

# 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

2008年5月9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 岩崎先端中間子研究室 基礎科学特別研究員

## 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。核力の現象論的に最も重要な性質は次の二つに集約される。(i) 長距離の OPEP(One Pion Exchange Potential) を伴った中間距離の引力と、(ii) 近距離の斥力芯の存在の存在である。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ことが十分に予想される。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、最近まで全く手つかずの状況であった。

我々は最近格子 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。それが格子 QCD を用いて生成した 2 核子(ベータ・サルペータ)波動関数からシュレディンガー方程式を用いて核力を逆算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使った方法を我々が独自に拡張したものであり、従来型の無限大質量のスタティック・クォークを駆使してポテンシャルを求める方法とは質的に異なる点に注意されたい。一例は散乱位相差である。ベータ・サルペータ波動関数は長距離において次の漸近形

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

を持つ。そのため、このような波動関数を再現するように構成された我々のポテンシャルは自然に散乱位相差  $\delta_0(k)$  値を再現する。現在のようにポテンシャルを逆算するために、 $E \sim 0$  の波動関数を一つしか用いない場合においても、既に正しい散乱長を再現できることがこれにより理解できる。将来的には、様々なエネルギーの波動関数を同時に導入することによって、より広いエネルギー領域で NN 散乱実験データに忠実なポテンシャルを構成することを視野に入れている。また我々の方法には、二つの核子の間で  $q\bar{q}$  を交換することに対応する Feynman diagram が取り込まれているため、full QCD 計算においては長距離部分に one pion exchange が自然に再現されることが容易に理解される。

我々は平成 18 年度に引き続き、格子 QCD による核力の研究をこの方法を使って進めた。格子 QCD Monte Carlo 計算は、 $32^4$  の格子上で、 $\beta \equiv 6/g^2 = 5.7$  の standard plaquette gauge action を用いて生成した 1000 から 2000 個のゲージ配位を用いてクエンチ近似の範

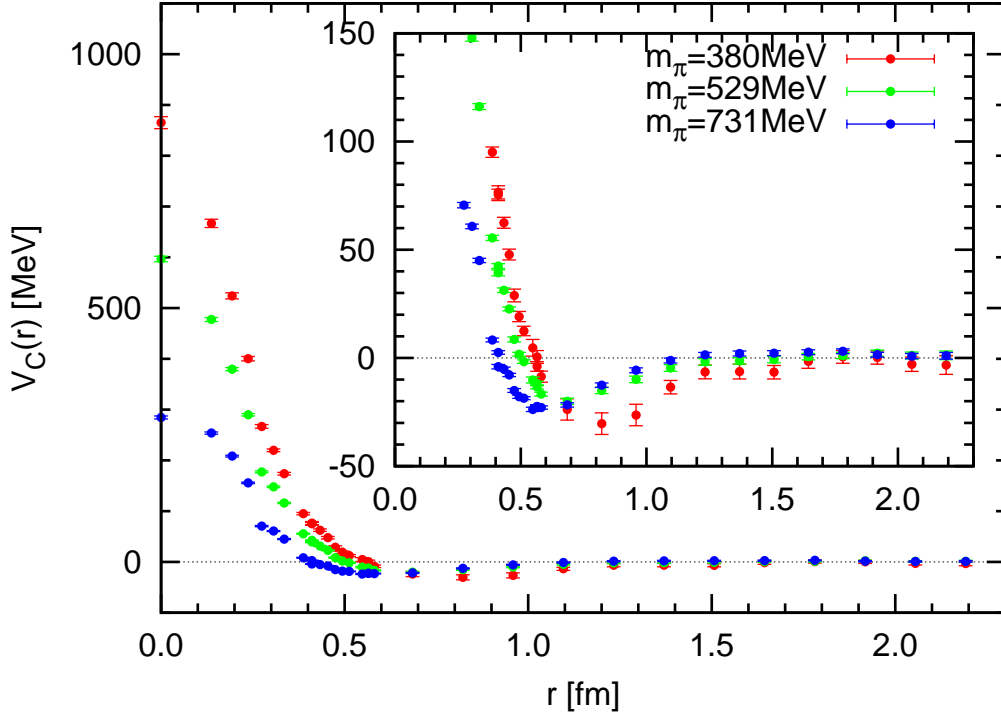


FIG. 1: 様々なクォーク質量での核力 ( $^1S_0$  中心力)

