

Fisica dei neutrini: Stato dell'arte

- Nel **Modello Standard** delle interazioni elettrodeboli esistono **3** tipi di **neutrini** (3 diversi “sapori”), ognuno dei quali costituisce, con il corrispondente leptone carico, un doppietto di spin isotopico **$SU(2)_L$** :

$$\begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_{\mu L} \\ \mu_L \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_{\tau L} \\ \tau_L \end{pmatrix}$$

I doppietti di isospin sono costituiti dalle **parti left-handed** (sinistrorse) delle funzioni d'onda dei leptoni :

$$\psi_L = \frac{1}{2} (1 - \gamma_5) \psi; \quad \gamma^5 = i \gamma^0 \gamma^1 \gamma^2 \gamma^3 .$$

Le matrici gamma di Dirac

- Matrici 4x4 che compaiono nell'equazione di Dirac (meccanica quantistica relativistica) e soddisfano le relazioni di anticommutazione $\{\gamma^\mu, \gamma^\nu\} = 2 g^{\mu\nu}$. Usando rappresentazione di Dirac

$$\gamma^i = \begin{pmatrix} 0 & \sigma^i \\ -\sigma^i & 0 \end{pmatrix}; \quad \gamma^0 = \begin{pmatrix} I & 0 \\ 0 & -I \end{pmatrix}. \quad \text{Matrici } \sigma \text{ di Pauli:}$$

$$\sigma_1 \equiv \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}; \quad \sigma_2 \equiv \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}; \quad \sigma_3 \equiv \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad \text{Dunque:}$$

$$\gamma^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}, \quad \gamma^1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \gamma^2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -i \\ 0 & 0 & i & 0 \\ 0 & i & 0 & 0 \\ -i & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad \gamma^3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\gamma^5 := i\gamma^0\gamma^1\gamma^2\gamma^3 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\psi_L = \frac{1}{2} (1 - \gamma^5) \psi$$

$$\psi_R = \frac{1}{2} (1 + \gamma^5) \psi$$

I neutrini e il Modello Standard

- A differenza di ciò che succede per i leptoni carichi, i termini cinetici e di interazione per il neutrino nella Lagrangiana del **Modello Standard** coinvolgono solo la parte left-handed della funzione d'onda $\nu_{l,L}$ (con l indice di sapore) e nel modello **non è prevista l'esistenza di una parte right handed della funzione d'onda per il neutrino.**

I neutrini e il Modello Standard (2)

- $\mathcal{L}_{cc} = \frac{g}{\sqrt{2}} [\overline{\nu_{l,L}} \gamma^\mu l_L W_\mu^+ + \overline{l_L} \gamma^\mu \nu_{l,L} W_\mu^-],$

con g costante di accoppiamento di SU(2) : $\frac{g^2}{2} = \frac{e^2}{2 \sin^2 \theta_W}$

La **corrente debole carica** è, dunque, mediata dallo scambio dei bosoni vettori $W^\pm$ e prevede **un'interazione di tipo V-A**:

$$\overline{\nu_{l,L}} \gamma^\mu l_L = \frac{1}{2} \overline{\nu_l} \gamma^\mu (1 - \gamma_5) l$$

- Corrente debole neutra per il neutrino**

$$\mathcal{L}_{NC} = - \frac{\sqrt{g^2 + g'^2}}{2} Z_\mu \overline{\nu_{lL}} \gamma^\mu \nu_{lL} = - \frac{g}{2 \cos \theta_W} Z_\mu \overline{\nu_{lL}} \gamma^\mu \nu_{lL},$$

con g' costante di accoppiamento di U(1) di ipercarica.

- Dunque **nel Modello Standard non si può costruire un termine di massa** di Dirac per il **neutrino, che** dovrebbe avere la forma : $m \overline{\psi_R} \psi_L$

..... **eppure**

Fisica dei neutrini: risultati sperimentali

- ...eppure i neutrini hanno massa

Prova (indiretta ma inconfutabile) fornita dalle **oscillazioni**.

Fenomeno quantistico possibile perché esistono almeno 2 diversi autostati di massa e gli autostati di sapore (ν_e , ν_μ , ν_τ) non coincidono con gli autostati di massa e, dunque, con gli autostati dell'Hamiltoniana (che determina l'evoluzione dei neutrini dal punto di produzione a quello di interazione).

- **Oscillazioni provate con neutrini da diverse sorgenti:**

atmosferici e acceleratori LBL: oscillazione ν_μ - ν_τ

(**Nobel** 2015 a Kajita, SuperKamiokande T2K);

solari e reattori: oscillazioni di ν_e - ν_x ed analoga per antineutrini elettronici.

Tra esperimenti sui solari, **ruolo particolare di SNO**: osservando simultaneamente canali sensibili a diversi "sapori", fornisce la prova definitiva che il flusso totale di neutrini è in accordo con le previsioni dei Modelli Solari (SSM), ma il flusso di ν_e è inferiore alle previsioni, perché parte dei neutrini hanno subito una oscillazione → **Nobel** 2015 ad A. Mc Donald.

- **Esperimenti** sulle oscillazioni sono **sia di disappearing che di appearing**.

Sorgenti di neutrini utilizzate per studio oscillazioni

Sorgente ν	Flavour	Distanza L	Energia ν	Minimo Δm^2 accessibile
Sole	ν_e	$\sim 1.5 \times 10^8$ km	0.2 – 15 MeV	$\sim 10^{-11}$ eV ²
Raggi cosmici	$\frac{\nu_\mu}{\nu_e}$	10 km – 13000 km	0.2 GeV – 100 GeV	$\sim 10^{-4}$ eV ²
Reattori nucleari	$\bar{\nu}_e$	20 m – 250 km	$\langle E \rangle \approx 3$ MeV	$\sim 10^{-1} - 10^{-6}$ eV ²
Acceleratori	$\frac{\nu_\mu}{\nu_e}$	15 m – 730 km	20 MeV – 100 GeV	$\sim 10^{-3} - 10$ eV ²

EVIDENZA / INDIZI DI OSCILLAZIONI

- **Deficit di neutrini solari:** scomparsa di ν_e tra il Sole e la Terra
Evidenza convincente, misura dei parametri di oscillazione, conferma da un esperimento con reattori nucleari
- **Scomparsa di ν_μ di origine “atmosferica”** su distanze dell’ordine del diametro terrestre
Evidenza convincente, misura dei parametri di oscillazione, conferma da esperimenti con acceleratori
- **Esperimento LSND a Los Alamos:** eccesso di $\bar{\nu}_e$ in un fascio di $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_e$
NON CONFERMATO

Risultati più recenti (post 2012), con neutrini da acceleratori LBL e da reattori medium and short baselines, descritti più avanti

I neutrini atmosferici

- I **primi indizi** a favore dell'ipotesi di **oscillazione** di sapore per i neutrini si sono ottenuti con lo studio dei **neutrini atmosferici** e di quelli **solari**.

