

Particle Detectors

Lecture 19

13/05/15

a.a. 2015-2016

Emanuele Fiandrini

Scintillatori organici

Gli **scintillatori organici** sono dei composti di idrocarburi che contengono delle strutture ad anello di benzene. In questi composti la **luce di scintillazione** deriva da **transizioni** degli **elettroni di valenza liberi** delle molecole.

Questi elettroni non sono associati ad un atomo particolare nella molecola ed occupano gli orbitali molecolari π .

Scintillatori Organici

composti di idrocarburi aromatici contenenti
strutture ad anello benzenico condensate

Caratteristica essenziale: piccolo τ_d (< qualche ns)

Meccanismo di scintillazione: eccitazione di livelli molecolari in un materiale fluorescente primario che diseccitandosi emette luce UV.

Luce UV è facilmente assorbita nella maggior parte dei materiali organici → aggiunta di secondo materiale fluorescente in cui questa luce è convertita in luce visibile: wavelength shifter, i.e. materiale con spettro di assorbimento compatibile con quello di emissione del primario e spettro di emissione adattato alla risposta spettrale del PMT

Scintillatori organici

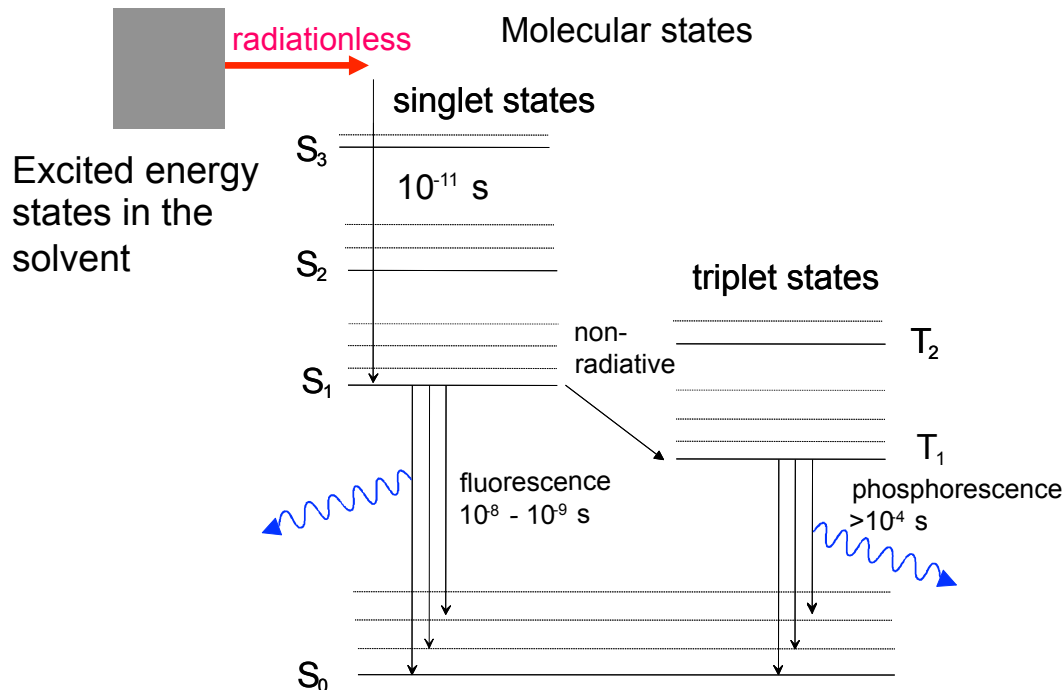
Gli scintillatori organici possono essere:

- ❖ **Cristalli organici** : i più comuni sono **antracene** e **naftalene**.
L'**antracene** è relativamente **lento (30 ns)**, ma dà **abbastanza luce**. Il **naftalene** è **rapido**, ma dà **poca luce**.
- ❖ **Scintillatori liquidi e plastici**: sono quelli più usati.
 - **Liquidi**: sono soluzioni di 1 o più **scintillatori organici** disciolti in un **solvente organico**. L'energia rilasciata dalla particella è, in generale, **assorbita dal solvente e poi rilasciata al soluto** (trasferimento rapido ed efficiente). Il soluto (o i soluti) funzionano da **wave length shifter** ovvero assorbono, ad esempio, nell'ultravioletto ed emettono nel visibile.
 - **Plastici**: sono del tutto analoghi agli scintillatori liquidi per il funzionamento e la composizione (**solvente e soluto/i**), ma sono solidi.

Liquid and plastic scintillators

They **usually** consist of a **solvent + scintillator** and a secondary fluor as **wavelength shifter**.

A traversing ionizing particle releases energy in the solvent. Then, energy flows **radiationless*** to the scintillator. Finally, light emitted by the scintillator is absorbed (**radiative transfer****) and re-emitted at longer wavelength by the secondary fluor.

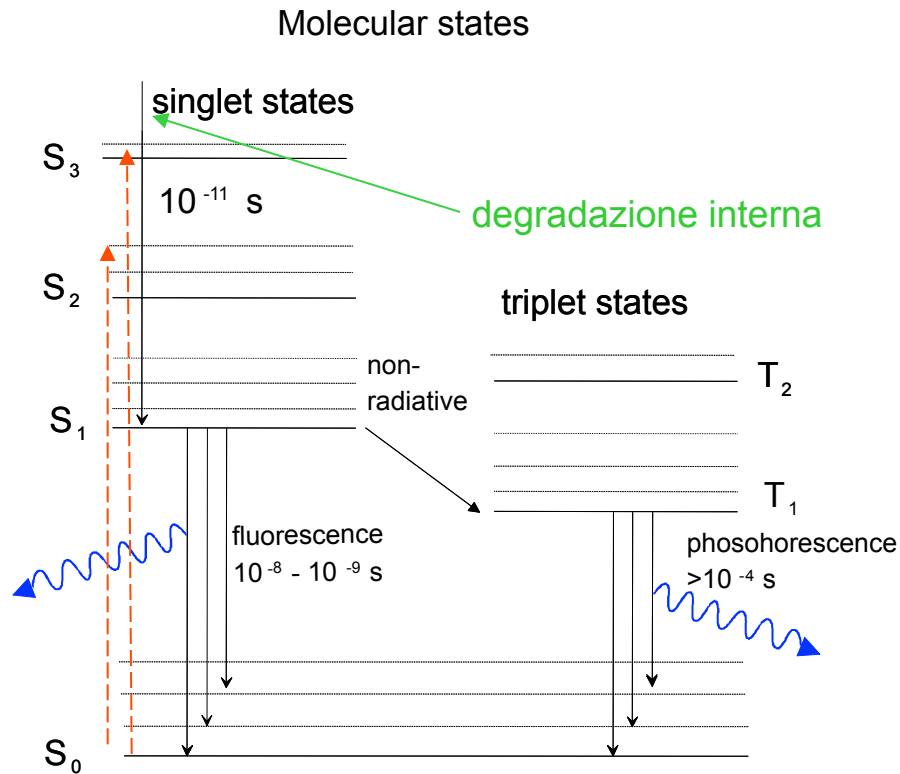


A fluor has its absorption and emission spectra shifted. The two peaks difference is called **Stokes shift**

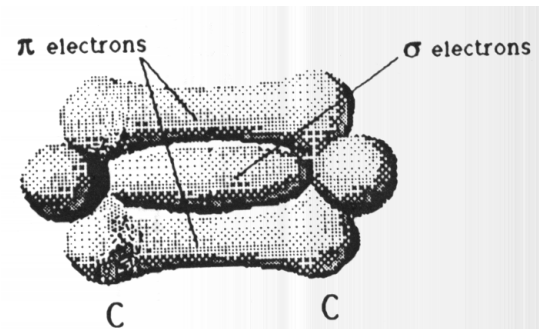
***fast and local energy transfer via non-radiative dipole-dipole interactions (**Förster transfer**).**

**** $\sim 1/R^2$ light attenuation**

Scintillatori organici

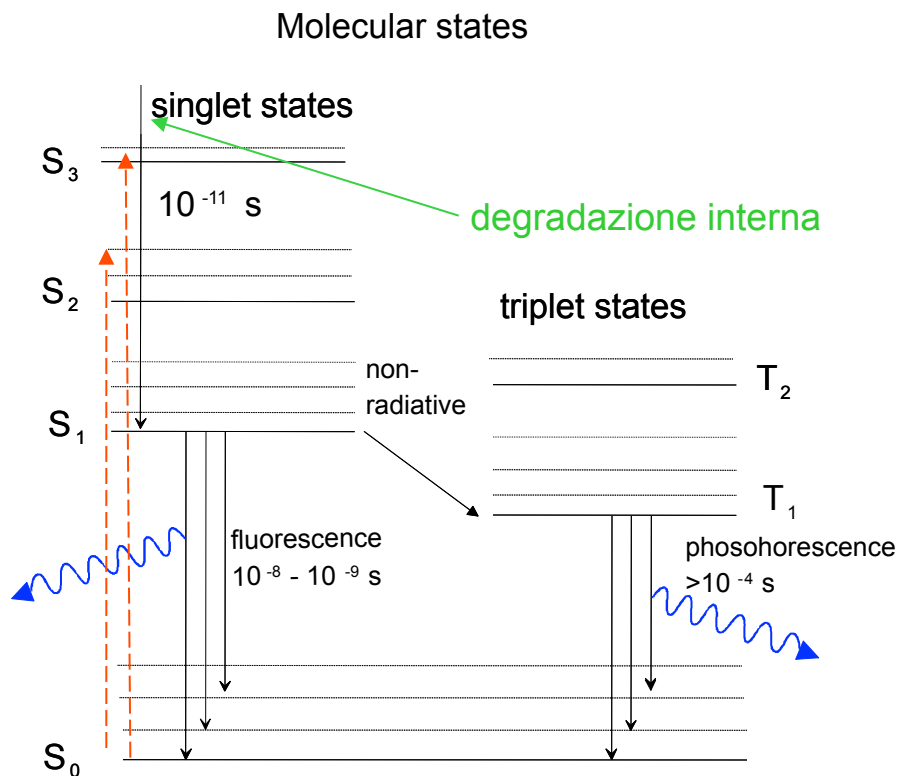


Scintillation is based on the 2π electrons of the C-C bonds.



