



Neutrini da Nobel

Alessandro Menegolli

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

Mercoledì 18 novembre 2015

Premio Nobel per la Fisica 2015



Takaaki Kajita



Arthur B. McDonald

The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald "*for the discovery of **neutrino oscillations**, which shows that neutrinos **have mass***"

Contenuti

- Cos'è il neutrino?
- Da dove vengono i neutrini?
- Cosa sono le oscillazioni di neutrini?
- Come si rivelano i neutrini?
- Cosa hanno scoperto i vincitori del Nobel 2015?
- Cosa sappiamo oggi, e cosa manca?

Una breve storia del neutrino...

- 1930 L'ipotesi di Pauli per spiegare il decadimento β dei nuclei
- 1933 Teoria di Fermi dell'interazione debole
- 1956 I primi neutrini rivelati da Reines e Cowan (Nobel 1995)
- 1958 Pontecorvo postula per primo l'oscillazione di neutrino
- 1962 Steinberger, Lederman e Schwartz (Nobel 1988) conducono a Brookhaven l'esperimento che porta alla scoperta del secondo neutrino
- 1967 Davis (Nobel 2003) inizia a misurare il flusso dei neutrini solari
- 1973 L'esperimento Gargamelle scopre l'esistenza delle correnti deboli neutre
- 1987 Si osservano, per la prima volta i neutrini prodotti dall'esplosione di una Supernova
- 1998 L'esperimento Super Kamiokande misura un deficit nel flusso dei neutrini atmosferici e lo attribuisce alle oscillazioni tra diverse famiglie
- 2002 Gli esperimenti SNO e KamLand confermano le oscillazioni dei neutrini del sole e dei reattori nucleari

Il neutrino di Pauli (1933)

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

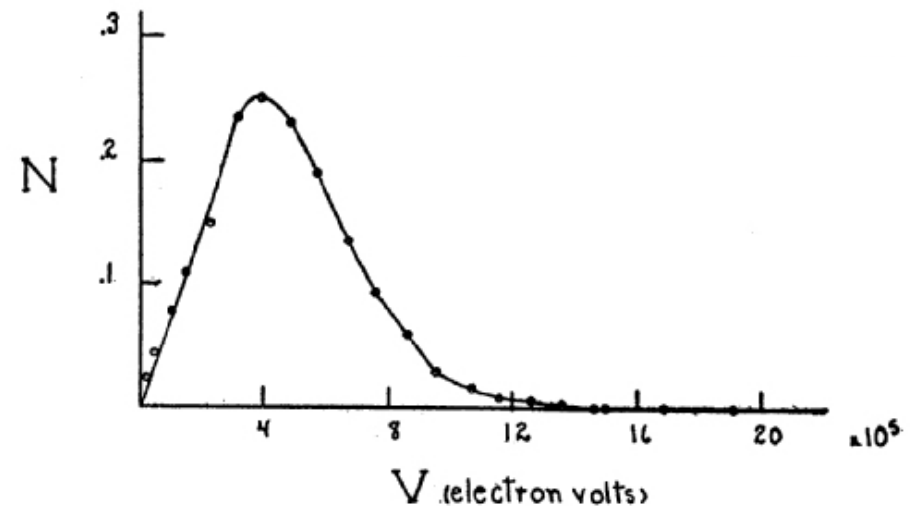
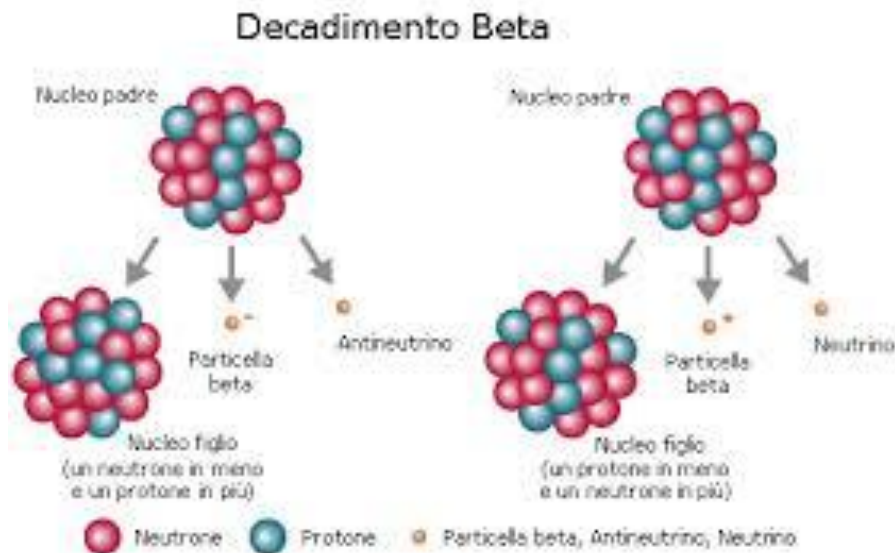


FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

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

Il neutrino di Pauli (1933)



Il neutrino di Pauli (1933)

4th December 1930

"Dear Radioactive Ladies and Gentlemen ..."

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gesellschafts-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

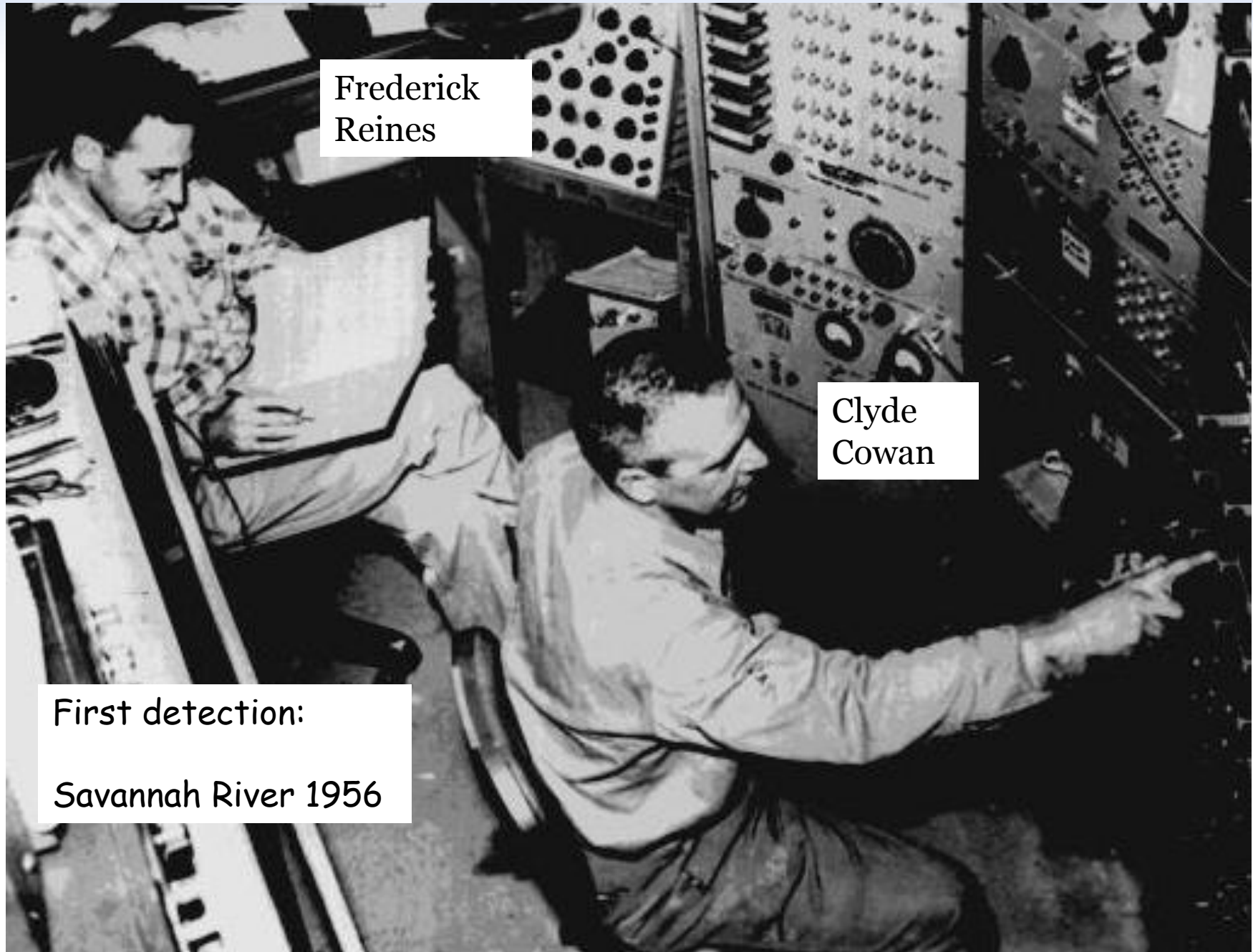
Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich baldmöglichst
ansprechen bitte, Ihnen das Näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N - und Li-6 Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg
verfallen: um den "Wechselwitz" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Anschlussprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

L'esperimento di Reines e Cowan (1956)



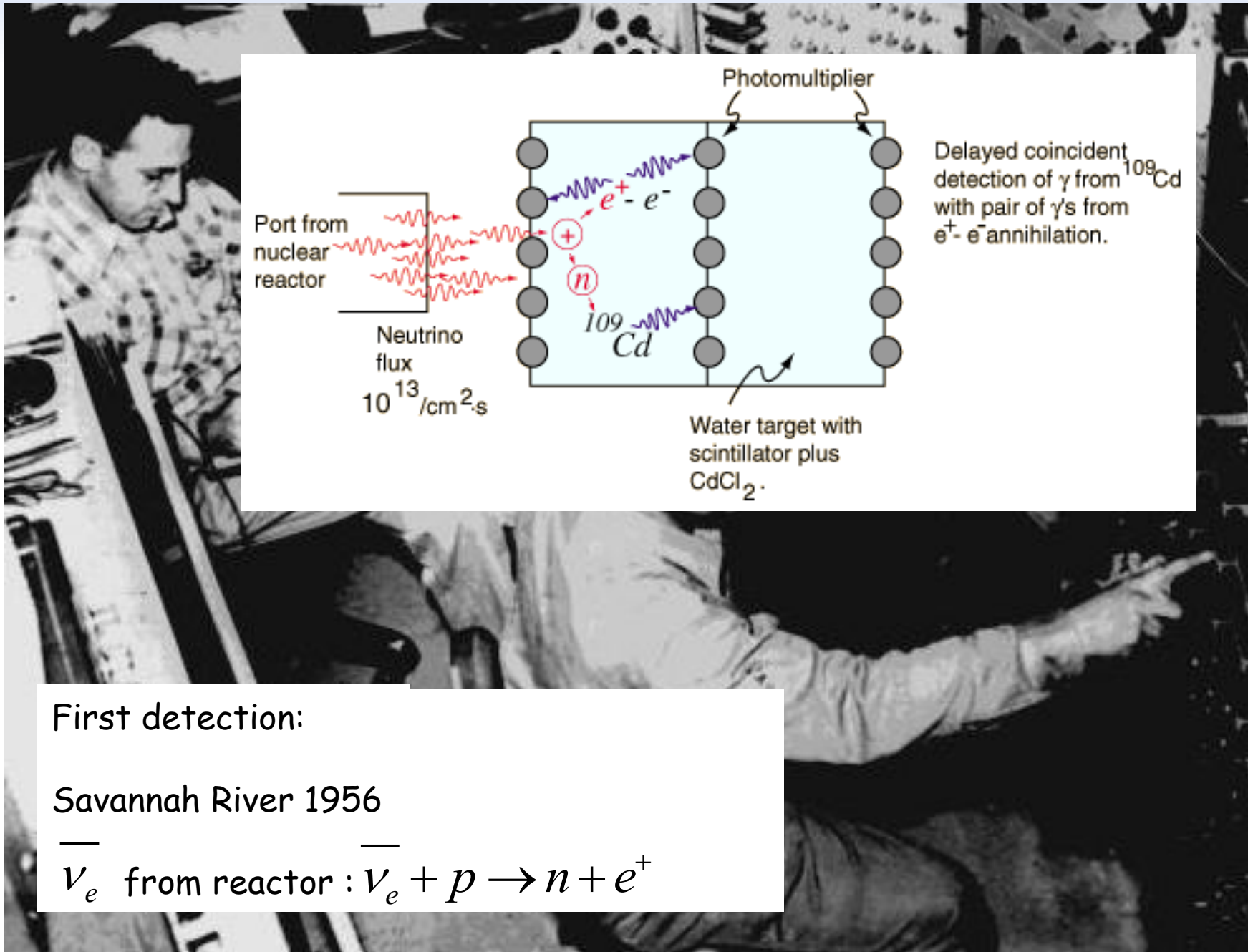
Frederick
Reines

Clyde
Cowan

First detection:

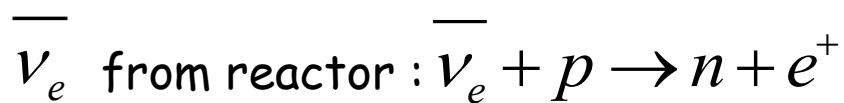
Savannah River 1956

L'esperimento di Reines e Cowan (1956)



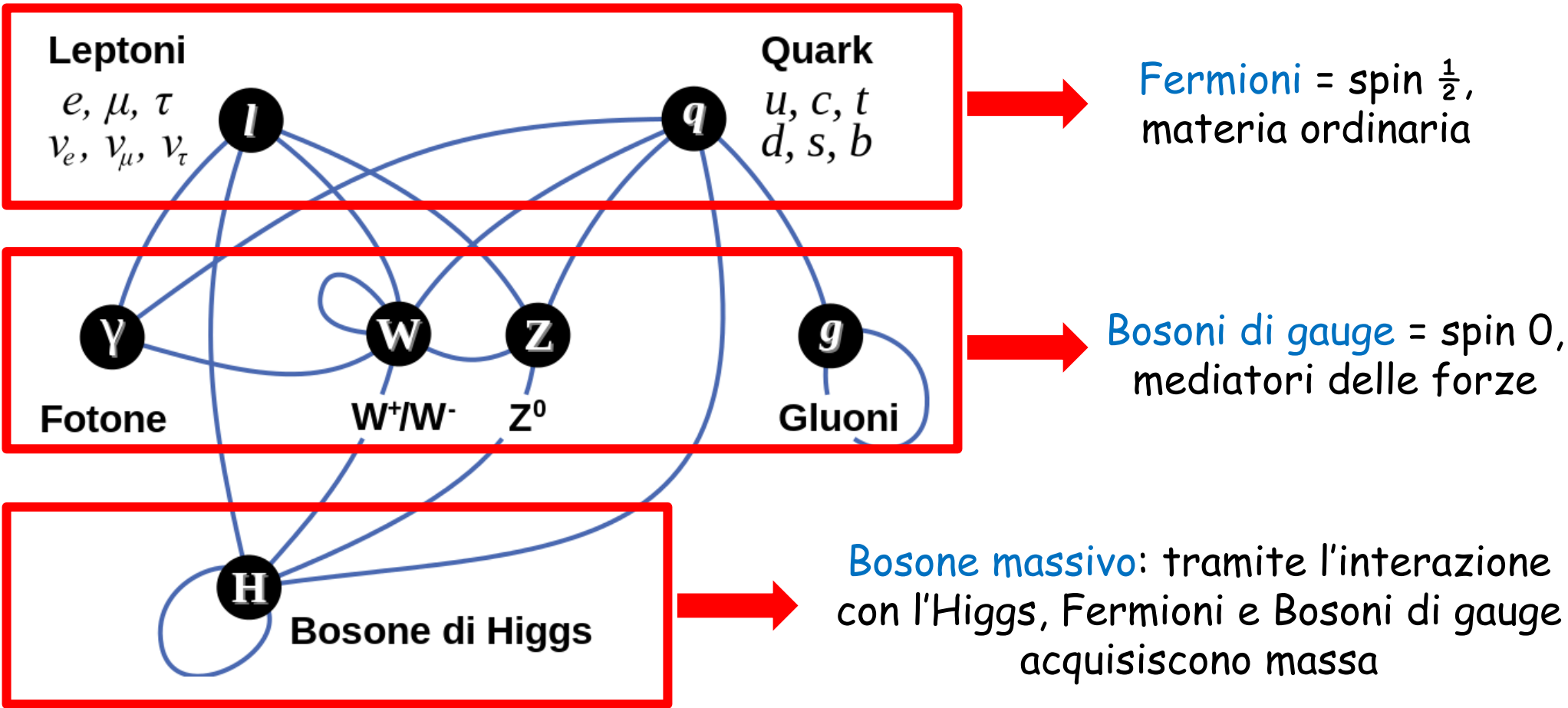
First detection:

Savannah River 1956



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  | NEUTRINO MU ν_μ  | NEUTRINO TAU ν_τ  |
| Carica elettrica: 0 Immune sia all'elettromagnetismo che all'interazione forte, non prende parte a quasi nessuna interazione, ma è essenziale nei decadimenti radioattivi. | Carica elettrica: 0 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i muoni. | Carica elettrica: 0 Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i leptoni tau. |
| ELETTRONE e  | MUONE μ  | TAU τ  |
| Carica elettrica: -1 Massa: 0,511 MeV La particella più leggera dotata di carica. Trasporta la corrente elettrica e orbita intorno ai nuclei atomici. | Carica elettrica: -1 Massa: 106 MeV Versione più pesante dell'elettrone, vita media di 2,2 microsecondi, scoperto come componente dei raggi X cosmici. | 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)



Ma può avere anche interazione di Corrente Carica...

