
会場 F

素粒子論, 理論核物理, 宇宙線・宇宙物理 領域

F-1 6次元時空上の大統一理論における細谷機構と対称性の破れのパターン

九州大学大学院理学府物理専攻^A, 九州大学基幹教育院^B 土屋創聖^A, 小島健太郎^B

本研究では、コンパクトな余剰次元を含む高次元時空上の大統一理論における、ゲージ対称性の自発的な破れについて議論する。大統一理論は、素粒子の標準理論に含まれる3つの力を、単一のゲージ対称性（大統一对称性）の自発的な破れの帰結として説明する理論である。典型的な大統一理論では、大統一对称性の自発的な破れを引き起こす真空期待値を取るヒッグススカラーが導入される。一方、余剰次元を含む高次元時空上の大統一理論では、ヒッグススカラーの導入なしに、ゲージ場の余剰次元方向の成分の自由度が真空期待値を持つ細谷機構を通じて、大統一对称性の自発的な破れが可能になる。細谷機構による大統一对称性の自発的な破れについては、これまでには S^1/Z_2 オービフォルドを余剰次元として持つ模型が構築され、解析されている。本研究では、 T^2/Z_3 オービフォルドを持つ6次元 $SU(5)$ 大統一模型を新たに構築した。また、その模型の真空構造や大統一对称性の破れのパターンについて解析を行った。

F-2 ヒッグス多重項の質量分離を考慮した SO(10) 大統一模型の構築

九大理^A, 九大基幹^B 釘崎充規^A, 小島健太郎^B

本研究では、SO(10) 大統一模型におけるゲージ結合定数の統一が、物質場およびヒッグス場の質量スペクトルに与える示唆を議論する。素粒子の標準理論は、約 1 TeV までの素粒子の現象をうまく記述している。一方で、標準理論はパラメーター数の多さやニュートリノ質量の不自然さといった解決すべき複数の問題も内包しており、より基本的な理論の存在が期待されている。大統一理論は、そのような基本理論の有力な候補であり、電磁気力・弱い力・強い力の 3 つを、統一したゲージ対称性から説明することができる。大統一理論の対称性として、SO(10) ゲージ群を仮定した場合には、SO(10) 対称性が段階的に小さな対称性に破れていき、その結果として標準理論のゲージ対称性 $(SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y \equiv G_{SM})$ が実現する可能性が考えられる。我々は、とくに $SO(10) \rightarrow SU(4) \times SU(2)_L \times SU(2)_R \rightarrow G_{SM}$ や $SO(10) \rightarrow SU(4) \times SU(2)_L \times U(1)_R \rightarrow G_{SM}$ などの段階を経る対称性の破れのパターンに着目した。これらの場合に、繰り込み群により得られるゲージ結合定数の値と、標準理論には含まれていない新たなヒッグス場の質量スペクトルの関係を解析した。

F-4 グラディエントフローを用いた $\mathcal{N} = 1$ SYM 理論における超カレントの構成

九州大学^A 鈴木博^A, 牧野弘樹^A, 稗田健治^A, 笠井彩^A

グラディエントフローを用いて、繰りこまれた複合演算子についての正則化の手法に依存しない表式を得ることができる。本研究ではこれを超対称性のネーターカレントである超カレントについて応用し、正則化に依存しない超カレントの表式を得る。 $\mathcal{N} = 1$ の super Yang-Mills 理論を考え、次元正則化により繰りこまれた超カレントを計算した。得られた超カレントをフローしたゲージ場とゲージノ場場で再表記し、有限かつ正則化の手法によらない超カレントの表式を得た。本研究で得られた正則化によらない超カレントを保存するようにパラメータ調整を行うことで、超対称性を持つ物理点での格子数値計算を行うことが可能になると考えられる。

F-5 2次元超対称 Landau–Ginzburg 模型の数値的研究

九大理^A 森川億人^A, 鈴木博^A

2次元 $\mathcal{N} = 2$ Wess–Zumino 模型は、超共形場理論の Landau–Ginzburg 記述を与えると信じられている。この模型は低エネルギーで強結合であるため、この予想を証明することは困難である。我々は、様々な超ポテンシャルを持つ場合について、Nicolai 写像に基づいた超対称性を厳密に保つ数値計算アルゴリズムを適用した。低エネルギーでの2点相関関数のフィッティングから、共形場理論を特徴づけるスケール次元と中心電荷を得た。この結果は、期待される超共形場理論の値と一致し、予想に対する非摂動的な傍証を与える。

