

# El problema de la masa de los neutrinos

Martín Pérez Comisso  
Universidad de Chile

Química Nuclear

Basado en la presentación de Gabriel Mengin

# ¿Es el **neutrino** una partícula sin masa?

# 1. Introducción

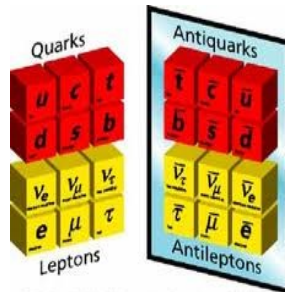
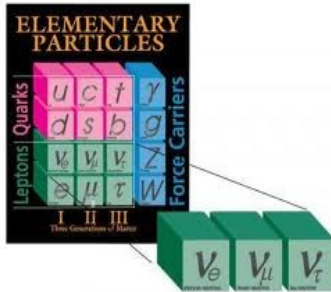
El Universo está hecho de 3 pequeñas partículas: electrones, protones y Neutrones. Estos constituyen el átomo. Pero por cada una de estas partículas en el Universo existe **¡Un billón de neutrinos!**

Una gran cantidad de neutrinos se genera de los procesos solares. En Los últimos 50 años se han probado modelos solares, pero se encontraban v perdidos: **Problema de los neutrinos solares.**

Esos v perdidos están, pero de distinta forma → **experimento SNO**

## 1.1 Neutrinos

Los neutrinos no se ven afectados por fuerzas EM ni nuclear fuerte.  
Si se ven afectados por Nuclear débil y Gravitatoria



The Standard Model contains 3 neutrinos of definite flavor; and a set of corresponding anti-particles.

“Si los neutrinos tienen masa, pueden presentar el fenómeno de Oscilación”

## 2. Modelo Solar

1920: Proposición de Eddington  $\Rightarrow$  El sol funciona por fusión nuclear

1930: Pauli y conservación de la energía  $\Rightarrow$  Hipótesis del neutrino

1962: Bahcall entre otros  $\Rightarrow$  Estudios del flujo de los neutrino

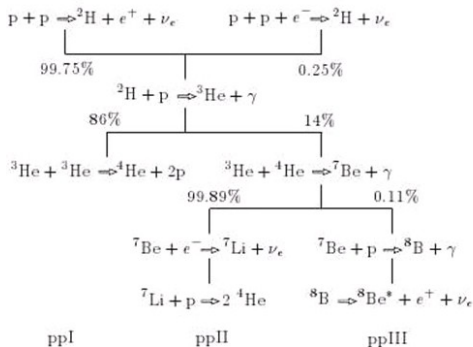
Postulados físicos previos:

- Equilibrio hidrostático: La gravedad está balanceada por un gradiente de presión de los gases
- La energía es transportada por los fotones y por convección
- La energía generada en la fusión nuclear, cambia la abundancia de los elementos químicos
- Condiciones de enlace y formación.

## 2. Modelo Solar

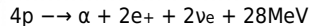


## 2.1. Fuentes de neutrinos en el sol



Los 3 ciclos pp están asociados a los neutrinos

La reacción nuclear en el interior del nucleo solar



El **proceso CNO** del sol contribuye tan solo con el 1.5% de los neutrinos. (Despreciable)

## 2.2. Flujo de Neutrinos

Se puede dar un orden aproximado de magnitud del flujo de neutrinos como

$$\Phi = \frac{(\text{Luminosidad})}{4\pi d^2 \times \frac{1}{2} (\text{Energía enlace de 4 He})} \approx \frac{4 \times 10^{33} \text{ erg/s}}{4\pi \times (1.5 \times 10^{13} \text{ cm})^2 \times 14 \text{ MeV}}$$

$$\Phi \approx 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Chain	Reaction	Flux on earth in $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
pp	pp	$5.95 \times 10^{10}$
	pep	$1.40 \times 10^8$
	hep	$9.3 \times 10^3$
	$^7\text{Be}$	$4.77 \times 10^9$
	$^8\text{B}$	$5.05 \times 10^6$
CNO cycle	$^{13}\text{N}$ decay	$5.48 \times 10^8$
	$^{15}\text{O}$ decay	$4.80 \times 10^8$
	$^{17}\text{F}$ decay	$5.63 \times 10^6$

ppl ~ 86% del flujo

ppII ~ 14% del flujo

PpIII ~ 10–4% del flujo



## 3. Experimentos relevantes

**1964:** R.Davis hace la primera medición de neutrinos solares.

**Una serie de experimentos :**

Gallex y GNO (Gran Sasso Lab, Italia),

SAGE (Baksan, Rusia),

Kamiokande y SuperKamiokande (Mina Kamioke, Japón)

**2002:**

SNO resuelve el problema de los neutrinos solares

⇒ 40 años de experimentos

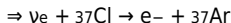
## 3.1. Experimento de Davis

1964: Davis  $\Rightarrow$  viabilidad de un tanque de 600 toneladas métricas de líquido de limpieza a base de cloro en la mina de Homestake, Dakota del Sur.

