

# *Particle Detectors*

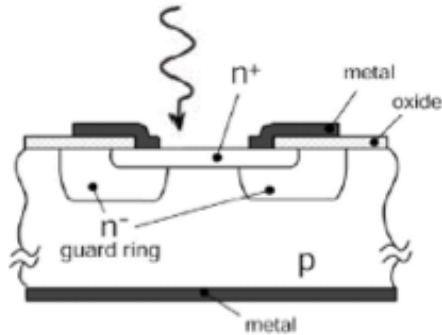
## *Lecture 19*

*11/05/17*

**a.a. 2016-2017**

**Emanuele Fiandrini**

APD are diodes operated in reverse bias mode above the breakdown voltage.



R. H. Haitz, J. App.Phys. Vol. 36, No. 10 (1965) 3123

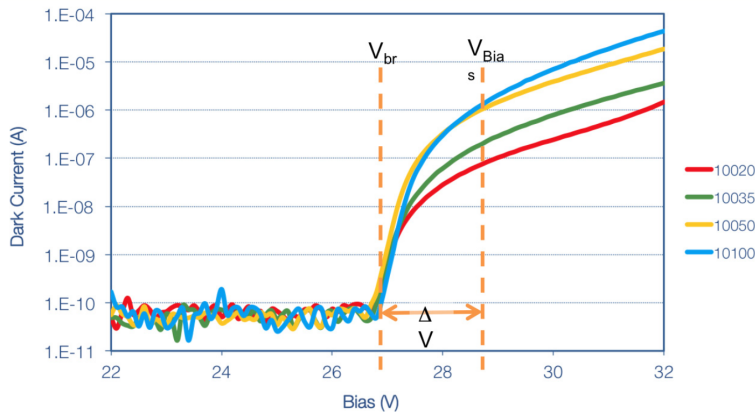
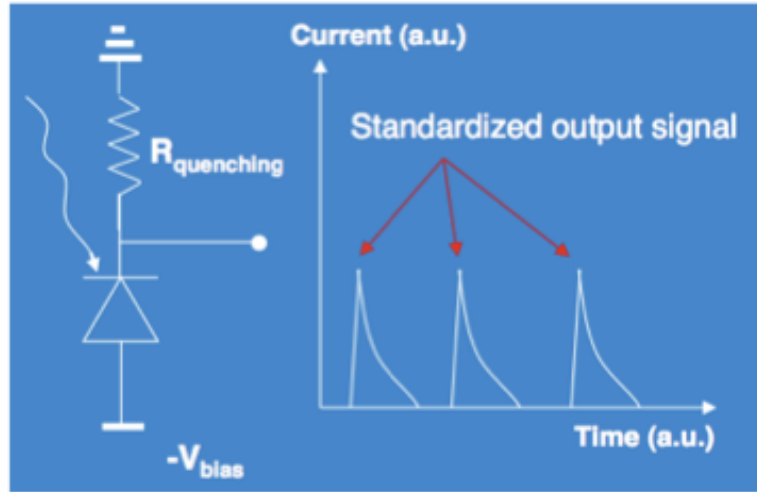


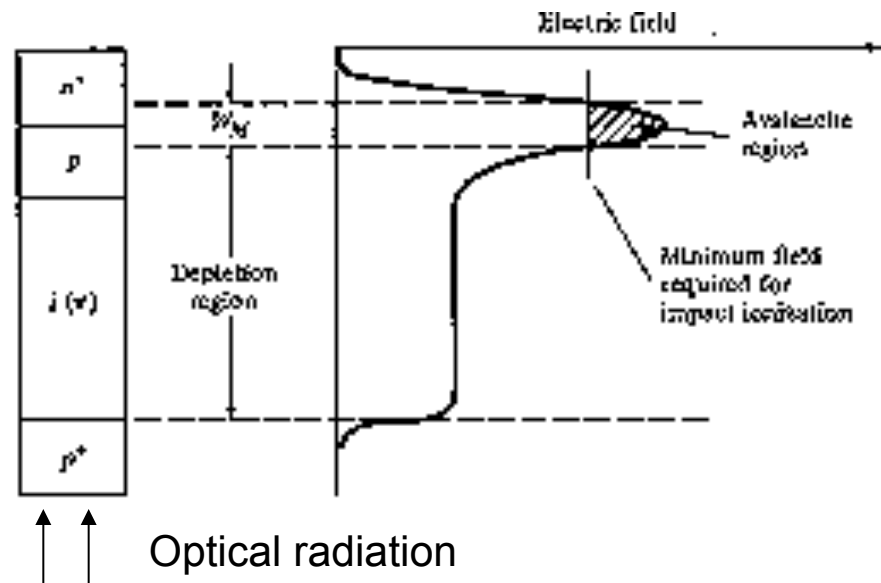
Figure 7 Dark current as a function of voltage for 1mm SPMs of various microcell size (20um, 35um, 50um, 100um).



