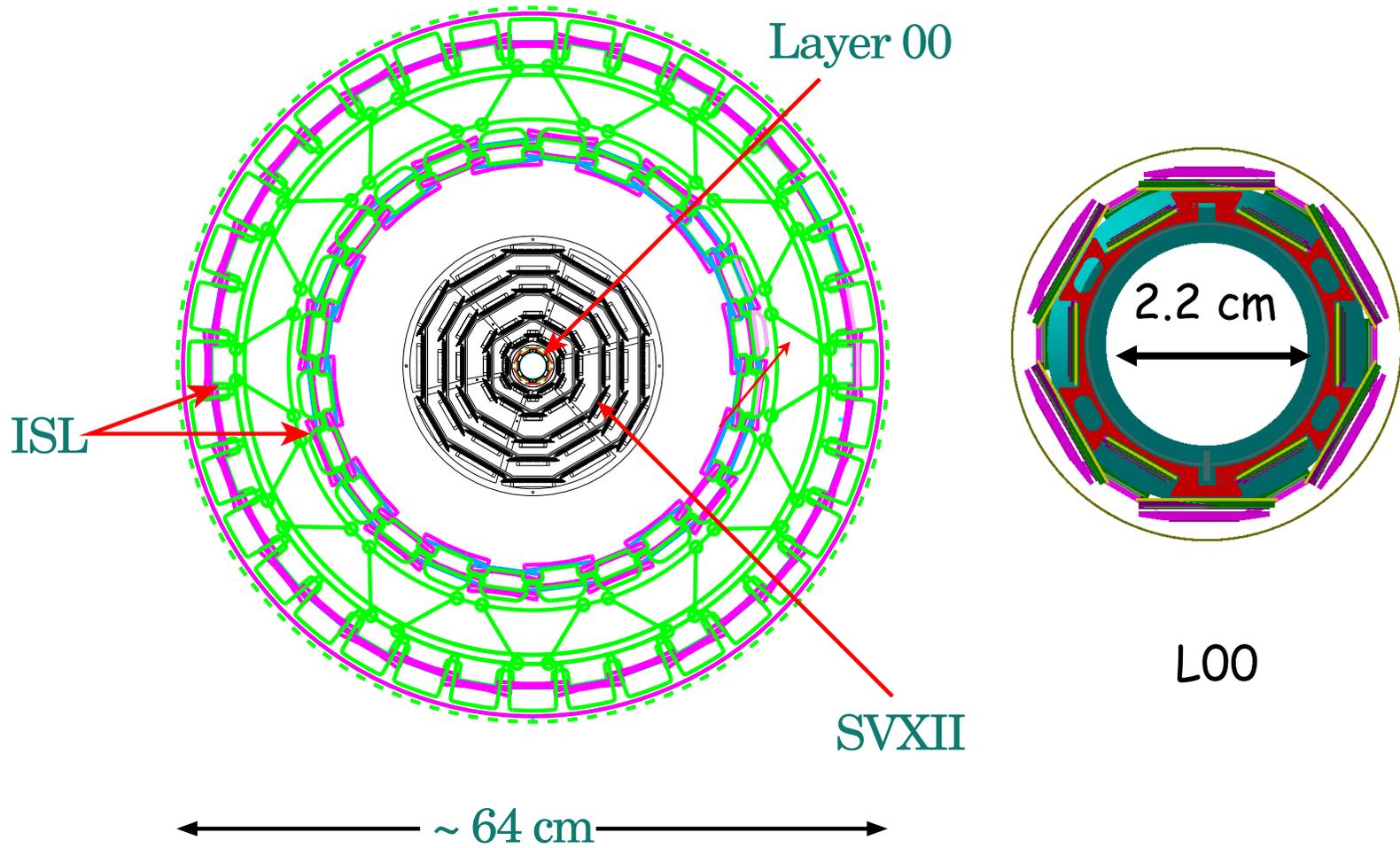


Il caso concreto

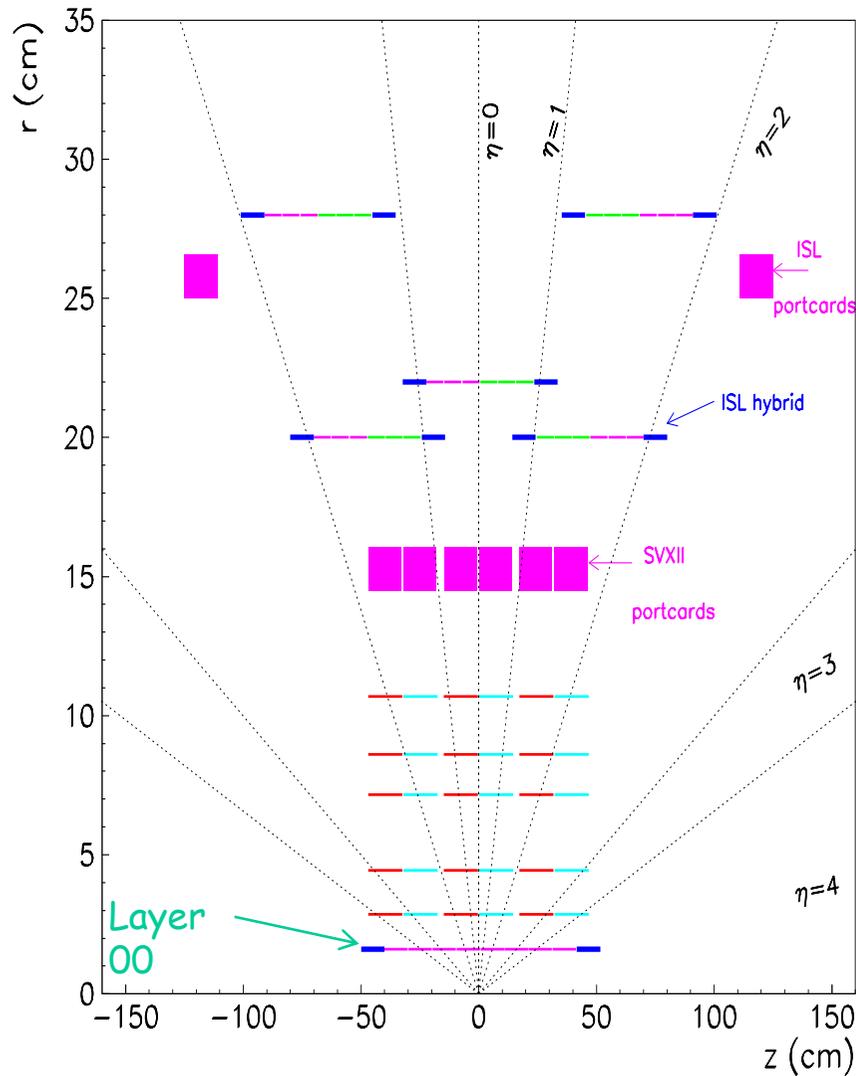
- ☛ Vediamo insieme un caso concreto.
- ☛ Il sistema di silici di CDF-II è stato in operazione per dieci anni, e quindi fornisce un utile "case study" per discutere sia del danno da radiazione che di problemi di operazioni
- ☛ Parleremo quindi di "operation" di un rivelatore che funziona dal 2001
 - ↳ Caso unico e che puo' insegnare molto per il futuro

Un caso: CDF Silic

— . er



CDF Silicon Tracking System



- Sistema composto da tre diversi rivelatori
 - ↳ L00
 - ↳ SVXII
 - ↳ ISL
- L00 è l'ultimo arrivato (aggiunto), rivelatore singola faccia rad-hard
- SVXII è stato il primo:
 - ↳ 5 strati doppia faccia (2 r-z stereo e 3 con strip a 90°)
- ISL e' il primo tracciatore a grande raggio:
 - ↳ 2 strati doppia faccia per $2 < |\eta| < 1$ ed 1 nella zona centrale

È un sistema misto

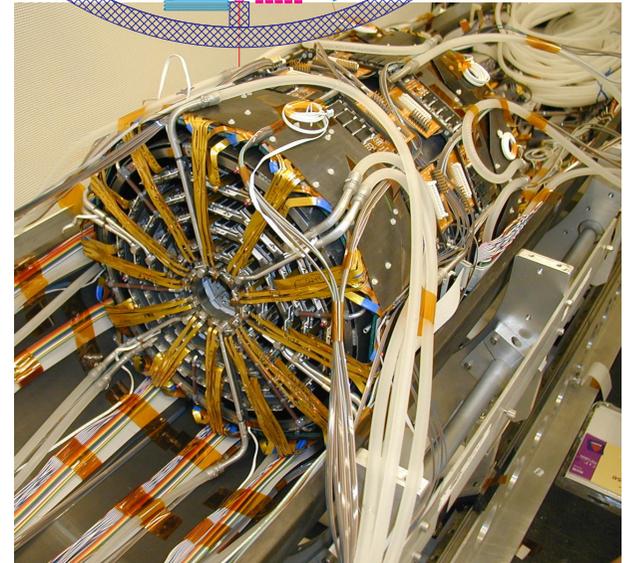
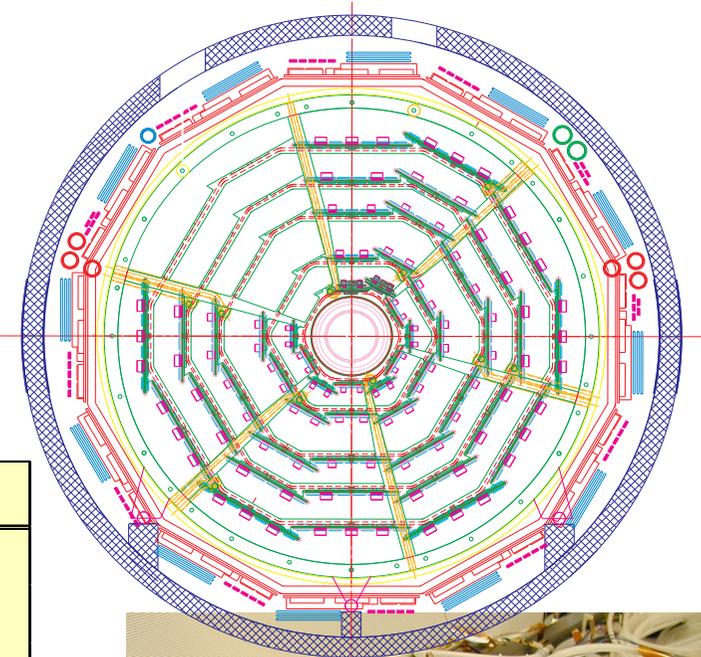
Un rivelatore a microstrip: SVX = L00+SVXII+ISL