Técnicas radioquímicas

$X + \nu \rightarrow Y$  (radionuclido)

$Y$  contado  $\Rightarrow$  flujo de  $\nu$



Nuclei		$E_{th}$ (MeV)	$\tau$ (days)	Capture rates in SNU				
$X$	$Y$			pp	pep	${}^7\text{Be}$	${}^8\text{B}$	Total
${}^{37}\text{Cl}$	${}^{37}\text{Ar}$	0.814	35	0.00	0.22	1.15	5.76	$7.6^{+1.3}_{-1.1}$
${}^{71}\text{Ga}$	${}^{71}\text{Ge}$	0.233	11.4	69.7	2.8	34.2	12.1	$128^{+9}_{-7}$

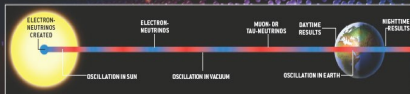
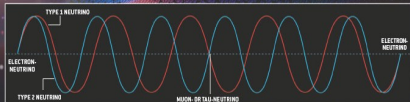
1 SNU (Solar Neutrino Unit) = number of captures per day in 1036 atoms

$\oplus\oplus$  : de energía de bajo umbral necesario para detectar  $\nu$   
 $\ominus\ominus$  : pérdida de información  $\rightarrow$  energía o la dirección de  $\nu$

## DETECTING FICKLE NEUTRINOS

### HOW NEUTRINOS OSCILLATE

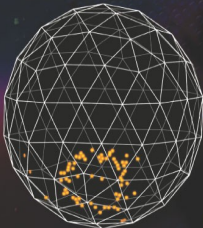
An electron-neutrino (left) is actually a superposition of a type 1 and a type 2 neutrino with their quantum waves in phase. Because the type 1 and type 2 waves have different wavelengths, after traveling a distance they go out of phase, making a muon- or tau-neutrino (center). With further travel the neutrino oscillates back to being an electron-neutrino (right).



### WHERE NEUTRINOS OSCILLATE

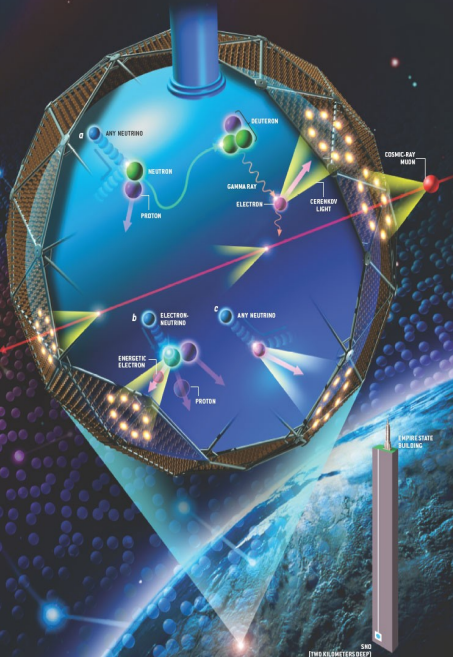
The electron-neutrinos produced at the center of the sun may oscillate while they are still inside the sun or after they emerge on their eight-minute journey to the earth. Which oscillation occurs depends on details such as the mass differences and the intrinsic degree of mixing of type 1 and 2 neutrinos. Extra oscillation may also occur inside the earth, which manifests as a difference between daytime and nighttime results.