- I neutrini atmosferici

- Il decadimento di particelle cariche (principalmente π e K) che costituiscono i raggi cosmici produce nell'atmosfera grandi quantità di neutrini sia di tipo μ che di tipo e.

Range: E tra 0.1 e 100 GeV, $L \approx$ tra 10 e 13000 km.

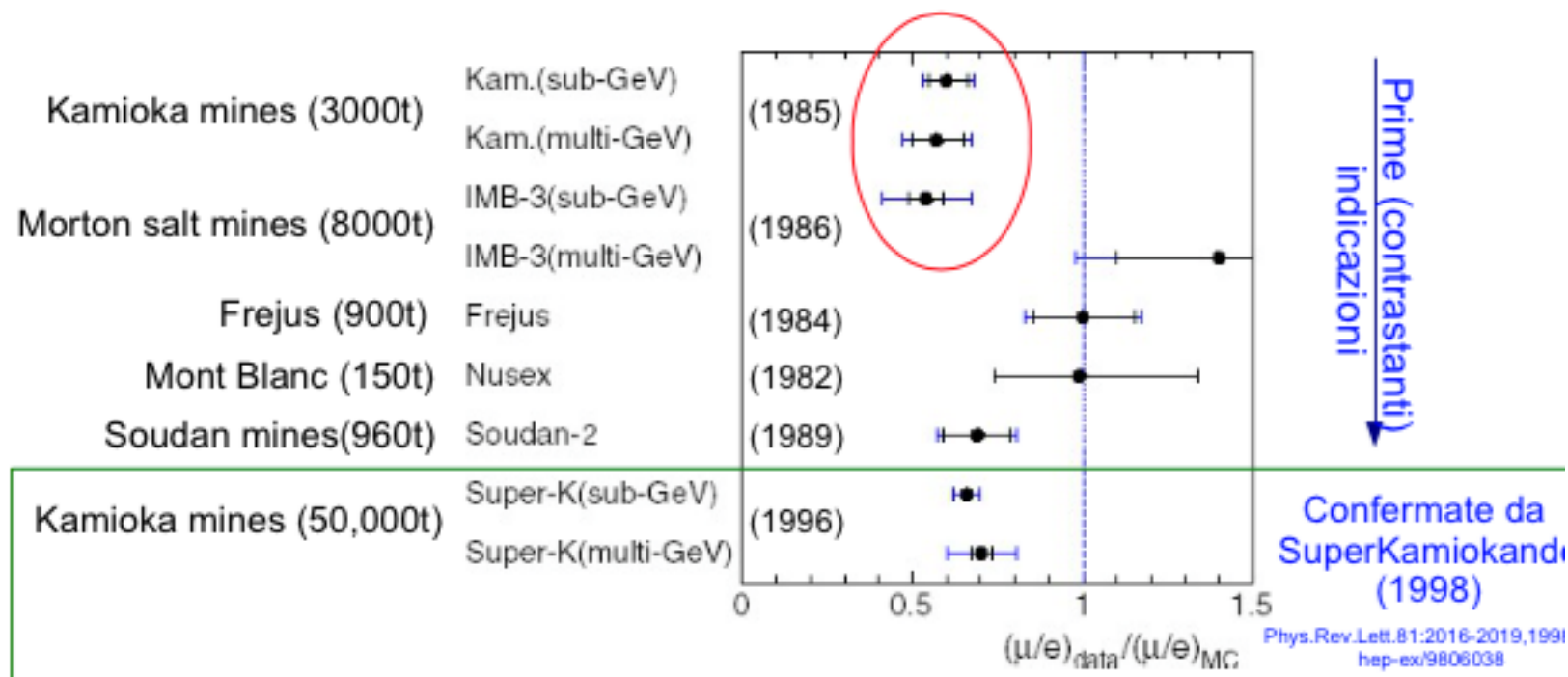
- Il rapporto tra ν_μ e ν_e è noto abbastanza bene, così come la dipendenza dall'energia.
- Dagli anni '80 diversi esperimenti, tra cui IMB, Soudan, MACRO (a G. Sasso) e, soprattutto, Kamiokande e SuperKamionde (SK) (in Giappone).

I neutrini atmosferici e le oscillazioni

Dalla metà degli anni '90 (grazie soprattutto ai risultati di SK) sappiamo che:

- $R \equiv \frac{(\nu_\mu/\nu_e)_{\text{Misurato}}}{(\nu_\mu/\nu_e)_{\text{Teorico}}} \cong 2/3;$
- Osservazione asimmetria up-down: riduzione del flusso di neutrini muonici che attraversano la Terra
→ Evidenza di oscillazione di ν_μ in neutrino non elettronico.

