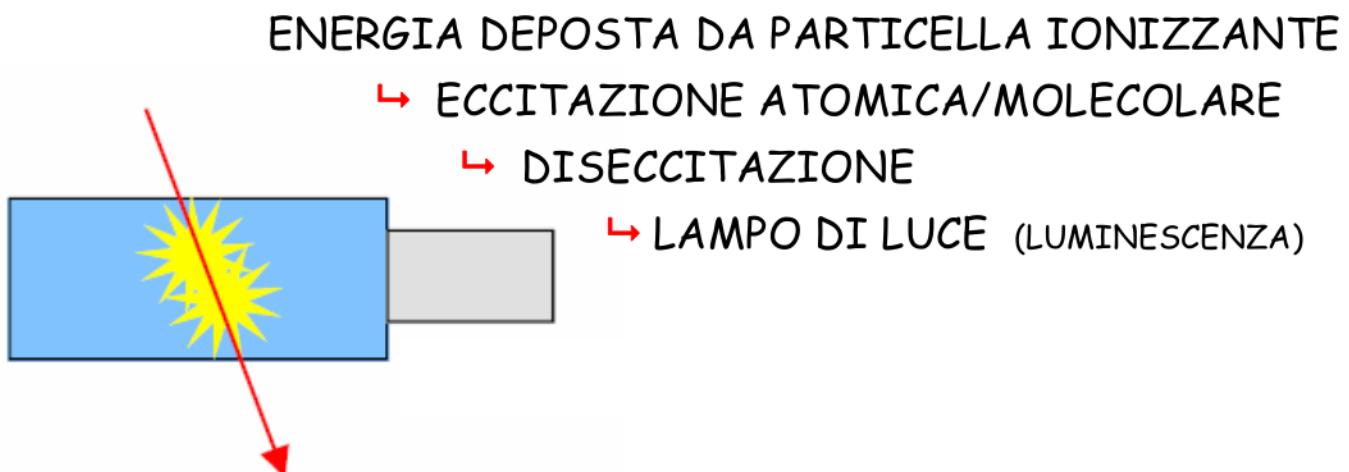


I RIVELATORI A SCINTILLAZIONE

IDEA DI FONDO



GLI SCINTILLATORI SONO RIVELATORI A MULTI-USO

- SPETTROSCOPIA γ
- CALORIMETRI
- TEMPO DI VOLO
- SISTEMI DI TRIGGER
- SISTEMI DI VETO
- TRACCIANTI

DUE GRANDI CLASSI DI SCINTILLATORI

INORGANICI



Buona resa in luce, ma lenti

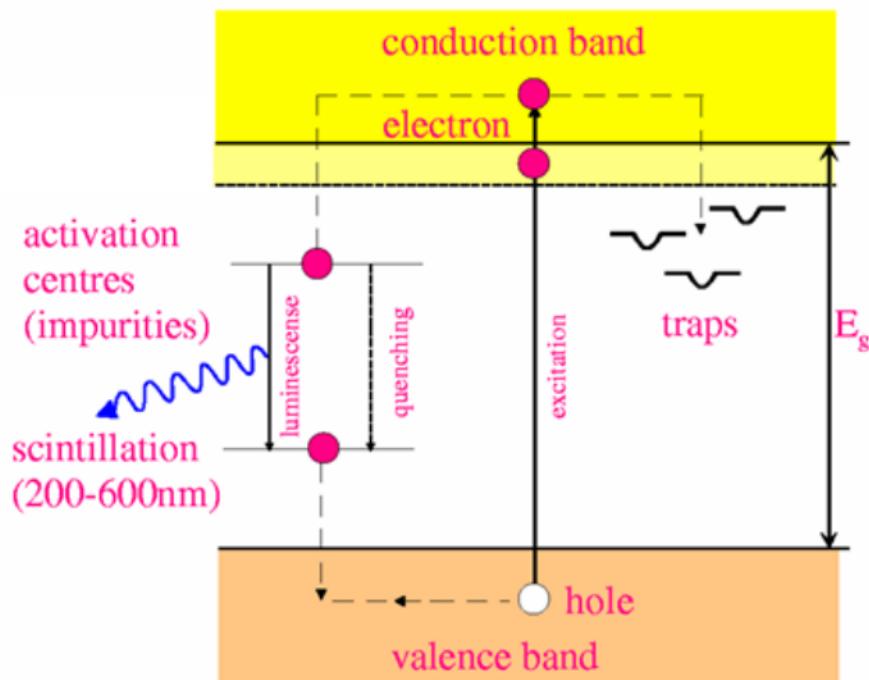
ORGANICI



Bassa resa in luce, ma veloci

MECCANISMO DI SCINTILLAZIONE

CRISTALLI INORGANICI (NaI, CsI, BGO...)



SPESSO 2 TEMPI CARATTERISTICI:

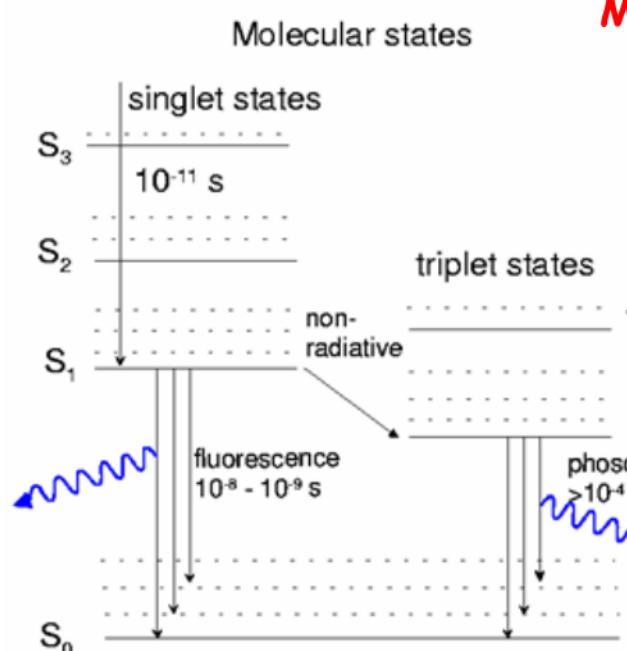
RICOMBINAZIONE VELOCE ($ns-\mu s$)
DAI CENTRI DI RICOMBINAZIONE

RICOMBINAZIONE RITARDATA (100 ms)
DOVUTA AI CENTRI DI INTRAPPOLAMENTO

L'ALTA DENSITA' E L'ALTO Z LI RENDE ADATTI
ALLA RIVELAZIONE DI PARTICELLE CARICHE O γ

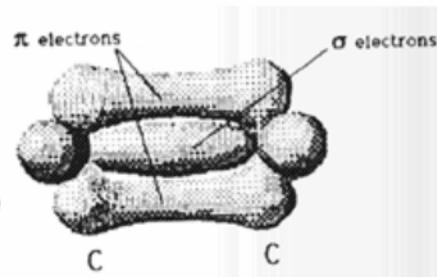
MECCANISMO DI SCINTILLAZIONE

SCINTILLATORI ORGANICI



MOLECOLE DI TIPO AROMATICO

La scintillazione si basa sugli elettroni dei 2 orbitali π dei legami C-C



Luce emessa nell' ultravioletto

MONOCRISTALLI ORGANICI (antracene, stilbene...)

SCINTILLATORI LIQUIDI O PLASTICI

Composti da un solvente nel quale e' dissolto lo scintillatore
A volte presenza anche di **WAVELENGTH SHIFTERS**

TEMPI DI EMISSIONE MOLTO BREVI (1-5 ns)
IDEALI PER MISURE TEMPORALI MOLTO PRECISE

BASSO Z MA ALTO CONTENUTO DI H

MOLTO ECONOMICI

LO SCINTILLATORE IDEALE

- ① CONVERTE E IN L CON ALTA EFF. DI SCINTILLAZIONE

$$S = \frac{L}{E}$$

VALORI TIPICI: QUALCHE % (PER NaI : 12%)

POICHE' $E_{ph} \sim 3-4$ eV $w \sim 50 - 100$ eV/fotone

Non competitivi con i diodi a semiconduttore !

