



Neutrini fantastici e dove trovarli

Alessandro Menegolli

Dipartimento di Fisica
Università degli studi di Pavia
INFN, Sezione di Pavia

Contenuti

- Neutrini fantastici...
- ... e dove trovarli!
- Neutrini nella fisica contemporanea: le oscillazioni di neutrino...
- ... e altri neutrini fantastici!

Neutrini fantastici...

ELECTRON-NEUTRINO ν_e



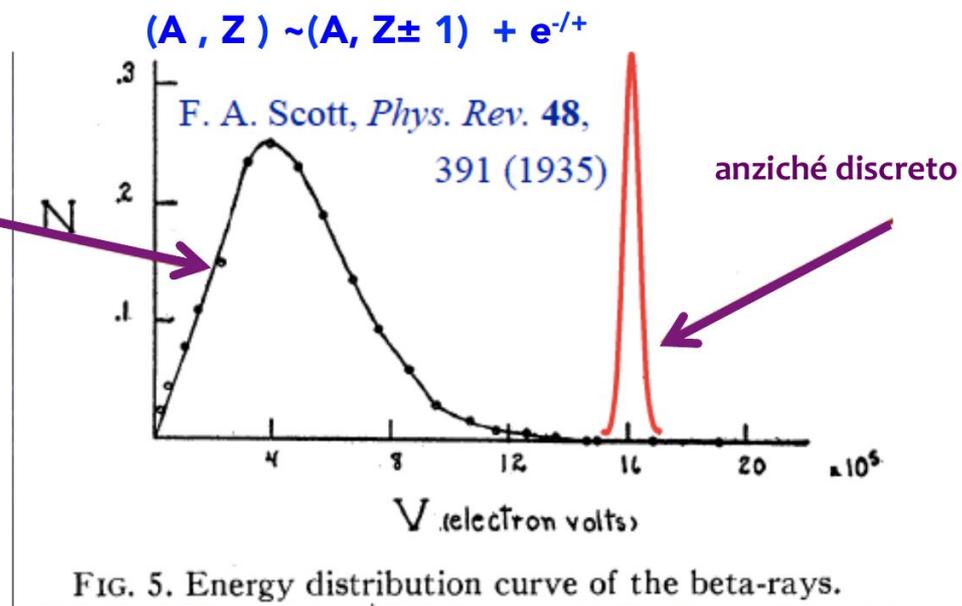
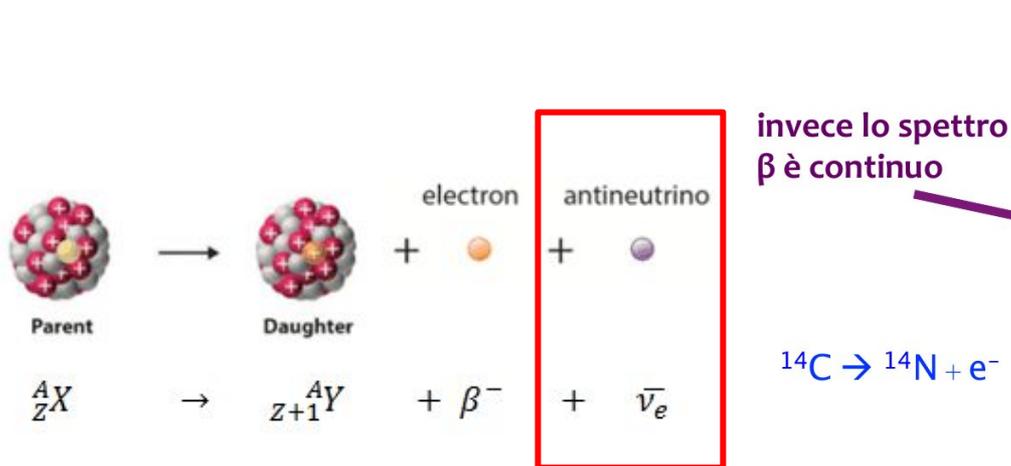
The **ELECTRON-NEUTRINO** wears a bandit's mask because he likes to steal away energy and is notoriously difficult to detect. Traveling close to the speed of light, he is the most pervasive form of matter in the universe. Trillions of neutrinos are passing through everything around us, including us, at every moment. The result of radioactive neutron decay, most neutrinos originate from the sun. Their mass is next to nothing.

●○○○○○○○○○○○
LIGHT HEAVY

The **PARTICLE ZOO**

Il neutrino di Pauli (1930)

L'esistenza del neutrino venne postulata da W. Pauli per spiegare il decadimento β dei nuclei



Bohr: forse nel decadimento beta l'energia non si conserva?

Lo spettro continuo di energia dell'elettrone si poteva spiegare ammettendo l'emissione di una terza particella neutra (non rivelata)

Il neutrino di Pauli (1930)



The "Neutrino"

[H. Bethe, R. Peierls, Nature 133 (1934) 532]

For an energy of 2 – 3 MeV ... a penetrating power of 10^{16} km in solid matter. It is therefore absolutely impossible to observe processes of this kind with the neutrinos created in nuclear transformations.

... one can conclude that there is no practically possible way of observing the neutrino.

- 10^{16} km $\approx 10^3$ anni luce ≈ 10 volte il diametro della Via Lattea!
- Però, la rarità delle interazioni dei neutrini può essere controbilanciata da una sorgente sufficientemente intensa.
- Se i neutrini hanno una lunghezza di penetrazione di circa 10^{16} km = 10^{19} m, la probabilità di interazione in ogni metro di materia è circa 10^{-19} . Quindi con una sorgente che emette 10^{19} neutrini si può avere una interazione in un rivelatore lungo circa 1 m!
- Il problema era che negli anni 30 non si conosceva nessuna sorgente così intensa e non si era in grado di costruire grandi rivelatori.

Il neutrino di Pauli (1930)



The "Neutrino"

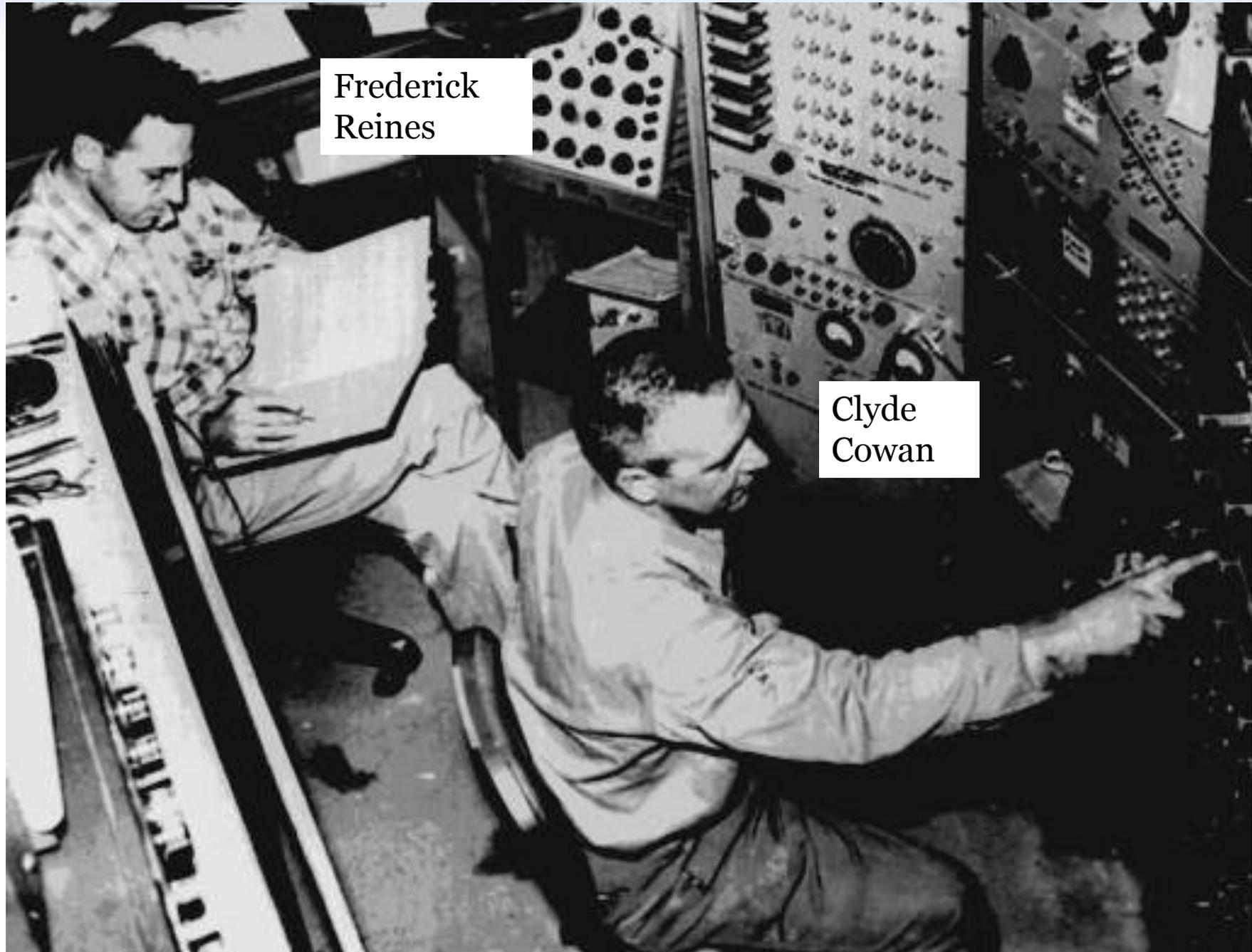
[H. Bethe, R. Peierls, Nature 133 (1934) 532]

For an energy of 2 – 3 MeV ... a penetrating power of 10^{16} km in solid matter. It is therefore absolutely impossible to observe processes of this kind with the neutrinos created in nuclear transformations.

... one can conclude that there is no practically possible way of observing the neutrino.

...ma dopo "solo" 26 anni...

L'esperimento di Reines e Cowan (1956)



Frederick
Reines

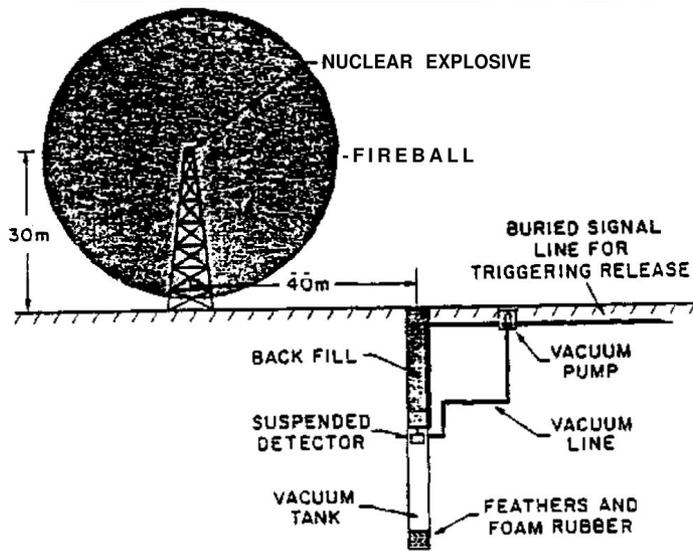
Clyde
Cowan

L'esperimento di Reines e Cowan (1956)

Frederick Reines

Reines fu direttore di diversi test nucleari nel Pacifico negli anni '50... poi tornò alla ricerca!

Infatti la prima idea fu quella di collocare un rivelatori di neutrini a 40 metri da Ground Zero di un'esplosione nucleare!

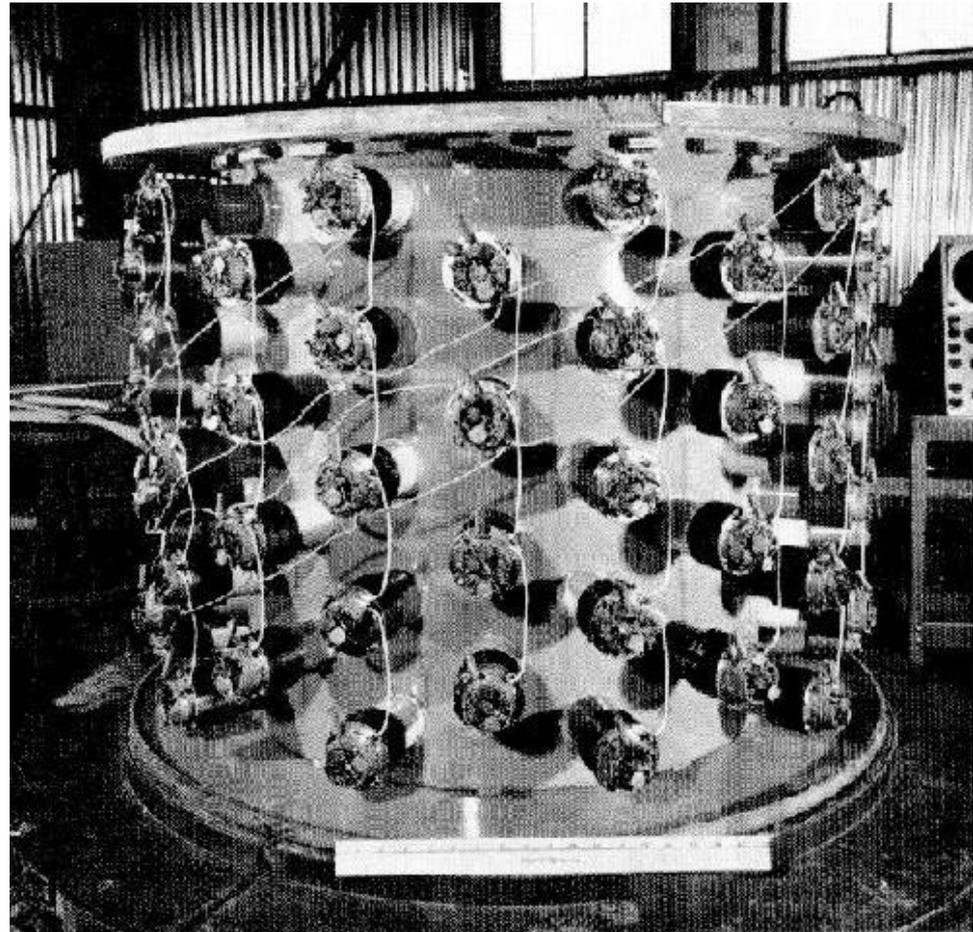


L'esperimento di Reines e Cowan (1956)

- Prima rivelazione: (anti) neutrini prodotti nel reattore di Savannah River.
- Flusso di neutrini 1000 volte inferiore ad una bomba, ma presa dati possibile per mesi o anni...



400 litri di una miscela di acqua e cloruro di cadmio letti da Tubi Foto-Moltiplicatore per la rivelazione delle luce.

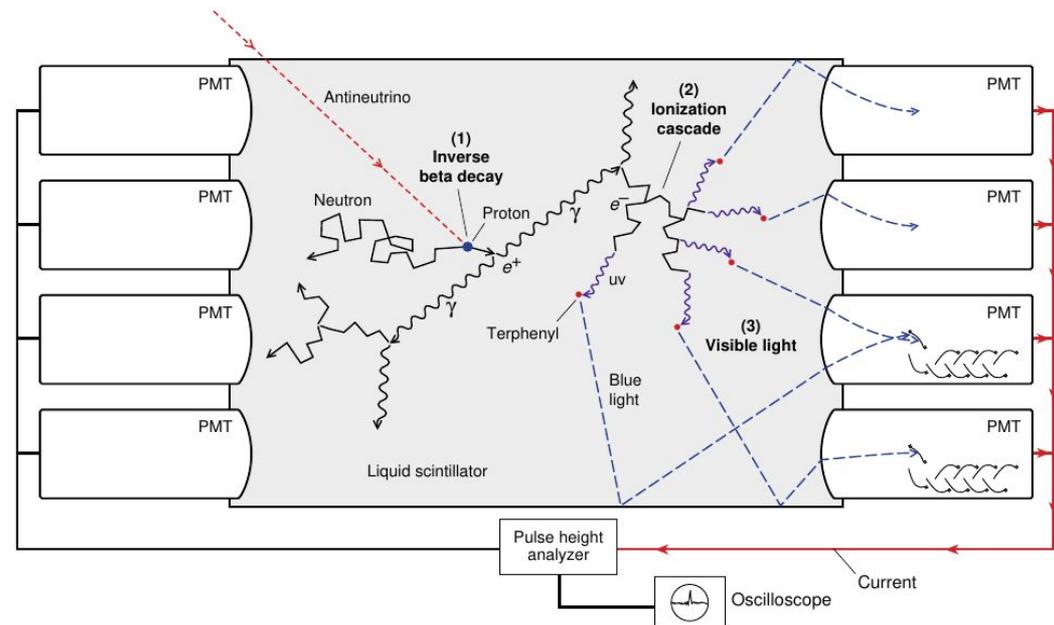
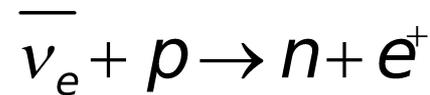


L'esperimento di Reines e Cowan (1956)

- Prima rivelazione: (anti) neutrini prodotti nel reattore di Savannah River.
- Flusso di neutrini 1000 volte inferiore ad una bomba, ma presa dati possibile per mesi o anni...



Metodo delle coincidenze tra il segnale prompt del positrone e il segnale ritardato (qualche μs) prodotto dalla cattura nucleare del neutrone su Cadmio.



L'esperimento di Reines e Cowan (1956)

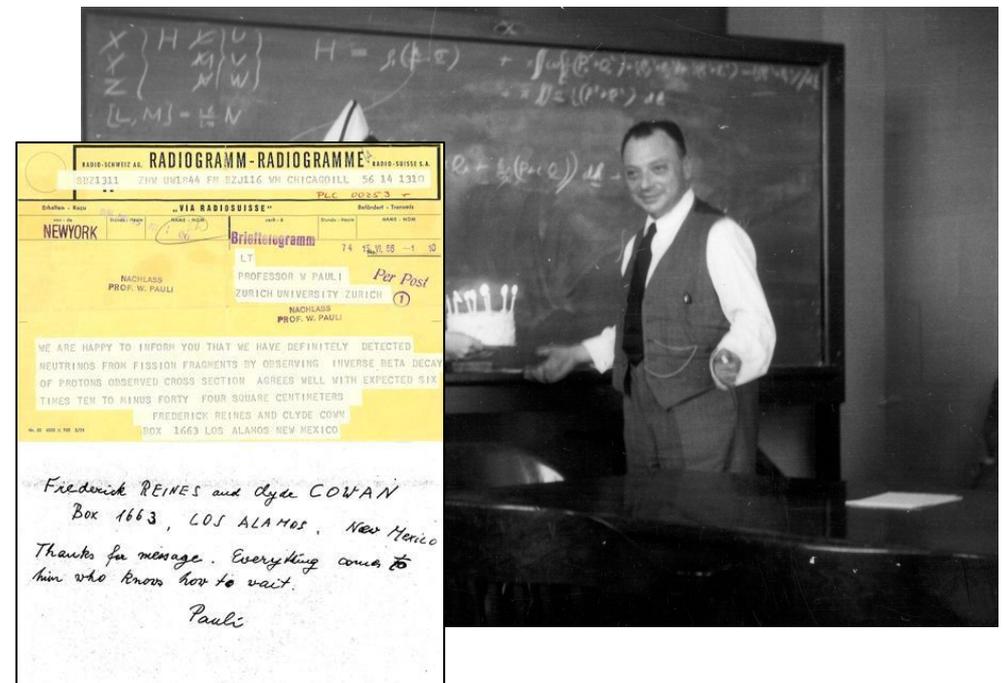


Telegramma a W. Pauli:

“We are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from fission fragments by observing the inverse beta decay of protons... Frederick Reines, Clyde Cowan.”

