

I NEUTRINI

Che cosa sono ?

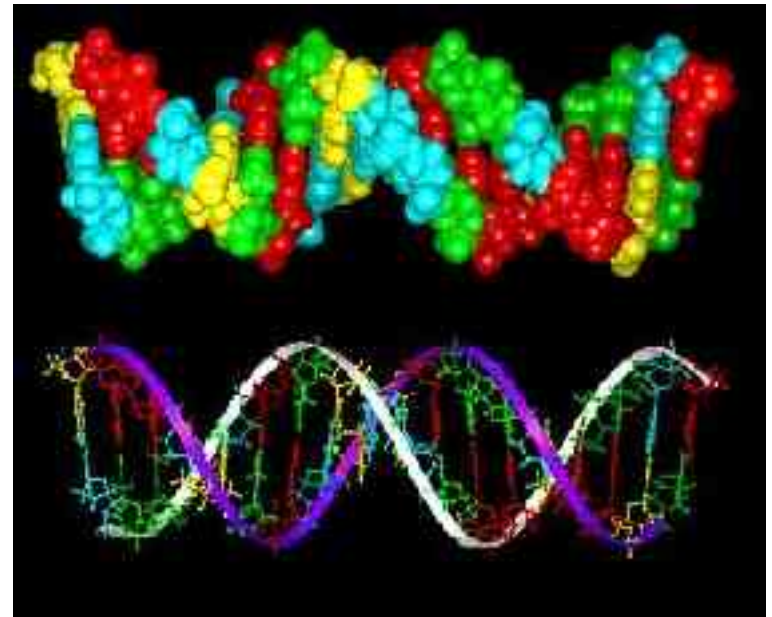
Dove sono ?

Come si vedono ?

A che cosa servono ?

Paolo Lipari
Frascati
6 ottobre 2004

Di che cosa e' Fatta la Materia ?



Di che cosa e' Fatta la Materia ?



(c) Andy Brice 1998

ARIA

FUOCO

ACQUA

TERRA



Atomo



Nucleo
Elettroni

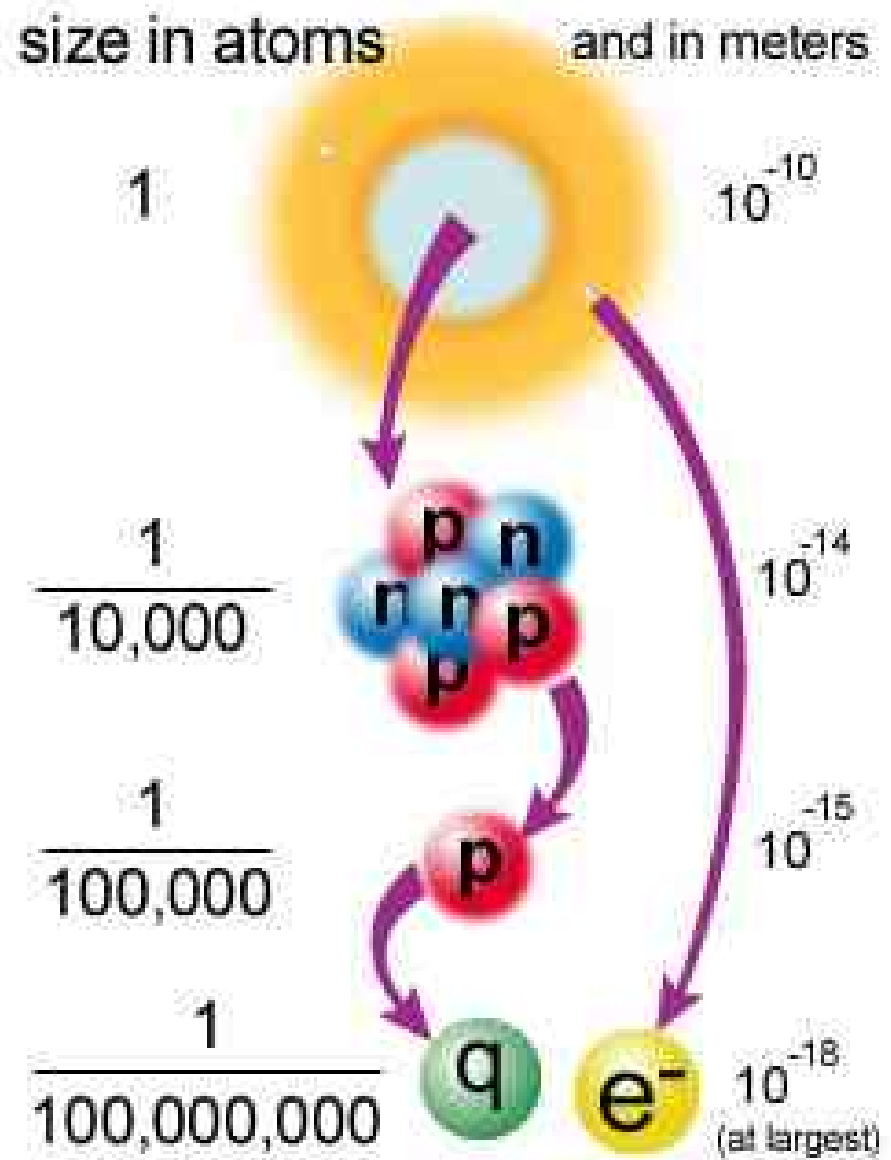
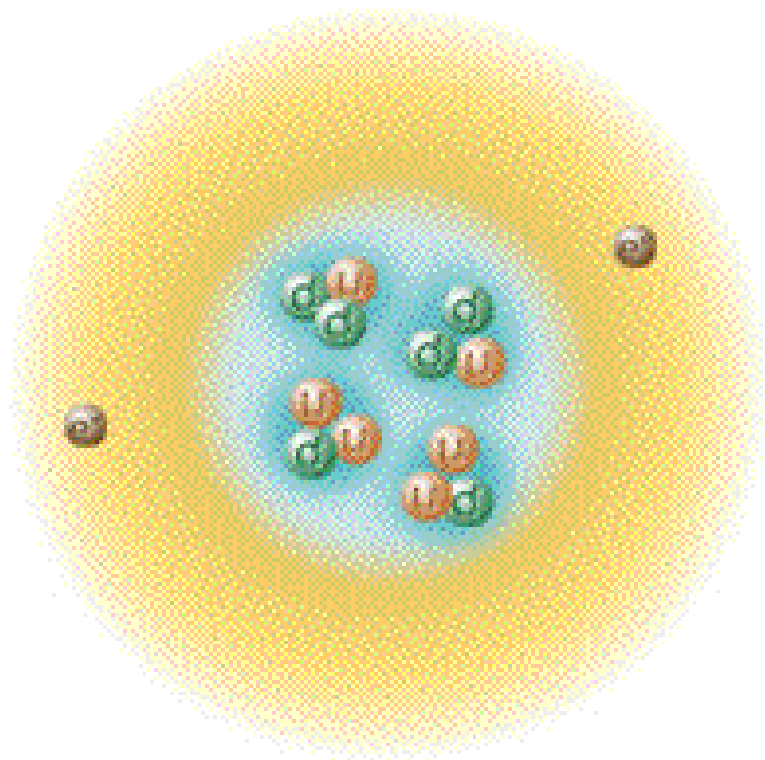


Protoni
Neutroni



Protone = U U D
Neutrone = U D D





La Materia Ordinaria

e' composta di tre particelle:

Elettrone	$Q = -1$
-----------	----------

Up-Quark	$Q = +2/3$
----------	------------

Down Quark	$Q = -1/3$
------------	------------

.... Quarta Particella Fondamentale :

IL NEUTRINO

La Scoperta del Neutrino

Comprensione della sua esistenza

Rivelazione del Neutrino

Decadimenti Radioattivi

Alcuni tipi di Nuclei sono instabili
e si trasformano in nuclei di tipo diverso

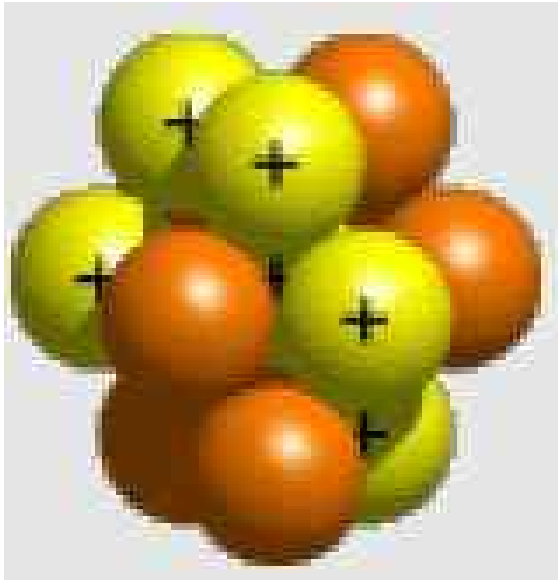
3 tipi di Decadimenti

ALPHA

BETA

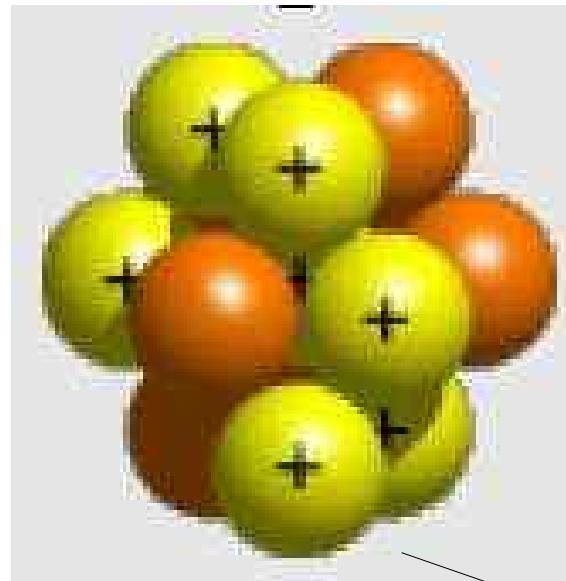
GAMMA

Decadimento "BETA" dei nuclei



Carbonio-14

6 protoni,
8 neutroni



Azoto-14

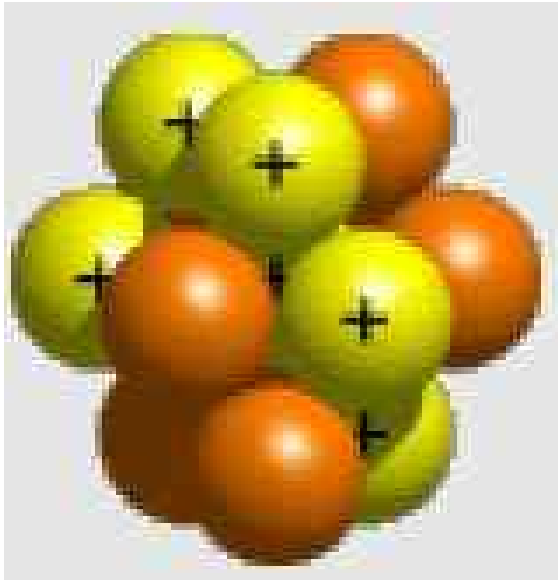
7 protoni,
7 neutroni

Qualcosa
"Manca"
Conservazione
Energia
e impulso



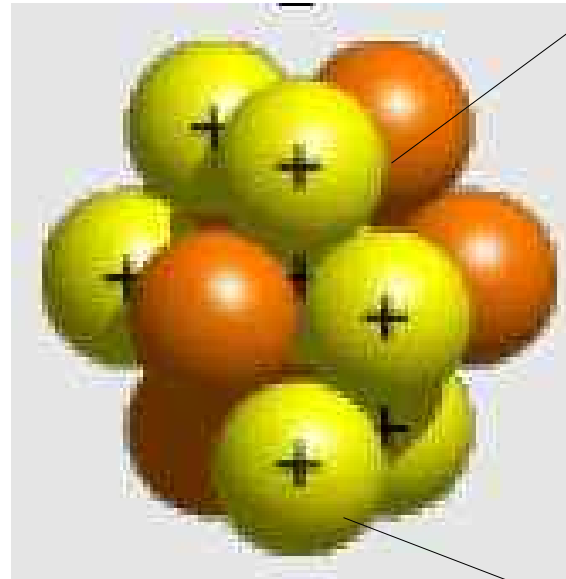
+ elettrone

Decadimento "Beta" dei nuclei



Carbonio-14

6 protoni,
8 neutroni



Azoto-14

7 protoni,
7 neutroni



neutrino



+ elettrone

Predizione della esistenza del Neutrino

Wolfgang Pauli (1930)



Comprensione del Meccanismo di Emissione dei Neutrini:

Enrico Fermi (1934)

“Tentativo di una Teoria dei raggi beta”



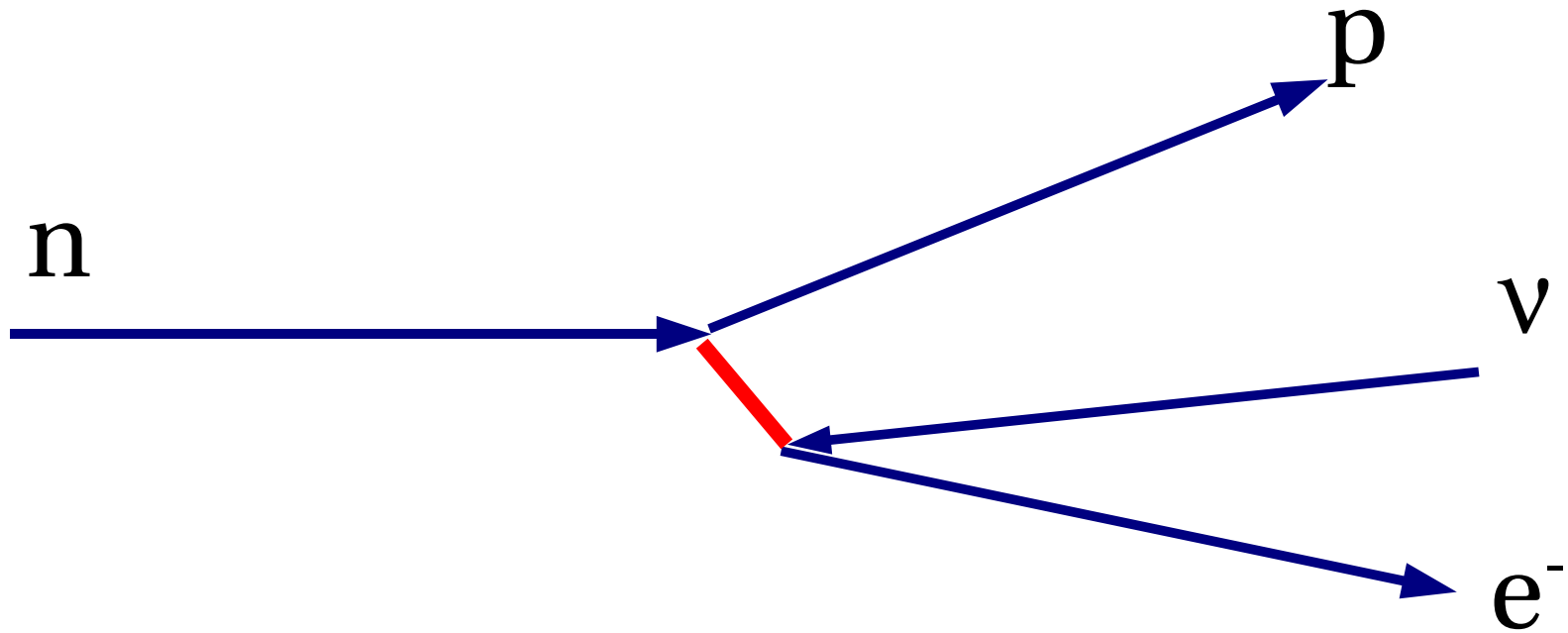
$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

