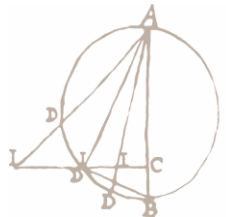




# Concettualizzazione delle oscillazioni dei neutrini

Giulia Carini

Istituto Fritz Haber della Società Max Planck, Berlino



MPIWG  
MAX-PLANCK-INSTITUT  
FÜR WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

---

*Bruno Pontecorvo. Il signore dei neutrino e non solo...*

Convegno storico-scientifico

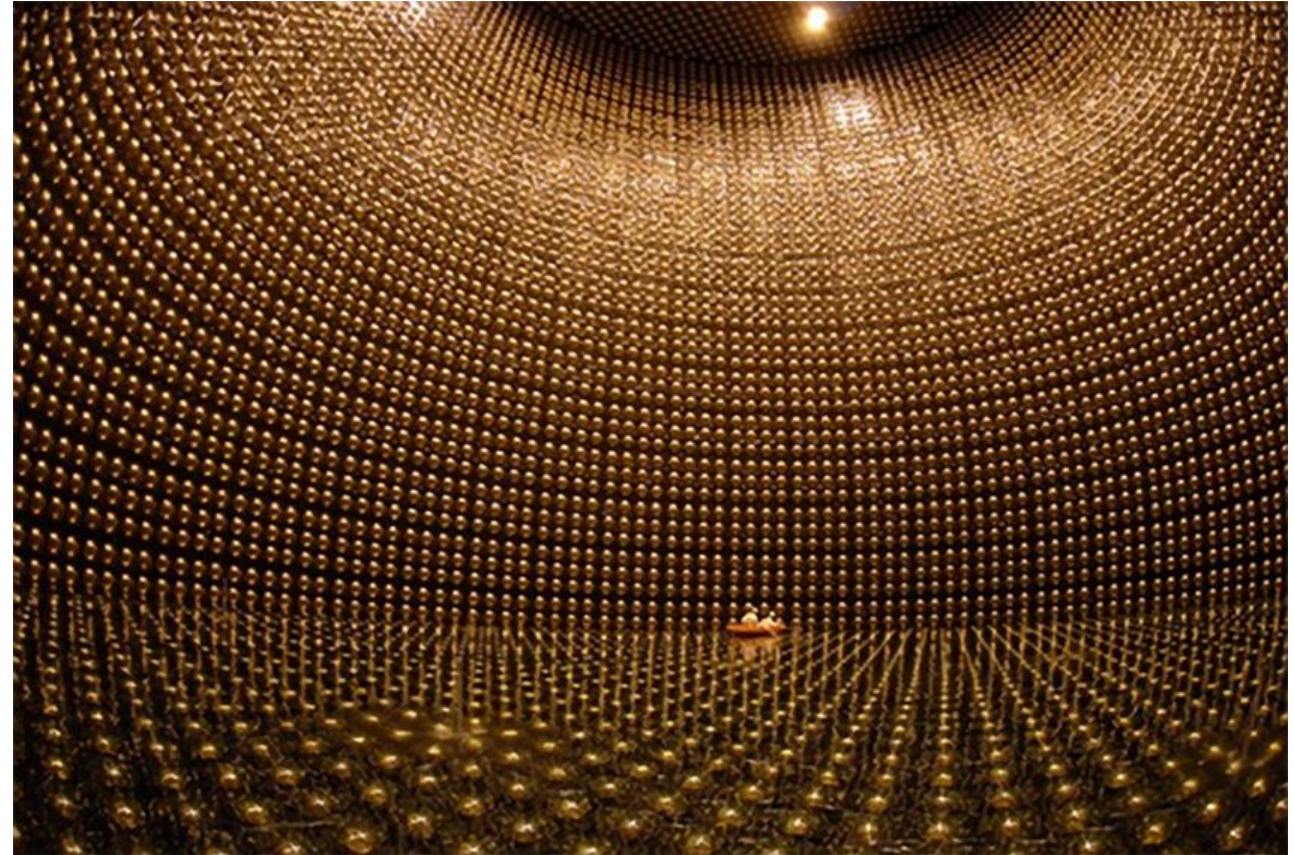
Pisa, 22/09/2023

# OSCILLAZIONI DEI NEUTRINI: COSA NE SAPPIAMO OGGI?

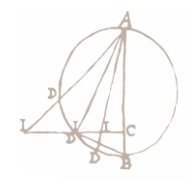


Matrice PMNS

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$



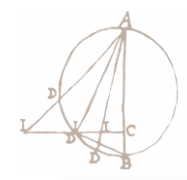
Rivelatore Super-Kamiokande in Giappone



# TRE DOMANDE PRINCIPALI



1. Come si inserisce il concetto di oscillazioni di neutrini-antineutrini nella storia del neutrino?
2. Quale ruolo svolse per Pontecorvo la possibilità di una verifica sperimentale nell'elaborazione della sua ipotesi teorica?
3. Fino a che punto Pontecorvo fu influenzato da discussioni con altri fisici del suo ambiente, il JINR di Dubna?



