

GdL Fisica del Neutrino

Alcune slides introduttive per:

- ✓ Richiamare quali sono i temi cruciali del nostro settore cercando di identificare le nuove opportunità e le criticità sottovalutate nelle roadmap internazionali
- ✓ Mostrare i temi e le idee nuove su cui si è concentrato l'interesse dei partecipanti al nostro Working Group.
 - ✓ Due Satellite Meetings
 - ✓ Misure di fisica nucleare per il doppio beta
 - ✓ Nuove proposte per la rivelazione di relic e Mossbauer neutrinos
 - ✓ Work in progress: gerarchia di massa, fisica doppio beta in gerarchia diretta...
- ✓ Fornire spunti per la discussione di oggi e idee su come proseguire l'attività

Un buon inizio

“Numeri” del gruppo ad oggi:

~90 iscritti su <https://lists.infn.it/sympa/info/whatnextnu>

~40 messaggi ricevuti su whatnextnu@lists.infn.it + molti altri individuali

~20 documenti condivisi e discussi su whatnextnu@lists.infn.it

2 meeting virtuali tematici (con ~12 e ~20 partecipanti in remoto x 2h-3h)

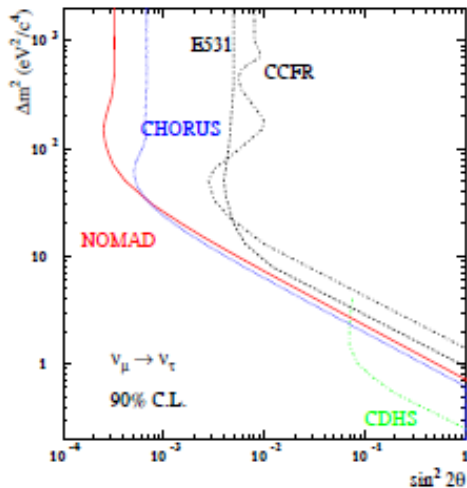
~120 registrati qui all'Angelicum su “Neutrini”

Molti colleghi hanno espresso interesse e curiosità per questa iniziativa. La modalità di lavoro basata su **discussioni informali** seguite da **Satellite Meetings** su argomenti specifici ci sembra stia portando a risultati interessanti.

Davvero un buon inizio! Grazie a tutti coloro che ci hanno dato e ci daranno una mano.
Confidiamo nel contributo di O(100) presenti per la discussione che seguirà!

Quindici anni (1998-2013) di fisica... in una slide

Quindici anni fa, la fisica del neutrino era un settore di ricerca che non aveva un paradigma di riferimento. Si cercava “nuova fisica” (oscillazioni di neutrino, neutrini massivi) a tutto campo e progettavamo esperimenti per esplorare le regioni dei parametri “più verosimili” sulla base di prior teorici (spesso risultati fuorvianti)



Gallex, GNO, CHOOZ,
Superkamiokande Macro,
Kamland, SNO, Borexino,
K2K, T2K, Icarus,
OPERA, Minos, Daya Bay,
Double Chooz, Reno...

Parameter	best-fit ($\pm 1\sigma$)
Δm_{21}^2 [10^{-5} eV ²]	$7.54^{+0.26}_{-0.22}$
$ \Delta m^2 $ [10^{-3} eV ²]	$2.43^{+0.06}_{-0.10}$ ($2.42^{+0.07}_{-0.11}$)
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.307^{+0.018}_{-0.016}$
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.386^{+0.024}_{-0.021}$ ($0.392^{+0.039}_{-0.022}$)
$\sin^2 \theta_{13}$ [173]	0.0241 ± 0.0025 ($0.0244^{+0.0023}_{-0.0025}$)

PDG 2013

Dal 1998 al 2013 questo settore ha acquisito un paradigma di riferimento semplice, coerente con il resto dello SM e in grado di orientare la progettazione di nuovi esperimenti (compresi quelli per identificare nuova fisica oltre il paradigma standard)

Il “three family neutrino oscillation paradigm”

I neutrini sono fermioni elementari dotati di masse a riposo non nulle, non degeneri e molto più piccole rispetto a quelle degli altri fermioni carichi

Nessuno ha mai misurato le masse dei neutrini ma l'esistenza delle oscillazioni di neutrino dimostra che le differenze di massa sono tutte $\neq 0$

$$\Delta m_{12}^2 = m_2^2 - m_1^2$$

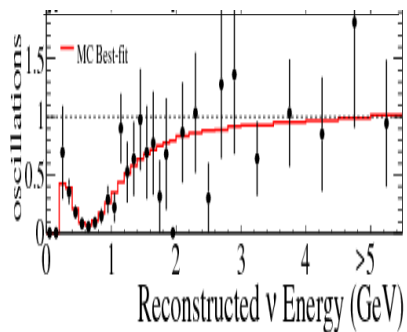
Scala dei “solari” (MeV)

$$\Delta m_{23}^2 \approx \Delta m_{13}^2 = m_3^2 - m_1^2$$

Scala degli “atmosferici” (GeV)

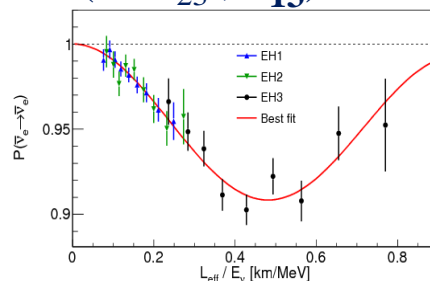
Gli angoli di mixing tra autostati di flavor (ν_e, ν_μ, ν_τ) e autostati di massa (ν_1, ν_2, ν_3) sono non nulli e molto più grandi rispetto a quelle dei quark (CKM)

$(\Delta m_{23}^2, \theta_{23})$ vacuum



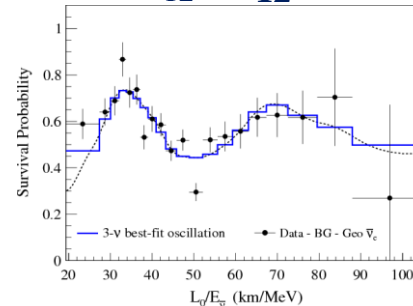
T2K

$(\Delta m_{23}^2, \theta_{13})$ vacuum



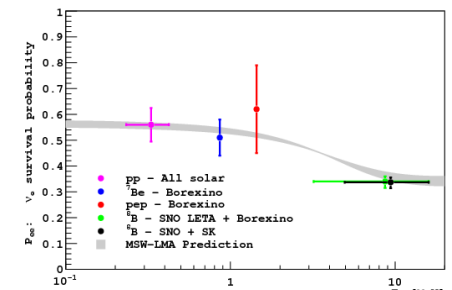
Daya Bay

$(\Delta m_{12}^2, \theta_{12})$ vacuum



KamLAND

$(\Delta m_{12}^2, \theta_{12})$ matter



Borexino 4

Una classifica **molto opinabile** ma che vale la pena di discutere...

