

# Ricerca di modi di decadimento doppio beta senza emissioni di neutrini in canali $0\nu 2\varepsilon$ con effetto risonante al LNGS

Belli P.<sup>1</sup>, Bernabei R.<sup>1,2</sup>, Boiko R.S.<sup>3</sup>, Brudanin V.B.<sup>4</sup>, Cappella F.<sup>5,6</sup>, Caracciolo V.<sup>7</sup>, Cerulli R.<sup>7</sup>, Chernyak D.M.<sup>3</sup>, Danevich F.A.<sup>3</sup>, d'Angelo S.<sup>1,2</sup>, Dossovitskiy A.E.<sup>8</sup>, Di Marco A.<sup>1</sup>, Di Vacri M.L.<sup>7</sup>, Galashov E.N.<sup>9</sup>, Grinyov B.V.<sup>10</sup>, Incicchitti A.<sup>5,6</sup>, Kobychhev V.V.<sup>3</sup>, Kropivnyansky B.N.<sup>3</sup>, Kudovbenko, V.M.<sup>3</sup>, Laubenstein M.<sup>7</sup>, Mikhlin A.L.<sup>8</sup>, Nagornaya L.L.<sup>10</sup>, Nagorny S.S.<sup>3</sup>, Nikolaiko A.S.<sup>3</sup>, Nisi S.<sup>6</sup>, Nozzoli F.<sup>1,2</sup>, Poda D.V.<sup>3,7</sup>, Podviyanuk R.B.<sup>3</sup>, Polischuk O.G.<sup>3</sup>, Prospero D.<sup>5,6,†</sup>, Shlegel V.N.<sup>9</sup>, Stenin Y.G.<sup>9</sup>, Suhonen J.<sup>11</sup>, Tolmachev A.V.<sup>12</sup>, Tretyak V.I.<sup>3</sup>, Vasiliev Y.V.<sup>9</sup>, Yavetskiy R.P.<sup>12</sup>, Yurchenko S.S.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> INFN, Sezione di Roma "Tor Vergata"

<sup>2</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Roma "Tor Vergata"

<sup>3</sup> Institute for Nuclear Research, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup> Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

<sup>5</sup> INFN, Sezione di Roma "La Sapienza"

<sup>6</sup> Dipartimento di Fisica, Università di Roma "La Sapienza"

<sup>7</sup> INFN, Laboratori Nazionali del Gran Sasso

<sup>8</sup> Joint Stock Company NeoChem, Moscow, Russia

<sup>9</sup> Nikolaev Institute of Inorganic Chemistry, Novosibirsk, Russia

<sup>10</sup> Institute for Scintillation Materials, Kharkiv, Ukraine

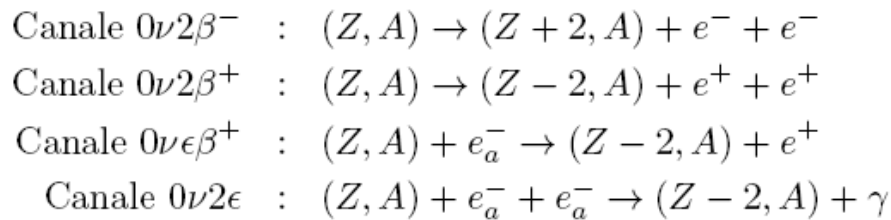
<sup>11</sup> Department of Physics, University of Jyväskylä, Finland

<sup>12</sup> Institute for Single Crystals, Kharkiv, Ukraine

†Deceased

# Il doppio decadimento $0\nu\beta\beta$ ed il caso $0\nu2\varepsilon$ risonante

Canali di decadimento doppio beta  $0\nu$ :



Canale più studiato:  $2\beta^-$ , sensibilità sperimentale iniziale  $T_{1/2} \sim 10^{15}$ - $10^{18}$  anni (anni 1940/50).

Attuale sensibilità per il canale  $2\nu2\beta^-$ :  $T_{1/2} \sim 10^{18}$ - $10^{24}$  anni; e per il canale  $0\nu2\beta^-$ :  $T_{1/2} \sim 10^{23}$ - $10^{25}$  anni.