ν_μ/ν_e Ratio (of Ratios)



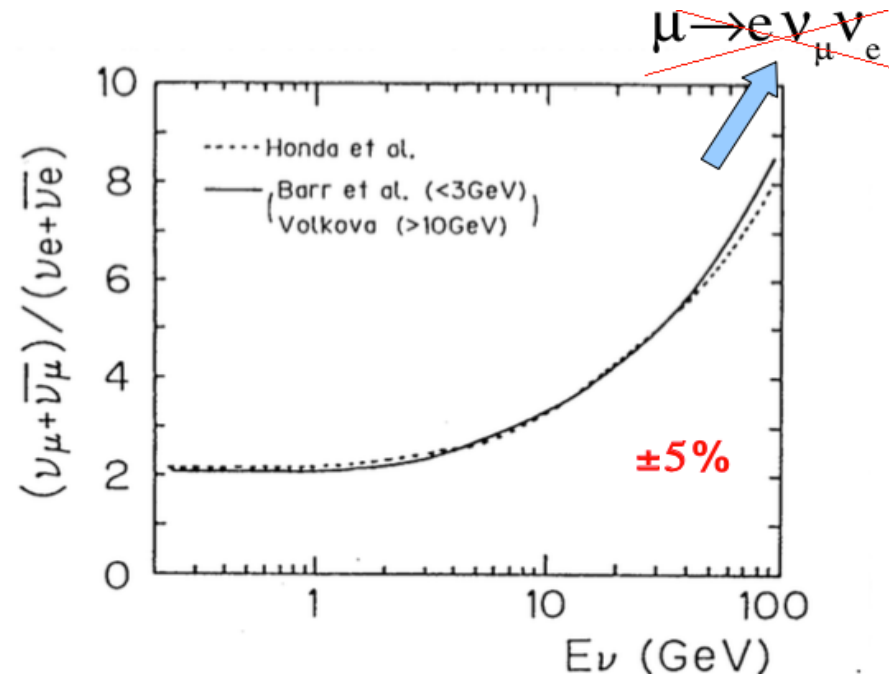
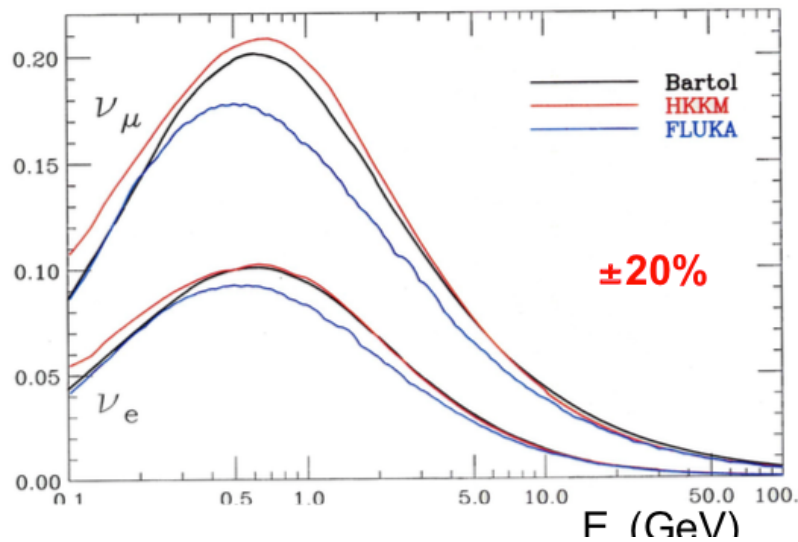
Prima indicazione del deficit di ν_μ dal rapporto ν_μ/ν_e (Kamiokande)

Indicazioni contrastanti negli anni '80

Osservazione dell'asimmetria up-down (Super-Kamiokande, 1998)

Approfondimenti sui neutrini atmosferici

- Flussi ν_μ e ν_e e rapporto dei flussi teorico.

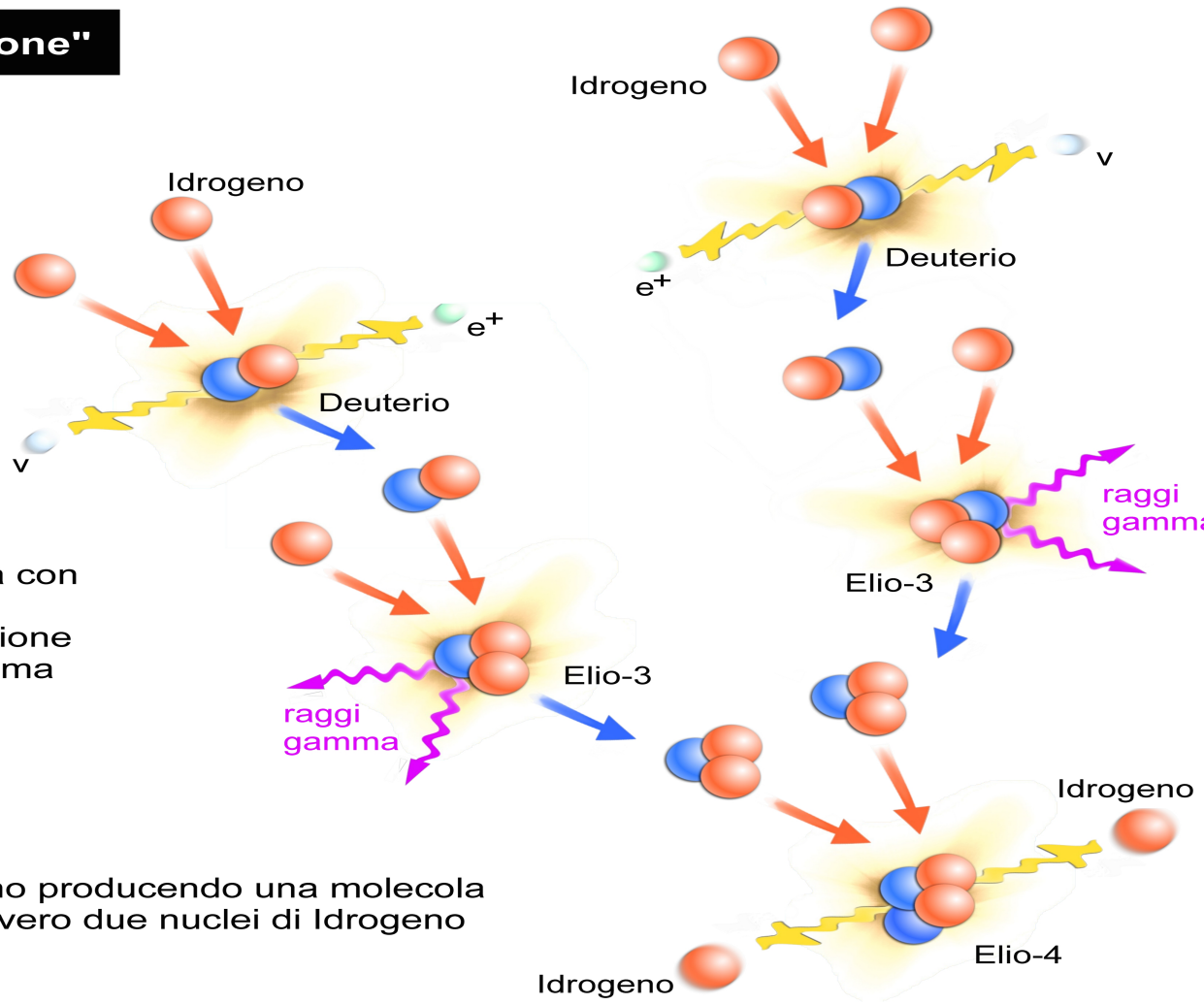


La fusione nel sole: la catena p-p (protone-protone)