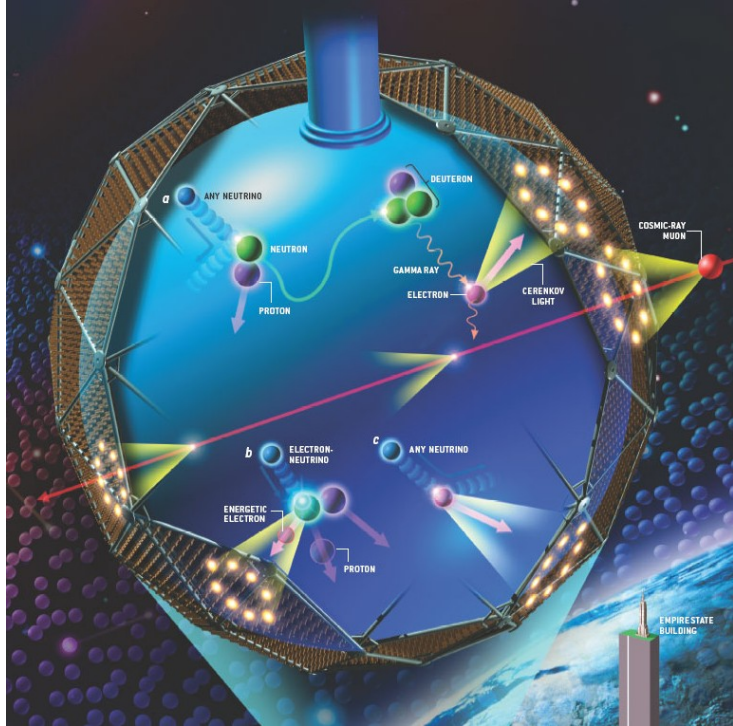
### ACTUAL DATA OF A CANDIDATE NEUTRINO EVENT



### HOW SNO DETECTS NEUTRINOS

The Sudbury Neutrino Observatory, or SNO (opposite page), detects a neutrino by seeing a characteristic ring of Cerenkov light emitted by a high-speed electron. The neutrino produces the energetic electron in SNO's heavy water (large blue sphere) in one of three ways. In deuterium breakup (a), the neutrino (blue) splits a deuterium nucleus into its component proton (purple) and neutron (green). The neutron eventually combines with another deuterium, releasing a gamma ray (wavy line), which in turn knocks free an electron (pink) whose Cerenkov light (yellow) is detected. In neutrino absorption (b), a neutron absorbs the neutrino and is thereby turned into a proton and an energetic electron. Only electron-neutrinos can be absorbed in this way. Less often the neutrino may collide directly with an electron (c). Cosmic-ray muons (red) are distinguished from neutrinos by the amount of Cerenkov light they produce and where they produce it—outside the detector as well as inside. The number of muons is reduced to manageable levels by positioning the detector two kilometers underground.





1967: primeros resultados  $\Rightarrow$  1 Ar/día (en comparación con la teoría: 2.5 Ar/día)!  
pero la confirmación triunfante de la teoría de la fusión solar

Posibles explicaciones

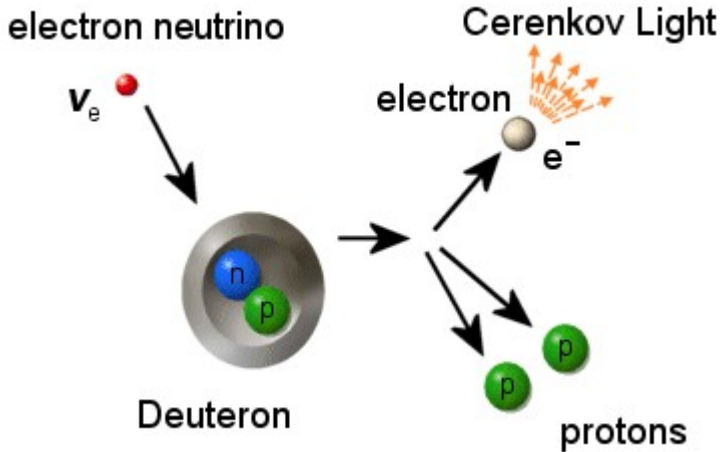
El experimento está mal

Cálculos erróneos

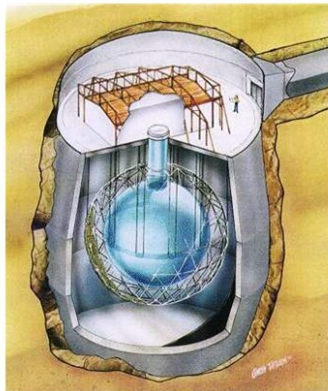
Los físicos no entienden cómo se comportan  $\nu$

Estamos recibiendo menos neutrinos de los que se supone produce el Sol.

## 3.2 Detección Cherenkov



## 3.3 Experimento SNO (Solar Neutrino Observatory)



Situado a una profundidad de 6.010 m  
cerca de Sudbury (Ontario, Canadá)

T 1000 de agua ultra-pura (D2O)  
en un recipiente esférico de acrílico  
de 12 m diámetro.

