

# Leggeri, veloci e sfuggenti I neutrini



Liceo Scientifico "Renato Donatelli"  
16 dicembre 2015 - Terni

# Agenda

---



# Agenda

---



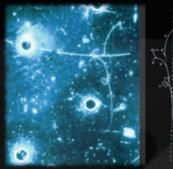
L'invenzione e la scoperta



L'osservazione



La teoria di Fermi



Le correnti neutre e le famiglie



Il ruolo nel Modello Standard



Le oscillazioni



Cosmologia

# Prima (1896-1930)

## Radioattività

Il nucleo radioattivo emette:

- ★ un nucleo di  ${}^4\text{He}$ , radioattività  $\alpha$ .
- ★ un elettrone, radioattività  $\beta$ .
- ★ un fotone energetico (MeV), radioattività  $\gamma$ .

L'energia dell'elettrone emesso nel decadimento  $\beta$  è

$$E_{\beta} = \Delta m c^2$$

$\Delta m$  = massa iniziale - massa finale

Serendipità

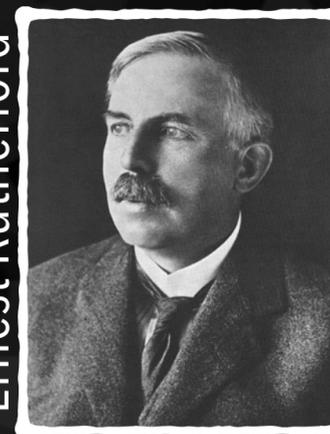
Gli eventi che hanno portato alla attuale conoscenza dei neutrini, come spesso accade nelle storie della Fisica, non seguono alcun ordine temporale. Si tratta piuttosto di un insieme di esperimenti, scoperte e idee le cui linee temporali si avvolgono, si intrecciano e si intersecano seguendo intuizioni geniali e casualità.

Genialità

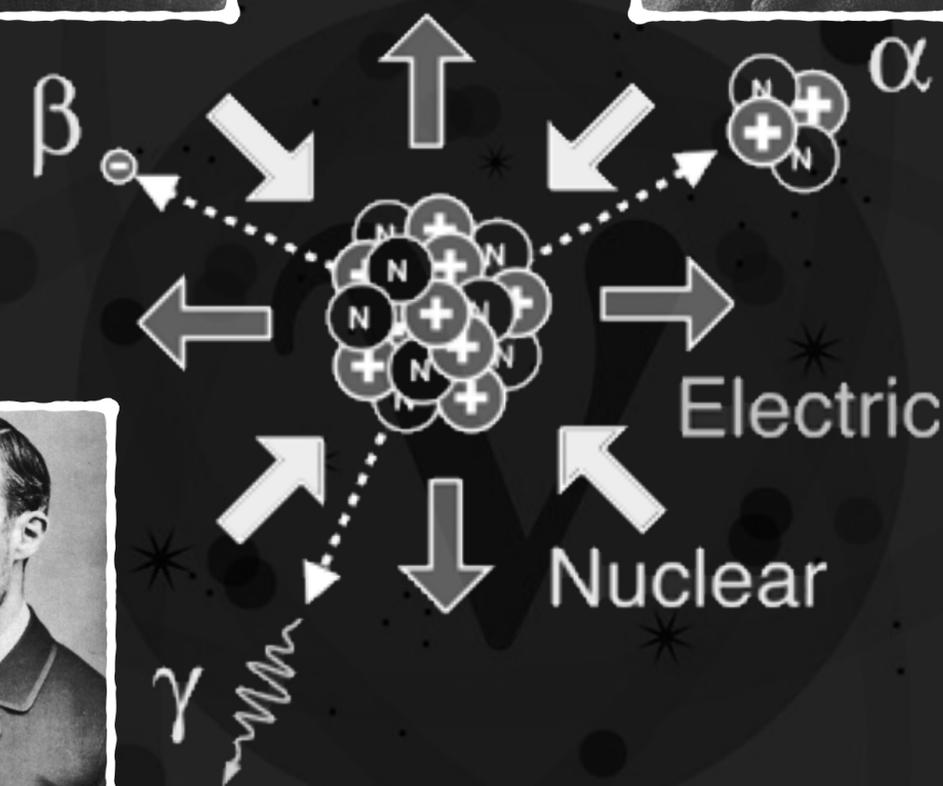
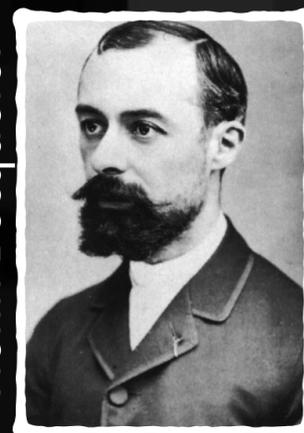
Marie e Pierre Curie



Ernest Rutherford



Henri Becquerel

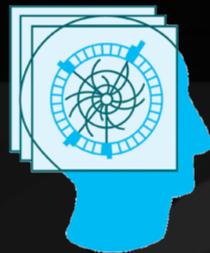


# La scoperta (1930)

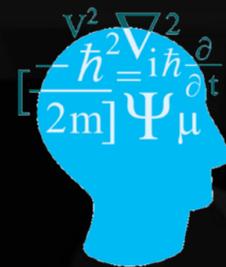


Wolfgang Pauli è preoccupato dalla "sparizione" di energia nei decadimenti  $\beta$ . Secondo l'equivalenza massa energia di Einstein, l'energia degli elettroni emessi è minore della differenza tra massa iniziale e finale del nucleo radioattivo.

$$E_{\beta} < \Delta m c^2$$



Lo spettro dell'energia degli elettroni emessi è continuo.



Wolfgang Pauli ha un'idea per "salvare" il **principio di conservazione della massa-energia** (!). In una celeberrima lettera, postula l'esistenza di una **particella nuova** che, prodotta assieme all'elettrone nel decadimento radioattivo, porterebbe con se l'energia mancante.

Wolfgang Pauli



# La lettera di Pauli (1930)

Wolfgang Pauli



- 1 Care Signore e cari Signori **Radioattivi!**
- 2 Ho escogitato un rimedio disperato per salvare [...] **la legge di conservazione dell'energia.**
- 3 ...Potrebbero esistere delle particelle elettricamente neutre, che chiamerò **neutroni**, nei nuclei ...
- 4 Lo spettro continuo [...] avrebbe quindi senso assumendo che nel decadimento beta, oltre all'elettrone, **venga emesso un neutrone tale che la somma delle energie dei neutroni ed elettroni sia costante.**
- 5 Ma finora non ho avuto il coraggio di pubblicare nulla su questa idea e con fiducia mi rivolgo prima a voi, miei cari radioattivi, con la questione di quanto sia probabile **trovare le prove sperimentali per tali neutroni** ...
- 6 Ammetto che il mio rimedio possa sembrare quasi inverosimile perché probabilmente, se esistessero, questi neutroni sarebbero stati già visti da molto tempo. **Ma chi non risica, non rosica** ...
- 7 Così, cari radioattivi, **esaminate minuziosamente e giudicate.**

original - Photocopy of PLC 0373  
Abschrift/15.12.56 PM

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

Abschrift  
Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule  
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930  
Gloriastrasse

1 **Liebe Radioaktive Damen und Herren,**

2 Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst  
anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, **bin ich**  
angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie  
des kontinuierlichen beta-Spektrums **auf einen verzweifelten Ausweg**  
3 **verfallen um den "Wechselsatz" (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 Ausschliessungsprinzip befolgen und  
4 **sich** von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie  
**nicht** mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen  
**musste** 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  
5 **wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron**  
**konstant ist.**

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die  
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint  
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer  
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein  
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment  $\mu$  ist. Die Experimente  
verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons  
nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann  
6  **$\mu$  wohl nicht grösser sein als  $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$ .**

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee  
zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe  
Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis  
eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa  
10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein  
gamma-Strahl.

7 Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein  
wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn  
sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt,  
geht und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum  
wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt,  
Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat:  
"O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen  
Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.  
Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. Leider kann ich nicht  
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht  
vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabhöflich  
bin. Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Baek, Euer  
untertänigster Diener

ges. W. Pauli



# Il "neutrino" e la Teoria di Fermi (1933)

"... their mass can not be very much more than the electron mass. In order to distinguish them from heavy neutrons, mister **Fermi has proposed to name them "neutrinos"**. It is possible that the proper mass of neutrinos be zero... We know nothing about the interaction of neutrinos with the other particles of matter and with photons: the hypothesis that they have a magnetic moment seems to me not funded at all."

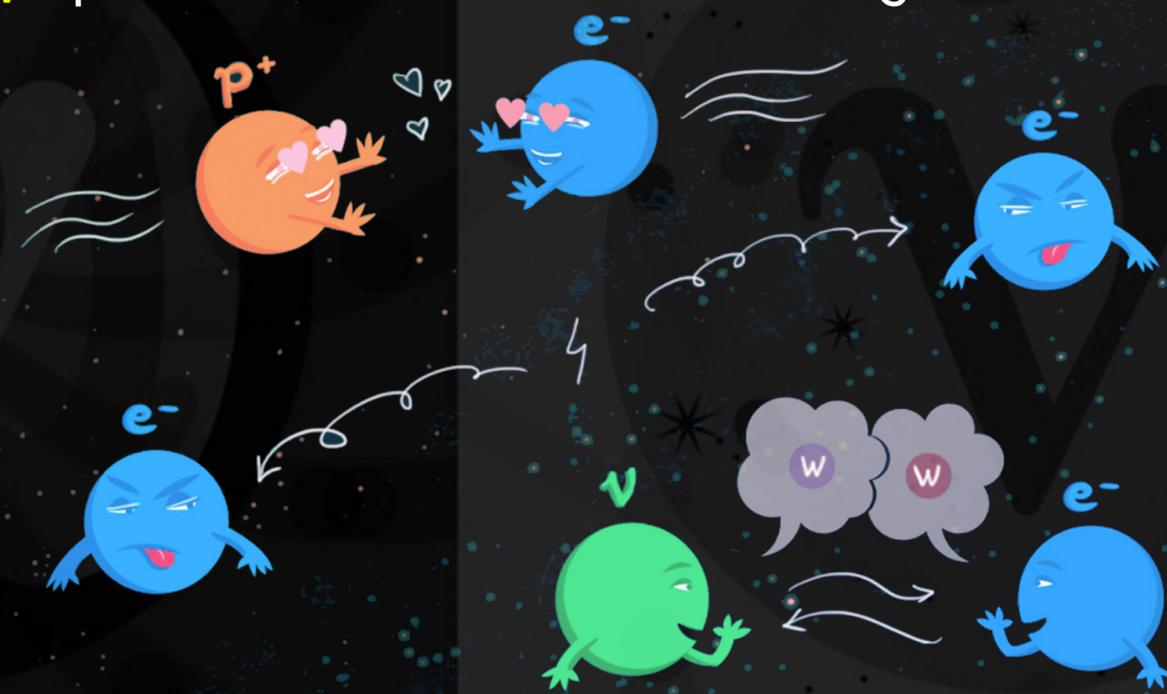
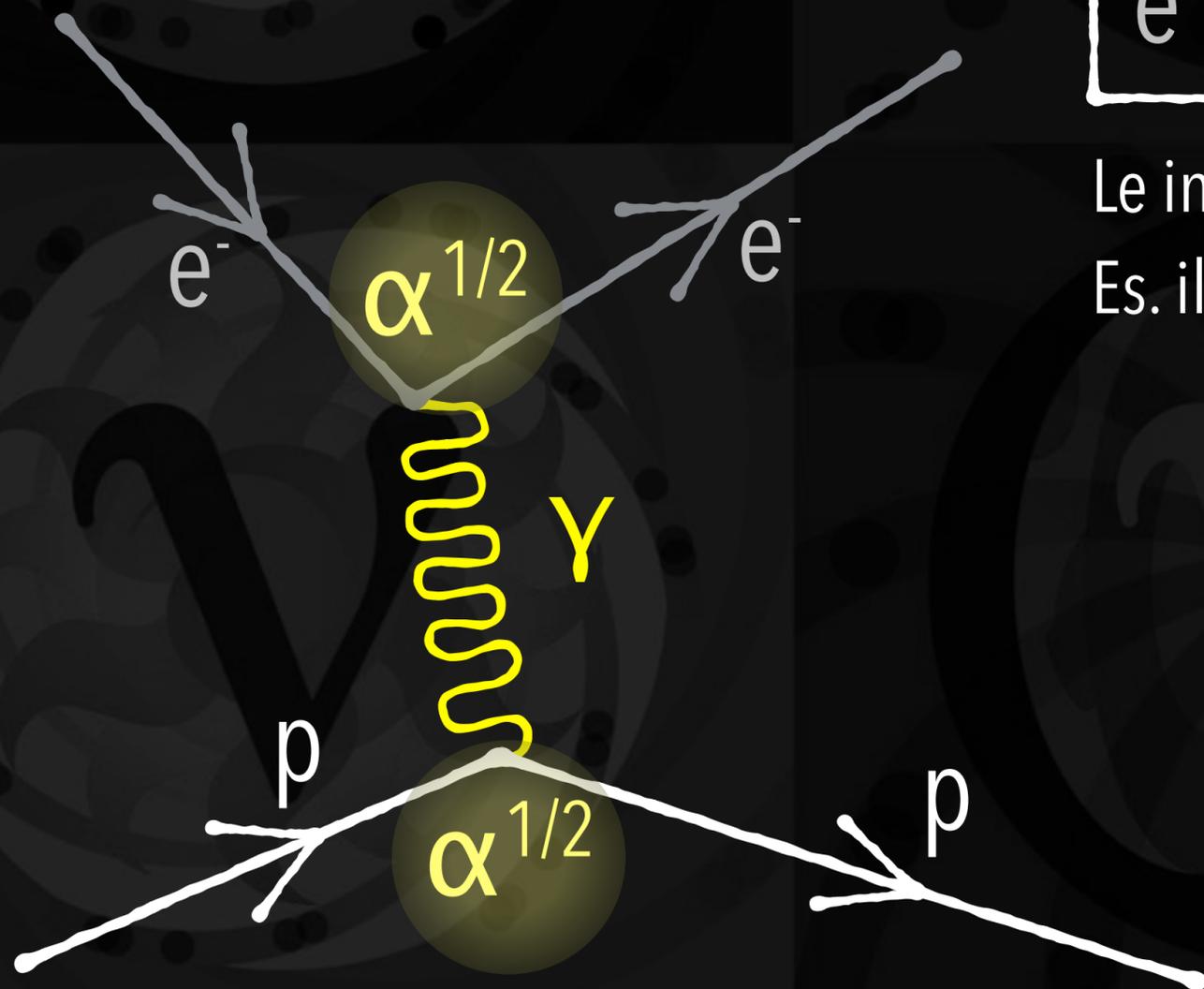
W. Pauli - Conferenza di Solvay, ottobre 1933