Studio di canali positivi: più recenti e meno studiati. Sensibilità sperimentali raggiunte  $T_{1/2} \sim 10^{16}$ - $10^{21}$  anni

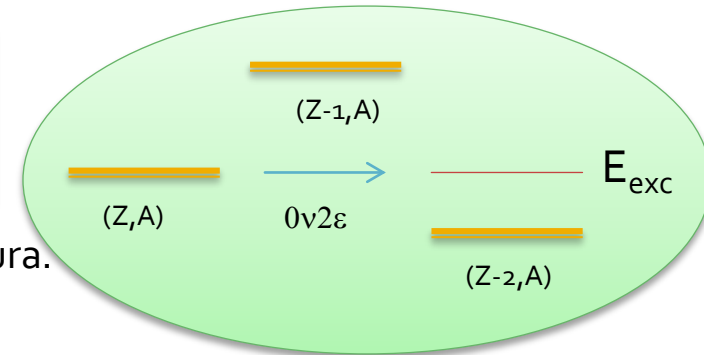
Possibilità del decadimento doppio beta  $0\nu2\varepsilon$  risonante.

## $0\nu2\varepsilon$ risonante

L'energia rilasciata è pari all'energia del livello energetico eccitato del nucleo figlio:  $Q = Q_{2\beta} - E_{b1} - E_{b2} = E_{exc}$  ( $Q_{2\beta} = \Delta M_a$ )

La possibilità di tale effetto risonante è stato discusso in letteratura. Esso può aumentare di alcuni ordini di grandezza il tasso del decadimento  $0\nu2\varepsilon$  risonante rispetto al caso non risonante.

Nel caso di degenerazione quasi esatta ( $Q \approx E_{exc}$ ) la cattura risonante  $0\nu2\varepsilon$  potrebbe competere col decadimento  $0\nu2\beta^-$  nello studio della sensibilità di  $m_\nu$



Articoli di interesse in letteratura:

Winter R.G. Phys. Rev. 100 (1955) 142

M.B. Voloshin, et al., JETP Lett. 35 (1982) 656

J. Bernabeu, A. De Rujula, C. Jarlskog, Nucl. Phys. B 223 (1983) 15

Z. Sujkowski, S. Wycech, Phys. Rev. C 70 (2004) 052501

M.I. Krivoruchenko et al., Nucl. Phys. A 859 (2011) 140

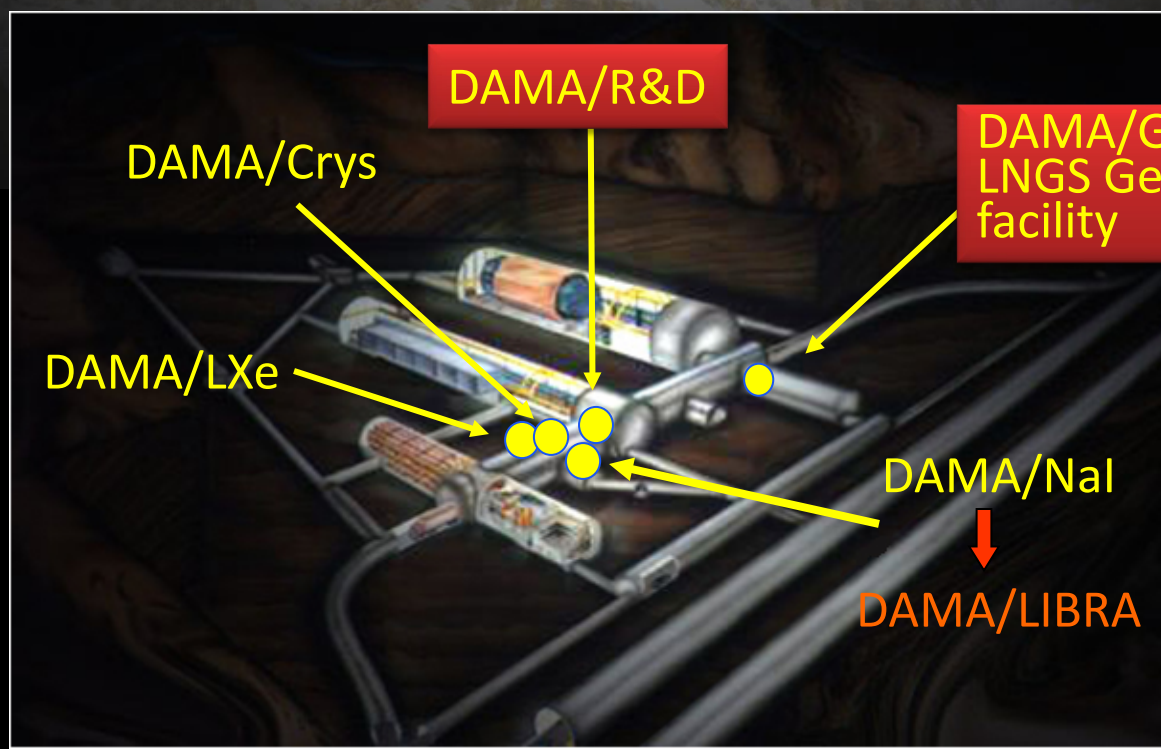
J. Suhonen, Phys. Lett. B 701 (2011) 490