- ② LA CONVERSIONE DOVREBBE ESSERE LINEARE

$$L = S \cdot E$$

S NON DEVE DIPENDERE DALLA POSIZIONE NELLO SCINTILLATORE

- ③ GLI SPETTRI DI EMISSIONE E ASSORBIMENTO DEVONO SOVRAPPORSI IL MENO POSSIBILE (alta trasparenza)

- ④ LA COSTANTE DI TEMPO CARATTERISTICA τ_0 DEV'ESSERE BREVE PER AVERE ALTA RISOLUZIONE TEMPORALE

Legge temporale di scintillazione

$$I = I_0 \exp(-t/\tau_0) + I_1 \exp(-t/\tau_1) - I_0 \exp(-t/\tau_p)$$

Fosforescenza, fluerescenza rit. popolamento dei livelli

- ⑤ PROPRIETA' OTTICHE E MECC. BUONE. MANEGGIABILITA'

Raccolta di luce +

Cristalli grandi +
Forme e dim. variabili +

Cristalli igroscopici -
fragili -

- ⑥ INDICE DI RIFRAZIONE SIMILE AL VETRO (~1.5) PER UN BUON ACCOPPIAMENTO OTTICO AL FOTOMULTIPLICATORE

IMPOSSIBILE SODDISFARE TUTTE LE RICHIESTE

EFFICIENZA DI SCINTILLAZIONE

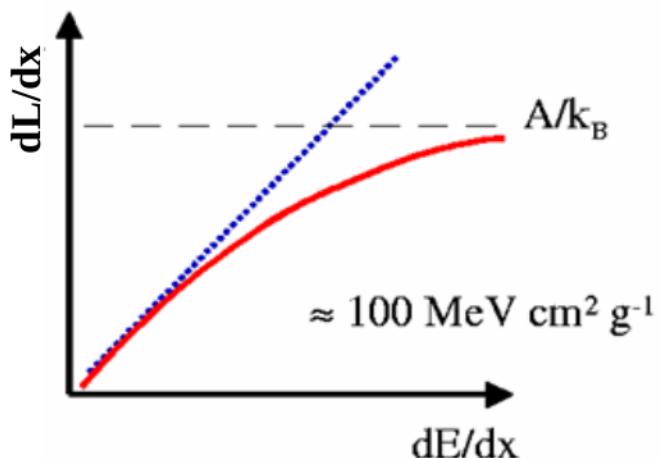
① DIPENDE DALL' ENERGIA

FORMULA DI BIRKS
(scintillatori organici)

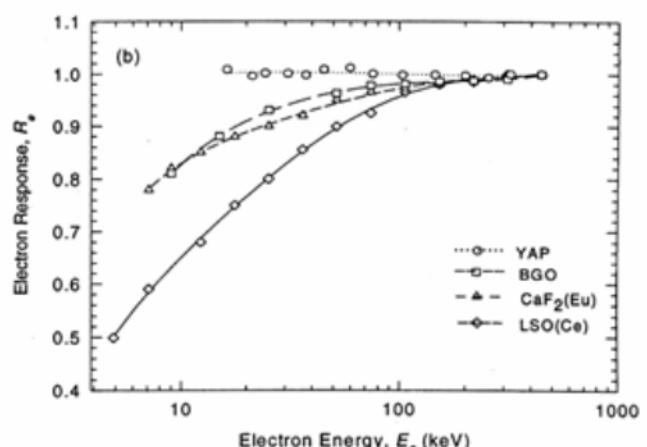
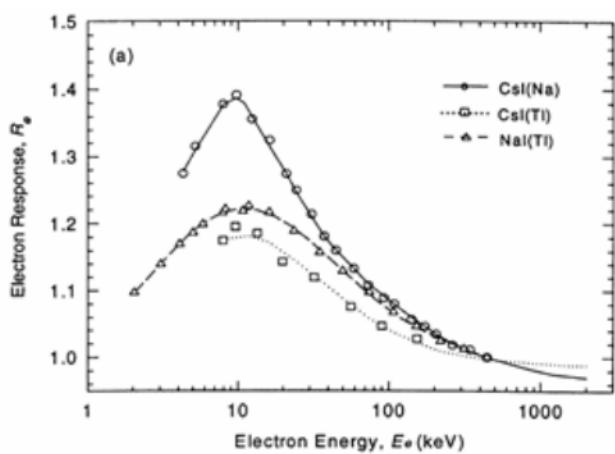
$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}}$$

$L = S \cdot E$ elettroni

$$\left. \frac{dL}{dx} \right|_{\alpha} = \frac{S}{kB}$$



MENO IMPORTANTE NEGLI INORGANICI



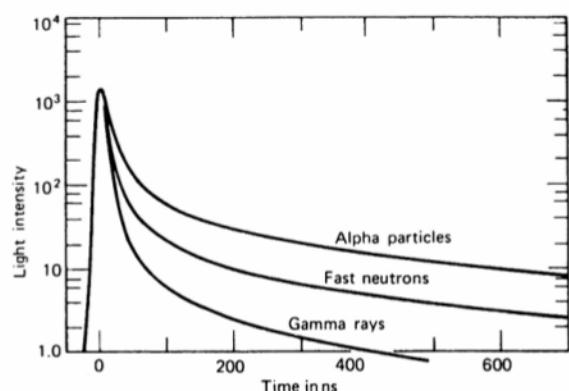
② DIPENDE DALLA PARTICELLA PIU' IMPORTANTE NEGLI ORGANICI

ad es.

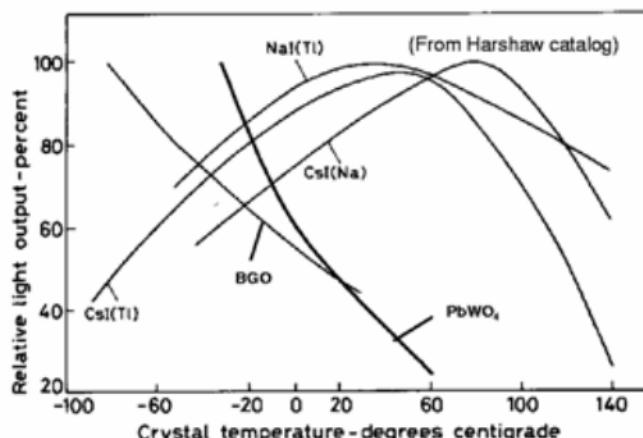
$$\left| \frac{S_\alpha}{S_\beta} \right|_{org} < \left| \frac{S_\alpha}{S_\beta} \right|_{inorg} < 1$$

E CAMBIA SE CAMBIA $\frac{dE}{dx}$

PROFILO TEMPORALE EMISSIONE



③ DIPENDE DALLA TEMPERATURA (SCINTILLATORI INORGANICI)



④ DIPENDE DALLE IMPUREZZZE PRESENTI (PB DEL QUENCHING)

⑤ SUBISCE IL DETERIORAMENTO DA ESPOSIZIONE E DA USO (nei plastici anche alla luce e/o all'ossigeno)

MECCANISMI IN COMPETIZIONE CON LA SCINT. BUONA

- ❖ Fosforescenza
 - ❖ Fluorescenza ritardata
 - ❖ Quenching (dissec. senza emissione di fotoni)
- } AFTERGLOW

Table 8.3 Properties of Common Inorganic Scintillators

| | Specific Gravity | Wavelength of Max. Emission | Refractive Index | Decay Time (μs) | Abs. Light Yield in Photons/MeV | Relative Pulse Height Using Bialk. PM tube | References |
|--|------------------|-----------------------------|------------------|----------------------------|---------------------------------|--|---------------|
| Alkali Halides | | | | | | | |
| NaI(Tl) | 3.67 | 415 | 1.85 | 0.23 | 38 000 | 1.00 | |
| CsI(Tl) | 4.51 | 540 | 1.80 | 0.68 (64%), 3.34 (36%) | 65 000 | 0.49 | 78, 90, 91 |
| CsI(Na) | 4.51 | 420 | 1.84 | 0.46, 4.18 | 39 000 | 1.10 | 92 |
| Li(Eu) | 4.08 | 470 | 1.96 | 1.4 | 11 000 | 0.23 | |
| Other Slow Inorganics | | | | | | | |
| BGO | 7.13 | 480 ^a | 2.15 | 0.30 | 8200 | 0.13 | |
| CdWO ₄ | 7.90 | 470 | 2.3 | 1.1 (40%), 14.5 (60%) | 15 000 | 0.4 | 98–100 |
| ZnS(Ag) (polycrystalline) | 4.09 | 450 | 2.36 | 0.2 | | 1.3 ^a | |
| CaF ₂ (Eu) | 3.19 | 435 | 1.47 | 0.9 | 24 000 | 0.5 | |
| Unactivated Fast Inorganics | | | | | | | |
| BaF ₂ (fast component) | 4.89 | 220 | | 0.0006 | 1400 | na | 107–109 |
| BaF ₂ (slow component) | 4.89 | 310 | 1.56 | 0.63 | 9500 | 0.2 | 107–109 |
| CsI (fast component) | 4.51 | 305 | | 0.002 (35%), 0.02 (65%) | 2000 | 0.05 | 113–115 |
| CsI (slow component) | 4.51 | 450 | 1.80 | multiple, up to several μs | varies | varies | 114, 115 |
| CeF ₃ | 6.16 | 310, 340 | 1.68 | 0.005, 0.027 | 4400 | 0.04 to 0.05 | 76, 116, 117 |
| Cerium-Activated Fast Inorganics | | | | | | | |
| GSO | 6.71 | 440 | 1.85 | 0.056 (90%), 0.4 (10%) | 9000 | 0.2 | 119–121 |
| YAP | 5.37 | 370 | 1.95 | 0.027 | 18 000 | 0.45 | 78, 125 |
| YAG | 4.56 | 550 | 1.82 | 0.088 (72%), 0.302 (28%) | 17 000 | 0.5 | 78, 127 |
| LSO | 7.4 | 420 | 1.82 | 0.047 | 25 000 | 0.75 | 130, 131 |
| LuAP | 8.4 | 365 | 1.94 | 0.017 | 17 000 | 0.3 | 134, 136, 138 |
| Glass Scintillators | | | | | | | |
| Ce activated Li glass ^b | 2.64 | 400 | 1.59 | 0.05 to 0.1 | 3500 | 0.09 | 77, 145 |
| Tb activated glass ^b | 3.03 | 550 | 1.5 | ~3000 to 5000 | ~50 000 | na | 145 |
| For comparison, a typical organic (plastic) scintillator: | | | | | | | |
| NE102A | 1.03 | 423 | 1.58 | 0.002 | 10 000 | 0.25 | |

