

Società Italiana di Fisica
101° Congresso Nazionale
ROMA. 21-25 Settembre 2013

I magnifici tre neutrini
Misurare l'imprevisto

A. Bettini

Università di Padova, Dipartimento di Fisica e Astronomia G. Galilei
INFN - Sezione di Padova

A. Bettini Padova University and INFN

I neutrini oggi

I neutrini sono secondi in abbondanza nell'universo ai soli fotoni, tra le particelle che conosciamo. Abbiamo rivelato neutrini dalla **crosta della Terra, dall'atmosfera, dal Sole, da Supernova, dalla Galassia** (non ancora il fondo cosmico), **da reattori nucleari e acceleratori**.

Tre “famiglie” di leptoni con strutture uguali, distinte dalle masse dei loro elementi carichi

Ogni famiglia ha un “sapore” leptonico (**elettrone, mu, tau**)

Leptoni

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

Antileptoni

$$\begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$$

Il Modello Standard assume che:

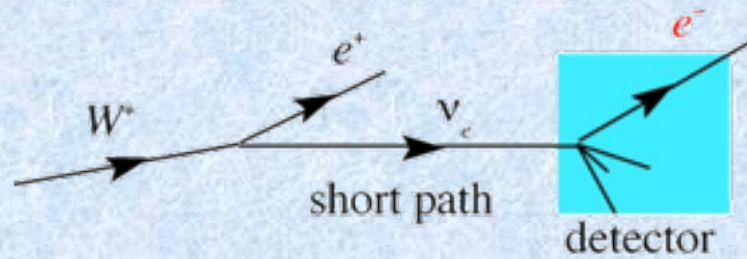
- Neutrini di sapore definito hanno massa definita (stazionari) **FALSO**
- I neutrini hanno massa nulla **FALSO**
- Neutrini: solo elicità negativa; antineutrini: solo positiva **Probabilmente FALSO**
- Neutrini e antineutrini sono distinti dal numero leptonico **NON PROVATO**
- Sono tre **OK** (a parte “anomalie”, ma $< 3 \sigma$)

Definizioni

ν_e = la particella neutra prodotta con e^+ (e.g. nel decadimento β^+)

anti ν_e = la particella neutra prodotta con e^- (e.g. nel decadimento β^-)

Analogamente per ν_μ e ν_τ



I neutrini non si possono rivelare direttamente

Si rivela **il leptone carico prodotto col neutrino alla nascita, dal neutrino all'interazione**, che ne identifica il sapore

Il sapore **alla rivelazione** è uguale a quello **alla produzione**?

SÌ, ma solo se il tempo proprio passato (L/E) è breve

NO, se passa abbastanza tempo proprio il “sapore” al rivelatore può essere diverso

1930. W. Pauli. *Il rimedio disperato*

**Gli spettri dell'elettrone nei decadimenti beta dei nuclei sono continui
La conservazione dell'energia è violata? (e quelle del momento e del momento angolare?)**

*“Liebe Radioactive Damen und Herren
sfortunatamente non posso essere a Tubinga, poiché sono indispensabile
qui a Zurigo per un ballo la notte tra il 6 e il 7 dicembre. ...
Considerando lo spettro β continuo, ho incontrato un rimedio
disperato per salvare la conservazione dell'energia*

Nel nucleo, oltre a elettroni e protoni (dei quali si pensava essere composto) ci sono particelle neutre di massa piccolissima o nulla, che vengono emessi con gli elettroni nel decadimento beta



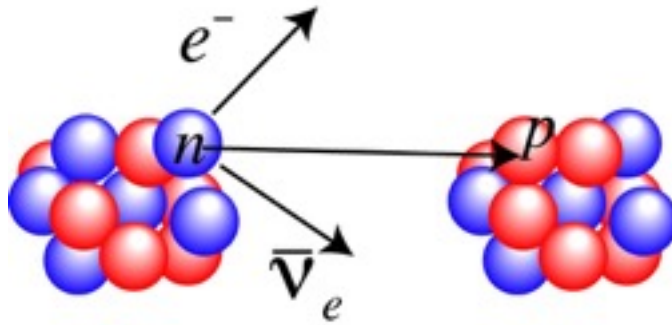
1932. Chadwick scopre il neutrone, fratello del protone

Più tardi : *“Ho fatto una cosa terribile. Ho postulato una particella che non si può rivelare. Una cosa che un fisico teorico non deve mai fare.”*

L'ultima frase di W.P. è riferita da Reines, nella prefazione a *Spaceship Neutrino* di C. Sutton (1992), p. XI]

1933. E. Fermi. L'interazione debole

Nota preliminare su La Ricerca Scientifica. Dicembre 1933



1934 *Nuovo Cimento* 11 1

Sunto. - Si propone una teoria quantitativa dell'emissione dei raggi β in cui si ammette l'esistenza del « neutrino » e si tratta l'emissione degli elettroni e dei neutrini da un nucleo all'atto della disintegrazione β con un procedimento simile a quello seguito nella teoria dell'irradiazione per descrivere l'emissione di un quanto di luce da un atomo eccitato. Vengono dedotte delle formule per la vita media e per la forma dello spettro continuo dei raggi β , e le si confrontano coi dati sperimentali.

N.B. Neutrino ed elettrone sono creati al momento dell'emissione. Prima non ci sono

Ancora due giganti



1937. Ettore Majorana

1928 Dirac

equazione relativistica per particelle di spin $\frac{1}{2}$ e loro antiparticelle
(4 gradi di libertà). $(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi(x) = 0$

Approccio inizialmente asimmetrico \rightarrow energie negative

TEORIA SIMMETRICA DELL'ELETTRONE E DEL POSITRONE

Nota di ETTORE MAJORANA

Nuovo Cimento 14 (1937) 171

1937. Majorana

Il nuovo approccio permette

di dare una forma simmetrica alla teoria elettroni-positroni,
di eliminare la necessità *di parlare di stati di energia negativa*

Energia negativa/positiva \rightarrow Carica negativa/positiva

di costruire una teoria sostanzialmente nuova per le particelle senza carica elettrica

Particella neutra ha solo 2 gradi di libertà. Neutrino = antineutrino

1939. W. H. Furry

DECEMBER 15, 1939

PHYSICAL REVIEW

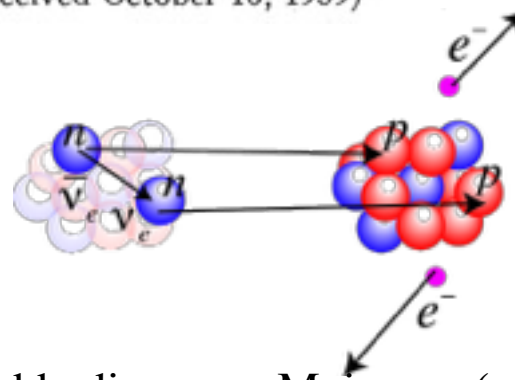
VOLUME 56

On Transition Probabilities in Double Beta-Disintegration

W. H. FURRY

Physics Research Laboratory, Harvard University, Cambridge, Massachusetts

(Received October 16, 1939)



$0\nu 2\beta$

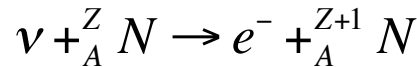
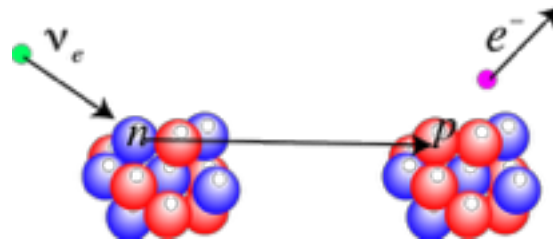
Se i neutrini obbediscono a Majorana (neutrino=antineutrino), è possibile il decadimento doppio beta senza neutrini

Solo due particelle sono prodotte invece di quattro nel doppio beta con due neutrini e la probabilità di decadimento ne risulta molto più grande

Ma sfortunatamente è molto più piccola

Perché l'interazione debole (corrente carica) ha struttura V-A e le masse dei neutrini sono $m \ll E$