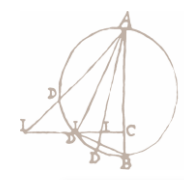
# TRE DOMANDE PRINCIPALI



1. Come si inserisce il concetto di oscillazioni di neutrini-antineutrini nella storia del neutrino?

2. Quale ruolo svolse per Pontecorvo la possibilità di una verifica sperimentale nell'elaborazione della sua ipotesi teorica?

3. Fino a che punto Pontecorvo fu influenzato da discussioni con altri fisici del suo ambiente, il JINR di Dubna?



# IDEA DELLE OSCILLAZIONI NEUTRINO-ANTINEUTRINO (PONTECORVO 1957)



## *INVERSE BETA PROCESSES AND NONCONSERVATION OF LEPTON CHARGE*

B. PONTECORVO

Joint Institute for Nuclear Research

Submitted to JETP editor October 19, 1957

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) **34**, 247-249  
(January, 1958)

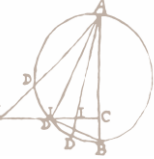
“Recently the question was discussed [by himself in *Mesonium and Antimesonium*] whether there exist other "mixed" neutral particles beside the  $K^0$  mesons, i.e., particles that differ from the corresponding antiparticles, with the transitions between particle and antiparticle states not being strictly forbidden. It was noted that the neutrino might be such a mixed particle, and consequently there exists the possibility of real neutrino-antineutrino transitions in vacuum, provided that lepton (neutrino) charge is not conserved. In the present note we make a more detailed study of this possibility, in which interest has been renewed owing to recent experiments dealing with inverse beta processes.”

Bruno Pontecorvo, Inverse beta processes and nonconservation of lepton charge, JETP 34, 247-249, Jan 1958.





# INTERESSE NELLA FISICA DEI MESONI K



*In the transformations of mesons*

The  $\Sigma$  meson has a long life  $\approx 10^{-10}$  sec, and is supposed to decay into  $\pi^+ + \pi^+ + \pi^+$ . If this is so, it must be concluded that  $\Sigma$  does not interact with nuclei, because, if the  $\Sigma$  interacted with nuclei, then the rate of the  $\Sigma$  would be very fast. (through the interaction with nucleons of the vacuum) Let us suppose that it does not interact strongly. Since it is strongly produced, it must be produced as a heavy product of a strongly interacting meson. But this  $M_0$  then would decay into  $\pi$  quanta from an  $\Sigma$ . So there is a contradiction between the existence of a strongly interacting particle and its long lifetime. This contradiction, of course, is resolved if the strongly produced  $\Sigma$  is produced in pairs. So from the very fact that  $\Sigma$  mesons have a long life, it can be concluded that they are present in abundance. We can conclude that there are mesons (not mesons) which are strongly produced in pairs. A consistent picture until now would be:

$\mu \rightarrow e + \nu$   
 $\pi^+ \rightarrow \mu + \nu$   
 $\Sigma^+ = K^+ = V^+ \rightarrow \begin{cases} \mu + 2\nu \\ \mu + \pi^+ + \pi^+ \\ \mu^+ + \pi^0 \end{cases}$  (golden no other mesons that  $\pi$  mesons have been produced.)

~~$V_{0\text{long}} \rightarrow \pi^+ + \pi^+ + \pi^+ + \mu^-$  ?~~  
 $V_0 \text{ long} \rightarrow \mu + \pi^-$

$\mu \rightarrow e + \nu + \mu$

Primo quaderno: I/XI 1950, p.8.  
 Per gentile concessione del Centro Dipartimentale "Bruno Pontecorvo", UNIPI

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 97, NUMBER 5

MARCH 1, 1955

## Behavior of Neutral Particles under Charge Conjugation

M. GELL-MANN,\* *Department of Physics, Columbia University, New York, New York*

AND

A. PAIS, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received November 1, 1954)

Some properties are discussed of the  $\theta^0$ , a heavy boson that is known to decay by the process  $\theta^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ . According to certain schemes proposed for the interpretation of hyperons and  $K$  particles, the  $\theta^0$  possesses an antiparticle  $\bar{\theta}^0$  distinct from itself. Some theoretical implications of this situation are discussed with special reference to charge conjugation invariance. The application of such invariance in familiar instances is surveyed in Sec. I. It is then shown in Sec. II that, within the framework of the tentative schemes under consideration, the  $\theta^0$  must be considered as a "particle mixture" exhibiting two distinct lifetimes, that each lifetime is associated with a different set of decay modes, and that no more than half of all  $\theta^0$ 's undergo the familiar decay into two pions. Some experimental consequences of this picture are mentioned.

