



## Uscite di Sicurezza vie di fuga in caso di Emergenza



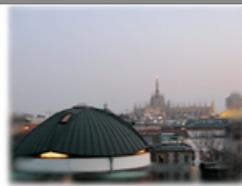
**Punto di ritrovo**  
Piazzetta Brera

# Novità dal mondo delle particelle: nuova luce sull'astrofisica

## Neutrino: il fantasma mutante

Fabrizio Tavecchio  
INAF-OAB

18 GENNAIO 2017



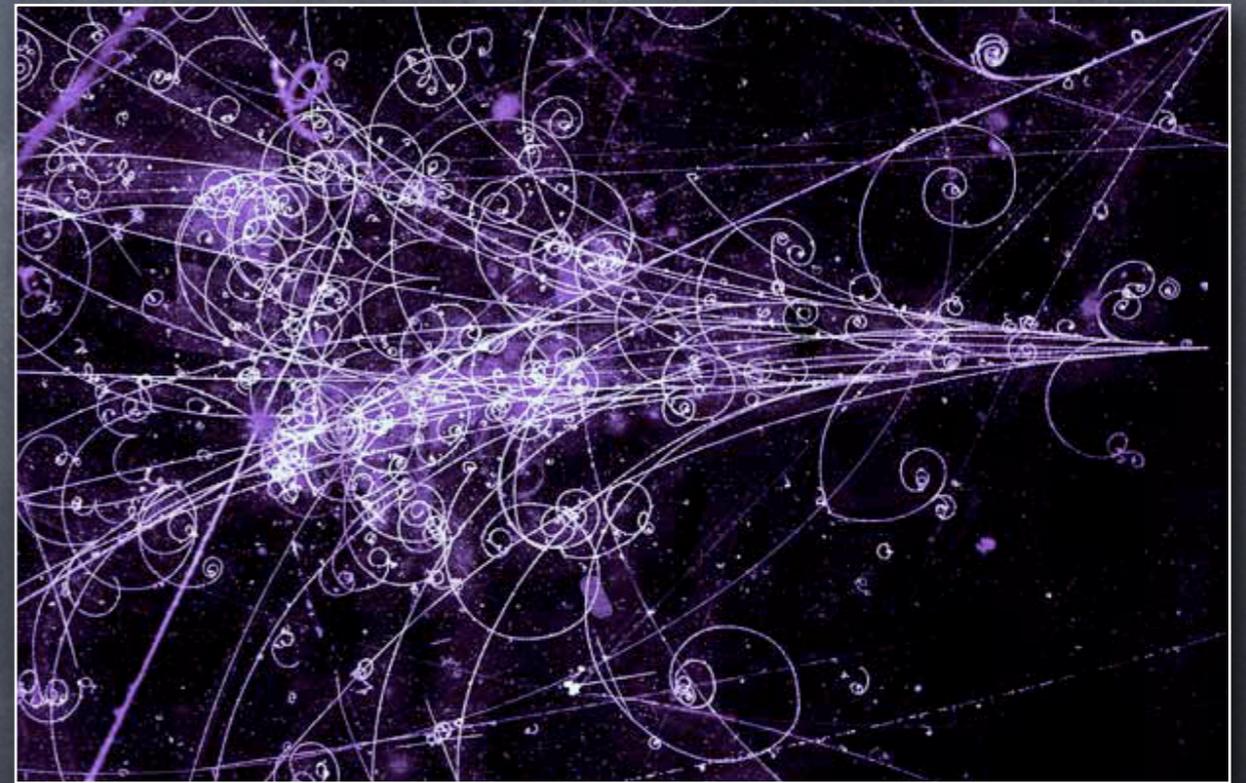
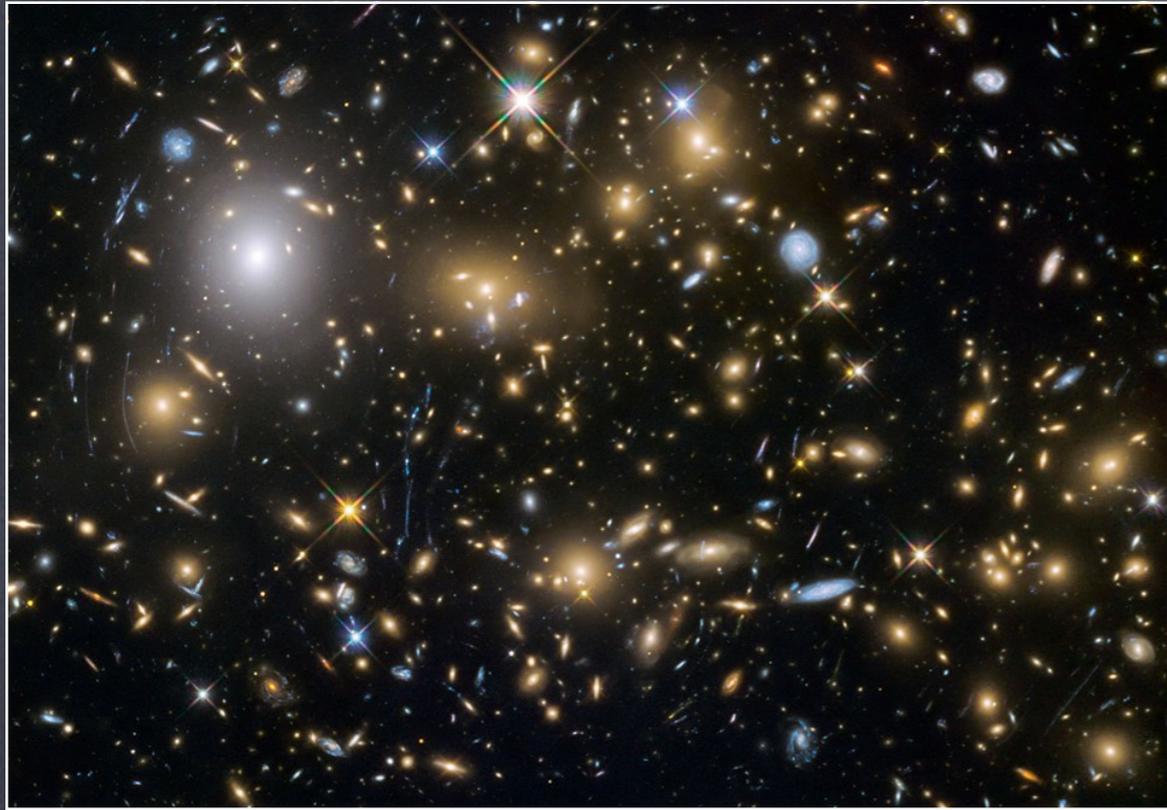
L'universo in fiore 2016-2017

*Corsi di astronomia all'Osservatorio Astronomico di Brera*

*«I colori maturano la notte» - Alda Merini*



Dal "macro" al "micro" ...  
e viceversa



# Preambolo

## IL modello standard delle particelle elementari

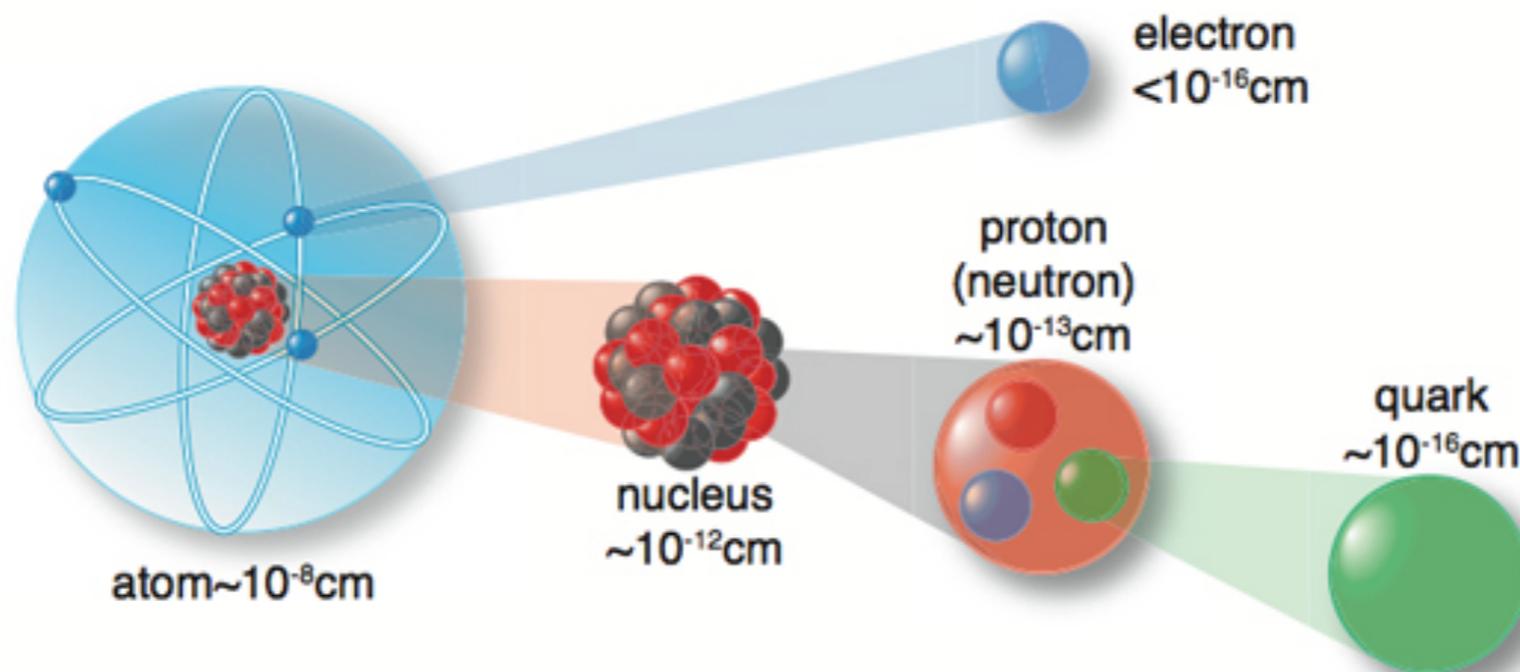
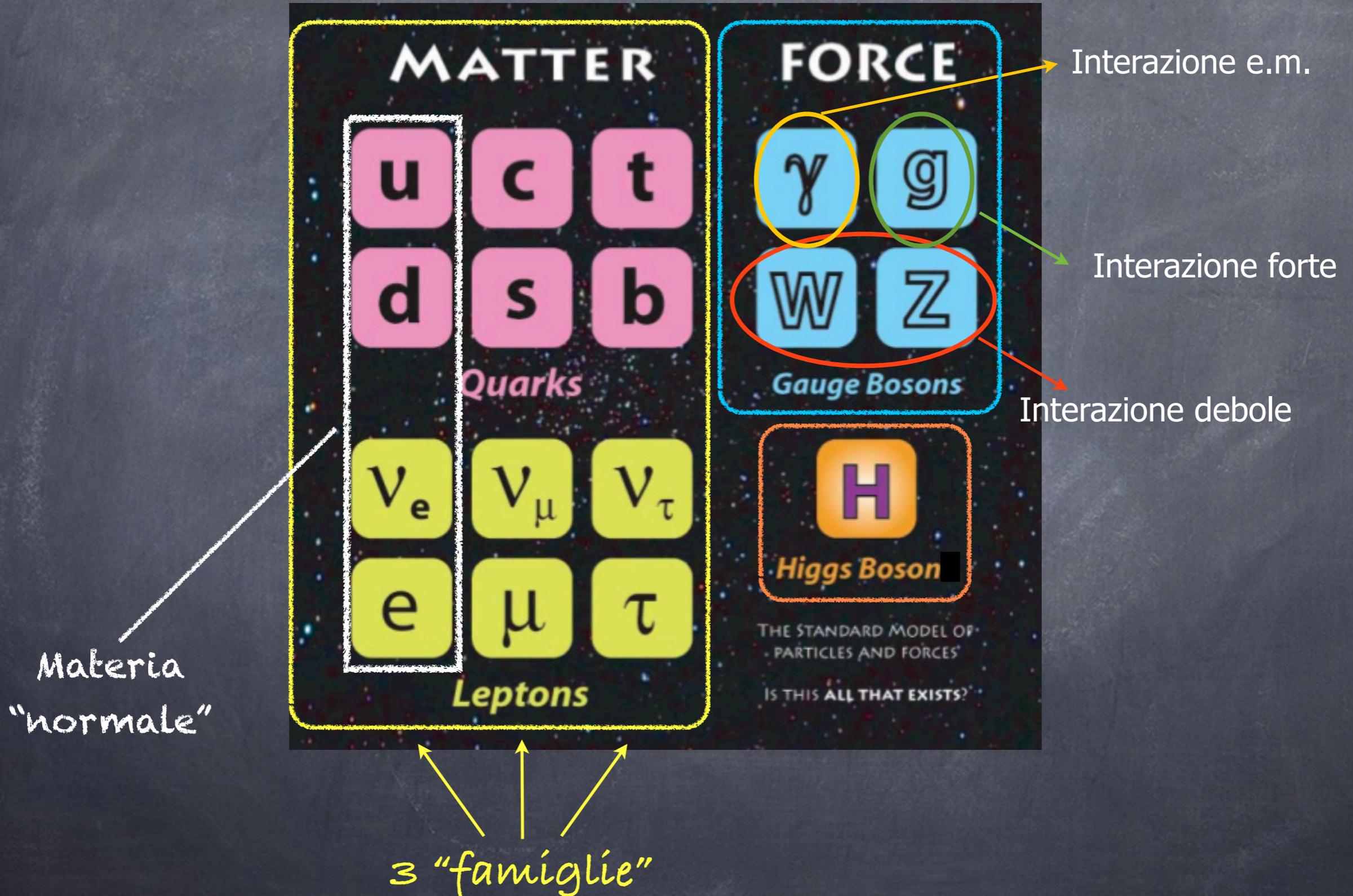
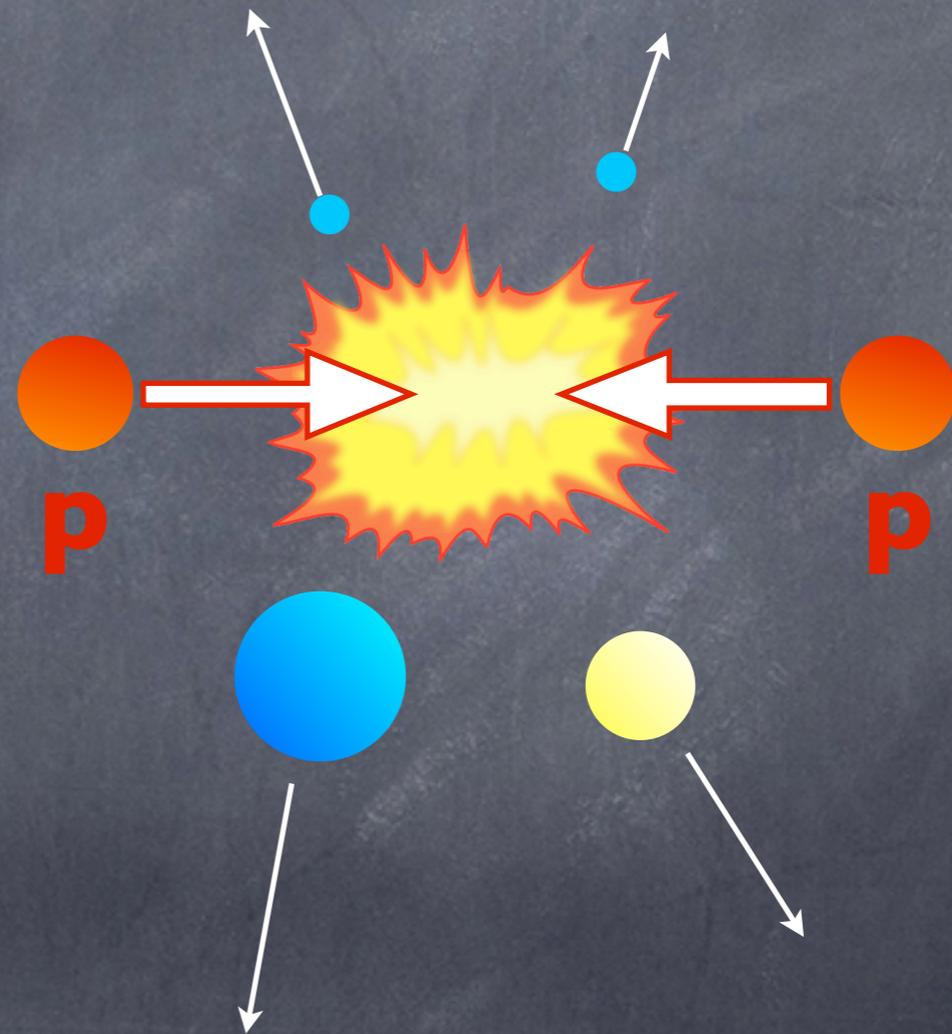


Figure 2: The particles inside an atom.

