

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

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。2024 年度には、これまでに以下の研究会等を開催・共催した。

- 国際先導研究「スーパーB ファクトリー研究による素粒子物理学～フロンティアの開拓と若手研究者の育成」研究会 : 2024/5/11
<https://agenda.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/indico/conferenceDisplay.py?confId=2637>
- Japan-US-Taiwan Particle Physics Workshop : 2024/6/10-13 @ 国立台湾大学
<https://conference-indico.kek.jp/event/263/>
- Joint Workshop: 29th Meeting on Physics at B factories & 26th New Physics Forum : 2024/6/19
<https://conference-indico.kek.jp/event/272/>
- International workshop on J-PARC hadron physics 2024 (J-PARC Hadron 2024): 2024/7/23-25 (@ 東海)
<https://kds.kek.jp/event/49981/>
- Kaons@J-PARC 2024 : 2024/7/27-29 (@ 東海)
<https://conference-indico.kek.jp/event/273/>
- KEK-JAEA One-Day Joint Workshop : 2024/8/1
<https://kds.kek.jp/event/51495/>
- 7th Plenary Workshop of the Muon g-2 Theory Initiative: 2024/9/9-13
<https://conference-indico.kek.jp/event/257/>

また、今後も以下のようなワークショップを予定している。

- 2024 Belle II Physics Week (tau and dark): 2024/10/14-18
<https://indico.belle2.org/event/12273/>
- KEK-Cosmo 2024 “Evolution of the inhomogeneous universe: From Inflation to structure formation”: 2024/11/6-8 <https://www-conf.kek.jp/KEKCosmoAY2024/index.html>
- HEP in the quantum era : 2024/12/2-4 (理研 iTHEMS との共催)
<https://conference-indico.kek.jp/event/289/>
- KEK Theory Workshop 2024: 2024/12/11-13 <https://conference-indico.kek.jp/event/282/>
- KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2025winter) : 2025/2/18-21 <https://conference-indico.kek.jp/event/278/>

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。

- 素粒子現象論研究会 KEK-PH2023

<https://conference-indico.kek.jp/event/218/overview>



2023 年度の KEK 素粒子現象論研究会 (KEK Theory Meeting on Particle Phenomenology, KEK-PH) が、11 月 7 日から 10 日に KEK つくばキャンパスで開催されました。KEK-PH は毎年つくばで開催されている素粒子理論の国際研究会で、20 年以上の歴史があります。国

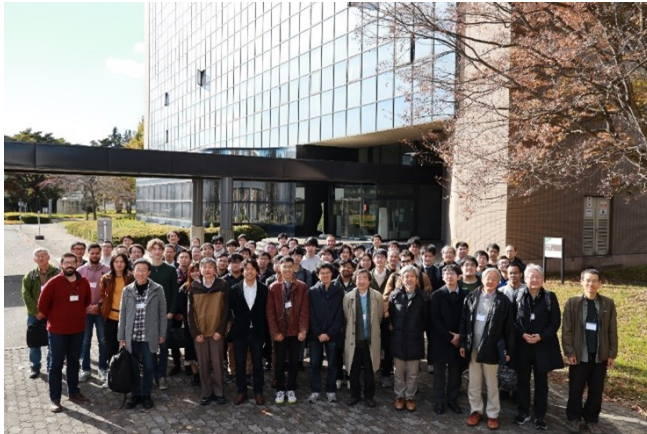
内外の若手研究者が研究発表する機会を提供する役割も担っています。

今年の研究会には国内、海外から約 100 名の参加者がありました。素粒子模型や理論的研究の報告のみならず、最新の素粒子実験結果の報告や、次世代加速器実験に関する議論、重力波検出に関する講演など話題が満載でした。