Enrico Fermi



$$e^- + p \longrightarrow e^- + p$$

Le interazioni fondamentali sono "mediate" da particelle di forza. Es. il fotone  $\gamma$  "porta" l'interazione elettromagnetica.

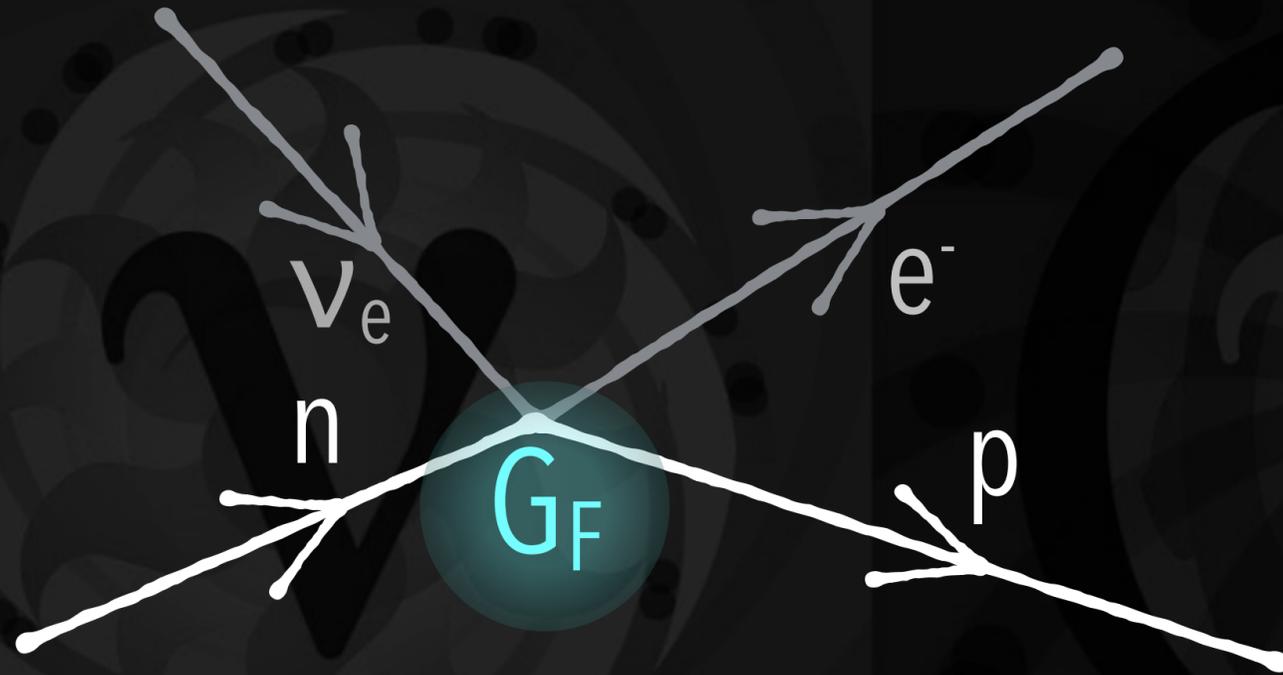


# Il "neutrino" e la Teoria di Fermi (1933)

"... their mass can not be very much more than the electron mass. In order to distinguish them from heavy neutrons, mister **Fermi has proposed to name them "neutrinos"**. It is possible that the proper mass of neutrinos be zero... We know nothing about the interaction of neutrinos with the other particles of matter and with photons: the hypothesis that they have a magnetic moment seems to me not funded at all."

W. Pauli - Conferenza di Solvay, ottobre 1933

Enrico Fermi



# Il "neutrino" e la Teoria di Fermi (1933)

"... their mass can not be very much more than the electron mass. In order to distinguish them from heavy neutrons, mister **Fermi has proposed to name them "neutrinos"**. It is possible that the proper mass of neutrinos be zero... We know nothing about the interaction of neutrinos with the other particles of matter and with photons: the hypothesis that they have a magnetic moment seems to me not funded at all."

W. Pauli - Conferenza di Solvay, ottobre 1933

Enrico Fermi

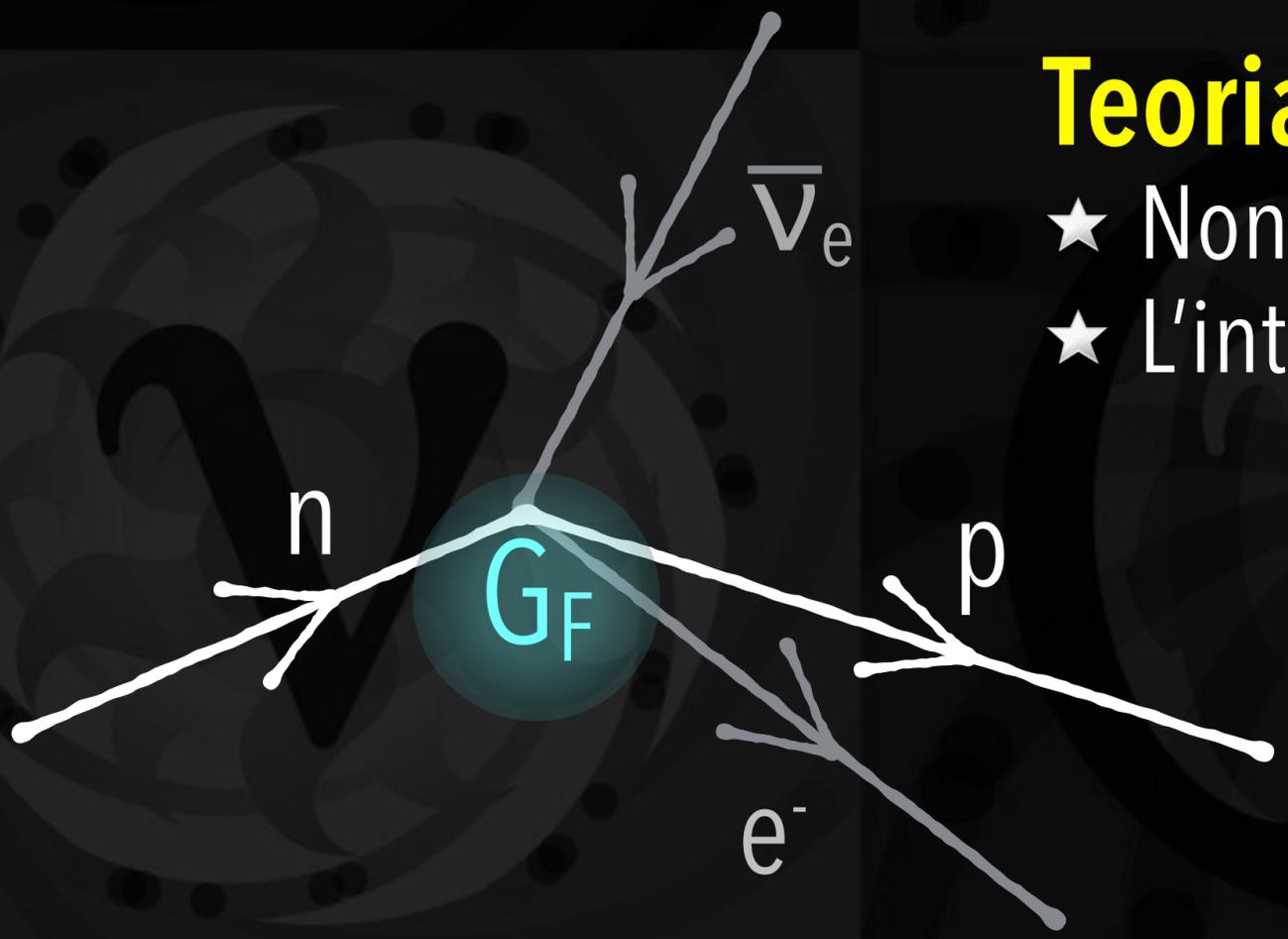


$$n \rightarrow \bar{\nu}_e + p + e^-$$

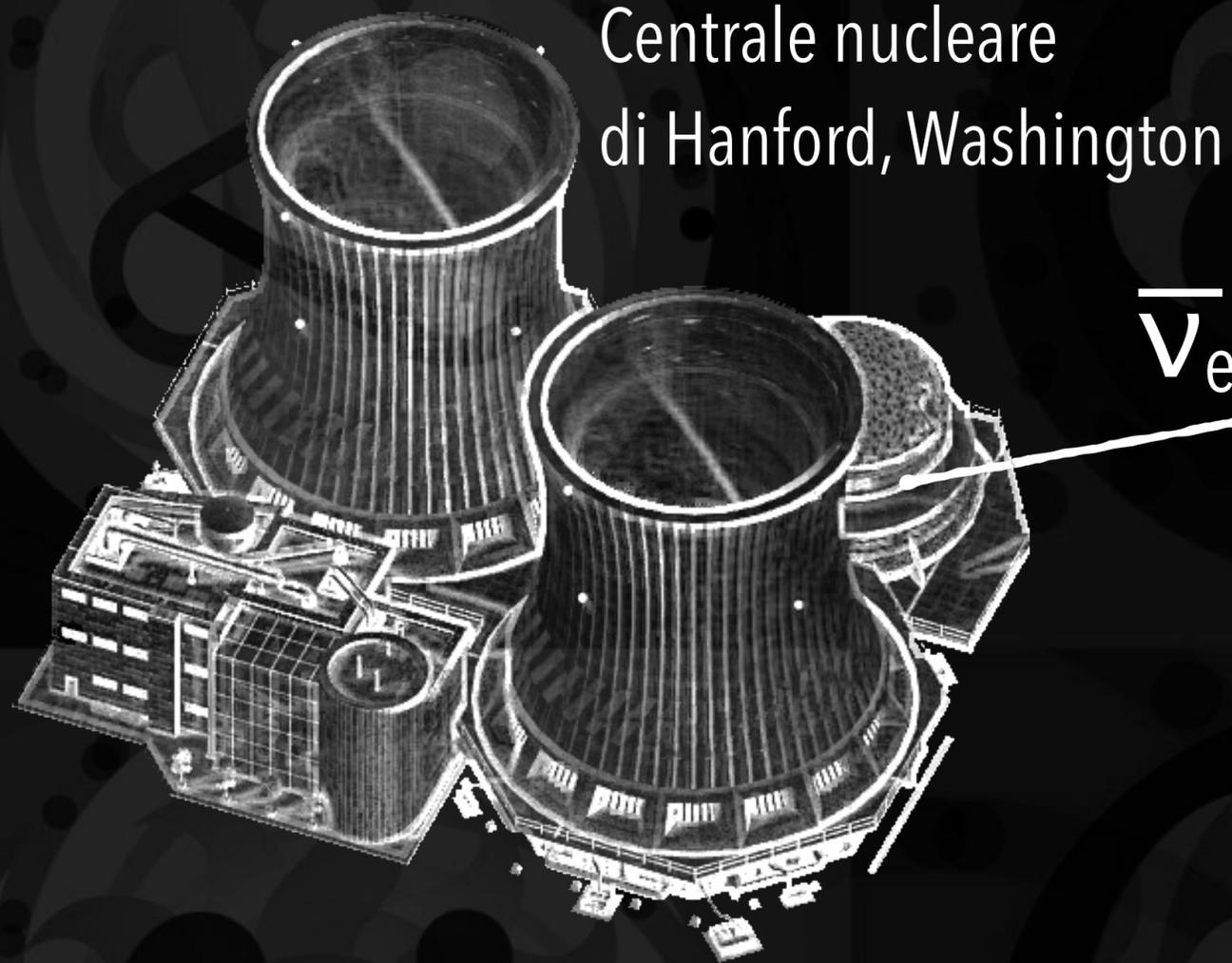
## Teoria di Fermi

- ★ Non ci sono mediatori → Interazione **puntiforme**
- ★ L'interazione è debole → Piccola carica debole  **$G_F$**

