

2025年度

京都大学大学院理学研究科

D 3 発表会アブストラクト

(2026年1月30日)

物 理 学 第 二 分 野

# D3 発表会

日時:2026年1月30日(金) 9時～  
場所:第4講義室(5号館5階525号室)  
発表時間:15分+5分(質問)

---

## 《目 次》

- |  |       |         |
|--|-------|---------|
| 1. T2K 実験新型検出器Super-FGD のデータ取得システム開発 および取得データを用いたニュートリノ反応解析                                      | 有元 隼太 | (9:00)  |
| 2. 1.60 GeV/c、1.82 GeV/c の $\pi^+$ 中間子ビームを用いた $\Lambda$ ハイパー核 <sup>12</sup> $\Lambda$ C の生成断面積測定 | 江端 健悟 | (9:20)  |
| 3. Bridging dS/CFT and Celestial Holography via Ward-Takahashi Identity                          | 小川 順生 | (9:40)  |
| 4. 質量比の極端な連星系のハミルトン形式に基づく一次摂動に関する研究  | 笥 嵩文  | (10:00) |
| 5. Strong-to-weak symmetry breaking at finite temperature and wormholes                          | 川本 大志 | (10:20) |
| 6. ハイパー核分光とSU(3)カイラル有効場理論に基づく核物質中のハイペロン  | 神野朝之丞 | (10:40) |
| 7. Study of AdS/CFT dictionary and an existence condition of holographic duals                   | 杉浦 駿  | (11:00) |
| 8. 量子エンタングルメントによるドジッター空間におけるホログラフィーについて  | 鈴木 優樹 | (11:20) |
| 9. Quasi-Periodic Eruptions as Multi-messenger Sources   | 鈴口 智也 | (11:40) |

## 《休 憩》

- |  |              |         |
|--|--------------|---------|
| 10 . 対称積共形場理論(symmetric orbifold CFT)における開弦的自由度の記述について   | 津田 崇史        | (13:00) |
| 11 . Selected Applications of Homotopy Algebras in Quantum Field Theory and String Field Theory  | 戸塚譲次郎        | (13:20) |
| 12 . 部分次元粒子の物質場理論における双対構造  | 中西 泰一        | (13:40) |
| 13 . Progenitor Constraint using CNO Abundances of Circumstellar Material in Supernova Remnants  | 成田 拓仁        | (14:00) |
| 14 . Fast Radio Bursts from Magnetars : Induced Scattering in Strongly Magnetized Pair Plasma  | 西浦 怜         | (14:20) |
| 15 . Measurement of neutrino Neutral-Current Quasi-Elastic interactions in the T2K experiment and application to Diffuse Supernovae Neutrino Background searches | FENG LiCheng | (14:40) |
| 16 . 陽子弾性散乱による $^{16,18}\text{O}$ の中性子密度分布測定   | 吉田 凌祐        | (15:00) |
| 17 . Celestial Holography meets dS/CFT   | 脇 隆浩         | (15:20) |
| 18 . LHC-ATLAS 実験における質量縮退領域での超対称性粒子スタウ探索   | 河本 地弘        | (15:40) |

# T2K 実験新型検出器 Super-FGD のデータ取得システム開発 および取得データを用いたニュートリノ反応解析

高エネルギー物理学研究室 有元隼太

**Abstract** The T2K experiment is a long-baseline neutrino oscillation experiment which mainly aims to precisely measure the neutrino oscillation parameters. For further precise measurement, the new detector Super-FGD is installed. I developed a data-acquisition system and a data quality check system for this and analyzed the first data from it.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

T2K 実験は長基線ニュートリノ振動実験であり、ニュートリノ振動パラメータの精密測定を主目的としている。T2K 実験はこれまで 95% の信頼度で CP 対称性の破れを示唆している [1]。現在までのところ、後置検出器スーパーカミオカンデでの電子ニュートリノイベント数の統計誤差が 10% 程度と支配的である。しかし、2027 年以降には後置検出器としてハイパーカミオカンデを利用するためニュートリノ反応由来の系統誤差約 5% も無視できず、前置検出器 ND280 による系統誤差の削減が喫緊の課題である。

そこで、2023 年に ND280 の一部を新型検出器 Super-FGD で置き換えた。この検出器は 3 方向に穴の開いた約  $1\text{cm}^3$  のキューブ状シンチレータを 3 次元的に積層し、それらの穴に通した波長変換ファイバーを通して MPPC で信号を読み出す構造であるため、棒状シンチレータを 90 度ずつずらしながら層状に積層する従来型検出器とは異なり、位置分解能が良くビーム軸から大角度に散乱する荷電粒子も検出できる。他方、読み出し MPPC チャンネルが約 56,000ch と非常に多く、新たな読み出しハードウェアおよびデータ取得システムを開発する必要があった。私は後者のデータ取得システムを ND280 全体でも用いられている MIDAS システムを元に開発した (Fig. 1)。これにより指定の手続きに従うことで誰でもデータ取得や検出器内部パラメータの操作ができ、シフト制による検出器の長期運用が可能になった。

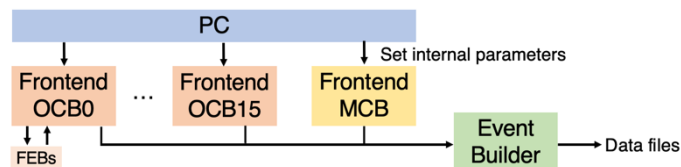


Fig 1. The structure of the data-acquisition system. MPPC data is sent to frontend boards (FEBS), and data from 14 FEBS are aggregated in a board called OCB. At the same time, a board called MCB records timing information. I developed frontend programs for OCB and MCB, and the event builder frontend program. Packets from 16 OCBs and MCB are first sent to the event builder, then the output is sent to the global ND280 data-acquisition system.

こうして取得したデータすべてが有意義というわけではなく、エラーが起こったイベントは解析から取り除く必要がある。私は Super-FGD からの各データパケットを検査し、パケットロス、同期ずれの有無等の確認を指定した時間単位で行うバッチプログラムを Python の Luigi パイプラインを用いて実装し、エラーイベントを解析から除去する手段を確立した。2025 年 11 月から 12 月に行われたランでは、実際にこのプログラムにより同期ずれが発見され、検出器構成要素のファームウェアアップデートの時期に同期ずれが始まったことが原因として特定され、当該ファームウェアのダウングレードで解消した。

私はこうして取得したデータの解析を行い、特に荷電カレント反応において生じるミュオンの飛跡が分断され、分断された点がニュートリノ反応点と誤認されてしまう問題に取り組んだ。これはミュオンが検出器中でデルタ線を発することで、分断されたミュオン飛跡の上流部とデルタ線が接続され、下流部の長いミュオン飛跡がニュートリノ反応により生じたと誤認されることで主に生じる。この発生頻度については現在のまでのところ 5.3% 程度と見積もっている。

## References

[1] T2K Collaboration, K. Abe et al., “Measurement of neutrino oscillation parameters from the T2K experiment using  $3.6 \times 10^{21}$  protons on target”, *Eur. Phys. J. C* **83** 9, (2023) 072011.

# 1.60 GeV/c、1.82 GeV/c の $\pi^+$ 中間子ビームを用いた $\Lambda$ ハイパー核 $^{12}_{\Lambda}\text{C}$ の生成断面積測定

原子核ハドロン研究室      江端健悟

**Abstract**  $\Lambda$  hypernuclear spectroscopy is an important probe for understanding baryon–baryon interactions and nuclear structure. We collected data for the  $^{12}_{\Lambda}\text{C}$  spectra with  $(\pi^+, K^+)$  reaction at higher momentum of 1.60 and 1.82 GeV/c in J-PARC, which reveal the detail of reaction mechanism and  $\Lambda$  potential.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