具体的には、Belle II 実験によって素粒子物理に対する着実な理解が進むことへの大きな期待に関する講演や、将来の加速器実験計画であるミューオンコライダーや ILC で可能となる多彩な新物理探索実験に関する講演がありました。これらの講演は、今後の素粒子理論研究の方向性を考えるよい機会となりました。また、宇宙の若い時代の姿を探る「ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST)」や、「北米ナノヘルツ重力波観測実験 (NANOGrav)」による 10 万～100 万年の周期を持つ重力波の検出報告などエキサイティングな話題もありました。一方、理論物理方面では、新しいカタチの対称性や量子計算などの新しい話題があり、「素粒子物理は面白い！」が再確認された研究会でした。

- KEK 理論研究会 2023

<https://conference-indico.kek.jp/event/231/>



2023 年 11 月 29 日から 12 月 1 日にかけて、KEK つくばキャンパスにおいて KEK 理論研究会 2023 が開催されました。素粒子理論の基礎をなす場の量子論や超ひも理論に関する議論を提供する場として、30 年以上毎年開かれてきた歴史のある研究会です。コロナ禍ではオンライン開催を余儀

なくされてきましたが、今年は4年ぶりに対面での開催となりました。

今回は特に、ブラックホールにおける情報喪失問題、量子重力に基づく宇宙誕生の謎、超ひも理論による我々の世界の記述、場の理論における非摂動ダイナミクス、などの素粒子物理学における最新のトピックスが議論されました。

参加者は外国人を含む 80 名余りで、七つの招待講演では、これらの幅広い分野に関する最近の発展や、新しい世界観に基づく考え方が議論され、講演中だけでなく、休憩中や夕食の時間まで、活発な議論が行われました。

これに加えて、公募したショートトークには 48 もの応募があり、2部屋でのパレルセッションが初日と二日目に行われました。こちらも若手からシニアまで、幅広い世代の研究者による力のこもった講演が続き、対面での開催は国内外からの参加者にも好評でした

- KEK-Cosmo2024 "Statistical Analysis of Random Fields in Cosmology" (宇宙論における確率場の統計解析), 2024 年 3 月 4 日から 6 日

<https://www2.kek.jp/ipns/ja/news/5579/> (素核研ホームページ)

2023 年度の KEK 宇宙物理研究会 (KEK-Cosmo 2024) "Statistical Analysis of Random Fields in Cosmology" (宇宙論における確率場の統計解析) が、2024 年 3 月 4 日から 6 日にかけて KEK つくばキャンパスにて開催されました。KEK-Cosmo は毎年つくばで開催されている宇宙物理分野の国際研究集会です。これまでに国内外の研究者を招いた国際会議や国際スクールを行ってきました。

今年の研究会では、情報・システム研究機構・統計数理研究所の研究者と連携し、宇宙論の統計解析にフォーカスした研究会を行いました。宇宙論の研究者のみならず数理統計・機械学習に詳しい数学分野で活躍する国内外の研究者も招き、宇宙論に現れる確率場に関係した物理や数学の周辺分野を中心としたトピックについて話し合いました。

招待講演を中心としたプログラムに、関連分野の一般講演の申し込みと合わせて5つのロングトークと16のレギュラートークで構成しました。一般参加者も含めて約50名の研究者や学生が集いました。数学や物理や工学分野における関連する解析手法が異なる分野の研究者と共有され、研究者間でとても有意義な議論や意見交換が行われました。この研究会で新たに知り合った参加者も多く、ここから将来の新しい共同研究が生まれるきっかけになることも期待できます。

- 素核研物構研連携研究会 2024

<https://www-conf.kek.jp/joint-colloquium/>

2024年3月25日と26日にかけ、KEK理論センターで素核研物構研連携研究会2024がハイブリッド形式で行われました。

現地とオンラインを合わせて200名を超える参加者が集まり、大変な盛況となりました。この研究会は、素粒子、原子核、宇宙、物性物理の理論、実験の研究者が一同に集まりそれぞれの分野で発展している話題を共有し、アイデアを出し合うことでそれぞれの分野の発展および新しい科学の創出を目指しています。今年は、量子コンピュータや量子情報、量子測定関連を中心テーマとし、測定誘起相転移、エラー訂正符号、量子計算の物性物理学や場の理論への応用、ブラックホールと量子情報の関係、様々な方式での量子コンピューター開発の現状と展望、といった幅白いテーマに関して9名の方に講演をお願いしました。今回取り上げたテーマは、現在急速に成長している分野であり、参加者同士で活発に議論し合う光景が見受けられました。本研究会を契機として、今後も更なる研究の進展が期待されます。