# Il modello standard delle particelle



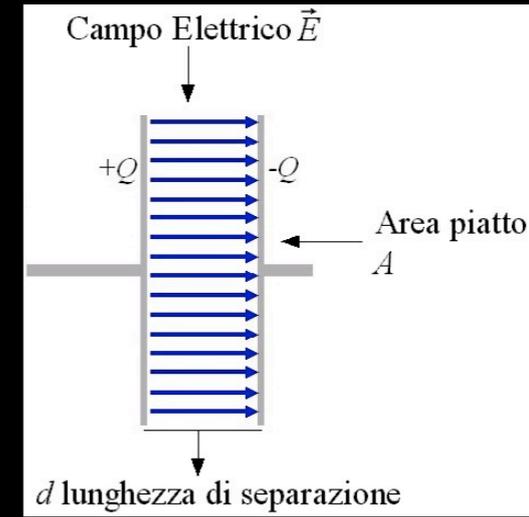
# Produzione/distruzione di particelle



# Digressione: scale di energia

I fisici usano l'elettronvolt (e i suoi multipli)

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$



eV	keV	MeV	GeV	TeV-PeV
reazioni chimiche	raggi-X	reazioni nucleari		
	$10^3$	$10^6$	$10^9$	$10^{12-15}$

$$1 \text{ TeV} = 1.6 \text{ erg}$$



LHC: 6.5 TeV



## PARTICELLE DI MATERIA

### QUARK

Queste particelle formano i protoni, i neutroni e un vero e proprio zoo di altre particelle meno note. Non sono mai stati osservati isolatamente.

UP



u

Carica elettrica:  $+2/3$   
 Massa: 2 MeV  
 Costituente della materia ordinaria; un protone è composto da due quark up e uno down.

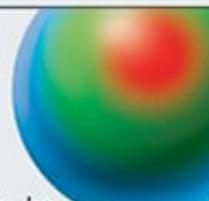
CHARM



c

Carica elettrica:  $+2/3$   
 Massa: 1,25 GeV  
 Cugino instabile e più pesante del quark up, scoperto come costituente della particella  $J/\psi$ .

TOP



t

Carica elettrica:  $+2/3$   
 Massa: 171 GeV  
 È la particella più pesante, ha massa paragonabile a un atomo di osmio e una vita media molto breve.

DOWN



d

Carica elettrica:  $-1/3$   
 Massa: 5 MeV  
 Costituente della materia ordinaria; un neutrone è composto da due quark down e uno up.

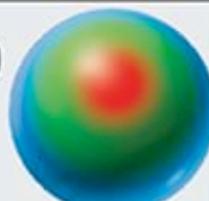
STRANGE



s

Carica elettrica:  $-1/3$   
 Massa: 95 MeV  
 Cugino instabile e più pesante del quark down, è il costituente del più studiato kaone, altra particella.

BOTTOM



b

Carica elettrica:  $-1/3$   
 Massa: 4,2 GeV  
 Altra copia instabile e ancora più pesante del quark down, è un costituente del mesone B.

### LEPTONI

Queste particelle sono immuni all'interazione forte e si osservano isolatamente. Ogni neutrino mostrato qui in realtà è una combinazione di neutrini diversi, ciascuno con massa non più grande di pochi eV.

NEUTRINO ELETTRONICO  $\nu_e$



Carica elettrica: 0  
 Immune sia all'elettromagnetismo che all'interazione forte, non prende parte a quasi nessuna interazione, ma è essenziale nei decadimenti radioattivi.

NEUTRINO MU  $\nu_\mu$



Carica elettrica: 0  
 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i muoni.

NEUTRINO TAU  $\nu_\tau$



Carica elettrica: 0  
 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i leptoni tau.

ELETTRONE  $e$



Carica elettrica:  $-1$   
 Massa: 0,511 MeV  
 La particella più leggera dotata di carica. Trasporta la corrente elettrica e orbita intorno ai nuclei atomici.

MUONE  $\mu$



Carica elettrica:  $-1$   
 Massa: 106 MeV  
 Versione più pesante dell'elettrone, vita media di 2,2 microsecondi, scoperto come componente dei raggi X cosmici.

TAU  $\tau$



Carica elettrica:  $-1$   
 Massa: 1,78 GeV  
 Un'altra versione instabile e ancora più pesante dell'elettrone con una vita media di 0,3 picosecondi.

## PARTICELLE DI FORZA

### BOSONI

A livello quantistico, ognuna delle forze fondamentali è mediata da una specifica particella o insieme di particelle.

FOTONE



$\gamma$

Carica elettrica: 0  
 Massa: 0  
 Mediatore dell'elettromagnetismo, il quanto di luce agisce sulle particelle cariche elettricamente. Il suo raggio d'azione è illimitato.

BOSONE Z



Z

Carica elettrica: 0  
 Massa: 91 GeV  
 Il mediatore delle reazioni deboli che non modificano l'identità delle particelle. Il suo raggio d'azione è di appena  $10^{-18}$  metri circa.

BOSONI  $W^+/W^-$



W

Carica elettrica:  $+1$  o  $-1$   
 Massa: 80,4 GeV  
 Sono i mediatori dell'interazione debole, che modifica il sapore e la carica delle particelle. Il raggio d'azione di queste interazioni è di appena  $10^{-18}$  metri circa.

GLUONI



g

Carica elettrica: 0  
 Massa: 0  
 Otto specie di gluoni mediano l'interazione forte, interagendo con i quark e con altri gluoni. Queste particelle non risentono delle interazioni elettromagnetiche e delle interazioni deboli.

HIGGS



H

Carica elettrica: 0  
 Massa: 125 gigaelettronvolt  
 Il bosone di Higgs conferisce la proprietà della massa ai quark, ai leptoni e ai bosoni  $W$  e  $Z$ .

**NEW!**

# Particelle "timide"!

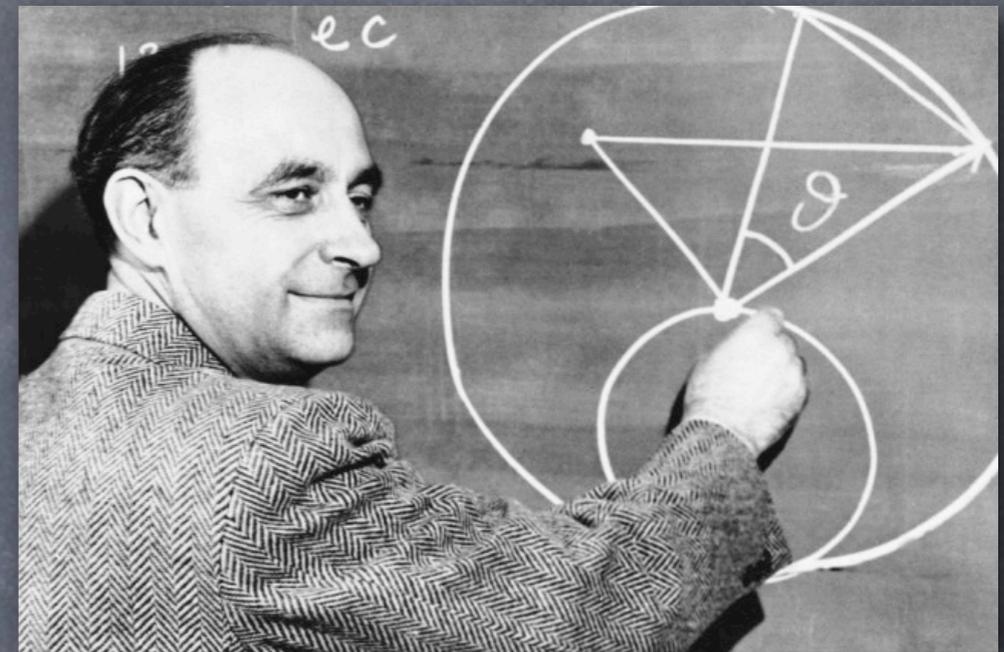
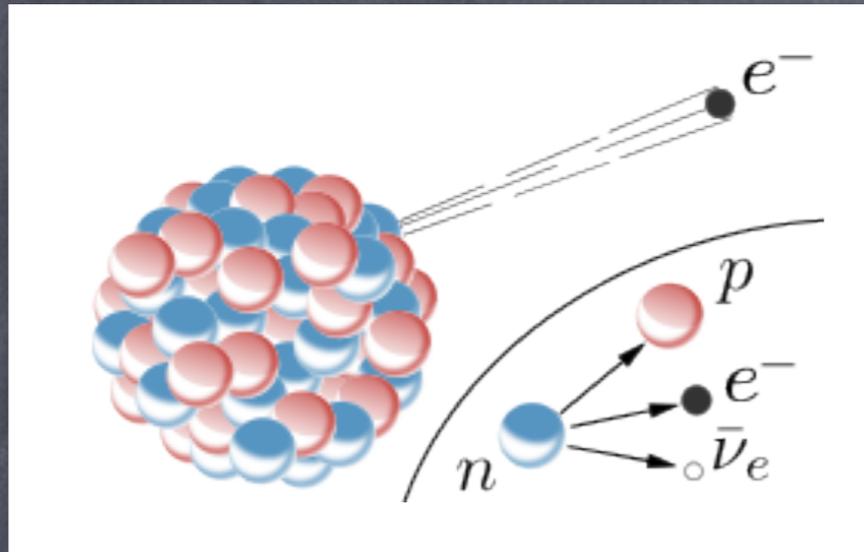
I neutrini interagiscono con le altre particelle solo attraverso l'interazione debole

Questo le rende molto difficili da rivelare e quindi da studiare

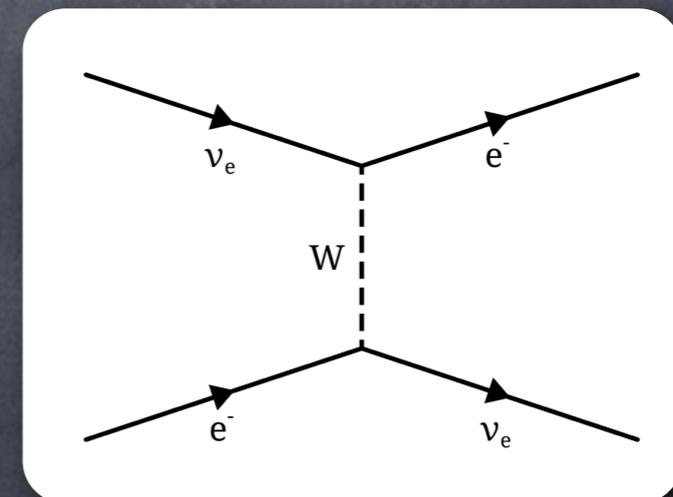
Ipotizzati da Pauli nel 1930, solo nel 1954-1955 si rivelarono neutrini emessi da un reattore  
**Premio Nobel 1995: Cowan e Reines**



# Particelle "timide"!



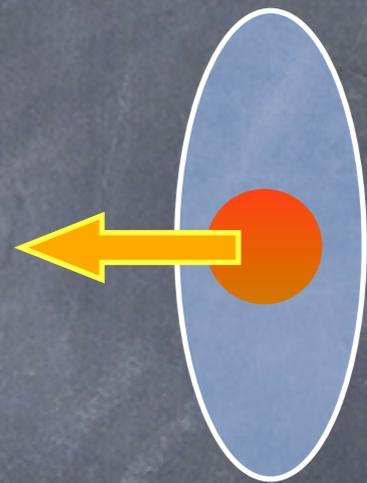
1932: E. Fermi denomino' "neutrino" la particella. Previde il tipo di reazioni e calcolo' la probabilita' associata



