Muito bem!

Violação CP

Rui Miguel Silva

1 de novembro de 2021

50%

1 Breve Introdução

De uma forma muito breve, o princípio de simetria CP refere que as leis físicas que descrevem e actuam numa partícula devem ser iguais mesmo quando essa partícula é permutada pela sua anti-partícula (simetria de carga) e as suas coordenadas espaciais são invertidas (simetria de paridade). Contudo, essa simetria é violada em determinados tipos de interacção fraca.

1.1 Motivação

Até antes de uma prova experimental, era tido como verdade que a conservação da paridade seria uma quantidade sempre conservada, tal como a conservação do momento ou a conservação de energia. A experiência da Madame Wu veio provar o contrário. Apesar das interacções electromagnéticas e as fortes preservarem a conservação da paridade, com a interacção fraca não havia evidências, de facto, a apoiar ou a desmentir.

2 Experiência da Madame Wu

A idealização desta experiência lida com o aspecto abstracto que se uma determinada interacção respeita uma simetria de paridade, então caso a orientação esquerda-direita de um sistema fosse permutada, a interacção iria ocorrer exactamente da mesma maneira.

O foco desta experiência foi então, determinar se esta conservação seria verdadeira para o caso das interacções fracas. Para isso, olhou-se para os produtos de decaimento que seriam emitidos do Cobalto-60, e se estes estariam a decair para uma determinada direcção ou não.

De forma a testar esta hipótese, a Madame Wu necessitava de três aspectos:

- Uma partícula com um núcleo electrónico que decaísse devido a uma interacção fraca (Decaimento β, onde uma partícula beta é ejectada com alta energia e a alta velocidade do núcleo atómico levando à formação de um isótopo.)
- Um núcleo atómico que tivesse um spin intrínseco bem definido.
- Que todos os núcleos atómicos possuíssem a mesma orientação de spin.

2.1 De uma forma simples...

Para isso, olhou-se para os produtos de decaimento que seriam emitidos do Cobalto-60, e se estes estariam a decair para uma determinada direcção ou não. O Cobalto-60 possui spin intrínseco bem definido, e sendo o spin uma forma de momento angular, este não se altera quando há uma inversão do sistema de coordenadas devido a uma reflexão em relação à origem do referencial (é um pseudovector). Ok!

Por outro lado, a direcção por onde os produtos de decaimento são emitidos é alterada devido à acção da paridade (porque o momento é um vector polar).

Logo de forma a provar a conservação da paridade, seria verificar que os produtos de decaimento não optam por uma direcção específica, ou seja, emitem-se em ambas as direcções com a mesma probabilidade. Assim ao aplicar um "espelho"ao sistema verifica-se que não existe uma preferência numa determinada direcção, existindo assim uma simetria.

Muito bem!

2.2 De uma forma mais teórica

A experiência estudou as transições β do núcleo atómico do cobalto-50 polarizado.

$$^{50}_{27}\text{Cu} \rightarrow ^{50}_{28}\text{Ni} + e^- + \overline{\nu_e} \tag{1}$$

Onde durante o processo, um dos neutrões do núcleo cobalto-60 decai para um protão emitindo um electrão e um anti-neutrino electrão.

2.3 Resultados

Na experiência as amostras de ^{50}Cu foram todas alinhadas por um campo magnético externo $\overrightarrow{B}$ de forma a terem todas a mesma orientação. Constatou-se a existência de uma assimetria na direcção pela qual os electrões emitidos eram observados.
Descobriu-se que o sinal desta assimetria mudava quando o campo magnético era invertido, de tal maneira que os electrões preferem serem emitidos numa direcção oposta à do spin.

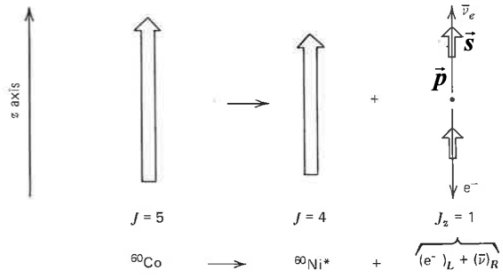

Figura 1: $J_{Cu} = +5$ mas como o campo magnético aplicado orienta esse momento segundo o eixo do z então $J_{Cu} = J_z = +5$.
O Níquel possui um J_{Ni} de $+4$, mas como há a conservação do momento angular total então $J_{Cu,z} = J_{Ni,z} + J_{e^-,z} + J_{\overline{\nu_e},z} = +5$. Pelo que $J_{e^-,z} = J_{\overline{\nu_e},z} = \frac{1}{2}$

De notar que : $\overrightarrow{J} = \overrightarrow{L} + \overrightarrow{S}$ Esta quantidade é chamada o momento angular total, e é sempre conservada. A mesma combina o spin e o momento angular orbital.

2.3.1 Análise de Resultados

Esta correlação entre o spin nuclear e o momento do electrão é explicado se a combinação requerida $J_x = 1$ for formada por um anti-neutrino "de lado direito"e um electrão "de lado esquerdo".
Desta forma pode-se definir uma orientação (onde $\overrightarrow{p}$ é o vector momento):

- partículas de orientação direita quando : $\overrightarrow{p} \uparrow$ e $\overrightarrow{S} \uparrow$.
- partículas de orientação esquerda quando : $\overrightarrow{p} \downarrow$ e $\overrightarrow{S} \uparrow$.

Desta forma, provou-se que a simetria de paridade não é conservada. É possível, de facto, definir esquerda e direita sem a necessidade de uma entidade humana como referência.

3 Aspectos Importantes

A evidência que foi acumulada de várias outras experiências deste género, é que em interacções fracas apenas anti-neutrinos direitos ($\overline{\nu_R}$) e neutrinos esquerdos (ν_L) estão envolvidos. A ausência da presença de anti-neutrinos esquerdos ($\overline{\nu_L}$) e e neutrinos direitos (ν_R), é uma clara violação da simetria de paridade.

Também a simetria de carga não é conservada, uma vez que não é invariante. Não é possível numa interacção fraca estar envolvido um anti-neutrino esquerdo por exemplo, logo as leis não se conservam para uma equivalente anti-partícula porque a interacção não chega a puder existir.

3.1 Quiralidade vs Elicidade

Introduz-se a helicidade (λ) como a projecção do vector spin na direcção do movimento. É definida como:

$$\lambda = \overrightarrow{s} \cdot \widehat{p} \tag{2}$$

onde

$$\widehat{p} = \frac{\overrightarrow{p}}{\|\overrightarrow{p}\|} \tag{3}$$

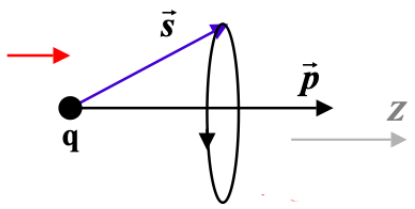

Figura 2: Helicidade para a direita : $\lambda > 0$, tem-se que $\overrightarrow{p} \uparrow$ e $\overrightarrow{S} \uparrow$

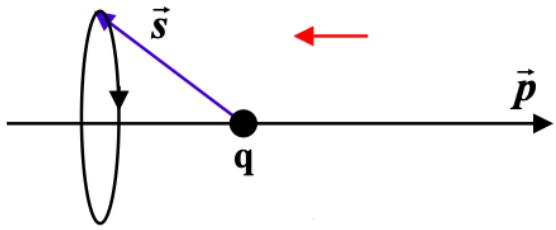

Figura 3: Helicidade para a esquerda : $\lambda < 0$, tem-se que $\overrightarrow{p} \uparrow$ e $\overrightarrow{S} \downarrow$

A Quiralidade é um conceito mais abstracto: refere-se mais se a partícula se transforma numa representação esquerda ou direita no grupo de Poincaré. Para partículas sem massa a quiralidade é igual à sua helicidade . Contudo no caso das partículas com massa como os fermiões, o mesmo não se pode dizer.

ok! ||

Num conceito mais geral matemático, dirá-se-ia que um fenómeno é quiral se o mesmo não for idêntico à sua imagem espelhada.No contexto de um fermião se existir invariância sobre uma simetria de paridade diz-se que existe uma simetria de quiralidade.

Deixo aqui para minha futura referência, um quadro que mais detalhadamente consegue fazer uma comparação entre a Quiralidade e a Helicidade

Referências

CP Violation. https://en.wikipedia.org/wiki/CP_violation.

Nakra, Rishabh. *The Amazing Story Of How This Nuclear Physicist Disproved A Crucial Law of Nature*. https://www.secretsofuniverse.in/parity-violation-weak-experiment/.

The Wu Experiment. https://en.wikipedia.org/wiki/Wu_experiment.

Weak interactions, parity, helicity. http://atlas.physics.arizona.edu/~shupe/Indep_Studies_2015/Notes_Goethe_Univ/L10_WeakInteractions_Lec_SS10.pdf.