

実施報告書

研究グループ: scnfqcd

研究科題名: 格子 QCD シミュレーションによる核力の研究

Nuclear force from lattice QCD simulations

東京大学大学院理学系研究科 教授

初田哲男

2007 年 5 月 21 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

2. 当該年度の実施報告の詳細

原子核を結合させている核力は、原子核物理において非常に基本的な力である。核力は pion 交換によって媒介されるという 70 年前の湯川秀樹の original の論文以降、非常に多くの研究が継続的かつ勢力的に展開されてきた重要なターゲットでもある。1 fm 以上の中間及び長距離の部分は one-pion exchange 及び中間子論によって理解でき、陽子や中性子を原子核に結合させるために非常に重要な役割を演じる。一方、1fm 以下の近距離の部分に存在する斥力芯は、テンソル力や交換力と競合して原子核密度の飽和性を生み出し、原子核が安定に存在するために必要不可欠の重要な役割を演じる。斥力芯はまた超新星爆発や中性子星の上限質量の議論においても非常に重要な影響力をもつのだが、その物理的起源については現在でも未解決の最重要課題の一つに数えられる。この領域では、核子どうしが重なりあうため、核子の quark/gluon structure が重要な鍵を提供すると考えられる。そのため、格子 QCD を使った第一原理の方法による核力の直接計算は非常に有望な方法だと考えられてきた。しかしながら、格子 QCD を用いて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非常に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、非常に最近まで全く手つかずの状況であった。(非常に最近、京都グループにより、質量無限大の static quark を駆使する方法を使った先駆的な計算があるが、斥力芯を再現するにいたっていない)

我々は従来考えられていた方法とはまったく違う方法を用いて、核力を計算することに成功した。この方法は、CP-PACS グループが $\pi\pi$ 散乱の研究に使った方法で、格子 QCD から NN の波動関数を計算し、それが Schrödinger 方程式を満たすことを要請して、NN ポテンシャルを逆算するという方法である。この方法は従来型の質量無限大の static quark を導入してポテンシャルを求める方法とはまったく違っていて、将来的に実験に忠実な NN ポテンシャルを格子 QCD で計算できる可能性が期待できる。例えば、この方法を用いて作られたポテンシャルは現在の段階でも、体積無限大の極限で正しい散乱長が出ることが by construction で示せる。(我々の方法を用いて構成した NN potential に通常の散乱理論を応用して計算された散乱長が、格子 QCD で散乱長を求める標準的な方法と考えられている Lüscher の有限体積の方法を用いて計算された散乱長と体積が無限大になる極限で一致することが示せる。) 従来 static quark を用いた方法では、このような性質はまったく期待できない特徴である。また、我々の計算には、二つの核子の間で $q\bar{q}$ を交換するという Feynman diagram が取り込まれている。そのため、full QCD 計算を行うと、長距離では自動的に one pion exchange の寄与が支配的になる。

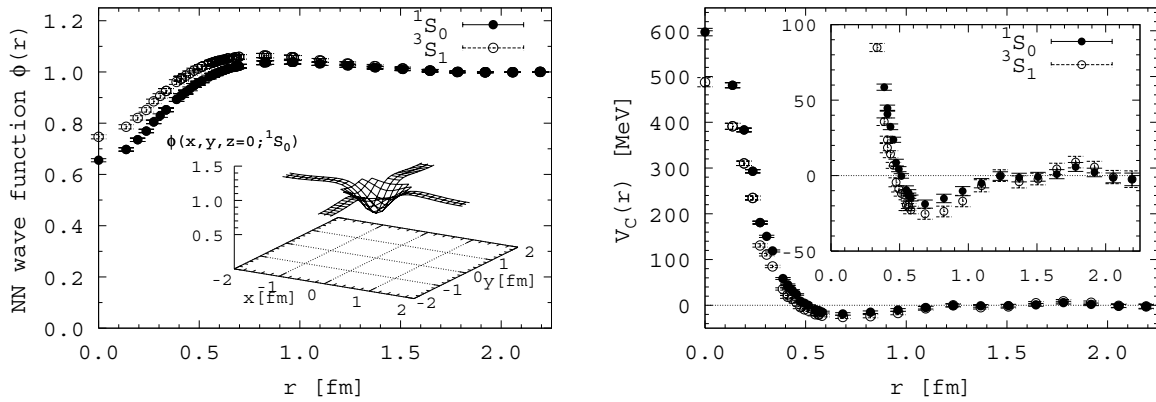


FIG. 1: 左図は 1S_0 (黒)と 3S_1 (白)のNN波動関数をプロット。右図は 1S_0 の中心力(黒)と 3S_1 の有効中心力(白)のプロット。

