

STATO E SVILUPPO SULLO STUDIO DI MODI DI DECADIMENTO $\beta\beta$ IN ^{106}Cd E ^{116}Cd

Barabash A.S., Belli P., Bernabei R., Brudanin V.B., Cappella F.,
Caracciolo V., Cerulli R., Chernyak D.M., Danevich F.A., d'Angelo S.,
Inicchitti A., Kobychhev V.V., Konovalov S.I., Laubenstein M., Mokina
V.M., Poda D.V., Polischuk O.G., Shlegel V.N., Tretyak V.I., Tupitsyna
I.A. Umatov V., Vasiliev Ya.V.

SIF, 101^a Congresso Nazionale
Roma, 25 settembre 2015

SOMMARIO

- ▶ Motivazioni
- ▶ Descrizione dell'apparato sperimentale con $^{116}\text{CdWO}_4$
 - ▶ Analisi dati
 - ▶ Risultati
- ▶ Descrizione dell'apparato sperimentale con $^{106}\text{CdWO}_4$
 - ▶ Analisi dati
 - ▶ Risultati
- ▶ Conclusioni

Decadimenti $\beta\beta$: Stato dell'Arte

$2\beta^-$	$2\varepsilon/\varepsilon\beta^+/2\beta^+$
35 nuclei candidati	34 nuclei candidati
Abbondanze isotopiche $\delta \sim (5-10-100)\%$	Tipicamente $\delta < 1\%$ con poche eccezioni
$Q_{2\beta}$ fino a 4.3 MeV	$Q_{2\beta} > 2\text{MeV}$ solo per 6 nuclei
$2\beta 2\nu$ è stato osservato per 11 nuclei (^{48}Ca , ^{76}Ge , ^{82}Se , ^{96}Zr , ^{100}Mo , ^{116}Cd , ^{128}Te , ^{130}Te , ^{136}Xe , ^{150}Nd , ^{238}U) con $T_{1/2} = 10^{18} - 10^{24}$ yr	$2\varepsilon 2\nu$ - ^{130}Ba ? ($T_{1/2} \sim 10^{21}$ yr) - ^{78}Kr ? ($T_{1/2} \sim 10^{22}$ yr)
Sensibilità raggiunte per 0ν fino a 10^{25} anni	Sensibilità raggiunte per 0ν fino a 10^{21} anni

Klapdor et al. published: $2\beta-0\nu$ in ^{76}Ge $T_{1/2} = 2.2 \times 10^{25}$ yr,
GERDA published: limit at given C.L. 2.1×10^{25} yr

$2\varepsilon/\varepsilon\beta^+/2\beta^+$ sono meno studiati ma non meno importanti: informazioni complementari ai decadimenti

Caratteristiche dei decadimenti del ^{116}Cd e ^{106}Cd

- Differenza in massa $Q_{2\beta} = 2813,44(13)$ keV
- Abbondanza isotopica $\delta = 7,49(18)\%$ e possibilità di arricchimento isotopico
- Stime teoriche promettenti per il $T_{1/2}^{0\nu} \sim 10^{26}-10^{27}$ yr.

- Differenza in massa $Q_{2\beta} = 2775,39(10)$ keV (uno di solo 6 nuclei $2\beta^+$)
- Abbondanza isotopica $\delta = 1,25(6)\%$ e possibilità di arricchimento isotopico
- Stime teoriche promettenti per il $T_{1/2}$ di:
 - $2\varepsilon 2\nu \sim 10^{20}-10^{21}$ yr
 - $\varepsilon\beta^+2\nu \sim 10^{21}-10^{22}$ yr
- Possibilità di osservare l'effetto risonante $2\varepsilon 0\nu$ al livello eccitato del ^{106}Pd ($KL_3 0\nu$ $E_{\text{exc}} = 2748.2(4)$ keV)

Esperimenti attuali con il ^{106}Cd e sensibilità raggiunte:

(1) TGV-2: 32 HP-Ge + 16 lastre di ^{106}Cd ($\delta = 75\%$), LSM (Francia)

Limiti per $T_{1/2}$ di vari modi di decadimento: $\sim 10^{20}$ yr [N.I. Rukhadze et al., NPA 852 (2011) 197, BRASP 75 (2011) 879]

(2) COBRA: 32/64 semiconduttori in CdZnTe di 1 cm^3 ognuno, LNGS (Italy)

Limiti per $T_{1/2}$ di vari modi di decadimento: $\sim 10^{18}$ yr

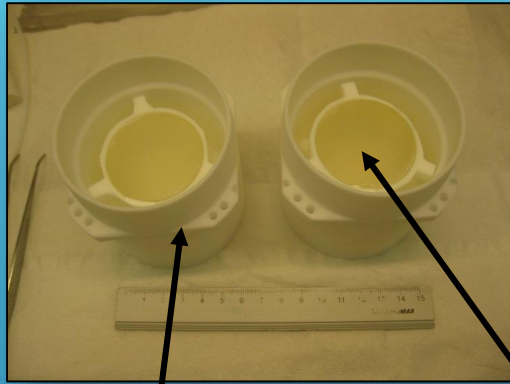
[K. Zuber, Prog. Part. Nucl. Phys. 64 (2010) 267]

(3) Primo stadio delle nostre misure con il cristallo scintillatore $^{106}\text{CdWO}_4$ (senza HPGe), LNGS (Italy)

Limiti per $T_{1/2}$ di vari modi di decadimento: $\sim 10^{20}-10^{21}$ yr (molti tra i migliori limiti)

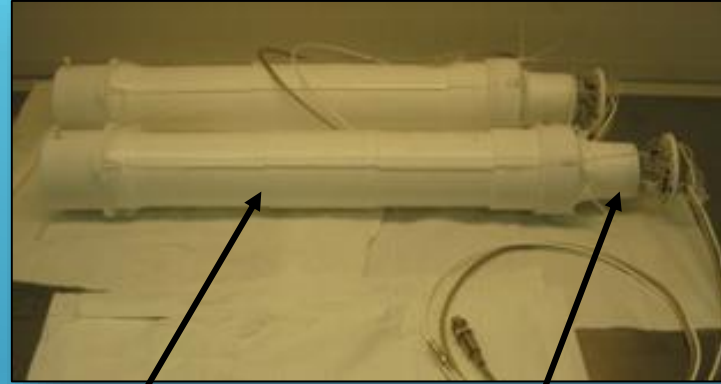
[P. Belli et al., PRC 85 (2012) 044610]