Difficoltà sperimentale	Gerarchia di massa (*)	Ottante di θ_{23} (**)	Precisione parametri già noti	Violazione di CP	Neutrini di Majorana (Double β decay)	Massa assoluta dei ν	ν dal Big Bang	ν sterili (eV)
Alla nostra portata (<10y)	X	X	X (1%)					X
Molto impegnativo (10-20 y)			X (CKM-like)	X (CKM-like: fase di Dirac)	X [se gerarchia inversa]	X [se gerarchia inversa]		
Forse fuori portata (tempistiche ignote)				X (fasi di Majorana, se i ν sono di Majorana)	X [se gerarchia normale]	X [se gerarchia normale]	X	

Occhio ai colori ☺ (è la parte più opinabile...)



Importante per la fisica del neutrino e potenzialmente utile per comprendere l'origine del mixing fermionico



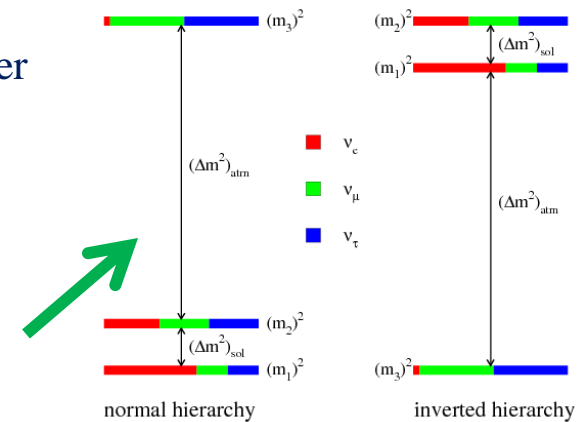
Importante per la fisica del neutrino e di grande impatto per altri settori (soprattutto cosmologia)



Impatto in ampi settori della fisica fondamentale perché fuori dal paradigma standard

(*) gli autostati che si mescolano maggiormente con il ν_e sono quelli più leggeri o quelli più pesanti?

(**) l'angolo θ_{23} è $> 0 < 45^\circ$




Criticità

Sulla carta la migliore situazione possibile (obiettivi chiari, possibilità di fisica oltre il Modello Standard etc.). Ma

Il paradigma standard offre predizioni qualitative: esperimento “facile” – “difficile” – “quasi impossibile”. Ma noi abbiamo bisogno di informazioni molto precise per costruire esperimenti impegnativi e costosi. **Come migliorare queste predizioni e ridurre i rischi?**

Per gli item classificati come molto difficili o difficilissimi, **c'è il rischio che l'R&D si fermi** perchè tutte le risorse sono assorbite dai progetti più abordabili

I due interrogativi chiave della fisica del neutrino (“perchè masse piccole?” “perchè angoli grandi?”) trarranno grande profitto da questo programma **ma non necessariamente troveranno risposta**

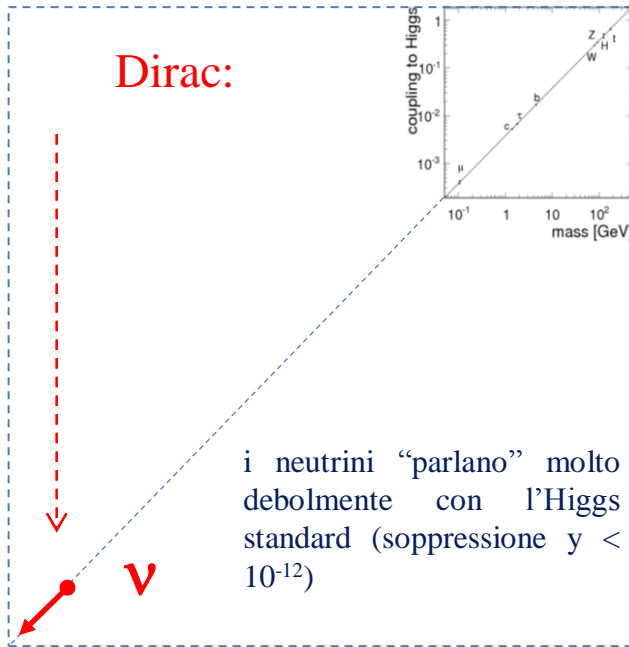


Una criticità molto “defilata” nelle roadmap internazionali. Un'importante provocazione per la fisica teorica

Perchè le masse sono così piccole?

Per caso: gli Yukawa sono piccoli perchè così piace allo sponsor dell'Università che oggi ci ospita.

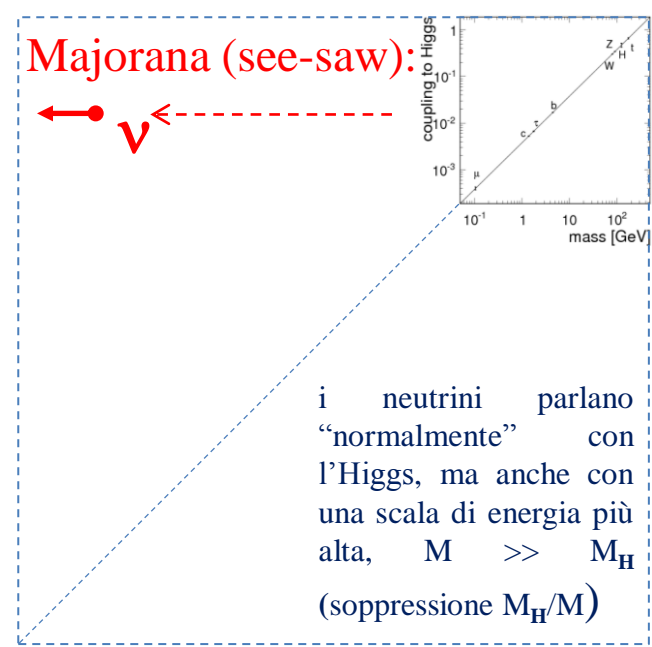
↑ accoppiamento con l'Higgs



→ masse dei fermioni

Perchè il meccanismo di Higgs non è l'unico responsabile delle masse dei neutrini

↑ accoppiamento con l'Higgs



→ masse dei fermioni

Nuova fisica non CKM-like!

