Neutrini Solari: analisi fenomenologica degli ultimi risultati di SNO

P. Aliani[a,b], V. Antonelli[a,b], R. Ferrari[a,b], M. Picariello[a,b], E. Torrente-Lujan[a,c]

[a] Dipartimento di Fisica, Università di Milano

[b] INFN, Sezione di Milano

[c] Universidad Autonoma de Madrid, CERN Theory Division

Sommario

- Fisica del neutrino: problema centrale di massa e oscillazioni ν
- Il *solar neutrino problem*:
  - Situazione pre e post-SNO
- La nostra analisi:
  - Modelli di mixing
  - Studio fenomenologico: codici numerici e analisi statistica
- Determinazione dei parametri di mixing (masse e angoli)
- Esperimenti e possibili scenari futuri
- Commenti finali e conclusioni

Breve storia del neutrino

Dopo una lunga e affascinante storia il neutrino occupa ancora un ruolo centrale nella fisica delle particelle elementari

- Sua esistenza postulata da Pauli negli anni '30
- Metodo di Fermi-Perrin: studio della massa del ν con l'analisi dello spettro β vicino all'*end point*
- Primo limite sperimentale (fine '40): $m_\nu \leq 500eV$
- Goldhaber('58): ν è una particella *left handed*
- Pontecorvo ('57): ipotesi di oscillazione del ν
- Versione *minimale* del Modello Standard: ν è una particella left handed senza massa
- Dati sperimentali: chiare indicazioni che il neutrino è una particella massiva (oscilla)
- Domande aperte: natura e origine di massa ν e spiegazione della sua *leggerezza*
- *Palestra* per nuove teorie (extradimensioni, SuSy and teorie unificate) e implicazioni rilevanti per i modelli cosmologici

Indicazioni di masse e oscillazioni dei ν

Ricerche di massa ν e di fenomeno oscillazioni:

- (1) Ricerche cinematiche dirette: decadimenti β e *neutrinoless double* β (recente affermazione di scoperta di massa ν)
- (2) ν da reattori e acceleratori:
  - (2a) Reattori *Shortbaseline* (SBL) (CHORUS, NOMAD, etc.): nessun segnale di oscillazioni
  - (2b) Reattori *Longbaseline* (LBL) (CHOOZ e Palo Verde): limiti importanti su $\sin^2(2\theta), \Delta m^2$
  - (2c) LSND: segnale di oscillazioni di $\bar{\nu}_\mu$; implicherebbe grandi $\Delta m^2 \to \nu$ sterile
  - (2d) Acceleratori LBL
    - K2K ($L \simeq 250$ Km): conferma oscillazioni
    - progetto Cern-G.Sasso
- (3) ν atmosferici (SK,IMB, Soudan, Macro)
- (4) ν solari

Esperimenti sui ν atmosferici

- Prodotti in seguito a processi innescati dai raggi cosmici nell'atmosfera. Valori di Rapporto tra ν_μ e ν_e e distribuzione angolare di flusso neutrini sono note.

- Primi esperimenti: Kolar (India) e Sud Africa.

- Oggi 2 categorie di esp.:
  - Cherenkov ad H_2O (Kamiokande, SK, IMB),
  - Calorimetri con piatti di ferro (Frejus, Nusex, Soudan), Macro

- Si misurano:
  (a) double ratio : $R = \frac{(\frac{\mu}{e})_{dati}}{(\frac{\mu}{e})_{MC}}$
  valore sper. indica deficit di eventi originati da ν_μ
  (b) Asimmetria *up-down*: $A_{e,\mu} = \frac{U-D}{U+D}$ $A_\mu \simeq 1/2$
  per alti valori del momento

- Risultati sperimentali in accordo con ipotesi di oscillazione dei neutrini. Possibilità di $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ con parametri di mixing:
  $\Delta m^2 \simeq 1.5 - 4 \times 10^{-3} eV^2$, $sin^2(2\theta) > 0.88$