- 国際研究会「J-PARCで展開されるハドロン物理 2024 (J-PARC Hadron 2024)」

<https://kds.kek.jp/event/49981/>



2024年7月23日～25日にかけてAYA'S LABORATORY 量子ビーム研究センター(AQBRC, 茨城県東海村)にて、J-PARCで展開されるハドロン物理に関する国際研究会を行った。今回はJ-PARCの十八番ともい

えるストレンジネス核物理、およびストレンジネスを伴うハドロン物理を主要テー

マとしつつ、関連する様々なテーマ(中性子星, Femtoscopy, 格子 QCD, エキゾチックハドロン, 原子核構造・反応など)も盛り込んだ研究会となった。

各テーマにて活躍されている方々による招待講演をじっくりと聞くことで、実験側では J-PARC を始めとする世界中の実験施設での最新の成果や今後の計画を把握できた。また理論側では Chiral EFT を始め、この分野でよく使われている理論手法及びその成果を詳しく学ぶことができた。特に近年様々なハドロン間相互作用の情報を提示している“Femtoscopy”のセッションは、理論・実験双方にとって刺激的なものであった。

今回の研究会ではアジア圏に加え、欧米の優れた研究者の講演を聞くことができ、そして長めに確保した休憩時間にも活発な議論が行われた。様々な場面での議論を通じて、新しいアイデアや共同研究が生まれたと期待される。リラックスした雰囲気の研究會、そして懇親会を通じて、世界中のストレンジネス核物理および関連分野の研究者が交流を持つことができた。参加者には比較的若い方が多く、この分野の将来性が感じられた研究会であった。

参加者 120 人(現地:62 人, オンライン:58 人)、参加者国 ハンガリー・ドイツ・スペイン)、アメリカ、ブラジル、中国、韓国

- KEK-JAEA One-Day Joint Workshop:

<https://kds.kek.jp/event/51495/>

KEK-JAEA One-Day Joint Workshop was held at the KEK Tsukuba Campus on August 1st, 2024. This workshop is part of the bi-monthly KEK-JAEA Joint Workshop series, which provides a platform for experimentalists and theorists to engage in discussions on current trends and future directions in hadron and nuclear physics, with a special focus on J-PARC activities.

The inaugural workshop focused on “Femtoscopy for Exotic Hadrons and Nuclei.” This one-day event centered around exotic hadrons and nuclei, featuring five distinguished speakers: two experimentalists from J-PARC and three theorists specializing in hadron physics. Approximately 20 researchers and students, including general participants, attended the workshop. The workshop included invited presentations and discussions that showcased the latest experimental results from J-PARC, various analytical methods, and new theoretical findings in the field. These exchanges among researchers from diverse backgrounds led to valuable discussions and idea exchanges, fostering new connections and potential collaborations.

The next seminar is anticipated to build upon this momentum, continuing to nurture partnerships and collaborations among researchers in the field.

- Muon $g-2$ Theory Initiative 第 7 回全体ワークショップ
<https://conference-indico.kek.jp/event/257/overview>



ミュオン異常磁気能率は、標準模型の予言からずれているのか、それとも一致しているのか。はっきりさせるには、標準模型の予言を信頼できる手法で計算し、誤差を含めて正確な評価を与える必要があります。すべての手法をレビューして現時点でのベストの値をあたえる目的で世界中の理論家と実験家が参加して始まったのが Muon $g-2$ Theory Initiative で、今回がその 7 回目の全体ワークショップになります。2024 年 9 月 9 日～13 日、KEK に 130 名ほどの専門家が集まり、現象論的手法と格子 QCD 計算のそれぞれについて突っ込んだ議論が5日間にわたって行われました。その成果は、来年にかけてホワイト・ペーパーとして発表される予定です。

