

Particle Detectors

Lecture 18

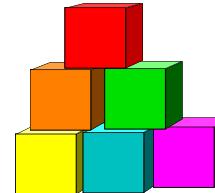
11/05/15

a.a. 2015-2016

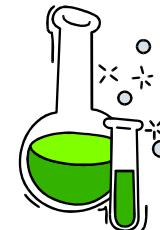
Emanuele Fiandrini

Scintillatori

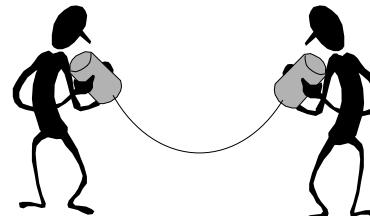
- Scintillatori inorganici



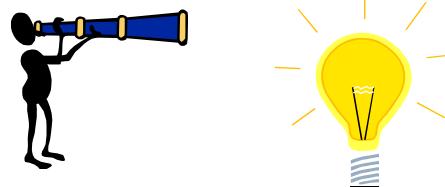
- Scintillatori organici



- Fibre



- Fotorivelatori



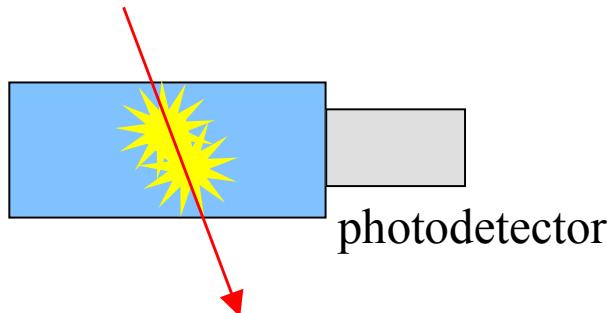
Scintillatori

Il contatore a **scintillazione** è uno dei più vecchi apparati sperimentali usati per la radiazione nucleare. 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.

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.



Scintillatori

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

The function of a scintillator is twofold:

- convert the excitation of, e.g., the crystal lattice caused by the energy loss of a particle into visible light;
- transfer this light either directly or via a light guide to an optical receiver (photomultiplier, photodiode, etc.)

The disadvantage of such indirect detection:

- much larger E required for the generation of 1 photoelectron than it is necessary for the creation of one e-h pair in solid-state ionisation detectors: 50 eV for the best scintillation counters with 3.65eV for silicon detectors.

This drawback compensated by the possibility to build a detector of large size and mass, up to tens of metres and hundreds of tons at relatively low cost of the scintillation material.

Rivelatori a Scintillazione

Passaggio di radiazione attraverso materiale scintillante → eccitazione di atomi e molecole del materiale → emissione di luce → raccolta e trasmessa (direttamente o via una guida di luce) ad un fotomoltiplicatore (PMT) → convertita in una corrente elettrica → analizzata da un sistema elettronico

Caratteristiche salienti di questi rivelatori:

a) Sensibilità all' Energia

al disopra di una certa energia minima, comportamento lineare dello scintillatore rispetto all' energia depositata, i.e. quantità di luce emessa \propto all' energia E che l' ha prodotta. PMT lineare → ampiezza del segnale elettrico di uscita $\propto E$ → strumento adatto per fare spettrometria

Rivelatori a Scintillazione

b) Risposta veloce

tempi di risposta e recupero sono brevi rispetto a quelli tipici di altri rivelatori → strumento adatto per ottenere info temporali (**timing**); alta velocità di risposta → piccolo tempo morto → **sopporta alta rate**

c) Discriminazione di forma

in certi scintillatori particelle di diversa natura producono impulsi di luce di **forma diversa**: eccitazione di meccanismi di fluorescenza diversi per particelle di differente potere ionizzante