1934. Il decadimento beta inverso



1934. Bethe e Peirls. Se esiste, il neutrino deve indurre il processo inverso al decadimento beta
 Sezione d'urto $< 10^{-44} \text{ cm}^2 \rightarrow$ un'interazione ogni 10^{16} km di materia solida (1000 anni luce)
"it is therefore absolutely impossible to observe processes of this kind with the neutrinos created in nuclear transformations"

Avogadro ci dà una mano, l'altra ce la dà il reattore ($O(1\text{GW})$)

$$R = N\sigma\Phi = 6 \times 10^{23} \times 10^{-48} (\text{m}^2) 10^{17} (\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}) = 6 \times 10^{-8} \text{mol}^{-1}\text{s}^{-1}$$

per esempio con un rivelatore di 1 t, $A=100$ il rateo è $R = 2/h$

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

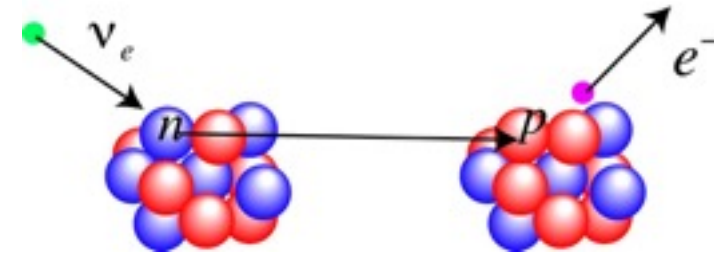
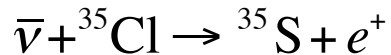
H. Bethe & R. Becher, Rev. Mod. Phys. 8, 82 (1936)

1939. H. R. Crane. Il metodo radiochimico

1939. Crane estensione del metodo radiochimico ai neutrini (^{35}Cl , ^{35}S)
1945. Gueron (^{35}Cl , ^{35}Ar): CCl_4 Costa poco, grandi quantità OK
1946. Pontecorvo (^{37}Cl , ^{37}Ar), l'idea
1949. Alvarez (^{37}Cl , ^{37}Ar), il progetto

1939. H.R. Crane. Il metodo radiochimico

- Esporre il bersaglio a neutrini per parecchio tempo
- L'atomo finale è diverso dall'iniziale
- Separazione chimica classica (usata dall'inizio del secolo)
- Nucleo finale **radioattivo** misurare la radioattività del campione



L'esperimento del sacco di sale

Una capsula con 1 mC di materiale beta attivo in un sacco di tre libbre di NaCl

Esposizione 90 giorni

Estrazione del S e conteggio in camera a ionizzazione.

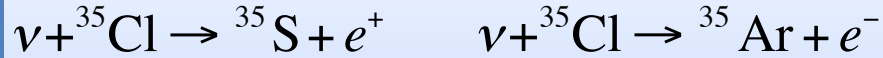
Nessuna attività rivelata $\rightarrow \sigma < 10^{-30} \text{ cm}^2$

Problema. Per $\sigma \sim 10^{-44} \text{ cm}^2$ bisogna separare $1/10^{30}$ Impossibile per S

1945-46. Chalk River (CA). Reazione Cl-Ar

Progetto nucleare UK-Canada "Tube alloy"

1945 Jules Guèron: proposta a Pontecorvo bersaglio = Cl in C Cl₄



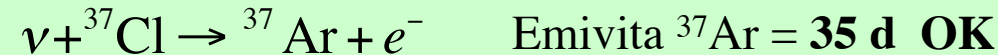
Ma, ³⁵S non estraibile in pochi atomi, ³⁵Ar emivita di 1.7 s

1945. PD-141. Classificato sino a 1964

La rivelazione via beta inverso *is not out of question*

Radiochimica, simile a Crane

1946. PD-205. Classificato sino 1948



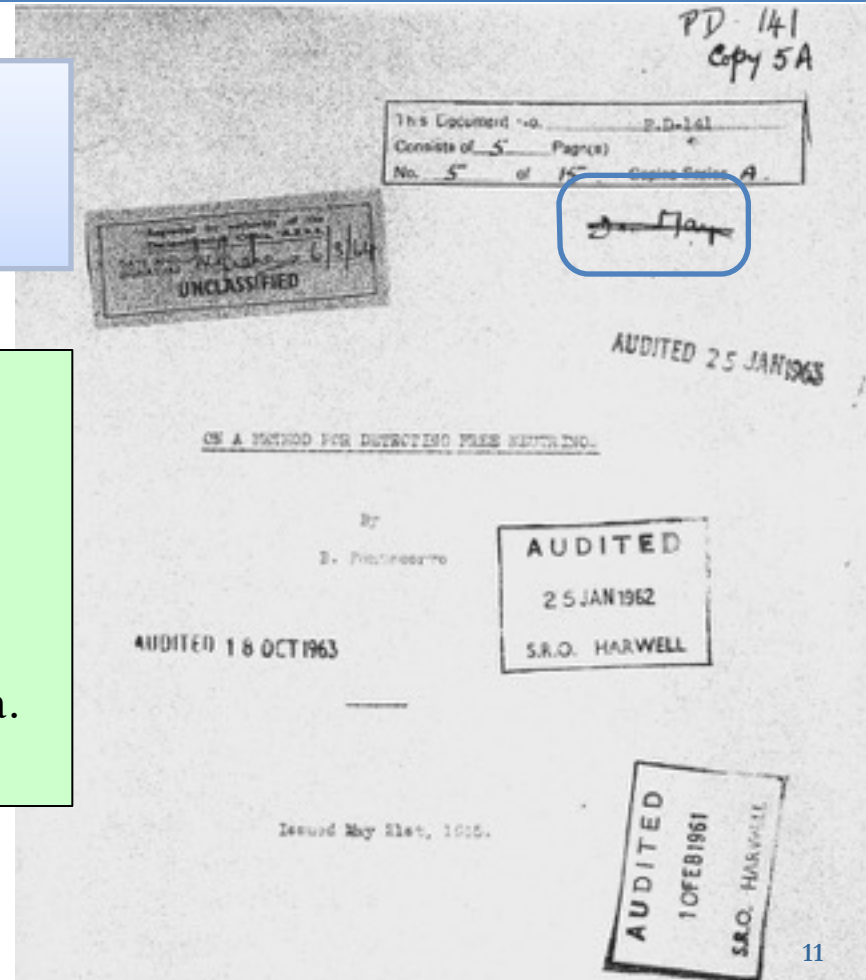
Ar inerte e volatile si potrebbe separare a 1/10³⁰

Sorgente. Reattore nucleare (flusso $\approx 10^{16} \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$)

(se neutrino=antineutrino)

$\sigma \sim 10^{-42} \text{ cm}^2$, sopravvaluta di due ordini di grandezza.

Affronta superficialmente il problema dei fondi



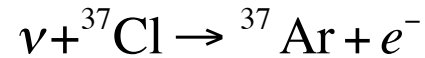
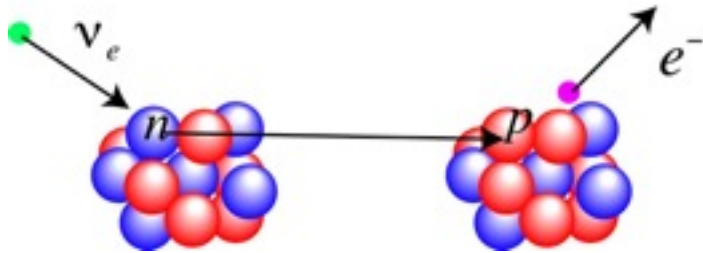
T. Kirsten. *Radiochemical solar neutrino experiments: door open for modern astroparticle physics*. Nuovo Saggiatore **31** (2015) n.1-2, p. 46

F. Close *Half-life*. Basic books New York 2015

4/25/15

A. Bettini Padova University

La reazione Cl-Ar. Quatitativa



1949. L. Alvarez Rapporto UCRL-238. Non classificato

Fireman sembra abbia trovato evidenza di decadimento $0\nu 2\beta$, neutrino=antineutrino. Non era vero

La reazione Cl-Ar può funzionare a un reattore

Calcolo sezione d'urto: $2 \cdot 10^{-45} \text{ cm}^2$

massa del rivelatore = 40 t di CCl_4

Problema principale: i fondi = altri processi che producano ${}^{37}\text{Ar}$, e.g. reazioni (p,n)

→ da raggi cosmici: in sotterraneo sotto reattore

1949-50. Lo scintillatore liquido

Scintillatore liquido

Rivelatore fondamentale per i neutrini

Molto trasparenti, si possono costruire grandi rivelatori (→chilotonnelate)

Si possono fare estremamente radio-puri

Rivela gli elettroni prodotti o urtati da ν

Scoperte (quasi) contemporanee a

Roma ISS. M. Ageno et al.