Risposta di W. Pauli:

“Frederick REINES, and Clyde COWAN, Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico. Thanks for the message. Everything comes to him who knows how to wait. Pauli.”



L'esperimento di Reines e Cowan (1956)



Telegramma a W. Pauli:

“We are happy to inform you that we have definitely detected neutrinos from fission fragments by observing the inverse beta decay of protons... Frederick Reines, Clyde Cowan.”

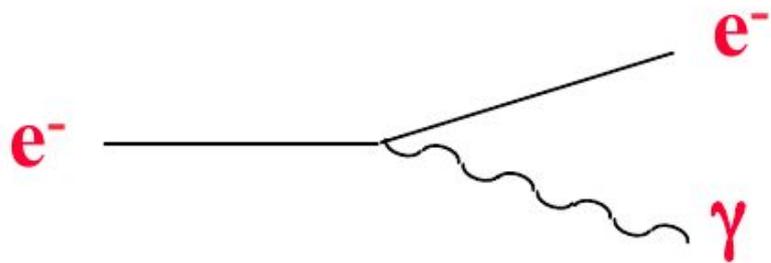
I confronted Bethe with this pronouncement some 20 years later and with his characteristic good humor he said, “Well, you shouldn’t believe everything you read in the papers”.

[Reines, Nobel Lecture 1995]

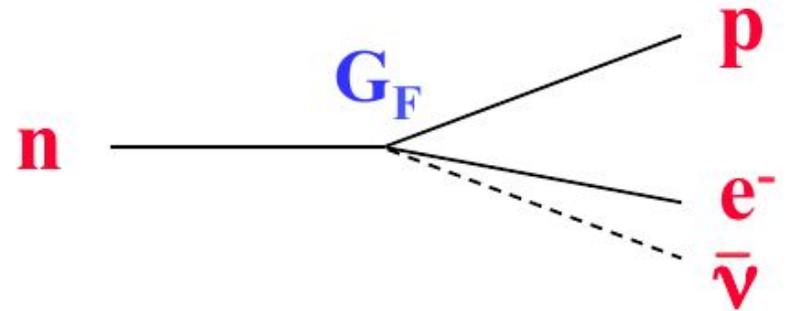
“Tentativo di una teoria di emissione dei raggi β ”

[E. Fermi, *Ricerca Scientifica* 4 (1933) 491]

“Riassunto - Teoria della emissione dei raggi β delle sostanze radioattive, fondata sull'ipotesi che gli elettroni emessi dai nuclei non esistano prima della disintegrazione **ma vengano formati, insieme ad un neutrino**, in modo analogo alla formazione di un quanto di luce che accompagna un salto quantico di un atomo. Confronto della teoria con l'esperienza”



Interazione
Elettro-Magnetica

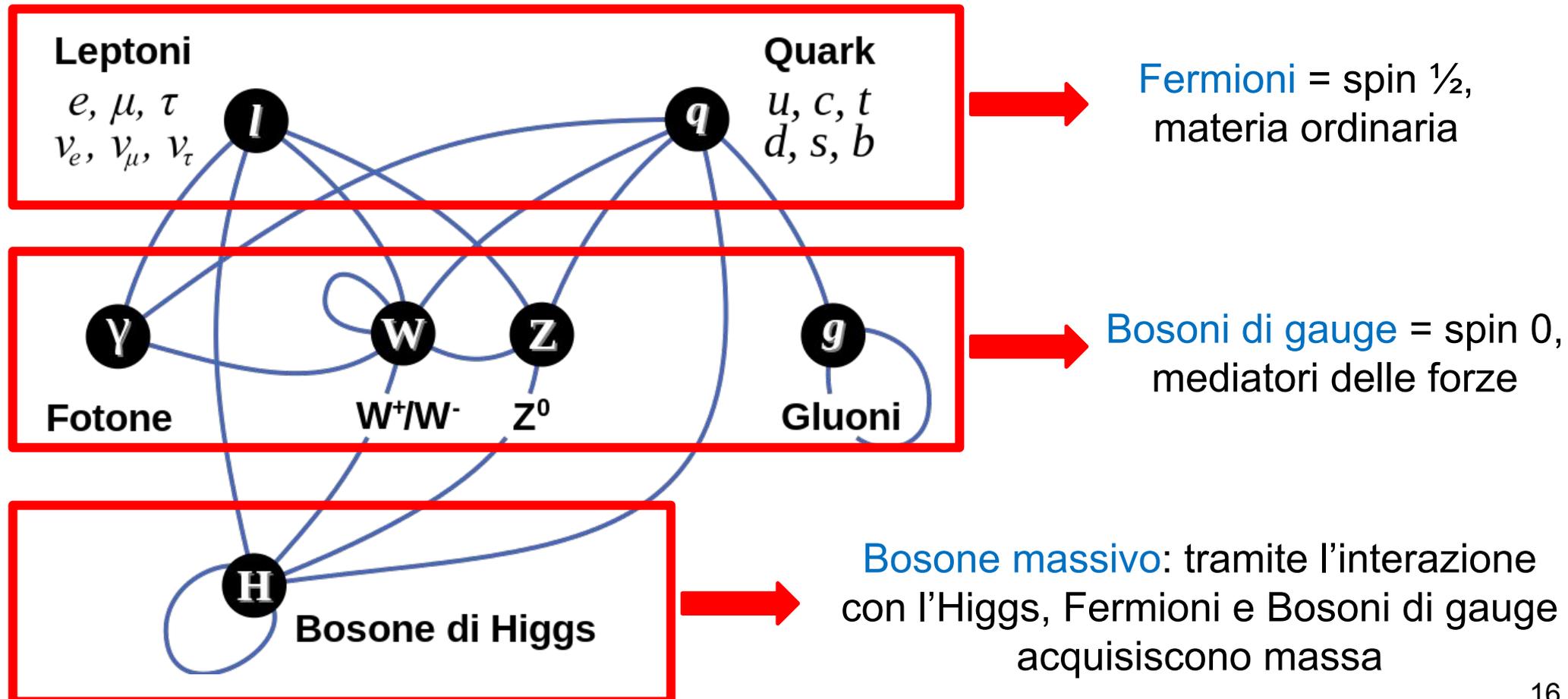


Interazione Debole

con probabilità proporzionale a G_F^2
(\ll interazioni e.m.)

Il modello standard delle particelle elementari

Descrive tre delle quattro interazioni fondamentali: forte, debole ed elettromagnetica.



I neutrini nel modello standard

I neutrini sono leptoni, a loro volta raggruppati in **tre famiglie (o flavours)**

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 ν_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 ν_μ  Carica elettrica: 0 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i muoni.	NEUTRINO TAU ν_τ  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 μ  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 τ  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.

- I neutrini sono i **partner** dell'**elettrone** (ν_e), del **muone** (ν_μ) e del **tau** (ν_τ) nelle interazioni elettrodeboli di corrente carica.
- Sono **particelle elementari stabili** di **massa nulla** ($m_\nu = 0$).
- **Interagiscono** con la materia **solo debolmente**.

I neutrini nel modello standard

Il neutrino può avere interazioni di **Corrente Neutra** con la materia (la carica leptonica si conserva)

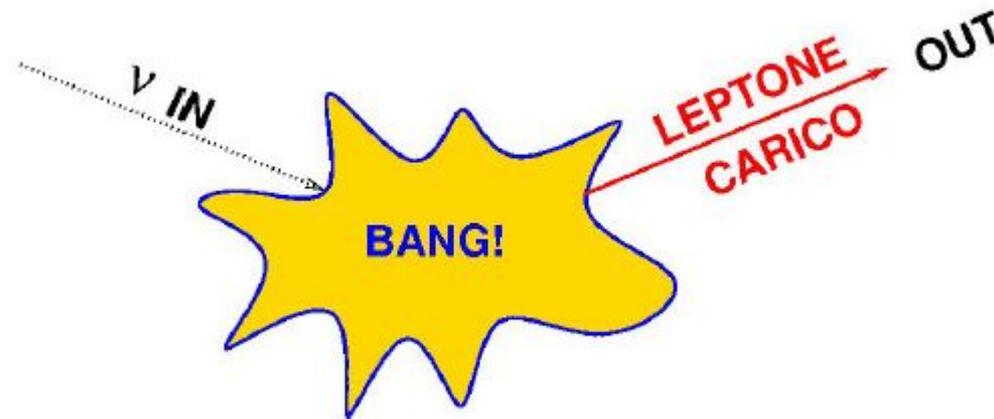


I neutrini nel modello standard

Il neutrino può avere interazioni di **Corrente Neutra** con la materia (la carica leptonica si conserva)



Ma può avere anche interazione di Corrente Carica...

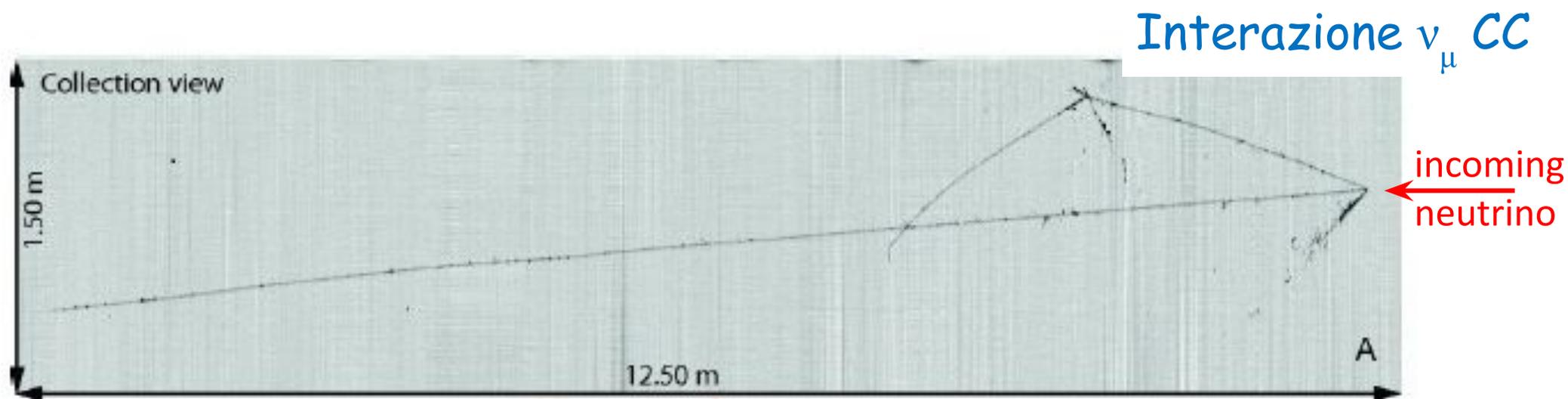
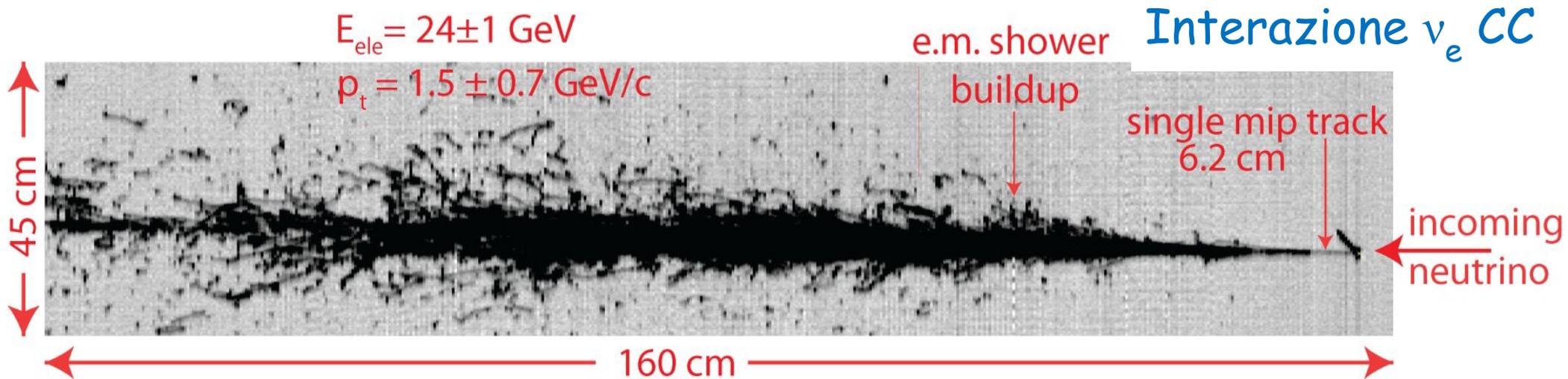


...e nella reazione emerge un leptone carico:

$\nu_e \rightarrow$ elettrone, $\nu_\mu \rightarrow$ muone, $\nu_\tau \rightarrow$ tau

(manifestazione della **conservazione del numero leptonico di flavour**)

I neutrini nel modello standard



Due eventi di interazione di neutrino da fascio CNGS in ICARUS al Gran Sasso (2010-2012)

... e dove trovarli!



... e dove trovarli!



(o come i fisici sperimentali si ingegnano per trovare particelle che non possono essere rivelate...)

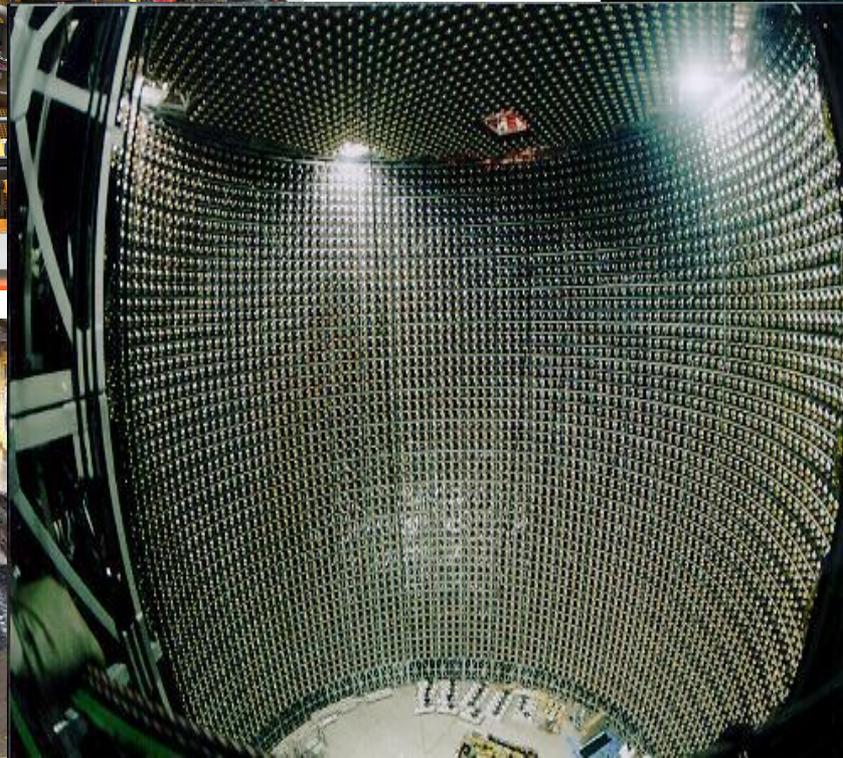
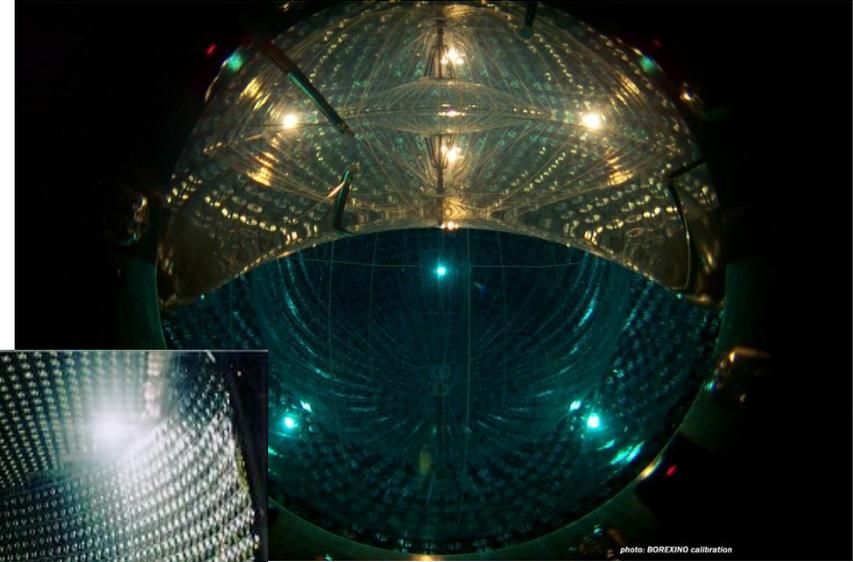
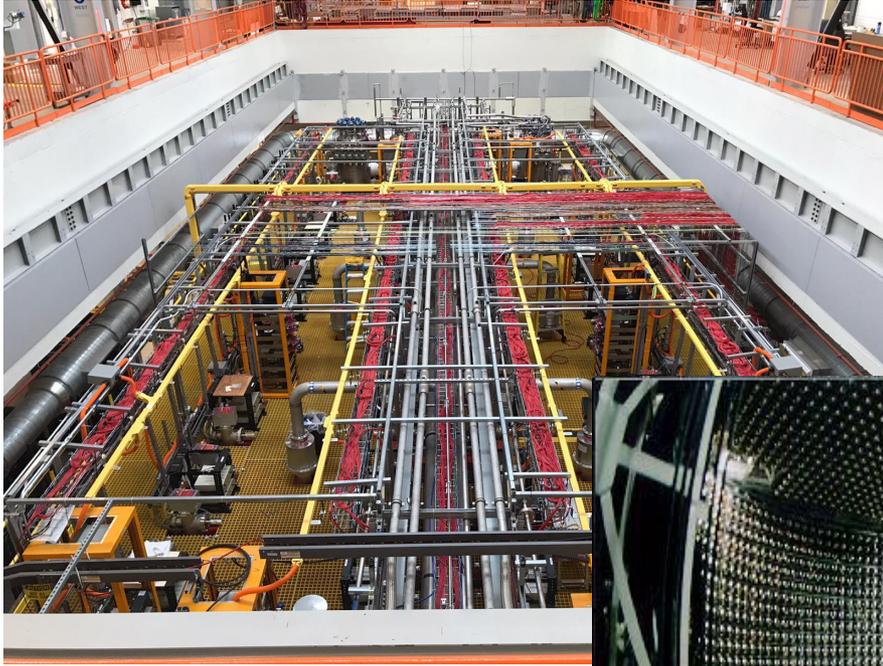
Come NON si rivelano i neutrini!

Dal film «2012» di R. Emmerich (2009)



For the first time ever, the neutrinos are causing a physical reaction!

Come si rivelano i neutrini?



Perché il neutrino è difficile da rivelare?

