

Física de neutrinos en el Polo Sur

Mauricio Bustamante

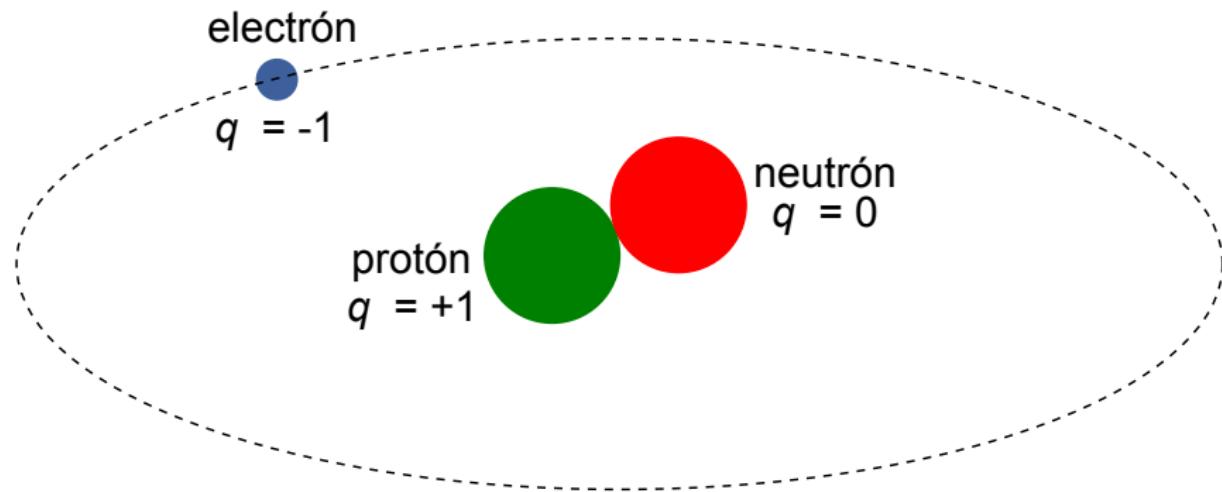
Grupo de Altas Energías, PUCP

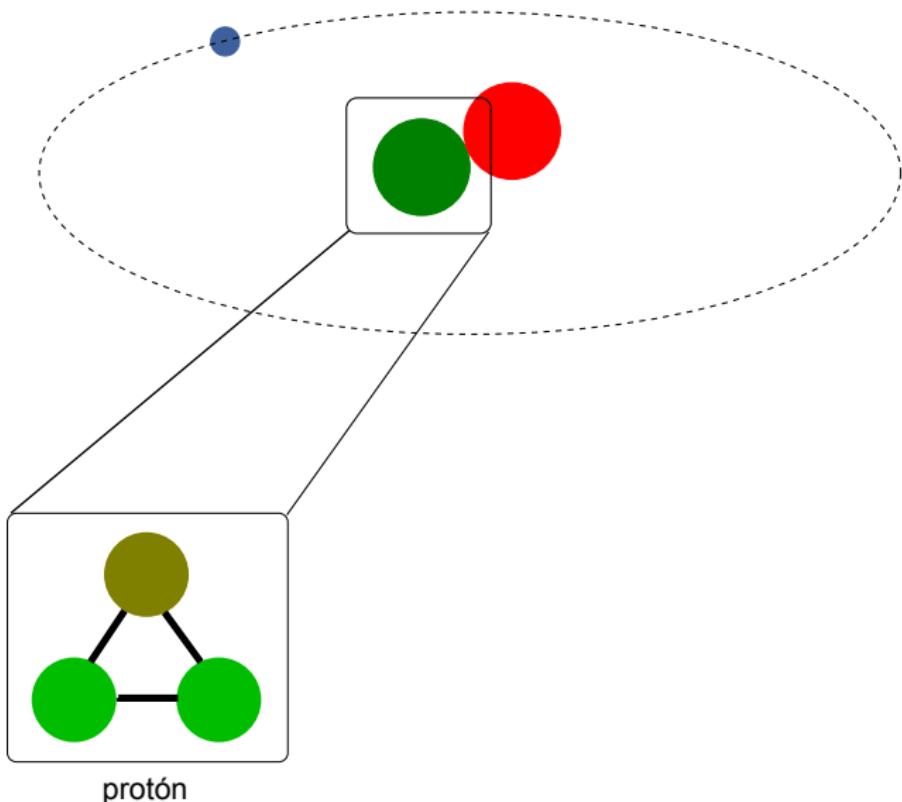
II Simposio sobre Investigación Antártica

19 de Noviembre del 2010

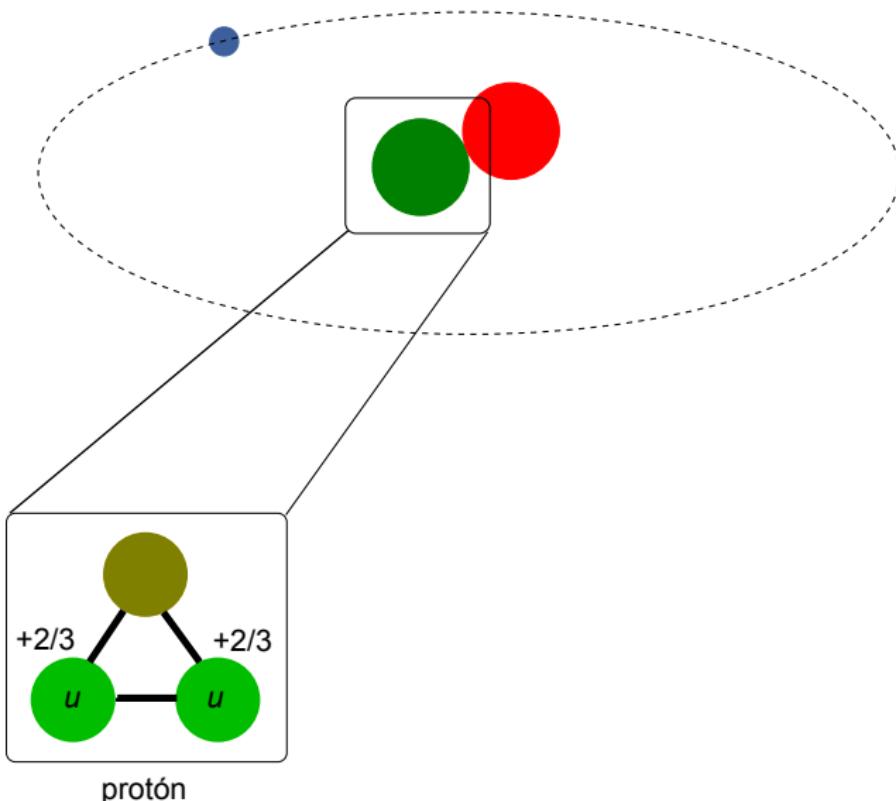
Neutrinos: ¿qué son?

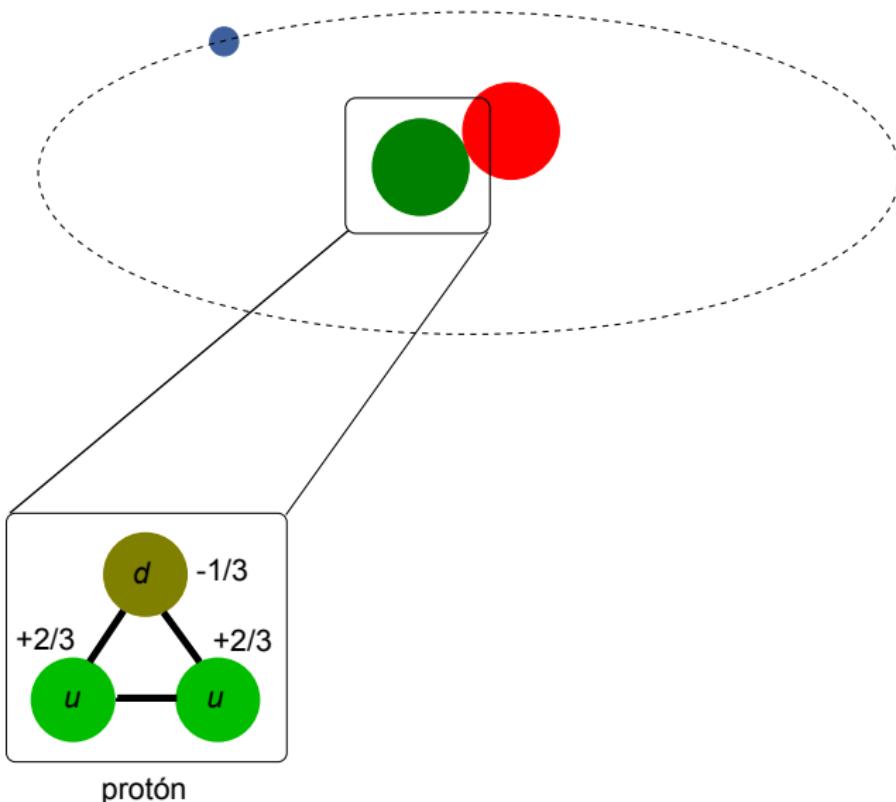
Un átomo de ${}^2_1\text{H}$:

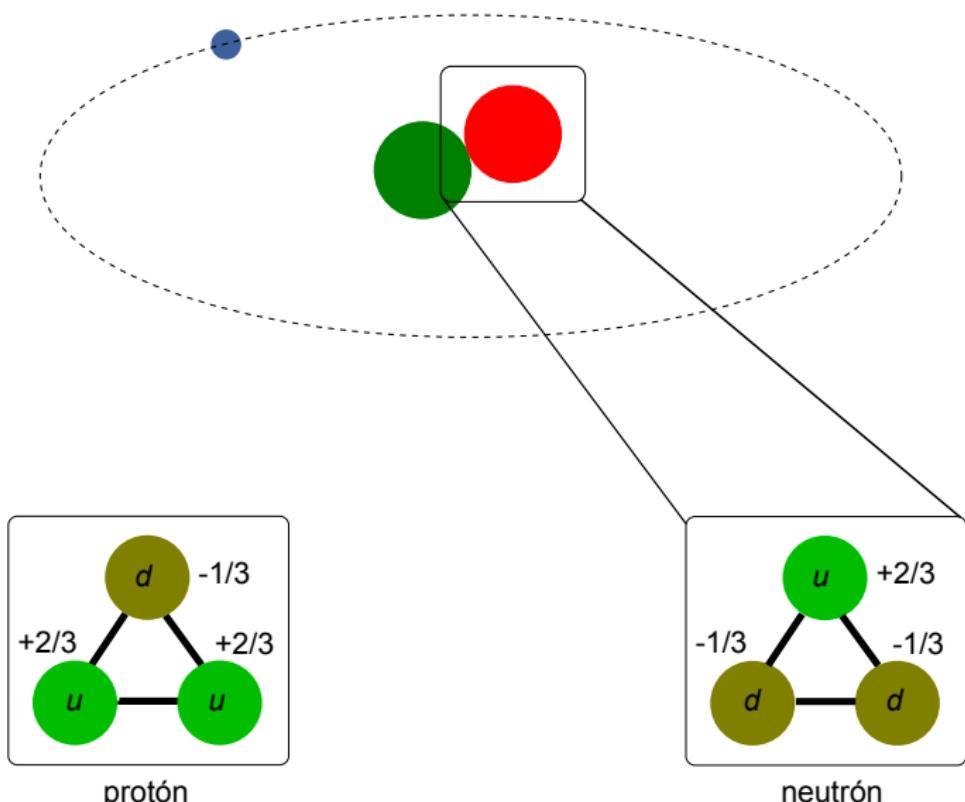


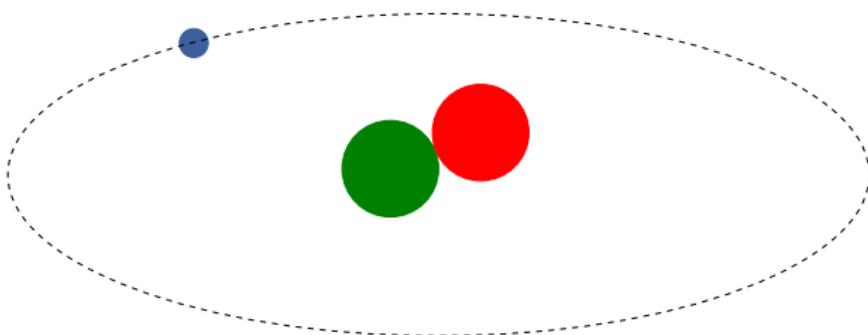


protón



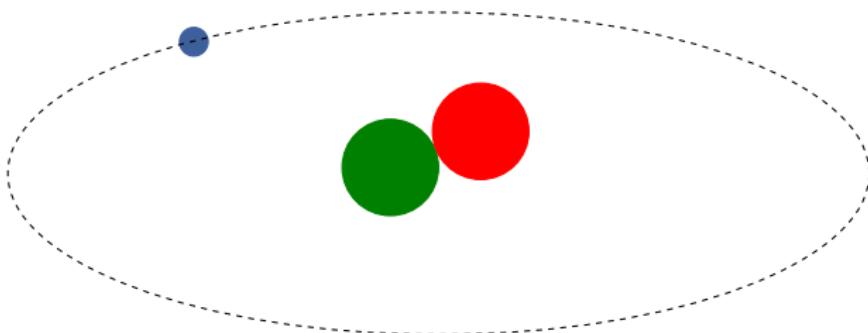






Seis quarks, agrupados en tres familias:

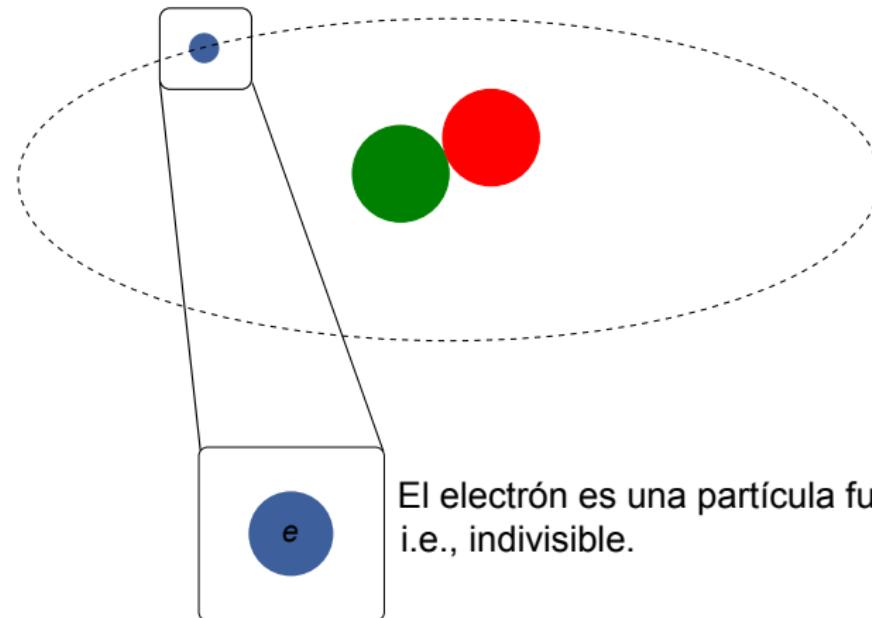
-1/3	d down	s strange	b bottom
+2/3	u up	c charm	t top



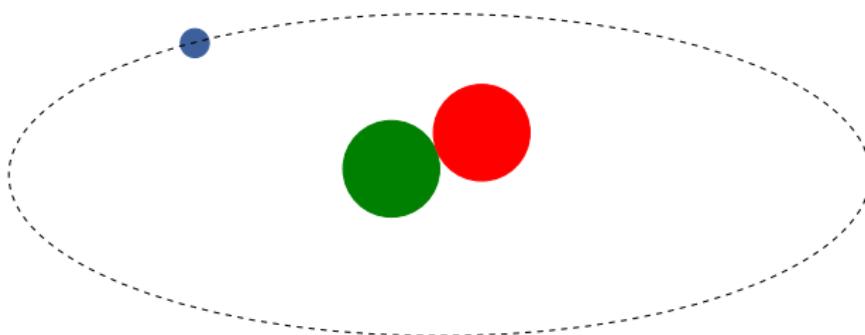
Seis quarks, agrupados en tres familias:

$-1/3$	down	strange	bottom
$+2/3$	up	charm	top

—>
masa



El electrón es una partícula fundamental,
i.e., indivisible.



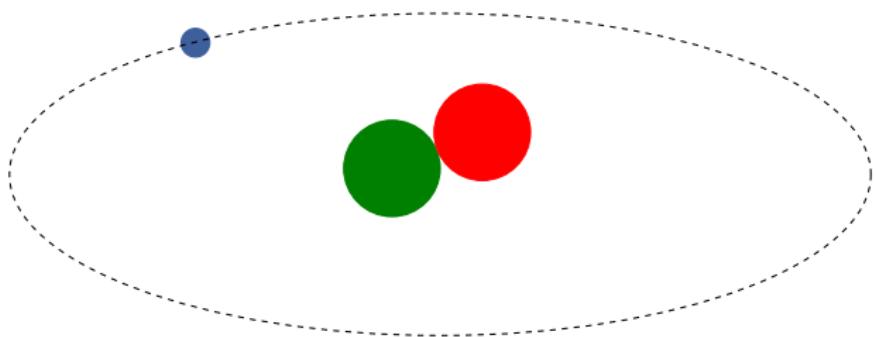
$q = -1$

electrón

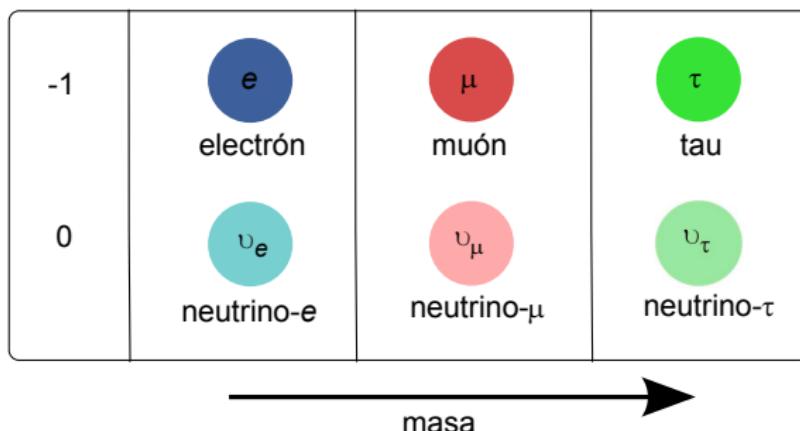
$q = 0$

neutrino-e

El electrón y el neutrino son *leptones*.



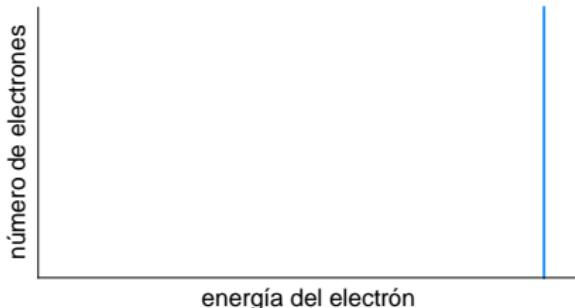
Los leptones están agrupados también en tres familias:



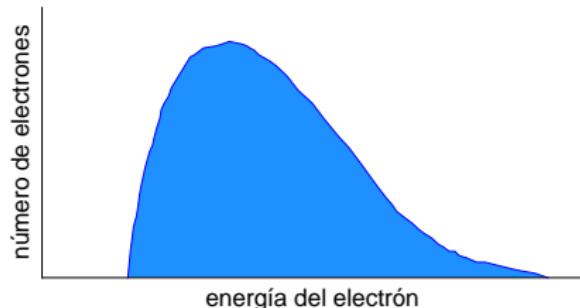
<1930: el decaimiento β se entendía como

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- .$$

Se esperaba ver ...



... pero se encontró

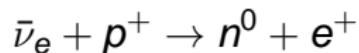


Bohr propuso restringir el principio de conservación de energía.

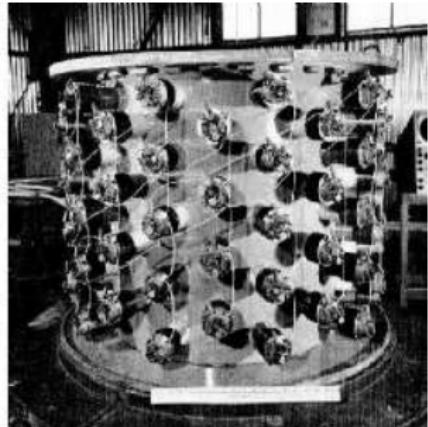
1930: Pauli postula el neutrino para mantener la conservación de energía y momentum en el decaimiento β :

$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e .$$

1956: Cowan y Reines detectan el $\bar{\nu}_e$ a través de



La coincidencia de ambas emisiones revela que interactuó un $\bar{\nu}_e$.



1962: Lederman, Schwartz y Steinberger detectan el ν_μ

1975: se descubre el τ en el Stanford Linear Accelerator Center

2000: detección del ν_τ por la colaboración DONUT en Fermilab

Hoy sabemos que los neutrinos ...

- ▶ son eléctricamente neutros;
- ▶ tienen masas muy pequeñas ($\sim 10^{-6} m_e$);
- ▶ interactúan sólo a través de la fuerza débil (10^{-11} veces la intensidad de la electromagnética);
- ▶ “oscilan”: un ν_e puede convertirse en ν_μ ó ν_τ .

1962: Lederman, Schwartz y Steinberger detectan el ν_μ

1975: se descubre el τ en el Stanford Linear Accelerator Center

2000: detección del ν_τ por la colaboración DONUT en Fermilab

Hoy sabemos que los neutrinos ...

- ▶ son eléctricamente neutros;
- ▶ tienen masas muy pequeñas ($\sim 10^{-6} m_e$);
- ▶ interactúan sólo a través de la fuerza débil (10^{-11} veces la intensidad de la electromagnética);
- ▶ “oscilan”: un ν_e puede convertirse en ν_μ ó ν_τ .

1962: Lederman, Schwartz y Steinberger detectan el ν_μ

1975: se descubre el τ en el Stanford Linear Accelerator Center

2000: detección del ν_τ por la colaboración DONUT en Fermilab

Hoy sabemos que los neutrinos ...

- ▶ son eléctricamente neutros;
- ▶ tienen masas muy pequeñas ($\sim 10^{-6} m_e$);
- ▶ interactúan sólo a través de la fuerza débil (10^{-11} veces la intensidad de la electromagnética);
- ▶ “oscilan”: un ν_e puede convertirse en ν_μ ó ν_τ .

1962: Lederman, Schwartz y Steinberger detectan el ν_μ

1975: se descubre el τ en el Stanford Linear Accelerator Center

2000: detección del ν_τ por la colaboración DONUT en Fermilab

Hoy sabemos que los neutrinos ...

- ▶ son eléctricamente neutros;
- ▶ tienen masas muy pequeñas ($\sim 10^{-6} m_e$);
- ▶ interactúan sólo a través de la fuerza débil (10^{-11} veces la intensidad de la electromagnética);
- ▶ “oscilan”: un ν_e puede convertirse en ν_μ ó ν_τ .

1962: Lederman, Schwartz y Steinberger detectan el ν_μ

1975: se descubre el τ en el Stanford Linear Accelerator Center

2000: detección del ν_τ por la colaboración DONUT en Fermilab

Hoy sabemos que los neutrinos ...

- ▶ son eléctricamente neutros;
- ▶ tienen masas muy pequeñas ($\sim 10^{-6} m_e$);
- ▶ interactúan sólo a través de la fuerza débil (10^{-11} veces la intensidad de la electromagnética);
- ▶ “oscilan”: un ν_e puede convertirse en ν_μ ó ν_τ .

1962: Lederman, Schwartz y Steinberger detectan el ν_μ

1975: se descubre el τ en el Stanford Linear Accelerator Center

2000: detección del ν_τ por la colaboración DONUT en Fermilab

Hoy sabemos que los neutrinos ...

- ▶ son eléctricamente neutros;
- ▶ tienen masas muy pequeñas ($\sim 10^{-6} m_e$);
- ▶ interactúan sólo a través de la fuerza débil (10^{-11} veces la intensidad de la electromagnética);
- ▶ “oscilan”: un ν_e puede convertirse en ν_μ ó ν_τ .

1962: Lederman, Schwartz y Steinberger detectan el ν_μ

1975: se descubre el τ en el Stanford Linear Accelerator Center

2000: detección del ν_τ por la colaboración DONUT en Fermilab

Hoy sabemos que los neutrinos ...

- ▶ son eléctricamente neutros;
- ▶ tienen masas muy pequeñas ($\sim 10^{-6} m_e$);
- ▶ interactúan sólo a través de la fuerza débil (10⁻¹¹ veces la intensidad de la electromagnética);
- ▶ “oscilan”: un ν_e puede convertirse en ν_μ ó ν_τ .

¿De dónde vienen?

Los neutrinos se generan en ...

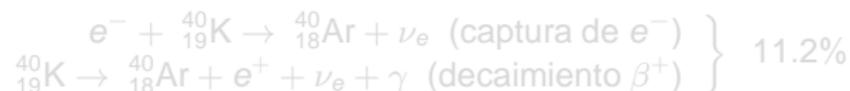
- ▶ procesos nucleares en el Sol
- ▶ reactores nucleares
- ▶ supernovas
- ▶ aceleradores de partículas
- ▶ la alta atmósfera
- ▶ objetos extragalácticos
(e.g., núcleos activos galácticos, *gamma-ray bursts*)

energía



Incluso en el cuerpo humano:

Potasio-40 es radioactivo, con $\tau_{1/2} = 1.25 \times 10^9$ años



$\sim 4400 \ (\nu_e + \bar{\nu}_e)$ emitidos s^{-1} por una persona de 70 kg



Los neutrinos se generan en ...

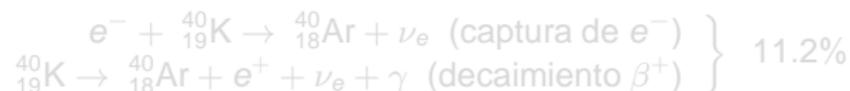
- ▶ procesos nucleares en el Sol
- ▶ reactores nucleares
- ▶ supernovas
- ▶ aceleradores de partículas
- ▶ la alta atmósfera
- ▶ objetos extragalácticos
(e.g., núcleos activos galácticos, *gamma-ray bursts*)

energía



Incluso en el cuerpo humano:

Potasio-40 es radioactivo, con $\tau_{1/2} = 1.25 \times 10^9$ años



$\sim 4400 \ (\nu_e + \bar{\nu}_e)$ emitidos s^{-1} por una persona de 70 kg



Los neutrinos se generan en ...