通常の原子核は、アップクォーク (u) とダウルクォーク (d) で構成された陽子と中性子が結合した多体系である。通常核力や核構造に関しては、これまで多くの散乱実験などを基にしてモデルの構築がなされてきた。これに対して、u, d クォークの次に重いストレンジクォーク (s) を含んだバリオン (ハイペロン) 間相互作用に関する研究も長年にわたり進められている。ストレンジネス自由度が入ったバリオン–バリオン間相互作用は、フレーバーSU(3) 対称性の下核力を俯瞰して扱うことができる。また、ハイペロンは核子に対して Pauli 排他律を受けないため、深部の原子核構造を探るためのプローブとしても重要である。中でも  $\Lambda$  ハイペロンが原子核に束縛した  $\Lambda$  ハイパー核は、これらの重要なプローブとして、 $(K^-, \pi^-)$ 、 $(\pi^+, K^+)$ 、 $(e, e' K^+)$  反応を用いて生成および分光測定されてきた[1]。得られた欠損質量スペクトルを、歪曲波インパルス近似 (DWIA) を用いた反応理論などを用いて解析することにより、core 核の構造や、連続状態のスペクトルから光学ポテンシャル成分[2]などの情報を引き出すことに成功している。特に、 $(\pi^+, K^+)$  反応での  $\Lambda$  ハイパー核研究においては、 $^{208}_{\Lambda}\text{Pb}$  までの幅広い質量数にわたって研究されてきた。ただし、反応に用いる  $\pi^+$  中間子ビームの運動量は、生成断面積が大きい 1.05 GeV/c が特に用いられるのみで、他には 1.2 GeV/c での  $^{12}_{\Lambda}\text{C}$  のスペクトルのデータしかない[3]。これは、より詳細な反応機構の解明やスペクトル解析の向上においては不十分である。

我々は J-PARC の K1.8 ビームラインにて、2種類の運動量 1.6 GeV/c と 1.82 GeV/c をもつ  $\pi^+$  中間子ビームを用いた、 $^{12}\text{C}(\pi^+, K^+)$  反応による  $^{12}_{\Lambda}\text{C}$  のエネルギースペクトルのデータを取得した。 $\pi^+$  ビームを炭素標的に照射し、素過程  $n(\pi^+, K^+) \Lambda$  反応を介して、 $\Lambda$  ハイパー核  $^{12}_{\Lambda}\text{C}$  ( $^{12}\text{C} + \Lambda$ ) を生成する。この時同時に散乱される  $K^+$  中間子を新磁気スペクトロメータ “S-2S” を使用して高分解能で運動量を測定し、この運動量から  $^{12}_{\Lambda}\text{C}$  の欠損質量スペクトルを導出した。

今回の測定で、従来測定より高運動量な  $\pi^+$  ビームをハイパー核生成に用いたことで、非常に大きな  $\Lambda$  の運動量移行により、角運動量移行がより大きな状態が強く励起され、また spin-flip amplitude も異なるので、 $\Lambda$  ハイパー核の束縛領域や連続領域のエネルギースペクトルが異なってくると予想される。新たに得られた運動学での  $\Lambda$  ハイパー核のスペクトルを DWIA 反応理論による解析と比較することで、スペクトル解析から物理情報を抽出する精度の向上と、ひいては  $\Lambda$ -核子 ( $\Lambda N$ ) および  $\Lambda NN$  3体相互作用のより精密な研究が可能になる。また、このデータは新磁気スペクトロメータの性能評価の観点においても非常に重要である。

本発表では、1.60、1.82 GeV/c の  $\pi^+$  中間子ビームを用いた  $\Lambda$  ハイパー核、 $^{12}_{\Lambda}\text{C}$  のスペクトル測定の詳細およびデータ解析の結果について報告する。

## References

- [1] O. Hashimoto, H. Tamura, Progress in Particle and Nuclear Physics **57**, 564–653 (2006)
- [2] T. Harada, Y. Hirabayashi / Nuclear Physics A **759**, 143 (2005).
- [3] T. Harada, Y. Hirabayashi / Nuclear Physics A **744**, 323–343 (2004).

# Bridging dS/CFT and Celestial Holography via Ward–Takahashi Identity

基礎物理学研究所素粒子論グループ 小川 順生

**Abstract** Celestial holography is a codimension-two holographic correspondence proposed for asymptotically flat spacetimes. Using a combination of Weyl transformations and analytic continuation, we established an operator map between the celestial CFT and cosmological operators. As a consequence, Ward identities for cosmological correlators reproduce the Ward identities of celestial holography.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

本発表では Celestial Holography を dS/CFT を通じて解釈する試みについて議論する。Celestial Holography は漸近的平坦な時空において提案されたホログラフィー対応で、D+2 次元の漸近的平坦な時空における量子重力が D 次元球面上の共形場理論と対応するというものである。ここでの主な対応物は D+2 次元における散乱振幅が D 次元における相関関数になるというものであり、様々な計算例が示されている。しかし、central charge などの共形場理論を決める重要な性質は未解明であり、具体的な理論の対応も与えられていない。

我々は D+2 次元 Euclidean flat な時空の理論に対して Weyl 変換と Fourier 変換を通じて D+1 次元球面上の理論に書き換え、その後解析接続をすることによって D+2 次元 Minkowski 時空上の理論と D+1 次元 dS 時空上の理論の対応を作った (Figure. 1)。この対応によって、Celestial Holography を dS/CFT の観点から理解することを目指す。

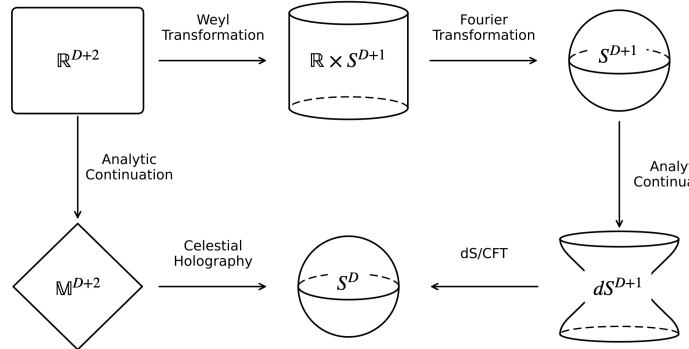


Fig. 1. Schematic diagram connecting Minkowski space and de Sitter space.

我々は以前の研究[1]において、D+2 次元時空上におけるスカラー場についてこの対応を用いた解析をし、Celestial holography における operator と cosmological operator の対応について議論した。本研究[2]では、D+2 次元時空上におけるゲージ場についてこの解析を行った。上記の場の変換により、D+2 次元時空上における massless spin 場は、D 次元時空における連続 mass spectrum を持つ massive spin 場になることがわかる。ここで、元の massless spin 場におけるラージゲージ変換は、D 次元時空上の massive spin 場のうち (partially) massless sector のゲージ変換に対応していることがわかる。これらの D 次元 dS 時空上の (partially) massless sector の early/late time limit によって asymptotic symmetry に対応した boundary の current を定義することができる。これと、Celestial Holography と dS 時空における Operator の対応の辞書を用いることによって、cosmological correlator における Ward Identity から、Soft theorem によって導かれる Celestial Ward identity を再導出することができる。また特に、Graviton について計算し、massless sector の Ward identity を考えることで、Celestial Holography における stress tensor を cosmological operator の文脈から理解することができる。

## References

- [1] H. Furugori, N. Ogawa, S. Sugishita, and T. Waki, JHEP 12 (2025) 126
- [2] H. Furugori, N. Ogawa, S. Sugishita, and T. Waki, arXiv.2512.10367

# 質量比の極端な連星系のハミルトン形式に基づく 一次摂動に関する研究

基礎物理学研究所宇宙グループ 笥嵩文

**Abstract** Extreme mass ratio inspirals (EMRIs) are key sources for LISA, requiring accurate modeling of the self-force and environmental effects. In this talk, I present a unified Hamiltonian framework for EMRIs: clarifying action-angle variables, quantifying tidal resonances with a dark-matter spike, and deriving an effective conservative Hamiltonian.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Extreme Mass Ratio Inspirals (EMRIs) are among the most promising sources for future space-based gravitational wave observatories such as LISA [1]. Accurately modeling their orbital evolution requires a precise description of the self-force and potential environmental effects. In this talk, we extend the Hamiltonian formulation of particle motion in Kerr spacetime and apply it to analyze the dynamical interaction between an EMRI and a surrounding dark matter (DM) spike.

First, we generalize the Hamiltonian formulation of geodesic motion to accommodate arbitrary time parameterizations [2]. While numerical implementations often utilize Mino time to separate the equations of motion, the canonical structure associated with this time parameter has not been explicitly clarified. We establish a rigorous correspondence between the action-angle variables defined in proper time and those in Mino time, providing a solid theoretical foundation for practical numerical schemes.

Second, applying this framework, we investigate the cumulative impact of tidal resonances on a DM spike in the strong-gravity region [3]. We generalize the relativistic formalism of tidal resonances and, for the first time, perform comprehensive numerical calculations including high-order resonances for generic eccentric and inclined Kerr orbits. Consequently, we demonstrate that the cumulative effect of tidal resonances on the DM distribution is limited, typically remaining at the percent level before the EMRI enters the LISA band.