Perché non ha carica elettrica

Quindi non ha la proprietà di eccitare/ionizzare la materia attraversata e manifestarsi nei rivelatori di particelle.

Perché non ha "accoppiamento" con la carica elettrica

come nel caso del fotone (e nemmeno con la carica forte di colore)

“Sente” solo l’interazione debole

l’interazione elettromagnetica è 10^{11} volte più intensa dell’interazione debole!

Perché il neutrino è difficile da rivelare?

Perché non ha carica elettrica

Quindi non ha la proprietà di eccitare/ionizzare la materia attraversata e manifestarsi nei rivelatori di particelle.

Perché non ha "accoppiamento" con la carica elettrica

come nel caso del fotone (e nemmeno con la carica forte di colore)

“Sente” solo l’interazione debole

l’interazione elettromagnetica è 10^{11} volte più intensa dell’interazione debole!



$$\sigma \approx 10^{-44} \text{ cm}^2 \quad \text{for} \quad E(\bar{\nu}) = 2 \text{ MeV}$$

1600 anni luce!

-> il percorso libero medio di un neutrino in acqua è $\lambda = \frac{1}{n\sigma} \approx 1.5 \times 10^{21} \text{ cm}$

Ingredienti per rivelare i neutrini

Probabilità di interazione con la materia bassa

rivelatori di grande massa $O(1\div 100 \text{ kton})$ e sorgenti intense di neutrini.

Eventi da cercare all'interno di un fondo di radiazione cosmica

rivelatori schermati con veto attivo o passivo oppure installati in laboratori sotterranei.

Identificazione dei parametri fondamentali

tipo, energia, direzione del neutrino.

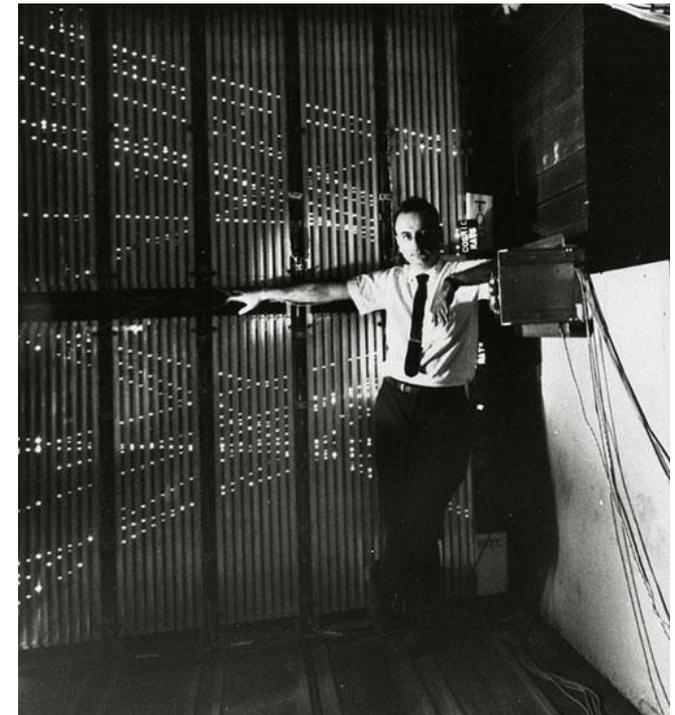
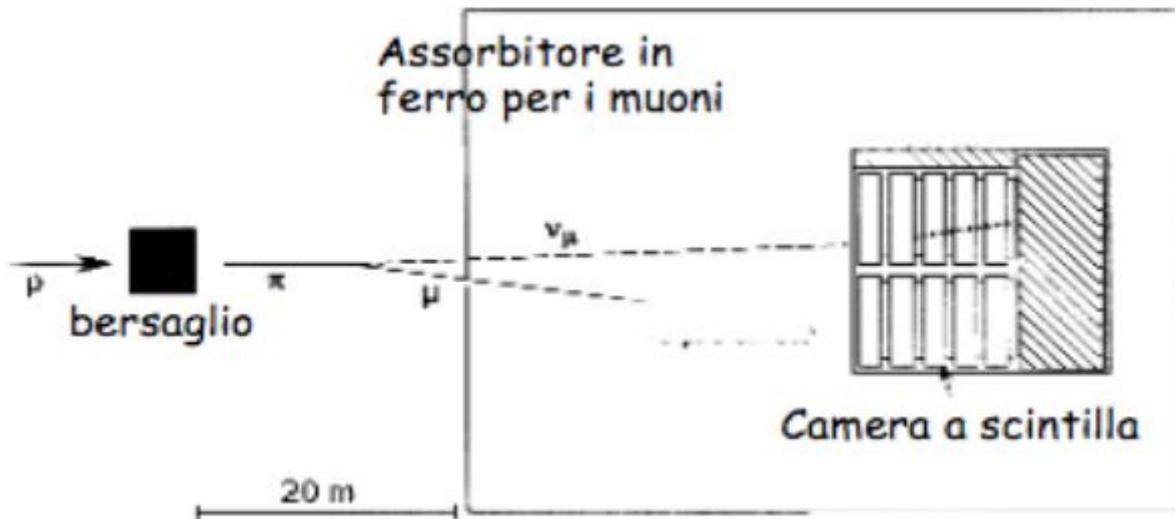
Diverse tecniche sperimentali

Bubble Chambers, Spark Chambers, Calorimetri a sampling, Ring Water Cerenkov, scintillatori liquidi, TPC ad argon liquido, emulsioni nucleari...

Il secondo neutrino ν_{μ} : spark chambers

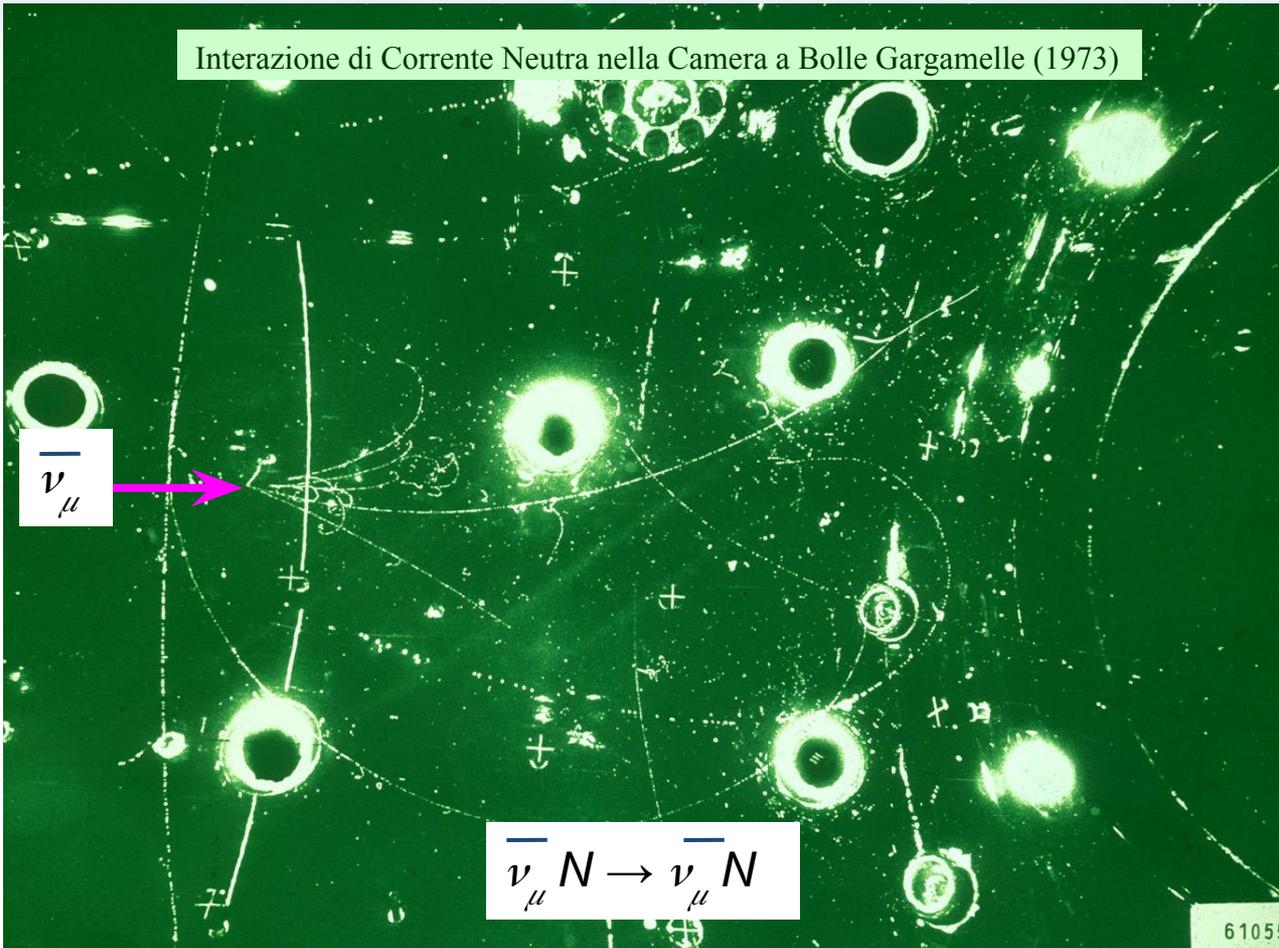


- Rivelazione del neutrino muonico nel 1962 (Lederman, Schwartz, Steinberger): primo utilizzo di un fascio di neutrini prodotto all'acceleratore AGS a Brookhaven (Premio Nobel 1988).
- Il rivelatore era costituito da una spark chamber riempita di neon. Interazione del neutrino su piani di alluminio e sparks, prodotte dal passaggio del muone CC nel gas, che venivano fotografate!

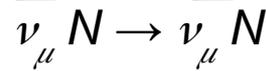


Correnti deboli neutre: le camere a bolle

Interazione di Corrente Neutra nella Camera a Bolle Gargamelle (1973)



$\bar{\nu}_\mu$



61055

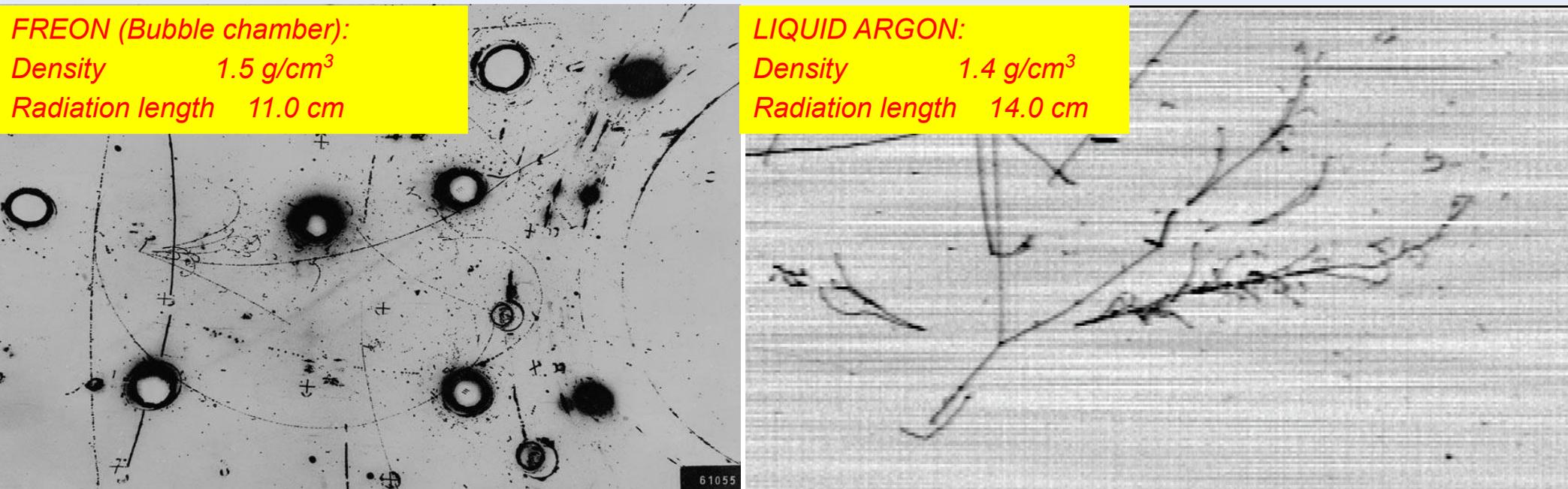
- Alta densità del freon (1.5 g/cm^3)
- Elevata risoluzione spaziale (1 mm)
- Ricostruzione 3D degli eventi
- Campo magnetico per misure del momento delle particelle.



Gargamelle

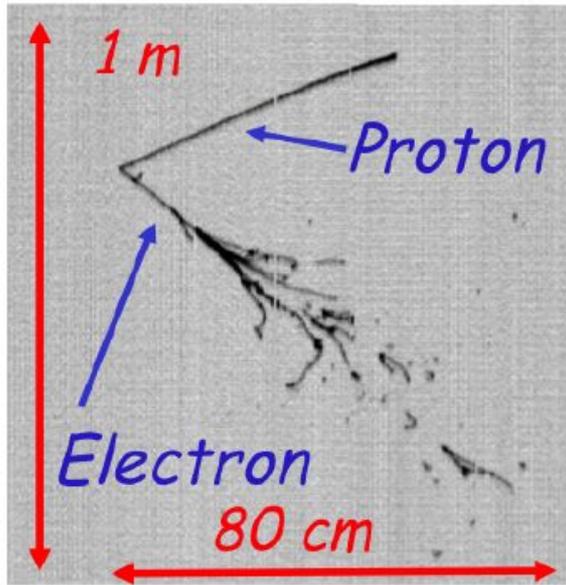
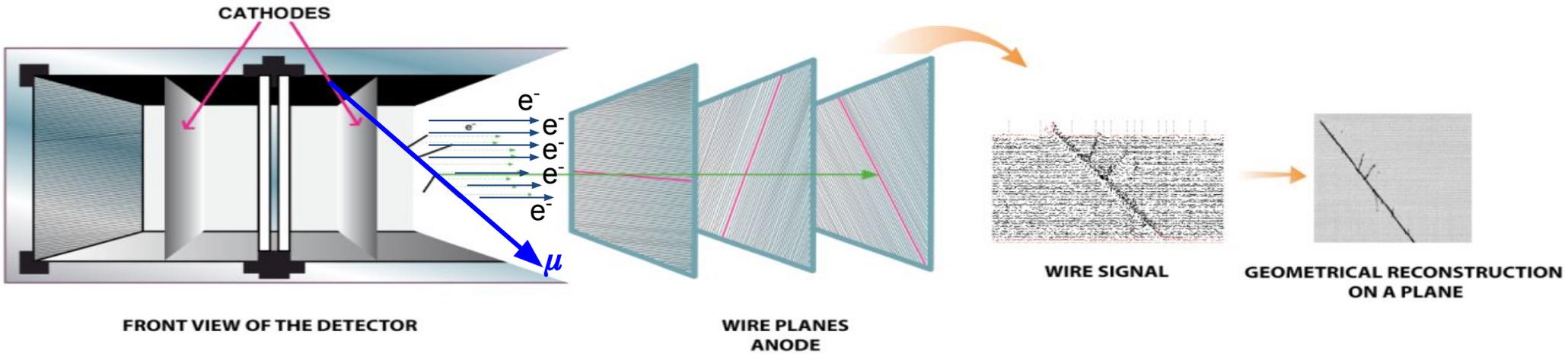
- Gas liquefatto tenuto quasi al punto di ebollizione. Prima del passaggio del neutrino, il volume della camera viene espanso producendo una riduzione di pressione e quindi portando il liquido al di sopra della temperatura di ebollizione.
- Gli ioni positivi prodotti al passaggio di una particella carica agiscono da centri di formazione per le bolle, producendo una traccia che può essere fotografata.

TPC ad argon liquido: camere a bolle “elettroniche”

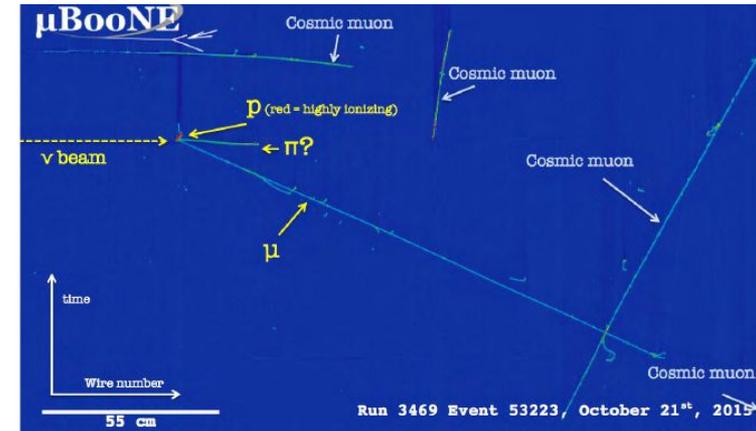
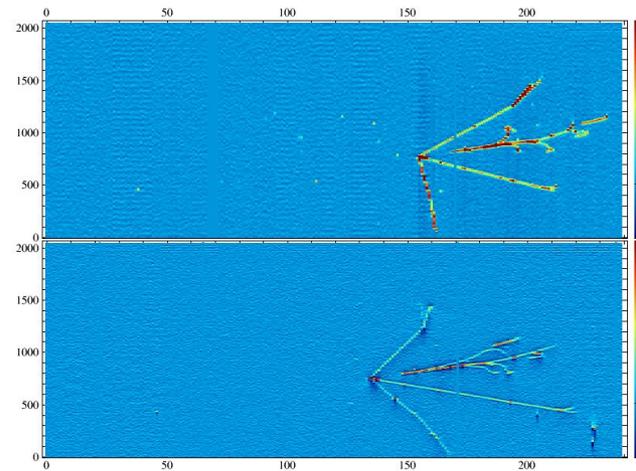


- Combina le caratteristiche delle camere a bolle con i vantaggi del read-out elettronico continuo del segnale, tipico delle Time Projection Chambers (TPC), evitando i tempi morti delle camere a bolle.
- Grosso dispositivo criogenico (un dewar), riempito con argon liquido che agisce sia come bersaglio per le particelle sia come rivelatore tramite i processi di ionizzazione e scintillazione.
- Proposta per la prima volta da C. Rubbia (1977) con R&D condotto al CERN e nell'INFN (principalmente a Pavia dagli anni '90). Dai primi prototipi da qualche tonnellata si arriva al rivelatore ICARUS T600, costruito a Pavia vent'anni fa, con ~ 500 tonnellate di LAr-TPC. 30

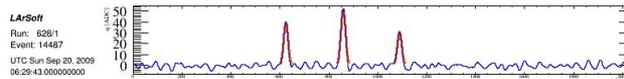
TPC ad argon liquido



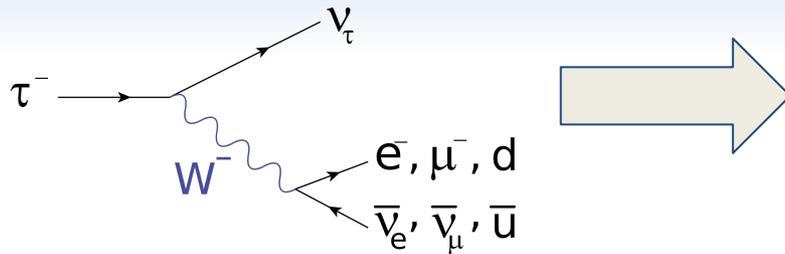
Argoneut@FNAL (2012): ν_μ CC from beam



ICARUS@LNGS (2012): ν_e CC atmospheric neutrino

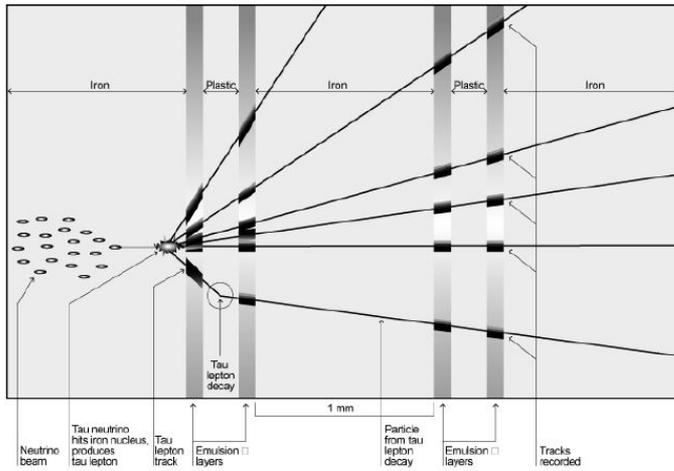


...e infine il terzo neutrino, ν_τ : le emulsioni nucleari



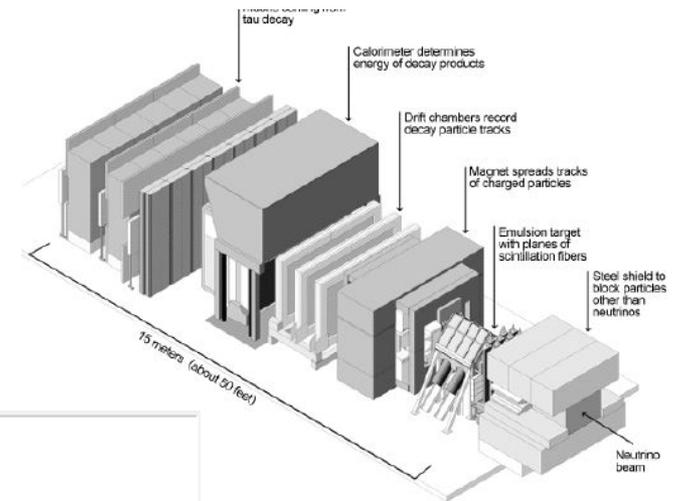
- Neutrini di alta energia per superare la soglia di produzione del leptone tau ($m_\tau = 1.8 \text{ GeV}/c^2$).
- Range brevissimo O(mm).

