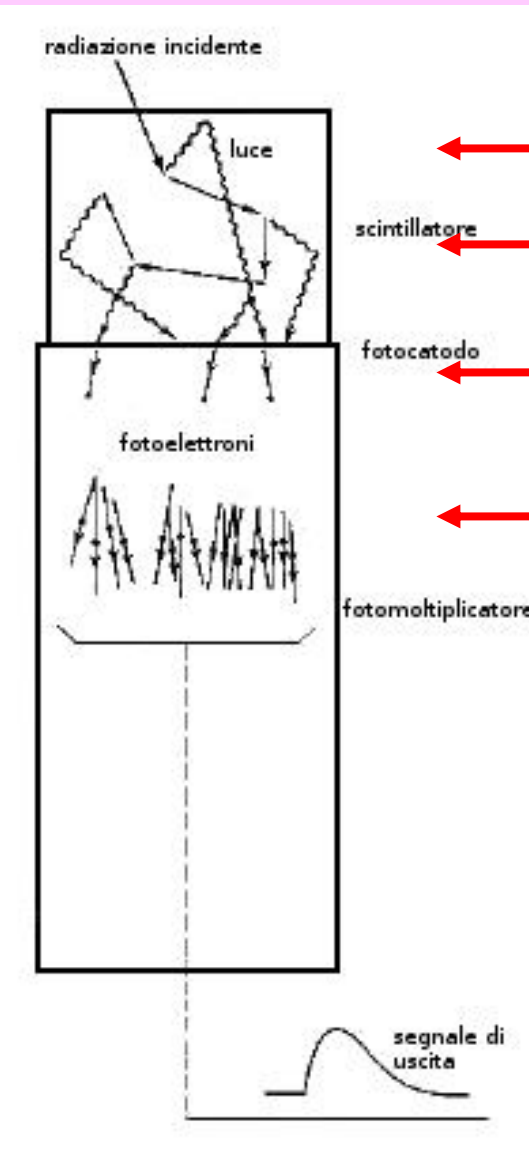


Rivelatori a scintillazione

Principio di funzionamento



eccitazione degli atomi

stati eccitati si diseccitano emettendo luce visibile

luce colpisce una superficie fotosensibile

elettroni secondari sono accelerati e moltiplicati

Caratteristiche ottimali:

- efficiente conversione energia – luce
- linearità energia – luce
- trasparenza alla propria luce
- breve tempo di decadimento
- indice di rifrazione vicino a quello del vetro (1.5)

Tipi di rivelatori a scintillazione:

- organici
- inorganici

Scintillatori organici

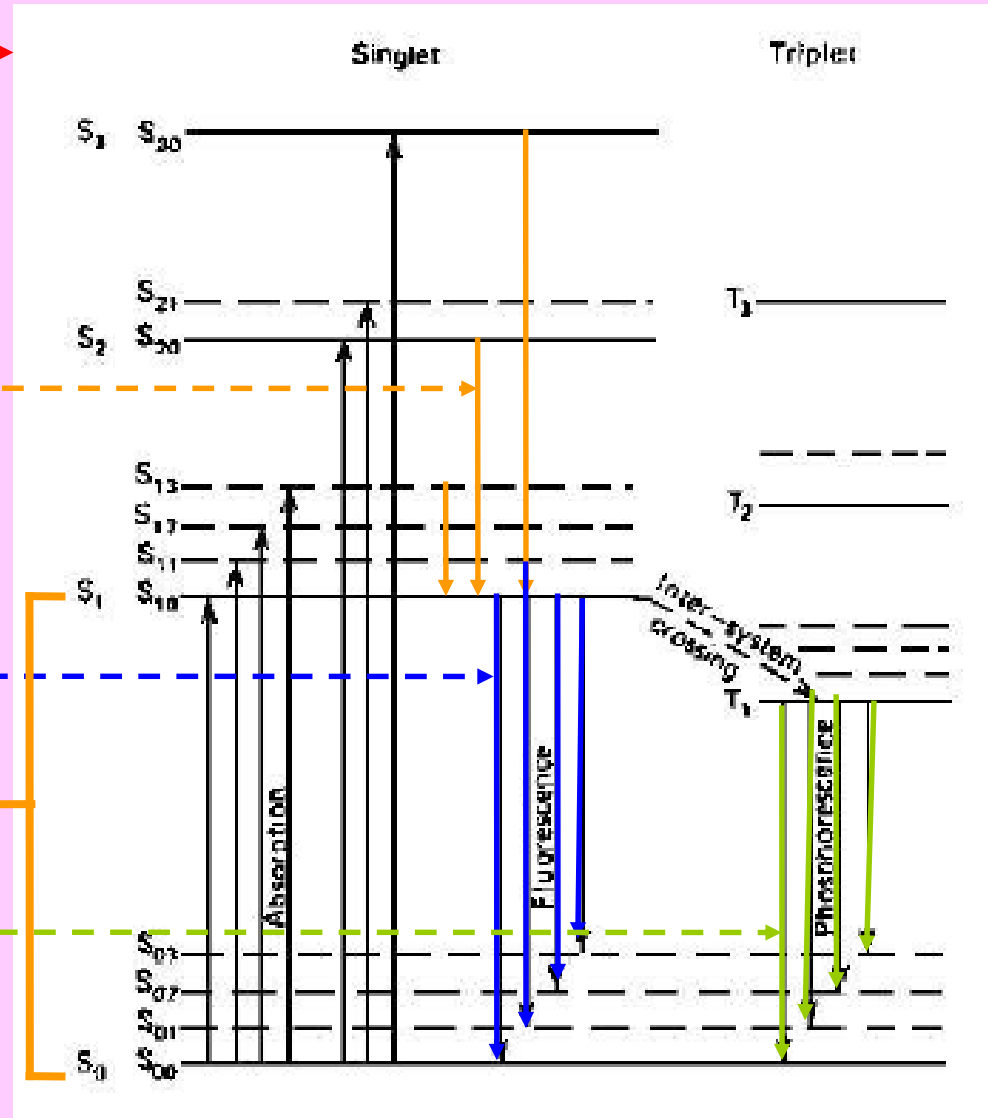
Stati eccitati di singola molecola

Diseccitazione non radiativa
 $\tau_1 \approx 100$ ps

Diseccitazione fluorescente
 $\tau_2 \approx$ ns

3-4 eV \rightarrow
400-300 nm

Diseccitazione fosforescente
 $\tau_3 \approx$ ms



Scintillatori organici

Risposta temporale

$$I = I_0 f_G(t) e^{-t/\tau_2}$$

funzione gaussiana $f_G(t)$ con deviazione standard $\sigma \simeq \tau_1$

Uscita di luce
“formula di Birks”

