

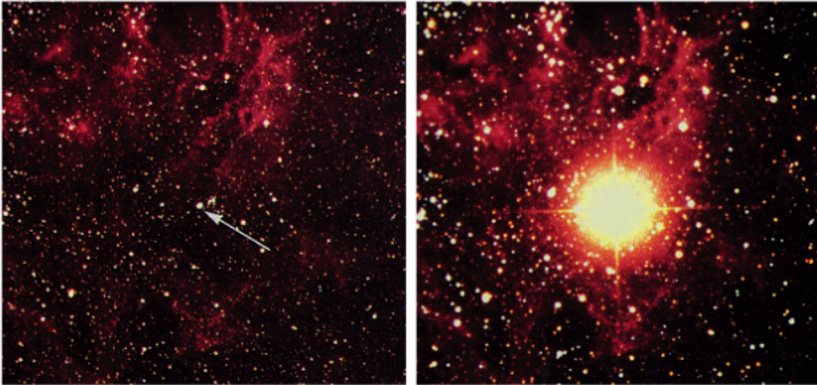
Il Futuro della Fisica dei Neutrini

Carlo Giunti

INFN, Torino, Italy

Scuola di Fisica 2017

Torino, 11-12 Aprile 2017



C. Giunti – Il Futuro della Fisica dei Neutrini – Scuola di Fisica 2017 – 12 Aprile 2017 – 1/31

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.

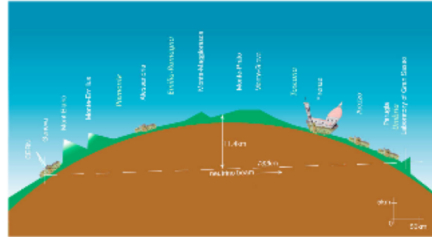
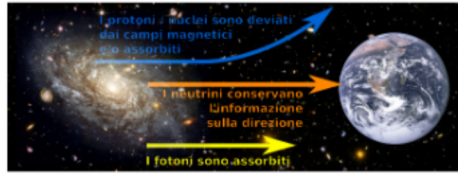
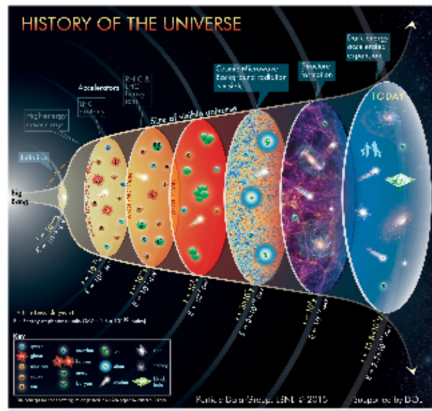
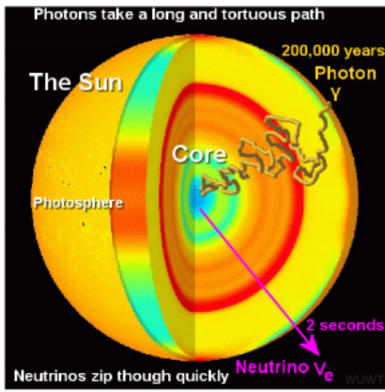
C. Giunti – Il Futuro della Fisica dei Neutrini – Scuola di Fisica 2017 – 12 Aprile 2017 – 2/31

Particelle e Forze

Tre generazioni della materia (fermioni)											
	I	II	III								
massa→	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0	0	10 ⁰					
carica→	2/3	2/3	2/3	0	0	breve					
spin→	1/2	1/2	1/2	1	1	quark					
nome→	u up	c charm	t top	γ fotone		gluoni					
Quark	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0	0						
	d down	s strange	b bottom	g gluone							
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	81,2 GeV	0						
ν _e neutrino elettronico	ν _μ neutrino muonico	ν _τ neutrino tauonico	Z ⁰ forza debole								
0	1/2	1/2	1	1							
Leptoni	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV	±1						
	e elettrone	μ muone	τ tauone	W [±] forza debole							
	-1	1/2	1/2	1	1						
					Bosoni di gauge						
GRAVITAZIONALE							<table border="1"> <tr><td>10⁻³⁸</td></tr> <tr><td>infinito</td></tr> <tr><td>tutte</td></tr> <tr><td>gravitoni</td></tr> </table>	10 ⁻³⁸	infinito	tutte	gravitoni
10 ⁻³⁸											
infinito											
tutte											
gravitoni											
					<table border="1"> <tr><td>10⁻²</td></tr> <tr><td>infinito</td></tr> <tr><td>particelle elettricamente cariche</td></tr> <tr><td>fotoni</td></tr> </table>		10 ⁻²	infinito	particelle elettricamente cariche	fotoni	
10 ⁻²											
infinito											
particelle elettricamente cariche											
fotoni											