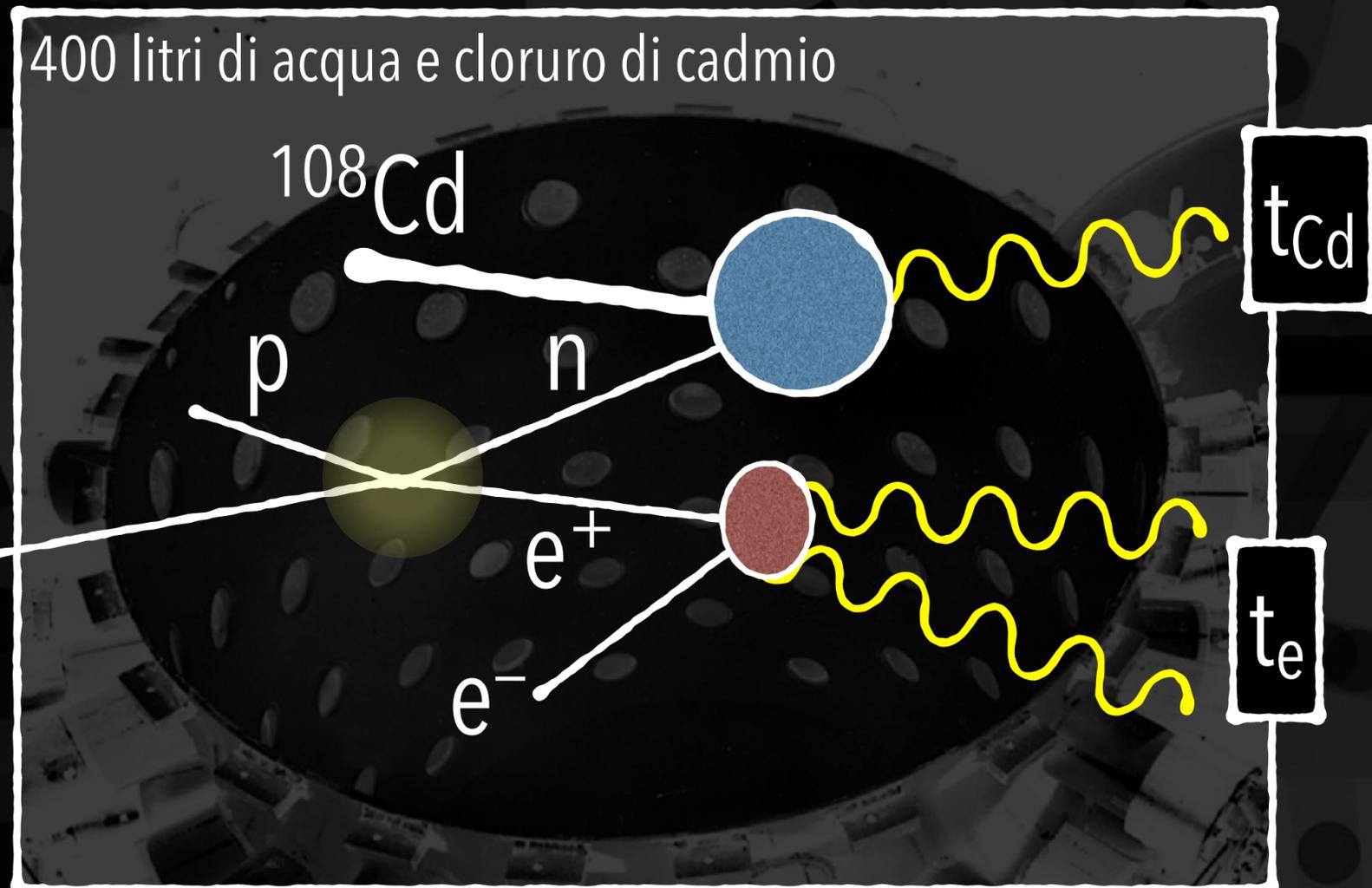
$$G_F \ll \alpha / (0.1 \text{ GeV})^2$$
$$= 0.00007 \text{ GeV}^{-2}$$
$$= 1 \text{ GeV}^{-2}$$



# La rivelazione (1956...)



$\bar{\nu}_e$



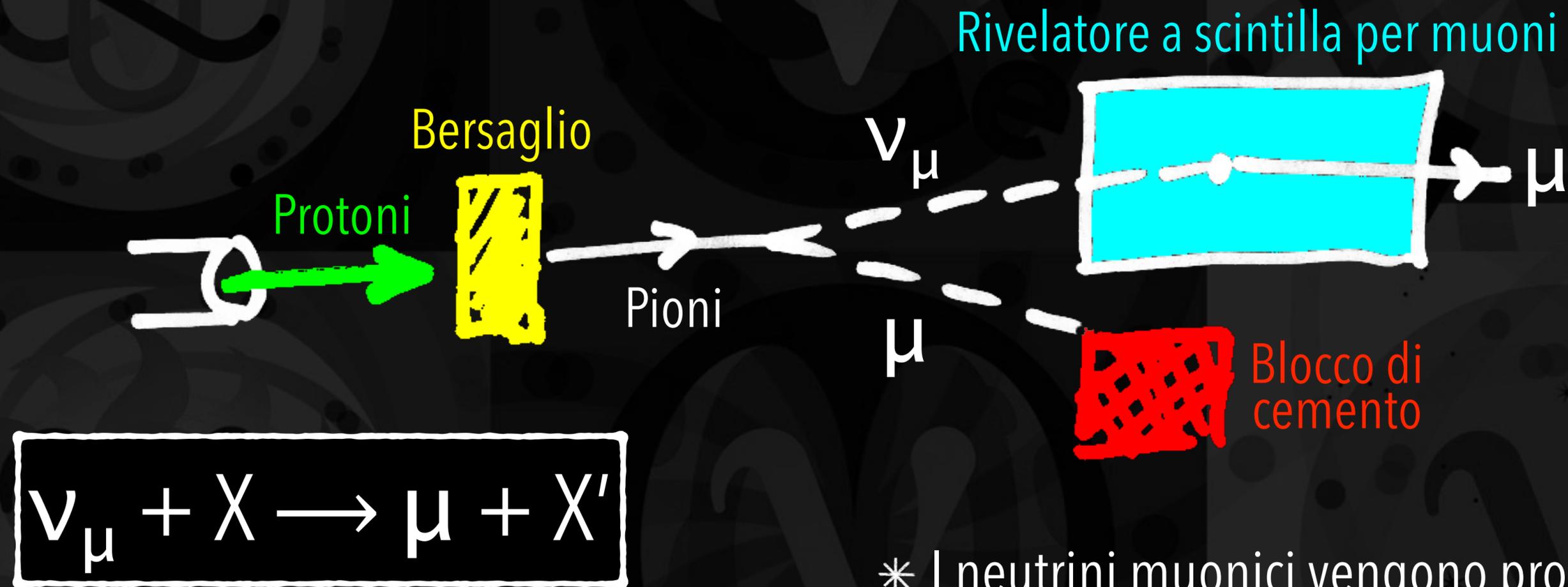
$$t_e - t_{\text{Cd}} = 15 \mu\text{s}$$

Clyde L. Cowan and Frederick Reines (1956).

**Anti-neutrini elettronici** (associati all'elettrone) prodotti da un reattore nucleare vengono osservati in un rivelatore "al cadmio".

# Neutrini muonici (1963)

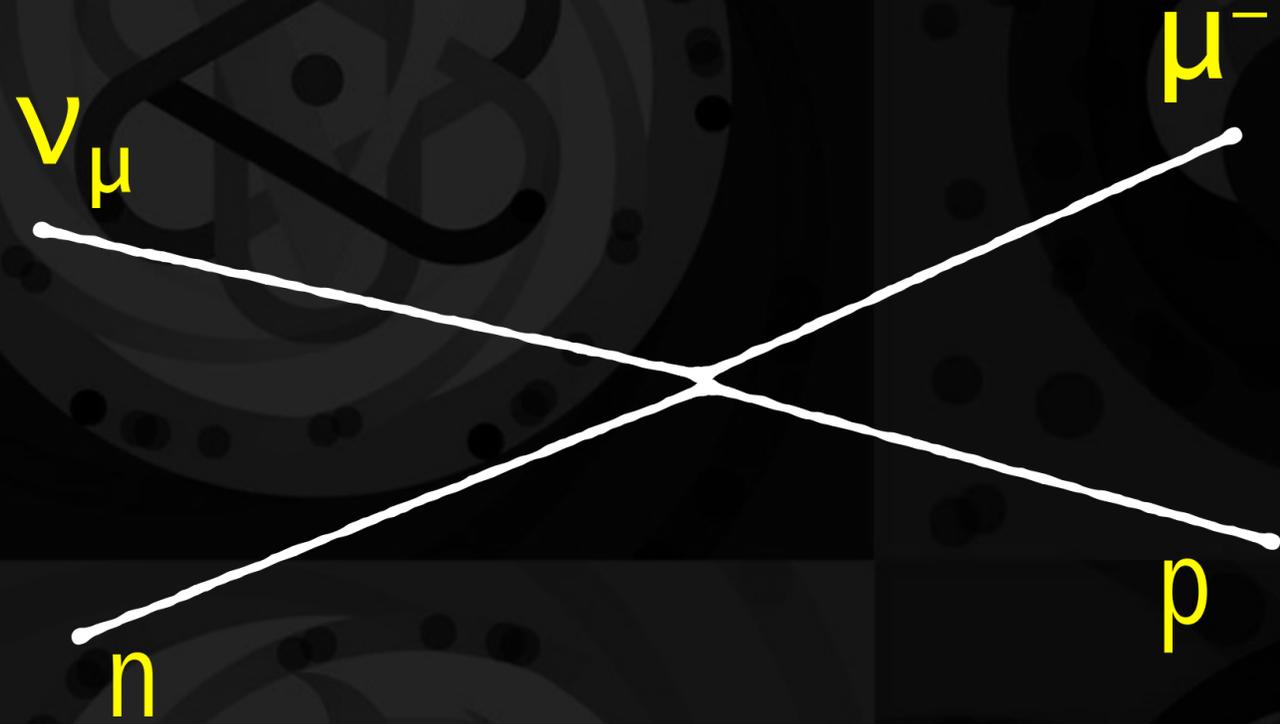
Nel 1963 **Melvin Schwartz, Leon Max Lederman e Jack Steinberger** ottengono il premio Nobel per la scoperta dei **neutrini muonici** in un esperimento all'acceleratore di Brookhaven



- \* I neutrini muonici vengono prodotti **solo** con i muoni e non con gli elettroni.
- \* Hanno **caratteristiche diverse**.

# Le correnti deboli neutre (1973)

Il modello di Fermi di interazione debole puntiforme rappresenta il limite per basse energie di una **interazione "mediata"**



# Le correnti deboli neutre (1973)



Il modello di Fermi di interazione debole puntiforme rappresenta il limite per basse energie di una **interazione "mediata"**

I portatori dell'interazione debole hanno:

- \* carica elettrica:  $W^\pm$
- \* massa molto grande:  $M_W \sim 85 M_{\text{protone}}$

# Le correnti deboli neutre (1973)



Il modello di Fermi di interazione debole puntiforme rappresenta il limite per basse energie di una **interazione "mediata"**

I portatori dell'interazione debole hanno:

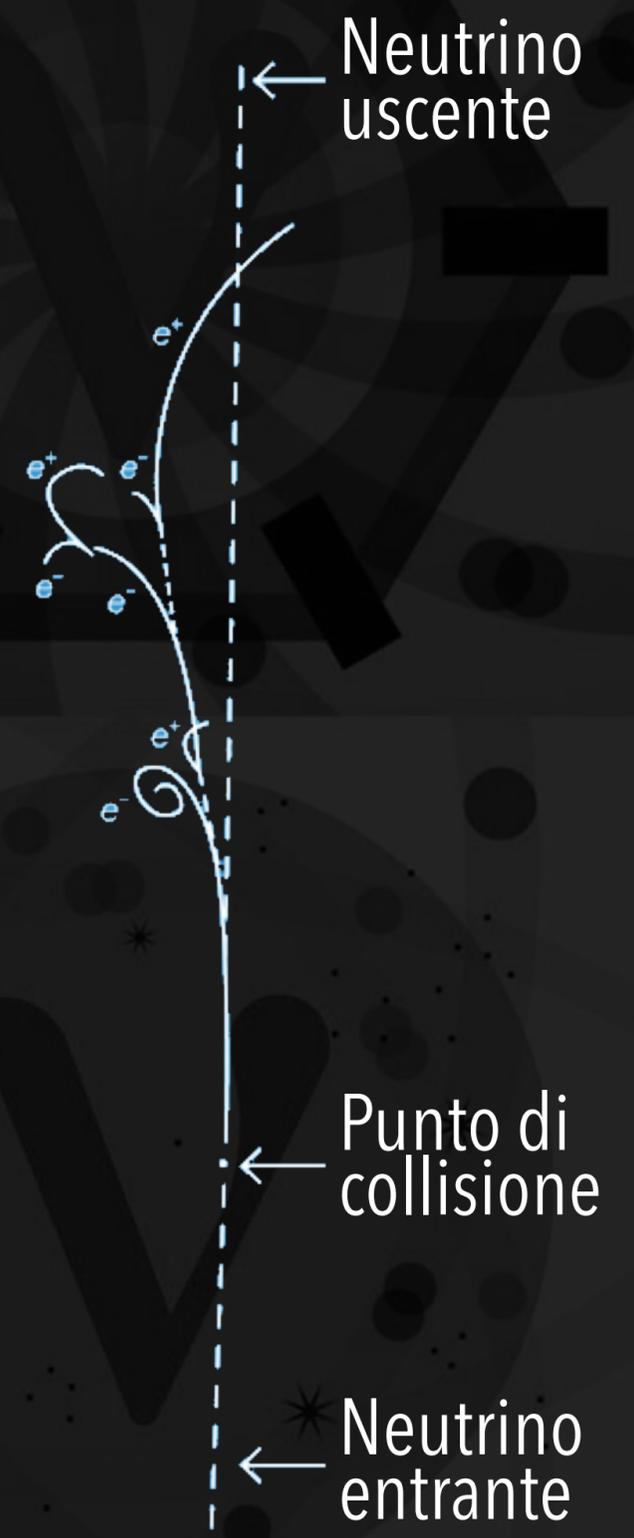
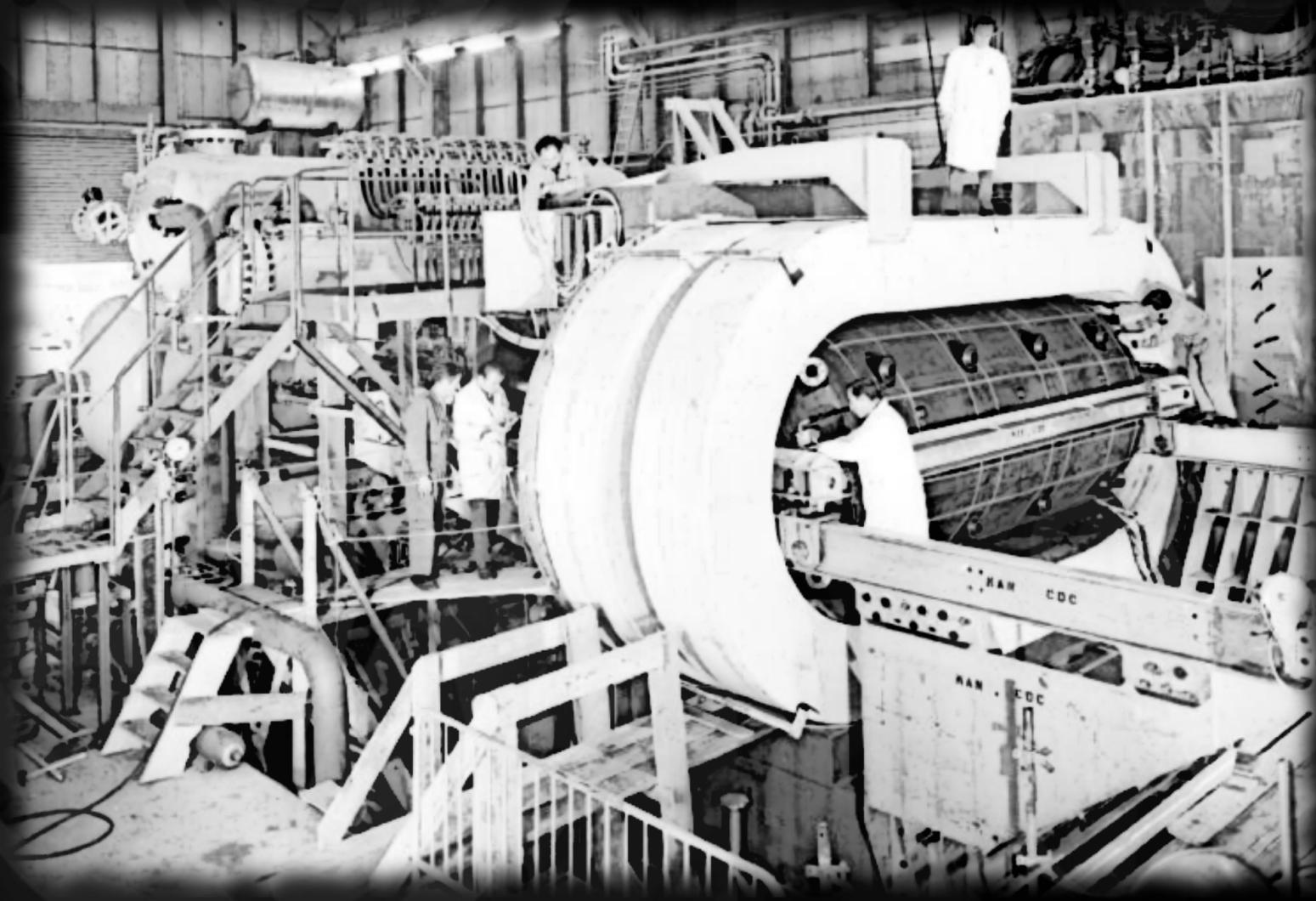
- \* carica elettrica:  $W^\pm$
- \* massa molto grande:  $M_W \sim 85 M_{\text{protone}}$

La teoria **elettrodebole** di Steven Weinberg, Sheldon Glashow e Abdus Salam prevedeva le cosiddette correnti neutre mediate dalla **particella neutra  $Z^0$** , con  $M_Z \sim 97 M_{\text{protone}}$



# Scoperta delle correnti neutre (1973)

Nel 1973 l'esperimento **GARGAMELLE** al CERN di Ginevra con la sua **camera a bolle** scopre le "**correnti neutre**".



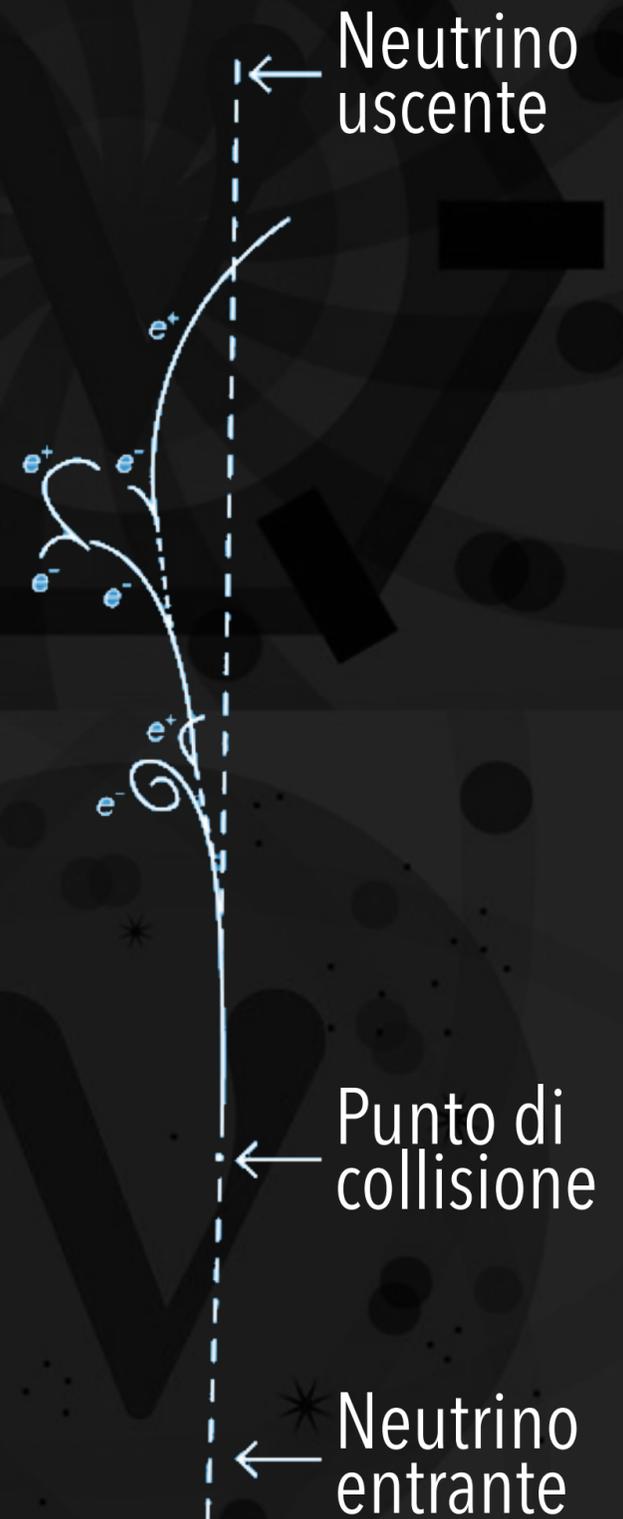
# Scoperta delle correnti neutre (1973)

Nel 1973 l'esperimento **GARGAMELLE** al CERN di Ginevra con la sua **camera a bolle** scopre le "**correnti neutre**".



Il neutrino dopo la collisione **non cambia natura** come nel decadimento beta.

L'interazione con l'elettrone deve essere mediata da una **particella neutra:  $Z^0$** .



# Quanti neutrini ci sono? (fino al 2001)

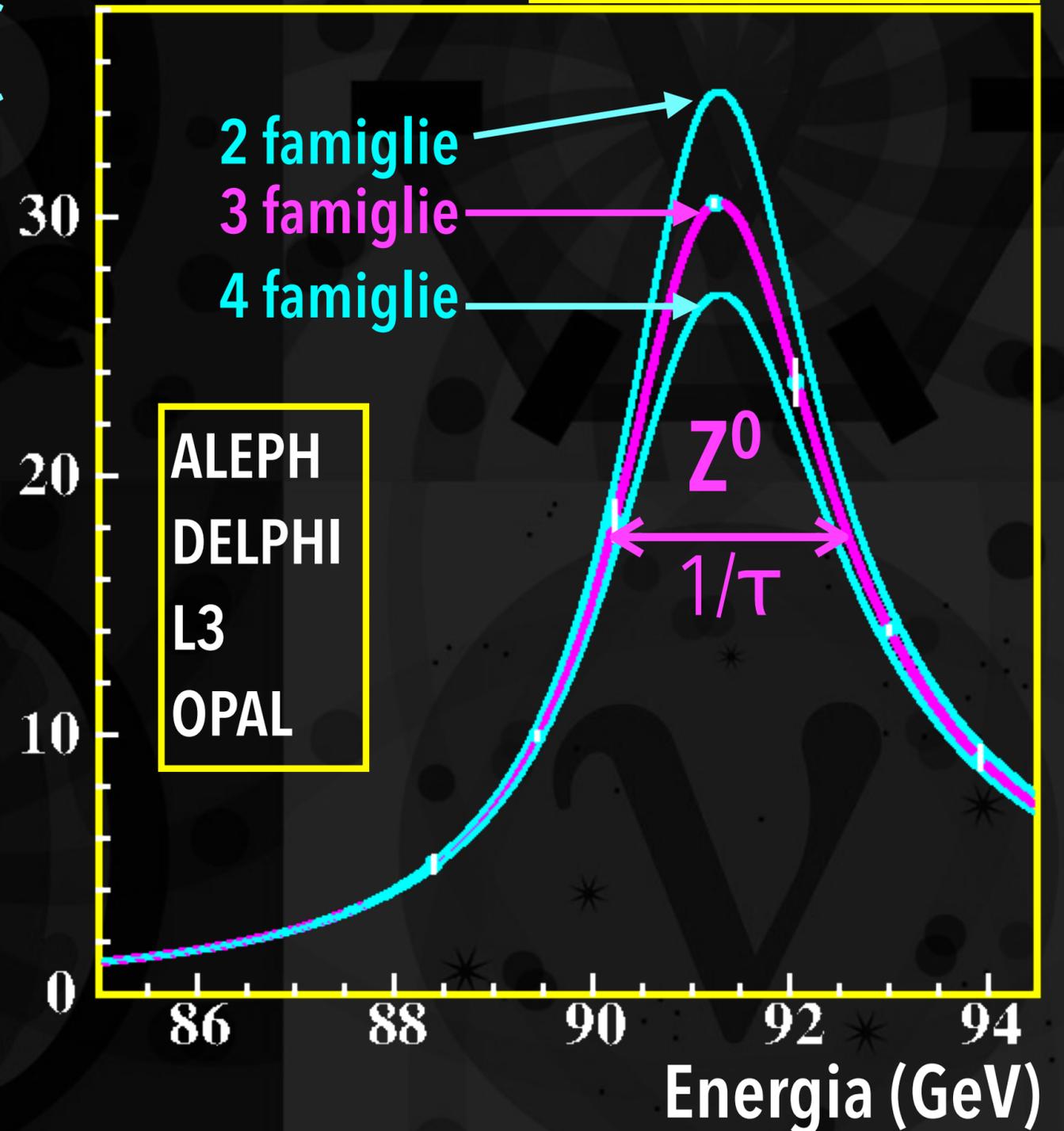
- ★ La particella  $Z^0$  può "accoppiarsi" con tutte le "specie" di neutrini.
- ★ La sua vita media  $\tau = 10^{-23}$  s, dipende dal numero di specie di neutrini. Tanto maggiore è questo numero tanto minore è la vita media.



