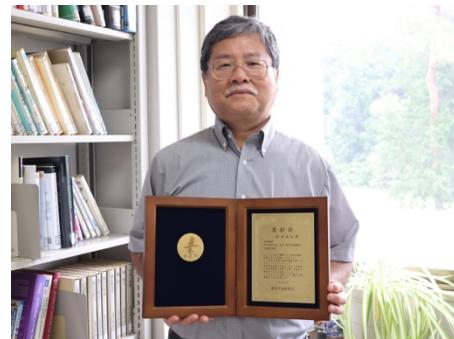


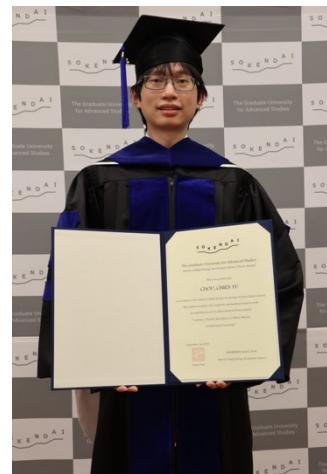
素粒子原子核研究所活動報告(1)理論センター 2025年12月5日

<https://www2.kek.jp/theory-center/theory/>

理論センターの岡田安弘名誉教授(KEK ダイヤモンドフェロー)が、北野 龍一郎教授(京都大学基礎物理学研究所)、小池 正史教授(宇都宮大学)とともに、第25回素粒子メダルを授与しました。今回の受賞論文は「原子核中の μ 粒子-電子変換確率の高精度計算」です [R. Kitano, M. Koike, Y. Okada, Phys. Rev. D 66, 096002 (2002)]。受賞理由はこちらを参照。www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~sg.www/award_s/sg-l.9401.html



理論センター所属の台湾からの留学生、周 建宇(Chou, Chien-Yu)さん(総合研究大学院大学、素粒子原子核コース)が研究科長賞を受賞しました。授賞式は9月26日(金)葉山本部で学位記授与式後に開催され、賞状が授与されました。対象となった学位論文のタイトルは「行列模型と量子宇宙論におけるレフシェツ・シンブル・シミュレーション」「Lefschetz Thimble Simulations in Matrix Models and Quantum Cosmology」(指導教員: 西村 淳教授)です。



理論センターでは、関係分野の研究会・ワークショップ等を幅広く開催している。2025年度前半には以下の研究会等を開催・共催した。

- 集中講義「holographic QCD」, May 12, 13, 14, 2025
- Mini-Workshop on Topological Analysis in Data Science, May 10, 2025
- 30th Meeting on Physics at B Factories, May 22, 2025, 岩手大学,
<https://kds.kek.jp/event/55250/>

- iTHEMS-KEK Joint Workshop 2025: Scientific Writing and Diversity-Equity-Inclusion, Jun 24, 25, 2025; 理研和光, <https://www.notion.so/iTHEMS-RIKEN-Theory-Center-KEK-Joint-Workshop-2025-Scientific-Writing-and-Diversity-Equity-Incl-ff86b7631c584902a1f5b1ecca2d92bc>
- One day workshop on High Frequency Gravitational Waves, Aug 7, 2025, <https://sites.google.com/view/hfgw2025>
- Belle II Physics Week 2025, Oct 6–10, 2025, <https://indico.belle2.org/event/14981/overview>
- Neutrino Interactions for Current and Future Experiments, Oct 27–29, 2025, <https://conference-indico.kek.jp/event/341/>

これまでに開催したワークショップのいくつかについて報告する(素核研ホームページより)。

- One day workshop on High Frequency Gravitational Waves, Aug 7, 2025, <https://sites.google.com/view/hfgw2025>

2025年8月7日、KEK つくばキャンパスにて、高周波重力波をテーマとするワークショップを開催しました。本ワークショップでは、高周波重力波について、マイクロ波およびレーザー干渉計を用いた実験的検出手法から、理論的な宇宙論的応用まで、多様な視点からの講演と議論が行われました。とりわけ、インフレーション直後の再加熱期における高周波重力波が解き明かす可能性のある物理法則、初期宇宙における原始ブラックホール生成との関連、さらには量子論的観点からの重力波のデコヒーレンスの可能性などが重要なテーマとして浮かび上がりました。参加者間での活発な意見交換により、実験と理論を橋渡しする貴重な機会となり、今後の研究の方向性や共同研究の可能性が多数示されました。今後は、この分野での継続的な議論と協力を通じて、より実証的・理論的な発展が期待されます。

- Belle II Physics Week 2025 <https://indico.belle2.org/event/14981/overview>

2025年10月6日から10日までの5日間、130名を超える研究者がKEK つくばキャンパスに集まり、Belle II Physics Week 2025 が開催されました。国内外から、理論分野の専門家や Belle II 実験の研究者に加え LHCb、BESIII、NA62 といった他の主要実験からも参加者が集まりました。

今回で8年目を迎えるPhysics Weekは、Belle IIコミュニティにとって重要なイベントです。Toshiko Yuasa Lab (TYL)、素粒子宇宙起源研究所 (KMI)、そして日米科学技術協力事業(高エネルギー物理分野)からの支援のもと、Belle II コラボレーションと KEK 素粒子原子核研究所 理論センターとの共催で行いました。



