

Pisa, 27 novembre 2008

Cenni su rivelatori a stato solido

G.Collazuol

Sommario

- * introduzione ai rivelatori a stato solido
- * proprietà di base
- * segnale e rumore
- * misure di energia
- * misure di posizione
- * rivelazione di fotoni

Impiego dei rivelatori in generale (particelle cariche / fotoni)

- | | |
|--|-------------------|
| (1) misura di energia (calorimetria, spettroscopia) | - distruttiva |
| (2) misura di posizione (tracking, imaging) | - non distruttiva |
| (3) misura di tempi | - " " |
| (4) identificazione di particelle | - " " |
- (scelta ρ , Z)

Sempre catena di rivelazione e`:

- (a) perdita di energia nel mezzo (gas, liquido, solido)
- (b) energia convertita in segnale elettrico (carica/corrente)

* DIRETTAMENTE => IONIZZAZIONE oppure

* INDIRETTAMENTE => ECCITAZIONE

(scintillazione, cherenkov/TR, bolometri)
e poi convertita in carica (PMT/trasduttori)

- (c) amplificazione - moltiplicazione secondaria (ionizz per impatto)
- circuito amplificazione elettronico

(d) pulse shaping (filtri) per ottimizzare (Segnale/Rumore) S/N

(e) Analog to Digital Conversion (ampiezze/tempi), sampling vs t

NOTA: processi (a), (b), (c) soggetti a fluttuazioni (noise)

processo (e) introduce approssimazione, bit meno significativo (LSB)

NOTE:

(1) energia necessaria per ottenere $Q=1e$ nel rivelatore:

semiconduttori	~ 3-10 eV
gas	~ 30 eV
scintillatori	~ 20-500 eV

(2) tempi necessari per raccogliere tutta la carica:

semiconduttori	~ 10 ps - 10 μ s
scintillatori	~ 1 ns - 1 μ s
bolometri	~ 1 ms - 1 s

(3) fluttuazioni in ogni stadio della catena:

- (a) distribuzione di dE/dX (Landau/Bohr)
- (b) fluttuazioni in ionizzazione/eccitazioni primarie
- (c) fluttuazioni in moltiplicazione (amplificazione interna)
- (c') fluttuazioni del segnale da elettronica di amplificazione

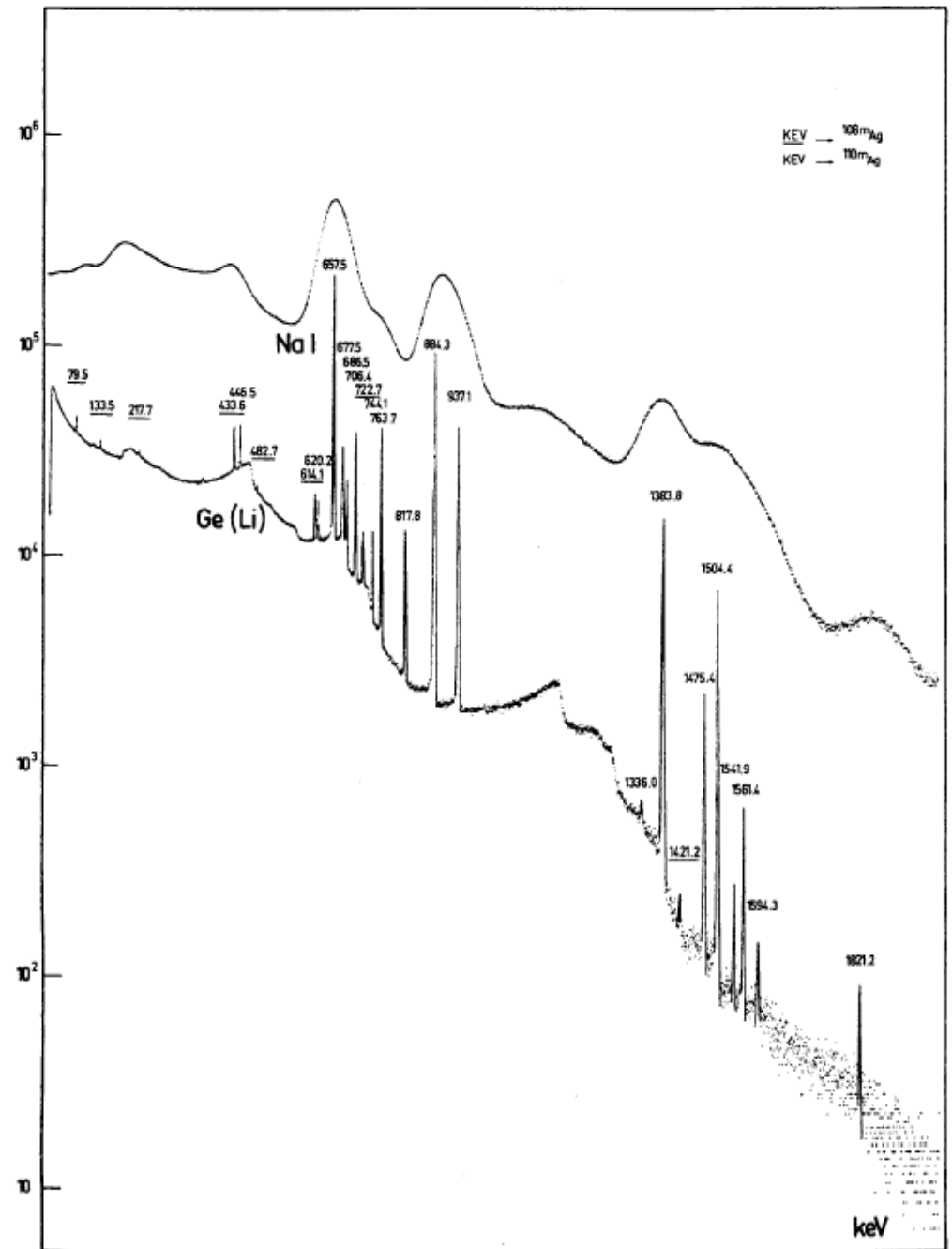
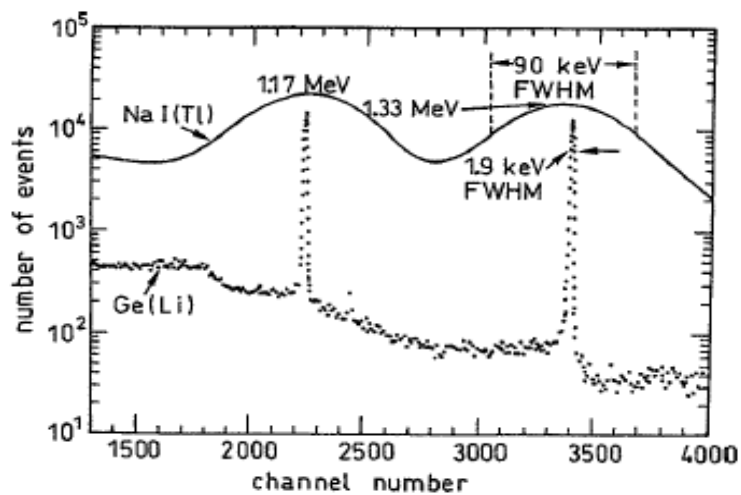
Esempio: MISURE DI ENERGIA ad energie intermedie (keV ~ MeV)

* RIVELATORI A STATO SOLIDO (meccanismo: IONIZZAZIONE)

Esempio in Lab:
particelle alfa in
esperimento di Rutherford

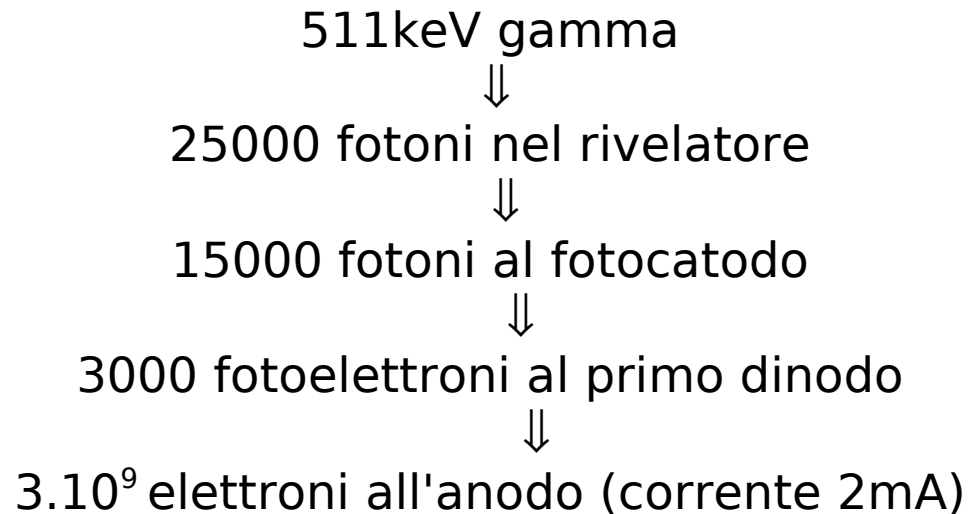
* SCINTILLATORI (meccanismo: ECCITAZIONE)

Esempio in Lab:
NaI detector in
esperimento Compton



Esempio: MISURE DI ENERGIA

Risoluzione (fluttuazioni) per SCINTILLATORI (esempio NaI)

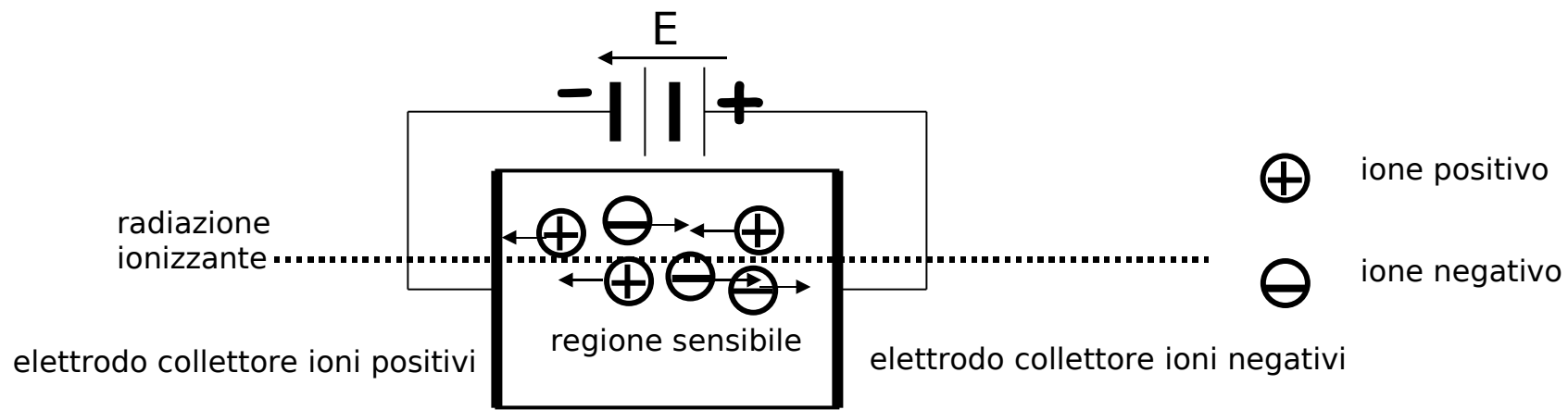


Risoluzione determinata dalla varianza sul numero dei quanti prodotti nella catena
(domina la fluttuazione sul piu` numero piccolo nella catena)

$$\Delta E/E = \Delta N/N = \sqrt{N}/N = 1/\sqrt{N} \sim 1/\sqrt{3000} = 2\% \text{ rms (x2.35 FWHM)}$$

In realta` con cristalli si ottiene al meglio ~8%
(raccolta luce, guadagno, non uniformita`, ...)

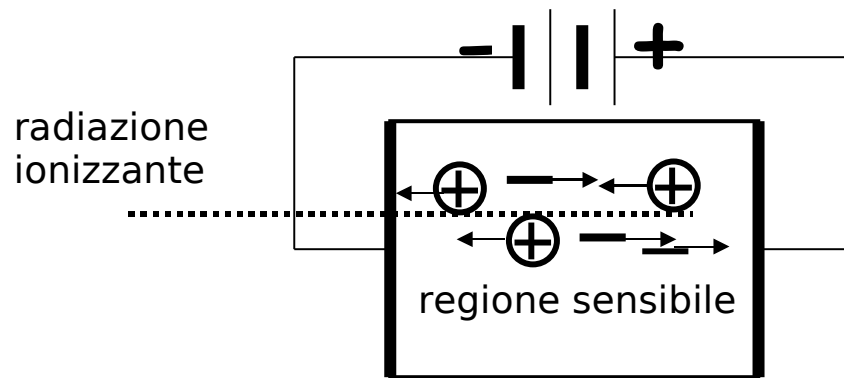
PRINCIPIO DEI RIVELATORI A IONIZZAZIONE A STATO SOLIDO: (ma anche a gas e liquidi)



Il campo elettrico determinato dalla tensione di polarizzazione nella regione sensibile ha una duplice funzione:

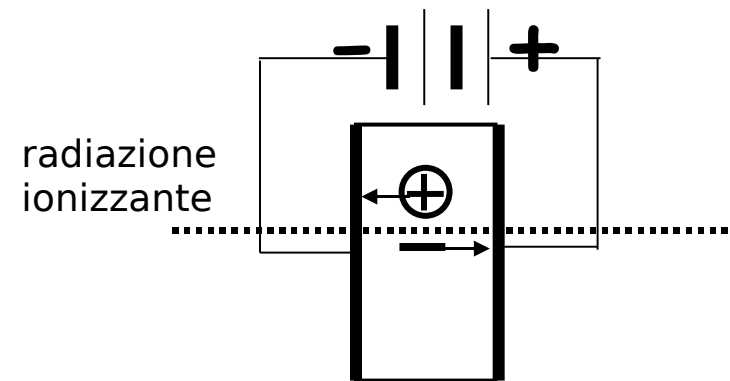
- allontana i portatori di carica opposta impedendone la ricombinazione
- li fa migrare verso i rispettivi elettrodi

In questo processo di migrazione viene indotta sugli elettrodi la corrente di segnale che contiene l'informazione relativa alla carica Q rilasciata nella regione sensibile (Ramo)



b) Regione sensibile molto sottile. Misura di dE/dx

a) Arresto nella regione sensibile. Misura di energia totale



Rivelatori a ionizzazione a stato solido interessanti per:

- * **bassa energia di ionizzazione**
=> - ottima risoluzione
- elevato S/N
- * **grandi campi elettrici nella regione attiva**
=> - risposta rapida
- meno ricombinazione q^+/q^-
- * **elevato stopping power** (si possono fermare le particelle nel rivelatore)
- * **ottima risoluzione in posizione** (di passaggio delle particelle)

Parametro fondamentale di un rivelatore a ionizzazione è

l'energia ϵ necessaria a creare una coppia di portatori ([energia di ionizzazione](#))

Per un dato valore di energia E depositata dalla radiazione nel rivelatore,

il numero N di coppie di portatori resi liberi è tanto maggiore quanto più basso è ϵ :

$$N = E/\epsilon$$

Un'elevata carica resa disponibile dalla radiazione incidente è importante per i rivelatori senza processo di moltiplicazione di carica

Quanto maggiore è la carica resa disponibile dal rivelatore, tanto meno critico risulta il processo di estrazione dell'informazione dal segnale e tanto meno esposto è il segnale all'azione dei disturbi esterni (noise).

