

2024年度

京都大学大学院理学研究科

修士課程

修士論文アブストラクト

(2025年2月3日、2月4日)

物 理 学 第 二 分 野

修士論文発表会

日時: 2025年2月3日(月)4日(火)
場所: 理学研究科5号館 525号室
発表時間: 15分+5分(質問)

《 目 次 》

2月3日(月)

- | | | |
|---|-------|---------|
| 1. 星周物質のX線精密分光によるIa型超新星残骸
Kepler's SNRの伴星推定 | 穴澤 萌衣 | (9:00) |
| 2. 核子超流動の性質解明に向けた(α , He6)反応の微分
断面積測定 | 池水 玄 | (9:20) |
| 3. 原子核の高励起対振動探索のための(α , 6He)反応ス
ペクトルの多重極展開解析 | 伊津野勝英 | (9:40) |
| 4. 磁気スペクトロメータS-2Sの高分解能実現に向けた解
析手法の研究 | 岩井 沙彩 | (10:00) |

《 休 憩 》 10分

- | | | |
|---|-------|---------|
| 5. Jlabにおける($e, e'K^+$)反応を用いた高精度ラムダハイ
パー核分光実験のトリガー設計 | 岩本 哲平 | (10:30) |
| 6. 原子核乾板を用いたニュートリノ反応精密測定のため
の新型シンチレーショントラックの開発 | 大谷 尚輝 | (10:50) |
| 7. 1次元長期間進化計算による長寿命原始惑星系円盤
の進化過程の研究 | 大山 航 | (11:10) |
| 8. J-PARC MARQ 実験のためのMPPC読み出し回路
CIRASAMEの運用試験およびビームファイバー飛跡検
出器の性能評価 | 岡崎凜太郎 | (11:30) |

《 午 後 》

- | | | |
|--|-------|---------|
| 9 . CMB実験に用いる希釈冷凍機の性能評価と電波吸収体の開発 | 笠井優太郎 | (13:00) |
| 10 . CMB観測実験GroundBIRDの焦点面検出器アライメントと長期運用に向けた角度データ取得システムの最適化 | 片岡 敬涼 | (13:20) |
| 11 . θ 項をもつ2次元コンパクトボソンの解析 | 片山 颯 | (13:40) |
| 12 . MARQ 実験用 Multi-gap Resistive Plate Chamber のための新素材高圧印加電極の開発 | 小池諒太郎 | (14:00) |
| 13 . 鉄輝線のパルス遅延によるX線連星4U 1538-522での自転公転整列の観測的検証 | 斉藤裕次郎 | (14:20) |

《 休 憩 》
20分

- | | | |
|---|-------|---------|
| 14 . 漸近対称性に映るゲージ理論の赤外構造について | 清水 慧人 | (15:00) |
| 15 . de Sitter時空におけるホログラフィ原理とバルク再構成 | 新名宏太郎 | (15:20) |
| 16 . $\gamma - \gamma$ 摂動角相関法を用いたIn錯イオン形成における超微細気泡の作用 | 竹下 清人 | (15:40) |
| 17 . 混合状態の対称性・相転移とホログラフィー原理 | 田耕 健也 | (16:00) |
| 18 . SCRIT実験におけるルミノシティモニター用位置検出器の開発 | 立花万梨子 | (16:20) |

2月4日(火)

19. 相対論的ハートリー・フォック理論によるスピン偏極核物質の状態方程式の研究	橘 刀生	(9:00)
20. 高感度MeVガンマ線観測実験SMILE-3に向けた μ -PIC読み出し基板の開発と放射性廃棄物の放射能測定	塚本 博丈	(9:20)
21. 非定常過程におけるブラックホールエントロピーの定義について	徳竹 温也	(9:40)
22. ベクトルテンソル重力におけるブラックホール摂動の有効理論	富塚 祥伍	(10:00)
《 休 憩 》 10分		
23. ^8He におけるdineutron相関およびmonopole励起における3体クラスター相関	中川 昂星	(10:30)
24. 高輝度LHC-ATLAS実験に向けた初段ミュオントリガーアルゴリズムの最適化	中川 徹郎	(10:50)
25. 中重核領域の陽子弾性散乱測定を用いた新反跳陽子テレスコープの性能評価	中田 智也	(11:10)
26. 超伝導デバイスSISミキサを搭載したミリ波受信機によるダークフォトン探索研究	埴村 圭吾	(11:30)

《 午 後 》

- | | | |
|---|-------|---------|
| 27 . Simons Observatory実験で用いる偏光角較正装置の
系統誤差に関する研究 | 星野 大輝 | (13:00) |
| 28 . 一般化対称性の破れた相における分配関数のふるま
いについて | 前田 潤 | (13:20) |
| 29 . 電子蓄積リング(SR2)におけるビーム安定化のための
HOM減衰空洞の設計とランダウ空洞の実装 | 前田 裕成 | (13:40) |
| 30 . MoMoTarOのISS搭載に向けた陽子照射試験と軌道上
でのバックグラウンドレートの推定 | 前田 涼太 | (14:00) |

《 休 憩 》
20分

- | | | |
|---|-------|---------|
| 31 . U(1)バリオン対称性のゲージ化とクォークハドロン連続
性 | 武藤 永治 | (14:40) |
| 32 . AdS/CFT対応における波束を用いた解析 | 吉川 史起 | (15:00) |
| 33 . 自己閉じ込め型不安定核標的(SCRIT)における標的イ
オン状態の研究 | 吉田 暁 | (15:20) |
| 34 . Lee-Yang ゼロを用いた臨界点探索 | 和田 辰也 | (15:40) |

星周物質の X 線精密分光による Ia 型超新星残骸 Kepler's SNR の伴星推定

宇宙線研究室 穴澤萌衣

Abstract We performed X-ray grating spectroscopy of Kepler's SNR, a Type Ia supernova remnant. While previous studies suggest an asymptotic giant branch companion star, no conclusive estimate exists. Using XMM-Newton's Reflection Grating Spectrometer, we measured the N/O ratio in circumstellar material, providing the first constraints on the companion star's properties.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

中小質量星($\leq 8 M_{\odot}$)は最終的にコンパクト天体である白色矮星に進化する。連星系をなす白色矮星は相手の星(伴星)から質量を受け取って、チャンドラセカール質量($\sim 1.38 M_{\odot}$)に近づくと Ia 型超新星爆発を起こすと考えられている。銀河系外で起こった Ia 型超新星爆発の観測はされているものの、白色矮星が質量を受け取る過程やどのような星が伴星になりうるかなど未解明な部分が多い。爆発後に残った高温プラズマである、Ia 型超新星残骸の一つ、Kepler's SNR は爆発前に伴星から吹き出した星風が周囲に溜まった物質(星周物質)起源の放射が観測されており[1]、伴星からの質量輸送を解明する上で重要な天体である。星周物質には伴星の恒星進化で作られた様々な元素が含まれ、特に伴星の比較的外層で生成される炭素(C)、窒素(N)、酸素(O)は星風に多く含まれる。したがって、星周物質の C, N, O の組成比は伴星の初期質量や初期回転速度、初期金属量などのパラメータに依存しており、中でも N/O を測定することが Ia 型超新星の伴星を知る手掛かりとなる[2]。先行研究[1]では、星周物質に窒素が豊富であることから伴星が漸近巨星分枝星であると推定されたが、統計が足りず N/O の測定ができなかったため、伴星の初期質量や初期回転速度などの制限はできていなかった。

そこで本研究では、先行研究[1]の後の観測を追加し、先行研究の 6 倍の統計の観測を用いて、N/O の測定を行った。スペクトル解析の結果、星周物質特有の元素組成比($N/O = 2.26^{+0.07}_{-0.11} (N/O)_{\odot}$)を初めて得ることができた。さらに、恒星進化シミュレーションを用いて様々な物理パラメータの伴星外層の N/O を計算し、観測結果と比較したところ、漸近巨星分枝星の表面組成と一致し、先行研究と無矛盾な結果となった。さらに伴星の初期質量の下限値が $\sim 1-2 M_{\odot}$ であると初めて制限をつけることができた。一方で初期回転速度や初期金属量と伴星外層の N/O は、初期質量に比べて依存性が低く、制限をつけることができなかった。この結果は先行研究にて窒素のみの組成の特徴、質量損失率を用いて制限された伴星の質量($4-5 M_{\odot}$ [3]、 $\geq 10 M_{\odot}$ [4])と一致しており、初期回転速度や金属量を考慮しても Kepler's SNR の伴星が漸近巨星分枝星であったことの強い証拠となる[5]。この手法は星周物質が観測されている他の Ia 型超新星にも適用可能であり、超新星の研究に有用な手法である。

References

- [1] S. Katsuda et al., ApJ, 808(1):49, (2015)
- [2] P. Marigo, A&A, 370:194–217, (2001).
- [3] A. Chiotellis et al., A&A, 537:A139, (2012)
- [4] R. Bandiera et al., Symposium - International Astronomical Union, 125:127–127, (1987)
- [5] M. Anazawa et al., in prep.

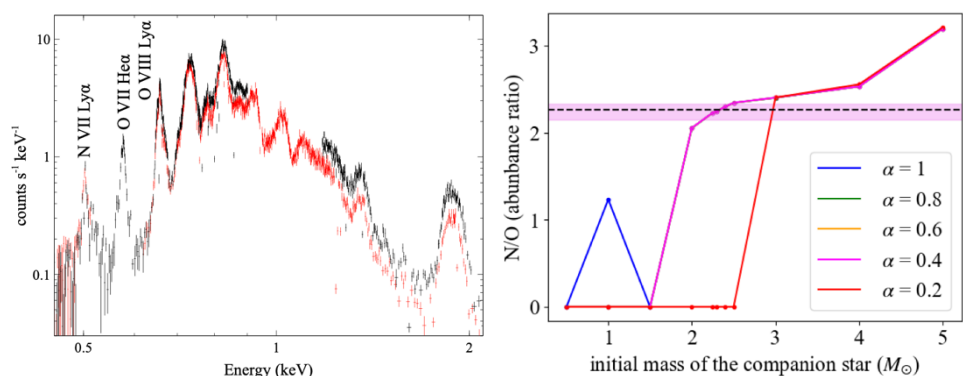


Fig. 1. Left: X-ray spectrum of Kepler's SNR. Right: measured N/O from our observation (the magenta hatched region) and those expected from stellar evolution simulations assuming different initial masses.

核子超流動の性質解明に向けた (α , ${}^6\text{He}$)反応の微分断面積測定

原子核・ハドロン物理学研究室 池水玄

Abstract The pair vibration is a collective excitation associated with the pair correlation in nuclei and unravels the properties of pair condensation in nuclear matter. A new probe for the pair vibration, the (α , ${}^6\text{He}$) reaction, was applied to ${}^{118}\text{Sn}$. We revealed a new candidate for the pair vibration.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

フェルミオンである核子がクーパー対を形成して凝縮する核子対凝縮(超流動)は、核子無限系である核物質に現れる特徴的な現象である。核物質の性質、特に中性子星の相構造や状態方程式との関連が示唆されており、核子対凝縮の性質解明は原子核物理学のみならず、天体分野にまたがる課題である[1]。しかし、対凝縮の秩序変数であるエネルギーギャップの値には大きな不定性が残されているなど、定量的な性質はあまり議論されてこなかった。これらは理論に依存している現状に由来する。そのため、対凝縮の性質を定量的に評価する実験的手法が求められている。

原子核反応から核子対凝縮の有効ポテンシャル形状にアクセスできる手法が理論的に示唆されている[2]。核子対移行反応で現れる対振動モードと呼ばれる、残留核の広い励起エネルギー領域に分散した応答を、例えばSn原子核だと20 MeVまで調べることによって、有効ポテンシャルの曲率や、対凝縮によって系が獲得するエネルギーなどを算出できる。核子対凝縮の中で本研究が対象とする中性子 ${}^1\text{S}_0$ 対凝縮を考えると、対振動モードは中性子対移行反応による残留核の 0^+ 励起状態に対応する。今までも(p, t)反応などを用いて対振動モード探索は行われてきたものの[3]、反応の運動学的制約によって高励起対振動モードへのアクセスが難しかった。そこで本研究では、新たに考案した核子対移行反応(α , ${}^6\text{He}$)を用いることで、20 MeVまでの対振動モードの観測を目指した。

2023年に大阪大学核物理研究センターのサイクロトロン施設にて高精度磁気スペクトロメーターを用い、100 MeVの α ビームを ${}^{120}\text{Sn}$ 標的に入射して ${}^{120}\text{Sn}(\alpha, {}^6\text{He}){}^{118}\text{Sn}$ 反応の微分散乱断面積測定を行った。本測定ではトリガーレスなデータ収集システムを用いることで大きなデータ量を得ることができたと同時に、オンラインデータ処理の基準信号ロストによるデータロス considering 断面積の較正を行った。解析で得られた ${}^{118}\text{Sn}$ の励起エネルギースペクトルと、基底状態、励起エネルギー4.5 MeVの微分散乱断面積をFig. 1, 2にそれぞれ示す。反応の移行角運動量・パリティが $\Delta L^\pi = 0^+$ である対振動モードが角度分布に特徴的な前方ピークを持つことを利用して、先行研究[3]で見つかっている対振動モードを確認したのに加え、新たに 0^+ 励起状態を発見した。今後は測定した20 MeVまでの高励起領域における対振動モード分布の全貌を明らかにしたい。

References

- [1] T. Takatsuka and R. Tamagaki, Prog. Theor. Phys. suppl., 112, 27–65 (1993)
- [2] K. Takahashi et al., Prog. Theor. Exp. Phys., 2023, 8 (2023)
- [3] P. Guazzoni et al., Phys. Rev. C, 78, 064608 (2008)

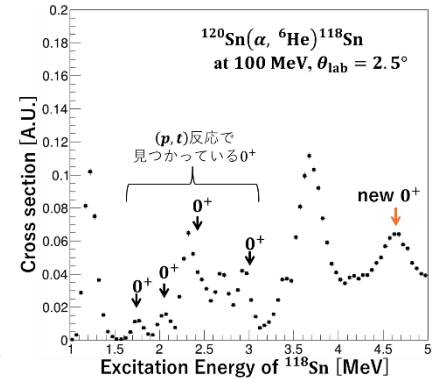


Fig. 1. The excitation energy spectrum for ${}^{120}\text{Sn}(\alpha, {}^6\text{He}){}^{118}\text{Sn}$ at $E_\alpha = 100$ MeV, $\theta_{\text{lab}} = 2.5^\circ$.

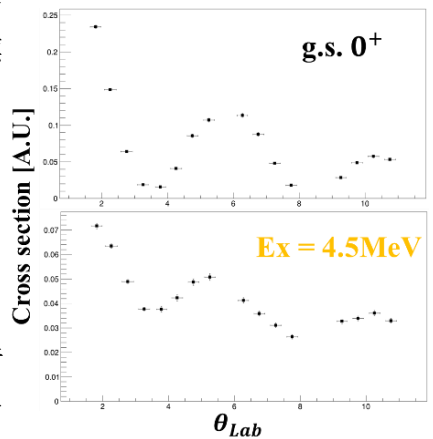


Fig. 2. Differential cross section for the ground state (up) and a new bump at $\text{Ex} = 4.5$ MeV (down).

原子核の高励起対振動探索のための (α , ^6He) 反応スペクトルの多重極展開解析

原子核・ハドロン物理学研究室 伊津野勝英

Abstract The pair vibration is a collective excitation associated with pair correlations in nuclei. To search for pair vibrations, a multipole-decomposition analysis(MDA) was applied to $^{120}\text{Sn}(\alpha, ^6\text{He})$. We revealed a new bump of the pair vibration at 4.6MeV in ^{118}Sn .

