

LA-CoNGA International Network School
Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia
6-8 de Diciembre de 2021

FÍSICA DE NEUTRINOS Y PARTICIPACIÓN LATINOAMERICANA

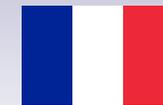
Carlos Javier Solano Salinas
UNI – UNMSM, Perú



Latin American alliance for
Capacity building in Advanced physics
LA-CoNGA physics



Cofinanciado por el
programa Erasmus+
de la Unión Europea





- Fisica Moderna
- Historia del Neutrino
- Revolucion del SNO-SK
 - Oscilaciones de neutrinos
 - Neutrino-Nucleus interaction:
 - MINERvA
- DUNE



Dos revoluciones científicas en la primera mitad del siglo XX

Relatividad

Relatividad Especial

- No podemos alcanzar a la luz.
- Masa es una forma de energía: $E = m c^2$

Relatividad General

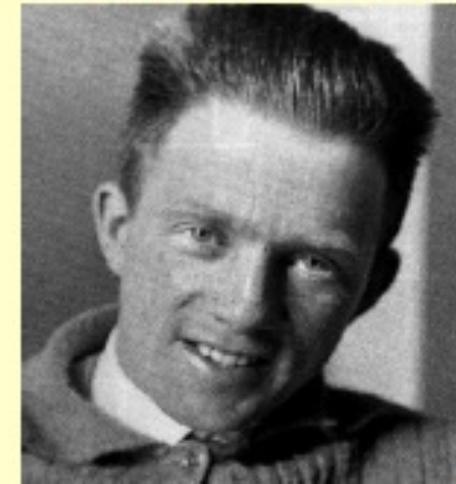
- GR abarca gravedad y describe el universo en expansión y los agujeros negros.



Mecánica Cuántica

Para describir cualquier cosa tan pequeña como un átomo se requiere el uso de la Mecánica Cuántica.

Principio de incertidumbre de Heisenberg





HISTORIA DE LOS NEUTRINOS



ν_e, ν_μ, ν_τ

Wolfgang Pauli

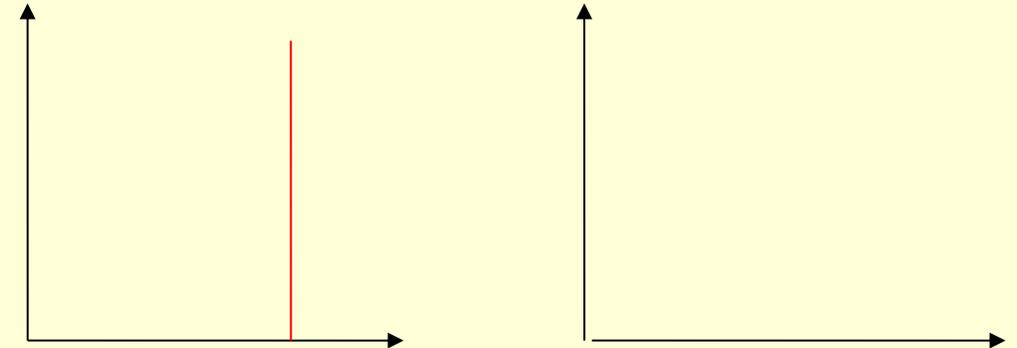
postuló la existencia de los

neutrinos

el

**4 de diciembre de
1930**

Propuestos por W. Pauli (1930)
para explicar el espectro continuo
de electrones en el decaimiento β
de neutrones





Propuestos por W. Pauli (1930) para explicar el espectro continuo de electrones en el decaimiento β de neutrones



con $\sigma \sim 10^{-44} \text{ cm}^2$

E. Fermi (1933-34) \rightarrow teoria de decaimiento Beta (interacciones debiles, neutrinos)

C. Cowman y F. Reines $\rightarrow \bar{\nu}_e$ (1956), Nobel 1995

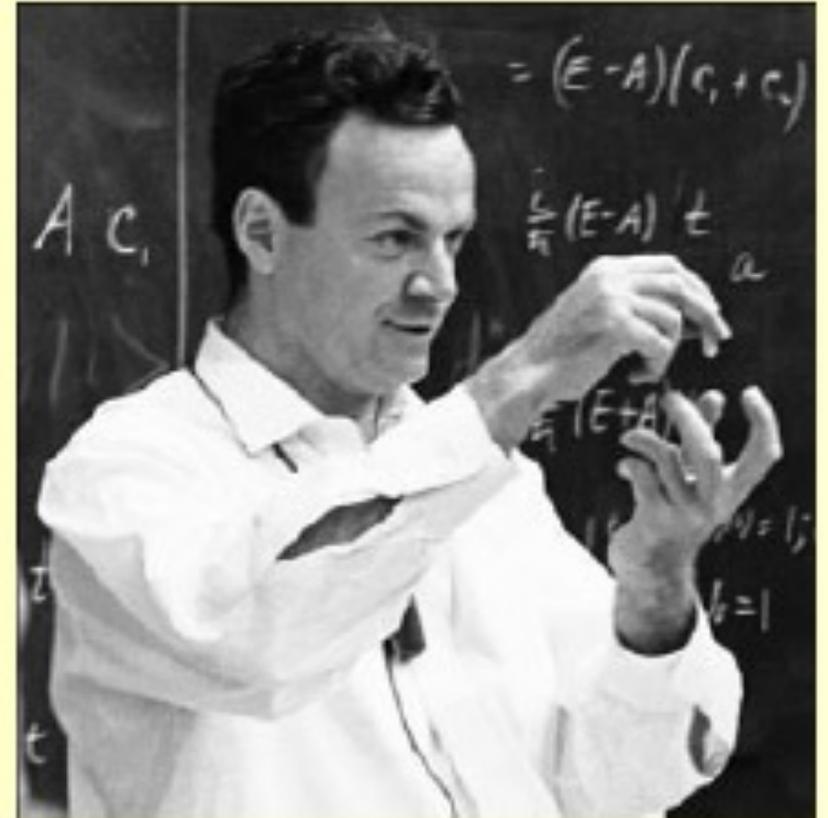
L.Lederman, M.Schwartz, J.Steimberger $\rightarrow \nu_\mu$ (1962), Nobel 1988



Uno de los grandes logros intelectuales de la segunda mitad del siglo XX

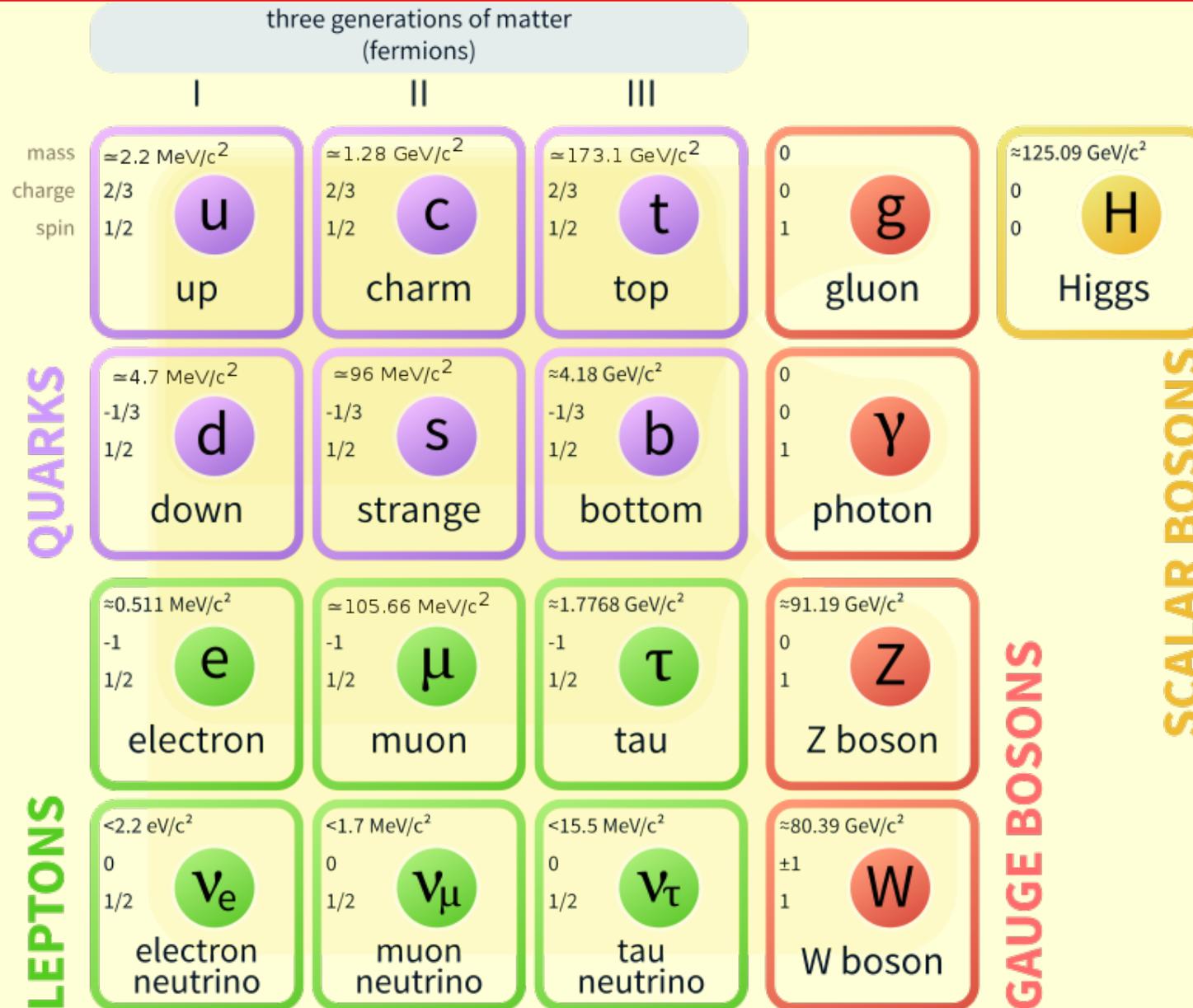
Está basada en la Teoría Relativista de Campos Cuánticos (QFT)

La primera QFT fue la teoría cuántica de Electricidad y Magnetismo (QED)





Modelo estandar de Particulas Elementales





Construyendo el Modelo Estándar : Escenario completo?

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c$$

QUARKS	mass	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0
	charge	2/3	2/3	2/3	0
	spin	1/2	1/2	1/2	1
		u up	c charm	t top	g gluon
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
LEPTONS	mass	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$
	charge	-1	-1	-1	0
	spin	1/2	1/2	1/2	1
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	± 1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	

En “este” Modelo Estándar:

La interacción débil es de largo alcance.

Las partículas no tienen masas.

Higgs, Brout, Englert proponen un mecanismo que rompe la simetría entre la interacción débil y electromagnética:

Mecanismo de BEH!!!



Construyendo el Modelo Estándar : Mecanismo de BEH

Se añade a la teoría un nuevo ingrediente : Campo escalar

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c + \psi_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. + |D_\mu\phi|^2 - V(\phi)$$

- llena el vacío del Universo
- interactúa con las demás partículas, rompiendo espontáneamente la simetría



Partículas masivas

Interacción débil de corto alcance

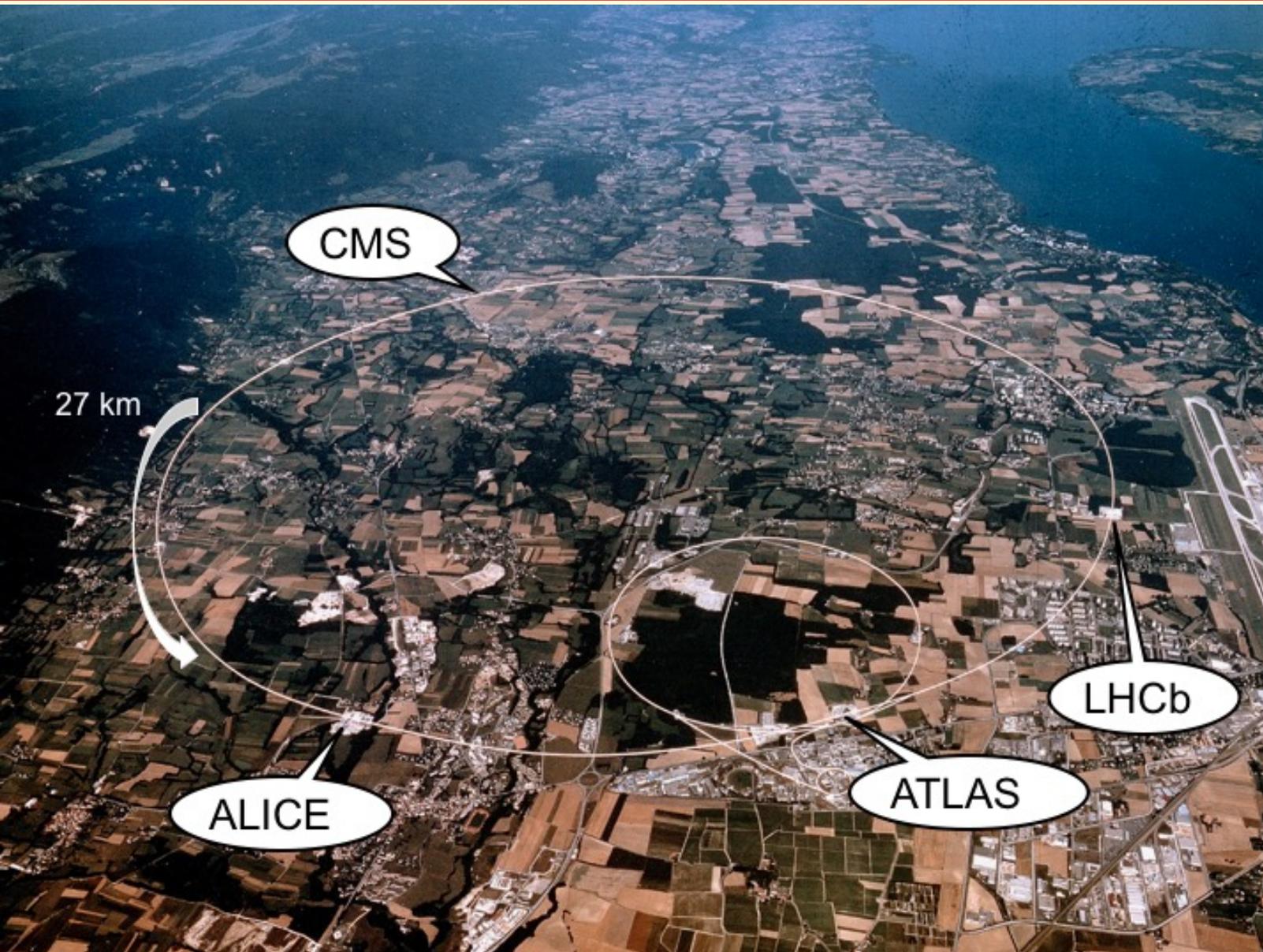
Aparece una nueva partícula : Bosón de Higgs

Escenario completo

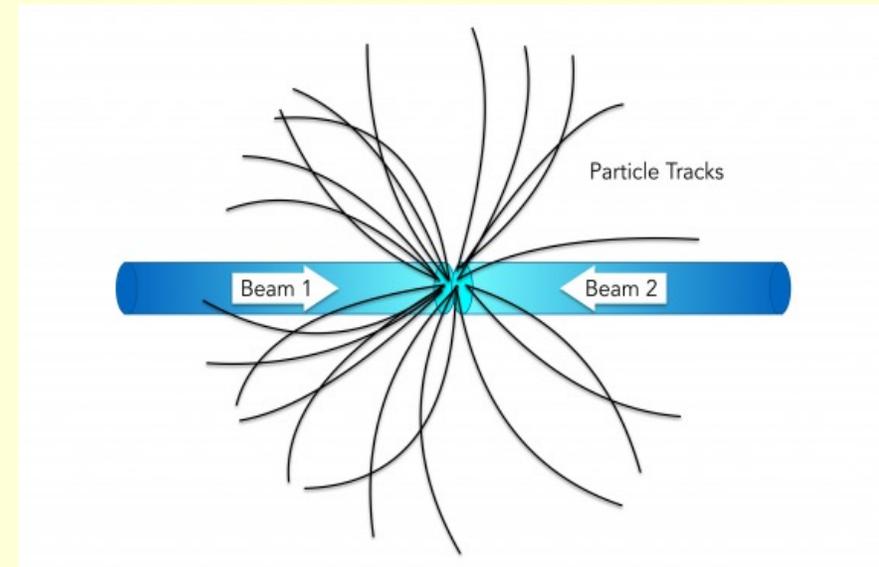
	mass charge spin	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ u up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ c charm	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ t top	0 0 1 g gluon	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 H Higgs
QUARKS		$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	0 0 1 γ photon	SCALAR BOSONS
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	GAUGE BOSONS
LEPTONS		$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e electron neutrino	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	



Como hallar el Higgs: El Gran Colisionador de Hadrones



En el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) protones colisionan casi a la velocidad de la luz.



