

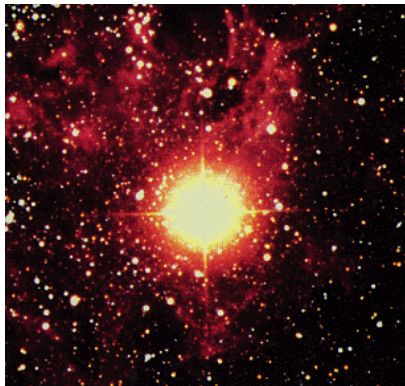
Il Futuro della Fisica dei Neutrini

Carlo Giunti

INFN, Torino, Italy

Scuola di Fisica 2017

Torino, 11-12 Aprile 2017



Il Futuro della Fisica dei Neutrini

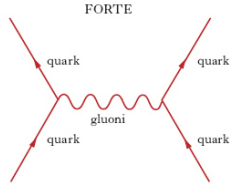
- ▶ Introduzione: i neutrini e le loro oscillazioni.
- ▶ Masse dei neutrini.
- ▶ Gli antineutrini sono diversi dai neutrini?
- ▶ I neutrini primordiali.
- ▶ I neutrini da supernove.

Particelle e Forze

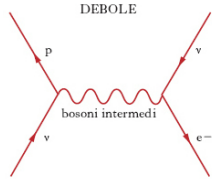
Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III	
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nome →	u up	c charm	t top	γ fotone
Quark	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	d down	s strange	b bottom	g gluone
Leptoni	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	Z^0 forza debole
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	e elettrone	μ muone	τ tauone	W^+ forza debole

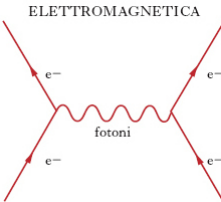
Bosoni di gauge



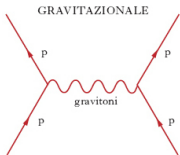
10^0
breve
quark
gluoni



10^{-5}
breve
elettroni (e) neutrini (ν) quark (presenti in n e p)
bosoni intermedi

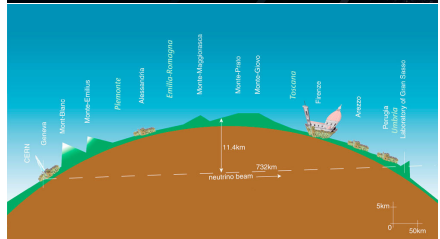
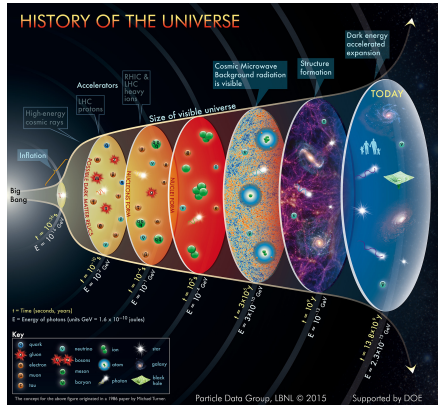
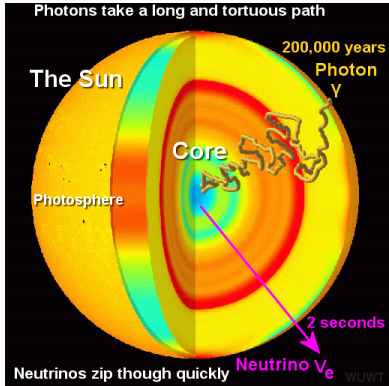


10^{-2}
infinito
particelle elettricamente cariche
fotoni



10^{-39}
infinito
tutte
gravitoni

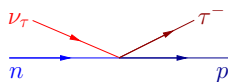
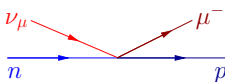
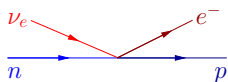
Neutrini



Le Oscillazioni dei Neutrini

- ▶ Le oscillazioni di neutrini sono state ipotizzate per la prima volta da Bruno Pontecorvo nel 1957.

- ▶ **Neutrini Interagenti:** ν_e ν_μ ν_τ (Flavor Neutrinos)
prodotti e rivelati nelle interazioni deboli con la materia.



