

---

## 会場 E

# 素粒子論, 理論核物理, 宇宙線・宇宙物理 領域

---

### E-9

#### 時空 16 元数のディラック方程式—電磁場及び重力場との相互作用—

宮嶋学術財団<sup>A</sup> 那須俊一郎<sup>A</sup>

(1) 日本文理大学の竹本義夫教授は「4元ベクトル積」を使って、電磁場には、スカラー電場  $E_s$  が存在することを明らかにし、4元マクスウェル方程式の完全形を導いた。(2) ロシアのV・ミロノフは「時空 16 元数」を用いてクライン・ゴールドン方程式を導いているが、ベクトル部分に虚数が出て来る。これは、「4元ベクトル積」を使って計算すると解決する。さらに、後でディラック方程式を導くために、ミロノフの行列をディラックの行列で置きかえる。すなわち  $e=\rho$ 、 $a=\sigma$  (3) 4元ポテンシャル  $W$  が従うクライン・ゴールドン方程式は、特殊相対論で粒子が従うエネルギー・運動量の関係式を量子演算子で置きかえたものである。これを、時空 16 元数を使って書き直すと、符号が対称的なディラック演算子の積で表せる。(4) 片方のディラック演算子を4成分スピノル  $\Psi$  に作用させたのが時空 16 元数のディラック方程式である。前回みたように、これは「カイラル表示」になっている。(5) 電磁場との相互作用項は、通常どおり、このディラック方程式の「運動項」に加えられる。(6) 重力場との相互作用項は、意見が分かれるところではあるが、日本大学の藤田丈久氏が提唱している通り、ニュートンの重力ポテンシャルとして、このディラック方程式の「質量項」に加えられると考える。(7) 参考文献 ①日本大学 藤田丈久著 「新しい重力理論」(ネット論文) ②東洋大学 手塚洋一著 「Dirac 方程式のポテンシャル問題」

## E-11      ガウス展開法による $nn\Lambda$ の共鳴状態の研究

九大院理<sup>A</sup>, 理研<sup>B</sup> 宮本亮祐<sup>A</sup>, 肥山詠美子<sup>A,B</sup>

2013年にGSIの実験によって $nn\Lambda$ の三体系が $nn\Lambda$ のしきい値より下にある、つまり束縛状態が存在すると報告された[1]。その実験を受けて、様々な理論計算が行われた。その結果、束縛状態が存在することは困難であると述べられている[2-4]。ある理論計算は束縛状態は存在しないが共鳴状態として存在する可能性があるとは指摘している[5]。現在、 $nn\Lambda$ の再実験がJLAB実験施設で昨年行われ、現在解析中である。このような状況下で我々は $nn\Lambda$ の三体系の共鳴状態に着目し、その構造研究を行う。 $nn$ 相互作用はminnesotaとAV8を用いた $n\Lambda$ 相互作用は ${}^3\Lambda\text{H}$ に合わせたものを用いる。共鳴状態を得るための計算法である複素座標回転法を用いる。その計算結果を報告する。

### 参考文献

- [1] C. Rappold *et al.*, Phys. Rev. C **88**, 041001(R) (2013).
- [2] H. Garcilazo and A. Valcarce, Phys. Rev. C **89**, 057001 (2014).
- [3] E. Hiyama, S. Ohnishi, B. F. Gibson, and Th. A. Rijken, Phys. Rev. C **89**, 061302(R) (2014).
- [4] A. Gal and H. Garcilazo, Phys. Lett. B **736**, 93 (2014).
- [5] I. R. Afnan and B. F. Gibson, Phys. Rev. C **92**, 054608 (2015).

## E-12      Infrared renormalon in $SU(N)$ QCD(adj.) on $R^3 \times S^1$ (I)

九州大学 理<sup>A</sup>, 九州大学 理<sup>B</sup>, 九州大学 理<sup>C</sup>, 九州大学 理<sup>D</sup>, 九州大学 理<sup>E</sup> 芦江誠大<sup>A</sup>, 鈴木博<sup>B</sup>, 高浦大雅<sup>C</sup>, 竹内健悟<sup>D</sup>, 森川億人<sup>E</sup>

場の量子論で行われる物理量の計算には摂動級数展開がしばしば用いられる。ところが展開係数が展開次数の階乗に比例するような場合に、この級数の和が発散してしまい摂動論による評価に不定性が残ることがある。このような不定性のうち、特に赤外リノーマロンと呼ばれるものはバイオンという古典解に由来する不定性と互いに打ち消しあうことで解消されると予想されている。バイオンは空間一方向が $S^1$ コンパクト化された時空上で存在しているが、一方でコンパクト化されたときのリノーマロンについて最近の2次元時空での議論では予想に反する結果が得られている。

本研究では $R^3 \times S^1$ にコンパクト化された時空において、アジョイントフェルミオンを含む $SU(N)$ ゲージ理論で赤外リノーマロンを議論している。今回の講演ではそのリノーマロンの不定性をみる準備として、ラージ $\beta_0$ 近似に基づいて1ループの有効作用を計算しゲージ場のプロパゲーターの量子補正を提示する。

