

Determinazione della massa del neutrino tramite la ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini



Marisa Pedretti
Università dell'Insubria
INFN-Milano



Linea della presentazione

- Il Doppio Decadimento Beta
- Cosa possiamo imparare a proposito del neutrino dal Doppio Decadimento Beta?
- Approcci sperimentali al Doppio Decadimento Beta
- Esperimenti di Doppio Decadimento Beta senza neutrini
- Prospettive future
- Conclusioni

Neutrino di Dirac e di Majorana

Domanda: qual'e' la differenza tra un **neutrino ν** e un **antineutrino $\bar{\nu}$** ?



due modi per spiegare questo comportamento

numero leptonic differente

differente elicit 

$$L(\nu_e, e^-) = -1$$

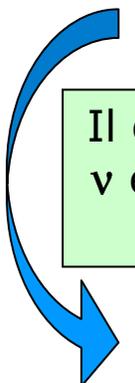
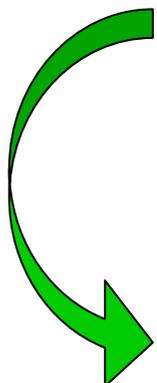
$$L(\bar{\nu}_e, e^+) = +1$$

$$H(\nu_e) = -1$$

$$H(\bar{\nu}_e) = +1$$

Il numero leptonic, come una **carica**,   strettamente conservata

Il comportamento del ν   determinato solo dalla elicit 



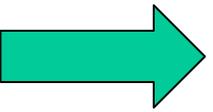
Dirac

$$\nu_e \neq \bar{\nu}_e$$

Majorana

$$\nu_e = \bar{\nu}_e$$

Se $m_\nu = 0$



$L = H$

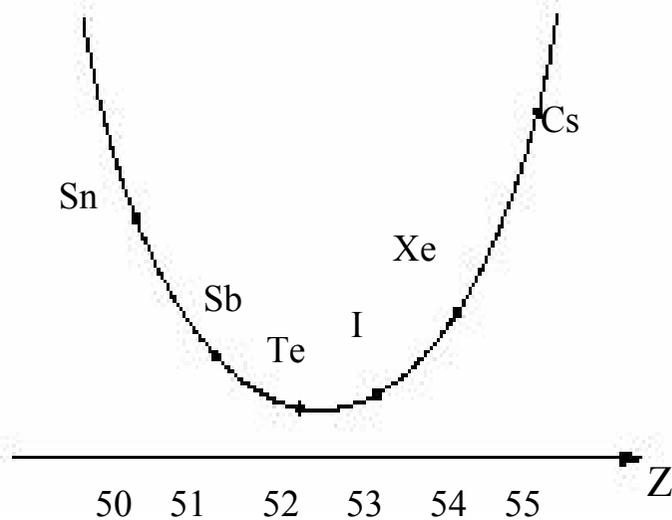
DIRAC = MAJORANA

Ma noi sappiamo che il ν ha massa

Neutrino di Dirac e di Majorana

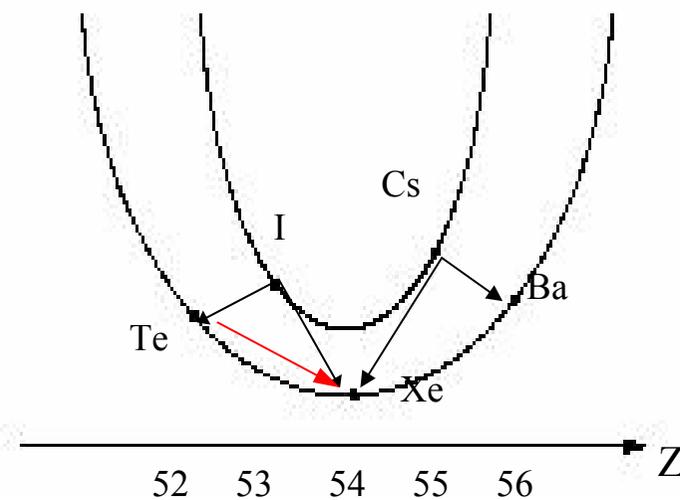
L'**unico** esperimento che può testare la natura del neutrino e' un decadimento nucleare **raro** chiamato Doppio Decadimento Beta senza neutrini

Pari-Dispari $A=125$



$A=130$

Pari-Pari



E' possibile osservare il DDB per quei nuclei con A pari per i quali il decadimento beta singolo e' fortemente soppresso.

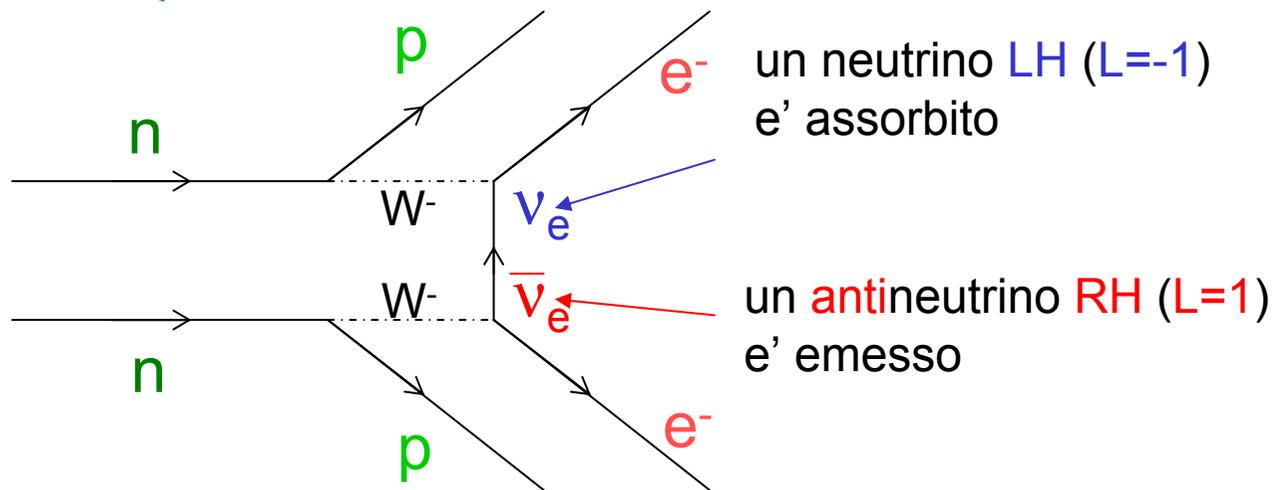
Per esempio il ^{130}Te non può fare un decadimento beta singolo perché energeticamente proibito ma e' possibile solo il DDB sullo ^{130}Xe

Natura del Neutrino e DDB0ν

◆ Normalmente si discutono **due canali** di DDB:

① **DDB2ν**: $(A,Z) \rightarrow (A,Z+2) + 2e^- + 2\bar{\nu}_e \rightarrow$ Permessato dal SM

② **DDB0ν**: $(A,Z) \rightarrow (A,Z+2) + 2e^- \rightarrow$ Implica una fisica "OLTRE SM"