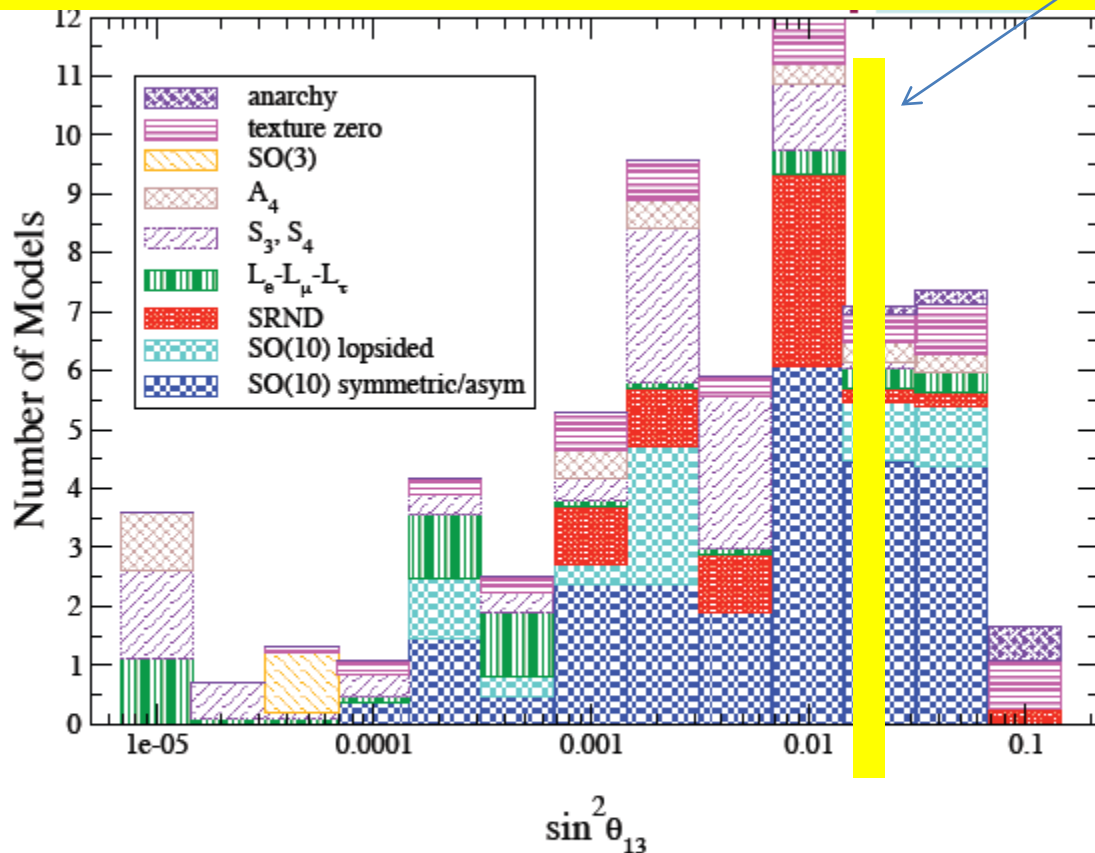
- Neutrinoless double beta decay
- Violazione di CP con fasi di Majorana
- Leptogenesi – asimmetria materia/antimateria nell'universo

Perchè gli angoli sono così grandi?

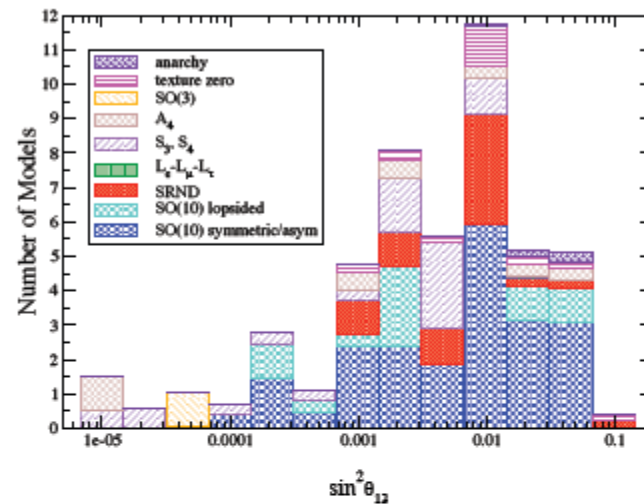
$$\sin^2 \vartheta_{13} \simeq 0.023 \pm 0.002$$

Best fit 2013

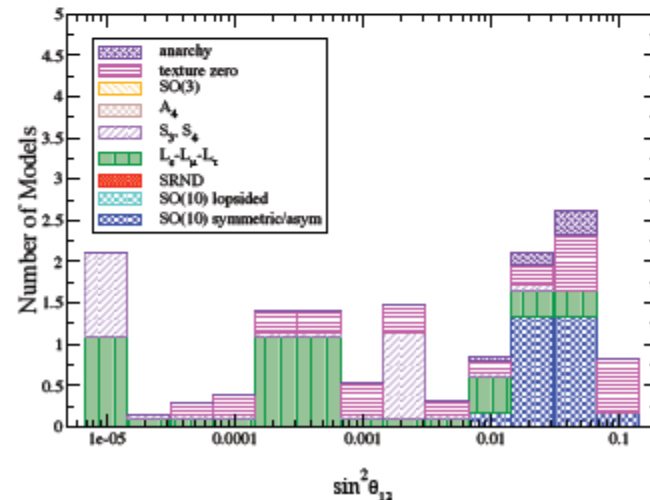
La situazione è molto più confusa sulla seconda domanda: perchè gli angoli sono grandi? Qual'è l'origine del flavor leptonic?



