
会場 A

素粒子論, 理論核物理領域

A-1 Holographic Approach to Regge Trajectory and Rotating D5 brane

九大理^A, 福工大情報工^B, 近畿大産業工^C 田港朝貴^A, 郷六一生^B, 豊田文彦^C

レッジ軌跡と呼ばれるハドロンの質量の2乗とスピンの関係が実験的に線形であるという現象は、QCDの非摂動的領域における性質であるため、一般にQCDの摂動論を用いた解析で導出する事は困難である。そこで我々は非摂動的領域の解析方法として盛んに研究されているゲージ/重力対応を用いることで、ハドロンのレッジ軌跡の解析的な導出を試みた。

ゲージ/重力対応を用いたQCDのモデルとして、我々はクォークの閉じ込めを実現する10次元漸近的 $AdS_5 \times S^5$ 時空における重力理論(超弦理論)を考える。このモデルでは、メソンはD7ブレーンを端点を持つ開弦、バリオンは S^5 に巻きついたD5ブレーンが対応している。この見方のもとで、回転する開弦とD5ブレーンの運動方程式を解く事によって、メソンとバリオンの質量と角運動量(スピン)の関係性が得られると期待される。

このアイデアを用いた解析を行うと、メソンとバリオンの質量の2乗とスピンの関係が、大きなスピンの領域で、線形である事を示す事が確認できた。さらに、メソンのレッジ軌跡を実験とパラメータを合わせる事で、バリオンのレッジ軌跡も実験と10%程度の誤差で一致する事を示せた。

本講演では、以上の内容について報告したいと思う。

A-2 Wilson 流くりこみ群を用いた 3 体系の解析

九州大学^A, 佐賀大 SL センター^B, 東北公益文科大学^C 原田恒司^A, 久保博史^B,
山本裕樹^C, 吉本一世^A

3 体の散乱について、Wilson 流のくりこみ群を用いて、flow 方程式を解析した。有効理論を用いて 3 体系を解析する場合、2 体と 3 体の演算子の分離は nontrivial である。なぜなら、2 体の演算子の組み合わせによって 3 体への寄与が生まれるため、3 体の結合定数の cutoff 依存性は、2 体と 3 体の混合によって与えられるためである。Wilson 流のくりこみ群の解析は、それらの演算子の cutoff sensitivity を調べる解析手段である。

また、ポテンシャルを用いた現象論的な解析とは違い、場の理論の解析では、off-shell ambiguity が無いことは重要である。したがって、Wilson 流の解析は、off-shell の効果を取り入れた 3 体系への応用に寄与すると考えられる。

A-3 Holographic Glueballs and Dynamical Wall Driven by Dilaton

九大理^A, 福工大情報工^B, 近畿大理工^C 久保幸貴^A, 田港朝貴^A, 郷六一生^B, 豊田文彦^C

ゲージ/重力対応はゲージ理論の非摂動的振る舞いを調べるために用いることのできる強力な解析方法の一つである。特に超対称性の破れたゲージ理論であることは QCD などのより現実的な場の理論であるためには必要な条件のひとつである。その中で、我々が今回解析に用いたモデルは、超対称性を破っていて、尚且つ、比較的煩雑でない計算により解析が実行できるような簡単な計量により表されるモデルになっている。しかし、その一方で時空に特異な振る舞いがみられるような領域が存在しており、解析の上でストリングや D ブレーンがその領域に進入しうことは理論的に不満足であった。

今回我々は、ゲージ理論ではそれぞれグルーボール、メソン ($q\bar{q}$ 対)、バリオンに対応するような、閉弦、開弦、D7 ブレーン、D5 ブレーンなどを調べ、そのいずれにも時空の特異点には到達できないようにダイナミカルな壁が存在していることを確かめた。この壁の存在により、それらの弦や D ブレーン配位は問題なく解析することができる。

