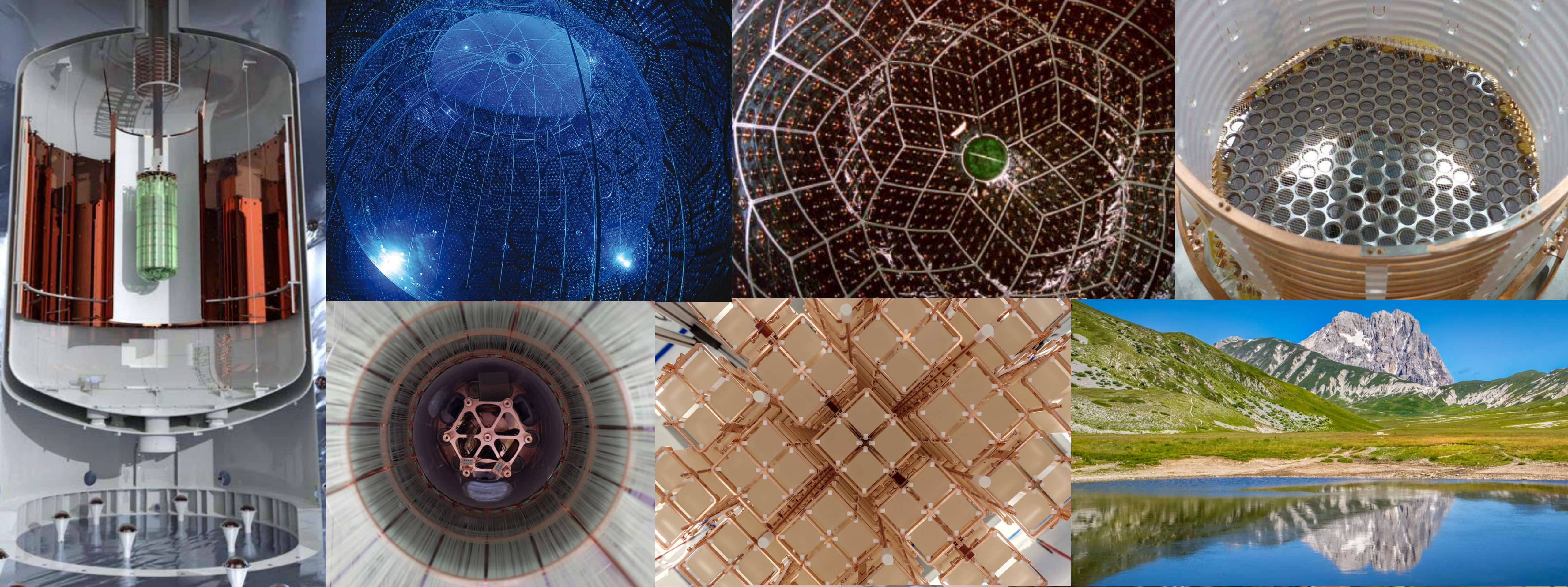
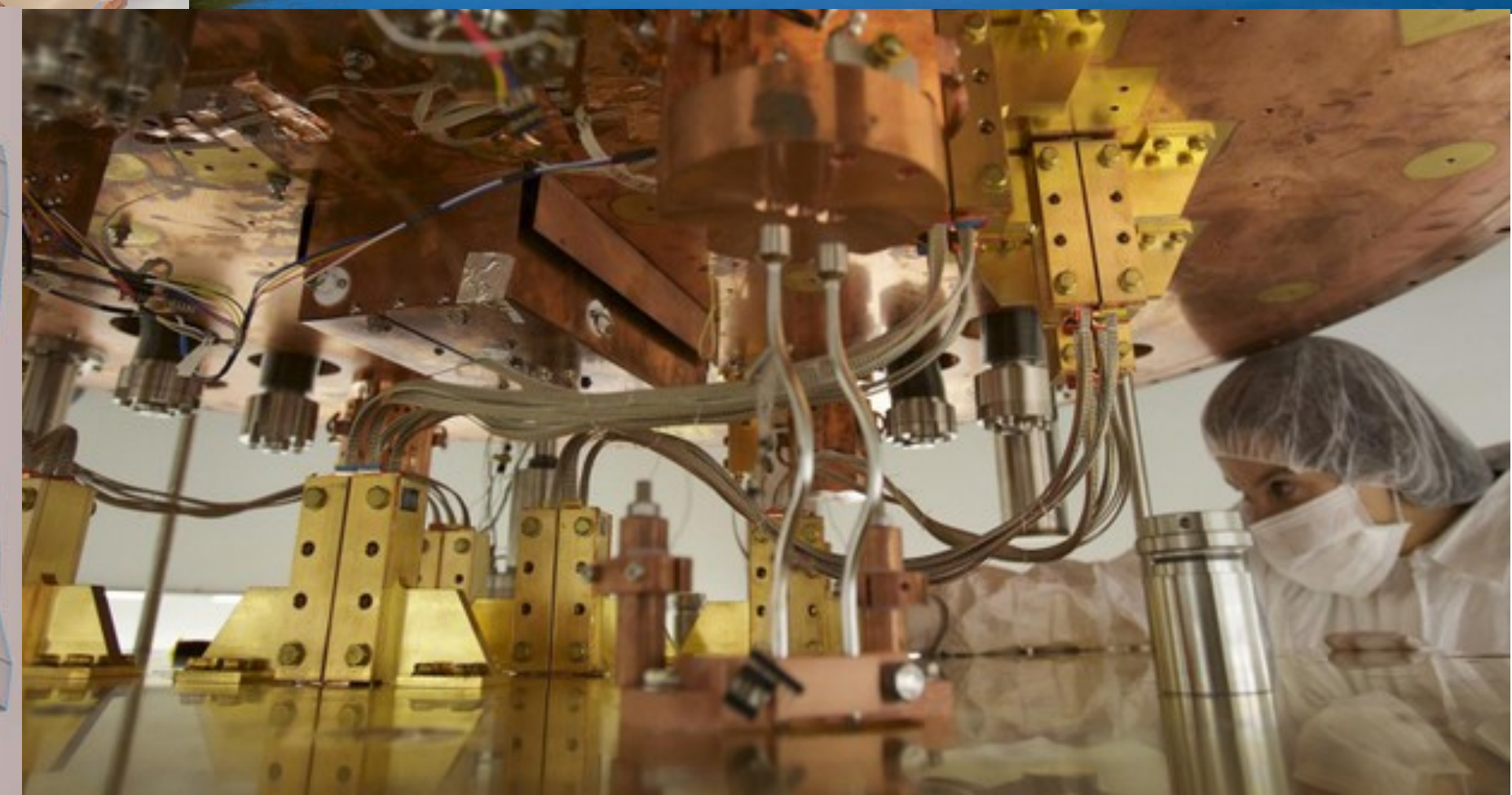
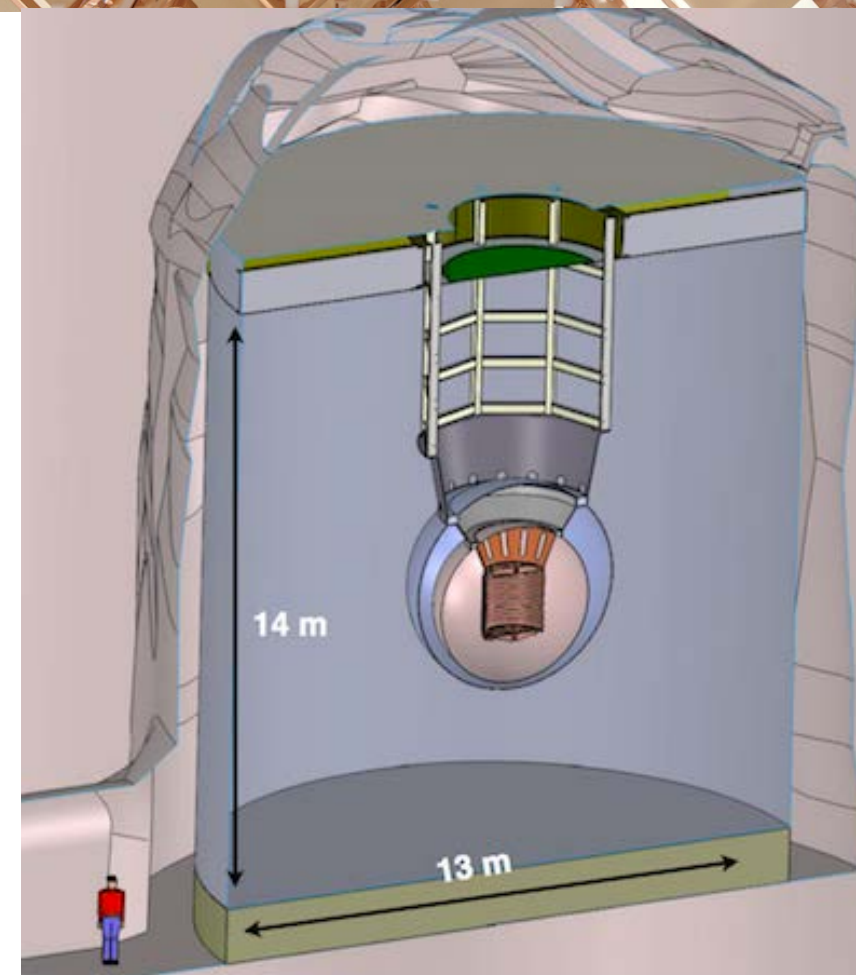




Stato e prospettive della ricerca del decadimento doppio beta



Oliviero Cremonesi
INFN - Sez. Milano Bicocca



perchè



Il Modello Standard e il Neutrino

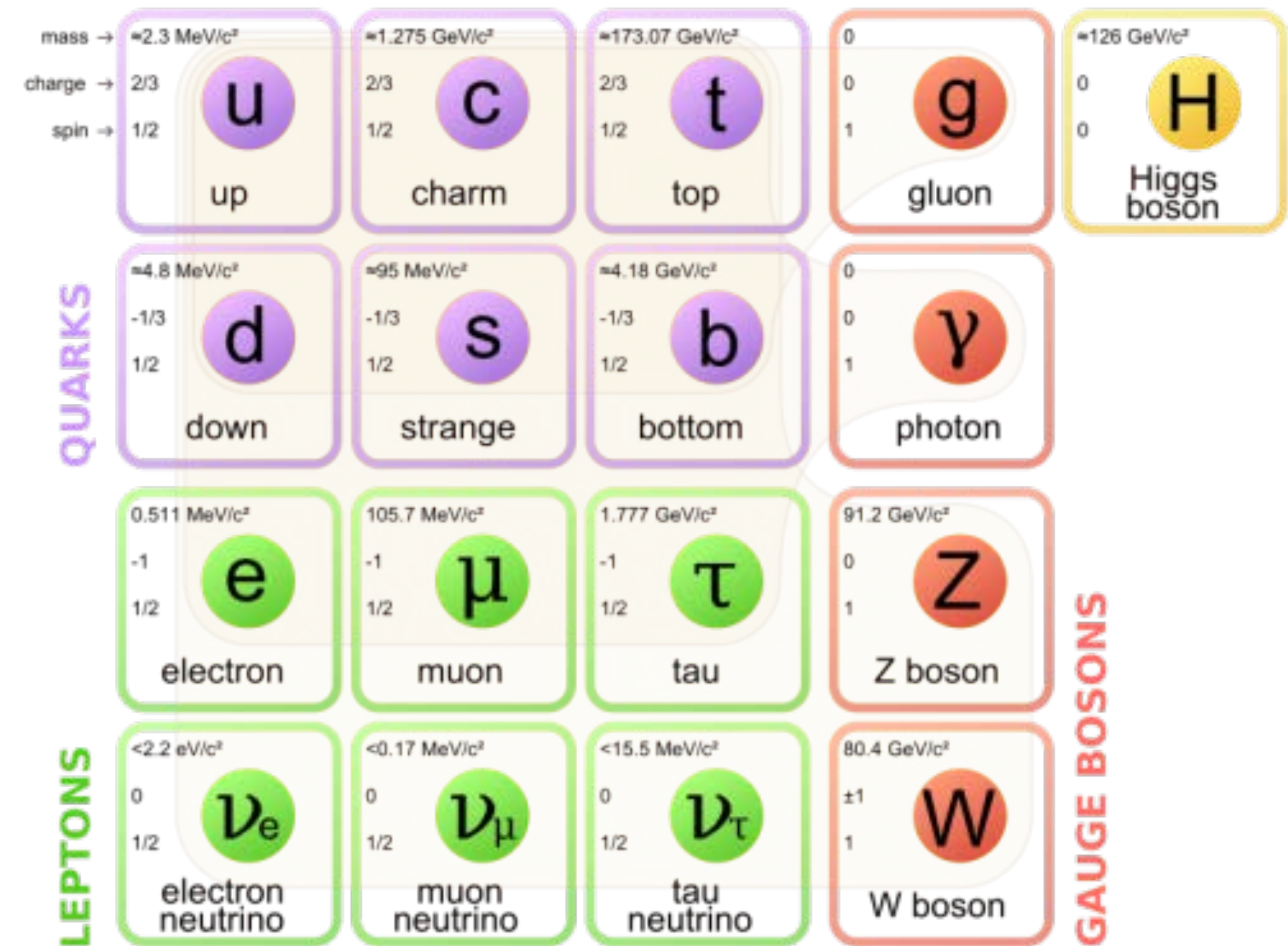
Il Modello Standard delle particelle elementari rappresenta una sintesi straordinaria

Anche trascurando qualche neo qua e là che può indicare la necessità di una sua estensione ...

... i neutrini ...

- non sono proprio ben inquadrati
 - $m_\nu \neq 0$
 - particelle di Dirac (2 gradi di libertà)

1998: scoperta delle oscillazioni ν
- $m_\nu \neq 0$



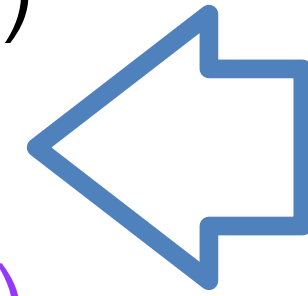
tuttavia l'informazione non è completa:

- $m_\nu = ???$
- ordinamento autostati di massa ν

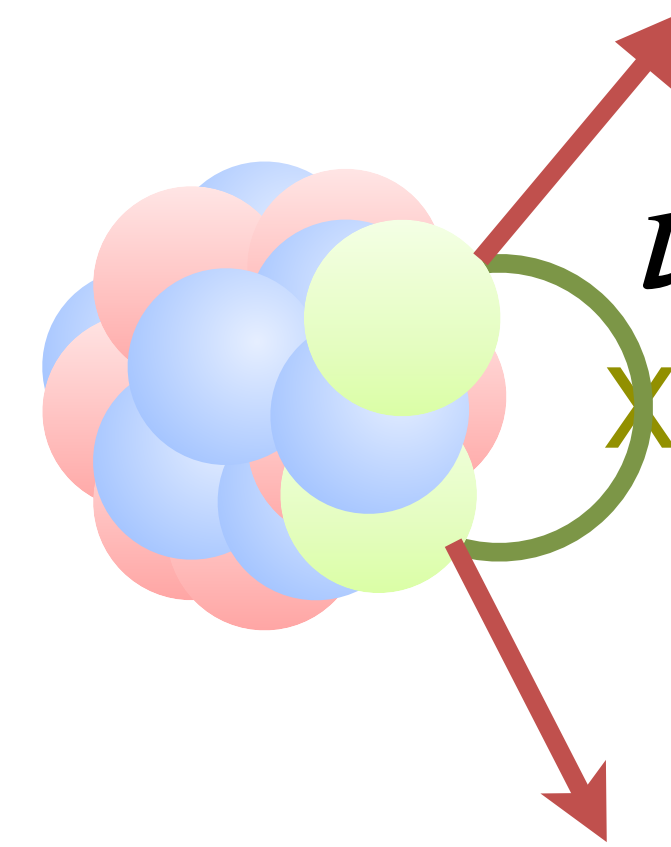
Il doppio decadimento beta (DDB)

Decadimento **nucleare** raro tra isobari con $|\Delta Q|=2$

- $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^- + 2\bar{\nu}$ ($2\nu\beta\beta$)
- $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^-$ ($0\nu\beta\beta$)
- $(A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + n\chi$ (modi esotici)



Neutrinoless

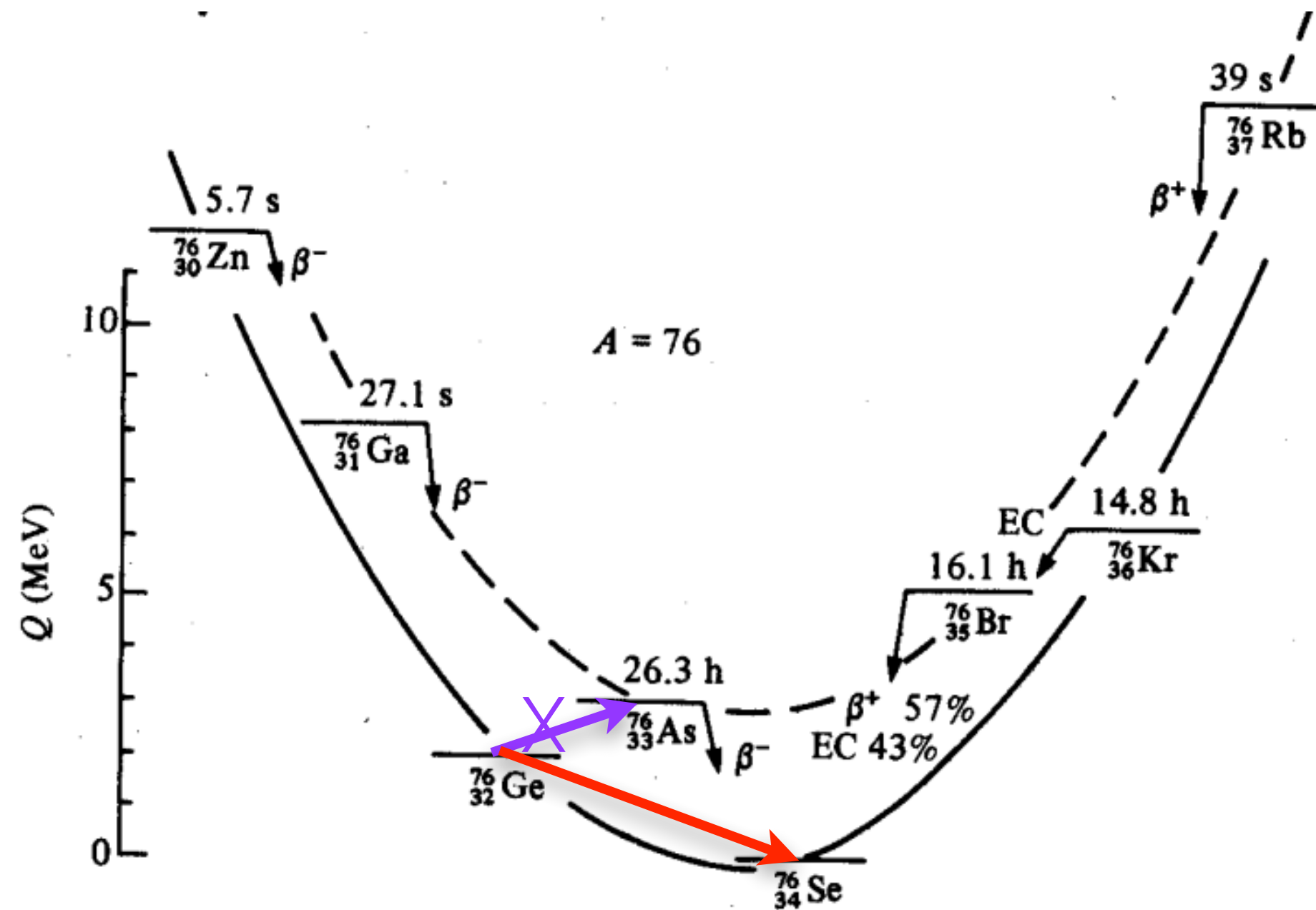


$$\nu \equiv \bar{\nu}$$

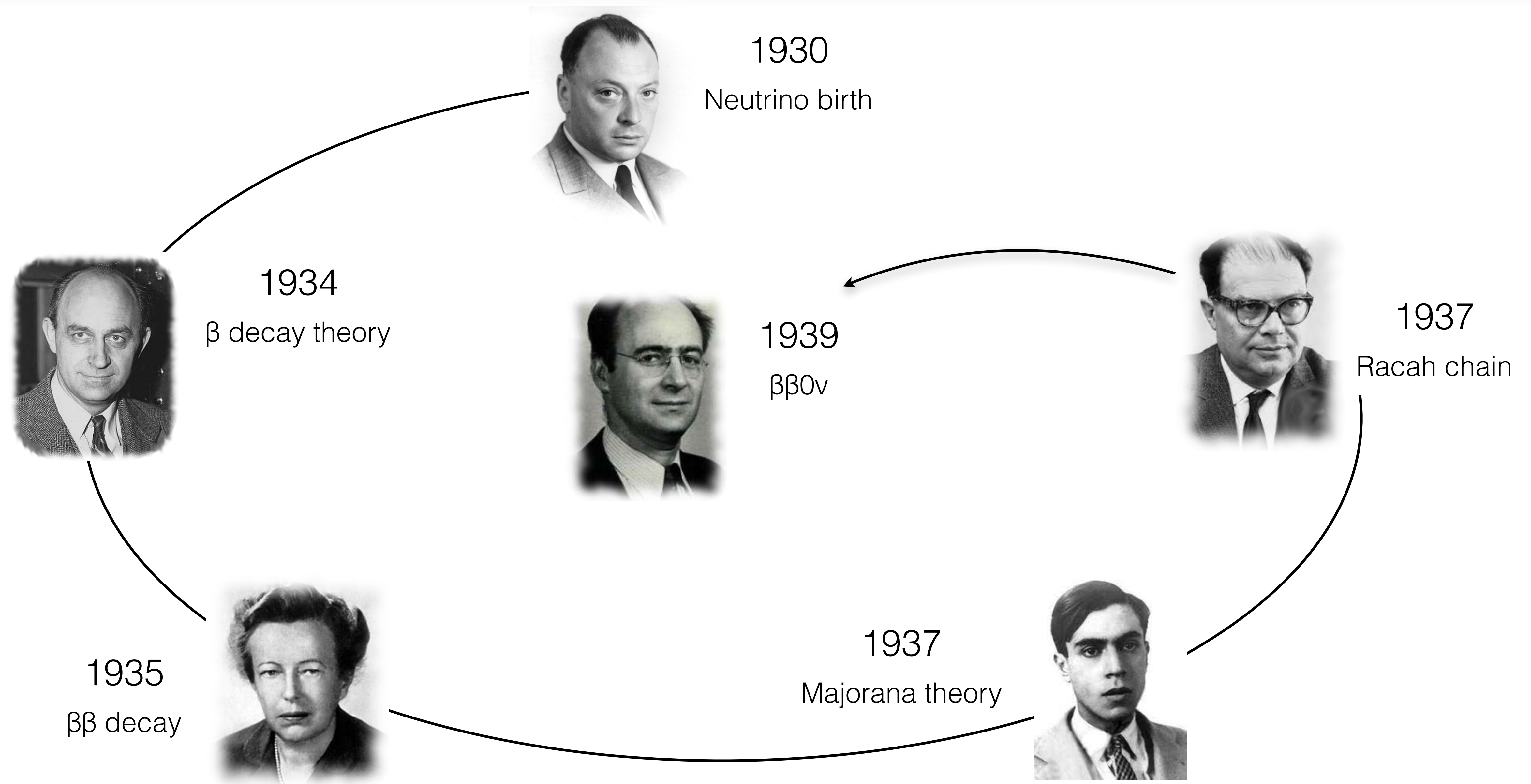
$\times m_{\beta\beta}$

Violazione della Parità
(aggiustamento della
elicità)

