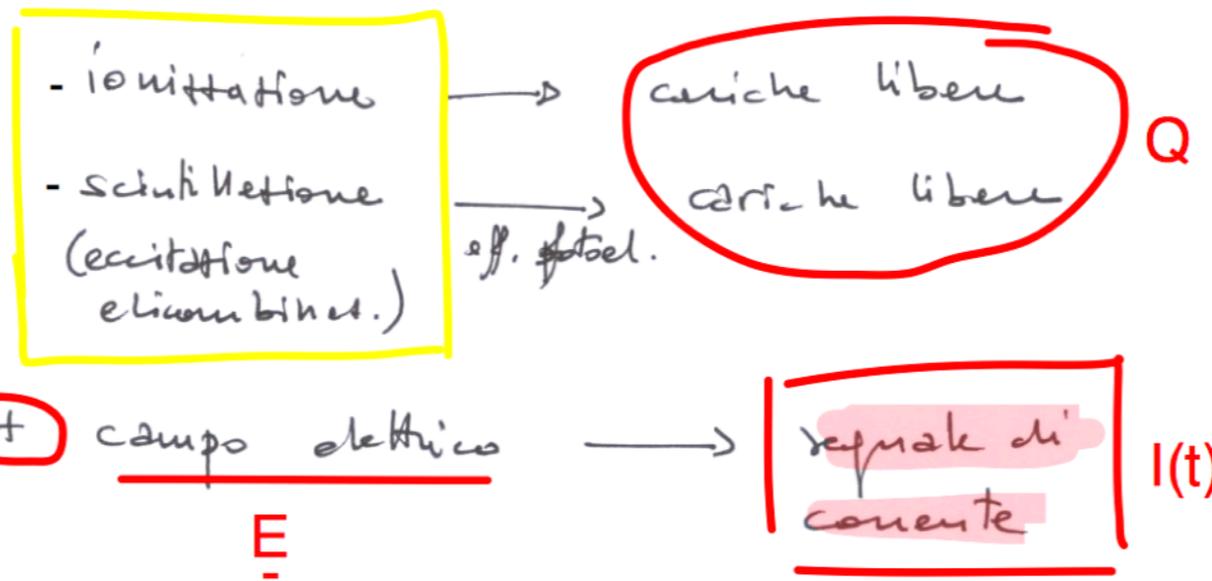


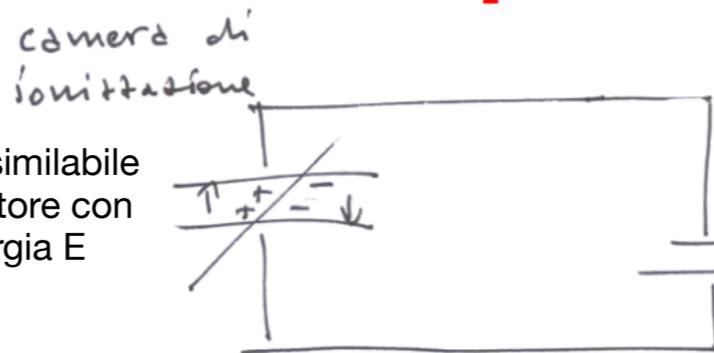
Rivelatori

Funzionamento di un rivelatore di particelle 1

• Radiatione incidente



Il rivelatore è assimilabile ad un condensatore con C, Q₀ ed energia E



La q in moto induce sugli elettrodi un ΔQ (teor. di Ramo) che riduce il valore della Q iniziale e quindi dell'energia immagazzinata E, generando una corrente che dura finché tutte le cariche sono state raccolte.

OSS: le cariche vengono prodotte dalla particella in un tempo \sim ps (praticamente istantaneamente)

Corrente a spese dell'energia immagazzinata nel condensatore:

$$E = \frac{1}{2} C V_0^2$$

$$\Delta E = C V_0 \Delta V = V_0 \Delta Q$$

$$dQ = \vec{F} \cdot d\vec{s} = q \vec{E} \cdot d\vec{s} = \Delta E$$

Funzionamento di un rivelatore di particelle 2

$$\Delta Q = q \frac{\vec{E}}{V_0} \cdot d\vec{s}$$

(NOTA: lo spostamento non è necessariamente allineato al campo: caso $\vec{E} \times \vec{B}$ o induzione su ~~dat~~ configurazioni di elettrodi complessi)

$$i(t) = \frac{dQ}{dt} = q \frac{\vec{E}}{V_0} \cdot \vec{v}$$

I diversa da zero finché c'è moto di cariche

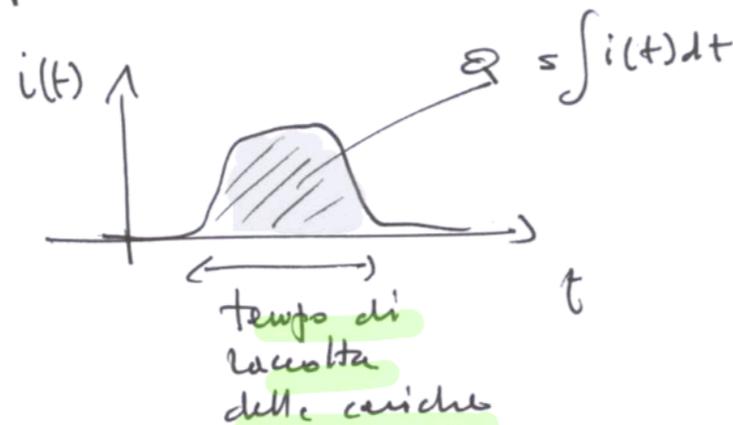
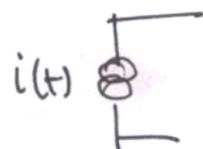
Oss. Il tempo di raccolta $t = s/v$ dipende sia dalla velocità, ovvero dalla mobilità della carica nel mezzo e dall'intensità del campo elettrico, sia dalla distanza che la carica percorre prima di essere raccolta.

$$Q_{TOT} = \int i(t) dt$$

$$Q = eE/w$$

informazione sull'energia depositata

• Rappresentazione superavanzata di corrente (impulsiva)



Un **rivelatore** può quindi essere visto come un sistema la cui risposta ad una **particella interagente** sarà una **corrente I(t)** che fluisce al suo interno per un tempo pari al **tempo di raccolta** della carica Q generata dall'interazione della particella nel rivelatore. Dalla **misura di Q** si può poi risalire alla **E depositata** dalla particella incidente.

Funzionamento di un rivelatore di particelle 3

- modo in corrente

(corrente media
dosimetrica)

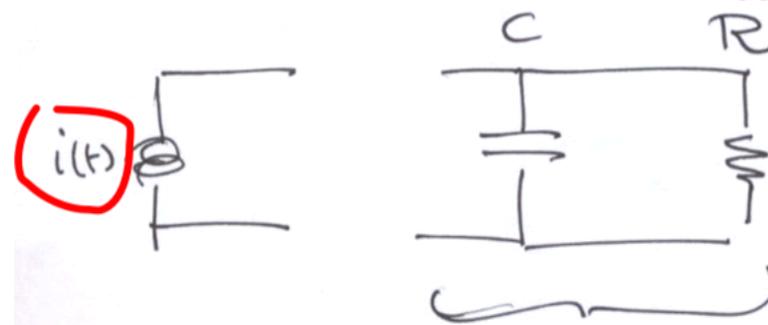
- modo impulsivo

(informazione sul singolo evento)

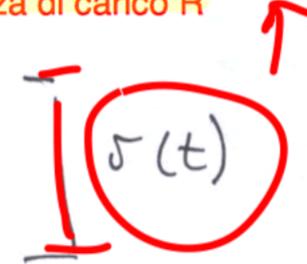
$\Rightarrow Q \rightarrow$ misura
 $\Rightarrow t \rightarrow$ tempo

le altre informazioni (posizione, \dots) dipendono dalla configurazione del rivelatore o sono grandezze derivate

Modo impulsivo



Il segnale elettrico base è la differenza di potenziale che si sviluppa ai capi della resistenza di carico R



Condizione statiche

condizione dinamica

Rappresentazione per il segnale (ignora HV)

Il primo elemento del circuito di lettura di solito è un preamplificatore, il cui scopo principale è quello di integrare la corrente su una capacità per ricavare la Q creata e quindi l'energia depositata.

$$C = C_{\text{rivelatore}} + C_{\text{connessioni}} + C_{\text{circuito di lettura}}$$

Funzionamento di un rivelatore di particelle 4

Calcolo di $v(t)$:

$$\begin{aligned}
 v(t) &= R i_R(t) && \leftarrow \text{corrente generata nel rivelatore} \\
 &= R(i(t) - i_c(t)) \\
 &= R i(t) - RC \frac{dv}{dt} && \text{Variazione di potenziale}
 \end{aligned}$$

Soluzioni = int. generale omogenea associata (risposta ad una δ)
 + int. particolare (dipende da $i(t)$)

Omogenea associata : $i(t) = 0$ tenuto a $t > 0$ che dispone le condizioni iniziali (v di corrente)

Soluzioni!

$$v(t) = v_0 e^{-t/RC}$$

\longleftarrow
tempo di risposta del circuito

Nell'ipotesi in cui il **segnale di corrente sia una δ** , il ΔV_R sale istantaneamente al valore massimo, dopo di che il sistema ritorna all'equilibrio con un **tempo caratteristico** del circuito di rivelazione+lettura **$\tau=RC$** .

All'equilibrio il condensatore del rivelatore è tornato al valore di tensione iniziale e il ΔV_R è tornato a zero.

Funzionamento di un rivelatore di particelle 5

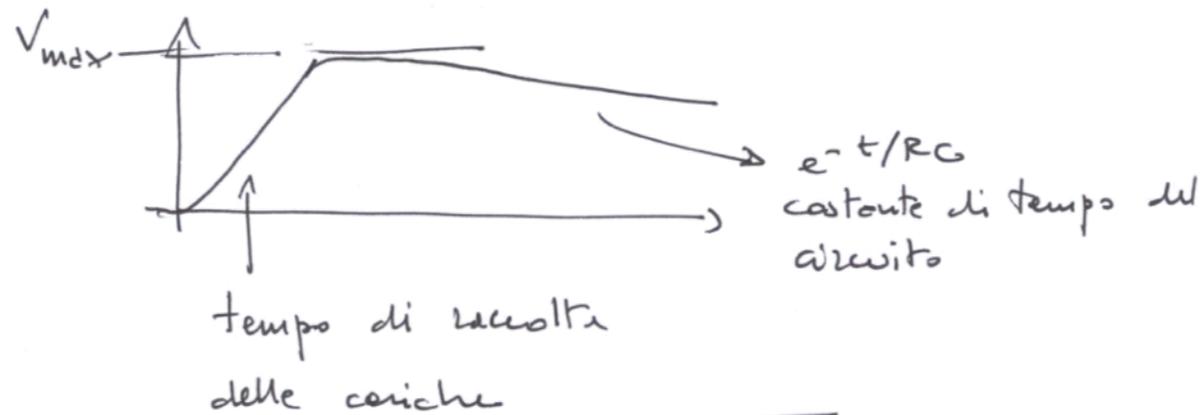
Integrale particolare:
($I(t) \neq \delta(t)$)

Soluzione qualitativa

1) Segnali "rapidi"

$$t_c \ll RC$$

(al limite ancora una S)



$$V_{max} = \frac{Q}{C} \div \underline{F}$$

condizione di lavoro per misure di spettroscopia

2) Segnali "lenti"

$$t_c \gg RC$$

il condensatore è un "circuito aperto" (componente di bassa frequenza nel segnale preponderante)
 $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$ molto grande) : $i(t)$ ai capi di R è

