

Misure decadimento $\beta\beta 0\nu$

Studente
Francesco
Gizzarelli

Tutor
C. Tomei
F. Bellini

Sommario

- Natura del neutrino
- Decadimento doppio beta
- Tecnica bolometrica
- Cuoricino
- CUORE

Dirac vs Majorana

Equazione di Dirac $(i\partial - m) \psi = 0$

I neutrini sono considerati fermioni a massa nulla

Weyl = Chiralità = Elicità

$$m = 0$$
$$v \neq \bar{v}$$

$$\begin{cases} v = v_L \\ \bar{v} = \bar{v}_R \end{cases}$$

- 2 stati indipendenti
- Distinzione grazie elicità

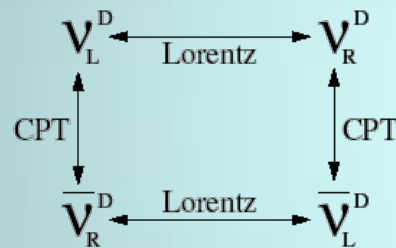
Dirac vs Majorana

Ma i neutrini hanno massa!!!

Dirac = Chiralità

$$\nu \neq \bar{\nu}$$

$$\begin{cases} \nu = \nu_L + \nu_R \\ \bar{\nu} = \bar{\nu}_L + \bar{\nu}_R \end{cases}$$



Dirac

- 4 stati indipendenti di neutrino ed antineutrino
- L'elicità non li distingue
- Conservazione della corrente leptonica

Majorana = Coniugazione di Carica

$$\nu = \bar{\nu}$$

$$\begin{cases} \nu_1 = \nu_L + \bar{\nu}_L \\ \nu_2 = \nu_R + \bar{\nu}_R \end{cases}$$

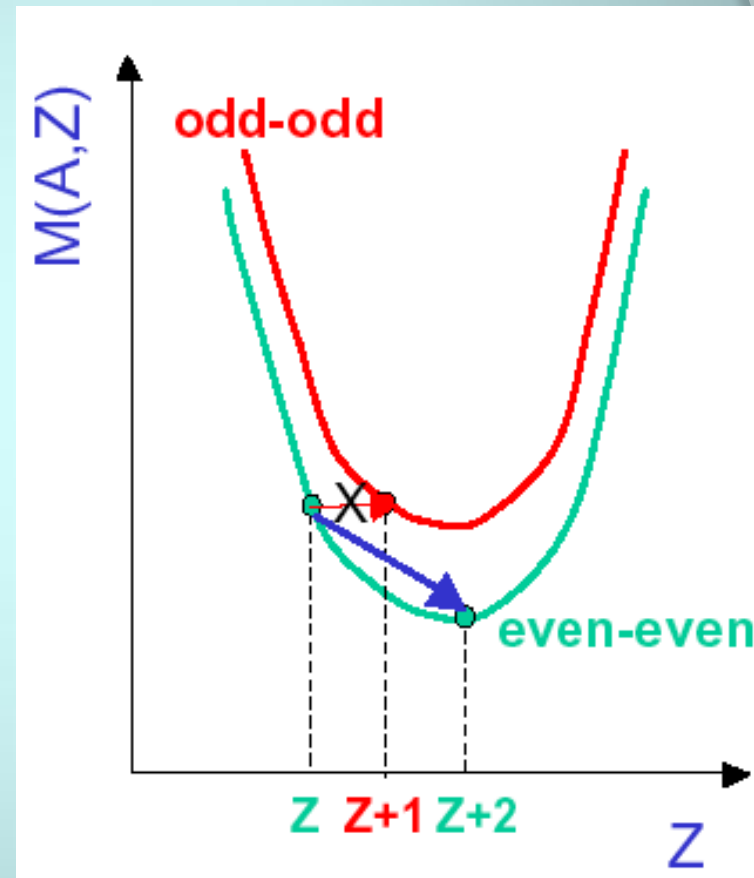


Majorana

- 2 stati indipendenti del neutrino
- Distinzione grazie all'elicità
- Non conservazione della corrente leptonica

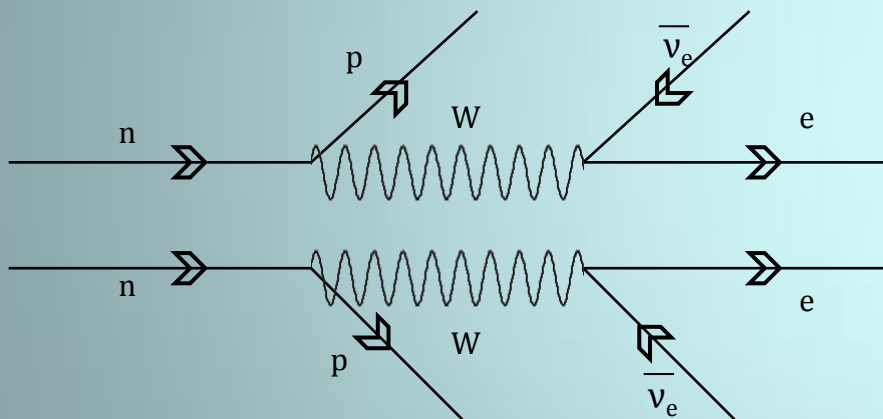
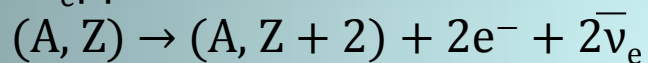
Decadimento doppio beta

- Goeppert- Mayer 1935
- Prima evidenza sperimentale nel 1987 in un nucleo di ^{82}Se
- Processo al II° ordine = molto raro
- $\tau_{1/2} \sim 10^{20}$ y
- Può avvenire solo se il β singolo è energeticamente soppresso

