会場 B

理論核物理, 宇宙線・宇宙物理領域

B-1 情報幾何を利用した 2 カラー QCD の相構造研究

福岡工大情工 [A], 佐賀大理工 [B] 柏浩司[A], 大島理樹 [B], 河野宏明 [B]

有限密度 QCD の相構造の解明は、強結合な量子多体系の理解において重要な課題である。本研究では、符号問題の存在しない 2 フレーバー 2 カラー QCD を対象とし、その有効模型である Nambu－-Jona-Lasinio 模型の平均場近似の下で、熱的混合状態に対する情報幾何学的解析を行った。

具体的には、Nambu－ Gor'kov 密度行列の Bogoliubov－ de Gennes 表現から Bures 計量および Quantum Fisher Information (QFI) を構成し、温度・化学ポテンシャル空間上でその幾何学的性質を調べた。その結果、QFI および計量体積密度はカラー超伝導相境界近傍で顕著な増大を示し、熱状態間の識別可能性が大きく変化することが分かった。一方、カイラルクロスオーバーでは比較的弱い応答しか現れず、BEC-BCS クロスオーバーに対応する明瞭な特徴は見られなかった。以上の結果は、情報幾何に基づく量子状態の識別可能性が、従来の秩序変数とは異なる観点から高密度 QCD 物質の相構造を特徴付ける指標となりうる可能性を示している。

B-2 QCD 物質における有効自由度の非減少性

佐賀大理工 [A], 福工大 [B] 河野宏明[A], 大島理樹 [A], 柏浩司 [B]

格子 **QCD** 計算によって、零化学ポテンシャルの場合は、温度の上昇に伴って、QCD 物質はハドロンからクォーク・グルーオン・プラズマ（**QGP**）へ連続的にクロスオーバー転移することが明らかになった。しかし、この転移現象の物理的な描像は必ずしも明確でない。低温では、格子 QCD で得られた状態方程式 (EOS) は、ハドロン共鳴ガス（**HRG**）模型によりうまく説明できる。しかし、高温になると、EOS に寄与するハドロン共鳴の種類が急速に増加し、EOS は発散傾向を示す。一方、格子 QCD では、高温で理想 QGP の結果を超える事はない。この事は、HRG の有効自由度は、高温において何らかの理由で抑制される必要がある事を意味する。 2 次元の共形場理論においては、系のスケールが大きくなると、系の有効自由度が小さくなる事が示されている（**c** 定理 [1]）。この事から、逆に、温度や化学ポテンシャルが増加したとき、系の有効自由度が減少することはないと推測される [2]。この研究では、HRG 模型等の現象論模型を用いて、QCD 物質において、系の有効自由度が上記の予測に合うかどうかを調べ、そこから逆に現象論模型の適用限界を探る [3]。

参考文献

[1] A. B. Zamolodchikov, JETP Lett. **43**, 730 (1986).
[2] R. Oshima, H. Kouno, M. Tachibana and K. Kashiwa, Phys. Rev. D **113**, 094023 (2026), arXiv:2601.16762.
[3] H. Kouno, R. Oshima and K. Kashiwa, arXiv:2603.02085.

B-3 Nonequilibrium Andreev transport at the QGP-2SC interface

佐賀大 [A], 香港大 [B], Jagiellonian 大 [C], 東京大 [D], 佐賀大 [E] 星野帆香[A], Tingyu Zhang[B], Mariusz Sadzikowski[C], 田島裕之 [D], 橘基 [E]

巨大な中性子星の内部には、通常相の QGP とカラー超伝導相の 2SC という、異なるクォーク物質が隣り合う「境界」が存在すると考えられる。本発表ではこの境界における物質の移動（輸送現象）に着目し、クォークが反射してホールに変わる「アンドレーエフ反射」等の現象を議論した。従来の BdG 法とは異なり、非平衡グリーン関数を用いた相対論的定式化を行い、エネルギー差や運動量によって電流がどのように変化するかを解明した。本発表は、香港大の Tingyu Zhang 氏、Jagiellonian 大の Mariusz Sadzikowski 氏、東京大の田島裕之氏、佐賀大の橘基氏との共同研究（arXiv:2606.30521[nucl-th]）に基づく。

B-4 パルス駆動オプトメカ系における古典時間結晶の振幅・位相ダイナミクス

九大理 [A] 原口慶久[A], 福澄諒太郎 [A], 山本一博 [A]