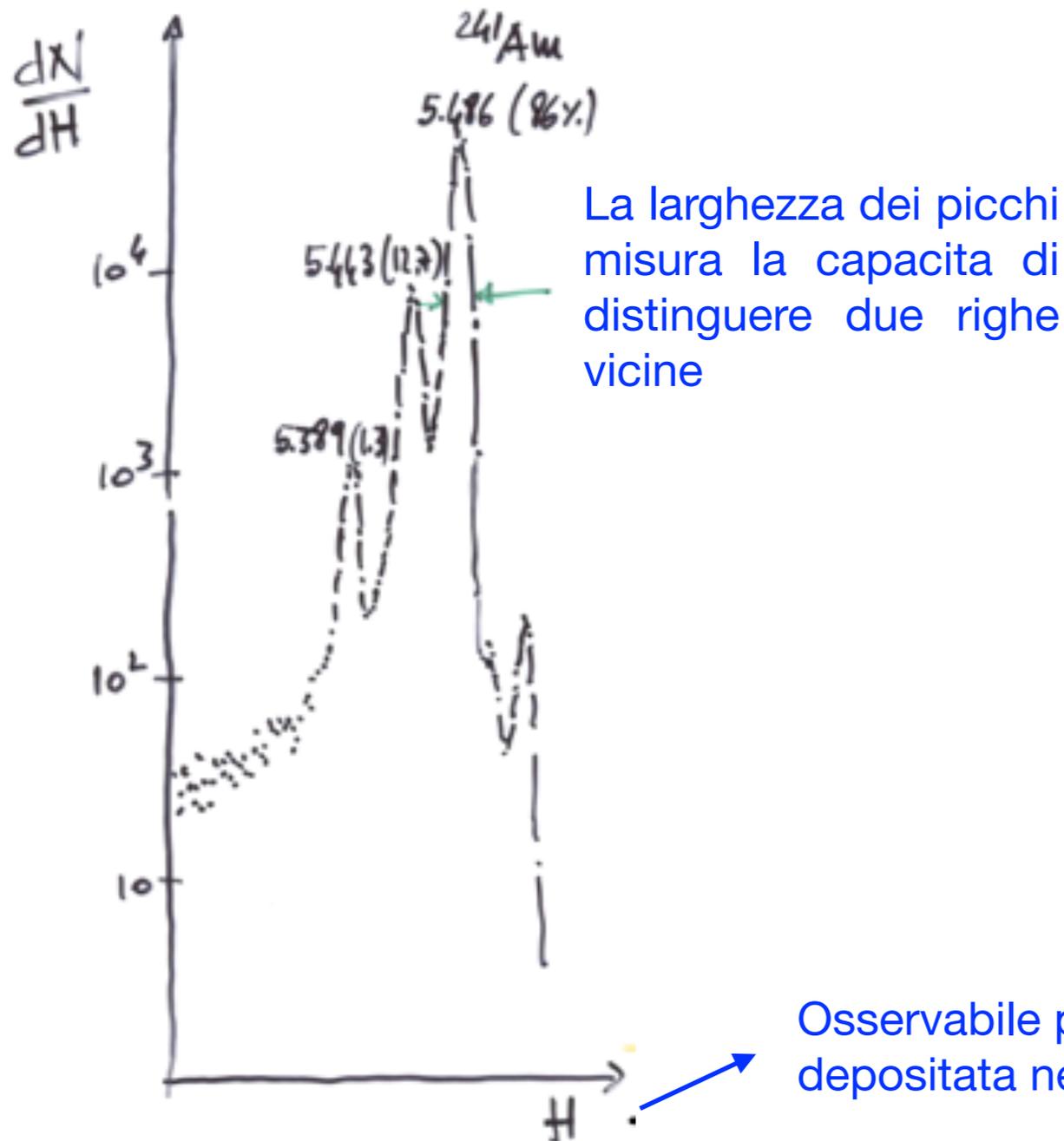
essenzialmente uguale alla $i(t)$ che fluisce nel rivelatore.

$$v(t) \div i(t)$$

$$Q \div \int v(t) dt \quad (\text{in questo caso non c'è stata integrazione})$$

Spettroscopia di radiazioni

- L'occhio umano distingue i colori, facendo una grossolana analisi spettrale della luce visibile
- **Spettro** = distribuzione d'intensità della radiazione al variare della frequenza (o energia, o lunghezza d'onda)
- La spettroscopia è lo **studio della struttura interna** di atomi, molecole e solidi **tramite l'analisi degli spettri**
- Nel nostro caso: **misura della distribuzione di energia della radiazione incidente**



Limite gaussiano

$$\text{Risoluzione FWHM} = 2.35 \frac{\sigma_H}{H}$$

Il segnale elettrico è il risultato della **Q prodotta** dalla deposizione di energia nel rivelatore.

Inevitabile è la componente alla risoluzione dovuta alla **natura statistica** del processo di produzione della carica: il **numero di portatori** prodotti a parità di energia depositata **fluttua**:

$$\left. \frac{\sigma_H}{H} \right|_{stat} = \frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{\frac{FN}{N}} = \sqrt{\frac{F}{N}}$$

Rivelatori per spettroscopia usati in laboratorio

Rivelatori a semiconduttore

Isolanti, semiconduttori e conduttori

Una **classificazione** sommaria dei solidi cristallini in base alle loro proprietà elettriche permette di dividerli in:

- **Metalli:** buoni conduttori di corrente elettrica a qualunque T , corrente di elettroni ($q=-e$)
- **Isolanti:** resistenza altissima, praticamente infinita, al fluire di corrente
- **Semiconduttori:** hanno proprietà elettriche particolari:
 - A T **sufficientemente bassa** si comportano come **isolanti**
 - All'aumentare di T **la resistività ρ diminuisce** e quindi la conducibilità σ aumenta
 - ρ (e quindi σ) può essere **variata** mediante “**drogaggio**” del materiale
 - I è trasportata da **due portatori di segno opposto** (e^- , h^+)
 - ρ **che diminuisce illuminandoli** con luce di λ opportuna

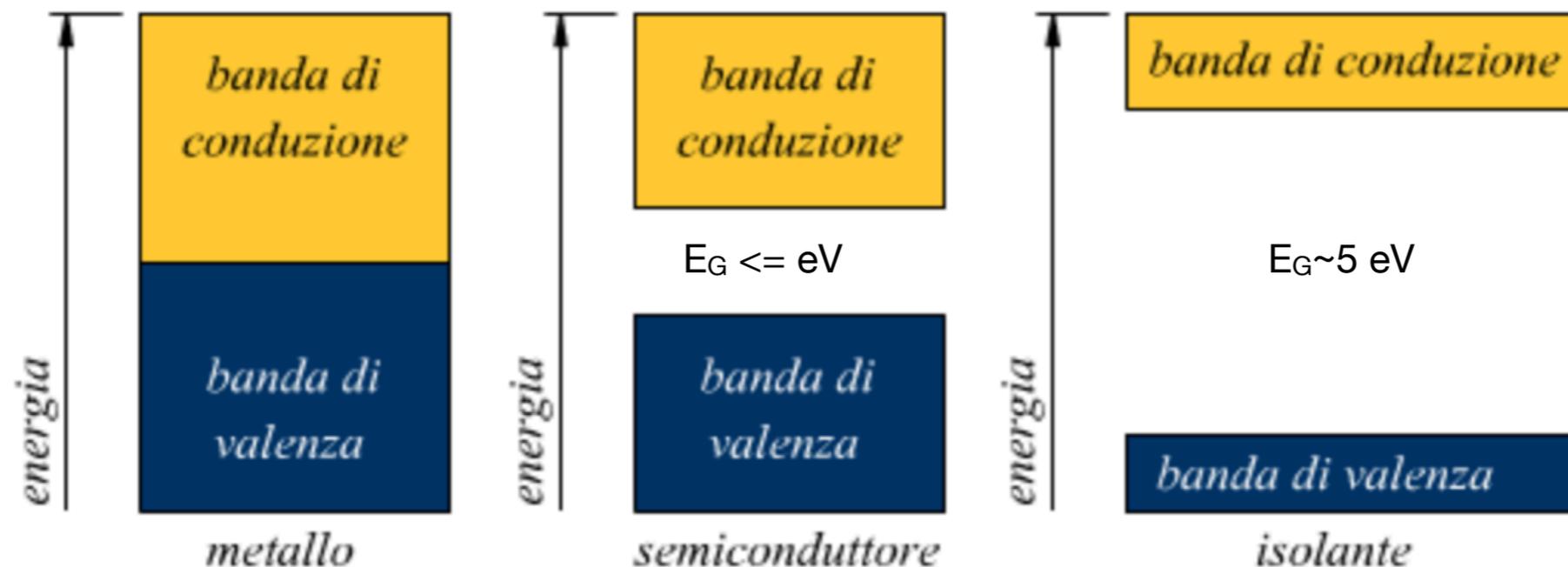
Rivelatori a semiconduttore

Avvicinando N atomi identici da distanza infinita alla distanza reticolare i livelli elettronici del singolo atomo si modificano, creando una **struttura "a bande"** in cui gli elettroni non sono più localizzati sul singolo atomo.

Banda di valenza: nasce dall'interazione degli elettroni di valenza (i più esterni). Non permette conduzione perché tutti i livelli sono occupati.

Banda di conduzione: nasce da livelli atomici ad energia più alta, solitamente non occupati. Permette conduzione perché gli elettroni hanno molti livelli liberi tra cui possono spostarsi.

In base al tipo di atomo e di come interagiscono avvicinandosi, **può nascere una zona tra le bande in cui non ci sono livelli accessibili** agli elettroni: **Gap di energia E_G**



Applicando E c'è conduzione anche a $T=0$

Applicando E c'è conduzione solo per T sufficientemente alta da superare E_G

Anche a T alte non si ha praticamente mai corrente

Rivelatori a semiconduttore

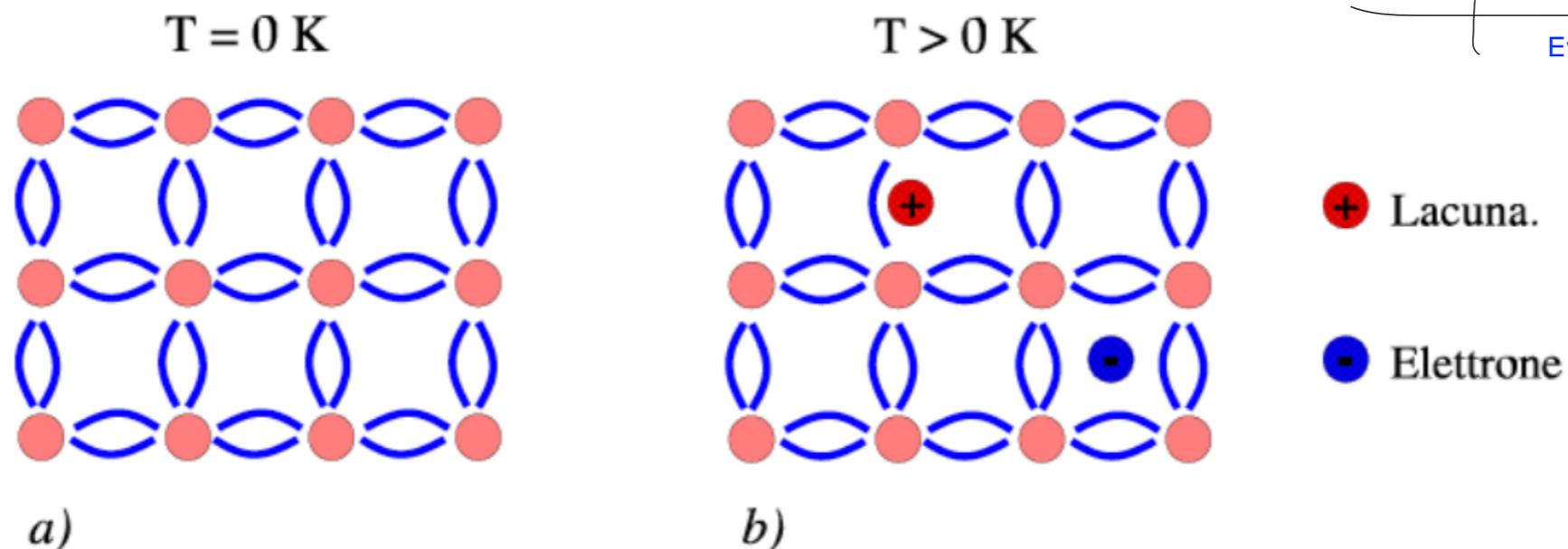
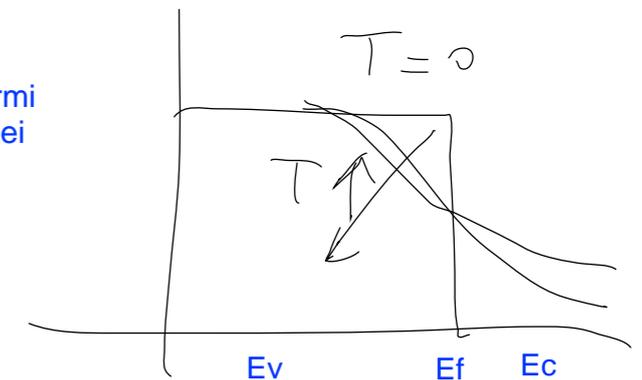
Semiconduttori intrinseci

Si e Ge: hanno 4 elettroni nella banda di valenza, gli servono 4 elettroni per arrivare in una configurazione più stabile -> nel reticolo fanno **4 legami covalenti con 4 atomi vicini**, mettendo in compartecipazione gli elettroni.

