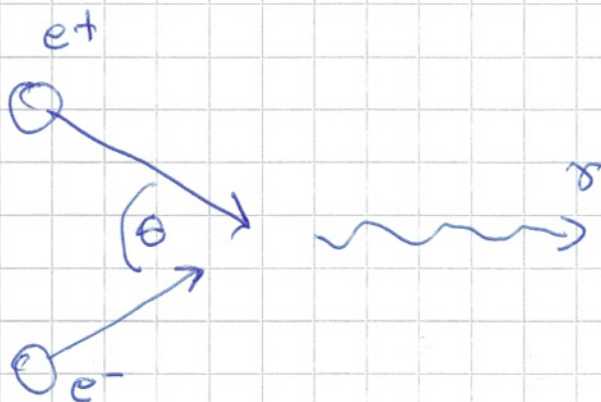


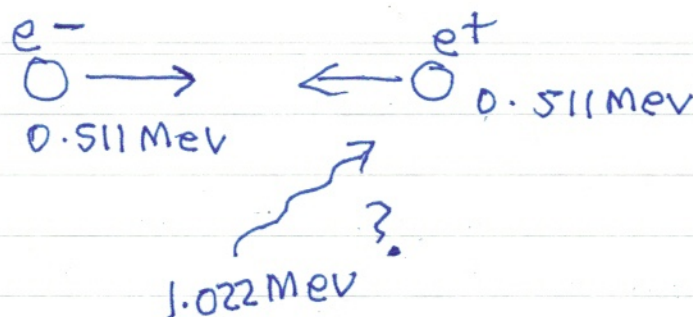


No is possible

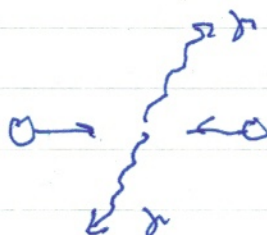
cons. de énergie: $E_\gamma = 2E_e \Rightarrow \frac{E_\gamma}{(E_\gamma/c)} = \frac{2E_e}{2p_e \cos \theta}$

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

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 $\vec{P}$



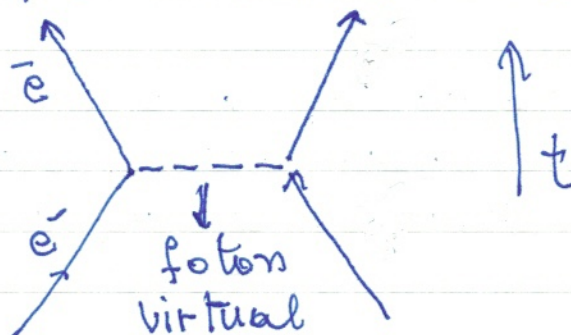
MESONES

1930..

Proton , electron , neutrons
+
Fotón , neutrino , positron

Problema.. que mantiene unido a un núcleo?

partículas
cargadas



Eq. de los nucleos

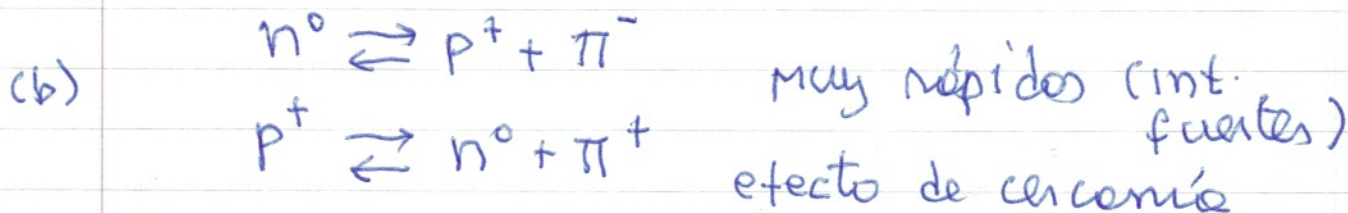
para $Z \approx N$ hay estabilidad

si $Z \gg N$ o $N \gg Z$ inestabilidad

neutrón aislado:



Dentro del núcleo:



la reacción (a) No tiene tiempo de ocurrir

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

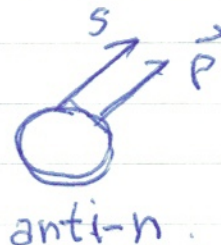
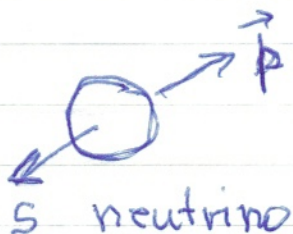
$Spin = 1/2$. Parecen ser verdaderos partículas
elementales, sin tamaño ni estructura.