74

- ← SVXII e' il nome dato al rivelatore di vertice costruito in vista del Run II del Tevatron
 - ↳ E' il terzo minivertice costruito
 - ↳ SVX, DC coupled, 4 strati SS, "Evidence for top"
 - ↳ SVX', AC coupled, 4 strati SS, "Top discovery"
 - ↳ Progettazione partita nei primi anni '90
 - ↳ sopravvivere a 2fb^{-1} (circa 1 MRad, strato piu' interno)
 - ↳ 5 strati, doppia faccia (punti spaziali)
 - ↳ estendere le capacità di *b-tagging* dell'esperimento alla zona in avanti ($|\eta| > 2$) ($2.44\text{ cm} < R < 10.6\text{cm}$)
 - ↳ poter essere utilizzata in un trigger alla ricerca di tracce con grande parametro d'impatto
- ← Nel 1996 aggiunti due strati a $R=20, 28\text{ cm}$ (ISL) e poi (1999) uno strato rad-hard S.S. ad $R=2\text{ cm}$ (L00)
 - ↳ sistema integrato di 7÷8 punti spaziali
 - ↳ tracciatore

SVXII

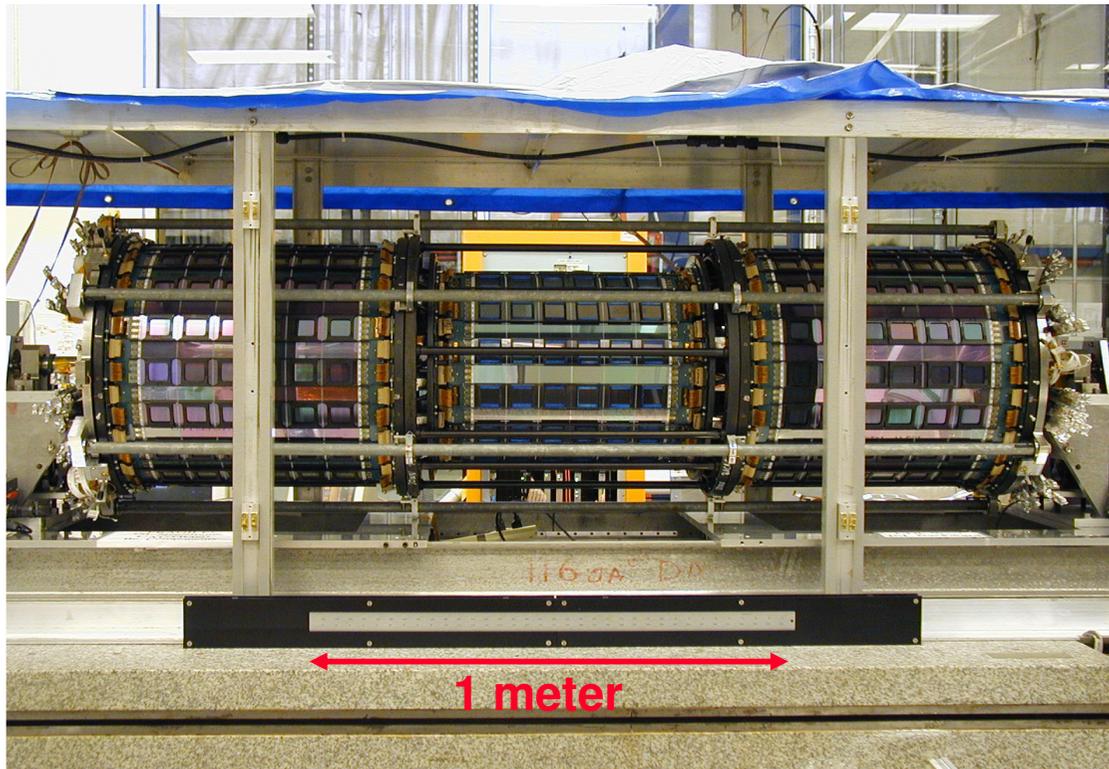
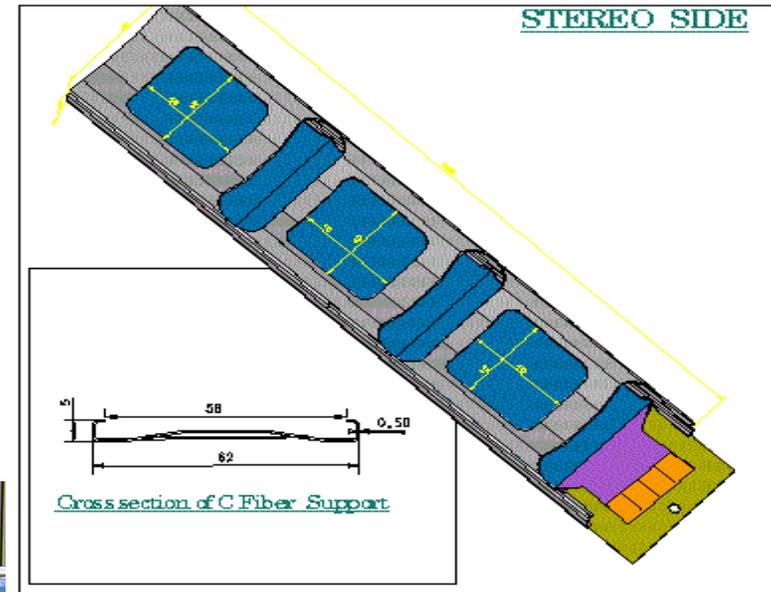
- ☛ Main CDF silicon vertex detector
 - ↳ ISL, L00 are improvements to SVX II
 - ↳ Sensors are DS:
 - ↳ 3 x 90° layers + 2 x SAS layers
 - ↳ R- ϕ pitch $\sim 60 \mu\text{m}$,
 - R-z $\sim 60 - 140 \mu\text{m}$ (SVXII)



SVX II Parameters	
Number of Barrels	3
Active length per barrel	29 cm
Number of layers	5
Readout coordinates per layer	$\phi+z / \phi+\phi'$
Radius of inner and outer layers	2.45 cm, 10.6 cm
Ladders per barrel-layer = ϕ sectors	12
Each 1/2 ladder is one electrical unit of length	14.5 cm
Total number of electrical ϕ sector wedges	72
Readout channels: ϕ	211.968
Readout channels: z	193.536
Total	405.504

ISL

- ☛ Estende SVX II a grande raggio (28 cm) e rapidità ($|\eta| \sim 2$)
 - ↳ raddoppia l'accettanza per *b-tagging* e l'identificazione di elettroni/ γ
- ☛ Il più grande tracciatore costruito
 - ↳ La struttura di supporto è una sfida



☛ Sensori:

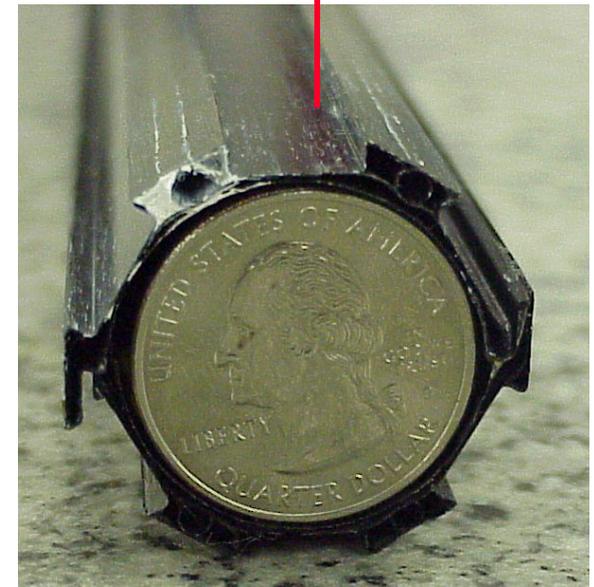
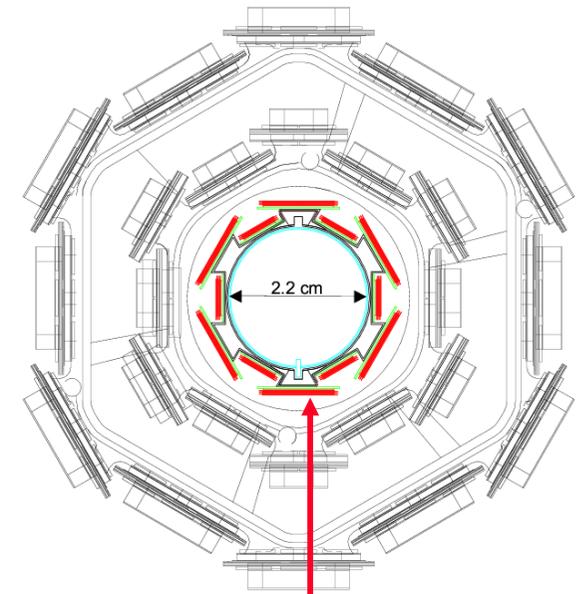
- ☛ doppia faccia tutti con angolo stereo a piccolo angolo
- ☛ 112 μm pitch

☛ Supporto

- ☛ struttura in fibra di carbonio a basso peso ed alta rigidità

➤ Rivelatore più interno di CDF:

- ↳ Migliora la risoluzione in parametro d'impatto a basso p_T
- ↳ Sensori connessi ai chips da cavi di Kapton (fino a 40 cm) per evitare materiale nella regione di tracciatura
- ↳ Sensori:
 - ↳ Single sided - accoppiati in AC
 - ↳ 25 μm pitch, 50 μm readout
 - ↳ Struttura rad-hard ($V_{\text{max}} \sim 500 \text{ V}$)
 - ↳ 128 o 256 canali di lettura/sensore
 - ↳ usati 144 sensori
 - ↳ Sensori raffreddati a 0 °C per ridurre gli effetti della radiazione

