

What Next

Leggendo nella sfera di cristallo per il DBD
compito molto arduo....

A quali domande può rispondere il DDB-0v?

I neutrini sono particelle di Dirac



$$\nu \neq \bar{\nu}$$

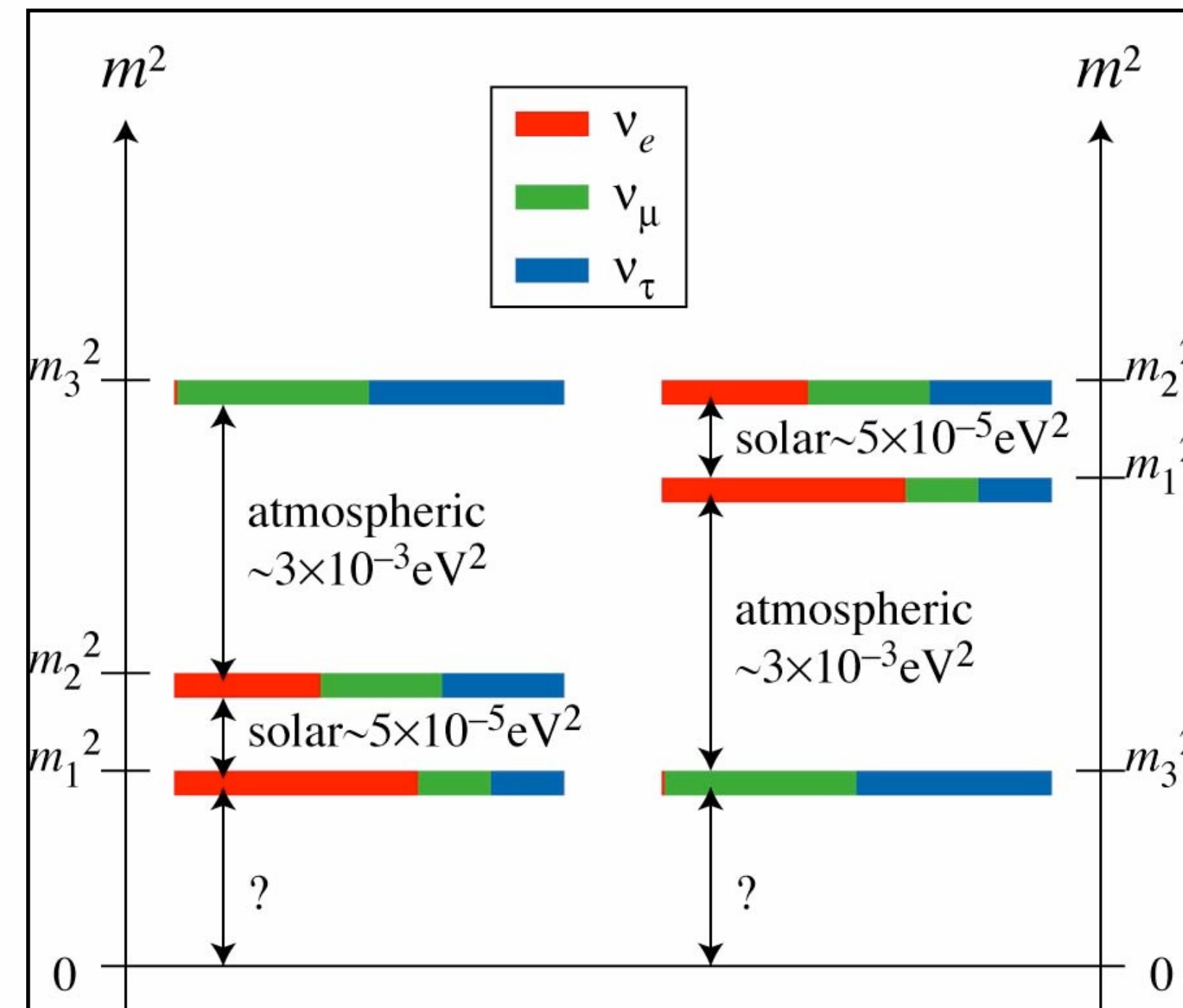
o di Majorana?



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

Qual è il segno di Δm^2

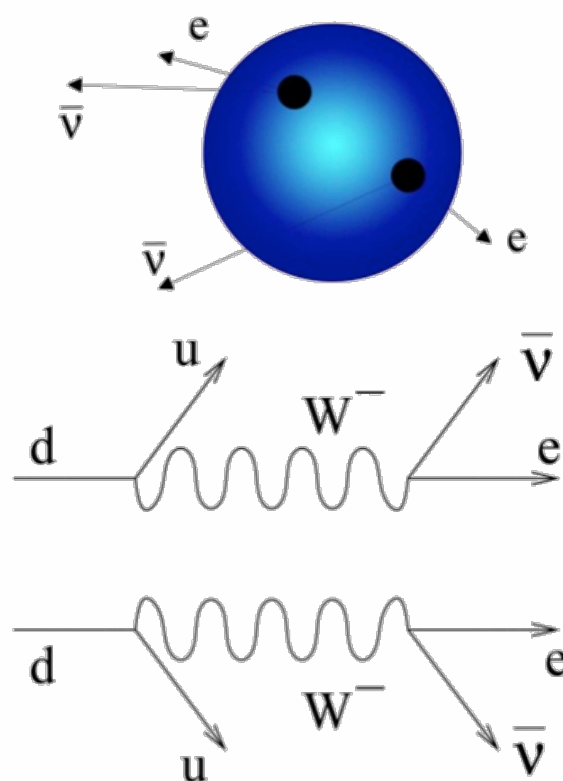
Qual è la scala assoluta di massa?



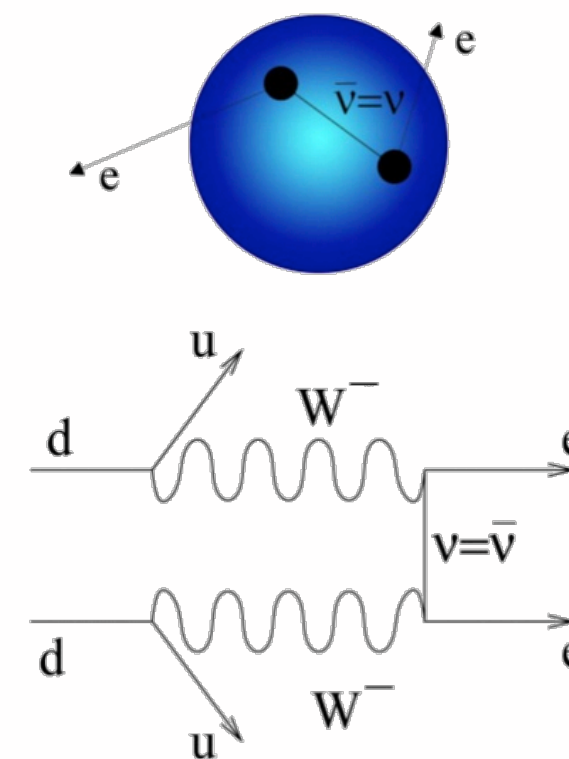
Il doppio decadimento beta

- È un decadimento estremamente raro: $(N, Z) \rightarrow (N-2, Z+2)$

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^- + 2\bar{\nu}$$



$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$$



- 2nd order process allowed in SM
- Observed in several nuclei
- Lepton number violating process ($\Delta L=2$)
- Exists if neutrino is a Majorana