New York. H. Kallmann

Princeton. G. I. Reynolds, F.B. Harrison, G. Salvini

Una miscela di due (o tre) componenti organiche liquide emette luce “di scintillazione” al passaggio di particelle cariche

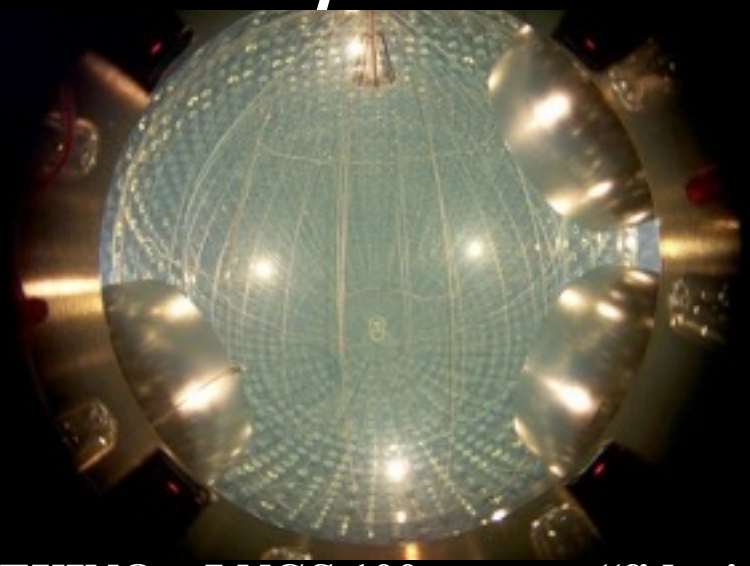
La luce viene rivelata da fotomoltiplicatori (disponibili a partire dal 1934)

M. Ageno et al. Atti Acc. Naz. Lincei **6** (1949) 626; Phys Rev **79** (1950) 720

H. Kallmann Phys. Rev. **78** (1950) 621

G. I. Reynolds, F.B. Harrison, G. Salvini Phys Rev. **78** (1950) 488

A. Bettini Padova University and INFN



**BOREXINO a LNGS 100 t massa “fiduciale”
Futuro: progetto JUNO 22 kt**

1956-58. Gli anni cruciali

1956. C. L. Cowan e F. Reines. Scoperta del neutrino

Reattore di Savannah River (0.8 GW). Scintillatore liquido



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

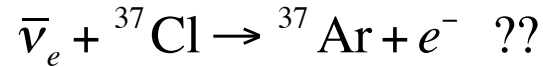
Pauli

1956. T. D. Lee e C. N. Yang. Ipotesi della non conservazione della parità

1957. C. S. Wu et al. Scoperta della violazione della parità

1957. R. E. Marshak e C. G. Sudarsham. Teoria V-A

1958. Raymond Davis, Jr



Esperimento al reattore di Savannah River

11 400 l (18.5 t) di percloroetilene (C_2Cl_4)

Sensibilità sufficiente:

1/20 del valore teorico se neutrino = antineutrino

Nessun evento rivelato

Le particelle neutre dal reattore non inducono la reazione Cl-Ar

Neutrino e antineutrino sono differenti particelle

La conclusione, assunta nel Modello Standard, è prematura

La reazione Cl-Ar non è indotta per diversa ragione

R. Davis *Phys. Rev.* **97** (1955) n. 2

R. Davis, Unesco Conference 1958. Paris. Vol. 1 p. 728

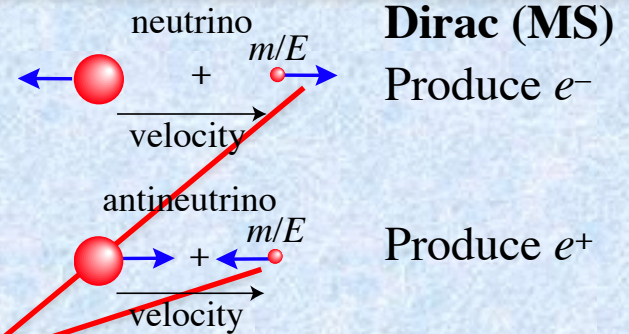
Neutrino e antineutrino

V-A + $m \neq 0$

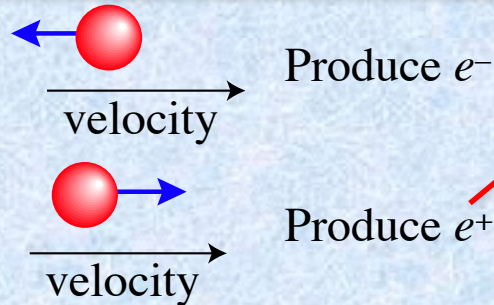
Esistono solo neutrini e antineutrini “left-handed”, “mancini”

Neutrino-e = particella neutra prodotta con e^+ .
 Quasi tutto elicità negativa + m/E di elicità positiva

Antineutrino-e = particella neutra prodotta con e^- .
 Quasi tutto elicità positiva + m/E di elicità negativa



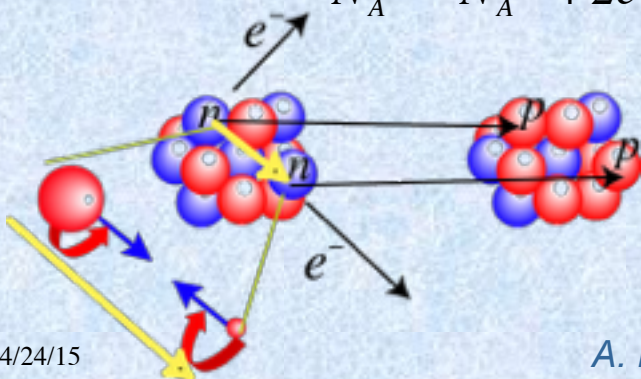
Majorana



Solo la piccolissima frazione m/E
 distingue Dirac da Majorana
 $E_\nu = 10 \text{ MeV}, m = 100 \text{ meV}$
 $\rightarrow (m/E_\nu)^2 = 10^{-14}$

$0\nu 2\beta$

$$N_A^Z \rightarrow N_A^{Z+2} + 2e^-$$



Migliori limiti attuali $T_{1/2} > 2 \cdot 10^{25} \text{ yr}$
 In preparazione sensibilità di 10^{26} yr .
 Massa neutrini circa 100 meV

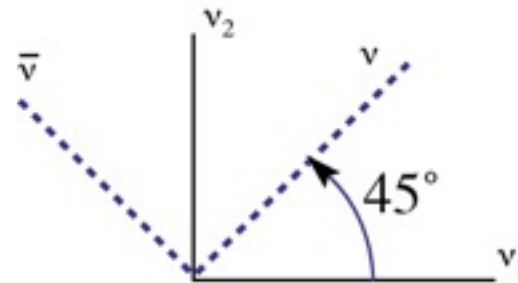
1957 Bruno Maximovich Pontecorvo

B. M. P. è raggiunto da voci che Davis vede un segnale al reattore. Erano false ma, non sapendolo, cerca un'interpretazione

...neutrino e antineutrino sono.... combinazioni di particelle di Majorana ν_1 e ν_2 .

$$\nu = \frac{1}{\sqrt{2}}(\nu_1 + \nu_2)$$

$$\bar{\nu} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\nu_1 - \nu_2)$$



Ne segue che i neutrini nel vuoto possono trasformarsi in antineutrini e viceversa....