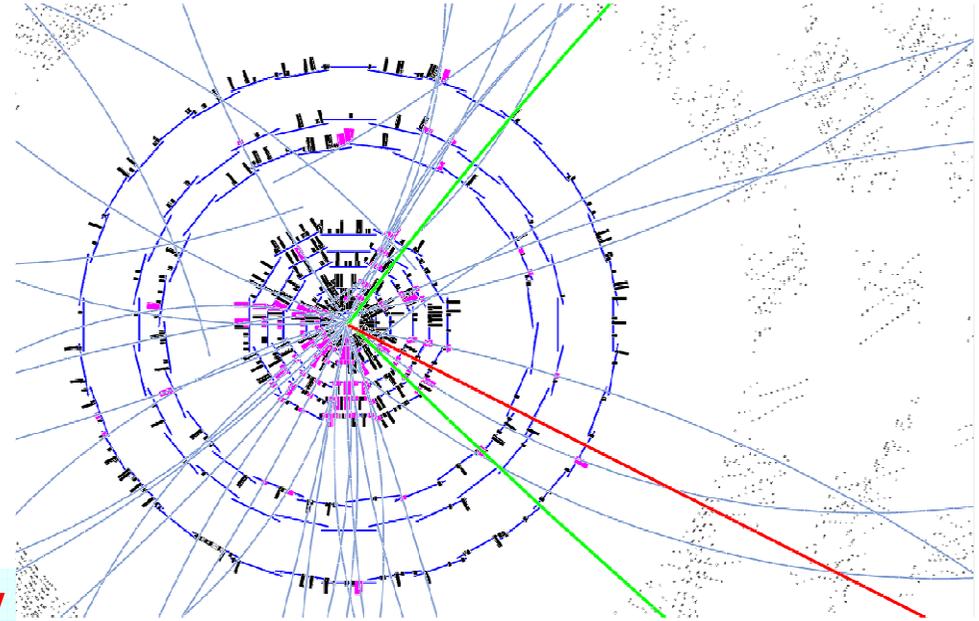


Silicon summary

CDF	Layer 00	SVX II	ISL	Totals
Layers	1	5	2	8
Length	0.9 m	0.9 m	1.9 m	
Channels	13824	405504	303104	722432
Modules	48 SS	360 DS	296 DS	704
Readout Length	14.8 cm	14.5 cm	21.5 cm	
Inner Radius	1.35 cm	2.5 cm	20 cm	1.35 cm
Outer Radius	1.65 cm	10.6 cm	28 cm	28 cm
Power	~100 W	1.4 kW	1.0 kW	2.5 kW

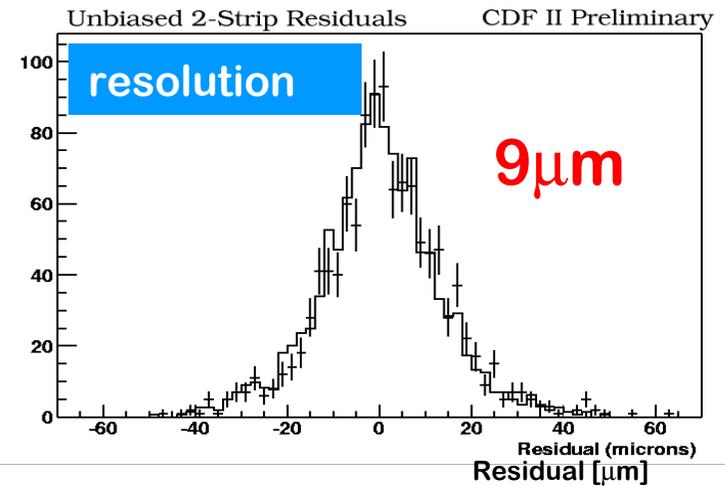
COT-Si "Outside-In" tracking

COT seeded tracking
"Progressive Road search"



Requirement	Efficiency	Requirement	Efficiency
$N_{r\phi} \geq 3$	94%	$N_z \geq 3$	80%
$N_{r\phi} \geq 4$	90%	$N_z \geq 4$	61%
$N_{r\phi} = 5$	46%	$N_z = 5$	26%

SVX is aligned in $r - \Phi$



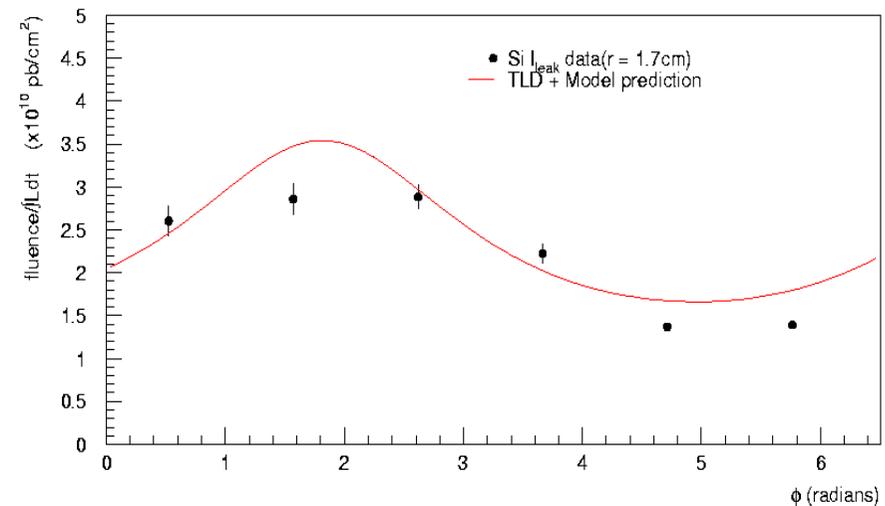
Danno da radiazione al silicio

← Esempio: vita media del rivelatore di CDF, tabella costruita a partire dalle misure del Run I:

Layer	safe fb ⁻¹	cause
0 (SS)	7.4	Vdep
1 (DS)	4.3(5.6)	S/N(Vdep)
2 (DS)	8.5(10.9)	S/N(Vdep)
3 (DS)	10.7	Vdep
4 (DS)	23(30)	S/N(Vdep)
5(DS)	14	Vdep
6(DS)	>40	n/a
7(DS)	> 40	n/a

Run I data: $r^{-\alpha}$, $\alpha=1.7$

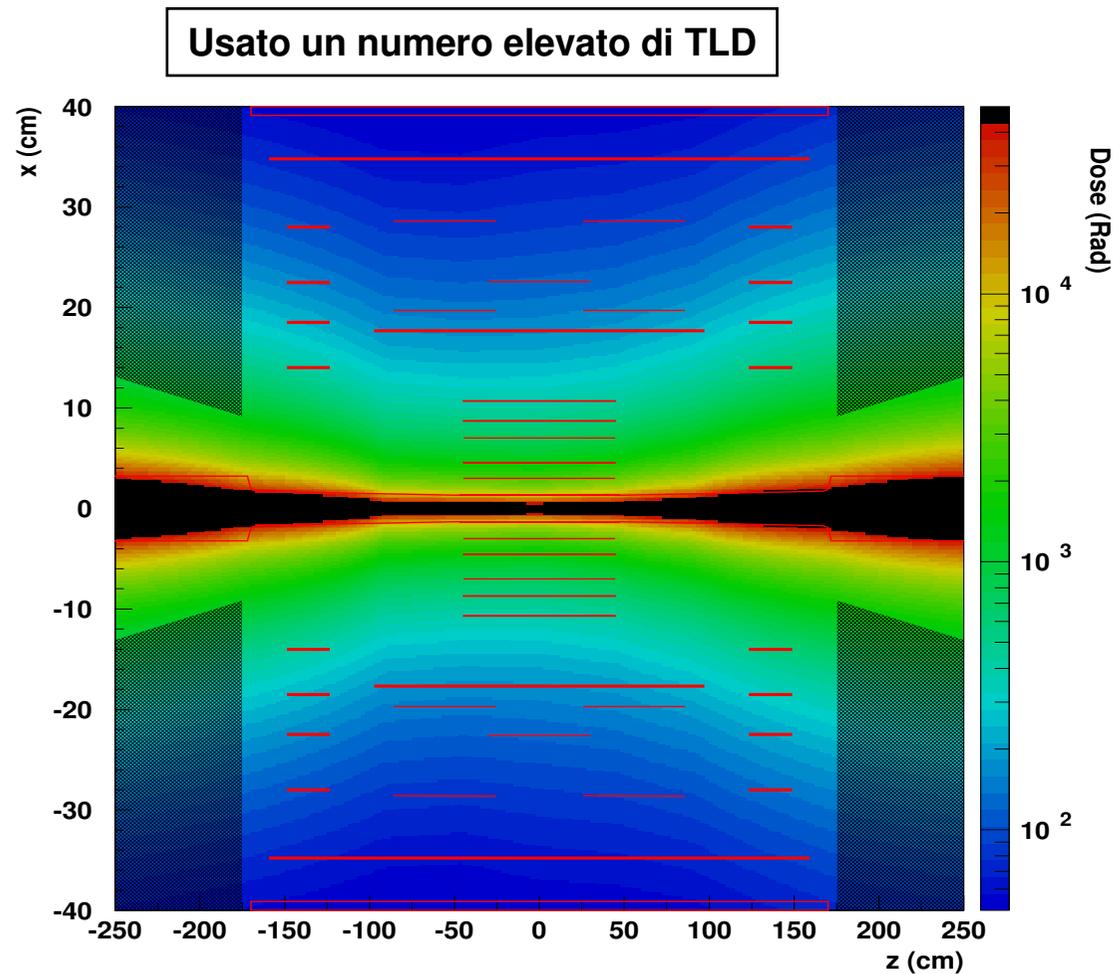
Run 2 data: $r^{-\alpha}$, consistent with expectations



Circa 2002-2003

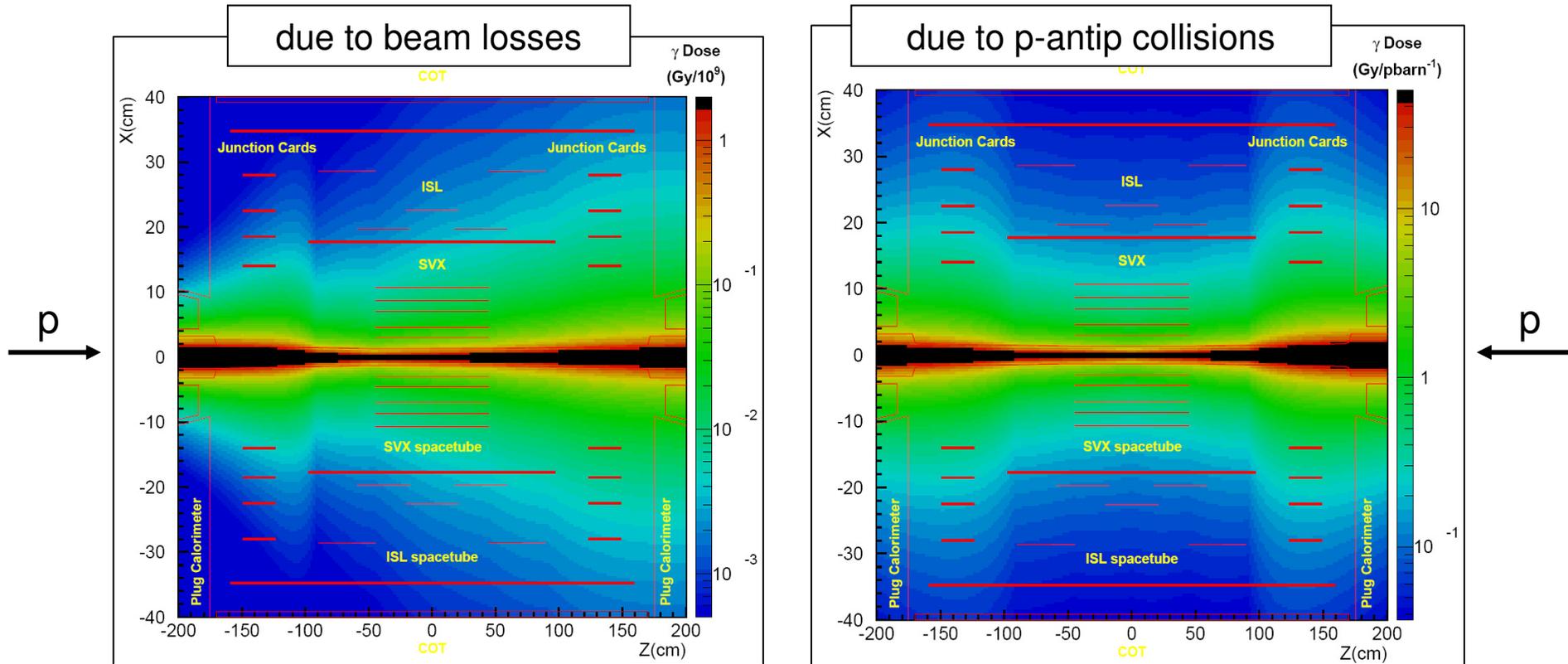
Misura della Radiazione Assorbita

- Periodo maggio-ottobre 2001
- Ancora molte perdite di fascio
- Misure per verificare andamento e totale dose
- Fit della dipendenza radiale con $1/R^\alpha$
- Risultato:
 $\alpha(z) = 1.5-2.0$
- Run IIa aspettativa di vita per il silicio fatta con
 $\alpha = 1.7 \pm 30\%$ (OK)