- Due processi di fusione nel Sole; entrambi prevedono emissione di neutrini.
 - catena protone-protone (processo principale): ν rivelati e studiati
 - ciclo CNO (importante per stelle + massicce): per ora solo limiti superiori su flussi ν
- **Descrizione schematica dei primi stadi della catena protone-protone**

Ciclo di Bethe "protone-protone"

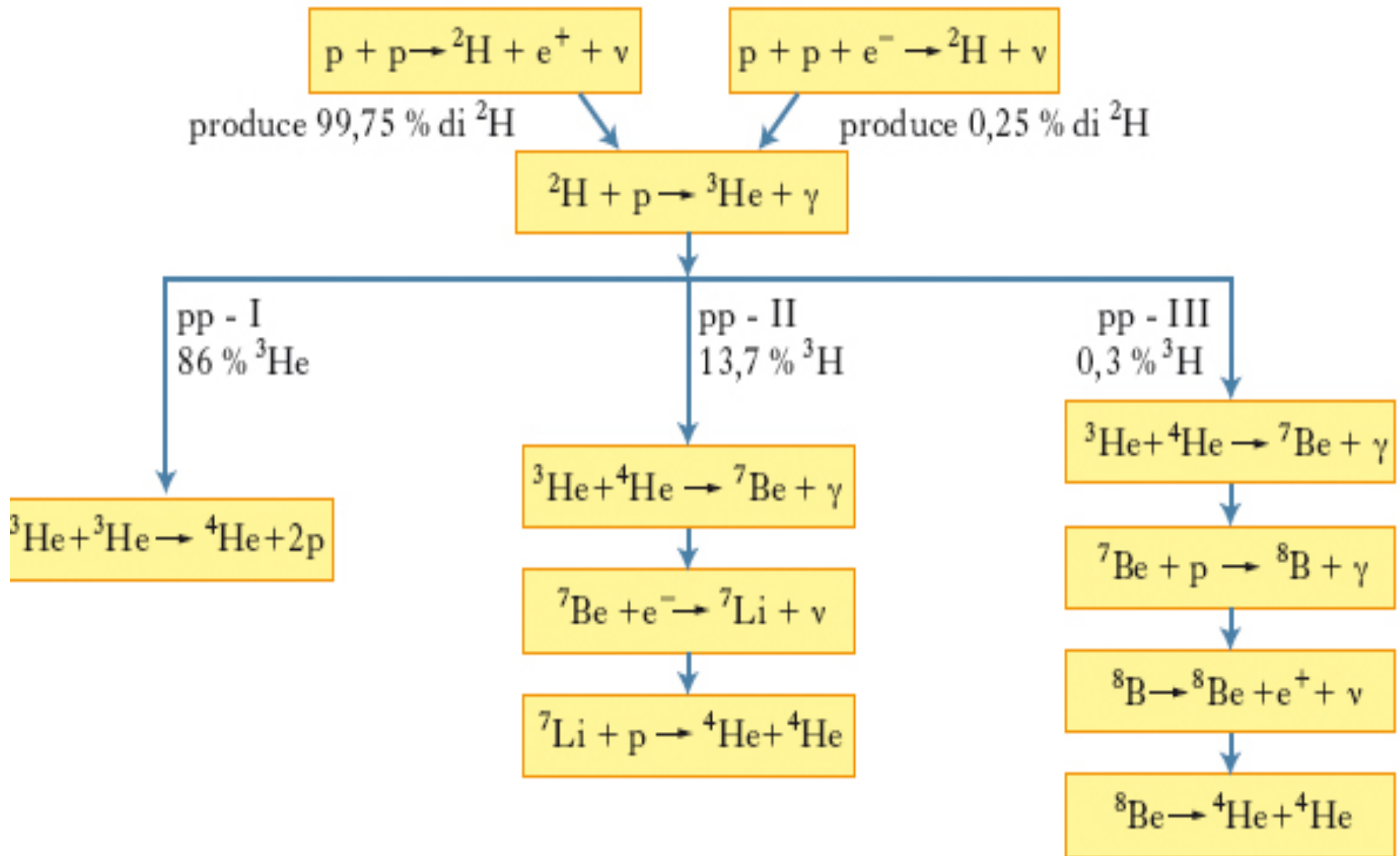
Due nuclei di Idrogeno si fondono originando una molecola di Deuterio liberando energia e particelle secondarie: un positrone ed un neutrino