Esempio: per un gas come Ar $\epsilon = 25$ eV

per un semiconduttore a basso gap, come Ge $\epsilon = 2.67$ eV

per un isolante ad alto gap, come C (diamante) $\epsilon = 13.2$ eV

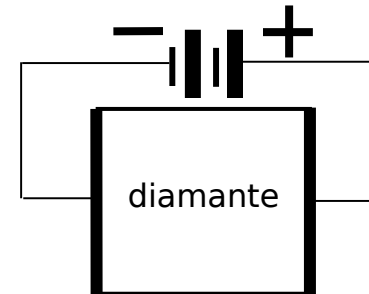
(confronta con NOTA 1 a pag.2)

L'**energia di ionizzazione** nei solidi e` proporzionale al gap tra le bande di valenza e conduzione:

- * piccolo gap ~ **conduttore**
 - piccolo campo elettrico
 - corrente DC \gg corrente indotta dal segnale

- * grande gap ~ **isolante**
 - grande campo elettrico
 - piccola corrente di segnale +
+ piccola corrente DC

esempio: **diamante**



- * gap moderato ~ **semiconduttore**
 - grande campo elettrico
 - grande corrente di segnale +
+ piccola corrente DC,

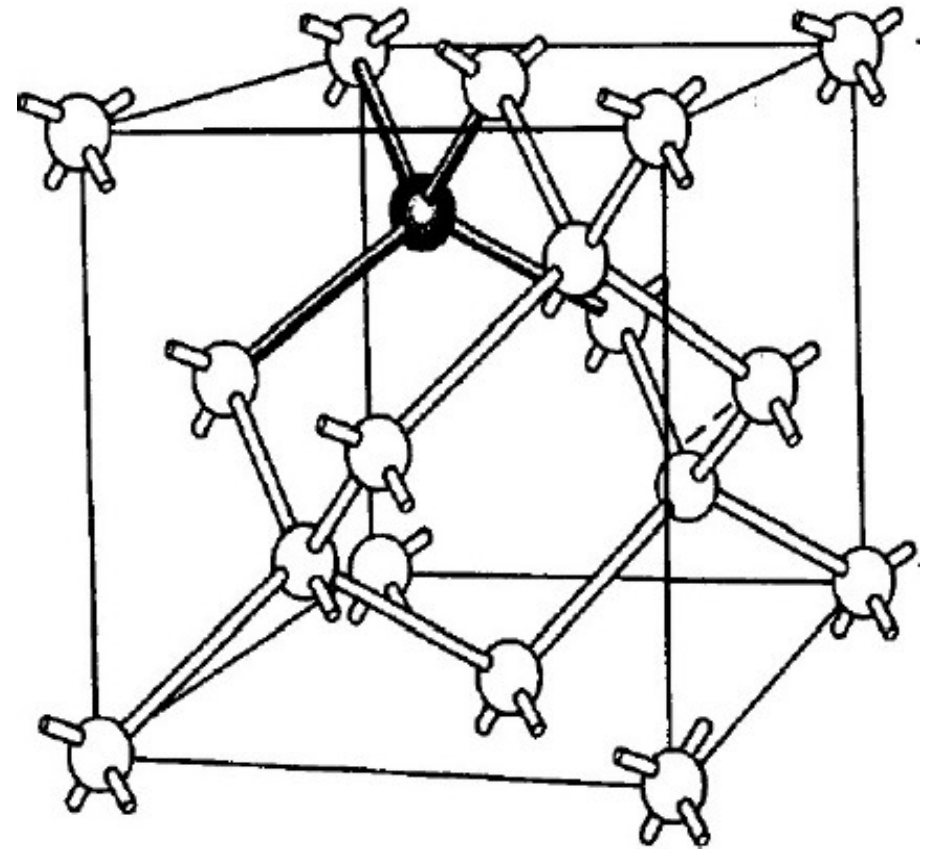
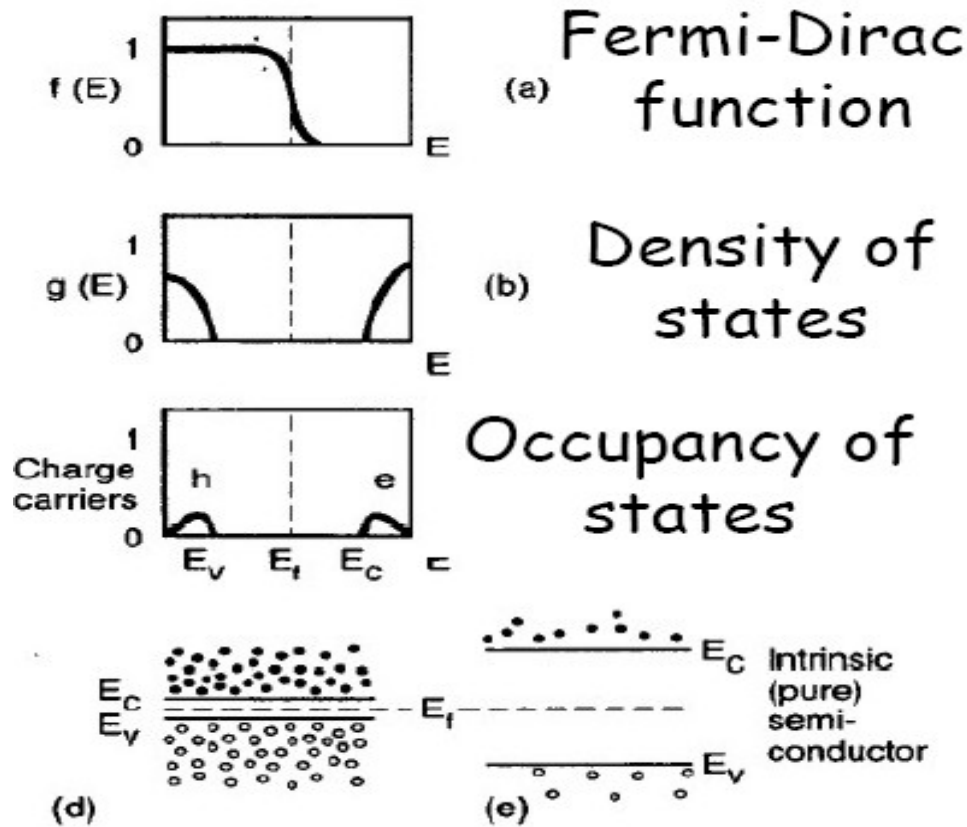
ma e` **necessario utilizzare una giunzione (pn)**

esempi: Si, Ge, GaAs

Proprietà di base dei semiconduttori

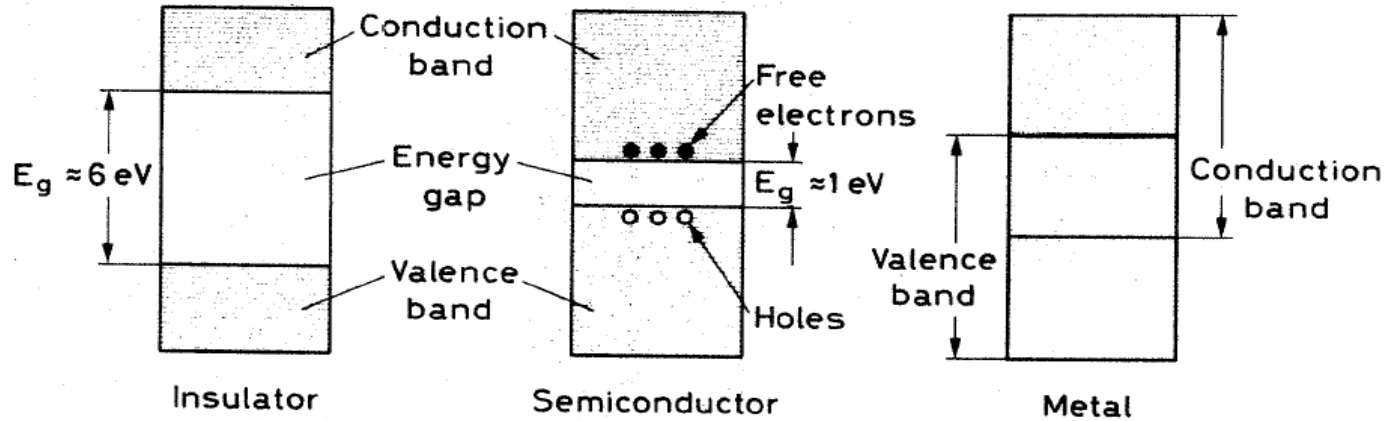
(1) cristalli → struttura a bande:

- livelli energetici costretti in bande, no livelli intermedi
- a basse T banda di valenza piena, banda di conduzione vuota
- ad alte T l'eccitazione termica promuove una frazione di elettroni



Gas di elettroni

Proprietà di base dei semiconduttori

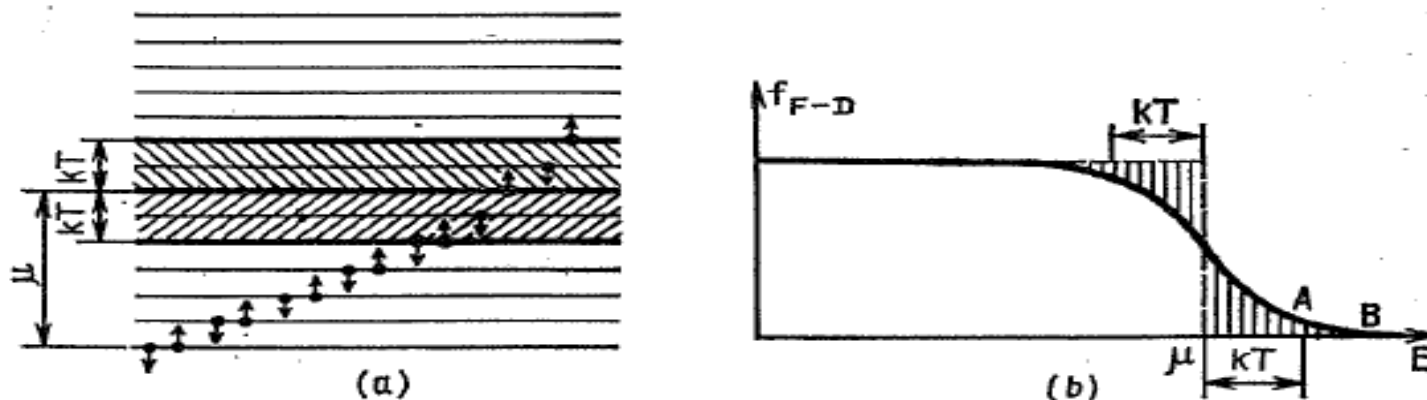


La probabilità che un elettrone salti dalla banda di valenza a quella di conduzione è proporzionale a:

$$e^{-E_g/kT} \quad \text{dove } E_g \text{ e' band energy gap (1.12 eV per silicio) ed}$$

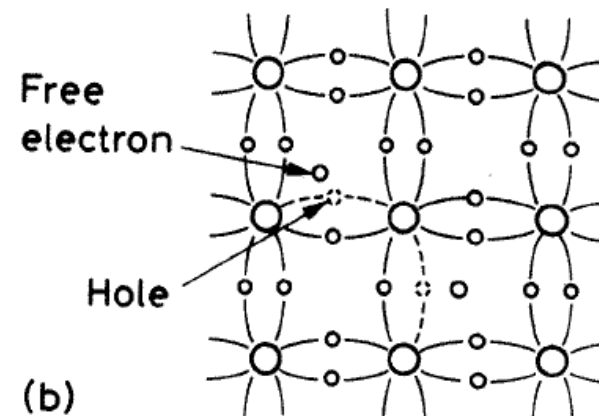
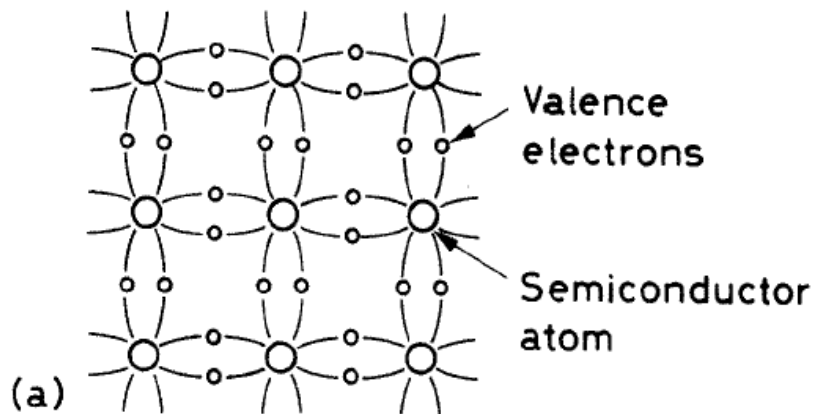
(a temperatura ambiente, $T=300\text{K}$) kT è 0.025 eV

Coppie e-h costantemente create (eccitazione termica) e distrutte (per ricombinazione) → **equilibrio**

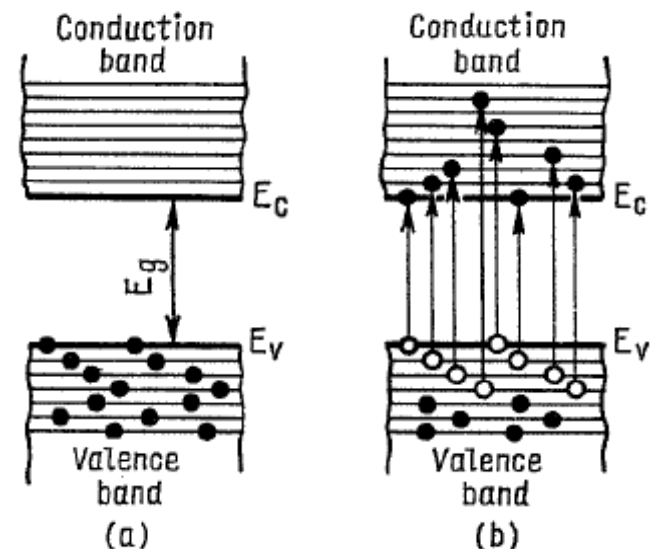


Proprietà di base dei semiconduttori Semiconduttori intrinseci

(2) portatori di carica: densità ($n_i = n_e = n_h$) a temperatura ambiente (300K)
 $n_i \sim 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ in Ge (rispetto a totale atomi: $1/10^9$)
 $n_i \sim 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ in Si (rispetto a totale atomi: $1/10^{12}$)
(concentrazioni molto piccole)



