Sistema de dois níveis em Física da Oscilação de Neutrinos.

Thiago M. Pradella*, Orlando L. G. Peres.

Resumo

Neste trabalho foi tratado o mecanismo de oscilação de neutrinos através de uma interpretação geométrica, fazendo uma analogia com o modelo de precessão de Larmor. Esse modelo, que não é discutido de forma completa em nenhum livro de física de partículas e de mecânica quântica, permite tratar a oscilação de neutrinos como um exemplo de sistema de dois níveis, se tornando um tópico apropriado para se abordar em um curso de mecânica quântica.

Palavras-chave:

oscilação de neutrinos, Precessão de Larmor, mecânica quântica.

Introdução

Os neutrinos são as partículas de matéria mais abundantes do universo, apesar de serem uma das partículas menos compreendidas pelo conhecimento humano. O Modelo Padrão das Partículas Elementares é a teoria que descreve todas as partículas existentes e que não prevê massa nem oscilação para os neutrinos. No entanto, experimentos confirmaram a oscilação de neutrinos, na qual foi dado o Prêmio Nobel em 2015, e então foi provado que os neutrinos possuem massa, ainda que pequena. Esse impasse é o que torna a física de neutrinos tão relevante, e compreender a oscilação de neutrinos profundamente passa a ser importante. Desse modo, o objetivo desse trabalho foi compreender a oscilação de neutrinos no vácuo e na matéria de um modo geométrico usando como analogia a precessão de Larmor. A discussão feita nesse trabalho é pouco abordada na literatura, e serve para mostrar que esse modelo pode ser abordado em um curso de mecânica quântica como um exemplo de sistema de dois níveis.

Resultados e Discussão

Quando uma partícula de spin $\frac{1}{2}$ está em um campo magnético uniforme $\vec{B}_0$, seu operador spin $\vec{S}$ gira em torno de $\vec{B}_0$, e este fenômeno é chamado de Precessão de Larmor¹. A equação que representa essa precessão é dada por:

$$\frac{d\vec{S}}{dt} = \gamma \vec{S} \times \vec{B}_0.$$

onde γ é o fator giromagnético da partícula. Esse é o exemplo mais estudado em sistemas de dois níveis em mecânica quântica. Usando o formalismo matriz densidade¹, foi obtido uma equação para a oscilação entre dois sabores de neutrinos (ν_e, ν_μ) no vácuo e na matéria análoga a equação da Precessão de Larmor:

$$i \frac{d\rho(t)}{dt} = [H, \rho(t)] \Rightarrow \frac{d\vec{S}}{dt} = \vec{S} \times \vec{B}$$

onde $\vec{S}$ e $\vec{B}$ são vetores em função das propriedades dos neutrinos, como ângulo de mistura θ e diferença dos quadrados das massas. Isso significa que podemos tratar a oscilação de neutrinos geometricamente² do mesmo modo que a precessão de Larmor e como um sistema de dois níveis, como mostram as Figuras 1 e 2.

Figura 1. Representação geométrica da oscilação de neutrinos (a) no vácuo e (b) na matéria uniforme.

Figura 2. Representação geométrica da oscilação de neutrinos na matéria não uniforme (a) caso adiabático: quando a densidade de matéria varia lentamente com a posição, e o cone de precessão se desloca e (b) caso não adiabático: quando o cone de precessão se desloca e sua abertura varia.

Conclusões

Foi possível representar geometricamente a oscilação entre dois sabores de neutrinos, e assim, mostrar que ela pode ser tratada como um sistema de dois níveis análogo a uma partícula de spin $\frac{1}{2}$ em um campo magnético. Essa representação é importante para a compreensão aprofundada da oscilação de neutrinos bem como por ser mais um exemplo de sistemas de dois níveis.

Agradecimentos

Agradeço ao meu orientador pela paciência e orientação; e ao CNPq pelo suporte financeiro.

¹ Cohen-Tannoudji, C. Wiley-VCH. vol.1, 3.ed, 2005.

² Akhmedov, E. K. Nucl.Phys.Proc.Suppl. vol.221, pp.19-25, 2006.