

Interações Nucleares e Simetrias CPT

Claudio M. Maekawa - Fisica- FURG

3 de novembro de 2008

1 Introdução

Modelo Padrão - Interações Electrofracas e Forte das partículas elementares

Setores testados: $\left\{ \begin{array}{l} \text{leptônico} \\ \text{semi-leptônico} \\ \text{não-leptônico com } \Delta S \neq 0 \\ \text{QCD perturbativa} \end{array} \right.$

Setores em aberto: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Regime não-perturbativo da QCD} \\ \text{não-leptônico c/ } \Delta S = 0 \text{ ou IHF- Inter. Hadr. Fraca} \\ \text{Higgs} \end{array} \right.$

Higgs \rightarrow LHC pode apontar para uma nova física

Dificuldades dos setores IHF e QCD-não perturbativa

Regime de energias baixas.

Interação forte - Teoria de Pertubação não é adequado

IHF - $\left\{ \begin{array}{l} \text{caroço repulsivo - previne a intermediação dos bósons fracos} \\ \text{Inter. Forte sombreia os efeitos da dinâmica fraca} \end{array} \right.$

Sistema a ser utilizado - Núcleons e mésons

P/ contornar \rightarrow Observáveis que violam simetrias - C,P e T

2 Simetrias CPT

C- conjugação de carga, P-paridade, T-reversão temporal

Violação CP (CPV) - Assimetria matéria - antimatéria

Fontes de CPV no SM

fases da matriz CKM - $\left\{ \begin{array}{l} \text{Explica CPV no setor com estranheza} \\ \text{insuficiente para explicar a assimetria} \end{array} \right.$

CPV s/ estranheza - Observáveis - EDM de n, p, e, μ, τ

n EDM - correções radiativas $\sim 10^{-34} e - cm$ Exp. $< 0.63 \times 10^{-25} e - cm$

Eidelman PL B592,1 (2004), Harris, PRL 82,904 (1999),

Novos experimentos $< 10^{-28} e\text{-}cm$ (LANL, PSI, ILL, Munich) Nico, Ann.Rev.Nuc.Part. 55,27 (2005).

Busca por novas fontes. \rightarrow Física além do SM.-

Modelos SUSY - Correções radiativas devido as Superpart.

MSSM $\leq 10^{-27} e\text{-}cm$.

Termos Trilineares. e.g – inter. $q_L q_R \tilde{q}$

Cuidado: Precisa restringir os termos que causam o decaimento do próton.

3 Interações Nucleares

Probl: Regime não perturbativo - como contornar?

Modelos fenomenológicos. Org. das contribuições - baseado no espectro de massa

Interação forte

Troca de Bósons - Bonn

Algebra de Corrente - Paris

Traj. de Regge - Reid

Concordam - Longo alcance - OPEP

Desacordo - Alcance médio e curto

Dificuldade - Tem relação com a física fundamental? Paris → Sim. Quiral

Interação Fraca com violação de P - Troca bosônica -

DDH - Desplanques, Donoghue, Holstein (Ann. Phys.,124,449, (1980).)

Valor de $h_{\pi NN}$. Desacordo entre os resultados exp.

Probl. Teorico: Falta maior controle sobre a descrição

4 Alternativa - TP_χ

Interação Forte

Só com píons: esp. $\pi\pi$: Colangelo, Gasser, Leutwyler, **NPB603**:125-179,2001

píon-núcleon. $\left\{ \begin{array}{l} \text{esp. } \pi N: \text{Fettes, Meissner, } \mathbf{NPA693}:693-709,2001; \text{ id biden, } \mathbf{PRC63}:045201,2001 \\ \text{Fettes, Meissner, Steininger, } \mathbf{NPA640}:199-234,1998 \\ \pi N \rightarrow \pi\pi N: \text{Fettes, Bernard, Meissner, Nucl.Phys.A669:269-330,2000} \end{array} \right.$

1 núcleon: $\left\{ \begin{array}{l} \text{F.F. EM: Gasser, Sainio, Svarc } \mathbf{NPB307}:779, 1988; \\ \text{Bernard, Kaiser, Kambor, Meissner, } \mathbf{NPB388}:315, 1992 \end{array} \right.$

2 núcleons: $\left\{ \begin{array}{l} \text{Interação NN: Weinberg, } \mathbf{NPB363}:3, 1991; \\ \text{Ordóñez.,Ray and van Kolck, } \mathbf{PRL72}, 1982, \\ \text{van Kolck, PPart Nuc } \mathbf{P43}, 337 (1999). \end{array} \right.$

esp. πD : S. Weinberg, **PLB295**, 114 (1992);
Beane, Bernard, Lee and Meissner, **PRC57**, 424, 1998;

3 núcleons: Inter. NNN: Weinberg, **PLB295**, 114 (1992); van Kolck, **PRC49**, 2932, (1994)

Interação Fraca com violação de P

FF Anapolo: Maekawa and van Kolck **PLB478**, 73 (2000);

Maekawa, Veiga and van Kolck **PLB488**, 167 (2000)

V_{NN}^{P-odd} : Zhu, Maekawa, Holstein, Ransey-Musolf, van Kolck, **NPA748**, 435 (2005)

Interação fraca com violação de P e T

1 nucleon- EDM -Hockings and van Kolck **PLB605**, 273 (2005)

2 núcleons NN- LO: Crewther, Vecchia, Veneziano, Witten, **PLB88**, 123 (1979),

NN- SLO: Maekawa and van Kolck, em andamento

5 TP χ

Baseado nos princípios da Teoria Fundamental.

Aplicável quando a teoria possui escalas de energia Λ

Física de Partículas $\rightarrow \Lambda$ Escalas de quebras de simetrias, delimitam regimes

Física Nuclear $\rightarrow \Lambda_\chi \sim 1\text{GeV}$ quebra da simetria quiral.

regime de energia $< \Lambda_\chi$

Simetria Quiral \rightarrow Realização não-linear $SU(2)_V \otimes SU(2)_A \rightarrow$ Acoplamentos derivativos

Expansão da Teoria em potências de $\left(\frac{Q}{\Lambda_\chi}\right)^\Delta Q \rightarrow$ energias típicas do processo

A quebra espontânea da simetria: $SU(2)_V \otimes SU(2)_A \rightarrow SU(2)_V$

pseudo-bóson de Goldstone: $\vec{\pi}$

Termos de quebra da simetria $\propto m_\pi \ll \Lambda_\chi \leftarrow$ quebra aproximada

$\Delta \propto$ potências de Q , de m_π , de $m_\Delta - m_N$

A ordem quiral Δ organiza os termos na Teoria

$$\mathcal{L} = \sum_{\Delta} \mathcal{L}^{(\Delta)}. \quad (1)$$

Elimina as ambiguidades do argumento baseado no espectro de massa e simplicidade.

Precisão teórica: Interrompe a série em $\Delta = \Delta_{\text{lim}}$ - erro $\sim \left(\frac{Q}{\Lambda_\chi}\right)^{\Delta_{\text{lim}}}$

A ordem quiral

$$\Delta = d + n/2 - 2 \quad (2)$$

onde $d = n^0$ de derivadas, $n = n^0$ de campos de núcleons.

Interação forte NN.

Em ordem quiral líder

$$\mathcal{L}_{\pi N}^{(0)} = \frac{1}{2} D_\mu \vec{\pi} D^\mu \vec{\pi} - \frac{1}{2\mathcal{D}} m_\pi^2 \vec{\pi}^2 + \bar{N} i v \cdot D N - \frac{g_A}{f_\pi} \bar{N} (S \cdot D \vec{\tau} \cdot \vec{\pi}) N, \quad (3)$$

onde $f_\pi = 93$ MeV, $g_A = 1,267$, N é o campo do núcleon field, $v^\mu =$ 4-velocidade ($v^\mu = (1, 0)$ at rest frame of N), $S^\mu=4$ -spin ($S^\mu = (0, \frac{\vec{\sigma}}{2})$ at rest frame of N) e $\mathcal{D} = 1 + \frac{\vec{\pi}^2}{4f_\pi^2}$.

Interação NN com violação de T .

Acima de Λ_χ : Fonte de violação P e T , termo líder é

$$\mathcal{L}_{\mathcal{T}}^{QCD} = m_* \bar{\theta} \bar{q} i \gamma_5 q + \dots, m_* = \frac{m_u m_d}{m_u + m_d} \quad (4)$$

tem a forma da quarta componente de $SO(4)$: $(\bar{q} \vec{\tau} q, \bar{q} i \gamma_5 q)$

Abaixo de Λ_χ : Quarta componente de $SO(4)$ em graus de lib. efetivos, a ordem quiral é $\Delta = -1$:

$$\mathcal{L}_{\mathcal{T}}^{(-1)} = \frac{\bar{g}_0}{\mathcal{D}} \bar{N} \vec{\tau} \cdot \vec{\pi} N, \quad (5)$$

Em ordem quiral $\Delta = 0$, temos

$$L_{\mathcal{T}}^{(0)} = 2\bar{h}_0 \vec{\pi} \cdot D_\mu \vec{\pi} \bar{N} S^\mu N \quad (6)$$

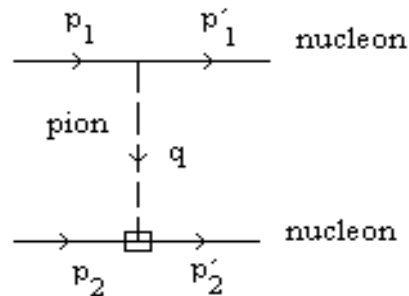
Em ordem quiral $\Delta = 1$, temos

$$L_{\mathcal{T}-NNNN}^{(1)} = \frac{C_1^{\mathcal{PT}}}{M} \bar{N} S \cdot \overleftrightarrow{\partial} N \bar{N} N + \frac{C_2^{\mathcal{PT}}}{M} \bar{N} \vec{\tau} S \cdot \overleftrightarrow{\partial} N \bar{N} \vec{\tau} N + h.c.$$

6 O Potencial no espaço de momentos

OPEP T-odd:

$$\text{ordem da contribuição: } \left. \begin{array}{l} \text{Vertice forte } \pi N \sim \frac{Q}{f_\pi} \\ \text{Propagador do } \pi \sim \frac{1}{Q^2} \\ \text{Vertice } T - \text{odd} \sim \bar{g}_0 \end{array} \right\} \sim \bar{g}_0 \frac{1}{f_\pi} Q^{-1}$$



De fato é de magnitude $\bar{g}_0 \frac{1}{f_\pi} Q^{-1}$

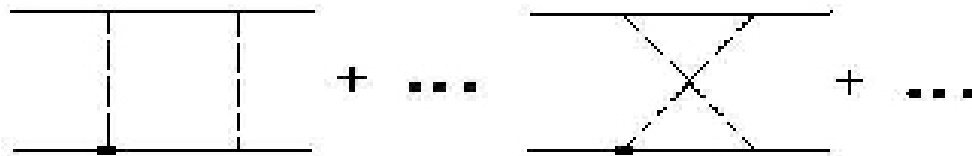
$$iT_{\pi N}^T = -\frac{g_A \bar{g}_0}{2f_\pi} \tau_{(1)}^a \tau_{(2)}^a \frac{\vec{\sigma}_{(1)} \cdot \vec{q} - \vec{\sigma}_{(2)} \cdot \vec{q}}{\vec{q}^2 + \mu^2} \quad (7)$$

TPEP T-odd

Diagramas caixa e cruzados

ordem da contribuição:

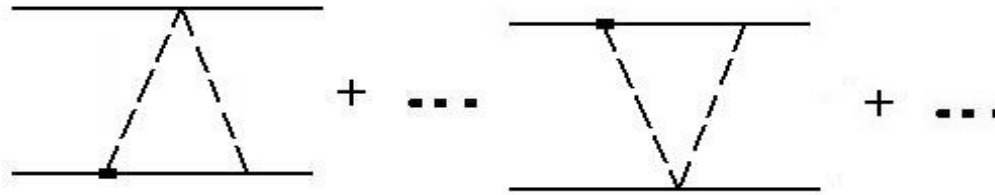
$$\left. \begin{array}{l}
 3 \text{ Vertices forte } \pi N \sim \left(\frac{Q}{f_\pi}\right)^3 \\
 2 \text{ Propagadores de } \pi \sim \frac{1}{Q^4} \\
 2 \text{ propagadores de } N \sim \frac{1}{Q^2} \\
 \text{loop de } \pi N \sim Q^4 \\
 \text{Vertice } T - \text{odd} \sim \bar{g}_0
 \end{array} \right\} \sim \bar{g}_0 \left(\frac{Q}{f_\pi}\right)$$



De fato é de magnitude $\bar{g}_0 \left(\frac{Q}{f_\pi^3} \right)$

$$\begin{aligned} iT_{2\pi N}^{box+cross} &= \bar{g}_0 \left(\frac{g_A}{f_\pi} \right)^3 \frac{3}{2} (\vec{\sigma}^{(1)} - \vec{\sigma}^{(2)}) \cdot \frac{\vec{q}}{2} \\ &\times \left[\frac{1}{(4\pi)^2} - 2 \frac{4}{(4\pi)^2} \frac{\mu^2}{\vec{q}^2} \frac{\sqrt{\vec{q}^2}}{\sqrt{4\mu^2 + \vec{q}^2}} \left(\ln \frac{\sqrt{\vec{q}^2} + \sqrt{4\mu^2 + \vec{q}^2}}{2\mu} \right) \right] \end{aligned} \quad (8)$$

Diagramas triangulos. magnitude $\bar{g}_0 \frac{Q}{f_\pi^3}$



$$\begin{aligned}
 iT_{2\pi N}^\Delta = & \frac{g_A}{f_\pi^3} \bar{g}_0 \tau_{(1)}^c \tau_{(2)}^c (\vec{\sigma}^{(1)} - \vec{\sigma}^{(2)}) \cdot \frac{\vec{q}}{2} \left[\frac{1}{2(4\pi)^2} \Gamma\left(2 - \frac{D}{2}\right) \left(\frac{4\pi\Lambda^2}{\mu^2}\right)^{2-D/2} \right. \\
 & \left. + \frac{2}{(4\pi)^2} - \frac{4}{(4\pi)^2} \sqrt{\frac{4\mu^2 + \vec{q}^2}{4\vec{q}^2}} \ln \frac{\sqrt{\vec{q}^2} + \sqrt{4\mu^2 + \vec{q}^2}}{2\mu} \right], \quad (9)
 \end{aligned}$$

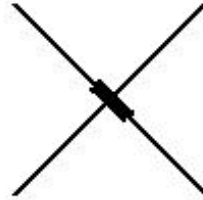


Diagrama de Contacto NNNN

ordem da contribuição: Vértice fraco $T - odd \sim C_1 Q$

Portanto não é contribuição líder é da mesma ordem da troca de 2π .

Na fenomenologia: Esse diagrama ,pelo critério de simplicidade , seria ordem líder.
Mas é usado para parametrizar trocas de mésons mais pesados que o π .
Que ordem é? Na fenomenologia: Depende quais mésons ele deve parametrizar.

Na TP_χ . De fato é de magnitude $\sim Q$

$$\begin{aligned} T_{NNNN}^{(1)} &= \frac{C_1^{p\mathcal{T}}}{2} i [\vec{\sigma}_1 \cdot (\vec{p}_1 - \vec{p}'_1) + \vec{\sigma}_2 \cdot (\vec{p}_2 - \vec{p}'_2)] \\ &+ \frac{C_2^{p\mathcal{T}}}{2} i \vec{\tau}_1 \cdot \vec{\tau}_2 [\vec{\sigma}_1 \cdot (\vec{p}_1 - \vec{p}'_1) + \vec{\sigma}_2 \cdot (\vec{p}_2 - \vec{p}'_2)] \end{aligned} \quad (10)$$

7 Comentários

TP χ : esquema organizacional das contribuições

Elimina as ambiguidades fenomenológicas

Controle preciso sobre a descrição: termos SLO são $\frac{Q}{f_\pi^3} <$ que LO

Baseado nos princípios da física acima de Λ_χ .

Dificuldade:

Inclusão de mais termos aumenta o número de parâmetros.

Requer grande número de dados experimentais.