The diode, operated above the breakdown voltage, is in a "meta-stable" state. Until some charge is generated in the avalanche region the current stays stable. Thermal generation is a noise source. A single photon is able to trigger an avalanche. The avalanche gives a large current pulse above the DC current. Counting the pulses, photons are counted (taking into account conversion probability, detection efficiency,...). No proportionality, it's a binary device. If two photons hit the APD, the output signal is the same

# Avalanche Photodiode (APD)

APDs internally multiply the primary photocurrent before it enters to following circuitry. In order to carrier multiplication take place, the photogenerated carriers must traverse along a high field region. In this region, photogenerated electrons and holes gain enough energy to ionize bound electrons in VB upon colliding with them. This multiplication is known as **impact ionization**. The newly created carriers in the presence of high electric field result in more ionization called **avalanche effect**.



Reach-Through APD structure (RAPD) showing the electric fields in depletion region and multiplication region.

# Principle of operation

1. photon is absorbed in the depleted semiconductor
2. photo electron drifts into high field region and initiates an avalanche breakdown
3. passive quenching by resistor (few  $M\Omega$ )
4. deadtime  $\approx 10^{-7}$  s given by the time constant to recharge the pixel's capacity

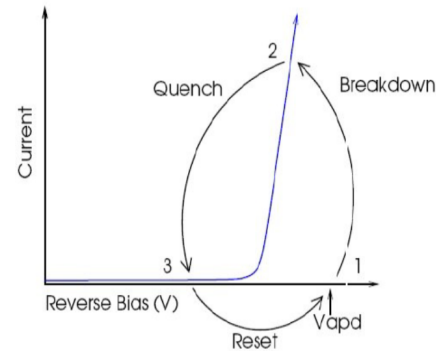


Figure 3a) Breakdown, quench and reset cycle of a photodiode working in the Geiger mode.

The avalanche initiated by the pe increases the current while the V stays constant (due to the slope of IV in geiger mode, almost vertical).

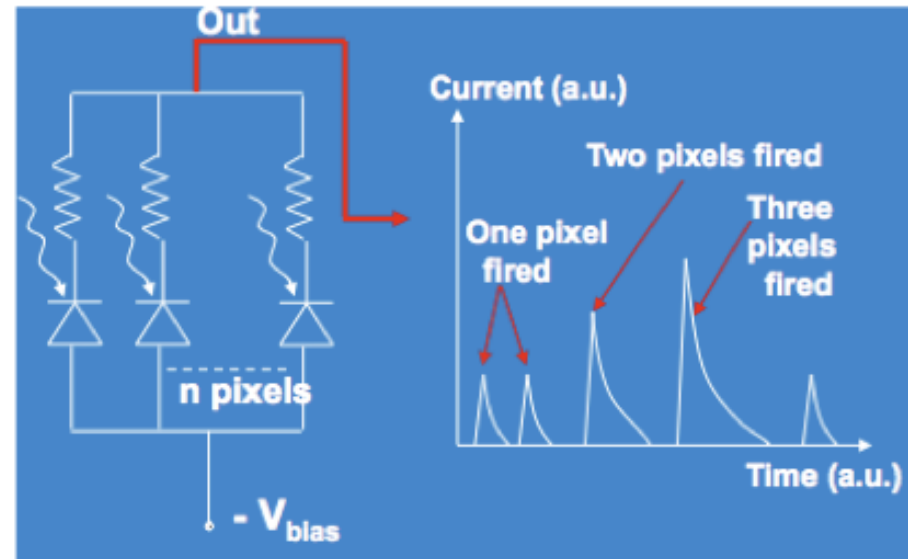
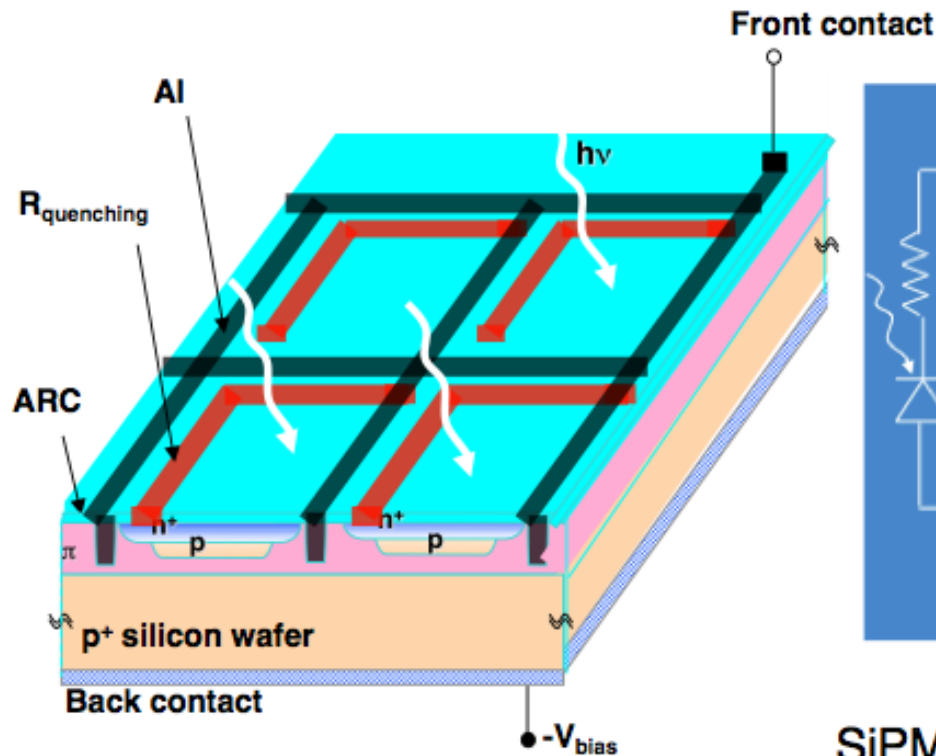
The voltage drop in the quenching resistor  $\Delta i R_q$  decreases the voltage at the diode below breakdown threshold and avalanche stops.