$^{116}\text{CdWO}_4$ (AURORA) - set-up sperimentale: DAMA/R&D



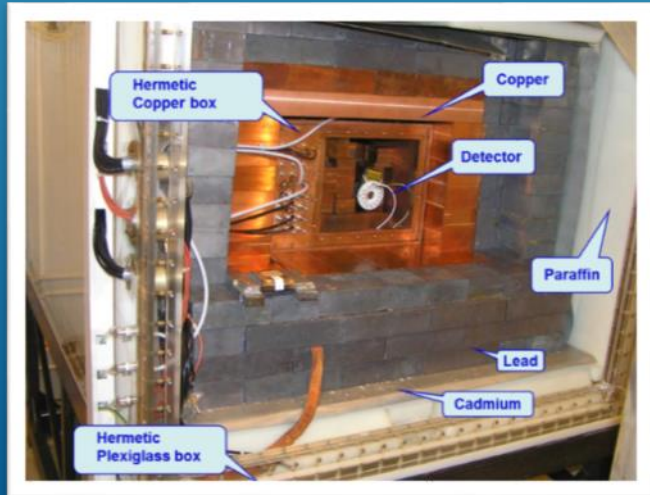
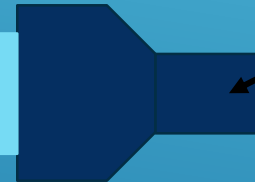
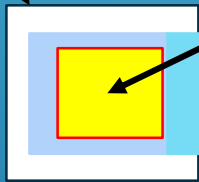
Contenitore in PTFE riempito con olio silicone

$^{116}\text{CdWO}_4$



Guida di luce in HP quarzo $\text{\O}7 \times 40$ cm

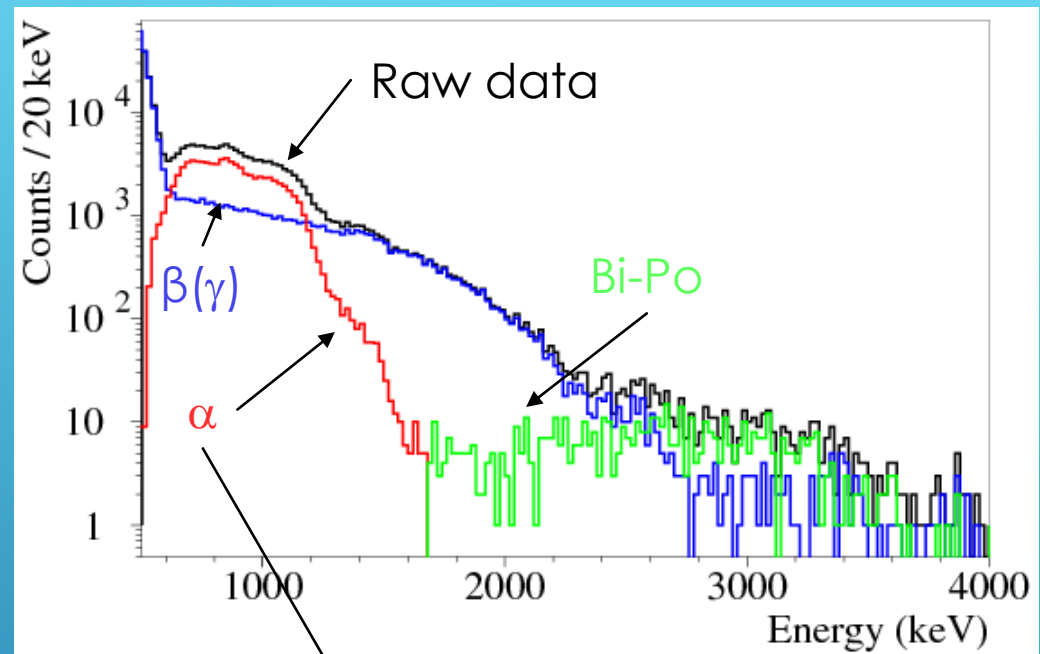
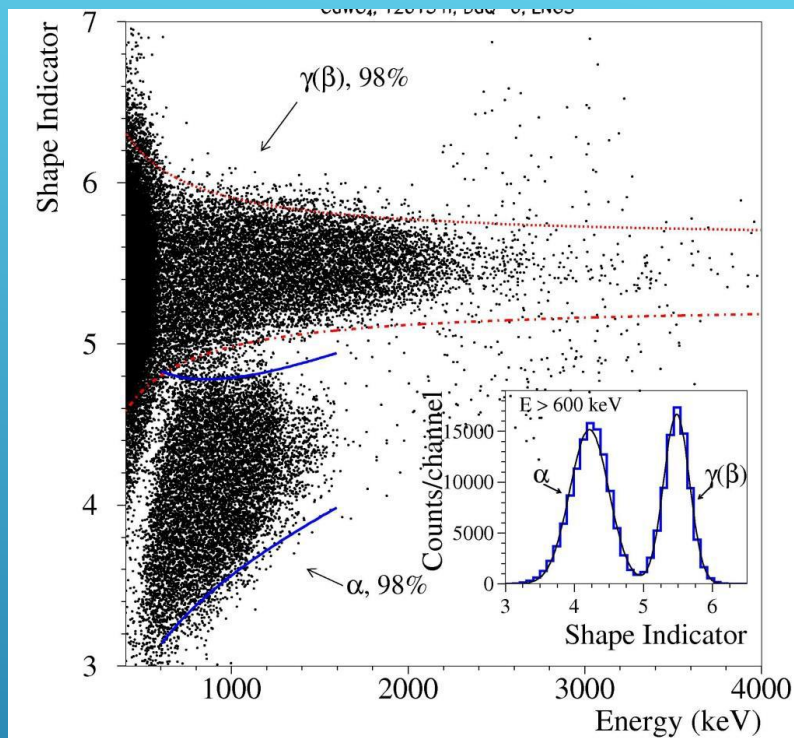
PMT Hamamatsu R6233



