

Ricerca di modi di decadimento di modi di decadimento 2β in ^{106}Cd con un cristallo di $^{106}\text{CdWO}_4$: risultati e prospettive

P.Belli¹, R.Bernabei^{1,2}, R.S.Boiko³, V.B.Brudanin⁴, F.Cappella^{5,6}, V.Caracciolo^{7,8}, R.Cerulli⁷, D.M.Chernyak³, F.A.Danevich³, S.d'Angelo^{1,2}, E.N.Galashov⁹, A.Incicchitti⁵, V.V.Kobychev³, V.M.Mokina³, M.Laubenstein⁷, D.V.Poda^{3,7}, R.B.Podviyanuk³, D.Proserpi^{5,6},[†], O.G.Polischuk³, V.N.Shlegel⁹, Y.G.Stenin⁹, J.Suhonen¹⁰, V.I.Tretyak³, Y.V.Vasiliev⁹

¹ INFN, Sezione di Roma "Tor Vergata"

² Dipartimento di Fisica, Università di Roma "Tor Vergata"

³ Institute for Nuclear Research, Kyiv, Ukraine

⁴ Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

⁵ INFN, Sezione di Roma "La Sapienza"

⁶ Dipartimento di Fisica, Università di Roma "La Sapienza"

⁷ INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso

⁸ Dipartimento di Fisica, Università dell'Aquila

⁹ Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Novosibirsk, Russia

¹⁰ Department of Physics, University of Jyväskylä, Finland

[†]Deceased

Motivazione per la scelta del ^{106}Cd

- Informazioni complementari al modo $2\beta^-$ per la comprensione di nuova fisica oltre il modello standard.
- Esistono solo 6 nuclei, uno dei quali è il ^{106}Cd , che manifestano tutti i 3 modi di decadimento $2\beta^+$.
- Q per il ^{106}Cd relativamente elevato: $(2771 \pm 8) \text{ keV}$
- Possibilità di usare i fotoni in coincidenza per identificare il segnale rispetto al fondo
- Le abbondanze isotopiche naturali di nuclei che possono decadere in modi $2\beta^+$ sono dell'ordine del percento. E' quindi indispensabile sviluppare cristalli radiopuri ragionevolmente arricchiti in isotopi interessanti allo studio di modi $2\beta^+$: $^{106}\text{CdWO}_4$
- Possibilità di implementare la PSD per un cristallo di CdWO_4
- Possibilità del metodo della sorgente attiva

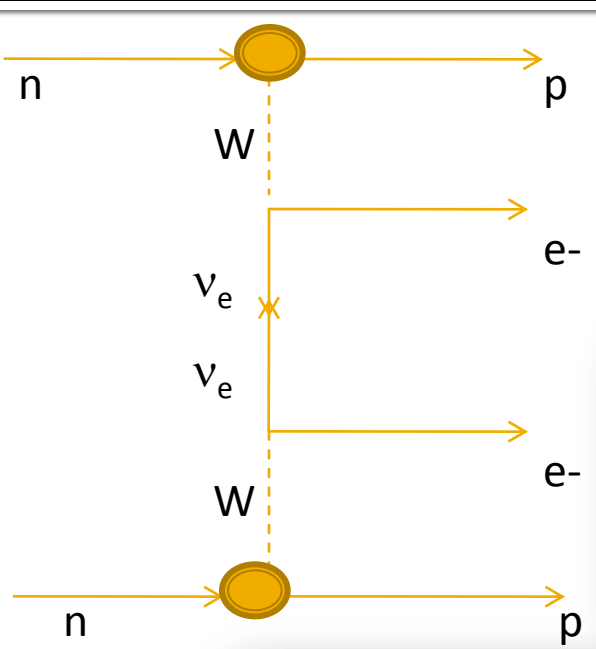


Transizione	$Q_{\beta\beta}$ (keV)	Abbondanza naturale (%)
$^{78}\text{Kr} \rightarrow ^{78}\text{Se}$	2866.0 (7)	0.35(0.01)
$^{96}\text{Ru} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	2719(8)	5.54(0.14)
$^{106}\text{Cd} \rightarrow ^{106}\text{Pd}$	2771(8)	1.25(0.06)
$^{124}\text{Xe} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2865.6(2.2)	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)

Necessità di sviluppare e studiare un cristallo di bassa attività arricchito in ^{106}Cd : $^{106}\text{CdWO}_4$