Nuclei pari-pari: condizione sperimentale favorevole



Un po' di storia (parte prima)



Sostanzialmente un processo nucleare

Con approssimazioni non banali e' possibile separare i contributi **atomici**, **nucleari** e **particellari** e fattorizzare l'ampiezza di transizione come

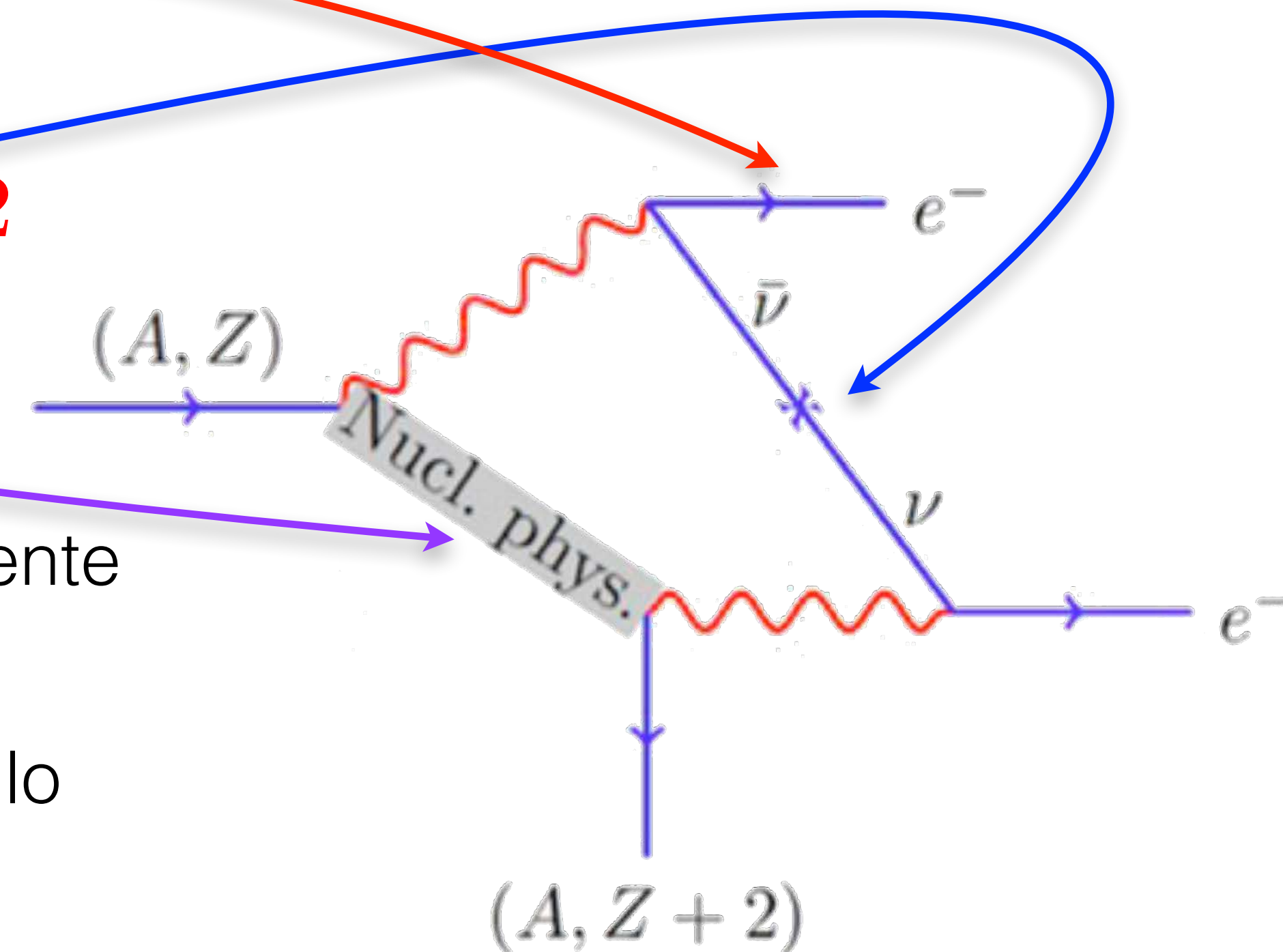
$$\Gamma^{0\nu} = G_x(Q, Z) |M_x(A, Z)|^2 |\eta_x|^2$$

$G_x(Q, Z)$ = fattore di spazio delle fasi → calcolabile precisamente

$M_x(A, Z)$ = elemento di matrice nucleare → problematico

η_x = parametro di fisica delle particelle → dipende dal modello

- neutrini di Majorana massivi
- GUT's
- SUSY
- ...



Neutrino e decadimento doppio beta

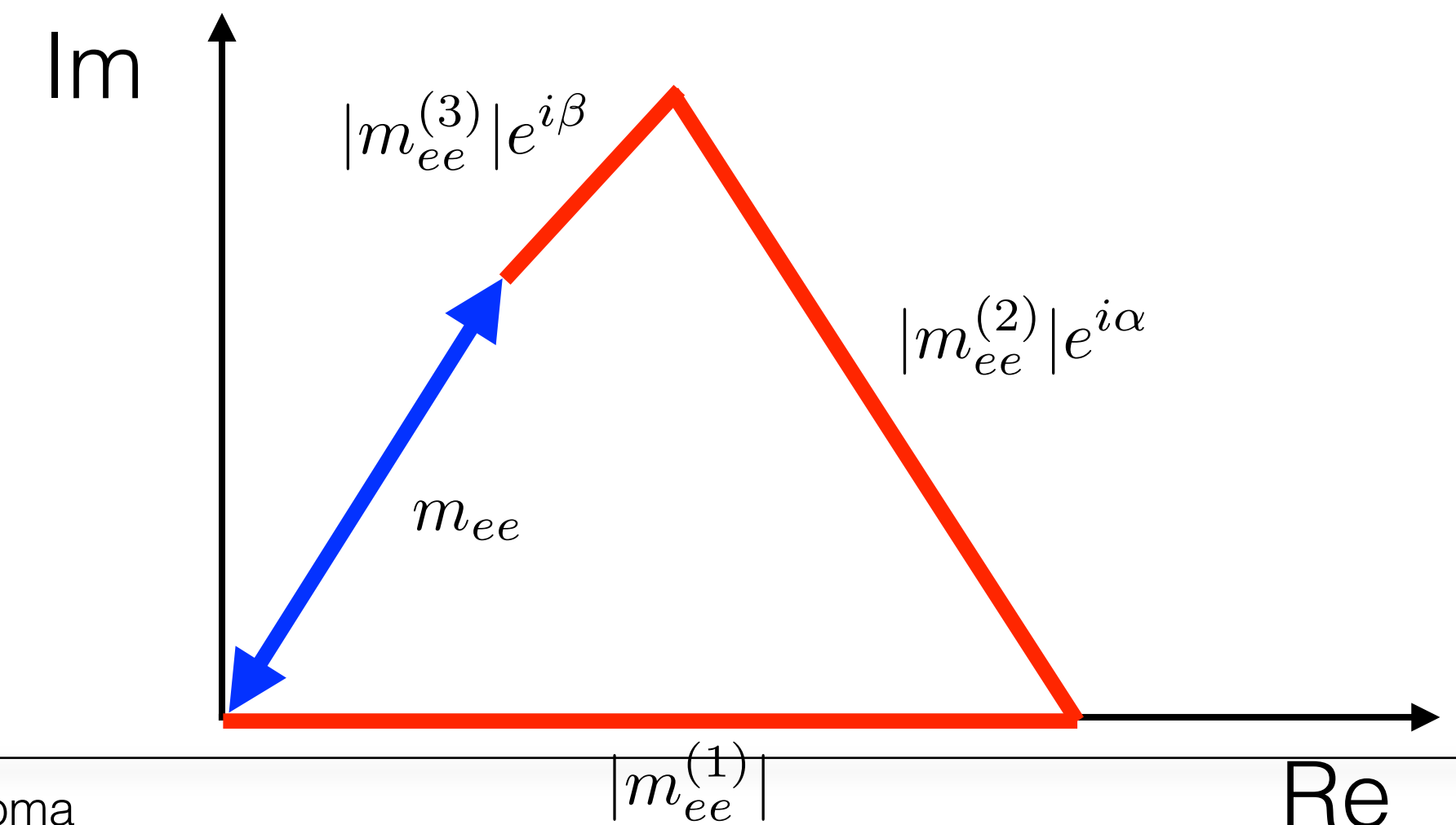
- ν è descritto da uno spinore di Dirac (come gli altri fermioni carichi) ma gli stati fisici sono solo due
 - ➔ descrizione di Majorana
- il numero leptonico non sembra riconducibile ad alcun principio primo.
- legge di conservazione di carattere fenomenologico
 - ➔ possibile violazione
- violazione della parità
 - ➔ stretto legame con m_ν
- la scoperta delle oscillazioni di neutrino ha portato NDBD alla ribalta connettendo la sua possibile osservazione al valore assoluto della massa

L'interpretazione standard: neutrino di Majorana

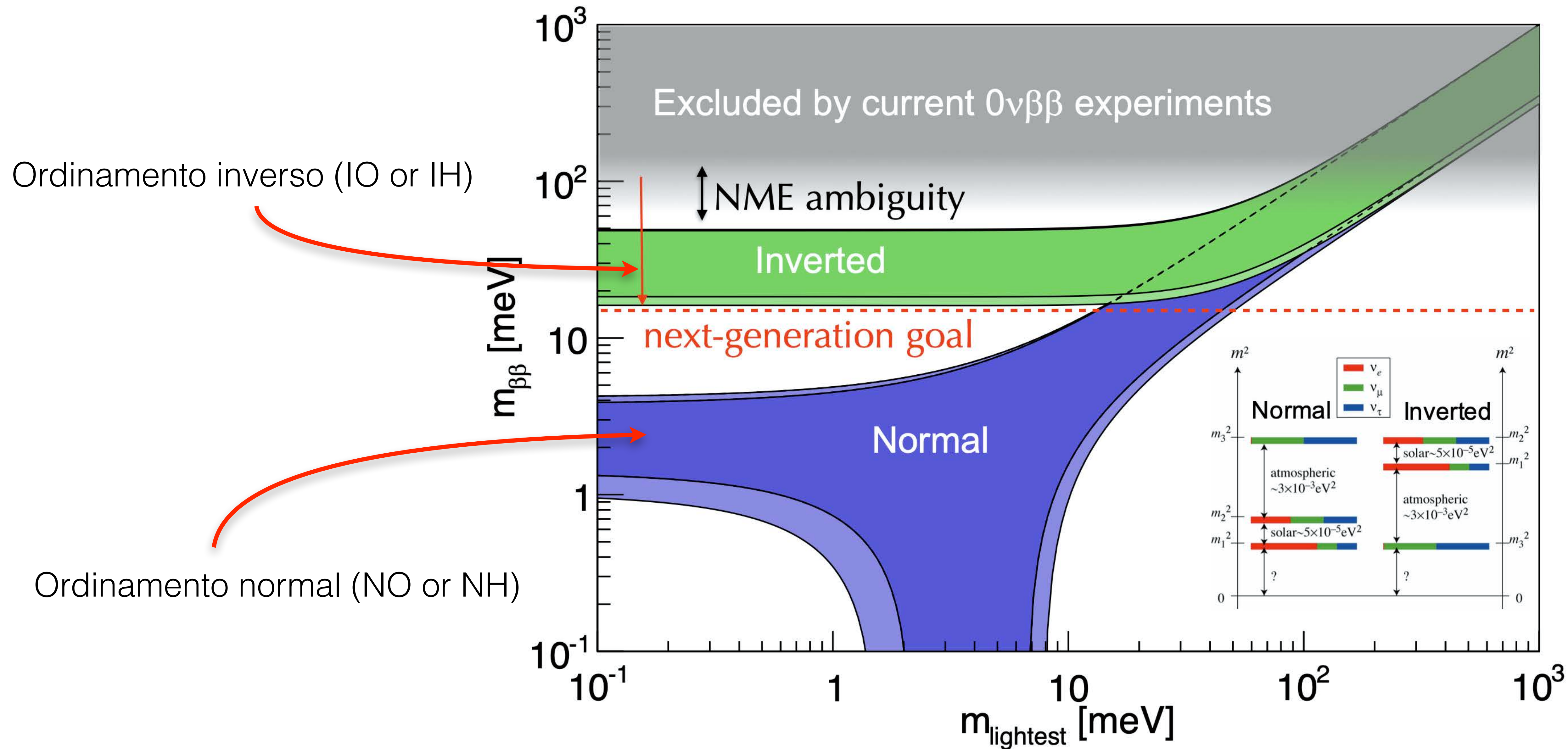
- si assume che $\beta\beta 0\nu$ sia mediato dallo scambio di neutrini di Majorana leggeri e tutti gli altri meccanismi diano contributi nulli o trascurabili

$$\begin{aligned}\eta_x = \langle m_{ee} \rangle &= \sum_k U_{ek}^2 m_k \\ &= c_{12}^2 c_{13}^2 m_1 + s_{12}^2 c_{13}^2 e^{i\alpha} m_2 + s_{13}^2 e^{i\beta} m_3\end{aligned}$$

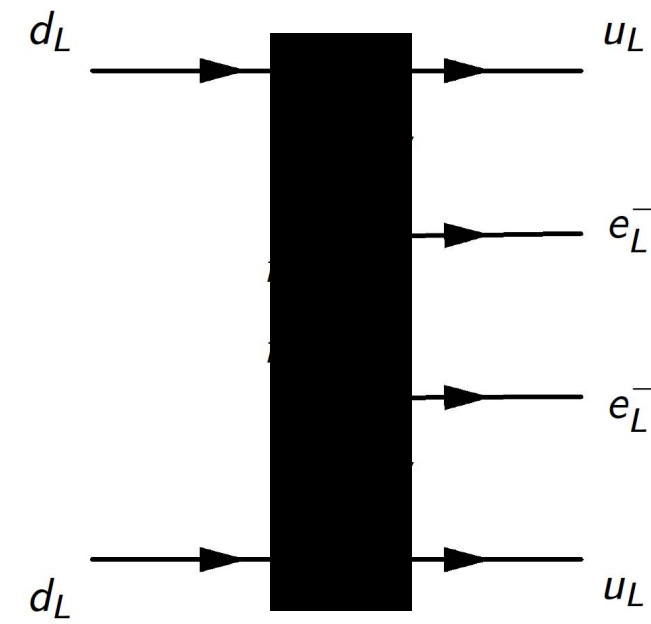
- L'ampiezza di transizione è proporzionale alla somma coerente delle masse dei neutrini
- Le fasi di Majorana svolgono un ruolo cruciale: possibili cancellazioni



Neutrini di Majorana leggeri



Violazione del numero leptonico (LNV) e $0\nu\beta\beta$

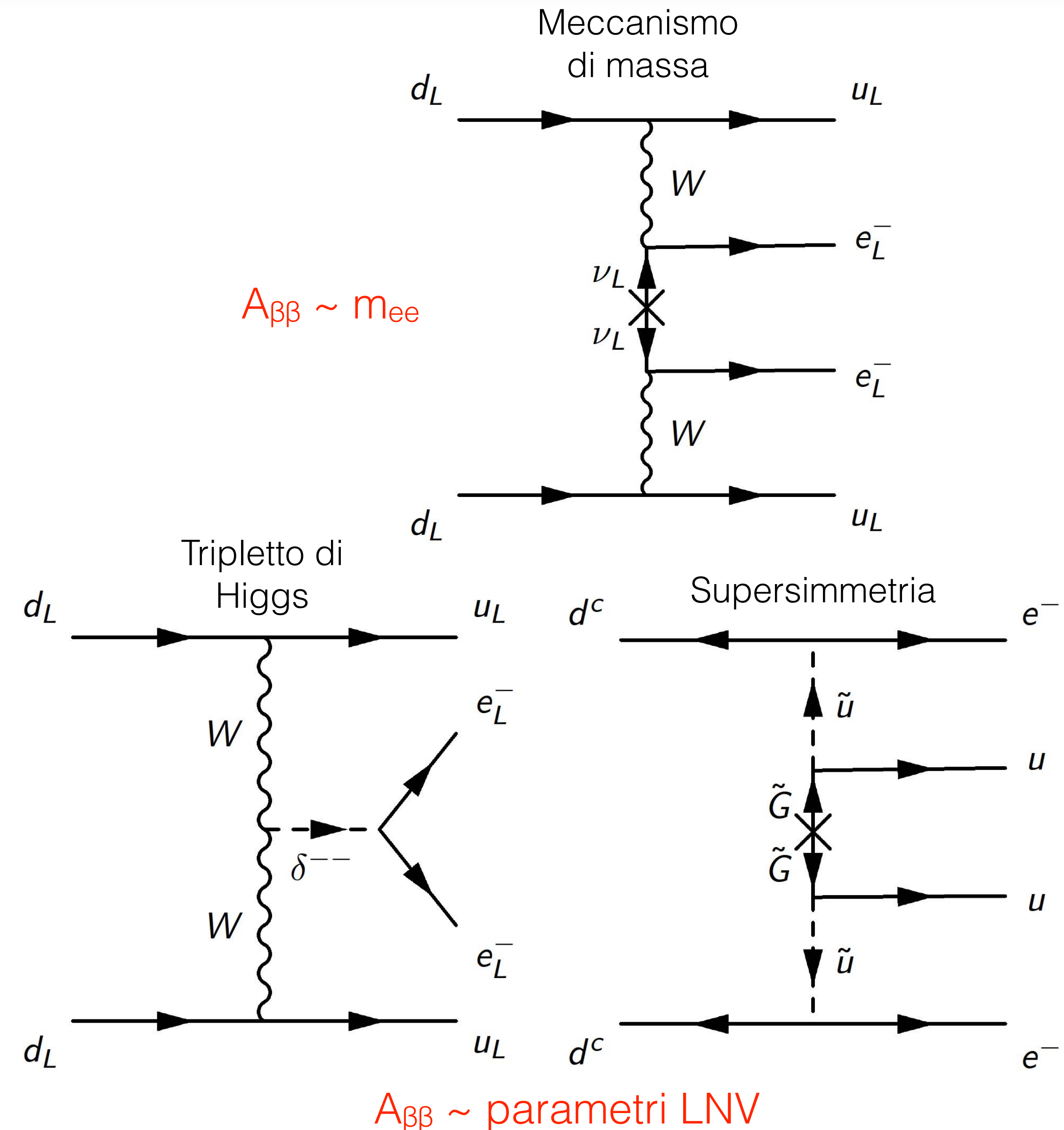


- Una semplice 'scatola nera' con tantissime possibili modellizzazioni
- Grande interesse per la possibilità di sondare nuova fisica

