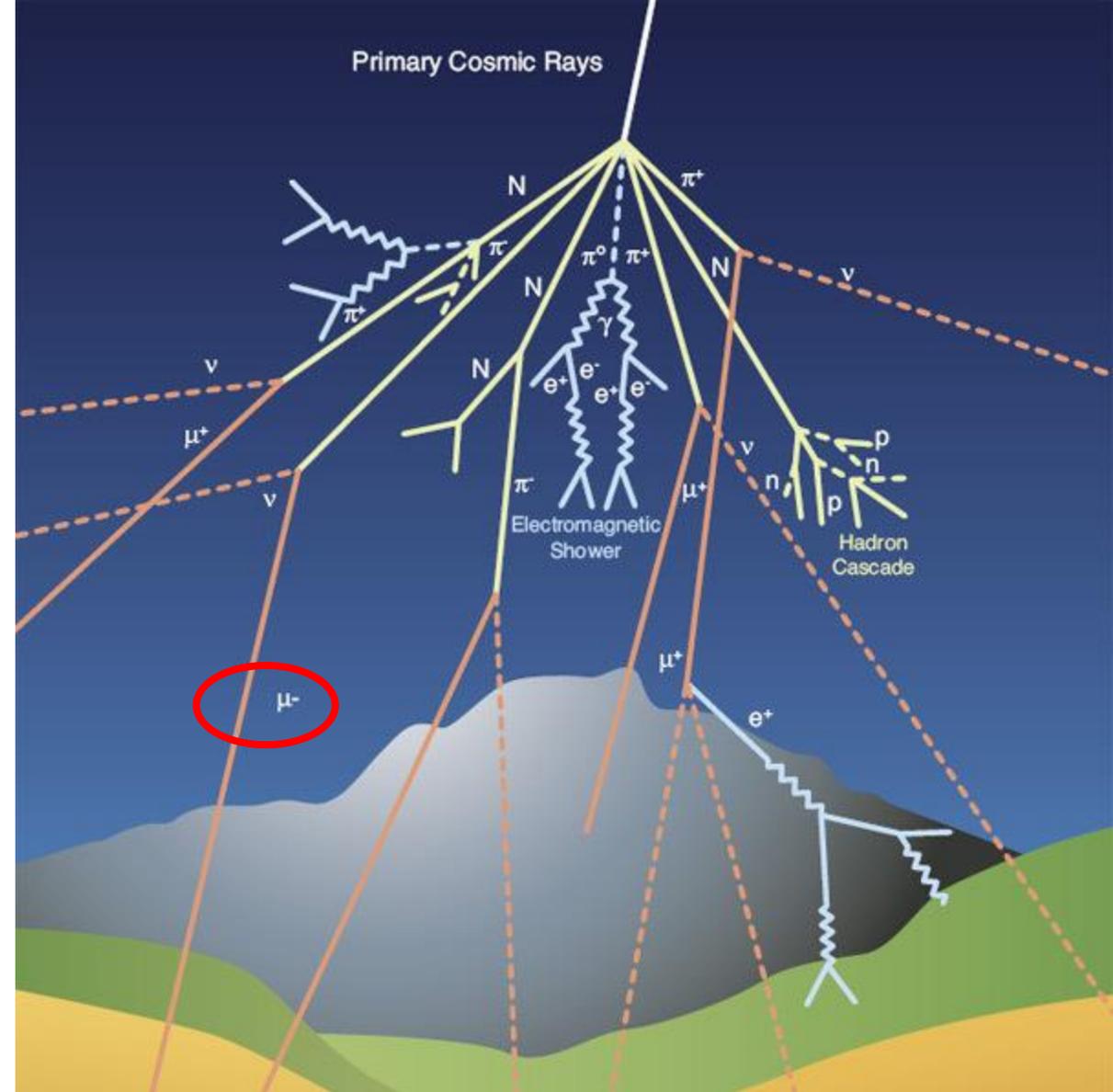
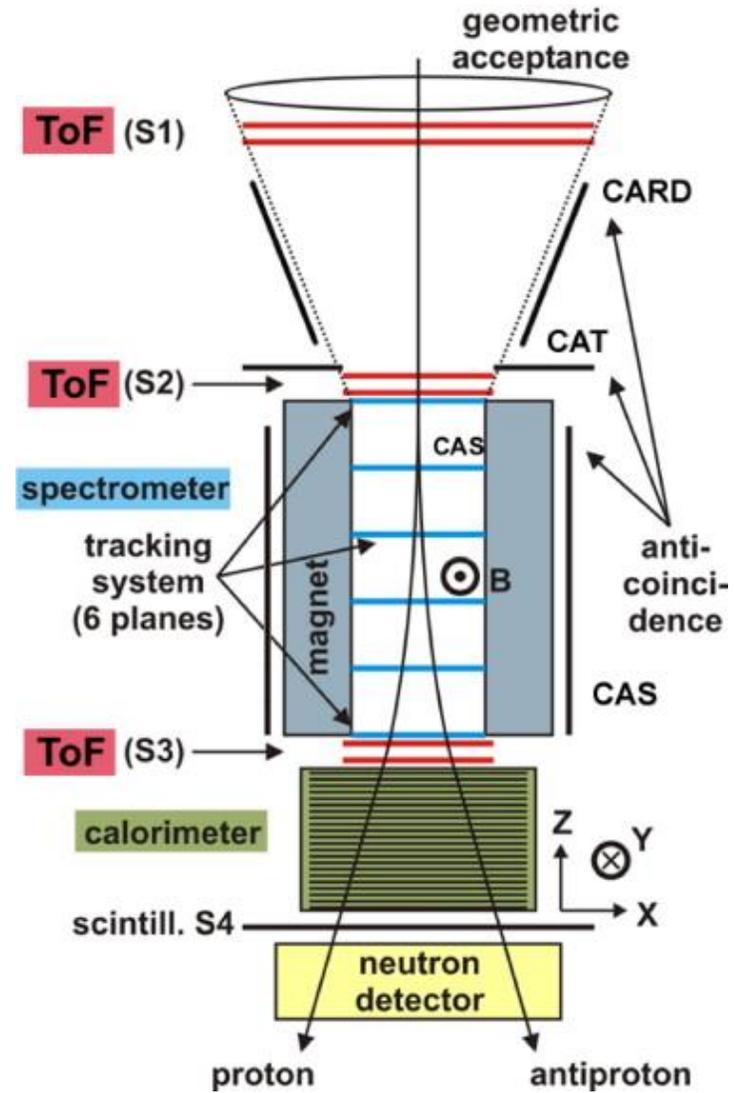