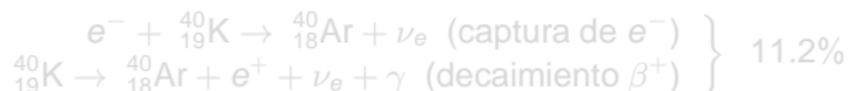
- ▶ procesos nucleares en el Sol
- ▶ reactores nucleares
- ▶ supernovas
- ▶ aceleradores de partículas
- ▶ la alta atmósfera
- ▶ objetos extragalácticos
(e.g., núcleos activos galácticos, *gamma-ray bursts*)

energía



Incluso en el cuerpo humano:

Potasio-40 es radioactivo, con $\tau_{1/2} = 1.25 \times 10^9$ años



$\sim 4400 \ (\nu_e + \bar{\nu}_e)$ emitidos s^{-1} por una persona de 70 kg



Los neutrinos se generan en ...

- ▶ procesos nucleares en el Sol
- ▶ reactores nucleares
- ▶ supernovas
- ▶ aceleradores de partículas
- ▶ la alta atmósfera
- ▶ objetos extragalácticos
(e.g., núcleos activos galácticos, *gamma-ray bursts*)

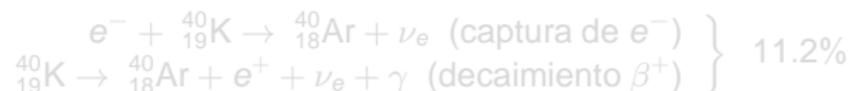
energía



Incluso en el cuerpo humano:



Potasio-40 es radioactivo, con $\tau_{1/2} = 1.25 \times 10^9$ años



$\sim 4400 \ (\nu_e + \bar{\nu}_e)$ emitidos s^{-1} por una persona de 70 kg

Los neutrinos se generan en ...

- ▶ procesos nucleares en el Sol
- ▶ reactores nucleares
- ▶ supernovas
- ▶ aceleradores de partículas
- ▶ la alta atmósfera
- ▶ objetos extragalácticos
(e.g., núcleos activos galácticos, *gamma-ray bursts*)

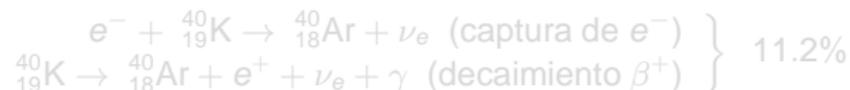
energía



Incluso en el cuerpo humano:



Potasio-40 es radioactivo, con $\tau_{1/2} = 1.25 \times 10^9$ años



$\sim 4400 \ (\nu_e + \bar{\nu}_e)$ emitidos s^{-1} por una persona de 70 kg

Los neutrinos se generan en ...

- ▶ procesos nucleares en el Sol
- ▶ reactores nucleares
- ▶ supernovas
- ▶ aceleradores de partículas
- ▶ la alta atmósfera
- ▶ objetos extragalácticos
(e.g., núcleos activos galácticos, *gamma-ray bursts*)

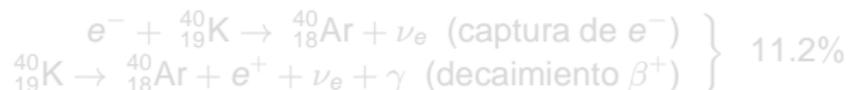
energía



Incluso en el cuerpo humano:



Potasio-40 es radioactivo, con $\tau_{1/2} = 1.25 \times 10^9$ años



$\sim 4400 \ (\nu_e + \bar{\nu}_e)$ emitidos s^{-1} por una persona de 70 kg

Los neutrinos se generan en ...

- ▶ procesos nucleares en el Sol
- ▶ reactores nucleares
- ▶ supernovas
- ▶ aceleradores de partículas
- ▶ la alta atmósfera
- ▶ objetos extragalácticos
(e.g., núcleos activos galácticos, *gamma-ray bursts*)

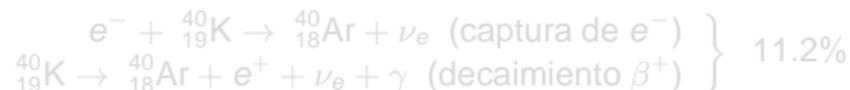
energía



Incluso en el cuerpo humano:



Potasio-40 es radioactivo, con $\tau_{1/2} = 1.25 \times 10^9$ años



$\sim 4400 \ (\nu_e + \bar{\nu}_e)$ emitidos s^{-1} por una persona de 70 kg

Los neutrinos se generan en ...

- ▶ procesos nucleares en el Sol
- ▶ reactores nucleares
- ▶ supernovas
- ▶ aceleradores de partículas
- ▶ la alta atmósfera
- ▶ objetos extragalácticos
(e.g., núcleos activos galácticos, *gamma-ray bursts*)

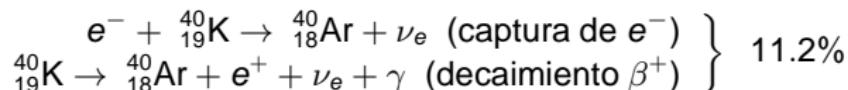
energía



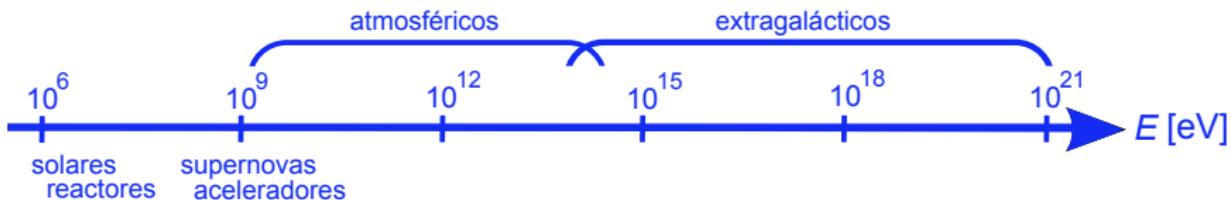
Incluso en el cuerpo humano:



Potasio-40 es radioactivo, con $\tau_{1/2} = 1.25 \times 10^9$ años

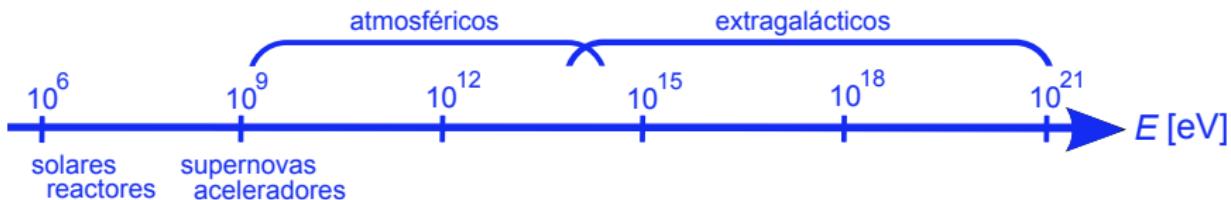


$\sim 4400 \ (\nu_e + \bar{\nu}_e)$ emitidos s^{-1} por una persona de 70 kg



$$1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV}/c^2 \approx 1.7 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

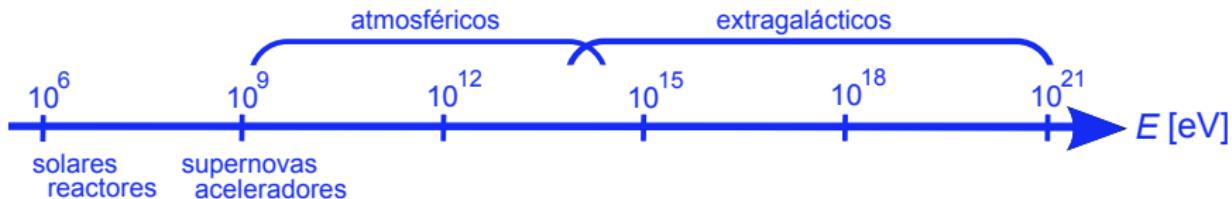


$$1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV}/c^2 \approx 1.7 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

e.g.,

- 0.5 MeV: masa del electrón

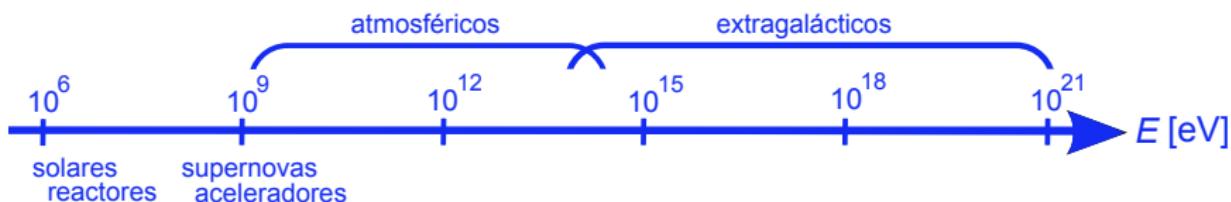


$$1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV}/c^2 \approx 1.7 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

e.g.,

- ▶ 0.5 MeV: masa del electrón
- ▶ 1 GeV: masa del protón/neutrón

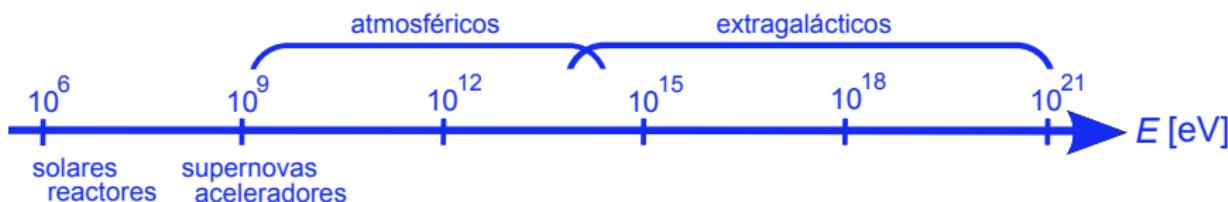


$$1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV}/c^2 \approx 1.7 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

e.g.,

- ▶ 0.5 MeV: masa del electrón
- ▶ 1 GeV: masa del protón/neutrón
- ▶ 1 TeV: energía cinética de un mosquito volando

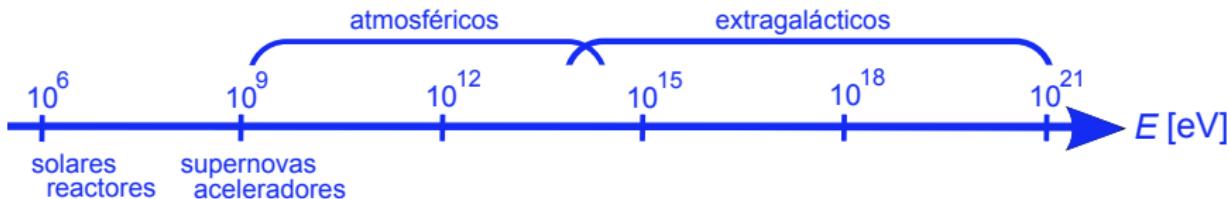


$$1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV}/c^2 \approx 1.7 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

e.g.,

- ▶ 0.5 MeV: masa del electrón
- ▶ 1 GeV: masa del protón/neutrón
- ▶ 1 TeV: energía cinética de un mosquito volando
- ▶ $\sim 624 \text{ EeV} (6.24 \times 10^{20} \text{ eV})$: energía necesaria para prender un foco de 100 W durante 1 s

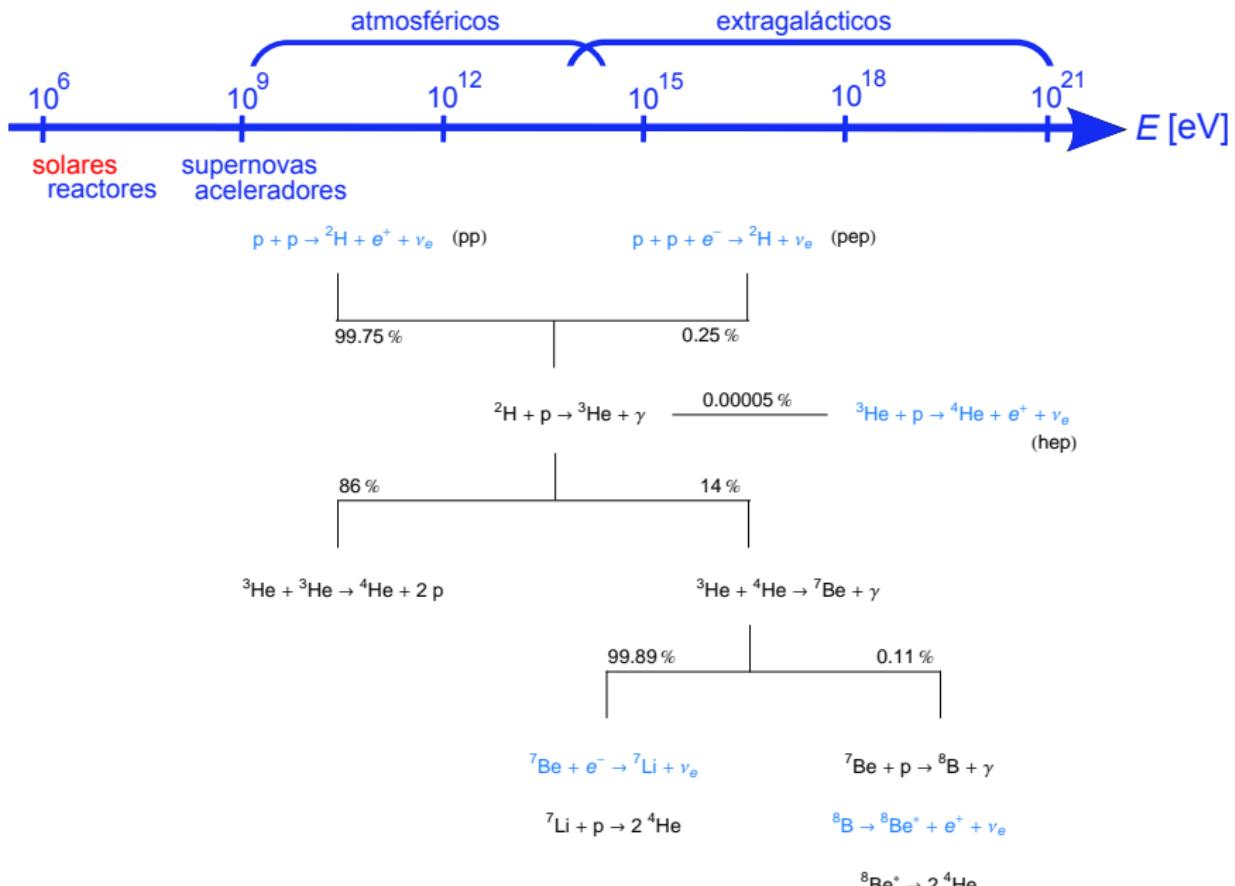


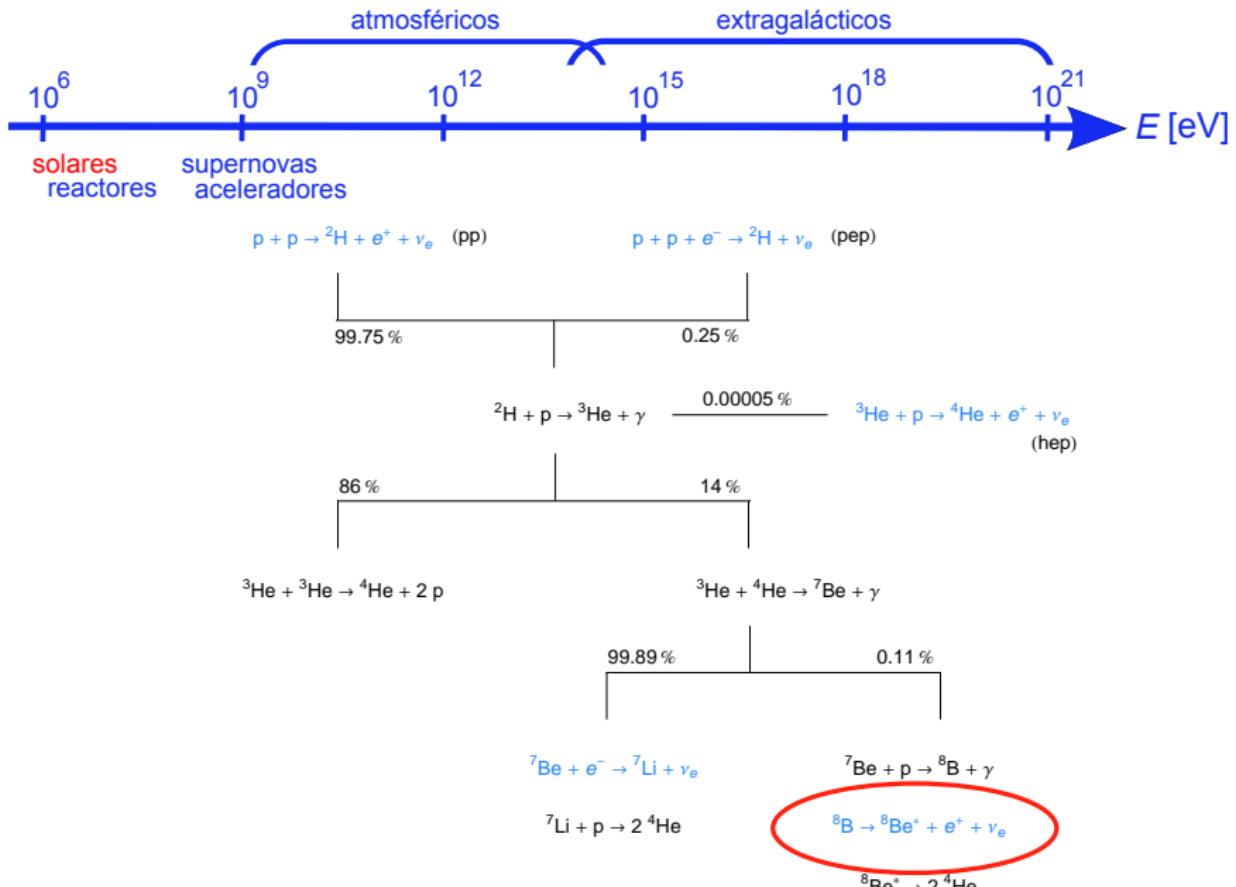
Entre más alta la energía del neutrino,
mayor la probabilidad de detectarlo.

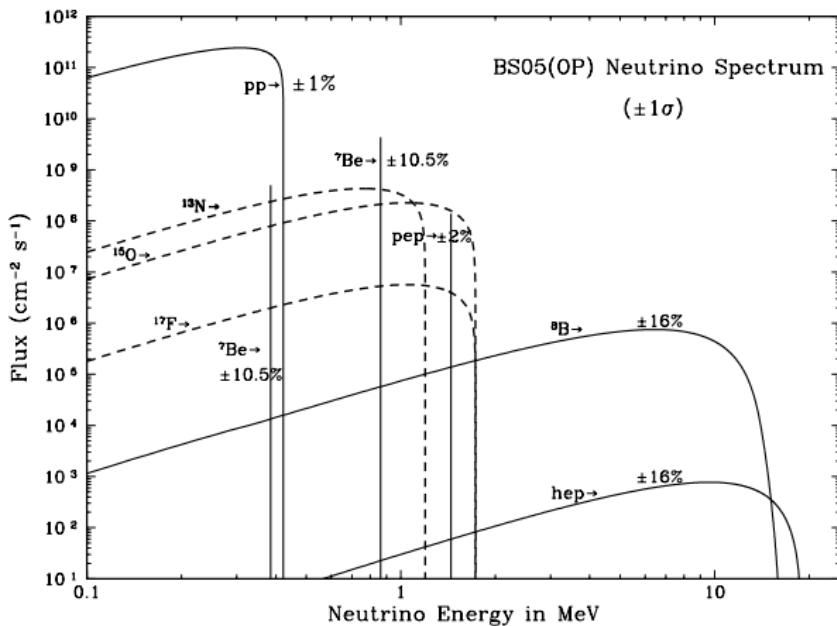
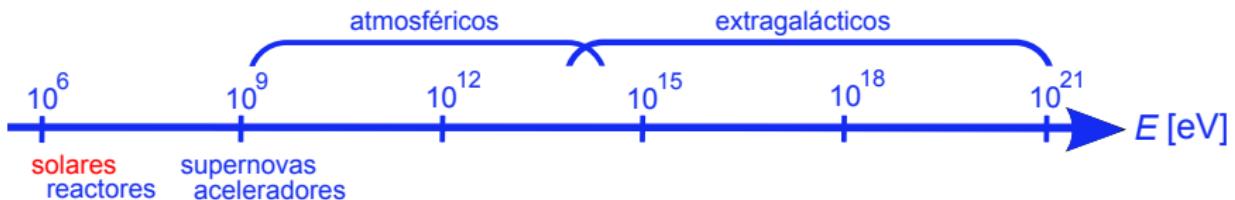
Sección de choque $\nu-p$ (elástica):

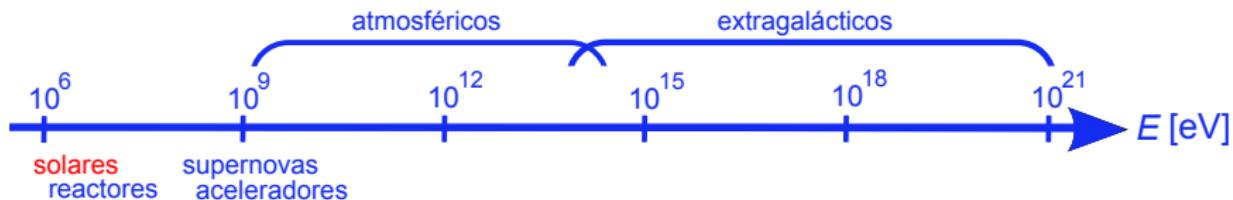
$$\sigma_{\nu p \rightarrow \nu p}(E) \approx 6 \times 10^{-46} \left(\frac{E}{1 \text{ MeV}} \right)^2 \text{ cm}^2$$

probabilidad de detección $\propto \sigma$



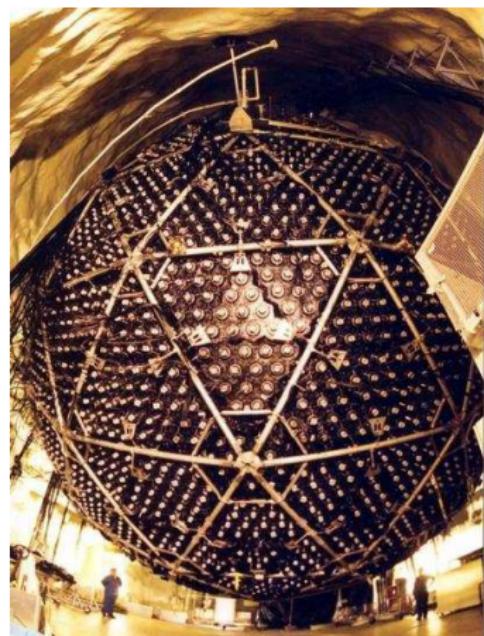


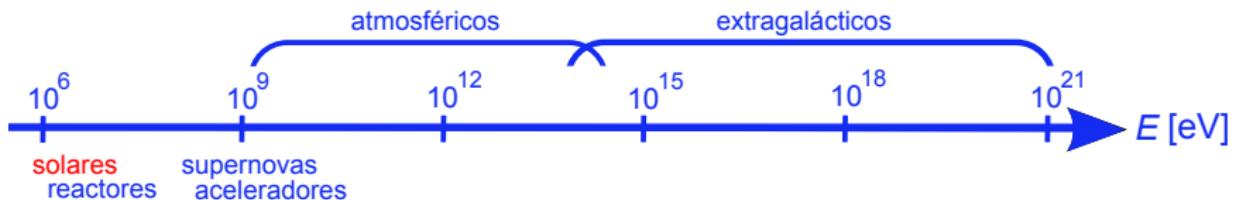




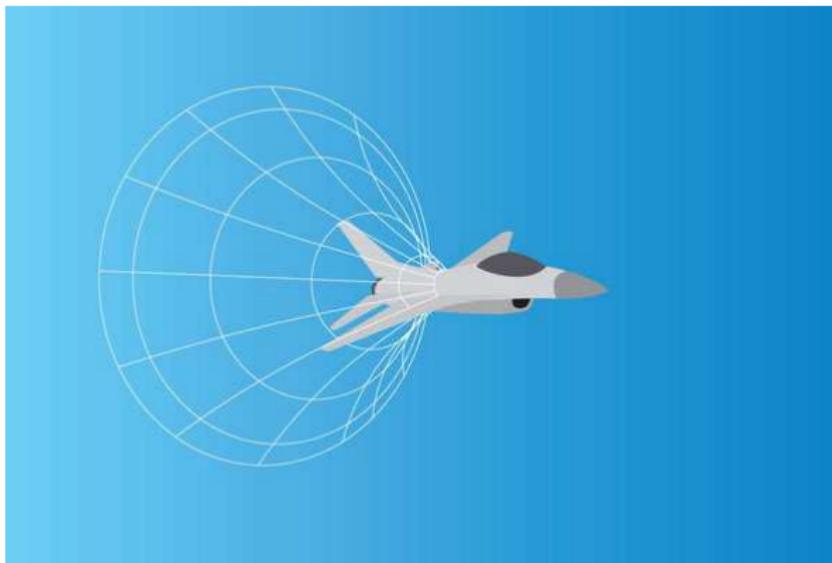
Sudbury Neutrino Observatory (SNO):

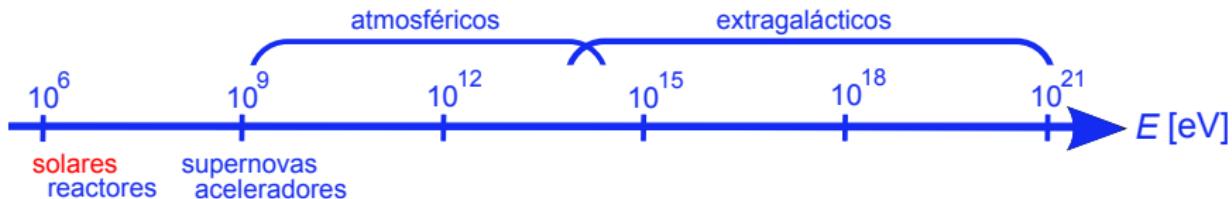
- en Sudbury, Canada
- ~ 1.5 km bajo tierra
- esfera de 8.5 m de radio
- interior recubierto con 9 600 PMTs
- 1 000 ton de agua pesada (D_2O)



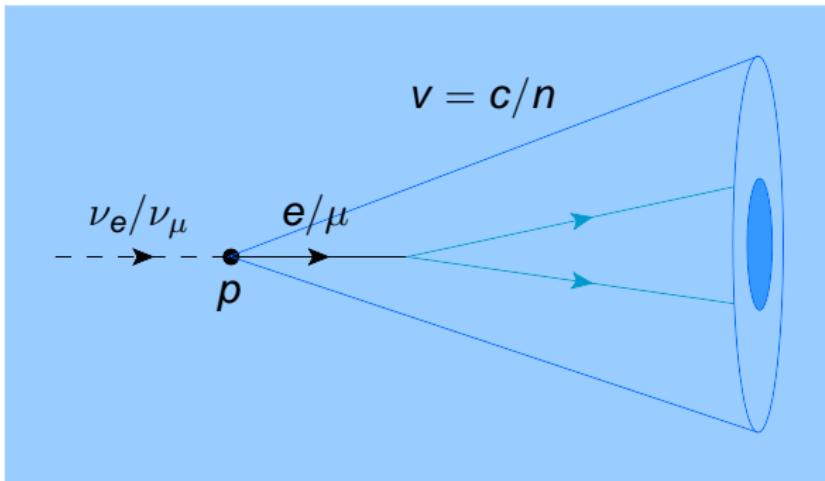


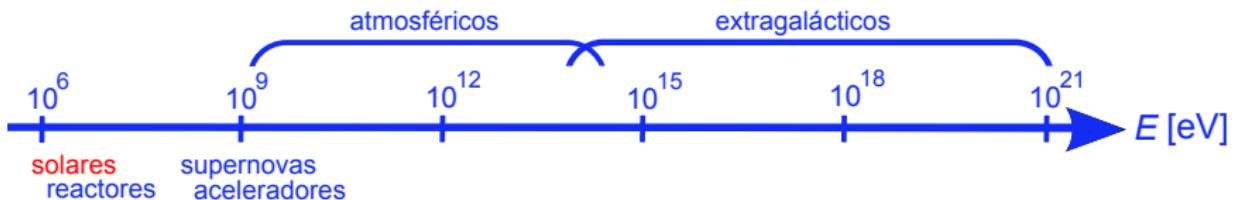
Método de detección: radiación Čerenkov



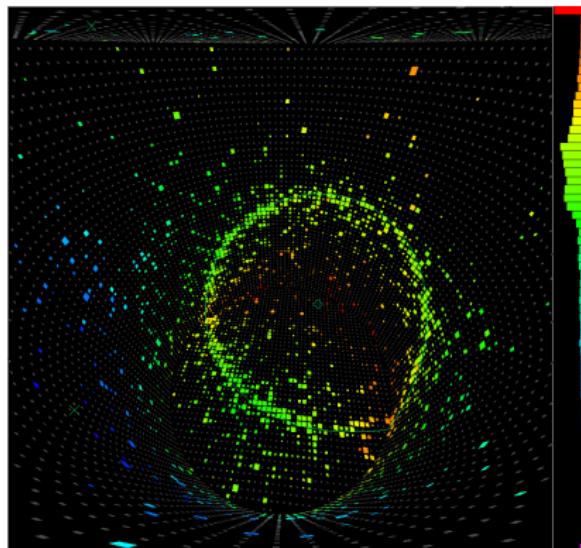


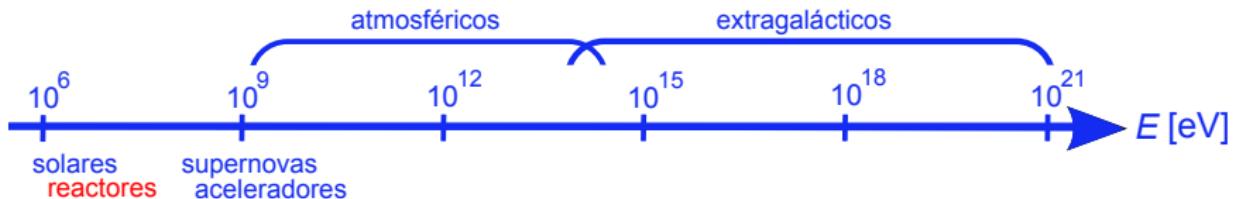
Método de detección: radiación Čerenkov





Método de detección: radiación Čerenkov



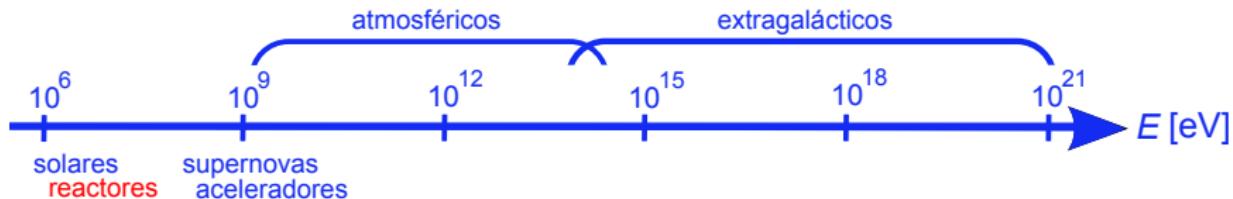


Los reactores emiten $\bar{\nu}_e$

KamLAND:

- ▶ en el Observatorio Kamioka
- ▶ rodeado de 53 reactores
- ▶ $\langle L \rangle = 180 \text{ km}$

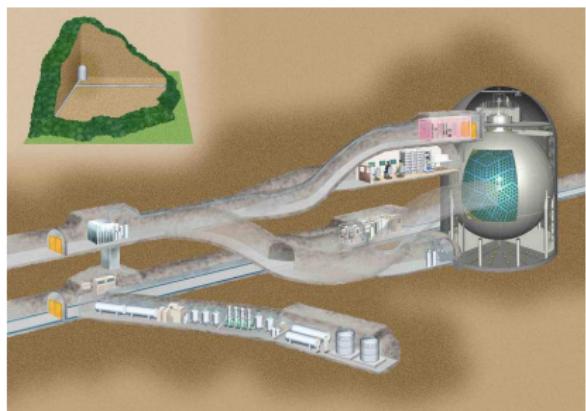


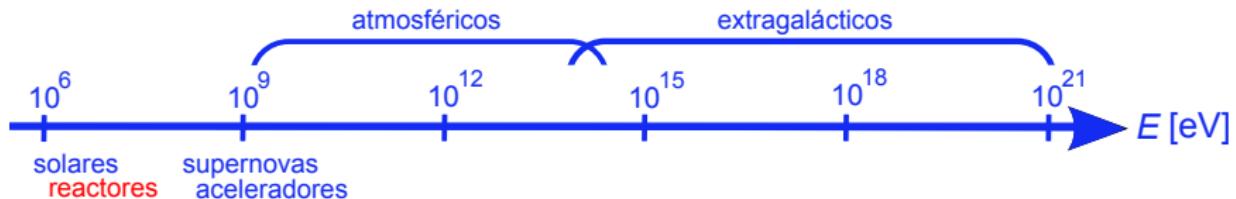


Los reactores emiten $\bar{\nu}_e$

KamLAND:

- ▶ en el Observatorio Kamioka
- ▶ rodeado de 53 reactores
- ▶ $\langle L \rangle = 180$ km
- ▶ 1 kton de centelleador líquido

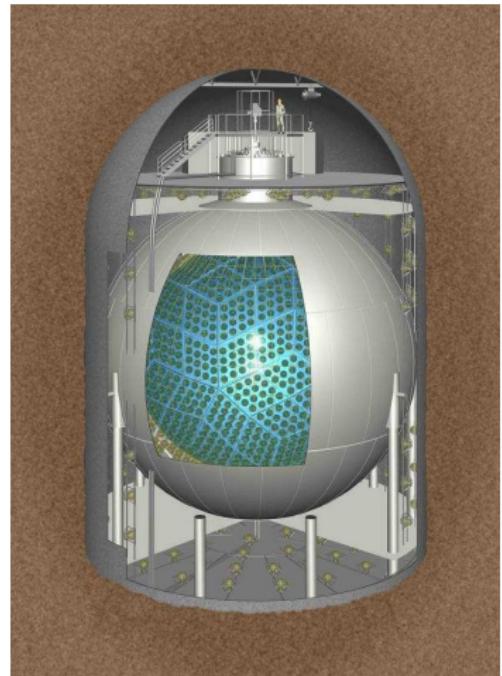


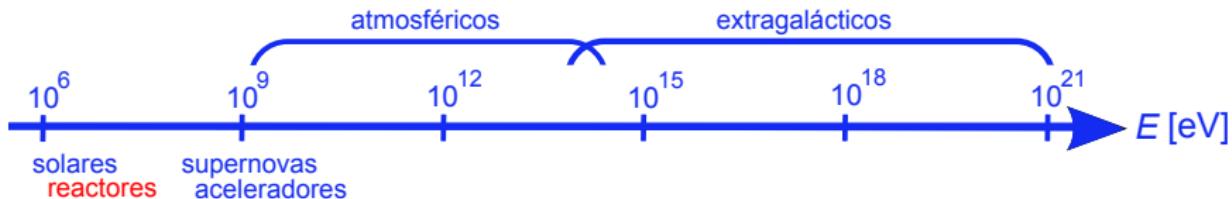


Los reactores emiten $\bar{\nu}_e$

KamLAND:

- ▶ en el Observatorio Kamioka
- ▶ rodeado de 53 reactores
- ▶ $\langle L \rangle = 180$ km
- ▶ 1 kton de centelleador líquido
- ▶ 1 900 PMTs



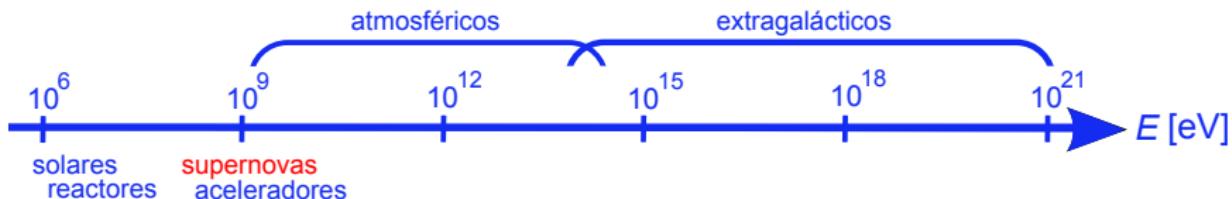


Los reactores emiten $\bar{\nu}_e$

KamLAND:

- ▶ en el Observatorio Kamioka
- ▶ rodeado de 53 reactores
- ▶ $\langle L \rangle = 180$ km
- ▶ 1 kton de centelleador líquido
- ▶ 1 900 PMTs





Son emitidos en supernovas tipo Ib, Ic y II:

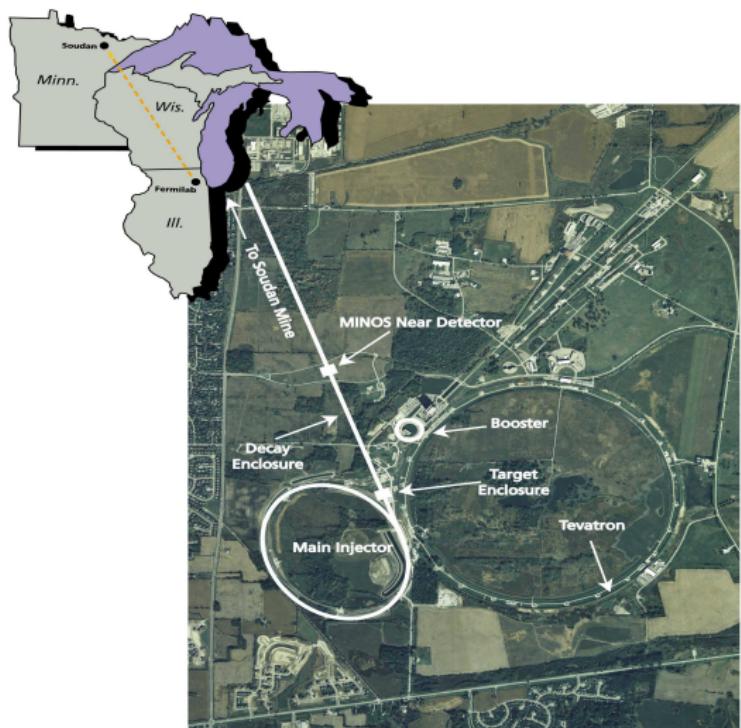
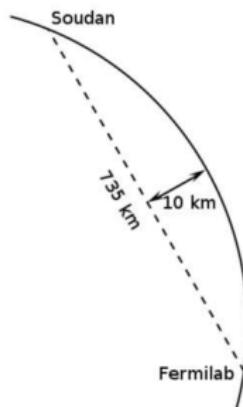
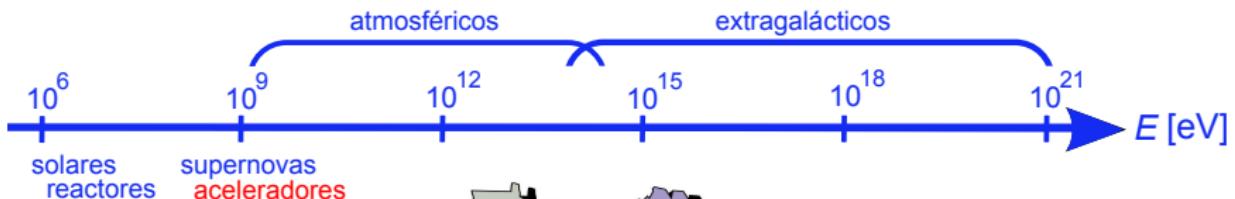
(1) Cuando la densidad del núcleo es muy alta ($\sim 10^{17} \text{ kg cm}^{-3}$), ocurre

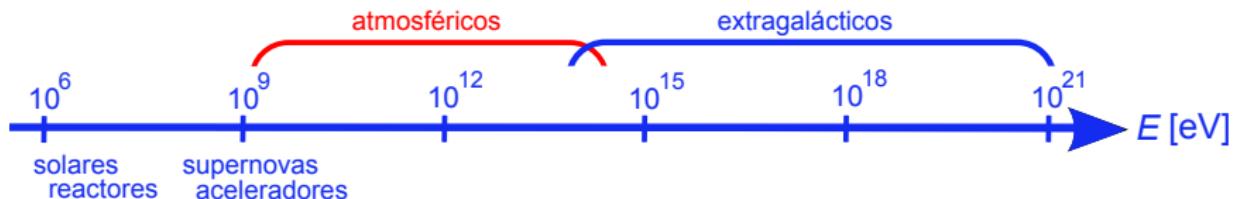
$$p + e \rightarrow n + \nu_e$$

(2) La energía térmica (10^{11} K) del núcleo de n se disipa en forma de pares $\nu - \bar{\nu}$.



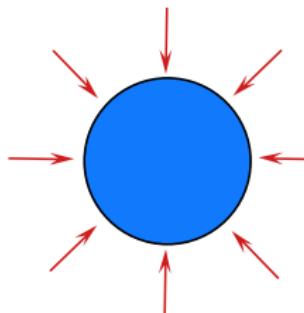
1987: se detectan 24 neutrinos provenientes de la supernova 1987A



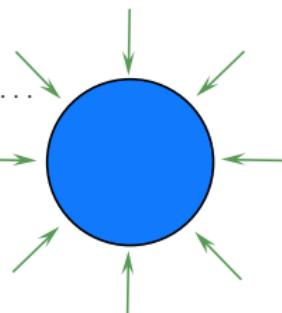


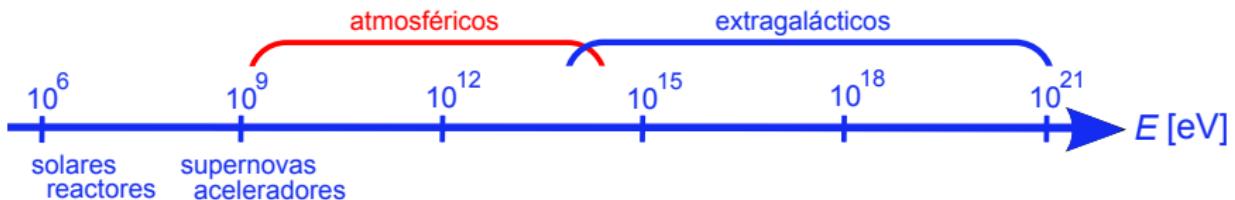
Los ν 's se crean por interacción de los rayos cósmicos (protónes, etc.) con las moléculas de la alta atmósfera:

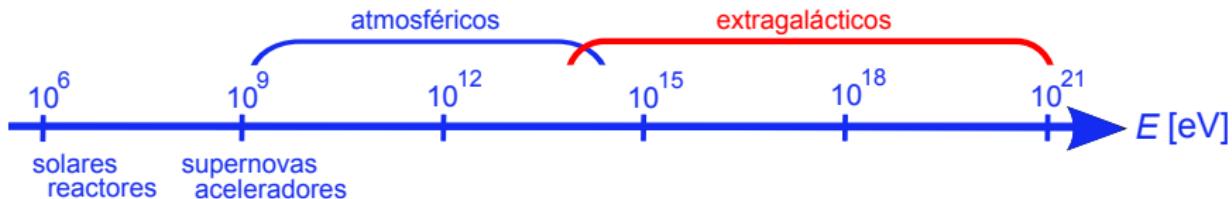
flujo de rayos cósmicos



flujo de neutrinos

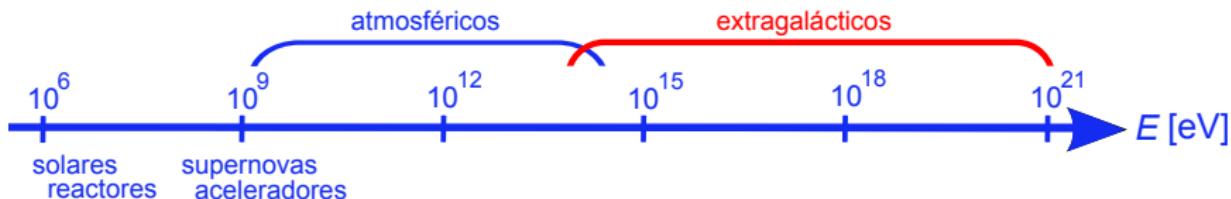






Los más energéticos del Universo.

Predichos, pero aún no detectados.



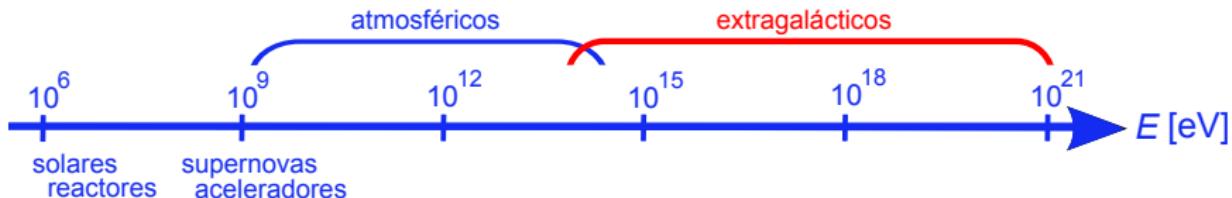
Los más energéticos del Universo.

Predichos, pero aún no detectados.

Se espera que provengan de:

- *gamma-ray bursts* (GRBs)

GRB 031203 en rayos X

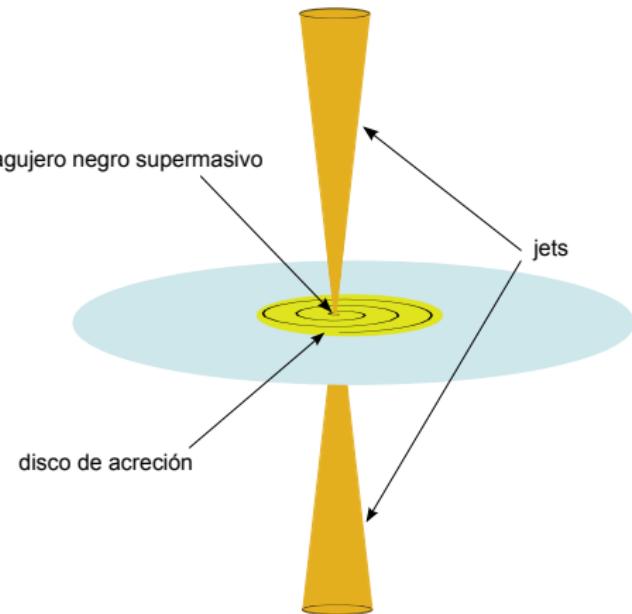


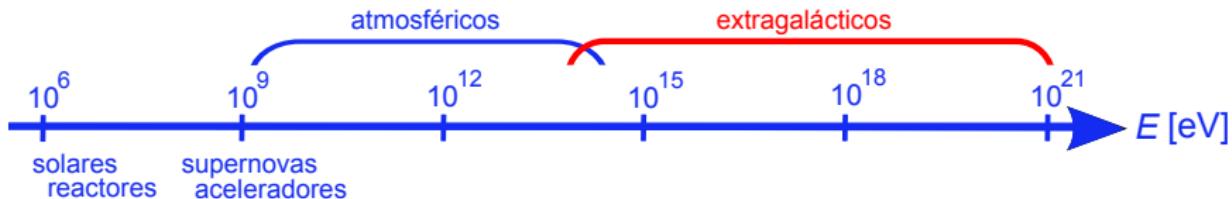
Los más energéticos del Universo.

Predichos, pero aún no detectados.

Se espera que provengan de:

- ▶ *gamma-ray bursts* (GRBs)
- ▶ núcleos activos galácticos (AGN)





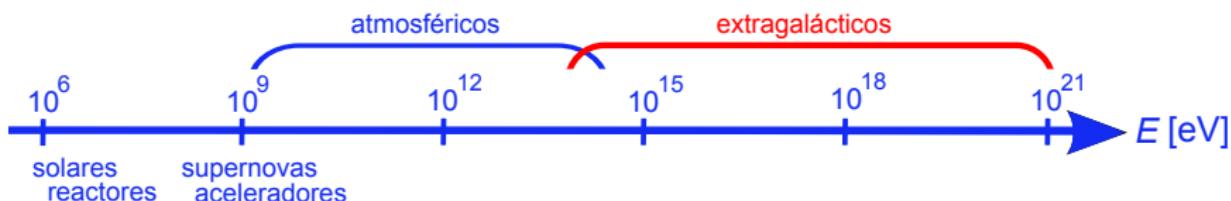
Los más energéticos del Universo.

Predichos, pero aún no detectados.

Se espera que provengan de:

- ▶ *gamma-ray bursts* (GRBs)
- ▶ núcleos activos galácticos (AGN)





La energía es alta, pero la distancia a las GRBs o AGN es muy grande:

$d = 750 \text{ millones} - 24 \text{ billones de años luz (redshift } 0.001 \lesssim z \lesssim 6.5\text{)}.$

El flujo baja como $1/d^2$, así que llegan sólo $\sim 0.4 \text{ neutrinos m}^{-2}$.

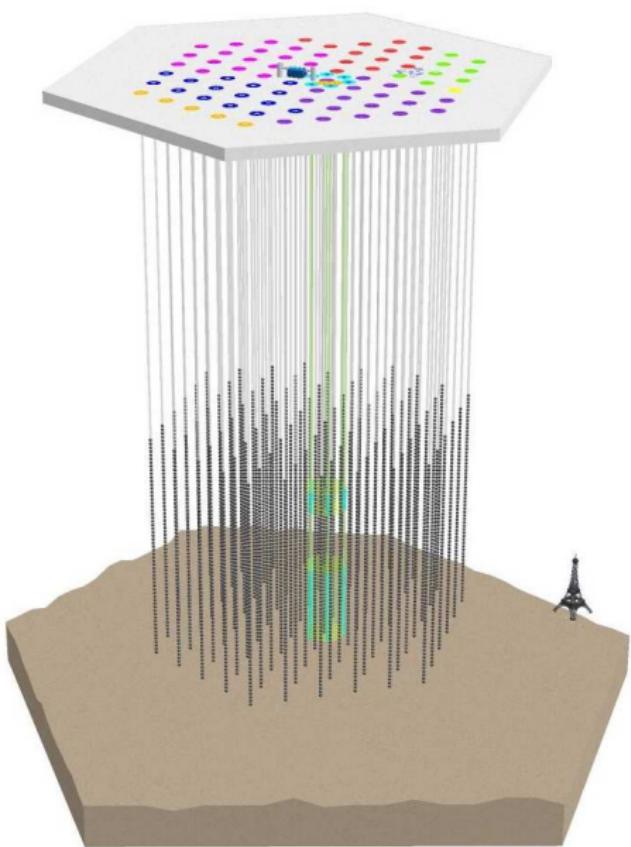
Son necesarios detectores más grandes:

reemplazamos los tanques con agua por el hielo puro de la Antártida.