- Possibilità di interferenza

$$T_{1/2}^{-1} = G_\nu \left| \frac{m_{ee}}{m_e} M_\nu + \epsilon M_\epsilon \right|^2$$

➡ misure su isotopi diversi



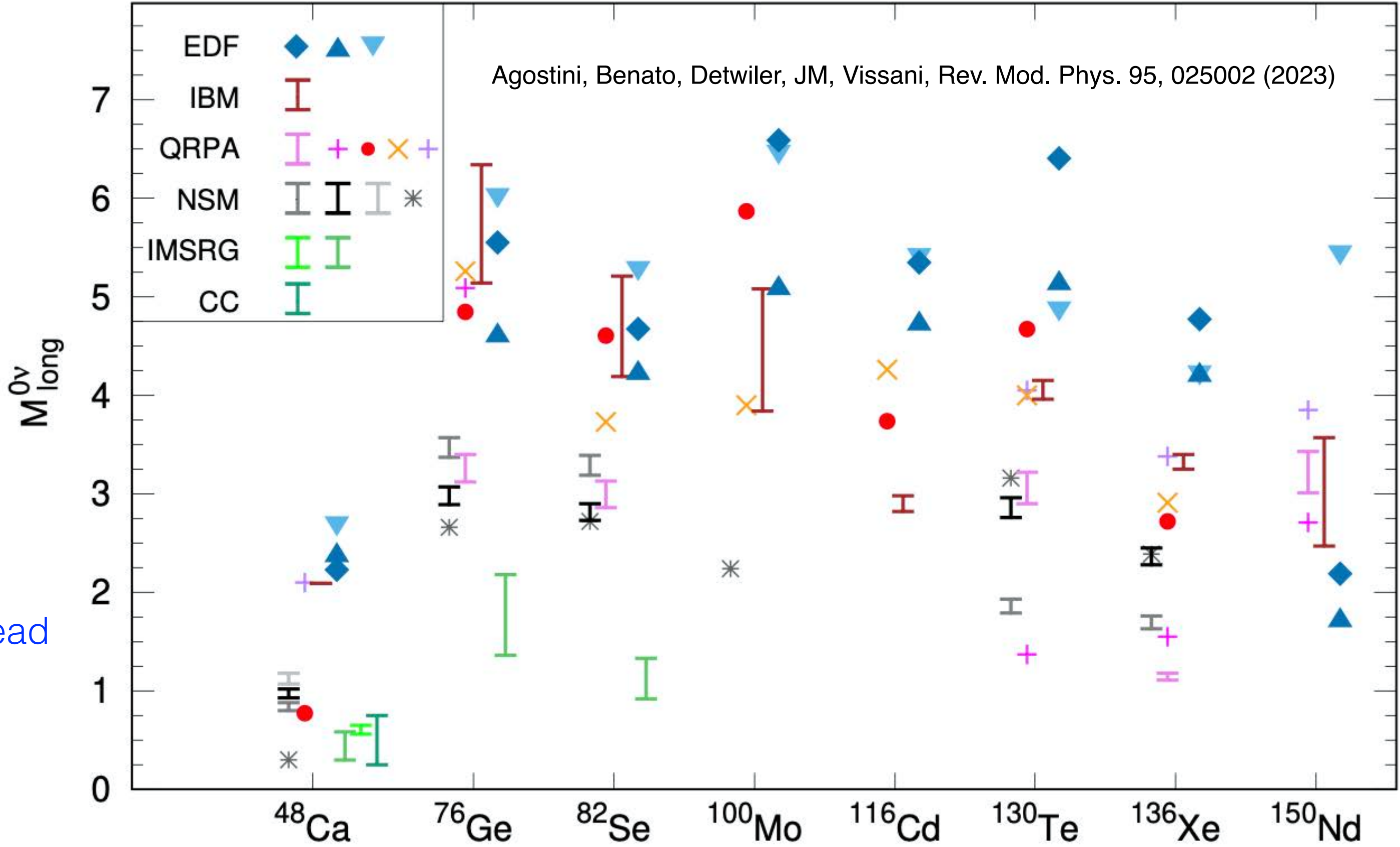
Estrarre m_{ee} dai dati: un compito difficile (1/2)

Valori di $M^{0\nu}$ stimati in base a diversi metodi di calcolo

$$\Gamma^{0\nu} = G_{0\nu}(Q, Z) |M_{0\nu}(A, Z)|^2 |m_{ee}|^2$$

Calcoli NME:

- EDF: grandi
- QRPA: maggiore spread
- NSM: piccoli
- IMSRG ^{48}Ca ab initio: molto piccolo



Il termine più problematico:
elementi di matrice nucleare

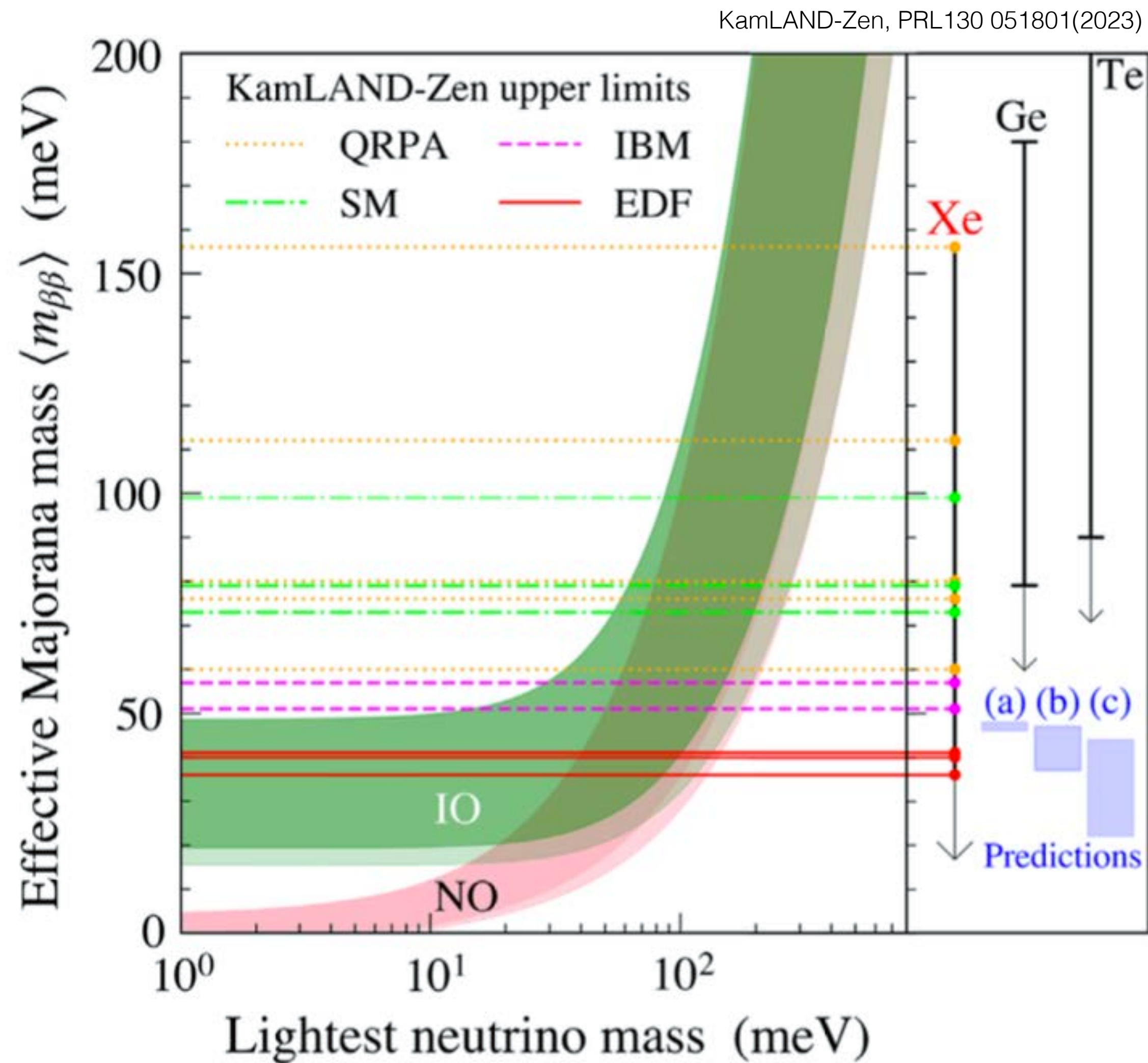
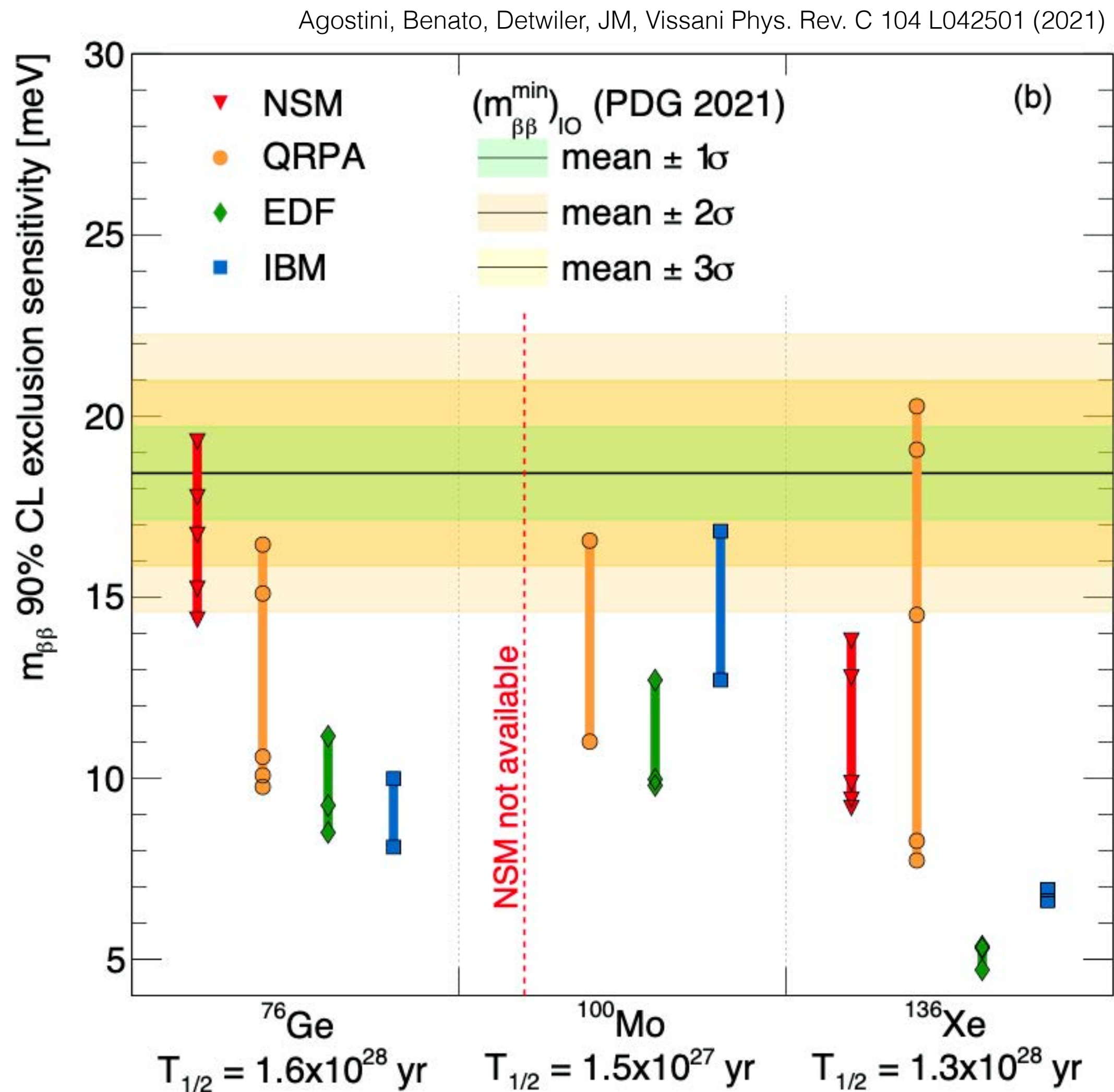
- Differenze significative
- Inaccuratezza dei valori

quenching di g_A ?

- Calcoli 'ab initio' per gli isotopi più leggeri danno valori più bassi

Estrarre m_{ee} dai dati: un compito difficile (2/2)

- Fattore 2-3 di incertezza tra i modelli nucleari
- ... che si riflette inevitabilmente su un'incertezza per i valori sperimentali su $\langle m_{\beta\beta} \rangle$





come

La “firma” del decadimento



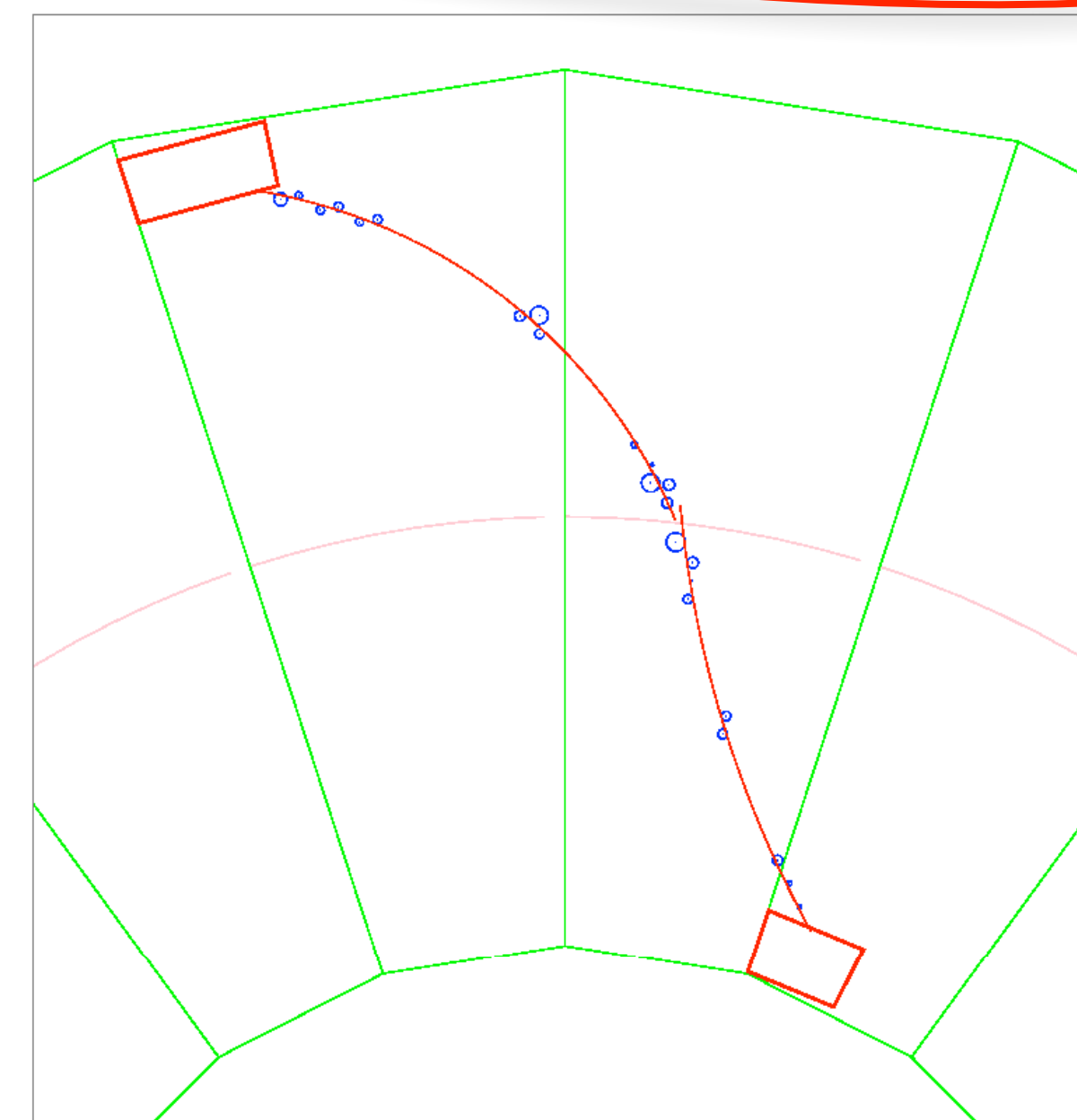
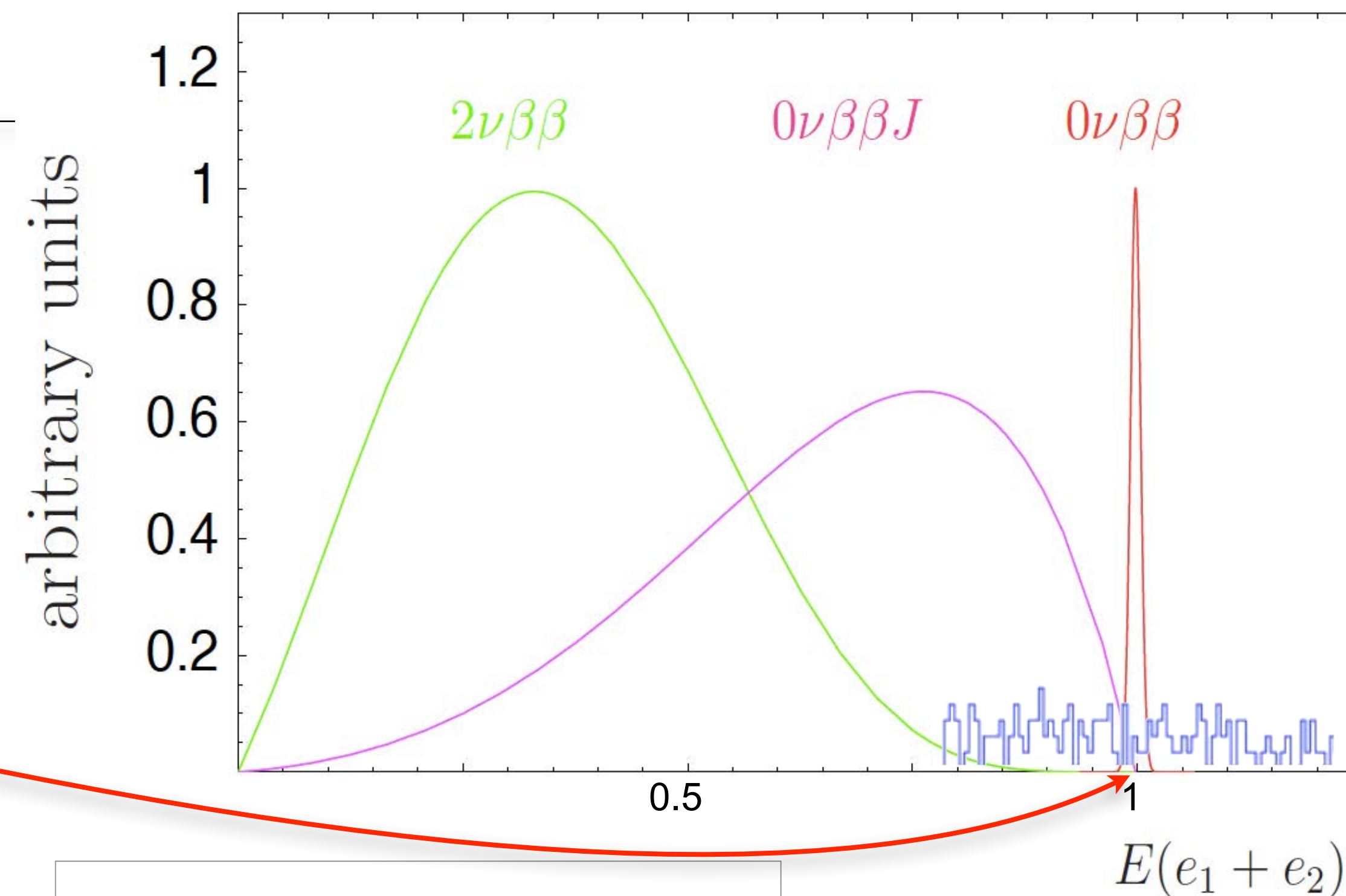
- Un nuovo isotopo (ionizzato)
- Due elettroni

Informazione minima caratterizzante:

- somma delle energie dei due elettroni
- $\beta\beta 0\nu$: picco a Q
- altri contributi: $\beta\beta 2\nu$ e ... fondo

Caratteristiche distintive aggiuntive:

- Nucleo figlio
- Spettro energetico dei singoli elettroni
- Correlazioni angolari tra i due elettroni
 - tracciamento (topologia)
 - tempo di volo



Sensibilità sperimentale

$$\tau_{1/2}^{0\nu} = \ln 2 \frac{\epsilon N_{nuclei} t_{meas}}{N_{\beta\beta}}$$

Vita media corrispondente al numero minimo di eventi rilevabile con un determinato livello di confidenza

$$N_{\beta\beta} \leq \sqrt{bkg \cdot \Delta E \cdot M \cdot t_{meas}}$$

N_{nuclei}	numero di nuclei attivi
t_{meas}	tempo di misura [y]
M	massa del rivelatore [kg]
ϵ	efficienza di rivelazione
i.a.	abbondanza isotopica
A	numero atomico
ΔE	risoluzione energetica [keV]
bkg	indice(tasso) di fondo [c/keV/y/kg]

$N_B = bkg \cdot \Delta E \cdot T \cdot M$ numero di eventi di fondo attesi sulla durata della misura

$N_B \gg 1$

$$S_{1/2}^{0\nu} \propto \epsilon \frac{i.a.}{A} \sqrt{\frac{M \cdot t_{meas}}{bkg \cdot \Delta E}}$$

$N_B \leq O(1) \rightarrow$ “zero background”

$$S_{1/2}^{0\nu} \propto \epsilon \frac{i.a.}{A} M \cdot t_{meas}$$

- **Abbondanza isotopica**
- **Massa**
- **Risoluzione energetica**
- **Livello di fondo**

Performance

**Scala
o esposizione**

$$N_B = S \cdot P \equiv 1$$

$$S_{FB} \sim \sqrt{\frac{S}{P}}$$

$$S_{ZB} \sim S$$

$< m_{ee} >$

$$\frac{1}{S_{1/2}^{0\nu}(m_{ee})} \propto \sqrt{S_{1/2}^{0\nu} \cdot G^{0\nu} |M^{0\nu}|}$$

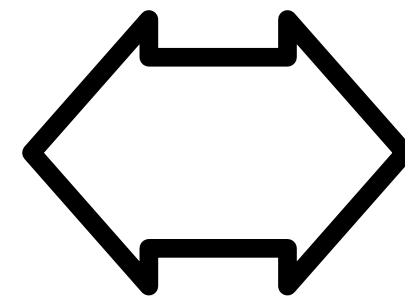
- **Scelta dell'isotopo**

Tecniche sperimentali e classificazione

Tecnica sperimentale $\leftrightarrow$ miglioramento della sensibilità

Molti parametri: inevitabile una scelta di compromesso

- Abbondanza isotopica
- Risoluzione energetica
- Massa
- Tempo di misura
- Fondo
- Efficienza



- scelta isotopo / arricchimento isotopo
- tecnica / approccio sperimentale
- scalabilità
- stabilità
- costo

➡ Tutti ugualmente importanti ma ciascun esperimento stabilisce (e promuove) il peso di quelli su cui scommette di più

➡ Necessario un confronto globale che tenga conto simultaneamente di tutti i parametri

Un po' di storia (parte seconda)

Due approcci sperimentali principali:

- omogeneo (sorgente $\equiv$ rivelatore) $\rightarrow$ calorimetri
- disomogeneo (sorgente $\neq$ rivelatore) $\rightarrow$ tracciatori

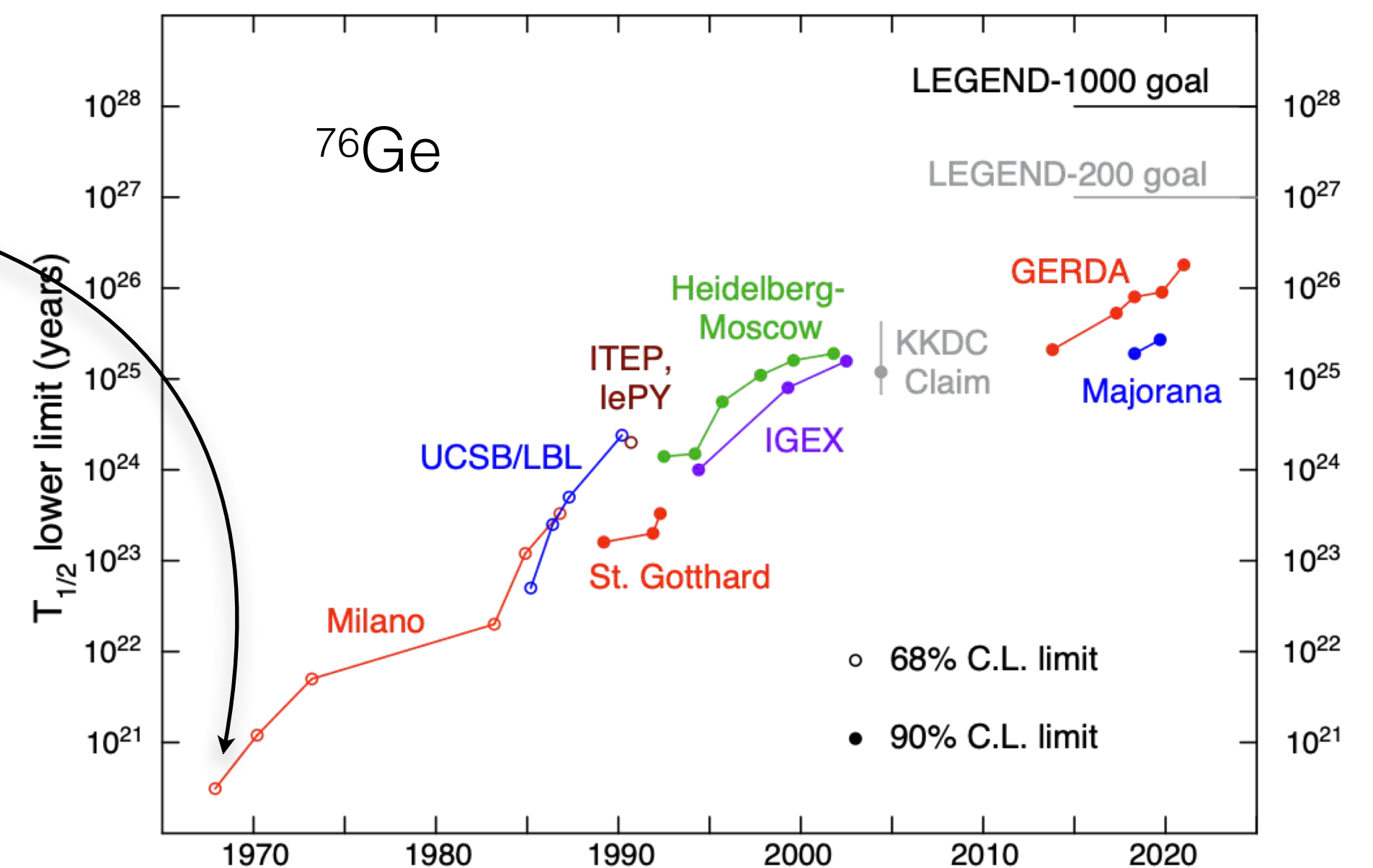
$\rightarrow$ il migliore per $\beta\beta 0\nu$

$\rightarrow$ molto efficace per $\beta\beta 2\nu$



Promotore dell'approccio calorimetrico:

- Germanio
- Xenon (multiproporzionale a gas)
- Bolometri



Approccio calorimetrico

Due principali classi di esperimento

Fluido o diluita in un fluido

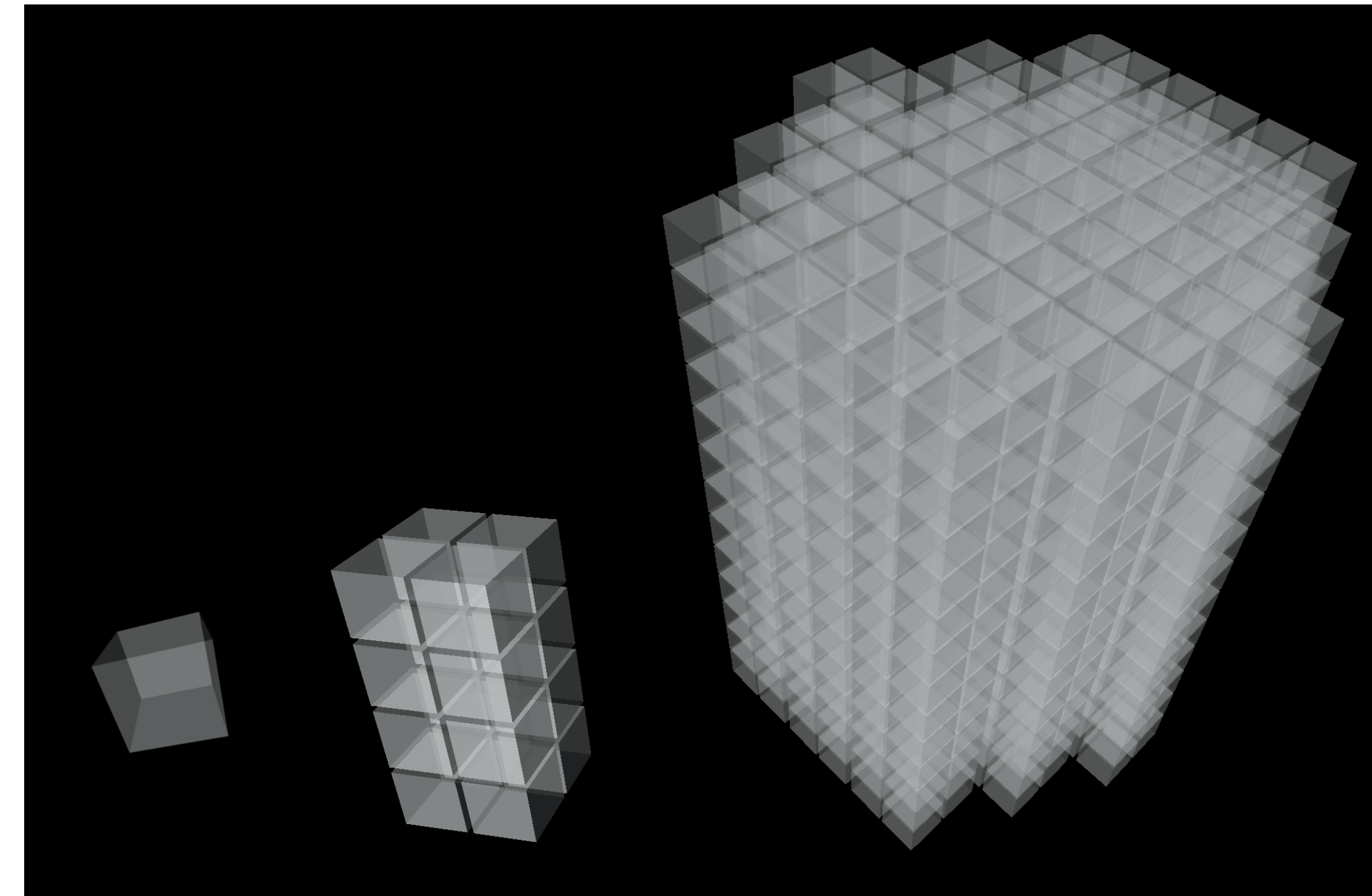
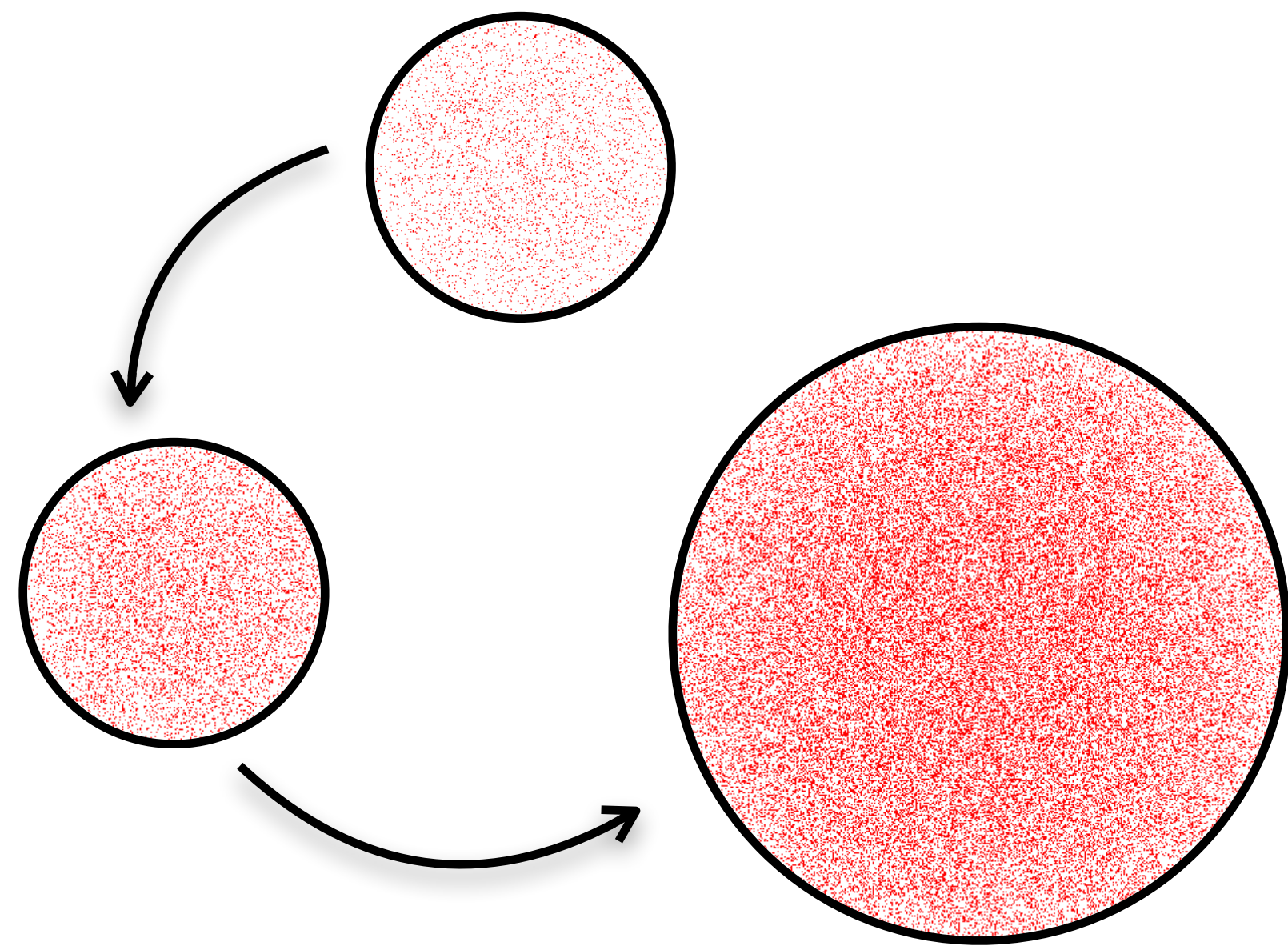
- Dimensione del contenitore
- Concentrazione della sorgente

Sorgente

Scalabilità

Parte integrante di un cristallo

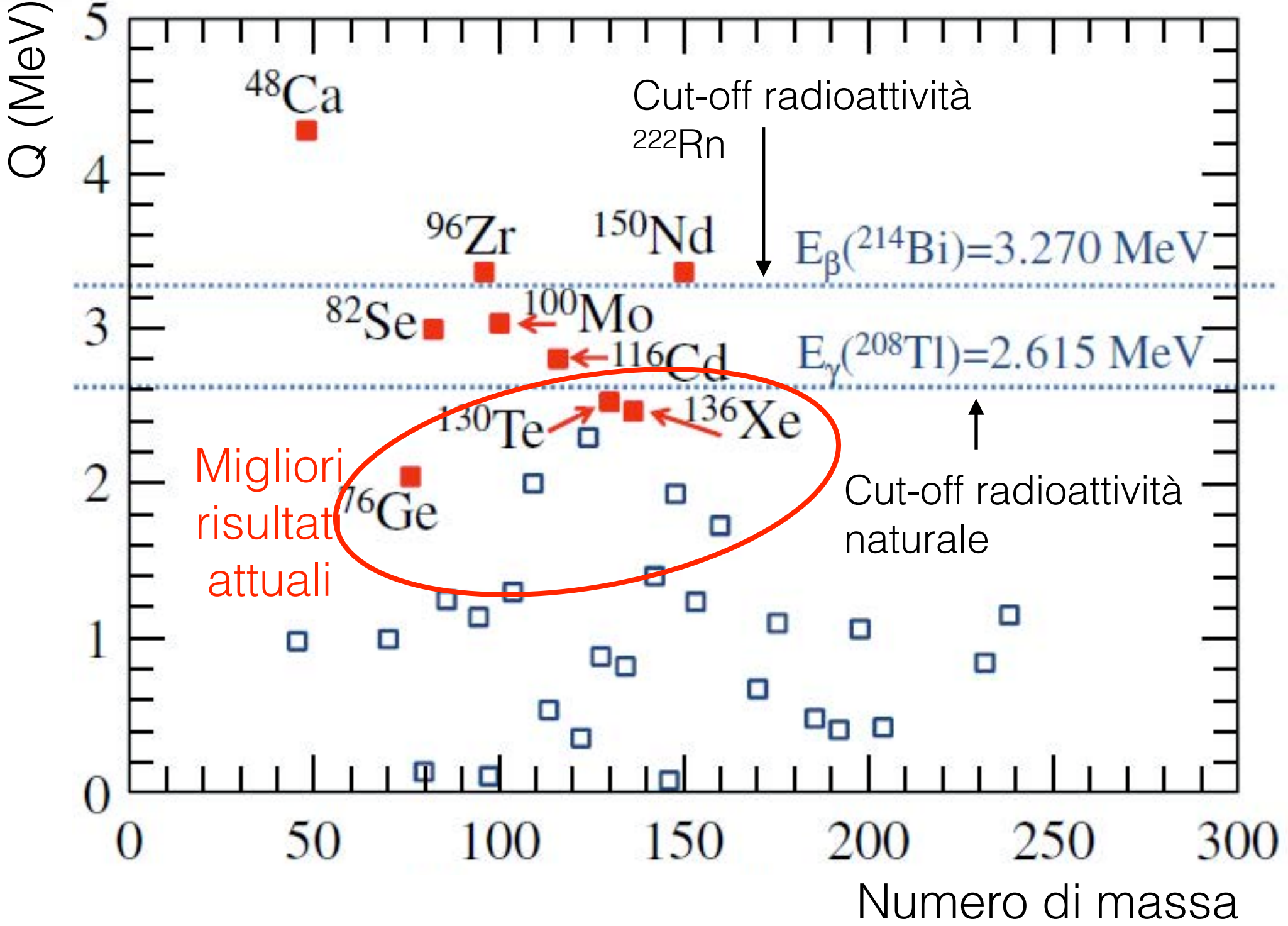
- Dimensione del singolo cristallo
- Numero di cristalli



Scelta dell'isotopo o del Q valore

Transition	Q	Abundance	first 2+
	(keV)	(%)	(keV)
$^{46}\text{Ca} \rightarrow ^{46}\text{Ti}$	985	0.0035	889
$^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$	4272	0.187	984
$^{70}\text{Zn} \rightarrow ^{70}\text{Ge}$	1001	0.62	-
$^{76}\text{Ge} \rightarrow ^{76}\text{Se}$	2045	7.8	559
$^{80}\text{Se} \rightarrow ^{80}\text{Kr}$	136	49.8	-
$^{82}\text{Se} \rightarrow ^{82}\text{Kr}$	3005	9.2	776
$^{86}\text{Kr} \rightarrow ^{86}\text{Sr}$	1249	17.3	1077
$^{94}\text{Zr} \rightarrow ^{94}\text{Mo}$	1148	17.4	871
$^{96}\text{Zr} \rightarrow ^{96}\text{Mo}$	3350	2.8	778
$^{98}\text{Mo} \rightarrow ^{98}\text{Ru}$	111	24.1	-
$^{100}\text{Mo} \rightarrow ^{100}\text{Ru}$	3033	9.6	540
$^{104}\text{Ru} \rightarrow ^{104}\text{Pd}$	1301	18.7	556
$^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$	2014	11.8	658
$^{114}\text{Cd} \rightarrow ^{114}\text{Sn}$	540	28.7	-
$^{116}\text{Cd} \rightarrow ^{116}\text{Sn}$	2808	7.5	1294
$^{122}\text{Sn} \rightarrow ^{122}\text{Te}$	358	4.56	-
$^{124}\text{Sn} \rightarrow ^{124}\text{Te}$	2278	5.64	603
$^{128}\text{Te} \rightarrow ^{128}\text{Xe}$	869	31.7	443
$^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$	2533	34.5	536