Il doppio decadimento beta senza emissione di neutrini

Esempio processo elementare $2\beta^-$



$$\Gamma_{2\nu} = G_{2\nu} |M_{2\nu}|^2$$

$$\Gamma_{2\nu} \propto Q^{11}$$

$$\Gamma_{0\nu} = G_{0\nu} |M_{0\nu}|^2 \langle m_\nu \rangle^2$$

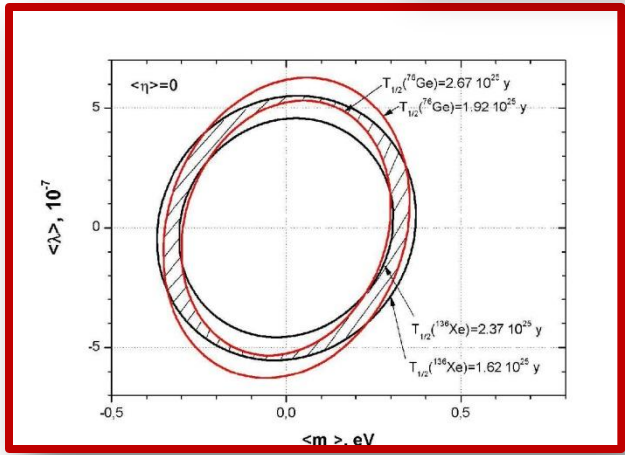
$$\Gamma_{0\nu} \propto Q^5$$

$$[T_{1/2}^{0\nu}(0_i^+ \rightarrow 0_f^+)]^{-1} =$$

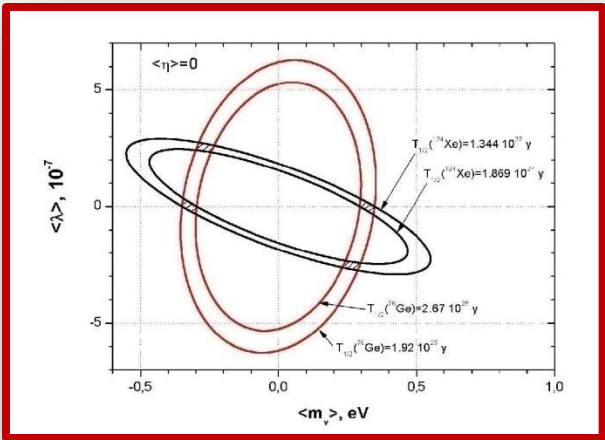
$$= C_{mm} \frac{\langle m \rangle^2}{m_e^2} + C_{\eta\eta} \langle \eta \rangle^2 + C_{\lambda\lambda} \langle \lambda \rangle^2 + C_{m\eta} \langle \eta \rangle \frac{\langle m \rangle}{m_e} + C_{m\lambda} \langle \lambda \rangle \frac{\langle m \rangle}{m_e} + C_{\eta\lambda} \langle \eta \rangle \langle \lambda \rangle,$$

$$\langle m \rangle = |m_{ee}^{(1)}| + e^{i\phi_2} |m_{ee}^{(2)}| + e^{i\phi_3} |m_{ee}^{(3)}|,$$

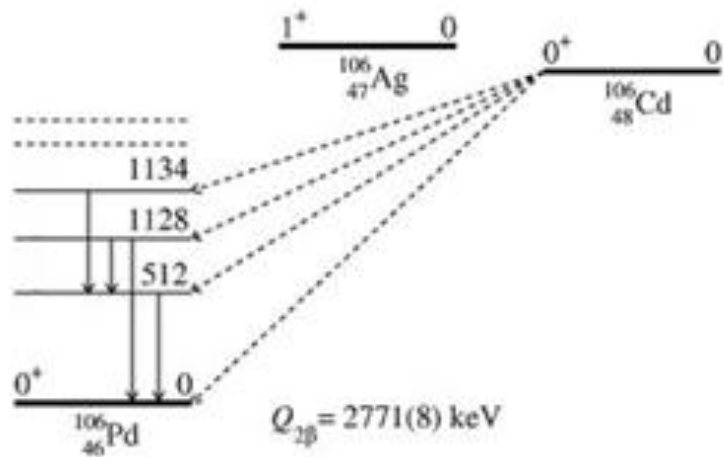
$2\beta^-$



$2\beta^+/\text{EC}$



Il decadimento 2β nel ^{106}Cd



Canali permessi

- Doppia cattura elettronica (2ε)
- Cattura elettronica con emissione di un positrone ($\varepsilon\beta^+$)
- Emissione di due positroni ($2\beta^+$)

Migliori risultati sperimentali (g.s.)

$0\nu 2\varepsilon$	$> 8.0 \cdot 10^{18} \text{ y}$	KINR, 2003
$2\nu 2\varepsilon$	$> 6.2 \cdot 10^{19} \text{ y}$	TGV, 2006
$0\nu \varepsilon\beta^+$	$> 3.7 \cdot 10^{20} \text{ y}$	DAMA+KINR 1999
$2\nu \varepsilon\beta^+$	$> 4.1 \cdot 10^{20} \text{ y}$	DAMA+KINR 1999
$0\nu 2\beta^+$	$> 2.4 \cdot 10^{20} \text{ y}$	DAMA+KINR 1999
$2\nu 2\beta^+$	$> 2.4 \cdot 10^{20} \text{ y}$	DAMA+KINR 1999