C. Giunti – Il Futuro della Fisica dei Neutrini – Scuola di Fisica 2017 – 12 Aprile 2017 – 3/31

Neutrini

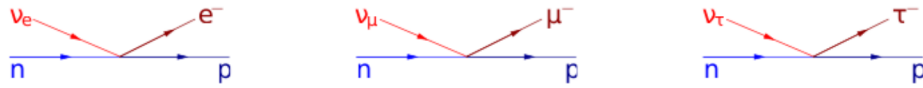


C. Giunti - Il Futuro della Fisica dei Neutrini - Scuola di Fisica 2017 - 12 Aprile 2017 - 4/31

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.

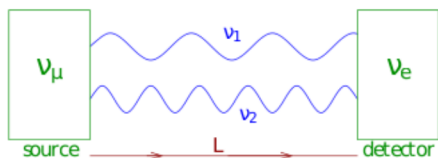
► Un **Neutrino Interagente** è una **sovrapposizione quantistica** di **Neutrini Massivi**. Considerando per semplicità solo due generazioni:

$$\begin{aligned} \nu_e &= \cos \theta \nu_1 + \sin \theta \nu_2 \\ \nu_\mu &= \sin \theta \nu_1 + \cos \theta \nu_2 \end{aligned}$$

θ è chiamato **angolo di mixing**.

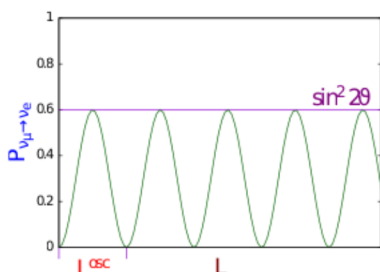
C. Giunti - Il Futuro della Fisica dei Neutrini - Scuola di Fisica 2017 - 12 Aprile 2017 - 5/31

$$\nu(L=0) = \nu_e = \cos \theta \nu_1 + \sin \theta \nu_2$$



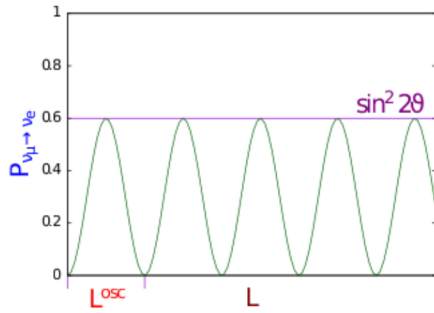
$$\nu(L > 0) = \cos \theta \cos \frac{m_1^2 L}{2E} \nu_1 + \cos \theta \cos \frac{m_2^2 L}{2E} \nu_2 + \sin \theta \left[\sin \frac{m_1^2 L}{2E} \nu_1 + \sin \frac{m_2^2 L}{2E} \nu_2 \right]$$

$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} = \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta m^2 L}{4E}$$



C. Giunti - Il Futuro della Fisica dei Neutrini - Scuola di Fisica 2017 - 12 Aprile 2017 - 6/31

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left[\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right]$$



- ▶ La probabilità di transizione dipende dall'angolo di mixing θ e da $\Delta m^2 \propto m_2^2 - m_1^2$.
- ▶ 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

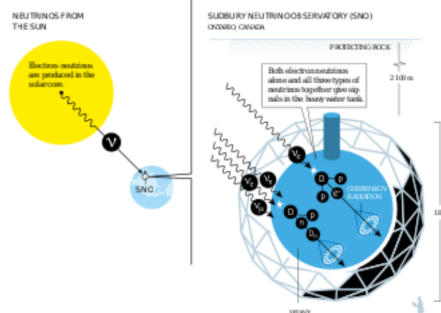
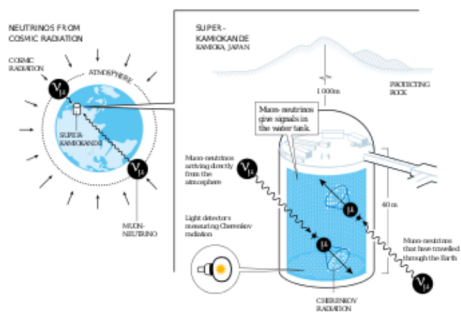
Scoperta delle Oscillazioni di Neutrini

