
会場 E

素粒子論, 理論核物理, 宇宙線・宇宙物理 領域

E-6 格子 $U(1)$ ゲージ理論における分数トポロジカル電荷の定式化

九大理^A, 阪大理^B 阿部元一^A, 鈴木博^A, 宮川侑樹^A, 森川億人^B

近年、Gaiotto らにより、離散的な対称性と高次対称性の間に混合't Hooft アノマリーに基づいて低エネルギーの物理が議論されて以来、この方面の研究が盛んに進められている。本研究では、こうした議論を完全に正則化された枠組みで理解することを狙い、Lüscher の方法を一般化することで、 $U(1)/Z_q$ principal bundle に付随する分数トポロジカル電荷を compact $U(1)$ 格子ゲージ理論において定式化する。この格子上で定義される分数トポロジカル電荷は、 Z_q one-form gauge 不変であり、時間反転変換で符号を変えることがわかった。これより、格子理論のレベルで、電荷 q (偶数) の物質場を含む $U(1)$ ゲージ理論が、 $\theta = \pi$ において Z_q one-form gauge 対称性と時間反転対称性の間にある混合't Hooft アノマリーを持つことが示される。これは、 θ 項を含む $SU(N)$ ゲージ理論における、 $\theta = \pi$ での Z_N 1-form gauge 対称性と時間反転対称性の間での混合't Hooft アノマリーのアナロジーになっている。

E-9

超弦理論における真空崩壊とインスタントン周りの量子揺らぎ

九大基幹^A, 九大院理^B 大河内豊^A, 塚原壮平^B

統一理論の有力な候補と期待される弦理論には、背景時空のコンパクト化やフラックスの導入の仕方等により膨大なストリング真空が存在すると考えられている。この複雑な真空構造において、異なる真空間ではトンネル効果による遷移の存在が期待される。本研究では Type II B 超弦理論において、特異点を持つような多様体に Dp-ブレーンを巻き付けることで幾何学的に準安定状態を構成し、インスタントンを用いた WKB 近似によって崩壊率を計算した。この時のインスタントン解周りの 1-loop の量子揺らぎは、ゼロモードの寄与を表すモジュライの積分と、その他のモードの寄与から来る van-Vleck 行列式によって表現されるが、Dp-ブレーンの低エネルギー有効理論に代表されるようなノンカノニカルな理論では、後者を明示的に計算するのは困難であることが知られていた。この点について我々は、一般の Sturm-Liouville 演算子における van-Vleck 行列式を先行研究に基づいて導出した。更に、reference 行列式で商をとり正則化する際の既存の手続きを精密化することで、量子揺らぎの露わな表式を得ることに成功した。また、前者のモジュライの積分についても通常のカノニカルな理論とは異なる事情があることを見出した。本発表では以上 2 点を鑑みたノンカノニカルな理論における崩壊率計算の留意点について指摘する。

E-10

4 元電磁場と 4 元ヘルツベクトル

宮嶋学術財団^A 那須俊一郎^A

一般的には、マクスウェル方程式から、4 元ポテンシャルが導かれる。しかし、この論考では、4 元ポテンシャルの波動方程式からマクスウェル方程式が導かれる。

すなわち、まずクライン・ゴルドン方程式の導出と同じように、特殊相対論で粒子が従うエネルギー運動量の関係式（質量がゼロの場合）を、微分演算子で置き換え（量子化し）て得られる、4 元ポテンシャルの波動方程式を考えるとところから出発する。

日本文理大学の竹本義夫名誉教授は「行列ベクトル」とその積を使うことによって、4 元ポテンシャルの微分から 4 元電磁場が発生することを明らかにされた。すなわち、電磁場は、4 元ベクトル場であり、空間成分であるベクトルの電場、磁場の他に、時間成分として「スカラー電場」が存在するのである。

この論考では、4 元電磁場（スカラー電場・ベクトル電磁場）が展開される部分を A とし、4 元ヘルツベクトル（ヘルツスカラー・ヘルツベクトル）が展開される部分を B とすると、 $A \rightarrow B \rightarrow A$ というように方程式が循環することを説明したい。