Previsioni teoriche

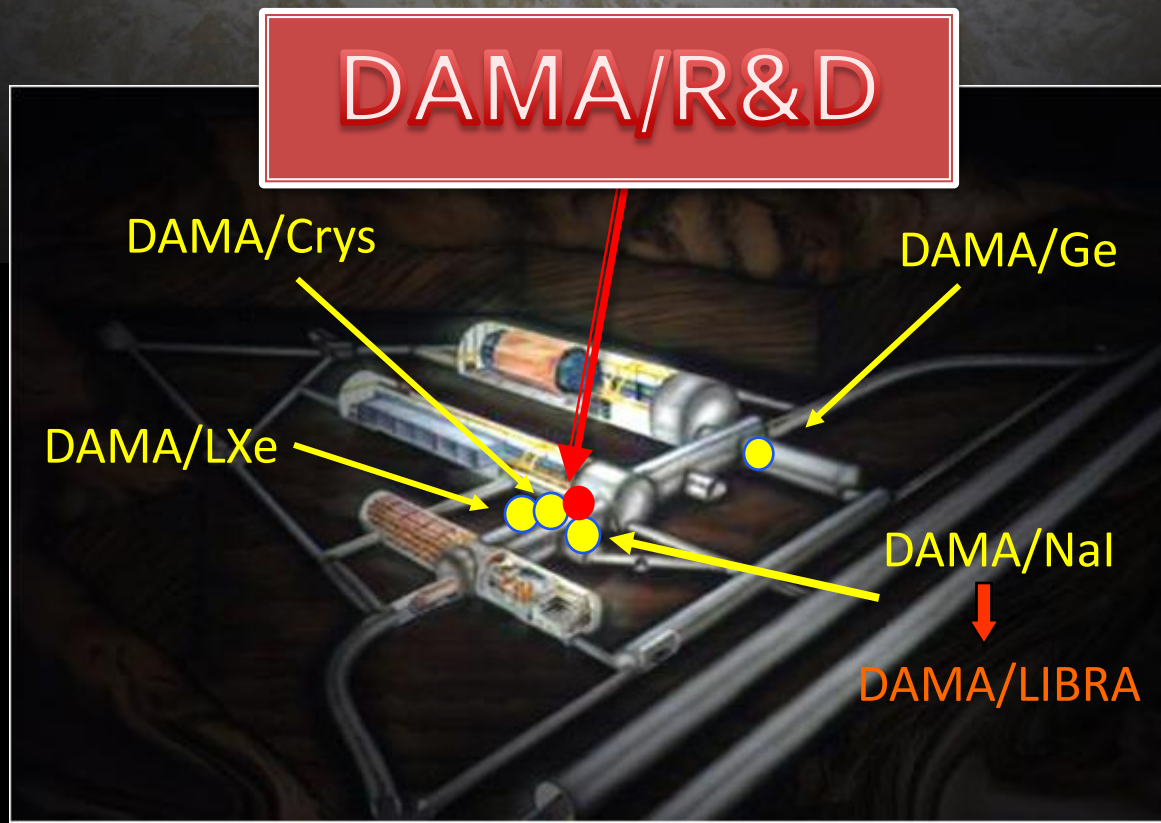
$0\nu 2\varepsilon$	
$2\nu 2\varepsilon$	10^{20-22} y
$0\nu \varepsilon\beta^+$	10^{26-28} y
$2\nu \varepsilon\beta^+$	10^{20-22} y
$0\nu 2\beta^+$	10^{27-28} y
$2\nu 2\beta^+$	10^{25-27} y

