
会場 E

素粒子論, 理論核物理

E-10 ディラック16元数とディラック方程式 (カイラル表示)

宮嶋学術財団^A 那須俊一郎^A

1, 日本文理大学の竹本義夫名誉教授は「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」と名付けたものを用いてクライン・ゴールドン方程式を導いているが、ここでは、後にディラック方程式を導くために、ディラック行列 ρ 、 σ を使った16元数を用いることにする。これを「ディラック16元数」略して「D16元数」と呼ぶことにする。

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 $E^2 - (cp)^2 - (mc^2)^2 = 0$ を量子演算子で置きかえた $(1/c^2 \cdot \partial^2 / \partial t^2 - \nabla^2 + (mc/\hbar)^2) W = 0$ である。これをD16元数で書くと、符号が対称的な積に分解できる。 $(i\rho_1 \cdot 1/c \cdot \partial / \partial t - \rho_2 \nabla - i\rho_3 \cdot mc/\hbar) \times (i\rho_1 \cdot 1/c \cdot \partial / \partial t - \rho_2 \nabla - i\rho_3 \cdot mc/\hbar) W = 0$

4, これから、D16元数のディラック方程式は、 Ψ を4成分スピノルとすると、 $(i\rho_1 \cdot 1/c \cdot \partial / \partial t - \rho_2 \nabla - i\rho_3 \cdot mc/\hbar) \Psi = 0$ である。内包されたディラック行列 σ を顕わにすると、 $(i\rho_1 \cdot 1/c \cdot \partial / \partial t - \rho_2 \sigma \nabla - i\rho_3 \cdot mc/\hbar) \Psi = 0$ となる。これを、通常のディラック方程式 (カイラル表示) $(i\rho_1 \cdot 1/c \cdot \partial / \partial t - \rho_2 \sigma \nabla - mc/\hbar) \Psi = 0$ と比較すると、D16元数のディラック方程式もカイラル表示であることがわかる。しかし、質量項が異なる。

5, クライン・ゴールドン方程式を導くときを考えると、通常のディラック方程式では、 $(i\rho_1 \cdot 1/c \cdot \partial / \partial t - \rho_2 \sigma \nabla - mc/\hbar) \times (i\rho_1 \cdot 1/c \cdot \partial / \partial t + \rho_2 \sigma \nabla + mc/\hbar) = -1/c^2 \cdot \partial^2 / \partial t^2 + \nabla^2 - (mc/\hbar)^2$ となるが、左辺の積の符号が対称的ではない。また、 σ を内包して ρ だけのD16元数の積にしても、 $(i\rho_1 \cdot 1/c \cdot \partial / \partial t - \rho_2 \nabla - mc/\hbar) \times (i\rho_1 \cdot 1/c \cdot \partial / \partial t - \rho_2 \nabla + mc/\hbar) = -1/c^2 \cdot \partial^2 / \partial t^2 + \nabla^2 - (mc/\hbar)^2$ となって、やはり質量項の符号が対称的ではない。

6, これに比べ、D16元数のディラック方程式では、すでに述べたように、左辺の積の符号が完全に対称的になっている。

E-11

Z₃ 対称性のある格子 QCD 計算と現象論模型

佐賀大理工^A, 九大院理^B 河野宏明^A, 開田丈寛^B, 管野淳平^B

量子色力学 (QCD) における相図の研究は、素粒子・原子核物理学だけでなく宇宙論・天体物理学においても重要な研究テーマである。しかし、高バリオン数密度状態では、第 1 原理である格子 QCD 計算は、符号問題という問題があり、信頼できる計算がない。格子 QCD では、経路積分で書いた大分配関数をクォークの場合について積分を行うと、有限のバリオン数化学ポテンシャルがある場合、積分後の有効作用が複素数になり、確率解釈を用いるインポートランス・サンプリングが使えなくなる。しかし、理論に Z₃ 対称性がある場合は、有効作用の虚部が小さくなる [1]。ここではこの問題を吟味し、対称性のある格子 QCD の計算について報告を行う。

参考文献 [1] T. Hirakida et al., Phys. Rev. D **96**, 074031 (2017), arXiv:1705.00665.

