

Introduzione ai rivelatori di particelle

Parte 6
scintillazione
e rivelatori a
scintillazione

Introduzione ai rivelatori di particelle

scintillazione

- Eccitazione atomica o molecolare

→ successiva emissione di fotoni

- nel UV e nel visibile
- se l'emissione avviene immediatamente ($\leq 10^{-8}$ s) si parla di fluorescenza
- altrimenti, se l'emissione è ritardata, di fosforescenza
 - ritardi da qualche μ s a ore
- l'andamento della luce emessa cala esponenzialmente con una costante di decadimento τ_D
 - A volte ci sono due componenti (fast e slow) con costanti di decadimento diverse

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{N_{TOT}}{\tau_D} e^{-\frac{t}{\tau_D}}$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = N_{TOT} \left(\frac{A}{\tau_F} e^{-\frac{t}{\tau_F}} + \frac{B}{\tau_S} e^{-\frac{t}{\tau_S}} \right)$$

- le frazioni A e B delle componenti fast e slow dipendono dai materiali
- in generale domina la componente fast

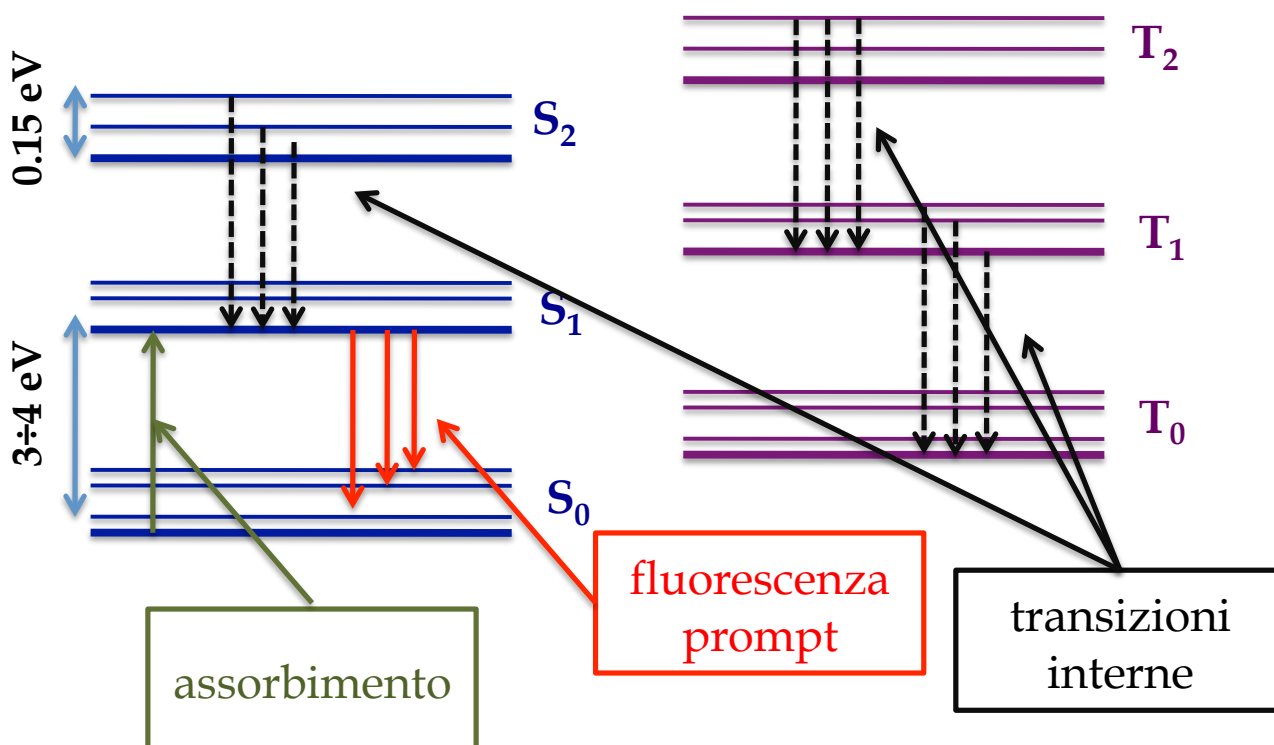
Introduzione ai rivelatori di particelle

scintillazione

- Caratteristiche importanti di uno scintillatore
 - alta efficienza
 - “light yield”, numero di fotoni prodotti per energia assorbita
 - trasparente alla radiazione emessa
 - possibilità di raccogliere la luce a distanza con attenuazione limitata
 - emissione spettrale compatibile con i rivelatori di luce
 - fotomoltiplicatori
 - linearità
 - luce emessa proporzionale all’energia depositata
 - inevitabili saturazioni
 - velocità
 - costante di decadimento corta
 - τ va dal ns a qualche μ s
- Gli scintillatori usati sono dei seguenti tipi
 - organici
 - plastici
 - liquidi
 - cristalli
 - cristalli inorganici
 - liquidi e gas inorganici
 - vetri
- spesso si usano scintillatori organici in quanto molto veloci

Introduzione ai rivelatori di particelle

scintillatori organici



- in una molecola di scintillatore organico, una particella carica eccita sia i livelli degli orbitali molecolari (qualche eV) che i livelli vibrazionali (frazioni di eV)
- le molecole si diseccitano internamente senza emissione di luce fino allo stato S₁ (singoletto) o T₀ (tripletto)
- dallo stato S₁ a S₀ eccitato vibrazionalmente il decadimento emette il fotone di fluorescenza
- la frequenza è leggermente diversa da quella di assorbimento tra stati non vibrazionali
 - il mezzo è trasparente alla frequenza emessa per fluorescenza
- dallo stato T₀ ad S₀ la transizione è per urto
 - $T_0 + T_0 \rightarrow S_0 + S_1 + \text{fonone}$; $S_1 \rightarrow S_0 + h\nu$
 - è la componente slow della fluorescenza

Introduzione ai rivelatori di particelle

scintillatori organici

- Cristallini
 - antracene ($C_{14}H_{10}$), naftalene ($C_{10}H_8$), trans-stilbene ($C_{14}H_{12}$)
 - buon tempo di risposta (ns) a parte naftalene che arriva a 30ns
 - effetto di channelling, risposta in energia dipende dalla direzione
 - l'antracene ha l'efficienza più alta di tutti gli organici
- Liquidi
 - materiale scintillante diluito in solvente
 - tipicamente qualche grammo/litro
 - caratteristiche possono essere modificate con altri elementi in soluzione
 - boro 11 per aumentare la sensibilità ai neutroni
 - sensibili a impurità
- Plastici
 - sono i più comuni
 - scintillatore organico in un solvente plastico
 - molto veloci
 - per descrivere la risposta in tempo è necessario parametrizzare anche il tempo di salita

$$N(t) = N_0 g(\sigma, t) e^{-\frac{t}{\tau_D}}$$

- convoluzione di una gaussiana con un esponenziale decrescente
- salita dominata dalla gaussiana