Finally, we address the theoretical distinction between the "pseudo-Hamiltonian" formulation-commonly used in self-force literature-and the genuine Hamiltonian formulation. By employing an action-integral approach and integrating out the metric perturbations, we derive an effective Hamiltonian that describes the conservative dynamics. Within this unified framework, we provide a transparent derivation of the first law of binary mechanics and elucidate the physical origin of the "renormalized" action variables required to restore the first law in pseudo-Hamiltonian systems.

Collectively, these results offer a consistent and unified Hamiltonian framework for describing EMRI orbital dynamics, contributing to both the fundamental understanding of the two-body problem in general relativity and the precise modeling of waveforms for future observations.

## References

- [1] Monica Colpi et al. LISA Definition Study Report. 2 2024.
- [2] T. Kakehi and T. Tanaka, Phys. Rev. D, 110, 124031 (2024).
- [3] T.Kakehi, H.Omiya, T.Takahashi, and T.Tanaka, Phys. Rev. D, 112, 104061 (2025).

# Strong-to-weak symmetry breaking at finite temperature and wormholes

基礎物理学研究所素粒子論グループ 川本大志

**Abstract** Symmetry concepts have recently been extended to mixed states. We discuss holographic implications of their spontaneous symmetry breaking, showing its close relation to wormhole formation in AdS. This connection is illustrated using AdS gravity coupled to a U(1) Chern–Simons theory, based on ongoing work with collaborators.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Recently, the notion of symmetry has been extended to mixed states[1]. In particular, mixed state symmetries can be classified into two types: strong symmetries, which act on individual pure states, and weak symmetries, which emerge only after averaging over states. Interestingly, strong symmetries can sometimes be spontaneously broken down to weak symmetries, and this structure provides a powerful tool for understanding nonequilibrium phase transitions and hydrodynamics.

In this talk, we discuss the holographic implications of strong-to-weak symmetry breaking (SWSSB). Especially, we discuss specific SWSSB in finite temperature[2]. We show that this phenomenon is closely related to the appearance of wormholes in AdS. We demonstrate this connection in a simple setup consisting of AdS gravity coupled to a U(1) Chern-Simons theory. This talk is based on on-going work with Masahito Yamazaki (Tokyo) and Kenya Tasuki (YITP)[3]

## References

- [1] J. Y. Lee, C.-M. Jian, and C. Xu, PRX Quantum 4, 030317 (2023), arXiv:2301.05238 [cond-mat.stat-mech]
- [2] L. A. Lessa, R. Ma, J.-H. Zhang, Z. Bi, M. Cheng, and C. Wang, (2024), arXiv:2405.03639 [quant-ph].
- [3] T. Kawamoto, K. Tasuki, M. Yamazaki, on-going.



# ハイパー核分光と SU(3) カイラル有効場理論に基づく 核物質中のハイペロン

原子核理論研究室 神野朝之丞

**Abstract** The hyperon single-particle potentials are investigated using the hypernuclear spectroscopy and baryon forces within chiral effective field theory. The chiral two- and three-body forces are consistent with the hypernuclear constraint and the existence of the massive neutron stars. The up-to-date chiral two-body force suggests that further quantitative study is required.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

核物質は、中性子星や重イオン衝突、超新星爆発など、原子核・宇宙物理学の様々な場面で中心的役割を担う。特に、中性子星中心部で実現される低温・高密度核物質中では、中性子のフェルミ面の上昇に伴い、ハイペロンの出現がナীবには予想される。しかし、ハイペロンを含む現象論的モデルのほとんどが、重力に反発するための圧力の不足により、2010年に初めて報告された大質量中性子星を説明できなかった。この原子核現象論と中性子星観測との矛盾は「ハイペロンパズル」と呼ばれる。その解決に重要な量の1つに、ハイペロン1粒子ポテンシャルがある。この量については数多くの議論がなされてきたものの、高密度領域では未だ不定性が大きくあり、パズルの根本的な解決にはほど遠い。

本研究では、高密度領域の不定性の制限のため、ハイペロン1粒子ポテンシャルへの地道な制限を試みる。まず、精密に測定されてきたラムダ・ハイパー核分光を用いて、ラムダ1粒子ポテンシャルを解析した [1]。ラムダ1粒子ポテンシャルをシステムチックに生成し、Skyrme-Hartree-Fock 法を用いてラムダ・ハイパー核の束縛エネルギーを計算した。その値と測定値とを比較し、実験データと整合する1粒子ポテンシャルを抽出した。その結果、通常原子核密度以下におけるラムダ1粒子ポテンシャルはある程度制限された。また、運動量依存性に対応する有効質量の値も制限された。この量は、高密度領域についての数少ない情報源である、中間エネルギー重イオン衝突[2]を調べる際に重要である[3, 4]。

次に、カイラル有効場理論に基づく2体および3体相互作用を用いた解析を行った[5]。先行研究に習い、2次摂動 (Next-to-leading order, NLO) までの2体力に、中間状態に十重項バリオンを含む3体力を用いた。その結果、我々の見出したハイパー核からの制限に加え、シグマ1粒子ポテンシャルの現象論的な値を再現することを示した。さらに、このラムダ1粒子ポテンシャルは、ハイペロンパズルを回避し得るほど、高密度領域での斥力が強い。このように、カイラル有効場理論の相互作用は、現状の制限と無矛盾に構成できることを示した。ただ、2体力としては2013年の古めの相互作用を使用している。この結果の信用性を探求するために、最新の相互作用を用いた更なる解析が必要である。

そこで、2023年に構築された最新の3次摂動 (Next-to-next-to-leading order, N<sup>2</sup>L0) まで含めたカイラル有効場理論によるハイペロン1粒子ポテンシャルの解析を行った [6]。その結果、ラムダ1粒子ポテンシャルは従来型のNLO相互作用と同様であった。一方、シグマ1粒子ポテンシャルは、J-PARCで近年測定されたシグマ・核子微分断面積からの制約を反映し、従来よりも引力的となった。今後、少数ハイパー核から決められたN<sup>2</sup>L0 3体力を用いた解析により、更に定量的な議論が可能となる。

## References

- [1] [A. Jinno](#), K. Murase, Y. Nara, and A. Ohnishi, Phys. Rev. C **108**, 065803 (2023).
- [2] H. Taya, [A. Jinno](#), M. Kitazawa, and Y. Nara, Phys. Rev. C **112**, L011901 (2025).
- [3] Y. Nara, [A. Jinno](#), A. Ohnishi, and K. Murase, Phys. Rev. C **106**, 044902 (2022).
- [4] [A. Jinno](#), K. Murase, Y. Nara, and J. Haidenbauer, Quark Matter 2025 proceeding, arXiv: 2508.19560.
- [5] [A. Jinno](#), K. Murase, and Y. Nara, PoS EXA-LEAP2024, 034 (2025).
- [6] [A. Jinno](#), J. Haidenbauer, and U.-G. Meißner, Phys. Rev. C **112**, 065209 (2025).

# Study of AdS/CFT dictionary and an existence condition of holographic duals

素粒子論研究室 杉浦駿

**Abstract** We find a peculiar spectrum of the quasinormal modes with a large angular momentum in an AdS black hole near its photon sphere. The AdS/CFT dictionary suggests that the appearance of such a subsector in quantum field theory works as an existence condition of holographic gravity duals.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

ホログラフィ原理、とりわけ AdS/CFT 対応は、ある重力理論がより低次元で定義された重力のない場の量子論と等価であることを主張する。その導出は限定的にしか存在しないものの、古典重力の領域における様々な状況証拠がこれを支持している。この双対性を量子重力理論に対しても適用することができれば、よく知られた場の量子論の言葉を用いて量子重力を記述することが可能となるであろう。言い換えれば、既知の範疇における対応関係をつぶさに調べ、それを拡張することで、未知の量子重力理論を定義しようというのである。そのためには、ふたつの理論の間の写像、すなわち AdS/CFT 対応の「辞書」を確立することが重要である。

これまでの AdS/CFT 辞書の研究においては、与えられた場の量子論が重力双対を持つことは主に既知とした上で、場の量子論のデータから重力理論の構成要素（背景時空の計量、物質場、そのダイナミクスなど）を再構築する方法が調べられてきた。しかし、ある理論がホログラフィックかどうか、すなわち重力双対を持つかどうかというのは、それ自体きわめて非自明な問題である。これはホログラフィ原理の背後に隠された機構に迫るために本質的であると同時に、与えられた物性系が量子重力研究に応用できるかを判別するという意味で、実際的な問題設定であるとすら言えよう。

重力理論に特有の現象としてブラックホールの存在がある。AdS/CFT 辞書によれば、ブラックホール時空は有限温度の場の量子論と等価になっている。また、ブラックホール時空上の場の揺らぎは準固有振動モード (QNM) と呼ばれるが、QNM のスペクトルは双対な有限温度系における演算子のスペクトルに他ならない。そのため、場の量子論のスペクトル構造のうちに、双対なブラックホールの存在に起因する特殊な部分構造を見出すことができれば、それをもって理論がホログラフィックであると判定できるであろう。