Detectores repletos de tecnologías avanzadas examinan los restos de las colisiones



El boson de Higgs: La pieza que faltaba

	mass	charge	spin																									
QUARKS	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	u	up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	c	charm	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	t	top	0	0	1	g	gluon	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$	0	0	0	H	Higgs		
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	d	down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	s	strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	b	bottom	0	0	1	γ	photon								
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	e	electron	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	μ	muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$	τ	tau	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	0	1	1	Z	Z boson							
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$	ν_e	electron neutrino	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_μ	muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_τ	tau neutrino	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1	1	W	W boson							

El elusivo bosón de Higgs estuvo fuera del alcance de los físicos durante casi cinco décadas...



El boson de Higgs: ¡Lo encontramos!



CERN congratulates Englert and Higgs on Nobel in physics

The 2013 Nobel prize in physics has been awarded to François Englert and Peter Higgs for their theoretical work on the Higgs boson

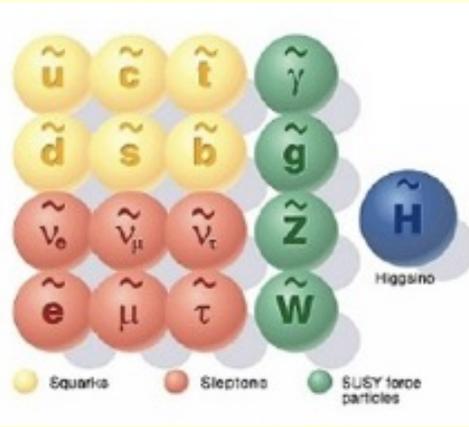
8 OCTOBER, 2013





Modelos más allá del Modelo Estándar

Supersimetría



	mass	charge	spin	particle
QUARKS	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	u (up)
	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	c (charm)
	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	t (top)
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	d (down)
	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	s (strange)
	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	b (bottom)
LEPTONS	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	e (electron)
	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	μ (muon)
	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$	τ (tau)
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$	ν_e (electron neutrino)
	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_μ (muon neutrino)
	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_τ (tau neutrino)
SCALAR BOSONS	0	0	1	g (gluon)
	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$	0	0	H (Higgs)
	0	0	1	γ (photon)
	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	0	1	Z (Z boson)
GAUGE BOSONS	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1	W (W boson)

Sector de Higgs no mínimo.
 Decaimientos invisibles.
 Higgs como portal a DM.
 Modelos extendidos: 2HDM, MSSM ...
 Charged scalars ...

Señales "Exóticas": gran variedad de modelos y teorías.

Bosones vectoriales pesados (Z' , W').
 Vector-like quarks, quarks excitados.
 Modelos de DM no supersimétricos.
 Lepto-quarks.

...

Introduce nuevas partículas que son los compañeras supersimétricas de las partículas del SM.
 Provee candidato para la DM.
 Unifica las fuerzas a una escala 10^{16} GeV

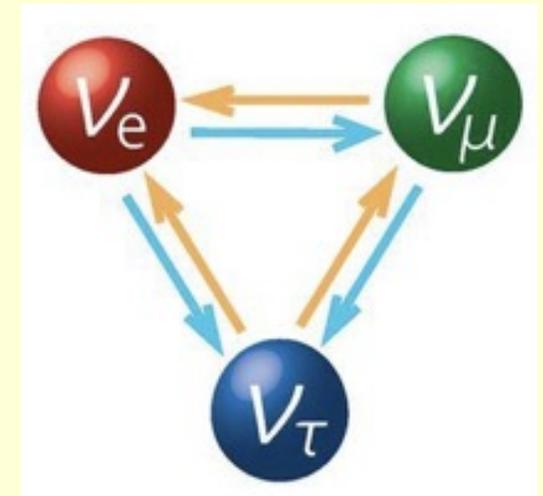
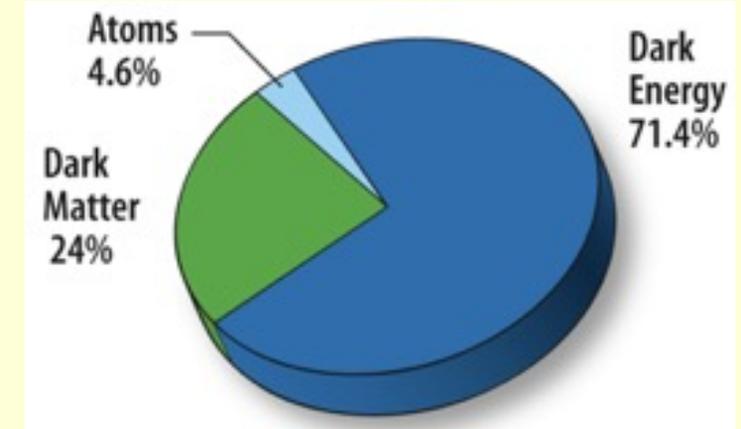


El Modelo Estándar: final de la historia?

Modelo Estándar (SM): descripción muy exitosa de algunos fenómenos conocidos.

Pero existen preguntas no resueltas por el SM:

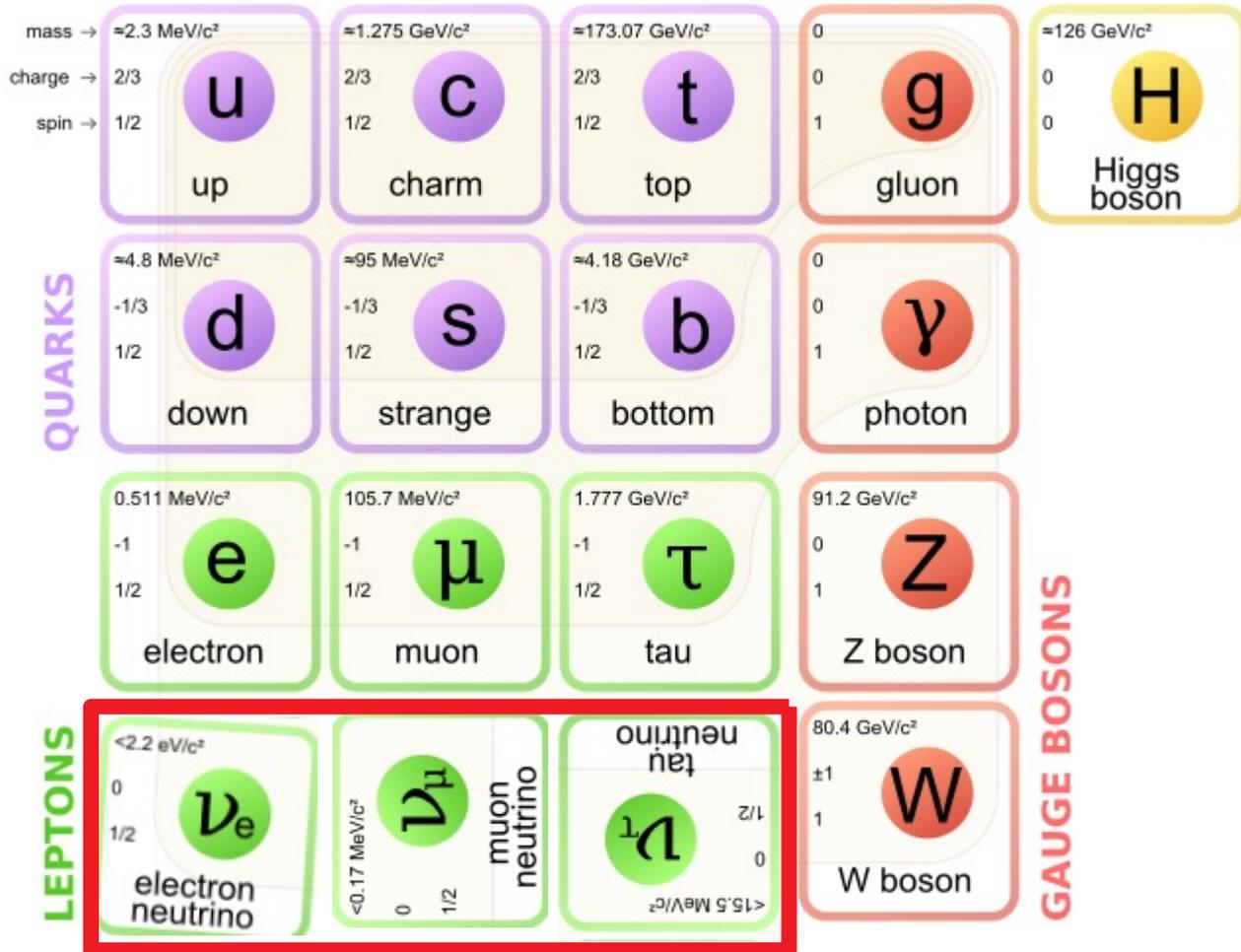
- Presencia de materia oscura (DM).
- Oscilación de neutrinos.
- No incluye una descripción de la gravedad.
- ...



Neutrinos la pieza que no encaja



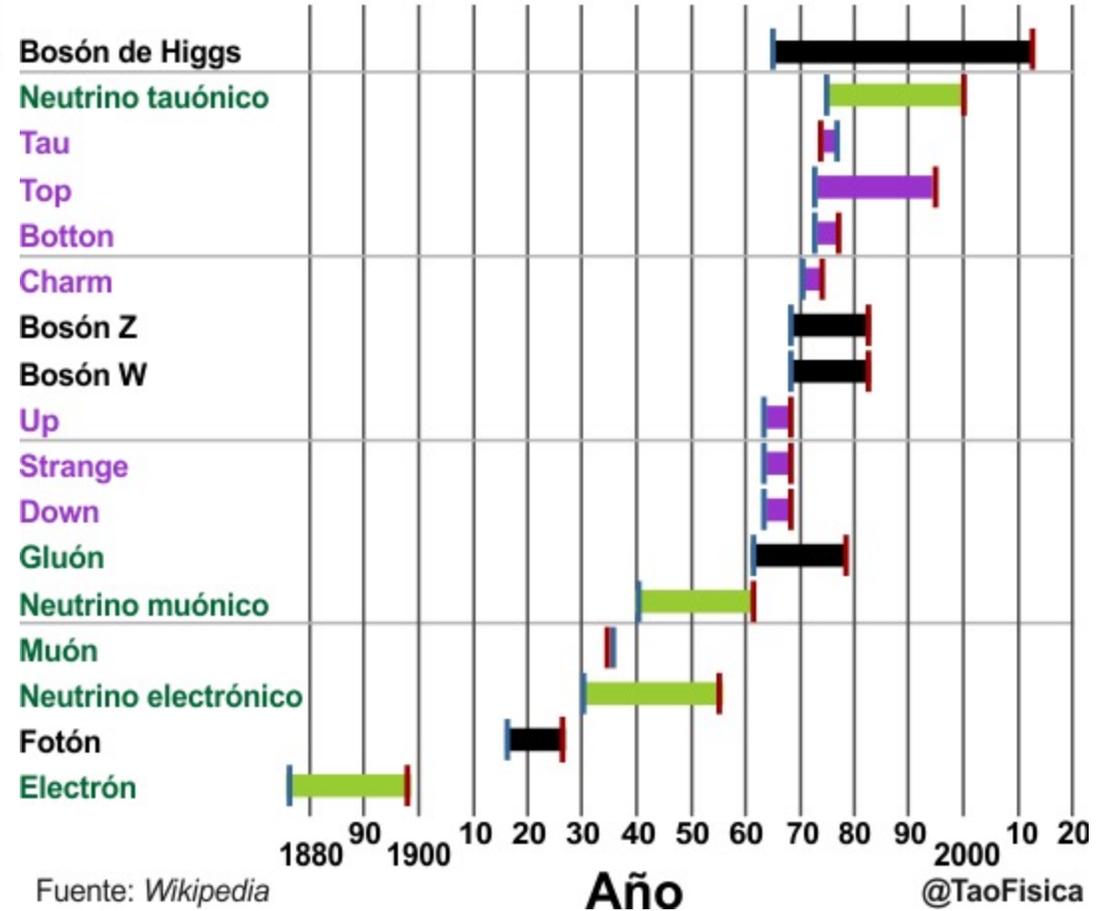
Neutrinos la pieza que no encaja



El modelo estándar de partículas físicas

Los años entre el concepto y el descubrimiento

■ Bosones
 ■ Leptones
 ■ Quarks
 ■ Teorizada/explicada
 ■ Descubierta





Neutrinos la pieza que no encaja

Neutrinos son las partículas más extrañas que hemos conocido.

Dieron problemas desde antes de su nacimiento, desde su concepción (**nació para salvar el principio de conservación de energía!!!**).

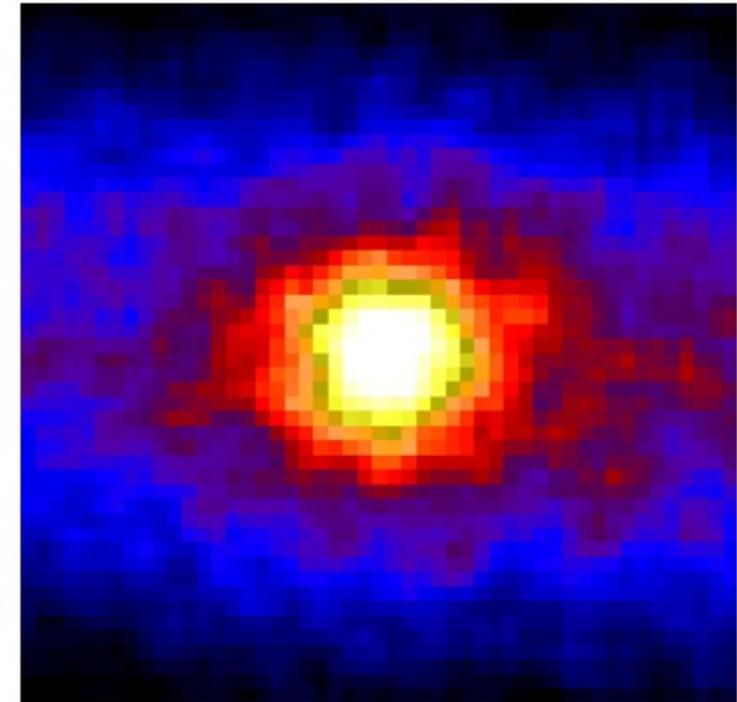
La materia es casi transparente a ellos.