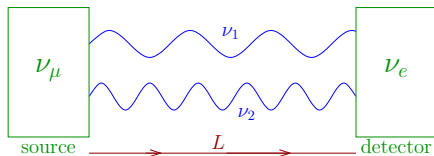
- ▶ **Neutrini Massivi:** ν_1 ν_2 ν_3
si propagano tra la sorgente e il rivelatore.
- ▶ Un **Neutrino Interagente** è una **sovrapposizione quantistica** di **Neutrini Massivi**. Considerando per semplicità solo due generazioni:

$$\nu_e = \cos \vartheta \nu_1 + \sin \vartheta \nu_2$$

$$\nu_\mu = -\sin \vartheta \nu_1 + \cos \vartheta \nu_2$$

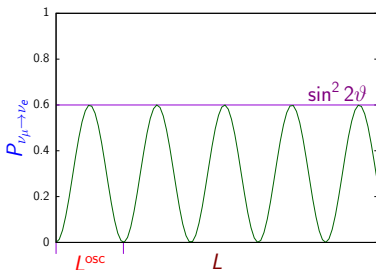
ϑ è chiamato **angolo di mixing**.

$$\nu(L=0) = \nu_\mu = -\sin\vartheta \nu_1 + \cos\vartheta \nu_2$$

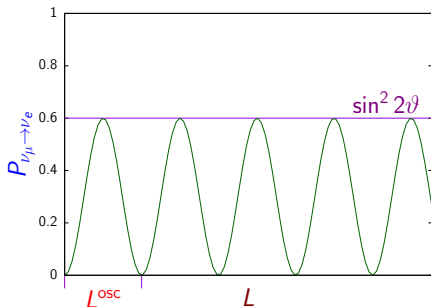


$$\nu(L > 0) = -\sin\vartheta \cos\left(\frac{m_1^2 L}{2E}\right) \nu_1 + \cos\vartheta \cos\left(\frac{m_2^2 L}{2E}\right) \nu_2 \neq \nu_\mu$$

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} = \sin^2 2\vartheta \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right)$$



$$P_{\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e} = \sin^2 2\vartheta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$



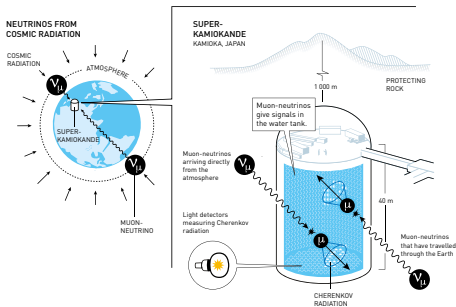
- ▶ La probabilità di transizione dipende dall' angolo di mixing ϑ e da $\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$.
- ▶ I neutrini oscillano perché hanno massa!
- ▶ Le oscillazioni di neutrini sono ottime per rivelare piccole differenze di massa, perché l'effetto è amplificato dalla distanza di propagazione L .

Premio Nobel per la Fisica 2015

Scoperta delle Oscillazioni di Neutrini

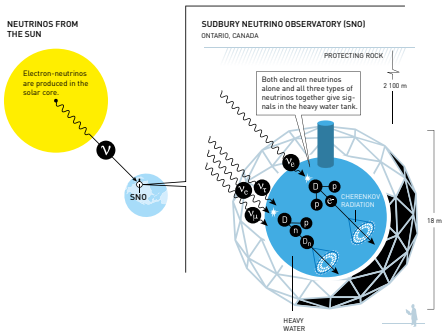
Takaaki Kajita

1998: Oscillazioni dei neutrini atmosferici misurate nell'esperimento Super-Kamiokande

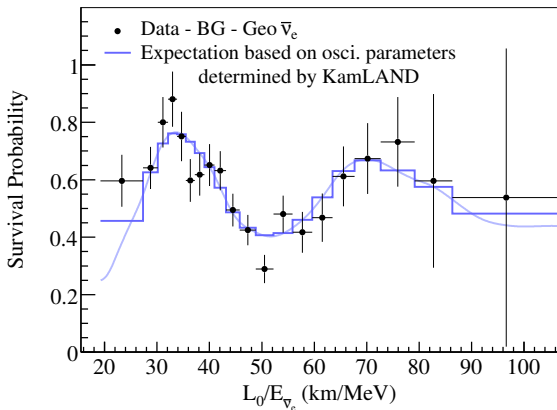


Arthur B. McDonald

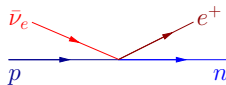
2002: Oscillazioni dei neutrini solari misurate nell'esperimento SNO (Sudbury Neutrino Observatory)



Osservazione Esplicita delle Oscillazioni di Neutrini



- ▶ L'esperimento KamLAND (Giappone) ha misurato le interazioni dei $\bar{\nu}_e$ prodotti da circa 30 reattori nucleari giapponesi e coreani.



