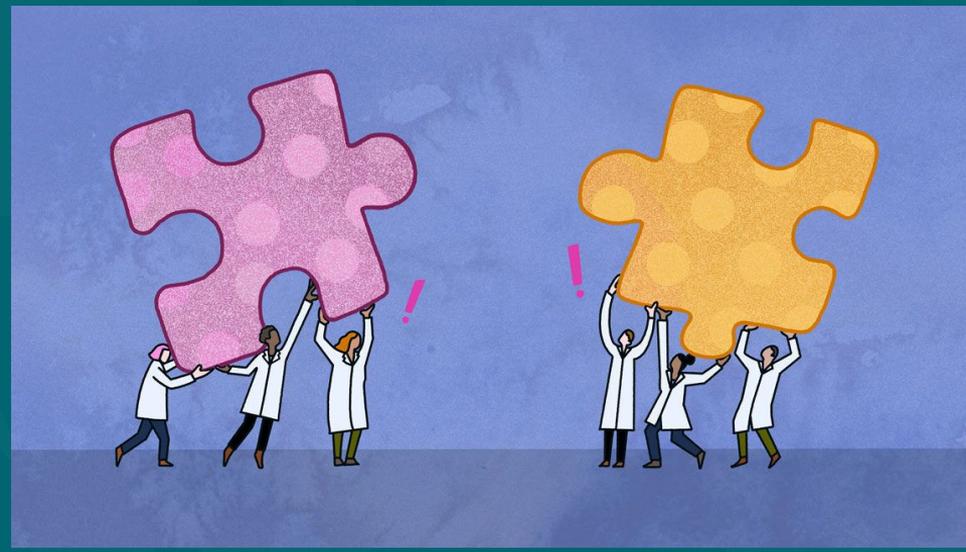


FÍSICA DE NEUTRINOS



ÍNDICE

1. Contexto histórico
2. ¿Qué sabemos? ¿Y qué no?
3. ¿Cómo los detectamos?
4. Plataforma de neutrinos en el CERN

An illustration featuring a person in a white lab coat on the right, holding numerous thin white strings that lead to various thought bubbles of different colors (blue, purple, green) scattered across the background. One prominent bubble in the center contains a detailed image of a galaxy with a bright core and spiral arms. The overall background is a soft, light blue with subtle star-like sparkles.

1. CONTEXTO HISTÓRICO

Desintegración beta (1914)

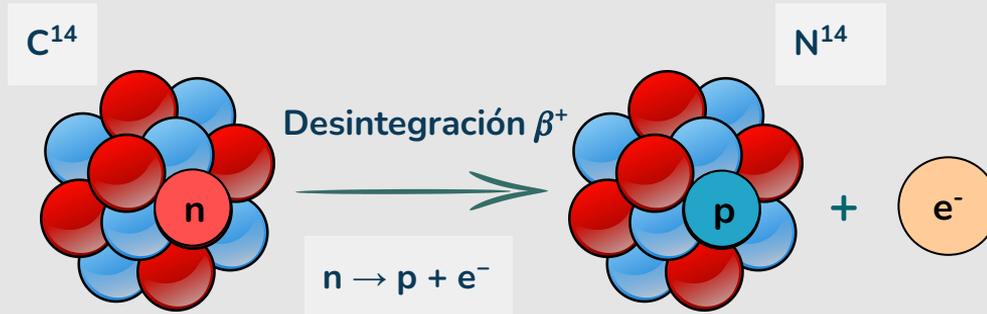
- Finales s. XIX principios del s. XX → la radiactividad estaba siendo observada por primera vez por los físicos (Becquerel, Curie, Rutherford, ...). Esto implicaba que los átomos podían cambiar emitiendo radiación.

Desintegración beta (1914)

- Finales s. XIX principios del s. XX → la radiactividad estaba siendo observada por primera vez por los físicos (Becquerel, Curie, Rutherford, ...). Esto implicaba que los átomos podían cambiar emitiendo radiación.
- En función de la partícula emitida se llega a la tres tipos de radiación: alfa (α), beta (β) y gamma (γ) donde se emite partículas alfa, electrones y fotones respectivamente.

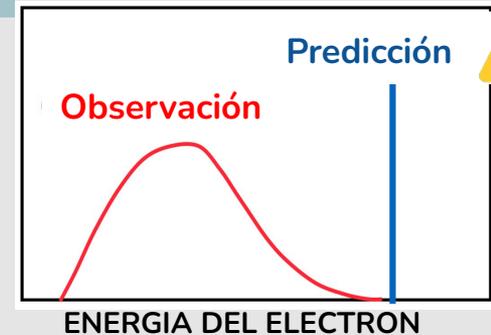
Desintegración beta (1914)

- Finales s. XIX principios del s. XX → la radiactividad estaba siendo observada por primera vez por los físicos (Becquerel, Curie, Rutherford, ...). Esto implicaba que los átomos podían cambiar emitiendo radiación.
- En función de la partícula emitida se llega a la tres tipos de radiación: alfa (α), beta (β) y gamma (γ) donde se emite partículas alfa, electrones y fotones respectivamente.
- La desintegración beta presentaba una **anomalía**



Si se emitieran dos cuerpos, la energía del electrón tendría un valor fijo

CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA



Propuestas (1930)

- Niels Bohr incluso propuso relegar la conservación de energía a un principio estadístico !!!

Propuestas (1930)

- Niels Bohr incluso propuso relegar la conservación de energía a un principio estadístico !!!
- Wolfgang Pauli theoretical proposal:
 - ★ Spin $\frac{1}{2}$
 - ★ Tiny mass
 - ★ Zero electric charge

“ I have done a terrible thing, I have postulated a particle that cannot be detected ”

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

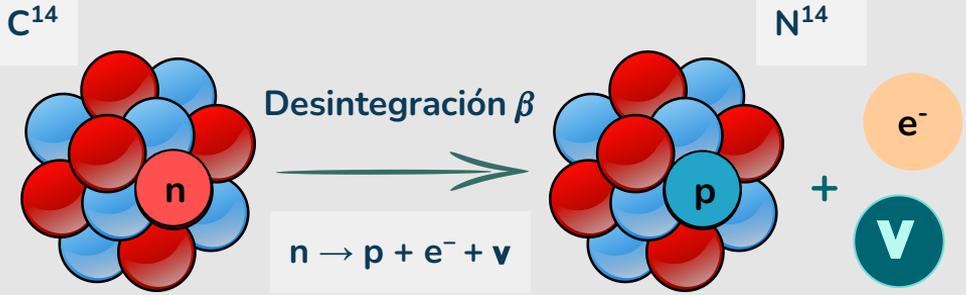
Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der α - und β -Kerne, sowie des kontinuierlichen β -Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energiemass zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $\frac{1}{2}$ haben und das Ausschliessungsprinzip 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 β -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim β -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert 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 μ ist. Die Experimente verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons nicht grösser sein kann, als die eines γ -Strahls und darf demnach wohl nicht grösser sein als $e \cdot 10^{-13}$ es.

Propuestas (1930)

- Niels Bohr incluso propuso relegar la conservación de energía a un principio estadístico !!!
- Wolfgang Pauli theoretical proposal:
 - ★ Spin $\frac{1}{2}$
 - ★ Tiny mass
 - ★ Zero electric charge

" I have done a terrible thing, I have postulated a particle that cannot be detected"



Abschrift
Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich halbvollst ansuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der K - und $Li-6$ Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselgats" (1) der Statistik und den Energiegats zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche der Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip 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.

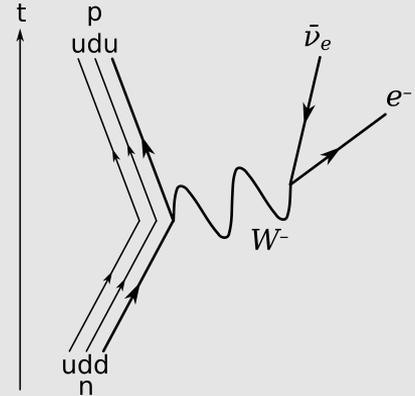
Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ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

Marco teórico (1934)

Enrico Fermi dota de marco teórico y bautiza los neutrinos (pequeños neutrones - recién descubiertos en 1932)



- Primer artículo de Quantum Field Theory más allá de QED
- Los ν no están en el núcleo \rightarrow se crean en la interacción

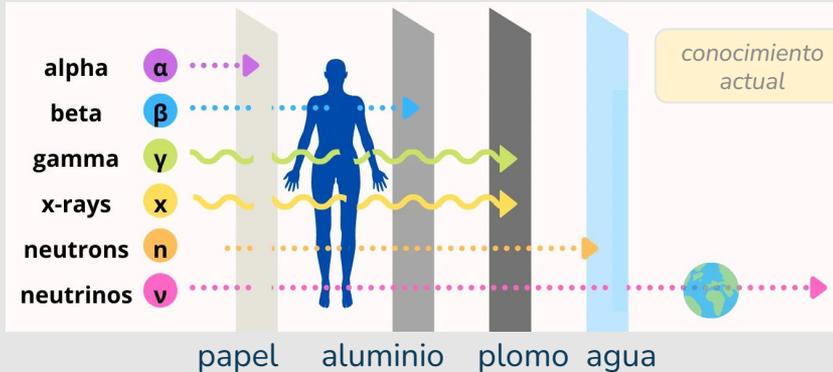
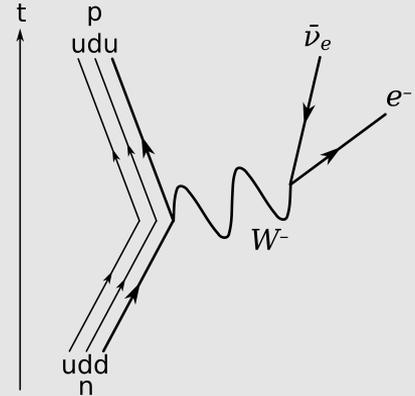


Marco teórico (1934)

Enrico Fermi dota de marco teórico y bautiza los neutrinos (pequeños neutrones - recién descubiertos en 1932)



- Primer artículo de Quantum Field Theory más allá de QED
- Los ν no están en el núcleo \rightarrow se crean en la interacción



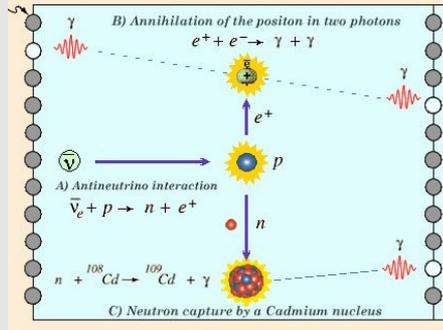
Problema: Esta nueva partícula es extremadamente difícil de detectar (si es que existe)

Primera detección (1956)

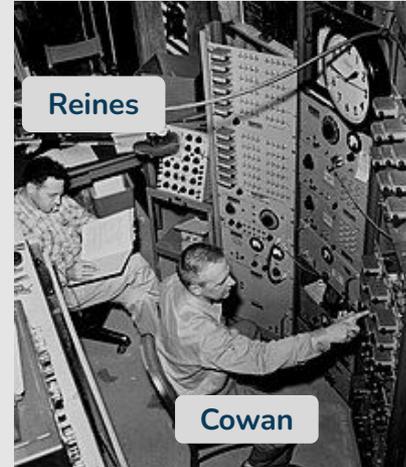
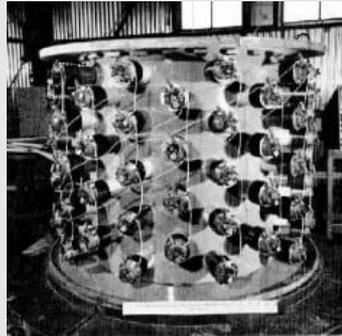
Reines and Cowan observed antineutrinos from the Savannah River reactor (US) with a 1 m³ liquid scintillator.

Fotosensores

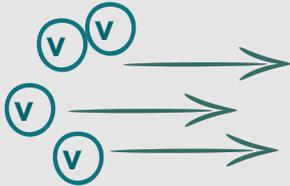
Fotosensores



Savannah River experiment



Desintegración β^-



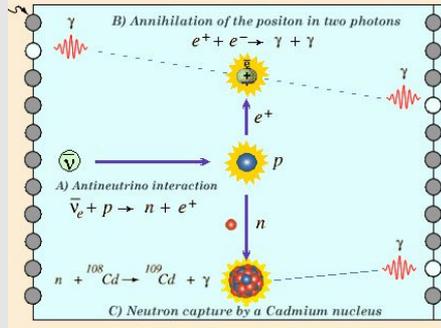
Producción de los neutrinos en el núcleo del reactor nuclear

Primera detección (1956)

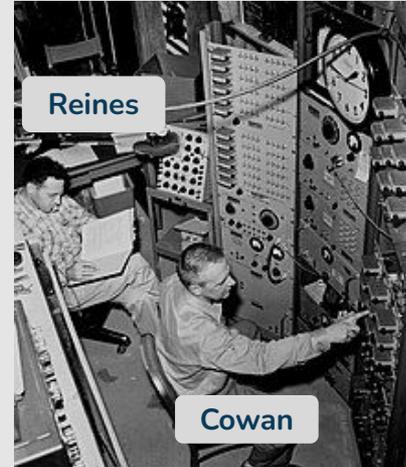
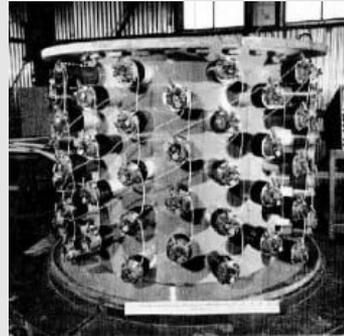
Reines and Cowan observed antineutrinos from the Savannah River reactor (US) with a 1 m³ liquid scintillator.