Emitted light is in the UV range.

Scintillatori organici



L'energia rilasciata dalla particella eccita sia i livelli elettronici che vibrazionali.

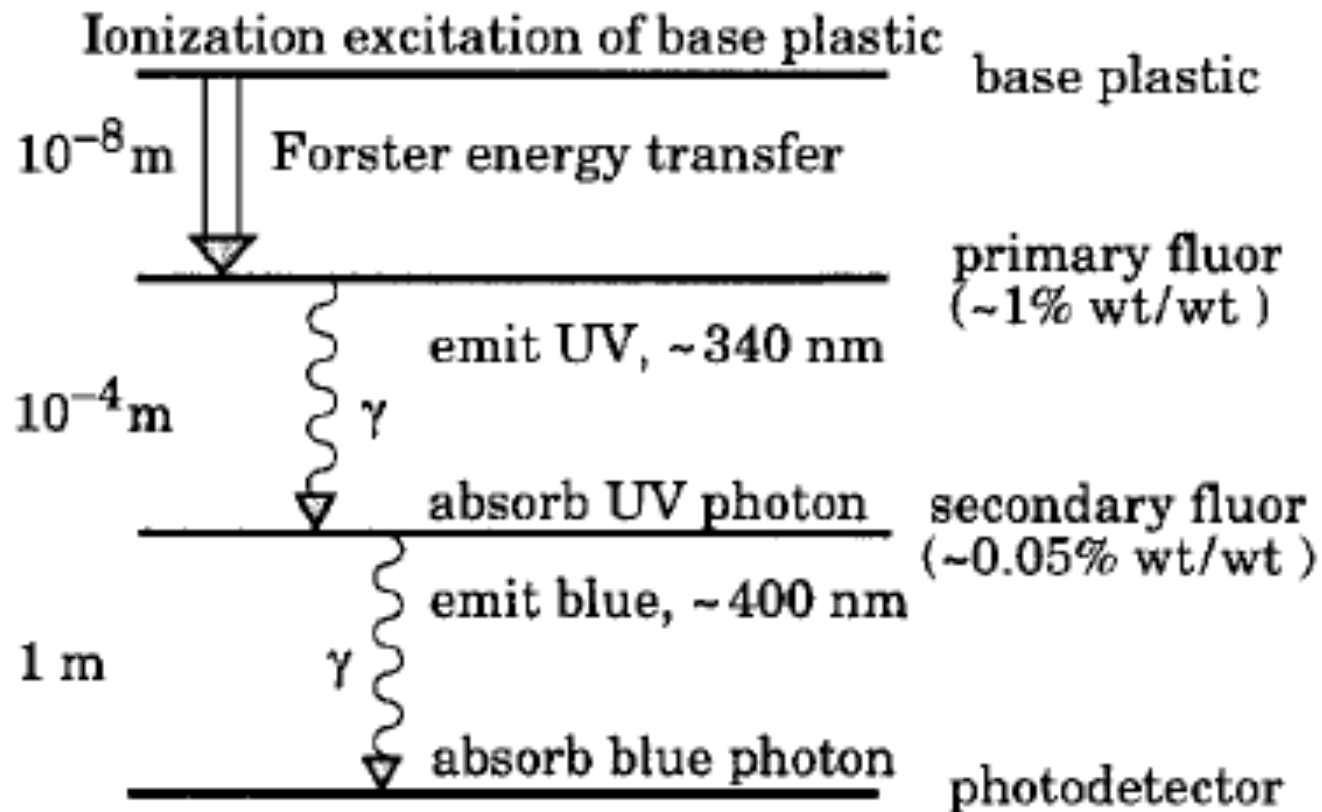
(Linee rosse tratteggiate)

Le eccitazioni dello stato di **singoletto** decadono in ≤ 10 ps senza emettere radiazione (**degradazione interna**).

dallo stato S_1 è facile decadere nello stato fondamentale S_0 con **emissione di luce di fluorescenza** in $1 \div 10$ ns.

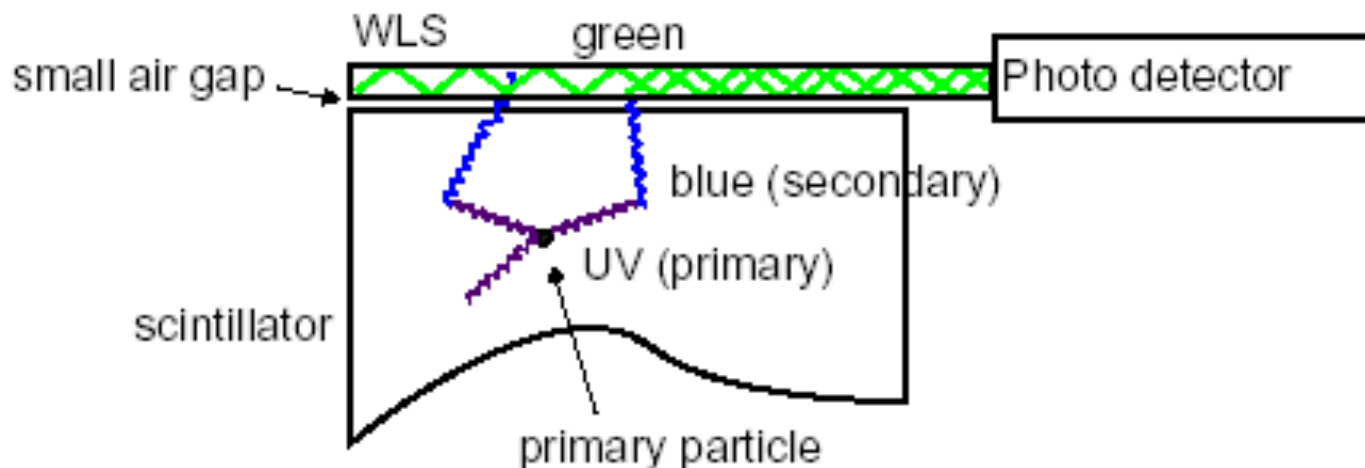
Analogamente dallo stato di **tripletto** si arriva tramite **degradazione interna** allo stato T_1 e poi si scende a T_0 in maniera complessa con **emissione di luce di fosforescenza** (lenta $> 10^{-4}$ s)

Energy transfer during scintillation



Wave length shifter

- Barre di wavelength shifter (WLS)



Per grandi aree si usano sbarrette di BBQ, Y7, K27. Assorbono sui 400nm e riemettono sui 500 nm. Hanno una lunghezza di assorbimento per lo spettro emesso (~500nm) fino a 10 m.

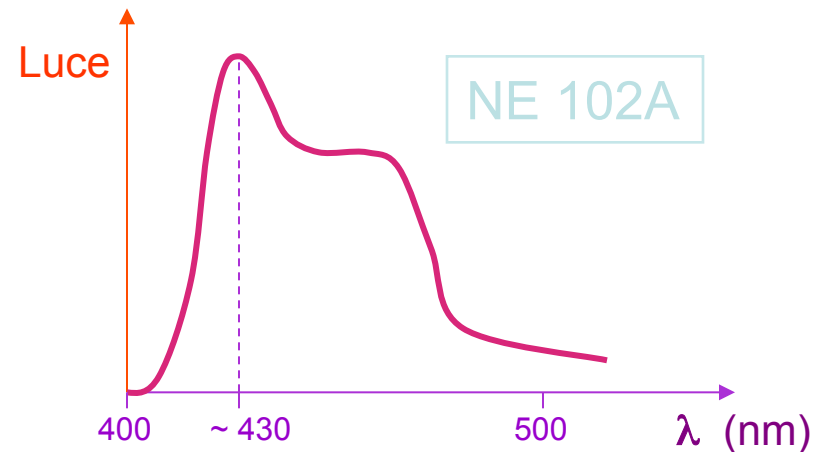
Scintillatori Organici

Particolarmente usati sono i plastici:

- $\tau_d = 2 \div 3$ ns
- grande quantità di luce

- Inoltre:
- facilmente sagomabili (film sottili, fogli, blocchi, cilindri)
 - resistenti all'acqua pura e a colle al silicio
 - basso costo

N.B. – basso $Z \rightarrow$ adatti per rivelazione di e^-



Svantaggi: facilmente attaccati da solventi organici (acetone)

Scintillatori organici

Solventi e soluti comunemente usati :

	solvent	secondary fluor	tertiary fluor
Liquid scintillators	Benzene Toluene Xylene	p-terphenyl DPO PBD	POPOP BBO BPO
Plastic scintillators	Polyvinylbenzene Polyvinyltoluene Polystyrene	p-terphenyl DPO PBD	POPOP TBP BBO DPS

Scintillatori organici

I tempi di risposta degli scintillatori liquidi e plastici sono brevi:

❖ Liquidi : $3 \div 4$ ns

❖ Solidi : $2 \div 3$ ns

Attenzione: gli scintillatori organici hanno basso Z (sono H,C) $\rightarrow$ scarsa efficienza per rivelare γ (praticamente solo effetto Compton).

