Introdução à Física das Partículas Elementares

4300422

edisciplinas.if.usp.br

(buscar: física das partículas elementares)

Fernando S Navarra

navarra@if.usp.br

Guilherme Germano

guilherme.germano@usp.br

Plano do Curso

14/03	Cap. 1
16/03	Cap. 1
21/03	Cap. 2
23/03	Cap. 2
28/03	Cap. 3
30/03	Cap. 3
04/04	
06/04	
11/04	Cap. 4
13/04	Cap. 4
18/04	Cap. 4
20/04	P1
25/04	Cap. 4
27/04	Cap. 5
02/05	Cap. 6
04/05	Cap. 6
09/05	Cap. 7
11/05	Cap. 7
16/05	Cap. 8
18/05	Cap. 8
23/05	P2
25/05	Cap. 9
30/05	Cap. 9
01/06	Cap. 9
06/06	
08/06	
13/06	Cap. 10
15/06	Cap. 10
20/06	Cap. 11 (Daniel)
22/06	Cap. 11
27/06	Cap. 11 (Lucas, Fran)
29/06	P3
04/07	Sub

Monitoria
27/06 18:00
Sala 2003

Aula 23

Capítulo 11

Interações Fracas

Quebrando espelhos...

Violação da Paridade !

A Paridade é
uma transformação !

Paridade

Transformação de paridade = inversão das coordenadas $\mathbf{x} \to -\mathbf{x}$

$$\psi(\mathbf{x},t) \to \psi'(\mathbf{x},t) = \hat{P}\psi(\mathbf{x},t) = \psi(-\mathbf{x},t)$$

$$\hat{P}\hat{P}\psi(\mathbf{x},t) = \hat{P}\psi(-\mathbf{x},t) = \psi(\mathbf{x},t) \quad \longrightarrow \quad \hat{P}\hat{P} = I$$

Esta deve ser uma transformação unitária : $\longrightarrow \quad \hat{P}^\dagger\hat{P} = I$

$\hat{P}^\dagger = \hat{P}$ Operador Hermitiano

Autovalores: $\hat{P}\psi(\mathbf{x},t) = P\psi(\mathbf{x},t)$

$$\hat{P}\hat{P}\psi(\mathbf{x},t) = P\hat{P}\psi(\mathbf{x},t) = P^2\psi(\mathbf{x},t)$$

$\hat{P}\hat{P} = I$ $\qquad P^2 = 1$

$$\boxed{P = \pm 1}$$

A Paridade também é um número !

Paridade

As leis da física são invariantes por transformação de paridade !

Exemplo: $$\vec{F} = m\,\vec{a}$$

$$\vec{r} \to -\vec{r} \qquad \begin{cases} \vec{F} \to -\vec{F} \\ \vec{a} \to -\vec{a} \end{cases}$$

$$\vec{F} = m\,\vec{a} \quad \longrightarrow \quad -\vec{F} = -m\,\vec{a} \quad \longrightarrow \quad \vec{F} = m\,\vec{a}$$

Com exceção das interações fracas !

A Paridade é um número quântico !

Conservado na QED e na QCD !

Não conservado nas Interações Fracas

Paridade Intrínseca

Partículas elementares têm paridade intrínseca !

Para uma partícula de Dirac o operador de paridade é :

$$\hat{P} = \gamma^0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Convenção : partículas têm paridade positiva e antipartículas têm paridade negativa !

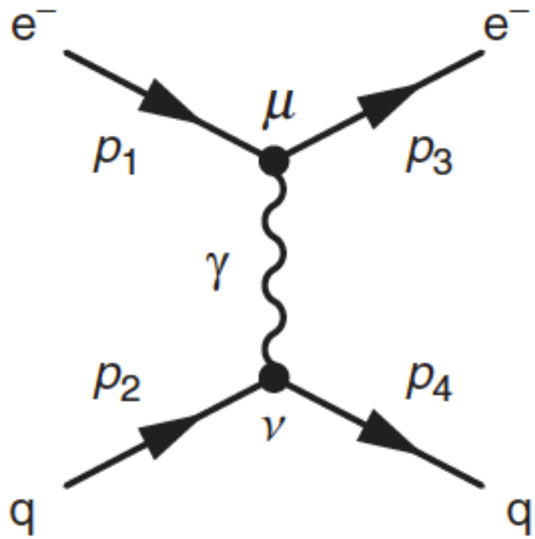
$$P(\mathrm{e}^-) = P(\nu_\mathrm{e}) = P(\mathrm{q}) = +1$$

$$P(\mathrm{e}^+) = P(\overline{\nu}_\mathrm{e}) = P(\overline{\mathrm{q}}) = -1$$

$$P(\gamma) = P(\mathrm{g}) = P(\mathrm{W}^\pm) = P(\mathrm{Z}) = -1$$

Conservação da Paridade em QED

$$e^- q \to e^- q$$



$$j_e^\mu = \overline{u}(p_3)\gamma^\mu u(p_1)$$

$$j_q^\nu = \overline{u}(p_4)\gamma^\nu u(p_2)$$

$$\mathcal{M} = \frac{Q_q e^2}{q^2} j_e \cdot j_q$$

$$\hat{P} = \gamma^0$$

$$u \xrightarrow{\hat{P}} \hat{P}u = \gamma^0 u$$

$$\overline{u} = u^\dagger \gamma^0 \xrightarrow{\hat{P}} (\hat{P}u)^\dagger \gamma^0 \;= u^\dagger \gamma^{0\dagger}\gamma^0 \;= u^\dagger \gamma^0 \gamma^0 \;= \overline{u}\gamma^0$$

$$\overline{u} \xrightarrow{\hat{P}} \overline{u}\gamma^0$$

$$j_e^\mu = \overline{u}(p_3)\gamma^\mu u(p_1) \xrightarrow{\hat{P}} \overline{u}(p_3)\gamma^0\gamma^\mu\gamma^0 u(p_1)$$

$$\gamma^0\gamma^0 = I \qquad \gamma^0\gamma^k = -\gamma^k\gamma^0$$

$$j_e^0 \xrightarrow{\hat{P}} \overline{u}\gamma^0\gamma^0\gamma^0 u = \overline{u}\gamma^0 u = j_e^0$$

$$j_e^k \xrightarrow{\hat{P}} \overline{u}\gamma^0\gamma^k\gamma^0 u = -\overline{u}\gamma^k\gamma^0\gamma^0 u = -\overline{u}\gamma^k u = -j_e^k$$

O produto escalar das duas 4-correntes dá :

$$j_e \cdot j_q = j_e^0 j_q^0 - j_e^k j_q^k \xrightarrow{\hat{P}} j_e^0 j_q^0 - (-j_e^k)(-j_q^k) = j_e \cdot j_q$$

$\boxed{\mathcal{M} \text{ é invariante por transformação de paridade !}}$

Paridade é conservada em QED e em QCD !!!

Consequências: J^{PC}

$$\rho^0(1^-) \rightarrow \pi^+(0^-) + \pi^-(0^-)$$

S=1	S=0	S=0
L=0	L=0	L=0
J=1	J=0	J=0

$$l = 1$$

$$\eta(0^-) \rightarrow \pi^+(0^-) + \pi^-(0^-)$$

S=0	S=0	S=0
L=0	L=0	L=0
J=0	J=0	J=0

$$l = 0$$

Momento angular total conservado !

$$P = P(1).P(2).(-1)^l$$

Antes: P = -1

Depois: P = (-1).(-1). (-1) = -1

Paridade é conservada !

Reação ocorre !

Antes: P = -1

Depois: P = (-1).(-1). 1 = +1

Paridade não é conservada !

Reação não ocorre !

A Experiência da madame Wu

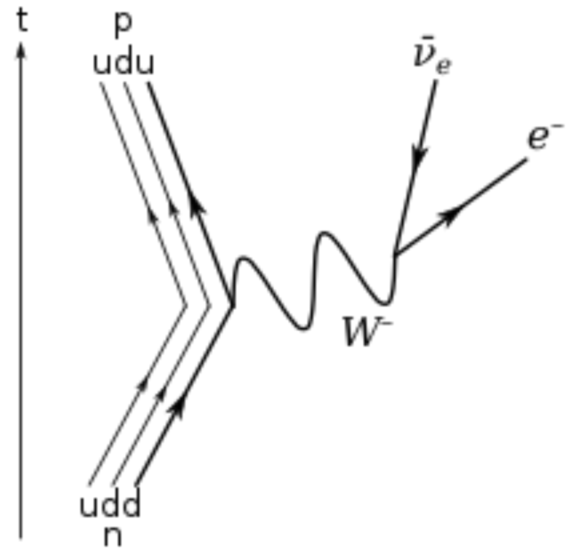
Violação da Paridade no Decaimento Beta Nuclear

$$^{60}_{27}\mathrm{Co} \longrightarrow \, ^{60}_{28}\mathrm{Ni} + e^- + \bar{\nu}_e$$

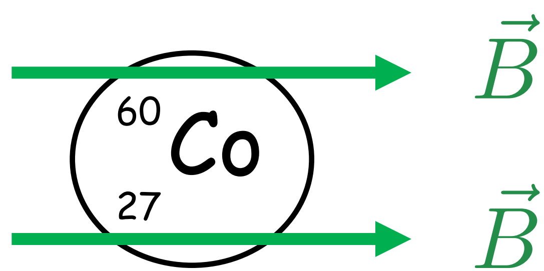
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$(udd) \quad (udu)$$

$$d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$$

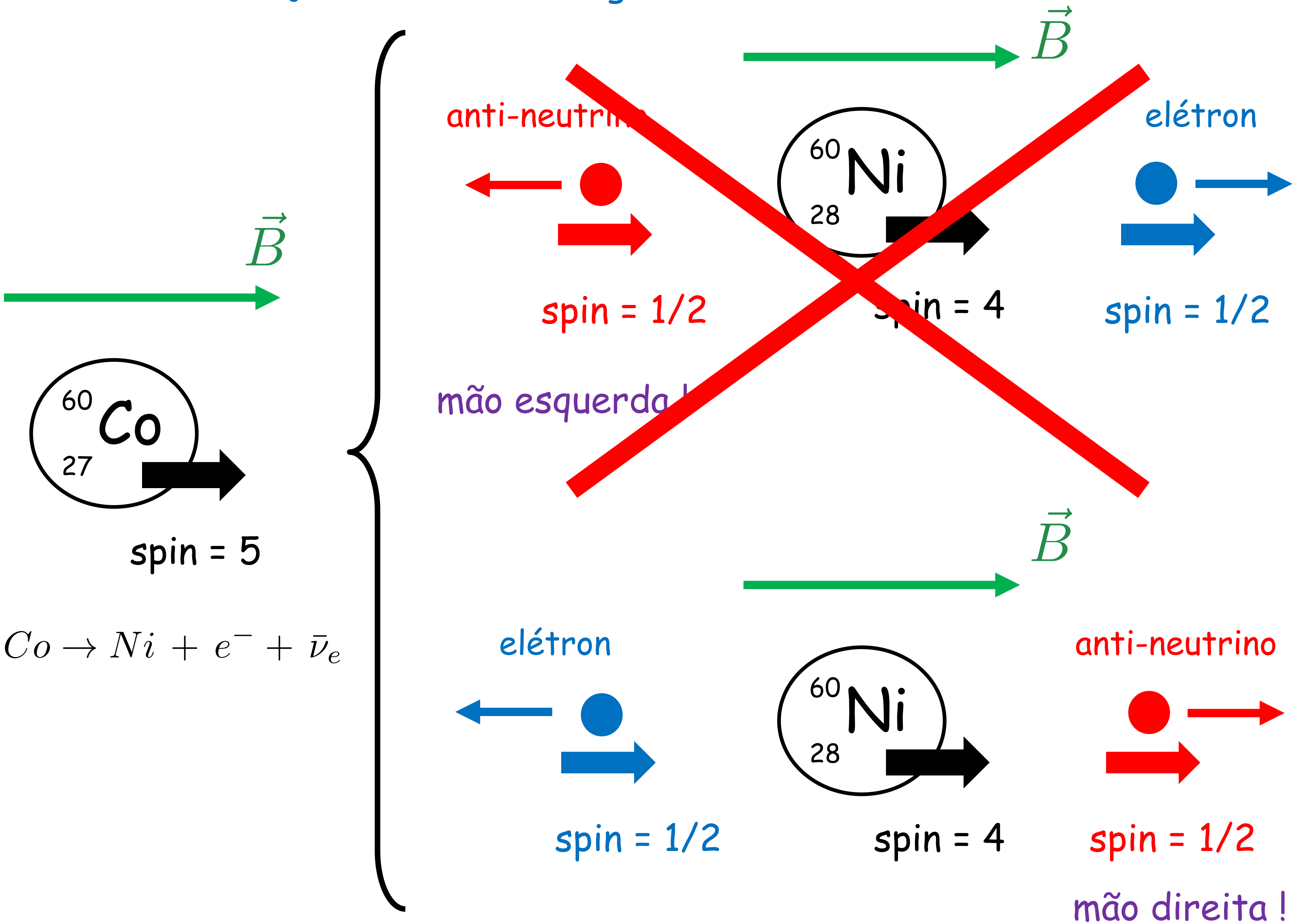


Átomo de cobalto em repouso



Campo magnético intenso

Conservação do momento angular e do momento linear

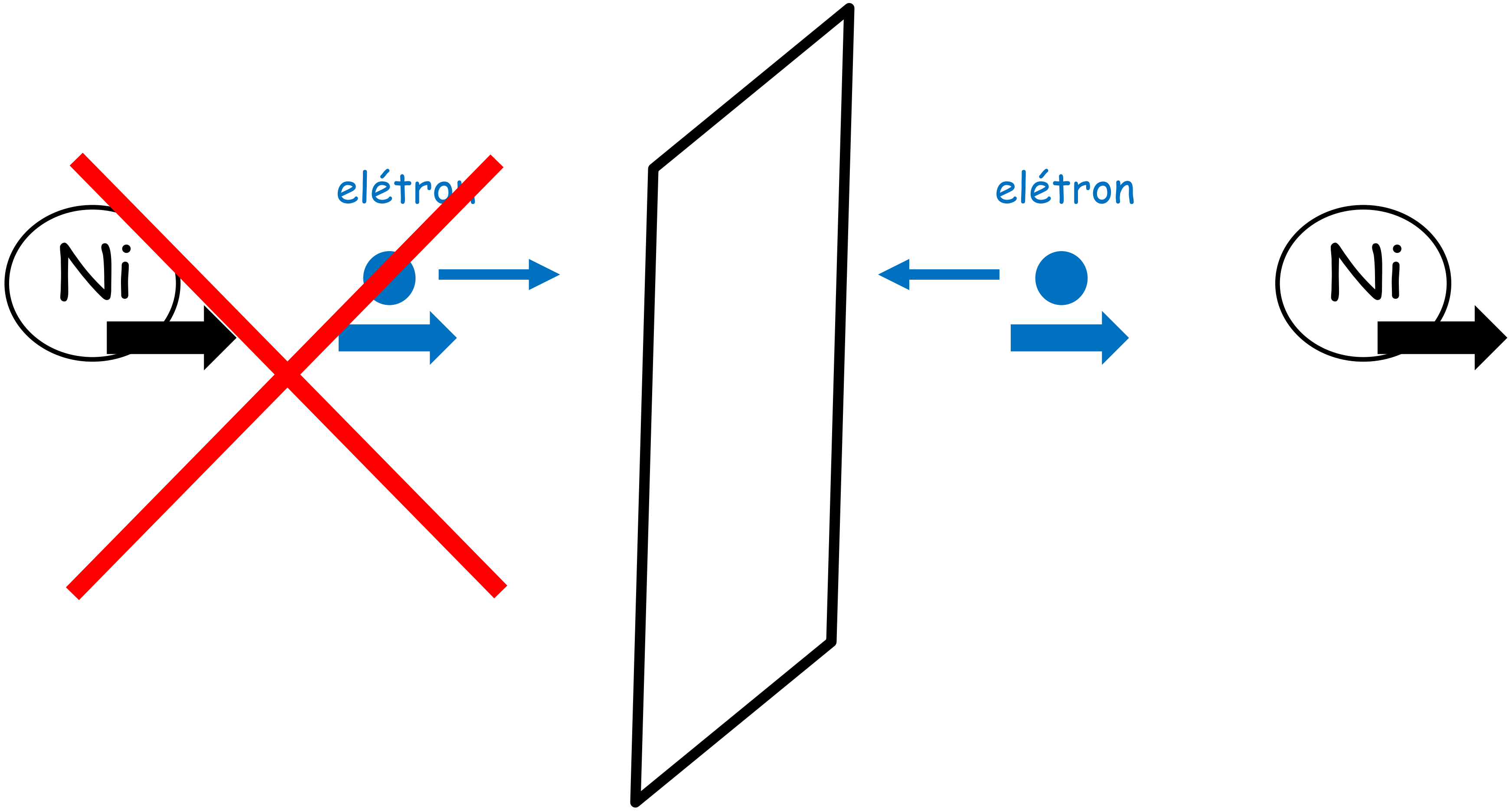


O espelho

O espelho "faz" a transformação de paridade.

Não existe a imagem especular do segundo processo

Quando a paridade é conservada ela existe !



Só observamos elétrons numa direção !

Só existem antineutrinos mão direita !

Só existem neutrinos mão esquerda !

Madame Wu

Prêmio Wolf 1978

Prêmio Nobel 1957

T.D. Lee and C.N. Yang

Porque só existem neutrinos
de mão esquerda ?

O que isso tem a ver
com paridade ?

A corrente das interações fracas

A corrente vetorial na QED e QCD : $j^\mu = \overline{u}(p')\gamma^\mu u(p)$

Vamos chutar a corrente nas interações fracas :

$$j^\mu \propto \overline{u}(p')(g_V\gamma^\mu + g_A\gamma^\mu\gamma^5)u(p) \;= g_V j_V^\mu + g_A j_A^\mu$$

onde : $j_V^\mu = \overline{u}(p')\gamma^\mu u(p)$ $\qquad j_A^\mu = \overline{u}(p')\gamma^\mu\gamma^5 u(p)$

$$j_A^\mu = \overline{u}\gamma^\mu\gamma^5 u \xrightarrow{\hat{P}} \overline{u}\gamma^0\gamma^\mu\gamma^5\gamma^0 u \;= -\overline{u}\gamma^0\gamma^\mu\gamma^0\gamma^5 u \qquad \gamma^5\gamma^0 = -\gamma^0\gamma^5$$

$$\begin{cases} j_A^0 = \xrightarrow{\hat{P}} -\overline{u}\gamma^0\gamma^0\gamma^0\gamma^5 u \;= -\overline{u}\gamma^0\gamma^5 u \;= -j_A^0 \\ j_A^k = \xrightarrow{\hat{P}} -\overline{u}\gamma^0\gamma^k\gamma^0\gamma^5 u \;= +\overline{u}\gamma^k\gamma^5 u \;= +j_A^k \end{cases}$$