Takaaki Kajita

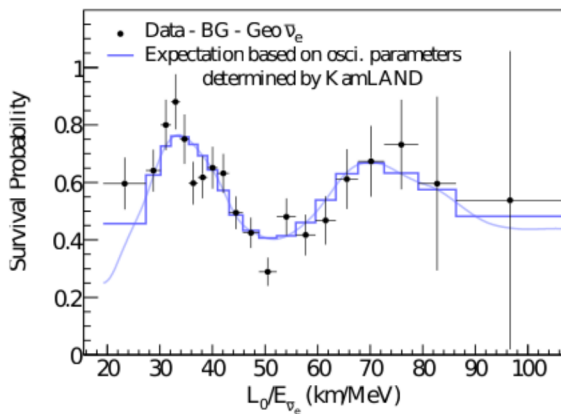
1998: Oscillazioni dei neutrini atmosferici misurate nell'esperimento Super-Kamiokande

Arthur B. McDonald

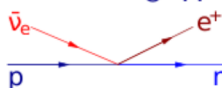
2002: Oscillazioni dei neutrini solari misurate nell'esperimento SNO (Sudbury Neutrino Observatory)



Osservazione Esplicita delle Oscillazioni di Neutrini

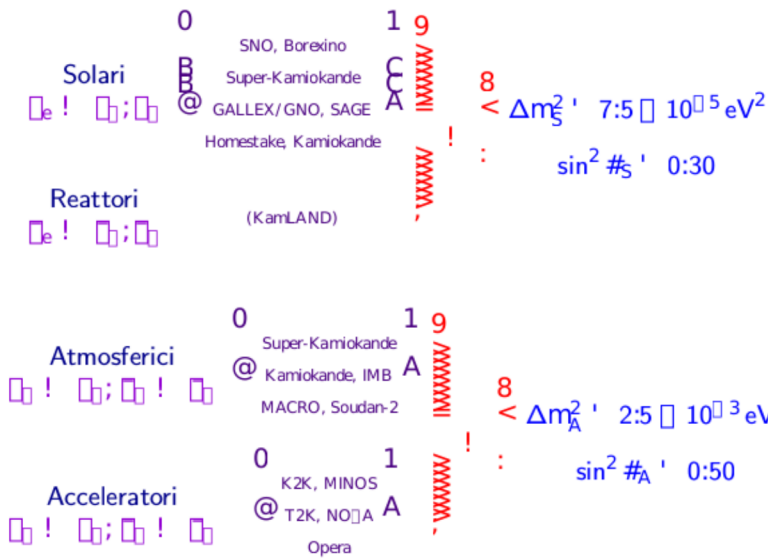


- ▶ L'esperimento KamLAND (Giappone) ha misurato le interazioni dei $\bar{\nu}_e$ prodotti da circa 30 reattori nucleari giapponesi e coreani.

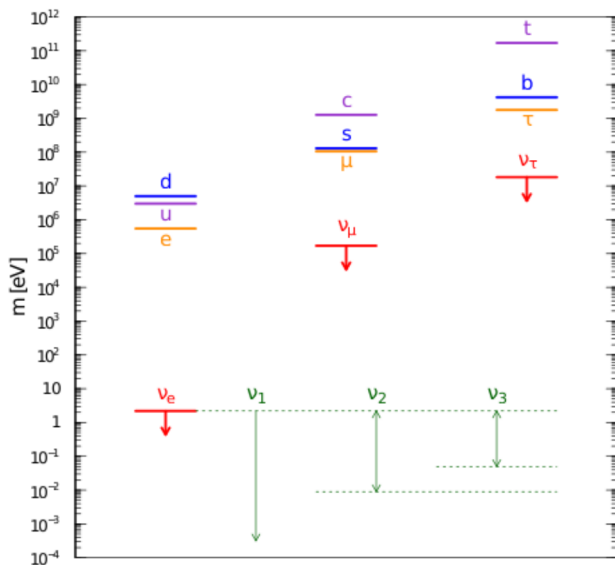


- ▶ Probabilità di sopravvivenza: $P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu} - P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\tau}$