Models with Normal Hierarchy

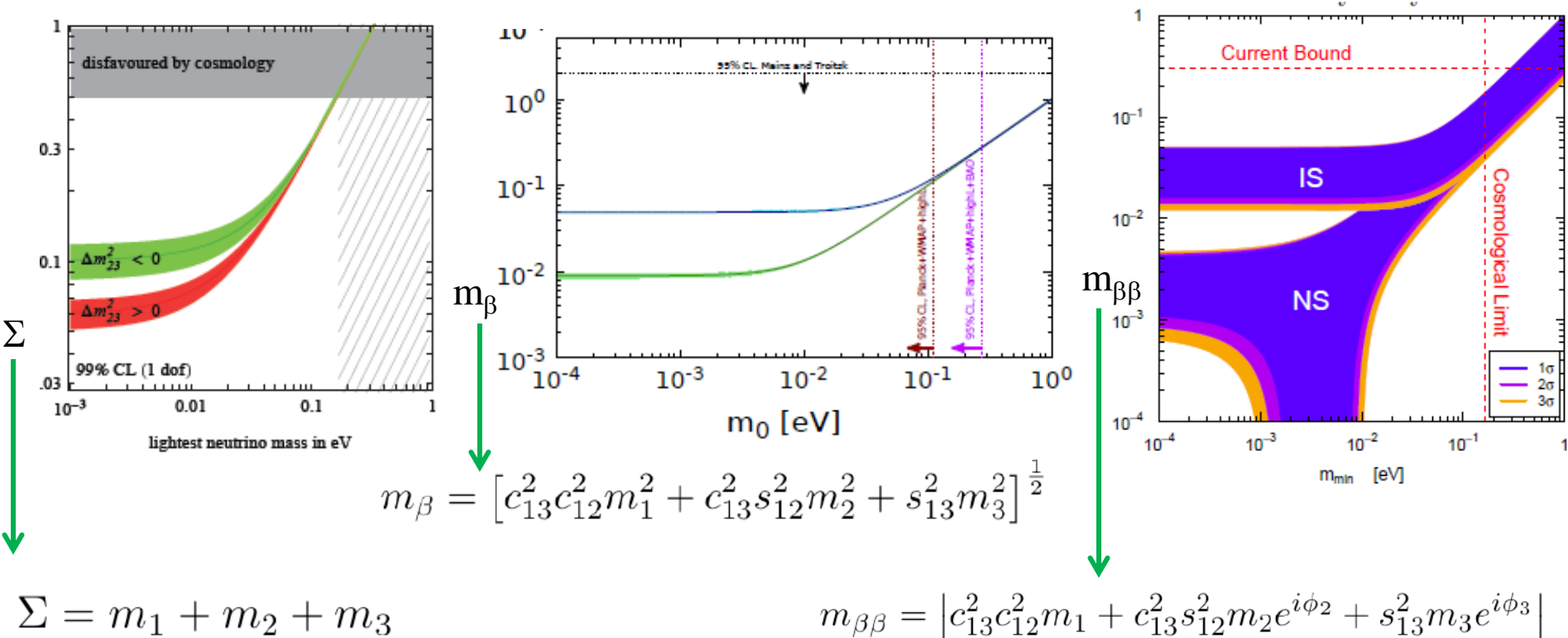


Models with Inverted Hierarchy



[slide di C. Albright, 2006 – scritta prima di conoscere il valore di ϑ_{13}]

La fisica delle masse assolute è oggi a un bivio



Per la prima volta nella storia della fisica del neutrino abbiamo l'opportunità di determinare univocamente gli obiettivi delle ricerche di masse assolute

Gerarchia massa	Cosmologia (Σ)	Massa assoluta (m_β)	Doppio β ($m_{\beta\beta}$)
Inverted	80-120 meV	50 meV	15-50 meV
Normal	50-70 meV	10 meV	<5 meV

Soluzioni “inattese” per determinare la gerarchia di massa

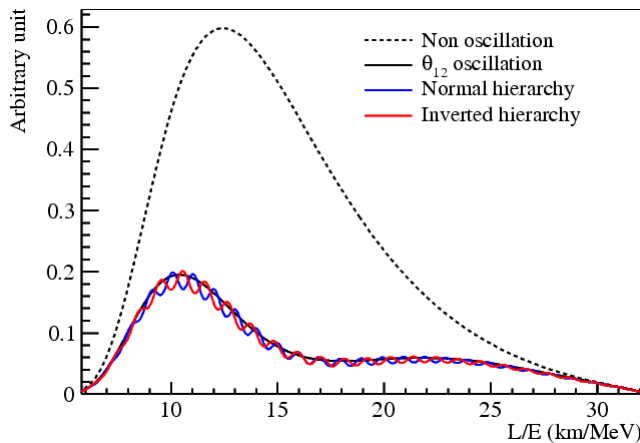
Per molti anni abbiamo dato per scontato che la gerarchia di massa si sarebbe determinata studiando gli effetti di materia negli esperimenti di fascio long-baseline. Il fatto che θ_{13} sia grande offre possibilità alternative. Almeno tre di queste hanno una rilevanza potenziale per l'INFN

Misurare lo shift di fase nelle oscillazioni prodotto da $\Delta m_{23} \neq \Delta m_{13}$

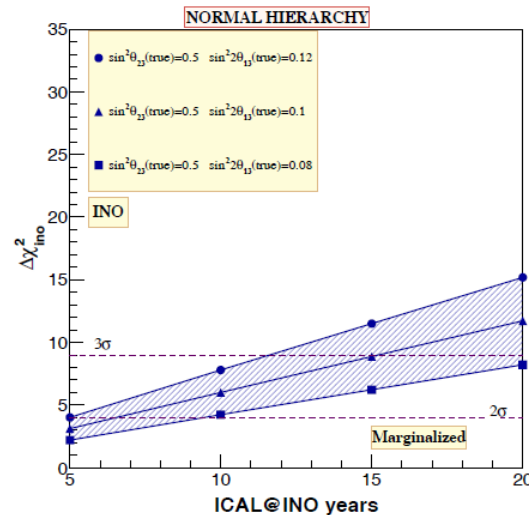
Sfruttare gli effetti di materia nei neutrini atmosferici

