
会場 E

素粒子論, 宇宙線・宇宙物理領域

E-1 格子正則化された2次元コンパクトスカラー理論における磁氣的演算子の定式化

九大理^A, 阪大理^B, YITP^C 阿部元一^A, 森川億人^B, 小野田壮真^A, 鈴木博^A, 谷崎佑弥^C

格子上で well-defined なトポロジカル電荷を得るには場の配位が admissibility 条件を満たしていることが不可欠であるが、この条件は同時に磁氣的演算子の存在を禁止してしまう。この講演では格子上で定義された2次元コンパクトスカラー理論において前述の困難を回避し、磁氣的演算子を定式化する方法について述べる。また、その定式化のもとで電氣的対称性と磁氣的対称性に付随する 't Hooft anomaly や Witten 効果を格子上で再現する。また、4次元の格子ゲージ理論へ今回の方法の拡張についても言及する。

E-2

Nonlinearly Charged Brane Shell as Over-extremal Object

九大院理^A, 九大基幹^B, 九大共創^C 塚原壮平^A, 大河内豊^{A,B,C}

弱重力予想によると、重力と結合した低エネルギー有効理論が量子重力理論と無矛盾であるには、少なくとも1つ over-extremal な物体が宇宙に存在しなければならない。弦理論の枠組みでそのようなコンパクト物体を構成し安定的に存在させられるかは非自明であるが、近年 Danielsson らによって、Freed-Witten 効果で帯電した brane shell のセットアップが提案された。本講演では、非線形に帯電した brane shell のセットアップを新たに提示する。加えて、重力の寄与によって shell の半径が安定化されるメカニズムについても議論する。

E-3

Distributions of Three Generation Models in Type IIB Chiral Flux Vacua

九州大学^A, 総合研究大学院大学^B 甲斐貴文^A, 石黒奎弥^B, 岡田寛^A, 大塚啓^A

本講演では、MSSM-like もしくは Pati-Salam ゲージ理論を導く 4次元真空を調べることで得られる 3世代模型の分布について紹介する。D-branes の tadpole cancellation conditions を通して、磁化された D-branes 上の background fluxes によって決まるフェルミオンの世代数とモジュライ場を安定化させる 3-form fluxes が関係づいている。モジュライ場が安定化された真空では、tadpole cancellation conditions によりフェルミオンの世代数が小さい値に制限され、Z3 対称性を持つ真空に分布がピークを持つことを明らかにした。

E-10 安定な擬南部ゴールドストーン暗黒物質の起源

東理大理工^A, DESY^B, 九大理^C 阿部智大^A, 濱田佑^B, 津村浩二^C

さまざまな観測から暗黒物質の存在は疑いようのないものとなっており、いくらかの性質が明らかになっている。一方で暗黒物質の正体は依然として不明であり、幅広い質量領域の粒子がその候補となり得る。現在、宇宙に残っている暗黒物質を宇宙の熱史の中で自然に実現できる WIMP はとても魅力的な暗黒物質候補であるが、近年の直接検出実験により自然なパラメタ領域の大部分が排除されてきている。擬南部ゴールドストーン暗黒物質は WIMP 暗黒物質にさらに特別な性質を加えたもので、直接検出実験の制限を回避することができる。一方、そのような特別な性質がどのようにして実現されたのかという疑問が残る。この問題を解決するアイデアはこれまでに複数提案されてきている。U(1)_{B-L}ゲージ対称性にもとづくモデルでは、特別な性質の起源は説明されたが、暗黒物質が不安定となることが知られている。本講演では安定な暗黒物質を実現する入れ替え対称性を持つ U(1) ゲージ対称性にもとづく新モデルを紹介する。

E-11 Relation between higher-dimensional gauge theories and gravitational waves from first-order phase transitions

九州大学^A, 金沢大学^B 廣瀬拓哉^A, 澁谷紘人^B

高次元ゲージ理論では、細谷機構と呼ばれるゲージ対称性の自発的破れを引き起こす機構が知られている。この対称性の自発的破れが潜熱を伴う 1 次相転移だった場合、相転移によって重力波が誘発されることが知られており、将来実験によって観測される可能性がある。本講演では、高次元ゲージ理論と 1 次相転移由来の重力波の関係性について議論する。特に高次元理論に特有のコンパクトスケールに着目しながら、重力波のスペクトルとの関係性を数値計算の結果を通して示す。本講演は arXiv:2303.14192 [hep-ph] に基づく。