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



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

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



meson



baryon

B = baryon

L_e = electron

L _{μ} = muon

L _{τ} = tau

S = extrañeza

Table 15.2 Some Particles and Their Properties

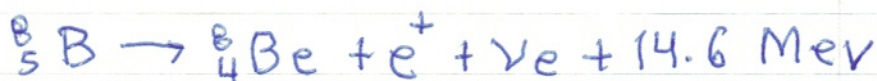
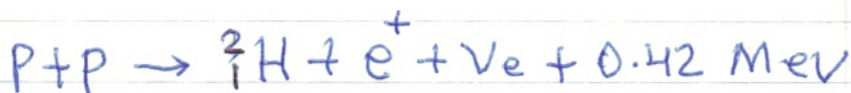
Category	Particle Name	Symbol	Anti-particle	Mass (MeV/c ²)	B	L _e	L _μ	L _τ	S	Lifetime (s)	Principal Decay Modes ^a
Leptons	Electron	e ⁻	e ⁺	0.511	0	+1	0	0	0	Stable	
	Electron-neutrino	ν _e	$\bar{\nu}_e$	$<2.8 \times 10^{-6}$	0	+1	0	0	0	Stable	
	Muon	μ ⁻	μ ⁺	105.7	0	0	+1	0	0	2.19×10^{-6}	e ⁻ $\bar{\nu}_e$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

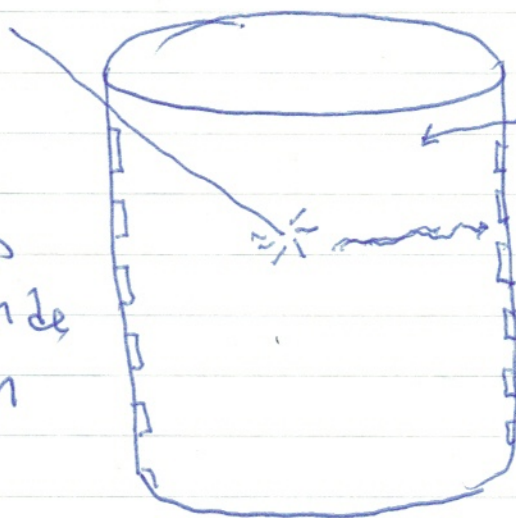


billones de ν_e
por cm^2 por seg



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

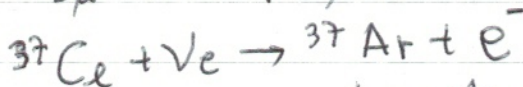
[el flujo esperado de ν_e se basó en el modelo estándar del sol y su producción de energía]



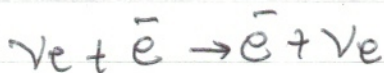
detecto
Kamiokande
Japón

18.000 TONS de H_2O

11.000 tubos fotomultiplicadores



$\hookrightarrow$ radioactivo



$\hookrightarrow$ 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' es
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

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

$$\nu_\tau = U_{\tau 1} \nu_1 + U_{\tau 2} \nu_2 + U_{\tau 3} \nu_3$$

$\downarrow$ $\downarrow$ $\downarrow$
 m_1 m_2 m_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

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

$$\begin{aligned} V_u^0 &= \cos\theta V_2 - \sin\theta V_3 & \left(\begin{array}{c} \cos\theta \\ \sin\theta \end{array} \right) \\ V_z^0 &= \sin\theta V_2 + \cos\theta V_3 \end{aligned}$$

~~$$V_u^0 =$$~~

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\langle V_u^0 | V_z(t) \rangle = \frac{1}{2} \sin(2\theta) e^{-iE_2 t} (1 - e^{-i(E_3 - E_2)t})$$

$$\langle V_u^0 | V_u^0 \rangle = 1$$

$$\langle V_u^0 | V_z^0 \rangle = 0$$

$$\langle V_z^0 | V_z^0 \rangle = 0$$

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

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

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

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

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