Le **lacune**: quando la banda di valenza non è completamente riempita, c'è possibilità per gli elettroni di cambiare livello all'interno della banda stessa → se si applica un campo elettrico c'è **corrente dovuta** non solo agli elettroni in banda di conduzione ma anche al **movimento degli elettroni in banda di valenza** (equivalente a corrente da cariche positive)



Proprietà di base dei semiconduttori

Cosa può accadere ai portatori di carica (liberi) in un semiconduttore:

1) **GENERAZIONE:**

termica, da radiazione elettromagnetica (fotoni), da particelle cariche

2) **DRIFT** se applicato campo elettrico esterno:

$v_{\text{drift}} = \mu E$ (dipendenza di v_{drift} da E : lineare, \sqrt{E} , poi saturazione)

corrente $J = q n v_{\text{drift}} = q n \mu E$ (resistività $1/\rho = \sigma = e n \mu$)

3) **DIFFUSIONE** se inhomogeneità di densità:

corrente $J = q D \nabla n$ (relazione Einstein tra D e μ)

4) **MOLTIPLICAZIONE:** se accelerazione (con campo elettrico) sufficiente

5) **RICOMBINAZIONE E TRAPPING:** “vita media” dei portatori

Proprietà di base dei semiconduttori Semiconduttori intrinseci

NOTE

1) portatori liberi VS cariche generate da passaggio di particelle
densità portatori liberi in silicio: $n_i \sim 1.5 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ in Silicio
Esempio: $300\mu\text{m} \times 1\text{cm}^2 \rightarrow \sim 4.5 \times 10^8$ portatori liberi in questo volume
da confrontare con $\sim 3.2 \times 10^4$ coppie e-h prodotte da MIP va ridotto il
numero dei portatori liberi !!! (“svuotamento” da portatori liberi)

2) idem, in termini di resistività: $1/\rho \sim q_e (\mu_n n + \mu_p p)$

Silicio cristallino può essere cresciuto al più con resistività $\sim 10^4 \Omega\text{-cm}$,
troppo bassa per utilizzo in rivelatori.

Esempio: $300\mu\text{m} \times 1\text{cm}^2 \rightarrow \sim 300\Omega$ dunque $V_{\text{bias}} = 30\text{V}$

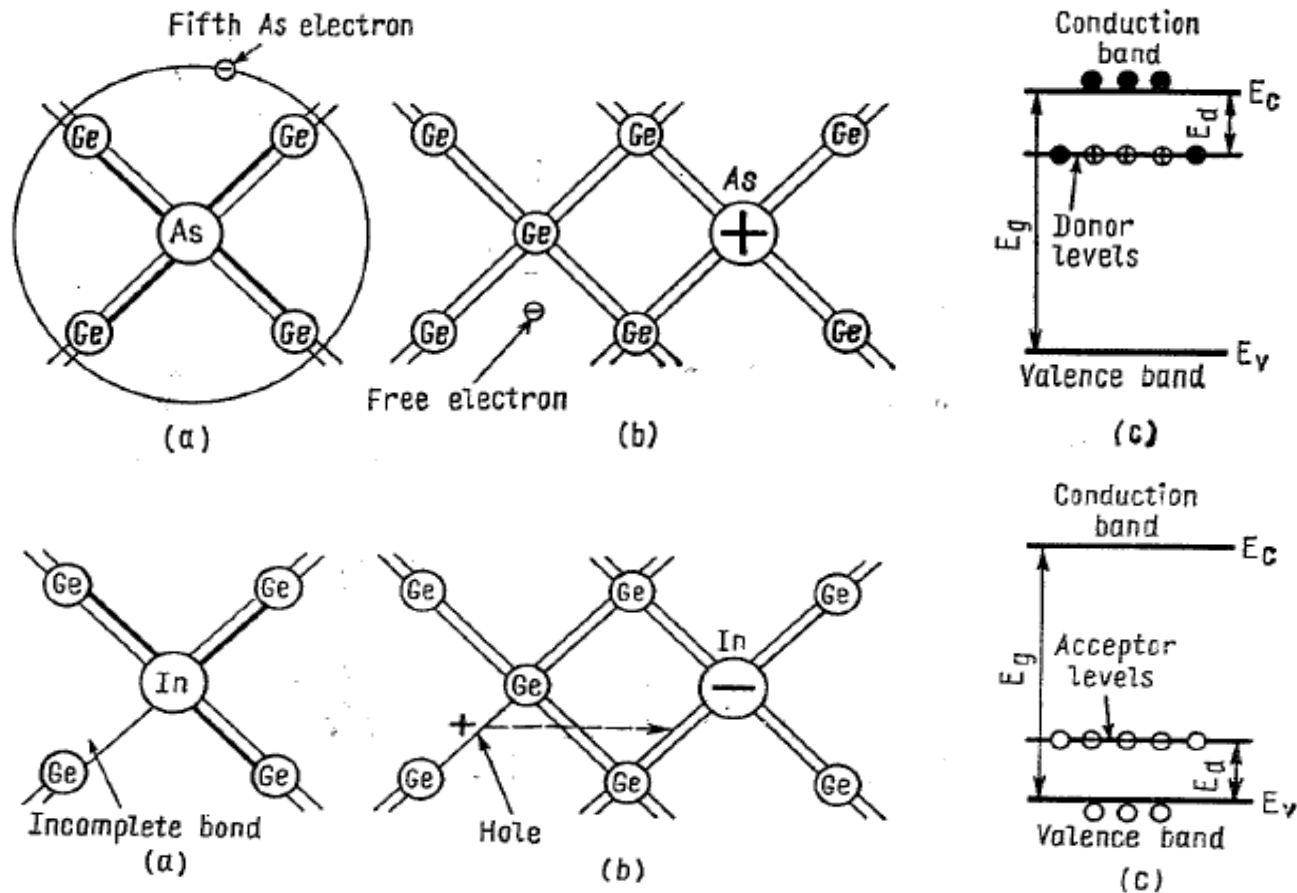
\rightarrow DC current $\sim 100\text{mA} \gg$ signal current $\sim \mu\text{A}$

Semiconduttori ultra-puri possono essere prodotti con resistività
elevate ($10^7 \Omega\text{-cm}$) ed essere usati come rivelatori (bulk detectors)
ma funzionano solo a basse T

\rightarrow In generale si utilizzano giunzioni con semiconduttori drogati

Proprietà di base dei semiconduttori Semiconduttori drogati

La densità di portatori liberi (e dunque la resistività) di un semiconduttore può essere modificata diffondendo nel cristallo opportune concentrazioni di impurezze (specie atomiche con $Z \pm 1$)



- * livelli spuri vicino alle bande ($\Delta E \sim 0.01 \text{ eV}$) $\Rightarrow kT \Rightarrow e^-$ fanno transizione
- * e/h sbilanciati con l'aggiunta di atomi droganti con $\pm 1e$ in shell esterna
- * concentrazioni e majority carriers
- * mass action law (in thermal equilibrium) $np = n_i^2 = AT^3 \exp\left(\frac{-E_g}{kT}\right)$

Proprietà di base dei semiconduttori

La giunzione p-n

La diffusione (per diverse concentrazioni) spinge lacune ed elettroni attraverso la giunzione dove si ricombinano (in superficie).

A causa di ciò nella regioni p (n), originariamente neutra, appare una carica netta - (+) dovuta agli ioni dei donatori (acceptors).

La carica spaziale che si crea finisce per fermare la diffusione degli elettroni (lacune), quando il potenziale supera l'energia disponibile per diffusione termica.

Si crea una regione svuotata, confinata tra due regioni di conduzione.

Risolvendo eq. Poisson:
$$\frac{d^2 V}{dx^2} = -\frac{\rho(x)}{\epsilon}$$

$$d \approx x_n \approx \left(\frac{2 \epsilon V_0}{e N_D} \right)^{1/2} \quad d \approx (2 \epsilon \rho_n \mu_e V_0)^{1/2}$$

Tipicamente:

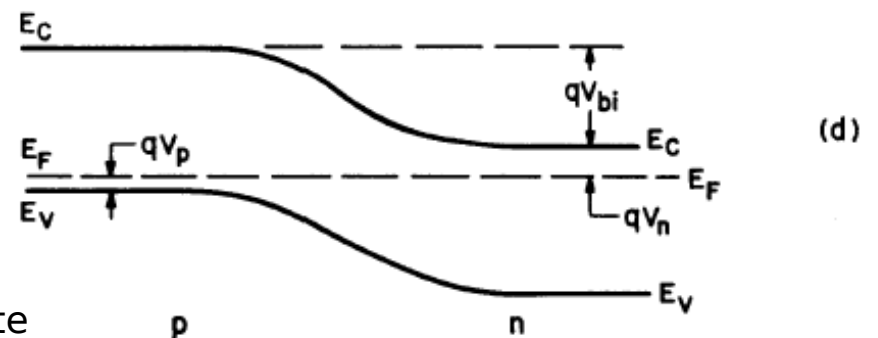
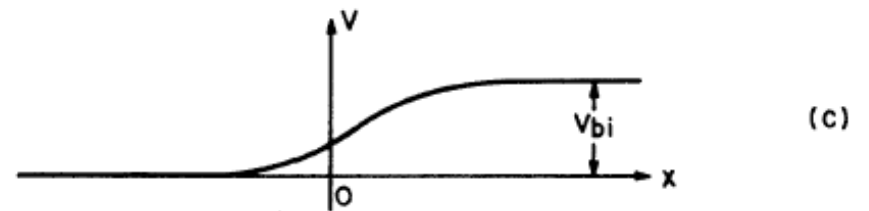
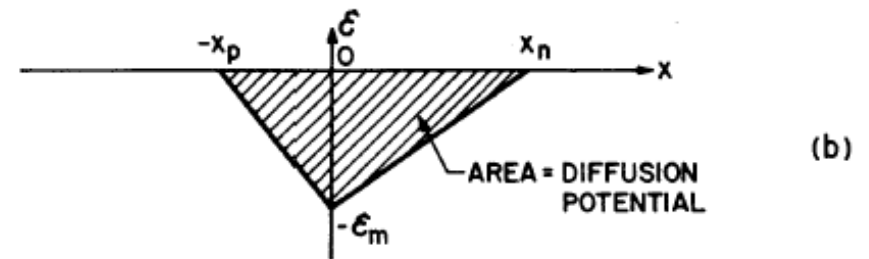
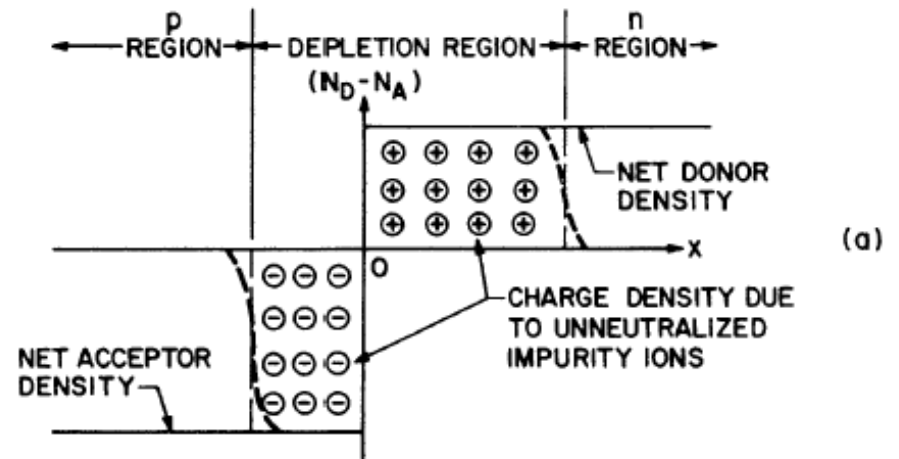
* potenziale di contatto: $V_0 \sim 1V$

* zona svuotata: $d \sim 75\mu m$

Zona svuotata (da portatori liberi) può essere usata come rivelatore: ma

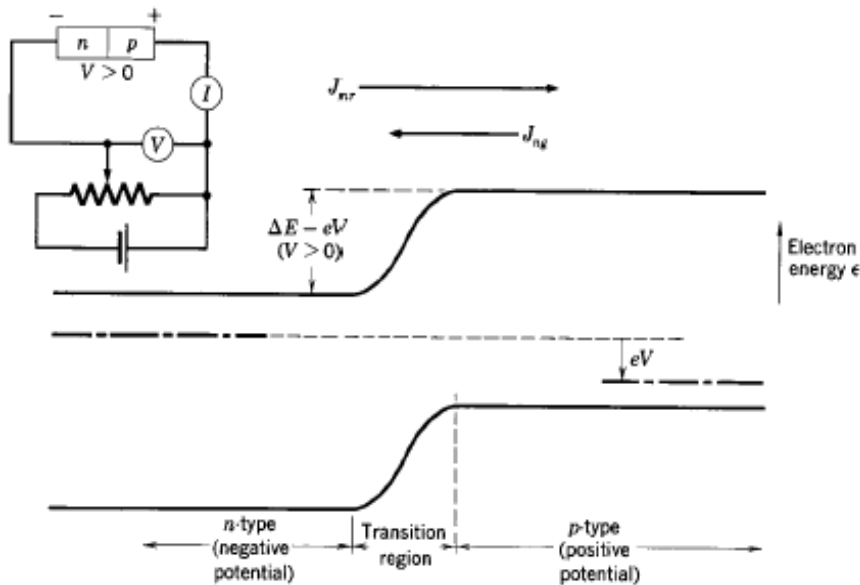
1) campo elettrico troppo debole per raccolta efficiente

2) zona svuotata troppo poco profonda



Giunzione p-n con polarizzazione (potenziale esterno)

- a) positive potential applied to the *p* region
negative potential applied to the *n* region



(from Kittel, *Introduction to Solid State Physics*)

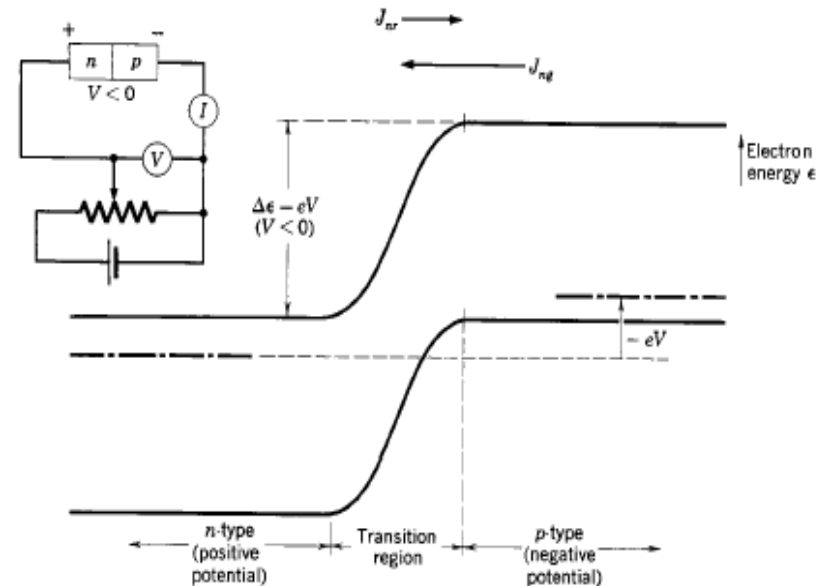
The externally applied voltage reduces the potential barrier, allowing increased charge transfer across the junction.