Il terzo neutrino,  $\nu_\tau$ , è stato scoperto dall'esperimento **DONUT al FermiLab.**

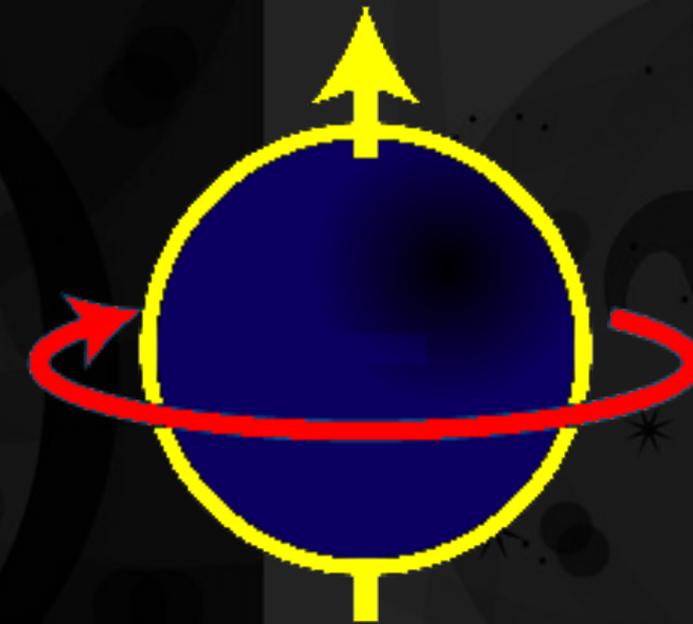
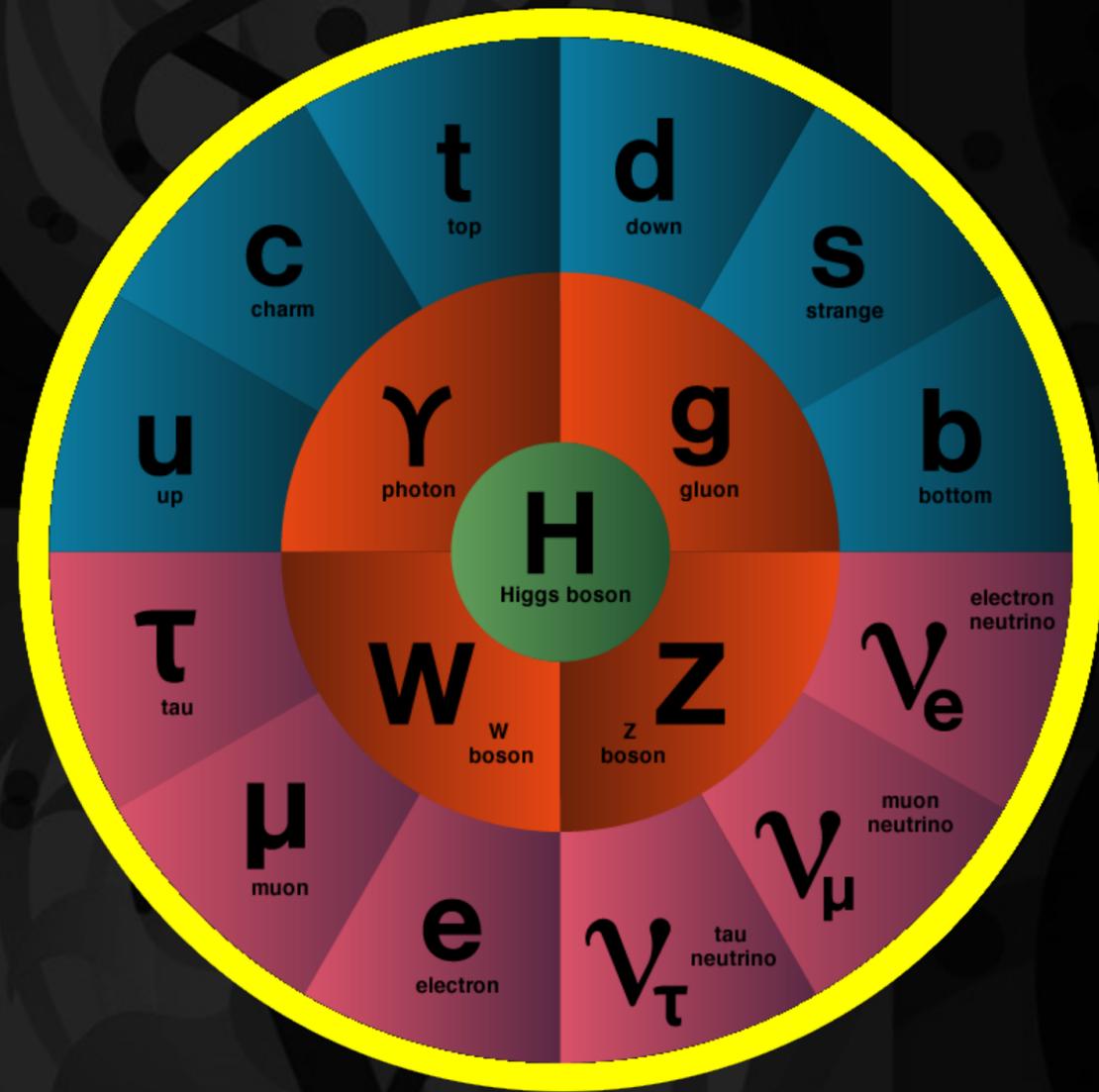
$$e^+ + e^- \longrightarrow \text{adroni}$$

Sezione d'urto (nb)

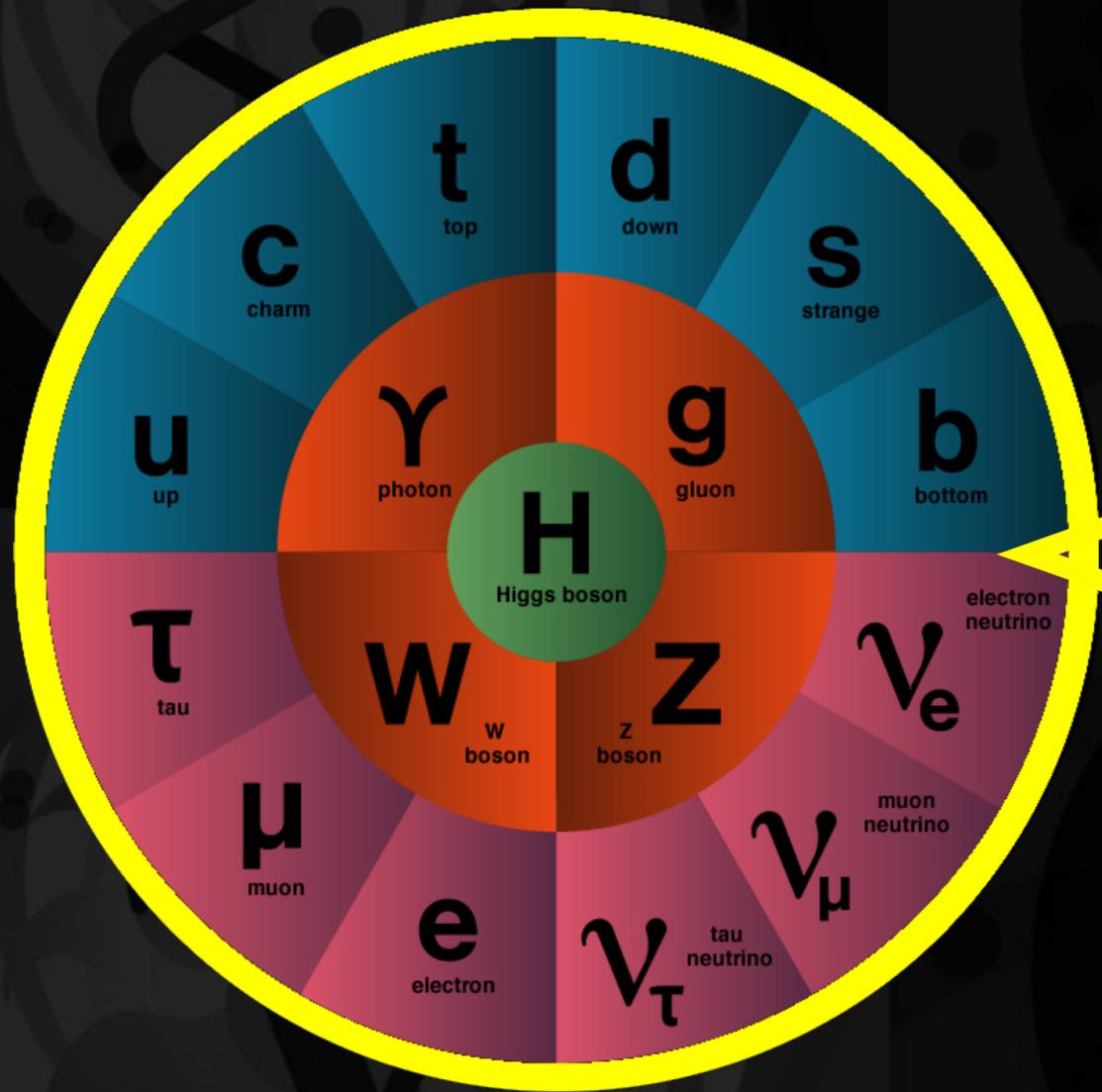


# I neutrini nel Modello Standard

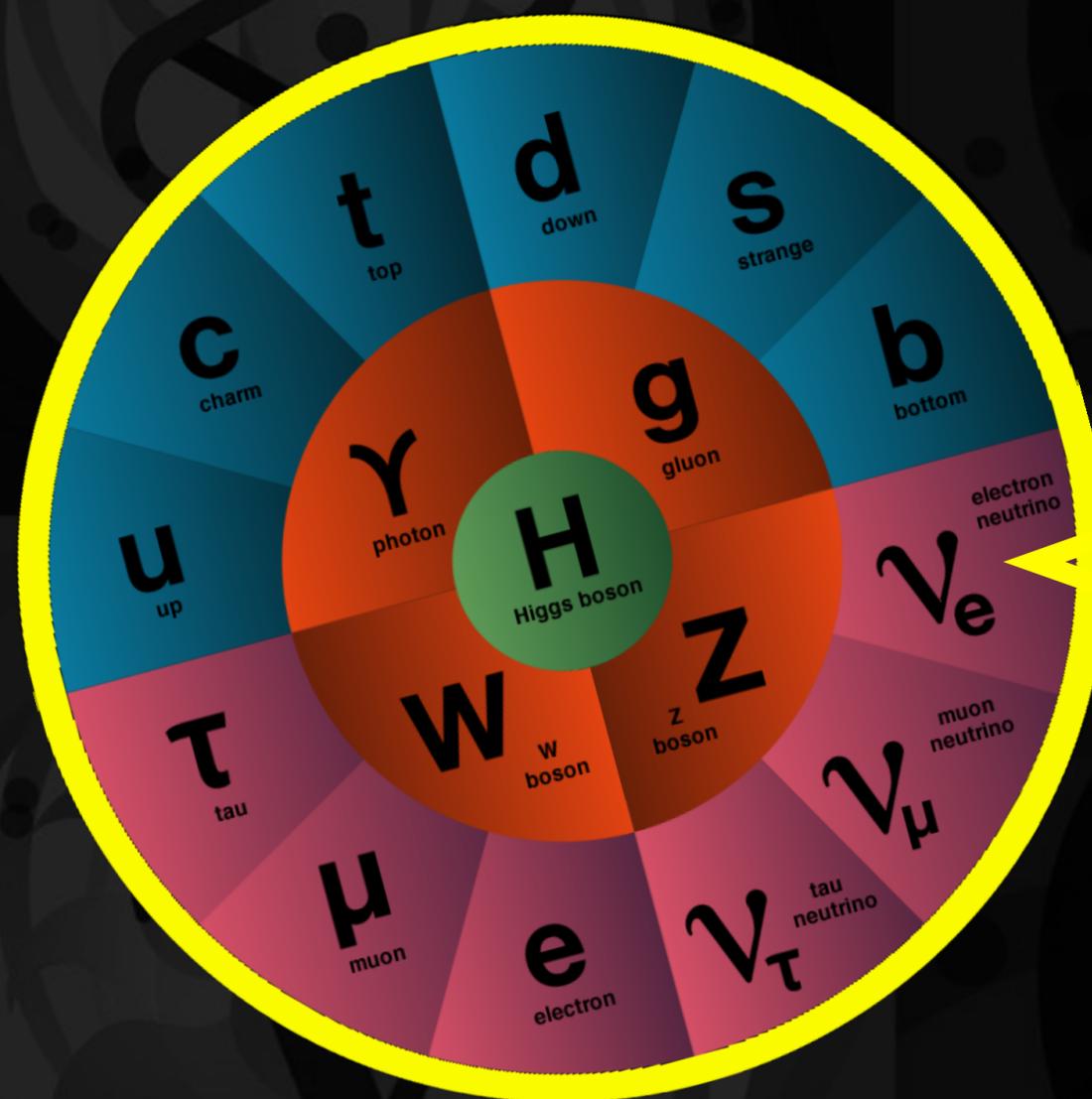
Lo **spin** è una **proprietà intrinseca** delle particelle, ha le dimensioni di un momento angolare.  
Nel Modello Standard le particelle sono **classificate in base al loro spin**.