Esperimenti sui ν solari

- Fine anni '60: prima misura flusso ν solari a Homestake
  ($^{37}Cl + \nu_e \rightarrow ^{37}Ar + e^-; E \simeq 0.81 MeV$) ($\nu$ da $^8B, ^7Be$,pep,hep)
  - Misura un deficit di $\nu \geq 60\%$
  - Cosa succede ai ν durante il loro cammino dal sole alla terra?
  - Il Modello Solare Standard (SSM) potrebbe essere sbagliato ?
- Altri esperimenti, con decadimento β di gallio: Sage e Gallex/GNO
  ($E_{thresh.} \simeq 233 KeV$; sensibile anche ai neutrini pp)
  - Conferma di risultati Homestake: il segnale misurato è solo il 55% del segnale atteso
  - Implicazioni teoriche del fenomeno delle oscillazioni del ν: segnale di nuova fisica ?
- Anni '90 Kamiokande e SK misurano lo scattering elastico $\nu_e - e^-$ in H_2O

  (sensibili solo a ν da ^8B ed hep)
  - conferma di deficit flusso di ν_e . Studio di asimmetrie *day-night*, distorsione dello spettro e variazioni stagionali del segnale: vincoli sui parametri di mixing
- 2001: Primi dati da SNO (CC e ES)
- 2002: Nuovi dati da SNO (incluse NC)

Il rivelatore SNO

1. Rivelatore Cherenkov con D_2O
2. Osservazione simultanea di diversi tipi di reazioni: scattering elastico (ES), correnti deboli cariche (CC) e neutre (NC)
   Misura di flusso di neutrini solari e prova di esistenza oscillazioni ν
3. Prima fase: risultati su ES e CC
   (Phys. Rev. Lett. **87 (2001) 071301**)
   conferma di validità SSM e del fenomeno delle oscillazioni
4. Seconda fase: dati su correnti neutre
   (nucl-ex/0204008 & nucl-ex/0204009)
   Prima misura diretta di flusso totale ν solari
   Conferma risultati di Luglio 2001 e forte indicazione a favore della soluzione del *solar neutrino problem*
5. Terza fase: aggiunta di sale
   Migliorerà la rivelazione di correnti neutre

Principi di funzionamento di SNO

Rivelazione di diverse reazioni:

$$\nu_e + d \to e^- + p + p$$

$$\nu_x + d \to \nu_x + n + p$$

$$\nu_x + e^- \to \nu_x + e^-$$

- Il flusso ricavato dal numero di eventi **NC** si può confrontare con il valore previsto dal SSM.
- La determinazione simultanea del numero di eventi **CC** e **NC** permette di fornire una stima della frazione di ν_e che si sono trasformati in ν_μ & ν_τ

SNO fase I

(Phys. Rev. Lett. **87 (2001) 071301**)

- Dalle (CC) $\rightarrow$ misura diretta di $\Phi_{\nu_e} = 1.75 \times 10^6 cm^{-2} s^{-1}$ ($\simeq$ 35% of S.S.M.)
- Dal confronto con SNO ES e SK ES: chiara indicazione dell'oscillazione dei ν_e in neutrini attivi (ν_μ, ν_τ)
- Misura del flusso totale ν attivi:
  - Ottimo accordo con SSM
  - L'ipotesi *Sterile* ν è sfavorita
- Indicazioni importanti circa la possibile soluzione del *puzzle* dei ν solari, ma ancora non c'è una risposta unica (*crystal-clear*)

Overview dei risultati recenti

(dopo 306 *live days*)

- Uso dei dati di ES, NC, CC e assunzione dell'ipotesi di non deformazione dello spettro per ^{8}B. Soglia $E_{cin} \geq 5MeV$.
- Risultati:
  (tutti i flussi sono in unità di $10^6 \mathrm{cm}^{-2}\mathrm{s}^{-1}$)
  $$\begin{aligned} \phi_{^8\mathrm{B}}(\nu_e) &= 1.76\ ^{+0.05}_{-0.05}\ (\mathrm{syst.})\ ^{+0.09}_{-0.09}\ (\mathrm{stat.}) \\ \phi^{\mathrm{NC}}_{^8\mathrm{B}}(\nu_{\mathrm{TOT}}) &= 5.09\ ^{+0.44}_{-0.43}\ (\mathrm{syst.})\ ^{+0.46}_{-0.43}\ (\mathrm{stat.}) \end{aligned}$$
- NC in accordo con previsione di SSM:
  $$\begin{aligned} \phi_{^8\mathrm{B}}(\nu_e) &= 5.05\ ^{+0.46}_{-0.43} \\ \phi(\nu_{\mu,\tau}) &= 3.41\ ^{+0.66}_{-0.64} \\ 5.3\sigma \neq 0 &\Rightarrow \text{chiara indicazione di oscillazione } \nu \end{aligned}$$