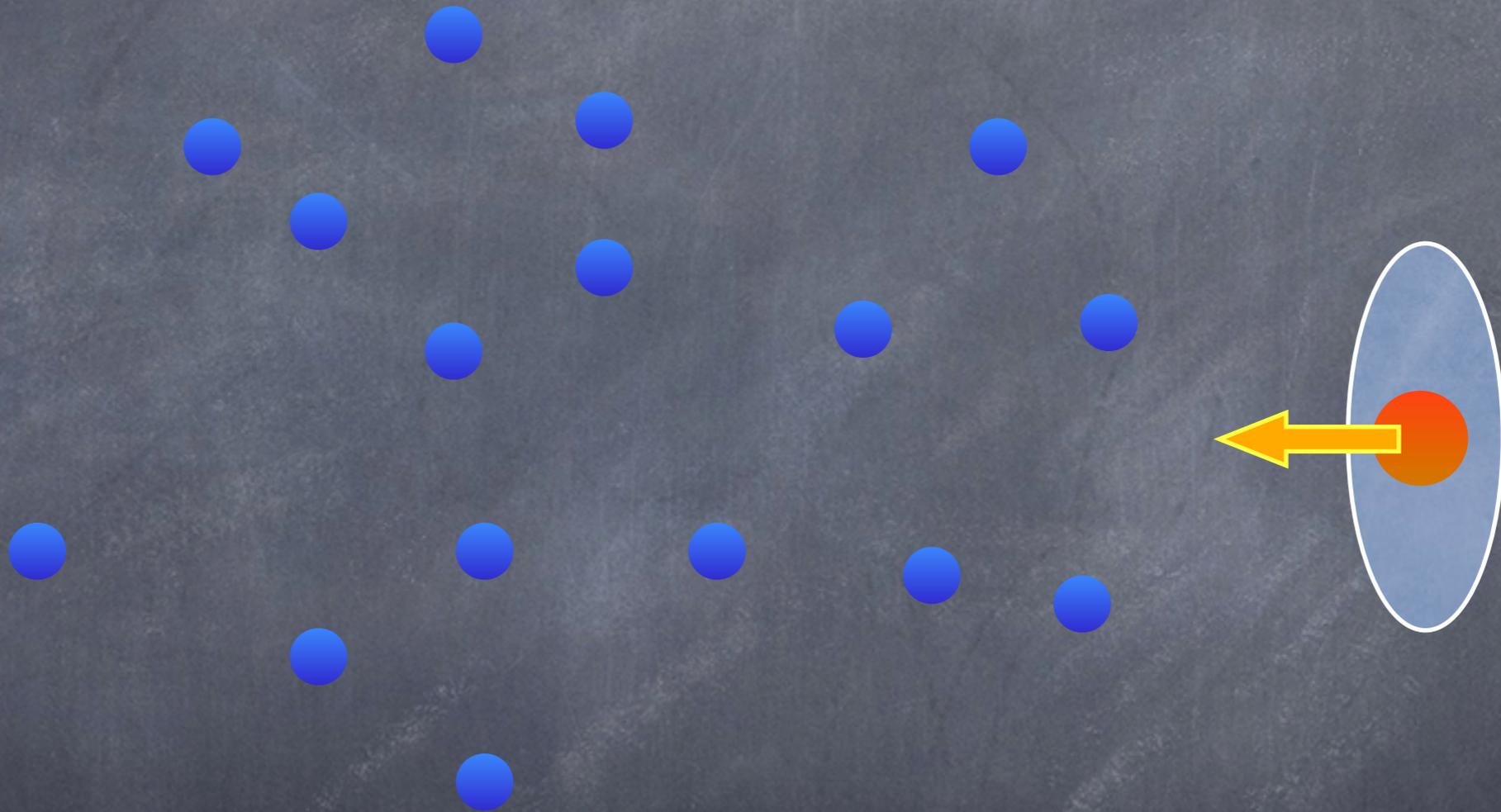
Sezione d'urto



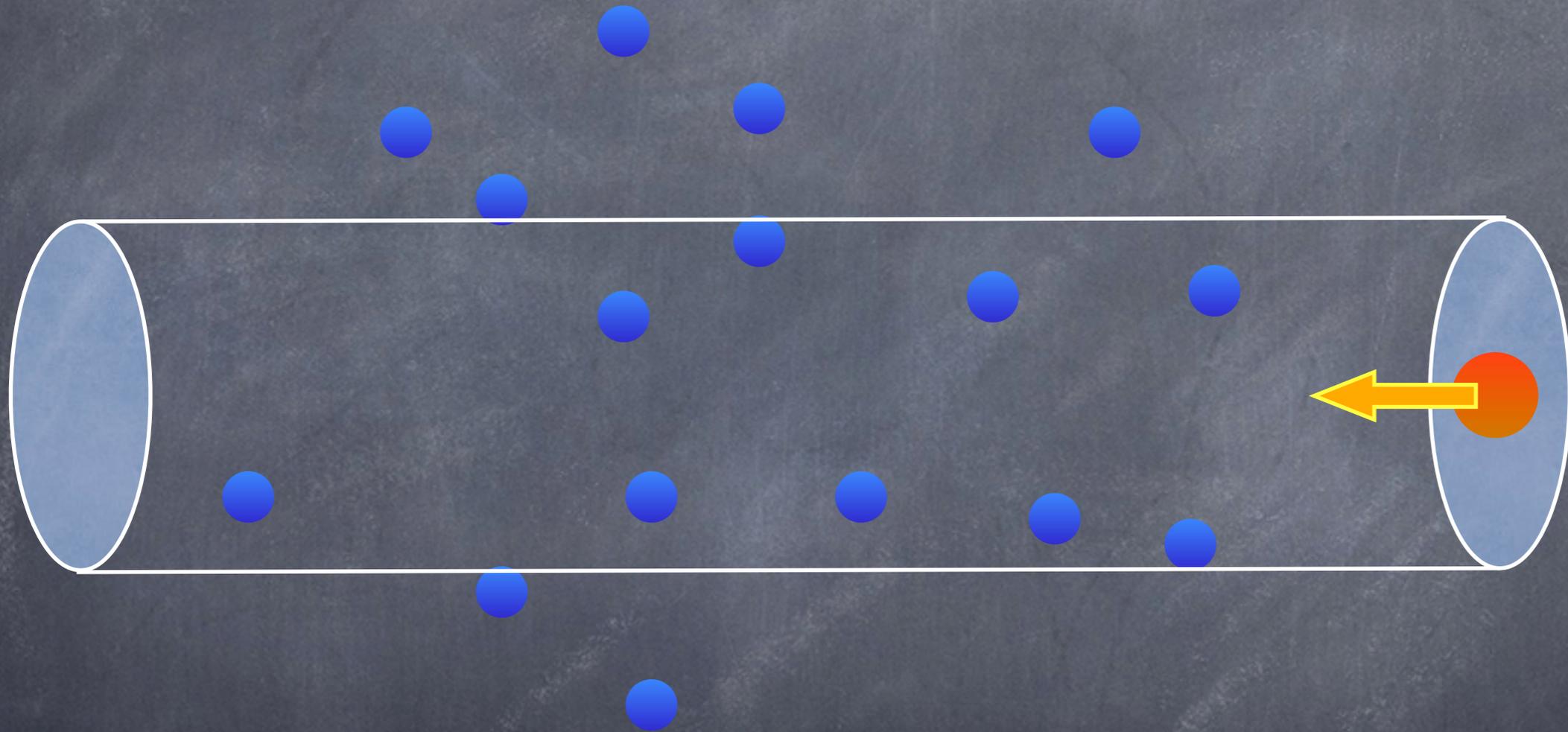
sezione d'urto



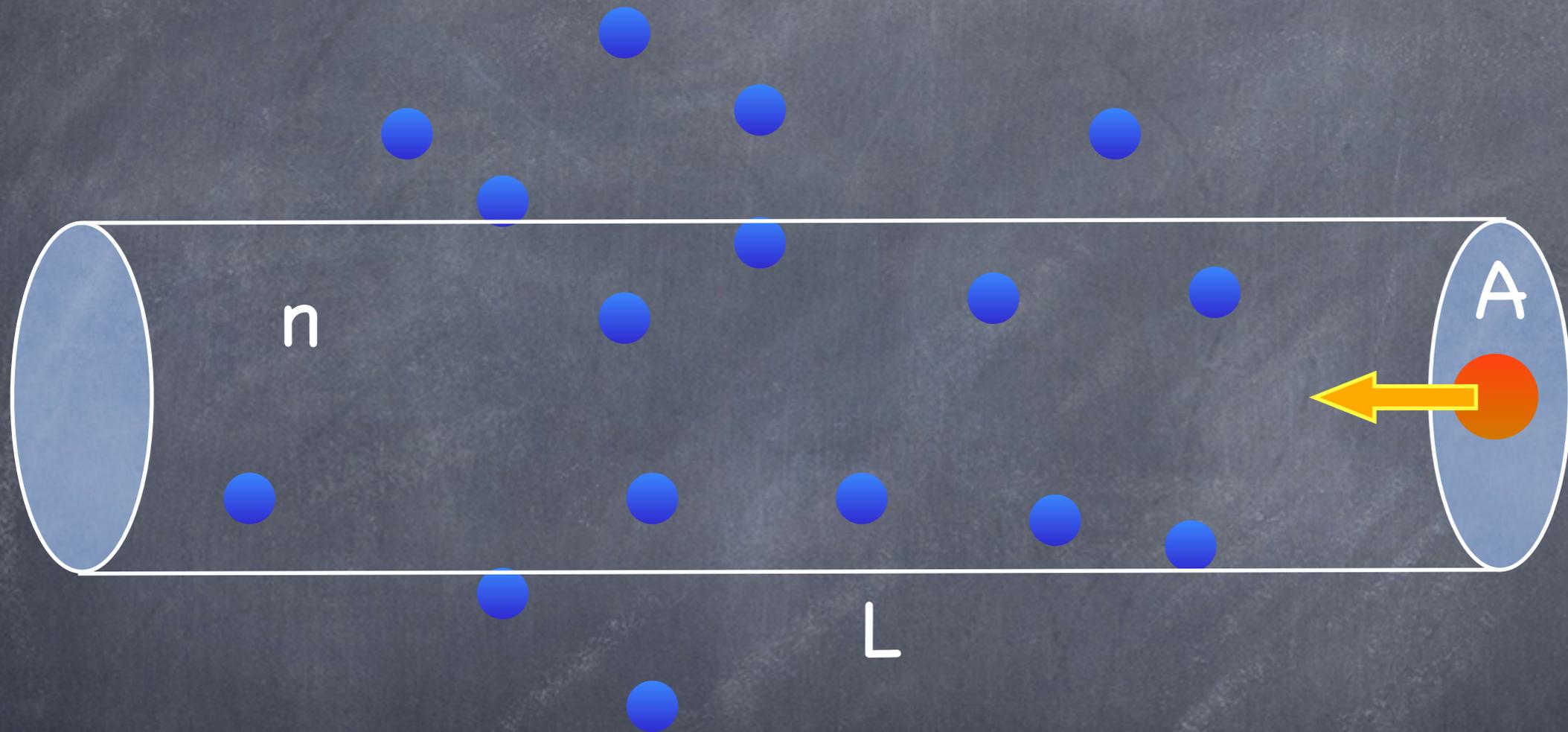
# Sezione d'urto



# Sezione d'urto

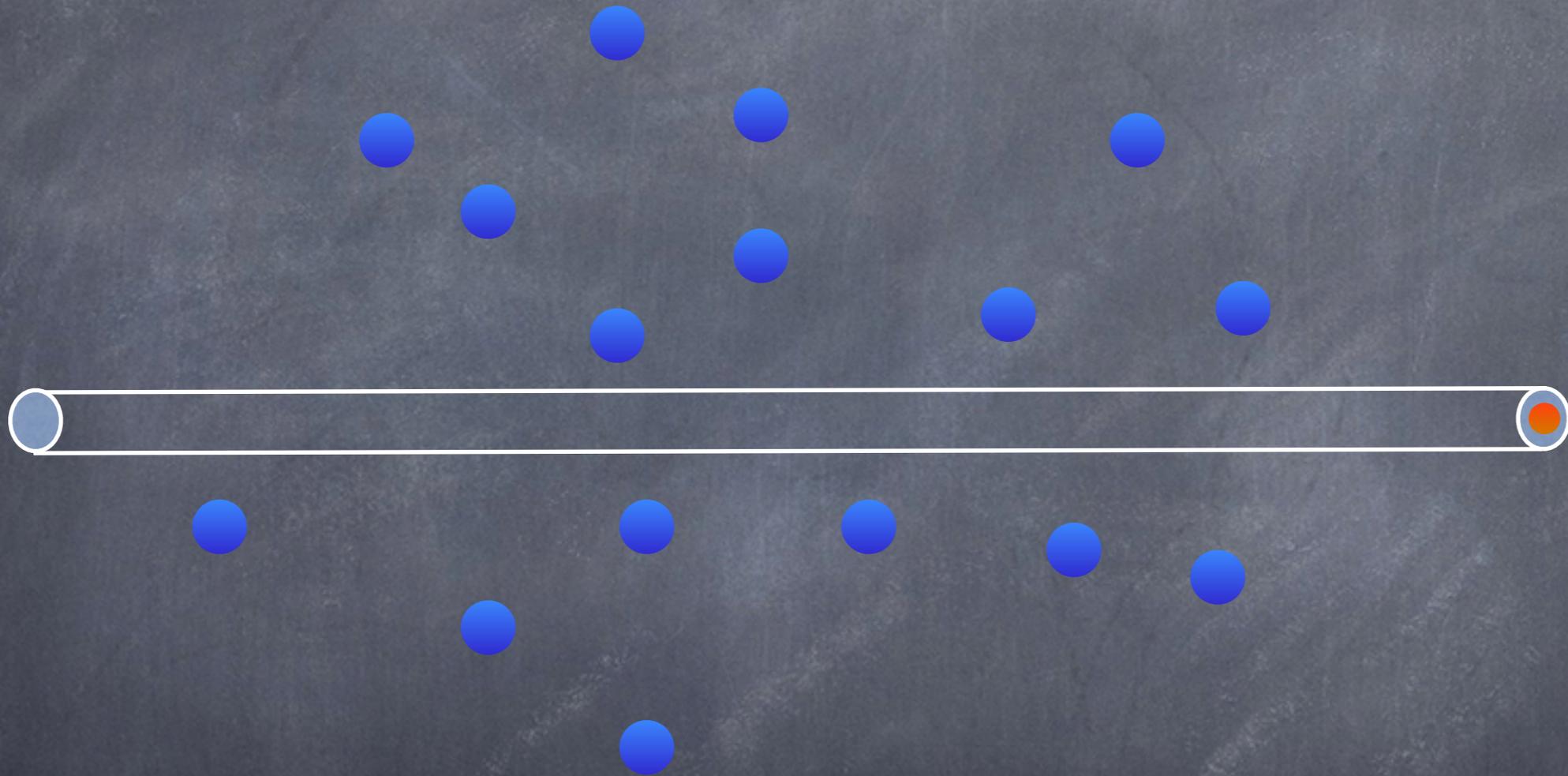


# Sezione d'urto



$$N = A \times L \times n$$

# Sezione d'urto



$$A = 10^{-44} \times E(\text{MeV}) \text{ cm}^2$$

Pochissimo propensi ad interagire



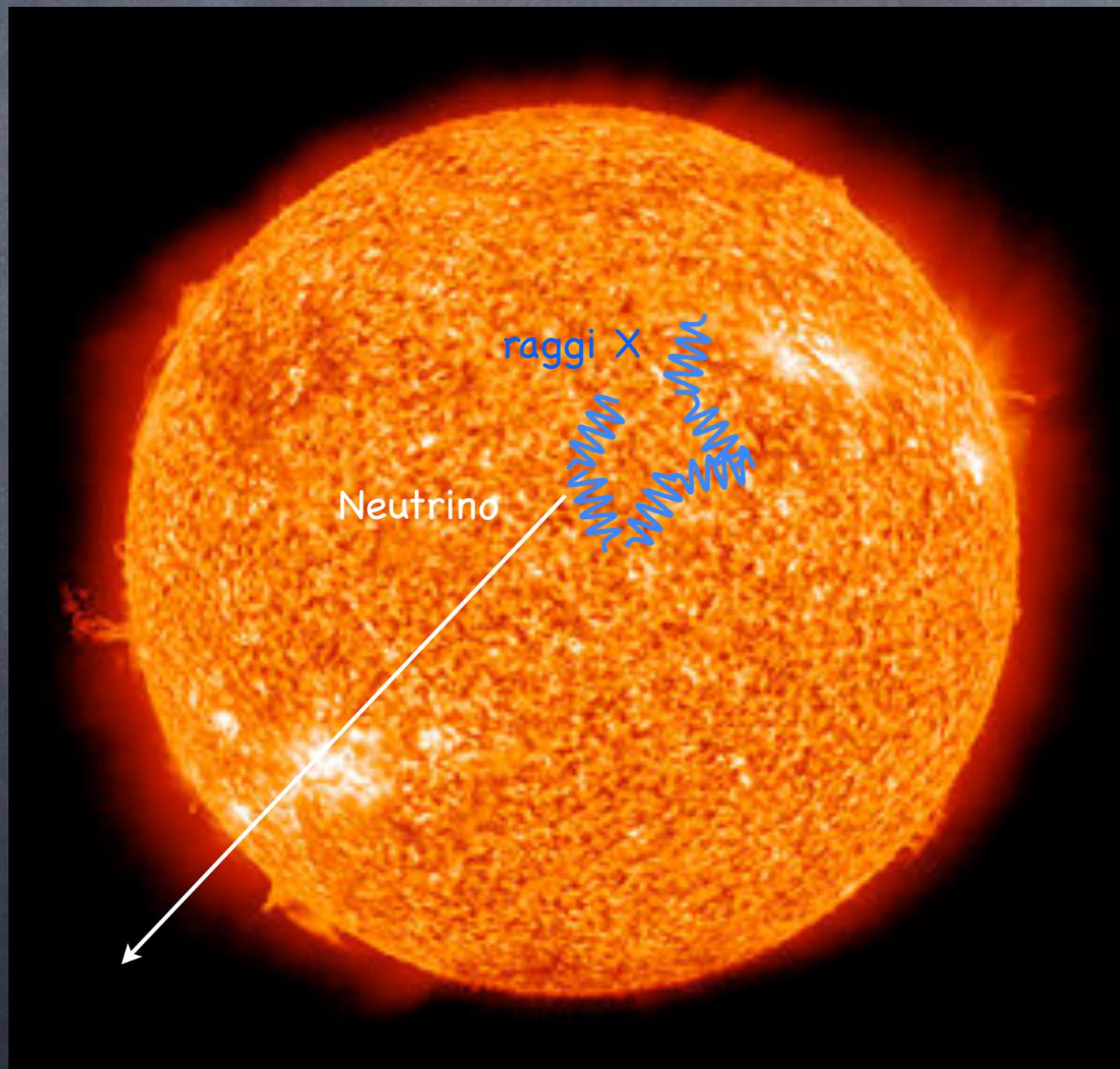
Rivelatori di grandi volumi (tanti bersagli)

Flussi di neutrini elevati (maggiore probabilità)

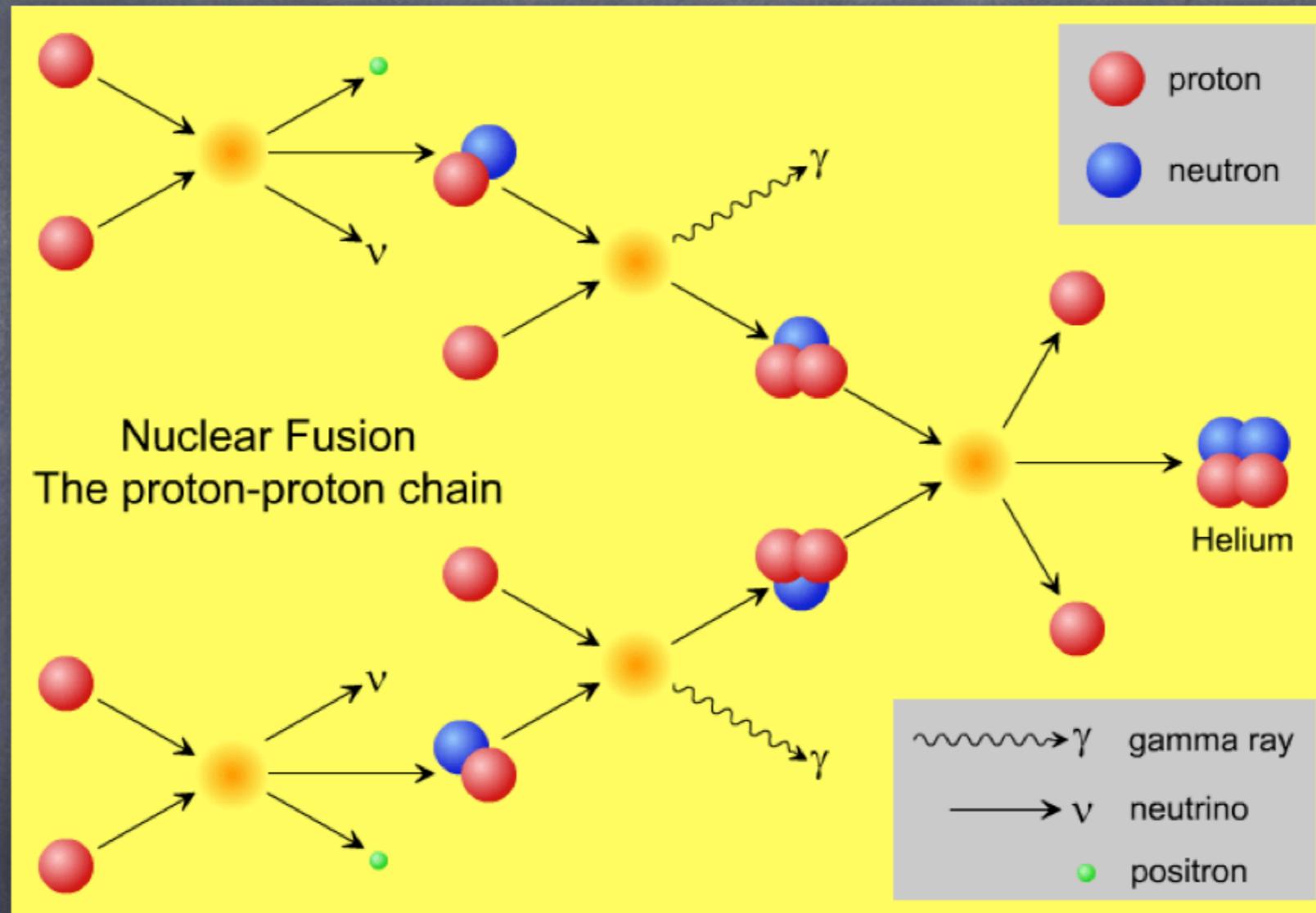
Tempi lunghi

# Il risvolto della medaglia

Perfette "sonde" per studiare  
il nucleo del Sole!