Per $T > 0$ nascono coppie e-h (in BC-BV) in ugual numero $N_e = N_h$. Sotto l'azione di \underline{E} entrambi i portatori si muovono e creano I. NB: si muovono in direzioni opposte.

Nel loro percorso e-h⁺ sono soggetti a ricombinazione.

Funzione di probabilità di Fermi
(Probabilità di occupazione dei livelli)

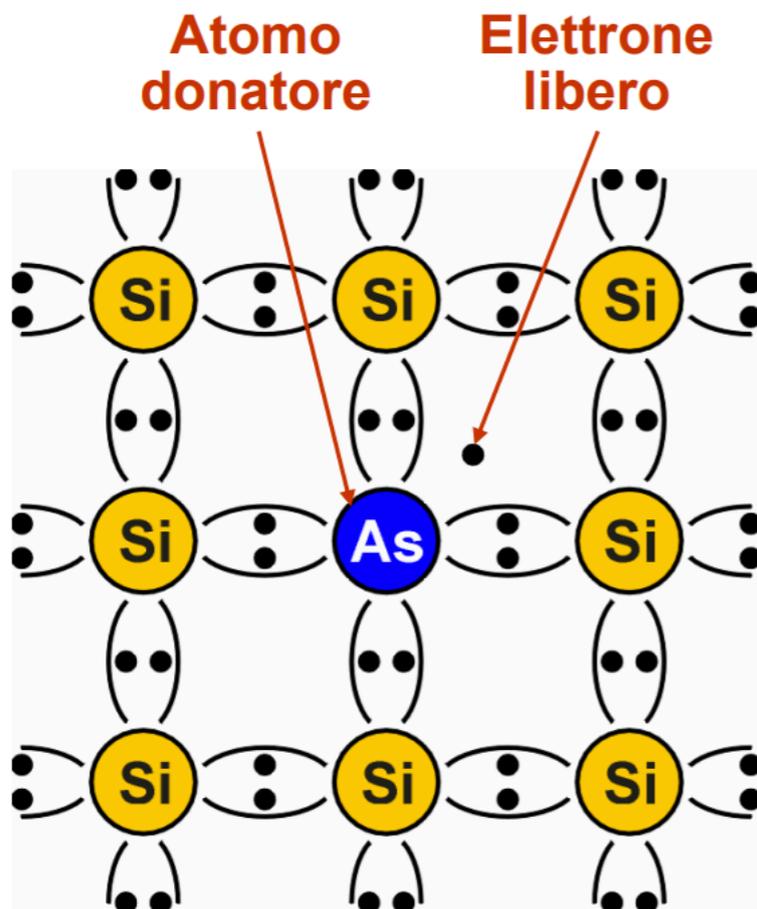


Rivelatori a semiconduttore

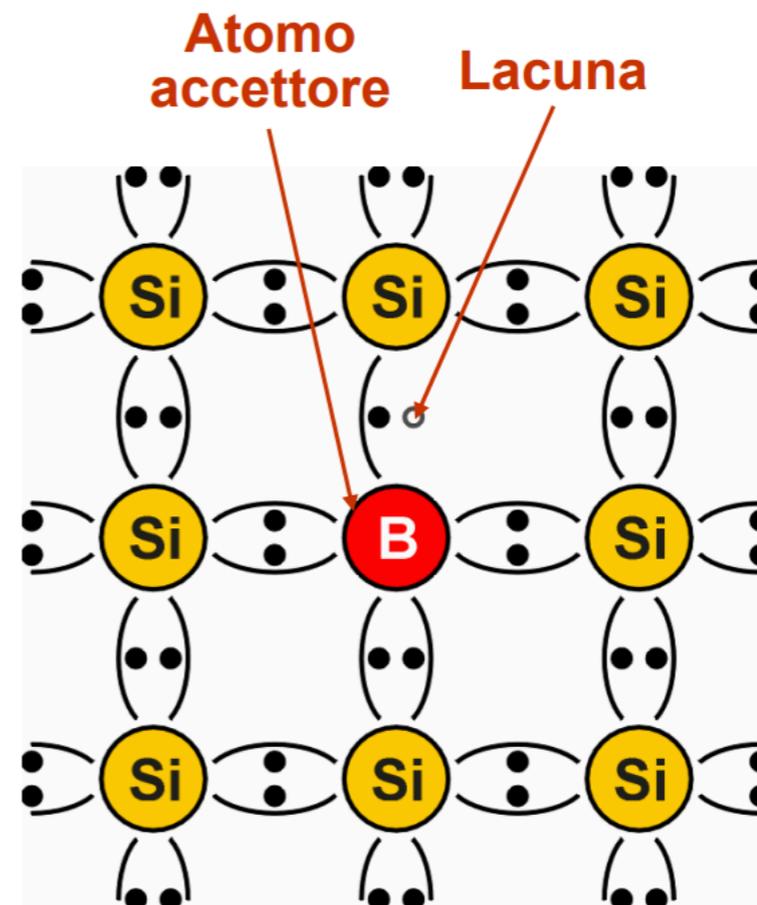
Semiconduttori drogati 1

È possibile **aumentare la conducibilità** dei semiconduttori drogandoli, ovvero inserendo nel reticolo cristallino atomi di impurezza, in particolare con **un e⁻ in più (DONORI)** o **un e⁻ in meno (ACCETTORI)** nel loro orbitale di valenza.

Drogaggio n (con donori)



Drogaggio p (con accettori)

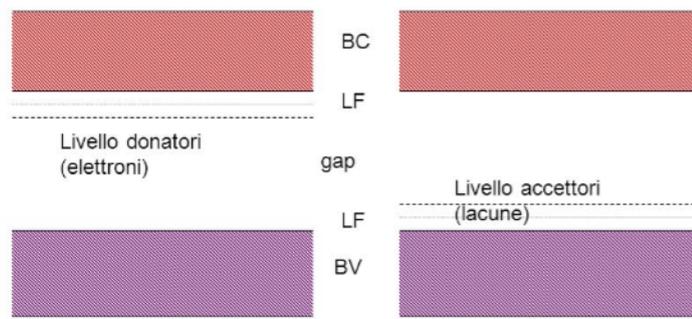


Rivelatori a semiconduttore

Semiconduttori drogati 2

La presenza di impurezze modifica la struttura a bande, ed in particolare:

- **Drogaggio n (con donori):** gli elettroni “in più” sono **debolmente legati** e gli basta poca energia per passare in BC. Ciò equivale ad avere un **livello con elettroni vicino alla BC**.
- **Drogaggio p (con accettori):** il legame non saturato del Si tende ad **attrarre elettroni**, a cui basta poca energia per passare. Ciò equivale ad avere un **livello vuoto vicino alla BV**.



Dopo il salto dell'e- rimangono:

- per donori: I⁺ fissi
- per accettori: I⁻ fissi

Il risultato è che a **T basse** può già iniziare la **conduzione** ad opera dei **portatori estrinseci** che saranno e⁻ per drogaggio n e h⁺ per drogaggio p (che lasciano ioni +(-) fissi).

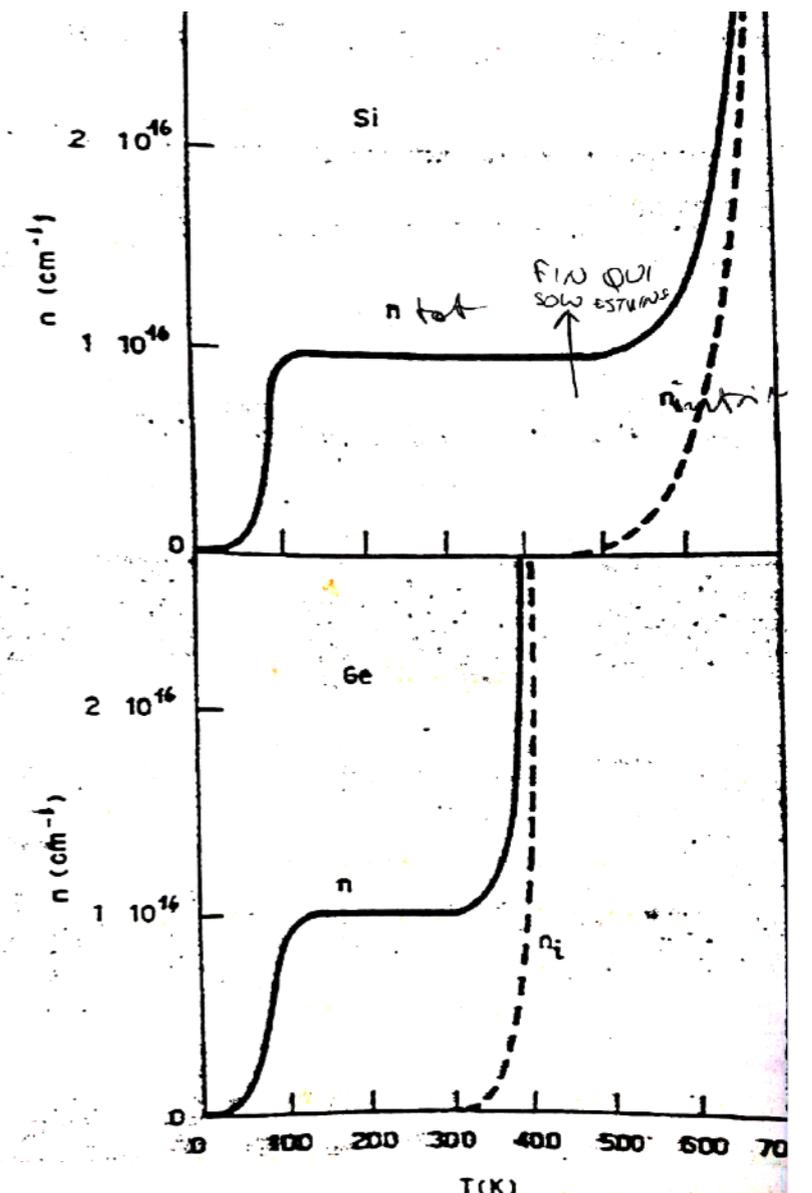
All'aumentare di T inizieranno ad essere prodotti **anche i portatori intrinseci** (con $N_e=N_h$).

Avremo quindi che:

- per **drogaggio n**: $N_e > N_h \Rightarrow$ gli e⁻ sono i portatori **maggioritari**
- per **drogaggio p**: $N_h > N_e \Rightarrow$ le h⁺ sono i portatori **maggioritari**

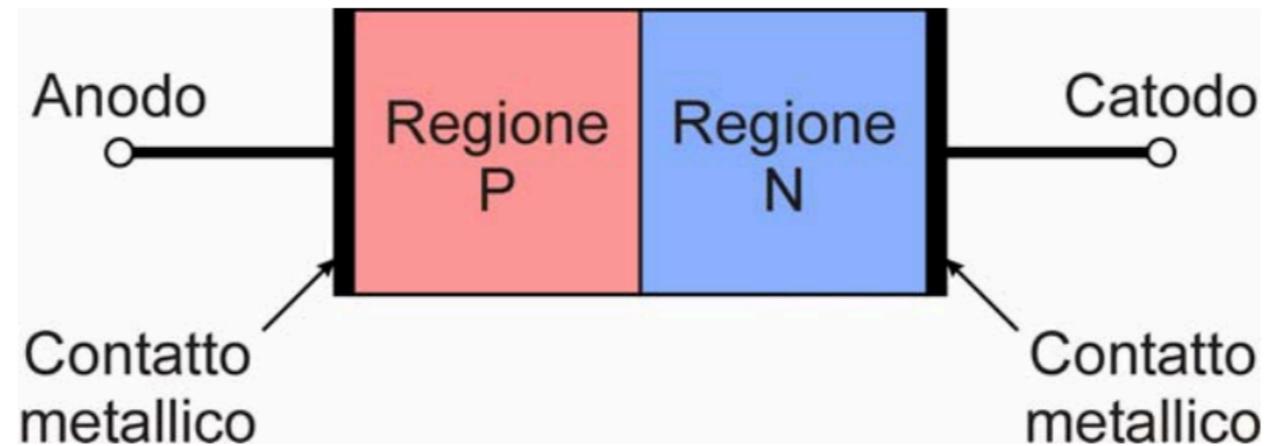
OSS: E_G (Si) = 1.14 eV, E_G (Ge) = 0.67 eV