Transition	Q	Abundance	first 2+
	(keV)	(%)	(keV)
$^{134}\text{Xe} \rightarrow ^{134}\text{Ba}$	843	10.4	605
$^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$	2481	8.9	819
$^{142}\text{Ce} \rightarrow ^{142}\text{Nd}$	1414	11.1	-
$^{146}\text{Nd} \rightarrow ^{146}\text{Sm}$	61	17.2	-
$^{148}\text{Nd} \rightarrow ^{148}\text{Sm}$	1928	5.7	550
$^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$	3367	5.6	334
$^{154}\text{Sm} \rightarrow ^{154}\text{Gd}$	1250	22.6	123
$^{160}\text{Gd} \rightarrow ^{160}\text{Dy}$	1731	21.8	87
$^{170}\text{Er} \rightarrow ^{170}\text{Yb}$	655	14.9	84
$^{176}\text{Yb} \rightarrow ^{176}\text{Hf}$	1077	12.6	88
$^{186}\text{W} \rightarrow ^{186}\text{Os}$	489	28.6	137
$^{192}\text{Os} \rightarrow ^{192}\text{Pt}$	408	41.0	317
$^{198}\text{Pt} \rightarrow ^{198}\text{Hg}$	1043	7.2	412
$^{204}\text{Hg} \rightarrow ^{204}\text{Pb}$	414	6.9	-
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{232}\text{U}$	850	100	48
$^{232}\text{U} \rightarrow ^{232}\text{Pu}$	1146	99.275	44



- 35 nuclei candidati
- Solo 9 interessanti dal punto di vista sperimentale
- Candidati più promettenti: $Q_{\beta\beta} > 2\text{-}3 \text{ MeV}$

Fondo

- Non esiste esperimento senza fondo
- Tuttavia si può lavorare per ridurlo a livelli estremamente bassi, al punto che la probabilità di osservare un solo evento di questo tipo lungo la durata di una misura diventa minore di uno
- Questa condizione è impropriamente nota come “zero background” (cui andrebbe aggiunto un “counts” per **correttezza**) ed è il santo Graal di tutti gli esperimenti, perché oltre alla massa è l'unico parametro su cui sono possibili incrementi di ordini di grandezza

Contributi più comuni e relative azioni generali:

- Radioattività naturale (α, β e γ): 1-100 Bq/kg $\rightarrow$ <1 mBq / kg
- Raggi cosmici: laboratori sotterranei (riduzioni $> 10^6$)
- Neutroni (generati dalla radioattività naturale e dalla radiazione cosmica)
 - Qualità e profondità dei laboratori sotterranei
 - Schermature attive e passive
- Attivazione cosmogenica dei materiali
 - Scelta dei materiali
 - immagazzinamento/realizzazione/lavorazione sotto terra

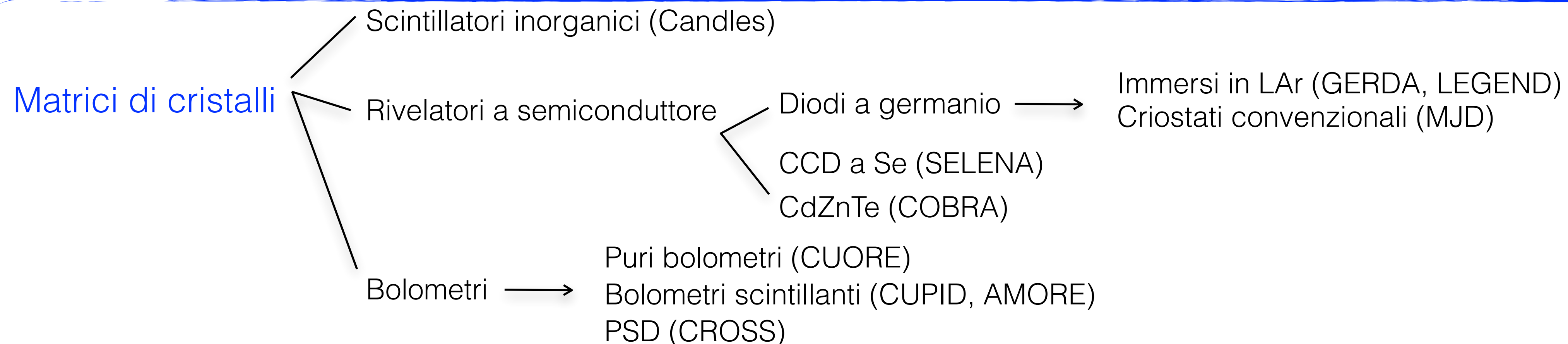
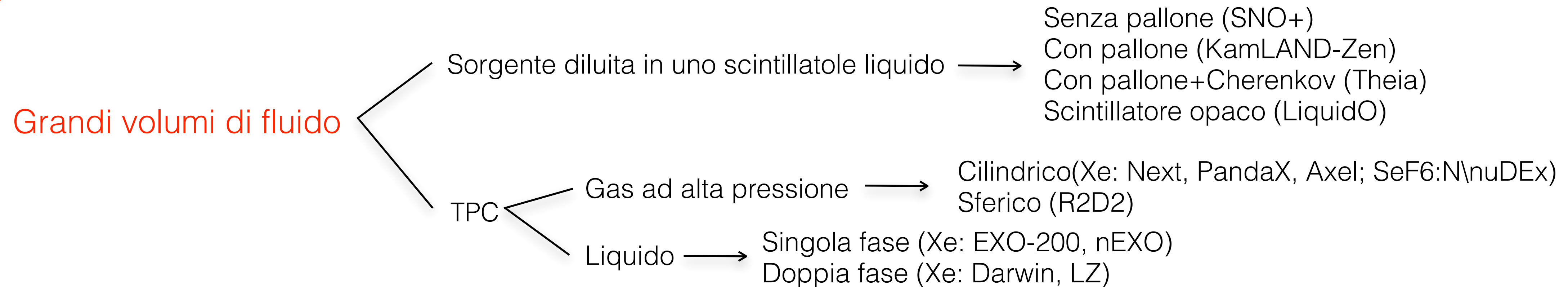
Azioni specifiche dipendenti dalla tecnologia:

- Elevata risoluzione energetica
- Identificazione delle particelle
- Tracciamento degli eventi
- Topologia (multi vs. singolo sito)
- Contributi superficiali
- Volumi fiduciali
- Schermature attive
- Identificazione del nucleo dello stato finale

Diversificazione delle tecniche

- Sviluppo di progetti in grado di sfruttare al meglio le attuali tecnologie
- Ricerca di nuove strategie per il futuro: ruolo fondamentale degli R&D

Al momento due strategie vincenti:



Lo zoo degli esperimenti

Collaboration	Isotope	Technique	Laboratory	mass (0νββ isotope)	Status
CANDLES-III	48Ca	305 kg CaF2 crystals in liquid scintillator	Kamioka	0.3 kg	Operating
CANDLES-IV	48Ca	CaF2 scintillating bolometers	Kamioka	TBD	R&D
GERDA	76Ge	Point contact Ge in active LAr	LNGS	44 kg	Complete
Majorana Demonstrator	76Ge	Point contact Ge in Lead	SURF	30 kg	Complete
LEGEND 200	76Ge	Point contact Ge in active LAr	LNGS	200 kg	Operating
LEGEND 1000	76Ge	Point contact Ge in active LAr	TBD	1 tonne	Proposal
SuperNEMO Demonstrator	82Se	Foils with tracking	LSM	7 kg	Operating
SELENA	82Se	Se CCDs	TBD	<1 kg	R&D
NvDEx	82Se	SeF6 high pressure gas TPC	TBD	50 kg	R&D
ZICOS	96Zr	10% natZr in liquid scintillator	Kamioka	45 kg	R&D
AMoRE-I	100Mo	40CaMoO4 scintillating bolometers	Y2L	6 kg	Complete
AMoRE-II	100Mo	Li2MoO4 scintillating bolometers	YemiLab	100 kg	Operating
CUPID	100Mo	Li2MoO4 scintillating bolometers	LNGS	250 kg	Propoal
COBRA	116Cd/130Te	CdZnTe detectors	LNGS	10 kg	Complete
CUORE	130Te	TeO2 Bolometer	LNGS	206 kg	Operating
SNO+	130Te	0.5% natTe in liquid scintillato	SNOLAB	1300 kg	Construction
SNO+ Phase II	130Te	2.5% natTe in liquid scintillator	SNOLAB	8 tonnes	R&D
Theia-Te	130Te	5% natTe in liquid scintillator	SURF	31 tonnes	R&D
KamLAND-Zen 400	136Xe	2.7% in liquid scintillator	Kamioka	370 kg	Complete
KamLAND-Zen 800	136Xe	2.7% in liquid scintillator	Kamioka	750 kg	Operating
KamLAND2-Zen	136Xe	2.7% in liquid scintillator	Kamioka	~tonne	R&D
EXO-200	136Xe	Xe liquid TPC	WIPP	160 kg	Complete
nEXO	136Xe	Xe liquid TPC	SNOLAB	5 tonnes	Proposal
NEXT-WHITE	136Xe	High pressure GXe TPC	LSC	~5 kg	Operating
NEXT-100	136Xe	High pressure GXe TPC	LSC	100 kg	Construction
PandaX	136Xe	High pressure GXe TPC	CJPL-II	~tonne	R&D
AXEL	136Xe	High pressure GXe TPC	TBD	~tonne	R&D
DARWIN	136Xe	natXe liquid TPC	TBD	3.5 tonnes	R&D
LZ	136Xe	natXe liquid TPC	SURF	>600kg	R&D
Theia-Xe	136Xe	3% in liquid scintillator	SURF	50 tonnes	R&D
R2D2	136Xe	HP cylindrical gas chamber (40 bar)	TBD	580 kg	R&D

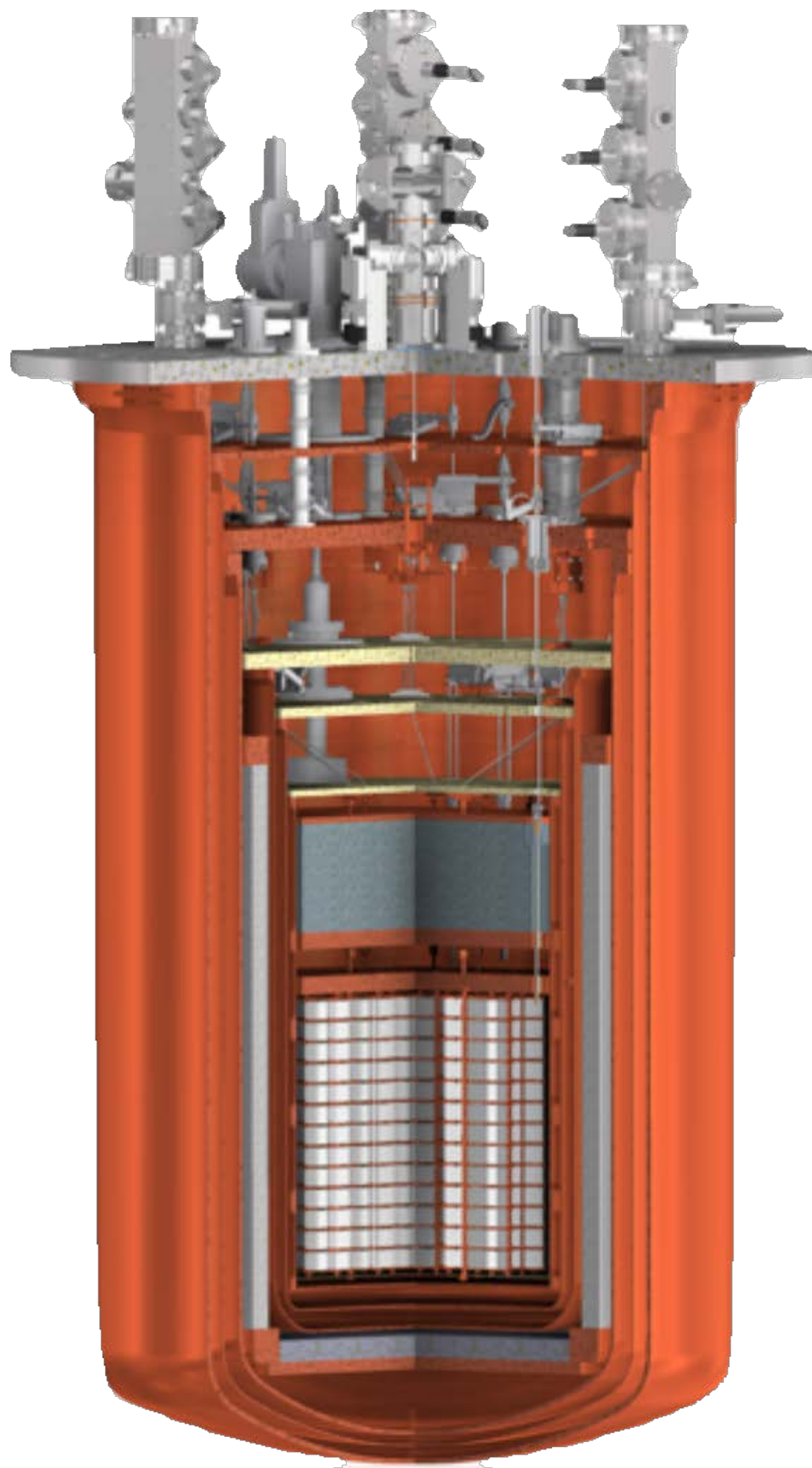
- Nutrito gruppo di esperimenti su scala internazionale
- Diversi approcci sperimentali
- Diversi isotopi

- Nessun isotopo è ‘vincente’
- Pochi eventi anche in caso di scoperta: serve verifica
- Solo l’analisi su isotopi diversi puo’ svelare il meccanismo responsabile