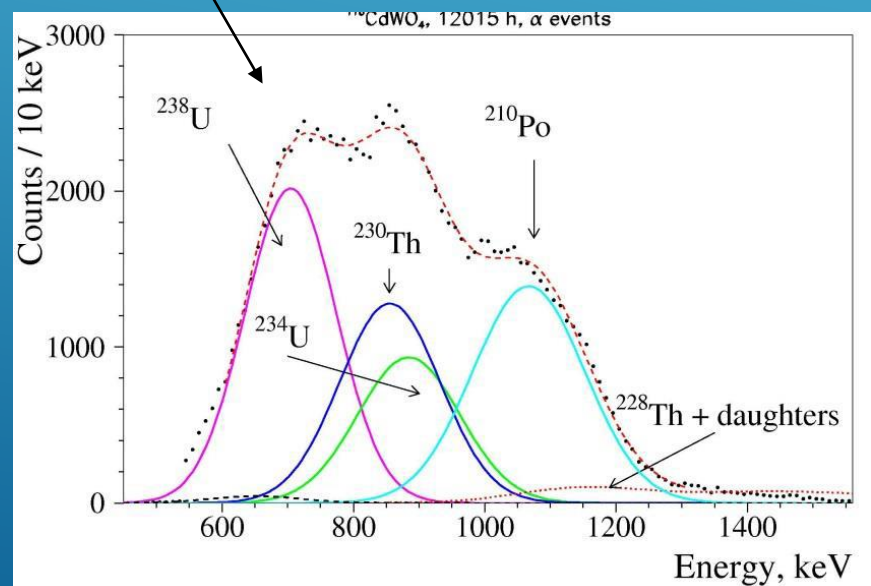
DAMA/R&D set-up

- Scatola di Cu a tenuta stagna continuamente flussata con HP N_2
- 10 cm di HP Cu
- 15 cm di Pb a bassa contaminazione radioattiva
- 1.5 mm di cadmio
- 4/10 cm polietilene/paraffina
- L'intero schermo è chiuso all'interno di una scatola di plexiglass continuamente flussata con HP N_2

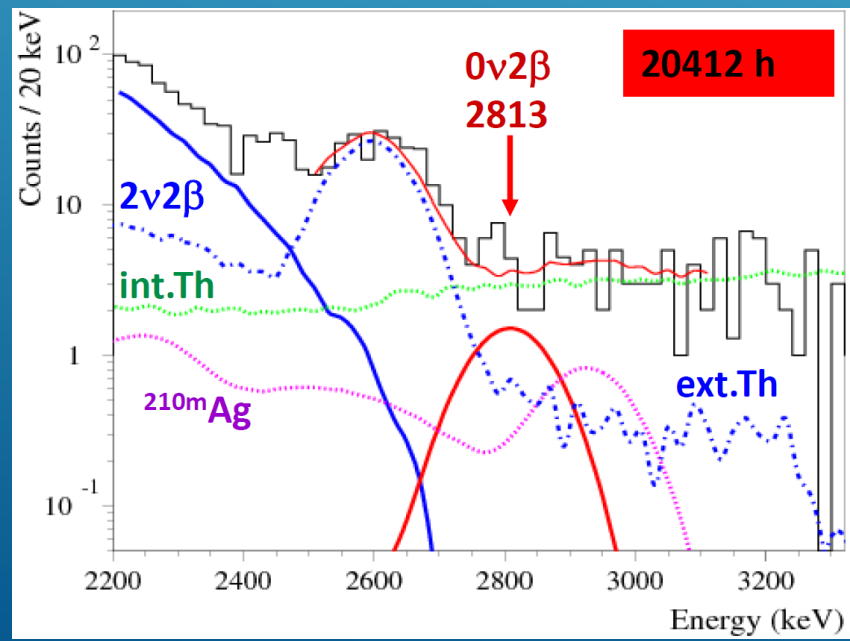
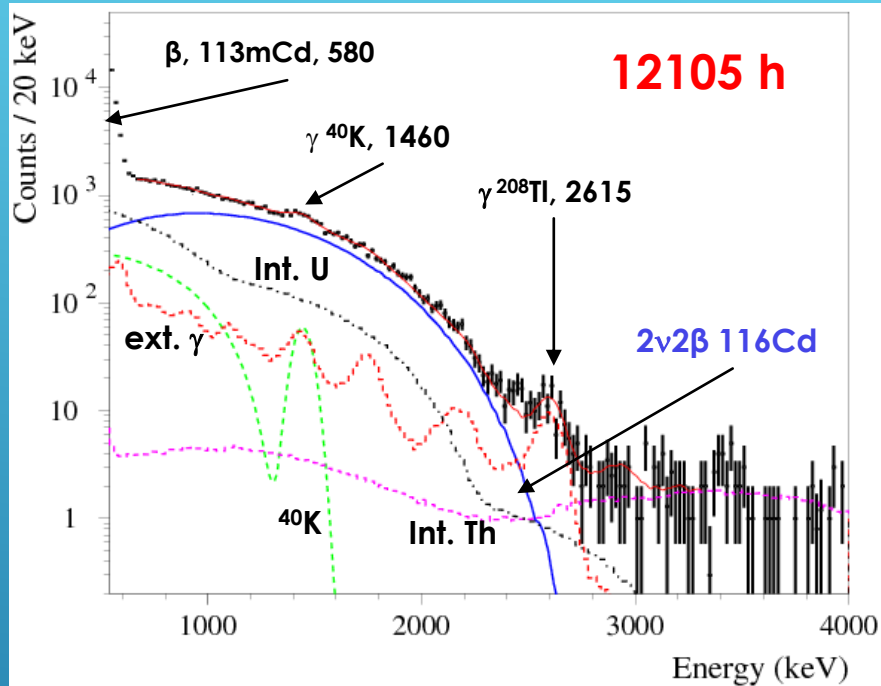
$^{116}\text{CdWO}_4$ - Analisi Dati (12105 h)



