

平成 2 9 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

(平成 3 0 年 1 月 2 2 日)

物 理 学 第 二 分 野

# D3 発 表 会

日時 平成30年1月22日(月) 8時30分～  
場所 理学研究科5号館 525号室  
発表時間 15分+5分(質問)

---

---

## 《目 次》

1 . Probabilistic eccentricity evolution of stars around shrinking massive black hole binaries	岩佐 真生	(8:30)
2 . Critical behavior of the matrix models generating 3D random volumes	梅田 直弥	(8:50)
3 . Chiral Primordial Gravitational Waves Sourced by Axion-Gauge Couplings	小幡 一平	(9:10)
4 . 理研RIBFにおける重イオン衝突実験で探る 高密度原子核物質の対称エネルギー	金子 雅紀	(9:30)
5 . Study of Acceptance Improvement for $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Search	上路 市訓	(9:50)
6 . The study on quantum field theories from numerical approaches	川井 大輔	(10:10)
7 . 't Hooft anomaly, global inconsistency, and some of their applications	菊池 勇太	(10:30)
8 . 核ガンマ線イメージングスペクトロスコープの開拓	岸本 哲朗	(10:50)

9 . ATLAS 実験における弱ボソン対に崩壊する共鳴状態の  
セミレプトニック終状態での探索 救仁郷 拓人 (11:10)

10 . Study of the neutrino mass hierarchy with the  
atmospheric neutrino data in Super-Kamiokande IV 江 森 (11:30)

11 . Deformation of  $N=4$  SYM with space-time dependent  
couplings 崔 在旺 (11:50)

---

午 後

---

12 . 場の理論におけるエントロピーの数値計算法の開発と  
それに基づく相対論的重イオン衝突での熱化機構の  
解析 築地 秀和 (12:40)

13 . 高強度レーザー照射による金属ワイヤー導波路上への  
テラヘルツ表面波発生 寺本 研介 (13:00)

14 . J-PARC KOTO実験における $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  崩壊探索の  
背景事象の研究 中桐 洸太 (13:20)

15 . ニュートリノ振動におけるニュートリノ反応モデルの  
系統誤差の評価と振動パラメータの精密測定 仲村 佳悟 (13:40)

16 . 加速膨張宇宙とブレーンワールドモデル 西 雅人 (14:00)

17 . Black hole microstates with a new constituent 朴 敏奎 (14:20)

18 . Toward a precision cosmological test of gravity from  
redshift-space bispectrum based on perturbation theory 橋本 一彦 (14:40)

19 .	反ミューオンニュートリノと核子のパイ中間子の生成を伴わない荷電カレント反応断面積の測定	林野 竜也	(15:00)
20 .	Simulating Extreme Spacetimes on the Computer	FEDROW, Joseph Mathew	(15:20)
21 .	超新星残骸 $\gamma$ -Cygniからのガンマ線放射の観測	増田 周	(15:40)
22 .	Investigation of the Formation Process of Recombining Plasmas in the Galactic Supernova Remnants with Suzaku X-ray Observatory	松村 英晃	(16:00)
23 .	連星中性子星合体GW170817はrプロセス元素の起源となりえるか?	松本 達矢	(16:20)
24 .	Analysis of $\Lambda(1405)$ based on chiral SU(3) dynamics	宮原 建太	(16:40)
25 .	$\Lambda$ cN interaction from lattice QCD and its application to $\Lambda$ c hypernuclei	宮本 貴也	(17:00)
26 .	MAIKoアクティブ標的を用いた巨大双極子共鳴領域における $^4\text{He}$ 光分解反応の断面積測定	村田 求基	(17:20)
27 .	Role of axial anomaly and nesting in the inhomogeneous chiral phase	吉池 遼	(17:40)
28 .	Scrambling and Complexity in AdS/CFT and Black Holes	渡邊 賢人	(18:00)

# Probabilistic eccentricity evolution of stars around shrinking massive black hole binaries

天体核研究室      岩佐真生

**Abstract** Based on the secular perturbation theory, we study how shrinking massive black hole binaries affect the orbital evolution of star clusters. We find that the eccentricity of stars could show the sharp transitions, depending on initial conditions.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

Massive black hole (MBH) binaries are considered to be formed after mergers of galaxies, and are one of the most important targets for the laser interferometer space antenna (LISA). By detecting gravitational waves from MBH binaries, we will be able to examine gravitational theories in the strong field regime, in addition to astrophysical information related to galaxy formation and evolution. Meanwhile, a MBH is expected to have associated star clusters. It has been pointed out that the infall rates of stars would be significantly enhanced for MBH binaries, compared with single MBHs. The infalling stars also emit gravitational waves and electromagnetic waves, and will work as key probes to study MBHs. Here, the Lidov-Kozai mechanism may play an important role.

