

Misure con fototubi

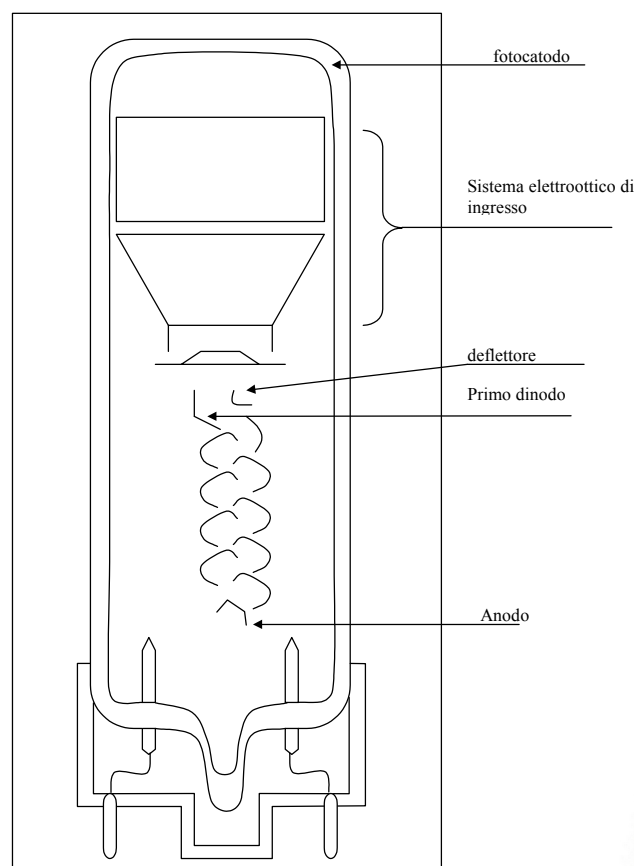
Il Fotomoltiplicatore (PMT)

Un tubo fotomoltiplicatore è un rivelatore elettronico di luce estremamente sensibile, in grado di rilevare il **singolo fotone**, fornendo in uscita una corrente elettrica proporzionale all'intensità della luce.

- tubo in vetro al cui interno è stato praticato il vuoto
- catodo
- anodo
- diversi elettrodi (dinodi)
- funziona se si applica una tensione di alcune centinaia di Volt tra catodo e massa (850 V)

Il funzionamento del fotomoltiplicatore si basa principalmente su due effetti

- **effetto fotoelettrico**
- **emissione secondaria**



Come funziona un Fototubo

→ La parte che converte i fotoni in elettroni → fotoelettroni

- Finestra a protezione del fotocatodo
- Il fotocatodo, che posto in testa al fototubo raccoglie i singoli fotoni di luce e li trasforma in fotoelettroni

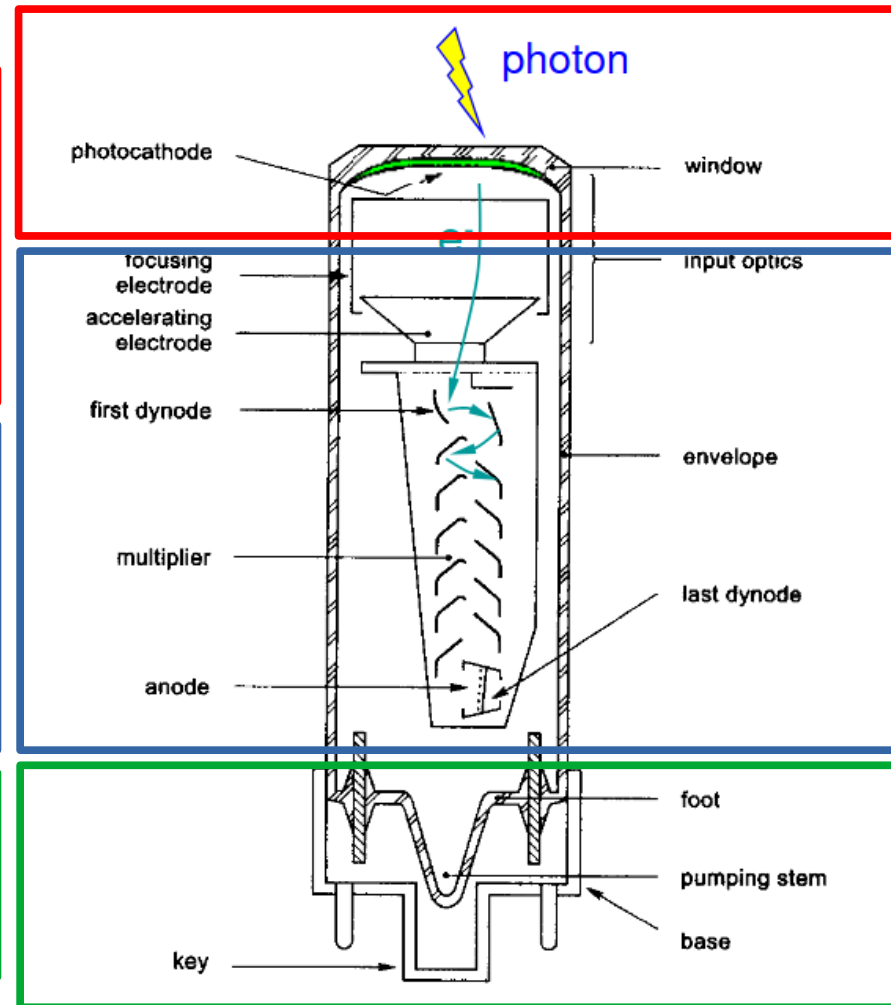
→ Il sistema di amplificazione del segnale iniziale

- Un sistema di focalizzazione e accelerazione
- Uno stadio moltiplicatore di corrente costituito da elettrodi (dinodi) che utilizza il fenomeno dell'emissione secondaria di elettroni.