^afor alpha particles

Table 8.1 Properties of Some Commercially Available Organic Scintillators

| Eljen | Bicron | Light Output %Anthracene* | Wavelength of Max Emission (nm) | Decay Constant (ns) | Attenuation Length (cm) | Refractive Index | H/C Ratio | Density | Loading Element % by weight or dist. feature |
|----------------|---------|------------------------------|------------------------------------|---------------------|-------------------------|------------------|-----------|---------|--|
| Crystal | | | | | | | | | |
| Anthracene | | 100 | 447 | 30 | | 1.62 | 0.715 | 1.25 | |
| Stilbene | | 50 | 410 | 4.5 | | 1.626 | 0.858 | 1.16 | |
| Plastic | | | | | | | | | |
| EJ-212 | BC-400 | 65 | 423 | 2.4 | 250 | 1.581 | 1.103 | 1.032 | |
| EJ-204 | BC-404 | 68 | 408 | 1.8 | 160 | 1.58 | 1.107 | 1.032 | 1.8 ns time constant |
| EJ-200 | BC-408 | 64 | 425 | 2.1 | 380 | 1.58 | 1.104 | 1.032 | |
| EJ-208 | BC-412 | 60 | 434 | 3.3 | 400 | 1.58 | 1.104 | 1.032 | Longest attn. length |
| | BC-420 | 64 | 391 | 1.5 | 110 | 1.58 | 1.100 | 1.032 | 1.5 ns time constant |
| EJ-232 | BC-422 | 55 | 370 | 1.4 | 8 | 1.58 | 1.102 | 1.032 | 1.4 ns time constant |
| | BC-422Q | 11 | 370 | 0.7 | < 8 | 1.58 | 1.102 | 1.032 | Benzophenone, 1% |
| | BC-428 | 36 | 480 | 12.5 | 150 | 1.58 | 1.103 | 1.032 | Green emitter |
| | BC-430 | 45 | 580 | 16.8 | NA | 1.58 | 1.108 | 1.032 | Red emitter |
| EJ-248 | BC-434 | 60 | 425 | 2.2 | 350 | 1.59 | 0.995 | 1.049 | High temp |
| | BC-436 | 52 | 425 | 2.2 | NA | 1.61 | 0.960 D:C | 1.130 | Deuterium, 13.8% |
| EJ-240 | BC-444 | 41 | 428 | 285 | 180 | 1.58 | 1.109 | 1.032 | |
| EJ-256 | BC-452 | 32 | 424 | 2.1 | 150 | 1.58 | 1.134 | 1.080 | Lead, 5% |
| | BC-454 | 48 | 425 | 2.2 | 120 | 1.58 | 1.169 | 1.026 | Boron, 5% |
| EJ-252 | BC-470 | 46 | 423 | 2.4 | 200 | 1.58 | 1.098 | 1.037 | Air equivalent |
| | BC-490 | 55 | 425 | 2.3 | | 1.58 | 1.107 | 1.030 | Casting resin |
| | BC-498 | 65 | 423 | 2.4 | | 1.58 | 1.103 | 1.032 | Applied like paint |
| Liquid | | | | | | | | | |
| EJ-301 | BC-501A | 78 | 425 | 3.2 | | | 1.212 | 0.874 | Pulse shape discrim. |
| EJ-305 | BC-505 | 80 | 425 | 2.5 | | | 1.331 | 0.877 | High light output |
| EJ-313 | BC-509 | 20 | 425 | 3.1 | | | 0.0035 | 1.61 | F |
| EJ-321H | BC-517H | 52 | 425 | 2.0 | | | 1.89 | 0.86 | Mineral oil-based |
| | BC-517P | 28 | 425 | 2.2 | | | 2.05 | 0.85 | Mineral oil-based |
| EJ-325 | BC-519 | 60 | 425 | 4.0 | | | 1.73 | 0.875 | Pulse shape discrim. |
| EJ-331 | BC-521 | 60 | 425 | 4.0 | | | 1.31 | 0.89 | Gd (to 1%) |
| EJ-339 | BC-523A | 65 | 425 | 3.7 | | | 1.67 | 0.93 | Enriched ¹⁰ B |
| EJ-335 | BC-525 | 56 | 425 | 3.8 | | | 1.57 | 0.88 | Gd (to 1%) |
| | BC-533 | 51 | 425 | 3.0 | | | 1.96 | 0.8 | Low temp operation |
| | BC-537 | 61 | 425 | 2.8 | | | .99 (D:C) | 0.954 | ² H |
| | BC-551 | 40 | 425 | 2.2 | | | 1.31 | 0.902 | Pb (5% w/w) |
| | BC-553 | 34 | 425 | 3.8 | | | 1.47 | 0.951 | Sn (10% w/w) |

*NaI(Tl) is 230% on this scale

LA RACCOLTA DI LUCE

LA LUCE E' EMESSA ISOTROPICAMENTE

PROBLEMA DELL' AUTOASSORBIMENTO: SCARSO

PROBLEMA DELLE PERDITE ALLA SUPERFICIE: IMPORTANTE

ANGOLO CRITICO PER RIFLESSIONE TOTALE

$$\sin \theta_c = \frac{n_1}{n_0} \quad \exists \text{ se } n_1 < n_0$$

- RIDUCE LE PERDITE ALLA SUPERFICIE $\varepsilon = 80\%$
- OSTACOLA LA TRASMISSIONE AL FOTOCATODO

USO DI ACCOPPIATORI OTTICI

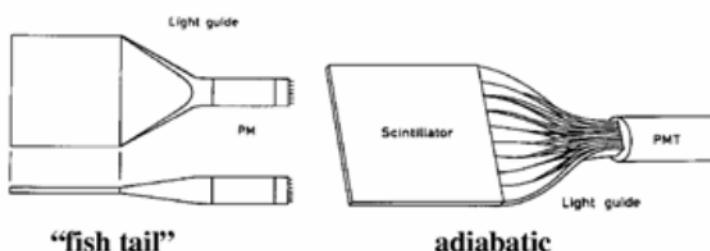
GRASSO OTTICO, SILICONE

LE GUIDE DI LUCE

SCINTILLATORE - FOTOMOLTIPLICATORE DISTANTI PER:

- NECESSITA' COSTRUTTIVE
- PRESENZA DI CAMPO MAGNETICO
- NECESSITA' DI UNIFORMARE LA RISPOSTA DEL FOTOC.

IL FUNZIONAMENTO SI BASA SUL
PRINCIPIO DI RIFLESSIONE TOTALE



IL FOTOCATODO

PROCESSO DI FOTOEMISSIONE

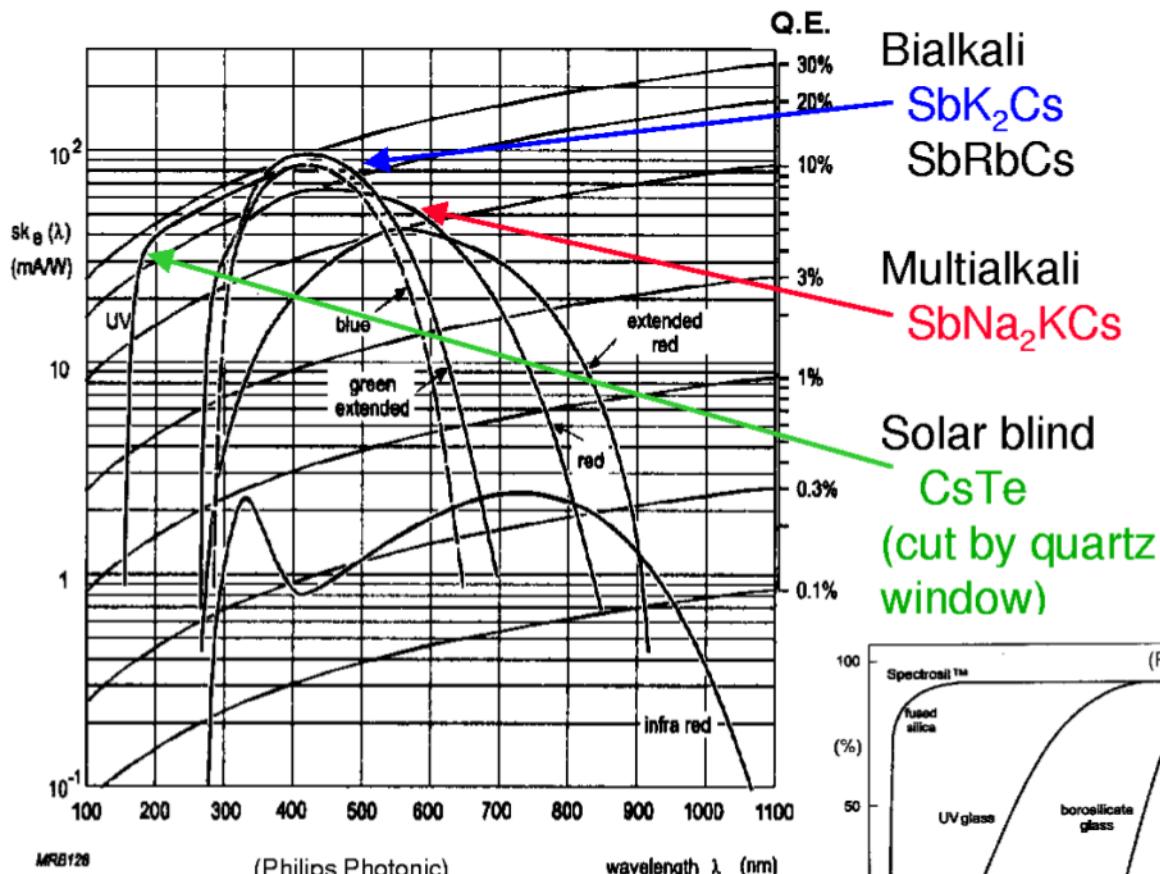
- ① IL FOTONE VIENE ASSORBITO E L'EN. VIENE TRASFERITA AD $1 e^-$
 $E_{max}^{e^-} = E_\gamma \sim 3 eV$
- ② L' e^- MIGRA SULLA SUPERFICIE. PERDE ENERGIA
 (nei metalli $R \sim nm$ TROPPO PICCOLO → SEMICONDUTTORI)
- ③ L' e^- SFUGGE DALLA SUPERFICIE DEL CATODO, PURCHE'
 (nei metalli $W \sim 3-4 eV$ NO! Materiali appositi con $W \sim 1-2 eV$)