# I neutrini nel Modello Standard



# I neutrini nel Modello Standard



Anno di scoperta  
**1956**

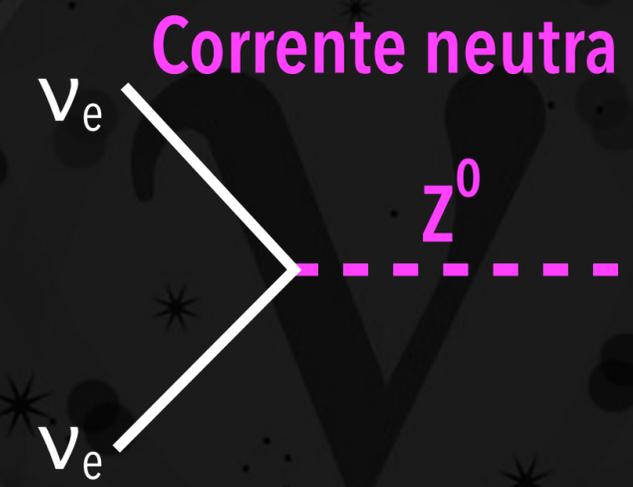
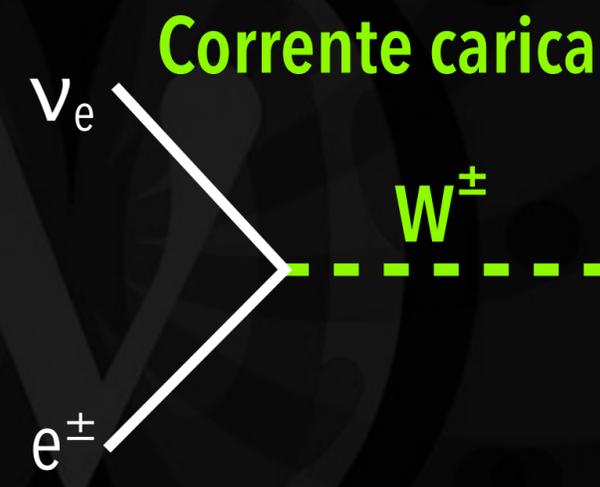
Luogo di scoperta  
**Centrale nucleare Savannah River**

Massa  
**< 2 eV**

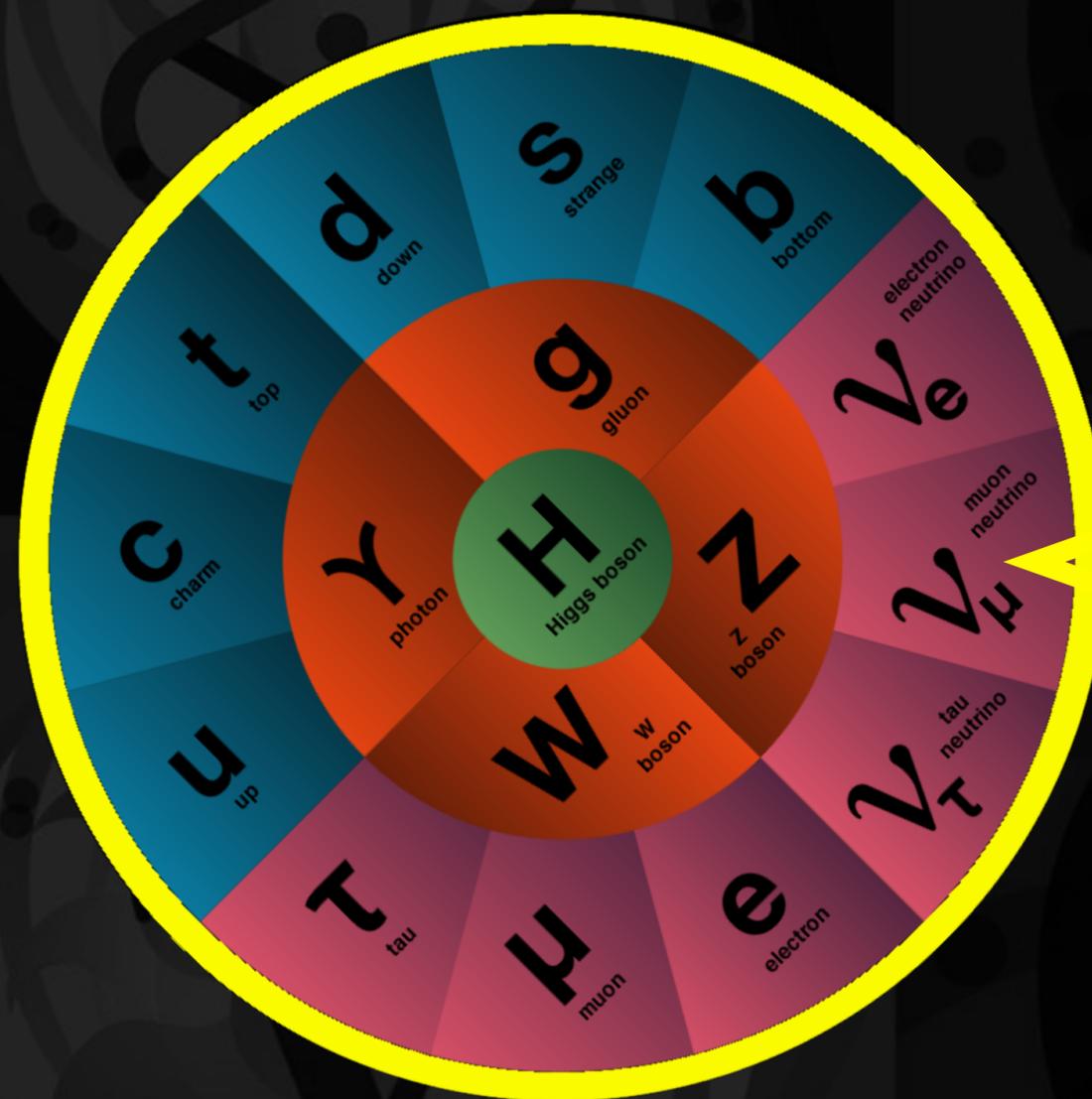
Carica  
**0**

Famiglia  
**Prima**

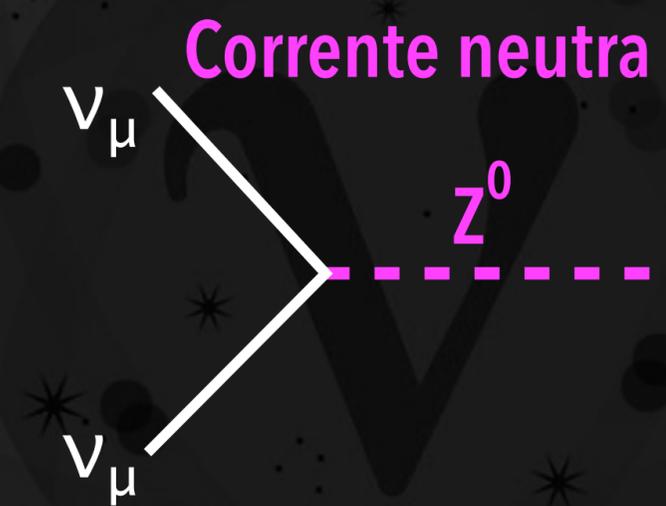
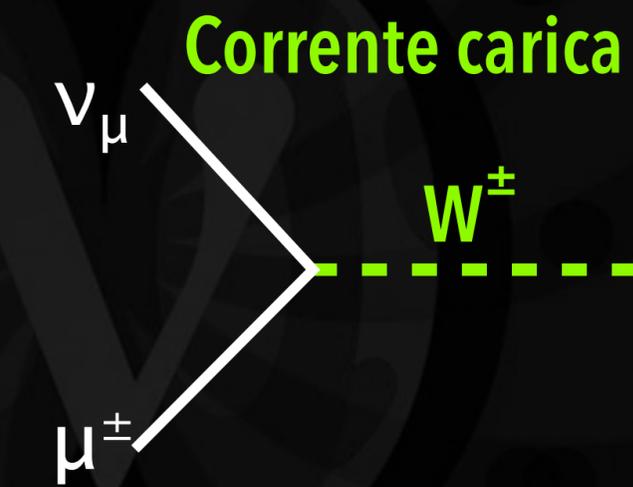
Spin  
**1/2**



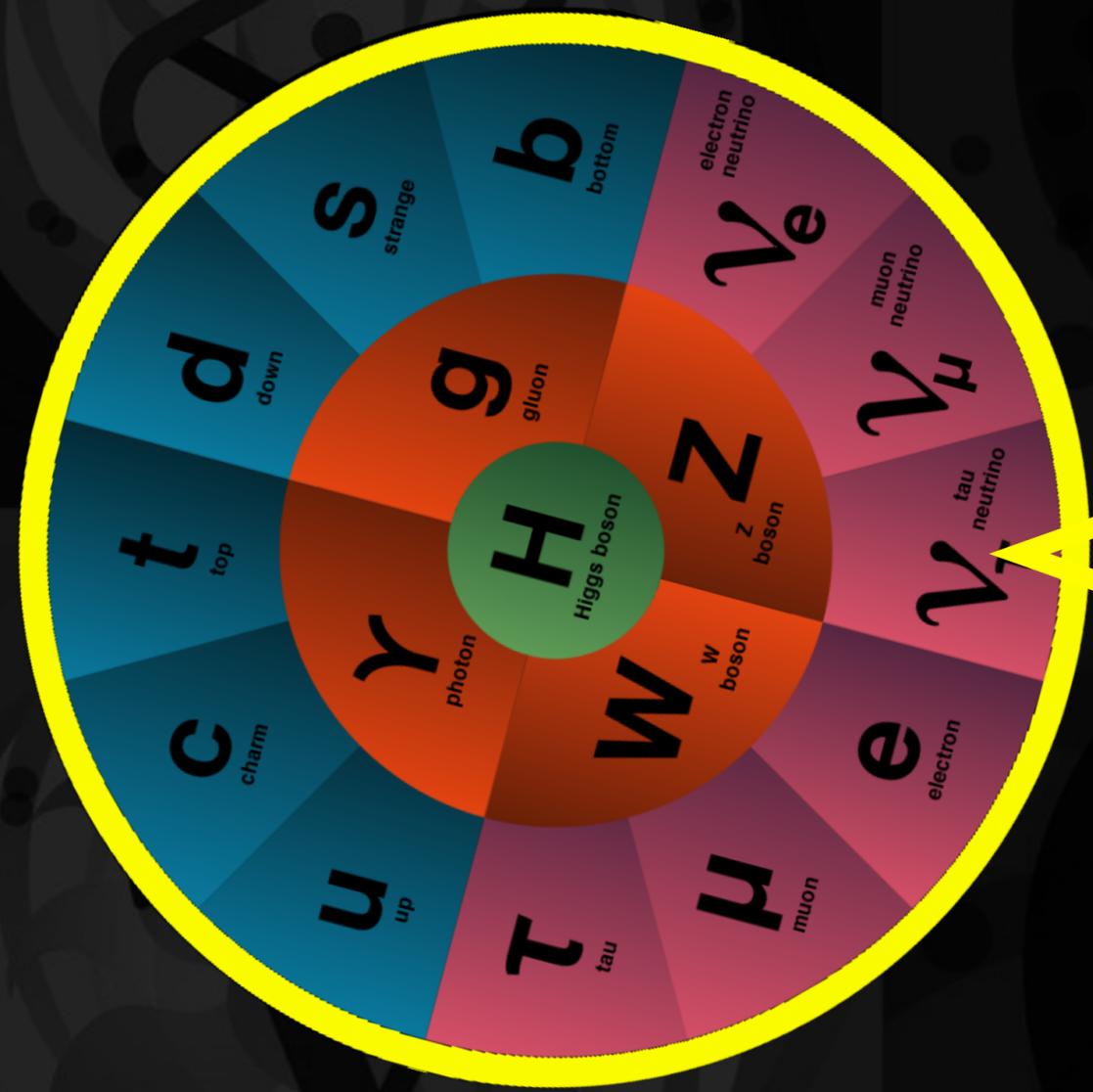
# I neutrini nel Modello Standard



Anno di scoperta <b>1962</b>	Massa <b>&lt; 0.19 MeV</b>	Famiglia <b>Seconda</b>
Luogo di scoperta <b>Brookhaven</b>	Carica <b>0</b>	Spin <b>1/2</b>