Detecting a Tau Neutrino

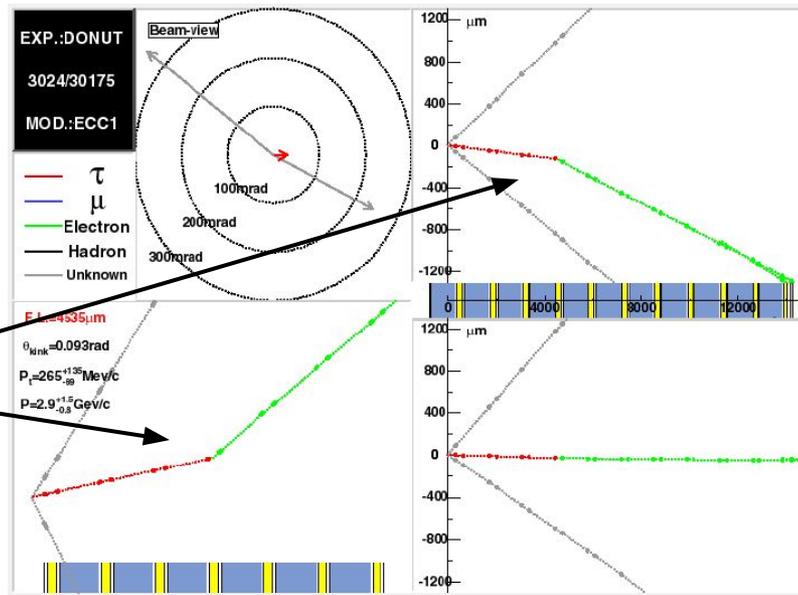


Of one million million tau neutrinos crossing the DONUT detector, scientists expect about one to interact with an iron nucleus.

DONUT Detector (2000)

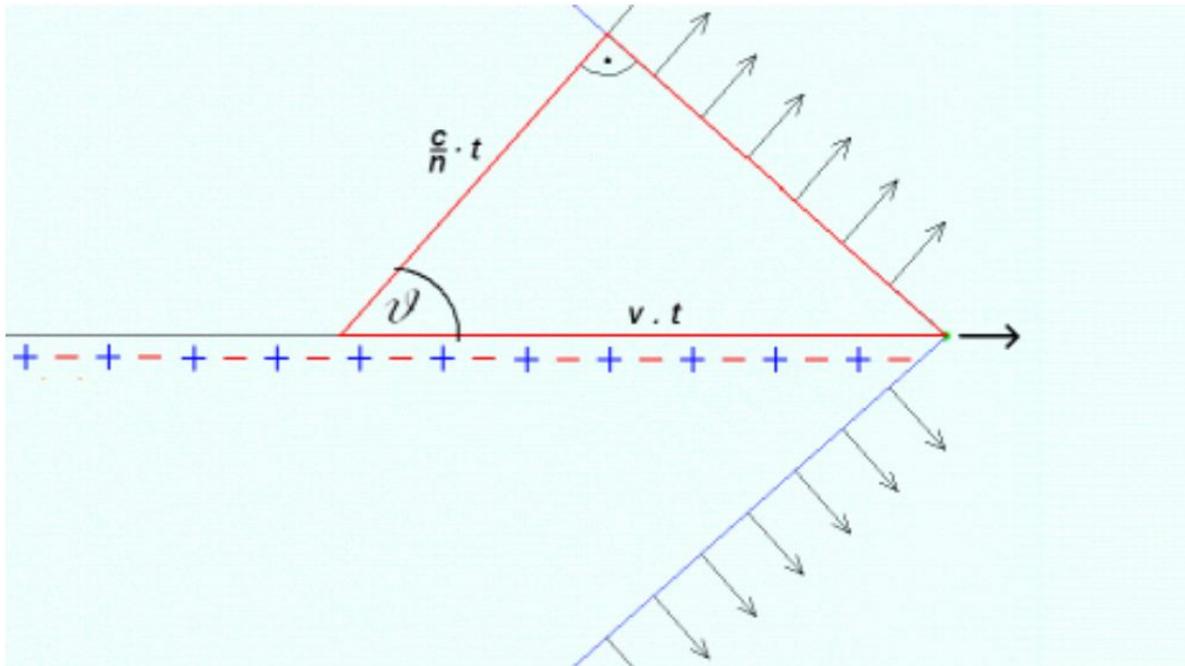


“kink” del decadimento del leptone tau



I rivelatori Ring Water Cherenkov

- In un mezzo con un indice di rifrazione n la velocità della luce è c/n .
- Quando una particella carica attraversa il mezzo con velocità superiore a quella della luce, viene emessa luce Cherenkov:



Cono di semiapertura:

$$\cos \theta = \frac{1}{n \beta}$$

In acqua, per $\beta = 1$, $\theta = 42^\circ$

- Particelle più leggere emettono luce Cherenkov ad energie più basse rispetto a particelle più pesanti → tecniche di discriminazione del tipo di particella utilizzando soglie in energia.

I rivelatori Ring Water Cherenkov

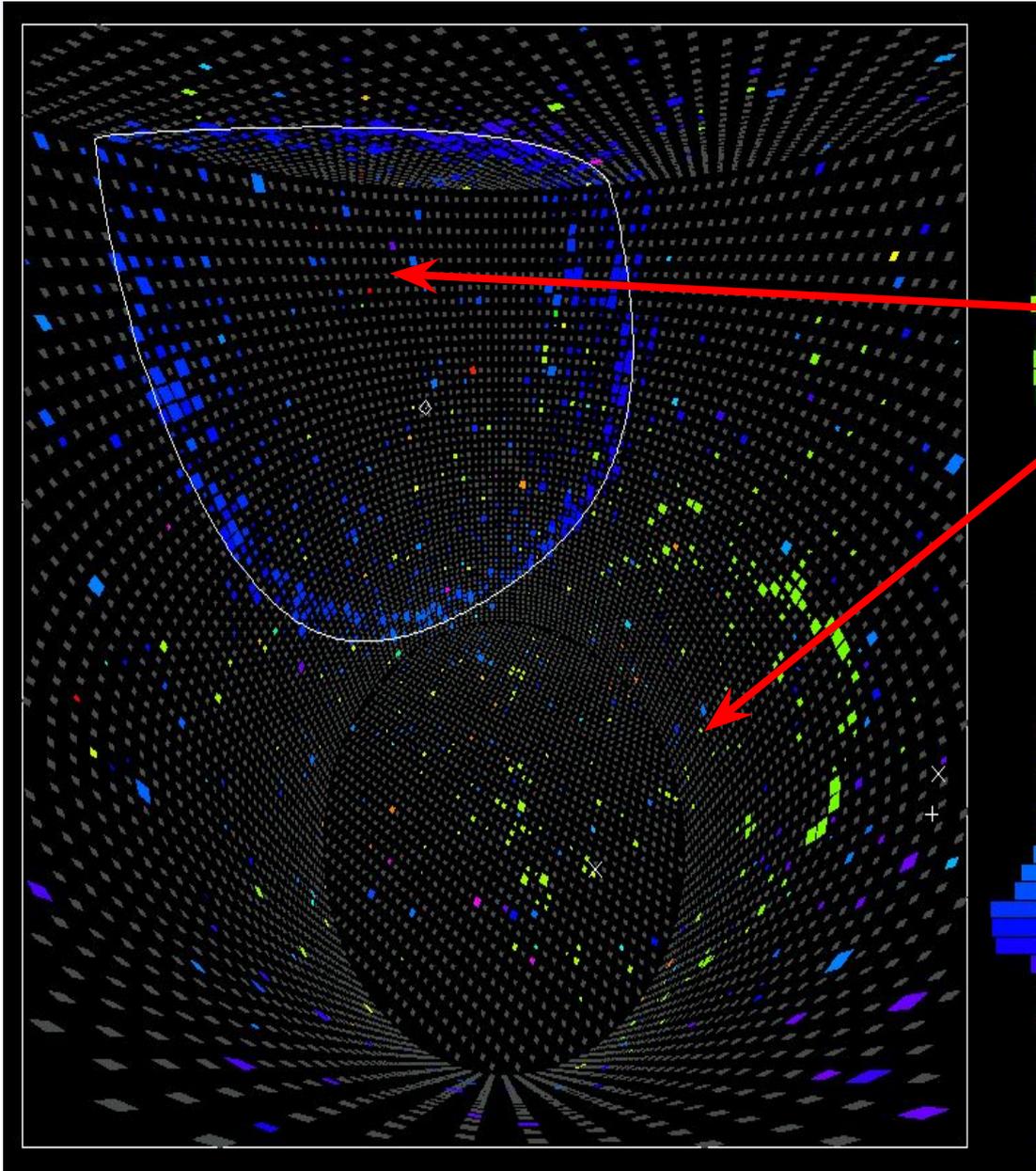
Esempio: interazione $\nu_{\mu} CC$

Si notano:

in blu l'anello prodotto dal muone CC.

in verde l'anello prodotto dall'elettrone del decadimento leptonic del muone.

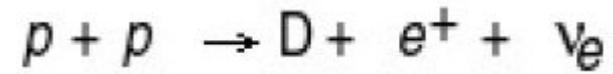
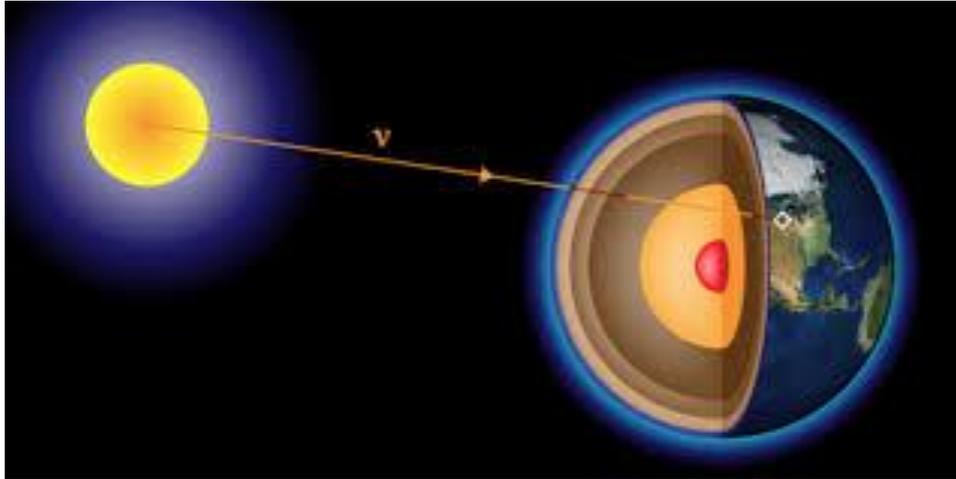
- Il colore corrisponde al tempo di arrivo della luce Cherenkov su ciascun foto-rivelatore.
- La dimensione del pixel è **proporzionale alla quantità di luce rivelata**.
- Il flavour del neutrino si determina dal flavour del leptone carico prodotto attraverso la misura della **nitidezza dell'anello**.



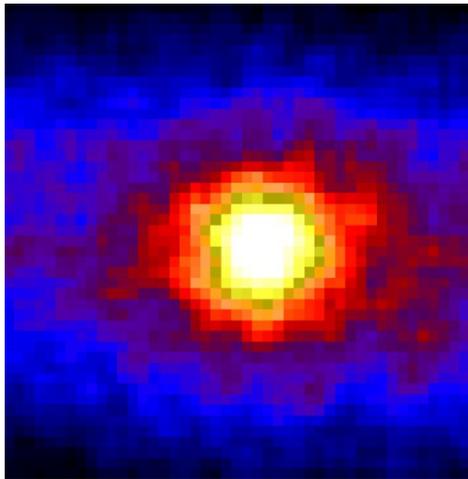
Neutrini che oscillano...



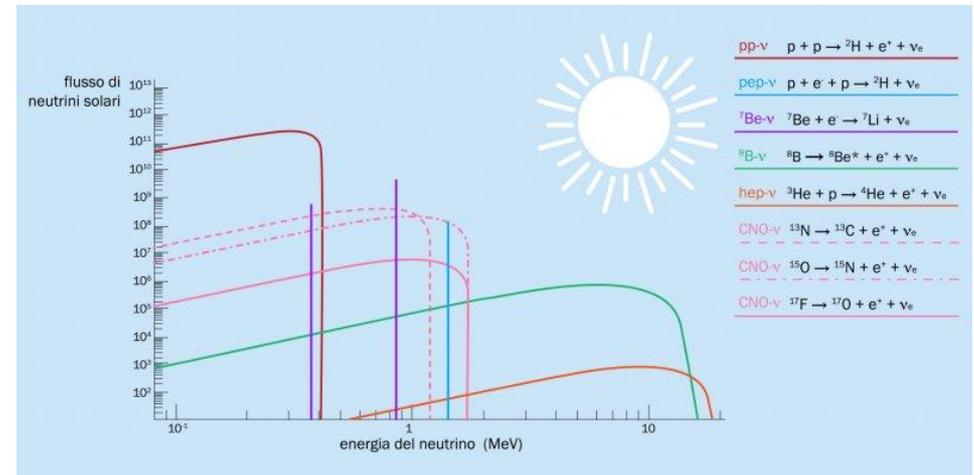
...e dove trovarli: neutrini solari



Energia: $O(10 \text{ MeV})$
Distanza: $O(10^8 \text{ Km})$



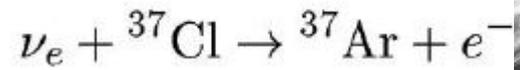
Il Sole visto coi neutrini: l'origine del segnale solare è dimostrata dalla correlazione angolare tra le direzioni del neutrino incidente e dell'elettrone di rinculo.



Flusso sulla Terra $\sim 6.4 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$

Il puzzle dei neutrini solari

Homestake, fine degli anni '60...



Esperimento "radiochimico": si estraggono e si contano periodicamente gli atomi di ${}^{37}\text{Ar}$

John Bahcall

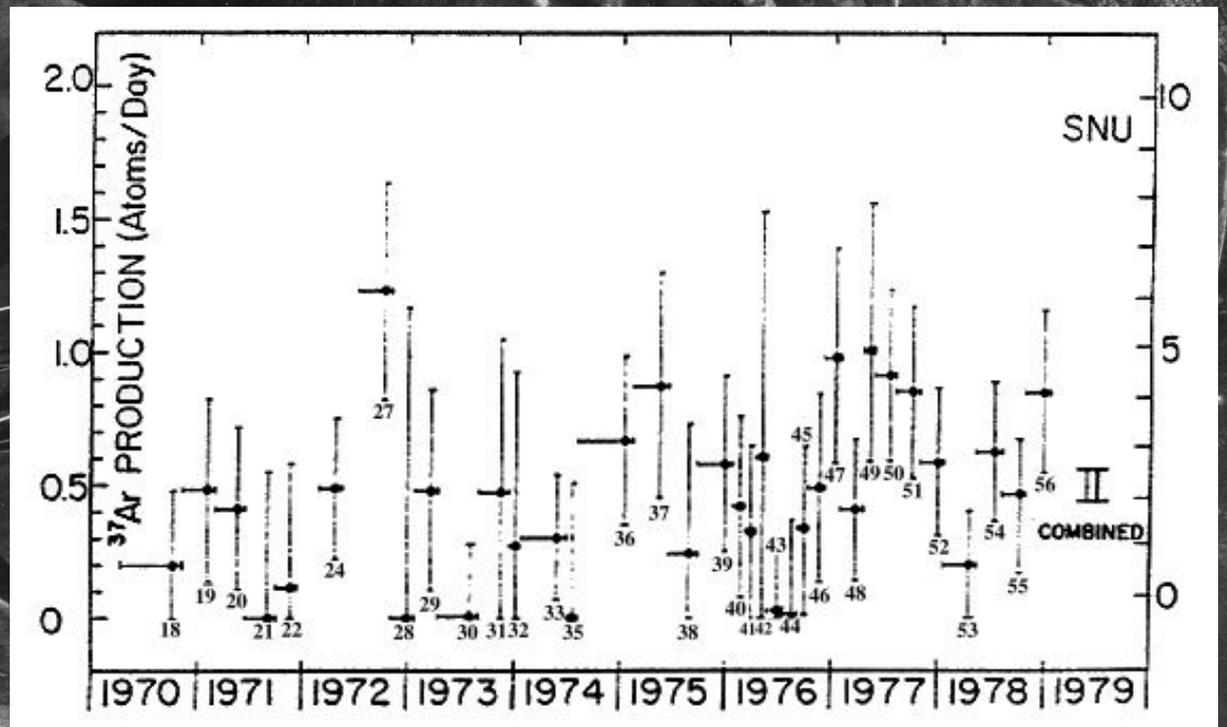
Raymond Davis

Il puzzle dei neutrini solari

Misurati: $2.56 \pm 0.16(\text{sys}) \pm 0.16(\text{stat})$ SNU

Predetti (Bahcall): 9.3 ± 1.3 SNU

Rivelati solo un terzo dei neutrini solari previsti nel Modello Solare Standard!