A-4 温度, 密度, アイソスピン空間における QCD 相構造の解明

九州大学院理^A, 佐賀大学理工^B 長野邦裕^A, 佐々木崇宏^A, 境祐二^A, 河野宏明^B, 八尋正信^A

中性子星の構造が注目されている。中性子星は高密度天体であるので、内部ではクォークが超流動状態になっていると考えられている。中心部の構造を知るためには、有限温度 (T)・有限化学ポテンシャル (μ) における、クォークとグルーオンの状態変化を表す量子色力学 (QCD) 相図の理解が必要である。QCD の第一原理計算である格子 QCD 計算は有限クォーク化学ポテンシャル領域 (μ_q) では実行困難なため、有効模型を用いて QCD の解析を行う。

今回、我々は chiral 対称性に関する物理を記述する Nambu-Jona-Lasinio 模型 (NJL 模型) を用いる。また、 u 、 d クォークの非対称度に対応するアイソスピン化学ポテンシャル (μ_I) に着目する。中性子星内部では一般に $\mu_I \neq 0$ であり、 π 中間子の凝縮はゼロではないので、その自由度も考慮する。そして $\mu_I - \mu_q - T$ に対する QCD 相図を描く。次に中性子星内部では、一般に電氣的に中性であることから、電荷の中性条件を課した上での計算を行う。この場合の QCD 相図も描く。本公演では、以上の結果を報告する。

A-5 QCD 相図における θ -真空の影響

九州大学^A, 九州大学^B, 九州大学^C, 佐賀大学^D, 九州大学^E 齊藤康浩^A, 佐々木崇宏^B, 境祐二^C, 河野宏明^D, 八尋正信^E

量子色力学 (QCD) 相図とは、有限温度 (T)・有限化学ポテンシャル (μ) におけるクォークとグルーオンの状態変化を表した図である。低温においてクォークは閉じ込め状態にあり陽子や中性子などのハドロンを形成しているが、宇宙初期の高温状態では閉じ込めから解放されたプラズマ状態であった。従って、宇宙進化の過程ではプラズマ相から閉じ込め相への相転移が起こり、バリオンやメソンなどのハドロンが生成されたと考えられる。またバリオン生成の際、CP 対称性の破れが深く関わっていたと考えられる。QCD において CP 対称性の破れは θ -項によって記述される。宇宙進化の過程では、 θ -項の強さを表すパラメータ θ は有限であってもよく、その状況における QCD 相転移について知る必要がある。QCD の第一原理計算である格子 QCD シミュレーションは有限クォーク化学ポテンシャル (μ_q) や有限の θ の領域で実行困難であるため、有効模型を用いて解析を行った。

本公演では、有効模型として θ -項を考慮した Polyakov-loop extended Nambu-Jona-Lasinio 模型 (PNJL 模型) とその拡張である EPNJL 模型を用いた結果を報告する。具体的には、 θ による QCD 相図の定性的な変化と PNJL 模型と EPNJL 模型の結果の違いを議論する。

A-6 ゼロおよび純虚数化学ポテンシャルにおける、3フレーバー QCD のクォーク質量依存性

九大院理^A, 佐賀大理工^B 佐々木崇宏^A, 境祐二^A, 河野宏明^B, 八尋正信^A

量子色力学 (QCD) 相図とは、有限温度 (T) ・有限化学ポテンシャル (μ) におけるクォークとグルーオンの状態変化を表した図である。現在のクォークは閉じ込め状態にあり陽子や中性子などのハドロンを形成しているが、宇宙初期の高温状態では閉じ込めから解放されたプラズマ状態であった。従って、宇宙進化の過程ではプラズマ相から閉じ込め相への相転移が起こり、ハドロンが生成されたと考えられる。この QCD 相転移を理解するためには、QCD 相図の情報が必要である。しかし、QCD の第一原理計算である格子 QCD シミュレーションは有限化学ポテンシャル (μ) 領域で実行困難である。そこで、QCD 相図の解析は有効模型を用いて行われている。有効模型には多くの不定性が伴うので、有限 μ 領域に対する信頼できる予言を得るためには、その不定性を除去する必要がある。

