



Cuoricino:

Decadimento doppio β

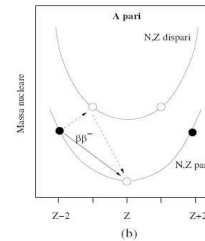
Sara Ridolfi

Outline

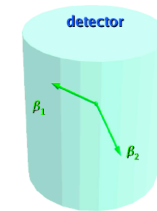
✓ Cosa sappiamo dei neutrini e cosa stiamo cercando di scoprire

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

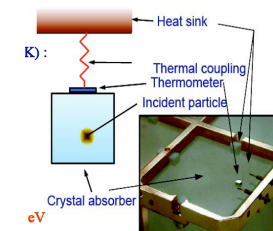
✓ Che cosa è il decadimento $\beta\beta$



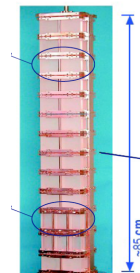
✓ Come possiamo studiare il decadimento $\beta\beta$



✓ Che cosa è un bolometro e perché è stata scelta questa strada

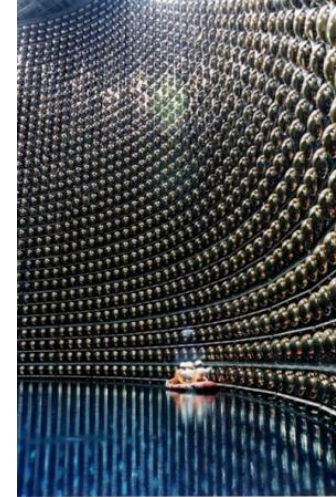


✓ Il rivelatore Cuoricino



1997

la collaborazione SK ottiene evidenze sperimentali dell'oscillazione dei neutrini.



L'oscillazione dei neutrini può essere spiegata solo assumendo che i neutrini siano particelle con massa.

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



↑
AUTOSTATI DELLE
INTERAZIONI DEBOLI

↑
AUTOSTATI DI MASSA

Il modello standard deve essere rivisto per tener conto della massa dei neutrini

I neutrini

I neutrini

Il neutrino è un leptone.

Ci sono tre diversi neutrini.

$$m_\nu = ?$$

Non possiedono carica di colore

Sono elettricamente neutri

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Possono interagire solo debolmente

Allora come posso distinguere un neutrino dalla sua antiparticella?

Se $m_\nu = 0$ Elicità $H = \frac{\vec{\sigma} \cdot \vec{p}}{|\vec{\sigma}| \cdot |\vec{p}|}$

Sperimentalmente si osserva che:

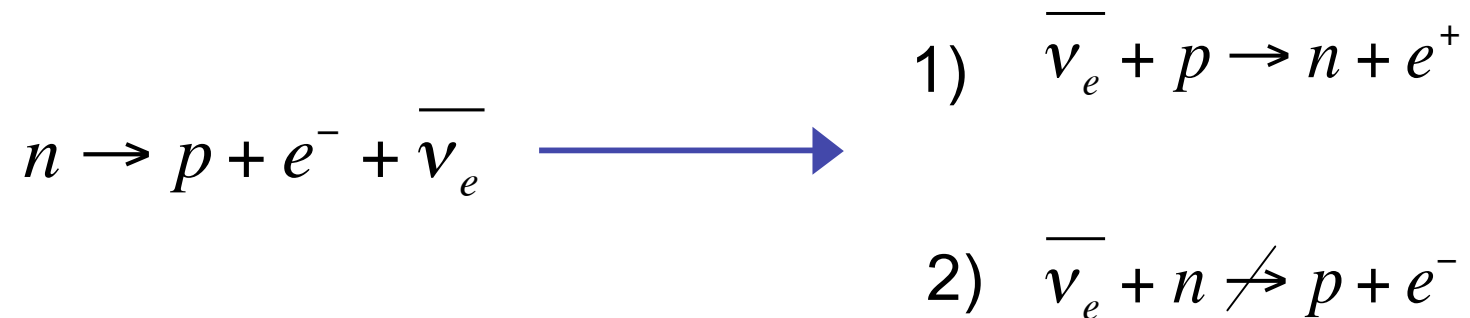
$$H(\nu) = -1 \quad H(\bar{\nu}) = 1$$

Ogni neutrino può essere distinto dal corrispondente antineutrino tramite l'elicità.

Ma i neutrini hanno massa! L'elicità non li distingue più!

I neutrini

Sperimentalmente si osserva:



Viene introdotto il numero leptonico:

$$L(\nu_l, l^{-}) = -1 \quad L(\bar{\nu}_l, l^{+}) = +1$$

Nel modello standard neutrino e antineutrino sono distinguibili per il numero leptonico.

In realtà il secondo processo potrebbe solo essere soppresso rispetto al primo e il numero leptonico non essere conservato.

