

# Corso Nazionale di Formazione

## ELETTRONICA DI FRONT-END PER I RIVELATORI DI PARTICELLE

25 - 29 Ottobre 2004 - PAVIA

---

M. Rossella

Elettronica per rivelatori di luce in fisica nucleare

INFN - Sezione di Pavia

28 Ottobre 2004 - PAVIA



Sezione di Pavia

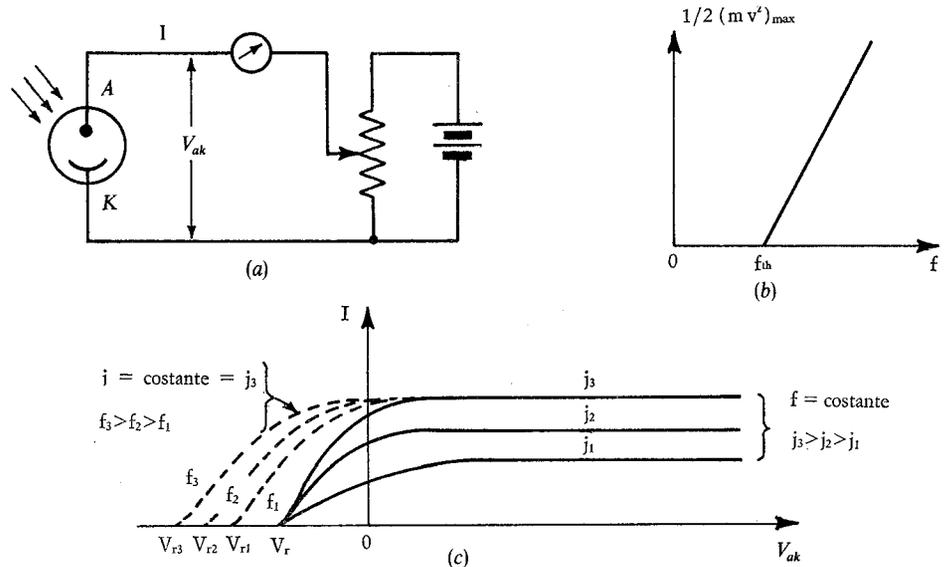
# Programma

## Elettronica per rivelatori di luce in fisica nucleare

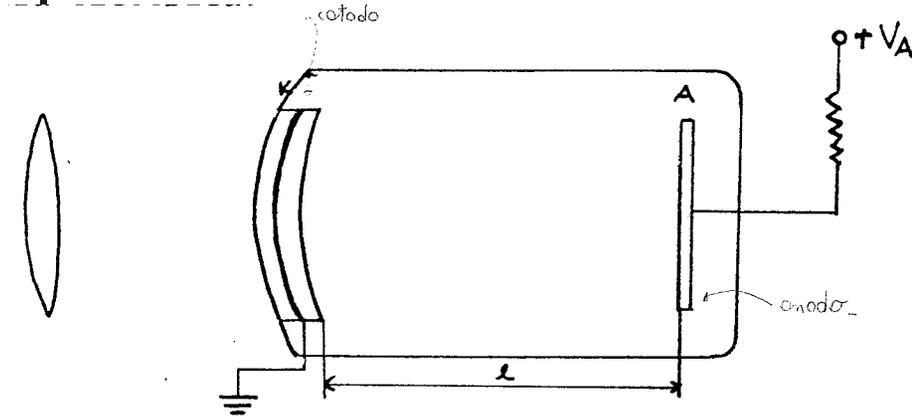
- ✓ Descrizione principali rivelatori di luce e loro problematiche
  - ☞ Dispositivi a vuoto
    - Fotodiode a vuoto
    - Fotomoltiplicatore
  - ☞ Dispositivi a stato solido
    - Fotodiode
    - Fotodiode a valanga
  - ☞ Dispositivi ibridi
- ✓ Rivelatori a scintillazione: utilizzo di rivelatori di luce nell'ambito della fisica nucleare con esempi front end elettronici

# Effetto Fotoelettrico

- Basati sull'emissione fotoelettrica: i metalli, in particolare quelli alcalini quali il Cs, K, Li, Na, Rb, permettono l'emissione di elettroni quando investiti da radiazione luminosa.
- Un atomo del materiale, quando viene colpito da un fotone, può disporre di un'energia  $h\nu$  utilizzabile per liberare un elettrone che poi può fuoriuscire dal materiale.
- Il rivelatore di luce più semplice basato sull'effetto fotoelettrico è costituito da un anodo A che raccoglie gli elettroni emessi da un catodo fotoemittente K (fotocatodo), una volta applicata una differenza di potenziale.
- L'anodo raccoglie tutti gli elettroni emessi e la corrente satura diventando indipendente dalla tensione applicata.
- In figura si può vedere la fotocorrente in funzione della tensione anodica e per varie intensità luminose

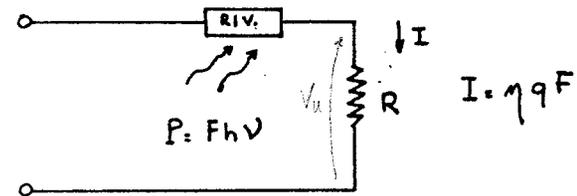


# Fototubo o fotodiodo a vuoto

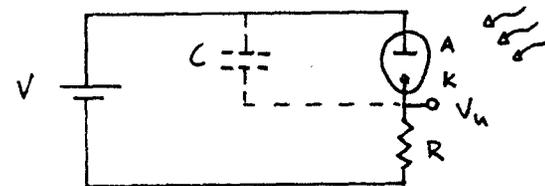


- ✓ E' costituito da un fotocatodo di ampia area su cui incide la radiazione luminosa ed un anodo per la raccolta dei fotoelettroni emessi.
- ✓ Entrambi gli elettrodi sono racchiusi in una ampolla di vetro o quarzo posta sotto vuoto.

- ✓ I tempi di risposta sono molto rapidi, buon range di linearità con l'intensità luminosa, indipendenti dalla resistenza di carico: è generatore ideale di corrente.
- ✓ Non dispone di un guadagno intrinseco.
- ✓ Rispetto ai diodi a stato solido, può presentare superficie sensibile più ampia e maggior sensibilità nello spettro UV.

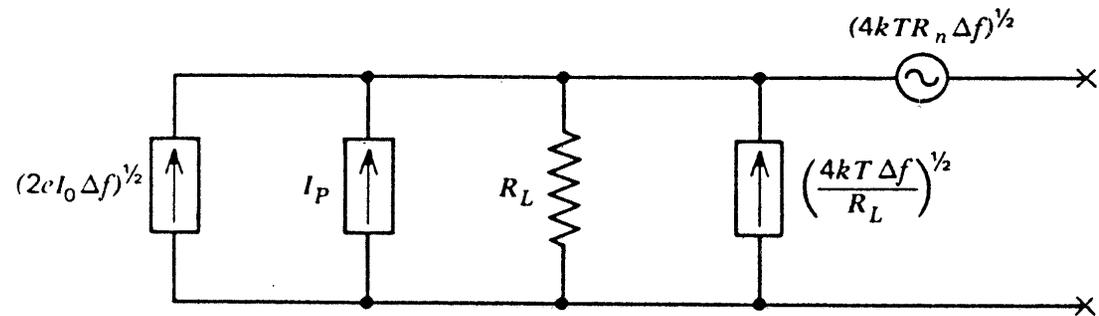


$F$  = numero di fotoni incidenti



# Fototubo o fotodiodo a vuoto

Il circuito equivalente del rivelatore connesso con una resistenza di carico  $R_L$ , ed un amplificatore con resistenza di rumore  $R_n$ .  $I_p$  è la fotocorrente prodotta



- ✓ La corrente di buio  $I_0$  è causata dall'emissione termoionica del fotocatodo e contribuisce al rumore del device come shot noise  $S(f) = 2 e I_0$
- ✓ E' poi necessario amplificare il segnale e quindi inviarlo su una resistenza di carico  $R_L$  con un contributo di rumore termico  $S(f) = 4 k T / R_L$
- ✓ Tipicamente è presente anche una capacità  $C$  che limita la banda insieme con quella  $C_i$  di un eventuale amplificatore



# Fotomoltiplicatore

✓ Si tratta sempre di un dispositivo a vuoto, ma estremamente sensibile in quanto dotato di un guadagno intrinseco.

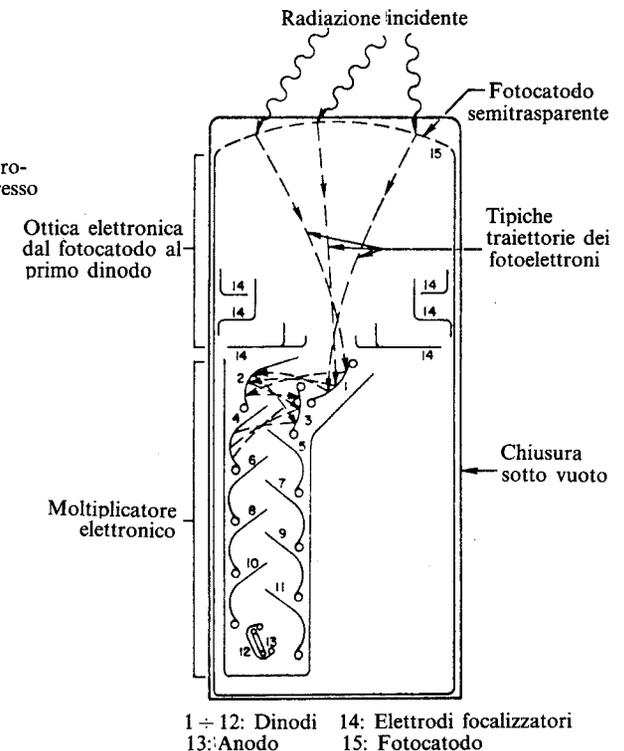
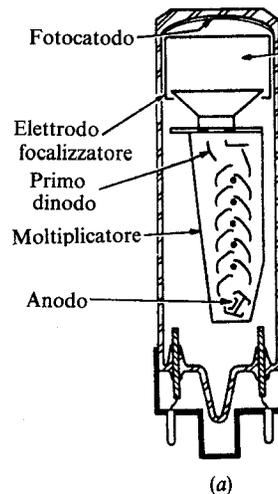
✓ E' costituito da:

- Un fotocatodo seguito da un primo sistema di messa a fuoco del fascio elettronico emesso e da uno di accelerazione.

- Sistema di amplificazione interna costituito da una serie di elettrodi chiamati dinodi che emettono un numero maggiore di elettroni di quelli assorbiti.

- Anodo di raccolta degli elettroni ottenuti.

✓ L'amplificazione ottenibile è molto elevata ed è data dal prodotto dei guadagni di ogni dinodo. Si arriva a guadagni fino a  $10^6$ - $10^8$ .



# Fotomoltiplicatore

✓ Deve essere applicata una differenza di potenziale tra i singoli dinodi che si ottiene con un unico alimentatore ad alta tensione ed una rete resistiva chiamata partitore.

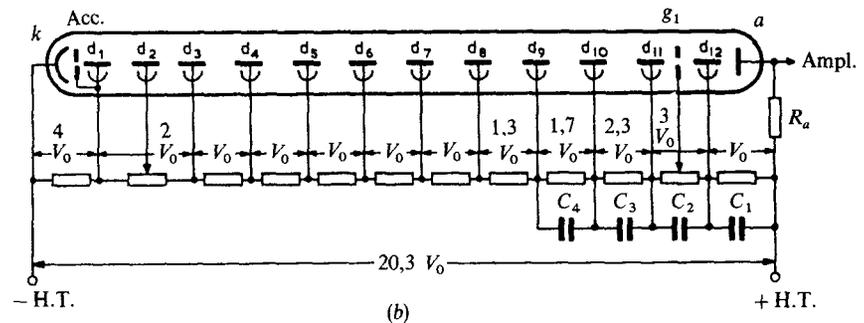
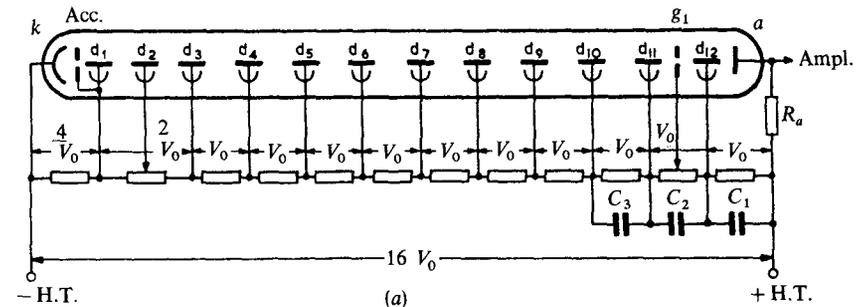
✓ L'uscita è spesso adattata su 50 Ohm con impulsi caratterizzati da un ritardo rispetto alla sollecitazione luminosa (transit time).