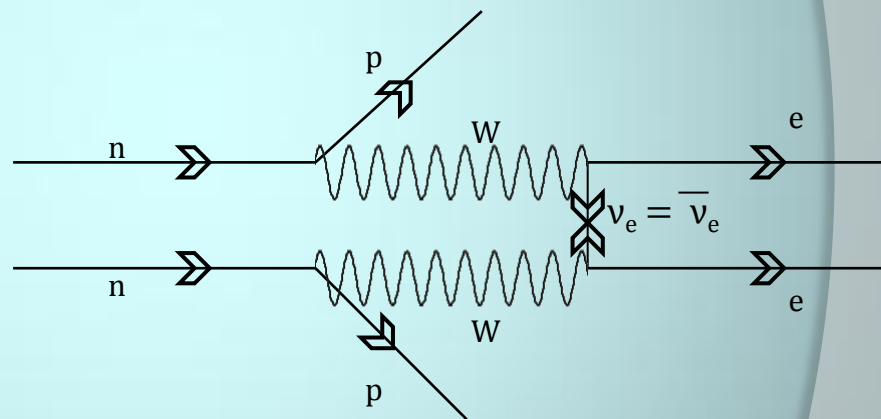


Decadimento doppio beta

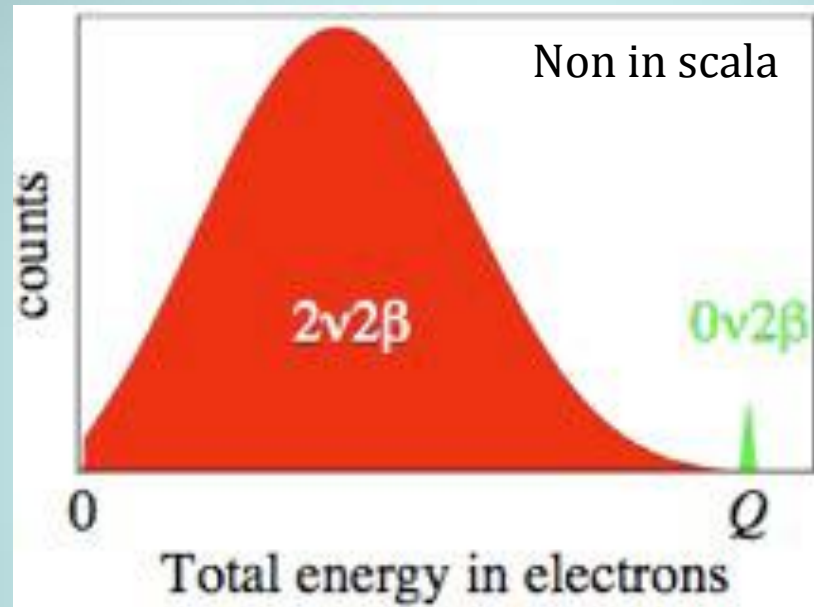
$$2\nu_e\beta\beta$$



$$0\nu_e\beta\beta$$



Segnatura sperimentale



$$1/\tau^{\beta\beta 0\nu} = G^{0\nu}(Q, Z) |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

spazio delle fasi

elemento di
matrice nucleare

massa media del
neutrino

$$m_e = \left| \sum_k U_{ek}^2 m_k \right|$$

Sensibilità

• Decadimento $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$

• Emivita $\tau_{1/2} = \tau \ln(2) = t \ln(2) \frac{N_0}{N_D}$

tempo di osservazione \nearrow t
 Nuclei totali \swarrow N_0
 Nuclei decaduti \swarrow N_D

$$S_{n\sigma}^{0v} = \ln 2 \frac{N_A a}{n A} \sqrt{\frac{t M}{b \Delta E}} \varepsilon$$

Emivita corrispondente al numero massimo di eventi che possono essere nascosti dalle fluttuazioni del fondo a n sigma

Proprietà rivelatori

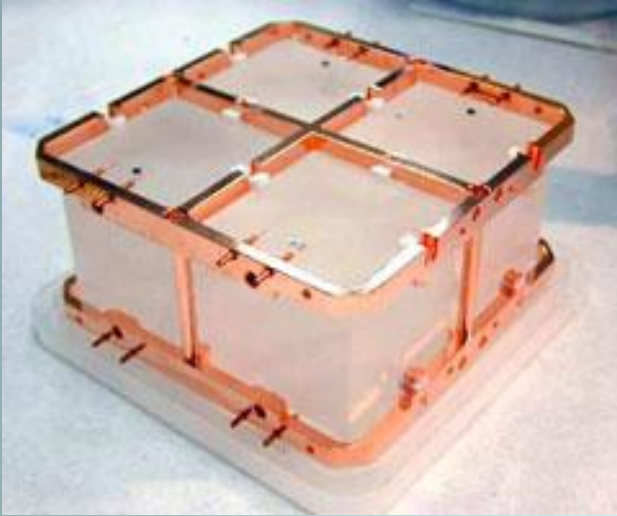
$$S_{\text{ng}}^{0\nu} = \ln 2 \frac{N_A a}{n A} \sqrt{\frac{t M}{b \Delta E}} \varepsilon$$

1. Alta risoluzione ΔE ($\sim 2-4 \text{ ‰}$)
2. Basso Background b ($<10^{-2}$ counts/kg /keV/y)
3. Alta efficienza ε ($\sim 100 \%$)
4. Grande massa M (~ 1 ton)

Proprietà materiali

1. Alta radiopurezza
2. Abbondanza isotopica a
3. Elevato Q-value

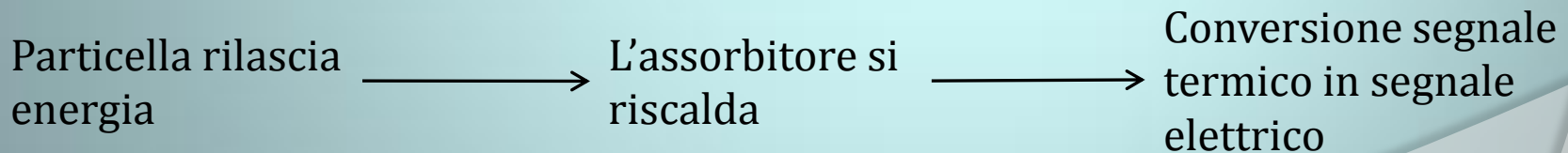
Tecnica Bolometrica



Perché il bolometro?

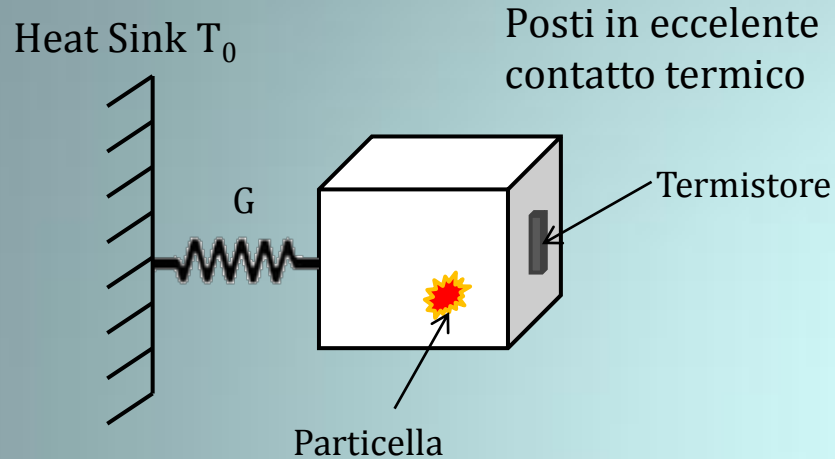
1. Rivelatore = Sorgente
2. Efficienza $\varepsilon \sim 100\%$
3. Alta sensibilità $\sim \text{keV}$
4. Possibilità di grandi masse

Il Bolometro è un rivelatore sensibile a segnali termici



Variazione in temperatura $\sim 100\mu\text{K} \Rightarrow$ temperatura criogenica $\sim \text{mK}$

Termalizzazione



$$\Delta E = C(T) \Delta T$$

$$\text{Debye } C(T) \propto (T/T_D)^3$$

Segnale termico = Fononi Termici

Discesa in temperatura

$$\Delta T(t) = \Delta T e^{-t/\tau_{\text{rel}}}$$

conduttanza termica



con $\tau_{\text{rel}} = C(T)/G$
tempo di rilassamento $\sim s$

\Rightarrow il segnale bolometrico è lento, non posso impiegarli in esperimenti con alta rate di conteggi