F-6 SU(2) 純ゲージ理論におけるスケール設定と物理量の測定

九大院理^A, 大阪大学^B, 高知大学^C 開田丈寛^A, 伊藤悦子^{B,C}

SU(2) ゲージ理論は、漸近自由性、閉じ込め、カイラル対称性の破れなどの観点から、定性的に SU(3) 純ゲージ理論や QCD と非常によく似た性質を持つ。一方、ゲージ群が小さいため、計算コストを抑えることができる。そのため、新しい解析手法の精査や、QCD では調べるのが困難な物理量の定性的な振る舞いに対する知見を得るためのトイ・モデルとして適している。本研究では、格子シミュレーションを用いて、近年急速に発展してきたグラディエントフロー法によるスケール設定を SU(2) 純ゲージ理論に応用し、ゲージ群が変わった場合の典型的な t_0 スケールの提案と、これまで用いられてきた Sommer スケールによるスケール設定との比較を行う。また、フロー時間展開法（鈴木法）を用いたエネルギー運動量テンソルの測定から、熱力学量の決定も行い、従来の積分法との比較も行う。

F-7 ランダムウォーク理論を使った符号問題の解析

佐賀大院工^A, 九大院理^B, 気象庁福航^C 河野宏明^A, 開田丈寛^B, 管野淳平^B, 高橋純一^C, 八尋正信^B

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。格子 QCD では、統計力学の大正準分配関数をユークリッド化した経路積分で書きなおし、クォークの場について積分を行うが、バリオン数化学ポテンシャルが存在すると、積分後の表式に複素数が現れ、確率解釈に基づいた importance sampling の手法が使えなくなるのである。しかしながら、積分後の標式に現れる有効作用の虚部は、理論に Z_3 対称性がある場合は小さくなる [1]。また、作用の虚部の出現確率は、近似的にランダムウォークの理論を使って解析する事ができ、その確率は作用虚部の絶対値が大きくなると、2項分布あるいはガウス分布的に小さくなる事が期待できる。この講演では、ランダムウォーク理論を使って符号問題を解析する。

参考文献 [1] T. Hirakida et al., Physical Review D **96**, 074031 (2017).

F-8 クォーク・ハドロン転移を記述する有効模型

佐賀大院工^A 平岩真次^A, 河野宏明^A

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。格子 QCD では、統計力学の大正準分配関数をユークリッド化した経路積分で書きなおし、クォークの場について積分を行うが、バリオン数化学ポテンシャルが存在すると、積分後の表式に複素数が現れ、確率解釈に基づいた importance sampling の手法が使えなくなるのである。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寄与が正しく含まれていない [1],[2]。そこでここでは、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、そのパラ未定メータを格子 QCD の結果がほぼ確定している零化学ポテンシャル領域で決定し、その後で有限密度領域の解析を行うことを試みる。

参考文献 [1] A. Miyahara et al., Phys. Rev. D **94**, 016003 (2016).

[2] A. Miyahara et al., arXiv:1704.06432.

F-9 QCD 不等式による虚数アイソスピン化学ポテンシャル領域の解析

九大院理^A, 佐賀大院工^B 管野淳平^A, 河野宏明^B, 八尋正信^A

外部変数が存在する場合の QCD 物性を理解することは、初期宇宙の冷却に伴う物質形成や中性子星の内部構造を理解するうえで重要である。本研究では、中性子星内部において実現している有限アイソスピン化学ポテンシャル領域を考える。有限アイソスピン化学ポテンシャル領域の特徴として (荷電) パイオン凝縮の存在が挙げられる。パイオン凝縮が発生するような領域においては同時に符号問題が強くなり、QCD の第一原理計算である格子 QCD 計算が困難になることが指摘されている。このため、格子 QCD 計算によって有限アイソスピン化学ポテンシャル領域を探るには困難が伴う。

符号問題を避ける方法の一つに虚数アイソスピン化学ポテンシャルの導入がある。虚数アイソスピン化学ポテンシャル領域においてはパイオン凝縮が発生しないことがゼロ温度において証明されており、符号問題を回避しつつ格子 QCD 計算を実行可能である。本研究では、温度・虚数クォーク化学ポテンシャルまで含めた状況を考えたうえで QCD 不等式を適用し、パイオン凝縮が存在しないことを示した。本講演ではその証明の内容について話す。