DA ③ SEGUE CHE **TUTTI I FOTOCATODI HANNO UN CUT-OFF**

DA ② SEGUE CHE **PROFONDITA' DI FUGA $\leq 25 nm$**

→ bassa capacita' di fermare i fotoni

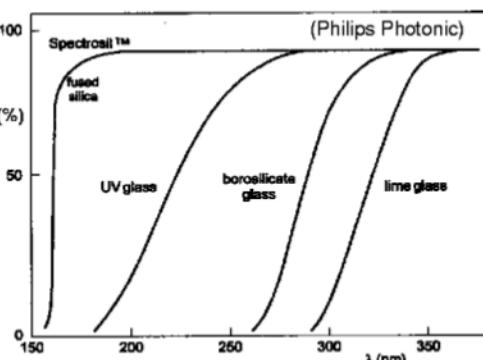
→ semitrasparenza



MRB126

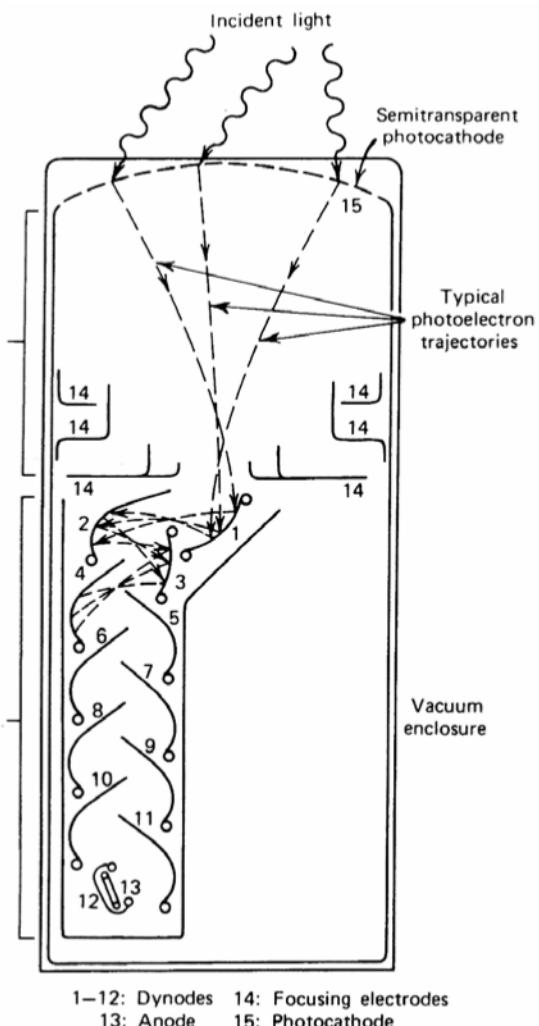
(Philips Photonic)

wavelength λ (nm)



IL FOTOMOLTIPLICATORE

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO



La risoluzione è fortemente dominata dalla moltiplicazione al primo dinodo, in quanto ho pochi elettroni

❖ FOTOEMISSIONE DAL FOTOCATODO

$\text{sse } E_\gamma > W \rightarrow \text{CUT-OFF}$

nei metalli $W \approx 3-4$ eV **NO!** Materiali appositi con $W \approx 1-2$ eV

$Q.E. = N_{\text{fotoel}} / N_{\text{fotoni}}$ ~ 20-30 %

❖ EMISSIONE DI e^- SEC. DAI DINODI

GUADAGNO DI SINGOLO DINODO: $g = 3-50$

GUADAGNO TOTALE $M = \prod_{i=1}^N g_i$

10 DINODI CON $g = 4$ $M = 4^{10} \approx 10^6$

❖ RACCOLTA ALL' ANODO. SEGNALE

può dare luogo a un segnale,
moltiplicandosi con i dinodi, devo tenere il pc freddo
► **RUMORE TERMOIONICO**

$KT \sim 25 \text{ meV} @ 300 \text{ K, ma prob. } \neq 0 | E_{th} > W$

semicond: $100 - 10000 \text{ / cm}^2 \text{ s}$
metalli: $100 \text{ e}^- \text{ / m}^2 \text{ s}$

DIPENDE (OVIAMENTE!) DALLA TEMPERATURA

➤ RISOLUZIONE ENERGETICA

DOMINATA DALLE FLUTTUAZIONI STAT. DEGLI e^- EMESSI DAI DINODI

$$\frac{\sigma_n}{\bar{n}} = \frac{\sqrt{n}}{\bar{n}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{n}}}$$

FLUTTUAZIONI > PER \bar{n} < ↳ 1° DINODO

Li ha saltati, ma ha detto di buttarci un occhio per farci un'idea

ESEMPI NUMERICI:

EFFICIENZA DI SCINTILLAZIONE IN NaI

$$E_\gamma = 1 \text{ MeV}$$

$$W_{e-h} \sim 3 \times E_{\text{gap}} \sim 20 \text{ eV} \quad \# \text{ coppie} = E_\gamma / W \sim 50000$$

$$S_{\text{NaI}} \sim 12\% \quad L = S \cdot E_\gamma \sim 120 \text{ keV}$$
$$E_{\text{tot}} \sim 3 \text{ eV} \text{ (visibile)} \quad \# \text{ fotoni} = L / E_{\text{tot}} \sim 40000$$

~ 1 fotone ogni coppia e⁻-h prodotta

IL TRASFERIMENTO DI ENERGIA DAL "BULK"
ALL' ATTIVATORE E' MOLTO EFFICIENTE

EMISSIONE TERMOIONICA

$$N = 10^3 e^- / s \quad G = 10^6$$

$$I_{\text{buio}} = 10^3 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^6 A = 160 \text{ pA} \quad \rightarrow \quad I \sim I_{\text{buio}}$$

RISOLUZIONE INFLUENZATA DALLE FLUTTUAZIONI DI I_{buio}

STATISTICA DELLA MOLTIPLICAZIONE

δ non è costante \rightarrow fluttuazioni
 \rightarrow allargamento della distribuz. del # di e⁻ prodotti ad ogni nuovo stadio di amplificazione

1° STADIO $\quad \langle n \rangle = \delta \quad \sigma_n = \sqrt{\delta} \quad \left(\frac{\sigma_n}{n} \right)^2 = \frac{1}{\delta}$

N-ESIMO STADIO

$$\langle n \rangle = \delta^n \quad \left(\frac{\sigma_n^{TOT}}{n_{TOT}} \right)^2 = \left(\frac{\sigma_n}{n} \right)_1^2 + \left(\frac{\sigma_n}{n} \right)_2^2 + \dots = \frac{1}{\delta} + \frac{1}{\delta^2} + \dots \approx \frac{1}{\delta - 1} \approx \frac{1}{\delta} \equiv \left(\frac{\sigma_n}{n} \right)_1^2$$

SE $\delta \gg 1$

IN REALTA' E' IMPORTANTE SOLO QUANDO SI HANNO
POCHI FOTOELETTRONI INIZIALI

ANCORA SUI FOTOTUBI...

FABBRICAZIONE DEI FOTOCATODI

OPACI

- SPESSEZZO > PROFONDITÀ DI FUGA
- SU SUBSTRATO SPESO
- LUCE INCIDENTE SUL LATO DI ESTRAZIONE DEGLI e^-

SEMI TRASPARENTE

- SPESSEZZO \approx PROFONDITÀ DI FUGA
- SU SUBSTRATO TRASPARENTE
- PIÙ PRATICI!