囲で行う。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研究における成果の柱は次の3つ (i) 「核力 ( $^1S_0$  中心力) のクォーク質量依存性」、(ii) 「ハイペロン相互作用 ( $I = 1$  の  $N\Xi$  系) への拡張」、(iii) 「テンソル力への拡張」である。以下、順をおって説明する。

#### 核力 (中心力) のクォーク質量依存性

格子 QCD Monte Carlo 計算はクォーク質量が軽くなるにつれて計算量が増える。そのため、物理的クォーク質量での直接計算は現在の段階ではまだ不可能である。しかしながらこの段階においても様々なクォーク質量で核力を計算することによって、現実的なクォーク質量で計算された核力の振舞を予想することは可能である。また、核力のクォーク質量依存性は、現在未解決である斥力芯の物理的起源に関して重要な情報を与える。ここでは、pion mass に換算して  $m_\pi \simeq 380, 529, 731$  MeV となる hopping parameter  $\kappa = 0.1678, 0.1665, 0.1640$  について、格子 QCD Monte Carlo 計算により核力を計算した。結果を FIG. 1 に示す。軽いクォーク質量領域で、近距離の斥力芯が著しく増大している。また、中間距離の引力も増大

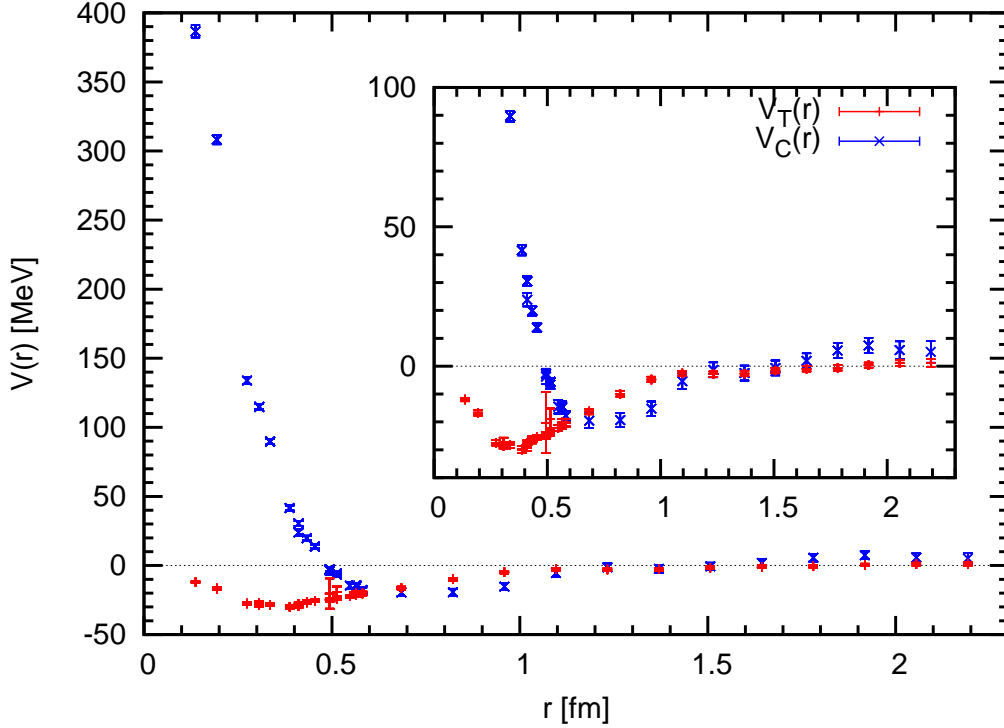


FIG. 2: テンソル力  $V_T(r)$  と  ${}^3S_1$  の中心力  $V_C(r)$  に関する格子 QCD の preliminary な結果