Introduzione ai rivelatori di particelle

scintillatori organici

- caratteristiche di alcuni scintillatori plastici

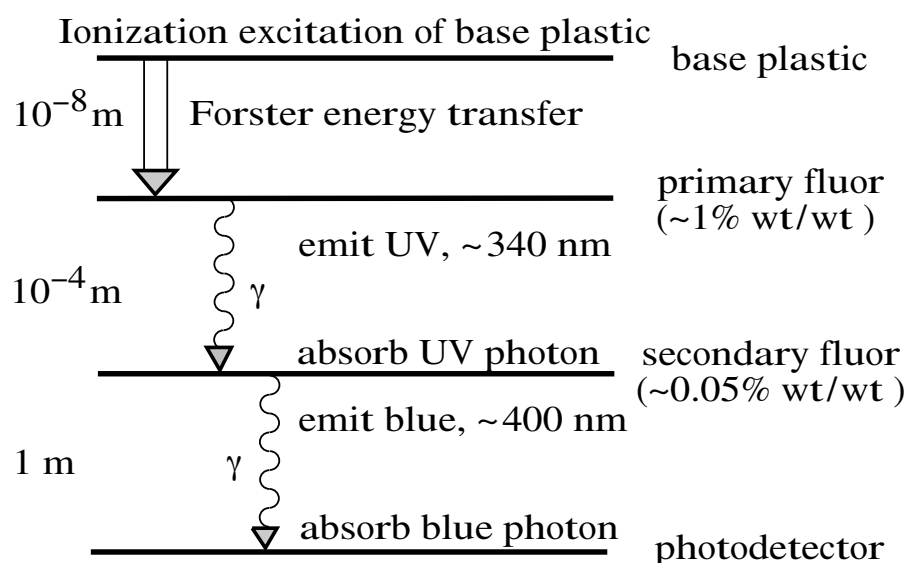
	σ (ns)	τ (ns)	Light (% Antracene)
NE102A	0.7	2.4	65
NE111	0.2	1.7	55
NE110		3.3	60
Naton 136	0.5	1.87	

- molto veloci, tipica scelta per misure di tempo di volo (TOF) o per il trigger
 - si arriva a risoluzioni in tempo dell'ordine dei 100ps
- buone caratteristiche meccaniche
- contengono idrogeno, adatti a rivelare neutroni veloci
 - da recoil del protone nell'urto neutrone-H
- problematiche da considerare
 - lunghezza di attenuazione della luce
 - radiation damage
 - danneggiamenti da esposizione ad agenti chimici
 - invecchiamento (cricche nella plastica)

Introduzione ai rivelatori di particelle

scintillatori plastici

- struttura chimica degli scintillatori plastici in generale è binaria o ternaria



- Scintillatori binari
 - l'energia del polimero di base viene trasferita in modo non radiativo ad uno polimero fluorescente
 - la luce emessa dalla molecola fluorescente viene assorbita da un'ulteriore molecola che la riemette a lunghezza d'onda diversa, adattandola alle necessità dei rivelatori di luce
- a volte si usa un terzo fluorescente
- NB a volte le funzioni di scintillatore e wavelenght shifter sono separate
 - scintillatore che fa da rivelatore
 - seguito da wavelenght shifter che cattura la luce e la riemette isotropicamente a lunghezza d'onda diversa

Introduzione ai rivelatori di particelle

scintillatori plastici

- Linearità
 - formula di Birks

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

- dove A è l'efficienza di produzione di luce dello scintillatore
 - B è una costante che dipende dal materiale e in parte anche dal tipo di particella ionizzante
- per perdite di energia piccole lo scintillatore è lineare

$$\frac{dL}{dx} = A \frac{dE}{dx} \rightarrow \frac{dL}{dE} = A \rightarrow L = AE$$

- per perdite di energia molto grandi si arriva a una saturazione

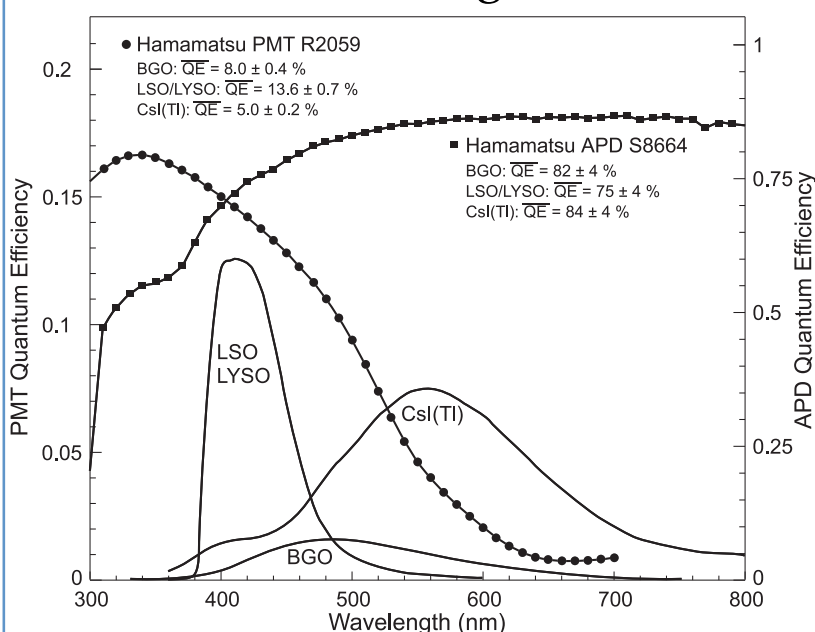
$$\frac{dL}{dx} = \frac{A}{B} \quad \text{indipendente da } E$$

Introduzione ai rivelatori di particelle

- Scintillatori gassosi o liquidi non organici
 - He, Ar, Xe, Kr
 - veloci (1 ns)
 - emettono nell'UV (poco adatti alla risposta dei rivelatori)
 - 120÷180nm
 - uso di wavelength shifters sulle pareti del contenitore o sulla superficie del rivelatore
 - Z più alto rispetto agli scintillatori plastici
 - più adatti a rivelare fotoni di bassa energia (sotto la soglia di pair production)
- Vetri
 - silicati di boro o litio attivati con Cerio
 - ottima resistenza meccanica e chimica
 - light yield $\approx 30\%$ Antracene
 - più lenti dei plastici (decine di ns)
 - adatti alla rivelazione di neutroni lenti
 - arricchiti in ${}^6\text{Li}$ o ${}^{10}\text{B}$

Introduzione ai rivelatori di particelle

- Cristalli inorganici
 - NaI, CsI con tracce di Tallio, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (BGO), CsF etc.
 - in genere lenti (500ns)
 - spesso fortemente igroscopici (a parte BGO)
 - Molto densi, piccole lunghezze di radiazione
 - ottimo light yield
 - CsI più di 10 volte rispetto all'antracene
 - c'è una sensibile dipendenza dalla temperatura
 - Molto adatti a realizzare calorimetri elettromagnetici



spettro di scintillazioni di alcuni cristalli confrontata con la risposta di due rivelatori di luce (PMT e APD)