✓ Inoltre considerate le diverse traiettorie tra elettrone ed elettrone, si ottengono delle risposte allargate con tempi di salita e larghezze intorno al nsec.

✓ Analogamente esistono anche fluttuazioni sul tempo di arrivo: si parla di transit time spread

✓ La linearità è garantita fino ad un impulso di picco di 100mA e una corrente media tipica di 1mA

✓ Il guadagno del dispositivo va come una potenza della tensione applicata.



# Rumore nei processi di moltiplicazione elettronica

- ✓ Supponiamo di avere un processo in cui si hanno  $N$  elettroni che incidono su un dispositivo; sia esso un processo Poissoniano tale per cui  $\text{var}(N) = \text{mean}(N) = \langle N \rangle$ ; supponiamo inoltre di avere più processi di amplificazione tutti uguali con "a" dunque il numero di elettroni secondari prodotti.
- ✓ Ora, definendo con "n" il numero di elettroni ottenuti dopo il processo di amplificazione, ovvero:

$$\bar{n} = \bar{N} \cdot \bar{a}$$

e per il teorema della varianza avremo:

$$\text{var}(n) = (\bar{a})^2 \cdot \text{var}(N) + \bar{N} \cdot \text{var}(a)$$

- ✓ Il primo termine viene chiamato *rumore primario amplificato*, mentre il secondo si chiama *rumore di moltiplicazione*. Supponendo quindi che il processo primario non ha fluttuazioni [ $\text{var}(N)=0$ ], avremo che :

$$\text{var}(n) = \bar{N} \cdot \text{var}(a)$$

- ✓ Applicando la formula al processo di emissione secondaria di elettroni da parte dei dinodi, avendo  $\langle a \rangle = \delta$  (guadagno medio del singolo dinodo) e  $\langle a^2 \rangle = k\delta$ , otterremo

$$\bar{n} = \bar{N} \cdot \delta$$

$$\text{var}(n) = \delta^2 \cdot \text{var}(N) + \bar{N} \cdot \delta \cdot (k - \delta)$$

# Ancora rumore nei processi di moltiplicazione

- ✓ Cui corrisponde uno spettro di rumore proveniente da un dinodo che moltiplica una corrente primaria  $I_{pr}$  di un fattore  $\delta$ , pari a

$$S_I(f) = 2 \cdot e \cdot I_{pr} \cdot \delta^2 + 2 \cdot e \cdot I_{pr} \cdot \delta \cdot (k - \delta)$$

- ✓ dove il primo termine è il rumore primario di moltiplicazione ed il secondo è il rumore di emissione secondaria
- ✓ Il parametro di rumore  $k$  è circa pari a  $\delta+1$  per cui  $k-\delta=1$
- ✓ Considerando  $n$  dinodi, in sequenza ognuno con gli stessi parametri  $k$  e  $\delta$ , l'amplificazione totale diventa  $\delta^n$ , da cui il noise di uscita diventa il noise primario amplificato 2 e  $I_{pr} \delta^{2n}$  più il noise di emissione secondaria di ciascun dinodo, ovvero:

$$S_I(f) = \left( \frac{k-1}{\delta-1} \right) \cdot 2 \cdot e \cdot I_{pr} \cdot \delta^{2 \cdot n}$$

- ✓ Il fattore  $(k-1)/(\delta-1)$  misura di quanto la moltiplicazione deteriora il rumore. Considerando ad esempio  $\delta=4$ , si ottiene come fattore 1.33, ovvero il processo di moltiplicazione garantisce un'amplificazione in pratica priva di rumore.
- ✓ Analogamente, indicando con  $G$  il guadagno totale ed evidenziando il guadagno del primo dinodo  $\delta_1$  le fluttuazioni di ampiezza del segnale prodotto da un singolo fotone risultano pari a

# Fluttuazioni di guadagno

$$\sigma_N^2 = G^2 \cdot \frac{\delta}{\delta - 1} \cdot \frac{1}{\delta_1}$$

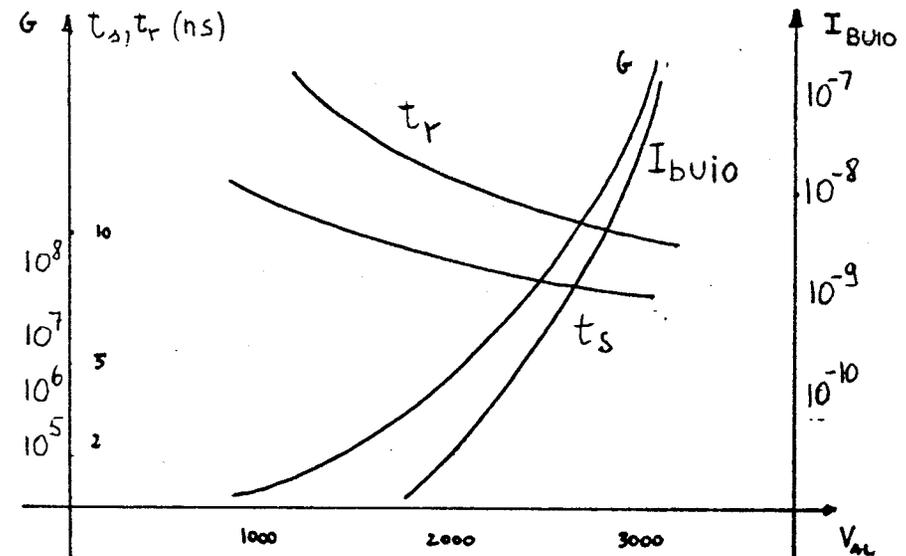
- ✓ Si noti che è importante avere un elevato guadagno sul primo dinodo per ridurre le fluttuazioni
- ✓ Considerando poi la situazione in cui si hanno R fotoelettroni, avremo:

$$\bar{N}_R = R\bar{N}$$

$$\sigma_{N_R}^2 = R\sigma_N^2$$

✓ Dove le fluttuazioni si riducono quanto più è alto il numero di fotoelettroni.

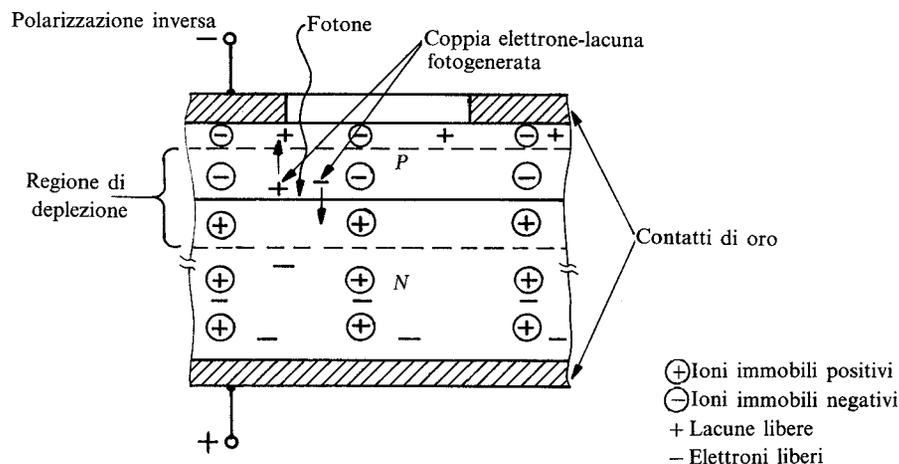
✓ Infine si noti a lato come varia la corrente di buio in funzione della tensione di alimentazione: questa cresce un po' più rapidamente del guadagno a causa dell'aumento del contributo della corrente di dispersione con l'aumento della tensione di alimentazione.



# Fotodiodo a giunzione

- ✓ Sostituisce il fotomoltiplicatore quando non sono necessari elevati guadagni, con notevoli vantaggi: una struttura piu' resistente, insensibilità a campi magnetici esterni, possibilità di poter lavorare senza la presenza di alte tensioni.
- ✓ Il suo funzionamento si basa sull'effetto fotoelettrico interno: è necessario che la radiazione luminosa assorbita determini la produzione di una coppia elettrone lacuna e che questa venga immediatamente separata.

✓ Questo può avvenire all'interno della regione di svuotamento di una giunzione p-n; infatti polarizzando inversamente una giunzione, si forma a cavallo della giunzione una zona di svuotamento nel cui interno è presente un campo elettrico tale da separare gli elettroni dalle lacune



# Fotodiodo a giunzione

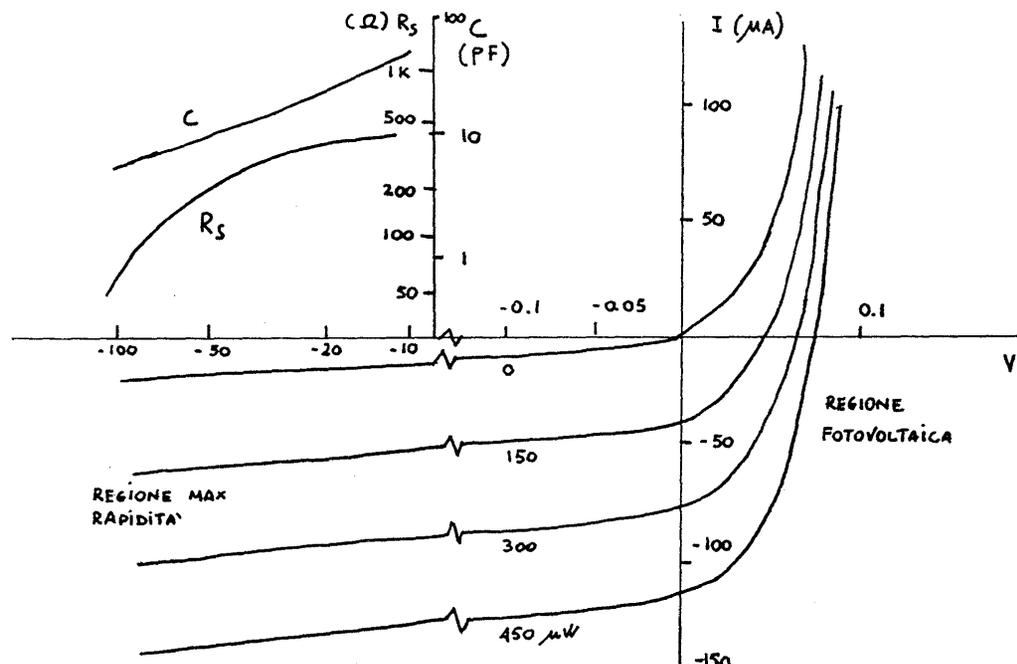
- ✓ In condizioni di polarizzazione diretta, vale la legge

$$I = I_0 \cdot \left( e^{\frac{q \cdot V}{\eta K T}} - 1 \right) - I_{ph}$$

- ✓ Si nota che la corrente fotogenerata  $I_{ph}$  si aggiunge alla corrente diretta del diodo che spesso si presenta di grandezza maggiore: conviene allora lavorare in polarizzazione inversa.
- ✓ Infatti se  $V \ll 0$ , si ottiene:

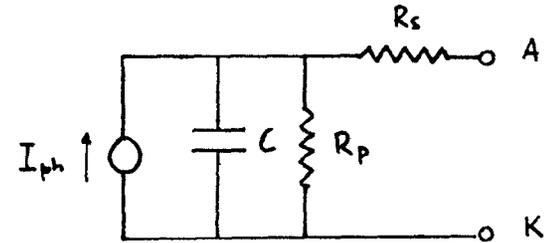
$$I = I_0 - I_{ph}$$

- ✓ Utilizzando tensioni di polarizzazione elevate si ottengono anche tempi di transito minori poichè i portatori vengono accelerati nella zona di drift d un campo elettrico più elevato, estensione della banda spettrale, riduzione degli effetti parassiti