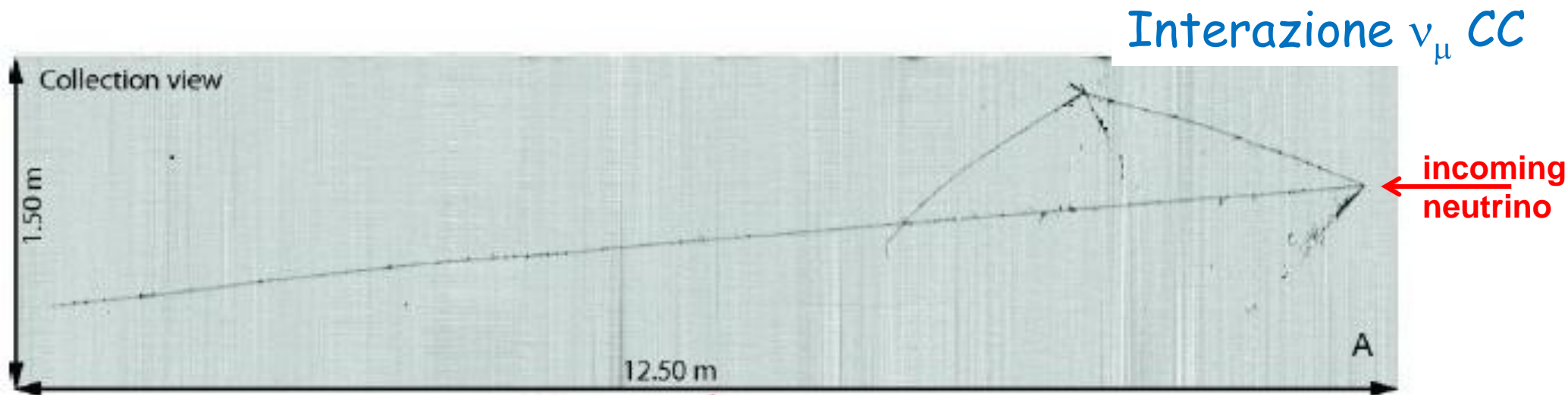
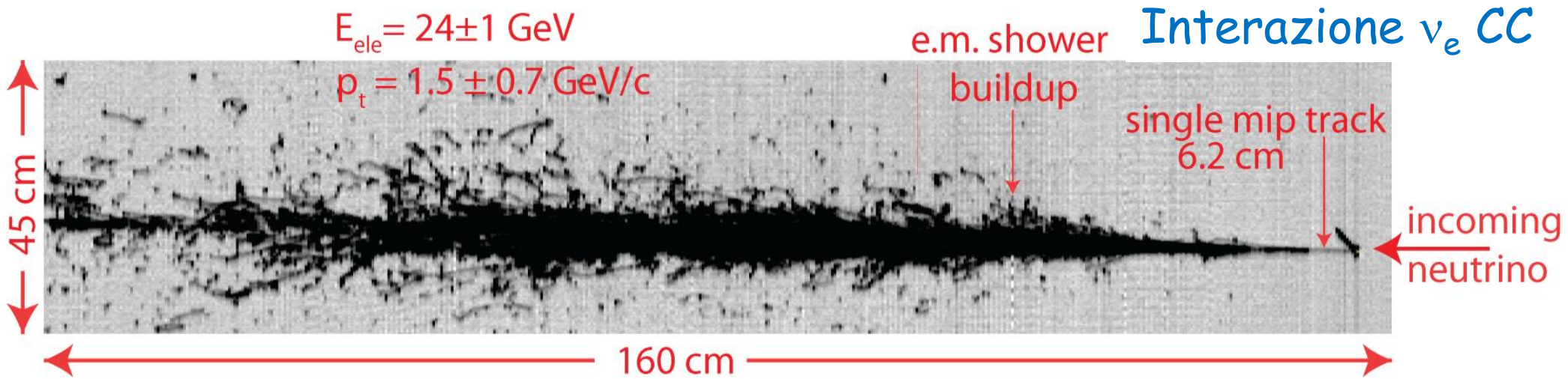


...e nella reazione emerge un leptone carico:

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

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

I neutrini nel modello standard



Da dove vengono in neutrini?



Sorgenti naturali: neutrini atmosferici

Energia: $O(\text{GeV})$
 Cammino: $O(10\text{Km})$

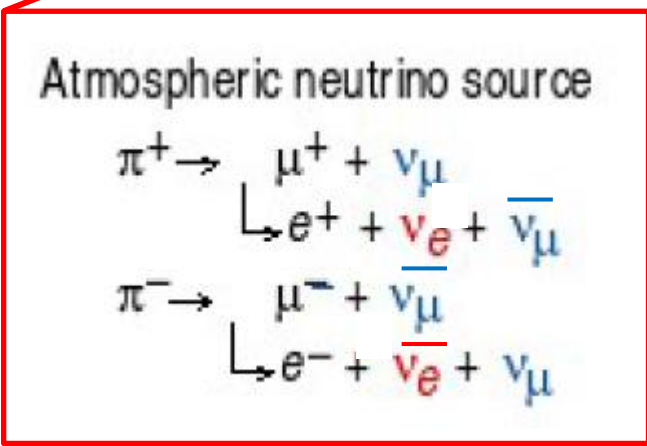
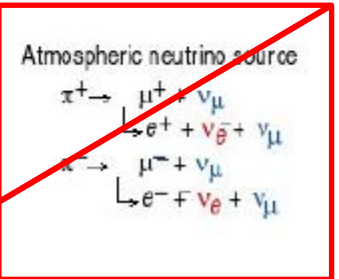
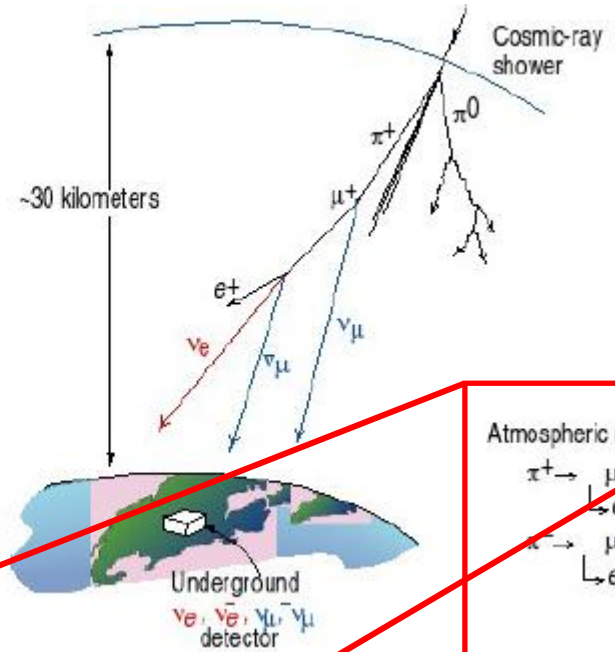
Prima evidenza di oscillazione di neutrino

$$R = \frac{V_{\mu}}{V_e} \neq 2$$



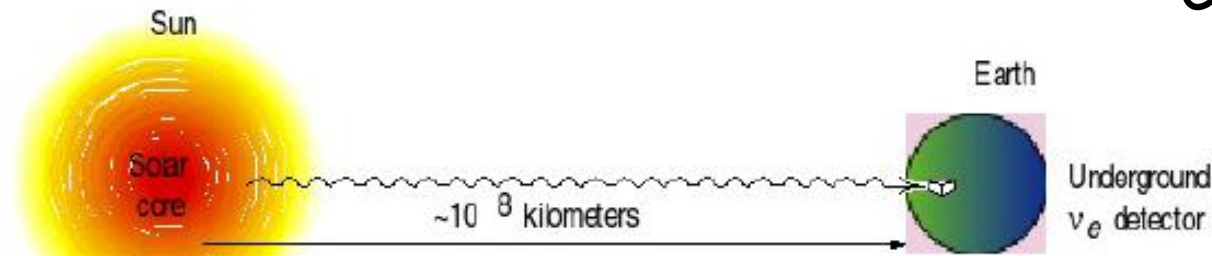
Un rapporto $R \neq 2$ misurato in un rivelatore prossimo alla superficie terrestre è segnale di scomparsa di almeno una specie di neutrino

Neutrini atmosferici
 (alte energie)



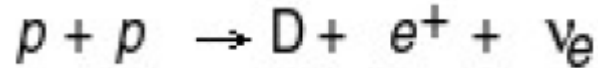
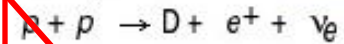
Sorgenti naturali: neutrini solari

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

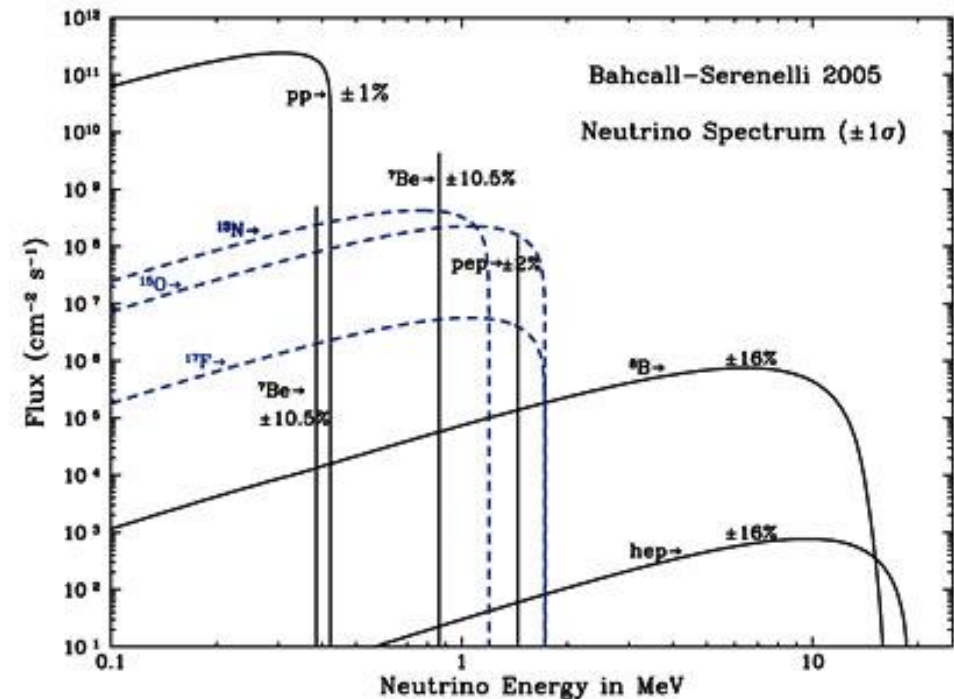


**Neutrini solari
 (basse energie)**

Primary neutrino source

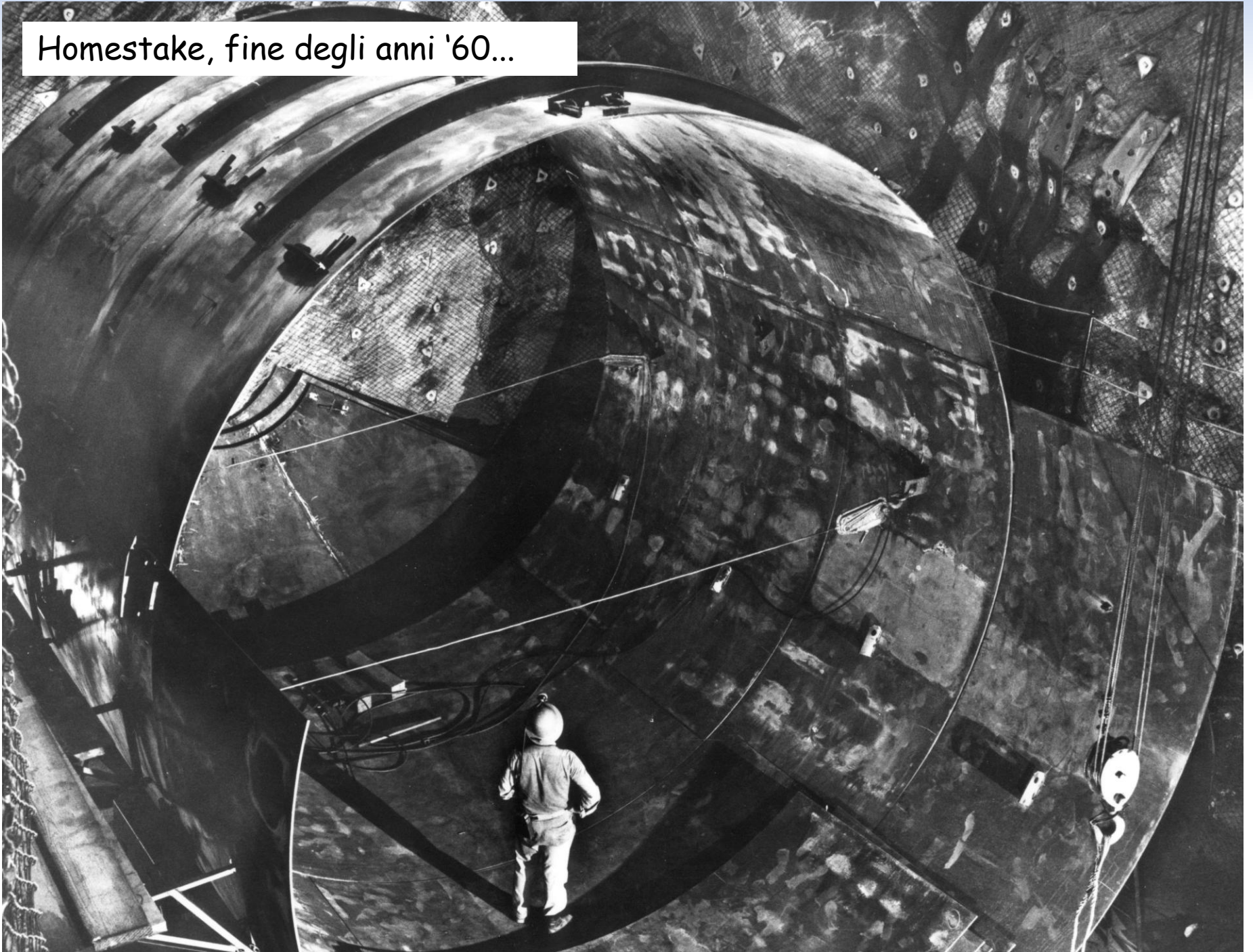


- Flusso sulla Terra $\sim 6 \cdot 10^{10} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Flusso ${}^8\text{B} \nu \sim 6 \cdot 10^6 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$



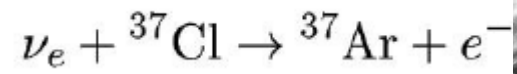
Il puzzle dei neutrini solari

Homestake, fine degli anni '60...