F-10 クォーク・ハドロンハイブリッド模型による格子 QCD 計算の解析 IV

九大院理^A, 佐賀院工^B 宮原昌久^A, 石井優大^A, 河野宏明^B, 八尋正信^A

QCD 相図を解明することは宇宙進化や中性子星の内部構造、原子核衝突実験など多岐にわたって重要な意味を持つ。QCD 相図へのアプローチとして、格子 QCD 計算と有効模型を用いた方法がある。格子 QCD 計算は QCD の第一原理計算であり、高温・低密度領域に対して解析が可能である [1,2]。一方、それ以外の領域では符号問題があるために格子 QCD 計算での解析は難しい。これに対して、有効模型は温度-密度面全域で計算可能であるが、その結果には模型のパラメーターによる不定性がつきものである。我々は高温・低密度領域において格子 QCD 計算の結果を再現する有効模型を構築することで模型の不定性を除き、温度-密度面全域への正当性の高い解析を目指す。本研究では、ハドロンの自由ガスを記述する模型 (Hadron resonance gas model) とクォークが互いに直接相互作用せずにグルーオン背景場中を動き回る模型 (Independent quark model) の二つの有効模型をもとにしたクォーク・ハドロンハイブリッド有効模型を用いて格子 QCD 計算の結果を解析する。系のハドロン支配率がどのように変化しているかを見ていくことで、格子 QCD 計算の結果から QCD 相転移の情報を引き出していく。

参考文献 [1]Z. Fodor, and S. D. Katz, Phys. Lett. B 534, 87 (2002). [2]C. R. Allton, S. Ejiri, S. J. Hands, O. Kaczmarek, F. Karsch, E. Laermann, Ch. Schmidt, and L. Scorzato, Phys. Rev. D 66, 074507 (2002).

F-11 角運動量射影計算による超変形核の記述

九大院理^A 牛谷征貴^A, 田上真伍^A, 清水良文^A

多くの原子核の状態を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を一般には破るが、孤立した有限量子系である原子核では対称性が破れることはない。そこで量子数射影法を用いることで、平均場の解から対称性の回復した状態を求めることができ、より正確な状態を得ることができる。角運動量射影法により、集団回転する原子核の量子スペクトルを計算する。この手法においては、角速度の異なる平均場をいくつか用いて、それを射影後に GCM の意味で重ね合わせる。今回、対象とするのは変形度が $\beta \sim 0.6$ と大きく、長軸と短軸の比が 1:2 となるような超変形状態である原子核である。主に慣性能率により状態の評価を行い、一般には $A=150$ 領域の原子核では角速度の増加に対して慣性能率が大きく変化しない。しかし $A=190$ 領域では、角速度の増加に伴い慣性能率が大きくなることが観測されている。先行研究において、 $A=150$ 領域の原子核における上記の手法の有効性が確かめられたため、本研究では $A=190$ 領域の原子核について議論する。

F-12 Complex-Scaling 法による芯核励起を考慮した励起エネルギースペクトルの解析

九州大学理学研究院^A 小川翔也^A, 松本琢磨^A, 豊川将一^A

中性子ハロー核は、芯核 (コア) 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。最近では ^{11}Be や ^{31}Ne などのコアが変形した変形ハロー核が注目されており、理論・実験の両面で盛んに研究されている。先行研究において、変形ハロー核ではコアの変形 (コア励起) による観測量への寄与が指摘されてきた。その効果を取り入れた計算方法として Particle-Rotor Model (PRM) が挙げられる。

本研究では ^{11}Be を ^{10}Be と n の 2 体系で記述し、コアの ^{10}Be の励起に 0^+ と 2^+ を取り入れた PRM を考える。さらに、連続状態や共鳴状態を Complex Scaling Method (CSM) で記述し、ハロー構造を反映する E1 遷移を解析する。その解析において CSM を用いることで各チャンネルへの励起エネルギースペクトルに分離できるか議論する。

F-13 超流動原子核における s 波散乱の S 行列

九州大学 基幹教育院 次世代型大学教育開発センター^A, 新潟大学 理学部^B 小林良彦^A, 松尾正之^B

対相関は配位混合を引き起こし、原子核を超流動状態にする。また、核子束縛限界であるドリップライン付近の原子核においては、対相関は低エネルギーの非束縛軌道も含めた配位混合をも引き起こす（対相関による連続状態結合）。したがって、弱束縛な超流動原子核に近づく低エネルギーの散乱核子是对相関の影響を強く受けることが予想される。