Ricordiamo infatti che l'effetto fotoelettrico va come Z^5 e la produzione di coppie come Z^2 , mentre l'effetto Compton è lineare in Z

Hanno invece alta efficienza per rivelare neutroni (reazioni $n+p \rightarrow n+p$).

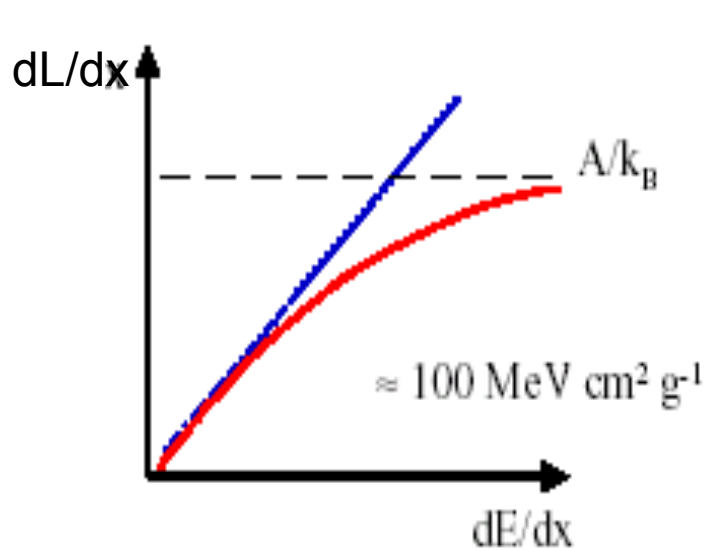
Scintillatori organici

Proprietà di alcuni scintillatori organici

materiale	densità (g/cm ³)	n	λ (nm)	τ (ns)	scint. rel antr	H/C	note	yeild/ NaI
naphthalene	1.15	1.58	348	11	11	0.800	monocrist.	
anthracene	1.25	1.59	448	30-32	100	0.714	monocrist.	0.5
NE 102 A	1.032	1.58	425	2.5	65	1.105	Nucl. Ent.	
NE 104	1.032	1.58	405	1.8	68	1.100	Nucl. Ent.	
NE 110	1.032	1.58	437	3.3	60	1.105	Nucl. Ent.	
BC 412	1.032	1.58	434	3.3	60	1.104	Bicron	
BC 414	1.032	1.58	392	1.8	68	1.110	Bicron	
BC 416	1.032	1.58	434	4.0	50	1.110	Bicron	

Scintillatori organici

La risposta degli scintillatori plastici non è lineare con la perdita di energia, ma vale la formula empirica di **Birk**.



Luce emessa per unità di lunghezza

$$\frac{dL}{dx} = \frac{A \cdot \frac{dE}{dx}}{1 + k_B \cdot \frac{dE}{dx}}$$

J.B.Birks, Proc. Phys. Soc. A64,874 (1951)

Esistono anche altri modelli e parametrizzazioni

La luce è ridotta a causa della ricombinazione delle molecole eccitate → la non linearità è proporzionale a dE/dx .

Per piccoli dE/dx è praticamente lineare.

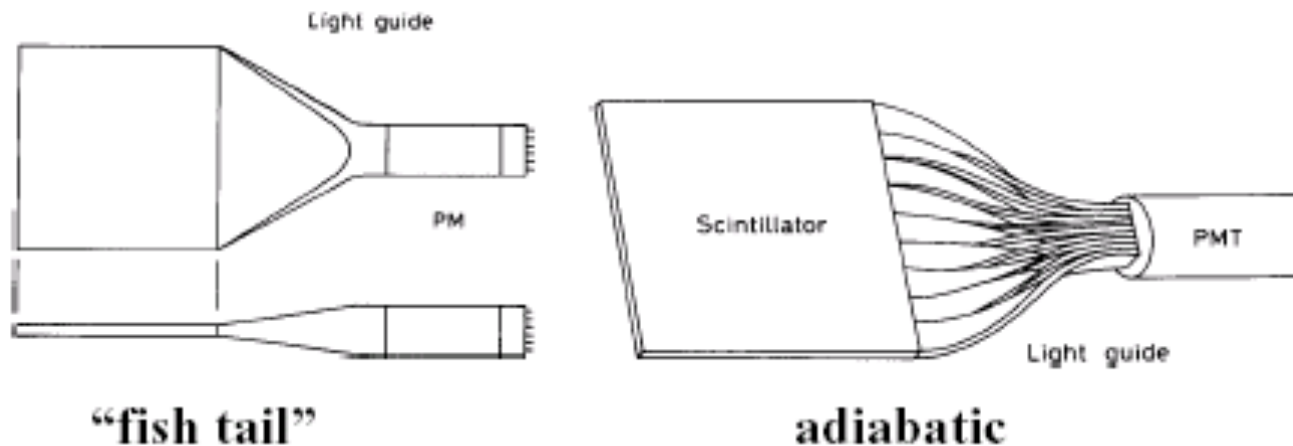
Un altro effetto non totalmente capito è la dipendenza della luce di scintillazione dal campo magnetico. (cresce al crescere di B di qualche %)

Guide di luce

Lettura della luce di scintillazione.

Normalmente la luce di scintillazione viene letta tramite un fototubo. Bisogna quindi adattare sia geometricamente che spettralmente la luce di scintillazione allo spettro e dimensioni del PM.

- **Guide di luce:** la luce viene trasferita tramite riflessione totale. Gli indici di rifrazione della guida e dello scintillatore sono praticamente uguali.



Guide di luce

Trasmissione della luce attraverso guide di luce

Quando si accoppia uno scintillatore ad un fototubo la tentazione di adattare uno scintillatore di grossa area ad un piccolo fototubo è grande. In questo modo si risparmierebbe notevolmente (Ad esempio usando come rivelatori dei fotodiodi che costano pochissimo).

Ma qual è l'efficienza di trasmissione della luce?

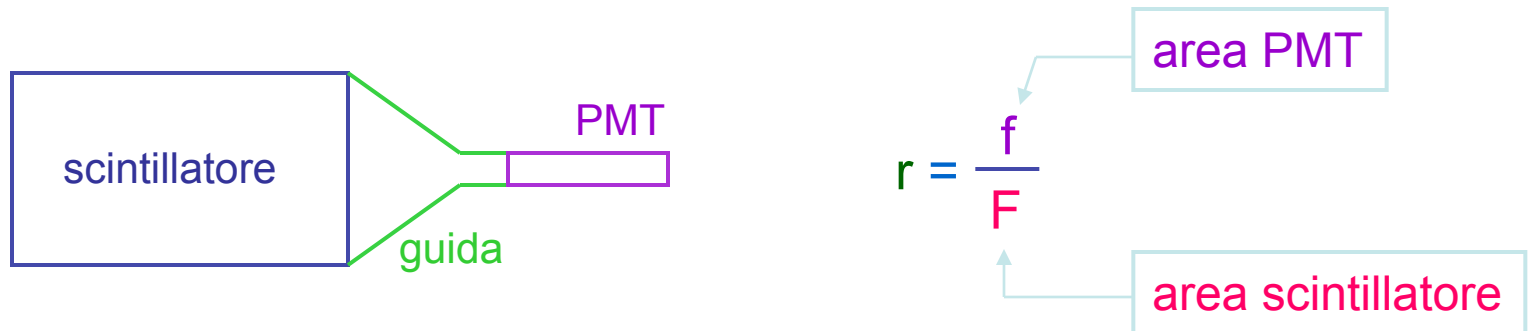
L'efficienza di trasmissione della luce è limitata da:

- L'angolo di riflessione totale
- Conservazione dello spazio delle fasi (teorema di Liouville)

Guida di Luce

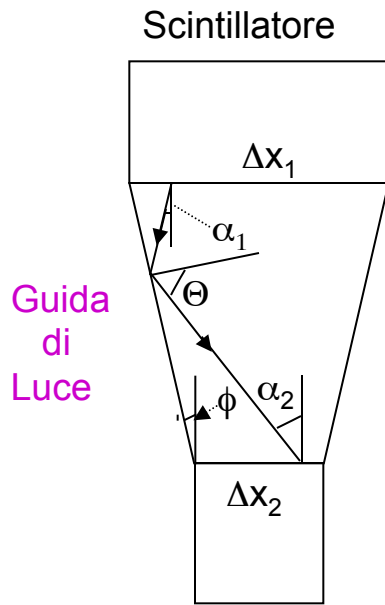
Sistema di trasporto della luce di scintillazione verso il PMT

Materiale plastico (plexiglass) opportunamente sagomato in modo da adattare la superficie di uscita dello scintillatore con quella d'ingresso del PMT → solo una frazione r della luce prodotta raggiunge il PMT



aumento di r per mezzo di geometrie più complicate (twisted): strisce separate di plexiglass attaccate all'estremità dello scintillatore e attorcigliate in modo da convergere nel PMT