- Se $m_\nu \neq 0$ e natura V e' di Dirac allora DDB0ν e' proibito
- Se $m_\nu \neq 0$ e natura V Majorana allora DDB e' permesso

Osservazione di **DDB0ν**



$$m_\nu \neq 0$$

$$\bar{\nu} \equiv \nu$$

DDB0ν e massa del neutrino

rate DDB
senza V

spazio delle fasi

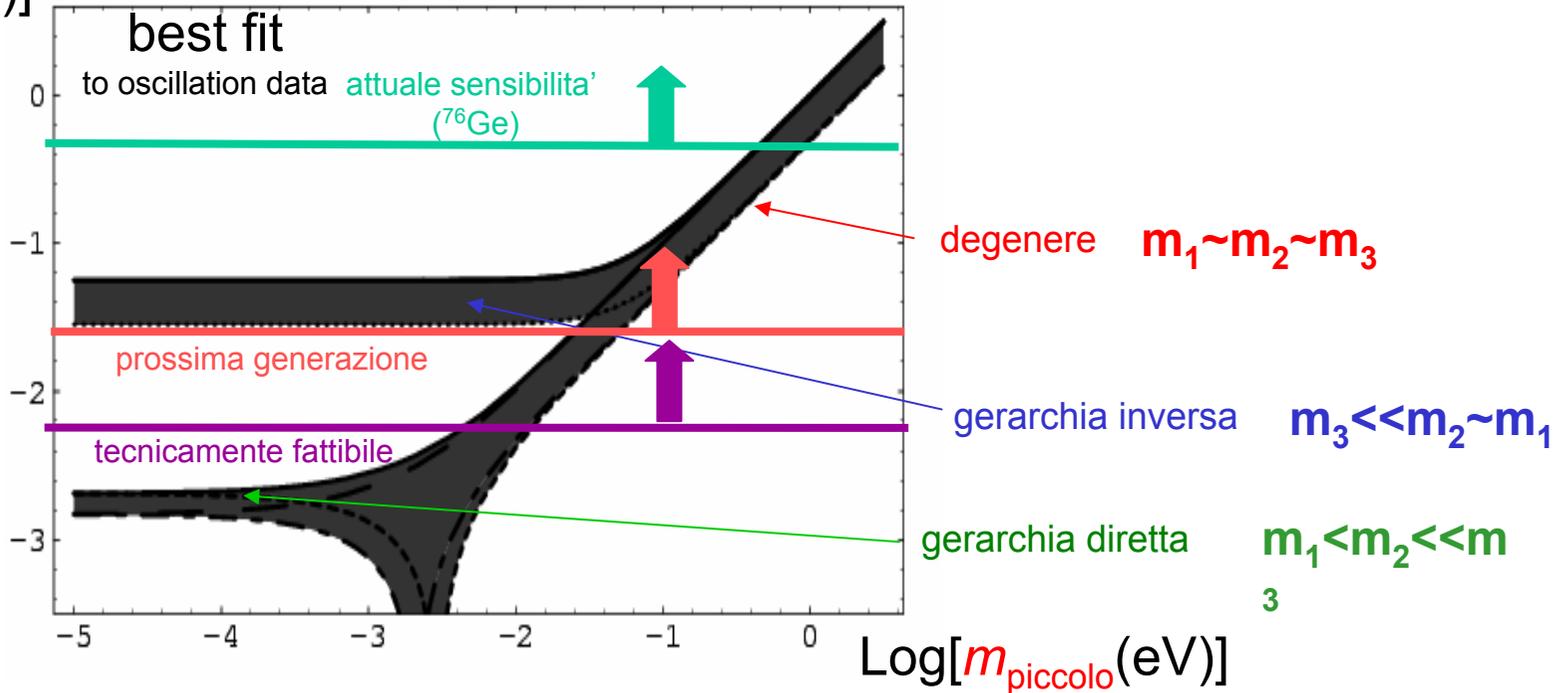
elementi matrice
nucleare

Massa Efficace
di Majorana

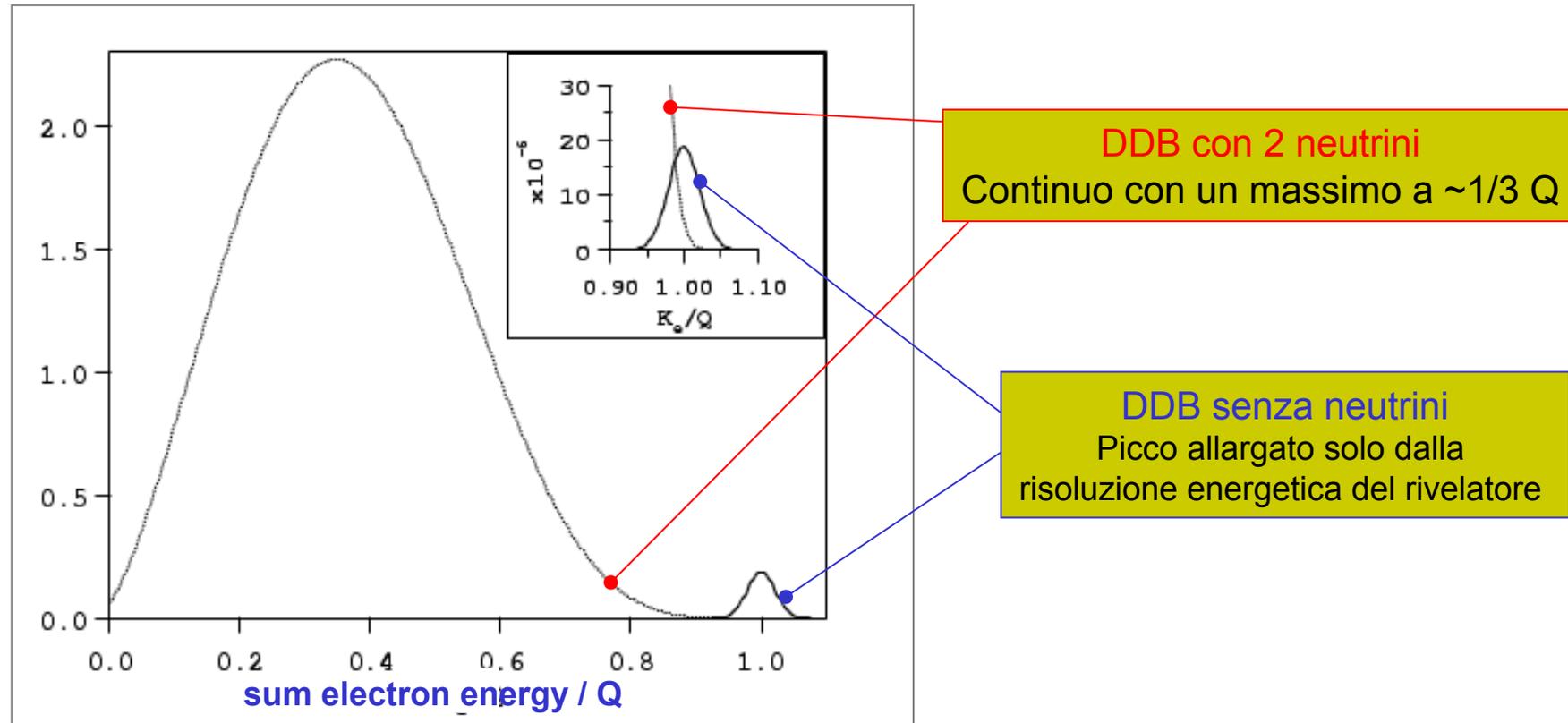
$$1/\tau = G(Q,Z) |M_{\text{nucl}}|^2 m_{ee}^2$$

$$m_{ee} \sim U_{e1}^2 m_1 + U_{e2}^2 m_2 + U_{e3}^2 m_3$$

Log[m_{ee} (eV)]



