

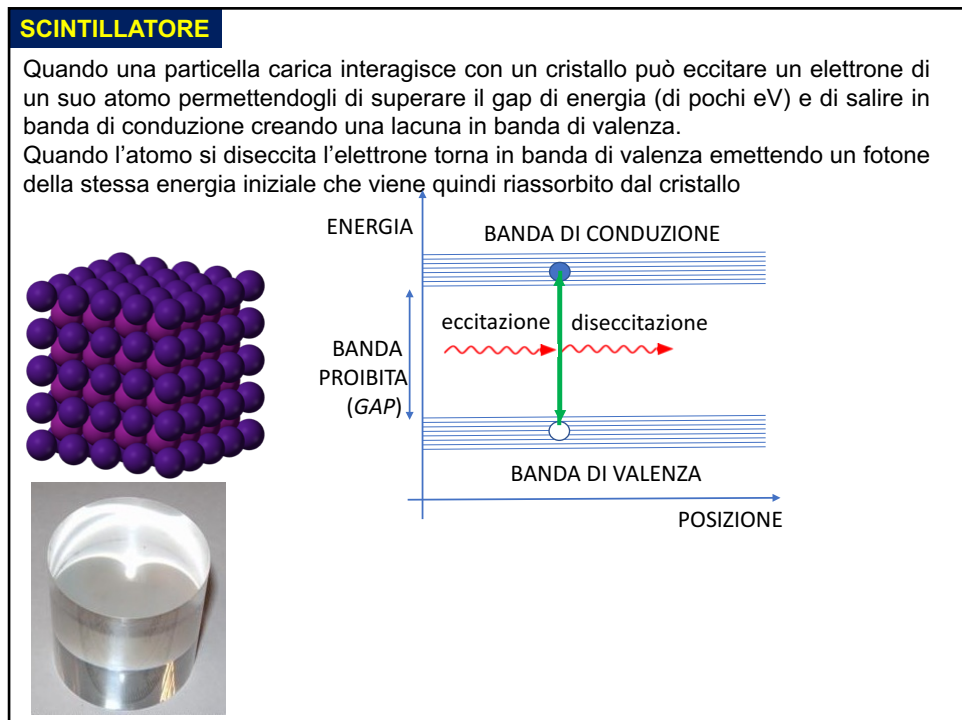
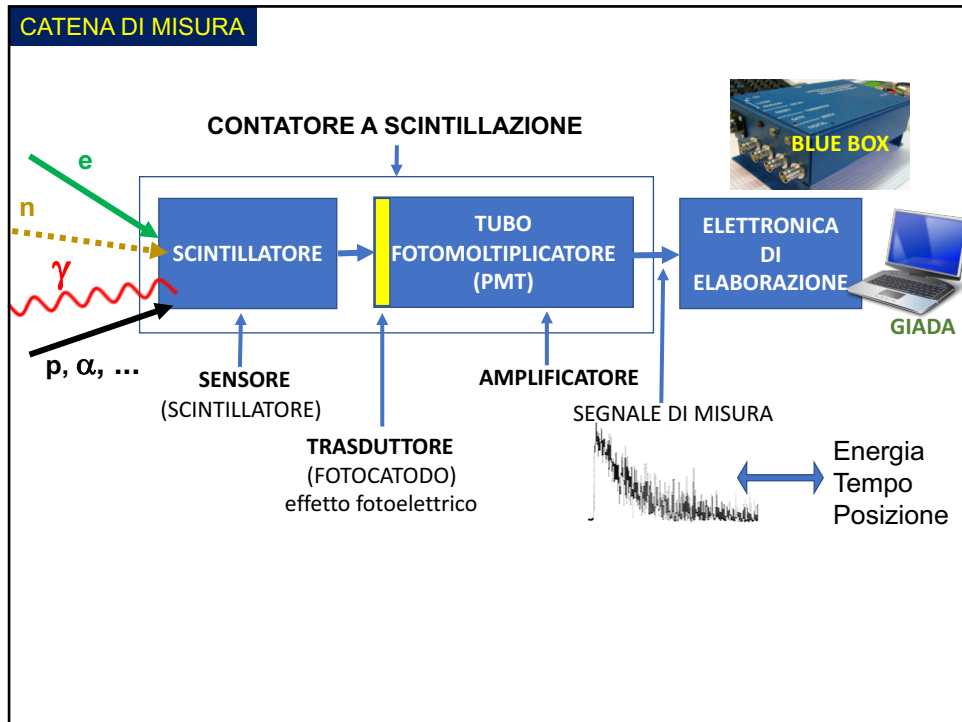
Positron Emission Tomography