The diode recharges at the working voltage after a time depending on cell capacity and quenching R,  $\tau = CR_q$ .

# SiPM

SiPM are matrices of APDs (up to 50.000) connected in parallel to a common bias line and a common readout line.

The output signal is the sum of the output of all the APDs which fired in the array: the output signal is proportional the number of photons hitting the SiPM



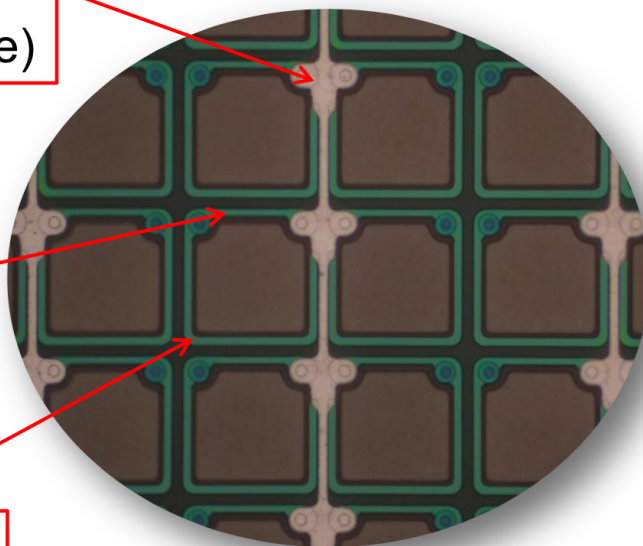
SiPM become more and more popular as replacement for standard photo multiplier.

## Device Layout: example of internal structure

Metal line connecting  
all cells in parallel  
(one common anode)

Polysilicon  
resistor

Field-plate  
to reduce electric  
field around the  
junction



The cathode is  
contacted on the  
rear side.

Resistor is located  
around the active  
area => no fill factor  
loss

**FF ~ 25% 25x25um<sup>2</sup> cell**  
**~ 45% 40x40um<sup>2</sup> cell**  
**~ 55% 50x50um<sup>2</sup> “**  
**~ 72% 100x100um<sup>2</sup> “**