Neutrini di Dirac e neutrini di Majorana

Per giustificare la massa del neutrino viene introdotto nella Lagrangiana di interazione un termine di massa di Dirac, e un termine di massa di Majorana della forma:

$$L^{D+M} = m_D (\overline{\nu}_R \nu_L + \overline{\nu}_L \nu_R) + m_L (\overline{\nu}_L^c \nu_L + \overline{\nu}_L \nu_L^c) + m_R (\overline{\nu}_R^c \nu_R + \overline{\nu}_R \nu_R^c)$$



- Per capire se il neutrino è una particella di Dirac o di Majorana consideriamo la condizione di Majorana: $\psi = \psi^c$

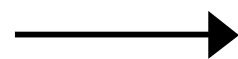
particella di Dirac $\nu \neq \overline{\nu}$

Coniugazione di carica

particella di Majorana $\nu = \overline{\nu} \longrightarrow$

La condizione di Majorana viola la conservazione del numero leptonico!

$$L(\nu) = L(\overline{\nu})$$



Bisogna quindi ricercare un processo che implichi la non conservazione del numero leptonico. Per esempio il decadimento $0\nu\beta\beta$

Doppio decadimento β

Decadimento β

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

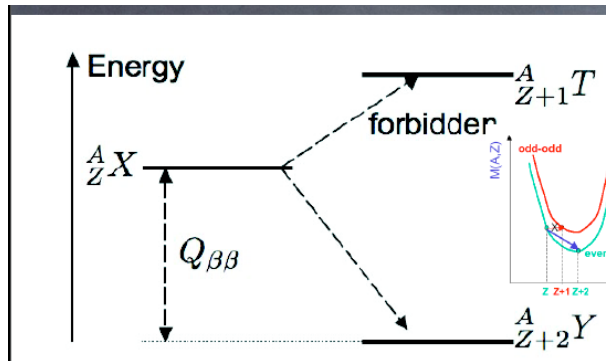
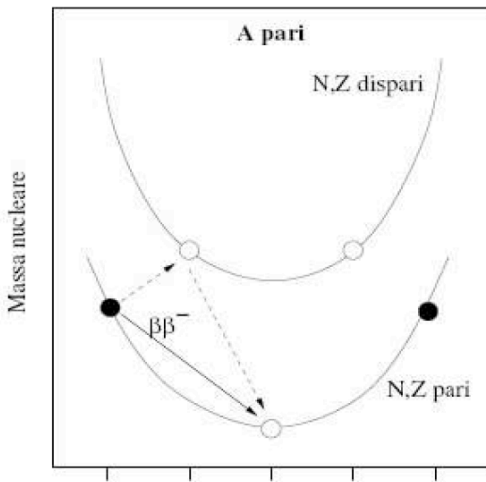
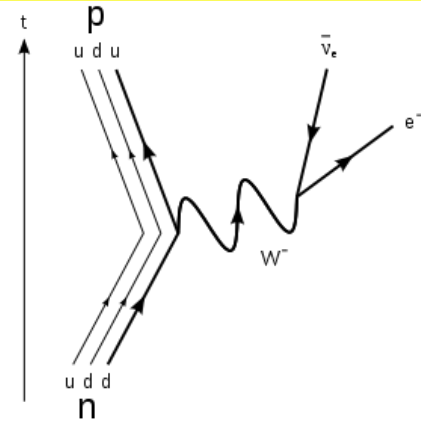
Decadimento $\beta\beta$

$$2n \rightarrow 2p + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$$

Permesso dal SM

$$2n \rightarrow 2p + 2e^-$$

Non permesso dal SM



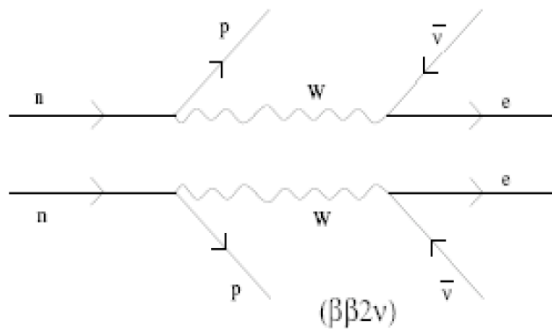
^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd

Doppio decadimento β

Può avvenire attraverso due canali principali:

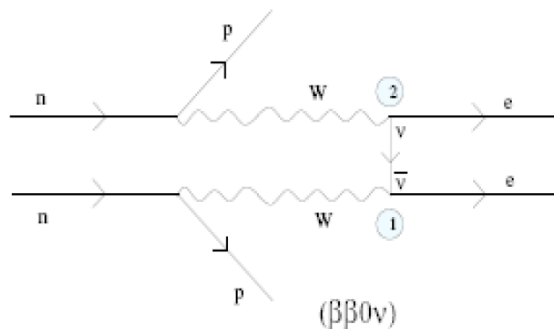
$$2\nu\text{DBD}: (A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e$$