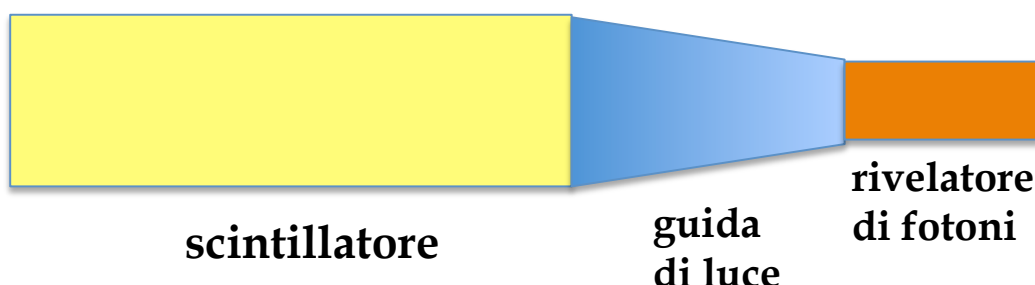
Introduzione ai rivelatori di particelle

proprietà di alcuni scintillatori cristallini

Parameter:	ρ	MP	X_0^*	R_M^*	dE/dx	λ_I^*	τ_{decay}	λ_{max}	n^{\ddagger}	Relative output [†]	Hygroscopic?	$d(\text{LY})/dT$
Units:	g/cm^3	$^{\circ}\text{C}$	cm	cm	MeV/cm	cm	ns	nm				$\%/^{\circ}\text{C}^{\ddagger}$
NaI(Tl)	3.67	651	2.59	4.13	4.8	42.9	230	410	1.85	100	yes	-0.2
BGO	7.13	1050	1.12	2.23	9.0	22.8	300	480	2.15	21	no	-0.9
BaF ₂	4.89	1280	2.03	3.10	6.6	30.7	630 ^s 0.9 ^f	300 ^s 220 ^f	1.50	36 ^s 3.4 ^f	no	-1.3 ^s $\sim 0^f$
CsI(Tl)	4.51	621	1.86	3.57	5.6	39.3	1300	560	1.79	165	slight	0.3
CsI(pure)	4.51	621	1.86	3.57	5.6	39.3	35 ^s 6 ^f	420 ^s 310 ^f	1.95	3.6 ^s 1.1 ^f	slight	-1.3
PbWO ₄	8.3	1123	0.89	2.00	10.2	20.7	30 ^s 10 ^f	425 ^s 420 ^f	2.20	0.083 ^s 0.29 ^f	no	-2.7
LSO(Ce)	7.40	2050	1.14	2.07	9.6	20.9	40	420	1.82	83	no	-0.2
GSO(Ce)	6.71	1950	1.38	2.23	8.9	22.2	600 ^s 56 ^f	430	1.85	3 ^s 30 ^f	no	-0.1

Introduzione ai rivelatori di particelle

rivelatori a scintillazione

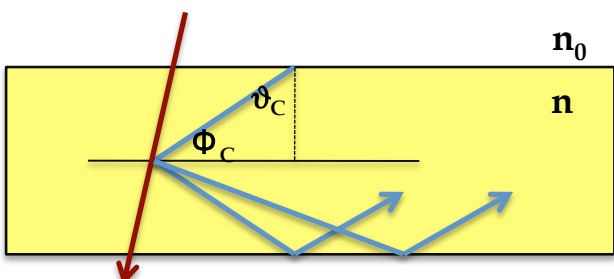


- Luce prodotta in uno scintillatore plastico
 - densità $\approx 1\text{g/cm}$, 1.7MeV/cm per una MIP
 - circa 10^4 fotoni prodotti per MeV
 - $E_\nu = hc/\lambda \approx 3\text{eV}$ per fotone con $\lambda = 420\text{nm}$
 - Energia luminosa $\approx 30\text{keV/MIP}$
 - circa il 2% dell'energia trasformata in luce (supponendo lo spettro monocromatico a 420nm)
- Effetti che riducono il segnale originario di uno scintillatore
 - attenuazione della luce nello scintillatore
 - perdita di luce dalle superfici
 - perdita di luce nelle guide di luce e negli accoppiamenti con il rivelatore di fotoni
 - efficienza quantica del rivelatore
 - numero di elettroni generati per fotone incidente
- Segnale per una MIP piccolo, serve amplificazione nel rivelatore di fotoni

Introduzione ai rivelatori di particelle

rivelatori a scintillazione

- attenuazione della luce $\lambda_{\text{ATT}} = 1 \div 2\text{m}$
 - per scintillatori nuovi, non danneggiati da radiazione etc.
 - effetto piccolo
- trasporto della luce nello scintillatore
 - riflessione totale per angoli maggiori dell'angolo limite
 - F= frazione di luce che viene riflessa in avanti per riflessione totale
 - per $n=1.58$ si ottiene $F=20\%$


$$\sin \vartheta_L = \frac{n_0}{n}$$
$$F = \frac{\Omega}{4\pi} = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\phi_L} d\Omega = \frac{1}{4\pi} \int_0^{\phi_L} 2\pi \sin(\phi) d\phi$$
$$F = \frac{1}{2} (1 - \cos \phi_L) = \frac{1}{2} (1 - \sin \vartheta_L) = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n_0}{n} \right)$$

Introduzione ai rivelatori di particelle

rivelatori a scintillazione

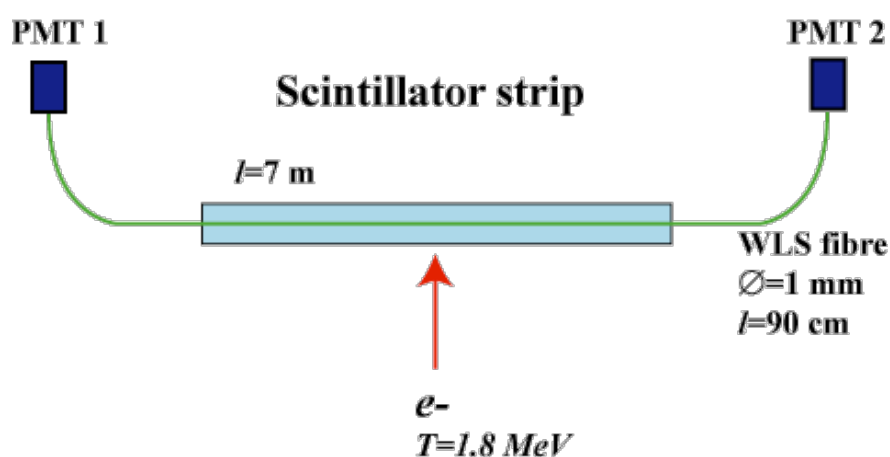
- trasporto della luce nello scintillatore
 - per recuperare parte della luce non riflessa internamente
 - si ricopre lo scintillatore con un foglio riflettente (alluminio)
 - oppure con sostanze bianche diffondenti
 - tyvek[®] = materiale con cui sono fatti i camici bianchi "usa e getta"
 - oppure ossidi di magnesio o di alluminio
 - il tutto racchiuso in materiale completamente opaco (carta o plastica nera) per evitare che filtri luce dall'esterno
- guide di luce



