

## Rivelatori a semiconduttore

**Motivazione: aumentare il numero di portatori di informazione a parità di energia rilasciata nel materiale**

**Semiconduttori: Si e Ge**

**Formano cristalli solidi in cui gli atomi formano 4 legami covalenti**

**Il reticolo periodico stabilisce bande di energia permesse per gli elettroni: “banda di conduzione” e “banda di valenza” separate da gap (0.7 eV per Ge, 1.1 eV per Si)**

**Probabilità per unità di tempo, alla temperatura  $T$ , di passaggio nella banda di conduzione (e quindi di produzione di una coppia elettrone-lacuna):**

$$p(T) = C T^{3/2} e^{\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)}$$

con  $T$  temperatura assoluta,  $E_g$  salto di energia tra le bande e  $k$  costante di Boltzmann.

## Rivelatori a semiconduttore

A temperatura ambiente:  $n_i = p_i = 1.5 \cdot 10^{10}$  ( $2.4 \cdot 10^{13}$ )  $\text{cm}^{-3}$  in Si (Ge)

All'applicazione di un campo elettrico  $E$  si ha

$$|\underline{J}| = n_i e (|\underline{v}_e| + |\underline{v}_i|)$$

con  $\underline{v}_e = -\mu_e \underline{E}$  e  $\underline{v}_h = \mu_h \underline{E}$

velocità di deriva di elettroni e lacune

$\mu_e \approx 1350$  ( $3900$ )  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  in Si(Ge)

$\mu_h \approx 480$  ( $1900$ )  $\text{cm}^2/\text{Vs}$  in Si(Ge)

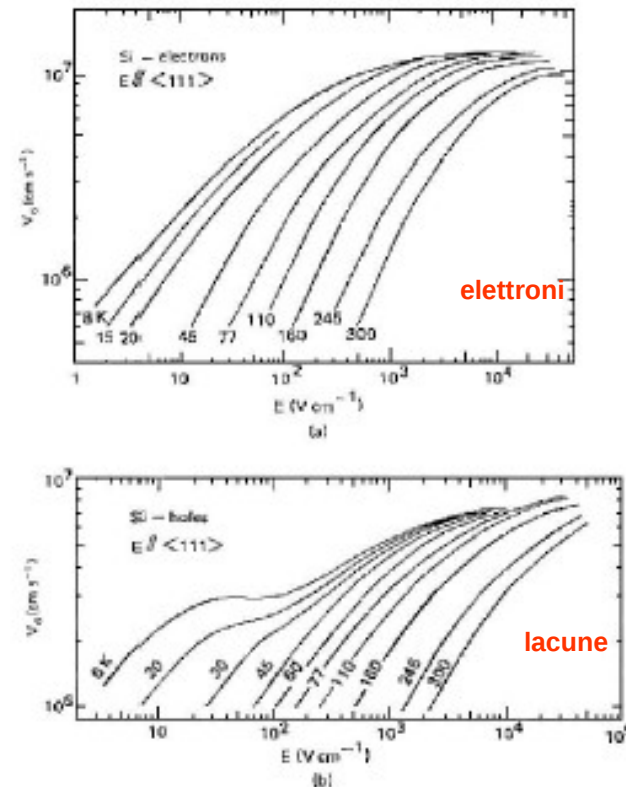
corrispondente ad una resistività

$\rho = 1/[en_i(\mu_e + \mu_h)] \approx 2 \cdot 10^5 \Omega \text{ cm}$  (ideale)

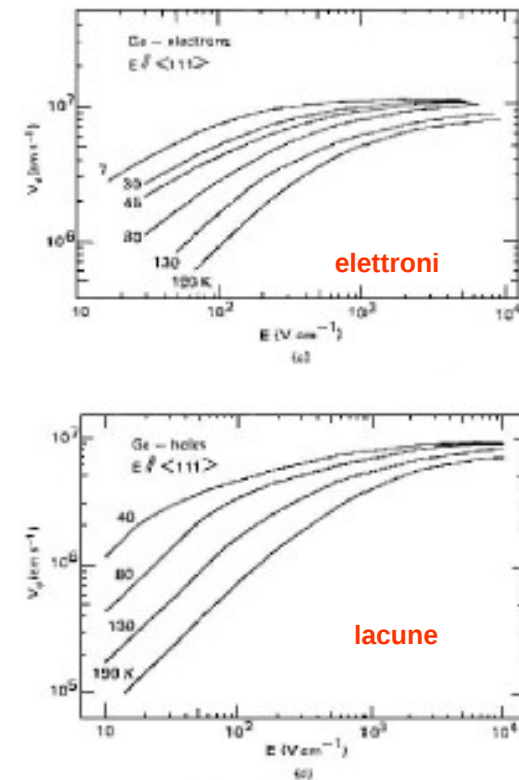
$\approx 5 \cdot 10^4 \Omega \text{ cm}$  (reale)

troppo bassa per l'utilizzo ai fini della rivelazione

Si



Ge



Per una lamina  $A = 1 \text{ cm}^2$  e  $s = 1 \text{ mm}$   
 $\rightarrow R = 5 \text{ k}\Omega \rightarrow$  se  $V = 100 \text{ V}$  si ha  $I = 20 \text{ mA}$   
 da confrontarsi con  $10^{-6} \text{ A}$  dovuti alle cariche prodotte dalla radiazione ionizzante

# Rivelatori a semiconduttore

## Motivazione: aumento della resistività del materiale semiconduttore

Monocristallo ideale di Silicio puro

Atomi/ $cm^3$	$5 \cdot 10^{22}$
Densita' intrinseca di portatori (a 300K) $cm^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{10}$
Energia per creare una coppia lacuna-elettrone (a 300 K) eV	3.62
Fattore di Fano medio	0.12

### 1) Specializzazione dei portatori di informazione: drogaggio

legge di azione di massa (a temperatura ambiente)

$$n_n p_n = n_i p_i = 2.25 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-6}$$

#### Caso n

concentrazione di donatori (P, As) di  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

$$n_n = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}, p_n = 4.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$

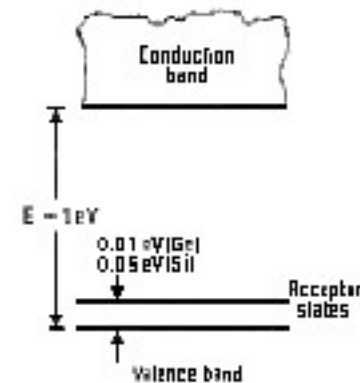
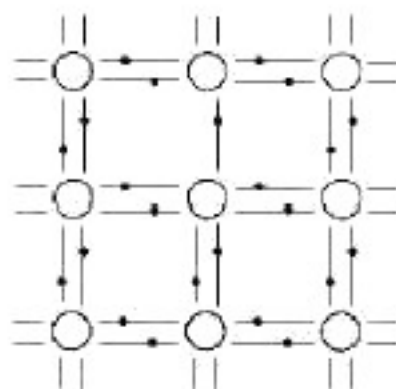
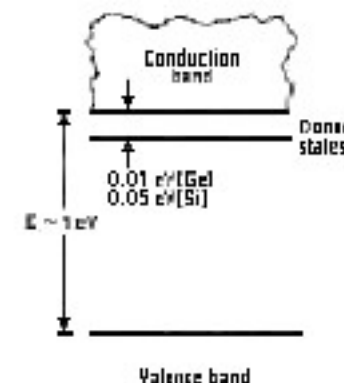
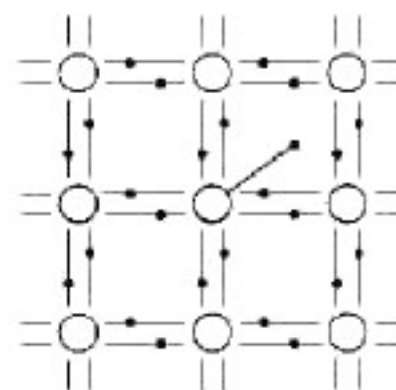
portatori di maggioranza

portatori di minoranza

#### Caso p

concentrazione di accettori (B, Al) di  $5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$

$$p_p = 5 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}, n_p = 4.5 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-3}$$



## Rivelatori a semiconduttore

Motivazione: aumento della resistività del materiale semiconduttore

### 2) Produzione di giunzioni tra semiconduttori drogati diversamente

Giunzioni p-n asimmetriche

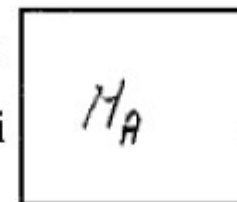


1 atomo di drogante  
ogni  $10^x$  atomi di Si

$x = 4$

Silicio n

$$N_D = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$
$$n_n = 5 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$$
$$p_n = 4.5 \cdot 10^1 \text{ cm}^{-3}$$

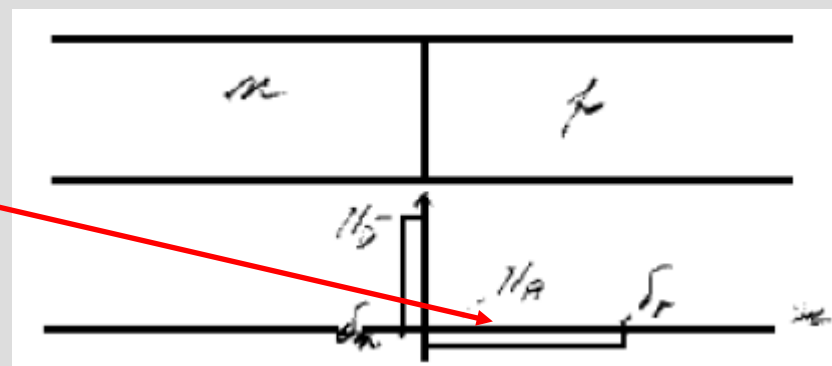


$x = 8$

Silicio p

$$N_A = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$
$$p_p = 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$$
$$n_p = 4.5 \cdot 10^5 \text{ cm}^{-3}$$

zona di svuotamento



## Rivelatori a semiconduttore

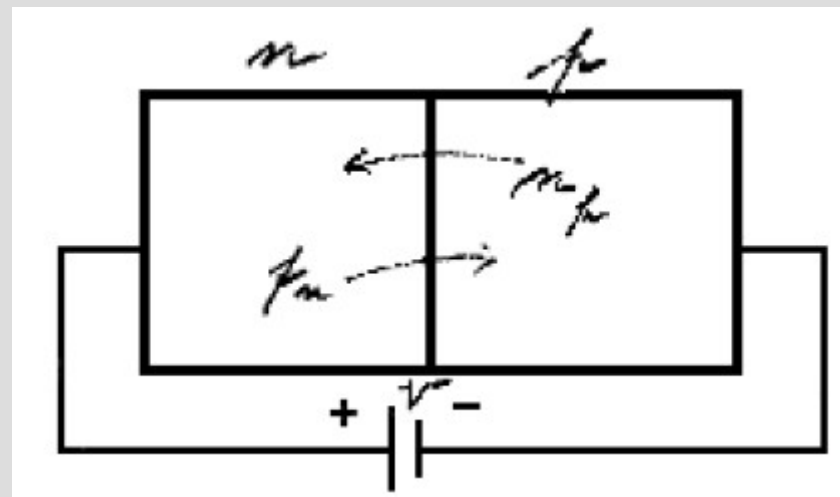
### 2) Produzione di giunzioni tra semiconduttori drogati diversamente