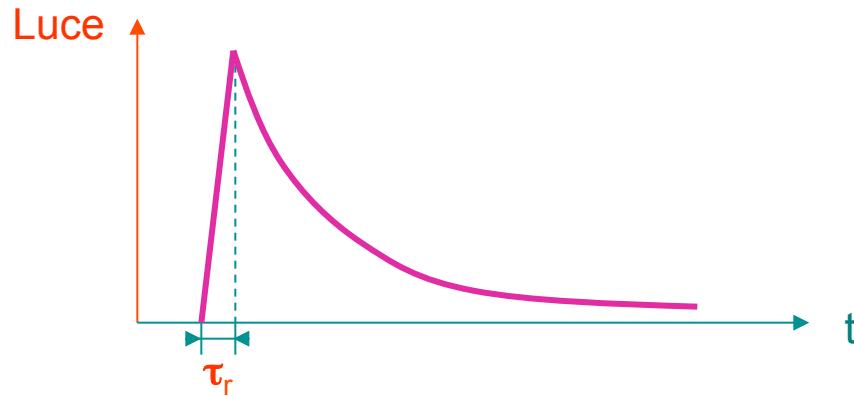
Scintillatori

Gli scintillatori hanno proprietà note come **luminescenza**. Materiali luminescenti assorbono energia e la riemettono sotto forma di luce visibile.

Se l'emissione avviene subito dopo l'assorbimento (10^{-8} s) il processo è chiamato **fluorescenza**. Se invece l'emissione è ritardata (lo stato eccitato è metastabile) il processo si chiama **fosforescenza**. In questo caso il tempo fra l'assorbimento e la ri-emissione può durare dai μs alle **ore** (dipende dal materiale).

Generalmente la componente veloce è quella che domina (e che ci interessa)

Scintillatori



N.B. – tempo di salita $\tau_r \ll \tau_d$

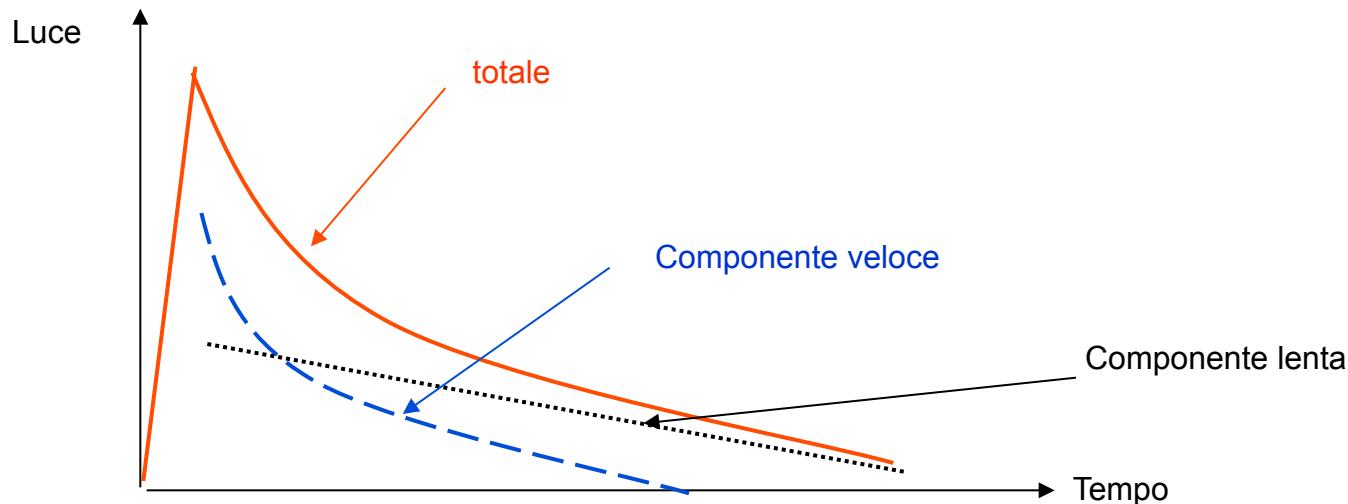
In prima approssimazione l'evoluzione temporale del processo di riemissione può essere descritto da una semplice legge esponenziale:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \cdot e^{-t/\tau_d}$$

dove N è il numero di fotoni emessi al tempo t , τ_d il tempo di decadimento ed N_0 il numero totale di fotoni emessi.