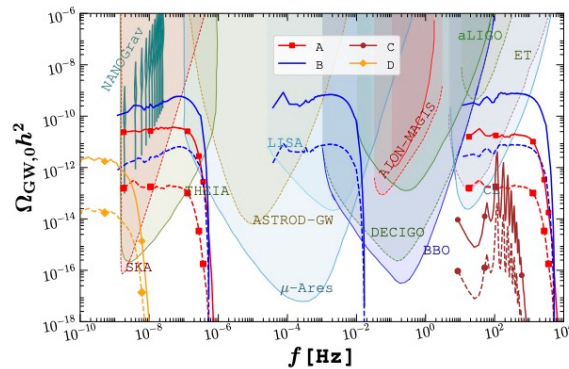
理論センターからの発表論文は、随時

<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、2023 年 10 月以降の主な成果を紹介する。

- 宇宙創成「インフレーション」の謎に迫る ～簡単かつ直観的な方法で原始重力波の計算が可能に～ (KEK プレスリリース, 2024 年 6 月 19 日)
<https://www.kek.jp/ja/press/202406191400gw>
- Gravitational Wave Symphony from Oscillating Spectator Scalar Fields [Yanou Cui, Pankaj Saha, and Evangelos I. Sfakianakis, Phys. Rev. Lett. 133, 021004 (2024)]

We investigated a generic source of stochastic gravitational wave background (SGWB) due to the parametric resonance of oscillating scalar fields in the early Universe. We considered four simple scalar field models including only renormalizable terms. By systematically analyzing benchmark models through lattice simulations and considering a wide range of



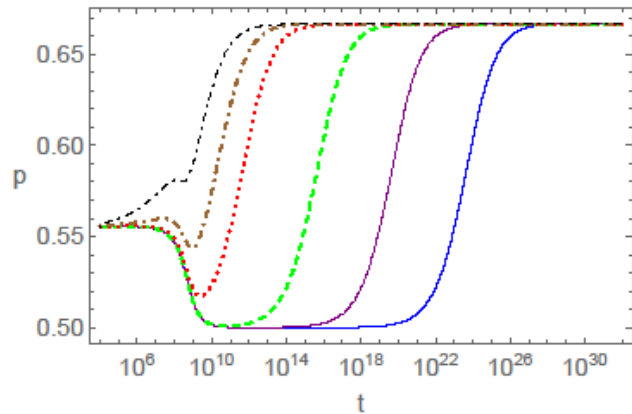
Gravitational waves spectra for the models considered in this work projected on the detection sensitivity of various experiments. A light scalar (such as ultralight axions) of mass around eV can account for all the dark matter in the Universe and reveal itself as a signal in the PTA detectors.

parameters, we demonstrate that such a scenario can lead to detectable signals in GW detectors over a broad frequency range and potentially address the recent findings by Pulsar Timing Array experiments. Furthermore, these models naturally yield ultra-light dark matter candidates or dark radiation detectable by CMB observatories. This study will pave the way for investigating the natural connection with ultralight DM as emerging in some benchmarks and its ramifications, as well as the other potential complementarity with CMB observations

- 余剰次元方向の圧力によって誘起されるモジュライ振動と宇宙膨張 [Hajime Otsuka, Yutaka Sakamura, “Induced moduli oscillation by radiation and space expansion in a higher-dimensional model”, Phys. Rev. D109 (2024) 11, 115019.]