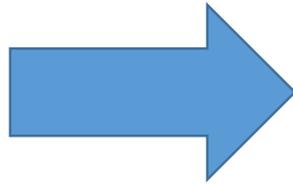
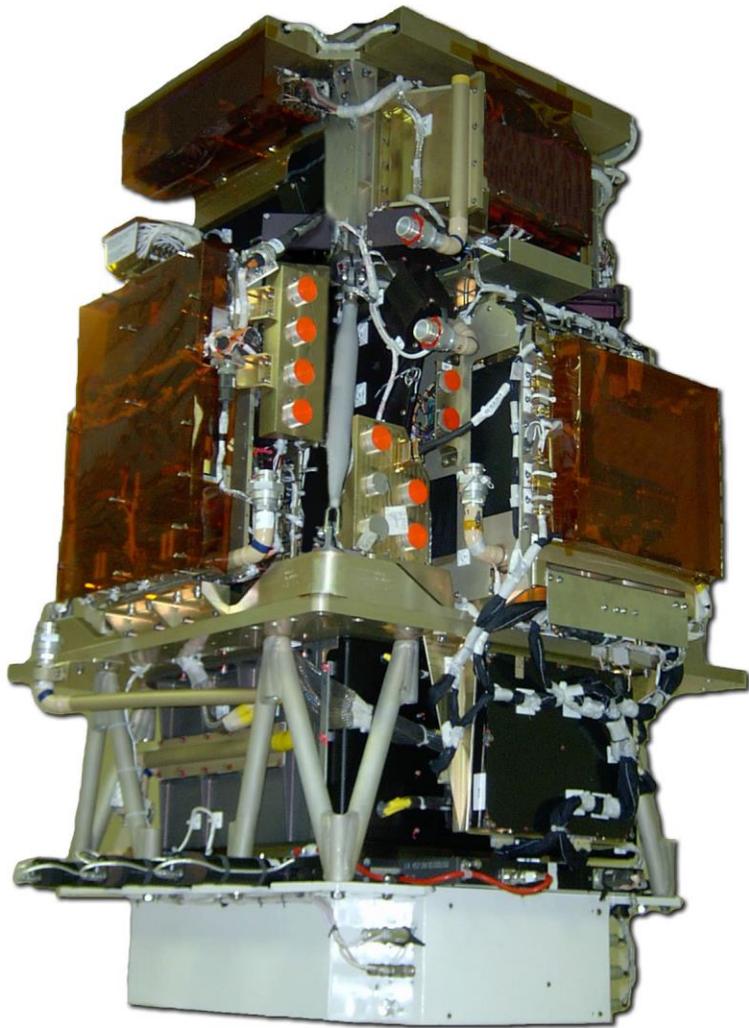