$$e^{+} + n \rightarrow p + \bar{\nu}_e$$

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^{-}$$

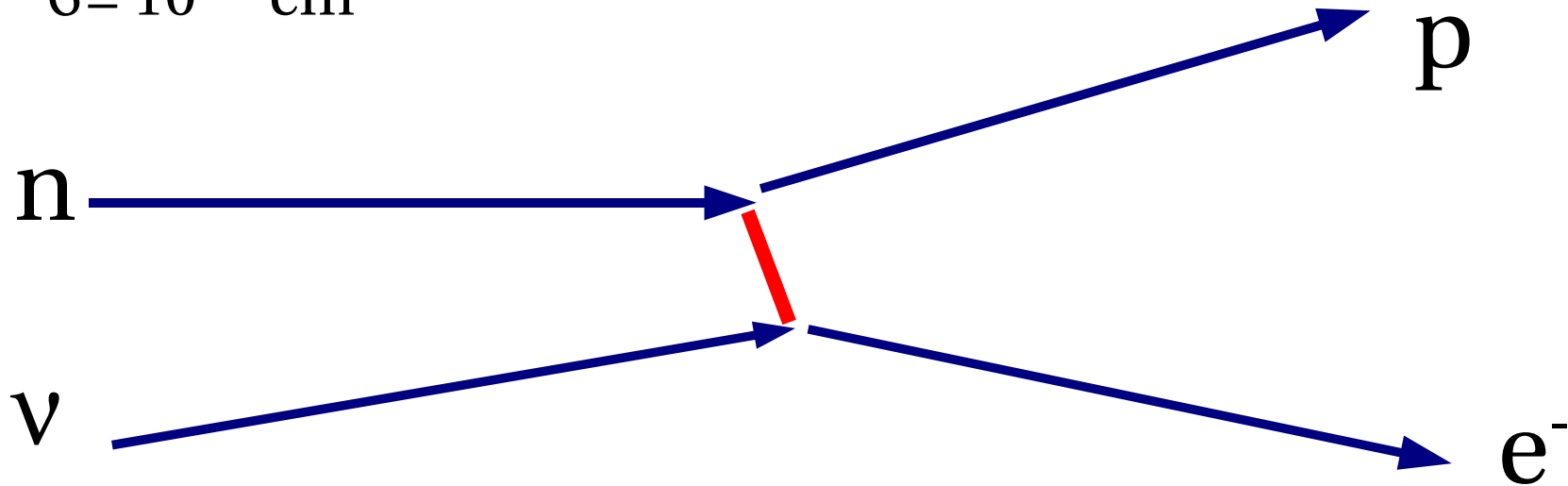
Metodo di Rivelazione

Fermi: Interazione Corrente-Corrente



Neutrino Cross section

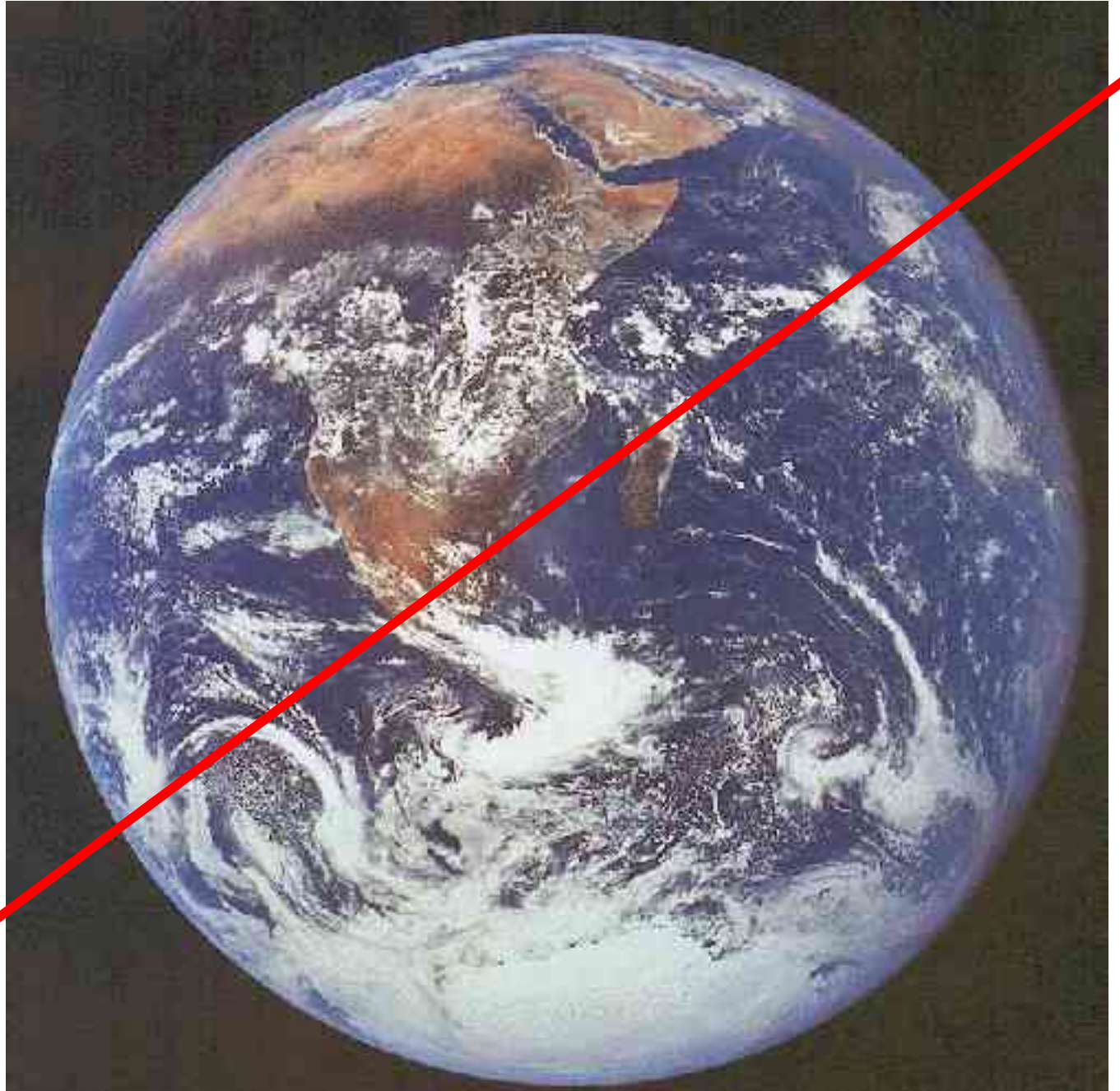
$$\sigma = 10^{-44} \text{ cm}^2$$



Neutrino
1 MeV

$$\sigma = 10^{-44} \text{ cm}^2$$

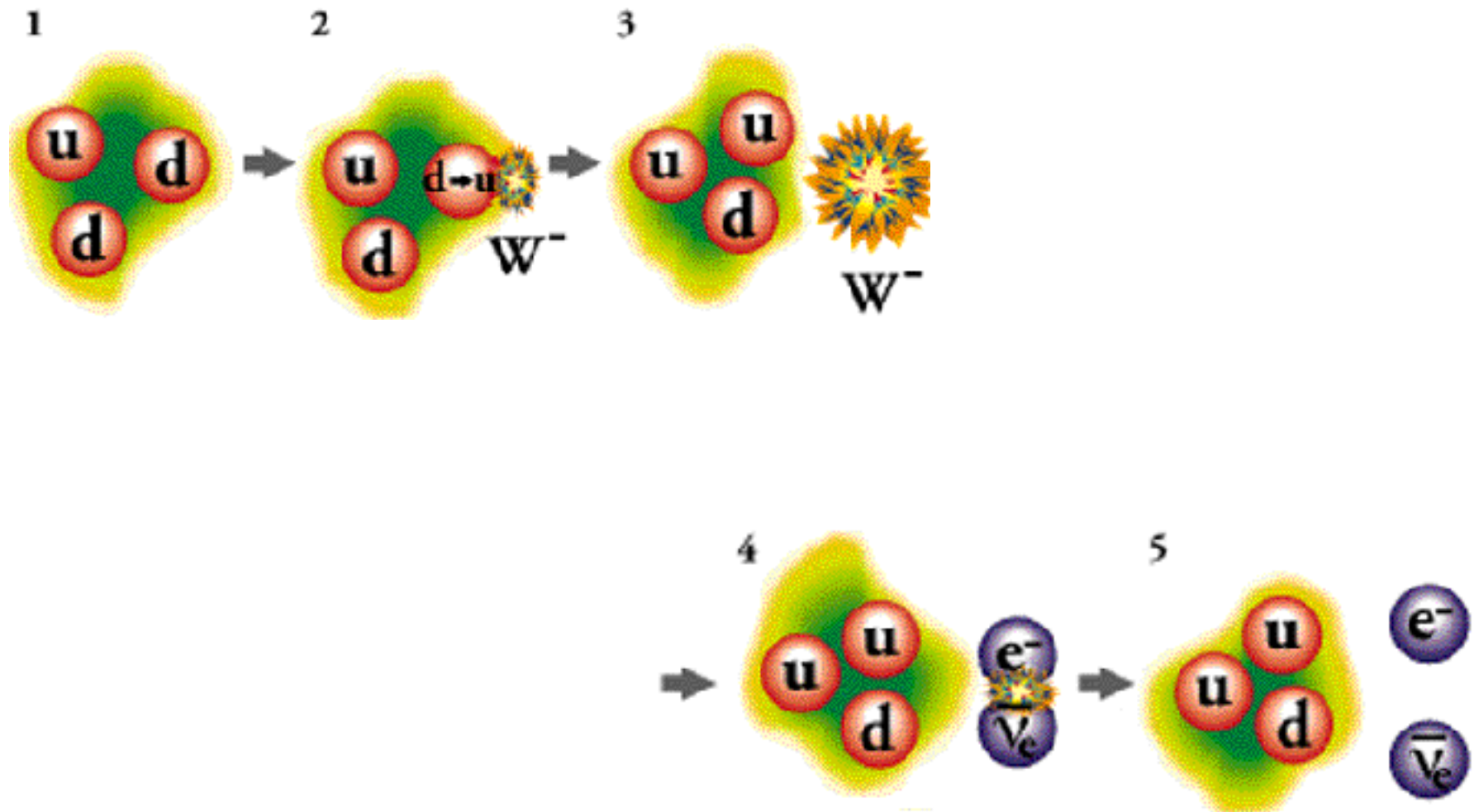
Probabilità di
interazione = 10^{-11}



Scoperta del Neutrino (antineutrini da Reattore Nucleare)

Reines e Cowan
1956

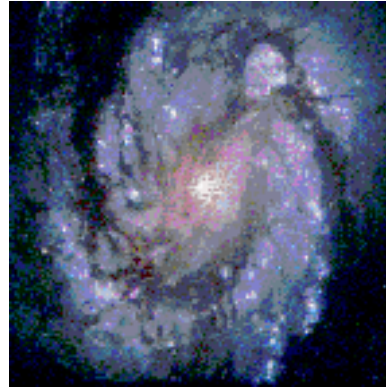




Neutrone $\rightarrow$ Protone + elettrone + (Anti)-Neutrino

Le 4 Forze della NATURA

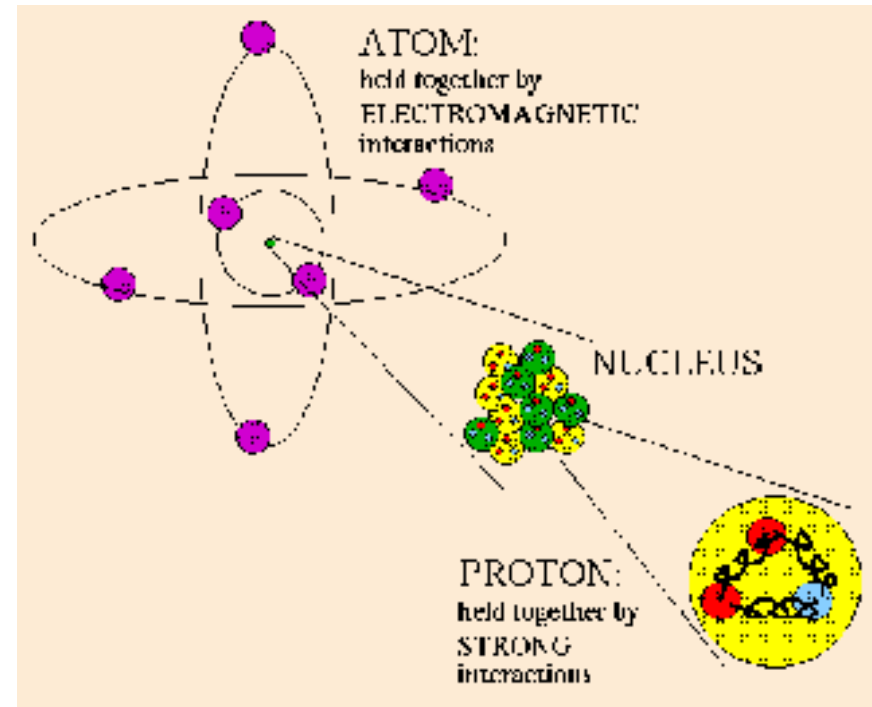
GRAVITA'



Elettro-Magnetismo

Interazione FORTE

Interazione DEBOLE



Forze Mediate dallo Scambio di Particelle (con spin 1)

Elettromagnetismo:
Scambio di Fotoni

$$M(\gamma) = 0$$

Interazione Forte
Scambio di Gluoni

$$M(\text{gluon}) = 0$$

Interazione Debole
Scambio di tre particelle pesanti

$$M(W^{\pm}) \simeq 85 M_{\text{protone}}$$

$$M(Z^0) \simeq 97 M_{\text{protone}}$$

$$V_{\text{elettrico}} = \frac{e}{r}$$

Potenziale elettrico
di un protone

$$V_{\text{debole}} = \frac{g}{r} e^{-\frac{c}{\hbar} M r}$$

Potenziale
Forza Debole

$$V_{\text{debole}} = \frac{g}{r} e^{-r/R_0}$$

$$R_0 = \frac{\hbar}{c} \frac{1}{M}$$

Corto Range

$$R_0 \simeq 2 \times 10^{-16} \text{ cm}$$

Perche' la “Forza Debole” e' debole ?

La “Forza Debole”
e' debole perche' e' mediata da una
Particella (il bosone W) con grande Massa
e dunque e' di “Corto Range”.

Le Interazioni
Elettromagnetica e Debole
sono intimamente legate

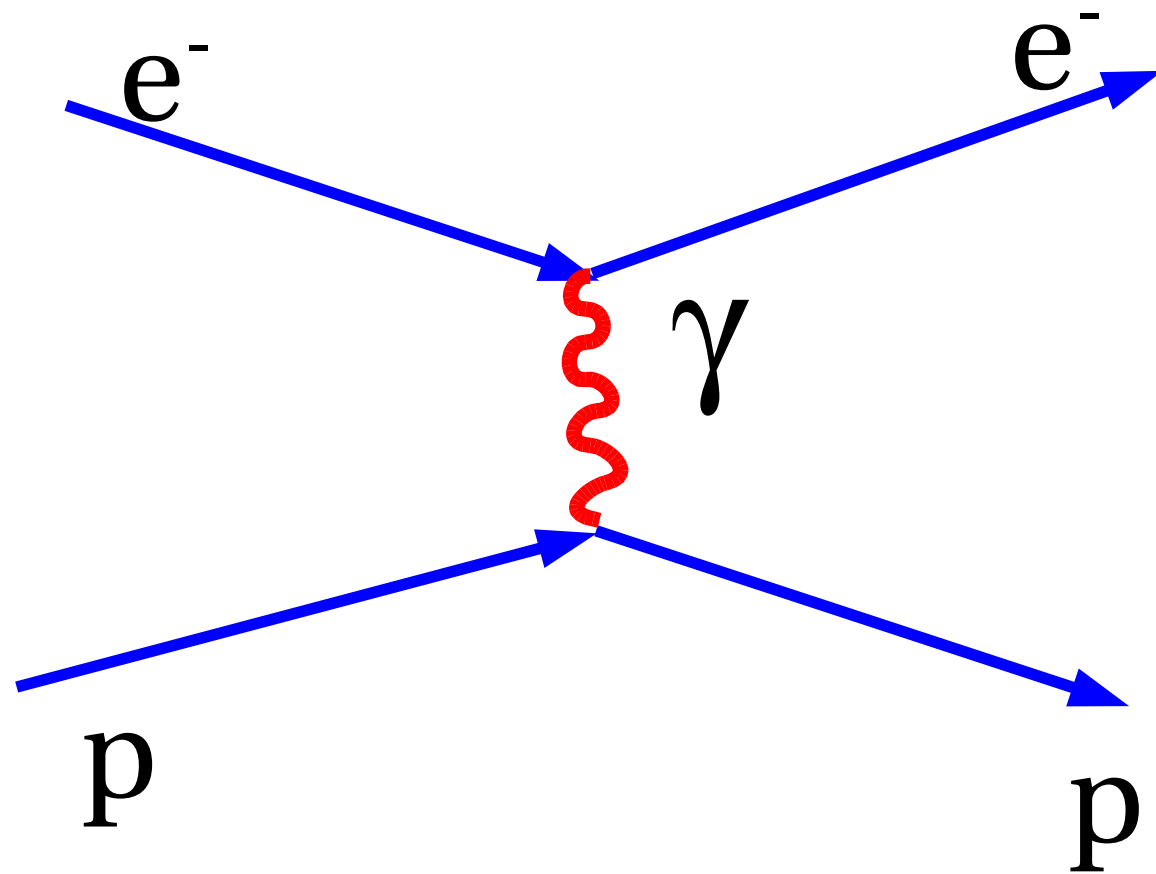
Confronto tra le sezioni d'urto di Due Processi

$$e^{-} + p \rightarrow e^{-} + p$$

$$\nu_e + n \rightarrow e^{-} + p$$

$$e^{-} + p \rightarrow e^{-} + p$$

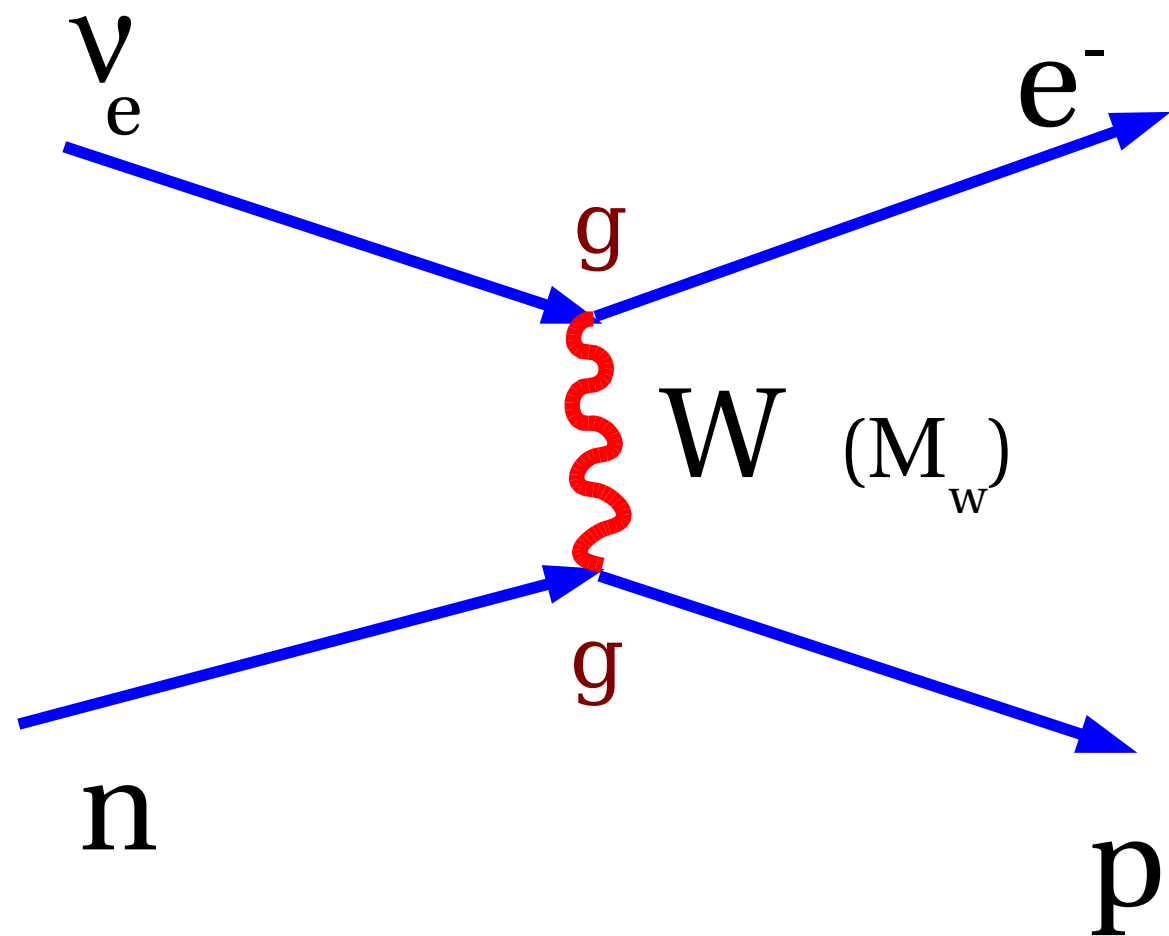
Formula di
Rutherford



$$Q^2 = (p_e - p'_e)^2$$

$$\frac{d\sigma_{ep}}{dQ^2} \simeq \frac{\alpha^2}{Q^4} (\hbar c)^2$$

$$\nu_e + n \rightarrow e^- + p$$



$$e \rightarrow g = \frac{e}{\sin \theta_{\text{Weinberg}}}$$

$$Q^2 \rightarrow (Q^2 + M_W^2)$$

$$M_W = 80 \text{ GeV}$$

$$\frac{d\sigma_{\nu n}}{dQ^2} \simeq \frac{(4\pi g^2)^2}{(M_W^2 + Q^2)^2}$$

$$\simeq \frac{(4\pi g^2)^2}{M_W^4} \frac{1}{(1 + Q^2/M_W^2)^2}$$

$$\sigma_{\nu n} = \int dQ^2 \frac{d\sigma_{\nu n}}{dQ^2}$$

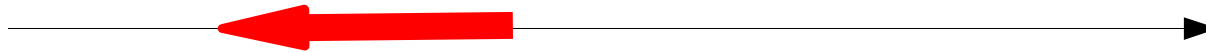
$$\simeq \frac{(4\pi g^2)^2}{M_W^4} (Q_{\text{max}}^2 - Q_{\text{min}}^2)$$

$$Q_{\text{max}}^2 = (p_\nu + p_n)^2 = M^2 + 2M E_\nu$$

$$\sigma_\nu(E_\nu) \sim \frac{\alpha^2}{M_W^4} M_p E_\nu (\hbar c)^2 \sim 10^{-38} E(\text{GeV}) \text{ cm}^2$$

Neutrino

Spin $1/2$



Direzione
Spin

Direzione
Momento

Anti-Neutrino



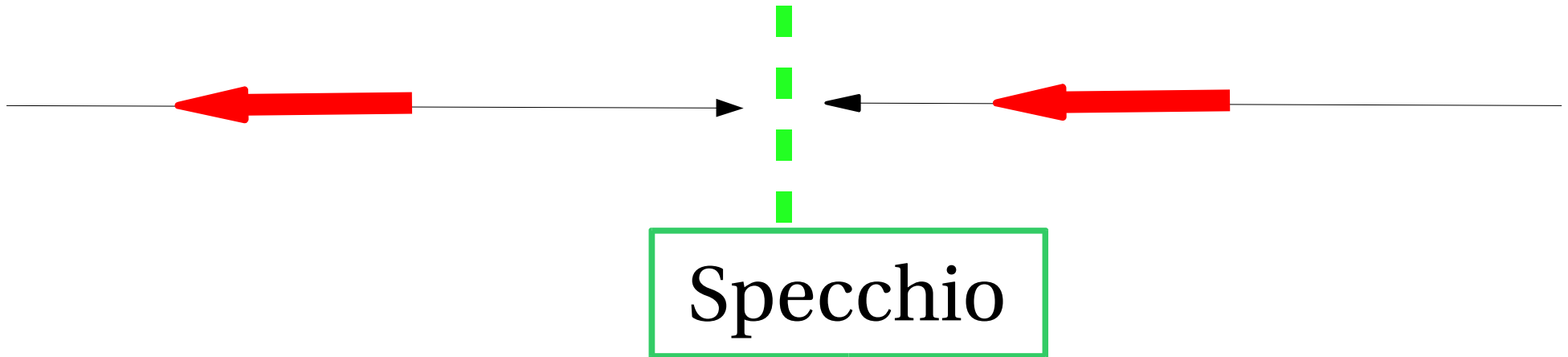
Direzione
Spin

Direzione
Momento

Violazione della Parita'

Il Mondo Reale

Il Mondo “attraverso lo Specchio”



