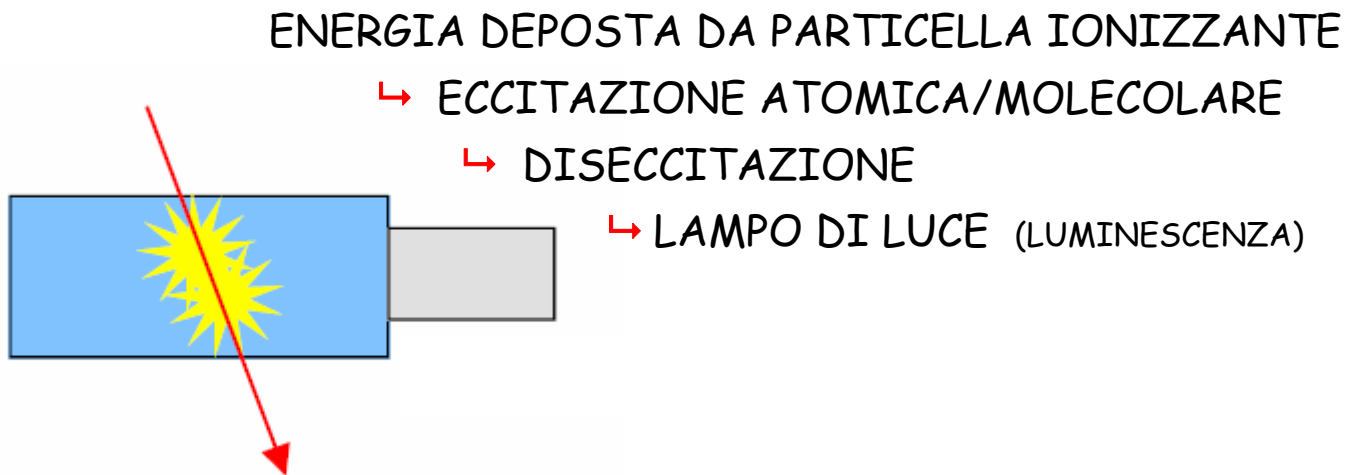


I RIVELATORI A SCINTILLAZIONE

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

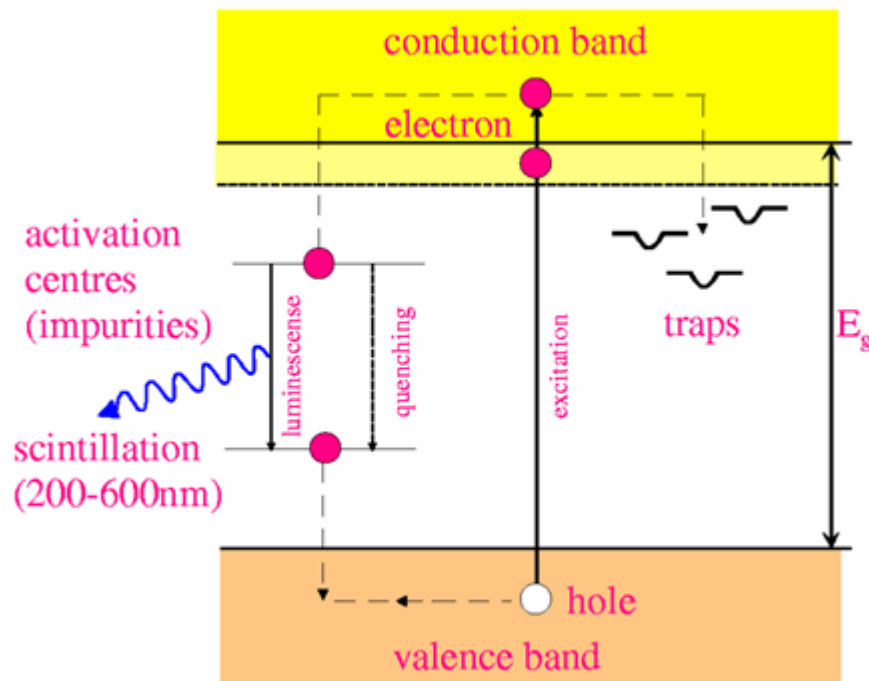
ORGANICI



Bassa resa in luce, ma veloci

MECCANISMO DI SCINTILLAZIONE

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



SPESSO 2 TEMPI CARATTERISTICI:

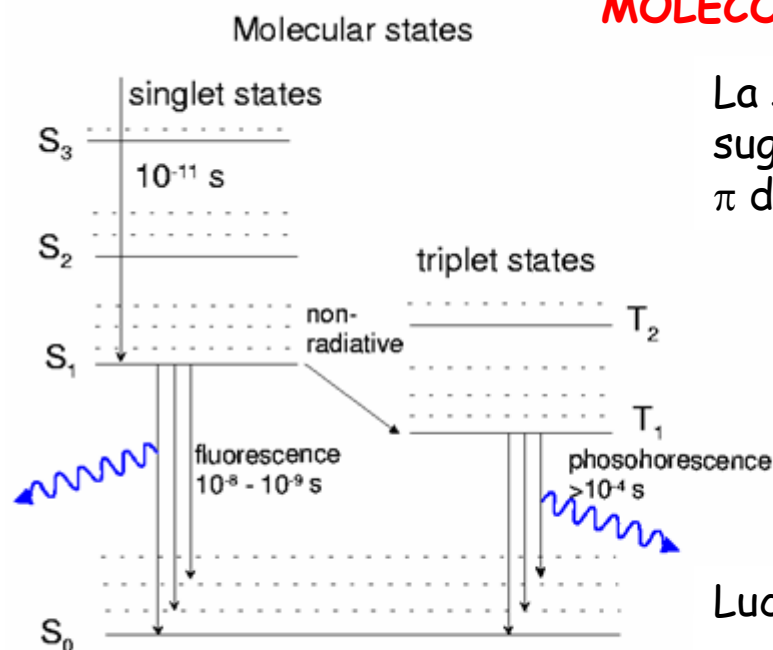
RICOMBINAZIONE VELOCE (ns- μ s)
DAI CENTRI DI RICOMBINAZIONE

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**

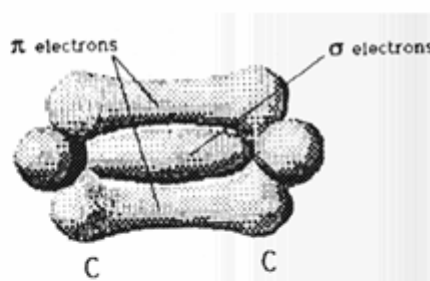
MECCANISMO DI SCINTILLAZIONE

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

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 FOTOMOLTIPLICATORE

IMPOSSIBILE SODDISFARE TUTTE LE RICHIESTE

EFFICIENZA DI SCINTILLAZIONE

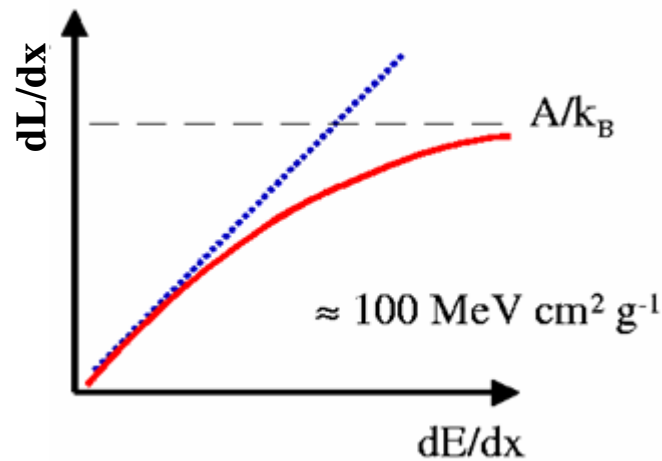
① DIPENDE DALL' ENERGIA

FORMULA DI BIRKS
(scintillatori organici)

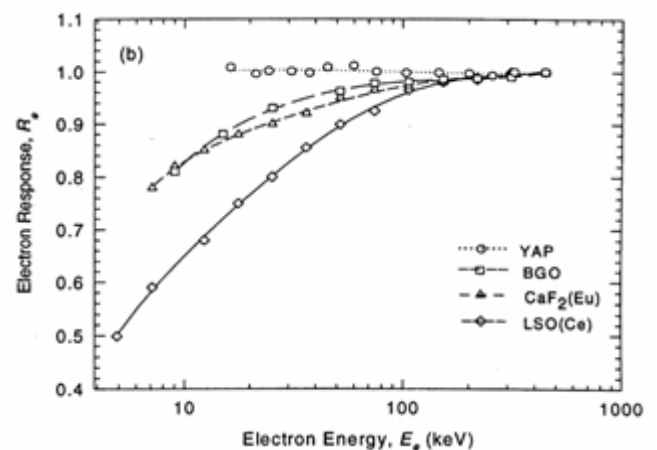
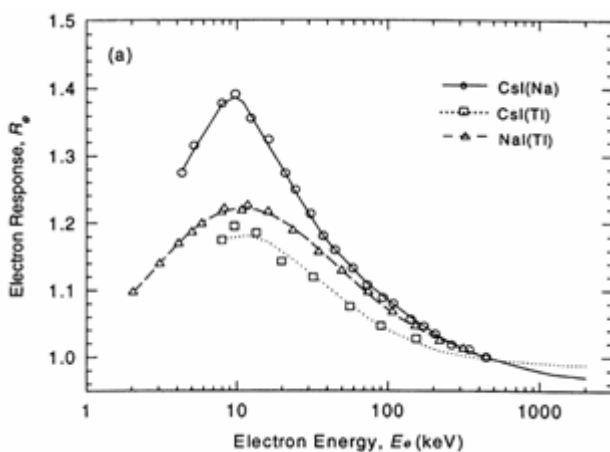
$$\frac{dL}{dx} = \frac{S \frac{dE}{dx}}{1 + kB \frac{dE}{dx}}$$