**Molti dei risultati che presentiamo sono stati conseguiti negli ultimi tre anni**

# IL SITO SPERIMENTALE



DAMA: un osservatorio per processi rari @LNGS



# CeCl<sub>3</sub> con HP-Ge

Cristallo CeCl<sub>3</sub> di 6.85 g con HP-Ge 244 cm<sup>3</sup>  
T = 1280h

## Isotopi di interesse:

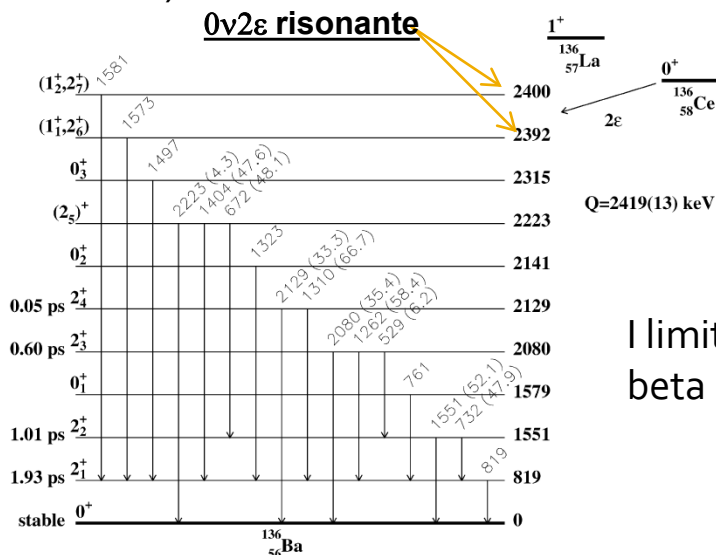
<sup>142</sup>Ce → δ = 11.114%, Q<sub>2β</sub> = (1416.7±2.1) keV, 2β-

<sup>138</sup>Ce → δ = 0.251%, Q<sub>2β</sub> = (693±10) keV, 2ε

<sup>136</sup>Ce → δ = 0.185%, Q<sub>2β</sub> = (2419±13) keV, 2ε, εβ+, 2β+, 0ν2ε risonante



L'energia rilasciata nella doppia cattura elettronica da *shell* L (6.0 keV) del <sup>136</sup>Ce è pari a Q(2L<sub>1</sub>) = (2407±13) keV



$$E_{exc} = 2392.1 \text{ keV}$$

$$E_{exc} = 2399.9 \text{ keV}$$

$$T_{1/2} > 2.4 \cdot 10^{15} \text{ yr}$$

$$T_{1/2} > 4.1 \cdot 10^{15} \text{ yr}$$

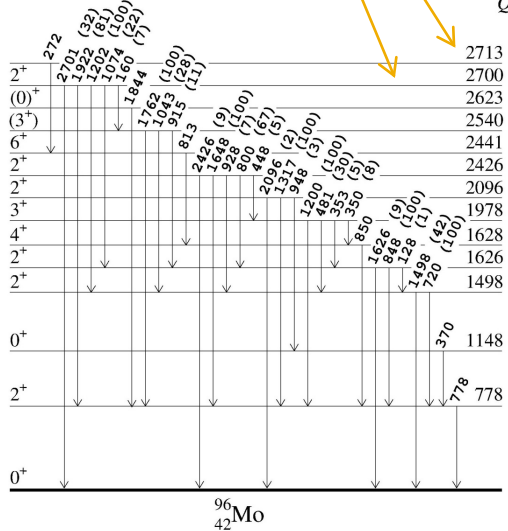
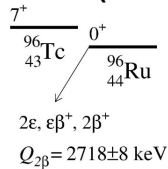
I limiti sperimentali raggiunti per altri canali di decadimento doppio beta in <sup>136</sup>Ce e <sup>138</sup>Ce sono: T<sub>1/2</sub> > (1-6) · 10<sup>15</sup> yr