#### Polarizzazione inversa

La corrente è portata dai portatori di minoranza



il valore della corrente inversa è collegato al drogaggio del materiale meno drogato



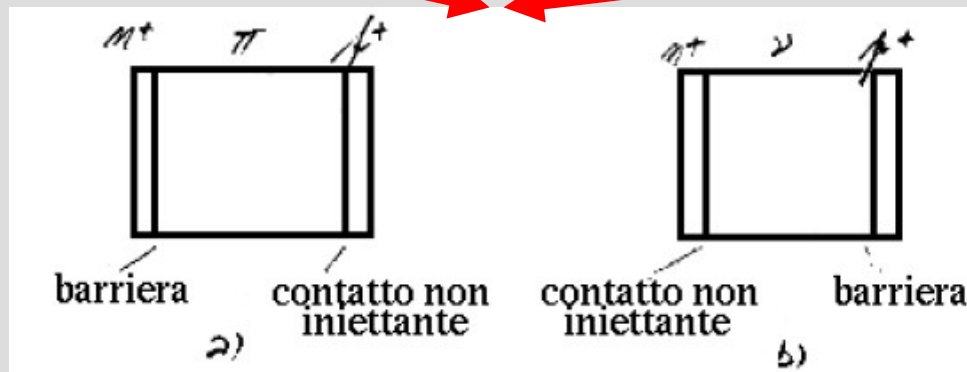
una parte del rumore elettrico è determinato dalle fluttuazioni della corrente inversa

ampia zona di svuotamento

una delle due zone sia poco o pochissimo drogata

$n^+, p^+ \quad 10^{20} \text{ cm}^{-3}$

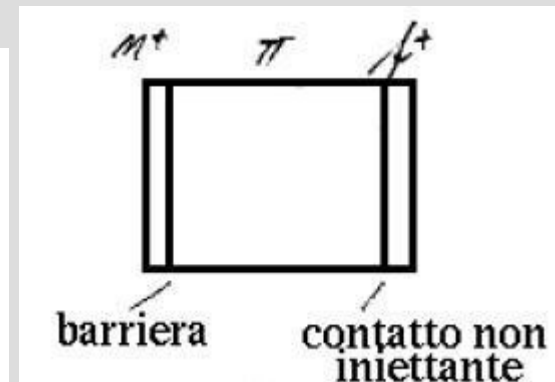
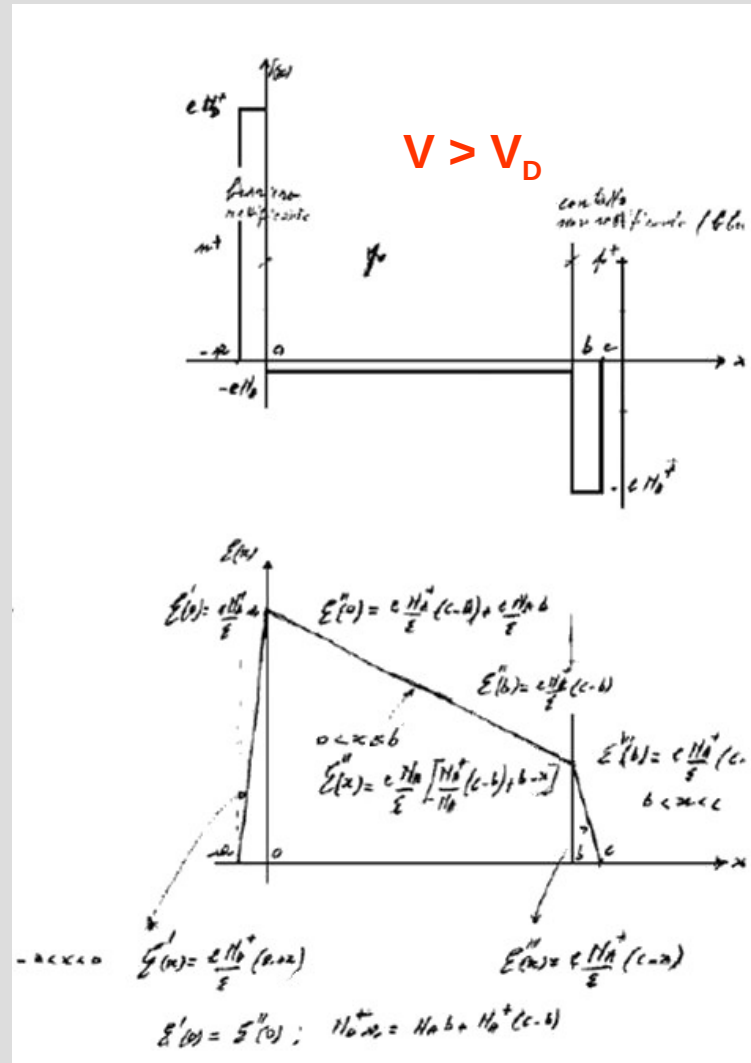
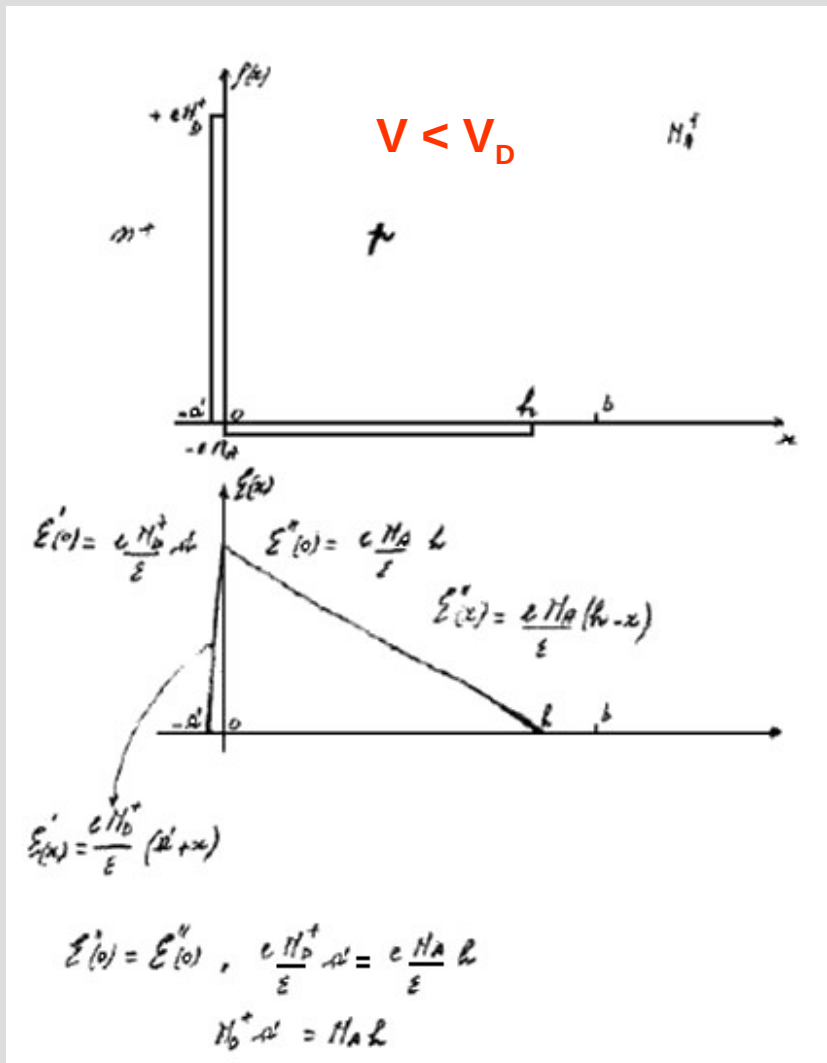
$\nu, \pi \quad \leq 10^{12} \text{ cm}^{-3}$