Simmetria Approssimata della Natura

Trasformazione **CP**

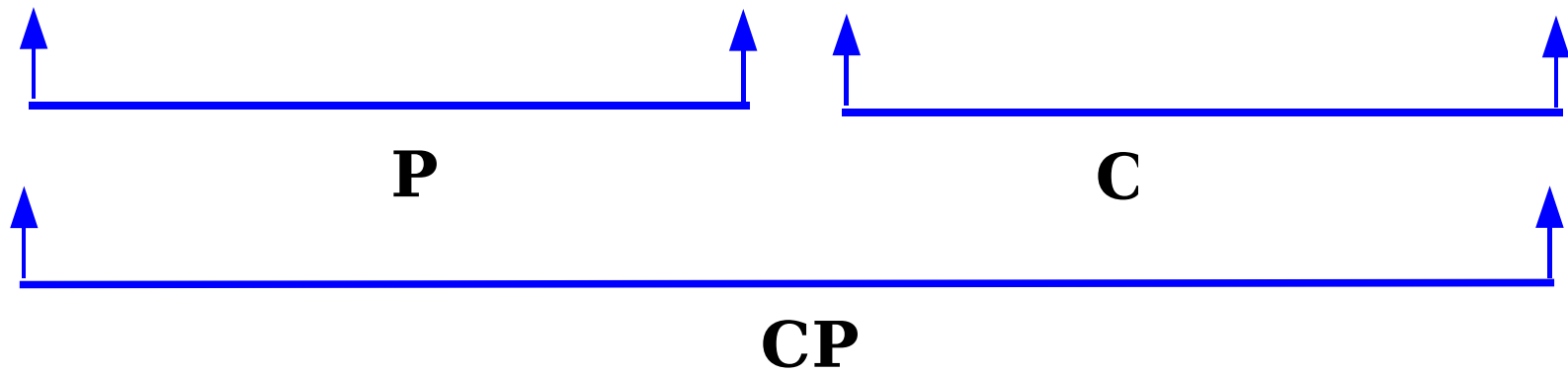
C = Coniugazione di Carica

[Particella $\longleftrightarrow$ AntiParticella]

P = Parita'

[Riflessione in uno Specchio]

Paul M. Dirac



Proprieta' Fondamentali dei Neutrini

$$\text{Spin} = 1/2$$

$$\text{Carica Elettrica} = 0$$

$$\text{Colore (Carica Forte)} = 0$$

Massa = molto piccola

$$M(\nu) \lesssim 10^{-5} M(\text{elettrone})$$

$$M(\nu) \gtrsim 10^{-7} M(\text{elettrone})$$

Per potere vedere i Neutrini

Necessario costruire
Grandi Rivelatori

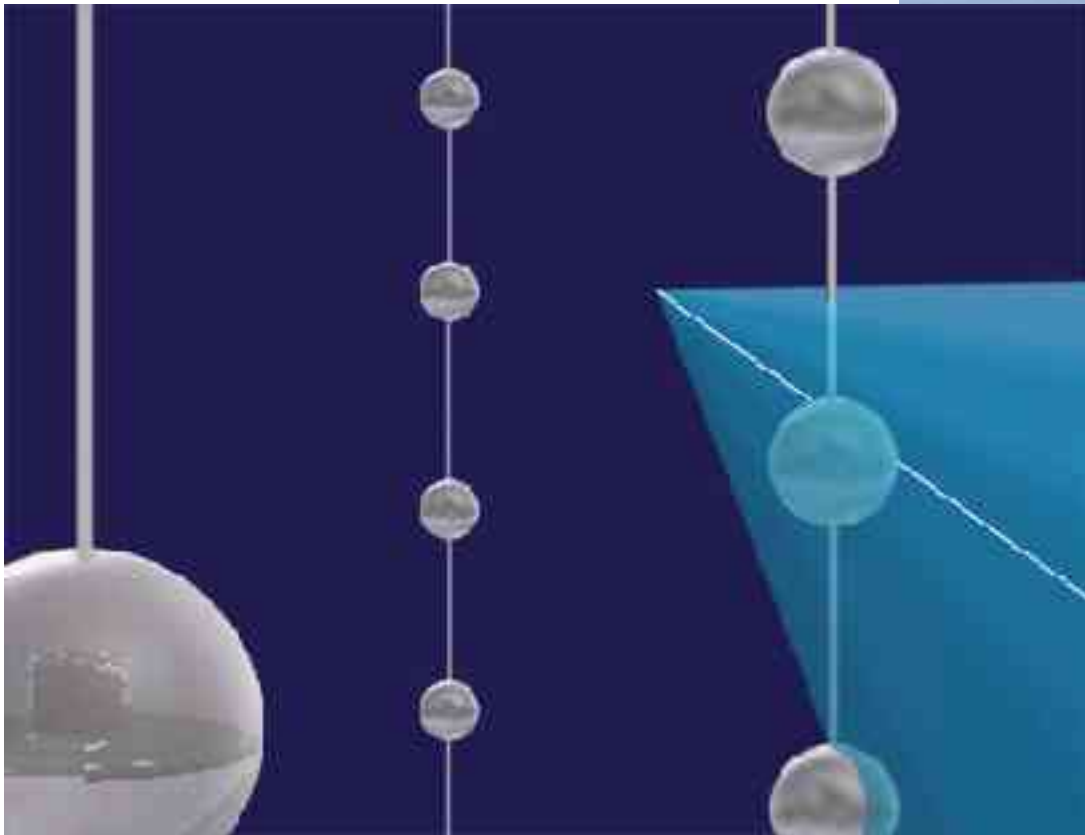
“Schermati”
da sorgenti di Rumore
(Sotterranei)

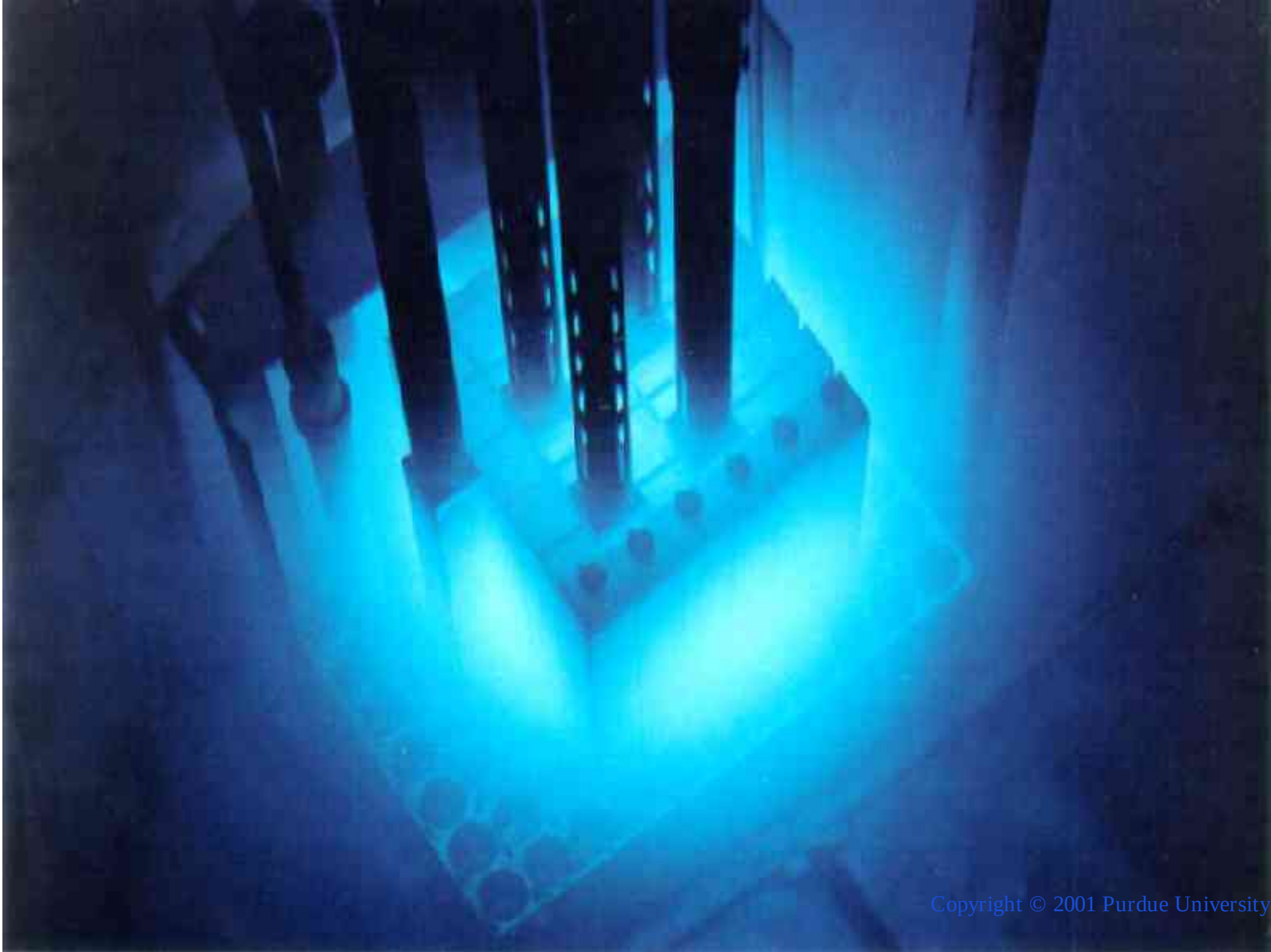
Gran Sasso



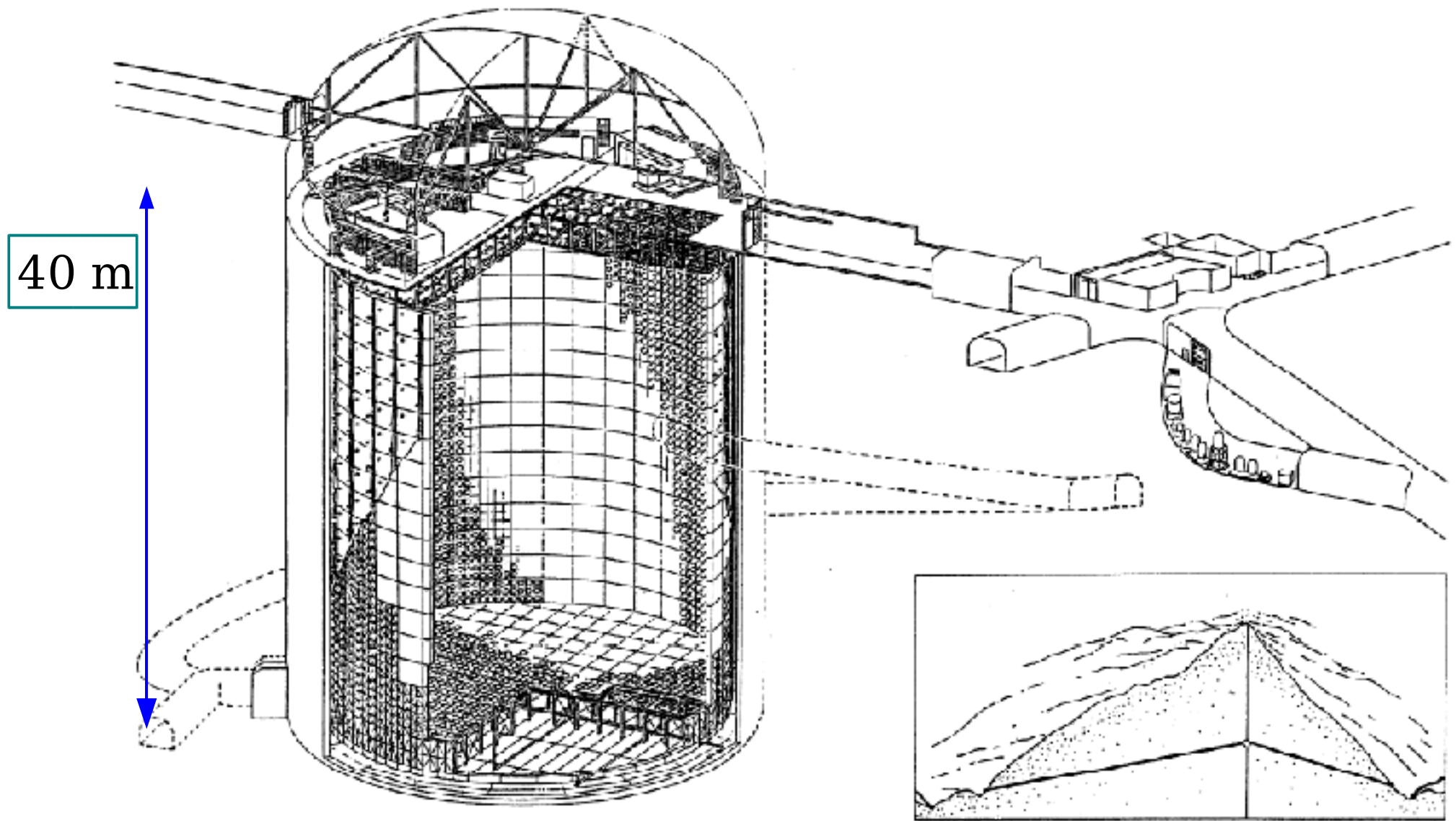
Luce Cherenkov

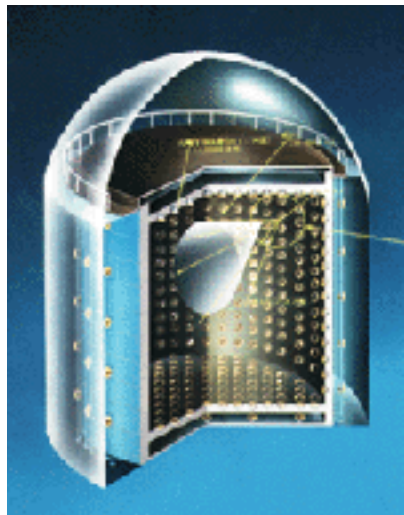
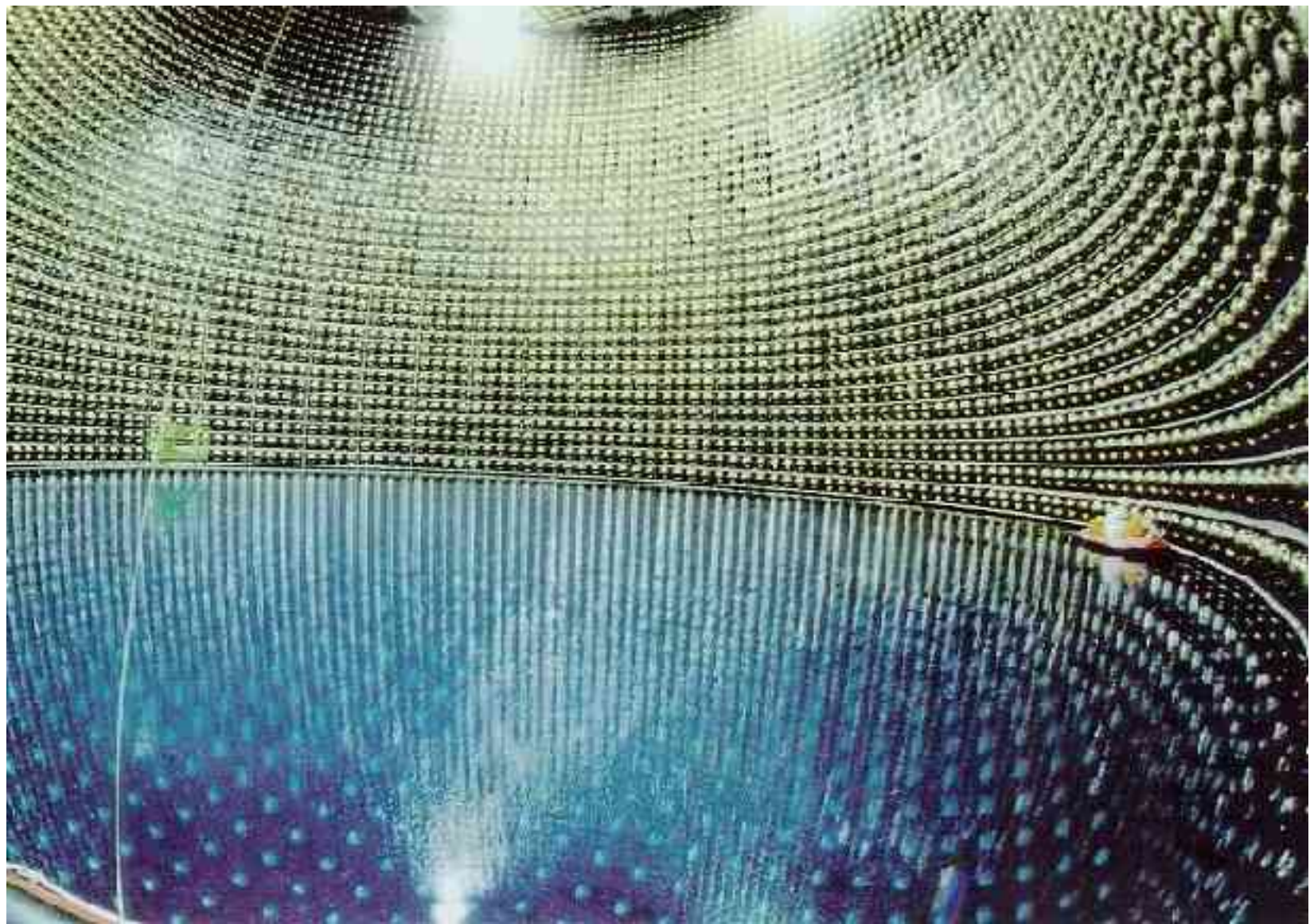
Emessa da
particelle Relativistiche
in un mezzo