# Ru con HP-Ge

Isotopi di interesse:  $^{96}\text{Ru}$  ( $2\beta^+$ ) e  $^{104}\text{Ru}$  ( $2\beta^-$ )

**$^{96}\text{Ru}$  è interessante perché:**

- (1)  $Q_{2\beta} = 2718 \pm 8 \text{ keV}$  ed è uno dei soli 6 isotopi che manifestano tutti i tre tipi di decadimento doppio beta **in canali positivi**
- (2) Abbondanza naturale relativamente alta  $\delta = 5.54\%$
- (3) Possibilità della doppia cattura elettronica  $0\nu 2\varepsilon$  con **effetto risonante**.
- (4) Per alcuni modelli le stime teoriche del  $T_{1/2}$  sono:  $2\nu 2\varepsilon - (4.7\text{-}39) \times 10^{20} \text{ yr}$ ,  $2\nu \varepsilon\beta^+ - (2.0\text{-}23) \times 10^{21} \text{ yr}$  (g.s.→g.s.), J. Suhonen, PRC 86 (2012) 024301



**Prima fase:** 473g con HP-Ge 468 cm<sup>3</sup> T= 158h, ma contaminato da  $^{40}\text{K}$  (3.4(6) Bq/kg) P. Belli et al., EPJA 42 (2009) 171



**Seconda fase:** campione di 720g di rutenio purificato posto in un *setup* sperimentale a bassa radioattività intrinseca con 4 HP-Ge di 225 cm<sup>3</sup> T = 5479 h ( $A(^{40}\text{K}) = 154(4) \text{ mBq/kg}$ )

$$E_b(K) = 20.0 \text{ keV}, \quad E_b(L_1) = 2.9 \text{ keV}$$

$$Q(KL_1) = (2695 \pm 8) \text{ keV} \rightarrow E_{\text{exc}} = 2700 \text{ keV}$$

$$Q(2L_1) = (2712 \pm 8) \text{ keV} \rightarrow E_{\text{exc}} = 2713 \text{ keV}$$

Articolo in preparazione.

$$T_{1/2} > 2.0 \cdot 10^{20} \text{ yr}$$

$$T_{1/2} > 3.6 \cdot 10^{20} \text{ yr}$$

Tutti i limiti sperimentali sono stati migliorati rispetto a quelli di letteratura Norman'1985 e HADES'2012

Step successivo: raggiungere la sensibilità prevista per il  $T_{1/2}$  teorico del canale  $2\nu \varepsilon\beta^+$ ; sensibilità che non è molto lontana da quella raggiunta.

# Dysprosium con HP-Ge

Primo apparato sperimentale per lo studio del decadimento  $\beta\beta$  da isotopi di Dy con un HP Ge 244 cm<sup>3</sup>

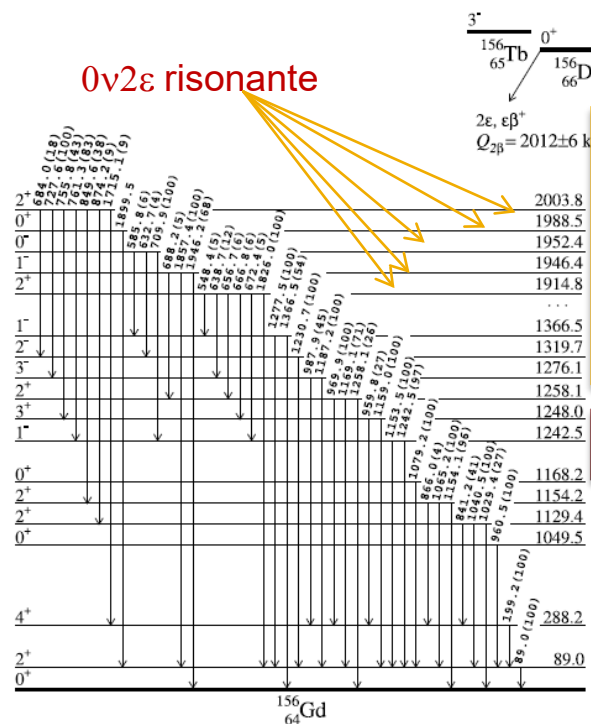
Campione di 322 g di Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> T = 2512 h