- ▶ Probabilità di sopravvivenza: $P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - (P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu} + P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau})$

Due Tipi di Oscillazioni

Solari
 $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$

Reattori
 $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$

(SNO, Borexino
Super-Kamiokande
GALLEX/GNO, SAGE
Homestake, Kamiokande)

(KamLAND)

$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Delta m_{21}^2 \simeq 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ \sin^2 \vartheta_S \simeq 0.30 \end{array} \right.$

Atmosferici
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau$

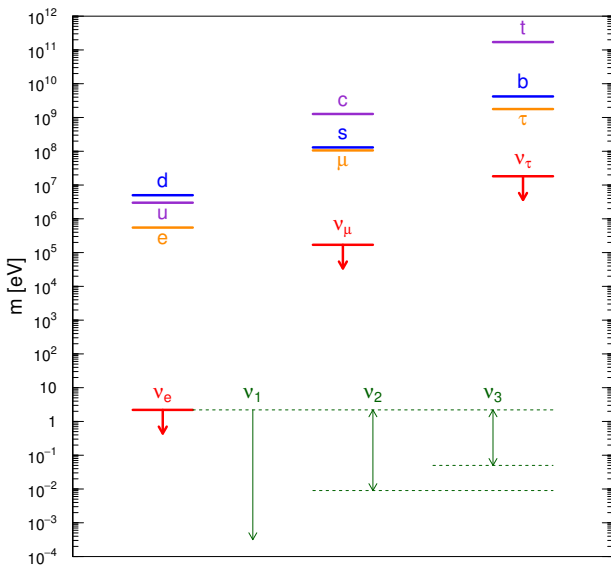
Acceleratori
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau, \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\tau$

(Super-Kamiokande
Kamiokande, IMB
MACRO, Soudan-2)

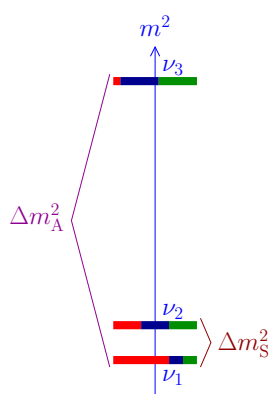
(K2K, MINOS
T2K, NO ν A
Opera)

$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \Delta m_{32}^2 \simeq 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 \\ \sin^2 \vartheta_A \simeq 0.50 \end{array} \right.$

Misure delle Masse dei Neutrini

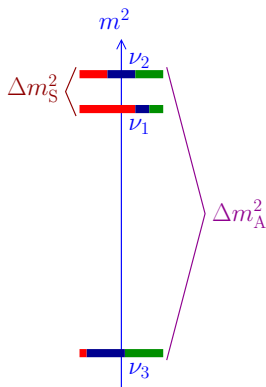


Ordinamento delle Masse



Ordinamento Normale

ν_e	ν_μ	ν_τ
---------	-----------	------------



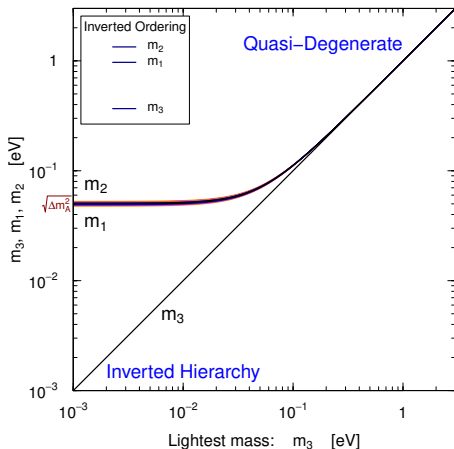
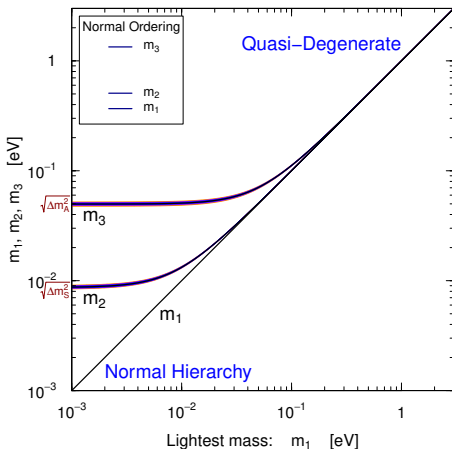
Ordinamento Inverso

