

平成 26 年 6 月 13 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24740144

研究課題名(和文) 格子QCD計算から導く ポテンシャル

研究課題名(英文) Lambda-Lambda potential from Lattice QCD simulations

研究代表者

佐々木 健志 (SASAKI, Kenji)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号：80457134

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,400,000円、(間接経費) 420,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、格子QCDシミュレーションを通じて導出された南部-ベテ-サルピーター波動関数を結合チャンネルシュレディンガー方程式に適用し、ストレンジネス $S=-2$ の系の中で特に重要と思われる $\Lambda\Lambda$ 相互作用について研究を行った。

この系はクォーク模型で予言されているH-ダイバリオン状態と密接に関係しており、この状態の存在可能性を $\Lambda\Lambda$ の散乱位相差を通じて調べた。本研究で、クォーク質量が重たい場合には、 $\Lambda\Lambda$ 状態よりも小さなエネルギー状態としてH-ダイバリオンが存在している事を発見し、その状態がクォーク質量の減少に連れて、共鳴状態となる事を格子QCD計算によって明らかにした。

研究成果の概要(英文)：The baryon-baryon interactions with strangeness $S=-2$ system, especially for Lambda-Lambda interaction, had been investigated by solving the coupled channel Schroedinger equation using Nambu-Bethe-Salpeter wave functions which are evaluated on the lattice.

The potential matrix extracted by this method is guaranteed to reproduce the proper scattering phase shift by construction through the NBS wave function. Using this potential, the Lambda-Lambda and N-Xi scattering phase shifts are calculated. The results show that H-dibaryon state can be found with heavy quark mass environment but its energy tends to be higher as decreasing light quark masses resulting in a resonance state between Lambda-Lambda and N-Xi energy levels.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：理論核物理 バリオン間相互作用 格子QCD ストレンジネス Hダイバリオン

1 研究開始当初の背景

物質の構成要素である原子の中心には原子核が存在し、それらは核子に代表される重粒子(バリオン)が集まって作られている事が知られています。湯川秀樹博士による中間子論の発表以来、核子間に働く引力は π 中間子などの中間子(メソン)交換描像によって非常によく記述される事が知られていました。核子間の力(核力)が中間子交換により長距離(1~2 fm)で強い引力を持つ一方で、原子核が潰れずに安定的に存在するためには、短距離(1 fm以下)で強い斥力を持たなければなりません。1990年代前半から、数千にのぼる核子-核子散乱の位相差データを高精度で再現する現象論的な核力ポテンシャルが登場し、核子多体系の第一原理計算に使われるようになってきたが、短距離での強い斥力の存在については依然として物理的な起源が不明であり、経験則に基づいてモデル化されていました。

近年、格子QCDから直接に核子間のポテンシャルを導き出した研究が発表され、世界中の注目を集めた[1-1]。この論文では、格子QCD計算によりNambu-Bethe-Salpeter(NBS)波動関数 Ψ を見積もり、Schrödinger方程式を通じて

$$(H_0 + V)\Psi = E\Psi \Rightarrow V = E - (H_0\Psi)/\Psi$$

のようにポテンシャルを導出する方法を提示しました。この研究により、核子間の相互作用が強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)から模型を介さずに導出できるようになり、核子間の近距離斥力がその構成要素であるクォークの部分的なパウリ排他律にしたがって導出される事が明らかとなりました。

原子核を構成する核子間の相互作用が明らかになりつつあった一方で、バリオンの一種であるハイペロンを含む原子核(ハイパー核)の研究はハイペロン間の相互作用が不明確であったために、様々な困難を抱えている状況でした。

文献

[1-1] N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, Phys. Rev. Lett. 99, 022001(2007).