Radiation Field

- Measured using more than 1000 thermo-luminescent dosimeters (TLDs)
- Two different data-taking periods allowed for distinction between fields:



(See R. J. Tesarek *et al.*, IEEE NSS 2003)

- Radiation field is collision-dominated and scales with $r^{-\alpha(z)}$, with $1.5 < \alpha(z) < 2.1$
- How this field affects the silicon sensors ?**

Depletion Voltage: Signal Vs Bias

➔ Look at the charge collection dis.

↳ Reconstruct a track w/o using the s

↳ If track points to hit in sensor reco

➔ Charge collection distribution

↳ Follows a landau distribution

↳ Distribution is smeared by intrinsic

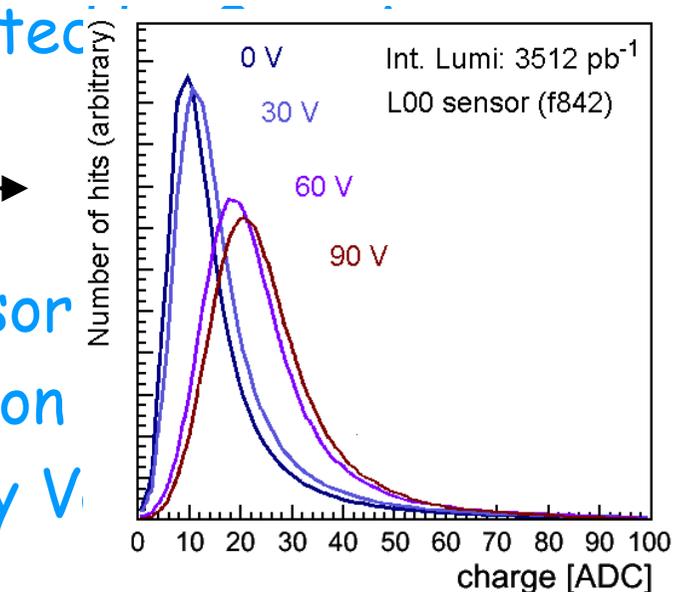
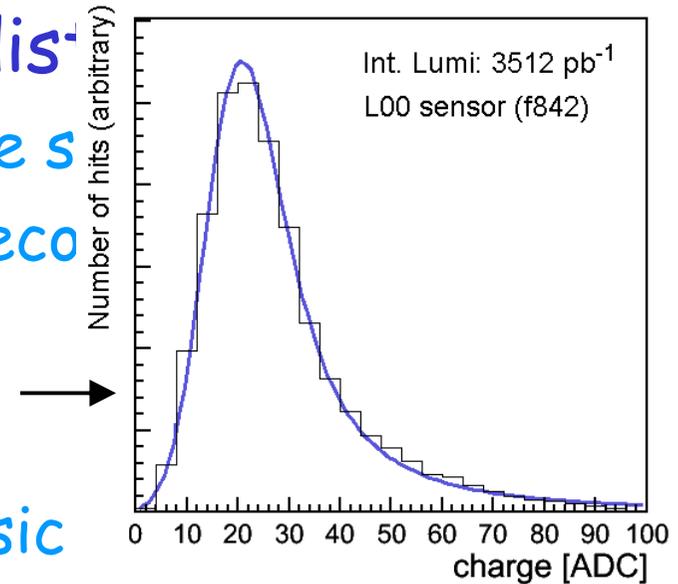
↳ Fit the curve to a Landau convoluted
(4 parameter fit)

➔ Depletion Voltage:

↳ Maximal for a fully depleted sensor

↳ Study charge collection as function

↳ Identify charge of Most Probably V
in each distribution

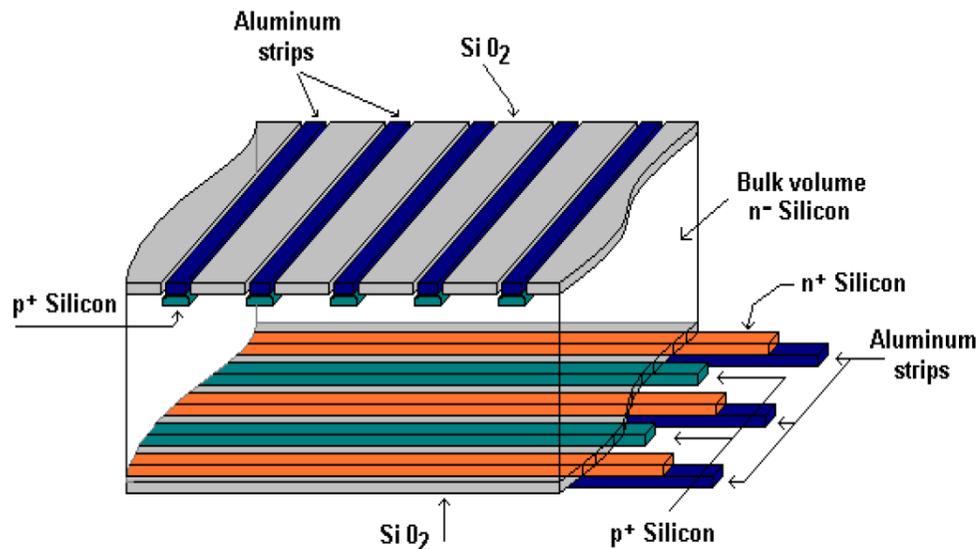


Problemi dovuti al danno da radiazione

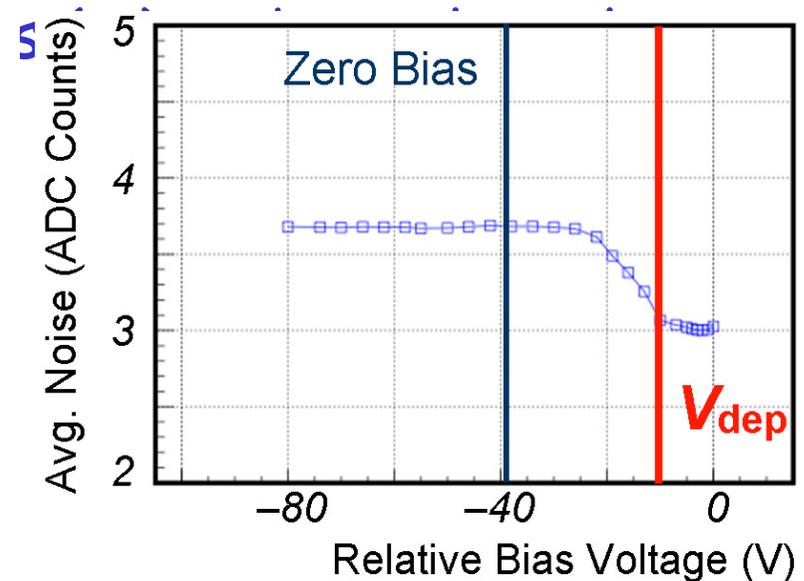
- ☛ Ricordiamoci che -operativamente- due possono essere i motivi per i quali il danno da radiazione può impedire l'utilizzo di sensori al silicio:
 - ↳ Tensione di svuotamento troppo alta
 - ↳ Breakdown o rottura dei condensatori di (dis)accoppiamento
 - ↳ Il rumore aumenta ad un livello in cui il rapporto S/N impedisce l'utilizzo sia per pattern recognition che per "hit linking"

Depletion Voltage: Noise Vs Bias

- Take advantage of double sided sensors, that have strips on the back side



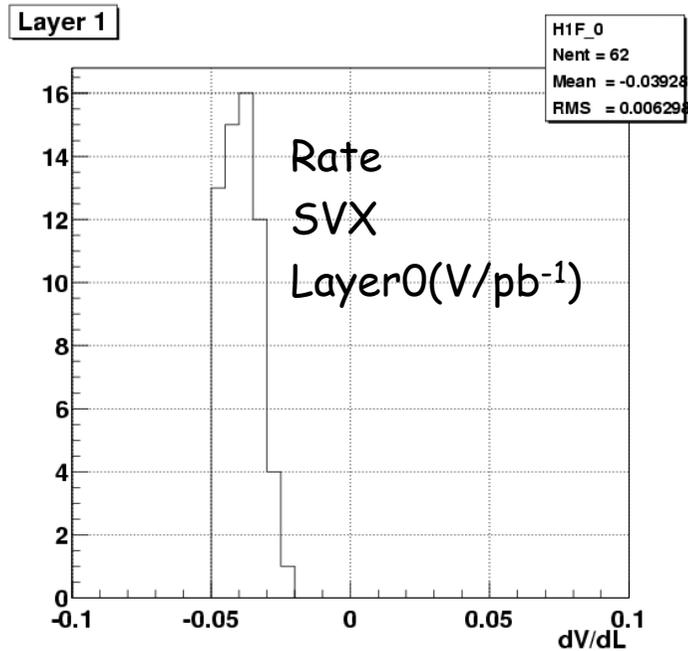
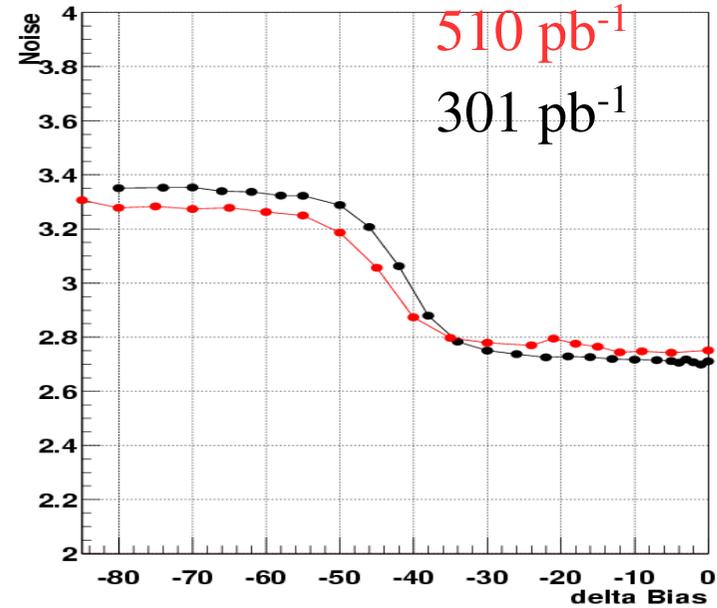
p⁺ side



- Need a criteria for defining V_d
 - We use 95% reduction in noise between the two plateaus
- No beam required
 - no interference with data-taking
- Does not work after the sensor underwent inversion.
 - Depletion zone generated differently

Alternative Method: Noise vs Bias Scan

- In double sided silicon sensors, noise exhibits a dip as a function of bias voltage as p-stops separate at \sim at V_{dep}
 - \Rightarrow Track V_{dep} as a function of luminosity and determine rate of change dV/dL
- Method does not require beam time
- Can't be used for L00 (single-sided)
- Won't work after type inversion.