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

相の構造を知ることは、自然界の物質を理解するために重要である。核子の超流動相には2種類の素励起モードが存在するが、我々はその内のヒッグスモードに焦点を当て、核子超流動におけるヒッグスモードと考えられている「対振動」について研究している。

無限系の超流動相に見られるヒッグスモードは、系のポテンシャルの形に応じて決まったエネルギーを持っている。それに対して、有限系の原子核内での対振動は、原子核の変形や殻効果によって、0 から 20MeV 程度までの広いエネルギー範囲に分散すると予測されており、これら全てを和則で解析することで、ヒッグスモードが再構築できる[1]。今まで $^{120}\text{Sn}(p, t)$ 反応によって低エネルギー領域は測定されてきた[2]が、高エネルギー領域に対してさらなる対振動モードを見つけるために、運動学的な条件の良い $^{120}\text{Sn}(\alpha, ^6\text{He})$ 反応を用いた実験が我々の研究グループによって実施された。

これにより、広いエネルギー範囲での反応スペクトルを得ることができたが、この中には対振動にあたるモード(0^+)以外にも様々なスピン・パリティの成分が混ざっている。そこで本研究では、対振動成分の抽出を目的として、 $^{120}\text{Sn}(\alpha, ^6\text{He})$ の反応スペクトルに対して、多重極展開法(MDA)を適用した。MDAとは、軌道角運動量移行 ΔL の大きさごとに特徴的な角度分布を持つことを利用して、励起スペクトルを各 ΔL 成分に分離する手法である。

しかし、 $^{120}\text{Sn}(\alpha, ^6\text{He})$ のような2核子移行反応は、粒子が1つずつ移行する2段階移行と、2粒子が同時に移行する1段階移行の2つの機構が存在しているため、この違いにより角度分布の形状が大きく変わる可能性がある。そこで、2つの反応機構が角度分布へどのような影響を及ぼすか調べた。

解析の結果、 $^{120}\text{Sn}(\alpha, ^6\text{He})$ 反応では、この2つの反応機構による角度分布への影響は見られなかった。この原因としては、2段階移行の散乱箇所が考えられる。 $^{120}\text{Sn}(\alpha, ^6\text{He})$ 反応の場合、標的核の吸収効果が大きく、2段階移行での2度の散乱箇所は、互いが近い場所のみに限定される。そのために、1段階移行とほとんど変わらないような経路でしか散乱を行わず、角度分布が一致すると考えられた。

上記の性質を用いて、1段階移行で理論計算を行い、MDAを行った。Fig. 1に結果を示す(対振動は赤に対応)。その結果、過去に(p, t)反応でも観測された対振動モード[2]を再現することに成功し、MDAが機能していることが確認できた。また、4.6MeV付近に新たな対振動モードを発見することができた。

今後は、MDAのより詳細な解析として、MDAに用いるパラメータ依存性などを調べる。また、さらに高励起の領域にもMDAを適用することで残りの対振動成分も探索する予定である。

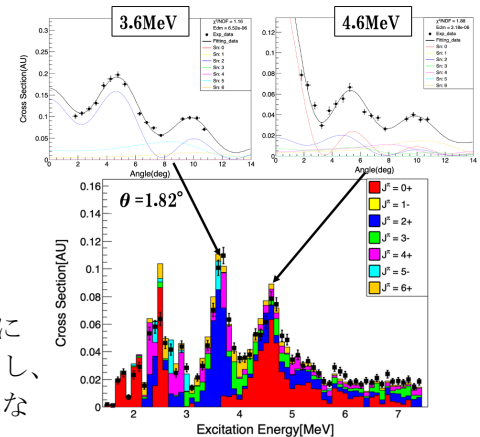


Fig.1. MDA result for excitation energies of $E_x=1.5\text{-}7.5\text{MeV}$

References

- [1] Kengo Takahashi, Yusuke Matsuda, and Masayuki Matsuo *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2023, 083D01 (2023)
- [2] P. Guazzoni and L. Zetta, *PHYSICAL REVIEW C* **78**, 064608 (2008)

磁気スペクトロメータ S-2S の 高分解能実現に向けた解析手法の研究

原子核・ハドロン研究室

岩井沙彩

Abstract The magnetic spectrometer S-2S is used for the spectroscopy of Ξ hypernuclei at J-PARC. The position and the magnetic field of the spectrometer system are basic inputs of the momentum analysis by Runge-Kutta method. Systematic analysis suggested in this research achieved a 10–20% improvement in momentum resolution. © 2025 Department of Physics, Kyoto University

ハイパー核の質量やエネルギー構造を調べることで、ハイペロン（ストレンジクォーク(s)を含むバリオン）と核子間の（YN）相互作用を探求し、一般化したバリオン間相互作用の理解に迫る。しかし、ハイパー核の実験データが乏しいため理論的な解析に基づく YN 相互作用への理解の不定性も大きい。J-PARC E70 実験では $^{12}\text{C}(K^-, K^+)^{12}_\Lambda\text{Be}$ 反応を用いて欠損質量分布を測定し、ストレンジクォークを2つ含むバリオンである $\Xi^-(\text{ssd})$ の束縛状態の存否を明らかにするとともに、得られたピーク位置から ΞN 相互作用の大きさを、状態幅から $\Xi\text{N}-\Lambda\Lambda$ 結合の強度をこれまでにない感度で得ることを目的とする。磁気スペクトロメータ S-2S と有感標的 AFT を用いることで、 $\Delta M = 2 \text{ MeV}/c^2$ （半値全幅、以下分解能に対しては全て半値全幅で示す）の高分解能かつ 100 事象の Ξ ハイパー核束縛状態の観測という高統計を達成する実験である（20 日間 800 k/spill の強度を持つ K^- ビームを用いた場合）。

S-2S は 2 台の四重極電磁石および 1 台の双極電磁石（磁石系総重量 135 トン）、5 台の飛跡検出器、3 台の粒子識別検出器から構成される。S-2S は 2023 年 6 月から運用を開始しているが、その時点における運動量分解能 $\Delta p/p$ の解析値は設計値の 3 倍程度大きく、解析上における分解能改善の余地があることがわかった。本研究では、運動量再構成手法にルンゲ・クッタ法（RK 法）を採用し、設計分解能に向けて解析パラメータの最適化による分解能の改善を目指した。まず運動量解析において重要な飛跡検出器の性能を確認した。検出効率は全ての面で 99% 以上、固有位置分解能は全ての面で 300 μm 以下と、十分な性能を有していることがわかった。さらに、得られた飛跡検出器の性能と実際の実験セットアップの詳細に基づいたモンテカルロシミュレーションを行い、より現実的な運動量分解能を評価した。1.4 GeV/c の運動量を持つ粒子に対して $\Delta p/p \approx 8.0 \times 10^{-4}$ と見積もられ、欠損質量分解能としては $2.5 \text{ MeV}/c^2$ となることがわかった。

RK 法を用いた解析においては、仮定する位置と磁場が現実の状態を再現することが求められる。そこで、位置情報と磁場情報に対して独立に系統的な変更を加え、運動量分解能やカイ二乗の応答を調べた。位置を変更した場合、運動量分解能は数%改善した。一方で磁場マップを変更すると 10–20%改善した。本研究の初期段階では、1.4 GeV/c の運動量を持つ粒子に対して $\Delta p/p \approx 1.68 \times 10^{-3}$ であったのが、磁場マップを変更し運動量分解能が最も良い場合で、 $\Delta p/p \approx 1.44 \times 10^{-3}$ まで改善することに成功した。欠損質量分解能では $3.7 \text{ MeV}/c^2$ から $3.2 \text{ MeV}/c^2$ への改善である。本研究で開発した位置と磁場の調整手法を、交互に繰り返し適用することや、今後さらに取得するエネルギー校正データ（ Ξ や Σ の生成等）にも適応することによって、より精度の高い運動量解析が実現すると期待できる。

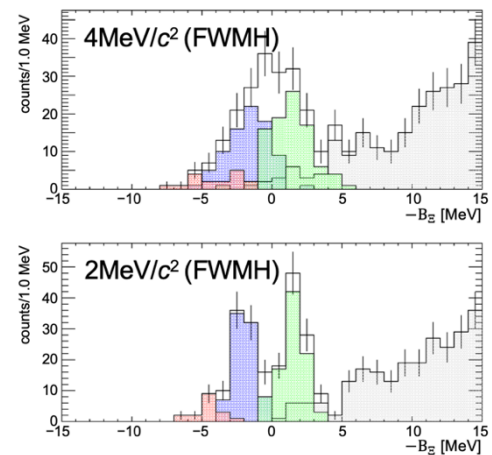


Fig. 1 Expected spectra in the J-PARC E70 experiment with assumption of the missing mass resolutions are 4 and 2 MeV/c^2 which correspond to the beginning of the analysis (top) and the design value (bottom). The parameter optimization analysis developed in the study improved the momentum resolution to be closer to the design value, 3.2 MeV/c^2 .

JLab における $(e, e'K^+)$ 反応を用いた 高精度ラムダハイパー核分光実験のトリガー設計

原子核・ハドロン物理学研究室 岩本哲平

Abstract I designed trigger for the Λ hypernuclear spectroscopy experiment scheduled for 2027 at Jefferson Lab, USA. The grouping-trigger method has been introduced to cut background events which are not on the optics of the spectrometer. This thesis describes outline of the experiment and the trigger development.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

ハイパー核の質量を調べることによってハイペロン-核子相互作用を調べることができる。しかし、ハイパー核の実験データは通常の原子核に比べて非常に乏しい。

米国 Jefferson Lab で 2027 年に予定されている Λ ハイパー核分光実験のトリガー設計を行った。本実験で用いる DAQ の許容レートが 20kHz であるのに対して、見積もられるコインシデンスレートは高々 10kHz である。しかし、予期しない背景事象が混入して許容レートを上回る可能性を考慮して、我々はグルーピングトリガー(GT)法を導入した。GT 法とはビーム光学上期待される粒子検出器のヒットの組み合わせをデータ取得の条件とする手法である (Fig. 1)。信号粒子である K^+ の軌道はモンテカルロ (MC) シミュレーションで取得する。Fig. 2 はプラスチックシンチレータである TOF1X と TOF2X のヒットコンビネーションを示す。2 本の直線の構造が見られるが、上側が MC シミュレーションによる K^+ 、下側が明示的に入力した背景事象で、色付きの 5 つの長方形がグルーピングにおいて設定したデータ取得条件の範囲を示す。このデータ取得条件では信号の生存率が $0.937^{+0.001}_{-0.001}$ 、バックグラウンドの生存率が $0.144^{+0.004}_{-0.004}$ となった。

また、JLab では実際に使用する検出器やフロントエンドモジュールで宇宙線による試験を行った。

本研究では、GT の開発を行い、ラムダハイパー核実験へ向けた DAQ システムの実装開発を進める基礎を構築した。

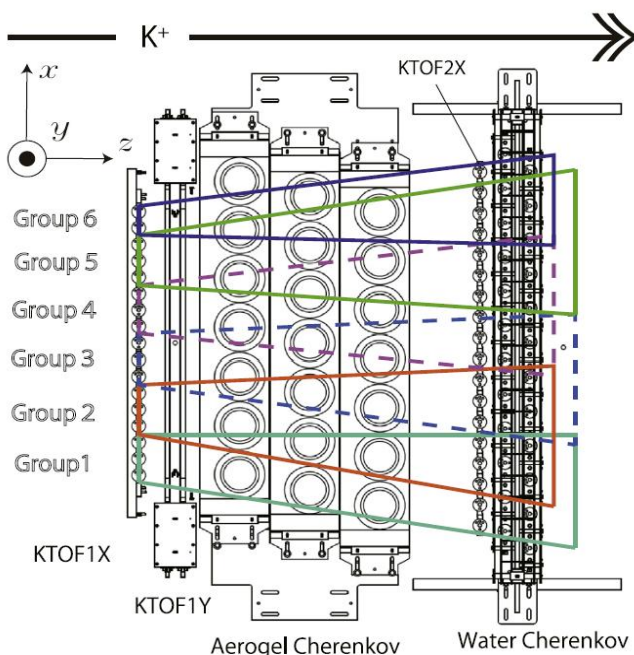


Fig. 1. Conceptual drawing of K^+ detectors.

Colored squares indicate the grouping condition.[1]

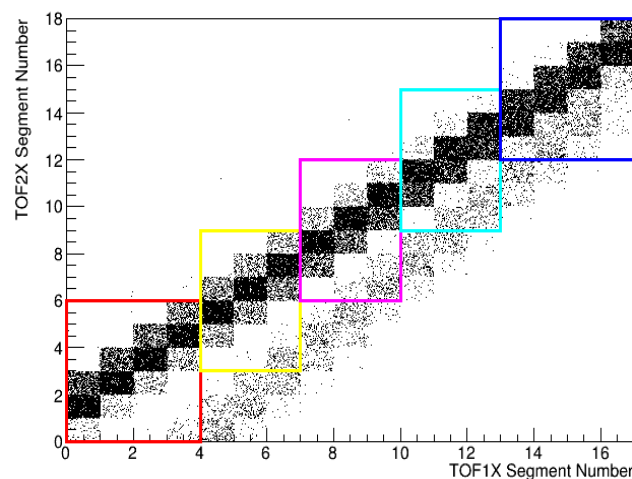


Fig. 2. Hit combination of K^+ and background in TOF1X and TOF2X. TOF1X and TOF2X are the first and the second layers of plastic scintillators arranged in the horizontal direction(X-direction).

References

- [1] T. Gogami et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A 900, 69–83 (2018).

原子核乾板を用いたニュートリノ反応精密測定のための新型シンチレーショントラッカーの開発

高エネルギー物理学研究室 大谷尚輝

Abstract The NINJA experiment aims to precisely measure neutrino-nucleus interactions using a nuclear emulsion. This thesis focuses on the development of a new scintillation tracker for the next physics run, including the design, the position reconstruction methods, and the performance evaluation with tracker prototypes in the positron beam test.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

T2K 実験は J-PARC 加速器で生成したニュートリノビームを 295 km 離れたスーパーカミオカンデで検出するニュートリノ振動実験である。現在、T2K 実験における系統誤差の主要因はニュートリノと原子核の反応モデルの不定性である[1]。特に、主な信号モードである CCQE 反応 ($\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$) のバックグラウンドとなる 2p2h 反応 ($\nu_\mu + n + p \rightarrow \mu^- + p + p$) の理論モデルの不定性が問題となっている。2p2h 反応では終状態に 2 つの陽子が放出されるが、それらの陽子の運動量が低く飛跡が短いため、既存の検出器では位置分解能が不十分でほとんど検出できない。このため、どのモデルが正しいか分かっていない。この問題を解決するために、J-PARC において、原子核乾板を用いたニュートリノ反応精密測定実験である NINJA 実験を行っている。原子核乾板はサブミクロンという非常に高い位置分解能を持つため、他実験では観測不可能な 200 MeV/c 程度の低運動量陽子も捉えることができる。

原子核乾板は優れた位置分解能を持つ一方で時間情報を持たず、実験中に生じた全ての飛跡が蓄積される。そのため、下流のミュオン検出器で検出されたミュオンの飛跡を原子核乾板と直接接続しようとする、原子核乾板内の飛跡の候補が多すぎてマッチングすることができず、原子核乾板に蓄積された飛跡の中でどれがニュートリノ反応によるものか分からない。そこで、NINJA 実験では優れた位置分解能と時間情報を持つトラッカーを間に設置して飛跡をマッチングする。

NINJA 実験では、これまで 2 回の物理ランを行ってきたが、統計量が少なく、今後統計量を増やすことが課題である。そこで、本研究では、過去の 1 m × 1 m のトラッカーよりも大きな 1.3 m × 1.4 m の新型トラッカーを開発し、2025 年秋に開始予定の次の物理ランで用いる標的物質の質量をこれまでの約 1.8 倍に増やして、より多くの統計量のデータ取得を行うことを可能にする。新型トラッカーは 1 枚の散乱体入りプラスチックシンチレータから成り、溝に埋められた複数の波長変換ファイバーと光検出器 MPPC によって、通過した荷電粒子により発生するシンチレーション光を検出する (Fig. 1)。散乱体入りのシンチレータを用いることでシンチレーション光を局在化させ、荷電粒子の通過位置に近いチャンネルほど検出光量が大きくなることを用いて位置再構成を行う。これにより、ファイバーの間隔 10 mm よりもはるかに高い精度で位置再構成が可能であり、チャンネル数を増やさずにトラッカーの大型化が可能になる。

要求される位置分解能 4.6 mm を達成するためには、光量の確保とシンチレーション光の局在化が重要である。そこで、まず宇宙線を用いた測定とシミュレーションにより、光量を十分に確保できる最適なデザインの決定とシンチレーション光の局在化のために最適な散乱体濃度の調査を行った。次に、1 粒子がヒットした場合の位置再構成方法を確立し、陽電子ビームと小型試作機を用いた性能評価により、要求位置分解能よりも良い精度で位置再構成が可能であることを確認した。さらに、2 粒子以上が同時にヒットした場合についての位置再構成手法を確立し、ニュートリノ反応シミュレーションを用いて、要求値よりも良い位置分解能 1.2 mm で位置再構成が可能であることを示した。

References

[1] K. Abe et al., Nature 580, 339-344 (2020).

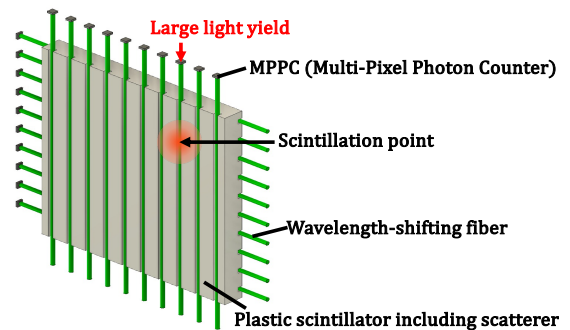


Fig. 1. The design of the new scintillation tracker

1次元長期間進化計算による長寿命原始惑星系円盤の進化過程の研究

天体核研究室 大山航

Abstract Protoplanetary disks (PPDs) are believed to dissipate within 10 Myr. However, recent observations have detected gas in debris disks older than 10 Myr (gas-rich debris disks). We show that gas-rich debris disks can form as remnants of PPDs with few small dusts, using one-dimensional simulations.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

原始惑星系円盤 (PPDs) は一般的に数Myrで散逸すると考えられてきた。しかし、近年の観測によって10Myr以上の年齢にも関わらずガスを保持するデブリ円盤の存在が確認された (ガスリッチデブリ円盤)。このガスの起源については依然未解明である。一つの可能性として、従来考えられていたより長寿命な原始惑星系円盤が存在し、それがガスリッチデブリ円盤となるという説がある (始原ガス説; the primordial-origin scenario) [1]。

この説の妥当性を検討するため、本研究では円盤ガス面密度 Σ の1次元動径方向分布の長期 (大体1-10Myr) 進化を解く数値計算を行った。また、星進化による放射の時間進化による光蒸発率の変化もモデルに組み込んだ。本研究では特にダストが枯渇し、遠紫外線による光蒸発が抑制され、長寿命が期待される円盤に着目した。

本研究の結果からこのような円盤は、比較的重い初期質量 ($M_{\text{disk}} \sim 0.1 M_*$)、弱い乱流粘性 ($\alpha \ll 10^{-2}$) を持つ場合、中心星質量によらず10Myrを超える寿命を持つことがわかった (Fig. 1参照)。幅広いパラメータ範囲で最も長寿命な円盤は $M_* = 2 M_\odot$ の中心星周りで見られ、ガスは $\sim 10^{-10} \text{ au}$ の範囲に残存する。これは早期A型星周りでガスリッチデブリ円盤がよく見つかること、ならびにガスの空間分布の観測結果に一致する。また、計算結果からCO質量について荒い推定を行ったところ、観測されている最も重いガスリッチデブリ円盤の結果と一致した。これらの整合性が始原ガスモデルによるガスリッチデブリ円盤形成の妥当性を補強する。加えて、本研究のモデルでは、中心星降着が円盤寿命と同程度維持された。ただし、ガス降着率は $10^{-8} M_\odot/\text{yr}$ 程度かそれ以下であり、現在の観測結果とは矛盾しない。これはガスリッチデブリ円盤においても、ガス惑星による阻害効果などがなければ降着が維持される可能性があることを示している。よって、降着の観測がガスリッチデブリ円盤の形成シナリオを特定するのに有効である可能性が示された。

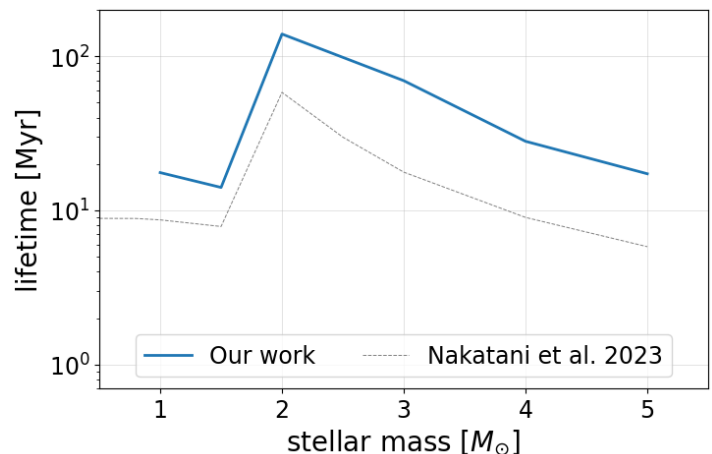


Fig. 1. Dependence of protoplanetary disk lifetimes on stellar mass. The blue line represents our models. The thin dotted line illustrates the one-zone models of [1].

