

Corso di introduzione all'astrofisica (III Modulo)

“Le astroparticelle”

Barbara Caccianiga

•Fino a 10/20 anni fa il mondo degli “astrofisici” e dei “fisici delle particelle” erano due mondi separati che parlavano linguaggi distinti e mantenevano rispettosamente la distanza gli uni dagli altri;

•Negli ultimi anni , questi due mondi hanno compreso di avere molto da imparare l’uno dall’altro: lo studio di particelle provenienti dal cosmo puo’ da una parte fare luce su teorie e modelli astrofisici e dall’altra puo’ fornire informazioni fondamentali sulle particelle stesse ad energie che sarebbe impossibile raggiungere con gli acceleratori;

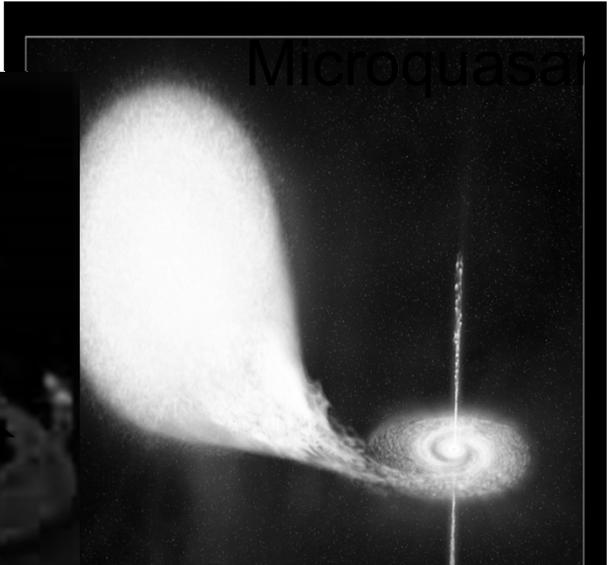
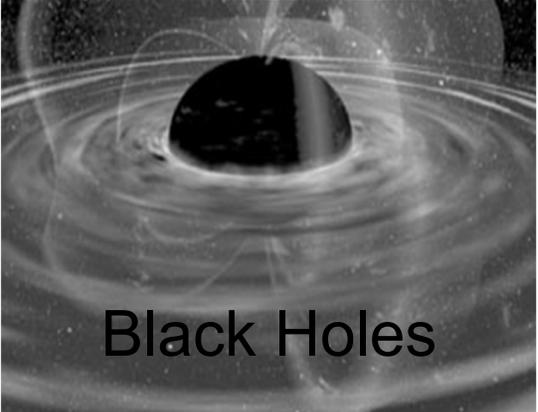
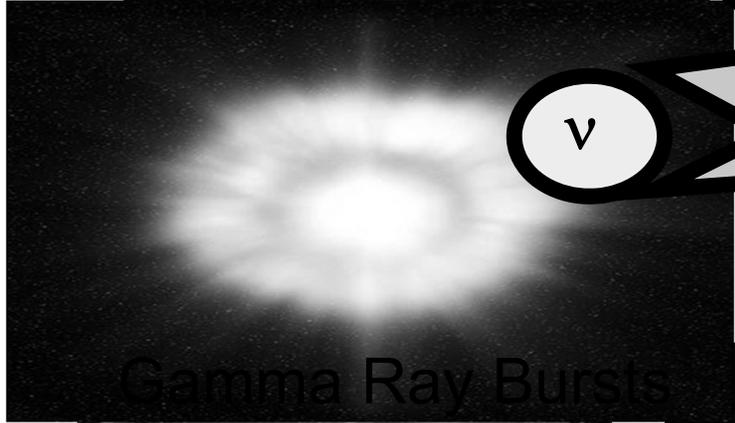
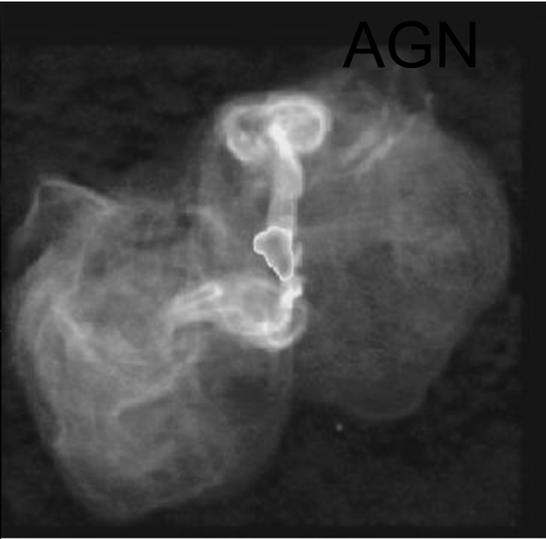
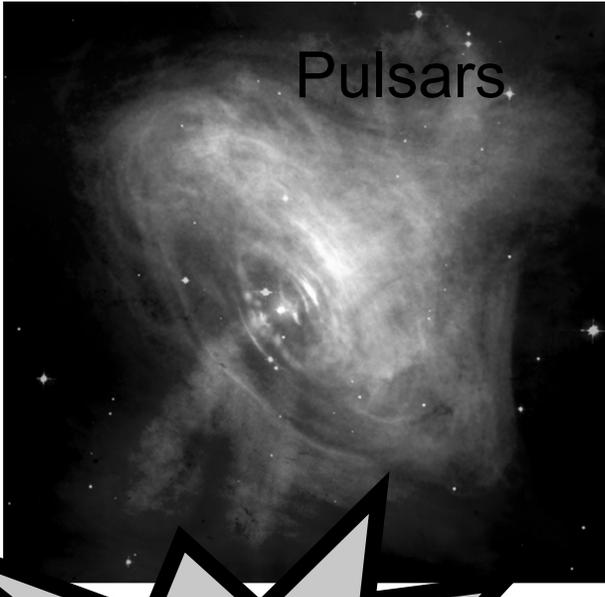
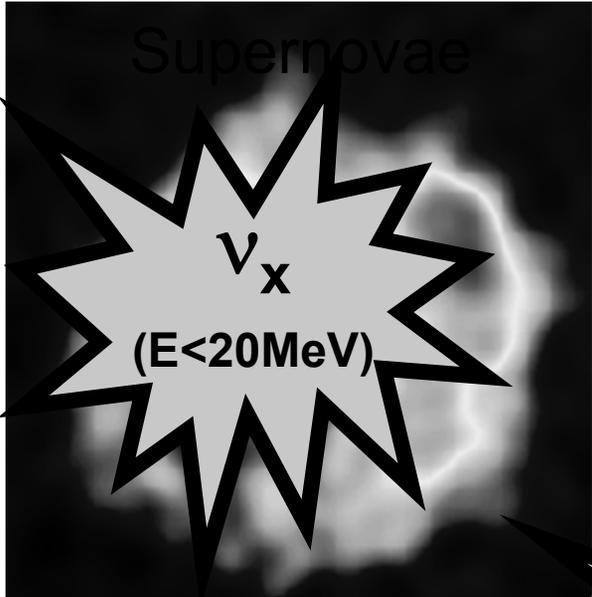
•Esempio n.1: lo studio dei neutrini provenienti dal sole e’ nato come verifica della validita’ del modello solare ed ha finito per portare a importantissime scoperte sulle proprieta’ dei neutrini;

•Esempio n.2: l’esistenza della materia oscura e’ supportata da molte evidenze astrofisiche, ma la sua effettiva rivelazione avrebbe implicazioni fortissime sulle teorie delle interazioni fondamentali;

•Ci sembrava giusto che un corso di “Introduzione all’astrofisica” rendesse conto della nascita di questa (relativamente) “nuova” branca della fisica che viene spesso denominata “fisica delle astroparticelle”;

Le particelle provenienti dal cosmo

- La radiazione elettromagnetica proveniente dal cosmo ha lunghezza d'onda che spazia di diversi ordini di grandezza: dai ~30 m delle onde radio, ~mm delle microonde, ~1000 Å della luce visibile, ~1-100 Å dei raggi X;
- Analogamente, le particelle provenienti dal cosmo hanno energie che spaziano di diversi ordini di grandezza: da ~MeV (neutrini solari, da supernova) a 10^{16} MeV (raggi cosmici);
- E' evidente che le tecniche di rivelazione dipendono fortemente dall'energia in gioco, oltre che dal tipo di particella;



Come promemoria.....

L' elettronvolt e' l'energia acquisita da un elettrone che attraversa un potenziale di 1 Volt.