The Lidov-Kozai mechanism is a well-known process in celestial mechanics, and works for inclined hierarchical triple systems. In the present case, a MBH and a near by star form the inner binary and the secondary MBH is the outer perturber. In the Lidov-Kozai mechanism, the inclination and the inner eccentricity oscillate due to the exchange of angular momenta between the inner and outer orbits. We call this the Lidov-Kozai mechanism. In some cases, the inner eccentricity of the star can be excited to  $\sim 1$ , and stars can closely approach MBHs.

The Lidov-Kozai mechanism is caused by the tidal force of the outer perturber, and the resultant inner apsidal precession is crucially important. But, non-Keplerian potentials can suppress the Lidov-Kozai mechanism by generating additional apsidal precessions. Therefore, if the outer body is far away, and the apsidal precession is dominated by other non-Keplerian potentials, the inner eccentricity could not be amplified appreciably.

For our hierarchical triple systems involving MBH binaries, general relativistic corrections and the potential of nuclear star clusters around each MBH correspond to such non-Keplerian potentials. In the long run, the distance between two MBHs will shrink due to dissipative effects such as dynamical friction, scattering of stars and gravitational wave emissions. Therefore, though initially suppressed, the Lidov-Kozai mechanism could be gradually effective, competing with other non-Keplerian potentials. However, this transition has not been investigated adequately.

In my talk, we examine how the "slow" contraction of the outer massive black hole affects the star cluster. Based on the secular theory, we find that the eccentricities of the stars could show sharp transitions, depending strongly on their initial conditions. By examining the phase-space structure of an associated Hamiltonian, we show that these characteristic behaviors are partly due to a probabilistic bifurcation at a separatrix crossing.

## References

- [1] Mao Iwasa & Naoki Seto, 2017, MNRAS, 472, 1600.
- [2] Mao Iwasa & Naoki Seto, 2016, Phys Rev D, 93, 124024.

# Critical behavior of the matrix models generating 3D random volumes

素粒子論研究室      梅田直弥

**Abstract** We propose a new class of models that generate three-dimensional random volumes, where each configuration consists of triangles glued together along multiple hinges. The models have the sign problem for numerical study, and we develop the generalized Lefschetz thimble method by implementing the parallel tempering algorithm.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

The worldvolume theory of membrane is mathematically equivalent to three-dimensional quantum gravity coupled to matter fields corresponding to the target space coordinates of embedded membrane. We propose a class of models, “triangle-hinge models”, that generate three-dimensional random volumes, where each configuration consists of triangles glued together along multiple hinges [1]. Although most of the diagrams represent configurations which are not manifolds, we show that the set of possible diagrams can be drastically reduced such that only (and all of the) three-dimensional manifolds with tetrahedral decompositions appear, by introducing a color structure and taking an appropriate large- $N$  limit. We further introduce matter degrees of freedom to the models by coloring simplices in a way that they have local interactions [2]. We also define unoriented membrane theories in terms of tetrahedral decompositions, and then realize them as triangle-hinge models [3].

Triangle-hinge models can be redefined so that they give finite free energies without changing the original perturbation series. We study the phase structure of the models numerically, but the restriction of the diagrams to tetrahedral decompositions makes the action complex-valued, and the complexified model suffers from the sign problem in the large- $N$  limit. We use the generalized Lefschetz thimble method [4], which is one of the promising methods to solve the sign problem. However, this method is known to suffer from a multimodal problem, and thus we improve it by implementing the parallel tempering method, where the flow time of an antiholomorphic gradient flow is used as a tempering parameter [5]. We then study the phase structure of the complexified triangle-hinge model. Our parallel tempering algorithm works well, but it turns out that a large amount of computational cost is still required to make a definite statement on the phase structure of the model.