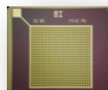


## Device Layout: examples of SiPM geometries

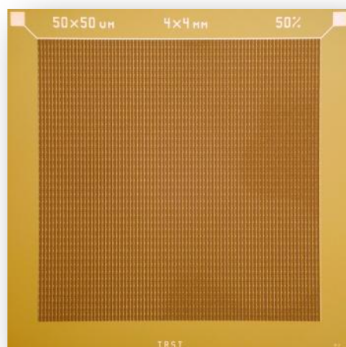
Scale of the pictures is the same

**2006**

1x1mm<sup>2</sup>  
40x40μm<sup>2</sup> cell



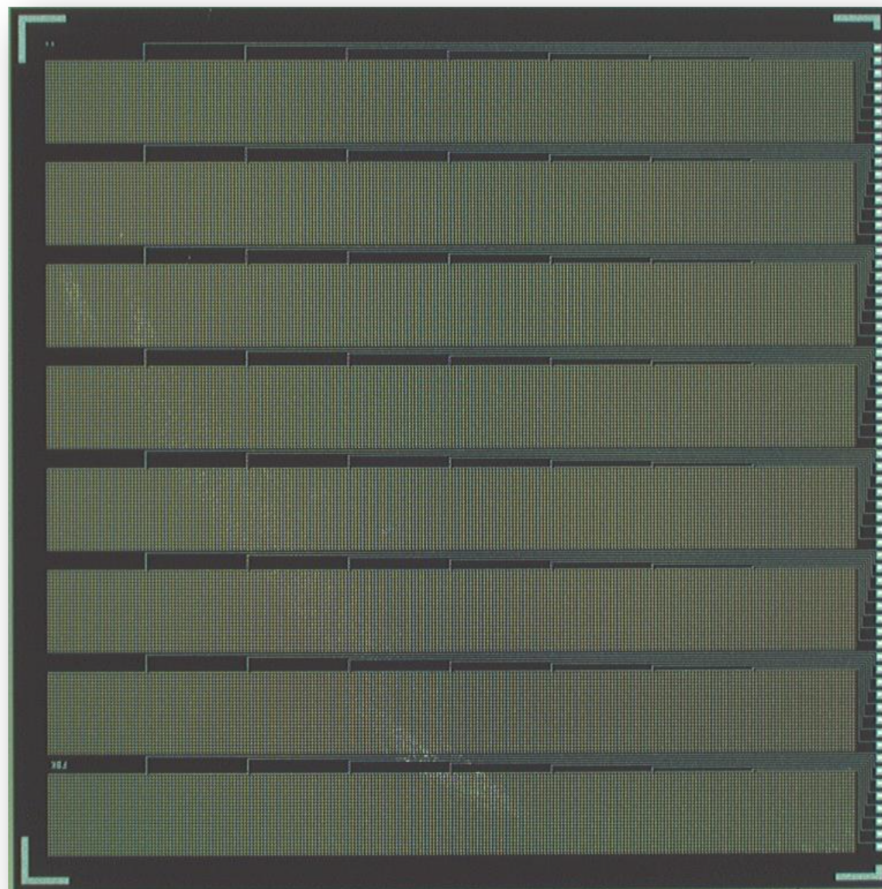
**2007**



4x4mm<sup>2</sup>  
50x50μm<sup>2</sup> cell

**2009**

8x8 array of SiPMs  
1.5x1.5mm pitch  
50x50μm<sup>2</sup> cell



C. Piemonte

FBK/

Produced for DaSiPM (INFN project)



## *Paragone di apparati per misure di posizione*

A seconda dell'applicazione vengono usati diversi apparati per le misure di posizione. C'è la tendenza ad andare a tempi di ripetizione sempre più corti ed a rate sempre più alti ( $10^9/\text{s}$  ad LHC)



rivelatori al Silicio se reggono il rate.

Per anelli  $e^+e^-$  con basso rate di eventi va benissimo una camera cilindrica ( a deriva o TPC o jet chamber).

Ogni esperimento necessita del suo apparato a seconda di quello che si vuole misurare.

Sviluppo di apparati ancora in corso, ogni anno novità.



# Rivelatori al silicio

- Solidi → autosostenenti (no strutture complicate)
- Alta granularita' (segmentazione 20 -50  $\mu\text{m}$ )
- Alta risoluzione spaziale (3-10  $\mu\text{m}$ )
- Alta risoluzione in energia
- Risposta temporale veloce ( $T_c < 30 \text{ ns}$ )
- No alta tensione ( $V_{\text{bias}} < 200 \text{ V}$ )
- Funzionano bene nel vuoto e in campi B
- Buona rad hard
- Costi contenuti
- Tecnologia di costruzione solida

## *Paragone di apparati per misure di posizione*

Apparato	Risoluzione ( $\mu\text{m}$ )	Tempo morto (ms)	Tempo sensibilità (ns)	Tempo lettura ( $\mu\text{s}$ )	vantaggi
MWPC	200	$<10^{-5}$	50	10	Tempo di risoluzione
MSGC	30	$<10^{-5}$	20	5	Alto rate, risoluzione spaziale
Cam. drift	100	$<10^{-5}$	500	10	Risoluzione spaziale
Cam. bolle	20	100	$10^6$	$10^4$	Analisi ev. complessi
c. streamer	30	10	$10^3$	$10^4$	Analisi molte tracce
Cam. flash	1000	10	$10^3$	$10^3$	Costano poco
c. scintilla	200	5	$10^3$	$10^4$	semplicità
Emulsioni	3	0	$\infty$	$10^9$	Risoluzione spaziale
Fibre scint.	35	$<10^{-5}$	20	1	Alto rate
Silici	10	$<10^{-5}$	50	1	Alto rate