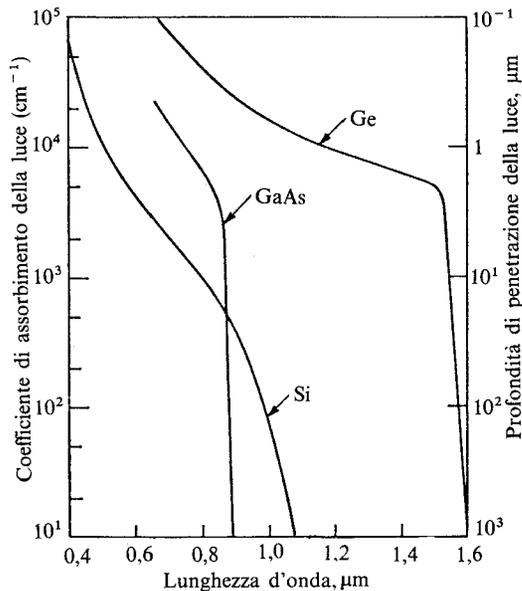


# Fotodiodo a giunzione

- ✓ Il circuito equivalente dal punto di vista degli effetti parassiti: gli effetti capacitivi sono causati dalla regione di svuotamento, mentre la resistenza serie è dovuta a parti di materiale non svuotato



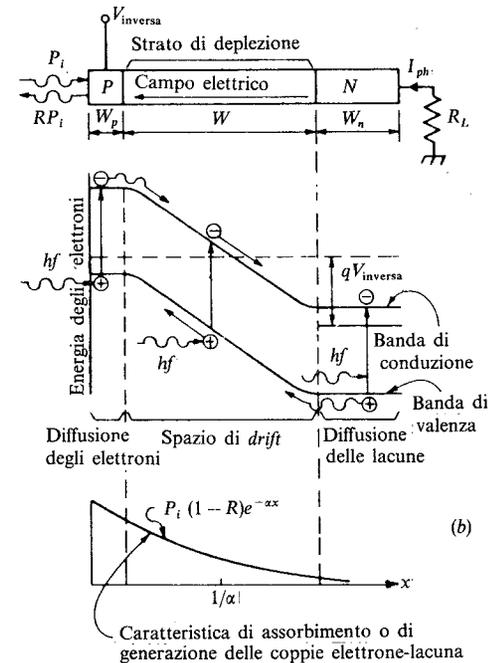
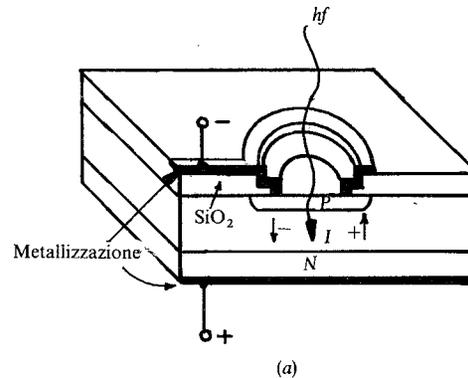
- ✓ La capacità  $C$  va come l'inverso della radice della tensione di polarizzazione e limita insieme con la resistenza serie la velocità del fotodiode: il rise time del dispositivo è pari a  $2.2 C R_s$ .



Si nota qua il coefficiente di assorbimento della luce per vari materiali in funzione della lunghezza d'onda

# Fotodiodo P-I-N

- ✓ Spesso tra gli strati p e n viene inserita una regione intrinseca ottenendo così il diodo pin
- ✓ Poichè la regione di deplezione si estende maggiormente in una zona di semiconduttore leggermente drogata, con il fotodiodo p-i-n si ottiene una regione di deplezione più larga in cui vi è un elevato campo elettrico.

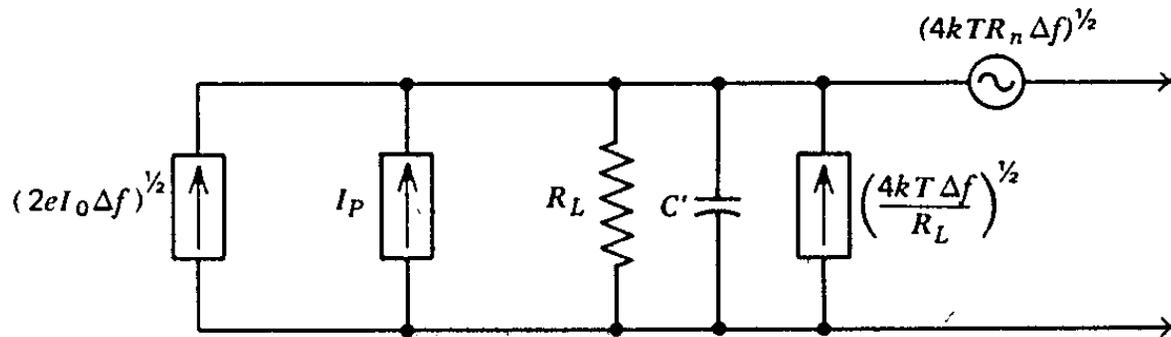


- ✓ Questa grande estensione della regione di deplezione determina una ridotta capacità della giunzione e quindi una maggior "velocità" del dispositivo.
- ✓ Migliora anche la corrente di buio, nonchè la corrente di rumore
- ✓ Tale dispositivo presenta infine una miglior sensibilità nello parte dello spettro verso l'infrarosso



# Rumore nei fotodiodi

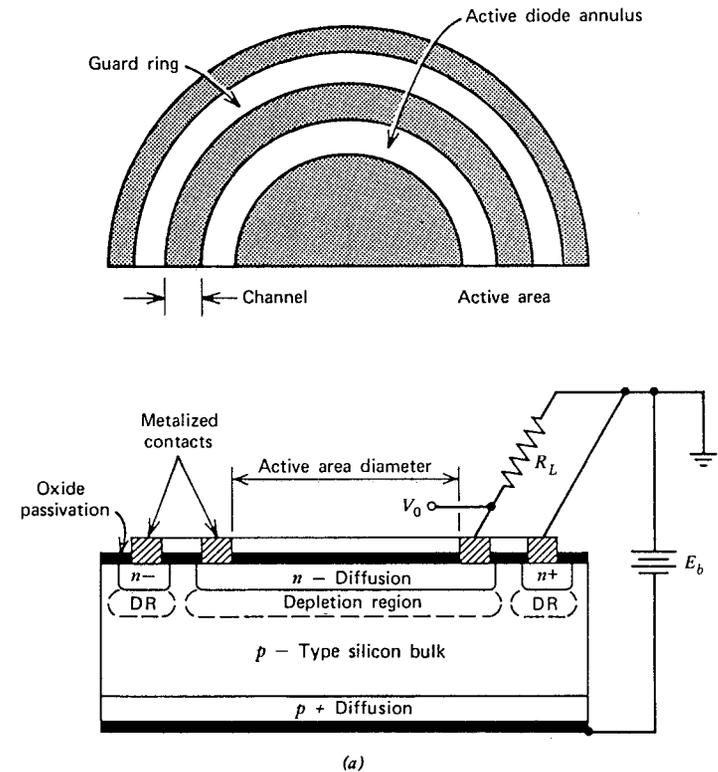
- ✓ Il fotodiodo presenta una corrente inversa  $I_0$  una volta polarizzato inversamente, con un rumore di tipo shot.
- ✓ Lo spettro di rumore è dunque:  $S_I(f) = 2 \cdot e \cdot I_0$
- ✓ Mentre il circuito equivalente di rumore è:



- ✓ Dove  $R_L$  è la resistenza di carico con il suo rumore; è poi previsto un amplificatore con resistenza di rumore  $R_n$ .
- ✓ La capacità  $C'$  ingloba sia la capacità della giunzione  $C$ , sia la capacità di ingresso dell'amplificatore  $C_i$ :  $C' = C + C_i$
- ✓ Questi effetti parassiti vanno a ridurre la banda del sistema.

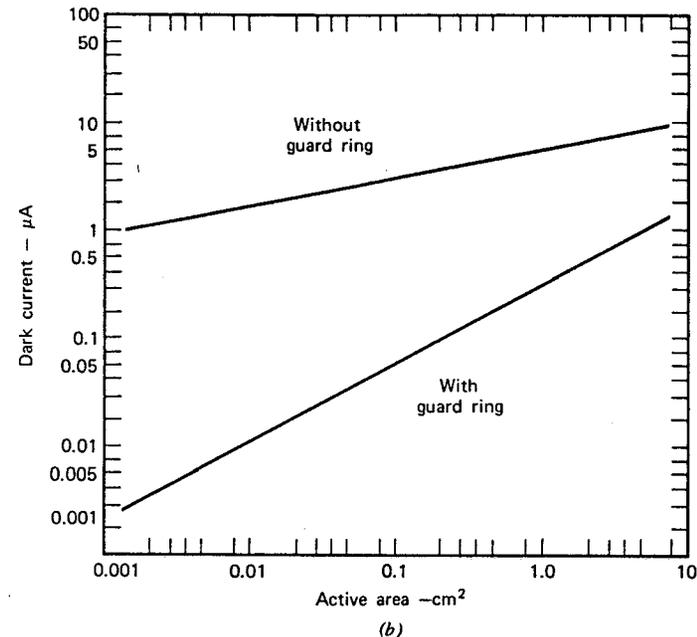
# L'anello di guardia

- ✓ La corrente di buio di un fotodiode p-n è prodotta principalmente da fenomeni di ricombinazione nella regione di carica spaziale .
- ✓ Si può dimostrare che nel caso di una giunzione circolare, la corrente  $I_0$  è proporzionale alla radice della superficie e quindi al raggio della giunzione stessa.
- ✓ L'effetto può essere ridotto utilizzando un anello di guardia" come indicato in figura .
- ✓ Vengono diffuse due regioni  $n^+$  : una regione circolare ed una anulare, quindi una metallizzazione viene fatta sia sul bordo della parte circolare, sia sull'anello, quindi la superficie è passivata.



# L'anello di guardia

- ✓ Ora se viene applicata una tensione tra i contatti, la corrente di buio dovuta al bulk scorre verso il contatto interno. Mentre la corrente di buio dovuta alla superficie scorre verso il contatto più esterno.
- ✓ In tale modo c'è una marcata riduzione della corrente di buio: a lato si nota l'andamento della corrente in funzione dell'area attiva.



- ✓ In particolare è stato calcolato lo spettro di rumore, nel caso di campo uniforme ottenendo :  
mentre è stato misurato:

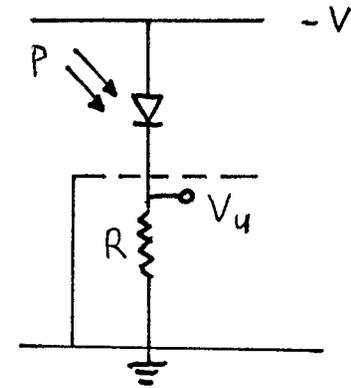
$$S_I(f) = \frac{2}{3} \cdot 2 \cdot e \cdot I_0$$

$$S_I(f) = \frac{11}{15} \cdot 2 \cdot e \cdot I_0$$

# Circuiti per fotodiode a giunzione

- ✓ Lo schema base per l'utilizzo di un fotodiode è banalmente quello a fianco.
- ✓ Indicando con  $P$  la potenza ottica incidente e con  $\sigma$  la sensibilità spettrale, avremo come tensione di uscita:

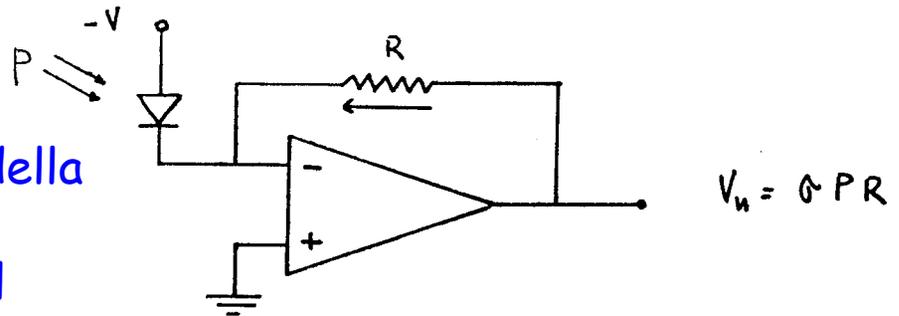
$$V_u = - \sigma P R$$



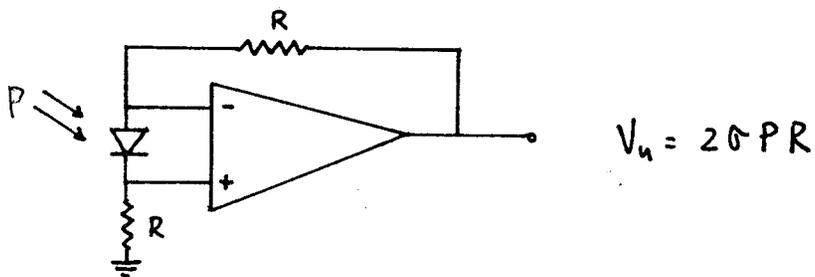
- ✓ Il problema di questa configurazione sta nella sensibilità e nella larghezza di banda: se si usa una resistenza piccola, per preservare la banda, si ha una bassa sensibilità; se si inserisce una resistenza di valore elevato, aumenta la sensibilità, ma peggiora drasticamente la banda.
- ✓ Un circuito alternativo è costituito dal circuito a resistenza fredda, dove si utilizza un operazionale

# Circuiti per fotodiode a giunzione

- ✓ Rispetto alla configurazione precedente, la sensibilità non cambia, tuttavia la connessione della resistenza  $R$  in reazione all'operazionale, fa in modo che il fotodiode veda una resistenza  $R' = R/(1+A)$
- ✓ E la larghezza di banda risulta quella determinata dalla resistenza  $R'$  (il limite è dato poi dall'operazionale).