IMPORTANZA DELL' UNIFORMITÀ DI SPESSEZZO per avere uniformità di risposta, è fondamentale

MATERIALI

MULTIALCALINO $Na_2K Sb Cs$

BIALCALINO $K_2Cs Sb$ ← bassa emissione termoionica
migliore Q.E. nel blu

SISTEMA DI TOLTIPLICAZIONE DEGLI ELETTRONI

EMISSIONE DI e^- SECONDARI

la resa di elettroni secondari aumenta all'aumentare del potenziale, do + energia però così gli elettronni penetrano nei dinodi, producendo e^- a profondità maggiore

- e^- dal fotocatodo accelerati fino al 1° DINODO
- emissione di diversi e^- dalla superficie
- ACCELERAZIONE fino al 2° DINODO
- emissione ...
:
RACCOLTA DI TUTTI GLI e^- ALL'ANODO

$$E_{\text{foto}}^0 \leq 1 \text{ eV} \quad AV \approx 100 \text{ V} \quad W_{\text{DIN}} \sim 2-3 \text{ eV} \sim 30 \text{ }e^- \text{ eccitati} \sim 5 \text{ emessi}$$

E_{DIN} dipende solo da AV e non da E^0

LA RESA IN e^- SECONDARI DIPENDE DA E_{e^-} INCIDENTE

CRESCE L'ENERGIA FORNITA AI SINGOLI e^- → AUMENTA LA PROB. DI F.
L' e^- PENETRA PIÙ IN PROFONDITÀ → DIMINUISCE LA PROB. DI FUGA
C'E' UN OTTIMO

Def

$$\sigma = \frac{\# e^- \text{ sec. emessi}}{\# e^- \text{ primari incisi.}} \quad \begin{array}{l} \sim 5 \times \text{DINODI STANDARD} \text{ E } AV \sim 100 \text{ V} \\ \sim 20-30 \times \text{MATERIALI NEA} \end{array}$$

ALTA TENSIONE E PARTITORE RESISTIVO

2 conf. fotocatodo a massa e alimento, o fotocatodo a tensione negativo e anodo a massa

2 CONFIGURAZIONI PRINCIPALI + H.V. - H.V.

d.d.p. ai dinodi (V_i) > d.d.p. al catodo (V_o) SEMPRE

$V_o - V_i \gg \Delta V_i$ SEMPRE

① scomodo usare 2 tensioni diverse apposite con batterie, che però scaricano velocemente
ALIMENTARE SEPARATAMENTE I VARI STADI (Batterie a multicelle)

SCOMODO! La corrente tra ultimo dinodo ed anodo è elevata
↳ LE BATTERIE SI SCARICANO RAPIDAMENTE

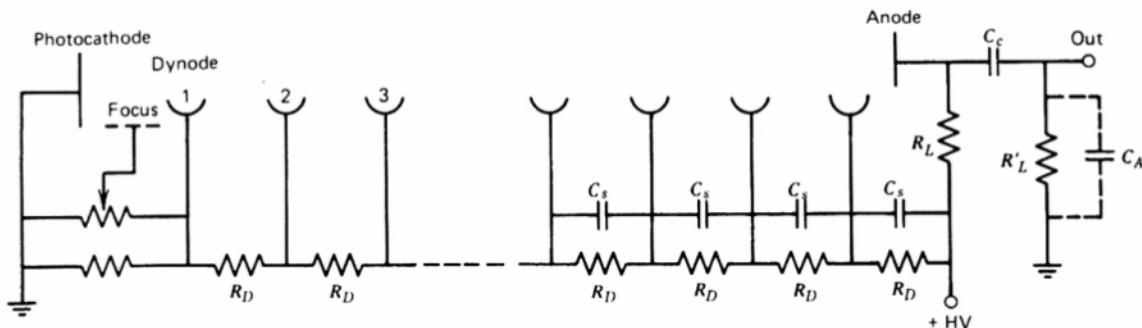
posso usare un partitore, posso garantire tensioni diverse e ben ripartite in base alla tensione complessiva di alimentazione

② PARTITORE DI TENSIONE RESISTIVO

$$i_p = \frac{H.V.}{\sum R_D} = \frac{H.V.}{N R_D} = \frac{\Delta V_i}{R_D} \leftarrow \Delta V_i = \Delta V_T + i_p R_D$$

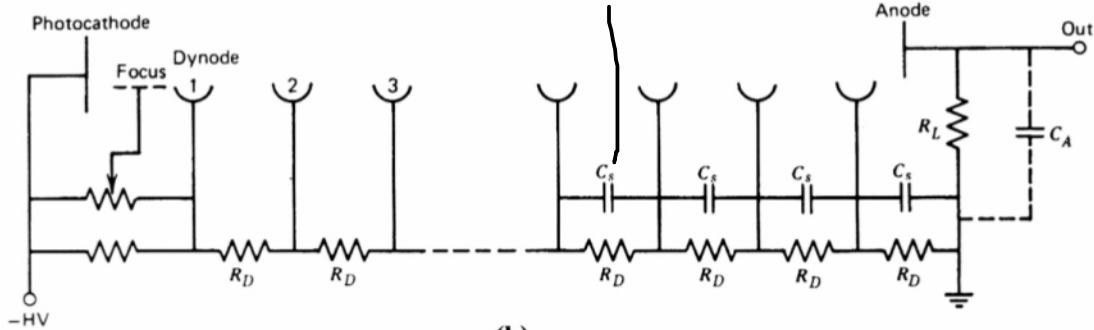
la corrente deve essere piccola per non dissipare troppa energia x eff. Joule, ma devo garantire stabilità di potenziale tra dinodi, ma questo significa che la i_p deve essere maggiore di quella che viene prodotta dagli elettroni nei dinodi

- Per punto di vista PRATICO si vuole i_p più piccola possibile ma che garantisca comunque la stabilità richiesta su ΔV_i
- Inoltre alta i_p implica alta potenza dissipata per effetto Joule nelle resistenze, NON VOLUTA!
- È comunque NECESSARIO che $i_p \gg i_{PM}$: se $i_p \approx i_{PM}$ ΔV_i varia e varia, più importante soprattutto negli stadi finali dove $i_{PM} < i_p$



(a)

CONDENSATORI DI STABILIZZAZIONE, VEDI PAGINA DOPO



(b)

ESEMPI NUMERICI:

QUANTO VALE LA CORRENTE DI PICCO?

Tipico evento di scintillazione: ~ 1000 fotoni emessi

Tipico guadagno $G_{PM} \sim 10^6 \rightarrow 10^9 e^-$ dall'ultimo anodo all'AN.

Rate di eventi di scintill. $\sim 10^5$ ev/s (~ 30 g. di cal. in lab.)

$$\hookrightarrow I_{MEDIA} = 10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^5 = 1.6 \times 10^{-5} A = 16 \mu A$$

ODO CONTINUO

In realtà I_{MEDIA} non è continua ma pulsata e

$$i_{picco}^{MAX} = \frac{10^9 \times 1.6 \times 10^{-19}}{5 \tau_0} = 32 mA$$

"è un fottio" (cit.) quindi ho un problema di alte correnti e quindi un notevole eff. Joule
 $\sim \sim 1 \text{ ns}$ negli scintill. veloci'

Quindi $i_p > I_{MEDIA}$ FACILE (uso il modo corrente)

$i_p \gg i_{picco}$ TROPPO ALTO (pb di dissip. Joule)

C'è "accorto" di $i_p \approx i_{picco}$ + CONDENSATORI STABILIZZ. dello stadio in cui $i_{picco} \sim 1 \text{ mA}$

Infatti la carica Q immagazzinata in C_s da i_p , fornisce nel transiente dell'impulso la carica al diodo necessaria a mantenere costante ΔV_i .
 C_s è poi nuovamente ricaricato nel Δt tra 2 impulsi!

SE VOGLIO CHE $\frac{\Delta V_i}{V_i} \leq 1\%$ DEVO AVERE $Q_c = C_s \cdot \Delta V_i = 100 \times q_{imp}$

$$\text{ES DIPRIMA: } C_s = \frac{Q_c}{\Delta V_i} = \frac{10^9 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 100}{200} \sim 80 \text{ pF}$$

LA SCINTILLAZIONE IN NaI È VISIBILE?

sensibilità occhio umano ~ 10 fotoni nella banda del visibile

diam. pupilla al buio $\sim 3 \text{ mm}$ $d = 10 \text{ cm}$

$E_\gamma = 1 \text{ MeV}$ $S_{NaI} \sim 12\%$ $E_{fot} \sim 3 \text{ eV}$ (visibile)

$$\# \text{ fotoni} = L / E_{fot} = S \cdot E_\gamma / E_{fot} \sim 40000$$

$$\Omega = \frac{\pi r_{pupilla}^2}{4\pi d^2} = 5.6 \times 10^{-5} \rightarrow n_{visti} = 40000 \times 5.6 \times 10^{-5} = 2.24$$

NON È VISIBILE

MATERIALI SPECIALI

MATERIALI N.E.A. (Negative Electron Affinity) GaP:Zn

STRATO FINISSIMO DI CS IONIZZATO ABBOLTO ZN CHE ABBASSA LA BARRIERA DI POT. SUPERFICIALE

- ↳ GLI e⁻ SUL FONDO della B.C. hanno en. sufficiente a sfuggire
- ↳ PROFONDITÀ DI FUGA ALLARGATA