Physics Weekでは、理論と実験の研究者の交流を促すために毎年テーマを設定しています。今年は「エネルギーの欠損を伴うボトムおよびチャームハドロンの稀崩壊 (Rare decays of beauty and charm hadrons with missing energy)」をメインテーマとして取り上げました。この崩壊は、高いエネルギー・スケールの新しい物理や暗黒セクターの軽い新粒子の発見につながる有望な研究分野のひとつとして注目されています。

プログラムは午前中の「スクール」セッションと午後の「ワークショップ」セッションで構成され、さらに、ポスター・セッション、Belle II 測定器の見学、パネルディスカッション、理論研究者との Q&A セッション、そして広く利用されている解析ツールの実践的チュートリアルなども実施されました。参加者同士の活発な議論を通じて、Belle II Physics Week 2025は、理論と実験の橋渡しを強化し、コミュニティ内外の連携と学びを深める、非常に有意義な場となりました。

[以上、素核研ホームページより
<https://ipnsweb.kek.jp/wordpress/ja/news/7782/>]

- Neutrino Interactions for Current and Future Experiments, Oct 27–29, 2025,
<https://conference-indico.kek.jp/event/341/>

10/27(月)から 10/29(水)に 国際研究会“Neutrino Interactions for Current and Future Experiments”を開催しました。国内外から 34 名の理論・実験研究者が集まり、核子レベルのニュートリノ相互作用の理解と原子核反応への展開、及び、ニュートリノ実験の解析への応用についての講演と活発な議論が行われました。ニュートリノ実験においては、ニュートリノと原子核との衝突確率を正確に知っておくことが系統誤差を抑える上で重要になります。核子との散乱から原子核

との散乱まで、異なる理論的手法が必要となる難しい問題です。さまざまな実験結果をもとに、どこまで迫れるのか、今後の研究が注目されます。

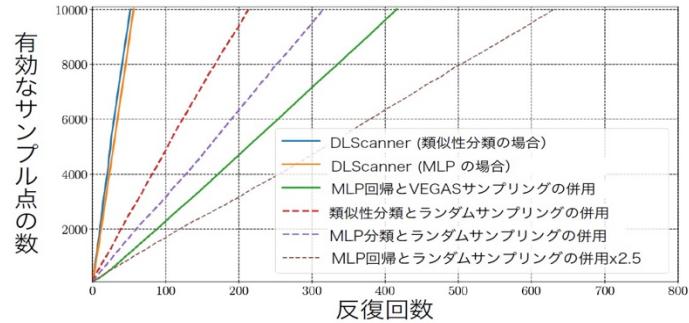
理論センターからの発表論文は、隨時

<https://www2.kek.jp/theory-center/theory/preprint/>

でアップデートしている。これらのうち、2025年4月以降の主な成果を紹介する。

- **深層学習によるパラメータ空間スキャン手法を提案** [A. Hammad and Raymundo Ramos, “DLScanner: A parameter space scanner package assisted by deep learning methods,” Computer Physics Communications, Vol. 314 (2025), 109659]

多くの変数がある現象で、条件を満たす最適な点を探す変数スキャナは、しばしば膨大な計算時間を見る。深



層学習とVEGAS法と呼ばれる数値積分手法を組み合わせ、このスキャンプロセスを加速するプログラム「DLScanner」を開発した。この手法は、多数の自由変数をもち、計算コストの高いあらゆる問題に対して効果的であると期待される。[素核研ホームページ <https://ipnsweb.kek.jp/wordpress/ja/news/7594/> より]

本研究で提案する DLScanner (VEGAS サンプリングと深層学習分類器の併用による、変数探索)とランダムサンプリングによる変数探索の比較。アルゴリズムの反復回数(横軸)を増やすにつれて、変数スキャナに有効なサンプル点の数(縦軸)は増えるが、DLScanner (青または、オレンジの実線)はランダムサンプリングや回帰分析によるアルゴリズムに比べ、少ない反復回数で有効サンプルを収集している。

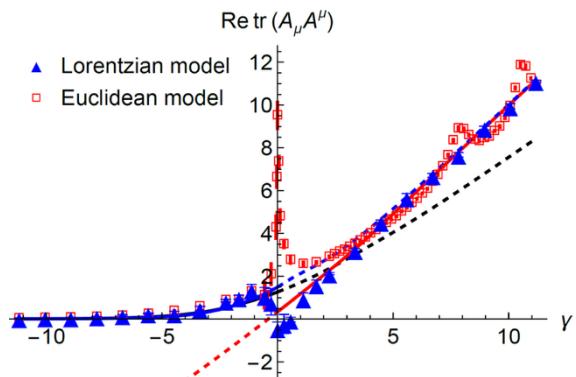
- **超弦理論の新たな数値シミュレーション、虚時間に関する長年の仮定に一石** [C.Y. Chou, J. Nishimura, A. Tripathi, Phys. Rev. Lett. 134, 211601 (2025)]

