



Presente e futuro della ricerca di decadimenti $\beta\beta$ con rivelatori bolometrici

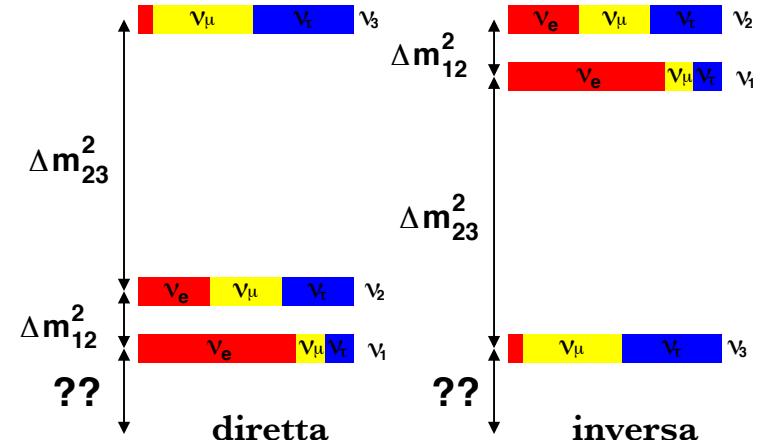
Laura Cardani

IFAE 2015
Università di Tor Vergata, Roma

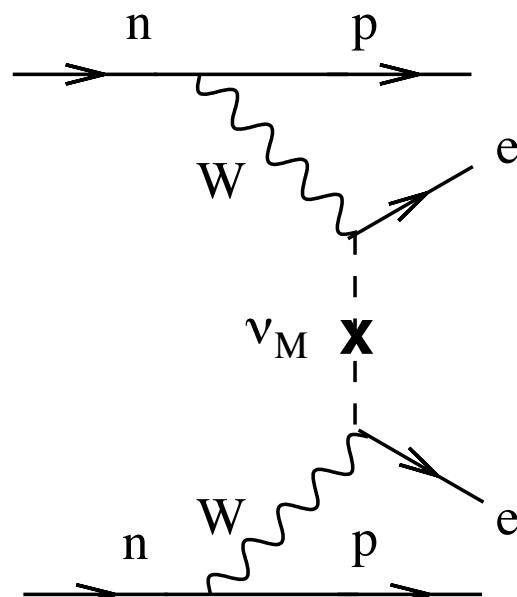
Importanza del decadimento $\beta\beta$

Nonostante le scoperte degli ultimi decenni, sono molti i problemi aperti nella fisica del neutrino:

- ν è una particella di Dirac o Majorana?
- Qual è la massa assoluta?
- Gerarchia diretta o inversa?



Decadimento doppio beta senza emissione di neutrini (0v $\beta\beta$)

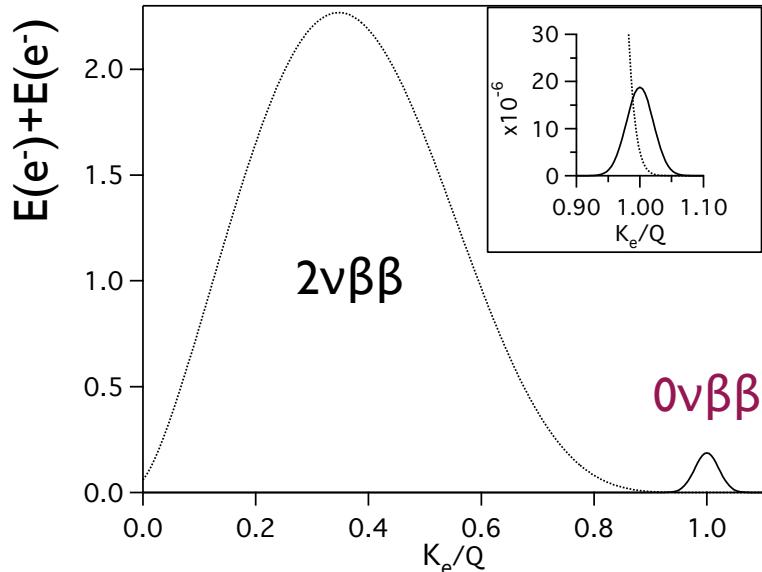


Transizione nucleare ipotizzata, mai osservata:

- Proibito dallo SM: **viola la conservazione del numero leptonico**
 $\Delta L = 2$
- Se avviene **il ν è una particella di Majorana**
- Il $T_{1/2}$ (0v $\beta\beta$) **è legato alla massa** assoluta di Majorana

Segnale Atteso

Il decadimento $0\nu 2\beta$ produce un picco monocromatico al Q -valore della transizione



Il decadimento $0\nu\beta\beta$ è previsto per pochi isotopi naturali.
Nel 2004 possibile scoperta con il ^{76}Ge :

$$T_{1/2}(^{76}\text{Ge}) = 2.23 \times 10^{25} \text{ y}$$

H.Klapdor-Kleingrothaus and I.Krivosheina, *Mod. Phys. Lett.*, vol.A21, pp. 1547–1566, 2006.

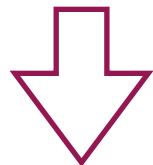
Esperimenti recenti non confermano questo risultato:

$$T_{1/2}(^{76}\text{Ge}) > 3.0 \times 10^{25} \text{ y}$$

M.Agostini et al., *Phys. Rev. Lett.* 111 (2013) 122503

Come possiamo migliorare la sensibilità?

$$T_{1/2} > 10^{25} \text{ y}$$



$10^{26} - 10^{27}$ emettitori

massa sorgente = 100 - 1000 kg



~ fondo zero

pochi conteggi nella ROI($0\nu\beta\beta$) nella vita
dell'esperimento

Tecnica Bolometrica

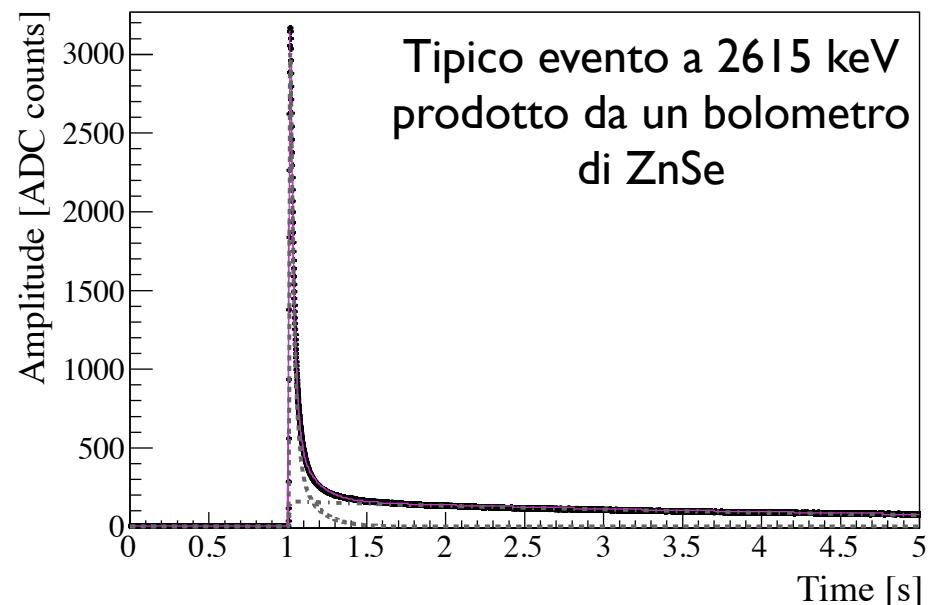
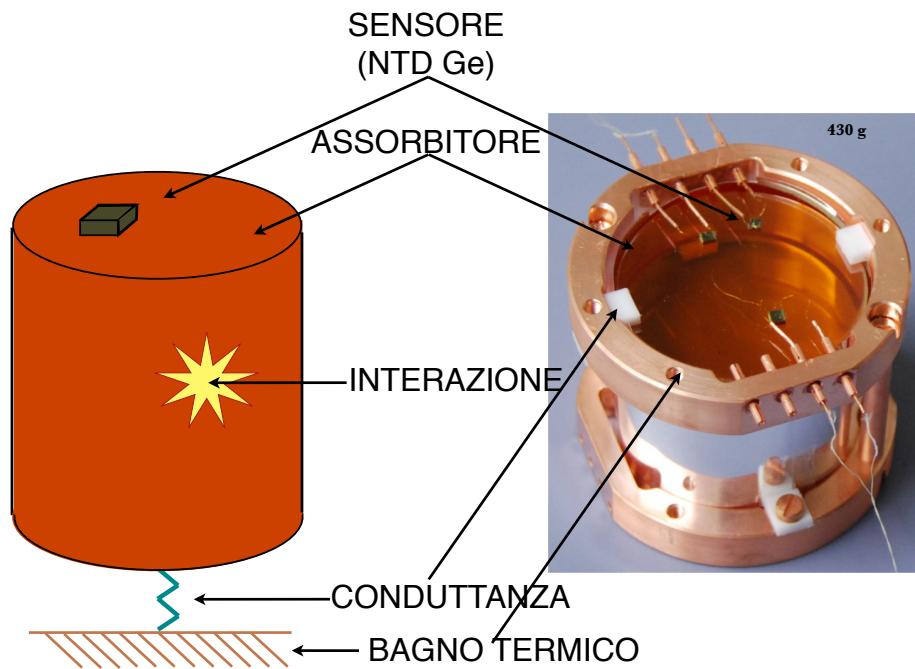
Bolometri = cristalli utilizzati come calorimetri a ~ 10 mK

Interazione \Leftrightarrow deposito di E \Leftrightarrow aumento di T

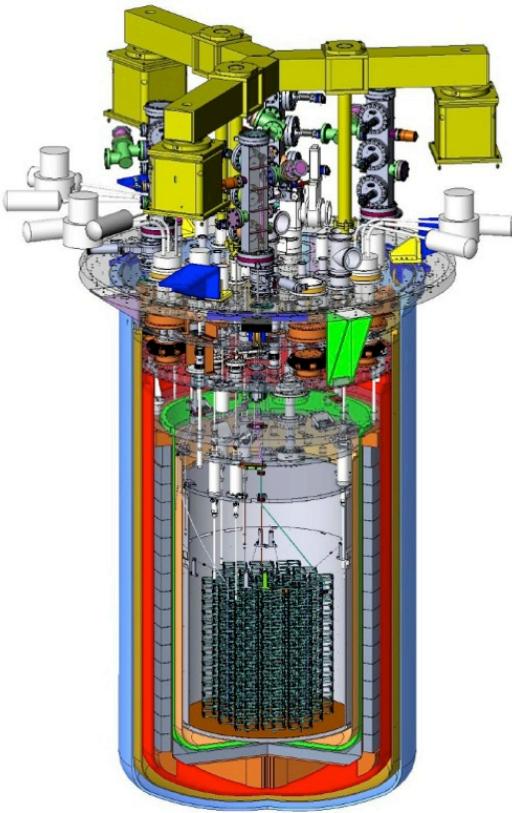
Un sensore dedicato converte l'aumento di T in un segnale elettrico con ottimo rapporto segnale/rumore

Vantaggi

- I cristalli vengono cresciuti partendo dall'emettitore del $0\nu\beta\beta$ \Leftrightarrow efficienza > 80% per cristalli sufficientemente grandi
- Test di diversi emettitori $0\nu\beta\beta$
- Risoluzione eccellente (5-20 keV FWHM a 3MeV)
- Modulari \Leftrightarrow masse notevoli con moduli semplici

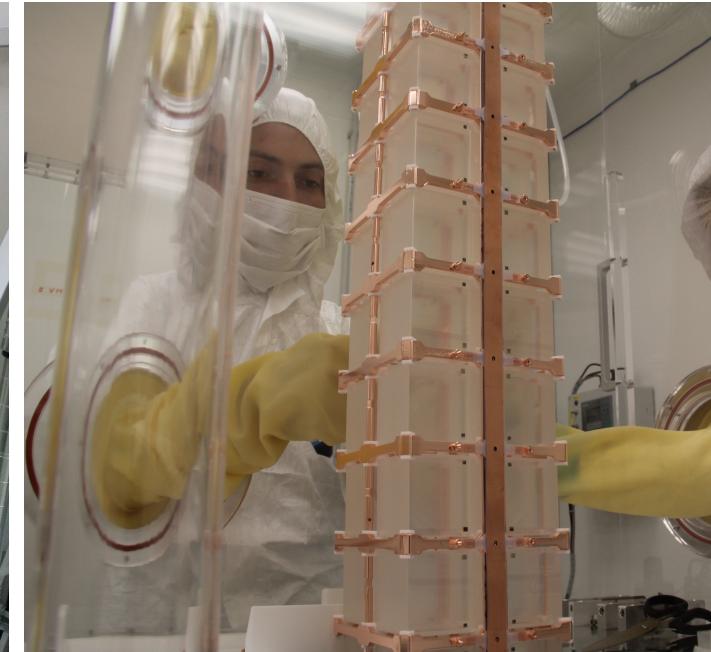
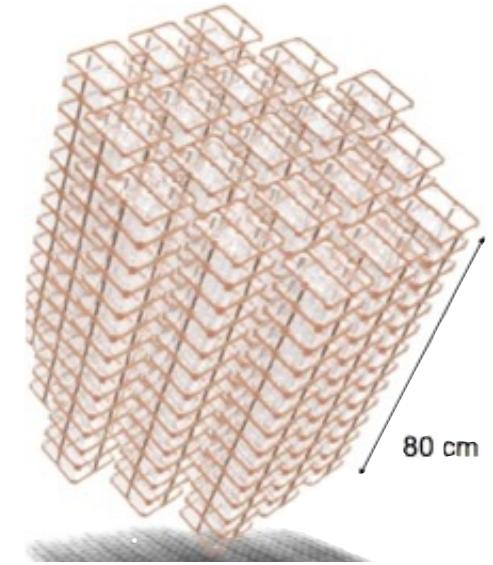