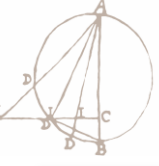
**Complesso dei mesoni  $K^0$ :**  
 kaoni neutri descritti come "particelle miste" formate da particelle "più" elementari.

$$K^0 \Leftrightarrow \pi^+ + \pi^- \Leftrightarrow \bar{K}^0$$

**Neutrino e antineutrino:**  
 sovrapposizioni di neutrini di Majorana con masse differenti.

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

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



# STATO DELL'ARTE DELLA FISICA DEL NEUTRINO



1957

Prima ipotesi teorica delle oscillazioni neutrino-antineutrino. L'idea si ispira ai kaoni neutri, ma considera la teoria a due componenti del neutrino come un ostacolo alla sua affermazione.



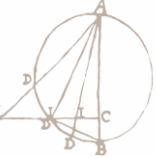
*INVERSE BETA PROCESSES AND NONCONSERVATION OF LEPTON CHARGE*

B. PONTECORVO

Joint Institute for Nuclear Research

Submitted to JETP editor October 19, 1957

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 34, 247-249 (January, 1958)



# STATO DELL'ARTE DELLA FISICA DEL NEUTRINO



$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p} \varphi_\nu = i \partial \varphi_\nu / \partial t$$

Lee&Yang, Landau e Salam sviluppano la teoria a due componenti del neutrino (ispirati da Weyl). Il neutrino diventa il “**becchino della parità**”

1957

Prima ipotesi teorica delle oscillazioni neutrino-antineutrino. L'idea si ispira ai kaoni neutri, ma considera la teoria a due componenti del neutrino come un ostacolo alla sua affermazione.



*INVERSE BETA PROCESSES AND NONCONSERVATION OF LEPTON CHARGE*

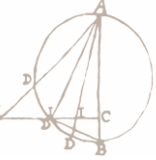
B. PONTECORVO

Joint Institute for Nuclear Research

Submitted to JETP editor October 19, 1957

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 34, 247-249 (January, 1958)





# TEORIA A DUE COMPONENTI DEL NEUTRINO



PHYSICAL REVIEW

VOLUME 105, NUMBER 5

MARCH 1, 1957

## Parity Nonconservation and a Two-Component Theory of the Neutrino

T. D. LEE, *Columbia University, New York, New York*

AND

C. N. YANG, *Institute for Advanced Study, Princeton, New Jersey*

(Received January 10, 1957; revised manuscript received January 17, 1957)

A two-component theory of the neutrino is discussed. The theory is possible only if parity is not conserved in interactions involving the neutrino. Various experimental implications are analyzed. Some general remarks concerning nonconservation are made.

## Possible Properties of the Neutrino Spin

L. D. LANDAU

*Institute for Physical Problems,  
Academy of Sciences, USSR*

(Submitted to JETP editor December 11, 1956)

*J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.)* 32, 407–408

(February, 1957)

IL NUOVO CIMENTO

VOL. V, N. 1

1° Gennaio 1957

## On Parity Conservation and Neutrino Mass.

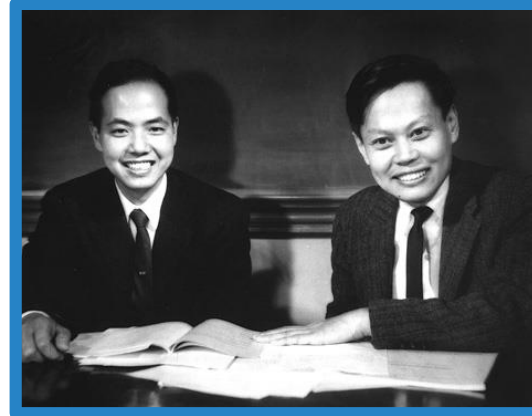
ABDUS SALAM

*St. John's College - Cambridge*

(ricevuto il 15 Novembre 1956)

”The spin and velocity of the neutrino represent the spiral motion of a right-handed screw while the spin and the velocity of the antineutrino represent the spiral motion of a left-handed screw.”

T.D. Lee, C.N. Yang, *Parity Nonconservation and a Two-Component Theory of the Neutrino*, *Physical Review*, 10(5)



Scoperta della violazione della parità nell'interazione debole (Lee & Yang)

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{p} \varphi_{\nu} = i \partial \varphi_{\nu} / \partial t$$

Lee&Yang, Landau e Salam sviluppano la teoria a due componenti del neutrino (ispirati da Weyl). Il neutrino diventa il “**becchino della parità**”

1957

1956

Prima ipotesi teorica delle oscillazioni neutrino-antineutrino. L'idea si ispira ai kaoni neutri, ma considera la teoria a due componenti del neutrino come un ostacolo alla sua affermazione.