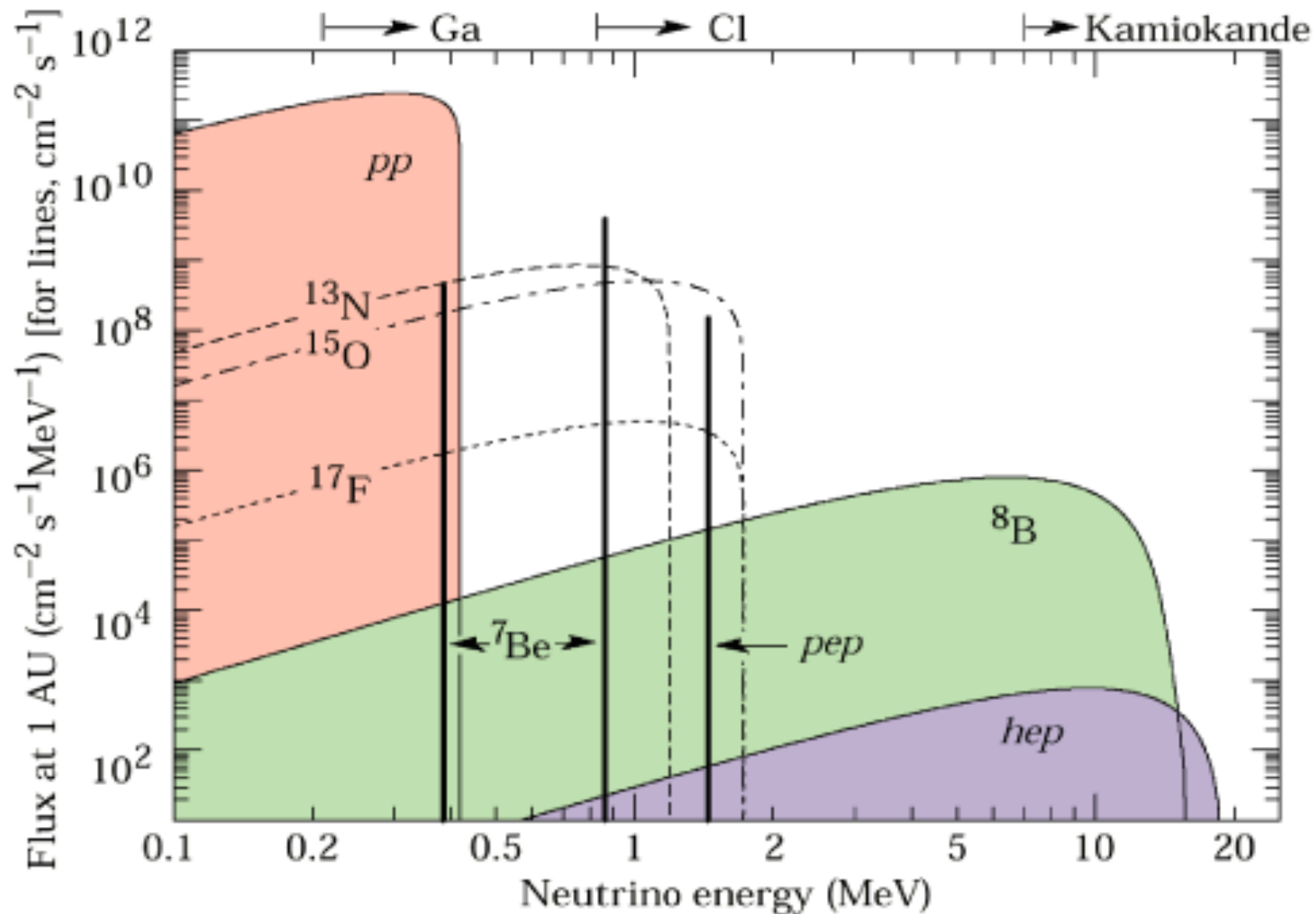
La molecola di Deuterio si combina con un nucleo di Idrogeno per formare una molecola di ^3He con la formazione di energia sotto forma di raggi gamma

Infine due molecole di ^3He si legano producendo una molecola di ^4He dissociando due protoni, ovvero due nuclei di Idrogeno

Schema della catena p-p



Spettro neutrini solari



Cenni sulla storia dei neutrini solari

(per trattazione più dettagliata di questo tema si vedano le lezioni di L. Miramonti)

Solar ν Experiments

- End '60th: 1st solar ν flux measure at **Homestake**
($^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$; $E \simeq 0.81\text{MeV}$) (ν da ^8B , ^7Be , pep, hep)
 - ν deficit $\geq 60\%$
 - What happens to ν on their way from Sun to Earth?
 - May the Solar Standard Model (SSM) be wrong?
- Other experiments with gallium β decay: **Sage** and **Gallex/GNO**
($E_{\text{thresh.}} \simeq 233\text{KeV}$; sensitive also to pp neutrinos)
 - Confirmation of Homestake: measured signal only 55% of the expected one
 - Theoretical implications of ν oscillations: new physics signal?
- End '90th **Kamiokande** and **SK**: $\nu_e - e^-$ elastic scattering in H_2O (sensitive only to ν from ^8B ed hep)
 - **confirmation of ν_e flux deficit**. Study of “day-night” asymmetries, spectrum distortion and seasonal variation of the signal $\Rightarrow$ **constraints on mixing parameters**
- 2001: 1st data from **SNO** (CC e ES)
- 2002: New data from **SNO** (including NC)

Richiami su SNO

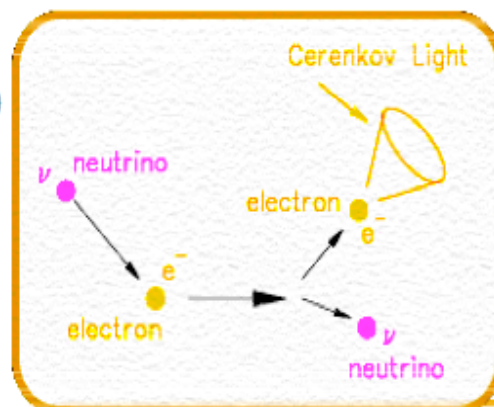
SNO

ν Reactions in SNO

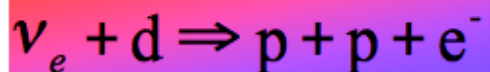
ES



- Both SK, SNO
- Mainly sensitive to ν_e , less to ν_μ and ν_τ
- Strong directional sensitivity

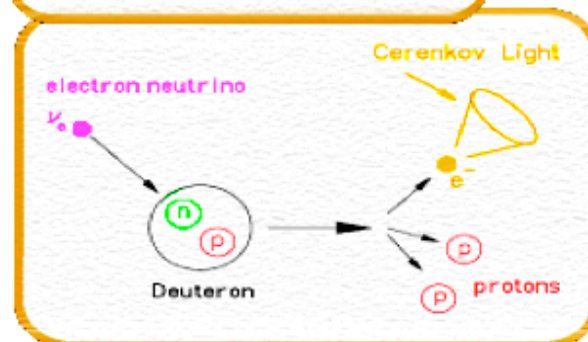


CC

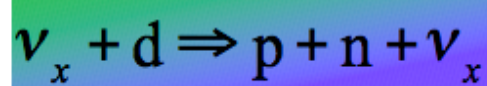


- Good measurement of ν_e energy spectrum
- Weak directional sensitivity $\propto 1 - 1/3 \cos(\theta)$