Con rivelatori magnetizzati

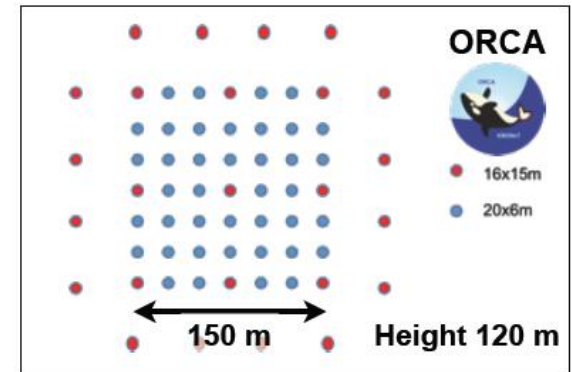
Con water telescopes



JUNO (Cina)
Cruciali competenze
acquisite in Borexino



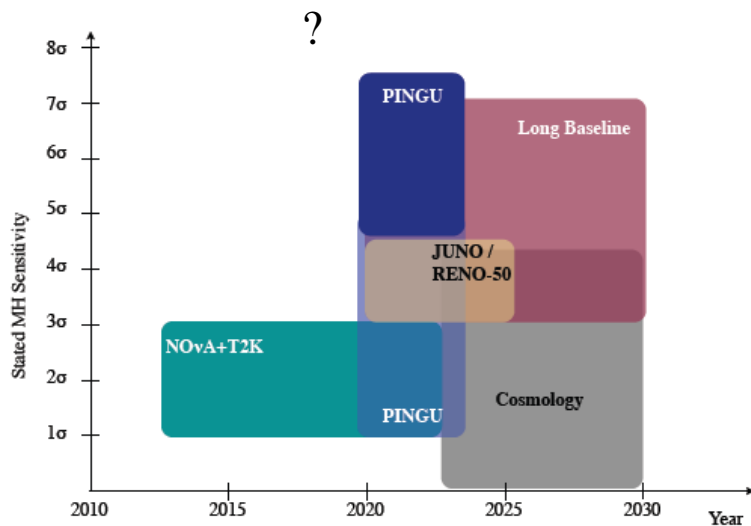
INO (India)
Proposto anche per i LNGS



PINGU (polo sud)
Possibile implementazione in
acqua (ORCA etc.)

Soluzioni rischiose

Ognuna di queste proposte basate su sorgenti naturali o reattori ha un'elevata componente di rischio: la sensibilità dipende in modo critico dalle performance finali del rivelatore e l'evidenza è spesso sotto i 4 sigma anche in 10 y di exposure. E' accettabile un rischio del genere o la soluzione più costosa (fasci di neutrini con baseline >1000 km) rimane quella più credibile?



Esempio: SWOT analysis di JUNO
SWOT = Strengths/Weaknesses/Opportunities/Threats

- S** Progetto chiaro: gerarchia + test di precisione (“CKM-like!”) del mixing di ν_e
- W** Tag: Made in China.
- O** Possibile nuova fisica del ν_e .
Alta statistica di geoneutrini.
- T** Esigenze di risoluzione e calibrazione in energia senza precedenti.

E' una questione che vorremmo mettere a fuoco in un nostro Satellite Meeting. Molte persone interessate a questo approfondimento: G. Ranucci, F. Mantovani, G. De Rosa, et al.

Una grande opportunità per il doppio beta

La scoperta di gerarchia inversa sarebbe la più grande opportunità del nostro settore dopo la scoperta delle oscillazioni e di $\theta_{13} \approx 8^\circ$. Siamo pronti ad approfittarne?

Gli sperimentali del doppio beta si! Enorme sforzo dentro e fuori l'INFN per raggiungere il target dei 10 meV.

$$T_{1/2}^{0\nu}(n_\sigma) = \frac{4.17 \times 10^{26}}{n_\sigma} \left(\frac{a\varepsilon}{W} \right) \sqrt{\frac{Mt}{(1+\zeta)b\delta(E)}}$$

Multi-ton (produzione e/o arricchimento dell'isotopo) →

→ Veto attivo, material selection...

Gerda fase III
[GERDA+MAJORANA]

Bolometri scintillanti
[LUCIFER]

Te con discr. α o
lettura Cherenkov
[ABSURD, CALDER]

Grandi masse scint
dopate con ^{136}Xe
[BOREXINO]

CRITICITA': non stiamo facendo sforzi sufficienti per ridurre le sistematiche sulle matrici nucleari. Abbiamo ancora problemi concettuali sostanziali (e.g. quenching dell'accoppiamento assiale) che rischiano di vanificare questi sforzi

Misure di doppio scambio carica, Single charge exchange, transfer reactions etc. possono dare informazioni molto utili

Un Satellite Meeting si è svolto a Marzo su questo tema e con proposte concrete di misure ai LNS. Agodi, Cappuzzello et al. Opportunità di lavoro comune con i fisici di Gruppo 3 e 4.

Due argomenti tabù

Cosa facciamo se la gerarchia è diretta?

Risposta tradizionale: ci penseremo tra 10 anni. Intanto gli R&D vanno avanti.

Come facciamo a vedere le fasi di Majorana?

Risposta tradizionale: se scopriamo che i ν sono di Majorana è già tanto 😊

Attenzione alle risposte affrettate!

Sapere se i neutrini sono di Majorana (nota la gerarchia) e sapere se esiste una sorgente di violazione di CP diversa da quella attesa nelle oscillazioni è troppo importante per la fisica delle particelle perchè il tema venga accantonato

In letteratura soprattutto approcci di forza bruta. E.g. S. Biller, Phys.Rev. D87 (2013) 071301. [che però potrebbero funzionare,. JUNO è la forza bruta di DayaBay + una buona idea 😊]

Almeno nei casi di gerarchia inversa o masse degeneri, le combinazioni di dati cosmologici di precisione, β e $\beta\beta$ danno risultati non banali su una fase di Majorana (ϕ_2).

Sono argomenti che vorremmo approfondire nel corso del 2014 e che stanno già sollevando interesse nel WG