→ Un anodo

→ Il partitore di tensione

- modulo elettronico che distribuisce la differenza di potenziale all'interno del fototubo e la mantiene costante



Come funziona un Fototubo

→ La parte che converte i fotoni in elettroni → fotoelettroni

- Finestra a protezione del fotocatodo
- Il fotocatodo, che posto in testa al fototubo raccoglie i singoli fotoni di luce e li trasforma in fotoelettroni

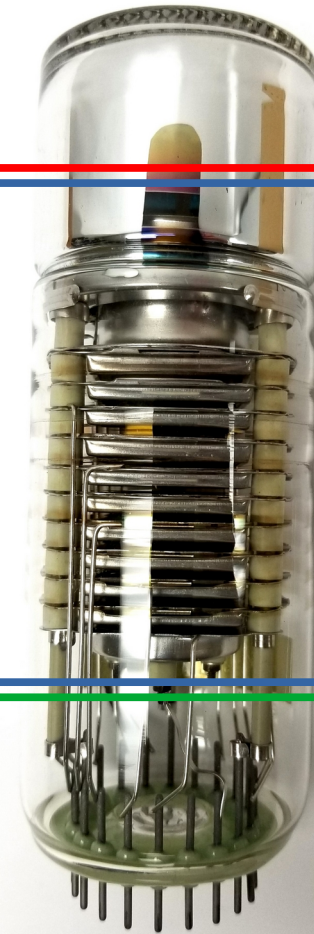
→ Il sistema di amplificazione del segnale iniziale

- Un sistema di focalizzazione e accelerazione
- Uno stadio moltiplicatore di corrente costituito da elettrodi (dinodi) che utilizza il fenomeno dell'emissione secondaria di elettroni.

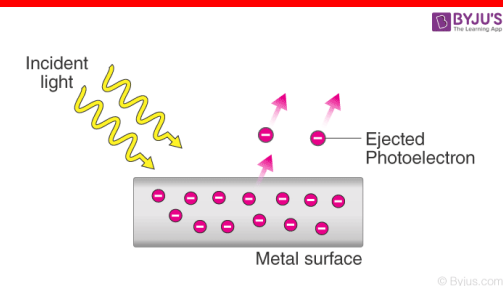
→ Un anodo

→ Il partitore di tensione

- modulo elettronico che distribuisce la differenza di potenziale all'interno del fototubo e la mantiene costante

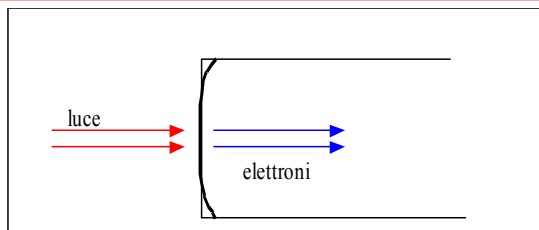


Fotocatodo e Effetto fotoelettrico



Il fotocatodo converte la luce incidente in una corrente di elettroni via Effetto fotoelettrico: emissione di elettroni da parte di un metallo colpito da radiazione elettromagnetica

■ **Fotocatodo: un film sensibile alla luce (strato emittente) e di uno strato di supporto, sul quale il film emittente è depositato.**



- Fotocatodo semitrasparente: lo strato di supporto è semitrasparente, quindi può essere attraversato dalla luce che raggiunge lo strato emittente.
- il numero degli elettroni emessi per unità di tempo aumenta all'aumentare dell'intensità della radiazione elettromagnetica incidente

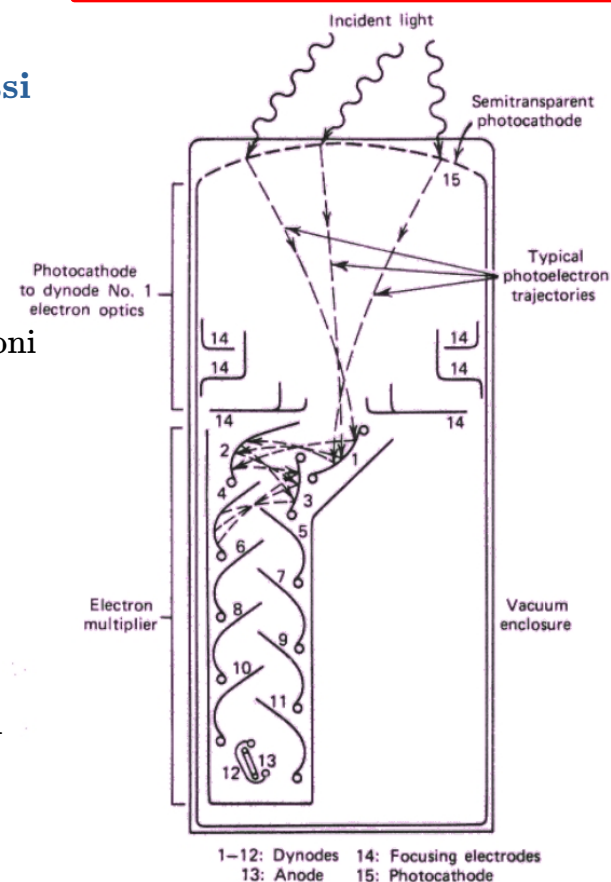
■ **Sistema di raccolta dei fotoelettroni: accelera e focalizza i fotoelettroni emessi dal fotocatodo, in modo che questi raggiungano il primo dinodo**

- buona efficienza di raccolta: deve fare giungere al primo dinodo il maggior numero di elettroni
- buone caratteristiche temporali: il campo elettrico del sistema di focalizzazione tra fotocatodo e primo dinodo progettato per compensare le differenze di percorso degli elettroni

■ **Sistema moltiplicatore: una serie di dinodi, ognuno mantenuto ad un potenziale maggiore rispetto al precedente.**

- i fotoelettroni che giungono al primo dinodo provocano l'emissione di elettroni secondari che, accelerati dal campo elettrico, vanno a incidere sul secondo dinodo, causando anch'essi emissione di altri elettroni.