Segnatura
sperimentale:
spettro continuo



Ci sono evidenze sperimentali di questo decadimento nel ^{82}Se fin dal 1986.

$$0\nu\text{DBD}: (A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$$

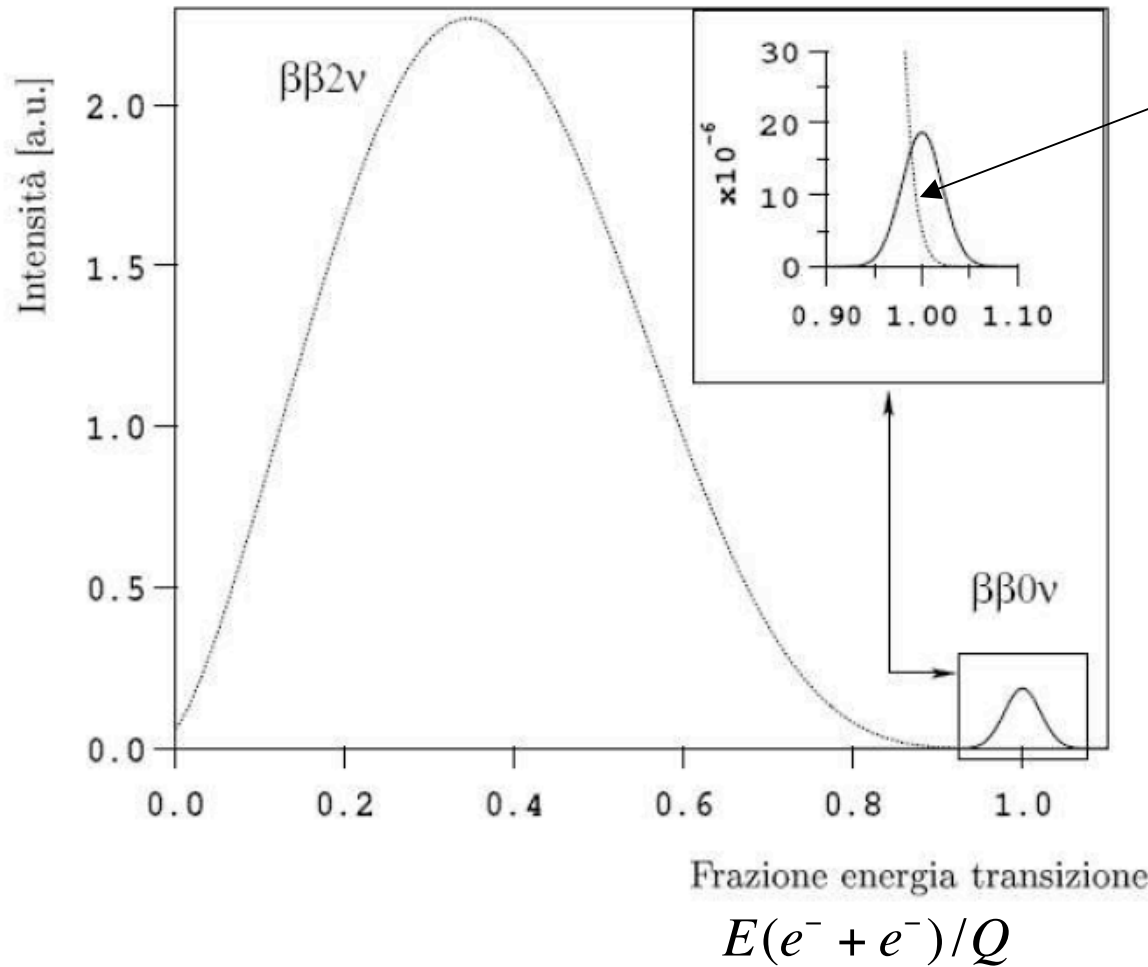


Viola il numero leptonico

$$\Delta L = 2$$

Segnatura sperimentale: lo spettro è una riga monocromatica pari alla differenza di massa tra i due nuclei