# Rivelatori a semiconduttore

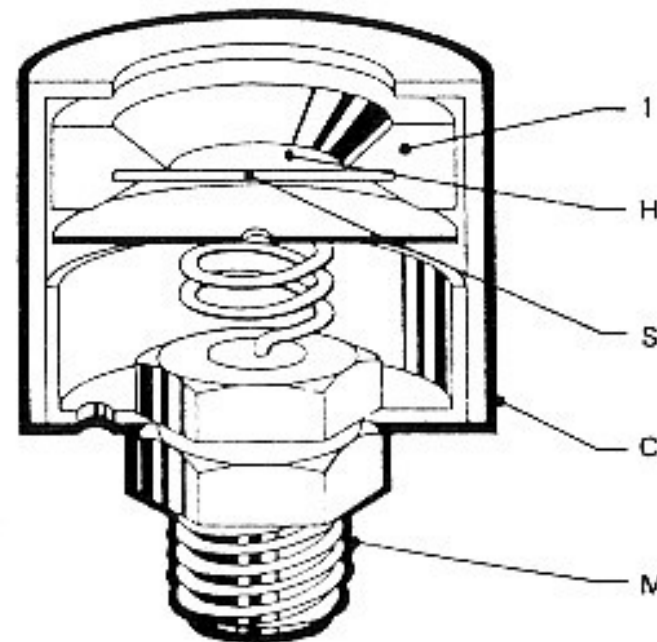
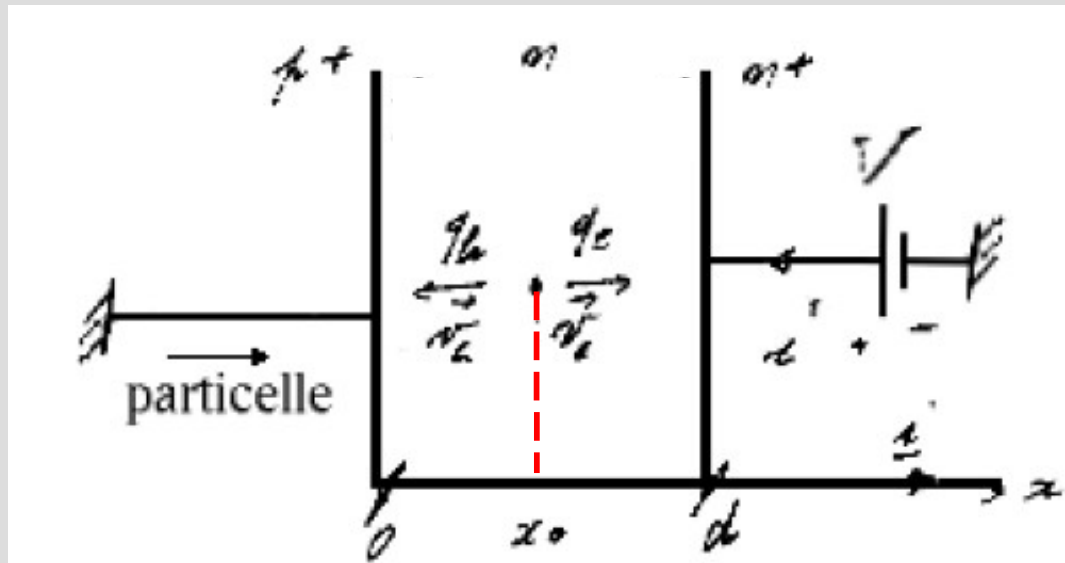
## 2) Produzione di giunzioni tra semiconduttori drogati diversamente

Polarizzazione inversa      Distribuzioni di carica e campi elettrici

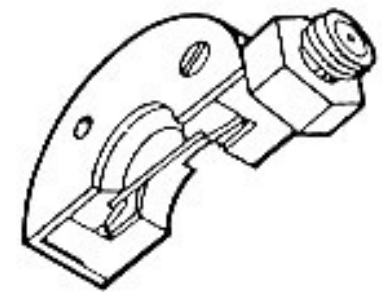


## Rivelatore planare con densità di carica di volume costante

Rivelatore Surface Barrier ORTEC ( $p^+n^+$ )



(a)



(b)

# Rivelatori a semiconduttore

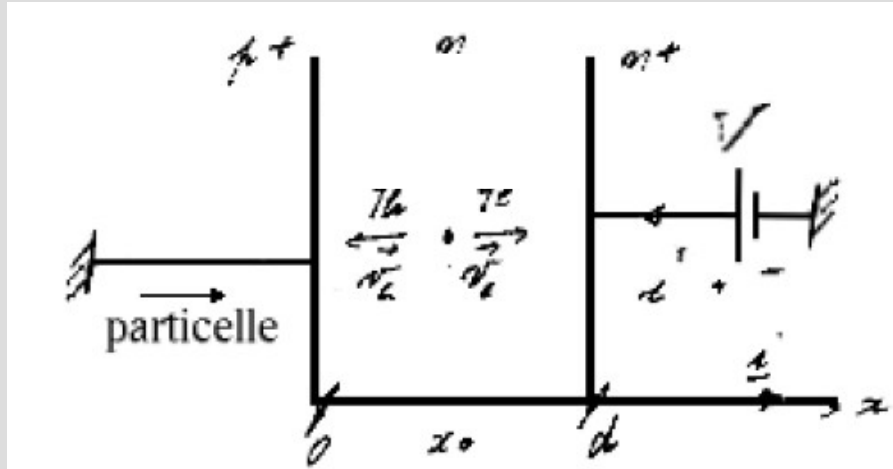
## Rivelatore planare con densità di carica di volume costante

Rivelatore Surface Barrier ORTEC ( $p^+vn^+$ ) BA-016-150-1000

risoluzione elettronica in keV

superficie sensibile  $mm^2$

spessore in  $\mu m$



### Resistività e drogaggio numerico

$$\rho_R = \frac{1}{ne\mu} \Omega m \text{ con } n \text{ in } m^{-3} \text{ e } \mu \text{ in } m^2 V^{-1} s^{-1}$$

Resistività $\rho_R$ $k\Omega cm$	Si-n $N_D^+ (cm^{-3})$	Si-p $N_A^- (cm^{-3})$
1	$4.63 \cdot 10^{12}$	$1.3 \cdot 10^{13}$
10	$4.63 \cdot 10^{11}$	$1.3 \cdot 10^{12}$
20	$2.31 \cdot 10^{11}$	$6.5 \cdot 10^{11}$
100	$4.63 \cdot 10^{10}$	$1.3 \cdot 10^{11}$

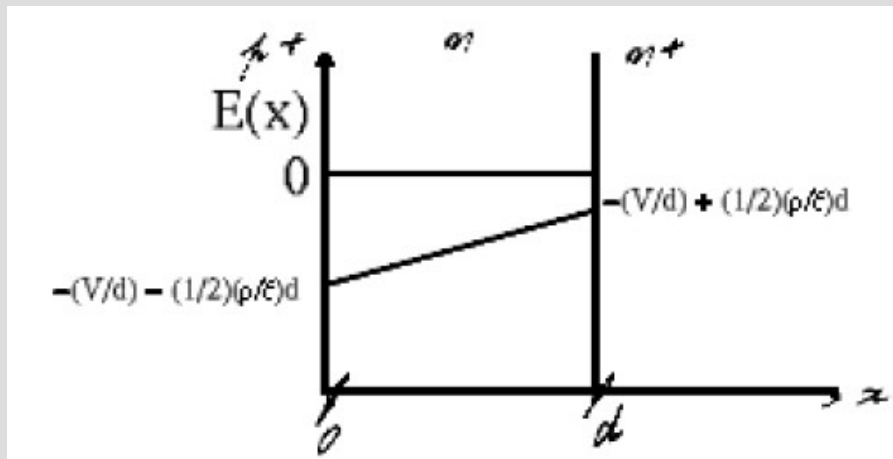
$\rho_R$ (nominale) =  $130 \Omega m$ ;  $V$  (tensione di lavoro) =  $350 V$   
 $C$  (capacità della superficie attiva) =  $\frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{d} = \frac{10^{-10} \cdot 150 \cdot 10^{-6}}{10^{-3}} = 15 pF$

### Determinazione del campo elettrico

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon}$$

In condizioni di svuotamento o di sovrasvuotamento ( $\rho$  costante da 0 a  $d$ )

$$E(x) = \left(-\frac{V}{d} - \frac{1}{2} \frac{\rho}{\epsilon} d\right) + \frac{\rho}{\epsilon} x = a + bx \quad \text{con} \quad a = -\frac{V}{d} - \frac{1}{2} \frac{\rho}{\epsilon} d \quad \text{e} \quad b = \frac{\rho}{\epsilon}$$

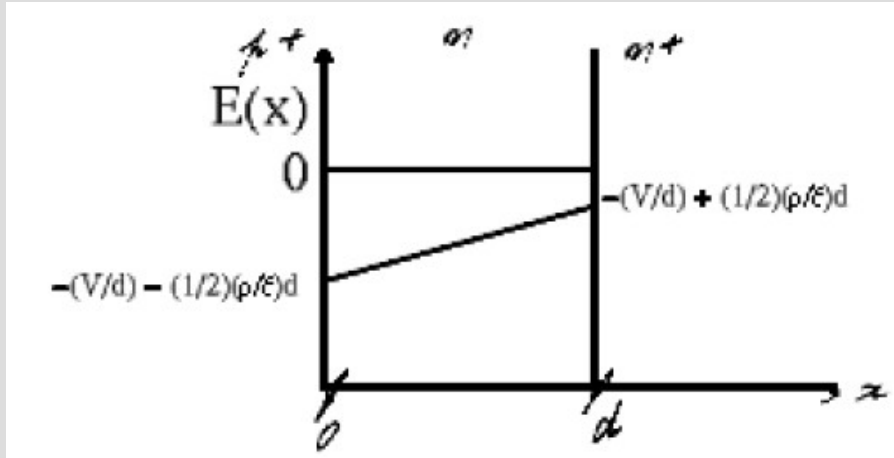




## Rivelatori a semiconduttore

### Rivelatore planare con densità di carica di volume costante

Rivelatore Surface Barrier ORTEC ( $p^+vn^+$ ) BA-016-150-1000



$$E(x) = \left(-\frac{V}{d} - \frac{1}{2}\frac{\rho}{\epsilon}d\right) + \frac{\rho}{\epsilon}x = a + bx \quad \text{con} \quad a = -\frac{V}{d} - \frac{1}{2}\frac{\rho}{\epsilon}d \quad \text{e} \quad b = \frac{\rho}{\epsilon}$$

tensione di svuotamento  $V_D$

$$E(d)=0 \rightarrow \rho = 2\epsilon V_D / d^2 \quad \text{ma} \quad \rho = eN_D^+ = e/\rho_R \mu_e$$

$$V_D = d^2 / (2\epsilon_r \epsilon_0 \rho_R \mu_e) = 275 \text{ V}$$

misura della capacità

In condizioni di svuotamento parziale ( $\rho$  costante da 0 a s)