References

- [1] Nakatani *et al.*, ApJL **959** L28 (2023)
- [2] Ooyama *et al.*, arXiv eprints, arXiv:2411.17114

J-PARC MARQ 実験のための MPPC 読み出し回路 CIRASAME の運用試験およびビームファイバー飛跡検出器の性能評価

原子核・ハドロン研究室 岡崎凜太郎

Abstract The charmed baryon spectroscopy will be performed in J-PARC. We plan to track beam particles with Beam Fiber Tracker (BFT) with new front-end electronics, CIRASAME. The test experiment was done using electronics with detectors. Gain adjustment system of MPPC was developed to use CIRASAME in the experiment.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

ダイクォークとはハドロン内部の有効自由度として考えられるクォーク対による構造であり、構成子クォーク模型における missing resonance 問題を解決することが期待される。長きにわたって議論されているが、ダイクォークの存在を裏付ける決定的な実験結果は未だ得られていない。

J-PARC E50 実験は、J-PARC ハドロン実験施設の高強度二次粒子ビームラインである $\pi 20$ ビームラインにおいて実施されるチャームバリオン分光実験[1]であり、現在開発中の MARQ スペクトロメータ (Fig. 1) を用いた MARQ 実験の一つである。チャームバリオンはチャームクォークを 1 つ含むバリオンであり、3 つの軽いクォークで構成されるバリオンではわからないダイクォーク相関の相互作用の強さの違いによる励起状態の準位の違いが確認できるようになると考えられている。本実験では、 $\pi^- + p \rightarrow D^{*-} + Y_c^{*+}$ 反応で生成されたチャームバリオン (Y_c^{*+}) の質量スペクトルを、 π^- ビームと散乱 D^{*-} の粒子特定と四元運動量測定を行い、欠損質量法を用いて算出する。

実験は高計数率環境下で実施され、MARQ スペクトロメータ全体のカウンtrateは 30 MHz 程度と考えられている。このレートに対応するためにハードウェアによるトリガーを必要としない Streaming DAQ を採用し、各検出器のデータ読み出しもそれに対応したフロントエンド回路が作成されている。

MARQ スペクトロメータの中で、入射するビーム粒子の飛跡を検出するシンチレーションファイバートラッカーの開発に関わった。ファイバートラッカーはファイバー状のシンチレーターを俵積み状に重ねたレイヤーを 3 種類の傾きで配置することで粒子の飛跡を追跡する検出器である。シンチレーション光を検出するために MPPC を使用しており、その読み出しには Streaming DAQ に対応した CIRASAME と呼ばれる MPPC 用フロントエンド回路が開発された。私は CIRASAME を用いてファイバートラッカーが測定を行えるように MPPC のゲイン調整システムを開発し、J-PARC K1.8BR ビームラインで実施されたテスト実験で初めて CIRASAME を読み出し回路として運用することに成功した。さらに、テスト実験で得られたデータを元にファイバートラッカーの性能評価も行った。

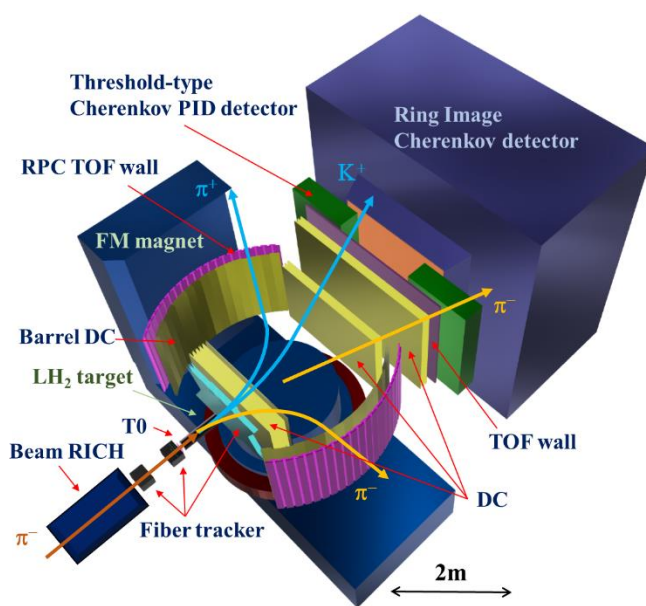


Fig. 1. Overview image of the MARQ spectrometer

References

- [1] Y. Morino *et al.*, Charmed Baryon Spectroscopy via (π, D^{*-}) reaction, J-PARC E50 proposal (2012)

CMB 実験に用いる希釈冷凍機の性能評価と電波吸収体の開発

高エネルギー物理学研究室 笠井優太郎

Abstract. The Simons Observatory seeks insights into early universe by the observation of the cosmic microwave background. I evaluated the dilution refrigerator's cooling capacity for the small aperture telescope for low-frequency band, improving the simplicity and efficiency of the cooling system. Additionally, I developed a radio wave absorber for the low-frequency band to reduce external noise.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測は、宇宙初期に関する貴重な情報を提供する。その中でも偏光 B モード測定は、宇宙初期の急激な加速膨張であるインフレーションの描像を明らかにする重要な手段となる。インフレーションによる原始重力波の強度に相当する量であるテンソル・スカラー比の情報を得ることで、いまだ未知であるインフレーションを生み出す場の情報が引き出せる。

現在、Simons Observatory (S0) 実験が進行中であり、テンソル・スカラー比を 0.003 の精度で求めることを目標の一つとしている。テンソル・スカラー比の測定には大角度スケールの測定が必要であるため小口径の望遠鏡が用いられる。現在、3 台の望遠鏡が完成しており、新たに日本グループから 1 台の低周波数帯域 (27/39 GHz) の望遠鏡 (SAT-LF) を増設する予定である。S0 で唯一低周波数帯域を観測する望遠鏡であり、CMB と混同される他の電波を分離するために必要不可欠である。特に、銀河からのシンクロトロン放射と CMB が混同されうる。低周波数帯域が観測できれば、それらの周波数依存性の違いから分離が可能となる。

S0 では感度上昇のためにさまざまな工夫を施している。検出器には高感度な超伝導検出器である TES ボロメータを用いており、それを動作させるために 0.1K の極低温まで冷却している。また、あらゆるものの黒体放射がノイズ源となるため、検出器の前面に搭載されるレンズなどの光学系も 1 K に冷却されている。さらに、窓を通して外環境から入ってくる外来の熱放射ノイズ「迷光」を抑制する工夫もされている。光学系が搭載される筒状の構造体の内壁には電波吸収体が貼り付けられ、迷光を吸収している。このように、望遠鏡内部に由来するノイズを減らすために冷却システムを活用し、さらに外来ノイズを減らすために電波吸収体を用いている。これら双方を最適化することにより低ノイズかつ効率的な観測を実現できる。

まず、本研究では SAT-LF で用いる冷却システムの最適化を行なった。冷却能力を正確に把握して設計を最適化すると、よりシンプルで効率的な望遠鏡の設計が可能になり、開発・運転コストを削減できる。そこで、熱源を冷却システムの各部に配置して人為的に熱を与えられる冷却性能評価システムを構築した。SAT の冷却システムは希釈冷凍機とパルスチューブクーラー (PTC) から構成される。特に、PTC に対して人為的に熱を与えることにより、PTC の冷却能力がどのように検出器の温度に影響するかを調査した。その結果、2 台用いられる予定であった PTC を 1 台に減らしても冷却能力の面で問題ないことがわかった。

次に SAT-LF で用いられる電波吸収体の開発も行なった。これまでの S0 では 50 GHz 以上の周波数帯域に特化した電波吸収体を用いており、SAT-LF がターゲットとする低周波数帯域では反射率が 1% を上回っていた [1]。本研究では低周波数帯域用に形状を最適化することで 1% を切る反射率を実現した。また、構造の変更に伴う機械的歪みの影響の削減や残留ガスの問題にも対処し、SAT-LF 実機への搭載に目処をつけた。

本研究で取り組んだ冷却システムの最適化から PTC の台数を 1 台減らすという効率的かつシンプルな望遠鏡の設計が可能となった。さらに、電波吸収体の開発から SAT-LF の迷光をより低減し低ノイズ化への道を開拓した。今後の展望として、SAT-LF 実機を作製して本研究による最適化の実用性を検証する。

References

[1] T. Otsuka, et al., "Material survey for a millimeter-wave absorber using a 3D-printed mold," Appl. Opt. 60, 7678-7685 (2021).

CMB 観測実験 GroundBIRD の焦点面検出器アライメントと 長期運用に向けた角度データ取得システムの最適化

高エネルギー物理学研究室 片岡敬涼

Abstract GroundBIRD is a CMB telescope which aims to measure optical depth to reionization. To enhance its availability and performance, we implemented two upgrades: an improved data acquisition system for the elevation monitor and an optimized telescope rotation around its optical axis. We describe these upgrades in detail in this thesis.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の温度異方性の観測によって宇宙を記述する標準理論が構築されてきた。現在ではCMBの偏光観測が大きなテーマとなっており、偏光を通してインフレーション理論やニュートリノ質量和といった未だ解明されていない課題に迫ることができると期待されている。

GroundBIRDはスペイン領テネリフェ島の標高 2,400 m に位置する大角度スケールの観測に特化したCMB望遠鏡である。望遠鏡を1分間で20回転させる高速スキャンによって大気揺らぎの影響を抑制した観測を行う。高速スキャンがもたらす効果を最大限に発揮するために、時間応答性の良い超伝導検出器MKIDを焦点面検出器として採用し、2023年5月から本格的な観測を開始した。大角度スケールでの偏光Eモードを観測することで、宇宙再電離期を特徴付け、さらにニュートリノ質量和と縮退したパラメータである光学的厚みを誤差 $\sigma \sim 0.01$ で測定することを目指す[1]。

観測を続けてデータを蓄積する段階にある現在、安定して長期運用をすること、そして質の良いデータを取得することが要求される。しかし、本研究の開始前の観測システムにおいて2つの未解決課題があった。1つは望遠鏡仰角データ取得システムが硬直的であること、もう1つは天球上での検出器配置がスキャン軸から傾いていることである。本論文ではこれら2つの課題に対する改善と最適化を行なった。

仰角データの取得にFPGAボードを使用しているが、そのシステムの運用をリモート主体で行えず、長期運用をする上で障壁となっていた。本論文ではボード内のFPGAチップにOSを搭載し、OS上からソフトウェアを動かすことでデータ取得システムの操作性向上を図った。また、信号処理の確認と安定動作の確認を行った後、望遠鏡システムへのインストールを完了させた(Fig. 1)。

検出器MKIDはCMBの偏光信号と大気放射由来のノイズを検出するが、スキャン軸上の異なる検出器間で信号の差分をとることで、共通した大気ノイズを差し引くことができる。しかし、配置が傾いていると検出器間で観測する大気が揺らぎ、差分をとってもノイズが残ってしまう。これではデータの質が落ちてしまう。そこで、天球上での検出器配置が望遠鏡のスキャン軸に対して約 6° 傾いていることを月の観測データから見積もった(Fig. 2)。この結果をもとに、望遠鏡を視線方向軸の周りに回転させることで天球上での検出器配置の改善を施し、さらに月と木星の観測データを用いて改善を確認した。加えて、スキャン軸上の検出器間で信号の差分をとり、検出器間での相関の強さを示す指標に焼き直し、回転の前後で比較することで観測する大気の揺らぎを抑制する結果を得た。

以上2点の改善と最適化を通してGroundBIRDが持つ観測性能の向上を成功させた。



Fig. 1. Installation of new DAQ system.

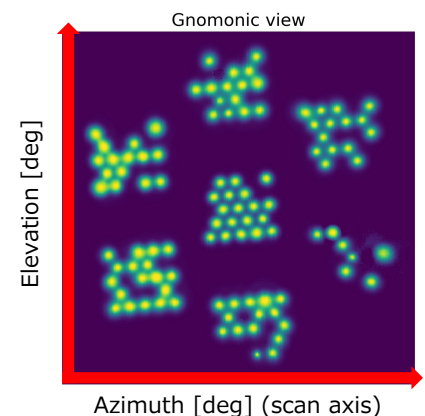


Fig. 2. Tilted detector alignment.

References

- [1] K. Lee et al, 2021, ApJ, 915, 88 .

θ 項をもつ 2 次元コンパクトボソンの解析

基礎物理学研究所原子核理論グループ 片山 颯

Abstract In order to study the nature of Confinement, we analyze 2D Compact Boson theory with θ term using Modified Villain formulations. In this system, we can understand Witten effects for the continuum theory and the lattice theory. Also, we discover that this system is interesting from the viewpoint of Renormalization Group.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

双対超伝導描像の立場から、クォーク閉じ込めを説明するにはモノポール凝縮が必要不可欠である。しかし理論に θ 項があるとき、モノポールは Witten effect により θ に比例した電荷をもち、モノポールだけでなく、ダイオン凝縮が起こると考えられる。このように理論に θ 項があるとき、閉じ込めの性質は変容すると期待され、実際 Cardy、Rabinovici による lattice $U(1)$ ゲージ理論を用いた解析からモノポール凝縮だけでなく、ダイオン凝縮も起こることが指摘された[1, 2]。さらにこの toy model の相構造の解析から、Higgs 相や Confinement 相だけでなく、非常に多くの Oblique Confinement 相が実現され、豊かな相構造を持つことが指摘された。しかしこの解析は物理的直観に基づいたもので、厳密な格子理論に基づく解析ではない。また近年 $U(1)$ lattice ゲージ理論において厳密なモノポールの取り扱いや θ 項の構成ができる Modified Villain (MV) 型格子理論が提案された[3]。そこで本研究では、 θ 項をもつ閉じ込めの性質を調べるため、 $U(1)$ lattice ゲージ理論による toy model を MV 型で構成し、そこで実現される相構造の厳密な解析をしたいと考えた。そこで本研究では 4 次元の問題をさらに簡便化した θ 項をもつ 2 次元のコンパクトボソンの理論について調べた。

本研究ではまず θ 項をもつ 2 次元コンパクトボソンの連続理論について調べた。その結果、この系による Witten effect が dual な Vertex op. の次元に θ 依存が入る形で理解できることがわかった。次にこの系の格子理論を MV 型で構成し、連続理論で得た性質を厳密に再現できるか確認した。特に Witten effect をみるために dual な場の書き換えを行うと、結合定数が連続理論と同様の変換がされることを確認できた。さらに $\theta + 2\pi$ で dual な Vertex op. の 2 点関数の期待値を計算をすると、Vertex op. と dual な Vertex op. を含む 4 点関数の θ での期待値に帰着できることを見た。さらに、その結果ダイオン演算子の配置が厳密に定まり、Wilson 型では実現できない厳密な lattice 理論であることがわかった。

またこの系では dual な Vertex op. の次元が θ 依存することから、繰り込み群の観点からも面白い model であることがわかった。例えば摂動項

$$g_a \cos(\phi_a)$$

を加えたとき、この項が低エネルギーの物理に影響を与えるかどうかはコンパクトボソンの半径と θ に依存して決まる。渦自由度を持つ 2 次元 XY 模型がコンパクトボソンの半径により低エネルギーの物理が gapped か gapless かが決まることは昔から指摘されてきたが、この系では半径に加えて θ が重要なパラメーターになり、より複雑な系となっている。

本研究で進められた部分はここまでであるが、今後の発展としては物質場を導入し、Cardy、Rabinovici が行ったように豊かな相構造を持つ理論を構成することができると考えている。さらに今回の 2 次元コンパクトボソンの理論で得た知見を活かして、4 次元 Maxwell 理論に応用し、

$SU(N)$ Yang-Mills 理論の閉じ込めに対する新たな知見を得たいと考えている。また dual な Vertex op. を含む摂動項の振る舞いは非自明であり、繰り込み群的解析もしたいと考えている。

References

- [1] J.L. Cardy and E. Rabinovici, Nucl. B, Vol. **205**, pp. 1-16 (1982).
- [2] J.L. Cardy, Nucl. Phys. B, Vol. **205**, pp. 17-26 (1982).
- [3] T. Sulejmanpasic and C. Gattringer, Nucl. Phys. B, Vol. **943**, p. 114616 (2019).