Introduzione ai rivelatori di particelle

rivelatori a scintillazione

- spesso lo scintillatore non si può accoppiare direttamente con il rivelatore di fotoni
 - per ex fogli di scintillatore di sezione trasversale = $2 \times 20 \text{ cm}$ da accoppiare ad un fotomoltiplicatore con finestra di ingresso circolare
 - oppure lo scintillatore è in campo magnetico che disturberebbe il rivelatore di fotoni
 - si usano guide di luce in plastica trasparente per il trasporto
 - la sezione minima A della guida non deve essere minore della sezione iniziale A_I (non si deve restringere), altrimenti la frazione di luce trasmessa è al massimo A/A_I



- un'alternativa sono fibre di wavelength shifter inserite nello scintillatore, o piani di wavelength shifter affacciati allo scintillatore, che assorbono la luce e la riemettono all'interno della fibra o del piano

Introduzione ai rivelatori di particelle

rivelatori di fotoni

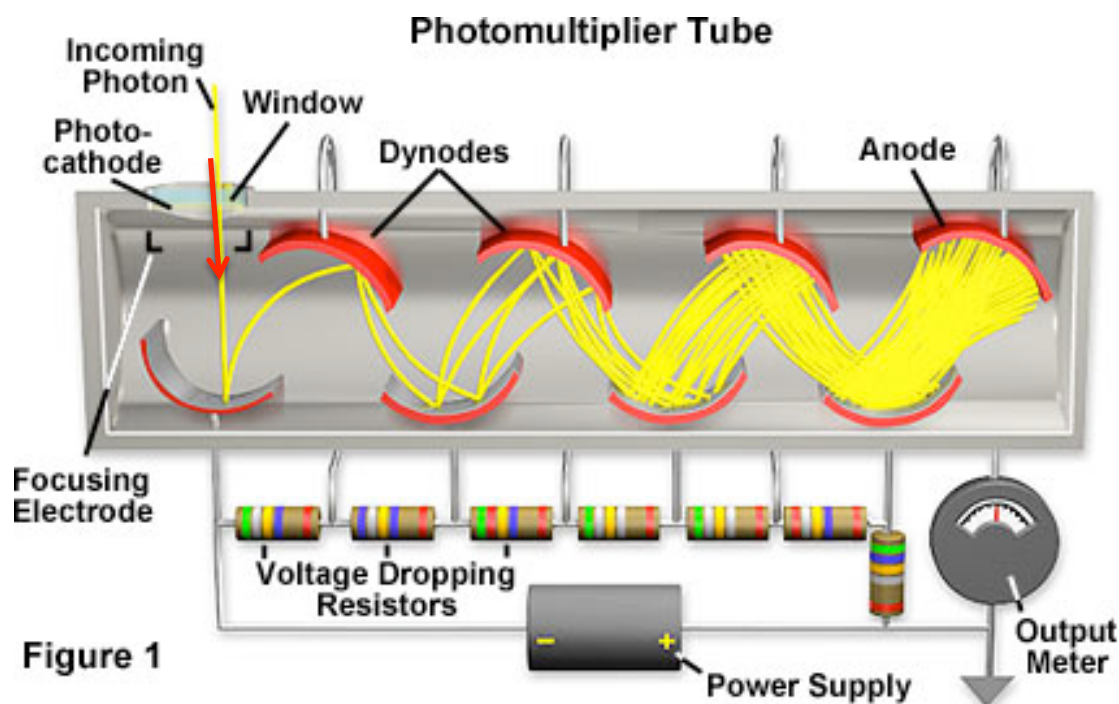
- **Funzionamento dei rivelatori di fotoni**
 1. assorbimento del fotone generazione di un fotoelettrone o coppia elettrone-lacuna primario
 2. amplificazione del segnale con processi di emissione secondaria o valanga
 3. collezione del segnale amplificato

- **Caratteristiche importanti**
 - quantum efficiency (QE): probabilità che un fotone generi un elettrone
 - in genere viene riportata quella alla lunghezza d'onda di massima sensibilità
 - efficienza di raccolta del segnale
 - guadagno (numero di elettroni finali per fotone)
 - rumore
 - risposta in tempo: tempo di transito e sue fluttuazioni
 - range dinamico e linearità
 - capacità di sostenere alti flussi

- **Classi principali**
 - rivelatori a vuoto
 - PMT (fotomoltiplicatori), MCP, HPD
 - rivelatori a gas
 - fotocatodo seguito da GEM, Micromegas ..
 - rivelatori a stato solido
 - SiPD (G=1), APD, SiPM

Introduzione ai rivelatori di particelle

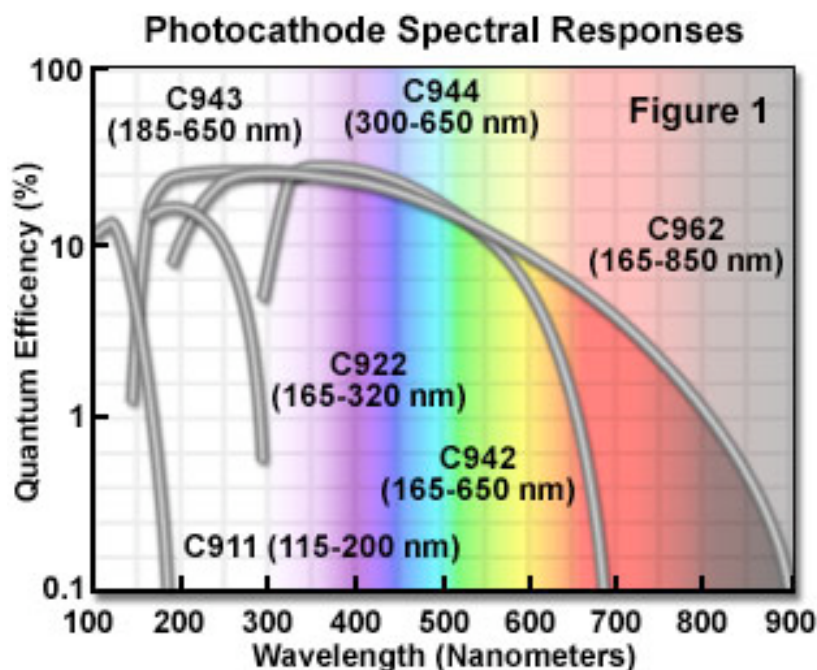
fotomoltiplicatore



- Principio di funzionamento del PM
 - finestra di ingresso trasparente (vetro o quarzo)
 - sul lato interno è depositato il fotocatodo
 - metalli alcalini pesanti (K_2CsSb)
 - il fotone estrae un elettrone dal fotocatodo per effetto fotoelettrico ($NB \propto Z^5$)
 - l'elettrone viene accelerato e produce una cascata di elettroni estratti (emissione secondaria) nei vari elettrodi successivi (dinodi)
 - nell'ultimo elettrodo viene raccolto il segnale (negativo) della cascata di elettroni