$$L = S \cdot E \quad \text{elettroni}$$

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



MENO IMPORTANTE NEGLI INORGANICI

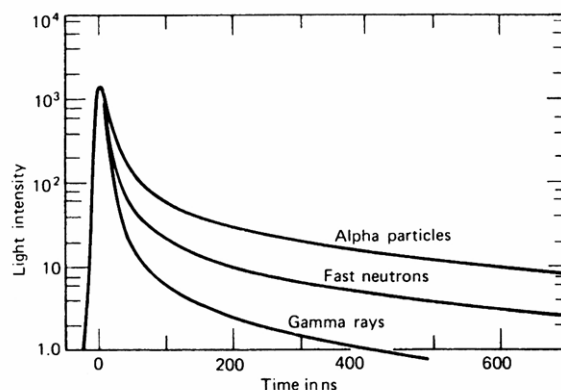


② DIPENDE DALLA PARTICELLA PIU' IMPORTANTE NEGLI ORGANICI

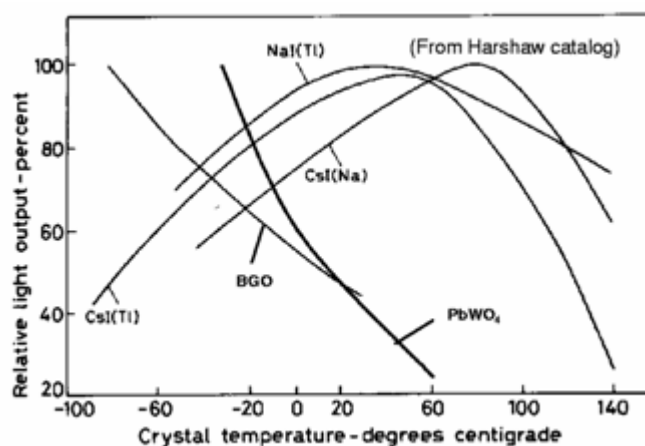
ad es.
$$\left. \frac{S_\alpha}{S_\beta} \right|_{org} < \left. \frac{S_\alpha}{S_\beta} \right|_{inorg} < 1$$

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

PROFILO TEMPORALE EMISSIONE



③ DIPENDE DALLA TEMPERATURA (SCINTILLATORI INORGANICI)



④ DIPENDE DALLE IMPUREZZE 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 (disecc. senza emissione di fotoni)
- } **AFTERGLOW**

Table 8.3 Properties of Common Inorganic Scintillators

	Specific Gravity	Wavelength of Max. Emission	Refractive Index	Decay Time (μ s)	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	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 μ s	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	Benzephenone, 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

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

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

USO DI ACCOPPIATORI OTTICI

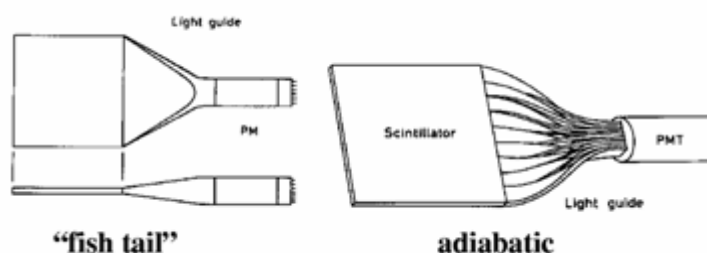
GRASSO OTTICO, SILICONE

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^-
 $E_{\max}^{e^-} = E_\gamma \sim 3 \text{ eV}$

② L' e^- MIGRA SULLA SUPERFICIE. PERDE ENERGIA
 (nei metalli $R \sim \text{nm}$ **TROPPO PICCOLO** → SEMICONDUTTORI)

③ L' e^- SFUGGE DALLA SUPERFICIE DEL CATODO, PURCHE' $E_{e^-} > W$
 (nei metalli $W \sim 3-4 \text{ eV}$ **NO!** Materiali appositi con $W \sim 1-2 \text{ eV}$)