Fotosensores

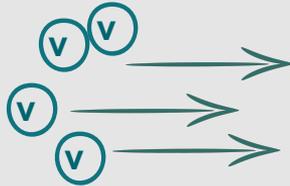
Fotosensores



Savannah River experiment



Desintegración β^-



Producción de los neutrinos en el núcleo del reactor nuclear

Detection of the Free Neutrino: a Confirmation

C. L. Cowan, Jr., F. Reines, F. B. Harrison, H. W. Kruse, A. D. McGuire



PARTÍCULA NUEVA

Más detecciones (1962, 2000)

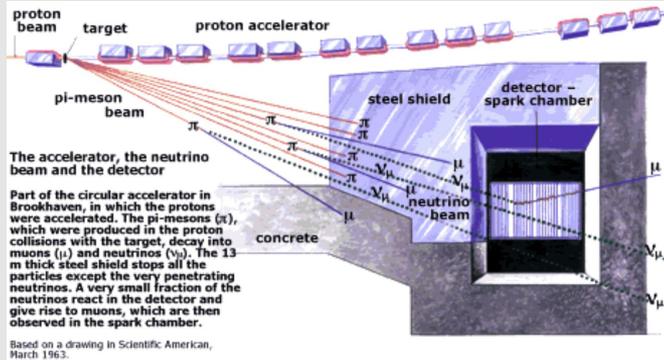
<https://neutrino-history.in2p3.fr/new-families-of-neutrino/>

- 1936 Anderson y Neddermeyer descubrieron el muón (μ) **PARTÍCULA NUEVA**

Más detecciones (1962, 2000)

<https://neutrino-history.in2p3.fr/new-families-of-neutrino/>

- 1936 Anderson y Neddermeyer descubrieron el muón (μ) **PARTÍCULA NUEVA**
- Si los electrones tenían su neutrino asociado, ¿los muones también? → Se confirmó en **1962** cuando Lederman, Schwartz y Steinberger descubrieron el neutrino muónico (ν_μ) en el Laboratorio Nacional de Brookhaven **PARTÍCULA NUEVA**

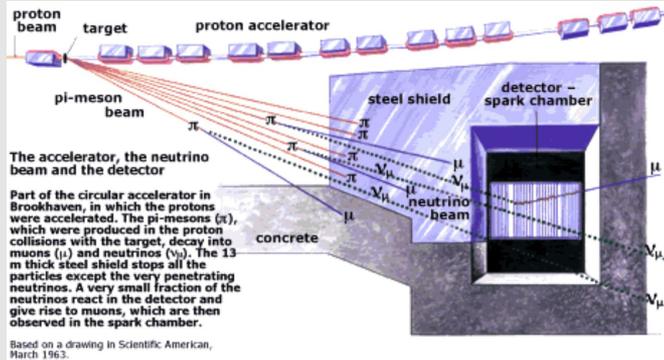


Lederman
Schwartz
Steinberger
(1988)

Más detecciones (1962, 2000)

<https://neutrino-history.in2p3.fr/new-families-of-neutrino/>

- 1936 Anderson y Neddermeyer descubrieron el muón (μ) **PARTÍCULA NUEVA**
- Si los electrones tenían su neutrino asociado, ¿los muones también? → Se confirmó en **1962** cuando Lederman, Schwartz y Steinberger descubrieron el neutrino muónico (ν_μ) en el Laboratorio Nacional de Brookhaven **PARTÍCULA NUEVA**



Lederman
Schwartz
Steinberger
(1988)

- Tercer tipo de neutrino observado por la Colaboración DONUT (2000) → ν_τ **PARTÍCULA NUEVA**

→ Hay un neutrino para cada tipo de leptón cargado: electrón, muón y tau. Los llamamos “sabores”.

Neutrinos solares

- El Sol es un brillante emisor de luz, ¡pero también de neutrinos! $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\gamma + 2\nu_e$
- Con el flujo de γ se puede estimar el de ν_e ($1 \gamma \sim 1 \nu_e$) \rightarrow J. Bahcal predijo 1 átomo de ${}^{37}\text{Ar}$ por día



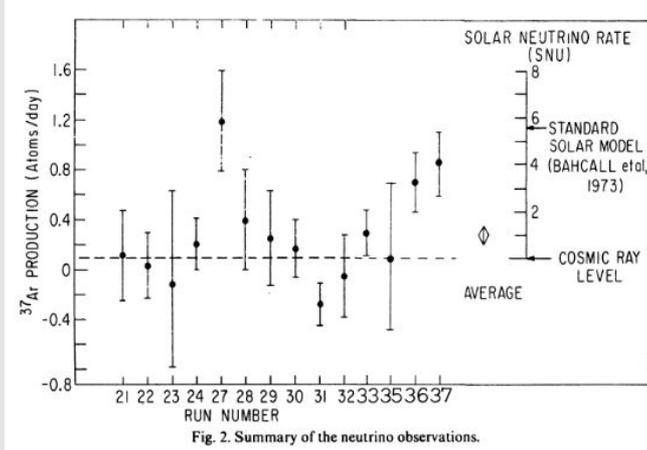
Neutrinos solares



- El Sol es un brillante emisor de luz, ¡pero también de neutrinos! $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\gamma + 2\nu_e$
- Con el flujo de γ se puede estimar el de ν_e ($1 \gamma \sim 1 \nu_e$) \rightarrow J. Bahcall predijo 1 átomo de ${}^{37}\text{Ar}$ por día

Problema: Los experimentos de los años 60-90 solo detectaban de $\sim 1/2$ a $\sim 1/3$ de los esperados (R. Davis)

Mina Homestake (South Dakota)



Tanque de 375 m^3 de C_2Cl_4

Neutrinos solares



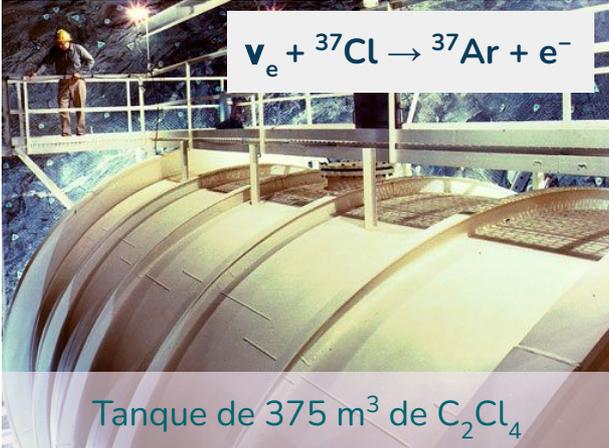
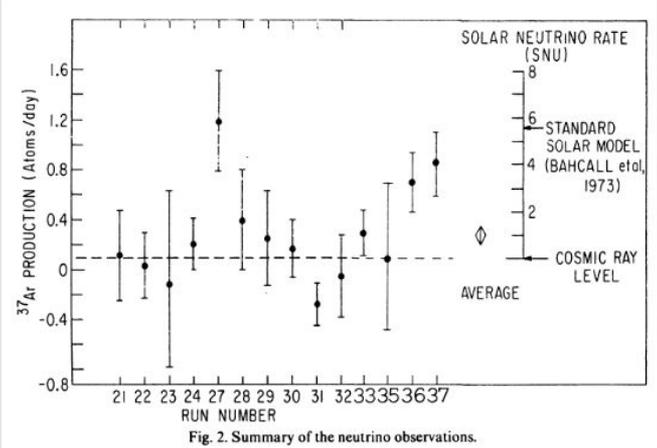
- El Sol es un brillante emisor de luz, ¡pero también de neutrinos! $4p \rightarrow {}^4\text{He} + 2e^+ + 2\gamma + 2\nu_e$
- Con el flujo de γ se puede estimar el de ν_e ($1 \gamma \sim 1 \nu_e$) \rightarrow J. Bahcal predijo 1 átomo de ${}^{37}\text{Ar}$ por día

Problema: Los experimentos de los años 60-90 solo detectaban de $\sim 1/2$ a $\sim 1/3$ de los esperados (R. Davis)



Mina Homestake (South Dakota)

¡ DISCREPANCIA durante 30 años SIN respuesta !



The Next Experiment

Another experiment is required to settle the issue of whether our astronomy or our physics is at fault. Fortunately, one can make a testable distinction. The flux of low energy neutrinos from the PP and PEP re-

Speculations

The conflict between observation and standard theory has led to many speculations about the solar interior that were advanced because their proponents believed that the subject is in a state of crisis. For example, it has been suggested that the sun contains a **black hole in its center**

Neutrinos atmosféricos

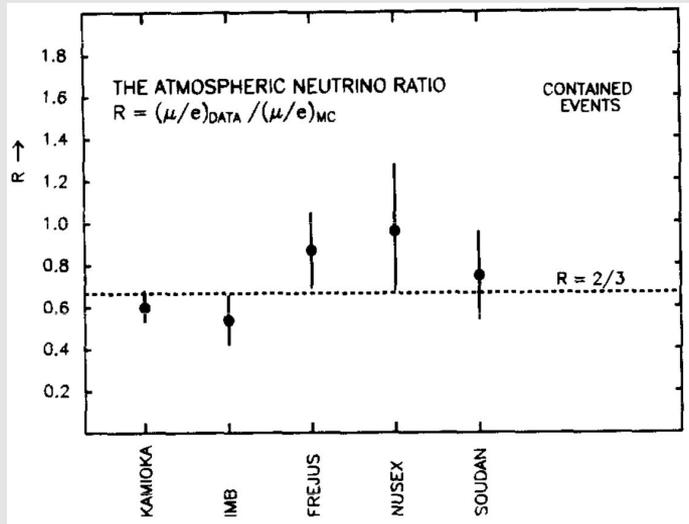
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370269397001056?via%3Dihub>

- Los neutrinos se producen en la atmósfera a partir de rayos cósmicos. Los muones de menor energía tienen tiempo de desintegrarse.

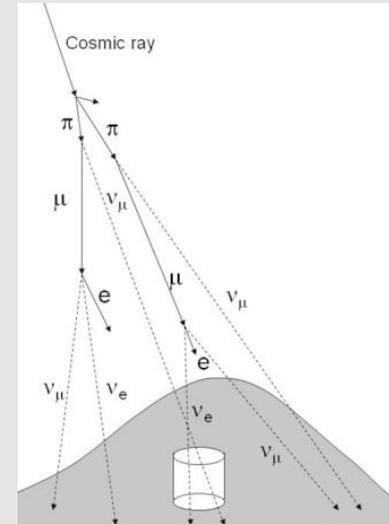
Neutrinos atmosféricos

- Los neutrinos se producen en la atmósfera a partir de rayos cósmicos. Los muones de menor energía tienen tiempo de desintegrarse.

Kamiokande e IMB detectan los neutrinos atmosféricos en los 80's



Problema: Se esperaban 2 ν_{μ} por cada ν_e . Pero el ratio que se medía era ~ 1 !



Solución: Oscilaciones

<http://www.jetp.ras.ru/cgi-bin/e/index/e/26/5/p984?a=list>

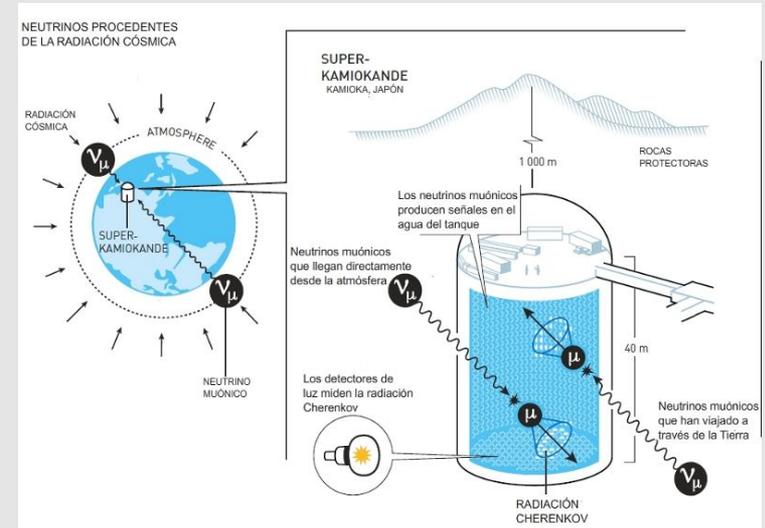
Una única solución para ambos problemas → los neutrinos “*oscilan*” cuando se propagan desde su fuente hasta llegar al detector por lo que cambian de sabor.

- Pontecorvo propuso la hipótesis en 1967

Solución: Oscilaciones

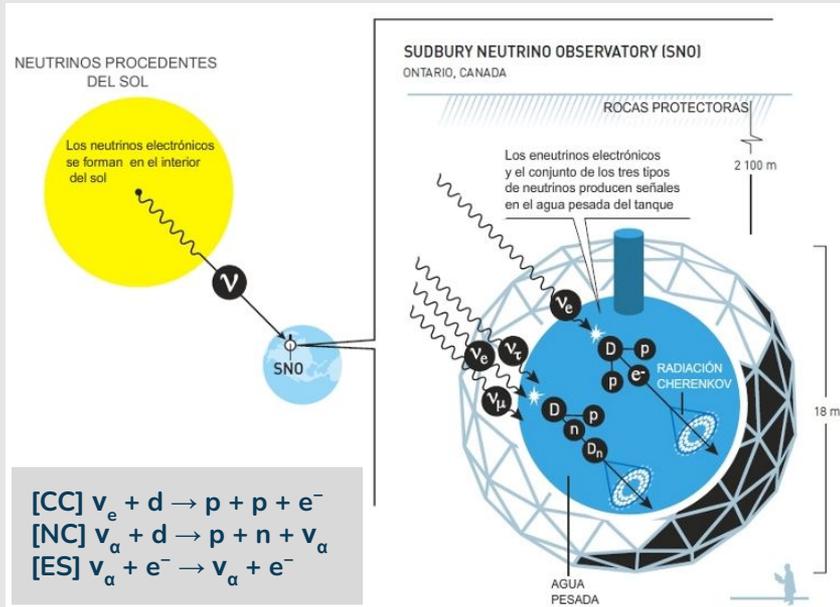
Una única solución para ambos problemas → los neutrinos “oscilan” cuando se propagan desde su fuente hasta llegar al detector por lo que cambian de sabor.

- Pontecorvo propuso la hipótesis en 1967
- En 1998 Super-Kamiokande midió el ángulo con el que los neutrinos atmosféricos llegaban a su detector:
 - Los ν_{μ} que atravesaban la tierra para llegar al detector eran menos de los esperados.
 - Las oscilaciones podían explicar esto si los ν_{μ} se estaban “convirtiendo” a ν_{τ} mientras se propagan a través de la materia.



Solución: Oscilaciones

Una única solución para ambos problemas → los neutrinos “oscilan” cuando se propagan desde su fuente hasta llegar al detector por lo que cambian de sabor.



Sudbury Neutrino Observatory: capaz de medir el flujo de ν_e y del resto de sabores ν_x de manera que si los flujos no coincidían ($\phi_e \neq \phi_x$) se demostraban las oscilaciones.