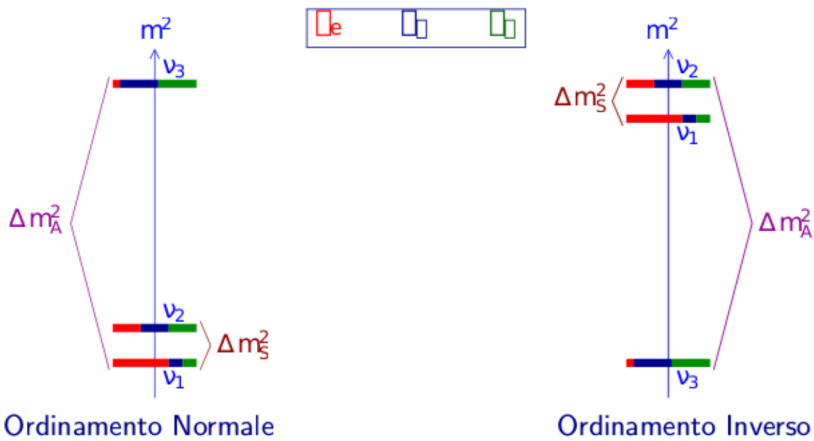
Due Tipi di Oscillazioni



Misure delle Masse dei Neutrini



Ordinamento delle Masse

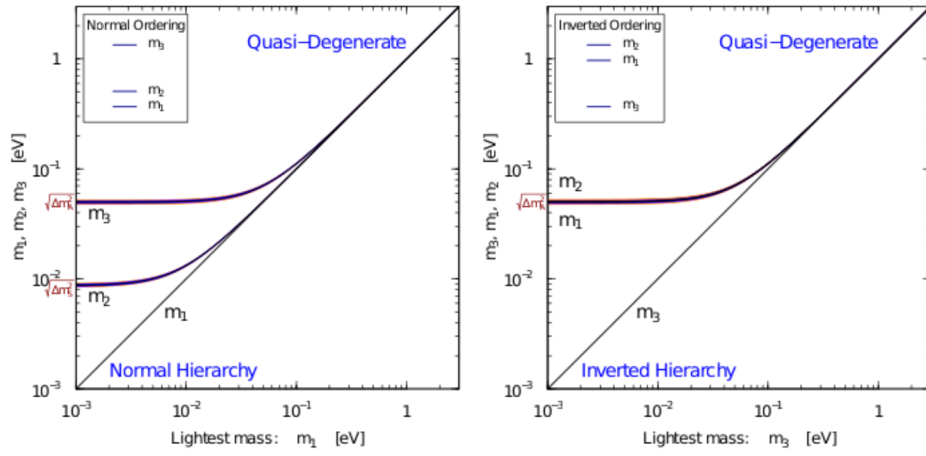


Solo due Δm^2 indipendenti:

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

la scala delle masse non è determinata dalle misure di oscillazione

Scala delle Masse



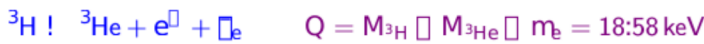
$$m_2^2 = m_1^2 + \Delta m_{21}^2 = m_1^2 + \Delta m_{21}^2$$

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

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

$$m_2^2 = m_1^2 + \Delta m_{21}^2 = m_3^2 + \Delta m_{31}^2 + \Delta m_{21}^2$$

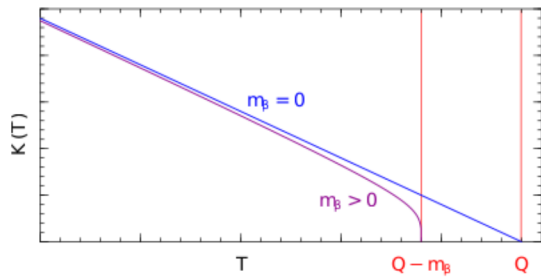
Decadimento Beta del Trizio



$$\text{Spettro energetico dell'elettrone: } K(T) = \frac{q}{(Q - T)^2 + m_\nu^2}$$

$$\text{Massa Efficace del Neutrino: } m_\nu = \sqrt{\cos^2 \theta m_1^2 + \sin^2 \theta m_2^2}$$

$$m_\nu = 0 \quad () \quad K(T) = Q - T$$



Limite attuale:

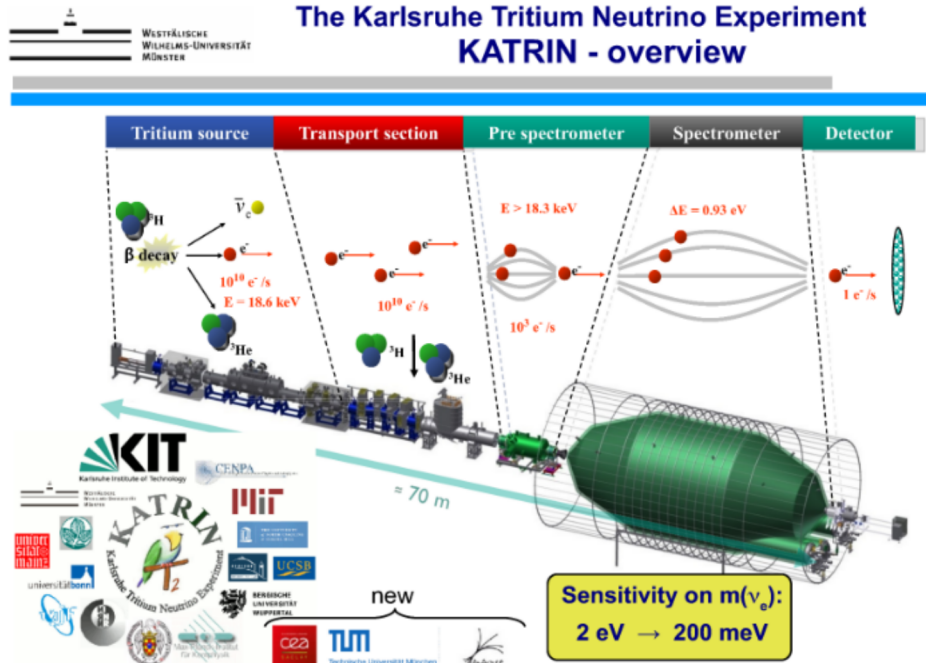
$$m_\nu \lesssim 2 \text{ eV}$$

Esperimenti:

Mainz (Germania)

Troitsk (Russia)

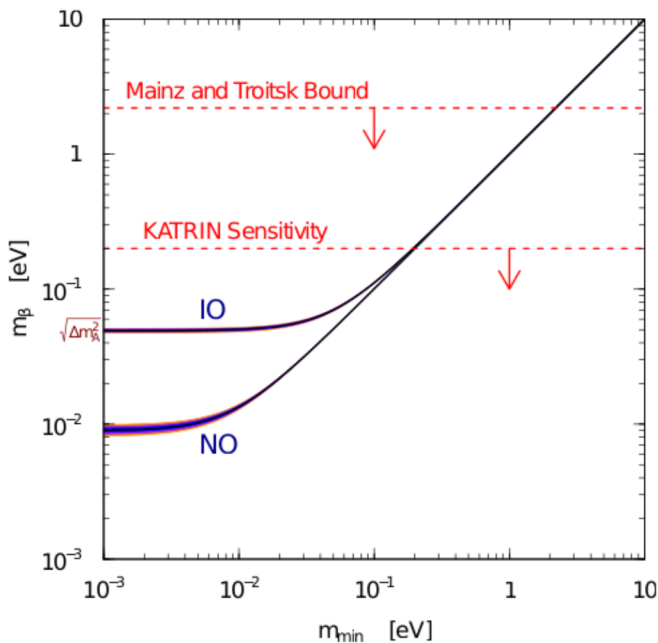
The Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment KATRIN - overview





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	+ $\frac{2}{3}$	\bar{u}	$-\frac{2}{3}$
d	$-\frac{1}{3}$	\bar{d}	+ $\frac{1}{3}$
e^-	-1	e^+	+1
ν_e	0	$\bar{\nu}_e$	0

- ▶ L'antiparticella di una particella carica ha carica elettrica opposta \Rightarrow particella e antiparticella sono necessariamente diverse: $\bar{u} \notin u$, $\bar{d} \notin d$, $e^+ \notin e^-$ 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 \Rightarrow neutrino e antineutrino possono essere la stessa particella: $\bar{\nu}_e = \nu_e$? Particella di Majorana

Neutrini: Particelle di Dirac o di Majorana?

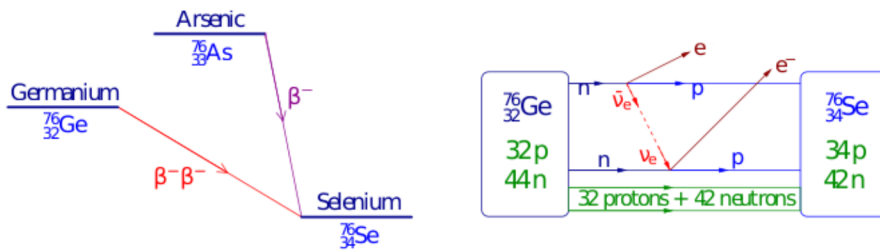
Neutrino Dirac: $\bar{\nu}_e \neq \nu_e$

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

Come distinguere le due possibilità?