近年、量子重力の有効理論に関する沼地予想などから大きな余剰次元が再考察されている。一般に大きな余剰次元が存在する場合、初期宇宙において輻射の温度がコンパクト化スケールよりも高くなり得る。そのような場合にはもはや4次元有効理論を用いた解析が妥当ではなくなるため、高次元場の方程式を直接解かなければならない。特に高次元アインシュタイン方程式には、余剰次元方向の圧力が現れ、モジュライのダイナミクスに影響を及ぼすことに注意する必要がある。実際、宇宙初期にモジュライが既に固定されている場合でも、その後輻射の圧力によってモジュライがポテ

ンシャルの底から押し出されて振動を始めることを我々は先行研究で確認している。本研究では、2次元球面にコンパクト化された6次元超重力理論に基づく模型において、初期の非線形項の影響が無視できない時期のみ数値計算を用い、その後の解析は線形近似を用いることによって長期間の宇宙膨張を追跡することに成功した。具体的には、6次元の輻射優勢期、4次元の輻射優勢期、モジュライ振動優勢期と遷移し、モジュライの崩壊により再び4次元の輻射優勢期に戻る。その後は標準宇宙論と同様の振る舞いをして現在に至る。本研究では比較的短時間の数値計算によって各時期への遷移時期を見積もることにも成功した。



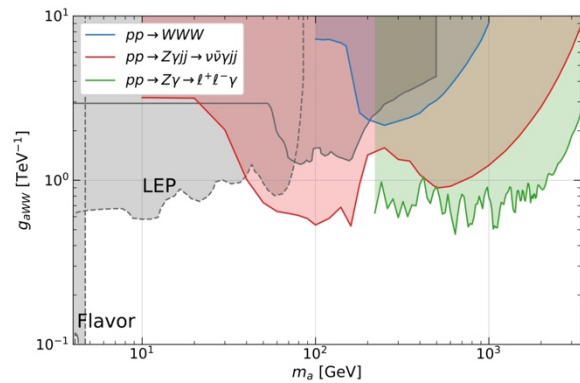
3次元スケール因子を $a(t) \propto t^p$ と近似したときのべき p を時間 t の関数として様々な初期温度の場合にプロットしたものである。初期では6次元の輻射優勢期の値 $9/5$ だったものが時間経過と共に4次元の輻射優勢期の値 $1/2$ を経て、モジュライ振動優勢期の値 $2/3$ に遷移していく様子が確認できる。

- インフラトンの摂動的崩壊による再加熱と pure Yang-Mills プラズマの熱化 [Kyohei Mukaida, Masaki Yamada, JHEP 05 (2024) 174]

インフラトンインフレーション終了時にそのエネルギーを輻射に転換して熱い宇宙を作らねばならず、その過程は再加熱と呼ばれる。インフラトンと輻射の結合が小さい場合、再加熱はインフラトンの摂動的な崩壊で記述される。インフラトンの質量程度のエネルギーを持つ粒子がまず生成され、それが cascade していくことで粒子数を増やし熱平衡へと至る。この過程はもちろん有限の時間がかかるため、これまでしばしば再加熱の解析で仮定されてきた瞬間的な熱化は正当化できない。本論文では、この摂動的な崩壊から生成された粒子の熱化過程を、輻射が pure Yang-Mills 理論で記述されるプラズマという簡単な場合において数値的にボルツマン方程式を解くことで解析した。以前の著者の論文によって示された定性的な振る舞いが正しいことを数値的に確かめ、宇宙の最高温度のより正確な評価をあたえた。

- LHC 実験による重い Axion-like particle の探索 [Masashi Aiko, Motoi Endo, K  re Fridell, JHEP 06 (2024) 194]

Axion-like particle は対称性が破れる際に現れる新粒子であり、TeV スケール以下に存在することが期待されている。これまでの研究では Axion-like particle の光子との結合が注目されていたが、本論文では新たに光子以外の電弱ゲージボソンとの結合に注目した。実際、このような結合には現象論的に数々の利点があることが知られている。今回新たに LHC Run-II 実験の最新データに注目した。Axion-like particle は陽子衝突による電弱ゲージボソン生成の散乱断面積に影響をあたえる。その結果、質量の大きな領域において、LHC 実験がこれまでの実験よりも高い探索感度をもつことを指摘した。



LHC 実験による Axion-like particle の制限。これまでの制限（灰色）と比較して、LHC 実験（青、赤、緑）が質量の大きな領域に高い感度をもつことがわかる。