*Rivelatori di radiazione cosmica:  
breve introduzione a **scintillatori**  
e **fotomoltiplicatori***

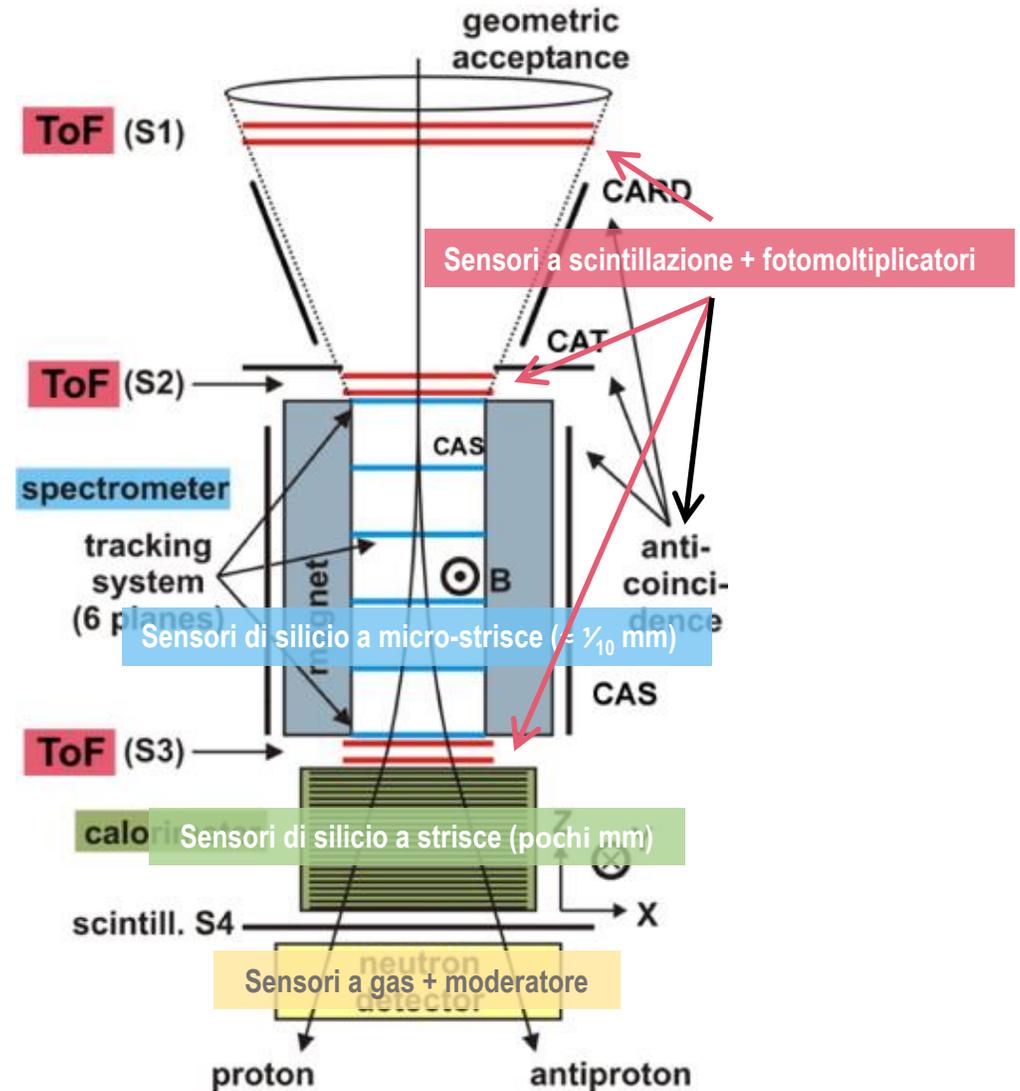
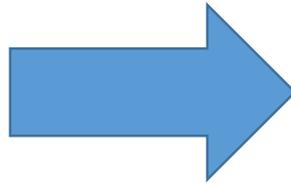
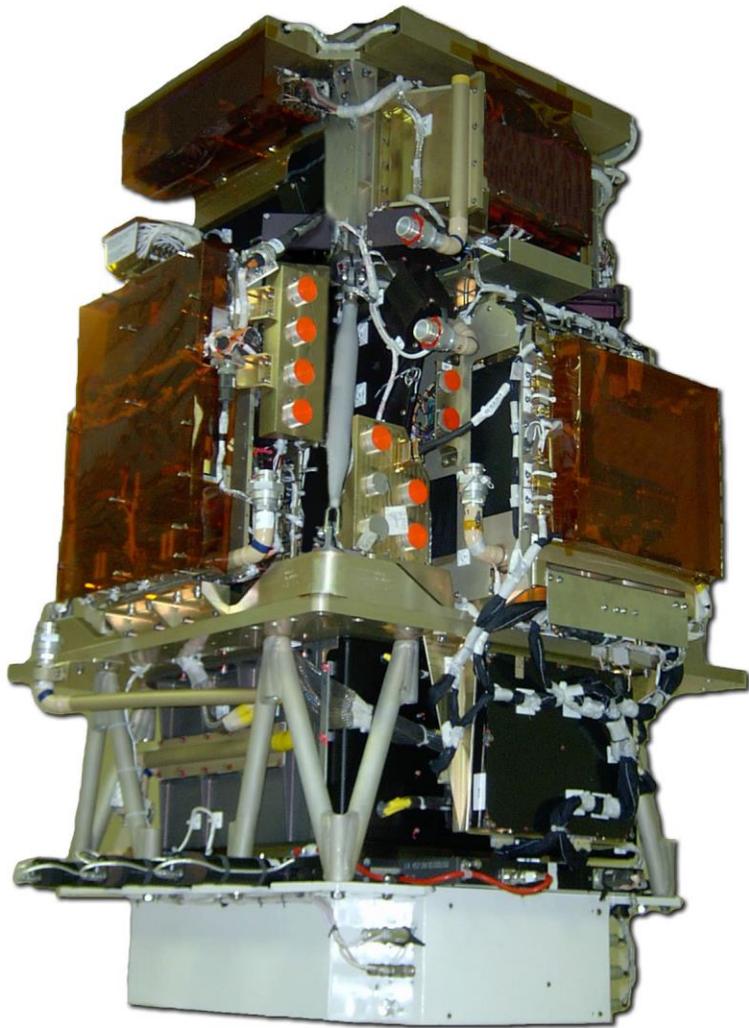


S. Levorato, G. Zampa INFN Trieste

# Un «tipico» rivelatore di raggi cosmici

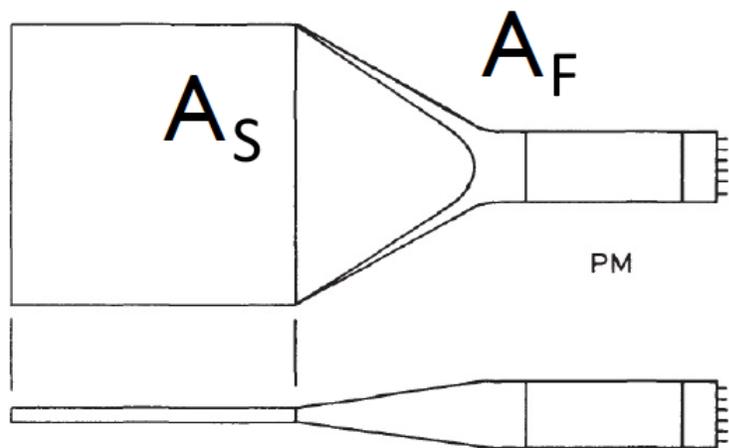


# Un «tipico» rivelatore di raggi cosmici

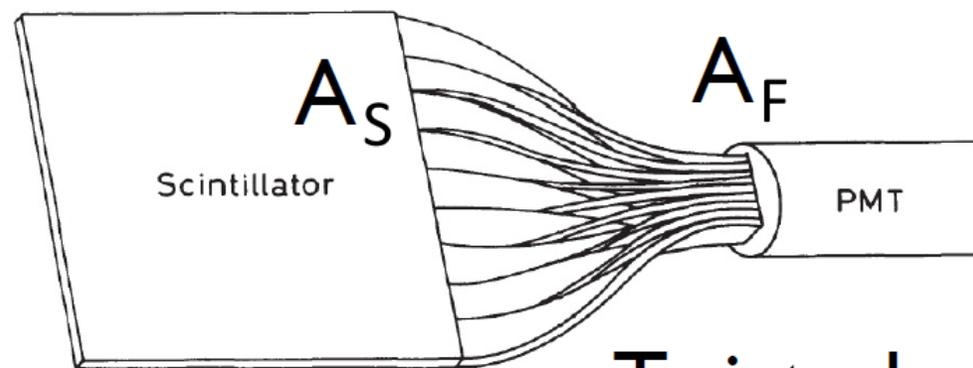


# Componenti di un rivelatore di raggi cosmici basato sul fenomeno della scintillazione

Questo tipo di rivelatore consiste generalmente in un **materiale scintillante** accoppiato otticamente ad un **fotomoltiplicatore** (PM) in modo diretto o tramite una **guida di luce**