宇宙を記述する超弦理論の数値シミュレーションを行い、これまで研究者の中で広く信じられていた虚時間の理論と実時間の理論との等価性が、この場合は成り立たないことを示した。虚時間の理論とは、実数値をとる時間を純虚数（2乗すると負の実数になる仮想的な数）に置き換えて構築する理論のことを指し、これにより時間座標

を空間座標と対等に扱えるようになる。この手法は素粒子論における様々な研究の基礎になっているだけでなく、宇宙が無から創成した際に起こったとされる「量子トンネル現象」を記述するのに、ホーキング博士らが用いたことでも良く知られている。宇宙を記述する究極の理論と目される（9+1）次元時空上の超弦理論から（3+1）次元の膨張宇宙が出現するかといった問題を研究する際にも、しばしば虚時間の理論が用いられるが、少なくとも超弦理論のように時空そのものの量子効果を含む理論では、虚時間の理論と実時間の理論の等価性が一般に成り立たないことが明らかになった。

- 量子デコヒーレンスを古典運動方程式の複素数解から再現 [J. Nishimura, H. Watanabe, “Quantum Decoherence from Complex Saddle Points,” Phys. Rev. Lett. 134, 211401 (2025)]

量子力学に特有な量子デコヒーレンス現象を、古典運動方程式の複素数解から再現できることを指摘した。量子力学において特徴的な状態として、シュレディンガーの猫のように、複数の異なる状態の「重ね合わせ」で表されるような状態が存在する。ところが、いま注目している系に影響を及ぼすような環境が周囲にある場合、こうした状態は短い時間で壊れてしまい、複数の異なる状態が一定の確率で存在しうるというだけの、古典論的な状況に遷移する（量子デコヒーレンス）。本研究ではこの現象が、古典運動方程式の複素数解から再現できることが指摘された。量子デコヒーレンスの簡単な模型では、近似や仮定なしに正確な数値計算が行われた。



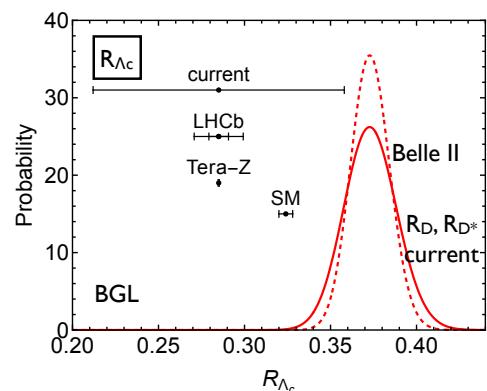
空間の大きさを表す量に対する計算結果を空間のエネルギーを表すパラメタの関数としてプロットしたもの。実時間の理論の結果を表す青い三角と、虚時間の理論の結果を表す赤い四角が、パラメタの全域で異なる振る舞いを示している。

- 超対称変形された弦理論のシミュレーションで見えてきた行列から創発する時空 [C. Y. Chou, Jun Nishimura, C.T. Wang, Phys. Rev. Lett. 135 221601 (2025)]

超対称性を保つ変形を加えた弦理論の数値シミュレーションを行い、行列から創発する時空を探るための物理量を具体的に計算するとともに、変形パラメタをゼロにする極限でも元の理論が再現されないという謎に対して明確な理解を与えた。弦理論は量子重力の有力な候補であり、そこでは時空さえも量子力学的に揺らいでいる。弦理論の基本的な力学的自由度はいくつかの巨大な行列であり、そこから時空及びその上の様々な種類の素粒子が力学的に現れると考えられており、行列から創発する時空がどのようなものになるかが重要な問題となります。最近この問題に対する一つの答えが、弦理論に超対称性を保つ変形を加えた場合について得られ、変形パラメタが一定の範囲内にあるときに、創発する時空の幾何が特定された。

- ボトムクォークのハドロン崩壊にひそむ新しい和則の導出 [M. Endo, S. Iguro, S. Mishima, R. Watanabe, “Heavy quark symmetry behind $b \rightarrow c$ semileptonic sum rule,” JHEP 05, 112 (2025); M. Endo, S. Iguro, T. Kretz, S. Mishima, R. Watanabe, Eur. Phys. J. C85, 9, 961 (2025)]

素粒子標準模型はレプトンフレーバー普遍性が成り立つことを予言している。しかし近年、この普遍性が破れている可能性を示す兆候が、B 中間子のセミレプトニック崩壊で観測されている。B 中間子の崩壊は、その構成要素であるボトムクォークの崩壊によって起こるため、ボトムクォークを含むさまざまなハドロンの崩壊でも、同様の普遍性の破れが観測されることが期待される。本研究では、これらのセミレプトニック崩壊過程のあいだに成り立つ「和則(sum rule)」と呼ばれる関係式を理論的に導いた。この関係式は異なる崩壊の整合性を体系的に検証するための新しい枠組みを与えていた。これによって、標準模型の精密な検



和則により予言される Λb バリオン崩壊におけるレプトンフレーバー普遍性の破れ

証が可能になるとともに、今後の新しい物理の探索にとって新たな基盤になることが期待される。