Limiti cosmologici sulla massa dei neutrini (cenni qualitativi)

Teorema di Hubble: l'espansione dell'universo é isotropa. Dalla meccanica newtoniana ne consegue che l'energia totale di una massa di prova m a distanza $R(t)r$ da un punto generico dell'universo é:

$$E = T + V = -1/2(\dot{R}r)^2 m + \frac{GMm}{Rr} = costante$$

dove $R(t)$ é il parametro che tiene conto dell'espansione di Hubble,
$M = 4/3\pi\rho(R(t)r)^2$ é la massa contenuta nella sfera di raggio $R(t)r$

Relativitá generale: si ritrova la stessa equazione con la costante quantificata:
Equazione di Friedman:

$$\dot{R}^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho R^2 = -kc^2$$

k=1: espansione infinita

k=0: universo piatto

k=-1: big crunch

La densitá critica ρ_c per cui l'universo risulta piatto é cosí:

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

dove $H = \dot{R}/R$ é la costante di Hubble: $H = h \cdot 100 km\, s^{-1}\, Mpc^{-1}$, h é un fudge factor (o costante di Hubble normalizzata) il cui miglior valore sperimentale é $h \simeq 0.7 \pm 0.07$

$\rho_c = 1.88 \cdot 10^{-26} h\ kg\, m^{-3} = 1.05 \cdot 10^4 heV\ cm^{-3}$

Si introduce infine un parametro di densitá Ω come il rapporto fra la densitá attuale e la densitá critica:

$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{8\pi G\rho}{3H^2}$$

Per il modello inflazionario i valori stabili di Ω sono $0,\ \infty,\ 1$ per cui c'é un forte bias verso il valore $\Omega = 1$, fortemente supportato dalle misure dello spettro di potenza del fondo di microonde.

Dalle osservazioni astronomiche il contributo a Ω della materia luminosa é
$\Omega_{lum} \simeq 0.01 h^{-2}$
mentre il contributo a Ω della radiazione a microonde é
$\Omega_{mw} \simeq 2.5 \cdot 10^{-5}\ h^{-2}$

- Dalla cosmologia del Big-Bang: la densitá dei neutrini relici é $3/11$ della densitá di fotoni $\rightarrow 115(\nu + \overline{\nu})\ cm^{-3}$ per sapore, a $T = 1.9\,^\circ K$. Ovunque nell'universo. Questo risultato deriva solamente da quando escono di equilibrio i processi $e^+e^- \rightarrow \gamma$, $e^+e^- \rightarrow \nu\overline{\nu}$ e dalle diverse statistiche (Bose-Einstein vs. Fermi-Dirac).
- La densitá di neutrini:

$$\Omega_\nu = \frac{\rho_\nu}{\rho_c} = \sum_\nu m_\nu [eV]/93\, h^{-2}$$

  Dalle osservazioni $\Omega_m h^2 \simeq 0.15$ per cui (limite di Gerstein-Zeldovich):

$$\sum_i m_i < 14 \quad \mathrm{eV} \quad (95\%\mathrm{CL})$$

- Big-bang nucleosintesys (di ^{4}He, ^{3}He, ^{2}H, ^{7}Li) prevede:

$$\sum m_\nu \leq 16\ eV \quad (95\%\mathrm{CL})$$

Massa dei neutrini e anisotropie cosmologiche.

In cosmologia i neutrini hanno una lunghezza caratteristica: é il cammino che compiono da quando escono di equilibrio a quando, per red-shift, diventano non-relativistici, e possono di nuovo essere intrappolati come le altre componenti della dark matter. Quest'ultima condizione:$p_\nu \simeq m_\nu$ dipende chiaramente dalla loro massa.