$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}}$$

quenching

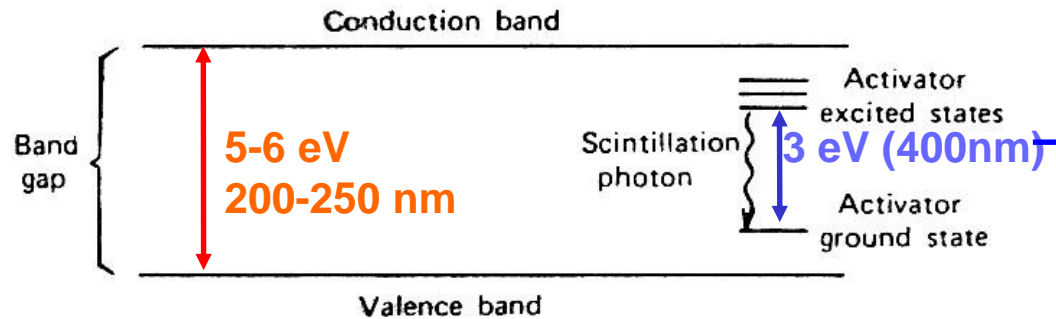
riduzione dell'efficienza di scintillazione

eccitazione da elettroni veloci $kB(dE/dx)$ è molto minore di 1
particella α il termine $kB(dE/dx)$ è molto maggiore di 1

Materiale	Densità g/cm ³	Resa di luce Fotoni/MeV	Lunghezza d'onda di max. emissione (nm)	Costante di decadimento (ns)
Antracene	1.25	16500	446	30
BC-404	1.03	11200	408	1.8
BC-444	1.03	6800	428	285

1 fotone/60 eV

Scintillatori inorganici



reticolo cristallino

Decadimento
 $\tau \approx \mu\text{s}$

Figure 8.6 Energy band structure of an activated crystalline scintillator.

Spettri di emissione

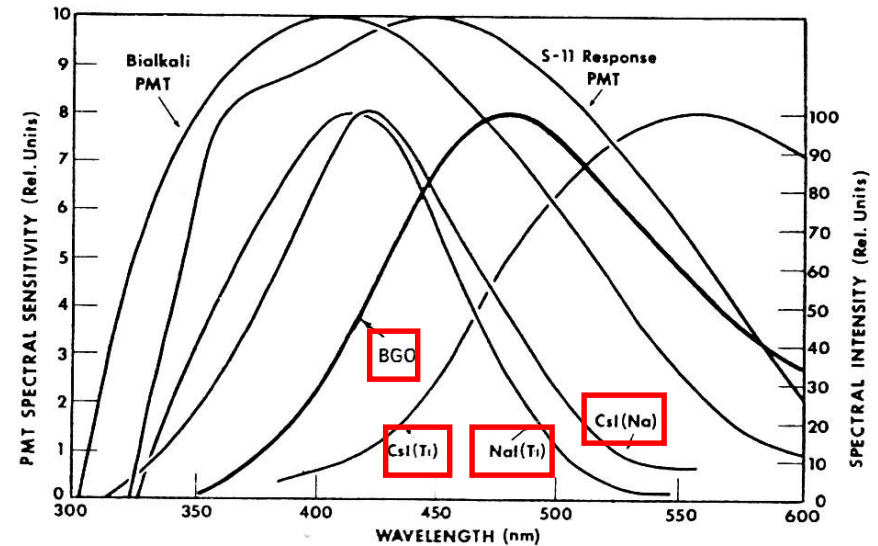


Figure 8.7 The emission spectra of several common inorganic scintillators. Also shown are the response curves for two widely used photocathodes. (Primarily from *Scintillation Phosphor Catalog*, The Harshaw Chemical Company. The emission spectrum for BGO is from Ref. 72.)

Scintillatori inorganici

NaI (TI)

energia depositata di 1 MeV

20 eV/coppia \longrightarrow $5 \cdot 10^4$ coppie

Sperimentalmente

efficienza assoluta di scintillazione 12%

$4 \cdot 10^4$ fotoni da 3 eV

La resa è quindi molto vicina a 1 fotone/coppia.