Doppio decadimento β



Fondo non eliminabile
dovuto al $\beta\beta_{2\nu}$

$$\tau^{\beta\beta_{2\nu}} \approx 10^{20} \text{ y}$$

$$\tau^{\beta\beta_{0\nu}} \approx 10^{25} \text{ y}$$

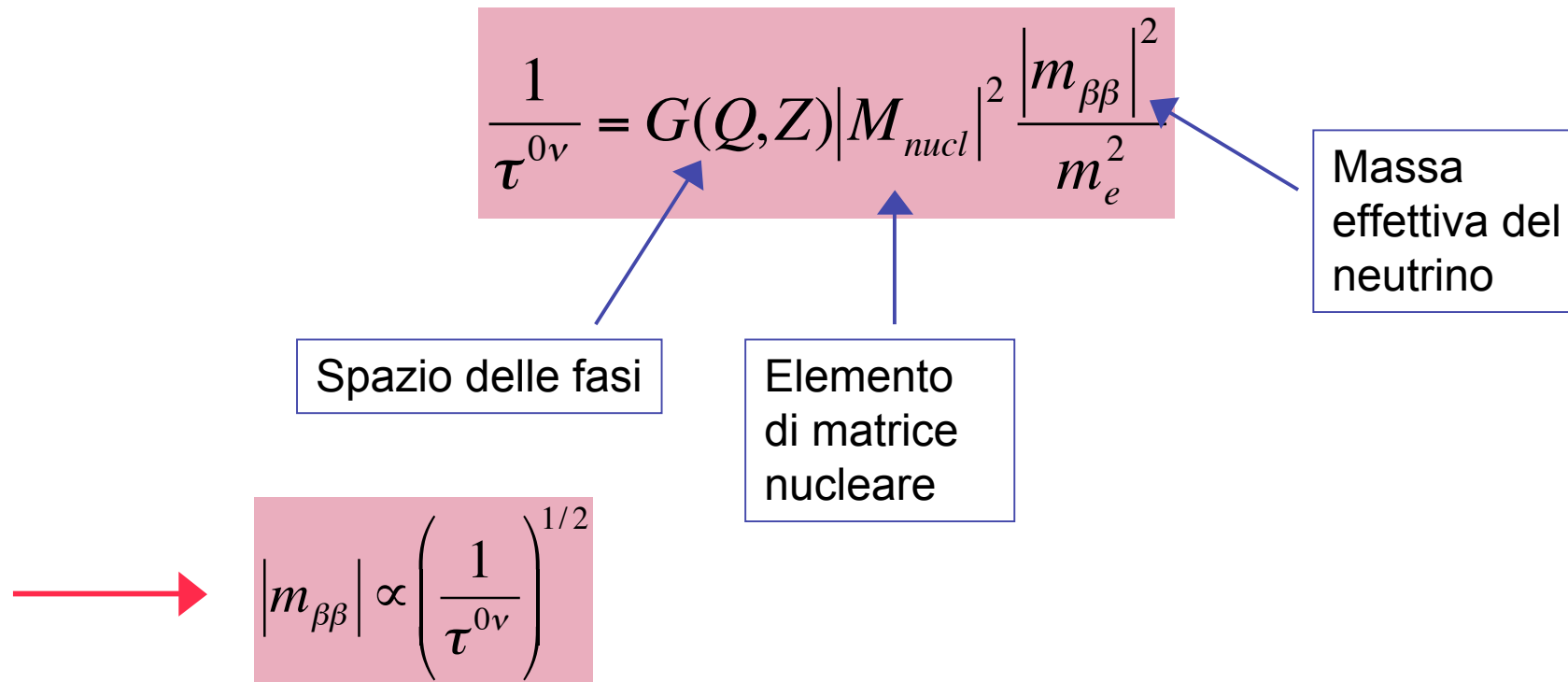
$$\frac{\tau^{\beta\beta_{2\nu}}}{\tau^{\beta\beta_{0\nu}}} \approx 10^5$$

$$\frac{N^{\beta\beta_{2\nu}}}{N^{\beta\beta_{0\nu}}} \approx \frac{\Delta E}{Q^5}$$

Per cuoricino:
 $\Delta E = 5 \text{ KeV}$
 $Q = 2530 \text{ KeV}$

La massa del neutrino

Una misura della vita media del decadimento ci dà informazioni sulla massa sei neutrini:



$$m_{\beta\beta} = \sum m_{\nu_k} U_{ek}^2 = \cos^2 \theta_{13} (m_1 \cos^2 \theta_{12} + m_2 e^{2i\alpha} \sin^2 \theta_{12}) + m_3 e^{2i\beta} \sin^2 \theta_{13}$$

La ricerca del decadimento

$N_{\beta\beta} \rightarrow$ numero di eventi da $0\nu\beta\beta$

$B \rightarrow$ numero di eventi dai fondo

Si può dire di aver osservato un decadimento se $N_{\beta\beta} > n \cdot \sqrt{B}$

$$N_{\beta\beta} = \lambda_{\beta\beta} N t \varepsilon$$

$\lambda_{\beta\beta} \rightarrow$ probabilità del decadimento (= $1/\tau$)
 $t \rightarrow$ tempo vivo di misura

$\varepsilon \rightarrow$ efficienza

$N \rightarrow$ numero di atomi candidati

Livello di
confidenza in σ

Nel caso in cui: $N_{\beta\beta} < n \cdot \sqrt{B} \longrightarrow \lambda_{\beta\beta} N t \varepsilon < n \cdot \sqrt{B}$