■ **Anodo** → all'anodo giunge un numero di elettroni molto maggiore di quelli arrivati al primo dinodo ($\sim 10^6$ volte)



Il Rivelatore a scintillazione

Un rivelatore a scintillazione

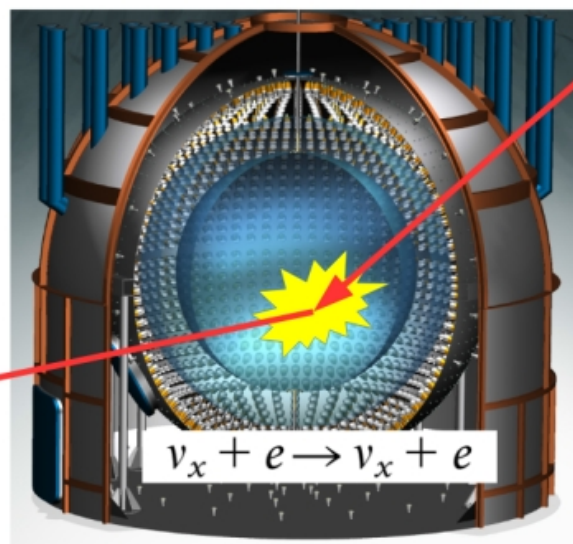
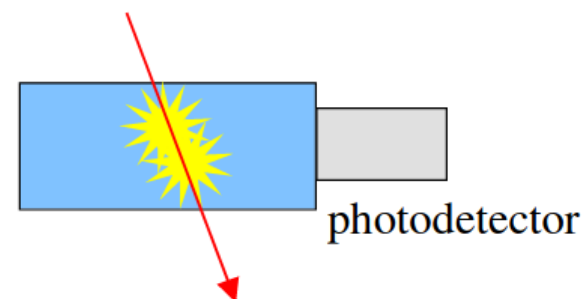
→ materiale scintillante accoppiato otticamente ad un fotomoltiplicatore (PMT)

Quando la particella passa attraverso lo scintillatore eccita gli atomi e le molecole dello scintillatore

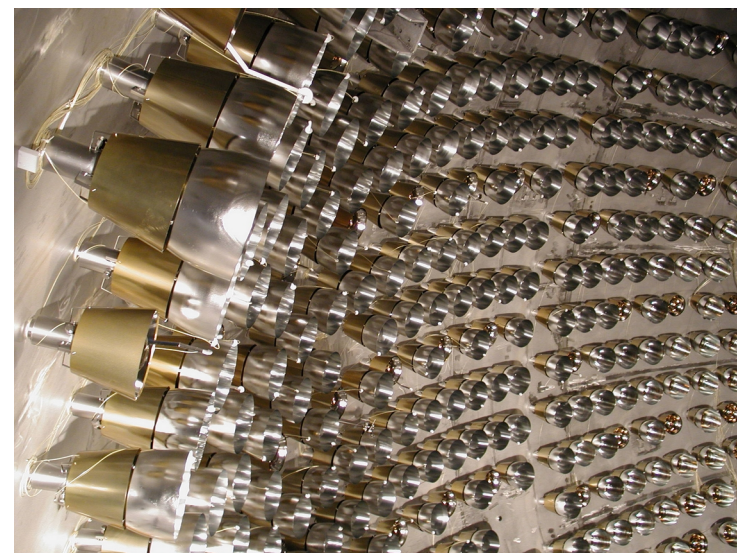
→ si emette luce

→ la luce viene trasmessa al PMT e viene convertita in una debole corrente di fotoelettroni, amplificata dai dinodi del PMT

→ abbiamo un segnale in corrente facilmente rivelabile dall'elettronica, amplificato di 10^6 - 10^7



PMT di Borexino



Rivelatore a scintillazione con PMT

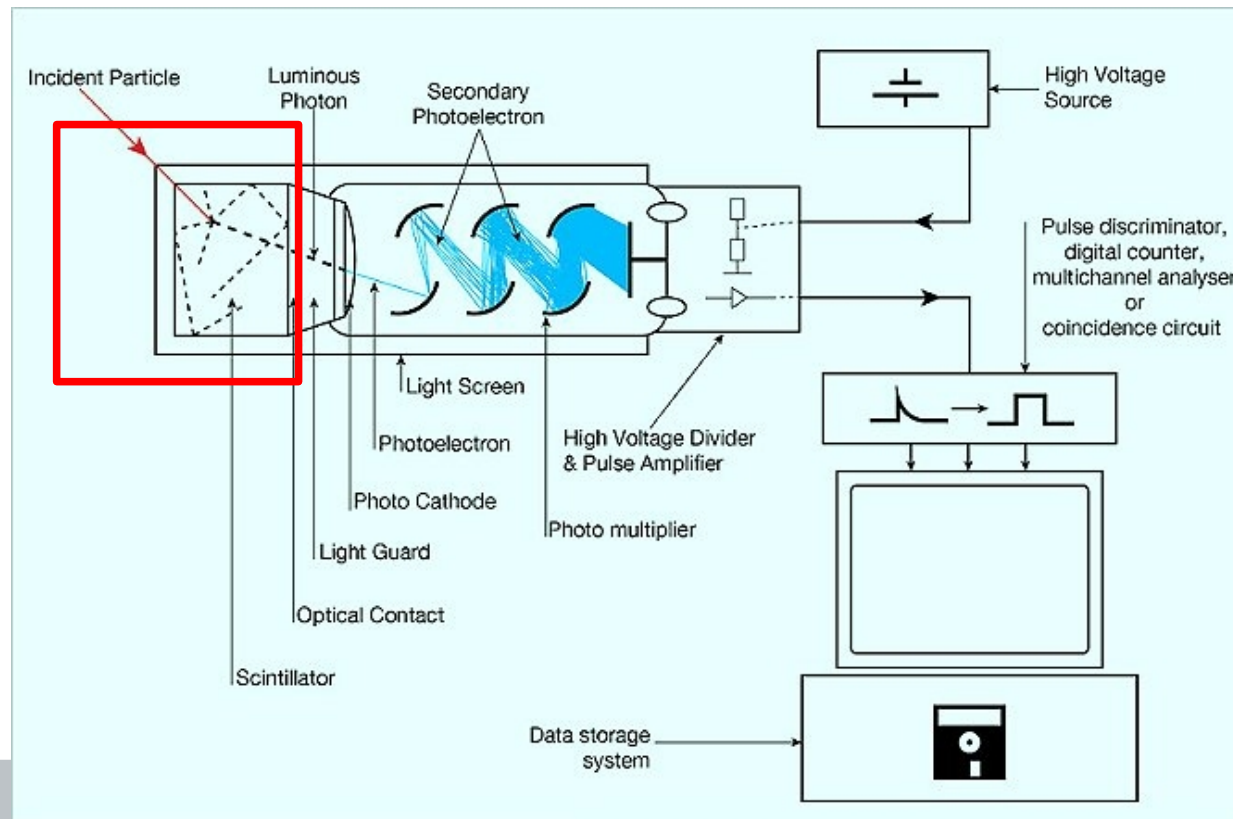
(1) Uno scintillatore è un materiale che converte l'energia persa dalla radiazione ionizzante in impulsi di luce.