*INVERSE BETA PROCESSES AND NONCONSERVATION OF LEPTON CHARGE*

B. PONTECORVO

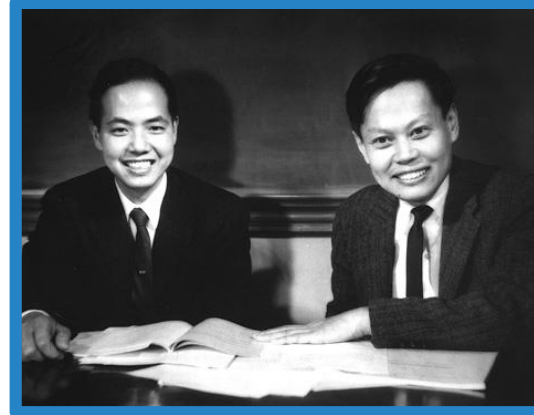
Joint Institute for Nuclear Research

Submitted to JETP editor October 19, 1957

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 34, 247-249 (January, 1958)



# STATO DELL'ARTE DELLA FISICA DEL NEUTRINO



$$\sigma \cdot p \varphi_\nu = i \partial \varphi_\nu / \partial t$$

Lee&Yang, Landau e Salam sviluppano la teoria a due componenti del neutrino (ispirati da Weyl). Il neutrino diventa il “**becchino della parità**”

Scoperta della violazione della parità nell'interazione debole (Lee & Yang)

1929



1957



1956



Teoria delle due componenti (**Weyl**)

Prima ipotesi teorica delle oscillazioni neutrino-antineutrino. L'idea si ispira ai kaoni neutri, ma considera la teoria a due componenti del neutrino come un ostacolo alla sua affermazione.



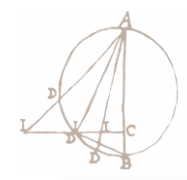
*INVERSE BETA PROCESSES AND NONCONSERVATION OF LEPTON CHARGE*

B. PONTECORVO

Joint Institute for Nuclear Research

Submitted to JETP editor October 19, 1957

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 34, 247-249 (January, 1958)



# TEORIA DELLE DUE COMPONENTI (HERMANN WEYL)



**Scopo:** elaborazione di una teoria unificata di gravitazione, materia ed elettricità.  
Non si riferisce al neutrino.

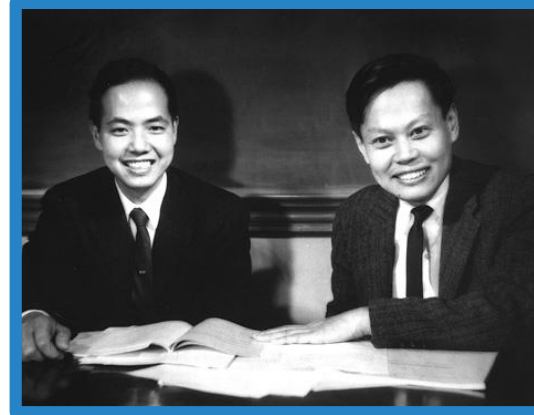
Tentativo di eliminare le soluzioni ad energia negativa dell'equazione relativistica di Dirac: riformulazione del sistema di equazioni di Dirac in due sistemi disaccoppiati.

"In the usual theory it is impossible to restrict attention to one pair of equations, since the two pairs are interchanged by a space-inversion. But if we require only invariance under combined inversion [CP], then we can suppose that the neutrino is described by a single pair of equations."

L. Landau, *Possible Properties of the Neutrino Spin*, JETP 32, 407-408, Feb 1957.



# STATO DELL'ARTE DELLA FISICA DEL NEUTRINO



$$\sigma \cdot p \varphi_\nu = i \partial \varphi_\nu / \partial t$$

Lee&Yang, Landau e Salam sviluppano la teoria a due componenti del neutrino (ispirati da Weyl). Il neutrino diventa il “**becchino della parità**”

Scoperta della violazione della parità nell'interazione debole (Lee & Yang)

1929



1957

1956



Teoria delle due componenti (**Weyl**)

Prima ipotesi teorica delle oscillazioni neutrino-antineutrino. L'idea si ispira ai kaoni neutri, ma considera la teoria a due componenti del neutrino come un ostacolo alla sua affermazione.



*INVERSE BETA PROCESSES AND NONCONSERVATION OF LEPTON CHARGE*

B. PONTECORVO

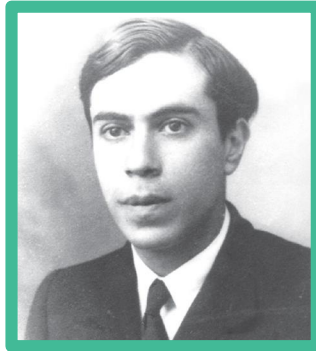
Joint Institute for Nuclear Research

Submitted to JETP editor October 19, 1957

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 34, 247-249 (January, 1958)

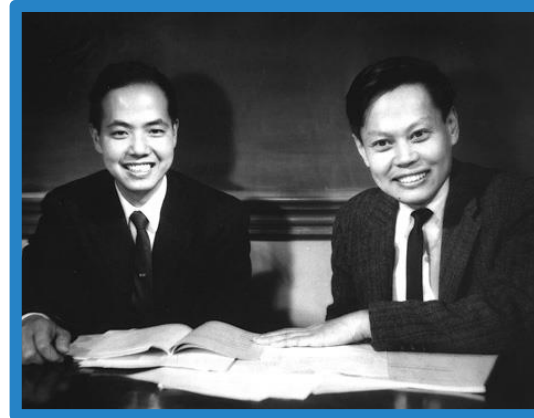


# STATO DELL'ARTE DELLA FISICA DEL NEUTRINO



Teoria simmetrica degli elettroni e dei positroni (**Majorana**): un approccio alternativo alle due componenti