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV}$$

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

$$1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$$

$$1 \text{ PeV} = 10^{15} \text{ eV}$$

$$1 \text{ EeV} = 10^{18} \text{ eV}$$

$$1 \text{ ZeV} = 10^{21} \text{ eV}$$

Programma del corso

- **Introduzione.**

- Strategie generali per rivelare particelle provenienti dallo spazio; richiami su alcuni tipi di rivelatori di particelle impiegati: scintillatori, rivelatori Cerenkov, bolometri, rivelatori a stato solido);

- **Neutrini solari e da Supernova;**

- Cosa sono? problematiche sperimentali per rivelarli e alcuni esempi di esperimenti;

- **Materia oscura;**

- Cos' e'? problematiche sperimentali per rivelarla e alcuni esempi di esperimenti;

- **Raggi cosmici;**

- Cosa sono? Problematiche sperimentali per rivelarli e alcuni esempi di esperimenti;

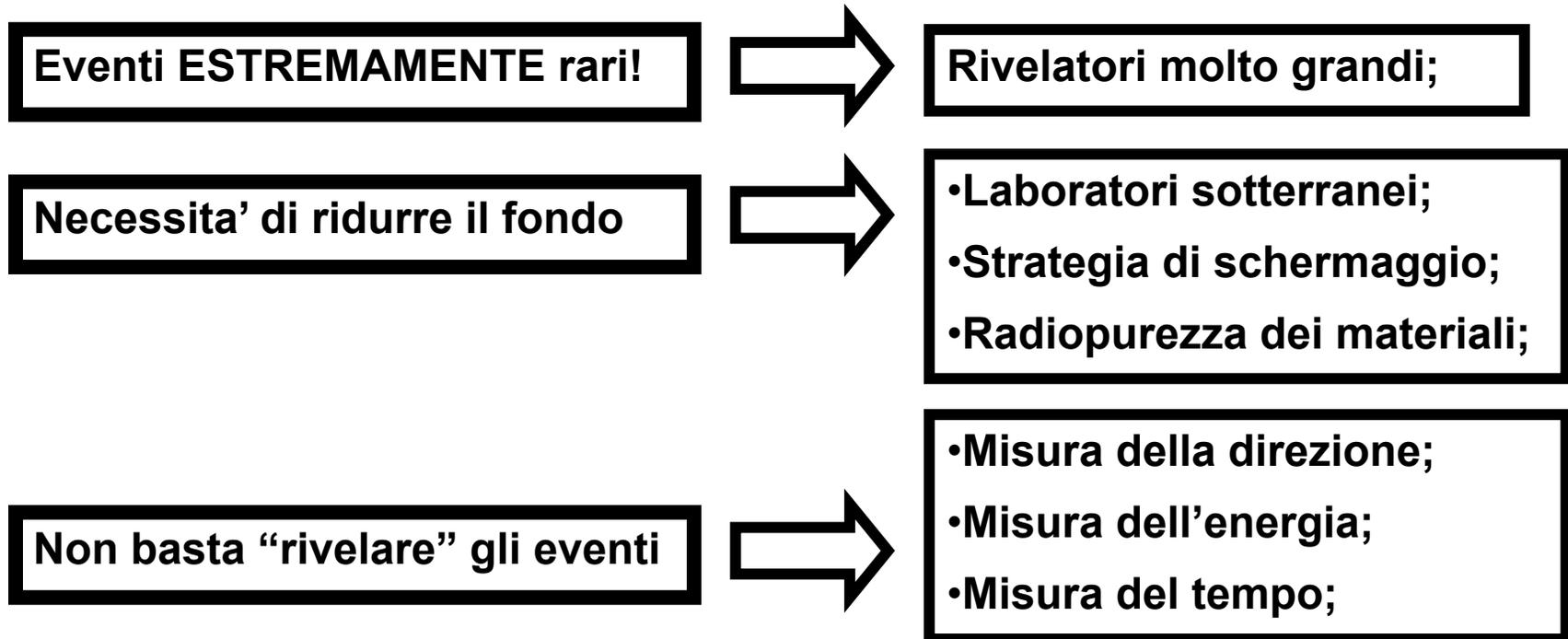
Libri di testo e referenze

- **G.Knoll “Radiation detection and measurement” (per la parte di rivelatori);**
- **A. Goobar, L. Bergstrom “*Cosmology and Particle Astrophysics*”, Springer-Praxis Books, 2nd ed. (2004) ;**
- **D. Perkins “*Particle Astrophysics*”, Oxford University Press (2003);**
- **C. Grupen “Astroparticle Physics”, Springer 2005;**
- **Slides sul sito web di volta in volta;**

Introduzione

Come rivelare le particelle che vengono dallo spazio? I “telescopi” di particelle

- A seconda dell'energia e del tipo di particella, le tecniche di rivelazione sono diverse;
- Esistono pero' alcune problematiche comuni agli argomenti che saranno trattati in questa parte del corso;



I telescopi di particelle

- In ultima analisi, per rivelare le particelle provenienti dallo spazio e' necessario farle interagire nel rivelatore;
 - I prodotti secondari di queste interazioni vengono visti tramite rivelatori comunemente usati nella fisica nucleare o delle alte energie;
 - In particolare, i rivelatori di interesse per i tipi di particelle trattati in questo corso sono
 - RIVELATORI A SEMICONDUETTORE;
 - SCINTILLATORI;
 - RIVELATORI CERENKOV;
 - BOLOMETRI;
- } TUBI FOTOMOLTIPLICATORI

Considerazioni generali sui rivelatori che utilizzeremo nel seguito del corso

- **Un rivelatore di particelle converte parte o tutta l'energia della particella che lo attraversa in “portatori di informazione”;**
 - Semiconduttori: elettrone-buca ;
 - Scintillatori: fotoni;
 - Cerenkov: fotoni;
 - Bolometri: fononi;
- **E' intuitivo capire che maggiore e' il numero di portatori di informazione per unita' di energia depositata, migliori saranno le prestazioni del rivelatore;**
 - Se il numero di portatori e' alto, sara' piu' facile “vedere” il segnale distinguendolo da segnali spurii;
 - La risoluzione energetica, cioe' la precisione con cui un rivelatore e' in grado di stimare l'energia originaria di una particella e' migliore tanto maggiore e' il numero di portatori di informazione creati (vedi dopo);
 - Altre quantita', come la direzione della particella incidente o la posizione in cui ha interagito, vengono determinate con maggiore accuratezza tanto maggiore e' il numero di portatori di informazione;

Determinazione dell'energia della particella

- I rivelatori non servono solo a “rivelare” una particella, ma anche a determinarne alcune caratteristiche come l'energia;
- La stima dell'energia di una particella che attraversa un rivelatore viene fatta “contando” il numero di portatori di informazione prodotti;
- E' auspicabile (ma bisogna verificarlo!) che la risposta del rivelatore sia lineare, cioe' che il numero di portatori sia direttamente proporzionale all'energia delle particelle;

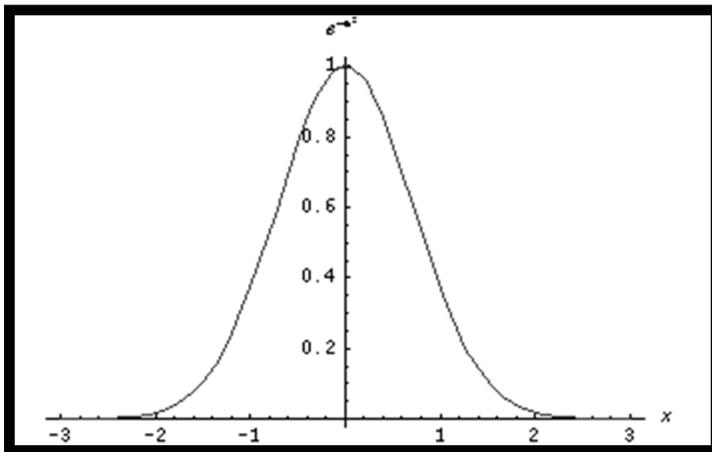


Quanti portatori di informazione N sono prodotti per Mev di energia depositata?

- Utilizzando particelle di energia nota e' possibile rispondere a questa domanda (calibrazione in energia del rivelatore);
- Quando il rivelatore e' calibrato e' possibile determinare l'energia di una qualsiasi particella che lo attraversa contando il numero di portatori raccolti;

Risoluzione energetica

- I processi che stanno alla base della produzione di portatori di informazione, sono processi statistici;
- Questo significa che due particelle con la stessa energia non produrranno esattamente lo stesso numero di portatori di informazione;
- La distribuzione del numero di portatori prodotti da un fascio di particelle della stessa energia sarà una Gaussiana con valore medio N e σ pari a $N^{1/2}$ (statistica di Poisson) ;