Rate di decadimento

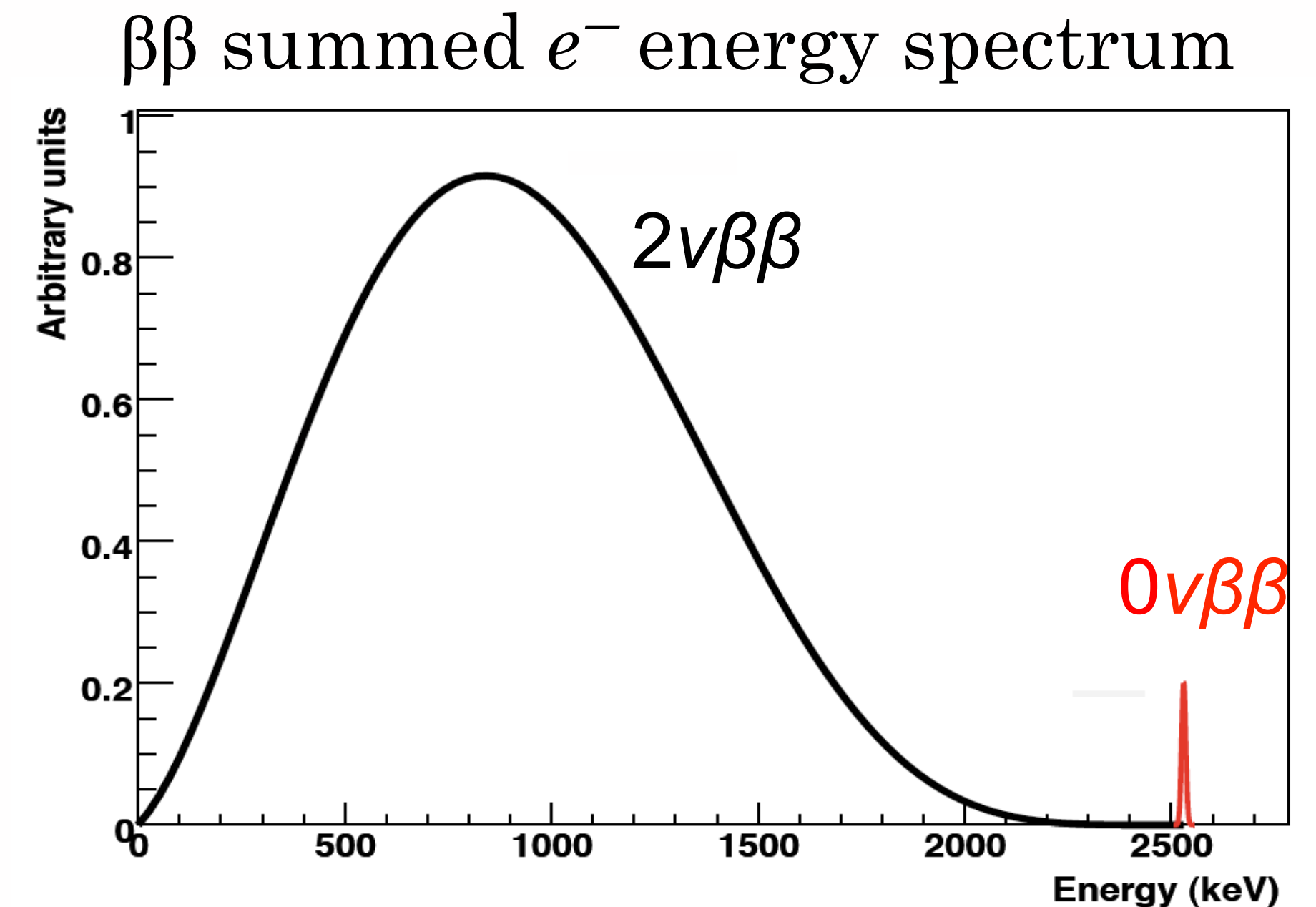
elemento di matrice nucleare

tempo di dimezzamento

spazio delle fasi

massa efficace

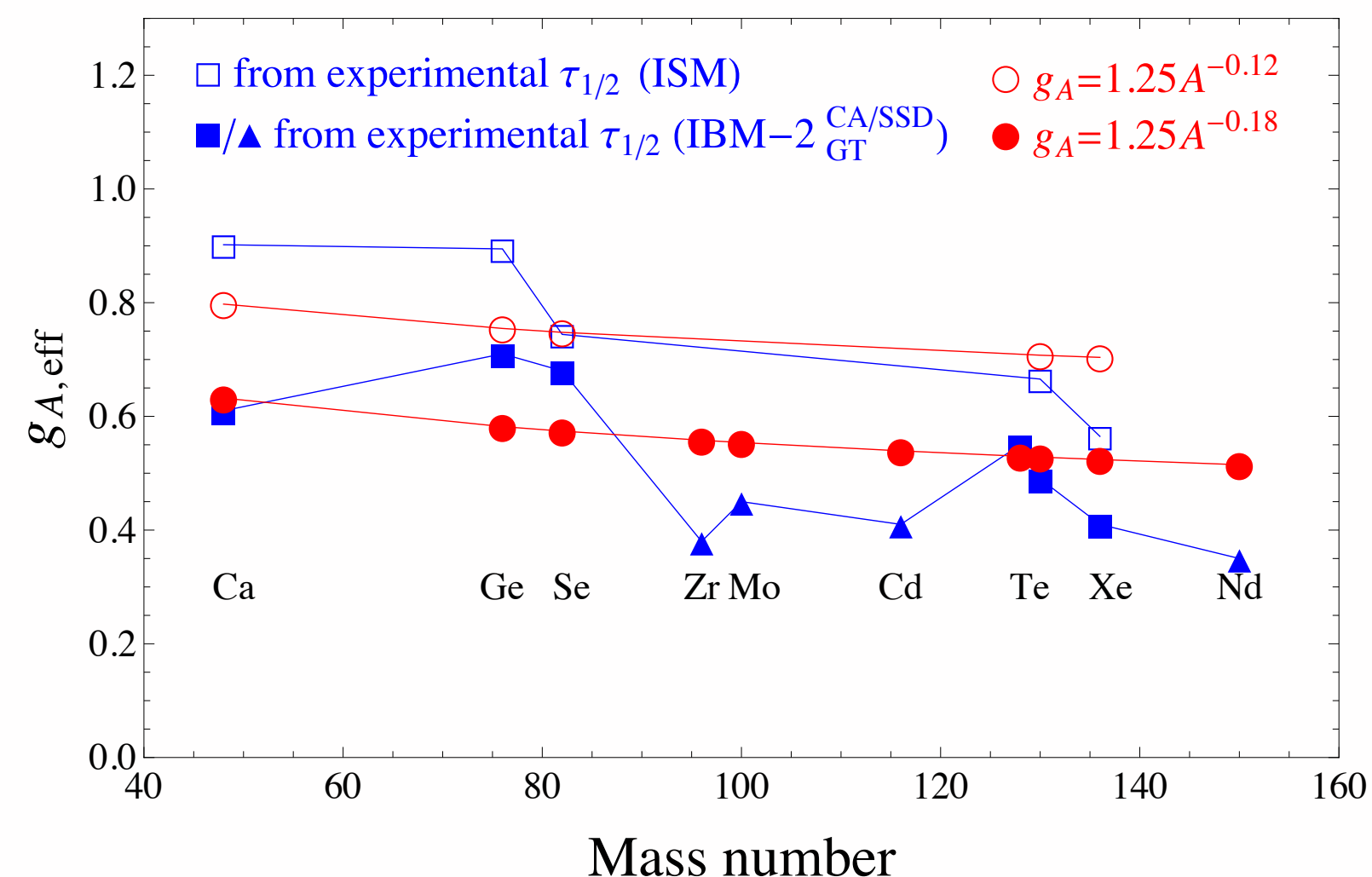
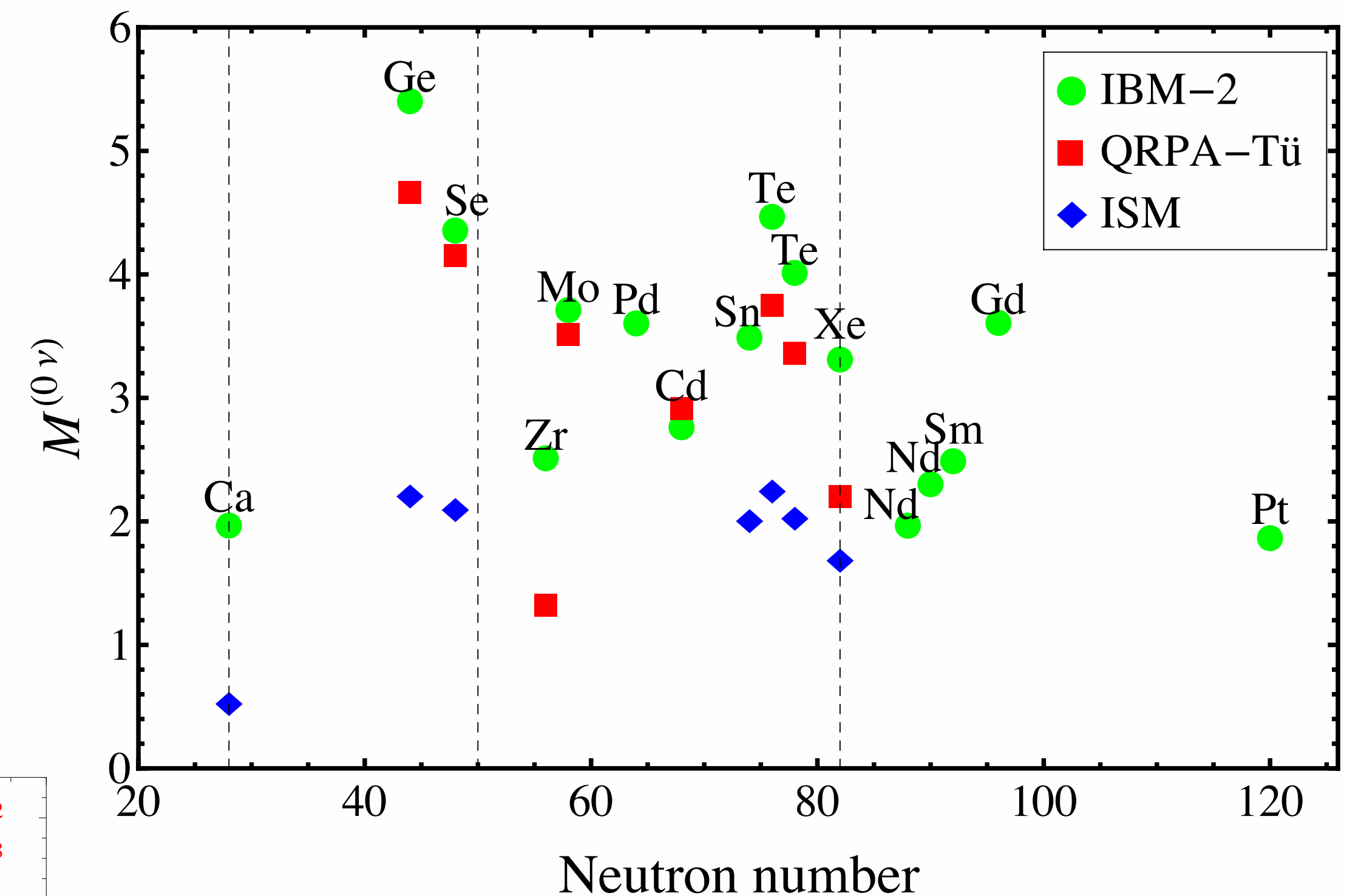
$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G_{0\nu} |M_{0\nu}|^2 \left| \frac{\langle m_{\beta\beta} \rangle}{m_e} \right|^2$$