MARQ 実験用 Multi-gap Resistive Plate Chamber のための 新素材高圧印加電極の開発

原子核・ハドロン物理学研究室 小池諒太郎

Abstract We plan the MARQ experiments, a series of hadron spectroscopies, at the J-PARC pi20 beamline. MRPCs in the MARQ spectrometer will serve for particle identification. We tested various coatings for High-Voltage electrode of MRPCs. The results of test experiments using new electrode candidates will be reported.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

バリオンの基底状態の性質はクォーク模型によって非常に良く記述されるが、クォーク模型で予測されるバリオンの励起状態の中で実験的に発見されていない状態が多く存在する。この問題を解決する模型として 2 つのクォーク間で相関を持つとするダイクォーク模型が提唱されている[1]。バリオン内部でのクォークの自由度を解明するにあたり、励起状態についての詳細な実験が期待されている。特に u, d クォークより質量の大きい c クォークを 1 つ含むチャームバリオンの励起状態の生成比から、ダイクォークの効果を検証できる。チャームバリオンの励起状態について精密分光を行うことで、バリオン内部の構造を明らかにすることができると期待される。

様々なハドロン分光・探索実験と、そのための汎用的な MARQ スペクトロメーターの建設が、J-PARC の $\pi 20$ ビームラインにて計画されている。チャームバリオン分光実験 (J-PARC E50 実験) もその 1 つであり、 π^- ビームを液体水素標的に照射し、チャームバリオンの励起状態の質量スペクトルを測定する[2]。欠損質量法により励起エネルギー $1 \text{ GeV}/c^2$ までの各励起状態を生成・測定することが目的である。MARQ スペクトロメーターにおいて、散乱粒子の π, K, p のうち運動量が $1.7 \text{ GeV}/c$ までのものは飛行時間法により識別する。そのためには高時間分解能を持ち、磁場中で動作し、大面積を覆うことができる検出器が必要であり、これらの特徴を兼ね備えた Multi-gap Resistive Plate Chamber (MRPC) が飛行時間法による粒子識別を担当する。

MRPC は荷電粒子検出用のガスチェンバーである。図 1 に示すように、ガラスなどの高抵抗板を積み上げて狭いガスギャップを作る。最も外側のガラスに貼られた電極に高電圧を印加することで荷電粒子が通過した際に電子雪崩を作り出す。高圧印加電極の抵抗率が高すぎると電圧降下が大きくなり一様な電場が得られなくなる。一方、抵抗率が低すぎると誘起される電荷が分散しパフォーマンスの低下を引き起こしてしまう。そのため典型的には、グラファイトを含み $10^5\text{--}10^7 \Omega/\text{cm}^2$ の抵抗率を持つ素材が用いられる。日本での MRPC 開発には半導電性のテープが使用されてきたが、製造中止のため入手困難となった。他の半導電性テープの使用も試みられてきたが代用になるものは見つからず、日本における MRPC の制作が困難となっていた。本研究ではガラスやフィルムに塗布する形態の素材を探索した。

新素材を用いて MRPC を作成し、高圧印加電極としての使用試験および使用した際の MRPC の性能評価を、SPring-8 にて電子ビームを用いて行った。複数の候補で MRPC として正常に動作することが確かめられ、得られた検出効率、時間分解能からどの候補が高圧印加電極に適しているか議論した。

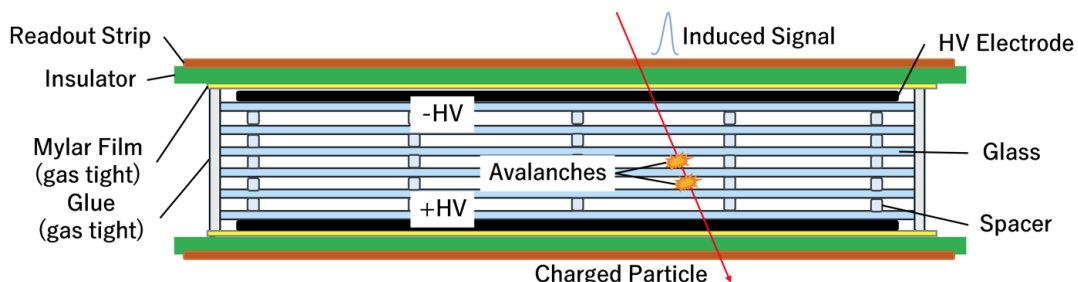


Fig. 1. Design of the MRPC. The HV electrode is shown in black.

References

- [1] M. Anselmino *et al.*, Rev. Mod. Phys. 65, 1199 (1993).
- [2] H. Noumi *et al.*, J-PARC E50 proposal (2012)

鉄輝線のパルス遅延による X 線連星 4U 1538-522 での 自転公転整列の観測的検証

宇宙線研究室 齊藤裕次郎

Abstract The kick of a neutron star at a supernova explosion can cause spin-orbit misalignment in high-mass X-ray binaries [1]. We determined which direction (prograde or retrograde) the neutron star is spinning relative by measuring the pulse lag of the Fe K α emission line in the X-ray binary 4U 1538-522.
© 2025 Department of Physics, Kyoto University

電波パルサーの観測から、中性子星が大きい固有速度を持っていること、および固有速度とスピンの向きが相関している傾向が知られている。この固有速度は中性子星が超新星爆発で数 100 km/s の反跳を受けた結果と考えられているが、反跳のメカニズムには未だ複数の候補があり統一的な理解は得られていない。中性子星を含む大質量 X 線連星の 20% ほどでは反跳により自転と公転の向きに 90 度以上のずれ(逆行)が生じる可能性が指摘されており [1]、このずれは軌道進化やコンパクト天体合体の際の重力波形に対して影響を及ぼすため、検証が重要である。しかし、順行と逆行を観測的に判別することは難しく、急速なスピン周期の変動から中性子星の逆行を示唆する研究もあるものの [2]、この変動を中性子星の順行により説明する研究もあり [3]、まだ議論の段階にある。

本研究では、自転や公転の周期だけでは回転方向の情報を得ることはできないが、中性子星からの強力な X 線ビームが、連星の相手の光学主星の表面を照射した際のパルスした Fe K α 蛍光輝線は、中性子星の自転の向きによって異なる位相遅れを生じることに着目した。そこで、NuSTAR 衛星、Suzaku 衛星、NICER 望遠鏡による食を持つ大質量 X 線連星 4U 1538-522 の観測データの軌道位相・パルス位相分解したスペクトル解析を行った。軌道位相分割した解析では、中性子星が手前の軌道位相で Fe K α 輝線の等価幅が大きい結果を得た。この変動は光学主星の表面や星風を Fe K α 輝線の放射起源として輻射輸送のモンテカルロ・シミュレーションにより再現することができた。また、Fe K α 輝線の強度はパルス位相によっても変動しているが、連続成分のパルスに対し光路差のみでは説明のつかない大きな位相遅れがあり、かつ軌道位相によって遅れの値が大きく異なっていることを発見した。光学主星表面を Fe K α 輝線の放射起源として中性子星の自転と光路長の 2 つの遅れの効果を考慮することにより、遅れの軌道位相変動が中性子星が順行している時にのみ説明可能であることを明らかにし、順行を逆行から区別することができた。この系の軌道周期は大質量 X 線連星の中では短い ~3.7 日であり、軌道周期の短い系では超新星爆発の際の反跳で中性子星が逆行している確率は低い。ため、反跳の観点では自然である。昨年度打ち上がった XRISM 衛星では、高いエネルギー分解能により鉄輝線のプロファイルの詳細に調べることが可能なため、本研究の手法を発展させて多くの系で系統的に中性子星の自転と公転のずれを調べることで、中性子星の反跳や重力波源への理解に繋がると期待される。

References

- [1] Brandt, N. & Podsiadlowski, P., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 274, 2 (1995)
- [2] Mönkkönen, J., Doroshenko, V., et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 494, 2 (2020)
- [3] Liu, J., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 496, 3 (2020)

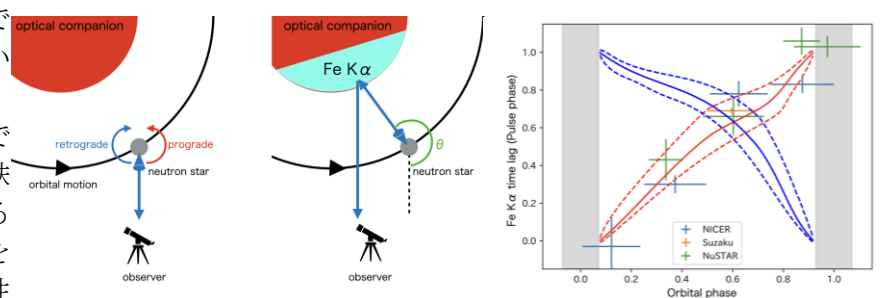


Fig. 1. left: Schematic diagram of Fe K α pulse time lag. Right: Fe K α pulse time lag relative to the continuum and predicted curve as a function of the orbital phase at the prograde (red) and retrograde (blue) cases.

漸近対称性に映るゲージ理論の赤外構造について

素粒子論研究室 清水慧人

Abstract We investigate infrared structures of gauge theories through the asymptotic symmetry, which gives physical local transformations in gauge theories. After providing a careful review, we examine the action of the asymptotic symmetry on asymptotic states in theories where confinement occurs.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

場の量子論の大きな目標の一つは、あるエネルギースケールで定義された理論の低エネルギーでの振る舞い、すなわち赤外構造を理解することである。例えば量子電磁気学における光子のように massless 粒子を含む理論の赤外構造は、たとえ摂動論が有効であったとしても非自明になりうる。このことは古くから知られている制動放射過程における赤外発散の問題[1]からも明らかであろう。他にも、低エネルギー光子の放出過程の散乱振幅に関する定理である soft photon theorem や、電磁波の通過前後で変化するゲージ場の配位に関する electromagnetic memory effect という観測可能現象なども、光子が massless 粒子であることに由来する非自明な赤外構造の現れである。同様の現象は重力理論でも起こり、そちらも soft graviton theorem[2]や gravitational memory effect[3]として広く知られている。

近年になって、これら soft theorem と memory effect が漸近対称性と呼ばれる対称性の Ward-Takahashi identity と等価であることが示された[4] (Fig. 1.)。漸近対称性とはゲージ理論の持つ局所的対称性変換のうち無限遠で消失しないもののことであり、普段扱うようなゲージ冗長性とは異なる真の物理的な対称性である。

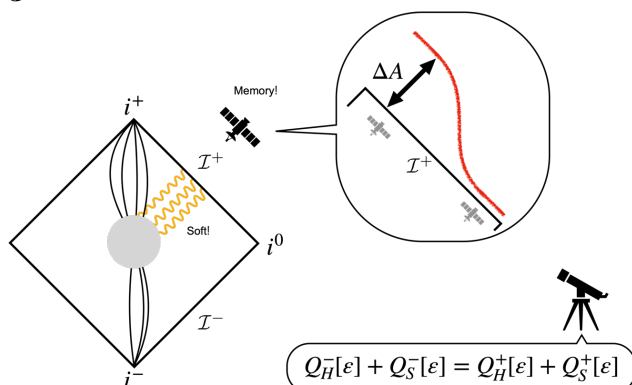


Fig. 1. Soft theorems and memory effects are equivalent to the Ward-Takahashi identity of the asymptotic symmetry.

本修士論文ではまず 4 次元の量子電磁気学の漸近対称性を生成する漸近電荷を構成し、その保存則あるいは Ward-Takahashi identity が soft photon theorem や electromagnetic memory effect と等価であることをレビューする。次に量子色力学でも同様の構成をし、漸近電荷のうち線形な項にのみ着目すれば同様に soft gluon theorem や color memory effect が導かれることをレビューする。しかし、量子色力学など閉じ込めが起きている理論では漸近状態として現れる状態には制限がつき、それに応じて漸近対称性の実現にも変更があるはずである。最後に、このことを同じく閉じ込めを起こす 3 次元の量子電磁気学を例にとって調べ、それを基にして閉じ込めと漸近対称性の関係性について推察する[5]。

References

- [1] F. Bloch and A. Nordsieck, “Note on the Radiation Field of the electron”, Phys. Rev. 52 (1937) 54–59
- [2] S. Weinberg, “Infrared photons and gravitons”, Phys. Rev. 140 (1965) B516.
- [3] Y. B. Zel’dovich and A. G. Polnarev, “Radiation of gravitational waves by a cluster of superdense stars”. Sov. Astron., Vol. 18, p. 17, 19
- [4] A. Strominger, “Asymptotic Symmetries of Yang-Mills Theory”, JHEP 07 (2014) 151 [1308.0589].
- [5] Keito Shimizu and Sotaro Sugishita, work in progress.

de Sitter 時空における ホログラフィ原理とバルク再構成

京都大学基礎物理学研究所 素粒子論グループ 新名 宏太郎

Abstract. We construct CFT states as a holographic dual to local excitations in dS₃. Unlike AdS₃/CFT₂, dS₃/CFT₂ requires combining two bulk states in a CPT-invariant way. This state determines dS Green's functions in the Euclidean vacuum, which are different from ones via Wick rotation from AdS.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

量子重力理論の顕著な性質の一つとして、ホログラフィ原理が活発に研究されている。これは、「任意の時空の量子重力理論とその境界上の1次元低い場の量子論が等価になる」という予想である。ホログラフィ原理の代表的な具体例として、 $d + 1$ 次元の Anti-de Sitter (AdS) 時空上の量子重力理論とその境界上の d 次元の共形場理論 (Conformal Field Theory, CFT) との等価性である AdS/CFT 対応が知られている。また、AdS/CFT 対応以外にも、de Sitter (dS) 時空上の量子重力理論と CFT の間の双対性として dS/CFT 対応が予想されているが、AdS/CFT 対応に比べると謎が多く、仮説の段階にとどまっている [2]。特に、dS/CFT 対応が AdS/CFT 対応と同様に実現される場合、dS 時空上の重力理論に双対な CFT は非ユニタリ性を持つことが知られている。

AdS/CFT 対応の一例として、3次元 AdS 時空上の自由スカラー場の局所励起が、2次元 CFT 側では大域共形対称性に関する石橋状態 [3] に対応することが知られている [4]。この結果は、「1次元低い場の量子論から重力理論がどのように再構築されるのか？」という素朴な問いに対し、対称性と表現の観点から一つの答えを与えている。しかしながら、これが dS/CFT 対応の枠組みの中でどのように実現されるかは未解明であった。

本研究では、dS 時空の持つ大域対称性と CFT の対称性を対応付けることで、3次元 dS 時空のスカラー場の局所励起に対応する双対な CFT 上の量子状態を構成することに成功した [5]。この中で、dS 重力に対応する CFT が特別な非エルミート内積を持つことが明らかになった。この非エルミート性は dS/CFT 対応における非ユニタリ性と深く関係すると考えられるが、[5] ではこの非エルミートな状態に CPT ゲージ化という射影を施すことで、dS 時空上の物理的なスカラー場の局所励起に対応する状態を導けることを示した。この状態は、AdS 時空の結果の単なる解析接続とは異なり、物理的な Green 関数を導く。

本修士論文の目的は、筆者らの論文 [5] に基づき、3次元 dS 時空上のスカラー場の局所励起に対応する CFT の量子状態を構成する流れを示し、この状態が物理的な Green 関数を導くことを確認することである。

References

- [1] Juan Martin Maldacena. The Large N limit of superconformal field theories and supergravity. Adv. Theor. Math. Phys., Vol. 2, pp. 231–252, 1998.
- [2] Andrew Strominger. The dS / CFT correspondence. JHEP, Vol. 10, p. 034, 2001.
- [3] Nobuyuki Ishibashi. The Boundary and Crosscap States in Conformal Field Theories. Mod. Phys. Lett. A, Vol. 4, p. 251, 1989.
- [4] Masamichi Miyaji, Tokiro Numasawa, Noburo Shiba, Tadashi Takayanagi, and Kento Watanabe. Continuous Multiscale Entanglement Renormalization Ansatz as Holographic Surface-State Correspondence. Phys. Rev. Lett., Vol. 115, No. 17, p. 171602, 2015.
- [5] Kazuki Doi, Naoki Ogawa, Kotaro Shinmyo, Yu-ki Suzuki, and Tadashi Takayanagi. Probing de Sitter Space Using CFT States. 5 2024.

γ - γ 摂動角相関法を用いた In 錯イオン形成における超微細気泡の作用

核ビーム物性学研究室 竹下 清人

Abstract Perturbed angular correlation measurements were performed for ^{111}Cd in O_2 -ultrafine bubble and O_2 -saturated water at pH 4, 7, 8, 10, and 13 to investigate the ultrafine bubble's functionality. No explicit difference was found, while $G_{22}(t)$ observed at pH 10 and 13 implies the existence of ions of lower symmetry.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

直径 1 μm 未満の気泡である超微細気泡 (Ultra Fine Bubble, UFB) は数ヶ月にも及ぶ長い寿命や表面が負に帯電しているなど一般的な気泡とは異なる性質を持ち、多彩な機能性を発現することから、農業や工業、水産業、医療など様々な分野で応用が進んでいる。その一方、可視光の波長よりも小さいことから、従来の気泡の研究手法が適用できず、UFB の基礎的な研究はあまり進んでいない。

我々の研究室では観測困難な UFB の基礎的な物性について原子核実験の手法を活用し研究を進めてきた。これまでも UFB 内に生成させた不安定核 ^{125}Xe の摂動角相関測定(PAC)から UFB の内部圧力の直接測定に成功し、通常の泡で成立する Young-Laplace の式が UFB では破綻することを明らかにした[1]。

本研究は PAC 法を UFB の多彩な機能性発現の機構の研究に適用する試みである。PAC 実験において広く使用される放射性核種 ^{111}In を同位体を持つ In は水中で水分子や OH^- を配位子とした錯イオンを形成するが、その形態は pH によって大きく変わる。Demille らは ^{111}In の PAC 測定により摂動係数 ($G_{22}(t)$) がこの錯イオンの pH 依存性を反映することを報告している[2]。また UFB 表面の負の帯電が陽イオンに作用することで機能が発現する報告もあり[3]、UFB を導入した ^{111}In 溶液の PAC 測定では $G_{22}(t)$ の pH 依存性に变化が現れる可能性がある。

本研究では pH が 4,7,8,10,13 の ^{111}In を含む O_2 -UFB 水溶液および O_2 -飽和水について PAC 測定を行い、 $G_{22}(t)$ の比較検証を行ったので報告する。

放射性医薬品である塩化インジウム (^{111}In) 注射液を、 O_2 -UFB (約 10^6 個/mL) の Na_2CO_3 水溶液または O_2 -飽和 Na_2CO_3 水溶液によって調製した pH が 4,7,8,10,13 の試料について、 ^{111}In の EC 壊変による ^{111}Cd の 245 keV 準位についての γ 線カスケードの 4counter PAC 測定により $G_{22}(t)$ を得た。pH が 4,7,8 において Demille らの報告と同様の $G_{22}(t)$ (図 1: 紫線) が得られている。UFB の作用に関する明瞭な差異は見られず、UFB の濃度を上げるなどして更なる検証が必要である。一方 pH が 10,13 の O_2 -UFB 水溶液および O_2 -飽和水いずれの場合も Demille らの報告にないパターン (図 1: 緑線) が観測された。これは ^{111}In が対称性の低い錯イオンを形成していることを示唆しており、In 錯イオンの pH 依存性に関する新たな理解に繋がる可能性がある。

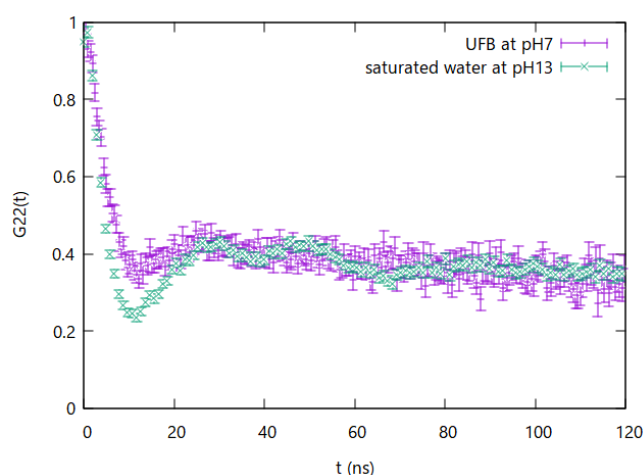


Fig.1. The $G_{22}(t)$ time spectra of ^{111}Cd measured at pH 7 and 13.