# ***Bibliografia***

Tutti gli argomenti sono comunque trattati anche su:

C. Grupen, *Particle Detectors*, Cambridge University Press, 1996, capitolo 4  
Konrad Kleinknecht, *Detectors for Particle Radiation*, Cambridge U.K., cap 2,3

Più in dettaglio:

Camere proporzionali e a deriva :

- i. Blum & Rolandi, *Particle Detection with Drift Chambers*, Springer Verlag, 1994
- ii. Principle of operation of multiwire proportional and drift chambers F. Sauli su *Experimental Techniques in High Energy Physics*, T.Ferbel (editore), World Scientific, 1991

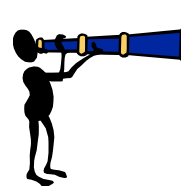
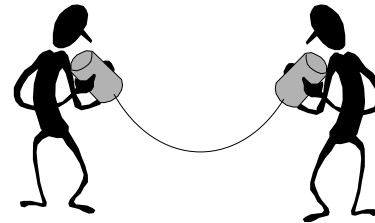
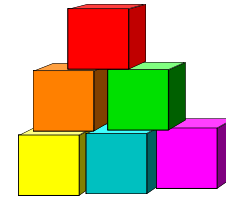
Stato solido:

Silicon Microstrip detectors A. Peisert su *Instrumentation in High Energy Physics*, F.Sauli (Editore), World Scientific, 1992

Altra bibliografia è indicata sulle slides.

# ***Scintillatori***

- Scintillatori inorganici
- Scintillatori organici
- Fibre
- Fotorivelatori



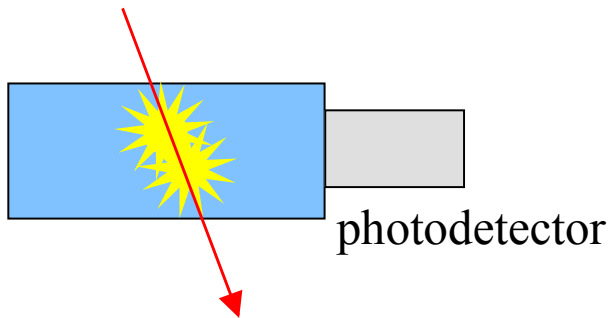
# Scintillatori

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 3.65 eV 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

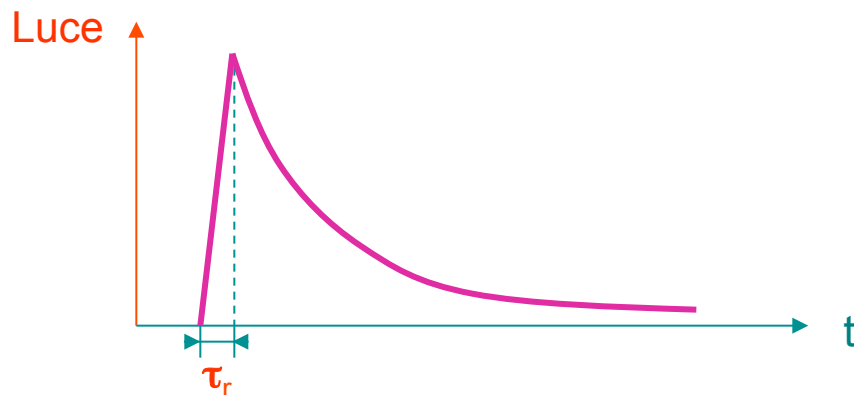
# Scintillatori

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  $\mu$ s alle ore (dipende dal materiale).