Abbondanza
isotopica

Massa totale
dell'isotopo

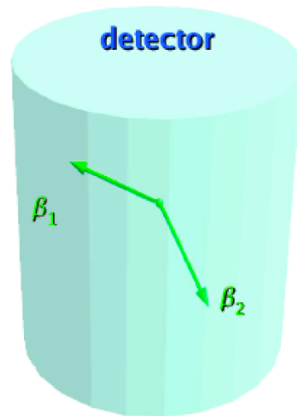
$$\tau_{1/2}^{0\nu} > \frac{\log 2 \cdot N_A \cdot \varepsilon \cdot \eta}{n \cdot m} \sqrt{\frac{M \cdot t}{b \cdot \Delta E}}$$

Massa molare

Bkgr nella
regione del
picco
(c/KeV/Kg/y)

Approccio sperimentale

sorgente = rivelatore



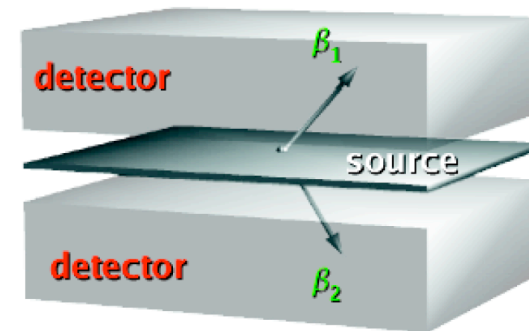
PRO

- 1) Grande massa
- 2) Buona ΔE
(0,2-0,3)%

CONTRO

- 1) Cattivo bkgd

sorgente \neq rivelatore



PRO

- 1) Differenti isotopi
- 2) Buon bkgd

CONTRO

- 1) piccola massa
(fogli di 10-40 mg/cm²)
- 2) Cattiva ΔE (15-30)%

Cuoricino: il metodo bolometrico

Energia rilasciata

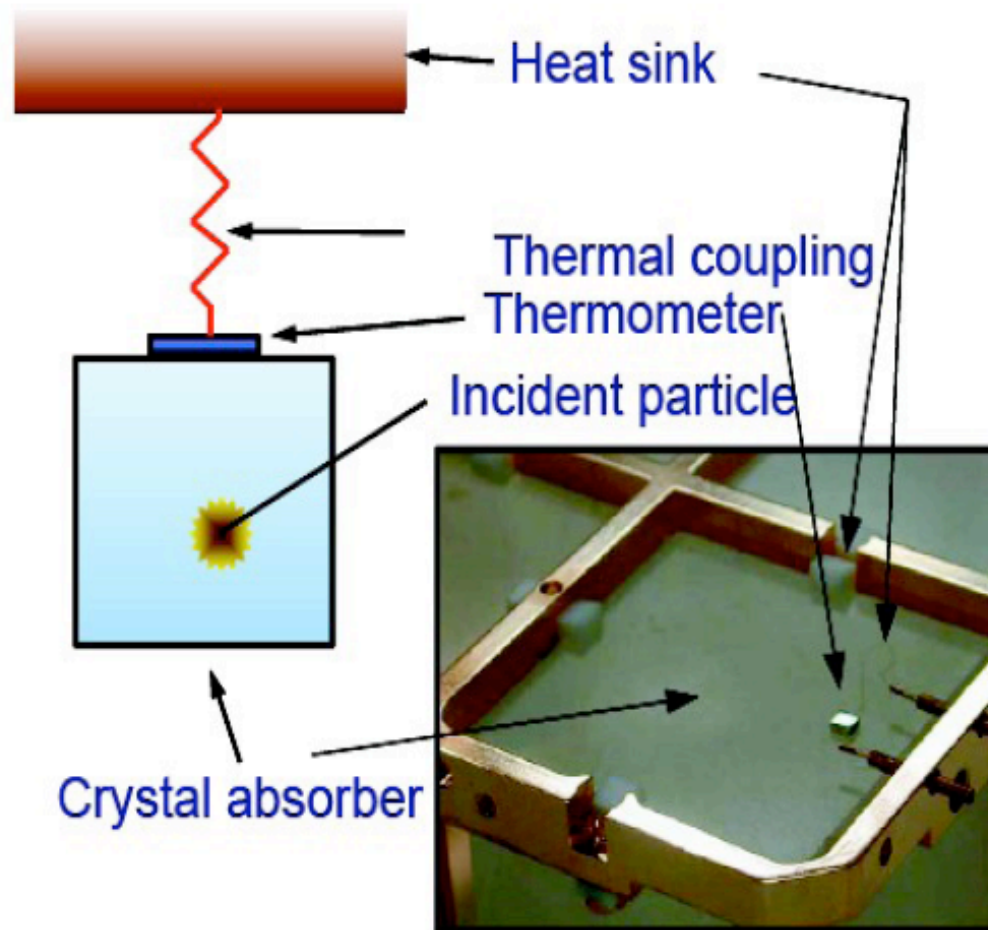


Variazione di temperatura



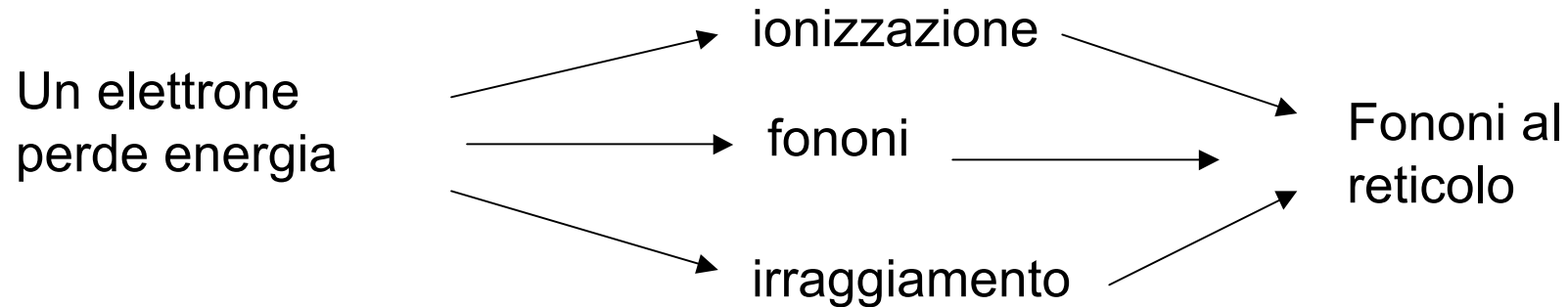
Variazione di tensione ai capi di una resistenza

TERMISTORE



$$\Delta E \rightarrow \Delta T \rightarrow \Delta V$$

Perché un bolometro?



Esempi:

1) Rivelatori a semiconduttore → 30% ionizzazione

2) Scintillatori → 15% luce di scintillazione

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

$$N = \frac{E}{\varepsilon} = \frac{C(T) \cdot T}{k_B \cdot T} = \frac{C(T)}{k_B}$$

Numero di portatori

E = energia rilasciata