する傾向にあることが見える。後者はクォーク質量が軽くなることによって、virtual pion が空間的により遠くへ伝搬できるようになるという事実と符合している。将来的に実験と比較できるデータを提供するためには、より軽いクォーク質量領域で Monte Carlo 計算を行うことが重要であることが再確認される。

#### テンソル力への拡張

テンソル力  $V_T(r)$  は、中心力の斥力芯と相俟って原子核の安定性に重要な影響力を持つ。deuteron を始めとする原子核の構造の理解において非常に重要な役割を演じる。最近の核構造理論においては、テンソル力の影響で single particle spectrum が変化して、魔法数にも変化が表れる可能性が指摘されている。この様にテンソル力は原子核物理において非常に興味深く重要な研究対象なのであるが、centrifugal barrier のため、近距離での実験的情報が得にくく不定性が大きいことが知られている。我々の方法では、微分展開の高次項である LS 力を無視し、 $J^P = 1^+$  channel のシュレディンガー方程式をテンソル力  $V_C(r)$  と中心力  $V_T(r)$  を“未知数”とする部分波  ${}^3S_1$  と  ${}^3D_1$  の連立方程式とみなすことによって原理的には求めることが可能である。この方程式を実際に解くことによって、テンソル力  $V_T(r)$  と  ${}^3S_1$  の中心力  $V_C(r)$  を独立に求めることに成功した。FIG. 2 にその preliminary な結果を示す。この方法を応用したテンソル力の詳細な研究は平成 20 年度以降の重要な課題である。