P.Belli et al, NPA 859(2011) 126

Isotopi di interesse:

<sup>156</sup>Dy →  $\delta = 0.056\%$ ,  $Q_{2\beta} = (2012 \pm 6)$  keV,  $2\varepsilon \varepsilon\beta^+$  0ν2ε risonante

<sup>158</sup>Dy →  $\delta = 0.095\%$ ,  $Q_{2\beta} = (284.6 \pm 2.5)$  keV,  $2\varepsilon$  0ν2ε risonante



$E_b(K)=50.2$  keV,  $E_b(L_1)=8.4$  keV,  $E_b(L_3)=7.2$  keV

$Q(2K) = (1912 \pm 6)$  keV →  $E_{exc} = 1915$  keV  
 $Q(KL_1) = (1954 \pm 6)$  keV →  $E_{exc} = 1946$  keV  
 $Q(KL_1) = (1954 \pm 6)$  keV →  $E_{exc} = 1952$  keV  
 $Q(2L_1) = (1995 \pm 6)$  keV →  $E_{exc} = 1989$  keV  
 $Q(2L_3) = (1998 \pm 6)$  keV →  $E_{exc} = 2004$  keV

$T_{1/2} > 1.1 \cdot 10^{16}$  yr  
 $T_{1/2} > 9.6 \cdot 10^{15}$  yr  
 $T_{1/2} > 2.6 \cdot 10^{16}$  yr  
 $T_{1/2} > 1.9 \cdot 10^{16}$  yr  
 $T_{1/2} > 3.0 \cdot 10^{14}$  yr

$Q(2L_1) = (267.8 \pm 2.5)$  keV →  $E_{exc} = 261.5$  keV

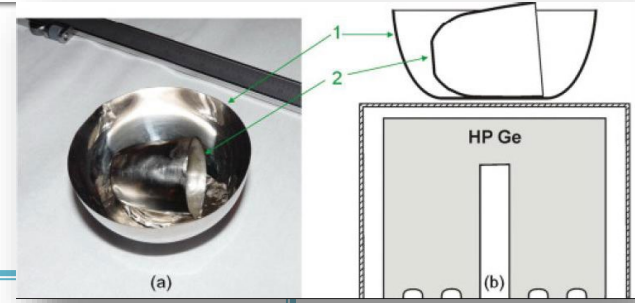
$T_{1/2} > 3.2 \cdot 10^{16}$  yr

Limiti posti su altri canali di decadimento  $2\beta$  da <sup>156</sup>Dy e da <sup>158</sup>Dy:  
 $T_{1/2} > (1.8 \cdot 10^{14} - 7.1 \cdot 10^{16})$  yr

Nuovo  $Q_{2\beta}$  per <sup>156</sup>Dy:  $(2005.95 \pm 0.10)$  keV [S. Eliseev et al., PRC 84 (2011) 012501].

# $^{190}\text{Pt}$ con HP-Ge

Campione di platino di **42.5 g**  
 Setup sperimentale di basso fondo intrinseco con spettrometro **HP Ge 468 cm<sup>3</sup>**  
**T = 1815 h**

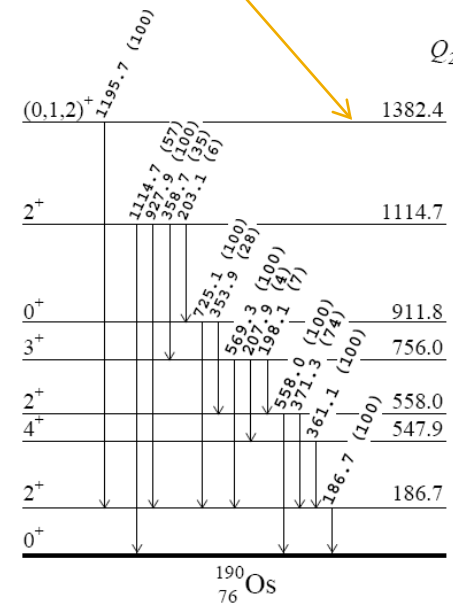
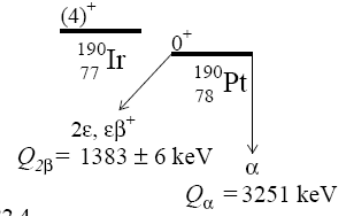