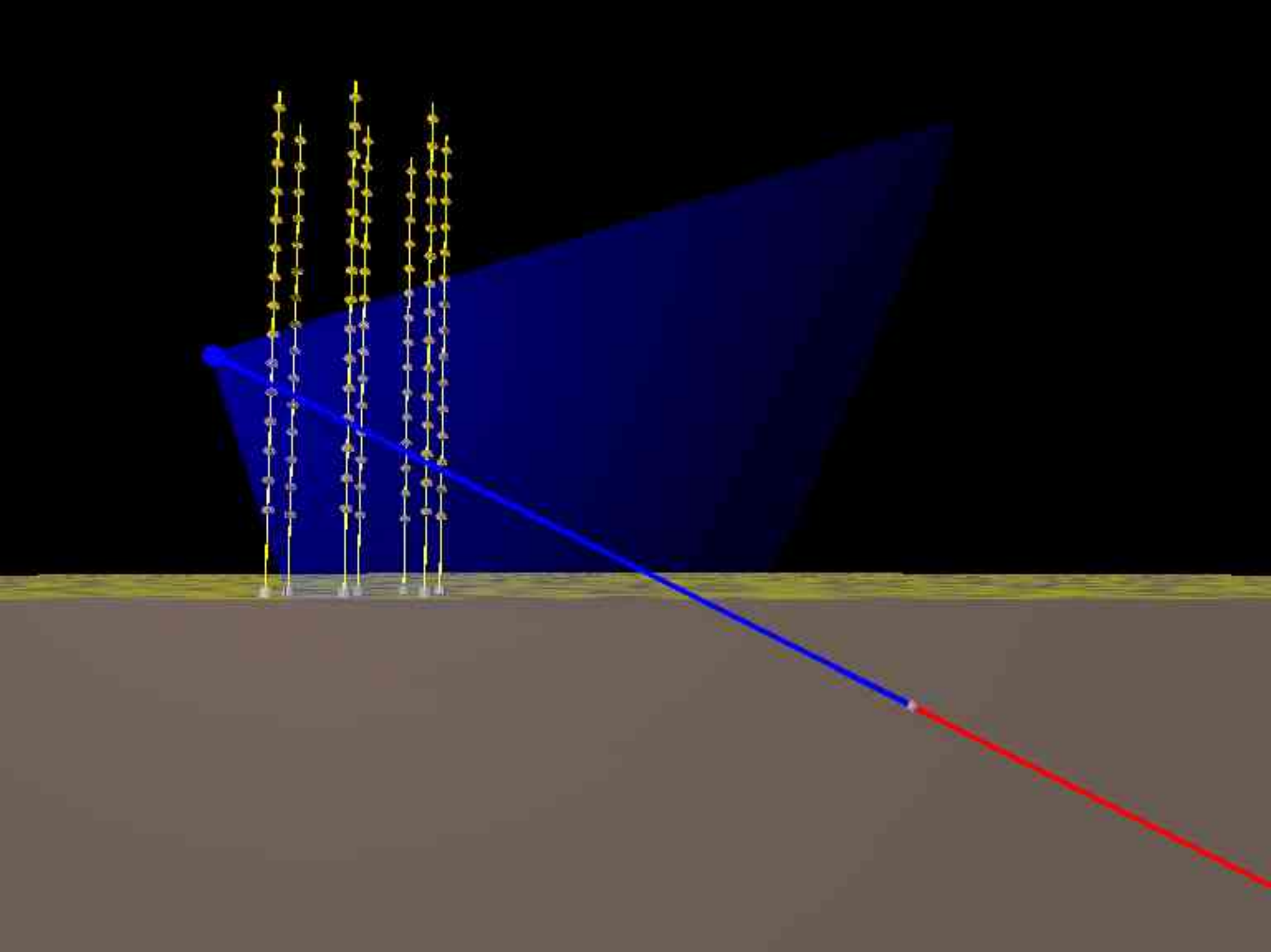




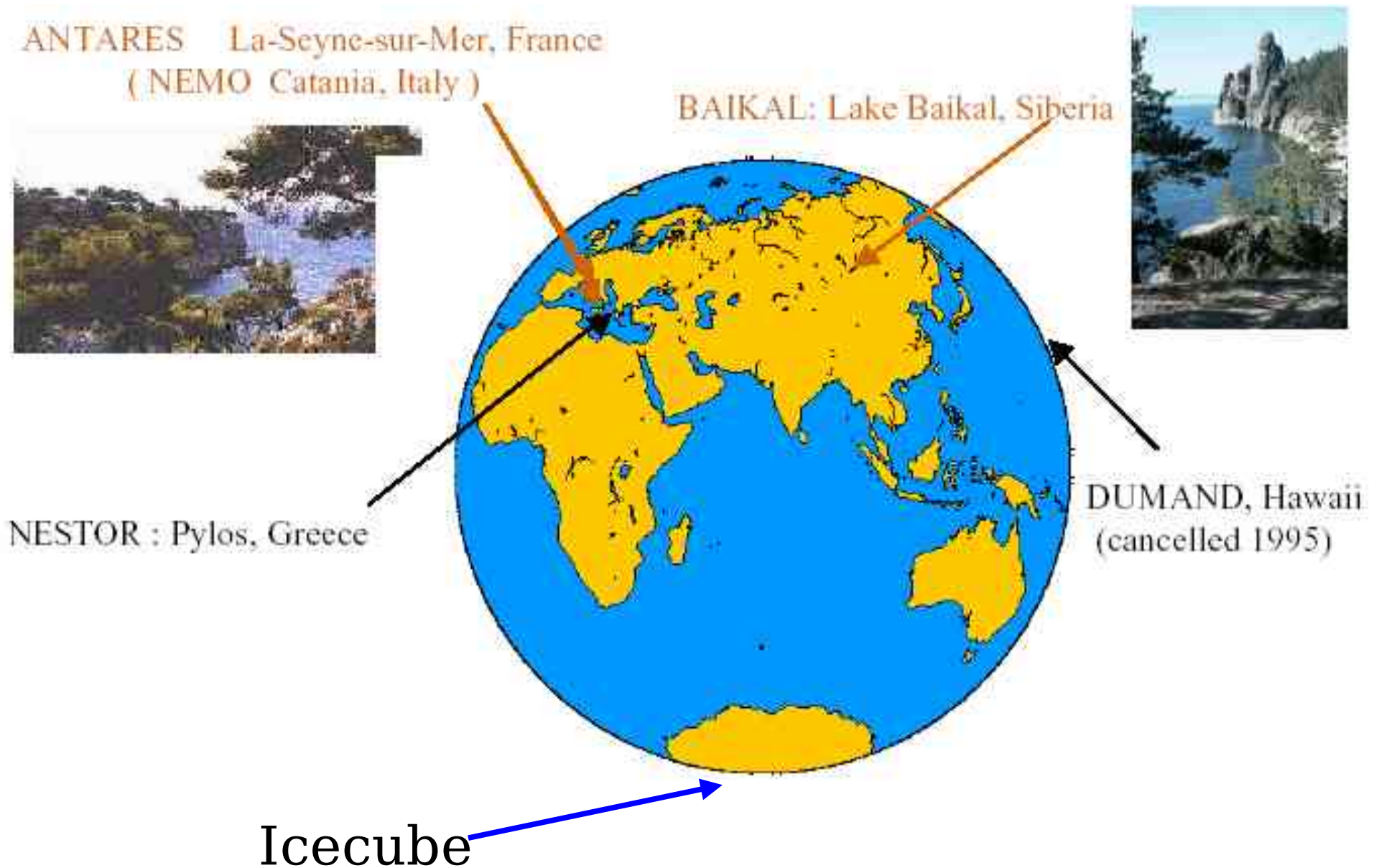
Super-Kamiokande detector







Neutrino Telescopes



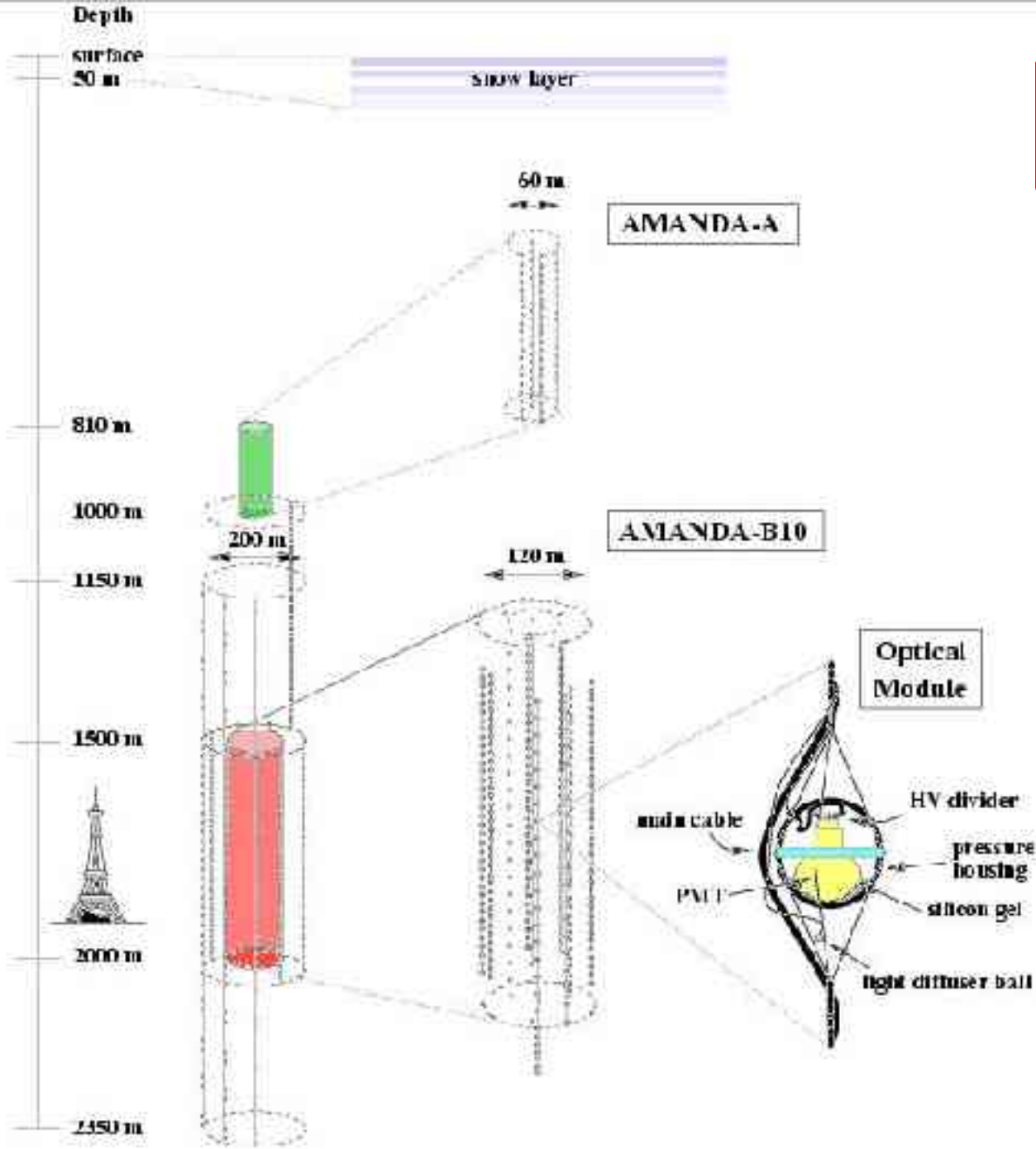
South Pole



AMANDA
1 mile deep



AMANDA



AMANDA as of 2000
Eiffel Tower as comparison
(true scaling)

zoomed in on
AMANDA-A (top)
AMANDA-B10 (bottom)

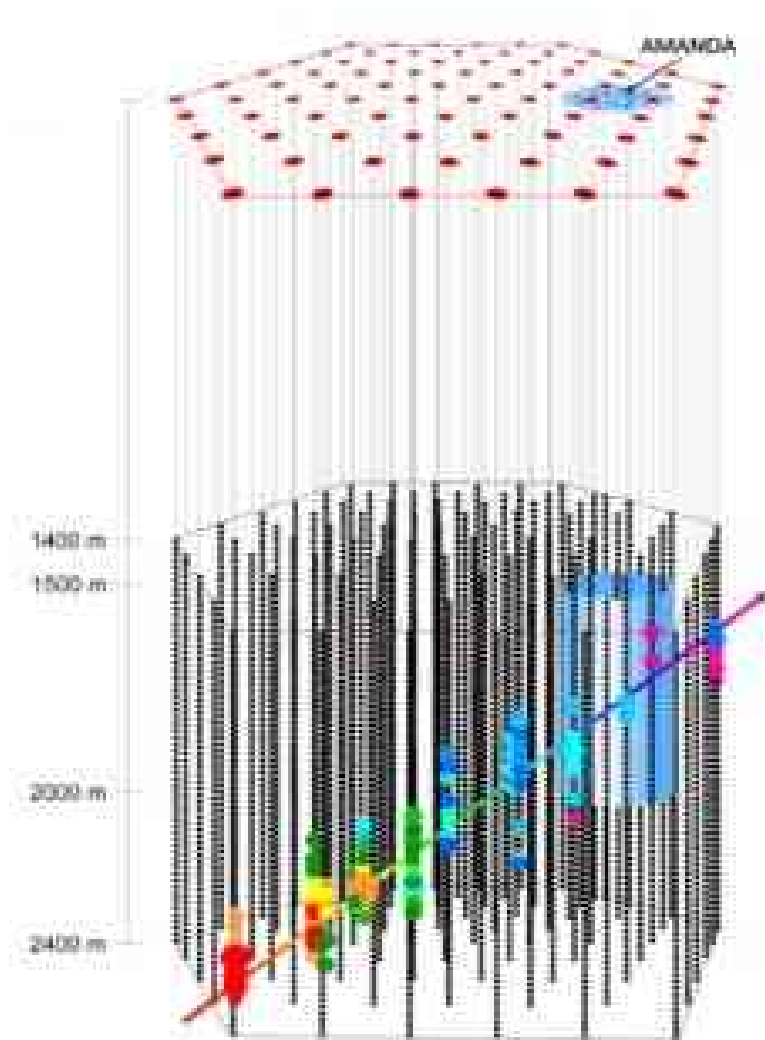
zoomed in on one
optical module (OM)

ICECUBE

80 strings
(distance 125 meters)

60 PhotoMultipliers per string
(17 m separation)

Total : 4800 PMT's



IceCube strings

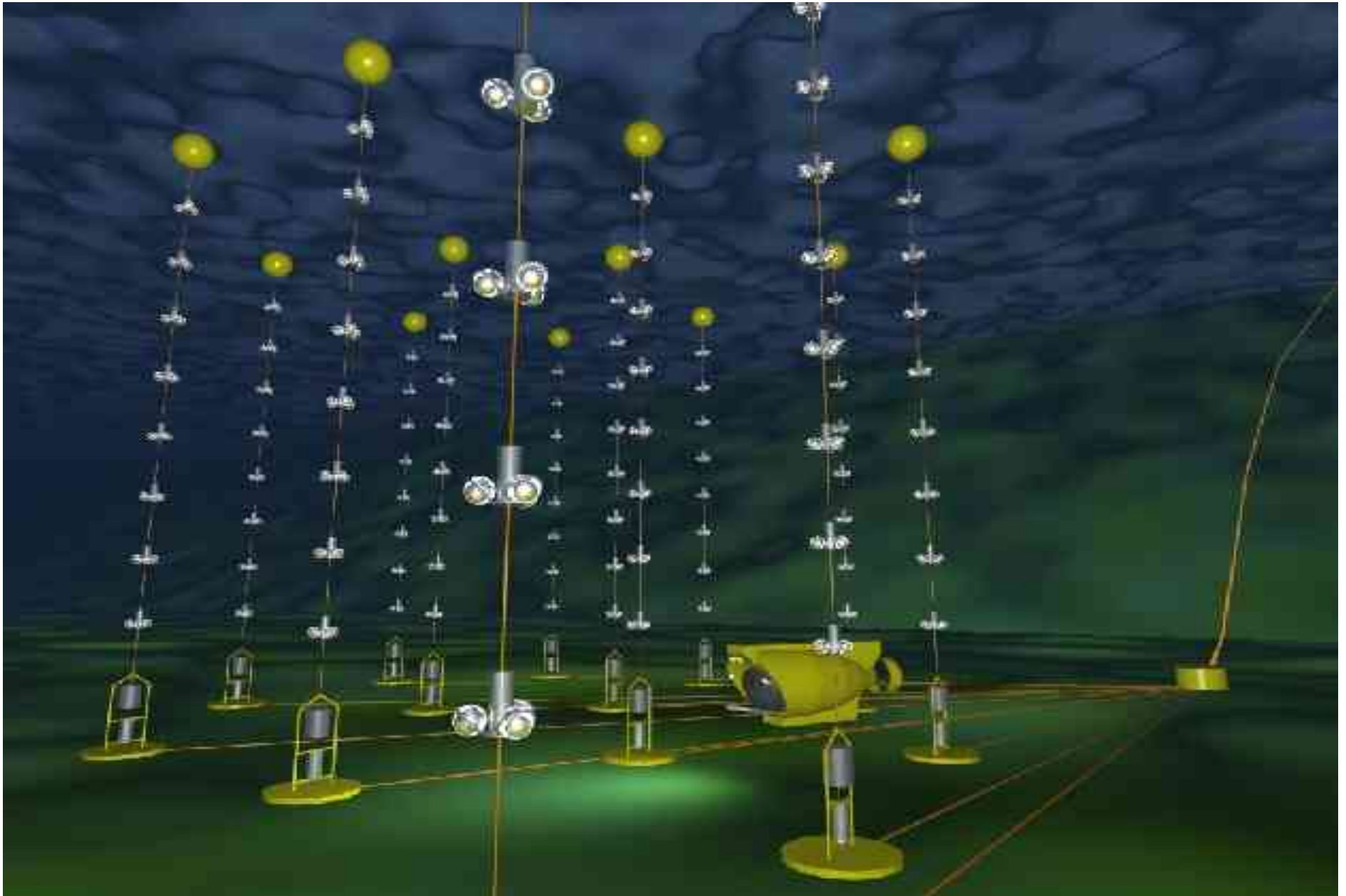
IceTop tanks

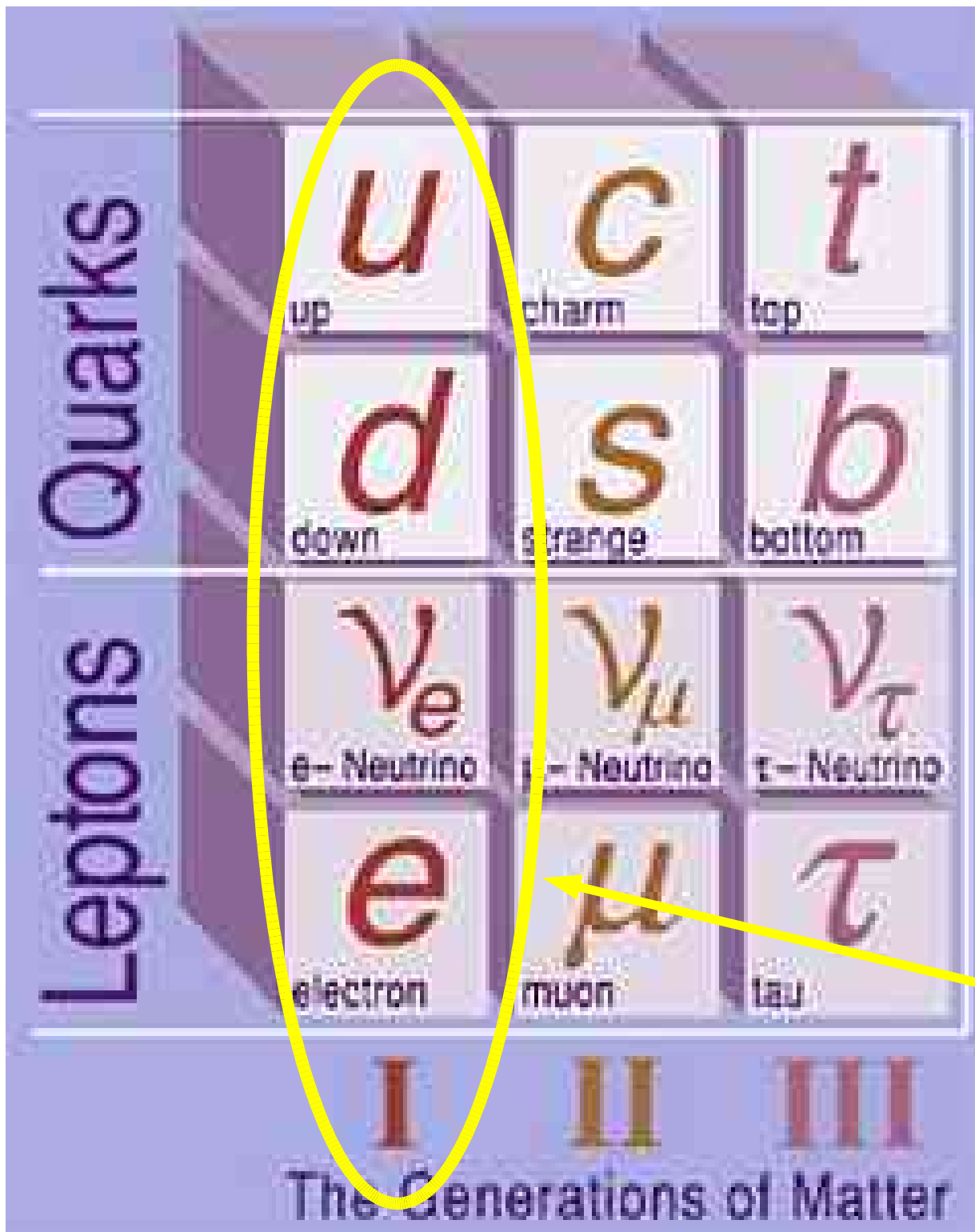
4	8	Jan 2005
16	32	Jan 2006
32	64	Jan 2007
50	100	Jan 2008
68	136	Jan 2009
80	160	Jan 2010

Deployment of the strings



ANTARES





3 GENERAZIONI
di Particelle
Elementari

Prima
Generazione

Materia
Ordinaria

Quarks	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom
	ν_e e- Neutrino	ν_μ μ - Neutrino	ν_τ τ - Neutrino
Leptons	e electron	μ muon	τ tau
	I	II	III
The Generations of Matter			

3 GENERAZIONI
di Particelle
Elementari

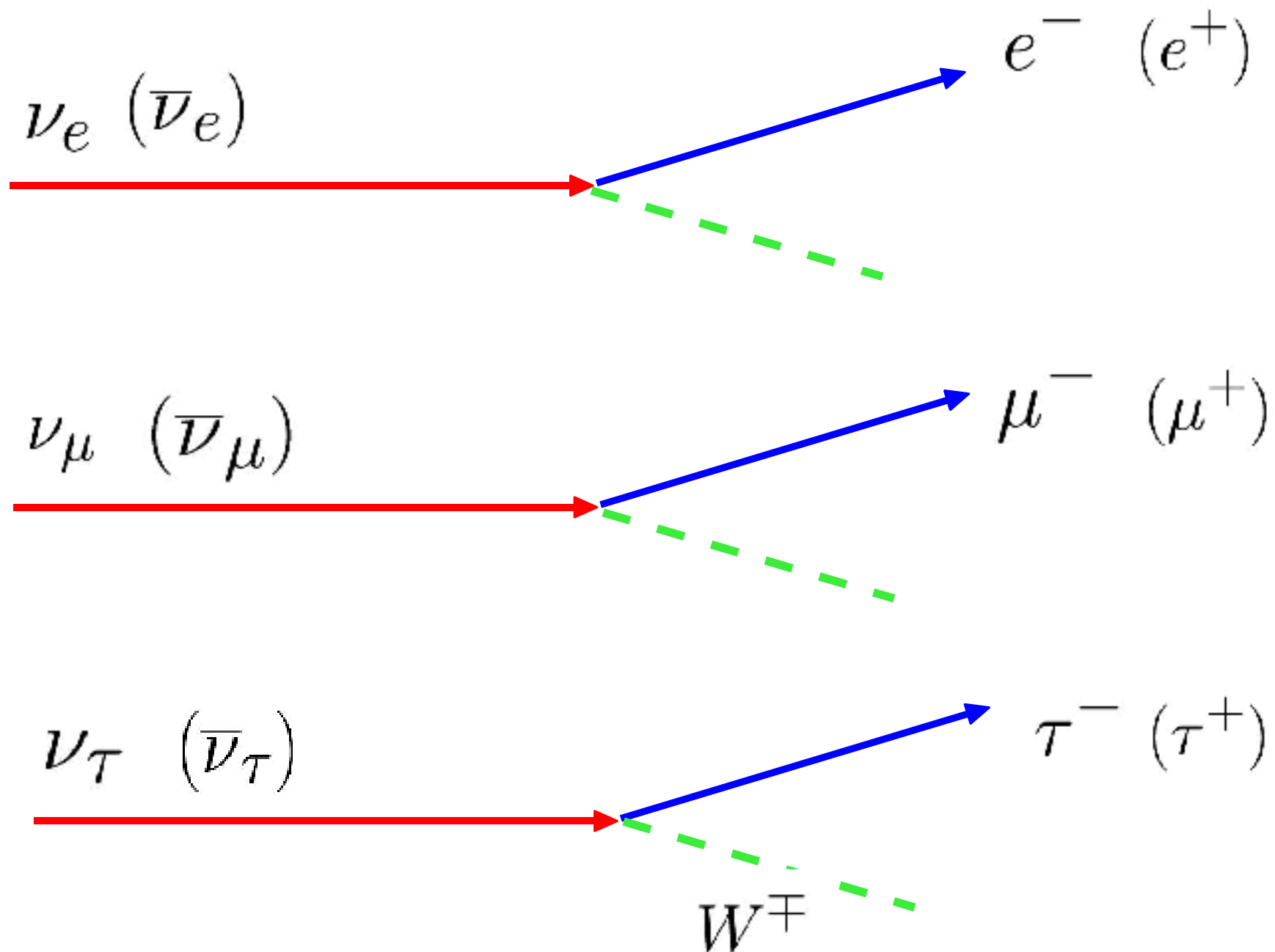
Chi le ha
ordinate ?