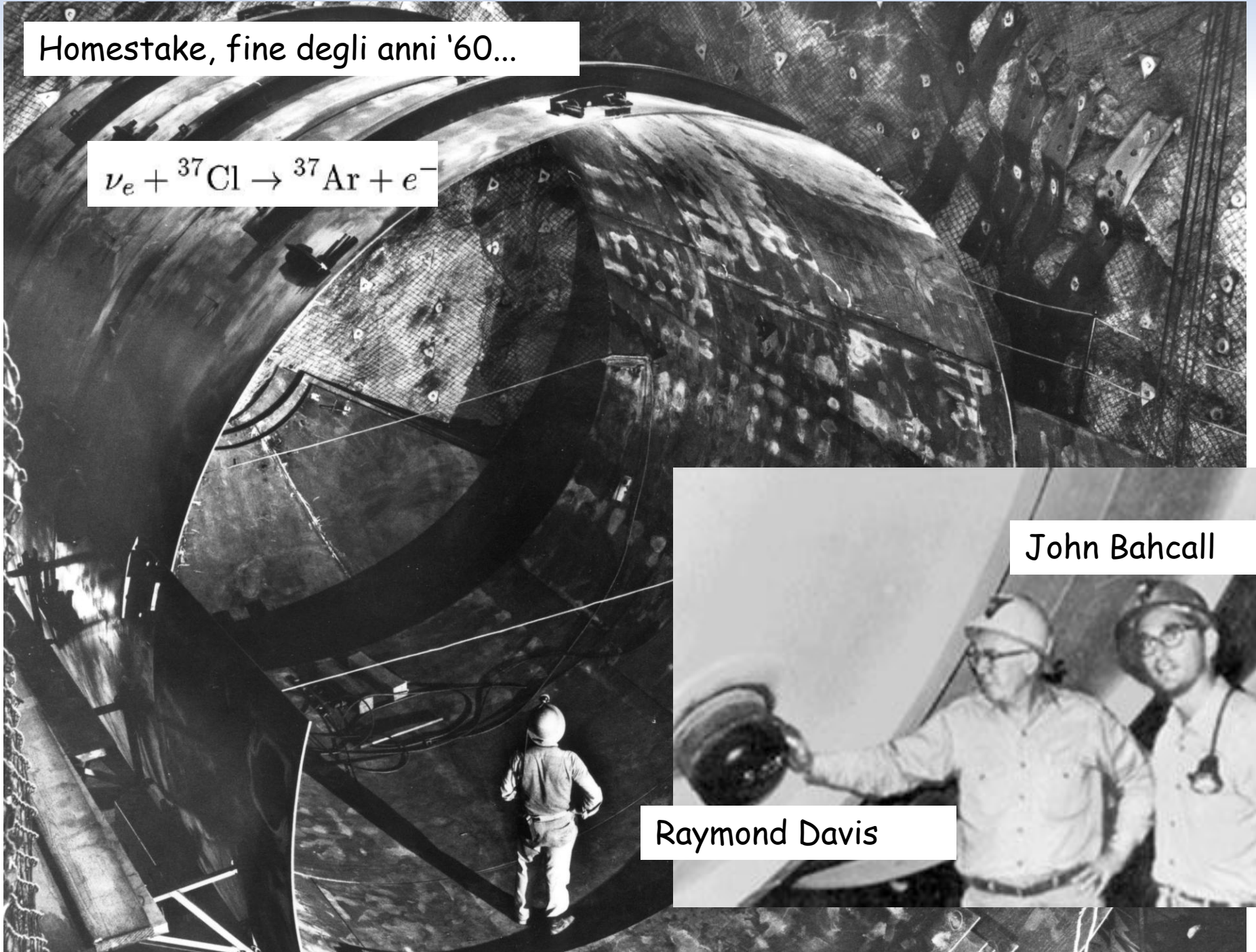
Il puzzle dei neutrini solari

Homestake, fine degli anni '60...



John Bahcall

Raymond Davis

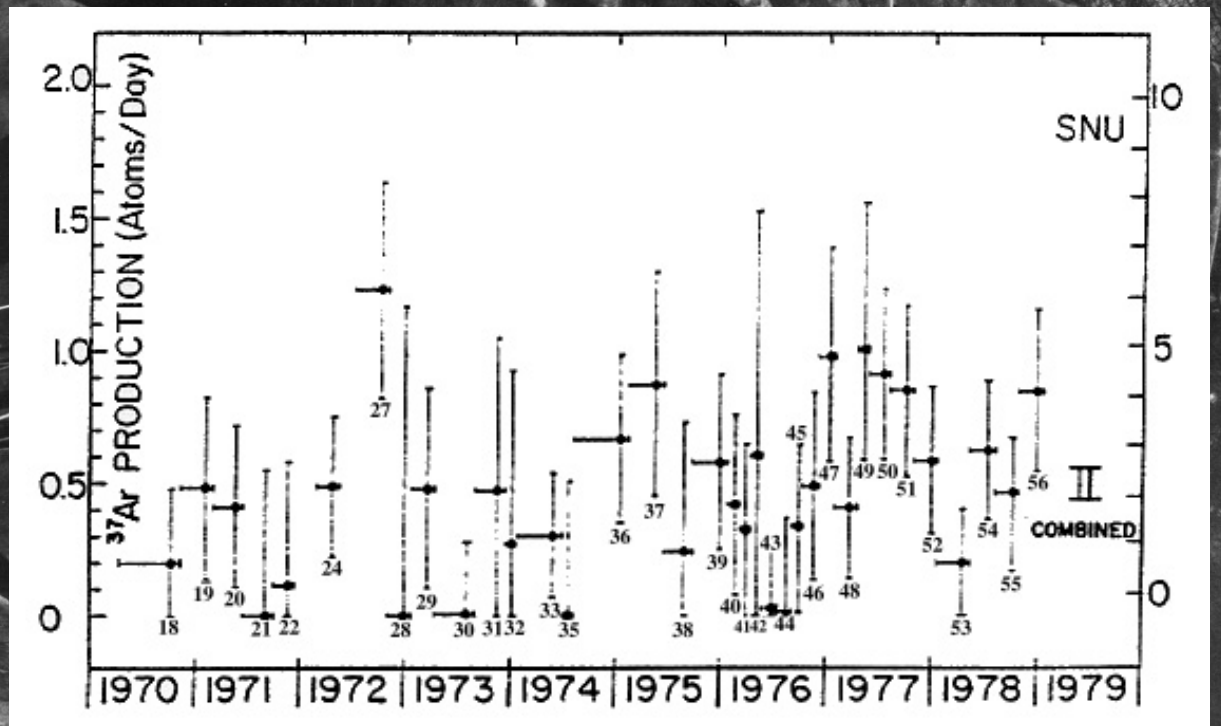


Il puzzle dei neutrini solari

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



Cosa sono le oscillazioni di neutrini?



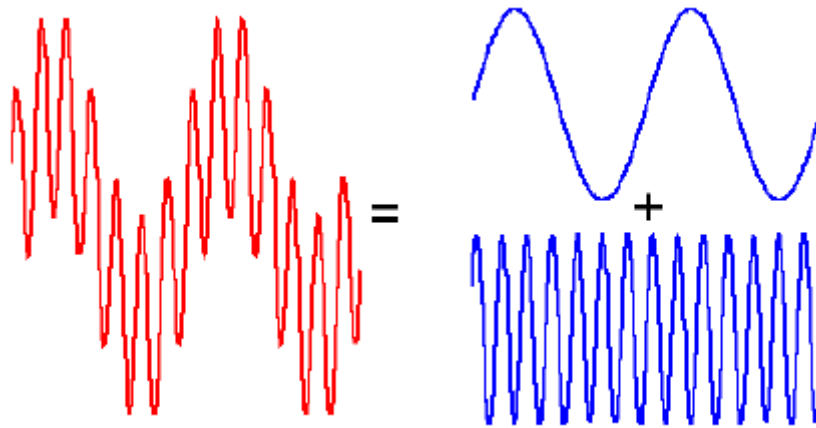
Oscillazioni di neutrini?

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

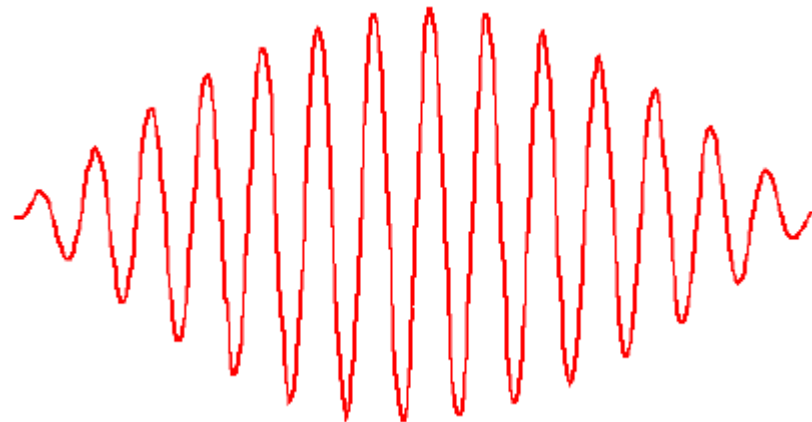


Oscillazioni e onde

- Le onde hanno un moto periodico: oscillano nel tempo.
- Se sommiamo due o più onde (principio di sovrapposizione) otteniamo ancora un'onda:



- Se le frequenze delle onde che sommiamo sono molto vicine, la somma ha un andamento particolare (fenomeno del battimento):



Oscillazioni di neutrini

- Le oscillazioni di neutrini hanno delle similitudini con il fenomeno dei battimenti (per via della doppia natura ondulatoria e corpuscolare della materia).
- Il tipo iniziale di neutrino lentamente si affievolisce.. e un nuovo tipo appare.
- Il fenomeno si manifesta soltanto se l'onda associata al neutrino è composta da due (o più) onde con una piccola differenza di fase che causa i battimenti → la differenza è nella massa!
- L'osservazione delle oscillazioni di neutrini avviene se i neutrini hanno massa → evidenza di fisica al di là del Modello Standard.

Neutrino mixing

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

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



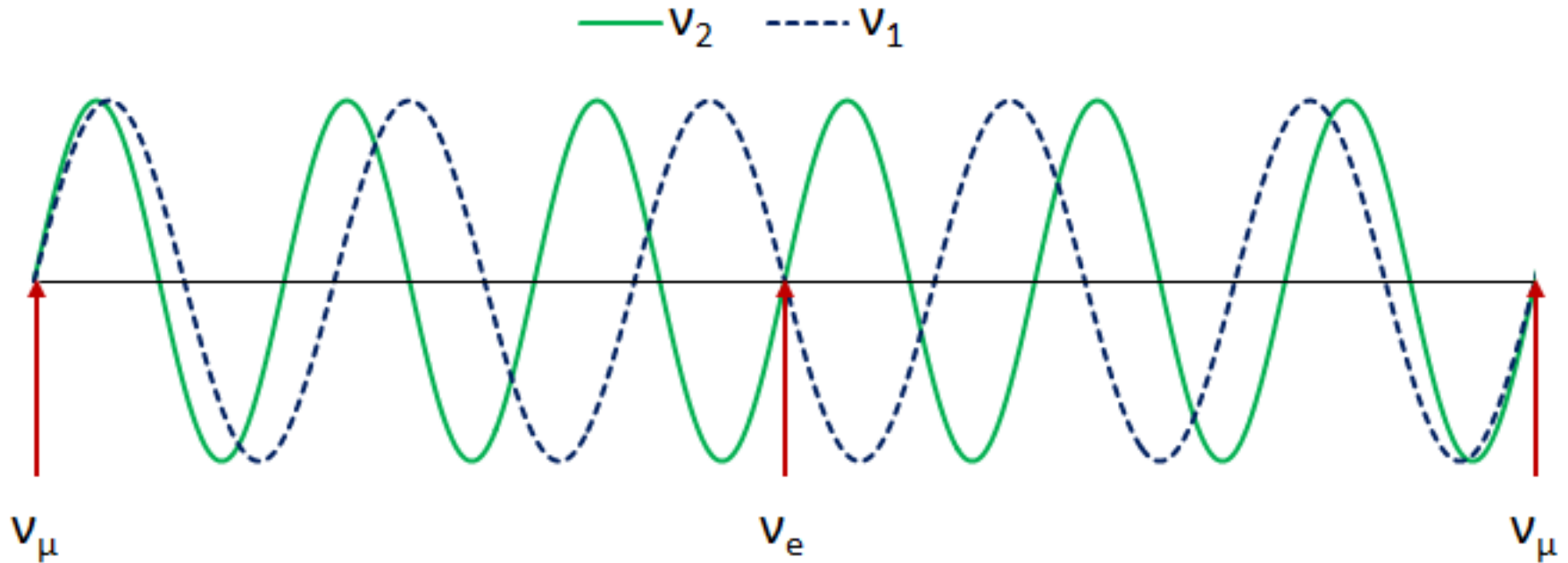
➤ Pacchetti d'onda che si propagano con fase

➤ Per neutrini ultra-relativistici si dimostra che: $\Delta\phi = \frac{\Delta m^2}{2p} t$

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

➤ Gli elementi della matrice U sono legati all'ampiezza dell'oscillazione.