**Isotopi di interesse:**  
 $^{190}\text{Pt} \rightarrow \delta = 0.014\%$ ,  $Q_{2\beta} = (1383 \pm 6) \text{ keV}$ ,  $2\varepsilon, \varepsilon\beta^+$   
 $^{198}\text{Pt} \rightarrow \delta = 7.163\%$ ,  $Q_{2\beta} = (1047 \pm 3) \text{ keV}$ ,  $2\beta^-$

**$0\nu 2\varepsilon$  risonante**

$E_b(M_{1-5}) = (3.0-2.0) \text{ keV}$   
 $E_b(N_{1-7}) = (0.65-0.05) \text{ keV}$   
 $E_{exc} = 1382 \text{ keV}$

$T_{1/2} > 2.9 \cdot 10^{16} \text{ yr}$



**Limiti posti su altre transizioni doppio beta:**

$^{190}\text{Pt}$ :  $T_{1/2} > (8.4 \cdot 10^{14} - 3.1 \cdot 10^{16}) \text{ yr}$

$^{198}\text{Pt}$ :  $T_{1/2} > 3.5 \cdot 10^{18} \text{ yr}$

**In letteratura i limiti sui tempi di dimezzamento dei decadimenti studiati sono assenti o dell'ordine di  $10^{11} \text{ yr}$ .**

Contaminazioni radioattive:  $^{192\text{m}}\text{Ir}$  (40 mBq/kg) e  $^{137}\text{Cs}$  (7 mBq/kg)

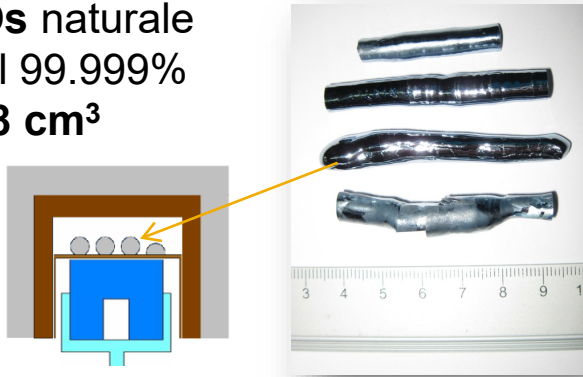
P. Belli et al., Eur. Phys. J. A 47 (2011) 91

**Prima osservazione del decadimento  $\alpha$  del  $^{190}\text{Pt}$  al primo livello eccitato ( $E_{exc} = 137.2 \text{ keV}$ ) di  $^{186}\text{Os}$**  P. Belli et al., Phys. Rev. C 83 (2011) 034603

# $^{184}\text{Os}$ con HP-Ge

Campione di **Os** naturale  
**172.5 g** puro al 99.999%  
 con **HP Ge 468 cm<sup>3</sup>**

Resultati preliminari



# $^{180}\text{W}$ con $\text{ZnWO}_4$

(sorgente attiva)

Utilizzati vari **cristalli scintillatori** di  $\text{ZnWO}_4$   
 per una esposizione totale di **0.529 kg · yr**

**Isotopi di interesse:**

$^{180}\text{W} \rightarrow \delta = 0.12\%, Q_{2\beta} = (144 \pm 4) \text{ keV}, 2\varepsilon \quad 0\nu 2\varepsilon \text{ risonante}$

$^{186}\text{W} \rightarrow \delta = 28.43\%, Q_{2\beta} = (489.9 \pm 1.4) \text{ keV}, 2\beta^-$

$^{64}\text{Zn} \rightarrow \delta = 49.17\%, Q_{2\beta} = (1095 \pm 7) \text{ keV}, 2\varepsilon \quad \varepsilon\beta^+$

$^{70}\text{Zn} \rightarrow \delta = 0.61\%, Q_{2\beta} = (988.5 \pm 2.2) \text{ keV}, 2\beta^-$