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

# Scintillatori



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

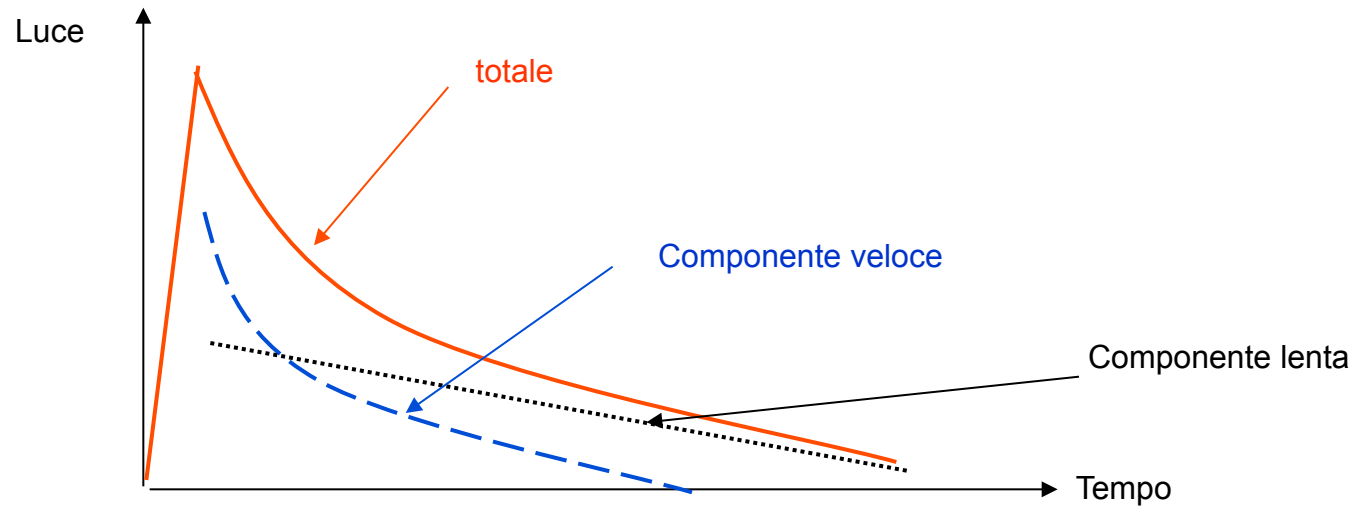
In prima approssimazione l'evoluzione temporale del processo di riemissione può essere descritto da una semplice legge esponenziale:

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

dove  $N$  è il numero di fotoni emessi al tempo  $t$ ,  $\tau_d$  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



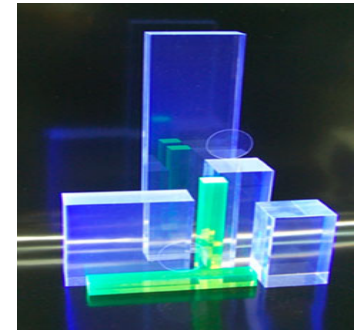
Quasi tutti gli scintillatori hanno 2 componenti di ri-emissione, una veloce ed una lenta (**fluorescenza e fosforescenza**) →

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

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  $\tau_d$

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,  $BaF_2$ )
- ❖ 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***

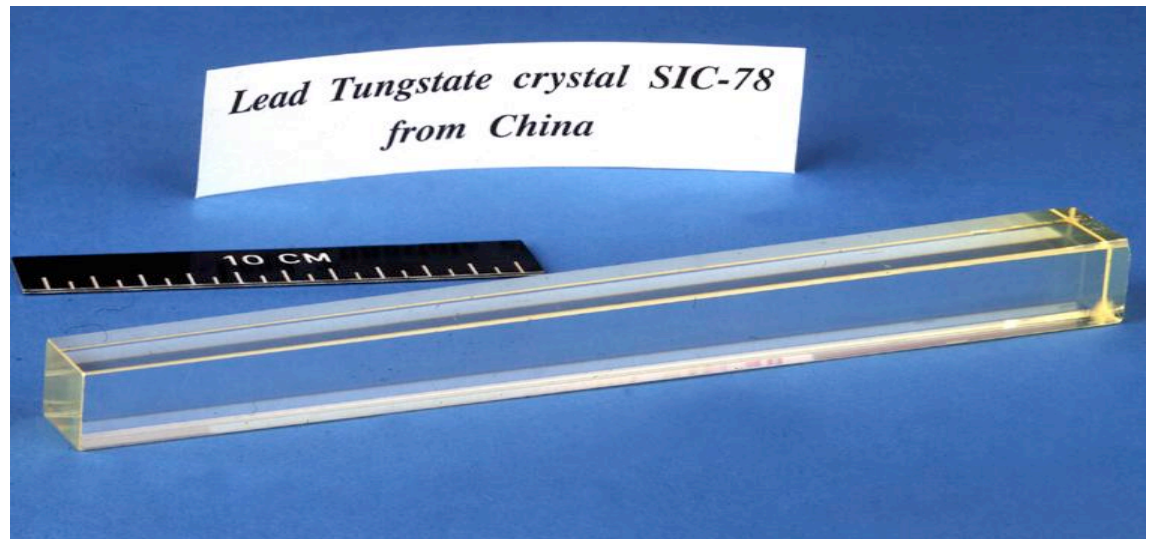
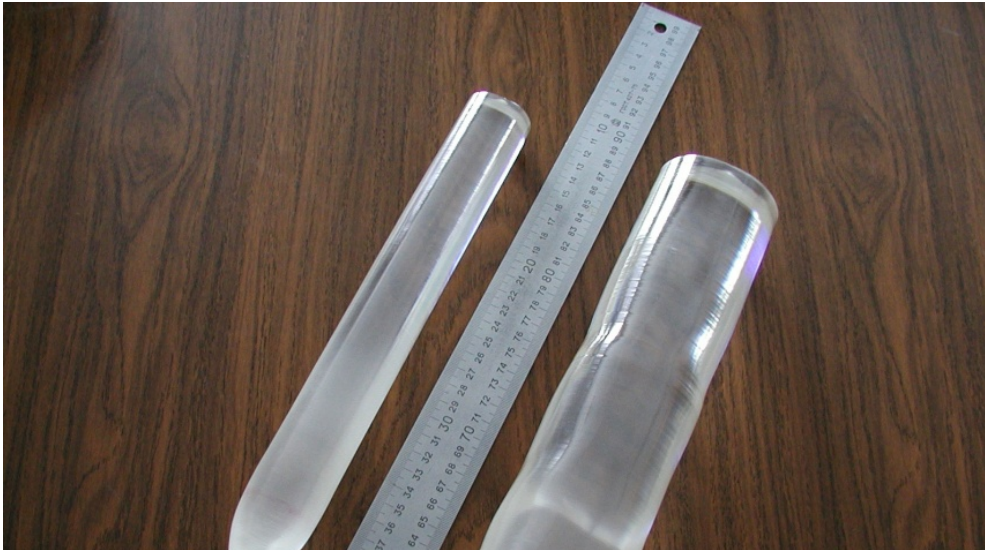
## **Scintillatori inorganici cristallini.**