Radioactive tracer

Scintillation detectors

General Electric
Siemens
Philips

wiki: Jens Maus (<http://jens-maus.de/>)



SCINTILLATORE

Affinché il fotone di diseccitazione possa uscire dal cristallo deve possedere un'energia diversa (minore) del gap l'atomo.
 Si droga il cristallo con tracce 10^{-3} di atomi che si inseriscono nel reticolo deformandolo.
 Si creano così dei centri di luminescenza con livelli energetici nella banda proibita.
 La luce di diseccitazione (scintillazione) non è in grado di eccitare altri elettroni e quindi esce dal cristallo.

Nello ioduro di cesio alcuni atomi di tallio sostituiscono il cesio deformando localmente il passo reticolare
 Nella gap di circa 6,5 eV si formano livelli intermedi → ioduro di cesio attivato al tallio: CsI(Tl)

SCINTILLATORE **FOTOCATODO**

Un parametro caratteristico di uno scintillatore è la sua **efficienza luminosa** definita come il rapporto tra l'energia convertita in luce e l'energia rilasciata nel cristallo (#fotoni/MeV)

Esercizio: qual è l'energia in eV di un fotone da 400 nm?
 Esercizio: qual è la massima efficienza luminosa teoricamente raggiungibile a 400 nm?

L'emissione luminosa non è monocromatica: spettro continuo $f(\lambda)$ con un massimo che dipende dal materiale [NaI(Tl) LYSO BGO CsI(Tl)]

Per confronto la curva "fotocatodo bialcalino" rappresenta l'efficienza (**efficienza quantica**) $s(\lambda)$ con la quale i fotocatodi più diffusi convertono la luce (effetto fotoelettrico)

- NaI(Tl) – ioduro di sodio attivato con tallio
storico – economico - altamente igroscopico

- CsI(Tl) – ioduro di cesio attivato con tallio
elevata resistenza al danno da radiazione – lento – molto luminoso ma a λ elevate

- BGO sigla di $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ – germanato di bismuto
molto diffuso (SPECT, PET) - bassa efficienza luminosa

- LYSO (Ce) sigla di $\text{Lu}_{1,8}\text{Y}_{0,2}\text{SiO}_5$ - silicato di lutezio e ittrio attivato con cerio
molto recente - elevata velocità di risposta - leggermente radioattivo (lutezio)

La quantità che interessa è l'integrale $\int_0^\infty f(\lambda)s(\lambda)d\lambda$ che per il CsI(Tl) vale 4-5%:
rappresenta la massima frazione dell'energia rilasciata nello scintillatore che può essere convertita in un segnale di scintillazione.