Doppio Decadimento $\beta\beta$ Senza Emissione di Neutrini

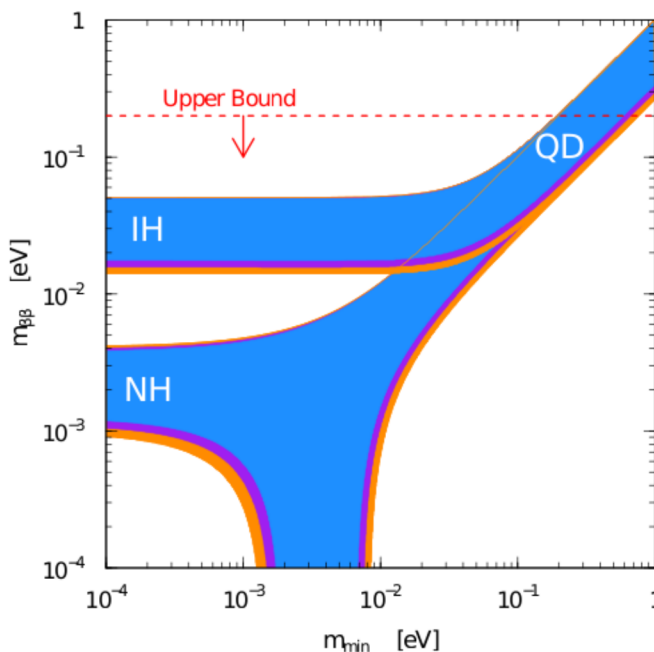
Esempio: ${}^{76}_{32}\text{Ge} \rightarrow {}^{76}_{34}\text{Se} + e^- + e^-$



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

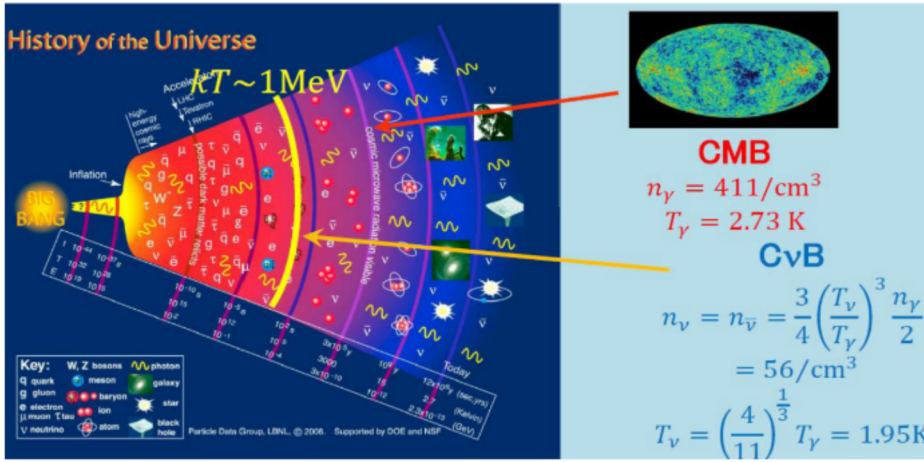
Massa Efficace del Neutrino: $m_{\beta\beta} = \cos^2\theta m_1 + \sin^2\theta m_2$

Indicazioni dalle Oscillazioni



I Neutrini Primordiali

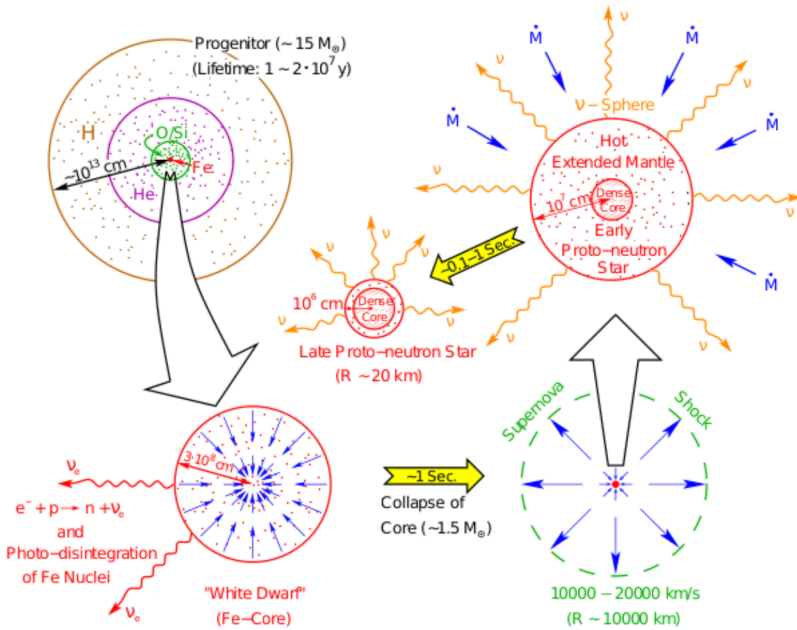
History of the Universe



- ▶ I neutrini primordiali sono estremamente freddi: $(0 \text{ K} = -273.15^\circ \text{C})$
 $T_\nu = 1.95 \text{ K} \approx -271.2^\circ \text{C}$
- ▶ Sono lenti: $E_\nu = 1.7 \times 10^{-4} \text{ eV} < \Delta m_{21}^2$, $8.7 \times 10^{-3} \text{ eV} \Rightarrow v_\nu \approx c$
- ▶ Hanno una probabilità di interazione circa 10^6 volte più piccola dei neutrini da reattore! \Rightarrow Riusciremo ad osservarli?