Ma non è proprio così

Бруно Понтекорво

Altri neutrini. Forse si mescolano

1950s. $R(\mu \rightarrow e + \gamma) < 10^{-4}$ porta a $\nu_\mu \neq \nu_e$ G. Bernardini, E. Hincks, B. Pontecorvo, G. Puppi, J. Steinberger...

1960. Acceleratori di protoni in funzione $E > 10$ GeV in URSS, CERN, USA

1959-1960. Proposte per ricerca $\nu_\mu \neq \nu_e$ di Pontecorvo in URSS e al CERN non funzionano

1960. Mel Schwartz calcolo di fascio di neutrini da decadimenti in volo di pioni prodotti su bersaglio interno.

1962. Lederman, Schwartz, Steinberger et al. scoprono il ν_μ a BNL. **Camera a scintilla 20 t**

1963. A. Zichichi inizia le ricerche della terza famiglia leptonica. **Identificazione e e μ**

2001. K. Niwa e collab. scoprono il ν_τ al FermiLab. **Identificazione τ**

MESCOLAMENTO

1962 Katayama et al. e Maki et al.

$$\nu_1 = \nu_e \cos \delta + \nu_\mu \sin \delta$$

Mescolamento dei sapori leptonici

$$\nu_2 = \nu_e \cos \delta - \nu_\mu \sin \delta$$

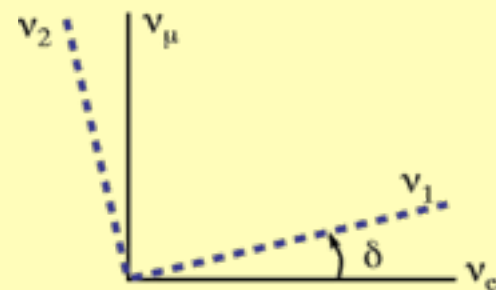
Maki anche “**trasmutazioni**”

1967 B. M. Pontecorvo; 1969 B.M.P. e V. N. Gribov

Mescolamento e oscillazioni neutrino - antineutrino e tra sapori

From an observational point of view the ideal object is the sun.....

....the only effect on the earth surface must be two times smaller than the total flux



Sapore definito \neq massa definita

Una serie di esperimenti **1964-1998** in laboratori sotterranei (schermati dai cosmici) su:

a. Neutrini dal sole

b. Neutrini dall'atmosfera

ha mostrato che i neutrini con sapore definito (ν_e, ν_μ, ν_τ) sono “mescolamenti” degli stati di massa definita (ν_1, ν_2, ν_3)

I neutrini nati con un sapore lo cambiano, se hanno masse non nulle, e se gliene si lascia il tempo

Due modi:

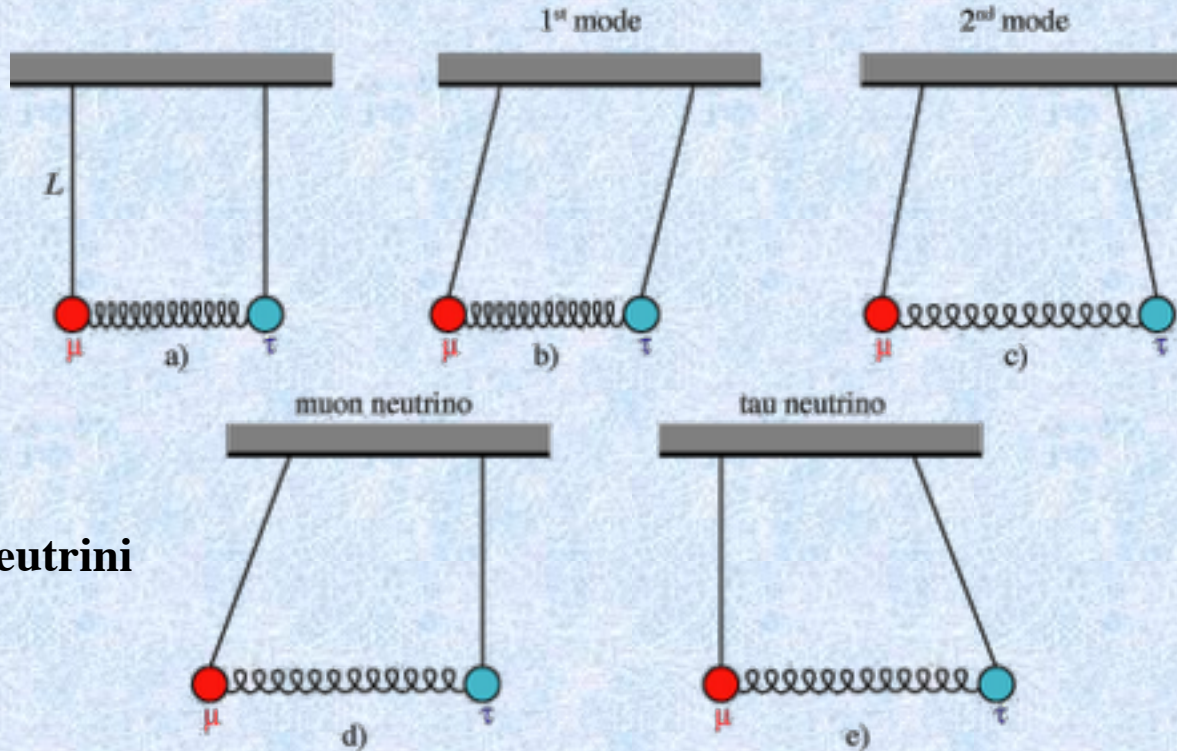
1. Oscillazione, periodico, con frequenza proporzionale a $|\Delta m^2|$