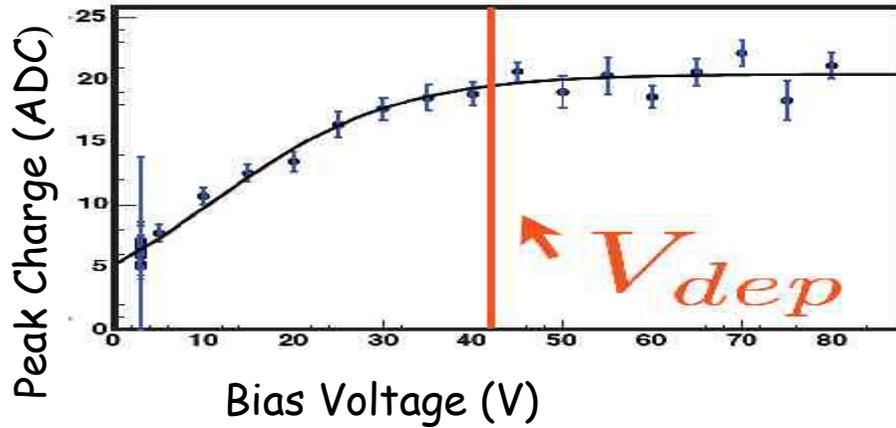


- Rate (V/fb⁻¹)
- layer 0: -39.3 ± 0.7
 - layer 1: -26.1 ± 0.7
 - layer 2: -6.7 ± 0.7
 - layer 3: -10 ± 0.7
 - layer 4: 1.8 ± 0.7
 - layer 5: 2.5 ± 0.4
 - layer 6: 5.8 ± 0.5

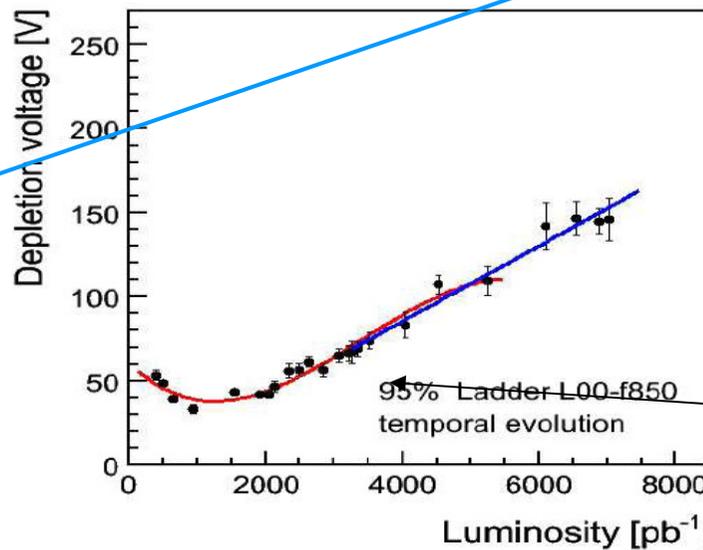
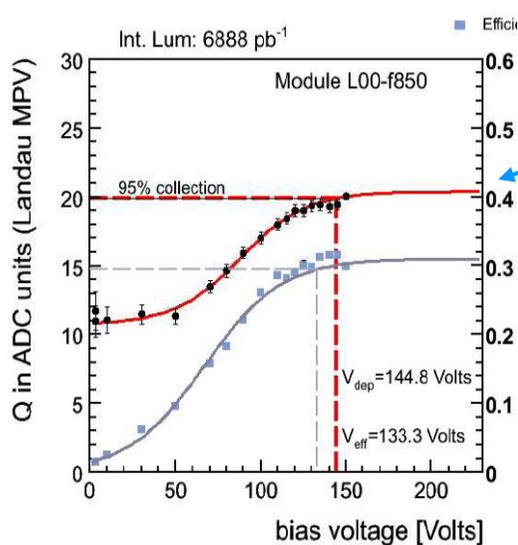
Statistical Uncertainties only
 Systematic uncertainties under investigation.

Alcuni risultati

- A CDF disponibile l'andamento della tensione di svuotamento con degli scan dedicati



- Ricetta:
 - ↳ Variare il V_{bias} sui rivelatori
- Per ciascun punto:
 - ↳ Registra la carica raccolta dagli hits associati a tracce
 - ↳ Fit distribuzione con Gaussian \otimes Landau per trovare Most Probable Value (MPV)
 - ↳ La tensione di svuotamento corrisponde a quella dove è raccolto il 95% della carica al plateau



- ↳ Un po' arbitrario ma ricordatevi che avete bisogno di una definizione operativa