In order to reduce the computational cost, it is generally important to carefully choose the set of tempering parameters. We define for a given Markov chain Monte Carlo algorithm a distance between two configurations that quantifies the difficulty of transition in the configuration space [6]. The distance enables us to make the above adjustment in a geometrical way. We also argue that an anti-de Sitter-like geometry naturally emerges when we consider highly multimodal action with a large number of degenerate vacua.

## References

- [1] M. Fukuma, S. Sugishita and N. Umeda, JHEP **1507** (2015) 088
- [2] M. Fukuma, S. Sugishita and N. Umeda, PTEP **2016** (2016) no.5, 053B04
- [3] M. Fukuma, S. Sugishita and N. Umeda, PTEP **2016** (2016) no.7, 073B01
- [4] A. Alexandru, G. Basar, P. F. Bedaque, G. W. Ridgway and N. C. Warrington, JHEP **1605**, 053 (2016)
- [5] M. Fukuma and N. Umeda, PTEP **2017**, no. 7, 073B01 (2017)
- [6] M. Fukuma, N. Matsumoto and N. Umeda, JHEP **1712** (2017) 001

# Chiral Primordial Gravitational Waves Sourced by Axion–Gauge Couplings

天体核研究室 小幡 一平

**Abstract** We study a cosmological mechanism of generating parity-violating primordial gravitational waves sourced by gauge fields coupled to a string axion during the inflationary period. We develop several models of axionic inflation with gauge fields which predict chiral gravitational waves potentially observable with future gravitational wave detectors [1][2]. © 2018 Department of Physics, Kyoto University

In the conventional inflationary scenario, primordial gravitational waves are produced by vacuum fluctuations of space-time being stretched out and getting classicalized across the Hubble horizon during inflation. This mechanism is common on the relevant scales discussed at inflationary age, so its amplitude has almost statistically scale-invariant and parity symmetric features. However, cosmic microwave background (CMB) observations so far show no evidence of primordial gravitational waves through the imprint of polarization of B-mode in CMB photons. Based on this fact, its amplitude should be tiny even on smaller scales where gravitational wave interferometers are going to probe, if the dominant contributions of gravitational waves are vacuum fluctuations. In addition to that, we might not be able to obtain sufficient information to search for fundamental physics in the early universe only by means of the amplitude and scale dependence of tensor modes.

After giving a short review of above standard inflationary pictures, we suggest another possibility to alter those pessimistic situations by developing an axionic inflation with gauge fields, in the case of both Abelian and non-Abelian gauge groups. The key phenomenon to understand is that the rolling axion amplifies one helicity mode of gauge particles via its parity-violating interaction, and hence particle production of gauge field occurs. Remarkably, the enhanced gauge field creates the parity-violating tensor power spectrum during inflation.

Firstly, we study the mechanism of generating chiral primordial gravitational waves sourced by U(1) gauge field at its quantum loop effect, and explore the possibility of their detection with future laser interferometers or pulsar timing array missions. There, we show that particle production of the gauge field also amplifies scalar modes and then leads to an overproduction of primordial black holes in our present universe. We propose a model which avoids such observational constraints by introducing many U(1) gauge sectors coupled to an axion.

Next, we also develop an axionic inflation with SU(2) gauge field called “Chromo-Natural inflation”, and find that this scenario predicts chiral gravitational waves sourced by gauge field at linear level, while they are produced too much to satisfy the current CMB data. In order to mend this conflict, we finally extend a model of Chromo-Natural inflation by introducing the dilatonic field which is kinematically coupled with gauge field. We discuss the possibility of Chromo-Natural inflation which provides testable chiral primordial gravitational waves at intermediate scales planned to observe by gravitational wave detectors, with satisfying the consistency with large scale CMB observations.

## References

- [1] I. Obata and J. Soda, Phys. Rev. D 93, no. 12, 123502 (2016).
- [2] I. Obata, JCAP 1706, no.06, 050 (2017).

