

素粒子パートプログラム

第 71 回原子核三者若手夏の学校

研究会 1: 8/8(金) 15:15 – 18:15 場所: 417 号室

番号	時間	名前	タイトル
1-1	15:15 – 15:30	岩井喬也	K 中間子の崩壊からの MeV アクシオンモデルの制限
1-2	15:30 – 15:45	石田恵海	CP 対称性の破れによるレプトン数生成
1-3	15:45 – 16:00	石川巧	擬南部ゴールドストーン暗黒物質モデルのレビュー
1-4	16:00 – 16:15	小川清人	Impact of the electroweak Weinberg operator on the electric dipole moment of electron
1-5	16:15 – 16:30	中村一徳	一般化対称性に由来する Cosmic Super String から放射される重力波 vs NANOGrav により観測された重力波
	16:30 – 16:45	休憩	
1-6	16:45 – 17:00	高田翔平	高次元コンパクト空間と素粒子現象論
1-7	17:00 – 17:15	那須亮太	量子操作としての厳密くりこみ群
1-8	17:15 – 17:30	山崎心鉄	The review of BCS in the sky
1-9	17:30 – 17:45	槇木直人	時間変動するダークエネルギーの理論モデルについて
1-10	17:45 – 18:00	片山友貴	Multi-Horndeski 理論に関する研究と今後の見通し
1-11	18:00 – 18:15	南和馬	原始背景重力波に対する熱的散逸効果

1-1: 岩井喬也 (大阪大学)

K 中間子の崩壊からの MeV アクシオンモデルの制限

TBA

1-2: 石田恵海 (奈良女子大学)

CP 対称性の破れによるレプトン数生成

初期宇宙での重いディラックニュートリノの崩壊で CP 対称性の破れが起こり、それがレプトンを生成するという理論に従って物質の起源を探ります。またこの理論では崩壊途中で自然な形でダークマターが生成されると考えられるため、ダークマターとの関係も模索します。

1-3: 石川巧 (東京理科大学)

擬南部ゴールドストーン暗黒物質モデルのレビュー

従来の WIMP 暗黒物質は直接検出実験によって強く制限されている。本発表では、これを回避する新たな枠組みとして、擬南部ゴールドストーン暗黒物質 (pNGDM) に注目する。特に、global $SU(2) \times \text{gauge } U(1)$ 対称性をもとに構築された pNGDM 模型 (arXiv:2205.11919) を紹介し、その安定性の起源や相互作用、宇宙論的・実験的整合性を概観する。

1-4: 小川清人 (名古屋大学)

Impact of the electroweak Weinberg operator on the electric dipole moment of electron

電子 EDM は CP 対称性の破れを示す重要な観測量であり、極性分子を用いた実験により劇的に感度が向上している。そして、将来実験では 3 ループの量子補正で初めて電子 EDM を誘起する新物理模型の検証の期待される。本研究では、TeV スケールの暗黒物質としての動機がある電弱相互作用する多重項の粒子による CP を破る湯川相互作用によって誘起される 3 ループの電子 EDM を有効理論の方法で概算した。この方法では、W ボソンによる次元 6 の演算子である”電弱ワインバーグ演算子”を通じて、電子 EDM が生成される。そして、次元正則化を用いて電弱ワインバーグ演算子から電子 EDM への接続条件を明らかにし、この模型が将来の実験で検証可能であることを示した。

1-5: 中村一徳 (東北大学)

一般化対称性に由来する Cosmic Super String から放射される重力波 vs NANOGrav により観測された重力波

NANOGrav による 15 年の重力波観測により従来の理論では説明の難しいシグナルが観測された。このシグナルの重力波源として Cosmic Super String(CSS) が有力視されているが、CSS 間にある相互作用を考慮した重力波スペクトルの予言はいまだに存在していない。そこで我々は $SO(4)$ ゲージ場の存在を仮定した場合に形成される CSS について、CSS 間の相互作用を考慮した統計モデ

ルを新たに作り、重力波スペクトルの予言を与えた。本発表では CSS 間の相互作用、新たな統計モデル、また、それらを用いた結果について紹介する。

1-6: 高田翔平 (北海道大学)

高次元コンパクト空間と素粒子現象論

素粒子標準模型におけるレプトン・クォークのフレーバー構造の起源は不明である。そこで、我々は標準模型を超えた物理として超弦理論を想定する。本講演では、non-factorizable background magnetic fluxes の導入を考慮した高次元コンパクト空間を想定し、フレーバー構造の再現可能性に関して発表する。

1-7: 那須亮太 (静岡大学)