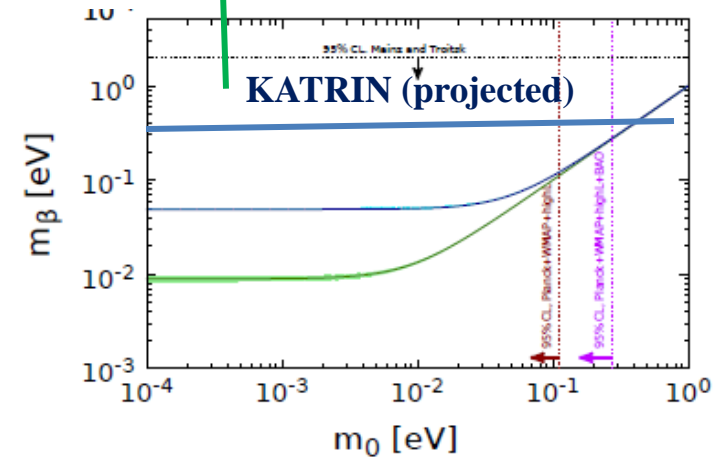
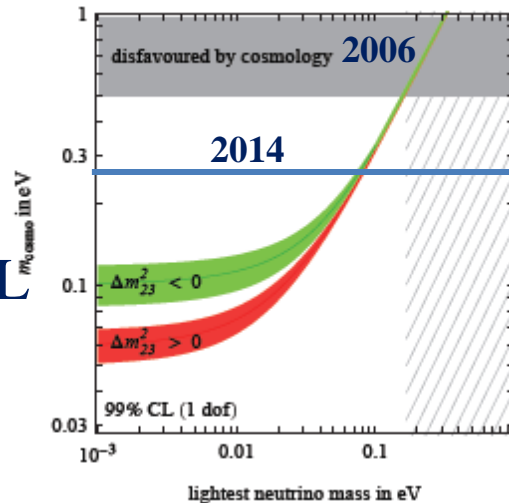
Misura della massa assoluta

La strategia tradizionale dell'INFN: “misure col trizio ancora lontane dalle sensibilità necessarie. Sviluppare un approccio diverso usando le competenze acquisite in microbolometria (MANU, MIBETA, MARE, HOLMES-EU).”
 E' una strategia sensata ma che deve prendere atto del ruolo determinante della cosmologia osservativa



CMB+DR11+BAO+HST
 +CFHTLens:

$$\sum m_\nu < 0.27 \text{ eV at 95\% CL}$$



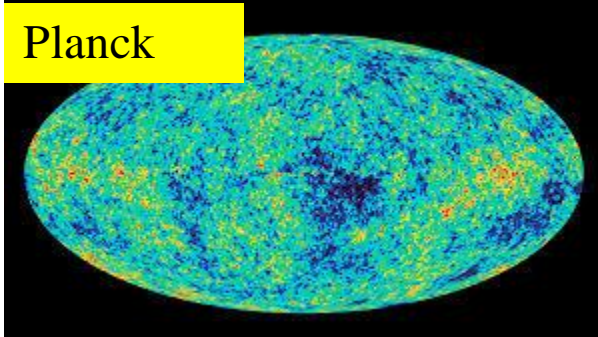
La cosmologia osservativa è l'unico settore che non è fortemente penalizzato dall'eventuale evidenza di gerarchia normale (v. GdL New Directions).

La significanza delle sue misure è però strettamente connessa alla consistenza del paradigma standard della cosmologia (Λ CDM)

Non vi è solo un link concettuale tra masse assolute e cosmologia osservativa. Vi è anche un link di natura tecnologica e sperimentale.

Cosmologia osservativa del CMB

Planck



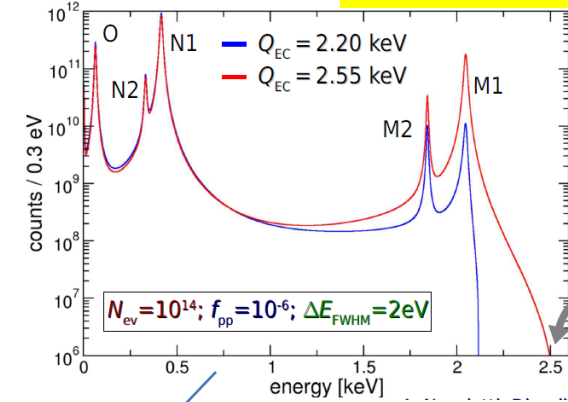
Bolometri in DC mode

Cosmologia osservativa del Cosmic Neutrino Background (relic neutrinos)

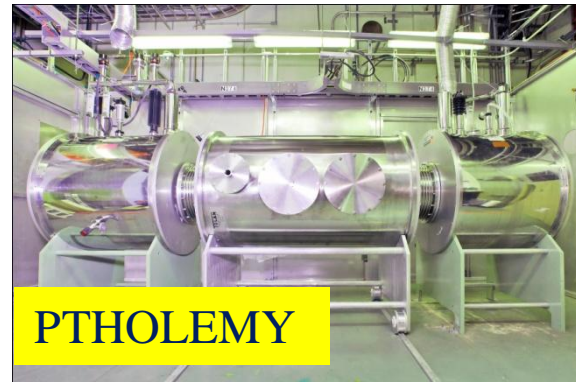
Masse assolute

Rivelatori ad alta risoluzione per esperimenti basati sulla tecnica di KATRIN (bolometri + nuove tecniche per sorgenti solide di trizio)

HOLMES



Bolometri in modalità calorimetrica



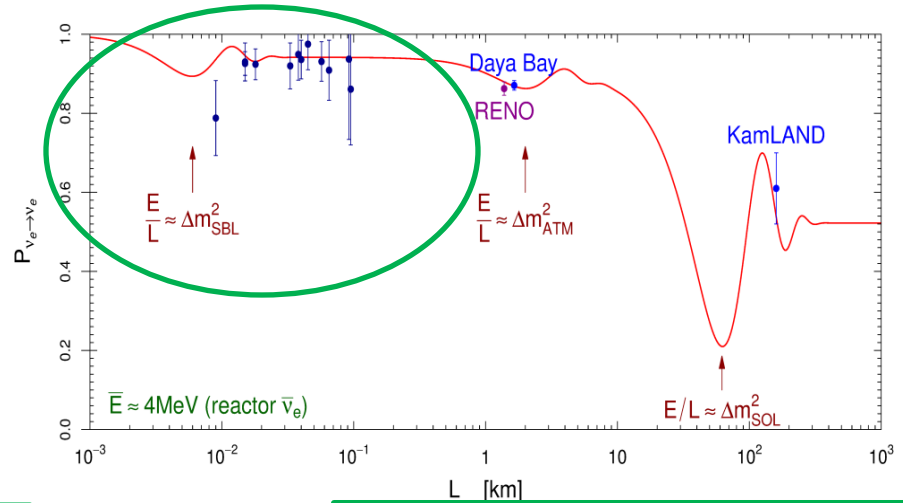
PTHOLEMY

Un ventaglio di opportunità che stiamo investigando. Satellite meeting (2/4/2014) su Relic e Mossbauer neutrinos. P. Cattaneo, A. Cocco, A. G. Mangano, A. Nucciotti et al.

