

La fisica del neutrino: sviluppi recenti e prospettive

F. Terranova

Università di Milano-Bicocca & INFN Milano-Bicocca

Alcune domande a cui proverò a dare risposta:

La fisica del neutrino sta vivendo un periodo di grande espansione e popolarità. Quali sono i motivi di un così grande successo?

Oggi si parla di «fisica di precisione» per la fisica del neutrino. Perché la stiamo facendo? Che sorprese potrebbero comparire nei prossimi anni? E soprattutto,

Quale possibilità ha la fisica del neutrino di produrre un profondo cambiamento nel paradigma della fisica delle particelle elementari (il Modello Standard) e della cosmologia (il paradigma Λ CDM)?

Sono domande che impattano sulla strategia INFN nel settore come delineata ai tempi di “INFN What Next” (2014), sui programmi di fisica dei laboratori tradizionalmente legati ai collider - CERN, Fermilab e KEK – e quelli underground (il Gran Sasso).

Caveat: la mia review è un po' polarizzata verso gli esperimenti che vedono la partecipazione INFN. Non copre la fisica dei «neutrino telescopes» (v. talk di Fiorenza Donato)

Cosa pensavamo fino al 2011?

Tra il 1998 e il 2005, le evidenze di oscillazioni di neutrino diventano davvero molto solide (SuperKamiokande, SNO, MACRO, K2K...) e appare chiaro che **esiste almeno un'oscillazione visibile sulla terra con sorgenti artificiali**. Quella tra la seconda e la terza famiglia di neutrino ("scala degli atmosferici"):

$$\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}$$

Year 2005

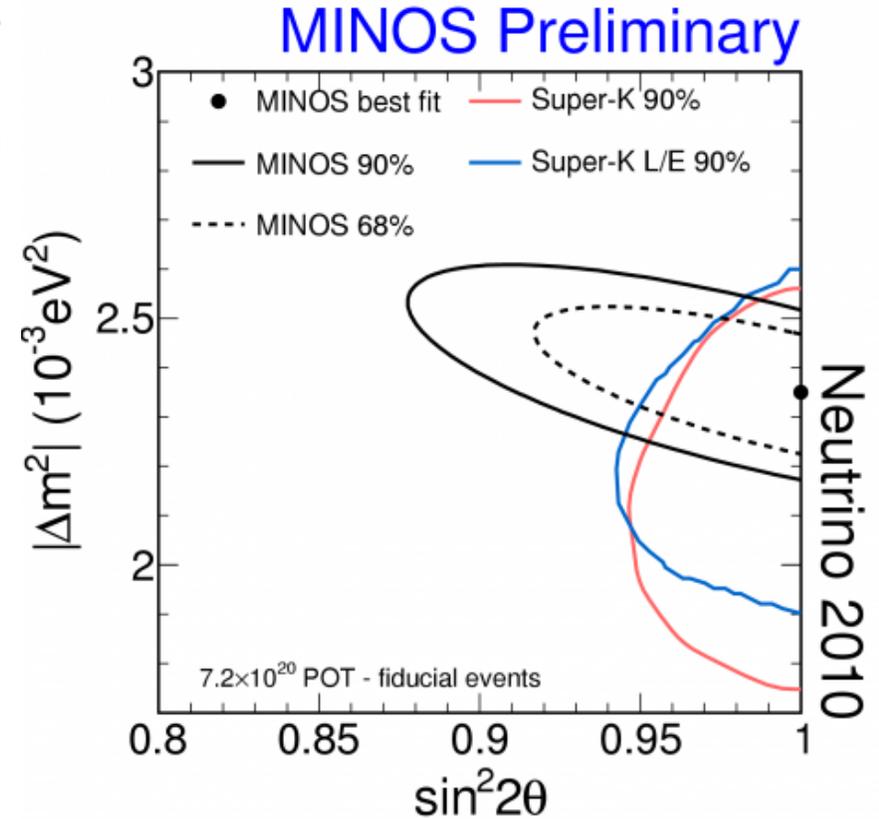


«oscillation phase» It is O(1) for
E= O(1 GeV) and L= O(100 km)
Cool, we can build experiment on Earth ☺

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \simeq \underbrace{\cos^4 \theta_{13}}_{\approx 1} \underbrace{\sin^2 2\theta_{23}}_{\approx 1} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}$$

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = \underbrace{\sin^2 2\theta_{13}}_{< 0.1} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}$$

<0.1 (ma quanto piccolo??)



Il "mood" era che le oscillazioni di neutrino avevano fatto il loro dovere, mostrando la "prima evidenza di fisica oltre il modello standard" (neutrino massivi) senza però realmente scardinare il modello standard stesso

La rivoluzione del 2012. Un incredibile colpo di fortuna 😊

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} \simeq & \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \frac{\sin^2[(1 - \hat{A})\Delta]}{(1 - \hat{A})^2} & \Delta \equiv \Delta m_{31}^2 L / (4E) & \xrightarrow{\text{Year 2005}} & \text{«oscillation phase» It is O(1) for} \\
 & + \alpha \sin 2\theta_{13} \xi \sin \delta \sin(\Delta) \frac{\sin(\hat{A}\Delta)}{\hat{A}} \frac{\sin[(1 - \hat{A})\Delta]}{(1 - \hat{A})} & & & E = O(1 \text{ GeV}) \text{ and } L = O(100 \text{ km}) \\
 & + \alpha \sin 2\theta_{13} \xi \cos \delta \cos(\Delta) \frac{\sin(\hat{A}\Delta)}{\hat{A}} \frac{\sin[(1 - \hat{A})\Delta]}{(1 - \hat{A})} & \alpha \equiv \Delta m_{21}^2 / |\Delta m_{31}^2| & \xrightarrow{\text{Year 2003}} & \text{Cool, we can build experiment on Earth 😊} \\
 & + \alpha^2 \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin^2(\hat{A}\Delta)}{\hat{A}^2} & & & \text{Must be } < 1. \text{ The larger the better.} \\
 & & \xi \equiv \frac{\cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23}}{\sin^2 2\theta_{13}} & \xrightarrow{\text{Year 2012}} & \text{We know now that is } 0.028 \\
 & & & & \text{The larger the better! It is O(1) in} \\
 & & & & \text{neutrinos! (it is tiny in quarks..)}
 \end{aligned}$$

Nel settore di Yukawa leptonic del modello standard:

- Tutti gli angoli di mixing sono grandi. Il più piccolo (θ_{13}) è circa grande quanto l'angolo di Cabibbo!!
- Il valore assoluto degli autostati di massa non è attualmente noto ma sappiamo che è piccolo mentre le differenze di massa sono abbastanza grandi da permettere oscillazioni di neutrini “da acceleratori” (1 GeV) per distanze di alcune centinaia di chilometri

In linea di principio, un esperimento di neutrino agli acceleratori “sufficientemente potente” sarebbe in grado di ricostruire tutto il settore di Yukawa del Modello Standard per i leptoni

Perché uso il termine “rivoluzione”?

A partire dal 2012, la fisica del neutrino ha potuto tracciare **quantitativamente** la sua strada per rispondere a domande estremamente ambiziose:

Come è fatto il settore di Yukawa del Modello Standard?

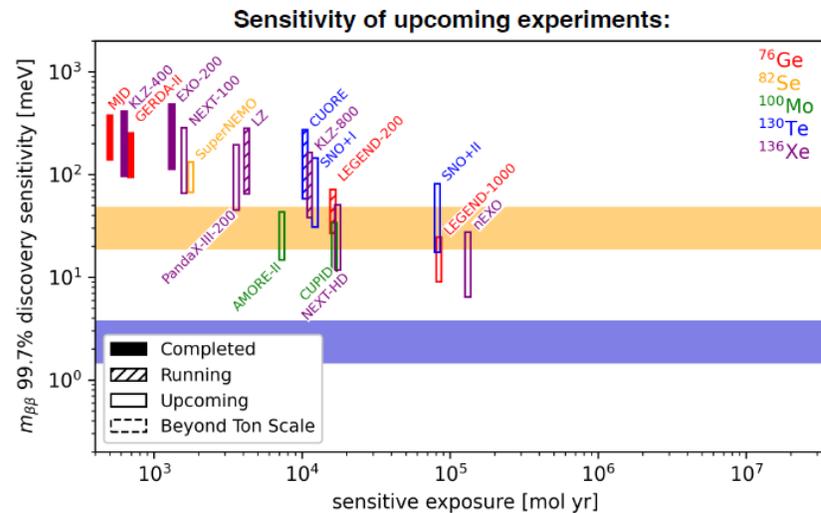
I neutrini violano la simmetria di CP?

Qual'è il pattern di massa dei neutrini? (mass ordering)

Il mixing massimale (θ_{23}) è davvero massimale?

La matrice di mixing è unitaria?

Qual'è la natura del neutrino?



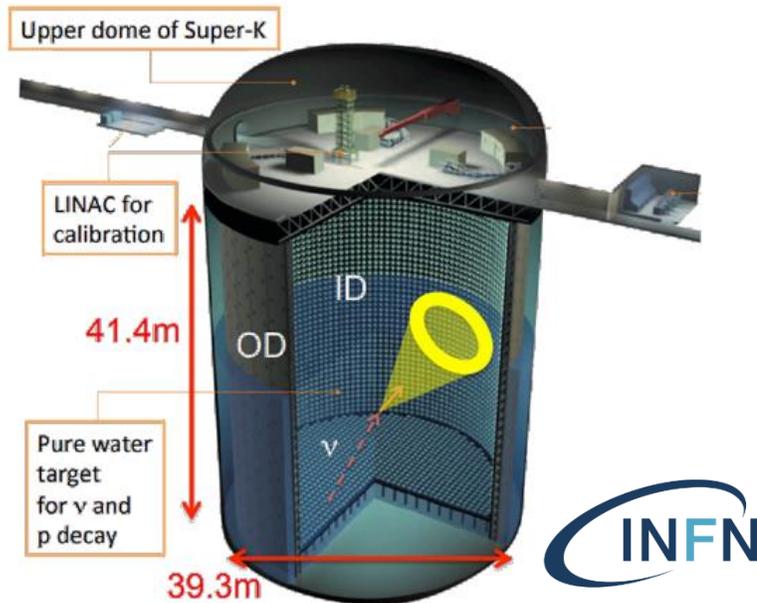
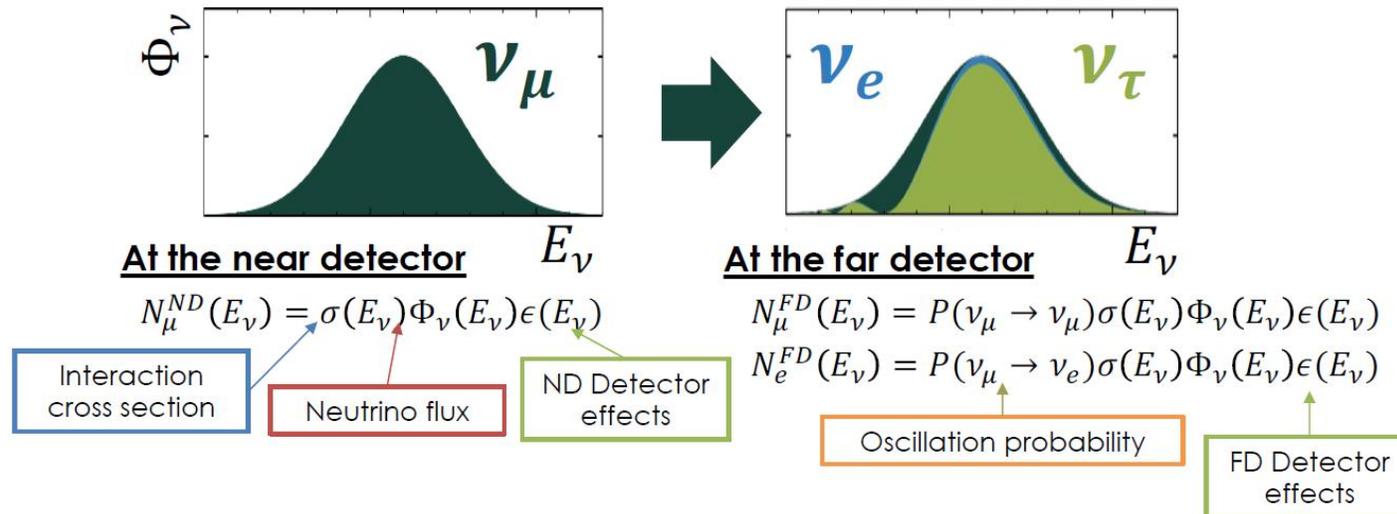
I neutrini nell'universo si comportano come previsto dal paradigma LCDM?

Sono in grado di originare l'asimmetria materia-antimateria?

Danno origine alle perturbazioni primordiali effettivamente osservate?

Quali sono le sorgenti astrofisiche dei neutrino energetici?