La nostra analisi

(hep-ph/0111418, hep-ph/0112101, hep-ph/0205053 e hep-ph/0205061)

- Studio fenomenologico di tutti i dati sui neutrini solari includendo i recenti dati di SNO
- Inclusione di vincoli da CHOOZ e ν atmosferici
- Scopo dell'analisi:
  -determinazione delle regioni permesse nello spazio dei parametri di mixing
  -previsioni per esperimenti futuri (Borexino e kamLAND)
- Strategia:
  -ipotesi di oscillazione ν;
  -introduzione dell'interazione con la materia
  -determinazione probabilità di transizione
  -calcolo funzione di risposta dei rivelatori
  -confronto con risultati sperimentali
  -analisi statistica con metodo del χ^2

Analisi statistica e numerica

- Rapporto tra i segnali calcolati e quelli previsti nel SSM in assenza di oscillationi
  $R_a^{th} = S_a^{th}/S_a^{SSM}$, a=$\{Cl,\ Ga,\ SK_i\}$
- Confronto con i rapporti sperimentali ed analisi del χ^2

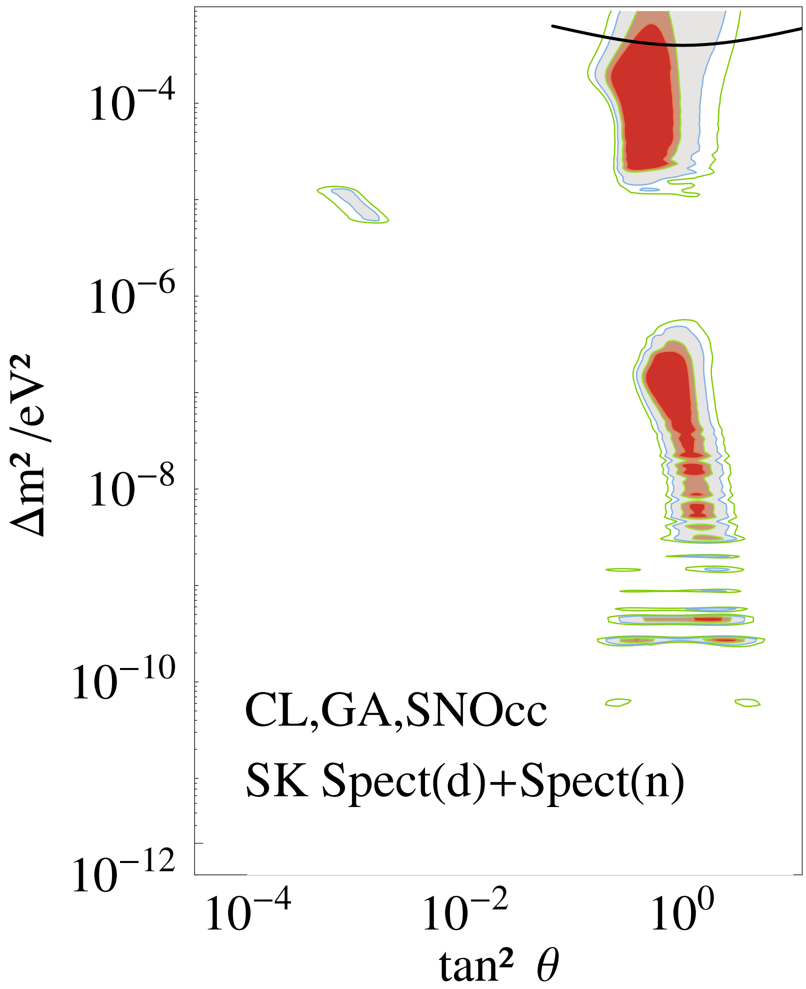
$$\chi^2 = \left(\alpha\mathbf{R}^{th} - \mathbf{R}^{exp}\right)^T \left(\sigma^{\mathbf{2}}\right)^{-1} \left(\alpha\mathbf{R}^{th} - \mathbf{R}^{exp}\right) + \left(\frac{\alpha - \alpha^{th}}{\sigma_\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\beta - \beta^{th}}{\sigma_\beta}\right)^2 + \left(\frac{A_e^{th} - A_e^{exp}}{\sigma_A}\right)^2$$

