

---

## 会場 B

### 素粒子論, 宇宙線・宇宙物理領域, 領域 1

---

#### **B-1**      Supersymmetry restoration in non-supersymmetric heterotic string compactifications

九州大学 <sup>A</sup> 古賀勇一<sup>A</sup>

コンパクト化された低次元非超対称ヘテロ弦理論には宇宙定数が極めて大きくなるという問題があるが、超対称性が漸近的に回復するモジュライ配位ではその値が指数関数的に抑制される。我々は非超対称ヘテロ弦のサークルコンパクト化と超対称ヘテロ弦の Scherk-Schwarz コンパクト化の各場合において、超対称性が回復するモジュライ配位を網羅的に特定した。また超対称性が漸近的に回復するモジュライ配位での宇宙定数についてや、超対称弦と非超対称弦の双対性についても議論したい。

## B-5

### Yukawa textures from non-invertible symmetries

九大理<sup>A</sup>, 北大理<sup>B</sup>, 新潟大理<sup>C</sup> 大塚啓<sup>A</sup>, 小林達夫<sup>B</sup>, 谷本盛光<sup>C</sup>

Phenomenological aspects of non-invertible symmetries, in particular the flavor structure of quarks and leptons, are studied. We start with a ZM discrete symmetry and gauge Z2 so as to obtain a non-invertible symmetry. We study which Yukawa textures can be derived from the non-invertible symmetries. Various textures can be realized and some of them cannot be realized by a conventional symmetry. For example, the nearest neighbor interaction texture as well as other interesting textures of quarks and leptons are obtained.

## B-6

### Novel lattice definition of 't Hooft line and its statistics

九州大学<sup>A</sup> 小野田壮真<sup>A</sup>

compact lattice gauge theories の文脈において、トポロジカルな性質を導入するためには、格子場の配位が十分に滑らかであることを仮定せねばならない。この仮定は、“admissibility condition” と呼ばれている。しかし、この admissibility condition は、Bianchi 恒等式を常に保証するため、't Hooft line のような磁氣的物体の存在を禁止する条件だと言うこともできる。最近、Abe.et.al では、2D compact scalar theory において、格子に「穴」を開けることにより、admissibility condition と矛盾しないまま磁氣的物体を定義する手法が提案された。本講演では、この“Excision method” を 4D Maxwell theory へ拡張し、格子上の't Hooft line に対する新しい定義を提案する。更に、この定義を用いて、Witten effect の格子対応物を導出する。加えて、't Hooft line を格子系の境界だと解釈する“Excision method” が、dyon の統計性に対して明快かつ示唆的な描像を与えることを説明する。

## B-13 Probing low reheating temperature with the Dark Ages 21cm line

佐賀大学<sup>A</sup>, Sungkyunkwan University<sup>B</sup> 岡松郁弥<sup>A</sup>, Ki-Young Choi<sup>B</sup>, 高橋智<sup>A</sup>

中性水素の 21cm 線は、中性水素原子が放射・吸収する、波長が 21cm のスペクトル線である。中性水素は宇宙の幅広い時代に存在しており、21cm 線は、宇宙の暗黒時代および再電離期などにおいて重要な観測量である。近年、月面や月の衛星軌道上における暗黒時代の 21cm 線の観測計画 (FAR SIDE, DAPPER, NCLE, TREED, TUKUYOMI など) がよく議論されている。本研究では、Ultra Compact mini halo (UCMH) が暗黒時代の 21cm 線に与える影響について調べる。また、インフレーション後の放射優勢期を経た後、振動するスカラー場のエネルギー密度が卓越する時期 (早期物質優勢期) が存在するシナリオを考慮する。そのスカラー場の崩壊により引き起こされる再加熱は、通常のインフレーション後の再加熱よりも低い温度で起こる。早期物質優勢期の間、密度揺らぎは成長するが、放射優勢期では成長しない。そのため、早期物質優勢期の長さが UCMH の存在量に影響を与える。UCMH の存在量が増加することによって、21cm 線への影響が大きくなるため、低い再加熱温度をプローブできる。我々は、暗黒時代の 21cm 線グローバルシグナルを用いた UCMH の存在量についての制限を通じて、低い再加熱温度に対する制限について議論する。

## B-14 速度場無矛盾関係の Monkey bias への適用

佐賀大学<sup>A</sup>, お茶の水女子大学<sup>B</sup> 山下青空<sup>A</sup>, 藤田智弘<sup>B</sup>, 高橋智<sup>A</sup>

銀河の密度ゆらぎ (トレーサー) は、バイアスモデルによって記述される。重力理論を調べるに当たり、バイアスパラメタの間でどのような関係が成り立つのかを調べることは意味がある。本講演では Monkey bias の方法 [arXiv:2003.10114] 及び速度場の無矛盾関係 [arXiv:1606.03708] を導入することでバイアスパラメタ同士の関係を議論する。