## E-13 Infrared renormalon in SU(N) QCD(adj.) on $R^3 \times S^1$ (II)

九大理<sup>A</sup> 芦江誠大<sup>A</sup>, 森川億人<sup>A</sup>, 鈴木博<sup>A</sup>, 高浦大雅<sup>A</sup>, 竹内健悟<sup>A</sup>

場の量子論では厳密に解ける問題は少ないので、結合定数  $\lambda$  のべき級数展開をする摂動論が有用である。ある種のファインマン図では、展開係数が摂動次数の階乗に比例しており、その和は無限大に発散してしまうことが分かっている。このような摂動級数にボレル変換を行うと正の実軸上に特異点を持つことがあり、それを特に赤外リノマロンと呼ぶ。この赤外リノマロンによって、実数の物理量の計算をしているにもかかわらず、虚部に不定性が出てしまう。

赤外リノマロンによる不定性は、理論全体の健全性のために、非摂動効果の不定性と相殺されているはずであり、その相手はバليونと呼ばれる半古典物体であるという予想がある。バليونは、空間を一方向コンパクト化した  $R^3 \times S^1$  にしか存在していないが、赤外リノマロンの  $R^3 \times S^1$  の振る舞いについては明確な結論が出ていない。有限の  $N$  で議論するのが困難なため、今回はラージ  $N$  極限での赤外リノマロンを議論する。

## E-14 高密度クォーク物質におけるアンドレーエフ反射

佐賀大学大学院 工学系研究科<sup>A</sup>, 佐賀大学 理工学部<sup>B</sup> 壽崎悠貴<sup>A</sup>, 橘基<sup>B</sup>

有限温度・有限化学ポテンシャルでのクォーク多体系の性質の解明は、初期宇宙における相転移や高エネルギー重イオン衝突実験、高密度天体の諸現象に関わる重要なテーマである。本研究は中性子星のような高密度天体を念頭に置く。中性子星内部には多様な相が存在すると考えられ、相境界の物理は重要である。ここでは凝縮系物理でよく知られたアンドレーエフ反射という相境界での現象をクォーク物質の場合に考察する。

## E-15 $\Omega NN$ の三体構造の研究

九大院理<sup>A</sup>, 理研<sup>B</sup> 山本拓実<sup>A</sup>, 肥山詠美子<sup>A,B</sup>

近年、核子  $N$  とストレンジクォーク 3 つからなる  $\Omega$  粒子の間の相互作用が HAL QCD Collaboration により提供された [1]。その  $N\Omega$  相互作用を用いて、Garcilazo ら [2] が  $\Omega NN$  三体系の計算を Faddeev 法を用いて行った。彼らの計算は、 $NN$  相互作用に Malfliet Tjon potential[3] を用いたものであった。本研究では、Malfliet Tjon potential、Minnesota potential[4]、AV8 potential[5] という 3 つの  $NN$  相互作用を用いて、それぞれの相互作用による、 $\Omega NN$  三体系の束縛エネルギーの違いを議論する。これまでに行なった計算結果の一部を下記に報告する。

$(I)J^P$	System	Malfliet Tjon	Minnesota	AV8
(1)3/2 <sup>+</sup>	$\Omega nn$	2.30	2.15	2.35
(1)3/2 <sup>+</sup>	$\Omega pp$	3.30	3.14	3.37
(0)5/2 <sup>+</sup>	$\Omega np$	21.5	22.8	–

表 1 Binding energies of  $\Omega NN$  [MeV]

### 参考文献

- [1] T. Iritani *et al.* (HAL QCD Collaboration), arXiv:1810.03416 (2019).
- [2] H. Garcilazo, and A. Valcarce, Phys. Rev. C **99**, 014001 (2019).
- [3] J. L. Friar *et al.*, Phys. Rev. C **42**, 1838 (1990).
- [4] D. R. Thompson, M. Lemere, Y. C. Tang, Nucl. Phys. A **286**, 53 (1977).
- [5] B. S. Pudliner *et al.* Phys. Rev. C **56**, 1720 (1997).

## E-16 ガウス展開法による $\Omega\Omega N$ の構造

九大院理<sup>A</sup>, 理研<sup>B</sup> 金龍熙<sup>A</sup>, 肥山詠美子<sup>A,B</sup>

近年、3 つのストレンジクォークで構成されている  $\Omega$  粒子について格子 QCD 理論により  $\Omega$ - $\Omega$  間、及び、 $\Omega$ -核子 ( $N$ ) 間のポテンシャルが与えられ、それを用いた計算によりこれらの系が束縛するということが指摘された [1, 2]。さらに、同じ相互作用により  $\Omega\Omega N$  の 3 体系も束縛することが、H.Garcilazo の研究により明らかにされた [3]。