C. Giunti – Il Futuro della Fisica dei Neutrini – Scuola di Fisica 2017 – 12 Aprile 2017 – 22/31

Neutrini, Messaggeri delle Supernove



C. Giunti – Il Futuro della Fisica dei Neutrini – Scuola di Fisica 2017 – 12 Aprile 2017 – 23/31

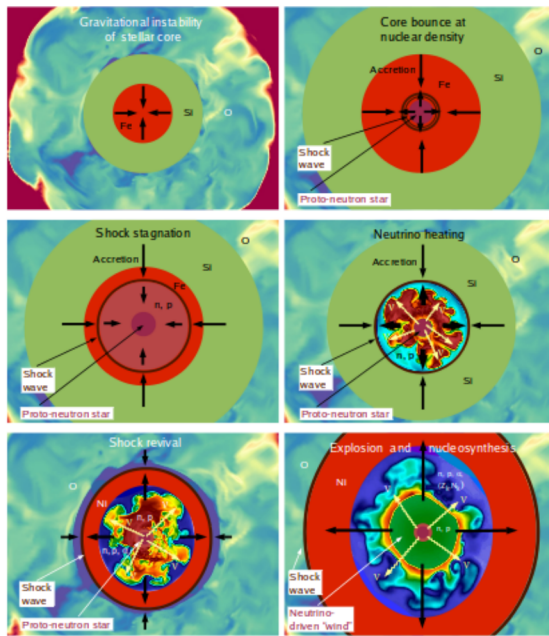
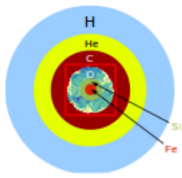
Energia totale emessa: circa $3 \times 10^{53} \text{ erg}$, di cui:

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

Confronti:

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

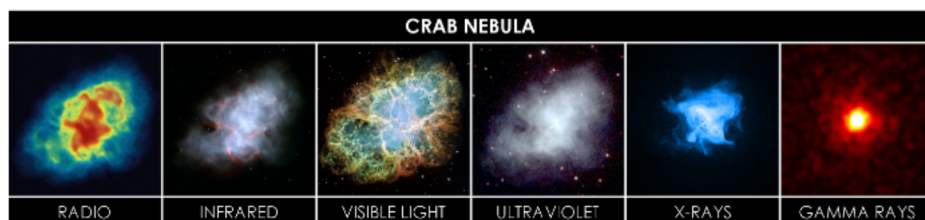
C. Giunti – Il Futuro della Fisica dei Neutrini – Scuola di Fisica 2017 – 12 Aprile 2017 – 24/31



- 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 $3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$.