Neutrinos del Big Bang

10 millones dentro de nosotros c/seg

Neutrinos del Sol

trillones cada segundo



El Sol visto con neutrinos



NEUTRINOS SON ESPECIALES

Los constituyentes de la materia:

Quarks, leptones cargados, neutrinos

Además de los neutrinos, el menos masivo de esos constituyentes es el electrón

Pero la $m \sim 10^{-(6-7)} m_e$

La masa de los neutrinos, aunque no es cero, es muy muy pequeñaaaaa



LOS NEUTRINOS Y EL UNIVERSO

Los fotones y los neutrinos son las partículas mas abundantes del Universo

Si deseamos entender el Universo debemos entender los neutrinos

Los neutrinos han jugado un rol en el modelamiento de la estructura de gran escala del Universo

Observaciones de esa estructura ha proporcionado información de la existencia de masa en los neutrinos

El mecanismo **See-Saw predice neutrinos **pesados**, **primos** de los neutrinos **livianos****

El exceso de esos neutrinos **pesados en el Universo primogenio puede haber dado origen al exceso de materia sobre anti-materia en el Universo actual**



NEUTRINOS SON ESPECIALES

LEPTOGÉNESIS

Probabilidad $[N \rightarrow e^- + \dots]$ Probabilidad $[N \rightarrow e^+ + \dots]$

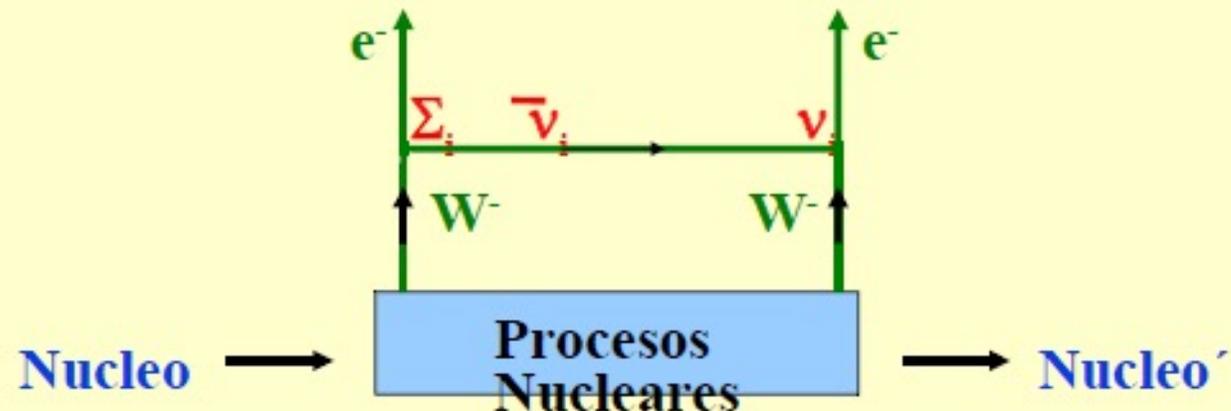
materia

antimateria

Son los neutrinos el origen de la Asimetría Materia-Antimateria del Universo?

PARA DEMOSTRAR QUE $\bar{\nu} = \nu$:

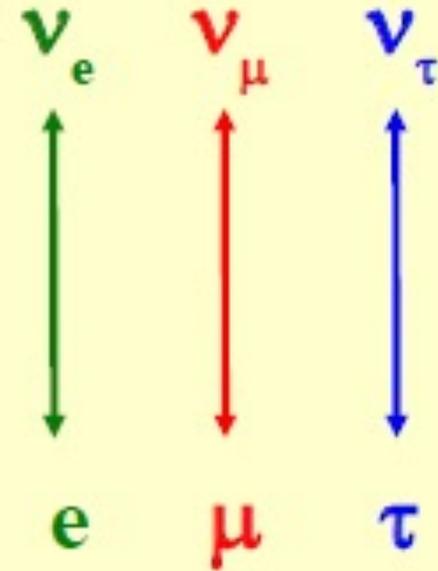
Decaimiento Doble Beta sin Neutrinos $[0\nu\beta\beta]$





Neutrinos vienen al menos en tres sabores

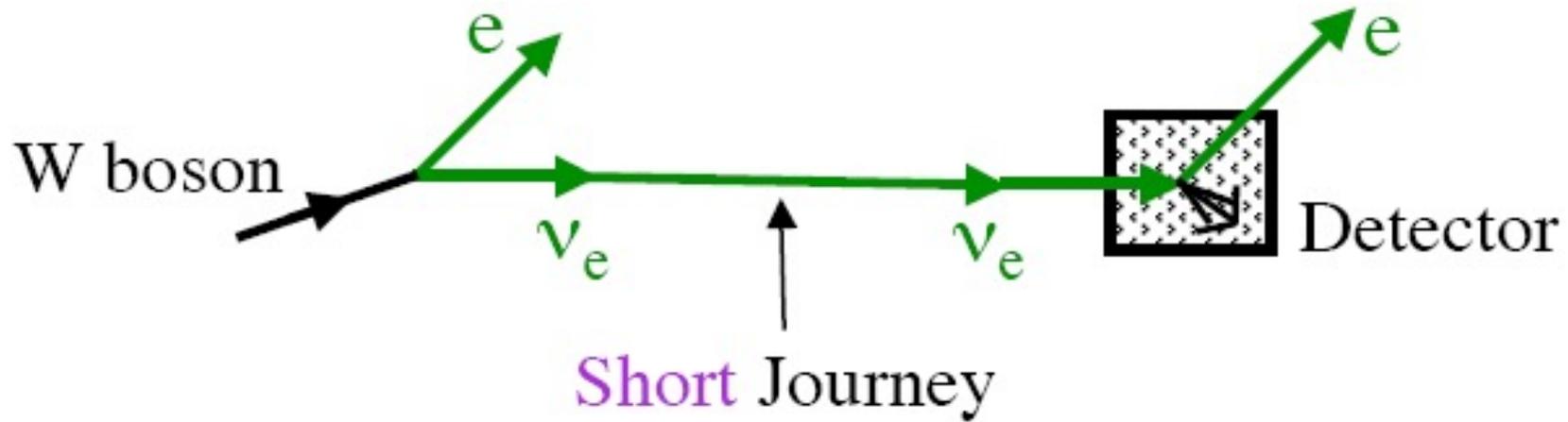
Los sabores conocidos de neutrinos:



Cada uno de ellos es **asociado**
con el correspondiente
lepton cargado:



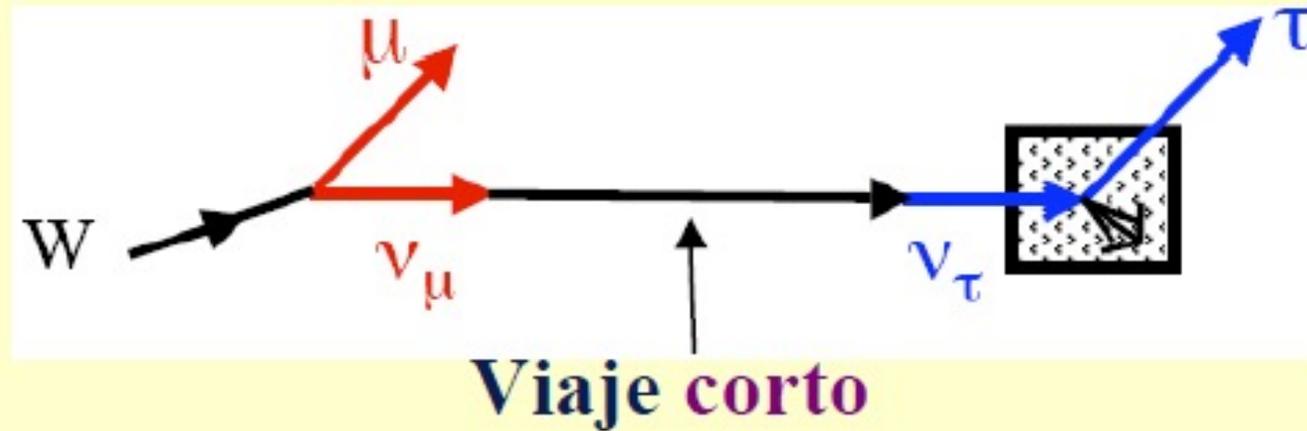
El significado de esta asociación





El significado de esta **asociación**

En distancias cortas los neutrinos no cambian de sabor



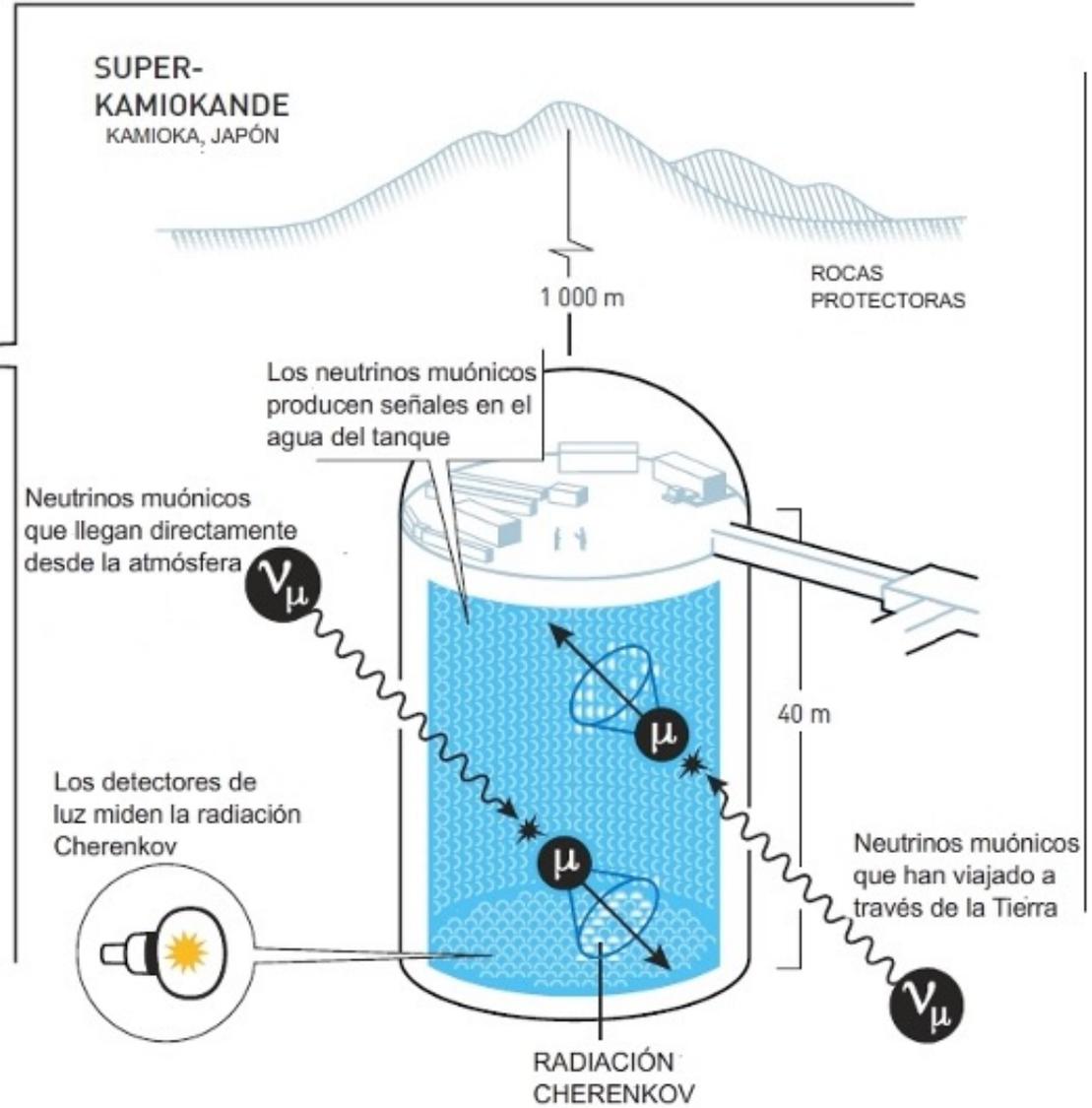
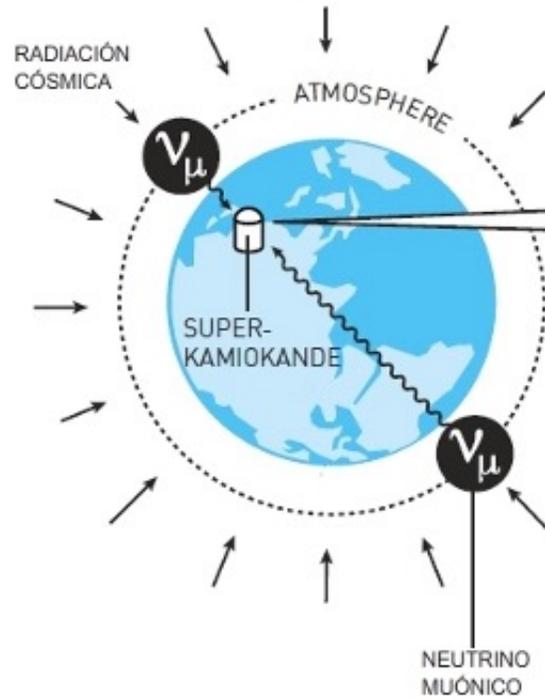
Esto no ocurre!!

Pero si los neutrinos tienen masa, y los leptones se mezclan, ocurren cambios en el sabor de los neutrinos en viajes **largos**



Neutrinos Atmosfericos

NEUTRINOS PROCEDENTES DE LA RADIACIÓN CÓSMICA





Neutrinos la pieza que no encaja (siguieron dando problemas!)