量子操作としての厳密くりこみ群

有限温度スカラー場の理論における密度行列の厳密繰り込み群 (ERG) 方程式を導く。まず、ディリクレ境界条件を持つ有限温度有効作用を用いて、経路積分によって密度行列を定義する。次に、密度行列のカットオフ微分を計算し、それを関数微分方程式として書き直す。そして、得られた ERG 方程式が Lindblad マスター方程式として解釈できることを示し、繰り込み群の流れが半群の性質を満たす trace-preserving completely positive (TPCP) 写像として働くことを示す。最後に、量子誤り訂正の議論で用いられる Petz 回復写像と機械学習で用いられる拡散モデルとの関係を紹介し、これらを用いたくりこみ群の逆過程について議論する。

1-8: 山崎心鉄 (東京大学)

The review of BCS in the sky

以下の論文のレビューをする。Tong, X., Wang, Y., Zhang, C., & Zhu, Y. (2024). BCS in the sky: signatures of inflationary fermion condensation. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2024(04), 022. <https://doi.org/10.1088/1475-7516/2024/04/022>

この論文では、CMB や大規模構造によって観測可能な primordial non-Gaussianity の生成源として、インフレーション期におけるフェルミオン場の BCS 状態を提案している。

1-9: 槇木直人 (総合研究大学院大学)

時間変動するダークエネルギーの理論モデルについて

宇宙の加速膨張を説明するにはダークエネルギーと呼ばれる未知のエネルギー成分が必要である。DESI による最新の観測の結果 [1] によれば、ダークエネルギーの状態方程式 $p=w\rho$ における w の値が Λ CDM モデルの値 ($w=-1$) よりも大きいことと、 w の値が増加している傾向が 2 シグマ以上で報告された。このような w の振る舞いは、例えば「Thawing(解凍)」モデルと呼ばれるスカラー場のモデルによって説明できる。本発表では、[2] についてレビューを行い、時間変動するダークエネルギーの理論について議論する。

[1]DESI Collaboration et al. (2025), arXiv:2503.14738

[2]Rayff de Souza et al. (2025), arXiv:2504.16337

1-10: 片山友貴 (総合研究大学院大学)

Multi-Horndeski 理論に関する研究と今後の見通し

現在の物理学における重力の有効理論は一般相対論であると広く理解されている。しかし暗黒エネルギーやインフレーションという現代宇宙論の大きな謎を解き明かすためのツールとして一般相対論を超える重力の有効理論を用いるアプローチがある。特にスカラー場と計量テンソル場から構成される、スカラー・テンソル理論と呼ばれる理論に関しては単純な理論としてよく研究されている。スカラー場を1つ含むスカラー・テンソル理論には Horndeski 理論と呼ばれる非常に一般的な理論が知られているが、スカラー場を複数含む場合の一般的な理論は作用が与えられていない。そこで Multi-Horndeski 理論の作用の構成に関する現在の研究について、発表者の研究結果をもとに紹介する。

1-11: 南和馬 (東北大学)

原始背景重力波に対する熱的散逸効果

原始重力波はインフレーション期に生成され、その観測は宇宙初期の高エネルギー物理を直接的に探る手段として注目されている。本研究では、インフレーション終期における再加熱過程に着目し、その際に生じる熱的散逸効果が原始背景重力波のスペクトルに与える影響を理論的に解析する。特に、インフラトン崩壊率に温度依存性を導入し、有限温度効果を取り入れることで、重力波スペクトルの振幅や傾きがどのように変化するかを評価する。得られたスペクトル変形の特徴は、今後の高感度な重力波観測計画（例えば DECIGO）によって検証可能であり、初期宇宙の熱的歴史や場の構造に関する新たな宇宙論的制約を与える可能性がある。