通常の空間的な結晶の類推として、周期的な構造を持ち、時間の並進対称性を破る状態として時間結晶が研究されている。これは、応答周期が駆動周期の整数倍となること（サブハーモニック性）や、摂動に対する安定性などにより特徴付けられる非平衡系であり、新物質相の開拓や量子センサへの応用などでも注目されている。　時間結晶は非平衡な量子多体系において提案されたが、その特徴を古典的に再現する研究も行われている。一つの実現方法として、ばね定数の周期的な変化により振動が成長しサブハーモニック性を持つパラメトリック発振がある。ここに非線形項の効果が加わることで、振幅の成長が飽和し安定な周期軌道が生じる。これをここでは古典時間結晶と呼ぶ。　本発表では、光学機械振動子系（オプトメカ系）を念頭に、周期的な短パルス駆動を受ける非線形振動子の運動方程式から出発し、古典時間結晶状態のダイナミクスと安定性を議論する。解析では、緩変化振幅近似と定数変化法を用いて、周期平均から振幅と位相の時間発展方程式を導出し、連続的な正弦波駆動との違いを明らかにする。特にパルス駆動では、時間平均による共振周波数のシフトに加え、パルス時刻の位相に依存した非線形結合が現れ、振幅と位相の定常点として飽和振幅が決定される。　さらに定常状態の周りで安定性解析を行う。系の状態は駆動の強さ、パルス時間、離調の条件により、有限振幅の定常状態と静止状態が共存する双安定性を示し、初期振幅と不安定解の大小関係から収束先を議論できる。これよりパルス駆動において安定なサブハーモニック軌道が維持されるパラメータ領域や系の量子的な取り扱いなど、今後の展望も議論する。

B-5 深層学習を用いた超新星ニュートリノシミュレー ションデータからの中性子星質量の推定

九大理 [A], 茨城高専 [B], 九大基幹 [C] 日隈祥吾[A], 原田了 [B], 中里健一郎 [C]

重力崩壊型超新星は、太陽の約 8 倍以上の質量をもつ大質量星が進化の最終段階で重力崩壊を起こすことによって発生する爆発現象であり、その中心には中性子星またはブラックホールが残される。この過程で放出される超新星ニュートリノの観測データには、超新星爆発のメカニズムや親星の構造、形成される中性子星などの情報が反映されると考えられる。数値シミュレーションでは、超新星モデルの違いに応じて中心天体への物質降着量が変化し、その結果として爆発後に残される中性子星質量に差異が生じることが示されている [1]。したがって、超新星ニュートリノ観測で得られるデータから中性子星の質量を推定できれば、超新星爆発のメカニズムや親星の構造を理解するための重要な手がかりとなる。Nakazato et al. (2013) [1] では、21 種類の超新星モデルについて、放出されるニュートリノのスペクトルが公開されている。これらのモデルは、親星の初期質量、金属量、衝撃波復活時間の組み合わせが互いに異なる。また、それぞれのモデルについて、形成される中性子星の質量と、重力崩壊開始時からコアバウンス後約 20 秒までの各時刻における、ニュートリノのフレーバーごとの粒子数スペクトルと光度スペクトルが求められている。本研究では、Nakazato et al. (2013) の超新星ニュートリノデータに基づき、深層学習により超新星モデルの分類器と中性子星質量の推定器を構成する。そのために、まず 21 種類の超新星モデルと 2 種類のニュートリノ質量階層を組み合わせた計 42 モデルについて、スーパーカミオカンデで期待される逆 β 崩壊、電子散乱、酸素原子核反応による模擬観測データを作成する。そして、各イベントの観測時刻、電子・陽電子のエネルギーおよび飛行方向を入力とする深層学習モデルを訓練し、計 42 モデルの分類と、中性子星質量の推定を行う。さらに、入力に用いる情報を変えたときの分類・推定精度の変化を調べ、超新星モデルの分類および中性子星質量の推定において、観測データ中のどの情報が重要であるかを検討する。

B-6 超新星背景ニュートリノ観測における理論モデル識別能力と観測条件依存性の評価

九州大学大学院 理学府 [A], 東北大学 理学研究科 [B], 九州大学 基幹教育院 [C] 高橋周大[A], 芦田洋輔 [B], 中里健一郎 [C]

太陽質量の約 8 − 10 倍以上の恒星は重力崩壊を起こし、重力崩壊型超新星としてニュートリノを放出する。過去に起こった超新星から放出されたニュートリノは超新星背景ニュートリノ（Diffuse Supernova Neutrino Background; DSNB）として観測できると考えられている。2026 年 6 月には、スーパーカミオカンデによる探索で 2.6 σ の DSNB の兆候が報告され、DSNB の発見への期待が高まっている。これまで観測データ解析によってフラックス上限を導出し、理論モデルに制限を与える研究が進められており、DSNB の観測・解析により宇宙における星形成の歴史や、ブラックホール形成を含む重力崩壊現象の多様性などの解明が期待されている。一方で、現実的な観測期間とバックグラウンド事象を考慮した条件のもとで、異なる理論モデルが予測するエネルギースペクトルをどの程度識別できるかは、十分に明らかになっていない。そこで本研究では、DSNB 理論モデルから予想されるニュートリノ信号に対し、水チェレンコフ型検出器および液体シンチレータ型検出器の両方を想定し、各検出器で観測されると期待されるエネルギースペクトルをシミュレーションにより構築する。さらに、現実的なバックグラウンド事象まで考慮したモンテカルロ計算を行い、unbinned maximum likelihood 解析を用いて各モデルの尤度を比較することで、異なる理論モデルの識別可能性を評価する。