(2) Gli impulsi di luce emessi dal materiale scintillante possono essere rilevati da un rivelatore di luce sensibile, spesso un tubo fotomoltiplicatore (PMT).

(3) Il fotocatodo del PMT, che si trova sul retro della finestra d'ingresso, converte la luce (fotoni) in cosiddetti fotoelettroni.

(4) I fotoelettroni vengono quindi accelerati da un campo elettrico verso i dinodi del PMT dove ha luogo il processo di moltiplicazione.

(5) Ogni impulso luminoso (scintillazione) produce un impulso di carica sull'anodo del PMT che può essere successivamente rilevato da apparecchiature elettroniche, oscilloscopio, analizzato.



Rivelatore a scintillazione con PMT

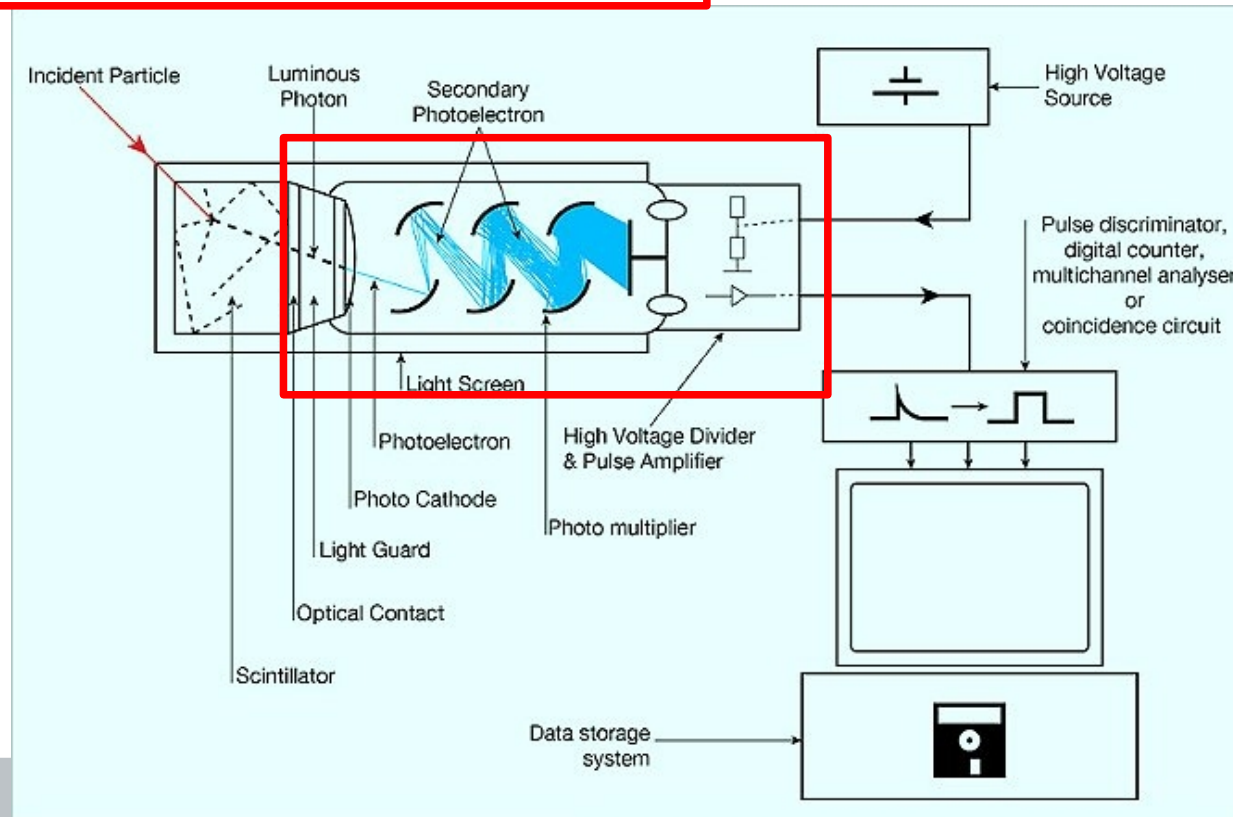
(1) Uno scintillatore è un materiale che converte l'energia persa dalla radiazione ionizzante in impulsi di luce.

(2) Gli impulsi di luce emessi dal materiale scintillante possono essere rilevati da un rivelatore di luce sensibile, spesso un tubo fotomoltiplicatore (PMT).

(3) Il fotocatodo del PMT, che si trova sul retro della finestra d'ingresso, converte la luce (fotoni) in cosiddetti fotoelettroni.

(4) I fotoelettroni vengono quindi accelerati da un campo elettrico verso i dinodi del PMT dove ha luogo il processo di moltiplicazione.