Neutrinos en el Polo Sur

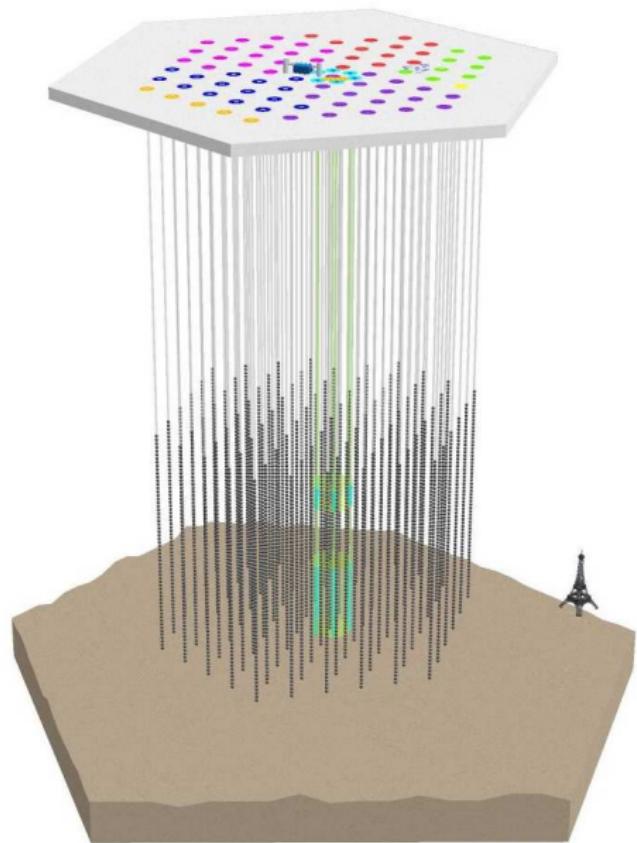
IceCube

- 1 km³ de hielo puro



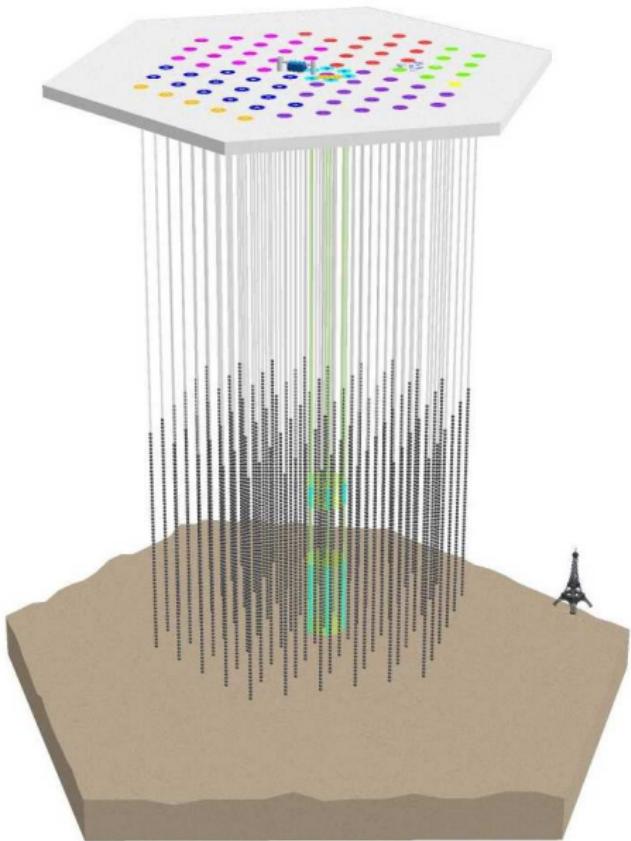
IceCube

- ▶ 1 km³ de hielo puro
- ▶ ubicado en la base EE.UU.
Amundsen-Scott, en el Polo



IceCube

- ▶ 1 km³ de hielo puro
- ▶ ubicado en la base EE.UU.
Amundsen-Scott, en el Polo
- ▶ 86 cadenas
entre 1 450 y 2 450 m



IceCube

- ▶ 1 km³ de hielo puro
- ▶ ubicado en la base EE.UU. Amundsen-Scott, en el Polo
- ▶ 86 cadenas entre 1 450 y 2 450 m
- ▶ 60 sensores por cadena



IceCube

- ▶ 1 km³ de hielo puro
- ▶ ubicado en la base EE.UU. Amundsen-Scott, en el Polo
- ▶ 86 cadenas entre 1 450 y 2 450 m
- ▶ 60 sensores por cadena
- ▶ taladro de agua caliente (88°C)



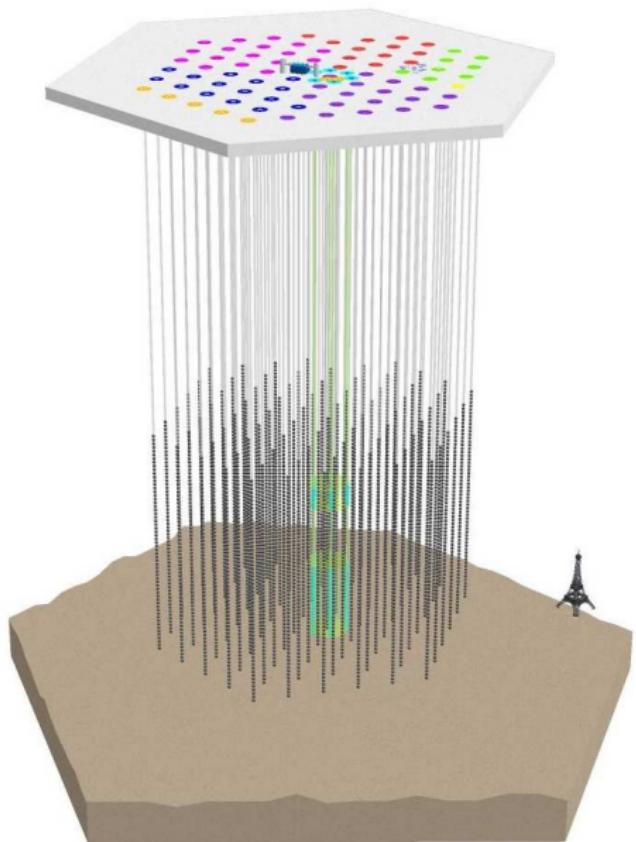
IceCube

- ▶ 1 km³ de hielo puro
- ▶ ubicado en la base EE.UU. Amundsen-Scott, en el Polo
- ▶ 86 cadenas entre 1 450 y 2 450 m
- ▶ 60 sensores por cadena
- ▶ taladro de agua caliente (88°C)



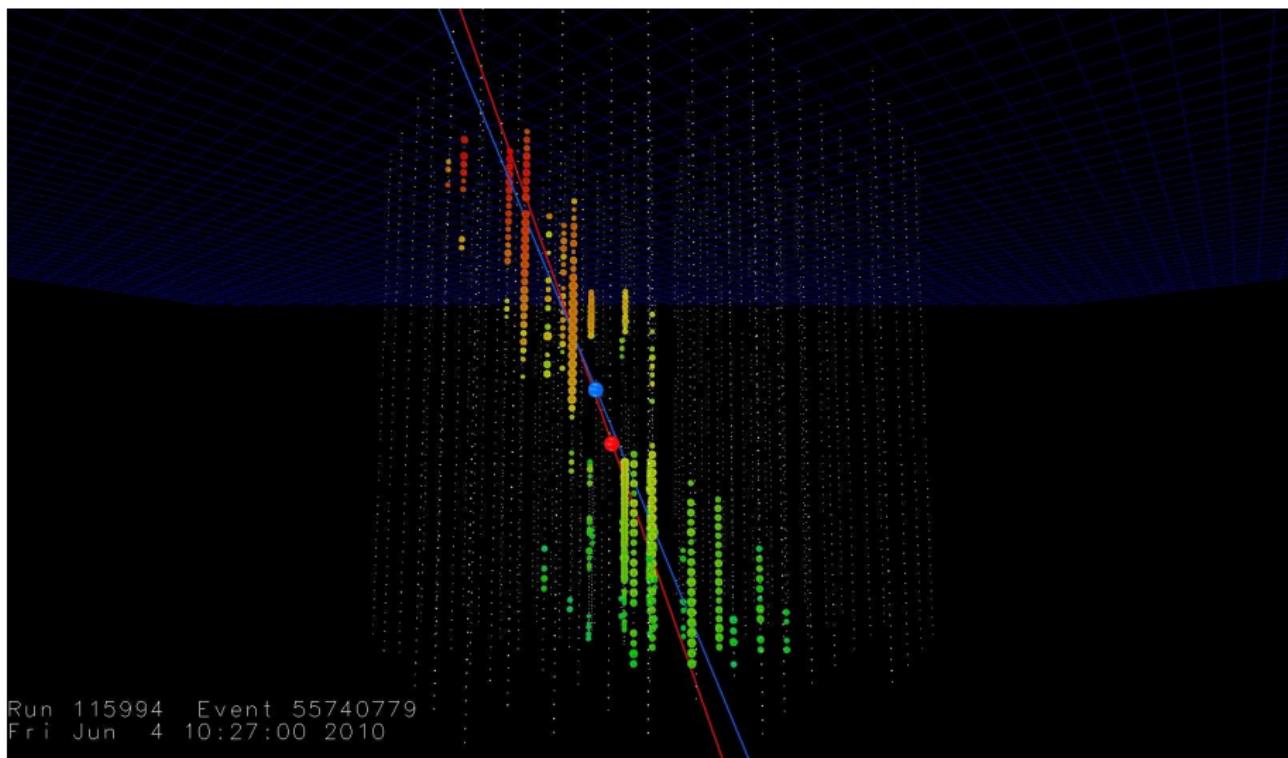
IceCube

- ▶ 1 km³ de hielo puro
- ▶ ubicado en la base EE.UU. Amundsen-Scott, en el Polo
- ▶ 86 cadenas entre 1 450 y 2 450 m
- ▶ 60 sensores por cadena
- ▶ taladro de agua caliente (88°C)
- ▶ 36 instituciones 252 colaboradores



Objetivo principal de IceCube:

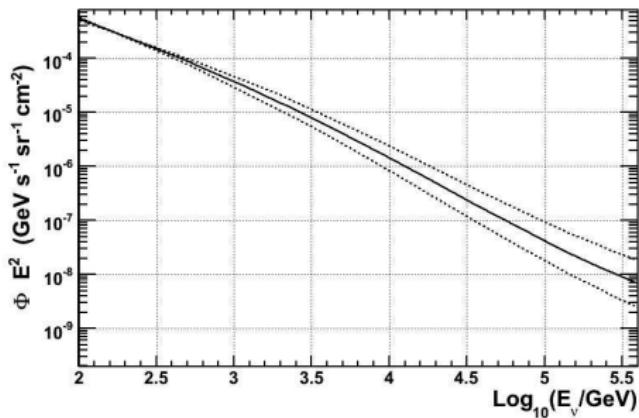
detectar el flujo de neutrinos cosmológicos de ultra-alta energía
(PeV-TeV)



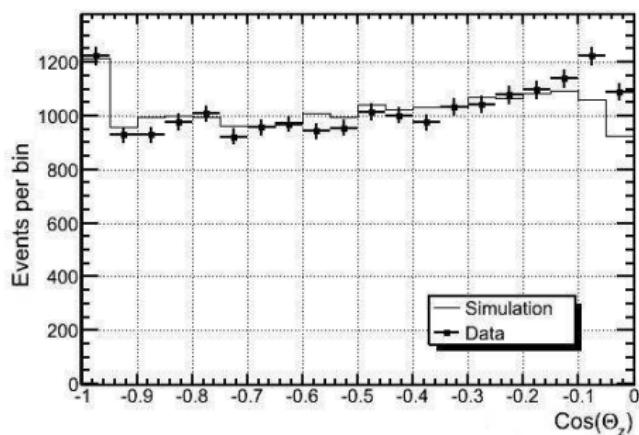
Run 115994 Event 55740779
Fri Jun 4 10:27:00 2010

¿Qué se puede hacer con IceCube?

Mejor medición del espectro de ν_μ 's atmosféricos:



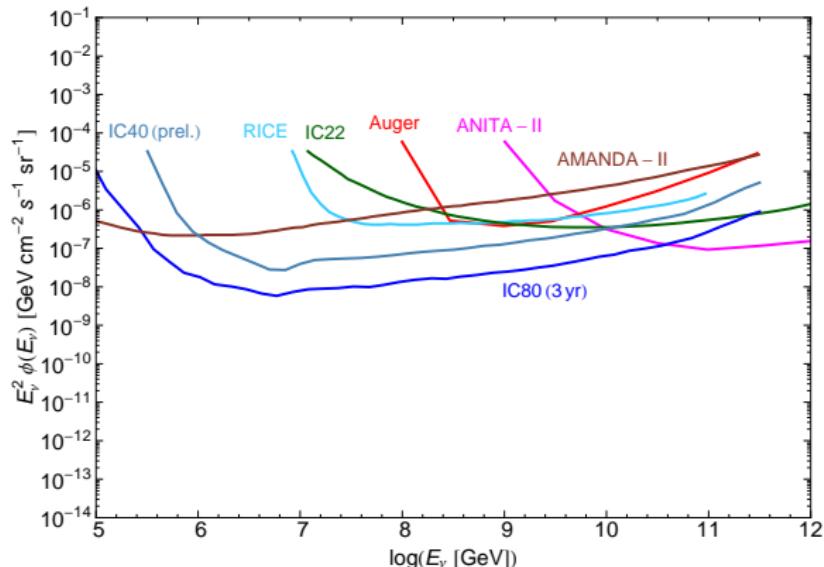
IceCube Collaboration, [arXiv:1010.3980]



Objetivo principal de IceCube:

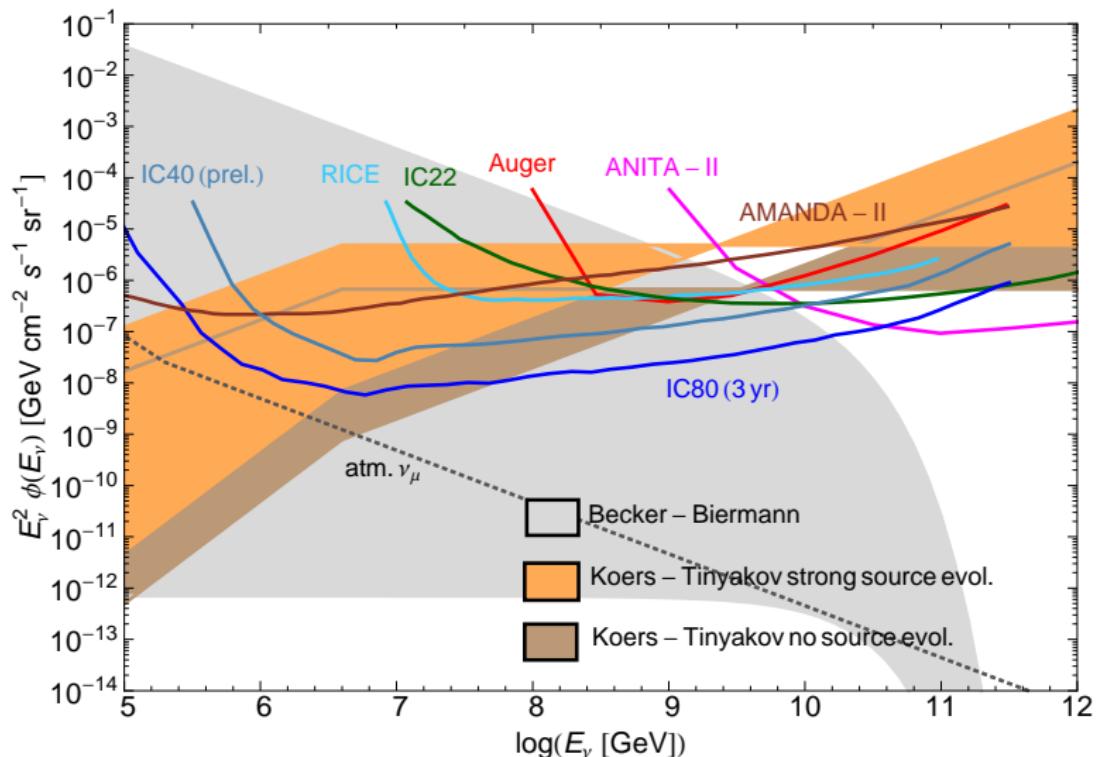
detectar el flujo de neutrinos cosmológicos de ultra-alta energía (PeV-TeV)

Si no se observa una señal, es posible poner una cota superior al flujo:



Actualmente, la cota más restrictiva la ha puesto **IceCube-40**.

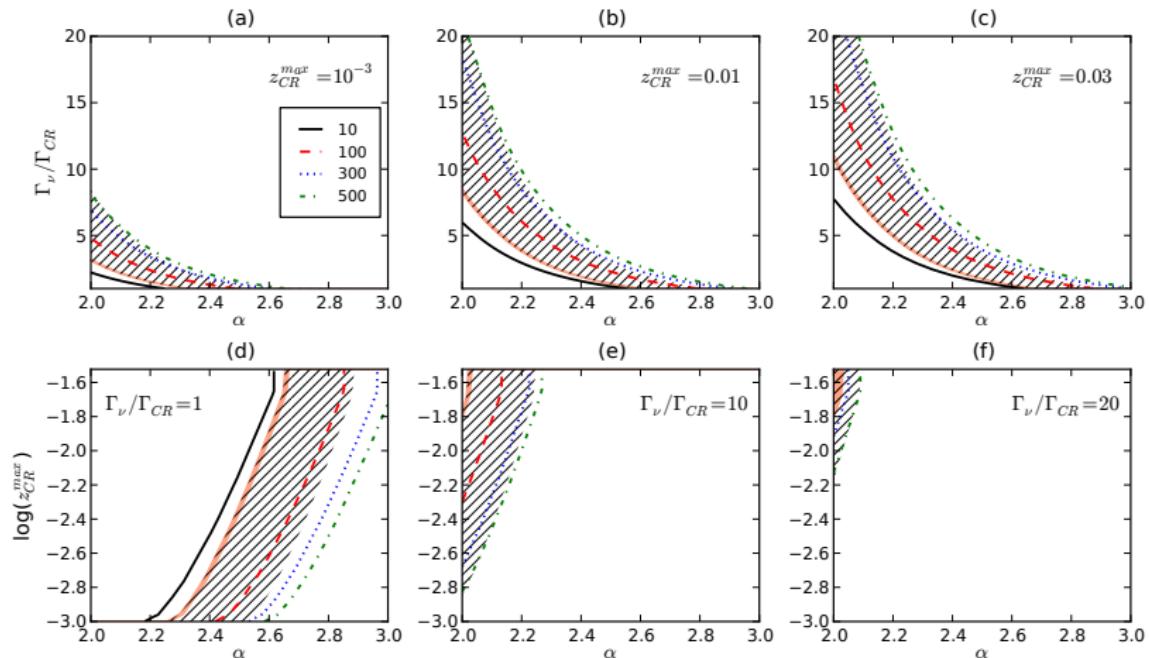
Los límites restringen los modelos de producción de neutrinos en AGN:



C.A. Argüelles, M.B., A.M. Gago [arXiv:1008.1396]

C.A. Argüelles, M.B., A.M. Gago, En preparación

Los límites restringen los modelos de producción de neutrinos en AGN:



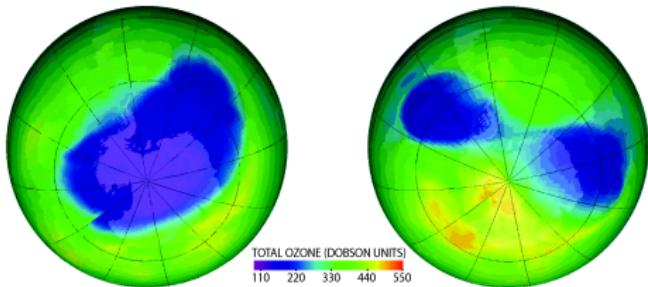
C.A. Argüelles, M.B., A.M. Gago [arXiv:1008.1396]

También se puede probar **física fundamental nueva**:

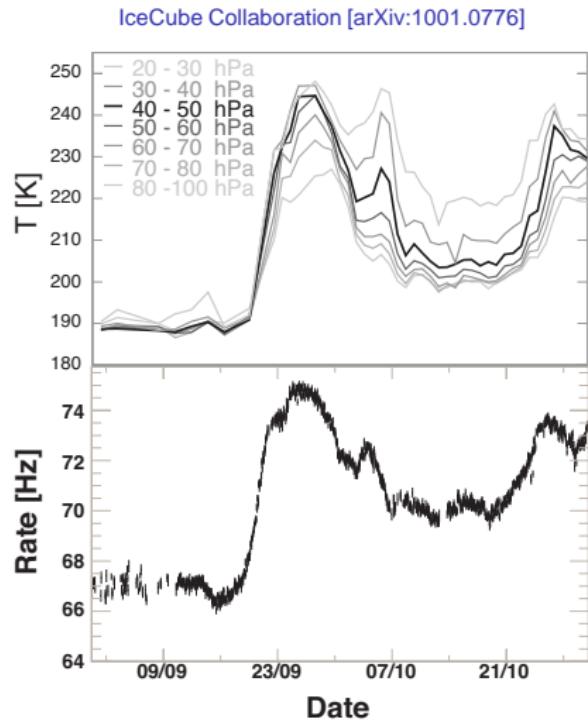
- ▶ rompimiento de la simetría CPT
- ▷ M.B., A.M. Gago, C. Peña-Garay, JHEP **1004**, 066 (2010) [arXiv:1001.4878]
- ▷ J.L. Bazo, M.B., A.M. Gago, O.G. Miranda, Int. J. Mod. Phys. **A 24**, 5819 (2009) [arXiv:0907.1979]
- ▶ contribuciones supersimétricas a las oscilaciones de neutrinos
- ▷ M.B., A.M. Gago, J. Jones, En preparación
- ▶ decoherencia
- ▶ decaimiento de neutrinos
- ▶ violación del principio de equivalencia
- ▶ dimensiones extra
- ▶ monopolos magnéticos
- ▶ etc.

Setiembre 2002: temperatura de estratosfera antártica aumentó de 40 a 60 K en una semana

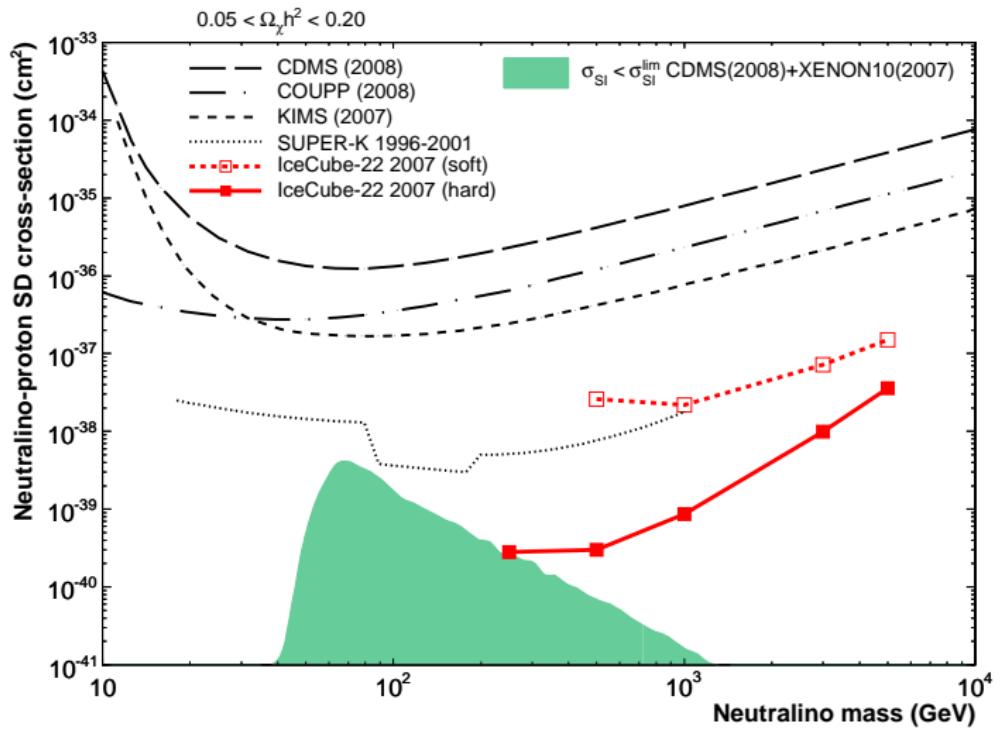
El agujero de la capa de ozono se dividió en dos:



Cambio de temperatura correlacionado al número de muones profundos en AMANDA ►



IceCube también puede restringir el espacio de parámetros de modelos de materia oscura:



Conclusiones

- IceCube es un instrumento útil para poner a prueba modelos de:
 - ▷ astrofísica
 - ▷ física más allá del Modelo Estándar
 - ▷ materia oscura
- Capaz de confirmar si los rayos cósmicos y neutrinos extragalácticos son generados en los mismos procesos.
- Es posible hacer física teórica basada en IceCube. Se necesita:
 - ▷ base teórica sólida, mas no exhaustiva (se aprende al hacer)
 - ▷ acceso a bibliografía (repositorios públicos)
 - ▷ curiosidad
 - ▷ financiamiento para dedicación a tiempo completo
- Posibilidad de formar parte de algunas de las colaboraciones de neutrinos en la Antártida.

- IceCube es un instrumento útil para poner a prueba modelos de:
 - ▷ astrofísica
 - ▷ física más allá del Modelo Estándar
 - ▷ materia oscura
- Capaz de confirmar si los rayos cósmicos y neutrinos extragalácticos son generados en los mismos procesos.
- Es posible hacer física teórica basada en IceCube. Se necesita:
 - ▷ base teórica sólida, mas no exhaustiva (se aprende al hacer)
 - ▷ acceso a bibliografía (repositorios públicos)
 - ▷ curiosidad
 - ▷ financiamiento para dedicación a tiempo completo
- Posibilidad de formar parte de algunas de las colaboraciones de neutrinos en la Antártida.

- IceCube es un instrumento útil para poner a prueba modelos de:
 - ▷ astrofísica
 - ▷ física más allá del Modelo Estándar
 - ▷ materia oscura
- Capaz de confirmar si los rayos cósmicos y neutrinos extragalácticos son generados en los mismos procesos.
- Es posible hacer física teórica basada en IceCube. Se necesita:
 - ▷ base teórica sólida, mas no exhaustiva (se aprende al hacer)
 - ▷ acceso a bibliografía (repositorios públicos)
 - ▷ curiosidad
 - ▷ financiamiento para dedicación a tiempo completo
- Posibilidad de formar parte de algunas de las colaboraciones de neutrinos en la Antártida.

- IceCube es un instrumento útil para poner a prueba modelos de:
 - ▷ astrofísica
 - ▷ física más allá del Modelo Estándar
 - ▷ materia oscura
- Capaz de confirmar si los rayos cósmicos y neutrinos extragalácticos son generados en los mismos procesos.
- Es posible hacer física teórica basada en IceCube. Se necesita:
 - ▷ base teórica sólida, mas no exhaustiva (se aprende al hacer)
 - ▷ acceso a bibliografía (repositorios públicos)
 - ▷ curiosidad
 - ▷ financiamiento para dedicación a tiempo completo
- Posibilidad de formar parte de algunas de las colaboraciones de neutrinos en la Antártida.