Termistore

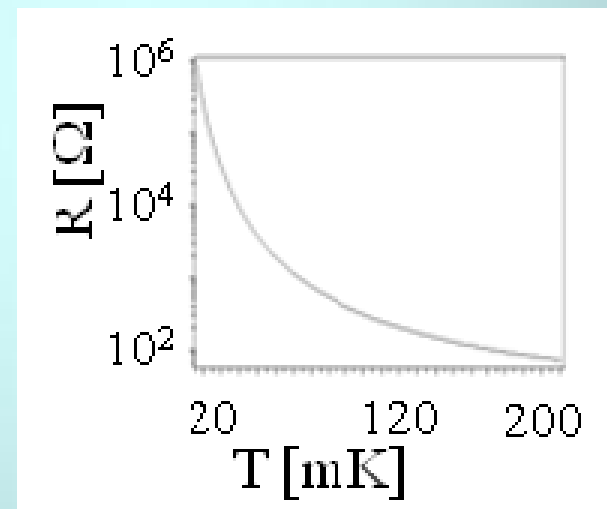
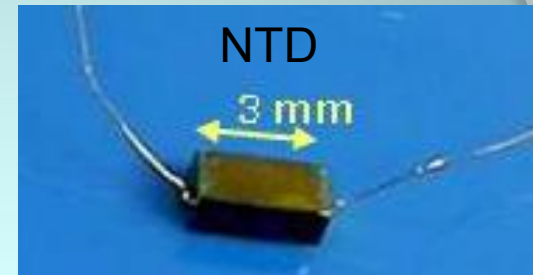
- Converte il segnale termico in un segnale elettrico
- Semiconduttore Ge o Si drogato leggermente al disotto della transizione di Mott
- Sensibile a piccoli cambiamenti di temperatura
- $I_{\text{BIAS}} = \text{cost}$

$$R(T) = R_0 e^{(T_0/T)^{1/2}}$$

$$R_0 = 1.15 \Omega$$

$$T_0 = 3.35 \text{ K}$$

L'innalzamento in temperatura varia $R(T) \Rightarrow$ varia la potenza dissipata \Rightarrow per tornare all'equilibrio termico la resistenza deve diminuire



Circuito di polarizzazione

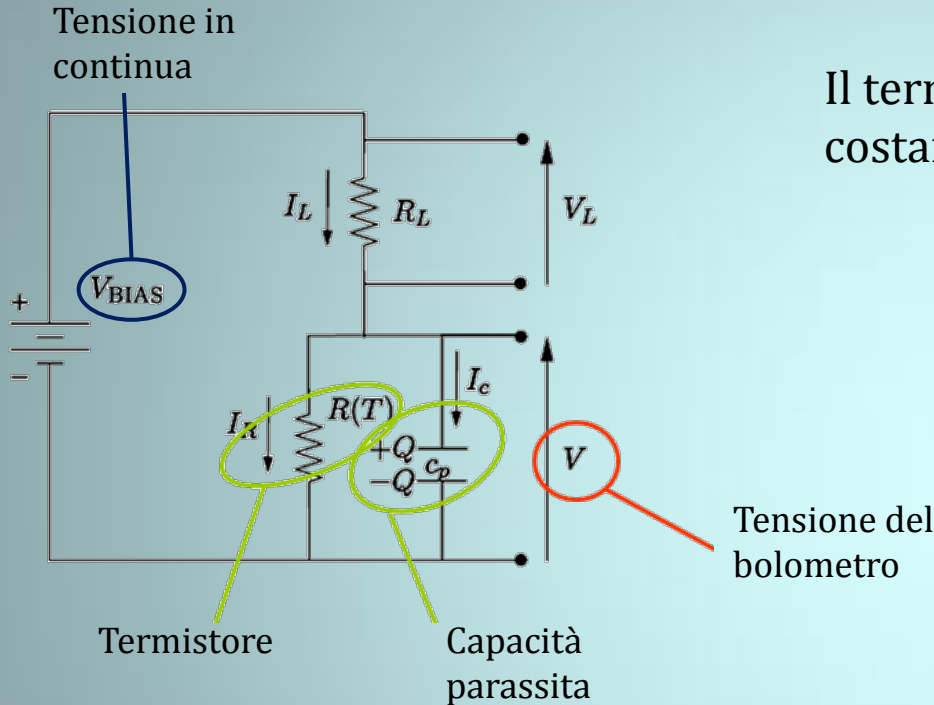
Il termistore NTD lavora a corrente costante dunque devo porre

$$R_L \gg R(T)$$

Valori tipici:

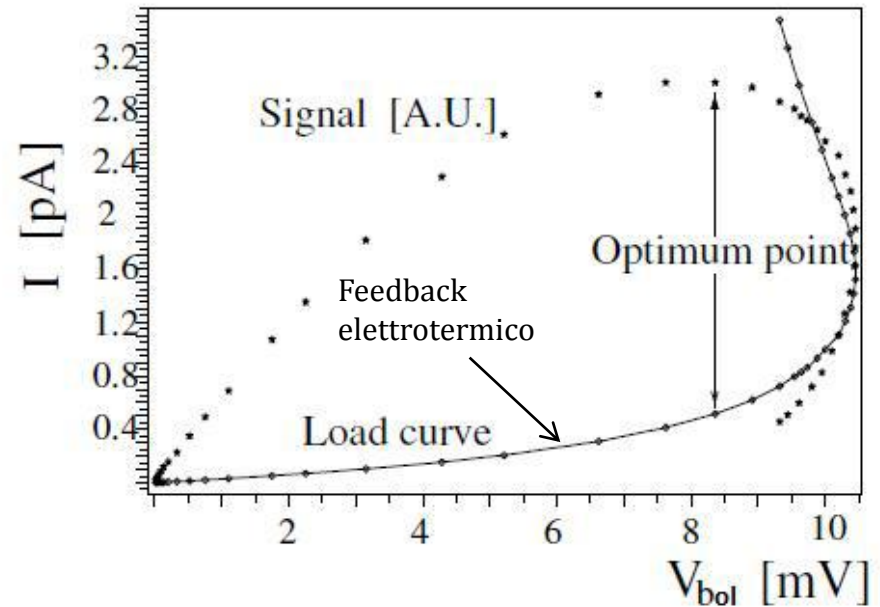
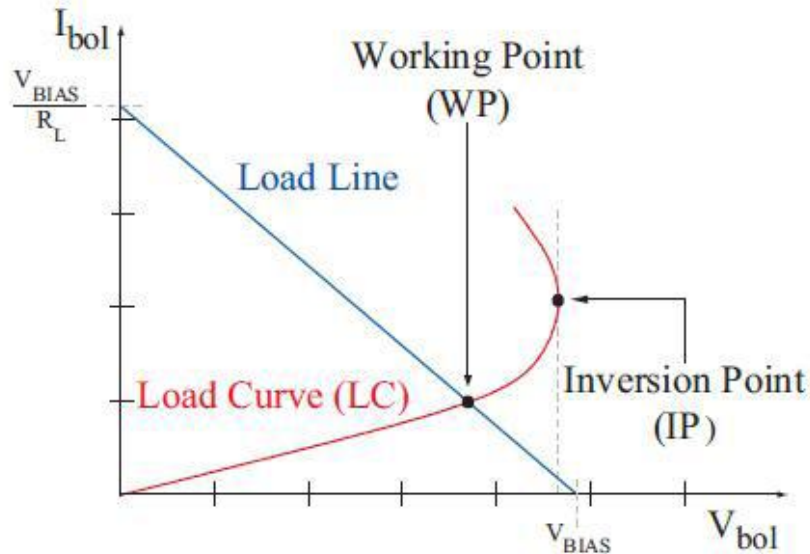
$$R_L = 54 \text{ G}\Omega$$

$$R(10\text{mK}) \sim 100 \text{ M}\Omega$$



$$V(T) = \frac{R(T)}{R(T) + R_L} V_B \quad \Rightarrow \quad \Delta V \sim \frac{E}{C_p T} \sqrt{PR(T)}$$