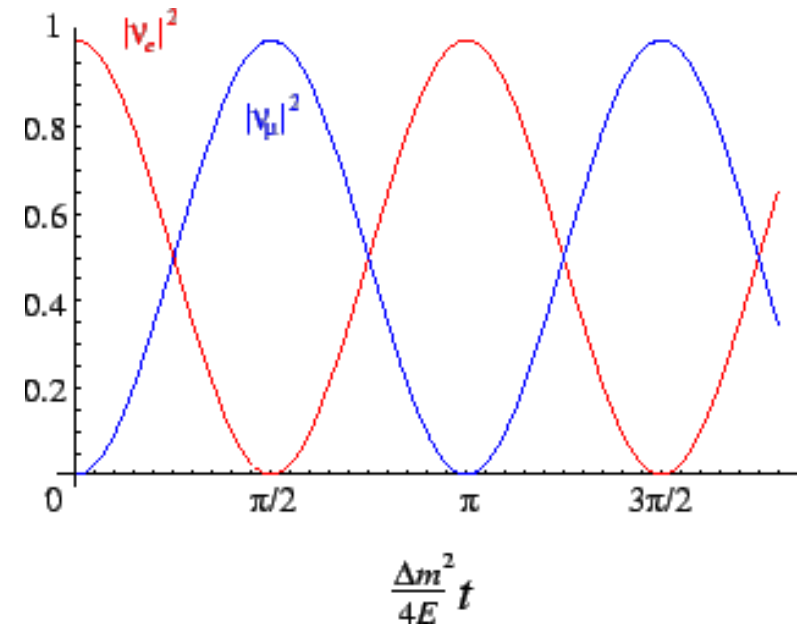
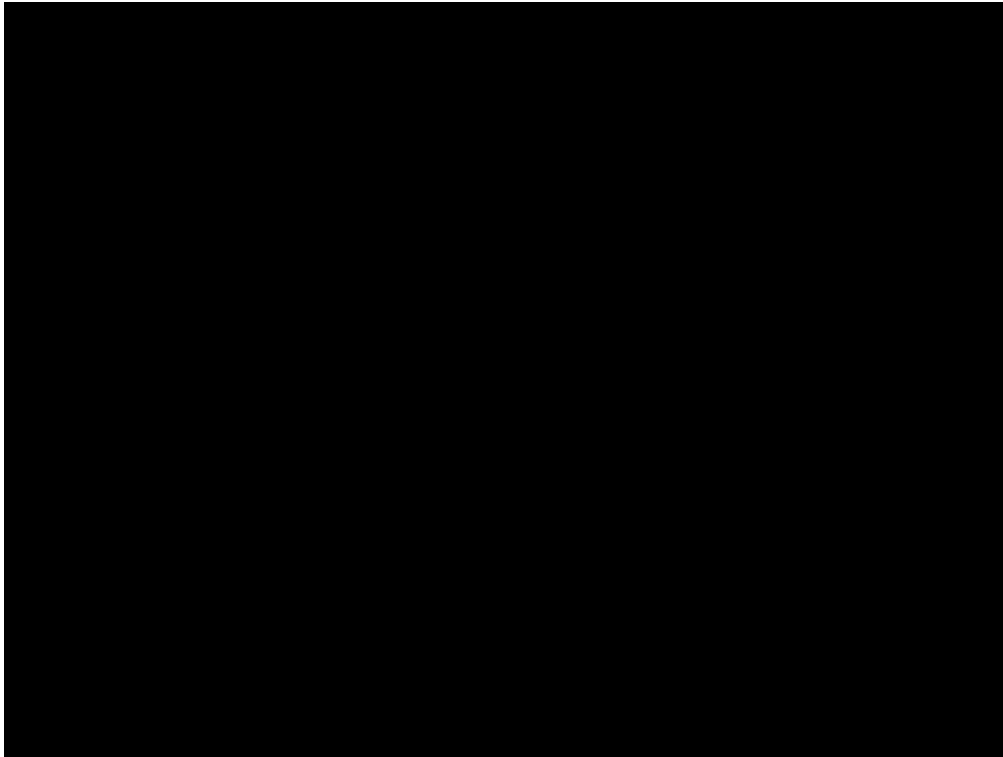
Oscillazione a due flavor



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \mathcal{G} & -\sin \mathcal{G} \\ \sin \mathcal{G} & \cos \mathcal{G} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

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

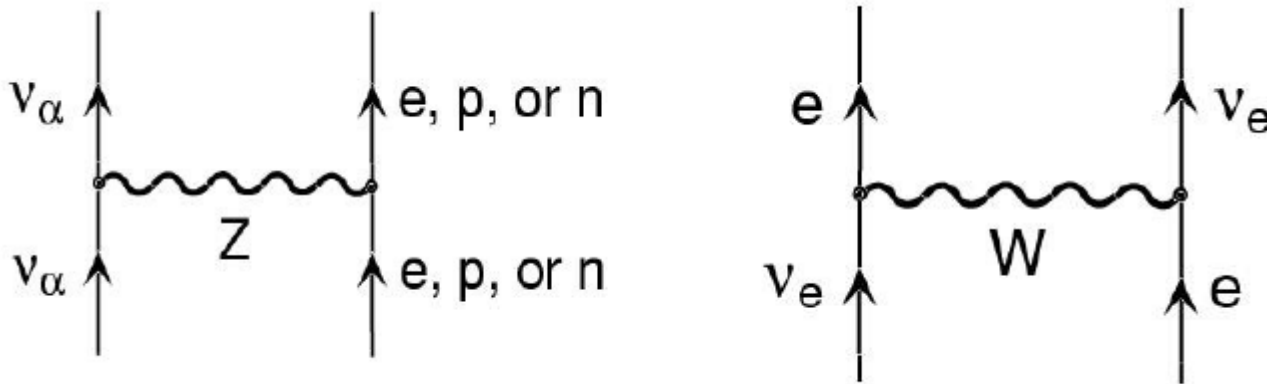
Analogo classico: pendolo doppio



Il neutrino dell'elettrone iniziale converte completamente in neutrino del muone in un tempo:

$$t = \frac{\pi}{2} \left(\frac{\Delta m^2}{4E} \right)^{-1}$$

Oscillazione nella materia



I neutrini dell'elettrone nella materia subiscono uno **scattering in avanti** → introduzione nell'Hamiltoniana di un potenziale che **dipende dalla densità di elettroni nel mezzo attraversato**.

$$i \frac{d}{dx} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = [\mathcal{H}_0 + \mathcal{H}_{\text{mat}}(x)] \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

$$= \left\{ \frac{1}{2E} U \begin{bmatrix} m_1^2 & 0 \\ 0 & m_2^2 \end{bmatrix} U^\dagger + \begin{bmatrix} V(x) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \right\} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

$$V(x) = V_e(x) - V_\mu(x) = \sqrt{2} G_F N_e(x)$$

Importante per i **neutrini solari**, prodotti nel nucleo del Sole dove la **densità di elettroni è elevata**: l'effetto è che il numero di neutrini che escono dal Sole è **minore di quanto atteso nel caso di oscillazioni nel vuoto**.

Oscillazione a tre flavor + effetti di materia!

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & 4C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \times \left(1 + \frac{2a}{\Delta m_{31}^2} (1 - 2S_{13}^2) \right) \\ & + 8C_{13}^2 S_{12} S_{13} S_{23} (C_{12} C_{23} \cos \delta - S_{12} S_{13} S_{23}) \cos \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \\ & - 8C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \cos \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \frac{aL}{4E} (1 - 2S_{13}^2) \\ & - 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin \delta \sin \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \sin \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} \\ & + 4S_{12}^2 C_{13}^2 \left\{ C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{23}^2 S_{13}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{23} S_{13} \cos \delta \right\} \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}. \end{aligned} \quad (3)$$

Misurando il numero di neutrini che interagiscono con un rivelatore **posto alla distanza L** dalla sorgente di neutrini **di energia E nota**, si possono misurare gli elementi della matrice di mixing e le differenze di massa.

Oscillazioni... online

<http://demonstrations.wolfram.com/NeutrinoOscillations/>

Cosa ci insegnano le oscillazioni di neutrini?

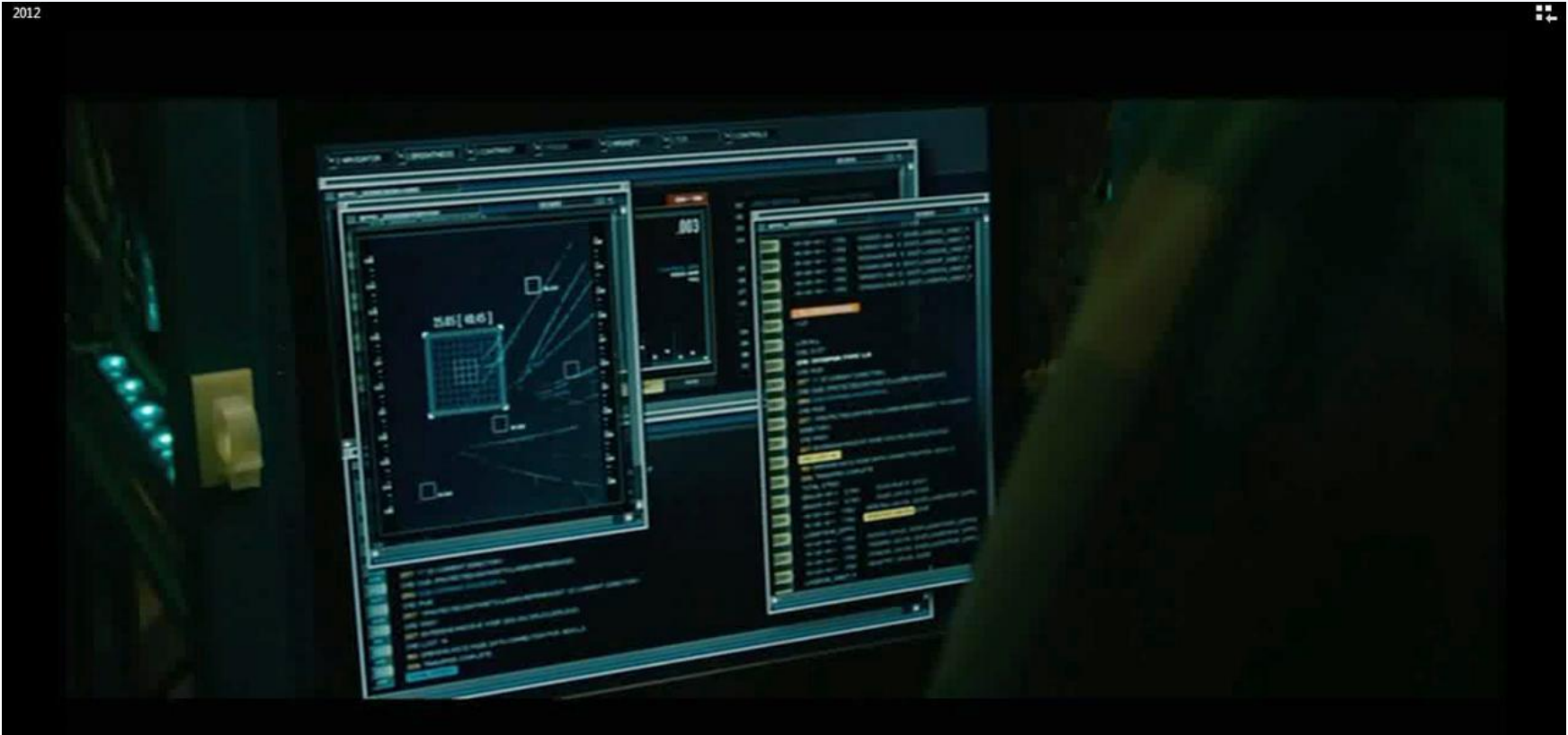
- 1) Se i neutrini oscillano, allora almeno una delle specie ha massa non nulla (segnale di fisica al di là del Modello Standard).
- 2) Matrice di mixing analoga a quella del settore dei quarks: possibile origine comune?
- 3) Se i neutrini oscillano, il numero leptonico di flavour non si conserva.
- 4) 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.

Come si rivelano i neutrini?



Come NON si rivelano i neutrini!

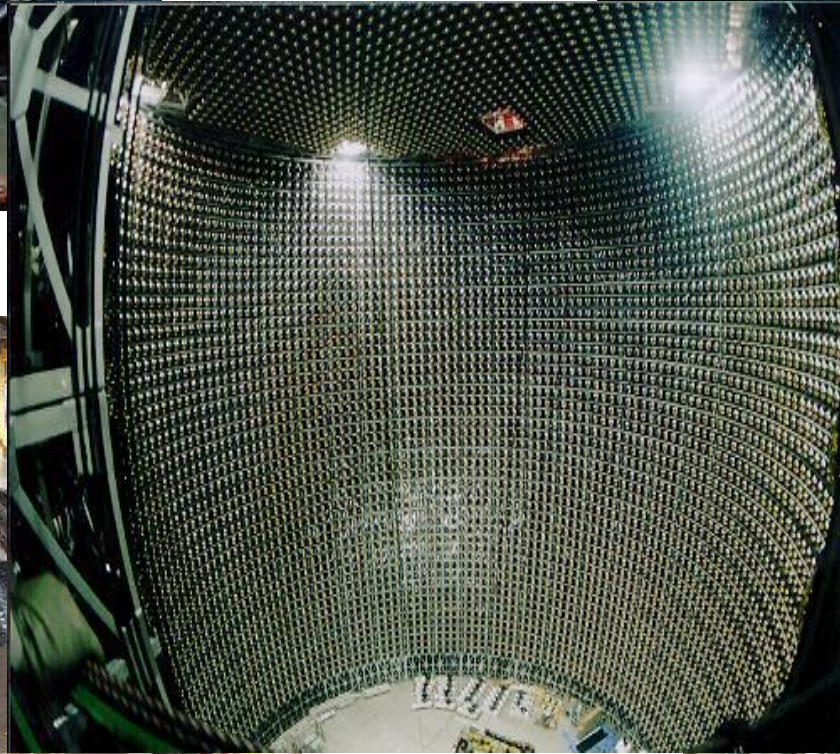
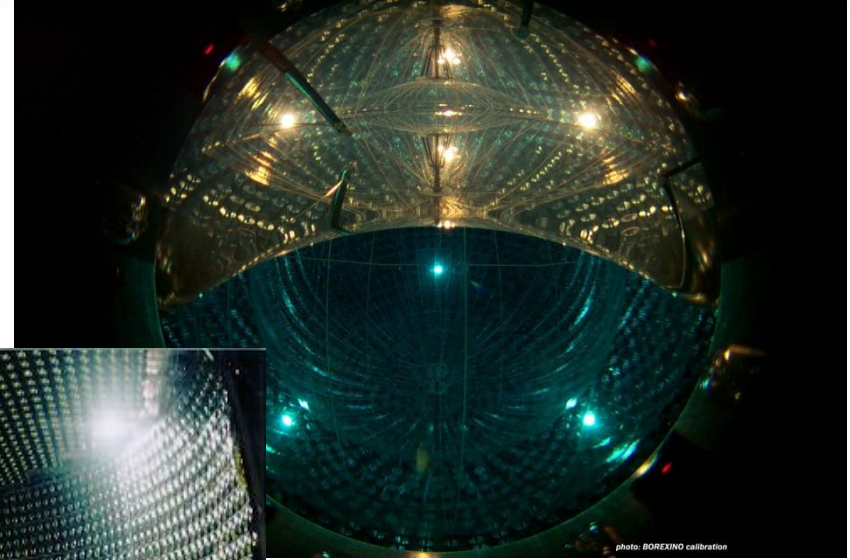
Dal film «2012» di R. Emmerich (2009)



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

They're hitting the Earth's core, and suddenly act like microwaves!

Come si rivelano i neutrini?