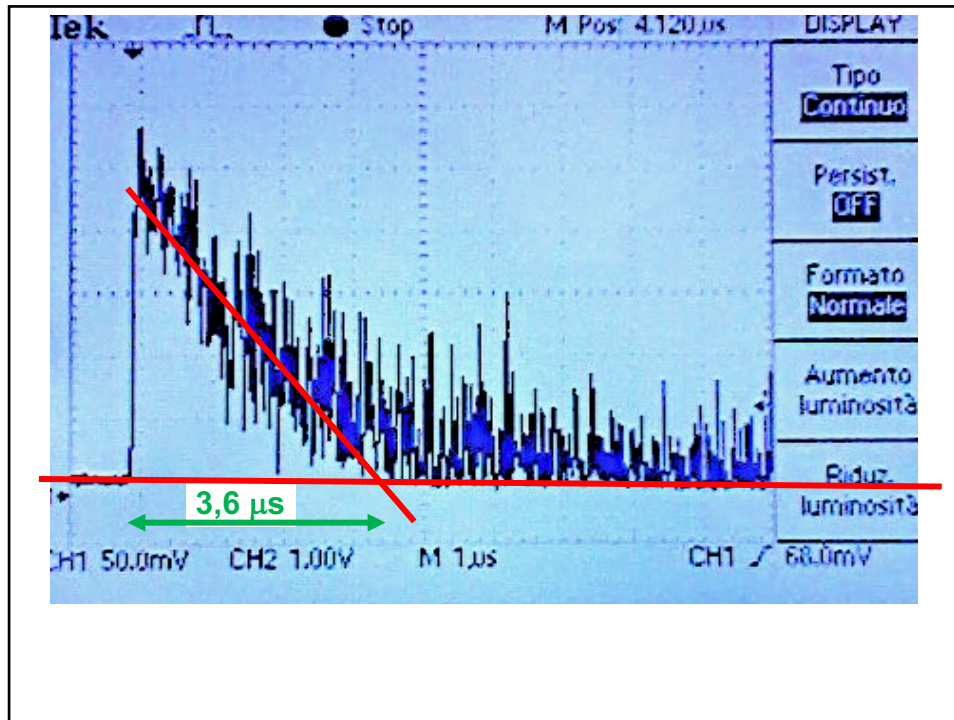
SCINTILLATORE

FOTOCATODO

	densità (g/cm ³)	$\epsilon_{\text{luminosa}}$ (#fotoni/MeV)	λ_{MAX} (nm)	τ (ns)
NaI(Tl)	3,7	38 000	415	250
CsI(Tl)	4,5	50 000	550	600, 3400
BGO	7,1	8 000	480	300
LYSO	7,2	40 000	410	40

SCINTILLATORE

L'emissione luminosa non avviene istantaneamente: in ogni intervallo temporale dt solo dN centri di luminescenza si diseccitano emettendo luce.
 dN è proporzionale al numero N di centri ancora attivi al tempo t e alla probabilità $K dt$ che si diseccitino in dt (K è una costante che dipende dal materiale): $dN = -K N dt$
 (il segno meno deriva dal fatto che N diminuisce e quindi $dN < 0$).
 $\rightarrow dN/N = -K dt \rightarrow N(t) = N_0 e^{-Kt}$ cioè un andamento esponenziale.



FOTOMOLTIPLICATORE

The diagram illustrates the internal structure of a photomultiplier tube. It shows a vertical glass tube containing a photocathode at the top, followed by an electro-optical input system, a deflector, a series of dynodes (starting with the first dynode), and an anode at the bottom. The tube is mounted on a base with electrical connections.

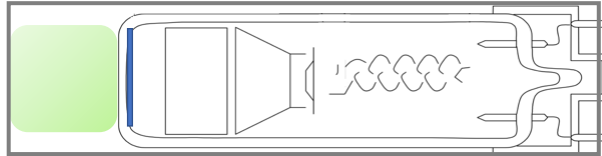
Rivelatore ottico per applicazioni che richiedono elevate sensibilità (fino al singolo fotone) e risposte rapide (fino a frazioni di nanosecondi). Costoso, necessita di tensioni di alimentazione elevate (dell'ordine dei kV).

Un fotomoltiplicatore è costituito da:

- un **fotocatodo** che converte i fotoni in elettroni per effetto fotoelettrico
- un sistema di **focalizzazione e accelerazione** (gestito dal sistema elettroottico d'ingresso)
- uno stadio **moltiplicatore** di corrente costituito da una serie di elettrodi (**dinodi**) che utilizza il fenomeno dell'emissione secondaria di elettroni
- un **anodo** (o più anodi nei sistemi di imaging) che raccoglie il flusso di elettroni dopo il processo di moltiplicazione e fornisce il segnale in uscita.

Il tubo di vetro è sotto **vuoto** spinto per ridurre le collisioni fra gli elettroni e il gas residuo. All'esterno viene posto uno schermo metallico di materiale ad alta permeabilità magnetica (**mu-metal**) per ridurre l'effetto curvante dei **campi magnetici**. Il tutto deve essere a **tenuta di luce**.

CONTATORE A SCINTILLAZIONE



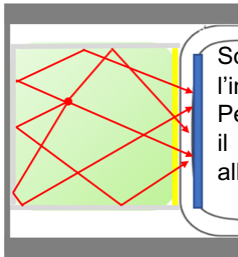
Quando un fotone proveniente dallo scintillatore incide sul fotocatodo, viene emesso un elettrone per effetto fotoelettrico (**fotoelettrone**) con una certa efficienza (efficienza quantica).

Un'opportuna geometria del campo elettrico **accelera e focalizza** l'elettrone sul primo dinodo dove trasferisce la sua energia agli elettroni del materiale.