B-7 暗黒時代 21cm 線で探る微細構造定数

日大文理 [A], 名古屋大学 [B], 佐賀大学 [C] 岡松郁弥[A], 吉浦伸太郎 [B], 高橋智 [C]

月面や月の周回軌道を用いた、暗黒時代の 21cm 線を観測する計画が国内外で進められている。中性水素の超微細分裂に由来する 21cm 線は、最初の天体が形成される以前の「宇宙の暗黒時代」を直接探ることのできる数少ない観測手段の一つであり、天体物理学過程の影響が小さいことから、宇宙論を検証する有力な観測量として注目されている。微細構造定数は電磁相互作用の強さを特徴付ける基礎物理定数であり、その時間変化の有無を検証することは、標準理論を超える物理を探る上で重要である。これまで、ビックバン元素合成、宇宙マイクロ波背景放射、クエーサー吸収線などを用いた検証が行われてきたが、宇宙の暗黒時代における制限はほとんど得られているない。本研究では、微細構造数が暗黒時代の 21cm 線グローバルシグナルに与える影響を計算する。さらに、前景放射及び観測ノイズを考慮した模擬観測に基づき、将来の暗黒時代の 21cm 線観測によって、微細構造定数をどの程度制限できるかを評価する。

B-8 複数場ストカスティックインフレーションにおける高次キュムラントと非ガウス性

佐賀大学 [A], 佐賀大学 [B], パリ高等師範学校 [C] 大嶋悠人[A], 高橋智 [B], 渡慶次孝気 [C]

宇宙初期には、宇宙空間が指数関数的に加速膨張するインフレーションが起きたと考えられている。宇宙マイクロ波背景放射の温度非等方性や宇宙の大規模構造は、インフレーション中に生成された量子揺らぎに起源を持つ。これらの揺らぎを記述する方法の一つに、非摂動論的かつ確率的な手法であるストカスティックインフレーションがある。この枠組みでは、インフラトン場を長波長モードと短波長モードに分離し、短波長モードの効果を確率的なノイズとして取り込むことで、長波長モードの時間発展をランジュバン方程式によって記述する。

本研究では、場空間が (O(d)) 対称性を持つ複数場インフレーション模型に焦点を当て、揺らぎの影響を受けるインフレーションの継続時間（e-fold 数）の統計的性質を調べる。特に、small-noise 展開を用いて、e-fold 数の平均、分散および高次キュムラントを任意の摂動次数で系統的に計算するための漸化式を導出する。

さらに、導出した漸化式を単項式ポテンシャルをはじめとするいくつかのポテンシャルに適用し、場の数 (d) に対する統計量の依存性を調べる。また、摂動展開の高次の振る舞いや収束性を解析することで、場の数 (d) に対して理論的な制限を与えられる可能性について議論する。加えて、曲率揺らぎのパワースペクトルや非ガウス性への応用についても考察する。

B-9 アクシオン暗黒物質における非線形相互作用によるデコヒーレンス

佐賀大学 [A] 正山礼士郎[A], 高橋智 [A]

アクシオンなどの非常に軽いダークマター（DM）は、粒子としての性質だけでなく、波としての性質も持っている。このような DM は、多数の粒子が同じ量子状態を占める場合、古典的な波として近似的に記述することができる。しかし、古典的な波として説明できる性質を観測しただけでは、DM が持つ量子力学特有の性質を確認したことにはならない。そのため、DM と検出器の相互作用によって生じる現象を調べ、古典的な波では説明できない量子効果が検出可能かどうかを明らかにする必要がある。本研究では、DM と検出器の相互作用によって生じるデコヒーレンスに着目し、デコヒーレンスの効果が DM のどのような量子的／古典的性質を明らかにできるか検討する。具体的には、DM と検出器の相互作用ハミルトニアンを用いて密度行列を摂動展開し、検出器の純度の変化を計算することで、DM の量子状態が検出器に与える影響を評価する。さらにアクシオン DM に加え、非線形な相互作用 DM モデルも考え，同様の計算を行う。 これらの結果を比較することで、相互作用の形式の違いがデコヒーレンスや量子効果の現れ方にどのような影響を及ぼすかを明らかにすることを目指す。

B-10 重力の量子性検証に向けた重力結合鏡の猫状態モデルと干渉計信号

九大理 [A], 時空量子連携研究機構 [B], 広大先進理工 [C] 村田毅明[A], 山本一博 [A,B], 松村央 [A,B], 西澤篤志 [C]