Introduzione ai rivelatori di particelle

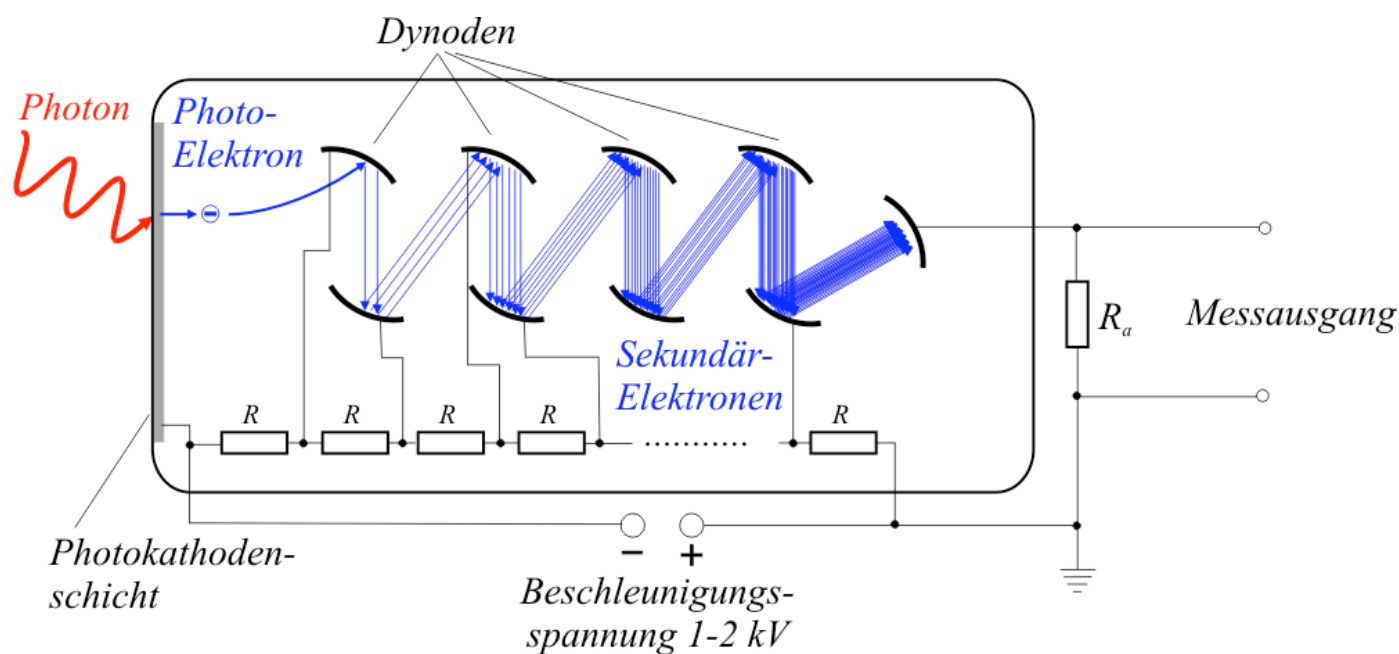
efficienza



- L'efficienza del PM dipende essenzialmente dall'efficienza quantica del fotocatodo (percentuale di fotoni incidenti che emettono un fotoelettrone)
 - l'efficienza quantica dipende dalla lunghezza d'onda, ed è diversa per diverse scelte del fotocatodo
 - **si arriva a efficienze quantiche di $\approx 25\%$ sul picco della sensibilità**
 - il PM va scelto adattandolo allo spettro di luce prodotta dal rivelatore (400÷500 nm sono tipici per uno scintillatore)
- altro fattore è l'efficienza di raccolta del primo fotoelettrone (focusing)
 - dipende dalla tensione

Introduzione ai rivelatori di particelle

alimentazione PM



- Una catena di resistenze crea il campo accelerante tra i dinodi
 - EX: fotocatodo a -2000V, primo dinodo a 1800V etc
 - leghe metalliche ricoperte da BeO, MgO, GaP, GaAsP
 - per ogni dinodo il fattore di moltiplicazione è 3÷5
 - il guadagno totale dipende dal numero di dinodi ($G=10^5 \div 10^8$)

Introduzione ai rivelatori di particelle

PM



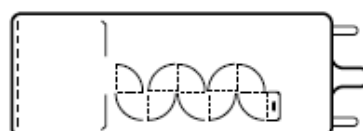
- Numerosissimi tipi di PM
 - differiscono per
 - dimensioni della finestra di ingresso
 - sensibilità spettrale
 - guadagno
 - range dinamico e linearità
 - velocità
 - sensibilità al campo magnetico