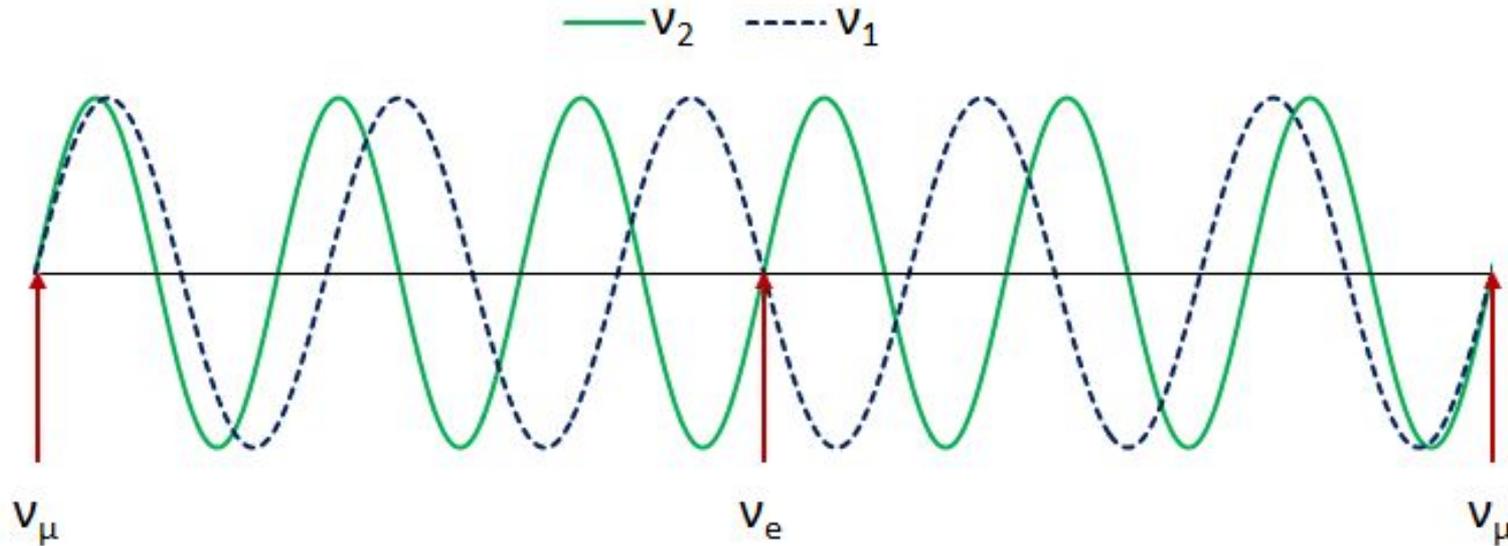


Oscillazioni di neutrini?

Già nel 1957 Bruno Pontecorvo aveva proposto il meccanismo delle **oscillazioni di neutrini...**



Oscillazione a due flavor



$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\vartheta & -\sin\vartheta \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

- L è misurato in metri (Km)
- E è misurata in MeV (GeV)

$$\mathcal{P}(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27\Delta m^2 \boxed{L/2E}) \quad \longrightarrow \quad \text{Rapporto } L/E \text{ legato alla sensibilità in } \Delta m^2$$

- L'osservazione delle oscillazioni di neutrini avviene se i neutrini hanno massa → evidenza di fisica al di là del Modello Standard.

Neutrino mixing



$$|\nu_a^{\text{fl}}\rangle = \sum_i U_{ai}^* |\nu_i^{\text{mass}}\rangle \Rightarrow \sum_i U_{ai}^* e^{-i\phi_i} |\nu_i^{\text{mass}}\rangle,$$

$$\phi_i = E_i t - p_i x$$

□ Pacchetti d'onda che si propagano con fasi differenti.

□ Per neutrini ultra-relativistici si dimostra che:

$$\Delta\phi = \frac{\Delta m^2}{2p} t$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{+i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

□ Gli elementi della matrice \mathbf{U} sono legati all'ampiezza dell'oscillazione.

.... e dove trovarli: neutrini atmosferici

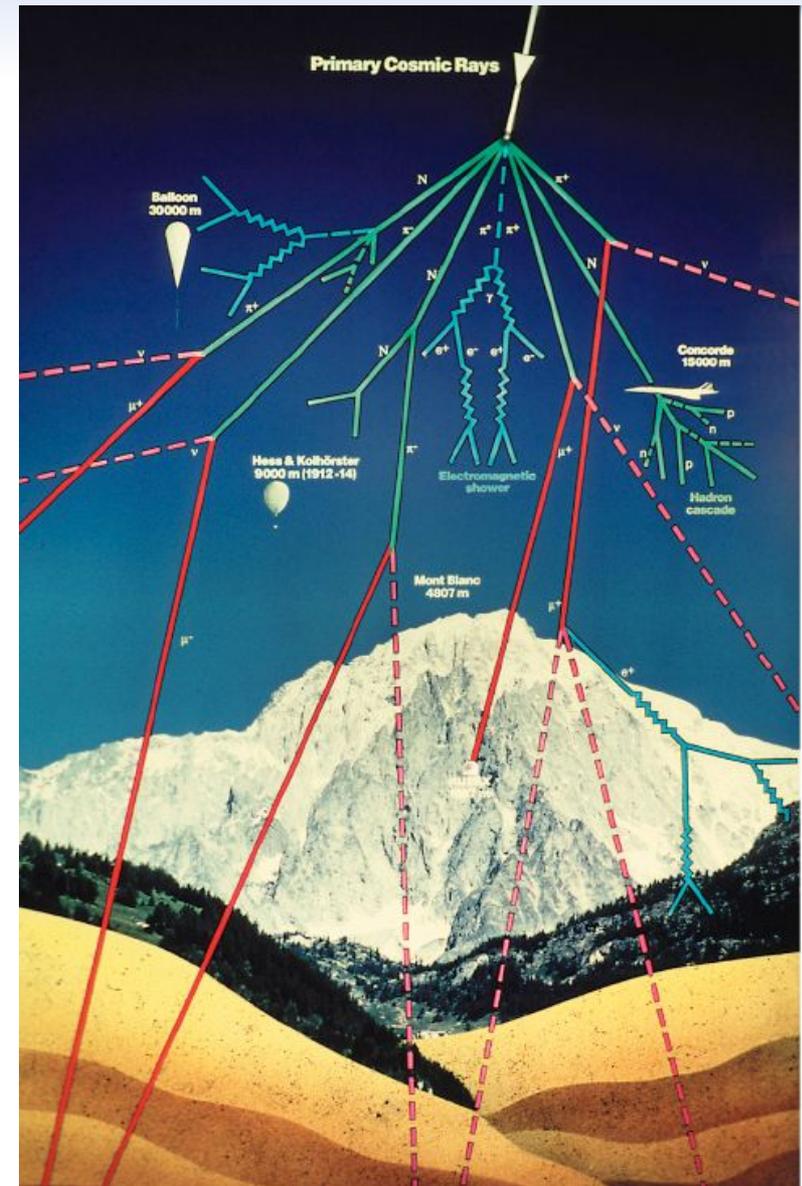
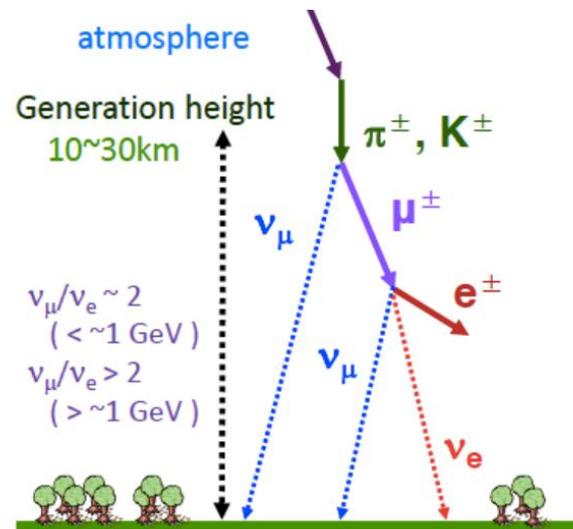
Energia: O(GeV)

Cammino: O(10 Km-10⁴ km)

$$R = \nu_{\mu} / \nu_e$$

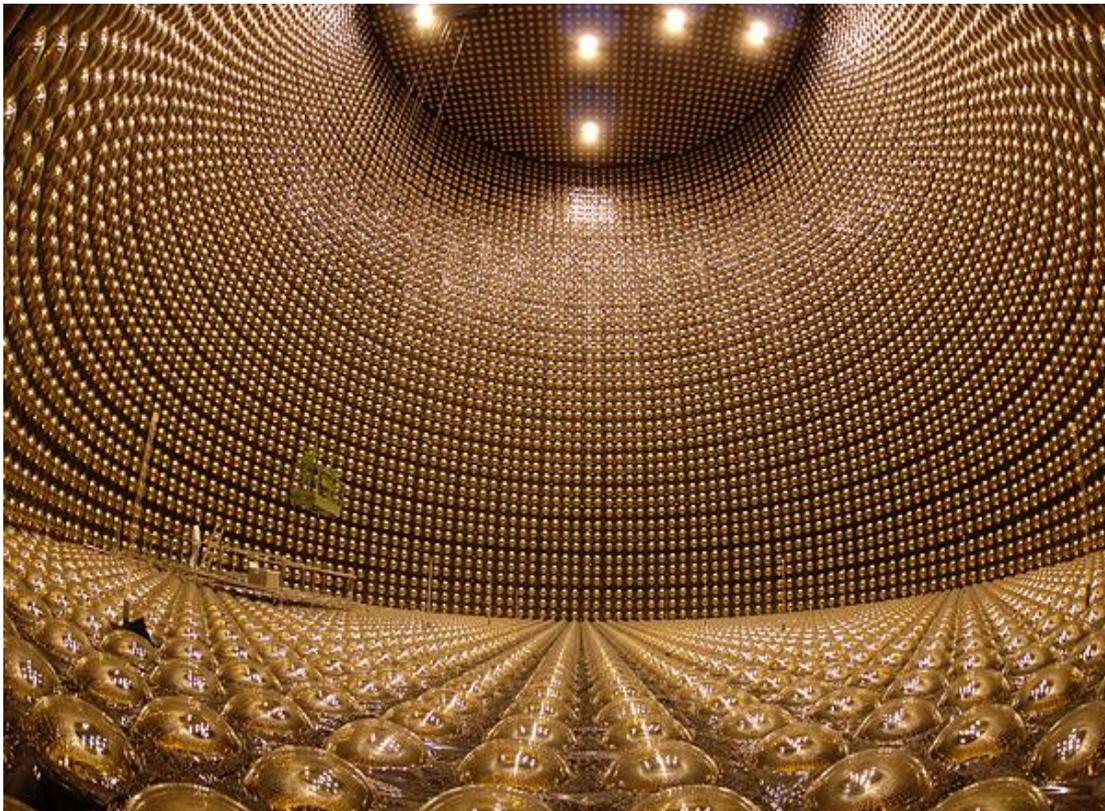


Un rapporto $R \neq 2$ misurato in un rivelatore prossimo alla superficie terrestre è segnale di scomparsa di almeno una specie di neutrino.



Super Kamiokande

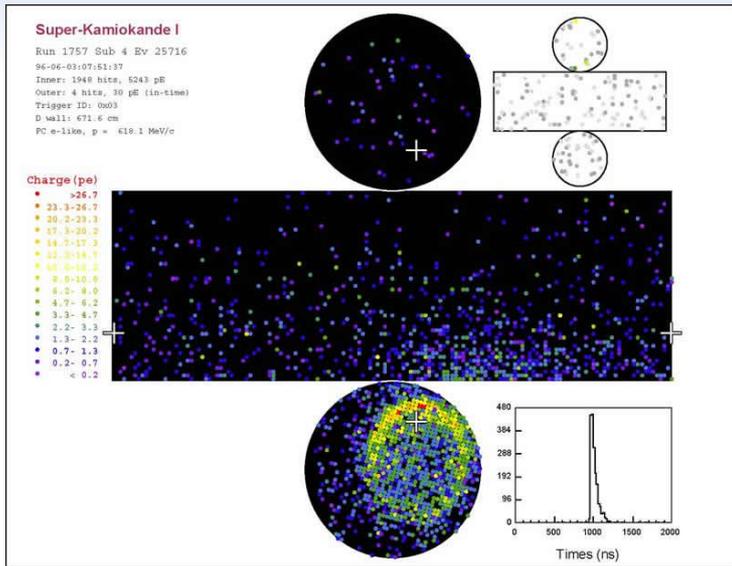
- Ring Water Cherenkov – Miniera di Kamioka (Giappone) – 1000 m sottoterra.
- Struttura cilindrica circa 40 m di diametro e 40 m di altezza.
- 50,000 tonnellate di acqua ultra-pura.
- 11.146 foto-rivelatori: Tubi Foto-Moltiplicatori (PMTs) del diametro di 20".
- Altri 1885 PMTs utilizzati per il veto.



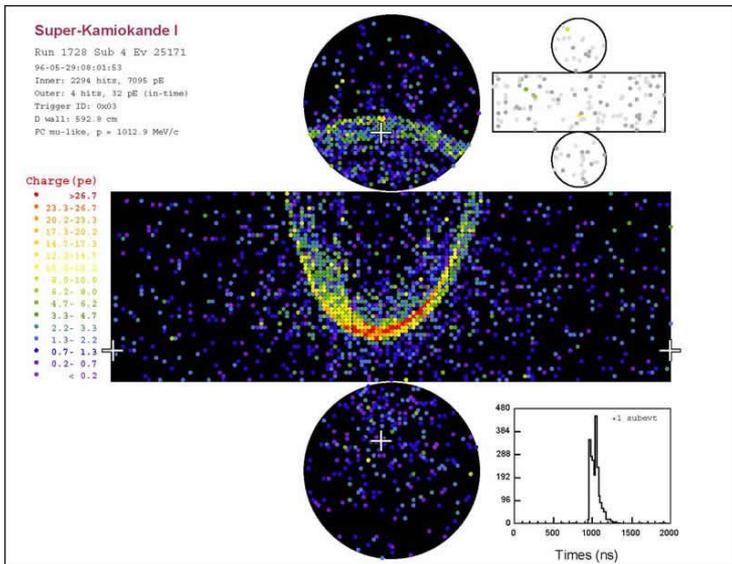
In funzione dal 1996!

- Neutrini atmosferici
 - Neutrini solari
 - Neutrini da SuperNova
 - Neutrini da acceleratori
 - Decadimento del protone
-
- $L/E \sim 10^5 \text{ Km/1 GeV} \rightarrow$
sensibilità fino a $\Delta m^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$

Super Kamiokande

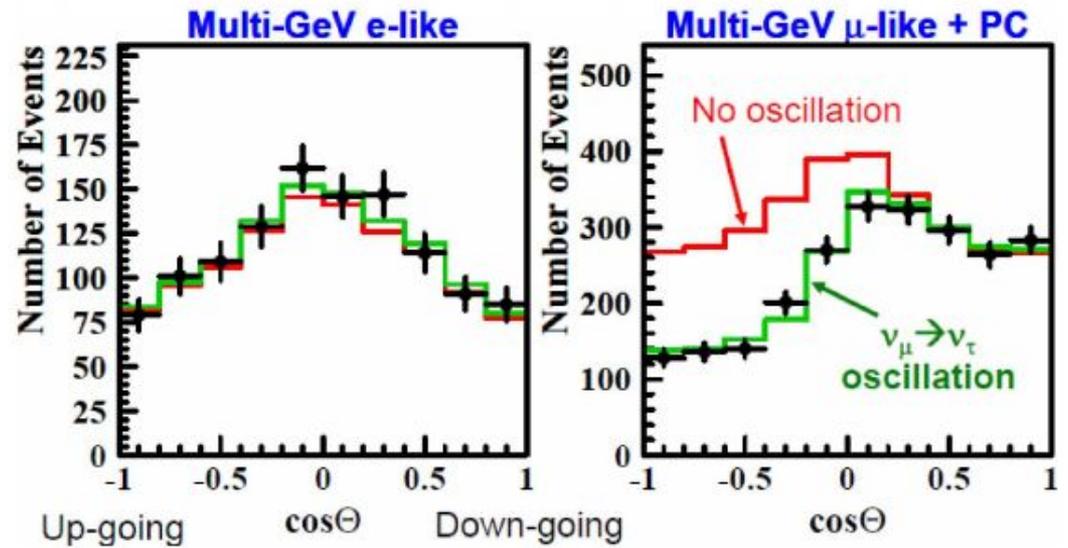


Evento di neutrino ν_e CC



Evento di neutrino ν_μ CC

L'asimmetria tra il numero di interazioni di neutrini atmosferici provenienti dall'alto (15 km) e dal basso (13,000 Km) è il segnale che i neutrini (muonici) provenienti dal basso sono oscillati:

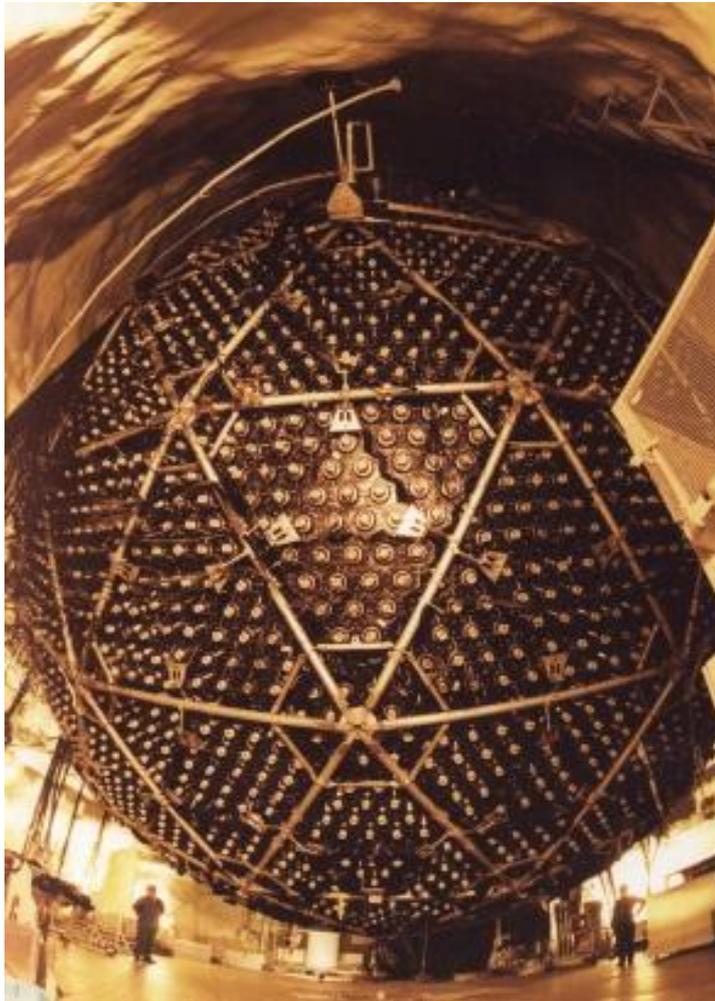


ν_e non cambia

ν_μ cambia

Sudbury Neutrino Oscillation (SNO)

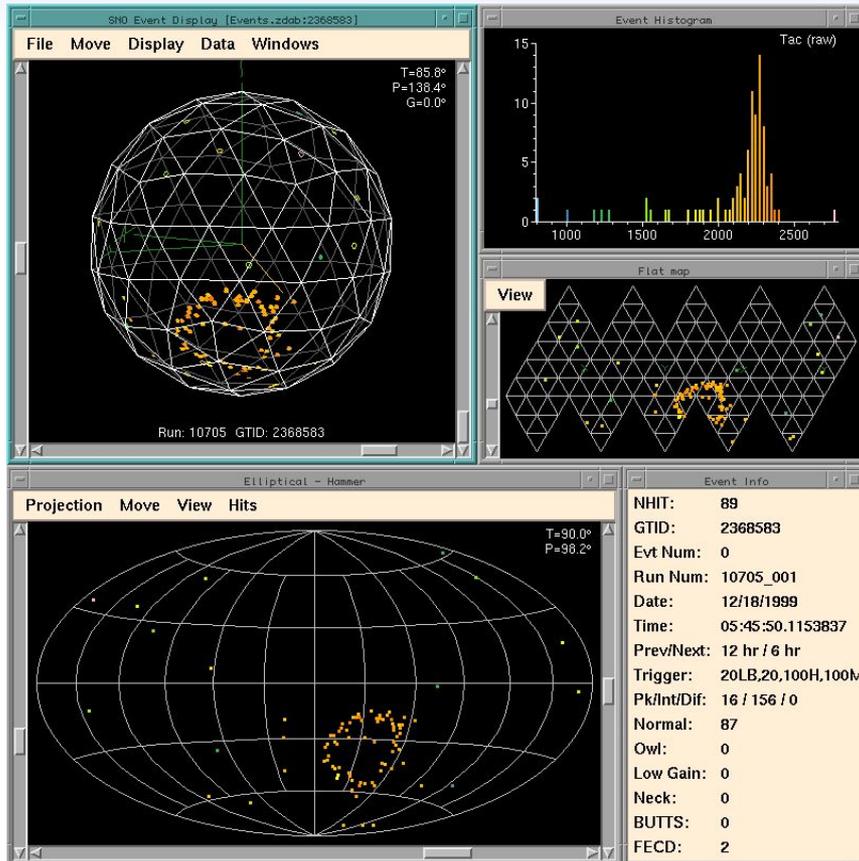
- Ring Water Cherenkov – Creighton Mine (Sudbury, Canada) – 2100 m sottoterra.
- Struttura sferica di 6 metri di raggio.
- 1,000 tonnellate di acqua pesante (D_2O).
- 9,456 foto-rivelatori: Tubi Foto-Moltiplicatori (PMTs) del diametro di 8".



