

2024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

(2025年1月31日)

物 理 学 第 二 分 野

# D3 発表会

日時: 2025年1月31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. Area-Bound Conjecture for Rotating AdS Black Holes   | 天羽 将也 | (9:00)  |
| 2. Application of the non-equilibrium Green function method to induced fission reactions                            | 鵜沢浩太郎 | (9:20)  |
| 3. Phase-space structure of collisionless dark matter halos from particle dynamics                                  | 柄本 耀介 | (9:40)  |
| 4. 奇核を含む原子核に対する超流動系の密度汎関数理論の構築と応用   | 加須屋春樹 | (10:00) |
| 5. 機械学習を用いたアンフォールディング手法によるニュートリノ-原子核反応の多重微分断面積測定  | 川上 将輝 | (10:20) |
| 6. スカラー場の理論における因子化代数のいくつかの側面について  | 川平 将志 | (10:40) |
| 7. Formation of supermassive stars and heavy seed black holes via cold accretion flow into the atomic cooling halos | 喜友名正樹 | (11:00) |
| 8. 近pp-波極限におけるカオス的な弦の運動   | 久代 翔大 | (11:20) |
| 9. 重力波の重力レンズ効果における偏極の影響   | 窪田圭一郎 | (11:40) |

## 《休 憩》

- |  |       |         |
|--|-------|---------|
| 10. J-PARC 主リングにおけるバンチ内運動に対する空間電荷効果の影響 | 吉村 宣倖 | (13:00) |
|--|-------|---------|

11 .	Holographic studies on semi-classical saddles in three-dimensional gravity	瀧 祐介	(13:20)
12 .	Coarse-graining black holes out of equilibrium with boundary observables on time slice	竹田 大地	(13:40)
13	(p,pX)反応で探る <sup>40,42,44,48</sup> Ca原子核中におけるt、 <sup>3</sup> Heクラスター形成	辻 峻太郎	(14:00)
14	Exploring the gamma-ray burst relativistic jet by very high energy gamma-ray observations	寺内 健太	(14:20)
15	Simons Observatory実験の小口径望遠鏡を用いたCMB観測における偏光角較正手法の開発	中田 嘉信	(14:40)
16	High-Energy Fixed-Angle Meson Scattering in Holographic QCD	Bartosz Pyszkowski	(15:00)
17	Development of Machine Learning Algorithms for the Search for Proton Decay in the Super-Kamiokande Experiment and Search for the Decay $16\text{O}(\text{ppp}) \rightarrow 13\text{C} \pi + \pi + \text{e}^+$	Feng Jiahui	(15:20)
18	Development of a Combined Pre-supernova Neutrino Alarm and a Search of Scalar Non-standard Interactions in Atmospheric Neutrinos at Super-Kamiokande	Hu Zhuojun	(15:40)
19	宇宙再結合期におけるモデルの修正がハッブル定数の不一致問題に与える影響	三浦 大志	(16:00)
20	Controlling method of gamma rays by vibrating nuclear resonant absorber and measuring method for study of quantum applications	山下 拓之	(16:20)
21	LHC-ATLAS実験におけるマルチジェット事象を対象としたR-パリティを破る超対称性粒子の包括探索	佐野 高嶺	(16:40)
22	Study of chaos in quantum mechanics and classical mechanics by complexity	渡辺 涼太	(17:00)

# Area-Bound Conjecture for Rotating AdS Black Holes

基礎物理学研究所 宇宙グループ 天羽将也

**Abstract** We introduce novel thermodynamic conjectures for stationary, axisymmetric, and asymptotically anti-de Sitter (AdS) black holes. Our conjectures establish relationships among mass, angular momentum, horizon area, and thermodynamic volume. These relationships offer an intricate understanding of black hole thermodynamics and the interplay between geometry and rotational properties.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

In the thermodynamics of black holes in asymptotically anti-de Sitter (AdS) spacetimes, the pressure and thermodynamic volume are introduced to ensure the consistency between the first law of thermodynamics and the Smarr formula. The framework incorporating these quantities is known as the extended black hole thermodynamics [1,2]. A notable property among the fundamental quantities in extended black hole thermodynamics is the Reverse Isoperimetric Inequality (RII)—an inequality between the area and the thermodynamic volume—which was proposed by Cvetic and collaborators in 2011 [2]. The RII states that the area of any black hole is less than or equal to that of a Schwarzschild-AdS black hole possessing the same thermodynamic volume. Although no rigorous mathematical proof of this inequality has been established, it has been verified to hold in a wide variety of spacetimes.

In this work, we propose a stronger conjecture, the stronger Refined Reverse Isoperimetric Inequality (stronger RRII) [3], which strengthens the original RII by taking into account the effect of angular momentum. The precise statement of the stronger RRII is that the area of any black hole is less than or equal to that of a Kerr-AdS black hole with the same mass, angular momentum, and thermodynamic volume. The refinement of the RII by the angular momentum is analogous to that of the Penrose inequality, in which an upper bound on the area of black holes in asymptotically flat spacetimes is refined with the angular momentum.

To test our new conjecture, we examined it across a broad range of spacetimes in various dimensions, encompassing all the examples previously used to verify the original RII, such as Kerr-Newman-AdS black holes. We found that the stronger RRII held true in all these cases. However, the scope of its applicability is restricted; for instance, it does not apply in situations where no Kerr-AdS black hole with the same mass, angular momentum, and thermodynamic volume exists.

Motivated by this limitation, we propose a second conjecture, which—while weaker than the stronger RRII—is still stronger than the original RII. Referred to here as the “weaker RRII,” this relation has a wider range of applicability. In particular, it can be applied even when no Kerr-AdS black hole exists with the same mass, angular momentum, and thermodynamic volume. We verify the weaker RRII in settings beyond the reach of the strong RRII, such as thin black ring spacetimes in five or higher dimensions, and show analytically that the weaker RRII holds in these cases. Furthermore, because the weaker RRII is more computationally efficient, we can test it for a broader set of parameters, thereby lending additional support to the conjecture.

## References

- [1] D. Kastor, S. Ray and J. Traschen, *Class. Quant. Grav.* 26 (2009) 195011.
- [2] M. Cvetic, G.W. Gibbons, D. Kubiznak and C. N. Pope, *Phys. Rev. D* 84 (2011) 024037.
- [3] M. Amo, A. M. Frassino and R. A. Hennigar, *Phys. Rev. Lett.* 131 (2023) 241401.

# Application of the non-equilibrium Green function method to induced fission reactions

原子核理論研究室      鵜沢浩太郎

## Abstract

We formulate induced fission reactions using the non-equilibrium Green function method. Based on this formalism, we analyze the degrees of freedom of fission channels microscopically. In addition, we introduce the novel efficient method of calculating the Green function applying the shift-invert Lanczos method.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Nuclear fission is a process in which a heavy nucleus splits into two smaller nuclei. Fission plays an important role in many fields, and an accurate and reliable theoretical calculation of nuclear fission is needed. However, its microscopic theory is not well established. This is because fission is not only a large-amplitude motion, which is difficult to treat theoretically, but also causes complex interactions between collective and single-particle motions. To establish a microscopic theory of induced fission reactions, we have developed a novel approach to induced fission based on the non-equilibrium Green's function (NEGF) method [1].

In this talk, we will first review the theoretical basis of our model. Then, we will analyze the fluctuation of fission decay channels. Following the idea of Porter and Thomas, we will analyze the distribution of transmission coefficients of fission channels [2]. Thereby, we will discuss the microscopic origin of the degrees of freedom in fission channels. Then, we will propose a novel approach which considerably reduces the numerical cost of the NEGF method. The main idea is that according to the distribution of fission width, fission channels can be described by a small number of degrees of freedom, and if these essential parts are calculated efficiently, the numerical costs of the NEGF method will be reduced. To achieve such efficient calculation, we will apply the shift-invert Lanczos method and demonstrate its effectiveness [3].

## References

- [1] S. Datta. “*Quantum Transport: Atom to Transistor*” (Cambridge University Press, 2005).
- [2] K. Uzawa and K. Hagino, Phys. Rev. C **110**, 014321 (2024).
- [3] K. Uzawa and K. Hagino, Phys. Rev. E **110**, 055302 (2024).

# Phase-space structure of collisionless dark matter halos from particle dynamics

天体核研究室      柄本耀介

**Abstract** We investigate the phase-space structure of collisionless dark matter halos utilizing cosmological  $N$ -body simulations. We classify particles by dynamical properties and find that their radial distributions exhibit universal features regardless of whether the dark matter is cold or warm.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Unveiling the nature of dark matter remains one of the greatest unsolved problems in modern physics. In the current concordant model of our universe, the Lambda Cold Dark Matter model, dark matter consists of 80% of matter component [1] and is indispensable to facilitating structure formation. While cold dark matter (CDM) is the most plausible model in terms of observational facts, other dark matter candidates are still under consideration as alternatives to CDM [2]. In this point, dark matter halos, which are gravitationally collapsed objects of dark matter, play a key role in unveiling the nature of dark matter. In other words, a quantitative understanding of the structure of dark matter halos is indispensable in testing dark matter models on small scales like halos.

However, our current theoretical understanding of the structure of halos is far from comprehensive. From cosmological  $N$ -body simulations, the CDM halos exhibit universal features such as density profiles [3] and pseudo-density profiles [4]. The physical origin of these universalities is not yet fully understood. Additionally, CDM halos possess the characteristic multi-stream structure of the three-dimensional sheet-like CDM distribution folded repeatedly within halos in six-dimensional phase space. Although this multi-stream region provides a clue to understanding the origin of the universalities mentioned above, a quantitative explanation remains lacking due to limited study.

In our study, we use cosmological  $N$ -body simulations to investigate the phase-space structure of the multi-stream region in CDM halos. We first classify dark matter particles in simulations by the number of their apocenter passages. Our analysis reveals that the radial density profiles of these classified particles follow a double power-law behavior, with a slope of -1 in the central regions and -8 in the outskirts, irrespective of halo mass. Comparing these density profiles with the spherically symmetric self-similar solutions having a stationary accretion, we found that none of them describes our findings. Rather, the multi-stream regions of  $N$ -body halos exhibit a broader angular momentum distribution than that of self-similar solutions.

We also conducted simulations for the warm dark matter (WDM) models with particle masses of 1 keV and 0.5 keV to explore the potential of distinguishing between dark matter models using this universal structure. Our analyses confirmed the presence of the same universal structure within halos across all models, while systematic differences in the amplitude and characteristic scales of density profiles were observed between cold and warm dark matter models. By exploring the origin of the universality of the power-law behavior, we would obtain a deeper understanding of the structure formation of halos. This will offer a framework for testing alternative dark matter models through observations of the phase-space structure of stars in our galaxy or local galaxies.