Circuito Dinamico



- Feedback elettrotermico nel quale la relazione V-I avviene in un regime non ohmico
- I termistori NTD permettono di raggiungere l'equilibrio della T in una zona intermedia del feedback elettrotermico
- L'ampiezza del segnale è massima

$$T_B = T_0 + \frac{P}{G}$$

Tellurio - 130

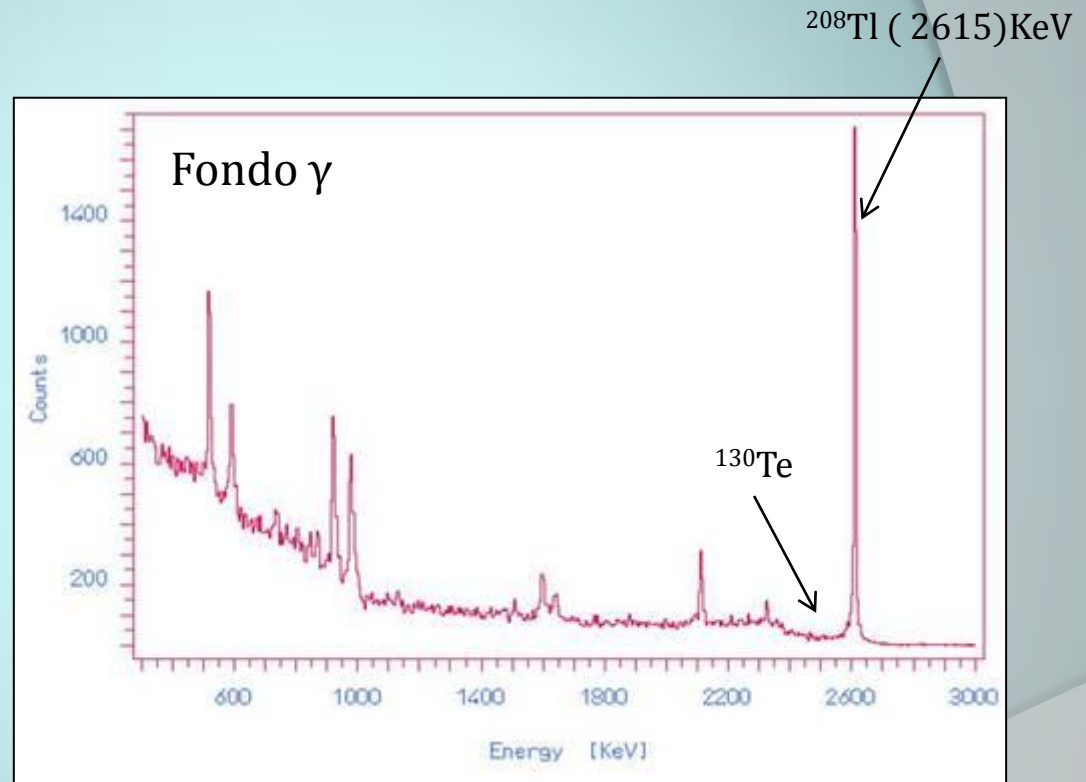


• $Q_V = 2528 \text{ keV}$

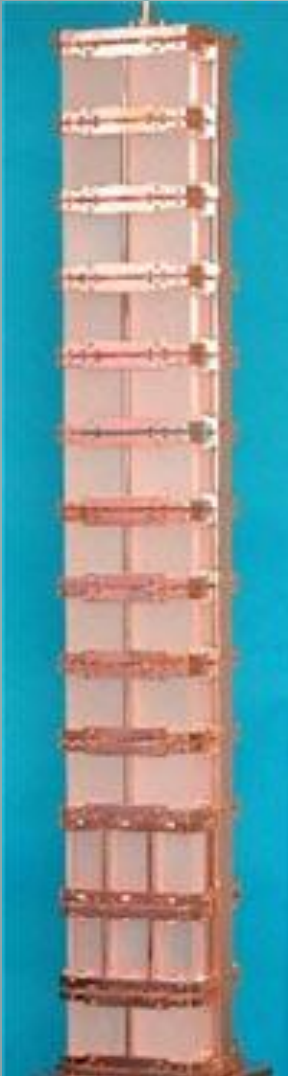
• $a = 34,2 \%$

In realtà TeO_2

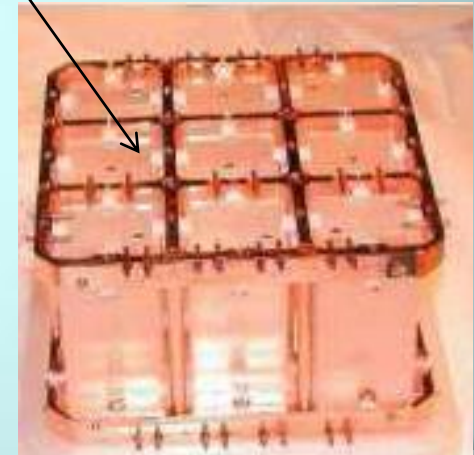
1. Alta $T_D = 232 \text{ K}$
2. Proprietà dielettriche e diamagnetiche
3. Longevità cristalli