研究会 2A: 8/9(土) 13 : 30 – 18 : 45 場所: 311 号室

番号	時間	名前	タイトル
2A-1	13 : 30 – 13 : 45	石井孝典	Lindblad dynamics in holography
2A-2	13 : 45 – 14 : 00	新名宏太郎	なぜ素粒子論物理学者は de Sitter を嫌うのか？
2A-3	14 : 00 – 14 : 15	田中憲成	ゲージ・重力対応を用いたワイル半金属の輸送特性解析
2A-4	14 : 15 – 14 : 30	稲田知也	de Sitter 時空における field-space curvature に対する摂動的ユニタリティバウンド
2A-5	14 : 30 – 14 : 45	吉川史起	Holographic Description of Bulk Wave Packets in AdS_4/CFT_3
2A-6	14 : 45 – 15 : 00	志賀智仁	AdS ブラックホールの準固有振動に対する完全 WKB 解析
	15 : 00 – 15 : 15	休憩	
2A-7	15 : 15 – 15 : 30	菅野翼	Large θ angle in two-dimensional large N $\mathbb{CP}^{N-1}$ model
2A-8	15 : 30 – 15 : 45	鈴木唯一	Monopole-String-Domain wall fermions and massless fermionic polyhedra
2A-9	15 : 45 – 16 : 00	前田潤	Gauging, Gapped phase, and Generalized symmetry
2A-10	16 : 00 – 16 : 15	福田将来	高次元アクシオン電磁気学における高次群対称性と 3-crossed module の構築
2A-11	16 : 15 – 16 : 30	木戸夏矢	非可換群による高次形式対称性とその AKSZ シグマ模型への応用
2A-12	16 : 30 – 16 : 45	折井一步	時間反転対称な位相的場の理論におけるヒルベルト空間の次元の考察
2A-13	16 : 45 – 17 : 00	原田互	向き付け不可多様体共形場理論におけるクロスキャップ状態の分類
	17 : 00 – 17 : 15	休憩	
2A-14	17 : 15 – 17 : 30	藤井壱	$\mathbb{Z}_2^2$ loop $osp(1 2)$ を用いた可積分方程式の階層の構成
2A-15	17 : 30 – 17 : 45	渋谷翔之	JT 重力理論の測地線長から捉える Complexity=Anything proposal
2A-16	17 : 45 – 18 : 00	藤木恒成	ブラックホールのカオス性から見る二次元量子重力理論 (JT 重力) の進展
2A-17	18 : 00 – 18 : 15	宮内祐	2 次元 dilaton 重力による D 次元 Einstein-Maxwell 理論の非極限な量子論的振る舞い
2A-18	18 : 15 – 18 : 30	前田陵汰	An apologia for islands
2A-19	18 : 30 – 18 : 45	ランカスター海	Einstein gravity from a matrix integral レビュー

2A-1: 石井孝典 (京都大学)

Lindblad dynamics in holography

リンドブラッドに従う開量子系における相関関数を、AdS/CFT 対応を用いて重力理論の側から導出する方法を紹介する (arXiv:2504.1732)。本講演では特に、 AdS_3/CFT_2 対応において、ジャンプ演算子として実スカラー場を選んだ場合を取り上げ、そのホログラフィック双対について発表する。これにより、非平衡量子系に対する AdS/CFT の新たな応用可能性について考察する。

2A-2: 新名宏太郎 (京都大学基礎物理学研究所)

なぜ素粒子論物理学者は de Sitter を嫌うのか？

学会での発表を聞いていると、弦理論やホログラフィ理論に関する量子重力の発表は対象としている時空が Anti de Sitter (AdS) 時空のものばかりである。しかしながら、観測事実から宇宙定数は正になることが指摘されているため、もし量子重力を考えるならば de Sitter 時空がいい模型になるはずである。このトークでは、なぜ素粒子論の人々があまり de Sitter 時空を扱わないのか、(1) 超弦理論の解、(2) 超対称性、(3) ホログラフィ原理の3つの観点からレビューする。出来るだけ野海さんの講義との重複を避けた内容にするつもりである。

2A-3: 田中憲成 (中央大学)

ゲージ・重力対応を用いたワイル半金属の輸送特性解析

ワイル半金属を記述する top-down のホログラフィー模型として、D3/D7 モデルに基づいたモデルが知られている。この模型では、D7 ブレーンに電場を印加することで、異常ホール効果といったワイル半金属特有の輸送現象が解析されてきた。本発表では、これらの先行研究を紹介するとともに、我々が進めている新たな輸送現象に関する研究について報告する。

2A-4: 稲田知也 (東京大学)

de Sitter 時空における field-space curvature に対する摂動的ユニタリティバウンド

本研究では、de Sitter 時空上で場の空間曲率をもつモデルについて、有効理論の摂動展開が破綻しないための条件（摂動的ユニタリティバウンド）を議論する。摂動の大きさを定量化する指標として運動量空間における純度を導入することで、曲がった時空上でも理論のユニタリティを検証することが可能となる。ユニタリティを課すことで、UV カットオフ、場の空間曲率、および時空の曲率の間にどのような制限が得られるかを明らかにし、de Sitter 時空の熱的性質との関連についても考察する。

2A-5: 吉川史起 (京都大学)

Holographic Description of Bulk Wave Packets in AdS_4/CFT_3

本研究では、AdS/CFT 対応における波束を用いた解析を高次元に拡張し、バルクを伝播する波束に対応する CFT 側のエネルギー密度を解析的に計算した。エネルギーは依然として光円錐上に局在するものの、高次元では空間的な広がりを示す。この結果は有限の N における Entanglement Wedge Reconstruction や AdS/CFT 対応における量子誤り訂正の限界を示唆する。

2A-6: 志賀智仁 (立教大学)

AdS ブラックホールの準固有振動に対する完全 WKB 解析

AdS/CFT 対応におけるブラックホールの準固有振動 (QNM) は、熱的相関関数の極として境界理論に現れ、非平衡物理の記述に重要な役割を果たす。5 次元 AdS では Heun 関数の接続公式により QNM の精密な解析が進展しているが、4 次元では特異点構造の問題により同手法は適用困難である。本研究では、4 次元 AdS ブラックホールに対して完全 WKB 解析を適用し、全領域での QNM スペクトルの導出を試みる。今後、ホログラフィーを通じた非平衡応答の理解へと発展させることを目指す。