そうしたスペクトル構造を引き出すため、我々は Schwarzschild AdS ブラックホールの周囲に存在する光子球と呼ばれる領域の近傍に着目した [1]。これは QNM のうち、角運動量が大きい部分セクターを取り出すことに対応する。QNM を解析的に求めることは一般に困難であるが、大角運動量極限の下では、可解な量子力学系で近似してスペクトルを解くことができる。その結果、光子球近傍の QNM は次のような特徴的な振る舞いを見せることがわかった：

- (1) QNM のダイナミクスを支配する有効ポテンシャルは光子球でピークを持ち、無限遠で発散するため、その間にはポテンシャル井戸が形成される。QNM のエネルギーが光子球の高さより低い場合、QNM は井戸の中に局在し、長寿命モードとなる。
- (2) QNM のエネルギーが光子球の高さを超えると、安定だった QNM は突然崩壊を始める。

これは双対な場の量子論においては、熱揺らぎに対して安定な準粒子と、その崩壊に対応する。こうした現象は一般の場の量子論に見られるものではなく、重力双対を持つ理論に特有であると考えられる。そのため、我々が「光子球セクター」と呼ぶこうした大角運動量スペクトルの存在は、理論がホログラフィックかどうかの判定条件として機能するものと期待される。

## References

- [1] K. Hashimoto, K. Sugiura, K. Sugiyama, and T. Yoda, “Photon sphere and quasinormal modes in AdS/CFT,” JHEP **10** (2023) 149, arXiv:2307.00237 [hep-th].

# 量子エンタングルメントによるドジッター空間におけるホログラフィーについて

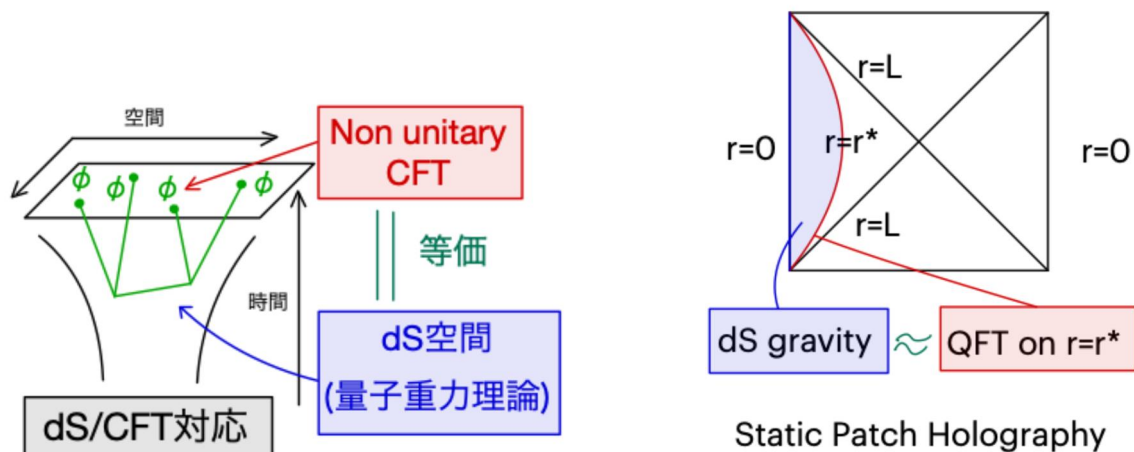
基礎物理学研究所素粒子論グループ 鈴木優樹

**Abstract** To understand quantum gravity in our universe, holographic principle in de Sitter space is one of the important topics. Instead of usual dS/CFT correspondence by Strominger, we pursue possibilities of realizing de Sitter holography with a timelike boundary. We discuss a few models and derive constraints by computing “entanglement entropies”.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

AdS/CFT 対応によって負の宇宙定数を持つ Anti-de Sitter 空間でのホログラフィー原理は理解され、量子重力理論を場の量子論によって記述する事が可能となった。一方、我々の宇宙における量子重力理論を理解する上で、加速膨張期 (de Sitter 時空) での量子重力理論を理解する事は非常に重要である。一つのアプローチとして de Sitter 時空においてもホログラフィー原理を構築する手法がある。Strominger によって dS/CFT 対応が提唱されたが、対応する共形場理論はユークリッド型で非ユニタリーである。この非ユニタリ性により、従来の共形場理論の手法による解析を困難にしている。

本研究では新たなホログラフィーモデルとして近年注目されている、half de Sitter holography[1] や static patch holography[2] モデルを紹介する。これらでは timelike な境界を導入することにより、その上で定義された場の理論が AdS/CFT 対応の時のように時間軸を含む。これにより、dS/CFT 対応の時に現れた非ユニタリ性などは出てこないと期待される。本研究では量子エンタングルメントを通してこれらのモデルについての理解を得た。[1] では Ryu-Takayanagi 公式を de Sitter 時空に拡張してエンタングルメントエントロピーを計算することで、対応する場の理論が非局所的である事がわかった。特に strong subadditivity (SSA) と呼ばれるエンタングルメントエントロピーが満たすべき量子不等式を破っている事もわかった。[3] では static patch holography において同様に Ryu-Takayanagi 公式から計算した極小曲面によるエンタングルメントエントロピーでは SSA が破れる事がわかった。そこで[3] ではツイスト演算子による手法を踏まえて SSA を満たす新たな”エンタングルメントエントロピー”の候補を提案した。またこの量が SSA を満たすという条件から static patch holography への制限も得られる。



## References

- [1] T. Kawamoto, S. M. Ruan, Y. Suzuki, T. Takayanagi, “A half de Sitter holography”, JHEP 10 (2023) 137.
- [2] L. Susskind, “De Sitter Holography: Fluctuations, Anomalous Symmetry, and Wormholes”, Universe 7 (2021) 12, 464.
- [3] S. M. Ruan, Y. Suzuki, “Toward a Consistent Definition of Holographic Entanglement Entropy in de Sitter space”, accepted in JHEP.

# Quasi-Periodic Eruptions as Multi-messenger Sources

天体核研究室      鈴木智也

**Abstract** We investigate the multi-messenger detectability of quasi-periodic eruptions, a newly discovered class of nuclear X-ray transients, with future X-ray and gravitational wave observatories. We find that the joint detections are limited unless gravitational wave detectors sensitive to lower frequencies are developed.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Recent X-ray observations have discovered a new class of recurrent nuclear transients known as quasi-periodic eruptions (QPEs) [1]. These events are characterized by burst-like X-ray flares recurring on timescales of hours to days, during which the X-ray luminosity increases by one to two orders of magnitude relative to the quiescent level. Accumulating observational evidence indicates that QPEs preferentially occur in galaxies that experienced tidal disruption events (TDEs) several years earlier, suggesting a physical connection between two phenomena [2]. Although the mechanism of QPEs remains uncertain, a leading explanation is that periodic X-ray bursts are generated when a stellar-mass object orbiting a central supermassive black hole (SMBH) repeatedly collides with an accretion disk produced by TDE debris [3].

Independently, systems hosting QPEs---comprising a stellar-mass object orbiting an SMBH---are also promising gravitational wave (GW) sources for future space-based detectors. Stellar-mass objects inspiraling around SMBHs are prime targets for such observatories, and if this configuration indeed underlies QPEs, then QPEs represent natural multi-messenger sources accessible through both electromagnetic and GW observations.

In our study, we investigate the multi-messenger observability of QPEs with future X-ray and GW detectors [4]. By using a minimal flare-emission model, we quantify the prospects for joint X-ray and GW detection of QPEs with orbital frequency in the mHz band, which is optimal for planned space-borne GW observatories such as the LISA. Our analysis shows that X-ray observations are most effective at orbital frequencies up to roughly 1 mHz, whereas LISA is sensitive chiefly above about 1 mHz. Since the optimal sensitivity windows overlap only marginally, we predict at most one joint detection during LISA's nominal mission lifetime. Extending GW sensitivity into the sub-millihertz regime ( $< 0.1$  mHz) would raise the possibility of the joint detection by an order of magnitude, enabling QPEs as an interesting multi-messenger target.

## References

- [1] Miniutti G., *et al.*, 2019, *Nature*, 573, 381.
- [2] Nicholl M., *et al.*, 2024, *Nature*, 634, 804.
- [3] Linial I., Metzger B. D., 2023, *ApJ*, 957, 34.
- [4] Suzuguchi T., Omiya H., Takeda H., 2025, arXiv:2505.10488 (accepted for publication in PASJ).