Cuoricino



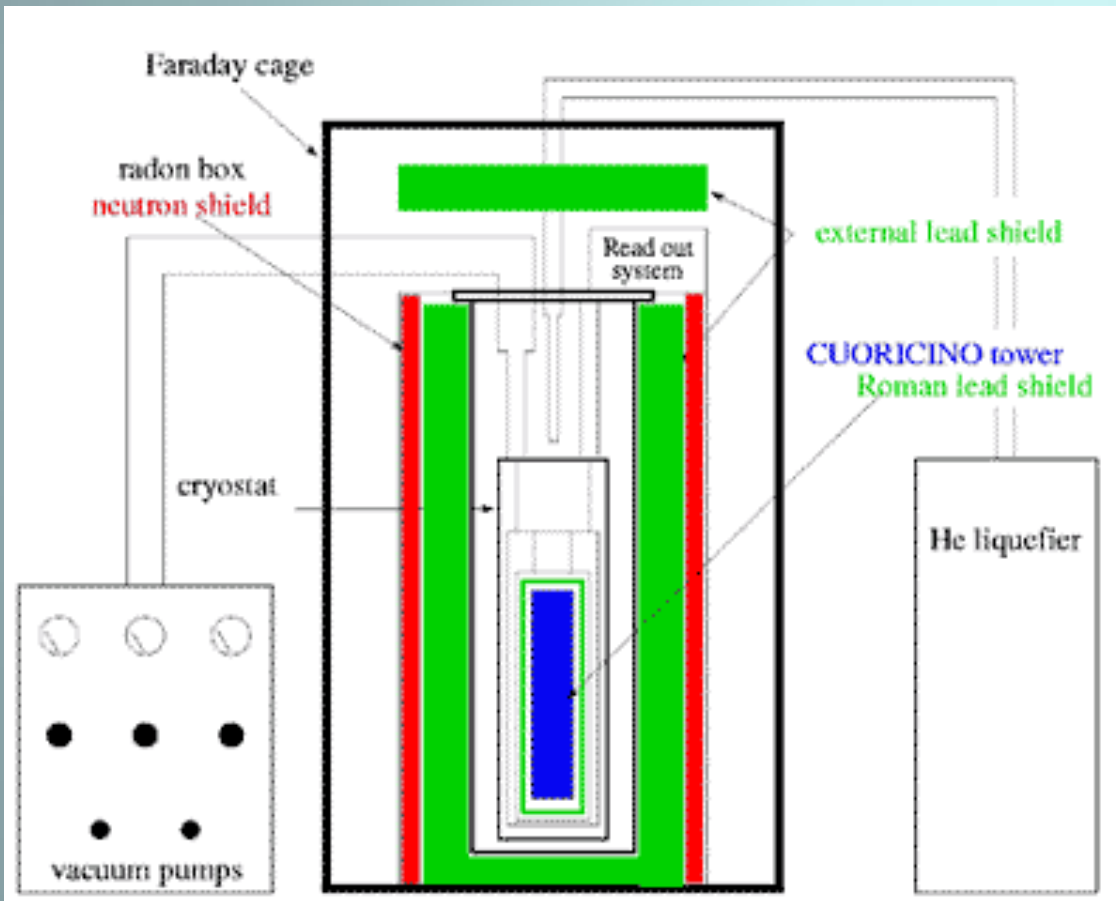
- Struttura di 13 piani per un totale di 62 cristalli di TeO_2
- 11 moduli da 4 cristalli $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ per 790 g, 2 moduli da 9 cristalli $3 \times 3 \times 6 \text{ cm}^3$ per 330 g
- $M = 41,7 \text{ kg}$
- $M_{\text{Te}} = 11 \text{ kg}$
- $T = 10 \text{ mK}$
- $b = 0.2 \text{ counts/kev/kg/y}$
- $\tau_{1/2}^{0\nu} > 4.7 \cdot 10^{24} \text{ y @68\% CL}$
- $\tau_{1/2}^{0\nu} > 2.8 \cdot 10^{24} \text{ y @90\% CL}$



Schermaggio

Fondo eliminabile = Radioattività, muoni μ , neutroni n
Fondo non eliminabile = $2\beta 2\nu$

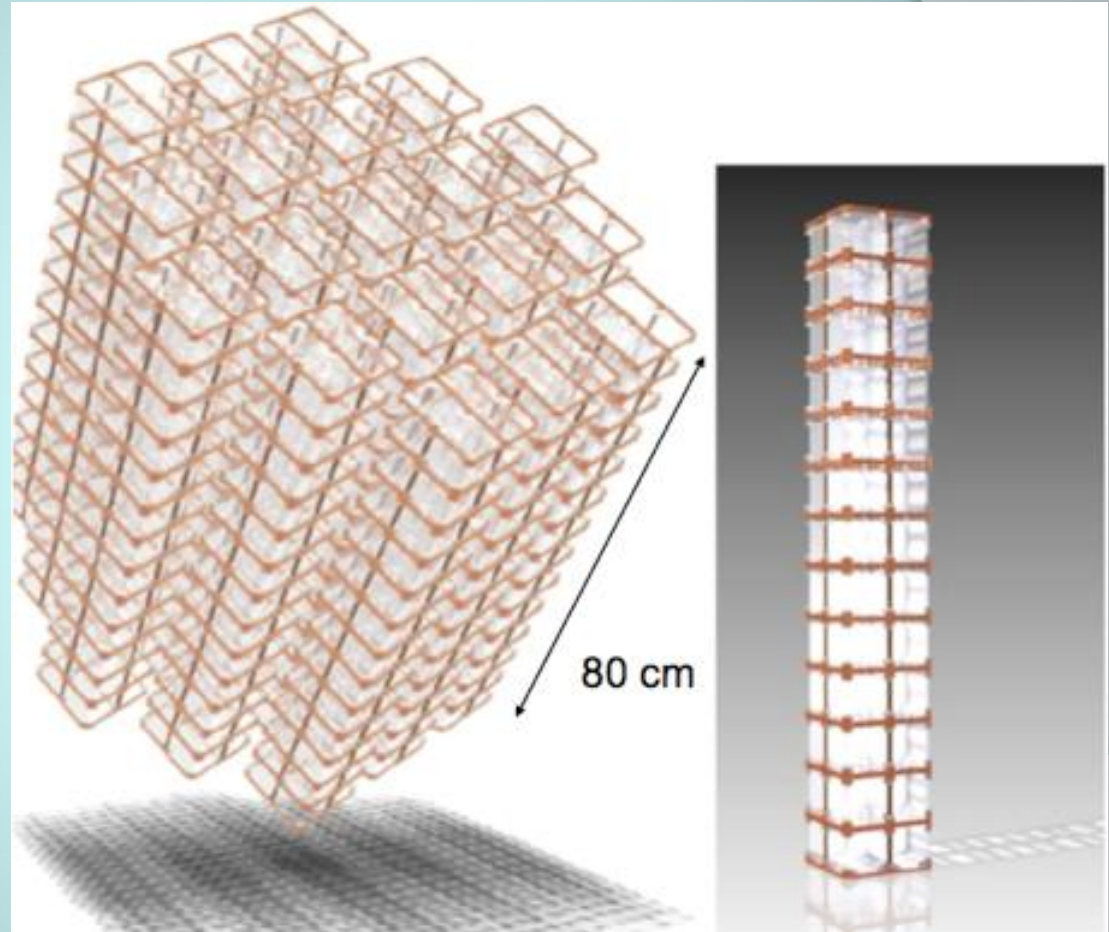
$$\begin{cases} \mu = 3 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \\ n = 10^{-8} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \end{cases}$$