3 tipi (SAPORI) di Neutrino

ν_e ν_μ ν_τ

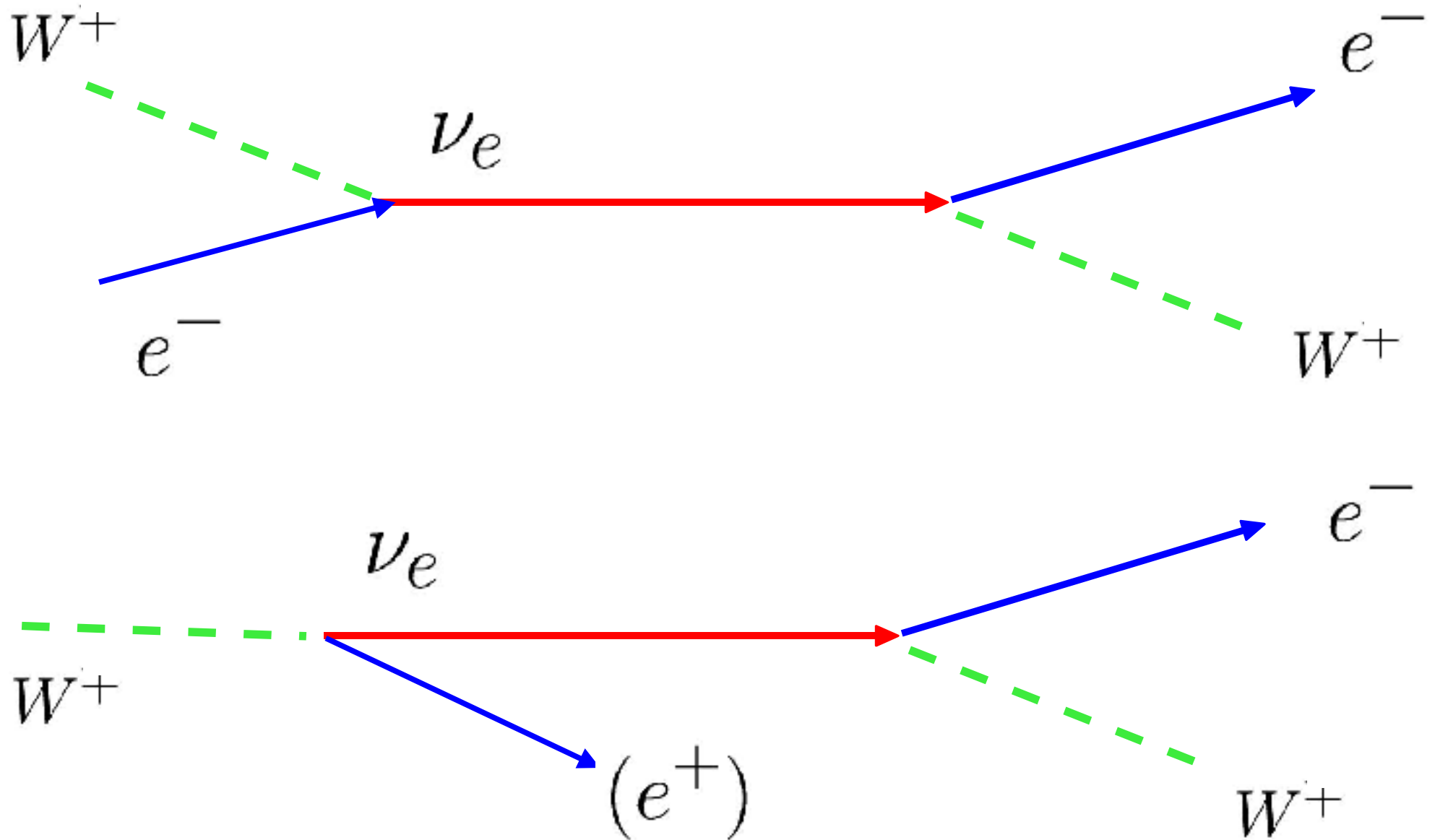
$\bar{\nu}_e$ $\bar{\nu}_\mu$ $\bar{\nu}_\tau$

SAPORE

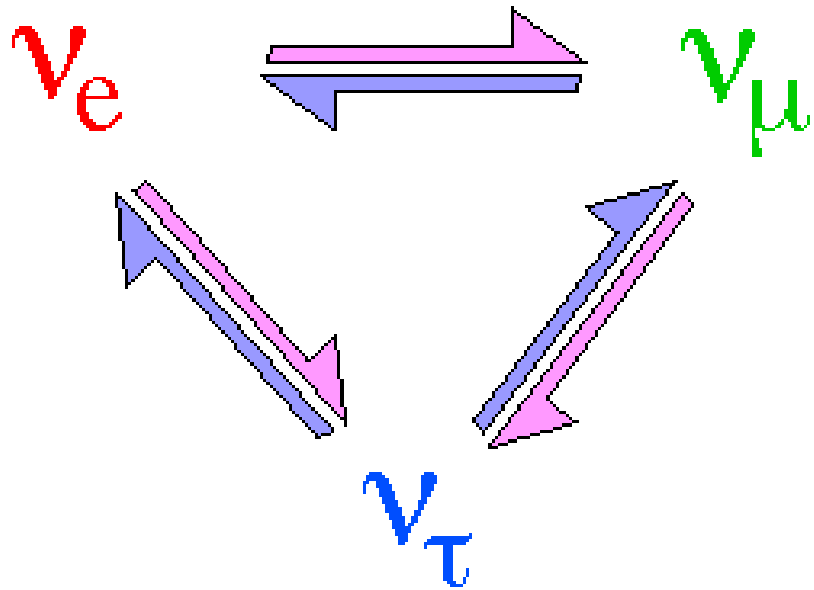


SAPORE

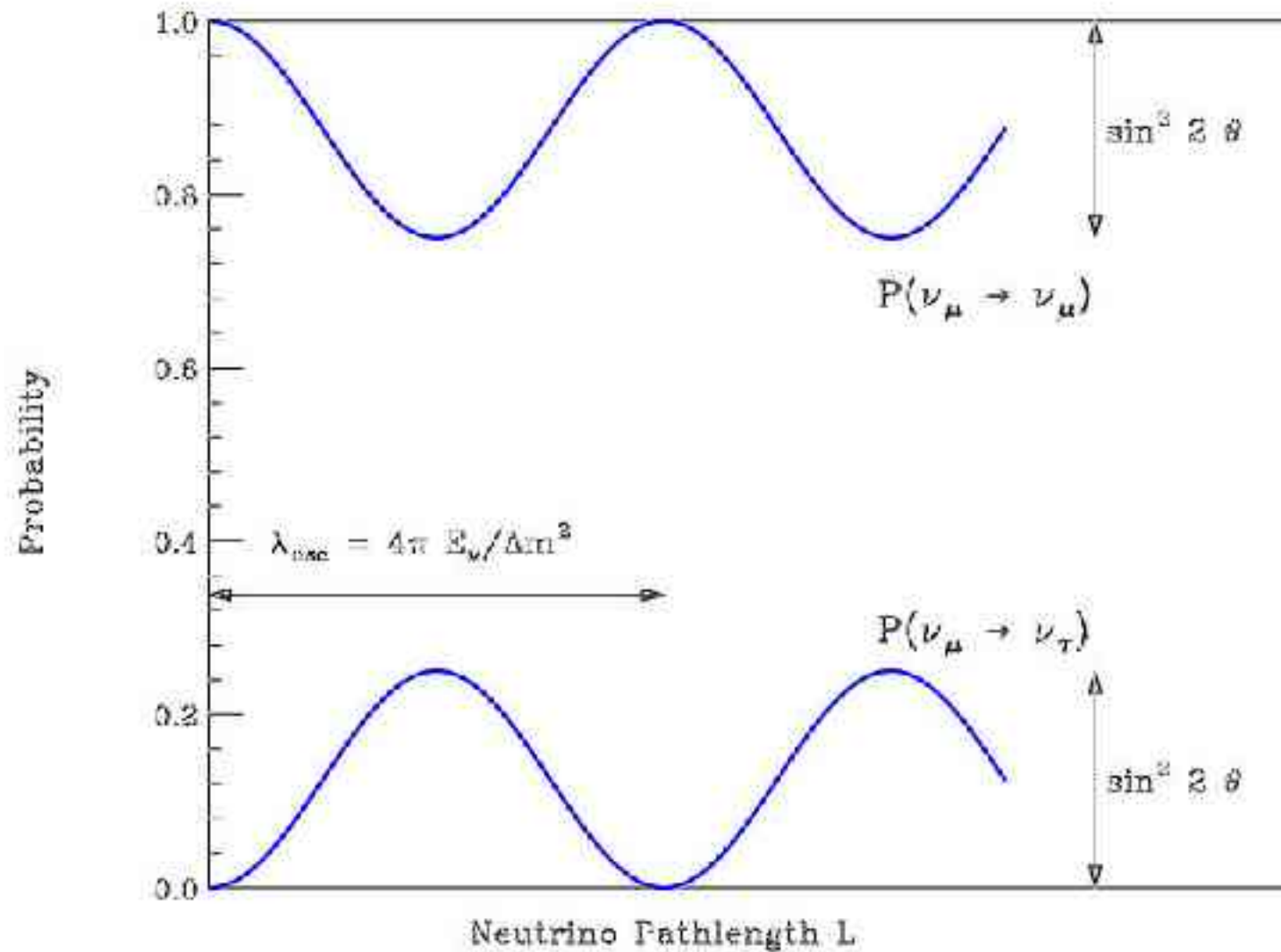
Sapore di Elettrone



Trasformazione di Sapore dei Neutrini



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau; L) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left[1.27 \Delta m^2 (\text{eV}^2) \frac{L(\text{Km})}{E(\text{GeV})} \right]$$



Fermilab to Minos



CERN to Gran Sasso



Giappone



NEUTRINI

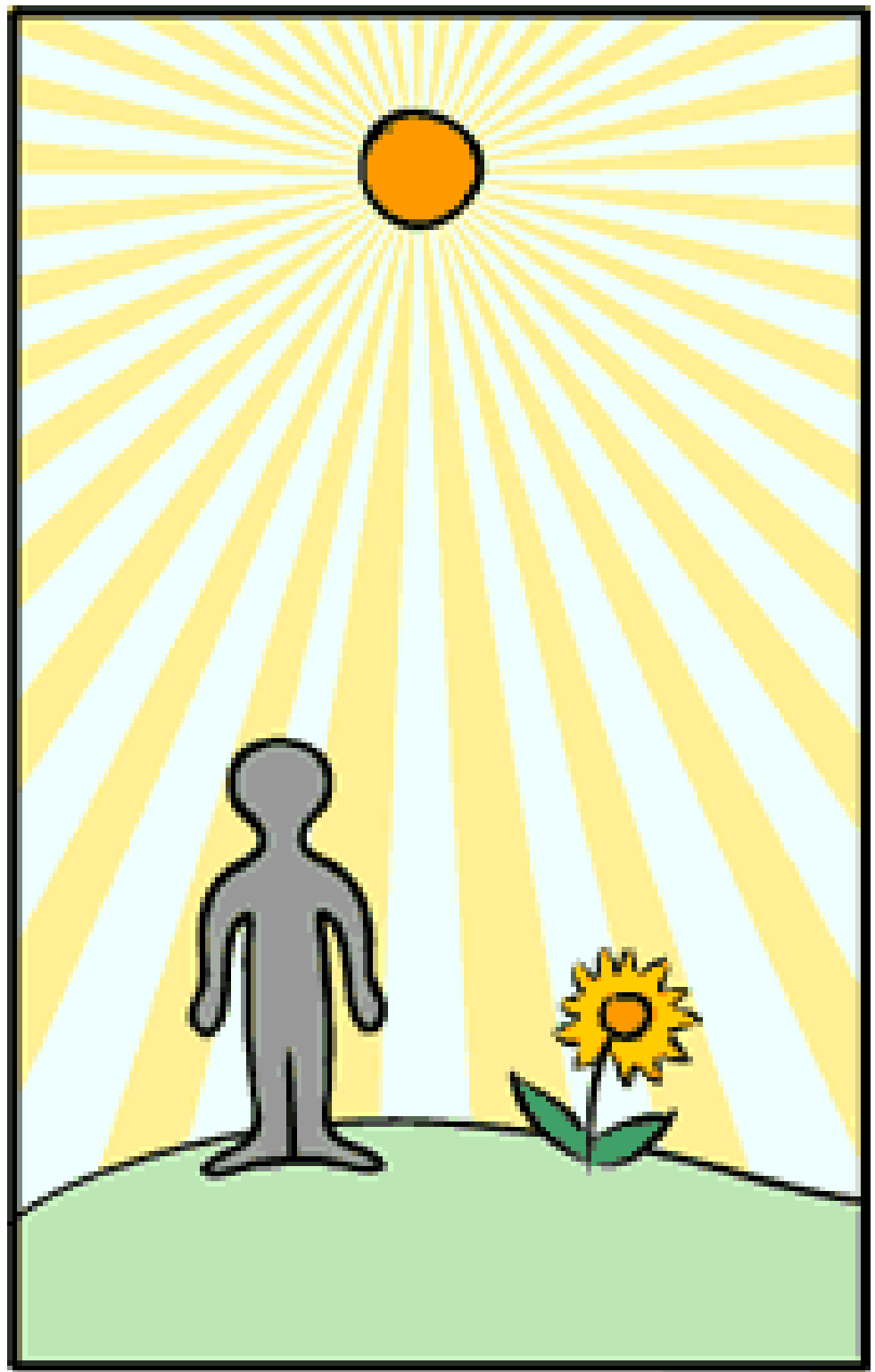
Essenziali nel funzionamento delle STELLE
(e del nostro SOLE)

Importante ruolo nelle ESPLOSIONI di
SUPERNOVA

Componente Fondamentale della
ZUPPA COSMICA
dell'UNIVERSO GIOVANE

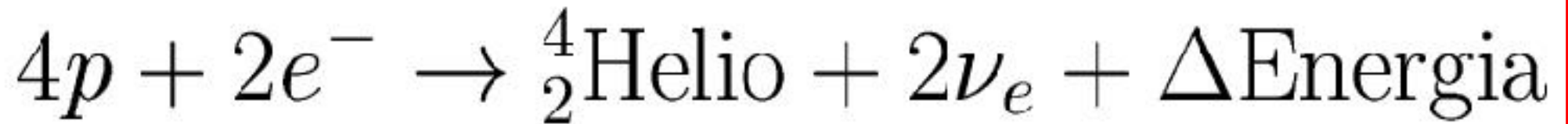
Prodotti nei luoghi piu' Violenti dell'Universo
(nelle Vicinanze dei BUCHI NERI)

Come produce
ENERGIA
il nostro
SOLE ??

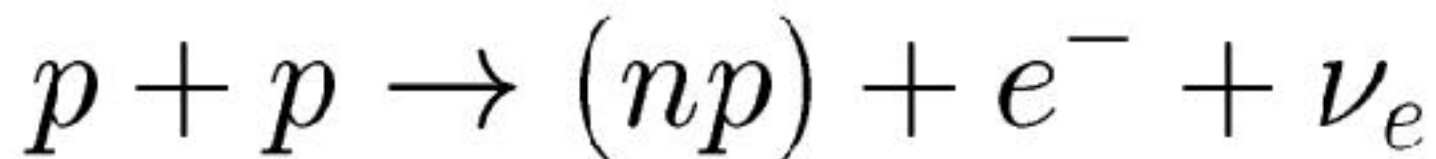
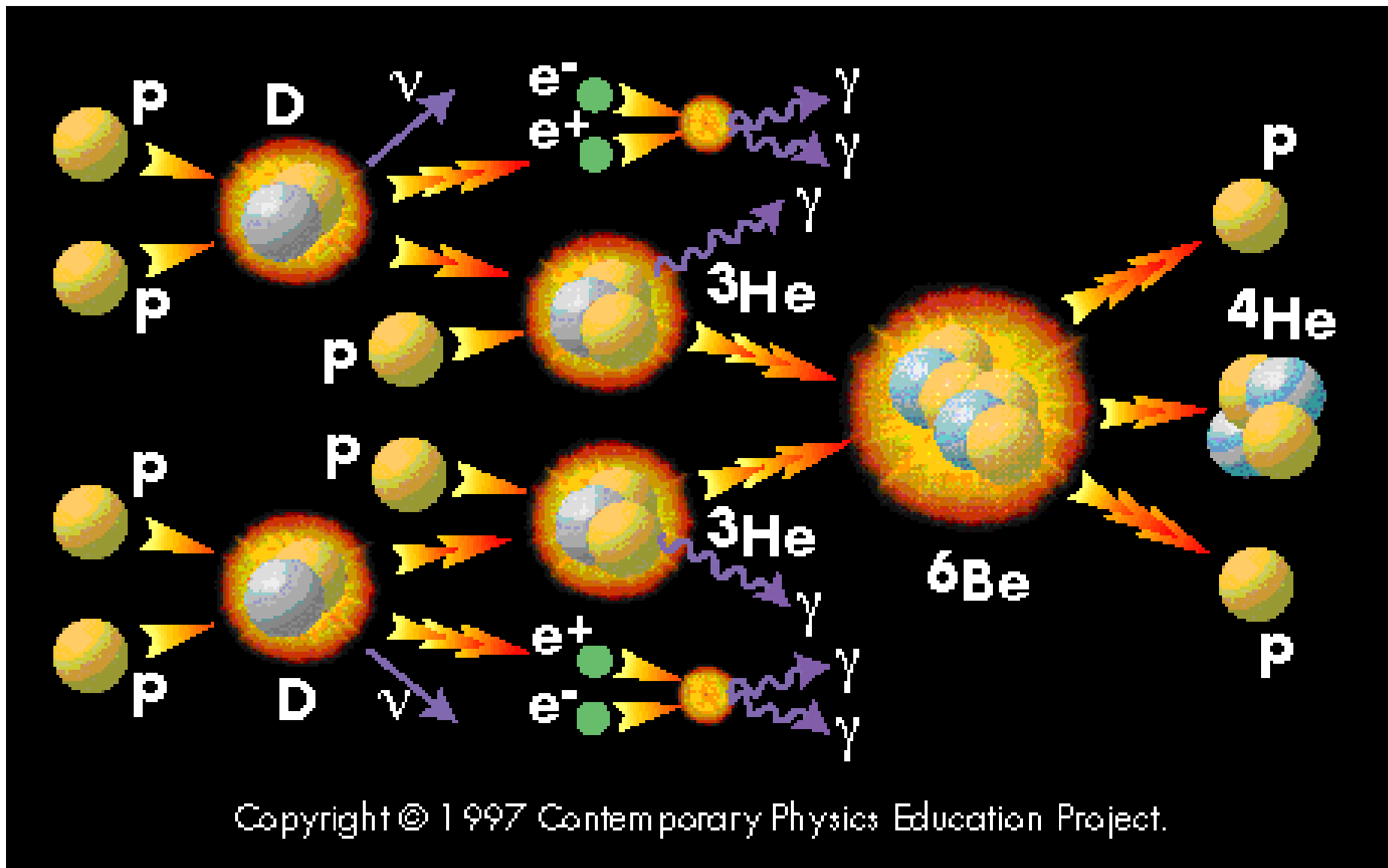