CUORE



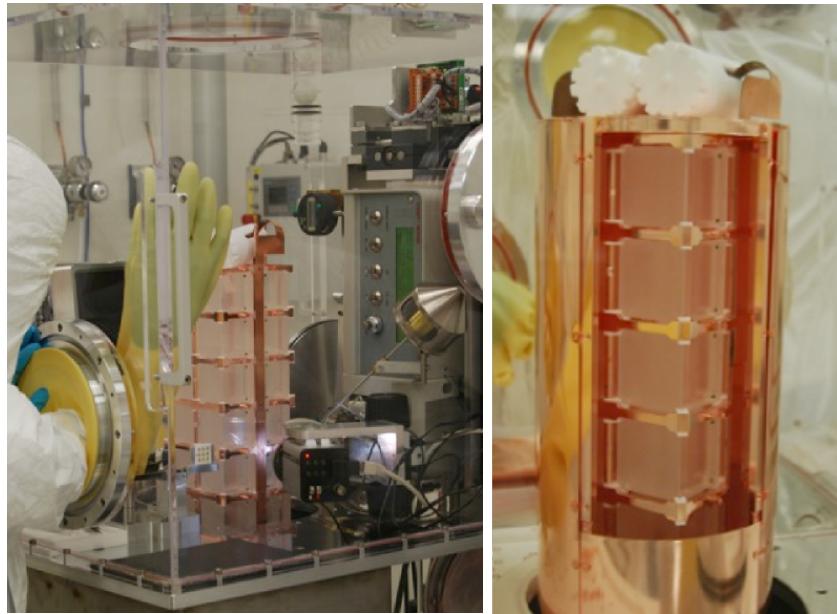
Ricerca del $0\nu\beta\beta$ del ^{130}Te con sensibilità (90% CL) $9.5 \times 10^{25} \text{ y}$ in 5 anni

- 206 kg di ^{130}Te ($Q=2528 \text{ keV}$, a.i. 34%)
- 19 torri di TeO_2 (988 cristalli, per 741 kg)
- Fondo atteso nella ROI: $10^{-2} \text{ c/keV/kg/y}$
- Detector assemblato, ultimi test sul criostato

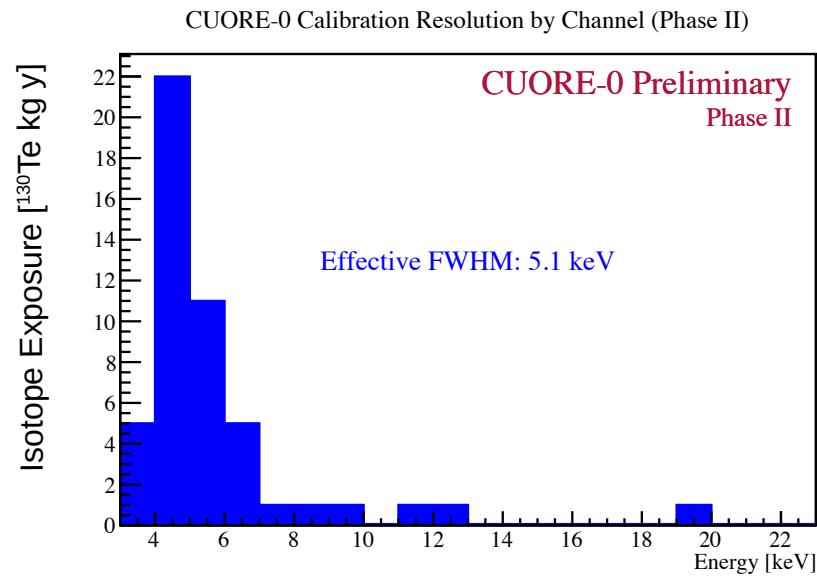
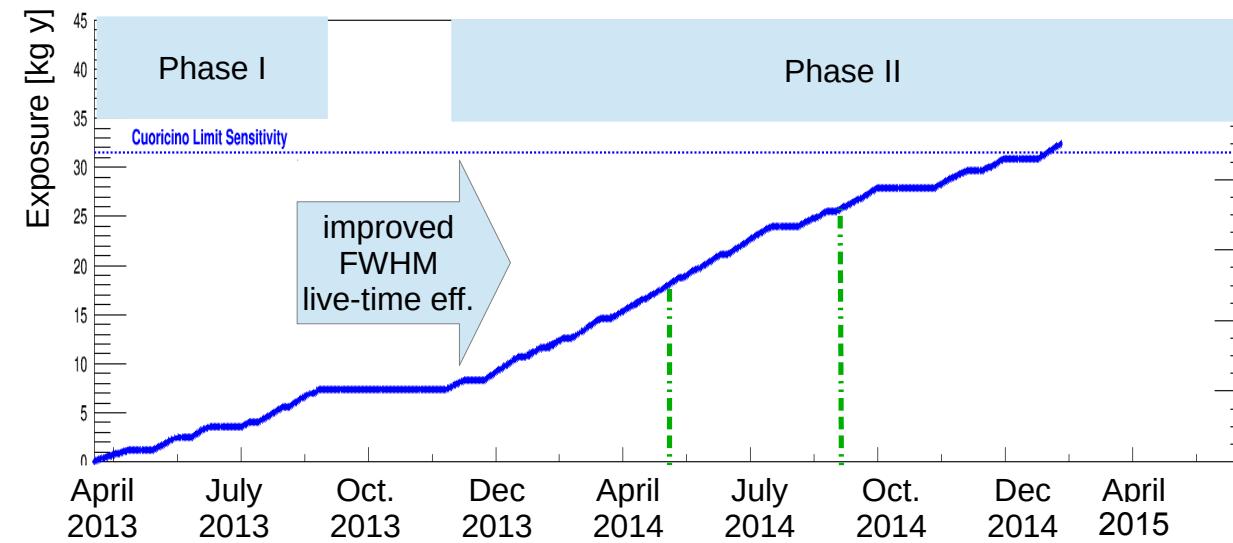


CUORE-0

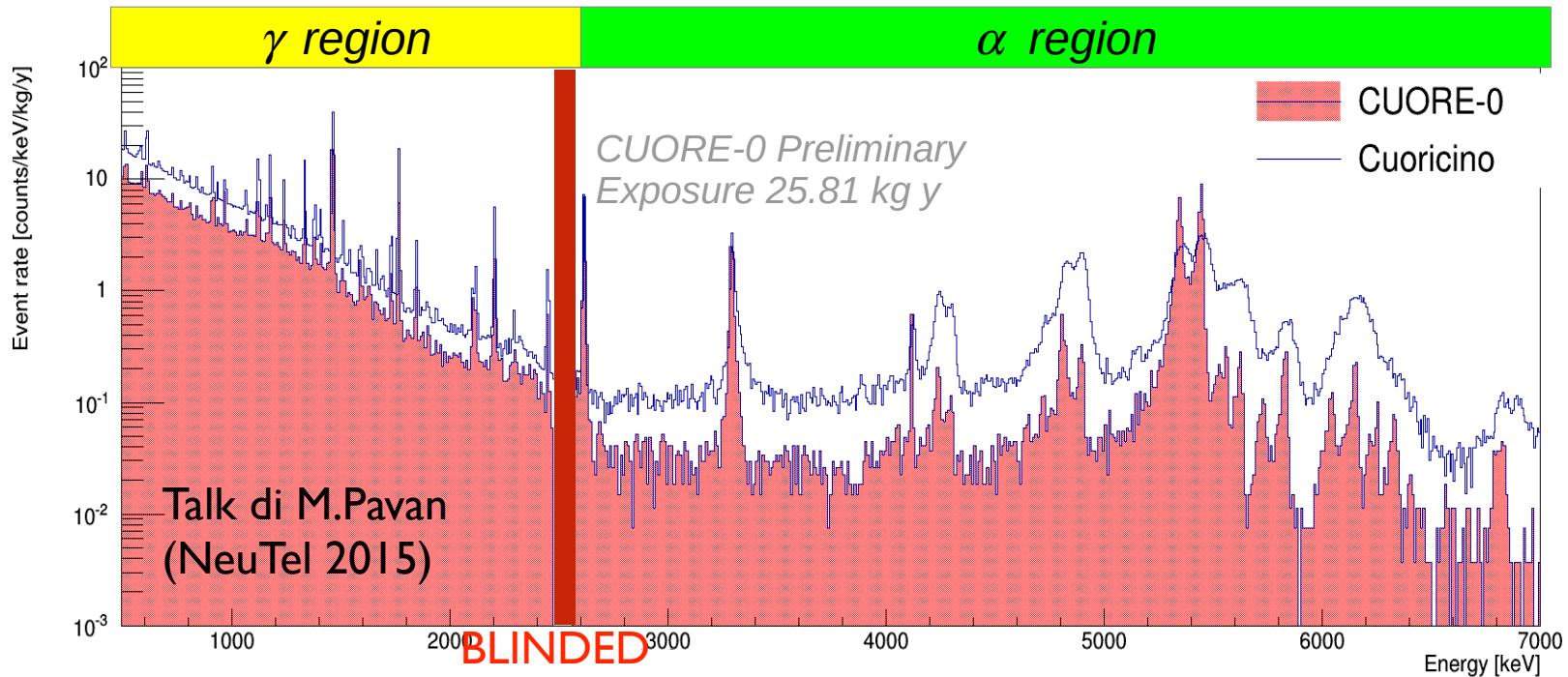
Un prototipo delle torri di CUORE, CUORE-0, è in presa dati da Marzo 2013



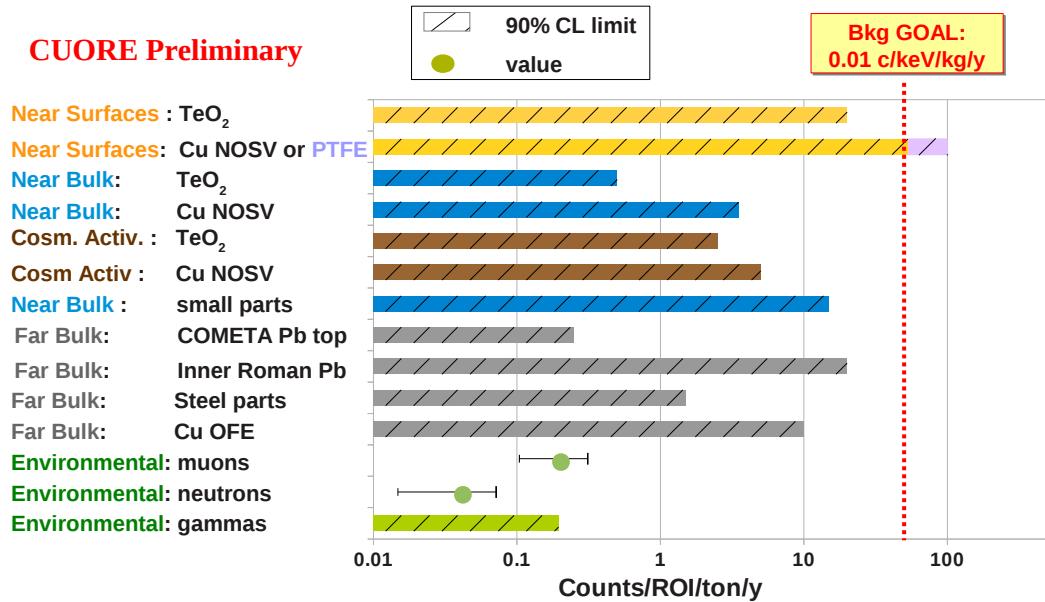
- 52 cristalli (39 kg) di TeO_2 , 11 kg di ^{130}Te ;
- prima torre assemblata nella linea di produzione di CUORE seguendo le procedure previste per la costruzione delle 19 torri;
- analisi preliminare con 18.06 kg.y oggi unblinding a LNGS con 25.81 kg.y.