MIGLIORÉ RISOLUZIONE TEMPORALE

- MAGGIORE UNIFORMITÀ DI EN. PEGLI E' EMESSI
- MINOR NUMERO DI DINODI PER STESSO G COMPLESSIVO

MOLTIPLICAZIONE PER STADI MULTIPLI

G RICHIESTO $\sim 10^6$

AD OGNI STADIO GUADAGNO δ

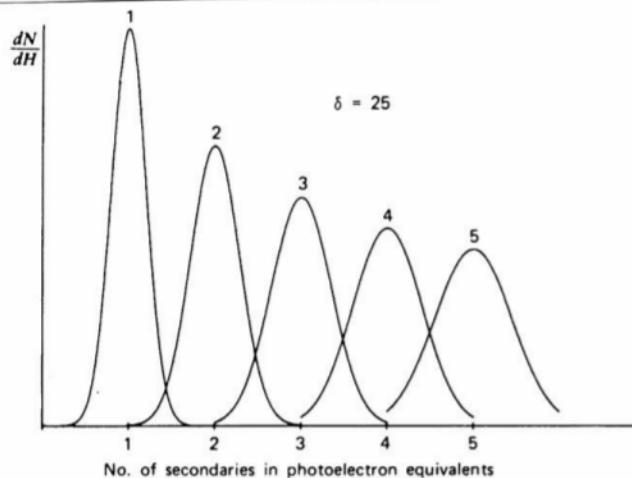
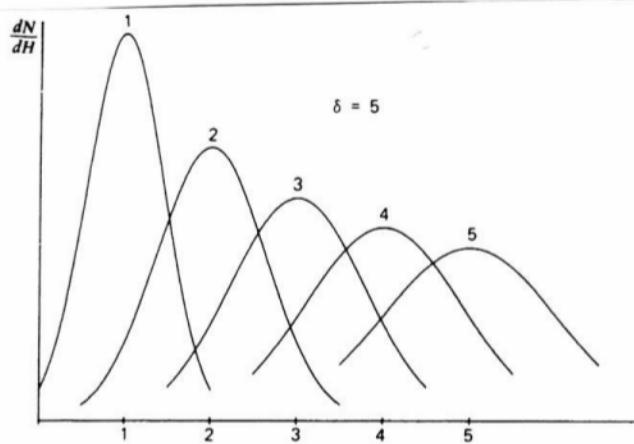
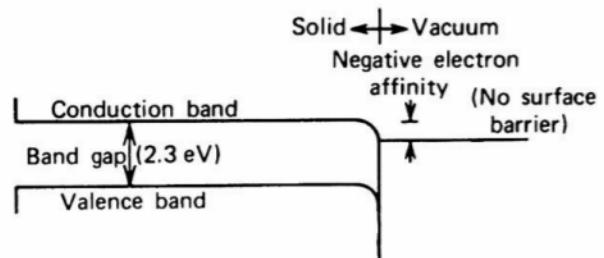
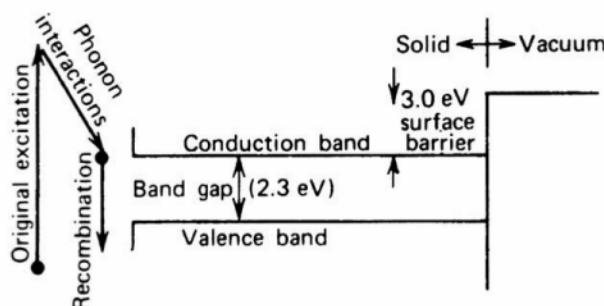
CON N STADI GUADAGNO $G = \alpha \delta^N$ $\alpha \leq 1$ ($\alpha = 1$ IDEALE)

ES $\delta = 5$ $\alpha \sim 1$ $N = 10$ $G = 5^{10} \sim 10^7$ PIÙ STANDARD

$\delta = 55$

N.E.A.

N.B. $G = G(\Delta V)$ se $\delta = K \Delta V \rightarrow G \propto (\Delta V)^N$ (in realtà $\delta = K(\Delta V)^{\beta}$ $\beta < 1 \dots$)



CARATTERISTICHE DEI FOTOTUBI

- ① DIFFERENZE STRUTTURALI



- ② PROPRIETA' TEMPORALI

(vedi dopo)

- ③ TENSIONI E CORRENTI MASSIME $G = G(\Delta V)$

dicono a che guadagno lavoro

- ④ SENSIBILITA' ALLA LUCE E ALLA POTENZA RADIANTE
UTILIZZO IN MODO CONTINUO

- ⑤ CORRENTE DI BUIO CORRENTE ALL'ANODO CON CATODO NON ILLUM.

- ⑥ LINEARITA'
NON BUONA SE: 1) Pb di carica spaziale x imp. molto grandi
2) variaz. di tensione ai dinodi

- ⑦ IMPULSI SPURI E RUMORE (vedi dopo)

associati ai fotomoltiplicatori

- ⑧ DISUNIFORMITA' DEL FOTOCATODO

NELLA RISPOSTA

NELLA RACCOLTA AL 1° DINODO

→ GUIDE DI LUCE

spessore deve essere omogeneo

Perchè determina fortemente la risoluzione, come detto prima, devo incanalare bene gli e- provenienti da tutto il fotocatodo nella regione del primo dinodo (che di solito è più piccola, vedi disegno precedente, devo usare guide di luce)

- ⑨ VARIAZIONI DI GUADAGNO CON IL TASSO DI CONTEGGI

CAUSATE DA VARIAZIONI SU ΔV INTERDINODICA

Tipica richiesta: $\Delta G/G \sim 1\%$ per tassi di $10^3 - 10^4$ c/s
le fluttuazioni devono essere minori del 1%

Table 9.1 Properties of Some Commercially Available Photomultiplier Tubes

| A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L | M | N |
|-------|---------|-------|-----|------|--------|------|------|------|-------------------|-----|-----|-----|-----|
| Ham | 1635 | 10 | 8 | L8 | BA | 1250 | 1500 | 1.1 | 95 | 76 | 1 | 0.8 | 8.5 |
| Ham | 1450 | 19 | 15 | L10 | BA | 1500 | 1800 | 1.7 | 115 | 88 | 3 | 1.8 | 19 |
| Ham | 380 | 38 | 34 | L10 | BA | 1250 | 1750 | 1.1 | 95 | 88 | 3 | 2.7 | 37 |
| Ham | 1306 | 51 | 46 | B8 | BA | 1000 | 1500 | 0.27 | 110 | 95 | 2 | 7.0 | 60 |
| Ham | 3318 | 51 sq | 45 | BM10 | BA | 1000 | 1500 | 0.27 | 110 | 95 | 2 | 4.8 | 45 |
| Ham | 3336 | 60 h | 55 | BM10 | BA | 1000 | 1500 | 0.27 | 110 | 95 | 2 | 6.0 | 47 |
| Burle | 4516 | 19 | 13 | L10 | BA | 1500 | 1800 | 0.52 | 66 | — | 0.2 | 1.8 | 20 |
| Burle | S83010E | 38 | 32 | C10 | RbCsSb | 1000 | 1000 | 2.4 | 100 | 92 | 1 | 2.8 | 32 |
| Burle | S83054F | 51 | 47 | B8 | BA | 800 | 1200 | 0.10 | 10.5 ^a | 103 | 3 | 11 | 63 |
| Burle | S83020F | 60 h | 56 | L10 | BA | 1100 | 1700 | 0.10 | 71 | 100 | 1 | 10 | 69 |
| Burle | S83079F | 76 sq | — | B8 | BA | 800 | 1200 | 0.21 | 11.3 ^a | 100 | 3 | 14 | 73 |
| Burle | S83006F | 130 | 111 | T10 | BA | 1100 | 1650 | 0.07 | 92 | 105 | 1 | 22 | 105 |
| ADIT | B29B02H | 29 | 24 | B11 | BA | 1100 | 1500 | 1.0 | 70 | 80 | 10 | 11 | 35 |
| ADIT | B51B01 | 51 | 46 | B10 | BA | 1100 | 1500 | 1.0 | 70 | 80 | 10 | 17 | 45 |
| ADIT | B76B01 | 76 | 70 | B10 | BA | 1100 | 1500 | 1.0 | 70 | 80 | 10 | 17 | 50 |
| ADIT | B133D01 | 127 | 119 | B10 | BA | 1100 | 1500 | 1.0 | 120 | 97 | 10 | 17 | 50 |
| ETL | 9078 | 19 | 15 | L10 | BA | 900 | 1200 | 0.71 | 70 | 90 | 0.1 | 1.8 | 20 |
| ETL | 9924 | 30 | 23 | B11 | RbCs | 870 | 1050 | 2.1 | 95 | 100 | 0.1 | 15 | 80 |
| ETL | 9266 | 52 | 45 | L10 | BA | 900 | 1100 | 0.6 | 80 | 100 | 0.2 | 4 | 37 |
| ETL | 9350 | 200 | 190 | L14 | BA | 1550 | 2300 | 67 | 75 | 100 | 15 | 5 | 80 |

A = manufacturer: Ham = Hamamatsu, ETL = Electron Tubes Limited.

B = model number.

C = diameter or dimension of tube outline (sq = square, h = hex) in mm.

D = minimum usable photocathode dimension.

E = dynode structure: L = linear focused, B = box and grid, BM = box and mesh, C = circular.

F = photocathode material: BA = bialkali.

G = recommended operating voltage.

H = maximum tube voltage.

I = gain $\times 10^6$ at voltage in G.J = cathode luminous sensitivity ($\mu\text{A/lm}$) measured with 2854 K tungsten source.K = cathode radiant sensitivity (mA/W) measured at or near the wavelength of photocathode peak sensitivity.

L = dark current (an approximate number due to large variations in the method of measurement between different manufacturers) (nA).

M = anode rise time at voltage in G (ns).

N = transit time at voltage in G (ns).

^acathode luminous sensitivity is measured using a blue Corning C.S. No. 5-58 filter.