\Rightarrow a T ambiente il Ge è già soggetto a corrente intrinseca



Rivelatori a semiconduttore

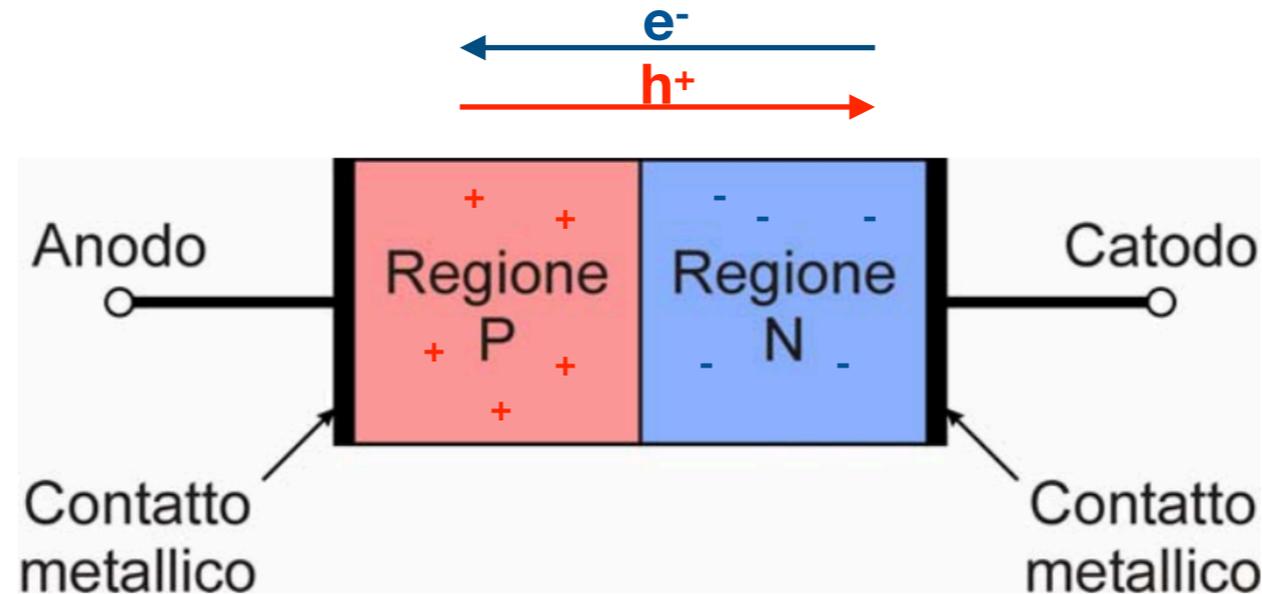
Giunzione P-N



- Una **giunzione pn** viene realizzata creando all'interno di un cristallo semiconduttore una regione drogata di tipo p e una di tipo n
- Alle estremità delle regioni p ed n vengono collegati due contatti metallici
- Il terminale collegato alla regione p è detto **anodo**, il terminale collegato alla regione n è detto **catodo**

Rivelatori a semiconduttore

Giunzione P-N: corrente di diffusione I_D

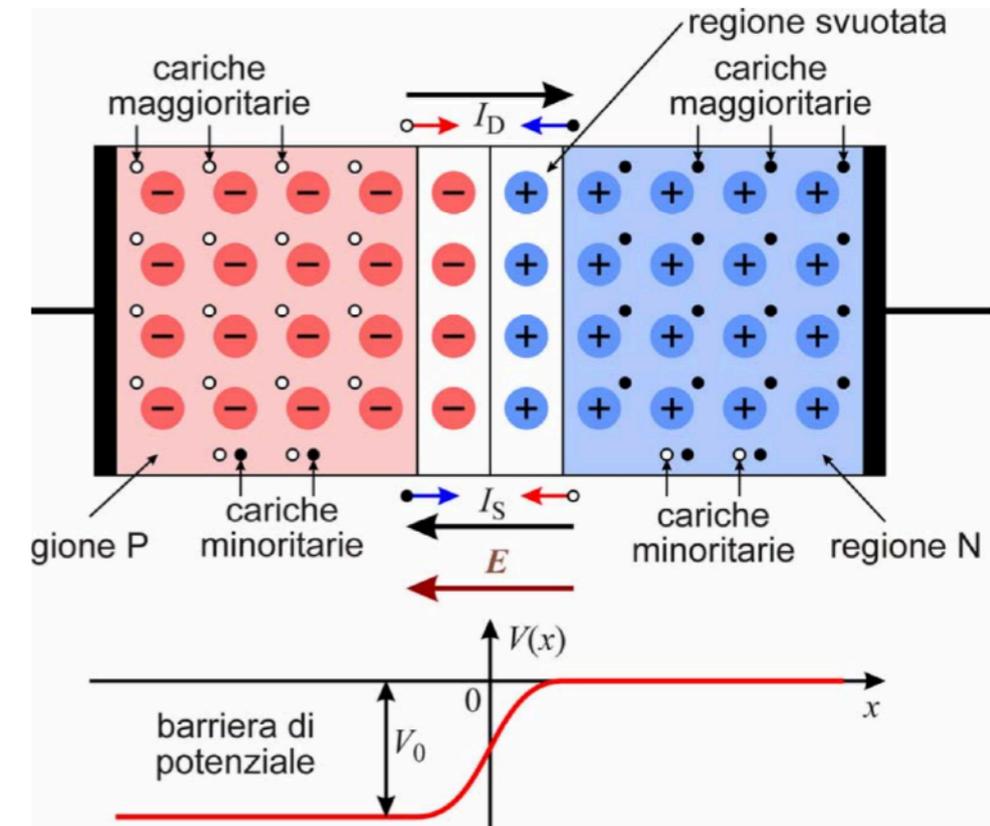


- Dato che nelle due regioni le densità dei portatori di carica sono diverse nasce una **corrente di diffusione** I_D costituita da
 - ♦ lacune che si diffondono dalla regione p alla regione n
 - ♦ elettroni che si diffondono dalla regione n alla regione p
- Le lacune transitate nella regione n si ricombinano rapidamente con gli elettroni che in questa regione rappresentano le cariche maggioritarie
- In modo analogo, gli elettroni che attraversano la giunzione si ricombinano con le lacune della regione p
- Queste ricombinazioni determinano una diminuzione delle cariche libere in una piccola regione in prossimità della superficie di giunzione (**regione svuotata**)

Rivelatori a semiconduttore

Giunzione P-N: corrente di deriva I_s e equilibrio

- Nella regione svuotata sono presenti cariche fisse non bilanciate da cariche mobili
- Queste cariche danno origine ad un campo elettrico \mathbf{E} che si oppone alla corrente di diffusione
- Tra le sezioni alle estremità della regione svuotata di ha una differenza di potenziale V_0 (**barriera di potenziale**) che ostacola il moto delle lacune verso la regione n e degli elettroni verso la regione p
- Nelle regioni p e n sono presenti anche cariche minoritarie prodotte per generazione termica
 - ♦ elettroni nella regione p
 - ♦ lacune nella regione n
- Il verso del campo elettrico è tale da **spingere le cariche minoritarie** ad attraversare la giunzione dando origine ad una corrente di deriva I_s diretta in senso opposto alla corrente di diffusione



**All'equilibrio $I_D = I_s$
e quindi $I_{\text{giunzione}}=0$**

Rivelatori a semiconduttore

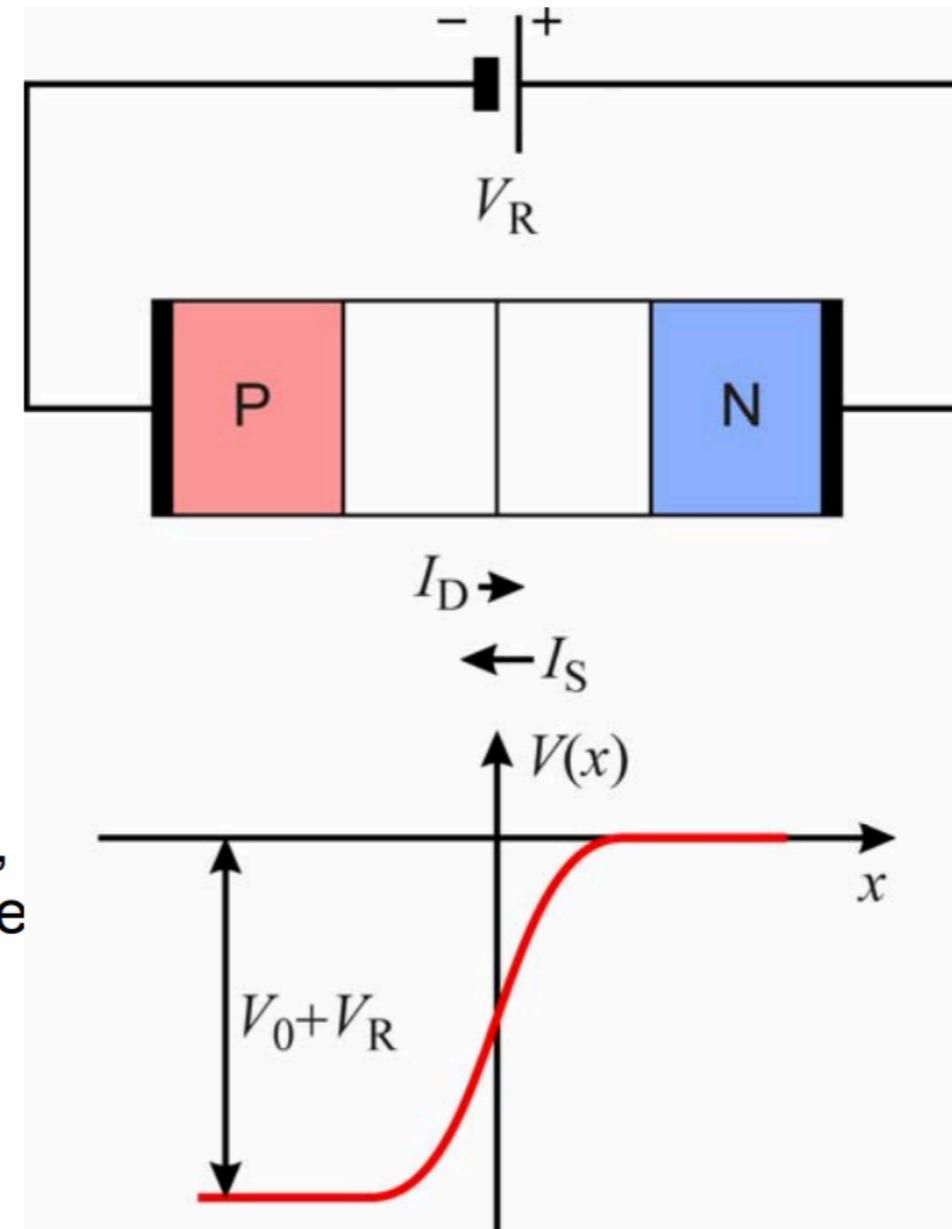
Giunzione P-N: polarizzazione

- Polarizzare la giunzione significa applicare una differenza di potenziale ai terminali
- Quando il potenziale applicato al lato p (anodo) è minore di quello applicato al lato n (catodo) si dice che la giunzione è polarizzata **inversamente**
 - ➔ In questo caso la differenza di potenziale applicata ha polarità concorde con la barriera di potenziale
 - ➔ La I_D , dovuta ai maggioritari, viene **ostacolata**
- Quando il potenziale applicato al lato p è maggiore di quello applicato al lato n si dice che la giunzione è polarizzata **direttamente**
 - ➔ In questo caso la differenza di potenziale applicata ha polarità discorde con la barriera di potenziale
 - ➔ La I_D , dovuta ai maggioritari, viene **umentata**