E-12

トポロジカルな観点からの非閉じ込め相転移の研究

福岡工業大学^A, 理化学研究所^B 柏浩司^A, 土居孝寛^B

近年トポロジカルな観点からの相転移の研究に注目が集まっている。特に、自発的対称性の破れが伴わない「トポロジカル秩序 [1]」によって記述される相転移はその一例である。本講演では、クォーク・グルーオン系の閉じ込め・非閉じ込め相転移のトポロジカルな観点からの研究の報告を行う。すでにゼロ温度での「閉じ込め・非閉じ込め状態」がトポロジカル秩序によって分類できることが示されており [2]、本研究はその有限温度への拡張を目指したものである。特に、物性系において有限温度のトポロジカル秩序が Uhlmann 位相によって分類可能であることが示唆されているため [3]、この量のクォーク・グルーオン系における計算を試みた。

参考文献

- [1] X. G. Wen, Int. J. Mod. Phys. B4 (1990) 239.
- [2] M. Sato, Phys. Rev. D77 (2008) 045013.
- [3] O. Viyuela, A. Rivas, M. Martin-Delgado, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 130401.

E-13

Persistent homology を用いた閉じ込め相と非閉じ込め相の解析

九大院理^A, 福工大情^B, 佐賀大理工^C, 気象庁福岡管区気象台^D 開田丈寛^A, 柏浩司^B, 河野宏明^C, 管野淳平^A, 高橋純一^D, 八尋正信^A

クォークとグルーオンは、強い相互作用によって結びついており、クォークは低温でハドロン内に閉じ込められる閉じ込め相、高温で自由粒子のように振る舞える非閉じ込め相にある。これは閉じ込め・非閉じ込め相転移と呼ばれており、クォークを無視した系では厳密に秩序変数を定義できるが、動的クォークを考慮すると厳密に定義できなくなる。一方、物性物理の分野では、相転移現象についてパーシステントホモロジーを用いた解析が詳細に行われている。本研究では、パーシステントホモロジーによる解析を閉じ込め・非閉じ込め相転移に対して導入した [1]。本講演では、解析手法の詳細や解析結果について議論する。[1] T. Hirakida, K. Kashiwa, J. Sugano, J. Takahashi, H. Kouno, and M. Yahiro, arXiv:1810.07635.

E-14

純ゲージ理論における Polyakov loop のパーシステントホモロジー解析

九州大学 理論核物理研究室^A, 福岡工業大学 情報工学部 情報工学科^B, 佐賀大学 理工学部 物理科学科^C 大野晃^A, 開田丈寛^A, 管野淳平^A, 柏浩司^B, 河野宏明^C

閉じ込め相から非閉じ込め相への相転移を表すオーダーパラメーターとして Polyakov Loop というものがある。これはクォークが存在しない系では厳密に定義できる一方で、動的クォークが存在する系では厳密な定義はできない。一方、パーシステントホモロジーと呼ばれる解析手法があり、タンパク質などの分子結晶構造の解析にも用いられているが、この手法を使って格子 QCD の有効模型に対して解析がなされている [1]。これにより、得られた結果から相転移によってクォークの配位がどのように変化するのかを数値的に議論できるのではないかと期待される。本研究ではこの手法を用いて、純ゲージにおける格子 QCD 計算から算出した Polyakov Loop を解析した。

[1]T. Hirakida, K. Kashiwa, J. Sugano, J. Takahashi, H. Kouno, and M. Yahiro, arXiv:1810.07635.

E-15

中性子星の冷却とその状態方程式依存性

九大理^A, 九大基幹教育院^B, 久留米工大^C 土肥明^A, 橋本正章^A, 中里健一郎^B, 松尾康秀^A, 野田常雄^C

中性子星は質量が $1 - 2M_{\odot}$ 、半径約 10km、中心密度が $10^{15} \text{ g cm}^{-3}$ 程度の高密度天体である。その構造は原子核密度を超える高密度核物質の状態方程式 (EoS) に大きく影響される。EoS は核力によって決まるが、核力の計算手法は多数存在するため、多くの EoS が作られており、パイオンやハイペロンなどのエキゾチックな粒子が現れる EoS も提案されている。高密度物質の EoS の実験的・理論的制限はいくつかあるが、これまでに提案されてきた EoS を十分に棄却することはできていない。