1929



Scoperta della violazione della parità nell'interazione debole (Lee & Yang)

$$\sigma \cdot p \varphi_\nu = i \partial \varphi_\nu / \partial t$$

Lee&Yang, Landau e Salam sviluppano la teoria a due componenti del neutrino (ispirati da Weyl). Il neutrino diventa il “**becchino della parità**”

1957

1937

1956



Teoria delle due componenti (**Weyl**)

Prima ipotesi teorica delle oscillazioni neutrino-antineutrino. L'idea si ispira ai kaoni neutri, ma considera la teoria a due componenti del neutrino come un ostacolo alla sua affermazione.



*INVERSE BETA PROCESSES AND NONCONSERVATION OF LEPTON CHARGE*

B. PONTECORVO

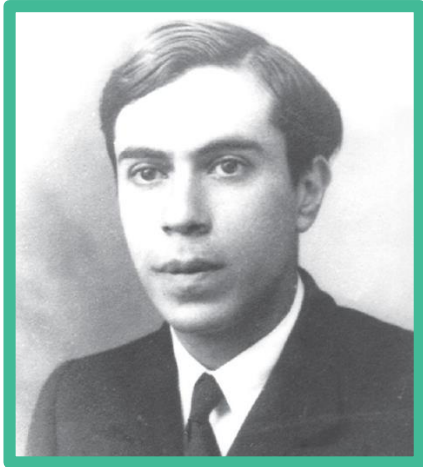
Joint Institute for Nuclear Research

Submitted to JETP editor October 19, 1957

J. Exptl. Theoret. Phys. (U.S.S.R.) 34, 247-249 (January, 1958)



# APPROCCIO ALTERNATIVO ALLA TEORIA A DUE COMPONENTI (ETTORE MAJORANA)



**Scopo:** costruzione di una teoria simmetrica degli elettroni e dei positroni, eliminazione delle soluzioni dell'equazione di Dirac ad energia negativa.

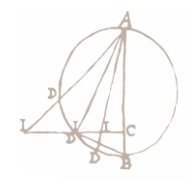
**Risultato:** equazione che descrive una particella neutra con spin up e spin down → neutrino di Majorana!

- Conservazione della parità
- Particella dotata di massa
- Spinore di 4 componenti a valori reali

→ equivalenza matematica delle teorie di Majorana e Weyl.

→ possibilità di una parziale non-conservazione della carica leptonica

→ proto-concetto di “particle mixing” (a un livello formale).



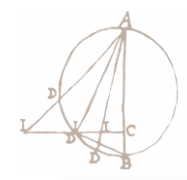
# TRE DOMANDE PRINCIPALI



1. Come si inserisce il concetto di oscillazioni di neutrini-antineutrini nella storia del neutrino?

2. Quale ruolo svolse per Pontecorvo la possibilità di una verifica sperimentale nell'elaborazione della sua ipotesi teorica?

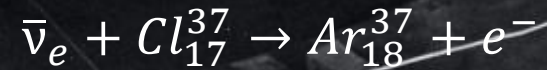
3. Fino a che punto Pontecorvo fu influenzato da discussioni con altri fisici del suo ambiente, il JINR di Dubna?



# DUE ESPERIMENTI-“GUIDA”



**Esperimento di R. Davis al Brookhaven National Laboratory:** metodo cloro-argon.  
Scopo: osservazione del processo di decadimento beta inverso



Esito negativo  $\rightarrow$  prova sperimentale che  $\nu \neq \bar{\nu}$   
Esito positivo  $\rightarrow$  oscillazioni neutrino-antineutrino?

**Esperimento di R. Davis e J. Bahcall nella miniera d'oro di Homestake:** problema dei neutrini solari.

Metodo cloro-argon applicato ai neutrino solari.

Carenza di neutrini osservati  $\rightarrow$  oscillazioni di flavour?





# DUE ESPERIMENTI-“GUIDA”



**Esperimento di R. Davis al Brookhaven National Laboratory:** metodo cloro-argon.  
Scopo: osservazione del processo di decadimento beta inverso



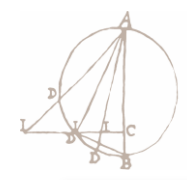
Esito negativo  $\rightarrow$  prova sperimentale che  $\nu \neq \bar{\nu}$   
Esito positivo  $\rightarrow$  oscillazioni neutrino-antineutrino?

**Esperimento di R. Davis e J. Bahcall nella miniera d'oro di Homestake:** problema dei neutrini solari.

Metodo cloro-argon applicato ai neutrini solari.

Carenza di neutrini osservati  $\rightarrow$  oscillazioni di flavour?