## References

- [1] Planck Collaboration, Ade, P. A. R., Aghanim, N *et al.*, *Astronomy and Astrophysics*, **594**, A13 (2016).
- [2] Bullock, J. S., & Boylan-Kolchin, M., *Annual Review of Astron and Astrophys*, **55**, 343 (2017).
- [3] Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M., *The Astrophysical Journal*, **462**, 563 (1997).
- [4] Taylor, J. E., & Navarro, J. F., *The Astrophysical Journal*, **563**, 483 (2001).

# 奇核を含む原子核に対する 超流動系の密度汎関数理論の構築と応用

基礎物理学研究所・原子核グループ 加須屋春樹

**Abstract** We develop a method to describe nuclei with finite spin, including odd-mass nuclei, by imposing a time-reversal antisymmetric external field in density functional theory for superfluid systems. This method is applied to calculate magnetic moments of odd-mass nuclei, radii of deformed halo nuclei, and energy spectra of high-K isomers.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

高々300個の核子（陽子と中性子）からなる原子核にとって、構成粒子の数が偶数であるか奇数であるかは、その原子核を特徴づける重要な因子である。例えば、合わせて奇数個の核子からなる核（奇核）や陽子数と中性子数が共に奇数の核（奇々核）は基底状態でも一般に有限の核スピンをもつが、陽子数と中性子数が共に偶数の核（偶々核）の基底状態の核スピンは例外なくゼロである。このような原子核における偶奇の差は主に、原子核中で同種2核子が合成スピンのペアを組む、スピン-重項対相関の結果として生じる。対相関による核子対の凝縮は、電子系と同様、原子核に超流動性をもたらすが、奇核や奇々核では対を組まないエキストラな核子の存在が特徴的である。

変形したコアのまわりに、月にかかる量のように、余分な1個の中性子が薄く広がる変形ハロー構造が、近年 $^{31}\text{Ne}$ と $^{37}\text{Mg}$ で発見された[1, 2]。また、最近測定された $^{131}\text{In}$ における電磁気モーメントの急激な変化は、対を組まない価核子がコアを変形・偏極させる効果が無視できないことを示している[3]。加えて、奇核と同様に有限の核スピンを持つ、高スピン核異性体と呼ばれる準安定励起状態が多くの原子核で見つかっており、高強度のガンマ線レーザーやエネルギー貯蔵への活用が期待されている[4]。

密度汎関数理論は、基底状態にある量子多体系を、粒子密度を基本自由度として記述する。計算コストは核子数によらず、原理的には核図表（中性子数-陽子数平面に核種を並べた表）のあらゆる領域を系統的に記述できる。しかしながら、これまでの密度汎関数理論による研究は偶々核に焦点が置かれ、核図表の実に3/4を占める奇核・奇々核の研究は限られていた。従来の超流動系の密度汎関数理論では、変分原理から得られる基底状態の全角運動量はゼロである。有限のスピンのもつ状態は、変分で得られた基底状態の上の励起状態として記述する必要がある。このことは、偶々核と比べて奇核を扱いづらいものになっていた。加えて、現在広く用いられる原子核のエネルギー密度汎関数は偶々核や核物質の性質を再現するように構築されたものであり、スピン密度などの時間反転反対称な密度を含む項の結合定数には大きな不定性がある。このこともまた、奇核の研究の障壁となっていた。

我々は、超流動系の密度汎関数理論において有限のスピンのもつ状態が、時間反転対称性を破る仮想の外場の下での変分原理により与えられることを見出した[5]。これにより、密度汎関数理論の中で奇核を偶々核と同様の手順で記述することが可能となった。この手法をNeおよびMg同位体に適用した。得られた一中性子分離エネルギーと $^{31}\text{Ne}$ 、 $^{37}\text{Mg}$ の変形ハロー構造は、実験をよく再現した。次に、 $^{131}\text{In}$ を含む二重魔法核周辺の奇核の磁気モーメントを計算し、得られた結果が先行研究[3]と無矛盾であることを確認した。さらに、手法を高スピン核異性体の記述に応用した。 $^{254}\text{No}$ のエネルギースペクトルは、実験および異なる相互作用を用いた先行研究[4]とよく一致した。最後に、スピンに関する観測量から理論に制限をかけることを目指して、中性子物質に対する帯磁率の評価を行った。時間反転反対称な密度を含む項の結合定数は、低密度から標準核密度領域での帯磁率に敏感であることを明らかにした。

## References

- [1] M. Takechi *et al.*, Phys. Lett. B **707**, 357 (2012).
- [2] M. Takechi *et al.*, Phys. Rev. C **90**, 061305 (2014).
- [3] A. R. Vernon *et al.*, Nature **607**, 260 (2022).
- [4] L. M. Robledo, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. **51**, 045108 (2024).
- [5] H. Kasuya and K. Yoshida, Prog. Theor. Exp. Phys. **2021**, 013D01 (2021).

# 機械学習を用いたアンフォールディング手法による ニュートリノ - 原子核反応の多重微分断面積測定

高エネルギー物理学研究室 川上将輝

**Abstract** For a precise measurement of CP violation in the neutrino oscillation, it is essential to understand the nuclear model which introduces a large uncertainty to the neutrino interaction. To reduce the uncertainty, a multi-dimensional unfolding method with machine learning is applied to the multi-differential cross-section measurement.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノの混合角のうちCP位相と呼ばれる角は今だその値の決定に至っておらず、T2K実験の結果は、CP対称性の破れがないことを意味する $0, \pi$ を90%の信頼度で排除している[1]。この値を精密測定するにはニュートリノと標的原子核との反応をよく理解することが必要である。この反応は原子核のモデルによる不定性が大きく、終状態にハドロンを含む反応過程の運動学的変数に対する微分断面積を測定することによりこの不定性を削減することが必要である。

終状態に複数の粒子が存在するため、全位相空間での多重微分断面積を求めるには多次元空間での計算が必要になる。しかし、アンフォールディングと呼ばれる、検出器の分解能によって測定量の分布が歪む効果をデータから取り除く過程は、現行の手法では多次元空間で行うには多大な計算量を要する。本研究では、機械学習を用いた多次元でのアンフォールディング手法[2]を初めてニュートリノの微分断面積測定に応用する。

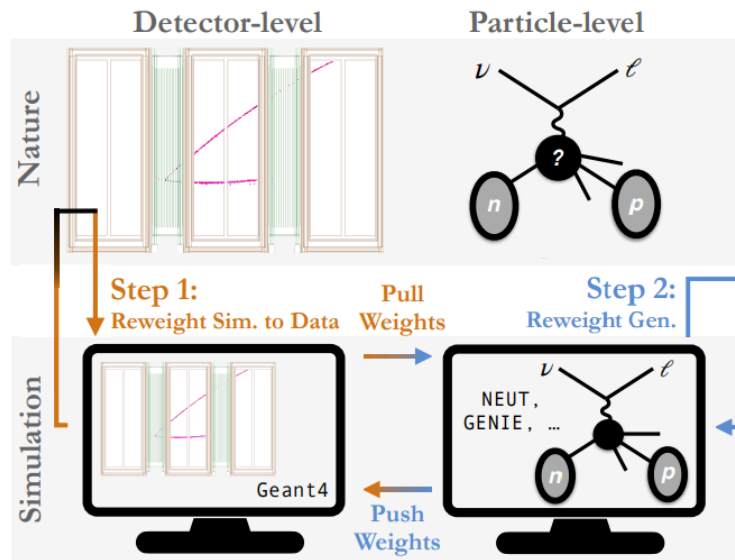


Fig.1 . The conceptual figure of the unfolding method with machine learning.

T2K実験の前置検出器のシミュレーションデータ[3]を使用し、本解析手法が適切に動作するか確認を行った。本研究には $\pi$ 中間子を伴わない事象を用い、特に陽子を伴う事象については、核内効果の検証に有用な、ビームに対して縦方向の運動量の不均衡を表す観測量についての微分断面積を測定した。シミュレーションから生成した擬データを用い、このデータに対する適切な正則化の強度や、ニューラルネットワークの構造やハイパーパラメータの探索を行った。

この手法を実データに用いて微分断面積を測定することで核内効果を精度よく理解し、CP位相の測定精度を向上させることが期待される。

## References

- [1] K. Abe, *et al* (T2K collaboration), Phys. Rev. D **103**, 112008 (2021)
- [2] A.Andreassen, P.T.Komishe, E.M.Metodiev, B.Nachman, and J.Thaler, Phys. Rev. Lett. **124**, 182001 (2020)
- [3] K. Abe, *et al* (T2K collaboration), Phys. Rev. D **108**, 112009 (2023)



# スカラー場の理論における因子化代数の いくつかの側面について

京基礎物理学研究所・素粒子論グループ 川平将志

**Abstract** Recently Kevin Costello and Owen Gwilliam gave a new mathematical formulation of quantum field theories based on factorization algebras. Factorization algebra is a convenient concept to describe the various kinds of quantum field theories. In particular, derived observable algebra is a class of factorization algebras, and it represents perturbative quantum field theories.

We focus on the investigation of free scalar theories based on factorization algebras or derived observable algebras. By using them, we can treat various physics concepts.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

場の量子論を数学的に定式化することは人類の長年の課題の 1 つである。近年、Kevin Costello と Owen Gwilliam によって因子化代数を用いた場の量子論の定式化が与えられた[1][2][3]。本発表では、因子化代数の中でも導来観測量代数  $\text{Obs}^{\text{cl}}(U)$  ないし  $\text{Obs}^{\text{q}}(U)$  について議論する。これを用いることで、摂動的場の量子論を数学的に定式化することが可能となる。

例えば経路積分は、観測量  $\mathcal{O}$  から期待値  $\langle \mathcal{O} \rangle$  への写像として捉える。この視点に立ったとき、いくらか議論することで、鞍点近似 ( $\hbar \rightarrow 0$  の極限) をとった経路積分は

$$\text{Obs}(U) \rightarrow H^0 \text{Obs}^{\text{cl}}(U) \rightarrow \mathbb{C}$$

という写像の合成で与えられることがわかる。ここで  $\text{Obs}(U)$  は時空の領域  $U$  上で台をもつ観測量  $\mathcal{O}$  がなす空間であり、 $\text{Obs}^{\text{cl}}(U)$  は古典的な導来観測量代数である。また、1 つ目の写像は運動方程式から誘導される。2 つ目の写像は任意性があり状態に対応する。

量子効果も取り入れた期待値を計算するには、 $\text{Obs}^{\text{cl}}(U)$  を変形量子化した量子的な導来観測量代数  $\text{Obs}^{\text{q}}(U)$  を考えればよい。

$$\text{Obs}(U) \rightarrow H^0 \text{Obs}^{\text{q}}(U) \rightarrow \mathbb{C}[\hbar]$$

ここで、1 つ目の写像は Schwinger-Dyson 方程式から誘導され、2 つ目の写像はやはり状態に対応する。また、 $H^0 \text{Obs}^{\text{q}}(U)$  には非可換な積が入り、これは演算子積に対応することが確認できる。

本発表では、以上のような枠組みの中で赤外発散の取り扱い[4]と一般化対称性の定式化[5]を議論する。赤外発散については、 $H^0 \text{Obs}^{\text{cl}}(U)$  を有質量の場合と無質量の場合で比較することで議論する。また、一般化対称性については、トポロジカル演算子の定義をコホモロジー  $H^n \text{Obs}^{\text{q}}(U)$  の言葉で与える。その後具体例として、自由な 1 次元無質量スカラー場理論のシフト対称性を取り扱う。また、トポロジカル演算子を具体的に構成する際には、演算子積由来の紫外発散が生じるが、 $H^n \text{Obs}^{\text{q}}(U)$  のコホモロジーとしての性質に着目することで、紫外発散を除去できることを説明する。

## References

- [1] K. Costello, Renormalization and Effective Field Theory, Mathematical surveys and monographs, American Mathematical Society (2011).
- [2] K. Costello and O. Gwilliam, Factorization Algebras in Quantum Field Theory, Cambridge University Press (12, 2016).
- [3] K. Costello and O. Gwilliam, Factorization Algebras in Quantum Field Theory, New Mathematical Monographs (41), Cambridge University Press (9, 2021), 10.1017/9781316678664.
- [4] M. Kawahira and T. Shigemura, States and IR divergences in factorization algebras, arXiv:2412.08183[hep-th].
- [5] M. Kawahira, A concrete construction of a topological operator in factorization algebras, Progress of Theoretical and Experimental Physics 2024 (2024) 123B01 [arXiv:2407.21784[hep-th]].

# Formation of supermassive stars and heavy seed black holes via cold accretion flow into the atomic cooling halos

天体核研究室      喜友名正樹

**Abstract** We study the formation of supermassive stars, promising candidates for supermassive black hole progenitors, under the influence of cold accretion. We discover that cold accretion supplies gas to the halo center, forming a dense gas disc where stars are born and grow into supermassive stars.  
© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Supermassive black holes (SMBHs), with masses of  $10^6\text{--}10^9 M_\odot$ , are located at the center of most galaxies. Since its discovery, the origin of SMBHs has been a significant unresolved problem, as their mass is substantially larger than that of other stars and compact objects. Recent discoveries of distant quasars at the redshift  $z \simeq 10$  highlight the challenge of their rapid formation. Even under ideal conditions, the growth of remnant BHs from the ‘first stars’ with  $\sim 10^{1-3} M_\odot$  is insufficient to explain the rapid formation of SMBHs [1].

One promising candidate for SMBH progenitors is supermassive stars [2] with masses of  $\sim 10^5 M_\odot$ . The typical star formation in the early universe is driven by  $\text{H}_2$  molecular cooling at  $T \simeq 10^3 \text{K}$ . In the early universe, supermassive stars are theoretically predicted to form in the Atomic Cooling Halos (ACHs, with masses of  $M_{\text{halo}} \simeq 10^7 M_\odot$ ) via Ly  $\alpha$  cooling (radiative cooling through deexcitation of collisionally excited H atoms) at  $T \simeq 10^4 \text{K}$ , provided that  $\text{H}_2$  molecular cooling is inhibited. After forming, supermassive stars collapse directly into BHs of  $\simeq 10^5 M_\odot$ , which can grow into SMBHs within the time limit. A key challenge lies in understanding how to inhibit  $\text{H}_2$  molecular cooling.

Cold accretion [3] refers to the phenomenon where gas accretes from outside the halo and funnels into the central region without being disturbed by the rarefied gas near the virial radius, provided that radiative cooling is sufficiently efficient. It occurs in mature galaxies with  $M_{\text{halo}} \lesssim 10^{11} M_\odot$ . It is proposed that cold accretion could occur in the ACHs [4], potentially facilitating supermassive star formation [5]. However, further investigation has been limited, leaving the overall picture of this supermassive star formation unclear. Most importantly, the mechanisms of cold accretion in the early universe had remained unclear. A subsequent study argued that cold accretion did not occur in the ACHs [6].

First, we investigate the emergence of cold accretion in the early universe using an analytical model and cosmological hydrodynamical simulations [7]. We find that cold accretion emerges in ACHs via efficient Ly  $\alpha$  cooling. The analytical model consistently interprets our simulation results with previous studies.

Next, we study star formation following the emergence of cold accretion, focusing on the potential formation of supermassive stars [8]. We use the same cosmological simulations with additional modules of radiative feedback of stars and ray tracing. We discover that multiple supermassive stars form shortly after the emergence of cold accretion. Cold accretion supplies gas to the halo center, forming a dense, compact gas disc where stars form. This disc efficiently transports gas to its center, feeding stars and enabling their growth into supermassive stars. Our results also suggest that the remnant BHs of supermassive stars grow efficiently, providing favorable conditions for SMBH formation.

## References

- [1] Inayoshi K., Visbal E., Haiman Z., *ARAA*, **58**, 27-97 (2020).
- [2] Bromm V., Loeb A., *ApJ*, **596**, 1, 34-46 (2003).
- [3] Birnboim Y., Dekel A., *MNRAS*, **345**, 1, 349-364 (2003).
- [4] Greif T. H., Johnson J. L., Klessen R. S., Bromm V., *MNRAS*, **387**, 3, 1021-1036 (2008).
- [5] Inayoshi K., Omukai K., *MNRAS*, **422**, 3, 2539-2546 (2012).
- [6] Fernandez R., Bryan G. L., Haiman Z., Li M., *MNRAS*, **439**, 4, 3798-3807 (2014).
- [7] Kiyuna M., Hosokawa T., Chon S., *MNRAS*, **523**, 1, 1496-1513 (2023).
- [8] Kiyuna M., Hosokawa T., Chon S., *MNRAS*, **534**, 4, 3916-3935 (2024).

# 近 pp-波極限におけるカオス的な弦の運動

素粒子論研究室 久代翔大

**Abstract** We investigate classical chaos in string dynamics on near-pp-wave backgrounds derived from the  $AdS_5 \times S^5$  space-time. By revisiting ansatz assumptions, we compute Poincaré sections and Lyapunov exponents, confirming chaotic motion. This study links quantum chaos in  $\mathcal{N} = 4$   $SU(N)$  super Yang-Mills theory to classical string dynamics.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

素粒子論における最も重要な研究課題の一つが AdS/CFT 対応である。その対応の中で注目すべき例の一つが「 $\mathcal{N} = 4$   $SU(N)$  超対称ヤンミルズ理論」と「 $AdS_5 \times S^5$  空間上の IIB 型超弦理論」の対応関係である。両方の理論は可積分構造を持っており、厳密な解析を行うことで AdS/CFT 対応の理解が進んだ。 $\mathcal{N} = 4$   $SU(N)$  超対称ヤンミルズ理論では異常次元の計算の際に可積分構造が現れる。特にスカラー場のシングルトレース演算子の 1 ループ異常次元計算する際に、可積分模型である XXX ハイゼンベルク模型が現れる[1]。この結果と弦理論側の弦の状態(古典解)のエネルギーを比較することで AdS/CFT の検証が進んだ。

2 ループ異常次元の場合、XXX ハイゼンベルク模型のハミルトニアンに次近接相互作用が加わったハミルトニアンとなる。

$$H = \epsilon_0 \sum_{i=1}^L 1 + \lambda_1 \sum_{i=1}^L \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_{i+1} + \lambda_2 \sum_{i=1}^L \mathbf{S}_i \cdot \mathbf{S}_{i+2} \quad (1)$$

このハミルトニアンエネルギー順位間隔統計を計算するとウィグナー・ダイソン分布になることが分かり、これはこのハミルトニアンが量子カオスであることを示している[2]。このカオス性が弦理論側では現れるのかを探ることが本研究の目的である。

本研究[3]では  $AdS_5 \times S^5$  空間のペンローズ極限に着目した。極限の主要項を取った pp-波背景における弦理論は可積分である。次に主要な寄与を取り入れたものは近 pp-波背景である。この背景上の弦理論の古典的な運動は[4]で計算されていたが、その際にはカオスが現れなかった。本研究では数値計算を行う際のアンザッツを再考し、その下でポアンカレ断面とリヤプノフ指数を計算した。その結果、近 pp-波背景における弦の運動がカオスであることを示した。

## References

- [1] J. A. Minahan and K. Zarembo, “The Bethe ansatz for  $N=4$  superYang-Mills”, JHEP, 03:013, 2003.
- [2] Tristan McLoughlin and Anne Spiering, “Chaotic spin chains in AdS/CFT”, JHEP, 09:240, 2022.
- [3] Shodai Kushiro and Kentaroh Yoshida, “Chaotic string motion in a near pp-wave limit”, JHEP, 01:065, 2023.
- [4] Yuhma Asano, Daisuke Kawai, Hideki Kyono, and Kentaroh Yoshida, “Chaotic strings in a near Penrose limit of  $AdS_5 \times T^{1,1}$ ”, JHEP, 08:060, 2015.

# 重力波の重力レンズ効果における偏極の影響

基礎物理学研究所      窪田圭一郎

**Abstract** Gravitational waves exhibit the unique signature of their spin-2 nature in processes of wave scattering, due to the interaction between spin and a background spacetime. Since the spin effect is more pronounced for longer wavelengths and gravitational waves sourced by binaries have a long wavelength, it may become an important effect in addition to the wave effect. We study the propagation of gravitational waves lensed by a Kerr black hole by analytically solving the equations of the spinoptics formalism and numerically solving the Teukolsky equation with a source term of the equal-mass circular binary. We derive an analytical expression for the polarization-induced correction in the amplification factor and find helicity-dependent small-period oscillation in the power spectrum of the amplification factor in the forward direction and the oscillation is enhanced as spin of a prograde Kerr black hole increases.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Gravitational waves can serve as powerful tools for cosmology and astrophysics. One of them is the lensing of gravitational waves. The wavelengths of gravitational waves originating from binary systems are exceptionally long. One of the primary targets for the gravitational wave detector LISA, which is particularly sensitive to long wavelengths, is gravitational waves emitted by massive black hole binary. The wavelengths of these gravitational waves can be comparable to or exceed the curvature radius of spacetime distortions caused by small-scale halos or supermassive black holes. When the wavelength is larger than the background spacetime curvature radius, wave effects such as diffraction become prominent. These effects are advantageous for extracting information about the mass distribution of lensing objects. Since LISA is planned to be launched within several decades, research concentrating on wave properties has been actively pursued in recent years. Many studies focusing on wave properties investigate the propagation of gravitational waves by treating them as scalar waves and neglecting polarization. However, it is known that the influence of polarization on the propagation of gravitational waves becomes more pronounced as the wavelength becomes long, and thus this effect may also be observable. If this effect is detected, new information about lensing objects can be obtained. For example, if the lensing object is rotating, the influence of polarization causes a difference in the propagation of right-handed and left-handed gravitational waves. By observing this difference, information regarding the rotation of the lensing object can be acquired.

In this talk, we study the effect of polarization in the gravitational lensing of gravitational waves. As the first step, we examined the impact of polarization on gravitational waves with wavelengths short enough that wave effects can be neglected, using the spin-optics formalism. Through this approach, we derived analytical expressions for the changes in amplification rates and time delays associated with polarization-induced modifications in propagation. Subsequently, we conducted numerical simulations to explore the influence of polarization on gravitational waves with long wavelengths, where wave properties are significant, using the Teukolsky formalism. This formalism enables the simultaneous consideration of both polarization and wave effects in our analysis. Our results revealed helicity-dependent oscillations in the amplification factor within the frequency domain, which reflect the spacetime structure of strong gravitational fields near black holes. Furthermore, we demonstrated that the amplification of gravitational waves lensed by black holes rotating in the same direction as the circular polarization is greater than that in the opposite direction.

# J-PARC 主リングにおけるバンチ内運動に対する 空間電荷効果の影響

高エネルギー物理学研究室      吉村宣倖

**Abstract** In high-intensity proton accelerators like J-PARC MR, chromaticity and transverse feedback optimization are crucial for beam stability. This study analyzed the transverse decoherence and recoherence of proton bunches, revealing that space-charge effects influence recoherence periods but not maximum frequency. Simulations validated these findings, incorporating direct/indirect space-charge effects and impedance sources.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Stable operation of high intensity proton beams has become more essential in high-energy physics research. Japan Proton Accelerator Research Complex Main Ring (J-PARC MR) produces neutrino beams and is the most important component for the T2K experiment and the future Hyper-Kamiokande experiment, the neutrino oscillation experiments. High beam power and stable operation of J-PARC MR contributes to increase the statistics and to improve the accuracy of measurements of neutrino oscillation parameters.

In order to achieve stable operation of the proton beam at a higher intensity, it is necessary to suppress the transverse beam instability more strongly, and at J-PARC, this is being addressed using chromaticity and digital feedback dampers. Enlarging chromaticity is a standard method for suppressing beam instability, but the higher-order, high-frequency head-tail modes could be excited by impedance, making digital feedback difficult. In order to establish the optimal adjustment method, it is necessary to deepen our understanding of the complex mechanisms that combine the effects of chromaticity, impedance, and space charge that cause beam instability.

We explored the effects of direct and indirect space charge effects on the head-tail modes through chromaticity in a parameter region where beam instability does not exist. During this measurement, we discovered that the modulation of the intra-bunch frequency injected with a transverse mismatch had a peculiar periodicity in. In order to investigate the cause of this modulation, we develop a particle tracking simulation code that modeled the time evolution of the transverse dipole moment and the space charge effect. To validate this code, we provide a robust foundation for handling direct and indirect space charge effects from a fundamental perspective. Furthermore, the simulation results are compared with theoretical predictions extended to partially address Gaussian beams in a harmonic potential, based on the ABS model originally developed by Blaskiewicz [1]. Through this simplified simulation, it is possible to better understand the combined effects of the head-tail modes, chromaticity, and space charge effects. The measurement results in Fig.1(a) and the calculation results in Fig. 1(b) for the transverse frequency component of the dipole moment in the bunch are in good agreement. We also examine the dependence of the modulation period and maximum intra-bunch frequency on the beam parameters (chromaticity and beam intensity) that characterize this modulation phenomenon.

## References

[1] M. Blaskiewicz Phys. Rev. AB 1, 4, 044201 (1998)

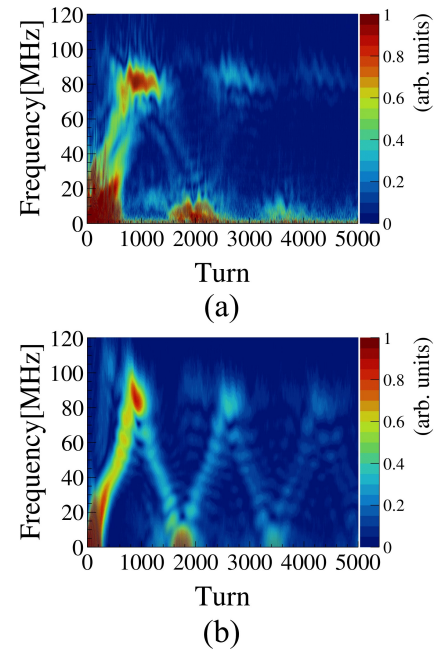


Fig. 1. Transverse frequency component of the dipole moment in the bunch for the chromaticity -12.5. (a) Measurement at the beam intensity  $8.6 \times 10^{12}$  proton per bunch. (b) Simulation at the beam intensity  $4.2 \times 10^{12}$  proton per bunch.

# Holographic studies on semi-classical saddles in three-dimensional gravity

基礎物理学研究所素粒子論グループ 瀧 祐介

**Abstract** The semi-classical saddles in three-dimensional gravity are discussed via holography. By using concrete models of  $\text{AdS}_3/\text{CFT}_2$  and  $\text{dS}_3/\text{CFT}_2$ , we determine the relevant saddles in the bulk from CFT calculations. In the gravity side, the mini-superspace model is utilized to discuss the integration contour that reproduces the CFT results.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

本発表では、3次元重力理論の半古典近似における複素鞍点を議論する。量子重力理論を重力経路積分を用いて定式化することを考えた場合、半古典近似は経路積分の鞍点近似をとることに相当する。しかしながら、量子重力理論が未知であることから重力経路積分の詳細な定義は与えられていない。特に、どの複素鞍点が鞍点近似に寄与するかを決定することは重力理論のみの議論からでは困難である。本研究では、ホログラフィー原理、特に  $\text{AdS}_3/\text{CFT}_2$  や  $\text{dS}_3/\text{CFT}_2$  を用いることで、CFT 側の計算から寄与する複素鞍点を決定する。

本研究では、 $\text{dS}/\text{CFT}$  を  $\text{AdS}/\text{CFT}$  に適切な解析接続を施したものとして構築する。実際に解析接続を実行するためには、具体的なモデルを考える必要がある。本研究では、 $\text{AdS}_3/\text{CFT}_2$  の具体例として、CFT 側が Liouville 理論と呼ばれる性質の良い共形場理論で与えられるような例を考え、この CFT の解析接続として  $\text{dS}_3/\text{CFT}_2$  の例を構築する[1]。

まず、 $\text{dS}/\text{CFT}$  を用いて正の宇宙定数を持つ重力理論を考える。上で説明した  $\text{dS}/\text{CFT}$  の例で分配関数や相関関数を計算することで、重力理論の宇宙の波動関数を評価することができる。この際に注目すべき点として、 $\text{dS}/\text{CFT}$  への解析接続の際に鞍点近似に寄与する鞍点がある点で大きく変化する、Stokes 現象と呼ばれる現象が起こる。このように解析接続を注意深く取り扱うことで、 $\text{dS}$  重力の半古典近似を計算することができる。その結果、 $\text{dS}$  重力では2個の鞍点が寄与することがわかる [2]。これらの鞍点の重力側での幾何学的解釈は、mini-superspace モデルと呼ばれる単純化された理論を用いることで議論することができる[3]。これにより、得られた2個の鞍点がそれぞれ Hartle-Hawking 鞍点とトンネリング鞍点と呼ばれる物理的意味を持つ鞍点に相当することがわかる。さらに、mini-superspace モデルの積分経路としてそれらの2つの鞍点が寄与するようなものを選ぶことができることも議論する。

次に、 $\text{AdS}/\text{CFT}$  についても同様の分析を行う[3]。上述した Stokes 現象により、この場合の CFT の分配関数や相関関数に寄与する鞍点は  $\text{dS}$  の場合と大きく異なり、無限個の鞍点が寄与する[4]。そこで、再び mini-superspace モデルを用いることにより、対応する重力理論の鞍点を議論する。 $\text{dS}/\text{CFT}$  の場合と同様に、CFT 側の結果を再現するような積分経路を取ることができる。さらに、十分重い演算子を挿入したときに起こる、別のパラメータの解析接続の下での Stokes 現象も同じ積分経路で再現することができる。寄与する無限個の鞍点は、 $\text{dS}$  の場合と同様の議論により、通常の変曲空間を虚数方向に接続したような時空になることを見る。

## References

- [1] Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi and Y. Taki, *Phys. Rev. Lett.* **129** (2022) 041601; *JHEP* **05** (2022) 129
- [2] H. Y. Chen, Y. Hikida, Y. Taki and T. Uetoko, *Phys. Rev. D* **107** (2023) L101902; *Phys. Rev. D* **108** (2023) 066005
- [3] H. Y. Chen, Y. Hikida, Y. Taki and T. Uetoko, *Phys. Rev. D* **110** (2024) 026018; *JHEP* **07** (2024) 283
- [4] D. Harlow, J. Maltz and E. Witten, *JHEP* **12** (2011) 071

# Coarse-graining black holes out of equilibrium with boundary observables on time slice

素粒子論研究室 竹田大地

**Abstract** The formulation of black hole thermodynamics is one of the important subjects to understand the unknown microscopic theory of gravity. In this study, we give a proposal for the coarse-gained entropy of dynamical black holes, based on the AdS/CFT correspondence.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

重力の熱力学的性質は量子重力を巨視的に制約すると期待される。特に定常なブラックホールに対しては、事象の地平面の面積をエントロピーと見做すことで、質量・角運動量・電荷などの示量変数との間に熱力学関係式（第一法則）が成り立つ。しかし、平衡状態間の遷移可能性を規定する第二法則は、ブラックホールが動的（非平衡）になるために、エントロピーの定義ですら完全には確立していない。これまでに、長きにわたって様々な提案と、その第二法則の検証がなされてきた。

そこで、この問題に/CFT対応から迫る方法が考えられる。AdS/CFT対応とは、「宇宙定数が負の重力理論は、それより次元が低いある場の量子論と等価である」という対応関係のことをいう。この対応関係についての一般論はまだ構成されてはいないが、さまざまな証拠が見つかり、重力理論を理解する助けになっている。

本研究[1]では、AdS/CFT対応を指導原理にして、ブラックホールエントロピーの1つの定義を提案する。このエントロピーは、定常なブラックホールが境界条件の時間依存性によって擾乱され、平衡を外れて時間発展していく過程に対して、各時刻で定義されている。それに対し、「任意の時刻で、エントロピーは初期値より減らない」という形で第二法則が成り立つことが証明される。従来、第二法則は適切なエネルギー条件を要請することで示されてきたが、今回の提案においては、重力理論に双対な場の量子論が存在することを仮定し、その量子論における相対エントロピーの正定値性に基づいて証明される。したがって、「ユニタリ性とブラックホールエントロピーの増大則が密接に結びついて」と、AdS/CFT対応は示唆していることが結論される。

また、提案するエントロピーは場の理論側でも重力側でも定義されているため、熱力学に関する新たなAdS/CFT対応の辞書を与えている。

## References

[1] Daichi Takeda, J. High Energ. Phys. 2024, 319 (2024).

# (p, pX) 反応で探る $^{40, 42, 44, 48}\text{Ca}$ 原子核中における t、 $^3\text{He}$ クラスター形成

原子核・ハドロン物理学研究室 辻峻太郎

**Abstract** The light clusters such as d, t,  $^3\text{He}$ , and  $\alpha$  form in the infinite nuclear matter and the ground state of nuclei according to recent studies. The cluster fractions depend on the density and the isospin asymmetry of the nuclear matter, but the nature and the mechanism of clustering are poorly understood. We focused on the mirror t and  $^3\text{He}$  clusters in  $^{40, 42, 44, 48}\text{Ca}$  which are the flagship nuclei of nuclear physics. We measured the (p, pX) reactions to survey the clusters in Ca isotopes at RCNP, Osaka University. We analyzed the data using the reaction theory based on the distorted wave impulse approximation. In this presentation, we will report the details of the experiments and the results of the analysis.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

無限系核物質や中重核を含む原子核の基底状態において d、t、 $^3\text{He}$ 、 $\alpha$  といった軽クラスターが自発的に形成するという現象が新たに示唆されている[1, 2, 3, 4]。クラスター形成は飽和密度の 1/10 程度の低密度領域で顕著に見られ、その形成率は核物質の密度・アイソスピン非対称度に依存して変化し、クラスター種ごとに異なる傾向を示す[1, 2]。この現象は従来の平均場理論に基づく原子核描像と共存する普遍的なクラスター形成という新しい原子核描像を提供するだけでなく、クラスター形成による核物質の状態方程式への影響や中性子星のパスタ構造、超新星爆発のニュートリノ応答などの天体現象への理解へと繋がる。しかし、この現象を実験的に実証したデータは乏しく、クラスター形成の性質やメカニズムの解明へは至っていない。クラスター形成の性質を理解する鍵は密度・アイソスピン非対称度依存性であり、特にミラー核の関係にある t、 $^3\text{He}$  クラスターは強いアイソスピン非対称度依存性が予想される。実際に無限系核物質中に対する理論計算では、中性子分率の増大に伴って t クラスターはほとんど形成率が変化しない一方、 $^3\text{He}$  クラスターは他のクラスターと比べて形成率が大きく減少することが示唆されている[2]。そこで本研究では原子核研究のフラグシップ核である  $^{40, 42, 44, 48}\text{Ca}$  における t、 $^3\text{He}$  クラスター形成率の同位体依存性に注目し、測定を実施した。

原子核中におけるクラスターを観測する方法の 1 つがターゲット核に入射した陽子が原子核中のクラスターを弾性散乱によって叩き出す (p, pX) 反応である[4]。この反応は、クラスターへの運動量移行が核内クラスターのフェルミ運動量よりも大きいという準自由条件を満たせば、歪曲波インパルス近似 (DWIA) に基づいたシンプルな反応理論で解析可能なプローブである[5]。そこで我々は大阪大学 RCNP において、226 MeV の陽子ビームを用いた  $^{40, 42, 44, 48}\text{Ca}$  (p, pX) (X=t,  $^3\text{He}$ ) 反応を準自由条件下で測定した。また運動学領域はクラスターのフェルミ運動量が 0 付近の領域を対象とする無反跳条件に設定された。散乱陽子は Grand Raiden スペクトロメーター、ノックアウトクラスターは Large Acceptance スペクトロメーターを用いて運動量、角度を測定した。測定データからクラスターの分離エネルギースペクトルを導出し、(p, pX) 反応の三重微分断面積を得た。分離エネルギースペクトルは、t で 200 keV ( $\sigma$ )、 $^3\text{He}$  で 400 keV ( $\sigma$ ) と高い分解能で得られ、残留核の基底状態周辺の状態を十分に分離可能である。さらに DWIA 反応理論による解析を行い、t、 $^3\text{He}$  クラスターの形成率を議論した。

本研究は中重核における t および  $^3\text{He}$  クラスターの存在を示す初の実験データを提供するだけでなく、ノックアウト反応を用いてクラスター形成の情報を引き出す手法を確立する上でも重要である。

本発表では、(p, pX) 反応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] S. Typel, J. Phys. Conf. Ser. 420, 012078 (2013).
- [2] Z.W. Zhang and L.W. Chen, Phys RevC 95, 064330 (2017).
- [3] S. Typel, Phys. Rev. C 89, 064321 (2014).
- [4] J. Tanaka, Z.H. Yang, S. Typel, *et al.*, Science 371, 6526 (2021).
- [5] K. Yoshida, *et al.*, Phys, RevC, 100, 044601 (2019).



# Exploring the gamma-ray burst relativistic jet by very high energy gamma-ray observations

宇宙線研究室 寺内健太

**Abstract** Relativistic jet produced in gamma-ray burst is believed to possess a slow component in addition to a fast component. The existence of the slow component is investigated utilizing very high energy gamma-ray observations of energetic gamma-ray bursts.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

ガンマ線バーストでは相対論的速度を持ったジェットが中心エンジンから駆動されているが、速度分布などといったジェット内の構造については未解明な部分が多い。これまでの観測から、初期ローレンツ因子が典型的に 100 以上であることが示唆されており、ガンマ線バーストの放射モデルではローレンツ因子がジェット軸からの角度に依らない単純なモデルが広く使われてきた。一方で、数値シミュレーションの結果により初期ローレンツ因子が数十と比較的遅い成分が速い成分を取り巻くように存在することが予言されている。残光放射の光度曲線をモデリングすることによって、この遅い成分の存在を主張した先行研究が数例あるが[1]、未だ明確な観測的証拠はない。本研究では残光放射のガンマ線観測を用いて、二つの観点からこの遅い成分について調べた。

第一に残光放射中に見られる緩慢減衰期を用いて調べた。この緩慢減衰期は、X線残光放射の中でも特に減衰の冪指数が 0.5 以下となるような緩やかな減衰を示す時期であり、物理的メカニズムは未だ謎が多い。伝統的には高速回転しているマグネターからのエネルギー注入モデルによって解釈されているが、ローレンツ因子が小さいジェットが星風の中を突き進むモデル（星風モデル）も極端な仮定を必要としないため有力なモデルである。緩慢減衰期の物理的メカニズムを解明、およびモデルの切り分けには GeV-TeV ガンマ線が有効である[2]。そこで本研究では、2024 年 5 月に発生したガンマ線バースト GRB 240529A に着目した。この天体は等方換算した放射エネルギーが  $2.2 \times 10^{54}$  erg と非常に明るく、なおかつ緩慢減衰期を伴っていた。まずフェルミ衛星の観測データを調べたところ、緩慢減衰期中の GeV 放射を  $4.5\sigma$  の検出有意度で検出した。衝撃波が時間発展するシミュレーションをもとに多波長データをモデリングしたところ、エネルギー注入モデルおよび星風モデル共に観測された GeV 放射強度を再現できるが、GeV スペクトルのべきを考慮すると、Wind モデルがより支持される示唆が得られた。続いて本研究では地上 TeV ガンマ線望遠鏡 LST-1 による観測データも解析した。月光下での観測であったため、通常時と比べて夜光レベルは上昇しており、夜光ノイズによる観測データへの影響を抑える解析が要求された。最終的に TeV 帯において、放射強度に対する上限値が得られ、エネルギー注入モデルは LST-1 による上限値を大きく破っている（100 GeV で約 7 倍）ことがわかった。以上から、GRB 240529A に伴う緩慢減衰期はブラックホールによる星風モデルで説明できることがわかり、ジェット中に初期ローレンツ因子が 30 の遅い成分が存在することが示唆された。

第二に本研究では、LST-1 による GRB 221009A の長期間観測を用いた。GRB 221009A は観測史上最も明るいガンマ線バーストであり、残光放射の多波長光度曲線を説明する上で、遅いジェット成分も含む構造を持ったジェットがよく用いられている[3]。バースト発生から 1.3 日後の LST-1 観測は、GRB 240529A のとき以上の夜光レベル中での観測であったため、より解析の最適化が求められた。解析の結果、バースト発生から 1.3 日後に、 $4.6\sigma$  の検出有意度でガンマ線信号が得られ、後期 TeV ガンマ線はジェットの外側から放射されている示唆が得られた。さらには、ジェット構造のモデルパラメータを制限した。

以上をもって、ガンマ線バーストの相対論ジェット中にはローレンツ因子の低い成分も存在している強い示唆が得られた。

## References

- [1] Y. Sato, et al. (2023b), *Journal of High Energy Astrophysics*, 37, 51  
[2] K. Asano (2024), *ApJ*, 970, 141 [3] J. Ren, et al. (2024), *ApJ*, 962, 115

# Exploring the gamma-ray burst relativistic jet by very high energy gamma-ray observations

宇宙線研究室 寺内健太

**Abstract** Relativistic jet produced in gamma-ray burst is believed to possess a slow component in addition to a fast component. The existence of the slow component is investigated utilizing very high energy gamma-ray observations of energetic gamma-ray bursts.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

ガンマ線バーストでは相対論的速度を持ったジェットが中心エンジンから駆動されているが、速度分布などといったジェット内の構造については未解明な部分が多い。これまでの観測から、初期ローレンツ因子が典型的に 100 以上であることが示唆されており、ガンマ線バーストの放射モデルではローレンツ因子がジェット軸からの角度に依らない単純なモデルが広く使われてきた。一方で、数値シミュレーションの結果により初期ローレンツ因子が数十と比較的遅い成分が速い成分を取り巻くように存在することが予言されている。残光放射の光度曲線をモデリングすることによって、この遅い成分の存在を主張した先行研究が数例あるが[1]、未だ明確な観測的証拠はない。本研究では残光放射のガンマ線観測を用いて、二つの観点からこの遅い成分について調べた。

第一に残光放射中に見られる緩慢減衰期を用いて調べた。この緩慢減衰期は、X線残光放射の中でも特に減衰の冪指数が 0.5 以下となるような緩やかな減衰を示す時期であり、物理的メカニズムは未だ謎が多い。伝統的には高速回転しているマグネターからのエネルギー注入モデルによって解釈されているが、ローレンツ因子が小さいジェットが星風の中を突き進むモデル（星風モデル）も極端な仮定を必要としないため有力なモデルである。緩慢減衰期の物理的メカニズムを解明、およびモデルの切り分けには GeV-TeV ガンマ線が有効である[2]。そこで本研究では、2024 年 5 月に発生したガンマ線バースト GRB 240529A に着目した。この天体は等方換算した放射エネルギーが  $2.2 \times 10^{54}$  erg と非常に明るく、なおかつ緩慢減衰期を伴っていた。まずフェルミ衛星の観測データを調べたところ、緩慢減衰期中の GeV 放射を  $4.5\sigma$  の検出有意度で検出した。衝撃波が時間発展するシミュレーションをもとに多波長データをモデリングしたところ、エネルギー注入モデルおよび星風モデル共に観測された GeV 放射強度を再現できるが、GeV スペクトルのべきを考慮すると、Wind モデルがより支持される示唆が得られた。続いて本研究では地上 TeV ガンマ線望遠鏡 LST-1 による観測データも解析した。月光下での観測であったため、通常時と比べて夜光レベルは上昇しており、夜光ノイズによる観測データへの影響を抑える解析が要求された。最終的に TeV 帯において、放射強度に対する上限値が得られ、エネルギー注入モデルは LST-1 による上限値を大きく破っている（100 GeV で約 7 倍）ことがわかった。以上から、GRB 240529A に伴う緩慢減衰期はブラックホールによる星風モデルで説明できることがわかり、ジェット中に初期ローレンツ因子が 30 の遅い成分が存在することが示唆された。

第二に本研究では、LST-1 による GRB 221009A の長期間観測を用いた。GRB 221009A は観測史上最も明るいガンマ線バーストであり、残光放射の多波長光度曲線を説明する上で、遅いジェット成分も含む構造を持ったジェットがよく用いられている[3]。バースト発生から 1.3 日後の LST-1 観測は、GRB 240529A のとき以上の夜光レベル中での観測であったため、より解析の最適化が求められた。解析の結果、バースト発生から 1.3 日後に、 $4.6\sigma$  の検出有意度でガンマ線信号が得られ、後期 TeV ガンマ線はジェットの外側から放射されている示唆が得られた。さらには、ジェット構造のモデルパラメータを制限した。

以上をもって、ガンマ線バーストの相対論ジェット中にはローレンツ因子の低い成分も存在している強い示唆が得られた。

## References

- [1] Y. Sato, et al. (2023b), Journal of High Energy Astrophysics, 37, 51  
[2] K. Asano (2024), ApJ, 970, 141 [3] J. Ren, et al. (2024), ApJ, 962, 115

# Simons Observatory 実験の小口径望遠鏡を用いた CMB 観測における偏光角較正手法の開発

高エネルギー物理学研究室

中田嘉信

**Abstract** Polarization angle calibration is a crucial step in the Cosmic Microwave Background (CMB) polarization observation. We have developed a calibration system for Simons Observatory, which uses a sparse wire grid as an artificial light source. In this presentation, we report the initial results of the polarization calibration using the commissioning data.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

初期宇宙のインフレーション仮説を検証する有力な手法が、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光観測である。観測によって得られた CMB の偏光マップには、光の伝搬する自由度に対応した、2 つのモード (E モード、B モード) が存在する。E モードは偏光の CMB マップにおいて支配的であり、過去の衛星実験によって高精度に測定されてきた[1]。一方、インフレーションの証拠となる B モードは微弱で、観測精度が足りず未検出である。この B モードの強度はテンソル-スカラー比 $r$ で決まるが、 $\sigma(r) = 0.003$ という精度で観測しようとする実験が、Simons Observatory(SO) である。

SO は CMB 偏光観測を世界最高感度で実現する実験である。我々はチリのアタカマ砂漠にて標高 5,200 m の山の上に観測所を構え、小口径望遠鏡を配備した。検出器として搭載する Transition Edge Sensor の数は、望遠鏡 1 台あたり 10,000 個以上と史上最大を誇る。そして、検出器アンテナの向きを  $0.2^\circ$  以下で理解することが B モード検出に向けた最重要課題である[2]。この課題解決に向け、我々は実験に特化した較正装置 Sparse Wire Grid Calibrator を開発した。

Sparse Wire Grid Calibrator は、金属ワイヤーによる環境放射の反射を人工光源として用いることで、アンテナの向きを理解する (偏光角較正する) 装置である。ハードウェアデザインにおいて、我々は系統誤差  $0.1^\circ$  以下を達成した [3]。またワイヤーを張ったフレームを回転することで、光学系起因の非対称性を較正によって取り除くことができる。我々はこれを実際の観測データを用いて確認した。Fig.1 は、較正されたアンテナの向きとシリコンウェハ上にデザインされたアンテナの向きの対応を表している。装置は検出器アンテナの向きを正確に理解することを可能にした。

本発表でコミッショニングデータを用いた較正結果、検出器の時定数の評価、今後の展望を述べる。

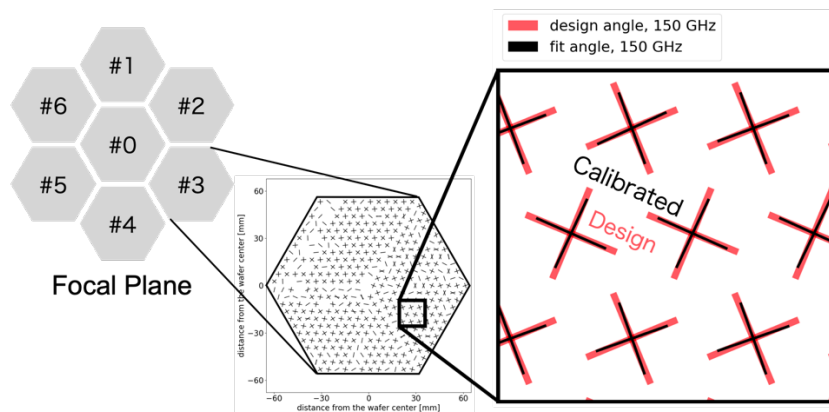


Fig. 1. The demonstration of the calibration of the antenna orientation. Small Aperture Telescopes (SATs) have seven wafers in each focal plane [left]. And the calibrated angle has the good agreement with the wafer-printed ("design") angle [right].

## References

- [1] Planck Collaboration (2018d), A&A **641**, A6. (2020)
- [2] Sean A. Bryan, et al. , Proc. SPIE 10708 1070840, . (2018)
- [3] Murata M., et al. , Rev. Sci. Instrum. **94**, 124502. (2023)

# High-Energy Fixed-Angle Meson Scattering in Holographic QCD

基礎物理学研究所・素粒子論グループ Bartosz Pyszkowski

**Abstract** We study high-energy fixed-angle meson scattering in a holographic QCD model. To this end, we generalise the approach [1] to write an ansatz for meson amplitudes based on superstring amplitudes in asymptotically AdS space. Our results are consistent with the Nambu–Goldstone boson equivalence theorem and the constituent counting rule.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

The early days of string theory can be traced back to 1968 when Veneziano first wrote down a cross-symmetric, Regge-behaved amplitude meant to describe 2-to-2 scattering of low-lying mesons [2]. The cross-symmetric property of strong interactions suggested that the  $s$ - and  $t$ -channels of meson amplitudes should be equivalent. Moreover, in the Regge regime, where  $s$  is large and  $t$  is fixed, the meson amplitudes were required to be  $A \sim s^{\alpha(t)}$ . Both requirements were captured by the Veneziano formula:

$$A(s, t) = \frac{\Gamma(-\alpha(s)) \Gamma(-\alpha(t))}{\Gamma(-\alpha(s) - \alpha(t))}, \quad (1)$$

where  $\alpha(s)$  and  $\alpha(t)$  denote linear functions of  $s$  and  $t$ .

However, the Veneziano formula did not succeed to describe mesons, in part due to experiments conducted at the SLAC National Accelerator Laboratory through the late 1960s and early 1970s, which investigated proton- and neutron-electron scattering at large  $s$  and  $t$  with their ratio fixed (i.e. in the high-energy fixed-angle regime). These experiments found that the differential cross sections for these processes exhibited power-law scaling with  $s$ , now expected to be captured by the so-called constituent counting rules. In contrast, the Veneziano formula in this regime predicted exponentially soft behaviour in  $s$ .

Today, with the aid of holography, we can reconsider whether string scattering can give rise to power-law scaling with  $s$  in the high-energy fixed-angle regime. An early breakthrough in this direction came from Polchinski and Strassler [1], who put forward a proposal based on a Virasoro–Shapiro-like amplitude formulated in hard-wall AdS space that appears to recover the leading-order scaling with  $s$  for  $n$ -point scalar glueball amplitudes in agreement with the constituent counting rule. In our recent work [3], we generalise their approach to propose that, in the context of a bottom-up holographic model, the high-energy fixed-angle limit of an  $n$ -meson amplitude  $A_n$  can be obtained from an  $n$ -superstring amplitude in a five-dimensional asymptotically AdS space, as given by the equation below (for details, see my presentation):

$$A_n(k_\mu^{(i)}, \zeta_\mu^{(i)}) = \int dw \sqrt{-g} \times \tilde{\mathcal{S}}_n(p_M^{(i)}, \zeta_M^{(i)}) \times \prod_{i=1}^n \psi^{(i)}(w). \quad (2)$$

In [3], we demonstrated that our generalisation of [1] is necessary to describe vector and axial vector meson scattering consistently with the Nambu–Goldstone boson equivalence theorem. Our results for pion, vector and axial vector meson amplitudes also agree with the constituent counting rule.

## References

- [1] J. Polchinski and M.J. Strassler, *Hard scattering and gauge / string duality*, *Phys. Rev. Lett.* **88** (2002) 031601 [hep-th/0109174].
- [2] G. Veneziano, *Construction of a crossing - symmetric, Regge behaved amplitude for linearly rising trajectories*, *Nuovo Cim. A* **57** (1968) 190.
- [3] A. Armoni, B. Pyszkowski, S. Sugimoto and D. Weissman, *High-Energy Fixed-Angle Meson Scattering and the Constituent Counting Rule in Holographic QCD*, 2412.17784.

# Development of Machine Learning Algorithms for the Search for Proton Decay in the Super-Kamiokande Experiment and Search for the Decay

$$16O(ppp) \rightarrow 13C\pi^+\pi^+e^+$$

High Energy Physics Laboratory

Jiahui Feng

**Abstract** This study implements convolutional neural networks to search for proton decay in Super-Kamiokande, specifically targeting the decay channel  $16O(ppp) \rightarrow 13C\pi^+\pi^+e^+$ . By applying a modified MobileNetV3 architecture with attention mechanisms, the analysis yields a proton lifetime limit of  $4.2 \times 10^{32}$  years.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Proton decay is a key prediction of grand unified theories (GUTs) that attempt to unify the fundamental forces of nature. Observing proton decay would provide crucial evidence for physics beyond the Standard Model and offer insights into the unification of electromagnetic, weak, and strong interactions. However, proton decay searches are inherently challenging, particularly due to the rarity of such events and the complexity of the resulting signals.

This study focuses on the search for proton decay in the Super-Kamiokande experiment, specifically targeting the decay channel:

$$16O(ppp) \rightarrow 13C\pi^+\pi^+e^+$$

The selected decay mode involves multi-pion final states, which introduce significant challenges due to the final state interactions (FSI) of pions in water. These interactions often distort the observable signals, complicating the reconstruction of decay events. FSI processes, including absorption, charge exchange, and scattering interactions within the nuclear medium, can significantly modify the pion kinematics and resulting Cherenkov ring patterns. Atmospheric neutrinos also pose a significant background, requiring precise modeling through Monte Carlo simulations to accurately estimate their contribution.

To tackle these challenges, we employ a modified MobileNetV3 Large architecture with integrated Squeeze-and-Excitation (SE) attention mechanisms and Bottleneck structures. This architecture is particularly effective in enhancing the identification of key features in Cherenkov ring recognition. The CNN models are trained using simulated data from five distinct Super-Kamiokande operational periods and evaluated with unseen datasets to ensure their robustness and generalization capability.

Monte Carlo simulations are used to model both the atmospheric neutrino background and the proton decay signals. Key observables, such as event energy, the number of Cherenkov rings, and the identification of Michel electrons from muon decay, are reconstructed to aid in the classification process. A comprehensive analysis of systematic uncertainties, including those arising from FSI and atmospheric neutrino interactions, has been incorporated into the sensitivity estimates.

After analyzing data with a cumulative exposure of 0.37 megaton-years, we observed only one candidate event, consistent with the expected background of  $1.8 \pm 0.67$  events. The results constrain the proton lifetime for this decay channel to  $4.2 \times 10^{32}$  years at 90% confidence level, exceeding previous limits by six orders of magnitude. This study not only demonstrates the effectiveness of deep learning techniques in rare event searches but also provides a foundation for future applications of machine learning in high-energy physics experiments.

## References

- [1] Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. D **95**, 012004 (2017).
- [2] Y. Ashie et al., Phys. Rev. D **71**, 112005 (2005).

# Development of a Combined Pre-supernova Neutrino Alarm and a Search of Scalar Non-standard Interactions in Atmospheric Neutrinos at Super-Kamiokande

高エネルギー物理学研究室      HU ZHUOJUN

**Abstract** We present two studies in neutrino physics: utilizing neutrinos from a massive star approaching core-collapse supernova as an alarm, and searching for non-standard interactions between neutrinos and fermions both coupled to a hypothetical boson at Super-Kamiokande.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Neutrinos are unique tools to advance our understanding of the universe because of the mysteries about whether or not their oscillations violate CP symmetry, the origin of their masses, and their ability to convey information inaccessible through other messengers. We present two studies in neutrino physics, including development of a combined pre-supernova (pre-SN) neutrino alarm and a search of scalar non-standard interactions (SNSI) in atmospheric neutrinos at Super-Kamiokande (SK).

**Development of a Combined Pre-supernova Neutrino Alarm:** Pre-SN neutrinos are produced in the interior of a massive star which will soon become a supernova (SN). As the star approaches the end of its life, various physics processes, including pair-production and beta decay, produce an increasing number of pre-SN neutrinos of all flavors characterized by mounting energies [1]. They can be used as an alarm of the imminent SN, allowing for preparation of observations with gravitational waves and neutrinos from the burst itself, which can reveal the underlying mechanism of SN and black-hole formation. We developed and put into operation a combined pre-SN neutrino alarm [2] utilizing the KamLAND detector and the SK detector. This alarm integrates observed pre-SN candidate events and expected background levels from the two detectors to obtain a false alarm rate, accounting for the look-elsewhere effect due to the unknown timing of a SN explosion. Fully leveraging the complementary properties of these two detectors, the combined alarm is expected to resolve a pre-SN neutrino signal from a 15  $M_{\odot}$  star within 510 parsecs of the Earth, at a significance level corresponding to a false alarm rate of no more than 1 per century. For a Betelgeuse-like model with optimistic parameters, it can provide early warnings up to 12 hours in advance.

**Search for Scalar Non-Standard Interactions in Neutrinos at SK:** The effects of SNSI appears as a perturbation of absolute neutrino masses, and can thus directly modify the neutrino mass matrix. SNSI can fake CP violation in accelerator neutrino experiments such as T2K and Hyper-Kamiokande, causing a deterioration in the sensitivities of CP measurements [3]. Compared to accelerator neutrinos, atmospheric neutrinos at SK passing through the core of the earth are more sensitive to SNSI, because the size of the effect scales linearly with the number density of fermions. Moreover, the density variation across the Earth can help identify SNSI unambiguously, because one set of neutrino mass matrix with SNSI cannot be redefined as an effective mass matrix as it can for constant density matter. We search for SNSI in data taken from the SK-I and SK-IV periods using a precision reconstruction tool “fitQun”. For the SK-I period, we re-calibrated the photomultiplier response in the detector simulation to improve the data-Monte Carlo consistency, enabling future studies with an additional 91.7 kton·year exposure of data, an increase of 36%. We present the result of the search and future prospects.

## References

- [1] K. M. Patton, *et al.*, The Astrophysical Journal, **851**, 6 (2017), doi: 10.3847/1538-4357/aa95c4
- [2] S. Abe, *et al.*, The Astrophysical Journal, **973**, 140 (2024), doi: 10.3847/1538-4357/ad5fee
- [3] A. Medhi, *et al.*, JHEP, **01**, 079 (2023), doi: 10.1007/JHEP01(2023)079

# 宇宙再結合期におけるモデルの修正が ハッブル定数の不一致問題に与える影響

天体核研究室      三浦大志

**Abstract** Modified recombination models have recently been studied as potential candidates for resolving the Hubble tension. This study demonstrates that the Hubble tension can be further alleviated by incorporating the spectral running of primordial scalar perturbations or by modifying the visibility function to extend the models.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

$\Lambda$ CDM モデルはこれまで標準宇宙論として多くの観測結果を説明してきたが、近年そのモデルで説明できないいくつかの矛盾が指摘されている。その中でも特に注目されているのが、ハッブル定数の測定値が観測手法によって大きく異なる「ハッブル定数の不一致問題」である。超新星爆発やセファイド変光星の距離-赤方偏移関係を用いた直接測定では  $H_0 = 73.04 \pm 1.04 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  と推定されている[1]。一方で、 $\Lambda$ CDM モデルを仮定した宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の異方性による推定値は  $H_0 = 67.36 \pm 0.54 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  であり[2]、両者は約  $5\sigma$  の不一致がある。この問題は、現代宇宙論における重要な課題として議論され、多くの  $\Lambda$ CDM モデルを修正した宇宙論モデルが提案されているものの、決定的な解決策には至っていない。

この不一致問題の原因を探る上で、他の観測結果との整合性も重要となる。特に、バリオン音響振動(BAO)の観測を考慮すると、CMBの異方性から測定されるハッブル定数を大きくする場合、音波の地平線を小さくする必要があることが示唆されている[3]。この条件を満たすモデルの一つとして、宇宙再結合期の小スケールのバリオン非一様性を取り入れることで電離率を変更し、再結合時期を早める宇宙論モデルが提案されている[4]。この既存のモデルはCMBの異方性によるハッブル定数の測定値を大きくするが、不一致問題を完全には解決できず、緩和に留まることが指摘されている。この理由として、再結合時期を早めるとCMBの異方性の減衰スケールが観測データと合わなくなることが挙げられている。

本発表では宇宙の再結合期を早める宇宙論モデルにCMBの異方性における減衰スケールに関連した修正を新たに加えて、ハッブル定数不一致問題のさらなる緩和を目指す。不一致を調べるためのパラメータ推定にはマルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法を用い、CMBの異方性のデータを用いて検証する。ここで再結合期のバリオン非一様性を簡略化したモデルと、再結合期の時刻およびそれにかかる時間をパラメータとするモデルの2種類を修正前のモデルとして採用し、それぞれ次の二つの修正を行う。(a)原始スカラー揺らぎのスペクトル指数の波数依存性(ランニング)を加える。(b)光子が最後に散乱された時刻の確率を表すビジビリティ関数を修正する。パラメータ推定の結果、(a)の場合では、2種類のモデルにおいて、修正前のモデルよりも大きなハッブル定数が推定された。次に(b)の場合ではビジビリティ関数の修正の仕方に依存するが、ハッブル定数の測定値を大きくすることが可能であることが示された。すなわち、これらの再結合期を早めるモデルに修正を加えることにより、ハッブル定数の不一致問題がより緩和されることが示された。さらに、各々の修正においてBAOなどの他の観測データも追加した場合の、MCMC法でのパラメータ推定の結果についても説明する。

## References

- [1] A.G. Riess *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **934** (2022) L7.
- [2] Planck collaboration, *Astron. Astrophys.* **641** (2020) A6.
- [3] K. Jedamzik, L. Pogosian and G.-B. Zhao, *Commun. in Phys.* **4** (2021) 123.
- [4] K. Jedamzik and L. Pogosian, *Phys. Rev. Lett.* **125** (2020) 181302.

# Controlling method of gamma rays by vibrating nuclear resonant absorber and measuring method for study of quantum applications

核放射物理学研究室      山下 拓之

**Abstract** We developed a coherent control of the gamma rays by the vibrating nuclear resonant absorber and a method allowing post-measurement analysis for measuring the frequency-modulated gamma-ray waveform. This method can be applied to future studies involving X-ray quantum optics.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

The recoilless nuclear resonant scattering, known as the Mössbauer effect and developed into spectroscopy, extends the concepts of quantum optics into the range of X-rays or gamma rays with an extremely narrow bandwidth [1-4]. For example, the natural linewidth of the first excited state of  $^{57}\text{Fe}$  is 4.6 neV, which corresponds to a linewidth-to-transition-energy ratio of approximately  $10^{-13}$  for the 14.4 keV transition. X-ray quantum optics has advanced rapidly with the emergence of remarkable X-ray sources such as synchrotron radiation and X-ray free electron lasers. X-ray quantum optics is attractive because these photons with wavelengths in the sub-nanometer range have several advantages over visible or infrared light which are primarily applied in quantum optics. However, there are still many challenges to controlling X-rays or gamma rays besides the source limitation. The technique of the vibrating absorber including the Mössbauer nuclide is one efficient method for controlling X-rays or gamma rays [1].

We developed a controlling method of the gamma rays using the vibrated nuclear resonant absorber. This technique utilizes the frequency modulation of gamma rays, and the frequency-modulated gamma rays can be represented as a superposition of spectral components equally spaced by the vibrational frequency centered at the carrier frequency of the gamma rays. The intensity of these components depends on the vibrational amplitude. Since the wavelength of the gamma rays in the 10 to 100 keV range is on the order of sub-nanometers, it is necessary to control the vibrational amplitude in the sub-nanometer scale to achieve the desired sideband intensities. Furthermore, efficient control of gamma rays requires high-frequency vibration with minimal amplitude variance in the nuclei within the sample.

It was confirmed that the nuclei in the stainless-steel foil glued on the PVDF film vibrated with almost zero amplitude variance in 100  $\mu\text{m}$  diameter region by the  $^{57}\text{Fe}$  synchrotron Mössbauer spectroscopy with X-ray focusing optics. Therefore, focused synchrotron radiation can make it possible to control the gamma rays without the influence of the variance of the vibrational amplitude.

Moreover, a method was developed that allows post-measurement analysis by recording all relevant information such as photon detection and the external parameters for future studies involving X-ray quantum optics. This method was applied to demonstrate the transformation of the exponentially decaying gamma-ray waveform into the pulse train with the radioactive source. The results successfully confirmed that the phase of the gamma-ray pulse train shifted with respect to the initial phase of the vibrating absorber. By recording all relevant data from the detected photon, experimental results under different conditions could be obtained without the need to repeat similar experiments.

The method of coherent control of gamma rays using frequency modulation and the experimental technique developed in this work can be applied to future studies of X-ray quantum optics using synchrotron radiation or X-ray free electron lasers. This work is expected to accelerate the progress of X-ray quantum optics and quantum technology applications involving photons with the energy of 10 to 100 keV.

## References

- [1] F. Vagizov *et al.*, *Nature* **508**, (2014) 80-83. [2] R. Röhlberger *et al.*, *Nature* **482**, (2012) 199-203.
- [3] K. P. Heeg *et al.*, *Science*. **357**, (2017) 375. [4] S. Velten *et al.*, *Sci. Adv.* **10**, (2024) eadn9825.



# LHC-ATLAS 実験におけるマルチジェット事象を対象とした R-パリティを破る超対称性粒子の包括探索

高エネルギー物理学研究室 佐野高嶺

**Abstract** R-parity violating supersymmetry (RPV SUSY) is a promising extension of the standard model of particle physics but remains underexplored. This study develops machine learning-based methods for the inclusive RPV SUSY search in multijet events and demonstrates their effectiveness.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

超対称性 (Supersymmetry, SUSY) は多くの大統一理論で仮定される、未発見の根源的な対称性である [1]。超対称性が実在する場合、既知の素粒子と対になる新粒子 (超対称性粒子) が存在する。この超対称性粒子を実際に観測することで SUSY の存在を実験的に検証できる。超対称性粒子は数 TeV の大きな質量を持つと予想されており、直接探索できる唯一の手段が LHC 加速器による衝突実験である。これまで多くの探索実験により幅広い領域が検証されてきたが、現在まで超対称性の兆候は見つかっていない。

従来の探索実験では R-パリティと呼ばれる物理量が保存することを課した、最もシンプルな形の超対称性理論 (Minimum Supersymmetric Standard Model, MSSM) が検証されてきた。これに対し、R-パリティを破る超対称性理論 (R-parity violating SUSY, RPV SUSY) も同様に考えることができ、標準模型の有力な拡張理論である。[2]

RPV SUSY では MSSM と比較して相互作用の種類が大幅に増加するため、より多様な事象を検証する必要がある。超対称性粒子の様々な生成・崩壊過程それぞれを個別に探索する場合、事象の種類が増加した分検証が進みづらいことが課題であり、MSSM と比較して探索が進んでいない。

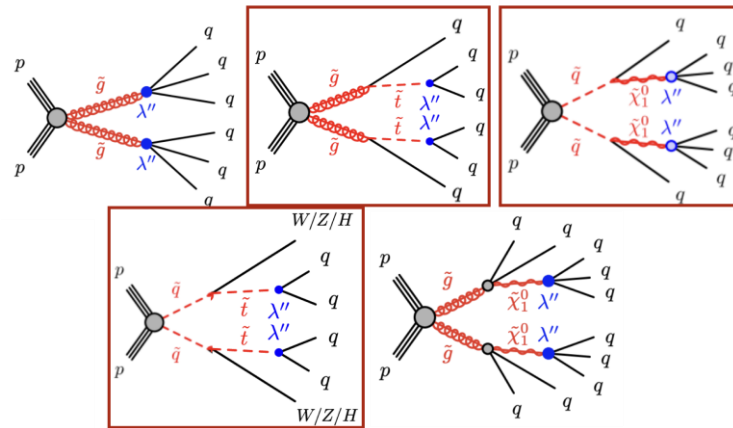


Fig. 1. Examples of diagrams covered in the study. The red lines in the diagrams indicate SUSY particles and the blue vertices show the RPV interaction. The diagrams surrounded by red lines will be covered for the first time.

本研究ではこの点を解決するために、特定の生成・崩壊過程を事前に仮定せずあらゆる過程を包括的に探索することを目指す。中でも複数のクォークを終状態に持つような事象 (マルチジェット事象) を対象とする。これらの事象は Fig. 1 のようにクォークの対となる超対称性粒子の崩壊やこれまでに探索されていない過程を多くカバーできる点で包括探索に適している。本研究では主に 2 点の手法開発が課題となる。崩壊後の粒子から崩壊前の超対称性粒子を再構成する手法と、信号事象・背景事象を選別する手法である。本研究ではそれぞれに機械学習を応用し、これらの手法を開発した。

本発表では開発したこれらの手法をシミュレーションを用いて評価した結果を報告する。

## References

- [1] Pierre Fayet, *et al.*, Adv. Ser. Direct. High Energy Phys. 26 (2016) 397-454
- [2] R. Barbier, *et al.*, Phys. Rept. 420:1-202, 2005

# Study of chaos in quantum mechanics and classical mechanics by complexity

素粒子論研究室 渡辺涼太

**Abstract** Chaos is ubiquitous, yet still not fully understood. We first propose a novel bound on energy dependence of the Lyapunov exponent. We also reveal in billiard systems that the variance of the Lanczos coefficients, which is used to compute the Krylov complexity, reflects the chaoticity of the system.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

Since its discovery in deterministic classical mechanics, chaos has been studied in various fields, including not only classical mechanics but also more fundamental quantum mechanics. However, compared to classical chaos, the concept of quantum chaos remains obscure, and various characterizations are still being investigated. One of them, the out-of-time-order correlator (OTOC), has attracted attention as a measure of the quantum counterpart of sensitive dependence on the initial condition in classical chaotic systems [1]. In addition to this, Krylov complexity has recently been proposed [2] as a more direct quantity to quantify the complexity of operators and quantum states, and its relationship with chaoticity has been studied. We focus on these quantities and investigate their relationship to the chaotic nature of quantum and classical systems.

In our work [3], focusing on the convergence of OTOC for finite temperature systems, we conjecture that there is an upper bound on the energy dependence of the Lyapunov exponent, a measure of sensitive dependence on the initial condition of the system. Specifically, the conjecture states that the Lyapunov exponent grows no faster than linearly in the total energy in the high-energy region. This bound is expected to apply to fairly general Hamiltonian systems. We confirm that it is satisfied in concrete examples and discuss that it is consistent with the chaos bound by Maldacena, Shenker and Stanford in the limit of large degrees of freedom.

Also, in our work [4], we study the characterization of quantum chaos using Krylov complexity with concrete chaotic systems. We begin with the stadium billiard as a typical example of the quantum mechanical system obtained by quantizing a classically chaotic system, and numerically evaluate Krylov complexity for operators and states. Despite no exponential growth of the Krylov complexity, we find a clear correlation between variances of Lanczos coefficients and classical Lyapunov exponents, and also a correlation with the statistical distribution of adjacent spacings of the quantum energy levels. This shows that the variances of Lanczos coefficients can be a measure of quantum chaos. The universality of the result is supported by our similar analysis of Sinai billiards.

## References

- [1] J. Maldacena, S. Shenker, and D. Stanford, JHEP 08 (2016) 106.
- [2] D. E. Parker, X. Cao, A. Avdoshkin, T. Scaffidi, and E. Altman, Phys. Rev. X 9 (2019) 4, 041017.
- [3] K. Hashimoto, K. Murata, N. Tanahashi, and R. Watanabe, Phys. Rev. D 106 no. 12, (2022) 126010.
- [4] K. Hashimoto, K. Murata, N. Tanahashi, and R. Watanabe, JHEP 11 (2023) 040.