$$s \simeq \left(\frac{2\epsilon V}{eN_D}\right)^{1/2}$$

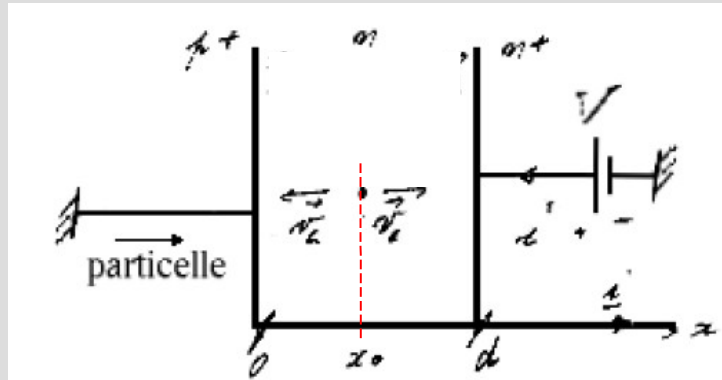
capacità per unità di area

$$C = \frac{\epsilon}{s} \simeq \left(\frac{e\epsilon N}{2V}\right)^{1/2}$$

$$C = kV^{-n} \rightarrow \ln C = \ln k - n \ln V$$

# Rivelatore planare con densità di carica di volume costante

## Rivelatore Surface Barrier ORTEC ( $p^+vn^+$ )



con  $\tau_e = \frac{1}{-\mu_e b}$

$$i_e(t) = \frac{1}{V}(-e)(v_e \vec{i}) \cdot \left(-\frac{V}{d} \vec{i}\right) = \frac{e}{d} v_e = -\frac{e}{d} \mu_e (a + bx_0) e^{-\frac{t}{\tau_e}} \quad \text{per } 0 < t < \tau_e \ln \frac{a + bx_0}{a + bd}$$

$$q_e(t) - q_e(0) = \int_0^t i_e(t) dt = -\frac{e}{d} \mu_e (a + bx_0) \tau_e \int_0^{\frac{t}{\tau_e}} e^{-\frac{t}{\tau_e}} d\frac{t}{\tau_e} = \left[-\frac{e}{bd} (a + bx_0)\right] [1 - e^{-\frac{t}{\tau_e}}]$$

$$i_h(t) = \frac{1}{V}(e)(-v_h \vec{i}) \cdot \left(-\frac{V}{d} \vec{i}\right) = \frac{e}{d} v_h = -\frac{e}{d} \mu_h (a + bx_0) e^{+\frac{t}{\tau_h}} \quad \text{per } 0 < t < \tau_h \ln \frac{a}{a + bx_0}$$

$$q_h(t) - q_h(0) = \int_0^t i_h(t) dt = -\frac{e}{d} \mu_h (a + bx_0) \tau_h \int_0^{\frac{t}{\tau_h}} e^{\frac{t}{\tau_h}} d\frac{t}{\tau_h} = \left[-\frac{e}{bd} (a + bx_0)\right] [e^{\frac{t}{\tau_h}} - 1]$$

- Calcolo di  $a, b, bd/a$

$$a = -(350 + 270)/10^{-3} = -6.2 \cdot 10^5 \text{ Vm}^{-1} \quad b = 540/10^{-6} = 5.4 \cdot 10^8 \text{ Vm}^{-2}$$

$$b/a = -5.4 \cdot 10^8 / 6.2 \cdot 10^5 = -871 \text{ m}^{-1} \quad bd/a = -871 \cdot 10^{-3} = -0.871$$

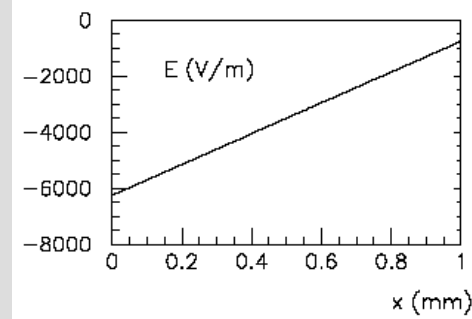
- Calcolo di  $\tau_e$

$$\tau_e = 1/(\mu_e b) = 1/(0.135 \cdot 5.4 \cdot 10^8) = 10 \cdot 10^{-8} / (7.89) = 13.7 \text{ ns}$$

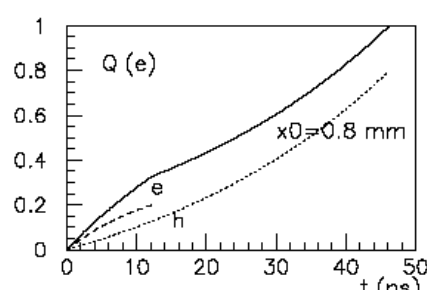
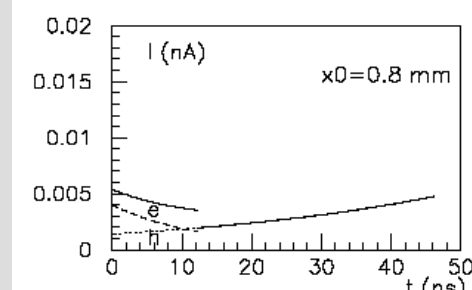
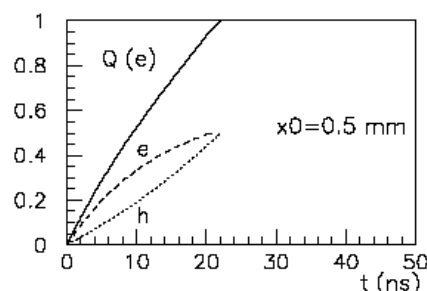
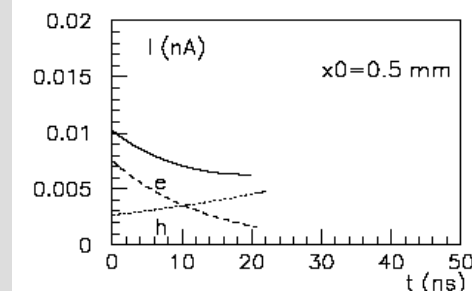
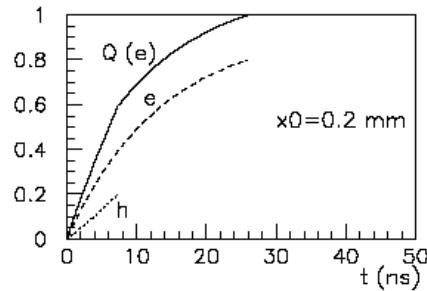
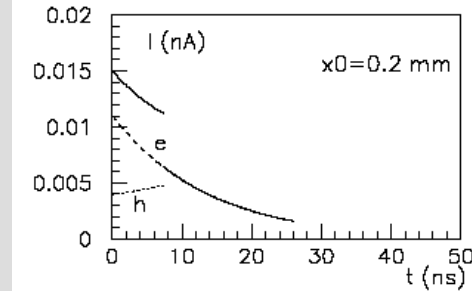
- Calcolo di  $t_e (x_0 = 0)$

$$t_e (x_0 = 0) = 13.7 \text{ ns} \cdot \ln 1/[1 + (bd/a)] = 13.7 \text{ ns} \cdot \ln 1/[1 - 0.871] = 28 \text{ ns}$$

ORTEC BA-016-150-1000



$\rho = 13000 \text{ } \Omega\text{cm}$   
 $V = 350 \text{ V}$

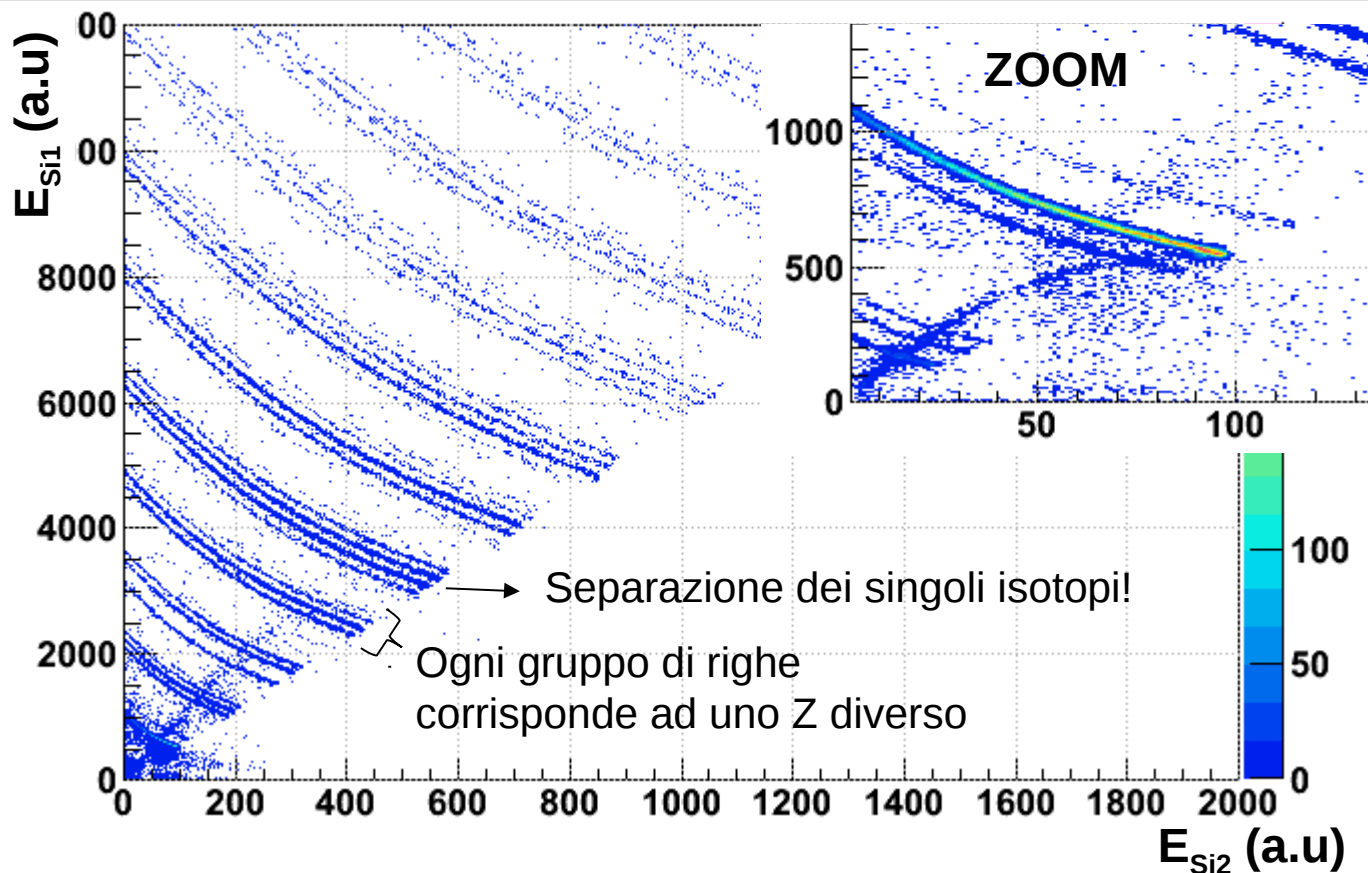
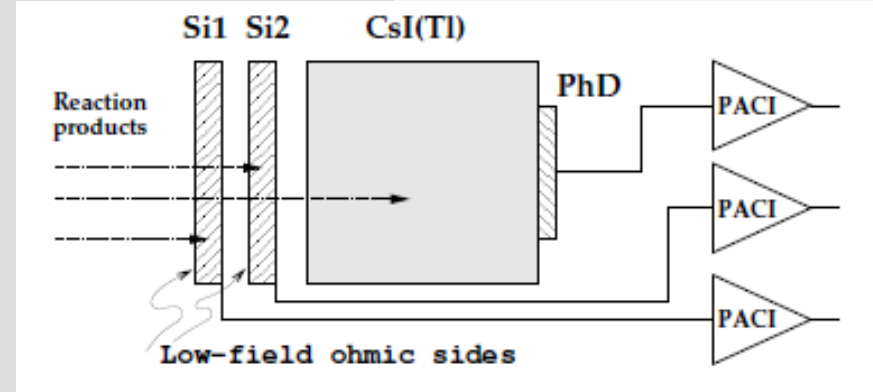