Spettro energetico degli elettroni nel DDB

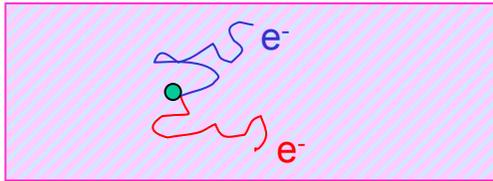


Il DDB con 2 neutrini può essere un fondo pericoloso per il DDB senza neutrini

Approcci sperimentali

Due approcci per rivelare i due e^- :

①

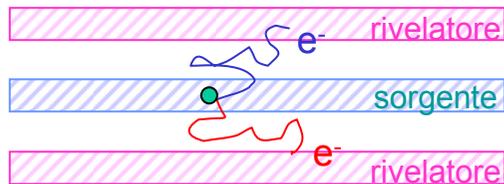


Sorgente \equiv Rivelatore
(tecnica calorimetrica)



- ☹️ limitazioni sul **materiale del rivelatore**
- 😊 sono possibili **grandi masse**
dimostrato: fino ~ 50 kg
proposto: fino ~ 1000 kg
- 😊 con una opportuna scelta del rivelatore,
ottime risoluzioni energetiche
diodi al Ge
bolometri

②



Sorgente \neq Rivelatore



- 😊 ricostruzione **topologia dell'evento**
- 😊 possono essere studiati **diversi candidati**
con lo stesso rivelatore
- ☹️ **difficoltà** nell'avere sorgenti con grandi
masse

Approcci sperimentali

Sensibilità F: vita media corrispondente al numero minimo di eventi rilevabile sopra un fondo a un dato livello di confidenza (1 s)

$$\text{Sensibilità } m_{ee} \propto (F/G |M_{\text{nucl}}|^2)^{1/2} \propto \frac{1}{G^{1/2} |M_{\text{nucl}}|} \left[\frac{b\Delta E}{MT} \right]^{1/4}$$

Esperimento ideale

- buona energia di risoluzione
- basso fondo
- grandi sorgenti (molti nuclei sotto controllo)
- metodo di ricostruzione degli eventi

un **picco** deve essere rivelato sopra il fondo (0ν-DBD)

Schermo per i raggi cosmici

↳ sotterraneo

Materiali radio-puri

$^{238}\text{U} - ^{232}\text{Th} \Rightarrow \tau \sim 10^{10} \text{ y}$

Rate del segnale $\Rightarrow \tau \sim 10^{25} \text{ y}$

Attualmente esperimenti piu' sens.: 10 - 100 kg
Obiettivo futuro: ~ 1000 kg $\Rightarrow 10^{27} - 10^{28}$ nuclei

- reiezione del fondo
- studio dell'energia e della distribuzione angolare degli elettroni

Situazione sperimentale

Descriviamo brevemente **tre** esperimenti particolarmente interessanti:

- Heidelberg – Moscow (HM)

E' stato per circa 10 anni l'esperimento più sensibile al DDB

- NEMO3

E' un esperimento di generazione intermedia in grado di studiare differenti nuclei candidati al DDB

- CUORICINO

E' un esperimento di generazione intermedia che ha ormai raggiunto la sensibilità di HM

E' anche un test per un esperimento di futura generazione **CUORE** (**C**ryogenic **U**nderground **O**bservatory for **R**are **E**vents), che punta a sondare la **gerarchia inversa**.

Esperimento Heidelberg Moscow

Sorgente = Rivelatore

Tecnologia ben conosciuta dei diodi al Ge

- Cinque diodi Ge per una massa totale di **10.9 kg isotopic. arricchito (86%) ^{76}Ge**
- situato nei Laboratori **Sotterranei** del Gran Sasso (Italia)
- rivelatori **schermati da piombo** e flussati con azoto
- **Analisi della forma degli impulsi (PSA)** (riduzione di un fattore 5)

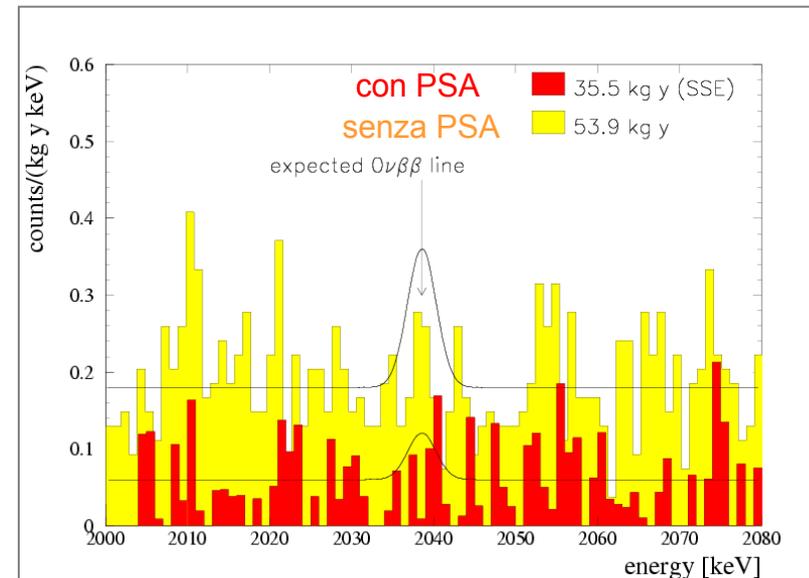
7.6×10^{25} ^{76}Ge nuclei

identificazione di eventi Multi-site
(fondo gamma)

Spettro di fondo nella regione del DDB

$b = 0.17$ conteggi/(keV kg y)

$m_{ee} < 0.3 - 2.5$ eV



HM: evidenze di DDB0ν

Nel dicembre 2001, 4 autori (KDHK) della collaborazione HM annunciano la **scoperta del DDB senza neutrini**

Immediato scetticismo della comunità DDB

Aalseth CE et al. , Mod. Phys. Lett. A 17 (2002) 1475
Feruglio F et al. , Nucl. Phys. B 637 (2002) 345
Zdezenko Yu G et al., Phys. Lett. B 546(2002)206

Commenti e rianalisi HD-M data

Klapdor-Kleingrothaus HV hep-ph/0205228
H.L. Harney, hep-ph/0205293

Risposte indipendenti degli autori

Klapdor-Kleingrothaus HV et al., NIM A 510(2003)281
Klapdor-Kleingrothaus et al., NIM A 522(2004)371

altri articoli

valore piu' probabile dell'evento:
28.7 in 71.7 kg y esposizione

KKDC evidenza: $m_{ee} = 0.1 - 0.9 \text{ eV}$ (**0.44 eV b.v.**)