- 1 kton de D_2O en 12 m de vasija acrílica + 9456 20 cm PMTs
- 55% cobertura
- 7 kton H_2O de blindaje con 91 PMTs
- 3 fases:
 - D_2O pura
 - Sal
 - 40 detectores verticales de corrientes neutras

McDonald
Kajita
(2015)
“for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass”

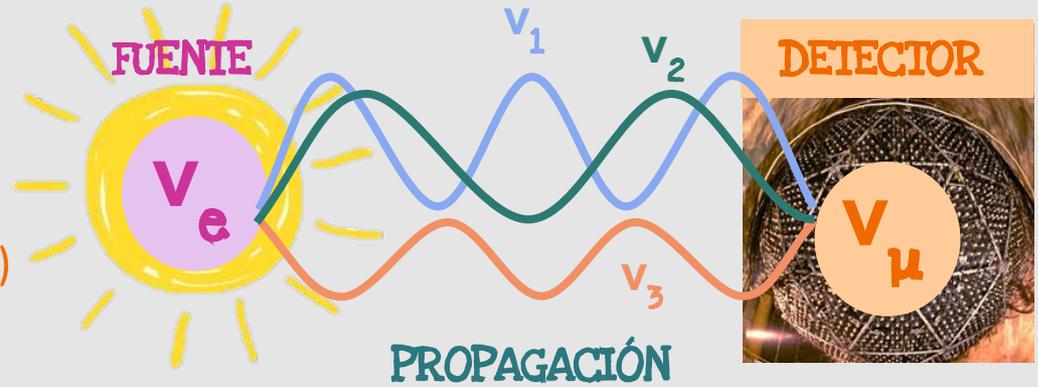


2. ¿QUÉ SABEMOS? ¿Y QUÉ NO?

Oscilaciones de Neutrinos

https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/staff/academic/boyd/stuff/neutrinolectures/lec_oscillations.pdf

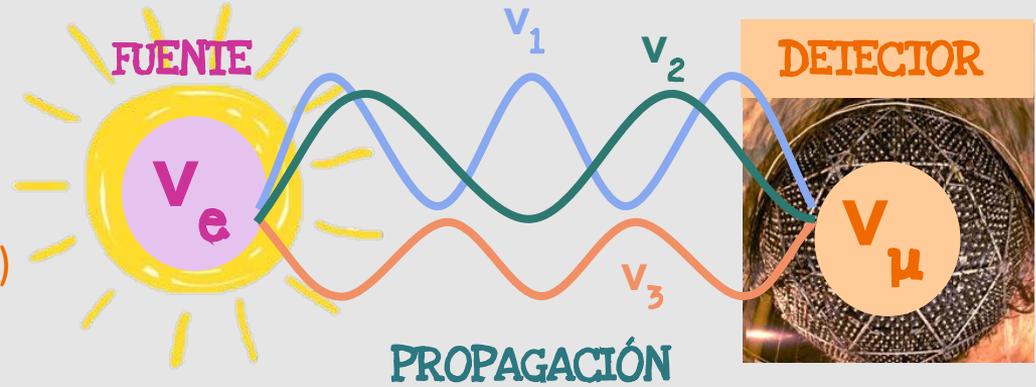
1. Generados: estados de SABOR (ν_α)
2. Propagación: estados de MASA (ν_i)
3. Detectados: estados de SABOR (ν_β)



Oscilaciones de Neutrinos

https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/staff/academic/boyd/stuff/neutrinolectures/lec_oscillations.pdf

1. Generados: estados de SABOR (ν_α)
2. Propagación: estados de MASA (ν_i)
3. Detectados: estados de SABOR (ν_β)



$$U_{2 \times 2} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \left[U_{2 \times 2} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \frac{\Delta m^2}{2E} \end{pmatrix} U_{2 \times 2}^\dagger \right] \begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix}$$

$$P_{e\mu} = \underbrace{\sin^2(2\theta)}_{\text{AMPLITUD}} \underbrace{\sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4E} L\right)}_{\text{LONGITUD DE ONDA}}; \quad P_{ee} = 1 - P_{e\mu}$$

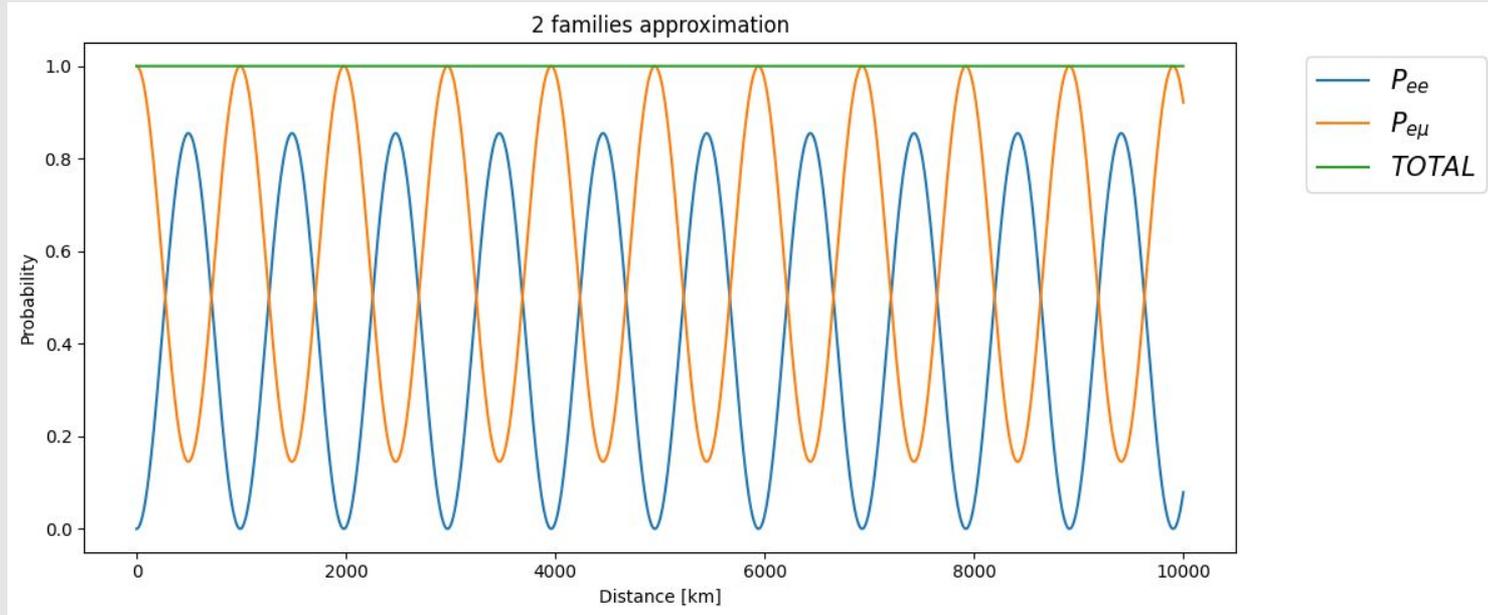
Asumimos $E^2 - p^2 = m^2 \Rightarrow E \simeq p + \frac{m^2}{2E}$ y neutrinos ultra-relativistas ($t \simeq L$) y **CALCULAMOS...**

Aproximación 2 familias

$$P_{e\mu} = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4E} L\right); \quad P_{ee} = 1 - P_{e\mu}$$

AMPLITUD (E = 1 GeV)

LONGITUD DE ONDA



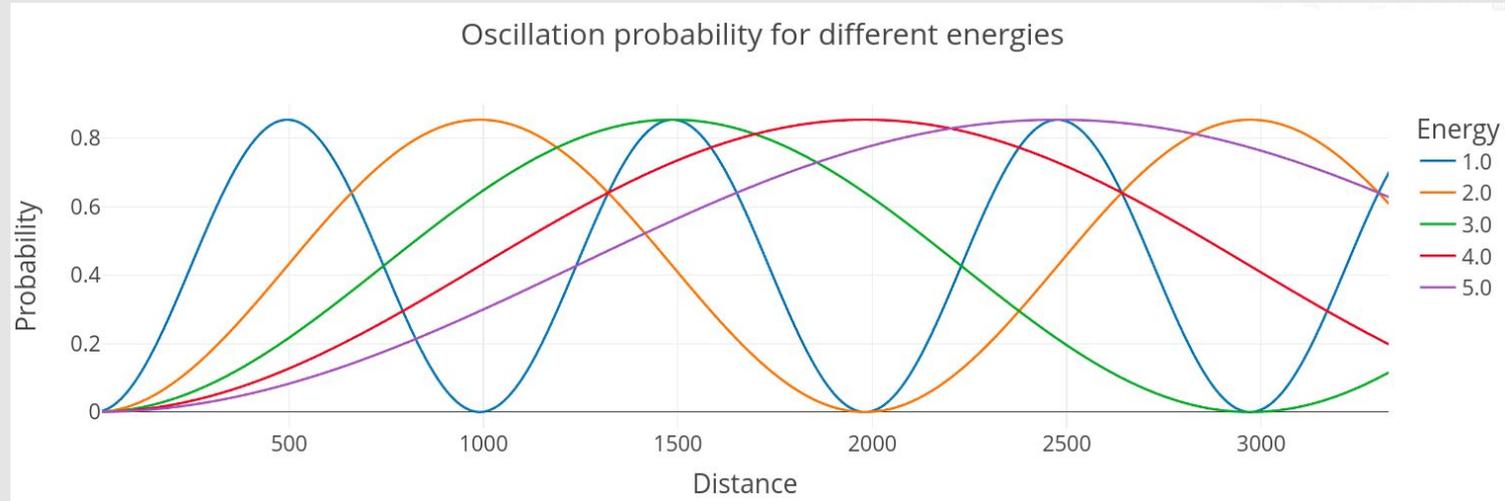
Aproximación 2 familias

https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/staff/academic/boyd/stuff/neutrinolectures/lec_oscillations.pdf

$$P_{e\mu} = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2}{4E} L\right); \quad P_{ee} = 1 - P_{e\mu}$$

AMPLITUD

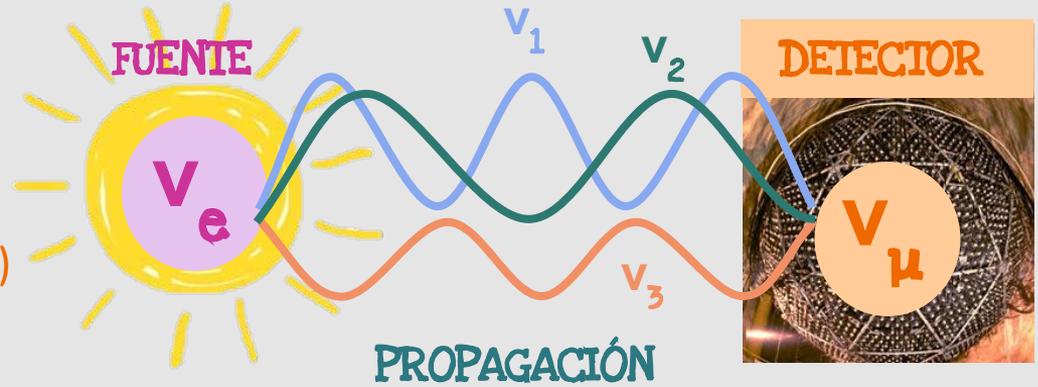
LONGITUD DE ONDA



Caso 3 familias

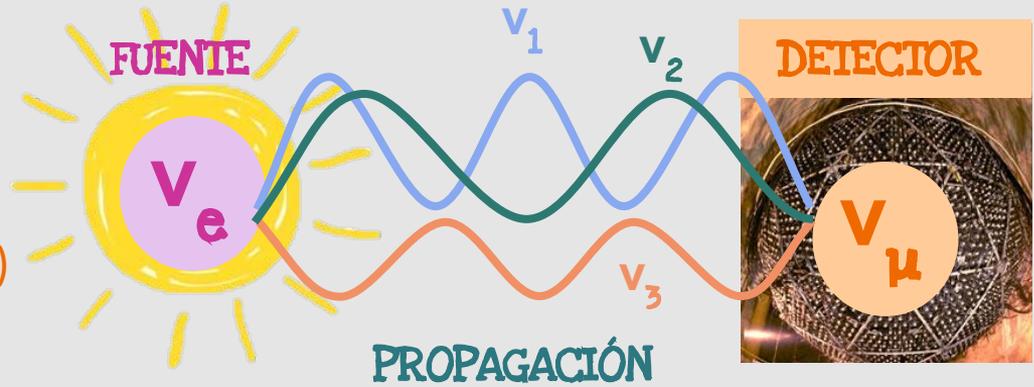
https://warwick.ac.uk/fac/sci/physics/staff/academic/boyd/stuff/neutrinolectures/lec_oscillations.pdf

1. Generados: estados de SABOR (ν_α)
2. Propagación: estados de MASA (ν_i)
3. Detectados: estados de SABOR (ν_β)



Caso 3 familias

1. Generados: estados de SABOR (ν_α)
2. Propagación: estados de MASA (ν_i)
3. Detectados: estados de SABOR (ν_β)



$U_{3 \times 3} \equiv$ PMNS matrix

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{-i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-i\alpha_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i\alpha_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Atmospheric

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

Reactors

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

Solar + KamLAND

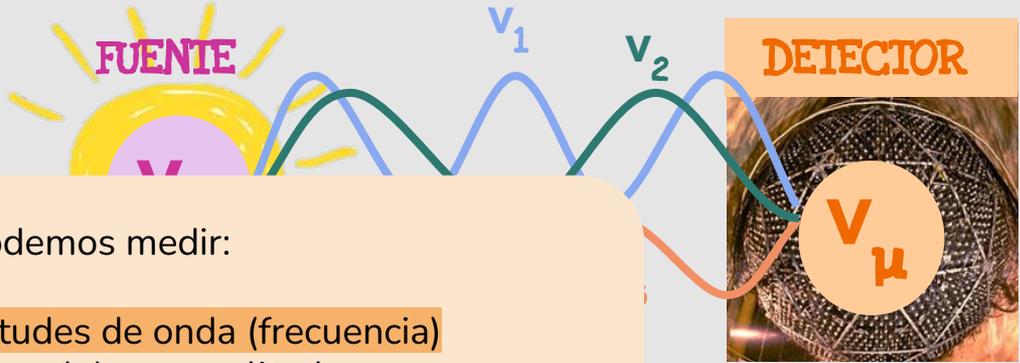
$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$

Majorana (?)

$$P_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re} [U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*] \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right)$$

Caso 3 familias

1. Generados: estados de SABOR (ν_α)
2. Propagación: estados de masa (ν_i)
3. Detectados: estados de SABOR (ν_β)



6 parámetros que podemos medir:

- $3 \Delta m^2 \rightarrow$ longitudes de onda (frecuencia)
- 3θ (ángulos mezcla) \rightarrow amplitudes
- $1 \delta_{CP} \rightarrow$ diferencias entre neutrinos y antineutrinos

$$U_{3 \times 3} \equiv \text{PMNS}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Sólo si tienen masa podemos medir las oscilaciones

$$e^{-i\alpha_2} \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Atmospheric

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$$

Reactors

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

Solar + KamLAND

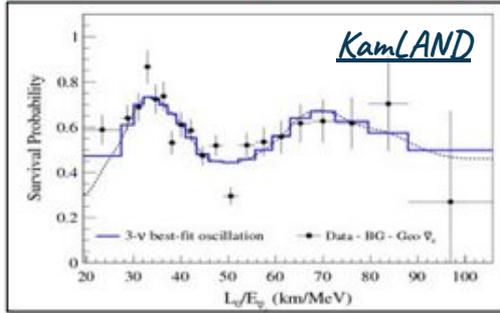
$$\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$$

Majorana (?)