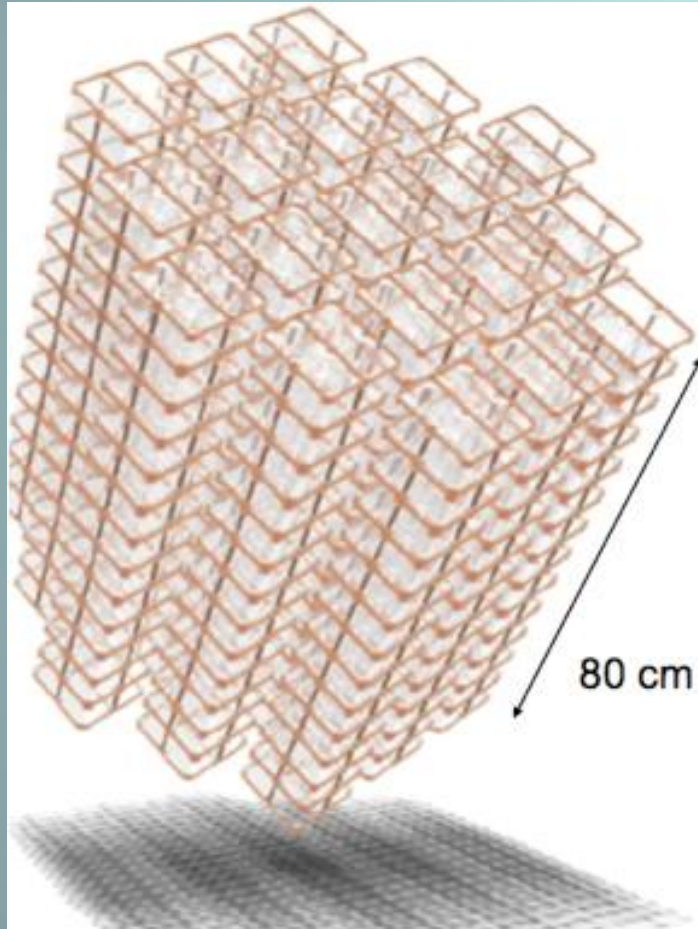
- gabbia di Faraday
- schermo per ridurre il flusso di neutroni in PET Borato
- 2 schermi in piombo (Pb) dove quello più interno di Pb romano
- flusso di azoto (N) per ridurre il Radon (Rd)
- sistema di dumping evita frizioni meccaniche tra le componenti

CUORE

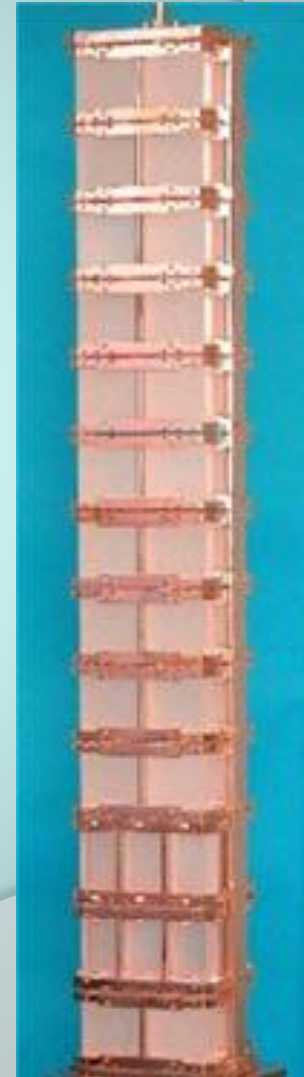
- Upgrade di Cuoricino
- 988 cristalli di TeO_2 in 19 torri da 52 cristalli ognuna
- Cristalli $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ per 750 g
- $M = 741 \text{ kg}$
- $M_{\text{Te}} = 206 \text{ kg}$
- $T = 10 \text{ mK}$
- $b = 0.01 \text{ counts/kev/kg/y}$
- $\tau_{1/2}^{0\nu} > 1.6 \cdot 10^{26} \text{ y @68\%CL}$
- $\tau_{1/2}^{0\nu} > 9.5 \cdot 10^{25} \text{ y @90\%CL}$



Confronto Cuore-Cuoricino



- $S_{\text{CUORE}} \sim 35 S_{\text{cuoricino}}$
- $M = 20 m$
- $t = 2 t$
- $b = b / 20$
- $\Delta E = \Delta E / 1.5$
- $\langle m_{\beta\beta} \rangle_{\text{CUORE}} = (41 - 95) \text{ meV}$



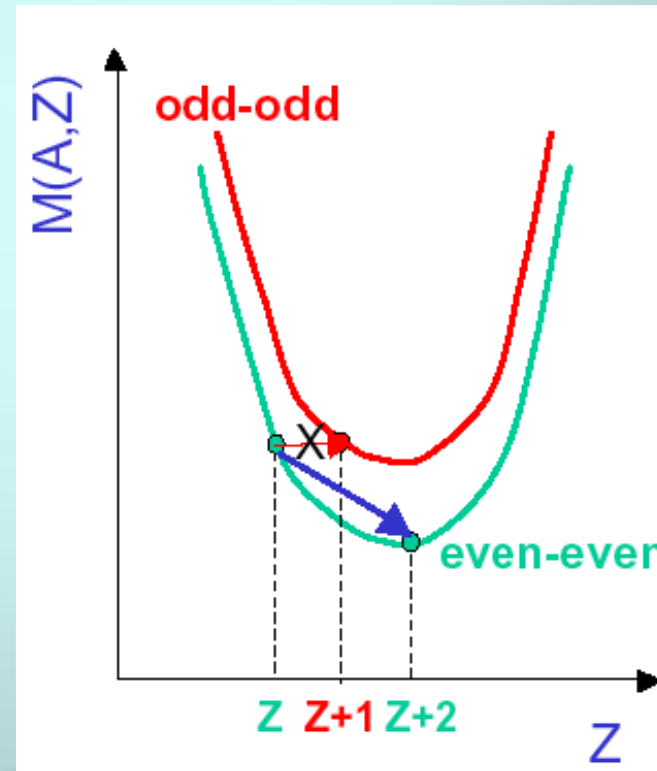
Appendice

- Energia di legame nucleare
- Sensitività
- Sensitività e massa
- Massa del neutrino
- Catene di decadimento principali
- Risoluzione energetica

Energia di legame nucleare

$$E_B = aA - bA^{2/3} - c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - d \frac{(A-2Z)^2}{A} \pm \frac{e}{A^{3/4}}$$

- I° termine di volume
- II° termine di superficie
- III° termine elettrostatico
- IV° termine di asimmetria
- V° termine di pairing



Sensibilità

• Decadimento $N(t) = N_0 e^{-t/\tau}$

• Emivita $\tau_{1/2} = \tau \ln(2) = t \ln(2) \frac{N_0}{N_D}$

↑
tempo di
osservazione

Nuclei decaduti N_D
Fluttuazione degli eventi del fondo
 N_B poissoniana in una finestra ΔE
con n livello di confidenza