$\tau_{1/2}^{0\nu}(\text{y}) = (0.69 - 4.81) \times 10^{25} \text{ y}$ (**$1.19 \times 10^{25} \text{ y b.v.}$**)

(99,9973 % c.l. $\Rightarrow 4.2 \sigma$)

H.V. Klapdor-Kleingrothaus et al. NIM. A 522(2004)371

→ Risultato non pienamente accettato

NEMO 3

sorgente \neq rivelatore

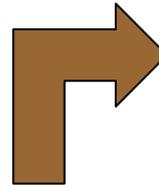
Ben note tecnologie di rivelazione di particelle
volume tracciante con celle Geiger
scintillatori plastici
campi magnetici

- **Diverse sorgenti** in fogli possono essere usati simultaneamente
- opera nei laboratori **sotterranei** del Frejus (Francia)
- schermo di **acqua e ferro**

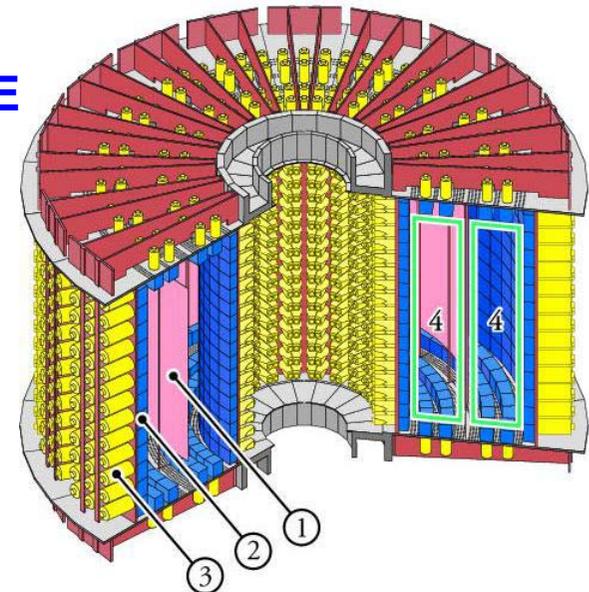
4.1×10^{25} ^{100}Mo nuclei

altre sorgenti		
Isotope	Study	Mass(g)
^{100}Mo	$\beta\beta 0\nu, \beta\beta 2\nu$	6914
^{82}Se	$\beta\beta 0\nu, \beta\beta 2\nu$	932
^{116}Cd	$\beta\beta 0\nu, \beta\beta 2\nu$	405
^{130}Te	$\beta\beta 0\nu, \beta\beta 2\nu$	454
^{150}Nd	$\beta\beta 2\nu$	36.6
^{96}Zr	$\beta\beta 2\nu$	9.4
^{48}Ca	$\beta\beta 2\nu$	7.0

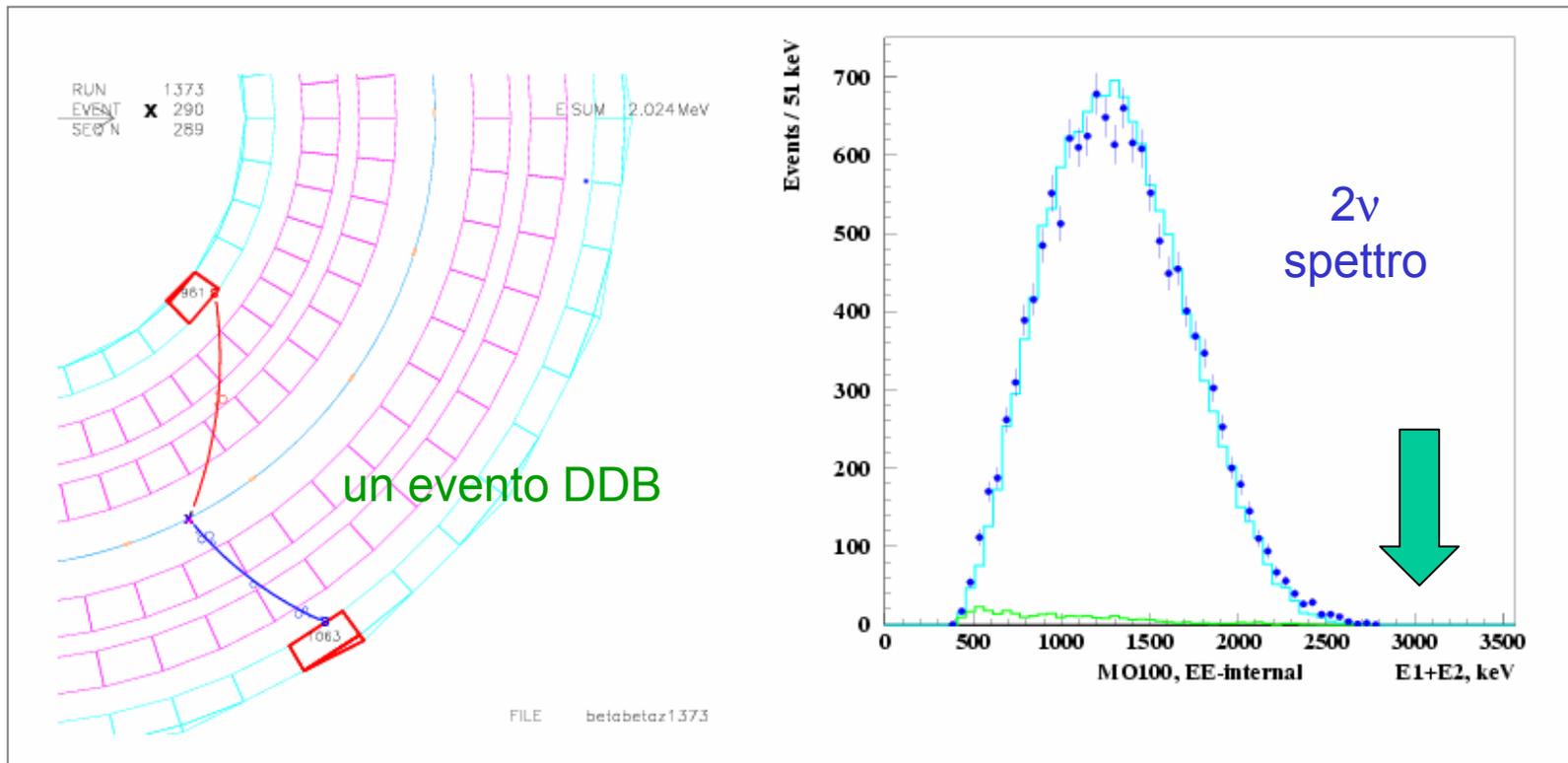
- 1 **SORGENTE**
- 2 **VOLUME TRACCIANTE**
- 3 **CALORIMETRI**



schema del rivelatore



NEMO 3



^{100}Mo

$\tau_{1/2}^{0\nu} (\text{y}) > 3.5 \times 10^{23} \text{ y (90\% CL)}$

$m_{ee} < 0.7 - 1.2 \text{ eV}$

Sensibilità finale: $0.2 - 0.35 \text{ eV}$

Limite intrinseco:

- sorgenti deboli e bassa efficienza
- bassa risoluzione energetica \Rightarrow 2v fondo

Espansione dell'esperimento: **SuperNEMO**

Cuoricino

sorgente = rivelatore

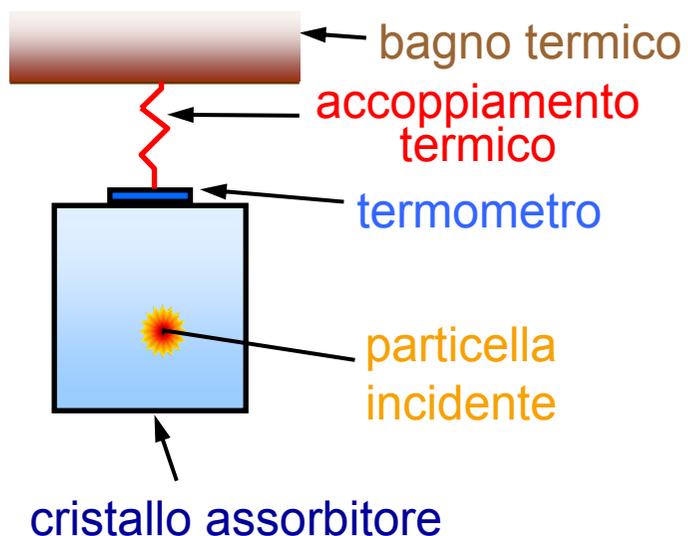
tecnica bolometrica:
giovane (~ 1985) ma ormai consolidata

Isotopo studiato: ^{130}Te
sorgente di CUORICINO

6.4×10^{25} ^{130}Te nuclei

▪ A.I.: 34% \Rightarrow arricchimento non necessario

↳ Esperimento estendibile a basso costo



Segnale termico

$$\Delta T = E/C$$

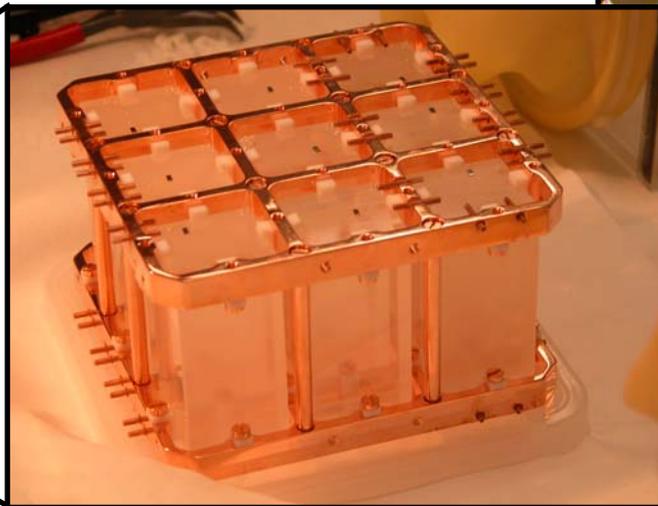
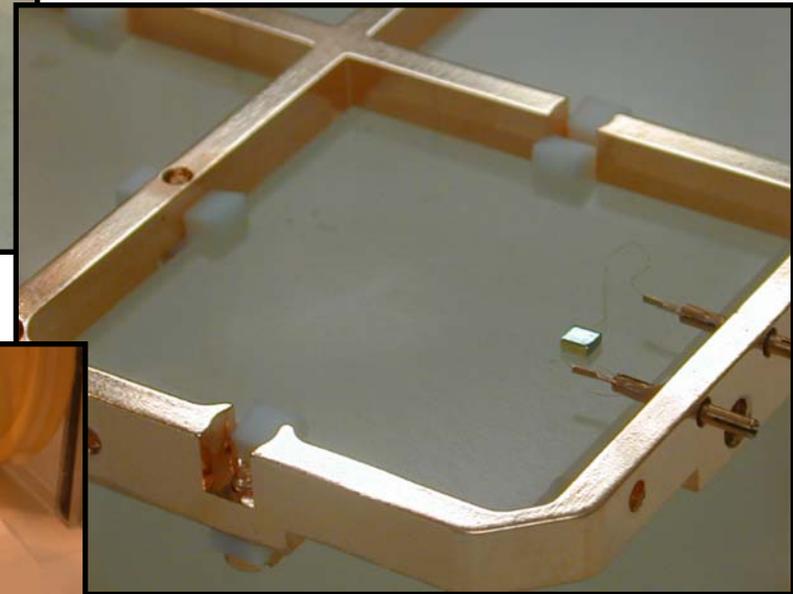
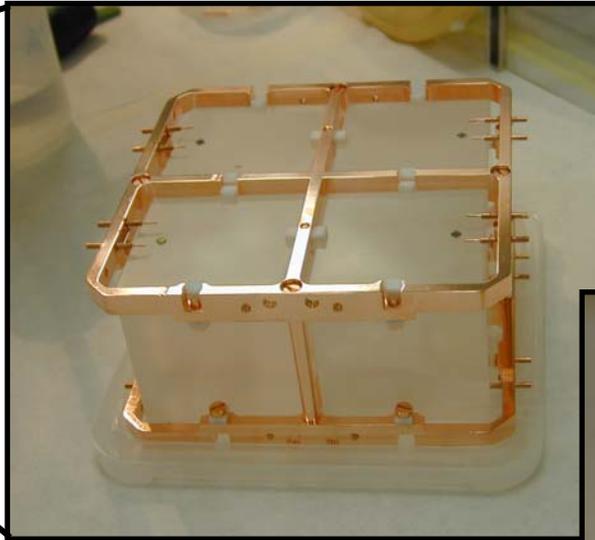
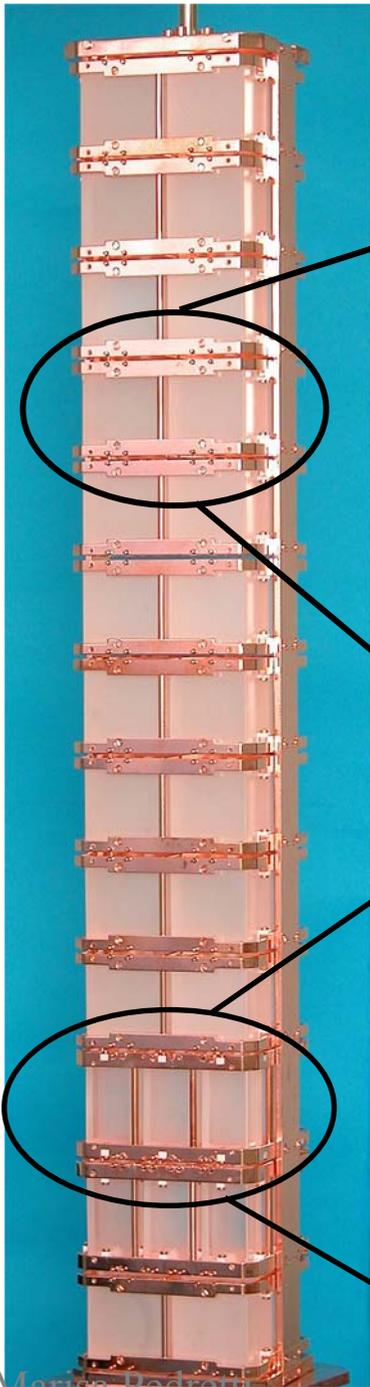
rivelatore opera a basse temperature