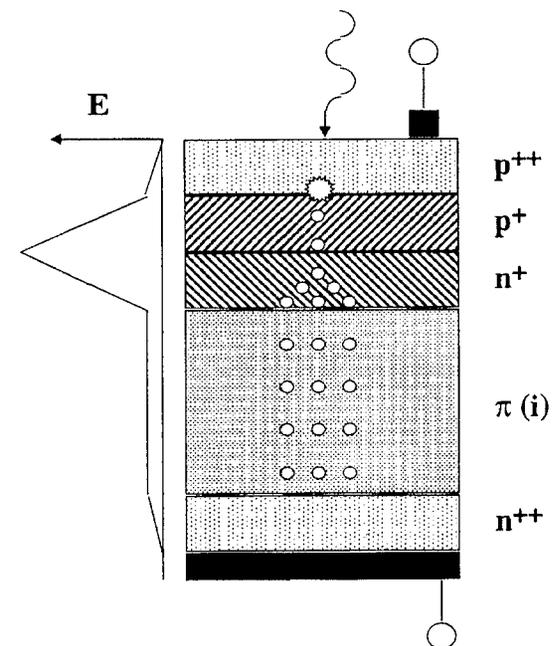


- ✓ A volte viene invece utilizzata la configurazione che prevede il fotodiode in cortocircuito.
- ✓ Si tratta di una configurazione dove si raggiunge una elevata sensibilità in quanto si elimina il contributo della corrente inversa del diode e le correnti di polarizzazione dell'operazionale



# Moltiplicazione a valanga

- ✓ Un'altro modo per amplificare internamente il segnale generato da un fotodiodo è l'utilizzo della moltiplicazione a valanga. Si parla di fotodiodo a valanga (APD).
- ✓ Il guadagno interno di corrente è ottenuto attraverso la moltiplicazione a valanga dei portatori nella regione di elevato campo elettrico di una giunzione fortemente polarizzata inversamente: i portatori fotogenerati acquistano sufficiente energia da produrre nuove coppie elettrone lacuna.
- ✓ Nello schema a lato, la luce penetra attraverso lo strato  $p^{++}$  ed è assorbita nel silicio, dove vengono generate le coppie elettrone-lacuna.
- ✓ Gli elettroni creati prima della giunzione p-n, driftano verso la giunzione e vengono moltiplicati per urto.
- ✓ Quindi driftano nella regione intrinseca e vengono raccolti dall'anodo.



# Fotodiodo a valanga

- ✓ Indicando con  $I_0$  la corrente di buio del diodo prima della moltiplicazione e con  $I_{ph}$  la fotocorrente prima della moltiplicazione, e supponendo che vengano prodotte "p" coppie elettrone lacuna quando una singola coppia attraversa la regione di carica spaziale una singola volta ( $p < 1$ ), allora la fotocorrente amplificata diventa:

$$I_{ph} \cdot (1 + p + p^2 + p^3 + \dots) = \frac{I_{ph}}{1 - p} = M \cdot I_{ph}$$

- ✓ Quindi il fattore di moltiplicazione è:  $M = \frac{1}{1 - p}$

- ✓ Passando ora al rumore, si nota che l'intensità spettrale della corrente di buio primaria è  $2eI_0$ . Poichè le coppie elettrone lacuna sono generate indipendentemente a tempi casuali, la corrente dovuta ad un singolo attraversamento della giunzione da parte di una coppia è di tipo shot

# Fotodiodo a valanga

- ✓ Di conseguenza tutti i singoli contributi della moltiplicazione sono di tipo shot:  $pI_0$ ,  $p^2I_0$ ,  $p^3I_0$ ,.....
- ✓ Tutti questi contributi devono essere sommati e quindi moltiplicati per  $M^2$ . Di conseguenza si ottiene come spettro:

$$\begin{aligned} S_I(f) &= 2 \cdot e \cdot I_0 \cdot (1 + p + p^2 + p^3 + \dots) \cdot M^2 = \\ &= \frac{2 \cdot e \cdot I_0}{1 - p} \cdot M^2 = 2 \cdot e \cdot I_0 \cdot M^3 \end{aligned}$$

- ✓ A prima vista puo' apparire che la moltiplicazione sia un effetto negativo considerando che il segnale è moltiplicato per un fattore  $M$ , mentren il rumore per il fattore  $M^{3/2}$ , tuttavia si opera in maniera tale che predomini il rumore dell'amplificatore.
- ✓ In tale modo si ottiene spesso un notevole incremento del rapporto segnale rumore

# Risoluzione in energia del fotodiode a valanga

- ✓ La risoluzione in energia ottenibile utilizzando un APD è limitata principalmente da tre fattori:
  - ✓ Limitazioni statistiche dovute alla distribuzione del guadagno
  - ✓ Non uniformità di guadagno nel volume sensibile del diodo
  - ✓ Dark noise dell'amplificatore
- ✓ Le limitazioni statistiche dell'APD, sotto forma di varianza del segnale in uscita espressa in numero di elettroni, sono date da:

$$\sigma_N^2 = M^2 \cdot \sigma_n^2 + N_{eh} \cdot \sigma_A^2$$

- ✓ Dove  $N_{eh}$  è il numero di elettroni primari,  $\sigma_n$ : la varianza degli elettroni primari,  $\sigma_A$  la varianza del guadagno.
- ✓ Normalizzando poi rispetto al gain si ottiene quindi

$$\sigma_{st}^2 = \sigma_n^2 + \frac{N_{eh} \cdot \sigma_A^2}{M^2}$$



# Risoluzione in energia del fotodiode a valanga

- ✓ Spesso viene definito un fattore di noise in eccesso  $F$  definito come:

$$F = 1 + \frac{\sigma_A^2}{M^2}$$

- ✓ Da cui si ottiene:

$$\sigma_{st}^2 = \sigma_n^2 + N_{eh} \cdot (F - 1)$$

- ✓ Dove il secondo termine dovuto al rumore del fotodiode a valanga.
- ✓ Assumedo poi una distribuzione Poissoniana degli elettroni primari, si ottiene:

$$\sigma_{st}^2 = N_{eh} \cdot F$$



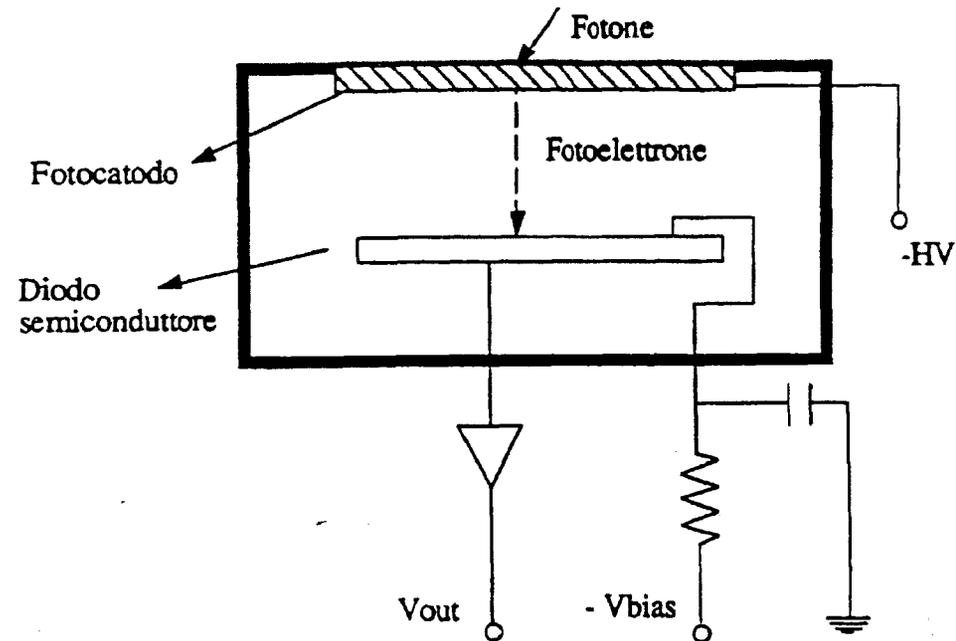
# Fotorivelatori ibridi

✓ Si tratta di dispositivi costituiti da un fototubo a vuoto con un fotocatodo che provvede alla conversione fotone-elettrone, seguito da un diodo a semiconduttore in grado di amplificare.

✓ E' dunque presente un fotocatodo con la funzione di convertire il segnale luminoso in fotoelettroni.

✓ Questi ultimi, dopo essere stati accelerati da un intenso campo elettrico incidono sul diodo producendo coppie elettrone-lacuna.

✓ La carica così generata è raccolta dagli elettrodi del diodo consentendo la lettura in carica o tensione.



# Fotorivelatori ibridi

✓ Il guadagno ottenibile è pari al numero medio di coppie elettrone-lacuna generate da ogni fotoelettrone incidente sul volume depleto del diodo:

$$G = \frac{E_e - E_p}{E_{\min}} = \frac{q \cdot V_k - E_p}{E_{\min}} = \frac{q \cdot V_k - E_p}{3.62eV}$$

✓ Dove  $E_p$  è la perdita di energia che il fotoelettrone subisce prima di raggiungere la regione depleta del diodo,  $E_{\min}$  è la minima energia richiesta per creare una coppia (3.62eV nel Silicio),  $E_e$  è l'energia che acquista il fotoelettrone nella zona interelettrodica (proporzionale alla differenza di potenziale applicata).

✓ Si nota che il guadagno è certamente più stabile rispetto ad un fotomoltiplicatore, in quanto direttamente proporzionale alla d.d.p. applicata (sia pure tipicamente più elevata).

✓ Analogamente il guadagno è meno sensibile alle fluttuazioni della tensione applicata.

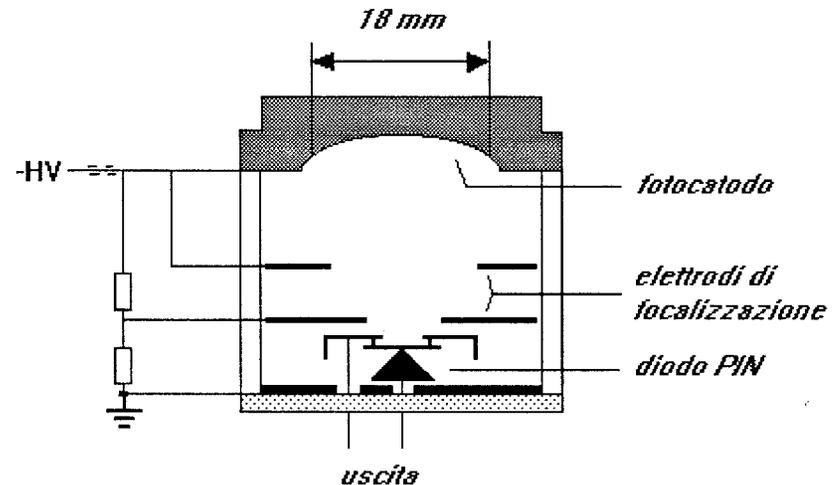
# Fotorivelatori ibridi

✓ I guadagni tipici ottenibili sono paria circa  $3 \cdot 10^3$ , ipotizzando di applicare una ddp di poco oltre i 10kV e che di questi, 1-2kV sono necessari per superare la prima regione fortemente drogata e raggiungere la zona depleta.