# I neutrini nel Modello Standard



Anno di scoperta  
**2000**

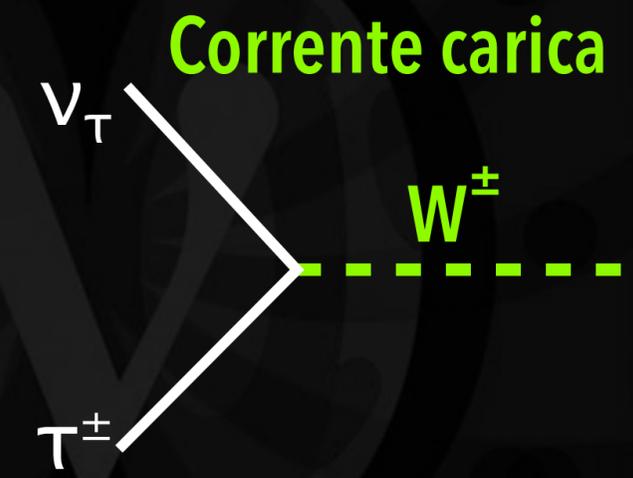
Massa  
**< 18.2 MeV**

Famiglia  
**Terza**

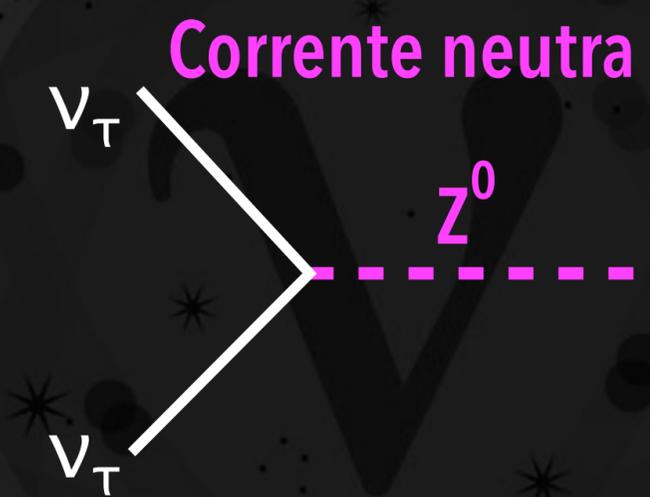
Luogo di scoperta  
**Fermilab**

Carica  
**0**

Spin  
**1/2**



**Corrente carica**



**Corrente neutra**

# Oscillazione dei neutrini (1962)

*"Se i neutrini hanno una massa devono **oscillare!**"*

**Bruno Pontecorvo**

- \* L'oscillazione è un fenomeno della **meccanica quantistica**.
- \* **Oscillano**, cioè cambiano ciclicamente, le famiglie, ovvero **i sapori del neutrino**.
- \* Gli **stati di massa**, propagazione, **non coincidono con quelli del sapore**, interazione.

Bruno Pontecorvo



$$[\text{Stati di sapore}] = [\text{Matrice di mescolamento}] [\text{Stati di massa}]$$

# Oscillazione dei neutrini (1962)

*"Se i neutrini hanno una massa devono **oscillare!**"*

**Bruno Pontecorvo**

- \* L'oscillazione è un fenomeno della **meccanica quantistica**.
- \* **Oscillano**, cioè cambiano ciclicamente, le famiglie, ovvero **i sapori del neutrino**.
- \* Gli **stati di massa**, propagazione, **non coincidono con quelli del sapore**, interazione.

Bruno Pontecorvo



$$\begin{pmatrix} \nu_e(t) \\ \nu_\mu(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1(t) \\ \nu_2(t) \end{pmatrix}$$

# Oscillazione dei neutrini (1962)

*"Se i neutrini hanno una massa devono **oscillare!**"*

**Bruno Pontecorvo**

- \* L'oscillazione è un fenomeno della **meccanica quantistica**.
- \* **Oscillano**, cioè cambiano ciclicamente, le famiglie, ovvero **i sapori del neutrino**.
- \* Gli **stati di massa**, propagazione, **non coincidono con quelli del sapore**, interazione.

Bruno Pontecorvo



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

# Oscillazione dei neutrini (1962)

*"Se i neutrini hanno una massa devono **oscillare!**"*

**Bruno Pontecorvo**

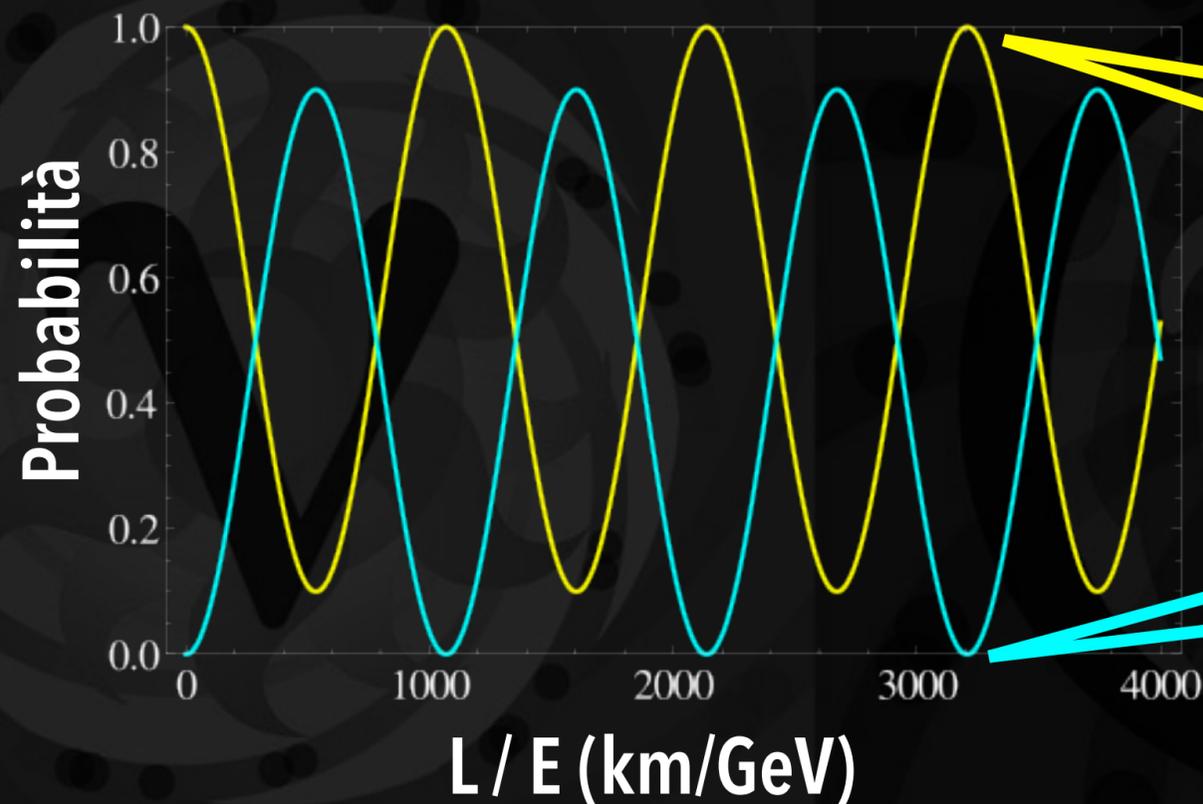
- \* L'oscillazione è un fenomeno della **meccanica quantistica**.
- \* **Oscillano**, cioè cambiano ciclicamente, le famiglie, ovvero **i sapori del neutrino**.
- \* Gli **stati di massa**, propagazione, **non coincidono con quelli del sapore**, interazione.

Bruno Pontecorvo



$$\nu_{1,2}(L) = e^{-im_{1,2}^2 L/2E} \nu_{1,2}(0)$$

$$P(e \rightarrow \mu) = \text{sen}^2(\theta) \text{sen}^2(1.267 \Delta m^2 L/E)$$



Probabilità per un neutrino di **energia E** di **mantenere** il sapore alla **distanza L**



Probabilità per un neutrino di **energia E** di **cambiare** il sapore alla **distanza L**

# Osservazione delle oscillazioni dei neutrini



**Neutrini elettronici** prodotti dalle reazioni termonucleari nel Sole e osservati a terra.

Homestake (USA), Kamiokande e Super Kamiokande (Giappone), SAGE (CCCP), GALLEX (Italia), SNO (Canada).

Effetto osservato: **Sparizione**.  
I neutrini elettronici cambiano sapore in muonico e tauonico.



**Neutrini muonici** prodotti dall'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera.

IBM (USA), Kamiokande II e Super Kamiokande (Giappone), MARCO (Italia).

Effetto osservato: **Sparizione**.  
I neutrini muonici cambiano sapore in tauonico.



**Antineutrini elettronici** prodotti nei reattori nucleari delle centrali elettriche.

KamLAND (Giappone), Daya Bay (Cina), RENO (Corea del Sud).

Effetto osservato: **Sparizione**.  
Gli antineutrini elettronici cambiano sapore.



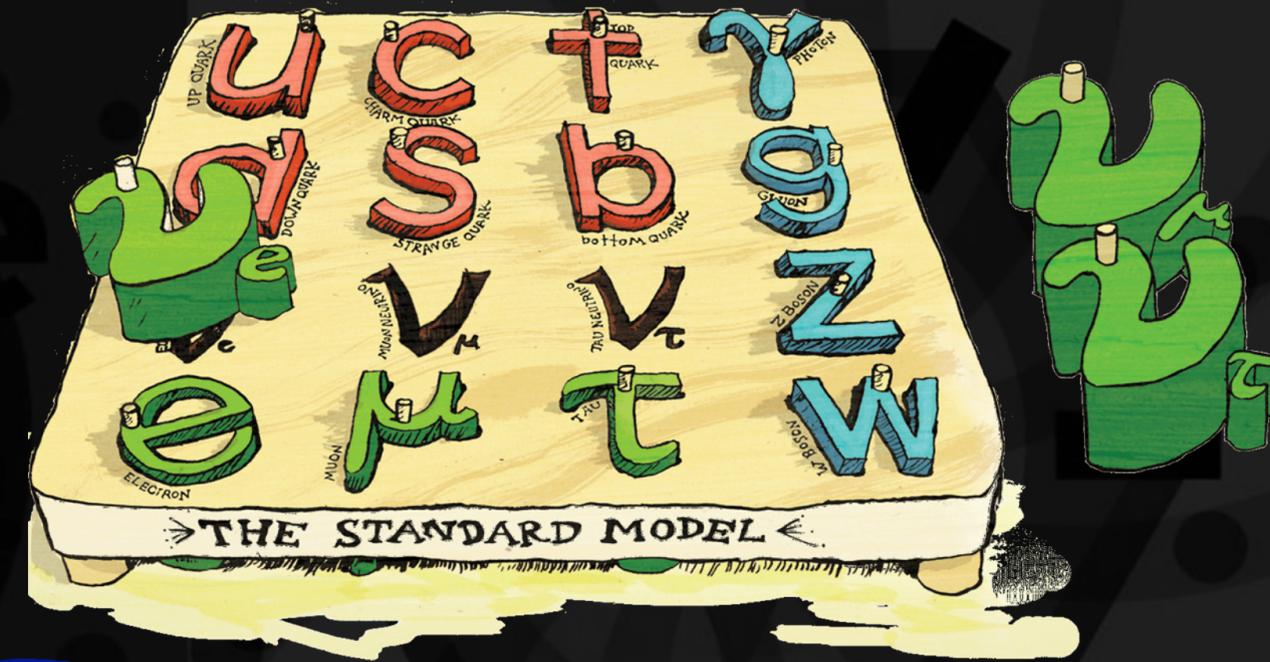
**Neutrini muonici** prodotti negli acceleratori di particelle.

MINOS (USA), K2K e Sper-K (Giappone), LSND e MiniBooNE (USA), OPERA (Italia).

Effetto osservato: **Apparizione**.  
I neutrini muonici cambiano sapore in tauonico.