Introduzione ai rivelatori di particelle

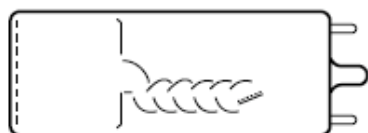
timing PM



(1) Circular-cage Type



(2) Box-and-grid Type



(3) Linear-focused Type



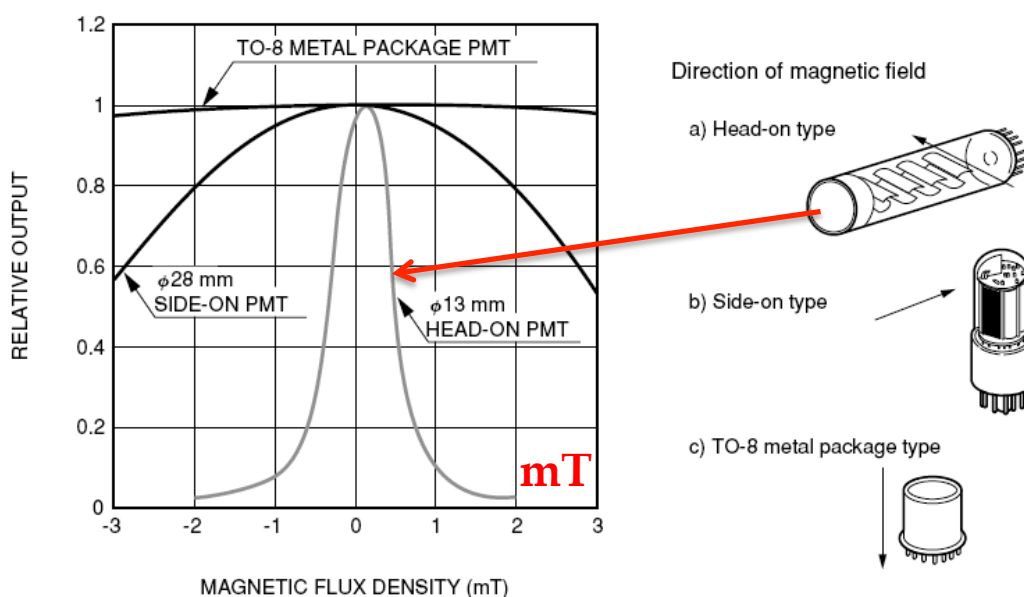
(4) Venetian Blind Type

- Tempi caratteristici in genere molto brevi
 - per i “linear focused”
 - tempo di salita $0.7 \div 3 \text{ ns}$
 - larghezza dell’impulso $1.3 \div 5 \text{ ns}$
 - tempo di transito $16 \div 50 \text{ ns}$
 - spread del tempo di transito $0.4 \div 1.1 \text{ ns}$
 - altre architetture un po’ inferiori come timing ma comunque buone
- molto adatti a misure con risoluzioni di tempo estreme
 - spread del tempo di transito molto piccolo
 - misura di tempi di volo (TOF)
- e a uso nei sistemi di trigger
 - segnali rapidi e disponibili in tempi rapidi

Introduzione ai rivelatori di particelle

fotomoltiplicatori

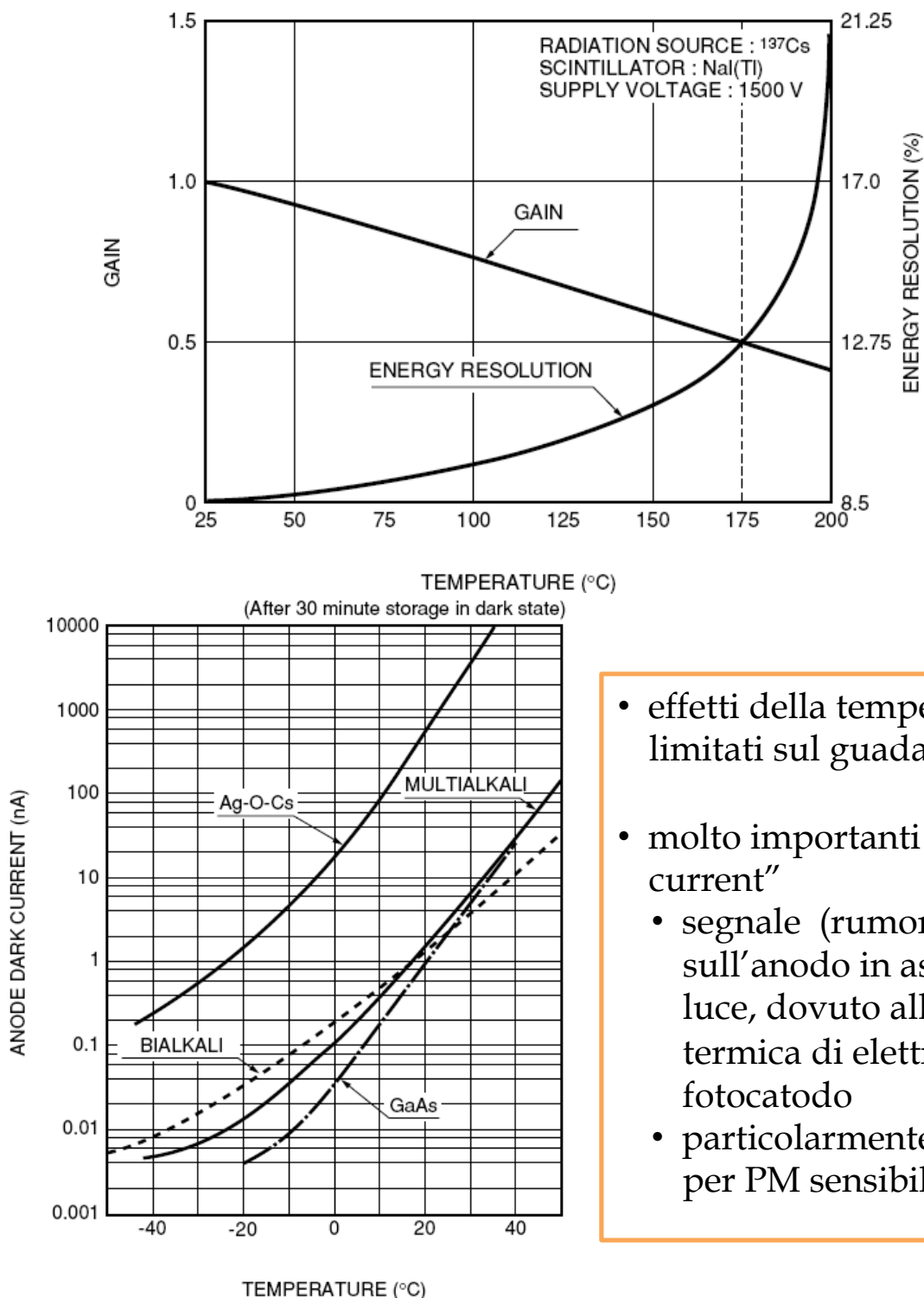
- Esempio
 - 1 cm scintillatore $\approx 10^4$ fotoni
 - efficienza di trasporto della luce nello scintillatore = 20%
 - efficienza di trasporto nelle guide di luce e nelle interfacce ottiche = 20%
 - rimangono 400 fotoni
 - efficienza quantica del 25%
 - 100 fotoelettroni dal fotocatodo
 - guadagno PM = 10^7
 - 10^9 elettroni pari a 0.16nC
 - se il segnale è di 5ns, corrisponde a 32mA
 - 1.6V su 50 Ω
 - segnali molto grandi e veloci



- Problema
 - estremamente sensibili ai campi magnetici
 - devono essere posti lontani dai magneti, ed in genere schermati

Introduzione ai rivelatori di particelle

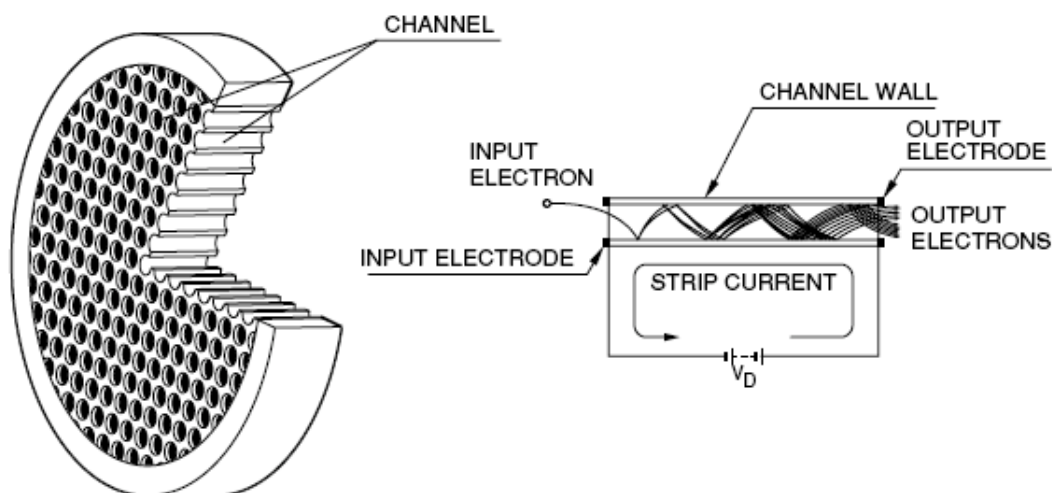
fotomoltiplicatori



- effetti della temperatura limitati sul guadagno
- molto importanti sulla "dark current"
 - segnale (rumore) sull'anodo in assenza di luce, dovuto all'emissione termica di elettroni dal fotocatodo
 - particolarmente rilevante per PM sensibili al rosso