2. Effetto di materia (indice di rifrazione), aperiodico, sensibile anche al segno

Oscillazioni. Due modi normali

Due modi normali con frequenze caratteristiche

$$\omega_1^2 = \frac{g}{L} \quad \omega_2^2 = \frac{g}{L} + 2 \frac{k}{m}$$



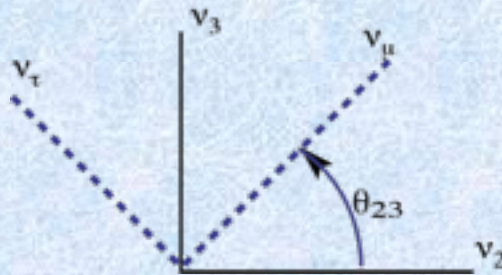
Analogia

Tempo $\rightarrow L/E$

Frequenza caratteristica \rightarrow massa neutrini

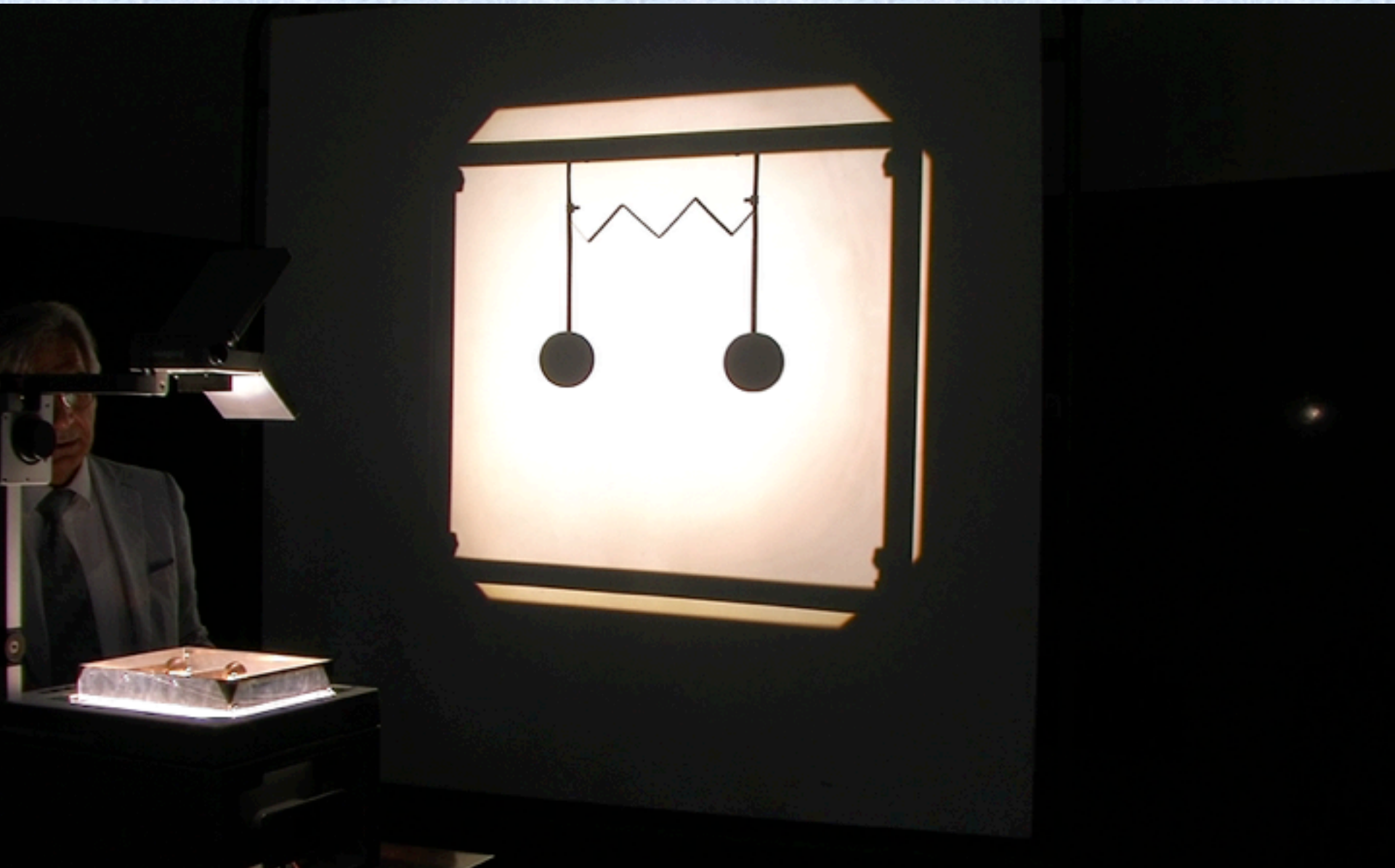
Mixing massimo \rightarrow lunghezze uguali