Esperimenti long-baseline



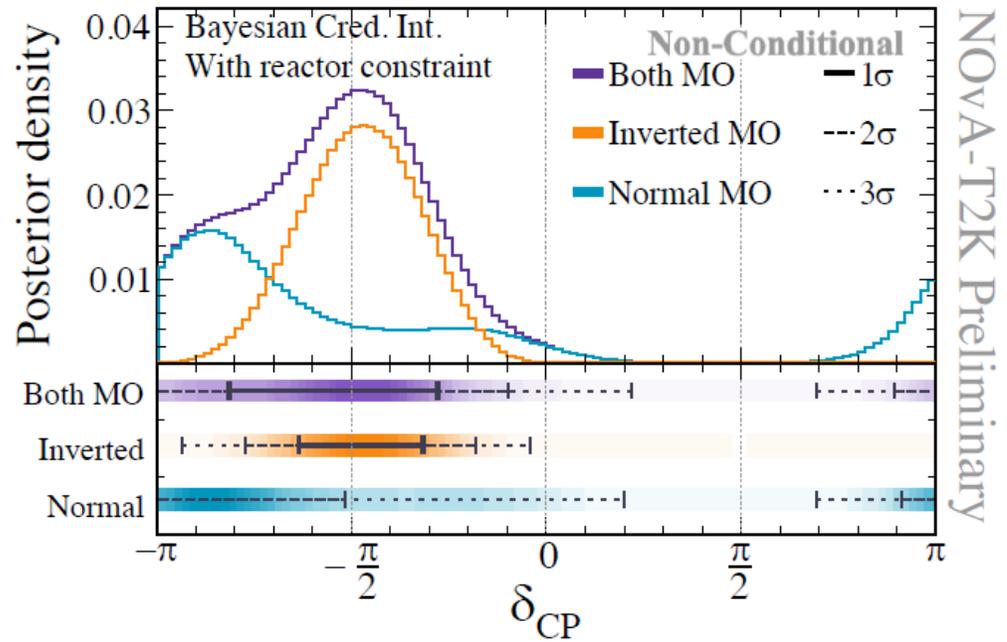
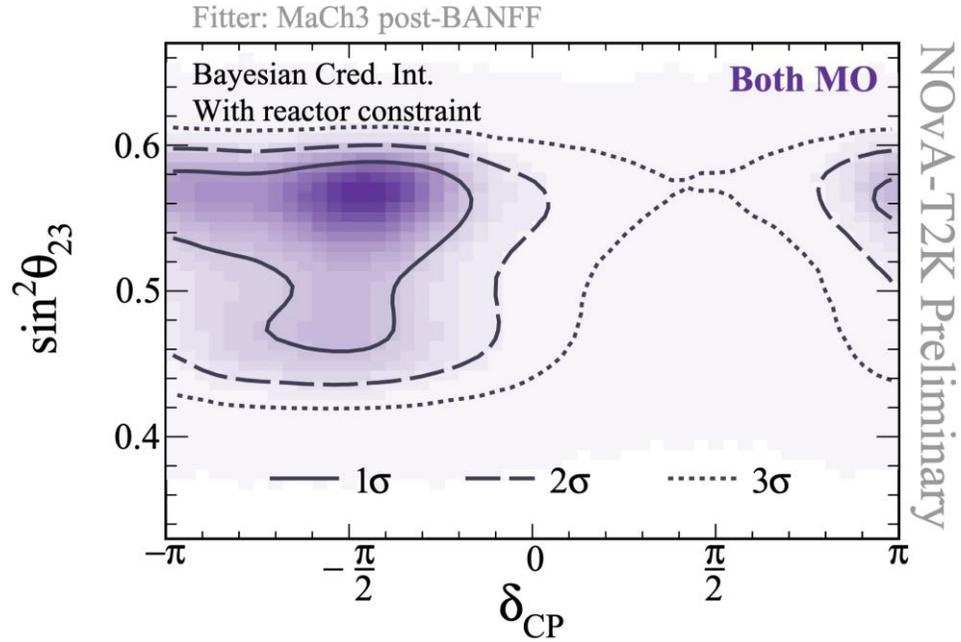
T2K: neutrini da JPARC a SuperKamiokande (296 km)

Ideale per θ_{13} e violazione di CP



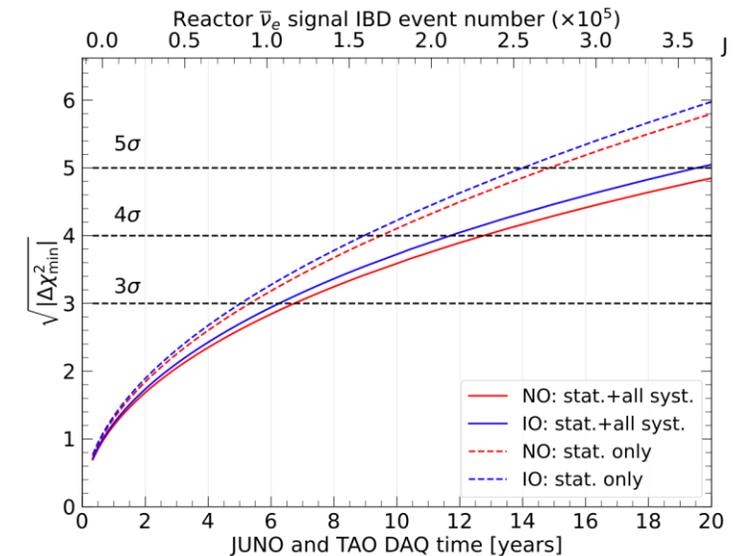
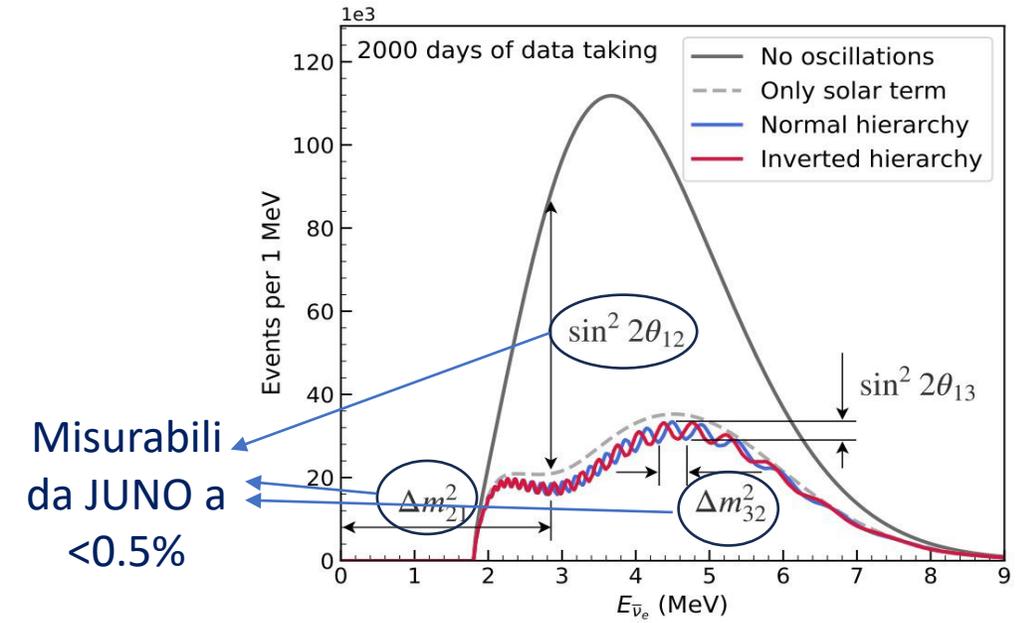
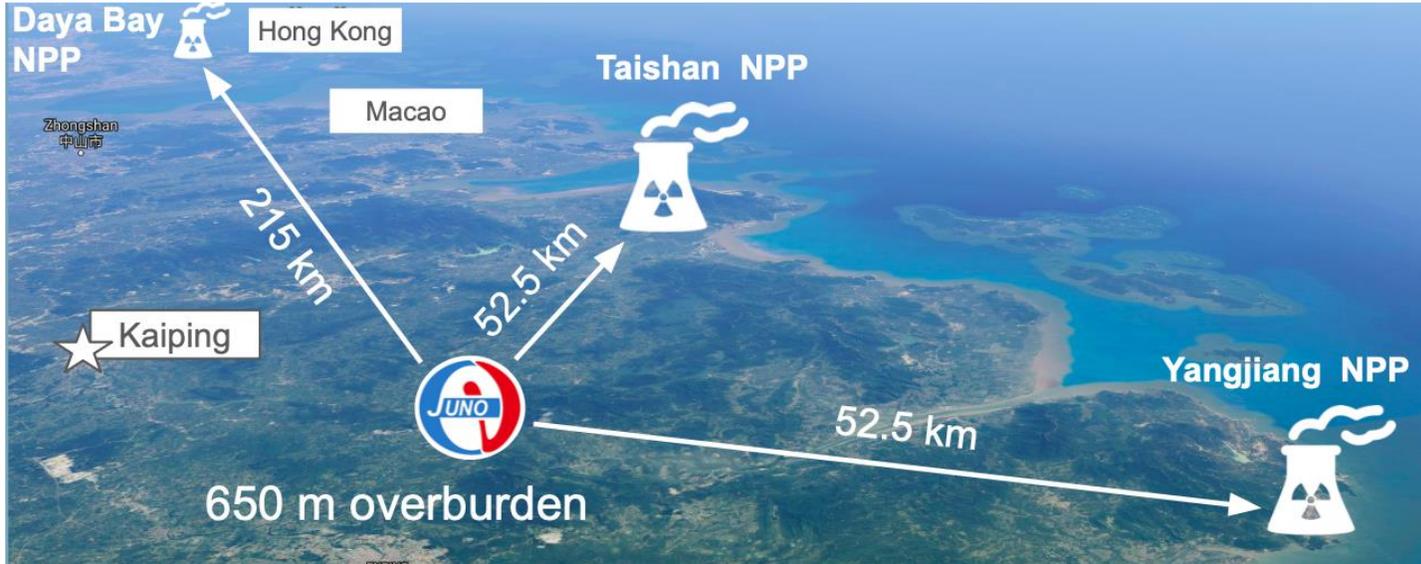
Nova: neutrini dal Fermilab ad Ash River (810 km). Ideale per la gerarchia di massa

Il primo fit combinato “stile LHC” (Febbraio 2024)

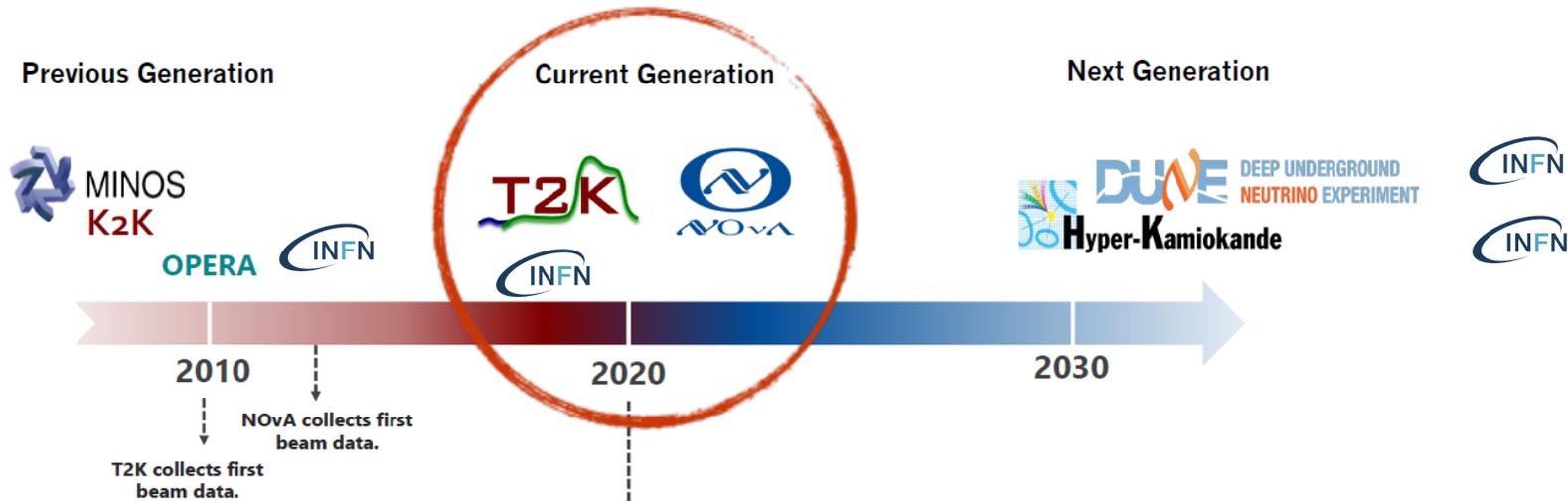


- Mass Ordering preference remains inconclusive.
 - Small preference for the Inverted Ordering** in the joint fit whereas individual experiments prefer Normal Ordering.
 - Reverts to a weak preference for Normal ordering on adding simultaneous constraint on $|\Delta m_{32}^2|$ and $\sin^2 2\theta_{13}$ from Daya Bay.
- $\delta_{CP} = \pi/2$ lies outside 3-sigma credible interval** for both mass ordering.
- Normal ordering permits a wide range of permissible δ_{CP} , while **CP conserving values for the Inverted Ordering fall outside the 3-sigma range.**

Verso la risoluzione del puzzle della gerarchia di massa: JUNO



Gli esperimenti long-baseline di nuova generazione

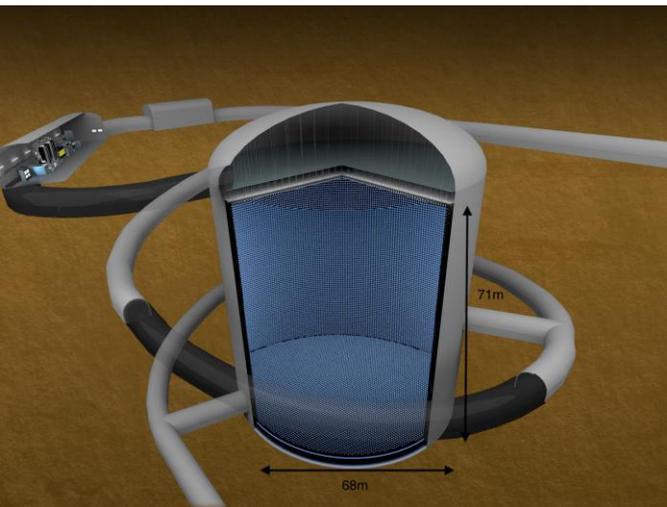


Sono progetti globali di durata multi-decennale con ampie collaborazioni internazionali. Uno standard insolito per la fisica del neutrino ma comune nella fisica dei collider.