ottima efficienza del processo di trasferimento di energia agli attivatori

Scintillatori inorganici

Risposta temporale

$$I = I_0 e^{-t/\tau}$$

Uscita di luce

$$\frac{dL}{dx} \parallel_e = S \frac{dE}{dx}$$

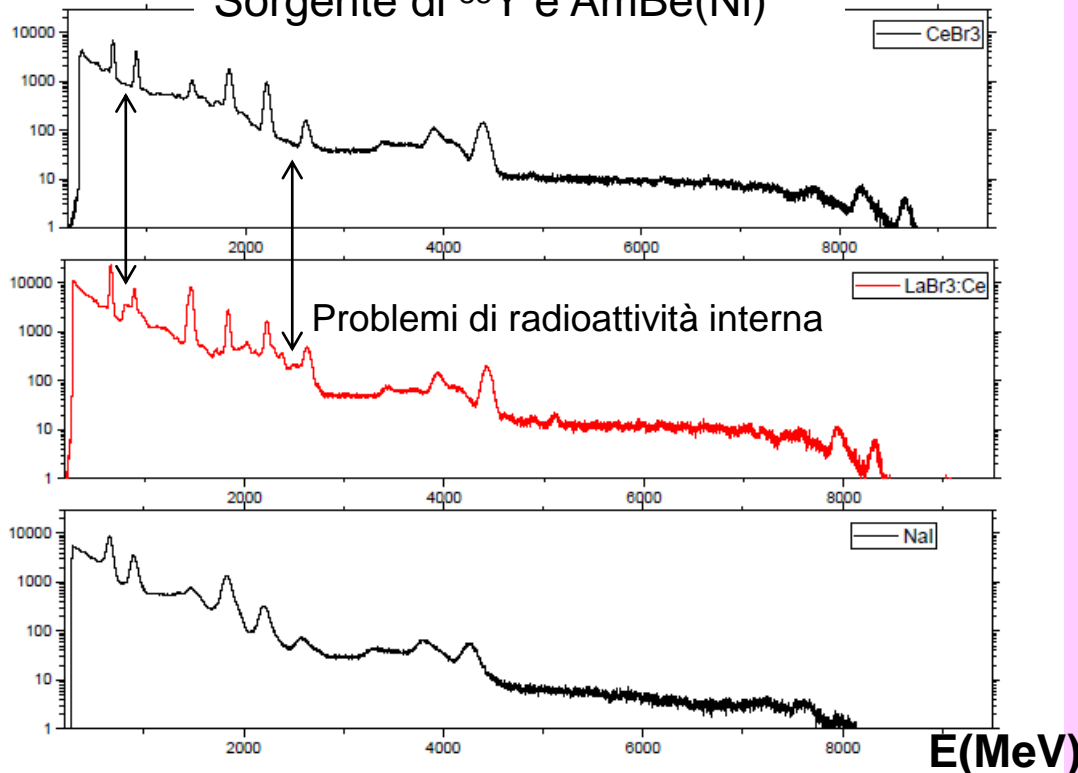
Materiale	Densità (g/cm ³)	Resa di luce Fotoni/MeV	Lunghezza d'onda di max. emissione (nm)	Costante di decadimento (μs)
Nal (Tl)	3.67	38000	415	0.23
Csl (Tl)	4.51	65000	540	0.68(64%), 3.34 (36%)
BGO	7.13	8200	480	0.06(10%), 0.30(90%)
CdWO ₄	7.90	15000	470	1.1(40%), 14.5(60%)
BaF ₂	4.89	1400,9500	220,310	0.0006(13%), 0.63(87%)

Scintillatori inorganici: novità dal mercato

Material	Light Yield [ph/MeV]	Emission λ_{\max} [nm]	En. Res. at 662 keV [%]	Density [g/cm ³]	Principal decay time [ns]
NaI:Tl	38000	415	6-7	3.7	230
CsI:Tl	52000	540	6-7	4.5	1000
LaBr ₃ :Ce	63000	360	3	5.1	17
SrI ₂ :Eu	80000	480	3-4	4.6	1500
CeBr ₃	45000	370	~4	5.2	17
GYGAG	40000	540	<5	5.8	250
CLYC:Ce	20000	390	4	3.3	1 CVL 50, ~1000

ceramic scintillator

Sorgente di ⁸⁸Y e AmBe(Ni)



AmBe(Ni) source:

A core of ⁹Be and alpha-unstable ²⁴¹Am is surrounded by a thick layer of paraffin; some metal discs of nickel are also placed inside the paraffin layer. When an alpha particle is emitted by the ²⁴¹Am, there is a high probability that it is captured by ⁹Be, leading to ⁹Be(α ,n)¹²C reaction. The neutrons are thermalized by multiple scattering in the paraffin layer, which serves both as moderator and as shielding

The CLYC scintillator ($\text{Cs}_2\text{LiYCl}_6:\text{Ce}^{3+}$)

The CLYC crystals were developed approximately 10 years ago.

- ✓ Density of 3.3 g/cm^3 ,
- ✓ light yield of 20 ph/keV
- ✓ high linearity, especially at low energy.
- ✓ Energy resolution at $622 \text{ keV} < 5\%$
- ✓ time resolution of 1.5 ns .
- ✓ Excellent neutron gamma discrimination.

Fast neutrons:

- ✓ $^{35}\text{Cl}(n,p)^{35}\text{S} \rightarrow Q\text{-value} = 0.6 \text{ MeV} \sigma \approx 0.2 \text{ barns}$ at $E_n = 3 \text{ MeV}$
- ✓ $^{35}\text{Cl}(n,\alpha)^{32}\text{P} \rightarrow Q\text{-value} = 0.9 \text{ MeV} \sigma \approx 0.01 \text{ barns}$ at $E_n = 3 \text{ MeV}$

Thermal neutrons:

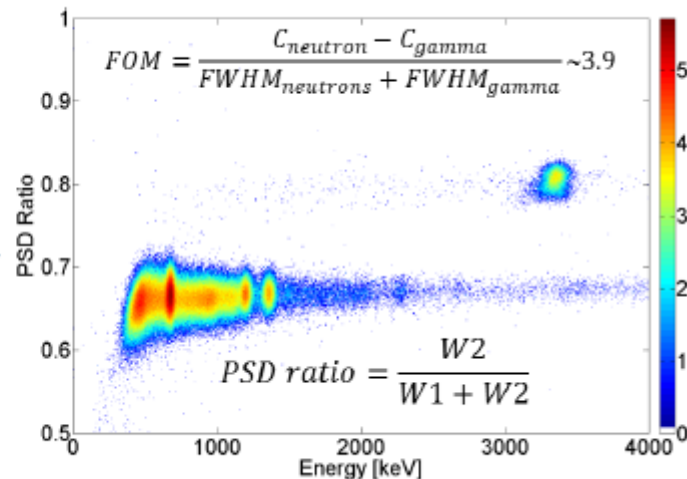
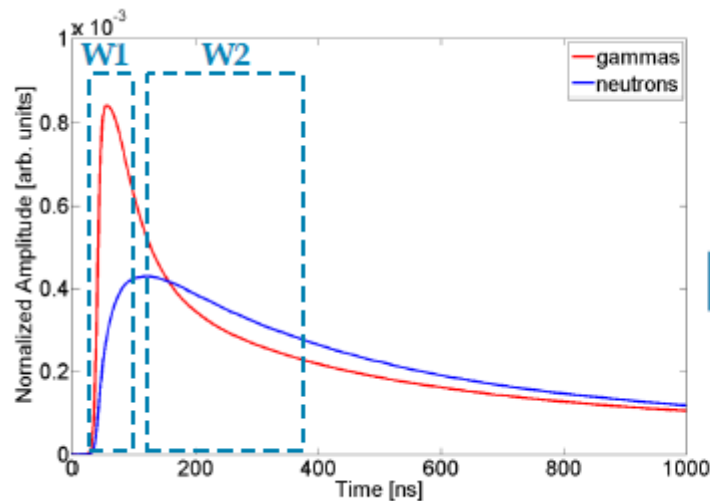
- ✓ $^6\text{Li}(n,\alpha)t \rightarrow Q\text{-value} = 4.78 \text{ MeV} \sigma = 940 \text{ barns}$ at $E_n = 0.025 \text{ eV}$.

To fast neutron detection:

^7Li ($^7\text{Li} > 99\%$) enriched CLYC \rightarrow CLYC-7

To Thermal neutron detection:

^6Li ($^6\text{Li} = 95\%$) enriched CLYC \rightarrow CLYC-6



Scintillatori

Uniformità nella raccolta di luce

La luce prodotta nella rivelazione è emessa in tutte le direzioni

↓
autoassorbimento ottico dentro lo scintillatore

perdite alla superficie dello scintillatore



riduce il numero di fotoni

lo scintillatore è avvolto da un materiale riflettore

riflettori diffusori:

ossido di magnesio o ossido di alluminio

nastro di teflon o carta millipore

accoppiamento tra scintillatore e PM

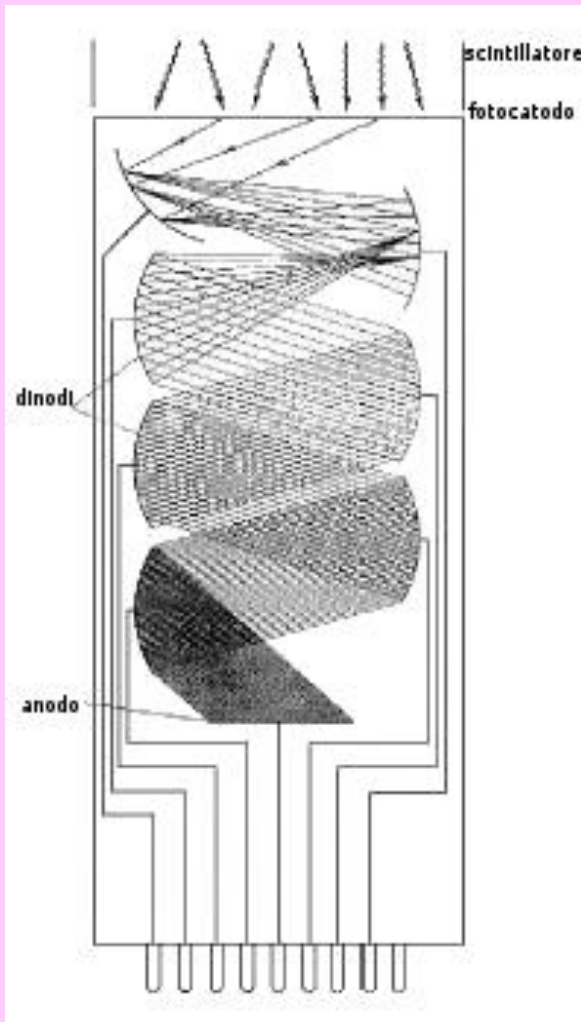
guide di luce

grasso ottico costituito da silicone ad alta viscosità

Scintillatori

Conversione segnali di luce in impulsi di corrente

Fotomoltiplicatori e fotodiodi



Il fotocatodo

$$\text{efficienza quantica} = \frac{\text{numero dei fotoelettroni emessi}}{\text{numero dei fotoni incidenti}}$$

Moltiplicazione degli elettroni

Potenziale di accelerazione (~100 V)