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

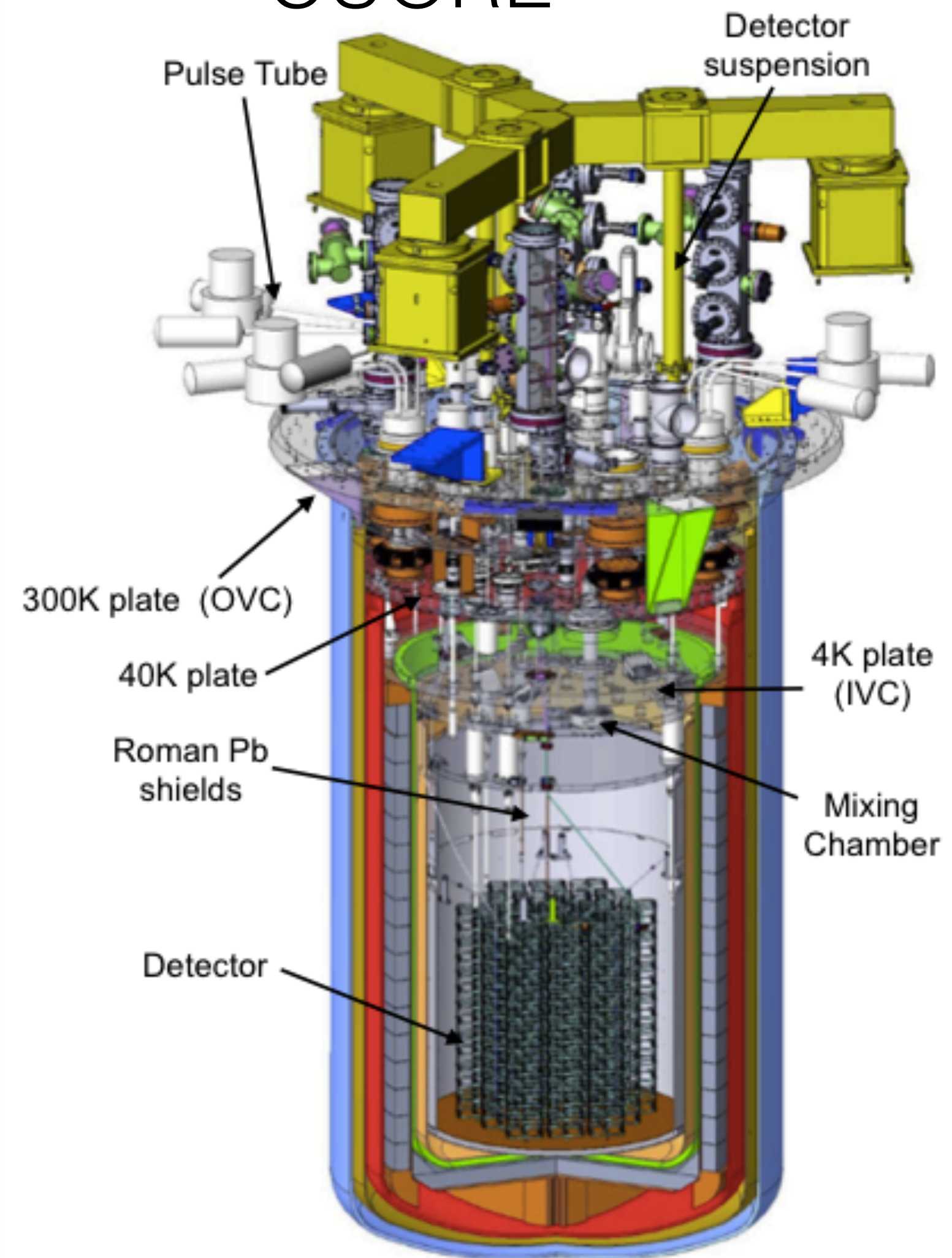
Matrici nucleari

- Gli elementi di matrice nucleari contengono il coupling assiale g_A al quadrato
- A parte g_A i calcoli ormai non differiscono di tanto
- Ma g_A introduce un'enorme incertezza
- Un fattore 2 g_A su porta ad un esperimento equivalente (a fondo 0) con una massa 16 volte maggiore!