L'energia rilasciata nel primo dinodo causa l'emissione di un certo numero di elettroni secondari che, a loro volta, incidono sul dinodo successivo permettendo un'ulteriore emissione di elettroni e così via, generando una **moltiplicazione degli elettroni** fino ad arrivare all'anodo dove viene raccolto il segnale la cui **carica è proporzionale all'energia rilasciata** nello scintillatore

OTTIMIZZAZIONE DELLA RACCOLTA DI LUCE

Il numero di **fotoelettroni** fluttua poissonianamente con una incertezza relativa $\sigma(n_{p.e.})/n_{p.e.} = \frac{1}{\sqrt{n_{p.e.}}}$ tanto più piccola quanto maggiore è il numero di fotoni raccolti.



Solo una frazione della luce di scintillazione (**isotropa**) raggiunge l'interfaccia cristallo-vetro.

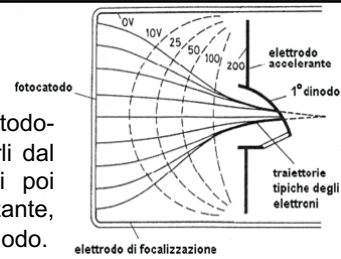
Per questo secondo motivo le pareti del cristallo non a contatto con il PMT vengono ricoperte di un materiale riflettente (spesso è alluminio) o diffondente (teflon o vernici al titanio ad alta riflettività).

Per evitare perdite di luce causate dalla **riflessione totale** fra lo scintillatore e il vetro del PMT o un eventuale strato di aria, si interpone fra cristallo e vetro uno strato di **grasso siliconico** che, avendo un indice di rifrazione intermedio, aumenta l'angolo limite al di sopra del quale la luce viene riflessa anziché essere trasmessa al PMT.

Nel caso del CsI(Tl) (indice di rifrazione $n_s=1,78$) accoppiato al vetro ($n_v=1,47$) l'angolo limite $\vartheta_L = \arcsin\left(\frac{n_v}{n_s}\right) = \arcsin\left(\frac{1,47}{1,78}\right) = 56^\circ$ mentre un sottile strato di aria fra scintillatore e vetro farebbe rimbalzare indietro i fotoni che arrivassero all'interfaccia con un angolo superiore a soli $\arcsin\left(\frac{1}{1,78}\right) = 34^\circ$

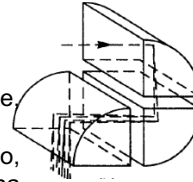
SISTEMA ELETTROOTTICO D'INGRESSO (FOCALIZZAZIONE E ACCELERAZIONE)

I fotoelettroni che riescono a superare la barriera fotocatodo-vuoto vengono accelerati da un elettrodo per strapparli dal fotocatodo aumentandone l'energia cinetica con cui poi urtano il primo dinodo mentre un elettrodo focalizzante, posto sulla parete dell'involucro, li indirizza sul primo dinodo.



SISTEMA DI MOLTIPLICAZIONE DINODI e COEFFICIENTE DI EMISSIONE SECONDARIA

I fotoelettroni che colpiscono il primo dinodo con un'energia sufficiente sono in grado di estrarre un certo numero di elettroni secondari. Tali elettroni vengono a loro volta accelerati verso il secondo dinodo, dal quale estraggono altri elettroni, e così via, producendo una moltiplicazione della carica raccolta da un elettrodo finale, l'anodo.



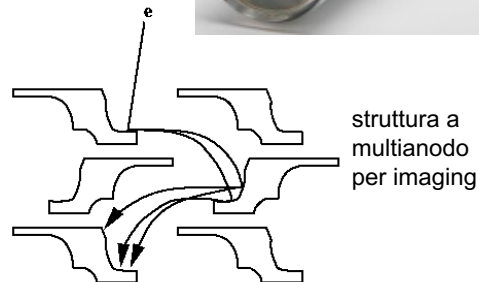
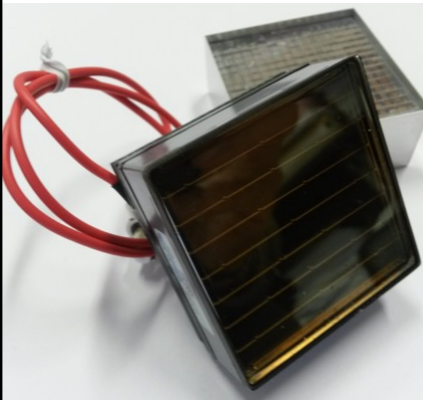
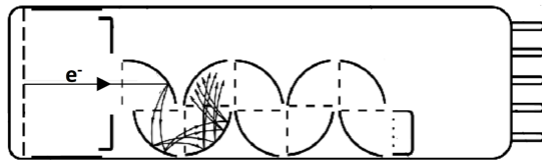
La teoria dell'emissione secondaria è simile a quella per l'emissione fotoelettrica, con la differenza che il fotone incidente è ora sostituito da un elettrone.