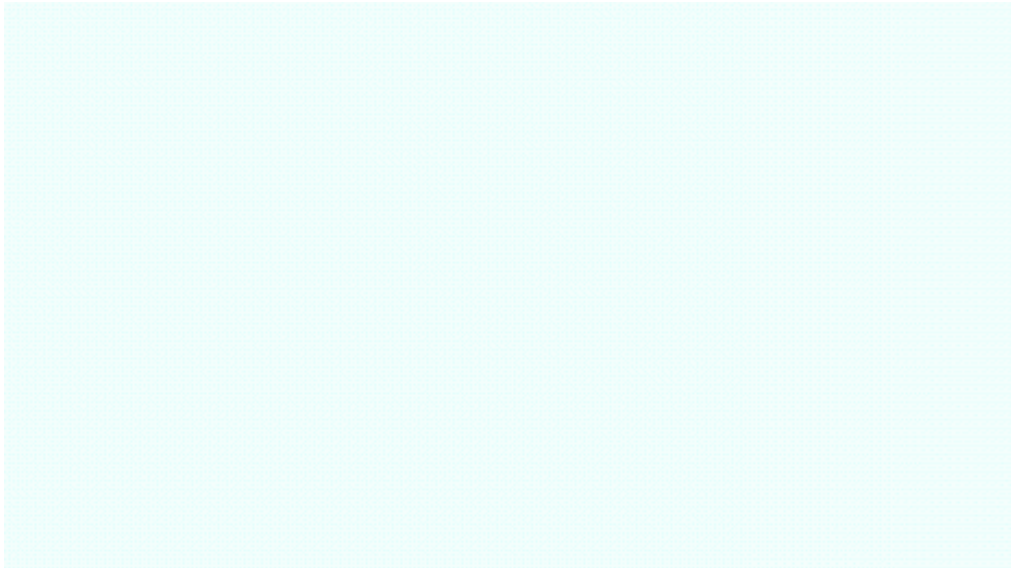


Tecniche sperimentali

- Probabilità di interazione con la materia bassa → rivelatori di grande massa $O(1\div 100 \text{ kton})$ e sorgenti intense di neutrini.
- Eventi rari da cercare all'interno del fondo di radiazione cosmica → rivelatori schermati con veto attivo o passivo oppure installati in laboratori sotterranei.
- Identificazione dei parametri fondamentali di ciascuna interazione di neutrino: tipo, energia, direzione.
- Molte tecniche sperimentali diverse: ci focalizziamo sui Ring Water Cerenkov detectors, come SuperKamiokande e SNO.

I rivelatori Ring Water Cerenkov

- 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 Cerenkov:



Cono di semiapertura:

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

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

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

I rivelatori Ring Water Cerenkov

- Un'interazione di neutrino con gli elettroni o i nuclei dell'acqua può produrre particelle **con velocità maggiore di quella della luce in acqua**.
- Il cono di luce Cerenkov delle particelle viene proiettato con una **forma di anello** sulle pareti del rivelatore.
- Se copriamo la superficie interna del rivelatore con dei **foto-rivelatori**, possiamo ricostruire la direzione dell'anello e il vertice primario dell'interazione del neutrino.
- Il flavour del neutrino si determina dal flavour del leptone carico prodotto attraverso la misura della **nitidezza dell'anello**.

I rivelatori Ring Water Cerenkov

Esempio: interazione ν_μ CC

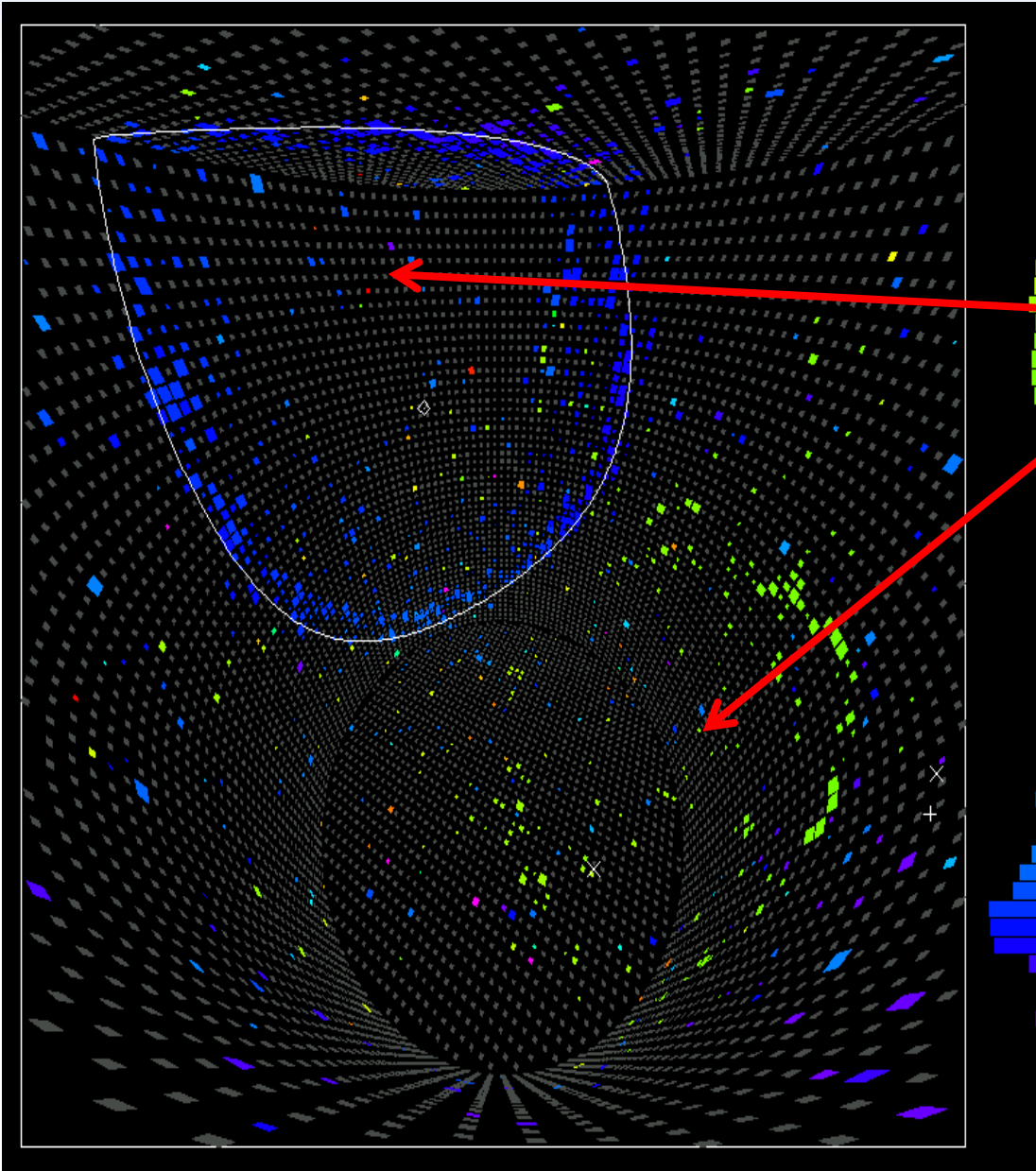
Si notano:

- 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 Cerenkov su ciascun foto-rivelatore.

- La dimensione del pixel è proporzionale alla quantità di luce rivelata.

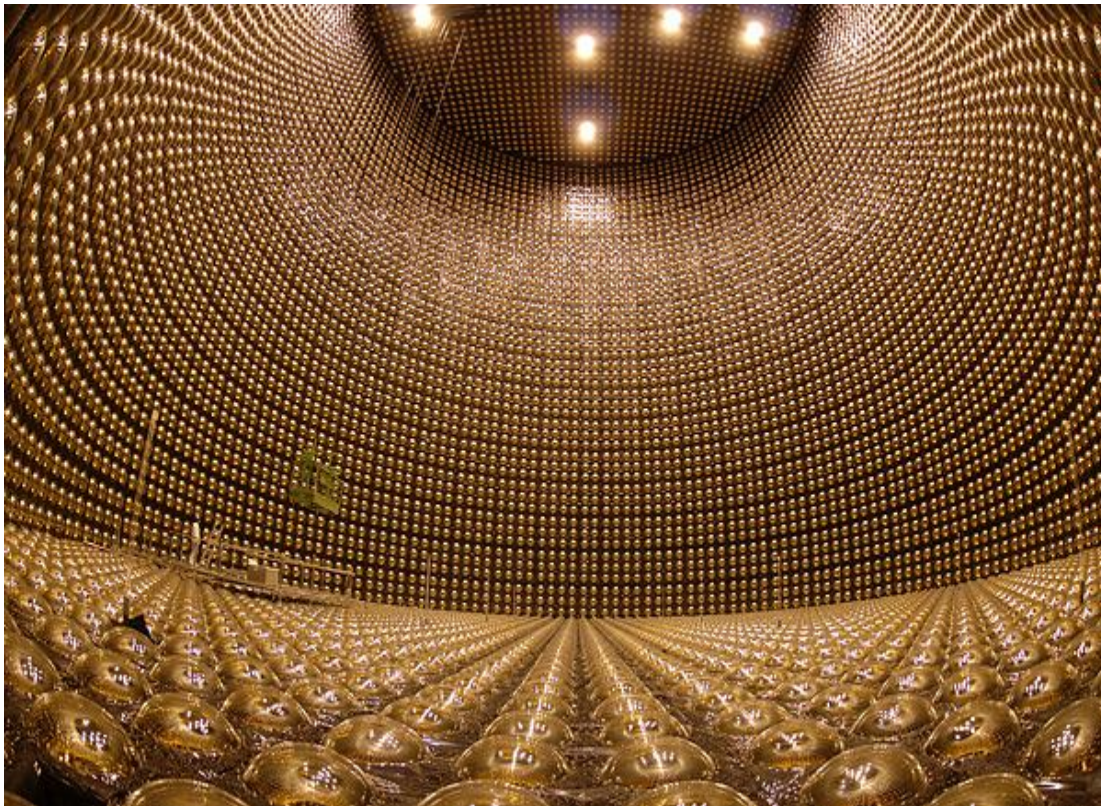


Cosa hanno scoperto i vincitori del Nobel 2015?



Super Kamiokande

- Ring Water Cerenkov - 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!

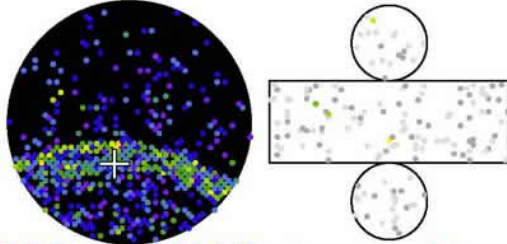
- Neutrini atmosferici
- Neutrini solari
- Neutrini da SuperNova
- Neutrini da acceleratori
- Decadimento del protone

- $L/E \sim 10^5 \text{ Km/1 GeV} \rightarrow$
sensibilità fino a $\Delta m^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$

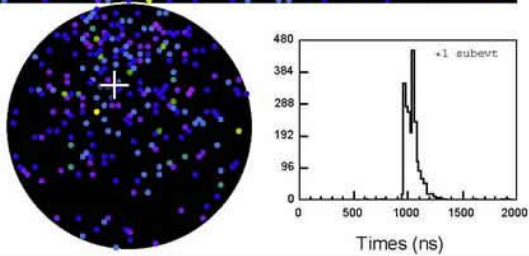
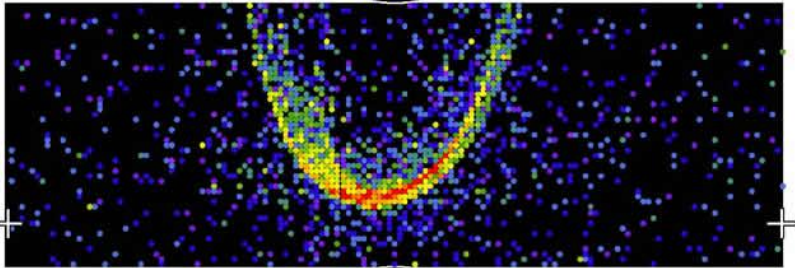
Super Kamiokande

Super-Kamiokande I

Run 1728 Sub 4 Ev 25171
96-05-29:08:01:53
Inner: 2294 hits, 7095 pE
Outer: 4 hits, 32 pE (in-time)
Trigger ID: 0x03
D wall: 592.8 cm
PC mu-like, $p = 1012.9$ MeV/c

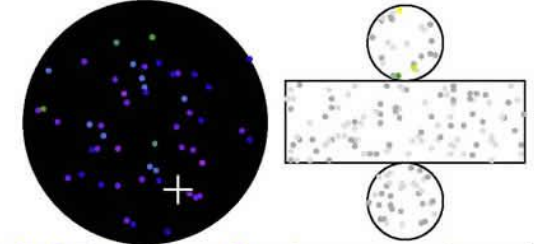


Charge (pe)

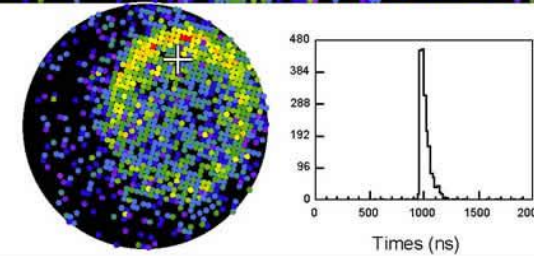
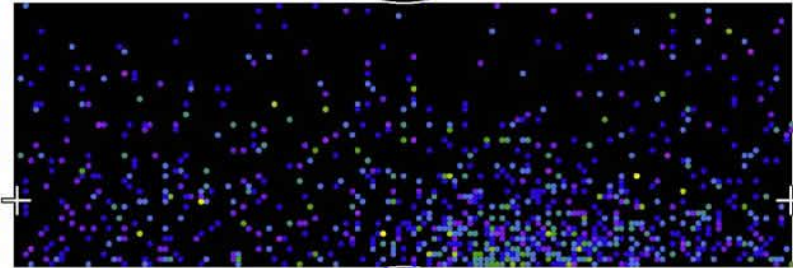


Super-Kamiokande I

Run 1757 Sub 4 Ev 25716
96-06-03:07:51:37
Inner: 1948 hits, 5243 pE
Outer: 4 hits, 30 pE (in-time)
Trigger ID: 0x03
D wall: 671.6 cm
PC e-like, $p = 618.1$ MeV/c



Charge (pe)