Resa di emissione elettronica

Fattore di moltiplicazione di singolo stadio δ

Partitore resistivo e singolo alimentatore di tensione

Scintillatori

Conversione segnali di luce in impulsi di corrente

Fotomoltiplicatori

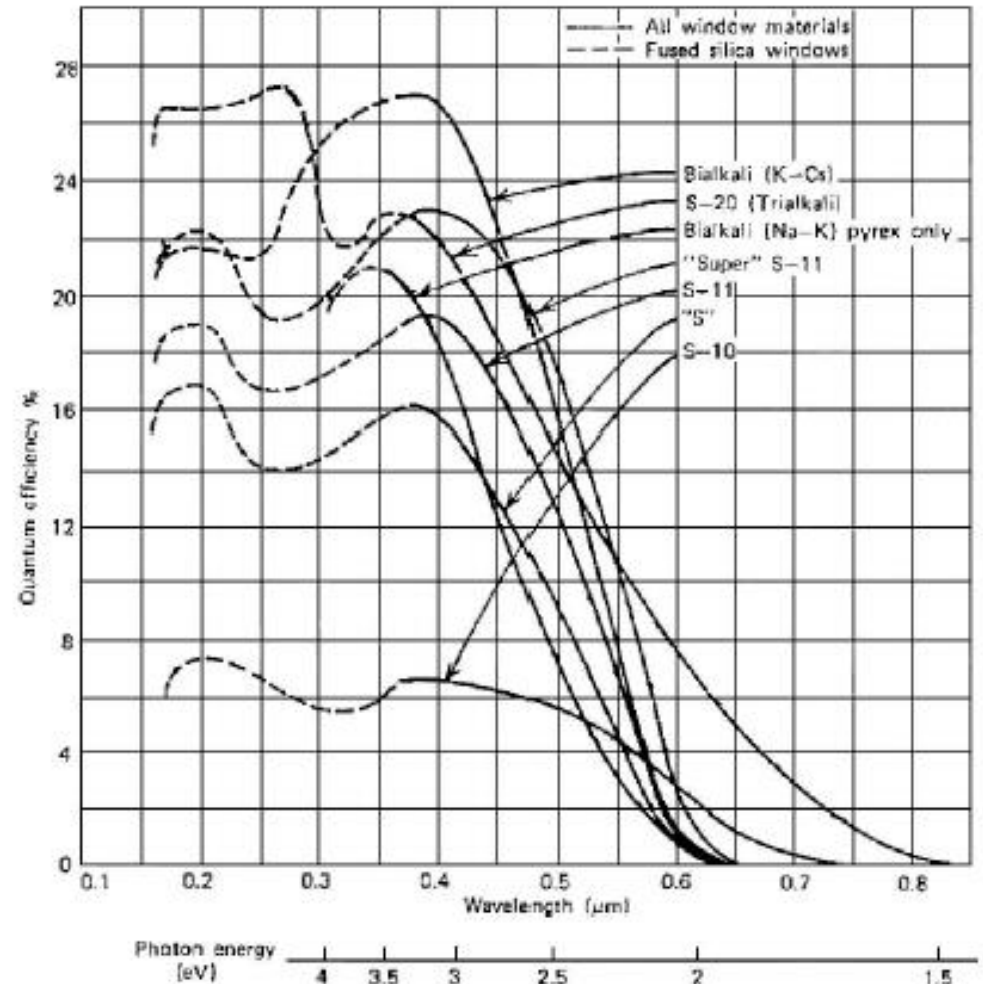
Il fotocatodo

efficienza quantica



In laboratorio:

- XP2020 finestra di vetro
- XP2020Q finestra sottile di quarzo (essenziale per BaF_2)



Scintillatori

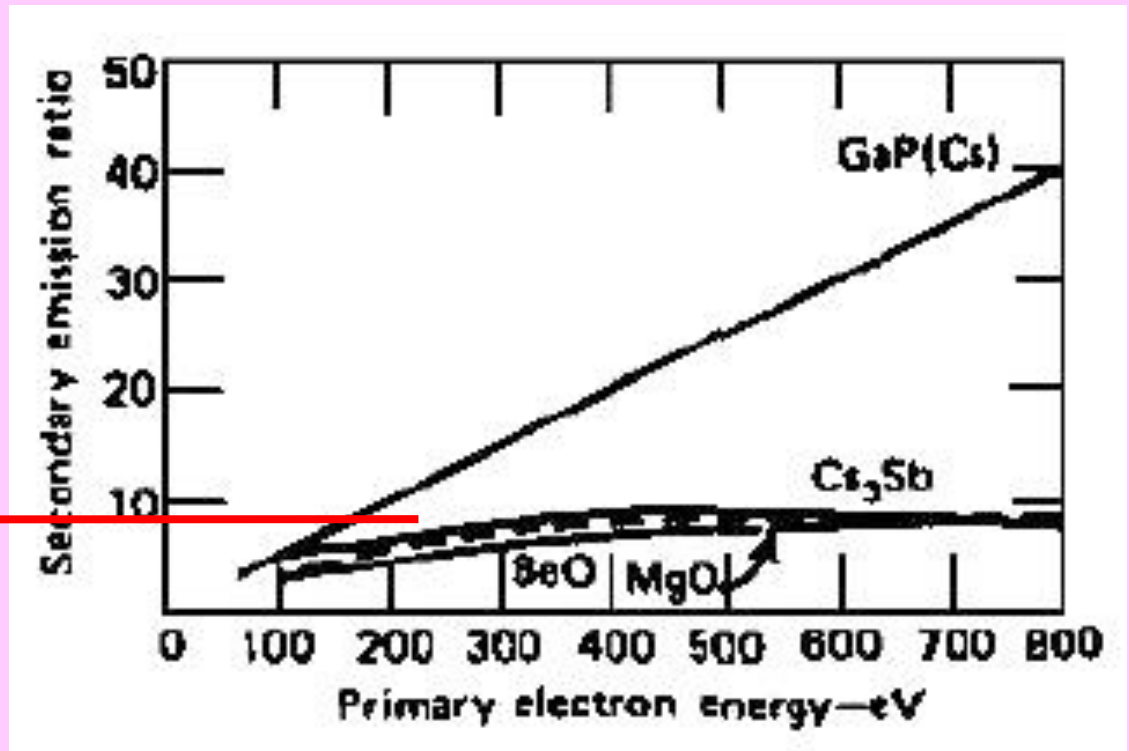
Conversione segnali di luce in impulsi di corrente