Esperimenti @ LNGS

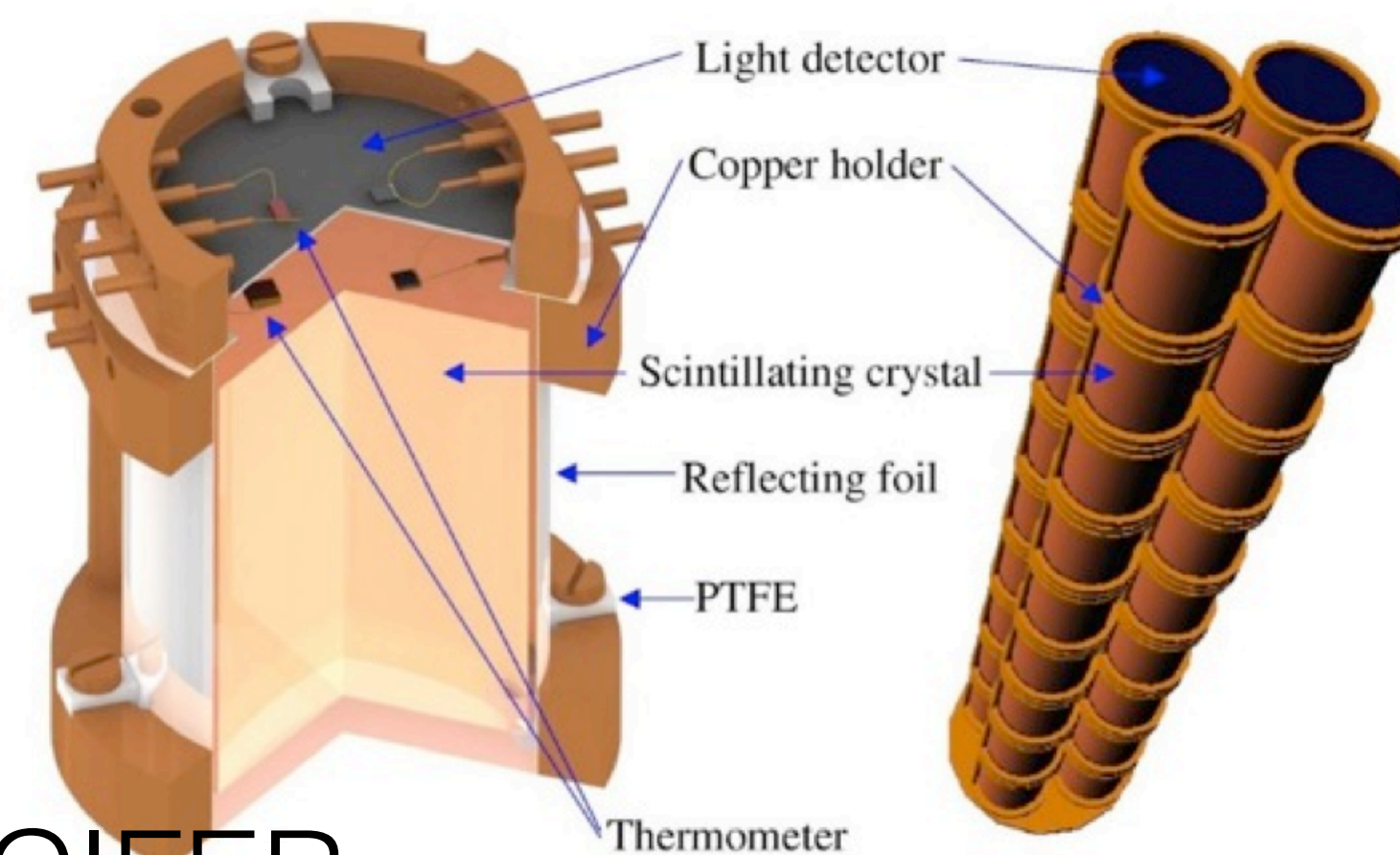
CUORE



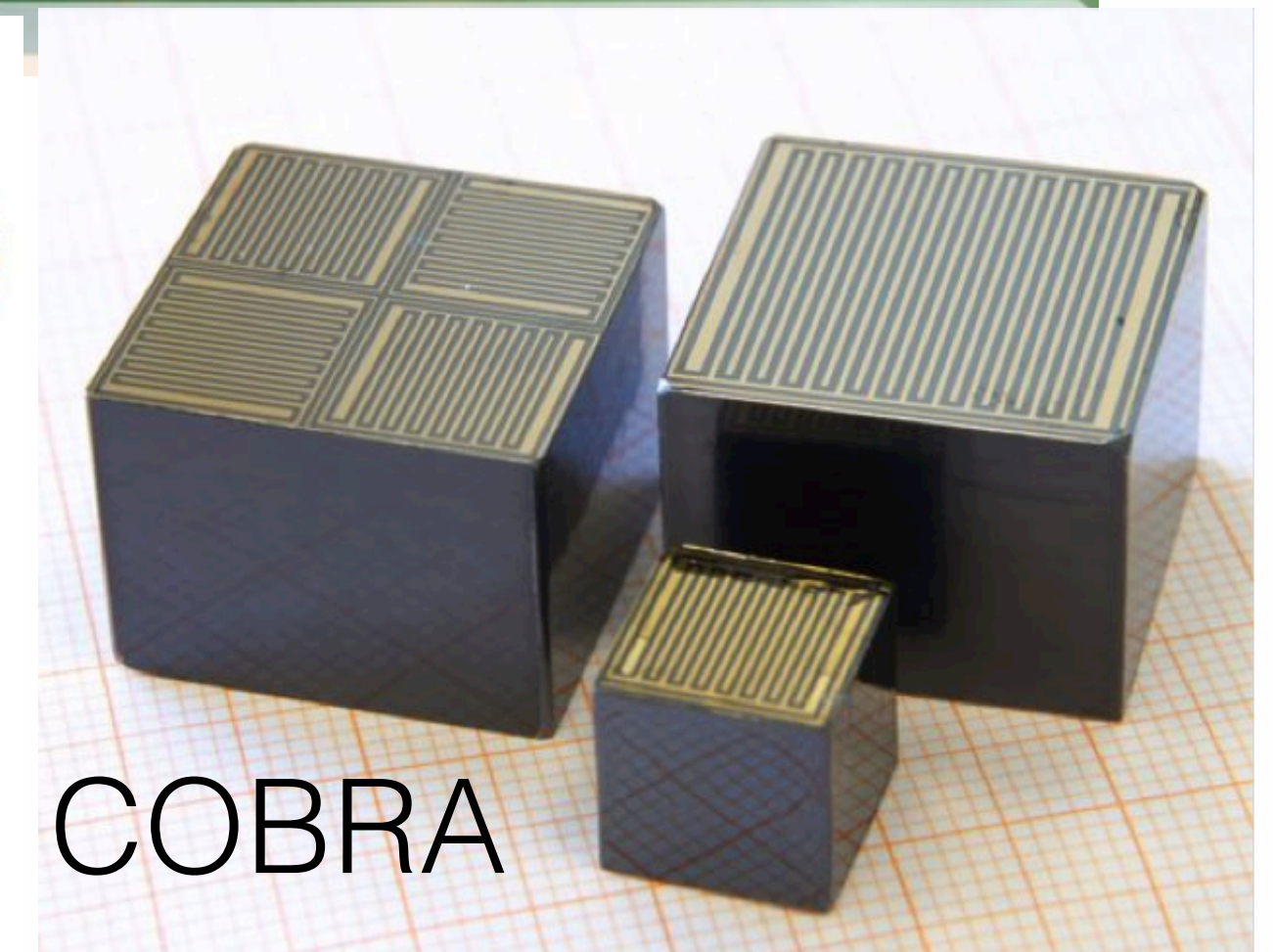
GERDA



LUCIFER

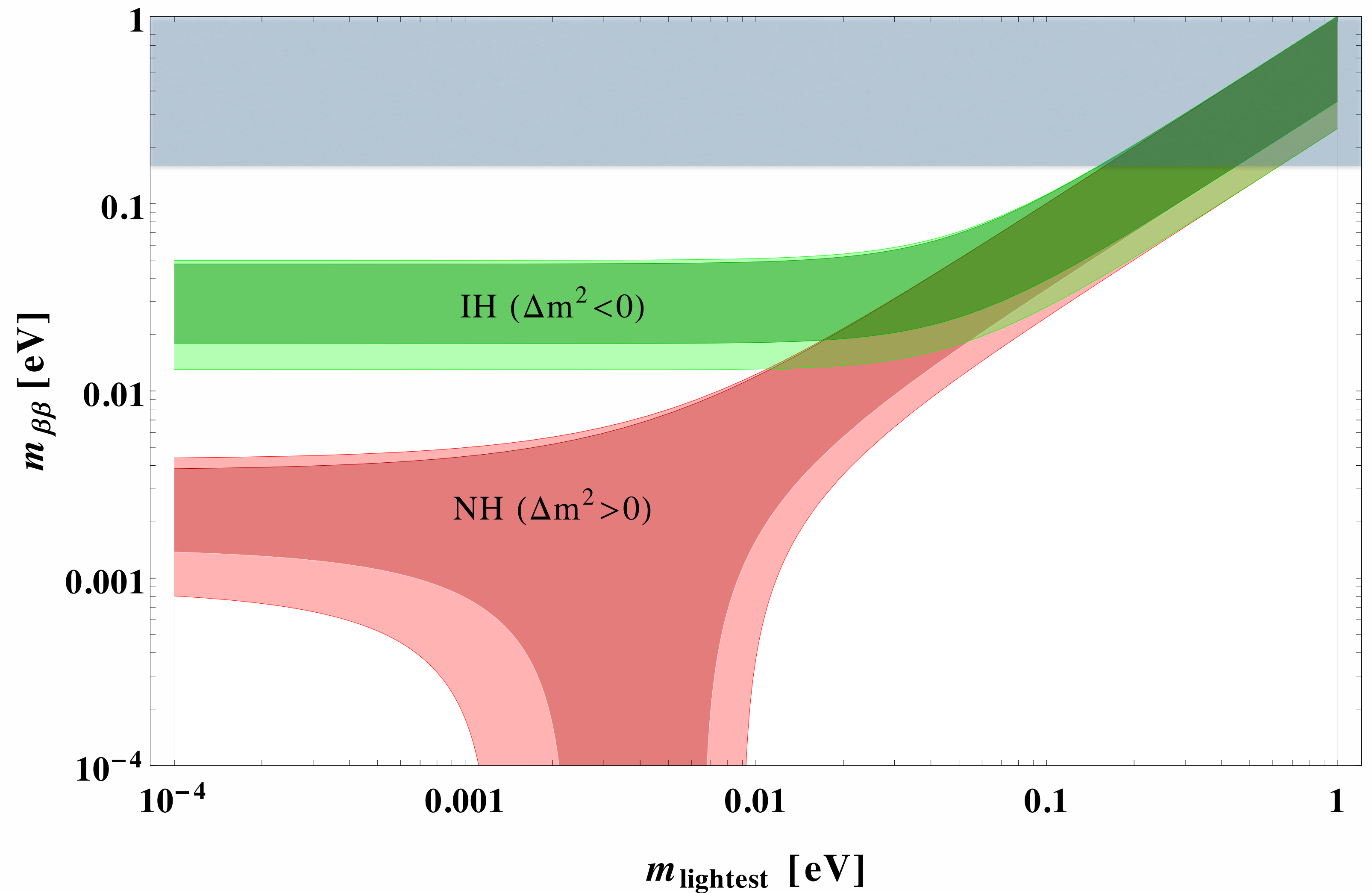
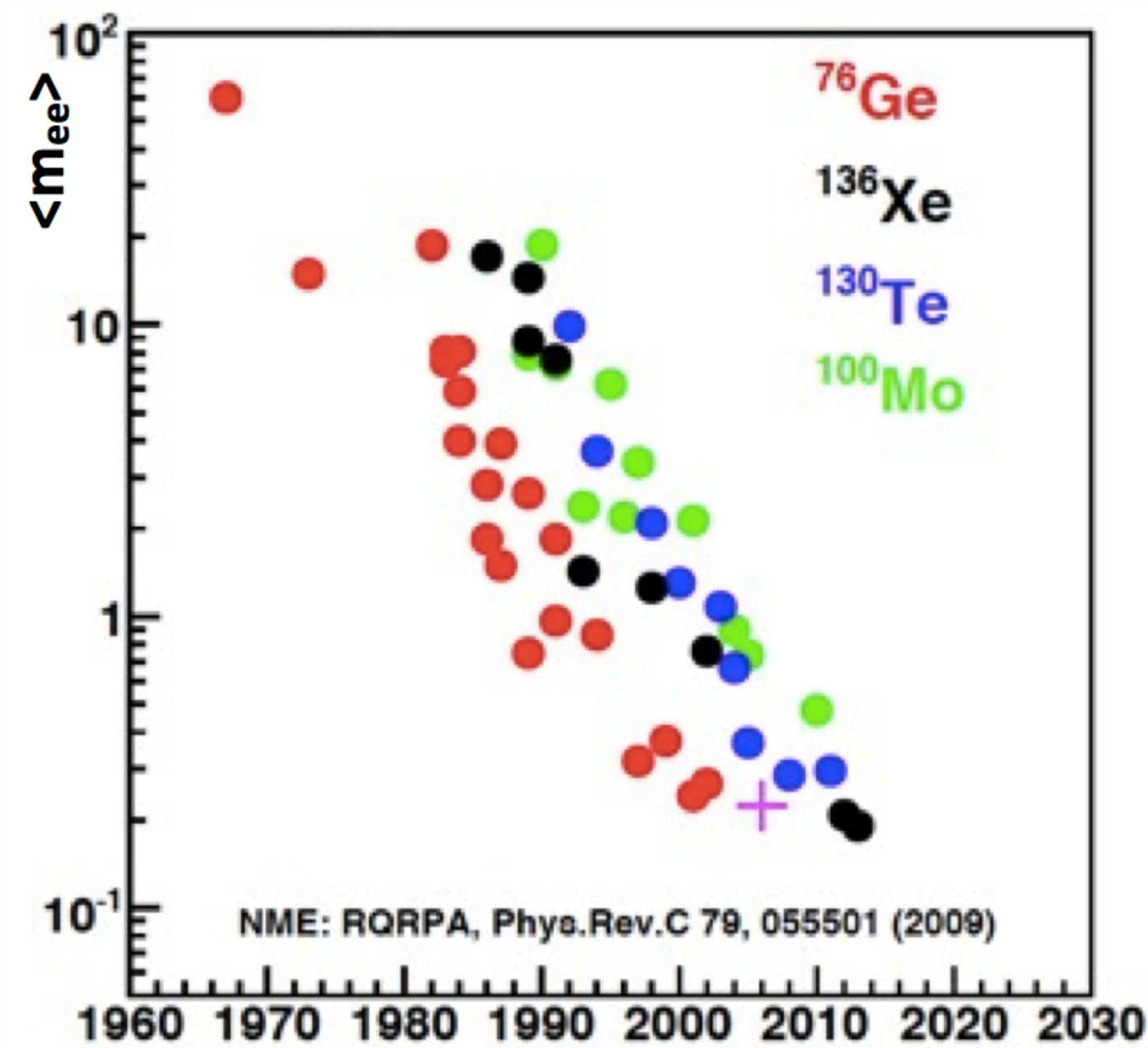


COBRA



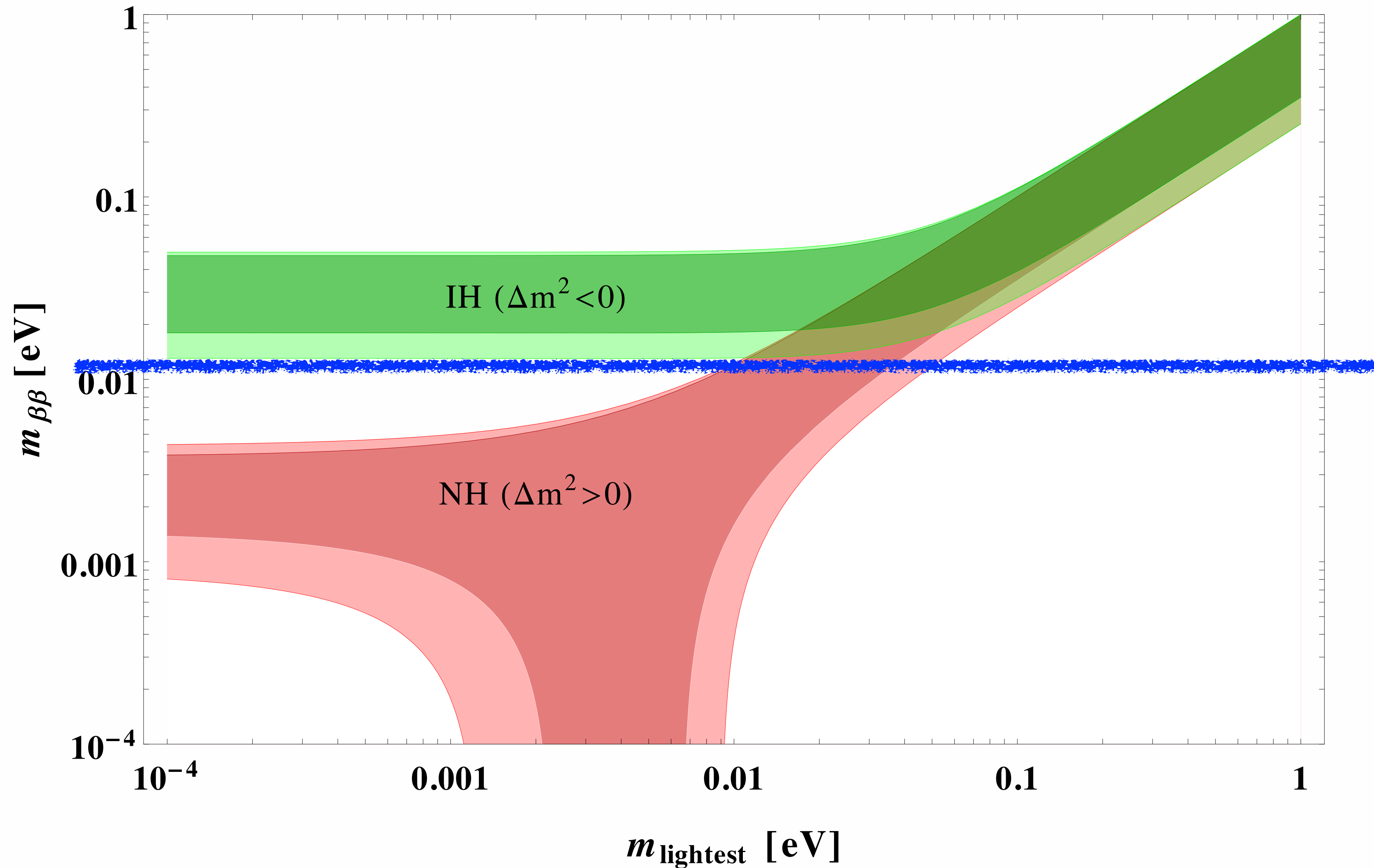
Stato attuale

Dell'Oro, Marcocci e Vissani, Phys. Rev. D 90, 033005 (2014)