Solo due Δm^2 indipendenti:

$$\Delta m_{21}^2 + \Delta m_{13}^2 + \Delta m_{32}^2 = (m_2^2 - m_1^2) + (m_1^2 - m_3^2) + (m_3^2 - m_2^2) = 0$$

la scala delle masse non è determinata dalle misure di oscillazione

Scala delle Masse



$$m_2^2 = m_1^2 + \Delta m_{21}^2 = m_1^2 + \Delta m_S^2$$

$$m_3^2 = m_1^2 + \Delta m_{31}^2 = m_1^2 + \Delta m_A^2$$

$$m_1^2 = m_3^2 - \Delta m_{31}^2 = m_3^2 + \Delta m_A^2$$

$$m_2^2 = m_1^2 + \Delta m_{21}^2 \simeq m_3^2 + \Delta m_A^2$$

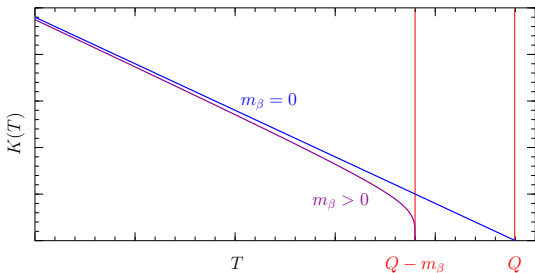
Decadimento Beta del Trizio



Spettro energetico dell'elettrone: $K(T) = \sqrt{(Q - T) \sqrt{(Q - T)^2 - m_\beta^2}}$

Massa Efficace del Neutrino: $m_\beta = \sqrt{\cos^2\vartheta m_1^2 + \sin^2\vartheta m_2^2}$

$$m_\beta = 0 \iff K(T) = Q - T$$



Limite attuale:

$$m_\beta \lesssim 2 \text{ eV}$$

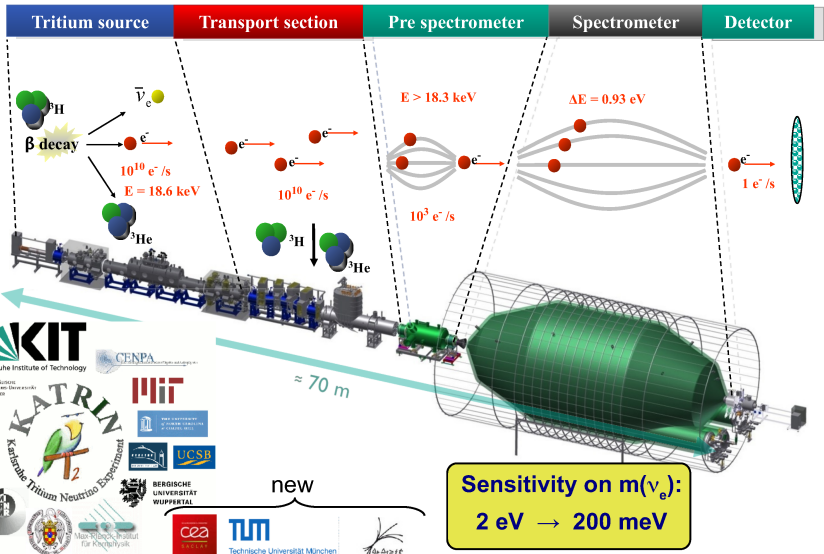
Esperimenti:

Mainz (Germania)

Troitsk (Russia)



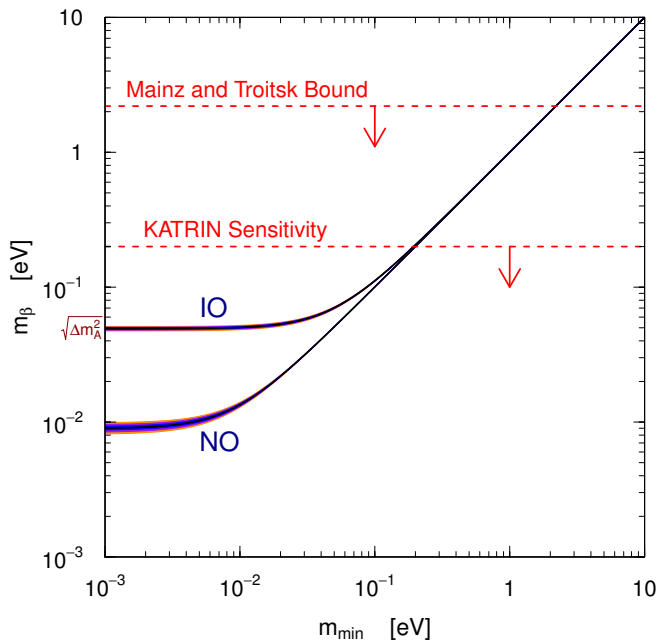
The Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment KATRIN - overview