FOTOELETTRONE

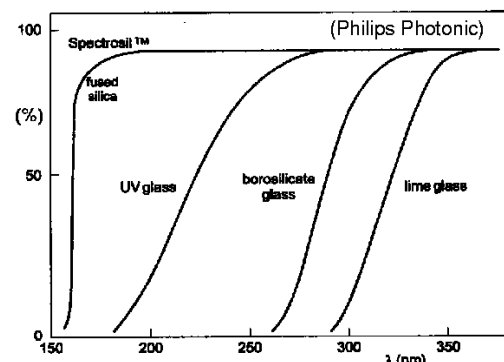
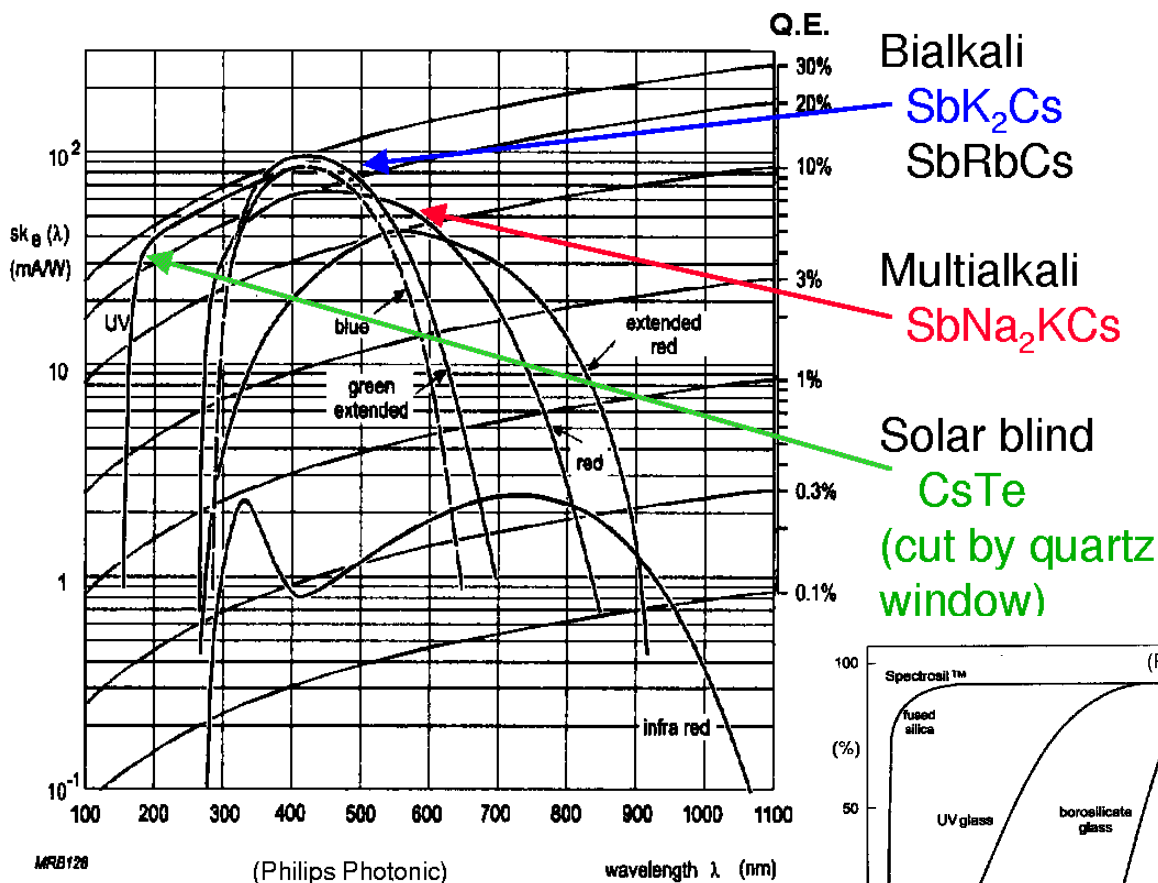
LAVORO DI ESTRAZIONE