Isotropia de rayos cosmicos
> 2 GeV

+ Ley de Gauss +

No-desaparecimiento de ν_μ

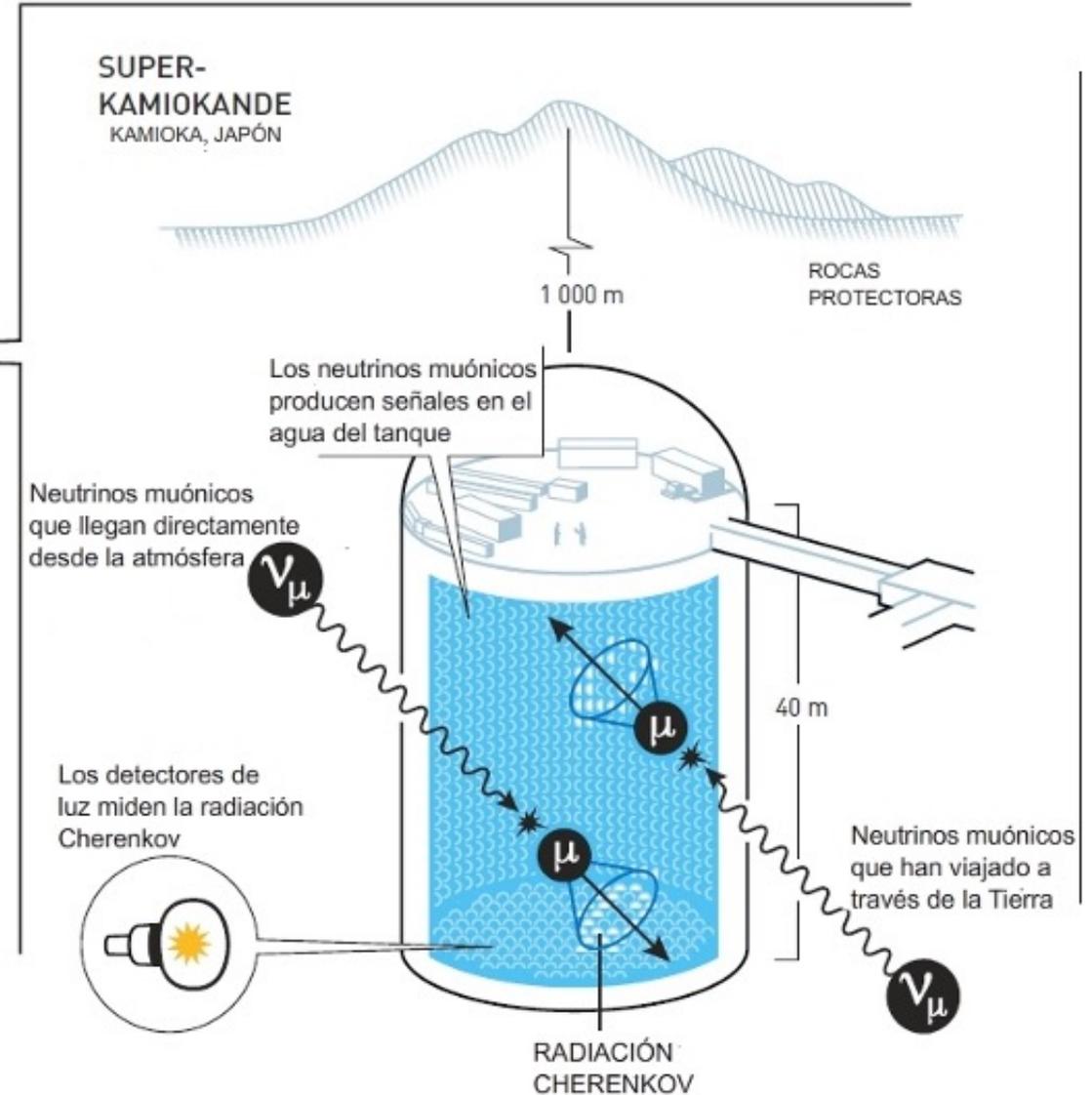
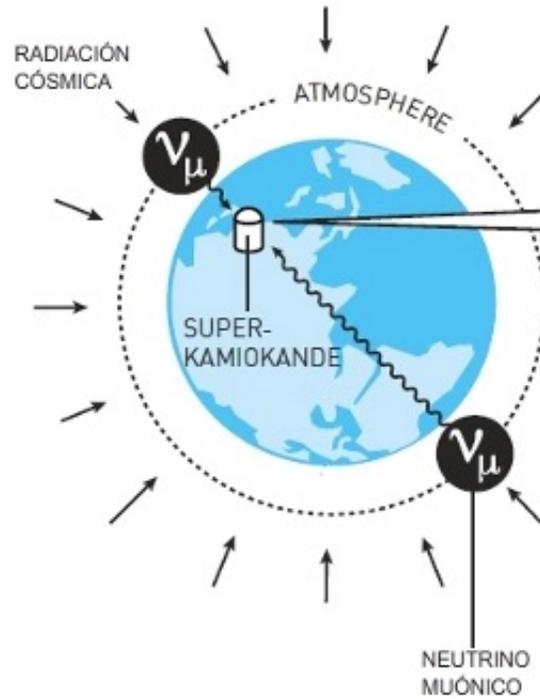
$$\Rightarrow \frac{\phi_{\nu_\mu}(Up)}{\phi_{\nu_\mu}(Down)} = 1$$

Pero Super-Kamiokande
(Japan) encuentra para
 $E_\nu > 1.3 \text{ GeV}$

$$\frac{\phi_{\nu_\mu}(Up)}{\phi_{\nu_\mu}(Down)} = 0.54 \pm 0.04$$



NEUTRINOS PROCEDENTES
DE LA RADIACIÓN CÓSMICA

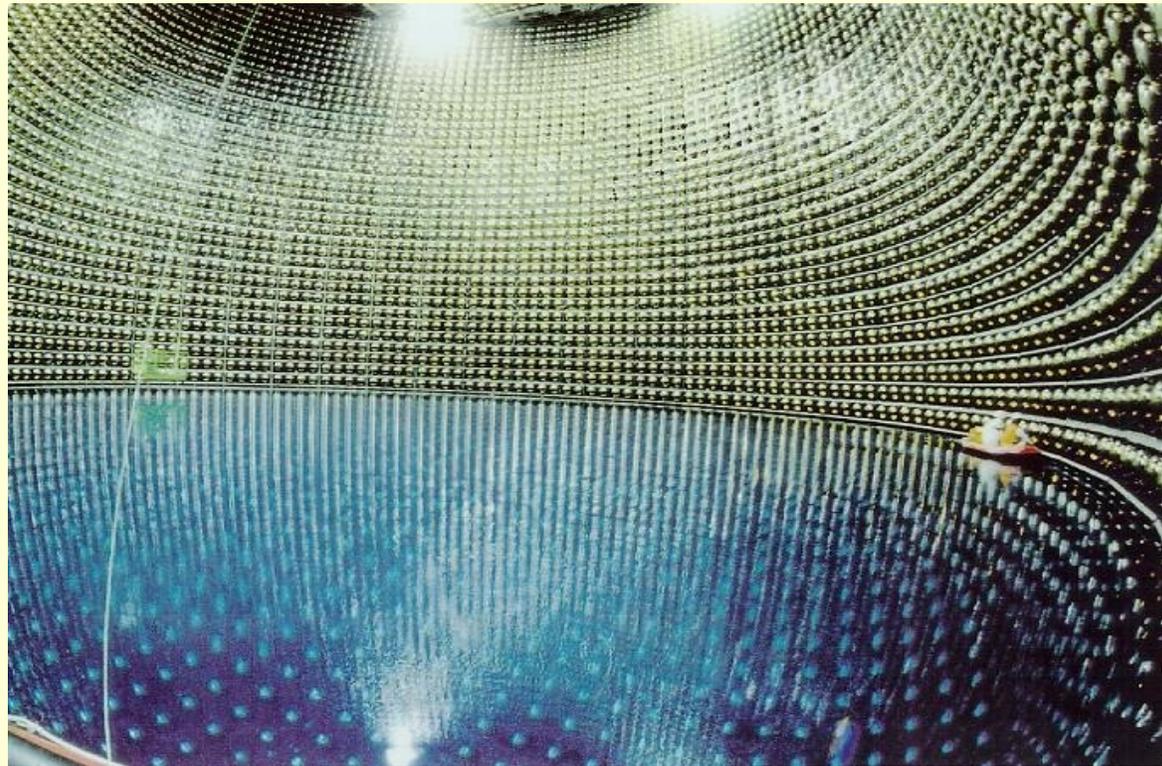




Observando Neutrinos



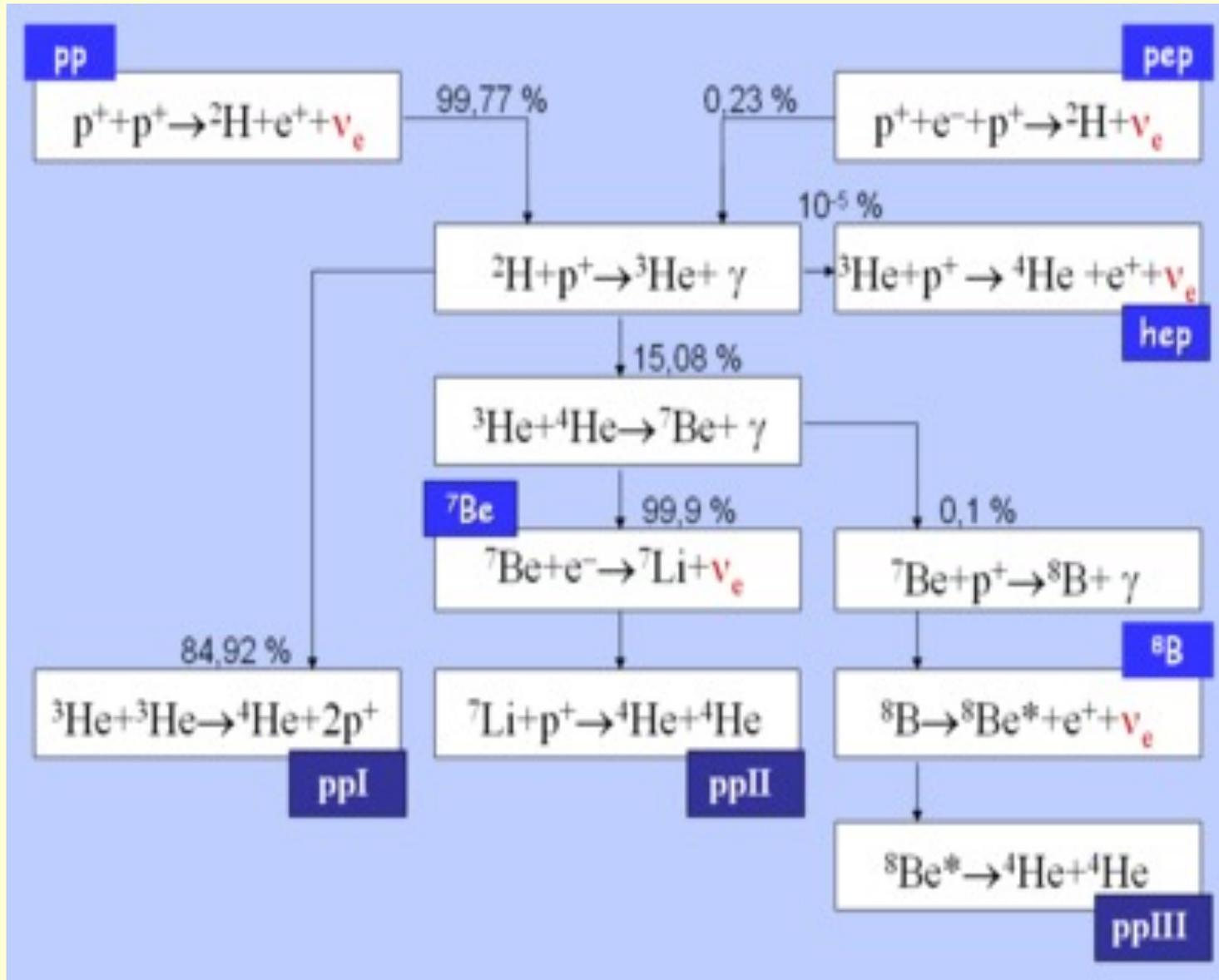
**Davis y Koshiba,
Nobel 2002**



Super-Kamiokande, detector de neutrinos



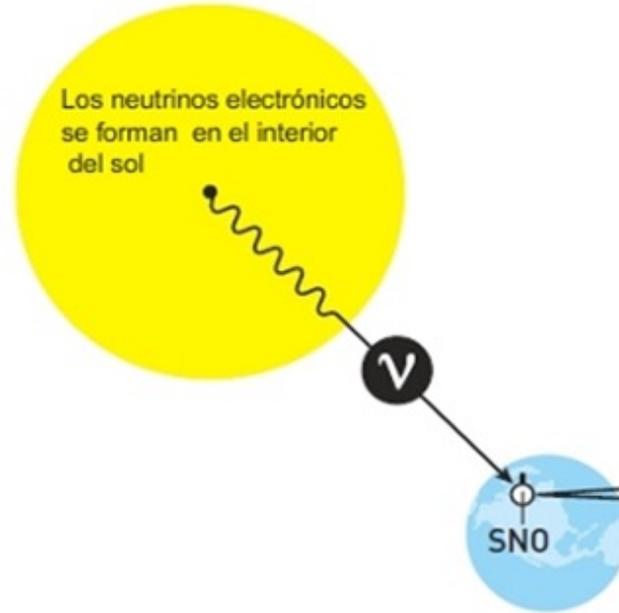
Neutrinos solares



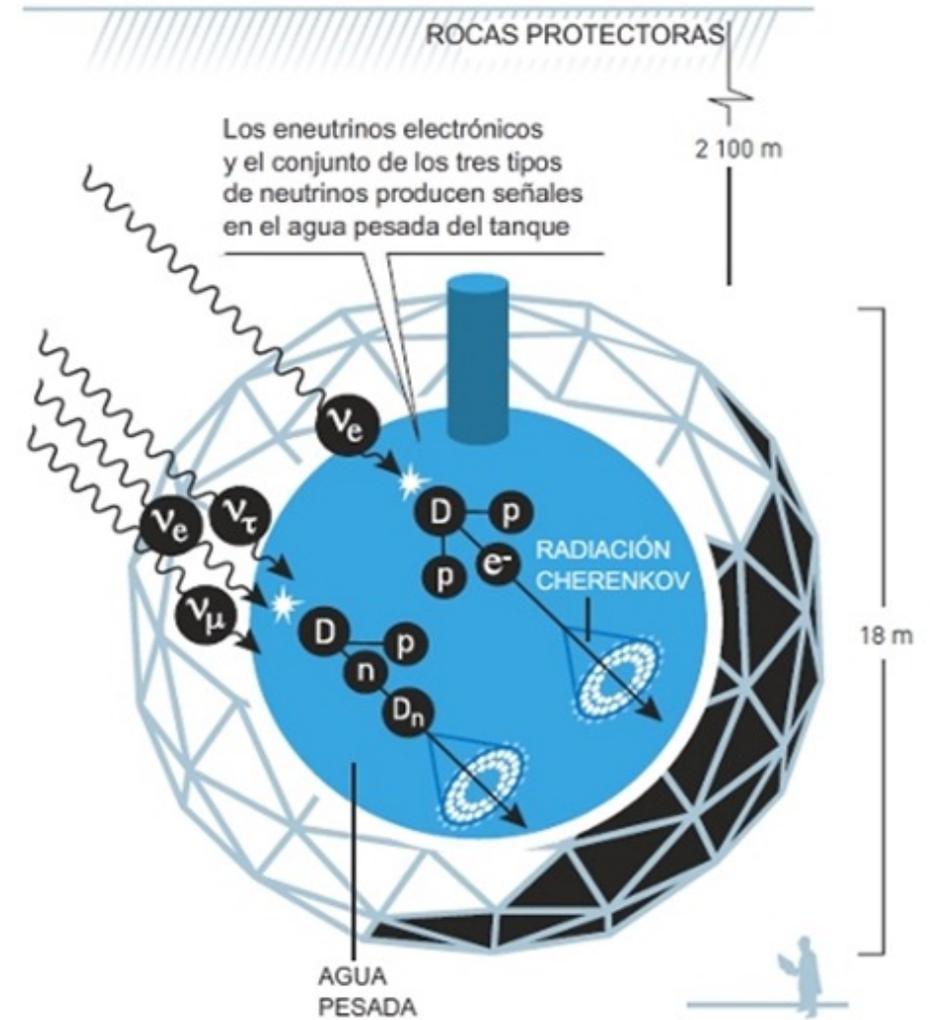


Neutrinos la pieza que no encaja (siguieron dando problemas!)

NEUTRINOS PROCEDENTES DEL SOL



SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY (SNO) ONTARIO, CANADA





Neutrinos la pieza que no encaja (siguieron dando problemas!)