Cuoricino

Torre composta da 13 moduli:

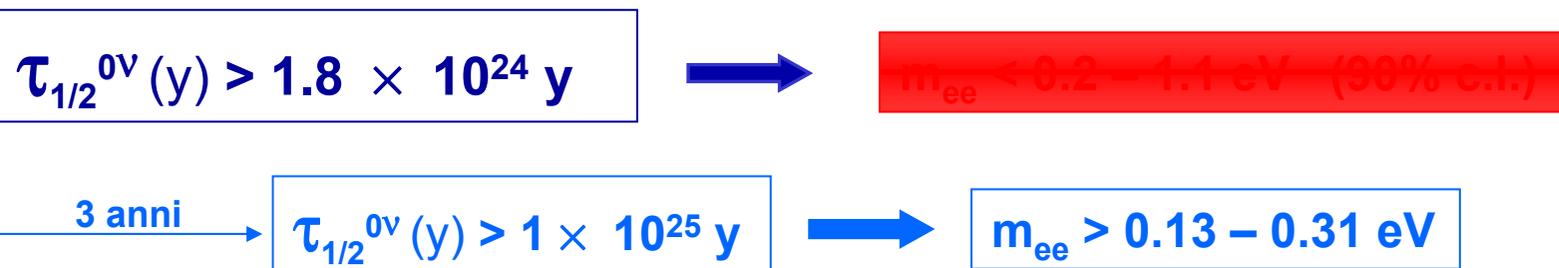
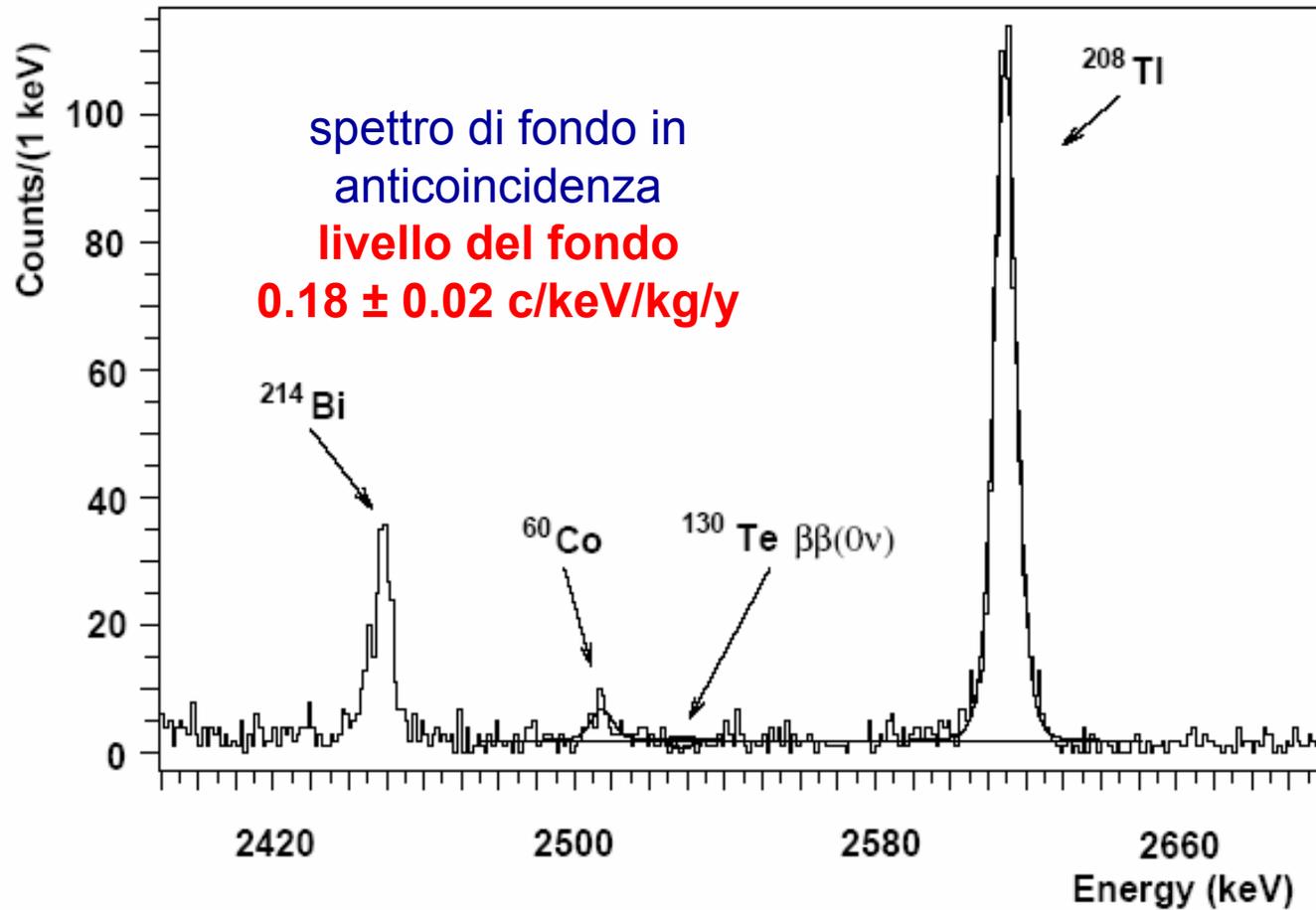
- 11 moduli x 4 rivelatori da 790 g
- 2 moduli x 9 rivelatori da 340 g