References

- [1] M. Tanigaki, T. Yamakura, D. Hayashi, Y. Ueda, A. Taniguchi, Y. Ohkubo, Y. Tokuda, Direct Measurement of the Internal Pressure of Ultrafine Bubbles Using Radioactive Nuclei, Chem. Eng. Technol. **46** (2023) 1773-1781
- [2] G.R.Demille et al., Perturbed gamma-ray directional correlations studies of indium(III) complexing in aqueous solution, Chemical physics letters volume 44 number 1, 1976
- [3] 南川久人 他, マイクロバブルのゼータ電位が水耕コマツナの生育に及ぼす影響, 実験力学 Vol.18 No.3, 2018.

混合状態の対称性・相転移とホログラフィー原理

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 田耕健也

Abstract: Symmetries and their breaking are essential in physics, especially for ground and thermal states. Recent advancements have extended this focus to general mixed states, which are expected to demonstrate richer phase structures. We explore symmetries of mixed states within open systems and ensembled systems in the context of holography.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

人類は、一般相対論を用いて重力や時空の物理を、量子論を用いて微視的スケールの物理を記述することに成功してきた。しかし、これら2つを統合する量子重力理論の構築は未解決であり、現代物理学における最も重要かつ挑戦的な課題の一つである。特に、ブラックホールや初期宇宙といった極端な重力場の中で量子効果が無視できないような極限領域の物理を記述する上では、量子重力理論を統一的に理解する必要があるとされる。量子重力理論の構築において鍵となるのがホログラフィー原理、特に AdS/CFT 対応である。AdS/CFT 対応は、 $(d+1)$ 次元 AdS 空間（バルク）上の重力理論と、その d 次元境界（バウンダリ）上の共形場理論（CFT）の双対性を主張し、相補的な解析を可能にする。

本修士論文でテーマとするのは、AdS/CFT 対応の文脈において現れる混合状態である。特に、開放系（部分系）の量子状態としての混合状態と、アンサンブル平均を通じて現れる量子状態としての混合状態という、2つの側面に注目する。閉鎖系では見られない現象や相転移が開放系では起きうることが知られており、AdS/CFT 対応の文脈でも豊かな物理が期待される。また、複数のバウンダリを持つ重力理論の双対として、バウンダリ上の量子系のアンサンブル平均が議論されている。これまで筆者は、部分系に制限された縮約密度行列および縮約遷移行列の性質に注目した研究[1, 2, 3]などを行ってきた。本修士論文の前半では、関連事項のレビューを行いつつ、これらの研究や現在進行中の研究について述べる。

相転移の議論において、対称性とその破れは重要な役割を担ってきた。昨年、一般の混合状態の対称性とその破れが主に開放系の量子相の文脈で注目され、大きく発展した[4, 5]。混合状態の対称性は、strong symmetry 及び weak symmetry と呼ばれる2段階が考えられる。これらの違いは、bra 空間と ket 空間それぞれに対する独立な変換全体の下での対称性か、それらを同時に同じ要素で行う対角的な変換のみの下での対称性かの違いとして解釈できる。この2段階の対称性がそれぞれ自明なものに破れるだけではなく、混合状態で特有の strong-to-weak symmetry breaking と呼ばれる2段階の対称性の間の遷移が起きうる。純粋状態における通常の対称性の破れは荷電演算子の2点相関関数の振る舞いで判別できることに對し、混合状態の strong-to-weak symmetry breaking は荷電演算子の Rényi-2 correlator と呼ばれる特殊な相関関数などの振る舞いで判別される。本修士論文の後半及び本発表では、混合状態の対称性とその破れについての最近の進展を概説した後、それらがホログラフィー原理の文脈で現れる具体的な例 [6] を紹介する。

References

- [1] K. Shinmyo, T. Takayanagi, K. Tasuki, JHEP **02** (2024) 111.
- [2] H. Kanda, T. Kawamoto, Y-k. Suzuki, T. Takayanagi, K. Tasuki, Z. Wei, JHEP **03** (2024) 060.
- [3] J. Harper, H. Kanda, T. Takayanagi, K. Tasuki, Phys. Rev. Lett. **133** 031501.
- [4] P. Sala, S. Gopalakrishnan, M. Oshikawa, Y. You, Phys. Rev. B **110** (2024) 15, 155150.
- [5] L. A. Lessa, R. Ma, J-H. Zhang, Z. Bi, M. Cheng, C. Wang, [arXiv:2405.03639].
- [6] T. Kawamoto, K. Tasuki, M. Yamazaki, in preparation.

SCRIT 実験におけるルミノシティーモニター用 位置検出器の開発

ビーム物理学研究室 立花万梨子

Abstract The SCRIT group aims to perform electron scattering experiments targeting short-lived radioactive nuclei using SCRIT method. We developed a position detector for more accurate luminosity measurement. To evaluate the performance of the position detector, electron scattering experiments were carried out at the SCRIT facility.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

原子核の内部構造に関する情報は原子核理論モデルの検証において極めて重要である。我々は理化学研究所の SCRIT 施設において、開発した新しい内部標的生成方法（SCRIT 法: Self Confining RI Ion Target 法[1]）を活用し、不安定な原子核を対象にした電子散乱実験を実施することを目指している。SCRIT 施設では、未知の散乱断面積を決定するため標的からの制動輻射の数から実験中のルミノシティーを測定する。そのためルミノシティーの絶対値を測定する測定系（LMon: Luminosity Monitor）の開発が必要になる。LMon によるルミノシティーの測定は、異なる電子ビームエネルギーを使った散乱電子データを結びつけるためにも重要になる。LMon は制動輻射のエネルギーと数を測定するカロリメータと空間分布を測定する位置検出器から構成される。位置検出器で測定した制動輻射の空間分布をシミュレーションで再現することが精度のよいルミノシティーを得るために重要になる。本研究では、制動輻射から生成される電子・陽電子対を測定するルミノシティーモニター用の位置検出器を開発した。位置検出器は 1 mm×1 mm のシンチレーションファイバーと MPCC を組み合わせたものを 2 セット用いて 2 次元空間分布を測定する。線源などを用いて開発した位置検出器の系統誤差評価を行った。

またルミノシティーモニターとしての性能評価のために SCRIT 施設にて ^{208}Pb 、 ^{132}Xe を標的にした電子散乱実験を行った。位置検出器の系統誤差は電子散乱実験での位置検出器の統計誤差は同程度であった。位置検出器から得た制動輻射の空間分布をシミュレーションで再現することが出来なかったため、信頼できるルミノシティーの値を得ることが出来なかった。原因として制動輻射が LMon まで通過するとき当たる構造物の詳細が不明なこと、今回の実験で加速器コンディションが通常と異なっていたことが考えられる。開発した位置検出器を導入した LMon でルミノシティーを測定するには更なる空間分布についての調査が必要である。また今後 LMon で求めたルミノシティーと散乱電子測定系から導出されたルミノシティーを比較することによってルミノシティーモニターの信頼性を確かめたい。

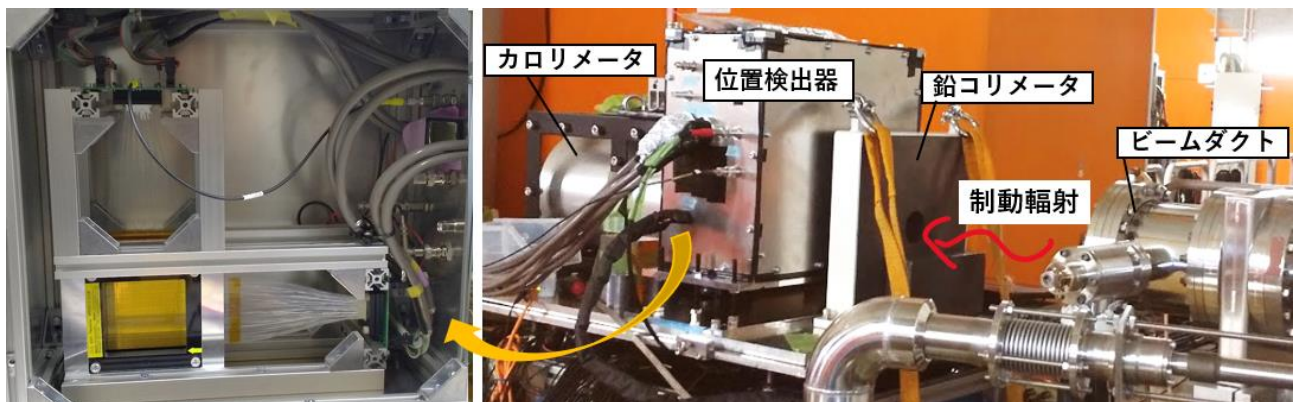


Fig.1. Developed position detector(left), LMon(right)

References

- [1] M.Wakasugi *et al.*, Nucl. Instr. Meth. **A532**, 216-223 (2004).

相対論的ハートリー・フォック理論によるスピン偏極核物質の状態方程式の研究

原子核理論研究室 橋刀生

Abstract We used the Relativistic Hartree-Fock theory to calculate the equation of state (EOS) of spin-polarized nuclear matter. From the calculated EOS, we defined the “spin slope parameter” in the same way as the ordinary slope parameter, and investigated the correlation between the slope parameter and the spin slope parameter.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

核物質の状態方程式 (EOS) は、中性子星の内部構造の探索や超新星爆発のシミュレーションなど、天体現象の幅広い問題で重要となっている。中性子星は極めて中性子過剰な系であるため、中性子過剰な核物質の EOS を高い精度で計算する必要があり、そのための理論的および実験的な研究が数多くなされてきた。近年では、中性子星合体におけるキロノヴァの観測から、核子のスピンの向きが上向きか下向きのどちらかに偏った、スピン偏極核物質が存在する可能性が示唆されており[1]、中性子過剰な核物質だけでなく、スピン偏極を考慮した核物質の EOS を精度良く記述することが重要となっている。

スピン偏極のない中性子過剰な核物質に対して、原子核理論の立場からは、EOS と相関を持つような有限核の観測量が提案されており、地上の原子核実験から核物質の EOS に制限をかけるための研究が行われている。例えば、中性子過剰な核物質の EOS を特徴付ける量としてスロープパラメータという量が定義されており、スロープパラメータと ^{208}Pb のような重い原子核の中性子スキン厚の間には、強い線形相関があることが知られている[2]。そのため、スロープパラメータの値に制限をかけるために有限核の中性子スキン厚を測定する実験が行われている[3,4]。これに対して、スピン偏極核物質に対しては、EOS と相関を持つような有限核の観測量は提案されておらず、スピン偏極核物質の EOS に拘束を課すことを目的とした実験はほとんど行われていない。

本研究の目的は、スピン偏極核物質の EOS と相関を持つような有限核の観測量を探索し、地上の原子核実験からスピン偏極核物質の EOS に制限をかける手法を提案することである。本研究では、核子のスピン自由度を自然に扱える相対論的 Hartree-Fock 理論を用いて、スピン偏極核物質の EOS を計算した。このとき、中性子と陽子のスピンの向きに偏極したアイソスカラー偏極と、それらが逆向きに偏極したアイソベクター偏極の 2 種類のスピン偏極を考慮した。さらに、スピン偏極のない中性子物質に対してスロープパラメータを定義するのと全く同様の方法で、スピン偏極核物質に対してスピンスロープパラメータという量を定義し、スロープパラメータとスピンスロープパラメータとの間の相関を調べた。アイソスカラー偏極を考慮した場合、スロープパラメータとスピンスロープパラメータの間には負の線形相関が見られ、アイソベクター偏極を考慮した場合は、スピンスロープパラメータはスロープパラメータにほとんど依存せず一定の値を取る、という結果が得られた。そして、これらの相関が用いた模型の相対論的構造に由来するという定性的な説明を与えることに成功した。以上の結果より、中性子スキン厚とスロープパラメータとの間の相関を通して、中性子スキン厚の測定からアイソスカラー偏極のスピンスロープパラメータに対して制限を加えられる可能性はあるが、アイソベクター偏極のスピンスロープパラメータはほとんど決定されない、という結論が得られた。

References

- [1] B. D. Metzger, T. A. Thompson, and E. Quataert, *Astrophys. J. Lett.* 856 (2018), 101.
- [2] X. Roca-Maza, M. Centelles, X. Viñas, and M. Warda, *Phys. Rev. Lett.* 106 (2011), 252501.
- [3] D. Adhikari, *et. al.*, *Phys. Rev. Lett.* 126 (2021), 172502.
- [4] J. Zenihiro, *et. al.*, *Phys. Rev. C* 82 (2010), 044611.

高感度 MeV ガンマ線観測実験 SMILE-3 に向けた μ -PIC 読み出し基板の開発と放射性廃棄物の放射能測定

宇宙線研究室 塚本博丈

Abstract In this study, I developed a new TPC readout board for SMILE-3, featuring the clock synchronization and the automatic recovery of ASIC latch-up to enhance TPC operation. Also, I measured radioactive waste with ETCC at Fugen and identified the radioactive sources.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

銀河中心領域における電子陽電子対消滅線の空間分布は *INTEGRAL*/SPI[1]で観測され、銀河中心に集中するバルジ成分と銀河面に広がるディスク成分が見られるが、未だ陽電子起源は不明である。陽電子起源の解明には詳細な空間分布画像が必要だが、従来の MeV ガンマ線望遠鏡では光子の到来方向を一意に定めることができず統計的推論方法に結果が大きく依存してしまう上に、MeV 帯域で発生する大量のバックグラウンドを除去できないため、現状の観測結果では議論を進めることができない。この現状を打破するため、我々は電子飛跡検出型コンプトンカメラ ETCC (Electron-Tracking Compton Camera) を開発している。ETCC は従来コンプトン法に加えて電子飛跡を検出することで、光子の入射方向を一意に決定し、かつ強力なバックグラウンド除去能力を持っている。次期気球実験計画 SMILE-3 (Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on balloon Experiments) では電子陽電子対消滅線の詳細な空間分布から暗黒物質・原子ブラックホールの存在に迫るため、前回実験 SMILE-2+から空間分解能を 2~3 倍、有効面積を 5~10 倍向上させ、エネルギー分解能を FWHM 8~9 % at 511 keV に改善する必要がある。

本研究では ETCC で使用しているガス TPC (Time Projection Chamber) 運用性向上を目指し、SMILE-3 に向けて新たに信号読み出し基板の開発を行なった(図 1)。開発した基板で取得した電子飛跡にノイズが発生したが、原因がクロストークだと突き止め、配線を修正した基板で問題なく TPC のデータを取得できることを確認した。更に以前の基板にはない新機能であるクロック同期機能と ASIC ラッチアップ自動復旧機能も実装し、TPC 全体の運用性を向上させた。

また ETCC を用いた天体解析手法のノウハウを獲得できることや ETCC の応用利用として放射能濃度測定の効率化が図れることから、新型転換炉原型炉ふげんで放射性廃棄物のモニター測定を行った。環境放射能濃度 $\sim 0.1 \mu\text{Sv}$ の場所で、 $\sim 1 \mu\text{Sv}$ の強い放射が見られた領域を視野に収めて測定したところ図 2 のガンマ線画像が得られた。領域ごとのエネルギースペクトル(図 3)から放射が強い領域の線源は ^{60}Co である可能性が高く、ETCC の応用利用性を示すことができた。

References

[1] L. Bouchet et al., *ApJ*, 720, 2, 1772 (2010)

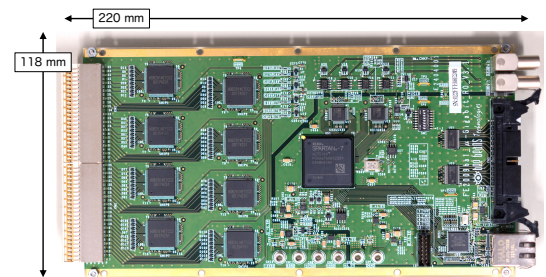


Fig. 1. A New Readout Board

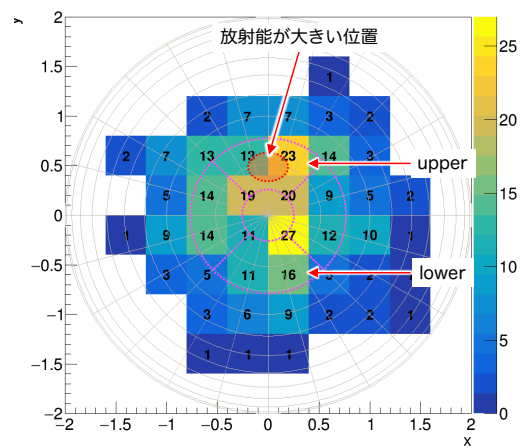


Fig. 2. Gamma-ray image at Fugen

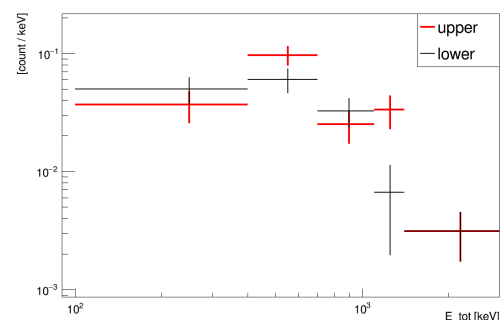


Fig. 3. Gamma-ray energy spectrum at Fugen

非定常過程におけるブラックホールエントロピーの定義について

素粒子論研究室 徳竹温也

Abstract The dynamical black hole entropy has recently introduced [1], which can be defined for any classical diffeomorphism covariant Lagrangian theory of gravity and satisfies the first and second laws of black hole thermodynamics for arbitrary two horizon cross-sections to first order for non-stationary perturbations from a stationary black hole background.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