2A-7: 菅野翼 (東北大学)

Large θ angle in two-dimensional large N $\mathbb{CP}^{N-1}$ model

4 次元ヤンミルズ理論などの理論は θ 角と呼ばれるパラメータをもつ。 θ 角は 2π 周期性をもつパラメータであるが、ラージ N 理論では複数の準安定な真空が現れ、 $\theta \sim N$ の領域を考えることが意味をもつ。本研究では、4 次元ヤンミルズ理論のトイモデルとして知られる 2 次元 $\mathbb{CP}^{N-1}$ 模型において分配関数の解析を行い $\theta \sim N$ の領域を調べた。本発表では、「標準的なラージ N 極限の手法」により得られた結果とその問題点について議論する。本発表は横倉孝洋氏、米倉和也氏との共同研究 (arXiv:2503.07012 [hep-th]) に基づく。

2A-8: 鈴木唯一 (山形大学)

Monopole-String-Domain wall fermions and massless fermionic polyhedra

トポロジカルソリトンの重要な拡張として、異なる種類のソリトンから構成される複合ソリトンと、0 質量フェルミオンの局在がある。特にアクシオン宇宙論では、0 質量フェルミオンによる宇宙ひもの超伝導化が研究されている。この宇宙ひものは QCD 相転移の際にドメインウォールとの複合ソリトンを形成する。しかし、このような複合ソリトン上の 0 質量フェルミオンの存在や局所性に関する研究はほとんど行われていない。本研究では、拡張した $N=2$ 超対称 Abelian-Higgs 模型におけるモノポール・ストリング・ドメインウォール複合ソリトンに結合したフェルミオンのゼロモードの解析解を導出し、その局所性を明らかにする。また、複合ソリトン上の超電導電流について議論する。

2A-9: 前田潤 (京都大学)

Gauging, Gapped phase, and Generalized symmetry

系が対称性を持つ場合、その対称性の破れ方に応じて相の分類が可能となる。この考え方は、近年注目されている「一般化対称性」にも拡張され、多くの研究が進められている。特に、離散対称性をゲージ化する操作によって、異なる対称性のギャップを持つ相同士が密接に関係付けられることが知られている。本発表では、離散対称性を持つギャップ相の分類に焦点を当て、ゲージ化を通じて異なる相がどのように対応付けられるのかについて議論する。

2A-10: 福田将来 (東北大学)

高次元アクシオン電磁気学における高次群対称性と 3-crossed module の構築

近年、場の量子論における対称性の概念は一般化対称性として再定義され、様々なタイプの対称性が理論構造の理解のために重要となることが明らかとなってきた。高次群対称性と呼ばれる対称性もその一つである。我々はアクシオン電磁気学と呼ばれる 4 次元の理論を高次元に拡張すると現れる高次群対称性に着目し、それを記述する新たな構造を四群 (3-crossed module) として導入した。本発表ではこの構造に加えて、四群対称性を持つと期待される 5 次元のアクシオン電磁気学を紹介する。本発表は慶應大の横倉諒氏、東北大の周星陽氏との進行中の共同研究に基づく。

2A-11: 木戸夏矢 (茨城大学)

非可換群による高次形式対称性とその AKSZ シグマ模型への応用

一般化対称性の一部をなす高次形式対称性は、対象とする演算子がトポロジカルな性質を持つことに由来して基本的に可換群による対称性が考えられている。本研究では次数付きベクトル束の概念を参考に、非可換群による高次形式対称性の定式化を提案し、その適用例として AKSZ シグマ模型について取り上げる。また高次圏を用いた higher gauge theory との関係も議論する。

2A-12: 折井一步 (東京大学)

時間反転対称な位相的場の理論におけるヒルベルト空間の次元の考察

位相的場の理論 (Topological Quantum Field Theory, TQFT) は、数学的に厳密に定式化された場の理論の一つであり、物理的には IR 極限における物理の記述において強力な道具となることが知られている。TQFT は時空のトポロジーのみに依存する場の理論を記述可能であるが、時間反転対称性を備えた TQFT に関しては未だ完全な定式化には至っておらず、アノマリーの現れの一つとしてヒルベルト空間の次元が非整数となる現象が知られている。本講演ではまず、位相的場の理論の基礎とその物理的背景について概説する。その後、arXiv:2502.13532 において検討した時間反転対称な TQFT におけるヒルベルト空間の次元の問題について解説する。最後に、現在執筆中の時間反転対称アノマリー公式の一般化に関する進捗と今後の展望についても紹介する予定である。