Fotomoltiplicatori

Moltiplicazione degli elettroni

Fattore di moltiplicazione di singolo stadio δ

$\delta \approx 5$
con $N=10$ dinodi
 $\delta^N \approx 5^{10} \approx 10^7$

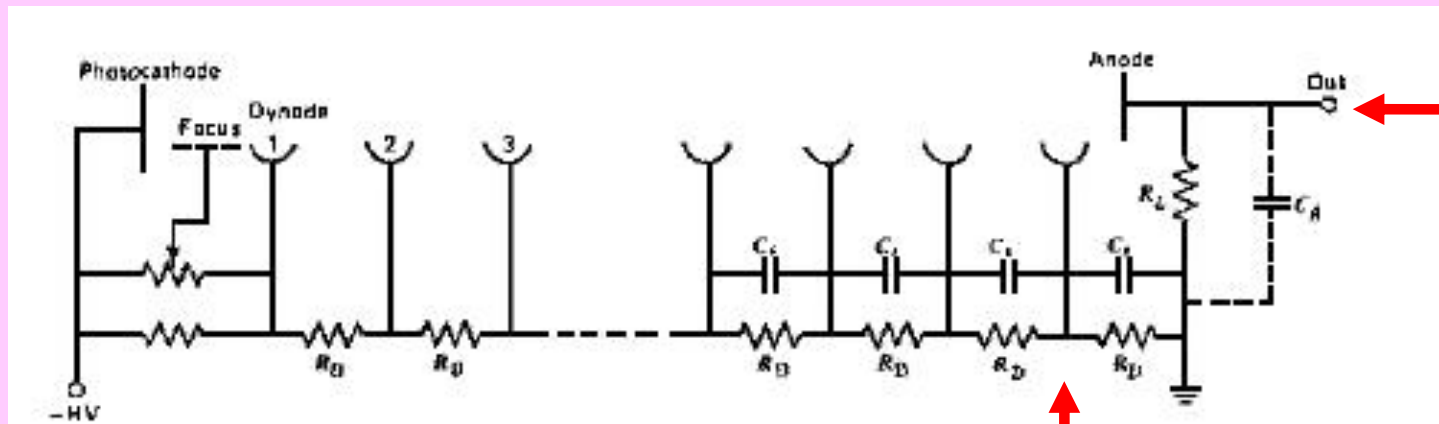


Scintillatori

Conversione segnali di luce in impulsi di corrente

Fotomoltiplicatori

Partitore resistivo e singolo alimentatore di tensione



Out
anodo

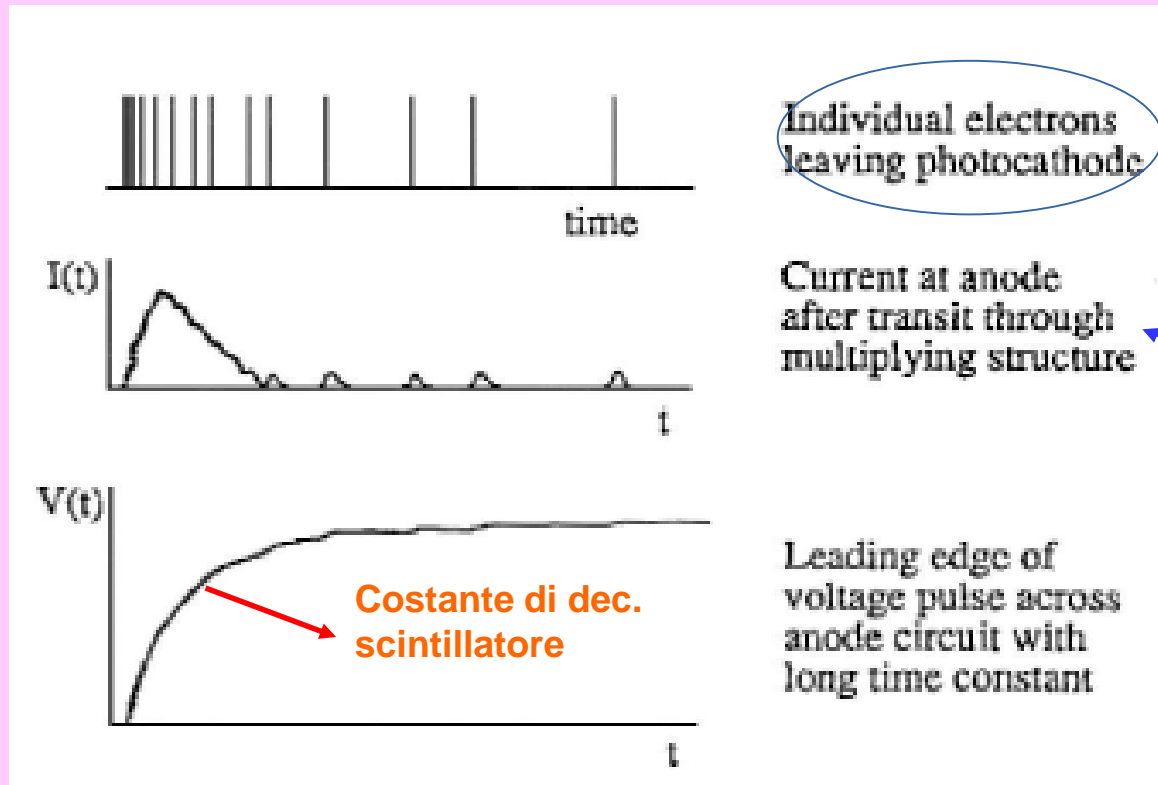
Out
dinodo

Scintillatori

Conversione segnali di luce in impulsi di corrente

