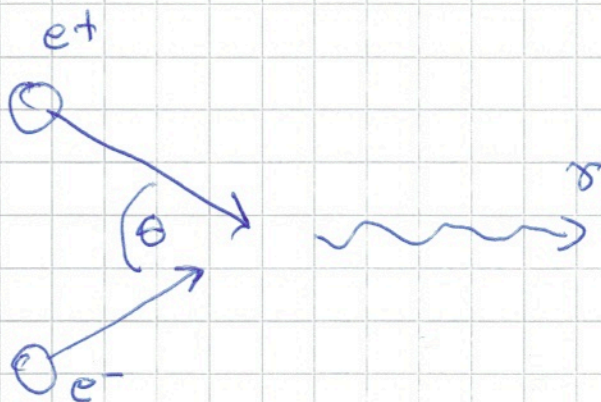




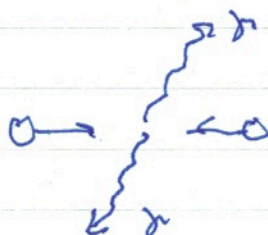
No is possible

cons. de énergie: $E_\gamma = 2E_e$
 $\frac{E_\gamma}{c} = 2p_e \cos \theta \Rightarrow \frac{E_\gamma}{(E_\gamma/c)} = \frac{2E_e}{2p_e \cos \theta}$

$$c = \frac{E_e}{p_e \cos \theta} \Rightarrow \cos \theta = \frac{E_e}{c p_e} = \frac{E_e}{\sqrt{E_e^2 - (mc^2)^2}}$$

1p, $\cos \theta = \frac{E_e}{\sqrt{E_e^2 - (mc^2)^2}} > 1 \Rightarrow \cos \theta > 1 \rightarrow \leftarrow$

γ tienen momentum (siempre). un solo γ violaría la conservación de $\vec{P}$



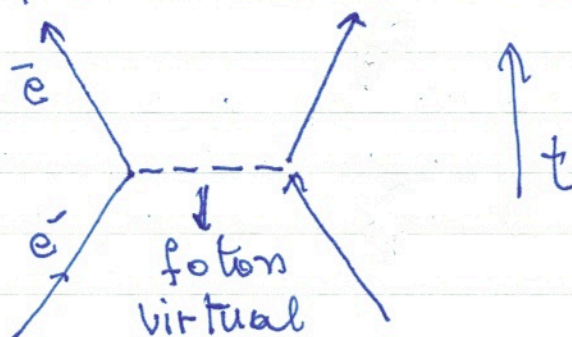
MESONES

1930..

Proton, electron, neutrón
+
Fotón, neutrino, positron

Problema: que mantiene unido a un núcleo?

partículas
cargadas



Clasificación de partículas

HADRONES $\rightarrow$ interaccionan a través de la F. Fuerte.

se dividen en mesones y bariones

Mesones: $SPIN = 0, 1$
 $m_e < m < m_p$

decaen en e^-, e^+, ν y fotones

PION = más ligero $m = 140 \text{ MeV}/c^2$
 $SPIN = 0$

Meson K: $m = 500 \text{ MeV}/c^2$
 $SPIN = 0$

Bariones ("heavy") $m > m_p$
 $SPIN$ semi-entero ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$)

ej. protones y neutrones

todo barión decae de modo q' hay un protón al final.

$\Sigma^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$ (10^{-10} s)

hiperon

$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ ($3 \times 10^{-10} \text{ s}$)

Leptones ("Livianos") $\rightarrow$ participan en las interacciones
electrom- y débiles

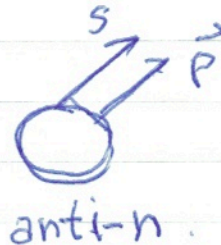
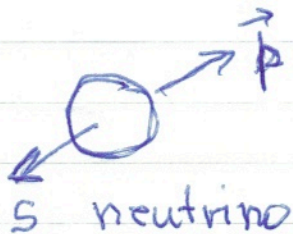
Spin = $1/2$. Parecen ser verdaderos partículas
elementales, sin tamaño ni estructura.

Hay solo 6 de ellos: e^- , μ^- , τ^- + 3 neutrinos
asoc. con c/u de ellos ν_e (neutrino electron),
 ν_μ (neutrino muón) y ν_τ (neutrino tau)

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

cada leptón tiene su antipartícula

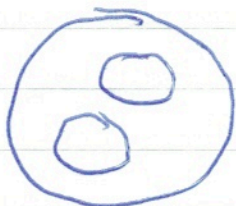
neutrino y anti-neutrino tienen distinta helicidad



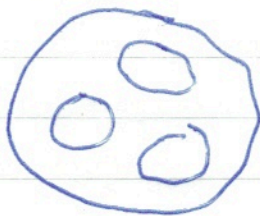
$$H \sim S \cdot P$$

neutrinos poseen pequeñas masas $\sim eV/c^2$

Los hadrones son partículas compuestas, de tamaño 1 f (10^{-15} m). Están formados de quarks ← puntuales, sin estructura.



meson



barión

B = barión

L_e = electrón

L _{μ} = muón

L _{τ} = tau

S = extrañeza

muon — — —> fusion fría mediada por muones

S. Jones (BYU, 1989). Producción de neutrones provenientes de la fusión de deuterio-tritio.

Table 15.2 Some Particles and Their Properties

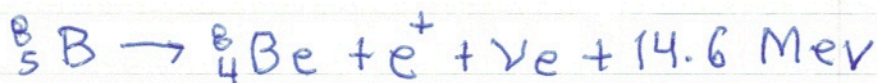
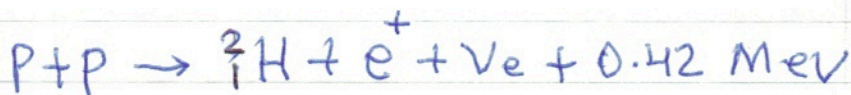
Category	Particle Name	Symbol	Anti-particle	Mass (MeV/c ²)	B	L _e	L _μ	L _τ	S	Lifetime (s)	Principal Decay Modes ^a
Leptons	Electron	e ⁻	e ⁺	0.511	0	+1	0	0	0	Stable	
	Electron-neutrino	ν _e	$\bar{\nu}_e$	$<2.8 \times 10^{-6}$	0	+1	0	0	0	Stable	
	Muon	μ ⁻	μ ⁺	105.7	0	0	+1	0	0	2.19×10^{-6}	e ⁻ $\bar{\nu}_e$ ν _μ
	Muon-neutrino	ν _μ	$\bar{\nu}_\mu$	$<3.5 \times 10^{-6}$	0	0	+1	0	0	Stable	
	Tau	τ ⁻	τ ⁺	1784	0	0	0	+1	0	3.3×10^{-13}	μ ⁻ $\bar{\nu}_\mu$ ν _τ , e ⁻ $\bar{\nu}_e$ ν _τ
	Tau-neutrino	ν _τ	$\bar{\nu}_\tau$	$<8.4 \times 10^{-6}$	0	0	0	+1	0	Stable	
Hadrons	Mesons	Pion	π ⁺	π ⁻	139.6	0	0	0	0	2.60×10^{-8}	μ ⁺ ν _μ
			π ⁰	Self	135.0	0	0	0	0	0.83×10^{-16}	2γ
		Kaon	K ⁺	K ⁻	493.7	0	0	0	+1	1.24×10^{-8}	μ ⁺ ν _μ
			K _S ⁰	$\bar{K}_S^0$	497.7	0	0	0	+1	0.89×10^{-10}	π ⁺ π ⁰ π ⁺ π ⁻
			K _L ⁰	$\bar{K}_L^0$	497.7	0	0	0	+1	5.2×10^{-8}	2π ⁰ π [±] e [∓] $\bar{\nu}_e$ 3π ⁰ π [±] μ [∓] $\bar{\nu}_\mu$
		Eta	η	Self	548.8	0	0	0	0	$<10^{-18}$	2γ, 3π ⁰
			η'	Self	958	0	0	0	0	2.2×10^{-21}	η π ⁺ π ⁻
	Baryons	Proton	p	$\bar{p}$	938.3	+1	0	0	0	Stable	
		Neutron	n	$\bar{n}$	939.6	+1	0	0	0	624	p e ⁻ $\bar{\nu}_e$
		Lambda	Λ ⁰	$\bar{\Lambda}^0$	1115.6	+1	0	0	-1	2.6×10^{-10}	p π ⁻ , n π ⁰
		Sigma	Σ ⁺	$\bar{\Sigma}^-$	1189.4	+1	0	0	-1	0.80×10^{-10}	p π ⁰ , n π ⁺
			Σ ⁰	$\bar{\Sigma}^0$	1192.5	+1	0	0	-1	6×10^{-20}	Λ ⁰ γ
			Σ ⁻	$\bar{\Sigma}^+$	1197.3	+1	0	0	-1	1.5×10^{-10}	n π ⁻
			Δ ⁺⁺	$\bar{\Delta}^-$	1230	+1	0	0	0	6×10^{-24}	p π ⁺
		Delta	Δ ⁺	$\bar{\Delta}^-$	1231	+1	0	0	0	6×10^{-24}	p π ⁰ , n π ⁺
			Δ ⁰	$\bar{\Delta}^0$	1232	+1	0	0	0	6×10^{-24}	n π ⁰ , p π ⁻
			Δ ⁻	$\bar{\Delta}^+$	1234	+1	0	0	0	6×10^{-24}	n π ⁻
			Xi	$\bar{\Xi}^0$	1315	+1	0	0	-2	2.9×10^{-10}	Λ ⁰ π ⁰
			Ξ^-	$\bar{\Xi}^+$	1321	+1	0	0	-2	1.64×10^{-10}	Λ ⁰ π ⁻
		Omega	Ω ⁻	Ω ⁺	1672	+1	0	0	-3	0.82×10^{-10}	Ξ^- π ⁰ , Ξ^0 π ⁻ , Λ ⁰ K ⁻

^aNotations in this column such as p π⁻, n π⁰ indicate two possible decay modes. In this case, the two possible decays are Λ⁰ → p + π⁻ and Λ⁰ → n + π⁰.

Misterio del neutrino solar

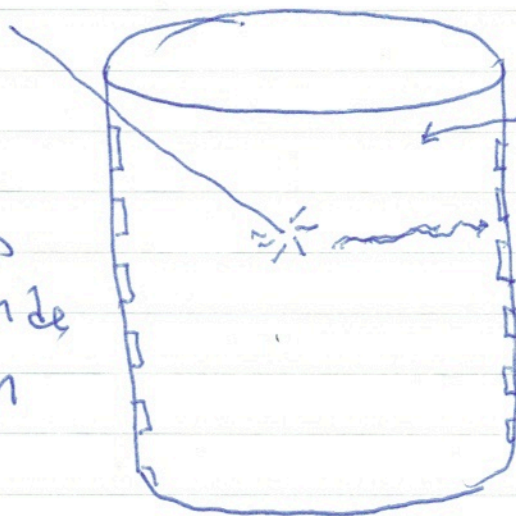


billones de ν_e
por cm^2 por seg



Mediciones desde 1960 $\rightarrow$ solo $1/3$ de los ν_e se observan en la Tierra

[el flujo esperado de ν_e se basó en el modelo estándar del sol y su producción de energía]

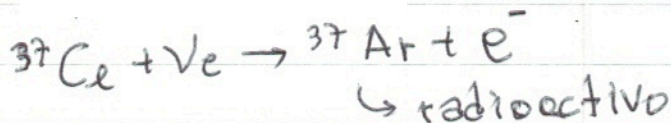


detecto
Kamiokande
Japón

18.000 TONS de H_2O

11.000 tubos fotomultiplicadores

Raymond Davies, Tetracloroetileno
(Dakota del Sur)



Kamiokande, Soudbury $\hookrightarrow$ alta velocidad.

explicación algunos ν_e durante el viaje
cambian en ν_μ o ν_τ , los cuales
no son detectados [ya q' los detectores fueron
diseñados para captar ν_e]

los cambios no son permanentes, sino q' ν_e
una oscilación

la frec. de oscilación dep. de las masas

Finalmente, usando el detector SNO (Sandsbury
neutrino observatory), con una técnica de
detección sensible a los 3 neutrinos, se comprobó
la oscilación de los neutrinos.

Leyes de conservación

conocidos: Energía, momento lineal, momento
angular, carga eléctrica

Nuevas leyes
de conservación } partículas elementales
origen empírico
no se cumplen 100%

Neutrino Oscillations

$\{ \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau \}$ = mezclas de $\{ \nu_1, \nu_2, \nu_3 \}$

$$\nu_\tau = \underbrace{U_{\tau 1}}_{m_1} \nu_1 + \underbrace{U_{\tau 2}}_{m_2} \nu_2 + \underbrace{U_{\tau 3}}_{m_3} \nu_3$$

caso especial, $\{ \nu_\mu, \nu_\tau \}$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\nu_\mu = \cos\theta \nu_2 - \sin\theta \nu_3$$

θ : mixing angle

$$\nu_\tau = \sin\theta \nu_2 + \cos\theta \nu_3$$

ν_μ hoy creado en $t=0$ con momento p

$$\nu_\mu(t) = \cos\theta \nu_2 e^{-iE_2 t/\hbar} - \sin\theta \nu_3 e^{-iE_3 t/\hbar}$$

$$\nu_2 \rightarrow E_2$$

$$\nu_3 \rightarrow E_3 \quad \text{estados estacionarios}$$

para ν_τ :

$$\nu_\tau(t) = \sin\theta \nu_2 e^{-iE_2 t/\hbar} + \cos\theta \nu_3 e^{-iE_3 t/\hbar}$$

next, condición matemática que en $t=0$ el neutrino es enteramente un neutrino μ

$$\nu_\tau(0) = 0$$

$$\begin{aligned} V_u^0 &= \cos\theta V_2 - \sin\theta V_3 & \begin{array}{l} \text{1} \end{array} \\ V_z^0 &= \sin\theta V_2 + \cos\theta V_3 & \begin{array}{l} \text{2} \end{array} \end{aligned} \quad \left| \begin{array}{l} \cos\theta \\ \sin\theta \end{array} \right.$$

$$\sin\theta V_u^0 = \sin\theta \cos\theta V_2 - \sin^2\theta V_3$$

$$\cos\theta V_z^0 = \cos\theta \sin\theta V_2 + \cos^2\theta V_3$$

$$\cos\theta V_z^0 - \sin\theta V_u^0 = V_3$$

$$\begin{aligned} \cos\theta V_u^0 &= \cos^2\theta V_2 - \sin\theta \cos\theta V_3 \\ \sin\theta V_z^0 &= \sin^2\theta V_2 + \sin\theta \cos\theta V_3 \end{aligned}$$

$$\cos\theta V_u^0 + \sin\theta V_z^0 = V_2$$

$$\psi(t) = \sin\theta (\cos\theta V_u^0 + \sin\theta V_z^0) e^{-i \frac{E_2 t}{\hbar}} +$$

$$\cos\theta (\cos\theta V_z^0 - \sin\theta V_u^0) e^{-i \frac{E_3 t}{\hbar}}$$

$$= \sin\theta \cos\theta \left(e^{-i \frac{E_2 t}{\hbar}} \cos\theta + e^{-i \frac{E_3 t}{\hbar}} \sin\theta \right) V_u^0 + \left(\sin^2\theta e^{-i \frac{E_2 t}{\hbar}} + \cos^2\theta e^{-i \frac{E_3 t}{\hbar}} \right) V_z^0$$

$$V_u^0 |V_z(t)\rangle =$$

$$\frac{1}{2} \sin(2\theta) e^{-i E_2 t} (1 - e^{-i (E_3 - E_2) t})$$

$$P(v_u \rightarrow v_z) = \frac{\sin 2\theta}{2} \left(1 - \cos \left(\frac{E_2 - E_3}{\hbar} t \right) \right)$$

Para P fijo y mayor que $m_2 c$ y $m_3 c$

$$E_2 = \sqrt{m_2^2 c^4 + p^2 c^2} = pc \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_2^2 c^4}{p^2 c^2} + \dots \right)$$

$$E_3 = \sqrt{m_3^2 c^4 + p^2 c^2} = pc \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_3^2 c^4}{p^2 c^2} + \dots \right)$$

$$E_2 - E_3 \approx \frac{m_2^2 c^4}{2pc} - \frac{m_3^2 c^4}{2pc} = \frac{(m_2^2 - m_3^2) c^3}{2p} //$$

another of the two antineutrino masses, but
in contrast, the neutrino is

$$v(0) = 0$$