Nell'impatto sul dinodo, l'elettrone trasferisce la sua energia direttamente agli elettroni del materiale consentendo l'emissione di un certo numero di elettroni secondari.

Il guadagno δ di ogni elettrodo (**coefficiente di emissione secondaria**) è il numero di elettroni secondari generati per ogni elettrone incidente sul dinodo.

DINODI Esistono diverse configurazioni dei dinodi. Una delle più comuni è quella a scatola e griglia (box and grid) in cui i dinodi sono una serie di semicerchi disposti su una linea.

I materiali tipicamente utilizzati per la costruzione dei dinodi sono leghe Cu-Be o Mg-Ag



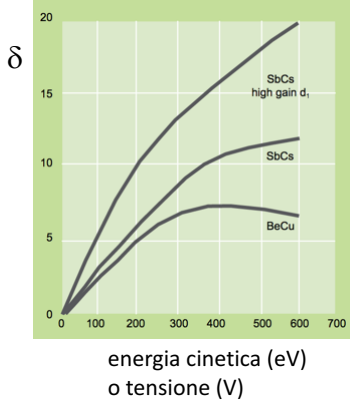
struttura a multianodo per imaging

MOLTIPLICAZIONE Il coefficiente di emissione secondaria δ dipende sia dal materiale che dall'energia dell'elettrone incidente: fino a 100 - 200 eV il valore di δ cresce linearmente con l'energia (e quindi con la tensione V_d dinodo-dinodo: $\delta = k V_d$). Per valori di energia più alti l'elettrone incidente penetra molto nel materiale per cui gli elettroni secondari possono essere riassorbiti prima di poter uscire.

Il guadagno complessivo G di un fotomoltiplicatore con N dinodi è $G = f (g \delta)^N$ dove:

- f è il fattore di raccolta fotocatodo-primo dinodo (normalmente dell'ordine del 90%)
- g è l'efficienza di trasferimento degli elettroni fra i dinodi (dell'ordine del 100%)

→ $G = f (g \delta)^N \approx \delta^N$ (tipicamente 10^5 - 10^7)



Energy (eV) / Voltage (V)	SbCs high gain d.	SbCs	BeCu
0	0	0	0
100	~5	~3	~2
200	~10	~5	~3
300	~14	~7	~4
400	~17	~9	~4.5
500	~19	~10	~4.5
600	~20	~10.5	~4.5

ALIMENTAZIONE IN ALTA TENSIONE (HV) CON UN PARTITORE

Spesso le tensioni fra un dinodo e il successivo vengono realizzate mediante un partitore di tensione realizzato con resistenze uguali. La tensione V fra fotocatodo e anodo viene ripartita equamente tra gli N dinodi: $V = N V_d$. Pertanto $G = \delta^N = (k V_d)^N = (k V/N)^N$. Bisogna porre attenzione sulla stabilità della tensione di alimentazione: $\frac{\sigma(G)}{G} = N \frac{\sigma(V)}{V}$ cioè la variazione percentuale del guadagno è N volte più grande della variazione percentuale della tensione di alimentazione.

Per ogni particella rivelata si genera una corrente di elettroni che viene estratta dai dinodi e indirizzata verso l'anodo. Questa corrente negli ultimi stadi del tubo moltiplicatore può diventare confrontabile con la corrente di partitore. Per stabilizzarla si aggiungono dei condensatori che forniscono la carica necessaria per tutta la durata del picco di corrente. Queste capacità vengono poi ricaricate durante l'intervallo tra due eventi.