Sono scintillatori inorganici NaI, CsI,  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$  (noto come BGO),  $\text{PbWO}_4$ ,  $\text{BaF}_2$ ...

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



PbWO<sub>4</sub> ingot and final polished CMS ECAL scintillator crystal from Bogoroditsk Techno-Chemical Plant (Russia).



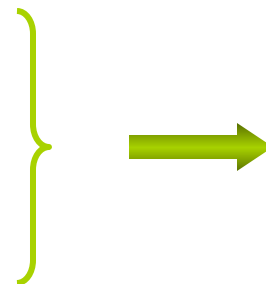
# Scintillatori Inorganici

cristalli ionici dopati con centri attivatori (centri di colore)



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:

The diagram illustrates the components of the Boltzmann factor in the decay law. A box on the left contains the text "energia d' eccitazione del livello A\*", with an arrow pointing to the  $E_c$  term in the exponent of the equation  $\exp\left(-\frac{E_c}{k_B T}\right)$ . Another box on the right contains the text "costante di Boltzman", with an arrow pointing to the  $k_B$  term in the denominator of the same equation.

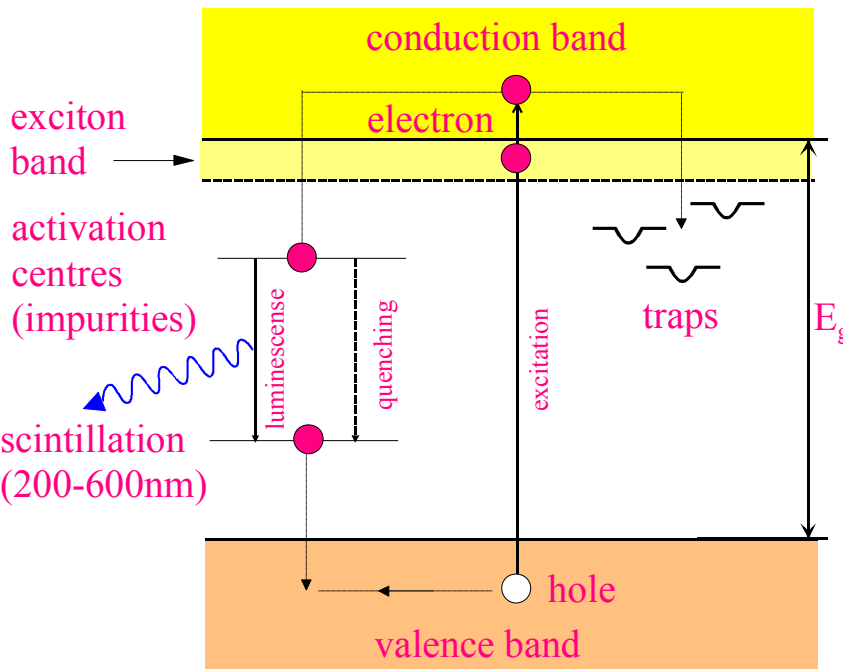
$$\exp\left(-\frac{E_c}{k_B T}\right)$$

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 **elettone** dalla banda di **valenza** in quella di **conduzione**, creando così un **elettone 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 **elettone 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 **buca 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.