$M = \sim 41 \text{ kg}$

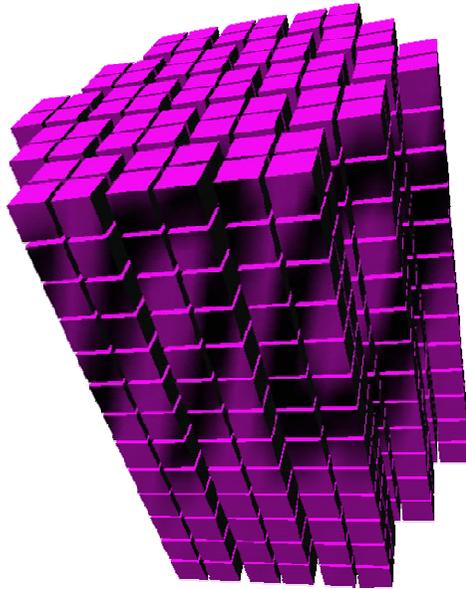


**Risoluzione energetica
media $\sim 7 \text{ keV}$**

Cuoricino



CUORE



25 torri come Cuoricino, $M = \sim 1$ Tonnellata

5 anni

fondo = 0.01 c/(keV kg y)

$$F^{0\nu} = 2.1 \times 10^{26} \text{ y}$$

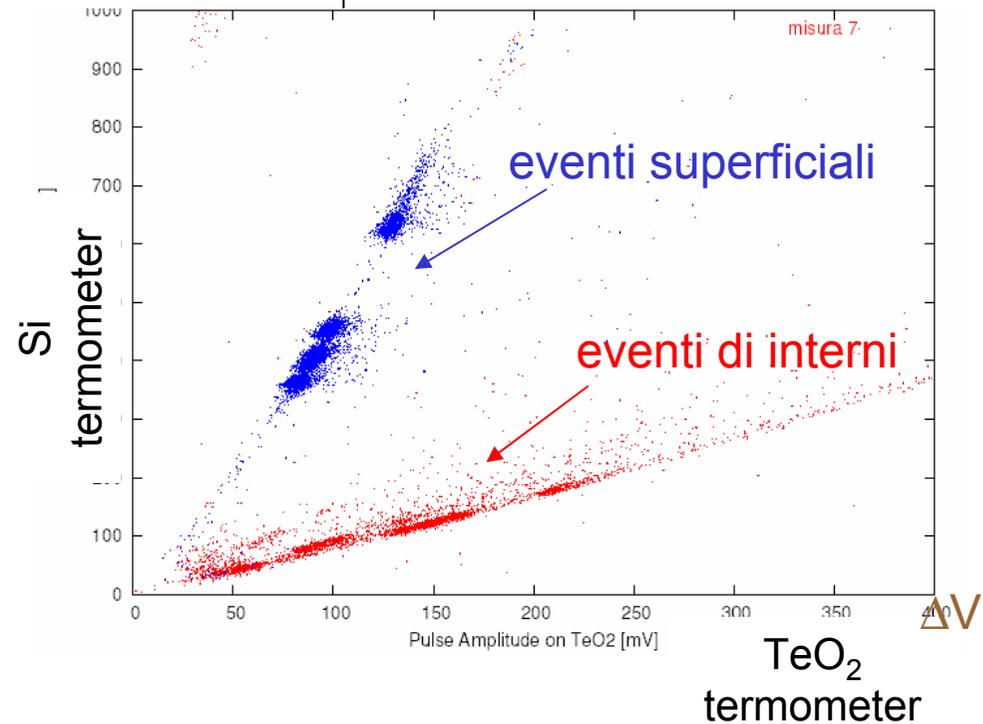
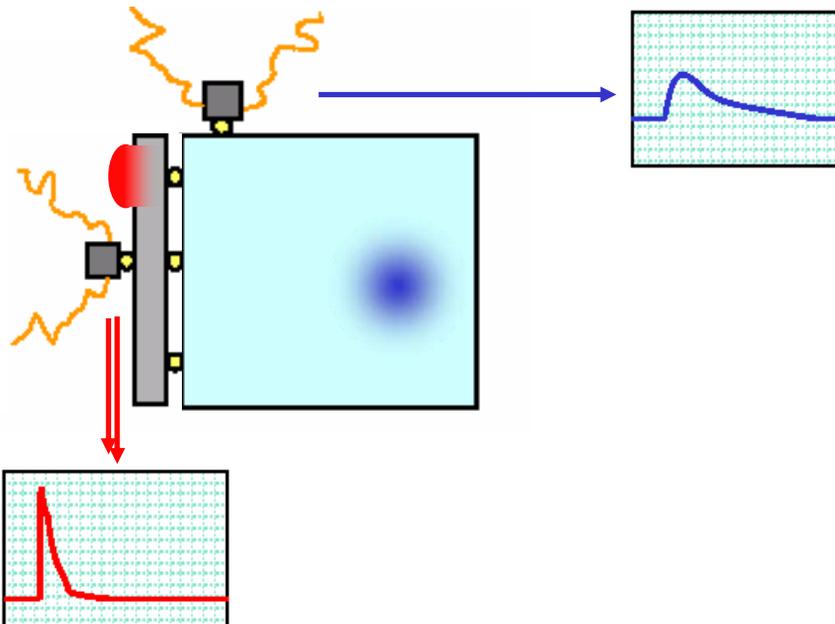
$$m_{ee} < 28 - 68 \text{ meV}$$

5 anni

fondo = 0.001 c/(keV kg y)

$$F^{0\nu} = 6.5 \times 10^{26} \text{ y}$$

$$m_{ee} < 16 - 38 \text{ meV}$$



Prospettive future

Cosa ci possono dire gli esperimenti attualmente in corso a proposito del risultato positivo di Klapdor et al.?

Purtroppo a causa delle incertezze sulle matrici nucleari non si puo' escludere tutto il range indicato dagli autori.

Cuoricino

A.Giuliani, F.Vissani, NOW 2004

Modelli nucleari	Ref. [21]	[22]	[23]	[6]	[24]	[25]	[26]
$T_{1/2}(^{76}\text{Ge})/ T_{1/2}(^{130}\text{Te})$	11.3	3.0	20	4.6	3.5	4.2	2.1
$T_{1/2}(^{130}\text{Te}) [10^{24} \text{ y}]$	1.06	4.0	0.6	2.6	3.4	2.8	5.7
Num. Eventi attesi	115	30	204	47	36	43	21
Effetto in 3 anni (σ)	7.2	1.9	13	2.9	2.3	2.7	1.3