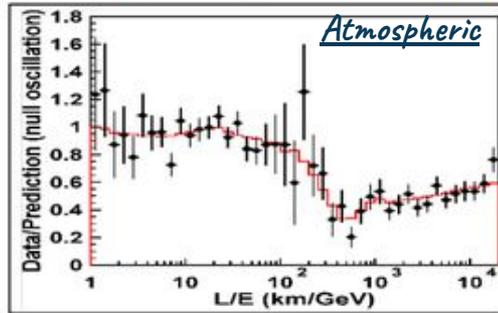
$$P_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re} [U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*] \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{ij}^2}{4E} L \right)$$

Medidas experimentales

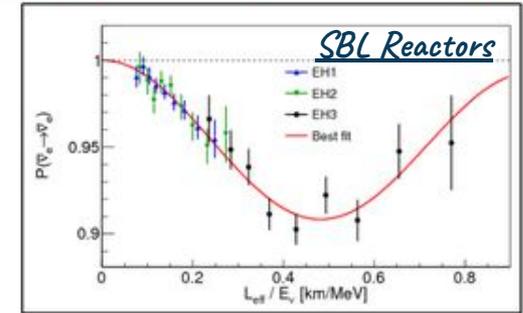
$e \rightarrow e$ ($\delta m^2, \theta_{12}$)



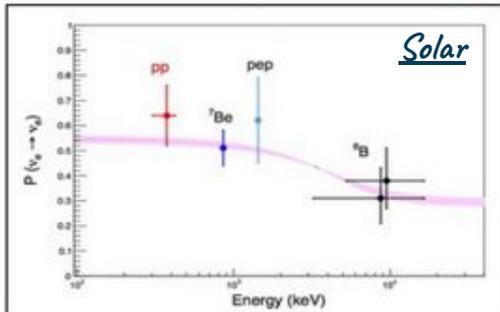
$\mu \rightarrow \mu$ ($\Delta m^2, \theta_{23}$)



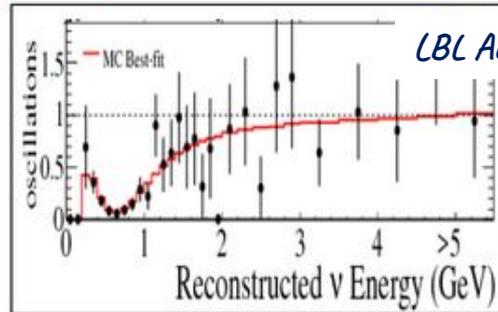
$e \rightarrow e$ ($\Delta m^2, \theta_{13}$)



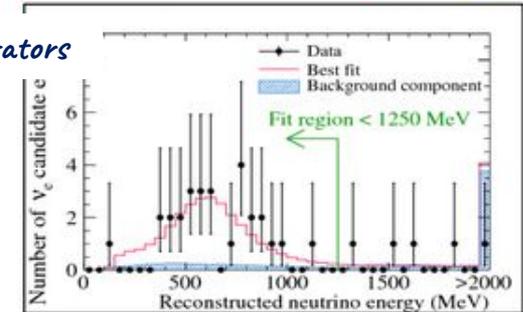
$e \rightarrow e$ ($\delta m^2, \theta_{12}$)



$\mu \rightarrow \mu$ ($\Delta m^2, \theta_{23}$)



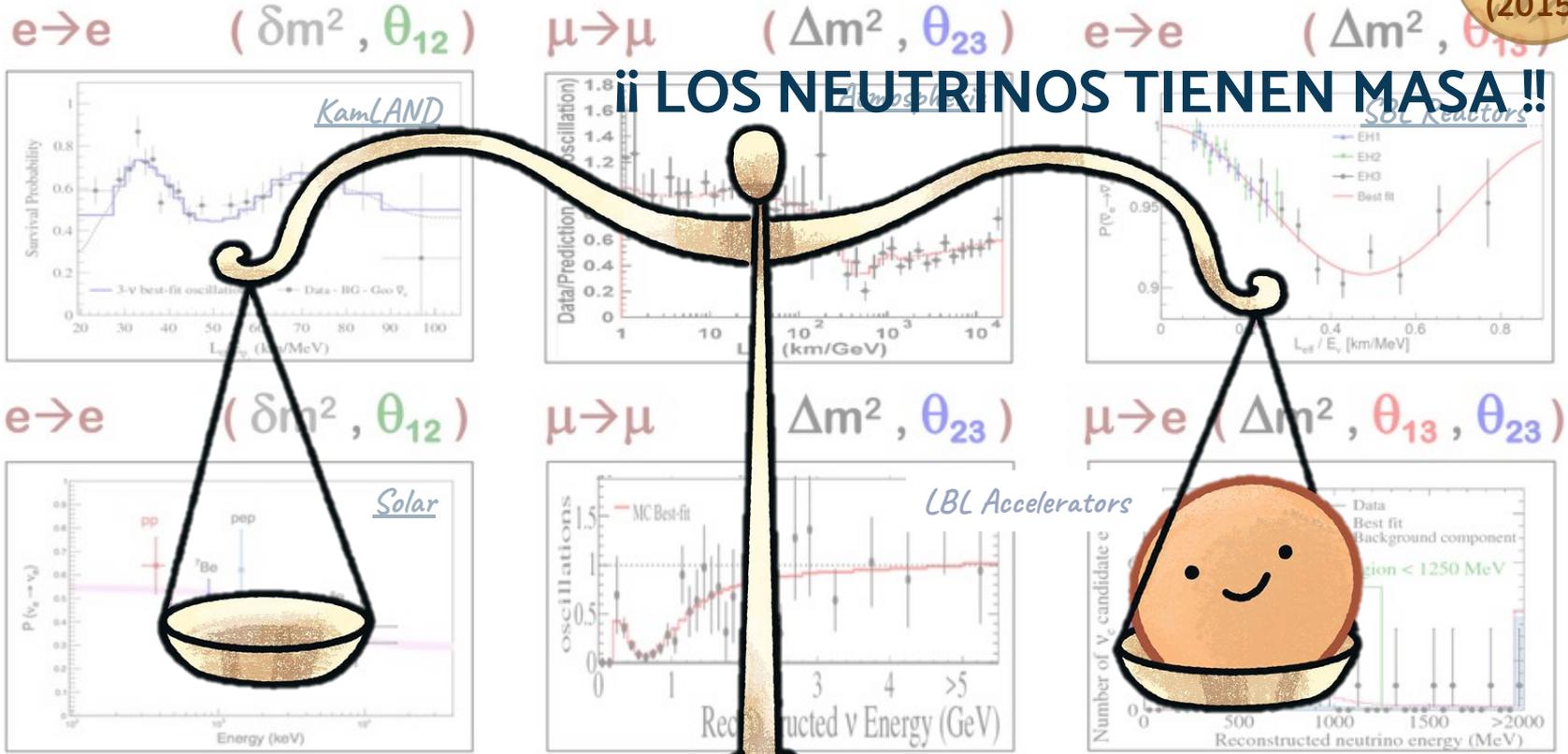
$\mu \rightarrow e$ ($\Delta m^2, \theta_{13}, \theta_{23}$)



Medidas experimentales

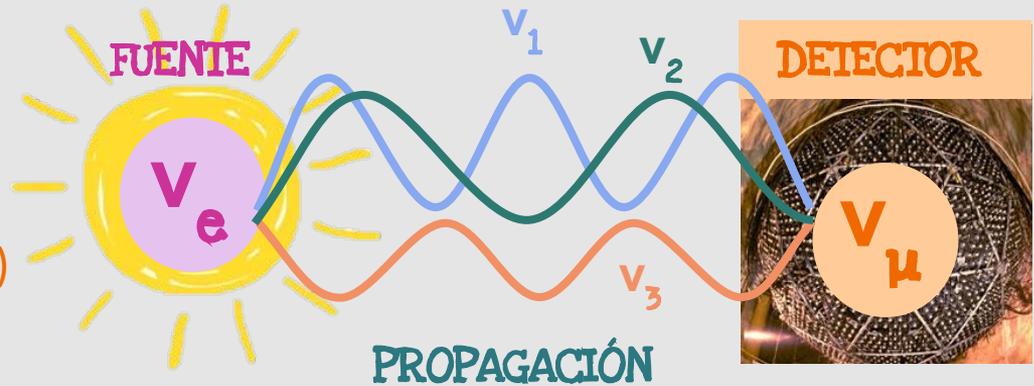


ii LOS NEUTRINOS TIENEN MASA !!



Medidas experimentales

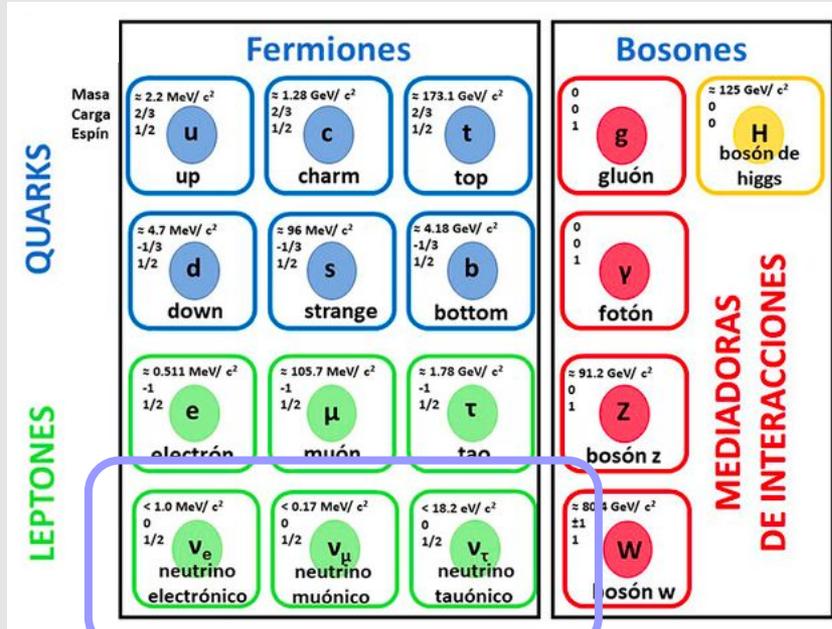
1. Generados: estados de SABOR (ν_α)
2. Propagación: estados de MASA (ν_i)
3. Detectados: estados de SABOR (ν_β)



$\theta_{12} \sim 33.8^\circ$	SOLAR	Reactors at L=180 km (KamLAND+SNO)	
$\Delta m^2_{21} \sim 7.4 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$			
$\theta_{13} \sim 8.6^\circ$	Atmospheric neutrinos	Reactors at L=1 km (Daya Bay, RENO, Double Chooz)	Long-baseline experiments
$\Delta m^2_{31} \sim 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$		(Super-K, DeepCore)	
$\theta_{23} \sim 48^\circ$			
δ_{CP}			

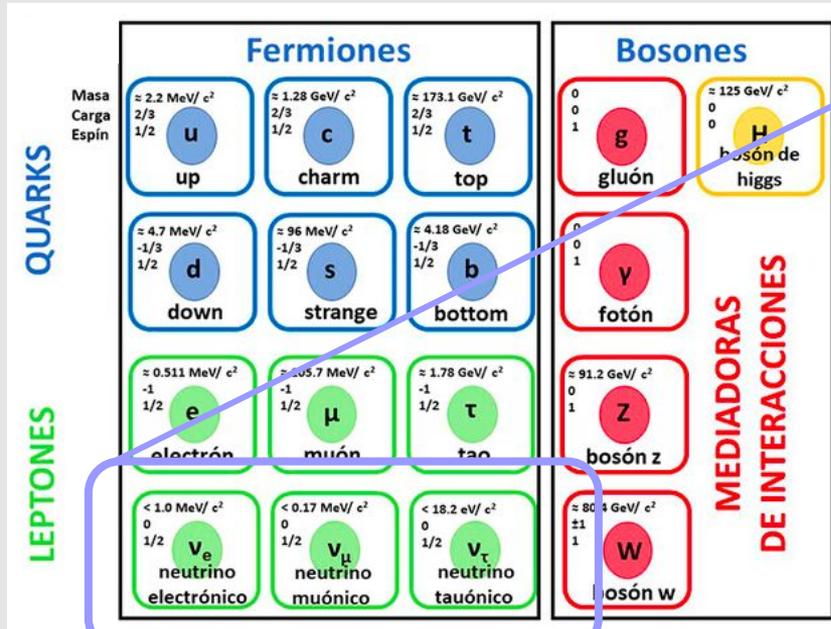
Modelo Estándar

<https://cds.cern.ch/record/2759492/files/Standard%20Model%20-%20ATLAS%20Physics%20Cheat%20Sheet.pdf>



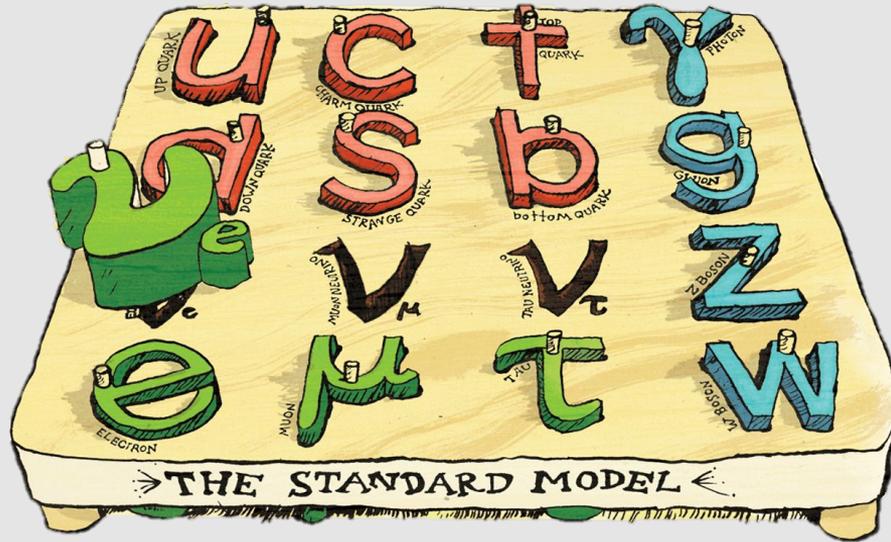
Modelo Estándar

<https://cds.cern.ch/record/2759492/files/Standard%20Model%20-%20ATLAS%20Physics%20Cheat%20Sheet.pdf>

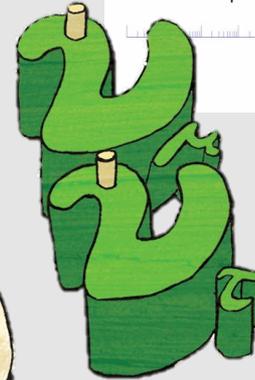
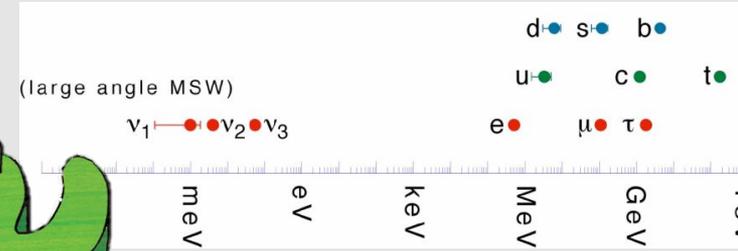


- Son partículas **fundamentales**.
- Hay **3 sabores**, uno por cada familia.
- Los compañeros dextrógiros de los neutrinos (ν_R) no existen
- Partículas **neutras** (no carga eléctrica)
- **Spin 1/2**, como los otros fermions.
- Sólo interaccionan a través de la **interacción débil**.
- Masas **muy pequeñas** (al menos 10^6 menos que el electrón).
- La partícula **más abundante** del Universo!