Frequenza di oscillazione $(\omega_2 - \omega_1)/2$

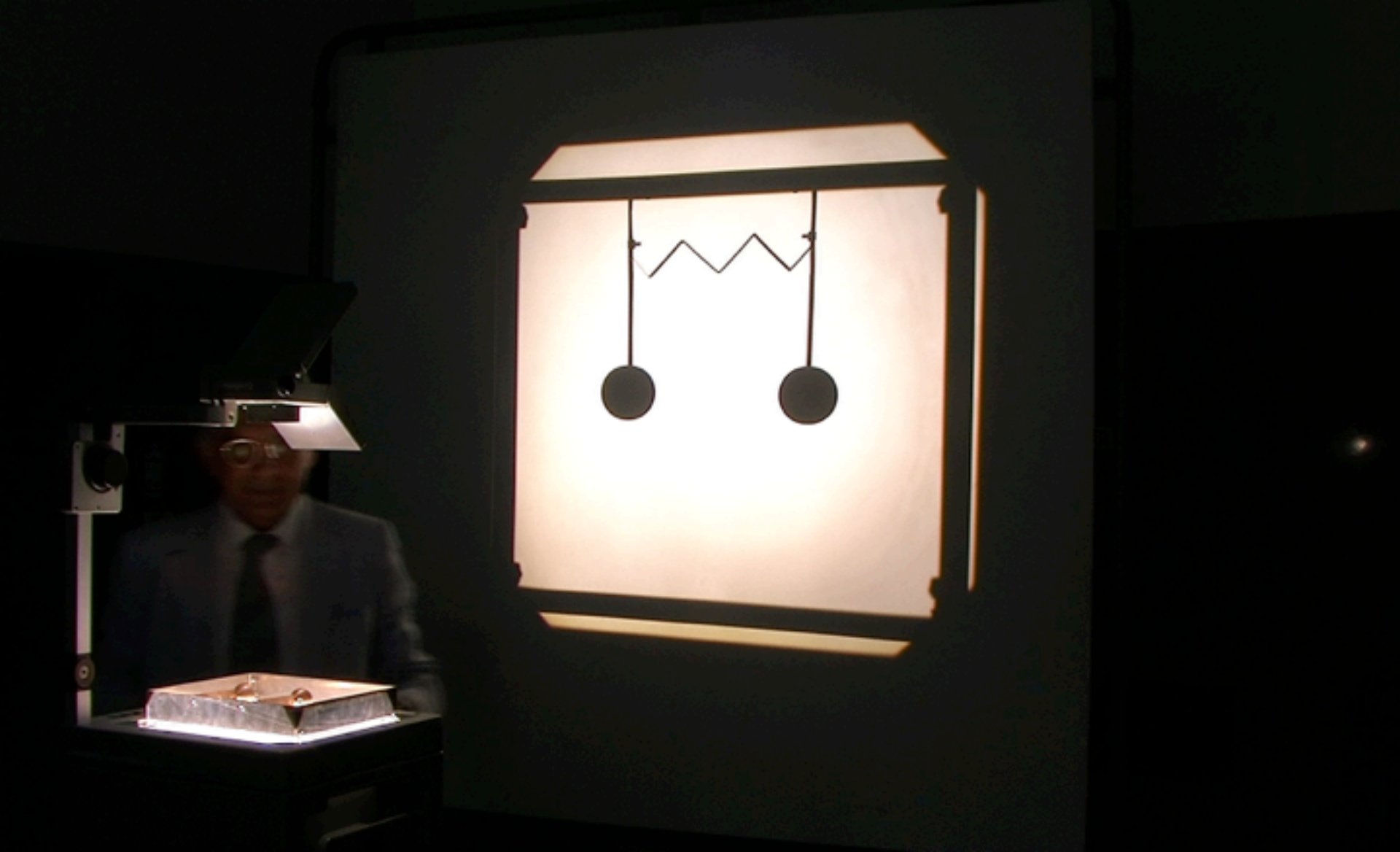


Lunghezze uguali.
 Mescolamento massimo.
 Rotazione di 45°

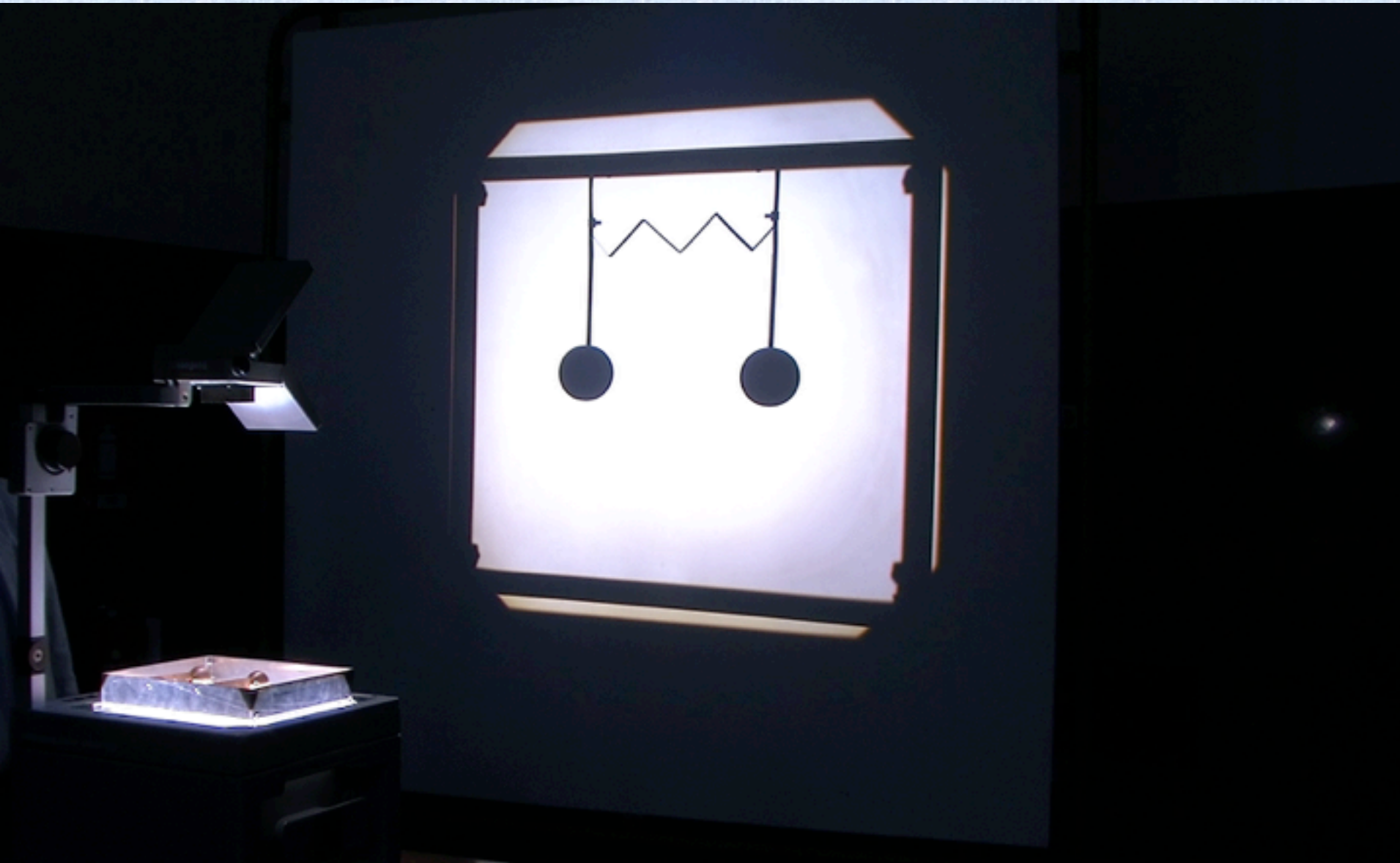
Modo normale 1



Modo normale 2



Da numu a nutau e ritorno



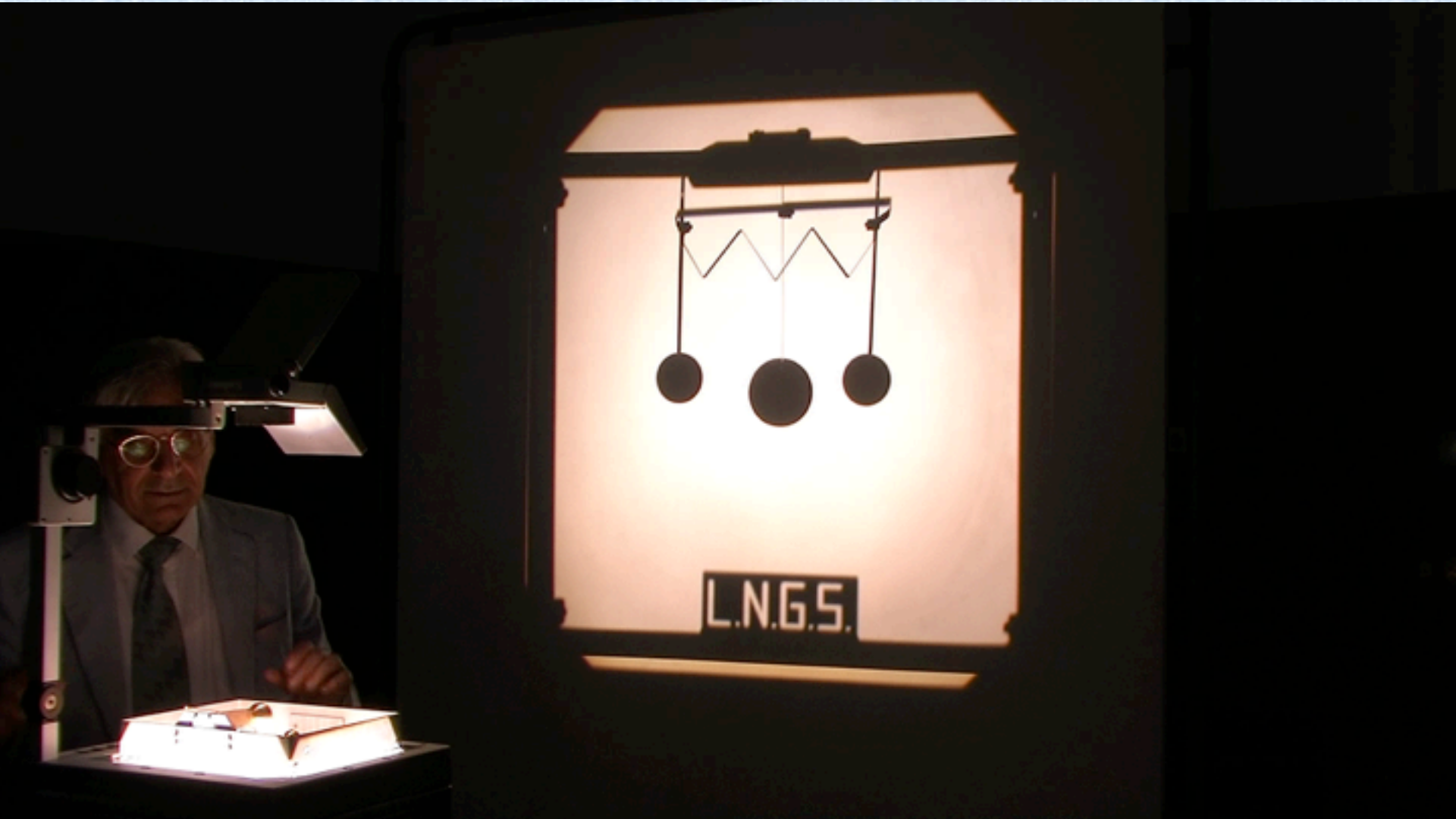
Mixing parziale



Nue in (numu+nutau) e indietro

Neutrini solari. I ν_e di energia più bassa cambiano sapore nel viaggio verso la terra

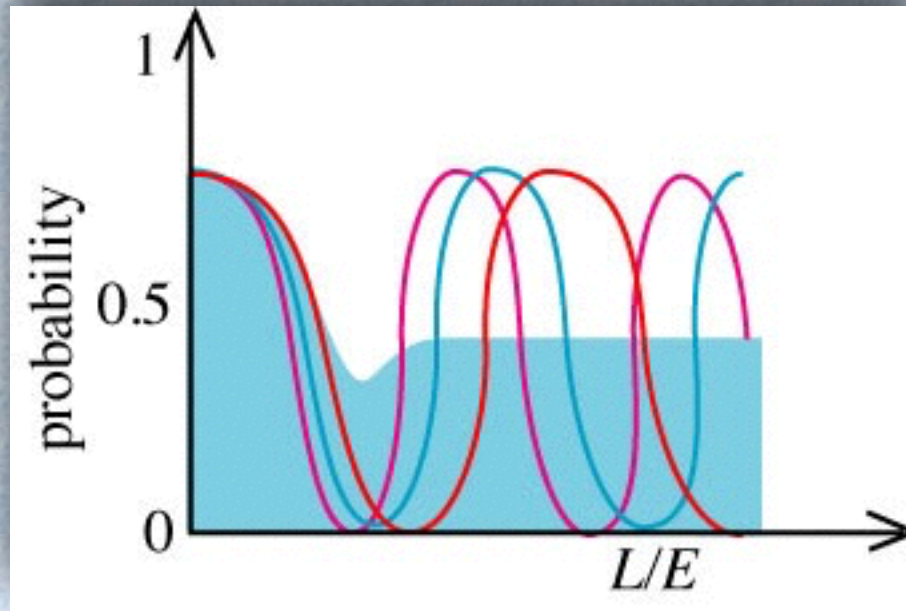
$$\nu_e \Leftrightarrow \frac{1}{\sqrt{2}}(\nu_\mu + \nu_\tau)$$