NEUTRINOS PROCEDENTES DEL SOL



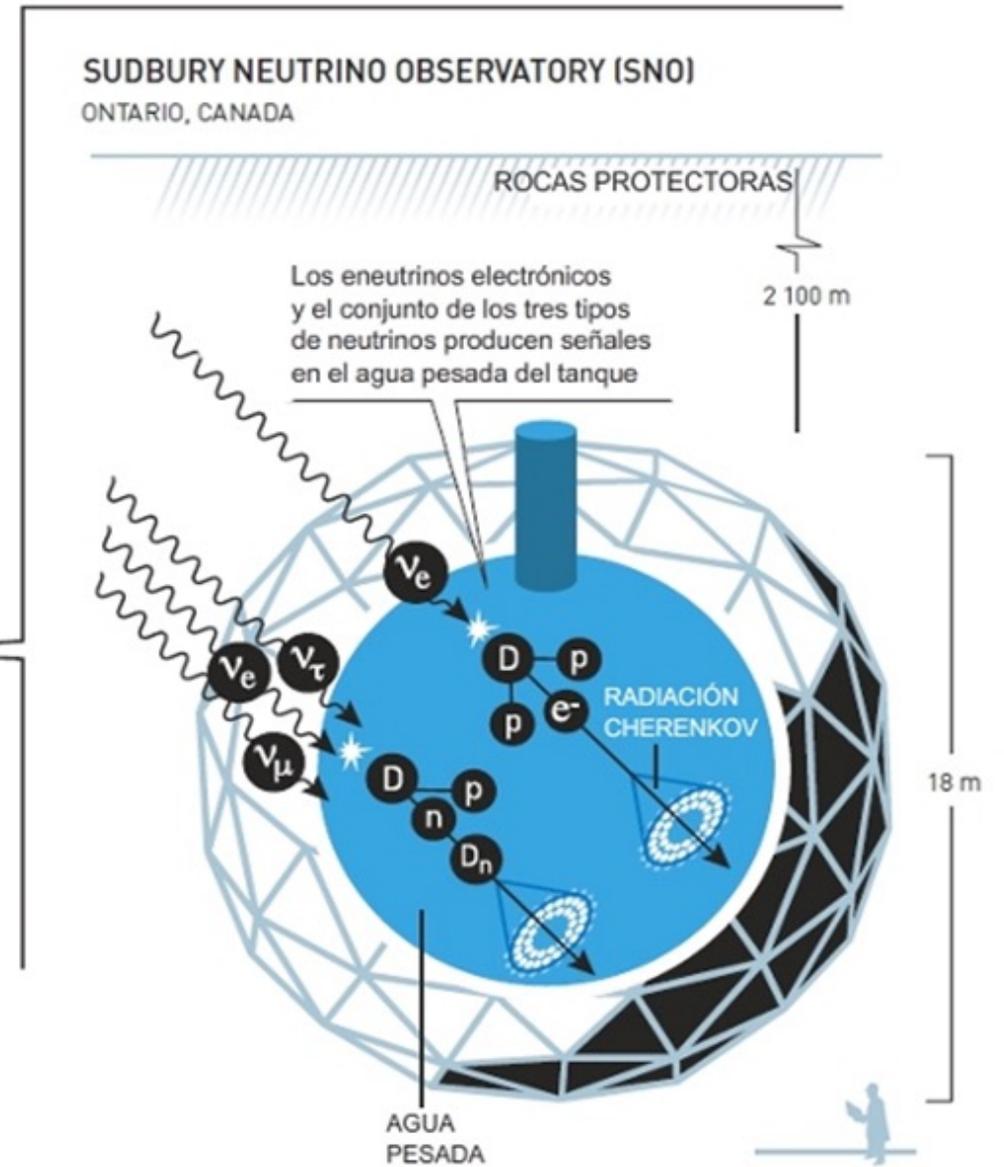
Los neutrinos electrónicos se forman en el interior del sol

ν



Experimento Homestake (USA) solo puede detectar ν_e
Encontro:

$$\frac{\phi_{\nu_e}(\text{Homestake})}{\phi_{\nu_e}(\text{Theory})} = 0.34 \pm 0.06$$





Neutrinos solares



Nobelpriset i fysik 2015

The Nobel Prize in Physics 2015

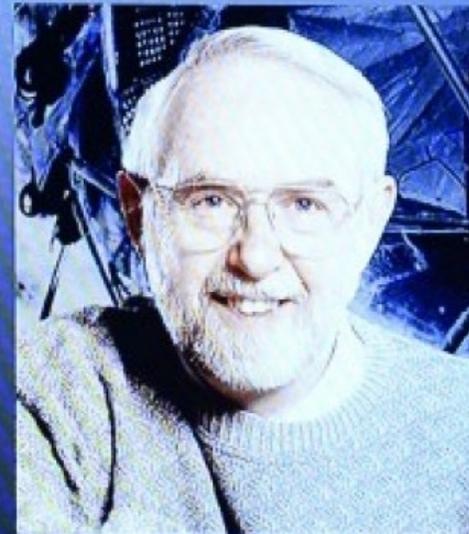
Nobelpriset i fysik 2015

KUNGL.
VETENSKAPS-
AKADEMIEN
THE ROYAL SWEDISH ACADEMY OF SCIENCES



Takaaki Kajita

Super-Kamiokande Collaboration
University of Tokyo, Kashiwa, Japan



Arthur B. McDonald

Sudbury Neutrino Observatory Collaboration
Queen's University, Kingston, Canada

"för upptäckten av neutrinooscillationer, som visar att neutriner har massa"
"for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"



¿Que paso?

Las posibilidades eran:

La teoría estaba errada

El experimento estaba errado

Ambos estaban errados

Ninguno estaba errado. $2/3$ de los ν_e cambian a un sabor de sabores que el experimento Homestake no podía ver

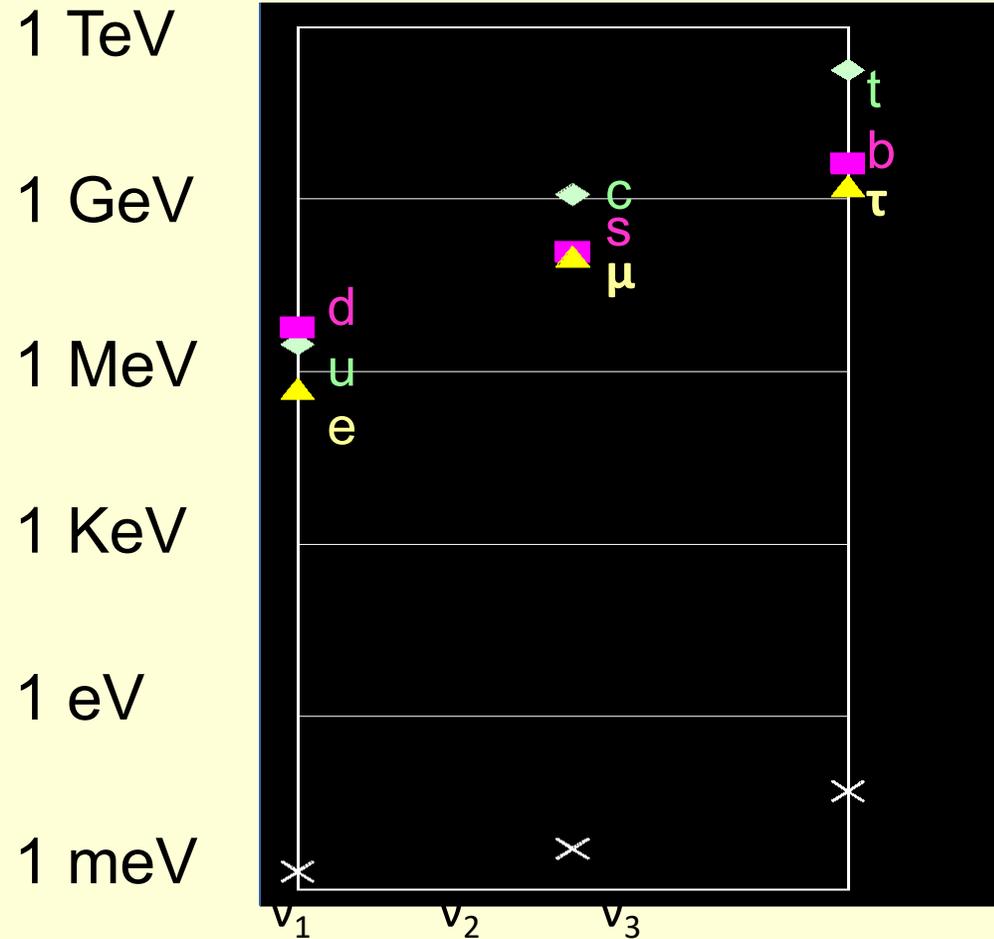


Neutrinos status (y ahora ya no darán problemas?)

Por 60 años pensamos que los neutrinos no tenían masa, como el fotón.

Ahora sabemos que tienen masa.

¿Pero cómo esa masa puede ser muchoooo menor que cualquier otra masa?



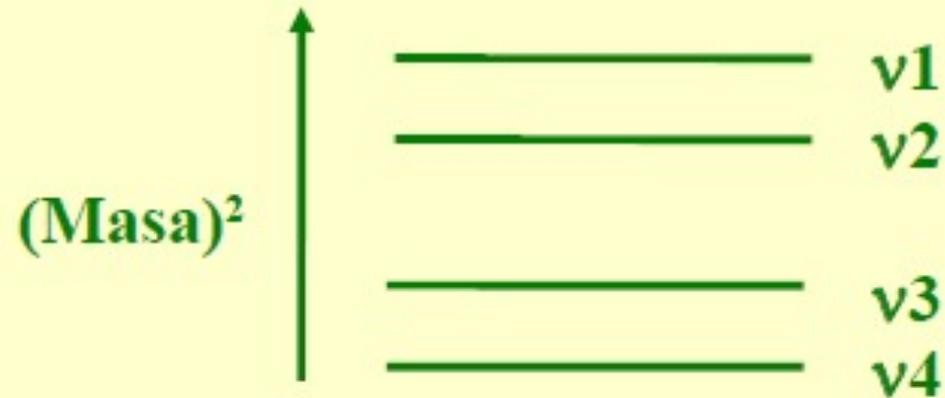
Masas de quarks y leptons



Asumamos que los neutrinos tienen masa y mezcla leptónica

Neutrinos con masa -

Hay algún espectro de 3 o mas autoestados ν_i de masa de neutrino:



$$\text{Masa } (\nu_i) = m_i$$



Oscilaciones de neutrinos

De acuerdo al Modelo Estándar, extendido para incluir masa en los neutrinos y mezcla leptónica -

El número de diferentes ν_i es igual al número de diferentes l_α (3)

La matrix de mezcla U es 3x3 y unitaria

Algunos modelos incluyen neutrinos “esteriles”, que no experimentan ninguna fuerza conocida excepto la gravedad

En esos modelos $N > 3$ ν_i y U es $N \times N$



Oscilaciones de neutrinos

La descripción de las **interacciones** del neutrino, según el **Modelo Estándar** (sin incluir masa ni mezcla leptónica), está **bien confirmada**

Asumamos que es correcto y extendámoslo para incluir mezcla (mixing)

Para el acoplamiento de leptones al boson W tenemos:

$$L_{SM} = -\frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{\alpha=e,\mu,\tau} \left(\overline{\ell}_{L\alpha} \gamma^\lambda \nu_{L\alpha} W_\lambda^- + \bar{\nu}_{L\alpha} \gamma^\lambda \ell_{L\alpha} W_\lambda^+ \right)$$

Left-handed

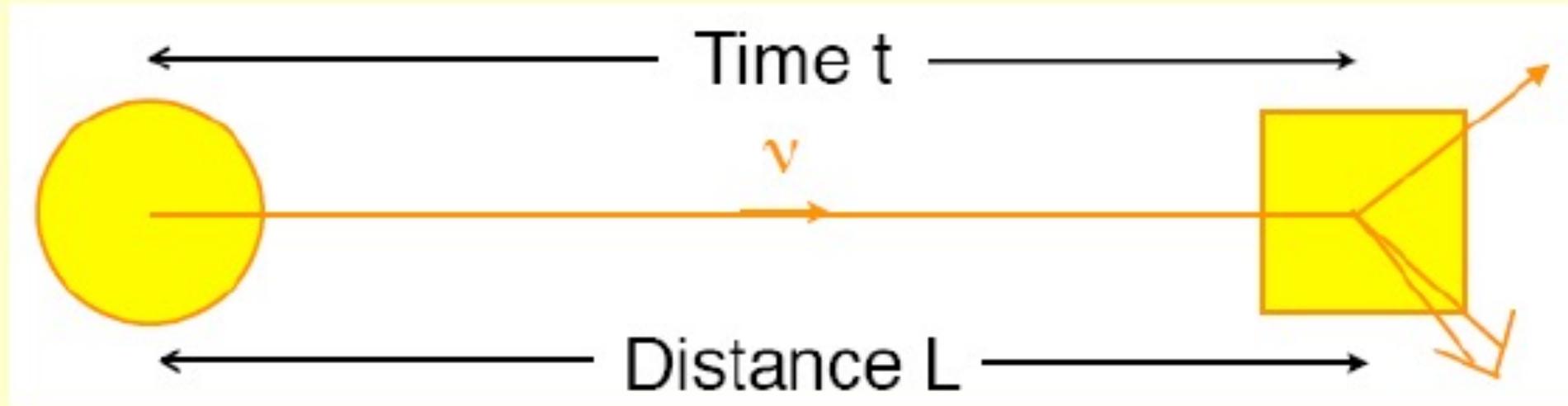
$$= -\frac{g}{\sqrt{2}} \sum_{\substack{\alpha=e,\mu,\tau \\ i=1,2,3}} \left(\overline{\ell}_{L\alpha} \gamma^\lambda U_{\alpha i} \nu_{Li} W_\lambda^- + \bar{\nu}_{Li} \gamma^\lambda U_{\alpha i}^* \ell_{L\alpha} W_\lambda^+ \right)$$

Tomando en cuenta la mezcla



¿Como estudiar los neutrinos?