2A-13: 原田 亙 (九州大学)

向き付け不可多様体共形場理論におけるクロスキャップ状態の分類

量子多体系において、非局所な物体であるトポロジカル欠陥は、非摂動的な効果を捉える上で重要な役割を果たしており、一般化対称性を用いた枠組みで理解されている。しかし、これらを向き付け不可多様体に適応した例は知られていない。今回は、向き付け不可多様体としてクロスキャップを用い、トポロジカル欠陥を合わせた共形ブートストラップ方程式について紹介する。これはクロスキャップ状態に強く制限を与える条件式となるので、これにより分類を考えることができる。

2A-14: 藤井 壱 (大阪公立大学)

$\mathbb{Z}_2^2$ loop osp(1|2) を用いた可積分方程式の階層の構成

リー代数 $\mathfrak{sl}(2)$ をループ拡張した代数から Liouville 方程式、sinh-Gordon 方程式や mKdV 方程式などを含む可積分方程式の階層が構成されることが知られている。これらの方程式は、ソリトン理論や場の理論において重要な役割を果たす。本研究の目的は、この構成を $\mathbb{Z}_2^2$ 次数付き代数に拡張し、新たな可積分系を導入することである。この拡張ではボゾン場の他にエキゾチックなフェルミオン場を含むソリトン方程式を得ることができる。 $\mathfrak{sl}(2)$ を部分代数として含む $\mathbb{Z}_2^2 - \text{osp}(1|2)$ のループ代数の場合の拡張に成功し、前述の方程式の可積分な $\mathbb{Z}_2^2$ 拡張を得ることができた。

2A-15: 渋谷 翔之 (名古屋大学)

JT 重力理論の測地線長から捉える Complexity=Anything proposal

未だ不明な重力の量子性を量子カオスから捉える試みが近年注目を集めている。特に量子カオス性を反映して特徴的な振る舞いをする Complexity という量が重力の量子性を理解する上で重要である。Complexity とホログラフィックに双対な重力理論の物理量は無数に存在する (Complexity=Anything) ことが示唆されているが、具体的な対応関係は分かっておらず完全な理解には程遠い。本講演ではまず JT 重力における非摂動計算で得られる測地線長の母関数が量子カオスの指標となり、Complexity=Volume(測地線長) となる事を示す。それを一般化した Complexity の母関数を考える事で、Complexity と双対な物理量が特定の極構造を持つ必要を述べる。

2A-16: 藤木 恒成 (京都大学基礎物理学研究所)

ブラックホールのカオス性から見る二次元量子重力理論 (JT 重力) の進展

経路積分を用いた量子重力理論の定式化は長らく困難を極めてきたが、ブラックホールのカオス性に対するランダム行列理論による記述を重力理論で解釈しようという試みにおいて、二次元量子重力理論 (JT 重力) が大きな進展を遂げている。本発表ではランダム行列理論を用いたブラックホールのカオス性の特徴づけを説明し、それが JT 重力の経路積分を用いてどのように再現されるかをレビューする。本発表は arXiv:1903.11115 [hep-th] に基づいたレビュー発表である。

2A-17: 宮内祐 (慶應義塾大学)

2次元 dilaton 重力による D 次元 Einstein-Maxwell 理論の非極限な量子論的振る舞い

非極限荷電ブラックホールの量子論的振る舞いを、2次元 dilaton 重力への次元還元を通して研究する。特に、Hawking-Page 相転移に焦点を当て、対応する相図を導出する。D 次元の Einstein-Maxwell 理論を Kaluza-Klein 還元し、電磁場と graviphoton に結合した 2次元 dilaton 重力理論を得る。次に、ゲージ場と Kaluza-Klein モードを積分して、非自明な dilaton ポテンシャルを持つ有効 dilaton 重力理論を得る。このポテンシャルを用いて、半古典的な方法で熱力学量を計算し、相図を構築する。また、重力の 1 ループ補正とその熱力学量への影響についても調べる。

2A-18: 前田陵汰 (京都大学基礎物理学研究所)

An apologia for islands

ブラックホール情報パラドックスの解決策として注目されるアイランド公式について、最新の研究動向をレビューする。従来の計算は主に AdS 時空を外部熱浴に結合したトイモデルで行われ、重力子が事実上の「質量」を持つため、アイランドがこの「質量」に依存するとの批判があった [Geng et al. 2020]。これに対し、Penington らの研究は、質量ゼロの重力子を持つ現実的な設定でもアイランドは普遍的に存在すると論証した [Antonini et al., 2025]。これは、ブラックホール蒸発におけるユニタリティ回復が、モデルの詳細に依らない普遍的メカニズムであることを示唆する重要な進展である。本発表ではこの最新研究を紹介する。

2A-19: ランカスター海 (筑波大学)