Preguntas sin respuesta



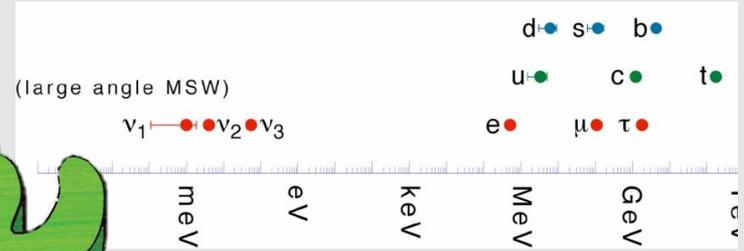
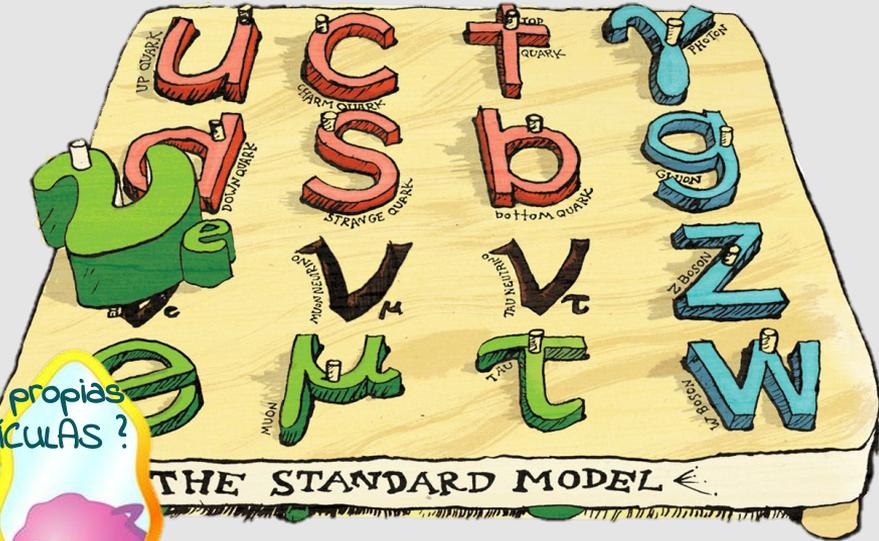
¿Cuál es su MASA ?



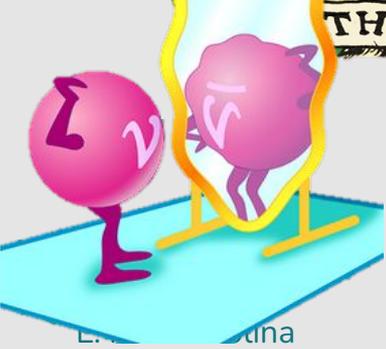
- ¿Por qué sus masas son tan pequeñas?
- ¿Cómo están ordenados por masa? (DUNE, HyperK)
- KATRIN ha determinado un límite superior de 0.8 eV para la masa media de los neutrinos.
- Además tenemos límites dados por la cosmología

Preguntas sin respuesta

¿Cuál es su MASA ?



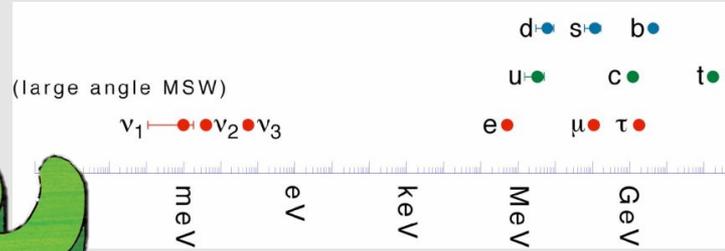
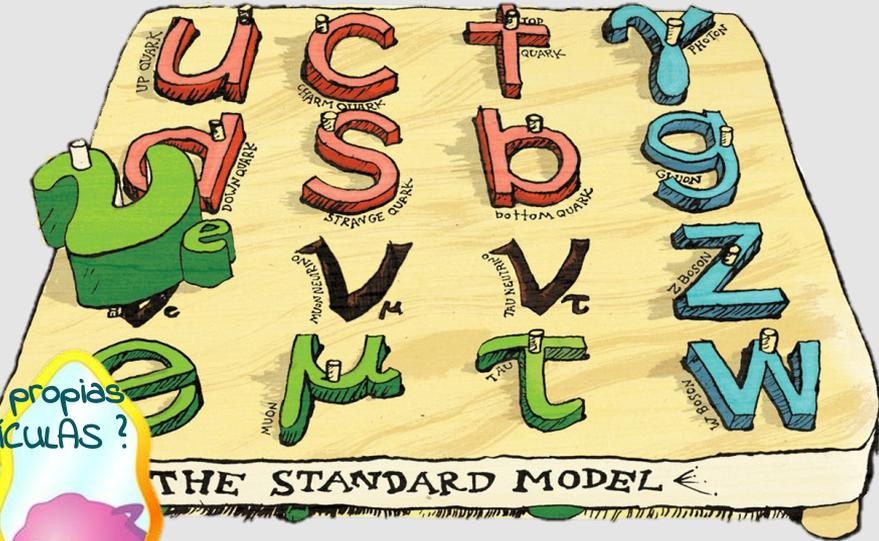
¿ Son sus propias ANTIPARTICULAS ?



- GERDA, MAJORANA Demonstrator and NEXT intentan medir (neutrinoless double beta decay) un proceso que solo se daría si los neutrinos son su propia antipartícula

Preguntas sin respuesta

¿Cuál es su MASA ?



¿ Son sus propias ANTIPARTICULAS ?

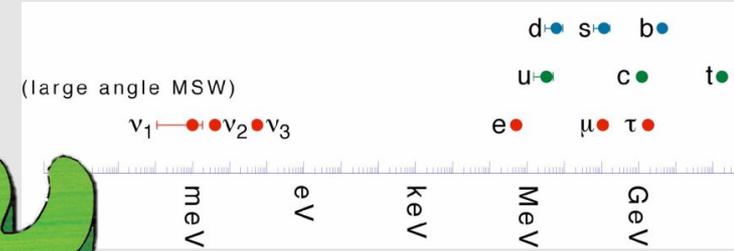
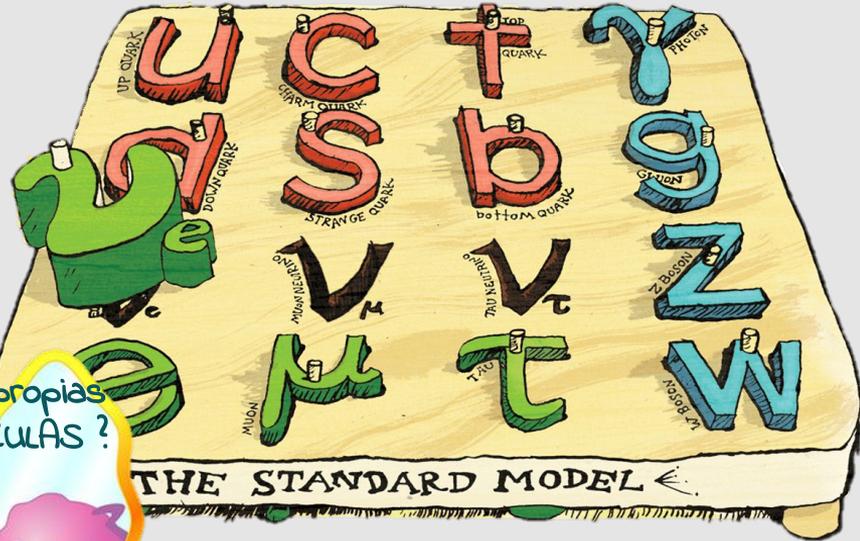


¿ qué MECANISMO les da masa ?

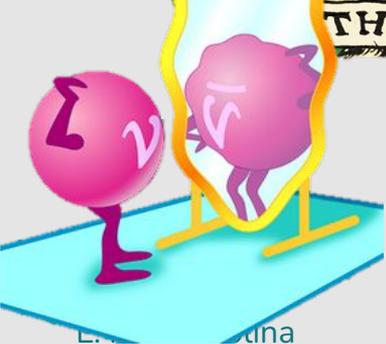


Preguntas sin respuesta

¿Cuál es su MASA ?



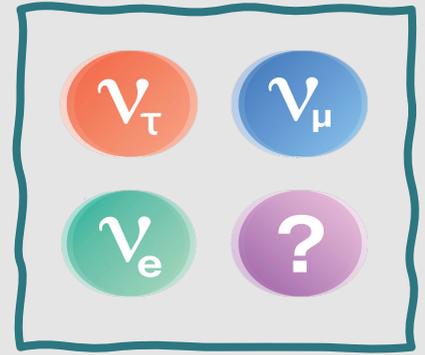
¿ Son sus propias ANTIPARTICULAS ?



¿ qué MECANISMO les da masa ?



¿ Más de 3 neutrinos ?



The image shows the interior of a particle detector, likely the ATLAS experiment at CERN. The structure is a large, cylindrical tunnel lined with a golden, grid-like material. The grid is composed of many small, square cells, and the overall appearance is highly reflective and complex. The lighting is warm and golden, highlighting the intricate details of the detector's construction. A white rectangular box is overlaid on the center of the image, containing the text "3. ¿CÓMO LOS DETECTAMOS?".

3. ¿CÓMO LOS DETECTAMOS?

Interacciones de Neutrinos

- No se pueden detectar **DIRECTAMENTE** (con los detectores actuales)
- Pueden interactuar y producir nuevas partículas que sí sean sensibles a **E** ó **B**

Interacciones de Neutrinos

- No se pueden detectar **DIRECTAMENTE** (con los detectores actuales)
- Pueden interactuar y producir nuevas partículas que sí sean sensibles a **E** ó **B**

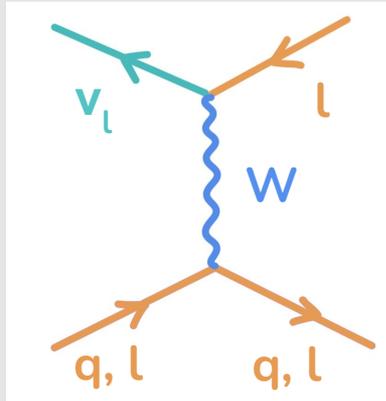
Corriente Cargada (CC)

Lepton saliente (l)
tiene el mismo
SABOR que el ν
entrante

$$e^- \rightarrow \nu_e \quad (e^+ \rightarrow \bar{\nu}_e)$$

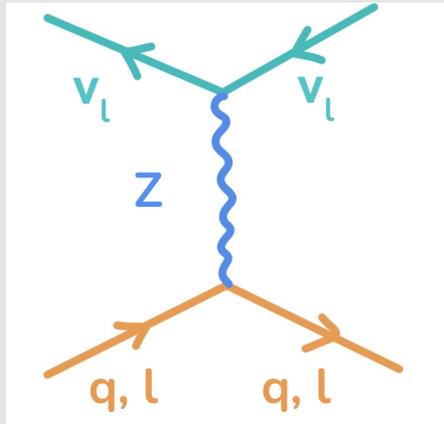
$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu \quad (\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu)$$

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau \quad (\tau^+ \rightarrow \bar{\nu}_\tau)$$