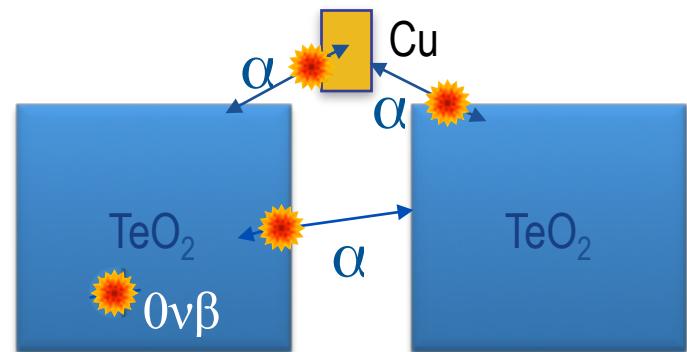
CUORE-0: fondo e sensibilità



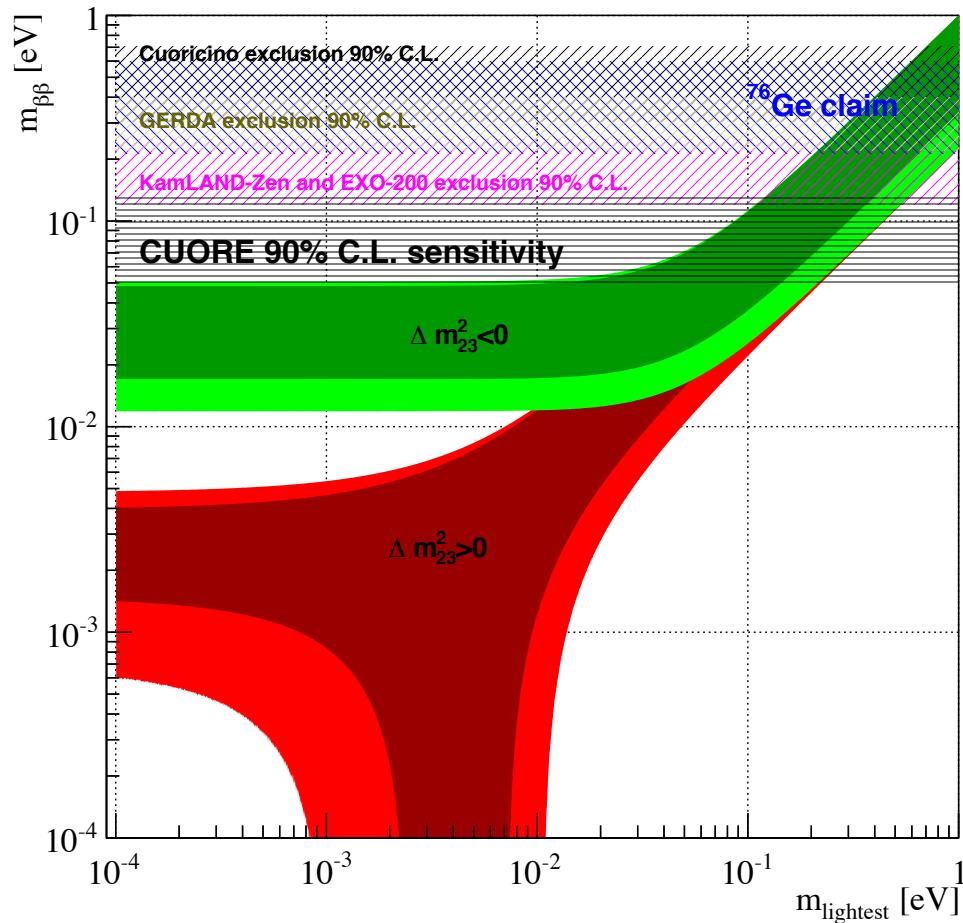
CUORE-0 ha dimostrato che la risoluzione e il fondo previsti per CUORE sono alla nostra portata.



Fondo α , (contaminazioni superficiali dei materiali) ridotto ~ 6 volte rispetto a Cuoricino Ciononostante, resta il fondo dominante per CUORE.



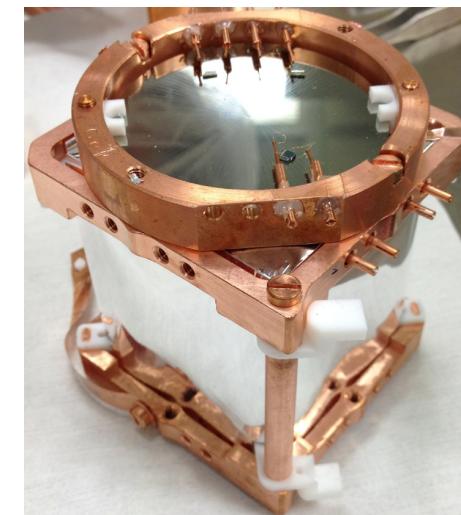
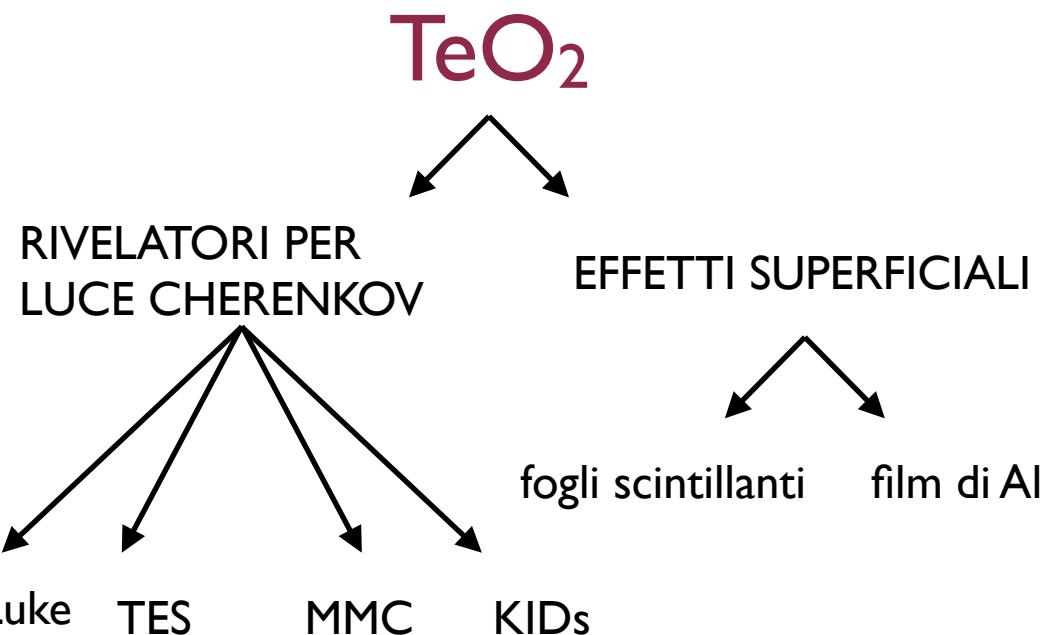
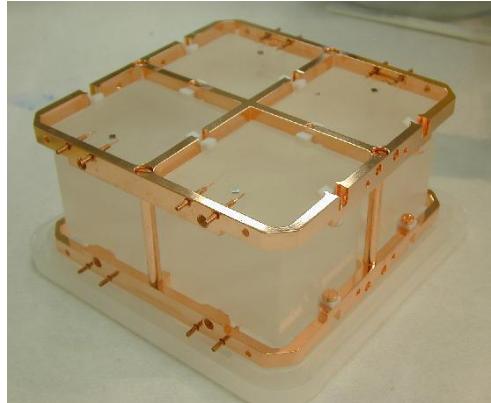
CUORE e il futuro dei bolometri



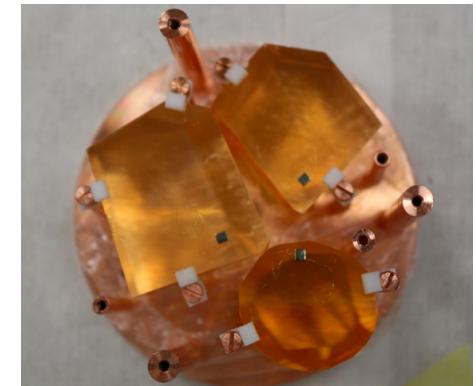
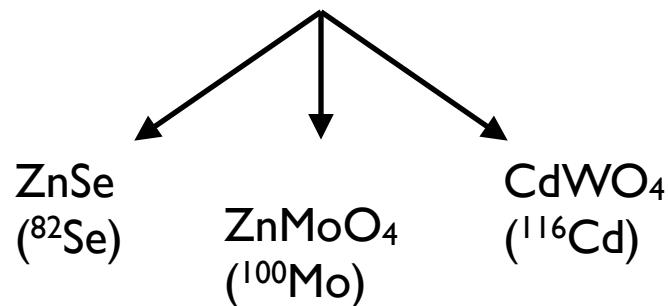
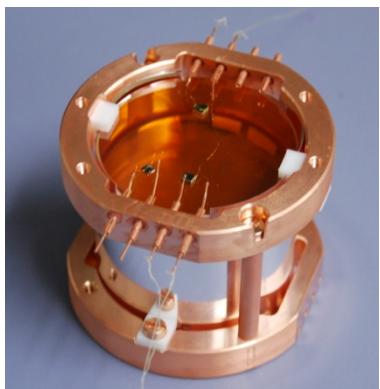
CUORE potrà sondare la regione di $m_{\beta\beta}$ fino a 51 - 133 meV.
Per esplorare la regione della gerarchia inversa, bisogna puntare alla riduzione del fondo:
da ~ 100 a pochi eventi nella ROI in 5-10 anni di misura

Servono nuove idee

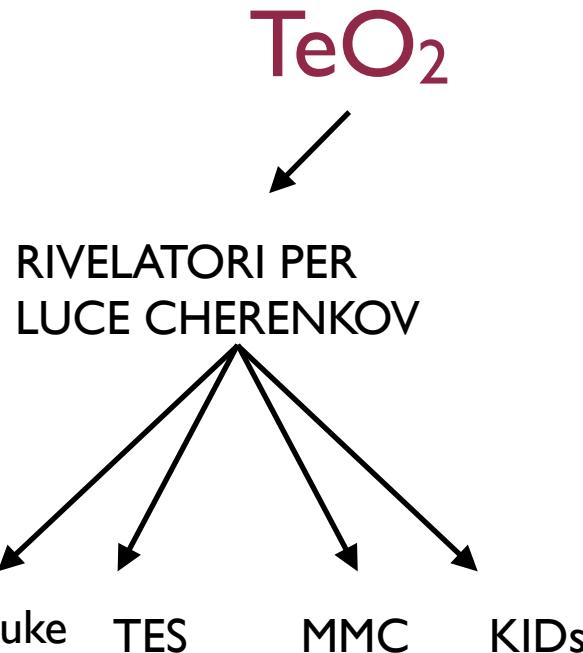
Un panorama ricco di prospettive...



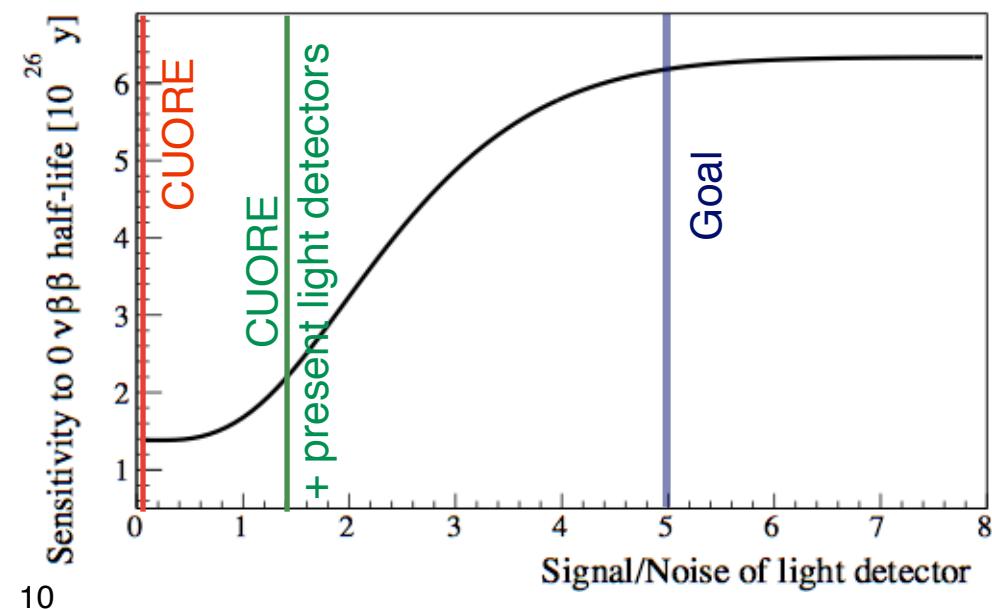
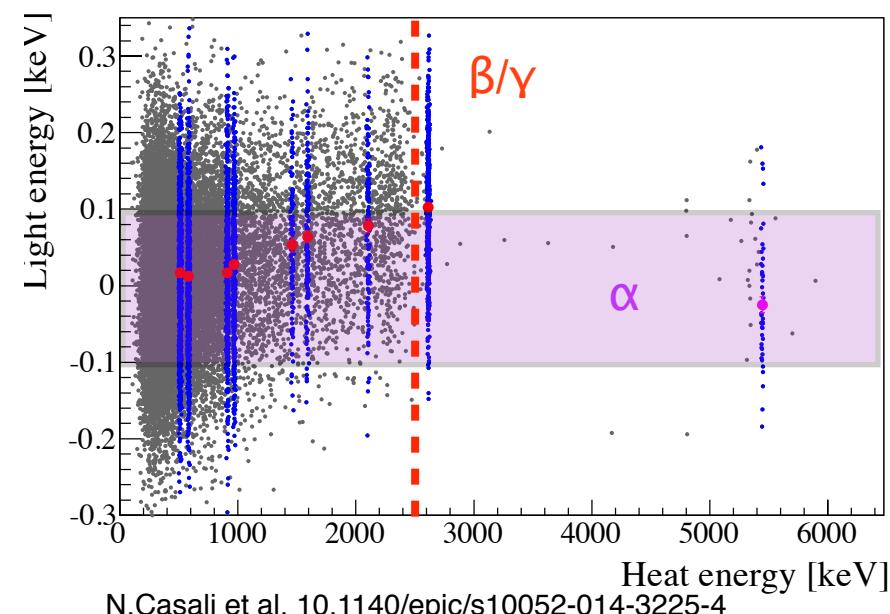
Altri emettitori/cristalli