対相関に起因する新奇現象として理論的に予言されているものに、準粒子共鳴がある。準粒子共鳴は散乱核子と束縛核子が核子 Cooper 対凝縮を通して結合することによって生じる。弱束縛な超流動原子核における準粒子共鳴は対相関によってどのように支配されるのだろうか。そして、その背後にはどのようなメカニズムがあるのだろうか。

本研究では、弱束縛な超流動原子核における s 波準粒子共鳴を座標空間表示 Hartree-Fock-Bogoliubov 理論を用いて記述する。s 波に着目する理由は、中性子ハローや中性子捕獲現象において重要な役割を担うためである。

発表では、位相のずれや弾性散乱断面積の計算結果から s 波準粒子共鳴が受ける対相関効果について説明する。さらに、複素波数空間および複素エネルギー空間における S 行列の極の計算結果を示し、その振る舞いから s 波準粒子共鳴が生ずるメカニズムについて議論する。

F-14 グラウバー模型に基づいた重陽子散乱における微視的光学ポテンシャルの導出

九大院理^A 堀ノ内亮^A, 豊川将一^A, 松本琢磨^A, 八尋正信^A

理化学研究所の不安定核ビーム施設 RIBF など、近年の実験加速器の発展により様々な不安定核反応の実験が行われている。特に安定核には見られない特異な構造を持つハロー核は、実験、理論の両面から大きな関心を集めている。このハロー核のような弱く束縛した入射核の場合、その励起、分解状態が反応に及ぼす影響は重要である。

RIBF のような高エネルギー入射核反応の解析にはグラウバー模型がよく用いられ、このグラウバー模型では入射核の分解効果を近似的に考慮することができる。

本研究ではグラウバー模型に基づいた微視的光学ポテンシャルの構築に向けて、重陽子-原子核間の微視的光学ポテンシャルを計算した。さらに、導出したポテンシャルから微分断面積、反応断面積を求め、CDCC、断熱近似との比較を行った結果について発表する。

F-15

陽子非弾性散乱の微視的解析による ^{12}C 共鳴状態の解明に向けて

九大院理^A 山田悠真^A, 松本琢磨^A, 豊川将一^A

^{12}C にはホイル状態と呼ばれる、元素合成の過程で重要な役割を担う励起状態が存在する。ホイル状態の構造を解明する上で ^{12}C の励起状態、特に共鳴状態を解明することは非常に重要であり、 ^{12}C の共鳴状態を探る実験は盛んに行われている。これらの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。共鳴状態を理論的に記述する方法として複素スケリング法があり、この方法を用いることで、エネルギースペクトルを連続化し実験データと照らし合わせることで、 ^{12}C の共鳴状態について議論できる。その第一歩として、今回は $p-^{12}\text{C}$ 弾性散乱の微分断面積の数値計算結果について発表する。

F-16

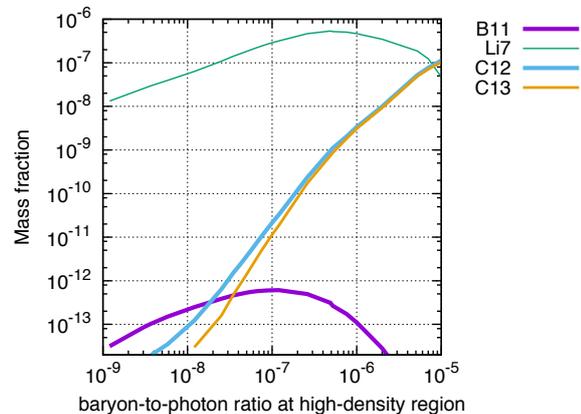
非一様ビッグバン元素合成による Li, Be, B 生成

久留米工業大学^A, 九州大学^B 中村理央^{A,B}, 橋本正章^B

ビッグバン元素合成 (BBN) は初期宇宙における軽元素の生成機構であり、高温 ($10^7 \text{ K} < T < 10^9 \text{ K}$) の状況下で、D, ^3He , ^4He , ^7Li が生成される。標準的な BBN は、一様密度の仮定のもとで研究が行われているが、一方で、非一様なバリオン密度を仮定した非一様 BBN (IBBN) の研究も長年行われている。我々の先行研究では、 ^4He , D の観測と矛盾しないパラメータ領域で、Ni や Eu などの重元素も生成されうると報告している (Matsuura et al. 2005; Nakamura et al. 2013)。しかし、Be, B についてはほとんど生成されていなかった。