Finché viaggiano indistrubati (free-steam) a velocitá relativistiche i neutrini drenano energia e modificano le distribuzioni di disomogeneitá di energia. La soppressione di potenza alle piccole scale é espressa dalla relazione:

$$\frac{\Delta P}{P} \simeq -8 \frac{\Omega_\nu}{\Omega_m}$$

La scala caratteristica é data dalla relazione

$$k_{nr} \simeq 0.03\,(m_\nu/1\mathrm{eV})^{1/2}\Omega_m^{1/2} h\ \mathrm{Mpc}^{-1}$$

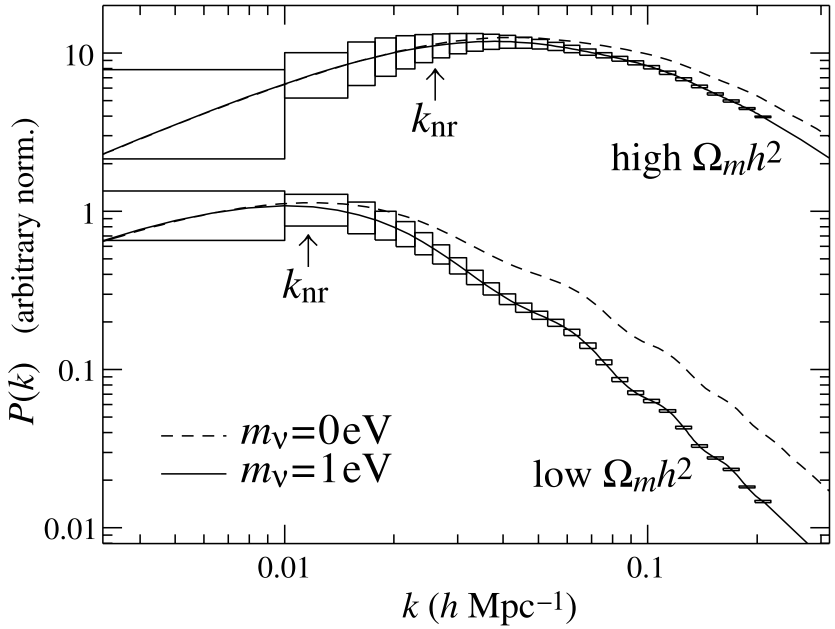
k_{nr} é la trasformata di Fourier della coordinata spaziale r, o volendo é legato alla lunghezza caratteristica λ dalla relazione $\lambda = 2\pi/k$.

$$\lambda_{nr} \sim 1200\ \mathrm{Mpc}\ m_\nu^{-1}(eV)$$

La massa di neutrini é quindi influente sulle distribuzioni di anisotropie di densitá di energia, che sono le misure piú interessanti e precise della cosmologia degli ultimi 10 anni.

- **Distribuzione di materia nell'universo** (distribuzione e disomogeneita' degli ammassi di galassie). Scala caratteristica: $d \sim 1 - 200$ Mpc. astro-ph/0204152, 2dFGRS, survey di 220000 galassie:

$$\sum m_\nu \leq 1.8 \, eV \quad (95\%\mathrm{CL})$$

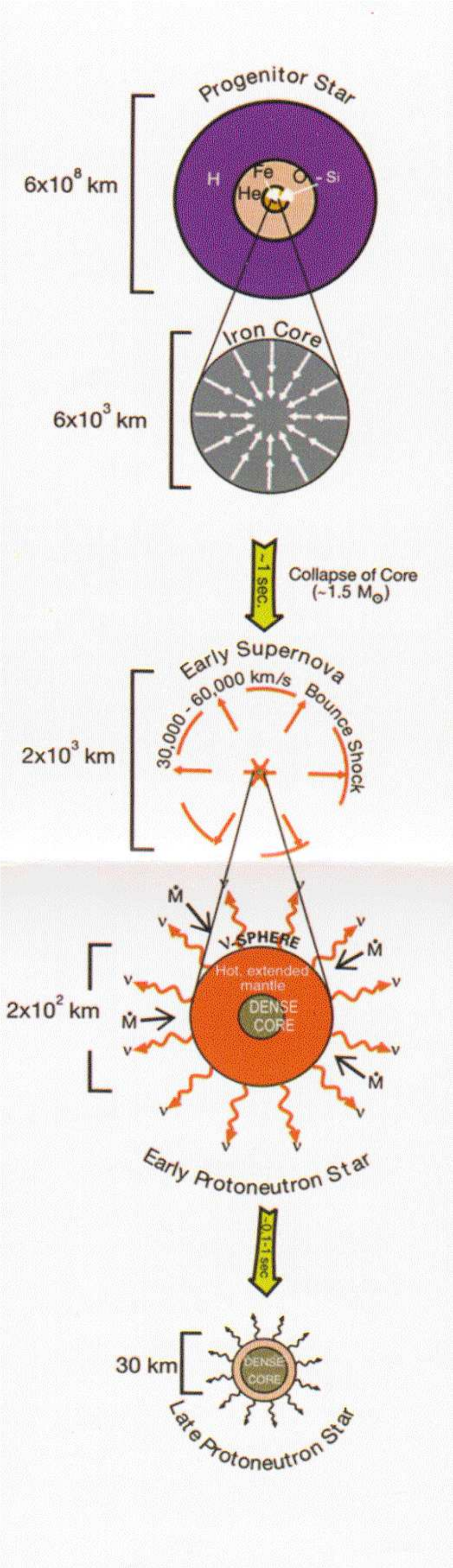


- **Cosmic Microwave Background (CMB)+ strutture a grande scala.** Scala caratteristica $d \sim 100 - 200$ Mpc. Dopo gli ultimi dati di WMAP (astro-ph/0302209).

$$\sum_i m_i < 0.25 \quad \mathrm{eV} \quad (95\%\mathrm{CL})$$

- **Lyman α forests**: i quasar sono fra gli oggetti piú antichi del cosmo. Emettono linee spettrali per le transizioni $2p \to 1s$ (Li α). Queste sono redshifted e piú importante hanno linee di assorbimento associate alle distribuzioni di materia che i fotoni incontrano. Questa foresta di linee di assorbimento é cosí correlata alla distribuzionedi materia e quindi alle sue anisotropie. Scala caratteristica $d \sim 0.1 - 10$ Mpc.

$$\sum_i m_i < 5.5 \quad \mathrm{eV} \quad (95\%\mathrm{CL})$$



Neutrini da SuperNova

Energia ΔE_B emessa da una supernova:

$$\Delta E_B \sim \frac{GM^2_{CORE}}{R_n(star)} \sim 2\times10^{53} ergs.$$

$$\begin{cases} \leq 1\% & \text{energia cinetica, radiazione e.m.} \\ 99\% & \text{neutrini} \begin{cases} \nu_e \text{ dall'esplosione} & \sim 1\% \\ \nu\overline{\nu} \text{ dal cooling} & 99\% \end{cases} \end{cases}$$

$\langle E_{\nu_e} \rangle \sim 12$ MeV
$\langle E_{\overline{\nu}_e} \rangle \sim 15$ MeV
$\langle E_{\nu_\mu,\nu_\tau} \rangle \sim 18$ MeV

SCALA DEI TEMPI:

$\Delta t \sim 10 s$,
$\sim 50\%$ nel primo secondo
É possibile un ripido cutoff se si forma un buco nero.