En el sistema de Laboratorio -



El experimento fija L y t

Estos son comunes a todos los componentes del haz



Probabilidad para Oscilacion de neutrinos en el vacio

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) &= |\text{Amp}(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)|^2 = \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2\left(\Delta m_{ij}^2 \frac{L}{4E}\right) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \Im(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin\left(\Delta m_{ij}^2 \frac{L}{2E}\right) \end{aligned}$$

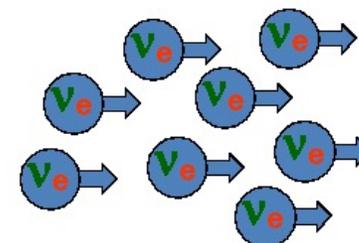
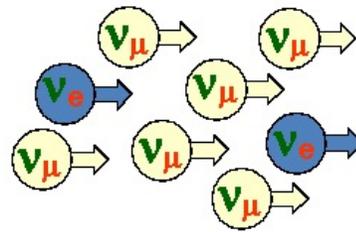
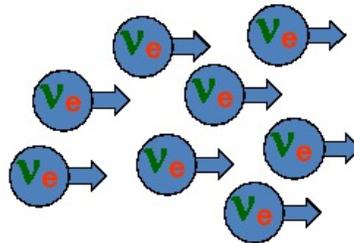
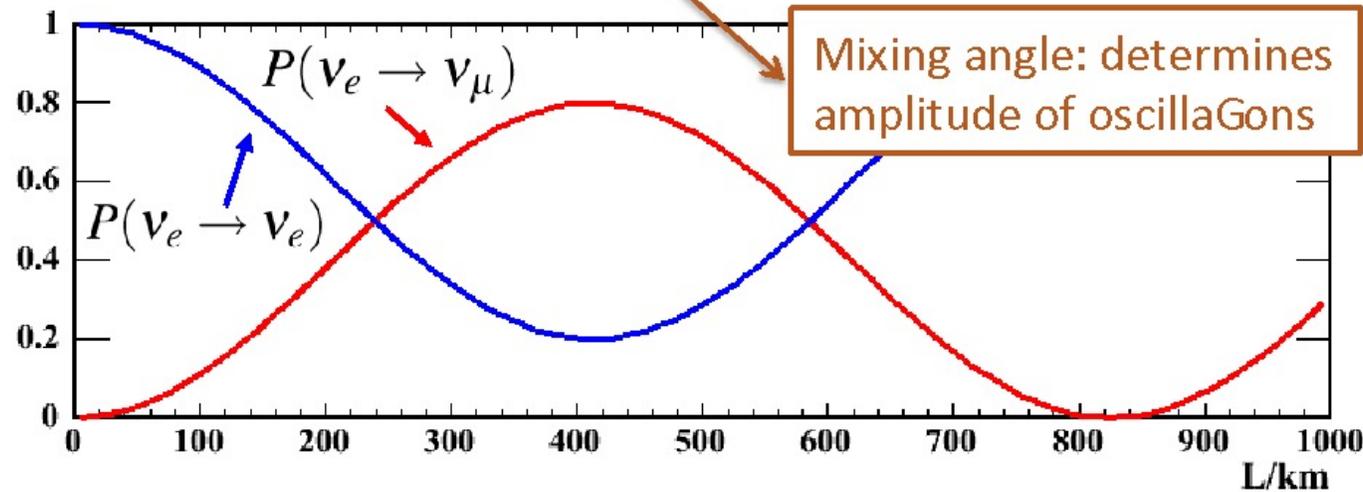
where $\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$



Probabilidad para Oscilacion de neutrinos en el vacio

- With some simple algebra, the oscillation probability

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(2\theta) \sin^2 \left[1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E [\text{GeV}]} \right]$$





¿Que hemos visto hasta ahora?

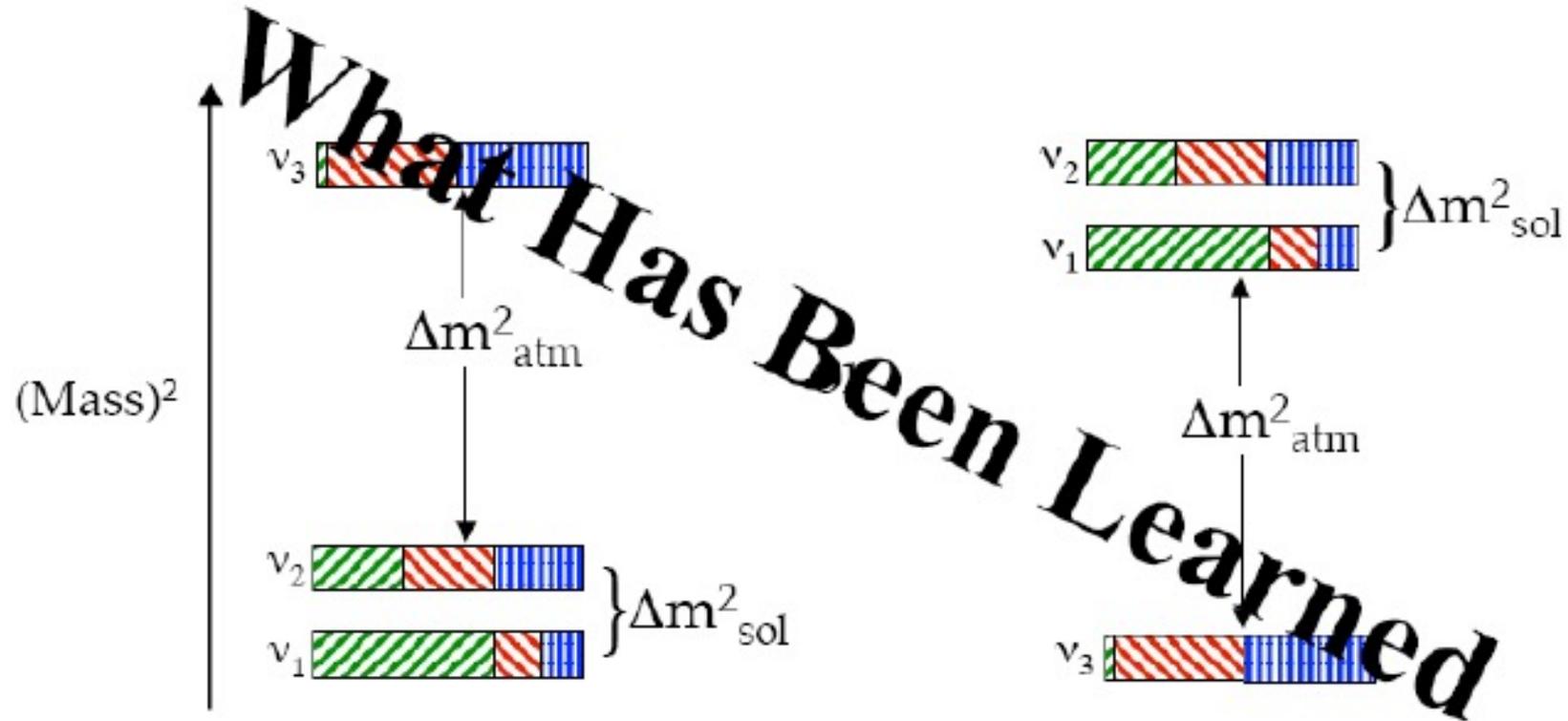
A large, textured sphere, possibly representing a planet or a celestial body, is the central focus. The sphere has a complex, cracked, and metallic-looking surface. In the center of the sphere, there is a circular area with a smoother, brownish texture. Overlaid on this central area is the text "What Has Been Seen" in a blue, serif font with a white outline. The background is dark, suggesting space.

**What Has
Been Seen**



¿Que hemos aprendido hasta ahora?

The Neutrino Mass Spectrum



Normal

Inverted

 $\nu_e [|U_{ei}|^2]$

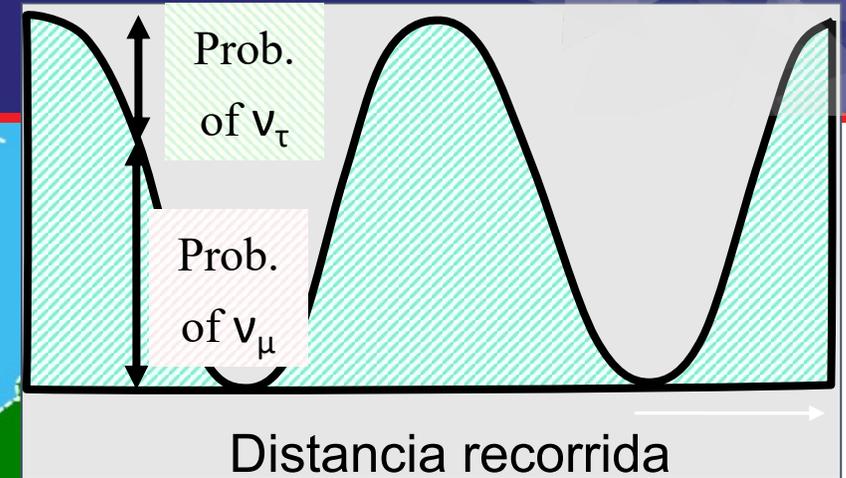
 $\nu_\mu [|U_{\mu i}|^2]$

 $\nu_\tau [|U_{\tau i}|^2]$



Experimentos con haces de neutrinos

Cómo se estudia a un fantasma?



T2K (Tokai to Kamioka)



Centro de Investigación Subterráneo de Sanford (SURF)

Laboratorio Nacional Acelerador Fermi (Fermilab)

1,300 km

Detector de partículas

Producción de neutrinos

DUNE DEEP UNDERGROUND NEUTRINO EXPERIMENT

UAN UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO



Observatorios de neutrinos





Experimentos de neutrinos de reactores





¿Cuales son las preguntas abiertas en Fisica de Neutrinos?

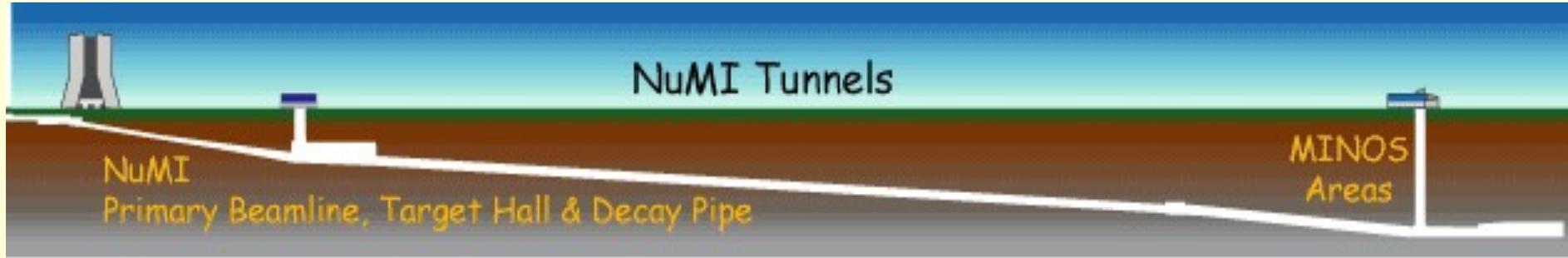
¿Cuales son la preguntas abiertas en la Física de Neutrinos?

- ◆ ¿Cuáles son las masas de los neutrinos?
- ◆ ¿Cuál es el patrón de mezcla entre los diferentes tipos de neutrinos?
- ◆ ¿Son los neutrinos sus propias antipartículas?
- ◆ ¿Violan los neutrinos la simetría CP?
- ◆ ¿Hay neutrinos “estériles”?
- ◆ ¿Tienen los neutrinos propiedades no esperadas o exóticas?
- ◆ ¿Qué pueden decirnos los neutrinos sobre modelos de nueva Física mas allá del Modelo Estándar?

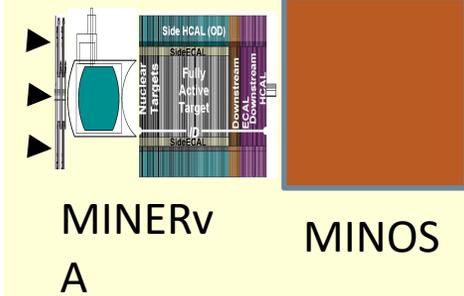
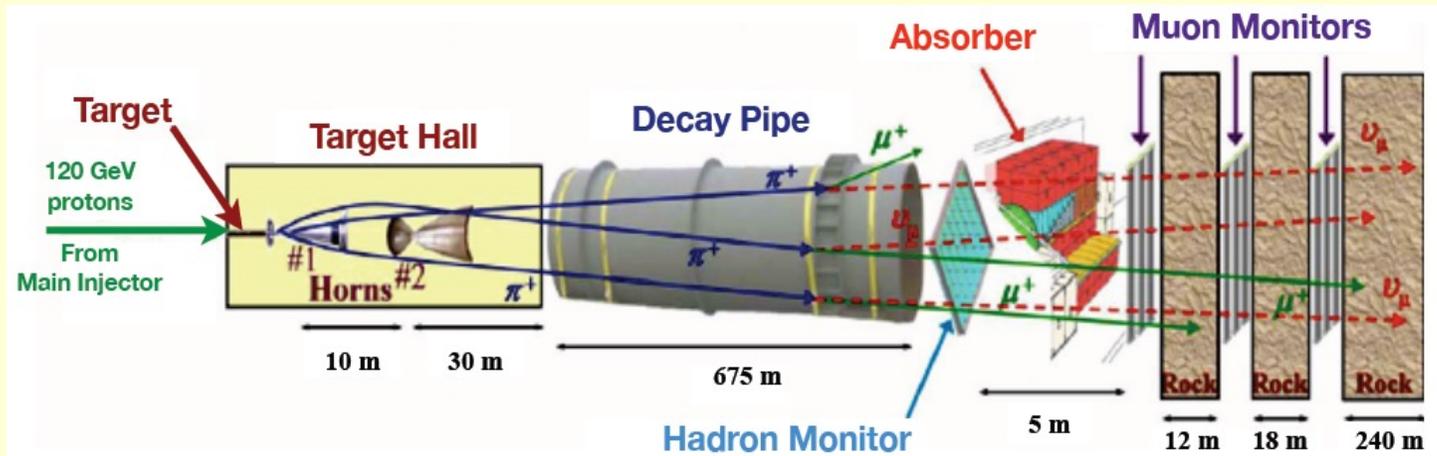
¡La respuesta a cada una de esas preguntas implica un entendimiento de la interacción de los neutrinos con la materia!



Beam-line

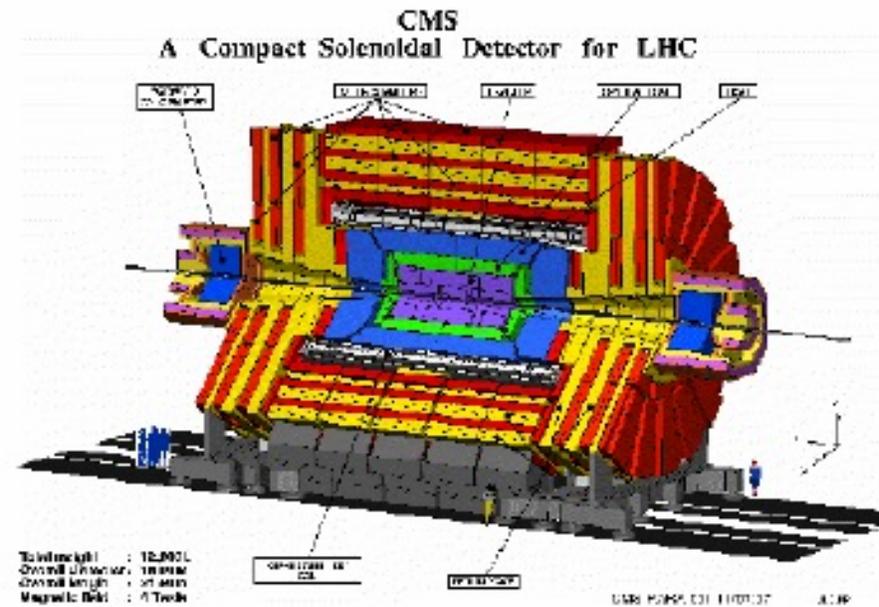
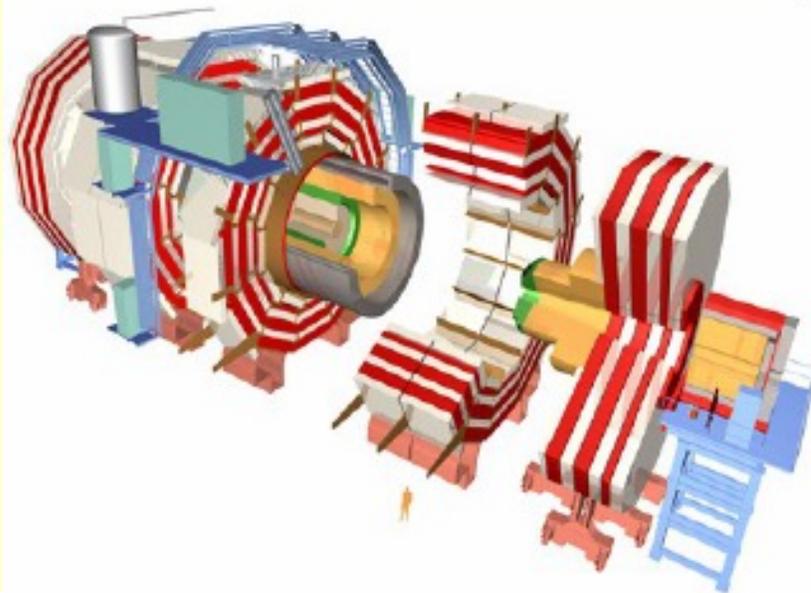