Introduzione ai rivelatori di particelle

Micro Channel Plate



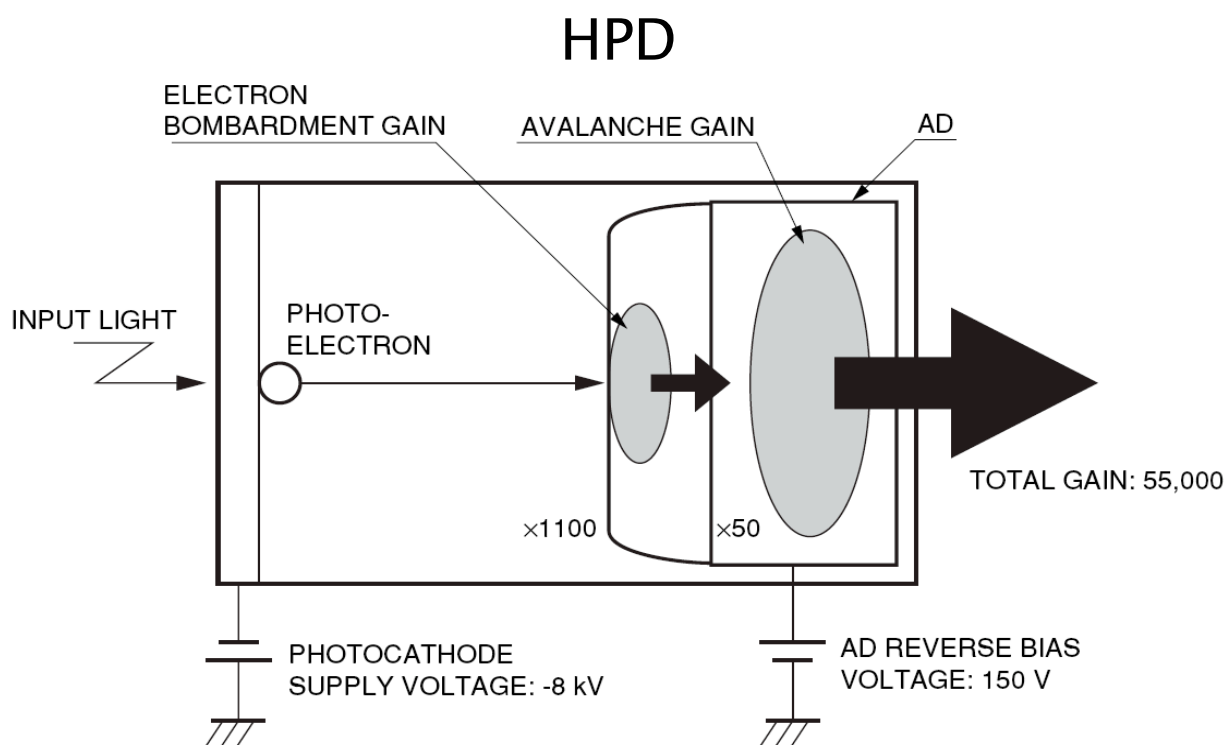
THBV3

(a) Schematic structure of an MCP

(b) Principle of multiplication

- MCP
 - fotomoltiplicatori con una struttura di amplificazione continua a micro canali resistivi
 - diametro dei canali $\leq 10 \mu\text{m}$
 - Vantaggi
 - molto veloci, tempi di salita $\approx 100\text{ps}$ e tempi di transito $< 1\text{ns}$
 - resistenza al campo magnetico (fino a 2T assiale, 70mT trasversale)
 - Svantaggi
 - efficienza di collezione del fotoelettrone inferiore
 - linearità limitata (effetti di saturazione)