# 理研 RIBF における重イオン衝突実験で探る 高密度原子核物質の対称エネルギー

原子核・ハドロン物理学研究室 金子雅紀

**Abstract** Charged  $\pi$  meson from intermediate energetic heavy-ion collisions is proposed as a good probe to investigate the nuclear symmetry energy at supra-saturation densities. At RIKEN-RIBF, we measured charged particles and neutrons emitted from four kinds of Sn+Sn isotopic reactions at 270 MeV/A. In this presentation, analysis status will be presented.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

核物質の状態方程式(EOS)は中性子星の内部構造や超新星爆発ダイナミクスなどといった、原子核物質のバルクな性質を記述する上で重要である。特に、中性子過剰な環境における寄与が大きい対称エネルギーは、状態方程式を決定する上で大きな不定性を持つ要素の一つである。絶対零度極限におけるEOSの表式は、核子数密度  $\rho = \rho_n + \rho_p$  とアイソスピン非対称度  $\delta = (\rho_n - \rho_p)/\rho$  を変数として、1核子あたりのエネルギーを以下のような展開形で表す。

$$\mathcal{E}(\rho, \delta) = \mathcal{E}(\rho, \delta \sim 0) + \mathcal{S}(\rho)\delta^2 + \mathcal{O}(\delta^4)$$

ここで、 $\rho_{n(p)}$ は中性子(陽子)数密度であり、 $\delta$ の二次の係数として現れる  $\mathcal{S}(\rho)$ が対称エネルギーである。

現在のところ、原子核飽和密度( $\rho_0 \sim 0.16$  /fm<sup>3</sup>)以下の領域では主に原子核実験により制限が与えられているが、高密度領域では不定性が大きい[1]。理論的には、数百 MeV/核子における重イオン衝突からの荷電 $\pi$ 中間子比が高密度領域における対称エネルギーの有用なプローブとなることがBao-An Liらにより指摘されている[2]。しかしながら、中間エネルギー重イオン衝突における核子やクラスターの運動、 $\pi$ 中間子生成・吸収プロセスの取り扱いには特有の難しさがあり、対称エネルギーに対する感度はモデル依存性が非常に大きい。そのため、複数の輸送モデル計算による比較検討が進められている[3]。また、高密度核物質をプローブする実験的取り組みとして、ドイツ GSI において複数種類の同種核衝突系からの荷電 $\pi$ 中間子比が測定された[4]が、クーロン力の影響が混入しているために対称エネルギーの寄与を正しく引き出せているかどうかは議論の余地がある。

我々は理研 RIBF により供給される様々な種類のスズ同位体ビームを用いることで、 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 、 $^{108}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 、 $^{112}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$ 、 $^{124}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$  といった中性子数のみが異なる衝突系を比較する系統的測定を行った。本測定はクーロン力の影響をキャンセルすることで、対称エネルギーに対してより高い感度を持つことが期待される。特に、 $\pi$ 中間子は核子-核子衝突により生じる  $\Delta(1232)$ の崩壊を通して生成されるため、データ取得トリガーにより中心-準中心衝突事象を選択することで高統計の測定を目指した。ビームエネルギーはいずれの衝突系も 270 MeV/核子であり、想定される衝突時の到達密度はおよそ  $2\rho_0$  である。衝突事象から放出される荷電粒子は、SAMURAI スペクトロメータ内に S $\pi$ RIT-TPC[5]を設置して運用することで粒子のエネルギー損失-運動量分析を行い識別する。また、中性子は前方 30°の位置に設置した NeuLAND demonstrator[6]によって検出する。今後は衝突径数に対する測定感度を決定した上で、荷電 $\pi$ 中間子比の導出を目指す。本発表では、本実験の概要と解析の現状について報告する。

## References

- [1] M. B. Tsang *et al.*, Phys. Rev. C **86**, 015803 (2012).
- [2] B. A. Li *et al.*, Phys. Rev. C **71**, 014618 (2005).
- [3] J. Xu *et al.*, Phys. Rev. C **93**, 044609 (2016).
- [4] W. Reisdorf *et al.*, Nucl. Phys. A **781**, 459 (2007).
- [5] R. Shane *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A **784**, 513 (2015).
- [6] K. Boretzky *et al.*, GSI Rep. 2015-1, 200-202 p. (2015).