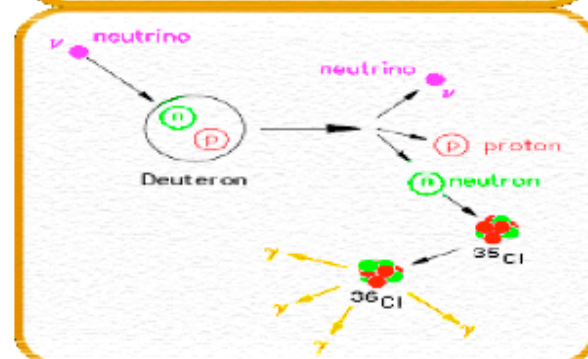
- ν_e ONLY



NC



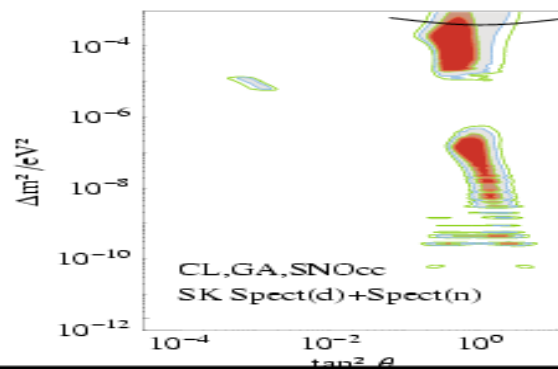
- Measure total ^8B ν flux from the sun.
- Equal cross section for all ν types



L'analisi globale dei diversi esperimenti sui neutrini solari aveva portato a selezionare diverse possibili regioni nello spazio dei parametri $\sin^2\Theta_{12}$, Δm_{21}^2 e prima della pubblicazione dei risultati di SNO sulle correnti neutre e di quelli dell'esperimento KamLAND (LBL reattori), sopravvivevano ancora diverse possibili soluzioni

The 2001 situation

- Data for Cl, Ga, SNO CC total signals and SK energy spectrum included.
- Colored areas: allowed regions at 90%,95%,99% and 99.7% C.L.
- LMA and LOW solutions preferred (absolute minum in LMA). The SMA and “vacuum” solutions strongly disfavored



Nel 2002 : SNO e KamLAND selezionano definitivamente la soluzione LMA

Neutrino mixing

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{i=1}^3 U_{\alpha i} |\nu_i\rangle$$

con U matrice unitaria $UU^\dagger = U^\dagger U = I$, almeno 3x3 (nel caso di soli sapori attivi).

La matrice di mixing U (matrice PMNS), nel caso 3 x 3 può essere scritta nella forma:

$$U = \begin{pmatrix} \cos\theta_{12}\cos\theta_{13} & \sin\theta_{12}\cos\theta_{13} & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ -\sin\theta_{12}\cos\theta_{23} - \cos\theta_{12}\sin\theta_{23}\sin\theta_{13}e^{i\delta} & \cos\theta_{12}\cos\theta_{23} - \sin\theta_{12}\sin\theta_{23}\sin\theta_{13}e^{i\delta} & \sin\theta_{23}\cos\theta_{13} \\ \sin\theta_{12}\sin\theta_{23} - \cos\theta_{12}\cos\theta_{23}\sin\theta_{13}e^{i\delta} & -\cos\theta_{12}\sin\theta_{23} - \sin\theta_{12}\cos\theta_{23}\sin\theta_{13}e^{i\delta} & \cos\theta_{23}\cos\theta_{13} \end{pmatrix}$$

$= U1 \times U2 \times U3$

$$U_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \quad U_2 = \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \quad U_3 = \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Neutrino mixing 2

Gli autostati di massa per il neutrino sono autostati di energia e dunque soluzioni dell'equazione agli autovalori: $i \frac{\partial}{\partial t} |\nu_i(\vec{x}, t)\rangle = E |\nu_i(\vec{x}, t)\rangle$.

Dunque, uno stato rappresentato al tempo $t = 0$ dalla funzione d'onda $|\nu_i(0,0)\rangle$ evolverà e al tempo t si potrà scrivere come:

$$|\nu_i(\vec{x}, t)\rangle = e^{-i p x} |\nu_i(0,0)\rangle = \exp[-i(E t - \vec{p} \cdot \vec{x})] |\nu_i(0,0)\rangle.$$

Un neutrino prodotto con un sapore definito (ad es. un neutrino elettronico prodotto nei processi di fusione nucleare nel sole) è in realtà una miscela quantistica di autostati di massa differenti $|\nu_i\rangle$ (con un peso nella miscela determinato dagli elementi della matrice di mixing U_{ei}), ognuno dei quali evolve diversamente dagli altri autostati mentre il neutrino si propaga dal punto di produzione (dentro il sole) al punto di rivelazione (sulla terra).

Un neutrino di sapore α nella posizione $\vec{x}$ al tempo t è rappresentato dalla funzione d'onda:

$$|\nu_\alpha(\vec{x}, t)\rangle = \sum_{k=1}^{n_k} U_{\alpha k} e^{-i p x} |\nu_k(0,0)\rangle, \text{ con } n_k = \text{numero di autostati di massa per il neutrino}.$$

Per il calcolo delle probabilità di oscillazione (a partire dalle espressioni degli autostati di sapore e delle matrici di mixing) si rimanda alle lezioni tenute da V. Antonelli

Cosa conosciamo con certezza (a)

- Prove dell'esistenza delle oscillazioni

Esperimenti su oscillazioni sono sia di **disappearing** che di **appearing**.

- Esperimenti di **appearing** con **acceleratori LBL**

1. **Fascio Cern- Gran Sasso** (Esperimenti ICARUS e OPERA)

Fascio CNGS di ν_μ con $\langle E \rangle \cong 13$ GeV e LBL di ≈ 760 km.

- **Opera:** Ricerca di oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.

5 eventi candidati: significatività $> 5\sigma$

2. **T2K** (Giappone)

Fascio di ν_μ (od anti- ν_μ) prodotto a JPARC (Tokai) e rivelato a SuperKamiokande (Kamioka), baseline di 295 km.