Trasporto dello spettrometro dal Reno al Karlsruhe Institute of Technology.
(Novembre 2006)

Indicazioni dalle Oscillazioni



Neutrini e Antineutrini

- ▶ **1928:** Paul Dirac formula "The Quantum Theory of the Electron" che applicata alle particelle elementari implica che ad ogni particella corrisponde una antiparticella. (Premio Nobel per la Fisica 1933)
- ▶ Particelle e antiparticelle hanno carica elettrica opposta:

Particella	Carica	Antiparticella	Carica
u	$+2/3$	\bar{u}	$-2/3$
d	$-1/3$	\bar{d}	$+1/3$
e^-	-1	e^+	$+1$
ν_e	0	$\bar{\nu}_e$	0

- ▶ L'antiparticella di una particella carica ha carica elettrica opposta \implies particella e antiparticella sono necessariamente diverse: $\bar{u} \neq u$, $\bar{d} \neq d$, $e^+ \neq e^-$ Particelle di Dirac
- ▶ **1937:** Ettore Majorana formula la "Teoria simmetrica dell'elettrone e del positrone" secondo la quale una particella neutra può essere identica alla propria antiparticella.
- ▶ I neutrino sono neutri \implies neutrino e antineutrino possono essere la stessa particella: $\bar{\nu}_e = \nu_e$? Particella di Majorana

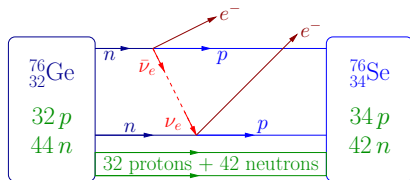
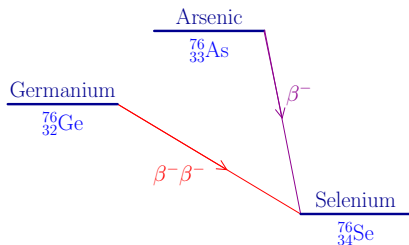
Neutrini: Particelle di Dirac o di Majorana?

Neutrino Dirac: $\bar{\nu}_e \neq \nu_e$

Neutrino Majorana: $\bar{\nu}_e = \nu_e$

Come distinguere le due possibilità?

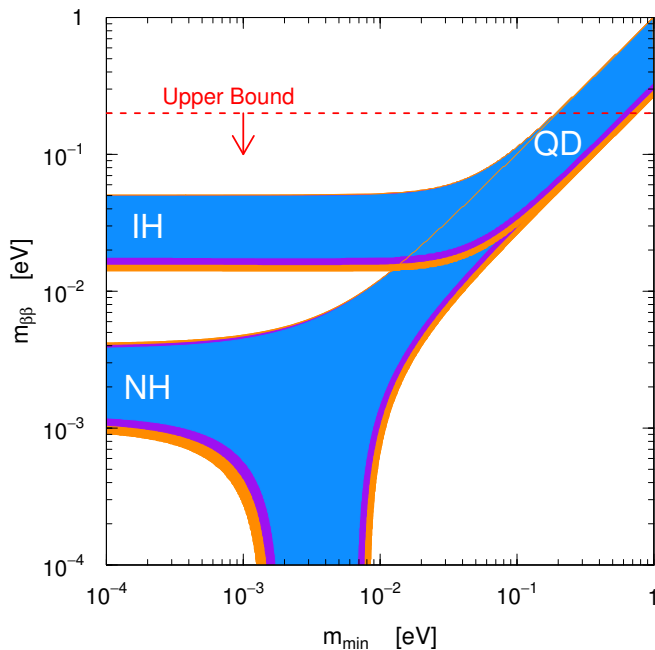
Doppio Decadimento β Senza Emissione di Neutrini