L'obiettivo

Dell'Oro, Marcocci e Vissani, Phys. Rev. D 90, 033005 (2014)



Aumentare la sensibilità sperimentale

$$S_{0\nu} = \ln(2) N_A \frac{\eta \cdot \epsilon}{W} \sqrt{\frac{M \cdot T}{\Delta E \cdot B}}$$

fondo finito: $M \cdot T \cdot B \cdot \Delta E > 1$

- ☒ M è la massa totale (attiva) del rivelatore [kg]
- ☒ T è il tempo vivo di misura [anni]
- ☒ B è il fondo nella ROI [conteggi $\text{keV}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ y}^{-1}$]
- ☒ W è il peso molecolare

$$S_{0\nu} = \ln(2) N_A \frac{\eta \cdot \epsilon}{W} M \cdot T$$

fondo zero: $M \cdot T \cdot B \cdot \Delta E \lesssim 1$

- ☒ N_A è il numero di Avogadro
- ☒ η è l'abbondanza isotopica
- ☒ ϵ è l'efficienza del rivelatore
- ☒ ΔE è la risoluzione energetica FWHM al Q-valore

Tempo

- 📌 Qua non si può fare un granché
- 📌 A fondo zero il limite va come T altrimenti come $\sqrt{T}$
- 📌 Nel prosieguo assumo $T = 5y$

Risoluzione

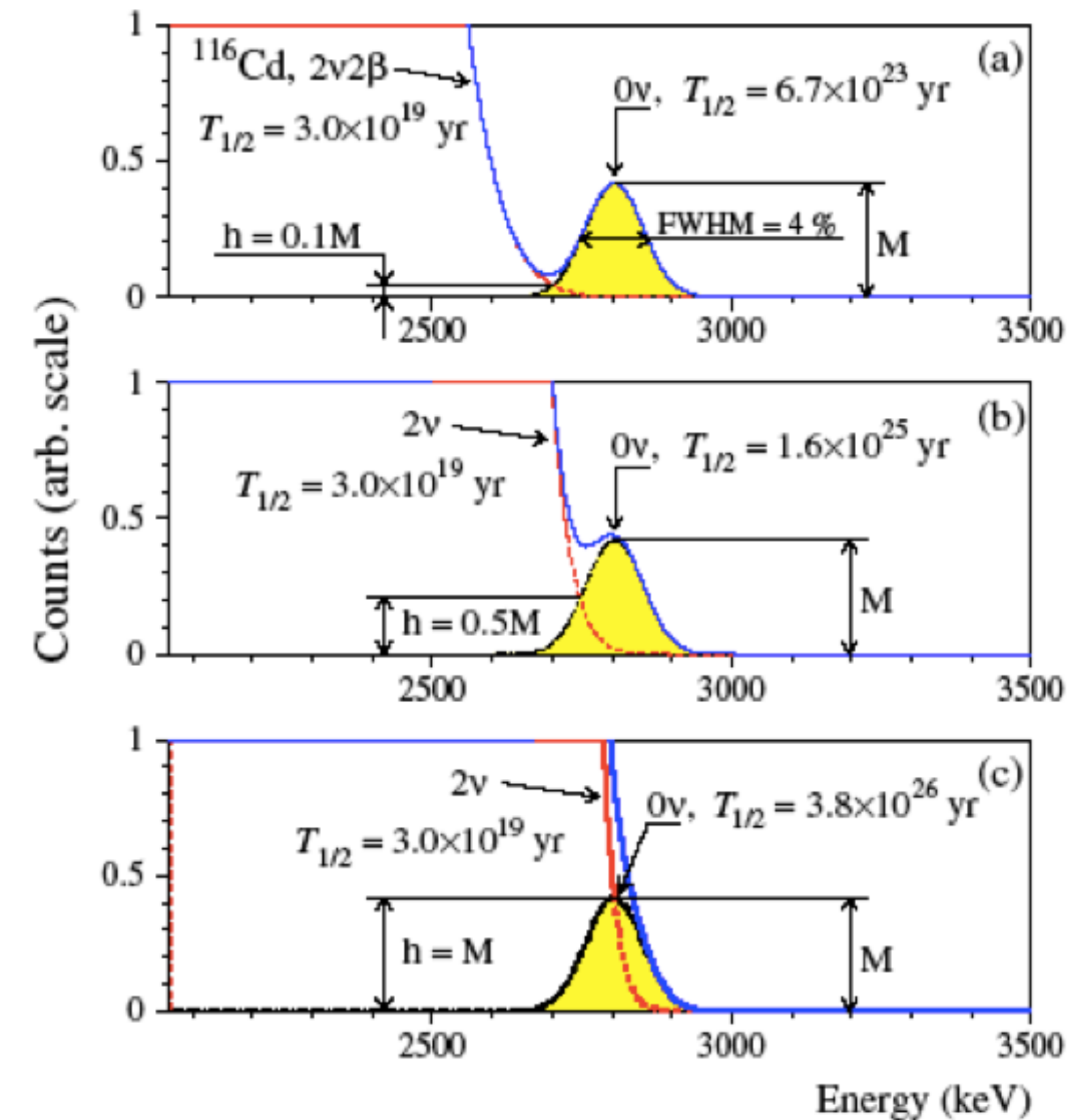
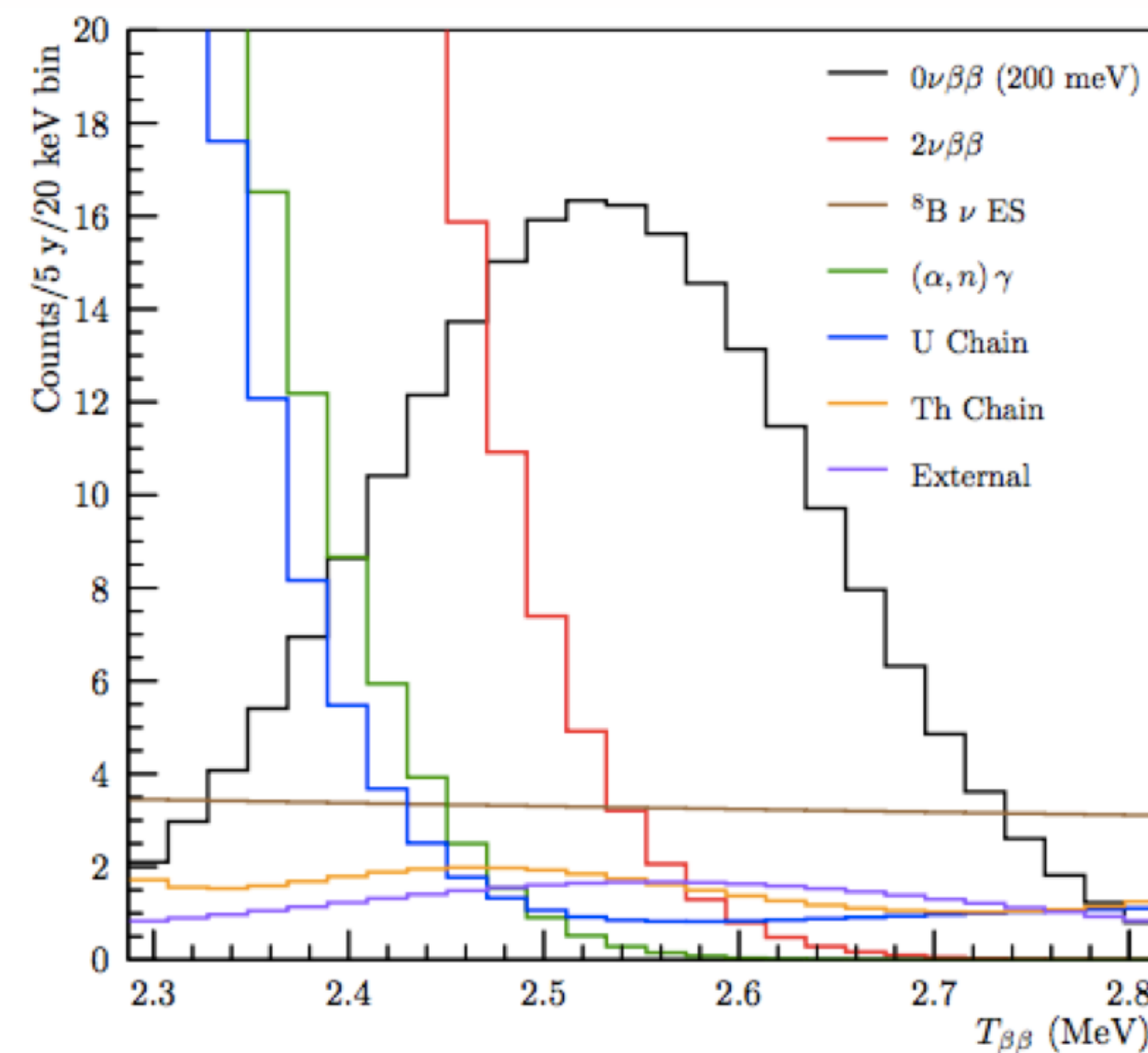
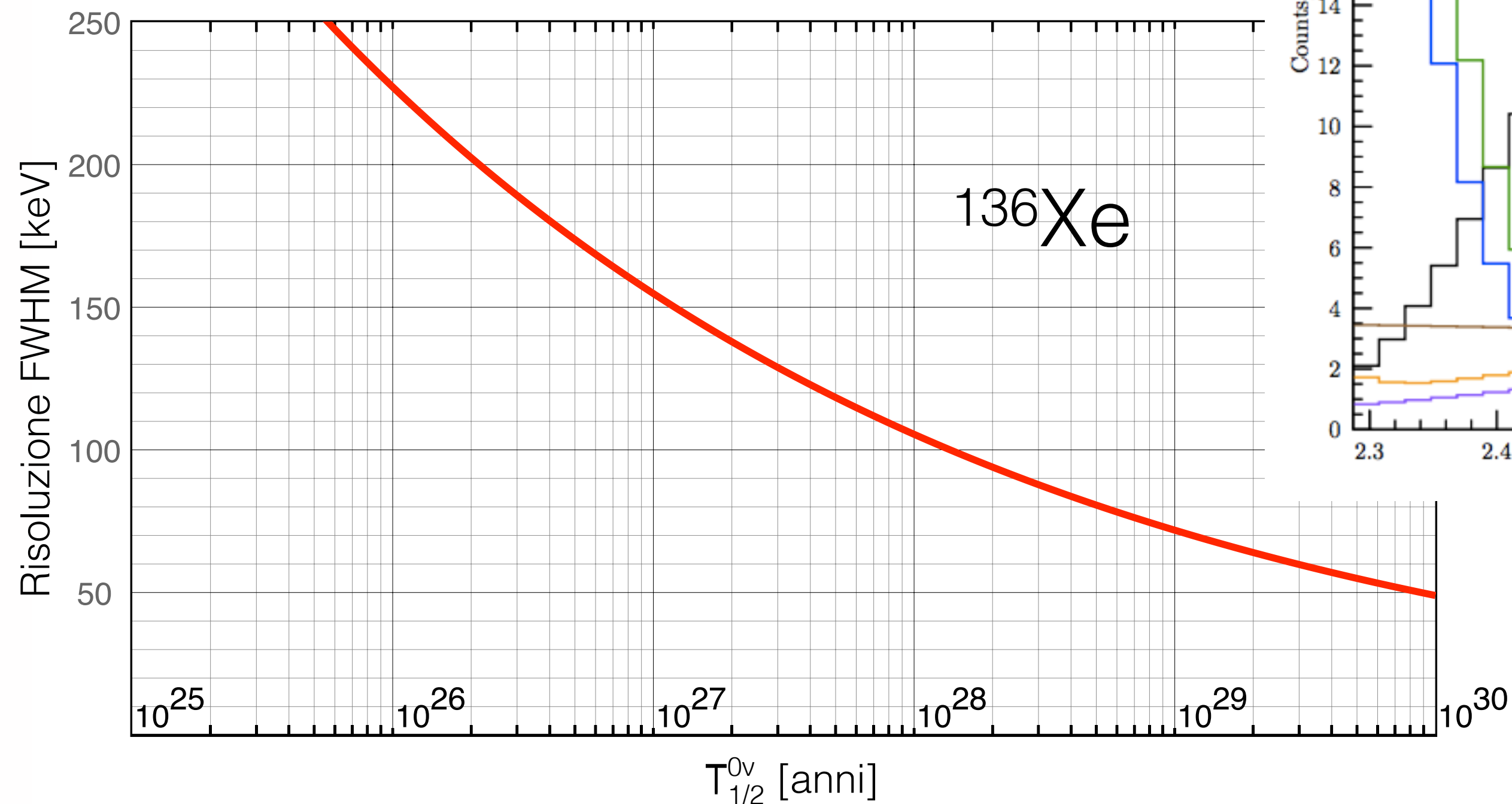
- 📌 Una buona risoluzione energetica è auspicabile per una serie di motivi:
 - una ROI più stretta significa una migliore sensibilità
 - migliore identificazione dei contributi di fondo
 - minore probabilità di sovrapposizione con picchi dovuti a radioattività naturale (e.g. linea 2448 del ^{214}Bi a soli 10 keV dal Q valore dello ^{136}Xe)
 - minimizza l'effetto del fondo indotto dal Doppio Decadimento Beta con 2 neutrini