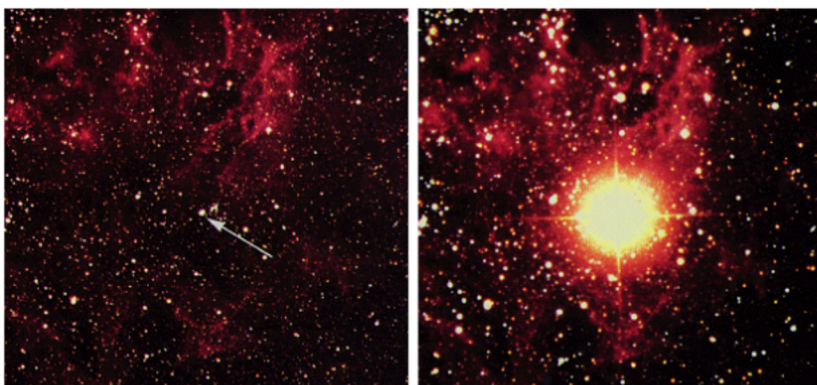
Supernove Storiche

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	{	{	{	{

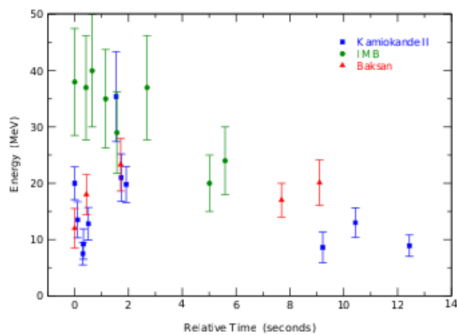


SN1987A

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



Neutrini dalla SN1987A



Number of event	Time UT ± 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

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

2:52 UTC del 23 Febbraio 1987

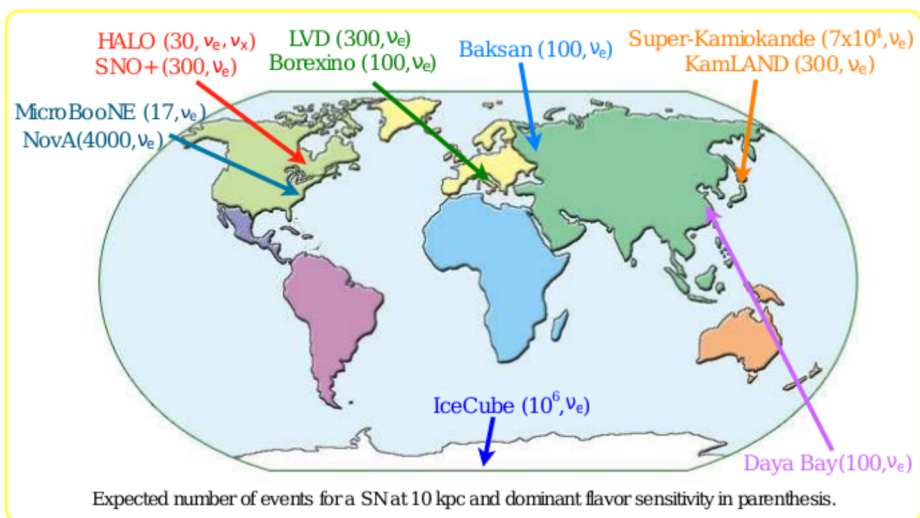
LSD (Liquid Scintillator Detector)

Monte Bianco

Collaborazione: Torino e Mosca

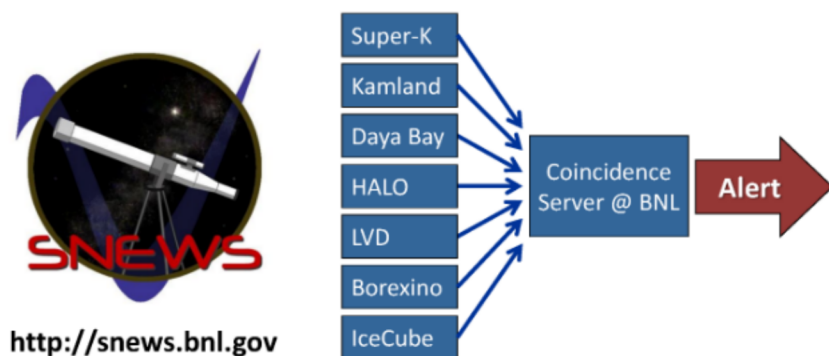
C. Giunti – Il Futuro della Fisica dei Neutrini – Scuola di Fisica 2017 – 12 Aprile 2017 – 28/31

Siamo Pronti per la Prossima Supernova?



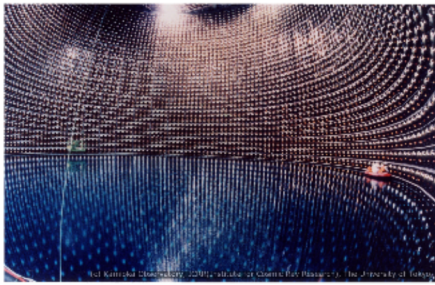
C. Giunti – Il Futuro della Fisica dei Neutrini – Scuola di Fisica 2017 – 12 Aprile 2017 – 29/31

SuperNova Early Warning System (SNEWS)



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

C. Giunti – Il Futuro della Fisica dei Neutrini – Scuola di Fisica 2017 – 12 Aprile 2017 – 30/31



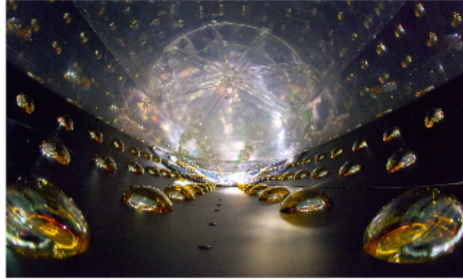
Super-Kamiokande (Giappone)



Sudbury Neutrino Observatory (Canada)



Borexino (Italia)



Daya Bay (Cina)