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

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

↳ bassa capacita' di fermare i fotoni

↳ semitrasparenza



IL FOTOMOLTIPLICATORE

PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

❖ FOTOEMISSIONE DAL FOTOCATODO

sse $E_\gamma > W \rightarrow$ **CUT-OFF**

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

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

SEMPRE FUNZIONE DI λ

❖ EMISSIONE DI e^- SEC. DAI DINODI

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

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

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

❖ RACCOLTA ALL' ANODO. SEGNALE

➤ RUMORE TERMOIONICO

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

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

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

DIPENDE (OVVIAMENTE!) DALLA TEMPERATURA

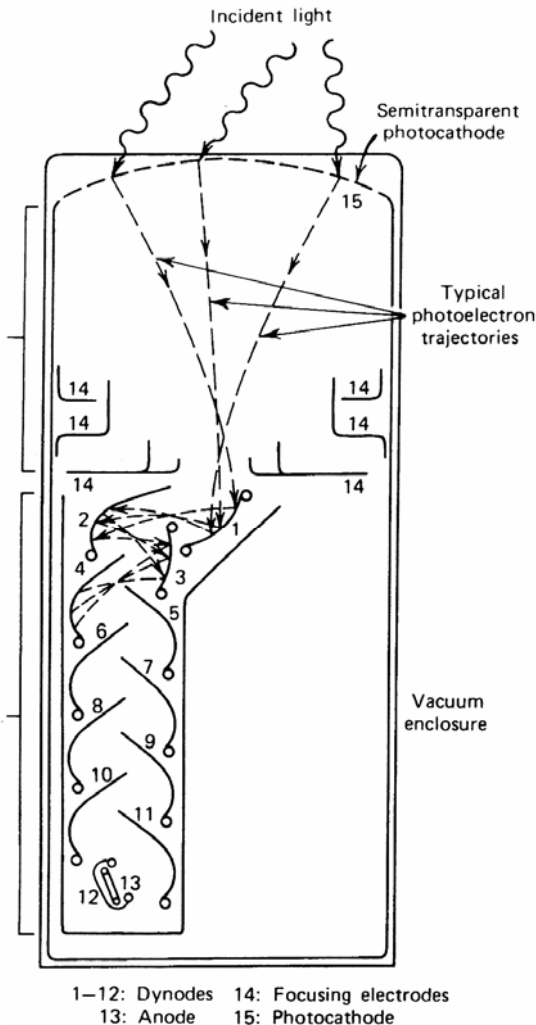
➤ RISOLUZIONE ENERGETICA

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

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

FLUTTUAZIONI $>$ PER $\bar{n} <$

↳ 1° DINODO



ESEMPI NUMERICI:

EFFICIENZA DI SCINTILLAZIONE IN NaI

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

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

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

~ 1 fotone ogni coppia e^- -h prodotta

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

EMISSIONE TERMOIONICA

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

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

RISOLUZIONE INFLUENZATA DALLE FLUTTUAZIONI DI I_{buio}

STATISTICA DELLA MOLTIPLICAZIONE

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

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

N-ESIMO STADIO

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

SE $\delta \gg 1$

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

ANCORA SUI FOTOTUBI...

FABBRICAZIONE DEI FOTOCATODI

OPACHI

- SPESSORE > PROFONDITÀ DI FUGA
- SU SUBSTRATO SPESSO
- LUCE INCIDENTE SUL LATO DI ESTRAZIONE DEGLI e^-

SEMI TRASPARENTI

SPESSORE \approx PROFONDITÀ DI FUGA

SU SUBSTRATO TRASPARENTE

↑
PIÙ PRATICI!

IMPORTANZA DELL' UNIFORMITÀ DI SPESSORE

MATERIALI

MULTIALCALINO $Na_2K Sb Cs$

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

SISTEMA DI MOLTIPLICAZIONE DEGLI ELETTRONI

EMISSIONE DI e^- SECONDARI

- e^- del 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

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

↑
 E_{DIN} DIPENDO SOLO DA ΔV E NON DA E^0

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

CRESCe L'ENERGIA FORNITA AI SINGOLI $e^- \rightarrow$ AUMENTA LA PROB. DI F.

L' e^- PENETRA PIÙ IN PROFONDITÀ \rightarrow DIMINUISCE LA PROB. DI FUGA

↪ C'È UN OTTIMO

Def

$$\int = \frac{\# e^- \text{ sec. emessi}}{\# e^- \text{ primari incid.}} \sim 5 \times \text{DINODI STANDARD E } \Delta V \sim 100 \text{ V}$$

$$\sim 20-30 \times \text{MATERIALI NEA}$$

ALTA TENSIONE E PARTITORE RESISTIVO

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

d.d.p. ai dinodi (V_i) > d.d.p. al catodo (V_0) SEMPRE

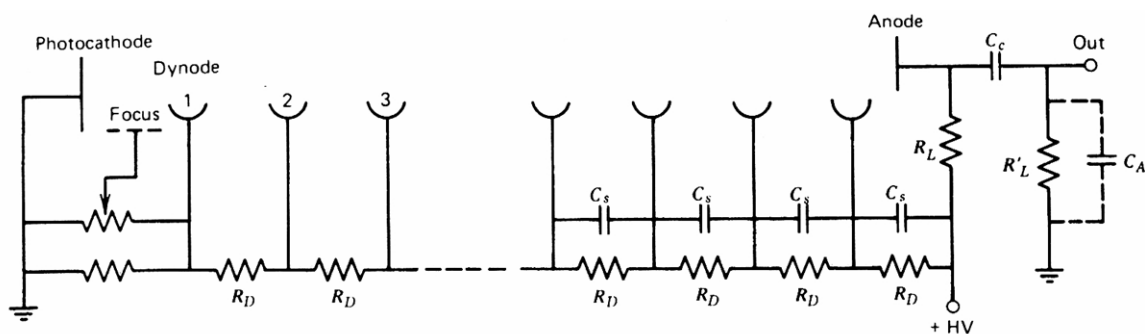
$$V_0 - V_1 \gg \Delta V_i \text{ SEMPRE}$$

- ① ALIMENTARE SEPARATAMENTE I VARI STADI (batteria a multielle)
SCOMODO! LA CORRENTE tra ultimo dinodo ed anodo è elevata
↳ LE BATTERIE SI SCARICANO RAPIDAMENTE