Una estructura de acero  
inoxidable soporta 945.620 cm de  
los tubos fotomultiplicadores (PMT).  
con la luz del 55% de los concentradores  
de la luz producida en  
7m concentrada un PMT

**¿Por qué es SNO único?**

Detecta todos los sabores con  $\nu$  = interacciones (ES, CC, NC)

## Detector de agua Cherenkov (similar to Kamiokande)

$\nu + \text{O or H atom} \rightarrow \boxed{\nu + e \rightarrow \nu + e} \quad \text{Scattering Electrónico (ES)}$

$\rightarrow$  dipolo eléctrico, si  $v > c$   $\Rightarrow$  Emisión de Radiación Cherenkov

### Agua pesada de los nucleos de D

$\boxed{\nu_e + d \rightarrow p + p + e^-}$  (+ luz Cherenkov) (CC)

$\boxed{\nu + d \rightarrow \nu + n + p}$  (+ rayos gamma) Neutral Current (NC)

(NaCl se añadieron en 2001 para aumentar que la captura)

$\Rightarrow$  SNO experiment

$\oplus\oplus$  : tiempo real, detecta todos los sabores  
 $\ominus\ominus$  : umbral de energía de alta es necesario ( $E_{th} \sim 5 \text{ MeV}$ )  
 $\rightarrow$  radiación Cherenkov



Datos registrados entre el 02 de noviembre 1999 y el 15 de enero 2001  
 → Tiempo en directo de 240.95 días

Analysis step	Number of events
Total event triggers	355 320 964
Neutrino data triggers	143 756 178
$N_{\text{hit}} \geq 30$	6 372 899
Instrumental background cuts	1 842 491
Muon followers	1 809 979
High level cuts <sup>a</sup>	923 717
Fiducial volume cut	17 884
Threshold cut	1 169
Total events	1 169

## 3.4 Resultados recientes

Se lleva a cabo en el Laboratorio Nacional Gran Sasso.

→ Detector de centelleo (se utiliza la propiedad de la luminiscencia en excitado por la radiación ionizante)

La primera medición en tiempo real del flujo de la energía baja neutrinos procedentes del  ${}^7\text{Be}$  de captura de electrones en el núcleo del Sol. Energía experimental umbral muy bajo (250 keV).

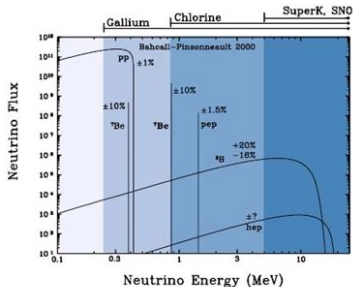
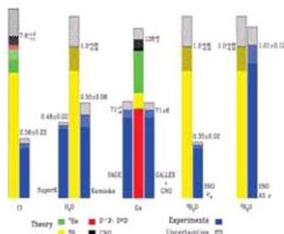
Confirma la **oscilación de neutrinos** solares primer caso la medición directa de la probabilidad de supervivencia en el régimen de la materia bajo consumo de energía de vacío

Experiment	Type	Ref.	Result ( $1\sigma$ )
Homestake	CC	[14]	$2.55 \pm 0.17 \pm 0.18$ SNU
Kamiokande	ES	[15]	$3.0 \pm 0.41 \pm 0.35$ CGS
SAGE	CC	[16]	$70.8^{+5.3+3.7}_{-5.2-3.2}$ SNU
Gallex	CC	[17]	$74.1 \pm 5.4^{+4.0}_{-4.2}$ SNU
SNO	CC	[18]	$1.75^{+0.06}_{-0.05} \pm 0.09$ CGS
	ES	[18]	$2.39^{+0.24}_{-0.23} \pm 0.12$ CGS
	NC	[19]	$5.09^{+0.44+0.46}_{-0.43-0.43}$ CGS

1 SNU = Numero de capturas por día en  $10^{36}$  átomos

1 CGS =  $10^6 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Los resultados de experimentos de neutrinos solares en comparación con el modelo solar estándar.



## 4. Oscilación de Neutrinos

No hay masa detectado directamente  $\Rightarrow$

**¿ El neutrino es una partícula sin masa?**

$\rightarrow$  Suposición del MODELO ESTÁNDAR

**1969**  $\Rightarrow$  Gribov y Pontecorvo explicar el número anómalo de neutrinos detectados por las oscilaciones de neutrinos, suponiendo que el neutrino tiene masa.