格子QCD Monte Carlo 計算は、 32^4 の格子上で、 $\beta \equiv 6/g^2 = 5.7$ の Wilson gauge action を用いて生成した 500 個のゲージ配位を用いてクエンチ近似の範囲で行う。quark の action として $\kappa = 0.1665$ の Wilson quark action を用いる。カイラル極限の ρ meson mass を使ってスケールを導入することにより、格子間隔 $a \simeq 0.137$ fm ($a = 1.44(2)$ GeV), $m_\pi \simeq 0.53$ GeV, $m_\rho \simeq 0.88$ GeV, $m_N \simeq 1.34$ GeV となり、一辺の長さは $L = 32a \simeq 4.4$ fm となる。

Fig. 1(左)に格子QCDで求めたNN波動関数のプロットを示す。内側に示されているのは、 1S_0 の波動関数の3次元プロットである。計算量をおさえるため、 $r > 0.7$ fmでは座標軸上の点とその隣の点の集合(座標軸上で離散ラプラシアンを計算するのに必要とされる点)に限って計算した。3Dプロットから4本足が出ていたり、2Dプロットで外側の点で密度が低かったりするのはそのためである。この領域ではポテンシャルの変化はなだらかであることが期待される。一方、 $r < 0.7$ fmの領域では、ポテンシャルは起伏に富んだ構造が期待されるため、全ての点で計算する。

Fig. 1(右)に格子QCDで求めたNN波動関数から再構成したNNポテンシャルをプロットした。現在の重いクォーク質量を用いた計算の段階においても、我々の核力は既に現象論的に要求される全ての定性的性質を保持している。波動関数(Fig. 1(左))の近距離領域のへこみに対応して、このポテンシャルは $r < 0.5$ fmに弱めの(500~600MeV程度の)斥力芯を持つ。斥力芯が期待より弱くなっているのは、現在採用しているクォーク質量が現実のものよりも重いためと考えられる。実際、constituent quark 模型では、斥力芯の起源は、color-magnetic interaction とされており、color-magnetic interaction は相互作用に参与する2つのクォークの constituent quark 質量の積の逆数に比例するため、軽いクォーク質量の

領域で強力になることが予想される。 $0.5 < r < 1$ fm に弱め (20~30 MeV 程度) の引力が存在する。引力が期待されるより弱くなっている理由は、現在採用しているクォーク質量が重いため、パイオンが重くなり遠くまで伝搬できなくなっているためと考えられる。(現在計算を進めている様々なクォーク質量に対応する NN ポテンシャルの preliminary な結果では、近距離の斥力芯に対しても、中間距離の引力に対しても、実際この傾向が見られている)
 1S_0 の中心力と 3S_1 の有効中心力を比べると、 3S_1 の有効中心力の方が引力的である傾向が見られる。これは、 3S_1 には束縛状態 (重陽子) が存在するのに、 1S_0 には存在しないことと consistent である。

これらの結果は、既にいくつかの国際会議や研究会等で発表している。インターネット上で公開されている e-print archive nucl-th/0611096 は、Physical Review Letters に accept されて現在印刷中である。これらの結果に対して、国内外の多くの著名な物理学者から大きな反響を得ている。今後は、この方法を用いて、大強度陽子加速器計画 J-PARC で中心的ターゲットの一つの hyperon 間ポテンシャル (YN, YY) を研究していきたいと思っている。また、核力自体においても、核構造の理論で重要な役割を果たすテンソル力や LS 力に拡張を予定しており、核力のエネルギー依存性や non-locality についても議論していきたいと考えている。

3. 口頭研究発表、発表論文 (査読)、国際会議のプロシーディング論文、その他投稿中の論文のリスト

3.1. 口頭研究発表

- i. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,
“*Nuclear Force from Lattice QCD*”,
The 24th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice 2006),
Tucson, Arizona, USA, July, 2006.
- ii. 石井理修、青木慎也、初田哲男、
“格子 *QCD* による核力の計算”
日本物理学会
奈良女子大学、奈良県奈良市、2006 年 9 月
- iii. 石井理修、青木慎也、初田哲男、
“格子 *QCD* による核力”
基研研究会「有効相互作用の理論と核構造」
京都大学基礎物理学研究所、京都府京都市、2007 年 2 月
- iv. 石井理修、青木慎也、初田哲男、
“*Lattice QCD approach to the nuclear force*”
「ストレンジネスとエキゾティクス・理論の課題」研究会
志摩ビーチホテル、三重県鳥羽市、2007 年 3 月
- v. 石井理修、青木慎也、初田哲男、
“格子量子色力学による核力の研究”
日本物理学会 (企画講演)
首都大学東京、東京都八王子市、2007 年 3 月

3.2. 発表論文 (査読)

- i. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,
“*Nuclear Force from Lattice QCD*”,
nucl-th/0611096, Physical Review Letters in press.

3.3. 国際会議のプロシーディング論文

- i. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,
“*Nuclear Force from Lattice QCD*”,
PoS(LAT2006) 109.

(The 24th International Symposium on Lattice Field Theory(Lattice2006), Tucson, Arizona, USA, July 2006.)

3.4. その他投稿中の論文リスト