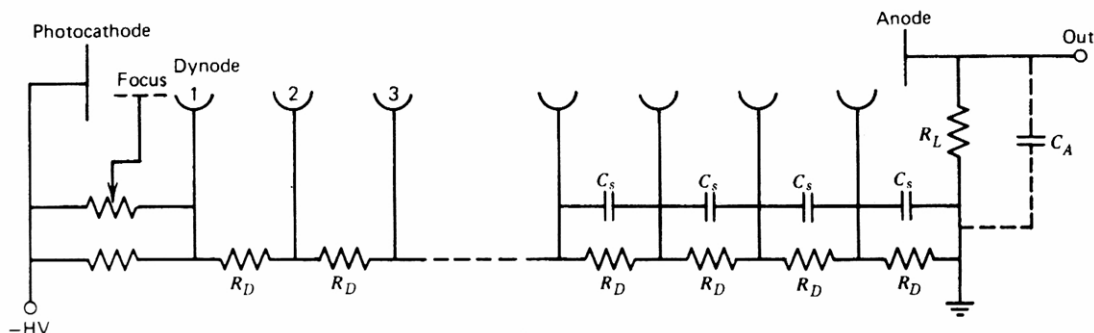
② PARTITORE DI TENSIONE RESISTIVO

$$i_p = \frac{H.V.}{\sum R_0} = \frac{H.V.}{NR_0} = \frac{\Delta V_i}{R_0} \leftarrow \Delta V_i = \Delta V_f + i_p R_0$$

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



(a)



(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 dinodo all'AN.
Rate di eventi di scintill. $\sim 10^5 \text{ ev/s}$ (\sim sorg. di cal. in lab.)

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

MODO CONTINUO

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

$$I_{picco}^{max} = \frac{10^9 \times 1.6 \times 10^{-19}}{5 \tau_0} = 32 \text{ mA}$$

$\tau_0 \sim 1 \text{ ns}$ negli scintill. veloci

Quindi $I_p \gg I_{MEDIA}$ FACILE (uso in modo corrente)

$I_p \gg I_{picco}$ TROPPO ALTO (pb di dissip. FOULE)

Ci si "accontenta" di $I_p \sim I_{picco}$ + CONDENSATORI STABILIZZ. dallo stadio in cui $I_{picco} \sim 1 \text{ mA}$

In effetti la carica Q immagazzinata in C_s da I_p fornisce nel transiente dell'impulso la carica al dinodo necessaria a mantenere costante ΔV ?
 C_s è poi nuovamente ricaricato nel Δt tra 2 impulsi

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

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

LA SCINTILLAZIONE IN NaI E' 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 E' VISIBILE