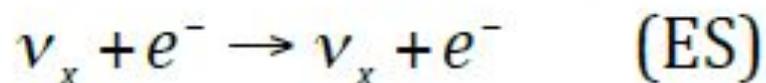
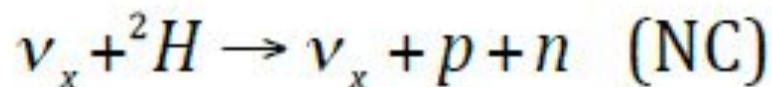
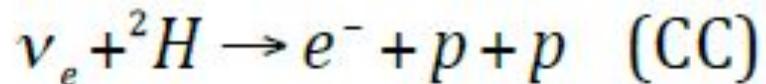
In funzione dal 1999 al 2006

- Neutrini solari (del 8B)
- Neutrini da Super Nova
- $L/E \sim 10^{11} \text{ m}/10 \text{ MeV} \rightarrow$ sensibilità fino a $\Delta m^2 \sim 10^{-10} \text{ eV}^2$

Sudbury Neutrino Oscillation (SNO)

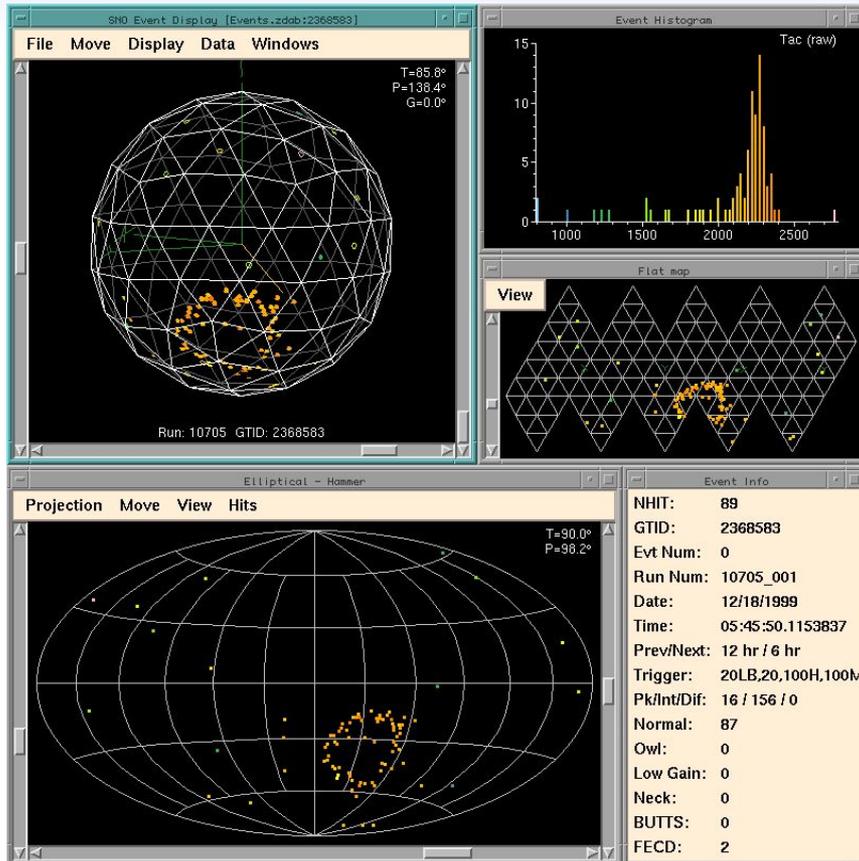


- Capace di rivelare tre diversi tipi di reazioni:
- ν_{CC} : dovuta **solo a ν_e** perchè i neutrini solari hanno un'energia inferiore alla soglia produzione della massa di muoni e tau.
- ν_{NC} : **tutti e tre i flavours contribuiscono con la stessa probabilità**. Questa misura quindi ci dà il flusso totale dei neutrini solari.
- Scattering elastico ν -elettrone: **tutti e tre i neutrini contribuiscono** tramite lo scambio di un bosone Z, ma il **ν_e contribuisce anche tramite scambio del bosone W^+** (sezione d'urto ν_e è circa sei volte maggiore).



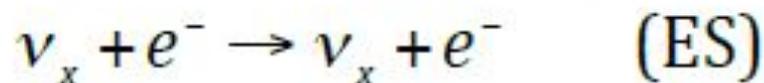
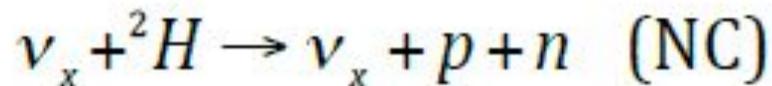
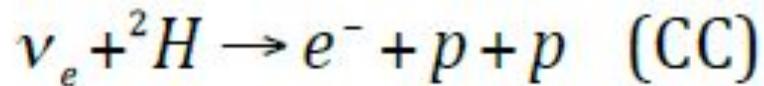
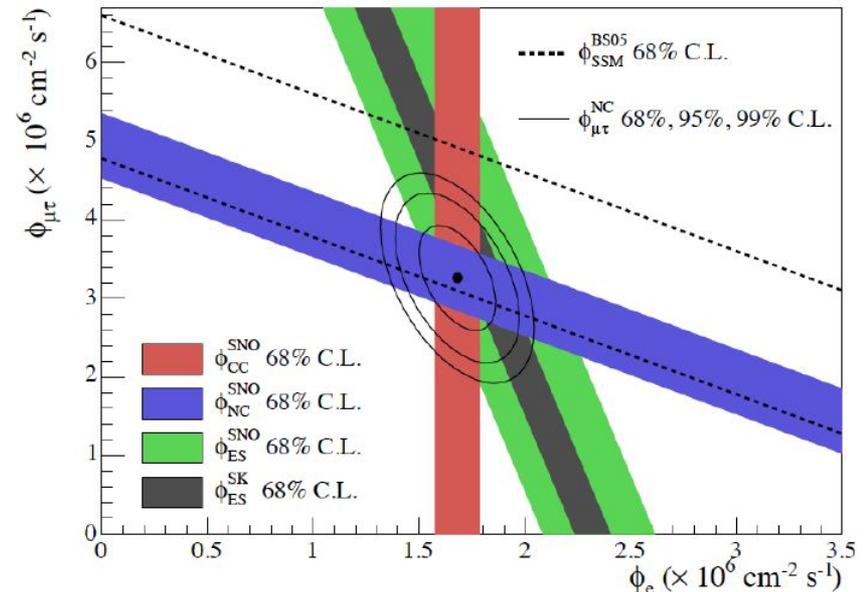
Ridondanza di informazioni!

Sudbury Neutrino Oscillation (SNO)



$$\phi_e = 1.76_{-0.05}^{+0.05}(\text{stat})_{-0.09}^{+0.09}(\text{syst}),$$

$$\phi_{\mu\tau} = 3.41_{-0.45}^{+0.45}(\text{stat})_{-0.45}^{+0.48}(\text{syst}),$$

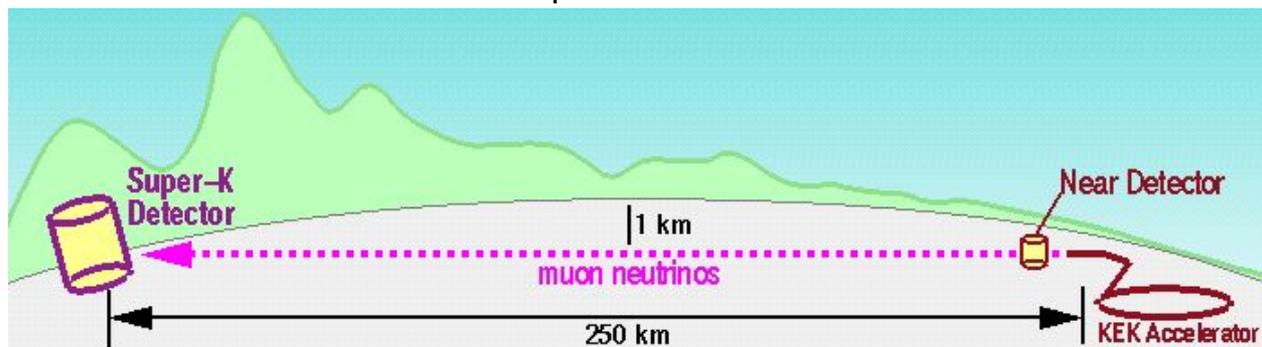


$$\text{SSM: } {}^8\text{B } \phi = 5.05_{-0.81}^{+1.01} \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

2002-2020: Fisica di precisione delle oscillazioni

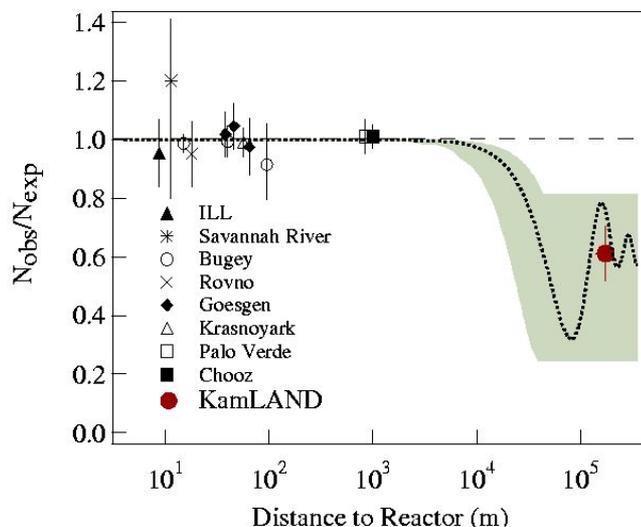
I risultati di SuperKamiokande e SNO sono stati confermati e migliorati da una serie di esperimenti successivi con sorgenti naturali (atmosferici e solari) e artificiali (reattori e fasci di neutrini da acceleratore):

- K2K: fascio artificiale di ν_μ con una baseline $L = 250$ Km e $E_\nu \sim 1.4$ GeV.



Conferma risultati
atmosferici SK

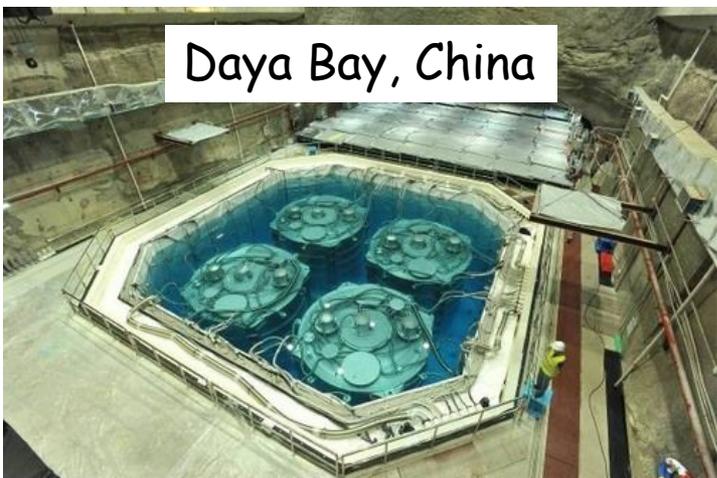
- Kamland: anti ν_e da reattore con una baseline $L = 180$ Km e $E_\nu \sim 4$ MeV.



Conferma risultati
solari SNO

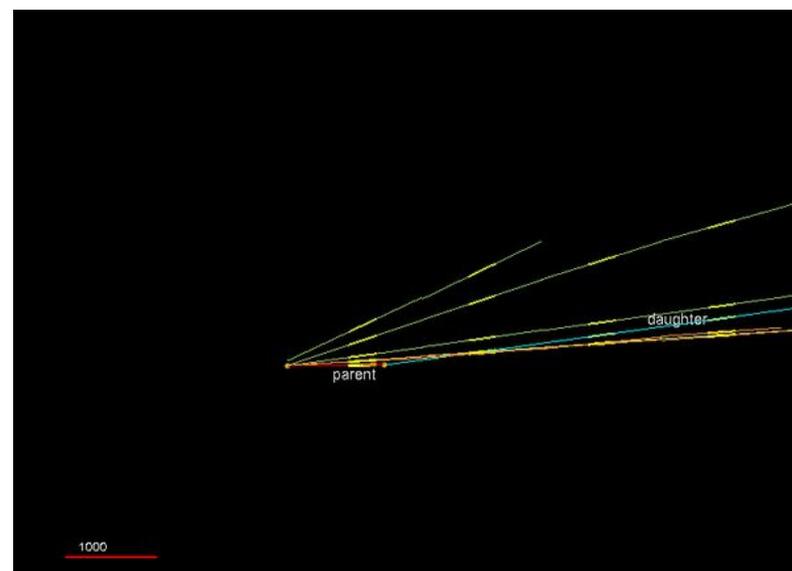
2002-2020: Fisica di precisione delle oscillazioni

Daya Bay, Reno (scintillatore liquido, antineutrino da reattore) e T2K water Cerenkov, neutrini da acceleratore): nel 2012 misurano anche l'oscillazione sotto-dominante $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ che permette di misurare anche l'angolo di mixing θ_{13}



Borexino (Gran Sasso) misura per la prima volta i **neutrini solari a bassa energia** (${}^7\text{Be}$, pep, pp, nel 2020 CNO).

OPERA (emulsioni nucleari) rivela nel 2010 i **neutrini del tau** che provengono dall'oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ (fascio CNGS dal CERN al Gran Sasso).



Cosa ci insegnano le oscillazioni di neutrini?

- Se i neutrini oscillano, allora almeno una delle specie ha massa non nulla (segnale di fisica al di là del Modello Standard).
- Matrice di mixing analoga a quella del settore dei quarks (CKM): possibile origine comune?
- Se i neutrini oscillano, il numero leptonico di flavour non si conserva.
- Misurando il rapporto tra oscillazioni di neutrini e antineutrini dello stesso flavour si può studiare un'eventuale violazione di della simmetria CP nel settore leptonico -> importante per capire l'asimmetria materia/antimateria nell'Universo.

... e altri neutrini fantastici!



Cosa sappiamo oggi, e cosa manca?

Cosa sappiamo oggi...