2 研究の目的

格子QCD計算により核子間のポテンシャルを導出する方法は、核子と異なる種類のバリオン間の相互作用やメソン-バリオン間相互作用に容易に拡張可能であり、応用範囲が非常に広い事が明らかになり、私は格子QCD計算によりバリオン間のポテンシャルを求める方法を拡張し、 $S = -2$ のバリオン2体系の相互作用を求める事を考えました。

ハイペロン-核子(YN)、ハイペロン-ハイペロン(YY)間の相互作用ポテンシャルを格子QCDから決定することは、核力の導出にも増して重要で

あると言えます。ハイパー核物理や中性子星中心部でのハイペロン物質の発現等を議論するためには、 YN や YY 相互作用の詳細な理解が必要となりますが、入射粒子としてハイペロンを用いる事が実験的に困難なため、 YN や YY についての相互作用の情報を得る事が非常に困難であるのが現状です。特に $\Lambda\Lambda$ 系に関しては散乱実験が出来ないため、散乱位相差を利用した従来の方法による相互作用の決定は期待できない状況です。このような実験的情報の不足を補うためにも、格子QCDの第一原理計算による情報の収集は実験的な情報収集と相補的であり、非常に重要な意味があると考えられています。

このような実験的な困難に反して、 $\Lambda\Lambda$ 系は様々な興味深い物理を含んでいる事で注目されています。重要な現象の一つは Λ 粒子を2個含む原子核(ダブル Λ ハイパー核)であり、2001年に発表された論文[2-1]により初めて明確にその存在が確認されました。この系は、現在稼働中のJ-PARCにおいて核物理の主要テーマとも直結しており、様々なダブル Λ ハイパー核の探索実験が計画され、ストレンジネス $S = -2$ を持つ核図表の作成が期待されています。実験的研究が着々と進む一方で、 $\Lambda\Lambda$ 相互作用の理論的不定性によりダブル Λ ハイパー核の構造研究がなかなか進まないという現状があります。このような状況を打破するためにも、格子QCDによる $\Lambda\Lambda$ 相互作用の決定が待たれています。もう一つ関連する物理として、1977年にR.L.Jaffeによって予言された6個のクォークで構成される H ダイバリオン状態[2-2]があります。Jaffeは6個のクォークを考え、その系のflavor(香り)量子数が一重項となる場合においては、近距離斥力が働かない一方で色量子数による磁氣的相互作用による強い引力が働く事により H ダイバリオン状態が作られる事を示唆していました。この状態は他の様々な理論計算によってもその存在が示唆されていながら、未だに実験で見つかっていない未知のクォーク多体系であり、今なおその探索実験が行われています。

これらの重要な物理があるにも関わらず、従来のバリオン間相互作用に関する模型的研究では近距離斥力の決定に不定性が残ってしまうので、本研究によりQCDの第一原理計算による $\Lambda\Lambda$ 相互作用を提示する事で $S = -2$ のバリオン2体系に関する全ての問題を解決したいと考えています。

文献

[2-1] H. Takahashi et al., Phys. Rev. Lett. 87, 212502(2001).

[2-2] R. L. Jaffe, Phys. Rev. Lett. 38, 195(1976).

3 研究の方法

本研究では、論文[1-1]を基にして、格子QCDの手法を用いてNambu-Bethe-Salpeter(NBS)波動関数からポテンシャルを逆算する方法により、スト

レンジネス $S = -2$ のバリオン 2 体系の相互作用を求めようと考えています。この方法は散乱位相差を計算する Lüscher の有限体積の方法 [3-1] に基づいており、NBS 波動関数を再現するように構成されたバリオン間ポテンシャルは、波動関数の長距離部分に埋め込まれている散乱位相差の情報も再現する事が分かります。

しかし、この論文の方法でそのまま $S = -2$ のバリオン 2 体系の相互作用を計算する事は出来ません。なぜなら、この系は例えば 1S_0 状態で $\Lambda\Lambda, N\Xi, \Sigma\Sigma$ が強く結合した系になっており、結合チャンネル法による取り扱いが必要になるからです。