Guide di luce



Abbiamo visto che la riflessione interna totale permette un angolo massimo:

$$\alpha_2 = \frac{\pi}{2} + \phi - \Theta$$

per cui:

$$\sin \alpha_2 = \sin \left(\frac{\pi}{2} + \phi - \Theta \right) = \cos(\Theta - \phi) = \sqrt{1 - \sin^2(\Theta - \phi)}$$

e nell'ipotesi che $\phi \ll \Theta$:

$$\sin \alpha_2 \approx \sqrt{1 - \sin^2 \Theta} = \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}$$

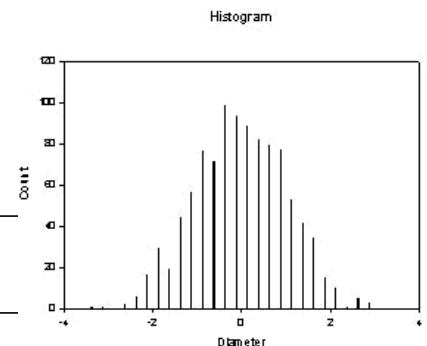
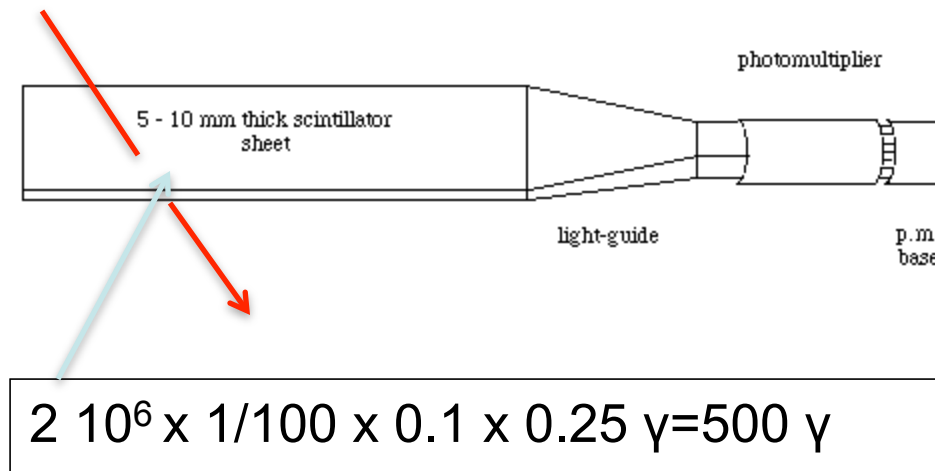
➔ il massimo angolo di accettazione all'ingresso della guida imposto dallo spazio delle fasi è:

$$\sin \alpha_1 = \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} \sin \alpha_2 = \frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} \sqrt{1 - \frac{1}{n^2}}$$

Scintillatori e guide di luce hanno tipicamente $n=1.5 \rightarrow \sin \alpha_1=0.75$

Scintillazione Ordini di grandezza

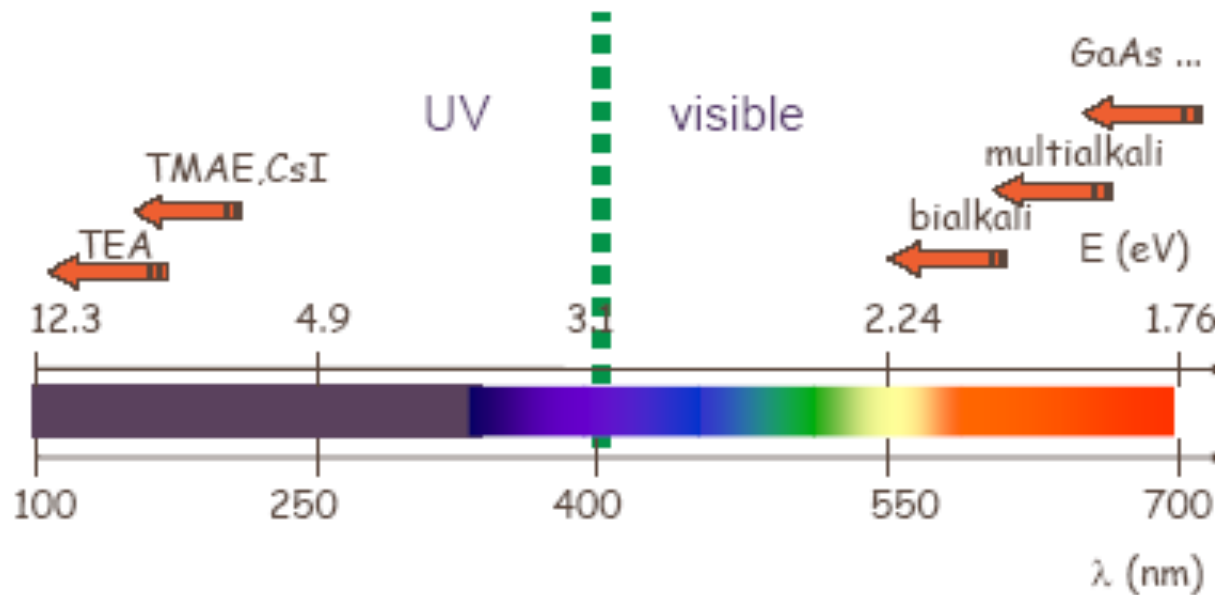
- Perdita di energia in plastica: $\sim 2 \text{ MeV/cm}$
- Efficienza di scintillazione: $\sim 1\gamma/100 \text{ eV}$
- Efficienza di raccolta: ~ 0.1
- Efficienza del fotocatodo: ~ 0.25



Fotorivelatori

Fotorivelatori

Scopo dei vari fotorivelatori è quello di convertire la luce in segnali elettrici rivelabili. Lo spettro che ci interessa va normalmente dall'ultravioletto al visibile.



Fotorivelatori

Requisiti di un fotorivelatore:

- ❑ Alta sensibilità, normalmente indicata come Efficienza Quantica
 $Q.E. = N_{p.e.} / N_{fotoni}$

I fotorivelatori possono essere suddivisi nelle seguenti categorie:

- ❑ Fotorivelatori a gas (e.g. vedi RICH)
- ❑ Fotorivelatori sottovuoto (e.g. PM)
- ❑ Fotorivelatori a stato solido (e.g. diodi)

Fotorivelatori

Il Fotomoltiplicatore

(Philips
Photonic)



Rivelatori di Particelle

Fotorivelatori

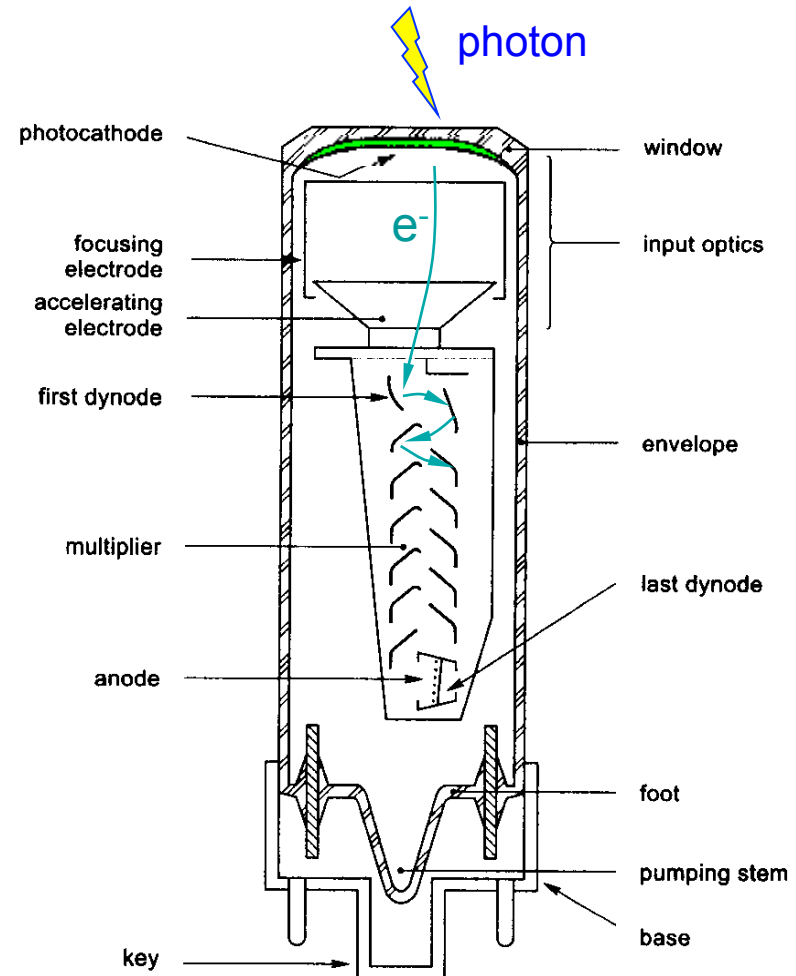
Il **fotomoltiplicatore (PM)** consiste in un **catodo** di materiale **fotosensibile** seguito da un sistema di **raccolta degli elettroni**, una sezione di **moltiplicazione degli elettroni (dinodi)** ed infine da un **anodo** dal quale si preleva il **segnale elettrico**. Tutto il sistema sta in un tubo di vetro sotto vuoto.

Quando è in funzione si alimenta con una **tensione negativa** il **catodo** (a massa l'anodo) ed i **dinodi** ad una **tensione degradante** dal valore catodico a quello dell'anodo, come si può ottenere da un partitore di tensione.