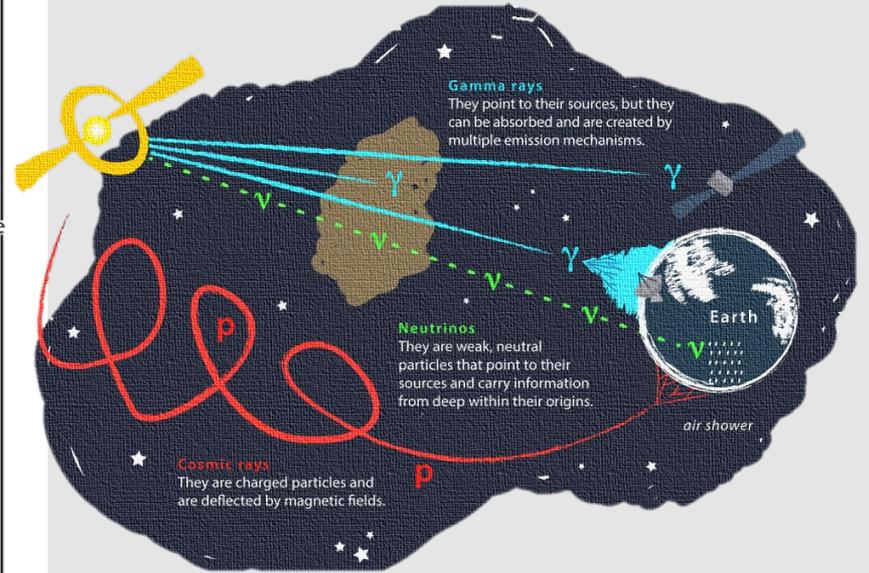
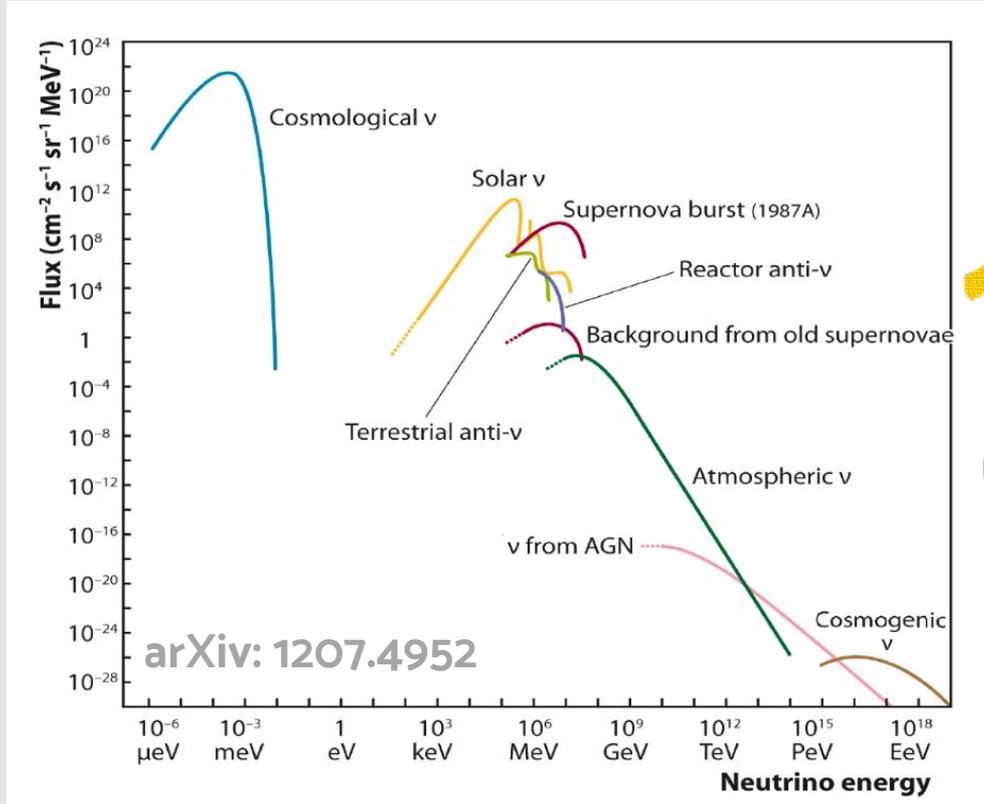


Corriente Neutra (NC)

Fermión saliente es
INDEPENDIENTE
del ν entrante. **No**
podemos saber el
sabor del ν .



Fuentes de Neutrinos



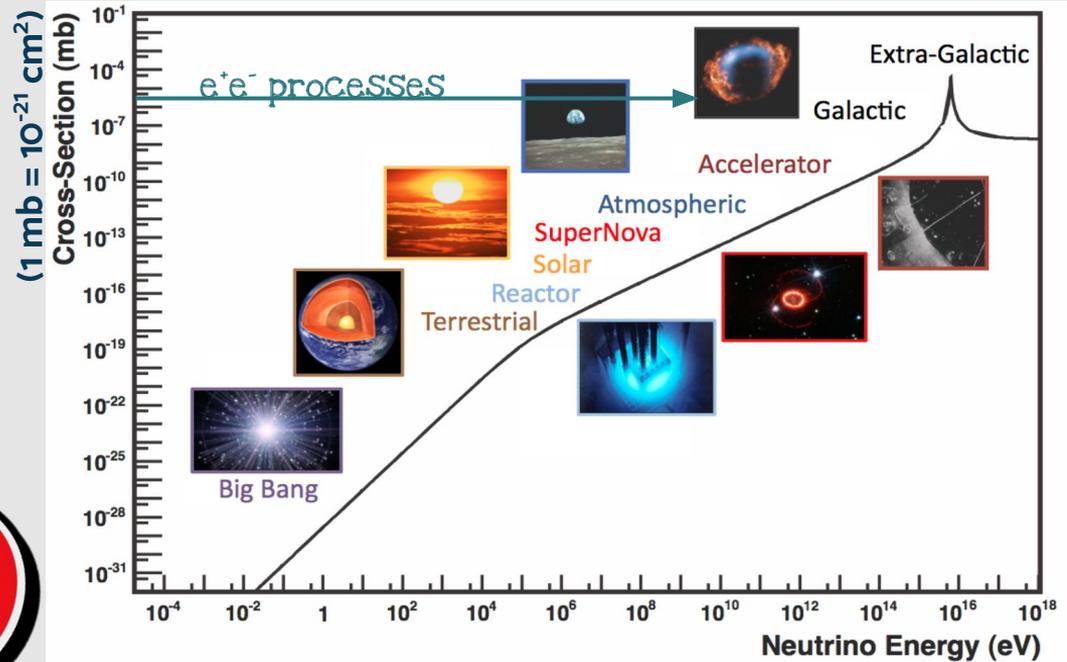
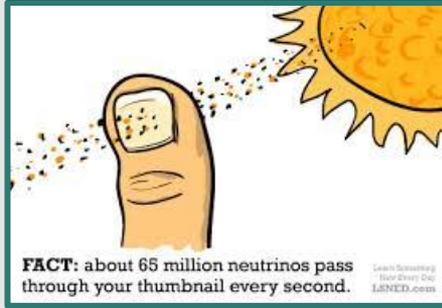
Detección de Neutrinos

<http://dx.doi.org/10.1103/RevModPhys.84.1307>

◆ **SIN EMBARGO** su sección eficaz es MUY **pequeña**

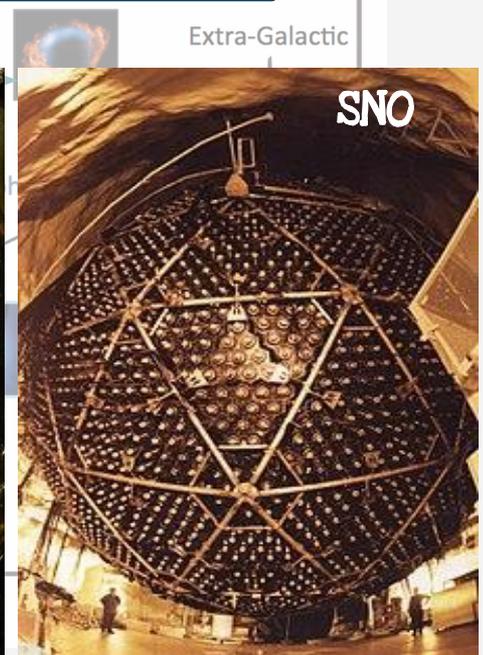
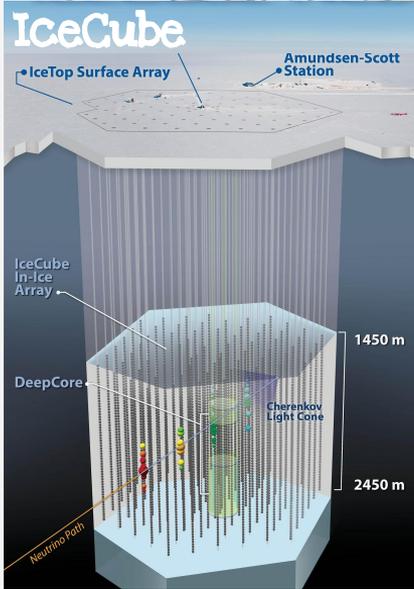
Detección de Neutrinos

◆ **SIN EMBARGO** su sección eficaz es MUY **pequeña**



Detección de Neutrinos

NECESITAMOS DETECTORES MASIVOS



Detectores de Neutrinos: KATRIN



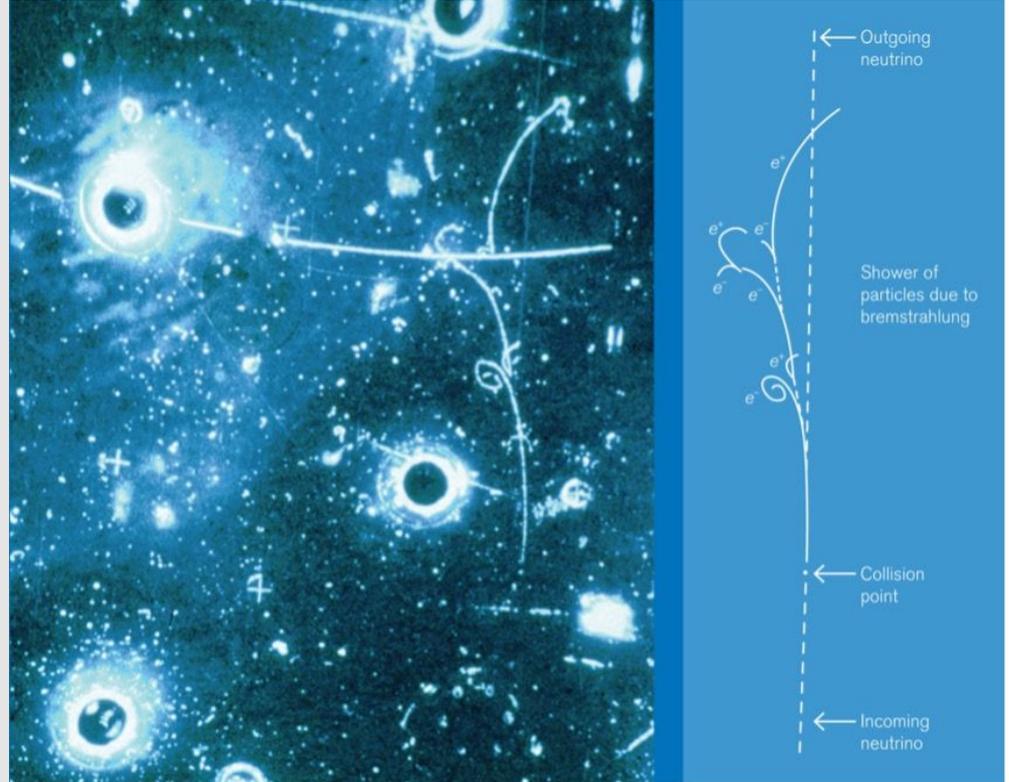
Detectores de Neutrinos: ICARUS



Eventos con Neutrinos



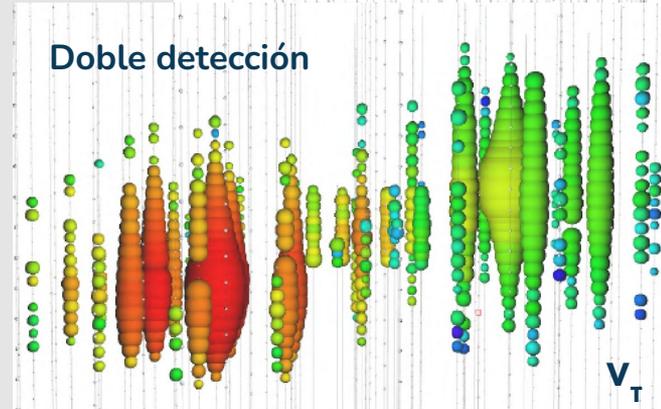
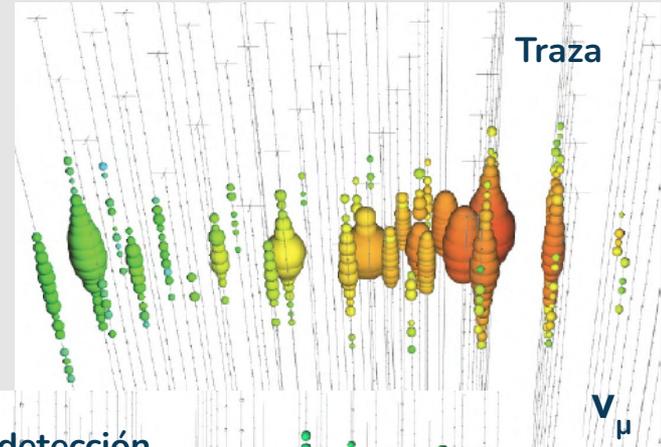
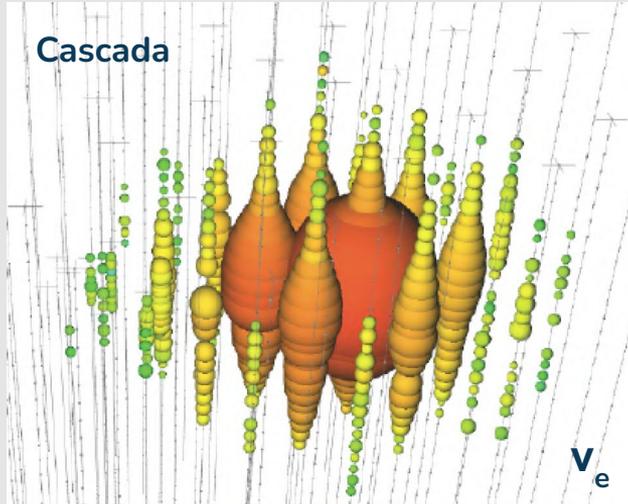
- Primer suceso candidato a corrientes neutras leptónicas del experimento **Gargamelle** del CERN (cámara de burbujas)
- Gran avance en la comprensión de la fuerza electrodébil y de la estructura del Modelo Estándar



Detector en hielo: IceCube

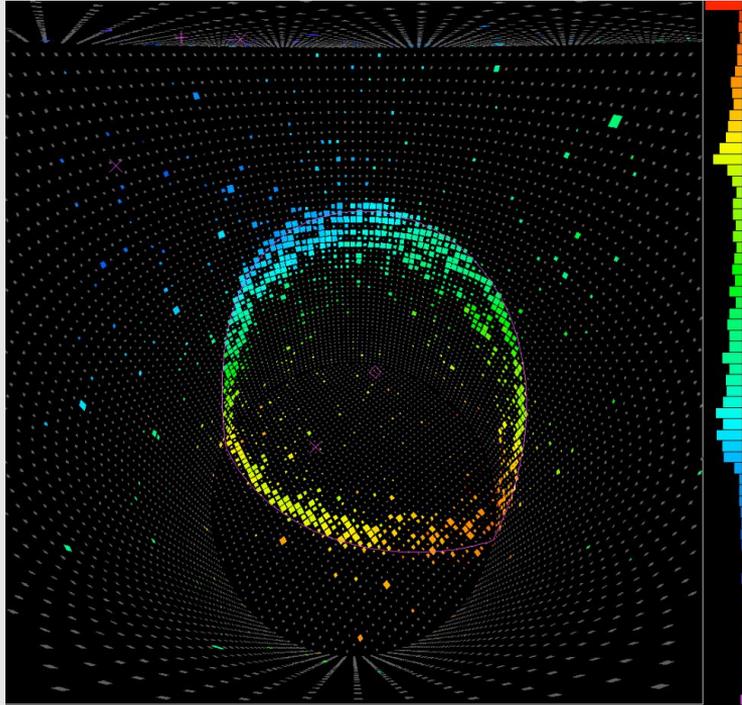
https://www.ph.nat.tum.de/fileadmin/w00bya/cosmic-particles/_my_direct_uploads/BachelorThesis_Mockler_final_compressed.pdf

Neutrinos de muy alta energía !