そこで様々な EoS を用いた中性子星の熱的進化に関する研究が盛んに行われている。中性子星は主にニュートリノの放射によってその表面温度を下げてゆく。そのため、中性子星の冷却でニュートリノ放射過程が重要になる。その中の重要な過程の 1 つに direct URCA 過程 (DU 過程) がある。この過程は放射率が非常に高いものの、陽子の割合 Y_p がある閾値よりも高くなければ発生しない。中性子星内部の Y_p は EoS によって変わるため、DU 過程の発生の有無は EoS によって変化する。また、中性子星冷却では核子の超流動も重要となる。中性子星はフェルミ温度と比べて十分に低温なので、核子がペアを作り超流動状態となることでニュートリノ放射が大きく抑制される (Yakovlev et al. 2000)。DU 過程の発生の有無や超流動効果を考慮したニュートリノ放射率の大きさは EoS によって変化するため、中性子星の冷却シミュレーションでは EoS の選択が重要である。

そこで我々は、現実的な 2 体力、3 体力ポテンシャルを基にして作られた有限温度の EoS である Togashi EoS (Togashi et al. 2017) を用いて冷却シミュレーションを行った。この Togashi EoS は多くの実験・観測的制限を満たすことが知られている。さらに、比較のために、高密度物質の EoS としてよく知られた Shen EoS (Shen et al. 1998, 2011) も用いて冷却シミュレーションを行った。この結果、Shen EoS では軽い星でも DU 過程が起きる一方、Togashi EoS では DU 過程が起きなかった。これは高密度領域で Shen EoS は DU 過程が起こるほど十分に Y_p が高くなるのに対して、Togashi EoS では Y_p が DU 過程を起こせるほど十分に高くないことが原因である。従って、Togashi EoS は超流動効果の有無に関わらず表面温度が比較的低い観測値を説明することができないことが分かった。よって、Togashi EoS を用いて中性子星の表面温度の観測を再現するためには、エキゾチックな粒子によるニュートリノ放射が必要であることがわかった。

E-16

入射核分解効果を考慮した微視的光学ポテンシャルの ${}^6\text{He}$ 入射反応への応用

九大院理^A 小川翔也^A, 堀ノ内亮^A, 豊川将一^A, 松本琢磨^A

中性子ハロー核は、芯核に 1 つまたは 2 つの中性子が弱く束縛した原子核である。 ${}^6\text{He}$ は 2 中性子ハロー核であり、かつ ${}^4\text{He}+n+n$ の 3 体系で初めて束縛状態となるボロミアン核と呼ばれ、理論・実験の両面から精力的に行われている。 ${}^6\text{He}$ -標的核反応における断面積の解析には光学ポテンシャルが用いられるが、不安定核である ${}^6\text{He}$ の場合は実験の難しさからポテンシャルを現象論的に決定できない。そのため、2 核子間相互作用から微視的に光学ポテンシャルを構築する必要があり、畳み込み模型や Glauber 模型などが用いられる。

Glauber 模型は、不安定核を含む高エネルギー入射の原子核反応の解析に有用な模型として広く用いられている。この Glauber 模型を用いると、原子核-原子核間の多段階効果を考慮した光学ポテンシャルが導出できる。

今回は、核子-核子間相互作用である Melbourne G 行列を畳み込んだポテンシャルを用いて Glauber 模型から得られる光学ポテンシャルを構成し、 ${}^6\text{He}$ -標的核反応における散乱断面積の計算と微視的なチャネル結合計算の結果を比較した。本講演では解析より明らかとなったポテンシャルの有用性と、その性質について述べる。

E-17 ^{12}C 散乱における ^{12}C 共鳴状態の解析

九大院理 ^A 山田悠真^A, 松本琢磨 ^A

炭素同位体ではクラスター構造が発達し、 α 粒子のガスの状態とみなされる様々な励起共鳴状態が現れることが示唆されている。 ^{12}C の共鳴状態を探る実験は盛んに行われているが、実験により得られたデータには共鳴状態だけでなく、非共鳴状態が含まれるため、共鳴状態だけの情報を精密な解析から引き出す必要がある。一方、これまでの理論的な解析では共鳴状態のみを取り入れた計算は行われているが、非共鳴状態まで考慮し、それらが共鳴状態にどのような効果を及ぼすかまではまだ調べられていない。