## Il rivelatore al Silicio: tecniche di identificazione

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi N Z \frac{z^2 e^4}{m_e c^2 \beta^2} \left[ \ln \frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 \right]$$

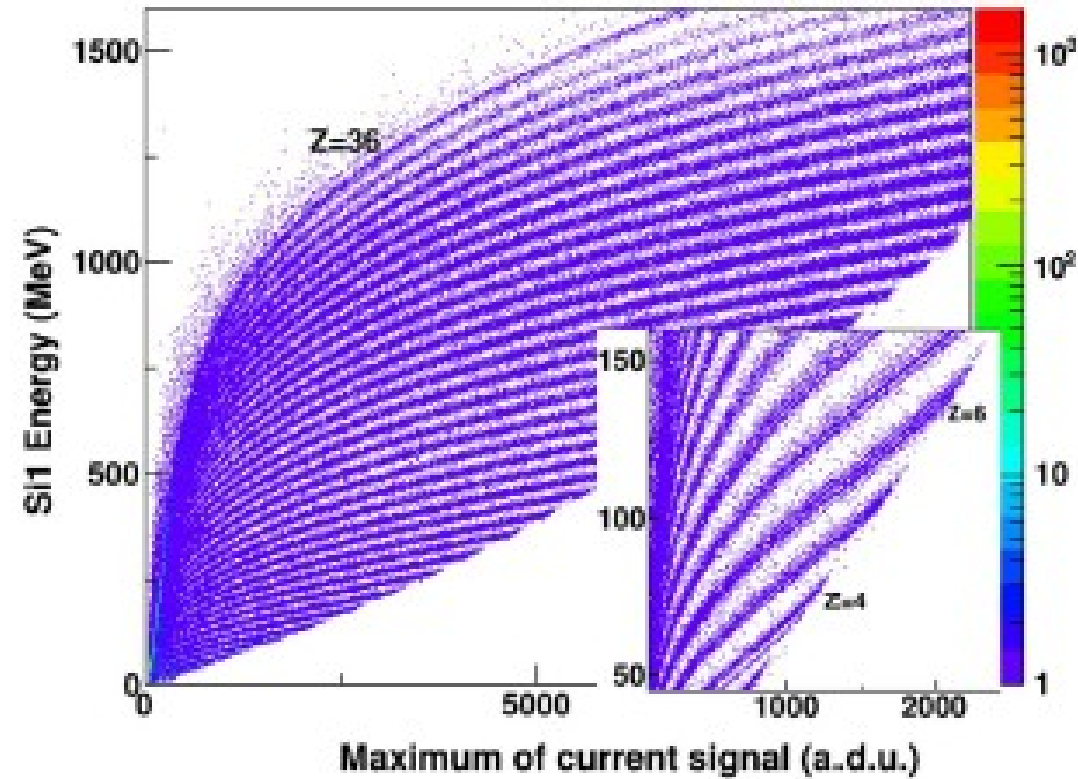
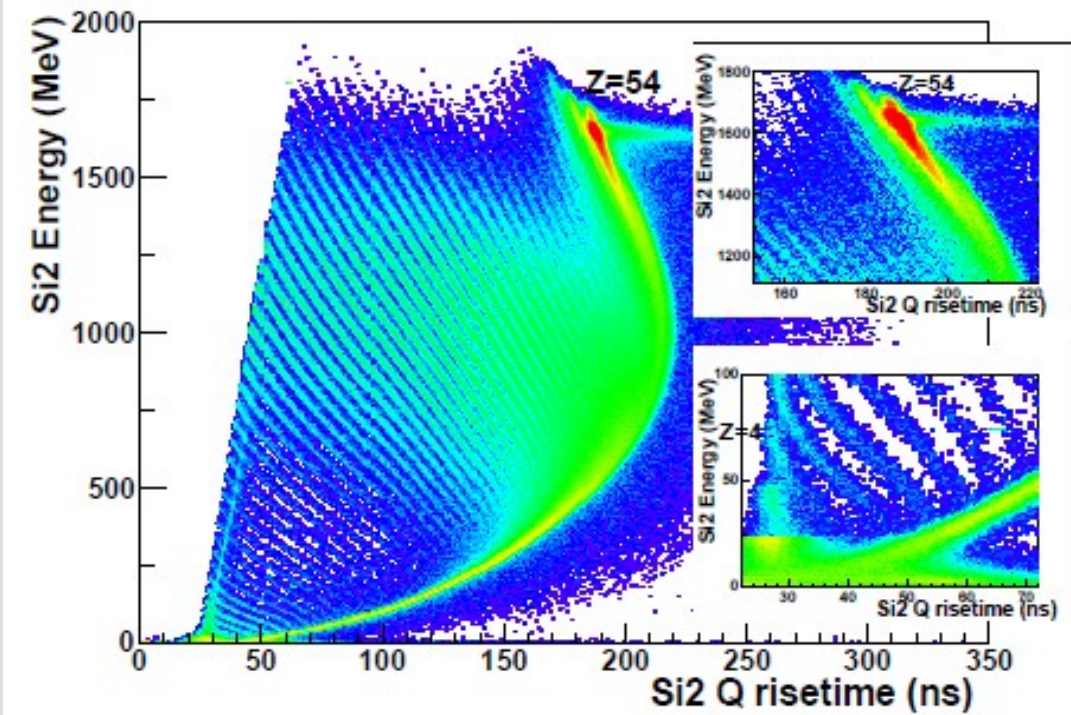
$$dE \propto \frac{Az^2}{E_{res}} \Delta x$$

## L'esempio di FAZIA

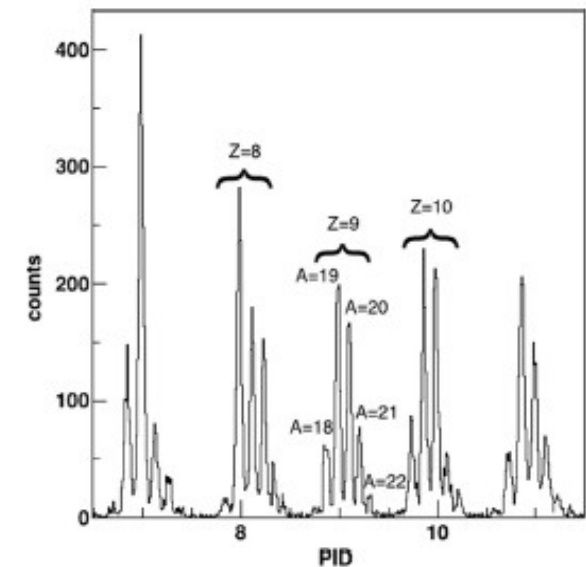


La tecnica di identificazione  $\Delta E$ - $E$  può essere applicata a qualsiasi tipo di "coppia" di rivelatori (silici, scintillatori e rivelatori a gas). Ovviamente, migliore è la risoluzione dei rivelatori usati, migliore sarà l'identificazione ottenibile. Esiste una soglia di identificazione dovuta al fatto che la particella deve attraversare il primo rivelatore.