重力の量子的性質を低エネルギー実験で検証する手法として、重力相互作用による重力誘起量子もつれが注目されている。本研究では、重力相互作用する二つの量子的な鏡 A、B を考え、鏡 A に猫状態を生成する。このとき、鏡 B を光干渉計によって測定し、猫状態と対応する古典的混合状態の検出確率の差を解析する。特に、鏡の質量や固有振動数、猫状態の大きさに対する信号差の依存性を調べ、信号が顕著になる時間スケールと条件を明らかにする。また鏡 B の純度を評価することで、重力誘起量子もつれと干渉信号の関係を考察する。さらに、物質の位置の期待値を重力源とする Schr ö dinger − Newton 型半古典重力模型との比較を行い、特定の条件では古典的混合状態との信号差が消失することを示す。以上より、本模型における干渉計信号が重力の量子的性質を検証するための指標となる可能性を議論する。

B-11 系外惑星の高コントラスト撮像における画像処理手法の定量的評価

大分大学 [A] 武石琉之介[A], 小西美穂子 [A]

系外惑星の撮像では、強い恒星光に埋もれた微弱な惑星光を検出するため、観測画像の前処理と恒星光を抑制する画像処理を施す。従来、すばる望遠鏡の撮像装置 VAMPIRES では明るい恒星が観測されてきたが、本研究ではその約 100 分の 1 の明るさの恒星を対象に従来の前処理の適用性を検証した。おうし座 IQ 星の観測画像 203 枚を用い、星像の品質評価による画像選別と、画像処理に伴って発生する十字パターンの抑制を評価した。 画像選別では、全画像を使用する場合と、3 種類の星像評価指標それぞれで画像の 20、50、80 %を除外する計 10 条件を比較した。評価指標には、星像の先鋭さ、画素値の二乗和平方根による集中度、正規化分散による鮮明さを用いた。恒星の測光値を信号とする信号対雑音比で評価した結果、全画像を使用する条件が最適であった。 十字パターンとは、明るい 2 画素四方を中心として上下左右に明暗が広がる偽信号であり、画素間隔より細かい画像の位置調整に伴って発生した。抑制のため、特に画像間の位置合わせに注目し、①離散フーリエ変換による位相差、②星像の輝度重心、③最大輝度画素の位置を用いる 3 手法を評価した。十字パターンの個数、1 個あたりの広がり、中心の強度、全体強度の 4 指標を用いて、手法①と比べた改善率を求めた。その結果、画像間の位置合わせに手法③を用いた条件では個数が 81.0 以上より、本データでは全画像を用い、画像間の位置合わせは手法③を用いる条件が最適であった。今後は、従来の明るい恒星の前処理では問題にならなかった不良画素の影響を調べ、十字パターンの発生原因と抑制方法を検討する。

B-12 近赤外線偏光撮像を用いた原始惑星系円盤の非対称性解析

大分大学 [A] 坂井有希[A], 小西美穂子 [A]

原始惑星系円盤は、若い恒星の周囲に形成されるガスとダストからなる構造であり、形成された惑星と相互に作用をすることが考えられている。例えば、傾いた軌道を持つ惑星との重力相互作用によって、内側円盤が外側円盤に対して傾くことが数値シミュレーションによって示されている (Nealon et al. 2018)。この時、恒星から放射された光の一部が内側円盤に遮られ、外側円盤への光の照射が方位角によって異なるため、円盤輝度に方位角の非対称性があるように検出される。そこで本研究では、おうし座 DH 星に付随する原始惑星系円盤の方位角の輝度非対称の有無を確認し、内外円盤の傾きなどの構造を決定することで未検出の惑星の可能性を検証する。観測はヨーロッパ南天天文台の大型望遠鏡 VLT とすばる望遠鏡を用い、近赤外線の偏光撮像によって恒星光が円盤上層部のダストによって散乱された偏光強度を取得した。画像データセットに対して適切な画像処理を施した後、円盤の長軸・短軸方向の動径プロファイルを作成して半径依存性を確認することで、円盤散乱光の偏光強度の非対称の有無を調べた。その結果、VLT のデータでは有意な円盤散乱光からの非対称な偏光強度を得られたが、すばる望遠鏡のデータでは有意な非対称は得られなかった可能性が高い。この偏光強度の非対称が内側と外側円盤の異なる傾きによって生じたものかを検討するために、今後は、モンテカルロ法による輻射輸送計算を行う。内側・外側円盤の相対的な傾きや位置角、ダストの空間分布などを変え、観測された偏光強度分布を再現する円盤形状を制約する。これにより、非対称性の起源を検証するとともに、円盤内に未検出の惑星が存在する可能性について検討する。