本研究では、同様にこの  $\Omega\Omega N$  3 体系粒子に注目し、ガウス展開法 [4] を用いて計算を行った。先行研究では角運動量が S 波のみに対して、私たちの研究方法ではより高い角運動量をも取り入れた計算が可能である。その計算の違いをここに報告する。

### 参考文献

- [1] T. Iritani *et al.* (HAL QCD Collaboration), arXiv:1810.03416.
- [2] S. Gongyo, K. Sasaki, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, T. Inoue, T. Iritani, N. Ishii, T. Miyamoto, and H. Nemura (HAL QCD Collaboration), Phys. Rev. Lett. **120**, 212001 (2018).
- [3] H.Garcilazo and A.Valcarce, Phys. Rev. C **99**, 014001 (2019)
- [4] E.Hiyama, Y.Kino, and M.Kamimura, Phys. Part. Nucl. Phys. **51** (2003) 223-307

## E-17 ${}^6\text{He}+p$ 反応を通した共鳴状態の微視的解析

九州大学<sup>A</sup> 小川翔也<sup>A</sup>, 松本琢磨<sup>A</sup>

共鳴状態は、原子核だけでなくハドロンやクォーク多体系、原子・分子においても現れる普遍的な物理状態であり、多くの分野で精力的に研究されている。原子核物理では、2 中性子ハロー核と呼ばれる不安定核が注目され、逆運動学的な  $(p, p')$  反応を用いてその共鳴状態が調べられている。実験データの解析にはしばしば歪曲波 Born 近似 (DWBA) が用いられ、2 中性子ハロー核のひとつである  ${}^6\text{He}$  の実験解析にも DWBA が適用されている。しかし、共鳴状態はそのエネルギー付近の非共鳴な連続状態との結合が強く、この効果を扱えない DWBA では共鳴状態への遷移の強さを精密に評価できない。また、 ${}^6\text{He}$  は複数の共鳴状態の存在が予想されているが、実験的には  $2_1^+$  と  $2_2^+$  のみ観測されており、他の共鳴状態に関しては観測量への寄与はわかっていない。

本研究では、様々な状態間の結合を扱える連続状態離散化チャネル結合法を用いて  ${}^6\text{He} + p$  反応を解析し、断面積における非共鳴な状態の効果は無視できないことを示した。本講演ではその計算結果を述べ、さらに、複数の共鳴状態が断面積にどのように現れるか議論する。

## E-19 Uhlmann 位相を利用した非閉じ込め相転移の研究

福岡工業大学<sup>A</sup>, 理化学研究所<sup>B</sup> 柏浩司<sup>A</sup>, 土居孝寛<sup>B</sup>

有限温度・密度では、量子色力学 (QCD) によって記述されるクォーク・グルーオン系は、カイラル相転移や閉じ込め・非閉じ込め相転移を示すと期待されている。しかし、特に閉じ込め・非閉じ込め相転移については、純ゲージ理論の場合を除いて、現実的な QCD での振る舞いはまだよくわかっていない。

そこで、本研究ではクォーク・グルーオン系で期待される閉じ込め・非閉じ込め相転移について、トポロジカルな観点からの研究を行った。具体的には、物性系において有限温度のトポロジカル秩序を記述できると期待されている Uhlmann 位相と呼ばれる量を調べた。まず理論的にどのような結果が QCD において期待されるかをまとめ、その後、SU(2) 純ゲージ理論の場合の格子計算結果を報告する予定である。

佐賀大学大学院理工学研究科<sup>A</sup>, 佐賀大学理工学部<sup>B</sup> 永良訓人<sup>A</sup>, 河野宏明<sup>B</sup>

量子色力学 (QCD) の相図の研究は、素粒子原子核物理学だけでなく宇宙論や天体物理学の観点からも重要な研究課題である。しかし、高バリオン密度状態においては、格子 QCD 計算による統計力学的計算は、符号問題という難問を抱えており、計算が進展していない。そこで、有限バリオン密度では QCD から導かれることが期待される現象論模型による解析が行われてきた。その代表的な模型は **Polyakov-loop extended Nambu–Jona-Lasinio(PNJL)** 模型であるが、これらの模型にはハドロンの寄与が正しく含まれていない [1-3]。この研究では、PNJL 模型と、ハドロンの模型として定評のあるハドロン共鳴ガス (**HRG**) 模型をつなぎ合わせた単純なハイブリッド模型を構築し、その未定パラメータを格子 QCD の結果で決めていくことを試みる。格子 QCD は、虚数化学ポテンシャル領域では符号問題がなく、計算が行われているので、今回は我々の模型での虚数化学ポテンシャル領域での計算結果について報告する。

## 参考文献

- [1] A. Miyahara et al., Phys. Rev. D **94**, 016003 (2016), arXiv:1604.05002.
- [2] A. Miyahara et al., Int. J. Mod. Phys. A **32**, 1750205 (2017), arXiv:1704.06432.
- [3] A. Miyahara et al., arXiv:1907.07306.