Introduzione ai rivelatori di particelle

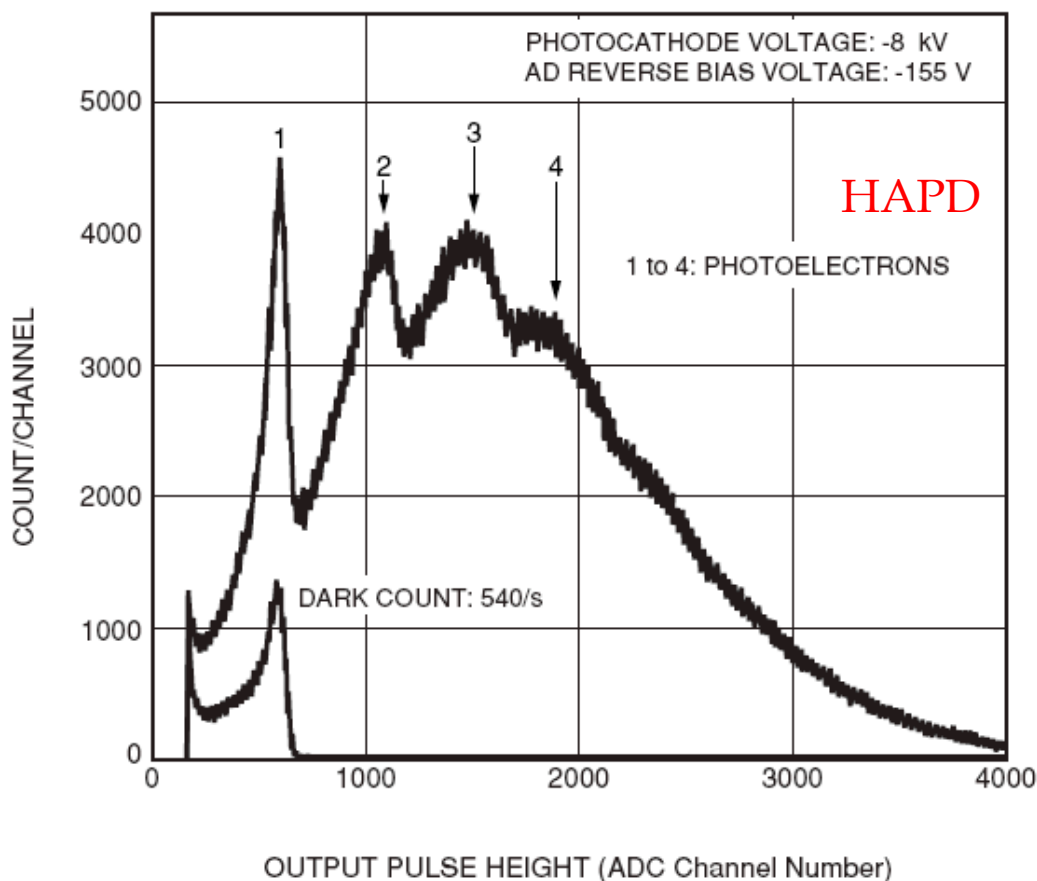


- **Hybrid Photo-Detector (HPD)**

- tubo a vuoto con fotocathodo come nei PMT
- il fotoelettrone viene accelerato da una differenza di potenziale elevata ($10 \div 20 \text{ kV}$)
- l'elettrone colpisce un semiconduttore (o un Avalanche Diode, APD) dove genera un cluster di coppie elettrone lacuna
 - guadagno di bombardamento, G_b $10^3 \div 2 \times 10^3$, dipende dalla tensione di accelerazione
 - all'interno del semiconduttore può avvenire un ulteriore guadagno che dipende dalla tensione di polarizzazione del diodo (alta per generare la valanga, $\approx 150 \text{ V}$)
 - in questo caso si parla di HAPD
 - avalanche gain ≈ 50
- si raggiungono guadagni di $\approx 5 \times 10^4$ con gli HAPD

Introduzione ai rivelatori di particelle

HPD



- **Ottima risoluzione**
 - si distinguono i segnali di 1,2...4 fotoni
 - fluttuazioni dell'amplificazione molto ridotte
 - risoluzione migliore negli HPD che negli HAPD
- guadagno limitato
- insensibili a campo magnetico assiale
 - ma molto sensibili a campo magnetico trasversale

Introduzione ai rivelatori di particelle

Rivelatori di fotoni a stato solido

- **Rivelatori a semiconduttore**

- efficienti anche a grandi lunghezze d'onda (450÷1000nm)
- vedi capitolo sui rivelatori a semiconduttore per maggiori dettagli generali

- Rivelatori a guadagno unitario

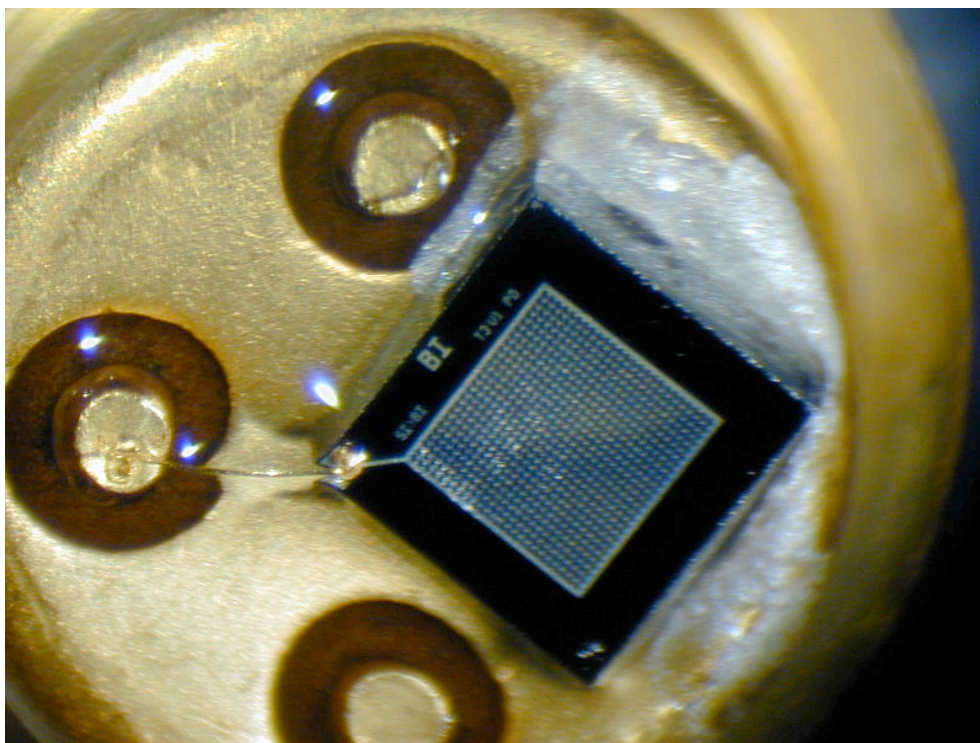
- diodi a silicio (con giunzioni PN o PIN), rivelatori di immagine (CCD, CMOS)
- adatti a rivelare alti flussi di fotoni
 - fotocamere digitali ...

- Avalanche photodiode (APD)

- diodi semiconduttori con una tensione di polarizzazione (inversa) sufficiente a generare una valanga
 - proporzionali: guadagno limitato (≤ 1000)
 - **Geiger mode**: guadagno $\approx 10^6$
 - » tensioni di polarizzazione più alte
 - » un fotoelettrone genera una scarica generalizzata, che viene spenta abbassando la tensione (alte resistenze o in modo attivo)

Introduzione ai rivelatori di particelle

Rivelatori di fotoni a stato solido



– SiPM

- matrice di avalanche photodiode in Geiger mode ($1000/\text{mm}^2$)
- ogni APD dà un segnale “digitale” di scarica quando colpito da un fotone
- efficienza quantica $\approx 20\%$
- il numero di pixels che scaricano fornisce il numero di fotoni incidenti
 - segnale analogico proporzionale al numero di fotoni, con effetti di saturazione se più fotoni colpiscono la stessa cella

Introduzione ai rivelatori di particelle

Riassunto

- Rivelatori a scintillazione
 - Numerosi tipi di scintillatore
 - Numerosi tipi di rivelatori-amplificatori di luce
- Prestazioni
 - Efficienza:
 - dipende essenzialmente dal numero di fotoelettroni raccolti dopo il fotocatodo

$$P(x,n) = \frac{n^x}{x!} e^{-n}$$

$$P(0,n) = e^{-n}$$

$$\text{efficienza } \varepsilon = 1 - e^{-n}$$

- numero medio n di fotoelettroni è pari al numero medio di fotoni prodotti \times efficienza di trasporto della luce al fotocatodo \times efficienza quantica del fotocatodo (mediata sullo spettro)
 - rilevante per segnali piccoli
 - velocità e risoluzione in tempo
 - dipende dal tipo di scintillatore, e dal rivelatore di luce
 - » tipico esempio di rivelatore veloce è uno scintillatore plastico con fotomoltiplicatore “linear-focused” o “microchannel”
 - essenziale per trigger e PID
 - Linearità
 - l’elemento più importante è il fotomoltiplicatore
 - essenziale per misure di energia