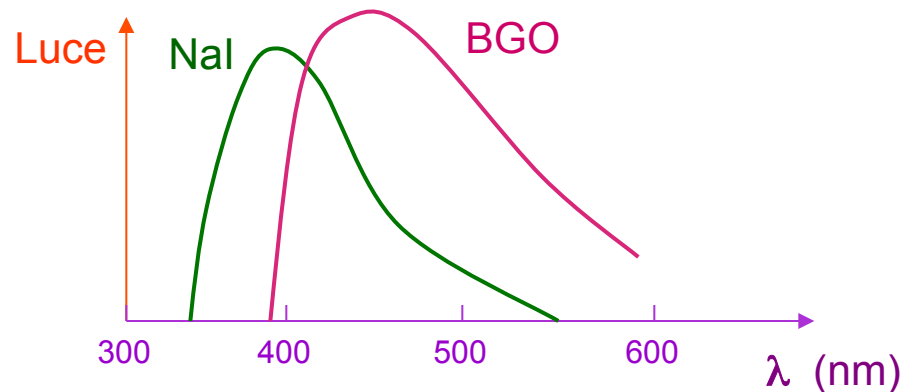
Spesso si hanno 2 costanti di tempo:

- ricombinazione rapida dai centri di attivazione (**ns- $\mu$ s**)
- ricombinazione ritardata (trappole) ( **$\sim 100$  ms**)

# Scintillatori Inorganici

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

Risposta di luce:



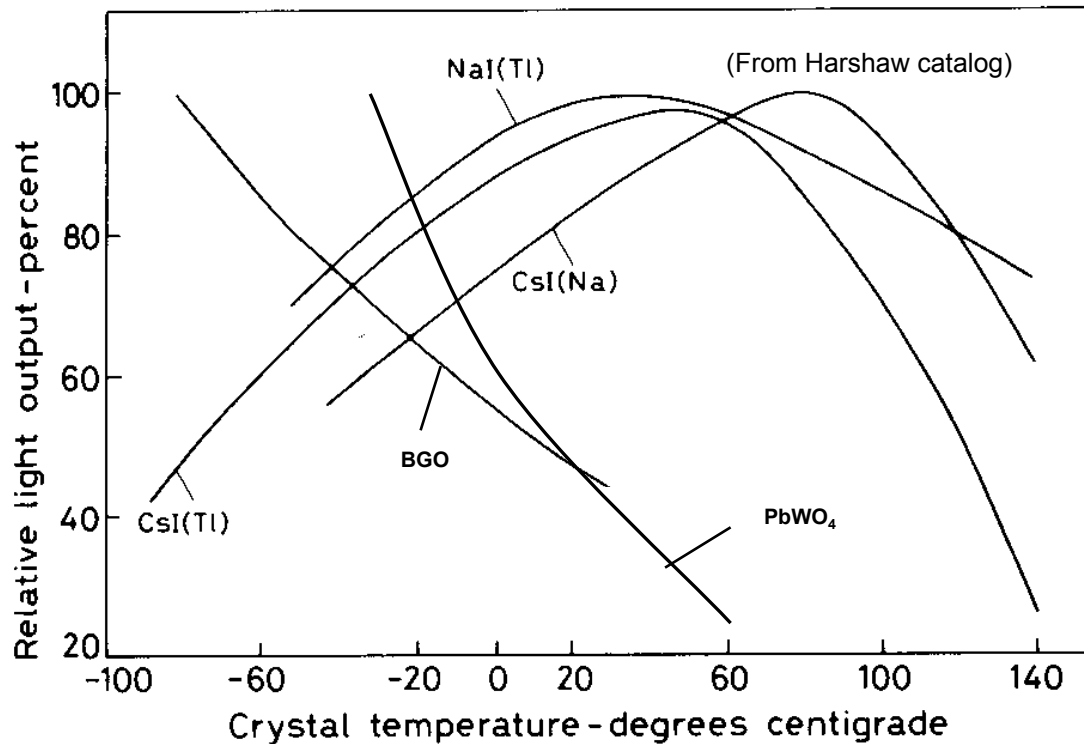
Risposta **più lenta** di quella degli organici (NaI:  $\tau_d = 250$  ns)

**Svantaggio:** igroscopicità  $\rightarrow$  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 <sup>3</sup> )	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 <sup>4</sup>
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 <sup>4</sup>
<sup>6</sup> LiI(Eu)	4.06	1.96	470-485	1.4	35	a 80 K	1.4x10 <sup>4</sup>
BaF <sub>2</sub>	4.88	1.49	190/220 310	0.0006 0.63	5 15		6.5x10 <sup>3</sup> 2x10 <sup>3</sup>
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	7.13	2.15	480	0.30	10		2.8x10 <sup>3</sup>
PbWO <sub>4</sub>	8.28	1.82	440,530		0.1		100