$$N_D = n(N_B)^{1/2}$$

$$N_B = b M t \Delta E$$

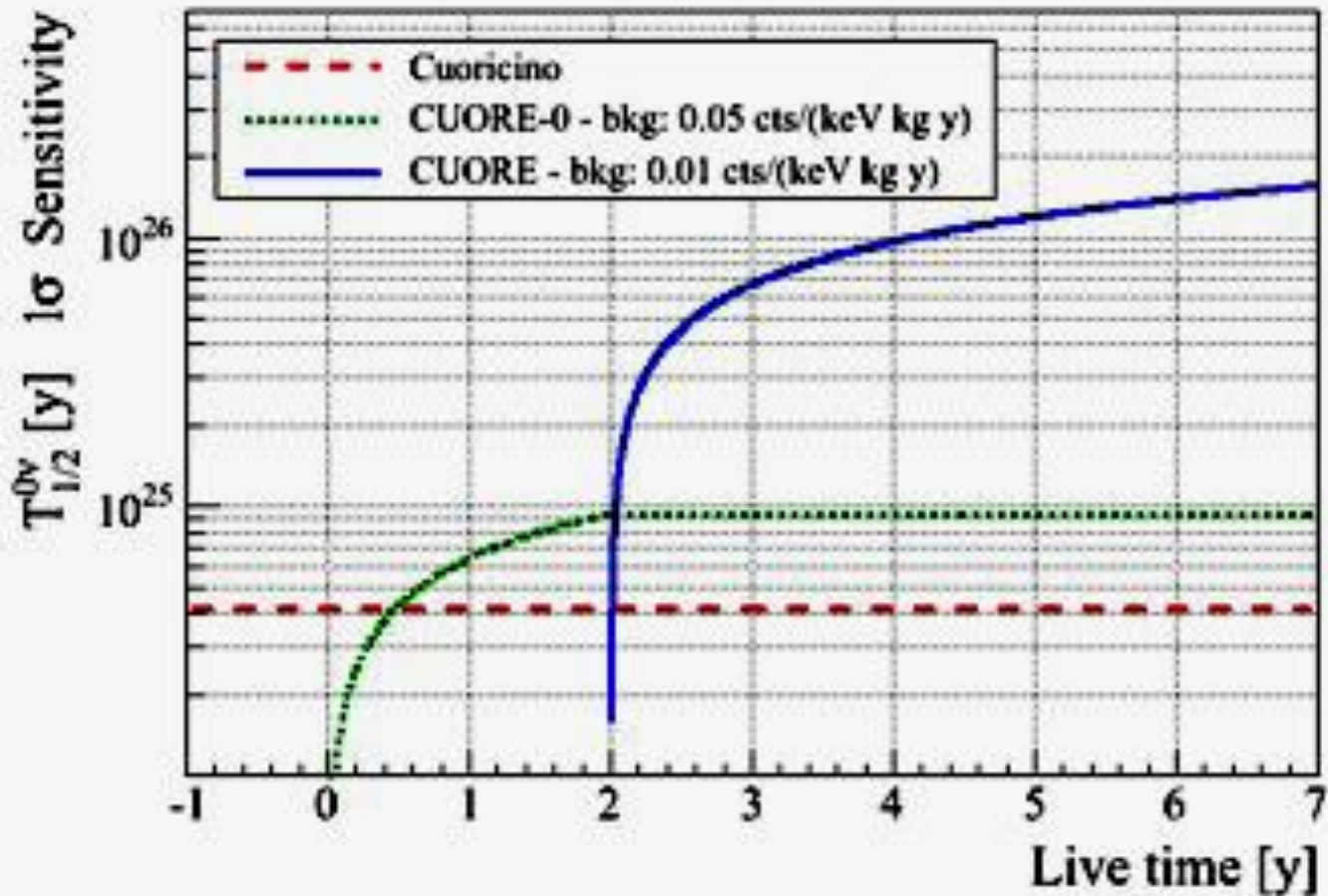
$$N_0 = \frac{N_A a}{A} \varepsilon$$

\Rightarrow

$$S_{no}^{0\nu} = \ln 2 \frac{N_A a}{n A} \sqrt{\frac{t M}{b \Delta E}} \varepsilon$$

Emivita corrispondente al numero massimo di eventi che possono essere nascosti dalle fluttuazioni del fondo a n sigma

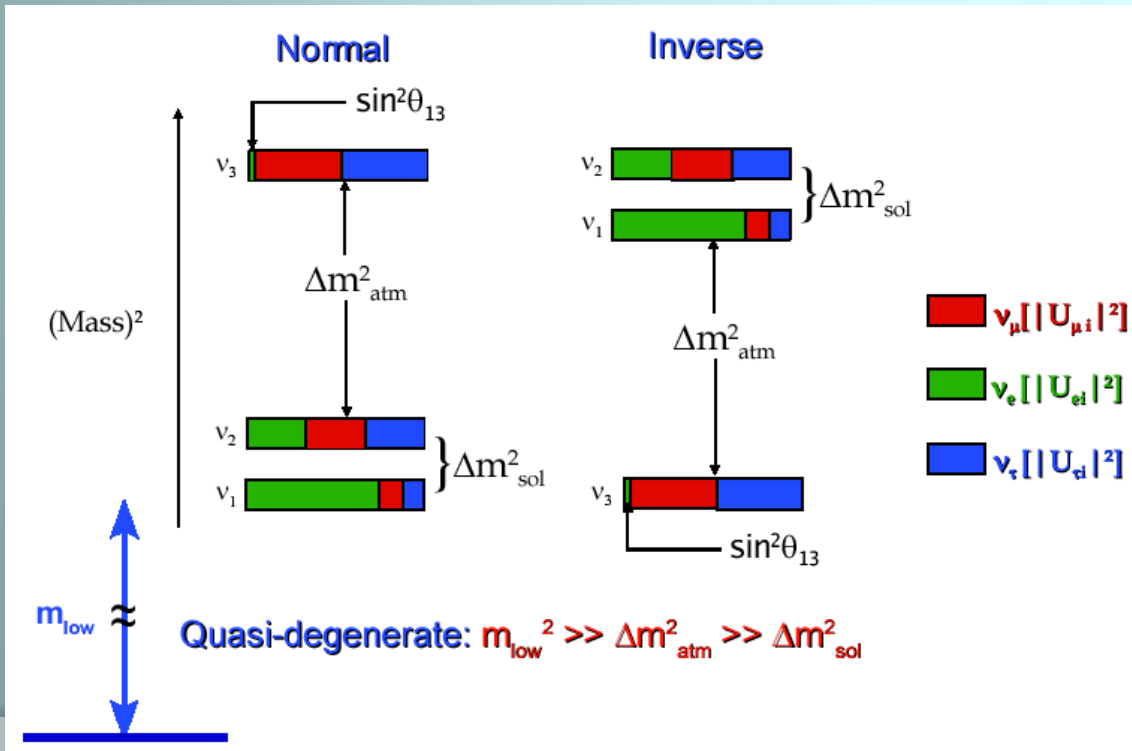
$$m_{\beta\beta} \propto \sqrt{1/\tau}$$