ブラックホールの熱力学的な性質は注目を集め、ブラックホールエントロピーについて盛んに研究されている。ブラックホールのエントロピー S は、ブラックホールの質量 M 、角運動量 J 、電荷 Q に対して、ホライズンの角速度 Ω 、電位 Φ を用いて、以下の摂動式、熱力学第一法則を満たすものとして定義される。

$$T\delta S = \delta M - \Omega\delta J - \Phi\delta Q.$$

温度 T はホーキング温度であり、ブラックホールの表面重力を用いて定義される。Einstein の一般相対論においては Bekenstein-Hawking エントロピーで与えられ、イベントホライズンの面積に比例することが知られている。一方で、一般の微分同相共変な重力理論に対しては、Wald エントロピーと呼ばれる表式で与えられる。

しかしながら、これらのエントロピーには以下のような不満点がある。本来、エントロピーが満たすべき性質として、熱力学第一法則及び熱力学第二法則（エントロピーの非減少性）は、任意の過程について成立すべきものであるが、上で挙げたエントロピーは、定常ブラックホール背景時空に非定常な摂動を加えた場合の有限（アフィンヌル）時間の過程に対する熱力学第一法則、熱力学第二法則に対応するものを持たない。それどころか、JKM 不定性とよばれる不定性が原因で、非定常な時空ではホライズンの任意断面に対してエントロピーを評価することができない。つまり、これらのエントロピーは有限（アフィンヌル）時間の過程によるエントロピー変化を議論できない。

近年、Hollands, Wald, Zhang によって提案された[1]、動的なブラックホールエントロピーがこれらの問題を解決した。このエントロピーは任意の微分同相共変な古典重力理論に対して、定常ブラックホール時空に非定常な摂動の 1 次の寄与を加えたブラックホール時空の、イベントホライズンの任意の断面に対して JKM 不定性なく次のように定義される。

$$S_{dyn} = \int \frac{2\pi}{\kappa_3} (Q_\xi - \iota_\xi \mathbf{B}).$$

ここで κ_3 は非定常時空に対する表面重力の定義の一つであり、 ξ は摂動の背景となる定常ブラックホール時空の対称性を表すキリング場で、 Q_ξ はそれに付随するネーターチャージであり、 $\mathbf{B}$ は理論のラグランジアンから定まる量である。そしてこのエントロピーは、定常ブラックホール時空からの、非定常な摂動に対して、摂動の 1 次で有限（アフィンヌル）時間の熱力学第一法則を満たし、外場に対するヌルエネルギー条件の下で熱力学第二法則を満たす[2]。なお、ヌルエネルギー条件は、物理的に意味のある物質場が満たすと考えられている条件である。またこの議論で、表面重力、すなわち温度に対する摂動も含むような場合でも、表面重力の摂動による項は摂動の 2 次以上であって無視できることが言える。

また、一般相対論に対して動的ブラックホールエントロピーを考えると、摂動の 1 次までで見かけのホライズンの面積に比例することが言える。

本修士論文では以上の動的ブラックホールエントロピーの性質をレビューする。今後の展望として、動的ブラックホールエントロピーを 2 次元重力に対して適用し、AdS-CFT 対応と比較すること、熱力学第一法則の議論で摂動のより高次を考慮し、温度変化を含む非平衡熱力学的な効果を見ることを目指す。

References

- [1] S. Hollands, R.M. Wald and V.G. Zhang, *The Entropy of Dynamical Black Holes*, [arXiv:2402.00818].
- [2] M.R. Visser and Z. Yan, *Properties of Dynamical Black Hole Entropy*, [arXiv:2403.07140].

ベクトルテンソル重力における ブラックホール摂動の有効理論

天体核研究室 富塚祥伍

Abstract In this thesis, we study the dynamics of odd-parity perturbations on a static and spherically symmetric black hole background with timelike vector field based on the Effective Field Theory (EFT) approach. We derive master equations of perturbations and calculate quasinormal mode frequencies for some parameters demonstrating deviations from general relativity.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

一般相対論は重力に関して現在観測されている現象をよく記述する。しかしその多くは弱い重力場に関する現象である。強い重力場に関する現象は、連星ブラックホール合体による重力波である GW150914[2]で初めて観測された。重力波はその後も多く受かっており、これを用いることで、今まで理論的にしか考えることができなかった強重力領域を観測と比較することができるようになった。特に次世代重力波観測機 LISA[5]などでは重力波に関する感度が向上し、より詳細な強重力領域に関する情報が得られると期待されている。このとき、重力波の一般相対論からのずれを監視することにより、強重力領域において一般相対論がどの程度よい記述となっているのかを、観測的に判断することができる可能性がある。一般相対論に代わる理論として、スカラーテンソル重力やベクトルテンソル重力などが提案されている。これらは、計量テンソルに加えてスカラー場やベクトル場を重力のセクターに用いることで、重力に関して一般相対論と異なる予言をする。特にベクトル場を用いると、スピンの奇数であることから、斥力的な効果を生むことができ、ハッブルテンションや S8 テンションなどを解決する可能性があると期待されている。これらのような理論を念頭に、一般相対論からのずれを観測するにあたり、個別の理論を用いてそれぞれで観測量を導出することも可能である。しかし理論の峻別のためには、理論を統一的に扱う枠組みを用いて、そこから観測量を導出するほうが効率的だと考えられる。本修士論文では、「有効場の理論 (EFT)」の方法を用いる。EFT では、対称性の自発的破れのパターンと力学的自由度を仮定するだけで、低エネルギーの摂動のダイナミクスを統一的に記述できる。

EFT の方法は、スカラーテンソル重力の分野において、ブラックホール時空における摂動の解析に用いられていた[3][4]。近年[1]において、ベクトルテンソル重力に対する、任意の背景時空かつ時間的な背景ベクトル場についての EFT が構築された。これを用いることにより、ベクトルテンソル重力におけるブラックホール時空での摂動に関する有効的な解析が可能となる。

本修士論文では、[1]で導入されたベクトルテンソル重力の有効理論の枠組みで、背景時空と背景ベクトル場が、静的球対称な場合を考えた。背景ベクトル場により時間方向の座標変換対称性が自発的に破れるが、このとき、ベクトル場のゲージ変換と組み合わせることにより、部分的に時間方向の座標変換対称性が回復する。この部分的に回復した時間方向の座標変換と、空間方向の座標変換に関する対称性を満たす一般的な作用を摂動展開することで、パリティ奇成分の摂動に関するマスター方程式を導出した。また、このマスター方程式を用いて、いくつかのパラメータで準固有振動数を求めた。特に、静的球対称な背景量のもとでは、重力セクターとベクトルセクターに関してマスター方程式が分離することを示した。このとき重力セクターに関しては、スカラーテンソル重力の文脈で求められていたマスター方程式[3]と完全に一致する。しかし観測される重力波は2つのマスター変数の線形結合で表されるため、観測によりスカラーテンソル重力とベクトルテンソル重力を区別できる可能性がある。

References

- [1] K. Aoki *et al.*, JCAP **03** (2024) 012.
- [2] LIGO Scientific, Virgo Collaboration, B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 06, 061102 (2016).
- [3] S. Mukohyama *et al.*, JCAP **10** (2022) 050.
- [4] S. Mukohyama *et al.*, JCAP **07** (2023) 050.
- [5] LISA Collaboration, M. Colpi *et al.*, (2024), arXiv:2402.07571

^8He における dineutron 相関および monopole 励起における 3 体クラスター相関

原子核理論研究室 中川昂星

Abstract We analyze dineutron cluster correlation in ^8He based on the microscopic cluster model. We consider not only 3-body cluster dynamics but dineutron breaking induced by the spin-orbit interaction. Each contribution in 0_1^+ , 0_2^+ state is discussed. We also apply this framework to ^{12}C and ^{10}Be .

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

真空中の2中性子は束縛に及ばないが核物質中や原子核表面など他核子からの引力の元では安定化し、ダイニュートロン (^2n と表す) と呼ばれる強い空間相関を示す中性子対を形成することがある。ダイニュートロンは中重核[1]から中性子物質[2]まで様々な核子多体系で見られるが、 ^8He の 0_1^+ 状態においても様々な殻模型的成分の混合によりダイニュートロン相関が生まれる[3]ことから、ダイニュートロンをクラスターと呼ばれる空間局在した部分系としてみなすという描像が可能である[4]。その描像に基づく理論計算[4,5]によりアイソスカラー型のモノポール (IS0) 遷移強度が励起 0^+ 状態で大きな値を取ることが示されており、発達したクラスター構造を持つことが予想されていた。近年理研にて $^8\text{He}(0_2^+)$ の候補となる状態が見つかりその状態に大強度の IS0 遷移強度が測定された[6]ことから、 0_2^+ 状態で発達したダイニュートロンクラスター構造を持っているという見方はさらに強固なものになった。しかし $^8\text{He}(0_2^+)$ のクラスター間の相対運動を詳細に取り扱った研究は存在せず、 ^8He におけるダイニュートロン構造は明らかになっていない。

本研究では微視的クラスター模型で $\alpha+^2\text{n}+^2\text{n}$ の3体クラスター構造を記述し、生成座標法によって3体クラスター間の相対運動の寄与を精密に取り入れた。一方、殻模型的な観点に立てばスピン軌道力にダイニュートロンの壊れた $0p_{3/2}$ 軌道の閉殻配位も重要であるため、反対称化準クラスター法を用いて1つもしくは2つのダイニュートロンが壊れた配位を作成し、これらを重ね合わせて波動関数を構築した。エネルギーや平均二乗半径を算出して先行の理論研究との比較により本枠組みの妥当性を議論した後、各状態の解析を通して 0_1^+ 状態ではコンパクトな、 0_2^+ 状態では空間的に発達した3体クラスター構造が主要な寄与を持ち、IS0 遷移が実験のように大きな値を示すことを確認した。加えて 0_1^+ 状態ではダイニュートロンが2つ、 0_2^+ 状態では1つ壊れている効果が有意に含まれており、3体クラスター構造に大きく影響を与えることが明らかになった。同一の手法を用いてこれらの性質を 3α クラスターの描像が確立されている ^{12}C と比較し、クラスター間の空間相関やクラスターの壊れに関して共通点や相違点を議論した。 ^{12}C も ^8He と同様に 3α クラスター構造が主要な寄与を持つことを確かめたが、 0_2^+ においてクラスターの壊れが起こっていなかった。 α とダイニュートロンというクラスターの種類の違いによってクラスター間の距離と相互作用の関係に明確な違いがあるということが示唆され、その違いにより ^8He と ^{12}C の3体クラスター構造に差異が生じることを明らかにした。また、本手法を $2\alpha+^2\text{n}$ の3体クラスターとして ^{10}Be に適用したところ、3体構造やダイニュートロンの壊れの効果が ^8He と同様に重要であり、 0_2^+ 状態で IS0 遷移強度が大きな値を示すという結果が得られた。一方で 0_2^+ 状態でダイニュートロンの壊れにより現れる2体クラスター構造のうちコンパクトな配位の影響も無視できないこと、異なる空間サイズを持つ3体クラスター構造が共存していることなど ^{10}Be に特有の性質も見られた。

References

- [1] N. Pillet, N. Sandulescu, P. Schuck, Phys. Rev. C **76**, 024310 (2007)
- [2] M. Matsuo, Phys. Rev. C **73**, 044309 (2006)
- [3] K. Hagino, *et. al.*, Phys. Rev. C **77**, 054317 (2008)
- [4] Y. Yamaguchi, *et. al.*, Phys. Rev. C **108**, L011304 (2023)
- [4] Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. C **76**, 044323 (2007)
- [5] F. Kobayashi, Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. C **88**, 034321 (2013).
- [6] Z. H. Yang, *et. al.*, Phys. Rev. Lett. **131**, 242501 (2023)

高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた初段ミュオントリガー アルゴリズムの最適化

高エネルギー物理学研究室 中川徹郎

Abstract We have optimized a muon hardware trigger algorithm that can cope with many more background events at the High-Luminosity LHC-ATLAS experiment. We report that we have achieved high trigger efficiency, including low transverse momentum muons below 10 GeV.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

欧州原子核研究機構（CERN）にある周長 27 km の円形加速器 Large Hadron Collider (LHC) では世界最高の重心エネルギーでの陽子陽子衝突実験が行われている。加速器の内部の陽子ビームはいくつかの塊（バンチ）に分割されていて、それぞれのバンチは LHC の周回軌道上で交差する。その衝突点の一つに設置された ATLAS 検出器は陽子衝突により発生する粒子を観測する。2030 年よりビームミノシティをそれまでの約 3 倍に増強した高輝度 LHC の運転が予定されていて、バンチ交差あたりの陽子衝突数もまた約 3 倍に増える。既存のシステムを高輝度環境下に用いると背景事象が大幅に増加するためトリガーにおける閾値を大幅に引き上げる必要があり、トリガー効率が著しく低下する。したがって、高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けてトリガーシステムや検出器のアップグレードが必要である。

ATLAS 実験のエンドキャップ部初段ミュオントリガーでは、磁場領域の外部に設置された Thin Gap Chamber (TGC) 検出器及び磁場領域の内部に設置された複数の検出器の情報を用いてミュオン飛跡の横運動量 (p_T) を判定し、これに基づいてトリガーを発行する。高輝度 LHC では TGC 検出器の回路系を刷新することで全てのヒット情報を大規模 FPGA に送ることができ、さらに処理時間が増加する。これらのアップグレードを活用することで高精度な飛跡再構成が可能となる。

本研究では、検出器の理想的な配置からのずれ（ミスアライメント）に対してロバストかつミュオンの検出効率が改善する飛跡の再構成アルゴリズムを開発した。従来のアルゴリズムでは p_T が 20 GeV 以上の飛跡の p_T 再構成効率は 93.7 % で、ミスアライメントがある場合には 85.9 % に低下する。これは従来のアルゴリズムではミュオンによるヒットが厳密に直線上にあることを要請しているためである。ミスアライメントを補正するためには検出効率が低いままデータの蓄積を待たなければならない。新たに開発したアルゴリズムではこの要請を緩和することで p_T が 20 GeV 以上の飛跡の p_T 再構成効率は 94.5 % に改善し、ミスアライメントがある場合でも 93.5 % までの低下にとどまる。さらに、現状のアルゴリズムには低い p_T を持つミュオンの飛跡再構成効率を回復する余地があることを発見し、新たなアルゴリズムを導入することで検出効率を 8 % 程度改善できることを示した。Fig.1 に本研究で開発したアルゴリズムを導入する前後でのミスアライメントの有無に対する p_T 再構成効率の比較を示す。

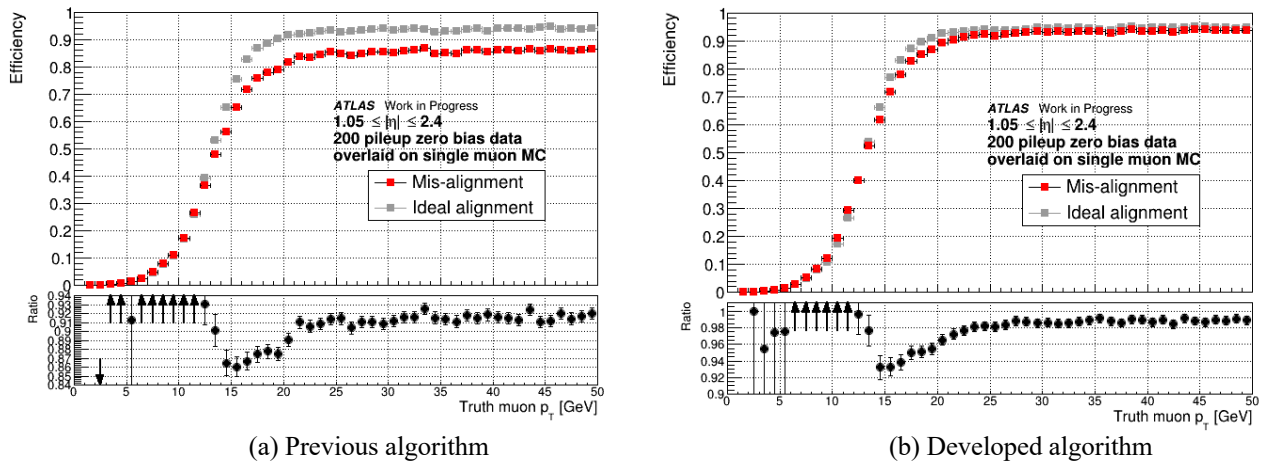


Fig. 1. Trigger efficiency as the function of muon transverse momentum with the ideal alignment and with a detector mis-alignment using (a) the previous and (b) the new algorithm.