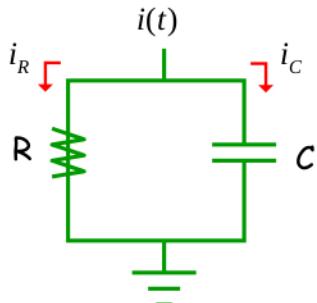
ANALISI DELLA FORMA DELL' IMPULSO

LEGGE TEMPORALE DELLA SCINTILLAZIONE

legge di produzione dei fotoni questa è la legge col quale ho gli elettroni

$$I = I_0 e^{-t/\tau_D} = I_0 e^{-\lambda t} \rightarrow i(t) = i_0 e^{-\lambda t}$$

ALLARGAMENTO NEL t DI TRANSITO TRASCURABILE



la carica $\int_0^\infty i(t)dt$ è l'int. della corr.

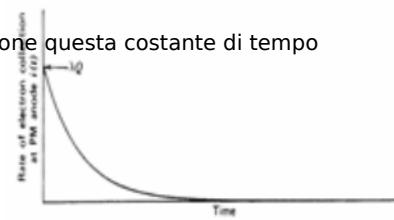
$$Q = \int_0^\infty i(t)dt \rightarrow i_0 = \lambda Q \rightarrow$$

impulso prodotto
 $i(t) = \lambda Q e^{-\lambda t}$

$$\vartheta \equiv \frac{1}{RC}$$

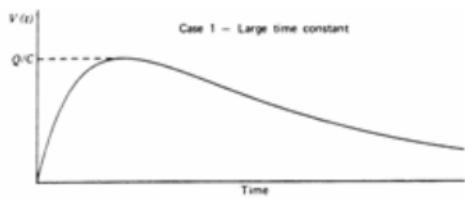
$$i(t) = i_R + i_C$$

$$\rightarrow V(t) = \frac{1}{\lambda - \vartheta} \cdot \frac{\lambda Q}{C} (e^{-\vartheta t} - e^{-\lambda t})$$



questo è l'impulso di tensione
sovraposizione degli effetti di res.
e cond.

CASO 1 $RC \gg \tau_D$ $\theta \ll \lambda$



$$V(t) \approx \frac{Q}{C} (e^{-\vartheta t} - e^{-\lambda t})$$

risetime dipendente da λ
decay time dipendente da RC

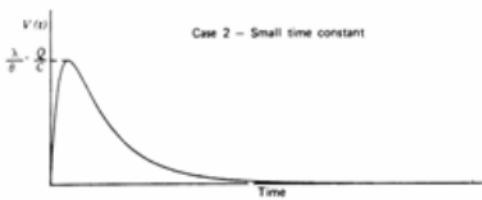
$$V_{MAX} = Q/C$$

tempi di emissione della luce

tempo di discesa dell'impulso

PER ALLUNGARE RC SI FA CRESCERE R MANTENENDO C PICCOLO, COSÌ V_{MAX} È GRANDE

CASO 2 $RC \ll \tau_D$ $\theta \gg \lambda$



$$V(t) \approx \frac{\lambda}{\vartheta} \cdot \frac{Q}{C} (-e^{-\vartheta t} + e^{-\lambda t})$$

risetime dipendente da RC
decay time dipendente da τ_D

$$V_{MAX} = \frac{\lambda Q}{\vartheta C} \ll \frac{Q}{C}$$

la cosa utile è che la durata dell'impulso corrisponde alla durata della produzione dei fotoni, utile per studi di tipo temporale

Fissate le condizioni (λ, θ) sembra $V_{MAX} \div Q$

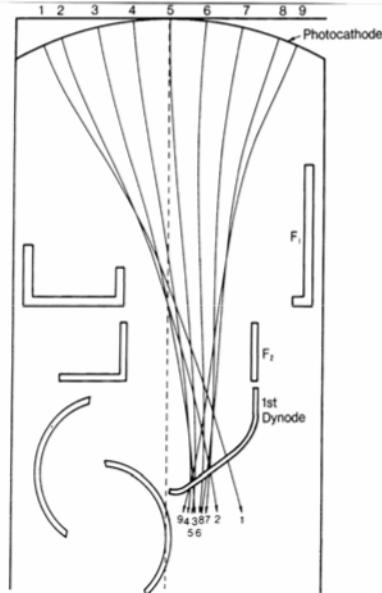
In realtà V_{MAX} è sensibile alle fluttuazioni che originano dalla natura statistica della produzione di fotoelettroni

ad ogni modo v_{max} dipende da Q , quindi posso fare spettroscopia

TEMPO DI TRANSITO E TIME SPREAD

Esempio: 14 dinodi
2 kV totale → 150 V interdinodica

$$\hookrightarrow E_k \text{ media} \approx 75 \text{ eV}$$



Tipica velocità media

$$\beta^2 = \frac{2\langle E_k \rangle}{mc^2} = \frac{150}{511 \times 10^3} = \left(\frac{1}{60}\right)^2$$

Tipico tempo di transito

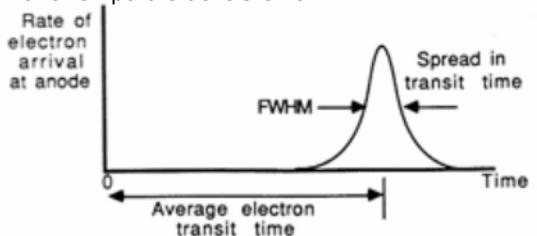
$$\tau = \frac{10 \text{ cm}}{\frac{1}{60} \times 3 \times 10^{10} \text{ cm/s}} = 20 \text{ ns}$$

FLUTTUAZIONI DI τ influenzano la risoluzione temporale del sistema

- Distribuzione energetica iniziale (0-2 eV)
- Fluttuazioni del percorso catodo - I dinodo

$$\sigma_\tau \approx 0.2 - 0.3 \text{ ns}$$

dipendono molto dal tempo di transito fotocatodo-1° dinodo



CALCOLO DELL' AMPIEZZA DI SEGNALE ASPETTATO

$$E = 1.2 \text{ MeV} \quad S = 12 \% \quad \varepsilon = 70 \% \quad \text{Q.E.} = 20 \%$$

$$M = 10^5 \quad C = 100 \text{ pF} \quad \text{L.y.} = 38000/\text{MeV}$$

$$h\nu = (S/\text{L.y.}) \times 10^6 = 3.2 \text{ eV} \quad n_\gamma = E \cdot S / h\nu = 4.5 \times 10^4$$

$$\begin{aligned} Q &= n_\gamma \cdot \varepsilon \cdot \text{Q.E.} \cdot M \cdot q_e \\ &= 4.5 \times 10^4 \times 0.7 \times 0.2 \times 10^5 \times 1.62 \times 10^{-19} \text{ C} \\ &= 0.1 \text{ nC} \end{aligned}$$

$$\Delta V = Q/C \approx 1 \text{ V}$$

ha vergognosamente letto tutto.

RISOLUZIONE ENERGETICA

ORIGINE DELLA PERDITA DI RISOLUZIONE

- STATISTICA DI RACCOLTA DELLE CARICHE casini con la moltiplicazione al primo dinodo
- RUMORE ELETTRONICO
- RISPOSTE \neq NELLE VARIE REGIONI DEL VOLUME ATTIVO
- DERIVE NELLA STABILITÀ DI TUTTA LA CATENA DI MISURA
- FLUTTUAZIONI NEL GUADAGNO DEL FOTOMULTIPLICATORE
- NON ESATTA PROPORZIONALITÀ DI RISPOSTA CON L'ENERGIA

STATISTICA DEI FOTOELETTRONI

LA PRODUZIONE DI FOTOELETTRONI AL FOTOCATODO È IL PUNTO DI MINIMO PER IL NUMERO DI PORTATORI D'INFORMAZIONE DI TUTTA LA CATENA \rightarrow È IL FENOMENO CHE DOMINA LA COMPONENTE STATISTICA DELLA RISOLUZIONE ENERGETICA

ES

$$E_x = 0.5 \text{ MeV} \quad S = 12\% \quad L = 60 \text{ keV} \quad \text{con } \langle E_y \rangle \sim 3 \text{ eV}$$

$$\# \text{ fotoni emessi} = \frac{L}{3 \text{ eV}} = 20'000$$

fotoni al fotocatodo ~ 15000 (perdite all'interfaccia)

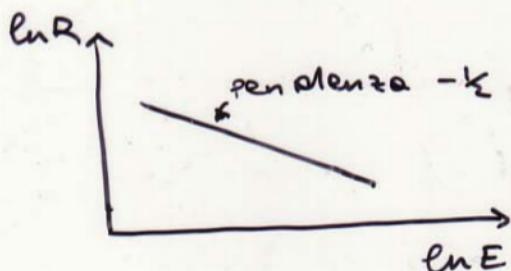
Q.E. $\sim 20\%$ \rightarrow # fotoelettroni emessi = 3000 MINIMO

$$\frac{\sigma(E)}{E} = \frac{\sigma_n}{n} = \frac{1}{\sqrt{3000}} = 1.8\% \quad \text{FWHM} = 2.35 \times 1.8\% = 4.3\% \quad \text{per } E_x \text{ da 500 keV}$$

DIPENDENZA DELLA RISOLUZIONE DALL'ENERGIA

$$R \equiv \frac{\text{FWHM [eV]}}{H_0 [\text{eV}]} = K \frac{\sqrt{E}}{E} = \frac{K}{\sqrt{E}}$$

$$\hookrightarrow \ln R = \ln K - \frac{1}{2} \ln E$$



In realtà

$$R = \frac{(a + \beta E)^{1/2}}{E} \quad \text{con } a \text{ e } \beta \text{ da determinarsi sperimentalmente.}$$

ALTRÉ SORGENTI DI PERDITA DI RISOLUZIONE

DA CARATTERISTICHE INTRINSECHE DEL CRISTALLO

- CONTANO LE CONDIZIONI IMPERFETTE DI RIFLESSIONE SULLE SUPERFICI
↳ EFFIC. DI RACCOLTA DELLA LUCE NON UNIFORME
- NON LINEARITÀ DELLA RISPOSTA: ANCHE IN CASO DI & MONOCROMATICI
AD OGNI EVENTO CORRISPONDE UNO SPECTRO / NEN. DEGLI E SECONDI PRODOTTI DIFFERENTE. SE NON C'È LINEARITÀ LA CONVERSIONE IN LUCE SARÀ DIFFERENTE DA EVENTO AD EVENTO
ogni proiettile non perde energia nello stesso modo
DIPENDE ANCHE DALLE DIMENSIONI E DALLA GEOMETRIA DEL PV.