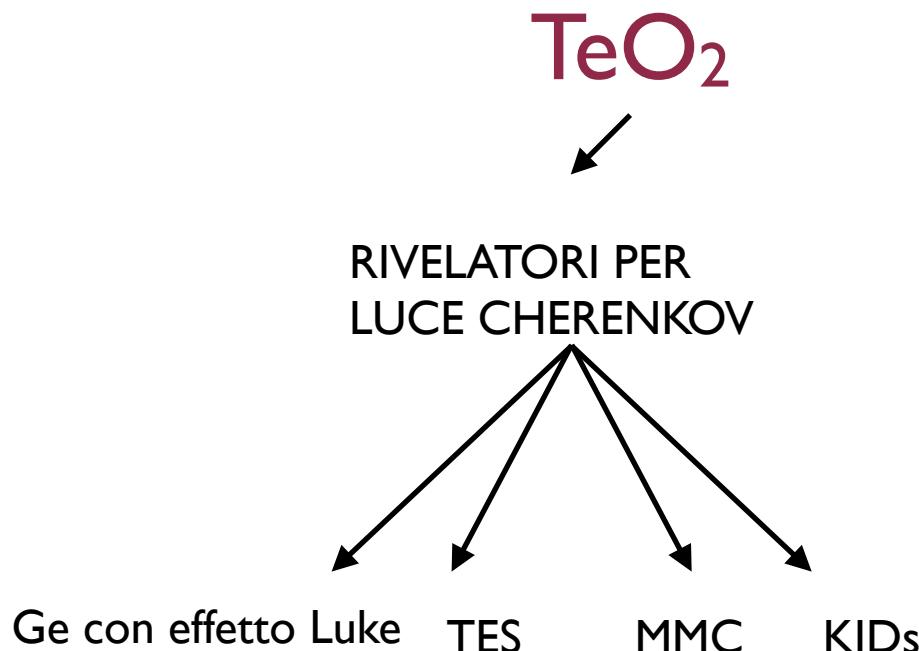
Un panorama ricco di prospettive...



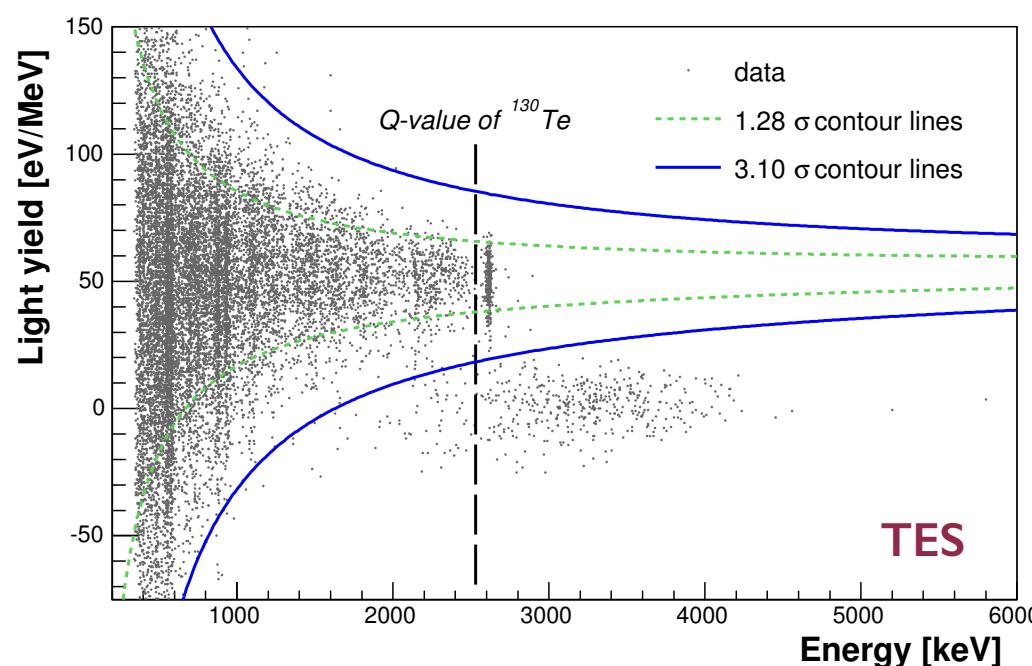
- A differenza delle α , gli elettroni che attraversano il TeO₂ emettono luce Cherenkov
T.Tabarelli de Fatis, *Eur. Phys. J.*, vol. 65, p. 359, 2010.
- Servono lettori di luce criogenici molto sensibili (noise <20 eV) e facilmente riproducibili
- Diverse possibilità in esame



Un panorama ricco di prospettive...



- I Transition Edge Sensors (TES) sono sensori a superconduttore molto sensibili, in grado di distinguere α da β/γ grazie alla lettura della luce Cherenkov;
K.Schäffner et al. (arXiv:1411.2562)
- Anche sfruttando l'effetto Neganov-Luke si ottengono risultati incoraggianti;
articolo in preparazione
- R&D per scalarli a ~ 1000 rivelatori



Un panorama ricco di prospettive...

erc

European
Research
Council

TeO₂



RIVELATORI PER
LUCE CHERENKOV

Ge con effetto Luke

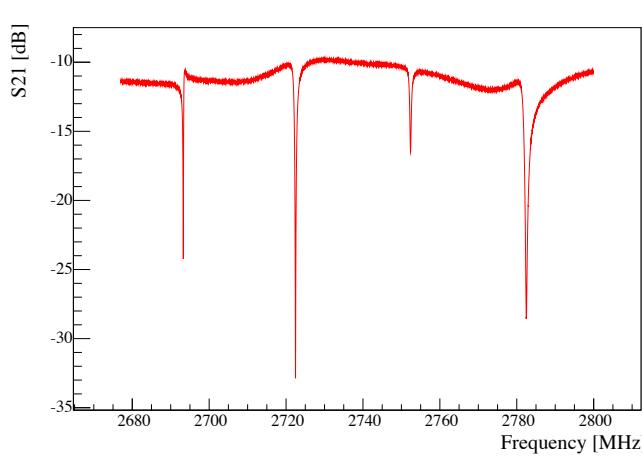
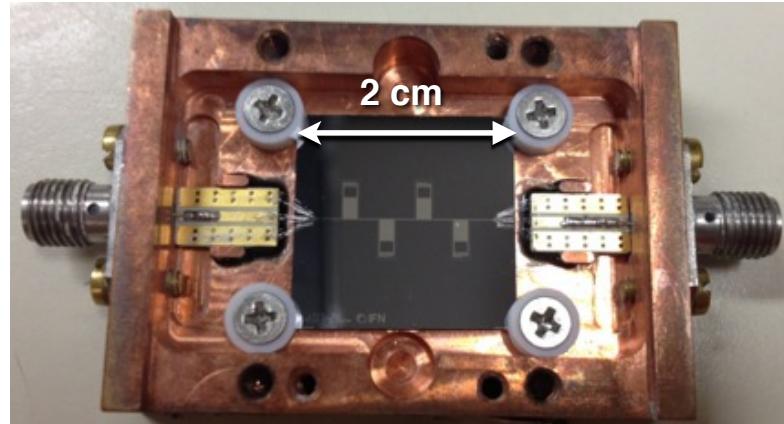
TES

MMC

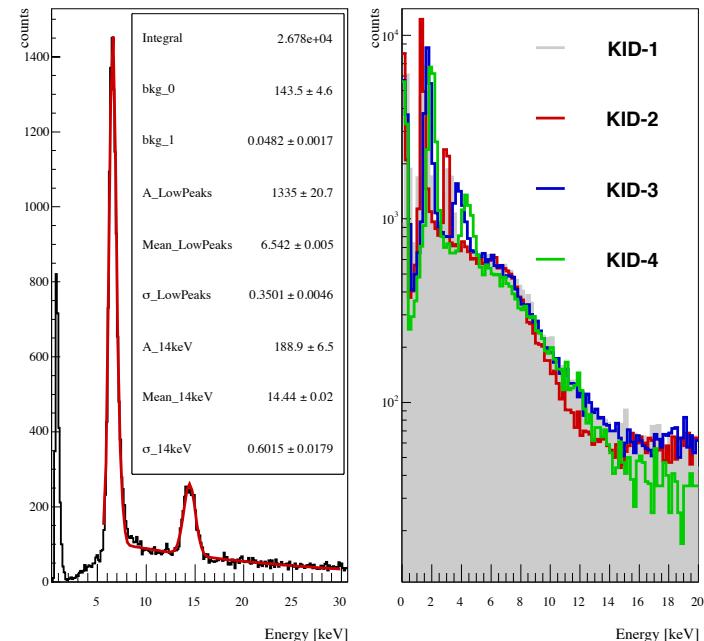
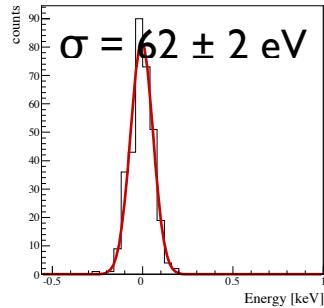
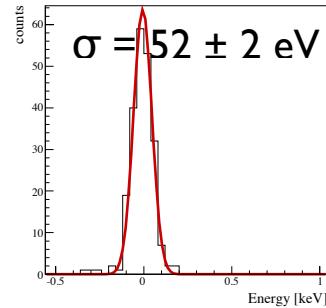
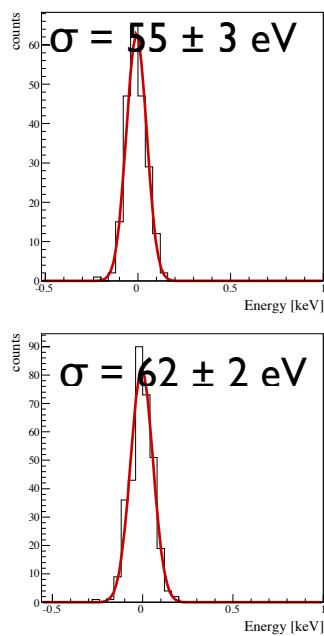
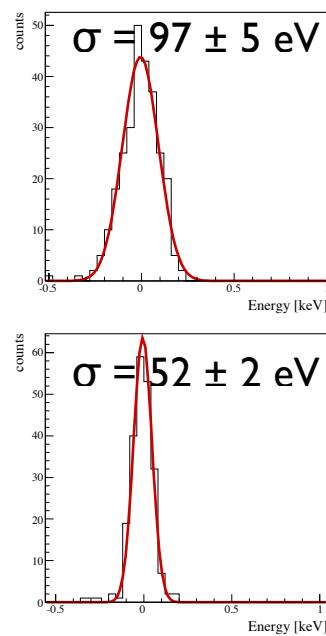
KIDs

Rivelatori con multiplexing naturale
→ Kinetic Inductance Detectors (progetto CALDER)