Quando un **fotone** urta il **fotocatodo** viene emesso un **elettrone** per effetto **fotoelettrico**. A causa della d.d.p. applicata viene **focalizzato ed accelerato** sul primo dinodo e, colpendolo, si ha **emissione secondaria di elettroni**.

I nuovi elettroni vengono accelerati dal campo elettrico sul secondo, terzo ... dinodo, producendo un **fascio di elettroni diretti verso l'anodo**.

All'**anodo** questo sciame di elettroni viene **raccolto** e fornisce un **segnale di corrente** che può essere ulteriormente amplificato e analizzato.



Tubo elettronico che converte la luce in corrente elettrica misurabile

Fotorivelatori

I **fotomoltiplicatori** possono funzionare sia in **continua**, ovvero con un'illuminazione costante, sia in **modo pulsato**, come nel caso di PM accoppiati a scintillatori.

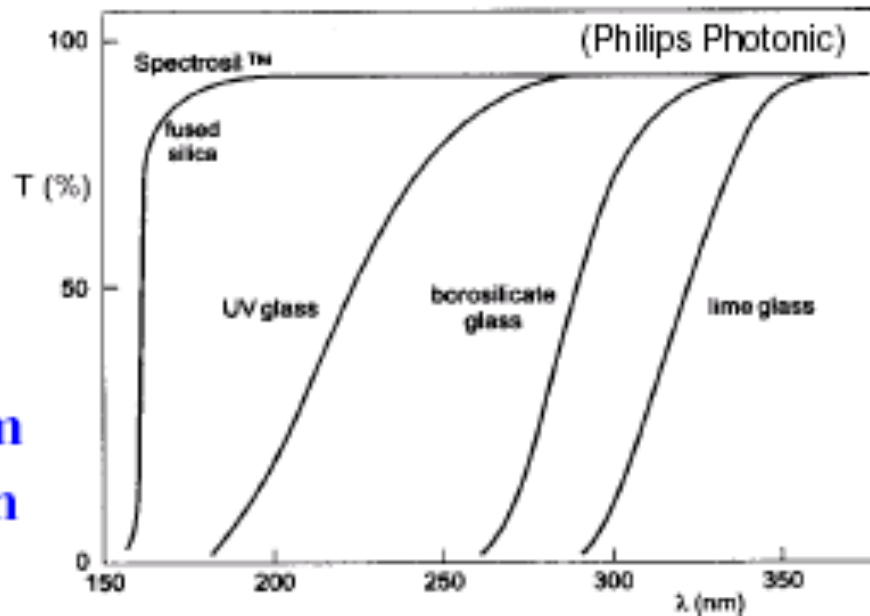
In ogni caso, se il catodo ed il sistema di dinodi sono **lineari** (come è il caso se operati bene), la corrente all'anodo è direttamente proporzionale al numero di fotoni incidenti, a sua volta in generale **proporzionale all'energia rilasciata nello scintillatore**.

Fotorivelatori

Il **fotocatodo** converte la luce incidente in una corrente di elettroni, via effetto fotoelettrico. Per facilitare il passaggio della luce il materiale fotosensibile è depositato su uno strato sottile all'interno della **finestra** del PM in generale fatta di **vetro o di quarzo**.

**Transmission
of various
PM windows**

**not shown:
MgF₂: cut @115 nm
LiF: cut @105 nm**



Fotorivelatori

L'energia cinetica degli elettroni emessi dal fotocatodo è :

$$T = h\nu - \phi$$

dove ϕ è l'energia per strappare l'elettrone dall'atomo e ν la frequenza della luce incidente.

È quindi chiaro che serve un'energia minima del fotone per poter avere effetto fotoelettrico. Al di sopra di questa soglia tuttavia la probabilità di avere effetto fotoelettrico è ben diversa da 1. Dipende infatti fortemente dalla frequenza della luce incidente e dal materiale del fotocatodo. Questa probabilità è chiamata **efficienza quantica** (Q.E.)

$$Q.E. = \# \text{ fotoelettroni} / \# \text{ fotoni incidenti } (\lambda)$$

Una quantità equivalente è la **sensibilità irraggiante** del catodo definita da:

$$sk_e(\lambda) = I_k / P(\lambda)$$

dove I_k è la corrente di elettroni fotoemessi dal catodo e $P(\lambda)$ è la potenza (di fotoni) incidente.

la sensibilità irraggiante è connessa alla Q.E.:

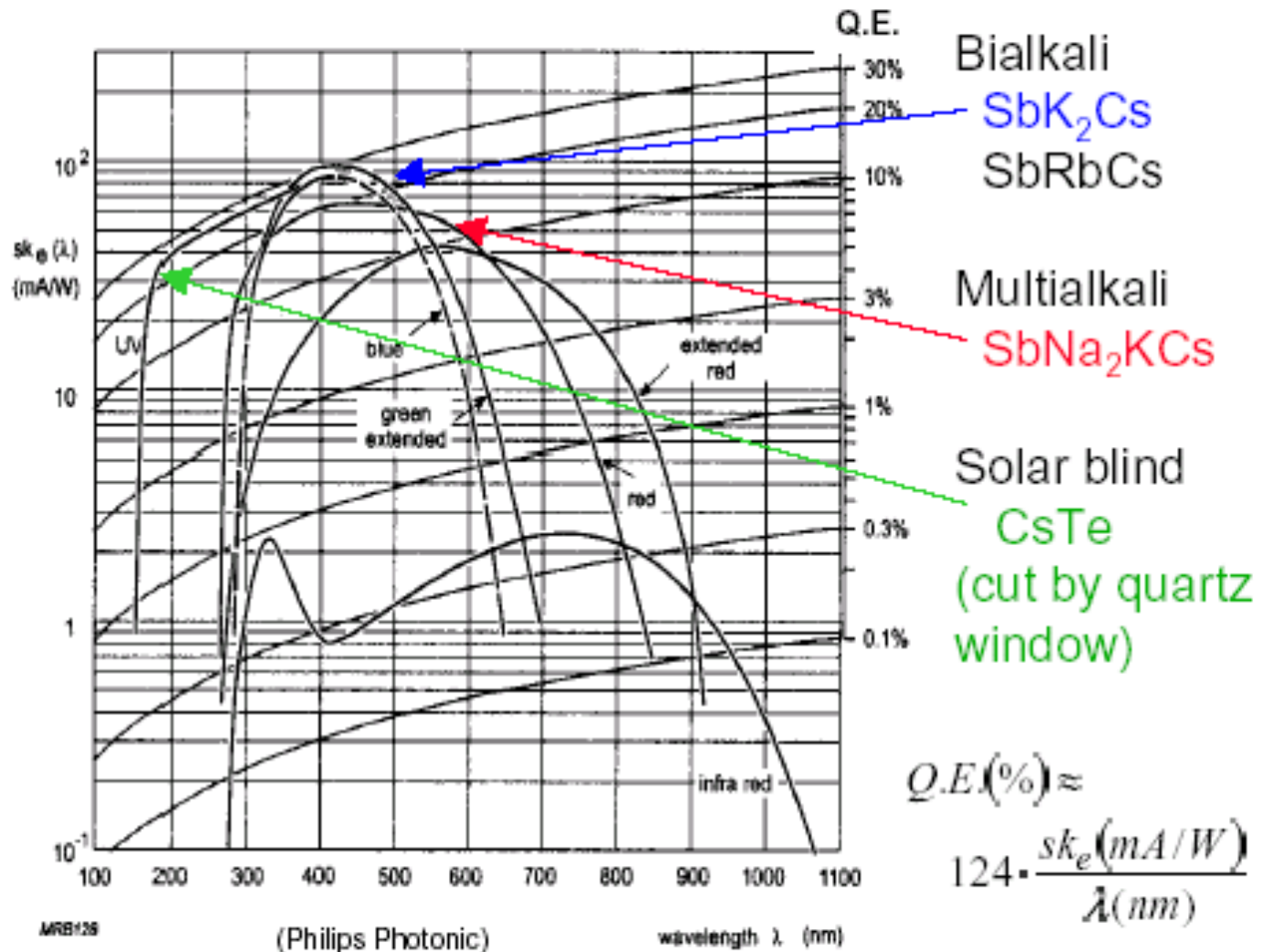
$$sk_e(\lambda) = (\lambda \cdot Q.E.(\lambda) \cdot e) / hc$$