**Isotopi di interesse:**

$^{184}\text{Os} \rightarrow \delta = 0.02\%, Q_{2\beta} = (1451.2 \pm 1.0) \text{ keV}, 2\varepsilon \quad \varepsilon\beta^+$

**$0\nu 2\varepsilon$  risonante**

$^{192}\text{Os} \rightarrow \delta = 40.78\%, Q_{2\beta} = (412.4 \pm 2.9) \text{ keV}, 2\beta^-$

$E_b(\text{K}) = 65.4 \text{ keV}$

$Q(2\text{K}) = (13 \pm 4) \text{ keV} \rightarrow \text{g.s.}$

$T_{1/2} > 1.3 \times 10^{18} \text{ yr}$

Limiti su diversi canali di decadimento per gli  
 isotopi  $^{64}\text{Zn}, ^{70}\text{Zn}, ^{180}\text{W}, ^{186}\text{W}$ :

$T_{1/2} > (1.0 \cdot 10^{18} - 1.0 \cdot 10^{21}) \text{ yr}$

( $T_{1/2}$  migliorati rispetto ai dati in letteratura di uno o due ordini di grandezza)

$^{64}\text{Zn} \rightarrow ^{64}\text{Ni}$
$^{70}\text{Zn} \rightarrow ^{70}\text{Ge}$
$^{180}\text{W} \rightarrow ^{180}\text{Hf}$
$^{186}\text{W} \rightarrow ^{186}\text{Os}$

P. Belli et al, J.Phys.G G38 (2011) 115107

$E_b(\text{K}) = 69.5 \text{ keV}$

$Q(2\text{K}) = 1312.2 \pm 1.0 \text{ keV}$

$E_{\text{exc}} = 1322.2 \text{ keV}$

$T_{1/2} \geq 1.3 \cdot 10^{16} \text{ yr}$

Primo esperimento per lo studio di modi di decadimento  $2\beta$  in  $^{184}\text{Os}$ .

Indicazione positiva del decadimento a da  $^{184}\text{O}$  al primo livello eccitato di  $^{180}\text{W}$

**Futuro:** nuovo esperimento per raggiungere sensibilità maggiori attualmente limitata dalla forma del campione



# $^{106}\text{Cd}$ con $^{106}\text{CdWO}_4$ (sorgente attiva)

Sviluppato un cristallo scintillatore di  $^{106}\text{CdWO}_4$  di 216g arricchito al 66.4% in  $^{106}\text{Cd}$

P. Belli et al, Nucl. Instrum. Meth A 615 (2010) 301

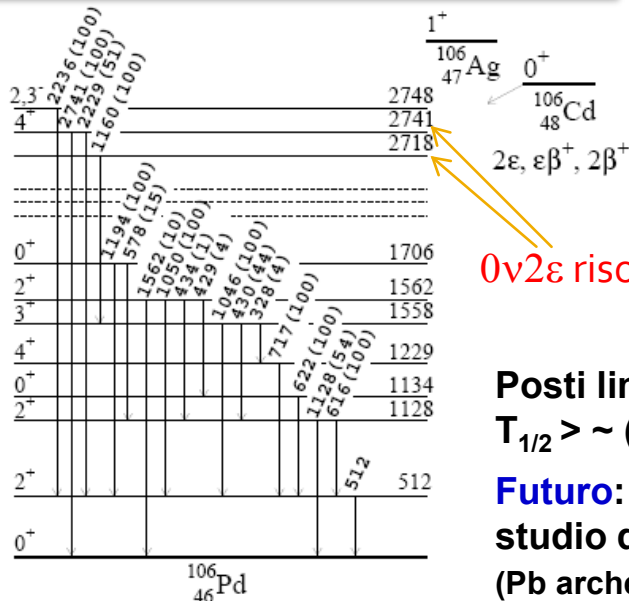
## Isotopo di interesse:

$^{106}\text{Cd} \rightarrow \delta_{\text{nat}} = 1.25\%$ ,  $Q_{2\beta} = (2770 \pm 7)$  keV,  $2\beta^+$ ,  $2\varepsilon$ ,  $\varepsilon\beta^+$   
0v2\varepsilon risonante (1 di soli 6 isotopi che permettono tutti i 3 tipi di decadimento doppio beta in canali positivi)