$R = 10 \text{ M } \Omega$
$C2 = 10 \text{ nF } 1 \text{ kV}$
$C3 = 10 \text{ nF } 2 \text{ kV}$

SCIONIX
Radiation Detectors & Crystals

Scionix Holland B.V.
P.O. Box 143
3880 CC Bunnik
The Netherlands
Tel +31 30 6670312
Fax +31 30 6671663
Email scionix@wxs.nl

Title: Voltage Divider
For 38 mm R609491261 (291003)*
Single MHV
May 2007
Drawing Number: R609491

$I_p = 600 \text{ V} / (12 \times 10 \text{ M}\Omega) = 5 \mu\text{A}$

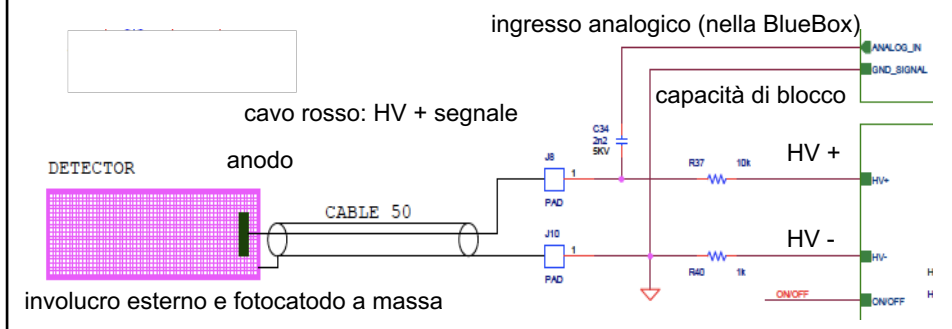
POLARITA' DELL'ALTA TENSIONE

I tubi fotomoltiplicatori possono lavorare con alta tensione sia positiva sia negativa purché il potenziale dei dinodi e dell'anodo sia maggiore di quello del fotocatodo.

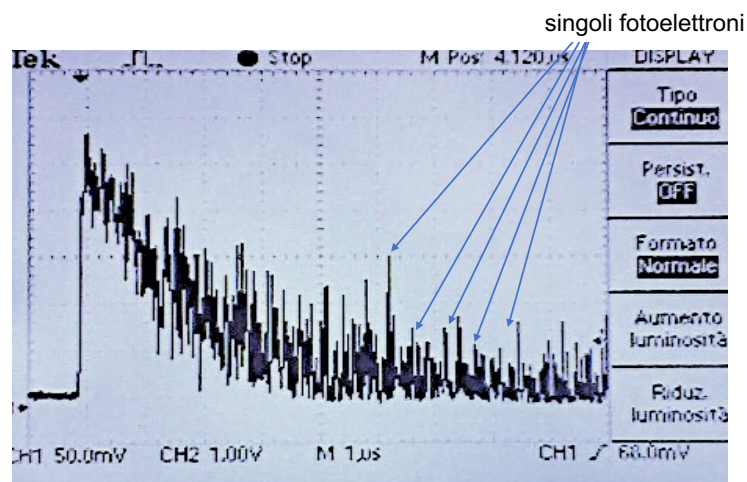
Il fotomoltiplicatore del nostro laboratorio utilizza una tensione positiva: il fotocatodo è mantenuto a massa per evitare scariche che possono verificarsi tra il fotocatodo e lo scintillatore o tra il fotocatodo e l'involucro esterno del rivelatore.

Questo vantaggio è però compensato dal fatto che l'anodo deve essere tenuto ad un potenziale positivo costante.

Pertanto è necessario disaccoppiare l'anodo attraverso una capacità di blocco che elimina la componente continua del segnale (con una perdita di informazione temporale: la capacità di disaccoppiamento forma, con la resistenza di ingresso del sistema di lettura, un filtro passa basso che taglia le armoniche del segnale a frequenze elevate).



Il contatore del laboratorio utilizza un fotomoltiplicatore ADIT B29B01 che ha $N = 11$ dinodi ed è alimentato a circa 660 V. Essendo δ (60 V) circa 3 si ha $G = 3^{11} = 1,8 \times 10^5$. Ogni p.e., quindi, produce una carica all'anodo $Q = 1,8 \times 10^5 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ C} = 30 \text{ fC}$.



Nei dispositivi (p.es. ToF-PET) in cui la misura dei tempi è critica occorre scegliere, oltre che cristalli veloci (p.es. LYSO), fotomoltiplicatori in cui le fluttuazioni del tempo di transito fotocatodo-anodo sono trascurabili. Questo richiede un'accurata progettazione del sistema elettroottico per rendere il tempo di arrivo degli elettroni sull'anodo quanto più possibile indipendente dal punto di impatto del fotone sul fotocatodo.