Catena	Nucleo	Attività (mBq/kg)
^{232}Th	^{232}Th	≤ 0.07
	^{228}Th	0.027(4)
^{238}U	^{238}U	0.69(2)
	^{226}Ra	≤ 0.005
	^{210}Po	0,57(3)
α totale		2,57(7)
	^{40}K	≤ 0.9

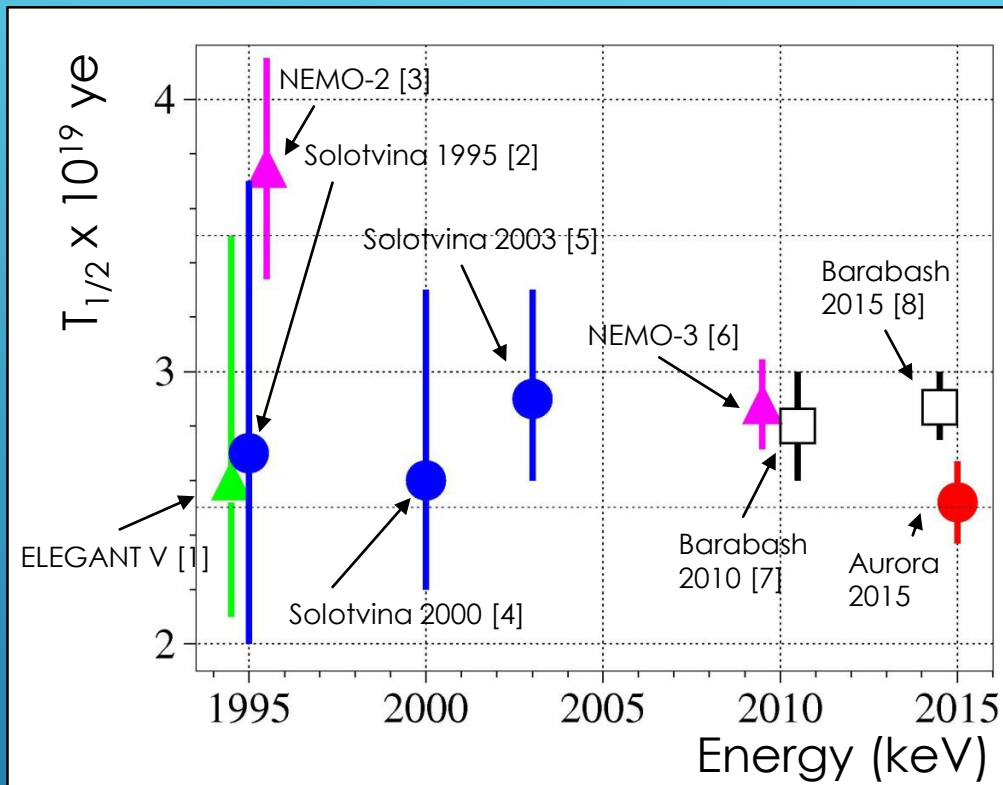


$^{116}\text{CdWO}_4$ - Risultati



$$T_{1/2}^{2\nu} = [2.52 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.14(\text{syst})] \times 10^{19} \text{ yr}$$

$$T_{1/2}^{0\nu} \geq 1.9 \times 10^{23} \text{ yr}$$



- [1] H. Ejiri et al., J. Phys. Soc. Japan 64 (1995) 339;
- [2] F.A. Danevich et al., Phys. Lett. B 344 (1995) 72;
- [3] R. Arnold et al., Z. Phys. C 72 (1996) 239;
- [4] F.A. Danevich et al., PRC 62 (2000) 045501;
- [5] F.A. Danevich et al., PRC 68 (2003) 035501;
- [6] V.I. Tretyak et al., AIP Conf. Proc. 1572 (2013) 110;
- [7] A.S. Barabash, PRC 81 (2010) 035501;
- [8] A.S. Barabash, NPA 935 (2015) 52