IL SITO SPERIMENTALE



DAMA: un osservatorio per processi rari @LNGS

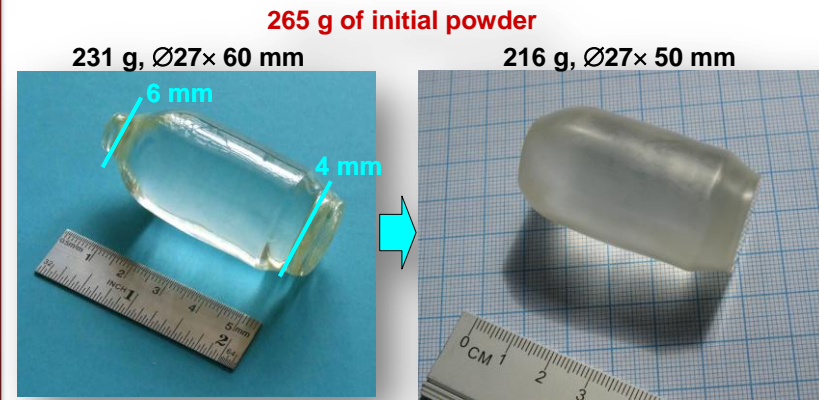
DAMA/R&D



Sviluppo e arricchimento del cristallo scintillatore di $^{106}\text{CdWO}_4$

NIMA615(2010)301

- Produzione del $^{106}\text{CdWO}_4$
- Con la purificazione del Cd si è raggiunto una riduzione di un fattore di circa 100 della presenza di Ni, Cu, Mg, Co, Pb.
- La sintesi dei composti di CdWO_4 e di $^{106}\text{CdWO}_4$ ($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 + (\text{NH}_4)_2\text{WO}_4 = \text{CdWO}_4 + 2\text{NH}_4\text{NO}_3$, purificazione ulteriore durante il trattamento chimico)
- Crescita del cristallo di $^{106}\text{CdWO}_4$ (Low Thermal Gradient Czochralski technique)
- Caratterizzazione del cristallo $^{106}\text{CdWO}_4$:
 - Transmittanza (Lunghezza di attenuazione di 60 ± 7 cm a 490 nm, un significativo miglioramento rispetto ai campioni precedenti di CdWO_4 presenti in letteratura)
 - Luminescenza ($I_{\text{max}} = 337.1$ nm)



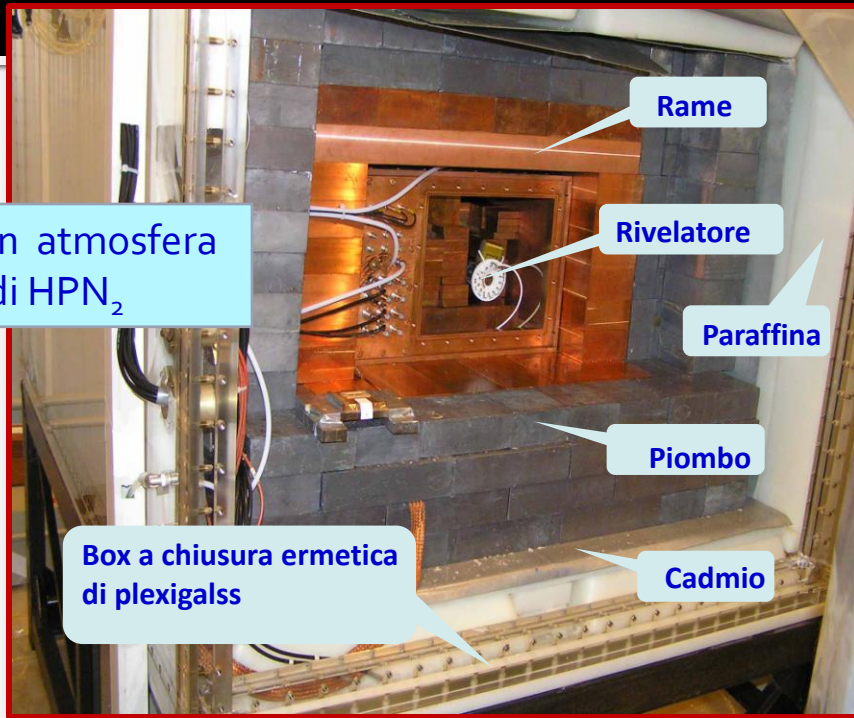
Nell'immagine è mostrato il cristallo prima (sinistra) e dopo il trattamento (destra) di opacizzazione della superficie laterale e della definizione della sua forma finale.

Principali proprietà di un cristallo commerciale di CdWO_4 :

- I. Densità = 7.9 g/cm^3 ;
- II. Guadagno in luce dal 30% al 50% di uno NaI(Tl);
- III. Indice di rifrazione = $2.2 - 2.3$;
- IV. Emissione massima a $\lambda = 475 \text{ nm}$;
- V. Tempo di decadimento effettivo $\tau = 14 \mu\text{s}$;
- VI. Chimicamente inerte e non igroscopico, con punto di fusione a 1598°C .

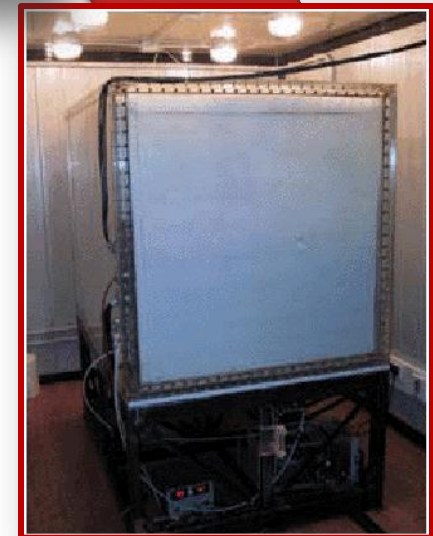
Atomic number	Enriched ^{106}Cd	Natural cadmium [10]
106	66.40 ± 0.05	1.25 ± 0.06
108	0.658 ± 0.004	0.89 ± 0.03
110	5.06 ± 0.01	12.49 ± 0.18
111	4.83 ± 0.01	12.80 ± 0.12
112	8.85 ± 0.03	24.13 ± 0.21
113	3.935 ± 0.003	12.22 ± 0.12
114	8.77 ± 0.03	28.73 ± 0.42
116	1.497 ± 0.008	7.49 ± 0.18