NuMI Beamline Graphic courtesy B. Zwaska





Tipos de Espectrometros ATLAS-LHC Detector



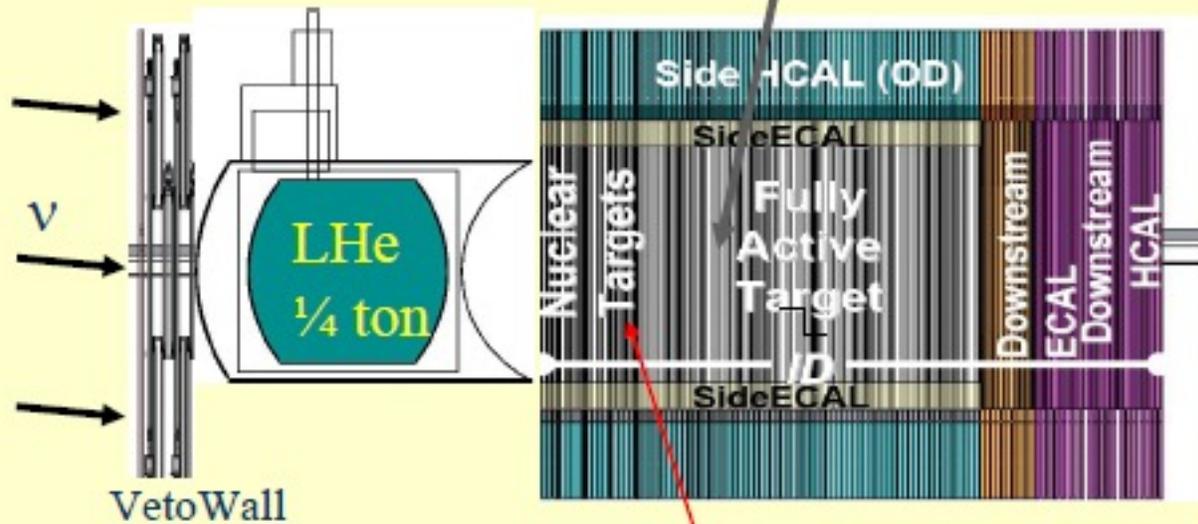


Detector MINERvA



120 “modulos” planos. Masa total: 200 tons. Total canales: ~32K

Blanco centellador finamente segmentado y completamente activo. 8.3 tons, 3 tons fiducial



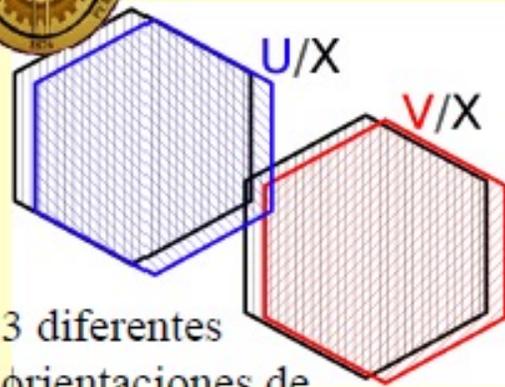
**MINOS Near Detector
(Muon Spectrometer)**

Blancos Nucleares con He, C, Fe, Pb, H₂O, CH

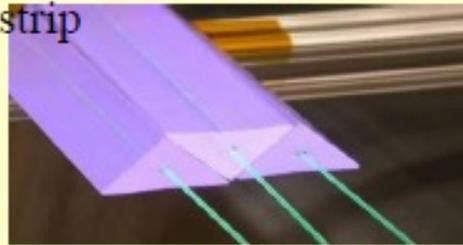
En mismo experimento reduce errores sistematicos entre nucleos



Tracking Scintillator Planes

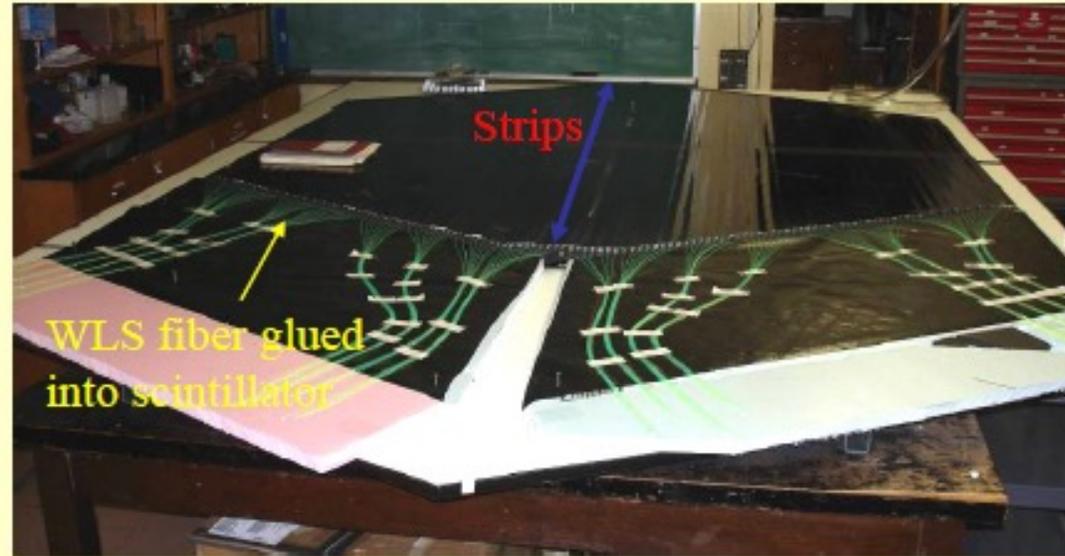
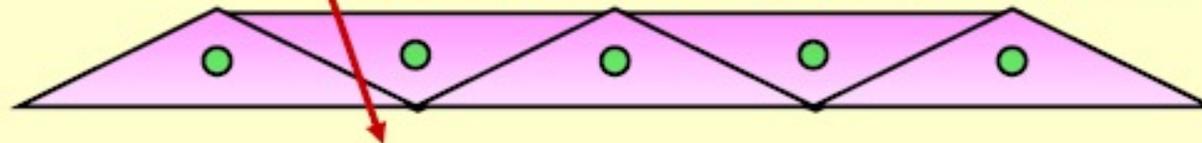


3 diferentes orientaciones de strip



Particula

Posicion determinada por carga compartida



Fibras reflejadas en extremo lejano. Extremo cercano terminado en conector óptico, pulido, con luz dirigida.



DUNE

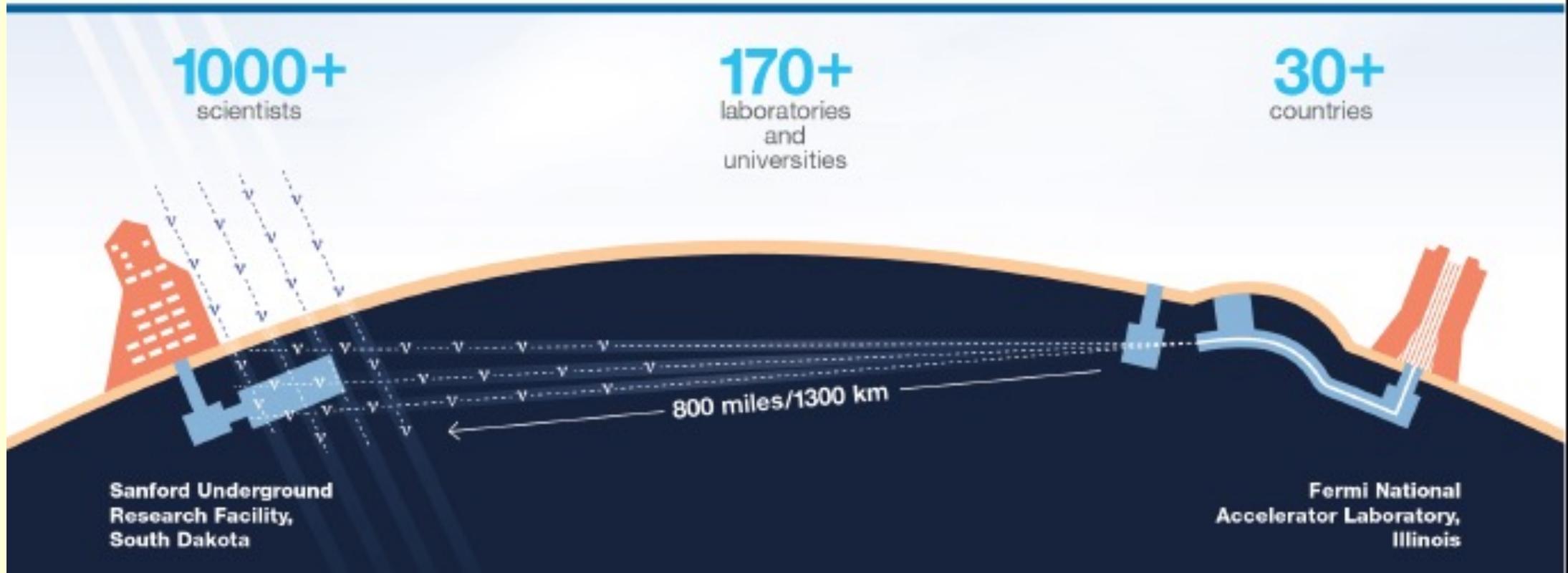
DUNE

DEEP UNDERGROUND NEUTRINO EXPERIMENT

1000+
scientists

170+
laboratories
and
universities

30+
countries



Sanford Underground
Research Facility,
South Dakota

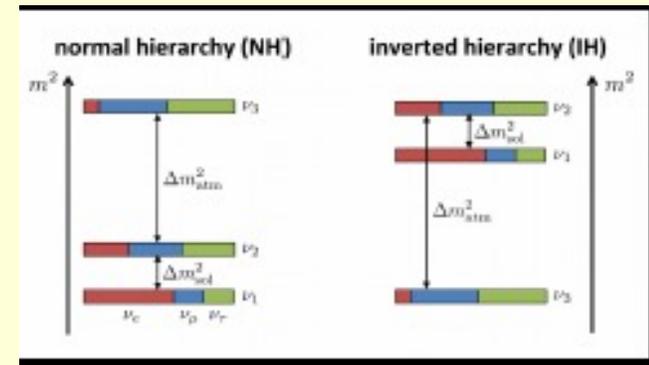
Fermi National
Accelerator Laboratory,
Illinois



Objetivos principales de DUNE

Oscilaciones de neutrinos: medicion precisa de los parametros de oscilacion

Determinar el orden correcto de las masas de neutrinos



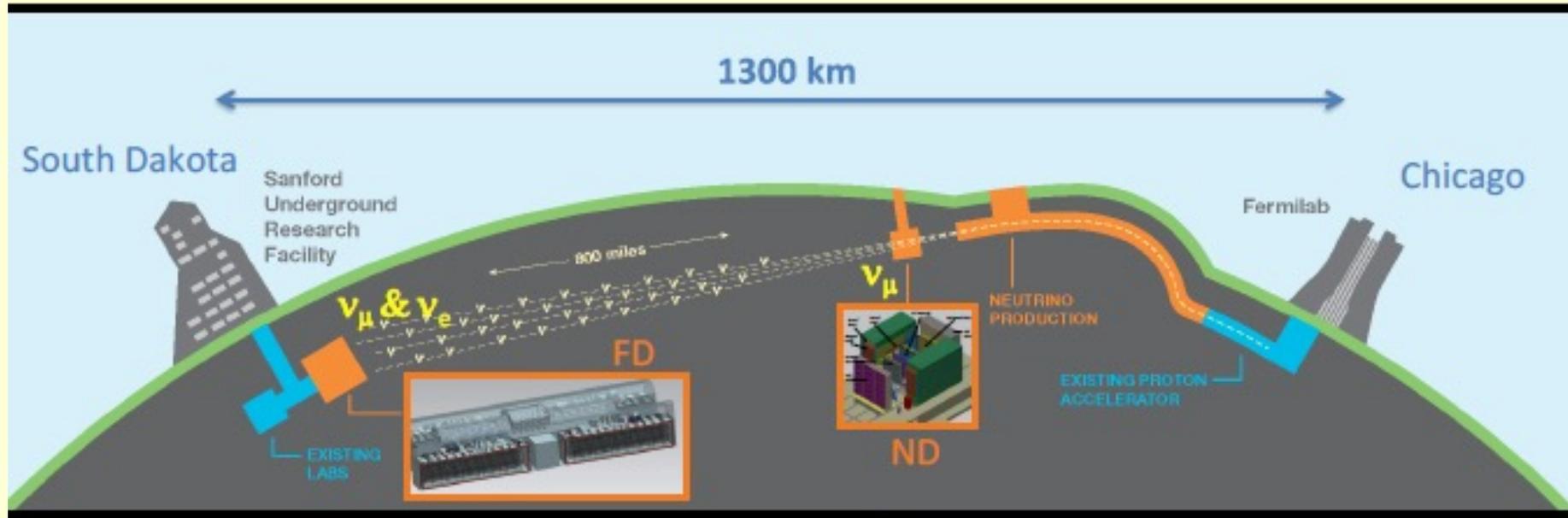
Proporcionar evidencia a favor o en contra de la violacion de CP

Estudio del decaimiento del proton (predicho por GUTs : $p \rightarrow K^+ \nu$)

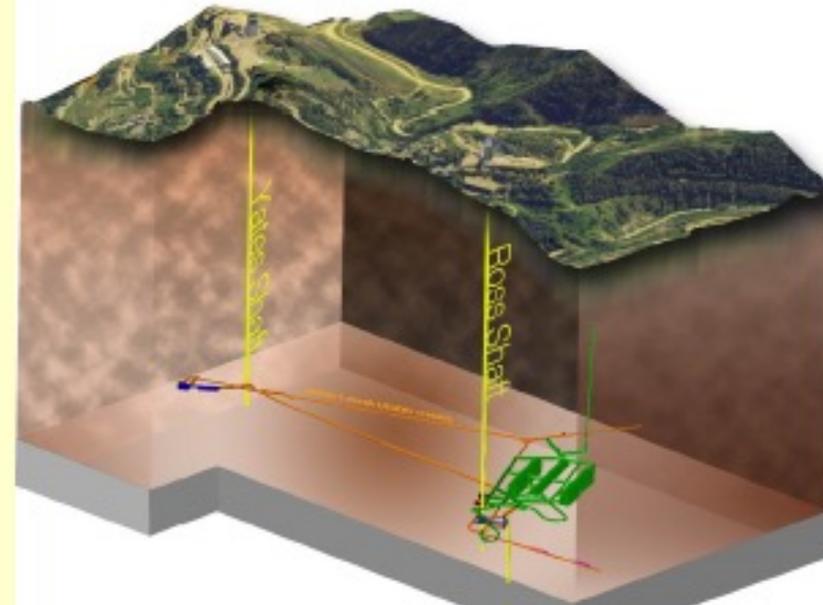
Fisica de neutrinos producidos en explosion de Supernovas



DUNE



Beam of muon neutrinos/antineutrinos generated in the LBNF.
Max energy of 2,5 GeV and 1,2 MW of power.
A “Near Detector” to characterize the neutrino beam.
An underground “Far Detector”: liquid argon temporary projection chamber (LArTPC).
4 x 17 kTon, with fiducial mass (usable) > 40 kTon.