有効模型の不定性を除去する方法として、格子計算が実行可能な純虚数化学ポテンシャル領域において、有効模型の結果と格子計算の結果を比較する方法が挙げられる。そこで本研究では、軽いクォークおよびストレンジクォークの質量の関数として、ゼロおよび純虚数化学ポテンシャルにおける QCD 相図を描いた。解析には、2+1 フレーバー Polyakov-loop extended Nambu-Jona-Lasinio 模型 (PNJL 模型) に対して Polyakov loop に依存する有効結合を導入した模型 (EPNJL 模型) を用いている。これらの結果を格子計算による予言と比較した結果、EPNJL 模型への拡張が格子計算の再現に対して重要であることが分かった。

A-7 複素化学ポテンシャルのもとでのクォーク・システム

佐賀大学大学院^A, 九州大学大学院^B, E.I.M. ^C 河野宏明^A, 岸川瑞穂^C, 佐々木崇宏^B, 境祐二^B, 八尋正信^B

通常の状態では、クォークは閉じ込め状態にあり陽子や中性子などのハドロンを形成しているが、たとえば中性子星などの高密度天体の内部では、ハドロンが強い重力でつぶされクォーク物質が生成されていると期待されている。この QCD 相転移を理解するためには、QCD 相図の情報が必要不可欠である。QCD の第一原理計算である格子 QCD シミュレーションは有限実バリオンの化学ポテンシャル (μ_B) 領域で実行困難であるため、QCD の解析には有効模型が用いられる。我々は格子計算が可能な領域で有効模型との定量的比較を行い、有効模型のパラメータを決定し、格子 QCD 計算が困難な有限実 μ_B 領域の QCD 相図を定量的に予言する試みを行ってきた。

今回我々は、実アイソスピン化学ポテンシャル (μ_I) かつ虚数 μ_B 領域での計算に注目した。この領域は、格子 QCD で原理的には計算可能であるが、現在のところ該当する格子 QCD 計算は存在しない。我々は、QCD の有効模型である PNJL 模型を使ってこの領域の解析を行った。今後、この領域での格子 QCD 計算が行われれば、有効模型のパラメータを改良でき、外挿などによって中性子星内部などの状態に相当する、有限実 μ_I かつ有限実 μ_B 領域の情報が得られると期待される。参考文献 H.Kouno, M. Kishikawa, T.Sasaki, Y. Sakai and M. Yahiro, arXiv:1110.5187[hep-ph]

A-8 格子 QCD による純虚数化学ポテンシャル領域の研究

九大院理^A, 佐賀大理工^B, 広大情報メディア教育研究センター^C 高橋純一^A, 長野邦裕^A, 佐々木崇宏^A, 境祐二^A, 永田圭太郎^C, 河野宏明^B, 八尋正信^A, 中村純^C

量子色力学 (QCD) はクォーク間に働く強い相互作用を記述する理論である。通常、クォークは陽子や中性子といったハドロンを形成し、いわゆる閉じ込めの状態にある。一方、誕生直後の宇宙では閉じ込めから解放されたクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 状態に、中性子星内部ではクォークがクーパー対を作るカラー超伝導状態になっていると予想されている。これらの状態変化は一般に温度 (T) とバリオン化学ポテンシャル (μ_B) の平面に描かれる QCD 相図によって記述される。しかし、QCD の非摂動性ゆえに QCD 相図には説明が困難な部分が現在も多く残っている。

本公演で我々は、QCD の第一原理計算である格子 QCD シミュレーションを用いた、閉じ込め相転移に関する有限体積依存性について言及する。格子 QCD 計算ではモンテカルロシミュレーションをするため、有限実バリオン化学ポテンシャル領域での計算が困難である。そこで我々は、純虚数バリオン化学ポテンシャル (μ_I) 領域での計算をしている。今回の計算と先行研究との比較を通して、大きな体積での計算の重要性について考える。

参考文献 K. Nagata and A. Nakamura, arXiv:1104.2142v2 [hep-lat]