L'apparato sperimentale



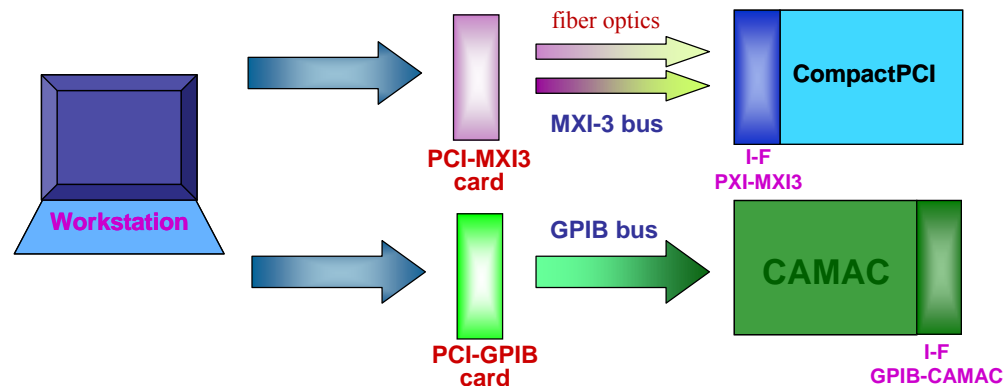
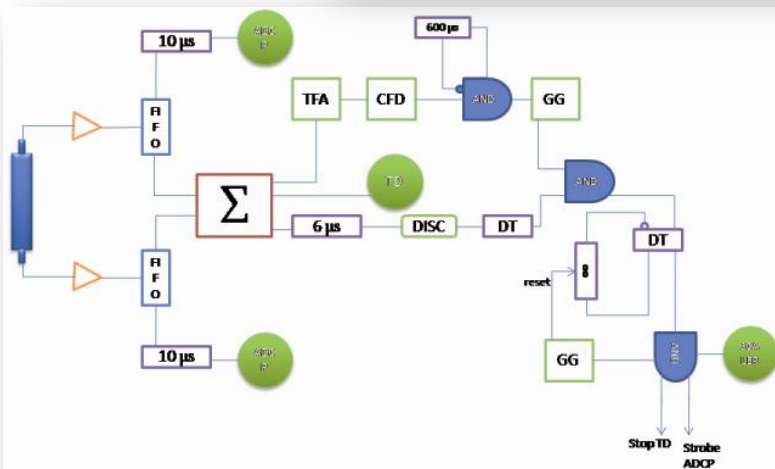
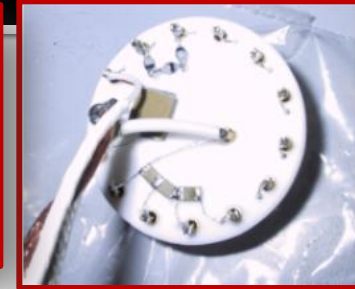
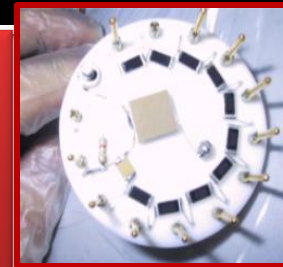
Radiopurezza dei materiali (95%C.L.):

Materiale	^{238}U (ppb)	^{232}Th (ppb)	^{nat}K (ppm)
Cu	< 0.5	< 1	< 0.6
Pb boliden	< 8	< 0.03	< 0.06
Pb boliden2	< 3.6	< 0.027	< 0.06
Polish Pb	< 7.4	< 0.042	< 0.03
Polietilene	< 0.3	< 0.7	< 2
Plexiglass	< 0.64	< 27.2	< 3.3



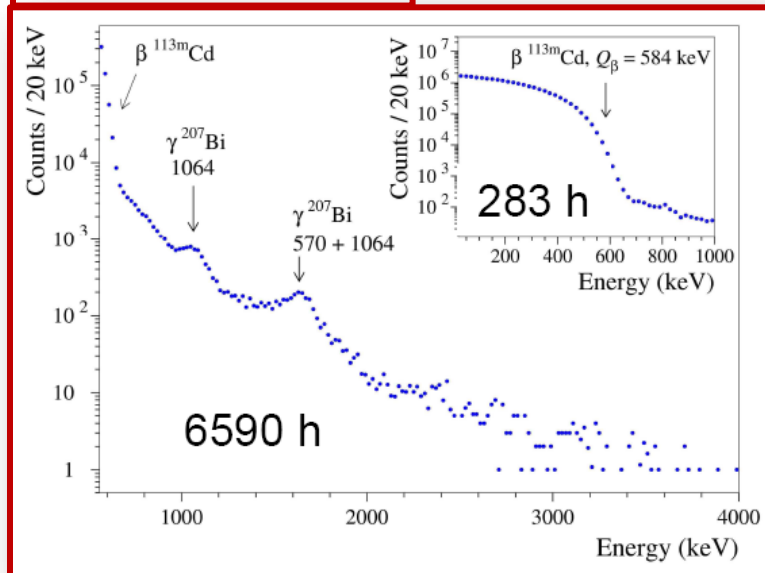
L'apparato sperimentale

- In questa presa dati il cristallo è stato accoppiato a due PMT *flying leads* (EMI9265) tramite due guide di luce.
- L'acquisizione viene eseguita da una *work-station* con s.o. Linux-SuSe interfacciata al *crate* CAMAC tramite scheda GPIB e al *crate* cPCI tramite una scheda PCI.