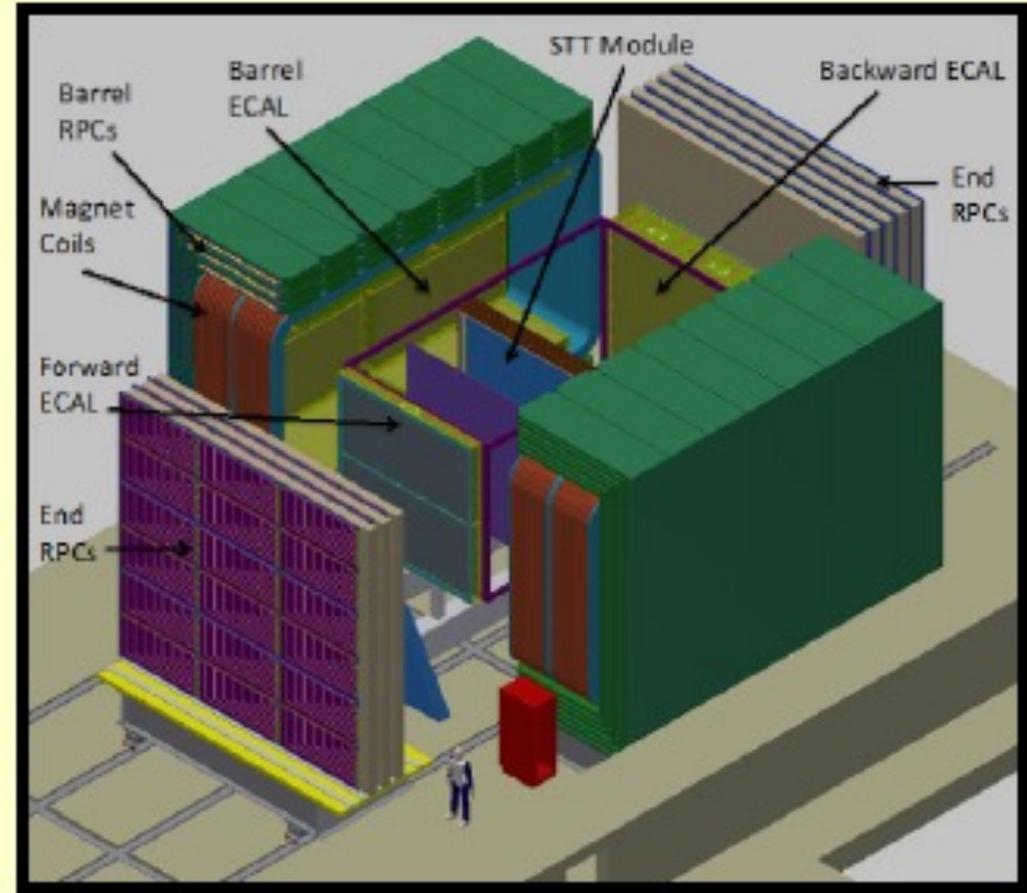


Near Detector of DUNE

Designed to characterize the neutrino beam and perform some high precision studies.

- It will provide data on cross sections and on the flow of neutrinos.
- It allows the use of several targets: argon, carbon, calcium, iron.
- Highly granulated interior, magnetic field of 0.4 T.

$\sim 10^7$ interactions/year





Far Detector of DUNE

Time Projection Chambers of liquid argon (LArTPC's)

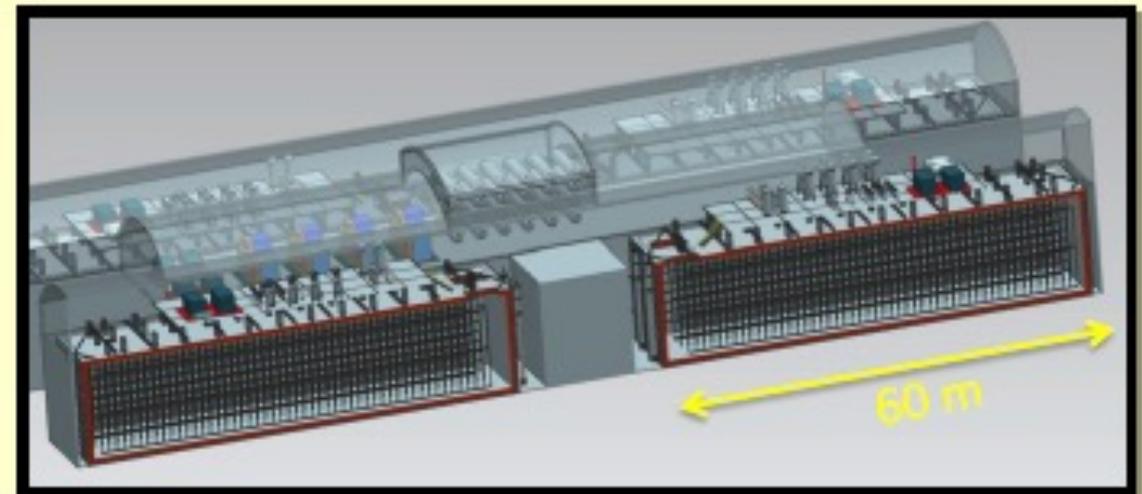
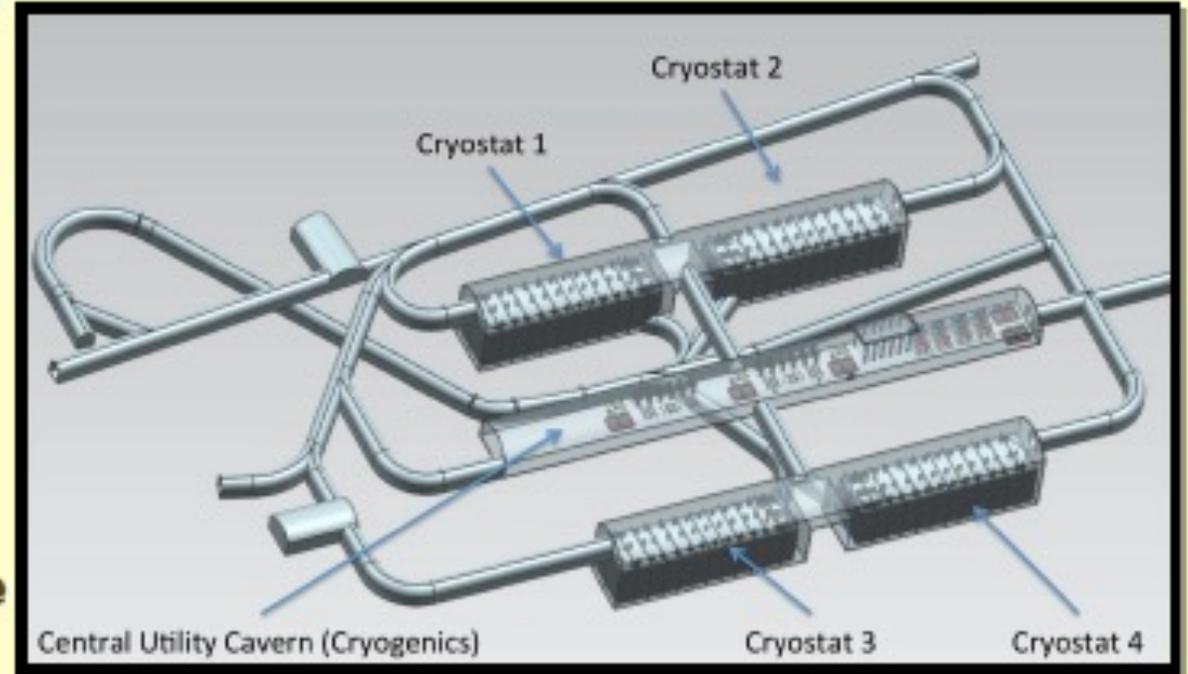
4 independent modules (cryostats) of ~ 17 kTon built in stages.

~ 40 kTon of total (usable) fiducial volume of liquid argon.

The liquid argon is at the same time target and medium of detection.

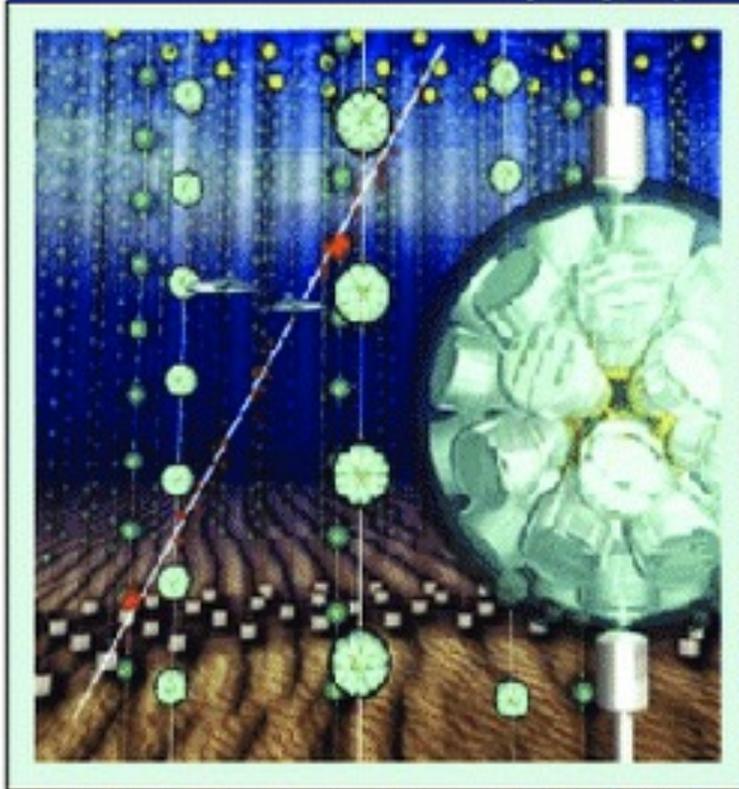
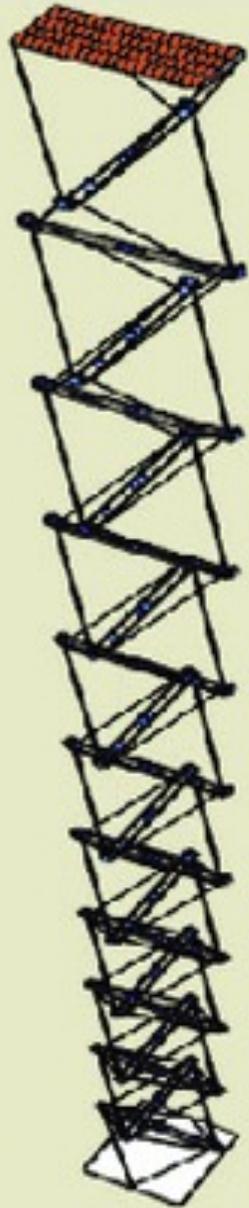
Dimensions of each cryostat: 15.1 (width) x 14.0 (height) x 62 (length) m³.

First module planned for 2024.

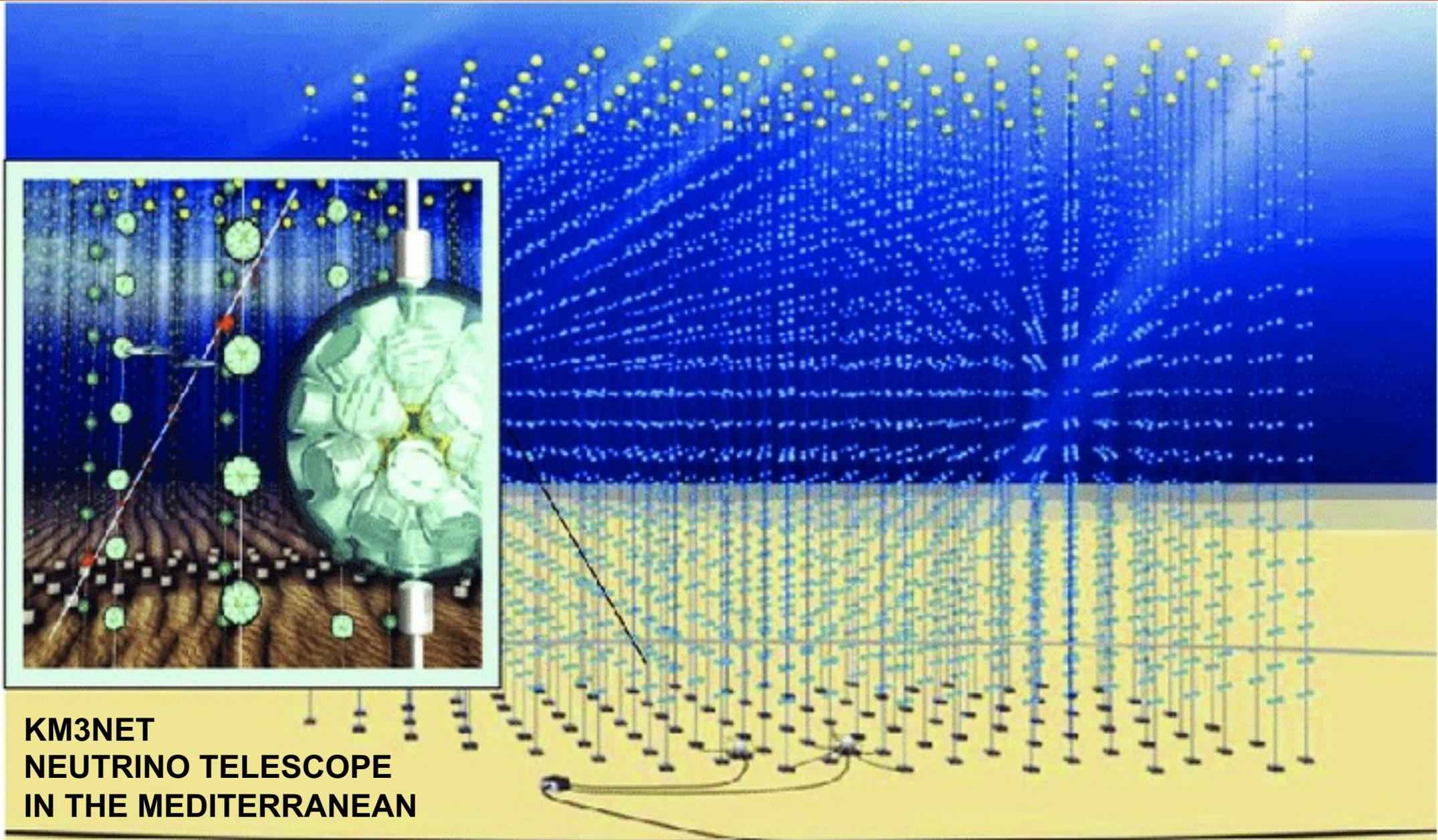




KM3NeT



**KM3NET
NEUTRINO TELESCOPE
IN THE MEDITERRANEAN**





Thank you

Gracias

**Obrigad
o**

Merci

Danke