# Reazioni nucleari solari

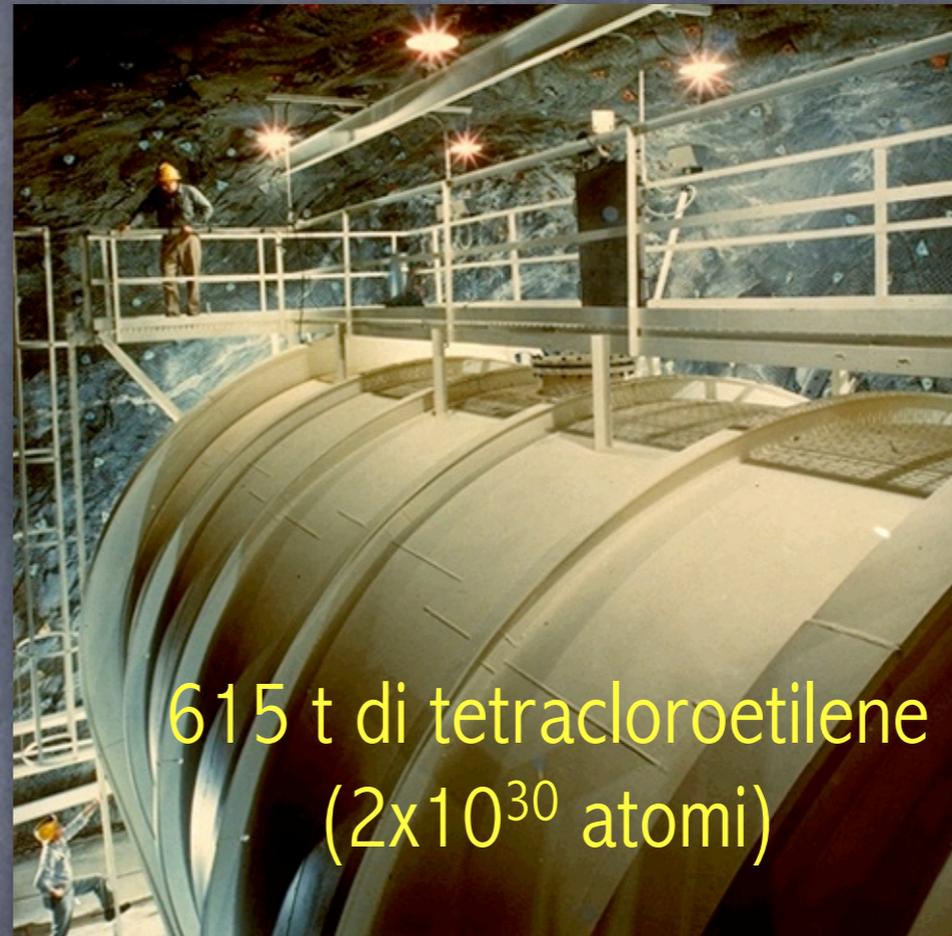


Hydrogen to Helium – Neutrino creation

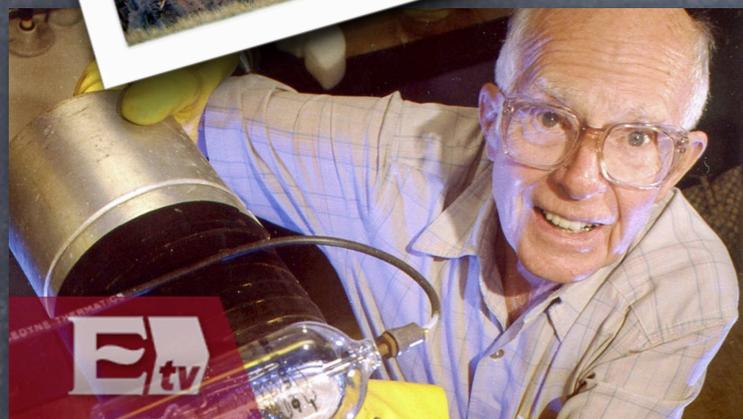
Image Credit – Randy Russell

# A caccia di neutrini solari

Homestake (South Dakota)



615 t di tetracloroetilene  
( $2 \times 10^{30}$  atomi)

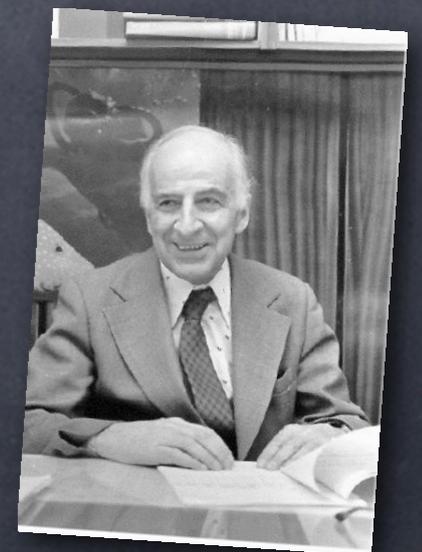


Raymond Davis

Cloro +  $\nu$   $\longrightarrow$  Argon (radioattivo)

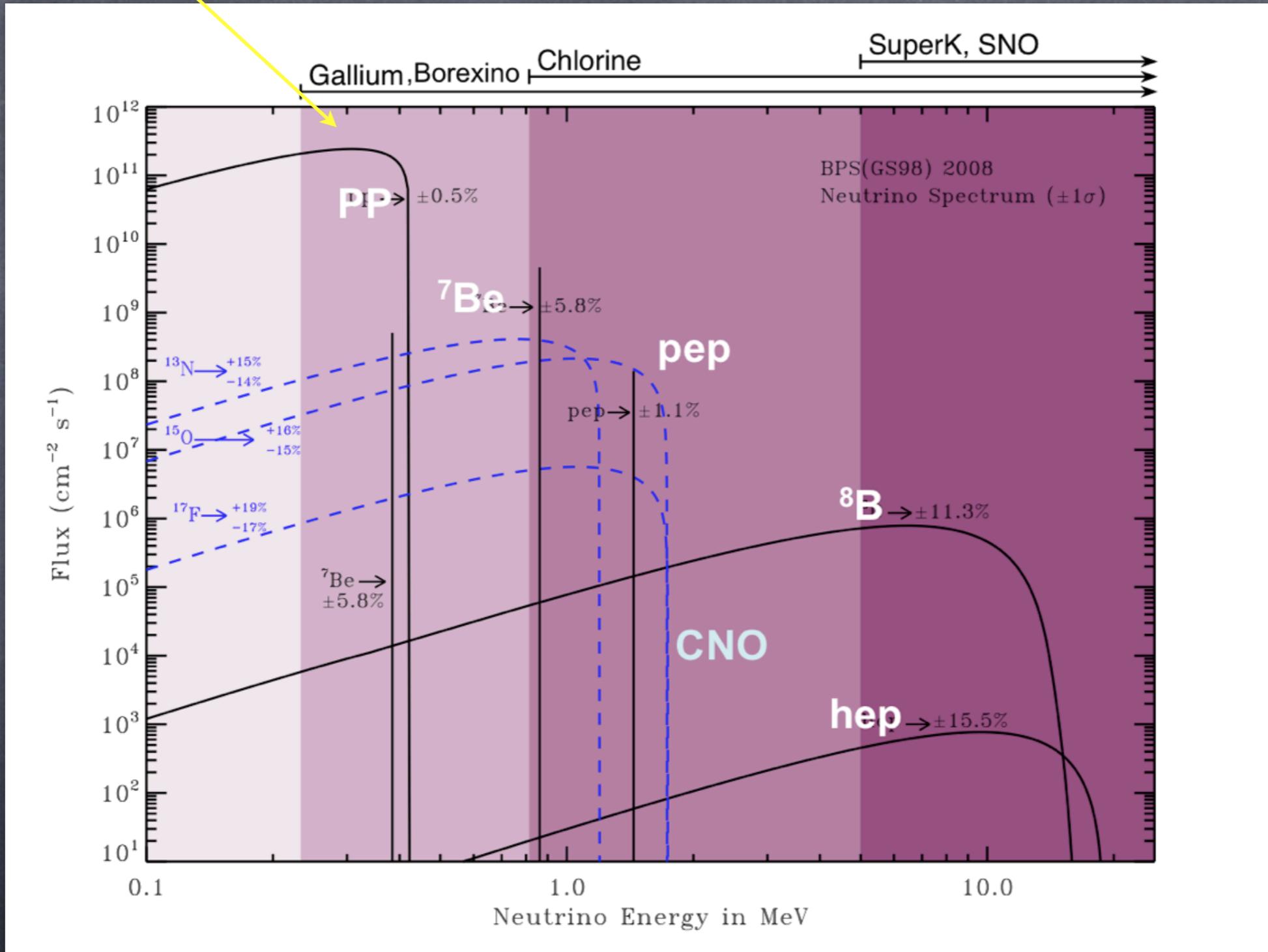
~ 1 atomo di Ar ogni 2 giorni

© B. Pontecorvo



# A caccia di neutrini solari

100 miliardi  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  !



# "Il problema dei neutrini solari"

Il flusso di neutrini misurato  
è circa il 30-50% di quello atteso!



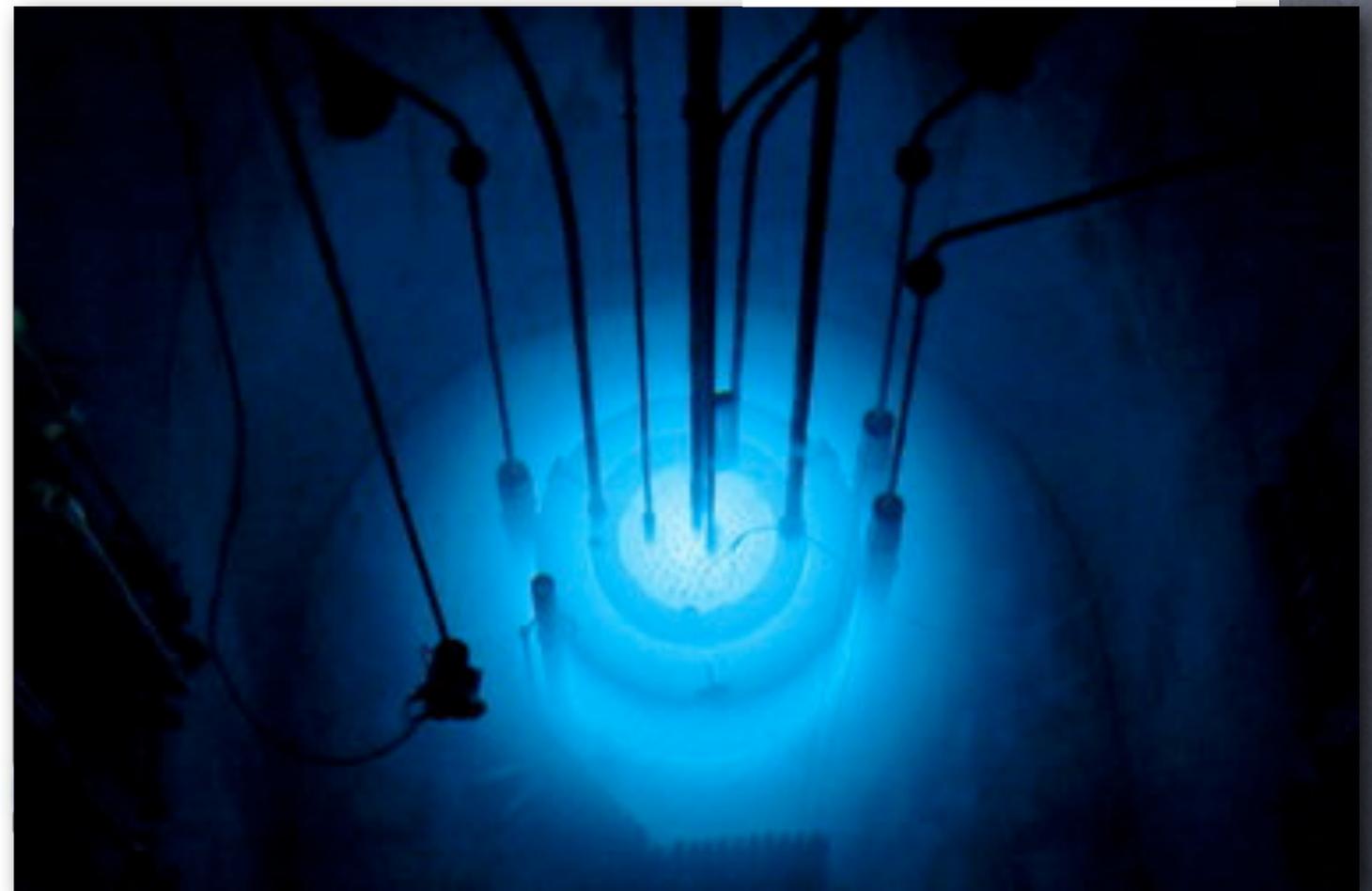
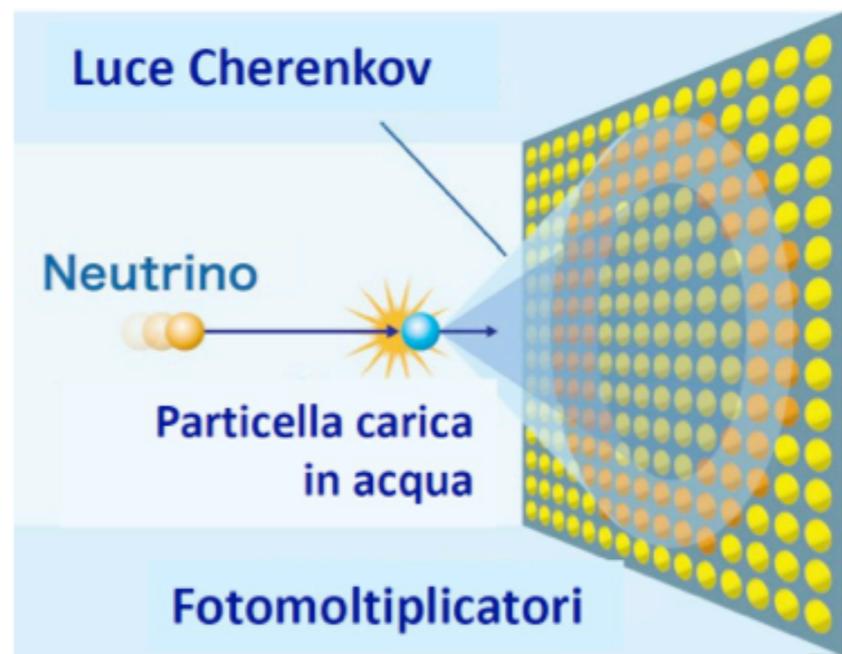
John Bahcall

Problemi con l'esperimento?

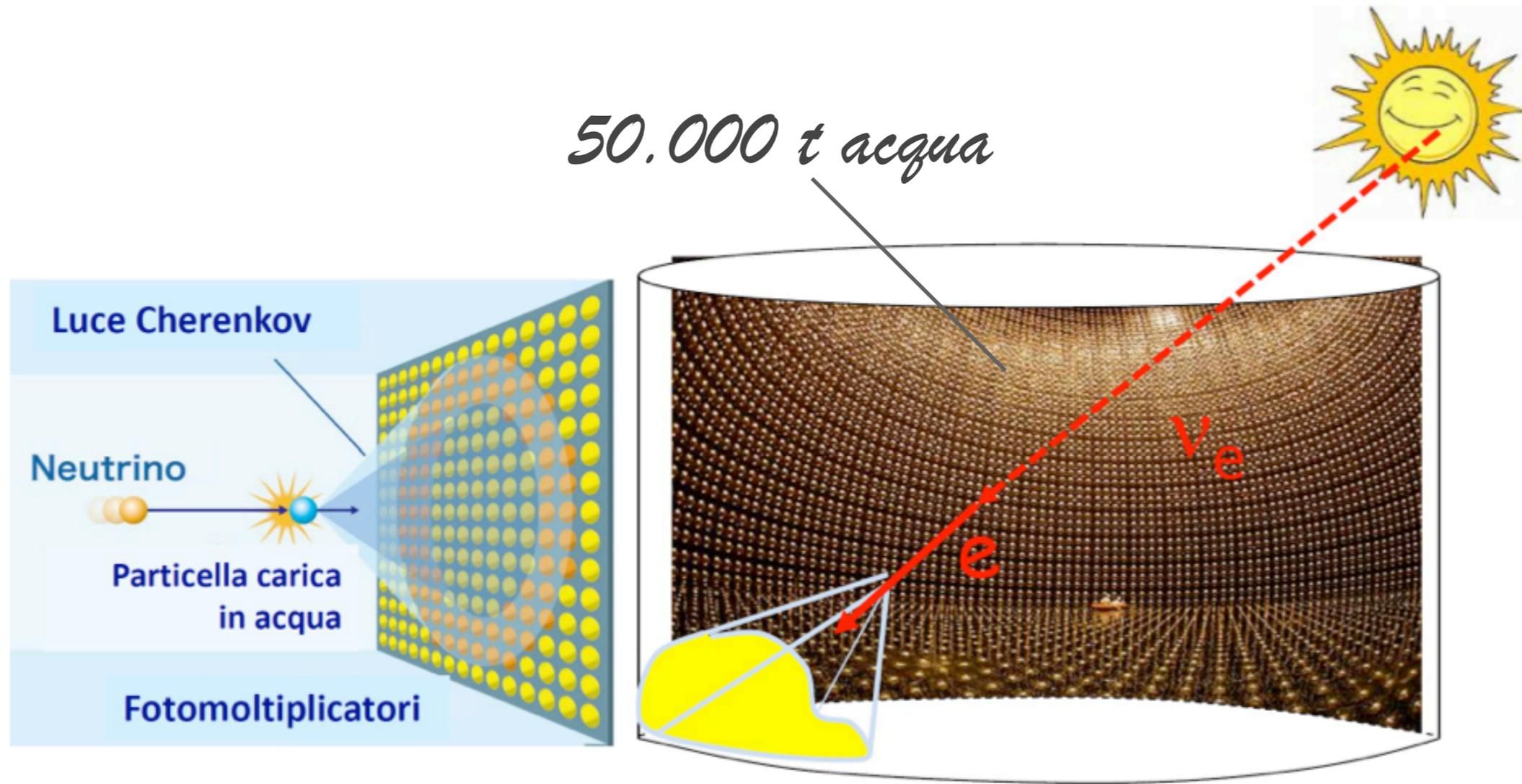
Errore nel modello del Sole?