S. Di Domizio et al, 10.1007/s10909-013-1076-2

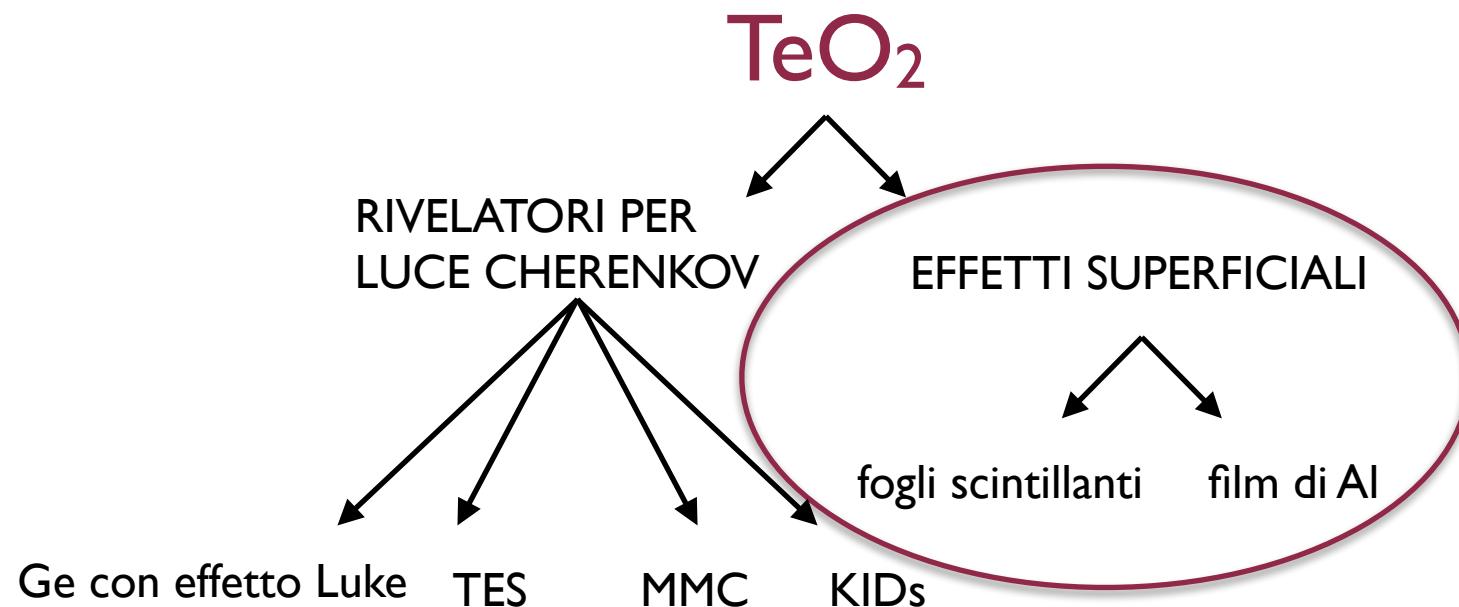


Primi prototipi con $\sigma \sim 150$ eV
 $\epsilon \sim 18\%$

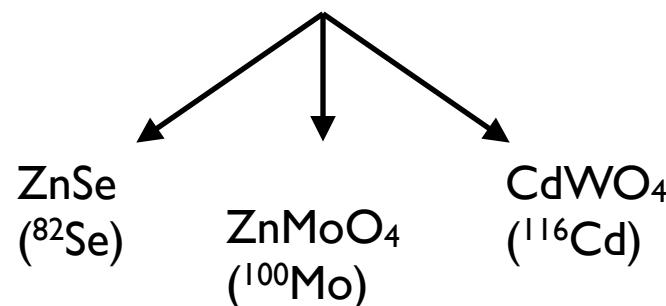


Energy [keV]

Un panorama ricco di prospettive...



Altri emettitori/cristalli



Un panorama ricco di prospettive...

- TeO₂ circondato da un foglio scintillante e affacciato a un lettore di luce;
- Le α che colpiscono il foglio provocano emissione di luce di scintillazione e vengono identificate
- Primi prototipi dimostrano che le α del ¹⁴⁷Sm possono essere identificate con questo metodo
L. Canonica et al. (doi:10.1016/j.nima.2013.05.114).

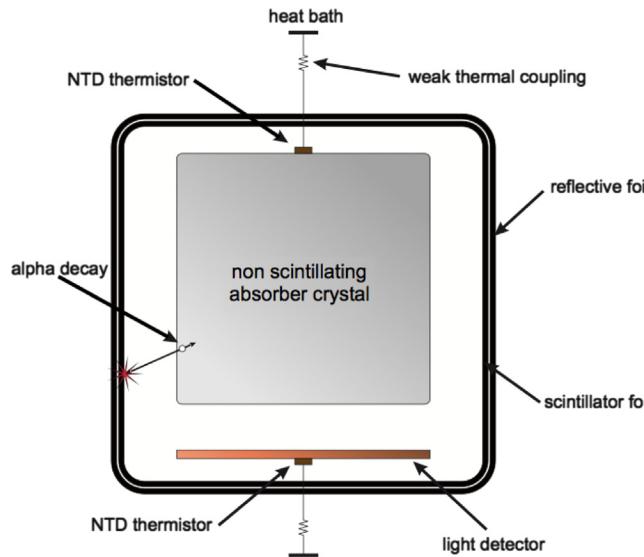
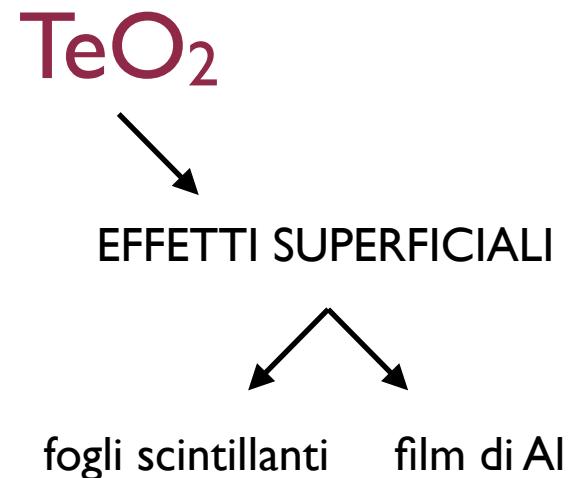
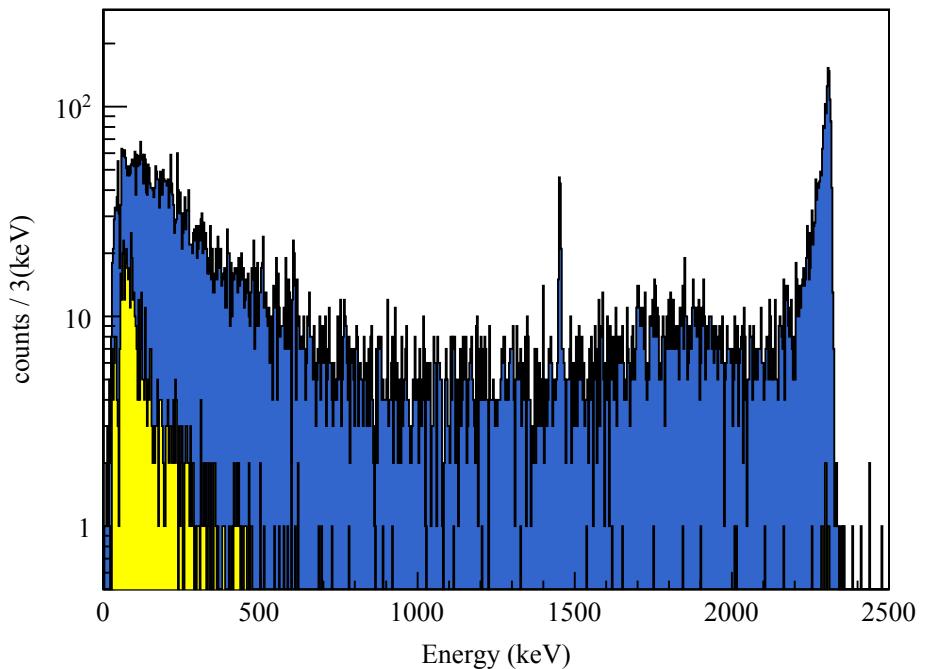
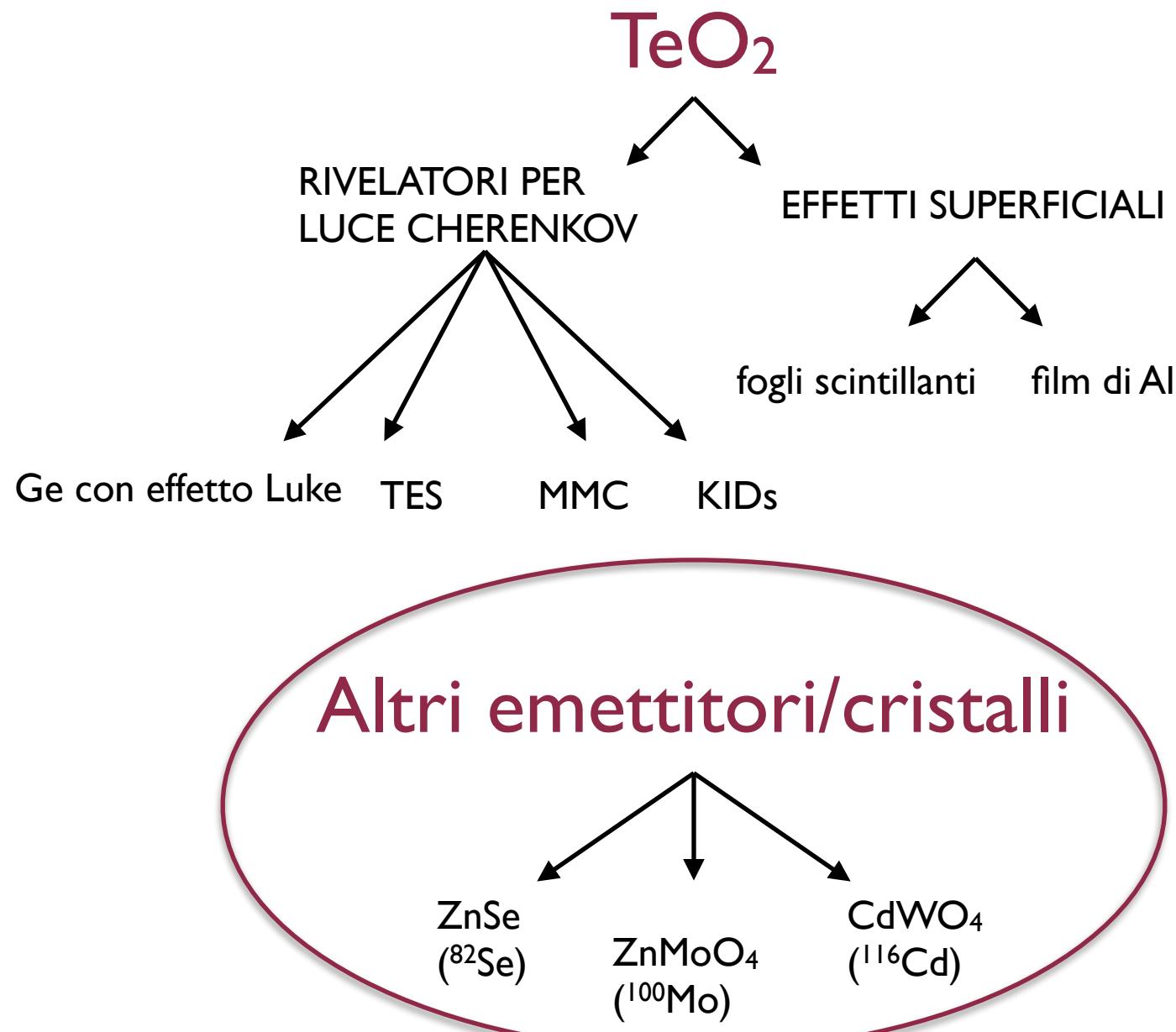


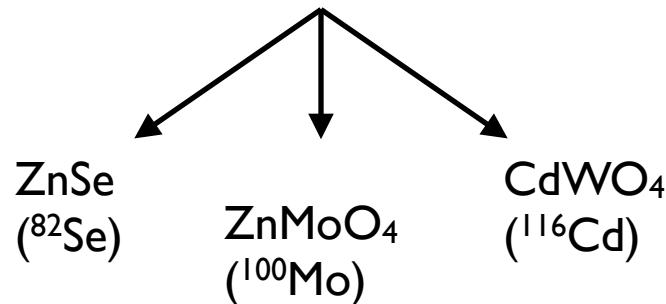
Fig. 1. Diagram of the proposed method.



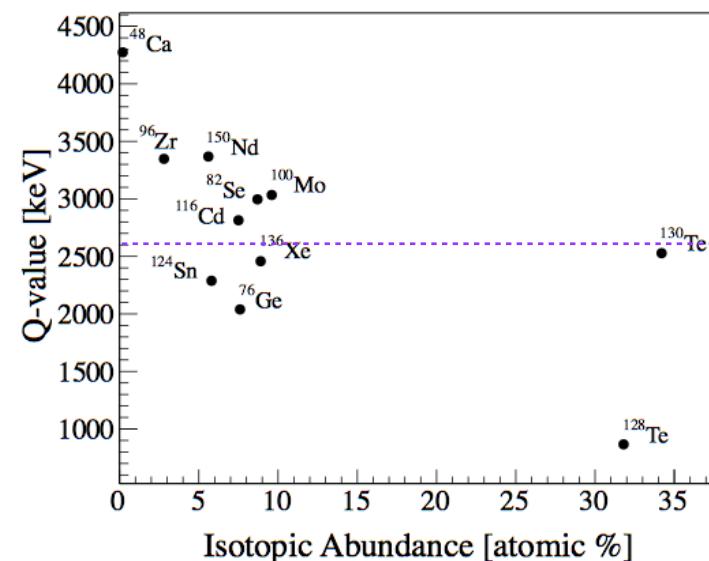
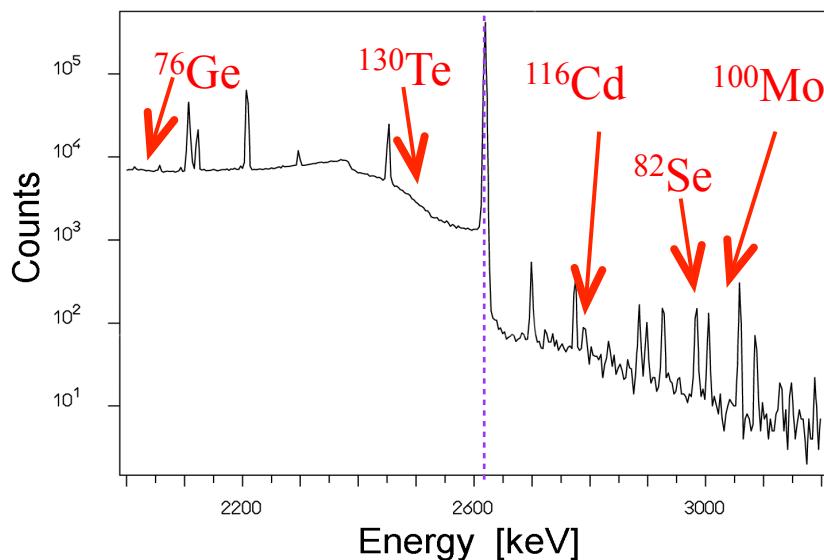
Un panorama ricco di prospettive...