A-9 虚数アイソスピン化学ポテンシャルのもとでのクォーク系 I

佐賀大学大学院^A 徳永幸平^A, 牧山隆洋^A, 河野宏明^A

クォークは通常の状態では強い相互作用のために陽子や中性子などのハドロンの中に閉じ込められている。しかし、高温や高密度の状態では、ハドロンが溶けたり、つぶされたりして、クォークがばらけたクォーク物質になっていると考えられている。これをクォークの非閉じ込め転移という。閉じ込めや非閉じ込めを強い相互作用を記述する第 1 原理である量子色力学 (QCD) から説明することは難しい。また、QCD から導かれると考えられる現象論的な模型においても閉じ込めを統一的に説明する模型はなかった。ところが、最近、PNJL 模型と呼ばれる模型では、低温であたかも 3 つのクォークが結合したような 3 クォーク状態が存在し、高温でそれが分離する事がわかった。この模型においては、低温でポリヤコフループが虚数の色化学ポテンシャルの役割を果たし、3 クォーク状態が出現する。一方、この模型で虚数アイソスピンを考えると、高温でもクォークの 2 体状態が存在する可能性があることが、境らによって指摘されている。この高温での香りの閉じ込めは、色の閉じ込めのアナロジーで理解できる。この研究では、この香りの閉じ込めを 2 フレーバー PNJL 模型を使って解析し、その中間子質量への影響を議論する。

参考文献 Y. Sakai, H. Kouno and M. Yahiro, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **37**, 105007(2010).

A-10 虚数アイソスピン化学ポテンシャルのもとでのクォーク系 II

佐賀大学大学院^A 牧山隆洋^A, 徳永幸平^A, 河野宏明^A

クォークの閉じ込めを理論的に説明する事は、いまだ未解決の重要な問題である。最近、PNJL 模型と呼ばれる量子色力学の有効模型では、低温であたかも3つのクォークが結合したような3クォーク状態が存在し、高温でそれが分離する事がわかった。この模型においては、低温でポリヤコフープが虚数の色化学ポテンシャルの役割を果たし、3クォーク状態が出現する。一方、この模型で虚数アイソスピンを考えると、高温でもクォークの2体状態が存在する可能性があることが、境らによって指摘されている。この高温での香りの閉じ込めは、色の閉じ込めのアナロジーで理解できる。また、この方法を3フレーバーの理論に拡張すると、高温でクォークの香りが3クォークのバリオンのような状態に閉じ込められたような状態が実現する可能性がある事がわかる。この研究では、この香りの閉じ込めを3フレーバー PNJL 模型を使って解析し、その性質を研究する。参考文献 Y. Sakai, H. Kouno and M. Yahiro, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **37**, 105007(2010).

A-11 磁場と温度の効果を考慮したクォーク物質の状態方程式

佐賀大学工学系研究科^A, 佐賀大学工学系研究科^B 荻田知幸^A, 橘基^B

中性子星の質量の観測は、その内部の物質状態（状態方程式）に制限を与えることが以前から知られていた。そんな中でごく最近、太陽質量の2倍近くの重い中性子星の観測が報告され大きな話題となっている。原論文では、この結果はクォークやハイペロンなどの核物質以外の状態を排除する可能性が指摘された。これに対し M.Alford らはモデルによらない解析に基づき、クォーク物質が存在するパラメータ領域に制限を与えた。彼らはそれを a_2 , a_4 パラメータと呼んでいる。一方彼らの研究では中性子星内部の温度や磁場の影響が考慮されていない。そこで今回の発表では中性子星質量へのそれらの効果を見積もる初めの段階として、状態方程式に対する温度および磁場の影響を考察する。

A-12 Eikonal reaction theory for neutron removal reaction

九州大学^A, 大阪大学核物理研究センター^B 蓑茂工将^A, 松本琢磨^A, 緒方一介^B,
八尋正信^A

近年の実験技術の大きな進歩により, 不安定核の性質の解明は着実に進展し, その研究対象は比較的軽い中重核のドリップラインにまで迫っている. その代表例が ^{31}Ne や ^{33}Mg などの中性子過剰核であり, このような中性子ドリップライン近傍の $N = 20$ 周辺領域は “Island of Inversion” と呼ばれ, 現在注目を集めている. この領域の解明は, 1 中性子分離反応の包括的断面積の実験と理論解析によって, 急速に進展すると期待されている.

