格子QCDによるフレーバーSU(3) 極限でのバリオン間ポテンシャル

井上貴史 筑波大学

HAL QCD Collaboration

S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y.Ikeda, T. I., N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki

- 導入、目的とゴール
- 方法、SU(3)極限
- 設定
- 結果
- まとめと今後





- ハイペロンへ拡張した一般化核力はとても興味深い。
 - 核力のより深い理解が期待できる。
 - ハイパー核、中性子星、超新星爆発の物理を左右。
- 核子間相互作用を除いて、詳細は不明である。
 - 核力の特徴(斥力芯と引力ポケット)は共通か?
 - それら特徴の物理的起源は何か?
- これらの疑問には80年代から、有効模型の立場で、
 フレーバー対称性を用いてアプローチされてきた。
 - クォーク反対称化と摂動グルーオン交換
 - Tamagaki, Neudachin, Smirnov (1977)
 - Oka, Yazaki (1980), Fujiwara, Nakamoto Suzuki (1994)
 - 中間子交換
 - Maessen, Rijken, de Swart (1989)



• クォーク・クラスター模型計算の例



Oka , Shimizu , Yazaki , Nucl Phys A464 (1987)

Observable (Phase shift) of YN scatt. are predicted.

- 目的とゴール
 - 格子QCDを用いてQCDから直接にバリオン間力を得る。
 厳密なフレーバー対称性の為にSU(3)極限を利用しよう。
 - 我々の結果と模型の予言との比較を通して、バリオン間力の物理的起源を特定し、理解を深める。[ゴール]

方法

- ポテンシャルは核物理で便利な道具である。
- 格子QCDでは、バリオン間ポテンシャルは4点関数を 通して定義および導出する事ができる。

$$W(t-t_{0},\vec{r}) = \sum_{\vec{x}} \langle 0|B_{i}(t,\vec{x}+\vec{r})B_{j}(t,\vec{x}) \ \bar{B}_{k}(t_{0})\bar{B}_{l}(t_{0})|0\rangle$$

at $t-t_{0} > t_{sat}$
B.S. amp. $\phi_{E_{0}}(\vec{r})$ $V(\vec{r}) = \frac{1}{2\mu} \frac{\nabla^{2}\phi_{E_{0}}(\vec{r})}{\phi_{E_{0}}(\vec{r})} + T_{0}$

- 石井、青木、初田によって核力に対して開発 (2006)。
 Phys. Rev. Lett. 99. 022001 (2007) [arXive:nucl-th/0611096] arXiv:0909.5585[hep-lat]
- 根村、石井、青木、初田によって、YN 力にも応用。
- 村野らによって、非局所性(エネルギー依存性)も評価。

SU(3)極限

• 基底8重項バリオンに限定。2体のフレーバーは $8 \times 8 = 27 + 8s + 1 + 10^* + 10 + 8a$

Symmetric Anti-symmetric

- 与えられたLに対し、6つの独立な状態が存在。
 - ${}^{1}S_{0}$: $V^{(27)}(r)$, $V^{(8s)}(r)$, $V^{(1)}(r)$ ${}^{3}S_{1}$: $V^{(10^{*})}(r)$, $V^{(10)}(r)$, $V^{(8a)}(r)$ ← この研究で 求めるもの
- SU(3) C.G. 係数を用いて規約な BB source 演算子
 を構成し、BS 振幅を計算、ポテンシャルを導出。

eg.
$$\overline{BB^{(8s)}} = -\sqrt{\frac{1}{5}} \overline{\Lambda} \overline{\Lambda} - \sqrt{\frac{3}{5}} \overline{\Sigma} \overline{\Sigma} + \sqrt{\frac{1}{5}} \overline{N} \overline{\Xi}$$

with $\overline{\Sigma} \overline{\Sigma} = +\sqrt{\frac{1}{3}} \overline{\Sigma^{+}} \overline{\Sigma^{-}} - \sqrt{\frac{1}{3}} \overline{\Sigma^{0}} \overline{\Sigma^{0}} + \sqrt{\frac{1}{3}} \overline{\Sigma^{-}} \overline{\Sigma^{+}}$

SU(3)極限



27重項、10重項、反10重項は、上の様な粒子基底の単純な演算子を用いても計算可能。

設定

- 2+1 flavor full QCD simulation by using a gauge conf. set by CP-PACS/JLQCD collabaration.
 - RG improved gauge & O(a) improved clover quark
 - 16³x32, Kuds=0.13760, a=0.1209 [fm], L=2.0 [fm].
- Flat wall source to produce S-wave BB state.
- 800 conf. x 8 sources x 2 forward&backward.
- KEK Supercomputer system BGL and SR11000





設定



	[]	[]	<u> </u>
π,Κ	0.5114(6)	834.7 (1.0)	5-10
Ν, Σ, Λ, Ξ	1.070(2)	1746 .7 (3.5)	8-13

物理点からは遠い。しかし、SU(3)対称である。



2体の有効質量とBS振幅の例



- 時間差 t-t₀≥9 において基底状態で飽和してそうである。
 以降、全て t-t₀=10 を採用する。
- 右図の様なBS振幅からポテンシャルが導出される。

紹介する
$${}^{1}S_{0}$$
: $V^{(27)}(r)$, $V^{(8s)}(r)$, $V^{(1)}(r)$ 3
順番 ${}^{3}S_{1}$: $V^{(10^{*})}(r)$, $V^{(10)}(r)$, $V^{(8a)}(r)$ 2

10

とこ



- それぞれ、NNの¹S₀と³S₁の極限に対応する。
 ³S₁の方は有効中心カポテンシャル。
- 以降グラフは全て Laplacian 部分のみ。
- これまでの結果(石井)と基本的に同じ。デバッグ。
 核力にSU(3)破れの影響は大きくなさそうである。

8a) トン



- 両方とも³S1の有効中心カポテンシャル。
- 10重項は NΣ (I=3/2,J=1)の極限。斥力が強い。引力浅い。
- 8a重項は NE (I=0,J=1)の極限。斥力は弱い。引力的。
- クォーク模型では、10重項は準禁止状態なために強い斥力、
 8a 重項は反対称化も OGE も弱い、と予言されていた。
 格子QCDの結果と合っている!

 $(8s) \succ \mathbf{V}^{(1)}$



- 両方とも ¹So のポテンシャル。
- 8s重項は斥力が非常に強い。6つの中で最大。
- •1重項は斥力芯なし!引力芯!6つの中でこれだけ。
- クォーク模型は、1重項はパウリ効果はなくOGEは引力の 寄与と予言。この予言も格子QCDの結果と合っている!

フレーバー1重項の波動関数



- 近距離での振幅の増加が特徴であり、引力に対応する。
- この関数でも束縛状態の可能性がある。→ H-dibaryon
- 格子QCDでは周期境界有限領域の影響で、束縛状態で もこうなり得る。はっきりさせるには、大きな領域での simulation が必要。ぜひ挑戦したい。現在計画中

格子基底状態のエネルギー



(1)を使った結果



エネルギーの寄与によっては、浅い束縛状態が出現する。
 (連続無限空間、Schrodinger 方程式)

SU(3)でのS波バリオン間ポテンシャル



- 規約表現で分けると、強いフレイバー依存性が明らかに。
- SU(3)に拡張した結果、多彩な相互作用が見えた。

まとめ

- 我々の動機、目的、ゴールを説明した。
 - 格子QCDを用いてQCDから直接にバリオン間力を得る。
 - そして、物理的起源の解明など、深い理解を得たい。
- 我々の方法を簡単に説明した。
 - 便利な道具であるポテンシャルを格子QCDから導出
 - 定性的理解 → フレーバーSU(3)極限の利用
- 数値シュミレーション結果を紹介した。
 - S波に対する6つの独立なポテンシャル。
 - SU(3)に拡張した結果、多彩な相互作用が見えた。
 - クォーク模型の予言は今回の結果と無矛盾である。
 - V⁽¹⁾は引力芯 + 中長距離の引力。
 - H-dibaryon が存在するかも。格子にも、現実にも。



• 現在進行中

- エネルギーの正確な決定
- ポテンシャルのクォーク質量依存性
- ポテンシャルへのSU(3)破れの影響
- 模型との比較検討。物理的起源の解明。
- 近い将来
 - 大きな領域を使ったSU(3)点でのシュミレーション
 - H-dibaryonの存在の可能性の追求
 - 格子QCDで初のハドロン束縛状態 challenging
 - 現実にも ΛΛ 質量より少し上に存在? 実験に期待。

既約な BB source 演算子

 $\overline{BB^{(27)}} = +\sqrt{\frac{27}{40}} \overline{\Lambda} \overline{\Lambda} - \sqrt{\frac{1}{40}} \overline{\Sigma} \overline{\Sigma} + \sqrt{\frac{12}{40}} \overline{N} \overline{\Xi} \quad \text{or} + \sqrt{\frac{1}{2}} \overline{p} \overline{n} + \sqrt{\frac{1}{2}} \overline{n} \overline{p}$ $\overline{BB^{(8s)}} = -\sqrt{\frac{1}{5}} \overline{\Lambda} \overline{\Lambda} - \sqrt{\frac{3}{5}} \overline{\Sigma} \overline{\Sigma} + \sqrt{\frac{1}{5}} \overline{N} \overline{\Xi}$ $\overline{BB^{(1)}} = -\sqrt{\frac{1}{9}} \overline{\Lambda} \overline{\Lambda} + \sqrt{\frac{3}{9}} \overline{\Sigma} \overline{\Sigma} + \sqrt{\frac{4}{9}} \overline{N} \overline{\Xi}$