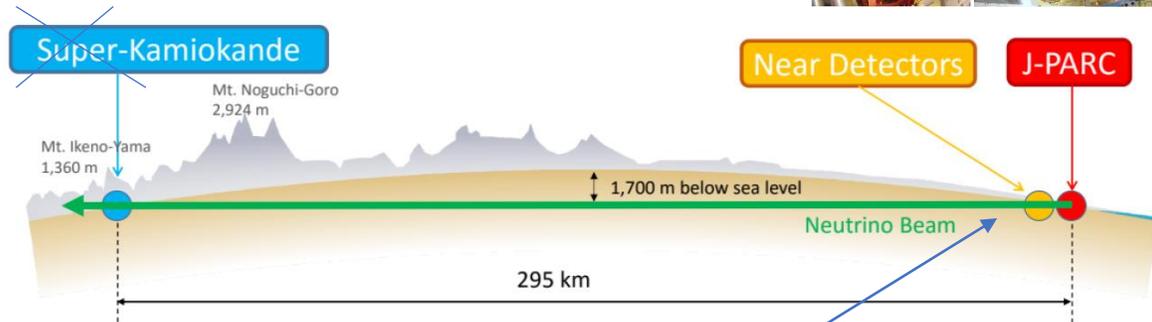
Obiettivi generali:

- Stabilire in modo certo la violazione di CP nel settore leptonic
- Determinare la gerarchia di massa dei neutrino e la massimalità del mixing 2-3
- Effettuare misure di precision su tutti gli angoli di mixing e la fase di Dirac a livello di $5-10^\circ$
- Studiare sorgenti astrofisiche come i neutrini da supernova, neutrino solari e atmosferici
- Investigare deviazioni dal Modello Standard dovuti a neutrino sterili, decadimento del protone, candidati dark matter (boosted dark matter di origine cosmica o dark sector prodotto dal fascio di neutrino)

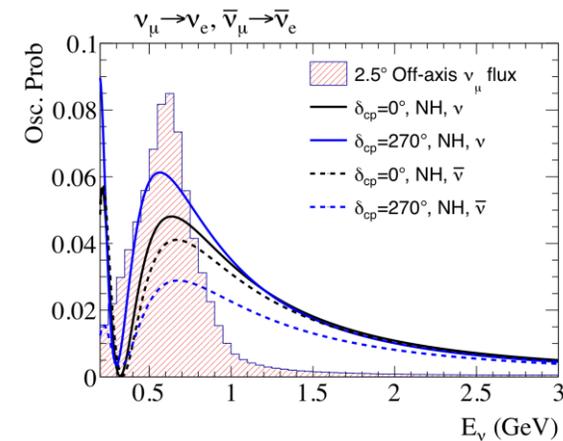
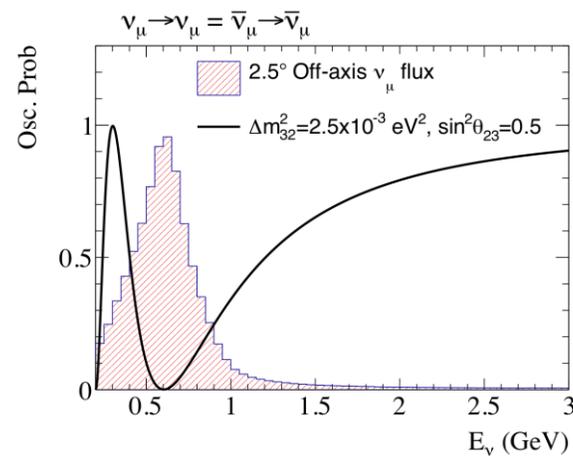
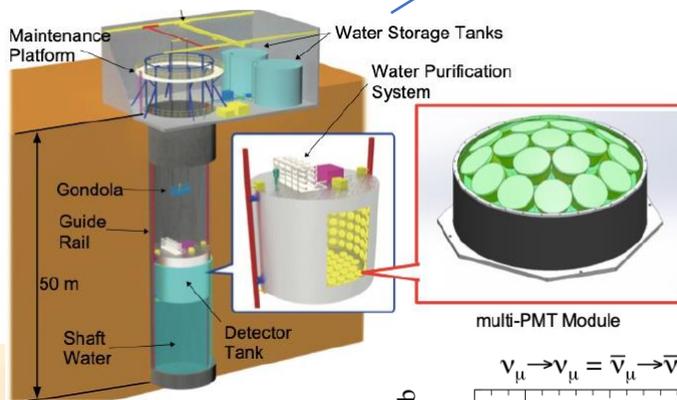
HyperKamiokande

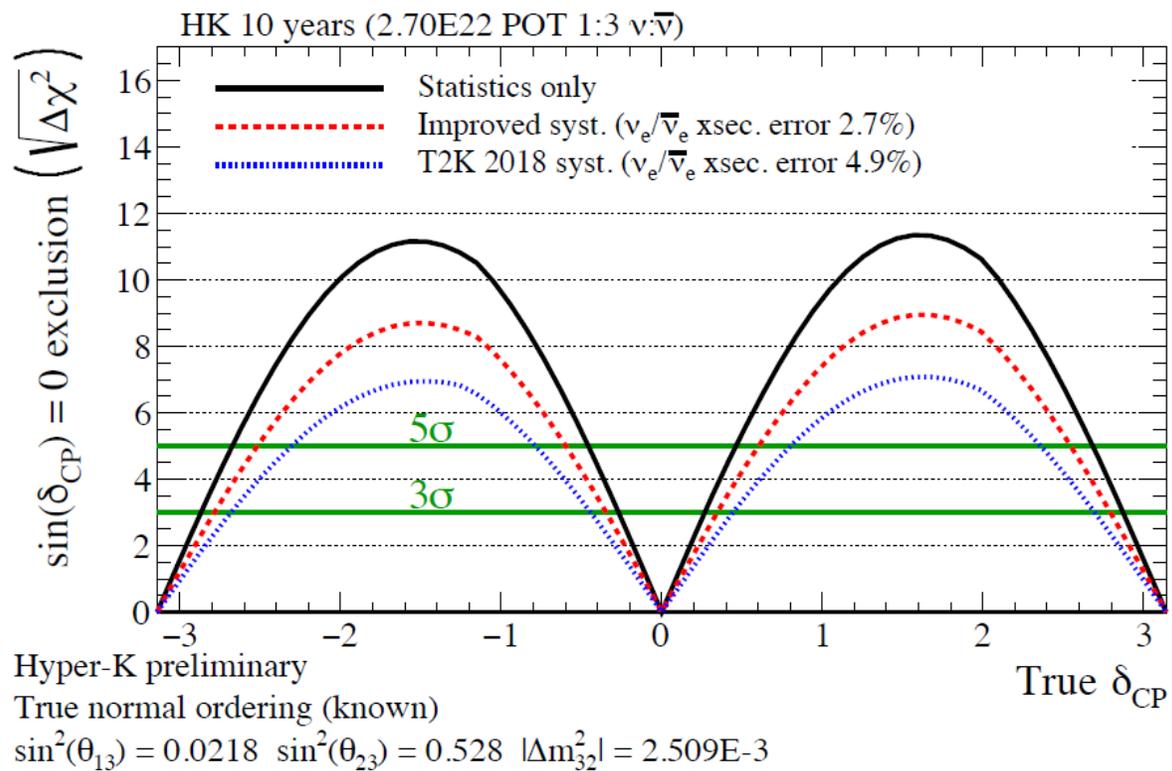
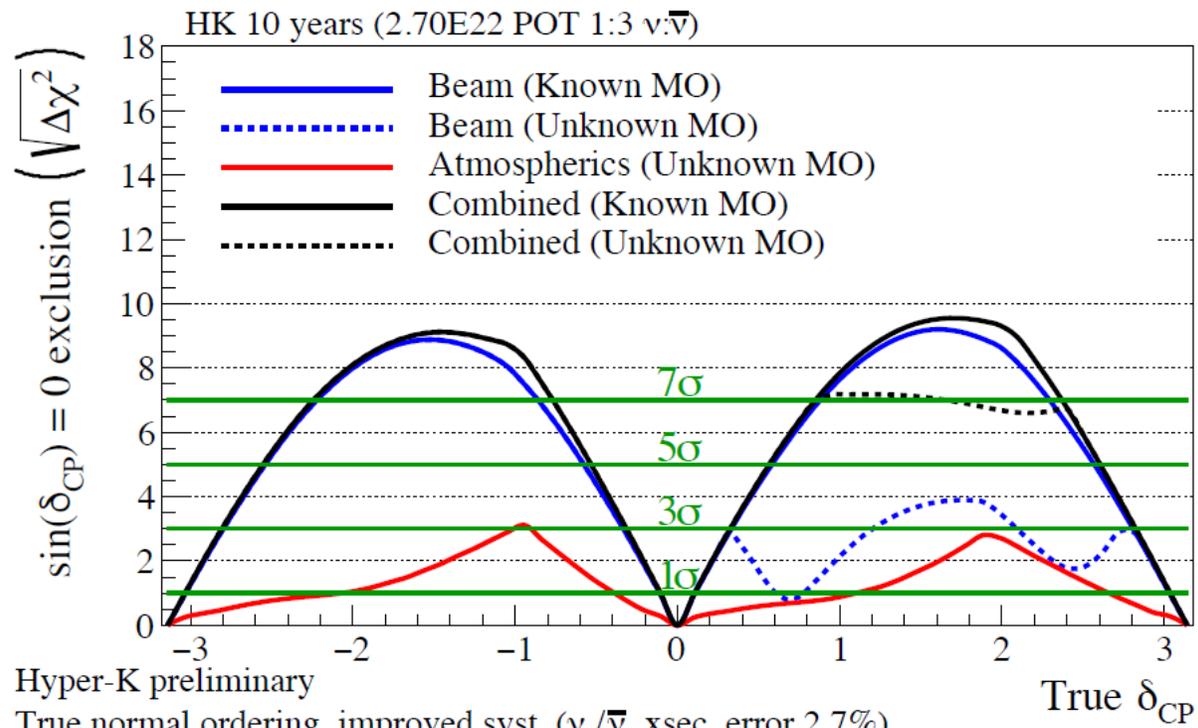


Hyper!!



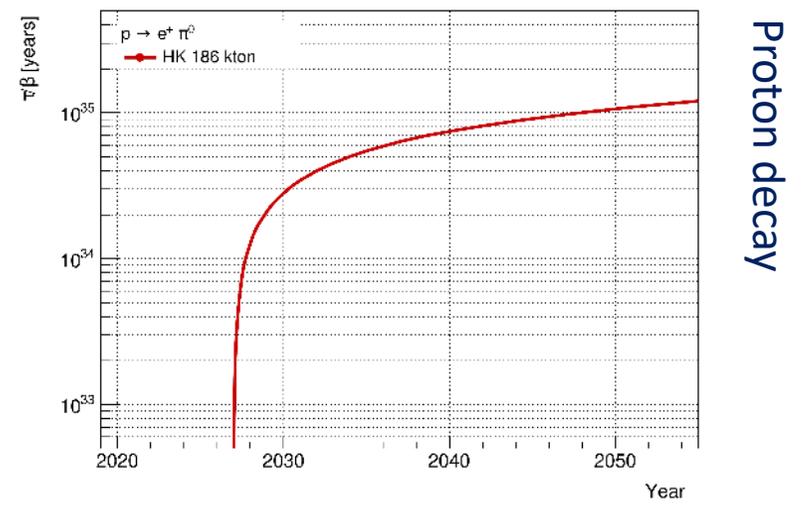
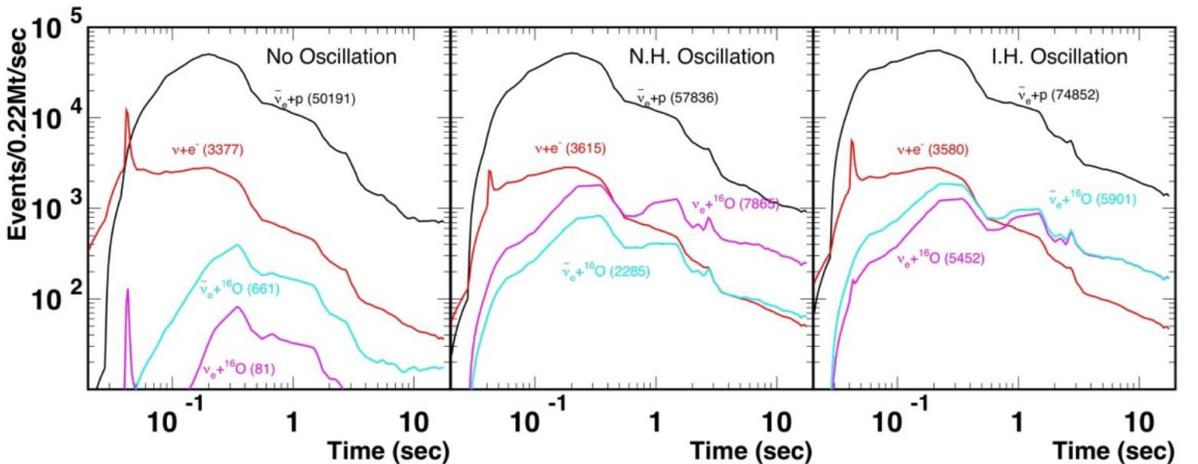
Intermediate detector