MATERIALI SPECIALI

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

STRATO FINISSIMO DI Cs IONIZZATO DALLO Zn CHE ABBASSA LA BARRIERA DI POT. SUPERFICIALE

- GLI e^- SUL FONDO DELLA B.C., HANNO EN. SUFFICIENTE A SFUGGIRE
- PROFONDITÀ DI FUGA ALLARGATA

MIGLIORE RISOLUZIONE TEMPORALE

- MAGGIORE UNIFORMITÀ DI EN. DEGLI e^- EMESSI
- MINOR NUMERO DI DIODI PER STESSO G COMPLESSIVO

MOLTIPLICAZIONE PER STADI MULTILI

G RICHIESTO $\sim 10^6$

AD OGNI STADIO GUADAGNO δ

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

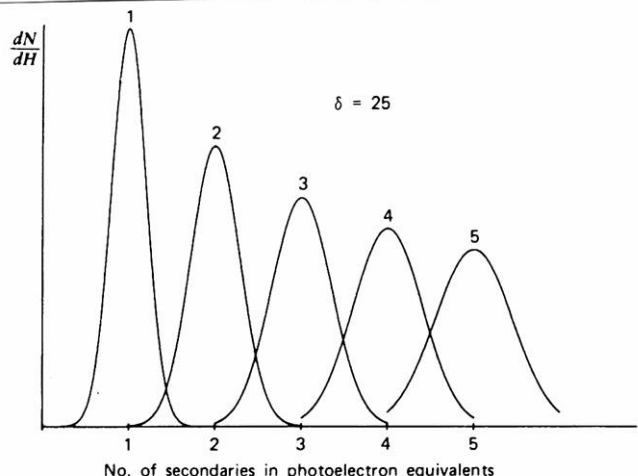
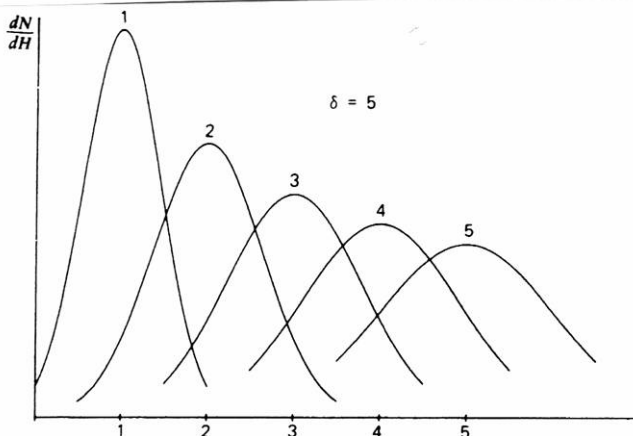
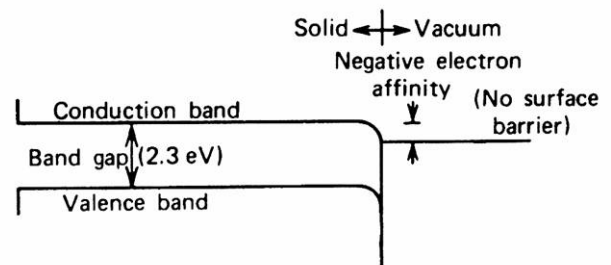
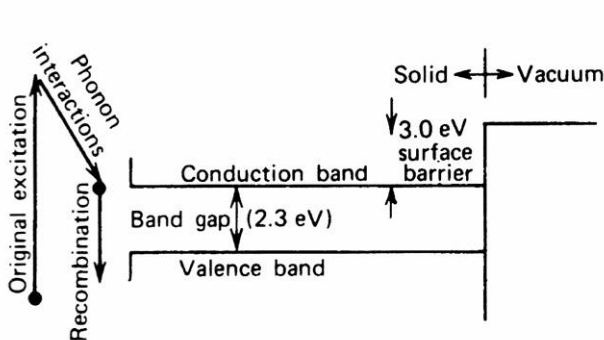
ES $\delta = 5$ $\alpha \sim 1$ $N = 10$ $G = 5^{10} \sim 10^7$ PM STANDARD

$\delta = 55$

$N = 4$

N.E.A.

NB $G = G(\Delta V)$ 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 $G = G(\Delta V)$

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)

⑧ DISUNIFORMITA' DEL FOTOCATODO

NELLA RISPOSTA NELLA RACCOLTA AL 1° DINODO → 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

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 ($\mu\text{A}/\text{lm}$) 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).

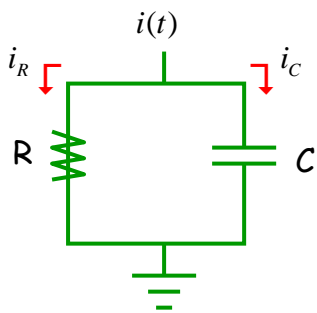
^acathode luminous sensitivity is measured using a blue Corning C.S. No. 5-58 filter.

ANALISI DELLA FORMA DELL' IMPULSO

LEGGE TEMPORALE DELLA SCINTILLAZIONE

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

ALLARGAMENTO NEL + DI TRANSITO TRASCURABILE

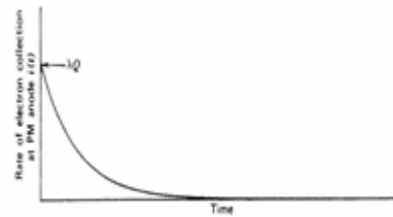


$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt \rightarrow i_0 = \lambda Q \rightarrow i(t) = \lambda Q e^{-\lambda t}$$

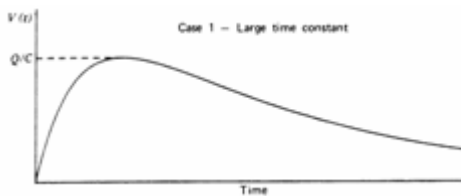
$$g \equiv \frac{1}{RC}$$

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

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



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

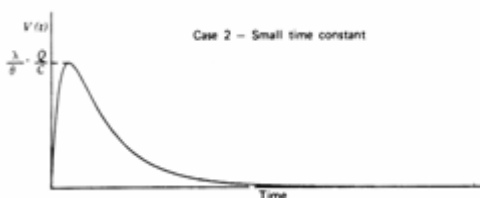


$$V(t) \approx \frac{Q}{C} (e^{-gt} - e^{-\lambda t})$$

risetime dipendente da λ
decay time dipendente da RC
 $V_{MAX} = Q/C$

PER ALLUNGARE RC SI FA CRESCERE R MANTENENDO C PICCOLO, COSI' V_{MAX} E' GRANDE

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



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

risetime dipendente da RC
decay time dipendente da τ_D
 $V_{MAX} = \frac{\lambda}{g} \frac{Q}{C} \ll \frac{Q}{C}$