ε = energia necessaria alla produzione di un quanto

Perché un bolometro?

In un bolometro a bassa temperatura

$$\varepsilon_{\text{fononi}} < \varepsilon_{\text{fotoni}}$$

Abbattimento
della soglia di
rivelazione

Miglioramento
della risoluzione

$$\Delta E = \frac{E}{\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{E \cdot E}{N}} = \sqrt{\frac{E \cdot E \cdot k_B}{C(t)}} = \sqrt{k_B \cdot C(T) \cdot T^2}$$

- Per avere una buona risoluzione sono dunque necessari:
- 1) basse temperature di lavoro
- 2) piccole capacità termiche
- 3) termometri molto sensibili
- 4) minimizzazione delle varie fonti di rumore

Caratteristiche dell'assorbitore

1) Deve contenere isotopi candidati al decadimento $0\nu\beta\beta$

2) Deve avere una piccola capacità termica:

$$C(T) = \beta \frac{m}{M} \left(\frac{T}{\theta_D} \right)^3 \longrightarrow \text{alta temperatura di Debye}$$

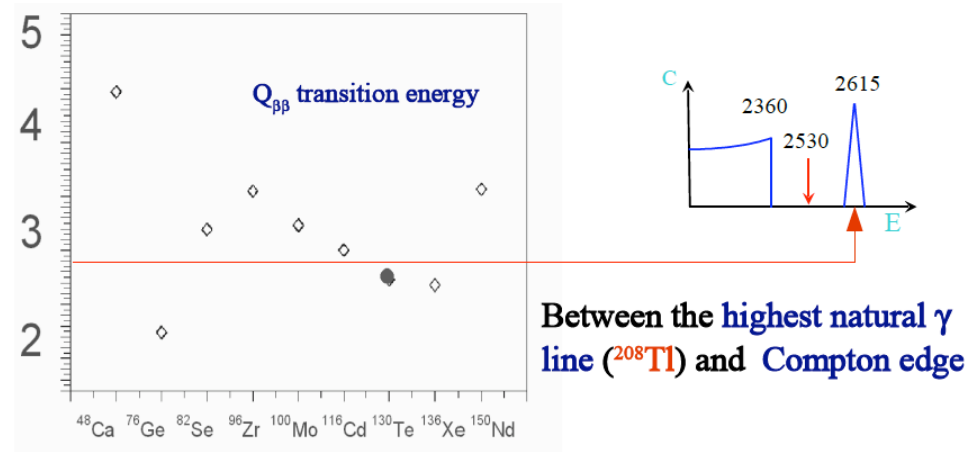
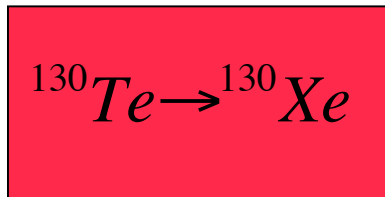
3) Deve avere una grande abbondanza isotopica naturale

4) Il Q value deve essere molto alto (per avere un ampio spazio delle fasi) ma non deve cadere in zone dello spettro di energia caratterizzate da altri decadimenti.