# 対称積共形場理論 (symmetric orbifold CFT) における 開弦的自由度の記述について

基礎物理学研究所素粒子論グループ      津田崇史

**Abstract** Symmetric orbifold CFTs are essential for a constructive, CFT-side understanding of the AdS3/CFT2 correspondence. In top-down realizations such as the D1-D5 and F1-NS5 systems, the dual gauge theories are described as (deformations of) a symmetric orbifold. This talk reviews how non-perturbative AdS excitations (AdS2 branes) and open-string excitations on them are formulated on the symmetric orbifold CFT side, based on my original works [1][2].

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

対称積共形場理論 (symmetric orbifold CFT) とは、AdS3/CFT2 対応を CFT 側から構造的に理解する上で必須の概念である。例として、超弦理論から top-down 的に構成される AdS3/CFT2 の実例は、以下のように symmetric orbifold CFT と関係することが知られる：

- D1-D5 系：ゲージ理論側は symmetric orbifold CFT の exactly marginal 変形。
- F1-NS5 系 (ないし、Type IIB on  $\text{AdS}_3 \times \text{S}^3 \times \text{T}^4$  w/  $k$ -unit NSNS flux)：
  - o ゲージ理論側は symmetric orbifold CFT の exactly marginal 変形。
  - o 特に  $k=1$  のとき、ゲージ理論側は symmetric orbifold CFT そのもの。

また、その定義は次：

1. Seed 理論と呼ばれる 2 次元 CFT をひとつ指定する。ここでは  $\mathcal{M}$  とする。
2.  $\mathcal{M}$  を  $N$  コピー用意し、そのテンソル積の CFT  $\mathcal{M}^{\otimes N}$  を考える。
3.  $N$  コピーの間の置換について、対称群  $S_N$  でゲージ化することで、symmetric orbifold CFT  $\text{Sym}^N \mathcal{M} = \mathcal{M}^{\otimes N} / S_N$  を得る。

AdS/CFT 対応は、局所的自由度だけでなく、AdS 時空上の非摂動的な励起 (D-brane) やその上の開弦的なモードに対しても成立するという期待がある。一方で、上述の AdS3/CFT2 において、このような励起は symmetric orbifold CFT の視点からは理解されてこなかった。

本発表では、symmetric orbifold CFT におけるこれらの励起の定式化について、[1][2] に基づいて解説する。AdS3 上の AdS2 プレーンに対応する励起は symmetric orbifold 上では interface と呼ばれる object で構成され、interface 上の励起として新たに open twist と呼ばれる自由度が導入される。

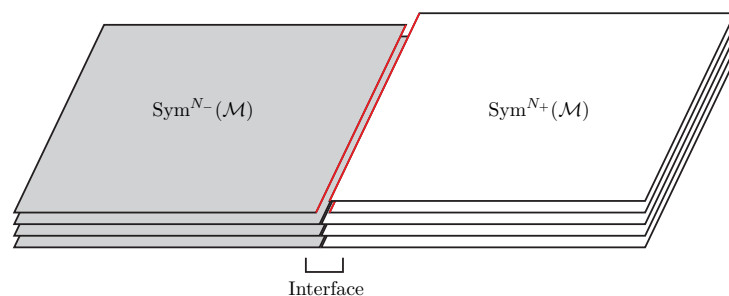


Fig. 1: schematic picture of an interface between two symmetric orbifold CFTs. Each sheet indicates one copy of seed CFT. Red line indicates boundary in some seed theory, while remaining seed copies are glued across the interface.

## References

- [1] S. Harris, Y. Hikida, V. Schomerus, and T. Tsuda. “Holographic Interfaces in Symmetric Product Orbifolds”, JHEP 12 (2025), p. 114.
- [2] S. Harris, V. Schomerus, and T. Tsuda. “Interface Correlators in Symmetric Product Orbifolds”, arXiv: 2512.02616 [hep-th].

# Selected Applications of Homotopy Algebras in Quantum Field Theory and String Field Theory

素粒子論研究室 戸塚譲次郎

## Abstract

Homotopy algebras offer a unified algebraic language for QFT and SFT. In this talk I reformulate the Ward–Takahashi identity within this framework: symmetry transformations and conserved currents are encoded by multilinear maps, and the identity follows from algebraic relations of homotopy-algebraic correlators. Quantum anomalies are characterized in the same language.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

ホモトピー代数は、結合法則やヤコビ恒等式といった通常の代数が満たす性質を一般には満たさない。その代わり、破れは高次の多重線形写像によって系統的に補正され、コホモロジー上ではこれらの性質が回復するという意味で、通常より広い代数構造を与える。

ホモトピー代数は、場の理論の相互作用やゲージ構造を記述する道具として用いることができ、とくに弦の場の理論（SFT）では作用を構成する枠組みとして発展してきた。さらに近年では、SFT に限らず通常場の量子論（QFT）にも適用し、相関関数や散乱振幅などの量を代数構造から解析する研究が進んでいる。ホモトピー代数は理論の詳細に依らない形で記述できるため、この枠組みで得られた公式は、SFT のように構造が複雑な理論にも移植できることが大きな魅力である。

本博士論文では、ホモトピー代数に基づく相関関数の記述を基盤として、QFT と SFT への応用を紹介し、(i) Ward-Takahashi 恒等式のホモトピー代数的再定式化[1]、(ii) LSZ 簡約公式に基づく散乱振幅の代数的定式化[2]、(iii) 特定の場の再定義による境界弦の場の理論に類似した作用の導出[3]、という三つの結果を示している。

本講演では、Ward-Takahashi 恒等式をホモトピー代数の言葉で再定式化する。まず、対称性変換と保存カレントを、多重線形写像としてホモトピー代数の枠組みに組み込む。ついで、相関関数のホモトピー代数的表式を出発点として、Ward-Takahashi 恒等式が理論の詳細に立ち入らず、代数的関係式から導かれることを示す。特に、量子的な対称性の破れであるアノマリーもホモトピー代数の枠組みで捉えなおすことができる。

本研究で得られた枠組みは、SFT を含む様々な場の理論に共通に適用でき、対称性やアノマリーの解析を統一的に進めるための基盤となることが期待される。

## References

- [1] K.Konosu and J.Totsuka-Yoshinaka, *Noether's theorem and Ward-Takahashi identities from homotopy algebras*, JHEP 09 (2024), 048 [arXiv:2405.09243 [hep-th]].
- [2] K.Konosu, Y.Okawa, S.Shibuya and J.Totsuka-Yoshinaka, *The LSZ reduction formula from homotopy algebras*, [arXiv:2504.08653 [hep-th]].
- [3] J.Totsuka-Yoshinaka, *BSFT-like action from cohomomorphism*, [arXiv:2504.10061 [hep-th]].

# 部分次元粒子の物質場理論における双対構造

基礎物理学研究所素粒子論グループ 中西 泰一

**Abstract** Matter theories of subdimensional particles exhibit nontrivial geometric effects induced by a background foliation structure. In this talk, I will explain exotic dualities between electric and magnetic sectors, and show how the subdimensionality parameter modulates the effective metric.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

物質の相の分類やその性質の研究は、物理学における中心的課題の一つである。その中でも、近年になって提案されたトポロジカル秩序相と呼ばれる相は、背景となる空間の幾何学的構造によって保護された長距離相関や、それを使った量子誤り訂正などの文脈で非常に精力的に研究が進められている。

さらに最近では、foliated fracton order と呼ばれる新しい物質相が提案された。この相は、元々の文脈では、トポロジカル秩序相を使った量子メモリの効率の向上や、熱化に対する情報保持能力の改善のために提案されたものである。しかし、現在ではさらに幅広く、物理系における新しい種類の対称性の存在や、付随する幾何学的演算子の数学的な意味づけなどの、理論的な面からも注目されている。

このような foliated fracton order は、トポロジカル秩序相と同様に、背景の幾何学的構造に特徴づけられるような物質相ではあるが、結合する幾何学的構造の種類が異なっている。トポロジカル秩序相では、背景空間の大域的な位相構造に結合するのに対して、foliated fracton order では背景空間の葉層構造と呼ばれる構造に結合する。この構造は、従来の物理理論が扱ってきたリーマン構造、スピン構造、複素構造などとも異なるようなもので、物理学ではあまり注目されることが少なかった構造である。

トポロジカル秩序相の基底状態が、位相的場の理論によって記述されるのと同様に、foliated fracton order についても葉層の場の理論を用いて記述することが可能なのではないかと考えられてきていた。しかし、長くの間、葉層構造を定める高次元束構造に付随した冗長性を包摂した物理理論を構成することができなかったため、多くの試みが困難に直面した。この幾何学的構造としての取り扱いの失敗が UV/IR mixing と呼ばれる、連続理論を格子上理論の極限として解釈することの困難さを引き起こした。