supernova burst

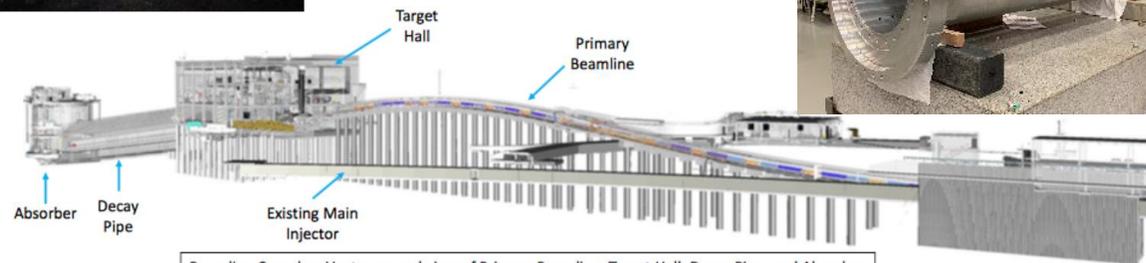
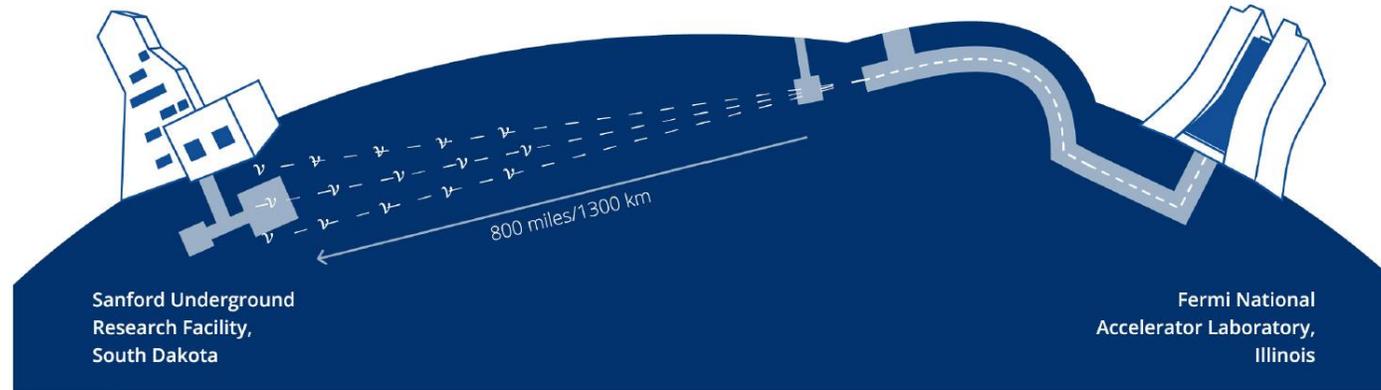
J. Wilson, Talk at Neutrino2022



La Long Baseline Neutrino Facility e SURF

A differenza di HyperK, DUNE utilizza due nuove facilities pensate per sostenere il programma di fisica delle particelle americano per i prossimi decenni: un fascio broad band da 1.2 → 2.4 MW power e il laboratorio SURF in South Dakota. E', perciò, il progetto flagship del Fermilab e della fisica underground USA.

L'INFN è fortemente coinvolta sia per gli stretti legami col Fermilab sia perché la tecnologia del Far Detector è basata su una tecnologia INFN: le TPC ad Argon Liquido proposta da C. Rubbia e sviluppata da ICARUS.



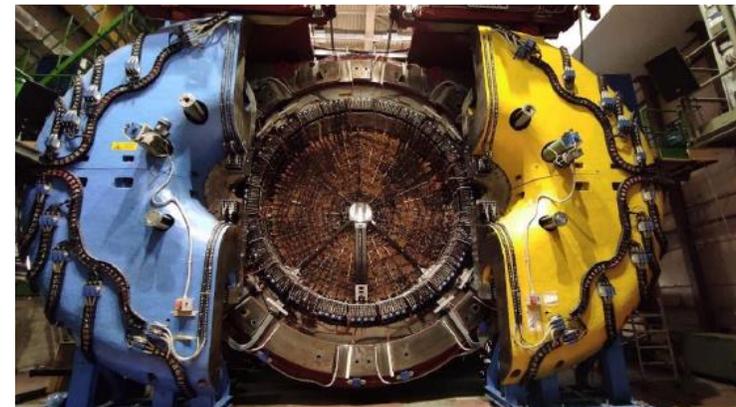
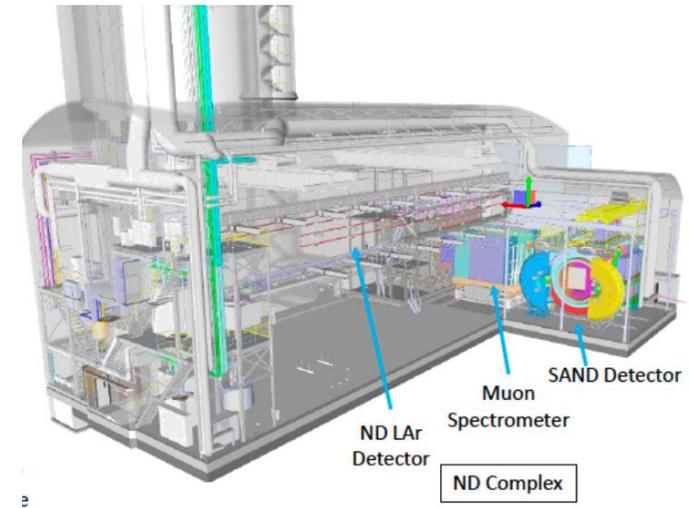
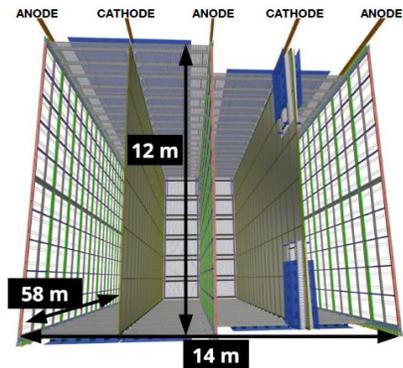
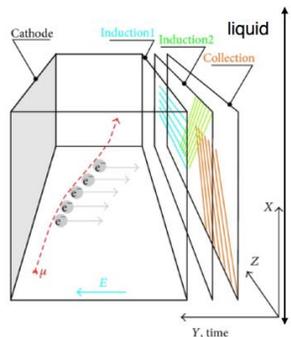
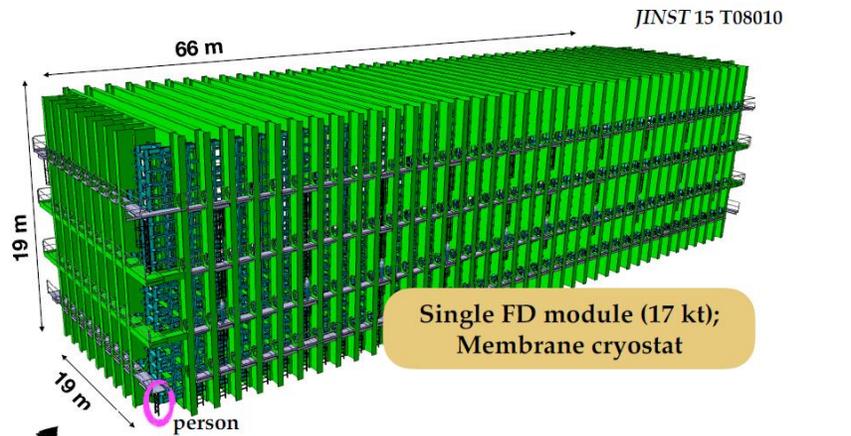
Scavi completati nel Feb 2024

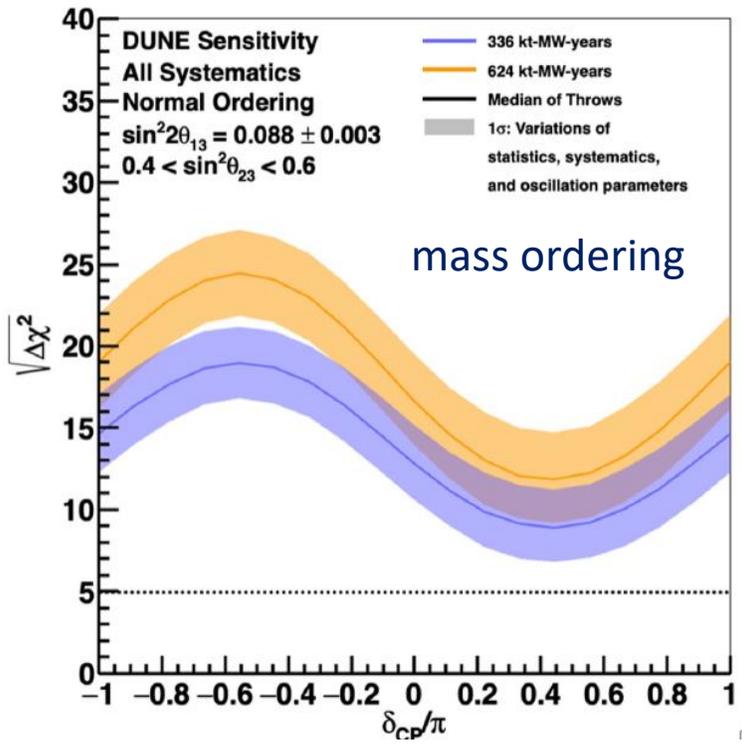
DUNE in a nutshell

Massa: il Far Detector di DUNE è composto da 4 moduli di liquid argon per una **massa fiduciale totale di 40 kton** (full mass **70 kton**).

Risoluzione: DUNE è basata sulla migliore tecnica di **particle imaging** disponibile alla scala del kton: la Liquid Argon TPC (C. Rubbia, 1977)

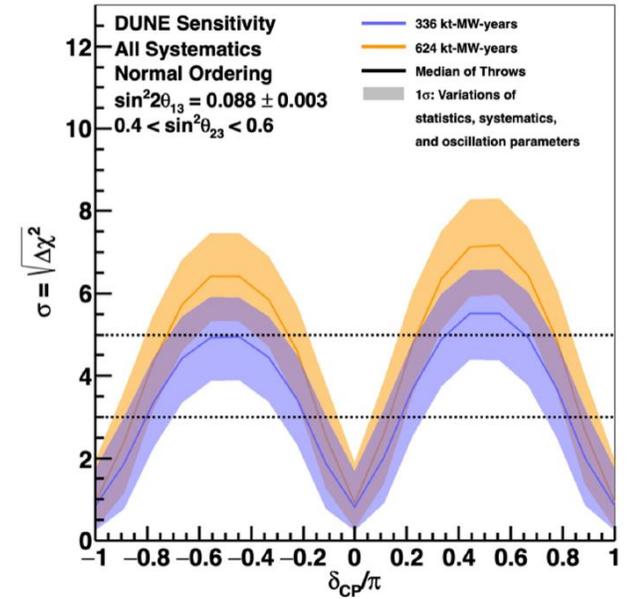
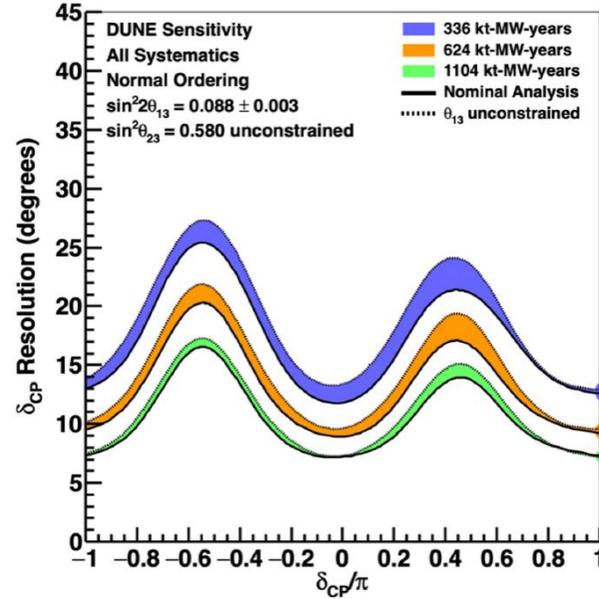
Precisione: DUNE utilizza un **near detector complex** per la caratterizzazione del fascio basato su un sistema mobile (NDLAr, TMS/NDGar) + un rivelatore on-axis (SAND+GRAIN) detector.