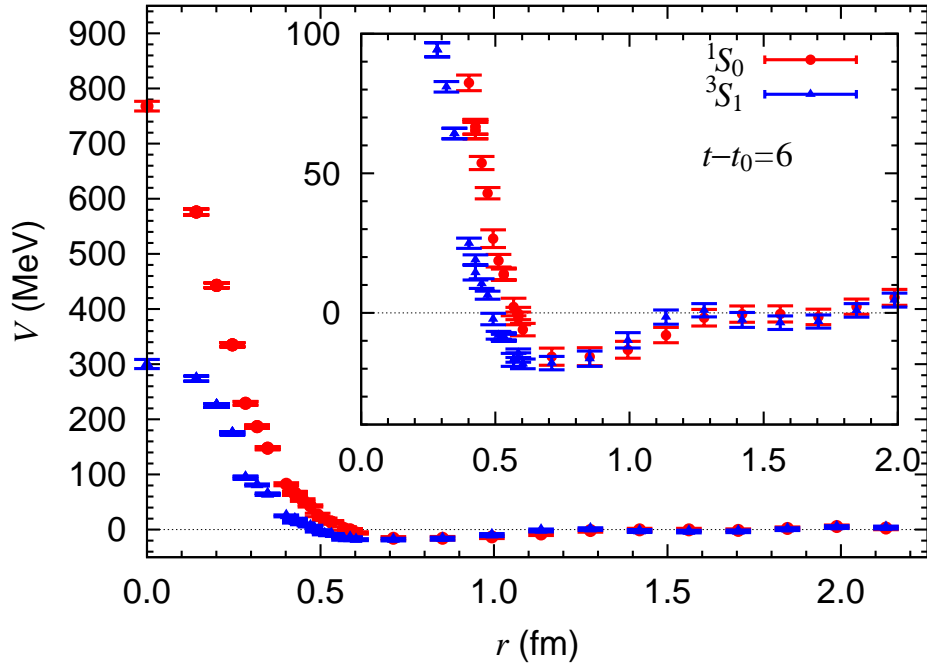


FIG. 3:  $N\Xi$  ポテンシャル ( $I = 1$ ) に関する格子 QCD の結果

### ハイペロン相互作用 ( $I = 1$ の $N\Xi$ 系) への拡張

ハイペロン相互作用 (YN および YY) は、ハイパー核物理のインプットとなる。ハイペロン相互作用を正しく理解することは中性子星内部でのハイペロン物質の出現の議論において非常に重要である。しかしながら、現在、直接のハイペロンビームが存在しないため、実験的な情報は非常に限られたものしか存在しない。また、2008 年に稼働する大強度陽子加速器 J-PARC における核物理の主要テーマと直結しており、実験開始と同時に大きな進展が予想される。我々の方法はハイペロン相互作用へも容易に拡張できる。最初のターゲットとして  $N\Xi$  系 ( $I = 1$ ) を選んだ。  $N\Xi$  相互作用は、J-PARC において DAY-1 実験の主要ターゲットとして注目されている重要な研究対象であるが、現在実験的情報は非常に乏しい。結果を FIG. 3 に示す。近距離部分には spin に依存して、 $^1S_0$  に強い斥力芯、 $^3S_1$  に弱い斥力芯を持ち、中間距離にはどちらの channel にも引力を持つポテンシャルが得られた。今後は、 $N\Lambda$ ,  $\Lambda\Lambda$ ,  $N\Sigma$  等へ順次拡張を進めていく。

これらの研究成果は、既に多くの国際会議や研究会で発表し、国内外の多くの著名な物理学者から多大の反響を得ている。いずれについても、現在論文準備中である。

3. □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. □頭研究発表

1. T. Hatsuda,  
“*Lattice QCD: (i) Nuclear Force, (ii) In-medium Hadrons*”,  
Lectures given at Berkeley School of Collective Dynamics in Heavy-Ion Collisions,  
LBNL, Berkeley, USA, May 21–26, 2007.
2. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
“*Lattice QCD approach to baryon-baryon potentials*”,  
Nuclear Physics at J-PARC, –Pre-symposium of INPC2007–,  
RICOTTI in Tokai village, Japan, June 1–2, 2007.
3. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
“*Strange Sector of Baryon-Baryon Interactions from Lattice QCD*”,  
The International Workshop “Nuclear Physics at J-PARC”,  
Ibaraki, Japan, June 1–2, 2007.
4. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
“*Lattice QCD studies to nuclear force*”,  
International Nuclear Physics Conference(INPC2007),  
Tokyo, Japan, June 2007.
5. 根村英克  
“ストレンジネス少数系の精密計算による研究”  
理研 RIBF ミニワークショップ「不安定核・ストレンジハドロン原子核の合同理論研究会—軽いエキゾチック系の構造を中心として—」  
理化学研究所, 2007年7月17日
6. 石井理修  
“*The nuclear force from lattice QCD*”  
理研 RIBF ミニワークショップ「不安定核・ストレンジハドロン原子核の合同理論研

研究会—軽いエキゾチック系の構造を中心として—  
理化学研究所, 2007年7月17日

7. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
“*Hyperon-Nucleon Potentials from Lattice QCD*”,  
The XXV International Symposium on Lattice Field Theory,  
Regensburg, Germany, July 30–August 4, 2007.
8. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
“*Lattice QCD approach to nuclear force*”,  
The XXV International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2007),  
Regensburg, Germany, July 30–August 4, 2007.
9. S. Aoki,  
“*Hadron Interactions from Lattice QCD*”,  
Invited talk at the XXV International Symposium on Lattice Field Theory (LATTICE2007),  
Regensburg, Germany, July 30–August 4, 2007.
10. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, H. Nemura,  
“*(The) Nuclear Force from lattice QCD*”,  
Invited talk at Workshop on “Hadron Physics on the Lattice”,  
Milos, Greece, September 2007.
11. 根村英克, 石井理修, 青木慎也, 初田哲男  
“格子  $QCD$  によるハイペロン-核子ポテンシャル”  
日本物理学会 第 62 回年次大会  
北海道大学 2007 年 9 月 21–24 日
12. 石井理修, 青木慎也, 初田哲男, 根村英克  
“格子  $QCD$  による核力の研究”  
日本物理学会 第 62 回年次大会  
北海道大学 2007 年 9 月 21–24 日
13. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, H. Nemura,  
“*Lattice QCD calculation of Nuclear Forces*”,