Einstein gravity from a matrix integral レビュー

IKKT 行列模型を用いて記述する重力理論の対称性や背景幾何、計量の導出に関する論文のレビュー。超対称質量変形、その双対となる背景幾何について扱い、静電ポテンシャルとのアナロジーやフラックスの量子化を用いた超重力解および fuzzy sphere vacua との対応について考える。

研究会 2B: 8/9(土) 13 : 30 – 15 : 00 場所: 310 号室

番号	時間	名前	タイトル
2B-1	13 : 30 – 13 : 45	安田航一郎	ダークマターハローに依らない逆問題手法による 極低エネルギー原子炉反ニュートリノ分布の抽出
2B-2	13 : 45 – 14 : 00	田原智治	場の量子論によるニュートリノ振動の解明
2B-3	14 : 00 – 14 : 15	成田悠馬	ステライルニュートリノによる KM3-230213A の起源解明
2B-4	14 : 15 – 14 : 30	宮本隼	ニュートリノ物理による $U(1)_{(L_\mu-L_\tau)}$ 模型への制限
2B-5	14 : 30 – 14 : 45	佐々木鉦太	Ds レプトニック崩壊における QED 量子補正と CKM ユニタリティ検証
2B-6	14 : 45 – 15 : 00	笠巻大陽	光トラップされたリュードベリ原子の励起による暗黒物質探索

2B-1: 安田航一朗 (UCLA)

ダークマターハローに依らない逆問題手法による極低エネルギー原子炉反ニュートリノ分布の抽出

逆ベータ崩壊のしきい値 (~ 2 MeV) を下回る反ニュートリノがどれほど存在するのかは未だ明らかではない。この未知の領域を直接調べる手段として、原子核とのコヒーレント弾性散乱 ($\text{CE } \nu \text{ NS}$) が注目されている。しかしニュートリノ分布の再構成においては、検出器応答や核反跳エネルギーの不確実性が大きな障壁となる。本研究では、ダークマター直接検出の理論研究で発展したハローに依らない手法を $\text{CE } \nu \text{ NS}$ 解析に応用し、2 MeV 未満の原子炉反ニュートリノスペクトルをモデルに依らず抽出する枠組みを構築した。その結果、安定性を保ちつつ、低エネルギー域でのスペクトル再構成が可能であることを示した。本手法は、将来の低しきい値ニュートリノ実験において、サブ MeV 領域の新物理を探索する有力な解析ツールとなる。

2B-2: 田原智治 (広島大学)

場の量子論によるニュートリノ振動の解明

ニュートリノ振動の定式化は、量子力学による振動公式では不十分な点が多い。特に、振動現象を粒子生成・伝播・検出の一連の過程として統一的に扱うことや、粒子と反粒子の区別といった問題には、場の量子論による定式化が必要とされる。本発表では、まず場の量子論による定式化の必要性について説明する。続いて、その解決を目指す代表的なアプローチとして、波束を用いる手法や、異なる真空状態の混合として現象を捉える理論などを比較・解説し、ニュートリノ物理の根源的理解に向けた我々の手法について紹介する。

2B-3: 成田悠馬 (東北大学)

ステライルニュートリノによる KM3-230213A の起源解明

KM3NeT/ARCA によって検出された超高エネルギーのミューオンイベント「KM3-230213A」は、およそ 220 PeV のエネルギーを持つニュートリノによるものと解釈されている。しかし、この事象に対応するガンマ線信号は観測されておらず、他のニュートリノ観測装置による追検出もないことから、標準模型に基づく解釈には困難がある。本発表では、この事象の起源としてステライルニュートリノによるシナリオを紹介する。特に、右巻きのステライルニュートリノが標準模型のニュートリノと微小に混合することで、検出器においてミューオンイベントとして観測される可能性に着目する。本研究は、宇宙ニュートリノ観測の枠組みを拡張する可能性を持ち、ダークセクターや標準模型を超える新たな物理の探索に新しい視点を提供する。

2B-4: 宮本隼 (東京大学)

ニュートリノ物理による $U(1)_{(L_\mu-L_\tau)}$ 模型への制限

標準模型 (SM) が持つ保存量の一つである、ミュー粒子数とタウ粒子数の差に対応する $U(1)_{(L_\mu-L_\tau)}$ 対称性は、ゲージ対称性として自然に拡張できる特徴を持ち、SM の未解決問題に

対する有力な解決策として注目されてきた。中でも「最小」 $U(1)_{(L_\mu-L_\tau)}$ 模型は、SM に 3 つの右巻きニュートリノと 1 つの SM シングレット・スカラー場を追加するシンプルな構成で、後者が自発的対称性の破れを通じてニュートリノに質量を与える。本講演では、この模型においてスカラー場の量子補正がニュートリノ質量と混合に与える影響を評価し、最新の実験と比較することで、 $U(1)_{(L_\mu-L_\tau)}$ 模型に対して新たな制限を与える。