そこで本研究では、 ^{12}C の共鳴・非共鳴状態の効果を調べるために、 ^{12}C を 3α クラスター構造とみなした 3 体計算に複素スケールリング法を適用することで共鳴・非共鳴状態を求め、そのような状態を含んだ計算を取り扱える連続状態離散化チャネル結合法 (CDCC) を用いて核子- ^{12}C , α - ^{12}C 散乱の微分断面積、分解断面積の計算を行った。

本講演では、計算した微分断面積と分解断面積から ^{12}C の共鳴・非共鳴状態の効果について議論する予定である。

E-18 量子散乱における仮想状態と共鳴状態の探索

九大院理 ^A 徳永航^A, 松本琢磨 ^A, 山田悠真 ^A

原子核は自己束縛系を成し、それらの束縛が弱くなると粒子崩壊を起こすが、崩壊した状態の中に準安定な共鳴状態が現れることがある。共鳴状態は量子力学的散乱においては散乱の S 行列の pole に対応し、Jost 関数を用いて議論される。共鳴状態と同じく S 行列の pole になる仮想状態も存在することが知られている。これらは特に原子核が弱束縛になる不安定核領域において現れることから注目され積極的に研究が進められている。

本研究では、先行研究 (Hiroshi Masui, Shigeyoshi Aoyama, Takayuki Myo, Kiyoshi Kato, Kiyomi Ikeda, Study of virtual states in ^5He and ^{10}Li with the Jost function method(2000)) を参考に Jost 関数を用いて共鳴状態と仮想状態の解析を行い、それらの相互作用依存性について議論する。

E-19

複素スケーリング法による S 行列の極と連続準位密度の関係

九大院理^A 青木宏平^A, 小川翔也^A, 松本琢磨^A

原子核には安定な束縛状態だけでなく、有限の寿命で崩壊する共鳴状態が存在し、理論・実験の両面から研究が進められている。共鳴状態は散乱の S 行列の極と対応し、また S 行列から導出される位相差の傾きと共鳴状態のエネルギーの位置に関係があることが知られている。先行研究では、 ^5He に対して複素スケーリング法 (CSM) を用いた連続準位密度 (CLD) の導出し、共鳴状態と位相差の比較が行われている。本研究では ^6Li , ^{11}Be 核に対し、CSM を用いて共鳴状態と CLD を導出し、S 行列の極や位相差と比較することで、その関係性を議論する。

Reference [1] R. Suzuki, T. Myo and K. Kato, PTP113('05)1273

E-20

カラー超伝導状態のクォーク物質を考慮した中性子星の冷却

久留米工大^A, 千葉工大^B, 九大理^C, JAEA^D, 京大理^E 野田常雄^A, 安武伸俊^B, 橋本正章^C, 松尾康秀^C, 丸山敏毅^D, 巽敏隆^E

中性子星は非常に高密度な天体であり、巨大な原子核と考えることができる。中性子星内部ではその密度は原子核密度を超え、通常の原子核では出現しない様々な状態が考えられている。ハイペロンやメソン凝縮、クォークの閉じ込め解放、核子の様々な超流動状態の出現等が考えられており、非常に興味深い天体である。また、中性子星の温度はその密度に対して非常に低温であり、地上実験での検証が困難な領域であるため、観測値と理論計算とを比較することが有効な探求手法となる。

中性子星は最初の発見から 50 年が経過し、以降様々な方法で観測が行われ、内部状態への観測的制限を与えてきた。近年の重力波・電磁波によるマルチメッセンジャー観測や、 $2M_{\odot}$ の質量観測等、重要な観測が行われてきた。しかし、依然として様々な物質の状態の可能性は残り、内部状態は確定していない。このような中性子星の内部状態の違いは、内部における最大の熱エネルギー放射機構であるニュートリノ放射に直接影響する。そのため、星全体の熱的進化の数値計算の結果と、観測値とを比較することで、高密度物質の状態に制限を与えることが可能となる。

本研究では、中性子星内部にカラー超伝導状態 (CSC) のクォーク物質の核があると仮定し、CSC の状態が中性子星全体の熱的進化へ及ぼす影響について調査した。CSC 状態はクォークの自由度によって複数のペアリングが考えられ、本研究では CFL 状態と 2SC 状態のどちらかが出現すると仮定した。CSC 状態のニュートリノ放射に及ぼす影響を考慮し、星の熱的進化計算を行った。