Oppure stranezze dei neutrini?

# Superkamiokande

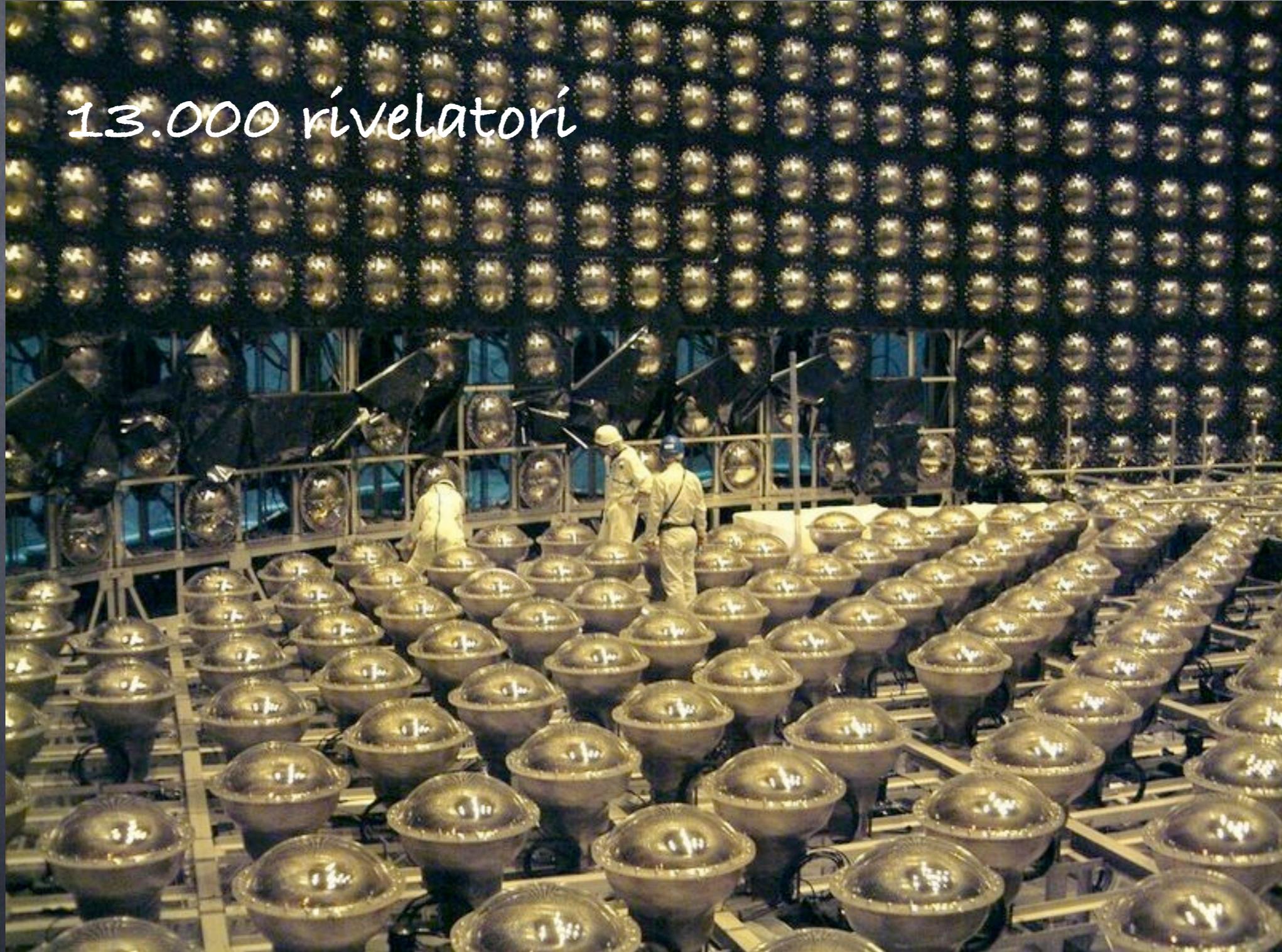


# Superkamiokande



# Superkamiokande

13.000 rivelatori

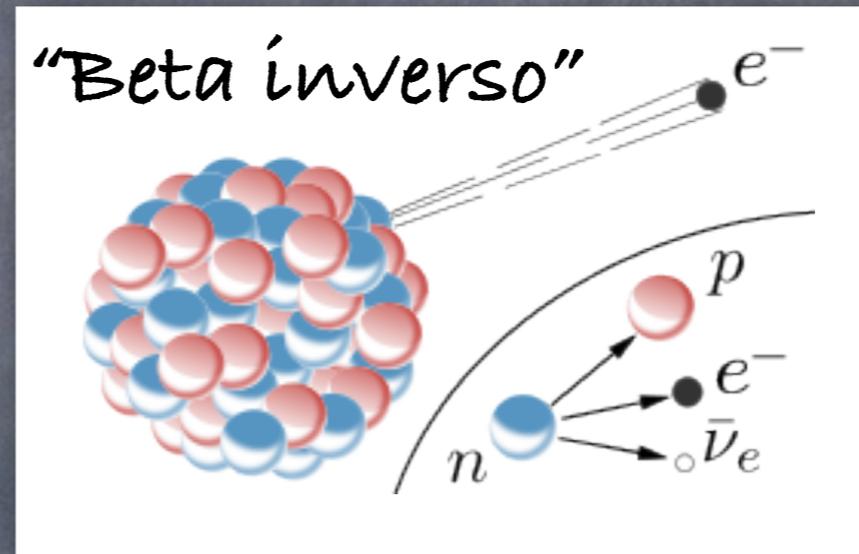


# SuperKamiokande

13.000 rivelatori

Premio Nobel 2002 per  
la rivelazione dei neutrini dalla  
SuperNova 1987A





Stella massiccia: finisce la propria esistenza con una grande esplosione che lascia una stella di neutroni o un buco nero



# "Il problema dei neutrini solari"

Il flusso di neutrini misurato  
è circa il 30-50% di quello atteso!



John Bachall

Problemi con l'esperimento? **No!**

Errore nel modello del Sole?

Oppure stranezze dei neutrini?

# "Il problema dei neutrini solari"

Il flusso di neutrini misurato  
è circa il 30-50% di quello aspettato!



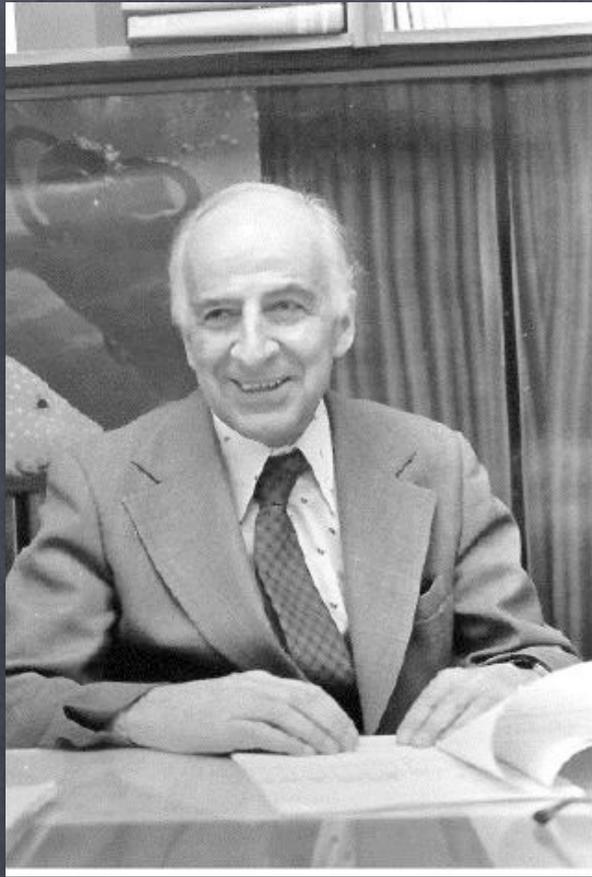
John Bachall

Problemi con l'esperimento? **No!**

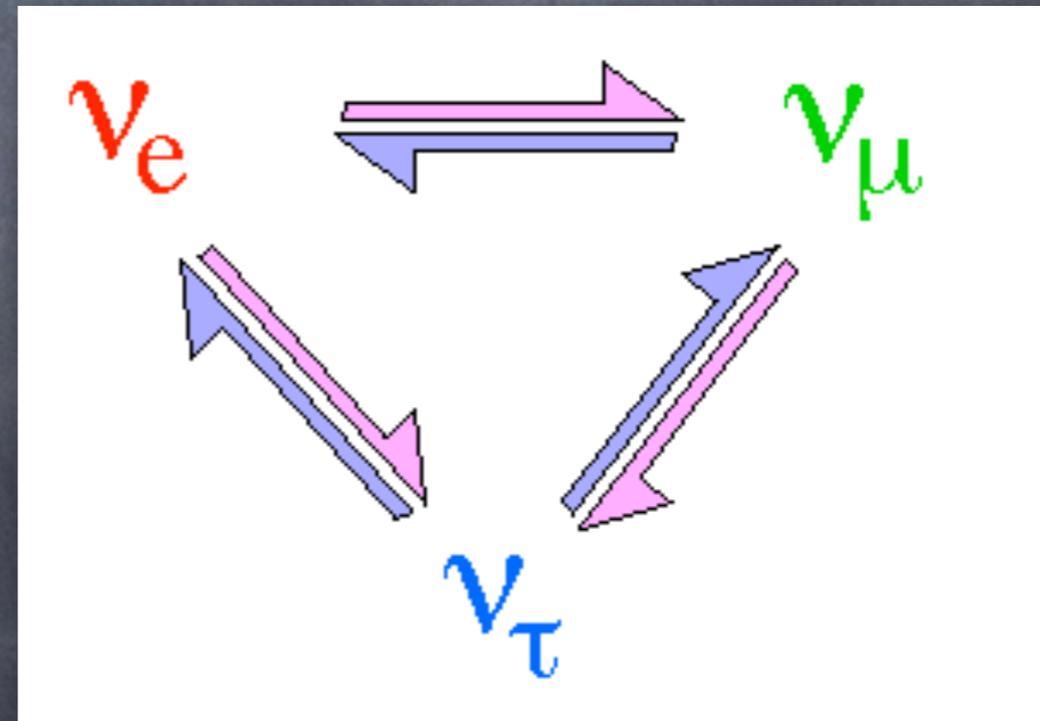
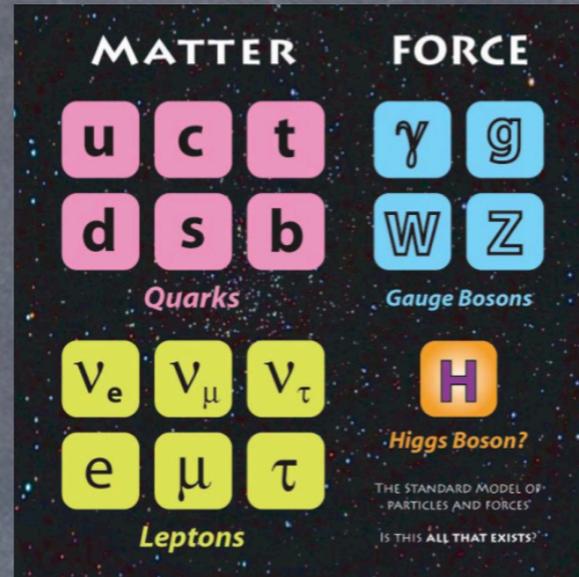
Errore nel modello del Sole? **No!?**

Oppure stranezze dei neutrini?

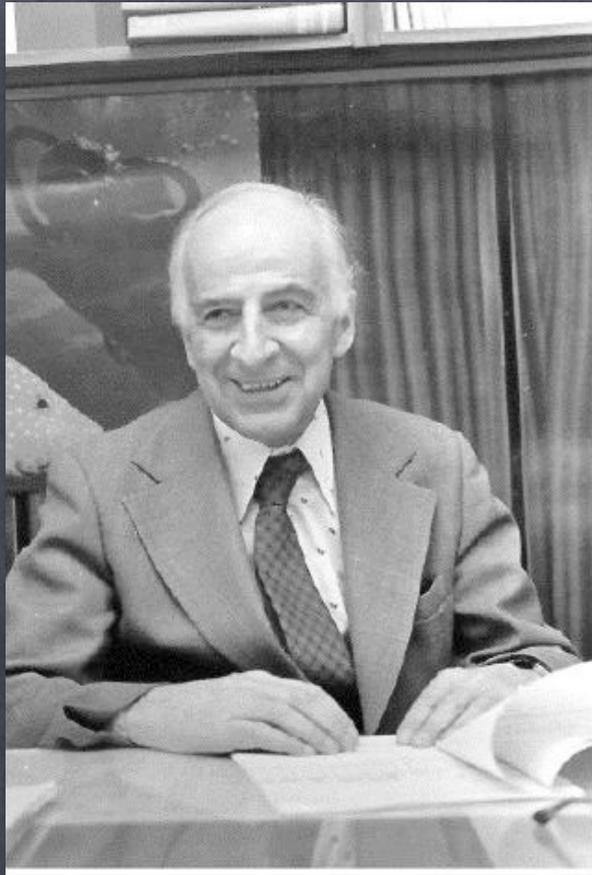
# Neutrini oscillanti



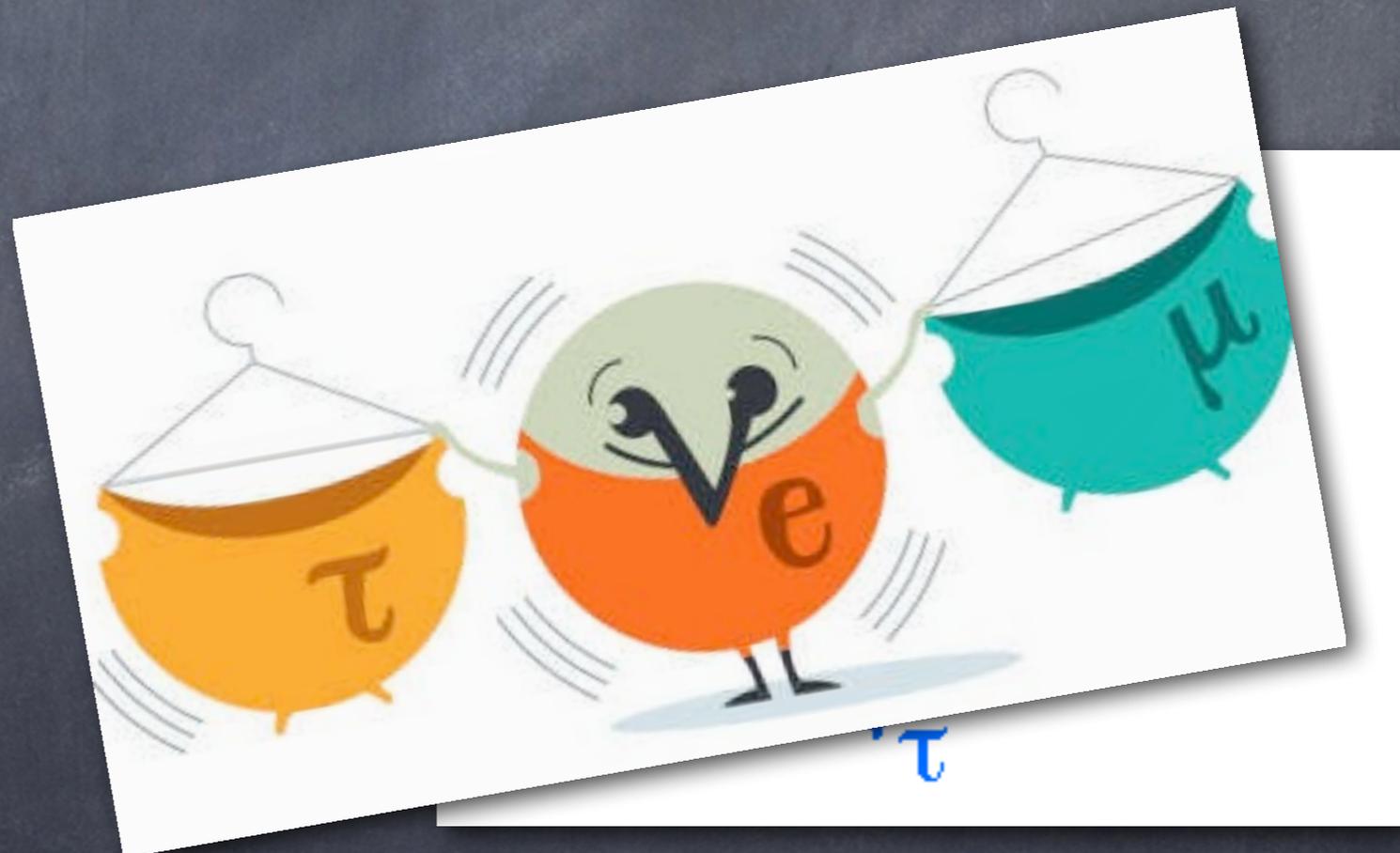
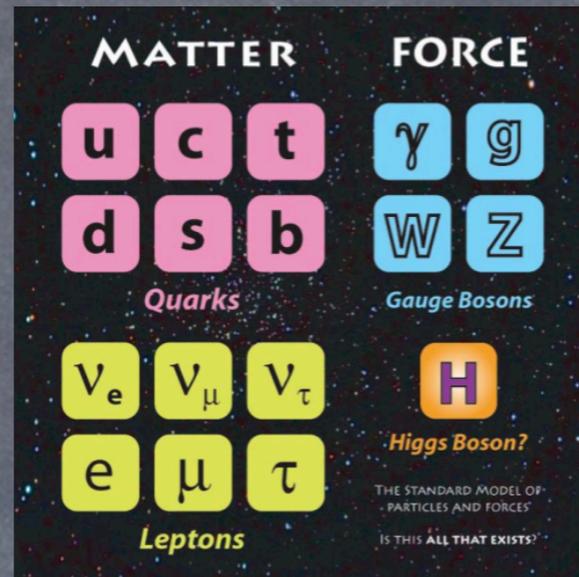
Bruno Pontecorvo