私の研究グループは、論文[1]において、葉層構造に付随した接続形式である Bott 接続と、葉層の特性数である Godbillon-Vey 数をもとに、内部対称性との適切な混合を行い、foliated fracton order の基底状態の再現と、幾何学的に整合した取り扱いの構成に成功した。この理論では、具体的な格子の切り方が連続極限に与える影響を排除し、葉層構造の幾何学的な指数のみによって対称性演算子の存在が議論でき、さらに低次元部分多様体が無限に積み重なる極限としての理論の構成に成功した。

また、この理論における束としての冗長性から、foliated fracton order の物質相に現れる部分次元粒子の特殊な電流保存則を自然に導き出すことができ、foliated fracton order の励起状態に対応する物質場の理論を明示的に構成することが可能となった。この理論は、実効的にはただの低次元理論の積み重ねと思えるものの、背景多様体の大域的な幾何学的効果を受けることができるため、従来の場の理論とは異なった非自明な幾何学的双対構造を持つことが分かった。特に、電気的な対称性と磁気的な対称性に対して、葉層構造の影響を特徴づけるパラメータを導入することができ、T-双対と呼ばれる多様体のホッジ双対に関連した双対性の議論から、これらのパラメータが反転することも確認することができる。また、このパラメータは物質の受ける幾何学的効果の変調となるため、任意に動かしていけば物質が受ける重力的效果の類似物と考えることも可能になる。

本発表では、このような部分次元粒子の物質場の理論における種々の解析により、通常の場の理論とは異なる効果が生まれることを議論する。

## References

[1] H. Ebisu, M. Honda, T. Nakanishi, and S. Shimamori, “New field theories with foliation structure and subdimensional particles from the Godbillon-Vey invariant,” Phys. Rev. D 112 no. 2, (2025) 025010.

# Progenitor Constraint using CNO Abundances of Circumstellar Material in Supernova Remnants

宇宙線研究室 成田 拓仁

**Abstract** Circumstellar Material (CSM) around supernova remnants (SNRs) is a powerful indicator of their progenitor history. We established a new method for constraining progenitor parameters with high resolution X-ray spectroscopy of CSM. By comparing CNO abundances in three SNRs with stellar evolution models, we revealed their mass, rotation, and binary histories.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

大質量( $\geq 10 M_{\odot}$ )の恒星は進化の最後に重力崩壊型超新星を引き起こし、白色矮星の連星はIa型超新星を引き起こすと考えられている。超新星は酸素や鉄などの重元素の主要な供給源であり、供給量を正確に知るためには、爆発機構の解明とそれを引き起こす元の星(親星)の解明が重要となる。これまで親星の制限は、主に超新星の残骸で観測された酸素、マグネシウム、ネオン、鉄などの重元素から行われてきた[1][2]。これらの元素は星の進化の最終盤で生成されるため、爆発が起きる直前のコア内部の情報を反映しており、爆発機構を調べる上で非常に重要であった。一方で、親星のより初期の進化の多様性によってコアの状態も多様になる。そのため、親星と超新星を繋ぐには、どんな星が進化最終盤のコアを形成したか知る必要がある。近年、大質量星や白色矮星と恒星の連星の外層から放出される星風の元素組成は、その星の進化経路によって変化するということがわかってきた[3][4]。特に、炭素、窒素、酸素といった元素の組成比は恒星の初期質量、初期回転速度、対流構造、連星相互作用などを反映して変化するということがわかっている。星風は星周物質(CSM)として、爆発前の親星の周囲に溜まり、超新星爆発の衝撃波によってかき集められる。また超新星残骸において、衝撃波で加熱されたCSMはX線で明るく光る。そのため我々はX線天文衛星で超新星残骸のCSMを観測することでこれまで制限の難しかった親星の初期状態を制限することができると考えた。

本研究では、複数の恒星進化コード(Geneva Code, HOSHI code, MESA code)を使い、様々な初期質量、初期回転、対流条件の親星が形成するCSMの元素組成を再現した。このシミュレーションから特に窒素と酸素の組成比(N/O)が親星の素性をよく反映していることがわかった。我々はさらに、この手法を実際の超新星残骸に適用した。これまで主に用いられてきたCCD検出器は、窒素や酸素の輝線が見えるエネルギー帯域において十分なエネルギー分解能を持っていなかった。そこで我々は主に点源に用いられるXMM-Newton衛星の反射型回折分光器を、見かけ上小さい領域を持つ超新星残骸に適用するという工夫を行なってこの問題を突破した。具体的に2つの重力崩壊型超新星残骸(RCW 103、G292.0+1.8)とIa型超新星残骸Kepler's SNRに対して精密X線分光観測を実施し、観測結果を恒星進化シミュレーションと比較し、親星の初期パラメータを決定した。RCW 103については、太陽組成より有意に高いN/O( $= 3.8 \pm 0.1$ )を測定し、親星は比較的低質量( $\sim 10 M_{\odot}$ )で、初期自転が遅い( $\sim 100 \text{ km s}^{-1}$ )の単独星であったと制限された[5]。G292.0+1.8については、低いN/O( $= 0.5 \pm 0.1$ )を得た。これは、親星が外層を剥ぎ取られたIb/c型超新星であったことを示唆する[6]。Kepler's SNRは、高いN/O( $= 2.26^{+0.07}_{-0.11}$ )が得られ、伴星は初期質量が $\sim 1 M_{\odot}$ のAGB星であると制限された[7]。本手法は重力崩壊型超新星を起こす全ての単独星、Ia型超新星を起こす恒星と白色矮星の連星など適用範囲が広い。現在は検出器の制約で対象天体が限られるが、ExCEEDなどの次世代X線ミッションにより、マゼラン雲等も含めた様々な超新星残骸に対して本手法の適用が可能となる。そのため本手法は超新星の多様な進化経路と爆発メカニズムを解明するための強力な手法になると期待される。

## References

- |   |   |
|---|---|
| [1] Katsuda, S., et al., ApJ, 863, 127 (2018).    | [5] Narita, T., et al, ApJ, 950, 137, (2023). |
| [2] Sato, T., et al., ApJ, 984, 185 (2025).       | [6] Narita, T., et al, ApJ, 976, 146, (2025). |
| [3] Maeder, A., et al., A&A, 565, A39 (2014).     | [7] Narita, T., et al, ApJ, in prep.          |
| [4] Marigo, P., et al., A&A, 478, 823–842 (2008). |   |



# Fast Radio Bursts from Magnetars: Induced Scattering in Strongly Magnetized Pair Plasma

天体核研究室      西浦 怜

**Abstract** Fast radio bursts (FRBs) from magnetars face a long-standing tension. Induced scattering in strongly magnetized electron and positron pair plasma should strongly attenuate FRBs, yet observations suggest emission sizes comparable to magnetospheric scales. We develop a kinetic theory of induced scattering and apply it to FRB propagation in magnetar magnetospheres.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Fast radio bursts (FRBs) are among the brightest radio transients, with origins and central engines that remain uncertain [1]. A breakthrough came in 2020, when FRBs were detected within the Milky Way and were linked to X-ray bursts from a known magnetar, establishing magnetars as at least one class of FRB source [2]. Several observations indicate characteristic emission scales comparable to the size of a magnetar magnetosphere [3]. However, such observational inferences appear to conflict with several theoretical expectations. If an FRB is produced inside the magnetosphere, it is expected to be strongly attenuated by induced scattering on the magnetospheric plasma, potentially preventing escape [4]. This contrast motivates a reassessment of FRB propagation through magnetar environments.

We develop the first analytic theory of induced scattering in strongly magnetized pair plasma within a kinetic framework [5,6]. The analysis identifies three density fluctuation modes, ordinary, neutral, and charged, and shows that each can host induced scattering. We find that magnetization qualitatively changes the plasma responses, allowing instabilities that are absent in unmagnetized pair plasma. We also show that a strong background magnetic field suppresses scattering by constraining particle motion, and that in some regimes an additional plasma microprocess, Debye screening, can suppress induced scattering much more strongly than previously expected.

We test and extend the theory using one-dimensional Particle-in-Cell simulations of circularly polarized Alfvén waves in magnetized pair plasma. For both the neutral and charged modes, the simulations reproduce the analytically derived linear growth rates for several parameter choices, with agreement within a factor of about two. They also reveal two nonlinear evolutions. In the partial scattering regime, scattering saturates at a low level after plateau formation in the distribution function, while the incident wave is hardly attenuated. In contrast, in the full scattering regime, the incident wave is strongly attenuated as its energy is transferred to scattered waves.