⇒ “forward bias”

Electrons flowing from the *n*-region across the junction are replenished from the external voltage supply and large current flow is possible.

Forward bias → current flow

- b) negative potential applied to the *p* region
positive potential applied to the *n* region



(from Kittel, *Introduction to Solid State Physics*)

This arrangement increases the potential barrier across the junction, impeding the flow of current.

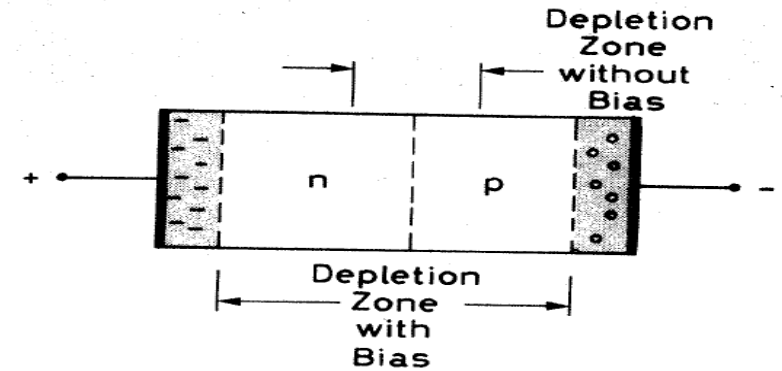
⇒ “reverse bias”

Reverse bias → depletion region extended

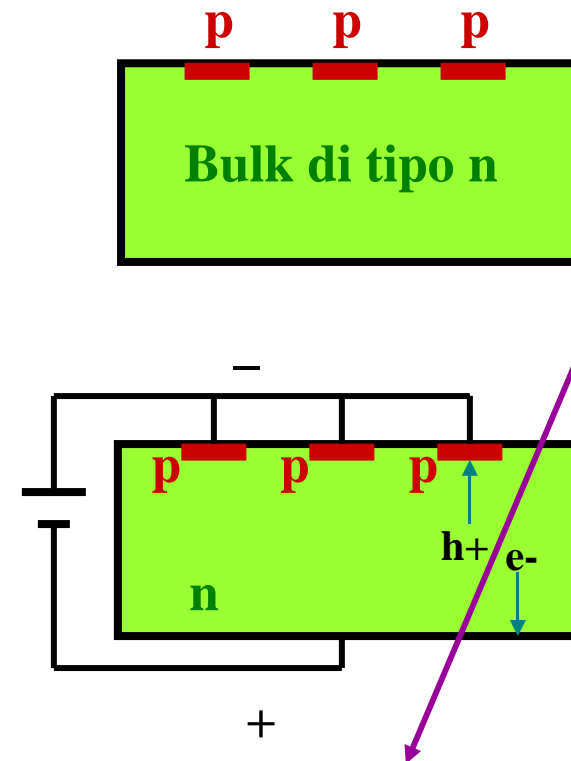
Giunzione p-n polarizzata inversamente per estendere la regione svuotata

Molto interessante come rivelatore:

- campo E piu` intenso
→ maggiore efficienza di raccolta della carica
- zona attiva piu` profonda
→ stop particelle con $> E$
→ capacita` piu` bassa



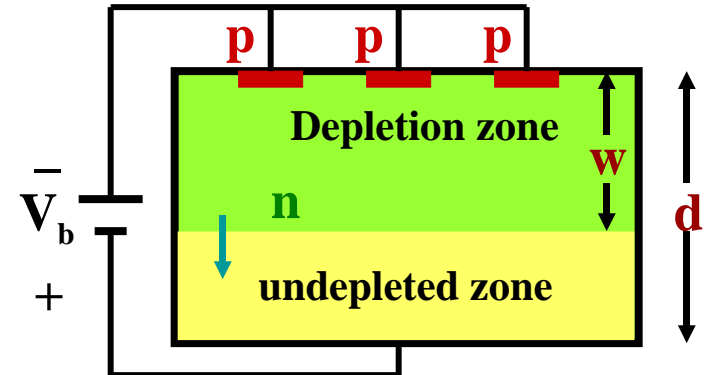
Esempio: giunzione p-n alla superficie di wafer di silicio di tipo n (bulk di tipo n)



Proprietà della regione svuotata

- La **profondità di svuotamento** è funzione della resistività del “bulk” (ρ), della mobilità (μ) e del potenziale di bias (V_b):

$$w = \sqrt{2 \epsilon \rho \mu V_b}$$



- La tensione (potenziale) necessaria per svuotare completamente un sensore di spessore d è chiamata **tensione di svuotamento** (“depletion voltage”)

$$V_d = d^2 / (2 \epsilon \rho \mu)$$

- Tensione più alta è necessaria per svuotare completamente materiale a bassa resistività

Limite allo spessore di svuotamento dalla resistività: breakdown se campo troppo alto
→ utilizzo di semiconduttori ad alta resistività (ad esempio Li drifted) se necessari spessori elevati (mm)

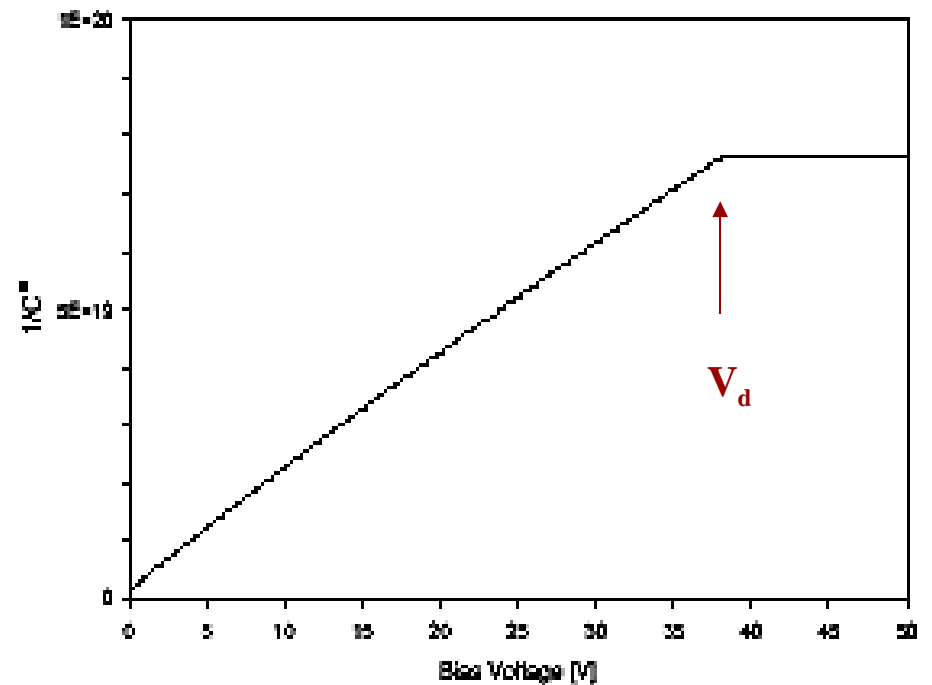
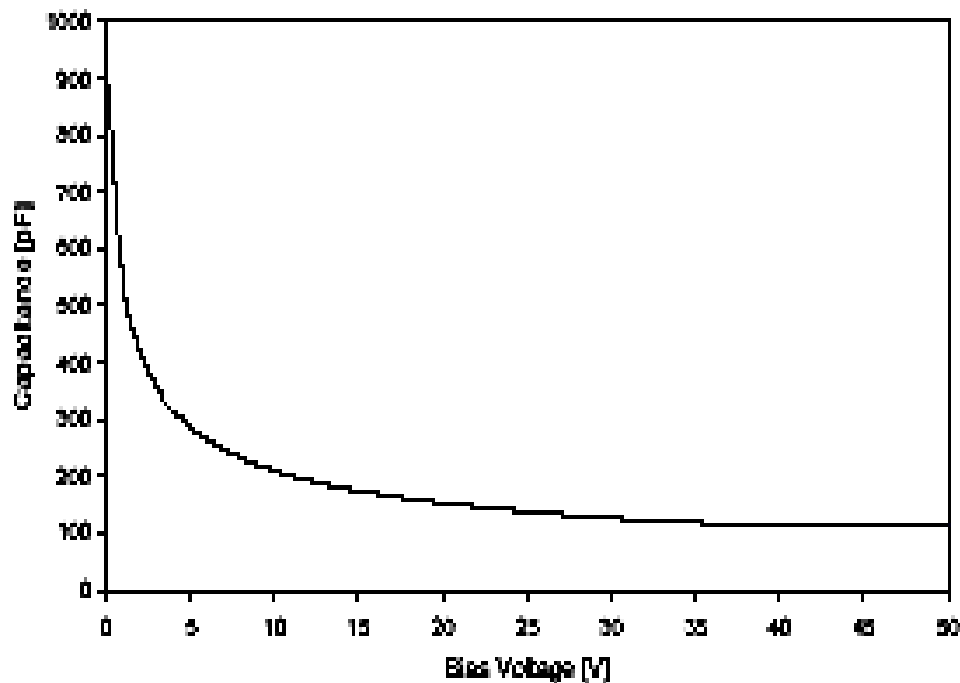
- Tensione più alta è necessaria per svuotare giunzioni (Si) con bulk di tipo p dato che $\mu_h < \mu_e$ (450 vs 1350 cm² / V s)

Proprietà della regione svuotata

- Dal punto di vista elettrico la giunzione è equivalente ad una **capacità** (+ resistenza in serie) che corrisponde alla capacità della zona svuotata

$$C = \epsilon A/d = A \sqrt{\epsilon / 2 \rho \mu V_b}$$

Normalmente si misura il comportamento dello svuotamento tramite la misura della capacità VS tensione di bias (inverso):



Il segnale: la carica rilasciata

Ad esempio da particelle al minimo di ionizzazione (MIP):

$$dE/dx|_{Si} = 3.88 \text{ MeV/cm}$$

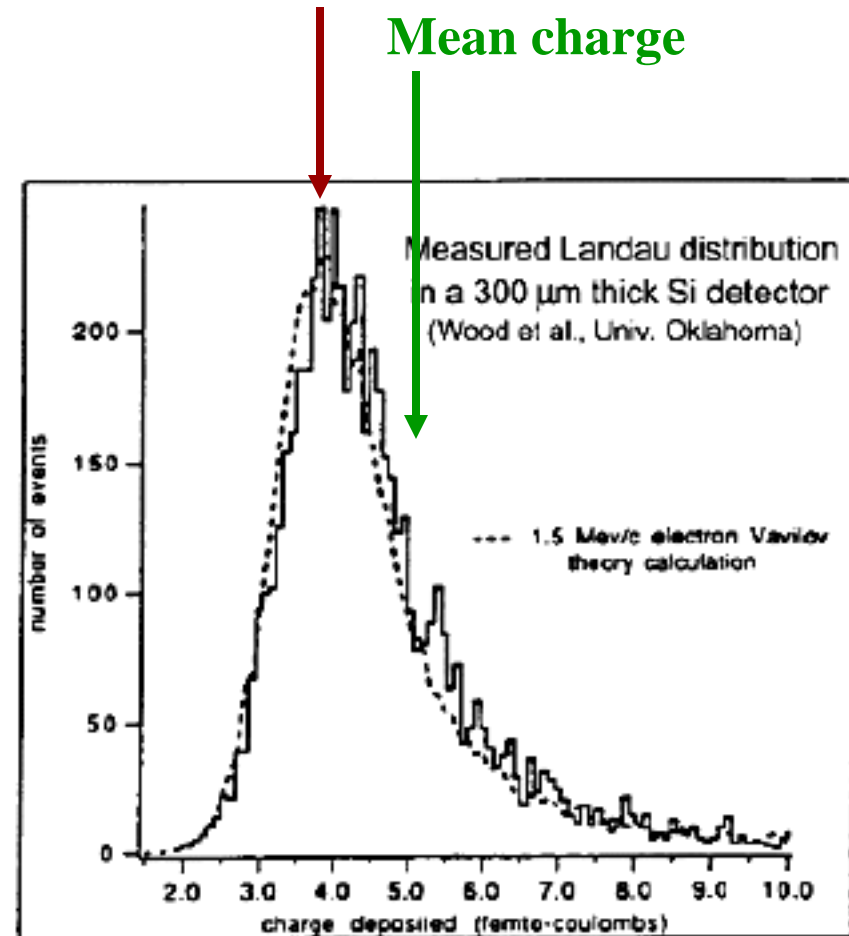
→ per profondità di 300 μm si hanno 116 keV → perdita più probabile e` (x0.7 media) 81 keV → 22500 elettroni (ovvero 3.6 fC) dato che servono 3.6eV per produrre una coppia e-h

NOTA:
per piccoli momenti si può sfruttare la Bethe-Bloch per identificazione del tipo di particella:

$$dE/dX \sim 1/\beta^2 \ln(\beta\gamma)$$

dunque noti $p=m\beta\gamma$ e β si ottiene m

Most probable charge $\approx 0.7 \times$ mean



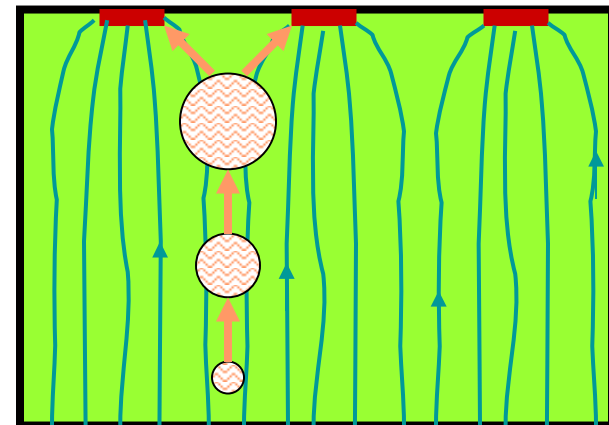
Il segnale: il trasporto della carica

Portatori si muovono per **diffusione** (in presenza di gradiente di concentrazione, in direzione opposta a concentrazione maggiore, causa urti) e per **drift** (in presenza di campo elettrico E)