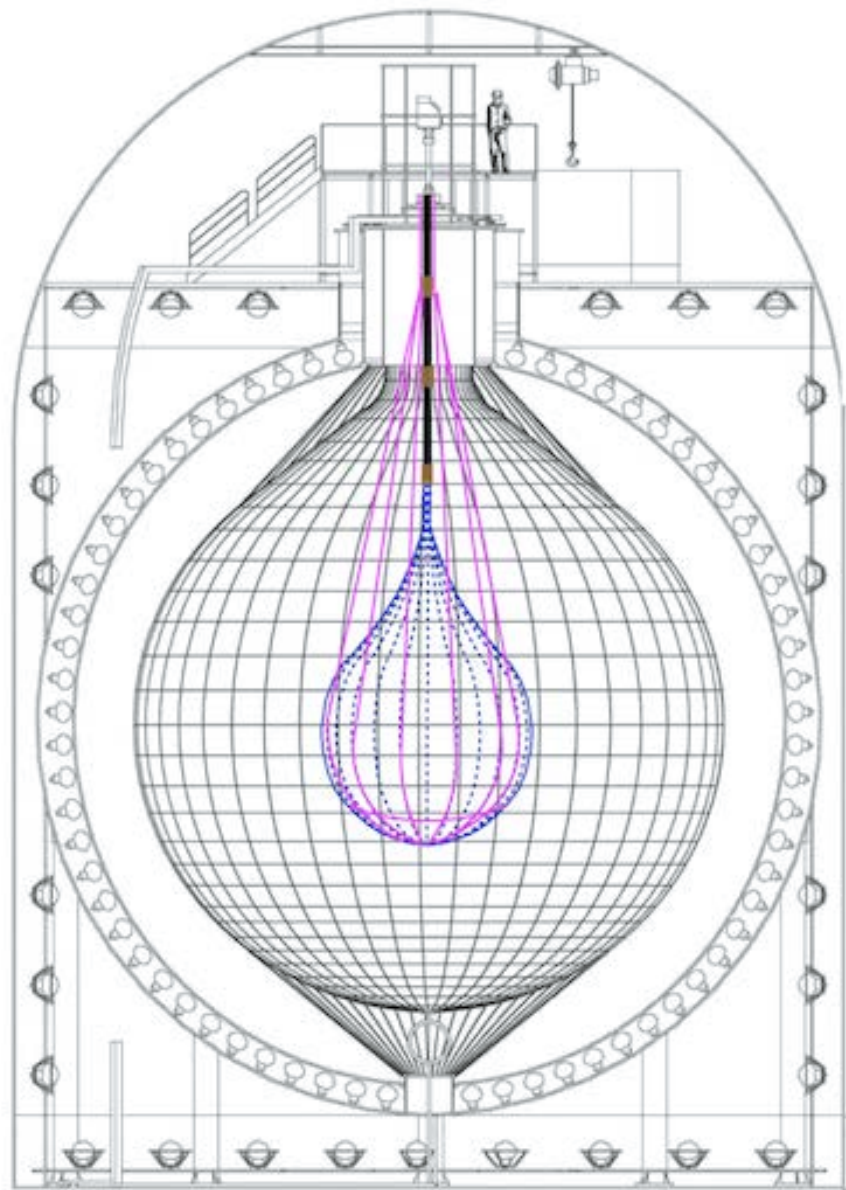
quando



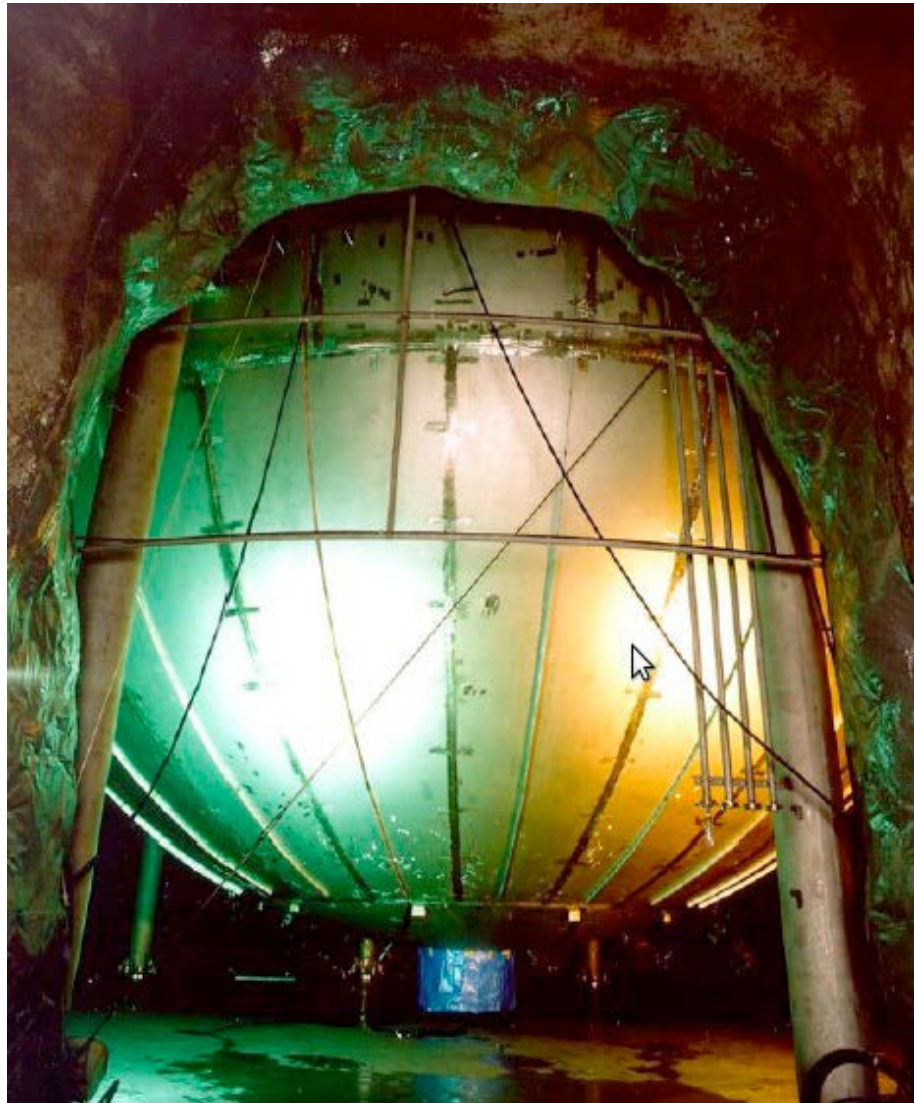
Presente e futuro prossimo



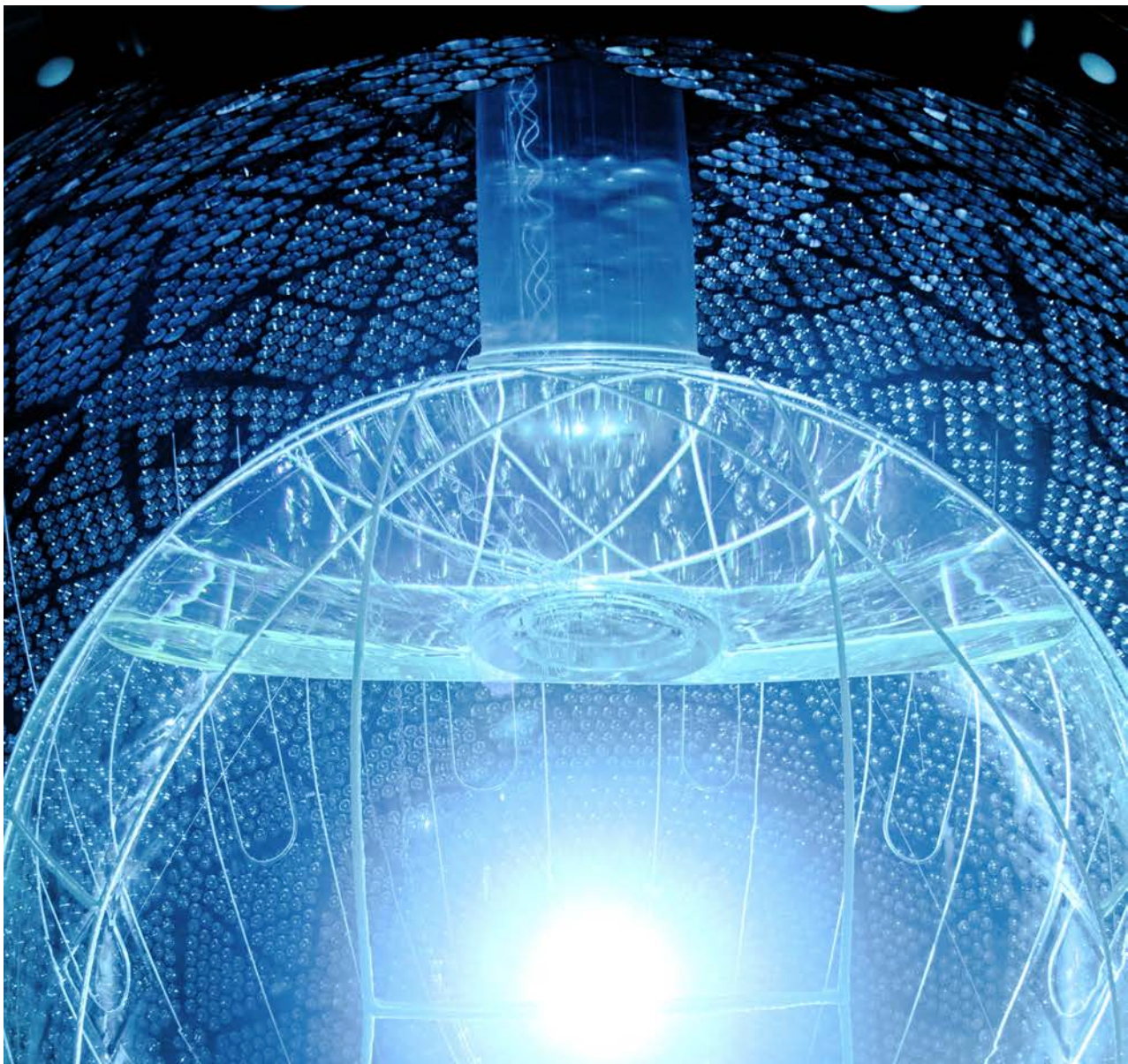
CUORE



KamLAND-ZEN-800



LEGEND-200



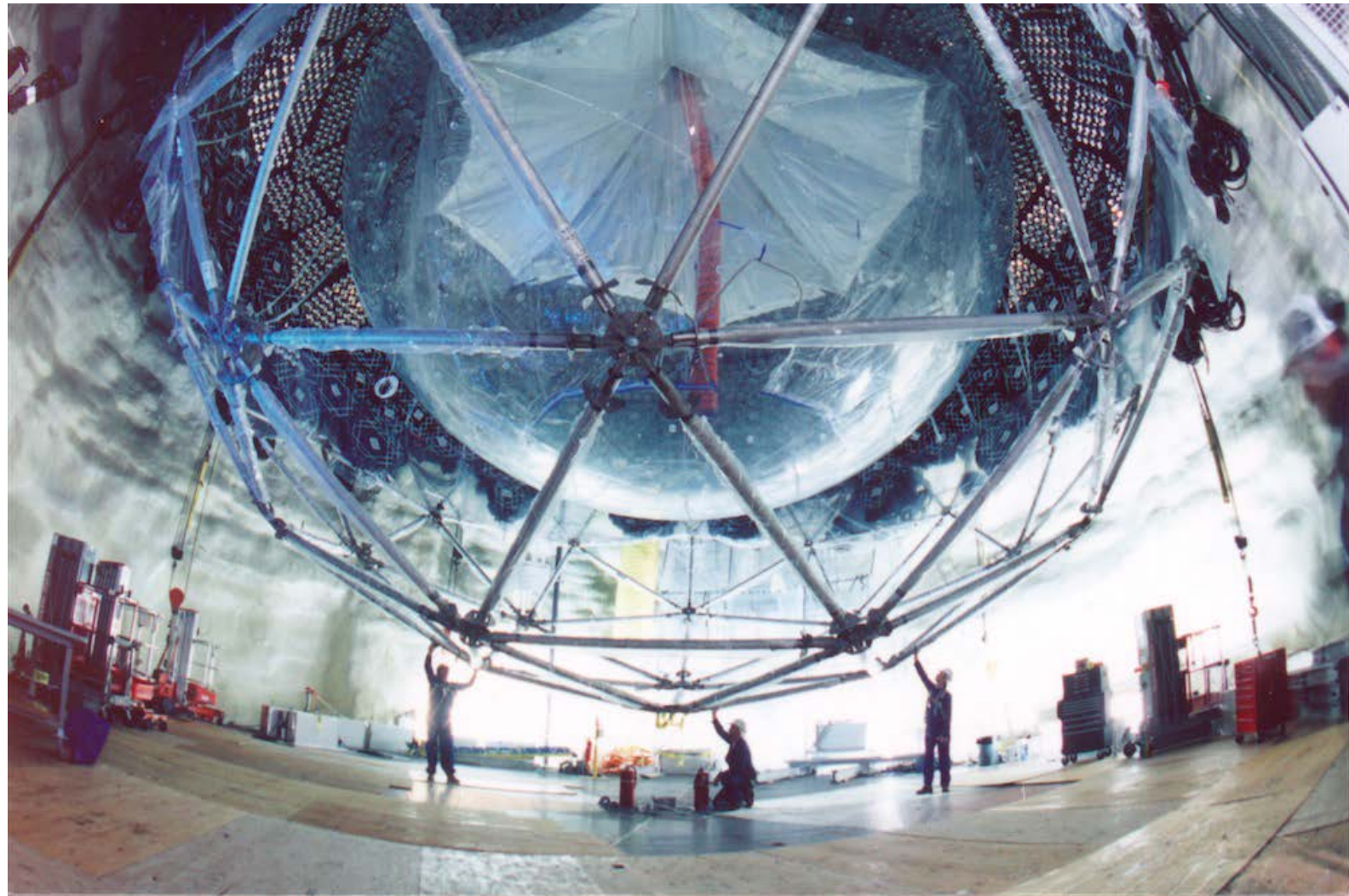
SNO+

Risultati più recenti

Experiment	Isotopo	$T_{1/2}$ (yr) limite	$\Gamma_{0\nu}$ (10^{-45} eV)	Sensibilità Media	BI (10^{-3} c/(keV kg yr))	FWHM (keV)	Esposizione (kg _{iso} · yr)	$m_{\beta\beta}$ (meV)	Riferimento
CANDLES III	⁴⁸ Ca	$5.6 \cdot 10^{22}$	3.77E-01	$2.7 \cdot 10^{22}$	~1	240	0.12		arXiv:2008.09288v3
GERDA	⁷⁶ Ge	$1.8 \cdot 10^{26}$	1.17E-04	$1.8 \cdot 10^{26}$	0.52	3	127.2	79-180	arXiv:2009.06079v1
LEGEND-200	⁷⁶ Ge	$1.9 \cdot 10^{26}$ (*)	1.11E-04		0.53	2.54	48.2	77-179	arXiv:2501.10046v1
MJD	⁷⁶ Ge	$8.3 \cdot 10^{25}$	2.54E-04		6.8	2.45	65	113-269	arXiv:2401.04782
CUORE	¹³⁰ Te	$3.5 \cdot 10^{25}$	6.03E-04	$4.4 \cdot 10^{25}$	14.2	7.3	567	70-250	arXiv:2404.04453v1
CUPID-0	⁸² Se	$4.6 \cdot 10^{24}$	4.59E-03	$7 \cdot 10^{24}$	3.5	21.8	8.82	263-545	PRL 129, 111801 (2022)
CUPID-Mo	¹⁰⁰ Mo	$1.8 \cdot 10^{24}$	1.17E-02		5,1	7.4	1.17	280-490	arXiv:2305.09003v1
KL-ZEN-800	¹³⁶ Xe	$2.0 \cdot 10^{26}$	1.06E-04	$1.3 \cdot 10^{26}$	0.08	145	510	36-156	PRL 130, 051801 (2023)
EXO-200	¹³⁶ Xe	$3.5 \cdot 10^{25}$	8.44E-04	$5 \cdot 10^{25}$	0.02	66	234	93-286	arXiv:1906.02723v3
AMORE	¹⁰⁰ Mo	$2.9 \cdot 10^{24}$	7.28E-03		25	9	3.89	355-620	arXiv:2407.05618v3

Futuro

SNO+



CUPID



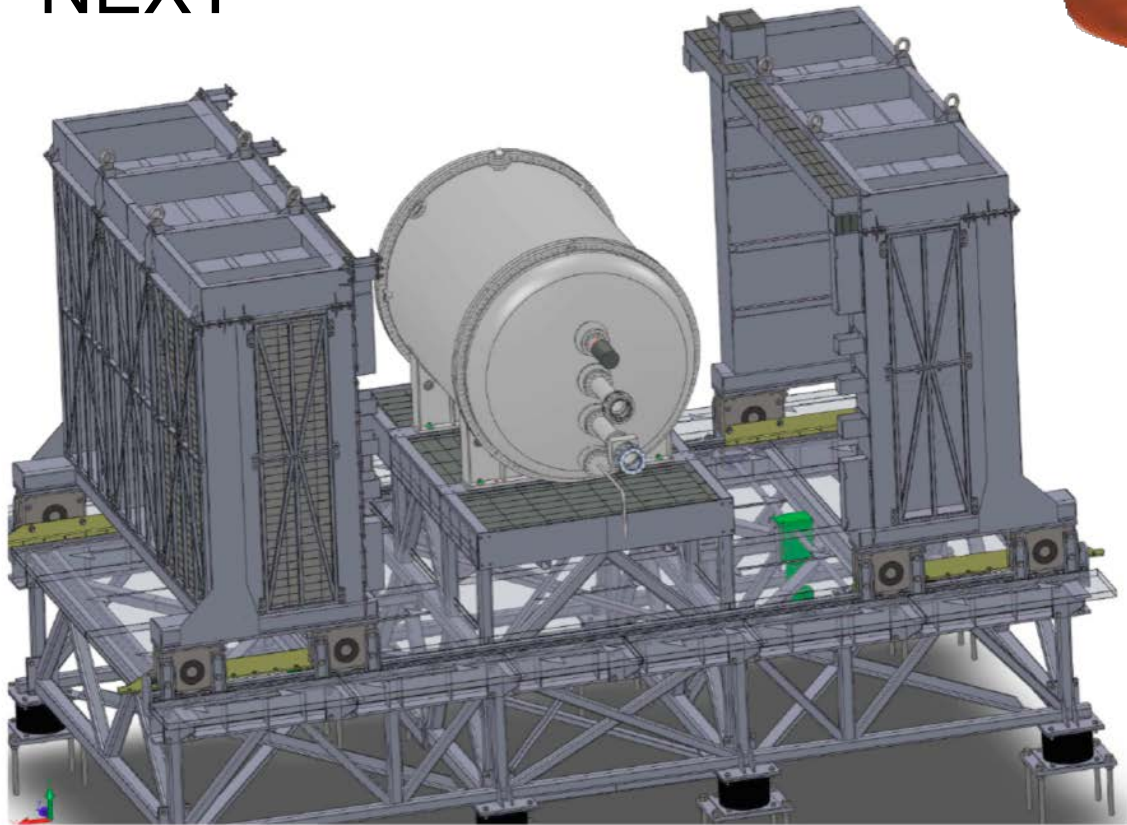
nEXO



KamLAND-ZEN



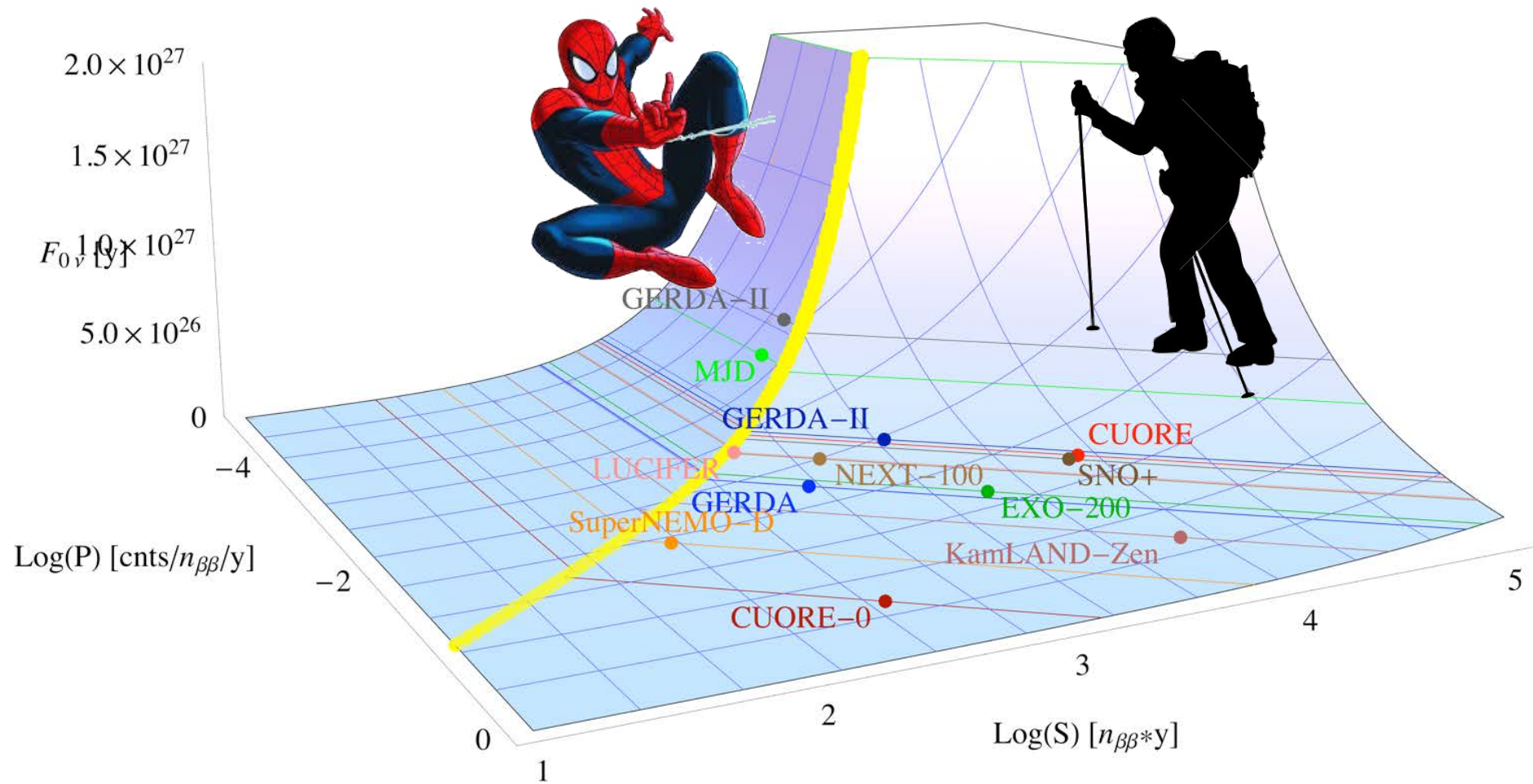
NEXT



LEGEND



... ancora sensibilità



↑ = Direction of maximum increase of $F_{0\nu}$

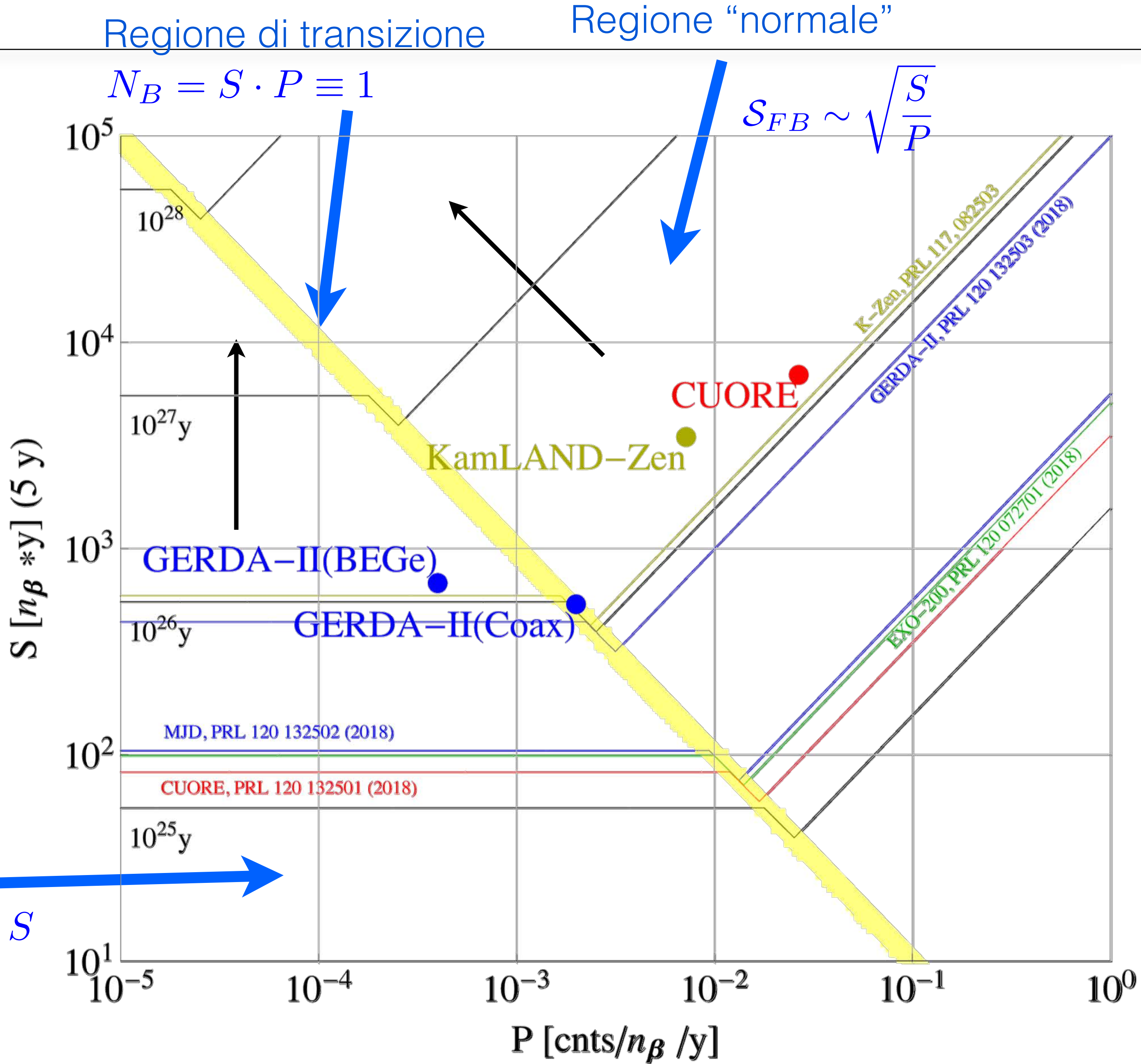
$$N_B = S \cdot P \equiv 1$$

$$S_{FB} \sim \sqrt{\frac{S}{P}}$$

$$S_{ZB} \sim S$$

Regione a
 “fondo zero”

$S_{ZB} \sim S$



Strategia USA-Europa per NDBD

10 Feb 2020: Double Beta Decay APPEC Committee Report [ArXiv:1910.04688v2]

Recommendations:

1. The search for neutrinoless double beta decay is a top priority in particle and astroparticle physics, as this process provides the most sensitive test of lepton number violation.
2. A sustained and enhanced support of the European experimental programme is required to maintain the leadership in the field, exploiting the broad range of expertise and infrastructure and fostering existing and future international collaborations.
3. A multi-isotope program exploiting different technologies at the highest level of sensitivity should be supported in Europe in order to mitigate the risks and to extend the physics reach of a possible discovery.
4. A program of R&D should be devised on the path towards the meV scale for the effective Majorana mass parameter.
5. The European underground laboratories should provide the required space and infrastructure for next generation double beta decay experiments. A strong level of coordination is required among European laboratories for radiopurity material assays and low background instrumentation development in order to ensure that the challenging sensitivities of the next generation experiments can be achieved on competitive timescales.
6. The theoretical assessment of the particle physics implications of a positive observation and of the broader physics reach of these experiments should be continued. A dedicated theoretical and experimental effort, in collaboration with the nuclear physics community, is needed to achieve a more accurate determination of the Nuclear Matrix Elements (NME).