DA CARATTERISTICHE INTRINSECHE DEL FOTOMULTIPLICATORE

- DISOMOGENEITÀ DEL FOTOCATODO
- NON UNIFORMITÀ NELLA RACCOLTA DEI FOTOELETTRONI DAL FOTOCATODO AL PRIMO DINODO
- FLUTTUAZIONI STATISTICHE NELLA MOLTIPLICAZIONE DEGLI e^-

DA VARIANZA DI TRASFERIMENTO

LEGATA ALLA PROBABILITÀ CHE 1 EVENTO DI SCINTILLAZIONE PRODUCA 1 FOTOELETTRONE RACCOLTO AL 1° PINODO

PER DERIVARE IL GUADAGNO DELLA CATENA ELETTRONICA + PV.

SI MISURA E SI CONTROLLA CON:

- IMPULSO DI TEST (solo catena elettronica)
- IMPULSO DI LUCE NOTO → LED (elettronico)
→ sorgente rad. + fosforo

TIPICAMENTE SI QUOTA LA RIS. ENERGETICA
A 662 KEV O A 1333 KEV

MIGLIOR RISOLUZIONE CON GEOM. CILINDRICA

Geom. + complesse hanno maggiore difficoltà di raccolta di luce uniforme → RISOLUZIONI PEGGIORI
(es: a pozzetto: + 1-3%)

IMPULSI SPURI E RUMORE

ELETTRONI DA EMISSIONE TERMOIONICA

IMPULSI DA SINGOLO $e^- \rightarrow$ MOLTO SPESSO ELIMINABILI

di solito la scint produce più elettroni, quindi riconosco quelli termoionici perché più piccoli, in quanto prodotti da 1 elettro

ALTRIMENTI CERCARE DI RIDURRE IL PROBLEMA A MONTE:

- SUP. FOTOCATODO + PICCOLA POSSIBILE la termoion. dipende dalla sup.
- MATERIALI "SILENZIOSI" scarsa em. spont.
- FOTOTUBI CON MINOR CORRENTE DI BUIO

così ho temp. più bassa
oppure posso usare con lav di estr. più alto

MODO IMPULSATO

$\Delta t \sim 1 \text{ ms} \rightarrow \tau_{sh} \sim \mu\text{s}$ = POCO DISTURBO

VENGONO DISCRIMINATI \rightarrow NESSUN RUMORE AGGIUNTO

MODO IN CORRENTE

LA CORRENTE DI BUIO SI SOMMA COMPLETAMENTE
LE SUE FLUTTUAZIONI CONTRIBUISCONO ALLA RISOLUZIONE

SOLUZIONE

RAFFREDDAMENTO DEL FOTOCATODO \rightarrow

$$I_{buio}' \sim \frac{1}{100} I_{buio}$$

SVANTAGGI:

CONDENSA

AUMENTO DELLA R DEL CATODO

→ DISTORSIONE DEL CAMPO ELETTRICO

→ PERDITA DI EFF. NELLA RACCOLTA DEI FOTOELETTRONI

SE ALIMENTATI, SEMPRE AL BUIO (I_A TROPPO ALTA)

ALTRA SORGENTE DI IMPULSI SPURI: LA RADIOATT. NAT.

- ^{40}K E ^{232}Th IN VETRO $\sim 10-100 \text{ Bq/Kg}$ il vetro di ingresso è radioattivo, quindi può fare casini
- RAD. COSMICA (da' luogo a Cerenkov) impulsi piccoli, da pochi fotoel.
i muoni <3

IMPULSI RITARDATI

x emiss rit di luce oppure per fotoni emessi dai dinodi, potrebbero raggiungere il photoc. facendo casini

Da γ emessi alla fine della moltiplicazione, che risalgono al catodo:

$\Delta t \sim t_{transito}$ IMPULSI PICCOLI

Da ioni $^+$ dovuti a gas residuo posso avere gas rimanente che viene ionizzato, gli ioni $^+$ vanno al pc. inducendo un'altra corrente

$\Delta t \gg t_{transito}$ IMPULSI NON PICCOLISSIMI

CAMBIARE FOTOTUBO

ALTERNATIVE: FOTODIODI E HPMT

FOTODIODI CONVENZIONALI p-i-n

VANTAGGI:

- MAGGIOR Q.E. (60% - 80%)
- MINOR POTENZA RICHIESTA
- PIU' COMPATTI
- PIU' RESISTENTI
- INSENSIBILI A B
- RISPOSTA SPETTRALE AMPIA (cut-off a en. minori).

MA NIENTE MOLTIPLICAZIONE

- ↳ RUMORE ELETTRONICO (serie + parallelo) NON TRASCURABILE (peggiore per A_{riv} maggiori)
- ↳ RISOLUZIONE ENERGETICA PEGGIORE DEI PMT

FOTODIODI A VALANGA

ALTO $\Delta V \rightarrow$ PRODUZ. DI NUOVE COPPIE $e^- - h \rightarrow G \sim 100$

BUONA Q.E. E BUONA RISOL. TEMPORALE

SENSIBILITA' A EN. MINORI MA RISOLUZ. EN. PEGGIORE DEI PMT

HPMT

FOTOCATODO + FOTODIODO AL Si

UN UNICO STADIO DI MOLTIPLICAZIONE CON ΔV GRANDE

$G_{\text{TOT}} \sim 3000$ (anziche' 10^6) MA $\delta \sim 3000$ anziche' 5 (o 25)

↳ risoluzione energetica migliore

↳ buona discriminaz. tra eventi da singolo fotoel. ed eventi da 2,3,4,... fotoel.
(noise termoionico)

$G \div \Delta V$ anziche' $\div (\Delta V)^2 \rightarrow G$ PIU' STABILE, $I_{\text{bias}} \ll$, BUONE CARATTER. TEMPORALI

MICROCHANNEL PLATE

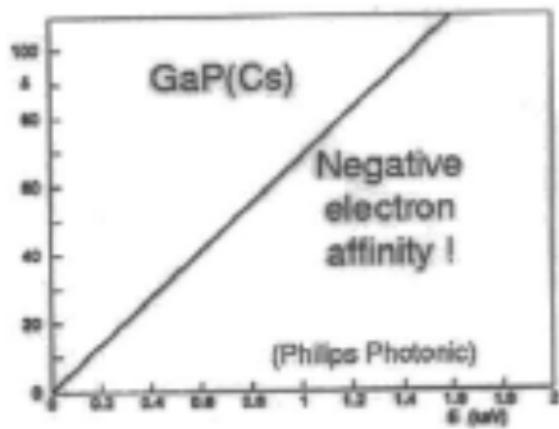
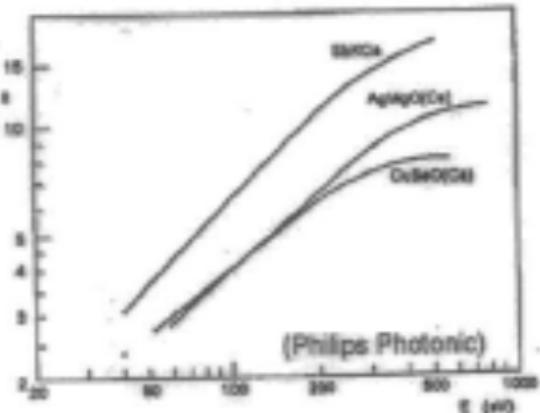
IL FATTORE MOLTIPLICATIVO δ NON E' FISSO \rightarrow SATURAZIONE

$\Phi \sim 15 - 50 \mu\text{m}$ OGNI FOTOEL. ENTRA IN UN CANALE DIVERSO

$$Q_{\text{TOT}} = N_{\text{ch}} \times Q_{\text{SAT}} \div n_{\text{fotoel}} \div n_{\text{fotoni}}$$

Proprieta' di tempo ECCELLENTI

$t_{\text{transito}} \sim \text{ns}$ (anziche' 20 - 80 ns STANDARD)
 $\sigma_t \sim 100 \text{ ps}$ (2-3 volte meglio)



MCP <3