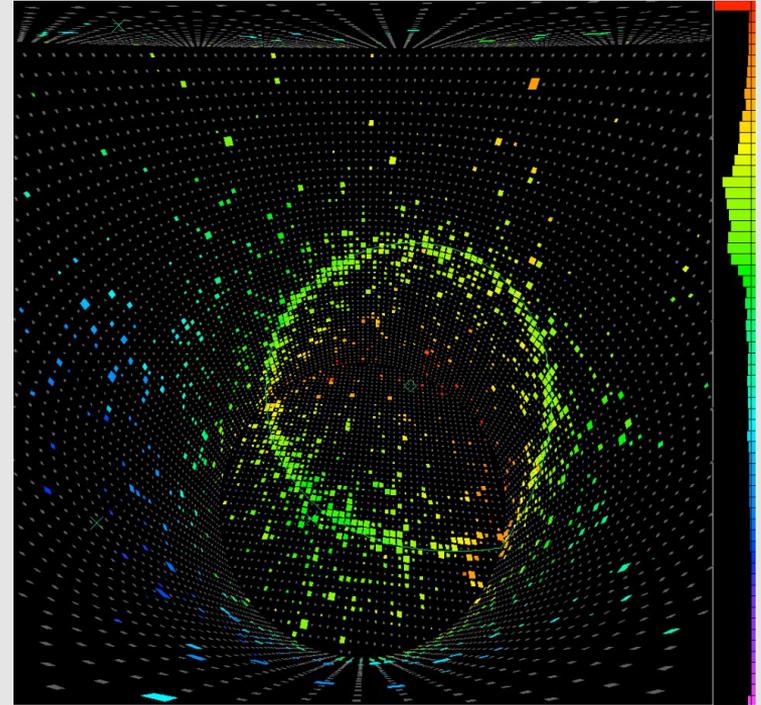


Cherenkov en T2K FD

https://www.researchgate.net/figure/Rings-of-Cerenkov-light-detected-in-1998-by-Super-K-reconstructed-as-a_fig13_324717828

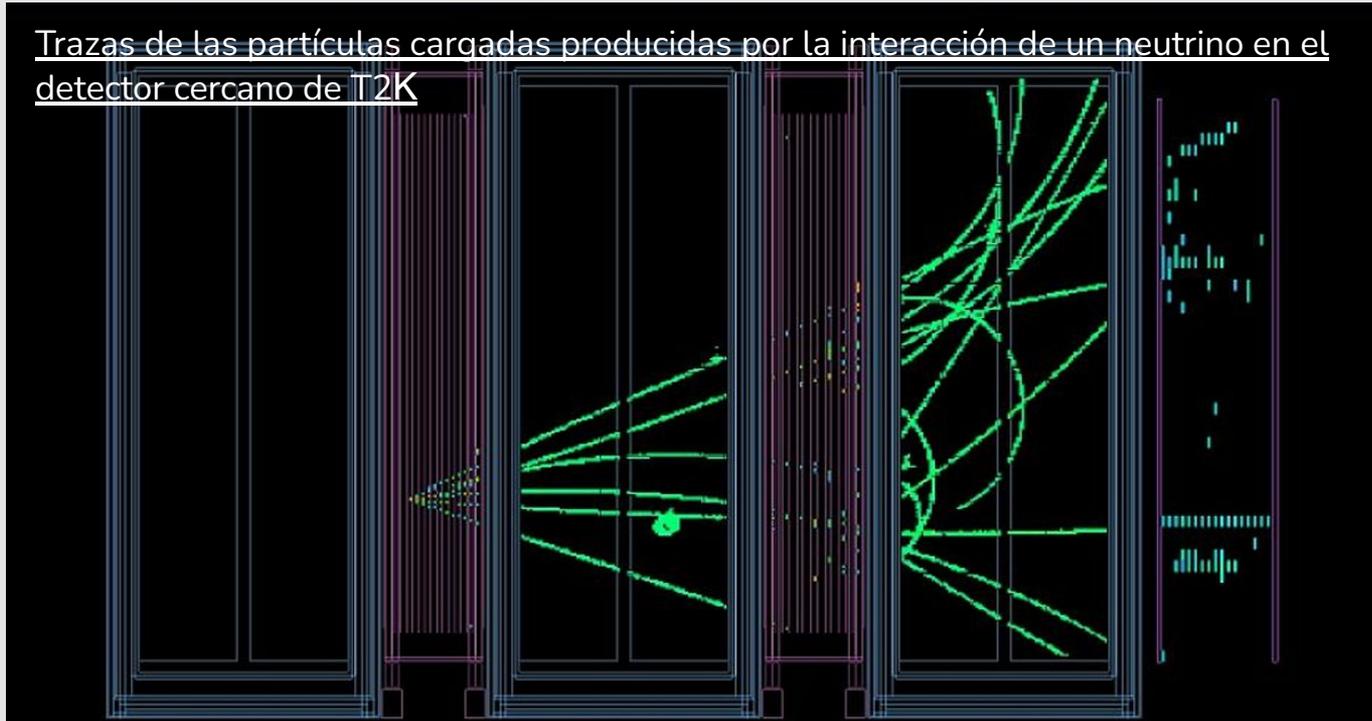


$p_{\mu} = 603 \text{ MeV}$



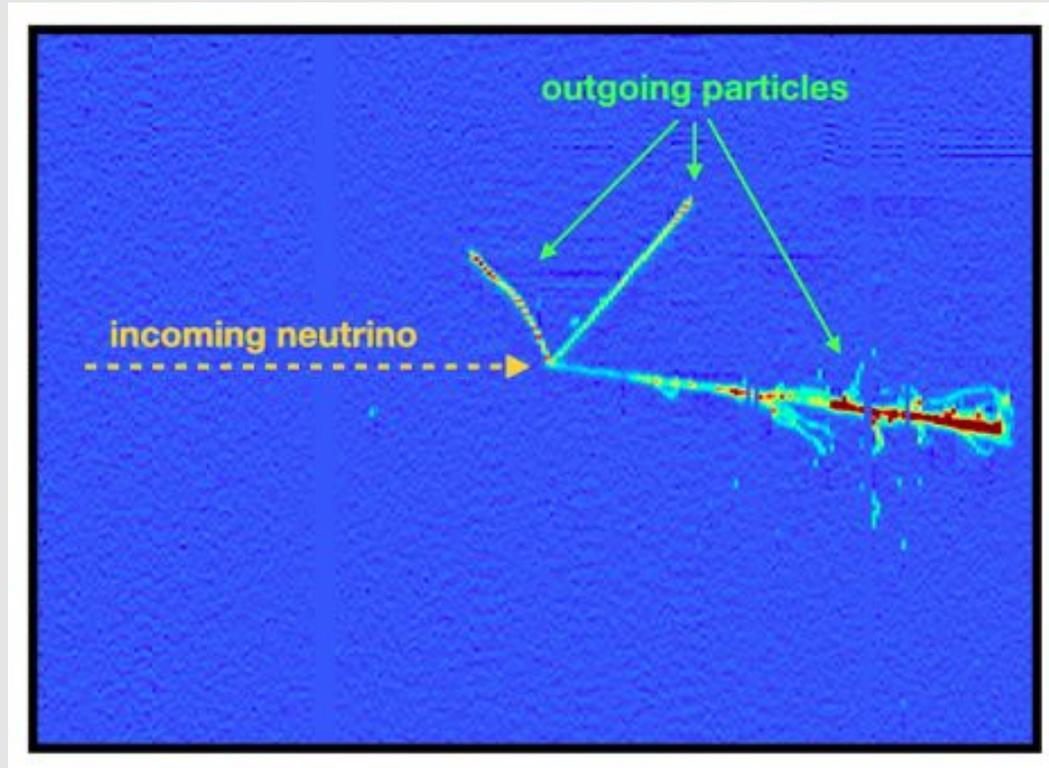
$p_e = 492 \text{ MeV}$

Evento en T2K ND



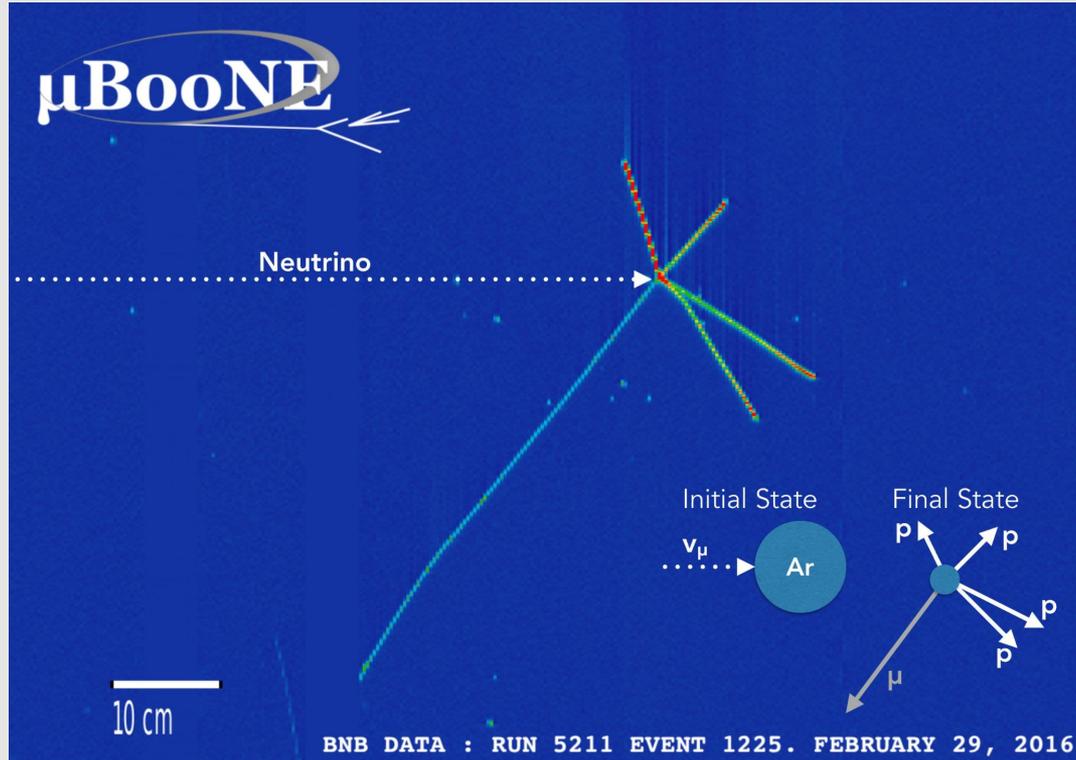
Detectores de Argón Líquido (V)

ArgoNeuT



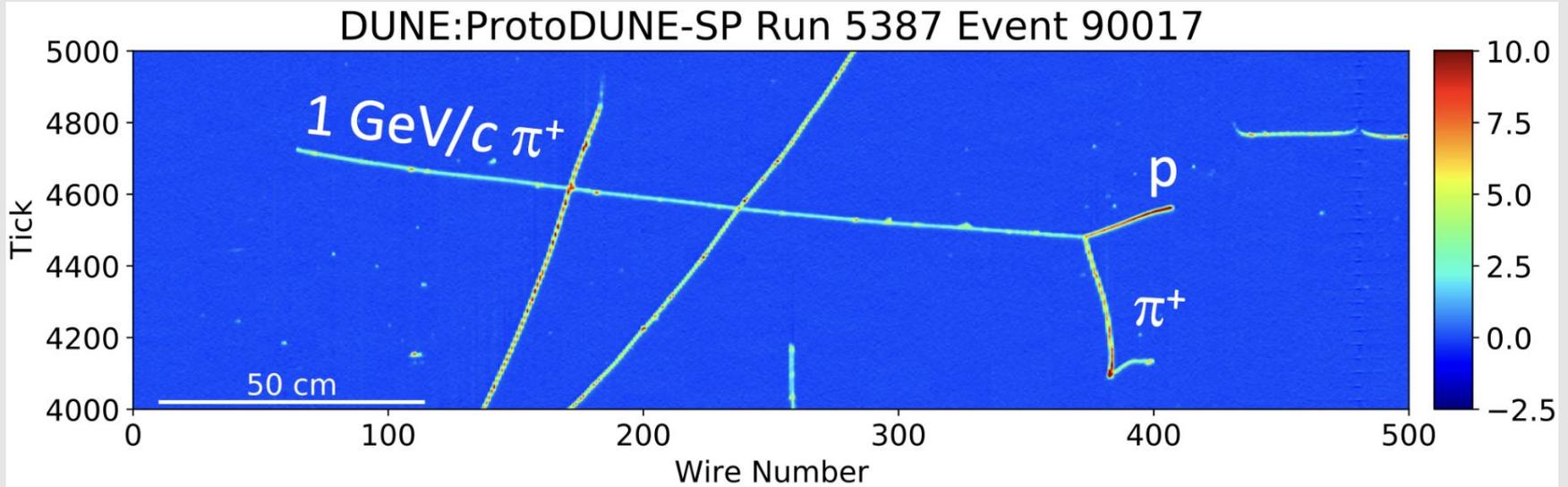
Detectores de Argón Líquido (1)

MicroBoone



Detectores de Argón Líquido (III)

ProtoDUNE



4. PLATAFORMA DE NEUTRINOS EN EL CERN



Neutrino
PLATFORM

ProtoDUNE-VD
(770 ton LAr)

Construir y probar las
tecnologías para los
detectores de neutrinos
actuales y del futuro!