## Applicazioni dello studio della forma del segnale: la Pulse Shape Analysis nei Silici



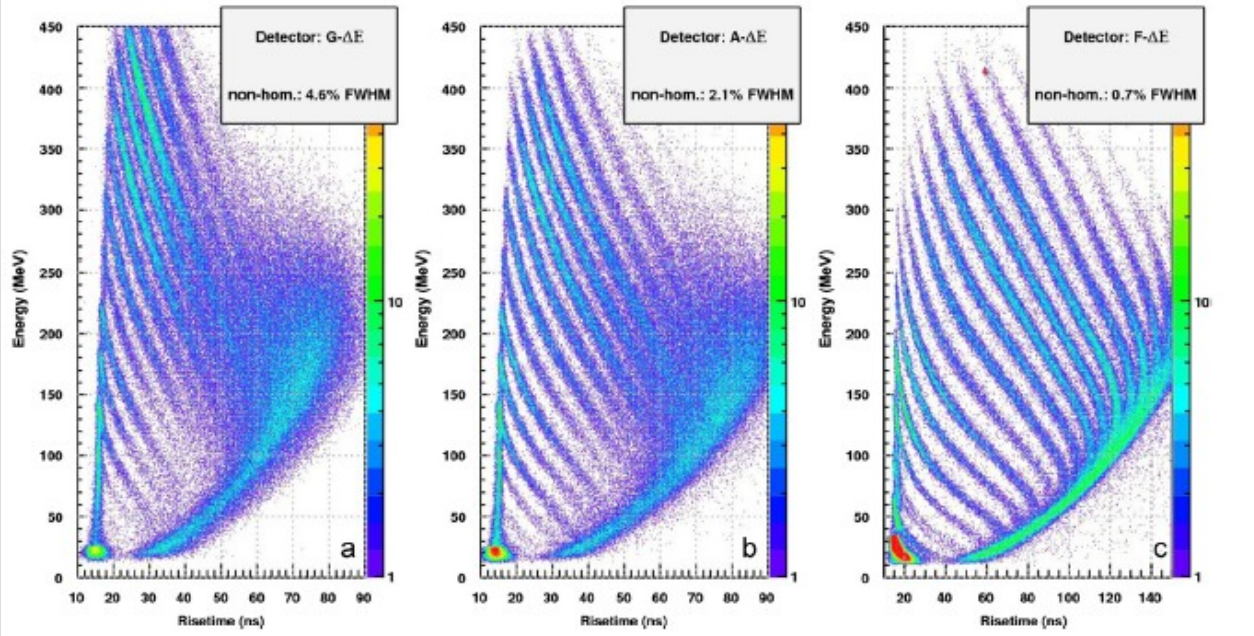
Sfruttando dei parametri che descrivono la forma dei segnali (come il risetime del segnale di carica o il massimo del segnale di corrente), è possibile identificare in carica e/o massa le diverse particelle usando un solo rivelatore, con evidenti miglioramenti in termini di soglia di identificazione rispetto alla tecnica standard del  $\Delta E-E$



# Applicazioni dello studio della forma del segnale: la Pulse Shape Analysis nei Silici

## FAZIA

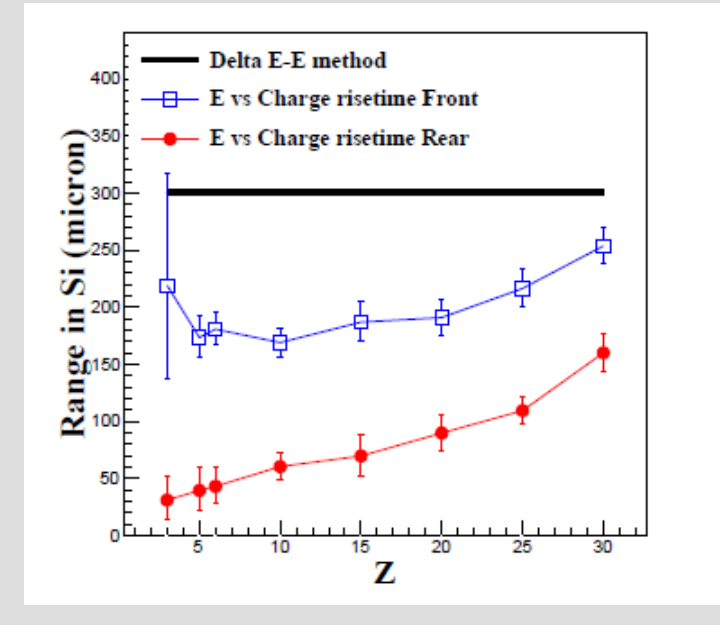
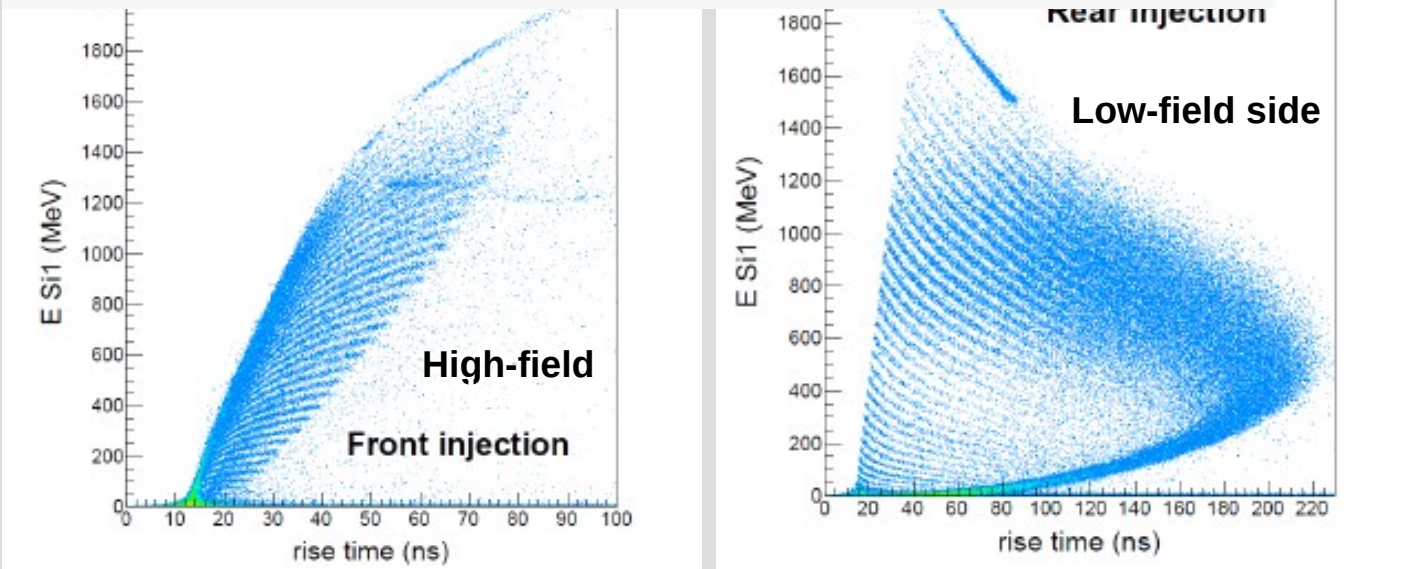
### Effetto della omogeneità di drogaggio sulla PSA



La PSA si basa sul concetto che a parità di energia incidente, il range nel silicio dipende dalla carica (e massa) dello ione incidente. Fissato uno spessore, se il campo elettrico in tutta la superficie del rivelatore NON fosse uguale, introduco una fluttuazione nella forma dei segnali che mi peggiora la PSA.

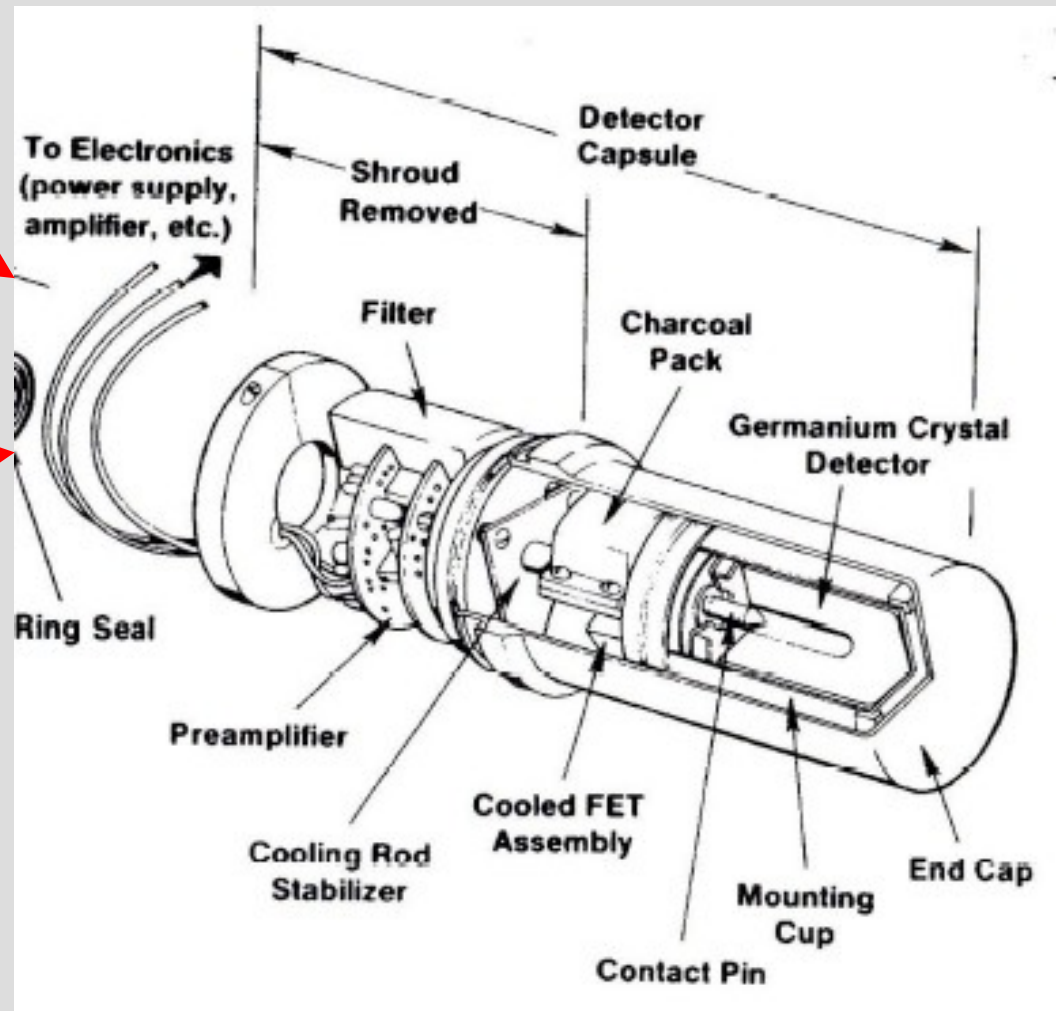
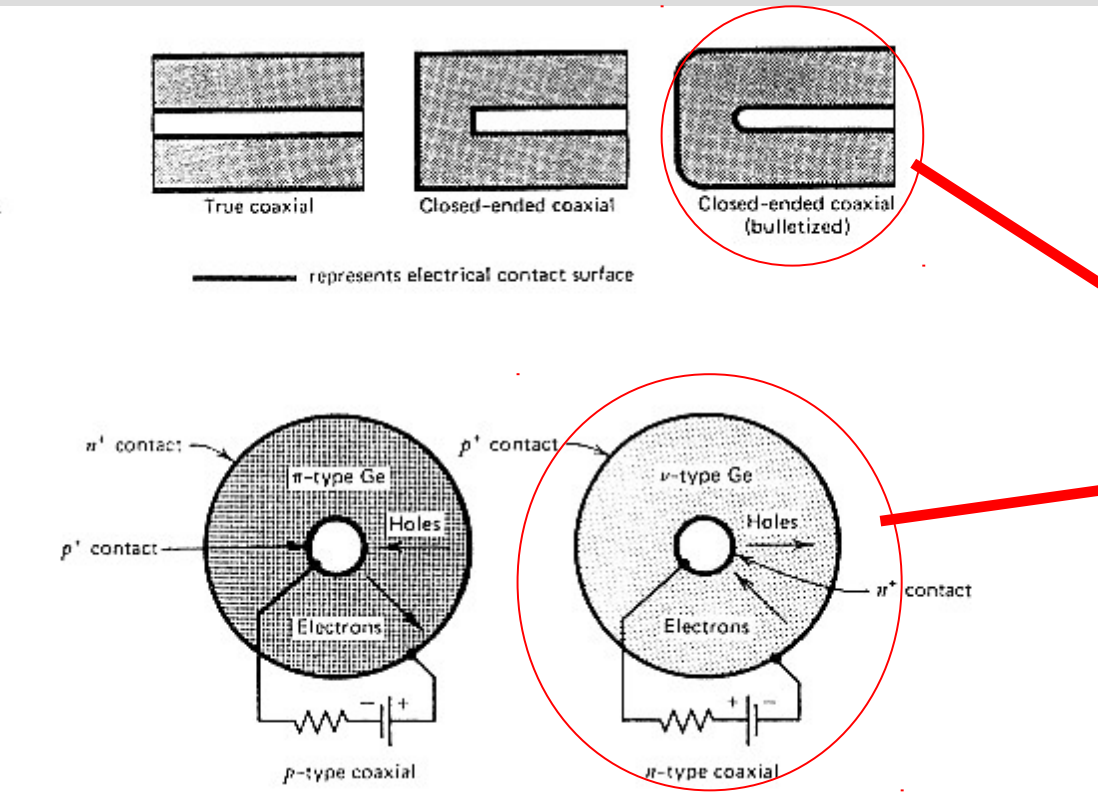
Entrare dal lato di campo debole, implica segnali più lenti per i quali le differenze in forma dei segnali sono amplificate.