Il tempo di **assorbimento o salita** dell'energia (eccitazione degli atomi e delle molecole) è in generale **molto più breve** del tempo di **ri-emissione o decadimento** (per semplicità l'abbiamo assunto 0).

Scintillatori



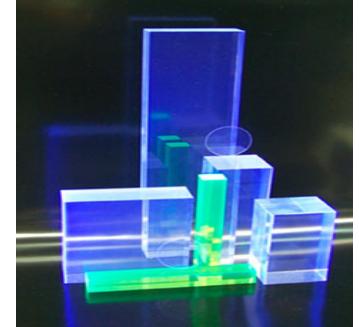
Quasi tutti gli scintillatori hanno 2 componenti di ri-emissione, una veloce ed una lenta (fluorescenza e fosforescenza) →

$$N = Ae^{-t/t_f} + Be^{-t/t_s}$$

N.B. – A e B
dipendono
dal materiale

Generalmente la componente veloce è quella che domina (e che ci interessa)

Scintillatori



Requisiti di un **buono** scintillatore:

- ✓ alta efficienza per la conversione **Energia** → **Luce**
- ✓ **trasparenza** alla sua luce di fluorescenza
- ✓ emissione luminosa in **regione di frequenza sovrapposta** a quella di sensibilità del **PMT**
- ✓ **piccolo** τ_d

Tipi di scintillatori:

- ❖ cristalli organici ($C_{14}H_{10}$, $C_{14}H_{12}$, $C_{10}H_8$)
- ❖ liquidi e plastici organici ($C_{18}H_{14}$, $C_{24}H_{16}N_2O_2$)
- ❖ cristalli inorganici (NaI, CsI, BGO, BaF₂)
- ❖ miscele gassose (90% ³He + 10% Xe)
- ❖ vetri (silicati di Li e B)

Scintillatori

Esistono 2 tipi di materiale scintillante:

- ❖ Scintillatori organici (poca luce, ma veloci)
- ❖ Scintillatori inorganici (molta luce, ma generalmente lenti)

Esistono diversi meccanismi di scintillazione

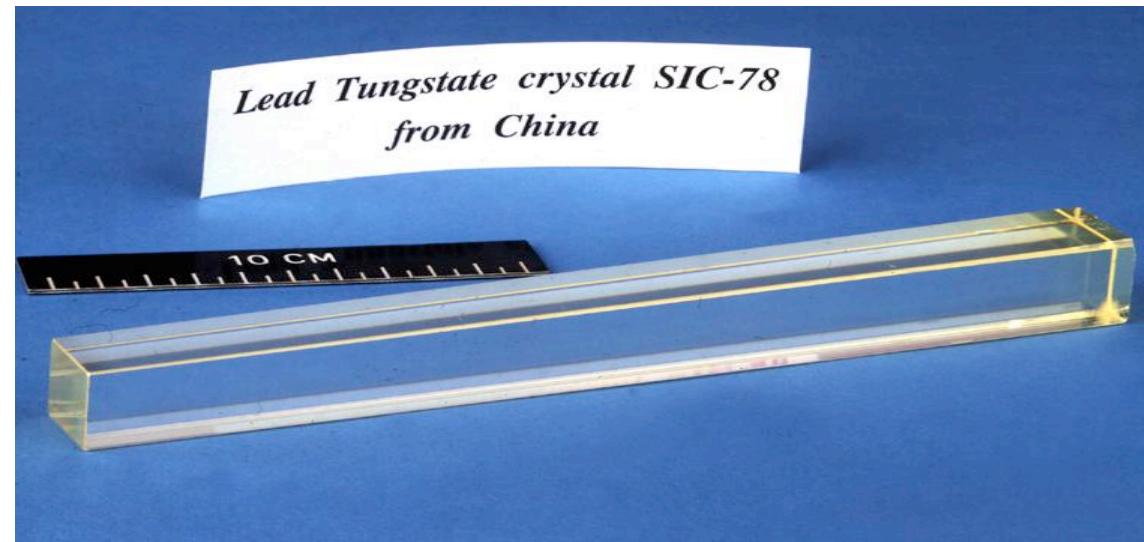
Scintillatori inorganici

Scintillatori inorganici cristallini.