Possibile solo se $\bar{\nu}_e = \nu_e \iff$ **Neutrini di Majorana!**

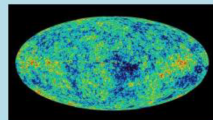
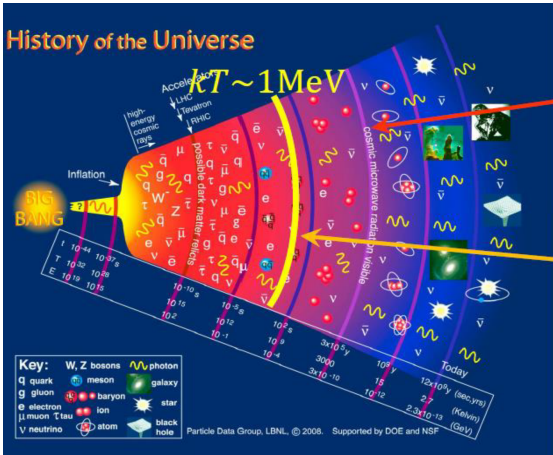
Massa Efficace del Neutrino: $m_{\beta\beta} = \cos^2\vartheta m_1 + \sin^2\vartheta m_2$

Indicazioni dalle Oscillazioni



I Neutrini Primordiali

History of the Universe



CMB

$$n_\gamma = 411/\text{cm}^3$$

$$T_\gamma = 2.73 \text{ K}$$

CvB

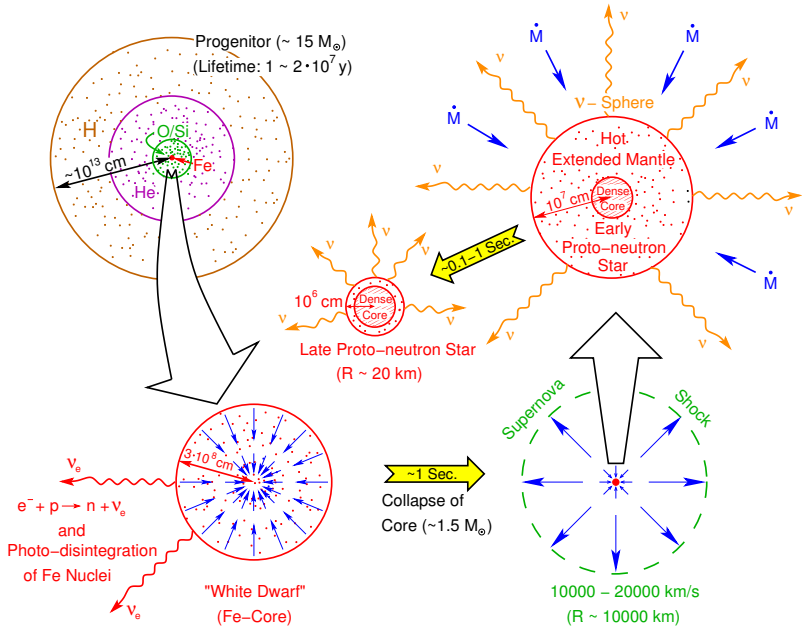
$$n_\nu = n_{\bar{\nu}} = \frac{3}{4} \left(\frac{T_\nu}{T_\gamma} \right)^3 \frac{n_\gamma}{2}$$

$$= 56/\text{cm}^3$$

$$T_\nu = \left(\frac{4}{11} \right)^{\frac{1}{3}} T_\gamma = 1.95 \text{ K}$$

- ▶ I neutrini primordiali sono estremamente freddi: $(0 \text{ K} = -273.15^\circ \text{C})$
 $T_\nu = 1.95 \text{ K} = -271.2^\circ \text{C}$
- ▶ Sono lenti: $E_\nu = 1.7 \times 10^{-4} \text{ eV} < \sqrt{\Delta m_\zeta^2} \simeq 8.7 \times 10^{-3} \text{ eV} \Rightarrow v_\nu \ll c$
- ▶ Hanno una probabilità di interazione circa 10^6 volte più piccola dei neutrini da reattore! \Rightarrow Riusciremo ad osservarli?

Neutrini, Messaggeri delle Supernove

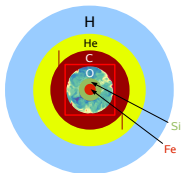


Energia totale emessa: circa 3×10^{53} erg, di cui:

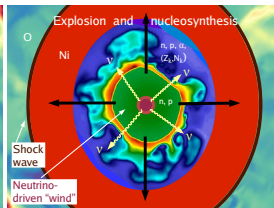
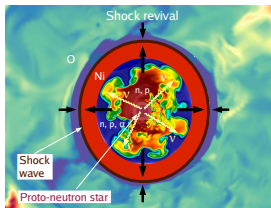
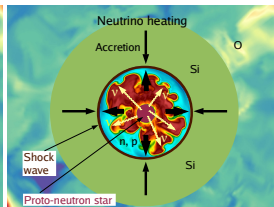
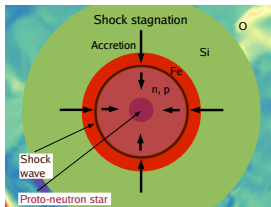
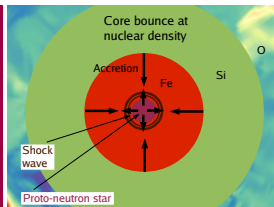
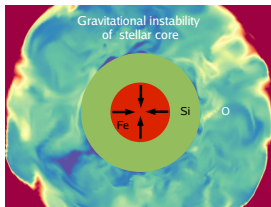
- ▶ circa 99% neutrini (3×10^{53} erg),
- ▶ circa 1% energia cinetica ($\sim 10^{51}$ erg),
- ▶ circa 0.01% energia elettromagnetica ($\sim 10^{49}$ erg).

Confronti:

- ▶ L'energia emessa dal sole ogni anno è circa 1.2×10^{41} erg,
- ▶ L'energia equivalente alla massa della terra è circa 5.4×10^{48} erg,
- ▶ L'energia emessa dal sole in 10 miliardi di anni è circa 1.2×10^{51} erg,
- ▶ L'energia equivalente alla massa del sole è circa 1.8×10^{54} erg.



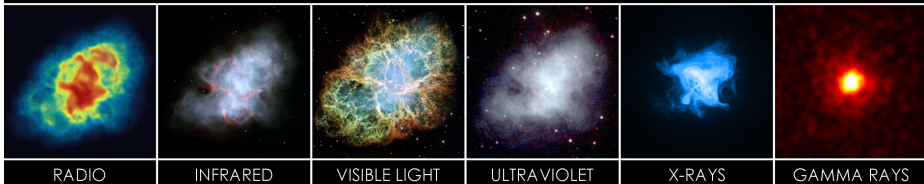
- ▶ Densità iniziale del nucleo ferroso di circa $1.5 M_{\odot}$: circa 10^{10} g/cm^3 .
- ▶ I neutrini restano intrappolati nella materia collassante quando si raggiunge la densità di circa $3 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$.
- ▶ Il collasso si arresta bruscamente quando la materia raggiunge la densità nucleare di circa $3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$.



Supernove Storiche

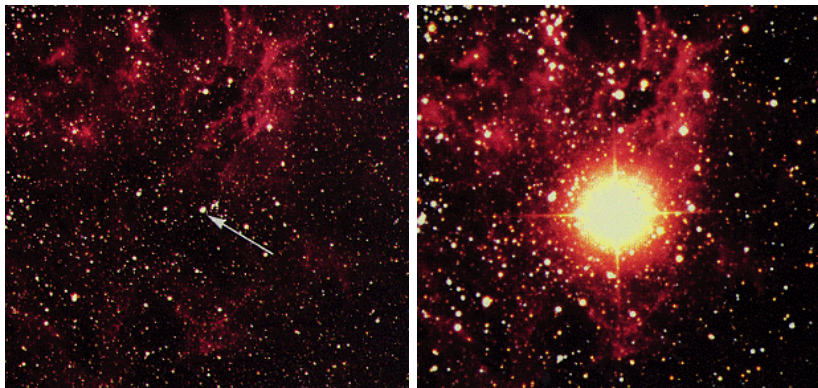
date	length of visibility	remnant	Historical Records				
			Chinese	Japanese	Korean	Arabic	European
AD1604	12 months	G4.5+6.8	few	–	many	–	many
AD1572	18 months	G120.1+2.1	few	–	two	–	many
AD1181	6 months	3C58	few	few	–	–	–
AD1054	21 months	Crab Nebula	many	few	–	one	–
AD1006	3 years	G327.6+14.6	many	many	–	few	two
AD393	8 months	–	one	–	–	–	–
AD386?	3 months	–	one	–	–	–	–
AD369?	5 months	–	one	–	–	–	–
AD185	8-20 months	–	one	–	–	–	–

CRAB NEBULA

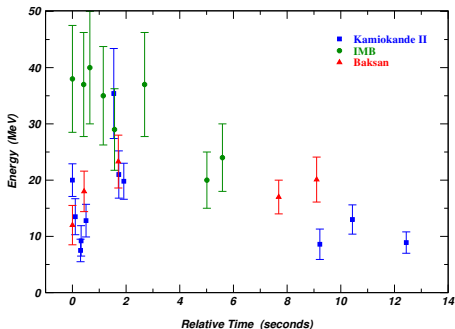


SN1987A

23 Febbraio 1987 nella Grande Nube di Magellano (168000 anni luce)



Neutrini dalla SN1987A



7:35 UTC del 23 Febbraio 1987

Kamiokande-II (Giappone)