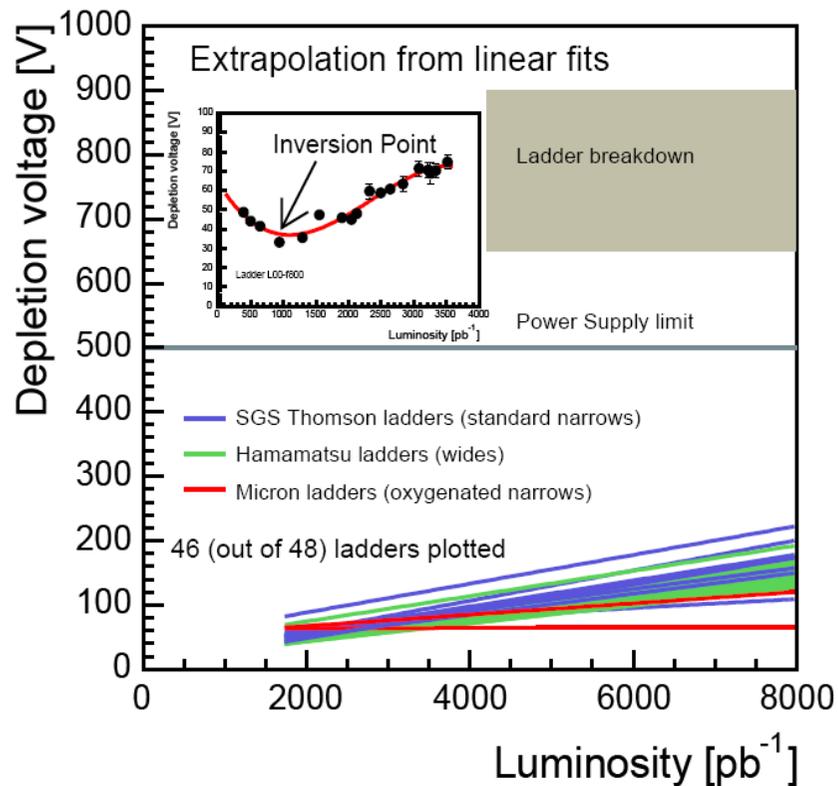
Inversione

Per un rivelatore del L00

Risultati: voltaggio di svuotamento

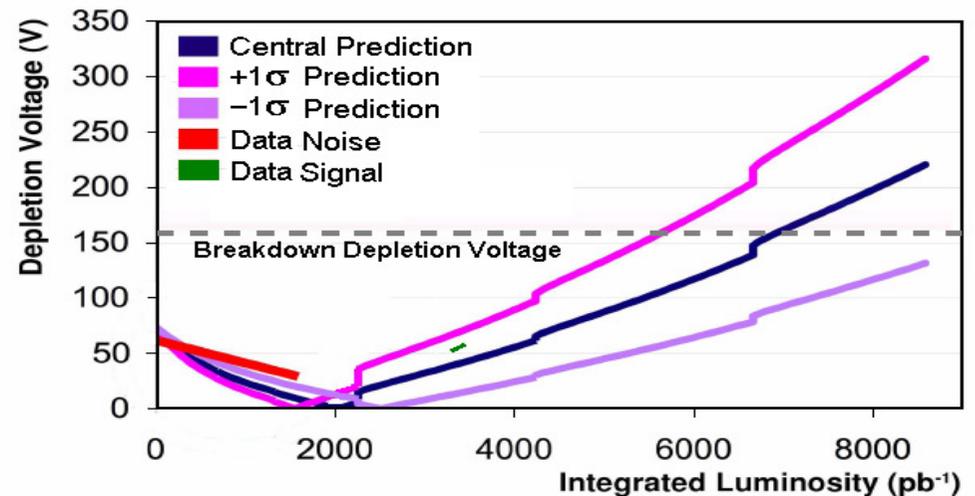
➡ Predizione per L00

- ↳ Dipende dal tipo di sensore
- ↳ Ladder ossigenate invertono molto più tardi



➡ Predizione per SVX-L0

- ↳ Dipende dal tipo di sensore
- ↳ Ladder ossigenate invertono molto più tardi



Prediction: S. Worm, "Lifetime of the CDF Run II Silicon," VERTEX 2003

Ad oggi le dosi ricevute sono di

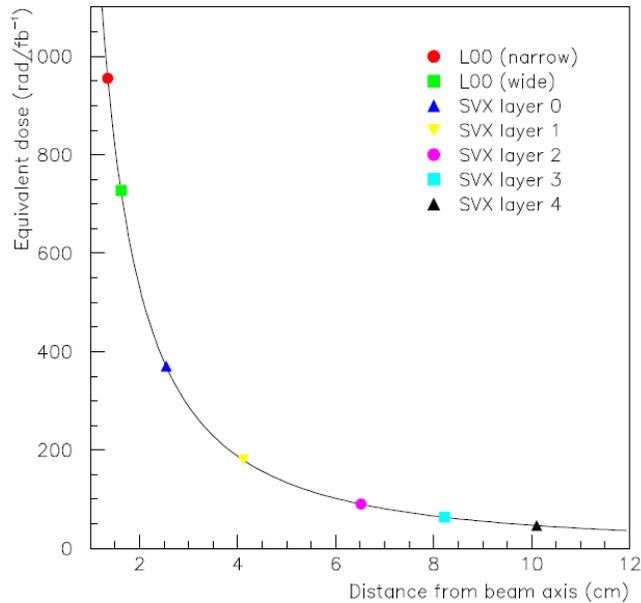
L00: 50kGy, L0: 20kGy, L1: 10 kGy

1Gy= 100 rad

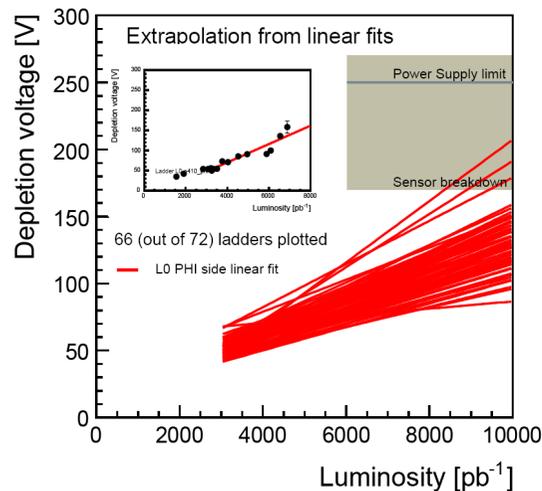
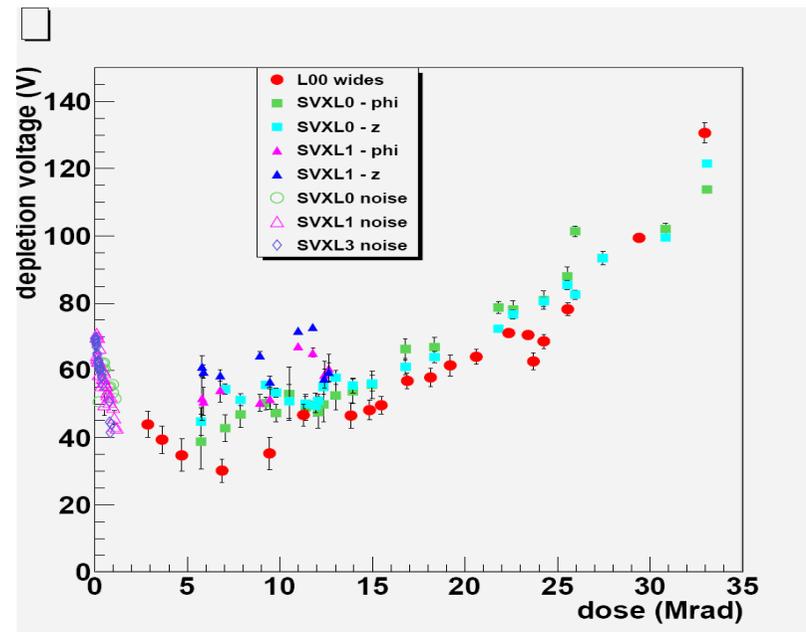
Saremo in grado di svuotare i rivelatori fino alla fine del Run II

Il Run 2 sta per finire

Il Run 2 finirà il 30 settembre 2011



$$\text{Dose}(r) = (1500 \text{ rad}/\text{fb}^{-1}) * r^{-1.5}$$



Saremo in grado di far funzionare tutti i rivelatori

Rapporto segnale su rumore

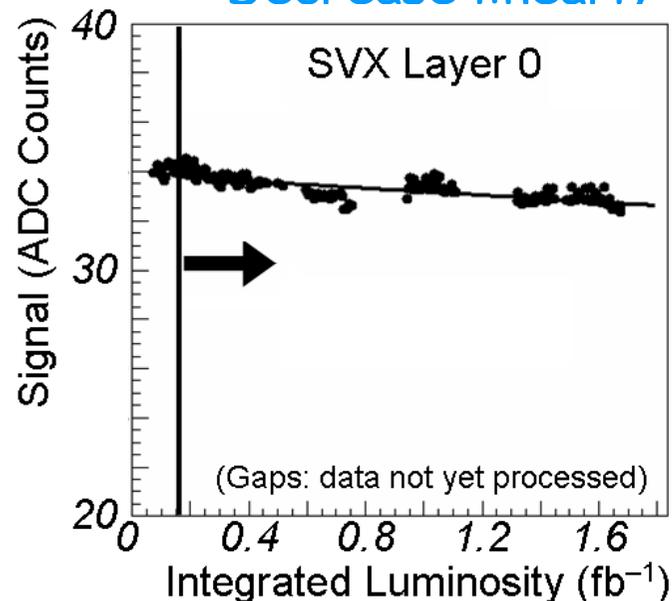
- ← The figure of merit of the performance is the Signal to Noise Ratio (S/N)

- ↳ Signal: charge collected when a charged particle crossed the sensor

- ↳ Noise: intrinsic noise of the detector

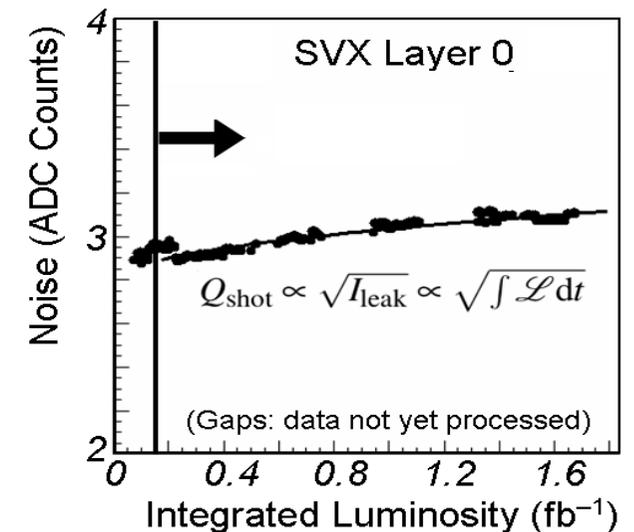
← Signal

- ↳ Use $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ tracks
 - ↳ Get total charge of cluster
 - ↳ Decrease linearly with Lum.



← Mean Strip Noise

- ↳ Average over strips in charge cluster
 - ↳ Obtained from calibrations taken every two week.
 - ↳ Square root increase with Lum.



Signal to Noise Ratio

Fit of S/N

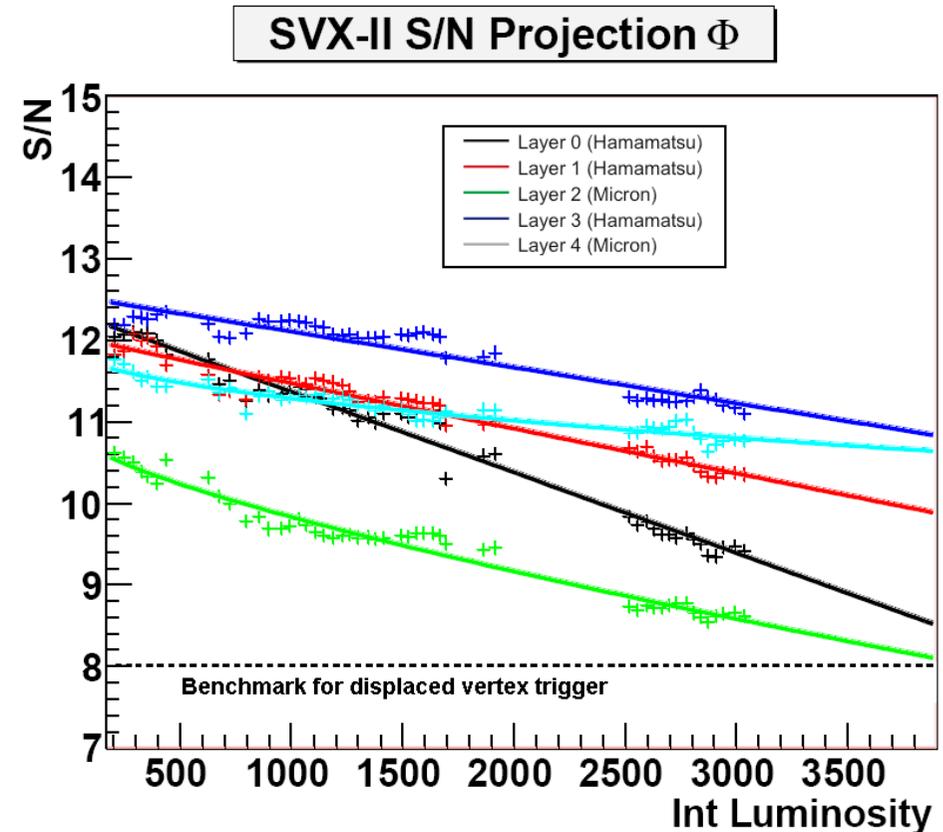
- ↳ Limit I: $S/N=8$ (SVT eff.)
 - ↳ $S/N = 6$, x% loss in SVT eff.
- ↳ Limit II: $S/N=3$ (B tag eff.)

Sensor-type behavior

- ↳ Layers 2,4 (Micron)
- ↳ Layers 0,1,3 (Hamamatsu)

First layer needs careful monitoring to see if it is going to be useful at $4\div 5 \text{ fb}^{-1}$.

- Monitoring the depletion voltage is a key aspect to predict how long the CDF silicon detector will last.



Most of the silicon layers will be fully operational until the end of Run II

Cosa è successo?