これまで不安定核反応解析に用いられてきた理論として, Glauber 模型や連続離散化チャネル結合 (Continuum Discretized Coupled Channels, CDCC) 法が挙げられる. Glauber 模型はアイコナル近似と断熱近似から構成される. しかし, Coulomb 相互作用を無視できない条件下では, 断熱近似は断面積の発散という問題を引き起こす. CDCC 法は分解反応を精度よく記述する理論であるが, 包括的断面積を計算できないという問題がある. そこで我々は, Coulomb 相互作用を正確に取り扱った上で, 1 中性子分離反応の包括的断面積を計算するための新たな手法 (Eikonal Reaction Theory) を提案した [1].

この Eikonal Reaction Theory を用い, 我々は ^{31}Ne の 1 中性子分離反応 [2] の解析を行った. 本講演では, 簡単に理論の定式化を示した後, 反応解析の結果を示す.

Reference

- [1] M. Yahiro, K. Ogata, K. Minomo, Prog. Theor. Phys. **126**, 167 (2011).
[2] T. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. Lett. **103**, 262501 (2009).

A-13 反応断面積による不安定核の変形度の決定に向けて

九大院理^A, 北大創成^B 渡邊慎^A, 蓑茂工将^A, 角剛典^A, 松本琢磨^A, 木村真明^B,
清水良文^A, 八尋正信^A

不安定核物理を解明することは非常に重要である. 中でも, Island of inversion と呼ばれる領域に含まれる原子核は大きな変形に伴う魔法数の破れが示唆されており, 不安定核物理における重要な課題となっている. 原子核の変形を探るために反応断面積を用いることができる. 反応断面積は, 入射核及び標的核の構造が変化するイベントに対応し, 安定核に対する研究から, この量は原子核の平均二乗根半径に強く依存することが知られている. 原子核が変形している場合, その平均二乗根半径は大きくなり, その結果, 反応断面積を実効的に大きくすることが予想される. 実際, Island of inversion 核を含む中性子過剰な Ne 同位体の中間エネルギーに対する実験データが, 変形を考慮した理論解析により定量的に説明された. しかし, 低エネルギー反応では, 前述の解析では無視されていた分解, 及び reorientation の効果が重要な役割を担う可能性が高い. 理論を系統的なものへと拡張するためには, これらの効果を考慮することが必要不可欠である.

本研究は二重畳み込み模型を用い, その 2 核子間有効相互作用として, 核子 - 原子核間の光学ポテンシャルの構築に定評のあるメルボルンの g 行列を採用した. 二重畳み込み模型で用いる入射・標的核の核子分布は, 原子核の構造理論により構築されたものを用いる. 特に, 今回用いた反対称化分子動力学法は, 2 体の有効核力から出発し, 原子核の構造に変形を仮定することなく変形を記述できる. これらの手法は調整パラメータを含まない.

本講演では, 実験データと理論計算の比較によって, 低エネルギー反応の反応断面積に対する原子核の変形の効果を議論する. さらに低エネルギー反応において無視できない可能性のある, 分解及び reorientation の効果を評価し, 報告する.

A-14 量子数射影の効率的手法と四面体変形核への適用

九大院理^A, Univ. of Strasbourg, IReS^B 田上真伍^A, 清水良文^A, J. Dudek^B

陽子と中性子という2種類の粒子から成る原子核は、粒子数がたかだか300の有限量子多体系であり、また典型的な時間スケールの短さから多くの場合に孤立系と見なせる。多くの原子核の状態を包括的に記述できる理論として、一般化された平均場理論 (Hartree-Fock-Bogoliubov 理論) があり、粒子数が十数から数百までの系に適用されている。自己無撞着に求められる平均場理論の解は系の持つ対称性 (回転対称性、大域的ゲージ不変性など) を一般には破るが、孤立した有限量子系である原子核の観測される状態ではこれらの対称性は破れない。よって、何らかの方法で平均場理論の解から対称性の回復した状態を求める必要があり、そのひとつが量子数射影法である。射影法において平均場理論の解は系の内部状態と見做され、観測される状態は内部状態に対称性を回復する集団的“回転運動”が加わったものであると理解される。