Risoluzione

- 📌 Diodi al germanio e bolometri hanno già una risoluzione più che sufficiente a mettersi al riparo dal fondo proveniente dal 2 neutrini.
- 📌 Sui bolometri c'è (in teoria) ancora margine di miglioramento; ogni miglioramento sulla risoluzione è equivalente ad un miglioramento sul fondo. Non aspettiamoci però ordini di grandezza
- 📌 I diodi al germanio hanno raggiunto con GERDA delle ottime prestazioni
- 📌 TPC a Xenon liquido o gassoso hanno buone risoluzioni
- 📌 Rivelatori di scintillazione (tipo SNO+ o Kamland) sono limitati dal light yield e dalla raccolta di luce

Fondo (irriducibile) dal DDB-2v

- Il fondo non riducibile proveniente dal DDB-2v può essere mitigato solo dalla risoluzione energetica
- Si può parzialmente attenuare con una scelta asimmetrica della ROI a prezzo dell'efficienza



Zdesenko, Danevich, Tretyak, J. Phys. G 30 (2004) 971

$$\frac{S}{B} = \frac{m_e}{7Q\delta^6} \frac{\Gamma_{0\nu}}{\Gamma_{2\nu}} = \frac{m_e}{7Q\delta^6} \frac{T_{1/2}^{2\nu}}{T_{1/2}^{0\nu}}$$

Massa e abbondanza isotopica

Dell'Oro, Marcocci e Vissani, Phys. Rev. D 90, 033005 (2014)

- Bisogna spingere sia sulla massa che sulla abbondanza isotopica
- Ovviamente possiamo ipotizzare un fondo piccolo a piacere ma se non abbiamo un numero sufficiente di atomi $\beta\beta$ attivi è difficile vedere qualcosa

$$T_{1/2}^{0\nu} = \ln(2) \cdot N_A \cdot \frac{M}{W} \cdot \eta \cdot \epsilon \cdot T$$

Assunzioni nelle tabelle seguenti

- 📌 Elementi di matrice da IBM-2
- 📌 Sensibilità ad 1 sigma
- 📌 Fondo zero (i.e. $M \cdot T \cdot B \cdot \Delta E \approx 1$)
- 📌 Percentuale di elemento $\beta\beta$ attivo nel rivelatore come negli esperimenti odierni
- 📌 Arricchimento isotopico 90% su tutti gli isotopi
- 📌 Costo isotopi attuale
- 📌 Efficienza (volume fiduciale) attuale
- 📌 Risoluzione energetica attuale (o dichiarata)
- 📌 Obiettivo: $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 12$ meV

$\langle m_{\beta\beta} \rangle = 12 \text{ meV}$ $g_A = 1,269$

	T1/2 0v [anni]	Massa isotopo [ton]	Efficienza (volume fiduciale)	Massa totale rivelatore [ton]	a.i. [%]	Costo isotopo/kg [k€]	Costo isotopo [M€]	B*ΔE [c/kg/y]	ΔE FWHM [keV]	Fondo [c/keV/kg/y]	Q value [keV]	T1/2 2v [anni]	Rapporto eventi 0v/2v
⁷⁶ Ge GERDA	1,0E+28	0,365	0,82	0,49	7,8	70,00	34,64	5,5E-04	3	1,8E-04	2039	1,8E+21	6,3E+08
⁸² Se Lucifer	3,7E+27	0,145	0,80	0,36	9,2	70,00	14,11	1,4E-03	10	1,4E-04	2996	9,2E+19	4,4E+05
¹⁰⁰ Mo (ZnMO ₄)	3,2E+27	0,151	0,80	0,48	7,6	100,00	20,97	1,3E-03	9	1,5E-04	3034	7,1E+18	8,0E+04
¹¹⁶ Cd (CdWO ₄)	5,4E+27	0,301	0,80	1,31	9,6	150,00	62,64	6,7E-04	6	1,1E-04	2814	2,8E+19	1,4E+06
¹³⁰ Te CUORE	3,0E+27	0,189	0,87	0,30	34,2	13,00	3,14	1,1E-03	5	2,1E-04	2527	6,8E+20	1,1E+08
¹³⁰ Te SNO+	3,0E+27	0,189	0,20	350,61	34,2	13,00	13,67	1,1E-03	270	3,9E-06	2527	6,8E+20	4,3E-03
¹³⁶ Xe EXO	4,3E+27	0,281	0,50	0,63	8,9	8,00	5,00	7,1E-04	58	1,2E-05	2458	2,1E+21	8,4E+01
¹³⁶ Xe Kam-Zen	4,3E+27	0,281	0,30	42,72	8,9	8,00	8,34	7,1E-04	250	2,8E-06	2458	2,1E+21	1,3E-02
¹³⁶ Xe NEXT	4,3E+27	0,281	0,30	1,04	8,9	8,00	8,34	7,1E-04	15	4,7E-05	2458	2,1E+21	2,8E+05

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = 12 \text{ meV}$$

$$g_A = 1,269 \cdot A^{-0.18}$$

	T1/2 0v [anni]	Massa isotopo [ton]	Efficienza (volume fiduciale)	Massa totale rivelatore [ton]	a.i. [%]	Costo isotopo/kg [k€]	Costo isotopo [M€]	B*ΔE [c/kg/y]	ΔE FWHM [keV]	Fondo [c/keV/kg/y]	Q value [keV]	T1/2 2v [anni]	Rapporto eventi 0v/2v
⁷⁶ Ge GERDA	2,3E+29	8,26	0,82	11,19	7,8	70,00	783,0	2,4E-05	3	8,1E-06	2039	1,8E+21	6,3E+08
⁸² Se Lucifer	8,8E+28	3,46	0,80	8,65	9,2	70,00	336,9	5,8E-05	10	5,8E-06	2996	9,2E+19	4,4E+05
¹⁰⁰ Mo (ZnMO ₄)	8,7E+28	4,16	0,80	13,25	7,6	100,00	577,4	4,8E-05	9	5,3E-06	3034	7,1E+18	8,0E+04
¹¹⁶ Cd (CdWO ₄)	1,7E+29	9,22	0,80	40,14	9,6	150,00	1919,9	2,2E-05	6	3,6E-06	2814	2,8E+19	1,4E+06
¹³⁰ Te CUORE	1,0E+29	6,30	0,87	10,02	34,2	13,00	104,6	3,2E-05	5	6,4E-06	2527	6,8E+20	1,1E+08
¹³⁰ Te SNO+	1,0E+29	6,30	0,20	11664,54	34,2	13,00	454,9	3,2E-05	270	1,2E-07	2527	6,8E+20	4,3E-03
¹³⁶ Xe EXO	1,5E+29	9,67	0,50	21,50	8,9	8,00	172,0	2,1E-05	58	3,6E-07	2458	2,1E+21	8,4E+01
¹³⁶ Xe Kam-Zen	1,5E+29	9,67	0,30	1468,24	8,9	8,00	286,6	2,1E-05	250	8,3E-08	2458	2,1E+21	1,3E-02
¹³⁶ Xe NEXT	1,5E+29	9,67	0,30	35,83	8,9	8,00	286,6	2,1E-05	15	1,4E-06	2458	2,1E+21	2,8E+05

Fattibilità economica

- 📌 Invertiamo il ragionamento
- 📌 Assumiamo di poter costruire un esperimento da ~ 100 M€
- 📌 Più aumentiamo la massa e più il costo dell'isotopo diventa preponderante rispetto alle infrastrutture
- 📌 Supponiamo che il costo dell'isotopo sia il 50% del costo totale
- 📌 Cosa ci potremmo permettere con questi soldi?