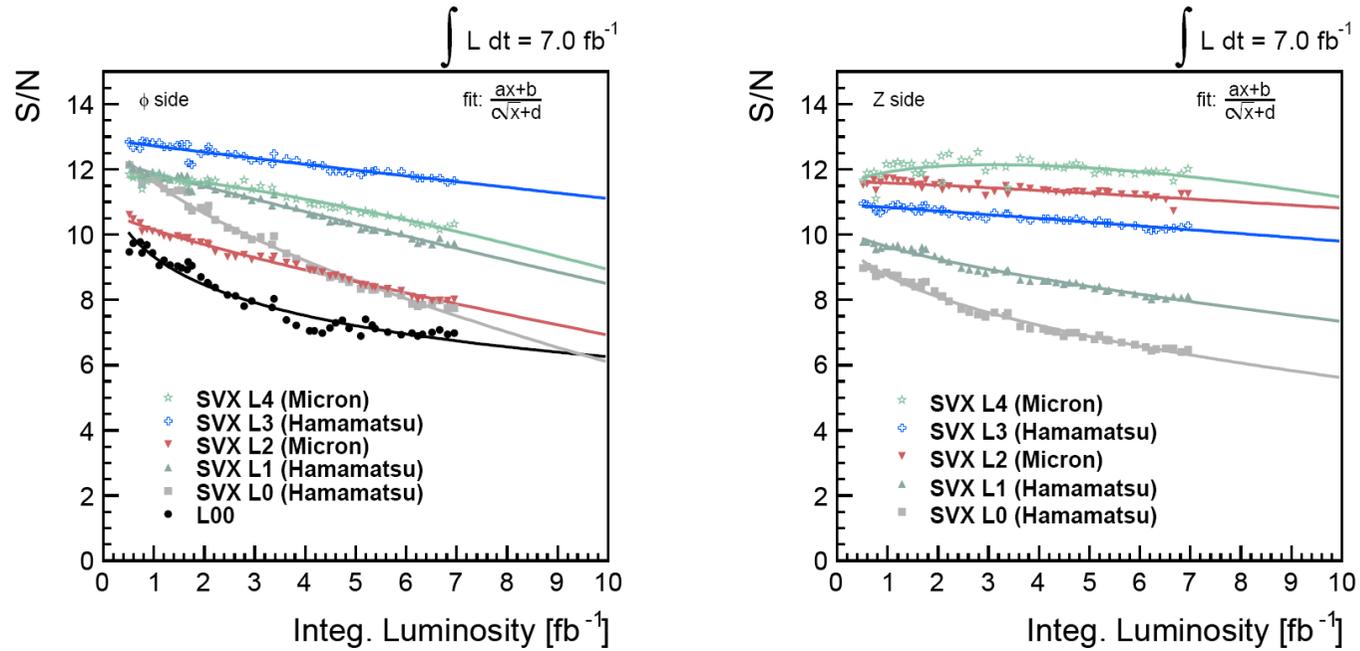


Figure 27: Signal-to-noise ratio for L00 and both sides of SVX-II. Extrapolations (solid lines) of the S/N ratio for integrated luminosities up to 10 fb^{-1} are also shown.

S/N	6.3	6.1	8.5	7.0	11.1	8.9
Error	± 0.5	± 0.2	± 0.5	± 0.3	± 0.4	± 1.0
z side						
S/N	0	5.6	7.3	10.8	9.8	11.1
Error	0	± 0.1	± 0.2	± 0.2	± 0.2	± 0.9

Table 3: Extrapolated values of the signal-to-noise ratio at an integrated luminosity of 10 fb^{-1} for L00 and each layer of SVX-II.

Problemi operativi

- ☛ Far funzionare un rivelatore così complesso comporta dei problemi operativi (talvolta inattesi)
 - ↳ SEU
 - ↳ Perdita (semi) disastrosa del fascio
 - ↳ Problemi di rumore
 - ↳ Resistenza alla radiazione di tutte le componenti
 - ↳ Failure mode imprevisto(i)

- ☛ Invecchiamento di alcune componenti
 - ↳ Sistema di raffreddamento

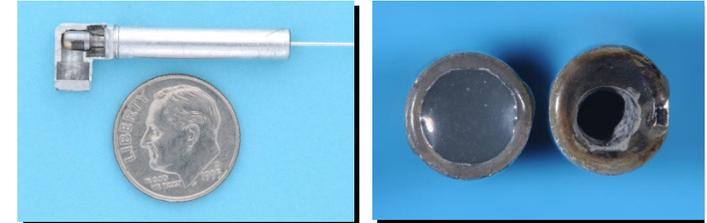
- ☛ In generale sistema disegnato per durare pochi anni ed integrare 2fb^{-1} , funzionerà per 8-9 anni fino a $6-8\text{fb}^{-1}$

Operational Issues

During commissioning:

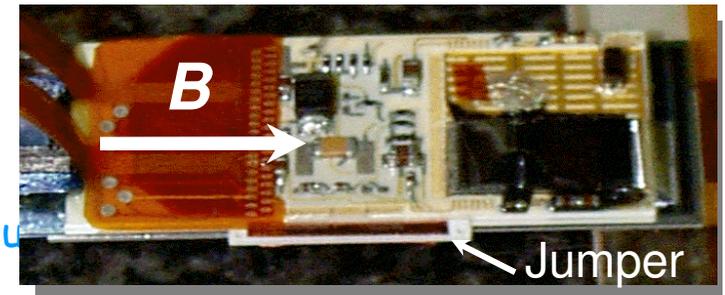
Blocked Cooling lines

- ↳ Blocked by glue, well inside the detector
- ↳ Solution: open them up with a powerful laser



Resonances

- ↳ Wire bonds \perp to the magnetic field
- ↳ Synch. Readout \rightarrow wire oscillate and break
- ↳ Solution: Stop high frequency synchronous readout



Beam Incidents

- ↳ High dose accidentally delivered to the detector
- ↳ Solution:
 - ↳ Collimators in key parts of the Tevatron
 - ↳ New Diamond based BLM system.



After commissioning: Infrastructure & Aging

Infrastructure & Aging: Power Supplies

95

Common failure modes of CAEN SY527

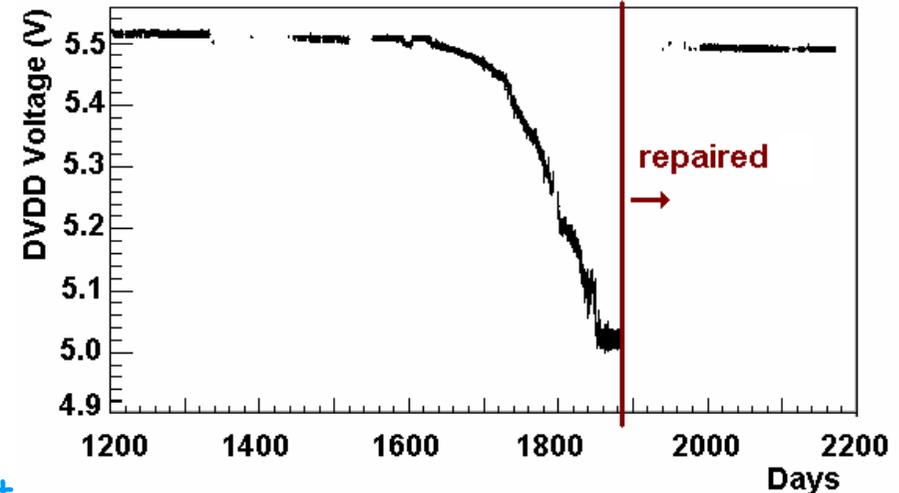
- ↳ Communication loss
- ↳ Corrupted read back of voltages/currents
- ↳ Spontaneous switch off

Failure mode of power supply modules:

- ↳ Voltages in Analog, Digital and Port-Card supply start slowly dropping.
- ↳ Up to 47 Power supplies started to show this.

Problem:

- ↳ aging of one type of capacitor
- ↳ 36 capacitors per power supply
- ↳ Can result in bit errors



➤ Solution:

- Wait for the shutdown of September 2007 and ...
 - take all faulty power supplies out
 - replace all 36 capacitors (on FNAL site)
 - put them back in and test them on location.

➤ Time intensive effort, lasted about 2 months.

- Not enough time to change all
- **Still expect to replace others as failure appears**

All power supplies with this failure were replaced!

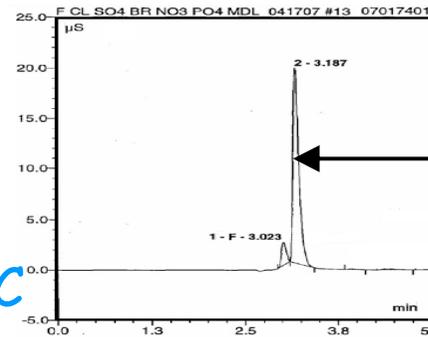
95

Infrastructure & Aging: Cooling Lines

96

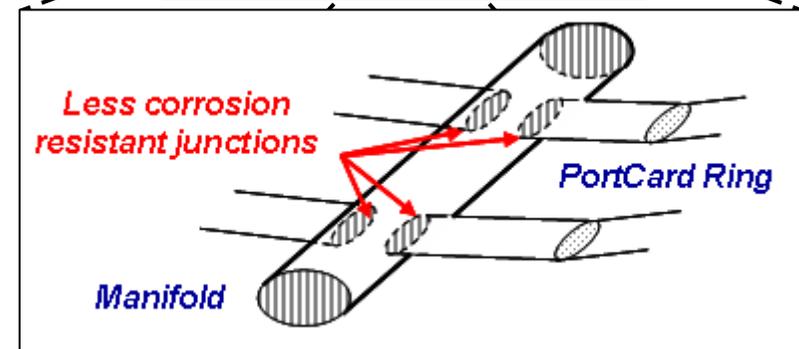
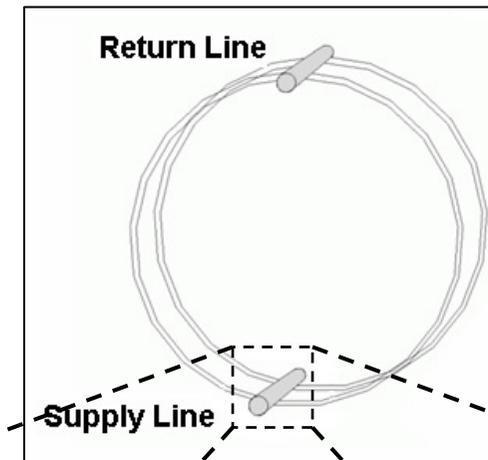
☛ Cooling Lines

- ↳ Symptoms: electronic-valves start failing.
- ↳ Problem: ISL cooling line (10% glycol in water) became **ACIDIC** (ph=2) during the 2006 shutdown
- ↳ Solution: coolant neutralized by draining and larger use of de-ionizing resin bed



- Ion chromatography analysis showed carboxylic acids, mostly formic acid.
- Likely came from the oxidation of glycol

- Welds of the aluminum rings that cool optical transmitter had already been corroded
 - ☞ One meter from the closest accessible point
 - ☞ Why there ?
- Corrosion-resistance: is alloy-dependent
 - ☞ Heat affected zone around junctions manifold most sensitive (alloy: 6061-Al).