中重核領域の陽子弾性散乱測定を用いた 新反跳陽子テレスコープの性能評価

原子核・ハドロン物理学研究室 中田智也

Abstract A new recoil proton telescope array has been developed for proton elastic scattering measurements in neutron-rich unstable nuclei. The performance of the telescope array was evaluated using ^{53}Sc beams at 300 MeV/nucleon. In addition, the angular distribution of proton elastic scattering for ^{50}Ca at $81^\circ \leq \theta_p \leq 85^\circ$ has been measured.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

中性子と陽子の量子多体系である核物質の状態 s 方程式 (Equation of State: EoS) の精密決定は、原子核物理学における重要なテーマの一つである。対称核物質の EoS は明らかになっている一方で、中性子過剰な非対称核物質では、EoS の振る舞いは未だに決定されていない。非対称核物質の EoS で最も重要なパラメータである対称エネルギー項 $S(\rho)$ は、中性子星などの高密度天体の理解に欠かせない。しかし、安定核より密度が大きい領域での $S(\rho)$ は解明に至っておらず、様々なアプローチによる実験的研究が進められている。

対称エネルギー項 $S(\rho)$ へのアプローチの一つに中性子スキン厚 δR_{np} の測定がある。これは、中重核領域の二重魔法核では $S(\rho)$ と δR_{np} の間に関連があることが知られており、 δR_{np} の測定によって $S(\rho)$ を間接的に決定することができるためである。私たちのグループでは、不安定核ビームを用いた逆運動学での陽子弾性散乱 (Elastic Scattering of Protons with RI beams: ESPRI) による δR_{np} の測定を進めており、 ^{132}Sn の陽子弾性散乱測定に成功している。ESPRI 実験では、よりアイソスピン非対称度の大きい原子核の核子密度分布の精密決定を目指しており、そのフラッグシップとして中性子過剰な不安定核 ^{52}Ca の陽子弾性散乱測定を計画している。しかしながら、大強度 RI ビームを誇る理化学研究所 (理研) RI ビームファクトリー (RIBF) においても ^{52}Ca ビームのビーム強度は小さいため、従来の ESPRI 検出器では十分な統計量を得ることが難しい。そこで、新たな ESPRI 検出器としてアクセプタンスの大きい新反跳陽子テレスコープを開発している (ESPRI+プロジェクト)。

本研究では、理研のグループ (TRIP MESA プロジェクト[1]) と共同で、不安定核弾性散乱測定のための検出器アレイ DELTA [2] を開発し、その性能評価を行った。DELTA は、2 枚のシリコンストリップ検出器(SSD)と GAGG(Ce)カロリメータからなる dE - dE - E 検出器であり、ESPRI+と同様のセットアップで構成されている。2024 年 5 月に、主に 300 MeV/nucleon の ^{53}Sc や ^{50}Ca からなる中重核領域の不安定核ビームを用いた性能評価実験を理研 RIBF で行った。本測定では、反跳陽子のエネルギーと散乱角の相関から励起エネルギーを決定し、DELTA の励起エネルギー分解能を評価した。その結果、 ^{53}Sc 陽子散乱において、DELTA の励起エネルギー分解能は $\Delta E_x = 0.66 \text{ MeV}$ (1σ) と求められた(Fig. 1)。これは、計画されている ^{52}Ca 陽子散乱測定における基底状態と第一励起状態の弁別に必要な分解能を持つことを示す結果となった。また、系統的な評価が不十分であるものの、陽子の反跳角 $81^\circ \leq \theta_p \leq 85^\circ$ において、 ^{52}Ca の近傍核であり物理的意義が大きい ^{50}Ca の陽子弾性散乱の微分断面積を測定することに成功した。本測定で得られた知見をもとに、 ^{52}Ca 陽子弾性散乱測定の実現に向けて新反跳陽子テレスコープの開発を進めていく計画である。

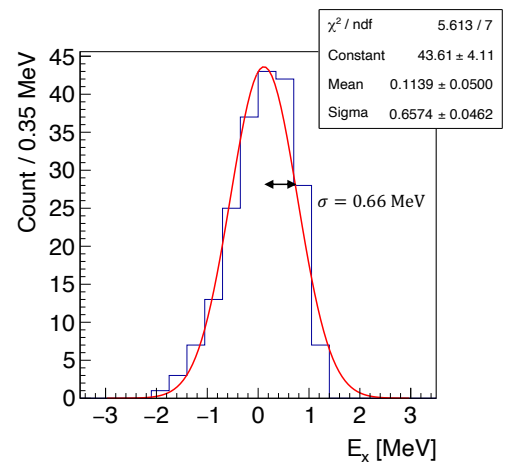


Fig. 1. Excitation-energy spectrum of $^{53}\text{Sc}(p, p)$ for recoil angle of $85^\circ \leq \theta_p \leq 86^\circ$.

References

- [1] H. Baba *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. **57**, 27 (2024).
- [2] S. Takeshige *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. **57**, 116 (2024).

超伝導デバイス SIS ミクサを搭載した ミリ波受信機によるダークフォトン探索研究

高エネルギー物理学研究室 埴村圭吾

Abstract We searched for dark photon dark matter using a cryogenic receiver equipped with a superconducting device, SIS mixer. We explored the mass region around 1 meV, and observed no significant signal. The obtained upper limit on the coupling constant is $\chi \lesssim 6.5 \times 10^{-9}$ at 95 % confidence level.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

宇宙の全エネルギーのうち 25 % は、ダークマターという未知の物質で占められている。その性質の解明、特に 1 粒子あたりの質量や重力以外の相互作用の有無を解明することは、素粒子物理学および宇宙物理学において極めて重要な課題である。

数あるダークマター候補の中で、ダークフォトンが近年注目されている[1]。ダークフォトンとは電磁場と極めて弱く相互作用することから、金属板の表面などといった電磁場の境界面で転換光を放出する性質を持つ新粒子である。また、転換光の周波数はダークフォトンの質量に比例し、転換光のパワーは結合定数の 2 乗に比例する。そのため、転換光を検出することで、ダークフォトンの質量と結合定数が決定できる。本研究では、質量にして 1 meV 近傍、転換光の周波数では 240 GHz 近傍(ミリ波)のダークフォトンを探した。

この質量の転換光は $O(10^{-20})$ W 未満と極めて微弱であり、低ノイズに信号を増幅することが求められる。本研究ではそのためのミリ波受信機を開発した (Fig. 1)。ミリ波受信機には超伝導デバイス「SIS ミクサ」と、その後段に 10 GHz 帯用の低ノイズアンプを搭載している。SIS ミクサは周波数変換器であり、そこを伝搬した転換光は周波数を 240 GHz から 10 GHz 程度にまで落とす。その後、低ノイズアンプで増幅される。このような設計により、受信機のノイズ温度 (ノイズレベルを温度で表現した指標。小さいほど良い。) を 150 K にまで抑えた。仮に市販で手に入る 240 GHz 用のアンプで転換光を直接増幅した場合、受信機のノイズ温度は 500 K を超えることになる。本研究で開発した受信機はノイズがその 1/3 以下となるため、より小さな結合定数まで探索することができる。

この受信機を用いて探索測定を行った。具体的には、242.9493–242.9503 GHz で探索を実施し、その結果、転換光と判定できる有意な信号は未検出であった。そこで、結合定数に対して上限 $\chi \lesssim 6.5 \times 10^{-9}$ を信頼度 95 % で設定した (Fig. 2)。本研究によって SIS ミクサを使用したダークフォトンの探索手法を確立した。さらに、本手法に集光ミラーによって転換光の受信量を増加させるといった改良を施すことで、現状の 90 倍広い質量領域を 500 倍小さな結合定数まで探索できる将来展望を確認した。

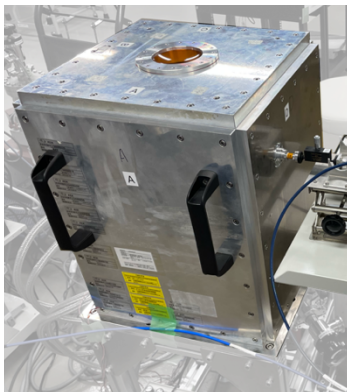


Fig. 1. The receiver.

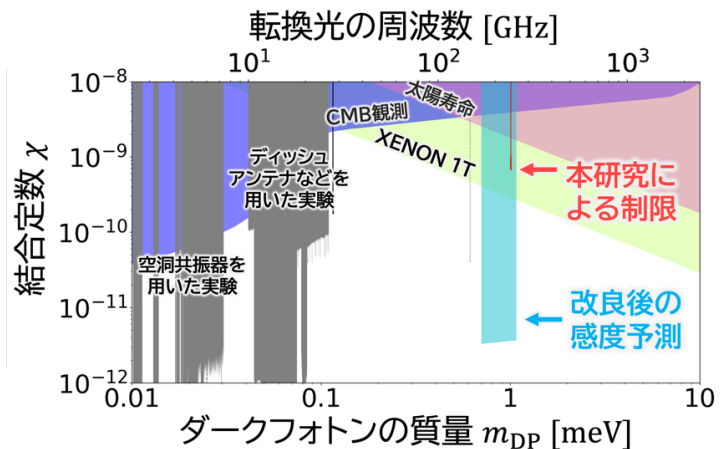


Fig. 2. The constraints on the coupling constant χ between dark photon and photon.

References

[1] P. Arias et al., “WISPy cold dark matter”, JCAP 1206 (2012) 013, [arXiv:1201.5902].

Simons Observatory 実験で用いる 偏光角較正装置の系統誤差に関する研究

高エネルギー物理学研究室 星野大輝

Abstract The Simons Observatory aims to observe the CMB polarization precisely. Sparse wire grid calibrator is developed to calibrate the polarization angle of the detectors. We evaluated the systematic errors of this calibrator derived from its tilt sensor and wire sag. We confirmed that the total systematic error is <0.1 degree.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は宇宙初期から現在に至るまでの宇宙の状態を反映し、標準宇宙モデルの構築に重要な役割を果たしてきた。現在はその偏光パターンの測定が注目されている。その理由は B モードと呼ばれる偏光パターンにはインフレーションによる原始重力波の痕跡が残ると期待されているからである。Simons Observatory 実験では、海拔 5,200 m のチリ・アタカマ砂漠に複数の CMB 望遠鏡を設置し CMB 偏光の精密測定を行うことで、原始重力波の痕跡とされるテンソルスカラー比を 0.003 という精度で測定することを目指す[1]。この精度を実現するためには、検出器の応答する偏光軸の向き (偏光角) を $<0.1^\circ$ という精度で較正しなければならない。この要求を満たすため、スパースワイヤーグリッドを用いた偏光角較正装置の開発・配備が行われてきた。スパースワイヤーグリッドは疎に張られた金属ワイヤーが周囲の熱放射を反射し、ワイヤーに沿う方向に直線偏光した光を生成する装置である[2]。スパースワイヤーグリッドが生成する直線偏光を較正源として使う場合にはワイヤーの方向を把握する必要があり、その把握精度が偏光角の較正精度を左右する。

ワイヤーの向きを天球面上の向きと対応づけるには、スパースワイヤーグリッドが重力となす角度が必要である。この角度を測定するために 2 軸の重力参照計を導入した。本研究では、この重力参照計の精度の評価を行った。長期的に安定した精度が維持されるか確認するために、1 ヶ月の間に出力値がどう変動するか評価した。また、観測サイトでの -20°C から 20°C の激しい温度変化に耐え、一定の精度を維持するか確認するために、恒温槽を用いて出力の温度変動を評価した。以上の 2 つの評価により、2 軸のうち 1 軸は出力角度の精度が $<0.04^\circ$ と要求性能を満たす結果であった。もう 1 軸については初期不良により満たさなかったが、修理することで同じく $<0.04^\circ$ の精度が期待できる。

ワイヤーのたわみも系統誤差の要因となる。先行研究[2]ではたわみ量の評価を手動にて行っていたため、労力がかかるとともに人依存のバイアスが含まれる可能性があった。本研究では、ワイヤーのたわみ量を自動で評価する装置を開発した (Fig. 1.)。これにより、人の手を介さず、以前よりも高精度な $50\text{ }\mu\text{m}$ の精度でのたわみ量の評価が可能となった。また、実際に使用されるスパースワイヤーグリッドに対してたわみ量の評価を行い、たわみ由来の系統誤差を 0.03° 程度に抑えられることを確認した。

以上の系統誤差の評価により、装置由来の系統誤差が要求精度 $<0.1^\circ$ を満たし得ることを確認した。

References

- [1] Peter Ade. et al, J. Cosmol. Astropart. Phys., Vol. 2019 (2019).
- [2] M. Murata. et al, Rev. Sci. Instrum. 94, 124502 (2023).

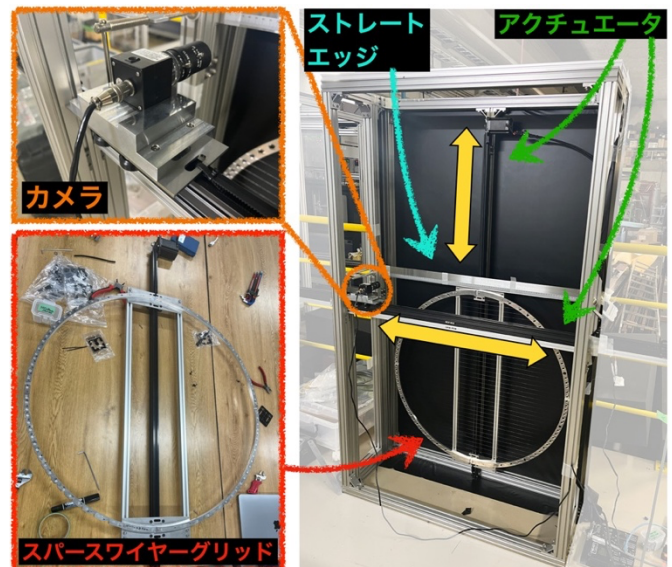


Fig. 1. A system to evaluate the wire sag automatically.

一般化対称性の破れた相における分配関数のふるまいについて

素粒子論研究室 前田潤

Abstract We study the broken phases of generalized symmetries using the partition function with a background gauge field. We find the behavior of the partition function in the broken phase can be understood in terms of the mixed anomaly between the original symmetry and the emergent solitonic symmetry.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

理論の相構造を解析する際に重要となる概念として対称性がある。例えば、対称性の自発的破れ (SSB) のパターンを調べることで多くの相が分類することができることが知られている [1]。しかし、SSB パターンだけでは相が区別できない例として、対称性に保護されたトポロジカル相 (SPT 相) と呼ばれる相が発見された [2]。SPT 相は対称性を壊すような摂動を加えると自明な相に連続的に移ることができるが、対称性を保つような摂動では自明な相に連続的に移れないような相である。SSB パターンと SPT 相を調べることで、与えられた対称性を持つ理論のギャップを持つ相の分類が可能となった。

通常、SSB は秩序変数の期待値によって調べられ、SPT は境界付きの多様体上で理論を考えた時の対称性演算子の境界への作用の仕方によって調べられる。このような SSB と SPT を同時に調べることでできる量として背景ゲージ場付きの分配関数がある [3]。背景ゲージ場付きの分配関数は離散対称性の SSB 相では

$$Z[A] = \delta(A) \quad (1)$$

のようにふるまい、SPT 相では

$$Z[A] = Z_{\text{inv}}[A] \quad (2)$$

のように可逆な場の理論の分配関数によって表されることが知られている。一般のギャップを持つ相は部分群への SSB と SPT 相が混じった相になるが、その場合の背景ゲージ場付きの分配関数はこれらの積によって表される。

また、近年対称性の概念が [4] によって大幅に拡張された。このような拡張された対称性を一般化対称性といい、従来では対称性として捉えられなかったものに対しても対称性として考えることができるようになった。一般化対称性に対しても SSB や SPT など考えることで、従来の対称性では調べられなかったさまざまな理論の相構造が調べられるようになった。

本修士論文では、一般化対称性のうち特に可逆な離散対称性の場合において、背景ゲージ場付きの分配関数が (1)、(2) のようにふるまうことを様々な観点から示した。また、連続対称性の SSB の場合は南部-Goldstone 粒子が生じギャップが閉じるため、離散対称性の場合とは異なるふるまいを示すと考えられるが、我々は $U(1)$ 対称性の SSB 相の低エネルギー有効理論において背景ゲージ場付きの分配関数を具体的に計算し、離散対称性の場合とどのような違いが現れるかについて調べた。その結果、SSB 相で創発するソリトンの対称性と元の対称性の間の混合アノマリーに着目することで、離散対称性の場合と連続対称性の場合の分配関数のふるまいが説明できることが判明した。

References

- [1] L. D. Landau, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* **7** (1937) 19-32
- [2] I. Affleck *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **59**, 799 (1987).
- [3] R. Thorngren and J. Wang, *JHEP* **04** (2024) 132.
- [4] D. Gaiotto *et al.*, *JHEP* **02** (2015) 172.

電子蓄積リング (SR2) におけるビーム安定化のための HOM 減衰空洞の設計とランダウ空洞の実装

ビーム物理学研究室 前田裕成

Abstract Beam instability in SR2 because of HOM in the acceleration cavity deteriorates the performance of the SCRIT system. To remedy this, we designed new acceleration cavity with TM020 mode and HOM damping structure and installed Landau cavity which suppress the growth of the beam instability.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

我々の研究グループでは SCRIT (Self-Confining RI Ion Targeting) 法という、オンライン生成した不安定核イオンを蓄積リングを回る電子の軌道にトラップする手法を用いて不安定核での電子散乱実験手法を開発し、2022 年には ^{137}Cs を用いた電子散乱実験に成功した[1]。今後のマイルストーンとして 2 重魔法核である ^{132}Sn の電子散乱実験の実施を目指しているが、そのためには今以上に電子ビームを安定化させることが求められる。現在の電子蓄積リング SR2 (SCRIT equipped RIKEN Storage Ring) にはビーム不安定性という問題があり、これによってビーム寿命、ルミノシティの低下といった問題が引き起こされている。このビーム不安定性の原因は加速空洞の HOM (Higher Order Mode) がビームによって誘起されることであるため、加速空洞のアップグレードが求められている。

そこで本研究ではビーム不安定性を抑制するための加速空洞の改善策として以下の 2 つの方法を検討した。一つ目は加速空洞の HOM の発生を抑制するために、TM020 モードを加速モードとし、その節の位置にスロット型の RF 吸収体を導入した新しい加速空洞[2]を開発するというものである。まず SUPERFISH を用いた 2 次元計算を行い、3 次元計算を行う際の大まかな空洞形状を決定した。その際、一般的なピルボックス型の空洞ではなく、空洞側面をビーム軸側が狭く、動径方向外向きに広がるような斜めの形状にすることで一般的な形状よりも Q 値、シャントインピーダンスが高くなることが分かった。その後、この形状について CST Studio Suite を用いた 3 次元計算を行い、HOM の減衰の様子や要求仕様を満たすための空洞形状について検討した。その結果、チューナー配置の工夫やカプラーによる磁場のゆがみを補正するための FCT (Field Correction Tuner) の導入によって、付属機器による Q 値の低下は抑えつつ HOM の Q 値は減少させるという電磁気的な特性を持つ空洞を設計することができた。もう一つはランダウ減衰を用いてビーム不安定性の成長を抑制するために、高調波空洞としてランダウ空洞を導入するというものである。まず、導入するランダウ空洞について、ビードプル法を用いた特性試験によってシャントインピーダンス、Q 値を測定した。続いて、ランダウ空洞へ RF を供給するための通倍器、パワーアンプについても性能を確認し、アンプ出力を空洞へ投入するハイパワー試験を行った。その結果、ランダウ空洞の運用上十分な RF の振幅、位相の制御を行うことができることや RF を投入した際の空洞でのパワーの蓄積、温度変化が問題ないことを確認できた。また、ランダウ空洞のインストール後にランダウ空洞の有無を比較する実験を行えるように、駆動式のインナーダクトを製作し、ビームからランダウ空洞が見えるかどうかを制御できるようにした。その後、実際に SR2 へのインストール、ベーキングを行い、リングへランダウ空洞を実装し、運用できることを確認した。

References

- [1] K. Tsukada *et al*, Phys. Rev. Lett. **131**, 092502 (2023)
- [2] H. Ego *et al*, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Aug. 9-11, p.237-241 (2014)

MoMoTarO の ISS 搭載に向けた陽子照射試験と軌道上でのバックグラウンドレートの推定

宇宙線研究室 前田涼太

Abstract We are developing the Moon Moisture Targeting Observatory (MoMoTarO) for lunar water resource exploration. We plan a demonstration experiment at the ISS on the fiscal year 2026. We conducted proton irradiation tests using two kinds of scintillators. We estimated the background rate on the ISS orbit using Geant4 simulations.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