Rivelatori a semiconduttore

Giunzione P-N: polarizzazione inversa

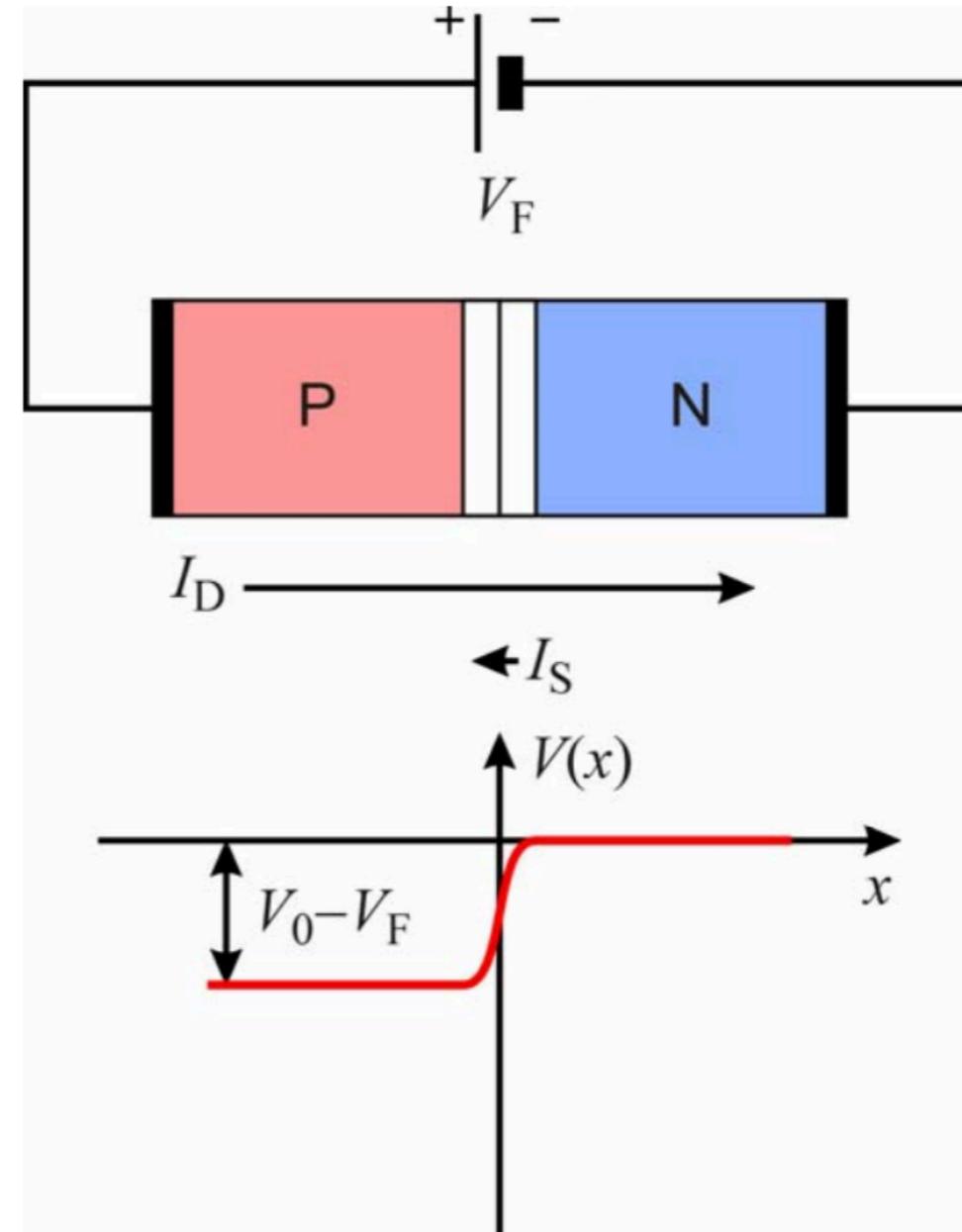
- La tensione di polarizzazione V_R richiama le lacune verso il terminale negativo gli elettroni verso il positivo
- La regione svuotata si allarga
- Aumenta il numero di cariche fisse non neutralizzate e, di conseguenza, anche l'ampiezza della barriera di potenziale, che diviene pari a $V_0 + V_R$
- All'aumentare di V_R la corrente di diffusione si riduce fino ad annullarsi
- Rimane la sola corrente di deriva che, dipendendo dalla concentrazione delle cariche minoritarie, è molto piccola e praticamente indipendente da V_R (mentre varia sensibilmente con la temperatura)



Rivelatori a semiconduttore

Giunzione P-N: polarizzazione diretta

- La tensione di polarizzazione V_F determina una riduzione della barriera di potenziale
- A questo corrisponde una riduzione della larghezza della regione svuotata e quindi del numero di cariche fisse non compensate
- Aumentando V_F , la riduzione della barriera di potenziale consente ad un numero sempre maggiore di elettroni e di lacune di attraversare la giunzione per diffusione
- La corrente di diffusione I_D diviene rapidamente maggiore di molti ordini di grandezza rispetto alla corrente di deriva I_S



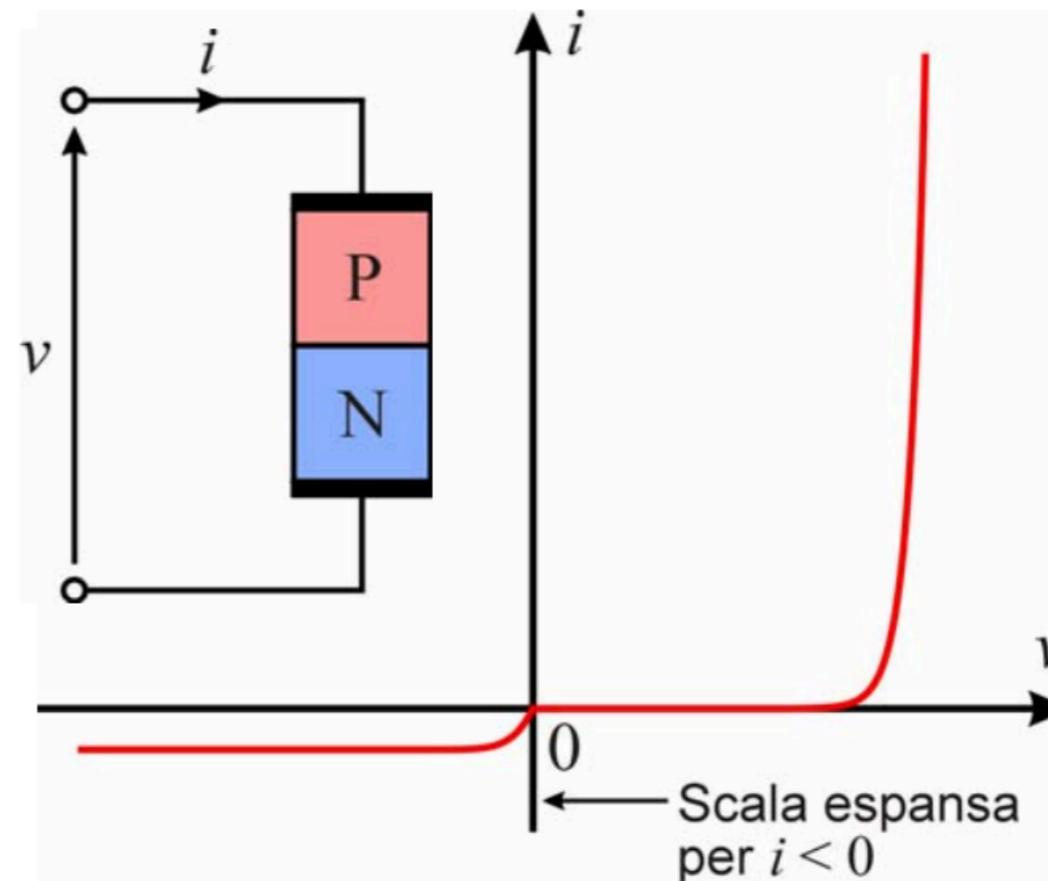
Rivelatori a semiconduttore

Giunzione P-N: equazione

- L'equazione caratteristica della giunzione pn è espressa dalla relazione

$$i = I_S (e^{v/V_T} - 1) \quad \text{Equazione di Shockley}$$

- Per $v < 0$ la corrente i ha valore praticamente costante ($i \approx -I_S$)
- In condizioni di polarizzazione diretta la corrente è trascurabile per valori di v inferiori a circa 0.5 - 0.6 V, quindi aumenta molto rapidamente



(I valori indicati si riferiscono al caso del silicio)

I_S = corrente di saturazione

V_T = tensione termica (~26 mV a T_{amb})

Rivelatori a semiconduttore

Regione di svuotamento in pol. inversa

La regione di svuotamento è **priva di cariche libere**. In essa si trovano:

- le **cariche fisse** dei droganti che hanno perso/ceduto un elettrone
- **gli atomi neutri** del semiconduttore

Quando una **radiazione incidente** deposita energia nella regione di svuotamento **crea coppie e⁻-h⁺** che, **sotto l'azione di \underline{E}** (V inversa) attraversano la giunzione generando una **corrente I_{segnale}**

I_{segnale} si sovrappone alla I_s del semiconduttore che deve quindi essere più piccola possibile. I_s è la corrente dovuta ai portatori **minoritari** (ovvero quelli intrinseci, che nascono da eccitazioni termiche), ed è quindi fortemente **legata a T e all' E_G** . Per questo il Ge deve operare a T basse (T_{azoto}).

Dati N_A e N_D si può dimostrare che la dimensione della regione di svuotamento è data da:

$$d \simeq \sqrt{\frac{2\varepsilon V}{eN}}$$

con:

ε = costante dielettrica del mezzo

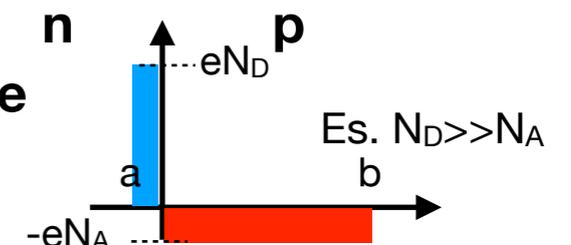
V = potenziale di polarizzazione

$N = N_A$ o N_D (quello predominante)

OSS:

$$C = \frac{\varepsilon S}{d} \propto \frac{1}{\sqrt{V}}$$

NB: La regione **si estende di più nel lato con densità di drogante minore**
(la carica spaziale totale deve essere =0 \Rightarrow $eaN_D = ebN_A$)



Rivelatori a semiconduttore per α

Risoluzione

termine statistico

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

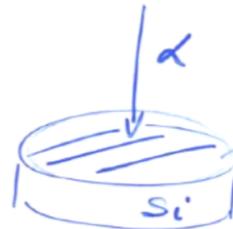
(30 eV per i.r. a gas)
100 eV per scintillatori

$$\text{Se } E = 3.6 \text{ MeV} \rightarrow N = 10^6 \text{ e-h}$$

$$R_{FWHM} = \frac{2.35}{\sqrt{N}} \leq \frac{2.35}{\sqrt{10^6}} = 2.35 \times 10^{-3}$$

$\rightarrow \Delta E \sim 10 \text{ keV} \text{ a } 3.6 \text{ MeV} \quad !!$

effetti di rivelatore



barriera superficiale
per contatto elettrico e
per la realizzazione della
giunzione (tipicamente
Au + SiO₂)
spessori $\leq 0.1 \mu\text{m}$
 $\Rightarrow \Delta E \approx 10 \text{ KeV}$

Dovuto alla fluttuazione dell'energia
rilasciata nello strato morto.

rumore elettronico

+ correnti di fuga (e nei fluttuazioni)

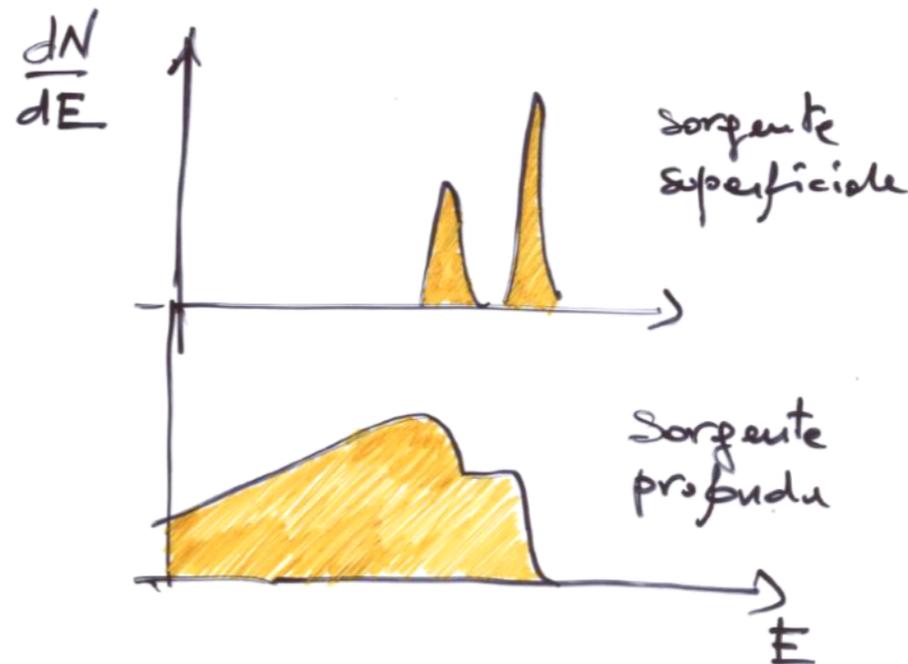
+ rumore serie (dipende dalla capacità
del rivelatore, del preamplificatore e dei cavi che li collegano)

Rivelatori a semiconduttore per α

Risoluzione

Spettroscopia precisa richiede

- Sorgenti superficiali
(no autoassorbimento)



- Camere a vuoto
(vuoto tra sorgente e rivelatore)