Supernovae: massa dei neutrini dal tempo di volo

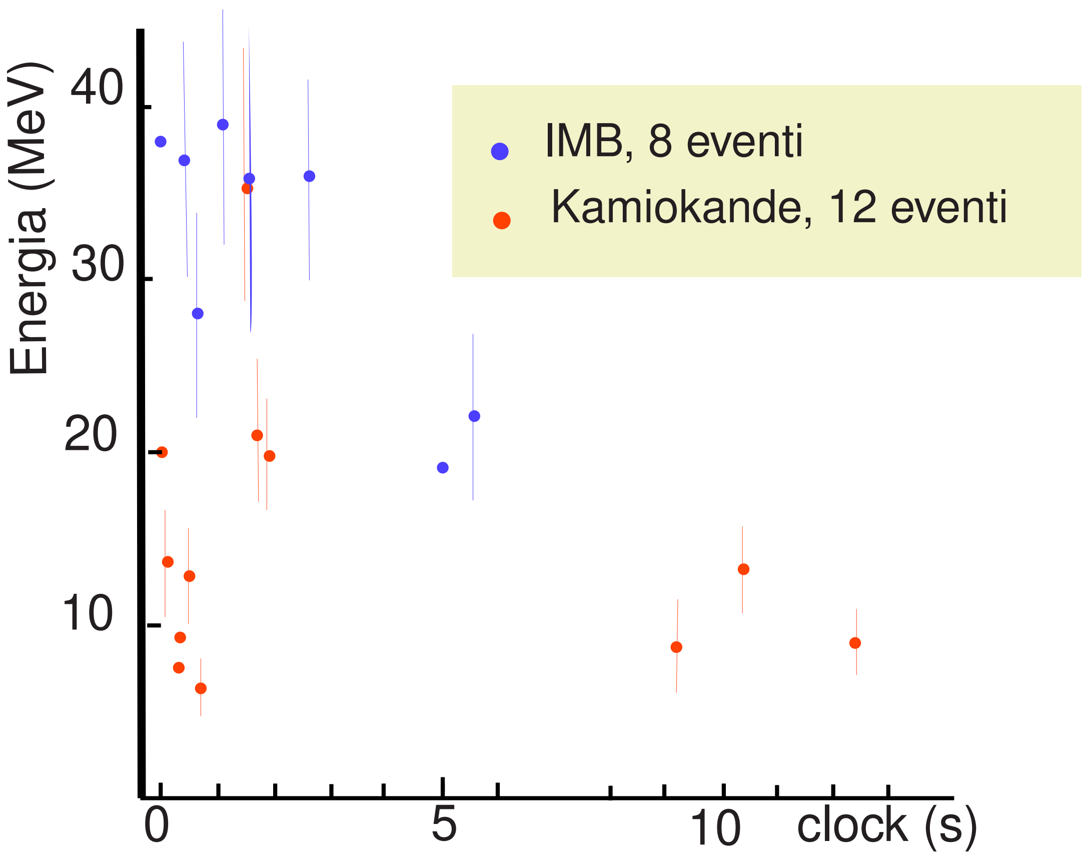
La massa dei neutrini puó essere misurata misurando il sapore, l'energia e il tempo di arrivo di ogni neutrino.

$$\Delta t(E_\nu) = 0.515 \left(\frac{m[eV]}{E[MeV]} \right)^2 D[kpc]$$

Dato che il tempo di emissione Δt é finito, e conosciuto solo attraverso i modelli, si possono ricavare SOLAMENTE upper limits sulla massa dei neutrini.

ESPLOSIONE DI SN1987A

$\overline{\nu}_e$ rivelati attraverso $\overline{\nu}_e\, p \to n e^+$ nei rivelatori IMB e Kamiokande.



$m_{\overline{\nu}_e} \leq 25$ eV

Cosa si potrá imparare dalle prossime esplosioni

- FISICA DEI NEUTRINI
  - Massa dei ν_e non competitiva con i limiti di laboratorio
  - Massa ν_μ , ν_τ fino a 10 eV, attraverso il ritardo relativo di questi neutrini rispetto ai ν_e
  - Oscillazioni attraverso gli spettri dei neutrini, e confronti fra CC e NC
- FISICA DELLE SUPERNOVAE
  - Meccanismo di esplosione
  - Raffreddamento della proto-stella di neutroni
  - Formazione dei buchi neri
- ASTRONOMIA DALL' “EARLY ALERT
  - I neutrini arrivano con qualche ora di anticipo rispetto alla luce. Questo perché i fotoni sono “intrappolati dalla supernova. Le interazioni di scattering elastico possono dare una indicazione della direzione di provenienza

Per fare tutto questo servono molti piú neutrini di quelli raccolti da IMB e KAMIOKA (~ 100 interazioni per un rivelatore di 1 kton e una SN a 10 kpc.)

Rivelatori di SuperNovae

Rivelatore	Tipo	Massa (kton)	Soglia (MeV)	Sito	Eventi (@8.5kpc)	Direzione	Spettro	Start
Super-K	Cerenkov	32	5	Japan	5000	Si	Si	Run
SNO	H_2O	1.4	5	Canada	300	Si	Si	Run
	D_2O	1	5	Canada	450	Si	Si	
LVD	Scint	1	7-10	LNGS	250	No	Si	Run
KAMLAND	Scint	1	2	Japan	300	No	Si	2001
BOREX	Scint.	0.3	0.2	LNGS	100	No	Si	2002
Baksan	Scint.	0.33	8	Russia	50	No	Si	Run
Amanda	Ice Ceren	$M_{eff} \sim 0.4/\mathrm{pmt}$	0.5	Polo Sud	20000	No	No	Run

Questi rivelatori formano il network SNEWS per il “trigger dei neutrini da supernovae. Fanno parte del network anche le antenne gravitazionali.