Evento di neutrino ν_{μ} CC

Evento di neutrino ν_e CC

Super Kamiokande

VOLUME 81, NUMBER 8

PHYSICAL REVIEW LETTERS

24 AUGUST 1998

Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos

Y. Fukuda,¹ T. Hayakawa,¹ E. Ichihara,¹ K. Inoue,¹ K. Ishihara,¹ H. Ishino,¹ Y. Itow,¹ T. Kajita,¹ J. Kameda,¹
S. Kasuga,¹ K. Kobayashi,¹ Y. Kobayashi,¹ Y. Koshio,¹ M. Miura,¹ M. Nakahata,¹ S. Nakayama,¹ A. Okada,¹
K. Okumura,¹ N. Sakurai,¹ M. Shiozawa,¹ Y. Suzuki,¹ Y. Takeuchi,¹ Y. Totsuka,¹ S. Yamada,¹ M. Earl,² A. Habig,²
E. Kearns,² M. D. Messier,² K. Scholberg,² J. L. Stone,² L. R. Sulak,² C. W. Walter,² M. Goldhaber,³ T. Barszczak,⁴
D. Casper,⁴ W. Gajewski,⁴ P. G. Halverson,^{4,*} J. Hsu,⁴ W. R. Kropp,⁴ L. R. Price,⁴ F. Reines,⁴ M. Smy,⁴ H. W. Sobel,⁴
M. R. Vagins,⁴ K. S. Ganezer,⁵ W. E. Keig,⁵ R. W. Ellsworth,⁶ S. Tasaka,⁷ J. W. Flanagan,^{8,†} A. Kibayashi,⁸
J. G. Learned,⁸ S. Matsuno,⁸ V. J. Stenger,⁸ D. Takemori,⁸ T. Ishii,⁹ J. Kanzaki,⁹ T. Kobayashi,⁹ S. Mine,⁹
K. Nakamura,⁹ K. Nishikawa,⁹ Y. Oyama,⁹ A. Sakai,⁹ M. Sakuda,⁹ O. Sasaki,⁹ S. Echigo,¹⁰ M. Kohama,¹⁰
A. T. Suzuki,¹⁰ T. J. Haines,^{11,4} E. Blaufuss,¹² B. K. Kim,¹² R. Sanford,¹² R. Svoboda,¹² M. L. Chen,¹³ Z. Conner,^{13,‡}
J. A. Goodman,¹³ G. W. Sullivan,¹³ J. Hill,¹⁴ C. K. Jung,¹⁴ K. Martens,¹⁴ C. Mauger,¹⁴ C. McGrew,¹⁴ E. Sharkey,¹⁴
B. Viren,¹⁴ C. Yanagisawa,¹⁴ W. Doki,¹⁵ K. Miyano,¹⁵ H. Okazawa,¹⁵ C. Saji,¹⁵ M. Takahata,¹⁵ Y. Nagashima,¹⁶
M. Takita,¹⁶ T. Yamaguchi,¹⁶ M. Yoshida,¹⁶ S. B. Kim,¹⁷ M. Etoh,¹⁸ K. Fujita,¹⁸ A. Hasegawa,¹⁸ T. Hasegawa,¹⁸
S. Hatakeyama,¹⁸ T. Iwamoto,¹⁸ M. Koga,¹⁸ T. Maruyama,¹⁸ H. Ogawa,¹⁸ J. Shirai,¹⁸ A. Suzuki,¹⁸ F. Tsushima,¹⁸
M. Koshihara,¹⁹ M. Nemoto,²⁰ K. Nishijima,²⁰ T. Futagami,²¹ Y. Hayato,^{21,§} Y. Kanaya,²¹ K. Kaneyuki,²¹
Y. Watanabe,²¹ D. Kielczewska,^{22,4} R. A. Doyle,²³ J. S. George,²³ A. L. Stachyra,²³ L. L. Wai,^{23,||}
R. J. Wilkes,²³ and K. K. Young²³
(Super-Kamiokande Collaboration)

We present an analysis of atmospheric neutrino data from a 33.0 kton yr (535-day) exposure of the Super-Kamiokande detector. The data exhibit a zenith angle dependent deficit of muon neutrinos which is inconsistent with expectations based on calculations of the atmospheric neutrino flux. Experimental biases and uncertainties in the prediction of neutrino fluxes and cross sections are unable to explain our observation. The data are consistent, however, with two-flavor $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations with $\sin^2 2\theta > 0.82$ and $5 \times 10^{-4} < \Delta m^2 < 6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ at 90% confidence level. [S0031-9007(98)06975-0]

Super Kamiokande

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:

TABLE I. Summary of the sub-GeV, multi-GeV, and PC event samples compared with the Monte Carlo prediction based on the neutrino flux calculation of Ref. [2].

| | Data | Monte Carlo |
|--|------|-------------|
| Sub-GeV | | |
| Single-ring | 2389 | 2622.6 |
| <i>e</i> -like | 1231 | 1049.1 |
| μ -like | 1158 | 1573.6 |
| Multi-ring | 911 | 980.7 |
| Total | 3300 | 3603.3 |
| $R = 0.63 \pm 0.03$ (stat.) ± 0.05 (syst.) | | |
| Multi-GeV | | |
| Single-ring | 520 | 531.7 |
| <i>e</i> -like | 290 | 236.0 |
| μ -like | 230 | 295.7 |
| Multi-ring | 533 | 560.1 |
| Total | 1053 | 1091.8 |
| Partially contained | 301 | 371.6 |
| $R_{FC+PC} = 0.65 \pm 0.05$ (stat.) ± 0.08 (syst.) | | |

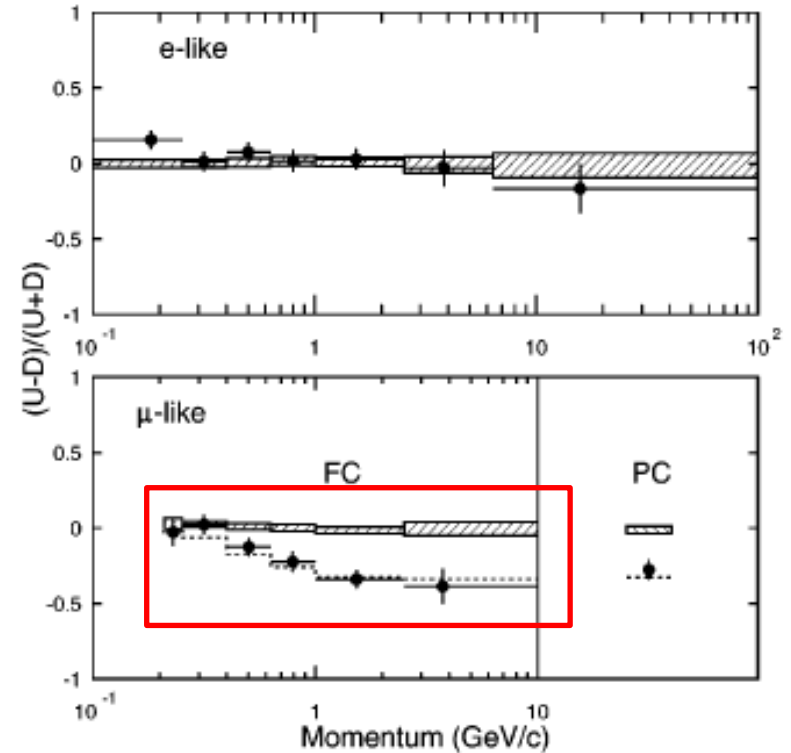


FIG. 1. The $(U - D)/(U + D)$ asymmetry as a function of momentum for FC *e*-like and μ -like events and PC events. While it is not possible to assign a momentum to a PC event, the PC sample is estimated to have a mean neutrino energy of 15 GeV. The Monte Carlo expectation without neutrino oscillations is shown in the hatched region with statistical and systematic errors added in quadrature. The dashed line for μ -like is the expectation for $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillations with $(\sin^2 2\theta = 1.0, \Delta m^2 = 2.2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2)$.

Super Kamiokande

- Test chi quadro: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ sfavorita, $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ favorita.
- Best fit ipotesi di oscillazione a due flavours:

$$\mathcal{P}(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \sin^2(1.27\Delta m^2 L/2E)$$

$$\sin^2 2\theta > 0.82$$

$$5 \times 10^{-4} < \Delta m^2 < 6 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

al 90% CL

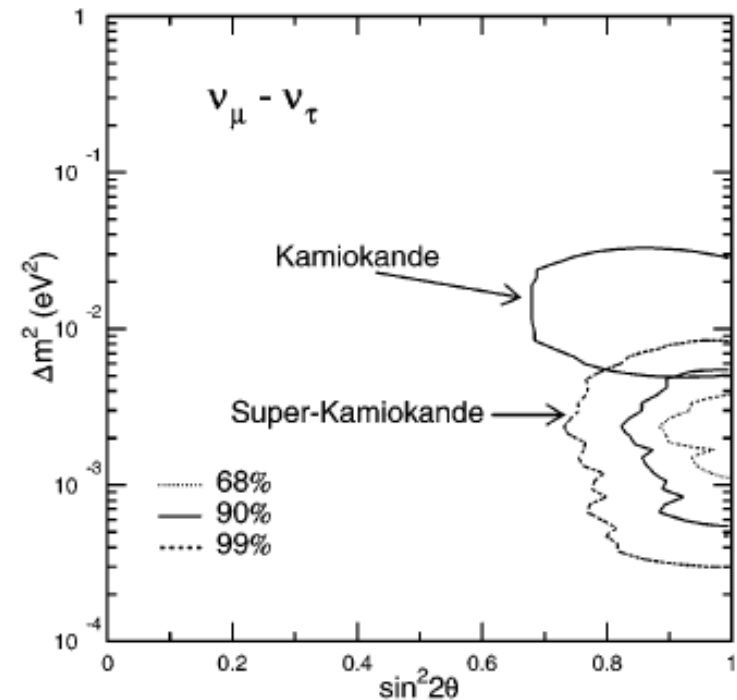
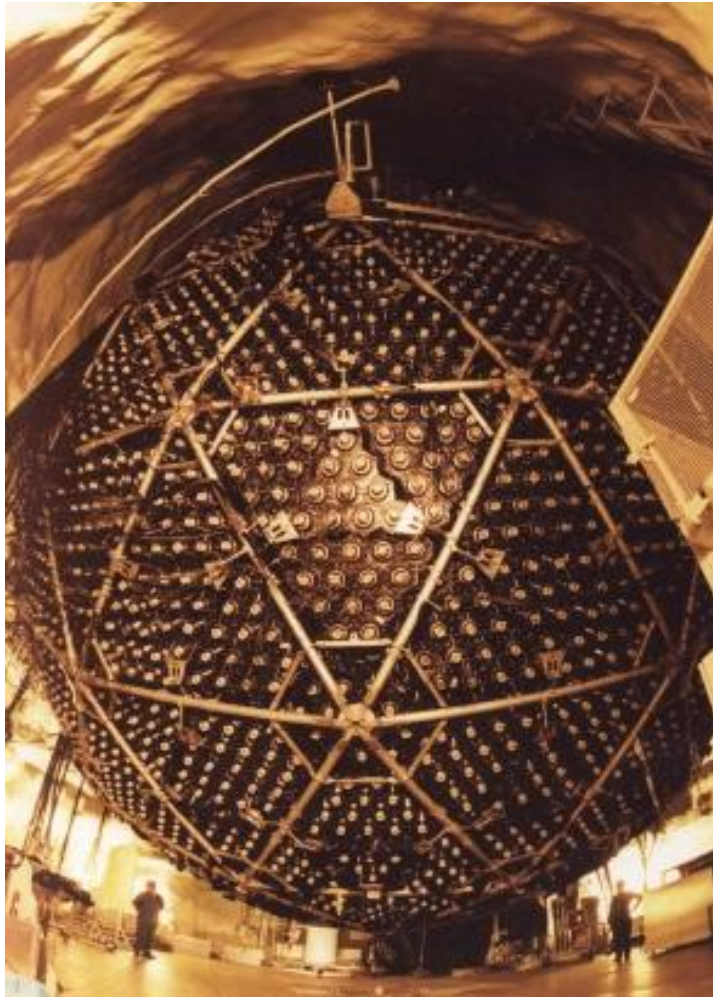


FIG. 2. The 68%, 90%, and 99% confidence intervals are shown for $\sin^2 2\theta$ and Δm^2 for $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ two-neutrino oscillations based on 33.0 kton yr of Super-Kamiokande data. The 90% confidence interval obtained by the Kamiokande experiment is also shown.

Sudbury Neutrino Oscillation (SNO)

- Ring Water Cerenkov - 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".

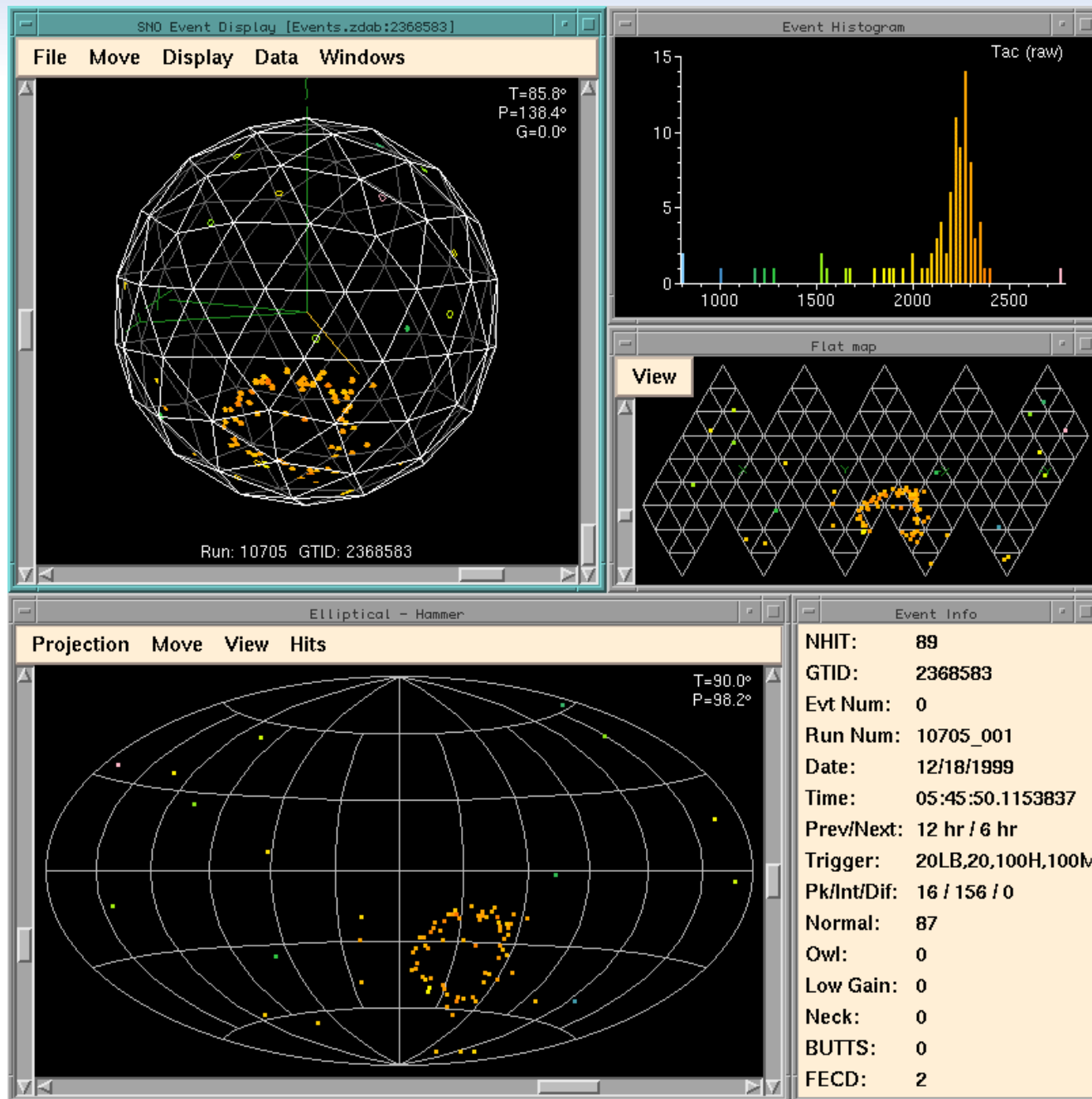


In funzione dal 1999 al 2006

- 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)



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 a quella necessaria alla 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^+** (la rate di ν_e è circa sei volte maggiore). La direzione dell'elettrone ci dà anche la direzione del neutrino.