最先端の平均場理論が用いている模型空間に対し量子数射影を行うことは多大な労力を要するため、量子数射影を効率的に行うことが必要となる。また、現実的な原子核では、内部状態が一切の対称性、特に時間反転不変性を持たない場合が考え得る。そこで我々は量子数射影を任意の状態、さらには左右の内部状態が異なる場合に適用できるよう拡張した効率的な計算手法と、それを行う数値計算プログラムを作成した。

近年の理論計算から存在が示唆されている、これまで調べられてこなかった新たな変形の一つに、パリティを破って非軸対称な正四面体型の変形がある。四面体変形をした原子核が一樣回転している状態はほとんどの対称性を破るため、新しい手法により初めて量子数射影が適用できる。本公演ではその一例を示す。

A-15 原子核の3軸非対称性の研究

九州大学 理学府 物理専攻 理論核物理研^A 藤岡雄大^A, 田上真伍^A, 清水良文^A

変形した原子核の回転運動について、対称軸回りの回転は量子力学的に禁止されているため (そのような状態は位相の自由度しか違いがない)、軸対称な変形では原子核は対称軸に垂直な軸回りの一樣な回転運動しかできない。これに対し、3軸非対称変形した原子核は3つの軸回りに回転できるように複雑な回転運動が可能になる。本公演では、このような3軸非対称に変形した原子核に特有な集団回転運動である「ウォブリング回転運動 (Wobbling Motion)」を取り扱う。ウォブリングとは歳差運動のような非一樣な回転運動であり、近年 ${}_{71}^{163}\text{Lu}$ において初めて測定された。これに対し原子核が剛体のように回転しているとした巨視的理論による解析が行われたが未だ成功を納めておらず、微視的理論からの研究が望まれている。

微視的理論における原子核の回転とは、その平均場の回転として理解される。今回はこの平均場を Woods – Saxon ポテンシャルに基づいた HFB 計算によって求める。ただし、この HFB 方程式は非線形であり自己無撞着に解を求めるため、解は系の Hamiltonian が持つ対称性を破ってしまう。しかし原子核は有限系であるため、観測される状態は必ず系の対称性を満たす状態である。よって、理論と実験を比較するためには何らかの方法で解の対称性を回復させる必要がある。今回の計算では角運動量射影法 (Projection) と呼ばれる方法を用いてこれを行う。

また、本公演ではこの HFB + Projection という手法を、3軸非対称変形と密接に関係する他の物理現象 (カイラル2重項など) にも適用し、その結果を見る。

A-16 N=40 近傍な同位元素の殻模型による研究

福岡大理^A 江口正人^A, 田崎茂^A

N=40 近傍の Zn 同位元素と Ge 同位元素の構造についての研究成果を報告する。これらの原子核のエネルギー準位構造をみてもと第 1 励起 2^+ や第 1 励起 4^+ は中性子数が増えるに従い励起エネルギーが低くなる傾向がみられる。ところが、第 1 励起 0^+ のエネルギー準位は、 $N = 40$ で低くなり $N = 42, 44$ で高くなる特異な振る舞いが起こることがわかっている。この振る舞いが見られる $N = 38, 40, 42, 44$ の原子核を対象にして研究を行った。

この領域をカバーする有効相互作用は本間さんたちによって開発されており、エネルギー準位構造が見事に再現されている。しかし、この計算では Ge 同位元素における第 1 励起 2^+ の *quadrupole moment* の計算結果が実験値とは異なるという指摘がある。我々はより良い再現を得るには模型空間を拡張することが必要と考え、関数型の有効相互作用を使って計算を行った。講演ではエネルギー準位構造、第 1 励起 2^+ の *quadrupole moment*、第 1 励起 2^+ から 0^+ への $B(E2)$ について議論する予定である。