Tensioni nei paradigmi standard

La combinazione di informazioni così eterogenee è garantita dalla consistenza dello SM (WG SM), del paradigma Λ CDM della cosmologia (WG new directions) e del paradigma a 3 famiglie dei neutrini

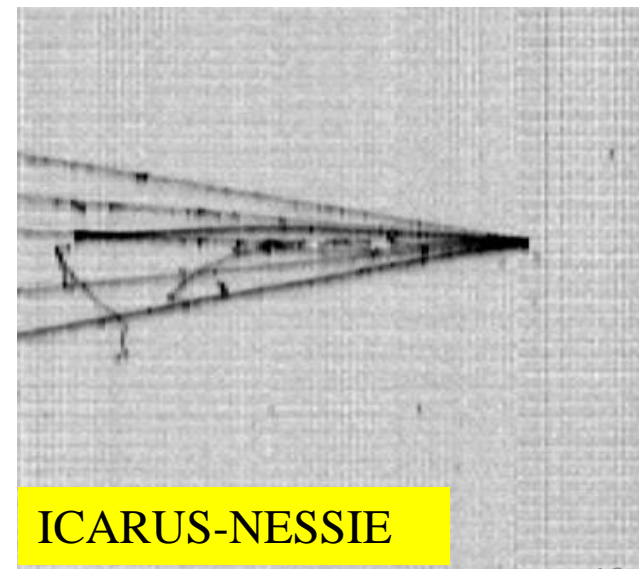
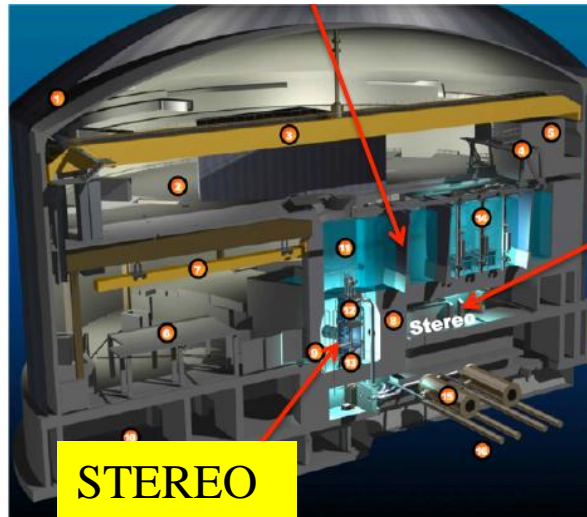
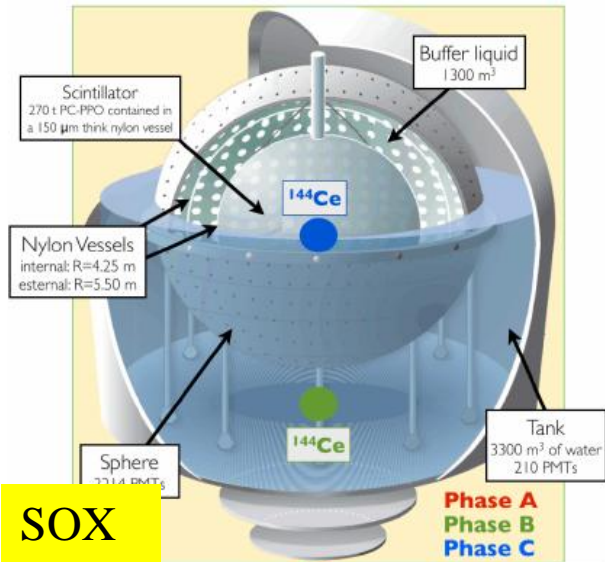
Neutrini sterili all' eV
La più importante anomalia sperimentale del nostro settore



Sorgenti radiattive

Reattori

Short baseline (Fermilab/CERN)

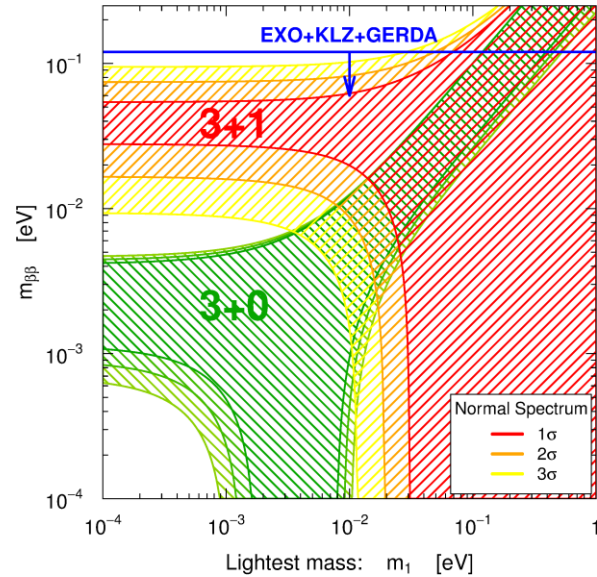


Ma anche Teseo, DANSS...

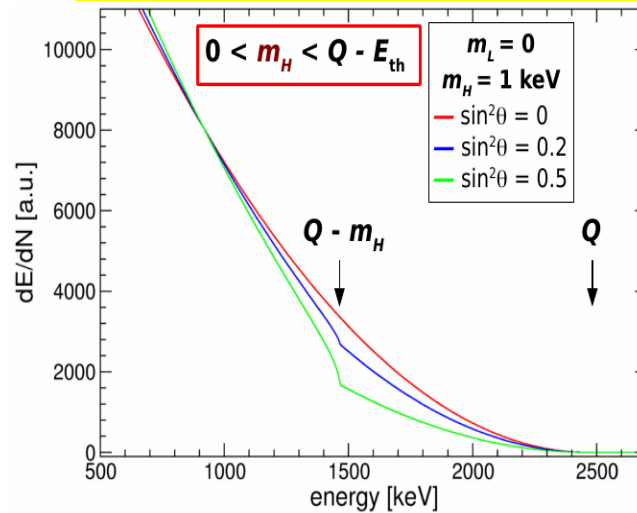
Nei prossimi 5-10 anni avremo una risposta definitiva sugli sterili all'eV. Bisogna essere vigili e guardare a tutto campo perchè:

L'impatto dei neutrini sterili sulla fisica è pervasivo

I particolari sono concentrati sugli sterili all'eV per ottime ragioni (LSND, MiniBoone, ..) ma i cosmologi hanno problemi piu' ampi ancora