Background e contaminazioni radioattive del $^{106}\text{CdWO}_4$

Dati sperimentali



Livelli di contaminazione del
cristallo di $^{106}\text{CdWO}_4$ (mBq/Kg)

^{207}Bi <0.7 (superficie)

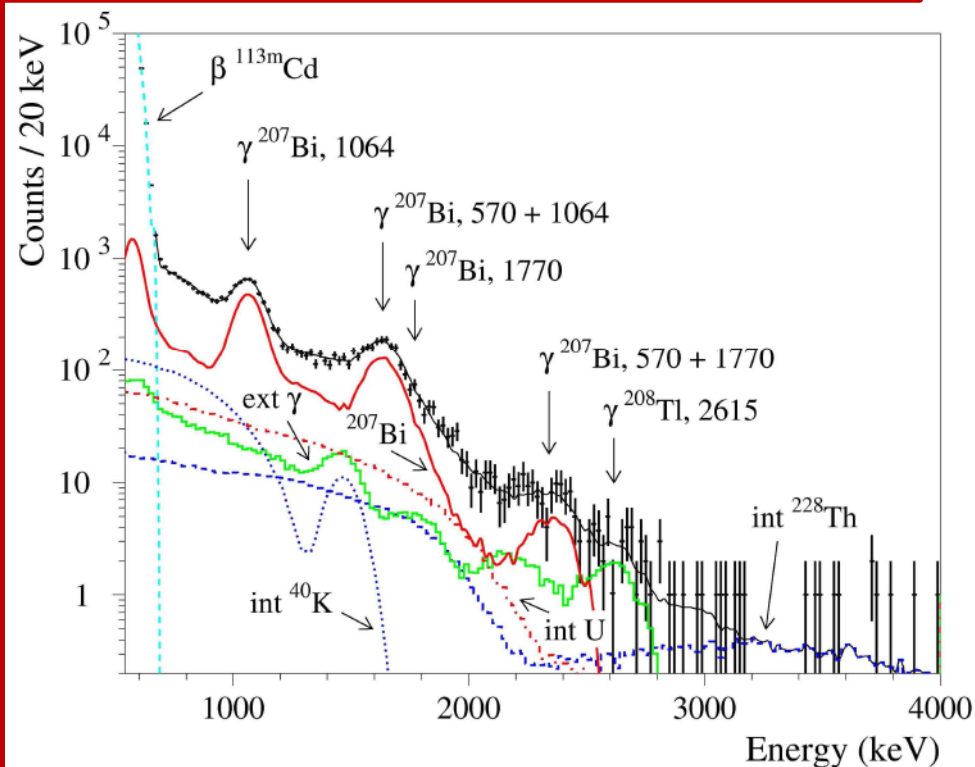
$^{113\text{m}}\text{Cd}$ $116 \cdot 10^3$

^{228}Th 0.04

^{226}Ra 0.01

α 2

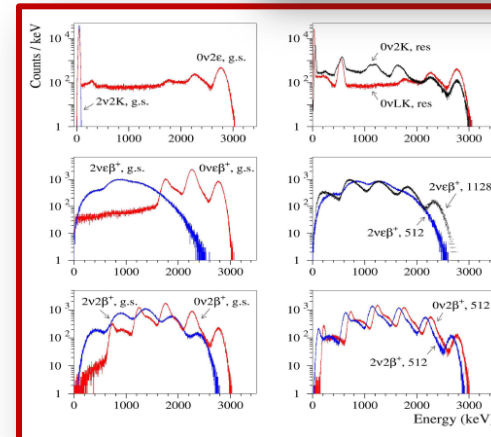
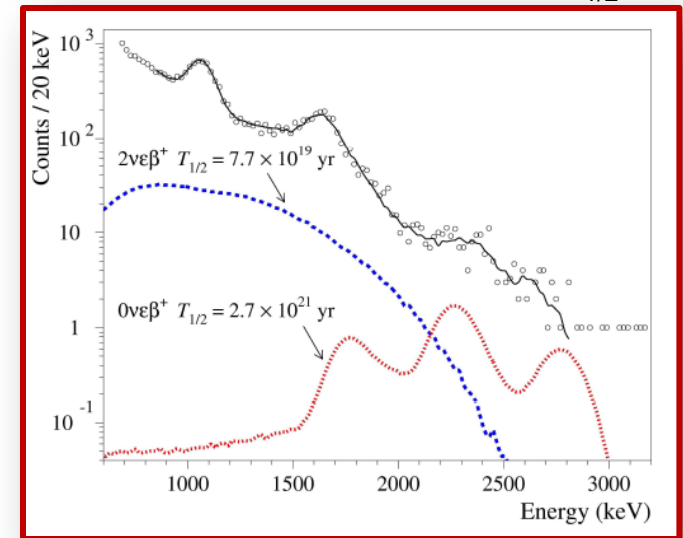
Distribuzione degli eventi γ/β selezionati tramite la PSD