(5) Ogni impulso luminoso (scintillazione) produce un impulso di carica sull'anodo del PMT che può essere successivamente rilevato da altre apparecchiature elettroniche, oscilloscopio, analizzato.



Rivelatore a scintillazione con PMT

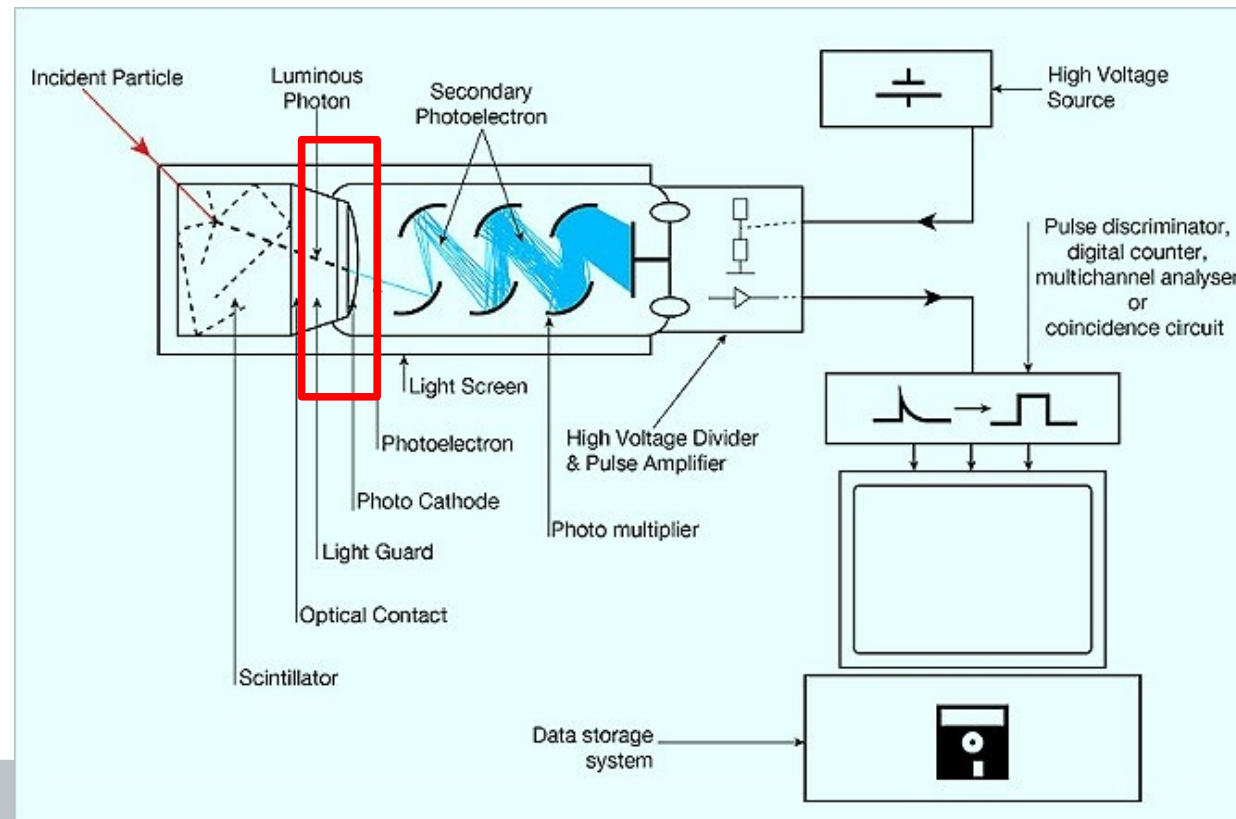
(1) Uno scintillatore è un materiale che converte l'energia persa dalla radiazione ionizzante in impulsi di luce.

(2) Gli impulsi di luce emessi dal materiale scintillante possono essere rilevati da un rivelatore di luce sensibile, spesso un tubo fotomoltiplicatore (PMT).

(3) Il fotocatodo del PMT, che si trova sul retro della finestra d'ingresso, converte la luce (fotoni) in cosiddetti fotoelettroni.

(4) I fotoelettroni vengono quindi accelerati da un campo elettrico verso i dinodi del PMT dove ha luogo il processo di moltiplicazione.

(5) Ogni impulso luminoso (scintillazione) produce un impulso di carica sull'anodo del PMT che può essere successivamente rilevato da altre apparecchiature elettroniche, oscilloscopio, analizzato.