Con la:

FUSIONE NUCLEARE



$$\Delta E = (4M_p + 2M_e - M_{\text{He}} - 2M_{\nu}) c^2 = 26.4 \text{ MeV}$$

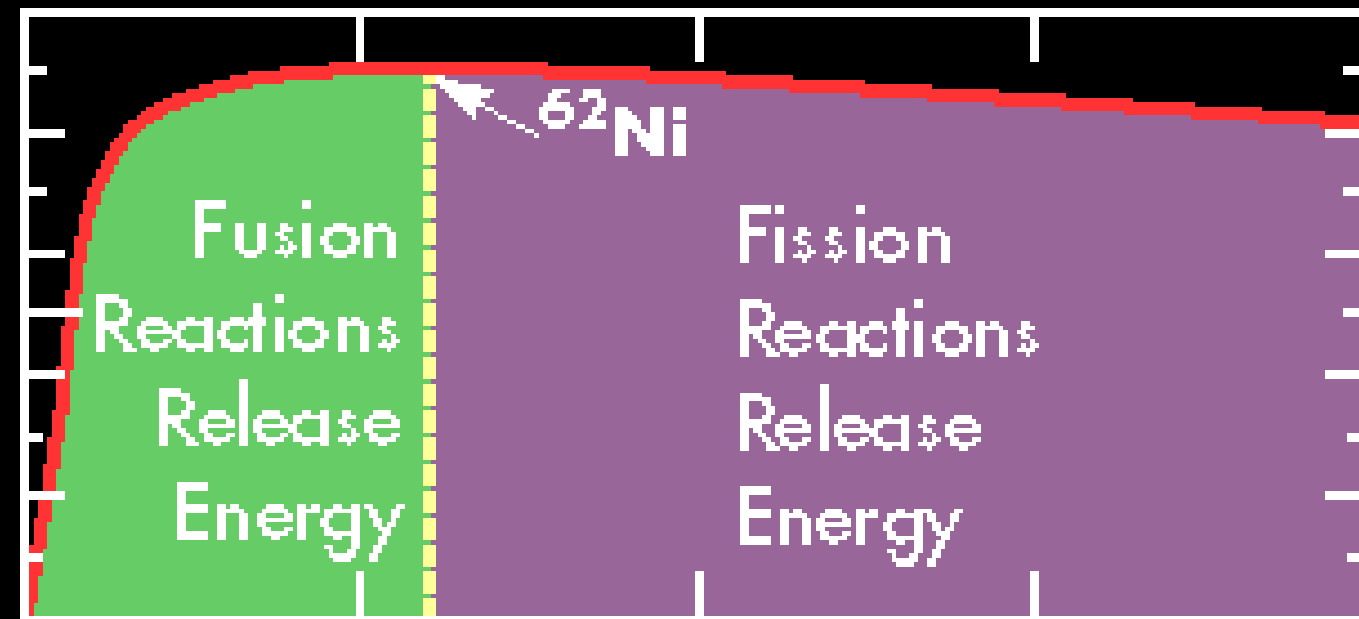


Binding Energy
Per Nucleon (MeV)

10

5

0



Fusion
Reactions
Release
Energy

Fission
Reactions
Release
Energy

^{62}Ni

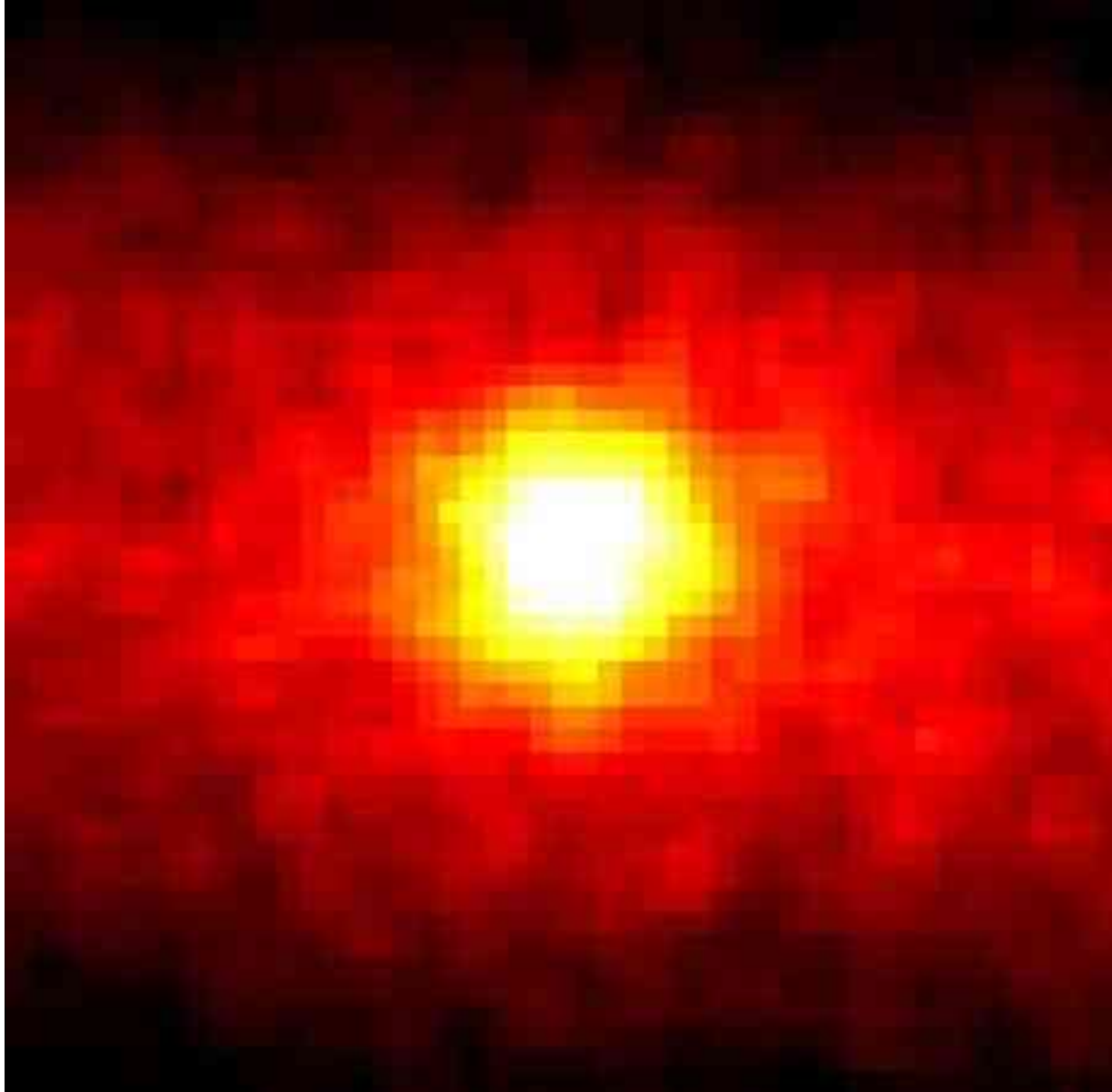
Nuclear Mass (u)

Copyright © 1996 Contemporary Physics Education Project.

$$N_\nu = 2 \times \left[\frac{\text{Luminosita del sole}}{\Delta \text{Energia}} \right]$$

$$2 \times 10^{10} \frac{\text{Neutrini}}{\text{cm}^2 \text{ sec}}$$

Il Sole visto in Neutrini da SuperKamiokande





Davis



Koshihara

Premi Nobel per
la FISICA 2003

Rivelazione
dei Neutrini Solari



Giacconi

SUPERNOVAE

SUPERNOVA 1006





23 Febbraio 1987

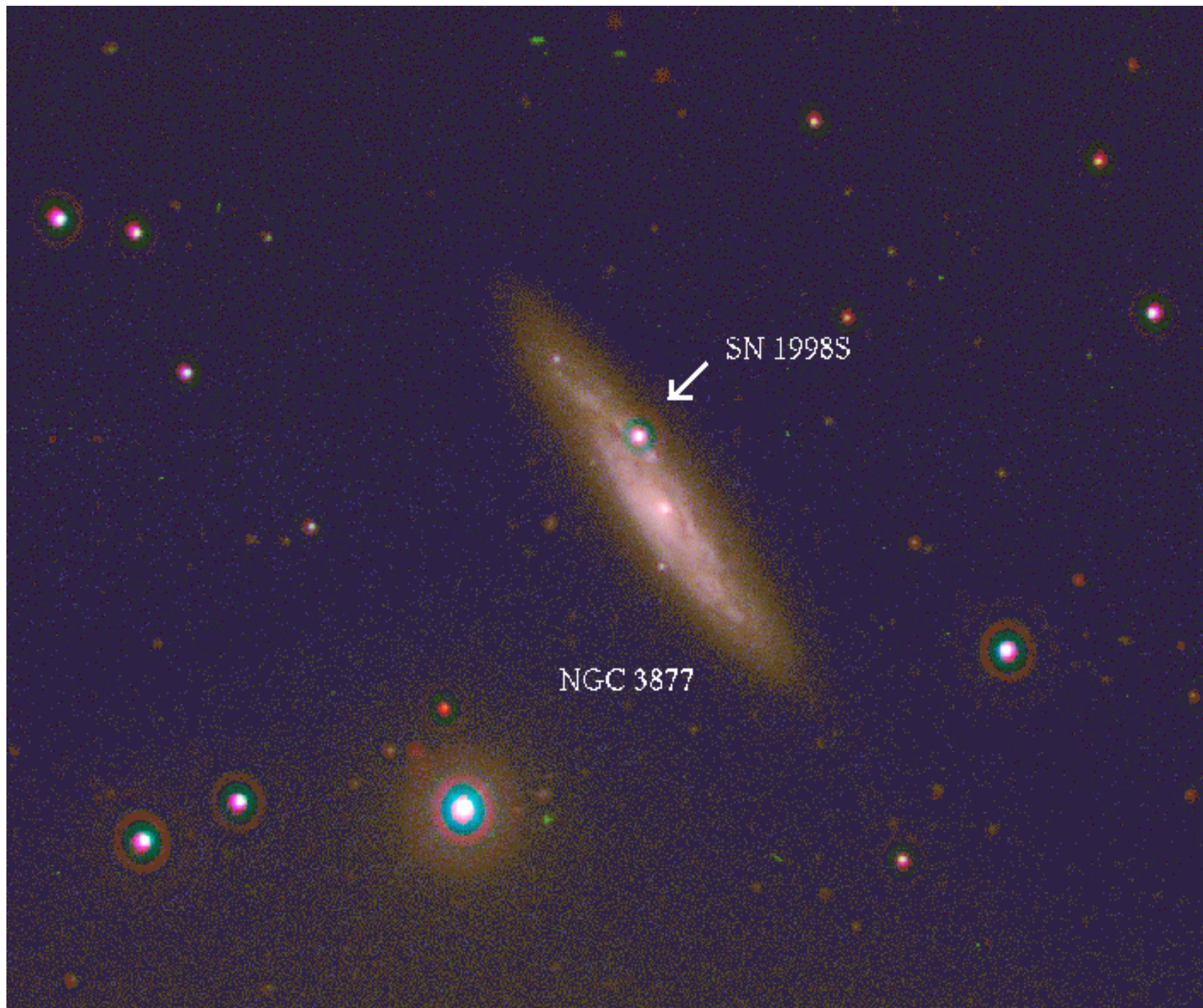
Supernova 1987A

Nella Grande Nube
di Magellano

14 Neutrini
rivelati





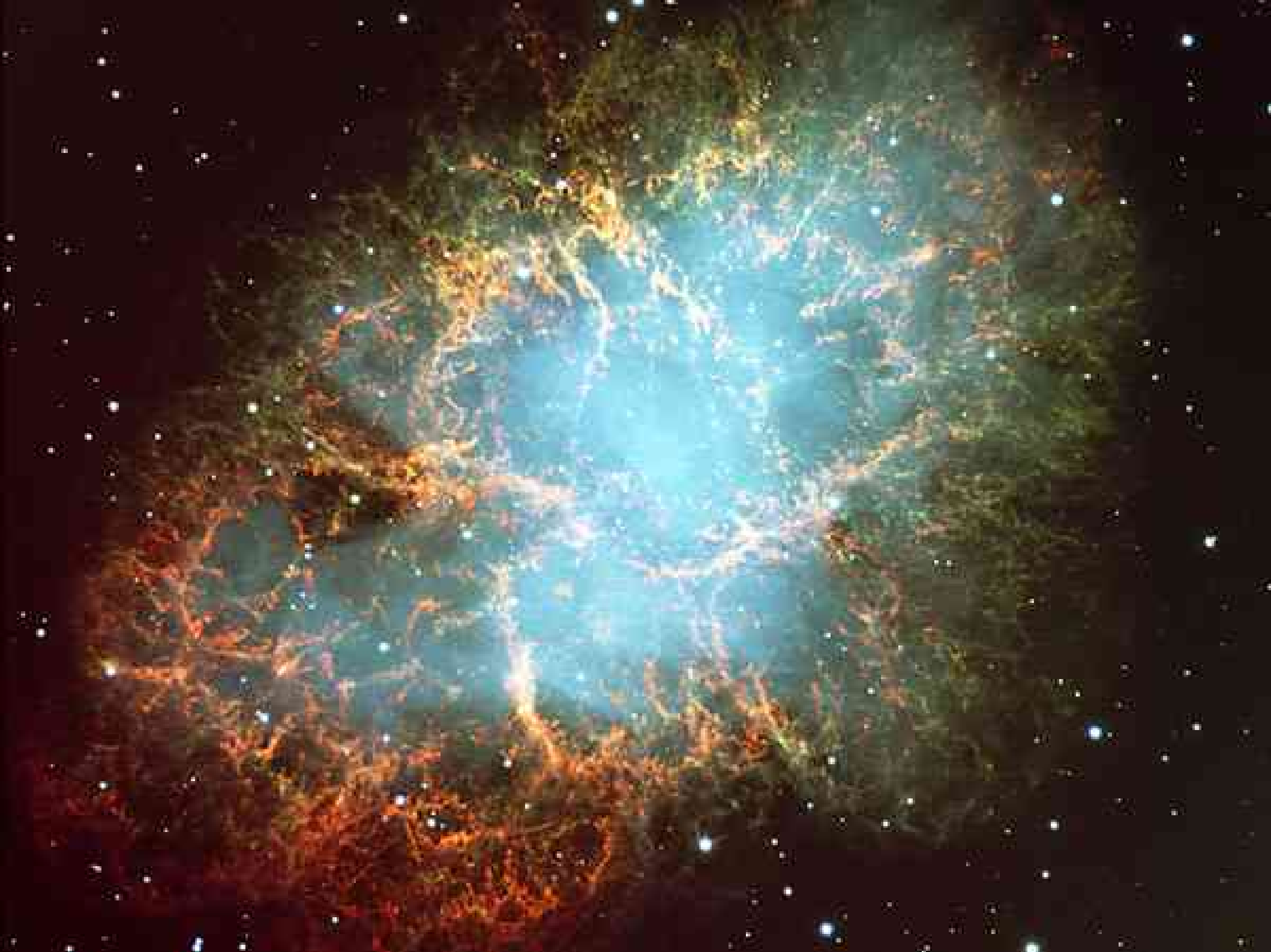


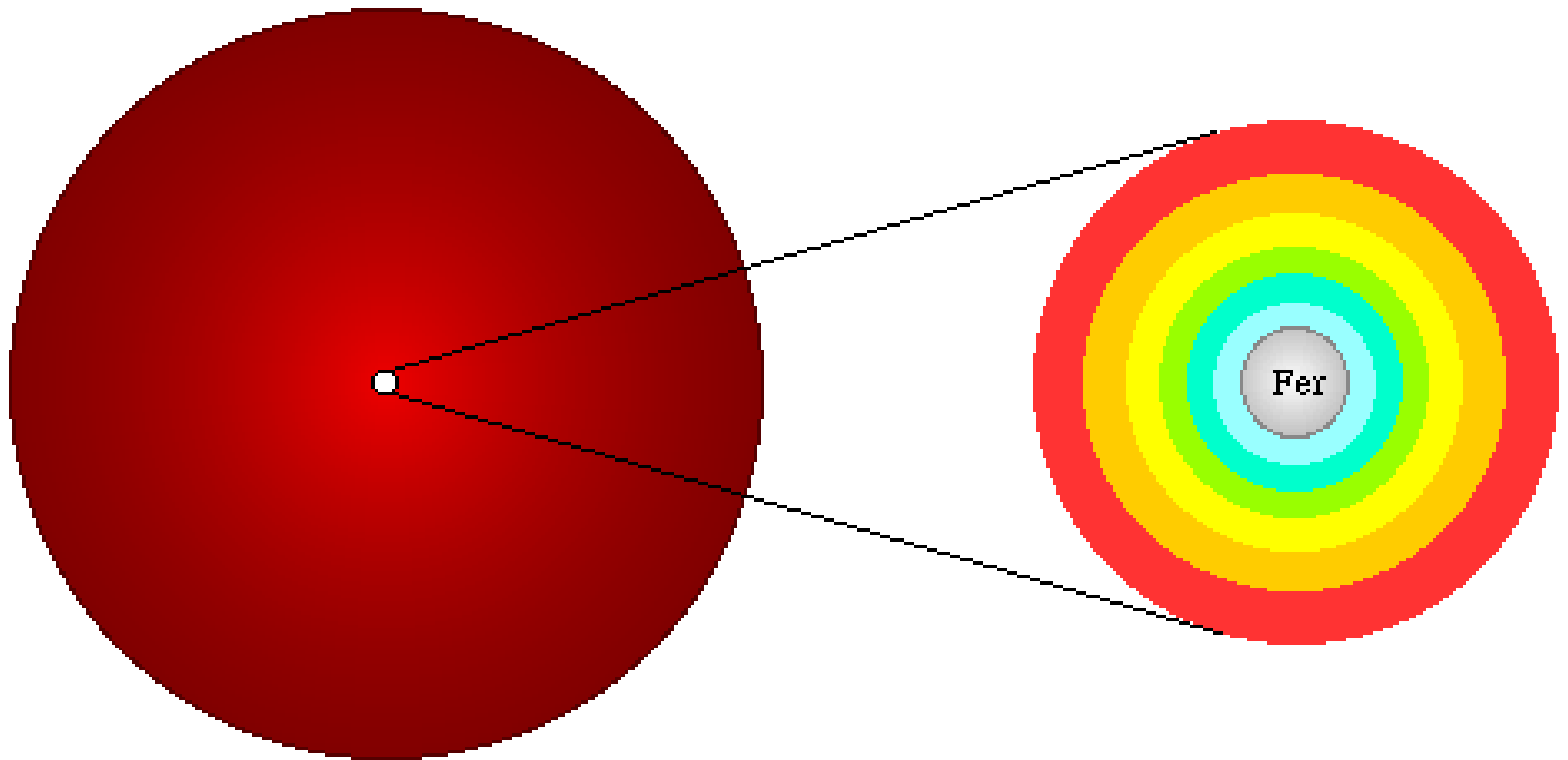
SN 1998S

NGC 3877



M1, Crab Nebula





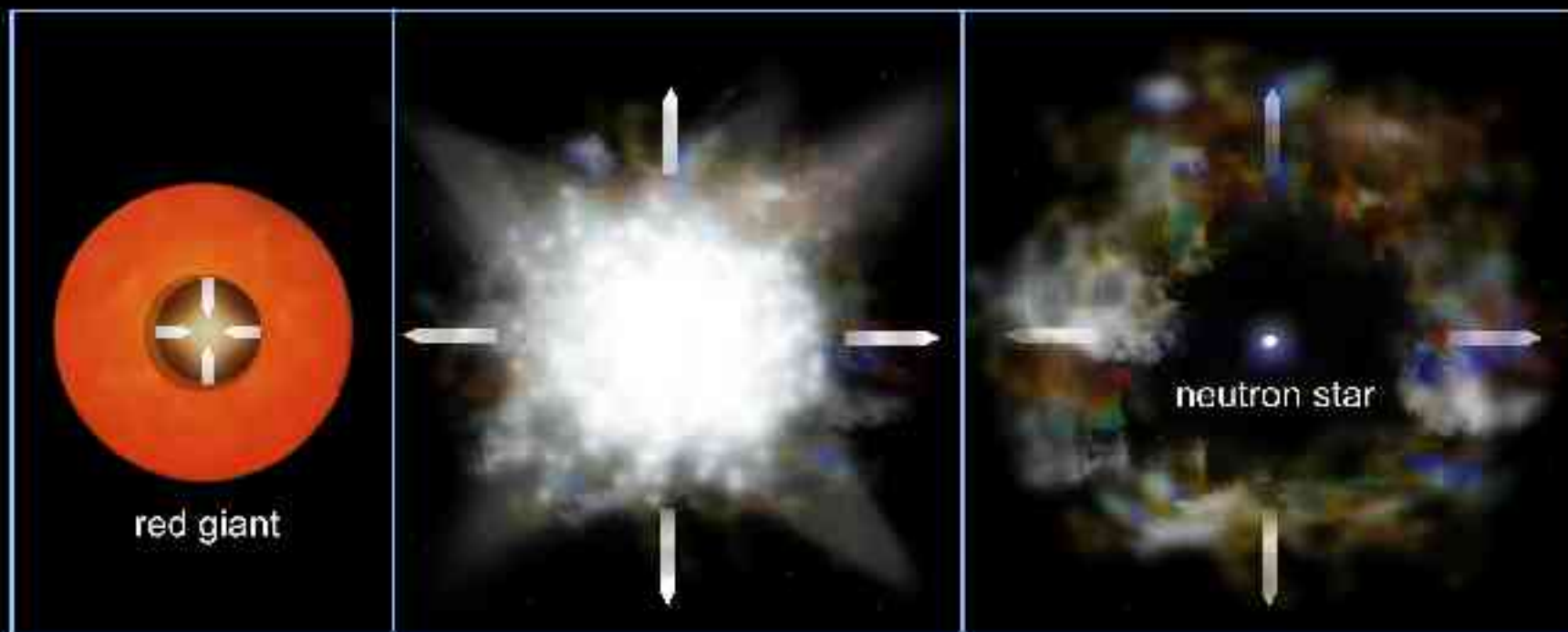
Stella di grande Massa
 $M > 10$ Masse Solari