Infrastructure & Aging: Cooling Lines Repair

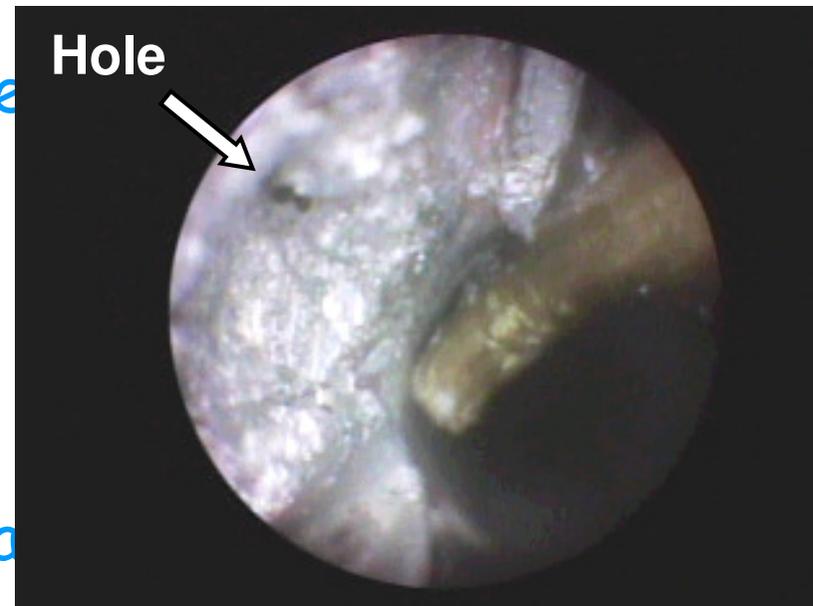
97

Started shutdown of 2007:

- ↳ Keep the silicon cold and dry at all times
- ↳ A plastic tent was setup to work.
 - ↳ A custom made air dryer changed the volume every 2 minutes.
 - ↳ Dew Point was always kept

↳ Basic Idea:

- ↳ Cover holes with epoxy the inside of the pipe
- ↳ using borescopes and ca



↳ **Repaired cooling system has been running stable for months !**

Feb 29th, 2008

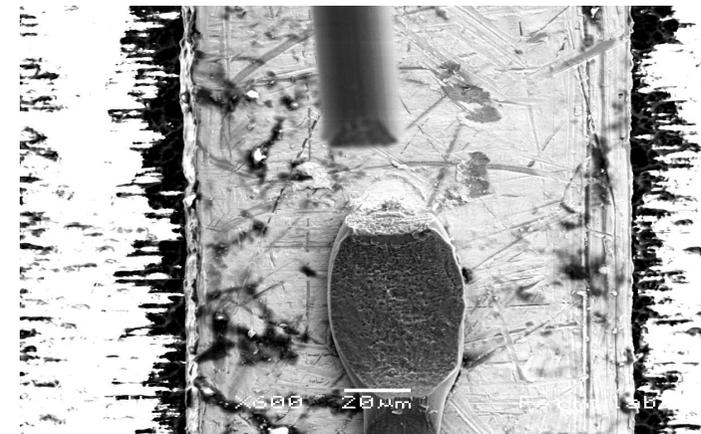
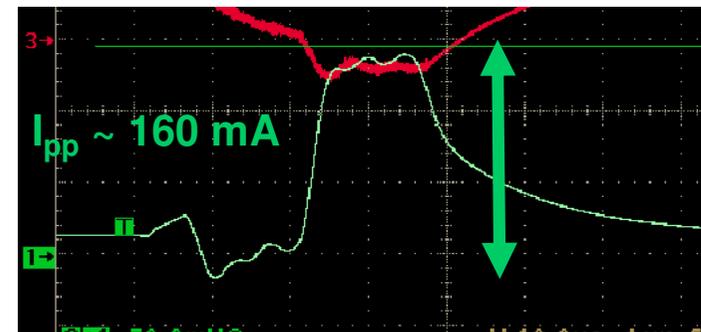
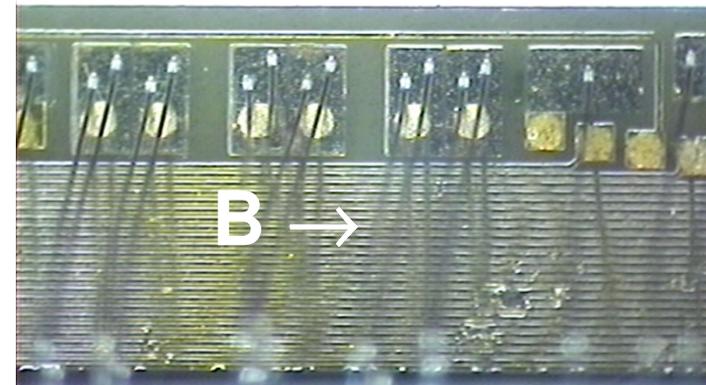
↳ 4 shifts of people

Ricardo Eusebi - INSTR 08, Novosibirsk, Russia

97

Rotture delle microsaldature

- ☛ Perdita di potenza sulla parte digitale di 13/360 lati Z di SVXII
- ☛ **Ipotesi:** sforzo da forza di Lorentz
 - ↳ Saldatura I ortogonale a B
 - ↳ $I \propto$ occupancy
 - ↳ L1A rate \Rightarrow Risonante?
 - ↳ Test convincenti
 - ↳ filmato
 - ↳ Cambiati i settings operativi
 - ↳ Ora funziona
- ☛ Si continua a monitorare il problema



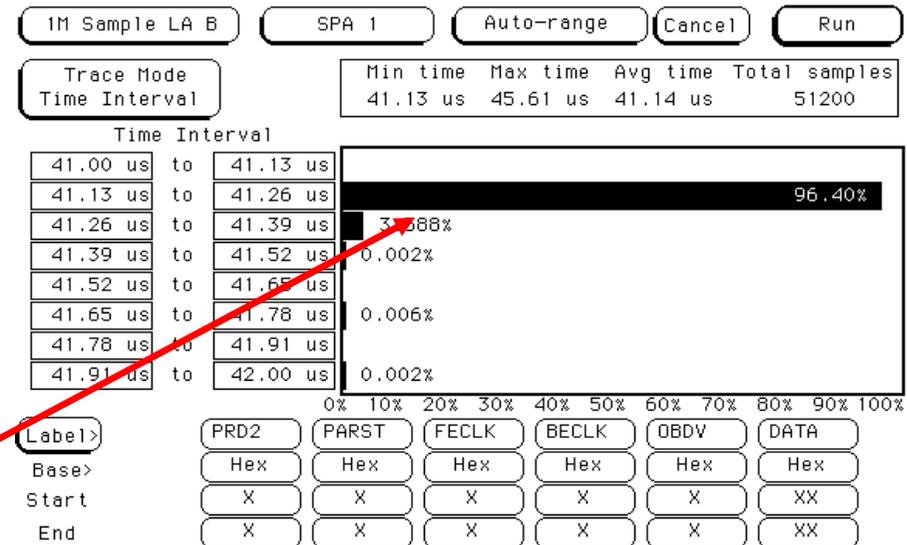
Final Confirmation

- Using actual spare SVXII ladders and real CDF DAQ and real power supplies

- ↳ Configured DAQ to readout silicon with a definite frequency
- ↳ Scanned these frequencies, looking for resonances
- ↳ After several days of testing ... DVDD jumper bond broke!

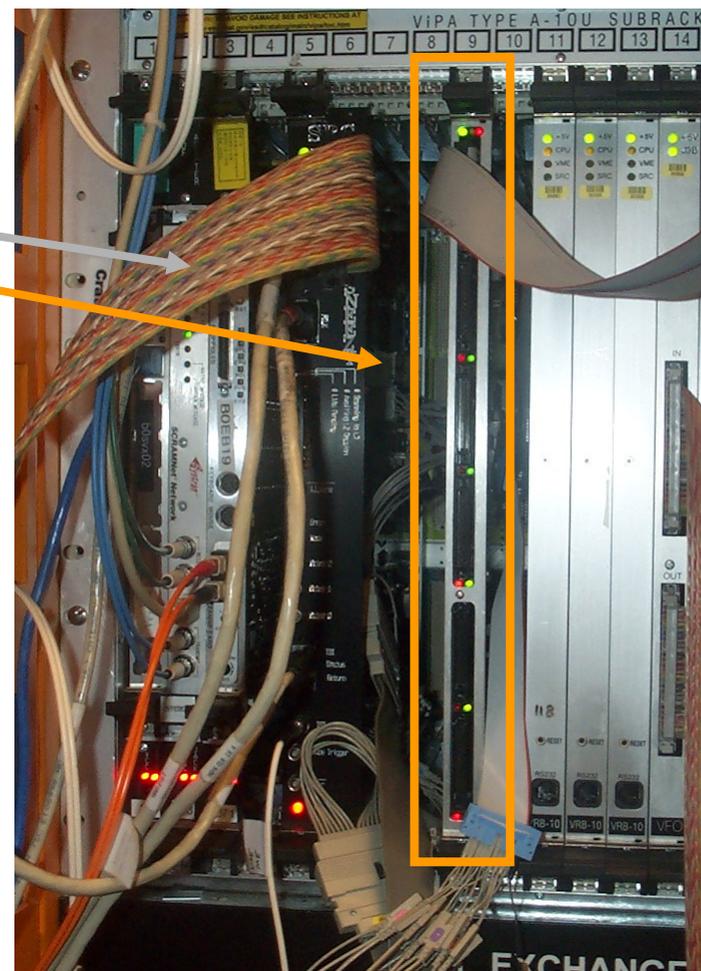
Fix:

- ↳ Use DAQ to detect resonance and abort
- ↳ Now happily running at 25KHZ (and more)



Wirebond Resonance Mitigation

- ☛ A synchronous trigger condition detector is now operational in CDF to avoid wire bond resonances
 - ↳ Performs FFT analysis of L1 trigger rates
 - ↳ Halts DAQ via SRC
 - ↳ Based on SVT **ghostbuster** board
 - ↳ DAQ code analyzes possible cause of synch. trigger conditions.
- ☛ System has been thoroughly tested - currently being migrated from prototype board to full 8 channel system
- ☛ Currently running successfully @ 25 kHz L1A rate.



Ospiti inattesi

☛ Nel L00 problemi di rumore

- ↳ I chip di FE sono stati montati lontani (connessi con cavi al rivelatore) e il pick up ha assunto le caratteristiche di noise coerente
 - ↳ Niente DPS, niente sparsified readout
 - ↳ Tempi di lettura lunghi, impossibilità ad essere usati online

☛ Nel L00 problemi di radiation hardness

- ↳ Non del rivelatore
- ↳ Ma dei power supplies (utilizzo di un componente rad-soft non esplicitamente citato nelle specifiche)

Conclusioni

- ☛ L'uso dei rivelatori a semiconduttore ha aperto nuovi settori di fisica
 - ↳ Percorso complesso e faticoso, lunga R&D
- ☛ Sono dei rivelatori oramai maturi
 - ↳ Expertise diffusa grazie anche ad LHC
- ☛ È il momento di inventarsi nuove strade (anche dal punto di vista degli utilizzi)

- ☛ L'intrinseca semplicità non deve far perdere di vista problemi operativi e sottigliezze di disegno che possono compromettere il loro funzionamento