Costo isotopo=50 M€ $g_A=1,269$

	T1/2 0v [anni]	Massa isotopo [ton]	Efficienza (volume fiduciale)	Massa totale rivelatore [ton]	a.i. [%]	Costo isotopo/kg [k€]	$\langle m\beta\beta \rangle$ [meV]	$B^*\Delta E$ [c/kg/y]	ΔE FWHM [keV]	Fondo [c/keV/kg/y]	Q value [keV]	T1/2 2v [anni]	Rapporto eventi 0v/2v
^{76}Ge GERDA	1,4E+28	0,53	0,82	0,71	7,8	70,00	9,8	3,8E-04	3	1,3E-04	2039	1,8E+21	4,4E+08
^{82}Se Lucifer	1,3E+28	0,51	0,80	1,28	9,2	70,00	6,4	3,9E-04	10	3,9E-05	2996	9,2E+19	1,2E+05
^{100}Mo (ZnMO₄)	7,5E+27	0,36	0,80	1,15	7,6	100,00	7,8	5,6E-04	9	6,2E-05	3034	7,1E+18	3,3E+04
^{116}Cd (CdWO₄)	4,3E+27	0,24	0,80	1,05	9,6	150,00	13,4	8,3E-04	6	1,4E-04	2814	2,8E+19	1,8E+06
^{130}Te CUORE	4,8E+28	3,01	0,87	4,79	34,2	13,00	3,0	6,6E-05	5	1,3E-05	2527	6,8E+20	6,8E+06
^{130}Te SNO+	1,1E+28	0,69	0,20	1280,37	34,2	13,00	6,3	2,9E-04	270	1,1E-06	2527	6,8E+20	1,2E-03
^{136}Xe EXO	4,3E+28	2,81	0,50	6,24	8,9	8,00	3,8	7,1E-05	58	1,2E-06	2458	2,1E+21	8,4E+00
^{136}Xe Kam-Zen	2,6E+28	1,69	0,30	256,18	8,9	8,00	4,9	1,2E-04	250	4,7E-07	2458	2,1E+21	2,2E-03
^{136}Xe NEXT	2,6E+28	1,69	0,30	6,25	8,9	8,00	4,9	1,2E-04	15	7,9E-06	2458	2,1E+21	4,7E+04

Costo isotopo=50 M€

$$g_A = 1,269 \cdot A^{-0.18}$$

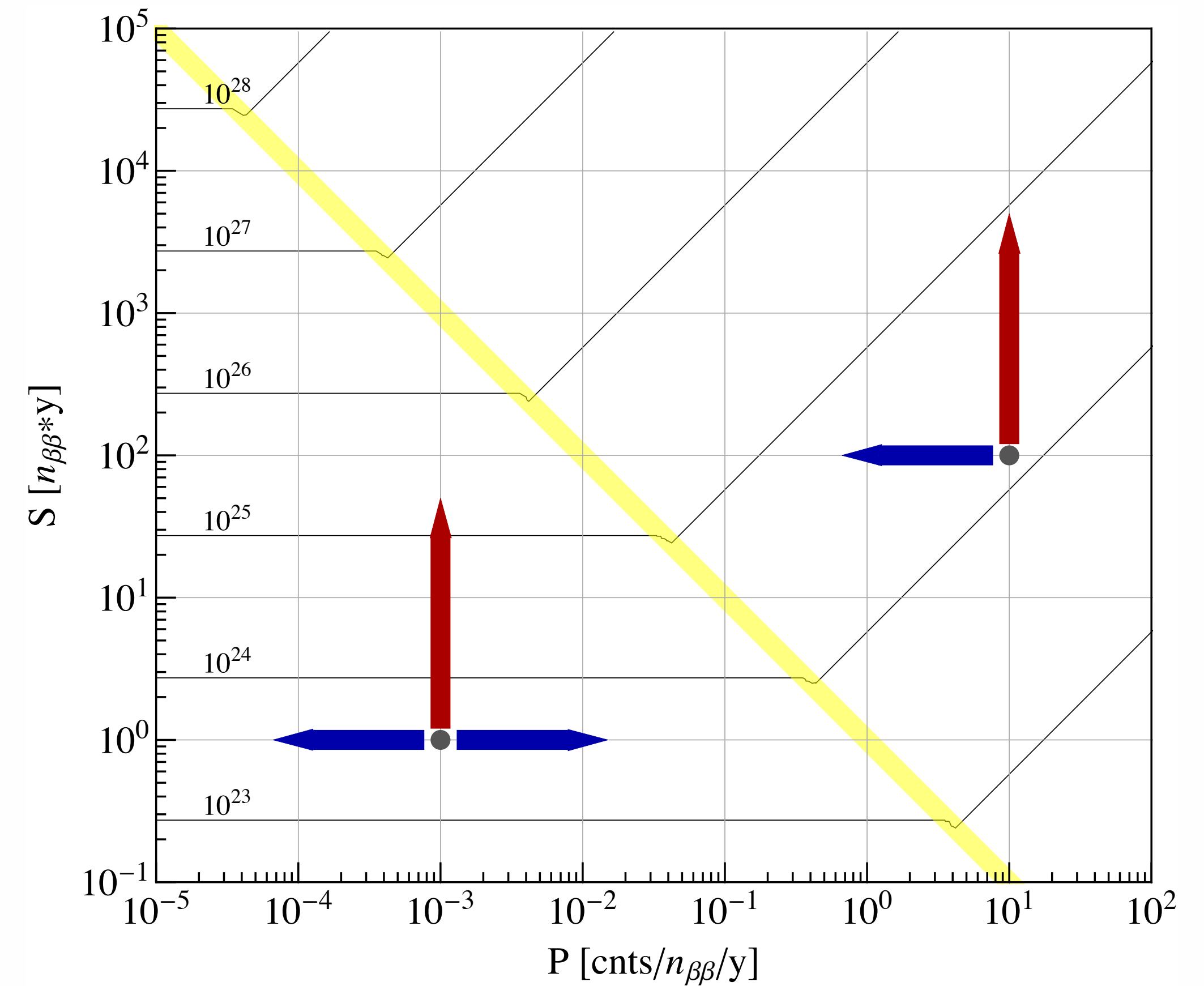
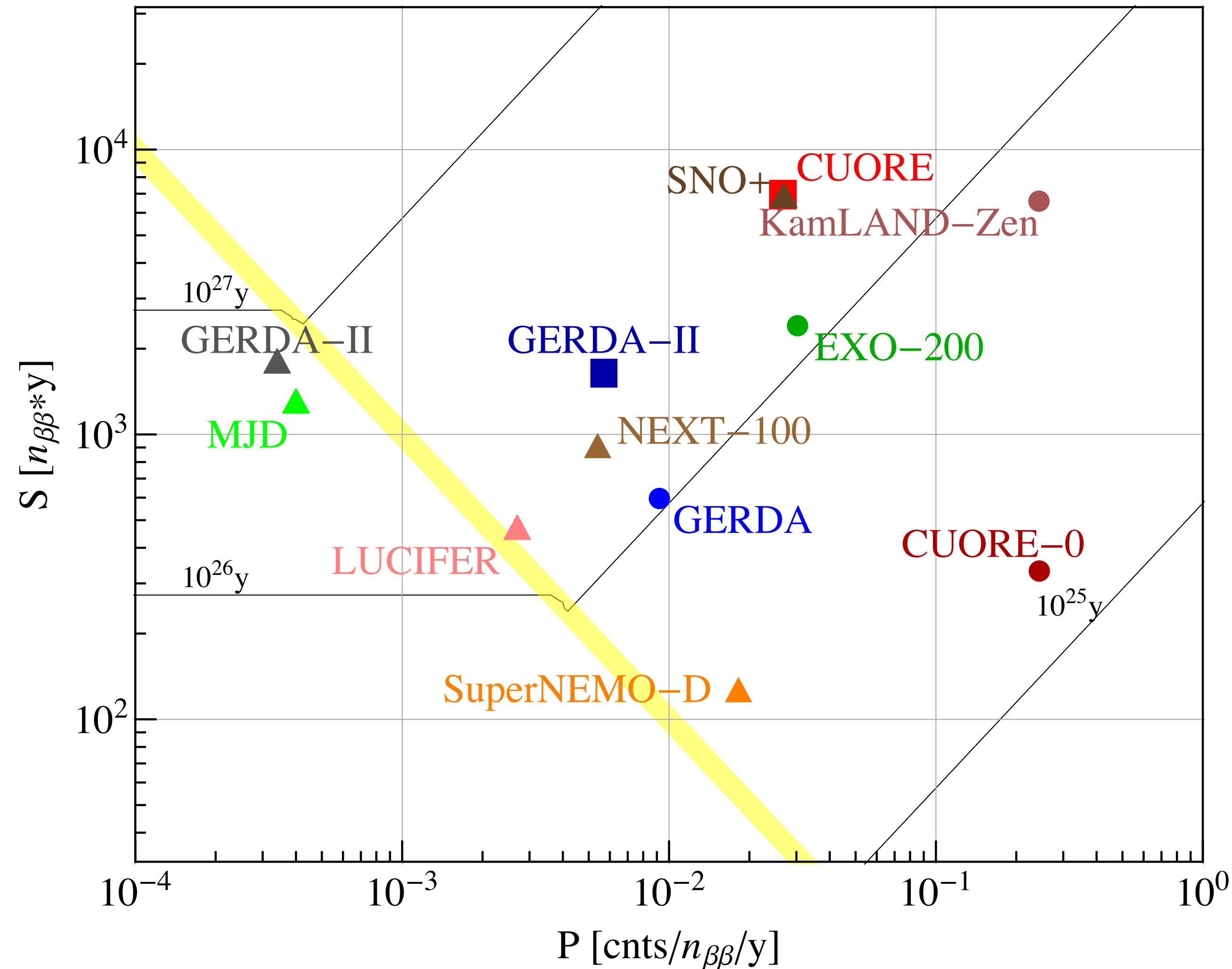
	T1/2 0v [anni]	Massa isotopo [ton]	Efficienza (volume fiduciale)	Massa totale rivelatore [ton]	a.i. [%]	Costo isotopo/kg [k€]	<mββ> [meV]	B*ΔE [c/kg/y]	ΔE FWHM [keV]	Fondo [c/keV/kg/y]	Q value [keV]	T1/2 2v [anni]	Rapporto eventi 0v/2v
⁷⁶ Ge GERDA	1,4E+28	0,53	0,82	0,71	7,8	70,00	47,5	3,8E-04	3	1,3E-04	2039	1,8E+21	6,3E+08
⁸² Se Lucifer	1,3E+28	0,51	0,80	1,28	9,2	70,00	31,2	3,9E-04	10	3,9E-05	2996	9,2E+19	4,4E+05
¹⁰⁰ Mo (ZnMO ₄)	7,5E+27	0,36	0,80	1,15	7,6	100,00	40,8	5,6E-04	9	6,2E-05	3034	7,1E+18	8,0E+04
¹¹⁶ Cd (CdWO ₄)	4,3E+27	0,24	0,80	1,05	9,6	150,00	74,4	8,3E-04	6	1,4E-04	2814	2,8E+19	1,4E+06
¹³⁰ Te CUORE	4,8E+28	3,01	0,87	4,79	34,2	13,00	17,4	6,6E-05	5	1,3E-05	2527	6,8E+20	1,1E+08
¹³⁰ Te SNO+	1,1E+28	0,69	0,20	1280,37	34,2	13,00	36,2	2,9E-04	270	1,1E-06	2527	6,8E+20	4,3E-03
¹³⁶ Xe EXO	4,3E+28	2,81	0,50	6,24	8,9	8,00	22,3	7,1E-05	58	1,2E-06	2458	2,1E+21	8,4E+01
¹³⁶ Xe Kam-Zen	2,6E+28	1,69	0,30	256,18	8,9	8,00	28,7	1,2E-04	250	4,7E-07	2458	2,1E+21	1,3E-02
¹³⁶ Xe NEXT	2,6E+28	1,69	0,30	6,25	8,9	8,00	28,7	1,2E-04	15	7,9E-06	2458	2,1E+21	2,8E+05