**Fish tail**



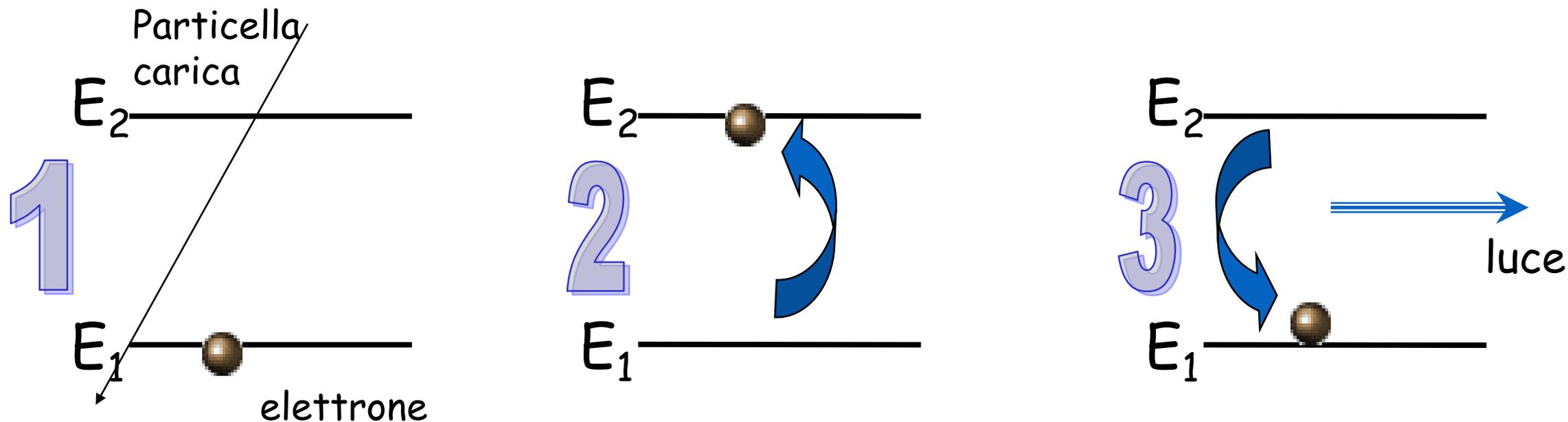
**Twisted  
(Adiabatic)**

Il contatore a **scintillazione** è uno dei più vecchi apparati sperimentali usati per la radiazione nucleare ma è ancora molto importante per gli esperimenti sui raggi cosmici

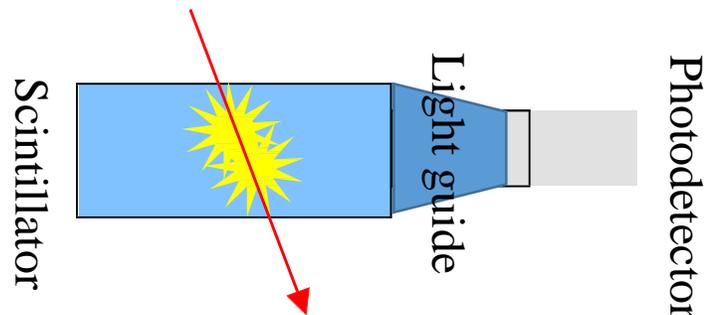
Prima del contatore a scintillazione si usava **l'occhio nudo**, osservando i flash di luce emessi quando le particelle colpivano uno schermo di solfato di zinco

# Il fenomeno della scintillazione

1. la particella carica **cede energia** agli elettroni delle molecole dello scintillatore
2. gli elettroni degli atomi di uno scintillatore sono **"eccitati"** (acquistano energia) dalla particella che lo attraversa
3. dopo un certo tempo (da qualche nanosecondo a centinaia di nanosecondi), gli elettroni si **"diseccitano"** (perdono energia) emettendo luce (fotoni con  $\lambda \sim 450 \text{ nm}$ )



# Proprietà generali di uno scintillatore per la rivelazione dei raggi cosmici



Definiamo **scintillatore** qualunque materiale che emette un impulso di luce poco dopo il passaggio di una particella carica

Particelle cariche



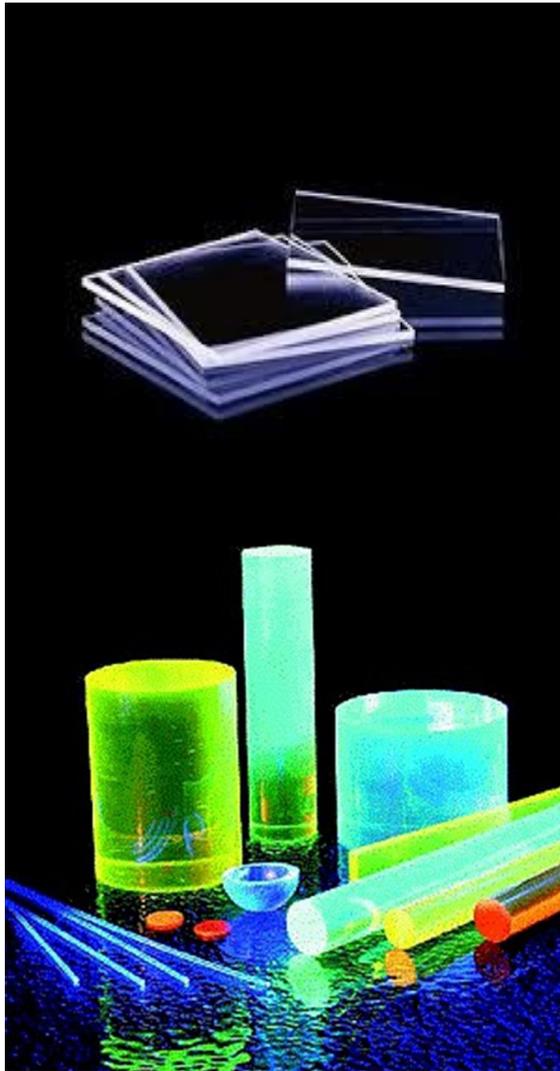
La funzione di uno scintillatore è duplice:

- Emettere luce (luminescenza)
- Trasmetterla al rivelatore di fotoni attraverso la guida di luce ad esempio ad un fotomoltiplicatore



Sia lo scintillatore che la guida di luce devono essere trasparenti alla luce di scintillazione

# Materiali scintillanti e loro proprietà



Scintillatore	Densità [g/cm <sup>3</sup> ]	Indice di rifrazione	Lunghezza d'onda [nm]	Costante di tempo [μs]	Scintillazione relativa a NaI(Tl)	Note	Fotoni/MeV
<b>NaI</b> Ioduro di sodio	3.67	1.78	303	0.06	190		
<b>NaI(Tl)</b> Ioduro di sodio drogato con tallio	3.67	1.85	410	0.25	100	a 80 K	4x10 <sup>4</sup>
<b>CsI</b> Ioduro di cesio	4.51	1.80	310	0.01	6	a 80 K	
<b>CsI(Tl)</b> Ioduro di cesio drogato con tallio	4.51	1.80	565	1.0	45	a 80 K	1.1x10 <sup>4</sup>
<b><sup>6</sup>LiI(Eu)</b> Ioduro di litio drogato con europio	4.06	1.96	470-485	1.4	35	a 80 K	1.4x10 <sup>4</sup>
<b>BaF<sub>2</sub></b> Fluoruro di bario	4.88	1.49	190/220 310	0.0006 0.63	5 15		6.5x10 <sup>3</sup> 2x10 <sup>3</sup>
<b>Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub></b> Germanato di bismuto	7.13	2.15	480	0.30	10		2.8x10 <sup>3</sup>
<b>PbWO<sub>4</sub></b> Tungstenato di piombo	8.28	1.82	440,530		0.1		100
<b>Lar</b> Argon liquido	1.4	1.29	120-170	0.005/0.860		a 170 nm	
<b>LKr</b> Kripton liquido	2.41	1.40	120-170	0.002/0.085		a 170 nm	
<b>Lxe</b> Xeno liquido	3.06	1.60	120-170	0.003/0.022		a 170 nm	4x10 <sup>4</sup>

# La guida di luce

Una guida di luce (solitamente plexiglass) serve a:

- collegare otticamente lo scintillatore al fotomoltiplicatore
- adattare la sezione dello scintillatore a quella del fotomoltiplicatore, generalmente diverse tra loro
- poter allontanare il fotomoltiplicatore dallo scintillatore

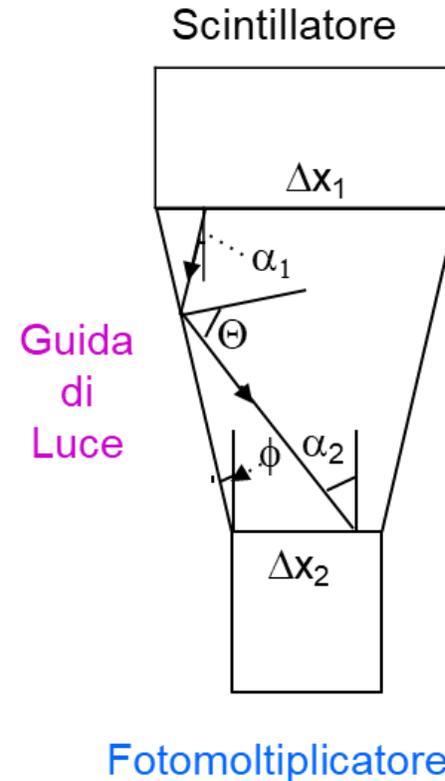
Le limitazioni dell'efficienza di trasmissione della luce di scintillazione sono legate a:

- Il rapporto tra le aree del fotomoltiplicatore ( $A_F$ ) e dello scintillatore  $A_S$ . Si può dimostrare che:

$$\frac{I_{OUT}}{I_{IN}} \leq \frac{A_F}{A_S} \quad (\text{non dipende dalla forma della guida})$$

- alla rifrazione/riflessione della luce dentro la guida

→ si opera in regime di riflessione totale



## Riflessione totale

Per avere riflessione totale:

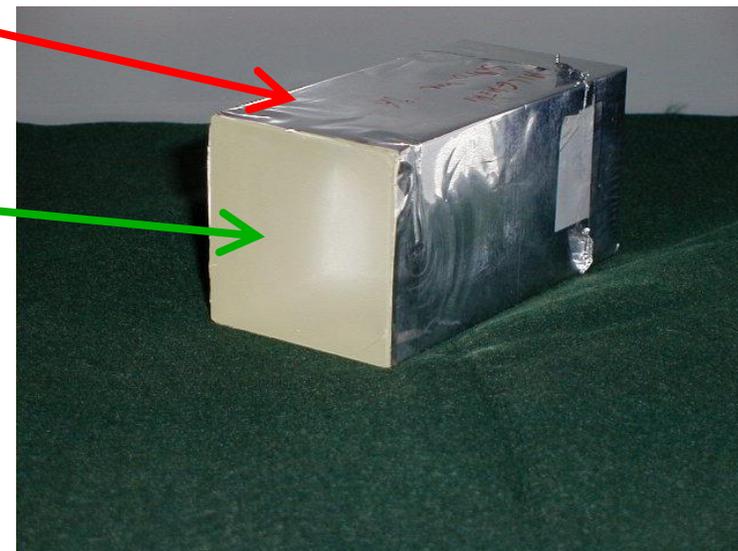
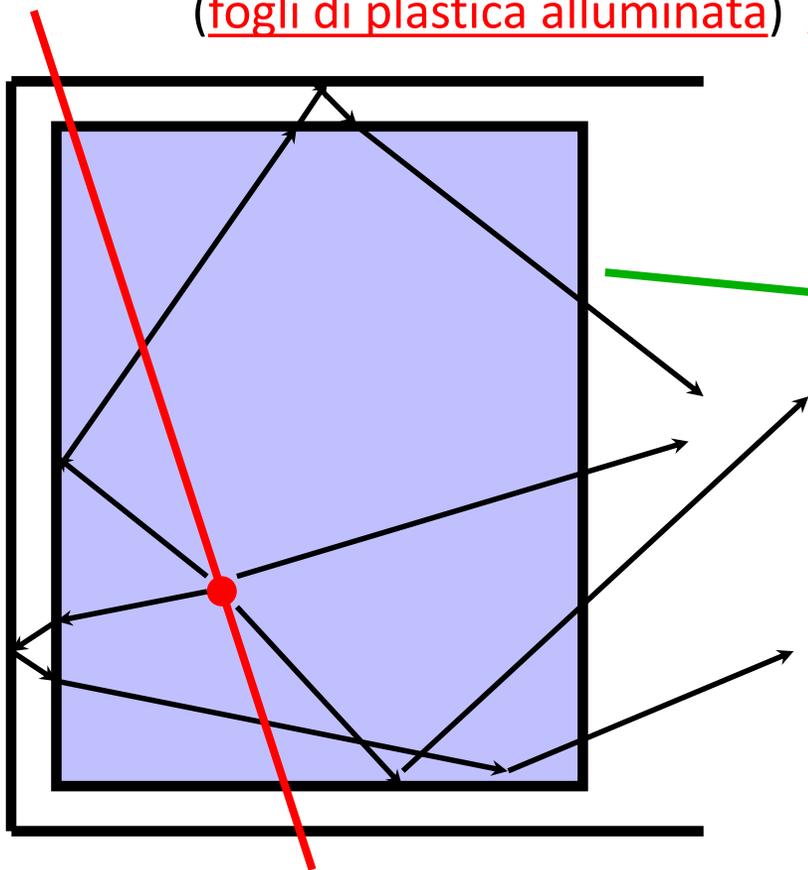
$$\sin \theta \geq \frac{n_e}{n} \quad \begin{array}{l} n_e=1 \text{ (aria)} \\ n = \text{indice rifr. della guida} \end{array}$$

Parte della luce si dirige verso le superfici esterne del materiale scintillante dove può essere riflessa e/o trasmessa.

Si ha riflessione totale per fotoni che incidono sulla superficie del materiale con angoli maggiori dell'angolo di Brewster

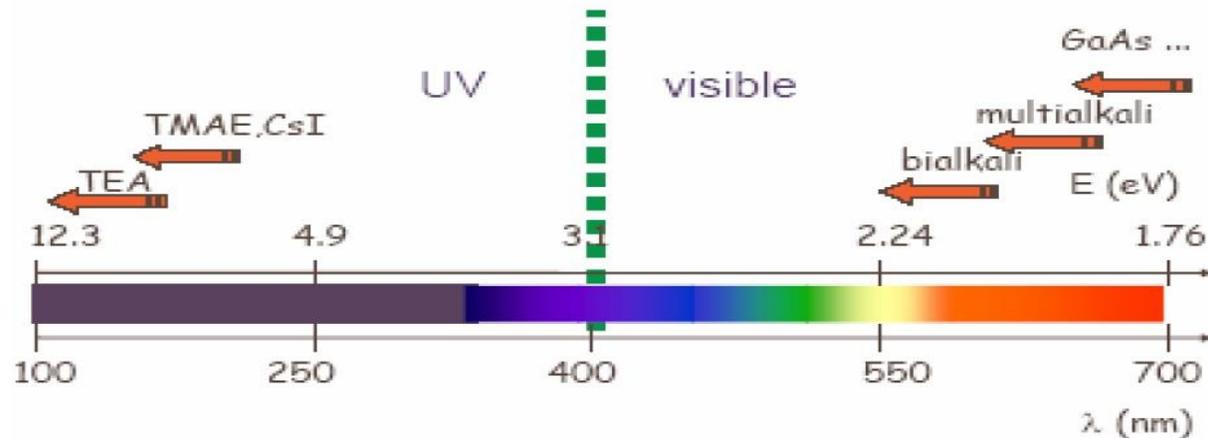
# Recuperare luce non riflessa internamente

Parte della luce che si dirige verso le superfici esterne del materiale scintillante dove può essere trasmessa, per recuperarla. Aggiunta di materiali a riflessione totale sulle superfici esterne dello scintillatore (fogli di plastica alluminata)



# Produzione di elettroni da fotone incidente

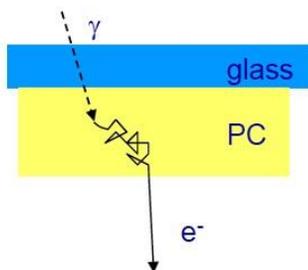
Scopo dei vari fotorivelatori è quello di convertire la luce in segnali elettrici rivelabili. Lo spettro che ci interessa va normalmente dall'ultravioletto al visibile.



Processo a 3 fasi:

- foto-ionizzazione della molecola
- propagazione degli elettroni nel catodo
- fuga degli elettroni nel vuoto

Semitransparent photocathode



Il fotocatodo converte la luce incidente in fotoelettroni per effetto fotoelettrico:

$$E = h\nu - \Phi$$

$h\nu$  incidente: ~3 eV

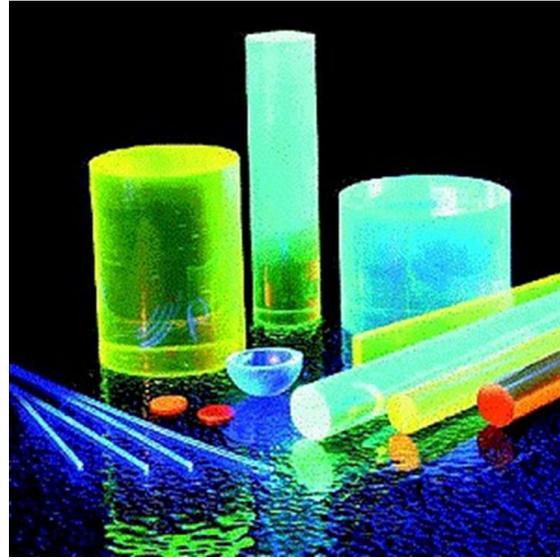
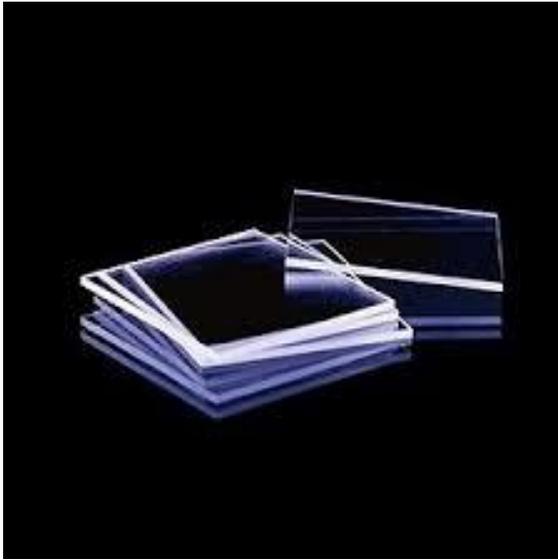
**Work function  $\Phi$ :**

- 3-4eV per i metalli,
- 1.5 eV per **semiconduttori**

- ❖ C'è un'energia di soglia
- ❖ Oltre a questa energia la probabilità di conversione dipende dalla frequenza della luce incidente e dal materiale che costituisce il fotocatodo
- ❖ Efficienze 10%-30%

Nel 1921 Einstein ricevette il [premio Nobel per la fisica](#) «per i contributi alla [fisica teorica](#), in particolare per la [scoperta della legge dell'effetto fotoelettrico](#)»

# L'occhio umano è un rivelatore di fotoni



Credit: [www.paginemediche.it](http://www.paginemediche.it)

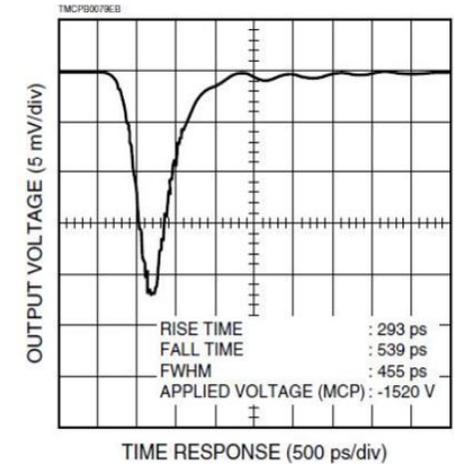
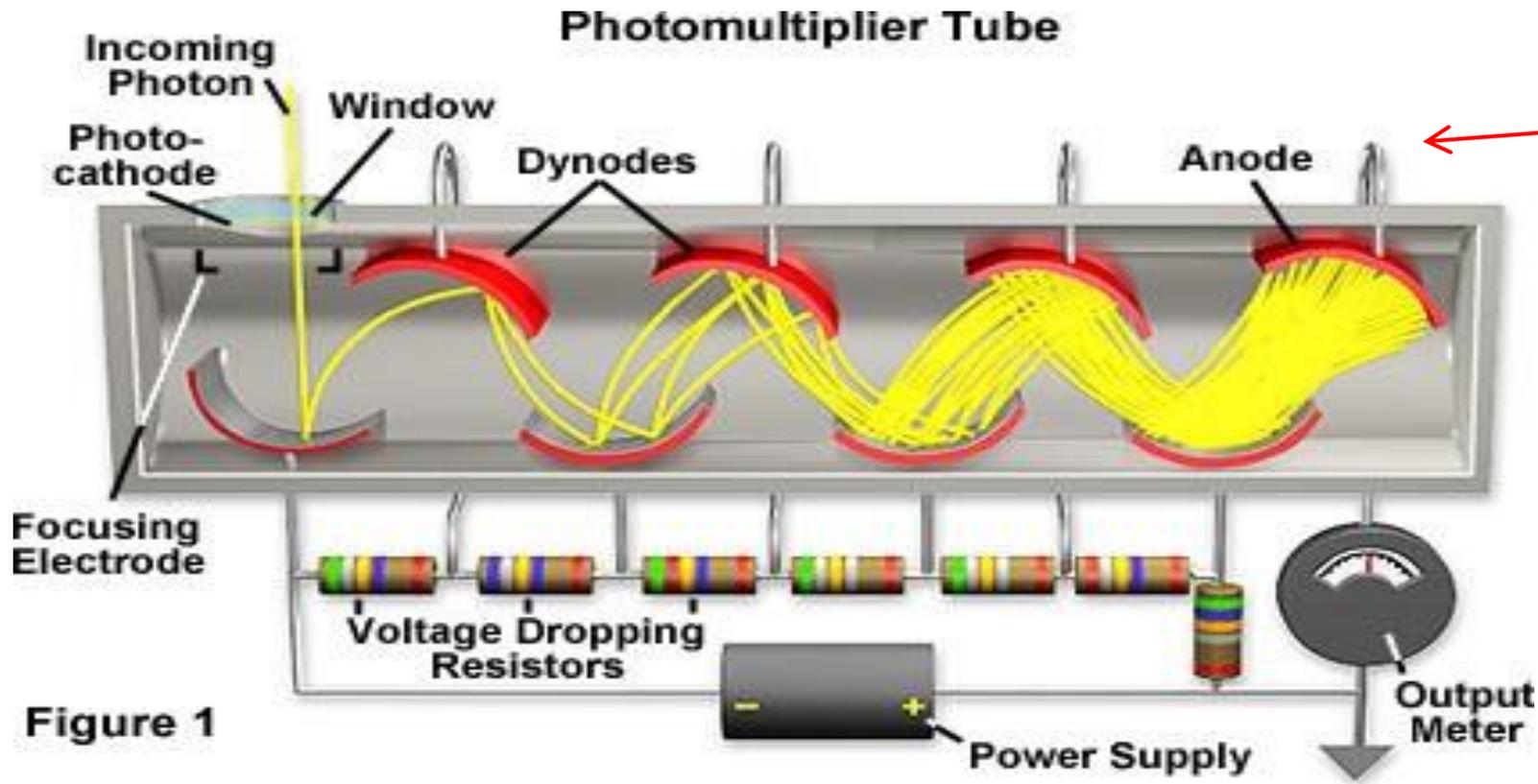
Pare che la sensibilità dell'occhio umano aumenta con una tazza di buon caffè (molto forte), possibilmente con l'aggiunta di una piccola dose di stricnina...!!!!