Sono scintillatori inorganici NaI, CsI, $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ (noto come BGO), PbWO_4 , BaF_2 ...

Il meccanismo di scintillazione negli scintillatori inorganici è caratteristico della struttura a bande elettroniche che si trovano nei cristalli.

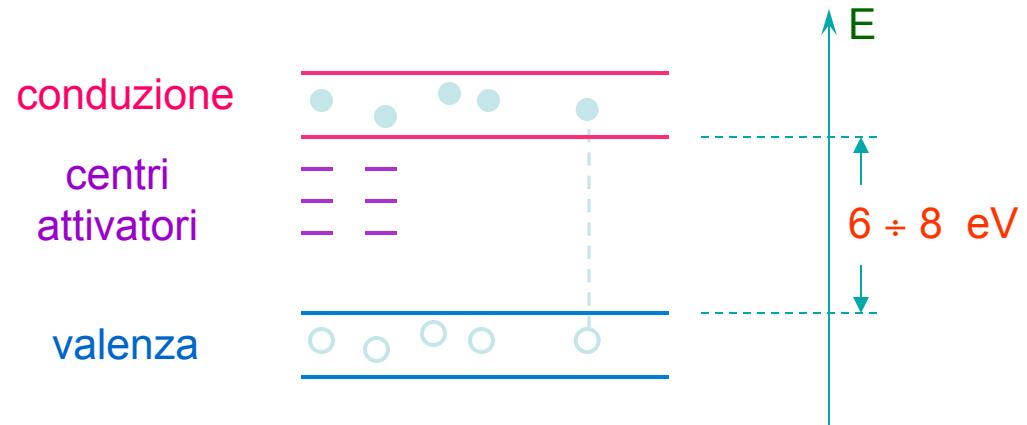
PbWO₄ ingot and final polished CMS ECAL scintillator crystal from Bogoroditsk Techno-Chemical Plant (Russia).



Scintillatori Inorganici

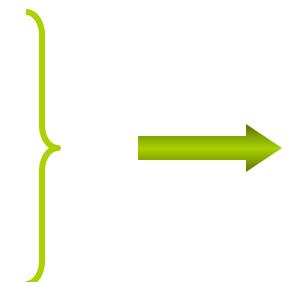
cristalli ionici dopati con centri attivatori (centri di colore)

Schema
Livelli
Energetici



Particella ionizzante → produzione di:

- elettroni liberi (●)
- lacune libere (○)
- coppie elettrone-lacuna = eccitoni (○---●)



Scintillatori Inorganici

portatori di carica in moto attraverso il reticolo fino a che incontrano centro attivatore A → trasformazione in centro attivatore eccitato A* che in seguito si ritrasforma in A con emissione di luce

tempo di decadimento della luce di scintillazione è dato da quello della transizione A* → A e dipende dalla temperatura secondo la legge:

$$\exp\left(-\frac{E_c}{k_B T}\right)$$

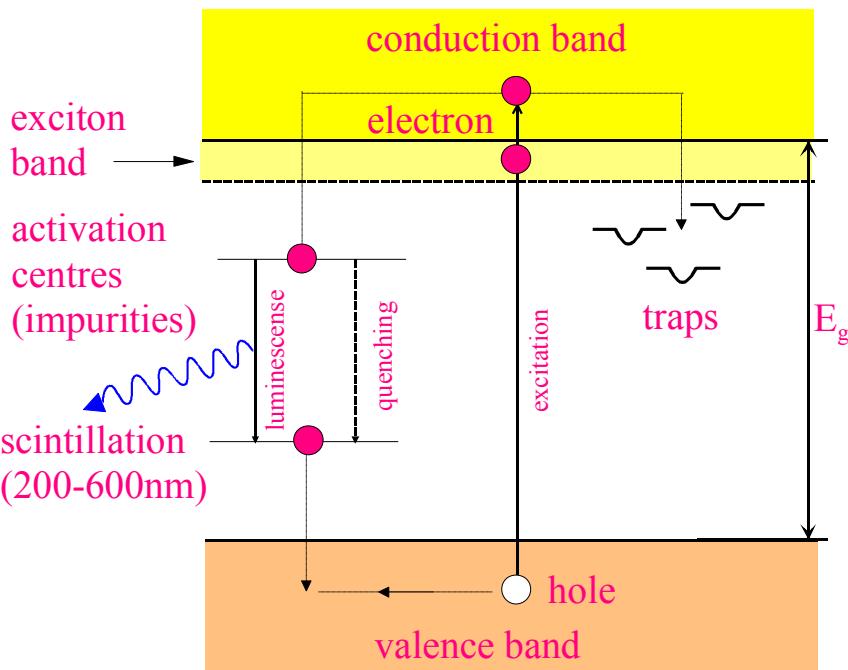
Diagram illustrating the exponential decay law for scintillation light intensity. The formula $\exp\left(-\frac{E_c}{k_B T}\right)$ is shown, with two components highlighted in boxes: "energia d' eccitazione del livello A*" (excitation energy of level A*) pointing to the numerator E_c , and "costante di Boltzman" (Boltzmann constant) pointing to the denominator $k_B T$.

Luce » di quella emessa negli scintillatori organici → < fluttuazioni statistiche nel n. di fotoni emessi → migliore risoluzione energetica

Scintillatori inorganici

Quando una particella entra in un cristallo possono accadere 2 processi:

- i. si eccita un **elettrone** dalla banda di **valenza** in quella di **conduzione**, creando così un **elettrone ed una lacuna liberi**. (ionizzazione)
- ii. si crea un **eccitone** (uno stato legato di e-h) spostando un elettrone dalla banda di **valenza** in quella degli **eccitoni** (posta appena al di sotto della banda di conduzione). In questo caso **elettrone e lacuna rimangono legati**, ma possono muoversi liberamente (in coppia) nel cristallo.(eccitazione)



Se il cristallo contiene delle **impurità** (sono necessarie), si possono creare localmente dei livelli elettronici nella banda delle energie proibite. Gli atomi di impurità sono chiamati **centri attivatori e costituiscono doping del materiale**.

Se una lacuna libera od una lacuna di un eccitone incontra uno di questi centri attivatori, può ionizzare uno di questi atomi di impurità. Se ora arriva un altro elettrone, questo viene catturato dalla **bucia di potenziale** (lacuna) lasciata dalla ionizzazione precedente → **emette fotoni**.

Se la transizione avviene senza emissione di radiazione (rapida) l'impurità diventa una **trappola** e l'energia **può essere persa in altri modi** o con tempi lunghi.

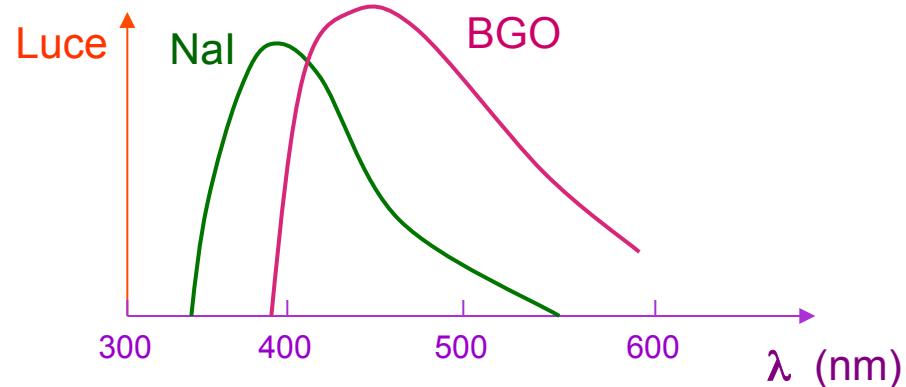
Spesso si hanno 2 costanti di tempo:

- ricombinazione rapida dai centri di attivazione (**ns- μ s**)
- ricombinazione ritardata (trappole) (**~100 ms**)