- Rivelatori nudi (o con piccole)
superfici esterne passive
(insensibili)

Rivelatori a semiconduttore per γ

Germanio

$$E_{gap} = 0.76 \text{ eV}$$

$\sim 4 \text{ eV} / \text{coppia } e-h$

\Rightarrow ottima risoluzione
perché produco molti portatori di carica

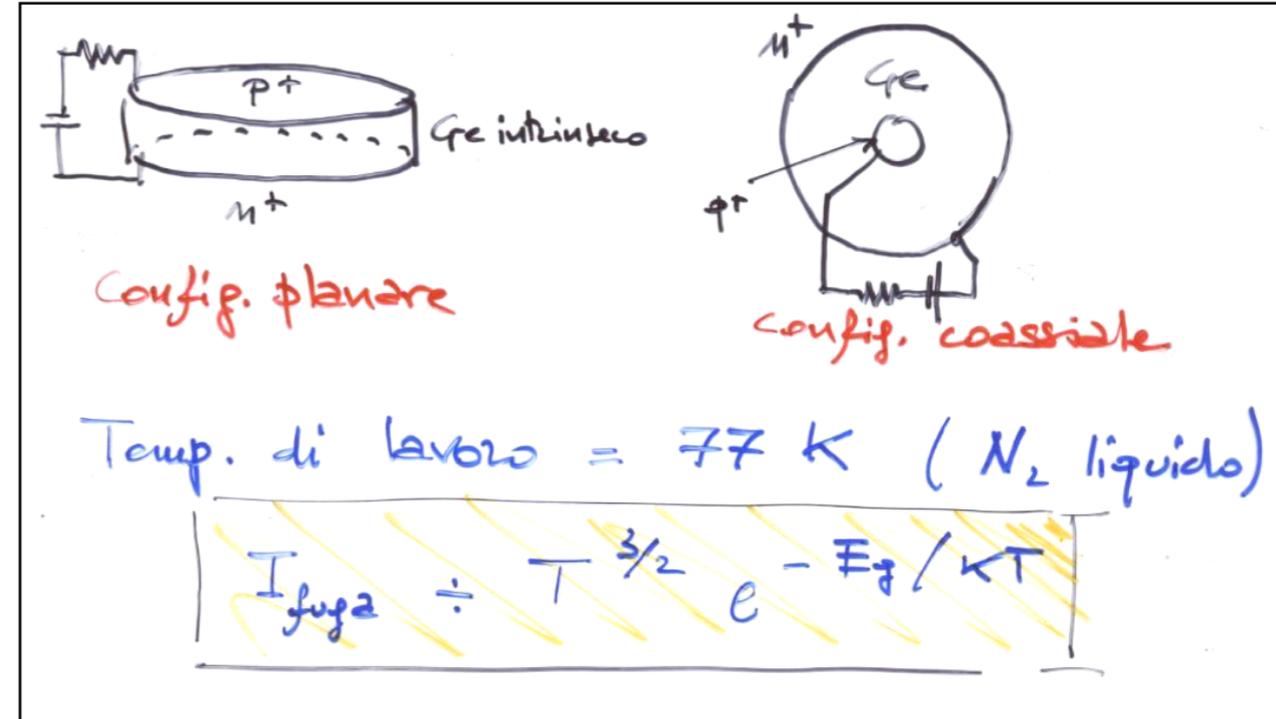
NB. Si vuole:

Regione di svuotamento di alcuni cm
per poter assorbire tutta l'energia dei gamma tipici

$$d = \left(\frac{2 \epsilon V}{eN} \right)^{1/2}$$

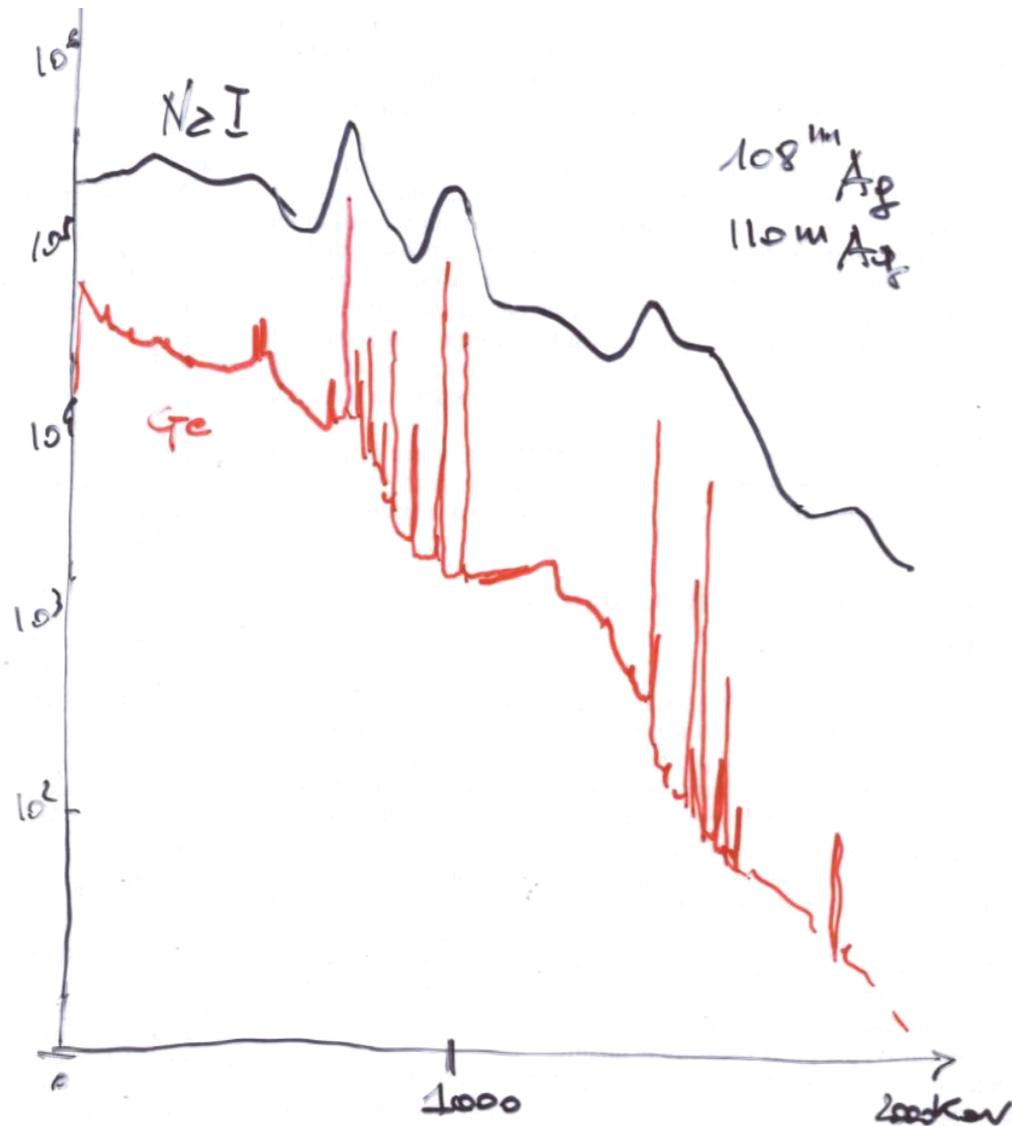
richiede $N < 10^{10} \text{ atomi/cm}^3$

\Rightarrow High Purity Ge / Intrinsic Ge
Lithium Drifted Ge



Rivelatori a semiconduttore per γ

Risoluzione



$$\text{FWHM}^2 = W_{\text{stat}}^2 + W_x^2 + W_E^2$$

- $W_{\text{stat}}^2 = 2.35 F W E$ Termine statistico
 $W \sim 1 \text{ eV}^2$, $F \sim 0.1$
- W_x^2 dovuto a raccolta incompleta di carica (intrappolamento e ricombinazione)
Significativo in rivelatori grandi
 $W_x \propto E$ (più è lunga la traccia ...)
- W_E^2 rumore elettronico (indep. da E)

Rivelatori a scintillazione

Se una **particella** incidente cede **energia** allo scintillatore causando **eccitazione di livelli atomici o molecolari**, il ritorno all'equilibrio può avvenire via **emissione di fotoni, tipicamente nel visibile**. La rivelazione di questi fotoni con opportuni sensori permette poi di **ricostruire l'energia** depositata dalla particella.

- La luce è emessa in quantità **proporzionale all'energia** persa dalla particella nel rivelatore
- La luce è emessa in modo **isotropo**
- La luce è emessa con **tempi di decadimento caratteristici** del materiale

$$I = I_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$$

Due processi di emissione:

- **Fluorescenza** ($\tau \leq 10^{-7}$ s)
- **Fosforescenza** ($\tau \sim 10^{-6} - 10^3$ s)

Siamo interessati a questa

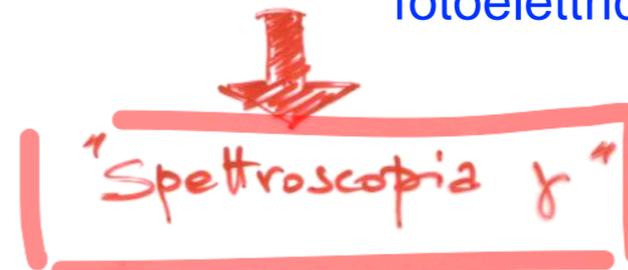
ORGANICI (plastici)

Veloci $\tau \approx 2-3$ ns
Discreta resa di luce
($\approx 10^4$ fotoni/MeV)



INORGANICI

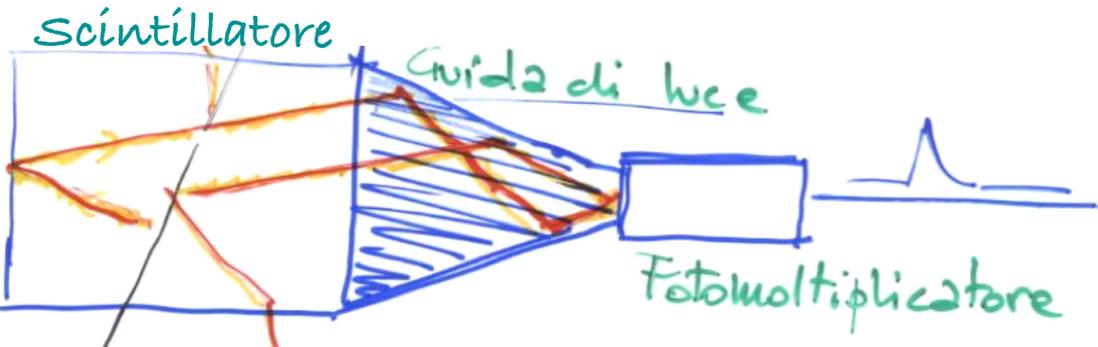
Più lenti $\tau \approx 100$ ns
Alta resa di luce
(NaI 40000 ph/MeV)
Alto Z (Alta probabilità di fotoelettrico)



Rivelatori a scintillazione

Letture del segnale luminoso

CATENA DI LETTURA



Scintillatore

Guida di luce

Fotomoltiplicatore

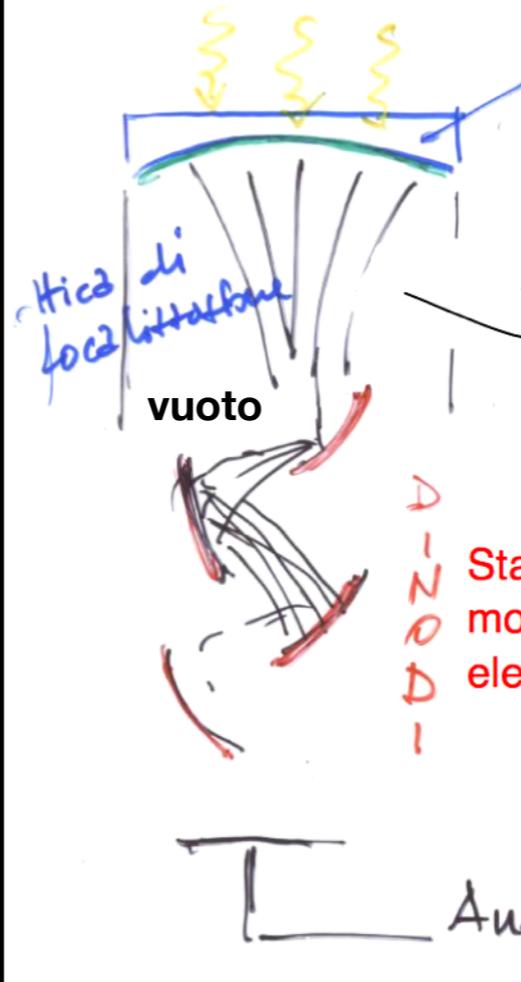
Resa di luce + raccolta + efficienza di conversione di fotoni in elettroni