## B-15

### 鉱物試料を用いた過去の超新星由来のニュートリノ探索

九大院理<sup>A</sup>, 九大基幹<sup>B</sup> 山崎真尋<sup>A</sup>, 中里健一郎<sup>A,B</sup>

宇宙に存在する星のうち、太陽質量の 8 倍以上の質量をもつ星は、一生の最後に重力崩壊して超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こし、ニュートリノを介してその重力エネルギーを宇宙空間に解放する。超新星から飛来するニュートリノを検出するため、現在、日本のスーパーカミオカンデをはじめとする大型の観測器が世界中で運用されている。一方、そのような大型の検出器ではなく、地球上に存在する鉱物試料を用いてニュートリノを検出する試みが Baum et al. (2020) によって提案されている [1]。過去の時代に鉱物試料に向かってニュートリノが飛来すると、ニュートリノは鉱物試料内部の原子核と相互作用し、反跳した原子核は飛跡を残す。現在まで保存されたこの飛跡を観測できれば、過去の地球にニュートリノが飛んできた証拠になり得る。このように、ニュートリノ検出器として用いる鉱物試料を Paleodetector と呼ぶ。Baum et al. (2020) は、銀河系内で過去にどのくらいの頻度で超新星爆発が発生していれば、Paleodetector でニュートリノの検出ができるかを評価した。一方、ニュートリノの発生源として、超新星爆発に失敗してブラックホールを形成する天体もあると考えられている。そこで本研究では、このような天体が Paleodetector によるニュートリノ検出に与える影響を評価した。その結果、ブラックホール形成の寄与を考慮することにより Paleodetector でニュートリノの検出可能性が向上することがわかった。

[1] S. Baum, T. D. P. Edwards, B. J. Kavanagh, P. Stengel, A. K. Drukier, K. Freese, M. Gorski, and C. Weniger 2020, Phys. Rev. D, 101, 103017

## B-16

### リュードベリ原子を用いた高周波重力波の観測方法の構築

九大理<sup>A</sup>, 神戸大理<sup>B</sup> 谷口彰<sup>A</sup>, 菅野優美<sup>A</sup>, 早田次郎<sup>B</sup>

高周波重力波は、様々な天体や初期宇宙に関する豊富な情報を含んでいると期待されているが、高周波重力波の観測方法は未だ確立されていない。このような背景から、私たちは、リュードベリ原子を用いた高周波重力波検出器を提案する。リュードベリ原子は、電磁誘導透明化 (EIT) システムとして使用されると、電場を高感度で検出することができる。近年、このシステムをさらに発展させたスーパーヘテロダイン法が考案され、電場の検出感度が大幅に向上した。そこで、リュードベリ原子を用いたスーパーヘテロダイン法が、一定の磁場中に重力波が到達した際に発生する微弱な電場を検出できるかどうかを検討した。本講演では、この重力波検出器の詳細と感度について説明する。

## B-17 重力波が巨視的物体間の量子もつれに及ぼす影響

九大理<sup>A</sup> 福澄諒太郎<sup>A</sup>, 三木大輔<sup>A</sup>, 山本一博<sup>A</sup>

現代物理学を支える2本の柱として、ミクロな物体が従う力学である量子力学と、重力を記述する一般相対性理論がそれぞれ挙げられる。しかし現在、量子状態が実現できている領域 ( $10^{-5}g$  程度) と重力の測定がなされている領域 ( $10^{-1}g$  程度) がそれぞれ重なっていないため、量子力学に従う系がどのような重力を作るのか、つまり量子力学と一般相対性理論がどのように関連しているのか、という問題は全く検証されていない。このような重力の量子的な性質を実験的に探るためには、より大きい質量をもった物体を量子状態にする必要がある。そこで近年着目されてきているのが光学機械振動子系である。光学機械振動子系とは、調和振動子としての鏡と固定された鏡からなる光共振器系であり、光との結合を利用することで鏡の重心運動の量子状態を実現することができる。また、レーザー干渉計を用いた重力波観測におけるノイズの低減に応用されており、*LIGO* のようなレーザー干渉計にこれを用いることで、 $40kg$  程度の4つの鏡が作る差動振動が量子的な基底状態に近づいていることが報告されている [1]。本発表では [2][3] のレビューを通して相互作用を含めて重力波と検出器を量子的に取り扱う枠組みを導出し、重力波が光学機械振動子系での測定に及ぼす影響について議論する。

Reference [1] C. Whittle et al., *Science* 372, 1333 (2021) [2] Belinda Pang and Yanbei Chen, *Phys. Rev. D* 98, 124006 (2018) [3] Daisuke Miki et al., *Phys. Rev. A* 107, 032410 (2023) [4] Jordy G. Santiago-Condori et al., arXiv:2008.10848v5 (2023)