✓ Caratteristiche peculiari di questo detector sono:

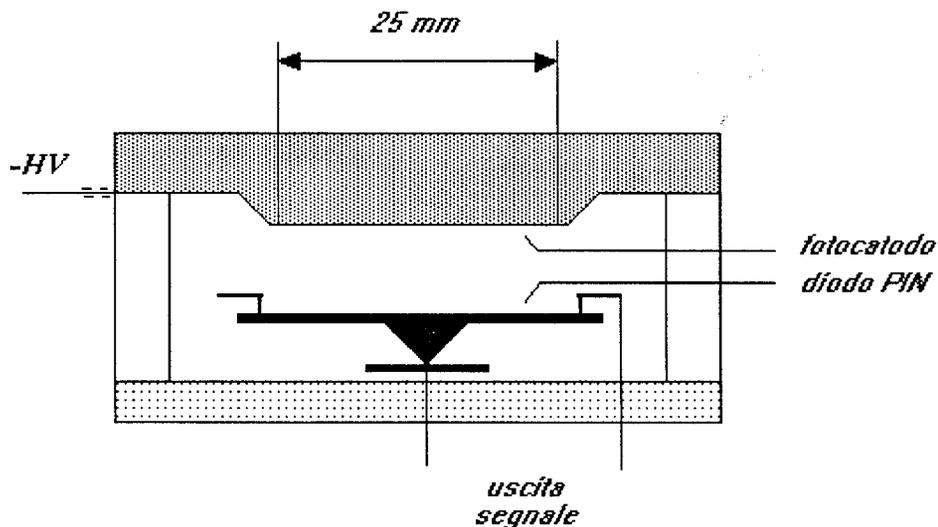
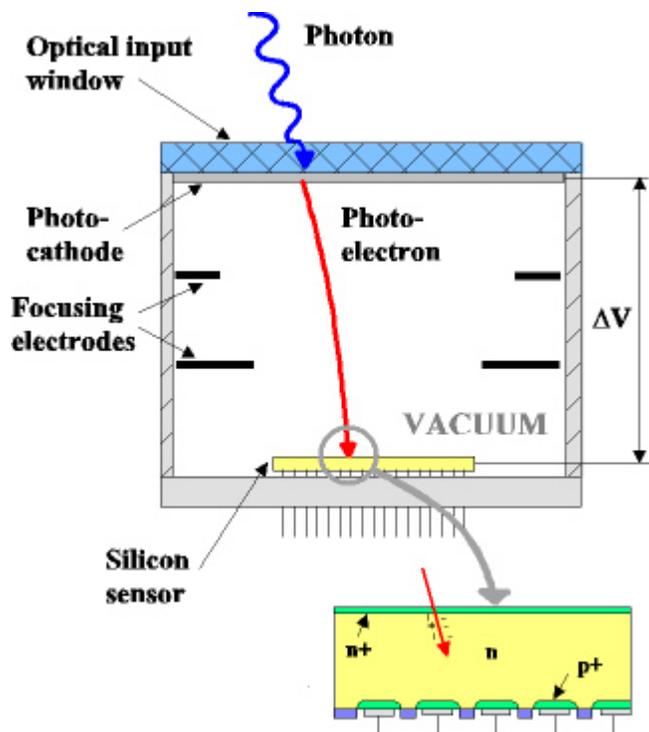
- Linearità in carica ed in picco di tensione su 7-8 ordini di grandezza (fino a  $10^8$  fotoelettroni)
- Sensibilità fino al singolo fotoelettrone
- Proprietà di timing legate alle caratteristiche del diodo utilizzato
- Possibilità di avere aree sensibili elevate (legate alla dimensione del fotocatodo)

▪ In particolare, nel caso della versione "cross focussed", gli elettroni sono accelerati e focalizzati su un diodo di ridotte dimensioni ottenendo tempi intorno al nsec.



# Fotorivelatori ibridi

▪ In alternativa è possibile porre il diodo estremamente vicino al catodo, ottenendo la versione "proximity focussed": adatta ad operare in presenza di elevati campi magnetici



- ✓ In tal modo diventa quindi anche possibile pixellizzare il dispositivo: semplicemente disponendo ad immagine del fotocathodo una matrice di fotodiodi.
- ✓ In pratica la faccia di ingresso degli elettroni è comune, mentre è sufficiente avere pads di raccolta segmentate sul lato opposto

# Fotorivelatori ibridi

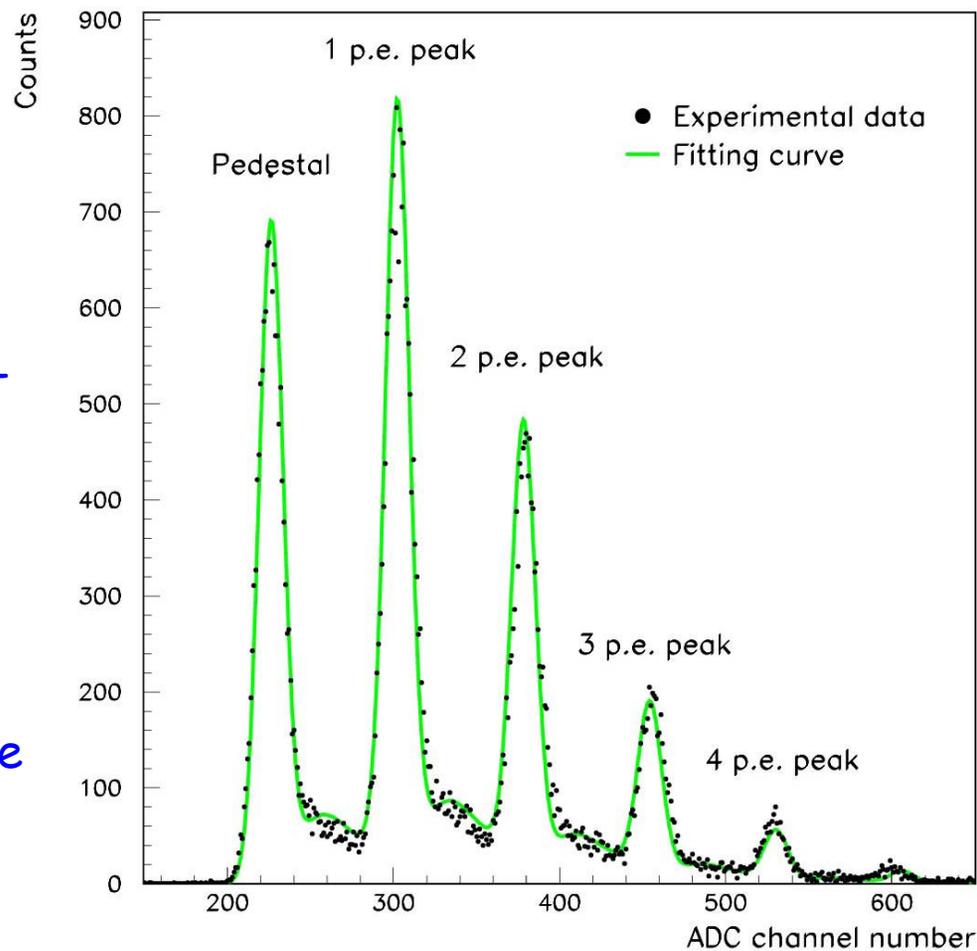
✓ Caratteristica particolare di questo detector è la capacità di risolvere un numero estremamente elevato di picchi dovuti a pochi fotoelettroni: si arriva fino a 20-30.

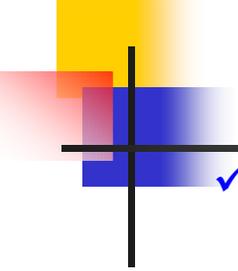
✓ Cio' è legato al tipo di processo utilizzato per produrre un guadagno: queste fluttuazioni sono date da:

$$\sigma_{tot}^2 = \sigma_G^2 + \sigma_{el}^2 = F \cdot G + \sigma_{el}^2$$

✓ Dove è stata evidenziato il contributo del gain di moltiplicazione e quello dell'elettronica.

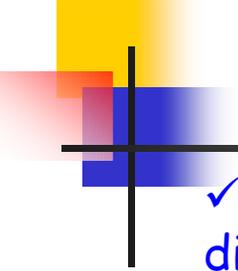
✓ In particolare il primo si presenta molto basso perche ridotto del fattore di Fano pari a 0.12 nel Silicio





# Rivelatori a scintillazione

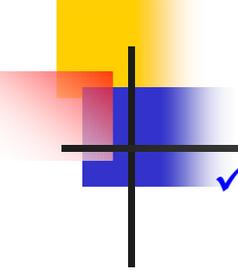
- ✓ I rivelatori a scintillazione vengono frequentemente usati nell'ambito della fisica nucleare per rivelare:
  - **Particelle cariche**
    - Elettroni veloci
    - Particelle pesanti (protoni, alpha,...)
  - **Particelle (radiazione) neutre**
    - Radiazione elettromagnetica
    - neutroni
- ✓ In ogni caso, vengono utilizzati dei materiali scintillanti (scintillatori) nei quali la particella deposita la propria energia che quindi viene trasformata in radiazione luminosa con una determinata efficienza (fotoni per unità di energia della particella).
- ✓ Lo scintillatore puo' essere:
  - **Liquido**
  - **Solido**
  - **Liquido o solido criogenico**
  - **Fibra scintillante**



# Rivelatori a scintillazione

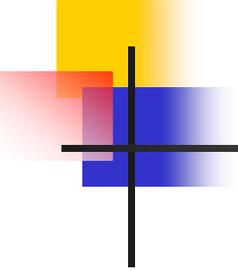
---

- ✓ Nel caso di particelle cariche, queste danno sempre un segnale di luce proporzionale all'energia depositata, tuttavia le particelle pesanti producono meno luce degli elettroni.
- ✓ Nel caso di particelle neutre, il processo di conversione in radiazione luminosa è più complesso:
  - per la radiazione elettromagnetica ( $\gamma$ ), questa produce per effetto fotoelettrico o Compton elettroni nello scintillatore, che poi vengono successivamente convertiti in luce.
  - I neutroni vengono invece rivelati grazie ad uno scattering elastico che produce protoni nello scintillatore (poi convertiti anch'essi in luce).
- ✓ Tuttavia si nota una forma d'impulso elettrico (rivelato ad es. da fotomoltiplicatori), differente per questi due fenomeni.



# Rivelatori a scintillazione

- ✓ Una volta prodotta la radiazione luminosa questa deve essere convertita in un segnale elettrico mediante rivelatori di luce.
- ✓ Sono principalmente utilizzati:
  - I fotomoltiplicatori
  - I diodi a valanga
- ✓ La scelta deve essere effettuata in base alle caratteristiche geometriche (ingombri, area sensibile.....) , all'intensità del segnale luminoso previsto, al tipo di lunghezza d'onda che deve essere rivelata, la dinamica richiesta, la presenza o meno di caratteristiche ambientali particolari (campi magnetici, criogenia,.....), al tipo di informazioni che si desidera ottenere, etc.....
- ✓ Due sono le informazioni che possono essere ottenute (al limite in parallelo):
  - **Informazione di energia (calorimetria): l'intensità della luce misurata è proporzionale all'energia della particella: si tratta di integrare il segnale sui tempi tipici dello scintillatore**



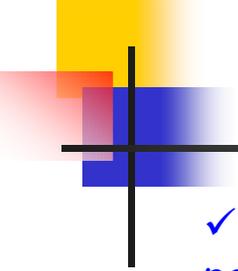
# Rivelatori a scintillazione

---

- Informazione temporale, dove viene misurato il tempo di arrivo della particella rispetto ad un tempo  $T_0$ , ottenendo in tal modo anche l'informazione relativa alla posizione di attraversamento della particella

✓ Verranno fatti ora alcuni esempi, e precisamente:

- Rivelazione radiazione luminosa prodotta da scintillatore nell'esperimento BOREXINO per la misura del neutrino solare
- La Pulse shape discrimination per la separazione dei neutroni dalla radiazione  $\gamma$  per misure di fondo neutronico.
- La rivelazione della luce di scintillazione dell'argon liquido come trigger e tempo  $T_0$  nell'esperimento ICARUS.
- L'utilizzo di fibre scintillanti accoppiate con fotodiodi a valanga come tracking nel timing counter dell'esperimento MEG.