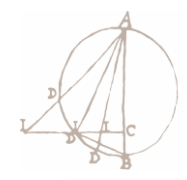


# VERIFICA SPERIMENTALE DI OSCILLAZIONI NEUTRINO-ANTINEUTRINO?



Due postulati:

1.  $\nu \neq \bar{\nu} \rightarrow \nexists$  neutrino di Majorana
2.  $\nu \leftrightarrow \bar{\nu} \rightarrow$  parziale non-conservazione della carica leptonica



# VERIFICA SPERIMENTALE DI OSCILLAZIONI NEUTRINO-ANTINEUTRINO?

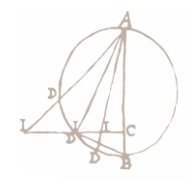


Due postulati:

1.  $\nu \neq \bar{\nu} \rightarrow \nexists$  neutrino di Majorana ✓
2.  $\nu \leftrightarrow \bar{\nu} \rightarrow$  parziale non-conservazione della carica leptonica

## Prova sperimentale del postulato 1: risultati preliminari di Brookhaven

Davis, R. J. (1956), *An Attempt to detect the Neutrinos from a Nuclear Reactor by the  $Cl^{37}(\bar{\nu}, e)A^{37}$* , Bulletin of American Physical Society, II(1):219



# VERIFICA SPERIMENTALE DI OSCILLAZIONI NEUTRINO-ANTINEUTRINO?



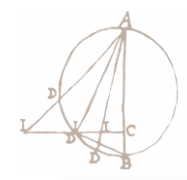
Due postulati:

1.  $\nu \neq \bar{\nu} \rightarrow \nexists$  neutrino di Majorana ✓
2.  $\nu \leftrightarrow \bar{\nu} \rightarrow$  parziale non-conservazione della carica leptonica ?

## Prova sperimentale del postulato 1: risultati preliminari di Brookhaven

Davis, R. J. (1956), *An Attempt to detect the Neutrinos from a Nuclear Reactor by the  $Cl^{37}(\bar{\nu}, e)A^{37}$* , Bulletin of American Physical Society, II(1):219

**Prova sperimentale del postulato 2?** Parziale non-conservazione della carica leptonica e transizioni nel vuoto di neutrino in antineutrino.



# OSCILLAZIONI DI SAPORE



*ELECTRON AND MUON NEUTRINOS\**

B.Pontecorvo

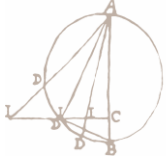
Ipotesi teorica dei  
neutrini muonici



**1959**



# OSCILLAZIONI DI SAPORE



*ELECTRON AND MUON NEUTRINOS\**

B. Pontecorvo

Ipotesi teorica dei  
neutrini muonici

1959



S. Sakata  
1911-1970

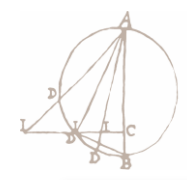
Z. Maki  
1929-2005

M. Nakagawa  
1932-2001

**Maki, Nakagawa, Sakata:**  
neutrino mixing e oscillazioni di  
sapore nel contesto di Nagoya

1962





# NEUTRINO MIXING NELLA SCUOLA DI NAGOYA



”The flavor mixing of neutrinos was proposed from a quite different line of thought than Pontecorvo’s approach. It was based on an attempt at a unified understanding of leptons and hadrons.”

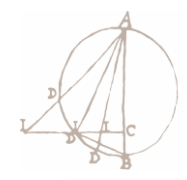
Nakagawa, M. (1998). *Birth of neutrino oscillation*. Arxiv preprint hep-ph/9811358

- Modello di Sakata (1956): modello composito per descrivere le nuove particelle adroniche.
- Influenza della teoria dei tre stadi di Taketani e del materialism dialettico.
- Estensione del modello di Sakata al **modello di Nagoya** → descrizione di barioni e leptoni:

$$p \iff \nu;$$

$$n \iff e^-;$$

$$\Lambda \iff \mu^-$$



Se il protone è un sistema composto da un neutrino e dalla materia  $B^+$ , quale dei due sapori dei neutrini è coinvolto?  $\nu_e$  o  $\nu_\mu$ ?

→  $\nu_e, \nu_\mu$  sono neutrini deboli

→  $\nu_1, \nu_2$  sono i neutrini veri, quelli che contribuiscono a formare la materia.

$$\begin{aligned}\nu_1 &= \nu_e \cos(\delta) + \nu_\mu \sin(\delta); \\ \nu_2 &= -\nu_e \sin(\delta) + \nu_\mu \cos(\delta)\end{aligned}$$



# OSCILLAZIONI DI SAPORE



*ELECTRON AND MUON NEUTRINOS\**

B. Pontecorvo



S. Sakata  
1911-1970

Z. Maki  
1929-2005

M. Nakagawa  
1932-2001

Ipotesi teorica dei  
neutrini muonici

**Maki, Nakagawa, Sakata:**  
neutrino mixing e oscillazioni di  
sapore nel contesto di Nagoya

**1967**

**1959**

**1962**

*NEUTRINO EXPERIMENTS AND THE PROBLEM OF CONSERVATION OF LEPTONIC  
CHARGE*

**B. PONTECORVO**

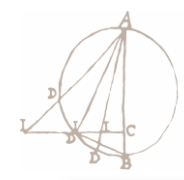
Joint Institute for Nuclear Research

Submitted June 9, 1967

Zh. Eksp. Teor. Fiz. 53, 1717-1725 (November, 1967)

**Ipotesi indipendente delle oscillazioni  
di sapore:**

Predizione del deficit di neutrini solari  
nell'esperimento di Homestake.