2B-5: 佐々木 鉦太 (千葉大学)

Ds レプトニック崩壊における QED 量子補正と CKM ユニタリティ検証

標準模型は最も成功した理論で、マクロな世界をよく記述する。一方、標準模型では説明出来ない現象も存在している。CKM 行列は標準模型でユニタリであり、その行列要素である V_{cs} の決定に Ds 崩壊が寄与する。しかし、現在のところ量子補正は考慮されていない。本講演では、ハドロニックスケール以上の短距離量子補正、長距離補正を標準模型の枠組みで議論する。ミューオン崩壊におけるフェルミ定数への量子補正を考慮に入れることで、先行研究における一般的な短距離量子補正を導出し、無視されていた高次項を発見した。この補正は CKM のユニタリティの破れを示唆した。いっぽう、加えて長距離補正を考慮した結果、ユニタリティがある程度回復した。

2B-6: 笠巻大陽 (東京大学)

光トラップされたリュードベリ原子の励起による暗黒物質探索

本研究では、リュードベリ原子を用いた波動的暗黒物質の新たな探索手法を提案する。リュードベリ原子は、電磁場に敏感に応答する量子センサーの 1 つであり、そのトラップ技術および操作技術は近年著しい進展を遂げている。そこで、多数のリュードベリ原子を光ピンセットによりトラップし、波動的暗黒物質が誘起する電磁場によるリュードベリ原子の励起を観測することで、暗黒物質の直接検出が可能となる。本発表ではダークフォトン暗黒物質を具体例として取り上げ、本提案によりこれまで未探索であったパラメータ領域を探索可能であることを示す。

研究会 3: 8/10(日) 9:00 – 11:30 場所: 102 号室

番号	時間	名前	タイトル
3-1	9:00 – 9:15	前野伶太	QMETTS アルゴリズムによるゲージ理論の相図の量子計算
3-2	9:15 – 9:30	荒木匠	格子理論で探る Pin^- 構造を持つ Majorana fermion のアノマリー
3-3	9:30 – 9:45	濱田雄大	ZN stability and adiabatic continuity in Twisted Eguchi-Kawai model with heavy adjoint fermions
3-4	9:45 – 10:00	小名木俊輝	3次元2フレーバー QED におけるモノポール凝縮 —アノマリーマッチングと Vafa-Witten の定理が織りなす必然—
3-5	10:00 – 10:15	前田玲史	行列模型とブートストラップ
	10:15 – 10:30	休憩	
3-6	10:30 – 10:45	川那子翔太郎	超弦理論とコボルディズム予想
3-7	10:45 – 11:00	音澤吉之助	チャーンサイモンズ理論における D ブレーンの振る舞いから 得られる数理解造
3-8	11:00 – 11:15	下垣春嘉	超弦理論における頂点演算子と降下方程式の関係
3-9	11:15 – 11:30	村山祐明	M 理論の理解に向けた行列模型の解析

3-1: 前野伶太 (東京大学)

QMETTS アルゴリズムによるゲージ理論の相図の量子計算

量子コンピュータを用いて強結合的なゲージ場の理論における有限温度・密度相図をハミルトニアン形式で計算する手法について議論する。本研究では、Quantum Minimal Entangled Typical Thermal States(QMETTS) アルゴリズムを用いて熱力学量を計算することで、Z2 ゲージ理論の有限温度・密度相図について議論する。QMETTS では状態を虚時間発展させる必要があるが、量子コンピュータ上では非ユニタリ演算が不可能である。本研究では、Quantum Imaginary Time Evolution(QITE) 法を用いることで虚時間発展を近似的に可能にする。さらに、ゲージ場の理論の拘束条件であるガウス則を QMETTS の中で効率的に課す手法について提案する。

3-2: 荒木匠 (大阪大学)

格子理論で探る Pin^- 構造を持つ Majorana fermion のアノマリー

Pin^- 構造をもつ 1 次元の Majorana fermion 系に存在するアノマリーの指数、またそれと等しい 2 次元 SPT 相の分類は $\mathbb{Z}_8$ であることが知られている。本研究では 2 次元の正方格子を用いて Klein bottle や端状態を伴う Mobius strip など、様々な向きづけ不可能な多様体の Majorana fermion の理論を正則化することで、SPT 相の $\mathbb{Z}_8$ 分類を格子上で定式化すること、またこれをドメインウォールフェルミオン上の $\mathbb{Z}_8$ アノマリーとして表現することを目指す。Majorana fermion の Pfaffian を解析的、数値的に評価、その複素位相と連続理論で知られている ABK 不変量との一致について検証する。

3-3: 濱田雄大 (近畿大学)

ZN stability and adiabatic continuity in Twisted Eguchi-Kawai model with heavy adjoint fermions