Struttura a Cipolla
Nucleo di Ferro
Raggio ≈ 5000 Km

Collasso del Nucleo
fino a Raggio ≈ 10 Km
(densità Nucleare)

Birth of a Neutron Star and Supernova Remnant

(not to scale)



Core Implosion → Supernova Explosion → Supernova Remnant

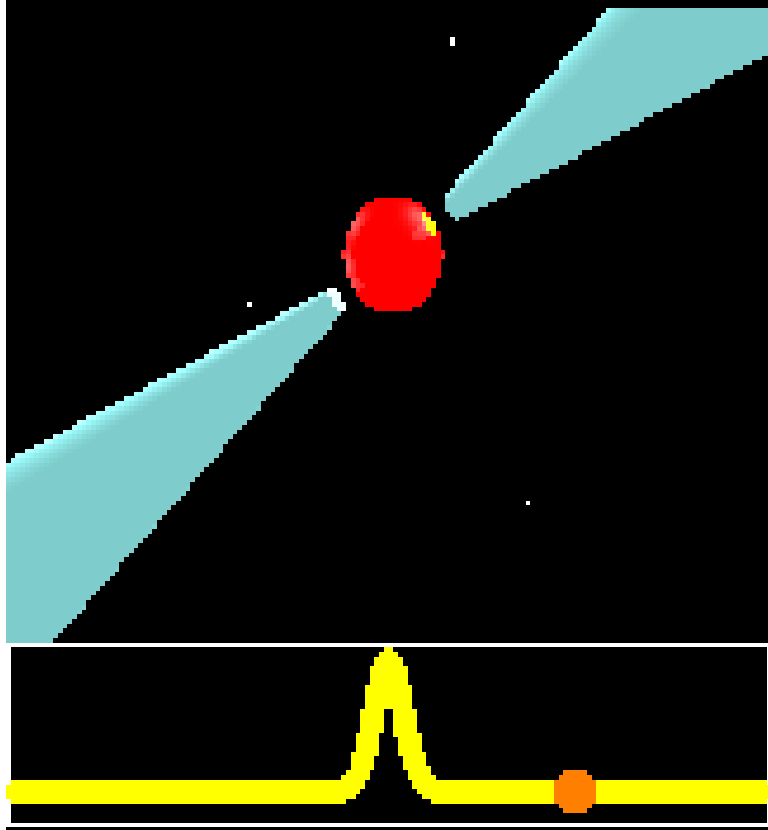
“Rimbalzo”
Espulsione
degli Strati Esterni

Stella di Neutroni
Densissima
ed inizialmente
caldissima

Emissione di Neutrini

$$\gamma + \gamma \rightarrow \nu + \bar{\nu}$$

MPIfR-Bonn Pulsar Group



Pulsar

Emissione di Neutrini

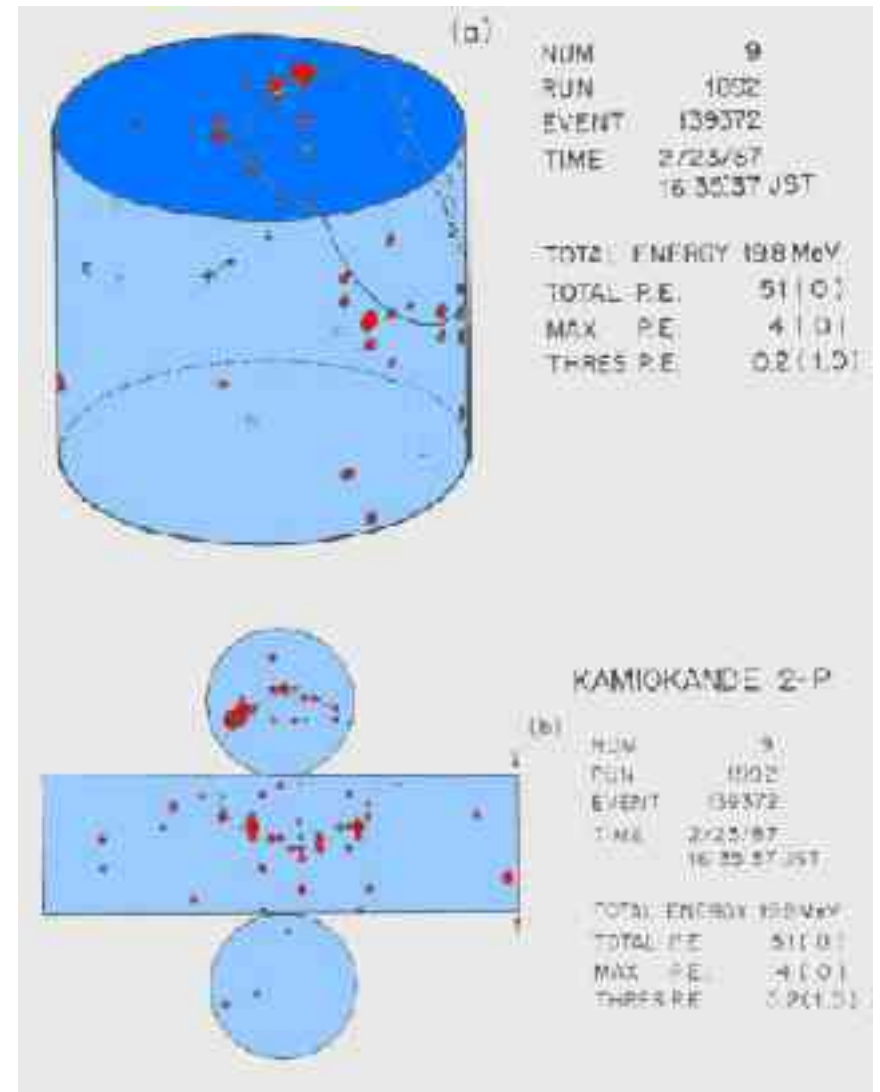
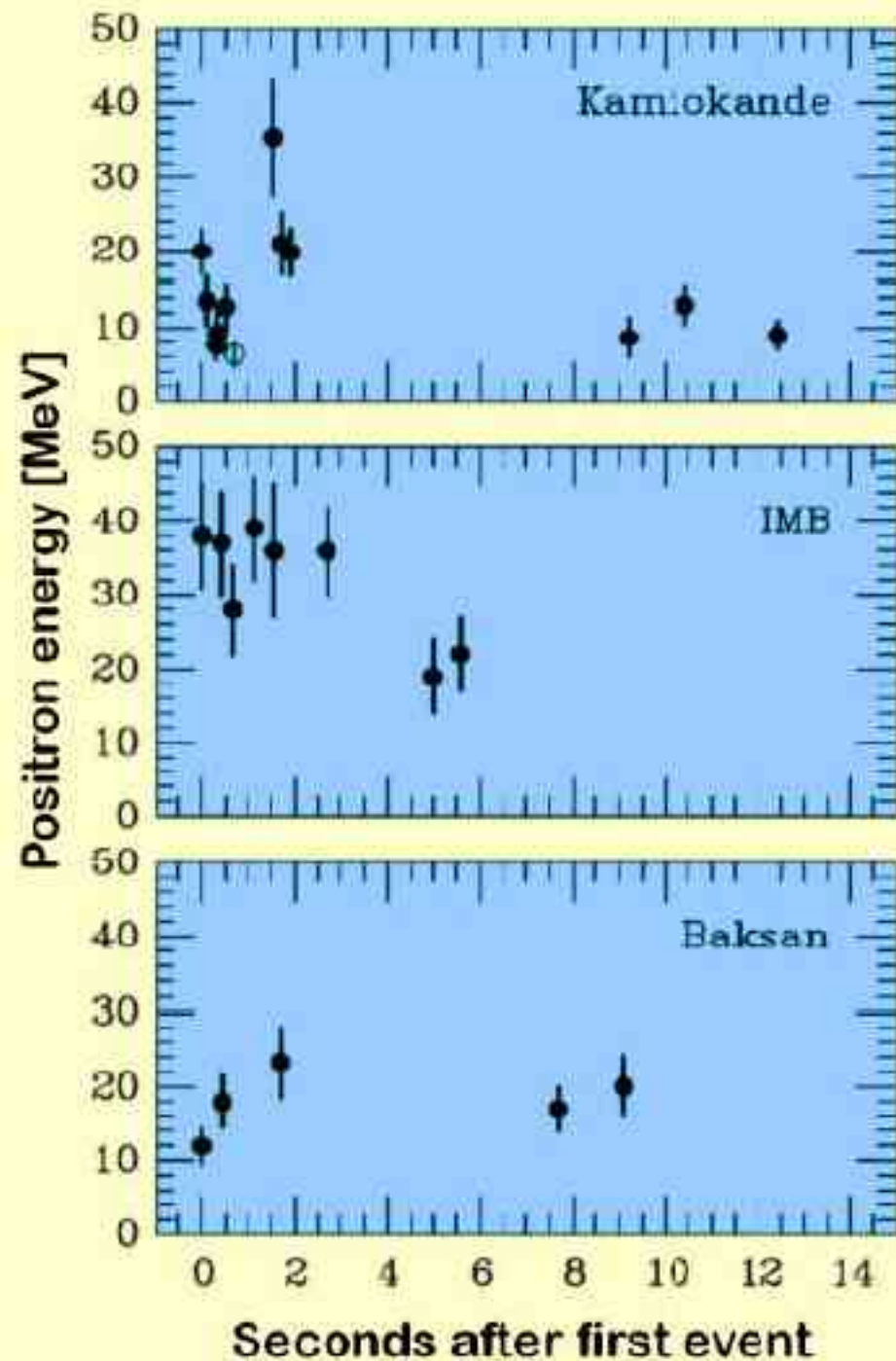
$$E_\nu \simeq 3 \times 10^{53} \text{ erg}$$

$$E_\nu \simeq 0.17 M_\odot c^2$$

$$\langle \varepsilon_\nu \rangle \simeq 15 \text{ MeV}$$

$$N_\nu \simeq 10^{58}$$

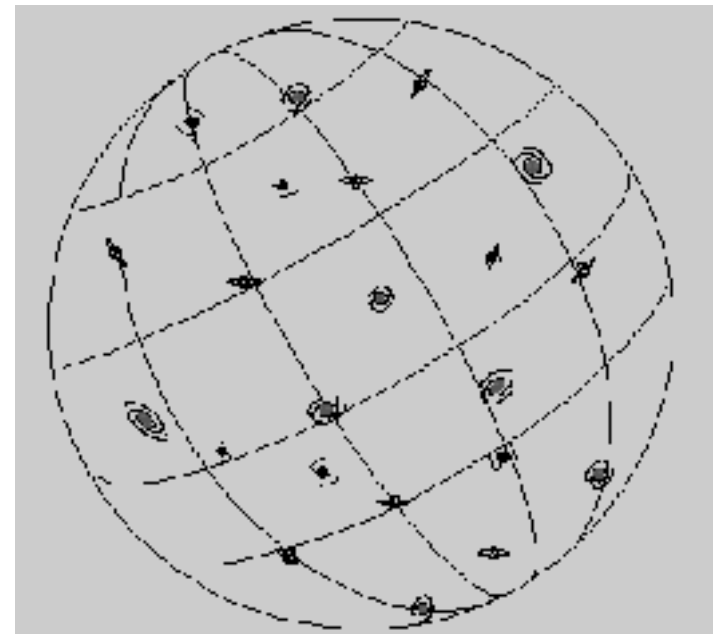
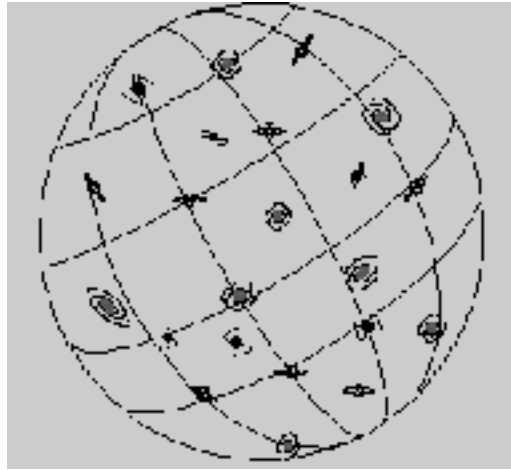
SN1987a

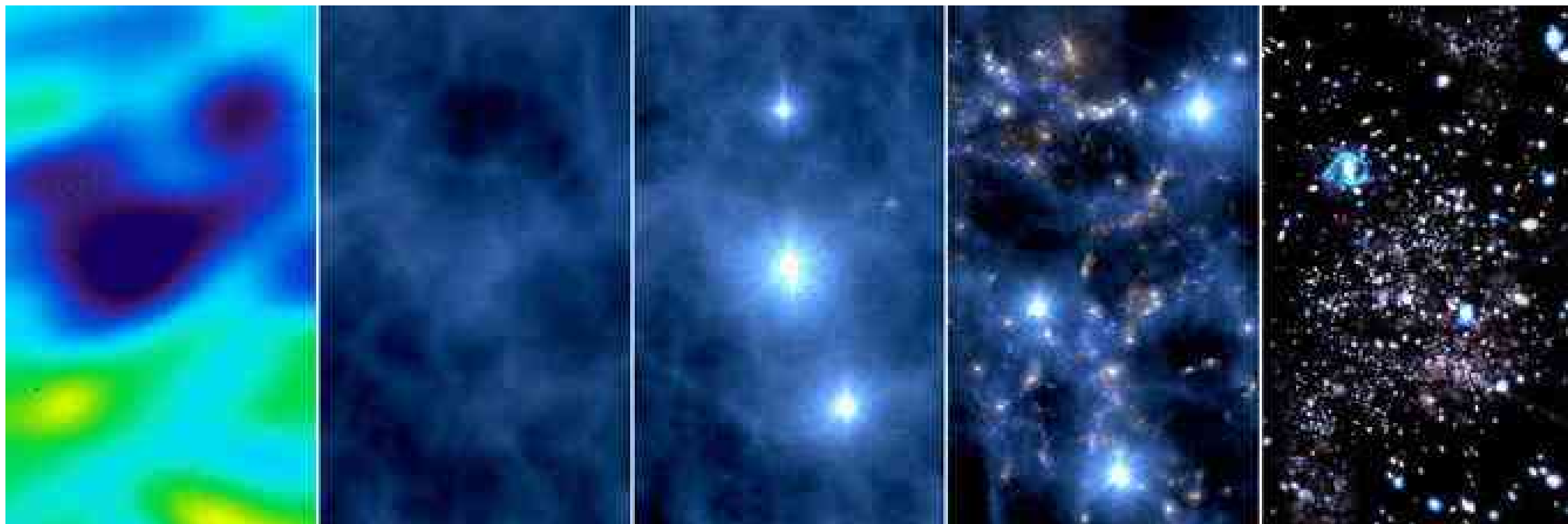


I NEUTRINI

nell' UNIVERSO

GIOVANE



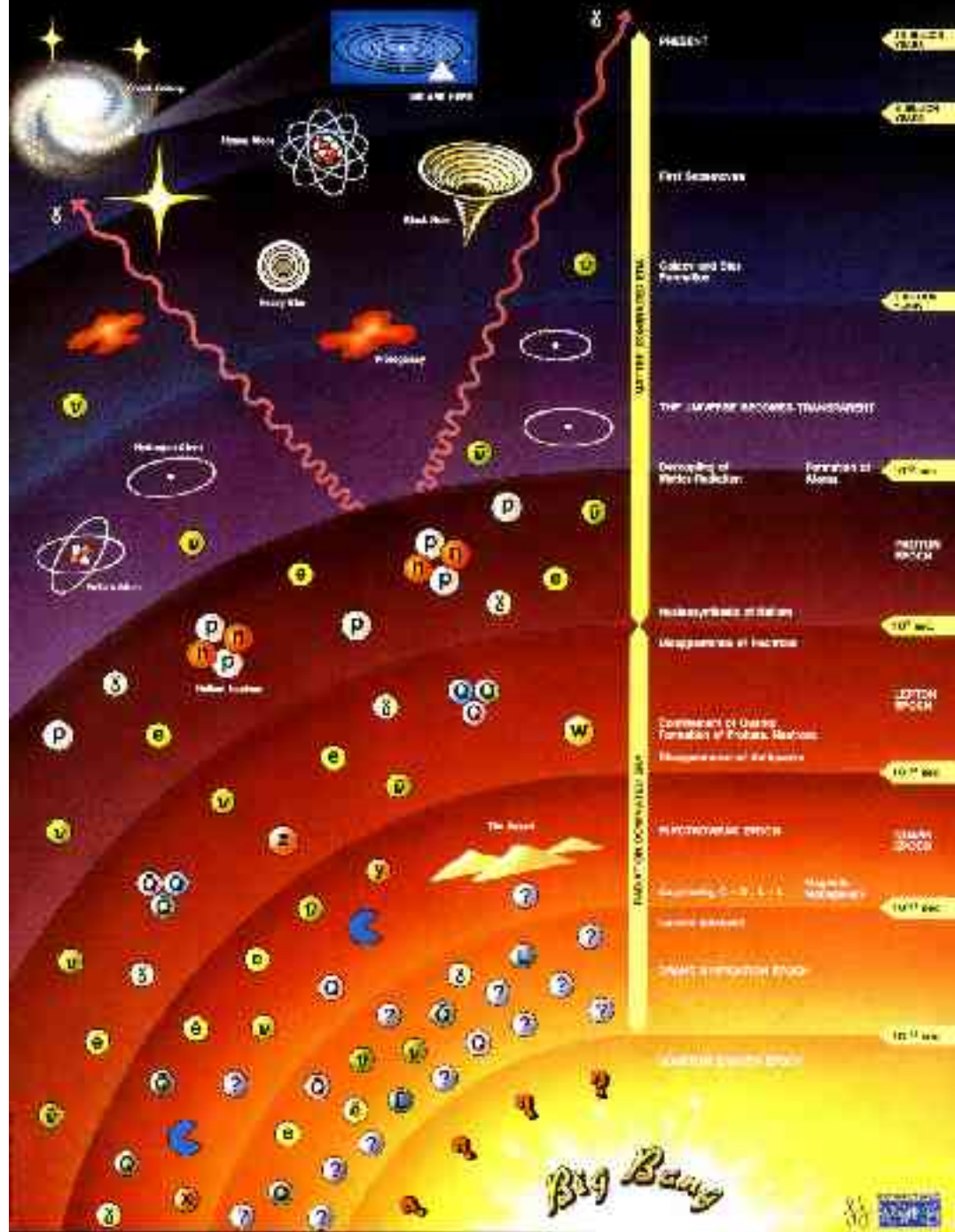


la

ZUPPA

COSMICA

History of the Universe



$$\gamma + \gamma \rightarrow \nu + \bar{\nu}$$

$$\simeq 360 \frac{\nu}{\text{cm}^3}$$

Neutrini Cosmologici

$$T_{\gamma}^{\text{now}} = 2.728 \text{ Kelvin}$$

$$T_{\gamma}^3 \times 2 = T_{\nu}^3 \times \left[2 + 4 \times \frac{7}{8} \right]$$