$^{116}\text{CdWO}_4$ - Risultati

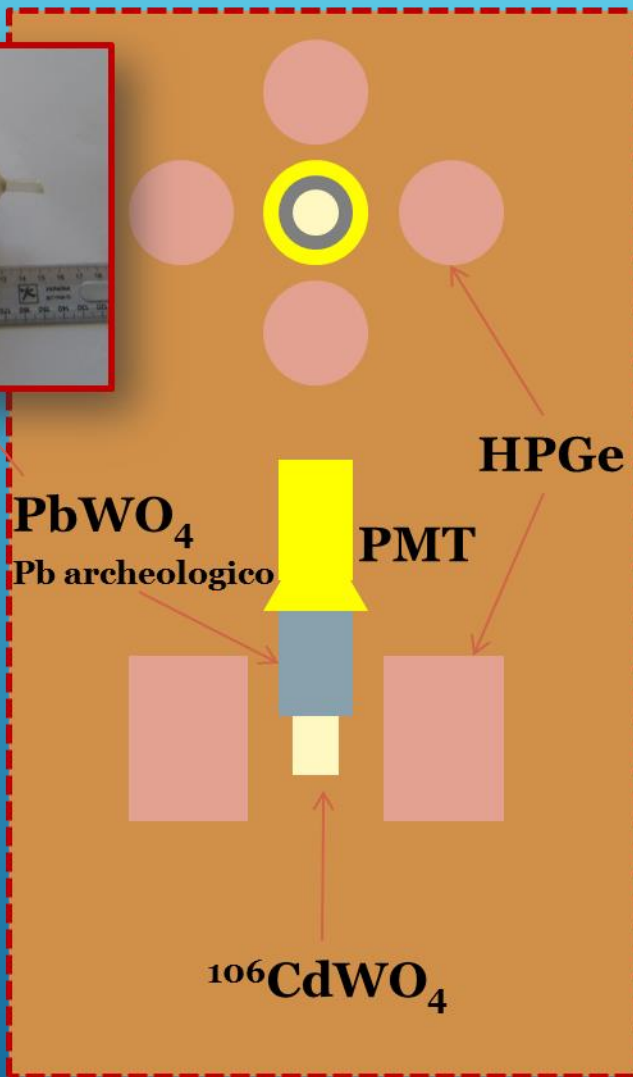
decadimento	Livello di transizione di ^{116}Sn	$T_{1/2}$ (yr) 90% CL	Migliore risultato precedente 90% CL
0v	g.s.	<u>$\geq 1.9 \times 10^{23}$</u>	$\geq 1.7 \times 10^{23}$ [1]
0v	2_1^+ (1294 keV)	$\geq 6.1 \times 10^{22}$	$\geq 2.9 \times 10^{22}$ [1]
0v	0_1^+ (1757 keV)	$\geq 6.2 \times 10^{22}$	$\geq 1.4 \times 10^{22}$ [1]
0v	0_2^+ (2027 keV)	$\geq 4.5 \times 10^{22}$	$\geq 0.6 \times 10^{22}$ [1]
0v	2_2^+ (2112 keV)	$\geq 3.0 \times 10^{22}$	$\geq 1.7 \times 10^{20}$ [2] (at 68% CL)
0v	2_3^+ (2225 keV)	$\geq 3.9 \times 10^{22}$	$\geq 1.0 \times 10^{20}$ [2] (at 68% CL)
0vM1	g.s.	$\geq 1.1 \times 10^{22}$	$\geq 0.8 \times 10^{22}$ [1]
0vM2	g.s.	$\geq 0.9 \times 10^{21}$	$\geq 0.8 \times 10^{21}$ [1]
2v	g.s.	<u>$= 2.52 \times 10^{19}$</u>	
2v	2_1^+ (1294 keV)	$\geq 0.9 \times 10^{21}$	$\geq 2.3 \times 10^{21}$ [3]
2v	0_1^+ (1757 keV)	$\geq 1.0 \times 10^{21}$	$\geq 2.0 \times 10^{21}$ [3]
2v	0_2^+ (2027 keV)	$\geq 1.1 \times 10^{21}$	$\geq 2.0 \times 10^{21}$ [3]
2v	2_2^+ (2112 keV)	$\geq 2.3 \times 10^{21}$	$\geq 1.7 \times 10^{20}$ [2] (at 68% CL)
2v	2_3^+ (2225 keV)	$\geq 2.5 \times 10^{21}$	$\geq 1.0 \times 10^{20}$ [2] (at 68% CL)

[1] F.A. Danevich et al., Phys. Rev. C 68 (2003) 035501

[2] A.S. Barabash, A.V. Kopylov, V.I. Cherehovskiy, Phys. Lett. B 249 (1990) 186

[3] A. Piepke et al. Nucl. Phys. A 577 (1994) 493

$^{106}\text{CdWO}_4$ - set-up sperimentale



- $^{106}\text{CdWO}_4$ in coincidenza o anticoincidenza con un sistema 4π HP-Ge

Sensibilità attesa per lo studio di modi di decadimento $2\nu\epsilon\beta^+$ e $2\nu2\beta^+$ del ^{106}Cd :

$$T_{1/2} \sim (1-10) \cdot 10^{20} \text{ yr}$$

Previsioni $T_{1/2}$ [1-4]:

$$2\nu2\beta^+ : (1-50) \cdot 10^{20} \text{ yr}$$

$$2\nu\epsilon\beta^+ : (8-400) \cdot 10^{20} \text{ yr}$$

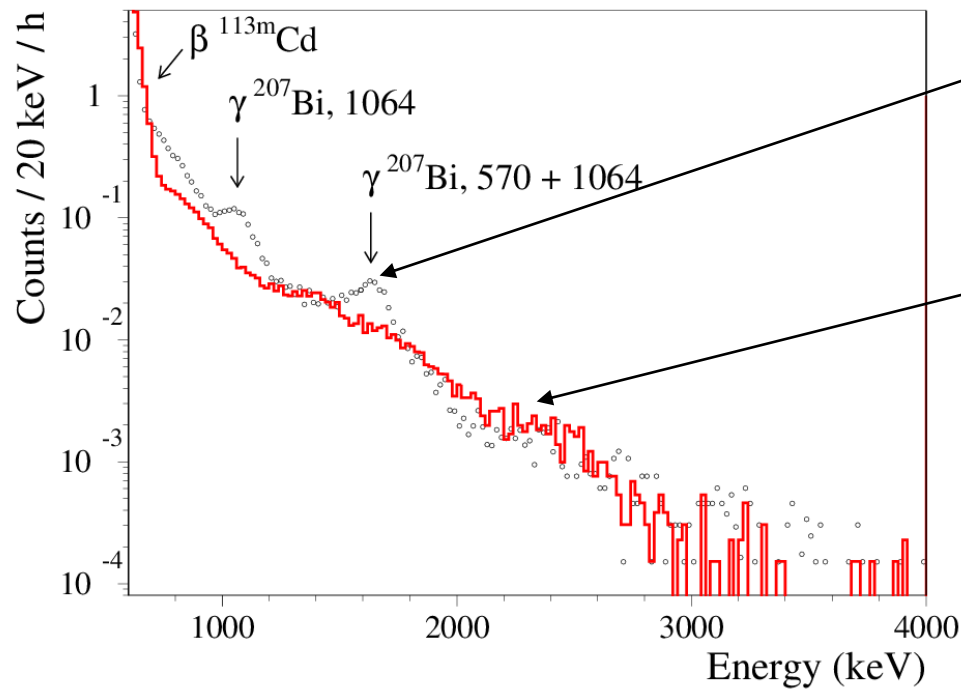
[1] see in V.I. Tretyak and Yu.G. Zdesenko, At. Data Nucl. Data Tables 80 (2002) 83.

[2] S. Stoica and H. V. Klapdor-Kleingrothaus, Eur. Phys. J. A 17 (2003) 529.

[3] A. Shukla et al., Eur. Phys. J. A 23 (2005) 235.

[4] P. Domin et al., Nucl. Phys. A 753 (2005) 337.