Altri emettitori/cristalli

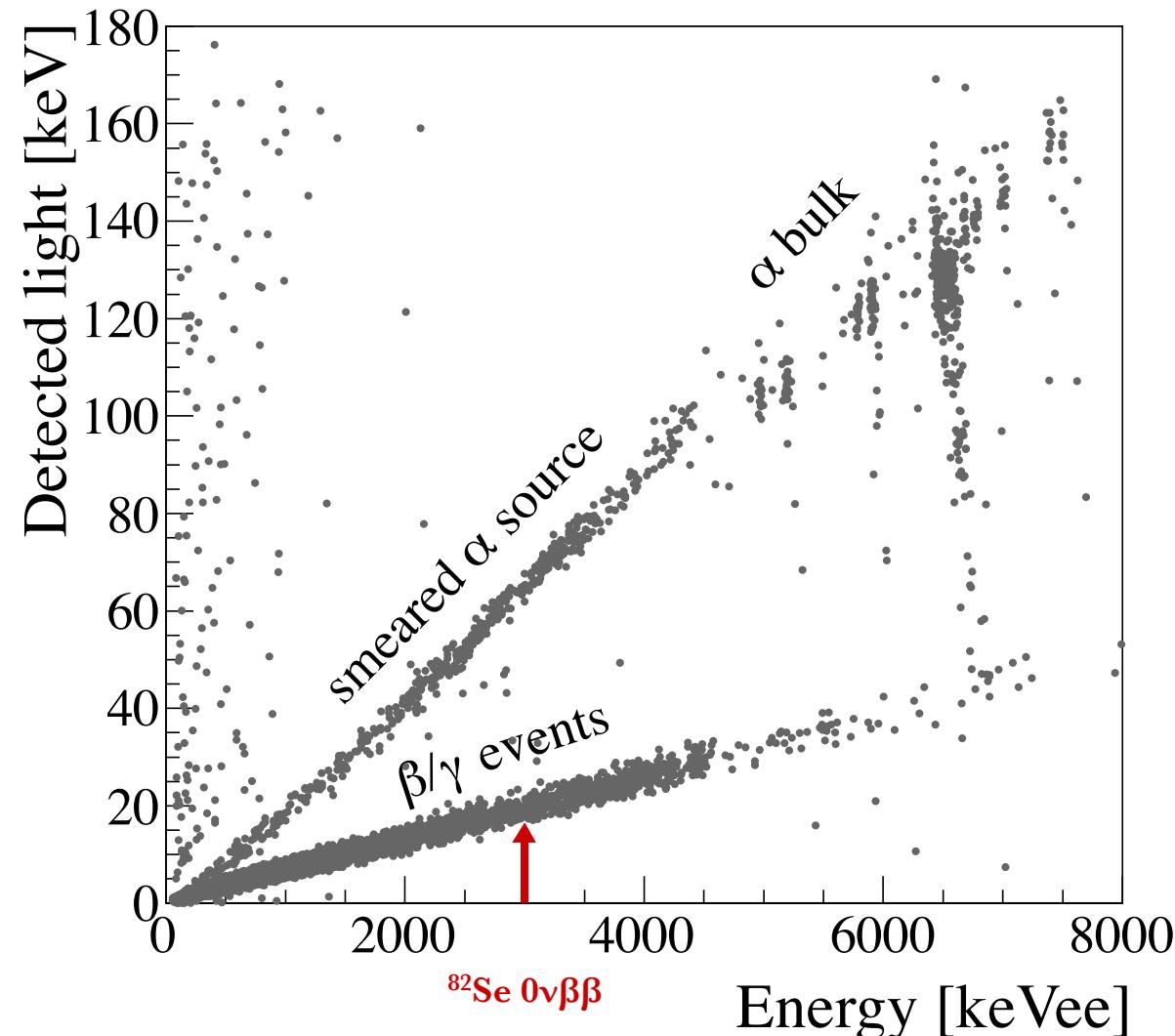


- Isotopi con Q-valore > 2615 keV \Leftrightarrow riduzione del fondo γ
- ^{82}Se , ^{100}Mo , ^{116}Cd hanno a.i. naturale $\sim 10\%$ e possono essere arricchiti a costi ragionevoli
- Con questi isotopi, cristalli che scintillano a 10 mK \rightarrow anche con lettori di luce meno sensibili si possono identificare le particelle α



Esperimento LUCIFER

Con un rivelatore di 36 ZnSe arricchiti (~ 9.8 kg ^{82}Se), punta a raggiungere fondo zero nella ROI



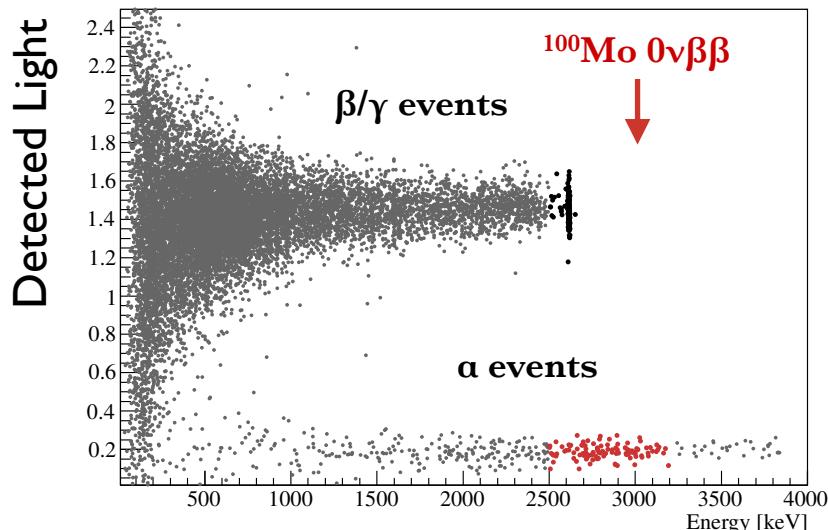
Peak	Heat [keV FWHM]	Heat + Light [keV FWHM]
1461 keV	13.4 ± 1.0	12.2 ± 1.8
2615 keV	16.3 ± 1.5	13.4 ± 1.3
$0\nu\beta\beta$ (^{82}Se)	19.4	16.5

Eccellente reiezione α usando l'ampiezza e la forma del segnale di luce
Buona risoluzione energetica ed efficienza $\sim 75\%$.

J.W. Beeman et al, 10.1088/1748-0221/8/05/P05021

ZnMoO₄

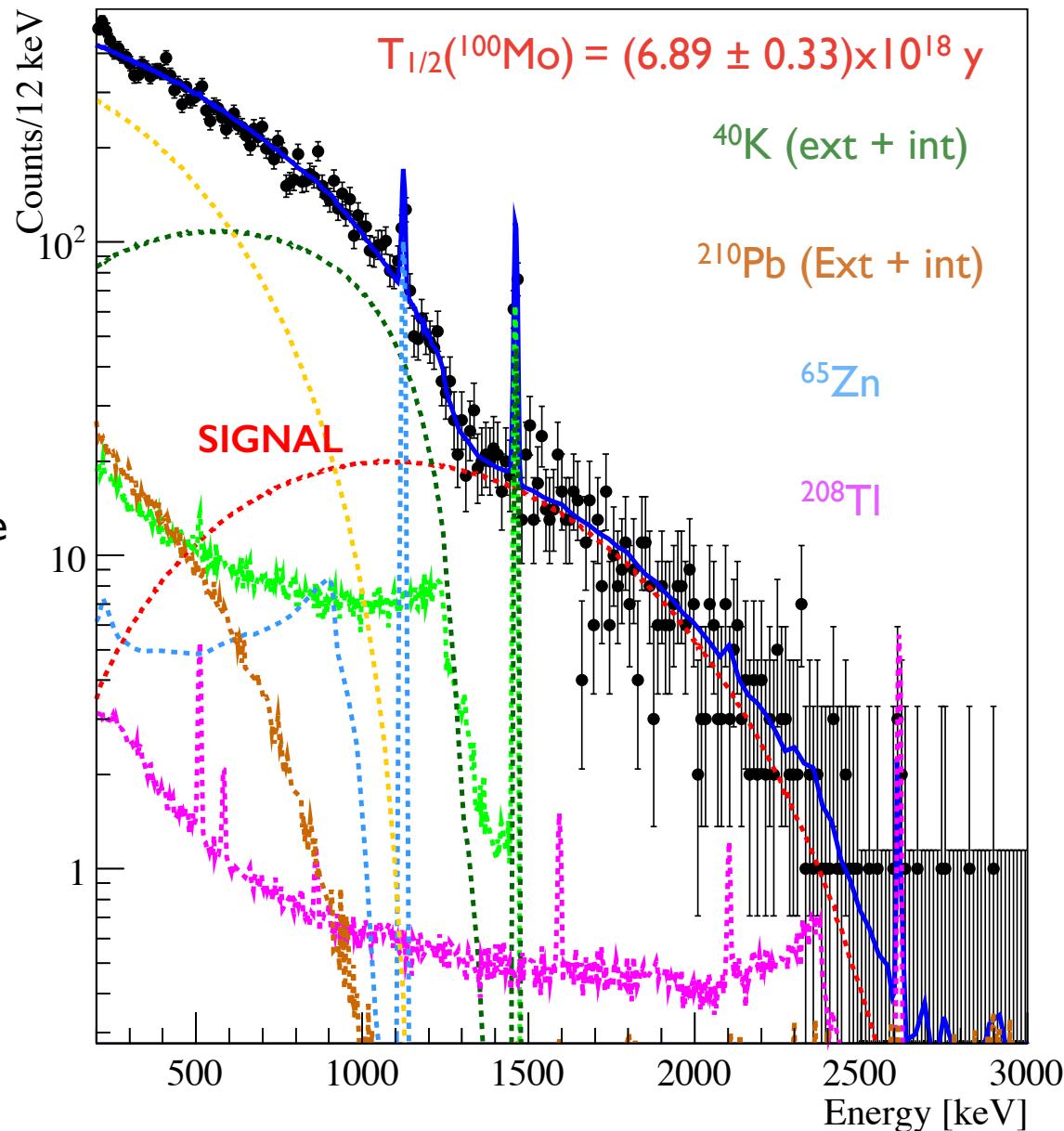
Possibile alternativa agli ZnSe per LUCIFER, investigato recentemente anche da altri progetti (LUMINEU)



- Ottima reiezione del fondo α , con ulteriore strumento di discriminazione: la forma del segnale di calore.
- Risoluzione energetica eccellente (0.1%).
- Prima misura bolometrica del 2v del ^{100}Mo

L.Cardani et al 10.1088/0954-3899/41/7/075204

	Exposure [kg · y]	Error
NEMO	7.5	~ 10%
This work	3.5×10^{-3}	~ 30%



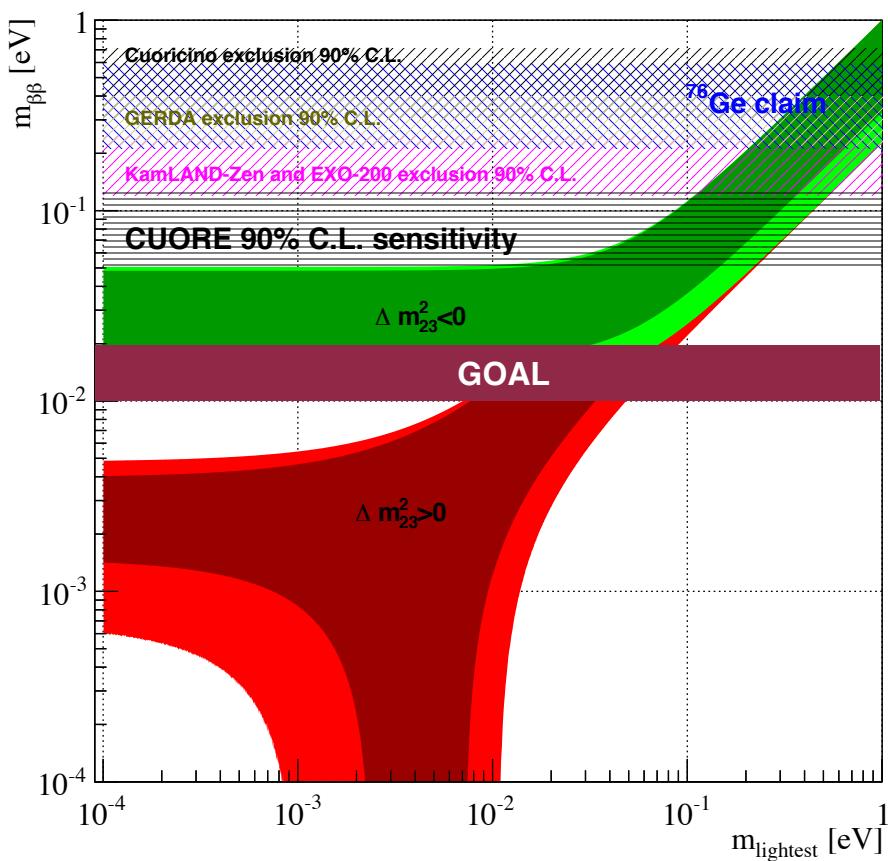
Esperimenti di prossima generazione: sensibilità