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{+i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

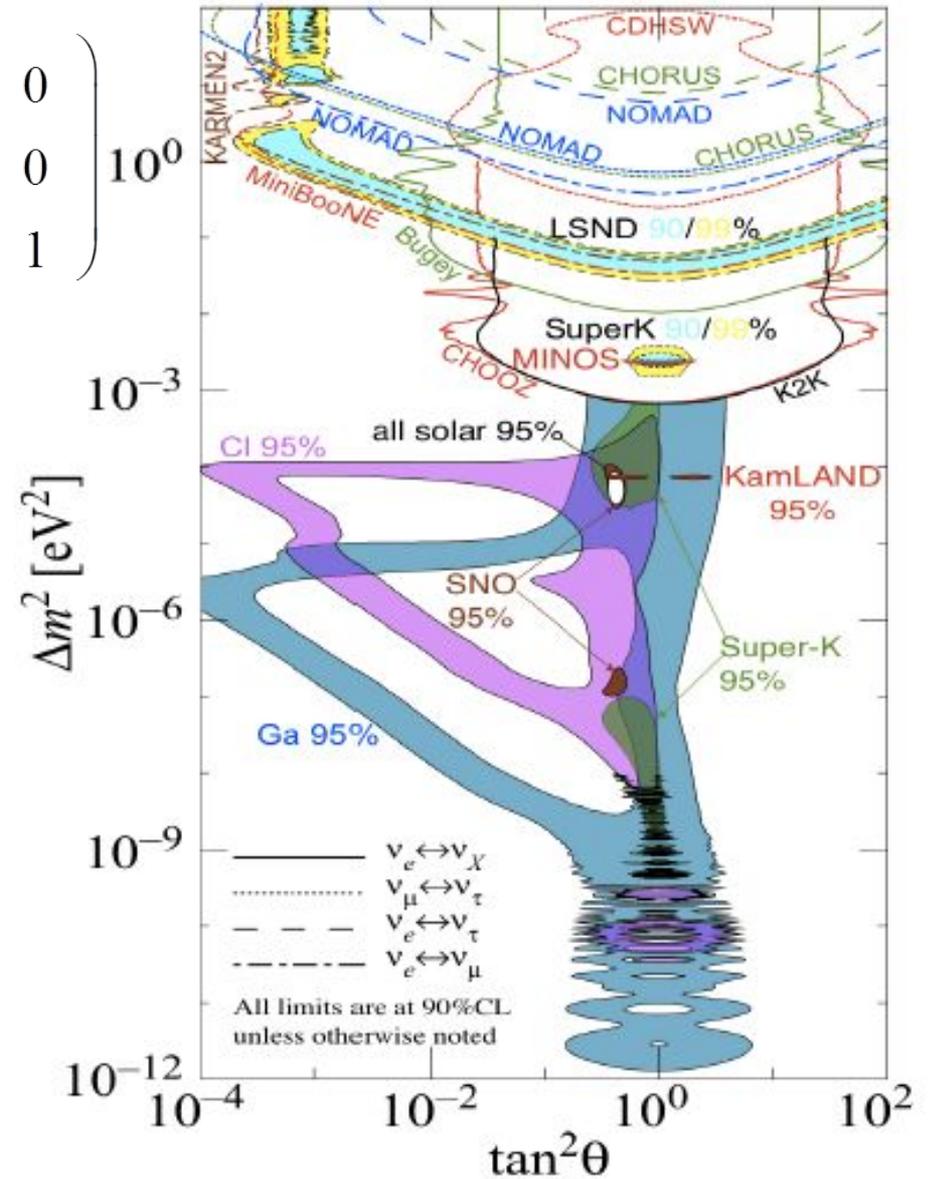
$$\sin^2 \vartheta_{12} = 0.312^{+0.018}_{-0.015}$$

$$\sin^2 \vartheta_{23} = 0.42^{+0.08}_{-0.03}$$

$$\sin^2 \vartheta_{13} = 0.096 \pm 0.026$$

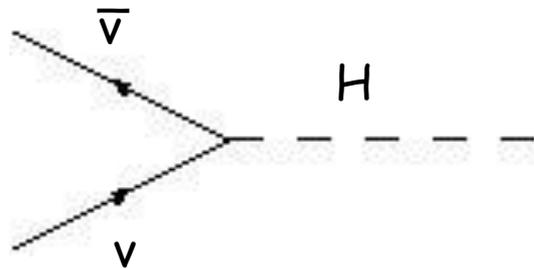
$$\Delta m_{sol}^2 = (7.59 \pm 0.21) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{atm}^2 = (2.43 \pm 0.13) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

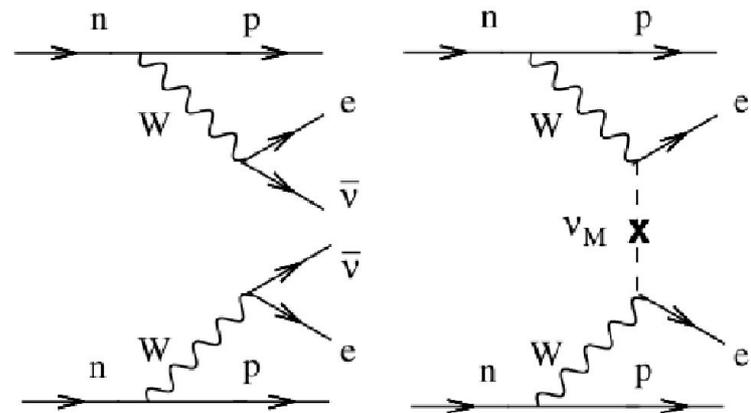


...e cosa manca!

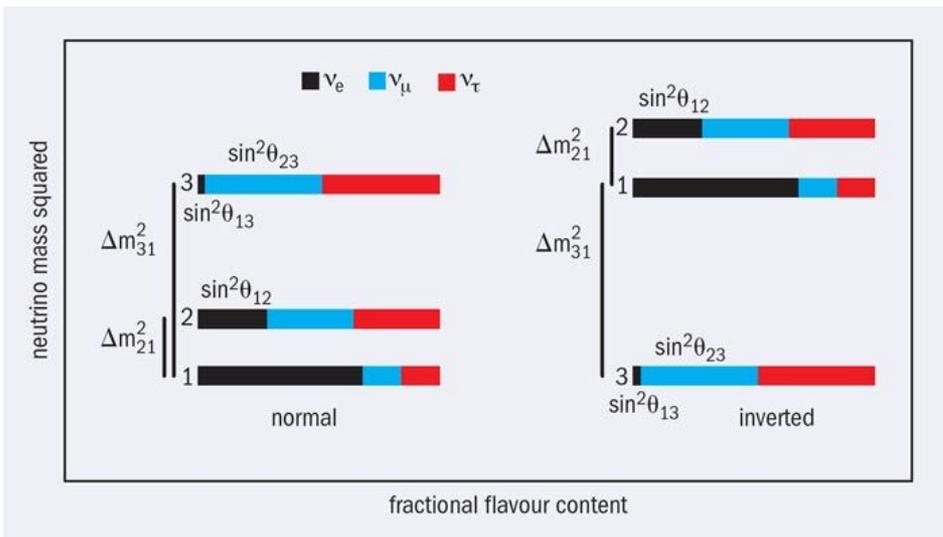
Masse assolute dei neutrini



Neutrino di Dirac o di Majorana?



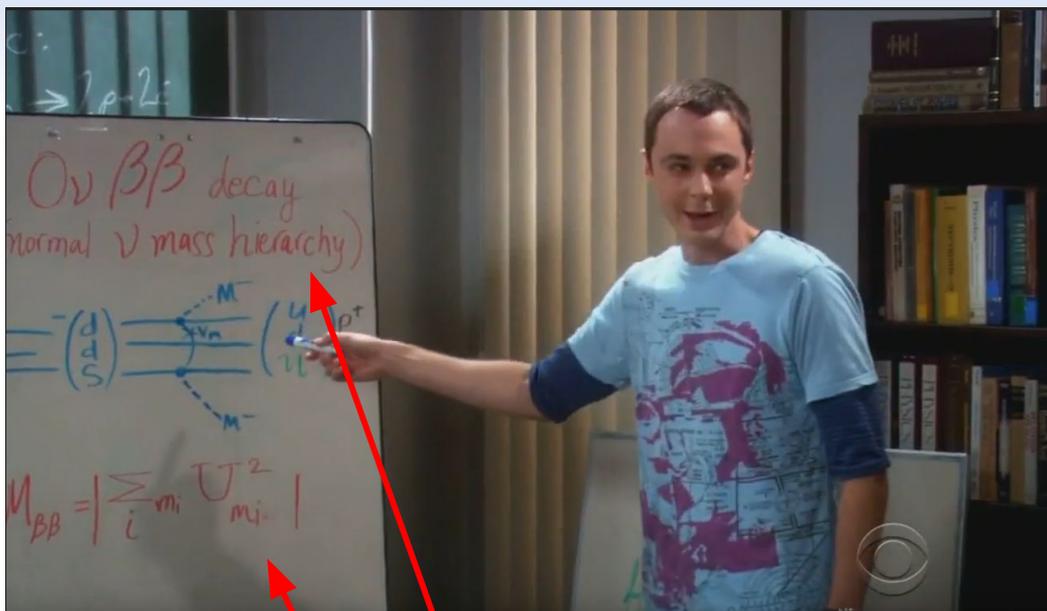
Gerarchia di massa



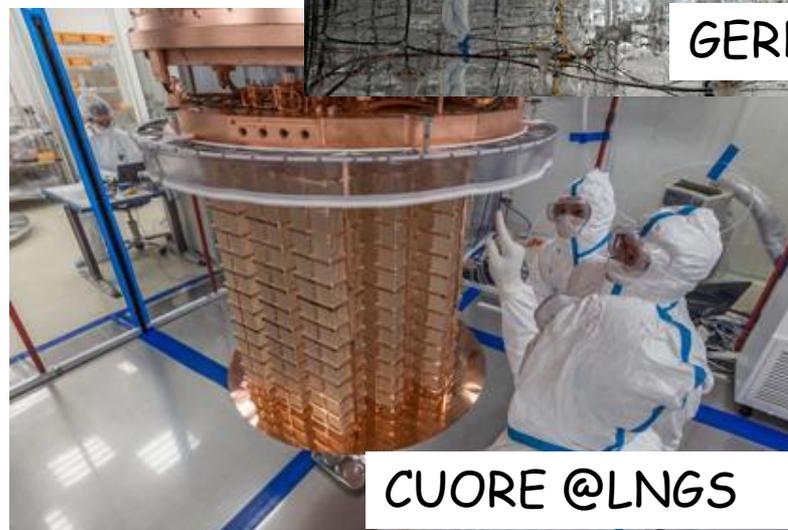
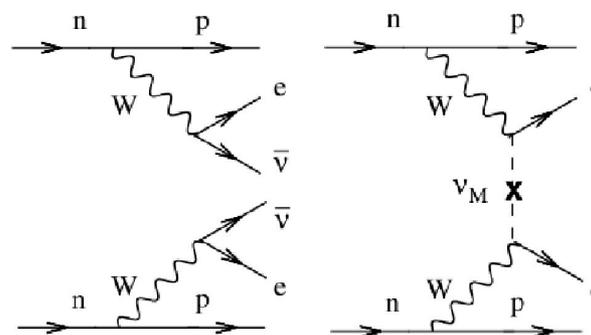
Violazione di CP nel settore leptonic?

$$\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{+i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}$$

Studiare i neutrini senza i neutrini...decadimento $0\nu\beta\beta$



Il neutrino è “nascosto” dentro il decadimento



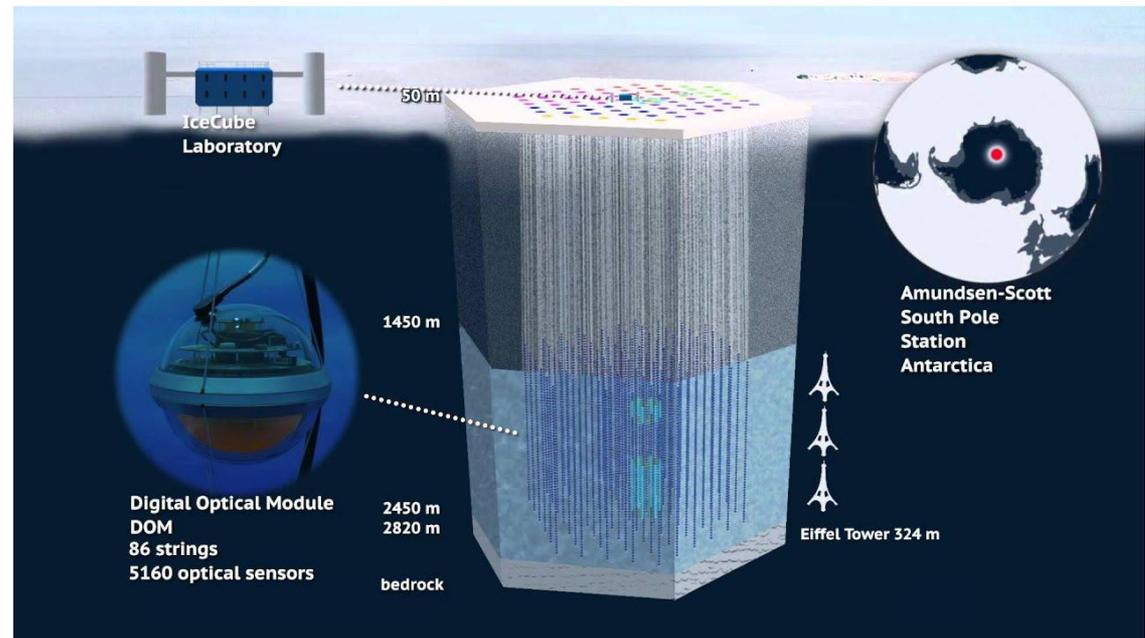
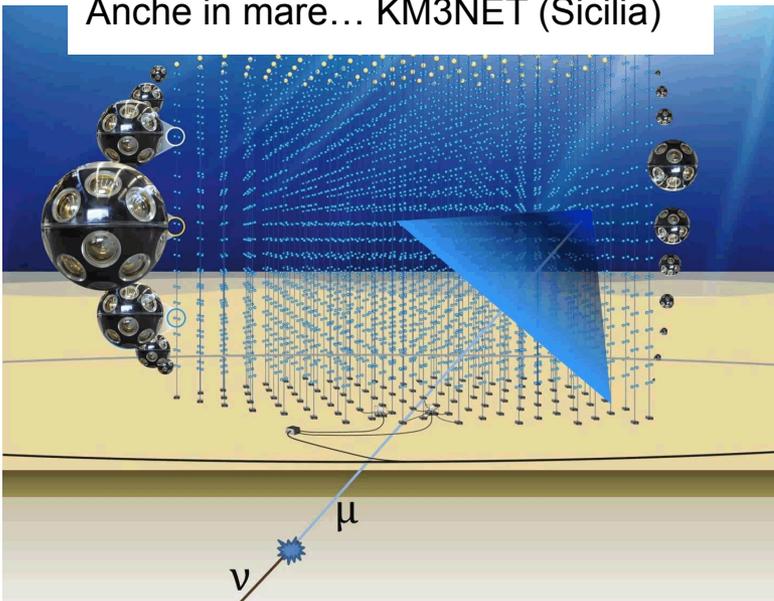
- Misura dei parametri di oscillazione.
- Gerarchia di massa dei neutrini.
- Neutrino == Antineutrino (Neutrino di Majorana)

Si cerca il raro decadimento in cristalli contenenti l'isotopo radioattivo e tenuti a temperature criogeniche (< 1 mK)

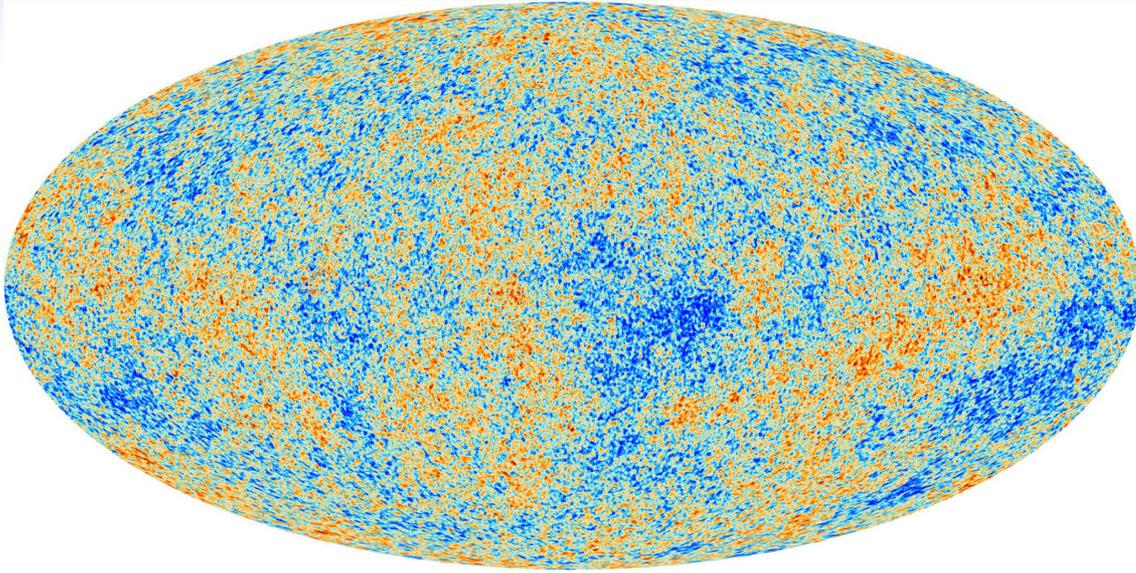
Neutrini dallo spazio: energie altissime...

- 2012: il neutrino di più alta energia mai registrato: 1.14 PeV!
- Osservatorio ICECUBE nell'Antartico: 1 Megaton Water Cherenkov detector.
- Ricerca di eventi di neutrini correlati ad altri tipi di radiazione (astronomia multimessenger).

Anche in mare... KM3NET (Sicilia)

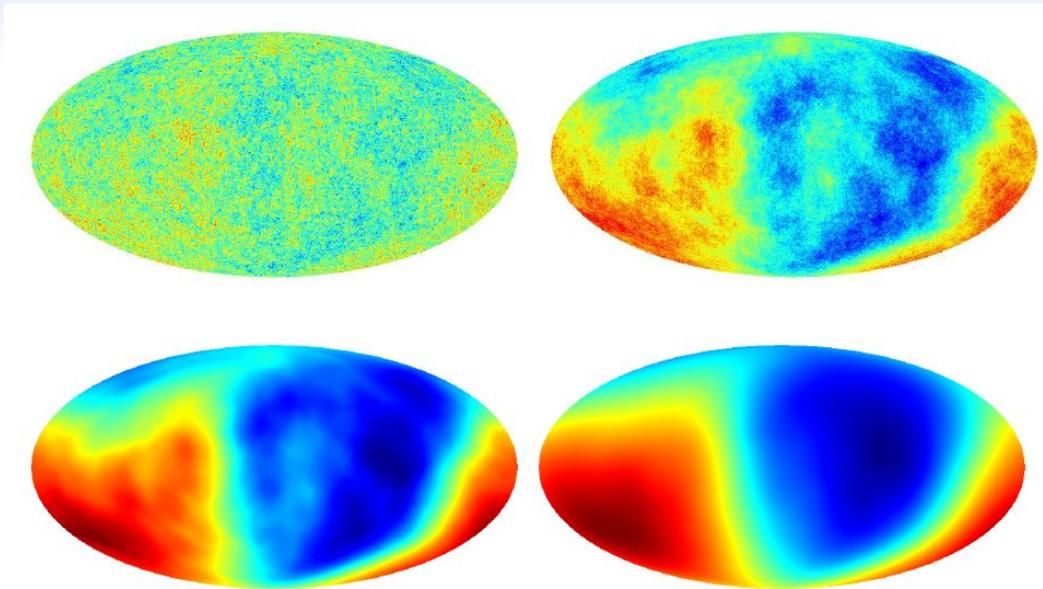


... e bassissime: neutrini fossili dal Big Bang



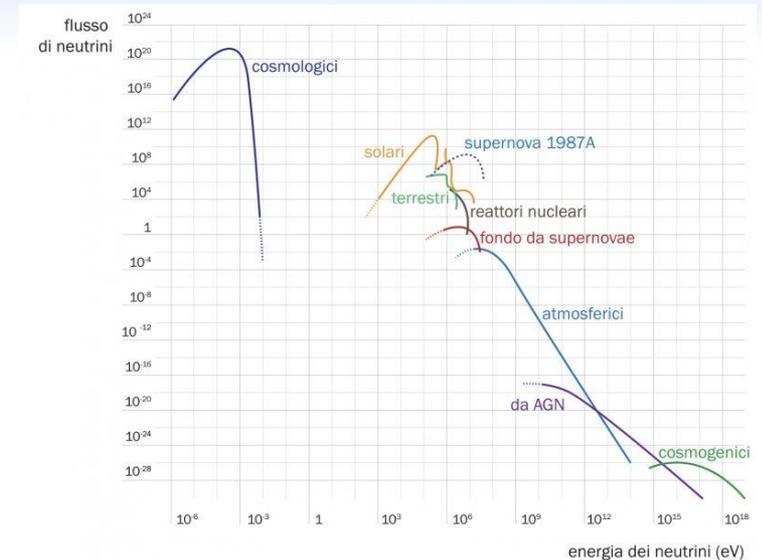
Fondo cosmico di radiazione alle microonde (CMB) - Planck

... e bassissime: neutrini fossili dal Big Bang

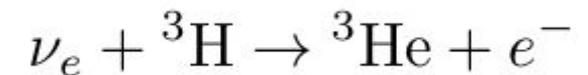


Fondo cosmico di neutrini previsto per diverse masse del neutrino più leggero.