Rivelatore a scintillazione con PMT

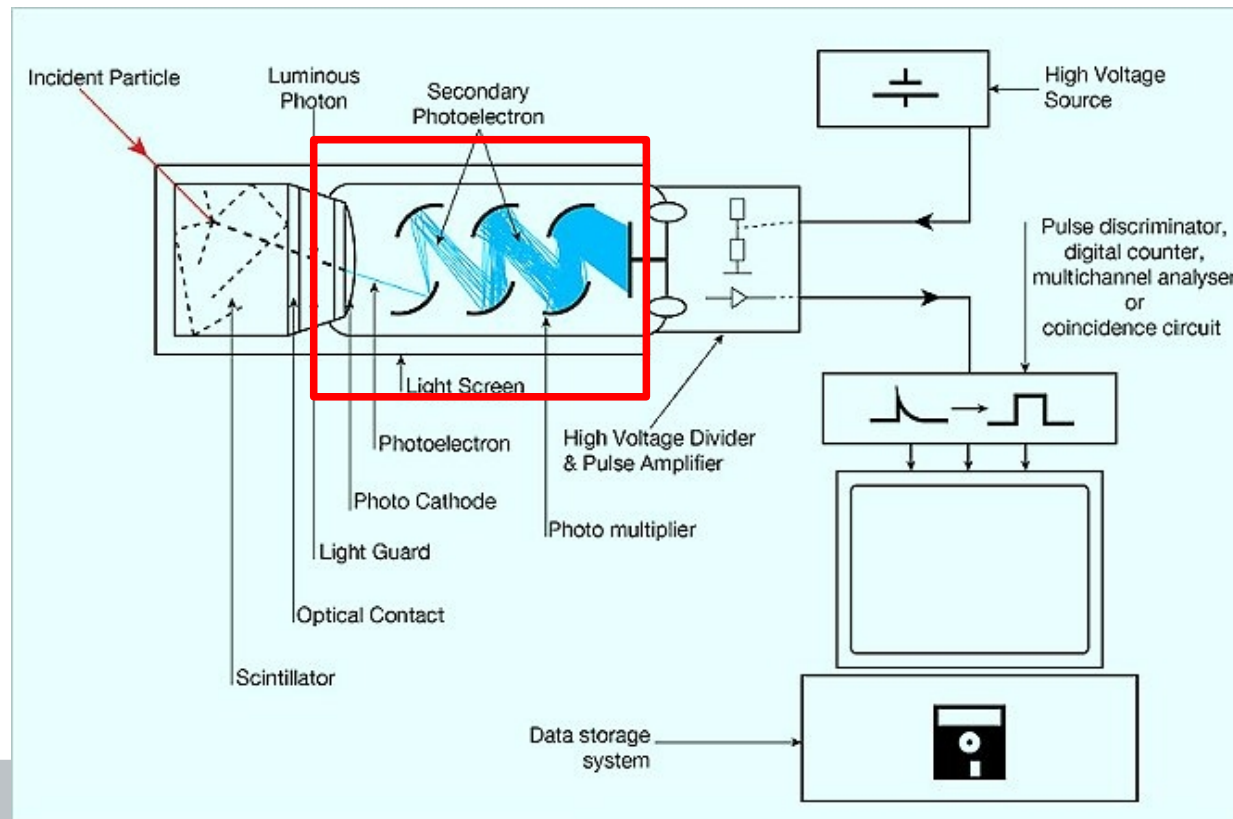
(1) Uno scintillatore è un materiale che converte l'energia persa dalla radiazione ionizzante in impulsi di luce.

(2) Gli impulsi di luce emessi dal materiale scintillante possono essere rilevati da un rivelatore di luce sensibile, spesso un tubo fotomoltiplicatore (PMT).

(3) Il fotocatodo del PMT, che si trova sul retro della finestra d'ingresso, converte la luce (fotoni) in cosiddetti fotoelettroni.

(4) I fotoelettroni vengono quindi accelerati da un campo elettrico verso i dinodi del PMT dove ha luogo il processo di moltiplicazione.

(5) Ogni impulso luminoso (scintillazione) produce un impulso di carica sull'anodo del PMT che può essere successivamente rilevato da altre apparecchiature elettroniche, oscilloscopio, analizzato.



Rivelatore a scintillazione con PMT

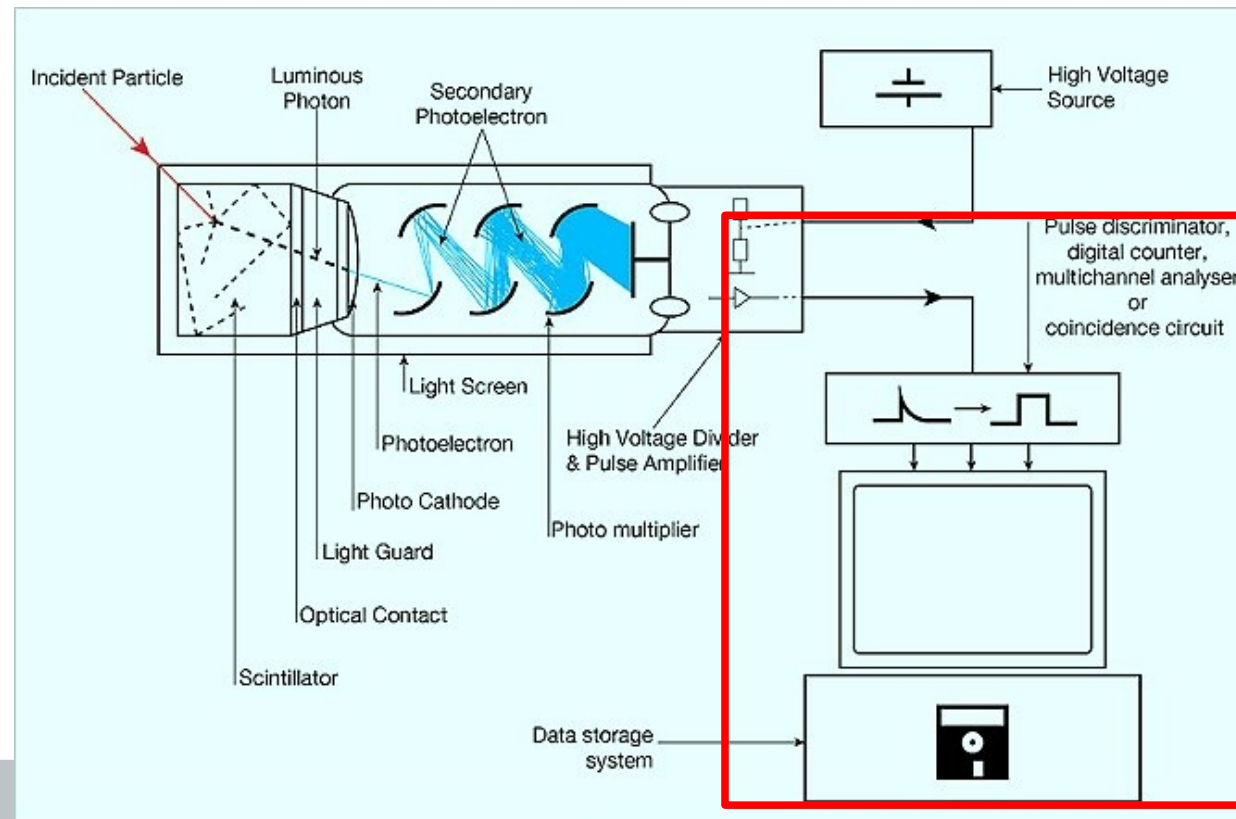
(1) Uno scintillatore è un materiale che converte l'energia persa dalla radiazione ionizzante in impulsi di luce.