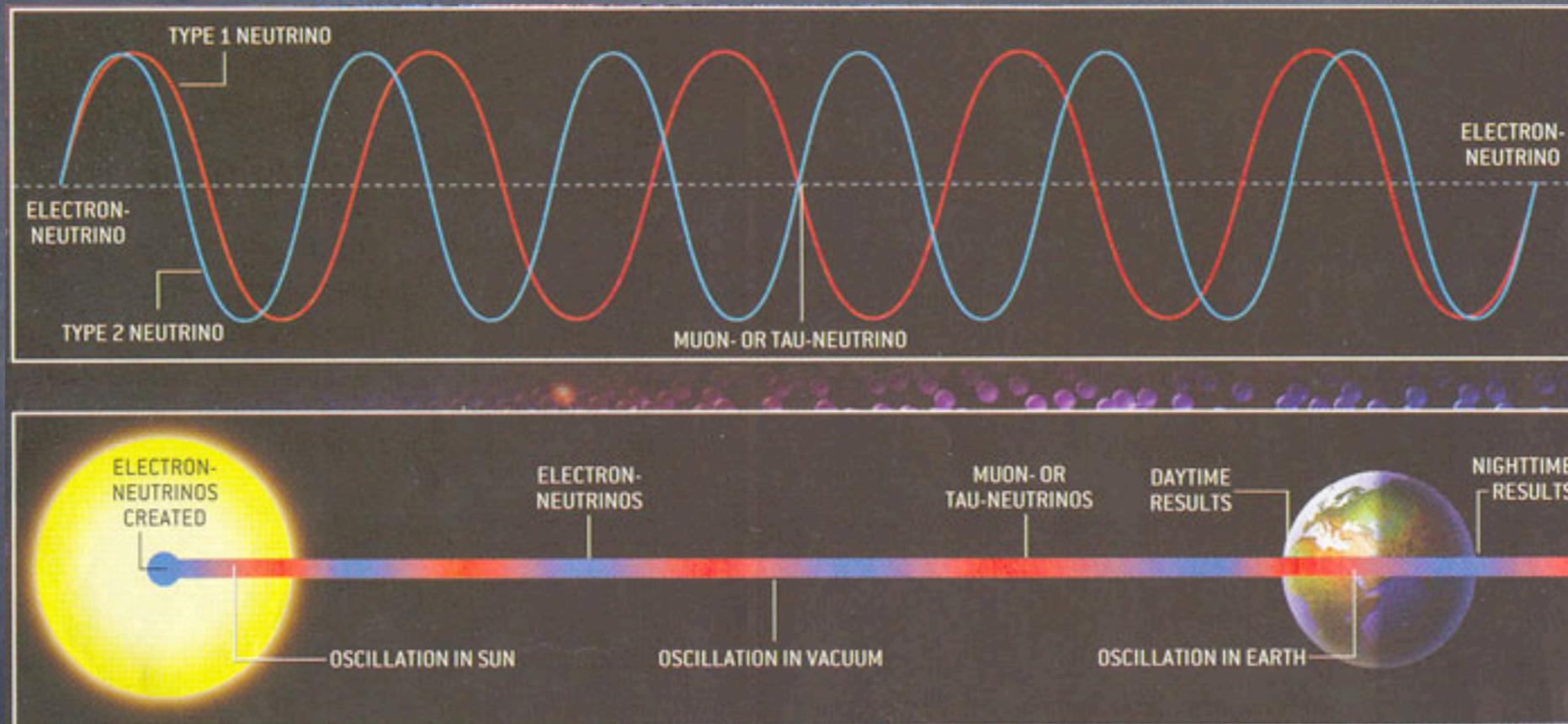
# Neutrini oscillanti



Bruno Pontecorvo



# Neutrini oscillantí



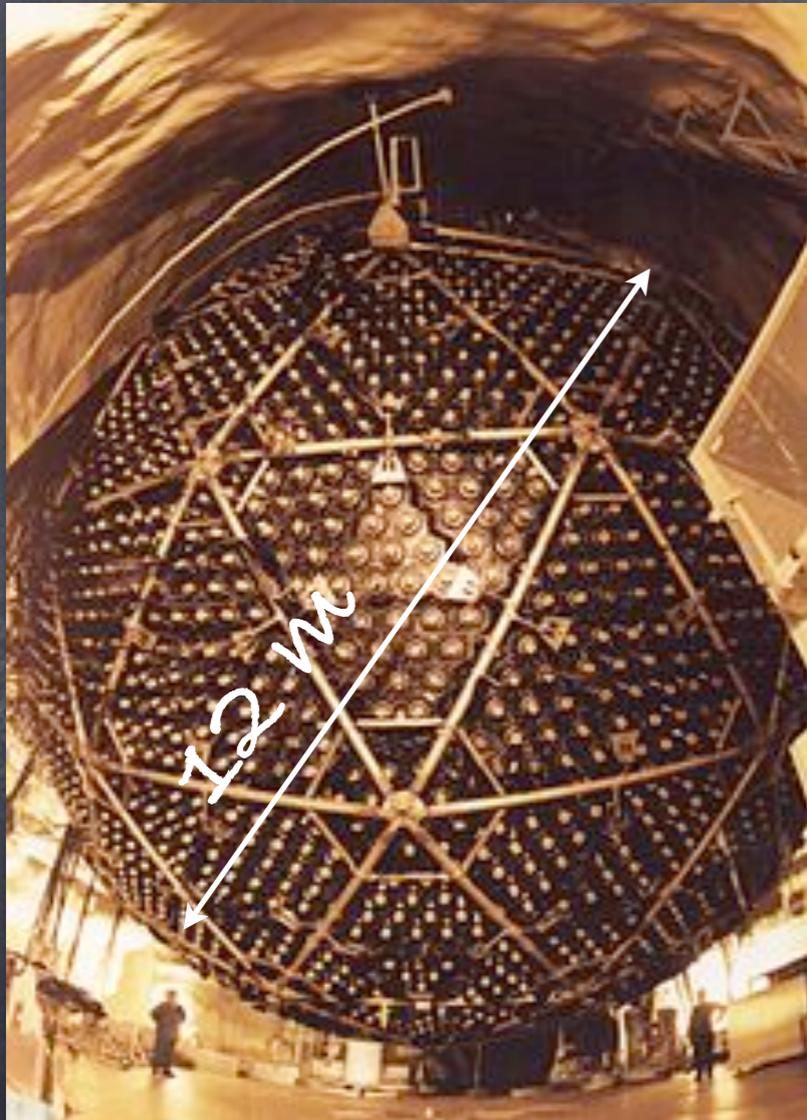
# "Il problema dei neutrini solari"

Il flusso di neutrini misurato  
è circa il 30-50% di quello aspettato!

Gli esperimenti sono sensibili ai  
neutrini ELETTRONICI. Durante il  
tragitto alcuni si trasformano in altri tipi  
(mu, tau) e quindi non vengono  
rivelati!

# SNO

Sudbury Neutrino Observatory  
(Canada)



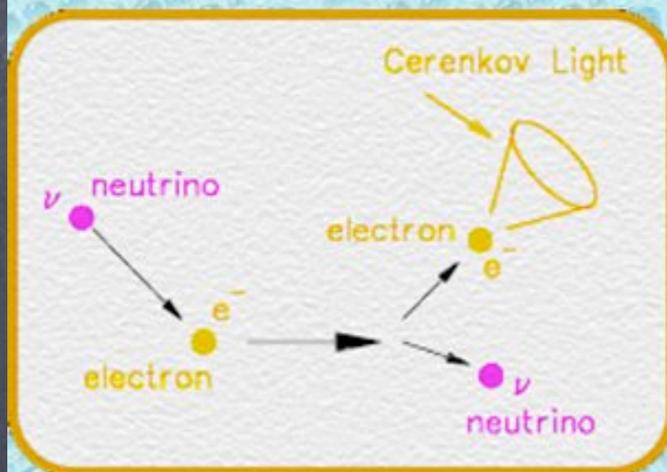
Caratteristica chiave: sensibilita' a  
TUTTI i tipi di neutrini!

Grande volume (1000 t) di  
purissima acqua pesante ( $D_2O$ )

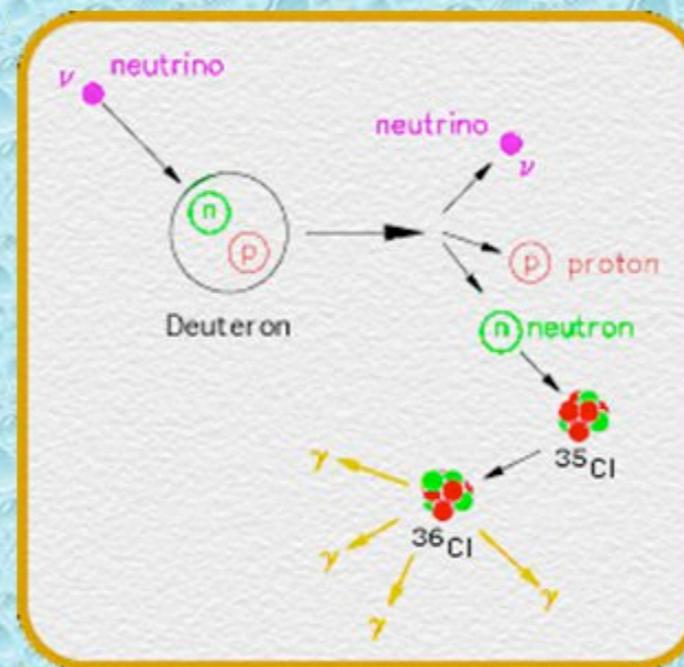
# SNO

## SNO Experiment

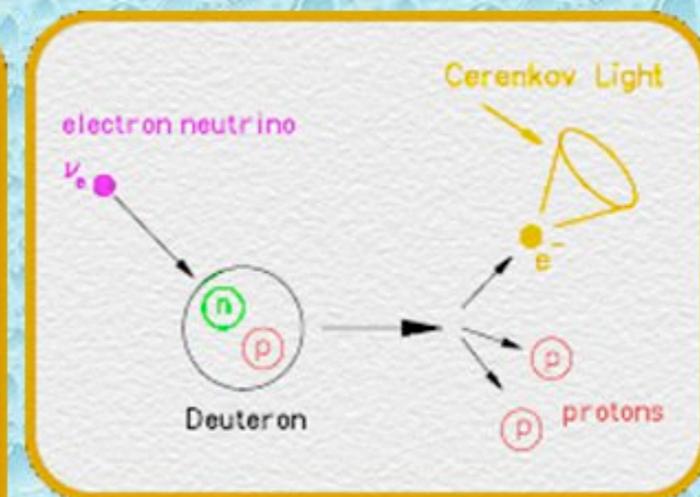
- Able to detect three different reactions.



Elastic Scattering  
(ES)



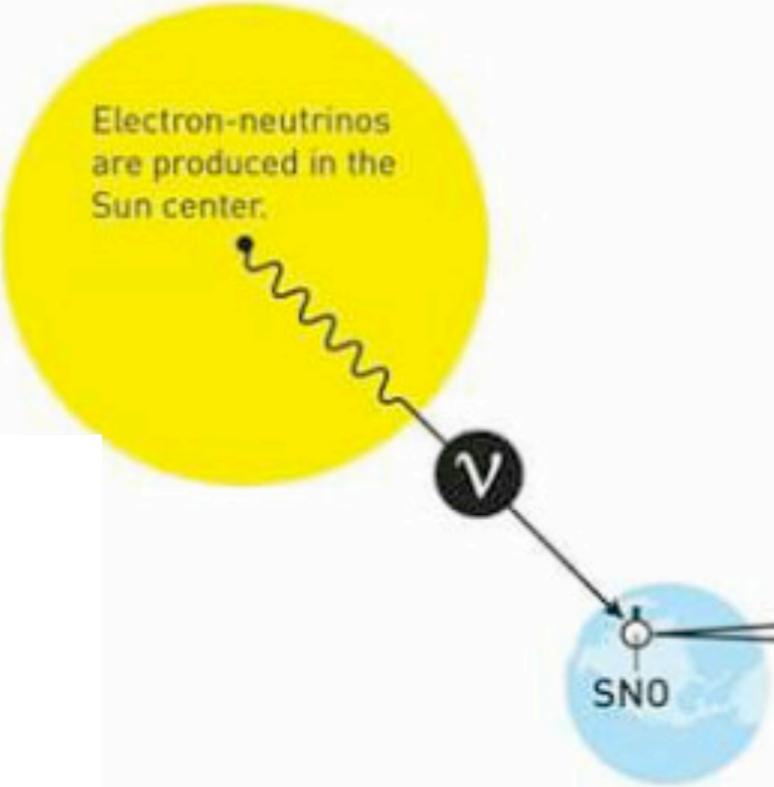
Neutral Current (NC)



Charged Current  
(CC)

# SNO

## NEUTRINOS FROM THE SUN



## SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY (SNO) ONTARIO, CANADA

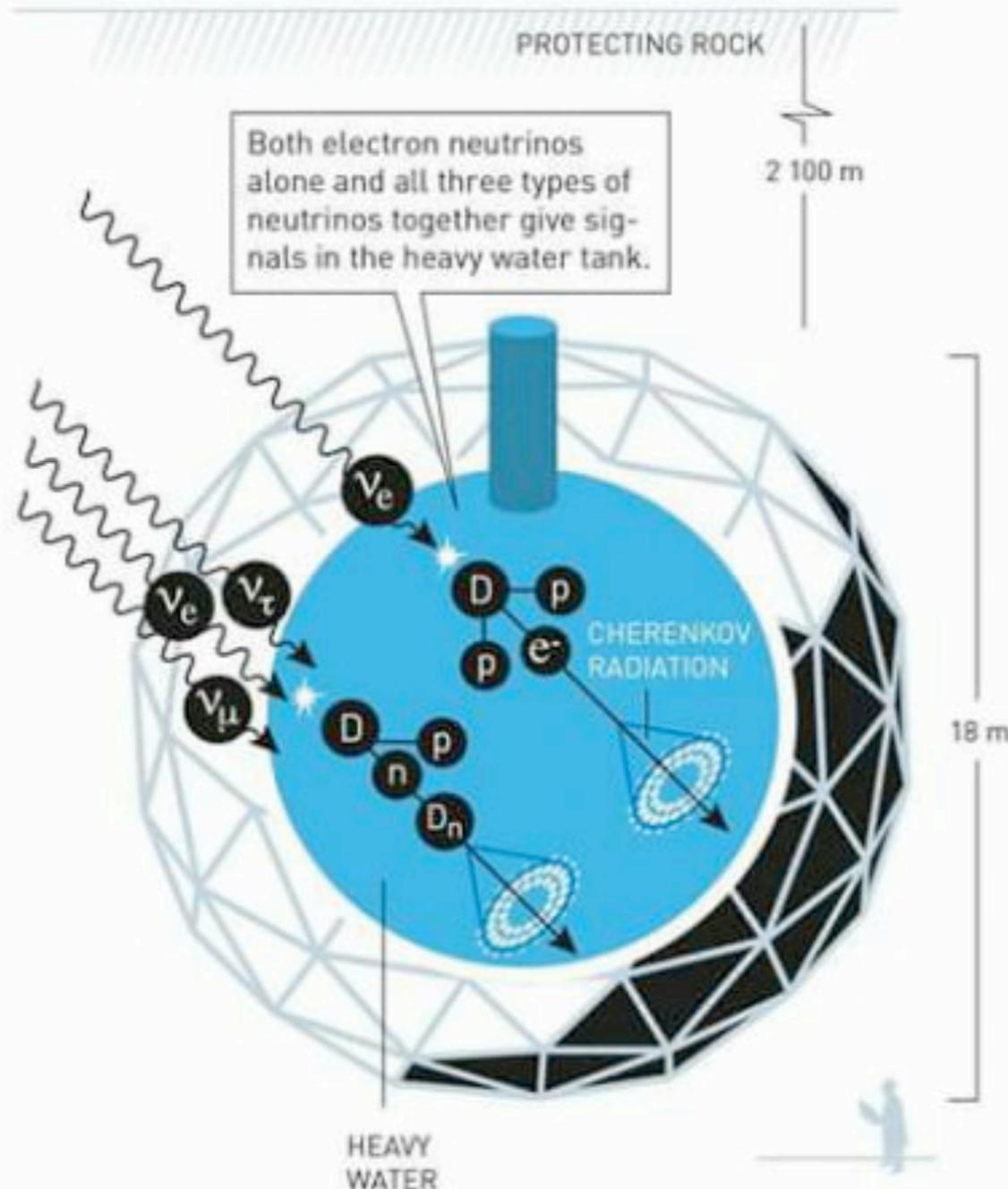


Illustration: © Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

# "Il problema dei neutrini solari"

Il flusso di neutrini misurato  
uguale quello atteso!