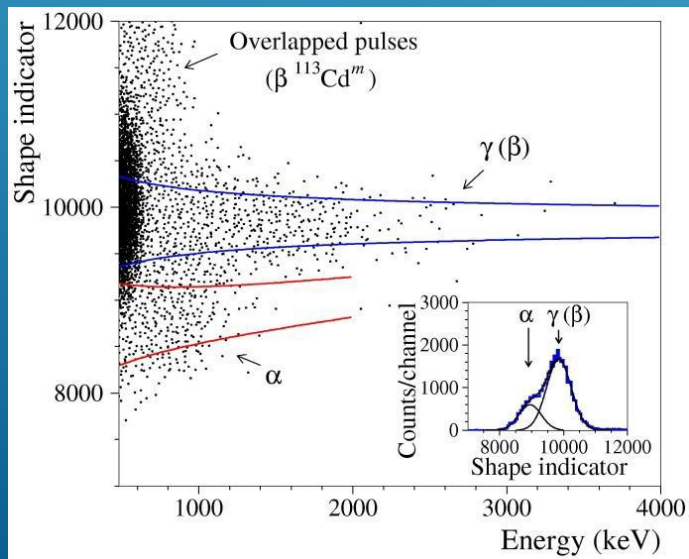
$^{106}\text{CdWO}_4$ - Analisi Dati (12105 h)



Misura precedente
PRC 85 (2012) 044610

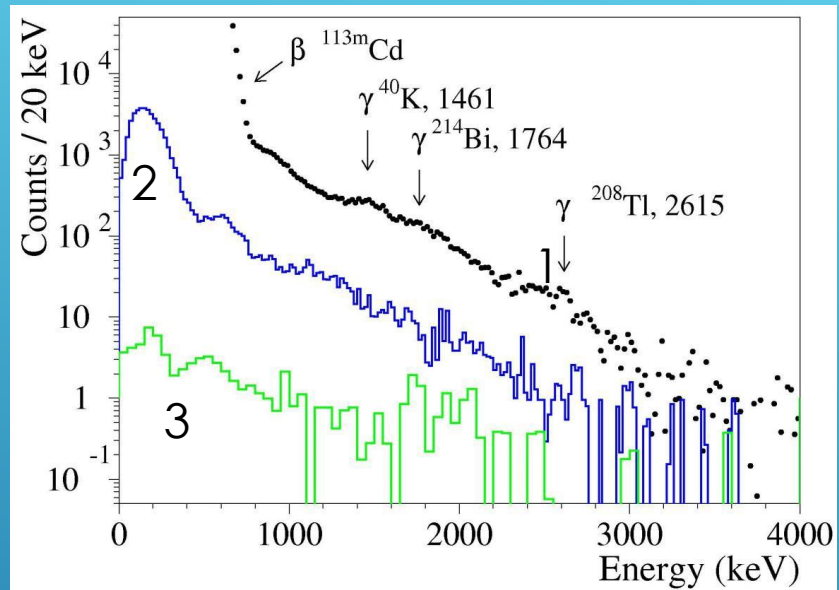
Misura attuale
(^{207}Bi rimosso grazie all'uso
Di acido nitrico ultra puro +
Detergente

Spettro $\beta(\gamma)$ misurato in
anticoincidenza con HP-Ge

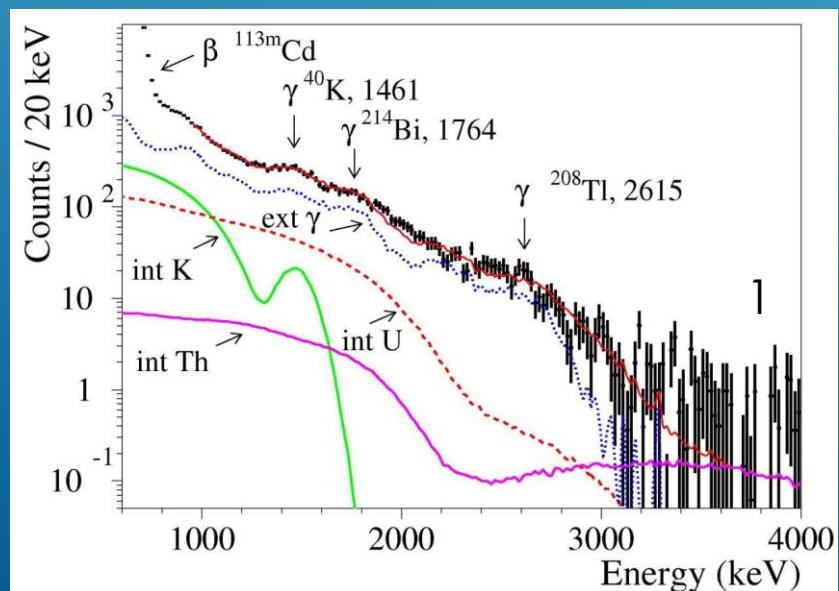


Catena	Nucleo	Attività (mBq/kg)
^{232}Th	^{232}Th	≤ 0.07
	^{228}Th	0.042(4)
^{238}U	^{238}U	0.6(2)
	^{226}Ra	≤ 0.005
	^{210}Po	0.12(3)
α totale		2.1(2)
	^{40}K	≤ 1.4
	$^{113\text{m}}\text{Cd}$	$116(4) \times 10^3$

$^{106}\text{CdWO}_4$ - Risultati preliminari (13085 h)



- 1 – In anticoincidenza con i rivelatori HP-Ge (AC)
- 2 – In coincidenza con i rivelatori HP-Ge e con energia rilasciata in almeno un HP-Ge > 200 keV (CC > 200)
- 3 – In coincidenza con E(HP-Ge) = 511 keV (CC 511)