Dopo un lungo periodo di adattamento, l'occhio umano può vedere circa 15 fotoni se emessi in un intervallo di tempo non superiore ad 1/10 di secondo e con lunghezza d'onda pari a quella cui l'occhio umano è più sensibile (verde). 1/10 s è il tempo di persistenza dell'immagine sulla retina.

Henry&Baucels (J.Phys.Path.Gen. XIII (1911),841) affermano che è visibile ad occhio nudo un deposito di energia di 3 eV corrispondente ad un singolo fotone nel verde.  $\lambda(nm) \sim \frac{1240}{E(eV)}$

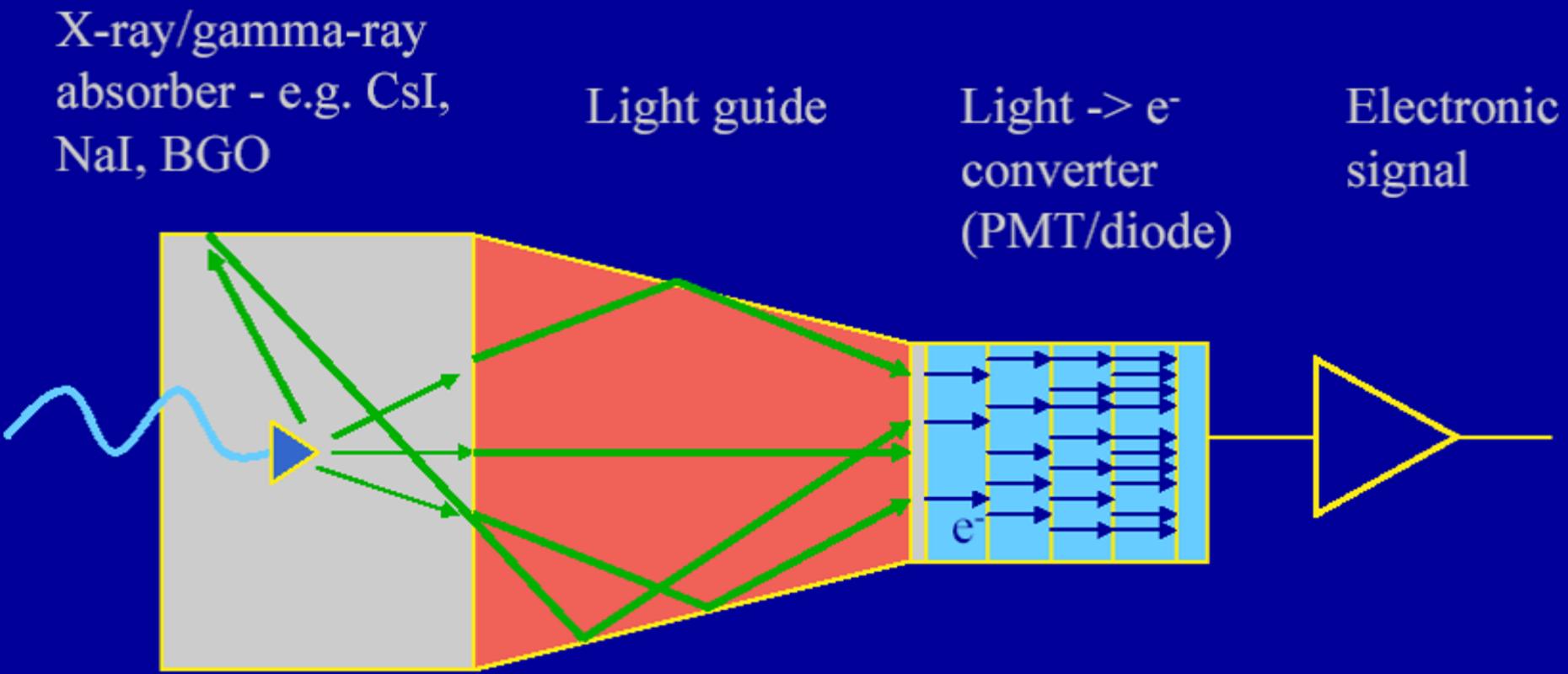
# Fotomoltiplicatori

la luce viene trasmessa al PM e viene convertita in una debole corrente di **fotoelettroni**, amplificata dai **dinodi** (altri elettrodi) del PM. → abbiamo un segnale in corrente facilmente rivelabile dall'elettronica di lettura



Linearità: corrente all'anodo  
proporzionale ai fotoni  
incidenti (energia rilasciata)

# Qualche numero per farsi un'idea quantitativa



25.000 fotoni

15.000 fotoni (60% efficienza)

3000 elettroni (20% efficienza QE)

Typical NaI(Tl) system (from Derenzo)

511 keV gamma ray  
 ↓  
 25000 photons in scintillator  
 ↓  
 15000 photons at photocathode  
 ↓  
 3000 photoelectrons at first dynode  
 ↓  
 3 · 10<sup>9</sup> electrons at anode  
 2 mA peak current

Resolution of energy measurement determined by statistical variance of produced signal quanta.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta N}{N} = \frac{\sqrt{N}}{N} = \frac{1}{\sqrt{N}}$$

Resolution determined by smallest number of quanta in chain, i.e. number of photoelectrons arriving at first dynode.

In this example

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{\sqrt{3000}} = 2\% \text{ r.m.s.} = 5\% \text{ FWHM}$$

Typically 7 – 8% obtained, due to non-uniformity of light

# Un esempio di rivelatore a scintillazione

- Scintillatore -> Guida di luce -> Fotomoltiplicatore
- Materiale riflettente
- Rivestimento nero per evitare che al fotomoltiplicatore arrivi luce diversa da quella di scintillazione