Scintillatori Inorganici

Uso più frequente come rivelatore di raggi X, γ e e^\pm di alta energia

Risposta di luce:



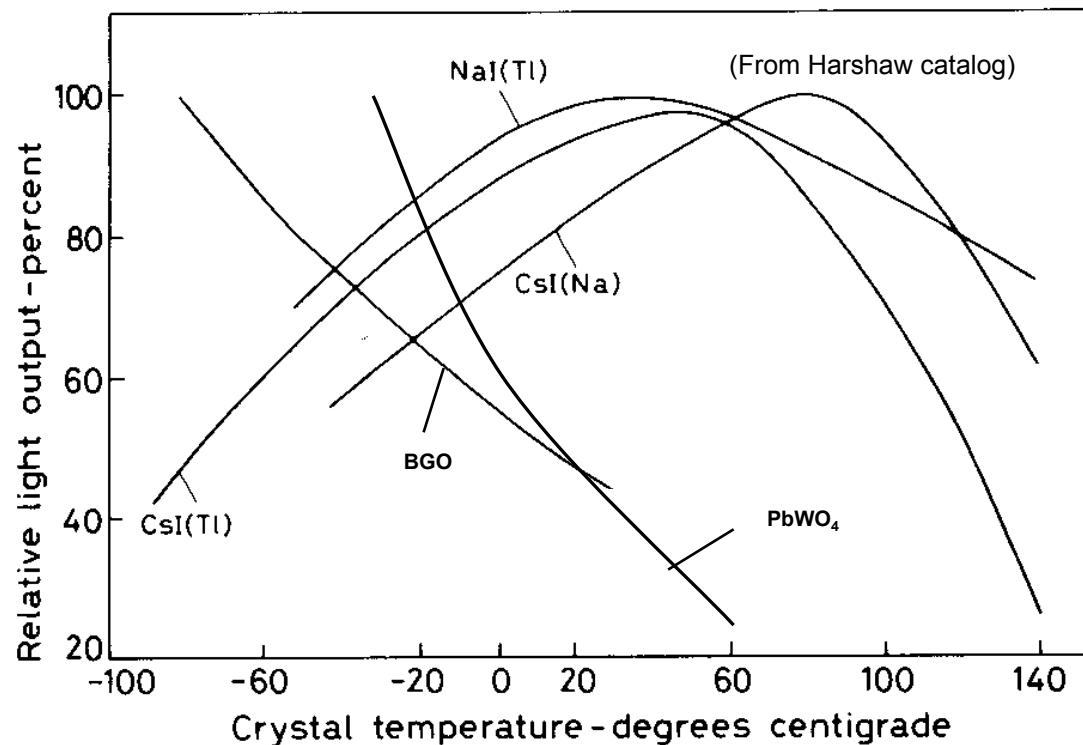
Risposta più lenta di quella degli organici (NaI: $\tau_d = 250$ ns)

Svantaggio: igroscopicità → necessità di contenitore protettivo

Scintillatore inorganico più utilizzato: NaI dopato con Tallio (TI)

Scintillatori inorganici

L'emissione di luce **dai cristalli scintillanti** dipende fortemente dalla temperatura:



Scintillatori inorganici

scintillatore	densità (g/cm ³)	indice rifrazione	lunghezza d'onda (nm)	costante di tempo (μs)	scintillaz. (relativa a NaI(Tl))	note	fotoni/MeV
NaI	3.67	1.78	303	0.06	190		
NaI(Tl)	3.67	1.85	410	0.25	100	a 80 K	4x10 ⁴
CsI	4.51	1.80	310	0.01	6	a 80 K	
CsI(Tl)	4.51	1.80	565	1.0	45	a 80 K	1.1x10 ⁴
⁶ LiI(Eu)	4.06	1.96	470-485	1.4	35	a 80 K	1.4x10 ⁴
BaF ₂	4.88	1.49	190/220 310	0.0006 0.63	5 15		6.5x10 ³ 2x10 ³
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂	7.13	2.15	480	0.30	10		2.8x10 ³
PbWO ₄	8.28	1.82	440,530		0.1		100