本研究の特徴としては、 $\Lambda\Lambda$ 状態が同じ量子数を持つ状態 ΞN や $\Sigma\Sigma$ と強く結合し、エネルギー的にも非常に近い事を利用し、これらの結合チャンネル Schrödinger 方程式からポテンシャルを導くことにあります。ここでは簡単のため、2つのチャンネルが結合している系の場合に計算概要を紹介する。結合チャンネルの Schrödinger 方程式は、非局所ポテンシャルの微分展開で主要項だけを見ると、チャンネル α, β に関する換算質量 μ と漸近運動量 p を用いて、

$$\begin{aligned} \left(\frac{p_\alpha^2}{2\mu_\alpha} + \frac{\nabla^2}{2\mu_\alpha} \right) \psi^\alpha(\mathbf{r}, E) &= \sum_{\gamma=\alpha,\beta} V^\alpha_\gamma(\mathbf{r}) \psi^\gamma(\mathbf{r}, E) \\ \left(\frac{p_\beta^2}{2\mu_\beta} + \frac{\nabla^2}{2\mu_\beta} \right) \psi^\beta(\mathbf{r}, E) &= \sum_{\gamma=\alpha,\beta} V^\beta_\gamma(\mathbf{r}) \psi^\gamma(\mathbf{r}, E) \end{aligned}$$

となり、 p は相対論的エネルギーと以下のような関係から求められる。

$$\begin{aligned} E &= \sqrt{m_{\alpha_1}^2 + p_\alpha^2} + \sqrt{m_{\alpha_2}^2 + p_\alpha^2} \\ &= \sqrt{m_{\beta_1}^2 + p_\beta^2} + \sqrt{m_{\beta_2}^2 + p_\beta^2}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

ポテンシャルの導出に用いられる NBS 波動関数は、バリオンの局所演算子 $B(\mathbf{x}) = \epsilon^{abc}(q_a^T(x)C\gamma_5 q_b(x))q_c(x)$ を使って、

$$\psi^{B_1 B_2}(\mathbf{r}, E) = \sum_{\mathbf{x}} \langle 0 | B_1(\mathbf{x} + \mathbf{r}) B_2(\mathbf{x}) | E \rangle, \quad (3.2)$$

と定義される。この波動関数は、以下のように定義される R -相関関数の中に含まれており、

$$\begin{aligned} R_{\mathcal{I}}^{B_1 B_2}(t, \mathbf{r}) &= \sum_{\mathbf{x}} \frac{\langle 0 | B_1(t, \mathbf{x} + \mathbf{r}) B_2(t, \mathbf{x}) \bar{\mathcal{I}}(0) | 0 \rangle}{e^{-(m_1 + m_2)t}} \\ &\propto A_E \psi^{B_1 B_2}(\mathbf{r}, E) e^{-\tilde{E}t} \\ A_E &\equiv \langle E | \bar{\mathcal{I}}(0) | 0 \rangle, \\ \tilde{E} &\equiv E - m_1 - m_2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

を通じて計算されることになる。ここで、 \mathcal{I} はバリオン数 2 のエネルギー固有状態 E を作り出すよう

に最適化された生成演算子である。

R -correlator の時間微分を考えると、

$$-\frac{\partial}{\partial t} R_{\mathcal{I}}^{B_1 B_2}(t, \mathbf{r}) \simeq \frac{p^2}{2\mu} A_E \psi^{B_1 B_2}(\mathbf{r}, E) e^{-\tilde{E}t}. \quad (3.4)$$

となり、漸近運動量に対応する量を容易に求めることができ、その関係を式 (3.1) に適用することにより、時間微分を含んだ Schrödinger 方程式が次のように得られる。

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} V^\alpha_\alpha(\mathbf{r}) & V^\alpha_\beta(\mathbf{r}) \\ V^\beta_\alpha(\mathbf{r}) & V^\beta_\beta(\mathbf{r}) \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} \left(\frac{\nabla^2}{2\mu_\alpha} - \frac{\partial}{\partial t} \right) R_{\mathcal{I}_1}^\alpha(t, \mathbf{r}) & \left(\frac{\nabla^2}{2\mu_\beta} - \frac{\partial}{\partial t} \right) R_{\mathcal{I}_1}^\beta(t, \mathbf{r}) \\ \left(\frac{\nabla^2}{2\mu_\alpha} - \frac{\partial}{\partial t} \right) R_{\mathcal{I}_2}^\alpha(t, \mathbf{r}) & \left(\frac{\nabla^2}{2\mu_\beta} - \frac{\partial}{\partial t} \right) R_{\mathcal{I}_2}^\beta(t, \mathbf{r}) \end{pmatrix} \\ \times \begin{pmatrix} R_{\mathcal{I}_1}^\alpha(t, \mathbf{r}) & R_{\mathcal{I}_2}^\alpha(t, \mathbf{r}) \\ R_{\mathcal{I}_1}^\beta(t, \mathbf{r}) & R_{\mathcal{I}_2}^\beta(t, \mathbf{r}) \end{pmatrix}^{-1} \end{aligned} \quad (3.5)$$