Ridondanza di informazioni!

Sudbury Neutrino Oscillation (SNO)

VOLUME 89, NUMBER 1

PHYSICAL REVIEW LETTERS

1 JULY 2002

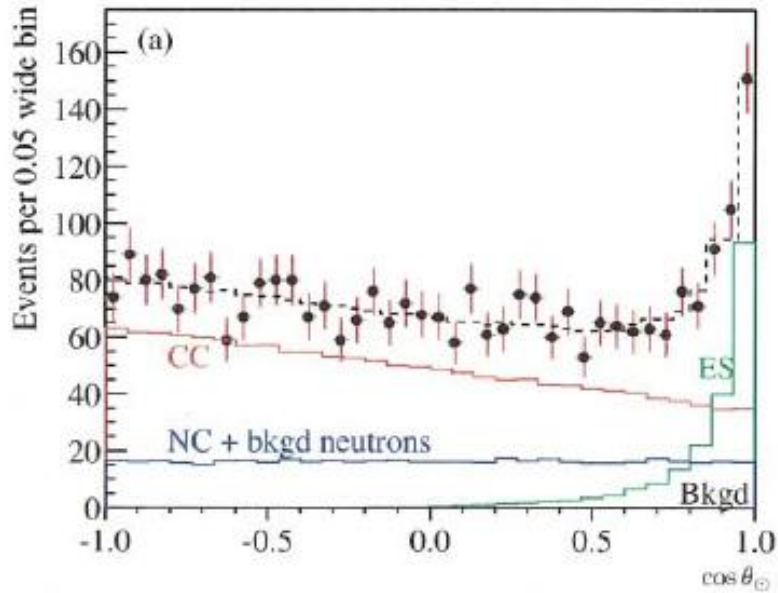
Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory

Q. R. Ahmad,¹⁷ R. C. Allen,⁴ T. C. Andersen,⁶ J. D. Anglin,¹⁰ J. C. Barton,^{11,*} E. W. Beier,¹² M. Bercovitch,¹⁰ J. Bigu,⁷ S. D. Biller,¹¹ R. A. Black,¹¹ I. Blevis,⁵ R. J. Boardman,¹¹ J. Boger,³ E. Bonvin,¹⁴ M. G. Boulay,^{9,14} M. G. Bowler,¹¹ T. J. Bowles,⁹ S. J. Brice,^{9,11} M. C. Browne,^{17,9} T. V. Bullard,¹⁷ G. Bühler,⁴ J. Cameron,¹¹ Y. D. Chan,⁸ H. H. Chen,^{4,†} M. Chen,¹⁴ X. Chen,^{8,11} B. T. Cleveland,¹¹ E. T. H. Clifford,¹⁴ J. H. M. Cowan,⁷ D. F. Cowen,¹² G. A. Cox,¹⁷ X. Dai,¹¹ F. Dalnoki-Veress,⁵ W. F. Davidson,¹⁰ P. J. Doe,^{17,9,4} G. Doucas,¹¹ M. R. Dragowsky,^{9,8} C. A. Duba,¹⁷ F. A. Duncan,¹⁴ M. Dunford,¹² J. A. Dunmore,¹¹ E. D. Earle,^{14,1} S. R. Elliott,^{17,9} H. C. Evans,¹⁴ G. T. Ewan,¹⁴ J. Farine,^{7,5} H. Fergani,¹¹ A. P. Ferraris,¹¹ R. J. Ford,¹⁴ J. A. Formaggio,¹⁷ M. M. Fowler,⁹ K. Frame,¹¹ E. D. Frank,¹² W. Frati,¹² N. Gagnon,^{11,9,8,17} J. V. Germani,¹⁷ S. Gil,² K. Graham,¹⁴ D. R. Grant,⁵ R. L. Hahn,³ A. L. Hallin,¹⁴ E. D. Hallman,⁷ A. S. Hamer,^{9,14} A. A. Hamian,¹⁷ W. B. Handler,¹⁴ R. U. Haq,⁷ C. K. Hargrove,⁵ P. J. Harvey,¹⁴ R. Hazama,¹⁷ K. M. Heeger,¹⁷ W. J. Heintzelman,¹² J. Heise,^{2,9} R. L. Helmer,^{16,2} J. D. Hepburn,¹⁴ H. Heron,¹¹ J. Hewett,⁷ A. Hime,⁹ M. Howe,¹⁷ J. G. Hykawy,⁷ M. C. P. Isaac,⁸ P. Jagam,⁶ N. A. Jelley,¹¹ C. Jillings,¹⁴ G. Jonkmans,^{7,1} K. Kazkaz,¹⁷ P. T. Keener,¹² J. R. Klein,¹² A. B. Knox,¹¹ R. J. Komar,² R. Kouzes,¹³ T. Kutter,² C. C. M. Kyba,¹² J. Law,⁶ I. T. Lawson,⁶ M. Lay,¹¹ H. W. Lee,¹⁴ K. T. Lesko,⁸ J. R. Leslie,¹⁴ I. Levine,⁵ W. Locke,¹¹ S. Luoma,⁷ J. Lyon,¹¹ S. Majerus,¹¹ H. B. Mak,¹⁴ J. Maneira,¹⁴ J. Manor,¹⁷ A. D. Marino,⁸ N. McCauley,^{12,11} A. B. McDonald,^{14,†} D. S. McDonald,¹² K. McFarlane,⁵ G. McGregor,¹¹ R. Meijer Drees,¹⁷ C. Mifflin,⁵ G. G. Miller,² G. Milton,¹ B. A. Moffat,¹⁴ M. Moorhead,¹¹ C. W. Nally,² M. S. Neubauer,¹² F. M. Newcomer,¹² H. S. Ng,² A. J. Noble,^{16,5} E. B. Norman,⁸ V. M. Novikov,⁵ M. O'Neill,⁵ C. E. Okada,⁸ R. W. Ollerhead,⁶ M. Omori,¹¹ J. L. Orrell,¹⁷ S. M. Oser,¹² A. W. P. Poon,^{8,17,2,9} T. J. Radcliffe,¹⁴ A. Roberge,⁷ B. C. Robertson,¹⁴ R. G. H. Robertson,^{17,9} S. S. E. Rosendahl,⁸ J. K. Rowley,³ V. L. Rusu,¹² E. Saettler,⁷ K. K. Schaffer,¹⁷ M. H. Schwendener,⁷ A. Schülke,⁸ H. Seifert,^{7,17,9} M. Shatkay,⁵ J. J. Simpson,⁶ C. J. Sims,¹¹ D. Sinclair,^{5,16} P. Skensved,¹⁴ A. R. Smith,⁸ M. W. E. Smith,¹⁷ T. Spreitzer,¹² N. Starinsky,⁵ T. D. Steiger,¹⁷ R. G. Stokstad,⁸ L. C. Stonehill,¹⁷ R. S. Storey,¹⁰ B. Sur,^{1,14} R. Tafirout,⁷ N. Tagg,^{6,11} N. W. Tanner,¹¹ R. K. Taplin,¹¹ M. Thorman,¹¹ P. M. Thornewell,¹¹ P. T. Trent,¹¹ Y. I. Tserkovnyak,² R. Van Berg,¹² R. G. Van de Water,^{9,12} C. J. Virtue,⁷ C. E. Waltham,² J.-X. Wang,⁶ D. L. Wark,^{15,11,9} N. West,¹¹ J. B. Wilhelmy,⁹ J. F. Wilkerson,^{17,9} J. R. Wilson,¹¹ P. Wittich,¹² J. M. Wouters,⁹ and M. Yeh³

(SNO Collaboration)

Observations of neutral-current ν interactions on deuterium in the Sudbury Neutrino Observatory are reported. Using the neutral current (NC), elastic scattering, and charged current reactions and assuming the standard ${}^8\text{B}$ shape, the ν_e component of the ${}^8\text{B}$ solar flux is $\phi_e = 1.76_{-0.05}^{+0.05}(\text{stat})_{-0.09}^{+0.09}(\text{syst}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ for a kinetic energy threshold of 5 MeV. The non- ν_e component is $\phi_{\mu\tau} = 3.41_{-0.45}^{+0.45}(\text{stat})_{-0.45}^{+0.48}(\text{syst}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 5.3σ greater than zero, providing strong evidence for solar ν_e flavor transformation. The total flux measured with the NC reaction is $\phi_{\text{NC}} = 5.09_{-0.43}^{+0.44}(\text{stat})_{-0.43}^{+0.46}(\text{syst}) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, consistent with solar models.

Sudbury Neutrino Oscillation (SNO)



$$\phi_{CC}^{SNO} = 1.76_{-0.05}^{+0.06}(\text{stat})_{-0.09}^{+0.09}(\text{syst}),$$

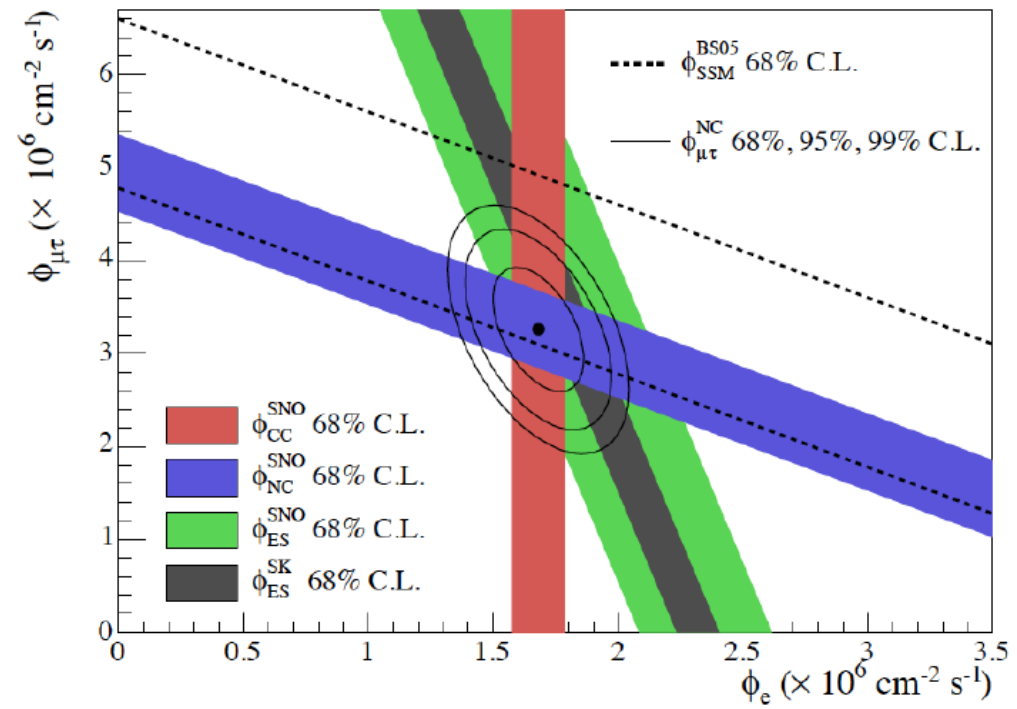
$$\phi_{ES}^{SNO} = 2.39_{-0.23}^{+0.24}(\text{stat})_{-0.12}^{+0.12}(\text{syst}),$$

$$\phi_{NC}^{SNO} = 5.09_{-0.43}^{+0.44}(\text{stat})_{-0.43}^{+0.46}(\text{syst}).$$

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

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

SSM: $\Phi_\nu = (5, 69 \pm 0, 91)$

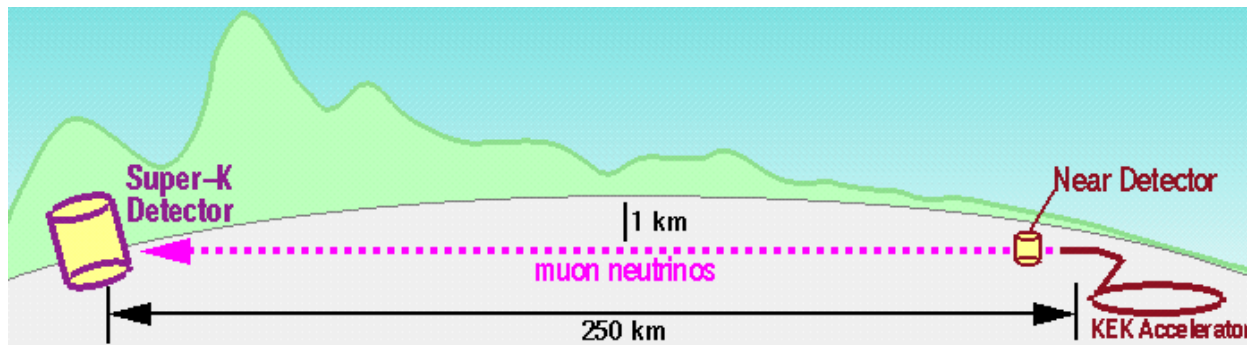


(Tutti i flussi in unità di $10^6 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

2002-2015: Fisica di precisione delle oscillazioni

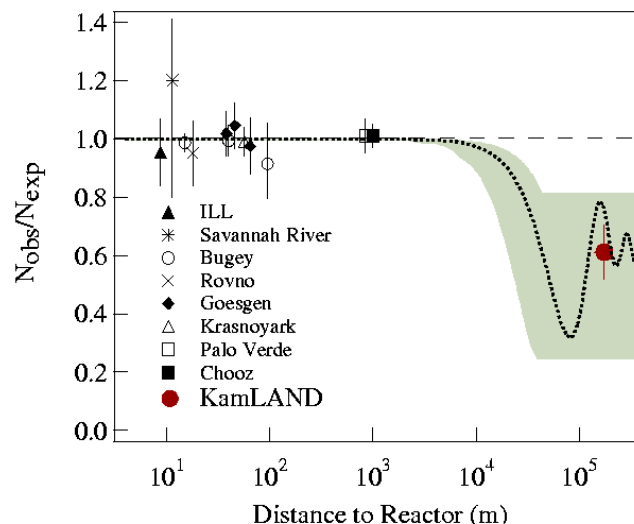
I risultati di SuperKamiokande e SNO sono stati confermati e migliorati da una serie di esperimenti successivi con sorgenti naturali (atmosferici e solari) e artificiali (reattori e fasci di neutrini da acceleratore):

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



Conferma risultati atmosferici SK

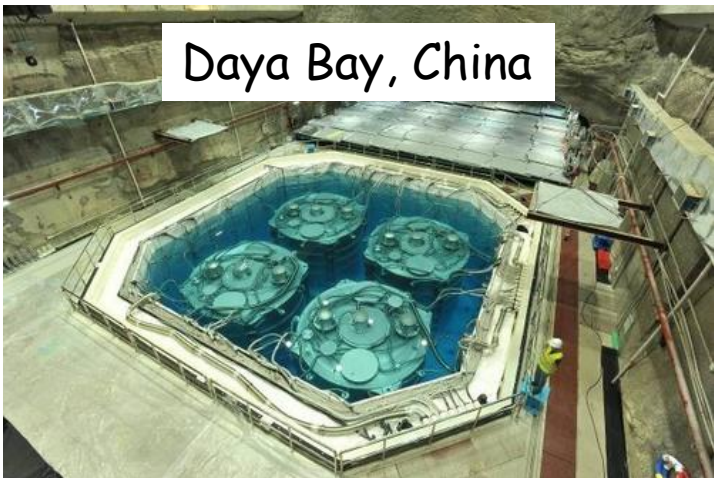
- Kamland: anti ν_e da reattore con una baseline $L = 180$ Km e $E_\nu \sim 4$ MeV.