E-12 重力波の円偏光とアクシオンドメインウォール

九大理^A, 神戸大理^B 谷口彰^A, 菅野優美^A, 早田次郎^B

近年、重力波天文学の発展が著しく、重力波観測によって新しい物理が見いだされることが期待されている。そこで、重力波観測を用いて、アクシオンについて新しい発見を得るための研究を行った。超弦理論はアクシオンの存在を予言し、アクシオンは暗黒物質の候補の1つでもある。このような背景から、アクシオンについての理解を深めることは、宇宙物理学や素粒子物理学における重要課題である。アクシオンは Chern-Simons (CS) 項を通して重力と結合し、CS 項は重力波に円偏光を生じさせる。したがって、重力波の円偏光の観測は、アクシオンや CS 重力について新たな発見を得るために有意義である。先行研究では、一様なアクシオンダークマター背景を伝搬する重力波に生じる円偏光についての研究が行われてきた。しかし、この場合に生じる円偏光は、観測可能な大きさにならないことが判明している。そこで、私たちは異なる背景を考え、アクシオンドメインウォールを通過する重力波に生じる円偏光について調べた。その結果、アクシオンと CS 重力の結合定数およびドメインウォールのエネルギーで決まる特定の周波数を持つ重力波に、観測可能な大きさの円偏光が生じることが分かった。さらに、現在の宇宙にアクシオンドメインウォールが残存している場合、円偏光の観測によってアクシオンと CS 重力の結合定数に制限を与える新しい方法を構築することに成功した。本講演では、この研究成果を紹介する。

E-13 Neural Network を用いた真空の相転移による重力波の解析

佐賀大学^A 大津佑太^A, 船久保公一^A

重力波の生成源は大きく分けて2種類あり、パルサーやブラックホールなどの天体起源のもの、インフレーションや真空の相転移などを起源とするものである。2015年の直接観測によって天体起源の重力波が検出されたが、後者については未だ探索されている段階であり、それらは宇宙初期の情報を持つと考えられるため重要視されている。真空の相転移では、宇宙膨張に伴い、温度が冷えていく過程でスカラー場の偽真空が真の真空へ崩壊する。その際に生じた複数のバブルは潜熱によって膨張し、互いに衝突することによって重力波が生成される。

一方、近年 Deep Learning 技術を用いて微分方程式の数値解を導く手段として PINN (Physics-informed neural network) が注目されている。従来の数値計算では、微分方程式を離散化してグリッドに分割し膨大な数の繰り返し計算が必要であったが、PINN では Neural Network を用いて多数のパラメータを含む関数を生成し、それが方程式の解に近づくように学習させるため、計算の高速化を期待することができる。また、従来の方法では方程式の複雑さに応じてコードも複雑になる一方、PINN では方程式の離散化が不必要であるためコードの簡素化を期待できる。

本研究では、真空の相転移を起源とする重力波の生成メカニズムについて議論する。また、重力波エネルギーの強度の解析に上記の Neural Network を応用し、先行研究との比較を行う。

E-14

一般化された早期暗黒エネルギーモデルにおける背景重力波生成と NANOGrav 観測

佐賀大学^A 兒玉樹^A, 篠原拓見^A, 高橋智^A

宇宙論ではあらゆる時期においてスカラー場は重要な役割を果たす。たとえば初期宇宙の加速膨張「インフレーション」を担うインフラトンや、後期宇宙の加速膨張を記述するダークエネルギーの候補の1つであるクインテッセンスがあり、それらは幅広く調べられている。最近では、ハッブル定数問題を解決する文脈において早期暗黒エネルギーと呼ばれるスカラー場が導入されるが、その解決のためにはモデルパラメータを微調整しなければならない。しかしながら、アприオリにはそれらモデルパラメータを微調整する必要はない。我々は、一般のパラメータ空間で早期暗黒エネルギーを考え、そのような成分を一般化早期暗黒エネルギーと呼ぶことにする。

我々の研究では一般化早期暗黒エネルギーの広いパラメータ空間を考えた時、それが宇宙論的にどのような影響を及ぼすのかを調べた。その1つに重力波背景放射の増幅がある。まず、重力波背景放射が大きく増幅され将来観測で検証可能となるパラメータ空間が存在することを示す。また、最近発表された NANOGrav 観測結果を一般化早期暗黒エネルギーモデルで説明可能か議論する。

E-15

超大質量ブラックホール候補としての原始ブラックホールの検証

佐賀大学^A, 国立天文台^B, 愛媛大学^C, 東京工業大学^D 篠原拓見^A, Wanqiu He^B, 松岡良樹^C, 長尾透^C, 須山輝明^D, 高橋智^A