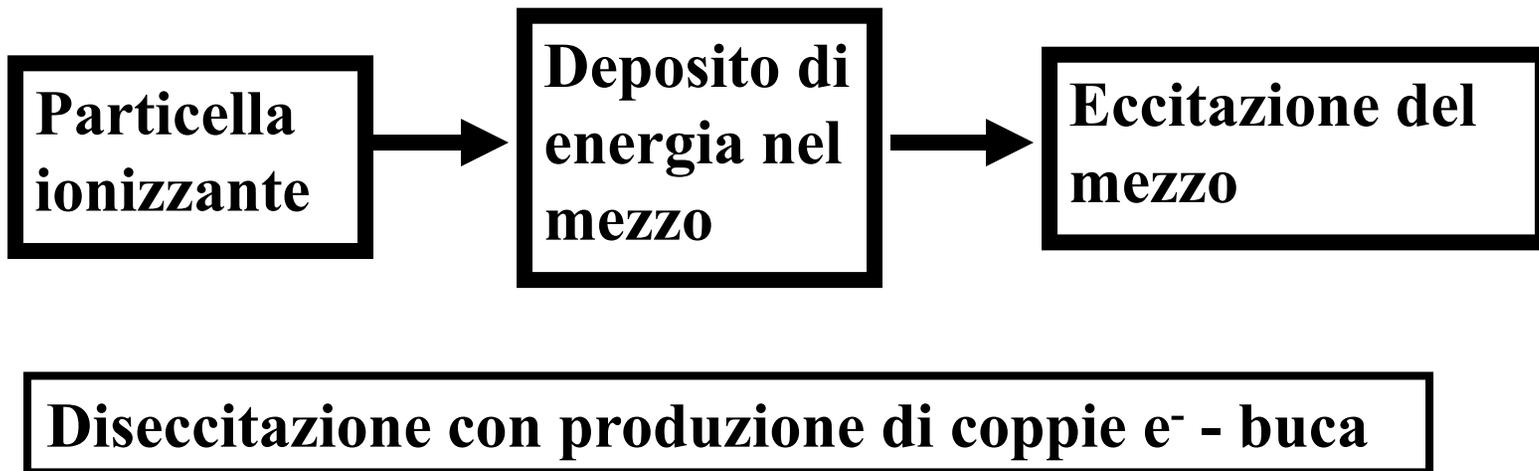
La risoluzione energetica R è definita come

$$R = \frac{\text{FWHM}}{E} = \frac{2.35 \cdot \sigma(E)}{E} \sim \frac{\sqrt{N}}{N} \sim \frac{1}{\sqrt{N}}$$

- Si noti che la risoluzione è tanto migliore quanto più grande è il numero di portatori di informazione N

- **N.B.:** a parte quello legato puramente alle fluttuazioni statistiche della produzione dei portatori di informazione sono molti i fattori che intervengono a determinare la risoluzione di un rivelatore, incluso per esempio il rumore dell'elettronica ad esso associata.

Rivelatori a semiconduttore (detti anche rivelatori a stato solido)

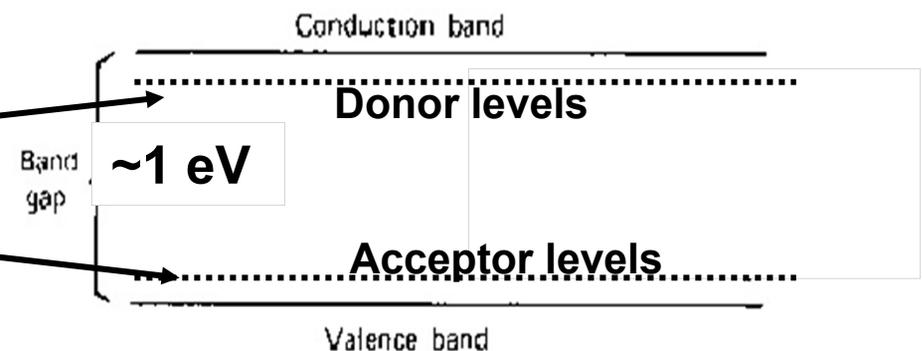


Il meccanismo che porta alla produzione di coppie elettrone buca e' strettamente legato alla struttura a bande dei livelli energetici dei semiconduttori

Semiconduttori

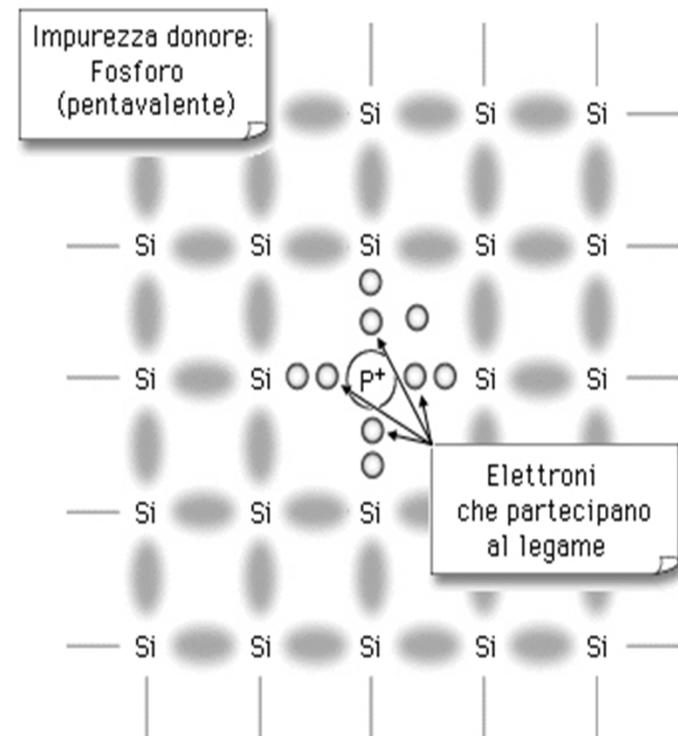
- I semiconduttori sono particolari materiali per i quali il gap fra banda di valenza e banda di conduzione e' particolarmente piccolo (~ 1 eV);
- Questo fa si che anche a temperatura ambiente si abbiano un certo numero di coppie elettrone-buca, prodotte quando un elettrone "salta" nella banda di conduzione lasciando alle sue spalle uno ione positivo;
- Tipicamente, a temperatura ambiente $n_i = p_i \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$;
- Ge e Si sono i piu' classici materiali semiconduttori; sono entrambi tetravalenti, cioe' con 4 elettroni di valenza che partecipano al legame nel reticolo cristallino;

Se si aggiungono piccole quantita' di sostanze pentavalenti (es. Fosforo) o trivalenti (es. Boro) si creano livelli permessi all'interno del gap proibito



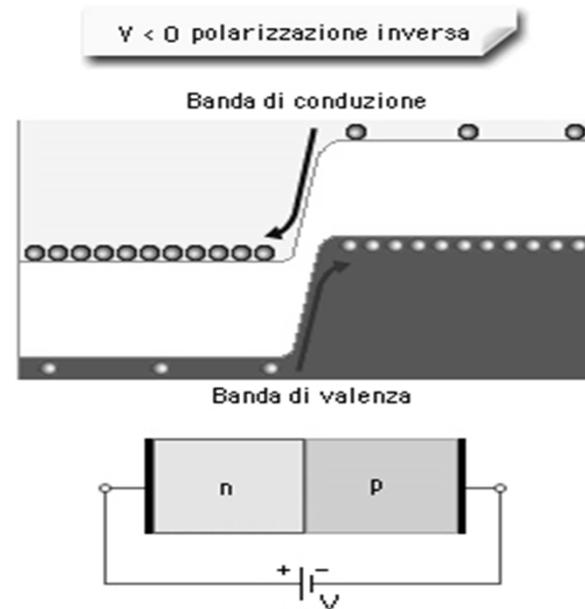
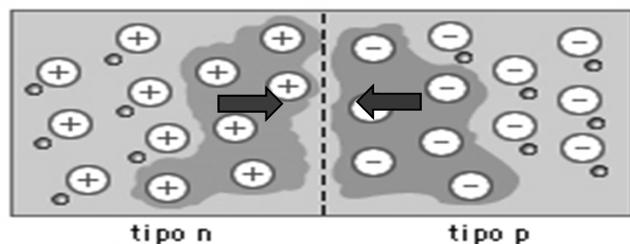
Semiconduttori

- Nel caso di semiconduttori drogati con impurezze pentavalenti (semiconduttori di tipo n) la situazione di equilibrio comporterà una prevalenza di elettroni sulle buche poiché l'impurezza tenderà a "donare" un elettrone alla banda di conduzione;
- Nel caso di semiconduttori drogati con impurezze trivalenti (semiconduttori di tipo p) la situazione di equilibrio comporterà una prevalenza di buche sugli elettroni;

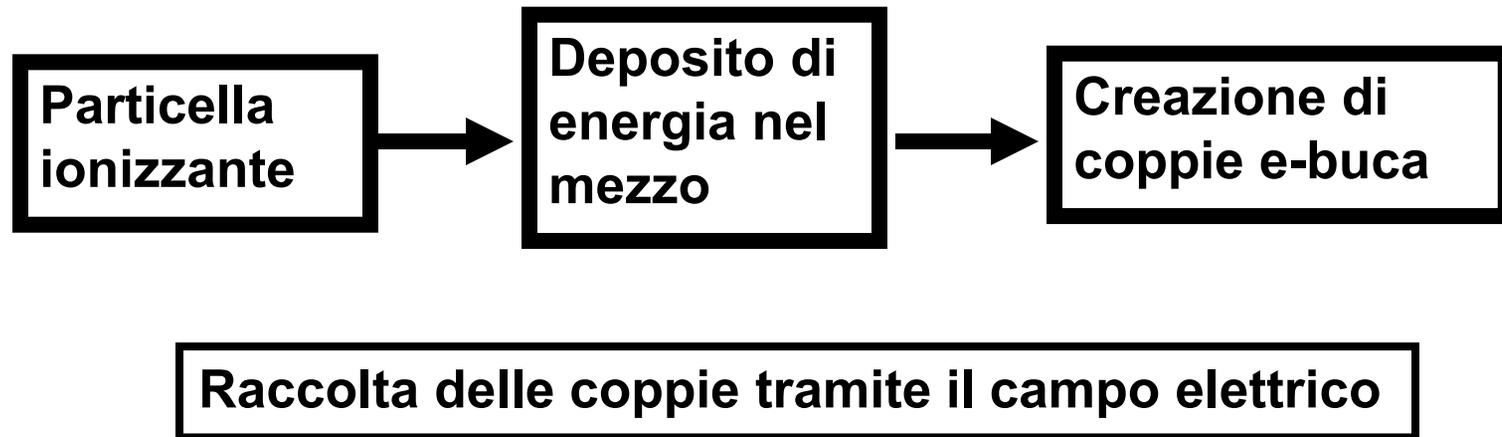


Giunzione p-n

- Se si drogano due parti contigue di uno stesso semiconduttore con impurezze di tipo donore e accettore rispettivamente, si crea la cosiddetta giunzione p-n;
- All'equilibrio si instaura un campo elettrico fra le due parti che crea una zona di svuotamento: qualunque coppia elettrone-buca che si forma in questa zona viene immediatamente raccolta dal campo elettrico;
- Se inoltre si applica un campo elettrico esterno (polarizzazione inversa), la zona di svuotamento si allarga e può addirittura arrivare a occupare l'intero cristallo;