Fotomoltiplicatori

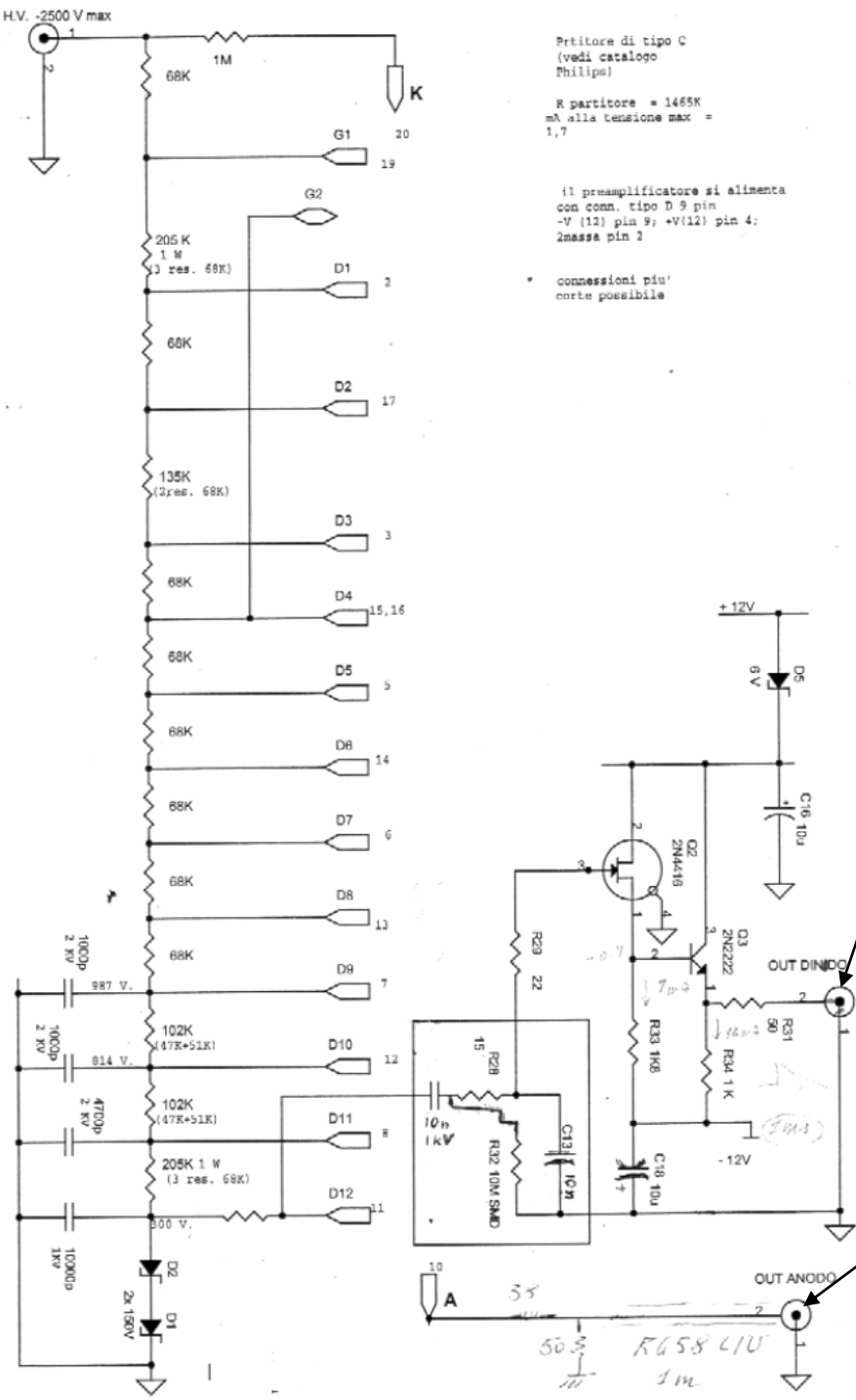
Segnali in uscita dal fotomoltiplicatore



Elettroni con distribuzione temporale caratteristica dello scintillatore

ma anche

Singoli elettroni emessi casualmente per effetto termoionico (segnale di corrente gaussiano → spread temporale dovuto a possibili percorsi diversi nella moltiplicazione)



Scintillatori

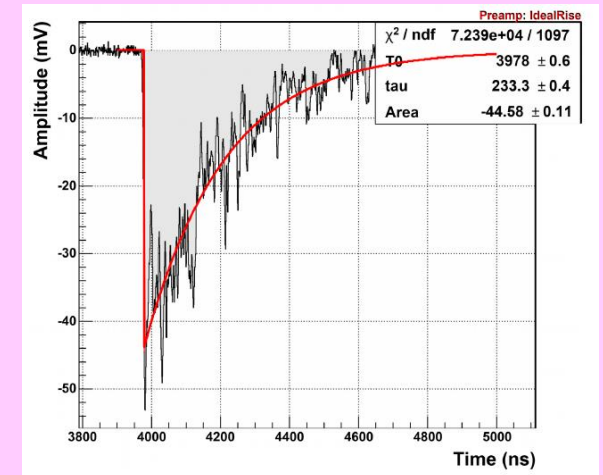
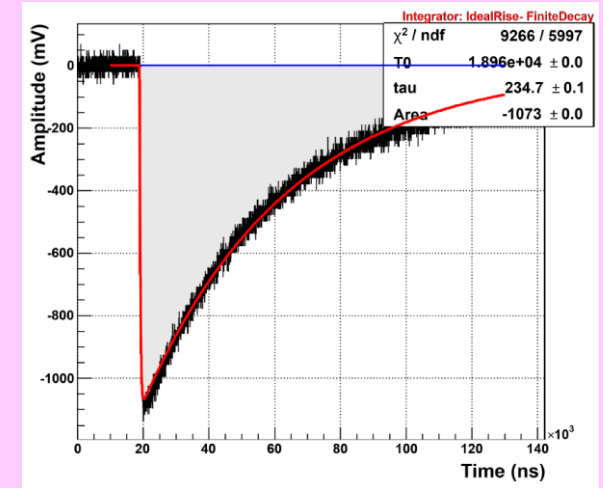
Conversione segnali di luce in impulsi di corrente