- A-1 4 元ポテンシャルの波動方程式 = 4 元電流密度
- A-2 4 元ポテンシャルの微分 = 4 元電磁場
- A-3 4 元電磁場の微分 = 4 元電流密度・マクスウェル方程式
- A-4 4 元電磁場の波動方程式 = 4 元電流密度の微分
- B-1 4 元電流密度の波動方程式 = 4 元ポテンシャル
- B-2 4 元電流密度の微分 = 4 元ヘルツベクトル
- B-3 4 元ヘルツベクトルの微分 = 4 元ポテンシャル
- B-4 4 元ヘルツベクトルの波動方程式 = 4 元ポテンシャルの微分

E-11 量子色力学におけるパーシステントホモロジーの応用

佐賀大理工^A, 福工大^B, 出水中央高^C 河野宏明^A, 柏浩司^B, 開田丈寛^C

量子色力学 (QCD) の相図の探求は原子核素粒子物理学だけでなく、天体物理や宇宙論にかかわる重要な問題である。格子 QCD によって、クォーク化学ポテンシャルが小さい領域の QCD 相構造は解明されてきた。しかし、この領域では、クォーク・ハドロンの相転移は連続的なクロスオーバーであり、クォーク相とハドロンの相の区別は必ずしも明確でない。そこで我々は、近年物性物理学や化学の分野で相の区別方法として発展しているパーシステントホモロジーの手法を QCD へ応用する事を提唱し、まず QCD の現象論的なモデルに適用し、この方法が相構造解析に有用である事を示した [1,2]。ここでは、格子 QCD のシミュレーションにおける結果を示す。特に、 Z_3 対称化され、1 次転移を持つと考えられる Z_3 -QCD の結果を報告する [3,4]。

参考文献

- [1] T. Hirakida et al., Int. J. of Mod. Phys. A 35 2050049 (2020).
- [2] K. Kashiwa et al., Symmetry 2022, 14, 1783 (2022).
- [3] H. Kouno et al., J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 39 085010 (2012).
- [4] H. Kouno et al., "Z₃-QCD and persistent homology", 2021 Highlights (Theoretical) , Annual Report 2021, RCNP, Osaka Univ. (2022).

E-12 虚数化学ポテンシャル領域における QCD 有効モデルのパーシステントホモロジー解析

福岡工業大学^A 安徳勇知^A, 柏浩司^A

本発表では、虚数化学ポテンシャル領域における QCD 有効モデルのパーシステントホモロジー解析について説明する。具体的には、QCD 有効モデルとして QCD-like ポッツモデルを用い、虚数化学ポテンシャル領域における非閉じ込め相転移の振る舞いを調べた。虚数化学ポテンシャル領域では、実数化学ポテンシャル領域で生じる符号問題が現れないことが知られており、また実数化学ポテンシャルと虚数化学ポテンシャルには密接な関係があり、重要な領域である。本研究では、空間的なトポロジーな観点から QCD-like ポッツモデルの非閉じ込め相転移の解析を行った。解析は、孔, 空隙, 連結成分に注目して行うパーシステントホモロジーに基づいて行った。

E-13

メトリック・パラティニ形式における非最小複数場インフレーションの解析

Yonsei University^A, Tongji University^B, 佐賀大学^C Sang Chul Hyun^A, Jinsu Kim^B, 兒玉 樹^C,
Seong Chan Park^A, 高橋 智^C

近年、Planck や BICEP/Keck などの観測により、インフレーションモデルは厳しく制限されている。特に単一場の最小結合インフレーションモデルの多くは排除されている。そこで重力と非最小結合を持つスカラー場を導入することで、排除されていたインフレーションモデルを再び観測と整合させる試みは多く行われている。

特にジョルダンフレームにおけるポテンシャルと非最小結合の関数の組み合わせがアトラクタータイプであると観測と整合することが知られている。主な例としてはヒッグスインフレーションが挙げられる。

多くの高エネルギーの理論では複数のスカラー場が現れうる。本講演では、複数場の効果を非最小結合インフレーションモデルに組み込んだ時に、観測量に対する予言がどのような影響を受けるかを議論する。さらに重力理論としてメトリック形式とパラティニ形式の両方を考慮したときに、観測量の予言にどのような差が現れるかも議論する。