I neutrini oscillano!

# Premio Nobel per la fisica 2015



Prize motivation:  
"for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"

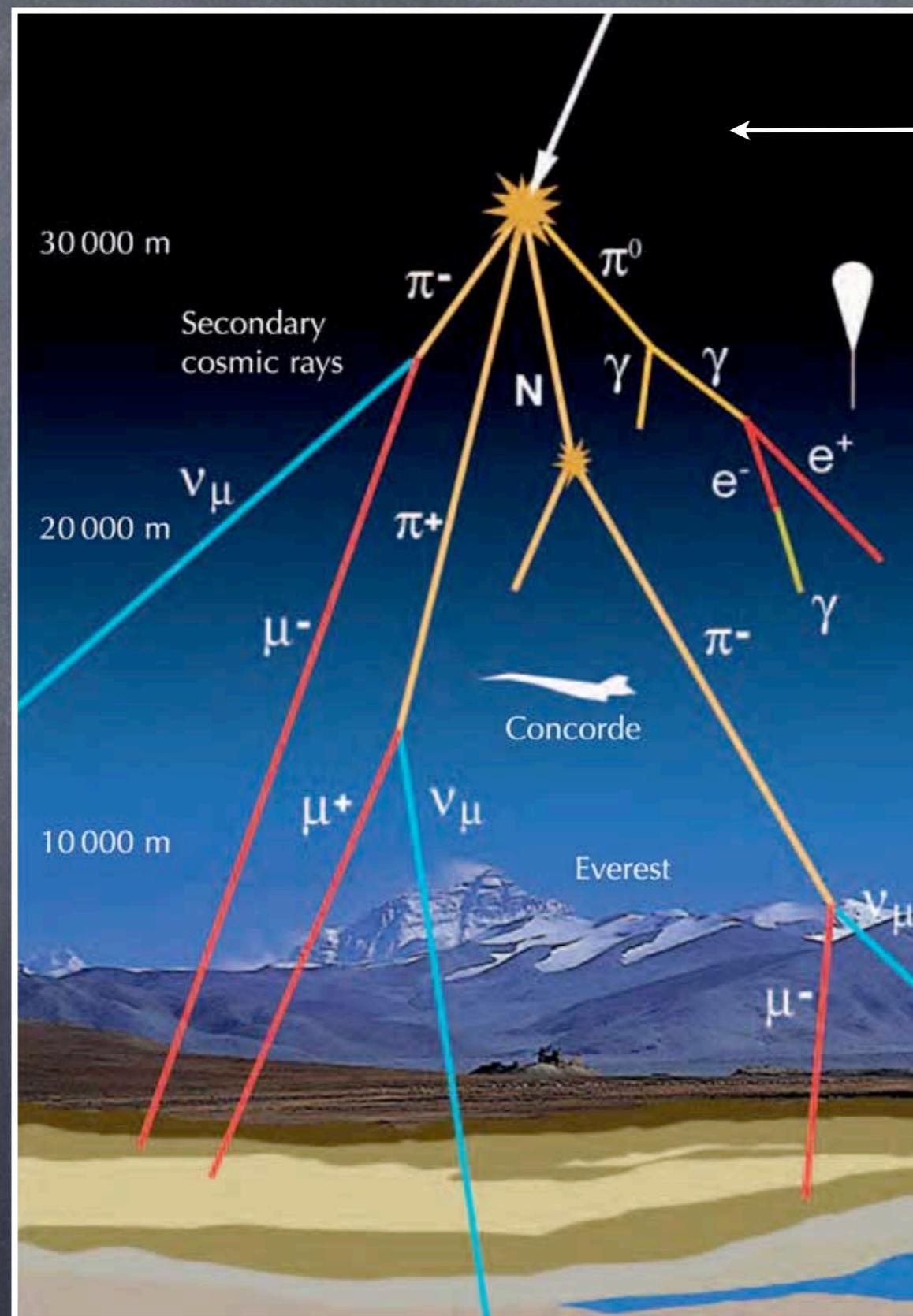


T. Kajita



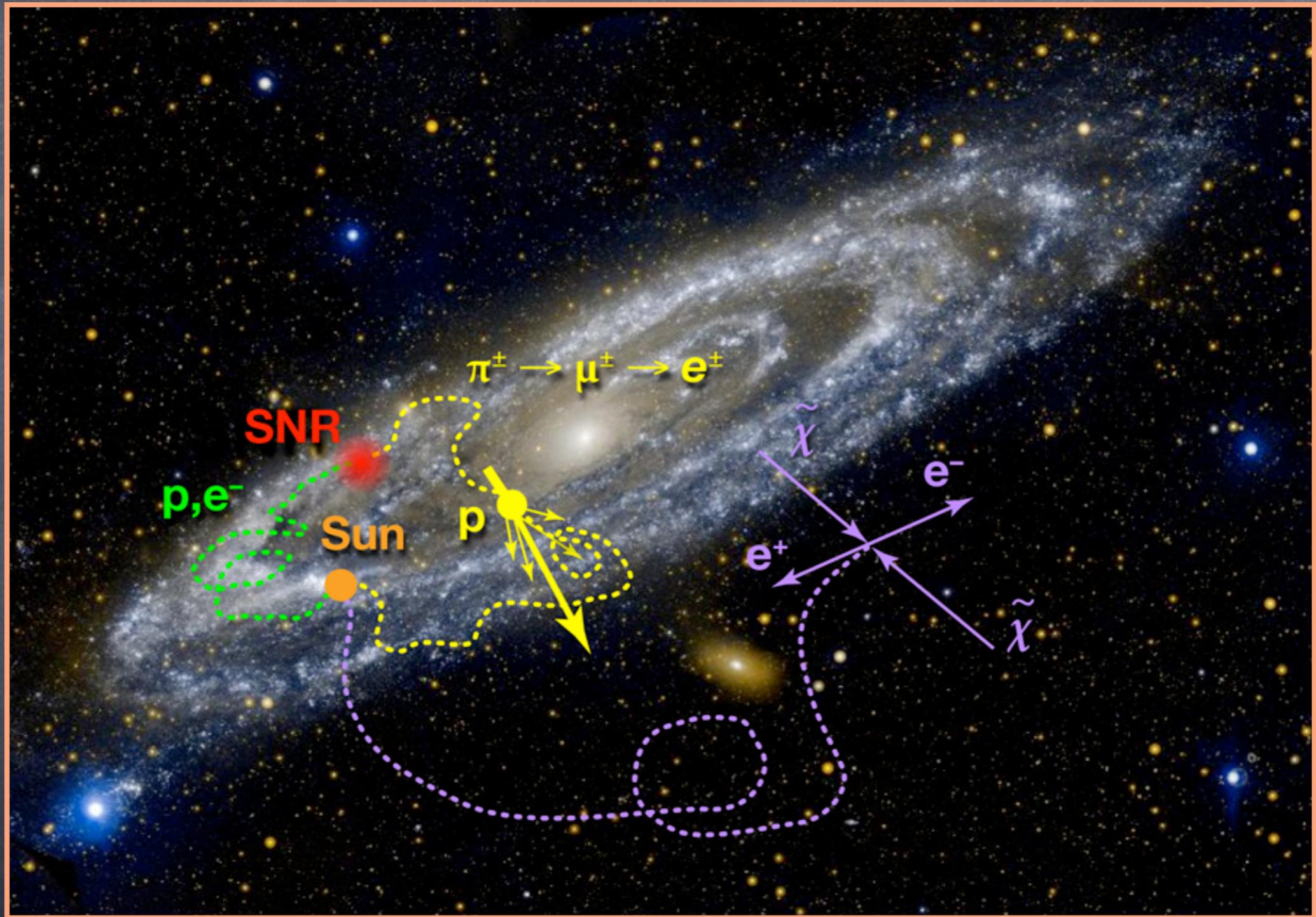
A. McDonald

# Neutrini atmosferici



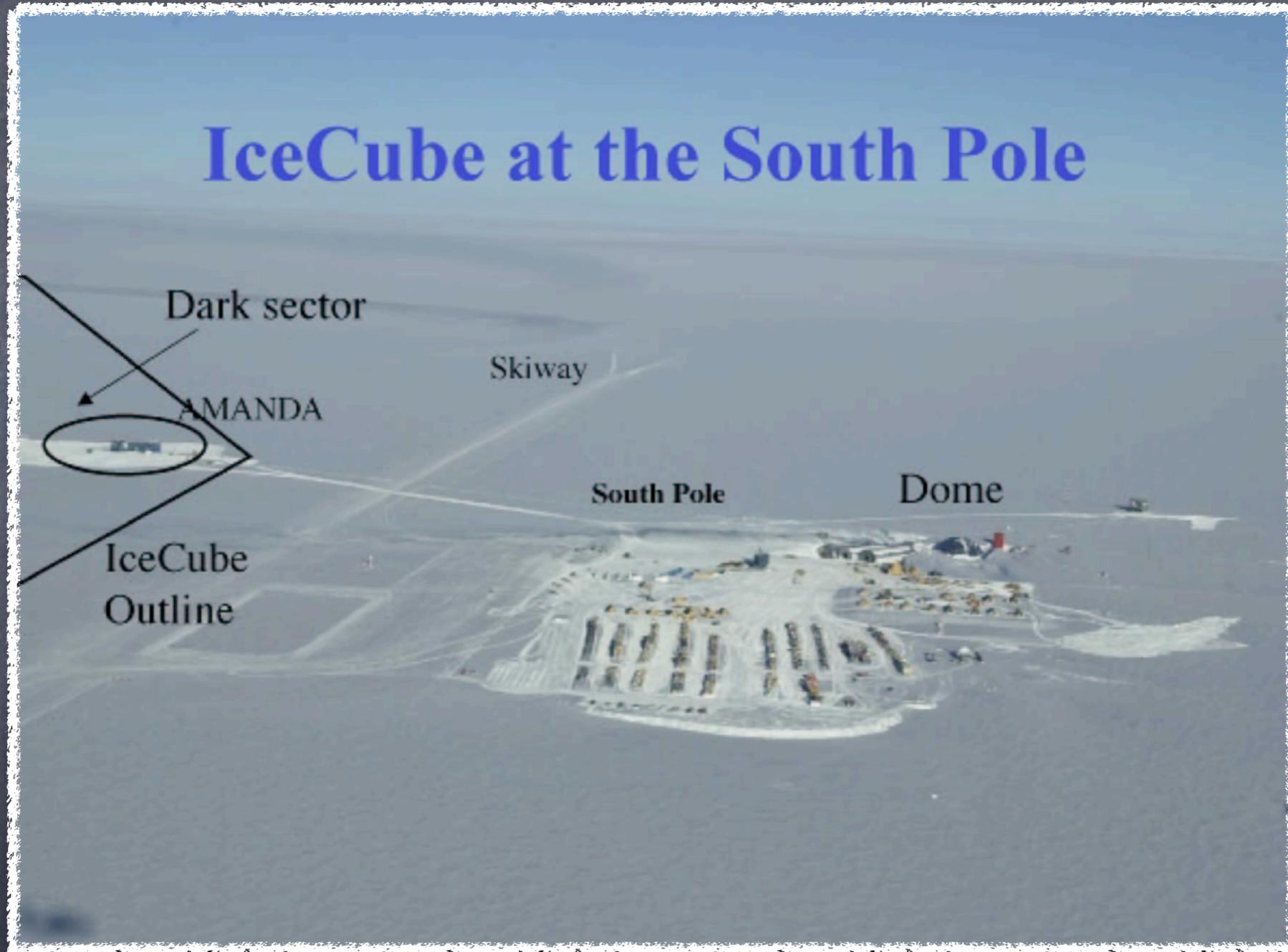
Raggio cosmico

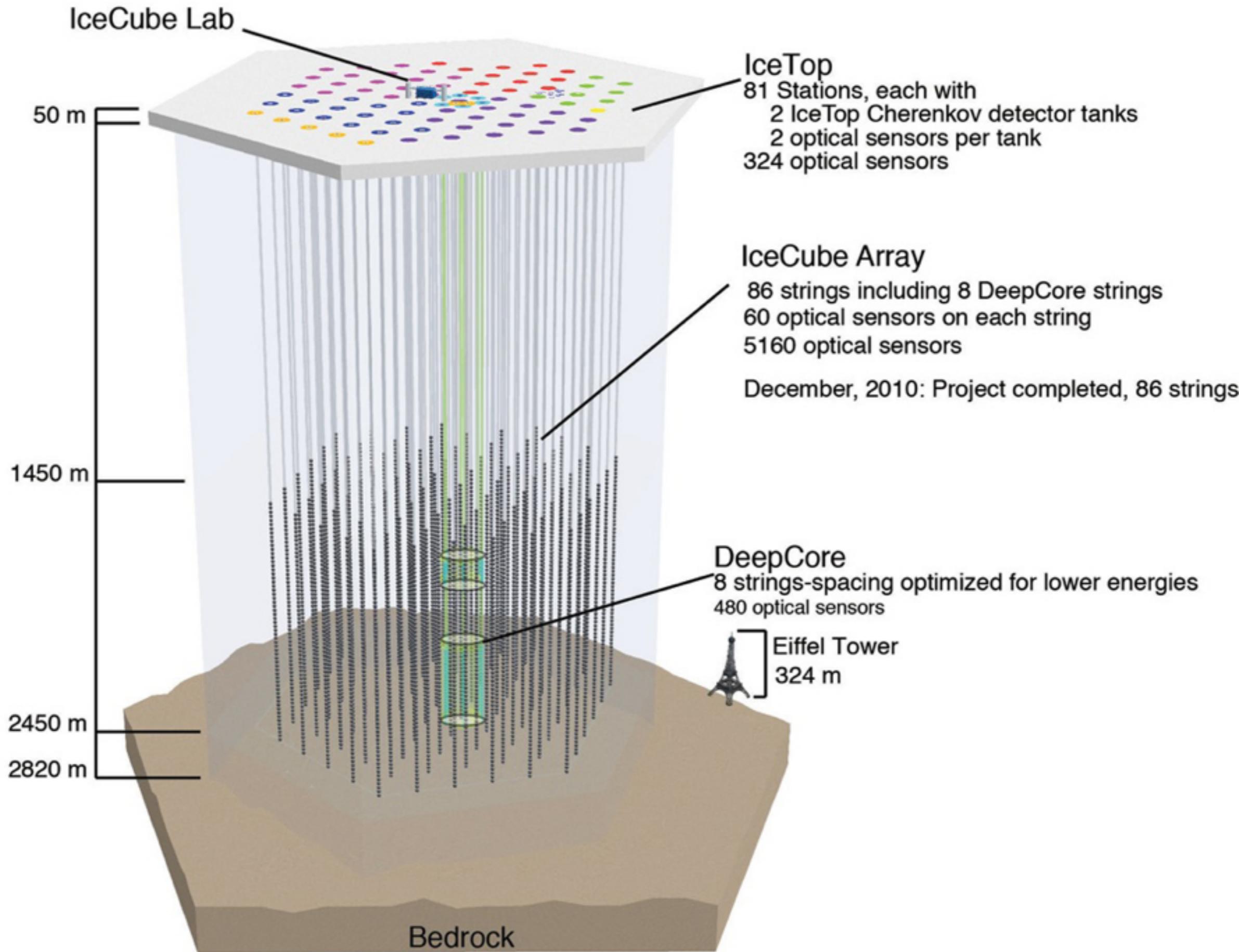
# Neutríní cosmící



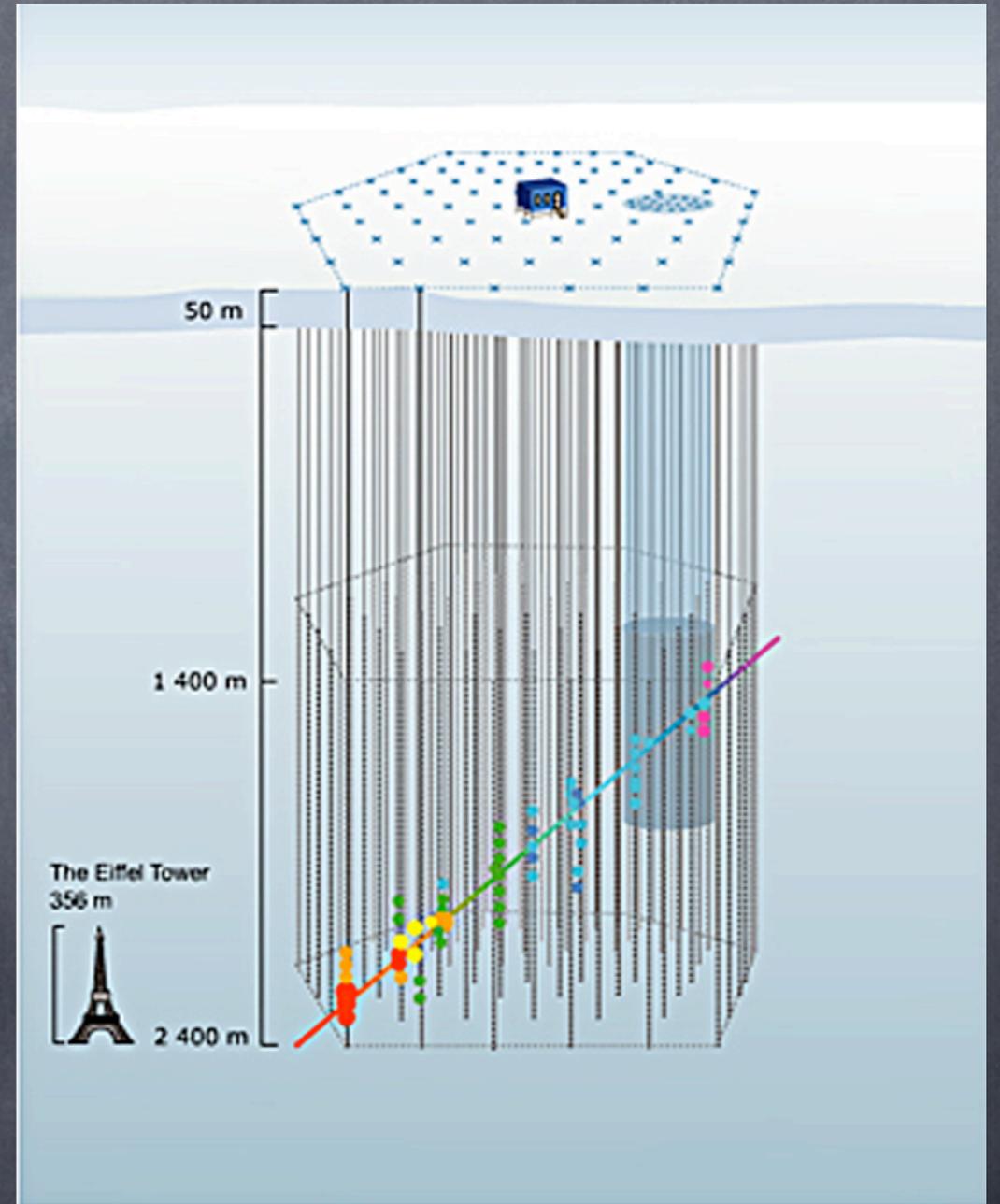
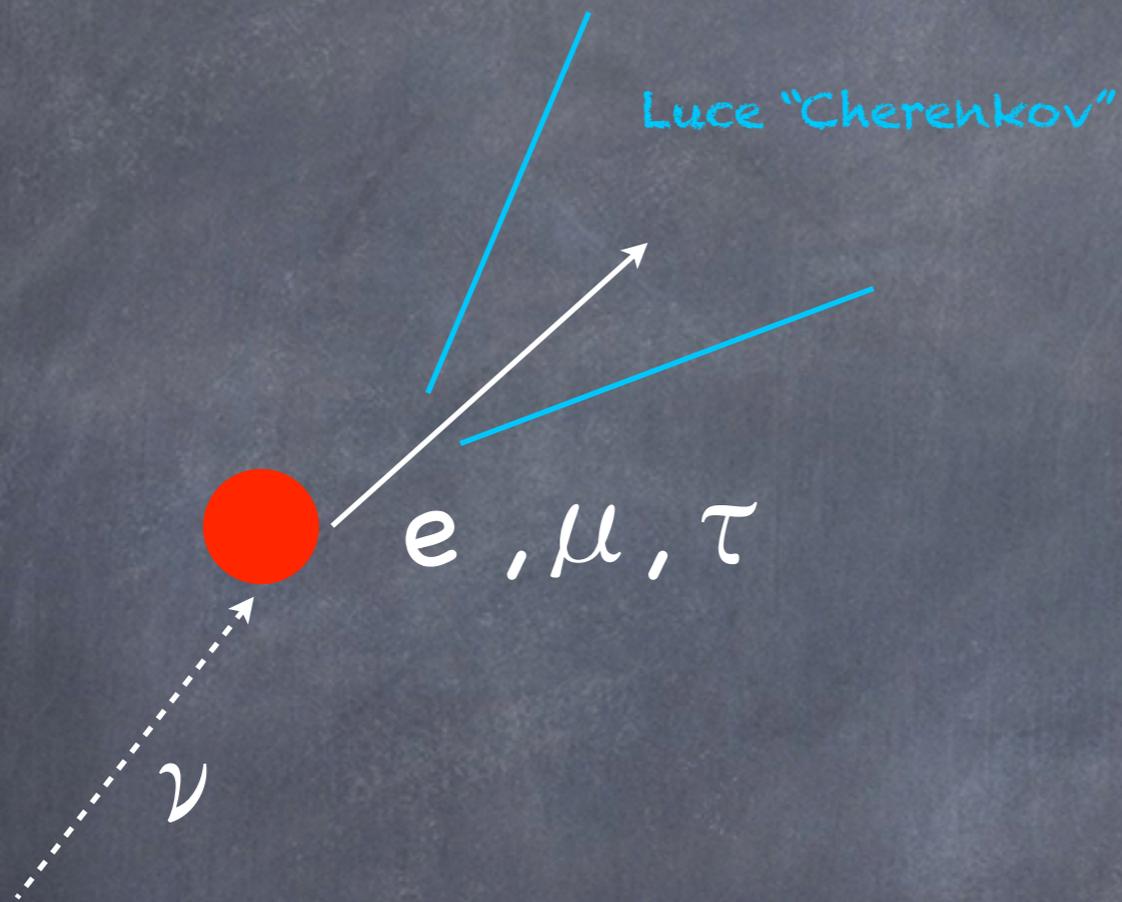