3. **NOvA** (Stati Uniti) . LBL off axis con fascio prodotto a Fermilab e studiato ad Ash River, MN ($L \approx 810$ km)

T2K e NOvA

- **T2K** (Kajita, premio Nobel 2015 appartiene a collaborazione)

Da 2010 a 13 studio di disappearance ν_μ (parametri atmosferici) e di comparsa di ν_e in fascio di ν_μ .

Oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$: 28 eventi candidati, significatività a 7.5σ di $\theta_{13} \neq 0$. Da maggio '14 a giugno '15 studio canale antineutrini muonici. Oscillazioni: conferma di risultati ottenuti con fascio neutrini; **osservati anche** eventi di **comparsa di $\bar{\nu}_e$ in fascio di $\bar{\nu}_\mu$** , ma **segnali di asimmetria** (da confermare) tra l'oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ e quella $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$.

- **NOvA:**

- ν_μ disappearance (conferma e studio di **parameteri atmosferici**)
- Appearance di ν_e : oltre a θ_{23} studio di **θ_{13} e δ_{CP}** e di **gerarchia di massa**
- Deficit di eventi di Neutral current? **Possibile** indicazione di **neutrino sterile**.

Cosa conosciamo con certezza (b)

- **Consistenza generale dei modelli** fenomenologici che descrivono le oscillazioni, includendo anche gli effetti di interazione con la materia.
- **Necessità teorica di andare aldilà del Modello Standard** delle interazioni elettrodeboli (o almeno di sua versione minimale) per spiegare la massa del neutrino.

Cosa conosciamo con certezza (c)

- Dai dati sperimentali: **almeno 2 distinti valori di**

$$\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$$

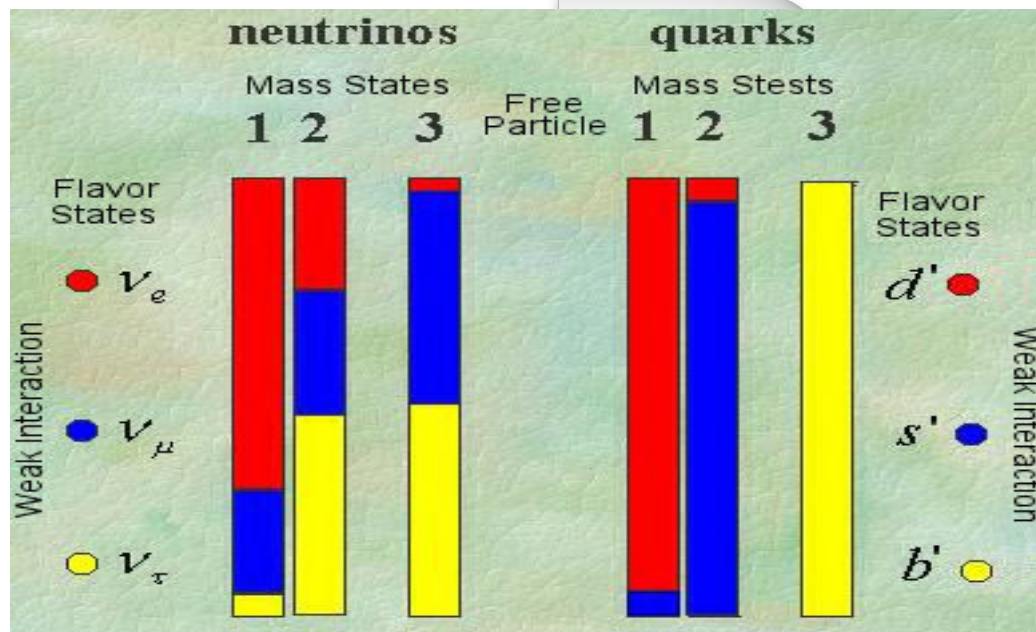
- $\Delta m_{21}^2 = (7.54 \pm 0.02) \times 10^{-5}$ **neutrini solari e KamLAND;**

$$|\Delta m_{31}^2| = (2.43 \pm 0.07) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$
 oscillazioni di atmosferici e LBL.

- Dunque esistono **almeno 3 autostati di massa**; **3** sono gli autostati di sapore di **neutrini “attivi”** (accordo coi dati di LEP e da cosmologia). Possibilità eventuale di neutrini sterili.

Cosa conosciamo con certezza (d)

- Situazione molto diversa da quella del mescolamento tra i quarks: **angoli relativamente grandi** e mixing massimale (o quasi) tra 2^a e 3^a generazione.



- Gli **angoli di mixing** sono **tutti diversi da zero**. Dopo lunga ricerca, è stato provato nel 2012 che **anche $\theta_{13} \neq 0$** . Prova fornita (oltre che da T2K) da 3 esperimenti con antineutrini da reattori: Daya Bay, RENO e Double CHOOZ.

Conferme di oscillazione e parametri di mixing

- L'ultimo angolo di mixing ad essere misurato è stato l'angolo tra la prima e la terza generazione dei neutrini (θ_{13}).
- Fino al 2012 esisteva solo un limite superiore per il valore di quest'angolo (ottenuto principalmente dall'esperimento da reattore CHOOZ): $\sin^2 2\theta_{13} < 0.17$ at 90% C.L..
- Le indicazioni più recenti (dallo studio di fasci di neutrini ad acceleratori LBL e da analisi fenomenologiche globali) erano a favore di un valore di $\theta_{13} \neq 0$, ma ...
- ... La prova definitiva (smoking gun) che $\theta_{13} \neq 0$:

3 esperimenti da reattori SBL (baselines ≈ 2 km).

Ricerca di deficit in IBD da antineutrini elettronici
(E from 1 to 8 MeV) da reattori.

Esperimenti da reattori SBL e θ_{13}

Daya Bay (Cina):

Fascio di antineutrini elettronici ($\bar{\nu}_e$) da reattore con near ($L \approx 500$ m) e far detector ($L=1650$ m). Probabilità di sopravvivenza per $\bar{\nu}_e$:

$$P_{ee} = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \left(1.267 \Delta m_{31}^2 \frac{L}{E} \right), \quad \Delta m_{31}^2 = \Delta m_{32}^2 \pm \Delta m_{21}^2$$

Rapporto tra eventi da antineutrini osservati e attesi al far detector è:

$R = 0.940 \pm 0.011(\text{stat}) \pm 0.004(\text{syst})$, corrispondente a $\theta_{13} \neq 0$ a 5.2σ e :

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.084 \pm 0.005$$

- **RENO** (Corea)

Near detector $L = 294$ m , far detector $L=1383$ m. Oscillazione a 4.9σ

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.101 \pm 0.008(\text{stat}) \pm 0.010(\text{syst})$$

- **Double CHOOZ** (Francia) $L=1050$ m . Simile ad altri 2 esperimenti, ma aggiunge anche analisi della forma dello spettro di antineutrino, insieme al rate del segnale. Trova:

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.090^{+0.032}_{-0.029}$$

Cosa vorremmo conoscere meglio

(parametri solo parzialmente noti e possibili anomalie)

Stato attuale di conoscenza dei parametri di massa e mixing

$$\Delta m^2_{ij} = m_i^2 - m_j^2 \text{ e } \theta_{ij} \text{ (vedi tabella)}$$

Parametro	Best fit and 1 σ range	Principali esperimenti
$\sin^2 \theta_{12}$	0.308 ± 0.017	Solari (in particolare SNO e SK), e in misura minore KamLAND
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.567^{+0.032}_{-0.128}$ (NH) oppure $0.573^{+0.025}_{-0.043}$ (IH)	Atmosferici (principalmente SK), acceleratori LBL (MINOS, K2K, T2K) e reattori.
$\sin^2 (2\theta_{13})$	0.091 ± 0.009 (NH) oppure 0.093 ± 0.009 (IH)	Reattori (Daya Bay, RENO, Double CHOOZ) e in misura minore LBL (T2K e MINOS)
Δm^2_{21}	$(7,54^{+0,26}_{-0,22} \times 10^{-5}) eV^2$	Principalmente KamLAND e solari (soprattutto SNO)
$\Delta m^2_{atm} = \frac{1}{2} \Delta m^2_{31} + \Delta m^2_{32} $	$(2,43 \pm 0,06) \times 10^{-3} eV^2$ (NH) oppure $(2,38 \pm 0,06) \times 10^{-3} eV^2$ (IH)	Atmosferici (principalmente SK) e acceleratori LBL (MINOS, K2K, T2K)
δ/π	$1.34^{+0.64}_{-0.38}$ (NH) oppure $1.48^{+0.34}_{-0.32}$ (IH)	Acceleratori LBL (T2K, MINOS) e reattori.

Cosa vorremmo conoscere meglio (b)

- Problema della determinazione della gerarchia di massa.
- Importanza di misura di precisione dei vari parametri.
- Possibili miglioramenti con esperimenti presenti e futuri: possibilità di determinazione parametri con livello di incertezza $\leq 1\%$.
- Angoli e Δm^2 misurabili a JUNO.

Cosa vorremmo conoscere meglio (c)

- Studio di spettro e pattern di oscillazione → Test dei modelli e ricerca di possibili “interazioni anomale” di neutrini.
- Studio fatto da acceleratori LBL e da solari.

Esistenza o meno di una anomalia nella regione di transizione tra vacuum e matter enhanced oscillations

Dati di SNO non riproducevano la forma attesa. I primi dati di SuperKamiokande sullo spettro nel 2014, invece, indicavano la presenza dell'upturn atteso nella zona di transizione, negli ultimi lavori e talk di SK però sembra di nuovo riaffiorare una possibile anomalia.

E' comunque auspicabile un aumento della statistica in questa regione di energie.

- Accenno a potenzialità di JUNO

Cosa vorremmo conoscere meglio (d)

- **Da fisica del neutrino: tests e miglioramento della conoscenza dei modelli solari.**
 - Misure più accurate di spettro solare a bassa energia (ν pp e pep): importanza, difficoltà e potenzialità di esperimenti futuri (accenno a SNO+ ed eventualmente agli esperimenti multi-purpose di nuova generazione).
 - Possibili misure future di neutrini CNO.
 - Problema di metallicità e versioni low Z e high Z di SSM.

Accenno a possibilità future di JUNO .

Cosa vorremmo conoscere meglio (e)

- **Problema delle anomalie**

- Reactor anti- ν anomaly (deficit, di circa 2.8σ , in dati reattori SBL rispetto a calcoli teorici dei flussi);
- “Gallium anomaly” (deficit di circa 20% per ν_e in misure di calibrazione di Gallex e SAGE);
- LSND anomaly (porterebbe ad un Δm^2 di ordine di 1 eV^2);
- Risultati contraddittori di MiniBoone.

Risultati di LSND

- Presa dati tra 1993 e 1998.
- Risultati pubblicati in diversi momenti tra 1995 e 2001. Risultati globali nel 2001.
- **Canale di oscillazione anti- ν_μ in anti- ν_e**
Eccesso di $87.9 \pm 22.4 \pm 6.0$ eventi corrispondente ad una probabilità di oscillazione (mediata sull'energia) di $0.264 \pm 0.067 \pm 0.045$
- Contemporaneamente esperimento KARMEN prese dati con fascio analogo a Rutherford Laboratory, ma con baseline più corta ($L = 17.7$ m) . KARMEN non osservò oscillazione e in questo modo limitò lo spazio dei parametri possibili da LSND.

Cosa non conosciamo

- Qual è la vera **natura** del **neutrino** ? Fermione di **Dirac** o di **Majorana** ?
- Ricerca di doppio decadimento β senza neutrino.
- **Perché la massa** del neutrino è **così leggera** → Quali modelli teorici descrivono correttamente la massa ?
- Qual è la **scala assoluta delle masse**?
- Studio di end point di decadimento β ; estrazione di valore masse da esperimenti di astrofisica (WMAP, Planck) .
- Qual è la **gerarchia delle masse**? Gerarchia diretta o inversa?

→ **Impatto sui modelli teorici.**

- **Possibilità di testare la gerarchia: JUNO e RENO 50**
- Esiste la **violazione di CP nel settore leptónico**?
- Condizione per avere CP violation e possibile verifiche sperimentali: collegamento con SOX.
- Esistono altre generazioni di neutrini (oltre alle 3 famiglie del modello Standard) ?
- **Possibili indicazioni** in favore di **neutrini sterili** (anomalie già discusse ed indicazioni eventuali da astrofisica).
- **Verifiche sperimentali: SOX.**