Conferma risultati solari SNO

2002-2015: Fisica di precisione delle oscillazioni

- Daya Bay, Reno (antineutrino da reattore) e T2K (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 (catene pep, pp)**.
- OPERA (Gran Sasso) rivela per la prima volta i **neutrini del tau** che provengono dall'oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ (fascio CNGS dal CERN al Gran Sasso).

Cosa sappiamo oggi, e cosa manca?



Cosa sappiamo oggi...

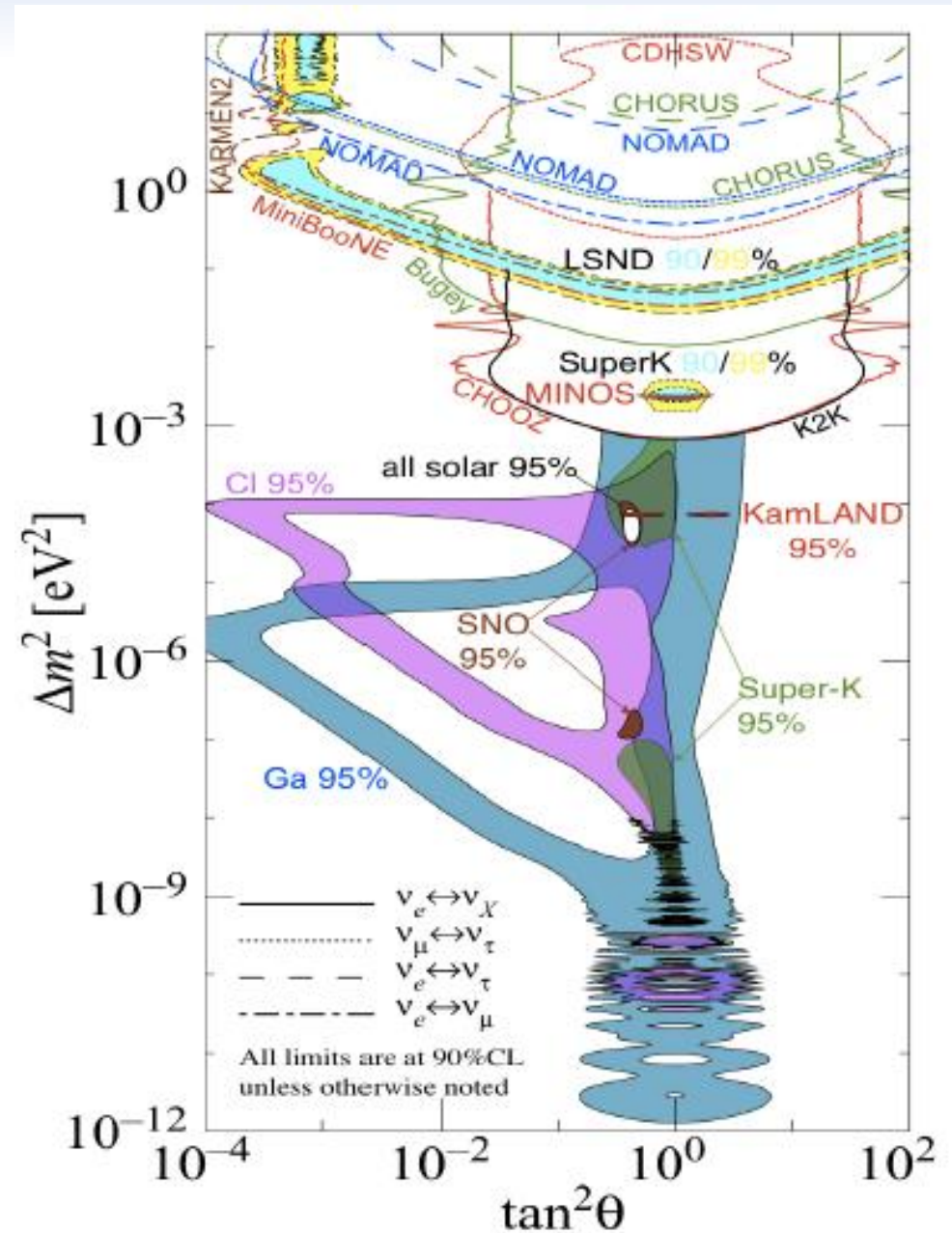
$$\sin^2 \theta_{12} = 0.312^{+0.018}_{-0.015}$$

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

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

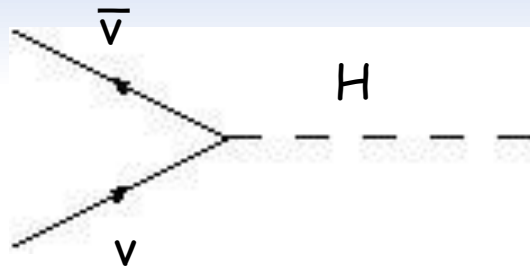
$$\Delta m_{sol}^2 = (7.59 \pm 0.21) \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

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

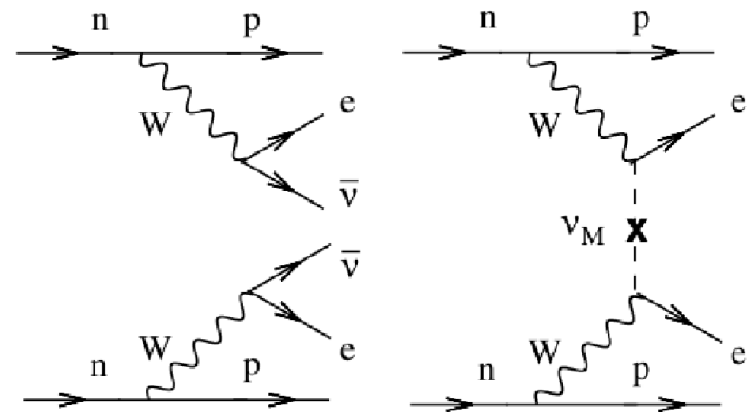


...e cosa manca!

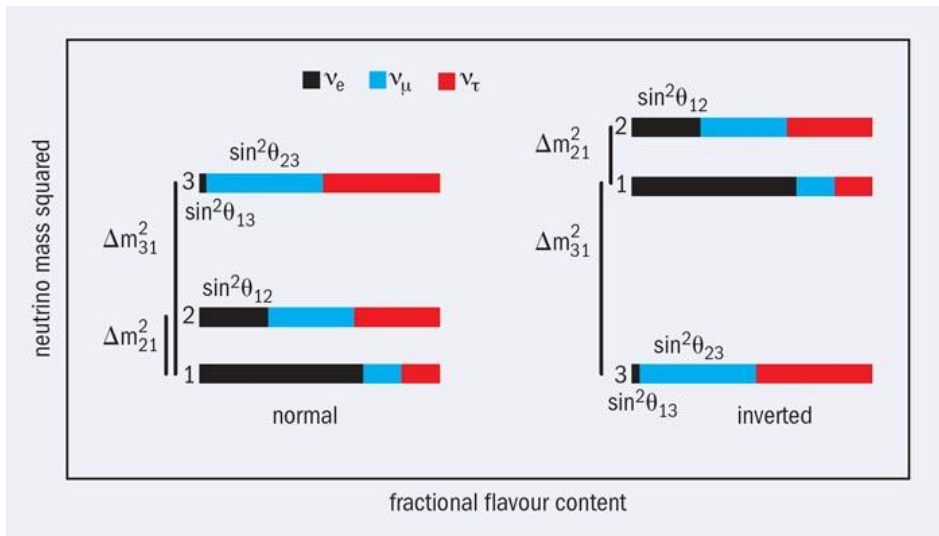
Masse assolute dei neutrini



Neutrino di Dirac o di Majorana?



Gerarchia di massa



Violazione di CP nel settore leptonic?

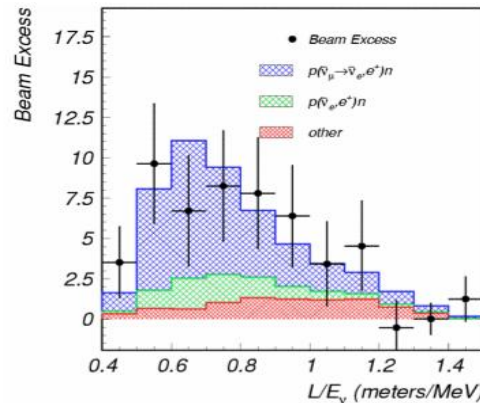
$$\begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{+i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}$$

Il prossimo futuro: il puzzle dei neutrini sterili

Risultato del 1998!



LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector)



Saw an excess of $\bar{\nu}_e$:
 $87.9 \pm 22.4 \pm 6.0$ events.

With an oscillation probability of
 $(0.264 \pm 0.067 \pm 0.045)\%$.

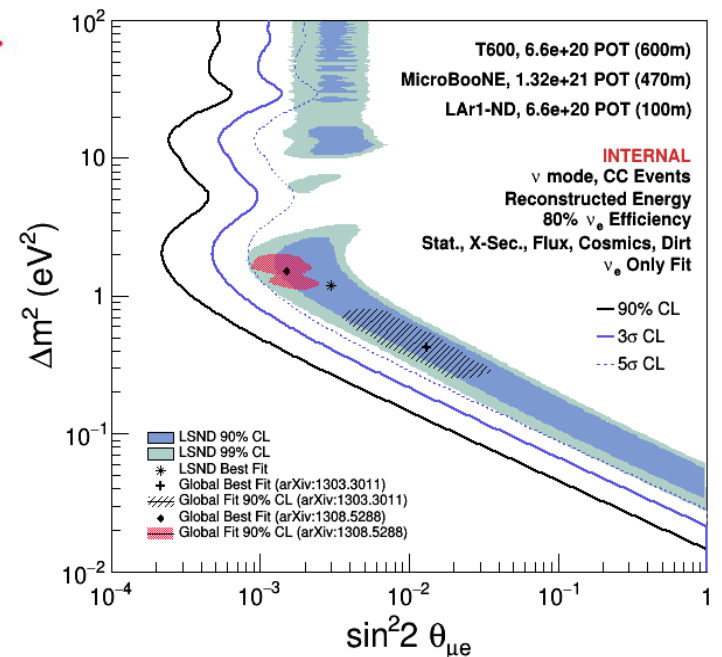
3.8 σ evidence for oscillation.

Altre anomalie con esperimenti di oscillazione con reattori e sorgenti radioattive...

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

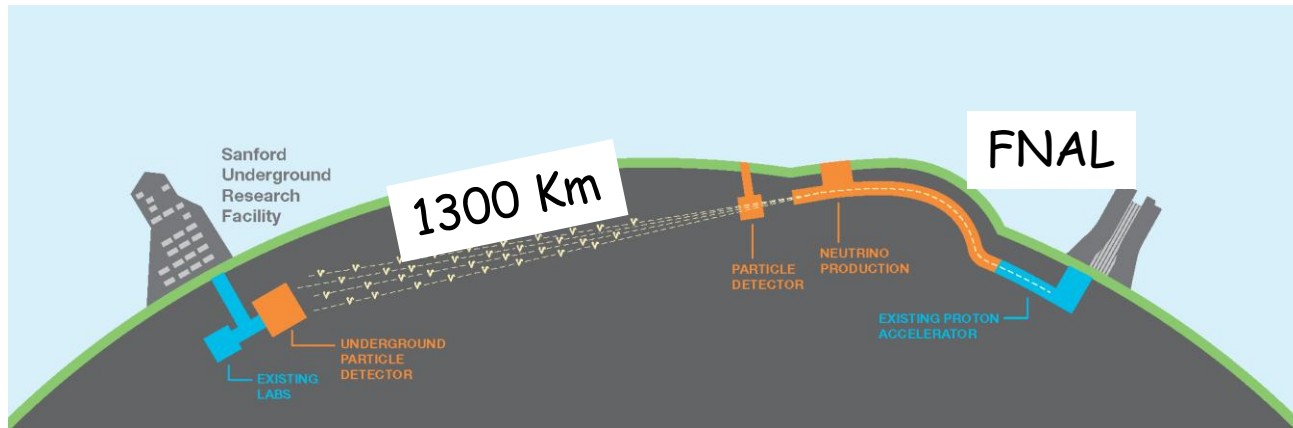


SBN experiment @ FNAL (2017)



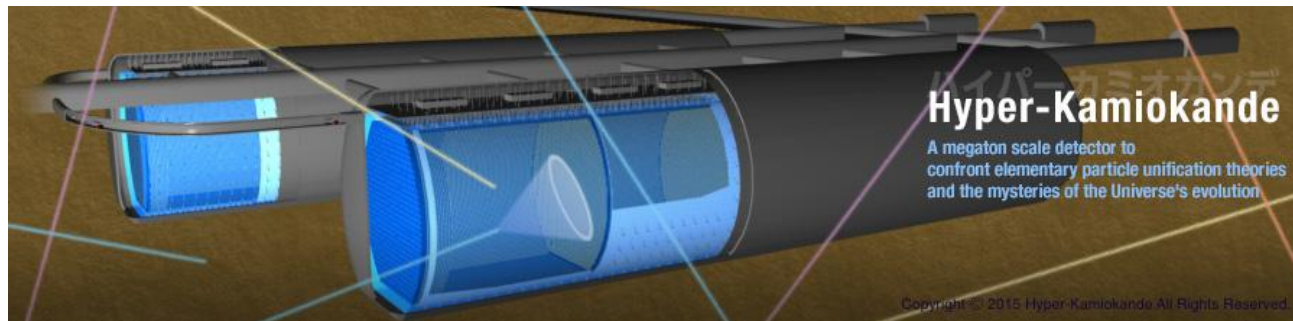
Il lontano futuro: DUNE e HyperK

DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment)



40,000 tonnellate LAr Time Projection Chamber

Hyper-Kamiokande



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

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

Bibliografia essenziale

- ✓ *B. Pontecorvo*, Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki, **34** 247 (1957); Soviet Physics—JETP **7** 172 (1958).
- ✓ *Y. Fukuda et al.* (Super-Kamiokande Collaboration) Phys. Rev. Lett. **81**, 1562 (1998).
- ✓ (SNO Collaboration) Phys. Rev. Lett. volume **89**, No. 1, 011301 (2002) .
- ✓ *A.B. McDonald*, New J. Phys. **6** 121 (2004).
- ✓ *T. Kajita*, Rept. Prog. Phys. **69** 1607 (2006).
- ✓ *C. Giunti, C. W. Kim*, Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics , Oxford University Press, Oxford, UK, 2007. ISBN 978-0-19-850871-7
- ✓ Neutrino unbound: <http://www.nu.to.infn.it/>
- ✓ Super Kamiokande: <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index-e.html>
- ✓ SNO: <http://www.sno.phy.queensu.ca/>

The image shows the interior of a large particle detector, likely the ATLAS experiment at CERN. The structure is a large, cylindrical cavern with a golden, spherical inner wall. The wall is covered in a dense grid of small, circular detectors. The floor is also covered in a similar grid of larger, circular detectors. The lighting is warm and golden, highlighting the intricate details of the detector's construction. The text "Grazie per l'attenzione!" is overlaid in the center of the image.

Grazie per l'attenzione!