NASA のアルテミス計画など、現在盛り上がりを見せている有人月面開発において、生命維持やロケットの燃料の生成などに重要な役割を果たすのが、月の水資源である。我々は、中性子とガンマ線の放射線測定を軸とした、月面・月周辺での多分野連携プロジェクトの Moon Moisture Targeting Observatory (MoMoTarO) を計画している。MoMoTarO 計画では、月面から漏出する中性子を用いた水資源探査(図 1)を中心とした複数のサイエンスを、 $1.0 \sim 1.5$ U (Unit: $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$) サイズのキューブサットサイズの検出器で行うことを目指している。

そして月面での運用に先駆けて、2026 年度に MoMoTarO を国際宇宙ステーション (ISS) の曝露部に設置し、宇宙実証を行うことが決定した。

我々は、MoMoTarO に搭載予定の ${}^6\text{Li}$ を添加したプラスチックシンチレータ (EJ-270) と GAGG (Ce) シンチレータの二種類のシンチレータに、200 MeV の陽子を 0.1、1、10 krad 照射する試験を行い、放射線耐性を調べた。それぞれ ISS 軌道上での 0.1、1、10 年分の線量に相当する。光量の減少は最大でも 20%程度であり、エネルギー分解能の低下は最大でも 60~70%程度であるという結果を得た。加えて、核反応により生じる放射性同位体を、EJ-270 では ${}^7\text{Be}$ など 3 種類、GAGG では ${}^{153}\text{Gd}$ など 12 種類特定した。EJ-270 の陽子照射試験は先行研究ではなく、照射後 1 日でバックグラウンドレートが元の水準に戻ることを初めて示せた。また、GAGG の陽子照射試験の先行研究[2]では扱っていない長寿命成分を特定した。

さらに、簡略化した MoMoTarO のモデルに対して、ISS 軌道上でのバックグラウンド環境をモデル化した種々の粒子を、南大西洋異常帯 (SAA) とそれ以外に分けて照射する Geant4 シミュレーションを行った。バックグラウンドレートは、SAA では GAGG が単位体積あたり約 55 counts/s/cm³、複数ある EJ-270 の平均が約 8.8 counts/s/cm³ となった。SAA 以外では銀河宇宙線由来の陽子が支配的であり、GAGG が約 6.5 counts/s/cm³、EJ-270 の平均が約 2.7 counts/s/cm³ となった。さらに、SAA 上で生じた放射性同位体の崩壊による放射化バックグラウンドのカウントレートは、GAGG が約 0.75 counts/s/cm³、EJ-270 の平均が約 0.11 counts/s/cm³ となった。MoMoTarO 全体では SAA で約 5500 counts/s、SAA 以外で約 1200 counts/s、放射化バックグラウンドは約 73 counts/s と見積もられた。ISS から地上へのテレメトリ量は毎秒 1800 word と限られているため、テレメトリパケットの設計条件が今回の結果で示された。また、サイエンスデータを取得する際のバックグラウンド、観測可能性の見積もりにも大きく寄与する。

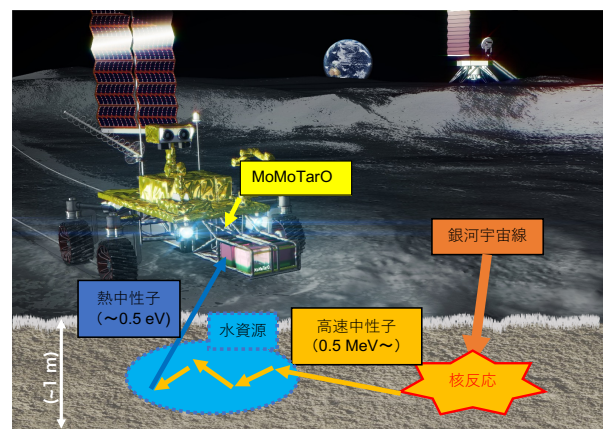


Figure 1. Schematic diagram of lunar water exploration by MoMoTarO [3]. The MoMoTarO detects thermal/epi-thermal neutrons from water under the lunar surface.

References

- [1] Creech, S., et al., 2022, IEEE, 1-7
- [2] Yoneyama, M., et al., 2018, JINST, 13, P02023
- [3] 京都大学. 中性子で月の水資源を探す, 2024 年 10 月.

U(1)バリオン対称性のゲージ化とクォークハドロン連続性

基礎物理学研究所原子核論グループ 武藤永治

Abstract This study investigates quark-hadron continuity by gauging U(1) baryon symmetry, revealing a shared $\mathbb{Z}_2$ -TQFT structure in CFL and hadronic phases. Furthermore, the transition in mutual statistics between Wilson loops and vortices highlights a nontrivial phenomenon linked to screening dynamics and quantum phase transitions in these systems.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

強い力を記述する量子色力学(QCD)の物質相において、十分高密度かつ低温のクォーク物質ではカラー超伝導状態が実現していると考えられている。クォークの持つ自由度に応じて様々な種類のカラー超伝導相が存在し、特にアップ、ダウン、ストレンジネスの3フレーバークォークを考えると、Color-Flavor-Locking(CFL)相とよばれるカラー超伝導相が実現する。一方で、低密度のハドロン相は核子超流動相になっている。このような核物質領域から密度上昇とともにクォーク物質へと相転移なしに変化するという予想がある。この予想はクォーク・ハドロン連続性とよばれ、核子超流動相とCFL相では対称性の破れ方が同じであり、Landauの対称性による相の分類の観点からもこれらの相は連続的につながりうる。この予想はCFL相に存在する量子渦の出現に伴い、量子相として再考されるようになった。絶対零度の量子相では対称性の破れを伴わないにも関わらず、量子相転移として相が区別される場合があり、そのときこれらの相の低エネルギー有効理論は異なるトポロジカルな場の理論(TQFT)で記述される。

クォーク・ハドロン連続性においても、CFL渦の周りのAharonov-Bohm(AB)位相が $1/3$ で分数量子化されていることから、ハドロン相との違いが指摘され、量子相転移を示す可能性が提案された[1]。しかしながら、CFL相における分数量子化したAB位相は量子相転移として区別される非自明なTQFTを示さないということがいわれている[2]。このような非自明なTQFTは、対称性を一般化した概念である高次対称性を用いて、その荷電物体(量子渦)がトポロジカルな性質を持つことで記述できる。クォーク・ハドロン連続性の場合には、理論が持つグローバルなU(1)バリオン対称性が自発的に破れている。これにより出てくる南部ゴールドストーンボソン(NGボソン)の影響で渦がトポロジカルではなくなり、バルクの理論は非自明なTQFTにならない。

本研究ではこの議論を発展させ、U(1)バリオン対称性をゲージ化することで、渦がトポロジカル性を持つ場合の低エネルギー有効理論の振る舞いを検討した。その結果CFL相およびハドロン相の低エネルギー有効理論はどちらの場合も $\mathbb{Z}_2$ -TQFTで記述できることを示した。CFL相の有効理論は $1/3$ に量子化したAB位相より素朴には $\mathbb{Z}_3$ -TQFTになると思われたが、実際にはハドロン相の同じように $\mathbb{Z}_2$ -TQFTとなることを示し、U(1)バリオンゲージ化した後においてもクォーク・ハドロン連続性は量子相として成立しうる予想であることがわかった。また関連して、ハドロン相におけるWilson loopと渦の相互統計性が、スクリーニングダイナミクスの切り替えにより非自明な振る舞いを示すことを発見した。この現象はバルク相転移ではなく、Wilson loopのスクリーニングに寄与する物質のlevel crossingによるものと解釈される。

これらの結果は、CFL相とハドロン相の連続性に関する新たな視点を提供するとともに、QCD相図および中性子星物理におけるさらなる議論の基盤を形成すると期待される。

References

- [1] A. Cherman, S. Sen, and L. G. Yaffe, Phys. Rev. D 100 no. 3, (2019) 034015
- [2] Y. Hirono and Y. Tanizaki, Phys. Rev. Lett. 122 no. 21, (2019) 212001

AdS/CFT 対応における波束を用いた解析

素粒子論研究室 吉川史起

Abstract The analysis of wave packet in the AdS/CFT correspondence is extended to the $\text{AdS}_4/\text{CFT}_3$ case, showing that energy density localizes on the light cone while exhibiting momentum-dependent, non-localized spatial distributions. These results reflect leading $1/N$ corrections, implying limitations of entanglement wedge reconstruction and holographic quantum error correction at finite N .

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

AdS/CFT 対応[1]は量子重力理論を調べるための強力な枠組みである。相関関数、ウィルソンループ、エンタングルメントエントロピーなど多くの物理量の性質が AdS/CFT 対応のもとで研究されてきた一方で、時間発展する波束の性質は比較的未解明となっている。波束はバルクの時空の基本的なプローブとして機能するため、その性質解明はバルクと境界の対応を理解する上で非常に重要となる。

先行研究[2]では、AdS/CFT 対応における波束の状態が構成され、最も簡単な $\text{AdS}_3/\text{CFT}_2$ の場合についてエネルギー密度が CFT 側で具体的に計算された。この結果、Fig.1.のように CFT 側ではエネルギーが光円錐上に局在し、バルクを飛ぶ波束に対応して CFT 上では光速で移動する二つの“粒子”が対応することが示された。三点関数であるエネルギー密度を計算することは、バルクの自由理論と対応する $N=\infty$ の Generalized Free Field Theory についての有限の N における主要な補正項をみることに対応しており、重力の量子効果の理解を深めるうえでも重要となる。

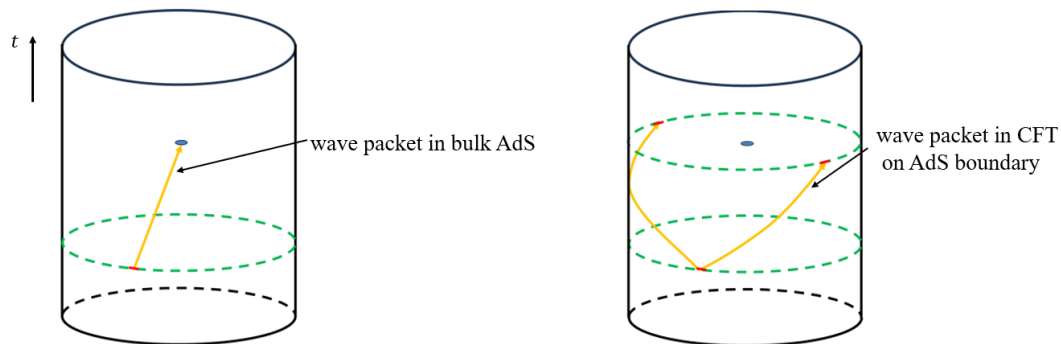


Fig.1. (a) An example of bulk wave packet

(b) The corresponding two “particles” in CFT on AdS boundary

本修士論文ではこの解析を次元上げた $\text{AdS}_4/\text{CFT}_3$ の場合に拡張し、CFT 側でエネルギー密度を解析的に計算した。その結果、 CFT_3 においてもエネルギー密度は光円錐上に局在することが確かめられた。また、次元が 1 つ増えたことで CFT におけるエネルギーの空間分布を新たに考慮する必要性が生じるが、これが運動量にどのように依存するかを解析的に示した。本研究の結果は、バルク再構築において広く信じられているエンタングルメントウェッジ再構築や量子誤り訂正に関する仮説が有限の N のもとでは破綻することを示唆する先行研究[3]と整合しており、高次元の場合にこれらの仮説の検証を進めるうえで重要な示唆を与える[4]。

References

- [1] J. M. Maldacena, “The Large N limit of superconformal field theories and supergravity,” Adv. Theor. Math. Phys. 2 (1998) 231, Int. J. Theor. Phys. 38 (1999) 1113.
- [2] S. Terashima, “Wave Packets in AdS/CFT Correspondence”, Phys.Rev.D 109 (2024) 10, 106012.
- [3] S. Terashima and S. Sugishita “Bulk Reconstruction and Gauge Invariance” 2409.02534[hep-th].
- [4] S. Yoshikawa, N. Tanahashi, and S. Terashima, work in progress.

自己閉じ込め型不安定核標的（SCRIT）における標的イオン状態の研究

ビーム物理研究室 吉田 暁

Abstract Using the SCRIT method, we created a fixed ^{132}Xe target and investigated the temporal evolution of trapped ions and residual gas ions, along with the spatial distribution of target ions in the SCRIT device. To deepen theoretical understanding, we propose an analytical differential equation accounting for the physical phenomena within SCRIT.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

電子散乱実験は原子核の構造を調べるのに有効なツールであり、安定核に対してはこれまで多数の実験が行われ安定核について多くの情報が得られた。近年では不安定核に対する関心が高まっており、不安定核の構造を調べる方法を確認することが必要不可欠である。そこでこれまで多くの安定核に行われてきた電子散乱実験を不安定核にも行うことができる手法である SCRIT (Self-Confining Radioactive isotope Ion Target: 自己閉じ込め型 RI イオン標的) 法が考案された。SCRIT 法とは電子蓄積リングでのイオントラッピング現象を応用した固定標的生成法であり、電子ビームの横方向のポテンシャルと電極を用いて生成した縦方向の静電井戸型ポテンシャルによって標的核イオンを 3 次元的にトラップして電子散乱の標的とする手法である。SCRIT 法の有効性を実証するために SCRIT 施設を建設し、2023 年に世界で初めてオンライン生成した不安定核 ^{137}Cs に対する電子散乱実験に成功している[1]。

今後の目標として不安定核の中でも特に注目されている 2 重魔法数の核である ^{132}Sn の電子散乱実験を行いたい。現状ではトラップした標的イオンの約 10% しかルミノシティに寄与していないことがわかっており、さらにルミノシティの時間安定性に制限があるため、弾性散乱実験を行うことは可能であるが今後非弾性散乱実験などの断面積の小さい反応研究に発展させるためにルミノシティの向上と安定化が求められる。そのためにまずは SCRIT 装置内部で起きている物理現象を詳細に理解する必要がある。

本研究では SCRIT 法を用いて ^{132}Xe の固定標的を作り SCRIT 装置内部でのそれらの蓄積イオン並びに残留ガスイオンの状態の時間発展と標的イオンの SCRIT 中での空間分布に関する知見を得た。また、それを理論的に理解するため SCRIT 内部で起きている物理現象を考慮した解析的微分方程式を提案した。

References

[1] K.Tsukada et al., Phys. Rev. Lett. **131**, 092502,(2023)

Lee-Yang ゼロを用いた臨界点探索

基礎物理学研究所 原子核理論 和田辰也

Abstract We propose a novel method to locate the critical point in general models with Lee-Yang zeros. We show that the ratio of different Lee-Yang zeros passes through a single point at the critical point. We apply this method to three models and confirm its validity in numerical simulations.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

有限温度有限密度における量子色力学 (QCD) はクォーク閉じ込め・非閉じ込め相転移などの多様な相転移現象を示すことが知られている。QCD の相構造は有効模型を使った解析などで調べられており、有限密度領域に一次相転移線およびその端点 (QCD 臨界点) が存在することが予言されている。臨界点は存在すれば臨界点近傍の性質に強い制限を与えるため、QCD の性質を理解する上で重要な研究対象である。QCD 相図の物理を解析する上で格子 QCD を用いたモンテカルロ数値計算は第一原理計算を実現する唯一の方法であり、ゼロ密度では格子 QCD の有効性が確かめられている。しかし、有限密度領域では符号問題と呼ばれる問題が発生し、モンテカルロ法を用いた解析ができなくなる。そのため、QCD 臨界点は未だ存在や位置を決定できていない。

最近、Lee-Yang ゼロ (LYZ) と Lee-Yang エッジ特異点 (LYES) を活用した QCD 臨界点の研究が進展している。LYZ は分配関数がゼロとなる複素パラメータ空間上の点である。熱力学極限では一次相転移点において LYZ は実軸に接する。一方で、一次相転移が存在しない場合には LYZ は熱力学極限で複素空間上のある点に収束する。この点を Lee-Yang エッジ特異点という。先行研究[1,2]では LYES とスケールリング則の性質を用いることで、臨界点を求める解析が行われた。これらの研究では格子 QCD を用いて LYZ を求めて、それを LYES とみなす仮定のもとで QCD 臨界点の位置が推定された。しかし、この仮定は有限体積効果を無視しており、妥当性は不明である。

そこで本論文では、LYZ に有限サイズスケールリングの方法を適用することで、有限体積効果について議論するほか、LYZ を用いた新しい臨界点探索の方法を提案する[3]。さらに、3つのモデルで数値解析を行い、手法の有効性を検証する。

はじめにイジング模型の LYZ の有限サイズスケールリングについて議論する。さらに、2つの LYZ の虚部の比 (LYZ 比) が臨界点直上では体積に依存しない値を取ることを有限サイズスケールリングを用いて示す。この方法では、複数体積で計算した LYZ 比はある点で交差し、その点が臨界点だと特定できる。

さらに、この解析をイジング模型と同じ普遍類に属する臨界点を持つ一般系にも拡張し、一般系の LYZ のスケールリング関数を議論する。これにより先行研究[1,2]で行われた LYES の解析が持つ有限体積効果を定式化する。また、このスケールリング関数を用いることで、一般系においても LYZ 比は熱力学極限では臨界点直上において一点で交わることを示す。加えて、交わる LYZ 比の値はイジング模型での値と同じになること、すなわちこの値は普遍類によって決まる値であることを示す。

LYZ 比法を数値的に検証するために 3次元イジング模型、3次元 3 状態ポッツ模型と、QCD において仮想的にクォーク質量を大きくした重クォーク QCD という 3つの模型に現れる臨界点に対し、LYZ 比法を適用する。これにより、いずれの系でもスケールリングの性質が確認でき、また LYZ 比法が有効に機能することを示す。

References

- [1] D. A. Clarke, *et al.*, "Searching for the QCD critical endpoint using multi-point Padé approximations", arXiv:2405.10196 [hep-lat].
- [2] G. Basar, "On the QCD critical point, Lee-Yang edge singularities and Padé resummations", arXiv:2312.06952 [hep-th]
- [3] T. Wada, *et al.*, "Lee-Yang-zero ratios for locating a critical point", arXiv:2410.19345 [hep-lat].