そこで、本研究では ^9Be , ^{11}B が、IBBN でどの程度生成されるのか、元素合成計算を行った。モデルは球対称な高密度領域が存在する 2 ゾーンモデルを採用し、拡散は考えないものとする。また、核反応率は $A < 16$ のものについては Descouvemont et al. (2004) と NACRE-II (Xu et al. 2013) のものを用い、中性子の寿命は Beringer et al. (2012) のものを用いている。高密度領域太陽系組成と、本研究の解析で得られた ^9Be , ^{11}B の量を比較した所、

^9B についてはほとんど生成されなかったが、 ^{11}B は García López らが報告している値と一致する結果を得た。しかし、 ^7Li が Sbordone らが報告している観測値より 4 桁ほど高くなっていた。このことから、結論として、本研究で採用したモデルでは、D, ^4He , ^7Li の観測と矛盾しない範囲内で、Be, B の観測を説明するのは難しいことがわかった。



F-17 時空 16 元数の重力電磁場方程式

宮嶋学術財団^A 那須俊一郎^A

(A) 4 元マクスウェル方程式の完全形 竹本義夫名誉教授 (日本文理大) は、「行列ベクトル」を使って、電磁場には「スカラー電場」が存在することを発見し、4 元マクスウェル方程式の完全形を導いた。また、それを重力場の発生にも適用して、同型の重力場方程式を導いた。

(B) 16 元重力電磁場方程式への拡張 筆者は、重力場と電磁場を複素表示にして統一的に導くことを考えていたが、ロシアの V. ミロノフが「時空 16 元数」を使ってすでに導いていることがわかった。しかし、ベクトル部分に「虚数項」が出て来て、それを処理できていなかった。筆者は、「時空 16 元数」を「行列ベクトル」にはめ込んで計算をやり直すと、問題が解決できることを明らかにした。

(C) シアマ・江川の慣性理論 この理論は、慣性質量は重力質量だけでなく、電磁質量からの寄与もあるとする江川秀範氏の慣性理論を支持している。

F-18 高密度核物質の織り成す多様な状態と中性子星の冷却

久留米工業大学^A, 九州大学^B, 千葉工業大学^C, 原子力研究開発機構^D, 京都大学^E 野田常雄^A, 橋本章^B, 安武伸俊^C, 丸山敏毅^D, 巽敏隆^E

中性子星のような高密度星の内部は、クォークの閉じ込めが解けたクォーク物質やハドロン物質中の核子による超流動状態等の、極端な物理的状态や素過程の舞台となっている。このような物質の状態の検証は、地上での実験では行うことができず、Bell & Hewish (1967) による中性子星の発見から 50 年となる今日においても、未だ解明されていない。中性子星合体のマルチメッセンジャー観測 (重力波及び電磁波、2017) においても、最大質量の上限値が示された (Margalit & Metzger, 2017) 程度であり、不確定となっている。高密度星において、高密度物質でのニュートリノ放射が支配的な冷却機構である。このニュートリノ放射過程は内部の物質の状態によって決定されるため、観測結果と熱的進化計算を比較することで高密度物質の状態に制限をあたえることができる。

$2M_{\odot}$ の質量を持つ高密度星の観測 (Demorest et al. 2010, Antoniadis et al. 2013) と中性子星合体の観測は、中性子星内部で実現する高密度物質の状態方程式に強い制限を与えたが、依然として様々な高密度物質の可能性は否定されていない。その代表例がクォーク物質である。クォーク物質は高密度星の温度-密度領域においては、カラー超伝導状態となることが考えられているが、カラーとフレーバーの自由度があるため、様々なペアリングが考えられる。その代表格が、CFL 状態と 2SC 状態である。このペアリングの違いは、ニュートリノ放射過程に顕著な違いをもたらす。

本研究では、2SC カラー超伝導状態にあるクォーク物質とハドロン物質中の核子の超流動を考慮した中性子星のモデルを構築し、熱的進化のシミュレーションを行った。