ここで、 $x \equiv \exp(-(m_{\beta_1} + m_{\beta_2})t) / \exp(-(m_{\alpha_1} + m_{\alpha_2})t)$ を用いた。この式は \mathcal{I}_1 と \mathcal{I}_2 が線形独立な波動関数を生成するという条件の下で正しい式になっている。ここで、最適化された生成演算子 $\mathcal{I}_1, \mathcal{I}_2$ が、 \mathcal{I}_A と \mathcal{I}_B により作られているとすると

$$\begin{pmatrix} \mathcal{I}_1 \\ \mathcal{I}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_1^A & U_1^B \\ U_2^A & U_2^B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathcal{I}_A \\ \mathcal{I}_B \end{pmatrix}, \quad (3.6)$$

となり、式 (3.5) は行列 U が逆行列を持つ限りは、 $\mathcal{I}_A, \mathcal{I}_B$ により生成された状態でも正しい式を与えることが分かります。つまり、生成演算子の最適化は、この方式を使う限りは必要ないことが確認できる。こうして、状態を表す独立な演算子を用意することで、それらの間の結合チャンネルポテンシャルを式 (3.5) から導出できることが分かります。

文献

[3-1] M. Luscher, U. Wolff, Nucl. Phys. B339, 222(1990).

4 研究成果

本研究では、ポテンシャルの導出方法を結合チャンネル Schrödinger 方程式に拡張したレンジネスを持つバリオン 2 体系のポテンシャル行列を系統的に調べ、特に H-ダイバリオン状態に着目し研究を行いました。

格子 QCD 計算ではゲージ配位に関する積分を行う必要があり、一般にモンテカルロシミュレーションにより計算を行います。このゲージ配位の生成には膨大な計算機資源が必要になりますが、格子 QCD データグリッド (JLDG/ILDG) [4-1] で公開されている配位を利用する事によって計算時間を大幅に節約する事が可能となりました。本研究では PACS-CS collaboration によって生成された (2+1)flavor

Table 1: 計算に用いたゲージ配位に関するパラメータと対応する中間子の質量

Lattice parameters				
β	κ_s	c_{SW}	lattice size	a [fm]
1.90	0.13640	1.715	$32^3 \times 64$	0.091
Lattice parameters				
	Esb1	Esb2	Esb3	
κ_{ud}	0.13700	0.13727	0.13754	
m_π [MeV]	701(1)	570(2)	411(2)	
m_K [MeV]	789(1)	713(2)	635(2)	
m_π/m_K	0.89	0.80	0.65	

のゲージ配位 [4-2] を用いて計算を行いました。これらのゲージ配位はゲージ場の真空偏極を取り入れたもので、比較的大きな空間体積 ($L \sim 3\text{fm}$) を持っており、パイオン質量がそれぞれ 700MeV, 570MeV, 410MeV のに対応する 3 つの異なるクォーク質量について結果の解析を行いました。これらをそれぞれ Esb1, 2, 3 と呼ぶことにし、これらの結果の比較を行う事でバリオン間相互作用の中間子質量に対する依存性やフレーヴァー対称性の破れに関する議論が可能となりました。