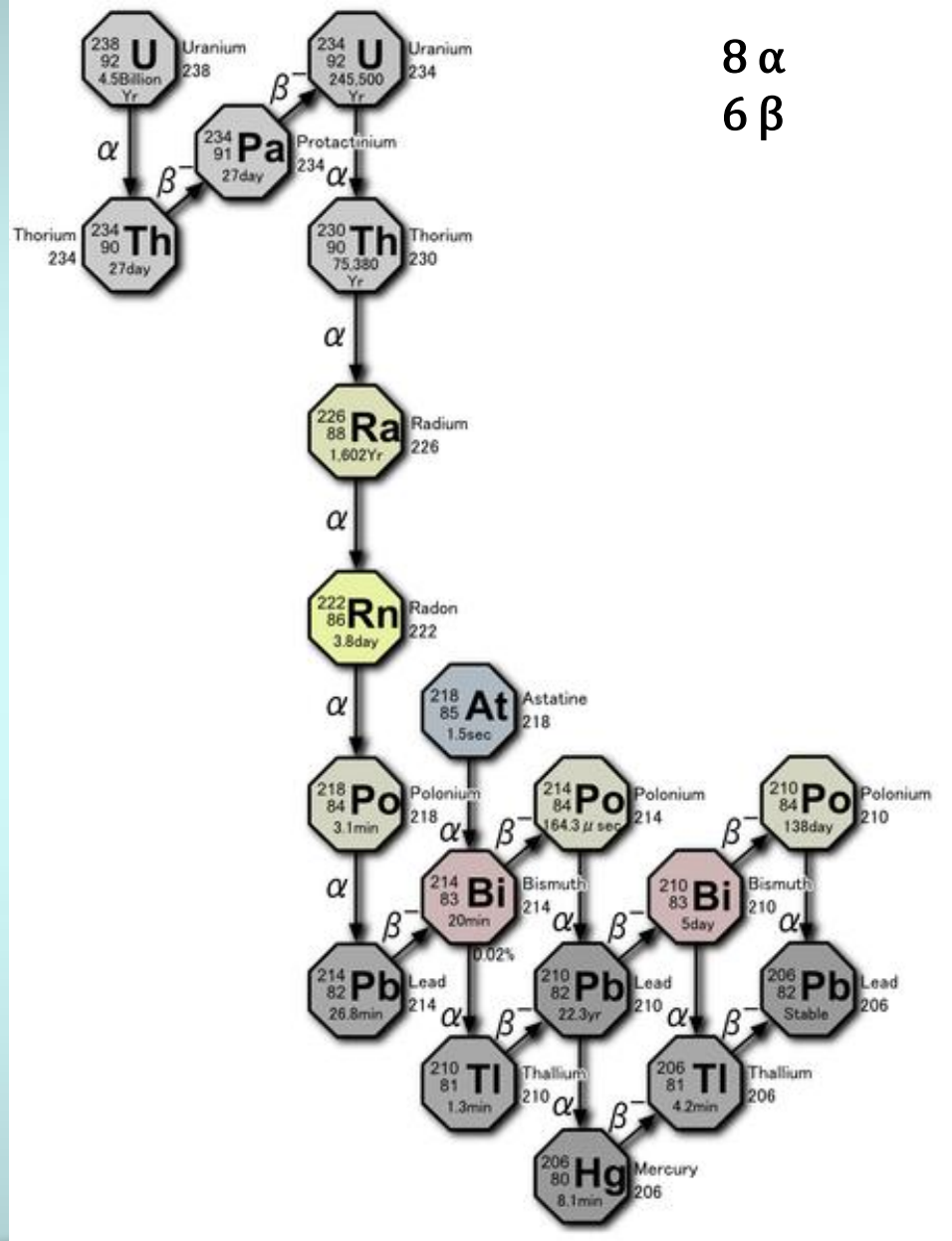
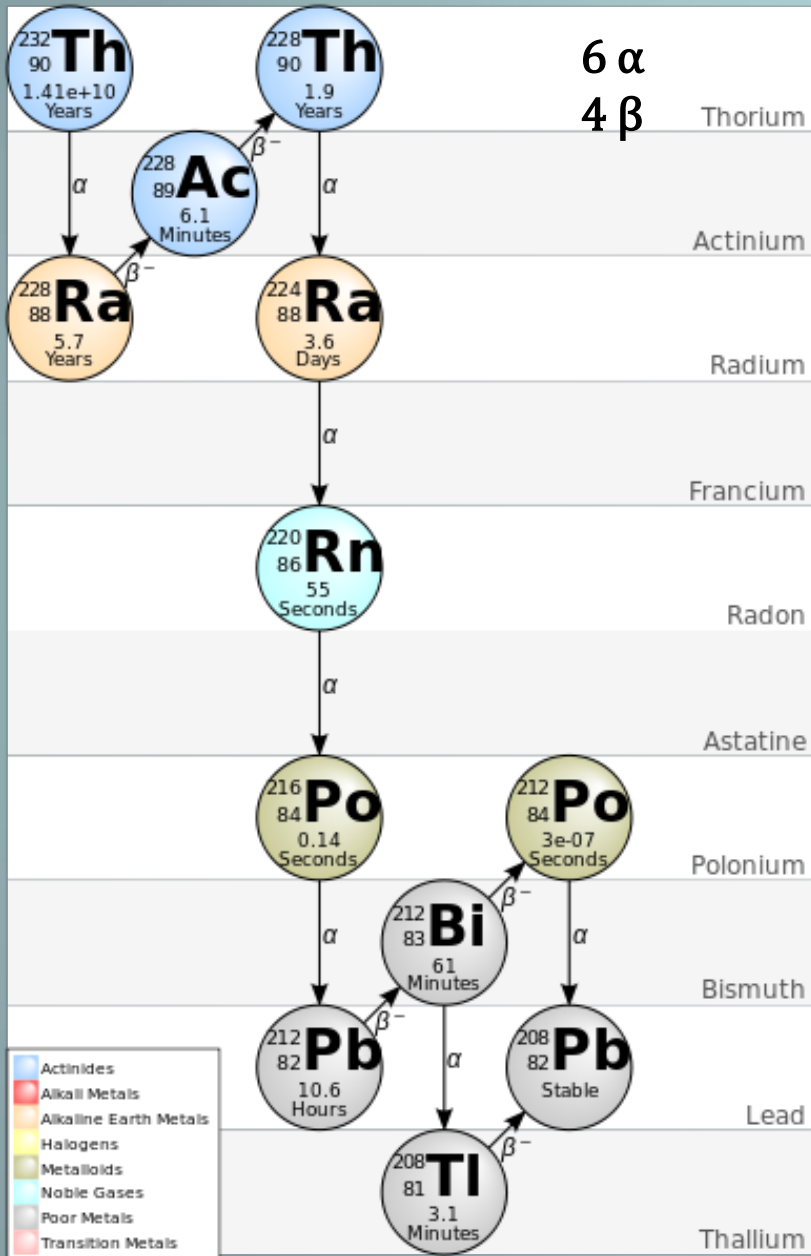
Massa del neutrino

Matrice di mixing PMNS (Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata)

$$U = \begin{matrix} & \text{Atmospheric} & & \text{Cross-Mixing} & & \text{Solar} \\ \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$



Gerarchie degli autostati di massa del neutrino



Risoluzione

Rilascio di energia = eccitazione di modi vibrazionali $N = \frac{E}{E_Q}$

$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1}{(N)^{1/2}} \Rightarrow$ La risoluzione dipenderà dall'energia fornita per eccitare un portatore di carica nel reticolo

Fononi Termici $E_Q = K_B T$

Energia nel Cristallo $E = C(T) T \Rightarrow \Delta E_b = [K_B C(T) T^2]^{1/2}$

EX

$T = 295 \text{ K}$

$\Delta E_b \sim \text{GeV}$

non buona!!!

$T = 10 \text{ mK}$

$\Delta E_b \sim \text{eV}$

$\Delta E_Q \sim \text{meV}$ per $E_Q \sim \text{KeV}$

\Rightarrow La risoluzione non dipende dall'energia della particella incidente