- **Velocità di drift** $v = \mu E \rightarrow$ tempo di drift $t_d = d/v$ (per una distanza d)
valori tipici: $d = 300 \mu\text{m}$, $E = 2.5 \text{ kV/cm}$, $\mu_e = 1350 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, $\mu_h = 450 \text{ cm}^2/\text{Vs}$
 $\rightarrow t_d = 9 \text{ ns}$ (e), 27 ns (h)
- **Diffusione** della carica \rightarrow espansione in tempo t_d della “nuvola” il cui raggio diventa: $\sigma = (2Dt_d)^{1/2}$ dove D e` la costante di diffusione (Einstein: $D = \mu kT/q$)

Note:

- 1) stesso raggio per e, h dato che $t_d \sim 1/\mu$
- 2) tipico raggio $\sigma \sim 6 \mu\text{m}$ che si puo` sfruttare per risoluzione spaziale



Il segnale: la corrente indotta

Applicazione del teorema di Ramo a giunzione p-n (geometria piani paralleli):

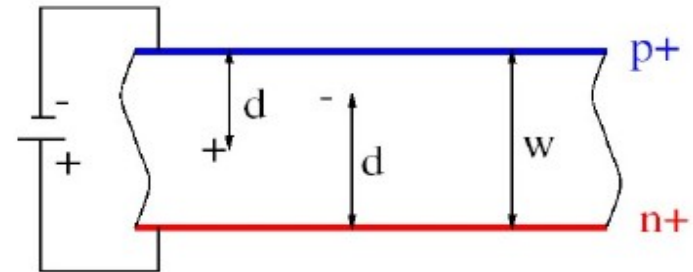
- Corrente istantanea indotta su elettrodo k dal movimento del portatore di carica q (in posizione x):

$$I_k = -q \vec{v}(x) \cdot \vec{E}_Q(x)$$

dove $v(x)$ (e la traiettoria delle cariche che driftano) dipende dal campo elettrico E applicato, mentre E_Q e' il campo elettrico "virtuale" determinato applicando all'elettrodo k potenziale 1 e agli altri elettrodi potenziale 0

- Calcolo della carica totale (Δq) indotta sugli elettrodi (tenuti a differenza di potenziale costante) dal movimento del portatore di carica q nella regione svuotata (profondita' w) per una distanza pari a d:

$$\Delta q = q d/w$$



Note importanti:

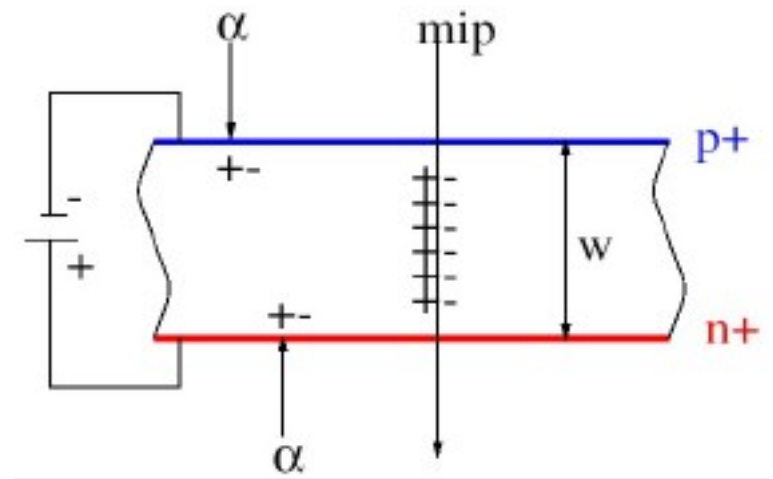
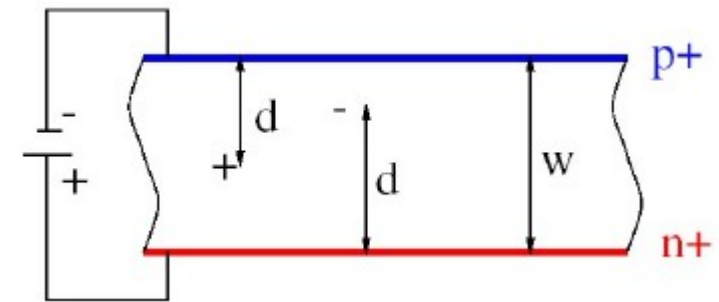
1) Quando inizia ad essere presente nuova carica (corrente) sugli elettrodi? Quando la carica (e-h) prodotta dalla particella arriva agli elettrodi (cioe' dopo tempo di drift t_d) oppure appena viene prodotta? Risposta: **nell'istante in cui viene prodotta !!!**

2) elettroni e lacune inducono corrente nello stesso verso dato che hanno carica opposta e si muovono in direzione opposta

Il segnale: efficienza di raccolta della carica

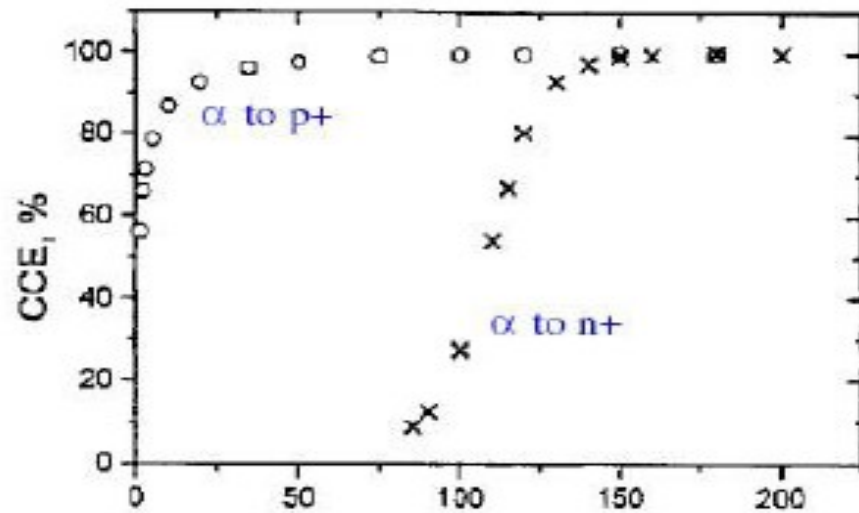
$$\Delta q = q d/w$$

- La carica si muove (drift) solo nella regione svuotata $\rightarrow d \sim (V_{\text{bias}})^{1/2}$
- La quantità di carica dipende dalla modalità del rilascio di energia:
 - per MIP si ha rilascio lungo tutta la traccia:
 $q \sim d \sim (V_{\text{bias}})^{1/2}$
 - per alpha particles si ha rilascio molto localizzato (vicino alla superficie):
 $q \sim \text{costante}$ (indipendente da V_{bias})
- w dipende dalle caratteristiche del rivelatore

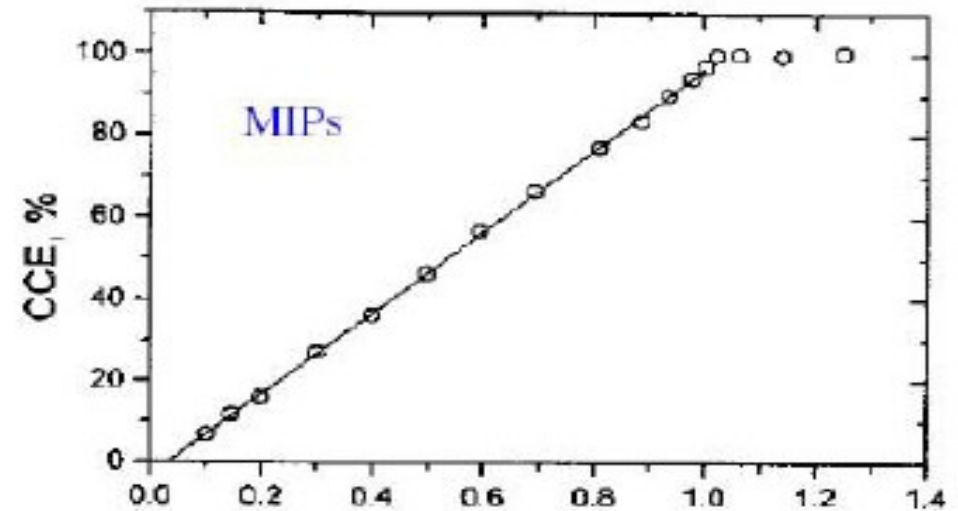


Efficienza di raccolta puo` essere influenzata ad esempio da danni per esposizione a radiazione \rightarrow studio dell'efficienza di raccolta con varie sorgenti di ionizzazione

Il segnale: efficienza di raccolta della carica (CCE)

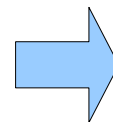


V_{bias}

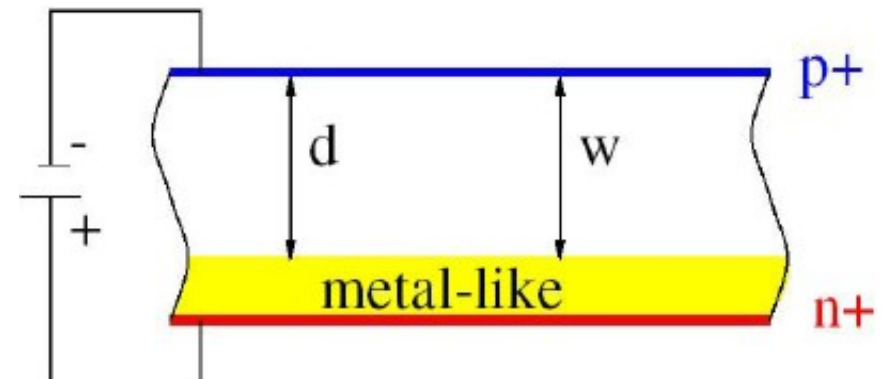


$\sqrt{\frac{V_{bias}}{V_{depletion}}}$

- α su n+ \rightarrow svuotamento a 115V
- α su p+ : CCE \sim 100% a pochi V \rightarrow $d/w \sim 1$
- MIP deposita carica $q \sim d \sim (V_{bias})^{1/2}$



Modello per junzione non irradiata

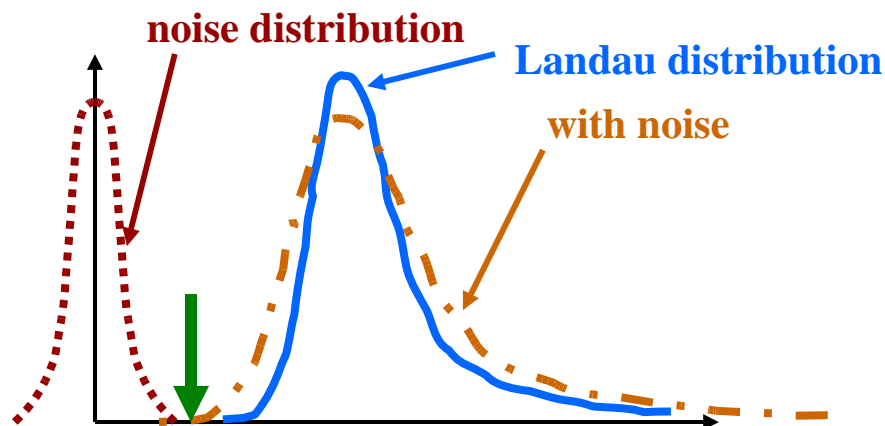


Il rumore

Segnale tipico: 22000; perdite di segnale tipiche $\sim 5-10\%$ per AC coupling, capacita` e resistenze parassite e trasferimento a elettronica di front-end

Rumore e` uno dei problemi piu` grossi per rivelatori a semiconduttore: sorgenti: in rivelatore oppure in catena di elettronica

Problema: dove applicare la soglia per rivelazione di segnale per evitare inefficienza ma anche rumore ?



Usualmente si esprime il rumore con equivalent noise charge (ENC) in unita` di carica dell'elettrone. In generale principali fonti sono

- 1) capacita` del rivelatore: $ENC \sim C_d$
- 2) resistenza di bias: $ENC \sim (kT/R)^{1/2}$
- 3) corrente di leakage del rivelatore: $ENC \sim (I)^{1/2}$

In generale si puo` scrivere: $ENC = a + b C_d$

Il rumore dipende dalla frequenza \rightarrow dipende dal metodo di read-out

Il rumore

Due principali sorgenti di corrente (indesiderata) in diodi reverse-biased:

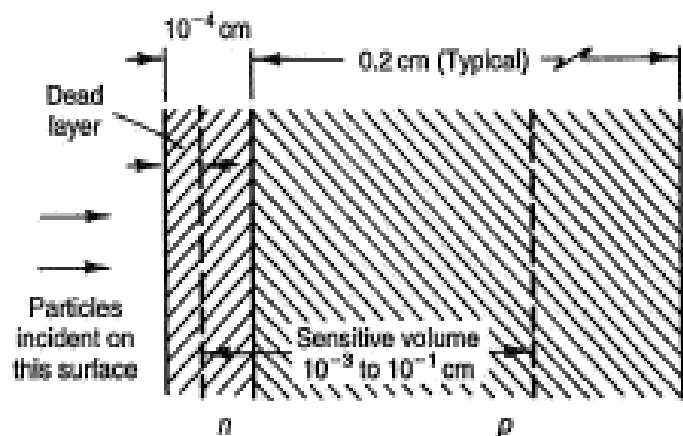
leakage currents

(1) **corrente di diffusione**: diffusione di carica dalla regione non svuotata in prossimità della regione svuotata alla regione svuotata

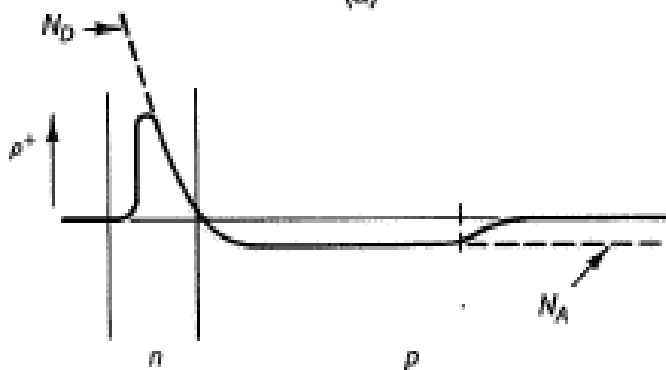
(2) **corrente di generazione (componente principale di leakage)**: cariche prodotte nella regione svuotata da difetti o impurezze. Dipendenza esponenziale da T : $J_{SRH} \sim \exp(-b/kT)$. Regola generale aumento per fattore 2 ogni 7°C