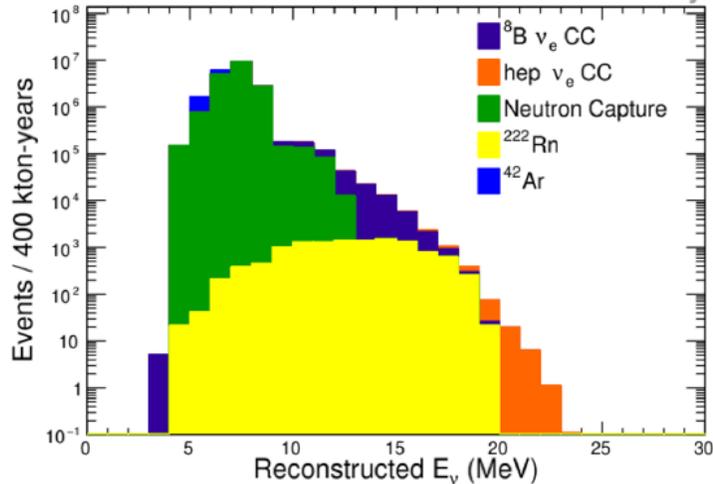
- 5σ discovery potential for CP violation over $>50\%$ of δ_{CP} values
- $7\text{-}16^\circ$ resolution to δ_{CP} , *with external input for only solar parameters.*

M. Bishai, Talk at Neutrino2022

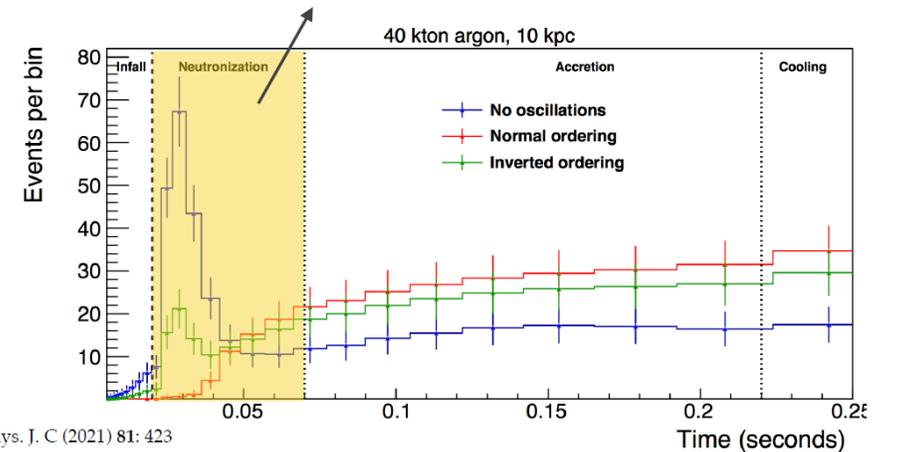
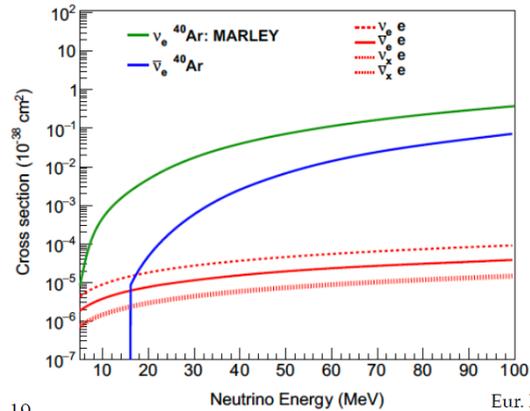


solar neutrinos

DUNE Preliminary

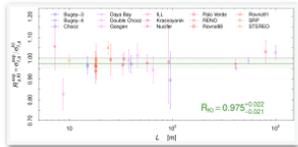


supernova neutrinos

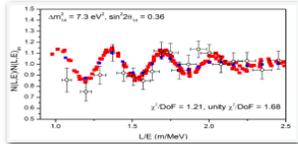


Un salto di qualità

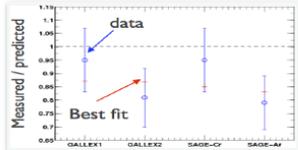
Affinchè questi progetti abbiano successo, la fisica del neutrino deve liberarsi di una sua debolezza storica: **la conoscenza delle sorgenti e dei processi SM deve essere portata agli standard della fisica dei collider.** Abbiamo già pagato a sufficienza lo scotto per questo tipo di «dimenticanze»



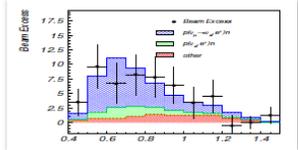
reactor flux anomaly
resolved with new input data
to flux calculation



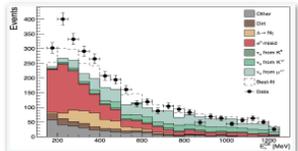
reactor spectra
is there really an anomaly?



gallium anomaly
unresolved, recently reinforced



LSND
unresolved

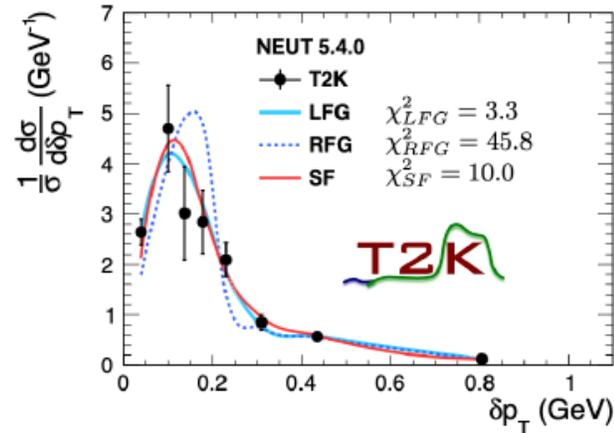


MiniBooNE
unresolved

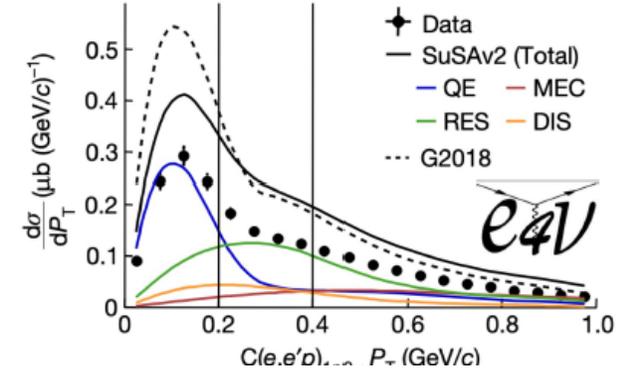


No model is able to describe global neutrino scattering measurements

arXiv:1810.06043
Phys. Rev. D 98, 032003 (2018)

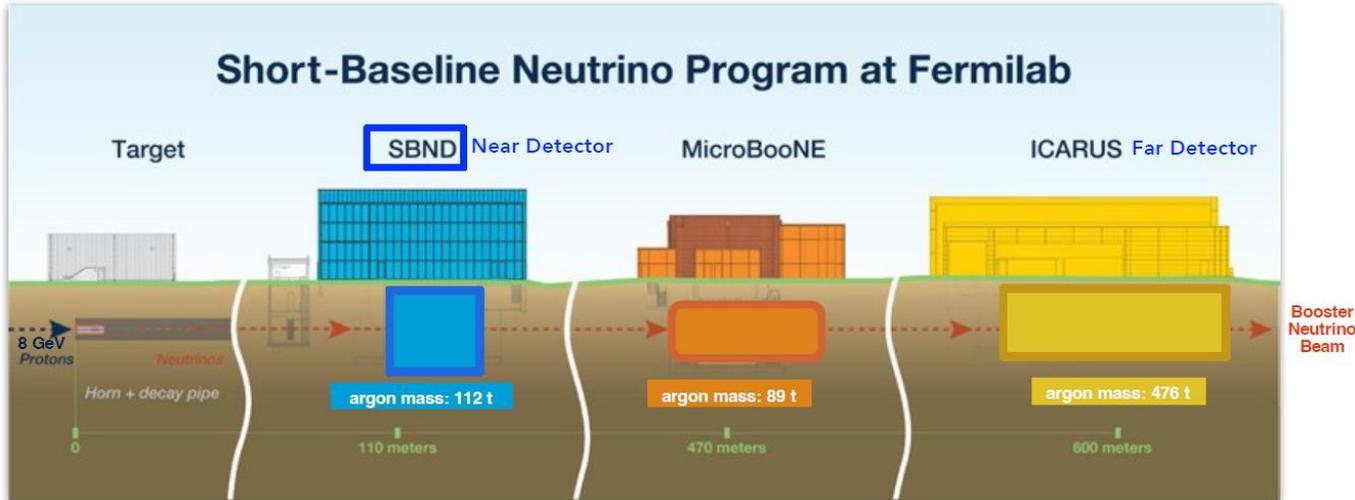


Nature 599, p. 565-570 (2021)

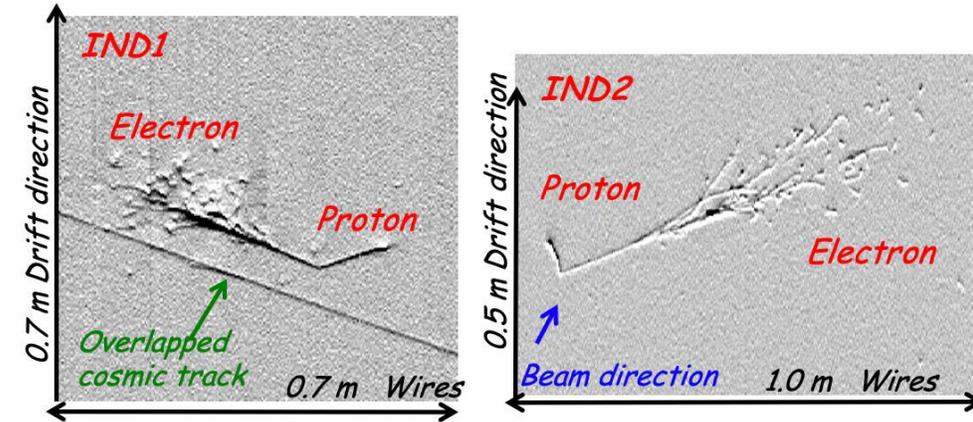


Due casi esemplari: (I) ICARUS e il programma SBN al Fermilab

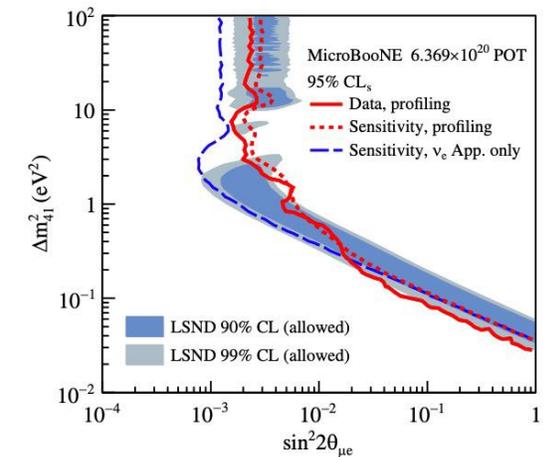
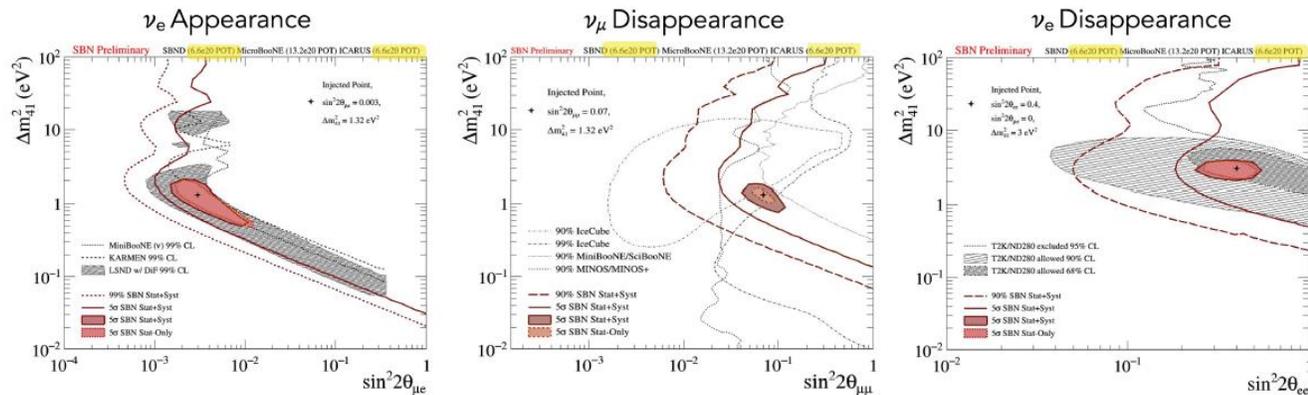
Grazie alla tecnologia delle TPC ad argon liquido, il Fermilab ha realizzato un programma completo di verifica delle anomalie di LSND e MiniBoone e questo sforzo sta dando i suoi frutti