# IPOSTESI DI PONTECORVO DELLE OSCILLAZIONI DI SAPORE



→ generalizzazione del concetto di oscillazioni di neutrino-antineutrino

Originalità di Pontecorvo: euristica diretta verso un cammino sperimentale → perché ipotizzare le oscillazioni di sapore? Per ampliare le conoscenze riguardo:

- massa dei neutrini
- astronomia solare.

”The work of the Japanese authors is rich in new ideas on the mixing of hadrons and leptons. However, in contrast to the Dubna work of the 1950’s-1960’s it did not exert any significant influence on the development of the physics of neutrino oscillations and was not accompanied by a flow of theoretical and experimental investigations or proposals of experiments either by the authors themselves or by other physicists.”

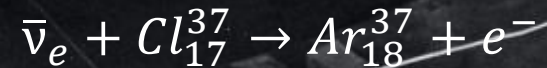
Pontecorvo, B. (1983). Pages in the development of neutrino physics. *Soviet Physics Uspekhi*, 26(12):1087



# DUE ESPERIMENTI-“GUIDA”



**Esperimento di R. Davis al Brookhaven National Laboratory:** metodo cloro-argon.  
Scopo: osservazione del processo di decadimento beta inverso



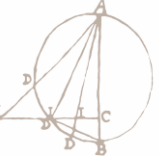
Esito negativo  $\rightarrow$  prova sperimentale che  $\nu \neq \bar{\nu}$   
Esito positivo  $\rightarrow$  oscillazioni neutrino-antineutrino?

**Esperimento di R. Davis e J. Bahcall nella miniera d'oro di Homestake:** problema dei neutrini solari.

Metodo cloro-argon applicato ai neutrini solari.

Carenza di neutrini osservati  $\rightarrow$  oscillazioni di flavour?





# OSCILLAZIONI DI SAPORE



*ELECTRON AND MUON NEUTRINOS\**

B. Pontecorvo

Ipotesi teorica dei  
neutrini muonici

1959



S. Sakata 1911-1970  
Z. Maki 1929-2005  
M. Nakagawa 1932-2001

**Maki, Nakagawa, Sakata:**  
neutrino mixing e oscillazioni di  
sapore nel contesto di Nagoya

1962



Problema dei neutrini solari: Bahcall e  
Davis notano una carenza di neutrino solari  
nell'esperimento di Homestake

1967

1969

1968

*NEUTRINO EXPERIMENTS AND THE PROBLEM OF CONSERVATION OF LEPTONIC  
CHARGE*

B. PONTECORVO

Joint Institute for Nuclear Research

Submitted June 9, 1967

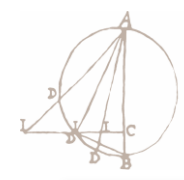
Zh. Eksp. Teor. Fiz. 53, 1717-1725 (November, 1967)

*NEUTRINO ASTRONOMY AND LEPTON CHARGE*

V. GRIBOV\* and B. PONTECORVO  
*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, USSR*

Received 20 December 1968

Ipotesi quantitativa delle oscillazioni di  
sapore in analogia con i mesoni  $K^0$



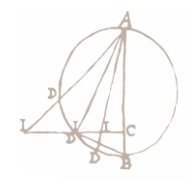
Studio delle reazioni termonucleari del Sole attraverso il metodo cloro-argon (neutrini).

## **Predizione di Pontecorvo (1967):**

”The only effect at the surface of the earth would consist in the fact that the flux of observable solar neutrinos would be half as large as the total flux of solar neutrinos.”

Pontecorvo, B. (1967). *Neutrino experiments and the problem of conservation of leptonic charge*.  
JETP, 26(984-988):165

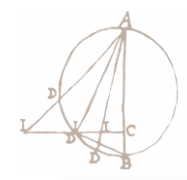
→ Problema dei neutrini solari!



# TRE DOMANDE PRINCIPALI



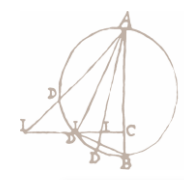
1. Come si inserisce il concetto di oscillazioni di neutrini-antineutrini nella storia del neutrino?
2. Quale ruolo svolse per Pontecorvo la possibilità di una verifica sperimentale nell'elaborazione della sua ipotesi teorica?
3. Fino a che punto Pontecorvo fu influenzato da discussioni con altri fisici del suo ambiente, il JINR di Dubna?