Rivelatori bolometrici di prossima generazione:

- stesso spazio sperimentale di CUORE;
- risoluzione di 5 keV (già dimostrata per diversi candidati);
- arricchimento isotopico al 90%;
- fondo ridotto da 100 a qualche conteggio nella ROI per rivelatore di una tonnellata in 5 anni)

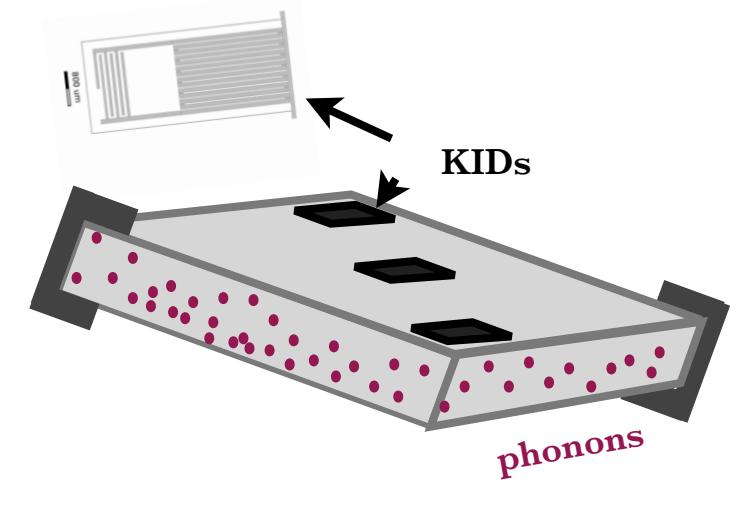
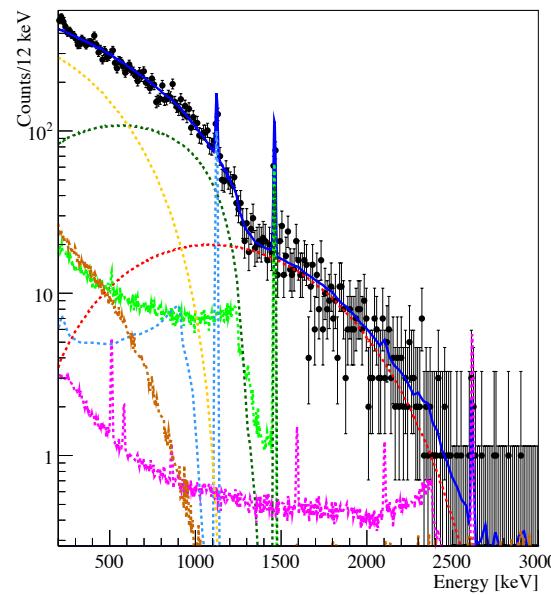
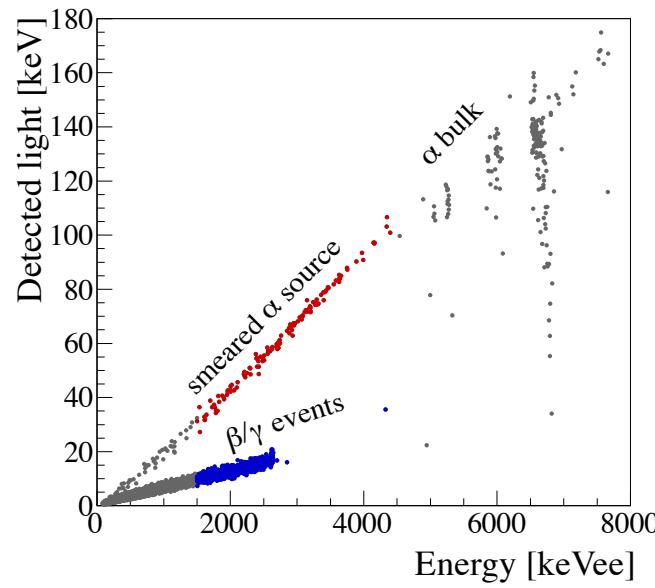
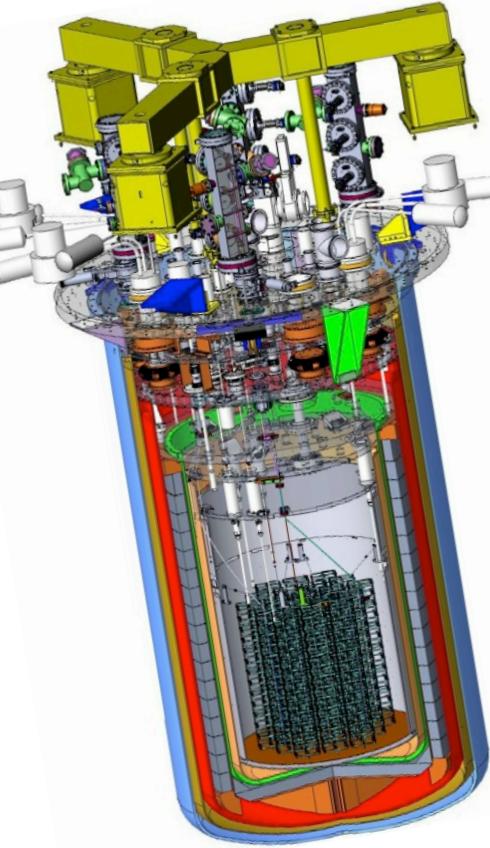
In 5 anni di presa dati avremmo:

	Massa [kg]	Isotopi	Sensibilità 90% [y]	Massa di Majorana [meV]
ZnSe	664	2.4×10^{27}	2.2×10^{27}	11 - 32
ZnMoO ₄	540	1.3×10^{27}	1.1×10^{27}	13 - 37
TeO ₂	751	2.4×10^{27}	2.5×10^{27}	10 - 25



Conclusioni

- I bolometri sono rivelatori ideali per la ricerca del $0\nu\beta\beta$; CUORE, il primo esperimento criogenico di **I ton**, dimostrerà il potenziale di questa tecnologia raggiungendo un'alta sensibilità su $m_{\beta\beta}$
- Per sondare la gerarchia inversa, servono nuove idee per la soppressione del fondo → panorama molto ricco di R&D sia per TeO_2 che per possibili alternative
- Diverse R&D hanno già ottenuto risultati molto incoraggianti: la riduzione del fondo è possibile!



Background suppression

Nowadays, all the detectors devoted to rare events searches are located in deep underground facilities



All the detectors described in the next slides were measured in the
LNGS
(Laboratori Nazionali del Gran Sasso, Italy)
3650 m.w.e.

muon flux: $(2.58 \pm 0.3) \times 10^{-8} \mu/(s \text{ cm}^2)$

Mei and Hime, Phys. Rev. D 73, 053004, 2006 [astro-ph 0512125]

neutron flux [$< 10 \text{ MeV}$] : $\approx 4 \times 10^{-6} \text{ n}/(\text{s cm}^2)$

F.Arneodo et al., Il Nuovo Cim. 112A, 819, 1999

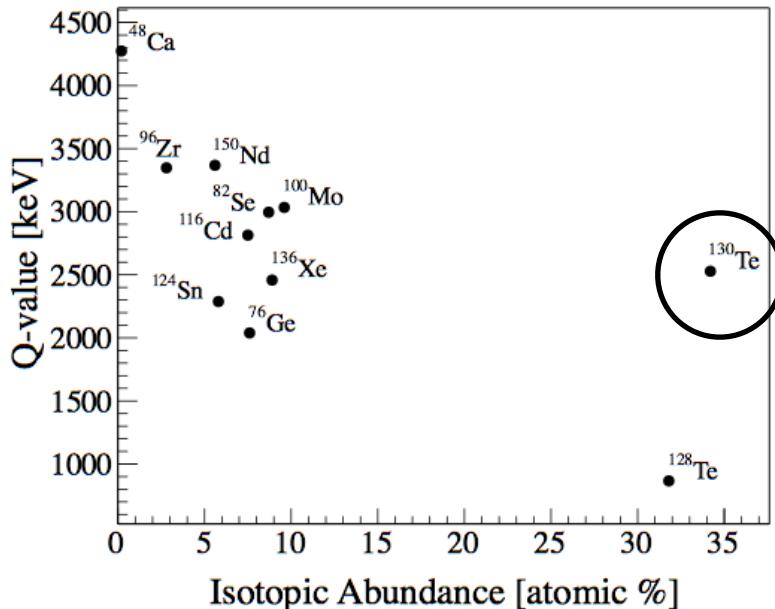
gamma flux: $\approx 0.73 \gamma/(\text{s cm}^2)$

C. Bucci et al., Eur. Phys. J.A, 41, 155-168, 2009

- detectors equipped with proper shields (water, lead...) and vetoes
- the ultimate limit to the background suppression may become the detector itself

The Cuoricino experiment

Study of ^{130}Te 0vDBD with TeO_2 bolometers

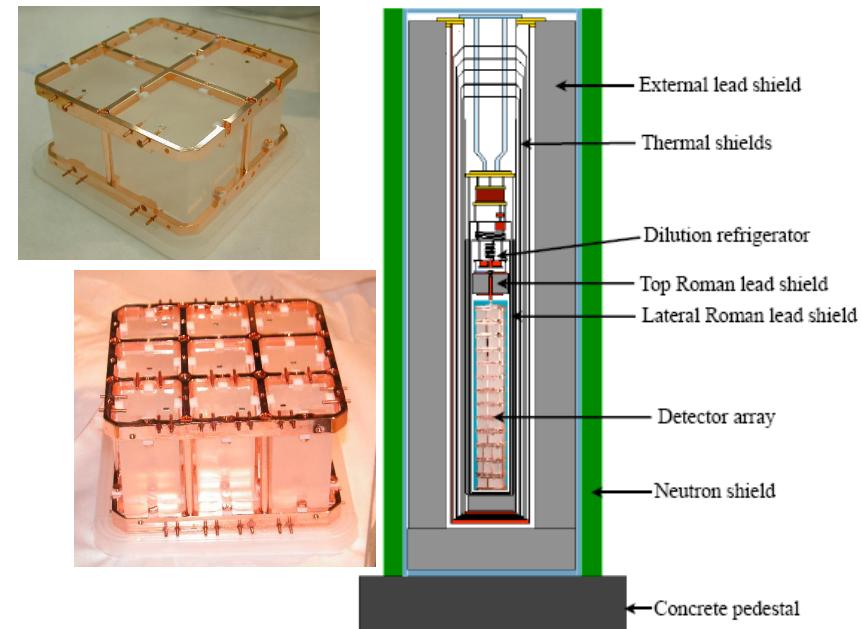


- ^{130}Te has large natural i.a. (34%) and a rather large Q-value (2527 keV)
- 11.6 kg of ^{130}Te were embedded in 62 crystals for a total mass of 40.7 kg of TeO_2
- operated until 2008 at LNGS, this detector collected an exposure of 19.75 kg·y