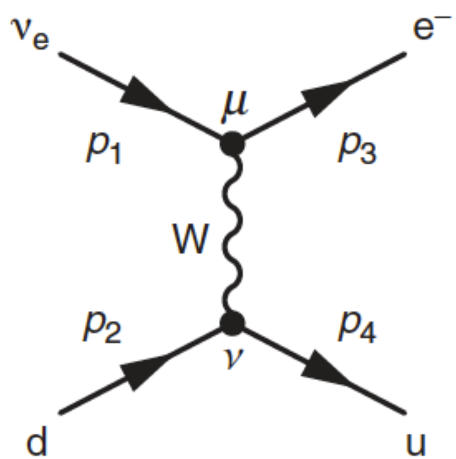
O produto escalar de duas correntes axiais é invariante por paridade:

$$j_1 \cdot j_2 = j_1^0 j_2^0 - j_1^k j_2^k \quad \xrightarrow{\hat{P}} (-j_1^0)(-j_2^0) - j_1^k j_2^k \quad = j_1 \cdot j_2.$$

Resumindo: $j_V^0 \xrightarrow{\hat{P}} +j_V^0, \quad j_V^k \xrightarrow{\hat{P}} -j_V^k, \qquad j_A^0 \xrightarrow{\hat{P}} -j_A^0, \quad j_A^k \xrightarrow{\hat{P}} +j_A^k.$

$$j_V \cdot j_A \longrightarrow -j_V \cdot j_A$$

Vamos estudar o processo:



$$j_{\nu e}^{\mu} = \overline{u}(p_3)(g_V \gamma^{\mu} + g_A \gamma^{\mu}\gamma^5)u(p_1) \quad = g_V j_{\nu e}^{V} + g_A j_{\nu e}^{A}$$

$$j_{du}^{\nu} = \overline{u}(p_4)(g_V \gamma^{\nu} + g_A \gamma^{\nu}\gamma^5)u(p_2) \quad = g_V j_{du}^{V} + g_A j_{du}^{A}.$$

FIM

$$\mathcal{M}_{fi} \propto j_{\nu e} \cdot j_{du} = g_V^2 j_{\nu e}^V \cdot j_{du}^V + g_A^2 j_{\nu e}^A \cdot j_{du}^A + g_V g_A (j_{\nu e}^V \cdot j_{du}^A + j_{\nu e}^A \cdot j_{du}^V)$$

$$j_{\nu e} \cdot j_{du} \xrightarrow{\hat{P}} g_V^2 j_{\nu e}^V \cdot j_{du}^V + g_A^2 j_{\nu e}^A \cdot j_{du}^A - g_V g_A (j_{\nu e}^V \cdot j_{du}^A + j_{\nu e}^A \cdot j_{du}^V)$$

$|g_V| = |g_A|$ Violação máxima

Interação $V - A$

$$\frac{-ig_W}{\sqrt{2}} \frac{1}{2} \gamma^\mu (1 - \gamma^5)$$

$$j^\mu = \frac{g_W}{\sqrt{2}} \overline{u}(p') \frac{1}{2} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) u(p).$$

A estrutura quiral das interações fracas

$$\begin{cases} P_R = \frac{1}{2}(1+\gamma^5) & \text{projetor direito} \\ P_L = \frac{1}{2}(1-\gamma^5) & \text{projetor esquerdo} \end{cases}$$

Qualquer espinor pode ser decomposto em parte direita e parte esquerda :

$$u = \frac{1}{2}(1+\gamma^5)u + \frac{1}{2}(1-\gamma^5)u \quad = P_R u + P_L u = a_R u_R + a_L u_L$$

A corrente V-A seleciona a componente de mão esquerda.

A de mão direita dá zero :

$$j^{\mu}_{RR} = \frac{g_W}{\sqrt{2}}\,\overline{u}_R(p')\gamma^{\mu}\frac{1}{2}(1-\gamma^5)u_R(p) \qquad = \frac{g_W}{\sqrt{2}}\,\overline{u}_R(p')\gamma^{\mu}P_L u_R(p) = 0,$$

$$\text{A corrente V-A} \begin{cases} \text{seleciona a componente de mão esquerda.} \\ \\ \text{viola a paridade} \end{cases}$$