

若山 将征 (理化学研究所、極東連邦大学)

格子QCDシミュレーションによる南部-ゴールドストーン粒子の質量生成機構の研究



質量の起源

陽子の質量 ~ 938 MeV (クォークの質量) × 3 ~ 15 MeV

balance

カイラル対称性

ハドロン相 (我々の世界) ← 温度 → クォーク-グルーオン プラズマ相

自発的な破れ ← 温度 → 自発的破れの回復

GeV

1.5
1.0
0.5
0.0

0⁺ π(135)
1⁻ ρ(770)
1⁻ a₁(1260)

本発表では、ゼロ温度でのπ, ρ & a₁ 中間子の計算

a₁ 中間子の実験データ

Particle Data Group (2016)

a₁(1260): 質量 = 1230(40) MeV
q̄q p-wave ((π-p)も混ざってる? Nagahiro et al., PRD83, 111504(R)(2011))

a₁(1420): 質量 = 1414(15) MeV COMPASS, PRL115, 082001(2015)
q̄q̄qq? H-X. Chen. et al., PRD91, 094022(2015)

a₁(1640): 質量 = 1647(22) MeV
q̄q p-wave n=1 励起状態

Conference Report
K. Chen. et al., PRD91, 074025 (2015)
a₁(1930), a₁(2095), a₁(2270) もあるかも...?

a₁ 中間子のこれまでの格子計算

- Wingate, DeGrand, Collins & Heller, PRL74, 23(1995)
ダイナミカル a₁ 中間子の質量: 1250(80) MeV ※ Wilsonフェルミオンとスタッガードフェルミオンを混合させた計算!
- Gattringer, Glozman, Lang, Mohler & Prelovsek, PRD78, 034501(2008)
クエンチLüscher-Weiszゲージ作用
カイラル改良型Dirac演算子
q̄q演算子

格子QCDによるa₁中間子へのアプローチはまだ発展途上!

格子カイラル対称性

格子QCDにおいて、**カイラル対称性**はフェルミオンダブリング問題のために満たすことができない

$$\gamma_5 D + D \gamma_5 = 0$$

- Wilson フェルミオン作用: カイラル対称性を陽に破る

しかし、Ginsparg-Wilson 関係式と呼ばれる**“格子”カイラル対称性**がある

P.H. Ginsparg & K.G. Wilson, Phys. Rev. D25 (1982) $D \gamma_5 + \gamma_5 D = RaD \gamma_5 D$

ドメインウォールフェルミオン作用

$$D_{TDWF} = \epsilon_s P_{st} (D_{PV}^{-1})_{tu} (D_{DWF})_{uv} P_{vw} \epsilon_w$$

※ 添字は5次元座標を表す

A. Boriçi, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 83, 771 (2000)

$$D_{DWF} = \begin{pmatrix} D_{WF} + 1 & -P_L & 0 & \dots & 0 & m_f P_R \\ -P_R & D_{WF} + 1 & -P_L & \dots & 0 & \vdots \\ 0 & -P_R & D_{WF} + 1 & \dots & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & \vdots & \vdots & \vdots & -P_R & D_{WF} + 1 \\ m_f P_L & 0 & \dots & 0 & -P_R & D_{WF} + 1 \end{pmatrix}$$

5次元方向

Wilson
フェルミオン: $D_{WF}(x, y) = (4 - M_5) \delta_{xy} - \frac{1}{2} \sum_{\mu=1}^4 [(1 - \gamma_\mu) U_\mu(x) \delta_{y, x+\mu} + (1 + \gamma_\mu) U_\mu^\dagger(y) \delta_{y, x-\mu}]$

4次元時空への射影

$$\begin{cases} D_{PV}(x, y) = D_{DWF}(m_f = 1)(x, y), \\ P_{st} = P_L \delta_{s,t} + P_R \delta_{s+1,t} + P_R \delta_{s,N_5} \delta_{t,1}, \quad \epsilon_s = \delta_{1,s} \end{cases}$$

5次元方向の格子サイズ: N₅ → 無限大
クォーク質量: m_f → ゼロ
の極限で、GW関係式を満たす。

COST (ドメインウォールフェルミオン) ~ COST (Wilson フェルミオン) × 10-100!

格子セットアップ

ゲージ配位について
2プレーン クエンチ格子計算

クォーク相関関数について
*ドメインウォールフェルミオン

- Plaquette ゲージ作用
- ハイブリッドモンテカルロ法
- 格子サイズ: 8*8*8*32
- 格子間隔: a = 0.171(2) fm
- 5次元方向の格子サイズ: N₅ = 10
- ドメインウォールの高さ: M₅ = 1.65
- クォーク質量: m_fa = 0.06, 0.04, 0.02, 0.01
- 配位数: N_{conf} = 600, 1240, 1240, 1240 conf.
- β = 5.7

T. Blum et al., Phys. Rev. D69 (2004)

π, ρ & a₁ 中間子の相関関数

ソース・シンクともに q̄q 演算子を使用

相関関数を cosh でフィットすることで質量を得ることができる

π, ρ & a₁ 中間子のクォーク質量依存性

○ (m_πa)² △ m_ρa ◇ m_{a₁}a

a₁ 中間子の質量
ρ 中間子の質量
(π 中間子の質量)²

カイラル極限におけるρ 中間子の質量を775 MeV にチューニング
→ a₁ 中間子の質量: 1264(129) MeV

まとめ

- a₁ 中間子に関する実験は様々な状態が報告されている。
a₁(1260), a₁(1420), a₁(1640), a₁(1930), a₁(2095), a₁(2270)
- (a₁ & ρ) はカイラルパートナーと考えられており、カイラル対称性とその自発的破れに関する情報を引き出せる可能性がある。
- 第一段階として、ドメインウォールフェルミオンを用いてゼロ温度での a₁ 中間子の質量の計算を行った。
- 今回の結果は、a₁(1260)は q̄q であることを示唆 (クエンチ計算で、ソース・シンクともに q̄q 演算子であるため)