$\Rightarrow W = 100 \text{ eV}$

Energia necessaria per produrre un portatore di carica (e^-)

Fotomoltiplicatore (PMT)

Converte il segnale di luce in segnale elettrico



Finestra di vetro/quarzo

Fotocatodo

- fotone cede energia ad un elettrone del materiale
- l'elettrone migra verso la superficie perdendo parte dell'energia in urti
- se l'energia residua è $>$ funzione lavoro esce

Fotoelettroni

vuoto

Stadio di moltiplicazione degli elettroni

Anodo

Eff. Quantica = $\frac{n^\circ \text{ di } e^- \text{ emessi}}{n^\circ \text{ di fotoni incid.}}$

$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$

$G \div S^N$

$\div 10^6$

$V(+)$

$N = n^\circ \text{ di stadi}$

$\approx 10 \div 30 \%$

$S = \text{guadagno del singolo stadio}$

Rivelatori a scintillazione per γ

Risoluzione

Per fare spettroscopia γ si usano scintillatori **inorganici** perchè hanno più **alti resa in luce e Z**

TRADIZIONALE

NaI(Tl)

- LY~40000 fotoni/MeV
- 25 eV per produrre 1 fotone di scintillazione

Statistica di fotoelettroni:

$$\begin{aligned}N_{p.e.} &= N_{ph} \cdot \epsilon_{geom} \cdot \epsilon_Q = \\ &\approx 4 \times 10^4 \times 0.75 \times 0.2 \text{ s} \quad (\text{Valori tipici}) \\ &= 6000 \quad @ \quad 1 \text{ MeV} \quad (\approx 150 \text{ eV/p.e.})\end{aligned}$$

$$\boxed{R} \div \frac{2.35 \sqrt{6000}}{6000} \approx 3\% \quad @ \quad 1 \text{ MeV} \\ (30 \text{ keV})$$

N.B. Non ho dimenticato il fattore di Fano:
in questo caso $F \sim 1$

Rivelatori a scintillazione per γ

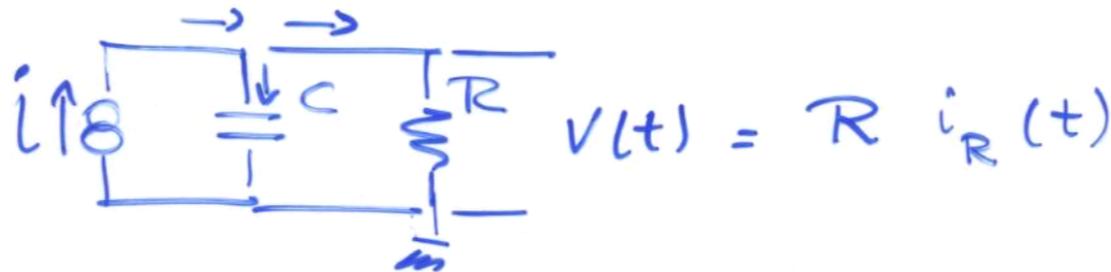
Forma dell'impulso (1)

Corrente di scintillazione:

Corrente dovuta agli elettroni che arrivano all'anodo

$$i(t) = \frac{Q}{\tau} e^{-t/\tau}$$

τ = vita media



C = Canodo, Ccavi, Cinput seguente

$$V(s) = R \frac{Z_c}{R + Z_c} i(s) =$$

$$= \frac{RC}{1 + sRC} \cdot \frac{1}{C} i(s)$$

esponenziale con costante di tempo RC

$$V(t) = \frac{Q}{C} \frac{RC}{RC - \tau} \left(e^{-t/RC} - e^{-t/\tau} \right)$$

Rivelatori a scintillazione per γ

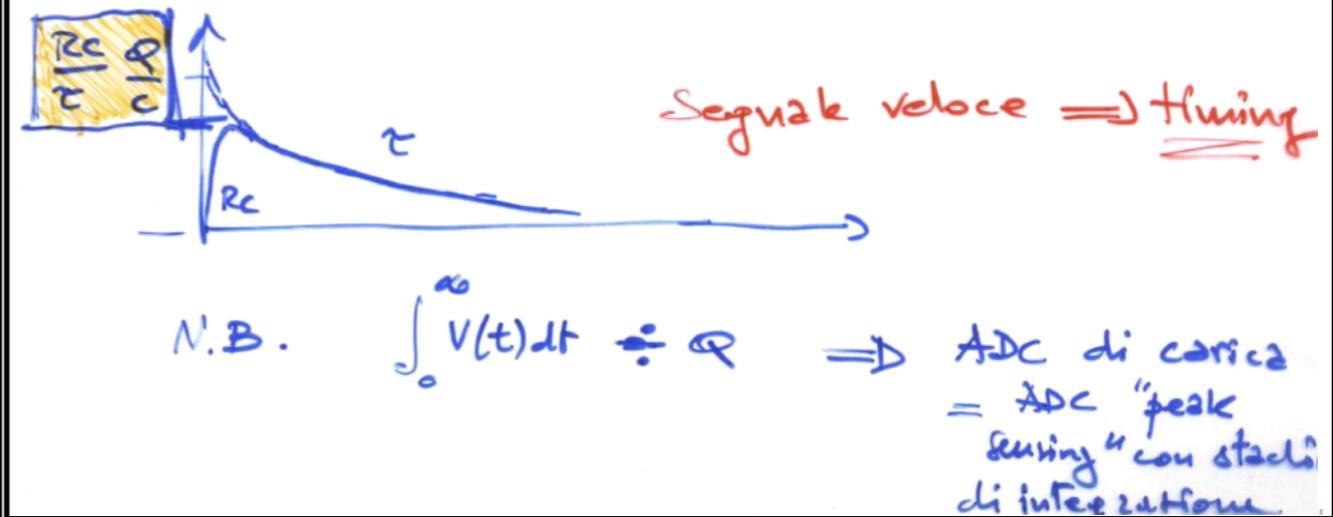
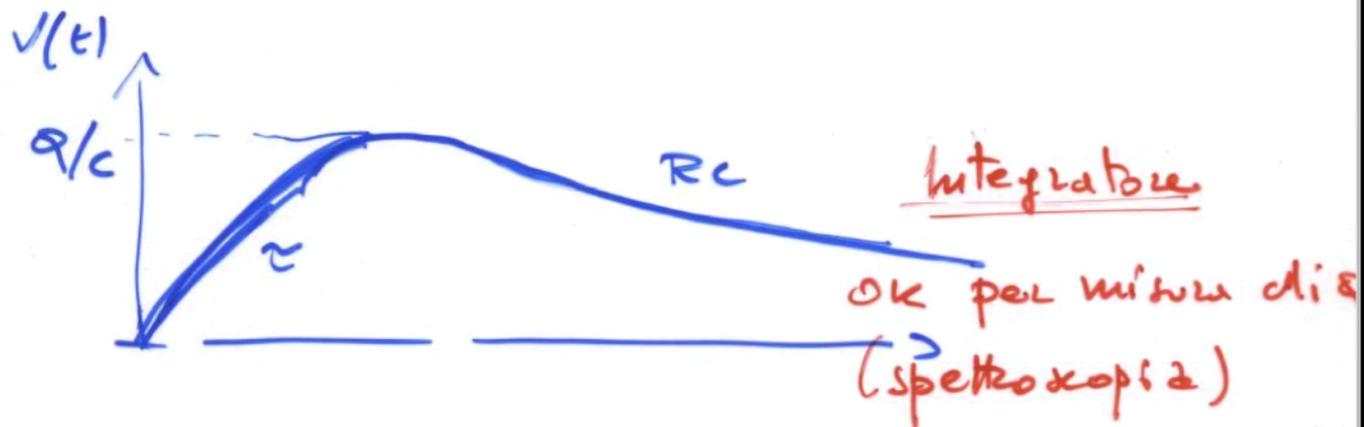
Forma dell'impulso (2)

Grande costante di tempo ($RC \gg \tau$)

Piccola costante di tempo ($RC \ll \tau$)

$$V(t) \approx \frac{Q}{C} (1 - e^{-t/\tau}) \quad \text{a tempi brevi}$$
$$\approx \frac{Q}{C} e^{-t/RC} \quad \text{a tempi lunghi}$$

$$V(t) \approx \frac{RC}{\tau} \frac{Q}{C} (1 - e^{-t/RC}) \quad \text{a tempi brevi}$$
$$\approx \frac{RC}{C} \frac{Q}{\tau} e^{-t/\tau} \quad \text{a tempi lunghi}$$



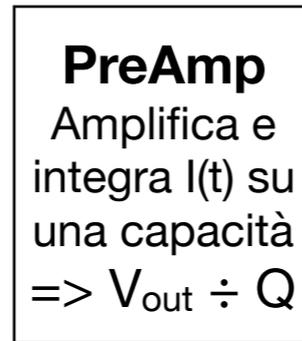
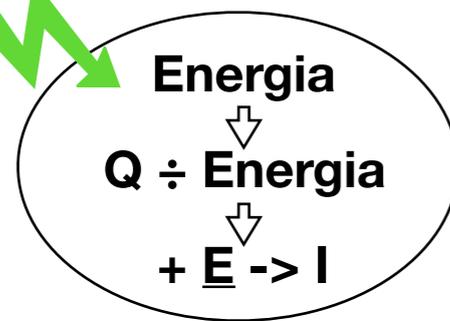
Catena elettronica di lettura del segnale per spettroscopia

Catena di lettura per spettroscopia

Condizione per spettroscopia: $RC \gg t_{\text{tracc}}$

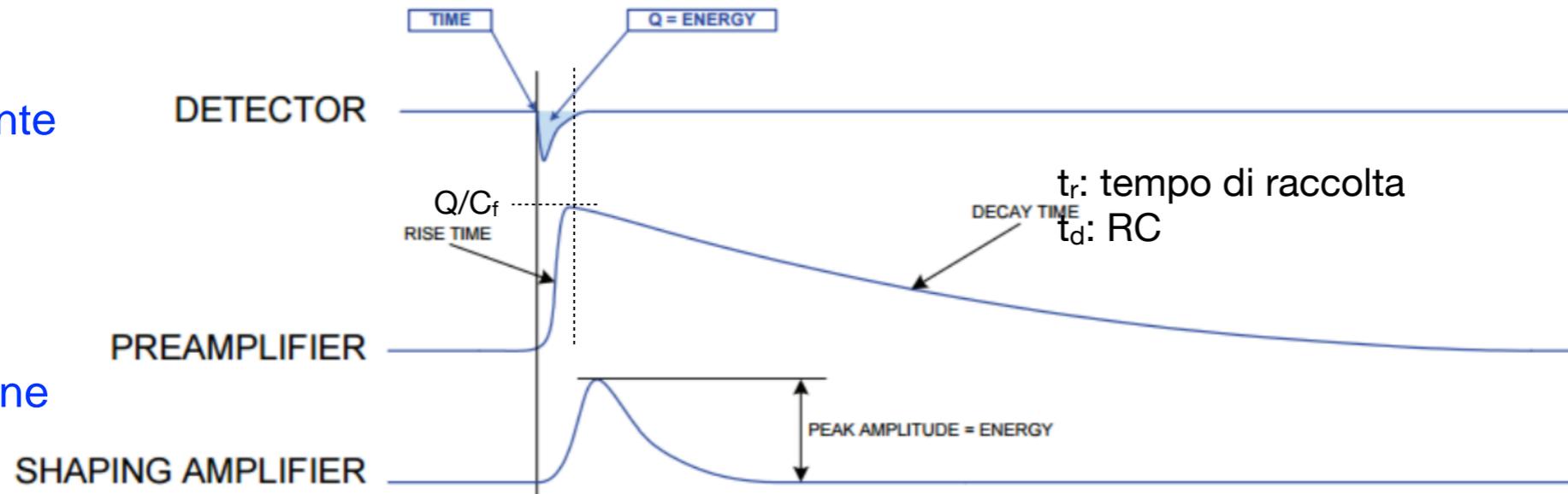
Trasforma il segnale di Q in arrivo dal rivelatore in un segnale di tensione