Misure di Energia

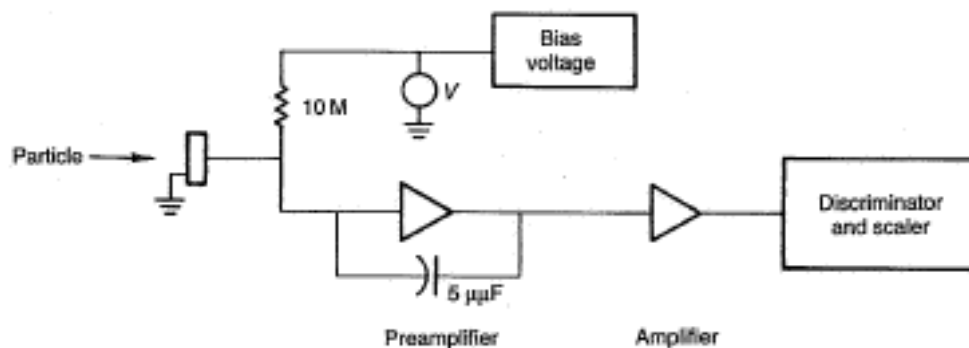
Per energie inferiori a $\sim 30\text{MeV}$ si puo` fermare completamente la particella nel rivelatore e misurarne con precisione (0.2%) l`energia



(a)

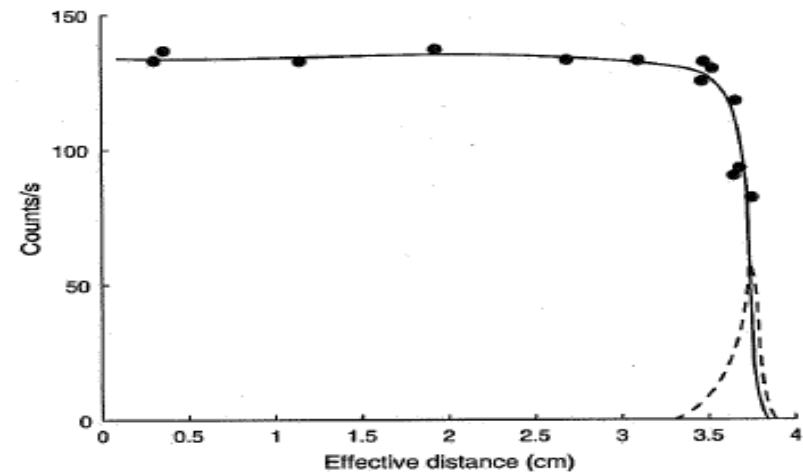
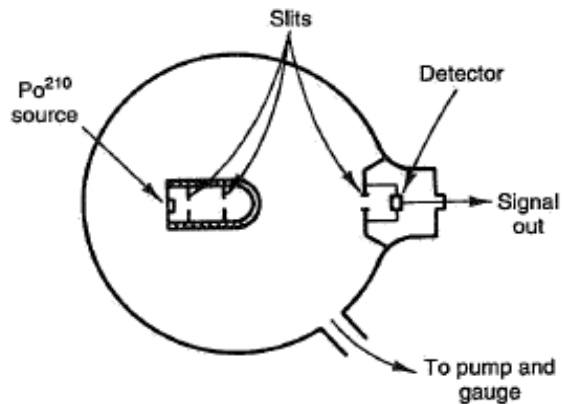


(b)

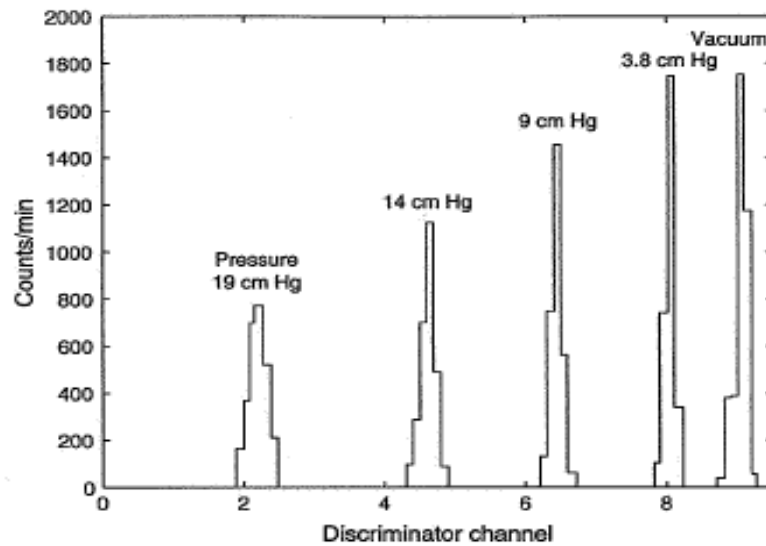


Esempio: particella da 1 MeV in rivelatore con $C_d \sim 200\text{pF}$ produce segnale in tensione
 $V \sim Q/C = q_e 10^6 / 3.6 / 200 \cdot 10^{-12} \sim 0.25\text{mV}$
 che va amplificata. Problema e` che C dipende da bias voltage \rightarrow uso di charge sensitive pre-amplifier per tradurre segnale di carica in segnale in tensione da amplificare successivamente

Misure di Energia: esempio particelle alfa da ^{210}Po

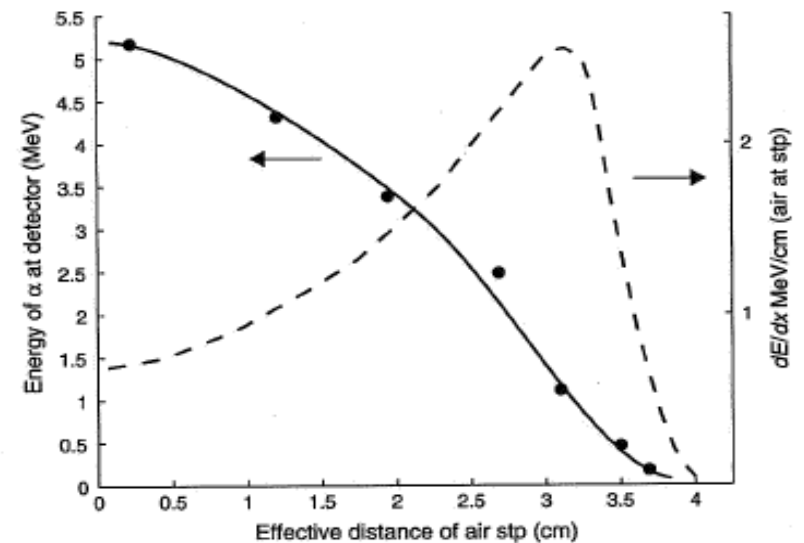


Conteggi di α al rivelatore in funzione della pressione (espressa in cm di aria STP)



Distribuzione dell'altezza di impulso del segnale per le particelle che raggiungono il rivelatore (a diverse pressioni)

Linearità del rivelatore



Curva di Bragg (tratteggiata)

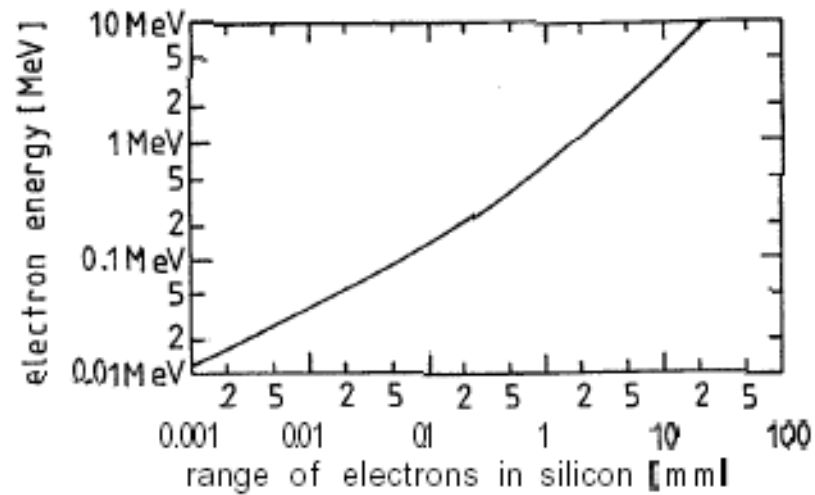


Fig. 7.7. Energy-range relation for electrons in silicon [487].

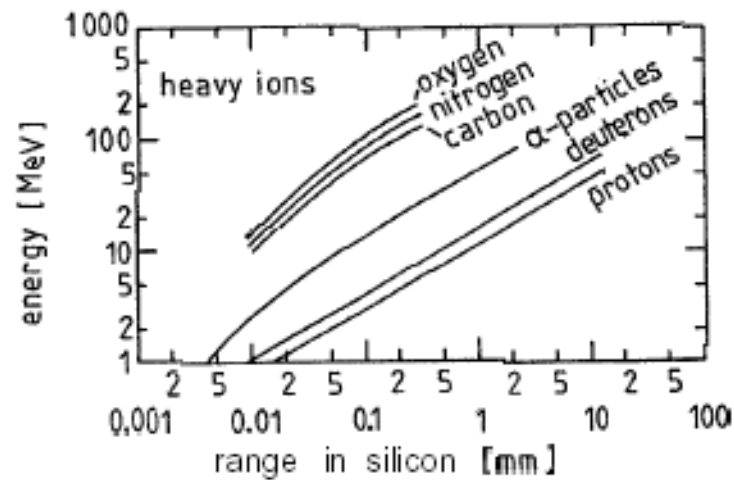


Fig. 7.8. Energy-range relation for protons, deuterons, alpha-particles and some heavy ions in silicon [487].

Misure di Energia: esempio raggi gamma

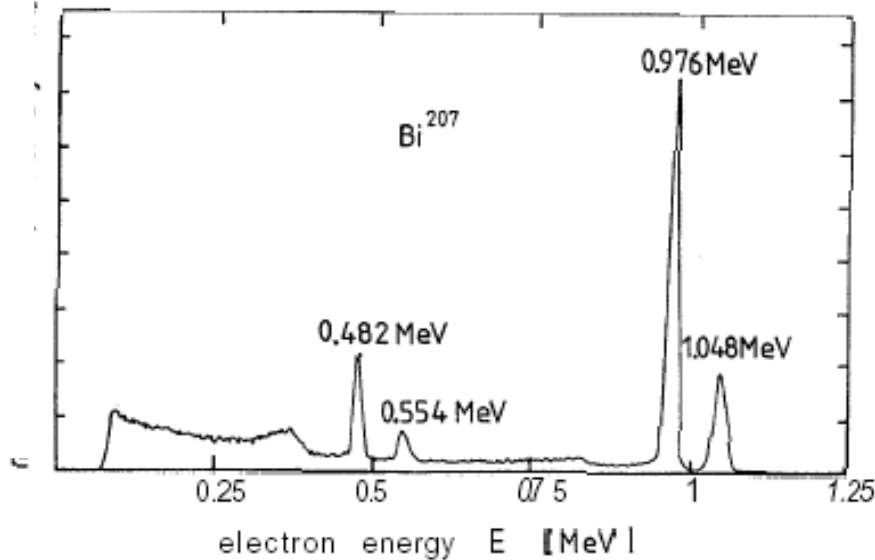


Fig. 7.9. Conversion line spectrum of ^{207}Bi , recorded in a Si(Li) detector [489].

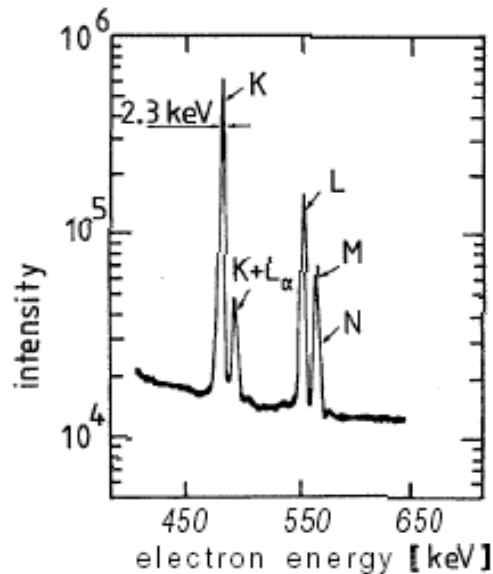
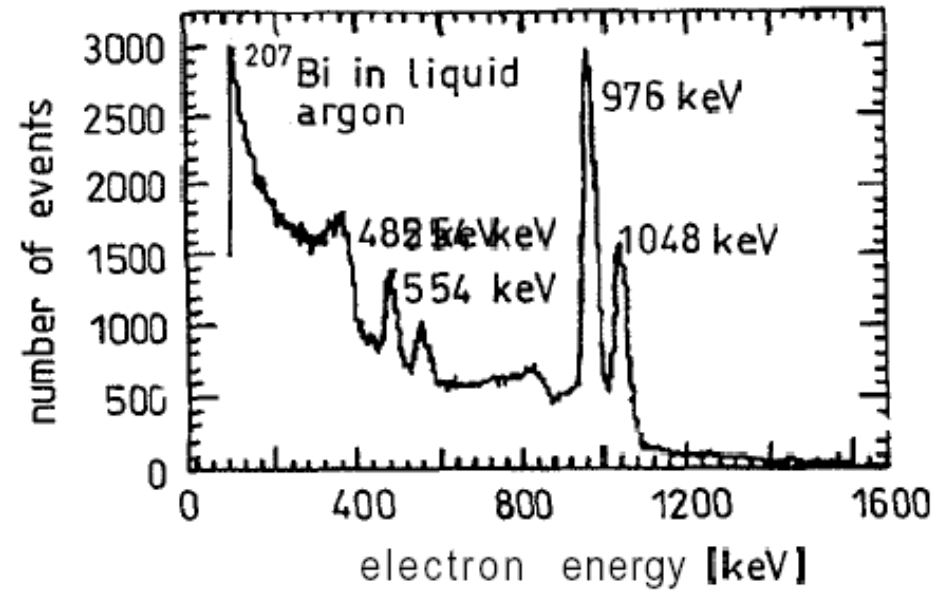
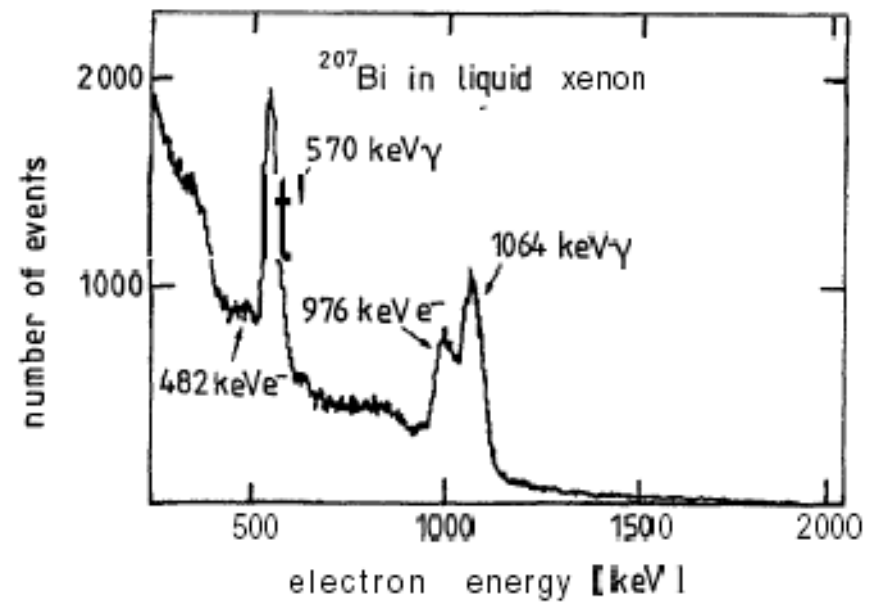


Fig. 7.10. Part of the ^{207}Bi -conversion line spectrum in the region of the 570 keV transition [488].