Rivelatori a semiconduttore



La giunzione p-n polarizzata inversamente permette di:

- **Avere una regione “svuotata”, ovvero virtualmente priva di coppie e-buca dovuta ad agitazione termica;**
- **La differenza di potenziale agli estremi della regione di svuotamento permette di raccogliere le coppie e-buca prodotte da una particella ionizzante;**

Rivelatori a semiconduttore

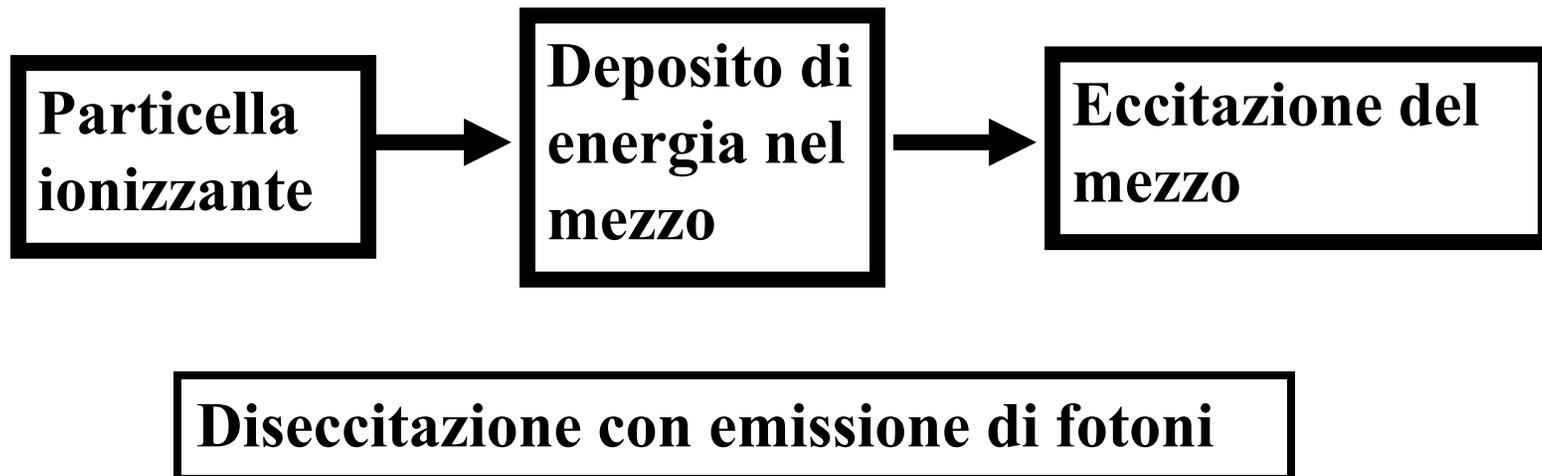
- Tipicamente l'energia necessaria per produrre una coppia elettrone-buca è di $\sim 3\text{eV}$ (il gap è di $\sim 1\text{eV}$, ma solo il 30% dell'energia di una particella va in ionizzazione);
- Quindi una particella di 1 MeV produce circa 300000 coppie;
- I rivelatori a stato solido hanno quindi una buona risoluzione energetica;
- I rivelatori a stato solido sono piuttosto veloci: la velocità di raccolta del segnale dipende dalla mobilità dei portatori di carica e ovviamente dalla grandezza del rivelatore;
- Tipicamente tempi di raccolta ~ 10 nsec (1 mm);

Dove incontreremo i rivelatori a semiconduttore...

- **Tipicamente nella rivelazione di materia oscura in combinazione con i bolometri;**

Scintillatori

Sono particolari materiali che emettono luce al passaggio di radiazione ionizzante



Il meccanismo che porta all' emissione di fotoni e' molto diverso nel caso di scintillatori organici e scintillatori inorganici

Scintillatori: organici e inorganici

Organici

- La scintillazione e' dovuta a transizioni fra livelli nelle singole molecole ---> scintillazione avviene in solidi, liquidi e gas;
- Scintillazione veloce (\sim nsec);
- Efficienza di scintillazione minore ($E_{\text{luminosa}}/E_{\text{dep}} \sim 5\%$);
- Preferiti per rivelazione di α , β

Inorganici

- La scintillazione e' legata alla struttura a bande dei cristalli;
- Scintillazione lenta (fino a $\sim \mu\text{sec}$);
- Efficienza di scintillazione maggiore ($E_{\text{luminosa}}/E_{\text{dep}} \sim 15\%$);;
- Grazie allo Z maggiore e alla loro maggiore densita' sono preferiti per la rivelazione di γ

Scintillatori organici: struttura livelli π

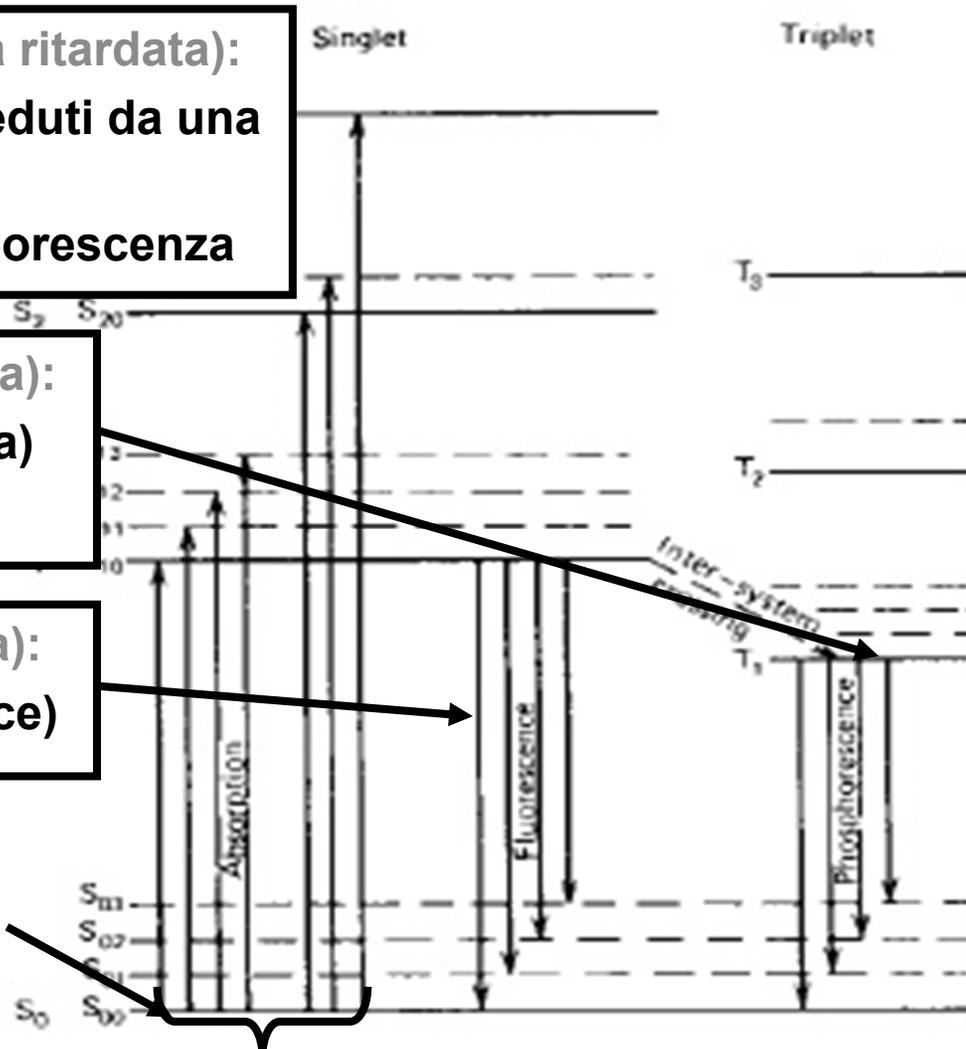
Livelli elettronici (visibile-UV), Livelli vibrazionali (vicino IR), Livelli Rotazionali (Lontano IR, micro-onde)