Particella



Segnale di corrente

Segnali di tensione

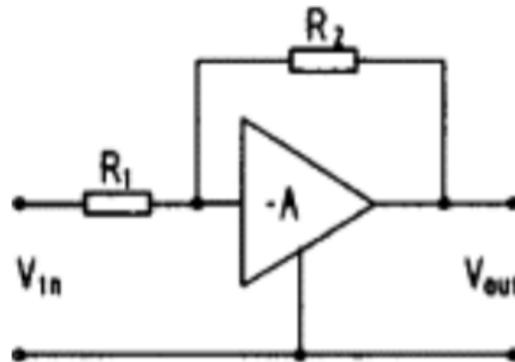


Catena di lettura per spettroscopia

Preamplificatore

In cfg. Voltage Sensitive

hp.) $A \gg R_2/R_1$ e $R_{in}C_{in} \gg t_{tracc}$



$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} V_{in}$$

gain

Se τ del circuito di input (R_{in}/C_{in}) $\gg t_{tracc}$
 V_{in} sarà dato da Q/C_{in}

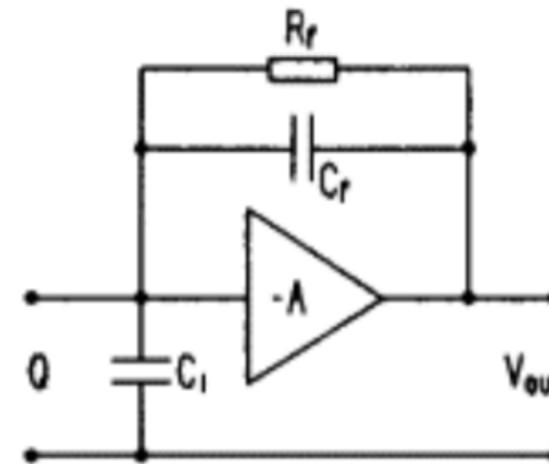
$$V_{out} = -\frac{R_2}{R_1} \frac{Q}{C_{in}}$$

dove $C_{in} = r_{iv} + c_{avi} + i_{in}$ del pre

- Dipende dalla capacità del rivelatore!!
- Può non essere stabile
- Può dipendere dalle condizioni di lavoro

In cfg. Charge Sensitive

hp.) $A \gg (C_i + C_f)/C_f$ e $R_f C_f \gg t_{tracc}$



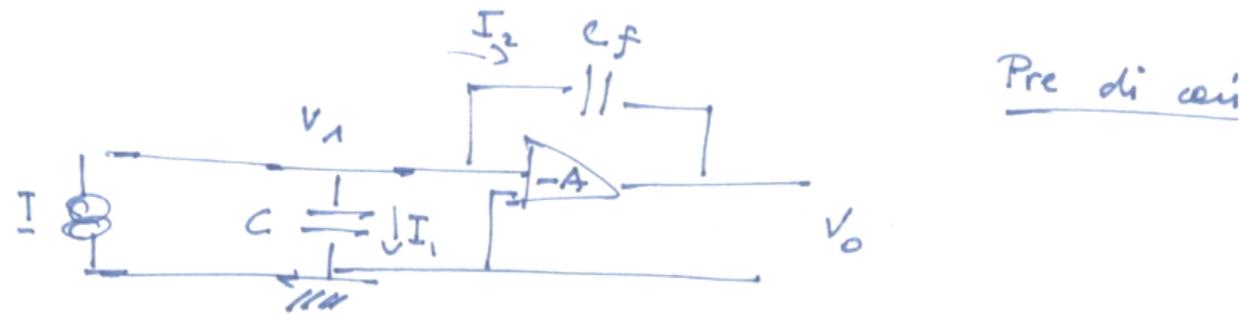
$$V_{out} = -A \frac{Q}{C_{in} + (A+1)C_f} \approx \frac{Q}{C_f}$$

Il segnale di uscita V_{out} è proporzionale alla Q ,
che viene integrata su C_f

- Non dipende dalla capacità del rivelatore!!
- Dipende da C_f che è un parametro hardware che controlliamo

Catena di lettura per spettroscopia

conto Preamplificatore charge sensitive



$$V_o = -A V_1$$

$$Z_c = \frac{1}{sC} \quad s=j\omega$$

$$\begin{aligned} I &= I_1 + I_2 = \\ &= \frac{V_1}{Z_c} + \frac{V_1 - V_o}{Z_{cf}} = \\ &= \frac{V_1}{Z_c} + \frac{(A+1)V_1}{Z_{cf}} \end{aligned}$$

$$I = s[C + (A+1)C_f] V_1$$

$$V_1 \stackrel{I/s=Q}{=} \frac{Q}{C + (A+1)C_f}$$

$$\begin{aligned} V_o &= -A V_1 = \\ &= -A \frac{Q}{C + (A+1)C_f} \end{aligned}$$

hp.) $A \gg (C_i + C_f)/C_f$

$$\approx -\frac{Q}{C_f}$$

Catena di lettura per spettroscopia

Amplificatore

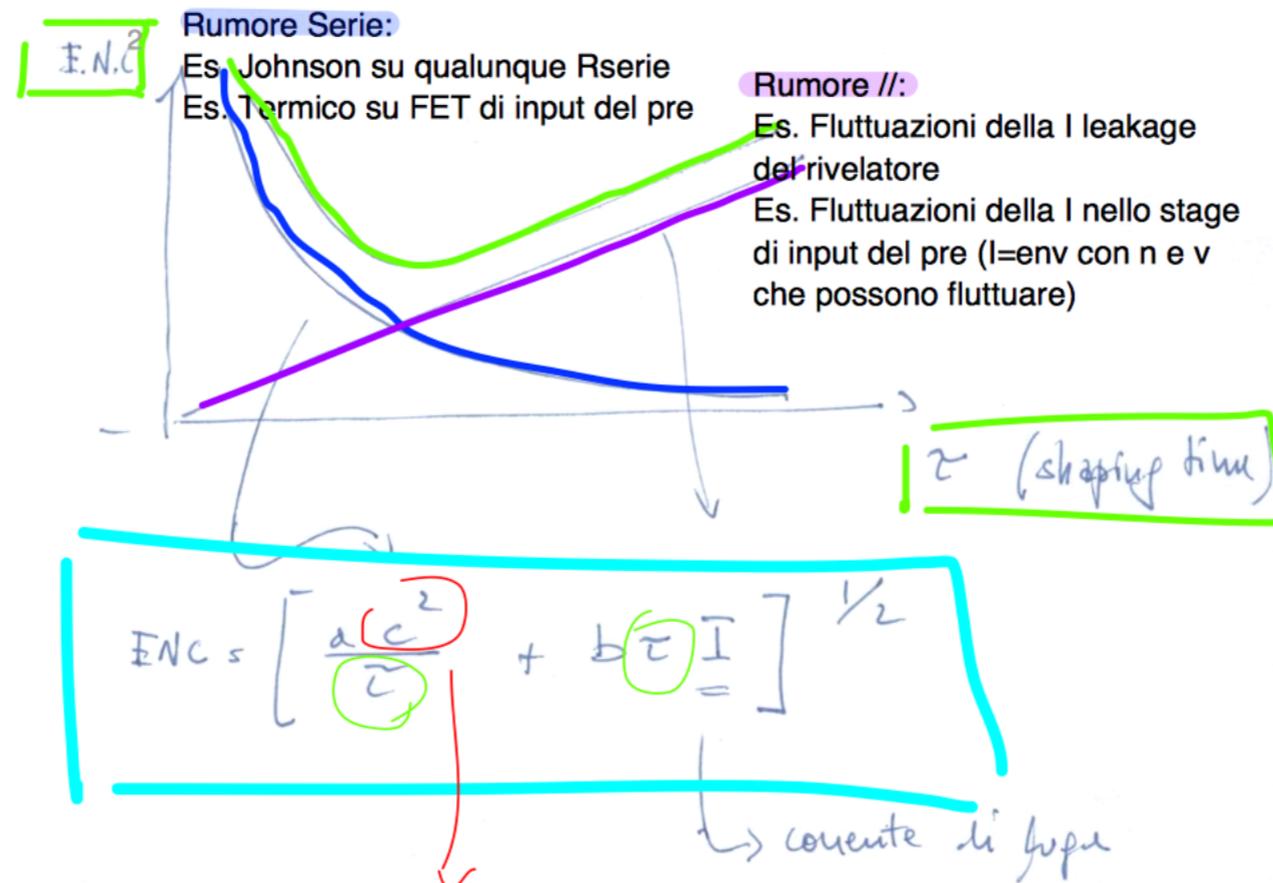
- Amplifica il segnale che arriva al suo input mantenendo proporzionalità tra V_{\max} e Energia
- Filtra il rumore
- Forma il segnale
- Seleziona la banda passante (fatto da circuiti RC-CR)

Def. **ENC: Q tc. S/N= 1**

$$\Rightarrow \text{FWHM (eV)} = 2.35 * \text{ENC} * 3.62 \text{ eV}$$

Dove 3.62 eV è la energia media per produzione di coppia nel Si

Ovvero se applico questa Q all'input ottengo un V_{out} di ampiezza uguale all'RMS dovuto solo al rumore

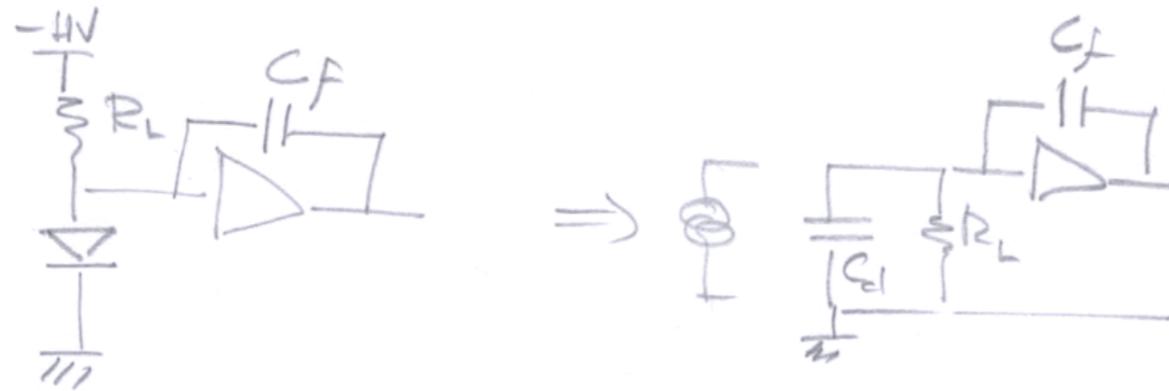


Il rumore serie diminuisce al diminuire della capacità, quindi rivelatori con capacità più bassa, ad esempio più piccoli, avranno rumore serie minore

Catena di lettura per spettroscopia

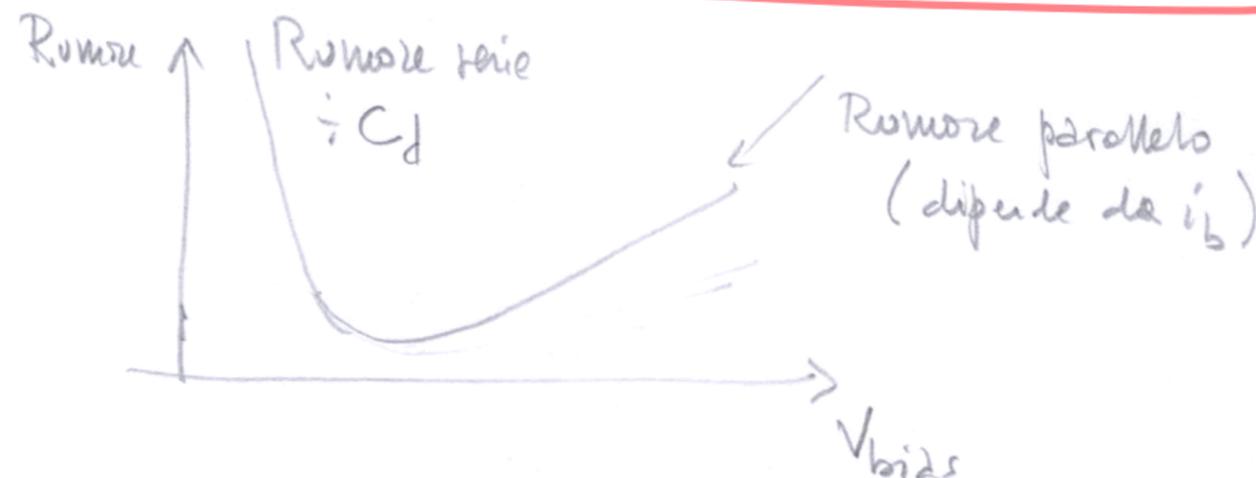
Rumore elettronico

- Rumore in funzione di V_{bias}



$$C_d = \frac{\epsilon S}{P} \div \frac{1}{V} \quad \text{diminuisce con } V$$

$$i_b \propto V \quad \text{cresce con } V$$



Punto di lavoro: Diodo svuotato, ma non
“fully svuotato”