Se $sk_e(\lambda)$ è misurata in A/W e λ in nm si ha:

$$sk_e(\lambda) = (\lambda \cdot Q.E.(\lambda)) / 1240 \text{ [A/W]}$$

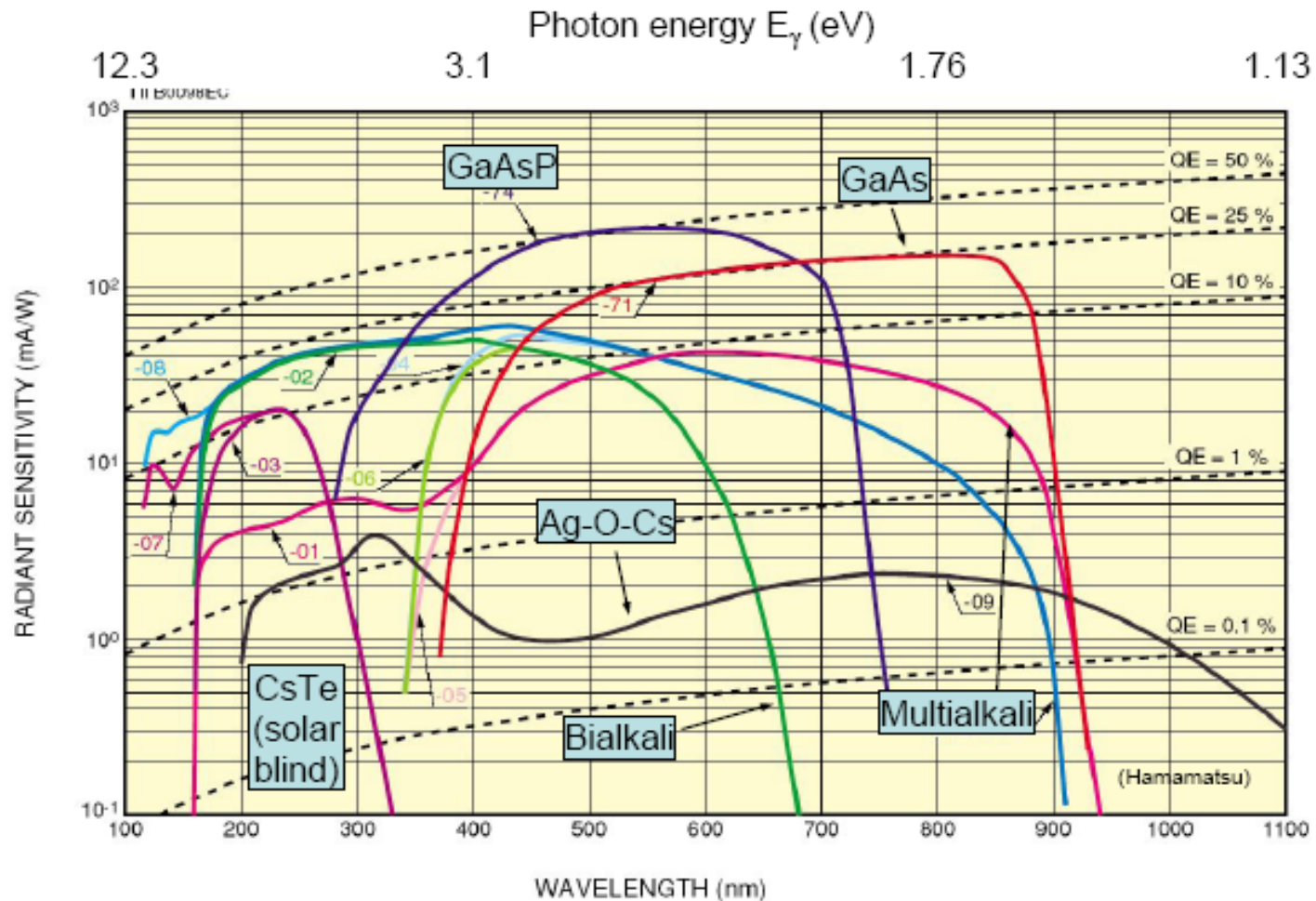
Fotorivelatori

Efficienza Quantica di fotocatodi tipici:



Fotorivelatori

QE's of typical photo-cathodes



Bialkali: SbKCs, SbRbCs Multialkali: SbNa₂KCs (alkali metals have low work function)

Fotorivelatori

Lo stadio di moltiplicazione

Lo stadio di moltiplicazione amplifica la debole corrente di elettroni prodotta dal fotocatodo, tramite una serie di elettrodi (**dinodi**) in modo da produrre una corrente misurabile all'anodo.

I dinodi sono di materiale tipo BeO oppure Mg-O-Cs, per assicurare un'alta emissione secondaria. Sono infatti necessarie:

- ❖ Alta emissione secondaria g per ogni dinodo. Per energie degli elettroni da 100 a 200 eV (tipici voltaggi di accelerazione fra i vari dinodi) si hanno dai 3 ai 5 elettroni secondari emessi, per ogni elettrone primario.
- ❖ Stabilità dell'emissione secondaria anche con alte correnti.
- ❖ Basso rumore (bassa emissione termoionica)

Fotorivelatori

I PM più usuali hanno 10÷14 stadi con guadagni totali fino a $10^6 \div 10^7$.

Se il guadagno di ogni dinodo è g_i in un PM con N dinodi avremo un guadagno totale G pari a:

$$G = \prod_{i=1}^N g_i$$

Esempio: 13 dinodi con guadagno=4 per ogni dinodo. $\rightarrow G=4^{13} \approx 7 \times 10^7$. La carica che arriva all'anodo è $\sim Q=eG=1.1 \times 10^{-11}$ C che, raccolta in 5 ns fornisce una corrente $i=dQ/dt \approx 2.2$ mA. Se l'anodo è terminato su $50 \Omega \rightarrow V=R(dQ/dt) \approx 110$ mV.

Fotorivelatori

Partitore di tensione

Normalmente i dinodi sono connessi ad una catena resistiva.

Possono avere resistenze uguali per cui il guadagno per ogni dinodo è uguale, essendo:

$$g_i = KV_i$$

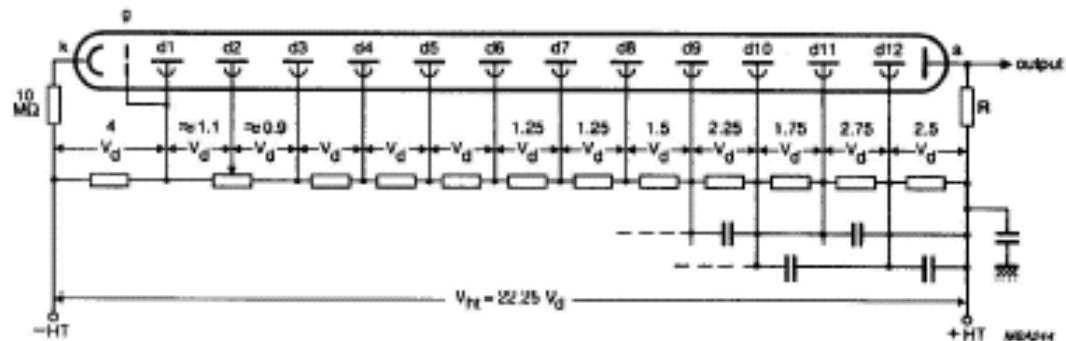
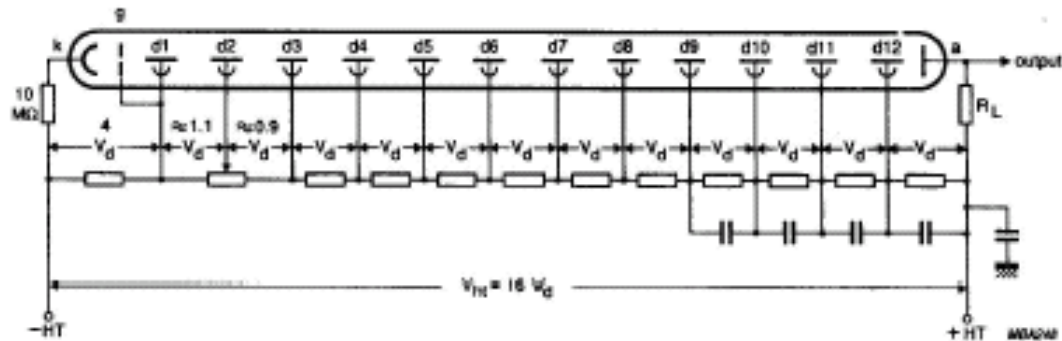
dove V_i è la differenza di potenziale fra due dinodi adiacenti.

Possono anche avere resistenze diverse.

Gli ultimi dinodi sono inoltre connessi a delle capacità, usate per mantenere costante la V_i . Possibile usare degli Zener sugli ultimi dinodi.

Fotorivelatori

Esempi di partitori di tensione.



Fotorivelatori

Risposta temporale

2 effetti principali condizionano la risoluzione temporale di un fotomoltiplicatore:

- 1) **Variazione del tempo di transito degli elettroni nel PM.** 2 origini principali:
1 puramente geometrica dovuta ai diversi punti di emissione dal fotocatodo e quindi (se il fotocatodo è grande) diversi percorsi geometrici. L'altra dipende dalla direzione e dall'energia degli elettroni emessi.
 - a) Elettroni più veloci raggiungeranno il primo dinodo prima di quelli più lenti.
 - b) Elettroni quasi ortogonali al catodo raggiungeranno il primo dinodo prima di quelli emessi // al fotocatodo.

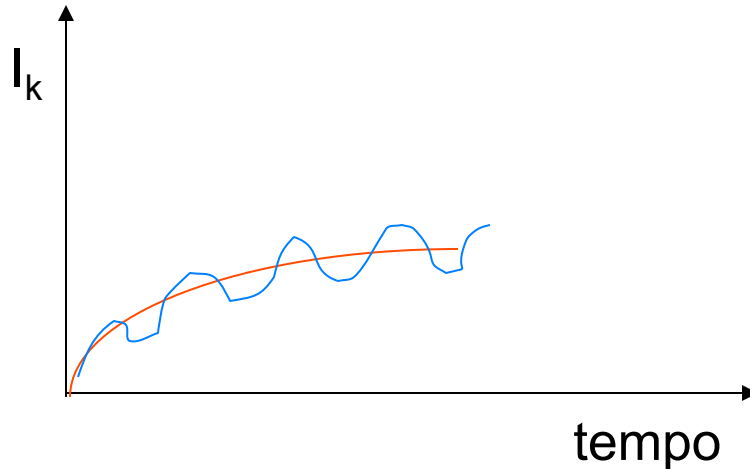
La somma dei 2 effetti è dell'ordine di **0.2÷0.5 ns** (per fototubi veloci).
Può essere ridotta con **catodi sferici** ed aumentando il **campo elettrico**.