Spettro di emissione (fluorescenza ritardata):
transizioni fra livelli $S_{10} \rightarrow S_{0k}$ preceduti da una
transizione $T_i \rightarrow S_i$
Emissione lenta; Stessa λ della fluorescenza

Spettro di emissione (fosforescenza):
transizioni fra livelli $T_1 \rightarrow S_{0k}$ (lenta)
 λ maggiore della fluorescenza

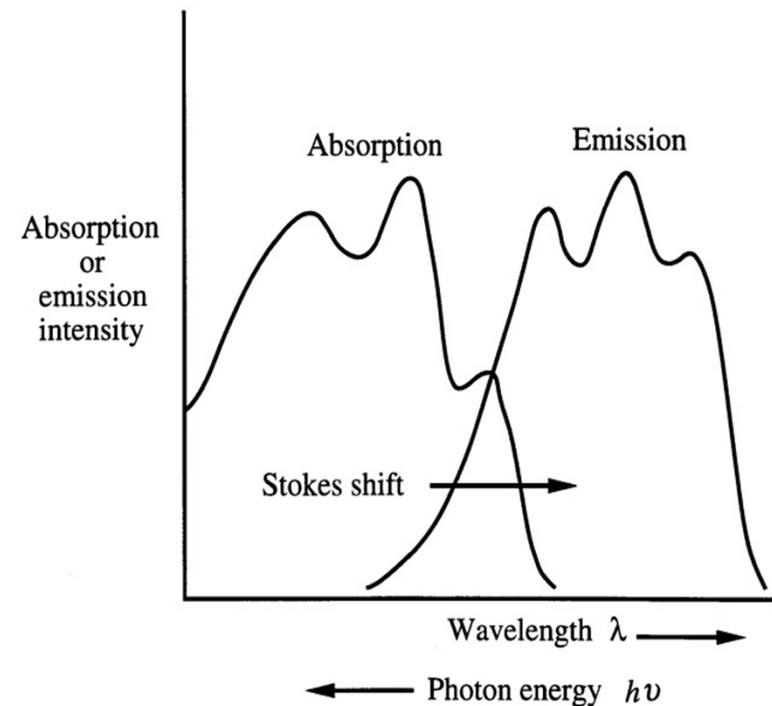
Spettro di emissione (fluorescenza):
transizioni fra livelli $S_{10} \rightarrow S_{0k}$ (veloce)

Spettro di assorbimento
transizioni fra livelli $S_{0i} \rightarrow S_{jk}$



Scintillatori organici

- Quello che interessa ai fini pratici e' la fluorescenza, perche' e' veloce;
- In un buon scintillatore la sovrapposizione fra spettro di emissione e di assorbimento e' in generale piccola—> scintillatore e' trasparente alla luce da esso stesso emessa;
- Per ridurre ulteriormente la sovrapposizione dei due spettri si puo' talvolta usare un "wavelength shifter";
- Per migliorare l'efficienza di scintillazione si usano talvolta miscele binarie, composte da un solvente organico e da un soluto;
- Quantita' di luce emessa da un buon scintillatore organico e' di circa ~ 10000 fotoni/Mev



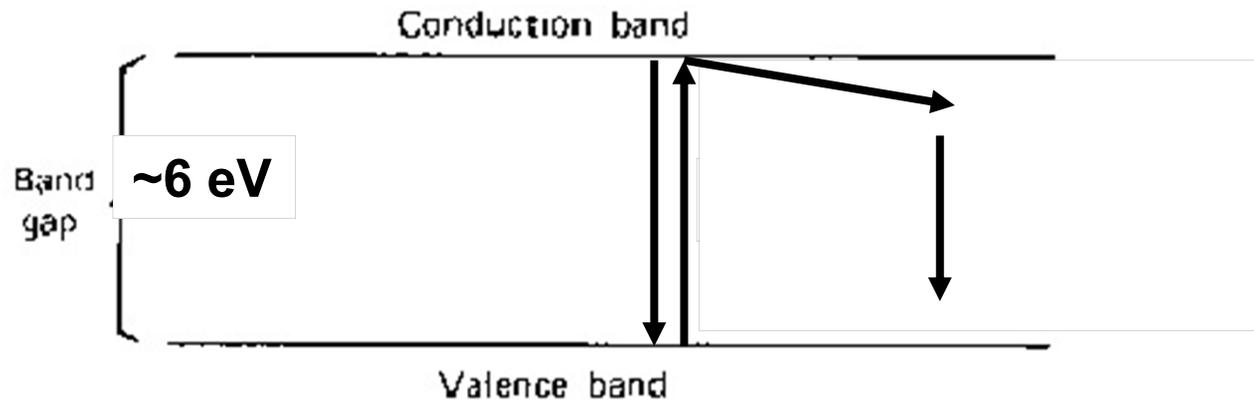
Alcuni tipi di scintillatori organici

- Cristalli: cristalli puri come antracene, stilbene;
 - migliore efficienza di scintillazione;
 - fragili;
 - quantita' di luce dipende dalla direzione della particella
- Liquidi:
 - tipicamente usati in modalita' binaria (concentrazione di soluto ~1-5 g/l) o ternaria (con un wavelenght shifter per accoppiare l' emissione al PMT);
 - possono essere impiegate grandi quantita' di liquido
- Plastici:
 - Binari o ternari.;
 - possono essere facilmente sagomati secondo necessita' ;
 - possono essere di grandi dimensioni

Dove incontreremo gli scintillatori organici..

- **Grandi quantita' di scintillatore liquido (100-1000 tonnellate) vengono utilizzate per la rivelazione dei neutrini solari e da supernova;**

Scintillatori inorganici



- L'energia fornita da una particella ionizzante provoca la transizione di elettroni dalla banda di valenza a quella di conduzione.
- Se l'elettrone ricadesse direttamente sulla banda di valenza non si avrebbe emissione di fotoni nel visibile perché il gap è troppo grande;
- Inoltre i fotoni emessi sarebbero riassorbiti dal mezzo stesso;
- Se si droga il materiale con piccole quantità di attivatore, si creano livelli energetici nella banda proibita;
- L'elettrone può finire dalla banda di conduzione su questi livelli;
- La transizione fra i livelli eccitati e il livello fondamentale dell'attivatore porta all'emissione di luce nel visibile (o nell'UV);
- Questa luce così emessa non viene ri-assorbita dal cristallo

Spettro di emissione

- Lo spettro di emissione ha λ maggiori rispetto a quello di assorbimento \rightarrow autoassorbimento della luce e' limitato;
- Lo spettro di emissione e' tipicamente caratteristico dell'attivatore

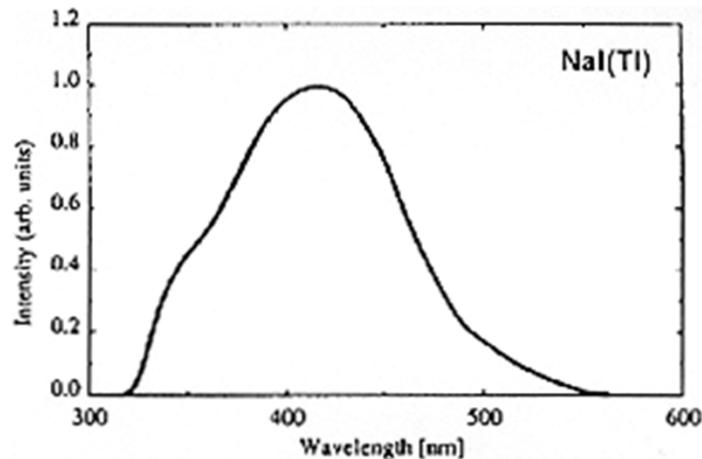


Figure 1. Scintillation emission spectrum of a canned NaI(Tl) crystal.

Altre caratteristiche

- Tipicamente, gli scintillatori inorganici sono lenti (~ 100 nsec);
- Le caratteristiche di uno scintillatore dipendono dalla natura del cristallo, natura e concentrazione dell'attivatore, concentrazione di difetti, temperatura;
- I più usati scintillatori inorganici sono:
 - NaI (Tl): alta efficienza di scintillazione (~ 40000 fotoni/MeV);
 - BGO (germanato di bismuto) : (8000 fotoni/MeV);
 - CsI (Tl o Na) : alta efficienza di scintillazione (60000 fotoni/MeV)