Limiti sui $T_{1/2}$ dei modi di decadimenti 2β in ^{106}Cd

Canale di decadimento	Modo di decadimento	Livello energetico del ^{106}Pd [keV]	$T_{1/2}$ [anni] (90% CL)
2ε	2V	1128 (2+)	$>5.1 \cdot 10^{28}$
	0V	g.s.	$>2.4 \cdot 10^{21}$
		512 (2+)	$>1.8 \cdot 10^{21}$
		1128 (2+)	$>3.6 \cdot 10^{20}$
$\varepsilon\beta^+$	2V	g.s.	$>7.7 \cdot 10^{19}$
		512 (2+)	$>8.8 \cdot 10^{21}$
	0V	g.s.	$>2.7 \cdot 10^{21}$
		512 (2+)	$>2.5 \cdot 10^{21}$
$2\beta^+$	2V	g.s.	$>3.9 \cdot 10^{20}$
	0V	g.s.	$>1.6 \cdot 10^{21}$

Esempio di fit per la determinazione del limite su $T_{1/2}$

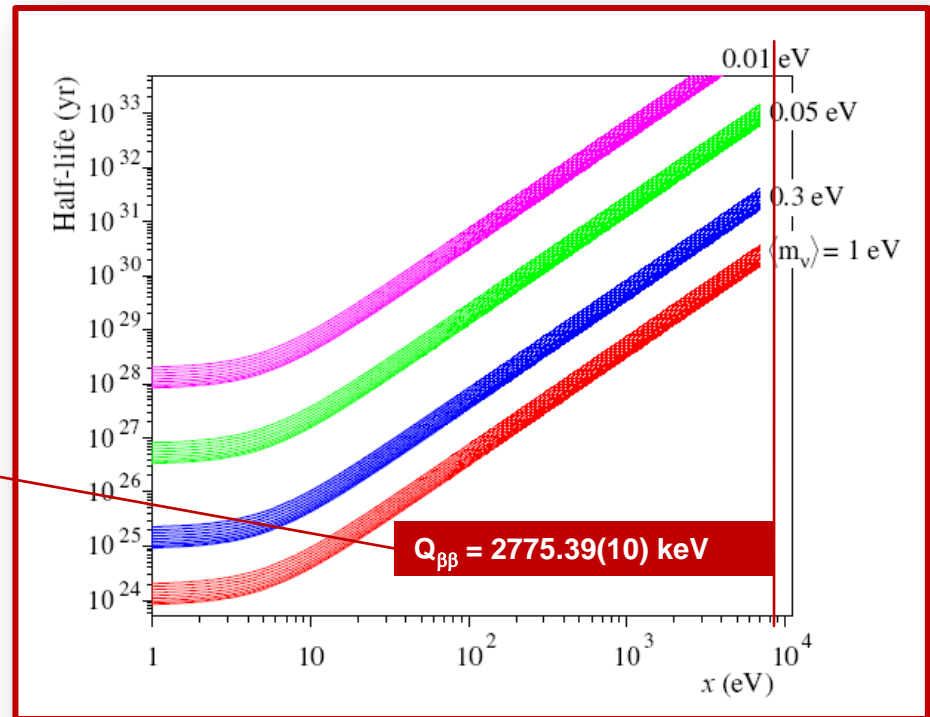


Simulazione della risposta del rivelatore di $^{106}\text{CdWO}_4$ per modi di decadimenti 2β in ^{106}Cd

Decadimento con effetto risonante del modo $0\nu 2\varepsilon$

Calcolo teorico del $T_{1/2}$ usando il modello higher-RPA per un modo di decadimento risonante $0\nu 2\varepsilon$ in un nucleo figlio di ^{106}Pd di livello energetico 2718 keV

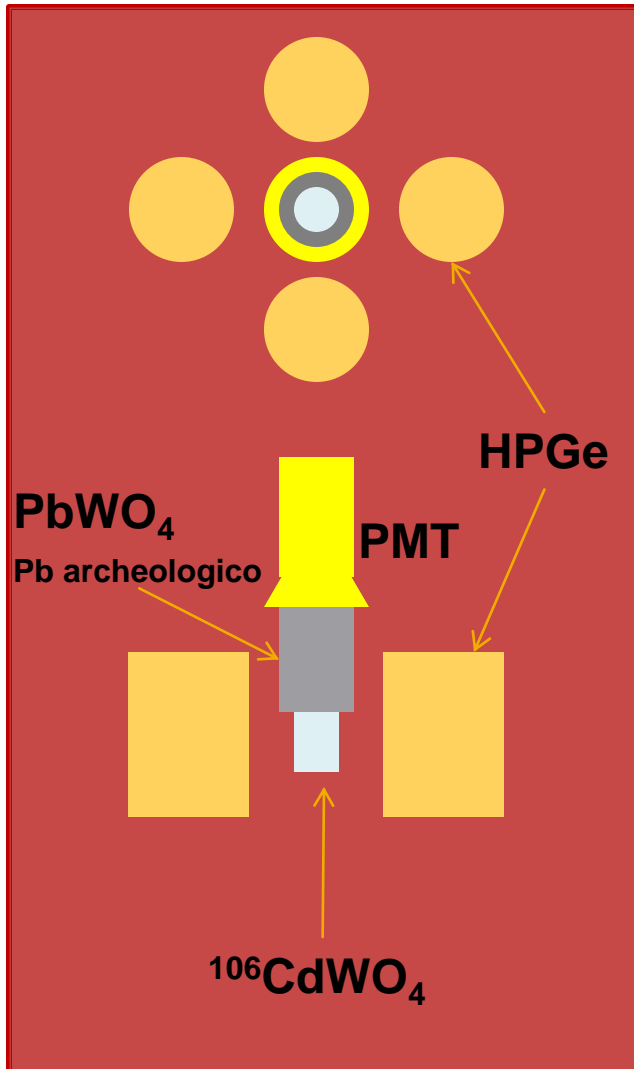
$$T_{1/2} = (2.1 - 5.7) \cdot 10^{30} \text{ anni}$$



Tansizione	Livello [keV]	$T_{1/2}$ [anni] (90% C.L.)
$0\nu 2K$	2718	$>3.8 \cdot 10^{20}$
$0\nu KL$	2741 (4^+)	$>9.6 \cdot 10^{20}$

Caso di una doppia cattura elettronica da shell KK o KL in cui l'energia rilasciata è pari, tenuto conto degli errori, all'energia del livello eccitato del nucleo figlio. Questo produce un effetto, detto risonante, che in generale può aumentare, rispetto al caso non risonante, di alcuni ordini di grandezza la probabilità del decadimento della doppia cattura elettronica.

Sviluppo futuro: $^{106}\text{CdWO}_4$ in HPGe



- $^{106}\text{CdWO}_4$ in coincidenza o anticoincidenza con HPGe
- Fondo atteso di qualche evento durante un anno di presa dati

Sensibilità attesa per $2\nu\epsilon\beta^+$ e $2\nu2\beta^+$ in ^{106}Cd :

$$T_{1/2} \sim 10^{20} - 10^{21} \text{ anni}$$

Previsione teorica:

$$2\nu2\text{K} \quad T_{1/2} \sim 10^{20} - 5 \cdot 10^{21} \text{ anni}$$

$$2\nu\epsilon\beta^+ \quad T_{1/2} \sim 8 \cdot 10^{20} - 4 \cdot 10^{22} \text{ anni}$$

Ulteriore possibile step futuro:

Produzione di $^{106}\text{CdWO}_4$ impoverito da ^{113}Cd per abbattere il fondo dovuto alla presenza del $^{113\text{m}}\text{Cd}$

Conclusioni

Sono stati ottenuti nuovi limiti sperimentali sui $T_{1/2}$ dei vari modi di decadimento, mostrati di seguito:

$$T_{1/2} (2\nu\varepsilon\beta^+) > 7.7 \cdot 10^{19} \text{ anni}$$

$$\text{previsione: } T_{1/2} \sim 8 \cdot 10^{20} - 4 \cdot 10^{22}$$

$$T_{1/2} (2\nu2\beta^+) > 3.9 \cdot 10^{20} \text{ anni}$$

$$\text{previsione: } T_{1/2} \sim 3.3 \cdot 10^{25} - 1.8 \cdot 10^{27}$$

$$T_{1/2} (0\nu2\varepsilon) > 2.4 \cdot 10^{21} \text{ anni}$$

Primi limiti sulla doppia cattura elettronica con effetto risonante:

$$T_{1/2} (0\nu2K) (\text{g.s.} \rightarrow 2718) > 3.8 \cdot 10^{20} \text{ anni}$$

$$T_{1/2} (0\nu LK) (\text{g.s.} \rightarrow 2741) > 9.6 \cdot 10^{20} \text{ anni}$$

Calcoli teorici, usando higher-RPA e una massa del neutrino pari a 1eV, danno:

$$T_{1/2} 0\nu2K (\text{g.s.} \rightarrow 2718) \approx (2.1 - 5.7) \cdot 10^{30} \text{ anni}$$

—————> Punto di partenza per ulteriori sviluppi

E' in programma la messa in opera di un nuovo setup sperimentale usando il cristallo scintillatore di $^{106}\text{CdWO}_4$ con 4-HPGe con una sensibilità di almeno $\sim 10^{21-22}$ anni, che è un valore che potrebbe permettere la rivelazione di modi di decadimenti 2β a 2ν .

Grazie per l'attenzione