Nace y se detecta a través de las interacciones débiles como autoestados de **sabor** ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ ) y se propaga como autoestados de masa (1,2,3)

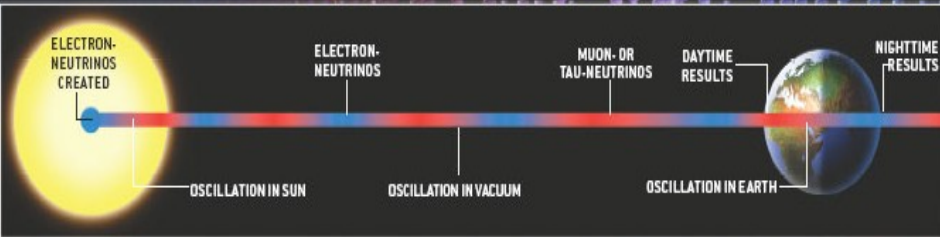
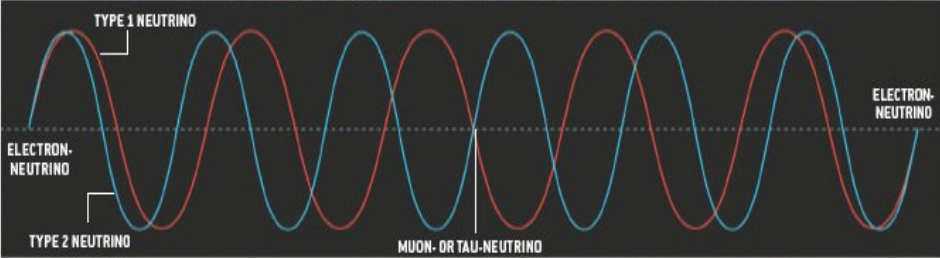
$\Rightarrow$  sabor a la conversión inducida por la masa de los neutrinos y los ángulos de mezcla

## 4. Oscilación de Neutrinos

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

PMNS matriz:  
 Describe eigenestados de sabor  
 como eigenestados de masa

$$\begin{aligned} U &= \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$



## WHERE NEUTRINOS OSCILLATE

The electron-neutrinos produced at the center of the sun may oscillate while they are still inside the sun or after they emerge on their eight-minute journey to the earth. Which oscillation occurs depends on details such as the mass differences and the intrinsic degree of mixing of type 1 and 2 neutrinos. Extra oscillation may also occur inside the earth, which manifests as a difference between daytime and nighttime results.

## 4.1. Oscilación Neutrinos en el vacío

Para simplificar consideremos la transformación unitaria de 2 especies de neutrinos:

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

con  $\theta$  el ángulo de mezcla al vacío y  $\Delta m^2 = |m_1 - m_2|$

La fracción de  $\nu_e$  que sobrevive como  $\nu_e$  se puede escribir como:

$$P_{surv} = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2}{E} L \right)$$

El mundo real de matriz 3x3  $\Rightarrow |P_{\nu_e \nu_e}| = \cos^4 \theta_{13} P_{surv} + \sin^4 \theta_{13}$

## 4.2. Oscilación de Neutrinos en la materia

Región de gran ángulo de mezcla ( $\Delta m^2 > 10^{-5} \text{ eV}^2$ )  
 la probabilidad de supervivencia durante el día es  $\Rightarrow$

$$P_{\nu_e \nu_e} = \cos^4 \theta_{13} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos 2\theta_{12}^M \cos 2\theta_{12} \right)$$

$\theta_{12}$ , ángulo de mezcla en el vacío  
 con  $\theta_{12}^M$ ,  $\cos 2\theta_{12}^M = f(\theta_{12}, \beta)$   
 $\beta$ , razón de la materia a efectos de vacío



## 4.3. Masas de los neutrinos

Electron Family	$\nu_e$	$< 15 \text{ eV}$
	$e^-$	$510999.06 \text{ eV}$
Mu Family	$\nu_\mu$	$< 170 \text{ keV}$
	$\mu^-$	$105658.389 \text{ keV}$
Tau Family	$\nu_\tau$	$< 18 \text{ MeV}$
	$\tau^-$	$1777.1 \text{ MeV}$

## 5. Implicancias y Conclusiones

- ▲ Los Neutrinos tienen masa
- ▲ La observación del sol y sus modelos permitio hacer este descubrimiento
- ▲ Neutrino = 2-3% de la energía del sol. (además de las ondas electromagnéticas)
- ▲ Validez de la estructura solar  $\Rightarrow$  modelo y evolución de las estrellas y la Evolución del Universo
- ▲ Mejora en instrumentos para medir oscilaciones de neutrinos
- ▲ Necesidad de mejorar la precisión de la diferencia de masa Responsable de oscilación, así como los ángulos de mezcla con Nuevos experimentos