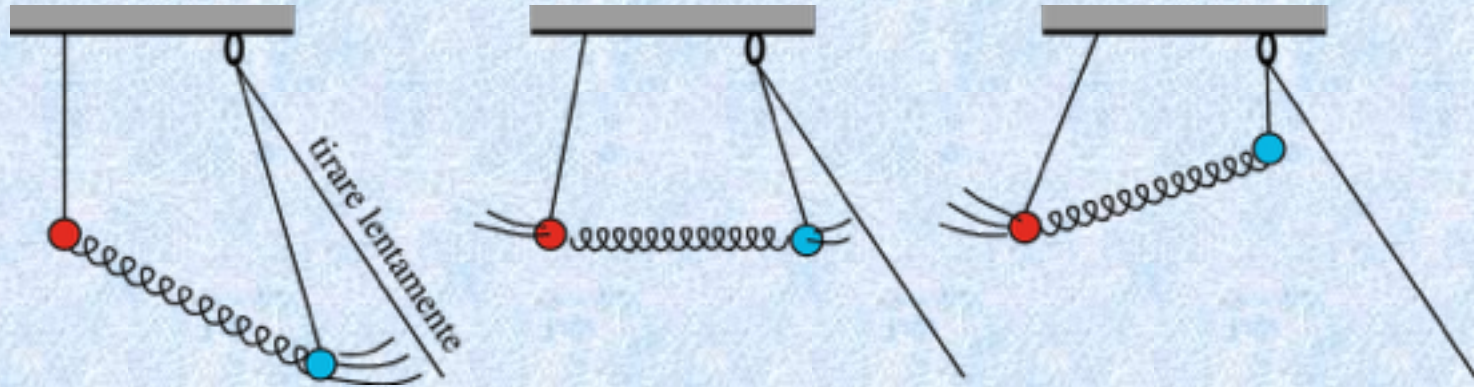
Se l'energia non è definita

I fasci di neutrini (naturali o artificiali) non hanno energia definita, quindi la variabile indipendente L/E non è definita.

Ad una data distanza L dopo il primo periodo le componenti si mediano



Cambio di sapore nella materia (MSW)



Neutrini solari. I ν_e delle maggiori energie (quelli del Boro) prodotti al centro del sole cambiano sapore nel loro viaggio verso la superficie con questo processo

1964. Come produce luce il sole?

La luce è un fenomeno superficiale.

L'energia è prodotta nel centro. Come guardarci? I neutrini escono senza assorbimento



Bahcall e Davis a Homestake

1964. J. Bahcall e R. Davis due articoli congiunti, uno teorico e uno sperimentale

Davis progetta l'esperimento, con l'esperienza del lavoro a Savannah River.

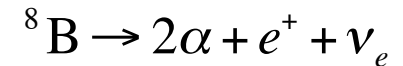
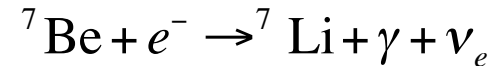
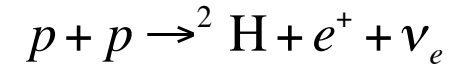
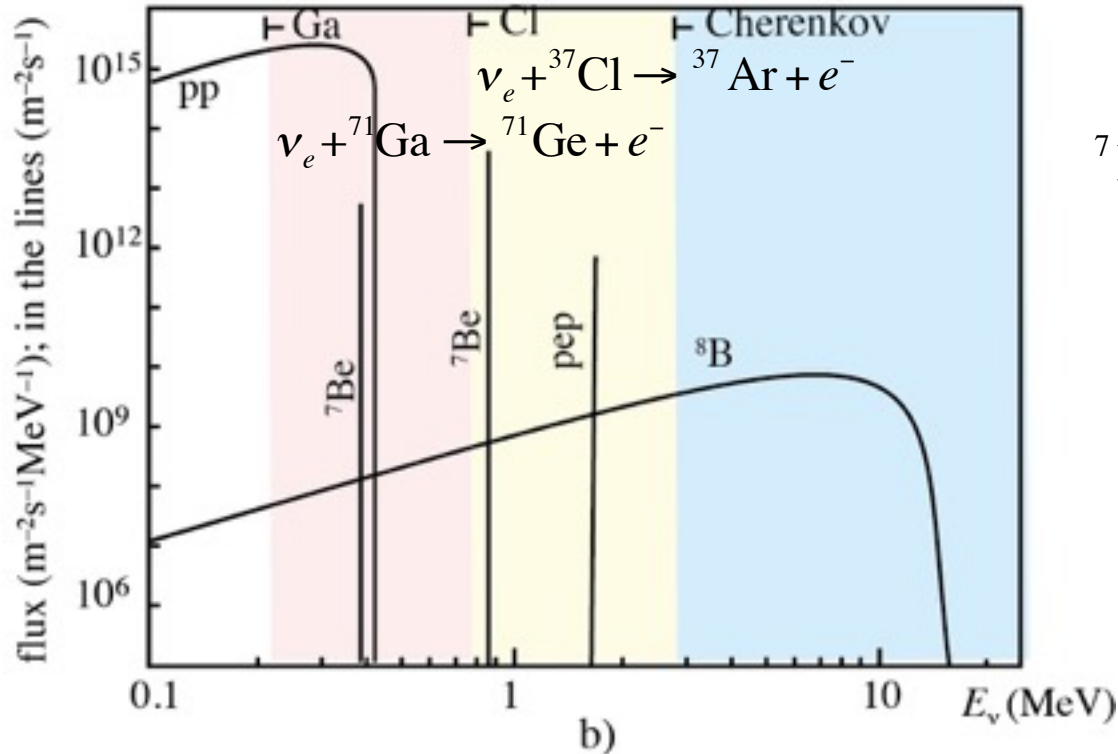
Per ridurre i fondi indotti dai raggi cosmici bisogna andare in profondità: miniera d'oro di Homestake nel South Dakota, profonda 1480 m. Flusso di cosmici: 10^{-6} che in superficie Rivelatore 380 m^3 di perchlorethylene (C_2Cl_4), $\rightarrow 133 \text{ t di } ^{37}\text{Cl}$

John N. Bahcall; *Phys. Rev. Lett.* **12** (1964) 300

Raymond Davis Jr. *Phys. Rev. Lett.* **12** (1964) 303

4/24/15

Lo spettro dei neutrini elettronici solari



Bahcall. Sviluppa nei dettagli il modello delle reazioni termonucleari nel sole (SSM), nei loro diversi rami, calcolando i loro spettri energetici.

Ramo principale, pp, termina a 420 keV

Reazione Cl-Ar sensibile a ν_e da ${}^7\text{Be}$ e ${}^8\text{B}$, non da pp

Calcola la sezione d'urto Cl-Ar (soglia 814 keV) con precisione

Homestake



1968. Primi risultati

Presi dati sono a 1995

Ogni mese (circa) si estraggono i pochi atomi di ^{37}Ar e si contano i decadimenti.