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

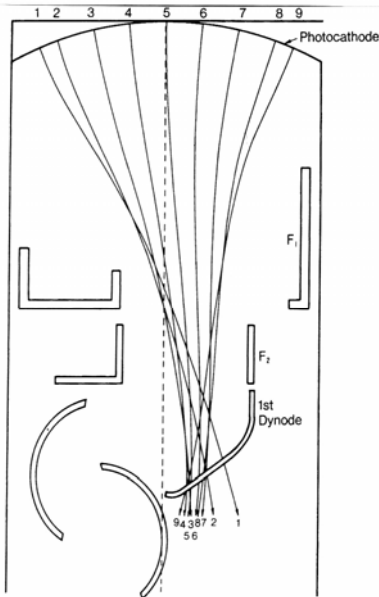
In realta' V_{MAX} e' sensibile alle fluttuazioni che originano dalla natura statistica della produzione di fotoelettroni

TEMPO DI TRANSITO E TIME SPREAD

Es: 14 dinodi
2 kV totale

→ 150 V interdinodica

↳ E_k media ≈ 75 eV



Tipica velocità media

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

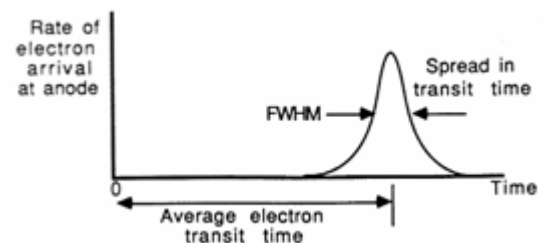
Tipico tempo di transito

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

FLUTTUAZIONI DI τ

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

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



CALCOLO DELL' AMPIEZZA DI SEGNALE ASPETTATO

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

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

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

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

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

RISOLUZIONE ENERGETICA

ORIGINE DELLA PERDITA DI RISOLUZIONE

- STATISTICA DI RACCOLTA DELLE CARICHE
- RUMORE ELETTRONICO
- RISPOSTE \neq NELLE VARIE REGIONI DEL VOLUME ATTIVO
- DERIVE NELLA STABILITÀ DI TUTTA LA CATENA DI MISURA
- FLUTTUAZIONI NEL GUADAGNO DEL FOTOMOLTIPLICATORE
- 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

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

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

fotoni al fotocatodo ~ 15000 (perdite all'interfaccia)

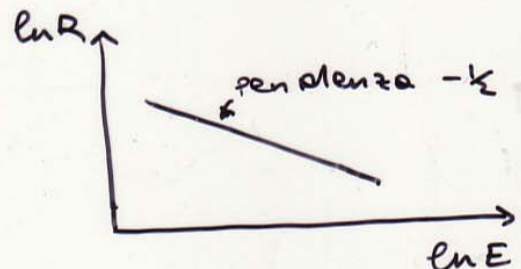
Q.E. $\sim 20\%$ \rightarrow # fotoelettroni emessi = 3000 MINIMO

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

DIPENDENZA DELLA RISOLUZIONE DALL'ENERGIA

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

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



In realtà

$$R = \frac{(\alpha + \beta E)^{1/2}}{E}$$

con α e β da determinarsi sperimentalmente.

ALTRE 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 γ MONOCROMATICI
AD OGNI EVENTO CORRISPONDE UNO SPETTRO IN EN. DEGLI E⁻ SECONDARI
PRODOTTI DIFFERENTE. SE NON C'È LINEARITÀ LA CONVERSIONE IN
LUCE SARÀ DIFFERENTE DA EVENTO AD EVENTO
DIPENDE ANCHE DALLE DIMENSIONI E DALLA GEOMETRIA DEL RV.

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° DINODO

PER DERIVA DEL GUADAGNO DELLA CATENA ELETTRONICA + RV.

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

Migliore 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^- → MOLTO SPESSO ELIMINABILI

ALTRIMENTI CERCARE DI RIDURRE IL PROBLEMA A MONTE:

- SUP. FOTOCATODO + PICCOLA POSSIBILE
- MATERIALI "SILENZIOSI"
- FOTOTUBI CON MINOR CORRENTE DI BUIO

MODO IMPULSATO

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

VENGONO DISCRIMINATI → NESSUN RUMORE AGGIUNTO

MODO IN CORRENTE

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

SOLUZIONE

RAFFREDDAMENTO DEL FOTOCATODO → $I'_{buio} \sim \frac{1}{100} I_{buio}$

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 $\sim 10\text{-}100 \text{ Bq/Kg}$
- RAD. COSMICA (da' luogo a Cerenkov) impulsi piccoli, da pochi fotoel.

IMPULSI RITARDATI

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

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

Da ioni⁺ dovuti a gas residuo

$\Delta t \gg t_{transito}$ 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 E MINORI MA RISOLUZ. EN. PEGGIORE DEI PMT

HPMT

FOTOCATODO + FOTODIODO AL Si

UN UNICO STADIO DI MOLTIPLICAZIONE CON ΔV GRANDE

$G_{TOT} \sim 3000$ (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 termionico)

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

MICROCHANNEL PLATE

IL FATTORE MOLTIPLICATIVO δ NON E' FISSO \rightarrow SATURAZIONE

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

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

Proprieta' di tempo ECCELLENTI

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