North America - Europe Workshop on Future of Double Beta Decay

29 Sept 2021, 14:00 → 1 Oct 2021, 21:30 Europe/Rome

"E. Fermi" auditorium (Gran Sasso National Laboratory (LNGS))



Organizzato congiuntamente da [INFN](#), [APPEC](#) and [DOE](#)

Conclusioni:

- Viene ribadita l'importanza di un piano che conduca alla realizzazione di più di un esperimento su nuclei diversi
- Sforzo condiviso per la realizzazione di questo programma

Second International Summit on the Future of Double Beta Decay SNOLAB 27-28 April 2023

Conclusioni:

- Vengono indicati esplicitamente 3 esperimenti: LEGEND-1000, nEXO e CUPID
- Viene nominato un GdL il cui compito è quello di definire una strategia comune condivisa

DOE Portfolio review July 2023

Conclusioni:

- Viene fissato un ranking: LEGEND è il favorito

... ultima/prossima puntata ...

3rd International Summit on the Future of Neutrinoless Double-beta Decay

26–27 May 2025 - Heidelberg
Max Planck Institute for Nuclear Physics

GDL for cooperative collaboration

- **Smith, Nigel (TRIUMF)**
- Mantica, Paul (DOE)
- Luc, Eva (ISED/ISDE)
- Quinn, Daniel (ISED/ISDE)
- Allena K. Opper (NSF)
- Cremonesi, Oliviero (INFN)
- Grasso, Marcella (CNRS, IJCLab Orsay)
- Besson, Nathalie (CEA, DAPNIA Saclay)
- Gagnon, Olivier (EMBA, Montreal)
- Harbour, Valerie (NSERC, Quebec)
- Sorensen, Paul (DOE)
- Blair, Grahame (STFC, SO, PROG)
- Swiebodzinski, Jacek (DESY, Hamburg)
- Hartmann, Patrick (BMBF)
- Konopek, Milan (ISED/ISDE)



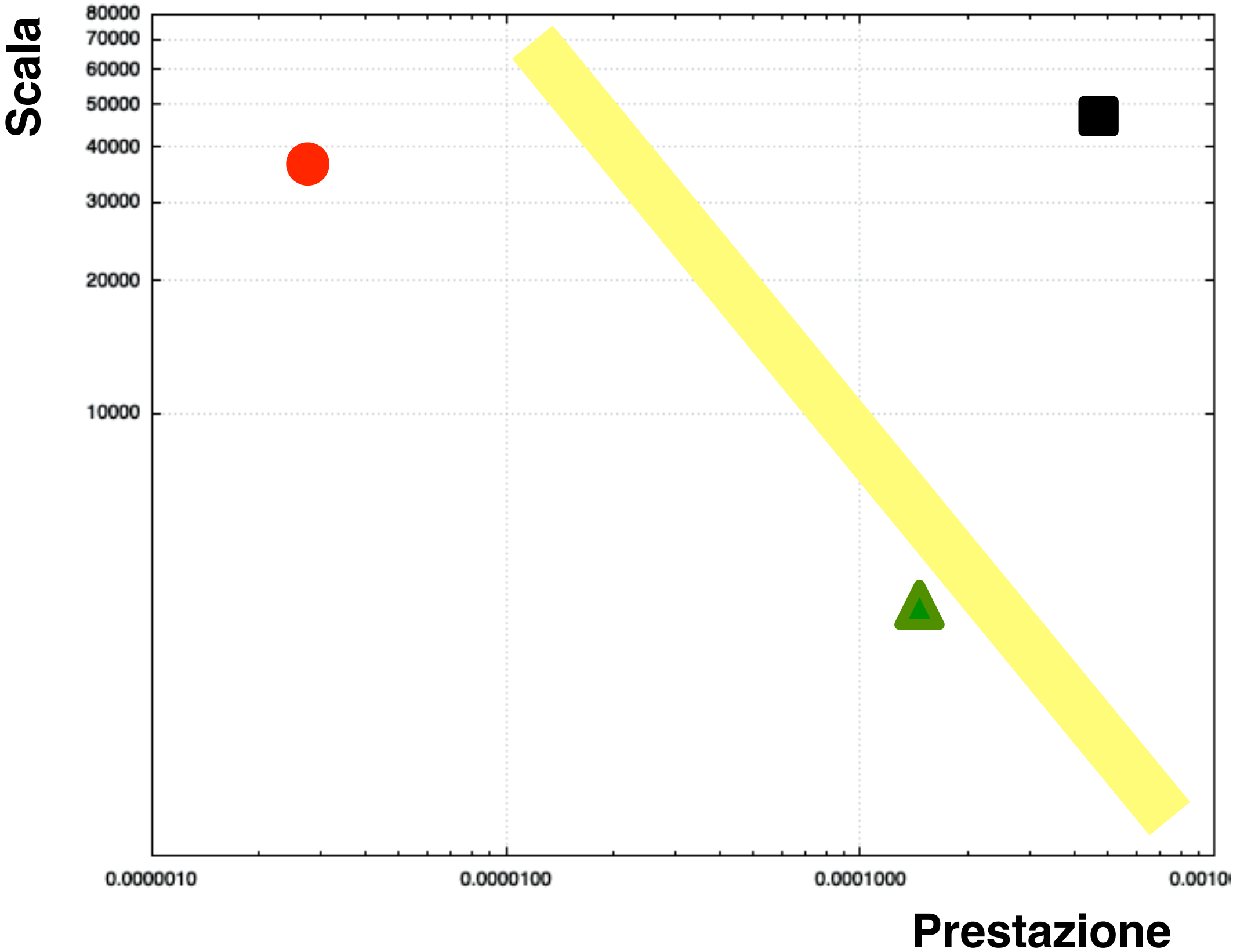
Charge:

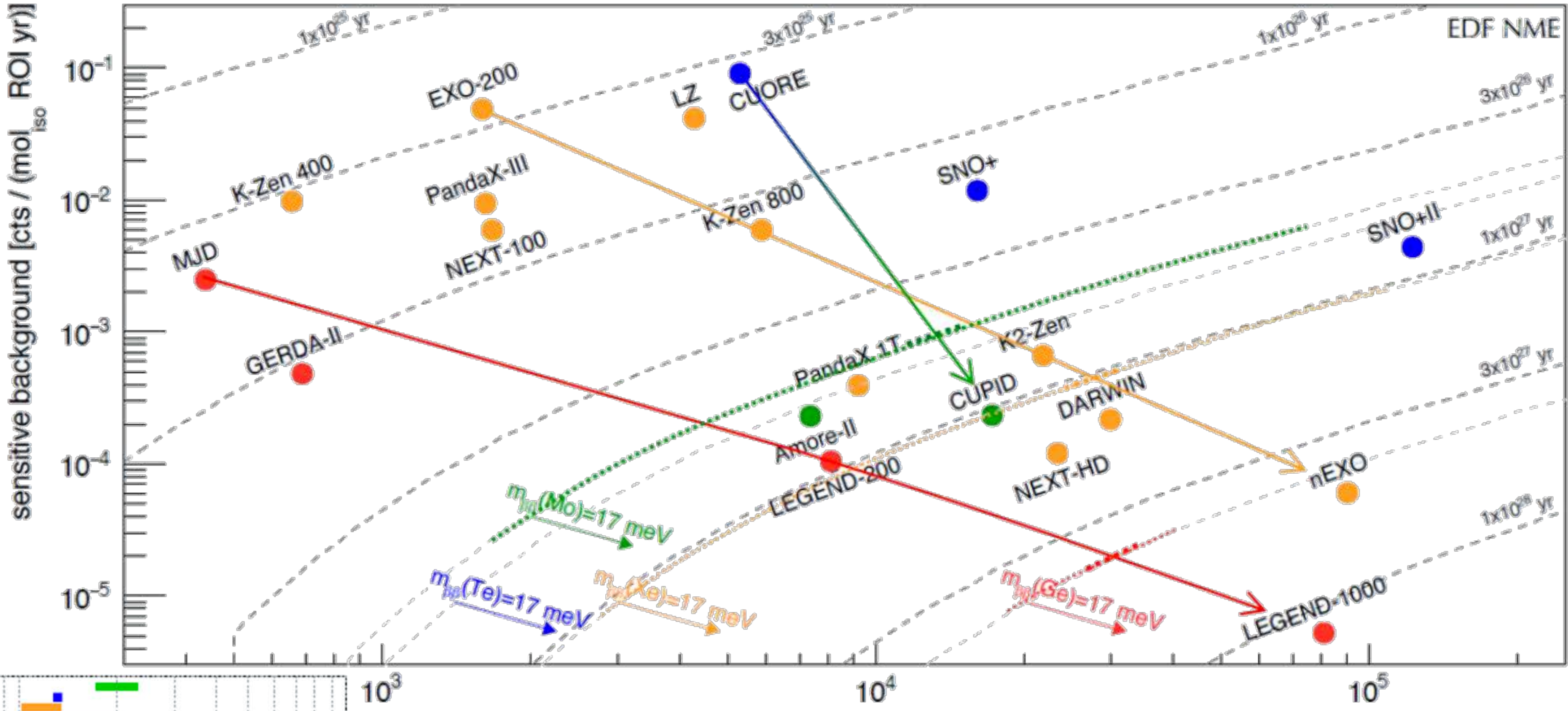
- Explore organizational frameworks to coordinate an international campaign with multiple isotopes and more than one ton-scale experiment implemented in the next decade and promote research and development on future efforts in double beta decay.
 - Consider a broad range of scenarios
 - Delineate and name at least two possible organizational frameworks
 - Perform a strengths, weaknesses, opportunities, and threats (SWOT) analysis

Prospettive future

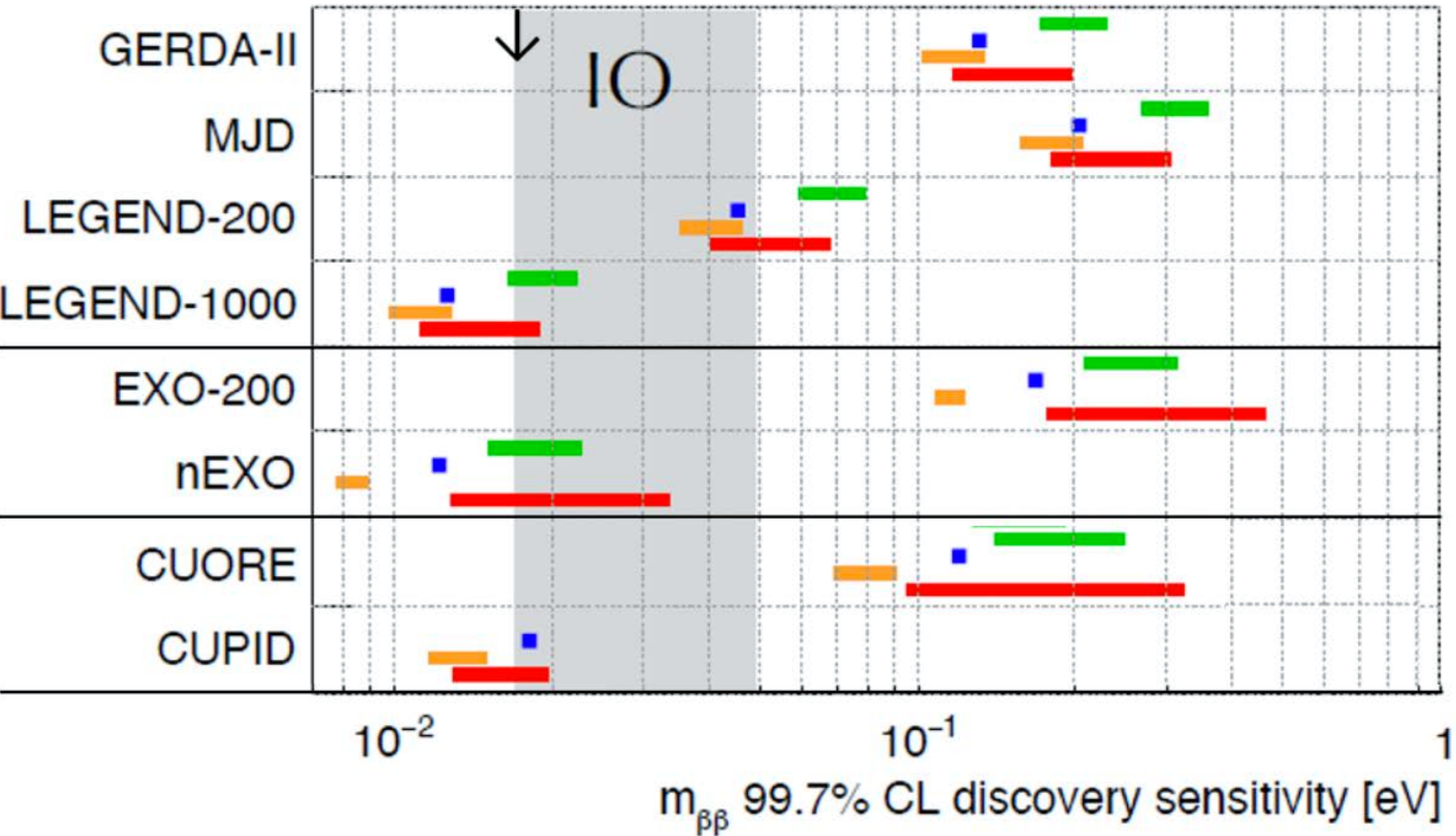
Experiment	Isotope	a.i.	M _{iso} (kg)	Efficienza	E _{ris} (keV)	BI (ckky)	P (10 ⁻⁶)	S	Σ (10 ²⁷ y)
LEGEND-1000	⁷⁶ Ge	0.9	1000	0.70	2.5	10 ⁻⁵	3.3929	36842.11	43.50
nEXO	¹³⁶ Xe	0.9	1800	0.83	50	5 · 10 ⁻⁵	529.0079	49136.03	4.02
CUPID	¹⁰⁰ Mo	0.95	240	0.68	5	10 ⁻⁴	136.2229	4404.55	2.37

Experiment	Isotope	G (10 ⁻¹⁵ y)	M (IBM-2)	T _{1/2} (S,P)	m _ν (meV)
LEGEND-1000	⁷⁶ Ge	2.363	4.68	5.3 · 10 ²⁸	8.03
nEXO	¹³⁶ Xe	15.92	4.22	3.2 · 10 ²⁸	11.28
CUPID	¹⁰⁰ Mo	14.58	3.05	6.4 · 10 ²⁷	21.24





Ton-Scale Goal



13-16 July 2021: DOE portfolio review

Scientific Merit of the Proposed Experiment	40%
Global Context	5%
Technical Maturity	20%
Cost Competitiveness and Timeliness	20%
Assurance of Successful Project Delivery	15%

Criteria and weights

CUPID

- The panel found CUPID highly creative but only recently developed
- Technical experience from CUORE helps, but the 1:100 scale-up from CUPID-Mo poses a risk
- The experiment still has not entirely solved the two-neutrino pileup rejection issue
- The panel had some concerns about only a single vendor for the isotope
- An intermediate scale demonstrator might have great value

- [...] split 45% DOE, 55% non-DOE scope, indicate that this is mostly an Italian project
- The panel considered the cost contingency budgeted inadequate
- The proposed full time equivalent (FTE) amounts seem low for the proposed work scope

... molte cose sono cambiate
nel frattempo

NSAC Long Range Plan

Invest in Research and Operations

(Recommendation 1):

Capitalize on the extraordinary opportunities for scientific discovery made possible by the substantial and sustained investments of the United States. We must draw on the talents of all in the nation to achieve this goal.

This recommendation requires:

- Increasing the research budget that supports theoretical and experimental research across the country
- Continuing effective operation of national user facilities—ATLAS at Argonne National Laboratory; the CEBAF at Thomas Jefferson National Accelerator Laboratory; FRIB at Michigan State University—and completing the science program at RHIC at Brookhaven National Laboratory
- Raising the compensation of graduate researchers to levels commensurate with their cost of living—without contraction of the workforce—to lower barriers and expand opportunities in STEM and boost national competitiveness
- Expanding policy and resources to ensure a safe and respectful environment for everyone.

The plan reaffirms the exceptionally high priority of two investments in new capabilities:

Support New Experiment Construction (Recommendation 2):

A campaign including expeditious **construction of ton-scale neutrinoless double beta decay experiments using different isotopes and complementary techniques** is the highest priority for new experiment construction. These experiments have the potential to dramatically change our understanding of the physical laws governing the universe. [...]



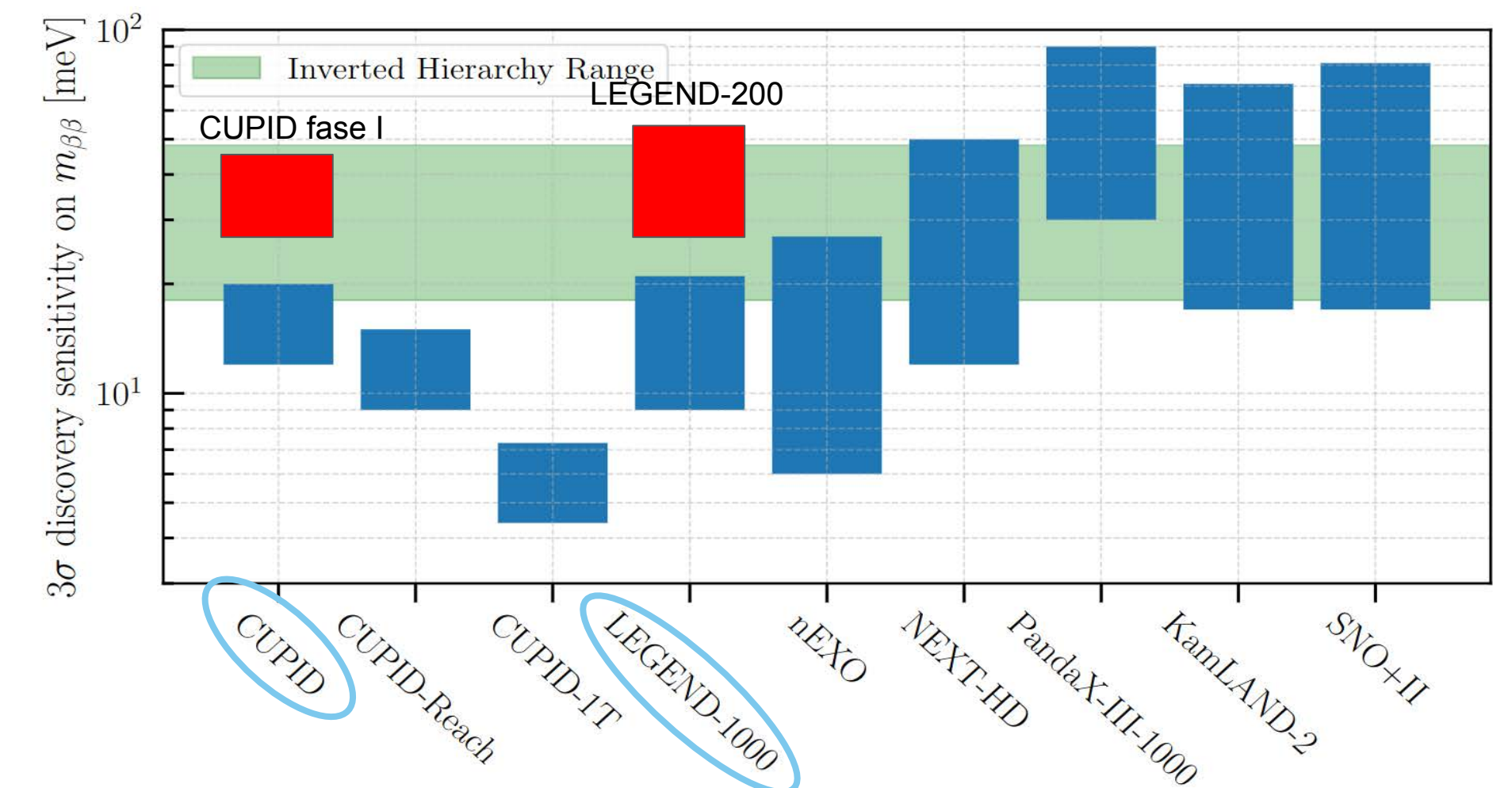
2024 ... un anno da dimenticare

- Inizia con una buona notizia: DOE conferma che LEGEND sarà @ LNGS
- Tim Hallman viene sostituito ed il budget 2025 per NDBD fortemente ridotto
- DOE comunica che finanzia' un solo esperimento (LEGEND @ LNGS)
 - nEXO sembra fuori gioco
 - CUPID costa molto meno e potrebbe implementare un piano a 2 fasi
 - LEGEND applica per un finanziamento NSF
 - NSF "rimanda" la proposta
 - nel frattempo arrivano i primi finanziamenti europei
- Viene eletto il nuovo presidente USA ...
- ... tutto va in standby ... o quasi!

CUPID 2 fasi ...