Pensierini sulla massa (i.e. arricchimento)

- 📌 Tutte queste considerazioni se il fondo è diverso da zero peggiorano notevolmente (e.g. se $M \cdot T \cdot B \cdot \Delta E = 10$, la massa per raggiungere lo stesso risultato è $M \times 10$)
 - un esempio concreto: CUORE arricchito in ^{130}Te al 90%, con fondo di 10^{-2} conteggi $\text{keV}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ y}^{-1}$ nell'ipotesi di $g_A = 1,269$ per raggiungere $\langle m_{\beta\beta} \rangle = 12 \text{ meV}$ dovrebbe portare la sua massa totale a $\sim 15 \text{ ton}$.
- 📌 D'altro canto un esperimento con un'ottima reiezione del fondo ma in cui l'aumento di massa non è finanziariamente percorribile serve a poco
- 📌 Se g_A è piccolo la strada è molto dura
- 📌 Bisogna intraprendere qualche azione forte per l'arricchimento a costi più abbordabili
 - In passato è stata proposta una macchina ICR per la produzione di isotopi stabili
 - È ancora più importante se la tecnica del futuro sarà basata su un isotopo diverso da ^{136}Xe e ^{130}Te
 - Per ^{130}Te (bolometri) e ^{136}Xe (NEXO, NEXT) anche ai costi odierni e con g_A piccolo sembrerebbe ragionevole che si possa avere una massa di isotopo sufficiente a coprire una buona frazione della gerarchia inversa; purtroppo però il cammino da fare sulla riduzione del fondo è ancora molto molto lungo

La difficoltà del fondo (ovvero tutto sulla carta è più facile)

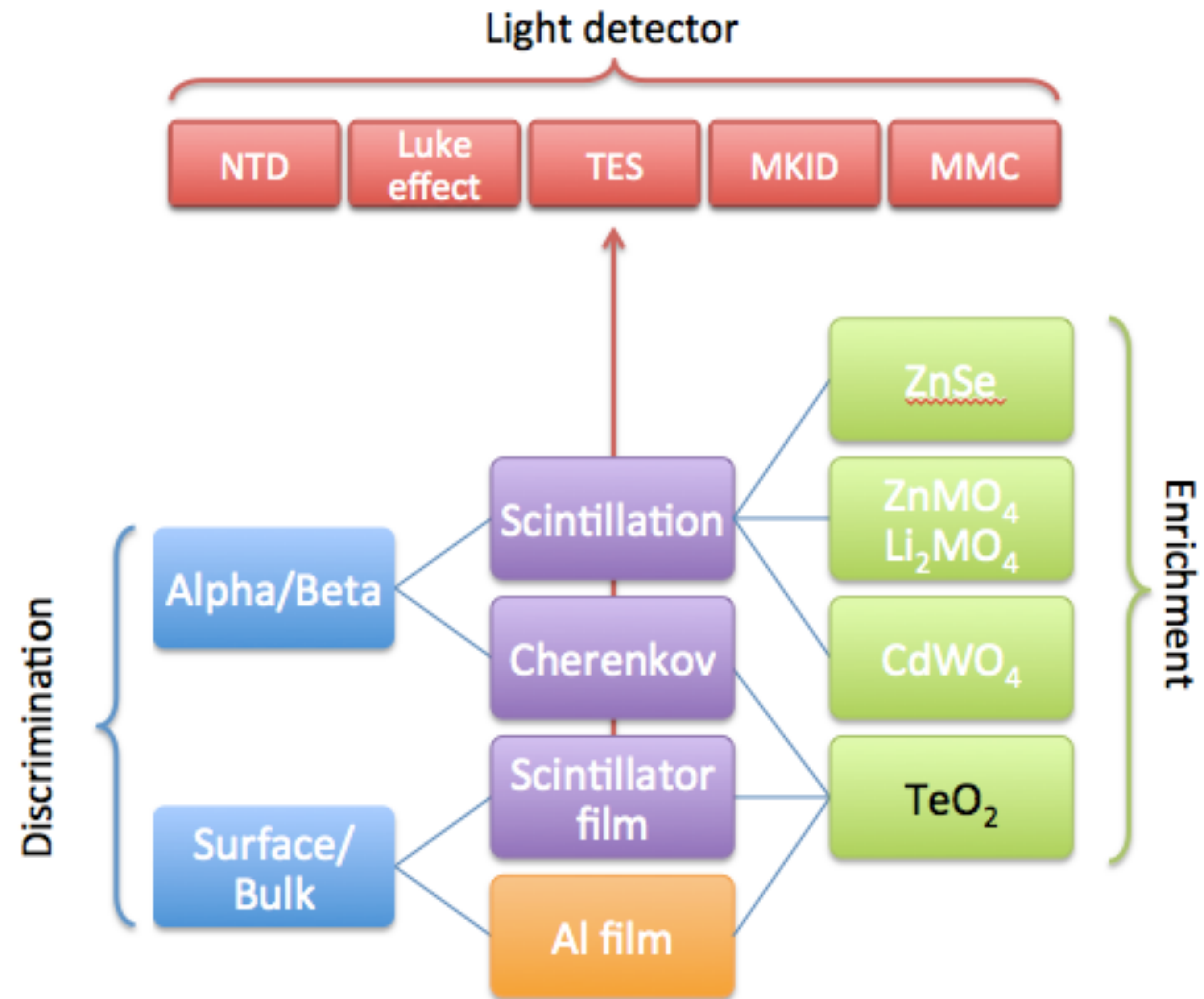
M. Biassoni, O. Cremonesi, P. Gorla, <http://arxiv.org/abs/1310.3870>



Fondo

- Molti R&D in corso per ridurre il fondo
 - Selezione materiali
 - Electroforming del rame
 - Diodi al germanio: Pulse shape discrimination SSE/MSE
 - TPC Xe: Barium tagging
 - TPC Xe gas: discriminazione topologica
 - Bolometri: lettura di luce di scintillazione o Cherenkov per discriminazione α/β o surface/bulk
 -

CUORE-IHE



Conclusioni/opinioni

- 📌 Un esperimento da solo non basta (specialmente se la risoluzione è bassa)
 - per fugare ogni dubbio qualsiasi risultato positivo dovrà essere verificato su un altro isotopo
 - fidarsi (dei teorici) è bene ma non fidarsi è meglio
- 📌 Ma nel futuro si può pensare al massimo ad un paio 2 esperimenti nel mondo da ~100 M€
- 📌 I prossimi anni devono servire ad identificare le tecniche e gli isotopi percorribili per gli esperimenti di prossima generazione
- 📌 La massa è sicuramente una questione di soldi (ma ci sono ovviamente anche tante altre difficoltà tecniche)
- 📌 La cosa più difficile (ma su cui c'è più margine di miglioramento) è il fondo
- 📌 C'è possibilità/necessità anche di migliorare la risoluzione energetica

Ringraziamenti

Una buona parte di questa presentazione è basata su:

- 📌 Dell'Oro, Marcocci e Vissani, Phys. Rev. D 90, 033005 (2014)
- 📌 M. Biassoni, O. Cremonesi e P. Gorla, <http://arxiv.org/abs/1310.3870>
- 📌 discussioni con M. Biassoni, O. Cremonesi, S. Dell'Oro, P. Gorla, S. Marcocci, E. Previtalli
- 📌 più qualche gretta considerazione economica