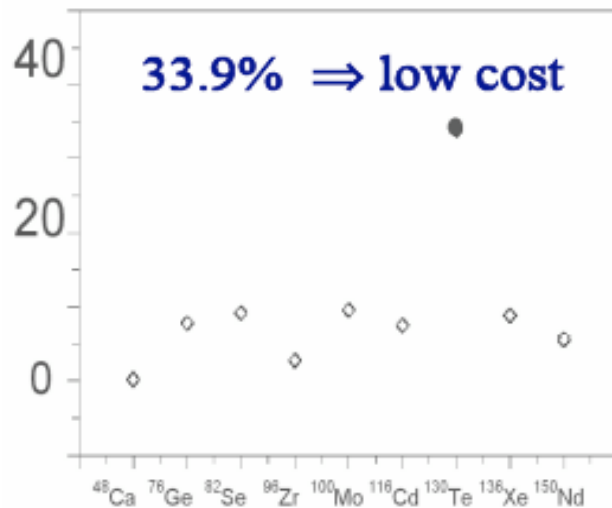
5) Deve avere una buona purezza intrinseca in modo da minimizzare la probabilità di avere altri decadimenti al suo interno.

6) l'elemento di matrice nucleare della transizione deve essere massimo.

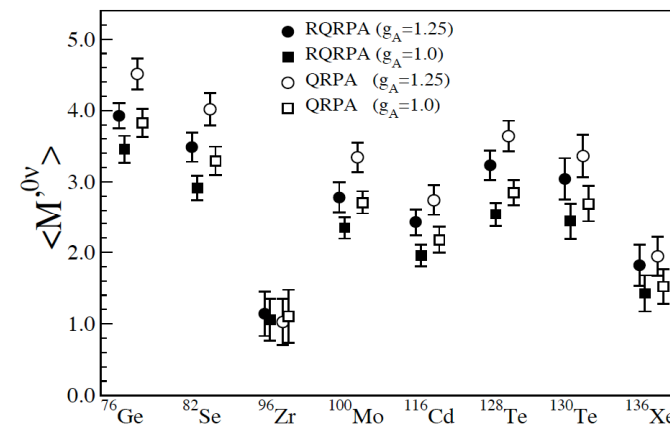
La scelta del Tellurio



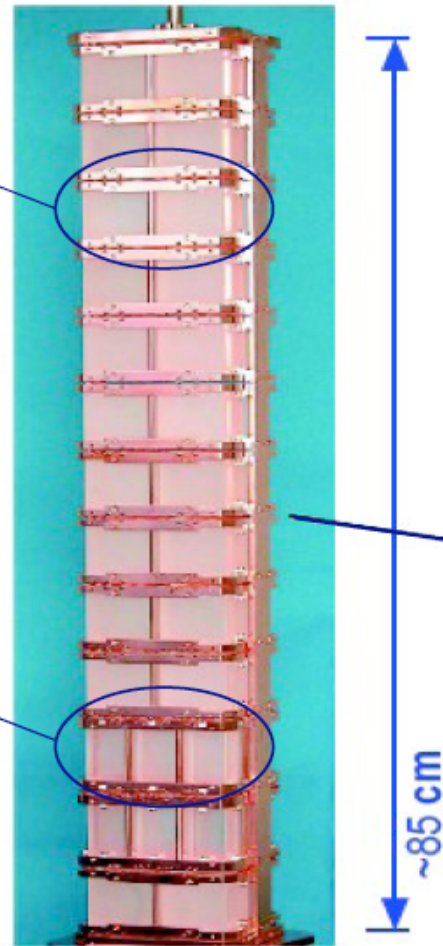
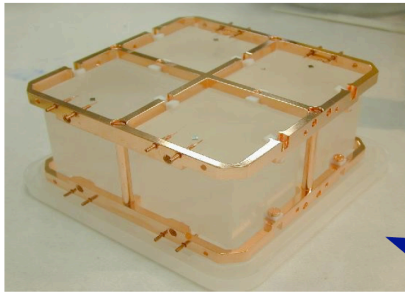
Abbondanza naturale



Elemento di matrice



Cuoricino



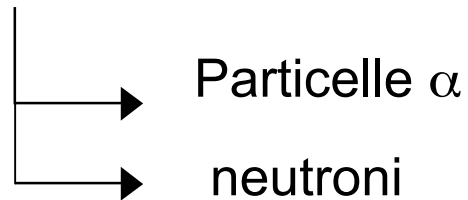
- È una torre di 13 piani.
- Ogni piano contiene 4 cristalli che misurano $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$
- L'undicesimo è il dodicesimo piano sono composti da 9 cristalli ciascuno $3 \times 3 \times 3 \text{ cm}^3$