宇宙の極初期に形成され得る原始ブラックホール (PBH) は、高赤方偏移 ($z \sim 6$) で観測されている超大質量ブラックホール (SMBH) の候補として考えられている。SMBH の質量は太陽質量のおよそ1億倍から100億倍であると測定されているが、そのような質量を持つ PBH は、その起源をガウス分布に従う原始曲率ゆらぎで考える場合、宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル歪みの未検出により禁止される。ただし、PBH 生成の確率が高くなる領域が大きくなるような非ガウス分布を持つ曲率ゆらぎ起源の PBH についてはその限りではない。そのような曲率ゆらぎはインフレーション中のスペクテータ場のゆらぎによって生成することができ、この場合では PBH がよりクラスターを形成すると予想される。先行研究では、そのクラスタリングの度合いを角度相関関数によって定量化し評価した。本講演では、上述の先行研究に基づく角度相関関数の理論予言値を SHELLQs プロジェクトで観測されたクエーサー (SMBH) のデータから見積もった値と比較することで、高赤方偏移 SMBH の説明が可能な PBH シナリオを強く制限できることを示す。

E-16 暗黒時代の 21cm シグナルで探るダークマターの性質

佐賀大学^A 菅真紀子^A, 岡松郁弥^A, 高橋智^A

宇宙の晴れ上がりの後、天体が形成されるまでの時期は宇宙暗黒時代と呼ばれ、この時期の宇宙進化は理論的には予言されているが、未だに観測されていない。この時期に宇宙の物質の大半を占める中性水素から、超微細構造に伴う遷移により波長約 21cm 線の吸収線や輝線を発生する。この 21cm 線のシグナルは暗黒時代を探るほぼ唯一の手段と考えられており、近年、暗黒時代の 21cm 線シグナルを観測するための計画が多く議論されている。本研究では、そのシグナルを用いてダークマターの性質を探る。特に、ダークマターの対消滅や崩壊により発生したエネルギーが 21cm 線シグナルにどのように影響を与えるかを調べ、将来観測における検証可能性についても議論する。

E-17 宇宙の暗黒時代における 21cm 線グローバルシグナルを用いた新しい観測量

佐賀大学^A, 清華大学^B, 岡山理科大学^C, 国立天文台^D 岡松郁弥^A, 箕田鉄兵^B, 高橋智^A, 山内大介^C, 吉浦伸太郎^D

中性水素の超微細遷移により放射されるスペクトル線を 21cm 線といい、宇宙の様々な時代を探索する方法として、多くの研究が行われている。宇宙の暗黒時代の 21cm 線の観測は、地球の電離層の影響により、地上からの観測は困難であるが、近年、暗黒時代の 21cm 線を観測できる場所の候補として月面が検討・議論されている。宇宙の暗黒時代は、最初の星が誕生する以前の時代であり、天体物理学的な不定性がないため、この時代の 21cm 線の観測量は宇宙論でのみ決定される。したがって、この時代の 21cm 線の観測は宇宙論に関する有益な情報が得られることが期待され、21cm 線の理論的な予測を行うことは重要である。本研究では、宇宙の暗黒時代の 21cm 線グローバルシグナルに焦点を当て、新しい観測量を提案する。まず、 Λ CDM モデルのグローバルシグナルにおける宇宙論パラメータ依存性を調べ、 Λ CDM モデルにおいて周波数に対する輝度温度の関数形の形状が宇宙論的パラメータにほぼ依存しないことを示す。この事実に基づいて、異なる 2つの周波数の輝度温度の比を取ることで、新しい観測量「暗黒時代整合性比」を提案する。この観測量は Λ CDM モデルにおいて一定の値を取る一方、 Λ CDM モデルを超えるモデルでは異なる値をとる。いくつかの非標準的なモデルを例に、この観測量の有用性について議論する。

E-18

宇宙の大規模構造における尖度パラメタの無矛盾関係と重力理論 (2)

佐賀大^A, KEKB^B, 総研大^C, 岡山理大^D 山下青空^A, 松原隆彦^{B,C}, 高橋智^A, 山内大介^D

ガウス分布からのずれを表す指標の量として、歪度パラメタや尖度パラメタが挙げられる。密度揺らぎの歪度・尖度パラメタは、空間微分の高次まで考慮することで、複数定義することができる。これらは重力理論に対する条件として書き下すことが出来る。これが指摘されており、特に観測量の間に満たすべき無矛盾関係を導くことが出来る。本講演では特に尖度パラメタの無矛盾関係について議論する。