### Effetto dell'orientamento del rivelatore (front-rear injection)



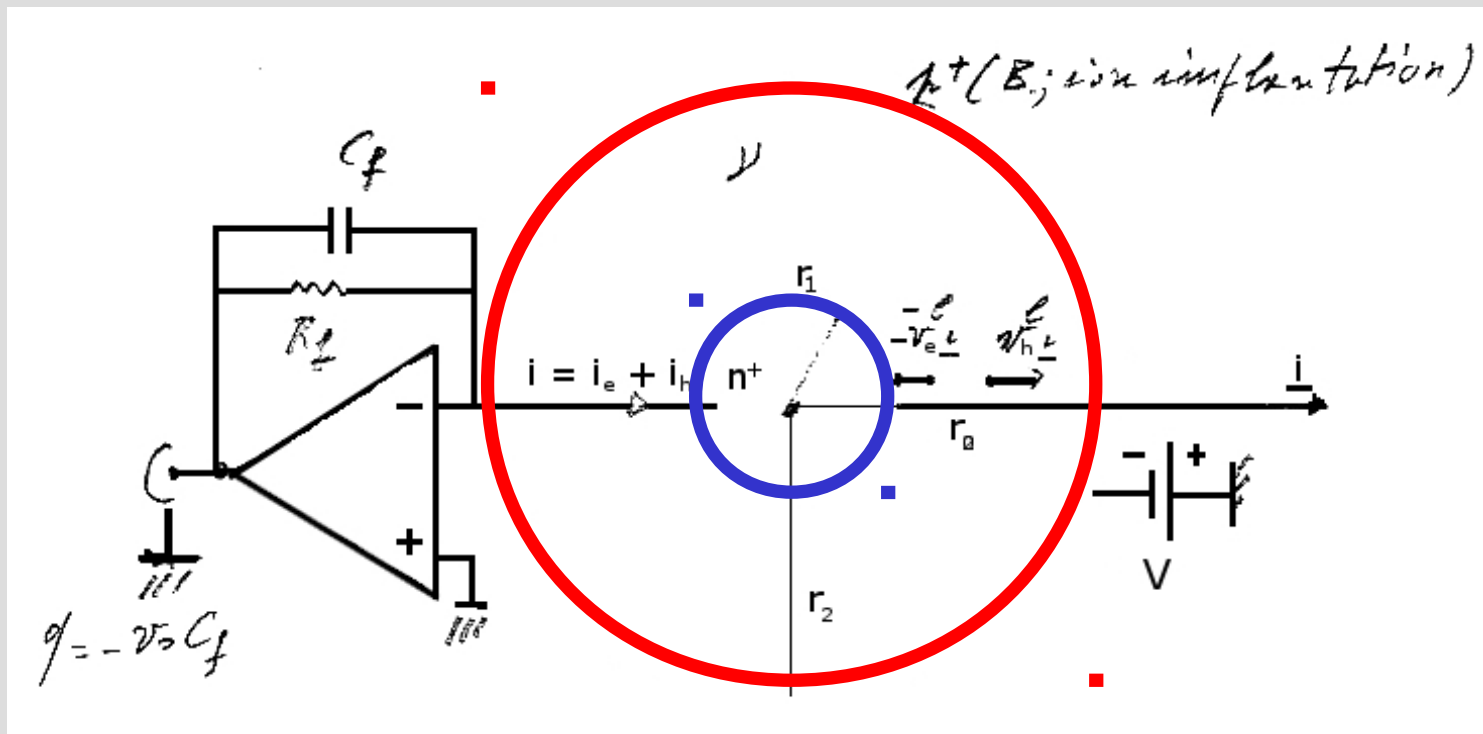
# Rivelatori a semiconduttore

## Rivelatori a semiconduttore coassiali Hp-Ge (true coaxial)



# Rivelatori a semiconduttore

## Rivelatori a semiconduttore coassiali Hp-Ge (true coaxial)



tipo  $\nu$  ( $N_D = 6 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$ )

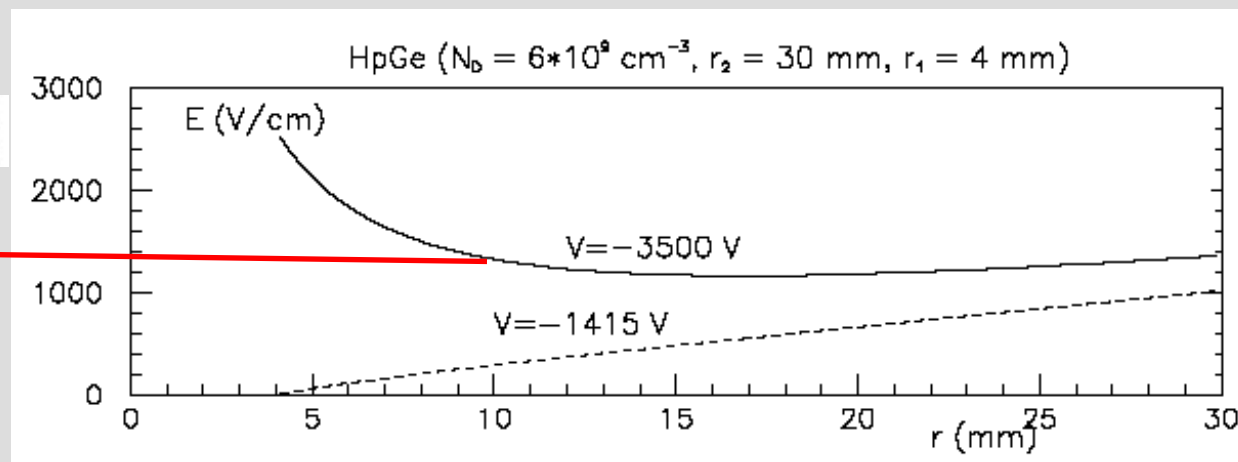
$r_1 = 4 \text{ mm}$  ;  $r_2 = 30 \text{ mm}$ .

$$\frac{1}{r} \left[ \frac{d(r E_r)}{dr} \right] = \rho / \epsilon$$

$$E_r = (\rho / 2\epsilon) r + \left\{ \frac{[V - (\rho / 4\epsilon)(r_2^2 - r_1^2)] / \ln(r_2 / r_1)}{r} \right\}$$

$E_r > 1000 \text{ V/cm}$

Le velocità degli elettroni e delle lacune sono uguali tra loro e prossime al valore di saturazione