(2) Gli impulsi di luce emessi dal materiale scintillante possono essere rilevati da un rivelatore di luce sensibile, spesso un tubo fotomoltiplicatore (PMT).

(3) Il fotocatodo del PMT, che si trova sul retro della finestra d'ingresso, converte la luce (fotoni) in cosiddetti fotoelettroni.

(4) I fotoelettroni vengono quindi accelerati da un campo elettrico verso i dinodi del PMT dove ha luogo il processo di moltiplicazione.

(5) Ogni impulso luminoso (scintillazione) produce un impulso di carica sull'anodo del PMT che può essere successivamente rilevato da altre apparecchiature elettroniche, oscilloscopio, analizzato.



Caratteristiche temporali del Fototubo

La risposta di un fotomoltiplicatore ad un impulso luminoso molto breve (che approssima una delta) è un impulso di corrente sull'anodo, ritardato rispetto a quello d'ingresso, con forma e larghezza caratteristiche del fototubo.

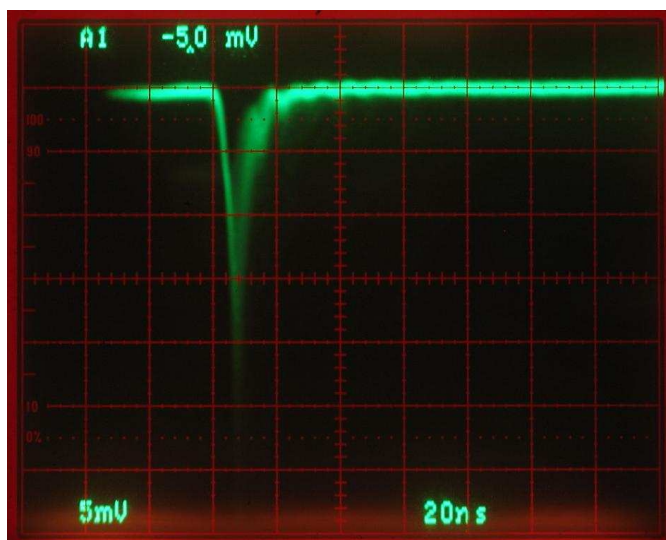
La risposta temporale dipende soprattutto dalla configurazione dei dinodi e dalla tensione di alimentazione.

Il tempo di salita → il tempo che impiega la corrente all'anodo per andare dal 10% al 90% del valore massimo.
~ **1-10 ns**

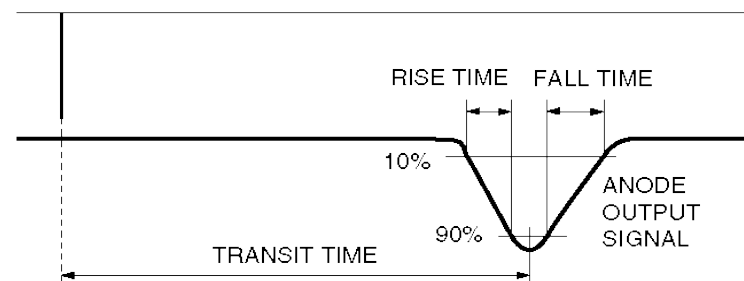
Il tempo di discesa → il tempo che impiega l'impulso di uscita per scendere dal 90% al 10% del valore massimo
~ **pochi ns a poche decine di ns**, circa due o tre volte maggiori rispetto al tempo di salita.

SinglePhoto Electron
characteristics
for PMT
ETL-9351.

Rise time: 4 ns
Fall time: 10 ns
Amplitude: -12mV
Charge: 1.6 pC



DELTA FUNCTION LIGHT



Caratteristiche del Fototubo: Dark Current

Dark Current → anche in condizione di assenza di luce, all'uscita del fotomoltiplicatore è presente una piccola corrente

1) Emissione termoionica dal catodo e dinodi

→ I materiali superficiali del fotocatodo e dei dinodi emettono elettroni per effetto termico.

2) Leakage current

→ piccole correnti (fino al nA) che scorrono attraverso i supporti degli elettrodi, o attraverso l'involucro o la base del fototubo, o qualsiasi altro isolante.

3) Ionizzazione di gas

→ gas residui all'interno del PMT nonostante sia a vuoto vengono ionizzati dalle collisioni con gli elettroni.

4) Effetti di campo

→ quando il campo elettrico tra i dinodi diventa abbastanza grande, un numero non trascurabile di elettroni viene emesso per effetto di campo

5) Raggi cosmici, radiazioni da radioisotopi contenuti negli involucri di vetro e raggi gamma ambientali

→ muoni $1 \text{ muone/cm}^2/\text{min}$ → rilasciano per effetto Cherenkov un alto numero di elettroni (più di 15 fotoelettroni), generando impulsi di grande ampiezza.

→ vetri del PMT con ^{40}K

→ gamma ambientali da radioisotopi

(1) Caratterizzare un PMT

Single Photo Electron spectrum del PMT utilizzando dark noise per stimare il guadagno del PMT

Spettro di singolo fotoelettrone: spettro dell'uscita del fotomoltiplicatore risultante dall'ingresso di un singolo fotoelettrone nel sistema moltiplicatore

→ In condizione di singolo fotoelettrone, il numero degli elettroni rilevati all'anodo equivale al guadagno del PMT