Decay, level of ^{106}Pd (keV)	$T_{1/2}$ (yr) at 90% C.L.	
	Present work	Previous limit
$2\nu 2\varepsilon, 0_1^+$ 1134	$\geq 3.1 \times 10^{20}$ (AC)	$\geq 1.7 \times 10^{20}$ [1]
$0\nu 2\varepsilon, \text{g.s.}$	$\geq 2.6 \times 10^{20}$ (AC)	$\geq 1.0 \times 10^{21}$ [1]
$2\nu \varepsilon \beta^+, \text{g.s.}$	$\geq 1.8 \times 10^{21}$ (CC 511)	$\geq 4.1 \times 10^{20}$ [2]
$2\nu \varepsilon \beta^+, 0_1^+$ 1134	$\geq 1.4 \times 10^{21}$ (CC 511)	$\geq 3.7 \times 10^{20}$ [1]
$0\nu \varepsilon \beta^+, \text{g.s.}$	$\geq 1.6 \times 10^{21}$ (CC >200)	$\geq 2.2 \times 10^{21}$ [1]
$2\nu 2\beta^+, \text{g.s.}$	$\geq 4.7 \times 10^{21}$ (CC 511)	$\geq 4.3 \times 10^{20}$ [1]
$0\nu 2\beta^+, \text{g.s.}$	$\geq 2.2 \times 10^{21}$ (CC 511)	$\geq 1.2 \times 10^{21}$ [1]
$0\nu 2K, 2718$	$\geq 6.3 \times 10^{20}$ (CC 511)	$\geq 4.3 \times 10^{20}$ [1]
$0\nu KL_1, 4^+$ 2741	$\geq 5.0 \times 10^{20}$ (HPGe)	$\geq 9.5 \times 10^{20}$ [1]
$0\nu KL_3, 2,3^-$ 2748	$\geq 8.7 \times 10^{20}$ (HPGe)	$\geq 4.3 \times 10^{20}$ [1]

[1] P. Belli et al., PRC 85 (2012) 044610
 [2] P. Belli et al., APP 10 (1999) 115

CONCLUSIONI

Sviluppata tecnica efficace per la realizzazione di scintillatori in CdWO₄ arricchito in ^{106,116}Cd con l'uso di quasi la totalità del Cd metallico arricchito

¹⁰⁶CdWO₄ (231 g; 66% di ¹⁰⁶Cd) & ¹¹⁶CdWO₄ (1.9 kg; 82% di ¹¹⁶Cd)

Il materiale perso durante le fasi di purificazioni del Cd arricchito non eccede il 3%

- Gli scintillatori sviluppati esibiscono ottimi proprietà ottiche, di scintillazione ed elevati livelli radiopurezza, specie per la presenza di Th e Ra.
- Sono stati realizzati esperimenti presso il Laboratorio Nazionale del Gran Sasso, che hanno *migliorato i limiti sperimentali di diversi canali di decadimento doppio beta o ponendone di nuovi* in ^{106,116}Cd, raggiungendo sensibilità di $T_{1/2} \sim 10^{19-23}$ yr.
- E' stato, inoltre, misurato il decadimento doppio beta $2\nu 2\beta$ in ¹¹⁶Cd con $T_{1/2} = (2.52 \pm 0.16) \cdot 10^{19}$ yr.
- Per il decadimento $\varepsilon\beta^{+2\nu}$ del ¹⁰⁶Cd abbiamo raggiunte sensibilità vicina alla previsioni teoriche $T_{1/2} > 1.8 \times 10^{21}$ yr.
- C'è la possibilità di incrementare la sensibilità dell'esperimento con ¹⁰⁶CdWO₄ migliorando la disposizione dei 4 rivelatori di HP-Ge: migliorare l'efficienza, diminuire il fondo misurato.

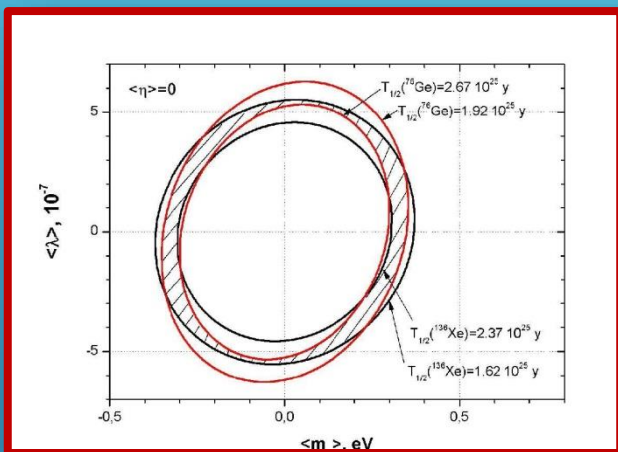
GRAZIE PER L'ATTENZIONE





MOTIVAZIONI PER LA SCELTA DI SCINTILLATORI ARRICCHITI IN ^{106}Cd

$2\beta^-$

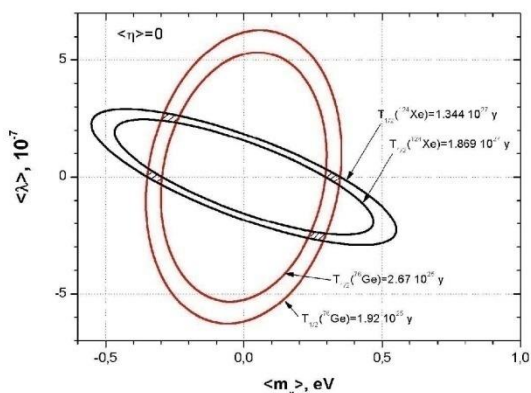


Regione dei
parametri
permessi per
un
decadimento
 $0\nu 2\beta^-$ da ^{76}Ge
e da ^{136}Xe

M.Hirsch et al., Z. Phys. A 347 (1994) 151; M.Hirsch Nucl.Phys. A577 (1994)

$\beta^+ \text{EC}$

Regione dei
parametri
permessi per un
decadimento
 $0\nu 2\beta^-$ da ^{76}Ge e
per un
decadimento
 $0\nu \beta^+ \text{EC}$
da ^{124}Xe



Caso del ^{106}Cd

Esistono solo 6 nuclei, uno dei quali è il ^{106}Cd , che manifestano tutti i 3 modi di decadimento $2\beta^+$ (anche effetto risonante).