We apply the theory to FRBs propagating through magnetar magnetospheres. Typical FRB luminosities enter at least one induced scattering mode over a wide range of plasma densities, which implies that linear growth is unavoidable. The nonlinear evolution, however, depends mainly on the plasma density. Very dense plasmas, as expected during magnetar X-ray bursts, favor full scattering and strong attenuation, whereas moderate densities can allow partial scattering and escape with limited attenuation. This diversity helps reduce the tension between theoretical attenuation estimates and observations. The framework may also be applicable to transient phenomena in other astrophysical plasmas.

## References

- [1] Lorimer, D. R., Bailes, M., McLaughlin, M. A., Narkevic, D. J., & Crawford, F. 2007, *Science*, 318, 777
- [2] CHIME/FRB Collaboration, Andersen, B. C., Bandura, K. M., et al. 2020, *Nature*, 587, 54
- [3] Nimmo, K., Pleunis, Z., Beniamini, P., et al. 2025, *Nature*, 637, 48
- [4] Lyubarsky, Y. 2021, *Universe*, 7, 56
- [5] Nishiura, R., Kamijima, S. F., Iwamoto, M., & Ioka, K. 2025a, *Phys. Rev. D*, 111, 063055
- [6] Nishiura, R., Kamijima, S. F., & Ioka, K. 2025b, arXiv e-prints, arXiv:2510.12869

# Measurement of neutrino Neutral-Current Quasi-Elastic interactions in the T2K experiment and application to Diffuse Supernovae Neutrino Background searches

高エネルギー物理学研究室      FENG LiCheng

**Abstract** We performed a systematic study of Neutral Current Quasi-Elastic (NCQE) interactions using T2K data, evaluating how nucleon-nucleus interaction modeling impacts cross-sections, event features, and neutron multiplicity, all of which are critical to the Diffuse Supernova Neutrino Background (DSNB) search at Super-Kamiokande. By developing a Neural Network classifier to suppress atmospheric NCQE events and utilizing T2K for a data-driven systematic uncertainties, we demonstrate that reducing this pivotal background enables a potential  $3\sigma$  detection of the DSNB.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

DSNB encodes the history of cosmic star formation. Detecting this faint flux is a major astrophysical goal but is hindered by atmospheric neutral-current quasielastic (NCQE) backgrounds in Super-Kamiokande. This thesis uses T2K data to characterize these interactions, constraining the background to improve DSNB sensitivity.

We report measurements of the three critical components of the NCQE background: neutron multiplicity, interaction cross sections, and Cherenkov-ring features. First, because DSNB signals are accompanied by a single neutron while atmospheric backgrounds often produce multiple neutrons, neutron multiplicity is a key discriminator. Using T2K data corresponding to  $1.76 \times 10^{20}$  protons on target (POT), we measured the mean neutron multiplicity for  $\nu$ - $^{16}\text{O}$  NCQE-like interactions to be  $\bar{M} = 1.37 \pm 0.33$  (stat.) $^{+0.17}_{-0.27}$  (syst.). This can be contrasted with predictions from neutrino generators, such as NEUT with the Bertini-base cascade model for secondary interactions, of  $(2.24 \pm 0.01$  (stat)). Using the INCL++ and BIC models instead give  $(1.84 \pm 0.01$  (stat)) and  $(1.87 \pm 0.01$  (stat)), which give better agreement.

Second, to determine the absolute scale of the background, we measured NCQE-like flux-averaged cross sections using  $21.42 \times 10^{20}$  POT for neutrinos and  $16.35 \times 10^{20}$  POT for antineutrinos. The resulting flux-averaged cross sections are

$$\begin{aligned}\langle\sigma_{\nu\text{NCQE}}\rangle &= (1.75 \pm 0.15 \text{ (stat.)})^{+0.43}_{-0.23} \text{ (syst.)} \times 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{oxygen}, \\ \langle\sigma_{\bar{\nu}\text{NCQE}}\rangle &= (0.97 \pm 0.16 \text{ (stat.)})^{+0.19}_{-0.13} \text{ (syst.)} \times 10^{-38} \text{ cm}^2/\text{oxygen}.\end{aligned}$$

Third, the Cherenkov rings features of NCQE are also crucial because they determine how well the atmospheric NCQE background can be separated from DSNB signal. We evaluate the uncertainty of the DSNB event selection at Super-Kamiokande based on these Cherenkov ring features. A Neural Network-based classifier was developed and tested using  $21.42 \times 10^{20}$  POT for neutrinos and  $16.35 \times 10^{20}$  POT for antineutrinos, demonstrating a superior efficiency over the existing cut while maintaining similar uncertainties.

Finally, these results were applied to a Super-Kamiokande sensitivity study (0.01% Gd, 552.1 days), reducing the atmospheric NCQE background uncertainty from 71.0% to 43.4%. This suppression improves sensitivity, potentially enabling a  $3\sigma$  DSNB detection by the end of operations in 2032. These constraints are directly applicable to future searches at Super-Kamiokande and Hyper-Kamiokande.

## References

- [1] T2K Collaboration, Phys. Rev. D **112**, 032003 (2025)
- [2] Super-Kamiokande Collaboration, arXiv:2511.02222 (2025)

# 陽子弾性散乱による $^{16,18}\text{O}$ の中性子密度分布測定

原子核・ハドロン物理学研究室      吉田凌祐

**Abstract** Density distributions and radii of nucleons are fundamental properties of nuclei. We have performed polarized proton elastic scattering from  $^{16,18}\text{O}$  and Si. Cross sections and analyzing powers were obtained from the measurement. Summary of the experiment and the current analysis will be presented.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

原子核中の核子の密度分布や半径は、原子核の最も基本的な性質である。酸素同位体のうち、 $^{18}\text{O}$  のみが他の中性子過剰な酸素同位体と比べて際立って大きな陽子半径であることが実験的に示されている[1]。一方で、理論的には様々な手法の計算が試みられているが、 $^{18}\text{O}$  の陽子半径の傾向は再現されておらず、その起源は十分に理解されていない。

3 体模型計算により  $^{18}\text{O}$  は  $^{16}\text{O}+n+n$  のダイニュートロン相関が存在することが示唆されており[2]、これが陽子半径増大の起源の候補として考えられる。ダイニュートロン相関を持つ原子核は、近接した 2 中性子ペアとコア核から構成され、固有座標系で考えると系の重心とコア核の重心がずれている描像が考えられる。一方、実験的には固有座標系の情報を得ることは困難であり、密度分布は系の重心周りでの回転平均を見ることになる。そのため、陽子密度分布はコア核よりも広がり、半径も大きくなったように見える。中性子密度分布は陽子と同様に広がったコア核の中性子と残る 2 中性子の和で構成される。つまり、コア核である  $^{16}\text{O}$  と  $^{18}\text{O}$  の両方の密度分布を決定することなしに、 $^{18}\text{O}$  中の核子の分布を議論することはできない。現在、電子弾性散乱の結果を用いて  $^{16,18}\text{O}$  の陽子密度分布を得られるが、一方で、実験的には  $^{16,18}\text{O}$  の中性子密度分布を得られていない。

我々のグループでは、大阪大学核物理研究センター(RCNP)において偏極陽子弾性散乱実験を行い、得られた微分散乱断面積と偏極分解能を用いて、中性子密度分布を決定することに成功した[3, 4]。そこで、本研究では同様の手法により  $^{16,18}\text{O}$  の中性子密度分布を決定し、 $^{18}\text{O}$  の陽子半径増大の解明を目指す。

実験は大阪大学 RCNP において行われた。リングサイクロトロンで 295 MeV に加速した偏極陽子を標的に照射し、散乱粒子を測定した。標的には、 $^{16}\text{O}$  標的として天然同位体比の  $\text{SiO}_2$ 、 $^{18}\text{O}$  標的として 98.58% の  $^{18}\text{O}$  同位体比の水 ( $\text{H}_2\text{O}$ )、さらに  $\text{SiO}_2$  標的の Si バックグラウンド測定のため天然同位体比の Si を用いた。散乱粒子は高分解能磁気スペクトロメータ Grand Raiden の標準検出器であるプラスチックシンチレータと vertical drift chamber (VDC) により、粒子と標的の励起状態のそれぞれを決定し、陽子弾性散乱事象のみを選んだ。陽子ビームの偏極度は、ビームラインに設置された陽子標的(ポリエチレン)とビーム粒子との弾性散乱を左右 2 組のプラスチックシンチレータで同時計数し決定した。これらの測定値を用いて、微分散乱断面積および偏極分解能を求めた。

本発表では、実験の詳細および解析の現状について報告する。

## References

- [1] S. Kaur *et al.*, Phys. Rev. Lett. **129**, 142502 (2022).
- [2] K. Hagino *et al.*, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **37**, 064040 (2010).
- [3] S. Terashima *et al.*, Phys. Rev. C **77**, 024317 (2008).
- [4] J. Zenihiro *et al.*, Phys. Rev. C **82**, 044611 (2010).