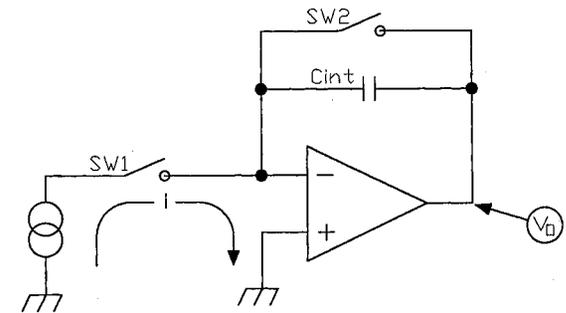


# Esperimento BOREXINO

- ✓ Si tratta di un sistema costituito da 300 tons di scintillatore liquido posto all'interno di un serbatoio sferico dove sono posti 2200 fotomoltiplicatori. I neutrini solari interagendo con lo scintillatore producono fotoni.
- ✓ Le informazioni di interesse per questo esperimento sono:
  - l'energia associata a ciascun evento, che è proporzionale al numero totale di fotoelettroni prodotti dai fotomoltiplicatori
  - la posizione dell'evento all'interno del serbatoio, legato ai tempi di arrivo dei segnali sui fotomoltiplicatori
- ✓ Viene utilizzato un cavo singolo per il segnale e per l'alta tensione, quest'ultima filtrata da una capacità.
- ✓ I segnali che si prevedono essere visti dai fotomoltiplicatori sono essenzialmente del tipo a singolo fotoelettrone (ampiezza 0.240mA, durata fwhm 15ns)
- ✓ La probabilità che ci sia produzione di fotoelettroni multipli è intorno al 10%, nel qual caso essi possono all'interno di una finestra della durata di 80-100nsec dall'arrivo del primo fotoelettrone.
- ✓ Vedremo in questa sede principalmente il circuito di front-end per la misura dell'energia.

# "Charge integrator" per BOREXINO

- ✓ Accanto si trova lo schema per un integratore di corrente standard. Normalmente gli interruttori SW1 e SW2 sono chiusi mantenendo la carica sulla capacità  $C_{int}$  a 0 e la tensione di uscita a ground.
- ✓ Se arriva un gate ad un tempo  $t_0$  allora SW2 viene aperto e  $C_{int}$  comincia ad integrare e la tensione  $V_o$  riproduce la differenza di potenziale su  $C_{int}$ .



Gated charge integrator

- ✓ Dopo un certo intervallo  $t_{int}$ , SW1 viene aperto e l'uscita rimane proporzionale all'integrale fatto sul tempo  $t_{int}$ .
- ✓ Questa uscita può essere quindi letta.
- ✓ Infine le condizioni iniziali vengono ripristinate richiudendo entrambi gli switch.
- ✓ Il tempo necessario per chiudere gli interruttori, effettuare la lettura ed attendere che la capacità si scarichi completamente è l'intervallo di tempo morto, quando il sistema non è in grado di accettare un nuovo gate

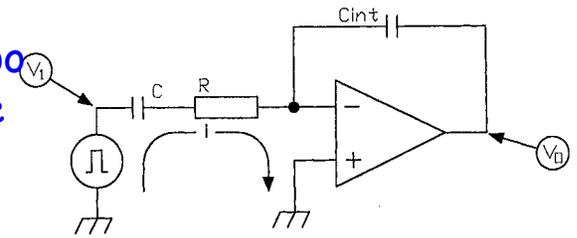
L'integratore implementato su Borexino evita l'utilizzo degli switch: è sempre in fase di integrazione

# "Charge integrator" per BOREXINO

- ✓ L'ingresso dell'integratore sale quando l'impulso arriva e raggiunge lo zero dopo un intervallo di tempo pari a  $\tau_{int} = RC$ , dove  $C$  è la capacità d'alta tensione e  $R = R_s + R_o$  con  $R_s$  la resistenza della sorgente, e  $R_o$  quella caratteristica del cavo ( $50\Omega$ ).
- ✓ Considerando ora un impulso di ingresso di ampiezza costante  $V_1$  e durata  $\tau_p$ , avremo in ingresso all'integratore:

$$i(t) = \frac{V_1}{R} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{se } t < \tau_p$$

$$i(t) = -\frac{V_1}{R} \cdot \left(1 - e^{-\frac{\tau_p}{RC}}\right) \cdot e^{-\frac{(t-\tau_p)}{RC}} \quad \text{se } t > \tau_p$$



Gateless charge integrator

- ✓ A questo punto il segnale viene integrato e l'uscita  $V_o$ , dopo  $\tau_p$ , dà informazioni relative alla carica associata all'impulso.

# "Charge integrator" per BOREXINO

- ✓ A questo punto il segnale viene integrato e l'uscita  $V_o$ , dopo  $\tau_p$ , dà informazioni relative alla carica associata all'impulso originale. Avremo cioè in uscita un segnale che va come:

$$Q_0 \cdot e^{-\frac{t-\tau_p}{RC}} \quad \text{per } t > \tau_p$$

- ✓ Dove  $Q_0 = V_1 \tau_p / R$  è la carica prodotta dal singolo fotomoltiplicatore
- ✓ Nel caso poi di una sequenza di impulsi di luce avremo:

$$\tilde{Q} \cdot e^{-\frac{t}{RC}} + \sum_j Q_j \cdot e^{-\frac{t-t_j-\tau_p}{RC}}$$

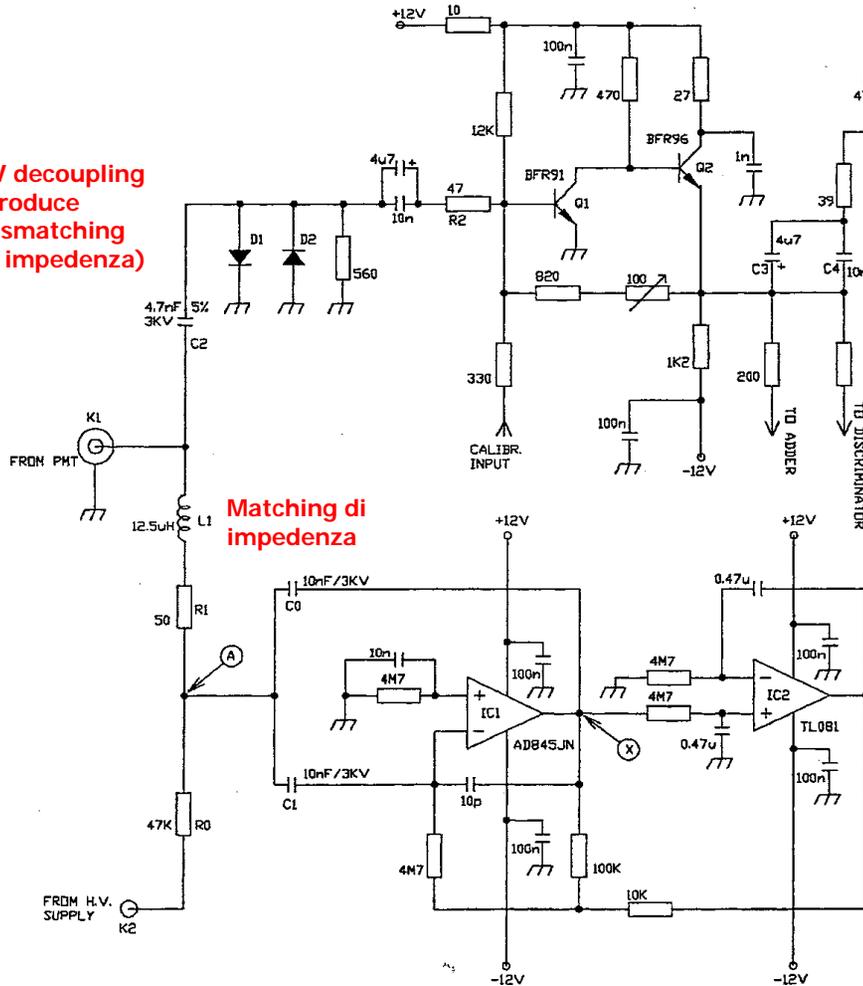
- ✓ Dove il primo termine è un residuo dovuto all'integrazione del segnale precedente, anch'esso decade con costante di tempo  $RC$ .

# "Charge integrator" per BOREXINO

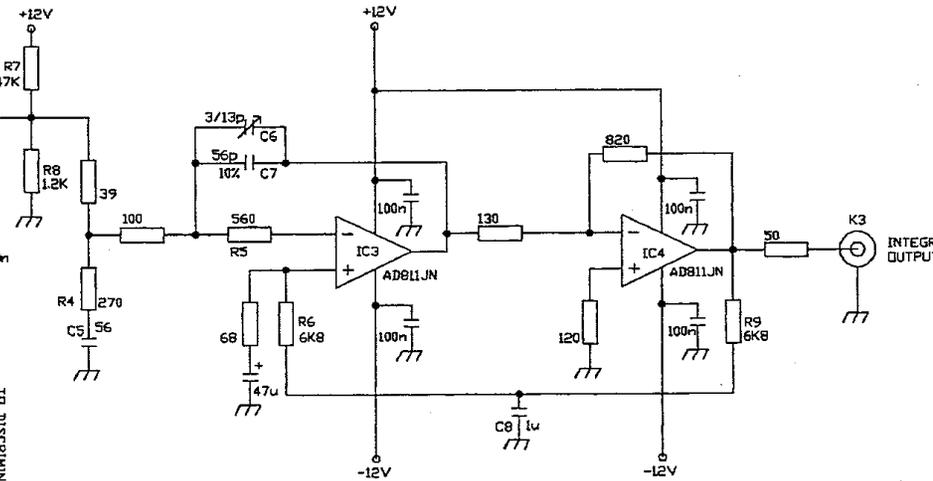
- ✓ Facendo l'ipotesi che i tempi di arrivo dei fotoelettroni siano piccoli rispetto a  $RC$ , la carica totale degli impulsi che arrivano all'interno del tempo di integrazione  $t_{int}$  (80-100ns) può essere ottenuta campionando l'uscita dell'integratore due volte:
  - il primo campionamento deve essere effettuato nell'istante in cui arriva il primo fotoelettrone sul PMT (misurato da un discriminatore inserito nella digital board).
  - Il secondo deve essere effettuato al tempo  $t = t_{int}$
- ✓ La differenza dei due segnali campionati dà la carica totale associata all'evento.
- ✓ Gli errori che si commettono sono legati alle differenze temporali tra i vari fotoelettroni.
- ✓ Segue il circuito di front-end analogico.
- ✓ Nell'esperimento è anche previsto un circuito digitale che provvede alla digitalizzazione dell'energia e fornisce le informazioni relative al tempo; provvede pure alle comunicazioni tra il circuito di trigger e il sistema di acquisizione dati.

# "Charge integrator" per BOREXINO

HV decoupling  
(produce  
Mismatching  
Di impedenza)

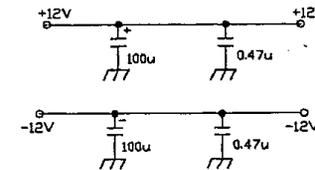


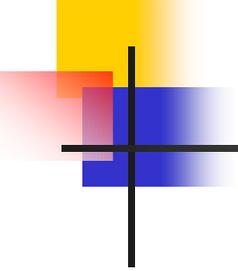
Rete di reiezione del rumore dell'alimentatore HV



Charge integrator  
Op. amp

Second amplification





# La "Pulse Shape Discrimination" PSD

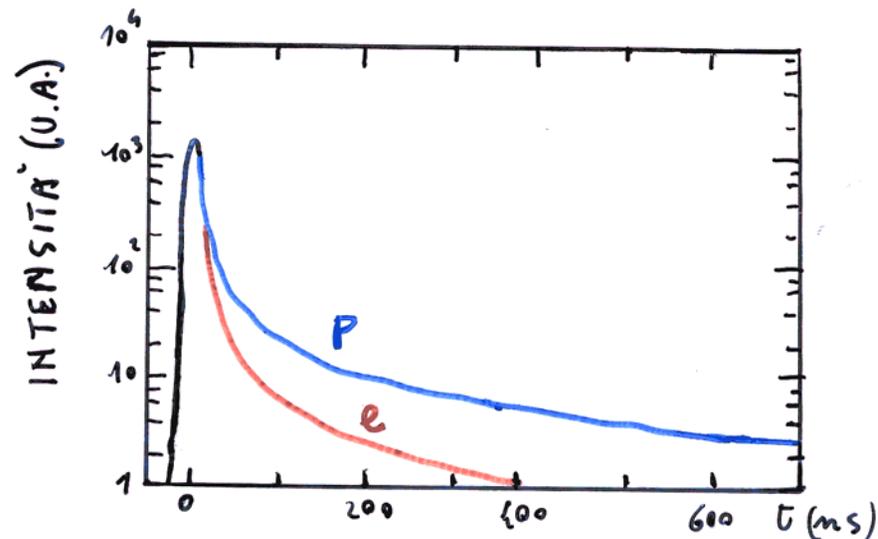
---

- ✓ Si tratta di una tecnica che permette di "separare" , distinguere elettronicamente i neutroni dalla radiazione  $\gamma$ . una volta rivelati e convertiti in radiazione luminosa da uno scintillatore liquido.
- ✓ La finalità è la misura di fondi neutronici a bassissimo livello anche in presenza di forte radiazione  $\gamma$ .