NBS 波動関数は粒子の 4 点相関関数から見積もりました。この際、Coulomb gauge 条件を課した空間的に平らなクォーク源を用い、二つのバリオンを生成の際に高い起動角運動量状態が混ざらないように工夫を行いました。また、虚時間方向に Dirichlet 境界条件を設定し、虚時間軸の逆方向に二つのバリオンが別れて伝播することからくる悪影響を抑制するとともに、荷電共役対称性と時間反転対称性を用いて統計誤差を改善する工夫をしました。

バリオン間相互作用はその近距離部分にバリオン中のクォーク自由度の影響を強く反映しており、特にストレンジネスを含む場合に多様な変化を見せる事になります。最も興味深いのは H-ダイバリオン状態であり、 $S = -2$ の場合に構成子クォークの排他律に起因する斥力が消失する事で 6 個のクォークの強い束縛状態として現れる事が予想されていました。このように、ストレンジネスを含むバリオン間相互作用の研究は、バリオン間の近距離斥力の起源を明らかにする事と密接に関連している事が分かります。

図 1 は、上から順に Esb1, 2, 3 のゲージ配位において計算された NBS 波動関数を通じて得られたポテンシャルから見積もられた $\Lambda\Lambda$ と $N\Xi$ の散乱位相差を示しました。 Λ - Λ の散乱位相差はクォーク質量の変化に伴い、弱い斥力的な振る舞いから強い引力的な振る舞いを経て、弱い引力的な振る舞いに変化している事が分かりました。この事実から、Esb1 の構成で見積もられた位相差は Λ - Λ 閾値の下に束縛状態が存在している事を示唆していると考え

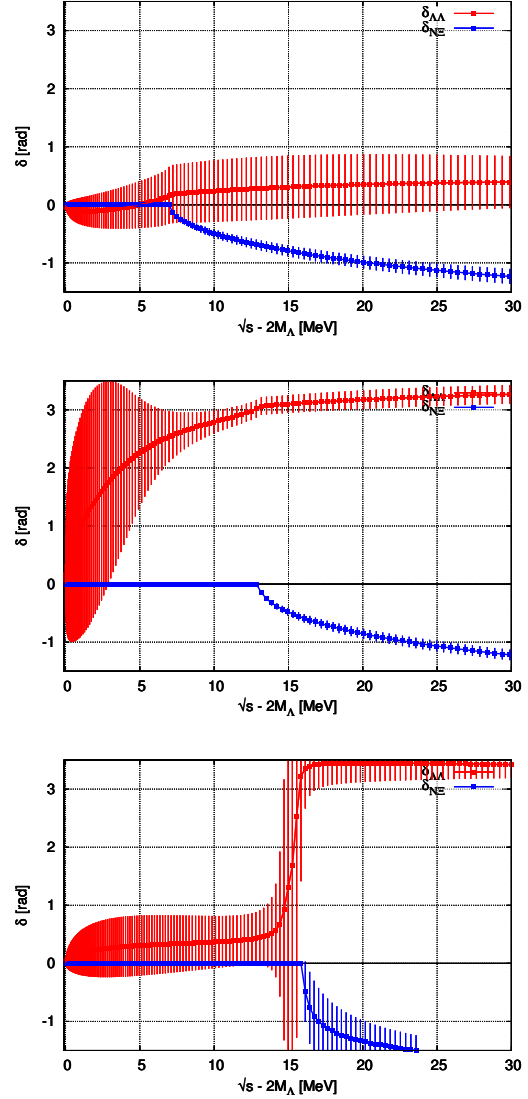


Figure 1: 上から $m_\pi = 700\text{MeV}$, 570MeV , 410MeV のゲージ配位における $\Lambda\Lambda$ と $N\Xi$ の散乱位相差。横軸は Λ - Λ の閾値を基準とした重心系でのエネルギーをとった。

られます。この束縛状態がいわゆる H-ダイバリオン状態と考えられます。この状態はクォーク質量の変化とフレーヴァー SU(3) 対称性の破れに伴って大きくエネルギーを変化させ、Esb2 や Esb3 の構成では Λ - Λ 閾値よりエネルギーの高い共鳴状態に移り変わっていく様子を確認する事が出来ました。また、 N - Ξ の散乱位相差は今回の中間子質量領域において常に斥力的に振る舞い、この H-ダイバリオン状態が N - Ξ 閾値に近づくに連れて位相差の変化が大きくなる事が分かった。