Misure di Energia

Fluttuazioni nel segnale di carica

Sono possibili due tipi di interazione della particella ionizzante:

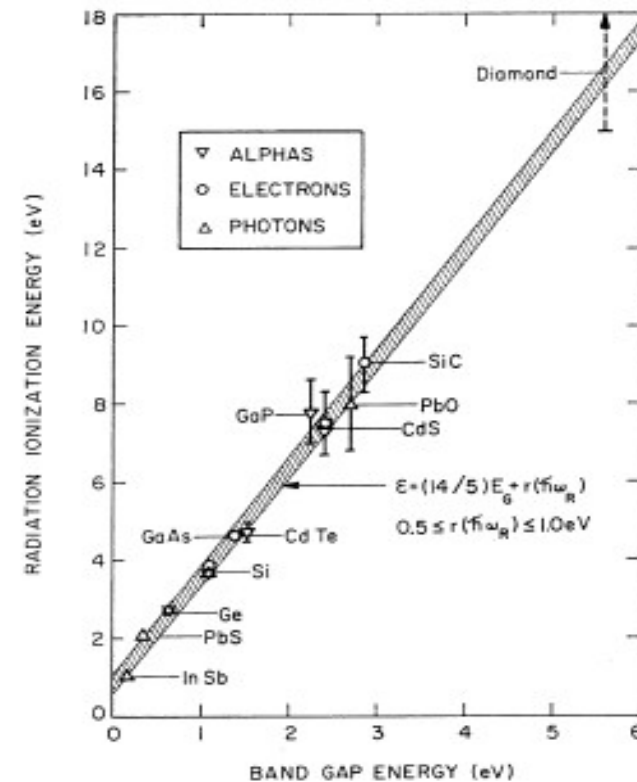
- 1) eccitazioni del cristallo: no produzione di carica ma N_x fononi, con E_x energia spesa per produrre la singola eccitazione
- 2) ionizzazione: produzione di N_i coppie di carica opposta, con E_i energia spesa per produrre la singola coppia

NOTA: Energia di ionizzazione $\varepsilon \sim 3 E_i$

a) conservazione di energia ed impulso richiede l'eccitazione di modi di vibrazione del reticolo

b) ci sono molti altri modi disponibili per la particella per perdere energie inferiori a E_i

(ie per ogni ionizzazione ci sono state molte eccitazioni di reticolo)



Se TUTTA l'ENERGIA E_0 della particella viene rilasciata nel rivelatore, essa è ripartita tra i due modi:

$$E_0 = E_i N_i + E_x N_x \quad (i) \quad \text{NOTA: } N_i = E_0/\epsilon$$

Le fluttuazioni di N_i ed N_x saranno allora correlate; assumendo poissoniana N_x ($\sigma_{N_x} = \sqrt{N_x}$) troviamo σ_i

$$\text{Le fluttuazioni i-x si devono compensare dunque: } E_x \sigma_{N_x} = E_i \sigma_{N_i} \quad (ii)$$

Da (i) ed (ii) si ricava:

$$\sigma_i = \frac{E_x}{E_i} \sqrt{\frac{E_0}{E_x} - \frac{E_i}{E_x} N_i} = \sqrt{N_i} \sqrt{\frac{E_x}{E_i} \left(\frac{\epsilon}{E_i} - 1 \right)} \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{F N_i}$$

Per il Si: si ha $E_x = 0.037$ eV

$$E_i = 1.1 \text{ eV}$$

$$\epsilon = 3.6 \text{ eV}$$

da cui $F \sim 0.08$ che torna con $F = 0.1$ misurato

!!! La varianza dell'ampiezza del segnale ($\sim Q$) è più piccola di quello che ci si aspetta dalla statistica di poisson !!!

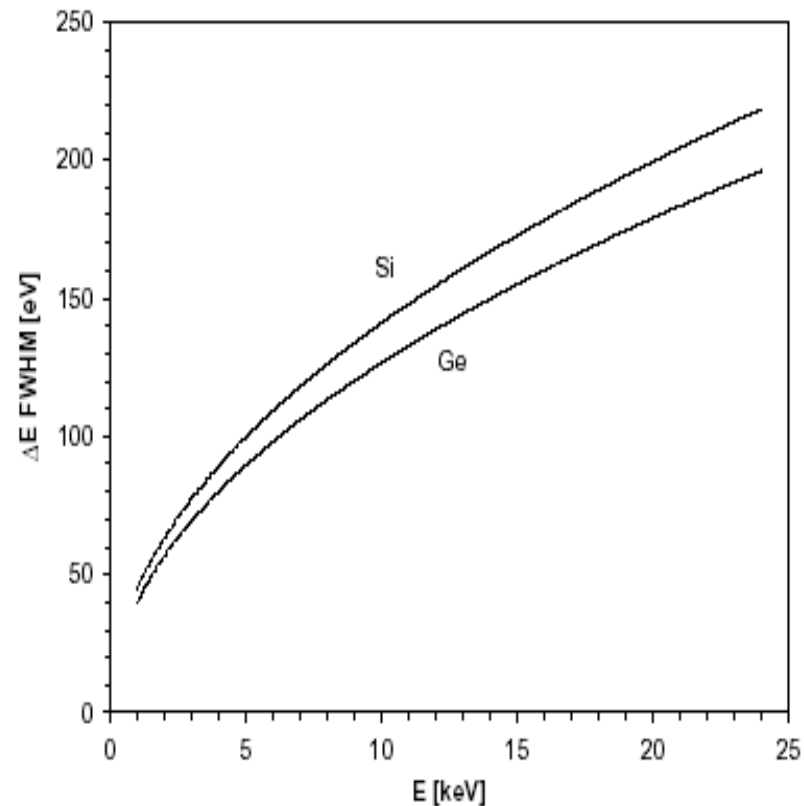
Per $E < 100$ keV in effetti la varianza intrinseca del segnale e' rilevante nella risoluzione

$$\Delta E = 2.35 \cdot \epsilon_i \sqrt{FN_Q} = 2.35 \cdot \epsilon_i \sqrt{F \frac{E}{w}} = 2.35 \cdot \sqrt{FE\epsilon_i}$$

Si: $\epsilon_i = 3.6$ eV $F = 0.1$

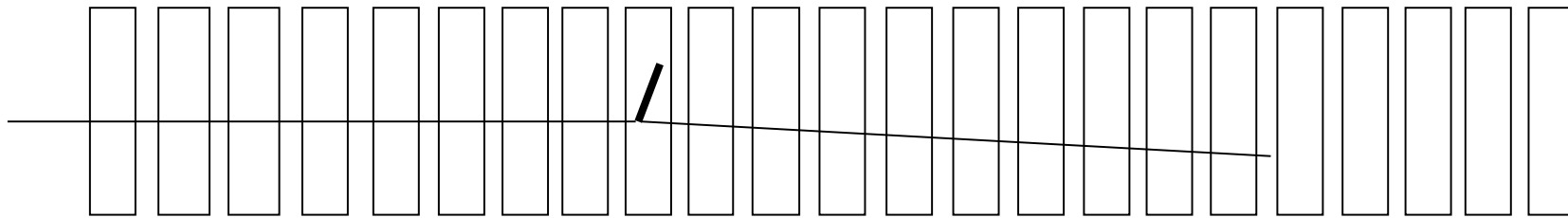
Ge: $\epsilon_i = 2.9$ eV $F = 0.1$

Intrinsic Resolution of Si and Ge Detectors

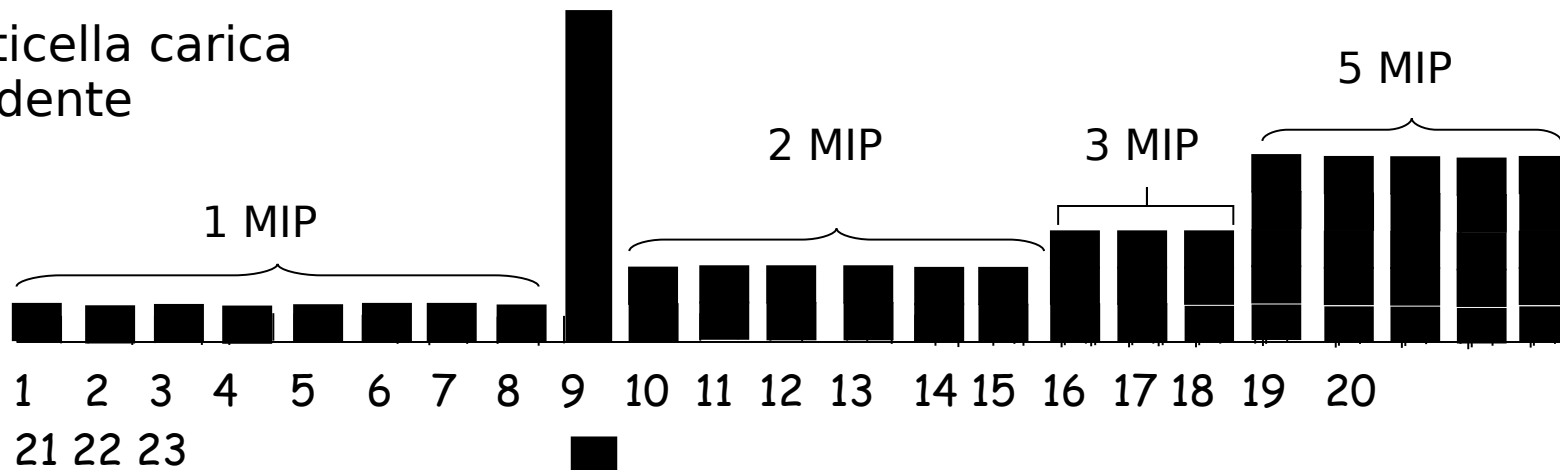


Ad energie piu' alte le dimensioni del rivelatore sono tali per cui la capacita' e' piu' elevata ed il rumore elettronico domina la risoluzione

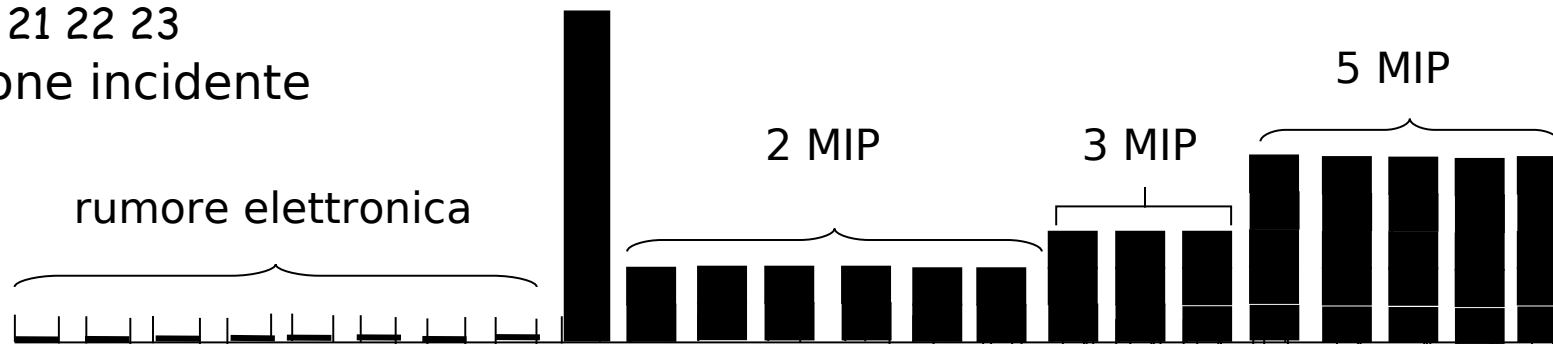
Misure in rivelatori per alte energie:
prime applicazioni: bersagli attivi