# Celestial Holography meets dS/CFT

基礎物理学研究所宇宙グループ 脇隆浩

**Abstract** We build an explicit map between cosmological correlators in (D+1)-dimensional de Sitter space and celestial amplitudes. Using slicing and analytic continuation from Euclidean theories, we identify Mellin-defined celestial operators with dS/CFT extrapolate operators. This unifies celestial holography, dS/CFT, and cosmological correlators, enabling (A)dS holography tools for asymptotically flat quantum gravity.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Celestial holography conjectures that scattering amplitudes in (D+2)-dimensional Minkowski spacetime can be described as correlation functions of a theory living on a D-dimensional sphere. In particular, for a massless scalar field in (D+2) dimensions, celestial CFT operators are defined via a Mellin transform as [1]

$$\mathcal{O}_\Delta(k) = \int_0^\infty d\omega \omega^{\Delta-1} a(\omega k),$$

where  $a$  is the annihilation operator of the massless scalar field. The operator  $\mathcal{O}_\Delta$  can be interpreted as an operator that “lives” on the celestial sphere  $S^D$ .

We also consider the late-time (or early-time) behavior of a bulk scalar field  $\phi$  in de Sitter space in the global patch, as

$$\psi \sim e^{-(D-\Delta)t} V_{D-\Delta} + e^{-\Delta t} W_\Delta(t \rightarrow \infty),$$

where  $\Delta = D/2 + i\lambda$  with  $\lambda \in \mathbb{R}$ . The extrapolate operators  $V_\Delta$  and  $W_\Delta$  play an important role in dS/CFT [2] and in the cosmological bootstrap [3]. As in the case of the celestial operators  $\mathcal{O}_\Delta$ , the operators  $V_\Delta$  and  $W_\Delta$  can also be regarded as living on  $S^D$ .

In this talk, we derive an explicit identification between  $\mathcal{O}_\Delta$  and the operators  $V_\Delta$  and  $W_\Delta$  based on [4]. The strategy is as follows. We start from a massless scalar field in flat Euclidean space  $\mathbb{R}^{D+2}$ . A Weyl transformation maps this theory to the cylindrical spacetime  $S^{D+1} \times \mathbb{R}$ . After performing a Fourier transform along the  $\mathbb{R}$  direction, we obtain a theory on the sphere  $S^{D+1}$ . We then analytically continue the theory on  $S^{D+1}$  to a theory on  $dS_{D+1}$  with the Euclidean vacuum, which is equivalent to the Bunch-Davies vacuum. Under this analytic continuation, the original theory on  $\mathbb{R}^{D+2}$  is mapped to a theory in Minkowski space  $M_{D+2}$ . In this way, we derive a relation between correlation functions in  $dS_{D+1}$  and those in  $M_{D+2}$ . By applying the celestial holography dictionary, we show that the extrapolate operators  $V_\Delta$  and  $W_\Delta$  can be expressed as linear combinations of the celestial operators  $\mathcal{O}_\Delta$  and their shadow counterparts.

Moreover, in the conventional slicing-based construction of celestial holography [5], essentially only the quantity known as the Geroch tensor tends to become manifest. As a result, it has been difficult to treat the celestial stress tensor as an *intrinsic* observable of the dS theory defined via slicing. However, within the formalism developed in this talk, we will see that the (formally) massless mode responsible for the celestial stress tensor indeed exists in the dimensionally reduced theory, and can be defined and identified intrinsically.

## References

- [1] S. Pasterski *et al.*, “Gluon Amplitudes as 2d Conformal Correlators,” *Phys. Rev. D* **96** (2017)
- [2] A. Strominger, “The dS/CFT correspondence,” *JHEP* **10** (2001)
- [3] D. Baumann, D. Green, A. Joyce, E. Pajer, G. L. Pimentel, C. Sleight and M. Taronna, “Snowmass white paper: The cosmological bootstrap,” *SciPost Phys. Comm. Rep.* **1** (2024)
- [4] H. Furugori, N. Ogawa, S. Sugishita and T. Waki, “Celestial holography meets dS/CFT,” *JHEP* **12** (2025) 126,
- [5] C. Cheung *et al.*, “4D scattering amplitudes and asymptotic symmetries from 2D CFT,” *JHEP* **01** (2017)

# LHC-ATLAS 実験における質量縮退領域での 超対称性粒子スタウ探索

高エネルギー物理学研究室 河本 地弘

**Abstract** Supersymmetry (SUSY) is a promising theory in particle physics that can naturally solve problems in the current standard model. This study targets a scenario that predicts a stau and a mass-degenerate neutralino. Kinematic cuts are set to extract the signal effectively.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

超対称性 (Supersymmetry, SUSY) は、標準模型粒子にスピンの  $1/2$  異なるパートナー粒子の存在を预言する理論であり、標準模型の諸問題を解決することから非常に有力であるとされてきた[1]。特に、R-パリティと呼ばれる量を保存することを仮定した SUSY の多くのモデルにおいては、ニュートラリーノと呼ばれる粒子が最も軽く中性であるために安定で、ダークマターの候補粒子となるという特徴を持つ。中でも、タウ粒子の超対称性パートナーであるスタウがニュートラリーノより  $0(10)$  GeV 程度の小さい質量差で存在するというシナリオは、ニュートラリーノとスタウが随伴消滅することによりダークマターの残存量を説明することができることから特に有力である[2]。LHC-ATLAS 実験では、LHC 加速器による陽子陽子衝突を通して SUSY 粒子を(対)生成することにより直接探索が可能である。スタウは検出不可能なニュートラリーノと低運動量のタウ粒子に崩壊するが、低運動量領域ではタウ粒子の再構成・同定・トリガー性能が著しく低下することから、既存のスタウ探索では未探索のままであった。

本研究は、低運動量領域に特化した戦略により、この領域での初探索を試みるものである。まず、高運動量のジェットによりスタウ対生成系が横方向にブーストされ、大きな消失横運動量を持つことによりトリガーされたイベントを用いることで信号事象を確保する。

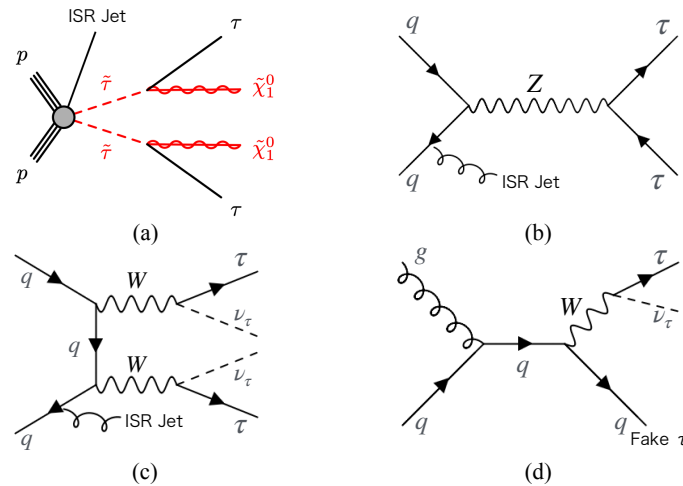


Fig. 1. Diagrams for signal (a) and examples of main backgrounds (b-d). Each has two taus and missing particles, but the differences in mother particle change the kinematic distributions.

また、信号事象を取り出すため、信号事象・背景事象の運動学的特徴に注目する。信号事象および代表的な背景事象のダイアグラムを Fig. 1 に示す。信号事象と背景事象の間にはタウ粒子や消失横運動量の由来に違いがあることから、運動学的特徴に違いが生じる。この点を活かして、信号事象を効率よく取り出しながら背景事象を棄却する最適な条件（カット）を施して探索感度を最大化した。

本発表ではカットの最適化による信号領域の設定および背景事象の見積もりを通した探索感度の評価について報告する。

## References

- [1] Pierre Fayet, et al., Adv. Ser. Direct. High Energy Phys. 26 (2016) 397-454.
- [2] A. Aboubrahim, P. Nath, and A. B. Spisak, Phys. Rev. D 95, 115030 (2017).
- [3] ATLAS Collaboration, JHEP05(2024)150.