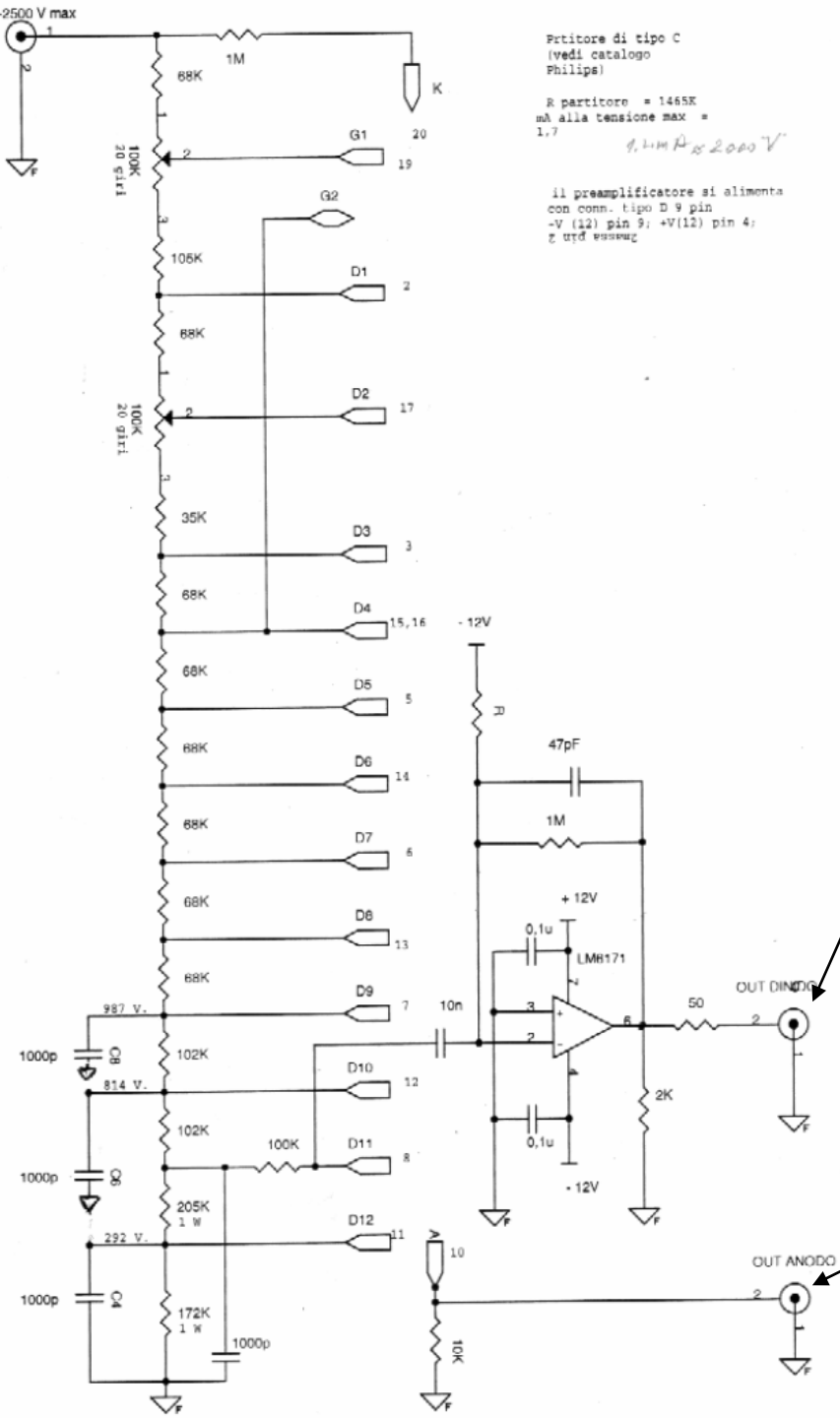
Fotomoltiplicatore XP2020

Out dinodo (integrato)

NaI

Out anodo





Scintillatori

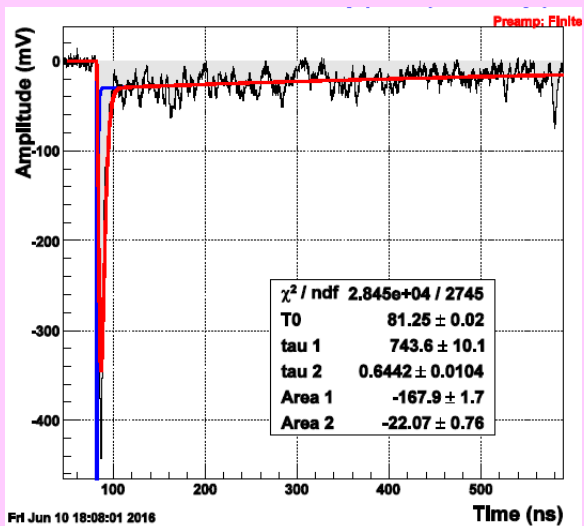
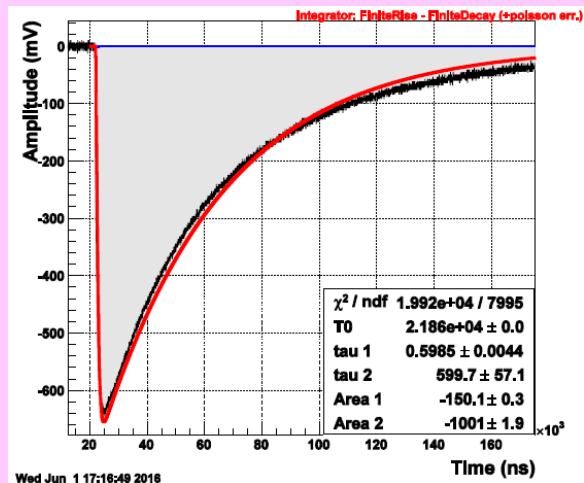
Conversione segnali di luce in impulsi di corrente

Fotomoltiplicatore XP2020Q

Out dinodo (integrato)

BaF₂

Out anodo



Scintillatori

Risposta energetica

$$V_{\text{out}} \propto n_0 * \delta^N = n_0 * G$$

dove n_0 = numero fotoelettroni primari = $\gamma * n_f$

γ = efficienza quantica di fotocatodo

n_f = numero fotoni di scintillazione = E/W

e

δ^N = moltiplicazione elettronica con N dinodi

Risoluzione energetica R

$$(\sigma_V / V_{\text{out}})^2 = (\sigma_{n_0} / n_0)^2 + (\sigma_G / G)^2 + \dots$$

ipotesi Poissoniana

$$\approx 1/n_0$$

$$\approx (1/\delta)^2$$

$$R \approx \alpha / E^{1/2} + \beta$$

con α e β dipendenti dalla coppia scint.- fotomolt.