# La "Pulse Shape Discrimination" PSD

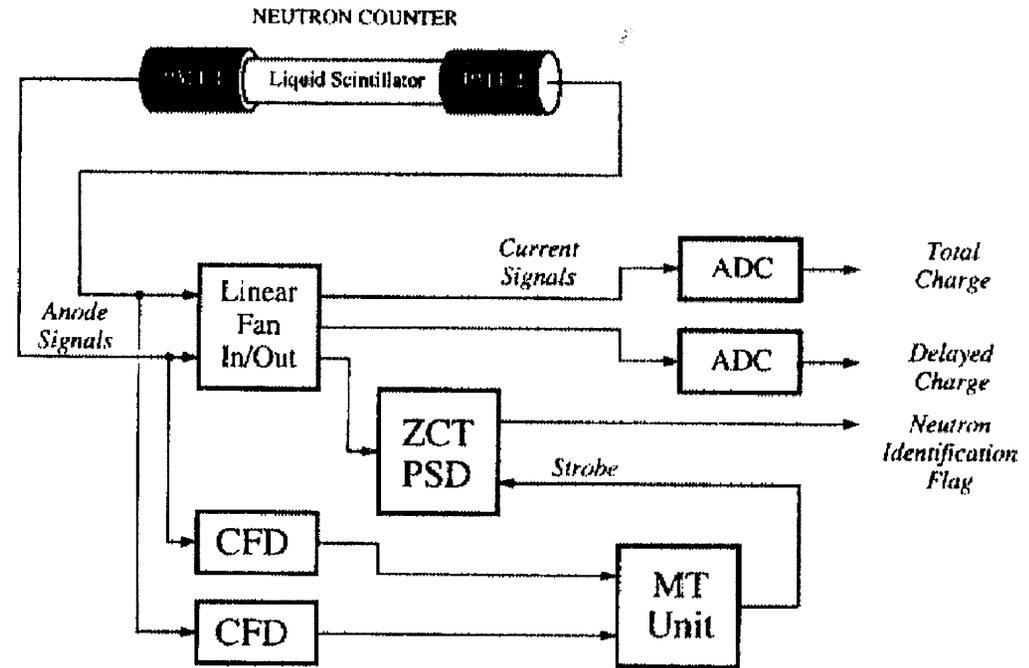
✓ Si basa sull'analisi della differente forma degli impulsi di luce prodotti all'interno dello scintillatore:

- si hanno risposte lunghe per i neutroni
- risposte più rapide per i  $\gamma$ .



# La "Pulse Shape Discrimination" PSD

- ✓ A lato si nota il set-up elettronico di base per la PSD.
- ✓ La luce di scintillazione prodotta dallo scintillatore è rivelata da due fotomoltiplicatori, i cui segnali sono sommati da un linear fan-in/fan-out.
- ✓ Questo modulo fornisce tre uscite in corrente, una delle quali è connessa ad un sistema di zero-crossing ZCT ottimizzato per la PSD.



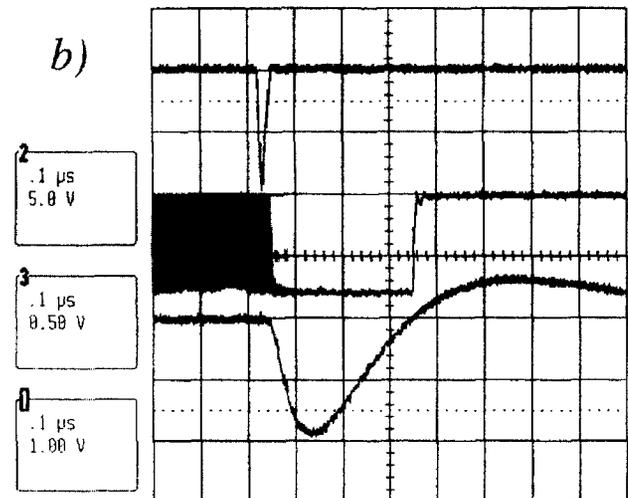
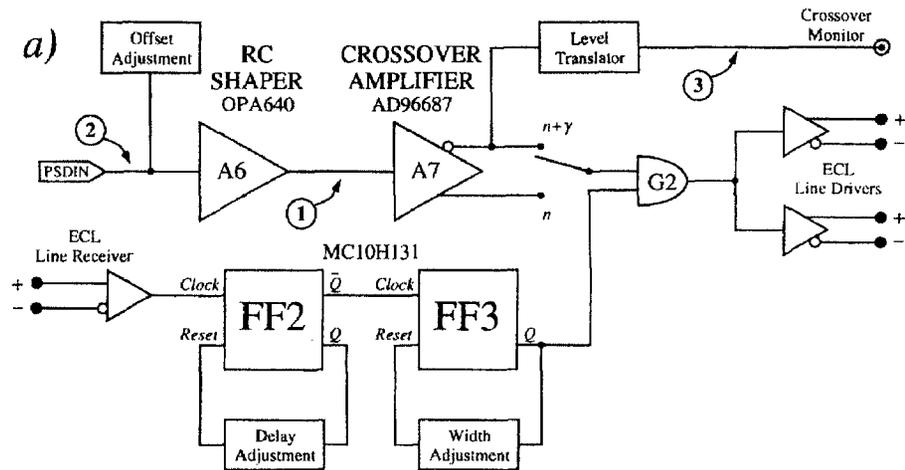
- ✓ Due discriminatori constant fraction (CFD) sono usati per definire la minima energia depositata dalle particelle.
- ✓ Un'unità meantimer (MT) genera un segnale di Strobe per compensare in tempo la coincidenza dei due segnali dei discriminatori

# La "Pulse Shape Discrimination" PSD

✓ L'unità di zero Crossing è il cuore della Pulse Shape Discriminator.

✓ Il segnale di corrente dei fotomoltiplicatori è integrato e differenziato da un preamplificatore OPA640 in modo che il tempo di zero cross dell'uscita dipende dalla costante di decadimento del segnale ottico originale.

✓ La costante di tempo RC viene determinata sperimentalmente cercando di ottimizzare le capacità di discriminazione tra i due tipi di particelle.

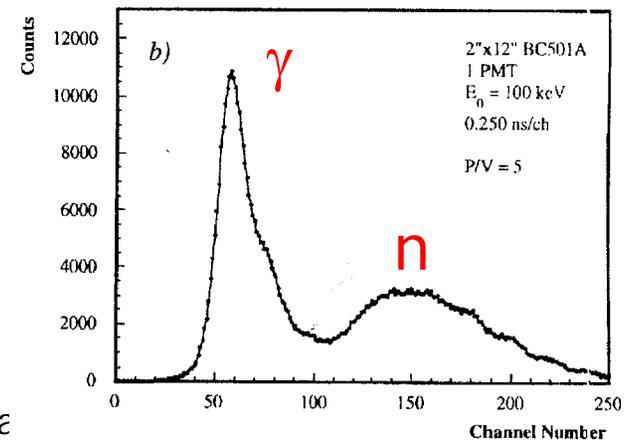
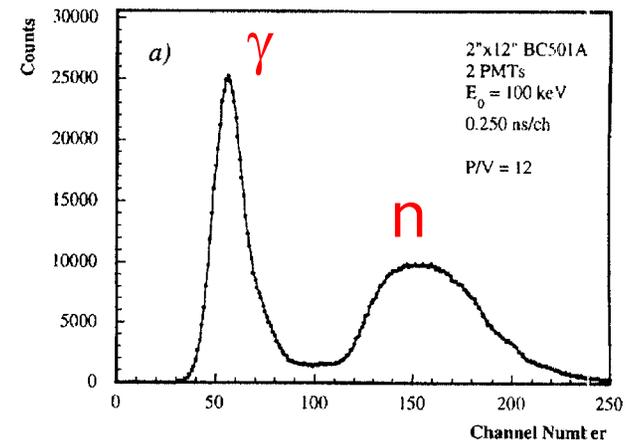


# La "Pulse Shape Discrimination" PSD

✓ La costante di integrazione è intorno ai 30ns, mentre la costante di differenziazione è scelta in modo da avere una double pulse resolution di 300ns.

✓ Il segnale così modificato viene inviato ad un comparatore ultraveloce Analog Devices AD96687 che rivela l'istante di attraversamento di zero.

✓ L'analisi dei tempi di attraversamento rispetto al segnale di strobe viene analizzato mediante un time to digit converter ottenendo due famiglie di segnali come indicate a lato.



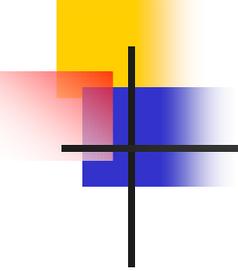
# Esperimento ICARUS

- ✓ L'esperimento ICARUS consiste in una camera a proiezione temporale TPC ad Argon liquido per studi sulla stabilità della materia e fisica del neutrino.
- ✓ In una camera a proiezione temporale, una delle coordinate spaziali (la profondità) è ottenibile in maniera assoluta solo conoscendo il tempo  $T_0$  degli eventi (istante di avvenimento).
- ✓ Il processo di interazione delle particelle in Argon liquido produce carica di ionizzazione e luce di scintillazione.
- ✓ mentre l'informazione calorimetrica è data dalla carica raccolta dai fili, la luce di scintillazione prodotta dà un'informazione prompt sull'istante dell'interazione e può dunque essere utilizzata come tempo  $T_0$ .
- ✓ L'esperimento ICARUS T600 utilizza a tale scopo un sistema di fotomoltiplicatori posti dietro i fili di raccolta, fotomoltiplicatori che devono lavorare immersi nell'Argon liquido