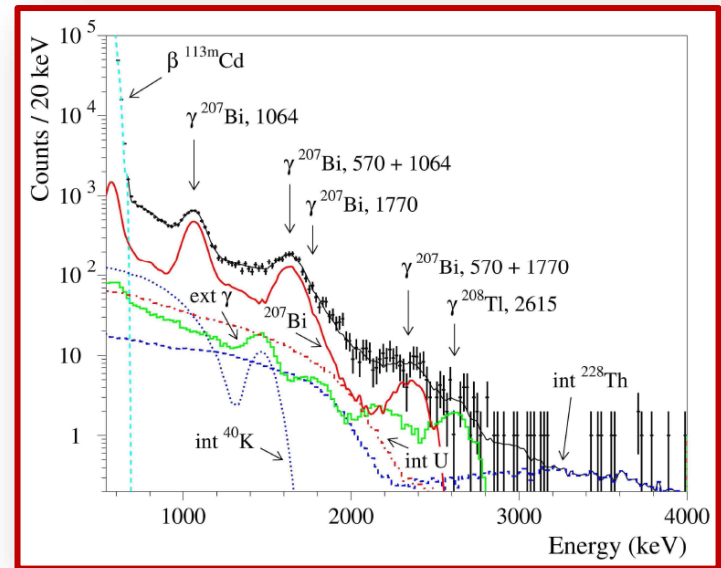
$E_b(K) = 24.4$  keV,  $E_b(L_1) = 3.6$  keV

$Q(KL_1) = (2742 \pm 7)$  keV  $\rightarrow E_{\text{exc}} = 2741$  keV  
 $Q(2K) = (2721 \pm 7)$  keV  $\rightarrow E_{\text{exc}} = 2718$  keV

$T_{1/2} > 9.5 \cdot 10^{20}$  yr  
 $T_{1/2} > 4.3 \cdot 10^{20}$  yr



0v2\varepsilon risonante



P. Belli et al, Phys.Rev. C85 (2012) 044610

Posti limiti su molti altri canali di decadimento doppio beta in  $^{106}\text{Cd}$ :  
 $T_{1/2} > \sim (10^{20} - 10^{21})$  yr (tra i migliori limiti in letteratura)

**Futuro:** nuovo setup sperimentale per aumentare la sensibilità nello studio di modi di decadimento  $2\beta$ :  $^{106}\text{CdWO}_4$  con guida di luce in  $\text{PbWO}_4$  (Pb archeologico) + 4 HP Ge 225 cm<sup>3</sup>

# Conclusioni

- Sono stati studiati diversi decadimenti doppio beta  $0\nu 2\varepsilon$  con effetto **risonante** in  $^{96}\text{Ru}$ ,  $^{106}\text{Cd}$ ,  $^{136}\text{Ce}$ ,  $^{156,158}\text{Dy}$ ,  $^{180}\text{W}$ ,  $^{190}\text{Pt}$  impiegando rivelatori HP -Ge o con cristalli scintillatori  $\text{ZnWO}_4$  e  $^{106}\text{CdWO}_4$ .

Sensibilità raggiunte:  $T_{1/2} > (3.0 \cdot 10^{14} - 9.5 \cdot 10^{20}) \text{yr}$

- I limiti sperimentali ottenuti sono **tra i migliori** in letteratura, migliore dei precedenti di qualche ordine di grandezza oppure ottenuti per la prima volta.

- Nello studio dei decadimenti doppio beta con effetto risonante è necessaria una ottima conoscenza del valore di  $Q_{2\beta}$  e delle proprietà dei livelli energetici dei nuclei figli ( $J^\pi$ ). Recentemente in letteratura sono stati fatti diversi progressi in tal senso per alcuni nuclei ( $^{74}\text{Se}$ ,  $^{96}\text{Ru}$ ,  $^{102}\text{Pd}$ ,  $^{106}\text{Cd}$ ,  $^{112}\text{Sn}$ ,  $^{120}\text{Te}$ ,  $^{128}\text{Te}$ ,  $^{130}\text{Te}$ ,  $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{136}\text{Ce}$ ,  $^{144}\text{Sm}$ ,  $^{150}\text{Nd}$  ed altri).

- Sono in fase di preparazione **nuovi setup** sperimentali per migliorare le sensibilità raggiunte.

**Grazie per l'attenzione**