ICARUS al Fermilab 2022-in corso



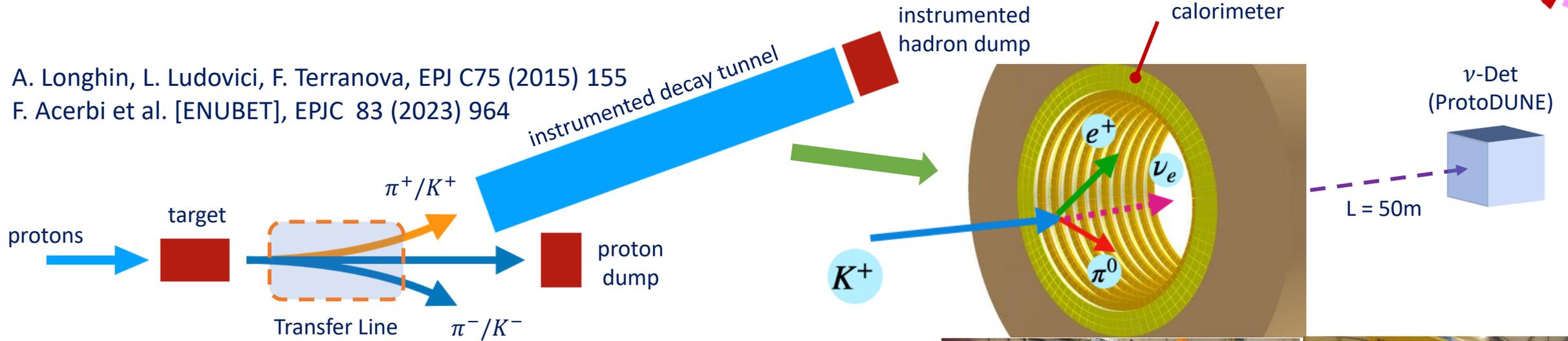
MicroBooNE 2016-23



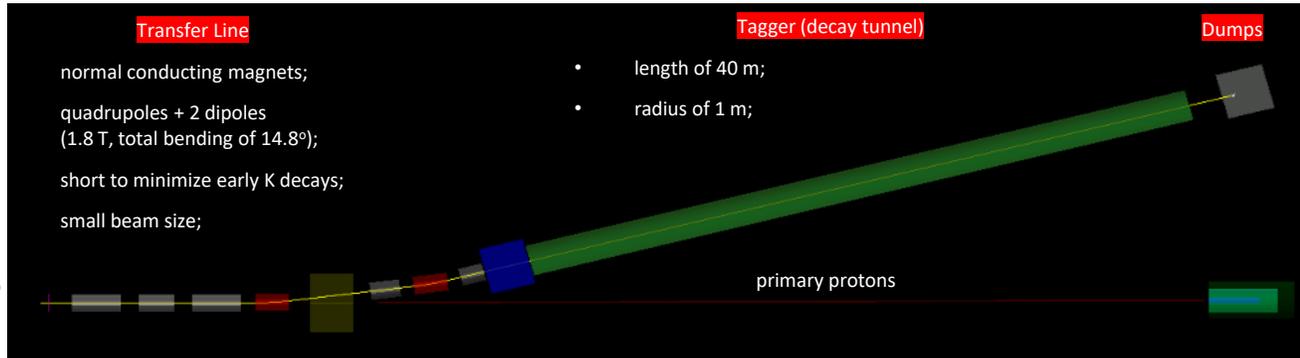
Due casi esemplari: (II) NP06/ENUBET e i fasci monitorati

A. Longhin, L. Ludovici, F. Terranova, EPJ C75 (2015) 155

F. Acerbi et al. [ENUBET], EPJC 83 (2023) 964



CERN SPS



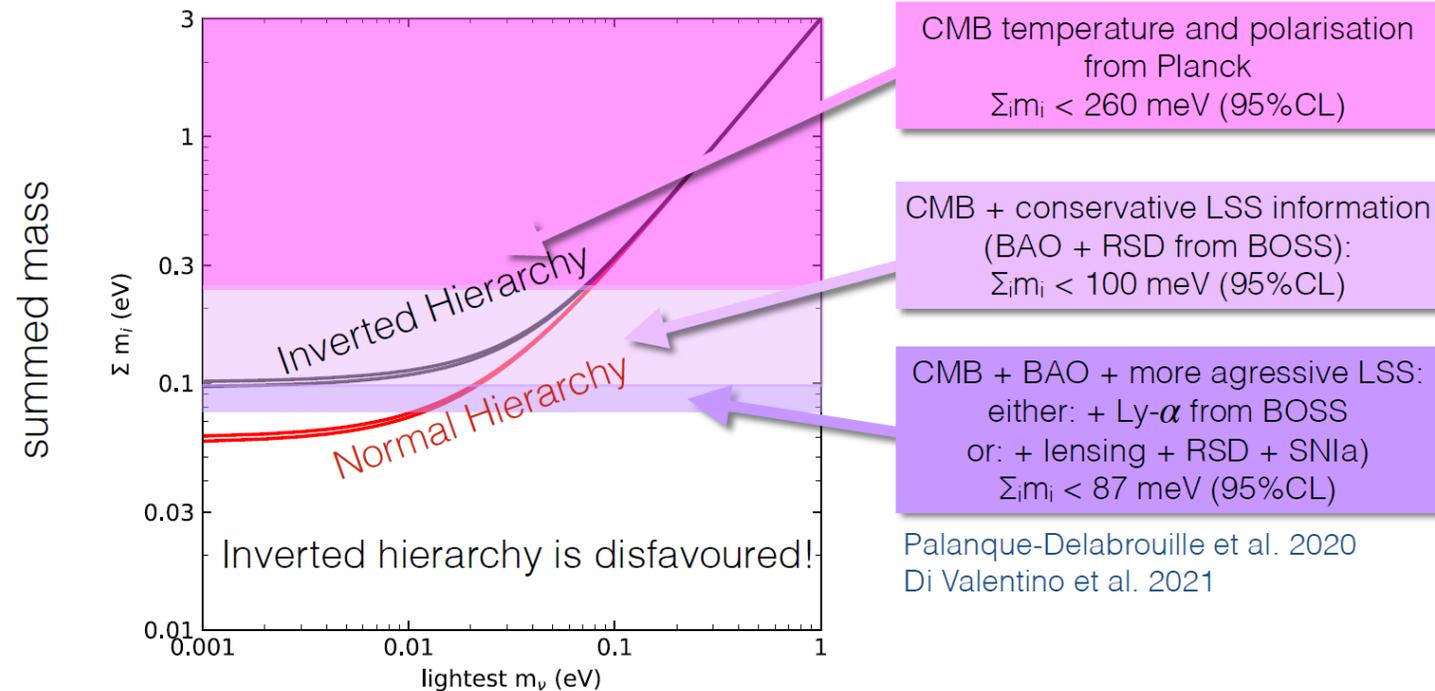
<https://www.pd.infn.it/eng/enubet/>



L'anello mancante: "the lightest mass eigenstate"

Le oscillazioni ricostruiscono il settore di Yukawa eccetto che per l'autostato più leggero. Ma la cosmologia osservativa dipende dalla somma di tutti gli autostati $m_1+m_2+m_3$. Per la prima volta, i fisici del neutrino hanno necessità di credere nel Λ CDM. O di testarlo....

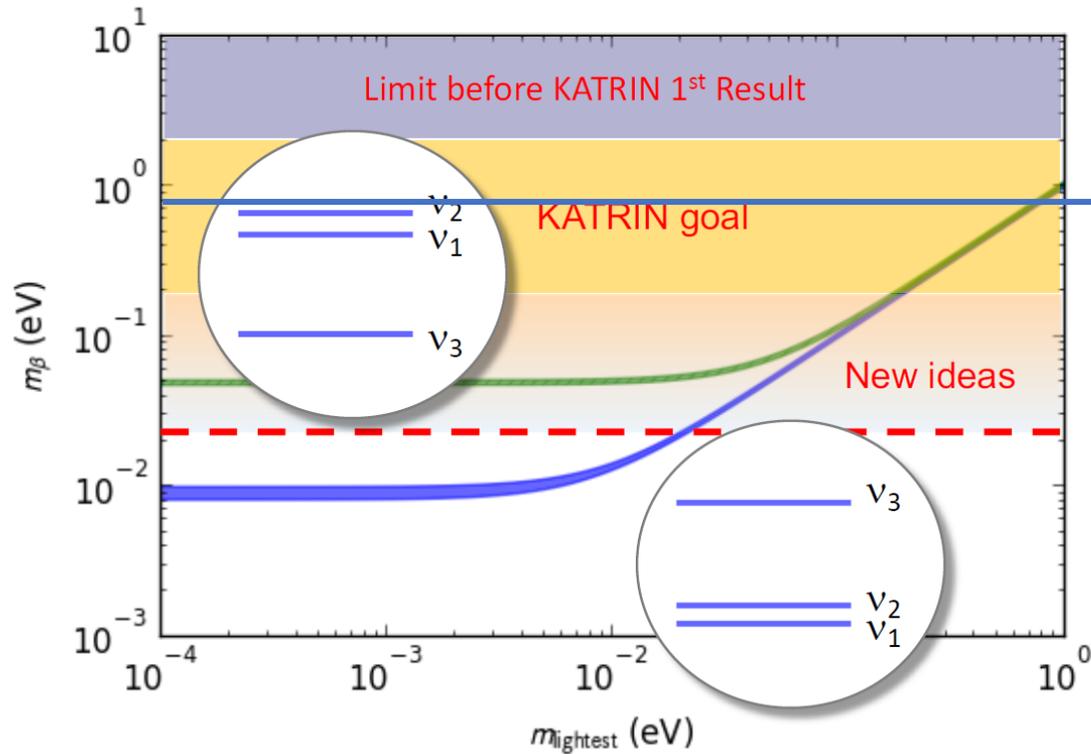
95%CL upper bounds on $\Sigma_i m_i$ for 7 parameters



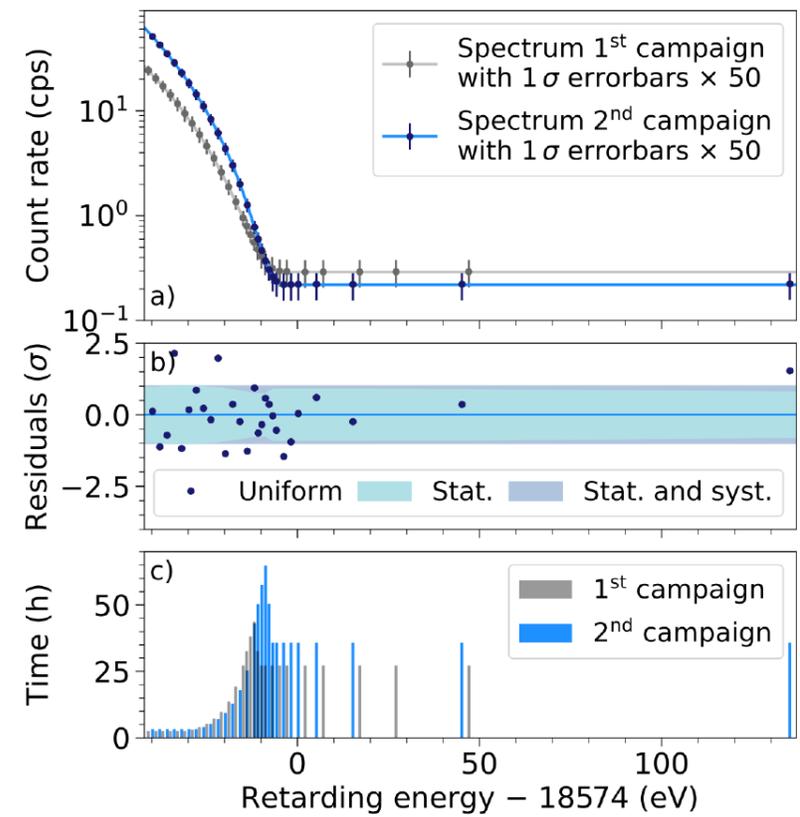
Ecco dove, secondo me, si nascondono le sorprese: nei prossimi 10-20 anni, le nostre misure impatteranno direttamente sulle osservabili del Λ CDM e la cosmologia osservativa dovrà confrontarsi con le misure di laboratorio. Visto che il Modello Standard e il Λ CDM sono disconnessi – eccetto per un'inconsistenza di 120 ordini di grandezza sulla costante cosmologica ☺ - non ci aspettiamo che tutto vada liscio