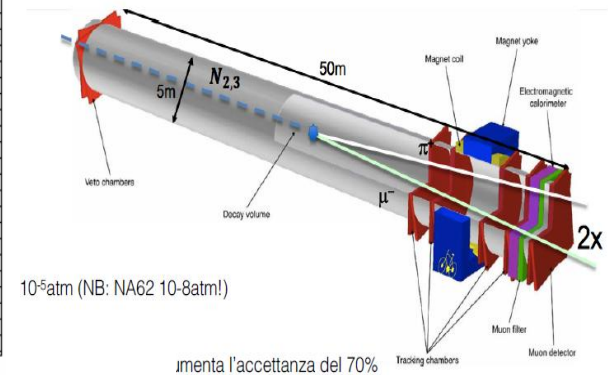


KATRIN/MARE/HOLMES



SHIP@CERN

v. anche GdL BeyondSM e DM



Doppio beta e sterili al eV: stravolge il ragionamento fatto sulle gerarchie di massa

Neutrini pesanti alla scala del keV e GeV

Un ventaglio di opportunità che stiamo investigando. Previsto un Satellite meeting. W. Bonivento, G. De Lellis, E. Ferri, et al...

Violazione di CP nel settore leptónico

E' finalmente alla nostra portata perchè tutte le condizioni necessarie sono soddisfatte e θ_{13} è molto grande (noto dal 2012).

- θ_{13} è sufficientemente grande da permettere lo studio della violazione di CP con fasci tradizionali ma di grande intensità (“Superbeams”)
- Non ci sono, però, scorciatoie: facilities con exposures inferiori a qualche MW-Mton-y (leggi: rivelatori giganteschi e prese dati decennali) hanno poche chance di vedere l'effetto
- La gerarchia di massa deve essere misurata, prima o in parallelo alla fase di CP.

θ_{13} implica alta statistica nelle oscillazioni $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ e renderà la misura di CP completamente dominata dalle sistematiche

Un programma per la riduzione delle sistematiche negli esperimenti long baseline è cruciale per il successo della misura e offre opportunità per esperimenti dedicati:

- Misure accessorie di flussi (come fu NA61 per T2K) e sezioni d'urto
- Combinazioni tra misure di servizio e R&D innovativi (NUSTORM, tagged ν beam)
- Near detector

E' la misura più impegnativa della fisica del neutrino [O(1 Geuro) di investimento] ed è un tema chiave di tutte le roadmap internazionali. L'INFN ha l'expertise (si pensi all'Argon Liquido o all'esperienza accumulata in T2K e nel CNGS) per avere un ruolo di protagonista.

Informazioni pratiche

Iscrivetevi alla nostra mailing list: whatnextnu@lists.infn.it

Sul sito <https://lists.infn.it/sympa/info/whatnextnu> troverete:

- 1) Archivio dei messaggi
- 2) Documenti condivisi divisi per settori
- 3) Tutte le slides dei Satellite Meetings
- 4) Una lista di temi interessanti per la discussione suddivisi in
 - Decadimento doppio beta
 - Oscillazioni standard e neutrini sterili
 - Masse assolute e nuove direzioni

Satellite Meetings organizzati finora in remoto via SeeVogh per facilitare la partecipazione. Idee, suggerimenti, proposte di nuovi temi sono molto benvenute!

ITEM 1 Doppio decadimento beta senza neutrini

Item prevalentemente sperimentali:

1.01 Facciamo anzitutto il punto della situazione: con gli esperimenti ora in corso o in costruzione a quale sensibilità si arriverà nel 2017? Quanto della zona con gerarchia inversa si sarà esplorato per allora?

1.02 Per poter estrarre le informazioni sul neutrino dalla misura sul tempo di dimezzamento dei vari isotopi candidati è importante che le incertezze tecniche sugli elementi di matrice nucleare non vanifichino le precisioni di misura sperimentale. Supponendo un null (o positive) result nel 2017, quale sarà la situazione?

1.03 Se ci fossero degli input sperimentali dai fusi nucleari – come gli IC Branching Ratios o le Charge Exchange Reactions sui vari nuclei lo sono per il $2\nu\text{DBD}$ – questi potrebbero guidare lo studio ed il calcolo degli elementi di matrice nucleare anche per lo $0\nu\text{DBD}$? Vale la pena di progettare un programma sperimentale dedicato nell'ambito di Gruppo 3?

1.04 Quale sarà la tecnologia che per prima arriverà a determinare se la gerarchia è diretta o inversa, con un livello di confidenza sufficiente a guidare le scelte sugli eventuali rivelatori futuri per esplorare il DBD in tale regione? Quando? (v. anche ITEM 2, di seguito)

1.05 Se la gerarchia è inversa, riusciremo ad esplorarla completamente nel doppio beta? Con quali tecniche e quali tecnologie? Potremo ancora permetterci di aprire più fronti contemporaneamente per studiare diversi isotopi? I LMSs forniranno ancora un ambiente adeguato allo scopo o bisognerà spostarsi altrove?

1.06 Se la gerarchia è diretta, esiste già una tecnologia che possa permetterci di andare a sondare anche tale regione? Se no, ci sono già delle idee sulle direzioni da prendere? Fino a che punto sarà ragionevole continuare a spingere in tale direzione visto che cancellazioni accidentali dell'effetto dovuto alle fasi di Majorana sono sempre possibili?

1.07 In soccorso agli esperimenti del DBD possono arrivare dei modelli teorici o altre misure sperimentali capaci di restringere i parametri della matrice di mixing affinché le misure sul DBD siano ancora d'interesse nel caso di gerarchia diretta?

1.08 La presenza di un neutrino sterile all'eV cambia in modo sostanziale il programma di fisica per il DBD?

1.09 Ci sono altri esperimenti, almeno sulla carta, che potrebbero testare se il neutrino è di Majorana? Se sì, quanto la tecnologia necessaria è ancora lontana dall'essere utilizzabile?

Item prevalentemente teorici:

Analisi delle motivazioni teoriche che giustificano l'attesa di importanti scoperte dalle imprese in corso o previste a medio termine. P.es.:

1.10 E' possibile "catalogare" a grandi linee le aspettative sul doppio beta emergenti da attuali modelli di see-saw, leptogenesis, etc. Oppure no?

1.11 Sotto quali assunzioni sufficientemente "general" si può motivare una preferenza per la gerarchia inversa versus normale o viceversa?

Identificazione dei problemi cruciali di fisica teorica particolare nel settore. P.es.: