

平成20年度 KEK 大型シミュレーション研究 実施報告書

研究グループ: scnfqcd

研究科題名: 格子 QCD による核力の研究

Nuclear force from lattice QCD

東京大学大学院理学系研究科 教授

初田哲男

2009年5月22日

1. 研究組織

研究責任者 初田哲男 (はつだてつお) 東京大学 大学院理学系研究科 教授

共同研究者 青木慎也 (あおきしんや) 筑波大学 大学院数理物質科学研究科教授

共同研究者 石井理修 (いしいのりよし) 筑波大学計算科学研究センター 研究員

共同研究者 根村英克 (ねむらひでかつ) 理化学研究所

肥山ストレンジネス核物理研究室研究員

共同研究者 村野啓子 (むらのけいこ) 筑波大学大学院数理物質科学研究科 大学院生

共同研究者 井上貴士 (いのうえたかし) 筑波大学大学院数理物質科学研究科研究員

2. 当該年度の実施報告の詳細

原子核を結合させている力(核力)は原子核物理において最も基本的で重要な概念である。現象論的には、長距離の OPEP(One Pion Exchange Potential) を伴った中間距離の引力と、近距離の斥力芯の存在の存在が重要である。中間距離の引力は、核子束縛系としての原子核の存在に必須であり、中間子論の立場から理解可能である。一方、近距離の斥力芯は、原子核の安定性、超新星爆発、高密度星の上限質量等の様々な方面で重要な影響を与えるのだが、その存在理由に関しては現在決着が付いていない。この領域では核子どうしが重なりあうため、quark/gluon の言葉による核子の構造の理解が重要な鍵を握っている。そのため格子 QCD を使った第一原理の方法による核力の研究が長い間切望されてきた。しかしながら、格子 QCD から核力へアプローチする確固たる方法も存在せず、計算できるとしても膨大な数値計算を必要とすることが考えられていたため、最近まで全く手つかずの状況であった。

我々は平成 18 年度の研究において、格子 QCD 計算によりこれらの重要な性質を同時に再現する有望な方法に到達した。格子 QCD を用いて 2 核子 Bethe-Salpeter (BS) 波動関数を生成し、それを再現するように核力を逆構成するという方法である。この方法はもともと CP-PACS グループが $\pi\pi$ 散乱の散乱長の研究に用いた BS 波動関数の方法を独自に拡張したもので、格子 QCD で散乱位相差を計算する標準的方法である Lüscher の有限体積の方法の拡張の一形態である。BS 波動関数を再現するように構成された核力ポテンシャルは、波動関数の長距離部分に埋め込まれている位相差の情報も同時に再現する。

$$\psi(\vec{r}) \sim e^{i\delta_0(k)} \frac{\sin(kr + \delta_0(k))}{kr} \quad (\text{s-wave}) \quad (1)$$

この性質を活用することにより、NN 散乱実験に忠実な核力を格子 QCD を用いて理論的に計算することに道が開かれる。結果として求めた核力には、現象論的な核力が共通に保持している二つの重要な性質である近距離の斥力芯と中間距離の引力の双方を同時に保持しており、非常に有望な方法であることが理解される。

またハイペロン力への拡張も容易に行える。現在直接のハイペロンビームが存在しないため、ハイペロン力の決定に際して非常に限られた範囲の実験的情報しか利用できない。我々の方法では、ハイペロン散乱に忠実なハイペロン力を格子 QCD を用いて理論的に生成できる可能性がある。ハイペロン力の決定は、現在本格稼働準備中の J-PARC において原子核物理の最重要テーマと直結しており、今後急速に発展する可能性が高い。

この研究は平成 18 年度からの継続研究である。我々はこの方法を用いて、核力・ハイペロン力の研究を進めてきた。平成 20 年度は、 $32^3 \times 48$ の格子上、 $\beta \equiv 6/g^2 = 5.7$ の standard

plaquette gauge action を採用して生成した 1000 個から 4000 個のゲージ配位を用いたクエンチ QCD により研究を進めた。クォークのプロパゲータは standard Wilson quark action を用いて生成する。カイラル極限での rho meson mass を使って決められた格子間隔は $a \simeq 0.137$ fm ($a = 1.44(2)$ GeV) であり、我々の格子は一辺 $L = 32a \simeq 4.4$ fm という巨大なものである。これは核子やハイペロンを二つ収容するために必要となる。

平成 19 年度の大型シミュレーションにおいては主に次の二つを中心に研究した。(i) 「核力のエネルギー質量依存性」、(ii) 「ハイペロン相互作用 (NA 系) への拡張」。以下、順をおって説明する。

核力のエネルギー依存性

式 (1) の性質をフルに活用すると、NN 散乱実験に忠実な核力を構成できる。このためには、広いエネルギー領域で Bethe-Salpeter 波動関数を生成して、それらを同時に再現できるようなポテンシャルを構築する必要がある。このようなポテンシャルは、一般に non-local であり、non-locality は微分展開を使うことにより取り込んでいく。この方向への第一歩として、核力のエネルギー依存性を調べている。これまでの我々のポテンシャルは、 $E \sim 0$ MeV

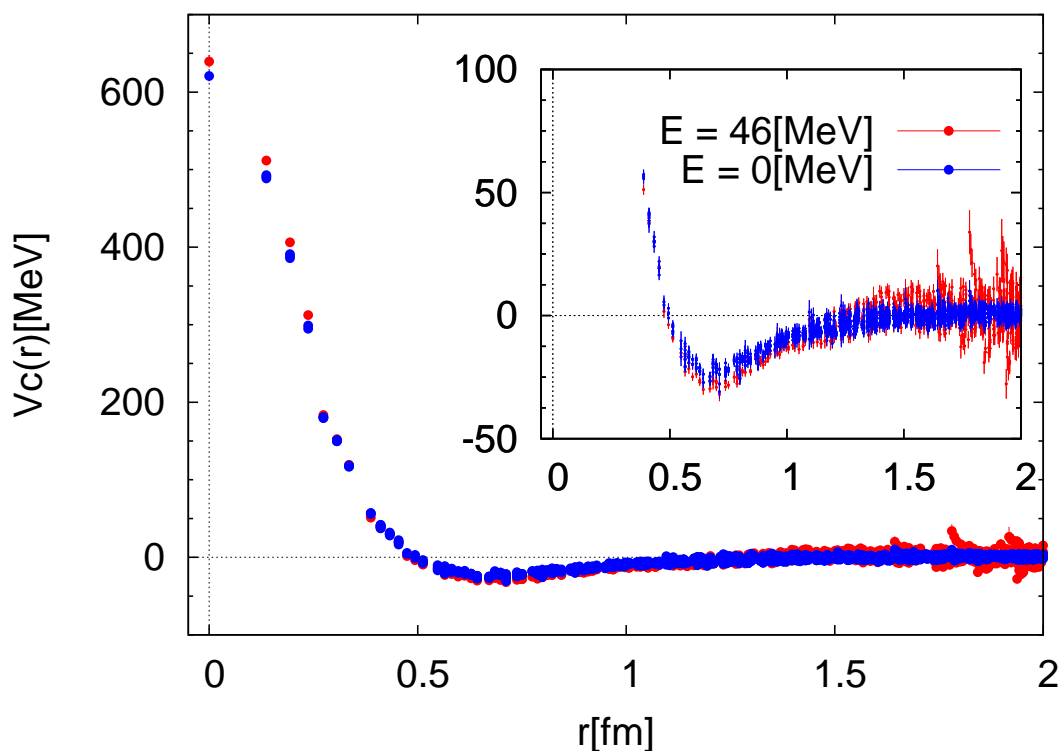


FIG. 1: 核力のエネルギー依存性 (1S_0 中心力)

の一つの Bethe-Salpeter 波動関数から構成された local ポテンシャルである。そのため、正確に再現するのが保証されているのは、 $E \sim 0$ MeV の位相差 (散乱長) だけである。他のエネルギーでの妥当性を議論するため、他のエネルギーで生成した Bethe-Salpeter 波動関数からポテンシャルを生成して比べる。ここでは、 $E \neq 0$ の Bethe-Salpeter 波動関数を生成するため、quark field の空間方向に反周期境界条件を課す。これにより、二つの核子が空間運動量 ~ 240 MeV で正面衝突しているという状態を生成でき、 $E \sim 50$ MeV(重心系)でのポテンシャルを得られる。このようにして作ったポテンシャルと $E \sim 0$ MeV で作ったポテンシャルを比べてみた図を FIG. (1) に示す。近距離に小さなエネルギー依存性が存在している。現在までに 4000 ゲージ配位使用しているが、まだノイズが非常に大きい。最終的に結論するにはもう少し時間をかけて解析する必要がある。エネルギー依存性が小さいということは、non-locality が小さいということの意味し、微分展開が有効に機能することを意味する。

ΛN 間ポテンシャル

ハイペロンポテンシャルとして、 ΛN 系の計算を行った。 ΛN 相互作用は、散乱断面積のデータや、軽いハイパー核のエネルギーのデータがいくつかあり、それらを直接的、間接的にとりいれた現象論的なポテンシャルモデルが作られている。したがって、格子 QCD から得

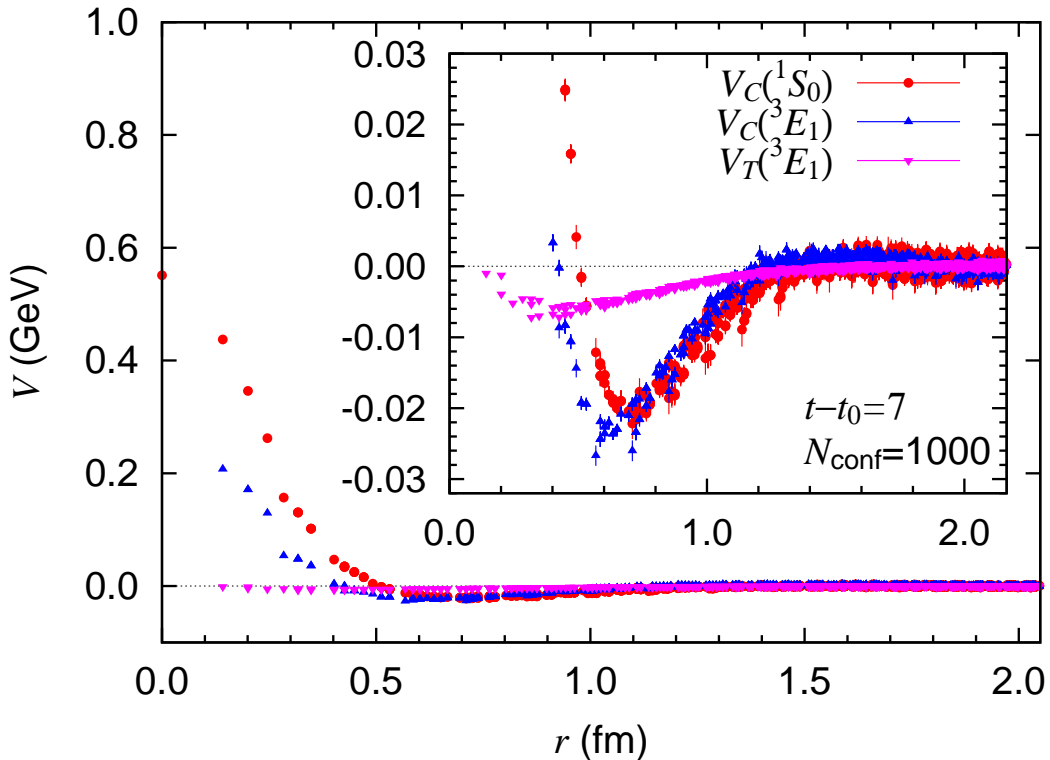


FIG. 2: ΛN の (有効) 中心力およびテンソル力

られたポテンシャルおよび散乱パラメータを、これまでの現象論的モデルによるものと比較することが可能であり、 ΛN にねらいを当てることは、核力に次いで重要であるといえる。具体的な数値計算は、前年度行った ΞN の計算での経験に基づき、数値計算アルゴリズムの改良を加えて行った。その結果、全空間点の BS 振幅を可能なスピンの組み合わせ全てについて求めることが可能となった。加えて、前年度に核力で行ったテンソル力への拡張を ΛN へも応用することにより、 $\Lambda N - \Lambda N$ の弾性チャンネルでの中心力とテンソル力を求めることに成功した。(FIG. 2 参照) 本年度の研究の結果、 ΛN 相互作用は引力であり、スピン一重項と三重項の間の差は、誤差棒の範囲内で区別が付けられないほど小さいことを示す結果が得られた。(FIG. 3 参照)

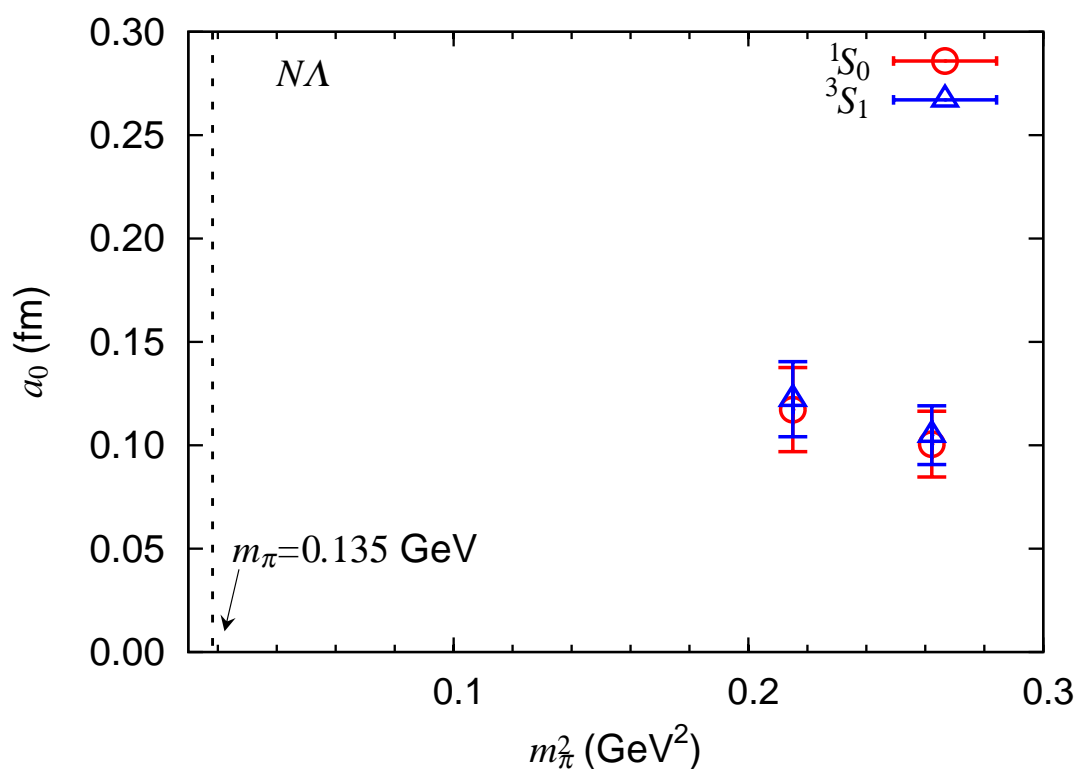


FIG. 3: ΛN の散乱長を m_π^2 (GeV²) の関数としてプロットしたもの。正の小さな値の散乱長は、弱い引力に対応する。