Sono prodotti **0.48 ± 0.04 $^{37}\text{Ar}/\text{d}$**

Circa 1/3 della previsione del SSM

Nasce il **Solar Neutrino Puzzle**

L'esperimento è sensibile solo a ν_e , non a ν_μ e ν_τ

Chi è il colpevole? La risposta ha richiesto 30 anni di lavoro, di diversi esperimenti

Il modello SSM è sbagliato? **No, è corretto**

L'esperimento è sbagliato? **No, è giusto**

La fisica nucleare dato che le sezioni d'urto sono estrapolate? **No, dalle misure di LUNA 1997**

Il neutrino? **Sì, non può essere che lui 1997**

R. Davis, *A review of the Homestake solar neutrino experiment*, Prog. Part. Nucl. Phys. **32** (1994) 13-32.

Due tappe fondamentali

1997. GALLEX al Gran Sasso (e poi SAGE a Baksan)



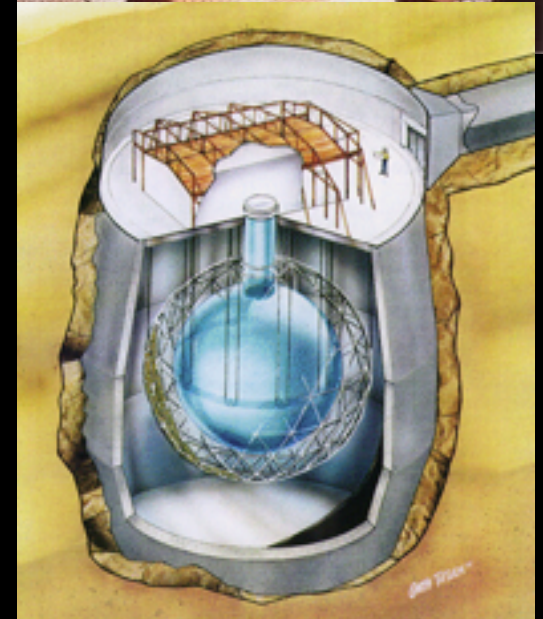
Anche il Ge è separabile a $1/10^{30}!!$

Soglia 233 keV.

Sensibile ai neutrini pp, il cui flusso dipende (quasi) solo dalla luminosità del sole

Osservato deficit di circa fattore 2

1997. Il colpevole è il neutrino. Parte dei ν_e scompaiono



2002. SNO. Sudbury Neutrino Observatory

Rivelatore Cherenkov ad acqua pesante

Rivela sia interazioni di corrente carica (indotte dai soli ν_e)

sia di corrente neutra (indotte da ν_e, ν_μ e ν_τ)

Somma di tutti in accordo con SSM. Scomparsa di ν_e

T. Kirsten Nuovo Saggiatore **31** n.1-2 (2015) 46

Ottimo movie sul canale youtube <https://www.youtube.com/user/somific>

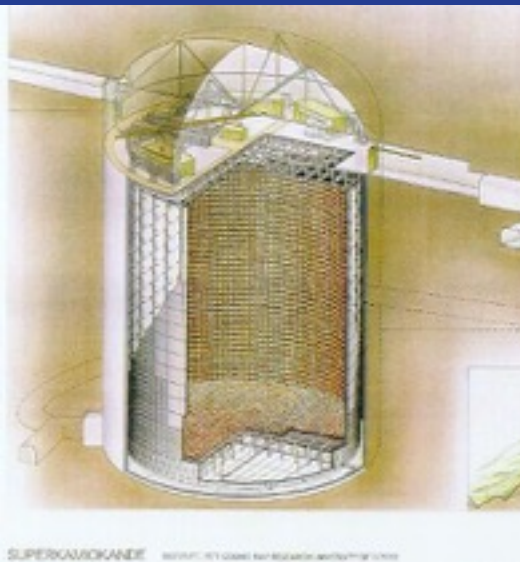
1998. Sueprkamiokande. Neutrini atmosferici

Ci sono ν_e e ν_μ e loro anti

Permettono indagine a largo spettro

Energie circa da 100 MeV a 100 GeV

Distanze di volo da 10 km a quasi 13 000 km



Scoperta delle oscillazioni dei ν_μ

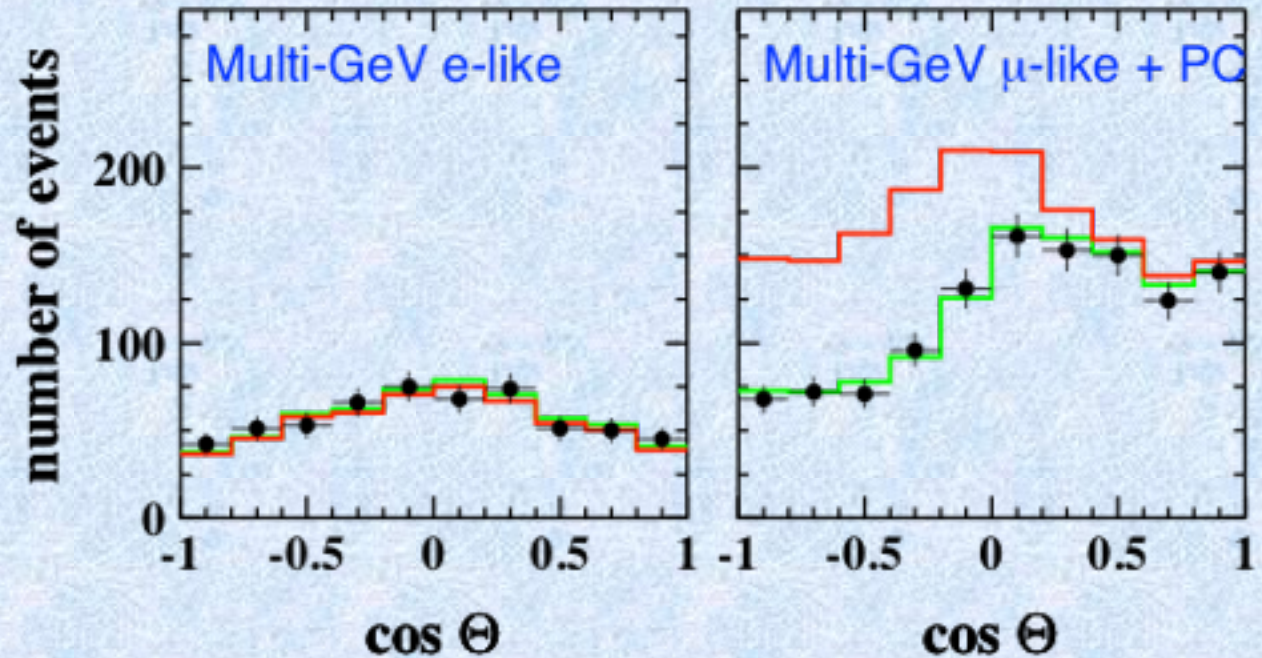
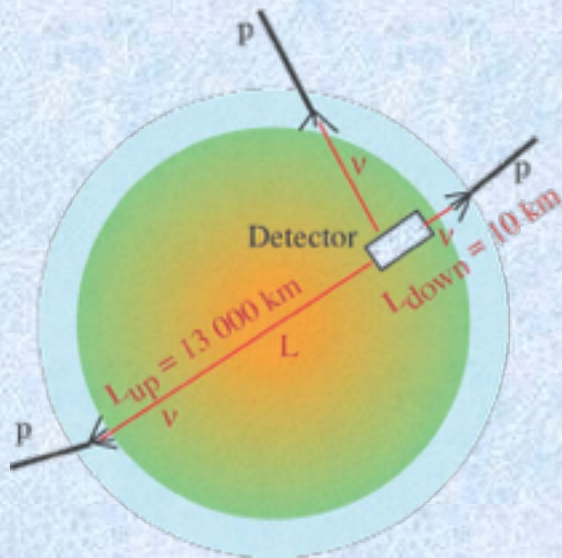
Supekamiokande. La scomparsa dei ν_μ

Zenith angle distribution

1144.4 d (70.4 kt·yrs)

— No oscillation

— Best fit ($\Delta m^2=3.2 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, $\sin^2 2\theta=1.00$)



Scomparsa dei ν_μ
di maggior L/E

Conclusioni

- **I neutrini ci hanno sempre riservato sorprese**
 - **Misurando, li abbiamo trovati diversi da quanto ci si aspettava**
- **Si può prevedere che continueranno ad essere imprevedibili**
- **La conoscenza del mondo fisico procede in maniera non lineare, ma attraverso sbagli, correzioni, riprese**
- **Idee nuove vengono mettendo assieme fisica di campi diversi**
- **Leggete gli originali, spesso la storia non è quella che si legge nei libri**

Grazie dell'attenzione