ラージ N 極限での格子ゲージ理論は、ツイスト境界条件を課した 0 次元行列模型 (Twisted Eguchi-Kawai 模型) と等価であることが示唆されている。しかし、ゲージ理論との等価性を保証する ZN 対称性を保つためにはツイスト境界条件のパラメータのチューニングを行いながらラージ N を取る必要がある。本講演では、重い随伴表現フェルミオンにより ZN 真空が安定化されたモデルを提案し、その模型における真空構造と物理量の計算結果を紹介する。さらに、この模型を拡張することで、コンパクト時空上の $\text{SU}(N)$ ゲージ理論に対応する 1 次元行列模型を構成し、QCD 閉じ込め相の連続性を行列模型のレベルで示す。

3-4: 小名木俊輝 (京都大学基礎物理学研究所)

3 次元 2 フレーバー QED におけるモノポール凝縮 —アノマリーマッチングと Vafa-Witten の定理が織りなす必然—

3 次元 2 フレーバー量子電磁力学 (QED3) は、QCD の閉じ込めや対称性の破れのダイナミクスを研究するための Toy モデルであり、物性物理における非閉じ込め臨界点やトポロジカル絶縁体の

記述に応用される重要な理論モデルであるが、その低エネルギーでの真空構造は長年の未解決問題であった。本レビューで紹介する近年の研究は、この謎を解く鍵が「モノポール（磁気単極子）凝縮」による対称性の自発的破れにあるという決定的な描像を提示した。このシナリオは単なる推測ではなく、't Hooft アノマリーが自明な真空を許さず、Vafa-Witten の定理が他の単純な対称性の破れを禁じる中で、理論的整合性を満たす必然的な帰結であると思うことができる。本講演では、これらの非摂動的な制約が、いかにしてモノポール凝縮という動的な現象を織りなすのかを解説する。

3-5: 前田玲史 (広島大学)

行列模型とブートストラップ—符号問題を越えて—

行列模型 (Matrix Model) は超弦理論、ひいては量子重力理論を非摂動的に解析できるモデルとして、今日でも盛んに研究が行われている。中でもモンテカルロ法による解析は極めて強力であり、ここから数多くの重要かつ示唆的な結果がもたらされてきた。しかし同時に、経路積分の直接計算は「符号問題」という深刻な障害に長年悩まされてきていた。そこで近年新たに提唱されたのが、ブートストラップの手法 (BS 法) による行列模型の解析である。本発表ではまだ歴史の浅い行列 BS 法について包括的にレビューし、また後半では、BS 法をミンコフスキー型の理論に適用する新たな手法についていくつか提案を行う。

3-6: 川那子翔太郎 (総合研究大学院大学)

超弦理論とコボルディズム予想

2019 年に McNamara と Vafa が量子重力の沼地予想である「コボルディズム予想」を提唱してから、様々な観点からこの予想の検証が行われてきました。中でも超弦理論に存在する双対対称性 (Duality Symmetry) に対する予想の検証は新たなブレーンの存在を予言し、理論的にも興味深い帰結を生んでいます。本発表では、ここ数年に Heckman、Montero らによって提唱された「IIBordia」、*「Utopia」* という一連のプログラムの紹介を行い、コボルディズム予想をとりまく最近の話題についてお話しします。

3-7: 音澤吉之助 (大阪公立大学)

チャーンサイモンズ理論における D ブレーンの振る舞いから得られる数理構造

チャーンサイモンズ理論での D ブレーンの特定の配位や、それら D ブレーンに対するある非摂動効果は群や代数の言葉で解釈することができる。今回は、その群・代数的解釈によって得られた数理構造を発表する。本発表は森山翔文氏との共同研究 arXiv:2411.09141 に基づく。

[キーワード] アファインディンキン図、アファインワイル群、ゾーン多面体、図形の空間充填

3-8: 下垣春嘉 (奈良女子大学)

超弦理論における頂点演算子と降下方程式の関係

ボソンの弦理論において、異なるゴースト数を持つ閉弦頂点演算子が微分形式と BRST 形式を用いて記述される降下方程式によって関連付けられることが明らかになった [1]。本発表では、この降下方程式を超弦理論に拡張し、NS-NS 頂点演算子に対する降下方程式を示す。

[1] I. Kishimoto, M. Kouga, S. Seki, T. Takahashi, Nucl. Phys. B 1004 (2024) 116549, [arXiv:2402.06179 [hep-th]].

3-9: 村山祐明 (筑波大学)

M 理論の理解に向けた行列模型の解析

非摂動的超弦理論として M 理論が提唱された。この M 理論は行列模型によって記述できると予想されており、BFSS 予想と呼ばれる。本発表では BFSS 予想を検証するために行っている研究を紹介する。経路積分を厳密に計算する手法である局所化について説明し、局所化を行列模型に適用することについて議論したい。