# "Nuova Fisica"!

I neutrini massivi sono le prime evidenze di  
"Nuova Fisica", "oltre il Modello Standard"

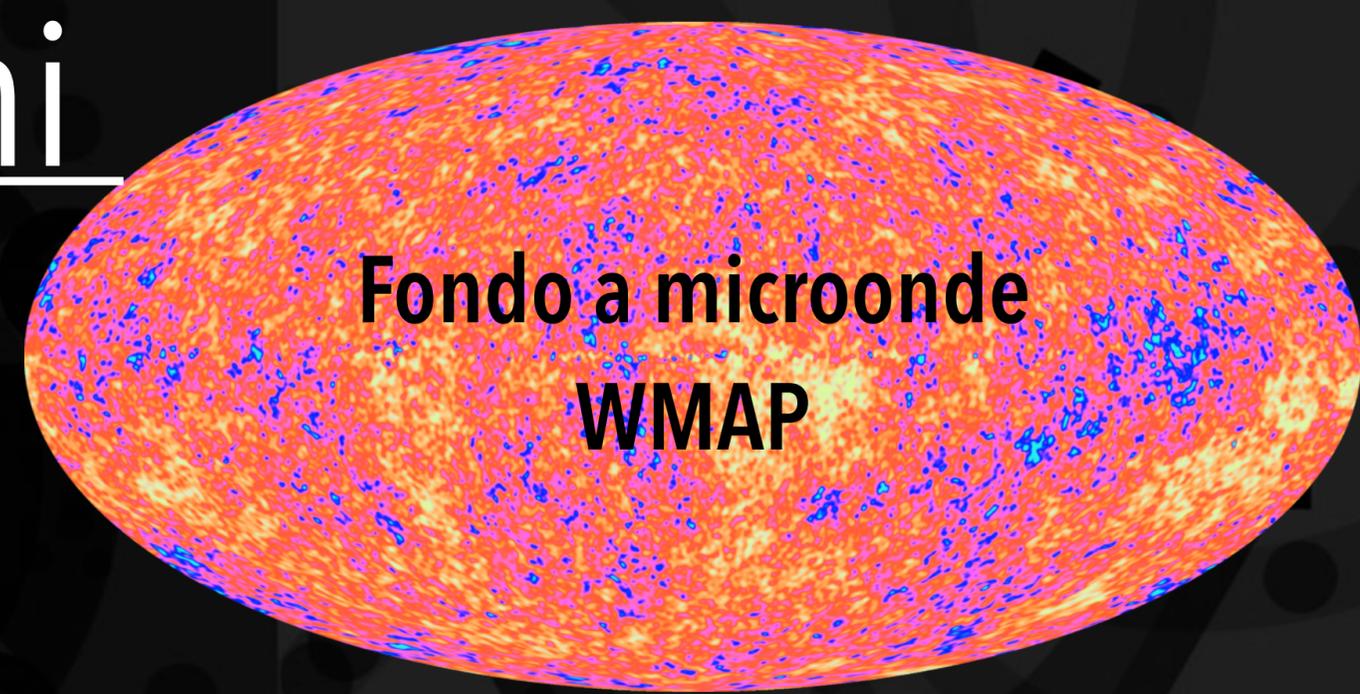


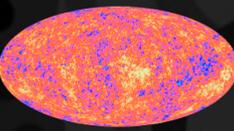
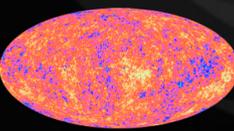
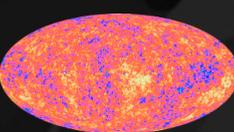
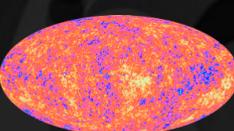
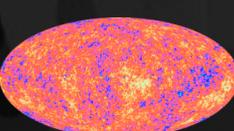
- ⌚ I neutrini hanno massa!
- ⌚ Si sono misurate solo le differenze.
- ⌚ Cosmologia:  $m_1 + m_2 + m_3 < 0.3 \text{ eV}$ .
- ⌚ Qual è l'origine delle masse?



- ⌚ Qual è l'antiparticella?
- ⌚ Dirac o Majorana?
- ⌚ Studio dei decadimenti "doppio beta".

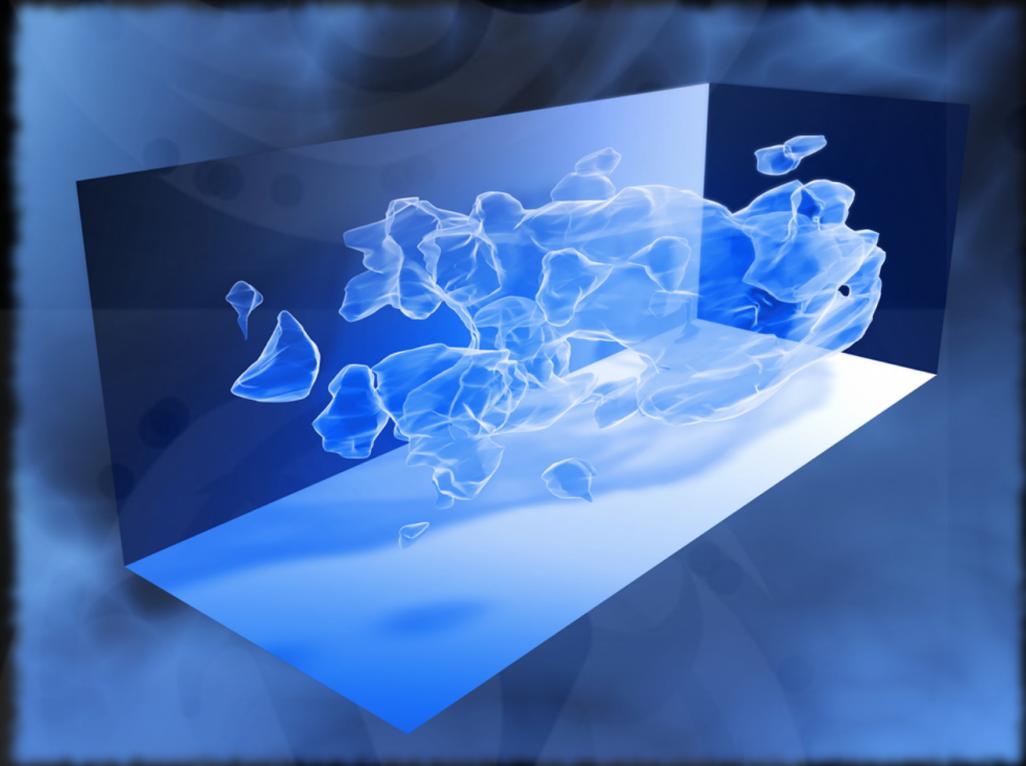
# Il fondo cosmico di neutrini



-  È costituito dai **neutrini "fossili"** del Big Bang.
-  I neutrini fossili si sono "disaccoppiati" dalla materia quando l'Universo aveva un'**età di 2 secondi**.
-  La temperatura di questo fondo è stimata essere **1.95 K**.
-  Non è stato ancora osservato e potrebbe **rimanere inosservato!**
-  Ci sono evidenze indirette dovute al contributo dei neutrini alla **densità di radiazione** dell'Universo.

# Materia oscura

La materia oscura, invisibile ai telescopi, rappresenta la più abbondante forma di materia gravitazionale dell'Universo. La sua esistenza è dedotta dagli effetti gravitazionali sulla materia visibile.



## Materia oscura fredda (lenta).

WIMP, Supersimmetria...

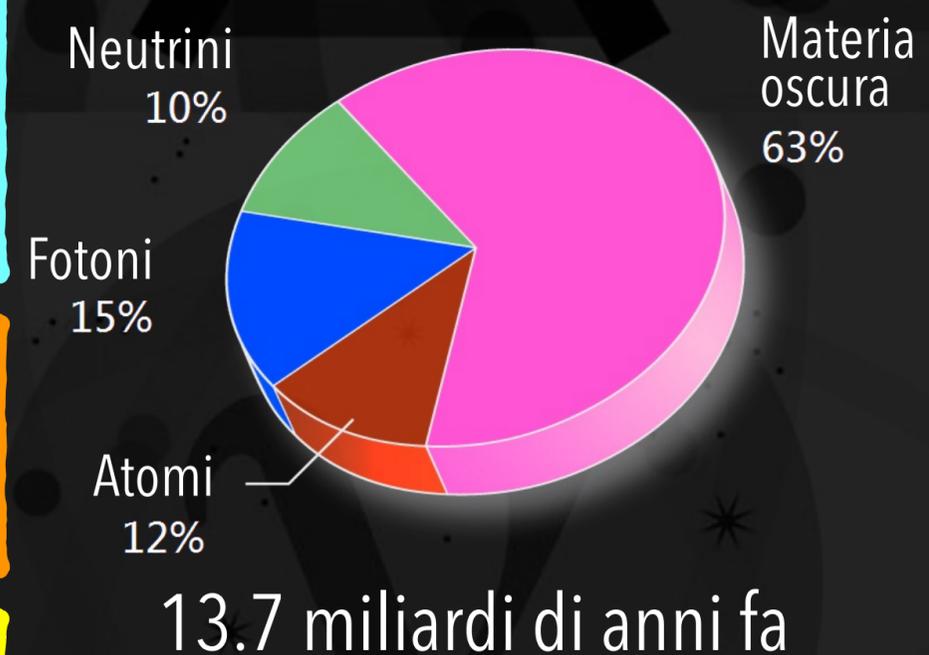
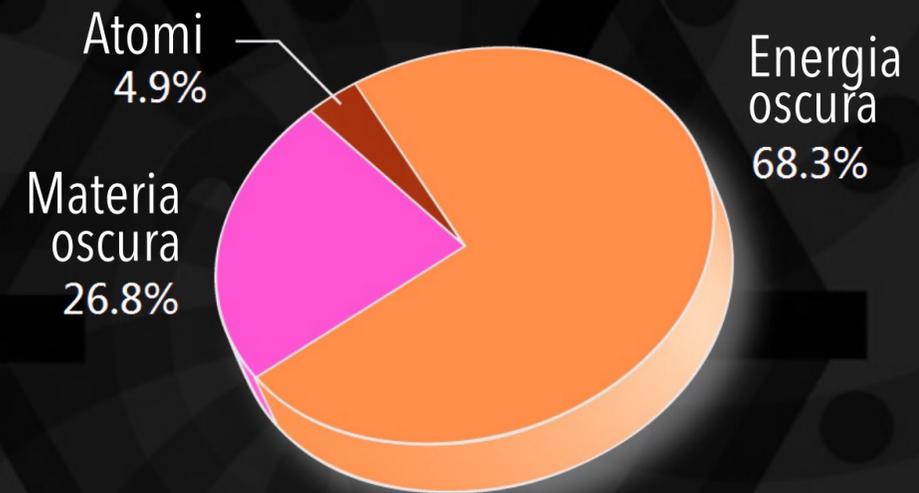
Passaggio omogeneità post Big Bang a disomogeneità attuale.

## Materia oscura tiepida.

Neutrini sterili?

## Materia oscura calda (relativistica).

Neutrini. Non può spiegare la formazione dei grossi agglomerati a causa delle velocità relativistiche. Le masse sono troppo piccole.



# Nobel 2015



**N**  
**N**  
**N**

**NO**  
**NO**  
**NO**

**NOBEL**  
**NOBEL**  
**NOBEL**

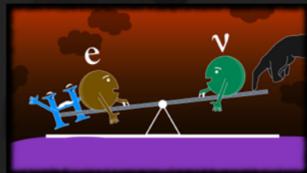
$\nu_\tau$   
 $\nu_\mu$   
 $\nu_e$

The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to

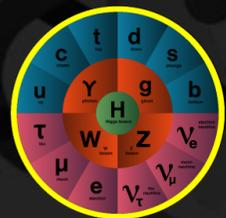
**Takaaki Kajita** and **Arthur B. McDonald**

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

# Cosa non sappiamo



Qual è l'origine delle masse dei neutrini?



Le masse dei neutrini seguono una gerarchia?



Quali sono le masse dei neutrini?



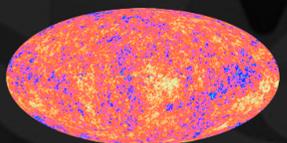
Ci sono altre specie di neutrino?



I neutrini si comportano diversamente dagli antineutrini?



I neutrini sono "di Dirac" o "di Majorana"?



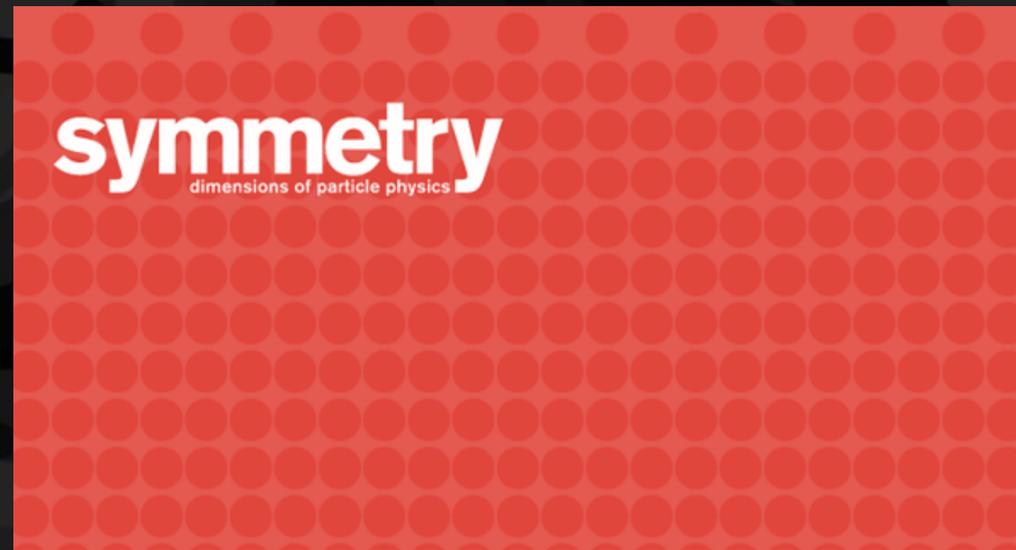
Potremo confermare il fondo cosmico dei neutrini fossili?

# Bibliografia

Simone Pacetti - Dipartimento di Fisica e Geologia



# Bibliografia



[www.symmetrymagazine.org](http://www.symmetrymagazine.org)



**WIKIPEDIA**  
The Free Encyclopedia

[it.wikipedia.org](http://it.wikipedia.org)