Minimizazione nei 2 parametri introdotti per tener conto dell'incertezza nel fattore di normalizzazione del flusso e nella correlazione dei bin di SK

- Determinazione del χ^2_{min} e ricerca dei parametri di mixing tali che:
  $\Delta\chi^2 = \chi^2(\Delta m^2, \theta) - \chi^2_{min} < \chi^2_n(C.L.)$

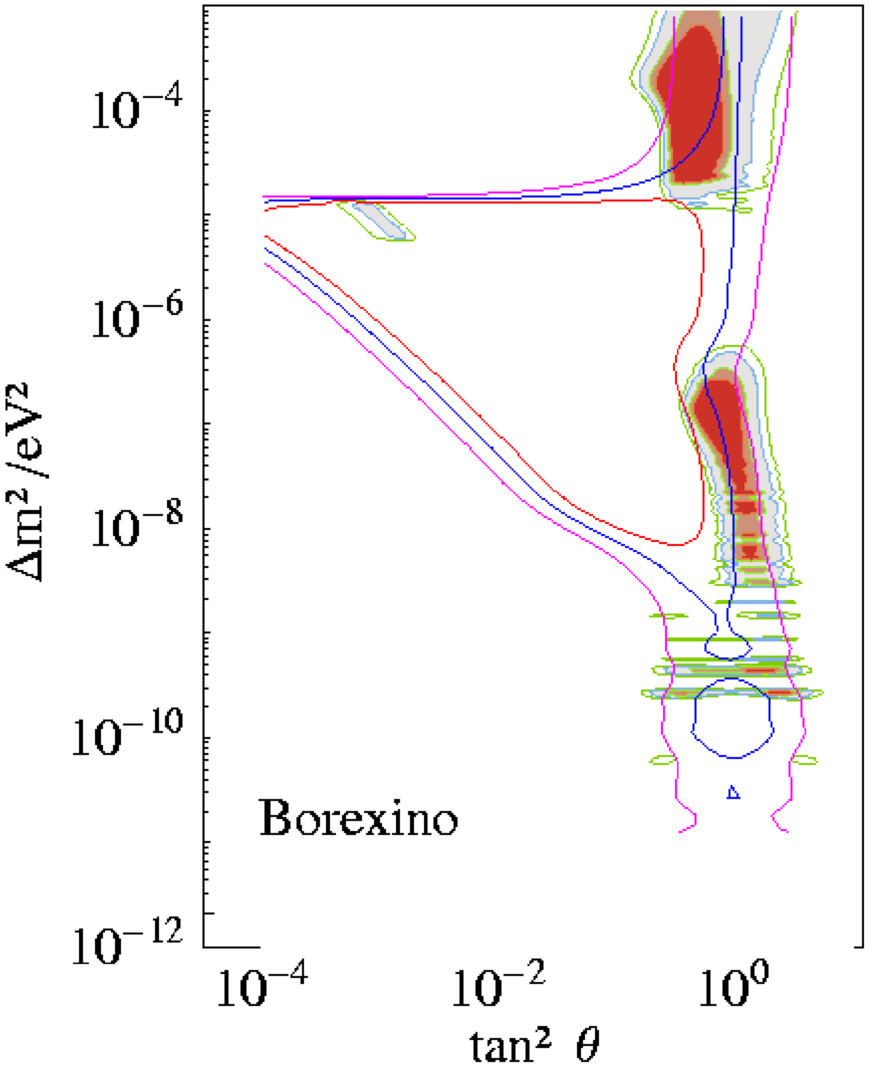
La situazione nel 2001

- Regioni permesse dai dati diversi *confidence levels* (90%, 95%, 99% and 99.7%)
- LMA (minimo assoluto) e LOW erano preferite. Le soluzioni SMA e VACuum fortemente sfavorite



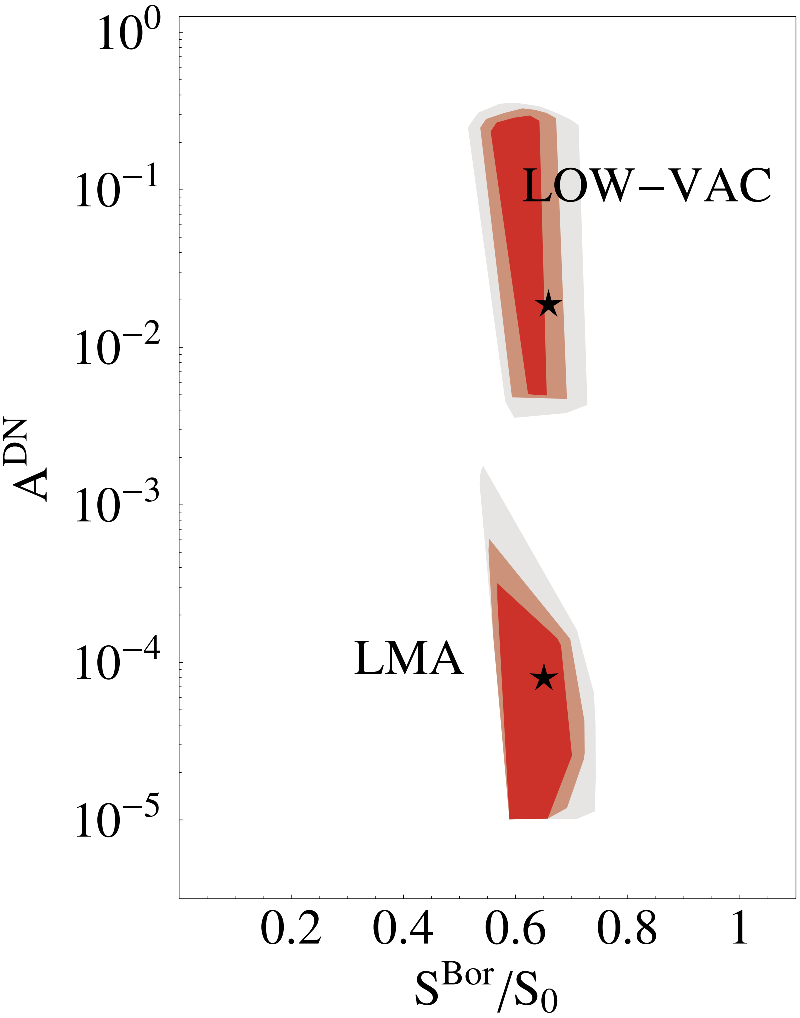
Borexino: analisi del segnale globale

- Segnale di Borexino (normalizzato al SSM) uguale a 0.5 (linea interna), 0.6 e 0.7 .
- SMA facilmente distiguibile (segnale ≤ 0.5). Per discriminare tra LMA e LOW, sarebbe richiesta una precisione di $5 - 10\%$



L'asimmetria Day-Night in Borexino

- Valori dell'asimmetria day-night prevista per Borexino. Chiara distizione tra la LMA e la LOW



L'impatto dei nuovi dati di SNO

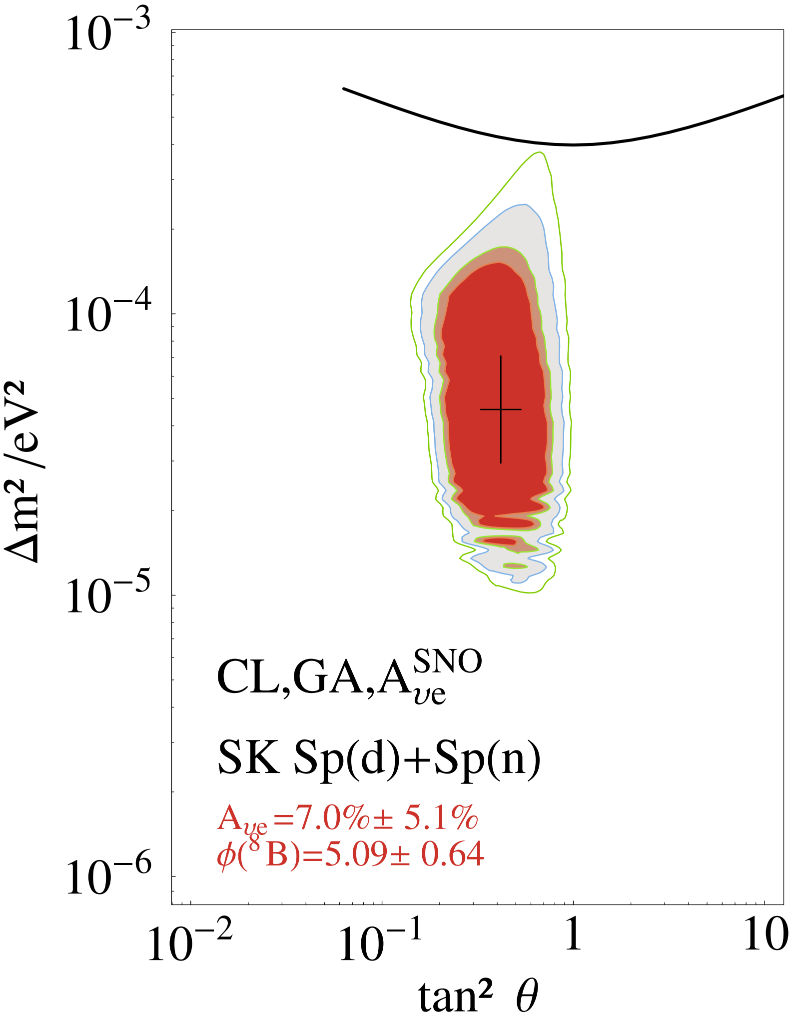
- Componente non-elettronica del flusso di ν è $\approx 3\sigma > 0 \rightarrow$ più forte indicazione di oscillazioni nel settore leptonico.
- Assumendo non distorsione dello spettro
  - $\frac{\Phi_{CC}}{\Phi_{ES}} = 0.73^{+0.10}_{-0.07}$
  - $\frac{\Phi_{CC}}{\Phi_{NC}} = 0.34^{+0.05}_{-0.04}$

  Si discosta di molti sigma dal risultato del SSM.
- Assumendo valori di flusso previsto dal SSM, $\sin^2\alpha = \frac{\Phi_{NC}-\Phi_{CC}}{\Phi_{SSM}-\Phi_{CC}} = 0.93^{+0.39}_{-0.20}$
- Sono ancora possibili le oscillazioni in neutrini sterili, ma l'ipotesi di transizione solo in sterili è esclusa a 5σ.

Mixing parameters

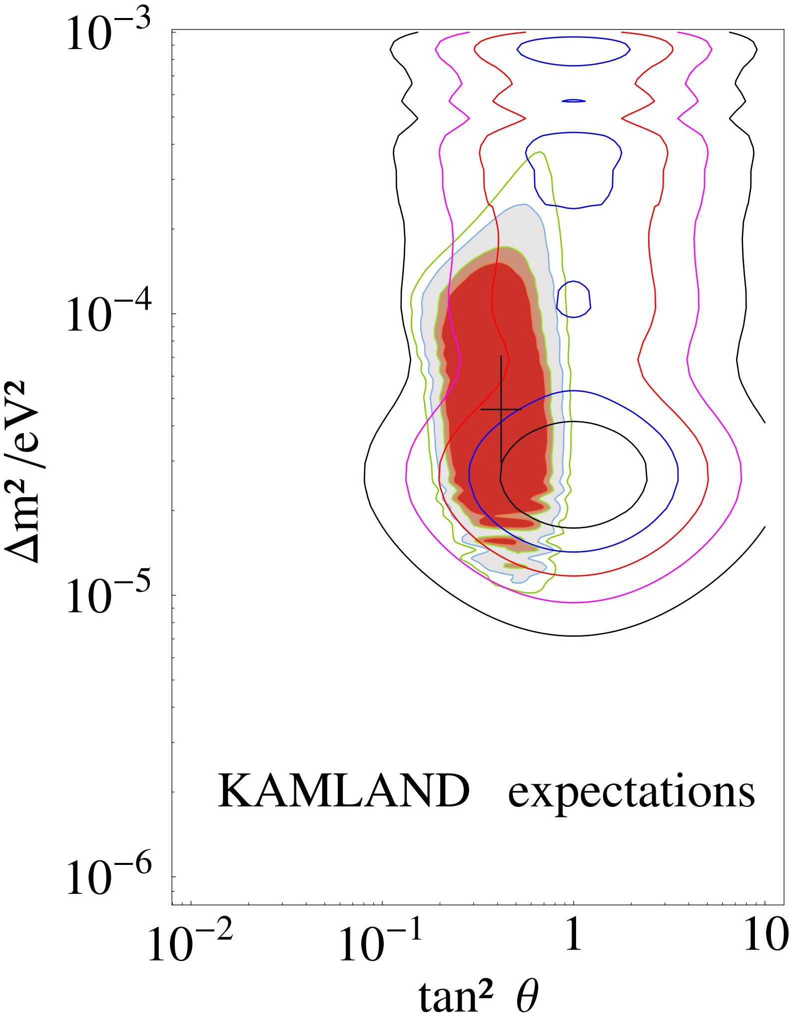
hep-ph/0205053

Analisi nella regione LMA
Minimo per $\Delta m^2 = 5.44 \times 10^{-5}$ eV^2 e
$\tan^2\theta = 0.40$, g.o.f $= 80\%$



Potenzialità di kamLAND

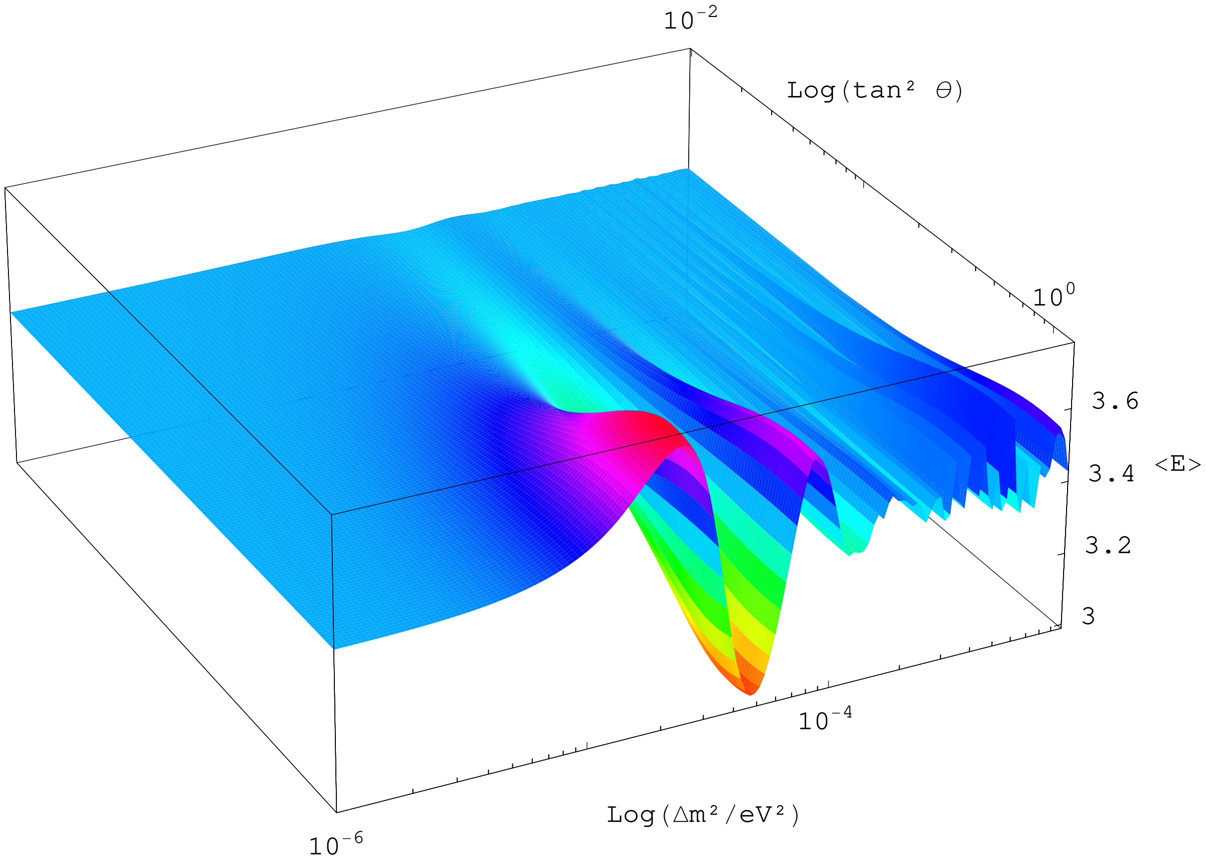
Analizzare in dettaglio la soluzione LMA



Potenzialità di kamLAND

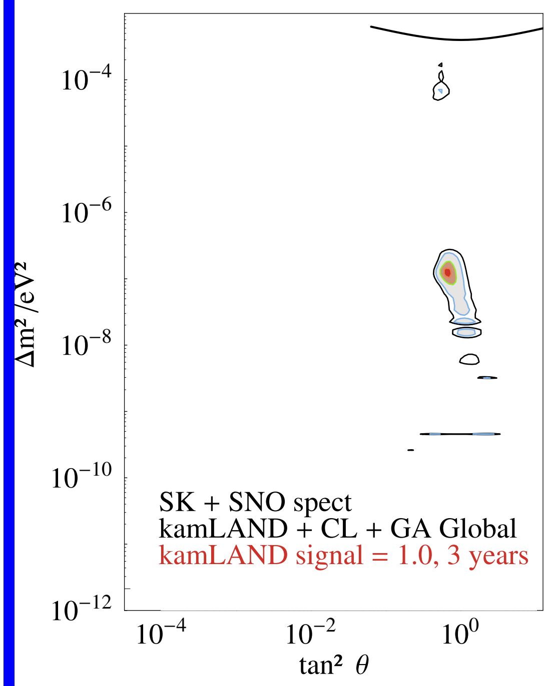
Utilizzare lo studio del momento

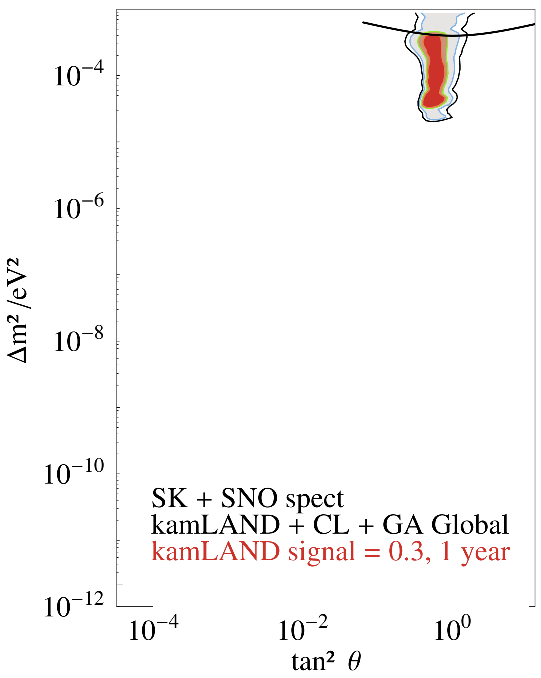
$$< E > \quad = \quad \frac{\sum \overline{E_i} S_i}{S_{tot}}$$



Potenzialità di kamLAND

Discriminare LMA da LOW





Conclusioni

- Fisica del neutrino: massa e oscillazioni ν
- Il *solar neutrino problem*:
  - Situazione pre e post-SNO
- La nostra analisi:
  Determinazione dei parametri di mixing
  (masse e angoli)
  - LMA favorita
  - LOW permessa
  - SMA, *only sterile* escluse
- Potenzialità di kamLAND e Borexino

Approfondimenti

- Analisi dei dati sui neutrini atmosferici
- Vincoli sperimentali sui modelli fenomenologici

  (per i quarks: hep-ph/0202055 F. Caravaglios et al.)