

2023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

(2024年2月2日)

物 理 学 第 二 分 野

# D3 発表会

日時:2024年2月2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. Monte Carlo study of Schwinger model at finite temperature and theta    | 大畑 宏樹  | (9:00)  |
| 2. テンソル繰り込み群による<br>2フレーバーSchwinger模型の数値計算                                  | 菅野 颯人  | (9:20)  |
| 3. CMB偏光観測望遠鏡GroundBIRDにおける<br>コミッショニングデータを用いた較正手法の開発                      | 末野 慶徳  | (9:40)  |
| 4. Axion clouds around black holes in inspiraling binaries                 | 高橋 卓弥  | (10:00) |
| 5. LHC-ATLAS実験における量子もつれ状態の<br>B中間子対を用いたベル不等式の破れの検証                         | 辻川 吉明  | (10:20) |
| 6. 有限密度下におけるベクター中間子質量スペクトル測定   | 中須賀さとみ | (10:40) |
| 7. The Petz lite recovery map for black hole information recovery protocol | 中山 泰晶  | (11:00) |
| 8. 集団運動の微視的記述に向けて  | 樋沢 規宏  | (11:20) |
| 9. 逆運動学陽子弾性散乱による<br>錫132の陽子・中性子密度分布測定                                      | 土方 佑斗  | (11:40) |

- |   |       |         |
|---|-------|---------|
| 10 . Higher-Form Symmetry and Eigenstate Thermalization Hypothesis                                      | 福島 理  | (13:00) |
| 11 . Exploring Energy Transfer and Evolution of Supernova Remnants through Year-Scale X-ray Variability | 松田 真宗 | (13:20) |
| 12 . Spin of Ultralight Dark Matter   | 間仁田侑典 | (13:40) |

# Monte Carlo study of Schwinger model at finite temperature and theta

基礎物理学研究所・原子核理論グループ 大畑宏樹

**Abstract** We study the interplay between the quantum effects of the  $\theta$  term and thermal effects through the first-principle Monte Carlo study of the Schwinger model. The sign problem is circumvented by using the bosonization technique, effectively evading the fermion doubling problem and preserving the chiral anomaly on a lattice simultaneously.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

The  $\theta$  term, the redundant term in gauge theories, has been attracting a large amount of interest due to its intriguing features. The effects of the  $\theta$  term are purely quantum since the term does not affect the classical equation of motion. Additionally, the  $\theta$  term explicitly breaks the CP symmetry except for the special case  $\theta = \pi$ , where the CP symmetry is not explicitly broken due to the topological nature of the term. Despite the theoretical interest, investigating the effects of the  $\theta$  term by the Monte Carlo method is known to be very challenging due to the sign problem.

We investigate the interplay between the quantum effects of the  $\theta$  term and thermal effects through the first-principle Monte Carlo study of quantum electrodynamics in  $1 + 1$  dimensions, known as the Schwinger model. The Schwinger model describes confinement, the chiral anomaly, and the nontrivial topological  $\theta$  vacuum, similar to quantum chromodynamics in  $3 + 1$  dimensions. After reviewing the lattice formulations of the Schwinger model, we point out [1] that the sign problem at finite  $\theta$  can be circumvented by using the bosonization technique, in which the Dirac fermion is transformed into boson, effectively evading the fermion doubling problem and preserving the chiral anomaly intact simultaneously. We explicitly confirm its validity and effectiveness through detailed comparisons with analytical and previous numerical results.

Using the proposed method, we perform a precise calculation of the string tension and quantitatively reveal the confining properties in the Schwinger model at finite temperature and  $\theta$  [1]. We find that the string tension is strongly affected by the  $\theta$  term and can become negative for noninteger probe charges near  $\theta = \pi$  at low temperatures. Furthermore, we observe that the string tension becomes less dependent as temperature increases, indicating the thermal suppression of the quantum effects of the  $\theta$  term.

We also explore the phase structure of the Schwinger model at  $\theta = \pi$  in the temperature and fermion mass plane focusing on the CP-breaking quantum critical point (QCP) at zero temperature, which belongs to the Ising universality class [2]. Specifically, we perform a detailed investigation of the correlation function of the electric field near the QCP and find that it shares the same asymptotic form as the quantum Ising chain. This finding indicates the existence of three regions near the QCP, each characterized by a specific asymptotic form of the correlation length, and demonstrates that the long-range order at zero temperature is broken by infinitesimally small thermal effects.

## References

- [1] Hiroki Ohata, “*Monte Carlo study of Schwinger model without the sign problem,*” *Journal of High Energy Physics*, 12 (2023) 007, arXiv:2303.05481 [hep-lat].
- [2] Hiroki Ohata, “*Phase diagram near the quantum critical point in Schwinger model at  $\theta = \pi$ : analogy with quantum Ising chain,*” arXiv:2311.04738 [hep-lat], accepted in *Progress of Theoretical and Experimental Physics*.

# テンソル繰り込み群による 2 フレーバー-Schwinger 模型の数値計算

基礎物理学研究所・素粒子論グループ 菅野颯人

**Abstract** The free energy of 2-flavor Schwinger model with finite  $\theta$  parameter is calculated. We use tensor renormalization group (TRG) method, with obvious  $2\pi$  periodicity of  $\theta$  parameter. We change mass of the fermions, and check that the results are consistent in large mass limit and small mass region to theoretical calculations.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

素粒子標準模型の未解決問題の1つとして、「強いCP問題」が知られている。これはQCDに含まれるトポロジカル項である $\theta$ 項の係数 $\theta$ が、現実世界では何故か0であるように見える、という問題である。この問題を解明するためには、 $\theta$ 項を含むQCDの性質について理解する必要がある。現在、QCDは主にモンテカルロ法による数値計算によって理解されているが、モンテカルロ法には符号問題と呼ばれる問題があり、一部の系では計算を行うことが難しいことが知られている。 $\theta$ 項を含むQCDも符号問題を持つため、現在でも数値計算を行うことは難しく、その性質は未解明である。

近年、モンテカルロ法に代わる新たな数値計算手法として、テンソルネットワークを用いた手法が注目されている。これらの手法は符号問題を持たないため、モンテカルロ法では計算が難しかった系の計算も可能である。本研究では、テンソルネットワーク法の一つである「テンソル繰り込み群 (Tensor Renormalization Group, TRG)」[1]という手法を用いて、QCDのToy模型として知られるSchwinger模型の数値計算を、 $\theta$ 項を含む場合に行った。

**Schwinger 模型**[2, 3]とは2次元QEDのことであり、QCDと同様にカイラル対称性を持つなど、特に低エネルギーで4次元QCDと良く似た性質を持つ。本研究では、フェルミオンが2種類含まれる場合に、自由エネルギーの $\theta$ 依存性を調べた。特に、 $\theta$ パラメータの $2\pi$ 周期性を保つ計算を行い、真空が $\theta = \pi$ の点でのみ二重縮退している事を確認した。また、フェルミオンの質量を変えて計算を行い、質量によって $\theta$ 依存性が変化する事を確認した。更に、フェルミオンの質量が小さい極限と大きい極限に知られている解析解と一致することを確認した。本研究は、秋山氏(筑波大)、村上氏(東工大)、武田氏(金沢大)との共同研究に基づく。

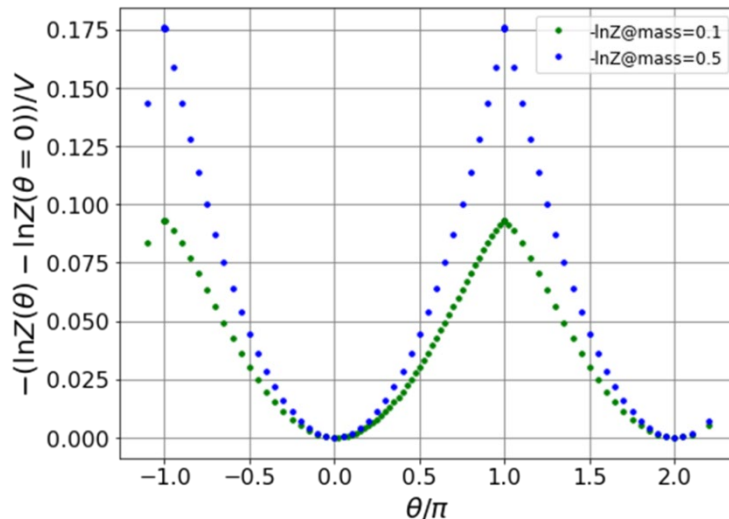


Fig.1  $\theta$  dependence of the free energy of 2-flavor Schwinger model

## References

- [1] M. Levin and C. P. Nave, Phys. Rev. Lett. **99** (2007), 120601.
- [2] J. S. Schwinger, Phys. Rev. **128** (1962), 2425-2429.
- [3] S. R. Coleman, Annals Phys. **101** (1976), 239.

# CMB 偏光観測望遠鏡 GroundBIRD における コミッショニングデータを用いた較正手法の開発

高エネルギー物理学研究室 末野慶徳

**Abstract** Calibration of pointing (line-of-sight) and polarization angle (antenna orientation at the sky) is essential for precise measurement of the CMB. We developed their calibration methods for the GroundBIRD experiment. The developed calibration methods and results are shown in this presentation.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

宇宙背景方放射 (CMB) は宇宙の始まりを知る上で最も強力なプローブである。ビッグバン以前の宇宙論として最有力のインフレーション仮説は、原始重力波の存在を予言し、大角度スケールの CMB の偏光パターン (E モードと B モード) を生成することが知られている。原始重力波由来の B モードの発見はインフレーション仮説の決定的な証拠となる[1]。また、大角度スケールの CMB 偏光は最初の天体が生まれた宇宙の再電離期の光学的厚みにも感度を持つ。光学的厚みは再電離期の宇宙を特徴づけるだけでなく、ニュートリノの質量和の決定精度向上にもつながる重要なパラメータである。大角度スケールの観測は大気放射の揺らぎの影響を受けてしまうため、これまで地上から測定することは困難であった。

GroundBIRD は大角度スケールの CMB 偏光観測に特化した地上観測実験である。GroundBIRD では望遠鏡を最速で三秒で一回転という速さで方位角方向に連続回転させて観測を行う。このユニークな高速変調観測により、大気放射の揺らぎの影響を抑制しつつ、全天のおよそ 40% の領域を観測する。我々は大角度スケールの CMB 偏光観測による原始重力波の探索と光学的厚みの精密観測を目指している。

CMB のデータ解析の際には、各検出器の時系列データから CMB 偏光マップを再構成する必要がある。その際に、各検出器の視線方向と偏光角 (空に射影したアンテナの感度のある方向) の較正は必須である。我々はプロトタイプ検出器を 2022 年にインストールして、コミッショニング観測を行った。本研究ではコミッショニング観測のデータを用いて視線方向と偏光角の較正手法の開発を行った。

視線方向の較正は、望遠鏡の分解能に比べて十分小さな木星などの惑星を用いて行われてきた。しかし、惑星は信号強度が弱く、角度分解能のよくない望遠鏡では高い S/N での観測が実現できない。また、10 年スケールで公転するため、観測できない期間が存在する。そこで、我々は月を用いた視線方向の較正手法を開発した。月は少なくとも月に一度は観測でき、信号強度も十分強い。我々は視線方向を過去の CMB 実験と同等の 3.3 分角の確度で較正することに成功した[2]。

偏光角の較正は、TauA などの既知の偏光信号を用いて行われてきた。しかし、TauA も信号強度が低いため、角度分解能が低い望遠鏡では観測が難しい。そこで、我々は較正した視線方向の情報に基づく新たな偏光角の較正手法を考案した。本手法は検出器ウエハの回転角度を各検出器の視線方向を用いて算出し、その回転角度から偏光角を求めるものである。我々は過去の CMB 実験と同等の  $0.27^\circ$  の精度で偏光角の較正を達成した[3]。

これらの達成した較正精度が物理観測に与える影響も見積もった。各較正における不定性は光学的厚みの 1% の不定性に匹敵するものであった。これは現在最も感度の良い測定における不定性の 1/10 である[4]。また、原始重力波由来の探索における不定性は最大でもテンソル・スカラー比 ( $r$ ) の現在の上限值 ( $r < 0.036$ ) の 1/30 であった[5]。

本発表では開発した較正手法とその結果、およびそれらの物理観測に与える影響について述べる。

## References

- [1] A. A. Starobinsky, JETP Lett. 30, 682-685 (1979)
- [2] QUIET Collaboration, et al., ApJ, 741, 111 (2011)
- [3] The Polarbear Collaboration, P. A. R. Ade, et al., ApJ, 794, 171 (2014)
- [4] Planck Collaboration, A&A 643, A42 (2020)
- [5] M. Tristram, et al., Phys. Rev. D 105, 083524 (2022)

# Axion clouds around black holes in inspiraling binaries

天体核研究室 高橋卓弥

**Abstract** We study the dynamics of axion clouds around black holes in binary systems. With the aim of clarifying the entire picture of the evolution of the system, we systemize the tidal effects on the axion cloud during the inspiral phase and discuss their implications to the observational signatures.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

With the beginning of the gravitational wave (GW) observations, we have obtained a new means to explore fundamental physics. Axions predicted by string theory can be crucial observational targets in connection with black holes (BHs) [1]. Bosonic fields such as axions can extract energy and angular momentum from rotating BHs by the mechanism called superradiance. When the axion has a mass corresponding to the Compton wavelength comparable to the BH radius, it grows efficiently and forms a cloud around the BH.

Most of the observed BHs belong to the binary system with another compact object and emit GW from their orbital motion. As a radiation reaction, their separation gradually becomes smaller, and they eventually merge. This is the source of the currently detected GW events. If one of the binary is a BH with the axion cloud, tidal interactions from the companion affect the cloud and change the evolution of the system. In particular, when the orbital frequency passes through the gaps between the eigenfrequencies of axion, the tidal interaction works resonantly [2,3]. This phenomenon manifests in the GW signal, and would alter the signatures appearing in the BH's mass-spin distribution associated with the formation of the cloud.

To confirm the detectability of the axion cloud through the GW observations and the robustness of the current constraints on axions obtained from the BH observations, it is necessary to comprehend the evolution of the binary system with the axion cloud. Firstly, we systemize the tidal effects that influence the axion cloud during the inspiral phase of the binary. In particular, we find that the effect of the dissipation plays an important role in determining the final state of the axion cloud. Furthermore, by considering the balance between the backreaction to the orbital motion and the decrease in the angular momentum of the cloud, it is shown that the behavior of the system changes greatly depending mainly on the mass ratio of the binary [4].

For nearly equal mass binaries, the axion cloud evaporates during the inspiral phase. On the other hand, when the mass ratio is small, the timescale of the orbital evolution becomes long, and the situation becomes complicated. The effect of the dissipation while the orbit passes through the resonance cannot be ignored, and it is necessary to analyze the actual time evolution. We present a formulation to examine the evolution of the system including those effects, and show that the axion clouds disappear by absorption to the central BH, unlike nearly equal mass binaries. In addition, we find that the change of the GW frequency evolution can be the indicator of the presence of the cloud and signatures regarding the BH's mass-spin distribution hardly change [5].

## References

- [1] A. Arvanitaki *et.al.*, Phys. Rev. D **81**, 123530 (2010).
- [2] D. Baumann *et.al.*, Phys. Rev. D **99**, 044001 (2019).
- [3] D. Baumann *et.al.*, Phys. Rev. D **101**, 083109 (2020).
- [4] T. Takahashi *et.al.*, PTEP **2022** 043E01 (2022).
- [5] T. Takahashi *et.al.*, Phys. Rev. D **107**, 103020 (2023)

# LHC-ATLAS 実験における量子もつれ状態の B 中間子対を用いたベル不等式の破れの検証

高エネルギー物理学研究室 辻川吉明

**Abstract** The Bell inequality is a principal touchstone of testing the local realism posited by Einstein at the time of the formation of quantum theory. We examine the feasibility of the Bell test, detecting a violation of the Bell inequality, through the flavor entanglement between pairs of the B mesons produced in pp collisions at the LHC.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

量子力学の予言する「量子もつれ」と呼ばれる、古典論では信じがたい量子の非局所性の性質は、近年、光子を用いた低エネルギーの実験において「ベル不等式」の検証を通じて証明された[1]。しかし、物質を構成する素粒子であるクォークやレプトンによる高エネルギー素過程反応といった量子力学が元来記述すべき微視的な現象について、まだ確かめられていない。本研究では、人類が自らの手で作り出せる最高エネルギーにおいて世界で初めてベル不等式の検証を行う。これにより、光での観測限界である「宇宙の晴れ上がり」のはるか以前の宇宙開闢直後、素粒子で満たされていた物質・宇宙の根源状態で「量子の非局所性」が成り立っていたのかを世界で初めて検証する。

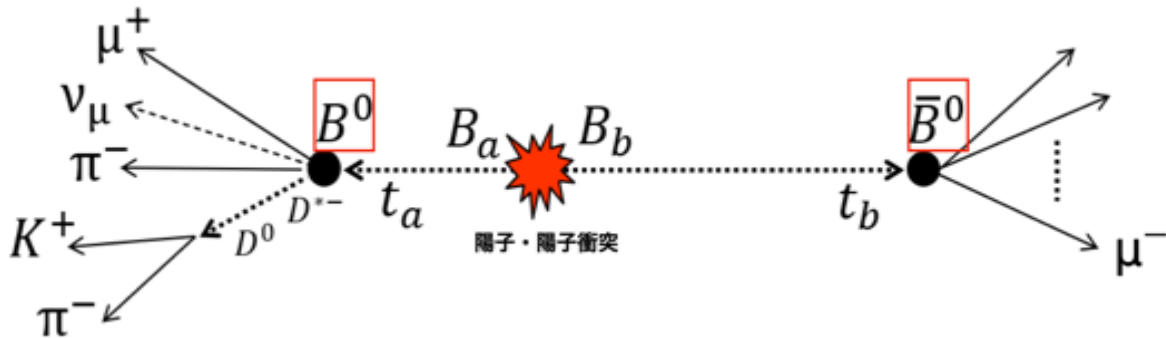


図 1: 本研究でターゲットとする B<sup>0</sup>-反 B<sup>0</sup> 中間子対生成および崩壊

本研究で重要な点は2点あり、二つの B 中間子のそれぞれの崩壊点の絶対的な位置を測定することと二つの B 中間子の間いの空間的な距離が崩壊時間に比べて十分離れているということである。この二つの点が問題となり、高エネルギー領域における本研究以前の検証は十分な検証とはなり得なかった[2]。対して LHC-ATLAS 実験においては高分解能である検出器の情報を用いることで、LHC 加速器による陽子・陽子反応からのもつれ状態の B 中間子対生成事象について、ATLAS 検出器でフレーバー相関を測定することによりベル不等式の検証することができる[3]。LHC-ATLAS 実験で 2015-2018 年に取得したデータに対して、図 1 に示すような生成・崩壊事象を起こす B 中間子対を用いてフレーバー相関を測定した場合の本研究の検証感度の見積もりについて報告する。

## References

- [1] Marissa Giustina *et al.*, Phys. Rev. Lett. 115 250401 (2015)
- [2] Belle Collaboration, Phys. Rev. Lett. 99:131802 (2007)
- [3] Y. Takubo, T. Ichikawa, S. Higashino, Y. Mori, K. Nagano, I. Tsutsui, Phys. Rev. D 104, 056004 (2021)



# 有限密度下におけるベクター中間子質量スペクトル測定

原子核・ハドロン物理学研究室 中須賀さとみ

**Abstract** The J-PARC E16 experiment aims at observing the spectral change of vector mesons in nuclei to study the chiral symmetry restoration at finite density. We measure di-electron decays of vector mesons produced in proton-nucleus reactions. Commissioning runs have been performed since 2020. The successful performance of the detectors was confirmed.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

カイラル対称性の自発的破れは低エネルギーQCDにおける興味深い現象のひとつであり、そのオーダーパラメータであるクォーク凝縮を定量的に評価することはQCD真空構造の理解に重要である[1]。真空中[2]及び有限温度下[3]では格子QCDを用いたクォーク凝縮の定量評価が進んでおり、有限密度下においてもカイラル摂動論[4]やQCD和則[5]の手法を用いた議論が行われている。有限温度・密度のような極限環境下ではカイラル対称性の回復が期待されている一方で、そのような環境におけるクォーク凝縮量の実験的な検証はまだ確立していない。

近年、QCD和則を用いて、有限密度下におけるハドロンのスペクトルとクォーク凝縮を関係づける予想[5]が提案された。これを受けて我々は、有限密度環境である原子核中でベクター中間子( $\rho/\omega/\phi$ )の質量スペクトルを測定するJ-PARC E16実験を行っている。30 GeVの陽子ビームと固定原子核標的の衝突で生成したベクター中間子の電子陽電子対崩壊を測定する。標的原子核半径と中間子速度を系統的に測定することによって、核内崩壊した中間子スペクトルの議論を可能にする。特に $\phi$ 中間子は質量近傍に他の共鳴状態がなく、また崩壊幅が $4\text{ MeV}/c^2$ と狭いため、核内スペクトル変形の議論に適している。 $\phi$ 中間子の核内質量変化の測定は、核内のストレンジネス凝縮量を評価できる[6]という点で重要となる。

実験では、終状態相互作用のないレプトン対をプローブに用いる。ベクター中間子のレプトン対崩壊の分岐比は $10^{-4}$ 程度と非常に小さいため、J-PARCの高運動量ビームラインによる $5\times 10^9\text{ Hz}$ の大強度陽子ビームと大立体角を覆うスペクトロメータを建設し使用する。

2020年にビームライン及びスペクトロメータの建設を完了し、コミッショニングランを開始した。目的は、高レート環境における検出器の動作試験及び性能評価、物理ランに向けた収量見積を行うことである。2021年6月までに行われた計3回のコミッショニングランにて、本番と同様のビーム強度に対して検出器が正常に動作することを確認した。また検出器性能はおおむね想定通りであることが確認されており、詳細は本発表で報告する。一方で、新設された陽子ビームラインから供給されるビームに時間構造があることが本コミッショニングで確認された。この時間構造はDAQ効率の低下、及びフェイクトリガーの増加を引き起こすことが判明している。2024年4月に予定されているコミッショニングにて、新光学を適用したビームとlive timeを改善したDAQを使用し、トリガー条件の最適化を行う。このデータを用いてベクター中間子の収量評価を行い、2024年度中に物理ランを開始する予定である。本発表では、J-PARC E16実験の概要及び現在までのコミッショニングランの結果、今後の見通しについて報告する。

## References

- [1] R. S. Hayano and T. Hatsuda, *Rev. Mod. Phys.* **82**, 2949 (2010).
- [2] Y. Aoki *et al.*, *Eur. Phys. J. C* **82**, 869 (2022).
- [3] G. Aarts *et al.*, *Phys. Rev. D* **105**, 034504 (2022).
- [4] N. Kaiser and W. Weise, *Phys. Lett. B* **671**, 25 (2009).
- [5] T. Hatsuda and S. H. Lee, *Phys. Rev. C* **46**, R34 (1992).
- [6] P. Gubler and K. Ohtani, *Phys. Rev. D* **90**, 094002 (2014).

# The Petz lite recovery map for black hole information recovery protocol

Theoretical particle physics group      Yasuaki Nakayama

**Abstract** The Petz recovery map reduces to the Petz lite if we consider scrambling. We show that the Petz lite can actually recover the quantum state thrown into a black hole in two famous scrambling dynamics, the Hayden-Preskill decoding protocol and the SYK model.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

Black hole information loss problem is one of the most important problems in theoretical physics, which was proposed by Hawking in 1975. Hawking concluded by applying quantum field theory (QFT) to gravitation that black hole is a thermal object which emits thermal radiation called Hawking radiation and eventually evaporates remaining only thermal radiation, and it violates unitarity of quantum physics. To maintain unitarity, entanglement entropy of Hawking radiation must return to zero following the Page curve. Island formula, which was derived in 2019 by holographic entanglement entropy formula and replica wormhole calculation, provides a consistent method to realize the Page curve. According to Island formula, quantum information inside a black hole can be extracted from Island region through Hawking radiation. We are interested in the problem to decode the original state from Hawking radiation by some operational procedure.

Hayden and Preskill studied the condition and procedure to decode a quantum state thrown into a black hole by considering black hole dynamics as random unitary matrix[1]. If the decoupling condition is satisfied, we can construct a decoder acting on Hawking radiation to recover the original state. Yoshida-Kitaev decoder is a famous example. Chandrasekaran and Levine studied the Hayden-Preskill setup in the Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) model[2]. The SYK model is one-dimensional QFT considering random coupling, so it is closer to real physics than random unitary matrix dynamics. Also, SYK is holographic dual of JT gravity, so we can study bulk physics.

Hayden-Preskill setup and Chandrasekaran-Levine's SYK setup can be studied by the framework of quantum error correction (QEC). The scrambling dynamics of them can be interpreted as a special quantum noise channel. In QEC, the condition to recover the original quantum state in code subspace is known as the Knill-Laflamme (KL) condition, and if the KL condition is satisfied, the recovery map is constructed as the Petz recovery map in general. When we consider scrambling channel such as the Hayden-Preskill protocol and the SYK model, the Petz recovery map reduces to the Petz lite, which is the adjoint of the noise channel up to the normalization constant.

In our paper[3], we show that the Petz lite can be used as the recovery map for Hayden-Preskill setup and the SYK setup. First, in the Hayden-Preskill setup, we evaluate by replica wormhole like calculation the relative entropy between the original state and the state after the noise channel and the Petz lite are acted, and show that it vanishes when the decoupling condition is satisfied. We also show that the Yoshida-Kitaev decoder is equivalent to the Petz lite. Second, in the SYK Hayden-Preskill setup, we consider the insertion of quantum information as two-dimensional code subspace of vacuum and the excited state made of a fermionic operator. We check that after twice the scrambling time, the Petz lite can recover the original information by transforming some matrix elements to modular flowed correlators and calculating them.

## References

- [1] P. Hayden and J. Preskill, JHEP **09** (2007) 120. [arXiv: 0708.4025]
- [2] V. Chandrasekaran and A. Levine, JHEP **06** (2022) 039. [arXiv: 2203.05058]
- [3] Y. Nakayama, A. Miyata and T. Ugajin, PTEP **2023** (2023) no.12, 123B04. [arXiv:2310.18991]

# 集団運動の微視的記述に向けて

原子核理論研究室 樋沢規宏

**Abstract** We developed a novel approach to extract information on a collective dynamics of nuclei with the density functional theory and deep learning techniques. The results show that two dimensional latent variables can reproduce a large part of the dynamics, while traditional multipole moments do not have enough information on it.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

強相関量子多体系である原子核では、陽子と中性子の複雑な量子もつれにより少数の協調的な自由度が創発され、集団的な挙動が発現する。核分裂や核融合に代表されるこれらの現象は集団運動と呼ばれ、集団運動の微視的理論に基づく記述は、現代の原子核理論における最重要課題の一つである。

集団運動の記述の難しさは、その集団的自由度の特定にある。自発核分裂は原子核の変形に伴うトンネル現象として記述可能であると考えられているが、どのような変形が核分裂を支配するかは極めて非自明な問題である。原子核全体の並進運動などの対称性に起因した集団運動は、自由度を厳密に特定することが可能である。一方で、核分裂には対称性程強い指針はないため、これまでのほぼ全ての研究では、多重極変形といった仮定されたモードが用いられてきた。さらに、仮定されたモードの取り扱いすら非自明であり、共役運動量を考慮する必要性 [1] など、さまざまなオプションが考えられている。

核分裂において特に興味の対象となる重い原子核の解析には、多大な計算コストを要するため、ダイナミクスに基づく集団座標の抽出は極めて困難である。一方で、密度汎関数理論 (Density Functional Theory, DFT) では、与えられた外場のもとでの厳密な基底状態の粒子数密度やエネルギーを、波動関数を計算することなく、比較的低いコストで計算することが可能である。外場に対する系の adiabatic ダイナミクスは粒子数密度のみに依存したエネルギー密度汎関数 (Orbital-free Energy Density Functional, OF-EDF) により支配される。しかし、OF-EDF の同定は極めて困難であり、実際の計算では Kohn-Sham 型の EDF (KS-EDF) と呼ばれる、粒子数密度以外の局所密度に依存した EDF が用いられる。

KS-EDF を用いた DFT の問題点は、エネルギーと密度の関係が非自明な点にある。OF-EDF ではエネルギーと密度の関係は汎関数として既に与えられている。一方で、KS-EDF では外場を入力し、Kohn-Sham 方程式と呼ばれる非線形微分方程式を解いた結果として、初めてエネルギーと密度の対応を得る。つまり、理論的に制御可能なのは外場であり、この意味で KS-EDF は外場を基点とした理論と言える。しかし原子核では、外場は多くの場合実験的に実現困難な非物理的存在であり、仮想的に原子核を変形させてその性質を調べるための数学的道具の側面が強い。したがって KS-EDF に基づく集団運動の解析には、外場を通じて人間の強いバイアスが混入する。この「外場の呪い」による難しさにより、多重極モーメントといった仮定された集団座標が、長らく使用され続けてきた。

本研究では「外場の呪い」から脱却し、ダイナミクスに根差した新しい集団座標の抽出を目指す。まず、ランダムに生成した外場のもとで、Skyrme DFT 計算を実行し、 $^{236}\text{U}$  の束縛エネルギーと核子数密度を求めた。この操作から得られたエネルギーと密度のペアで構成されるデータセットは、Skyrme EDF に対応する OF-EDF の情報をドメインの範囲内で復元可能であることが、教師あり学習により示されている [2]。我々は機械学習分野で標準的に仮定されている多様体仮説と集団運動の類似性を指摘し、autoencoder と教師あり学習を組み合わせた multi-task learning により、 $^{236}\text{U}$  の基底状態近傍の潜在的な情報を抽出した [3]。様々な次元の潜在変数にデータを圧縮したところ、わずか 2 次元の変数によりデータの大部分が支配されることが明らかになった。一方で、多重極モーメントはダイナミクスの情報をほとんど持っていないことが示された。以上は data driven アプローチに基づく集団座標の抽出という、集団運動の微視的記述における新展開の幕開けとなる結果といえる。

## References

- [1] N. Hizawa, K. Hagino, and K. Yoshida, Phys. Rev. C **105**, 064302 (2022).
- [2] N. Hizawa, K. Hagino, and K. Yoshida, Phys. Rev. C **108**, 034311 (2023).
- [3] N. Hizawa and K. Hagino, Phys. Rev. C (2024), in press.

# 逆運動学陽子弾性散乱による 錫 132 の陽子・中性子密度分布測定

原子核・ハドロン物理学研究室 土方佑斗

**Abstract** The measurement of the neutron skin thickness of the medium-heavy double-magic nuclei, such as  $^{132}\text{Sn}$  is a powerful method for investigating nuclear symmetry energy. To determine the skin thickness of the  $^{132}\text{Sn}$  precisely, we have performed a proton elastic scattering experiment in inverse kinematics.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

原子核物質の状態方程式 (EoS; Equation of State) は、原子核のマクロな性質の理解だけでなく、中性子星の構造や超新星爆発などの天体現象を理解するためにも不可欠である [1]。しかし、核物質の EoS のうち、陽子・中性子密度の非対称度に依存する対称エネルギー項のパラメータの不定性は未だに大きい。特に、対称エネルギー項の 1 次の密度係数  $L$  は中性子星の半径と質量の関係を直接決める要因となっているため、近年その決定が重要視されている。

パラメータ  $L$  を決める有力な手法の一つは、中性子過剰な中重核の中性子スキン厚の測定である。中性子スキン厚は中性子と陽子の平均二乗半径の差で定義され、平均場理論によって  $L$  と強い相関を持つことが知られている。これまでは、安定核で最も理論的不定性が小さい二重魔法数核である鉛 208 のスキン厚の測定が精力的に行われてきた [2, 3]。例えば文献 2 ではスキン厚は  $0.211^{+0.054}_{-0.063}$  fm と測定された。他の実験においても実験誤差はおよそこの値と同等がそれ以上であり、スキン厚に対して相対的に大きな値となっている。そのため、 $L$  への制限が不十分であるため、現状では特に高密度領域での EoS の振る舞いを理解することができていない。

そこで、本研究では鉛 208 よりも非対称度の大きい錫 132 のスキン厚の測定を行うことで  $L$  の精密決定を目指す。スキン厚を決める手法の一つとして、陽子弾性散乱による陽子・中性子密度分布測定が挙げられる。本手法により核構造モデルの依存性の少ないスキン厚の測定に成功している [2, 4]。錫 132 は不安定核であるため対象核を標的とした従来通りの順運動学での測定は困難であるが、対象核をビームとした逆運動学に本手法を拡張することで不安定核であってもスキン厚を測定することが可能である。そこで、逆運動学散乱実験に必要な開発を行い [5]、実際に錫 132 に対して陽子弾性散乱実験を行った。

実験は理化学研究所 RIBF で行った。ウラン 238 の一次ビームをベリリウム標的に照射し、錫 132 を含む 2 次ビームを生成した。2 次ビームは、BigRIPS スペクトロメータ [6] を用いて粒子識別および運動量解析される。ビームは標的及び反跳粒子用検出器が設置された F12 焦点面に輸送される。錫 132 ビームは、2 台の multi-wire drift chamber (MWDC) を通過し、固体水素標的に照射される。反跳陽子検出器は、MWDC、プラスチックシンチレータ、NaI (Tl) シンチレータで構成され、反跳陽子の角度およびエネルギーを測定する。以上の検出器の測定値を組み合わせることで弾性散乱事象のみを選択し、その微分散乱断面積を決定することに成功した。

本発表では、実験の詳細および解析の途中経過について報告する。

## References

- [1] M. B. Tsang *et al.*, Phys. Rev. C **86**, 015803 (2012).
- [2] J. Zenihiro, *et al.*, Phys. Rev. C **82**, 044611 (2010).
- [3] D. Adhikari *et al.*, Phys. Rev. Lett. **126**, 172502 (2021).; A. Tamii *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 062502 (2011).
- [4] S. Terashima *et al.*, Phys. Rev. C **77**, 024317 (2008).
- [5] Y. Matsuda *et al.*, Phys. Rev. C **87**, 034614 (2013).; H. Sakaguchi, J. Zenihiro, Prog. Part. Nucl. Phys. **97**, 1 (2017);
- [6] T. Kubo, Nucl. Instrum. Methods B **204**, 97 (2003).

# Higher-Form Symmetry and Eigenstate Thermalization Hypothesis

素粒子論研究室 福島 理

**Abstract** The eigenstate thermalization hypothesis is a celebrated framework for sufficient conditions of thermalization in isolated quantum systems. We discuss how higher-form symmetry affects the ETH in lattice field theories. In particular,  $p$ -form symmetry in  $(d+1)$ -dimensional quantum field theories leads to nontrivial  $(d-p)$ -dimensional observables that violate the ETH. We further propose the generalized Gibbs ensemble accommodating higher-form symmetries as the resultant thermal equilibrium.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

The eigenstate thermalization hypothesis (ETH) is a successful framework providing criteria for thermalization in isolated quantum systems [1,2]. The ETH for an operator ensures thermalization for the operator, i.e., its expectation value equilibrate to its thermal average. Although numerical and theoretical analyses support the ETH as a fundamental mechanism for explaining thermalization in diverse systems, it remains a challenge to analytically identify whether particular systems satisfy the ETH. In quantum many-body systems and quantum field theories (QFTs), phenomena that violate the ETH are expected to imply nontrivial thermalization processes, and are gathering increasing attention.

In the work [3], we elucidate how the existence of higher-form symmetries influences the dynamics of thermalization in isolated quantum systems. Under reasonable assumptions, we analytically show that a  $p$ -form symmetry in a  $(d + 1)$ -dimensional QFT leads to the breakdown of the ETH for many nontrivial  $(d - p)$ -dimensional observables. In the case of discrete higher-form (i.e.,  $p \geq 1$ ) symmetry, this indicates the absence of thermalization for observables that are non-local but much smaller than the entire system size even though the system has no local conserved quantities. We provide numerical evidence for this argument for the  $(2 + 1)$ -dimensional  $\mathbb{Z}_2$  lattice gauge theory. While local observables such as the plaquette operator thermalize even for mixed symmetry sectors, the non-local observable such as the one exciting a magnetic dipole instead relaxes to the generalized Gibbs ensemble that takes account of the  $\mathbb{Z}_2$  1-form symmetry. The assumptions of the ETH-violation above include the mixing of symmetry sectors within a given energy shell. This condition is rather challenging to verify because it requires information on the eigenstates in the middle of the spectrum.

Furthermore, we reconsider this assumption from the viewpoint of the 't Hooft anomaly to alleviate this difficulty [4]. In the case of  $\mathbb{Z}_N$  symmetries, we can circumvent the difficulty by considering  $\mathbb{Z}_N \times \mathbb{Z}_N$ -symmetric theories with a mixed 't Hooft anomaly, and then perturbing the Hamiltonian while preserving one of the  $\mathbb{Z}_N$  symmetries of interest. Additionally, we carry out numerical analyses for  $(1 + 1)$ -dimensional spin chains and the  $(2 + 1)$ -dimensional  $\mathbb{Z}_2$  lattice gauge theory to demonstrate this scenario.

## References

- [1] J. M. Deutsch, "Quantum statistical mechanics in a closed system," *Physical Review A* 43 no. 4, (1991) 2046.
- [2] M. Srednicki, "Chaos and Quantum Thermalization," *Physical Review E* 50 no. 2, (3, 1994) 888.
- [3] O. Fukushima and R. Hamazaki, "Violation of Eigenstate Thermalization Hypothesis in Quantum Field Theories with Higher-Form Symmetry," *Phys. Rev. Lett.* 131 no. 13, (5, 2023) 131602.
- [4] O. Fukushima, "Remarks on effects of 't Hooft anomaly on eigenstate thermalization hypothesis," arXiv:2310.11425 [cond-mat.stat-mech].

# Exploring Energy Transfer and Evolution of Supernova Remnants through Year-Scale X-ray Variability

宇宙線研究室 松田真宗

**Abstract** We investigate year-scale X-ray time variabilities in Tycho's SNR, aiming to explore the energy transfer at shock waves. We discovered two types of time variabilities: fluctuations in nonthermal radiation in the western "stripe" structure and gradual brightening in thermal radiation in the northeast rim.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

超新星残骸における衝撃波は、その厚さがクーロン衝突の平均自由行程よりも2桁以上小さいため、粒子間の衝突が起こらない。そのため、プラズマ中の磁場を介したエネルギー散逸が代わりに行われると考えられており、そのような衝撃波を「無衝突衝撃波」と呼ぶ。無衝突衝撃波は宇宙のあらゆる場所で観測されているが、それ自体の形成機構をはじめとして、衝撃波による電子加熱[e.g., 1] や宇宙線加速[e.g., 2] など、周辺の物理は未だ謎が多い。このような衝撃波面またはその後方のプラズマ状態の変動を調べることは、加熱・加速過程を観測する上で直接的なアプローチとなるが、その例は限られている[3]。そこで今回我々は、年スケールのX線時間変動という手法に着目して、衝撃波の加熱・加速過程に迫った。

ティコの超新星残骸は近傍 (2.5 kpc) の若い (約 450 年) 超新星残骸であり、角度分解能の優れたチャンドラ衛星の観測によって細かい構造まで観測できる。また、2000, 2003, 2007, 2009, 2015 年の4回観測が行われており、年スケールの時間変動を探索するのに適している。この天体に着目して、X線の時間変動を調べたところ、非熱的放射の年スケールでの増減光[4, 5] と熱的放射の増光[6] を発見した。前者の非熱的放射の変動は残骸の西部で見つかり、PeV エネルギーまでの陽子加速が示唆された縞状構造[7] に沿って変動していることがわかった。変動のタイムスケールから、磁場は約 500  $\mu\text{G}$  まで増幅していると見積もられた。また、縞状構造と近傍の衝撃波面のシンクロトロン放射を冪関数でフィッティングし、比較したところ、衝撃波面は定常状態を示すのに対して、縞状構造では光子指数と輝度が有意に時間変動していることが示された。また、縞状構造の光子指数と輝度は強い相関を示すのに対して、衝撃波面ではそのような相関はないこと、縞状構造の方が衝撃波面よりも放射が一律に硬いことも判明した。これらの結果は、縞状構造では、衝撃波面とは独立でより効率の良い加速機構により、粒子が加速されていることを示唆している。後者の熱的放射の変動は、北東部の残骸のリム付近に位置し、複数のフィラメント構造からなる H $\alpha$  線の分布とよく相関していた。H $\alpha$  線は中性ガスと衝撃波との相互作用によって放射されることから、この領域を衝撃波で加熱されたガス由来と解釈し、スペクトル解析を行うと、この領域の放射は周りよりも10倍ほど密度の大きい星間ガス由来であることがわかった。また、電子温度が15年の間に、約 0.3 keV から約 0.7 keV まで上昇していることがわかった。電子温度の上昇を陽子との温度平衡の過程によるものと解釈して電子温度の時間発展のシミュレーションと比較すると、衝撃波直後での電子と陽子の温度比 ( $\beta \equiv T_e/T_p$ ) は  $m_e/m_p \leq \beta \leq 0.05$  となることがわかった。この値は、衝撃波面での無衝突電子加熱の効率を表しており、近傍で H $\alpha$  輝線診断から測定された値と矛盾のない結果であった。

衝撃波直後での  $T_e/T_p$  は磁場の強度や向きに依存するという示唆があるが観測的証拠は得られていない。これを検証すべく、ティコの超新星残骸と年齢や距離が近いケプラーの超新星残骸で熱的放射のX線時間変動を探索した。その結果、星周物質の分布に沿って熱的放射が増光している兆候を発見した。これらの領域に今回の手法を適応することで、磁場と  $T_e/T_p$  の依存性の解明が期待できる。

## References

- [1] P. Ghavamian, et al. (2001), ApJ, 547, 995. [2] W. I. Axford, et al. (1977), ICRC, 11, 132.  
[3] Y. Uchiyama & F. A. Aharonian (2008), ApJL, 677, L105.  
[4] T. Okuno, et al. (2020), ApJ, 894, 50. [5] M. Matsuda, et al. (2020), PASJ, 72, 85.  
[6] M. Matsuda, et al. (2022), ApJ, 940, 105. [7] K. A. Eriksen, et al. (2011), ApJL, 728, L28.

# Spin of Ultralight Dark Matter

天体核研究室 間仁田侑典

**Abstract** In this talk, we explore the spin properties of ultra-light dark matter (ULDM) up to two. First, we explore a novel production mechanism for spin-2 ULDM within the bigravity framework. Second, we propose a method to distinguish the spin of ULDM in the search with gravitational wave detectors.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

In this study, we explore two methods to enhance our comprehension of ultra-light dark matter (ULDM), particularly focusing on the spin properties of these particles. ULDM consists of bosonic particles that have integer spins [1], and there is much research in the literature about spin-0 and spin-1 ULDM. In this talk, we will show our study to extend the research of ULDM up to spin-2, mainly based on [2,3].

Firstly, we propose a novel mechanism for producing spin-2 ULDM, emerging from anisotropies in spacetime [2]. This spin-2 ULDM model is developed within the framework of bigravity, a theory that extends general relativity by including an extra massive spin-2 field. In the bigravity framework, we scrutinize the fixed point cosmological background solutions found in axisymmetric Bianchi type I universes. By conducting a detailed analysis of the stability and classification of these fixed points, we find a novel mechanism for generating spin-2 ULDM. Our findings indicate that spin-2 ULDM could originate from the transition of a universe from an anisotropic fixed point to an isotropic one.

Secondly, we consider the ULDM search with interferometric gravitational wave detectors and propose a novel method to distinguish spin-0, spin-1, and spin-2 ULDM signals [3]. This method utilizes cross-correlation analysis across multiple detectors. The key feature in this analysis is the spin dependence of the overlap reduction function (ORF), which reflects the relative positions and orientations of the detectors. The ORF patterns for spin-0 and spin-1 ULDM are significantly different from those of spin-2. This distinction is primarily attributed to the finite-time traveling effect in spin-0 and spin-1 ULDM signals.

As a secondary outcome, we point out that the upper limit on the coupling constant for  $U(1)_B$  spin-1 ULDM needs to be revised. The standard analysis, which is based on an ORF designed for gravitational waves, does not consider the finite-time traveling effect. By including this effect, the allowed region in the parameter space becomes about 30 times larger than previously thought.

This study explores spin as a new dimension to dark matter research in addition to the traditional parameters, i.e., mass and coupling, potentially broadening the scope of the study of dark matter.

## References

- [1] E.G.M. Ferreira, “*Ultra-light dark matter*”, *Astron.Astrophys.Rev.* 29 (2021) 1, 7.
- [2] Y. Manita, K. Aoki, T. Fujita, S. Mukohyama, “*Spin-2 dark matter from an anisotropic universe in bigravity*”, *Phys.Rev.D* 107 (2023) 10, 104007.
- [3] Y. Manita, K. Aoki, T. Fujita, S. Mukohyama, “*Exploring spin of ultralight dark matter with gravitational wave detectors*”, 2310.10646 [hep-ph].