Attenzione: non confondere la risoluzione temporale, con il tempo di transito totale (~40ns)

Fotorivelatori

Risposta temporale (continua)

- 2) **Rumore statistico**. La risoluzione temporale risente della natura statistica dell'effetto fotoelettrico e dalla natura statistica del processo di emissione secondaria.

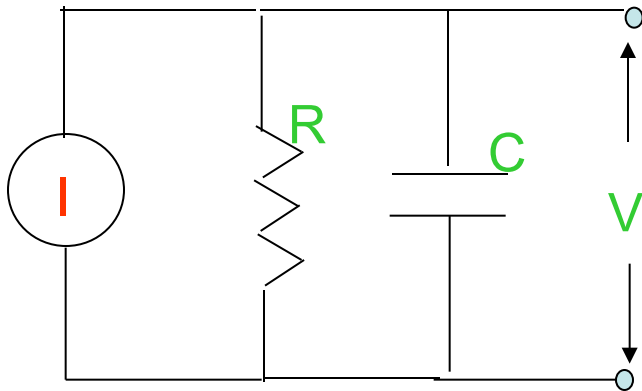


Rumore statistico di un
PM illuminato con luce
costante

Fotorivelatori

Forma dell'impulso e tempo di salita

Il segnale di uscita all'anodo è un segnale in corrente (o carica) proporzionale al numero di elettroni emessi dal catodo → il PM è un generatore di corrente.



La resistenza **R** e la capacità **C**, rappresentano la resistenza e la capacità dell'anodo oltre a quelle di ogni elemento del circuito di uscita (**R di carico sull'anodo, cavi ecc.**)

$$I(t) = \frac{V}{R} + C \cdot \frac{dV}{dt}$$

Fotorivelatori

La corrente all'anodo è, assumendo che l'ingresso è la luce di uno scintillatore, descritta da un decadimento esponenziale :

$$I(t) = \frac{GNe}{\tau_s} \cdot e^{-t/\tau_s}$$

dove **G** è il guadagno totale del PM, **N** il numero di fotoelettroni emessi al catodo, **e** la carica dell'elettrone e τ_s la costante di tempo di decadimento dello scintillatore.



$$V(t) = \begin{cases} -\frac{GNeR}{\tau - \tau_s} \left[e^{-t/\tau_s} - e^{-t/\tau} \right] & \tau \neq \tau_s \\ \frac{GNeR}{\tau_s^2} \cdot t \cdot e^{-t/\tau_s} & \tau = \tau_s \end{cases}$$

dove $\tau = RC$

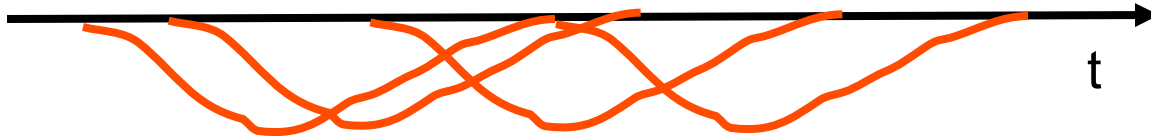
Fotorivelatori

Per $\tau \ll \tau_s$, il segnale $V(t)$ è piccolo, ma riproduce il tempo di decadimento del segnale d'ingresso. Il tempo di salita è rapido ed è $\sim \tau = RC$ del circuito d'uscita → **funzionamento in corrente** (la tensione $V(t)$ è data dalla corrente che passa in R , $V(t) = RI(t)$).

Per $\tau \gg \tau_s$ il segnale $V(t)$ è più grande, ma il tempo di decadimento è dominato da $\tau = RC$ del circuito d'uscita. Il tempo di salita del segnale è dato da τ_s → **funzionamento in voltaggio** (corrente integrata da C , $V(t)$ è dato dal voltaggio ai capi del condensatore C .)

Fotorivelatori

Il modo di funzionamento in voltaggio è preferito (**segnale più grande e che fluttua poco perché integrato su C**), ma rate raggiungibile minore in quanto gli impulsi si possono sovrapporre. Il rate è limitato a $1/\tau$



La RC del circuito di uscita deve essere adattata allo scintillatore usato
→ si modifica la R dell'anodo in modo da ottenere la RC voluta. La capacità C è mantenuta molto bassa (**cavi corti**) per massimizzare l'ampiezza del segnale.

Fotorivelatori

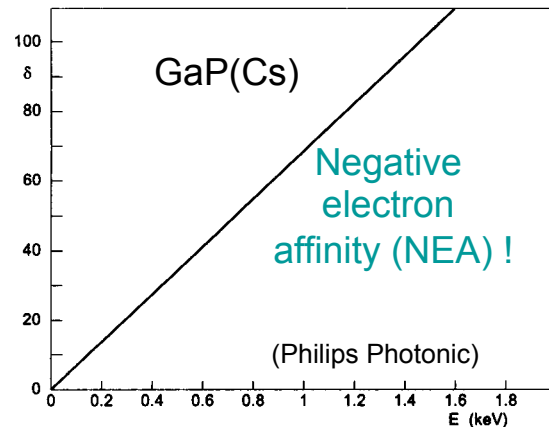
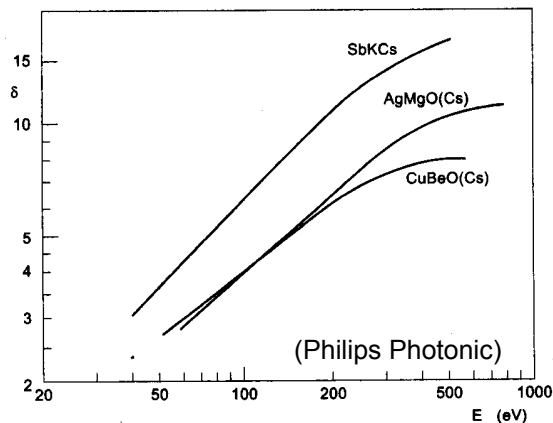
Risoluzione in energia

La risoluzione in energia è determinata dalle fluttuazioni del numero di elettroni secondari emessi dai dinodi.

Poisson distribution: $P(\bar{n}, m) = \frac{\bar{n}^m e^{-m}}{m!}$

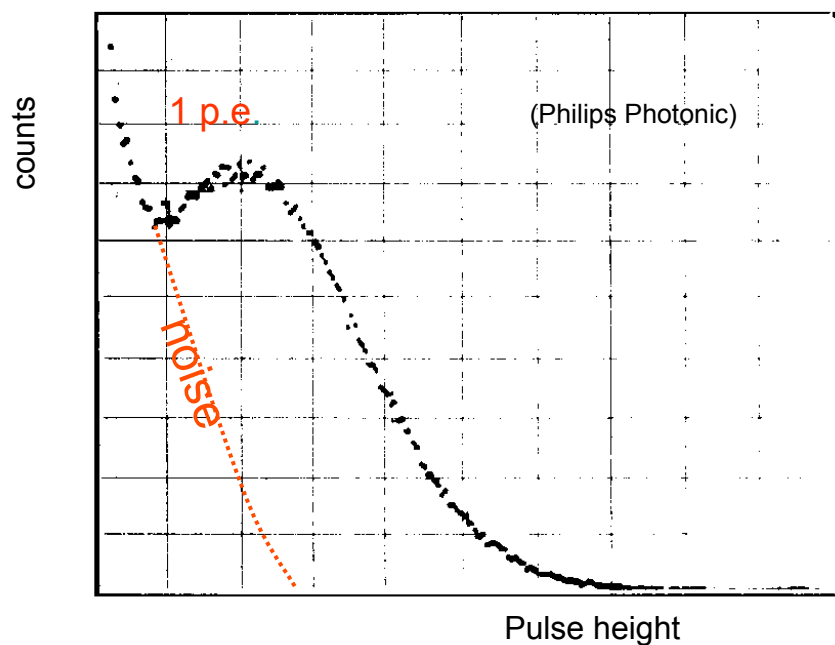
Relative fluctuation: $\frac{\sigma_n}{\bar{n}} = \frac{\sqrt{\bar{n}}}{\bar{n}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}}$

Fluttuazioni più grandi se $\langle n \rangle$ piccolo $\rightarrow$ primo dinodo