Alcuni scintillatori inorganici

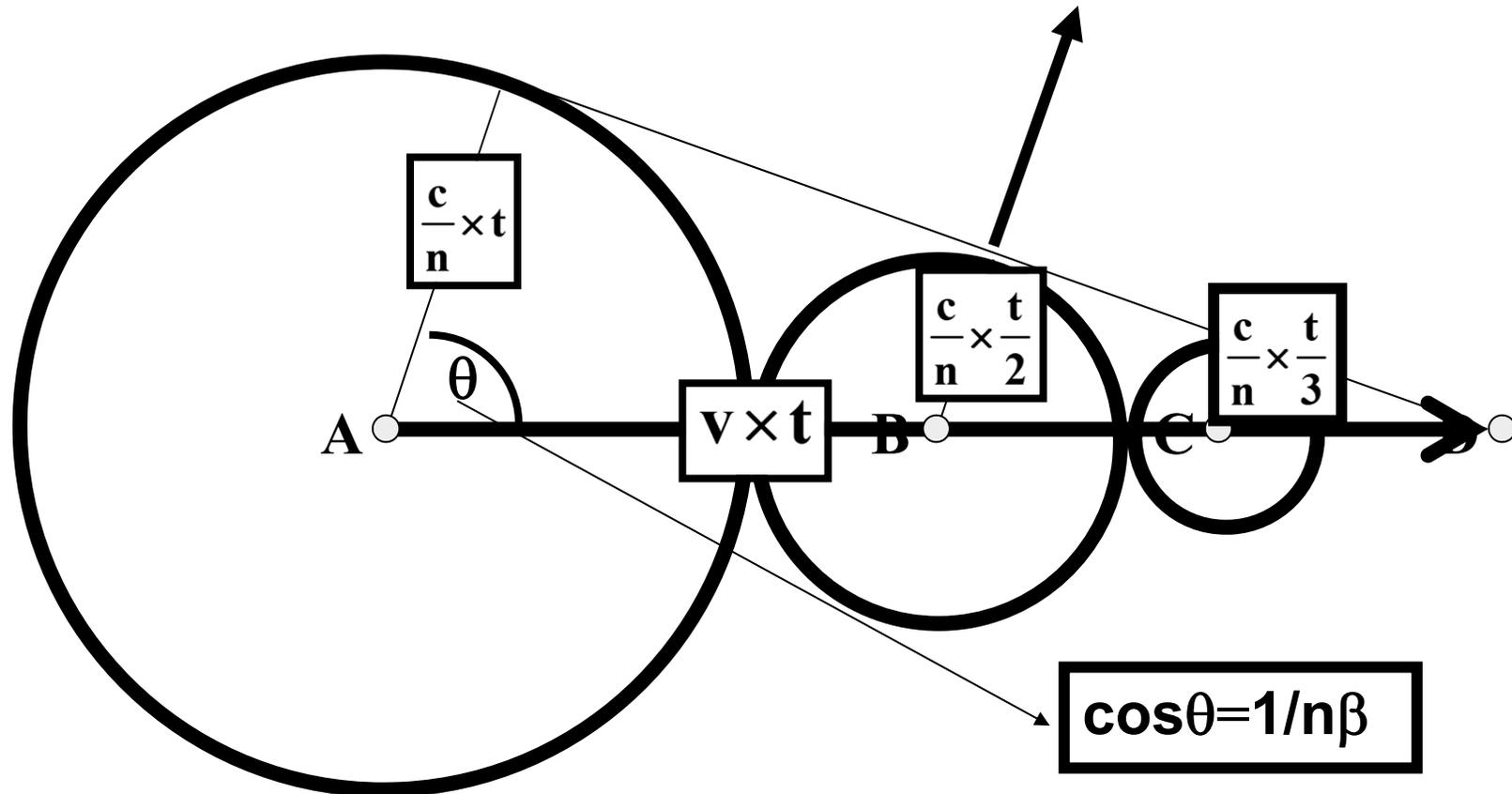
Material	Form	λ_{max} (nm)	τ_f (ns)	ρ (g/cm ³)	Photons per MeV
NaI(Tl) (20°C)	crystal	415	230	3.67	38,000
pure NaI (-196°C)	crystal	303	60	3.67	76,000
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (20°C)	crystal	480	300	7.13	8,200
Bi ₄ Ge ₃ O ₁₂ (-100°C)	crystal	480	2000	7.13	24,000
CsI(Na)	crystal	420	630	4.51	39,000
CsI(Tl)	crystal	540	800	4.51	60,000
CsI (pure)	crystal	315	16	4.51	2,300
CsF	crystal	390	2	4.64	2,500
BaF ₂ (slow)	crystal	310	630	4.9	10,000
BaF ₂ (fast)	crystal	220	0.8	4.9	1,800
Gd ₂ SiO ₅ (Ce)	crystal	440	60	6.71	10,000
CdWO ₄	crystal	530	15000	7.9	7,000
CaWO ₄	crystal	430	6000	6.1	6,000
CeF ₃	crystal	340	27	6.16	4,400
PbWO ₄	crystal	460	2, 10, 38	8.2	500
Lu ₂ SiO ₅ (Ce)	crystal	420	40	7.4	30,000
YAlO ₃ (Ce)	crystal	390	31	5.35	19,700
Y ₂ SiO ₅ (Ce)	crystal	420	70	2.70	45,000

Dove incontreremo gli scintillatori inorganici...

- **Gli scintillatori inorganici sono fra le tecniche piu' usate per rivelare la materia oscura**

Effetto Cerenkov

- Una particella che attraversa un mezzo con velocità superiore alla velocità della luce in quel mezzo emette luce, detta luce Cerenkov;



- Il campo elettrico della particella polarizza le molecole del mezzo, le quali diseccitandosi producono onde elettromagnetiche;
- Queste interferiscono costruttivamente SOLO se $v > c/n$;

Effetto Cerenkov

- In sostanza quindi la luce Cerenkov viene emessa a una direzione fissata rispetto alla direzione di volo della particella, su un cono di angolo $\theta = \arccos(1/\beta n)$;
- Per esempio, in acqua ($n=1.33$) una particella che si muove con $\beta=1$ produce luce su un cono di angolo $\theta \sim 41^\circ$;
- Per produrre luce Cerenkov una particella deve avere velocità che soddisfi alla condizione $v > c/n \rightarrow \beta > 1/n$;
- Quale deve essere la sua energia cinetica T e il suo momento p ?

$$T_{\text{soglia}} = E - M = M \cdot (\gamma - 1) = M \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} - 1 \right)$$

Tenendo conto che

$$\beta_{\text{soglia}} = \frac{1}{n}$$

$$T_{\text{soglia}} = M \cdot \left(\frac{n}{\sqrt{n^2 - 1}} - 1 \right)$$

$$p_{\text{soglia}} = \frac{M}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

- Per esempio, in acqua ($n=1.33$), $T_{\text{soglia}} \sim \frac{1}{2} M$
- T_{soglia} (elettrone) ~ 250 keV

Effetto Cerenkov

Lo spettro di luce Cerenkov e' prevalentemente nell'ultravioletto

$$\frac{dN}{d\lambda} = \frac{0.046}{\lambda^2} Z^2 L \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}\right)$$

L=distanza percorsa in cm

λ =lunghezza d'onda in cm

$$\frac{dN}{dE} = 370 Z^2 L \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2}\right) = 370 Z^2 L \sin^2 \theta$$

Si noti che:

- Il numero di fotoni emessi e' proporzionale al percorso compiuto dalla particella nel mezzo;
- Il numero di fotoni e' tanto maggiore tanto piu' grande e' l'indice di rifrazione e tanto piu' grande e' β ;
- Per esempio, in acqua, una particella con $Z=1$, $\beta=1$ produce circa ~ 650 fotoni/cm fra (200-600) nm;
- ??DOMANDA??:Come si confronta quantitativamente con l'energia persa per ionizzazione?

Rivelatori Cerenkov

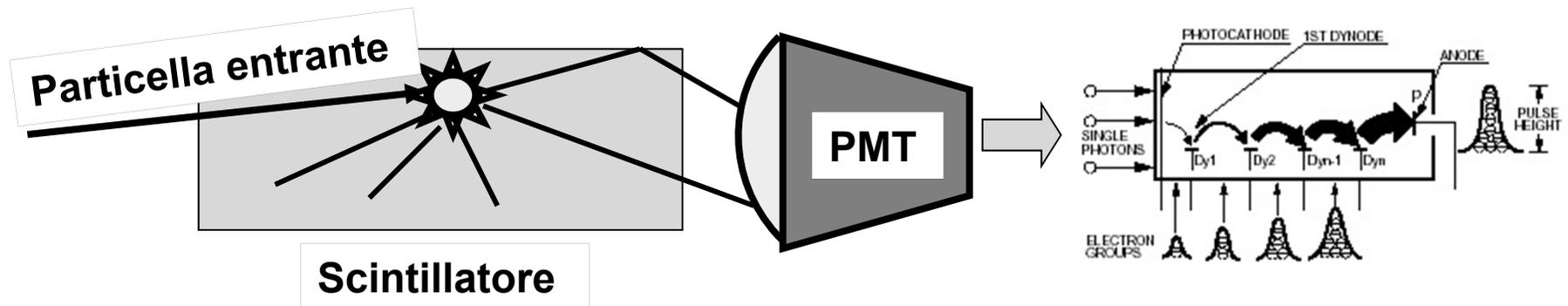
- **L'effetto Cerenkov e' utilizzato in numerosi esperimenti di fisica nucleare e subnucleare per la rivelazione, il tracciamento e l'identificazione di particelle;**
- **Le peculiarita' di questo fenomeno che vengono sfruttate sono:**
 - Dal numero di fotoni emessi e dall'angolo θ a cui sono emessi si puo' risalire al β della particella;
 - Il fatto che (a parita' di p) la soglia Cerenkov dipenda dalla M della particella permette di distinguere particelle di massa diversa;
 - Il fatto che la luce Cerenkov sia direzionale rende possibile avere informazioni sulla direzione della particella;
 - La quantita' di fotoni emessi fornisce informazioni su L (range) della particella e quindi sulla sua energia;
- **Sono particolarmente economici in quanto possono essere fatti semplicemente con acqua!**