11 eventi

M. Koshiba: Premio Nobel per la Fisica 2002

IMB (Irvine Michigan Brookhaven, USA)

8 eventi

Baksan (Caucaso, Russia)

5 eventi

Number of event	Time UT \pm 2 ms	Energy, MeV
994	2 h 52 min 36.79 s	6.2–7
995	2 h 52 min 40.65 s	5.8–8
996	2 h 52 min 41.01 s	7.8–11
997	2 h 52 min 42.70 s	7.0–7
998	2 h 52 min 43.80 s	6.8–9

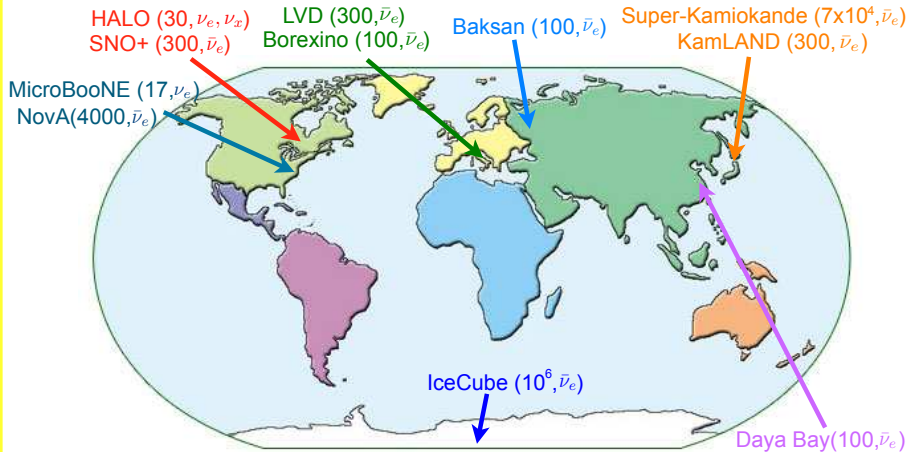
2:52 UTC del 23 Febbraio 1987

LSD (Liquid Scintillator Detector)

Monte Bianco

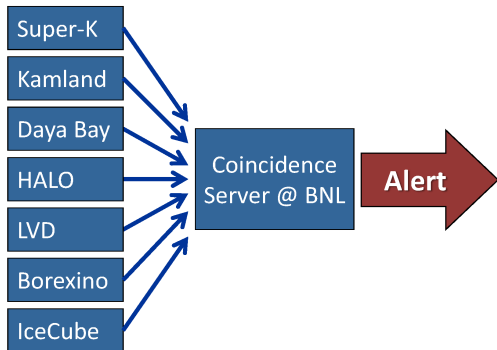
Collaborazione: Torino e Mosca

Siamo Pronti per la Prossima Supernova?

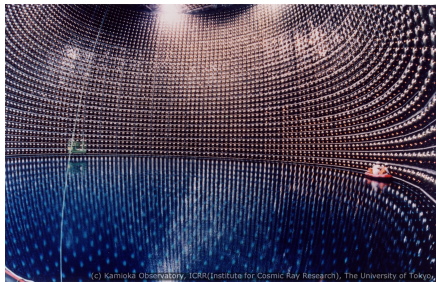


Expected number of events for a SN at 10 kpc and dominant flavor sensitivity in parenthesis.

SuperNova Early Warning System (SNEWS)

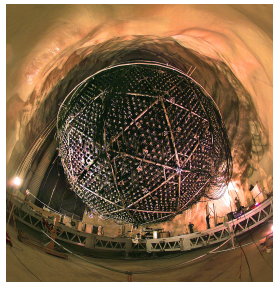


- ▶ I neutrini arrivano alcune ore prima del segnale ottico.
- ▶ Il segnale dei neutrini allerta la comunità astronomica.



(c) Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo.

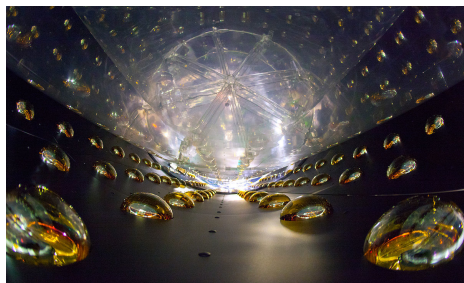
Super-Kamiokande (Giappone)



Sudbury Neutrino Observatory (Canada)



Borexino (Italia)



Daya Bay (Cina)