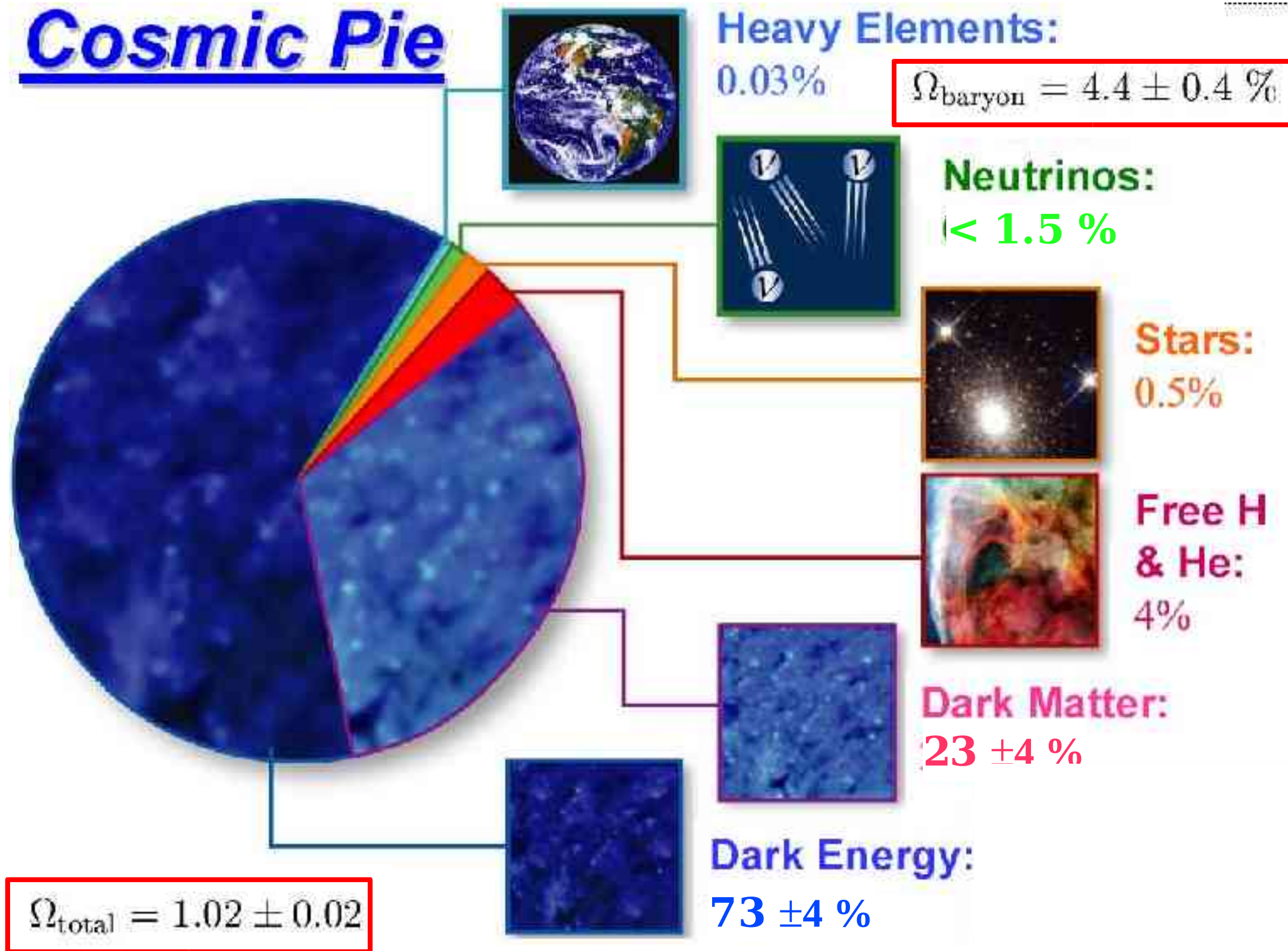
$$T_{\nu} = \left(\frac{4}{11} \right)^{\frac{1}{3}} T_{\gamma} = 1.98 \text{ Kelvin}$$

$$n_\gamma = \frac{2}{(2\pi\hbar)^3} \int d^3p_\gamma \frac{1}{e^{E/T} - 1} \simeq 412 \text{ cm}^{-3}$$

$$n_\nu = \frac{1}{(2\pi\hbar)^3} \int d^3p \frac{1}{e^{E/T} + 1} \simeq 56 \text{ cm}^{-3}$$

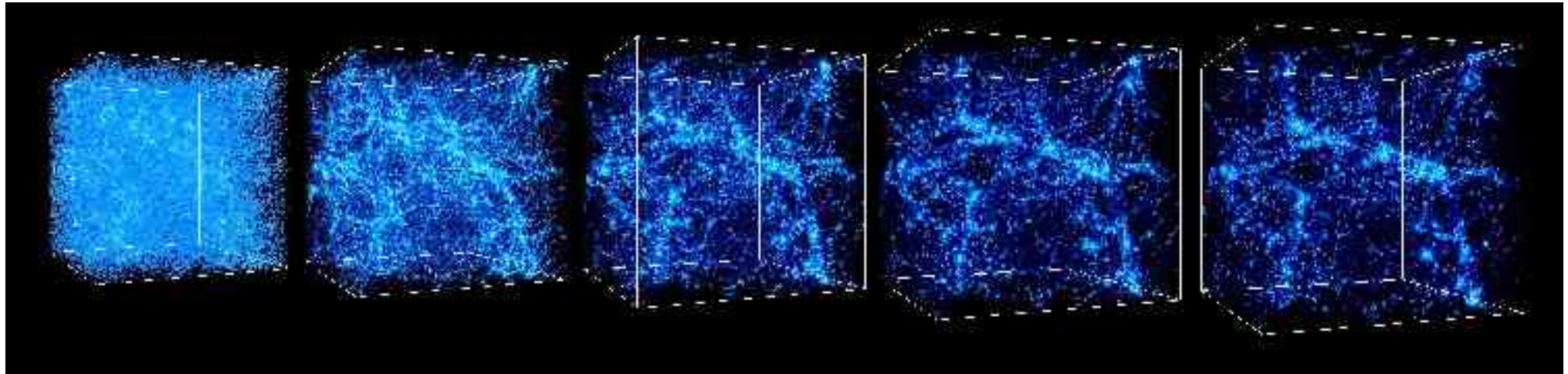
$$\Omega_\nu = \frac{\rho_\nu}{\rho_c} = \frac{1}{h^2} \frac{\sum_j m_j}{93 \text{ eV}}$$

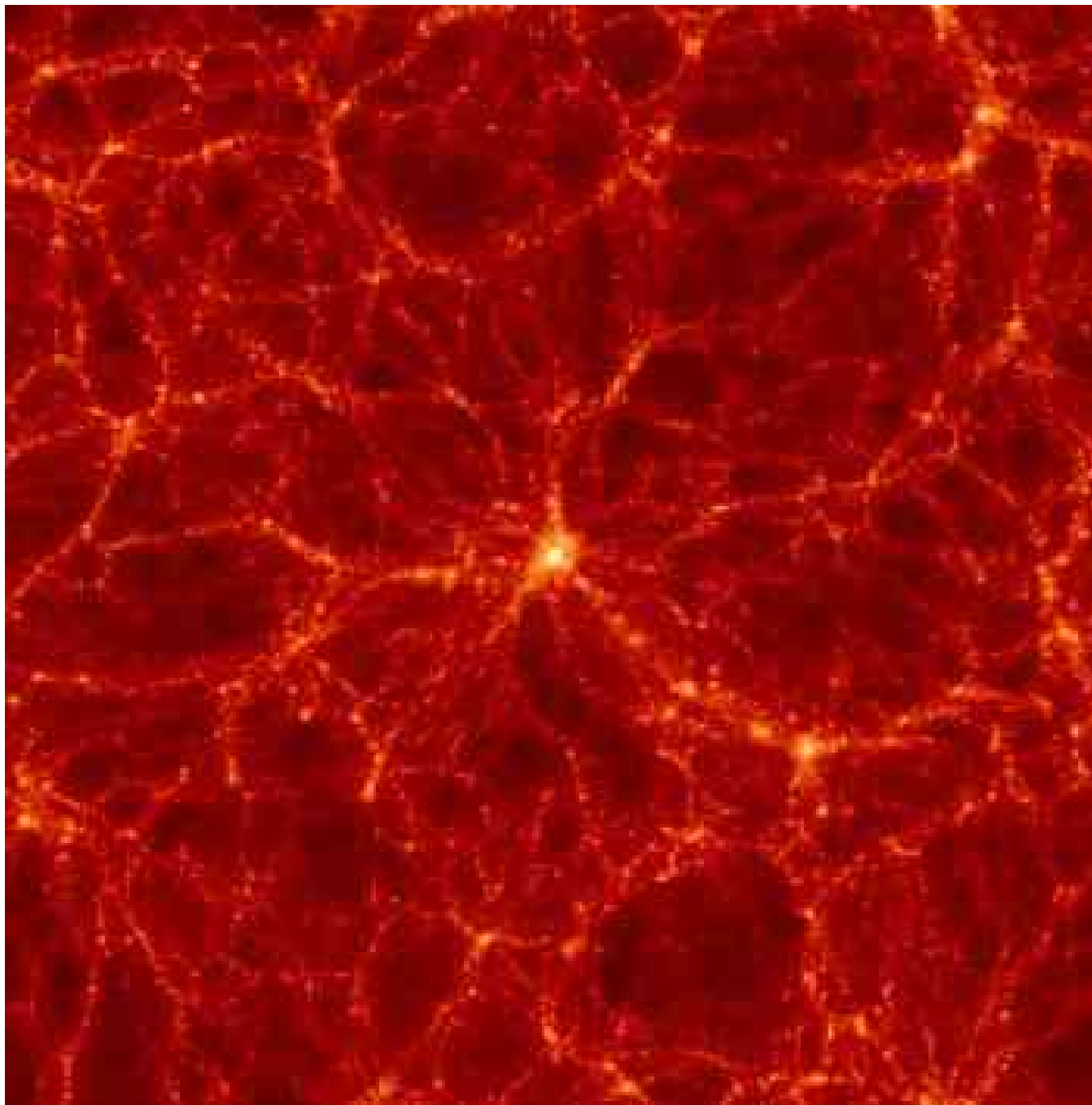
Cosmic Pie



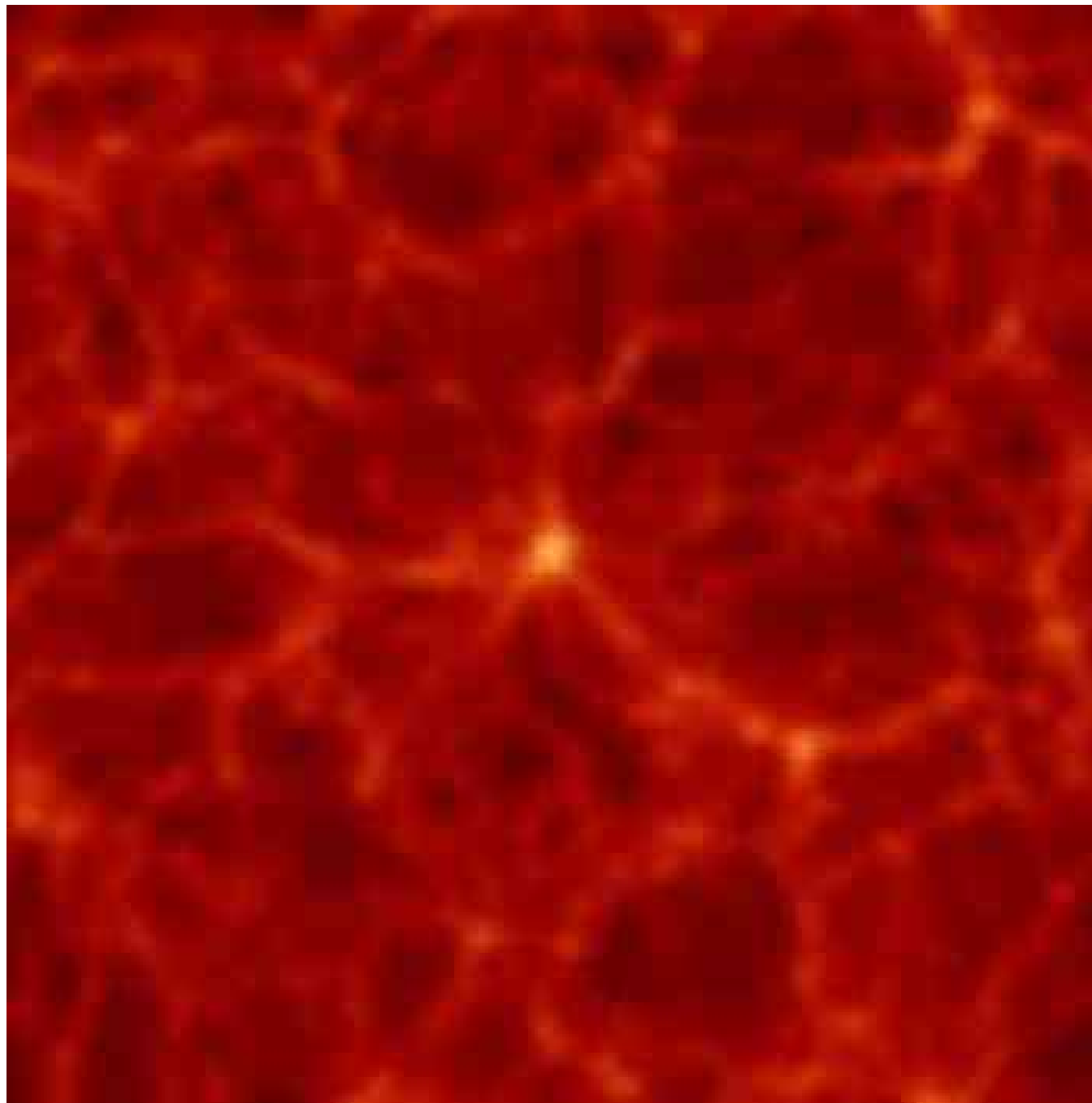
Formazione della Struttura che Osserviamo nell'Universo

Effetto della Gravitazione





Struttura dell'Universo



Aggiungendo
Massa ai
Neutrini

Che cosa sono ?

Particelle Elementari
(Componente Fondamentale
della Natura)

Dove sono ?

Dappertutto.
(Ma non si legano
a formare nulla)

Come si vedono ?

Quando si trasformano nel
leptone “fratello”.
Grandi Rivelatori necessari

A che cosa servono ?

A che cosa servono ?

Conoscere le componenti fondamentali della Natura (le particelle elementari) ha un interesse profondo.

Conosciamo 12 “Mattoni” fondamentali in Natura

6 Quarks

3 Leptoni carichi (e , μ , τ)

3 Neutrini

A che cosa servono ?

Ruolo Fondamentale in Astrofisica

Servono a fare funzionare le Stelle
(ed il nostro Sole)

Servono a fare esplodere le SuperNovae
(che iniettano nello Spazio la Materia
che compone i nostri stessi corpi)

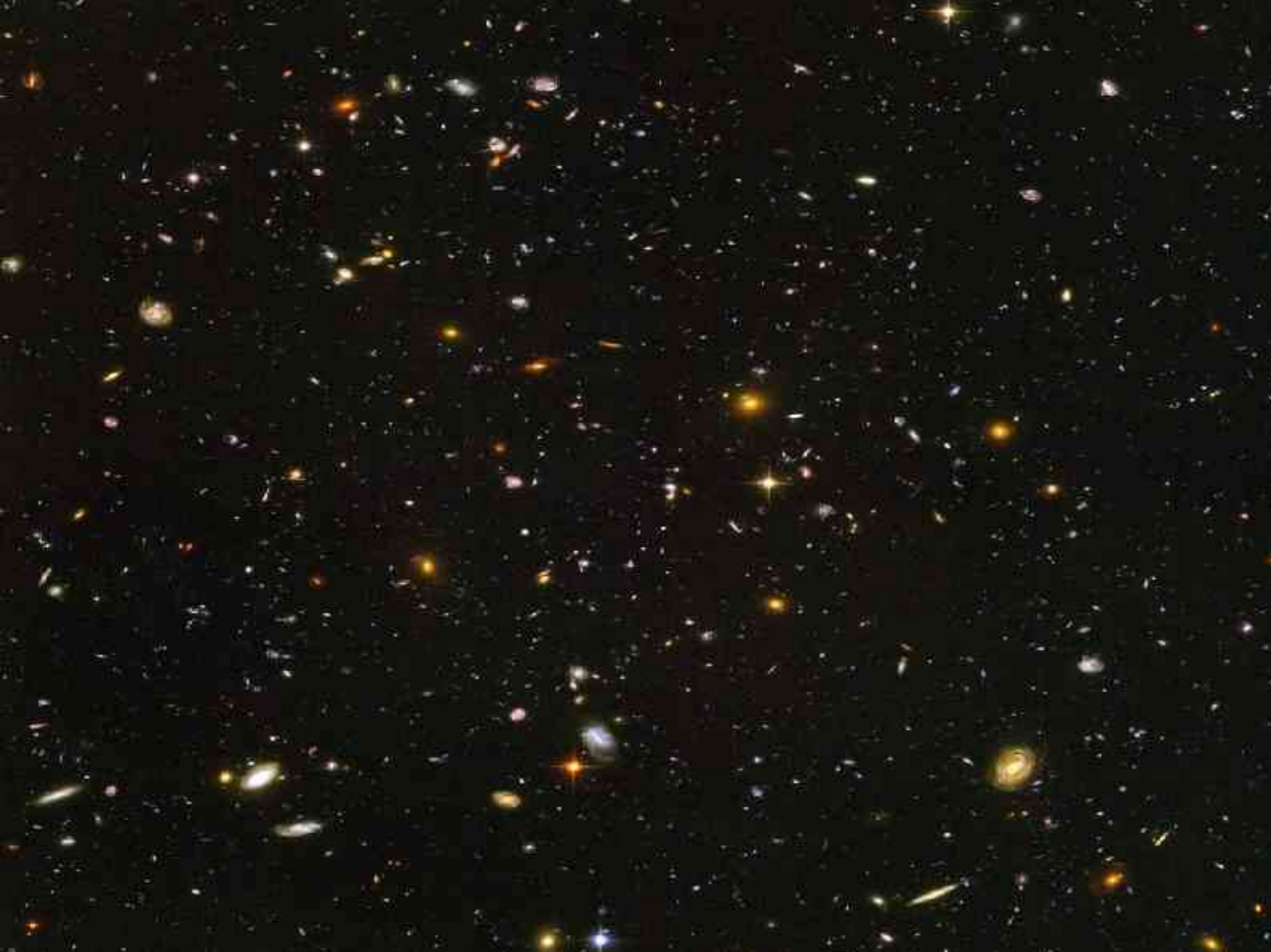
Contribuiscono a determinare la
distribuzione delle Galassie nello Spazio.

.....

A che cosa servono ?

Il Neutrino e'
un NUOVO MESSAGGERO
dall'Universo

UN NUOVO MODO
di VEDERE il CIELO



TUTTI i COLORI del CIELO

Praticamente tutto quello che conosciamo dell'Universo intorno a noi e' stato ottenuto osservando FOTONI.

La storia dell'Astronomia (e dell'Astrofisica) e' la Estensione del ventaglio di lunghezze d'onda (di "colori") di fotoni che sono osservabili.

Ottico ? infrarosso ? radio
ultravioletto ? Raggi X ? Raggi gamma

Neutrino : NUOVO MESSAGGERO

OSSERVARE L'UNIVERSO
CON UN
NUOVO MESSAGGERO

UNA PROSPETTIVA
ENTUSIASMANTE