## Rivelatori a semiconduttore

### Rivelatori a semiconduttore coassiali Hp-Ge (true coaxial)

moto elettroni:  $0 < t < t_e \rightarrow t = (r_0 - r_1)/v_e$

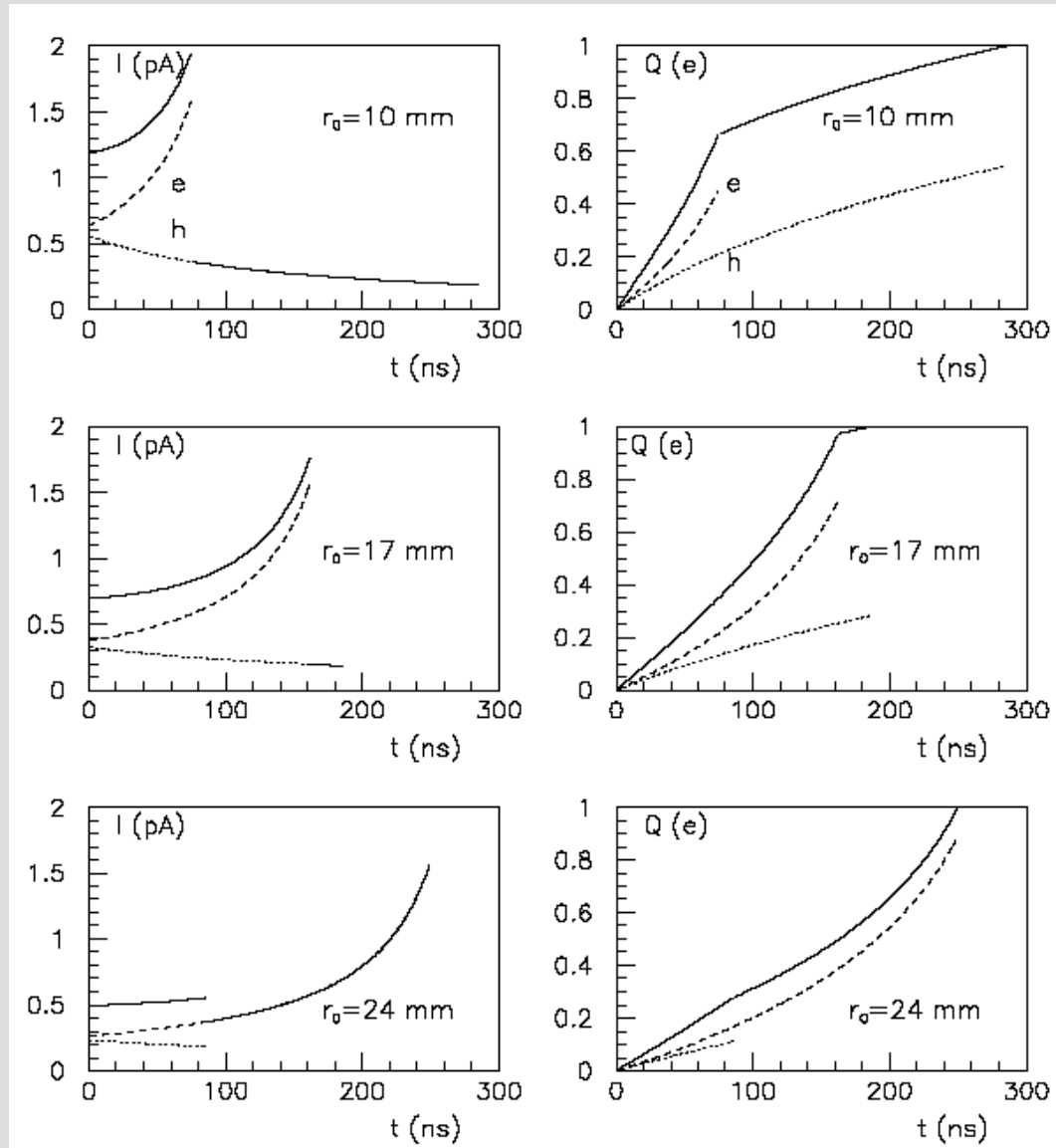
$$i_e(t) = \frac{ev_e}{\ln(r_2/r_1)} \frac{1}{r_0 - v_e t}$$

$$q_e(t) - q_e(0) = \frac{e}{\ln(r_2/r_1)} \ln \frac{r_0}{r_0 - v_e t}$$

moto lacune:  $0 < t < t_h \rightarrow t = (r_2 - r_0)/v_h$

$$i_h(t) = \frac{ev_h}{\ln(r_2/r_1)} \frac{1}{r_0 + v_h t}$$

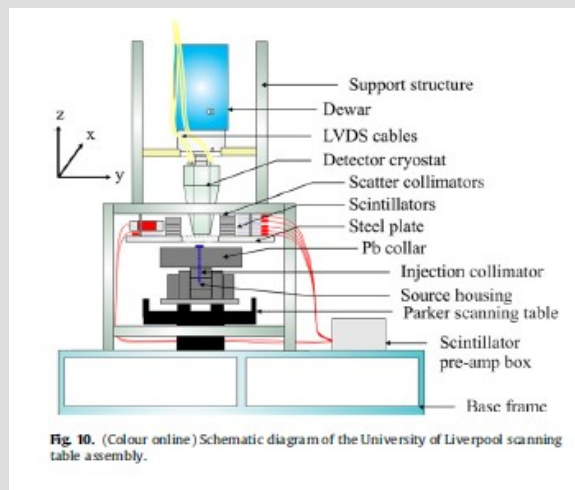
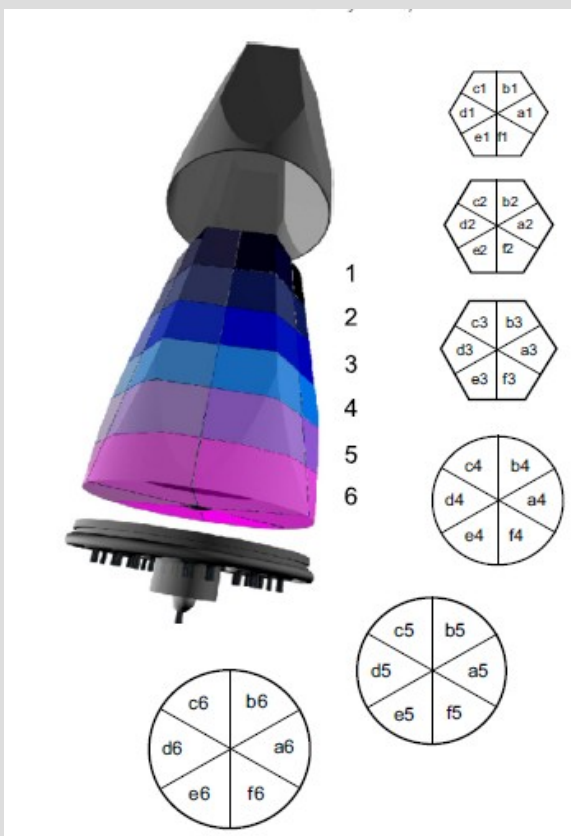
$$q_h(t) - q_h(0) = \frac{e}{\ln(r_2/r_1)} \ln \frac{r_0 + v_h t}{r_0}$$



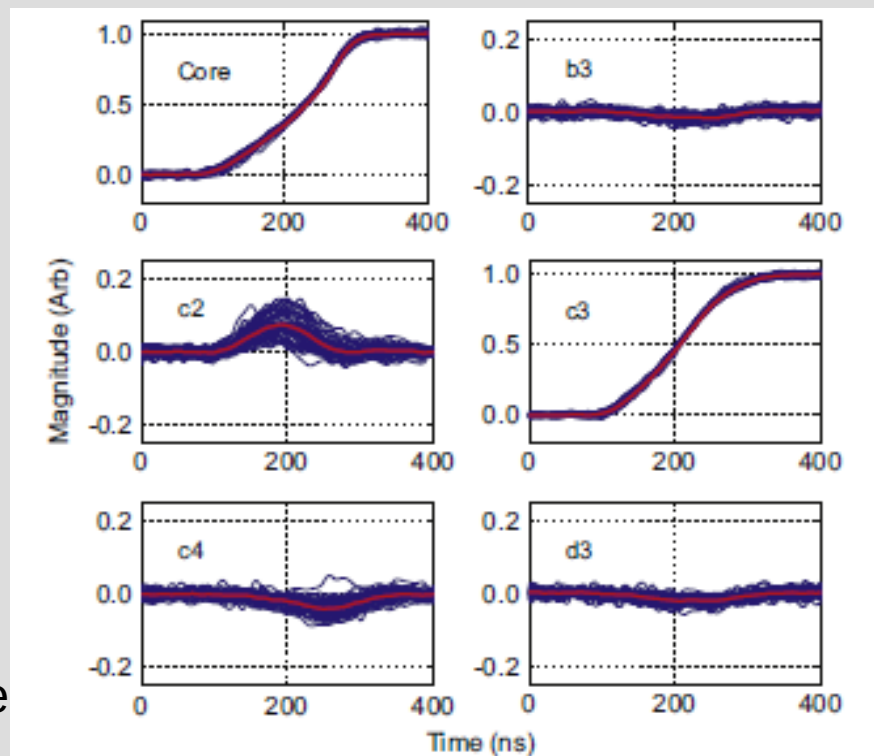
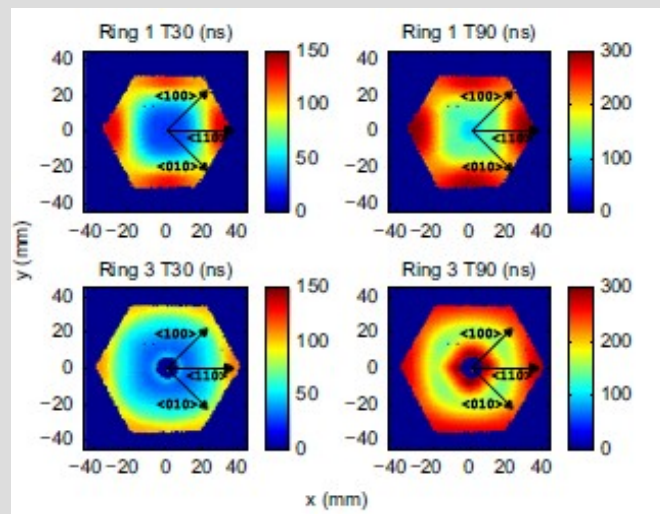


# Applicazioni dello studio della forma del segnale: la Pulse Shape Analysis nel Germanio

**AGATA:** Germanio Coassiale segmentato: 6x6 segmenti. Un segnale per Pad+ «core» interno (comune a tutti i Pad)



Sorgente collimata con un sistema di scanning per lo studio della forma del segnale in funzione del punto di impatto



**Fig 13.** Average (thick red line) and all constituent (thin blue lines) pulse shapes for a typical interaction in segment c3 following the  $\chi^2$  rejection (see text). The signal induced in the core and in the neighbouring segments b3, c2, c4 and d3 are also shown. (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

Avendo a disposizione i segnali campionati da ogni segmento ed un database di forme dei segnali per ogni possibile posizione di impatto, è possibile costruire algoritmi di PSA per ricostruire al meglio la posizione di impatto