Transizione	$Q_{\beta\beta}$ (keV)	Abbondanza naturale (%)
$^{78}\text{Kr} \rightarrow ^{78}\text{Se}$	2866.0 (7)	0.35(0.01)
$^{96}\text{Ru} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	2719(8)	5.54(0.14)
$^{106}\text{Cd} \rightarrow ^{106}\text{Pd}$	2771(8)	1.25(0.06)
$^{124}\text{Xe} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2865.6(2.2)	0.09(0.01)
$^{130}\text{Ba} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2611(7)	0.106(0.001)
$^{136}\text{Ce} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2400(50)	0.185(0.002)

$$\Gamma_{0\nu, \alpha}^{(0^+ \rightarrow 0^+)} = \left[C_{mm}^{\alpha} \left(\frac{\langle m_{\nu} \rangle}{m_e} \right)^2 + C_{\lambda\lambda}^{\alpha} \langle \lambda \rangle^2 + C_{\eta\eta}^{\alpha} \langle \eta \rangle^2 + C_{m\lambda}^{\alpha} \frac{\langle m_{\nu} \rangle}{m_e} \langle \lambda \rangle + C_{m\eta}^{\alpha} \frac{\langle m_{\nu} \rangle}{m_e} \langle \eta \rangle + C_{\eta\lambda}^{\alpha} \langle \lambda \rangle \langle \eta \rangle \right]$$

PROCESSO DI SVILUPPO DEI CRISTALLI SCINTILLATORI



Requisiti per lo sviluppo di cristalli scintillatori:

- Minimizzare le perdite del materiale arricchito nell'isotopo di interesse
- Massimizzare la produzione di luce dello scintillatore
- Minimizzare la presenza di impurità

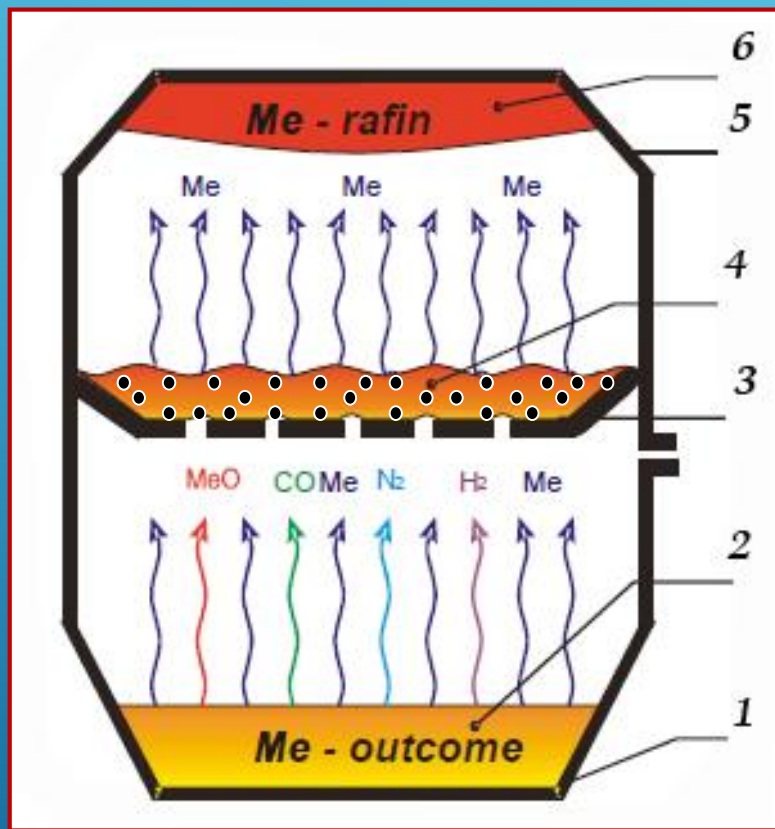
Procedura seguita:

- Purificazione di un campione di cadmio metallico ottenuta mediante la tecnica di distillazione a vuoto con filtro getter.
- Purificazione chimica e sintesi del composto di tungstato di cadmio.
- Crescita del cristallo.
- Tagli degli elementi scintillatori e loro trattamento ottico



LA PURIFICAZIONE DEL MATERIALE ARRICCHITO

106,116CD



1. crogiolo; 2. materiale iniziale;
3. piastra del filtro; 4. getter;
5. condensatore; 6. materiale
purificato

Tecnica della distillazione a vuoto con filtro getter

Il vapore metallico passava attraverso il filtro getter riscaldato alla temperatura di vaporizzazione del metallo [1].

Materiali impiegati per il filtro getter [1]:

- frammenti di **lega Zr-Fe**;
- frammenti di **Zr ultra puro**;
- frammenti di **grafite ultra pura**.

La tecnica impiegata ha permesso di purificare il campione di cadmio metallico con perdite minime del Cd arricchito <1% e con un impoverimento isotopico delle impurità del Cd ad un livello di (1 - 0.01) ppm [2,3].

Impurità	ppm
Ni, Cu	< 0.2
Fe, Mg, Mn, Cr, V, Co	< 1
Th, U, Ra, K, Rb, Bi, Pb, Lu, Sm	< 0.1

[1] Kovtun, G.P., et al., 2011. Functional Materials 18, 121-127.

[2] P.Belli, et al., Nucl. Instr. & Meth. A615 (2010), 301.
[3] A.S. Barabash, et al., J. of Instr. 06 (2011) P08011.

SINTESI DEL COMPOSTO DI $^{106,116}\text{CdWO}_4$

L'elevato costo del cadmio arricchito, ha limitato la scelta del metodo per la purificazione aggiuntiva.

Il metodo della *ricristallizzazione*, tipicamente usato per la purificazione di sali di cadmio, non è stato impiegato a causa della bassa efficienza, circa l'85%.

Tutte le operazioni sono state eseguite usando *oggetti di quarzo o polipropene* ed impiegando composti a basso livello di contaminazioni *radioattive*. Ad esempio, i reagenti usati avevano concentrazioni di metalli inferiori a **0.01 ppm**.

I materiali impiegati per la crescita dei cristalli sono stati prodotti dalla compagnia NeoChem (Mosca, Russia).

Tecnica impiegata:

Il cadmio è stato disciolto in acido nitrico ed è stato purificato tramite la coprecipitazione in un collettore.

Nitrato di Cd

Paratungstato di ammonio

Tungstato di cadmio

Nitrato di ammonio