E-19

ポアンカレ対称性を持つ量子マスター方程式の理論

九大理^A 柏木海翔^A, 松村央^A

ポアンカレ対称性の下でどのような Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad 形式のマルコフ型量子マスター方程式が得られるか調べた。マルコフ型量子マスター方程式は開放量子系のマルコフ時間発展を記述する方程式であり、その解は量子力学的半群によって与えられる。その半群の生成子に対してポアンカレ対称性を課し、ポアンカレ群のユニタリ表現を用いることで、スピン 0 有質量粒子が従うポアンカレ対称なマルコフ型量子マスター方程式を導出した。またこの粒子を励起モードにもつ場の時間発展が、散逸項のある Klein-Gordon 方程式で表されることを明らかにした。さらに今回導出した量子マスター方程式の下で、空間的に離れた 2 つの局所演算子が交換することも示した。これは本研究で導いたマスター方程式の理論において、微視的因果律が満たされていることを意味する。

E-20

二時刻レゲットガーグ不等式の破れ1～調和振動子への応用～

九州大学^A, 先端素粒子物理研究センター^B, 高エネルギー加速器研究機構^C, 総合研究大学院大学^D, BRIN^E, Universitas Indonesia^F 島山広聖^A, 三木大輔^A, 谷将樹^A, 山崎優樹^A, 磯暁^{C,D}, Apriadi Salim Adam^E, Ar Rohim^F, 山本一博^{A,B,C}

量子力学の登場以来、ミクロな世界のルールを記述する量子力学の世界と我々の日常のサイズを支配するマクロな世界の境界があるのではないかとということが長い間未解決でした。理論的には量子力学は物体の大きさによらず成立するはずですが、実際の我々の日常は古典力学が良い近似で成立しており、量子的性質を感じることはありません。量子力学は興味深い特徴が多くありますが、今回注目するのは非実在性という特徴です。私達は様々な量子状態にある調和振動子に対して二時刻レゲットガーグ不等式の破れについて研究しました。レゲットガーグ不等式とは系の実在性の是非を判定する方法の一つであり、不等式の破れを導くことで系の非実在性を証明することができます。二時刻レゲットガーグ不等式は擬確率分布関数と比例関係にあり、ここでは特に調和振動子の位置演算子に対する二分変数に関する二時刻擬確率分布関数に着目しています。これらの計算はスケールフリーで計算しているので、巨視的物体の物理状態が量子的になっているかを検証する実験の理論模型になっていることが期待されます。

最初に先行論文で示された擬確率分布関数の公式を拡張し、スクイーズドコヒーレント状態やサーマルスクイーズドコヒーレント状態などの様々な量子状態の調和振動子における二時刻レゲットガーグ不等式の破れを示し、その振る舞いを調べました。次にコヒーレント状態における擬確率分布関数とスクイーズドコヒーレント状態における擬確率分布関数の対応関係を導きました。

またレゲットガーグ不等式がどのような場合に破れるのかを直感的方法で説明しています。

E-21

二時刻レゲットガーグ不等式の破れ2～場の理論への応用～

九大理^A 谷将樹^A, 島山広聖^A, 三木大輔^A, 山崎優樹^A, 山本一博^A

古典力学は、測定の有無にかかわらず物理量は一意に確定しているという実在性を前提として成立している。一方で量子力学においては、測定するまで物理量は確定しておらずこの実在性が成り立っていない。レゲットガーグ不等式は、量子力学における実在性の破れを検証する道具として用いられており、例えば超伝導磁束量子ビットといった巨視的量子系で実在性の破れが実証されている。重力の量子性を検証する方法の一つとしてもレゲットガーグ不等式を用いた研究がなされている。また、調和振動子に対するレゲットガーグ不等式による実在性の破れに関する研究も報告されている [1]。私達は、連続変数に対して擬確率関数の新しい計算手法の定式化 [1] を用いて場の量子性へと応用した。その結果コヒーレント状態とスクイーズドコヒーレント状態でレゲットガーグ不等式を破ることが分かった。また期待値とレゲットガーグ不等式との対応を考えることで、レゲットガーグ不等式を強く破る状況についての傾向を考察した。本講演ではこの考察についても議論する。

[1]K. Hatakeyama, D. Miki, M. Tani, Y. Yamasaki, S. Iso, A. S. Adam, Ar Rohim, K. Yamamoto, arXiv:2310.16471