Misure di massa assoluta del neutrino

$$m_{\nu/\beta}^2 = \sum_i |U_{ei}|^2 \cdot m_i^2$$



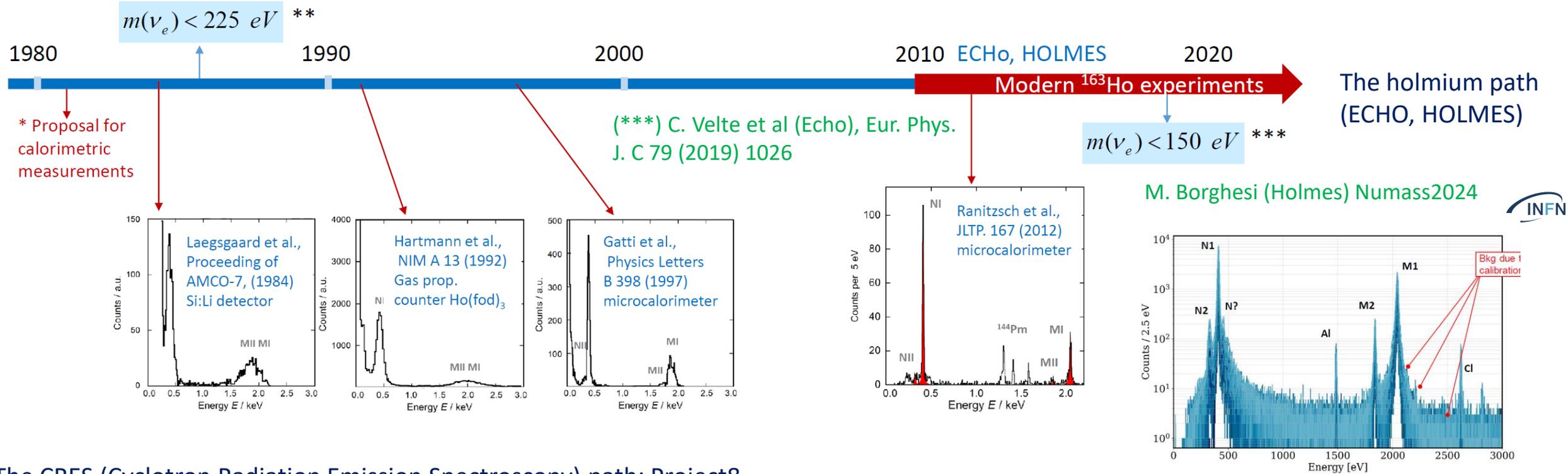
We are here
(800meV)
Final KATRIN
sensitivity
200 meV



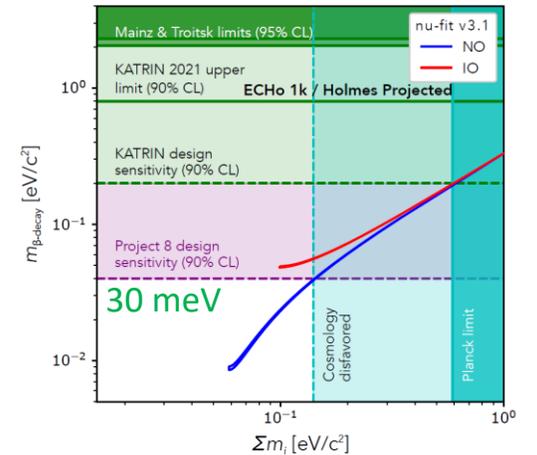
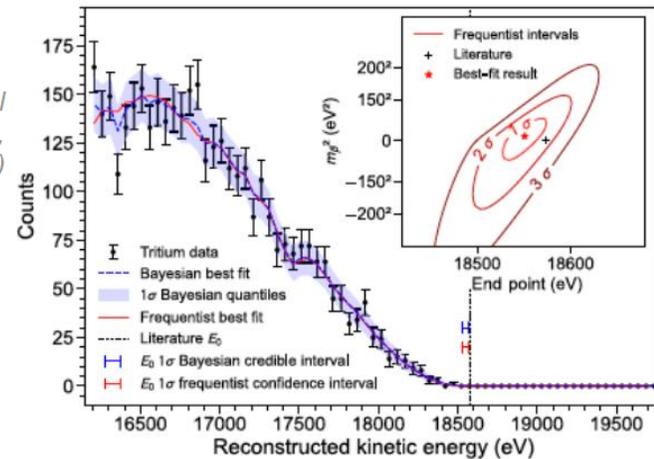
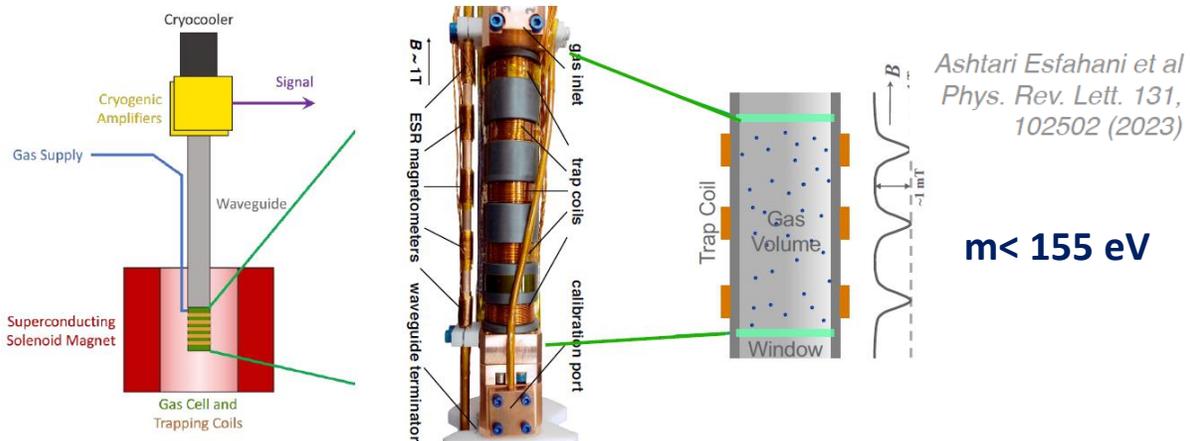
Nat. Phys. 18, 160–166 (2022)



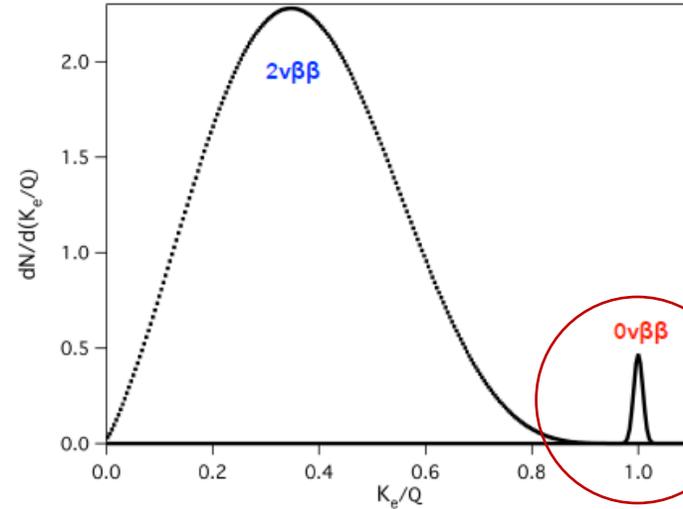
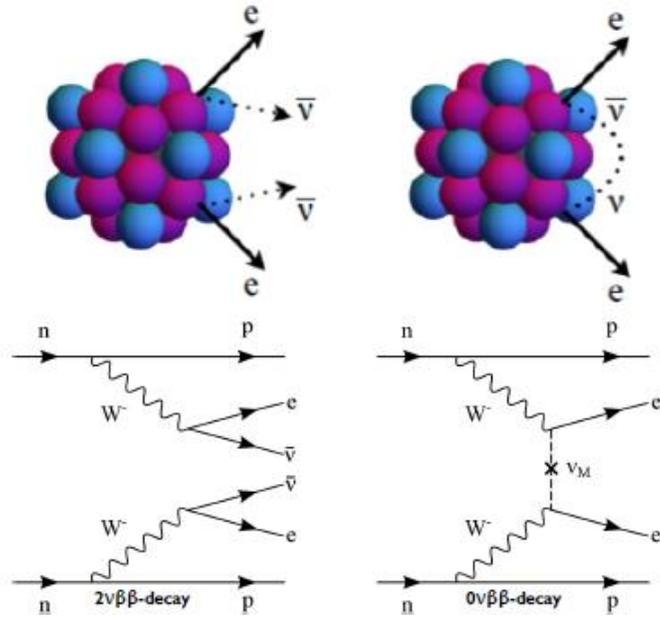
Masse assolute con i decadimenti beta



The CRES (Cyclotron Radiation Emission Spectroscopy) path: Project8



Neutrino-less double beta decay (NLDBD)



$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 |\langle m_{\beta\beta} \rangle|^2$$

Nuclear matrix element

Effective Majorana neutrino mass:
(exact form depends on the lepton
flavor violating mechanism!)

$$m_{\beta\beta} \equiv \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i$$

E' praticamente l'unica tecnica disponibile per stabilire la natura di Dirac/Majorana dei neutrini ($\nu = \bar{\nu}$)

Un'osservazione sperimentale del neutrino-less double beta decay

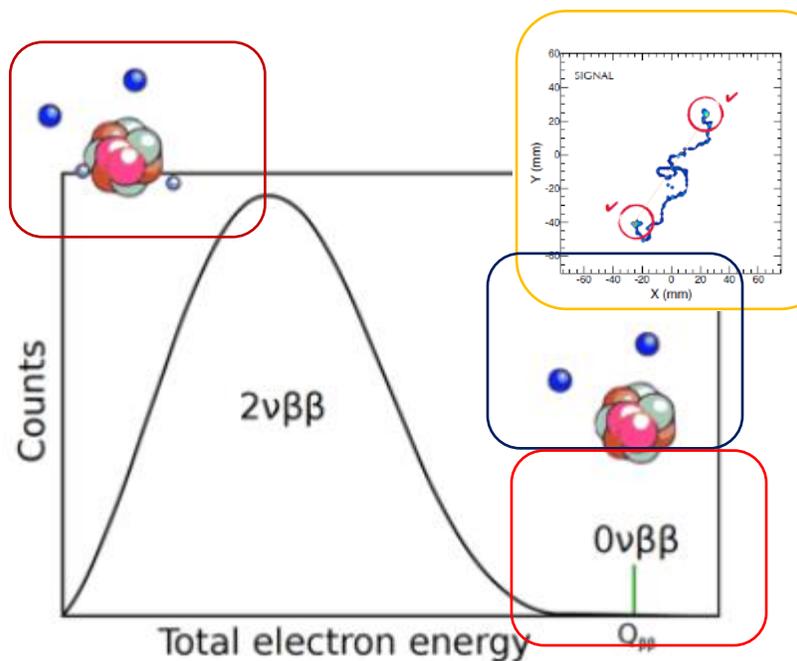
Dimostrerebbe la **violazione del numero leptonic** in fisica delle particelle

Chiarirebbe il **meccanismo di generazione delle masse** oltre il meccanismo di Higgs e, dunque, la piccolezza delle masse dei neutrini

E' essenziale per la leptogenesi e per la **matter dominance** nell'universo attuale

La segnatura sperimentale del doppio-beta è molto semplice: due elettroni la cui somma dell'energia (Q-value) è nota a priori con grande precisione (Penning traps). "Intrinsic" background: $(A,Z) \rightarrow (A,Z+2) 2e^- 2\nu$

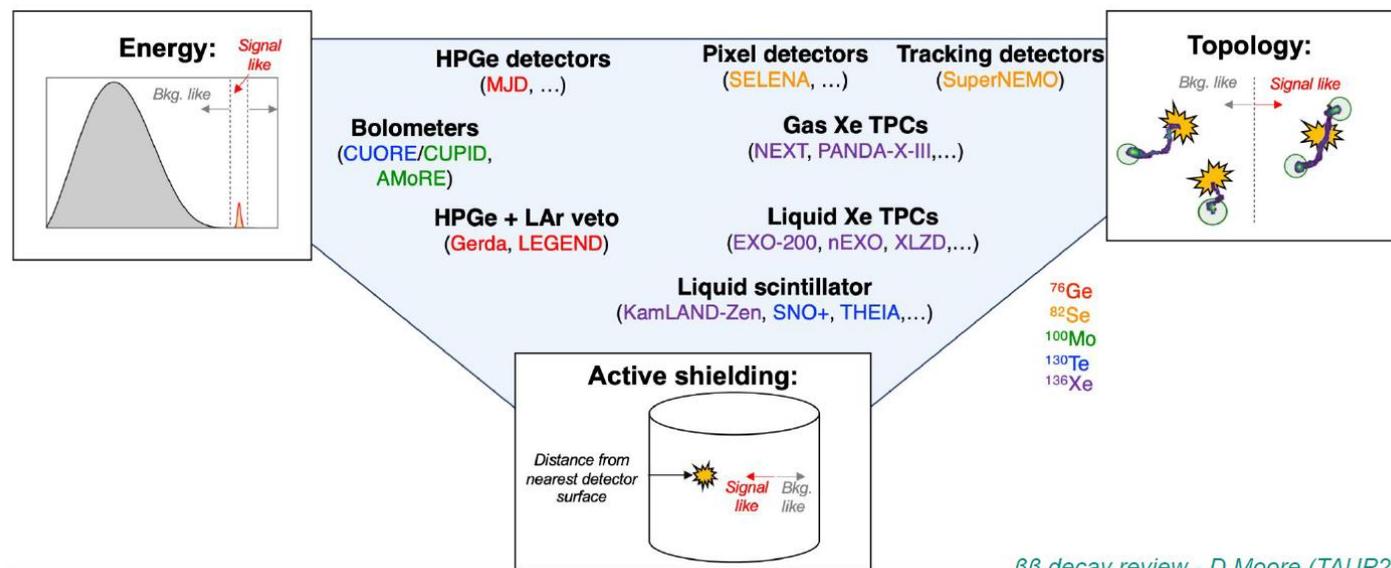
L'esperimento perfetto



Traccia gli elettroni uscenti per separare α , β , γ from $\beta\beta$

Scegli il rivelatore con la migliore risoluzione energetica ($<1\%$ FWHM) per ridurre il 2ν background