E-14

ハッブル定数問題と原始密度揺らぎの性質

佐賀大学^A 岡松郁弥^A, 高橋智^A

近年の観測により、ハッブル定数 H_0 における間接測定と直接測定の不一致が強く示唆されており、宇宙論において深刻な問題の1つとなっている。これを「ハッブル定数問題 (H_0 問題)」と呼び、様々な議論がなされている。間接測定の例として、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測があり、Planck 衛星のデータより $H_0 = 67.72 \pm 0.40 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ (A&A 641, A6 (2020)) と得られている。一方、直接測定の SH0ES Collaboration (Riess et al, Astrophys. J. Lett., 934 (2022)) では、 $H_0 = 73.04 \pm 1.04 \text{ km s}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ と測定されており、これらの間には、 5σ 程度の tension が存在する。

現在、 H_0 問題を解決するために様々なモデルが提案されているが、そのようなモデルでは、 H_0 以外の宇宙論パラメータも影響を受ける。本講演では、その中でも原始パワースペクトルのスペクトル指数 n_s に対する影響を議論する。 H_0 問題が解決することが示唆されている Early Dark Energy (EDE) モデルでは、 $n_s \simeq 0.98$ となり、スペクトルの傾きがスケール不変の傾きに近づくことが示唆されている。一方、電子質量が時間変化するようなモデルでは、標準 Λ CDM モデルの場合と同様な値が得られる。本研究では、どのようなモデルが n_s に影響を与えるか、様々なモデルを例に議論する。

E-15

ビッグバン元素合成時期における早期暗黒エネルギー：軽元素観測との整合性とハッブル定数問題

佐賀大理工^A 山下青空^A, 高橋智^A

近年の観測から、直接測定と間接測定によって測定されるハッブル定数の値が一致しないことが示唆されている。これはハッブル定数問題と呼ばれている。このハッブル定数問題を解決するために、 Λ CDM モデルの様々な拡張が試みられているが、これらのモデルの多くにおいては、宇宙背景放射の観測から制限されるバリオン量が影響を受けてしまう。これはビッグバン元素合成における重要なパラメータを変えることになり、ヘリウム残存量の予言に大きな影響を及ぼす。

一方、EMPRESS (Matsumoto et al.2022) の観測により得られた最新のヘリウム残存量は $Y_p = 0.2379_{-0.0030}^{+0.0031}$ となっており、従来の観測に比べて小さな値となることが示唆されている。この EMPRESS の結果を説明するには、ニュートリノ有効世代数、電子ニュートリノの化学ポテンシャルが標準的な値から外れていなければならないことが指摘されている (Matsumoto et al.2022)。

本研究では、ビッグバン元素合成期に早期暗黒エネルギーが存在することを仮定して解析を行った。ここで考える早期暗黒エネルギーとは、宇宙初期に正または負の宇宙定数として振る舞い、ビッグバン元素合成のある時期からそのエネルギー密度が減衰していくものである。解析の結果、正負いずれのモデルも標準的なパラメータからのずれを改善できることがわかった。本講演ではこの結果について議論する。

E-16

重力レンズパワースペクトルによる温かい暗黒物質の制限

近畿大学^A, 佐賀大学^B, 東京工業大学^C 井上開輝^A, 篠原拓見^B, 須山輝明^C, 高橋智^B

標準的な冷たい暗黒物質 (CDM) モデルはおよそ 1Mpc 以上の大スケールの宇宙構造をよく記述するが、一方で小スケールについては観測との不一致問題を抱えている。その問題を解決するモデルとして、小スケールの構造形成を抑制する「温かい暗黒物質 (WDM) モデル」が考えられている。本研究では四重像を持つ重力レンズクエーサーのサブミリ波観測によって得られた重力レンズパワースペクトルの観測値 (Inoue+21, arXiv:2109.01168) を用いて、WDM モデルに課される制限を調べた。具体的には、WDM モデルにおけるレンズ像の位置シフトのパワースペクトルを観測値と比較することにより、WDM の質量、および、WDM の全暗黒物質に占める割合に対する制限が得られる。本講演では、その結果について報告する。