- invited talk at the international workshop on chiral symmetry in hadrons and nuclei (CHIRAL07),  
Osaka, Japan, November 13–16, 2007.
14. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
“*Lattice QCD simulation of hyperon-nucleon potential*”,  
the international workshop on chiral symmetry in hadrons and nuclei (CHIRAL07),  
Osaka, Japan, November 13–16, 2007.
  15. T. Hatsuda,  
“From Lattice QCD to Nuclear Force”,  
Invited talk at the International workshop CHIRAL07,  
Osaka, Japan, November 13–16, 2007.
  16. 石井理修  
“*NN potentials from lattice QCD*”  
KEK 主催「原子核・ハドロン物理横断研究会」(招待講演)  
KEK, 2007年11月
  17. 根村英克, 石井理修, 青木慎也, 初田哲男  
“格子 *QCD*によるハイペロンポテンシャルの研究”  
特定領域研究「ストレンジネスで探るクォーク多体系」研究会 2007  
緑水亭(仙台市), 2007年11月26–28日
  18. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
“*Lattice QCD approach to NN potentials*”,  
QCD Downunder II,  
Auckland, New Zealand, January 17–19, 2008.
  19. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
“*Hyperon-nucleon potential calculated from lattice QCD*”,  
QCD Downunder II,  
Auckland, New Zealand, January 17–19, 2008.
  20. 石井理修, 青木慎也, 初田哲男, 根村英克  
“核力の第一原理計算”,



日本物理学会 第 63 回年次大会  
近畿大学 2008 年 3 月 23 日-26 日

21. 根村英克

“ハイパー核の大規模計算”,  
日本物理学会 第 63 回年次大会  
近畿大学 2008 年 3 月 23 日-26 日

**3.2. 発表論文 (査読)**

1. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
“*Nuclear Force from Lattice QCD*”,  
Phys. Rev. Lett.**99**,022001 (2007).

**3.3. 国際会議のプロシーディング論文**

1. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
“*Lattice QCD approach to nuclear force*”,  
PoS(LAT2007)146,(2007)
2. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
“*Hyperon-nucleon potentials from lattice QCD*”,  
PoS(LAT2007),156,(2007)
3. S. Aoki,  
“*Hadron interactions from lattice QCD*”,  
PoS(LAT2007)002,(2007)
4. N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, H. Nemura,  
“*Lattice QCD calculation of nuclear forces*”,  
Mod. Phys. Lett.**A** in press  
(proceedings of the International Workshop on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei  
(CHIRAL07))

5. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
 “*Lattice QCD simulation of hyperon-nucleon potential*”,  
 Mod. Phys. Lett.**A** in press  
 (proceedings of the International Workshop on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei  
 (CHIRAL07))
6. T. Hatuda, S. Aoki, N. Ishii, H. Nemura,  
 “*THE NUCLEAR FORCE FROM LATTICE QCD*”,  
 Mod. Phys. Lett.**A** in press  
 (proceedings of the International Workshop on Chiral Symmetry in Hadrons and Nuclei  
 (CHIRAL07))

### 3.4. その他投稿中の論文リスト

#### ポスターセッション

1. H. Nemura, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda,  
 “*Hyperon-Nucleon Interactions calculated from Lattice QCD*”,  
 International Nuclear Physics Conference (INPC2007),  
 Tokyo, June 3–8, 2007
2. 石井理修, 青木慎也, 初田哲男, 根村英克  
 “核力の *QCD* 第一原理計算”,  
 シンポジウム「未来の素粒子・原子核数値シミュレーション」,  
 つくば国際会議場「エポカルつくば」, 2007年12月19–20日
3. 根村英克, 石井理修, 青木慎也, 初田哲男  
 “格子 *QCD* 計算によるハイペロン散乱数値実験”,  
 シンポジウム「未来の素粒子・原子核数値シミュレーション」,  
 つくば国際会議場「エポカルつくば」, 2007年12月19–20日

#### その他

1. 査読論文 1 に関連して、2007年6月21日、筑波大学、東京大学、KEK にてプレスリリースを行った。朝日、読売、毎日を始めとするの新聞各社に取り上げられ話題を呼んだ。

2. 査読論文 1 は、英国科学誌「Nature」にて、editor が選ぶ RESEARCH HIGHLIGHTS 2007 の 21 この研究の一つに選出された。日本からの entry は、京大山中教授のグループの iPS 細胞の研究と我々の核力の研究の 2 件のみである。