ProtoDUNE-HD
(770 ton LAr)



Colaboración DUNE

Deep Underground Neutrino Experiment es un experimento de ν (long baseline) que comenzará a operar en 2029

- 1400 colaboradores
- 200 instituciones
- 30 países + CERN



DUNE CM Fermilab (Mayo 2022)



○ EE.UU

● Asia

● South America

○ Europe

📍 CIEMAT + IFIC + UGR

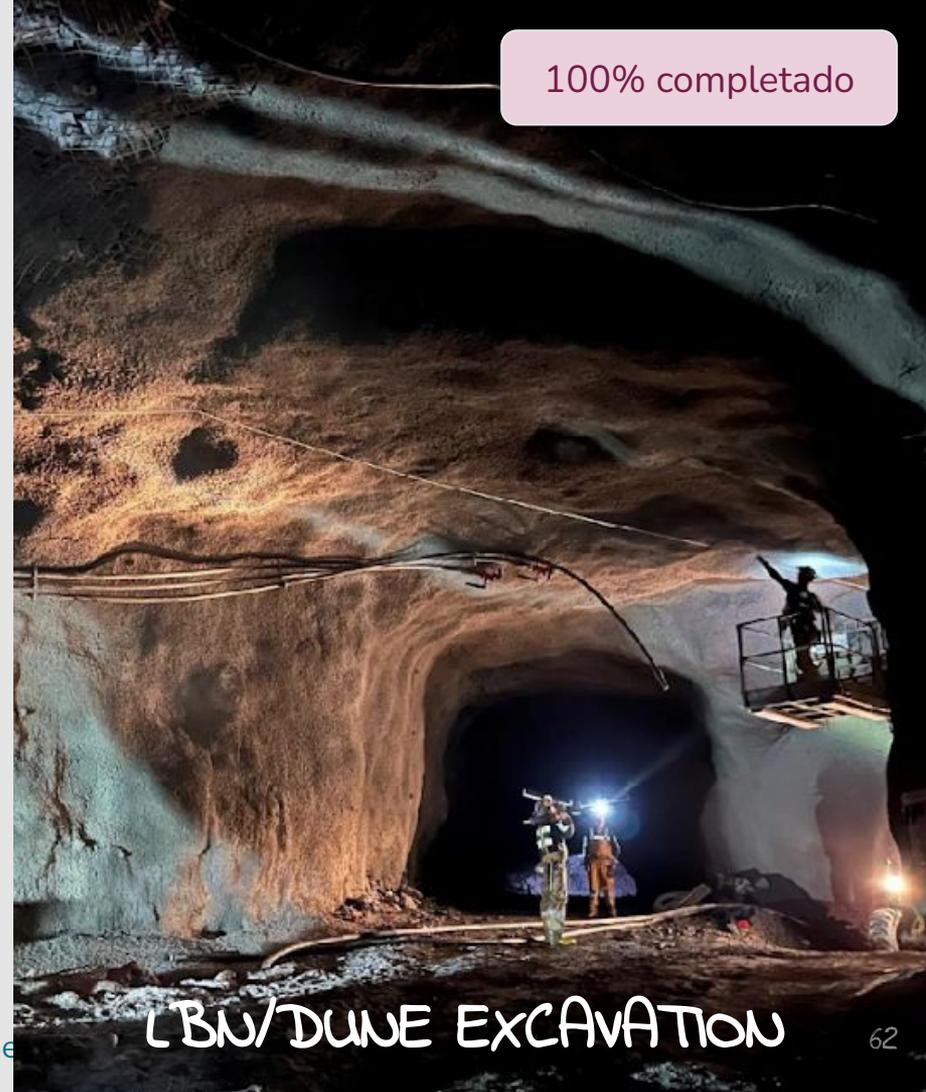
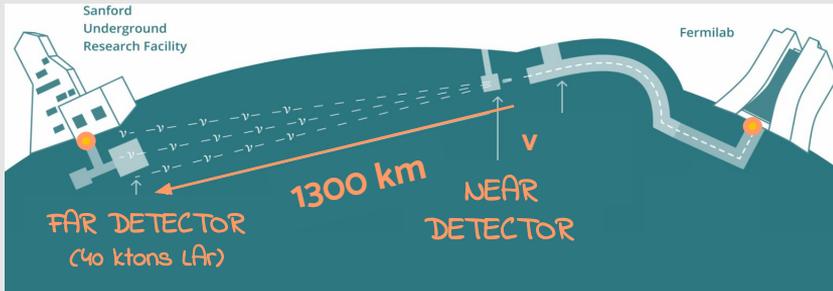


<https://www.duneScience.org/>

Objetivos de DUNE

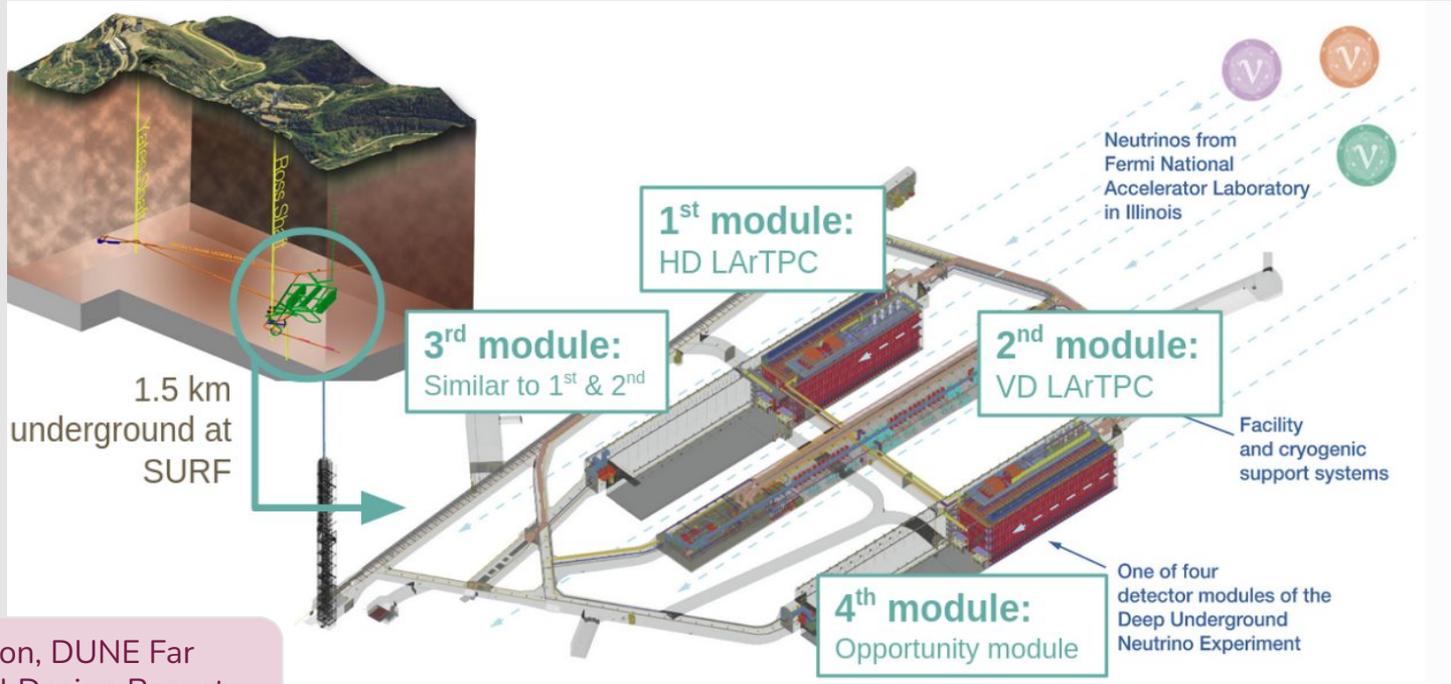
Mediciones de precisión de parámetros de oscilación: δ_{CP} , **jerarquía de masas** y los ángulos de mezcla. Además realizará medidas para buscar **física más allá del modelo estándar** y estudios sobre los neutrinos de las **supernovas**.

- 4 x 17 kt módulos con LArTPC
- Situado en SURF **1.5 km** BAJO TIERRA



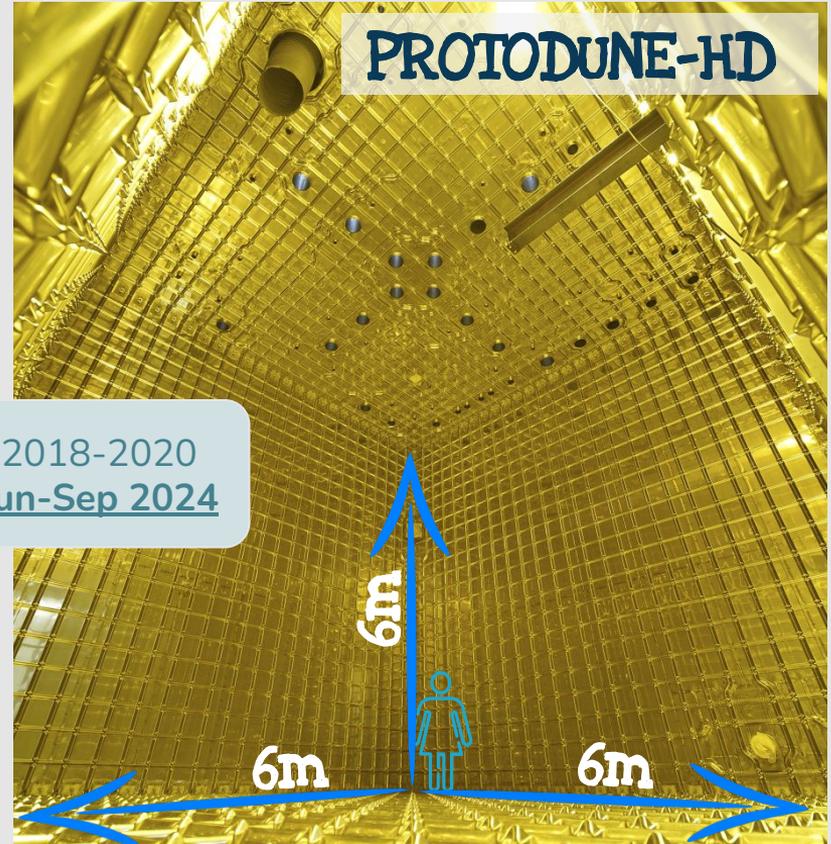
LBN/DUNE EXCAVATION

Detector Lejano de DUNE



DUNE Collaboration, DUNE Far Detector Technical Design Report, JINST 15 T08008 (2020).

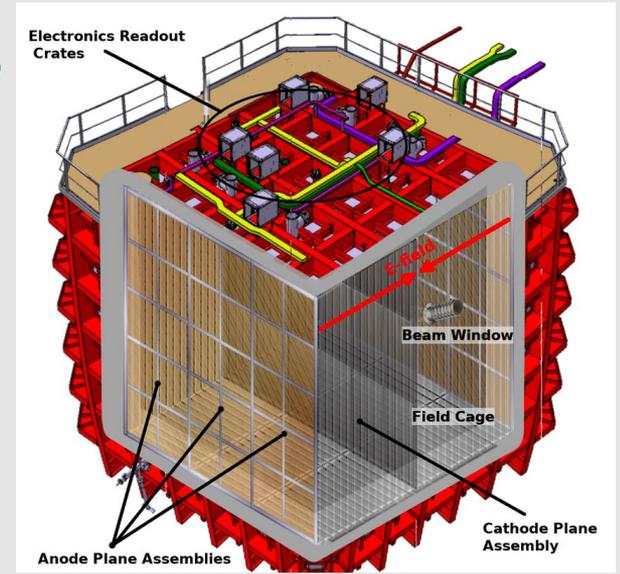
Dentro de los ProtoDUNEs (1)





Dentro de los ProtoDUNE

(11)



Otros experimentos



ICARUS (ahora en FermiLab) fue enteramente renovado y mejorado en la Plataforma de Neutrinos en 2016

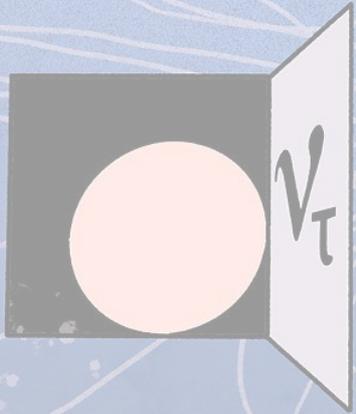


La mejora para el Time-of-Flight del detector cercano de T2K se mandó desde la plataforma a Japón!

Conclusiones

SON MENSAJEROS...

- Transportan información del Big Bang, de supernovas y de otros procesos astrofísicos.
- Podrían ayudar a explicar el exceso de materia sobre antimateria en el universo



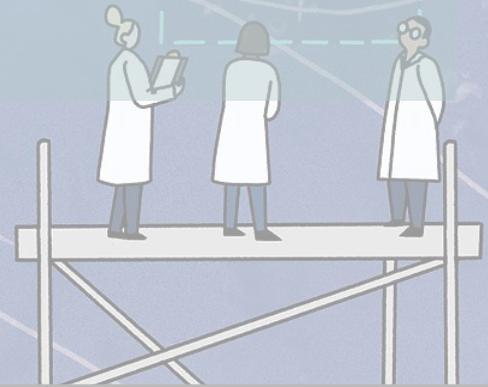
Conclusiones

SON MENSAJEROS...

- Transportan información del Big Bang, de supernovas y de otros procesos astrofísicos.
- Podrían ayudar a explicar el exceso de materia sobre antimateria en el universo

... Y DESCONOCIDOS

- Podrían ser su propia antipartícula
- No sabemos de dónde provienen sus masas
- Podría haber otras familias de neutrinos



Conclusiones

SON MENSAJEROS...

- Transportan información del Big Bang, de supernovas y de otros procesos astrofísicos.
- Podrían ayudar a explicar el exceso de materia sobre antimateria en el universo

... Y DESCONOCIDOS

- Podrían ser su propia antipartícula
- No sabemos de dónde provienen sus masas
- Podría haber otras familias de neutrinos

... Y EXTRAÑOS

- No encajan en el cuadro de tres familias (pequeña masa, orden entre familias)
- Son el único fermión neutro
- Oscilan durante la propagación



Conclusiones

SON MENSAJEROS...

- Transportan información del Big Bang, de supernovas y de otros procesos astrofísicos.
- Podrían ayudar a explicar el exceso de materia sobre antimateria en el universo

... Y DESCONOCIDOS

- Podrían ser su propia antipartícula
- No sabemos de dónde provienen sus masas
- Podría haber otras familias de neutrinos

... Y EXTRAÑOS

- No encajan en el cuadro de tres familias (pequeña masa, orden entre familias)
- Son el único fermión neutro
- Oscilan durante la propagación

CONTINUARÁ...



¡¡ GRACIAS !!