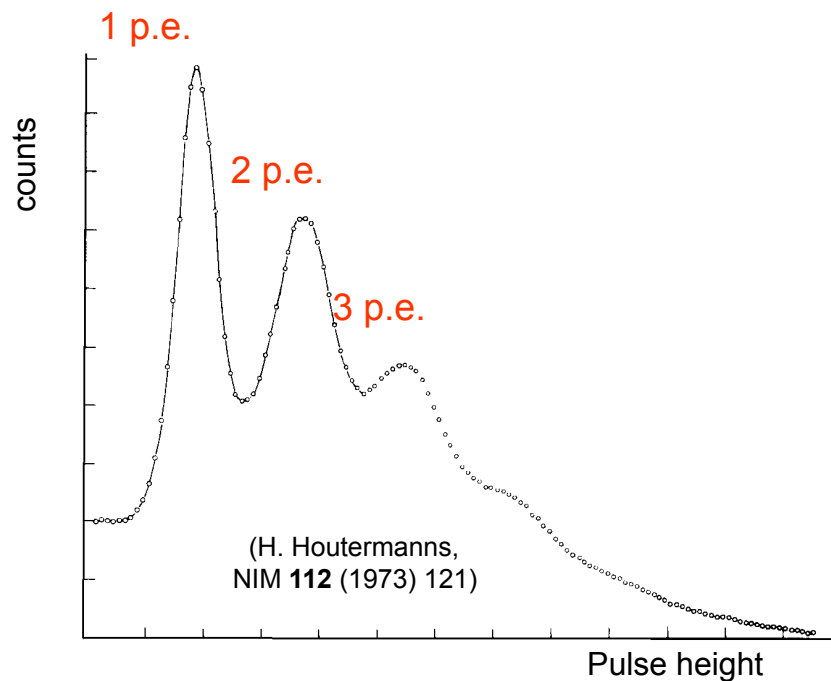


Fotorivelatori

Altezza d'impulso con dinodi di Cu-Be



Altezza d'impulso con dinodi con affinità negativa (NEA)



Fotorivelatori

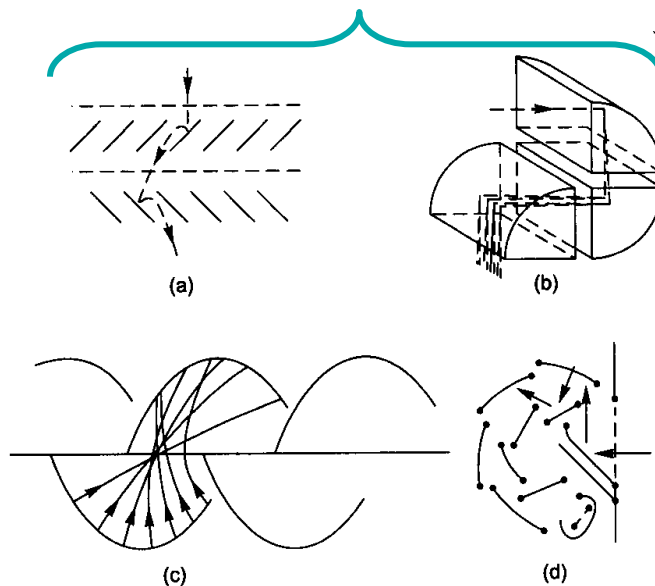
Fattori ambientali

- I PM sono molto sensibili alla luce → non metterli ad alta tensione alla luce. Possono recuperare (a volte) se tenuti dopo il misfatto luminoso al buio per molto tempo.
- I PM sono estremamente sensibili ai campi magnetici, sentono pure quello terrestre (fotoelettroni quasi fermi all'emissione dal catodo) → schermarli con μ -metal.

Fotorivelatori

Configurazione dei dinodi

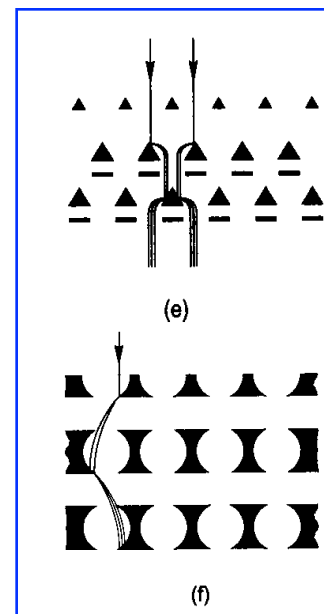
traditional



(Philips Photonics)

Dynode configurations: (a) venetian blind, (b) box, (c) linear focusing, (d) circular cage, (e) mesh and (f) foil

New 'micro-machined' structures



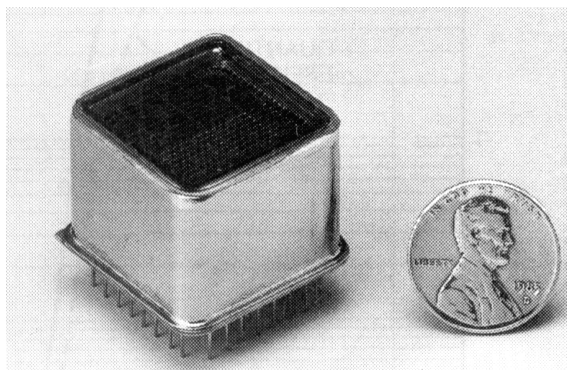
position
sensitive
PMT's

Rivelatori di Particelle

Fotorivelatori

PM a molti anodi

example: Hamamatsu R5900 series.



Up to 8x8 channels.

Size: 28x28 mm².

Active area 18x18 mm² (41%).

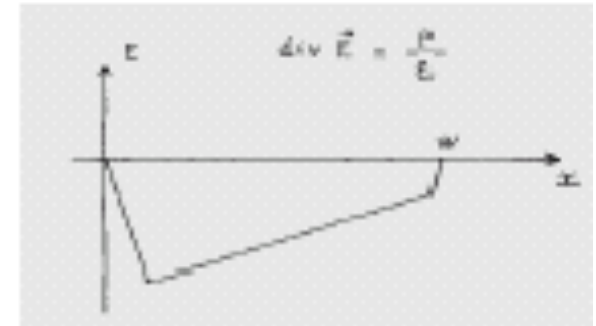
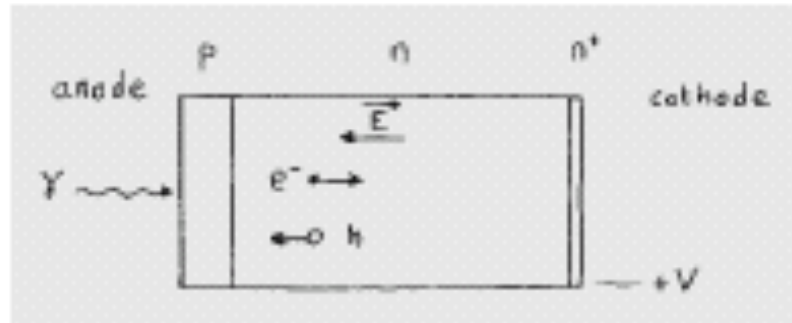
Bialkali PC: Q.E. = 20% at $\lambda_{\text{max}} = 400$ nm. Gain $\approx 10^6$.

Gain uniformity and cross-talk used to be problematic, but recently much improved.

Fotorivelatori

Fotodiodi

tipo pn



(sketches from J.P. Pansart, NIM A 387 (1997), 186)

Alla giunzione pn c'è la zona di svuotamento libera da e-h (cariche libere). In questa zona esiste un campo elettrico E dovuto alla densità di carica dovuta agli atomi ionizzati del cristallo, positiva nella zona di donatori (n) e negativa nella zona di accettori (p). Applicando una polarizzazione inversa → la zona di svuotamento aumenta (può diventare grande come tutto il diodo).

Se un γ ha $E > E_{\text{gap}}$ può mandare un e nella banda di conduzione → coppia e-h → si crea una corrente.

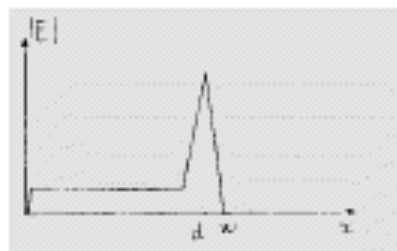
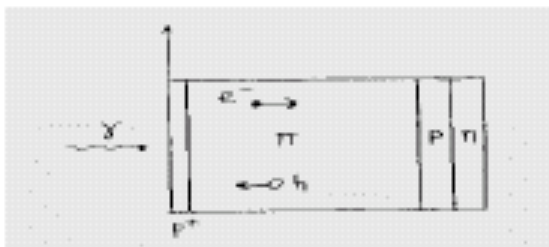
In condizioni di lavoro Q.E. $\sim 80\%$ e $G=1$.

Ovviamente non sentono il campo magnetico.

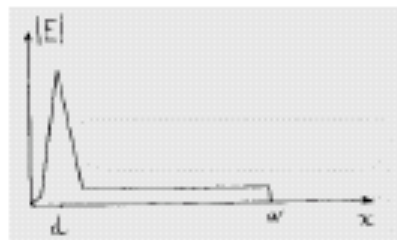
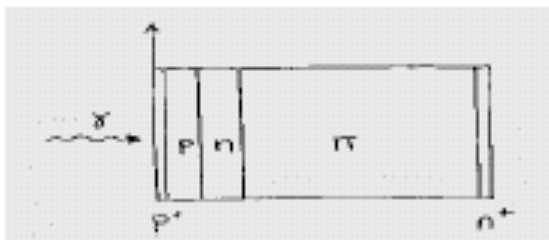
Fotorivelatori

Fotodiodi a valanga (APD)

(J.P. Pansart, NIM A 387 (1997), 186)



In questa configurazione gli e^- trovano prima un campo E basso e derivano verso un campo alto → **moltiplicazione a valanga**



La moltiplicazione avviene all'inizio e poi tutti gli e^- secondari vanno verso la fine del diodo

Alto voltaggio di polarizzazione inversa (100÷200 V)

Funzionano in modo lineare fino a V di pol. inversa ~300 V; al di sopra regime Geiger

Guadagni fino a 100 in zona lineare (più comune 50÷80)

Dimensioni trasverse ~ 1cm.

Applications of solid organic scintillators:

Particle trigger counters

Time Of Flight (TOF) detectors

Granular tracking detectors