TeO_2 → 40.7 kg
→ 11.6 kg
 ^{130}Te → 5×10^{25} nuclei candidati

Il fondo radioattivo

- Fondo delle contaminazioni interne
- Fondo delle contaminazioni superficiali e esterne →

Molto superiore



Laboratori Nazionali del Gran Sasso

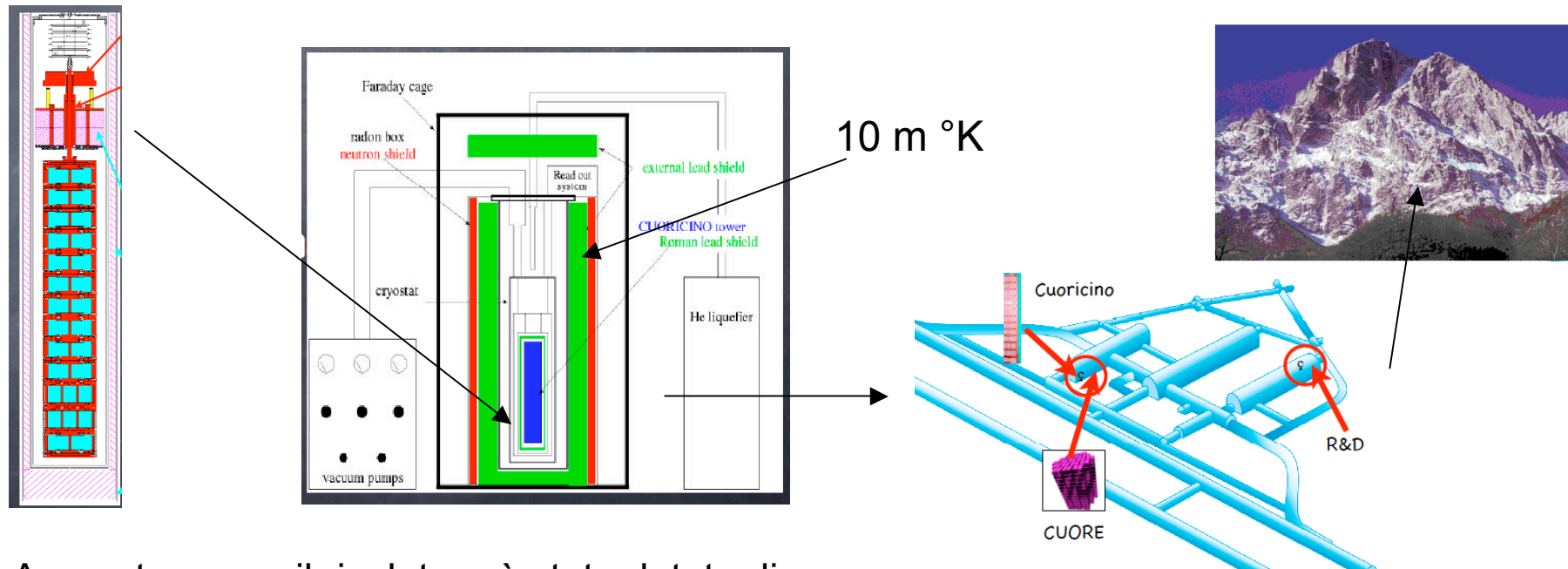


La montagna fornisce uno schermo di 3500 m di roccia come protezione dai raggi cosmici

$$\text{flusso } \mu \rightarrow 3 \cdot 10^{-8} /(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$$

$$\text{flusso } n \rightarrow 10^{-6} /(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$$

Cuoricino



A questo scopo il rivelatore è stato dotato di:

- 1) Schermo al piombo romano (1 cm)
- 2) Schermo a neutroni :PET borato (10 cm)
- 3) Flusso di azoto: per eliminare i contributi del Radon (nella catena di decadimento dell'Uranio)
- 4) Gabbia di Faraday, per evitare disturbi elettromagnetici
- 5) Sistema "dumping": per eliminare contributi vibrazionali

In Cuoricino il fondo medio nella regione del decadimento $0\nu\beta\beta$ è pari a:

$$0.18 \pm 0.01 \text{ count/keV/Kg/y}$$

Risultati ottenuti

- La collaborazione Cuoricino ha preso dati dal Gennaio 2003 fino al Giugno 2008.
- Per un totale di circa 2 anni e mezzo di tempo effettivo della misura divisi in due diversi RUN a causa del danneggiamento del bolometro.
- Ha operato per una corrispondente esposizione di $5.47 \times 10^{25} \text{y}$ senza osservazione di eventi da $0\nu\beta\beta$.
- Si è ottenuto il seguente risultato:

$$\tau_{1/2}^{0\nu}({}^{130}\text{Te}) \geq 3.0 \times 10^{24} \text{y} \quad (90\% \text{C.L.})$$

$$\longrightarrow m_{\beta\beta} < (0.19 - 0.68) \text{eV}$$