# Neutríní cosmící

## IceCube at the South Pole

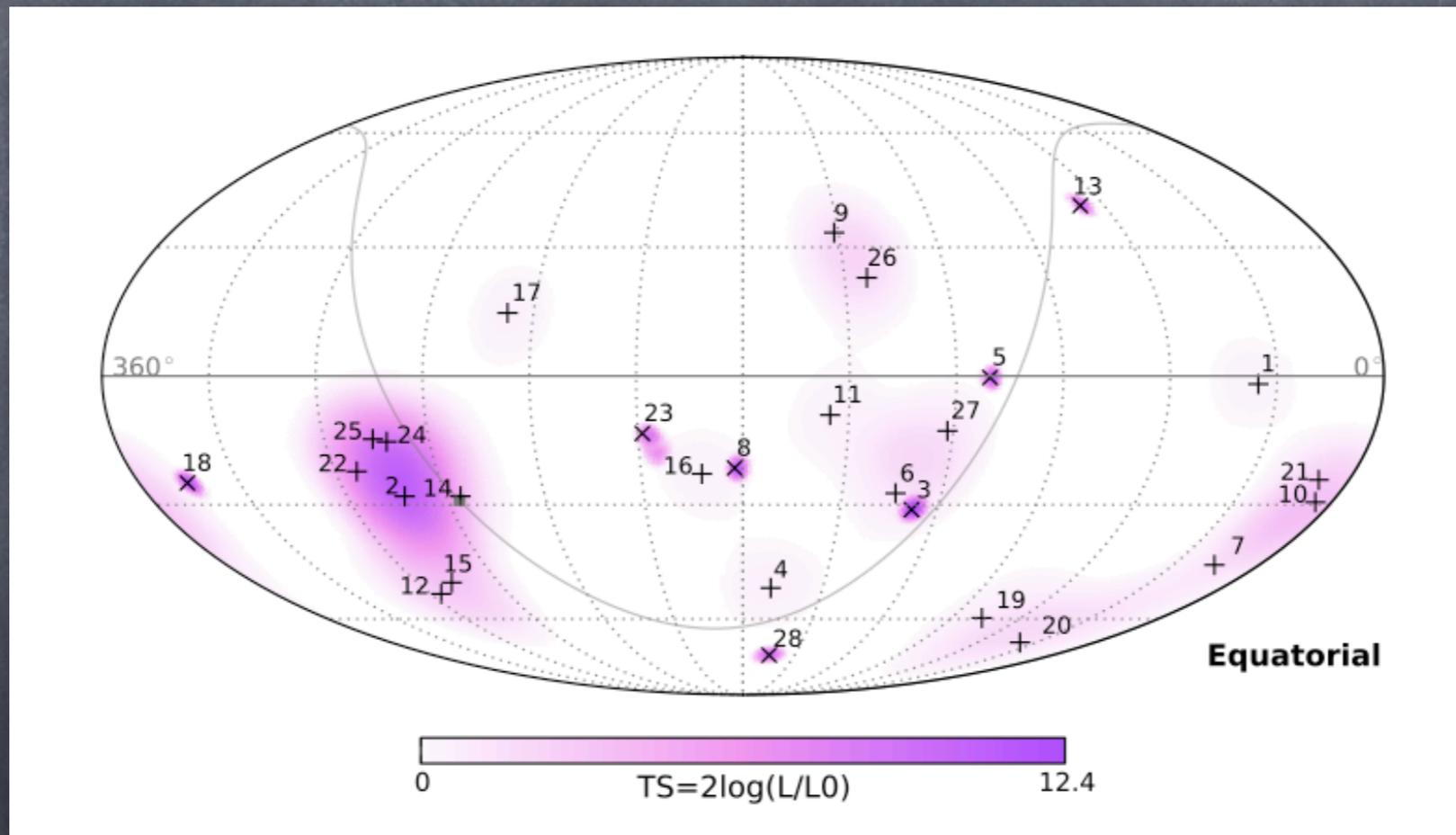






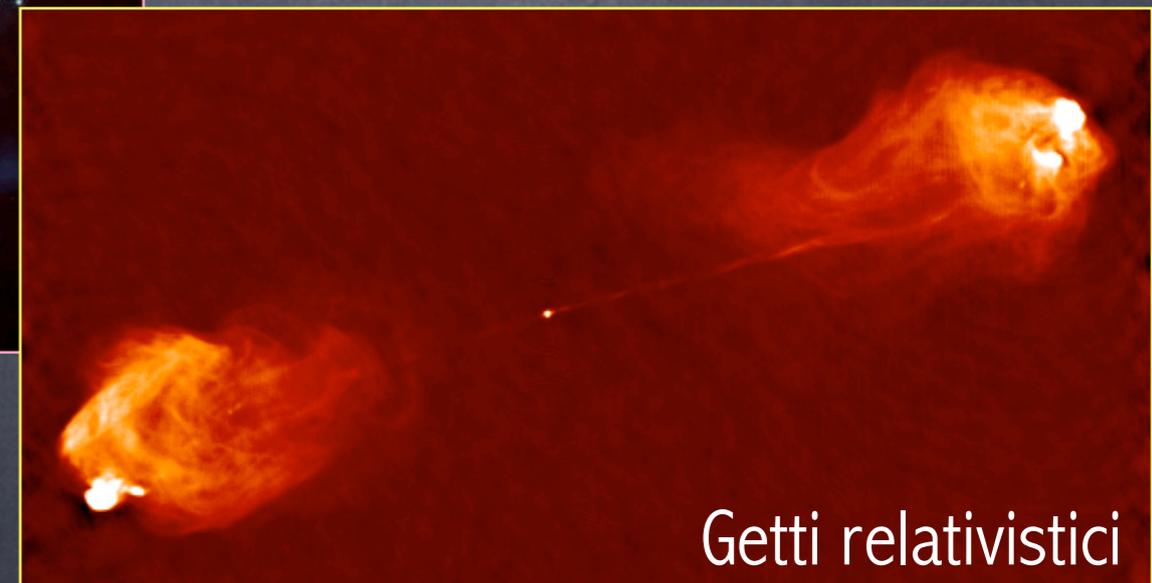


2012: prima evidenza di 28 neutrini  
cosmici con energie di 100-1000 TeV



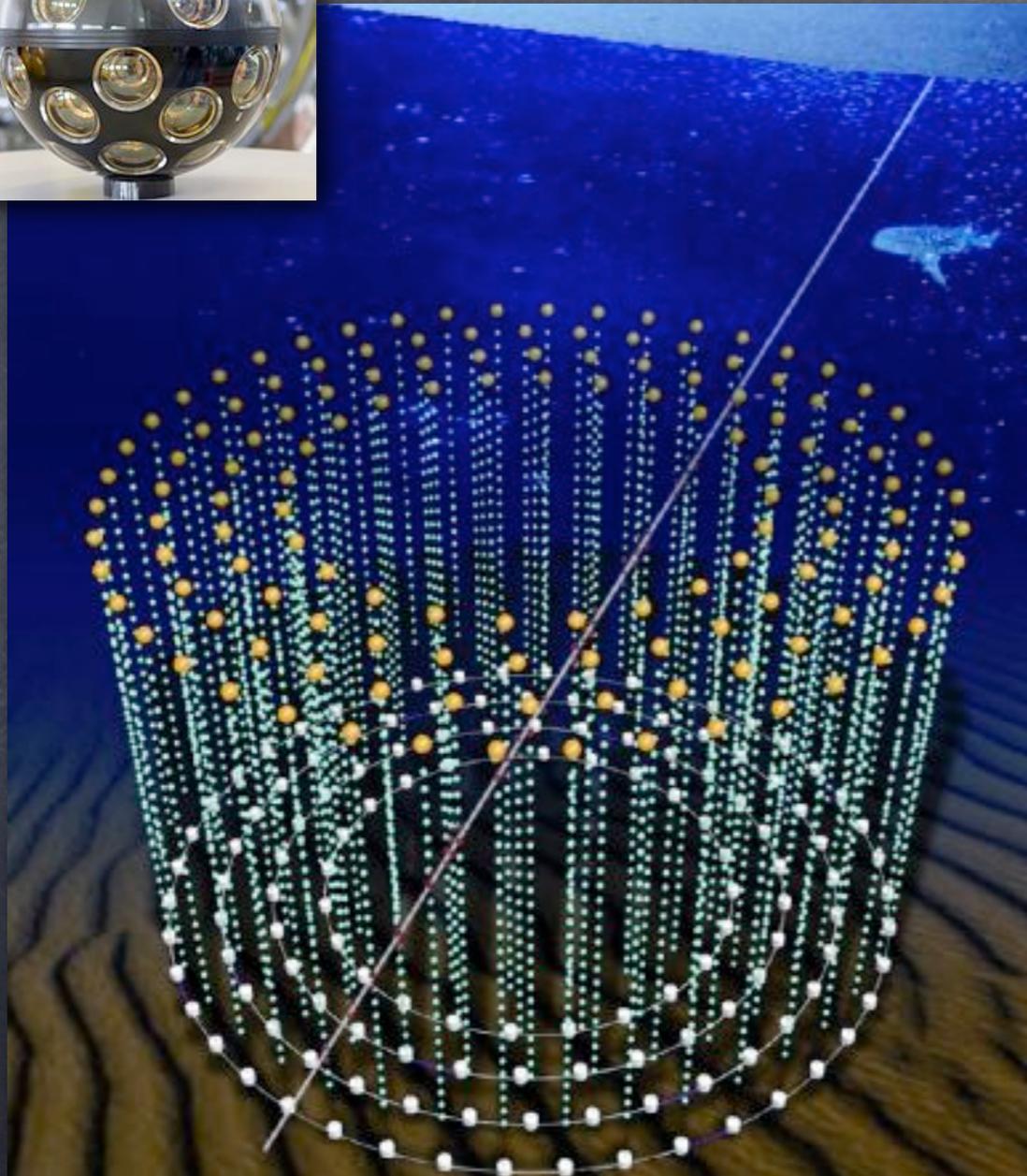
“Sottoprodotto” di reazioni indotte da protoni/nuclei di alta energia

- Sorgenti nella nostra Galassia
- Sorgenti astrofisiche extragalattiche



# Nuovi strumenti

## KM3NeT



Mar mediterraneo





**La caccia continua!**

*Consiglio di lettura*