# PONTECORVO E BOGOLIUBOV



Bruno Pontecorvo e Nikolay N. Bogoliubov negli anni '70.  
Fonte: Pontecorvo, B. (2013). *Bruno Pontecorvo selected scientific works: recollections on Bruno Pontecorvo*. SIF.



# BOGOLIUBOV: UNA POSSIBILE FONTE DI ISPIRAZIONE PER PONTECORVO



Teoria microscopica della superconduttività (1957): Bogoliubov formula una sorta di esempio fermionico di particle mixing per spiegare le eccitazioni elementary nei superconduttori.

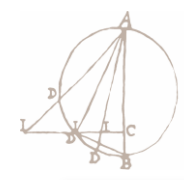
B. riformula l'Hamiltoniana di Froehlich

$$H_{Fr} = \sum_{k,s} E(k) a_{k,s}^\dagger a_{k,s} + \sum_q \omega(q) b_q^\dagger b_q + \sum_{k,q,s,k'-k=q} g \left( \frac{\omega(q)}{2V} \right)^{\frac{1}{2}} a_{k',s}^\dagger a_{k,s} b_q^\dagger + h.c.$$

nei termini di nuove ampiezze di Fermi

$$\alpha_{k0} = u_k a_{k,1/2} - v_k a_{-k,-1/2}^\dagger$$
$$\alpha_{k1} = u_k a_{-k,-1/2} + v_k a_{k,1/2}^\dagger$$

Applicando questo operatore sul vuoto, è poi possibile generare una quasiparticella, data dalla sovrapposizione di elettrone e lacuna: "Bogoliubone".



# BOGOLIUBOV: UNA POSSIBILE FONTE DI ISPIRAZIONE PER PONTECORVO

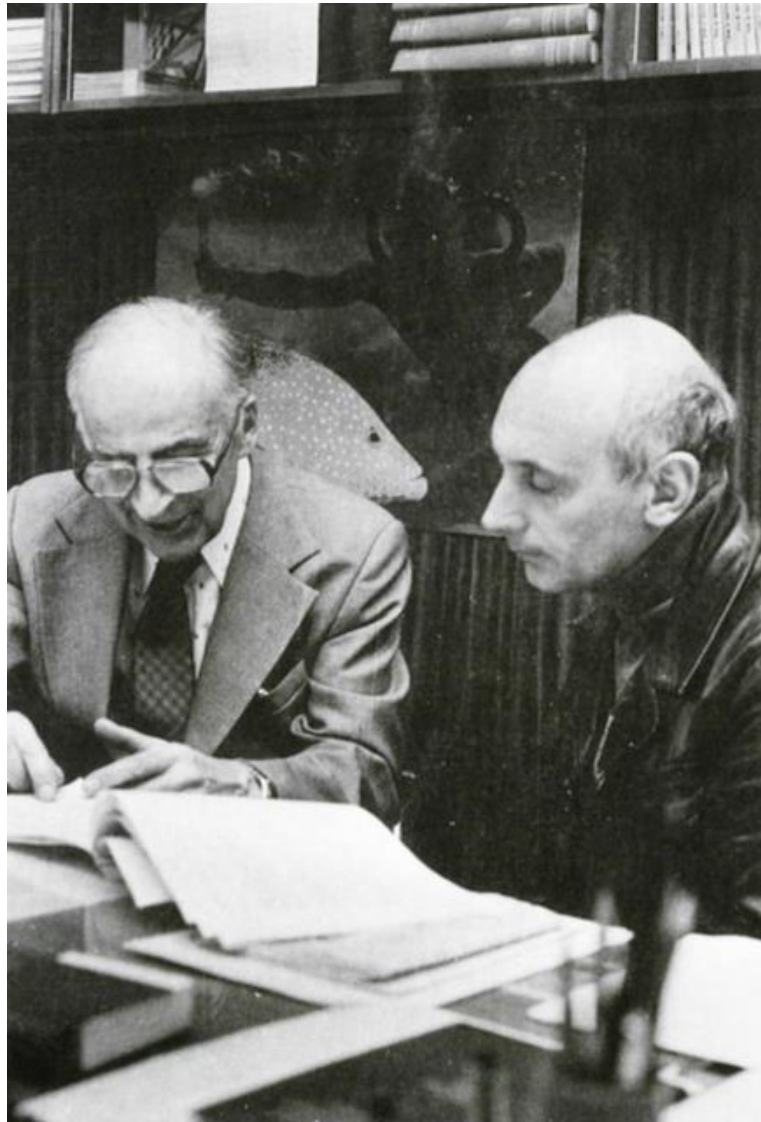
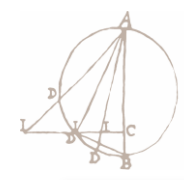


Pontecorvo: neutrino e antineutrino come sovrapposizioni (simmetrica e antisimmetrica) di due neutrini di Majorana

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

La quasi-particella di Bogoliubov rappresenta per lui una sorta di controparte fermionica del kaone neutro, rafforzando la sua convinzione che anche i leptoni possono essere soggetti a mixing!





**GRAZIE  
DELL'ATTENZIONE!**



