

格子量子色力学を用いたメソン・バリオン結合定数の研究

高橋徹^a, Güray Erkol^b, 岡真^b

^a京都大学基礎物理学研究所 ^b東京工業大学

ttoru@yukawa.kyoto-u.ac.jp

概要: 陽子・中性子などに代表される重粒子（バリオン）は世界の主要な構成要素であり、 π 中間子などの中間子（メソン）は、それらバリオンの間に働く力を媒介する。このようなバリオン間における中間子交換描像は、湯川秀樹以来、現在におけるまで、バリオン間相互作用を記述するのに成功してきている。原子核や中性子星内部など主に強い相互作用に従う系を理解するためには、バリオン・メソン結合定数の詳細な理解が必要である。しかしながら、実験的にその詳細が知られているのは、 πNN （ N は陽子・中性子）のみであり、ストレンジクォークを含むバリオン・メソンについての情報は非常に乏しいものとなっている。そこで本研究では格子量子色力学（QCD）計算を用いて、メソン・バリオン間の結合定数の大きさ等を研究する。

1 はじめに

原子核などを支配する、強い相互作用は現在では、背後にあるSU(3)非可換ゲージ理論によって支配されていることがわかっている。このSU(3)ゲージ理論に基づく力学は量子色力学(QCD)と呼ばれ、現在もなお多くの未解決問題を残している。特にその強結合性により、手作業による解析的計算は困難を極めており、信頼性の高い計算を行うには、スーパーコンピュータ等を用いた、大規模数値計算（格子QCD計算）を用いることが必須と言える。元は無限自由度の場の理論であるが、理論を有限格子以上に定義することにより、コンピュータ上でシミュレート可能となる。現在においては、格子QCD計算は、実験との直接比較に耐えうるほぼ唯一の計算手法となっており、特に実験が困難な状況などにおいては、「数値実験」として非常に有意義な結果を与えるであろうことが期待される。特に、近年のコンピュータ性能の向上により、より現実世界に近いコンディションで様々な物理量を計算することが現実的となってきた。

2 メソン・バリオン結合定数

強い相互作用における系で、重要な物理量はいくつも考えられるが、中でもバリオン（重粒子）とメソン（中間子）の結合定数はもっとも重要な物理量の一つとして位置づけられる。陽子・中性子などに代表されるバリオンは、よく知られているように、この世界の主要な構成要素であり、 π 中間子などのメソンは、それらバリオンの間に働く力を媒介する。このようなバリオン間における

中間子交換描像は、歴史的な湯川秀樹による提唱以来、現在におけるまで、バリオン間相互作用を記述するのに成功してきている（図1）。

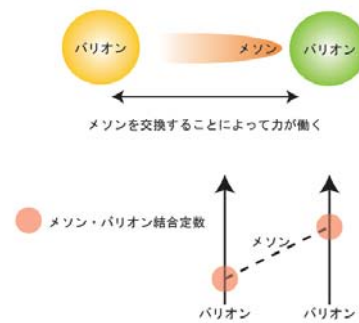


図1：中間子交換描像

この中間子交換として記述される核力は原子核飽和密度等、原子核の性質をよく説明してきた。つまり、原子核や中性子星内部など主に強い相互作用に従う系を理解するためには、バリオン・メソン結合定数の詳細な理解が必要である。しかしながら、実験的にその詳細が知られているのは、 πNN （ N は陽子・中性子）のみであり、ストレンジクォークを含むバリオン・メソンについての情報は非常に乏しいものとなっている。現象論的には8重項バリオンと8重項メソンの結合定数の間にはフレーバーSU(3)対称性(電磁相互作用の場合と異なり、アップ・ダウン・ストレンジクォークは量子色力学では区別されないことに起因する対称性)を反映した関係式が良く成り立つとされている(式1参照)。しかし、実際にはこの対称性は破れており、この関係式を満たしているかは全く自明ではない。そこで本研究では格子量子色力

学 (QCD) 計算を用いて、8重項メソン ($\pi \cdot K$ 中間子)・バリオン ($N \cdot \Sigma \cdot \Lambda$) 間の結合定数の大きさ等を初めて評価する。

$$g_{\pi NN} = g, \quad g_{\pi\Sigma\Sigma} = 2g\alpha, \quad g_{\pi\Lambda\Sigma} = \frac{2}{\sqrt{3}}g(1-\alpha),$$

$$g_{K\Lambda N} = -\frac{1}{\sqrt{3}}g(1+2\alpha), \quad g_{K\Sigma N} = g(1-2\alpha),$$

式1：フレーバーSU(3)対称性の下での、結合定数の関係式

3 結合定数

実際の計算[1]では、空間方向は 16^3 ・時間方向は 32 の長さを持つ格子を採用する。このときの格子間隔は、0.1555 fm ($1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$)となるようセットされたので、およそ、空間方向に 2.5fm・時間方向に 5fm の長さを持つことになる。また、クォーク・反クォーク対が真空中にループを形成することによるグルーオン場への偏極効果も、CP-PACS の生成したゲージ配位[2]を利用することにより、取り入れられている。クォークの質量としては、ストレンジクォークを約 90MeV (現実の値と同じ) に固定し、アップ・ダウンクォークは約 150, 100, 90, 60 30MeV の5種類について計算した。本来アップ・ダウンクォークは数 MeV という非常に軽い質量を持つが、この軽さを実現するためには、非常に多くの計算コストを投入せねばならず、本計算では、結果を「外挿」することにより、現実世界での値を求める。使用したスーパーコンピュータは、大阪大学の NEC SX-8R, 京都大学基礎物理学研究所の NEC SX-8, 東京工業大学の tsubame システムである。

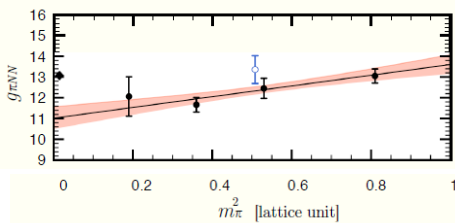


図2： πNN 結合定数

図2は、格子QCD計算によって得られた πN 結合定数である。横軸は、アップ・ダウンクォークの質量に対応し、左端が、「現実世界」である。Y軸上に位置するダイヤモンドは良く知られた実験値である。この外挿ではわずかにずれてしまうが、格子が荒いことやクォーク質量が大ききところから外挿していることがこのずれの原因と考えられる。図3に、本計算で得られた $\pi\Sigma\Sigma \cdot \pi\Lambda\Sigma \cdot K\Lambda N \cdot K\Sigma N$ の結合定数 (πNN の結合定数で規格化されたもの)を示す。このように実験ではアクセスし難い物理量にも、スーパーコンピ

ュータを使うことにより、アクセスすることが可能となる。

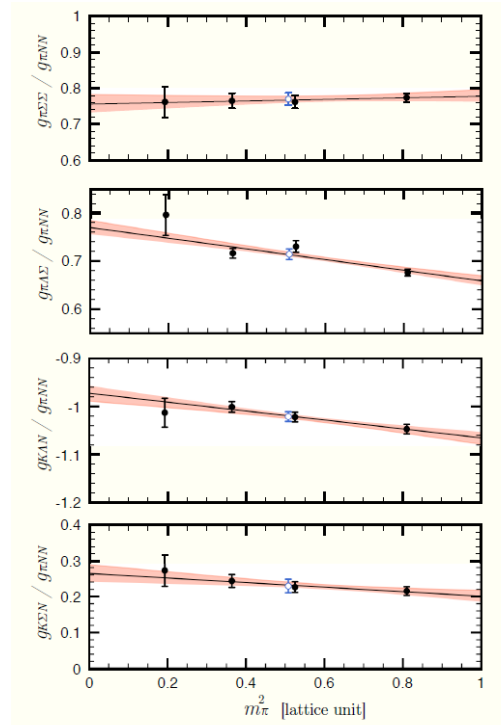


図3：計算で得られた様々な結合定数

本研究で得られたもっとも顕著な特徴は、式1に示されている関係式が、非常に広いクォーク質量領域において成り立つということである。これらの関係式は(フレーバーSU(3)対称性が現実には破れているので)、一般的には成り立たないと予想されるが、これらの関係式は、ほぼ数%以下の精度で成り立つことが数値的にわかった。このような現象の理由は現在研究中である。

4 まとめ

本研究では、格子QCD計算を用いて、8重項メソン・バリオン結合定数を求めた。その結果、現実にはフレーバーSU(3)対称性が破れているにも関わらず、結合定数に関しては破れの度合いは非常に小さいことをつきとめた。これらの結果は現象論的モデルなどのインプットとして、有効にフィードバックすることが可能であると考えられる。今回の計算は、現実世界に近いコンディションとは言い難いが、今後、計算能力が上がれば、ほぼ現実の条件を作り出すことができ、コンピュータ上で行われる「理想的実験」として、原子核・ハドロン物理の重要な部分を担っていくであろう。

参考文献

- [1] G.Erkol et al., arXiv:0805.3068
- [2] A. Ali Khan et al. (CP-PACS), Phys. Rev. D65,054505(2002).