Finora non abbiamo considerato il tempo necessario ai fotoelettroni per arrivare all'anodo. Se questo tempo fosse superiore o confrontabile con il tempo della diseccitazione del cristallo occorrerebbe tenerne conto nella scelta del PMT da usare.

Calcoliamo la velocità con cui un elettrone, partendo da fermo da un dinodo con energia potenziale di 60 eV arriva sul successivo (con un'energia cinetica di 60 eV). La velocità non è relativistica (l'energia cinetica è una piccola frazione dell'energia a riposo dell'elettrone):

$$60 \text{ eV} = \frac{1}{2} m v^2 \text{ con } m = 511 \text{ keV}/c^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \times 60}{511 \times 10^3}} c = 0,015 c = 0,45 \text{ cm/ns.}$$

Nell'ipotesi di campo elettrico uniforme l'accelerazione è costante e quindi la velocità media è la metà di quella massima: per percorrere i circa 10 cm di lunghezza della traiettoria fotocatodo-anodo con una velocità media di circa 0,25 cm/ns occorrono 40 ns, tempo decisamente trascurabile rispetto ai tempi dell'emissione di scintillazione del CsI(Tl).

IL CONTATORE DEL LABORATORIO

SCIONIX HOLLAND BV
Dedicated Scintillation Detectors

P.O. Box 143
3980 CC Bunnik
The Netherlands
Tel. 31 (0)30 657 0312
Fax. 31 (0)30 656 7563

E-mail: SCIONIX@wxs.nl
Web: <http://www.scionix.nl>

Specifications

Subject: 25.4 B 25.4 / 1.1 - E1 - Cs- X
Description: 1"x1 CsI(Tl) Scintillation detector with built-in High ohmic Voltage Divider

Scintillation crystal : CsI(Tl) 25.4 mm diameter, 25.4 mm high
Crystal read out : 30 mm dia. photomultiplier ADIT B29B01
Detector diameter : 35 mm
Detector length : 175 mm
Wall thickness : 1.5 mm aluminum
High Voltage requirements : Positive + 800 - 800 V.
Voltage Divider : Single connector, 100 MOhm
Electrical connections : Single MNV connector at backside for combined signal and High Voltage
High Voltage Polarity : Positive
Max High voltage current needed : 10 microAmperes
Energy Resolution : < 10% FWHM @ 662 keV

B29B01W Photomultiplier

The B29B01W is a 1-1/8" diameter, 11-stage end-on photomultiplier designed for scintillation counting and other applications where high quantum efficiency, low dark current, good collection efficiency, and gas stability are of paramount importance.

Electrical Operating Ratings

	MINIMUM	TYPICAL	MAXIMUM*	UNITS
Cathode to dynode No. 1 voltage	40	150	300	VDC
Cathode to anode voltage		700	1500	VDC
Voltage between consecutive dynodes			250	VDC
Ambient storage temperature		-23	60	°C
Anode current, average over 30 sec.		10	10.0	µA
Cathode current		0.2	0.3	µA
Cathode luminous sensitivity ⁽¹⁾ With 2854°K tungsten source With blue light source ⁽²⁾	50 5	70 10	90 13	µA/Im µA/Im(B)
Quantum efficiency @ 420 nm		25		%
Cathode radiant sensitivity @ 420 nm		80		mA/W
Anode luminous sensitivity 700 VDC: With 2854°K tungsten source of 1 x 10 ¹⁰ Im	10	20	40	A/Im
Current amplification @ 700 VDC ⁽³⁾		1 X 10 ⁶		
Anode dark current ⁽⁴⁾ @ 22° C	0.02	0.05	2.0	nA
Plateau dark current ⁽⁵⁾ @ 40 nA V threshold (approx. 100 keV) with 10 ¹⁰ Cs source		180		Volts

Typical Spectral Response Characteristics

Photocathode Sensitization Data:
Spectral Response: See Figure 1
Wavelength of maximum response: 400 ± 50 nm
Minimum diameter: 34 mm
Window shape: plano-convex circular
Window inside of cathode: Cs₂ coated Ba₈ & Cs₂
Dynodes: Any
Capacitors (anode to all): Any
Operating position: Upright
Weight: 90 grams
Rev: 01/04

SCIONIX HOLLAND BV
ASSEMBLY