Guadagno = fattore di amplificazione totale di un fotomoltiplicatore

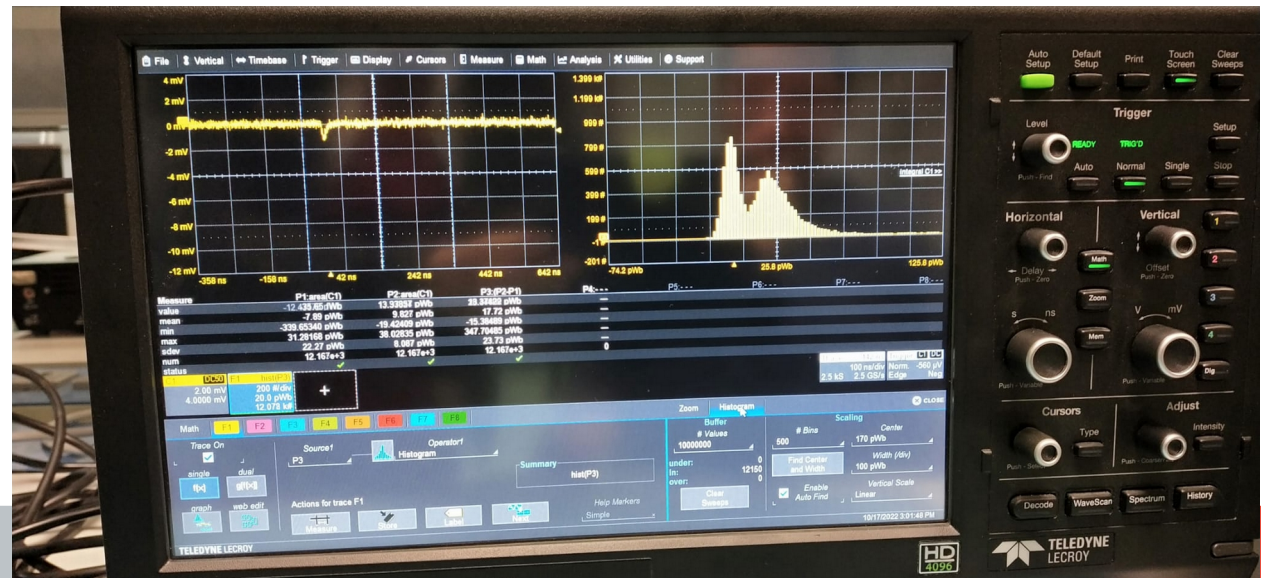
→ dipende dal numero di dinodi e dalla tensione di lavoro per PMT

Il PMT si considera in condizione di singolo foto-elettrone quando in risposta alla radiazione incidente sul fotocatodo, la probabilità che venga emesso più di un fotoelettrone è trascurabile rispetto alla probabilità che ne venga emesso solo uno.

→ Plot della distribuzione della quantità di carica di una larga statistica di segnali di uscita in condizione di singolo fotoelettrone

→ La posizione del picco fornisce il valore medio della quantità di carica dei segnali di uscita

→ stima del guadagno



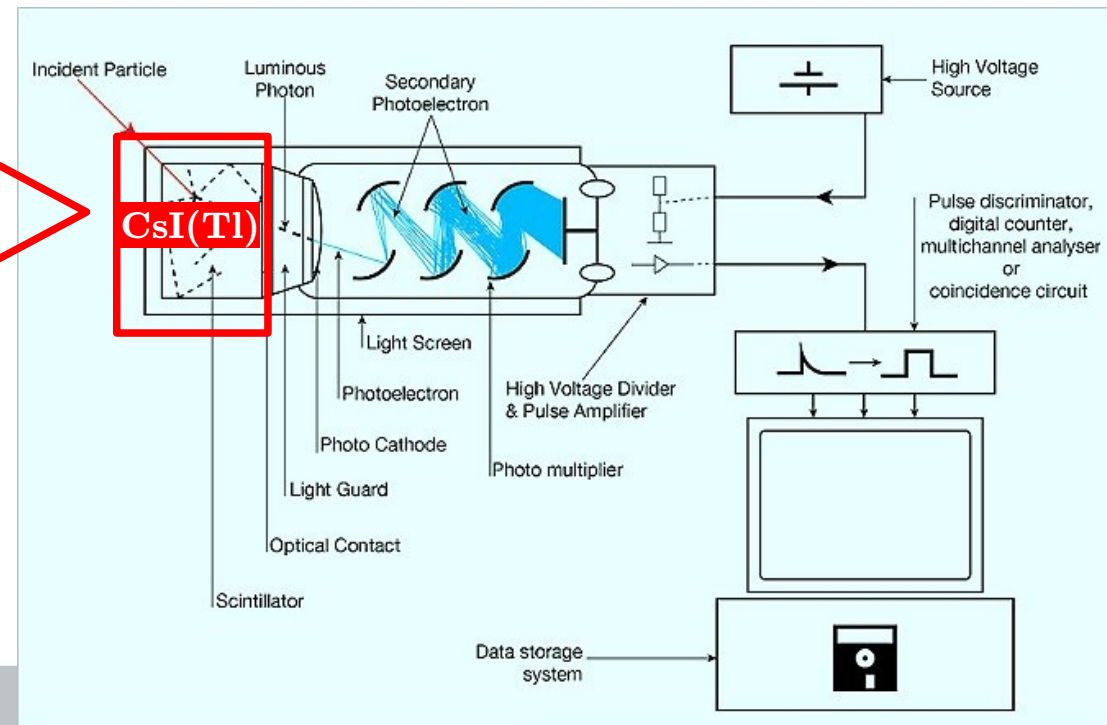
(2) CsI(Tl) Ioduro di Cesio drogato con Tallio

Un Rivelatore a scintillazione per gamma ambientali

- materiale scintillante + PMT
- quando la particella passa attraverso lo scintillatore eccita gli atomi e le molecole dello scintillatore
- si emette luce.
- la luce viene trasmessa al PMT e viene convertita in una debole corrente di fotoelettroni, amplificata dai dinodi
- abbiamo un segnale in corrente facilmente rivelabile dall'elettronica, amplificato di 10^6 - 10^7

**Scintillatore Inorganico
CsI(Tl) Ioduro di Cesio**

→ ~ 50 Photons/KeV



(3) Spettro gamma del ^{232}Th

Catena di decadimento del Torio