- Nell'universo visibile, i neutrini sono, assieme ai fotoni, le particelle più numerose.
- Apparsi liberi ben prima della luce, un secondo dopo il Big Bang, costituiscono oggi, dopo quasi 14 miliardi di anni, un fondo diffuso in tutto l'universo, una specie di gas freddissimo alla temperatura di 1.9 gradi sopra lo zero assoluto (CNB).



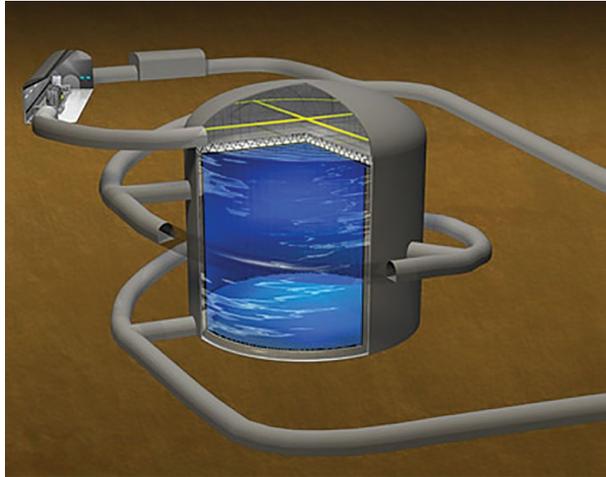
- Energia bassissima ~ meV!
- Unico modo: cattura del neutrino su di un isotopo instabile



- Servono 100 g di Trizio per 10 eventi all'anno: siamo ancora molto lontani!

Il (non lontano) futuro: HyperK e DUNE

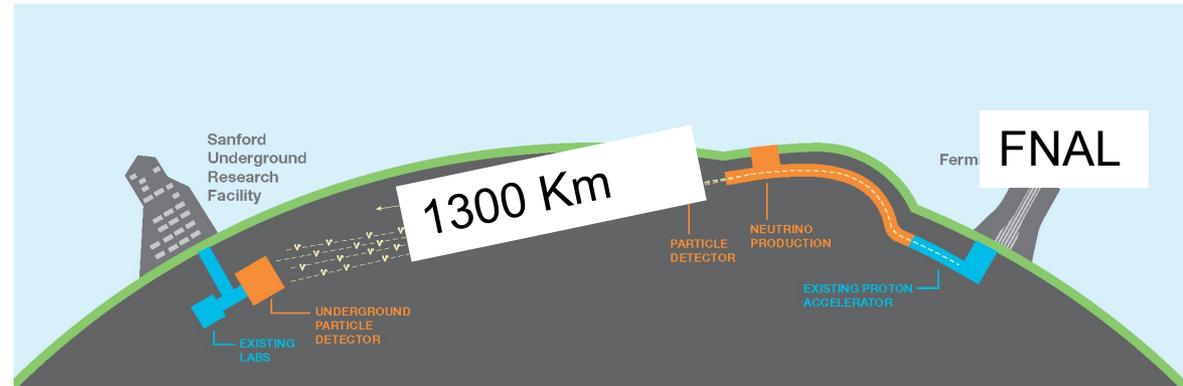
Hyper-Kamiokande



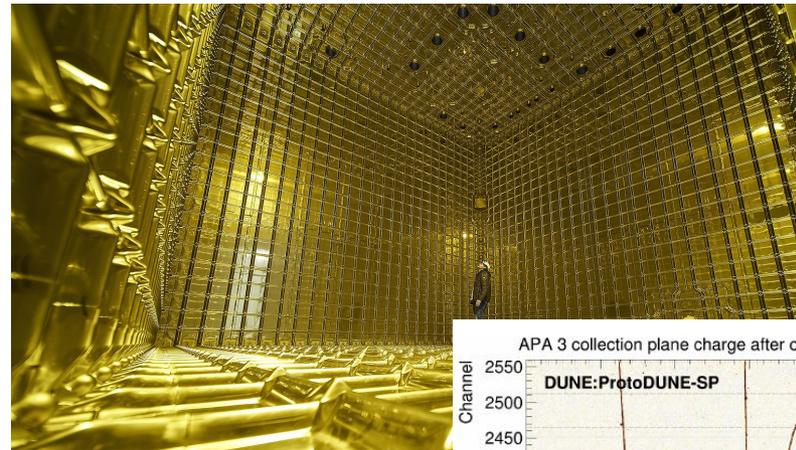
Un milione di tonnellate di acqua (Ring Water Cherenkov) → evoluzione di SK in Giappone

- Misura di violazione CP
- Fisica di precisione oscillazioni
- Neutrini da SuperNova
- Decadimento del Protone

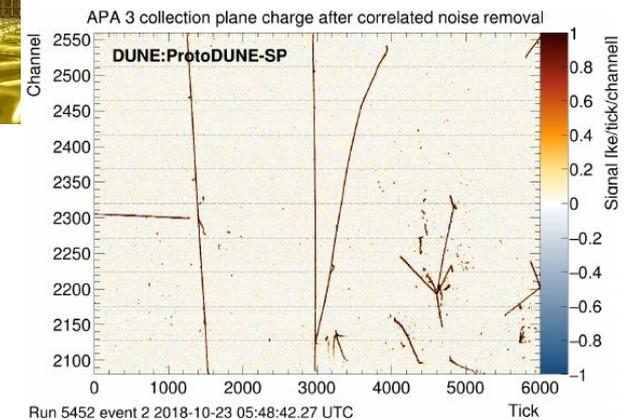
DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment)



40,000 tonnellate LAr Time Projection Chamber



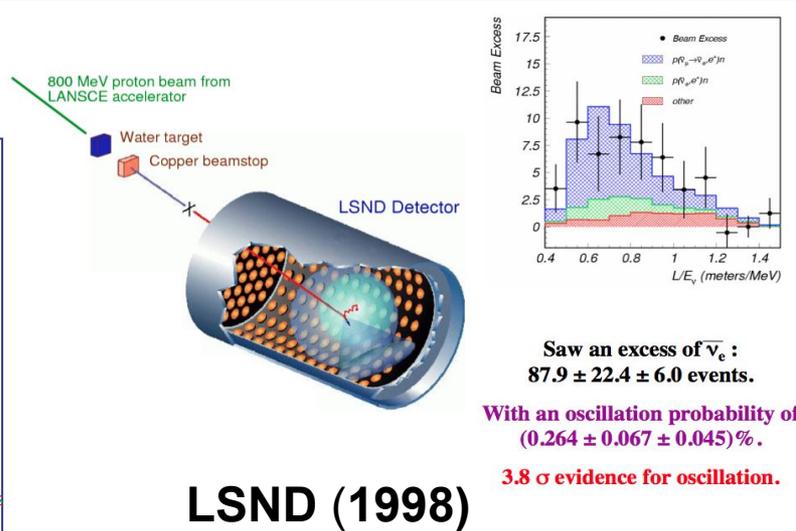
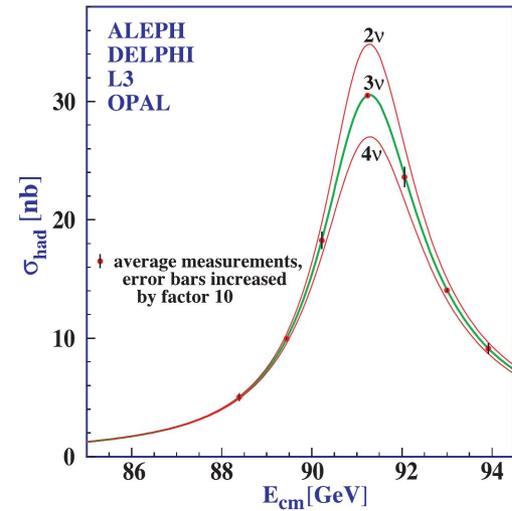
ProtoDUNE
@CERN (2018)



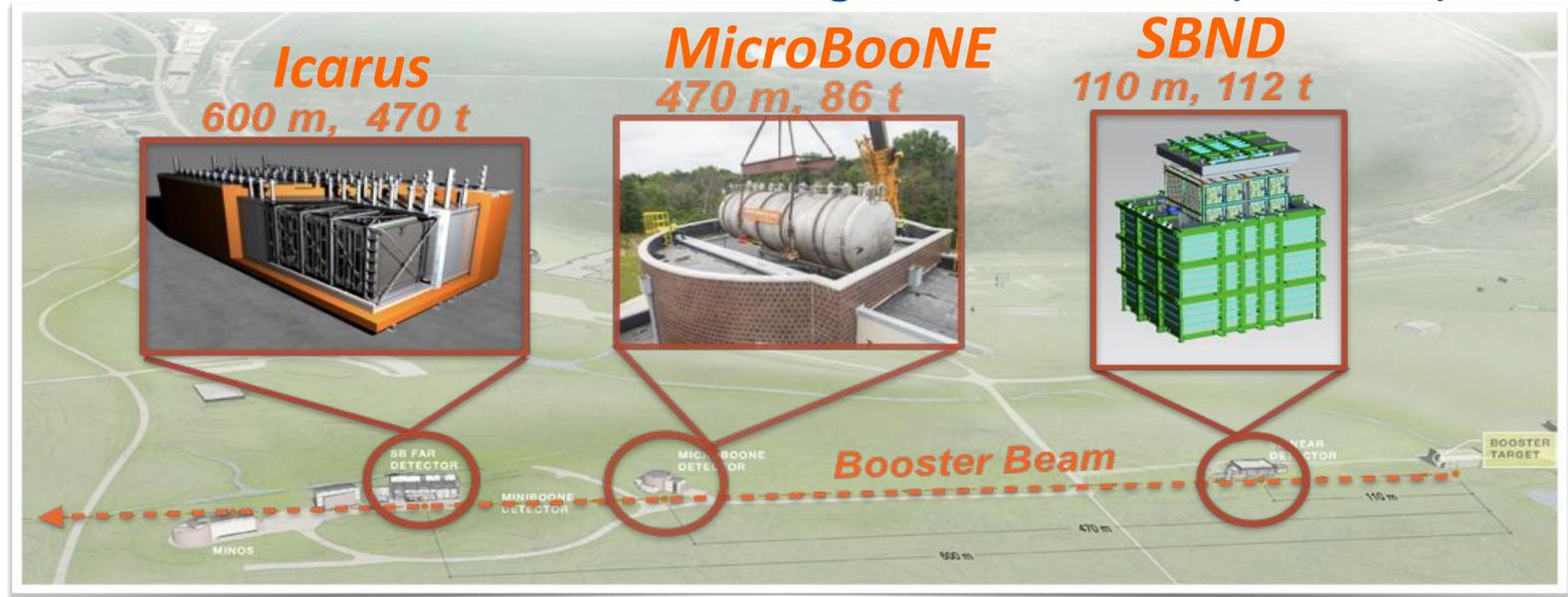
Più di tre neutrini?

Altre anomalie con esperimenti di oscillazione con reattori e sorgenti radioattive... esiste un quarto neutrino (sterile)?

$$\Delta m_{new}^2 \approx 1\text{eV}^2$$



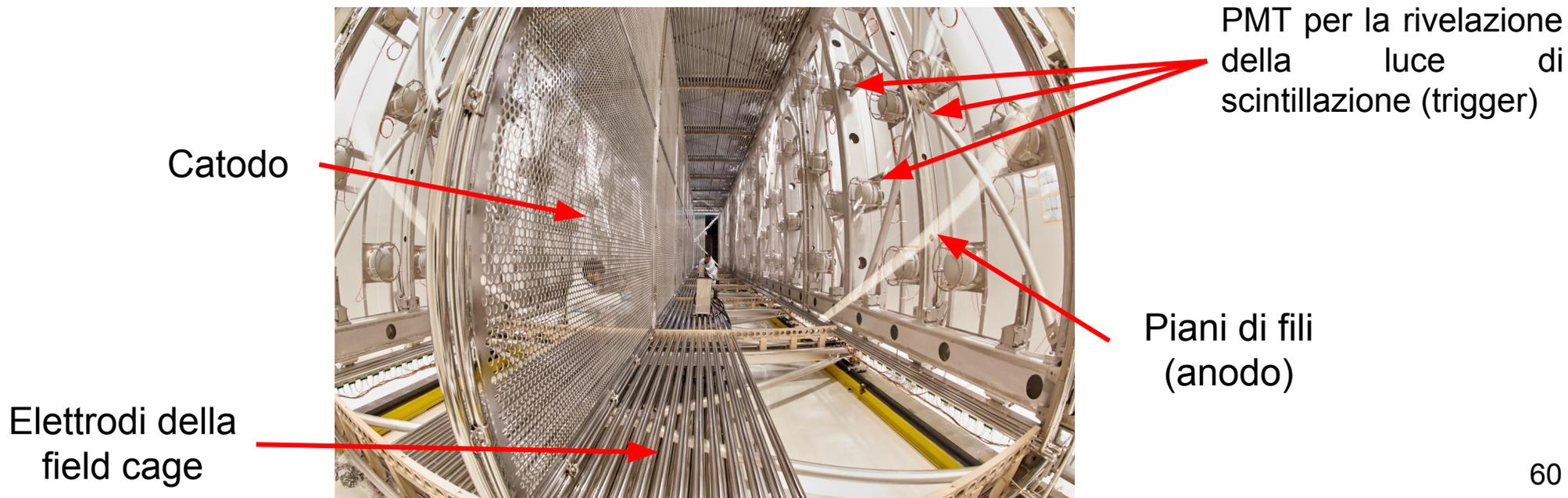
Short Baseline Neutrino Program at Fermilab (LAr-TPC)



Più di tre neutrini?



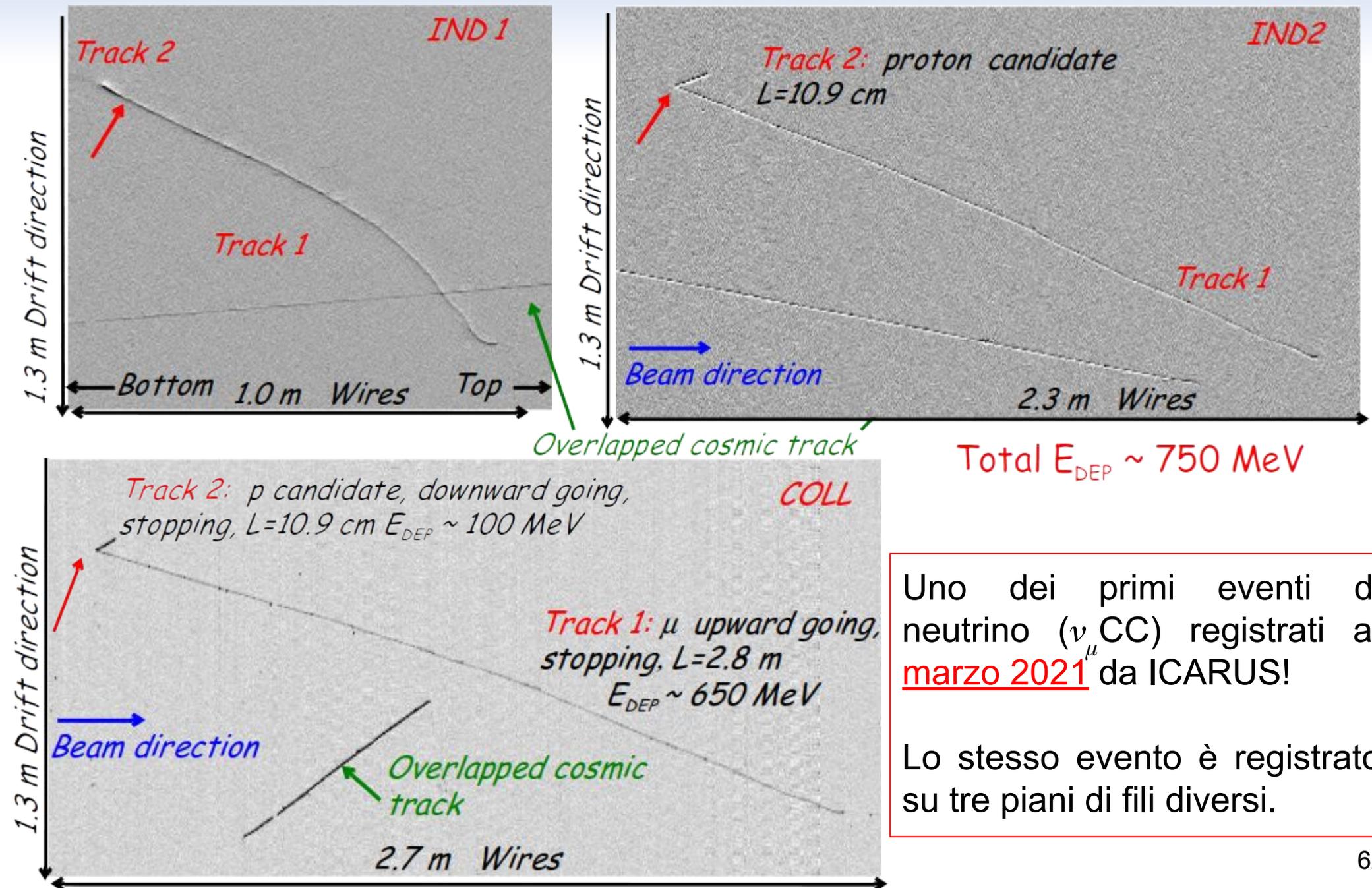
- ICARUS: TPC ad Argon Liquido (760 tons).
- Quasi 54000 fili di lettura permettono una risoluzione spaziale di $\sim 1\text{mm}$ per la ricostruzione delle tracce ionizzanti.
- Attivo al Gran Sasso (2010-2013) e poi upgrade al CERN (2014-2017) prima dello spostamento al Fermilab.
- Ricerca di oscillazione $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ Short Baseline al fascio Booster Neutrino Beam ($E_{\nu} \sim 0.8\text{ GeV}$): tre anni di presa dati per risolvere definitivamente l'anomalia di LSND e MiniBooNE.



Il “volo” di ICARUS



ICARUS @FNAL: primi eventi di ν_{μ} CC (marzo 2021)!



Uno dei primi eventi di neutrino (ν_{μ} CC) registrati a marzo 2021 da ICARUS!

Lo stesso evento è registrato su tre piani di fili diversi.

Conclusioni

- I neutrini sono strani.
- Difficili da rivelare... ma i fisici sono ostinati e fantasiosi!
- Hanno massa piccola ma finita → si richiede modifica/estensione del Modello Standard.
- Stanno aprendo una nuova finestra di osservazione anche dei fenomeni astrofisici.
- Sicuramente molto altro da imparare nei prossimi anni!

Qualche riferimento bibliografico

- ✓ [INFN: asimmetrie n.29 \(Novembre 2020\)](#)
- ✓ [Neutrino unbound](#)
- ✓ [Global analysis of neutrino oscillation measurements \(Nu-fit\)](#)
- ✓ *C. Giunti, C. W. Kim*, Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics, Oxford University Press, Oxford, UK, 2007. ISBN 978-0-19-850871-7
- ✓ *R. Mohapatra and P. Pal*, Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics, World Scientific Lecture Notes in Physics: Volume 72 (2004)



**Grazie per
l'attenzione!**