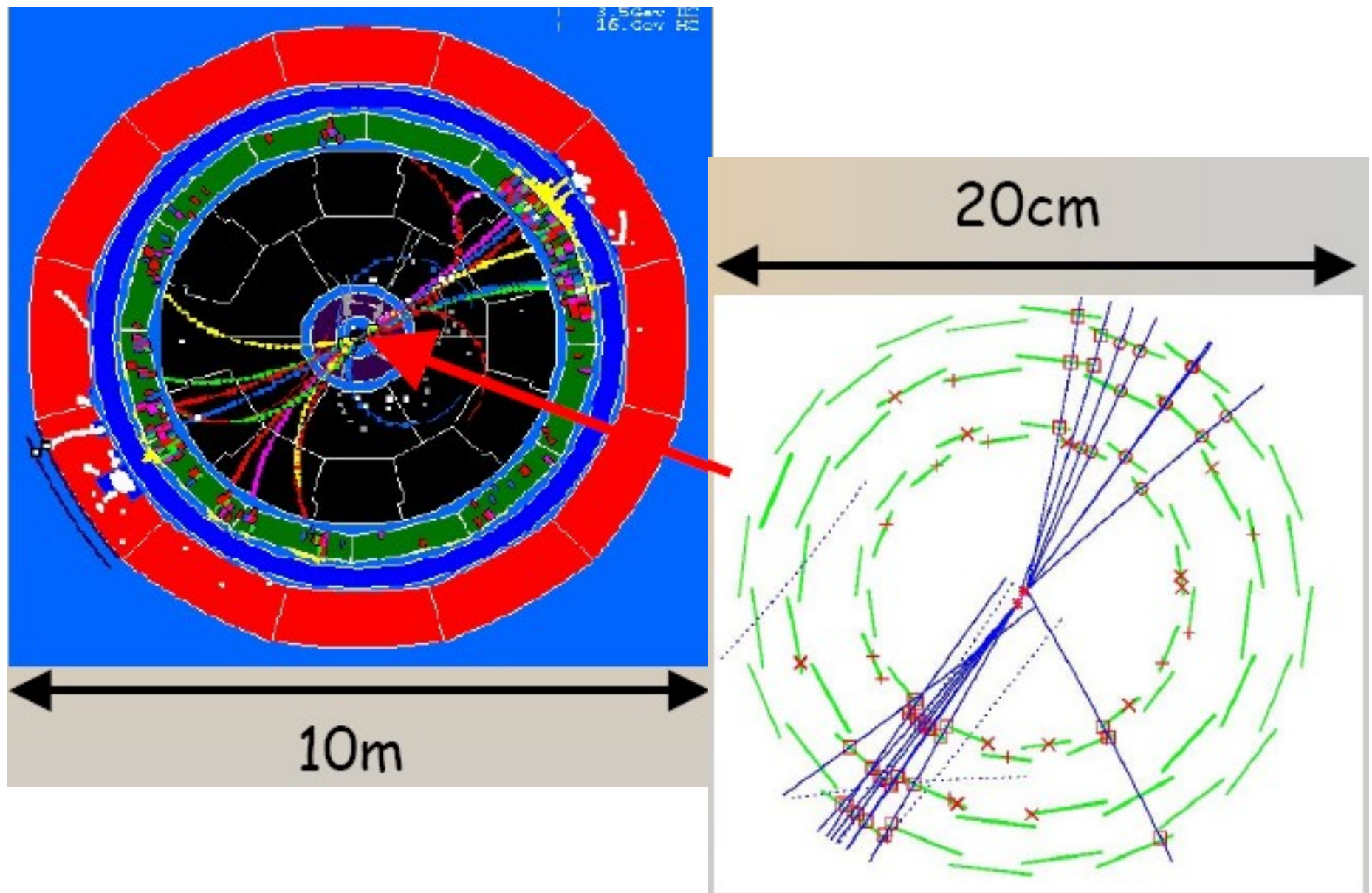
Particella carica
incidente



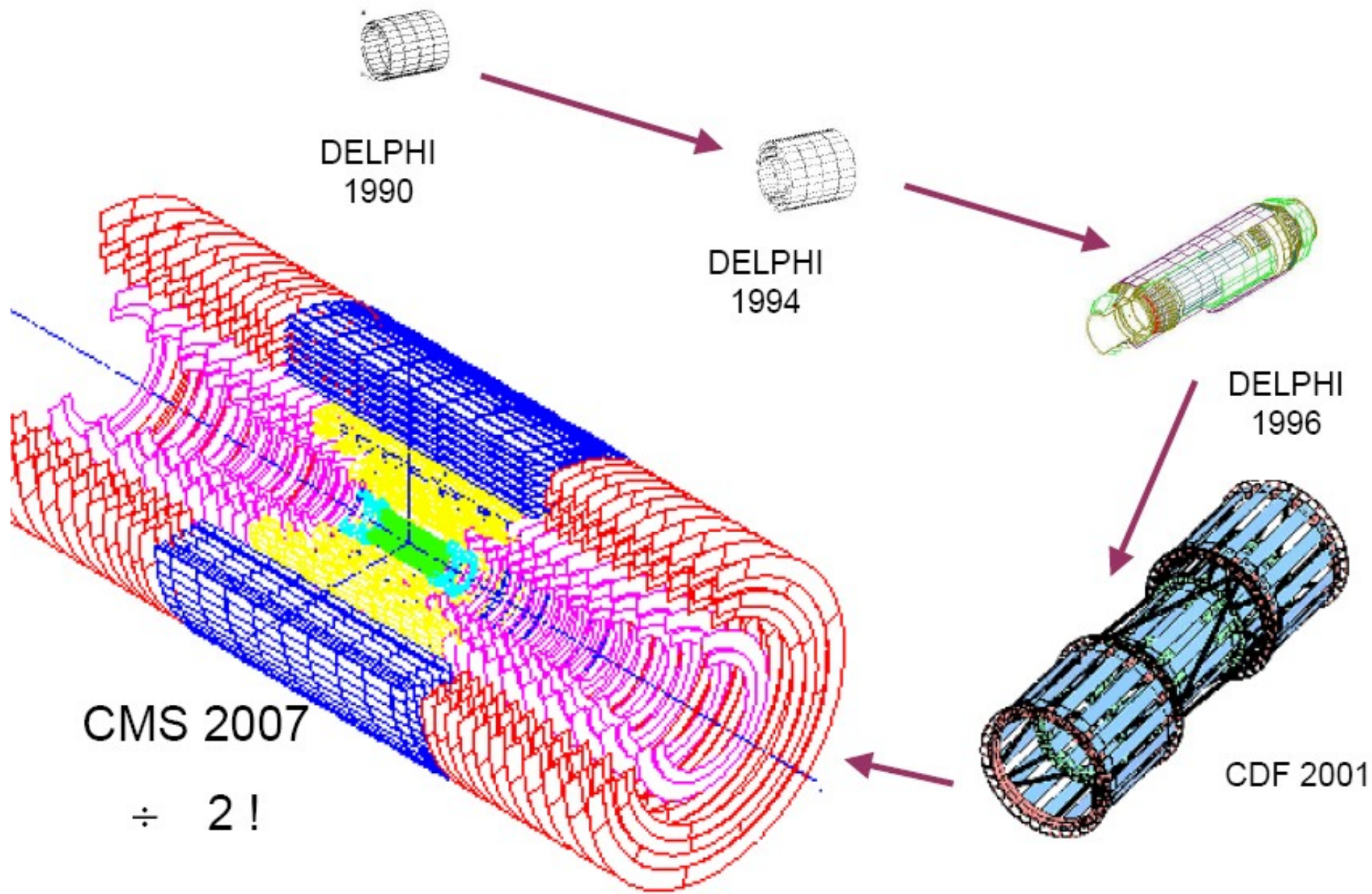
Fotone incidente



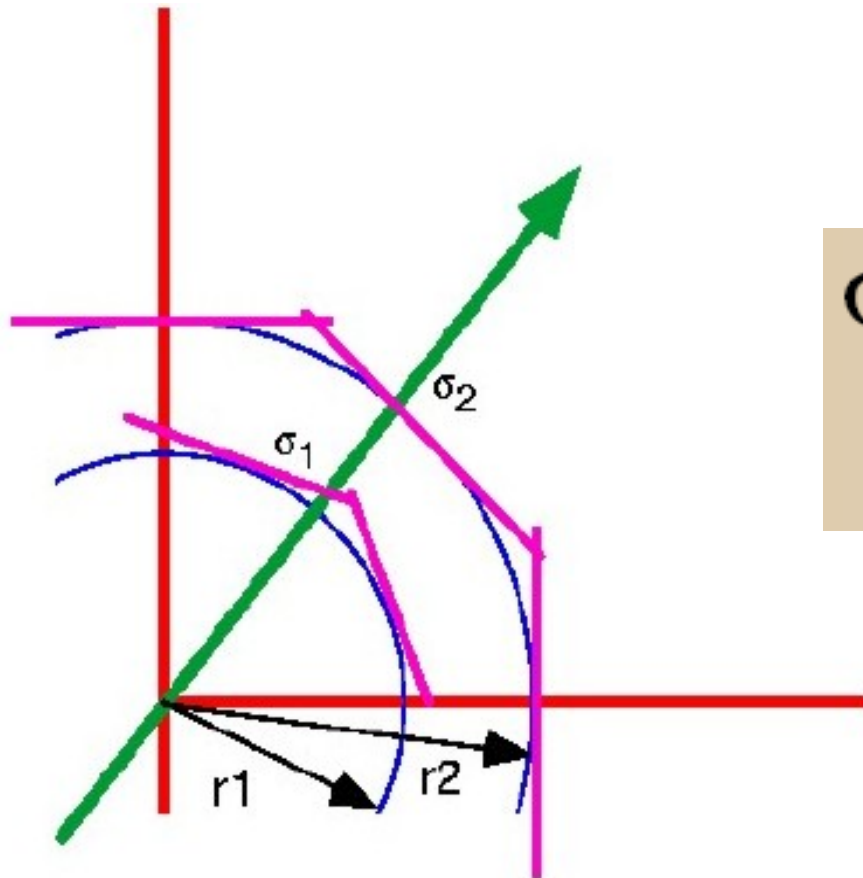
Misure di posizione: esempio di rivelatore per alte energie



Misure di posizione: rivelatori per alte energie



Misure di posizione: risoluzione sulla singola traccia



Misura del parametro di impatto
risoluzio:

$$\sigma = \frac{r_2 \sigma_1 + r_1 \sigma_2}{(r_2 - r_1)^2}$$

Vogliamo :
piccolo r_1 , grande r_2 e piccoli $\sigma_{1,2}$

Rivelatori di posizione

Rivelatori a strip

- High precision ($< 5\mu\text{m}$) 1-D coordinate measurement
- Large active area (up to $10\text{cm} \times 10\text{cm}$ from 6" wafers)
- Inexpensive processing (single-sided devices)
- 2nd coordinate possible (double-sided devices)
- Most widely used silicon detector in HEP

Rivelatori a pixel

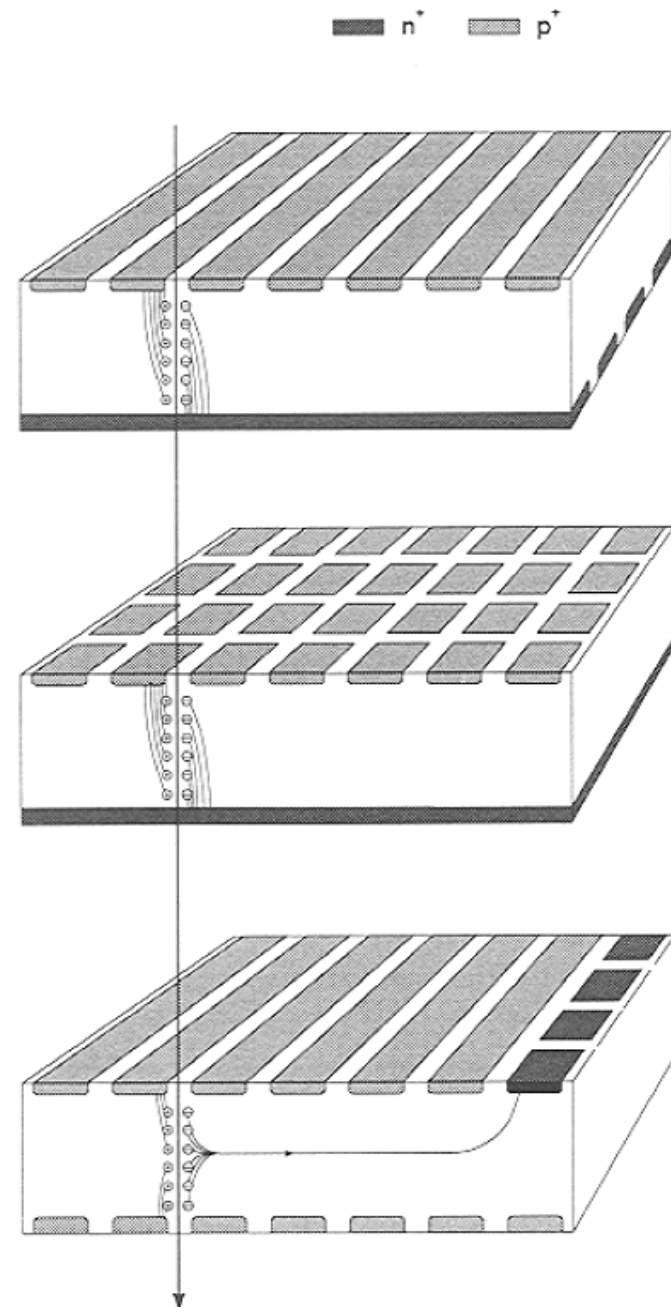
- True 2-D measurement ($20\mu\text{m}$ pixel size)
- Small areas but best for high track density environment

Rivelatori a pad

- Pre-shower and calorimeters (charge measurement)

Rivelatori a drift

- X from drift time (e) to anode, Y from anode c.o.g.
- Drift velocity must be predictable



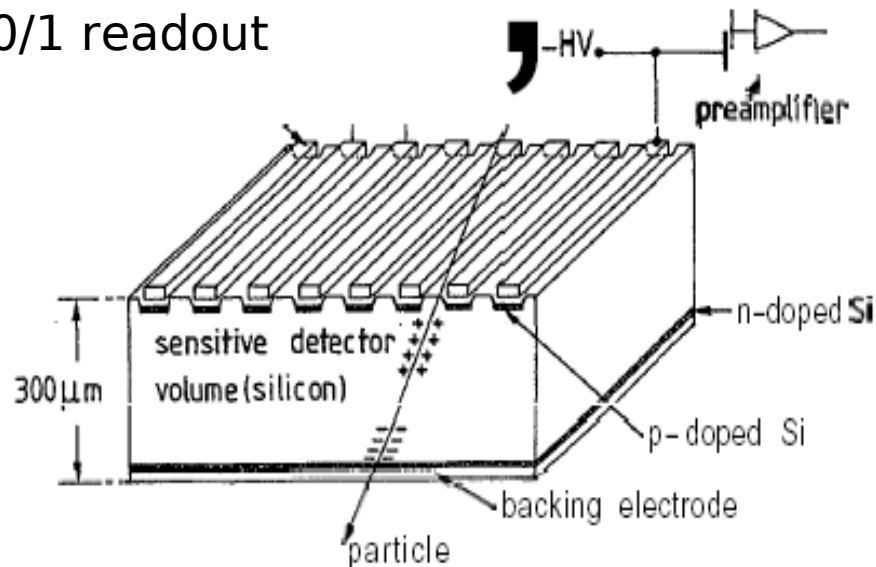
Rivelatori di posizione (strip detectors)

binary readout (threshold discrimination), center of strip as position

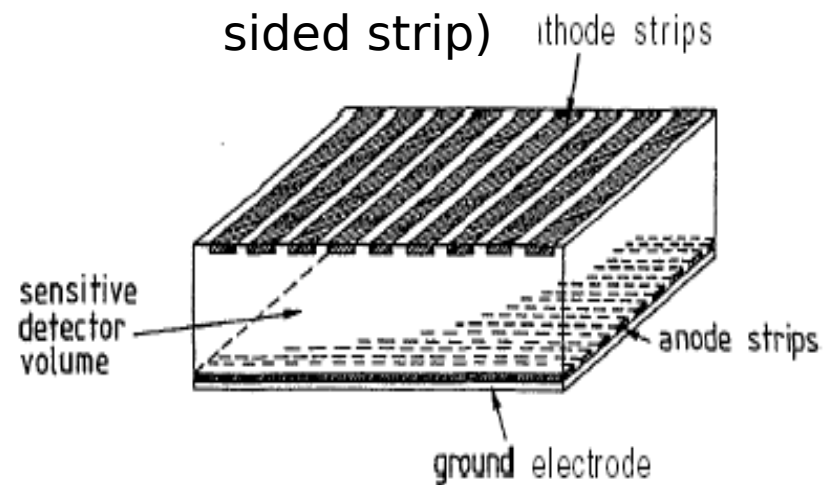
$$\sigma = \text{pitch} / \sqrt{12}$$

Tipicamente pitch 20 μm - 150 μm ; 50 μm \rightarrow 14 μm risoluzione

0/1 readout



0/1 readout
(double sided strip)



analog readout
with charge division