Dove incontreremo i rivelatori Cerenkov

- **Sono fra i rivelatori che incontreremo piu' spesso:
sia per lo studio dei neutrini solari e da Supernova,
sia per lo studio dei raggi cosmici di altissima
energia;**

Tubi fotomoltiplicatori (PMT)

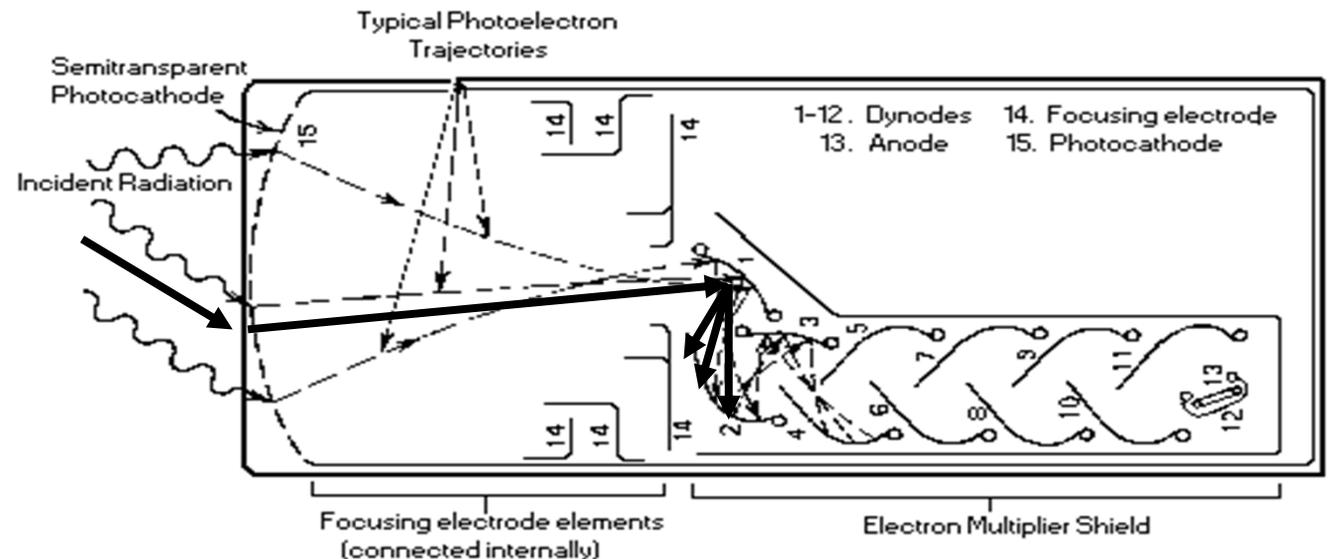
- In realta', perche' i rivelatori che si basano sul principio di scintillazione o Cerenkov possano funzionare, e' necessario che i (pochi) fotoni emessi vengano rivelati da "occhi" sensibilissimi, I TUBI FOTOMOLTIPLICATORI;
- Questi strumenti sono sensibili anche al singolo fotone;
- Grazie a un meccanismo di moltiplicazione a valanga, l'output di un PMT e' un segnale elettrico di ampiezza sufficientemente grande;



Il funzionamento di un fototubo

- Il fotone che incide sul fotocatodo porta all'emissione di un fotoelettrone per effetto fotoelettrico (la probabilità di emissione è detta Quantum Efficiency e dipende dalla lunghezza d'onda del fotone; Q.E. (max) ~ 30%);
- Il fotoelettrone prodotto viene accelerato da un campo elettrico di qualche centinaio di Volts fra il fotocatodo e il primo dinodo;
- Il processo di moltiplicazione a valanga avviene grazie a una serie di 8-10 dinodi posti a una differenza di potenziale 100-150 V l'uno dall'altro;

• Ogni volta che un elettrone arriva su un dinodo, produce δ elettroni ($\delta > 1$; tipicamente 3-4) i quali vengono a loro volta accelerati;



Caratteristiche di un PMT

- Tipicamente un fototubo viene alimentato a $V=1.5-2$ kV;
- Il potenziale fra un dinodo e l'altro $V_i \sim 100-150$ V;
- $V_i = V/(n+1)$ dove n e' il numero di dinodi;
- Il coefficiente di emissione secondaria δ (numero di elettroni emessi per ogni elettrone incidente su un dinodo) e' dato da:

$$\delta = V_i^\alpha$$

Dove $\alpha=0.7-0.8$ e dipende dal materiale e dalla geometria del dinodo

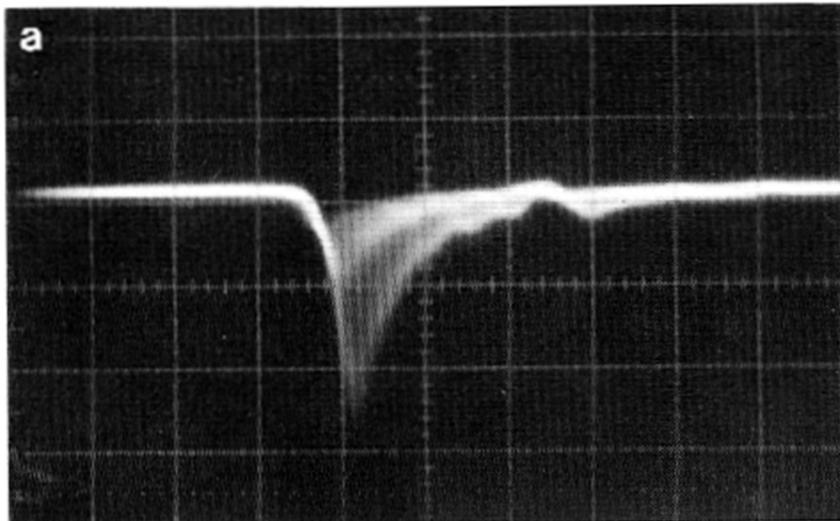
- Il guadagno totale di un fototubo (numero di elettroni in uscita per un fotoelettrone emesso dal catodo)

$$G = \delta^n \propto V_i^{\alpha n}$$

Per un buon fototubo $G \sim 10^6 - 10^7$

- N.B.: il guadagno e' molto sensibile anche a piccole variazioni di V , che deve quindi essere molto stabile;

Tipica forma di un segnale di uscente da un PMT per due diversi tipi di scintillatore



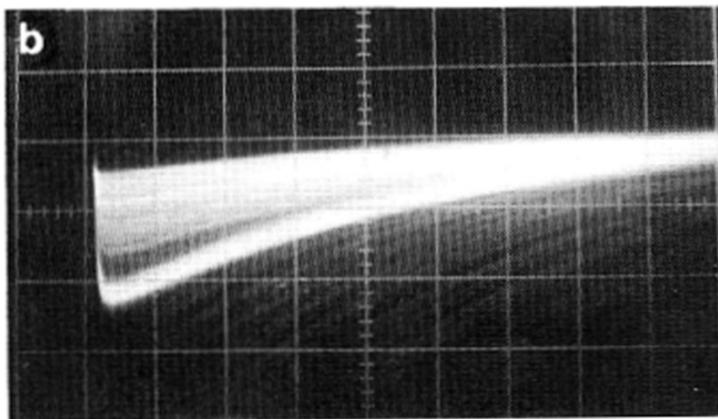
Scintillatore plastico

Plastic

Vert. scale : 0.2 V/cm

Hor. scale : 10 ns/cm

Source : ^{207}Bi 10 μCi



Scintillatore inorganico

NaI

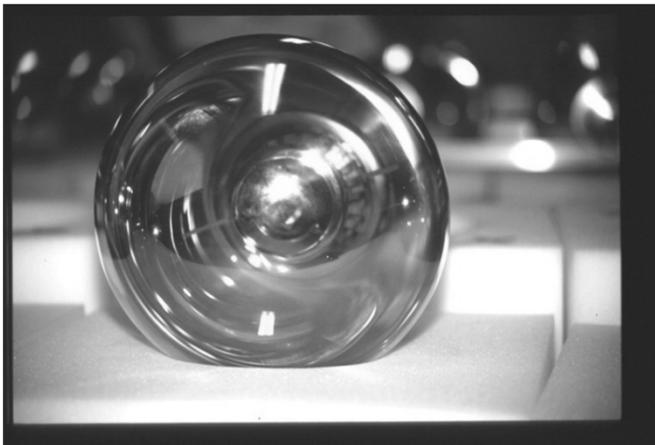
Vert. scale : 0.2 V/cm

Hor. scale : 5 $\mu\text{s/cm}$

Source : ^{137}Cs 10 μCi

Dove incontreremo I PMT...