L'esperimento reale

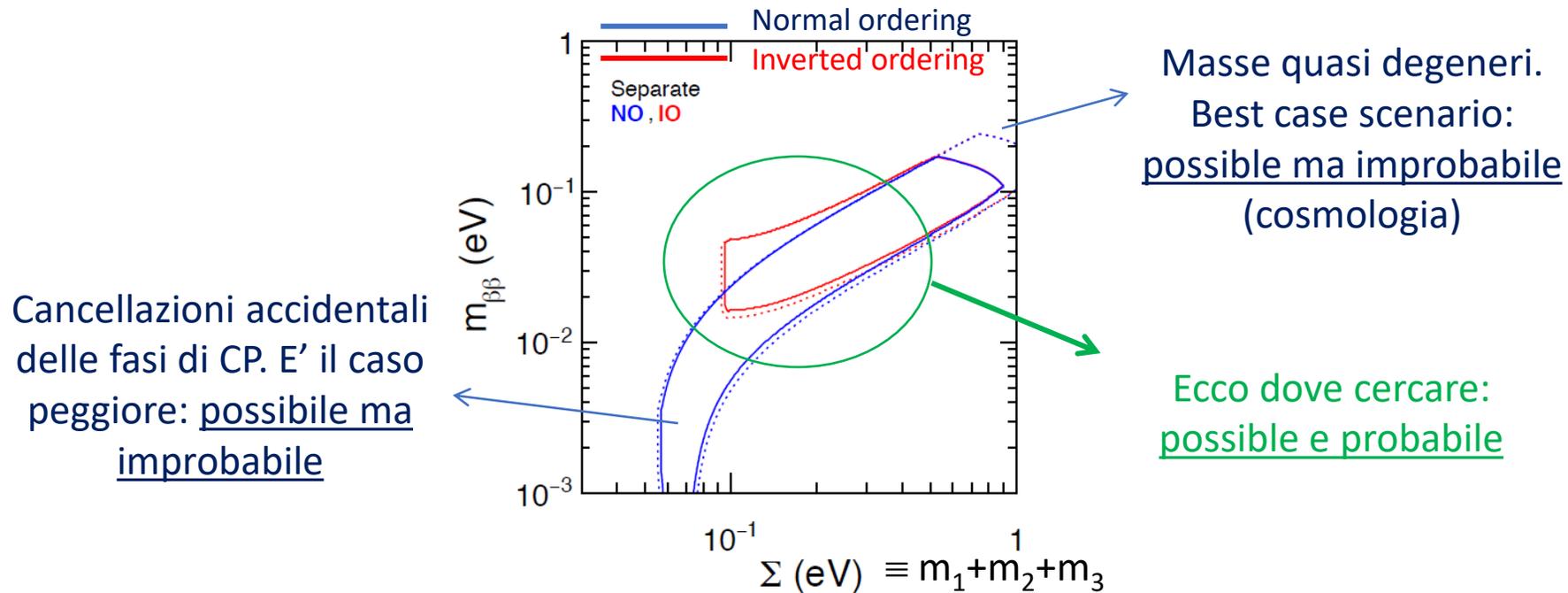


[ββ decay review - D. Moore \(TAUP2023\)](#)

Scegli l'isotopo col Q-value più alto e con grande abbondanza isotopica

Oscillazioni, cosmologia e neutrini di Majorana

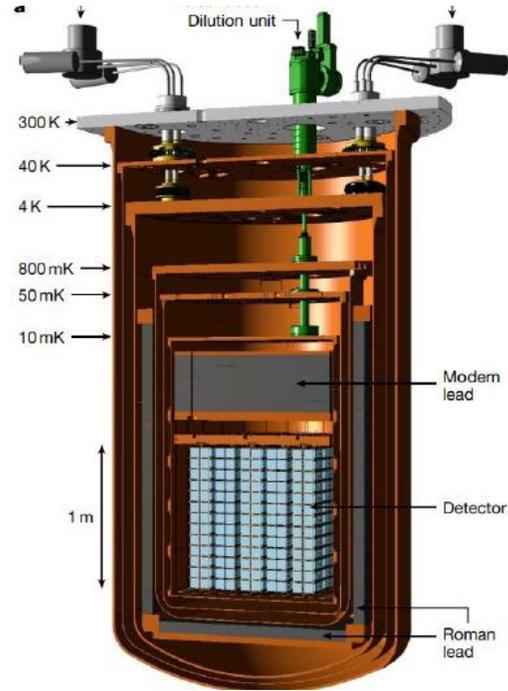
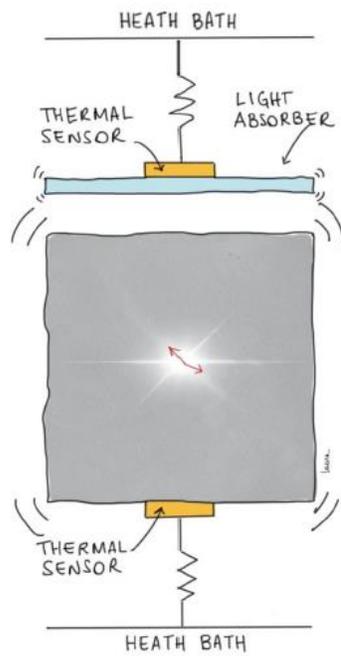
Dal 2012, $m_{\beta\beta}$ è ben costretto dalle oscillazioni e dalla cosmologia osservativa.
Sappiamo finalmente dove dobbiamo guardare



Stiamo sviluppando tecnologie che testano vite-medie al livello di 10^{26} y e che sono scalabili a livello di 10^{28} y.

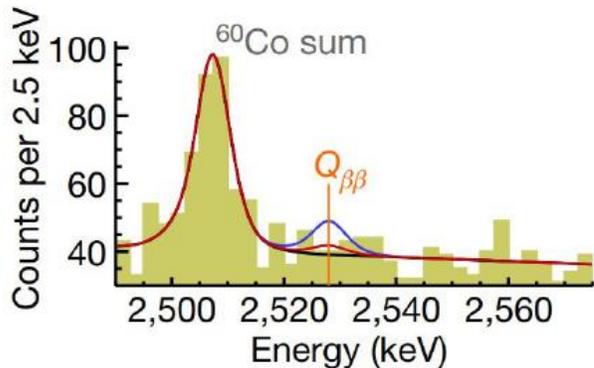
L'INFN e i Laboratori del Gran Sasso hanno un ruolo centrale e hanno scelto come tecnica di elezione i rivelatori ad alta risoluzione energetica

CUORE → CUPID



CUORE, Nature 604 (2022)

$$T_{1/2}^{0\nu} > 2.2 \cdot 10^{25} \text{ yr}$$

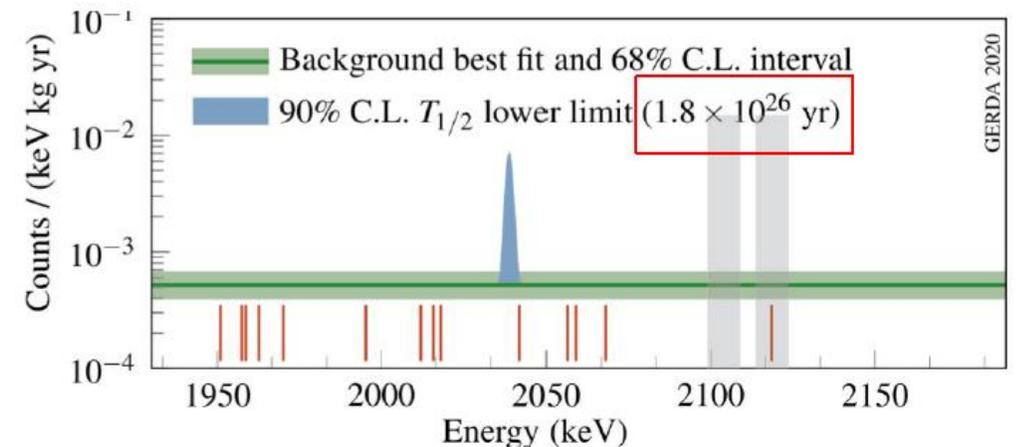


GERDA → LEGEND

GERDA/MAJORANA (40 kg), lowest background

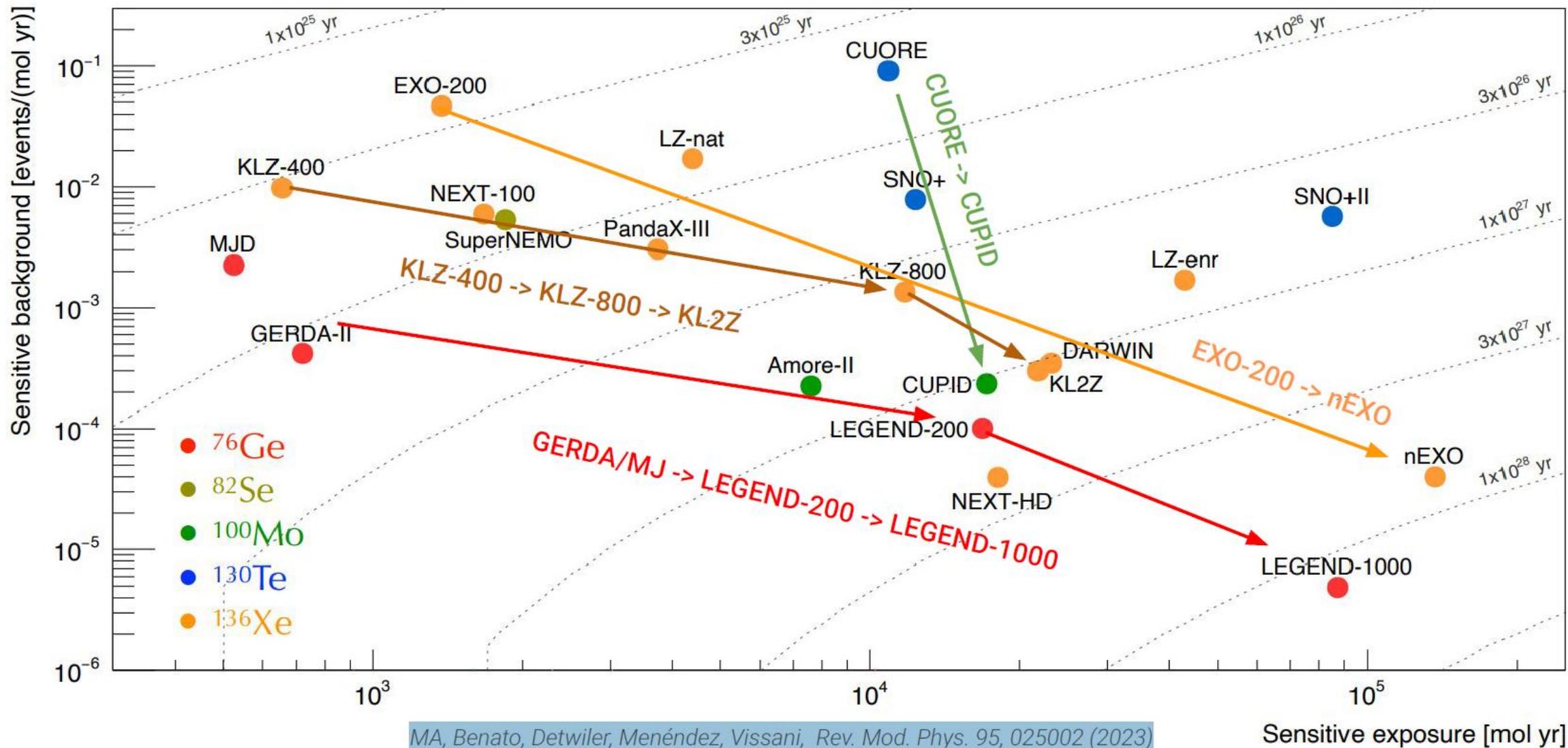
LEGEND-200 (200 kg) in data taking since 2023, good performance and background released at TAUP

LEGEND-1000 (1 t) preparing for DOE reviews this and next year, baseline design at LNGS



GERDA PRL 125 (2020)

Discovery Sensitivities



Conclusioni

Cosa possiamo aspettarci nel lungo termine dalla fisica del neutrino?

Una descrizione completa e precisa del settore di Yukawa leptonic del Modello Standard

Fa eccezione l'autostato più leggero di massa che potrà essere accessibile solo a mezzo di avanzamenti sostanziali nelle misure assolute di massa o grazie alla scoperta del doppio beta

Un potente strumento di caratterizzazione delle sorgenti astronomiche

Un tema che non ho coperto in questa review (v. talk di Fiorenza) dove l'INFN ha un ruolo chiave grazie alla realizzazione di **KM3NET**

Un link diretto tra il Modello Standard e il Λ CDM della cosmologia

