

Problema da Violação CP nas Interações Fortes

Fabricio Marques do Carmo

Introdução à Física das Partículas Elementares I

Universidade de São Paulo
Instituto de Física

29 de Junho de 2011



O que faremos:

1 Introdução

- Paridade ou Inversão Espacial
- Conjugação de Carga
- Paridade e Conjugação de Carga Juntas



O que faremos:

1 Introdução

- Paridade ou Inversão Espacial
- Conjugação de Carga
- Paridade e Conjugação de Carga Juntas

2 Cromodinâmica Quântica (QCD)

- Lagrangiana da QCD
- Violação CP
- Termo Extra na Lagrangiana da QCD
- O Problema da Violação CP nas Interações Fortes



O que faremos:

1 Introdução

- Paridade ou Inversão Espacial
- Conjugação de Carga
- Paridade e Conjugação de Carga Juntas

2 Cromodinâmica Quântica (QCD)

- Lagrangiana da QCD
- Violação CP
- Termo Extra na Lagrangiana da QCD
- O Problema da Violação CP nas Interações Fortes

3 Mecanismo de Peccei-Quinn

- Uma Tentativa de Solução para o Problema CP Forte
- O Áxion



O que faremos:

1 Introdução

- Paridade ou Inversão Espacial
- Conjugação de Carga
- Paridade e Conjugação de Carga Juntas

2 Cromodinâmica Quântica (QCD)

- Lagrangiana da QCD
- Violação CP
- Termo Extra na Lagrangiana da QCD
- O Problema da Violação CP nas Interações Fortes

3 Mecanismo de Peccei-Quinn

- Uma Tentativa de Solução para o Problema CP Forte
- O Áxion

4 Conclusões



Introdução

- Paridade ou Inversão Espacial
- Conjugação de Carga
- Paridade e Conjugação de Carga Juntas





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Introdução

- Paridade ou Inversão Espacial



Paridade ou Inversão Espacial

O que é Paridade?

- A *paridade* ou *inversão espacial* P é uma operação que atua invertendo o sentido do momento (ou das coordenadas espaciais):

$$P : \vec{p} \longrightarrow -\vec{p} \quad \text{e} \quad P : \vec{x} \longrightarrow -\vec{x}$$

- Antes dos anos 50 acreditava-se que a paridade era uma simetria fundamental inerente a qualquer processo físico, tendo sido amplamente testada para as interações eletromagnéticas e fortes.
- Em 1956, Lee e Yang propuseram uma série de possíveis testes experimentais para tentar verificar se a paridade poderia ser violada nas interações fracas.
- Realizado o teste, mostrou-se que, de fato, P era violada nas interações fracas, não devendo ser então uma simetria do nosso universo.



Paridade ou Inversão Espacial

Como P atua sobre os entes de uma teoria?

- Sendo P o operador paridade, podemos classificar os objetos de uma teoria de acordo com a maneira que eles se transformam sob a ação de P :

$$P : \phi(t, \vec{x}) \longrightarrow \phi(t, -\vec{x}) \quad \} \text{escalar}$$

$$P : \phi(t, \vec{x}) \longrightarrow -\phi(t, -\vec{x}) \quad \} \text{pseudoescalar}$$

$$P : A^\mu(t, \vec{x}) \longrightarrow g^\mu{}_\nu A^\nu(t, -\vec{x}) \quad \} \text{vetor}$$

$$P : A^\mu(t, \vec{x}) \longrightarrow -g^\mu{}_\nu A^\nu(t, -\vec{x}) \quad \} \text{pseudovetor}$$

$$\left. \begin{aligned} P : \psi(t, \vec{x}) &\longrightarrow \gamma^0 \psi(t, -\vec{x}) \\ P : \bar{\psi}(t, \vec{x}) &\longrightarrow \bar{\psi}(t, -\vec{x}) \gamma^0 \end{aligned} \right\} \text{spinor}$$



Paridade ou Inversão Espacial

Como P atua sobre os entes de uma teoria?

- A partir das leis de transformação acima, podemos definir as leis de transformação para os seguintes bilineares:

$$\left. \begin{aligned} P : \bar{\psi}\psi &\longrightarrow \bar{\psi}\psi \\ P : \bar{\psi}\gamma^5\psi &\longrightarrow \bar{\psi}\gamma^5\psi \end{aligned} \right\} \text{escalar}$$

$$P : \bar{\psi}\gamma^\mu\psi \longrightarrow g^\mu{}_\nu \bar{\psi}\gamma^\nu\psi \quad \left. \right\} \text{vetor}$$

$$P : \bar{\psi}\gamma^\mu\gamma^5\psi \longrightarrow -g^\mu{}_\nu \bar{\psi}\gamma^\nu\gamma^5\psi \quad \left. \right\} \text{pseudovetor}$$



Introdução

- Paridade ou Inversão Espacial



Introdução

- Paridade ou Inversão Espacial
- Conjugação de Carga



Conjugação de Carga

O que é Conjugação de Carga?

- A *conjugação de carga* C é uma operação que inverte o sinal da carga elétrica.

$$C : Q \longrightarrow -Q$$

- Essa operação converte o campo de uma partícula no campo da antipartícula correspondente.
- Foi proposta como uma operação complementar para, juntamente com a paridade, formar uma simetria para as interações fracas.



Conjugação de Carga

Como C atua sobre os entes de uma teoria?

- Sendo C o operador conjugação de carga, podemos classificar os objetos de uma teoria de acordo com a maneira que eles se transformam sob a ação de C :

$$C : \phi^\dagger(t, \vec{x}) \longrightarrow \phi(t, -\vec{x}) \quad \left. \vphantom{C} \right\} \text{escalar}$$

$$C : \phi^\dagger(t, \vec{x}) \longrightarrow -\phi(t, -\vec{x}) \quad \left. \vphantom{C} \right\} \text{pseudoescalar}$$

$$C : A^\mu(t, \vec{x}) \longrightarrow -A^\mu(t, -\vec{x}) \quad \left. \vphantom{C} \right\} \text{vetor}$$

$$C : A^\mu(t, \vec{x}) \longrightarrow A^\mu(t, -\vec{x}) \quad \left. \vphantom{C} \right\} \text{pseudovetor}$$

$$\left. \begin{aligned} C : \psi(t, \vec{x}) &\longrightarrow i[\bar{\psi}(t, -\vec{x})\gamma^0\gamma^2]^T \\ C : \bar{\psi}(t, \vec{x}) &\longrightarrow i[\gamma^0\gamma^2\psi(t, -\vec{x})]^T \end{aligned} \right\} \text{spinor}$$



Conjugação de Carga

Como C atua sobre os entes de uma teoria?

- A partir das leis de transformação acima, podemos definir as leis de transformação para os seguintes bilineares:

$$\left. \begin{aligned} C : \bar{\psi}\psi &\longrightarrow \bar{\psi}\psi \\ C : \bar{\psi}\gamma^5\psi &\longrightarrow \bar{\psi}\gamma^5\psi \end{aligned} \right\} \text{escalar}$$

$$\left. \begin{aligned} C : \bar{\psi}\gamma^\mu\psi &\longrightarrow -\bar{\psi}\gamma^\mu\psi \\ C : \bar{\psi}\gamma^\mu\gamma^5\psi &\longrightarrow \bar{\psi}\gamma^\mu\gamma^5\psi \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{vetor} \\ \text{pseudovetor} \end{array}$$



Introdução

- Paridade ou Inversão Espacial
- Conjugação de Carga



Introdução

- Paridade ou Inversão Espacial
- Conjugação de Carga
- Paridade e Conjugação de Carga Juntas



Paridade e Conjugação de Carga Juntas

- Juntando a paridade e a conjugação de carga, temos a chamada transformação CP .
- Nos anos 50 foi mostrado que P era violada nas interações fracas e, desde então, CP passou a ser proposta como uma simetria não violada.
- Em 1964, porém, foi observada a violação de CP no decaimento de kaons neutros.
- A partir daí, então, justifica-se o interesse em estudar as condições para que CP seja violada.



Cromodinâmica Quântica (QCD)

- Lagrangiana da QCD
- Violação CP
- Termo Extra na Lagrangiana da QCD
- O Problema da Violação CP nas Interações Fortes



Cromodinâmica Quântica (QCD)



Cromodinâmica Quântica (QCD)

- Lagrangiana da QCD



Lagrangiana da QCD

- A QCD é a teoria que descreve as interações fortes.
- As partículas da QCD são os quarks e glúons e a lagrangiana que descreve sua dinâmica é:

$$\mathcal{L}'_{\text{QCD}} = \bar{\psi}_i (i\gamma^\mu (D_\mu)_{ij} - m\delta_{ij}) \psi_j - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}$$

onde:

$$(D_\mu)_{ij} = \delta_{ij}\partial_\mu + igT_{ij}^a G_\mu^a \quad \text{e} \quad G_{\mu\nu}^a = \partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a - gf^{abc} G_\mu^b G_\nu^c$$

sendo $\psi_i(x)$ o campo do quark e $G_\mu^a(x)$ o campo do glúon.

- Note que $(D_\mu)_{ij}$ faz o papel de uma derivada covariante e $G_{\mu\nu}^a$ faz um papel análogo ao do tensor do campo eletromagnético na QED.



Cromodinâmica Quântica (QCD)

- Lagrangiana da QCD



Cromodinâmica Quântica (QCD)

- Lagrangiana da QCD
- Violação CP



Violação CP

- A lagrangiana apresentada acima *não viola* P e nem CP .
- De acordo com Callan, Dashen e Gross, sabemos que a QCD leva à novos efeitos de violação CP nas interações fortes.
- A origem disso está no fato de que a corrente axial de número bariônico $j^{\mu 5}$ tem uma anomalia, de modo que:

$$\partial_\mu j^{\mu 5} = \frac{g^2}{32\pi^2} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} G_{\mu\nu}^a G_{\rho\sigma}^a \neq 0$$

- Isso tem como consequência uma estrutura de vácuo multiplamente degenerado para a QCD: $|\nu\rangle$, $\nu = 0, 1, 2, \dots$ são diferentes soluções para o vácuo).
- O *verdadeiro vácuo* é então tomado como uma superposição de todos os $|\nu\rangle$'s:

$$|\Omega\rangle = \sum_\nu e^{i\nu\theta} |\nu\rangle$$



Cromodinâmica Quântica (QCD)

- Lagrangiana da QCD
- Violação CP



Cromodinâmica Quântica (QCD)

- Lagrangiana da QCD
- Violação CP
- Termo Extra na Lagrangiana da QCD



Termo Extra na Lagrangiana da QCD

- Levar em consideração como deve ser o *verdadeiro vácuo* corresponde à somar à lagrangiana da QCD o seguinte *termo extra*:

$$\mathcal{L}_\theta = \theta \frac{g^2}{32\pi^2} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} G_{\mu\nu}^a G_{\rho\sigma}^a$$

e, desse modo, redefinir a lagrangiana como:

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \mathcal{L}'_{\text{QCD}} + \mathcal{L}_\theta$$

- Esse termo extra *viola* P e também CP .
- Note que esse termo extra introduzido foi escolhido proporcional à quadridivergência de $j^{\mu 5}$ mostrada acima. Ele também surge a partir da lagrangiana original fazendo uma transformação $\psi_j \rightarrow e^{i\theta\gamma^5} \psi_j$ de modo que a lagrangiana original muda por uma quantidade $\delta\mathcal{L} = i\theta\partial_\mu j^{\mu 5}$.



Cromodinâmica Quântica (QCD)

- Lagrangiana da QCD
- Violação CP
- Termo Extra na Lagrangiana da QCD



Cromodinâmica Quântica (QCD)

- Lagrangiana da QCD
- Violação CP
- Termo Extra na Lagrangiana da QCD
- O Problema da Violação CP nas Interações Fortes



O Problema da Violação CP nas Interações Fortes

- Apesar de \mathcal{L}_θ ser uma quadridivergência total, espera-se que esse termo extra *traga consequências* à física das interações fortes:
 - Não contribui no caso da QED, por exemplo, pois pode ser convertido em um termo de superfície que *zera* no infinito.
 - No caso da QCD, porém, esperamos alguma contribuição (confinamento) e essa contribuição deve ser proporcional ao parâmetro θ do termo extra \mathcal{L}_θ .
- Uma consequência observada que poderia ser explicada pelo termo de violação CP \mathcal{L}_θ é o *momento de dipolo elétrico do nêutron*.
- De acordo com Crewther, Di Vecchia, Veneziano e Witten, a partir da QCD, com o termo \mathcal{L}_θ incluso, podemos deduzir que esse momento de dipolo elétrico é da ordem de $10^{-16}\theta$ ecm.
- Comparando esse valor com o experimental, somos levados a concluir que:

$$\theta \lesssim 10^{-9}$$



O Problema da Violação CP nas Interações Fortes

- Apesar de ser muito pequeno, θ deve ser *maior* que zero, do contrário \mathcal{L}_θ , que é o termo que viola CP , seria também zero e deixaria de existir.
- O problema de tentar justificar ou entender o valor pequeno ($\lesssim 10^{-9}$) do parâmetro θ é o que é conhecido como *Problema da Violação CP nas Interações Fortes* ou, simplesmente, *Problema CP Forte* (do inglês: *Strong CP Problem*).



Mecanismo de Peccei-Quinn

- Uma Tentativa de Solução para o Problema *CP* Forte
- O Áxion



Mecanismo de Peccei-Quinn



Mecanismo de Peccei-Quinn

- Uma Tentativa de Solução para o Problema *CP* Forte



Uma Tentativa de Solução para o Problema CP Forte

O Mecanismo de Peccei-Quinn

- O *Mecanismo de Peccei-Quinn* foi uma entre várias tentativas (talvez porém a mais aceita até hoje) de solucionar o Problema CP Forte.
- Em 1977, Peccei e Quinn propuseram uma solução para o problema admitindo a existência de uma “quase” simetria global $U_{PQ}(1)$ e admitindo que a QCD fosse representada por uma lagrangiana:

$$\mathcal{L}_{PC} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} + \theta \frac{g^2}{32\pi^2} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} G_{\mu\nu}^a G_{\rho\sigma}^a$$

$$+ i\bar{\psi}_i \gamma^\mu D_\mu \psi_i - k_i \psi_{Li}^\dagger \psi_{Ri} \phi - k_i^* \psi_{Ri}^\dagger \psi_{Li} \phi^\dagger + \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^\dagger \partial^\mu \phi - V(\phi^\dagger \phi)$$

contendo interações entre a QCD e um campo escalar ϕ e sendo simétrica sob certas transformações $U_{PQ}(1)$.



Uma Tentativa de Solução para o Problema CP Forte

O Mecanismo de Peccei-Quinn

- A simetria $U_{PQ}(1)$ é espontaneamente quebrada pelo valor esperado no vácuo de ϕ e as massas dos quarks podem ser geradas a partir daí de maneira análoga ao Mecanismo de Higgs.
- Essas massas porém têm uma fase complexa e são reais apenas para a escolha correta de θ .
- A partir disso eles explicam o valor de θ .

Mas ...



Mecanismo de Peccei-Quinn

- Uma Tentativa de Solução para o Problema CP Forte



Mecanismo de Peccei-Quinn

- Uma Tentativa de Solução para o Problema CP Forte
- O Áxion



O Áxion

- Conforme apontado por Weinberg e Wilczek, a proposta de solução do Problema CP Forte via Mecanismo de Peccei-Quinn implica que tenhamos que admitir a existência de um bóson ao qual denominamos *áxion*.
- Admitir isso, porém, leva a outros problemas (por ex: o áxion não foi medido por nenhum experimento pelo fato de sua energia estar limitada a um valor muito pequeno) de modo que, no final, estamos apenas mudando a maneira de enunciar o Problema CP Forte.





Conclulsões

- Introduzimos rapidamente as noções de *paridade* P , de *conjugação de carga* C e da junção de ambas CP .



Conclussões

- Introduzimos rapidamente as noções de *paridade* P , de *conjugação de carga* C e da junção de ambas CP .
- Mostramos como essas transformações atuam sobre os entes de uma teoria e como esses entes podem ser classificados conforme a maneira como essas transformações atuam.



Conclussões

- Introduzimos rapidamente as noções de *paridade* P , de *conjugação de carga* C e da junção de ambas CP .
- Mostramos como essas transformações atuam sobre os entes de uma teoria e como esses entes podem ser classificados conforme a maneira como essas transformações atuam.
- Apresentamos a lagrangiana da QCD, que, a princípio, *não viola* CP .



Conclusões

- Introduzimos rapidamente as noções de *paridade* P , de *conjugação de carga* C e da junção de ambas CP .
- Mostramos como essas transformações atuam sobre os entes de uma teoria e como esses entes podem ser classificados conforme a maneira como essas transformações atuam.
- Apresentamos a lagrangiana da QCD, que, a princípio, *não viola* CP .
- Introduzimos um novo termo \mathcal{L}_θ nessa lagrangiana, *violando* CP .



Conclulsões

- Introduzimos rapidamente as noções de *paridade* P , de *conjugação de carga* C e da junção de ambas CP .
- Mostramos como essas transformações atuam sobre os entes de uma teoria e como esses entes podem ser classificados conforme a maneira como essas transformações atuam.
- Apresentamos a lagrangiana da QCD, que, a princípio, *não viola* CP .
- Introduzimos um novo termo \mathcal{L}_θ nessa lagrangiana, *violando* CP .
- Apresentamos o chamado *Problema CP Forte*, que consiste na busca de uma explicação para tamanho do parâmetro θ .



Conclussões

- Introduzimos rapidamente as noções de *paridade* P , de *conjugação de carga* C e da junção de ambas CP .
- Mostramos como essas transformações atuam sobre os entes de uma teoria e como esses entes podem ser classificados conforme a maneira como essas transformações atuam.
- Apresentamos a lagrangiana da QCD, que, a princípio, *não viola* CP .
- Introduzimos um novo termo \mathcal{L}_θ nessa lagrangiana, *violando* CP .
- Apresentamos o chamado *Problema CP Forte*, que consiste na busca de uma explicação para tamanho do parâmetro θ .
- Discutimos brevemente a proposta de Peccei e Quin para solucionar esse problema e o conseqüente postulado da existência do áxion.



Referências



Mohapatra, R. N. *Unification and Supersymmetry: The Frontiers of Quark-Lepton Physics*. Springer, 2003 (Third Edition).

(Aqui estão expostas as principais ideias do Problema CP Forte e também as referências para os artigos com os detalhes de cálculos – Ver Cap. 4)



Donoghue, J. F., Golowich, E., and Holstein B. R., *Dynamics of the Standard Model*. Cambridge Monographs.

(Detalhes sobre como o termo extra na lagrangiana da QCD está associado à degenerescência do vácuo da teoria e mais detalhes sobre o Problema CP Forte)



Callan Jr., C. G., Dashen, R. F., and Gross, D. J., *Phys. Lett.*, **63B**, number 3, 334-340 (1976).

(Origem dos efeitos de violação CP nas interações fortes devido à anomalia na corrente $j^{\mu 5}$)



Crewther, R. J., Di Vecchia, P., Veneziano, G., and Witten, E. , *Phys. Lett.*, **88B**, number 1,2, 123-127 (1979).

(Dedução do valor do momento de dipoloelétrico do nêutron em função do parâmetro θ)



Peccei, R. D. and Quinn, H. R., *Phys. Rev. Lett.*, **38**, number 25, 1440-1443 (1977).

(O Mecanismo de Peccei-Quinn segundo Peccei e Quinn)



Pierre Sikivie, *Axion Searches*.

(Artigo, Nota de Aula ou Apostila com detalhes dos cálculos que levam a postular a existência do áxion)

Obrigado!