今後はこの散乱位相差を通して H-ダイバリオンの様子を詳細に調べ、物理点におけるこの共鳴状態の有無を調べようと計画しています。また、本研究で格子 QCD からバリオン間ポテンシャルを見積もる計算を結合チャンネル系に拡張する事ができたの

で、異なるストレンジネスを持つハイペロン-核子系などについても解析をすすめ、束縛状態の有無などを調べようと考えています。

文献

[4-1] International / Japan Lattice Data Grid (ILDG/JLDG), see, *i.e.* <http://www.jldg.org/>.

[4-2] PACS-CS Collaboration: S. Aoki, et al., Phys. Rev. D79 (2009) 034503.

5 主な発表論文等

【雑誌論文】(4 件)

[1] K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Studies of multi-strangeness baryon-bayon interactions from lattice QCD, 査読あり, PoS (LATTICE 2013) (2013) ref.233, pp.1-7. http://pos.sissa.it/archive/conferences/187/233/LATTICE_2013_233.pdf

[2] K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration, Coupled channel approach to S-wave hyperonic interactions from lattice QCD, 査読あり, Few-Body Systems **54** (2013) pp 1109-1112. DOI: 10.1007/s00601-013-0672-7

[3] K. Sasaki, for HAL QCD Collaboration, Coupled channel approach to hyperonic interactions from lattice QCD, 査読あり, Nuclear Physics **A914** (2013) pp 231-237. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2013.06.003

[4] K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, Quark mass dependence of hyperonic interactions from lattice QCD, 査読あり, PoS (LATTICE 2012) (2012) ref.157, pp.1-7. http://pos.sissa.it/archive/conferences/164/157/Lattice_2012_157.pdf

【学会発表】(8 件)

[1] 佐々木健志 for HAL QCD collaboration, 「格子 QCD によるハイペロン間ポテンシャルの性質」, 日本物理学会 2013 年秋季大会 (高知大学, 高知市, Sep. 20-23, 2013).

[2] K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「Coupled channel approach to baryon-baryon interactions with strangeness on the lattice」, The 22nd European Conference on Few Body Problems in Physics, (Krakow, Poland, Sep. 9 - 13 2013).

[3] K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「Lattice QCD approach to the strangeness S=-2

two-baryon system」, THE 9TH INTERNATIONAL WORKSHOP ON THE PHYSICS OF EXCITED NUCLEONS」, (Valencia, Spain, May 27 - 30, 2013).

[4] 佐々木健志 for HAL QCD collaboration, 「格子 QCD によるハイペロン間相互作用の研究」, 日本物理学会 第 68 回年次大会 (広島大学, 東広島市, March 26-29, 2013).

[5] K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「Baryon-baryon interactions in strangeness sector from lattice QCD」(招待講演), Workshop on Future Prospects of Hadron Physics at J-PARC and Large Scale Computational Physics in 2013 (Tokai, JAPAN, 11-13 Feb. 2013).

[6] K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「Coupled channel approach to hyperonic interactions from lattice QCD」, HYP2012-XI International Conference on Hypernuclear and Strange Particle Physics, (Barcelona, SPAIN, Oct.1-5, 2012).

[7] 佐々木健志 for HAL QCD collaboration, 「格子 QCD によるハイペロン間相互作用のクォーク質量依存性の研究」2012 年 9 月 京都産業大学日本物理学会 2012 年秋季大会 (京都産業大学, 京都市北区, September 11-14, 2012) .

[8] K. Sasaki for HAL QCD Collaboration, 「Quark mass dependence of hyperonic interactions from lattice QCD」, The 30th International Symposium on Lattice Field Theory (Lattice2013), (Cairns Convention Center, Cairns, AUSTRALIA, June 24-29, 2012).

6 研究組織

(1) 研究代表者

佐々木 健志 (SASAKI Kenji)

筑波大学・計算科学研究センター・研究員

研究者番号: 80457134