28 Ottobre 2004

Corso Nazionale di Formazione



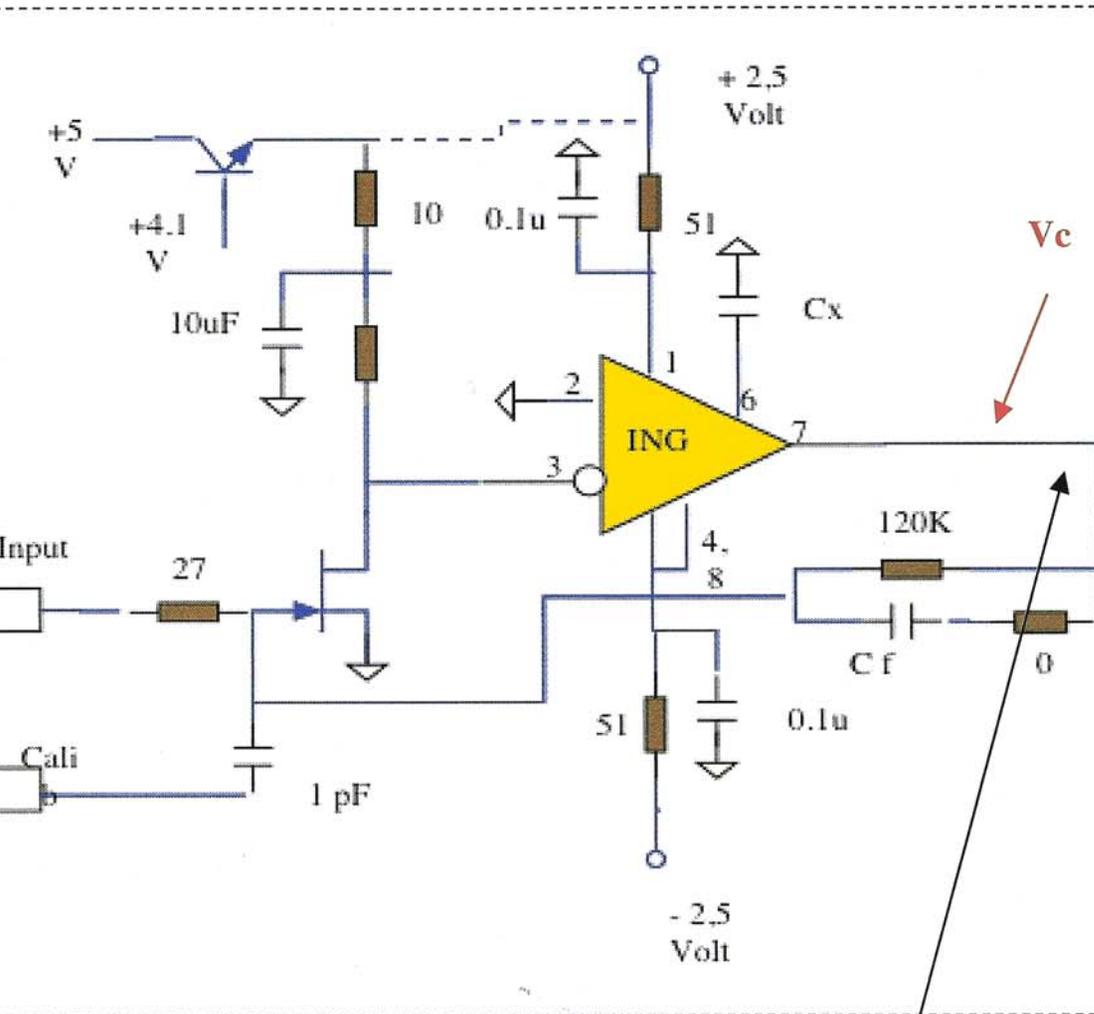
# Esperimento ICARUS

---

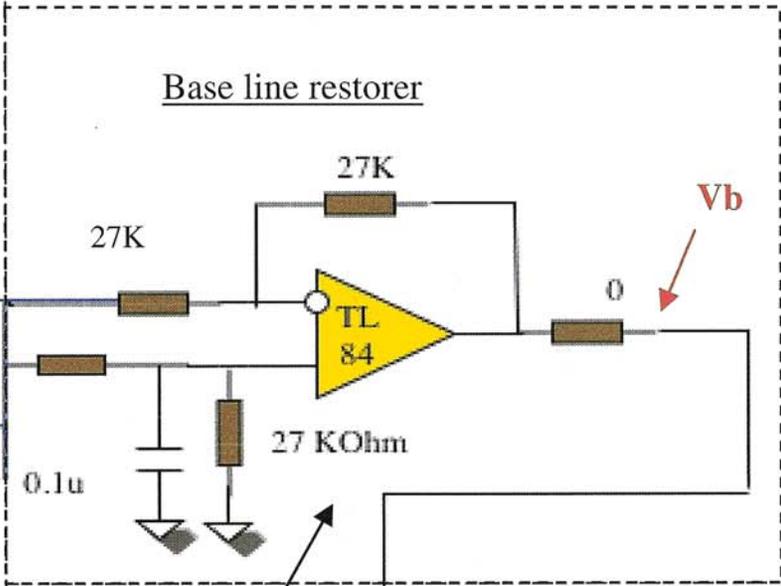
- ✓ Il segnale prodotto dalla scintillazione dell'argon liquido presenta una costante di decadimento intorno a  $1.6\mu\text{sec}$ , esaurendosi quindi completamente in circa  $5\mu\text{sec}$ .
- ✓ Il segnale è estremamente debole in quanto si tratta (in determinate condizioni) di rivelare il singolo fotone, ed inoltre il guadagno del fotomoltiplicatore tende a ridursi sensibilmente operando a 87K.
- ✓ E' dunque necessario amplificare ed integrare il segnale su tempi dell'ordine dei  $5-10\mu\text{sec}$  utilizzando un amplificatore di carica

Preamplifier

$C_x = 56 \text{ pF}$   
 $C_f = 82 \text{ pF}$



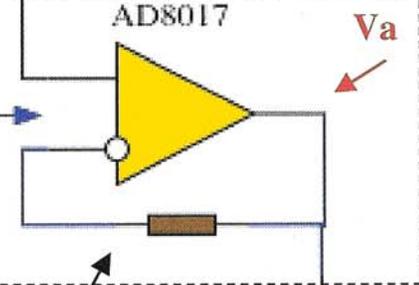
Base line restorer



Output of the preamplifier

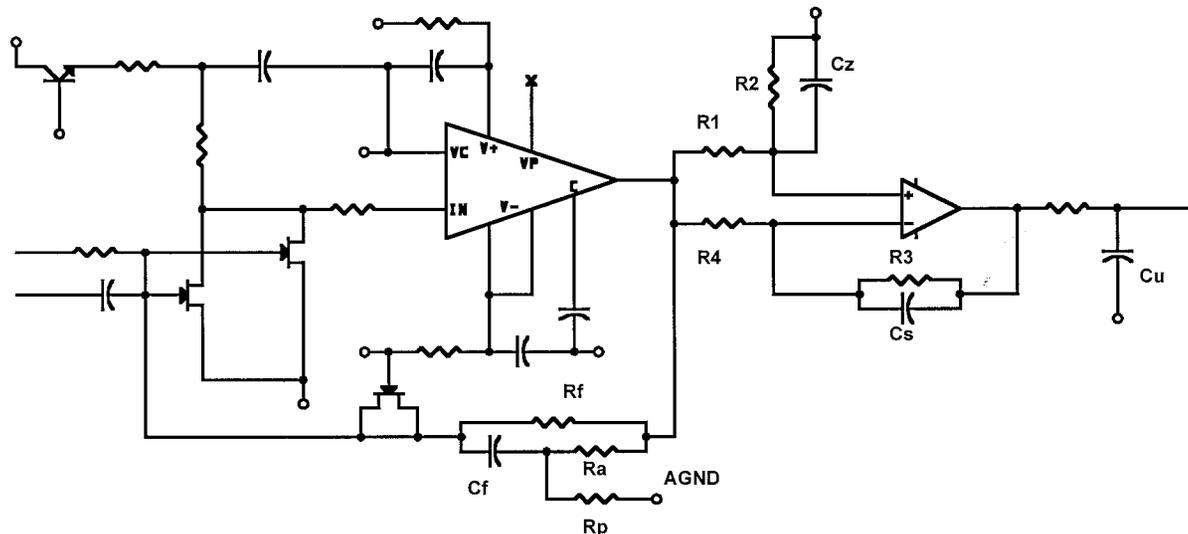
Output of base line restorer

Output of the driver



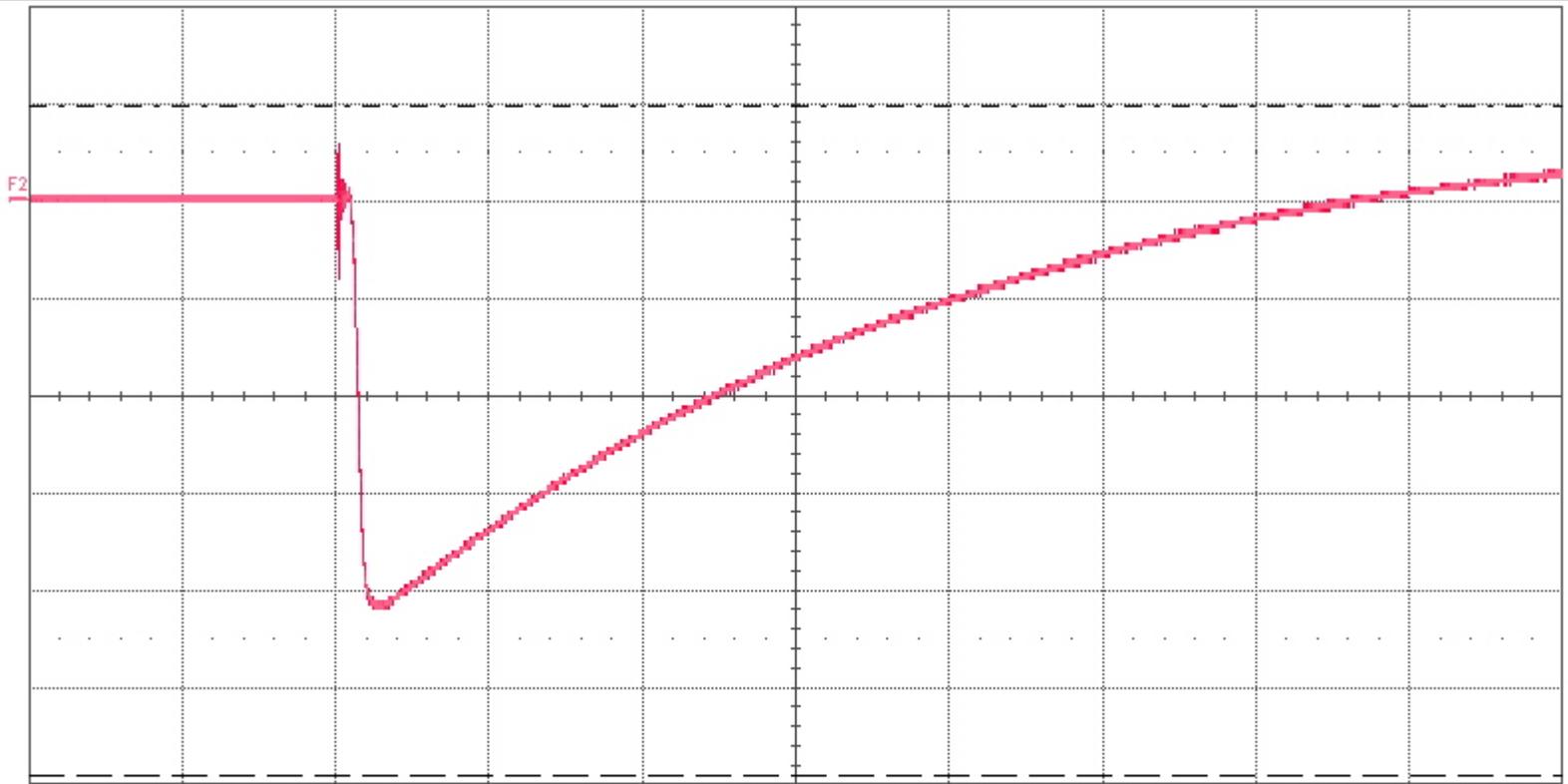
# Esperimento ICARUS

- ✓ Il circuito di front-end è quindi un integratore caratterizzato da una costante di feed back  $\tau_f = R_f C_f$ .
- ✓ Segue un "base line restorer" con la finalità di ridurre le fluttuazioni a bassa frequenza.
- ✓ Si sceglie  $R_f = 120\text{k}\Omega$ , mentre  $C_f = 82\text{pF}$ , in modo da ottenere una costante di integrazione pari a  $10\mu\text{sec}$
- ✓ Il guadagno  $G$  è pari a  $1/C_f = 12\text{mV/pC}$ , abbastanza basso, ma adeguato ad un segnale di singolo fotoelettrone di  $10^6$  elettroni



# Esperimento ICARUS

File Vertical Timebase Trigger Display Cursors Measure Math Analysis Utilities Help C4: Setup...



## Measure

value  
status

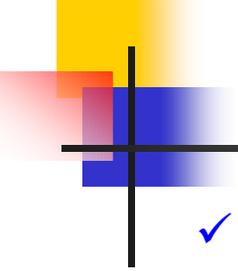
P1:rise(F1)	P2:mean(C1)	P3:rise(C4) 10.152300 $\mu$ s	P4:fall@lv(F2) ---	P5:width(F2) ---	P6:ampl(F2) 236.8 mV
		X	X	X	X

F2 <C4>  
50.0 mV/div  
2.00  $\mu$ s/div  
117 #  
 $\Delta$ y -343.5 mV

Timebase -6.04  $\mu$ s  
2.00  $\mu$ s/div  
50.0 kS 2.5 GS/s  
Trigger **Edge**  
Stop 190 mV  
Edge Positive

LeCroy

4/19/2004 3:34:48 PM



# Timing counter esperimento MEG

- ✓ Nel timing counter dell'esperimento MEG, è necessario un sistema che abiliti la misura del "timing" e l'acquisizione dell'evento.
- ✓ Analogamente deve essere fornita la posizione di impatto delle particelle.
- ✓ Queste informazioni sono fornite da una matrice di fibre ottiche scintillanti: si tratta di scintillatori sotto forma di fibre ottiche. Quanto una particella interagisce con una di queste, nel "core" scintillante viene prodotta luce, che viene guidata verso le estremità della fibra grazie al rivestimento (cladding) della fibra.
- ✓ la fibra ha dimensione contenuta, diametro 5mm, consentendo una elevata risoluzione spaziale, ed inoltre una notevole resa in luce
- ✓ Di conseguenza per problemi di costi e considerate la necessità dimensioni contenute, si è optato per inserire un fotodiodo a valanga ai capi della fibra ottica.
- ✓ Naturalmente, pur avendo una amplificazione interna il segnale di luce deve essere amplificato con un amplificatore di carica

# Timing counter esperimento MEG

✓ Schema del sistema:

