

SN1987A e proprietà del segnale di neutrini

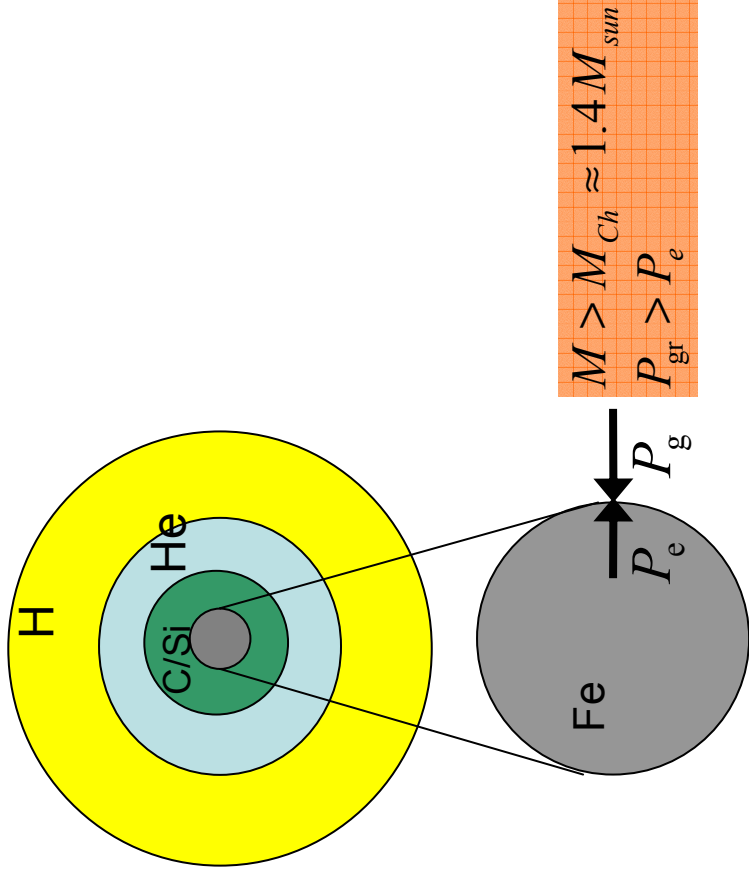
Maria Laura Costantini, Università dell'Aquila

Abstract:

- Generalità sul collasso gravitazionale
- Emissione di neutrini nel “delayed scenario”
- Descrizione dei flussi ed effetto delle oscillazioni
- Analisi dei dati di IMB e Kamiokande-II
- Sulla distribuzione angolare dei dati

Supernovae ed emissione di neutrini

- *Nella fase finale del ciclo evolutivo di stelle di grande massa si forma un core di ferro sostenuto dalla pressione di degenerazione elettronica.*



Effetti del collasso gravitazionale del core:

- esplosione della stella
- formazione di una stella di neutroni
- copiosa emissione di neutrini:

$$\Delta E_\nu \approx 99\% E_B \text{ (neutrini)}$$

$$E_B \approx \frac{3}{5} G_N \frac{M_{NS}^2}{R_{NS}} \approx (1-5) \cdot 10^{53} \text{ erg}$$

“Delayed scenario”

1) Infall Phase. $\Delta t \sim 0.1 \text{ s}$, $\Delta E < 1\% E_B$

$$\nu_e + (Z, A) \rightarrow \nu_e + (Z, A) \Rightarrow \nu\text{-trapping}$$

2) Bounce and “Flash”. $\Delta t \sim \text{ms}$, $\Delta E \sim 1\% E_B$

$\rho_{\text{ic}} \sim 10^{14} \text{ g cm}^{-3} \Rightarrow$ Rimbalzo, onda d’urto

3) “Accretion”. $\Delta t \sim 500 \text{ ms}$?, $\Delta E \sim 10\% E_B$?

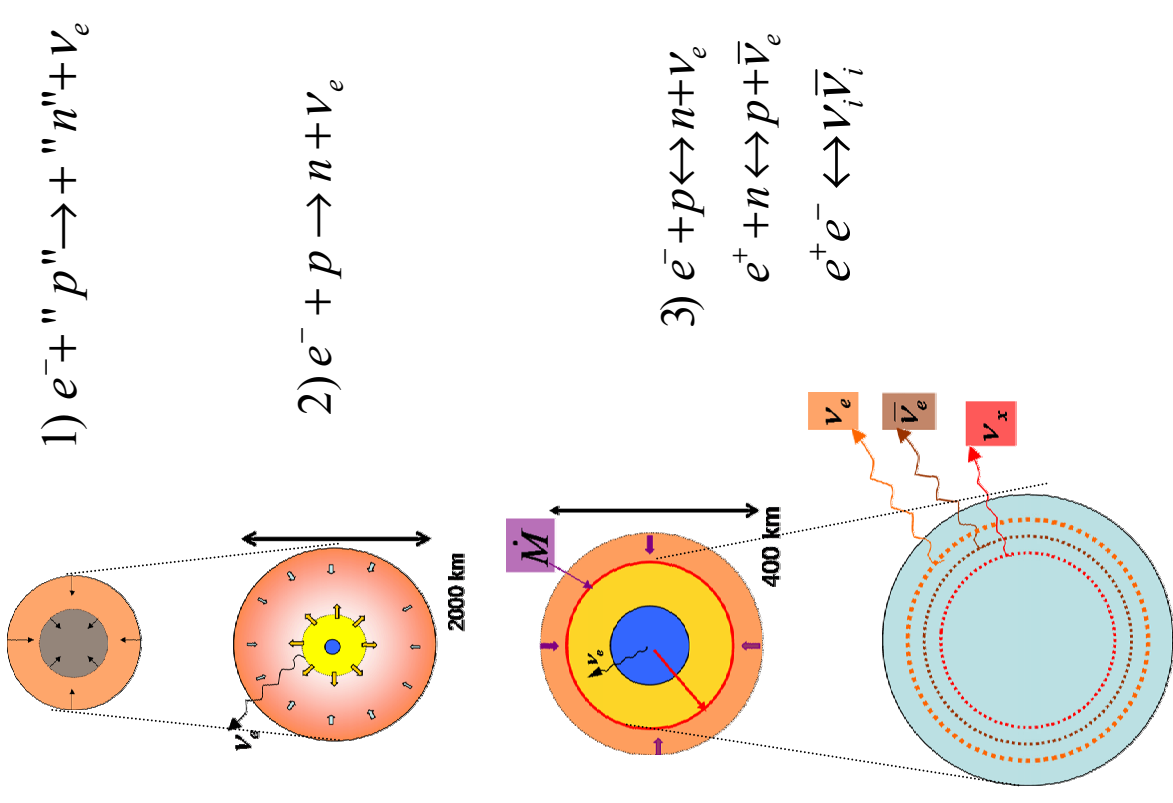
Lo shock si arresta. La PNS si accresce

“Shock revival” \equiv energia depositata dai neutrini + moti convettivi(?) \Rightarrow Esplosione

4) “Cooling”. $\Delta t \sim 10 \text{ s}$, $\Delta E \sim 90\% E_B$

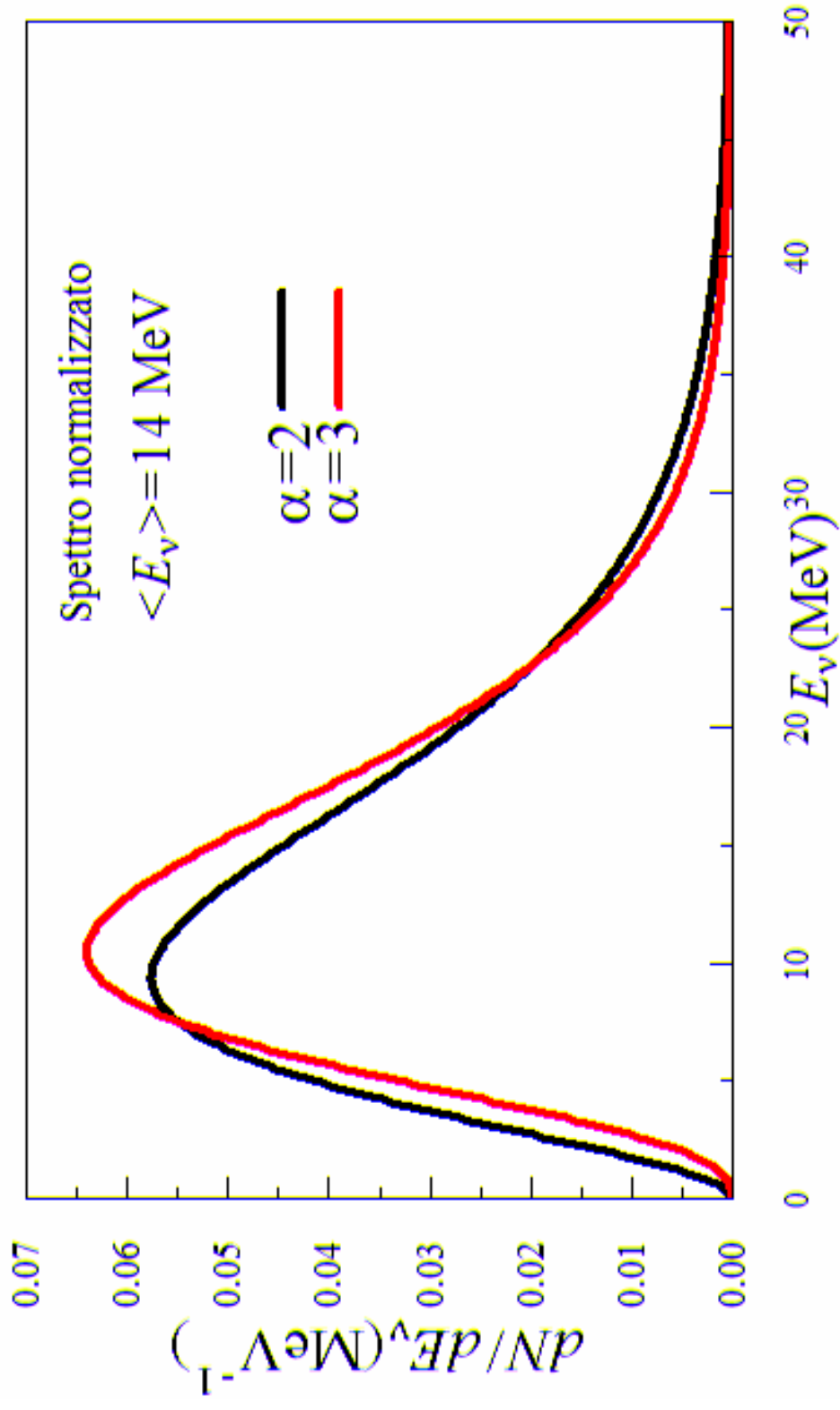
$$\nu_e, \bar{\nu}_e: CC + NC (m Y_p > Y_n);$$

$$\nu_x \equiv (\text{anti})\nu_\mu, \nu_\tau: NC$$



Emissione quasi termica

$$\rho_{MB} = E^\alpha \exp[-E/T]; \quad \alpha > 2$$



Flussi aspettati

Descrizione analitica dei flussi integrati nel tempo:

$$F_i(E) = \frac{\mathcal{E}_i}{4\pi D^2} \frac{N}{\langle E_i \rangle} z^\alpha e^{-(\alpha+1)z}, \quad z = \frac{E}{\langle E_i \rangle}, \quad i = e, \bar{e}, x$$

$N = (\alpha+1)^{\alpha+1} / \Gamma(\alpha+1)$ tale che $\int E F(E) dE = \mathcal{E}_i / 4\pi D^2$

- \mathcal{E}_i è l'energia portata dai neutrini di tipo i
- $\langle E_i \rangle$ è l'energia media dei neutrini di tipo i

I valori attesi per le quantità integrate nel tempo sono:

$$\langle E_{\bar{e}} \rangle = 12 - 18 \text{ MeV} ; \quad \langle E_x \rangle / \langle E_{\bar{e}} \rangle = 1 - 1.2$$
$$\mathcal{E}_{\bar{e}} = (2 - 10) \times 10^{52} \text{ erg} ; \quad \mathcal{E}_x / \mathcal{E}_{\bar{e}} = 1 / 2 - 2$$

Effetto delle oscillazioni

Nell'ipotesi che i ν_x abbiano flussi simili, avremo:

$$F_{\bar{e}} \rightarrow P_{\bar{e}\bar{e}} F_{\bar{e}} + (1 - P_{\bar{e}\bar{e}}) F_x$$

$$F_e \rightarrow P_{ee} F_e + (1 - P_{ee}) F_x$$

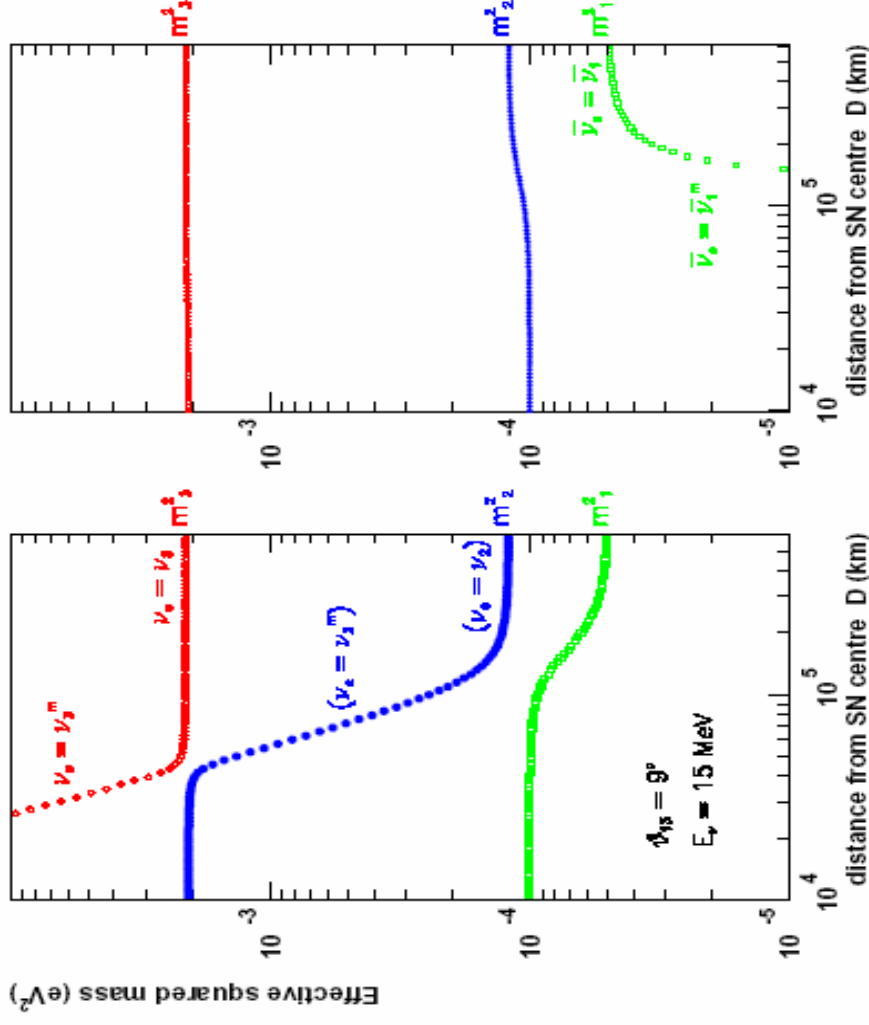
• Se la gerarchia di massa è come

in figura: $\bar{\nu}_e \rightarrow \nu_1$

• Se θ_{13} è grande: $\nu_e \rightarrow \nu_3$

$$P_{\bar{e}\bar{e}} = 0.7$$

$$P_{ee} = 0 - 0.3 \text{ (dipende da } \theta_{13} \text{)}$$

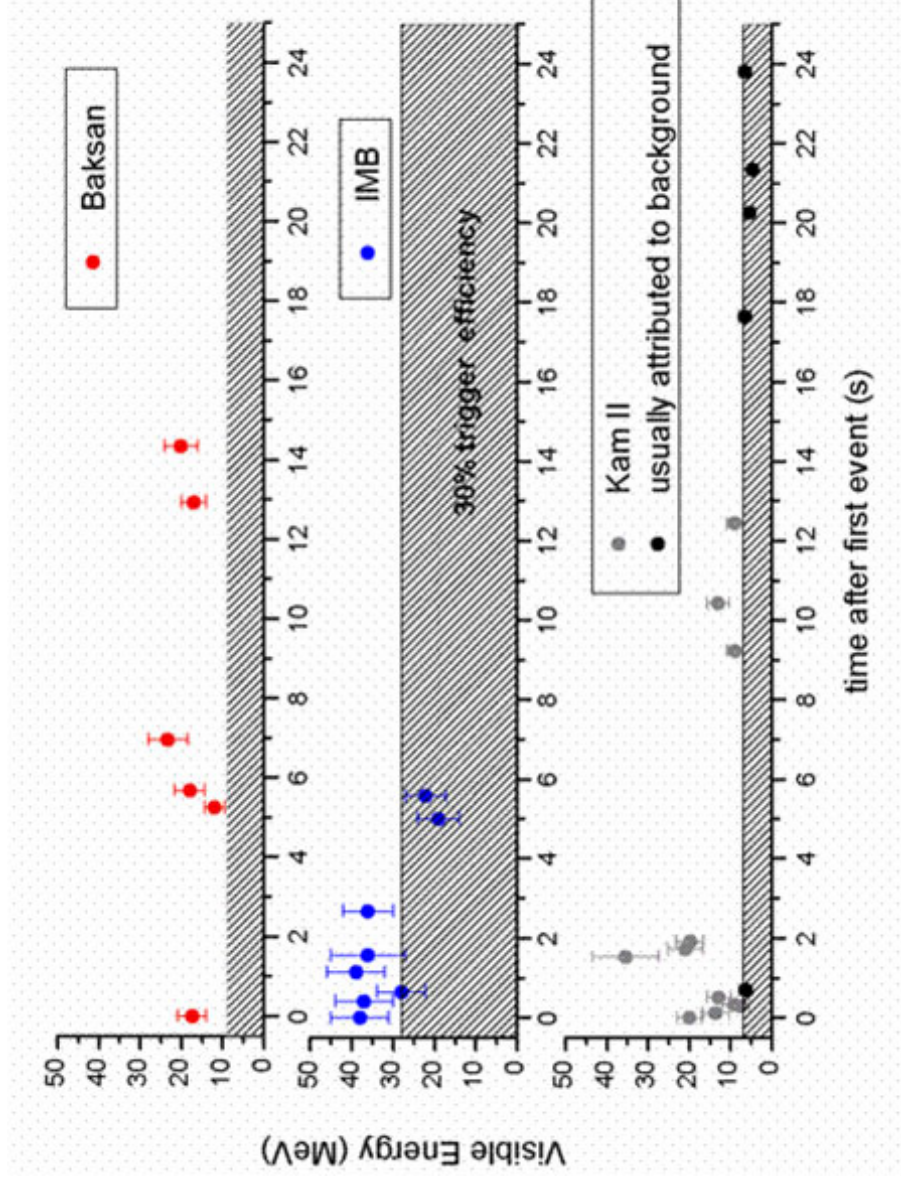


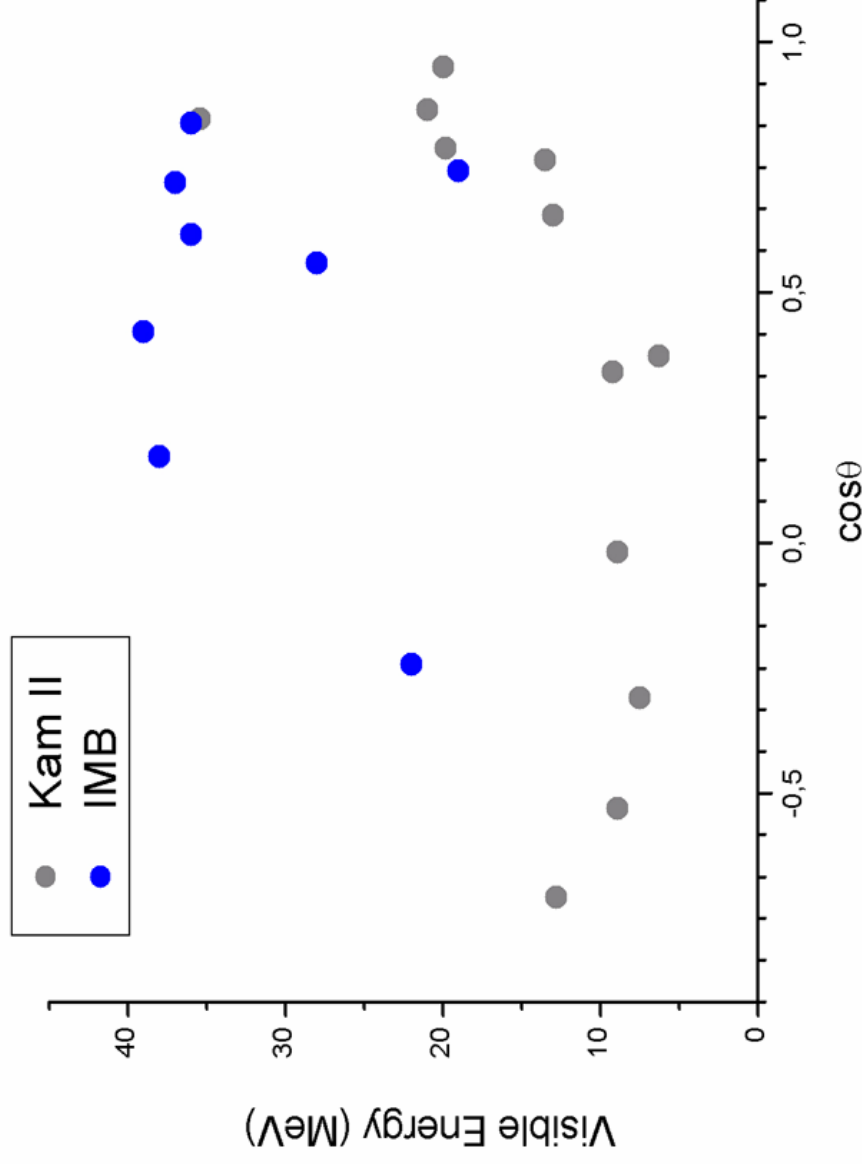
$$\Delta m_{21}^2 \approx 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2; \quad \theta_{12} \approx 34^\circ$$

$$\Delta m_{31}^2 \approx 7 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

SN1987A

Il burst di neutrini è stato osservato dai rivelatori KamII (11 eventi) e IMB (8 eventi), supportati dall'osservazione di 6 eventi in BST. Esiste una ulteriore osservazione (5 eventi) al Mont Blanc Scintillator Detector (LSD), che precede le altre di ~5 ore.





$$\langle \cos \theta^{KII} \rangle \approx 0.3, \quad \langle \cos \theta^{IMB} \rangle \approx 0.5$$

$$\langle E_{vis}^{KII} \rangle \approx 15 \text{ MeV}, \quad \langle E_{vis}^{IMB} \rangle \approx 30 \text{ MeV}$$

Ipotesi di Inverse Beta Decay

In acqua il segnale dominante prodotto dai neutrini da Supernova, assumendo le energie tipiche descritte in precedenza, è dato dalla reazione di **Inverse Beta**

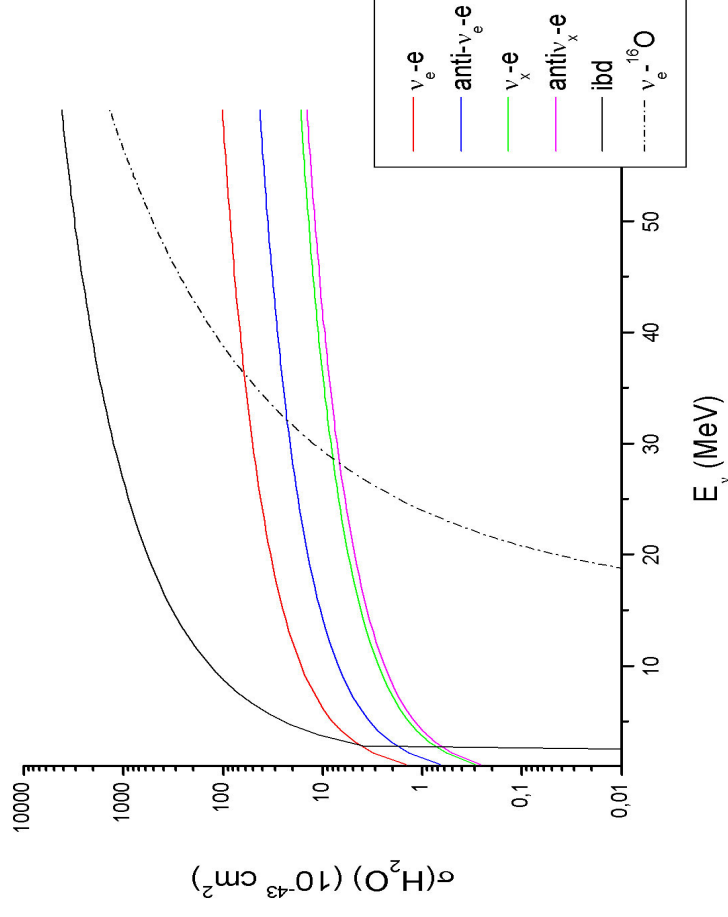
Decay:



Il tasso differenziale di eventi attesi è dato da:

$$\frac{dN_{ibd}}{dE_\nu dE_e} = N_p F(E_\nu) \varepsilon(E_e) \frac{d\sigma_{ibd}}{dE_e}(E_e, E_\nu)$$

Integrando la precedente si ottengono facilmente le distribuzioni differenziali in energia e in angolo.



Confronto con i dati

Energia media visibile e numero totale di eventi attesi in KII e IMB in funzione di E_0 .

I valori osservati sono:

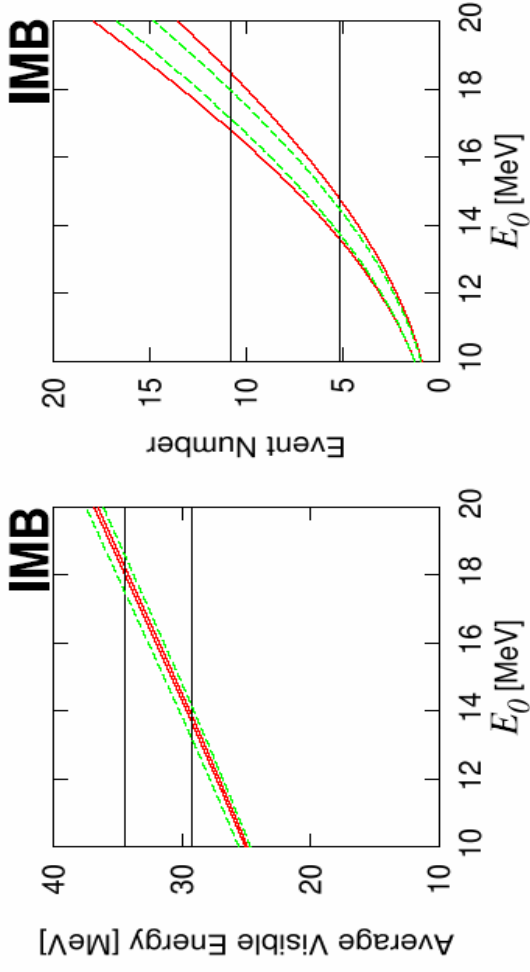
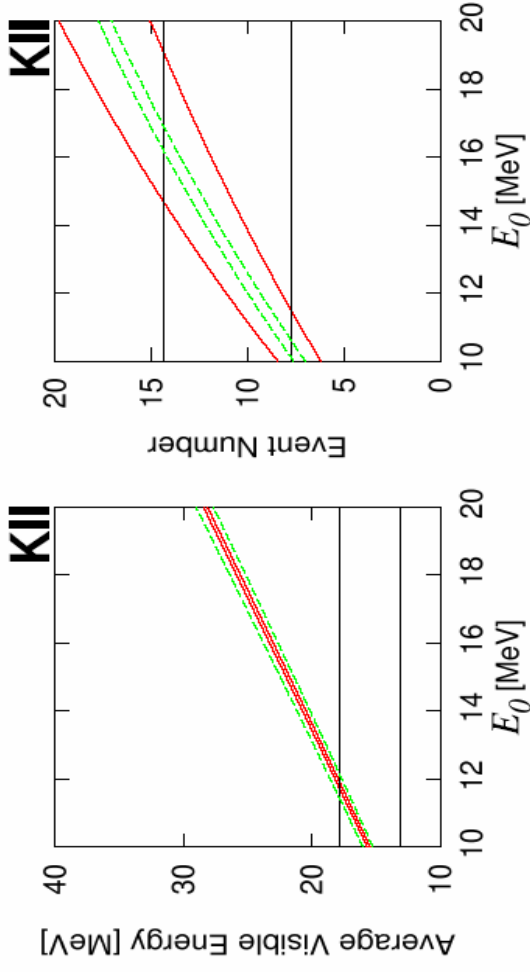
$$N_{IMB} = 8 \pm \sqrt{8}; \quad \langle E_{vis}^{IMB} \rangle = 31.9 \pm 2.6 \text{ MeV}$$

$$N_{KII} = 11 \pm \sqrt{11}; \quad \langle E_{vis}^{KII} \rangle = 15.4 \pm 2.4 \text{ MeV}$$

Un accordo ragionevole per:

$$E_0 = \langle E_e \rangle = 14 \text{ MeV}$$

$$\mathcal{E}_e = 4 \times 10^{52} \text{ erg}$$



Distribuzione angolare

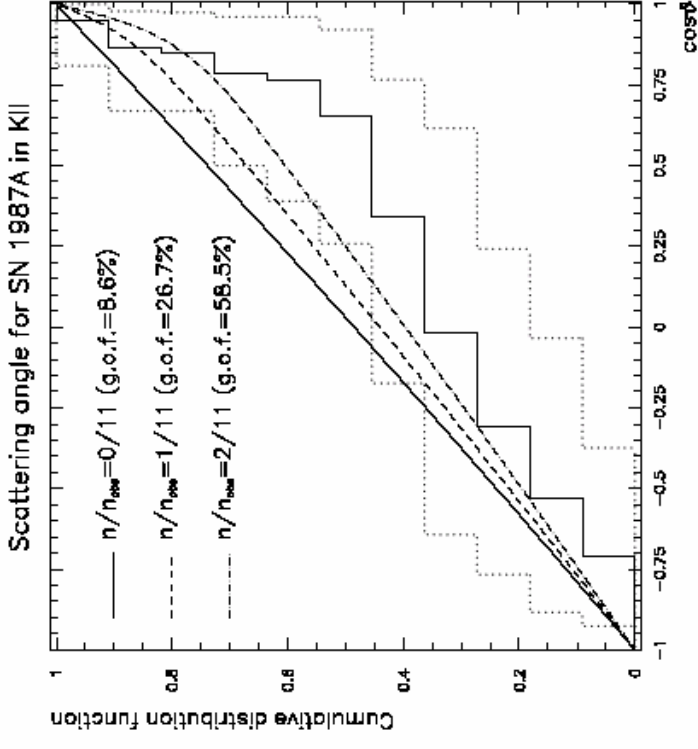
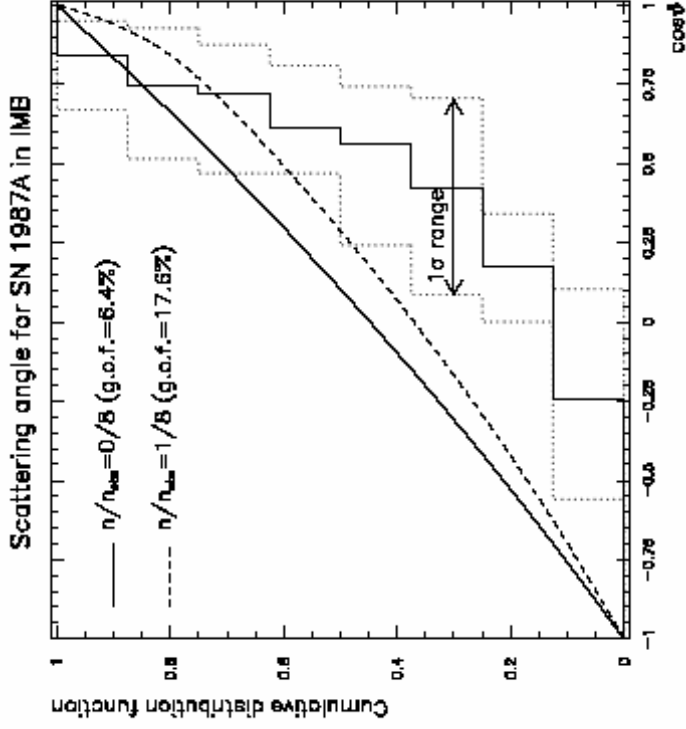
Abbiamo utilizzato la statistica di Smirnov-Cramer- Von Mises per testare la distribuzione angolare sotto varie ipotesi (IBD ed ES).

$$\rho = \frac{n_{ES}}{n_{obs}} \rho_{ES} + \left(1 - \frac{n_{ES}}{n_{obs}}\right) \rho_{ibd}$$

Abbiamo confrontato inoltre il risultato di questo test con un'analisi di Maximum Likelihood:

$$\text{Per IMB: } n_{ES} / n_{obs} < 0.12 (1\sigma)$$

$$\text{Per KII: } n_{ES} / n_{obs} = 0.23^{+0.21}_{-0.18} (1\sigma)$$



- La distrib. angolare suggerisce la presenza di diversi eventi direzionali
- Il modello predice solo 0.4 (0.1) eventi in KII (IMB) circa - dipende da \mathcal{E}_x
- Il compromesso tra le due indicazioni dice 0, 1 (forse 2) eventi di ES in KII, e 0, (forse 1) eventi di ES in IMB.



E' interessante considerare sotto quali condizioni sia possibile *aumentare il numero di eventi di scattering elastico*:

- Una parte significativa dell'energia del collasso ($\sim 1.5 \times 10^{53}$ erg) è emessa sotto forma di **v_e molto energetici** (40 MeV). Questo non aiuta perché a causa delle oscillazioni $v_e \rightarrow v_x$ (in KII, $N_{\text{dir}} = 0.6$)
- Nell'ambito dello scenario standard, i v_x potrebbero essere più energetici di quanto si assume. Questo aiuta per lo **spettro in energia**.
- Oscillazioni: se **θ_{13} è molto piccolo**, $P_{ee} = 0.3$, ma il numero di eventi direzionali nello scenario standard non varia in modo significativo. Invocando invece v_e molto energetici verrebbe chiamato in causa l'assorbimento su ossigeno, che non si osserva.

Conclusioni

Abbiamo rianalizzato il segnale della SN1987A nei rivelatori IMB e KamII alla luce delle oscillazioni a tre neutrini nell'ipotesi di gerarchia normale.

Le osservazioni forniscono informazioni utili sui parametri astrofisici del collasso nello scenario standard:

$$\langle E_{\bar{\nu}_e} \rangle \approx 12 - 16 \text{ MeV}; E_B \approx (2 - 3) \times 10^{53} \text{ erg}$$

L'ipotesi di inverse beta decay è in ragionevole accordo con i dati, sebbene la distribuzione angolare suggerisca la presenza di uno o più eventi direzionali.

➤ Le informazioni della **distribuzione angolare**, combinate con le **aspettative a priori** sul numero di eventi, indicano che **i dati comprendono qualche evento di ES, specialmente se \mathcal{E}_x è relativamente grande**, come suggerito da calcoli recenti.

E' di grande interesse osservare eventi di ES ed in generale reazioni da neutrini elettronici provenienti dalla prossima Supernova Galattica.

Grazie a tutti per l'attenzione!