... in modo da recuperare sul ritardo già accumulato

- **fase I ~ 21 M\$ nel 2025-2028** che si sommano a 4 M\$ Francia e 12 M\$ già investiti da INFN realizzazione di 1/2 **del detector** e preparazione dell'infrastruttura per il detector completo
- **fase II ~ 21 M\$ nel 2029-2032** acquisto della seconda metà dei cristalli e loro allestimento

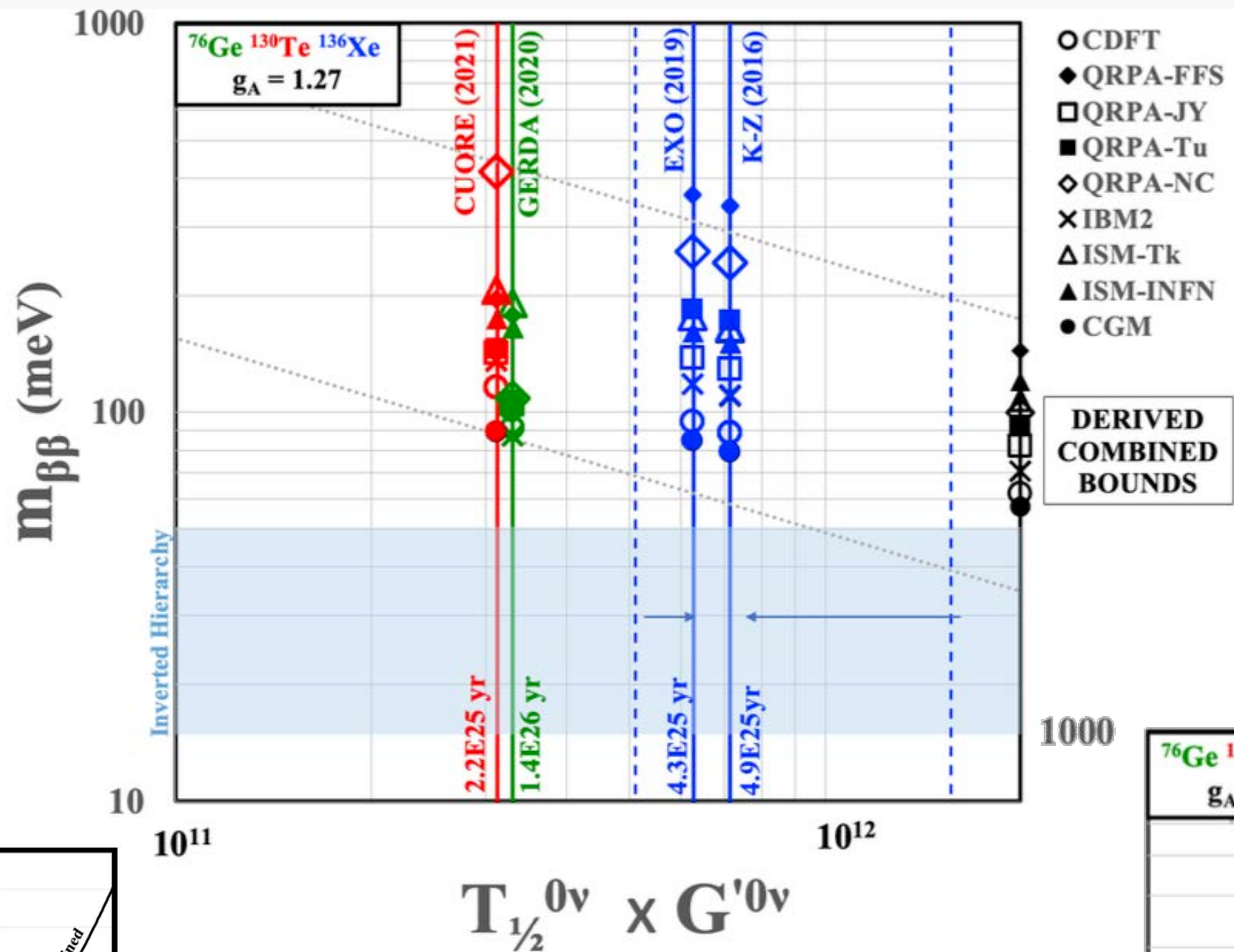
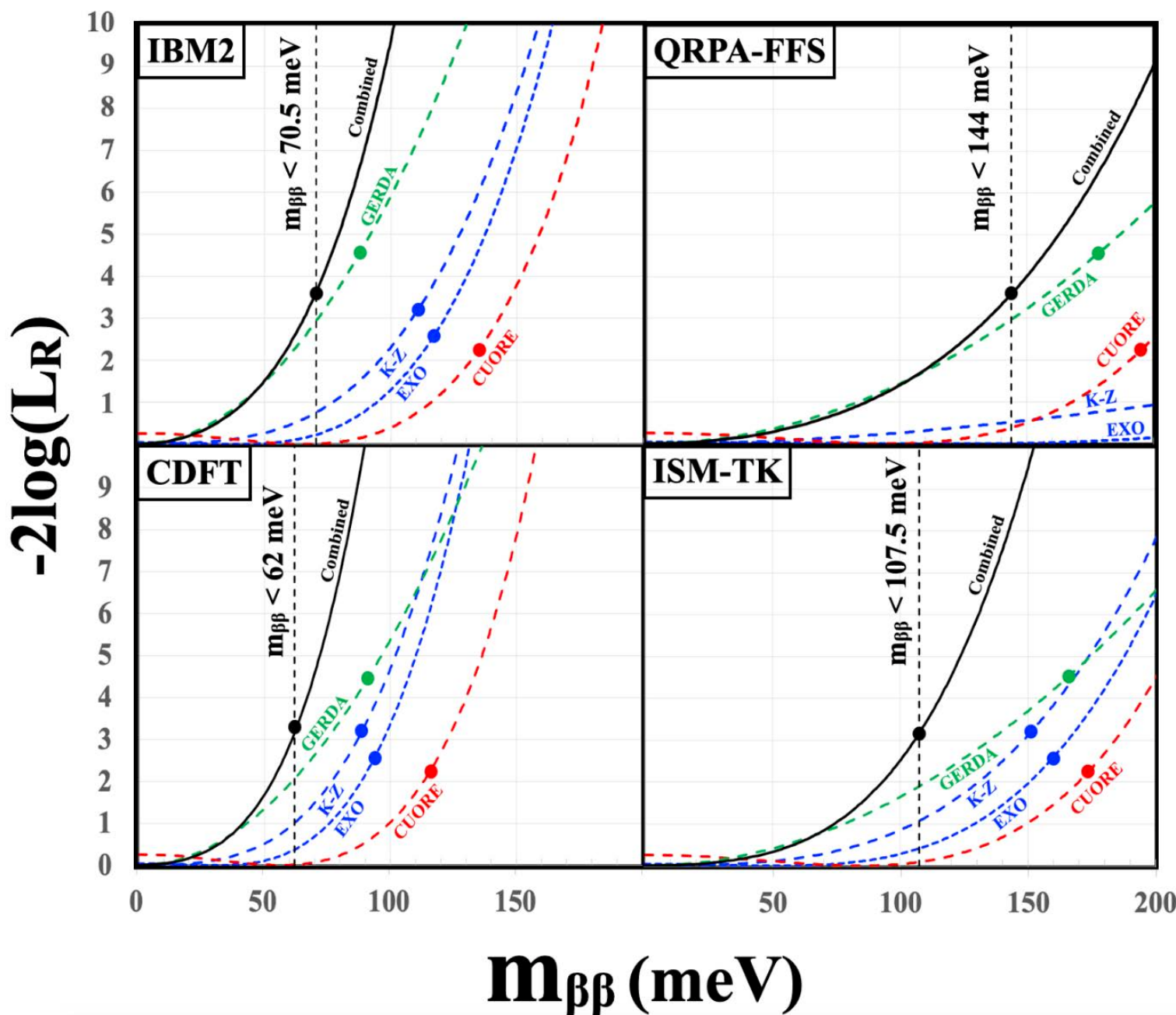
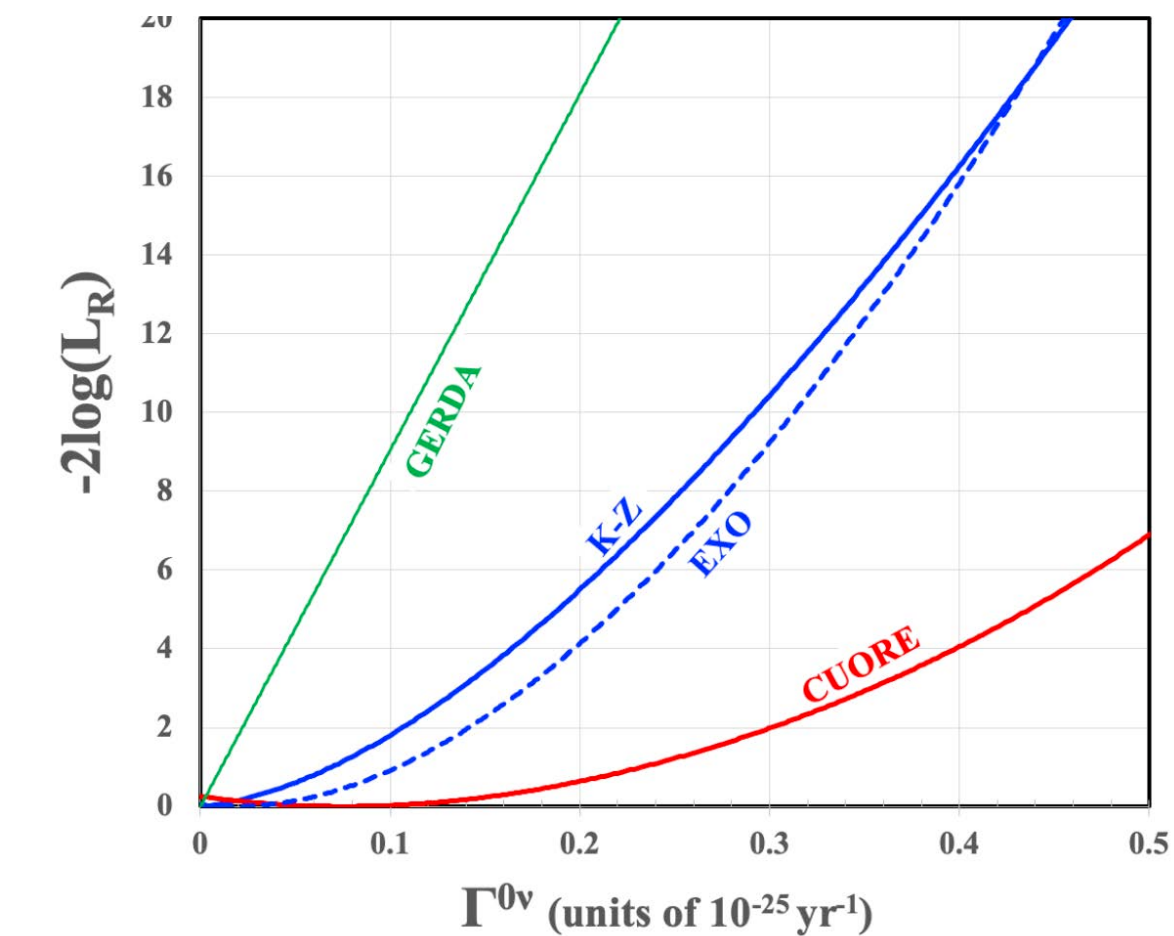


Conclusioni

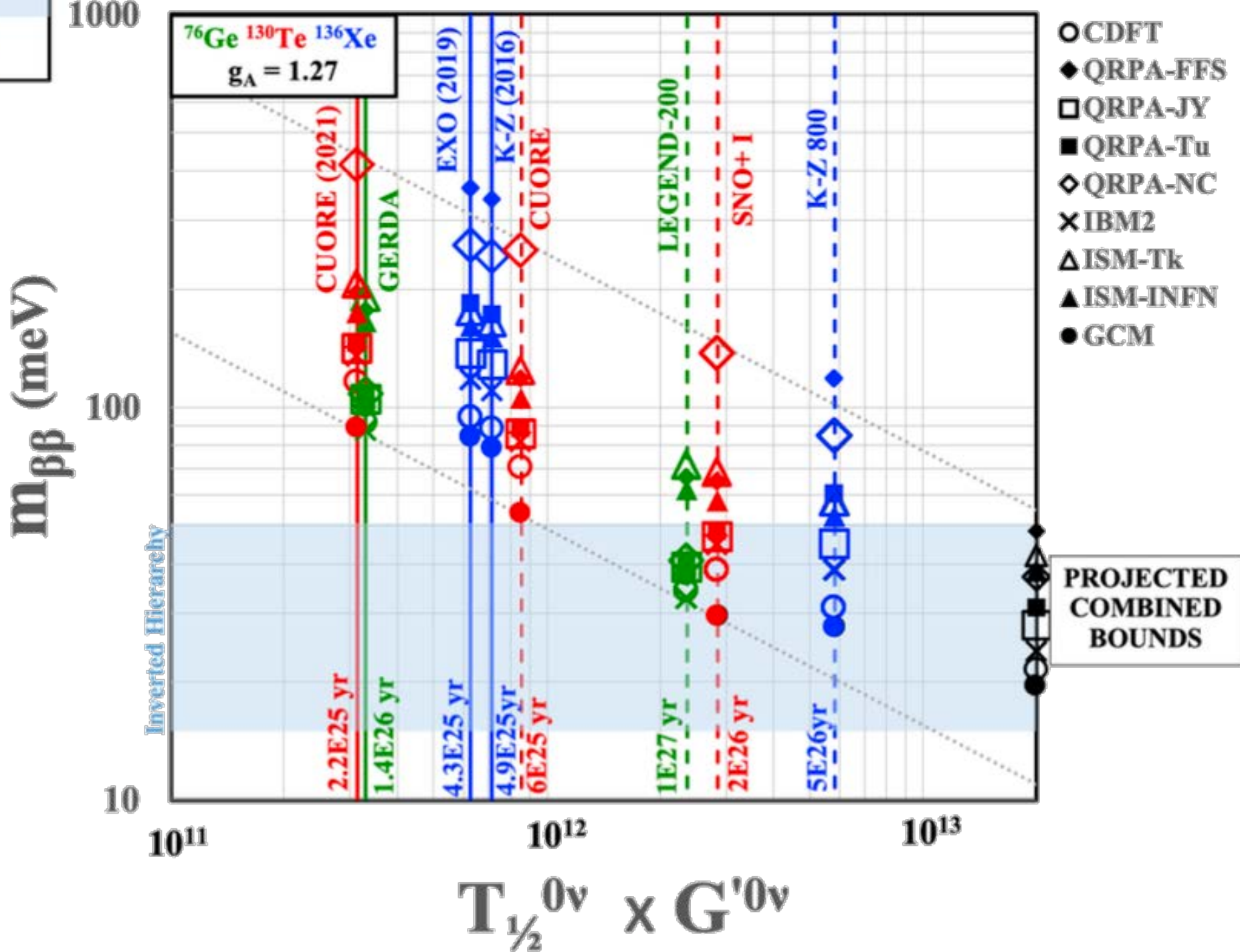
- $\beta\beta 0\nu$ è un test cruciale della natura del neutrino e di LNV
 - In caso di scoperta può fornire informazioni uniche sulle proprietà del neutrino
- Forte interesse internazionale motivato dalla portata scientifica del risultato
- Gli esperimenti di nuova generazione hanno masse di isotopo dell'ordine della tonnellata e mirano a coprire interamente la regione IH
- La sfida sperimentale è quella di raggiungere esposizioni di svariate ton yr in condizioni estreme di basso fondo
- Strategia basata su un'evoluzione graduale che permetta di produrre risultati fisici mantenendo al minimo i rischi
- Nella maggior parte dei casi i progetti sono estensioni di esperimenti esistenti con sensibilità crescenti
- Campo estremamente attivo: varietà di approcci e tecnologie
- Diversi isotopi e tecniche necessarie per sbarazzarsi delle incertezze teoriche
- Forte influenza della situazione internazionale: isotopi, costi,

Combinazione dei risultati su diversi nuclei

SD Biller: arXiv:2103.06036v3
P Guzowski 2016 J. Phys.: Conf. Ser. 718 062022



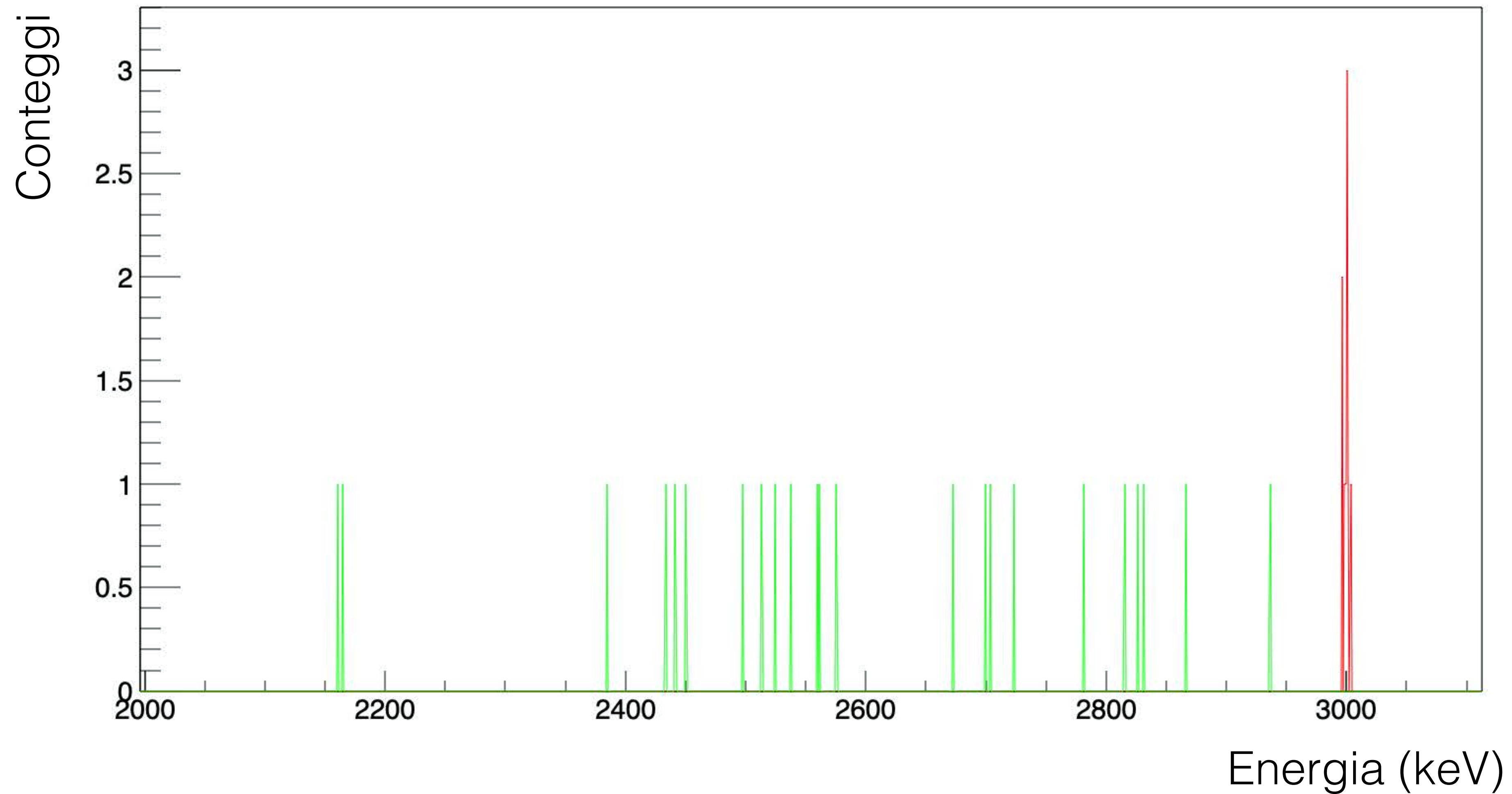
Presente



Futuro

In caso di scoperta ...

a chi credereste?



... ovvero l'importanza della risoluzione energetica

Un po' di parametri a confronto

- Quando si tratta di realizzare un grande esperimento non conta solo
 - portata scientifica
 - realizzabilità tecnologica
- anche altri fattori possono determinare la scelta

		Bkg	FWHM	M _{iso}	T ^{1/2} _{0ν} (ZB)	Cost(iso)	a.i.	Cost (iso)	US Prod.	Cost (nat)	M _{tot}
		[c/keV/kg/y]	[keV]	[ton]	[yr]	[M€]	[%]	[€/g]	[ton/y]	€/g	[ton]
LEGEND	76Ge	1E-05	2.5	0.9	5.3E+28	63	7.8	70	150	4	28.8
CUPID	100Mo	1E-04	5	0.24	6.4E+27	20.4	9.6	85	3E+05	0.06	2.4
nEXO	136Xe	5E-05	50	5	3.2E+28	40	8.9	8	60	1.2	50