- **Praticamente dappertutto! (ovunque si utilizzino scintillatori e/o rivelatori Cerenkov)**



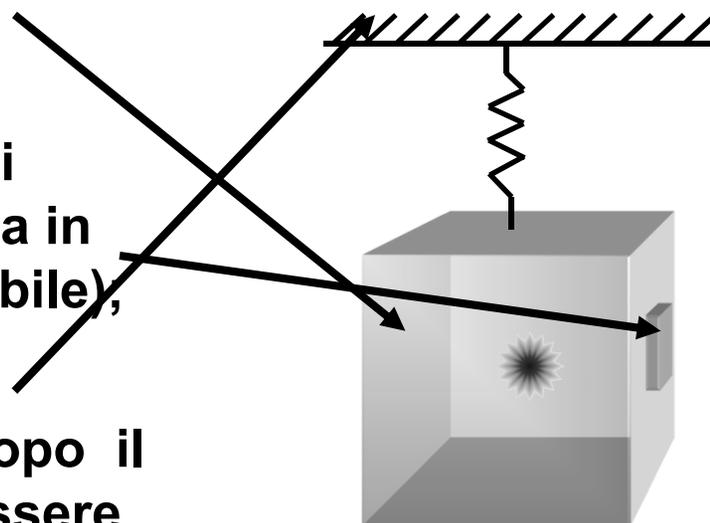
I bolometri

- Un bolometro si basa sulla capacita' di misurare la variazione di temperatura ΔT prodotta in un mezzo al passaggio di una particella;
- E' una tecnica molto efficiente perche' tutta l'energia di una particella viene in un'ultima analisi dispersa nel mezzo sotto forma di calore (mentre l'energia persa per ionizzazione e' solamente il 30%);
- In termini piu' tecnici, l'energia della particella provoca la produzione di "fononi", quanti di energia vibrazionale;
- Mentre per produrre una coppia elettrone-buca in un semiconduttore e' necessaria $\sim 3\text{eV}$, per produrre un fonone e' sufficiente $\sim kT$ che a temperatura ambiente corrisponde $\sim 0.025\text{ eV}$, a temperature $T=1\text{ K}$ corrisponde a $\sim 10^{-4}\text{ eV}$!
- Quindi a parita' di energia della particella, i portatori di informazione sono molto di piu' nel caso dei bolometri che in tutti gli altri rivelatori;
- Questo permette di avere un'altissima risoluzione energetica, non raggiungibile da altre tecniche di rivelazione;
- Questo rende inoltre i bolometri in grado di misurare piccolissimi depositi di energia, come quelli dovuti al rinculo di un nucleo in seguito all'interazione con particelle di materia oscura (WIMPs);

I bolometri

Un bolometro e' composto tipicamente da:

- assorbitore: in cui interagiscono le particelle da rivelare;
- sensore: che misura la variazione di temperatura (per es., trasformandola in una variazione di resistenza misurabile),
- bagno termico: che ha lo scopo di restaurare la temperatura di base dopo il passaggio di una particella; deve essere debolmente accoppiato con l'assorbitore (conduttanza termica G bassa)



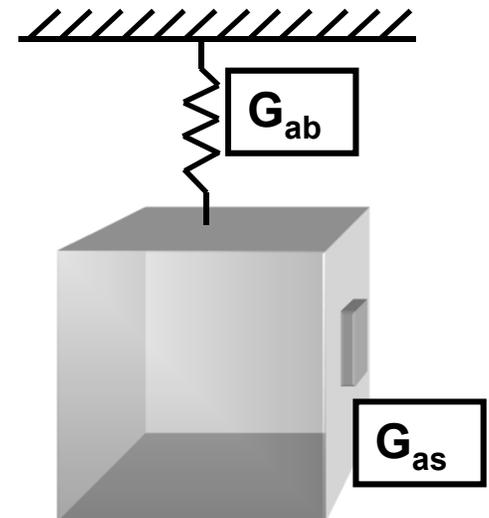
- Quando una particella deposita energia E nell'assorbitore, la variazione di temperatura e' data da $\Delta T = E/C$ dove C e' la capacita' termica dell'assorbitore;
- E' necessario quindi selezionare mezzi con bassa capacita' termica;

Scelta dei materiali assorbitore

- L'assorbitore deve avere bassa capacità termica C ;
- Ricordiamo che $C = c \times M$ dove c è il calore specifico del mezzo e M è la sua massa;
- È chiaro quindi che aumentando la massa, la situazione peggiora;
- Ricordiamo inoltre che il calore specifico c dipende dalla temperatura; in particolare diminuisce al diminuire della temperatura;
- È chiaro quindi che si deve lavorare a basse temperature;
- Nei metalli $c(T) \sim aT + bT^3$; quindi diminuisce lentamente con la temperatura; ne segue che i metalli NON sono adatti come assorbitori per bolometri;
- Nei semiconduttori, isolanti invece si ha che $c(T) \sim 1944 \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3$ dove Θ_D è la temperatura di Debye caratteristica di ciascun materiale (tipicamente ~ 200 K);
- Per questo è possibile trovare fra questi materiali quello più adatto come assorbitore;

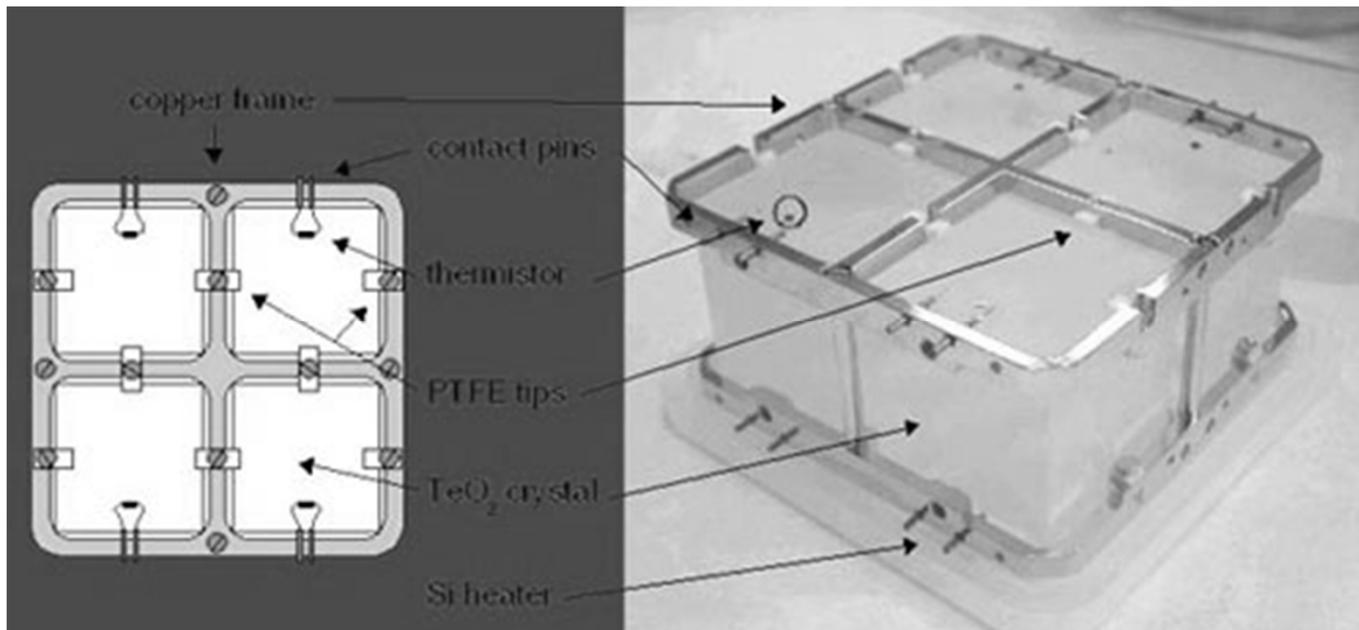
Scelta del sensore (termometro)

- I sensori piu' tipici sono costituiti da semiconduttori drogati, la cui resistivita' presenta una forte dipendenza dalla temperatura e puo' quindi venire usata per segnalare anche piccole variazioni ΔT ;
- In altri casi, viene sfruttato il brusco cambiamento in funzione di T di alcune proprieta' di un superconduttore in prossimita' della transizione da semi-conduttore a super-conduttore;
- L'accoppiamento termico fra assorbitore e sensore (G_{as}) deve essere molto buono, in particolare, molto maggiore di quello fra assorbitore e bagno termico (G_{ab});
- Il tempo di termalizzazione, e' piuttosto alto (\sim qualche μsec);
- Quindi i bolometri sono rivelatori molto lenti;
- Non vanno bene per rivelare eventi con alto rate, perche' si avrebbe il fenomeno di pile-up;



Bolometri

- Ecco un esempio di bolometro utilizzato per l'esperimento Cuoricino (ricerca del decadimento $\beta\beta$);
- 4 cristalli di TeO_2 da $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ($M \sim 790\text{g}$ ciascuno);
- Il sensore (termistore) e' di Ge;
- La temperatura di lavoro e' $\sim 10 \text{ mK}$;
- Capacita' di ciascun cristallo $\sim 1 \times 10^{-10} \text{ joule}/^\circ\text{K}$; $\sim 1.6 \times 10^9 \text{ eV}/^\circ\text{K}$;
- Per $E=1 \text{ MeV} \rightarrow \Delta T = 6 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{K}$;



Dove incontreremo i bolometri...

- **Essenzialmente nella ricerca della materia oscura. I bolometri sono l'ideale per misurare la piccolissima energia di rinculo che ci si aspetta in caso di interazione con una particella di materia oscura.**