## B-18 オプトメカ系における重力誘起エンタングルメントのフーリエ解析

九大理<sup>A</sup> 畠山広聖<sup>A</sup>, 三木大輔<sup>A</sup>, 山本一博<sup>A</sup>

量子力学と一般相対性理論を融合的に理解できる量子重力理論は多くの候補となる理論が提唱されているが、未完成である。これらの理論の実証には現代科学では到底不可能なエネルギースケールが必要で、実験的検証はなされていない。この問題の別の角度からのアプローチとして、ファインマンは重力の量子的な重ね合わせについての思考実験を行った。彼は量子的重ね合わせ状態の有質量物体が作る、重力場について考察を行った。ファインマンの思考実験の直接検証は難しいとされていたが、近年の Bose 等、および Marletto と Vedral による提案は重ね合わせの重力が作るエンタングルメントを実験的に検証する方法であり、ファインマンの思考実験の現実的なアプローチであると解釈できる。エンタングルメントは LOCC (局所操作と古典通信) では生まれなため、重力がつくるエンタングルメントは重力の量子性の検証につながる。この重力誘起エンタングルメントは未だ観測されたことはないが、検証することができれば量子重力理論の構築に向けて大きな一歩となる。しかし重力相互作用は非常に小さいので、重力の量子力学的性質を検証するためには、より質量が大きい物体を量子状態にすることが求められる。この問題に対して、オプトメカ系と呼ばれる鏡とレーザー光から構成される量子制御システムが有用であると考えられている。オプトメカ系は重力波実験で発展しており、近い将来  $mg$  スケールから  $kg$  スケールの巨視的鏡の量子状態が実現することが期待されている。本論文では鏡間に生じる重力誘起エンタングルメントについて議論する。先行研究 [1] を拡張し、本研究ではスクイーミングされた入射レーザーを用いた場合の重力誘起エンタングルメントを評価した。

[1]D. Miki, A. Matsumura, K. Yamamoto, *Phys.Rev.D* 109, 06490 (2024)

## B-19

### qutrit を用いた相対論的量子オットー熱機関の正仕事条件の導出

九州大学理学府物理学専攻<sup>A</sup>, 九州大学理学研究院物理学部門<sup>B</sup> 廣谷知也<sup>A</sup>, ギャロック芳村建佑<sup>B</sup>

ブラックホールの熱力学で知られるように, 熱力学と相対論は密接に関わっていることが知られている. この関係性はこれまで様々な観点から研究されているが, 本研究では, 曲がった時空の量子場と相互作用する 3 準位の量子系を用いた相対論的量子情報 (RQI) と量子熱力学の横断的観点から研究を行う. ここでは RQI と量子熱力学の融合的研究の一端として, 量子オットー熱機関のサイクルを通して, UDW 検出器が曲がった時空の量子場から仕事を取り出すための条件 (Positive Work Condition:PWC) に着目する. 先行研究ではいずれも 2 準位系の UDW 検出器を用いた議論がなされてきたが, 3 準位系を用いた議論は RQI の分野では未だ存在しない. そこで, 本研究では任意の曲がった時空において, 3 準位の UDW 検出器がオットーサイクルから取り出す仕事の条件を導出し, 2 準位系との違いなどについて議論する.

## B-20

### ガウス形式の相対論的量子オットー熱機関

九州大学 理学府<sup>A</sup>, 九州大学 理学研究院<sup>B</sup> 上永裕大<sup>A</sup>, ギャロック芳村建佑<sup>B</sup>

現代物理学において様々な分野同士は密接に関連しており, 融合分野に対する研究が進んでいる. その中に一つとして近年「量子熱力学」と呼ばれる「量子系における熱力学」が発展してきている. この分野では, 熱浴と相互作用する量子物質を作動物質とした量子熱機関が重要な研究テーマとなっており, 研究が盛んに行われている. 例として, 非マルコフ効果を取り入れ量子オットー熱機関を考えた場合, カルノー効率を超えた状況下においても仕事の抽出が可能であることが知られている.

量子熱力学をさらに相対性理論・場の量子論と融合させた研究テーマとして, 「相対論的量子オットー熱機関」が知られている. これは, 曲がった時空の量子場と相互作用する 2 準位の量子系, Unruh-DeWitt (UDW) 検出器モデルを利用して, 曲がった時空の量子場から熱力学的仕事を抽出するものであり, ウンルー効果を活用した仕事の抽出などが報告されている. また, 先行研究 [1] では, 一瞬だけ量子場と相互作用する UDW 検出器を用いることにより, 相対論的量子オットー熱機関における仕事は因果律が存在する時のみに抽出可能であることを明らかにした.

本研究では, 任意の相互作用時間依存性をもった調和振動子型 UDW 検出機を用いて, 非摂動的に因果律と相対論的量子オットー熱機関との関連性を調べる.

[1] K. Gallock-Yoshimura, J. High Energ. Phys. 01, 198 (2024)