- Average efficiency = 82.8%

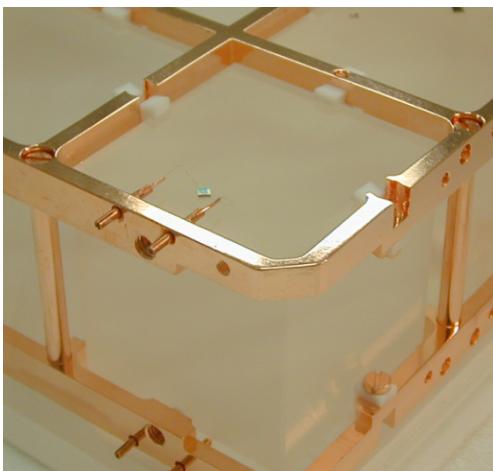
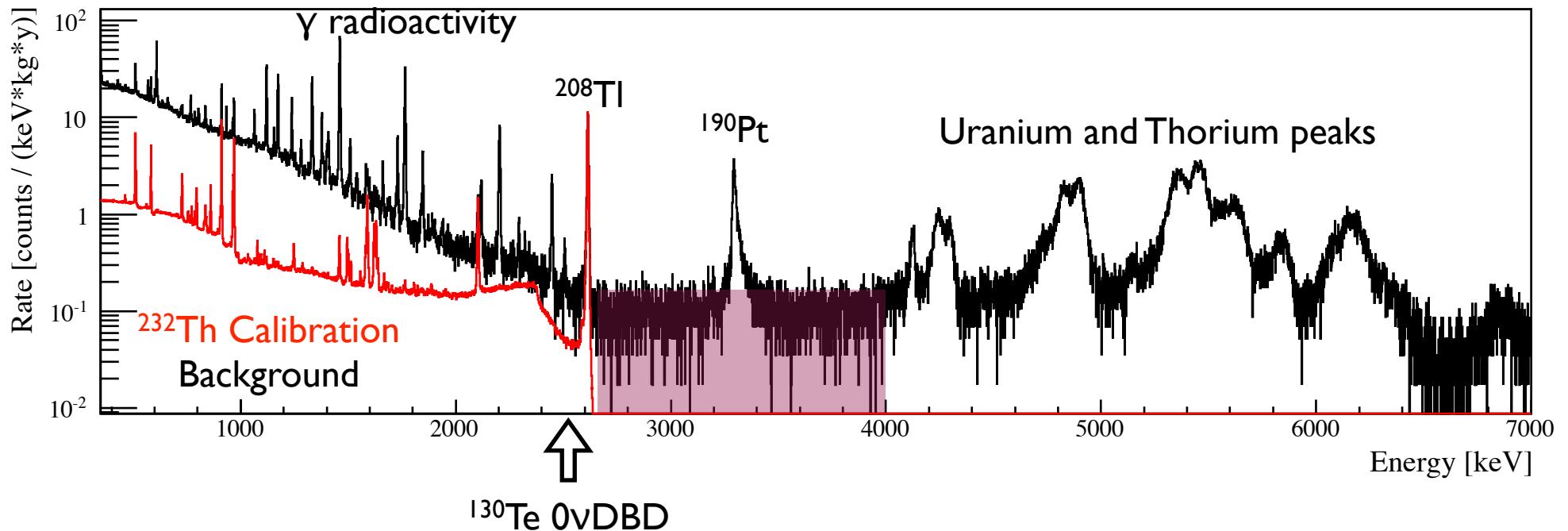
- FWHM energy resolution = 6.3 keV at 2615 keV

- Up to now, best limit on the ^{130}Te 0vDBD:
 $T_{1/2}(^{130}\text{Te}) > 2.8 \times 10^{24} \text{ y}$
and best limits on other rare decays



Background model of Cuoricino

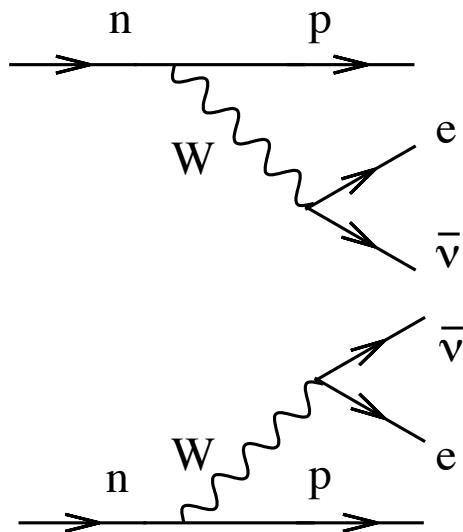
Cuoricino allowed to characterize the main sources of background for bolometric experiments.



- Flat background between the ^{208}Tl line and ~ 4 MeV ascribed to α decaying isotopes located in the material surfaces (crystals and copper)
- Lossing a variable fraction of energy in the material, the α particles give rise to a continuous distribution that extends to lower energies

The reduction of α contaminations plays a crucial role in the background suppression

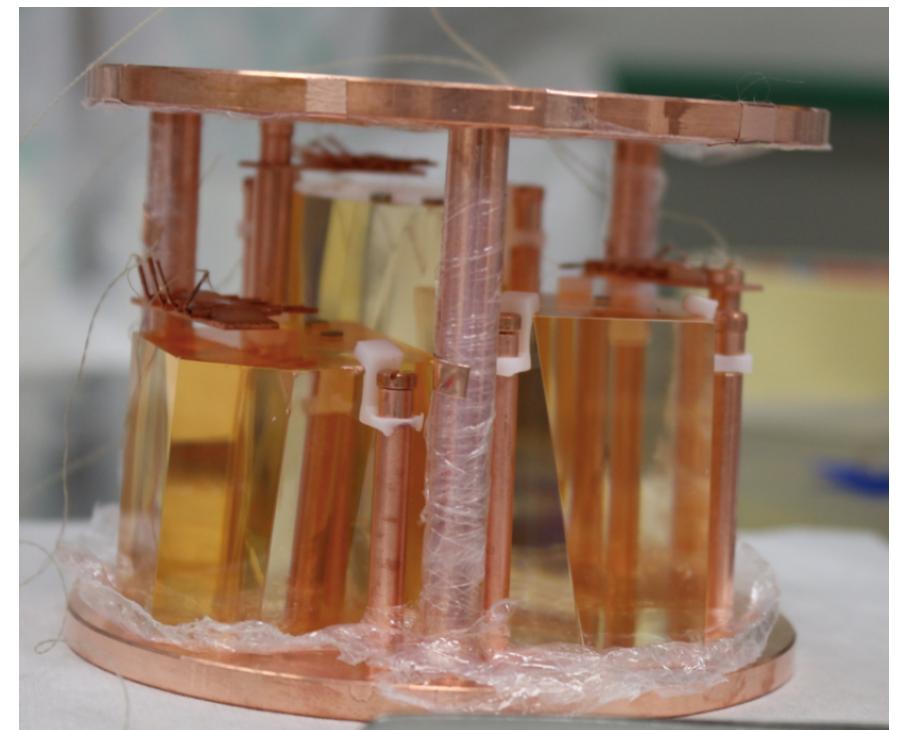
$2\nu\beta\beta$ of ^{100}Mo



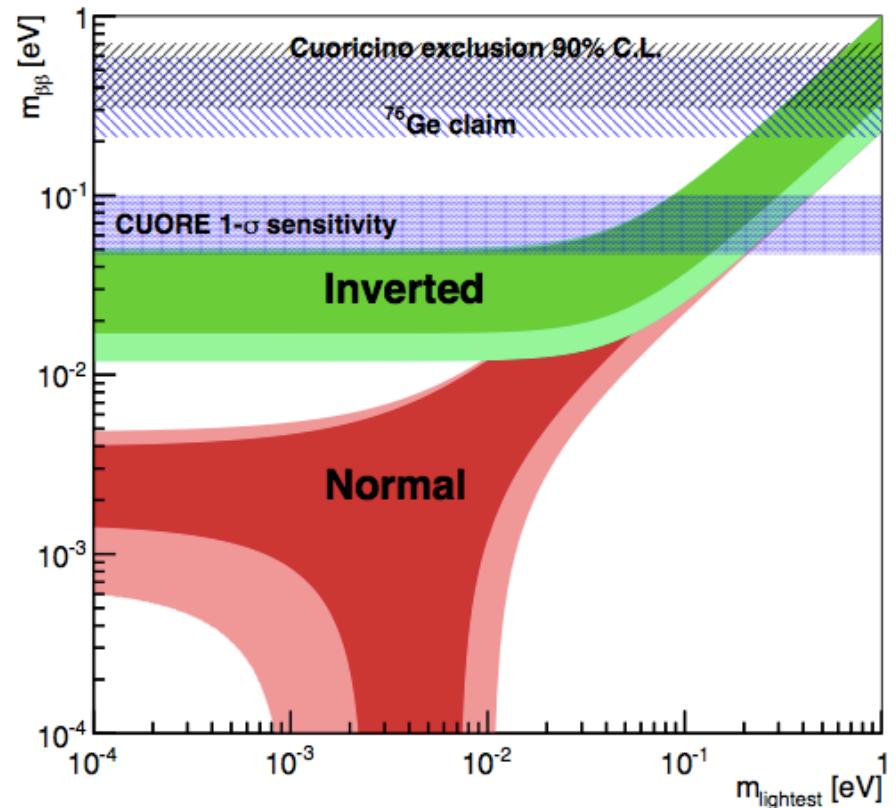
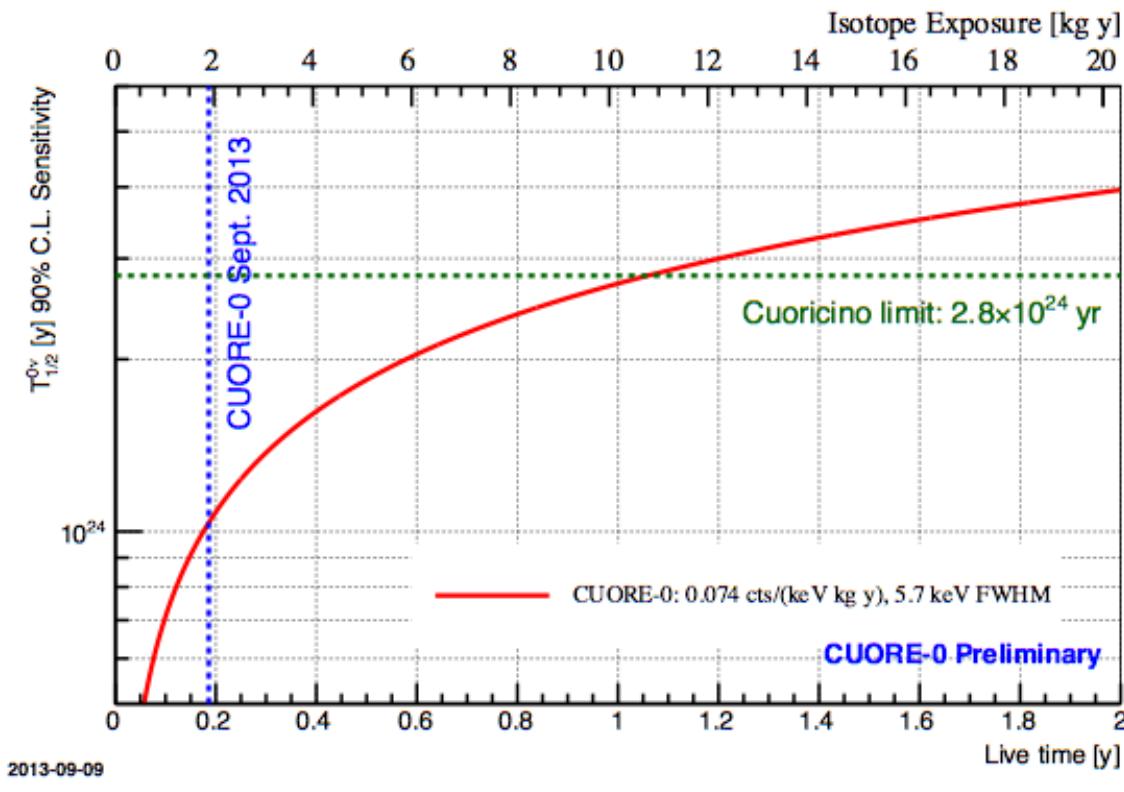
- Allowed by the SM (although very rare)
- Important to check our knowledge of the nuclear physics
- The most precise measurement of ^{100}Mo $2\nu\beta\beta$ was given by NEMO:
 $T_{1/2} = [7.11 \pm 0.02 \text{ (stat)} \pm 0.54 \text{ (syst)}] \times 10^{18} \text{ y.}$

We operated the 1st array of ZnMoO₄ bolometers
($N_0 = 2 \times 10^{23}$ isotopes of ^{100}Mo)

- FWHM energy resolution better than 1%
- $\epsilon > 80\%$
- Low internal contaminations (tens of $\mu\text{Bq}/\text{kg}$ in Th and U for the most contaminated sample)



CUORE-0 sensitivity on 0vDBD



- Preliminary results show that the background of CUORE-0 is (0.074 ± 0.012) counts/keV/kg/y
- With such a low background, CUORE-0 is expected to overcome the Cuoricino sensitivity in about 1 year of data-taking
- CUORE will be the ultimate limit to the background suppression achievable with this technique. New ideas are needed for a further increase of the sensitivity.

Neutrinoless Double Beta Decay

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G^{0\nu}(Q, Z) |M^{0\nu}|^2 \left(\frac{\langle m_{\beta\beta} \rangle}{m_e} \right)^2$$

Phase
Space
Factor Nuclear
Matrix
Element

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_j m_j U_{ej}^2 \right| = |u_{e1}^2 e^{i\alpha_1} m_1 + u_{e2}^2 e^{i\alpha_2} m_2 + u_{e3}^2 m_3|$$

Why reducing the background is fundamental?

If the background is almost zero

$$S^{bkg} \propto \varepsilon \frac{i.a.}{A} \sqrt{\frac{MT}{B\Delta E}} [y] \quad \rightarrow \quad S^{0bkg} \propto \varepsilon \frac{i.a.}{A} MT [y]$$

the detection technique:

- ε = detector efficiency
- M = detector mass [kg]
- T = measurement time [y]
- ΔE = energy resolution [keV]
- B = background [counts/keV/kg/y]

the $0\nu\beta\beta$ emitter:

- i.a. = isotopic abundance
 - A = mass number
 - ~~B = background [counts/keV/kg/y]~~
- S increases *linearly* with MT
→ Background free detectors!