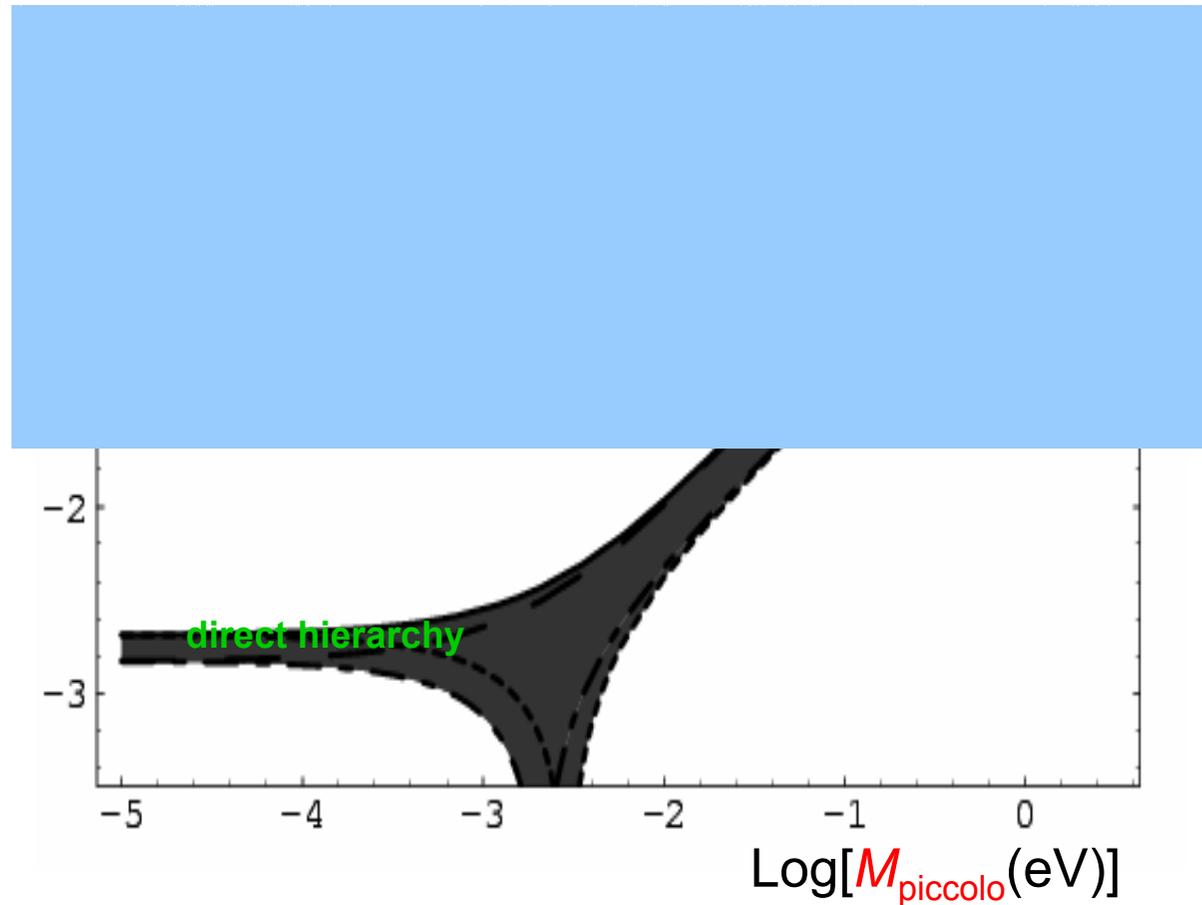
Prospettive future

esperimento	isotopo	tecnica	$T_{1/2}^{ov}$ [10^{28} y]	$\langle m_{ee} \rangle$ [meV]
CUORE	^{130}Te	bolometri	0.07	16-91
Majorana	^{76}Ge	rivelat. di germanio	0.4	21-67
GENIUS/GERDA	^{76}Ge	rivelat. di germanio	1	13-42
Super-NEMO	^{82}Se	fogli con rivel. tracc.	0.03	30-200
CAMEO	^{116}Cd	CdWO_4 in scint. liq.	0.01	22-69
CANDLES IV	^{48}Ca	crist. CaF_2 in scint. liq.	0.3	29-55
MOON III	^{100}Mo	fogli Mo in sint. plast.	0.1	13-48
EXO	^{136}Xe	Xe in TPC.	1.30	12-31

Prospettive future

Con gli esperimenti di prossima generazione potremo sondare la gerarchia inversa

Log[m_{ee} (eV)]

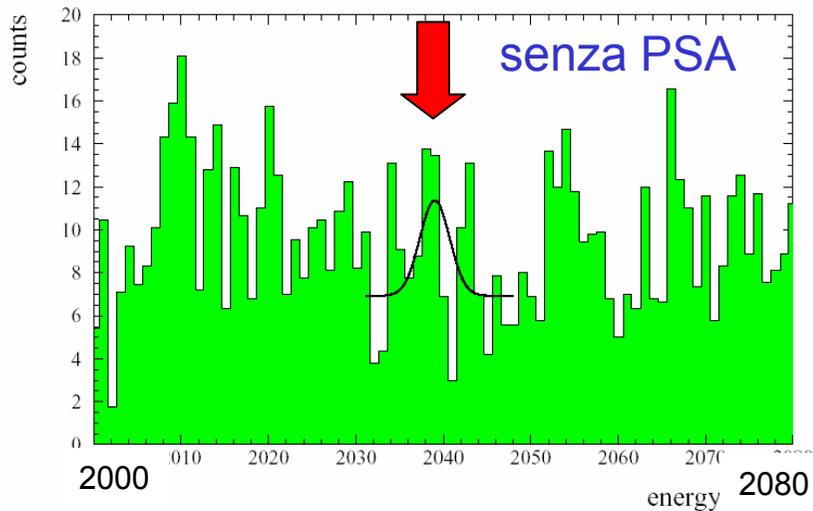


Conclusioni

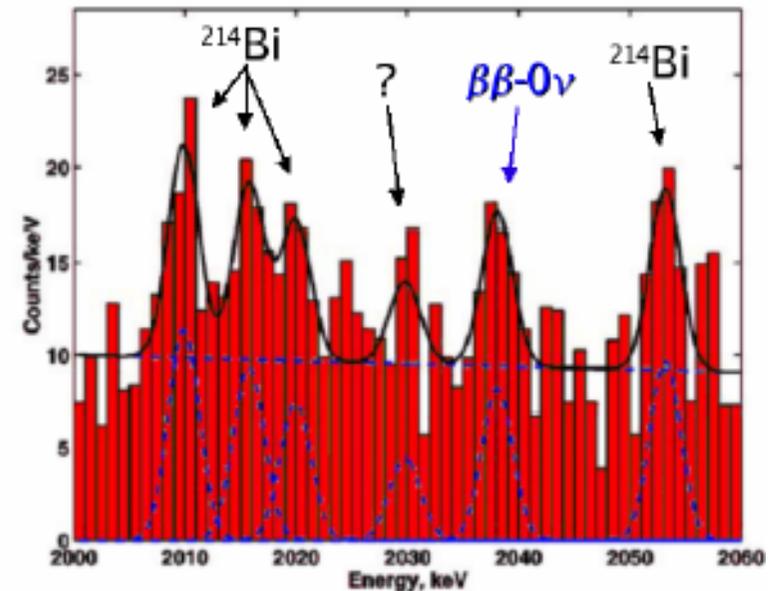
- E' un periodo di grande interesse per di Doppio Decadimento Beta (grazie alle recenti scoperte legate alle oscillazioni del neutrino e agli articoli di KDHK)
- Il Doppio Decadimento Beta può dare informazioni sulla natura del neutrino e sulla scala di massa dei neutrini
- Gli esperimenti attualmente in corso non possono escludere tutto il range indicato da KDHK.
 - necessità di ulteriori studi ed esperimenti dedicati ad aumentare le conoscenze sulle matrici nucleari
 - esperimenti con tecniche diverse e quindi con sistematiche differenti
 - esperimenti utilizzano diverse sorgenti
- Gli esperimenti di prossima generazione potranno sondare tutto il range della gerarchia inversa dello spettro di massa dei neutrini

HM: evidenze di DDB0ν

Spettro con 54.98 kg·y del 2002



Spettro con 71.7 kg·y del 2004



Procedura di ricerca del picco

Fit dello spettro con
fondo piatto + picco gaussiano

Scanning della posizione energetica del picco

si estrae la probabilità che esista
un picco ad una certa energia

Scetticismo della comunità DDB:

- problema nel riconoscimento dell'origine dei picchi
- dimensione della finestra energetica analizzata