# Study of Acceptance Improvement for $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Search

高エネルギー物理学研究室

上路市訓

**Abstract** A new analysis method is proposed to improve the signal acceptance in the KOTO experiment searching for the  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  decay. In the experiment, acceptance loss caused by the high rate operation of the detectors for background suppression limits the experimental sensitivity.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

The KOTO experiment aims to observe a rare neutral kaon decay,  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ . The decay is well suppressed in the Standard Model of elemental particle physics, whose branching fraction is estimated to be  $(3.00 \pm 0.30) \times 10^{-11}$  with small theoretical uncertainty of 1% [1]. Figure 1 shows the detection principle of  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ . The  $\pi^0$  immediately decays into two photons, hitting an electromagnetic calorimeter composed of undoped cesium iodide (CsI) crystals. Since the neutrinos cannot be detected, only the two photons are detectable, where their center of mass has finite transverse momentum. Other decays of  $K_L^0$  such as  $K_L^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  would be possible backgrounds (Fig. 2), which can be rejected by catching extra particles with the detectors surrounding the decay region, called “veto counters”.

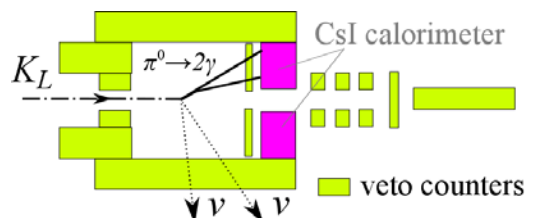


Figure 1 Principle of KOTO experiment

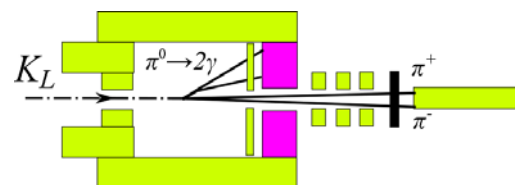


Figure 2 Example of background event

Since any signal in veto counters is assumed to be associated with a background event, accidental activities on the veto counters lead to a signal loss, called “accidental loss”, which is estimated to be 76% for the data taken in 2015. The accidental loss is proportional to the hit probability in veto counters determined by a product of counting rate and time window for synchronization with the CsI calorimeter (“veto window”). To maximize the acceptance of  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  by reducing the accidental loss, the veto window should be set as narrow as possible.

Narrower veto window can increase detection inefficiency caused by overlapped pulses of signal waveforms in the veto counters, called “masking inefficiency”. Figure 3 shows an example, where a preceding pulse outside the veto window hides the second pulse inside the veto window. To reduce the masking inefficiency, a new analysis method has been developed, where each overlapped pulse (the black dotted graph in Fig. 4) is decomposed into multiple single pulses (the red and green graphs in Fig. 4).

In this talk, the analysis status of acceptance improvement for the  $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  search in the KOTO experiment will be presented. The main topic is the development of the waveform decomposition method and its pulse finding performance for the suppression of masking inefficiency with narrower veto window.

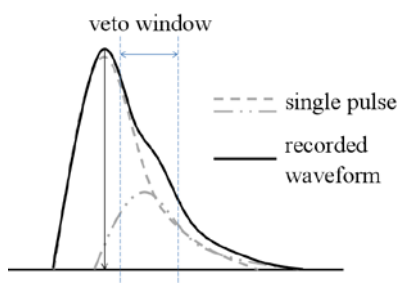


Figure 3 Example of masking inefficiency

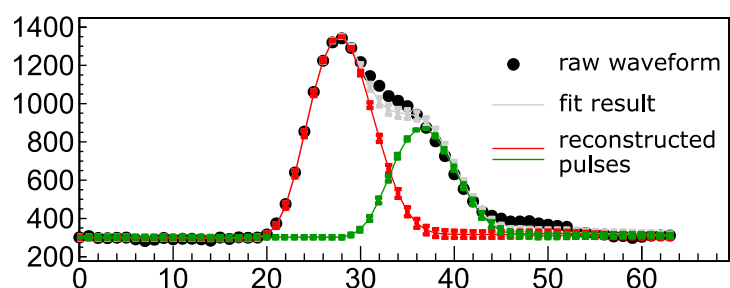


Figure 4 Example of waveform decomposition

## References

- [1] A. J. Buras, D. Buttazzo, JHEP **1511**, 033 (2015).

# The study on quantum field theories from numerical approaches

素粒子論研究室      川井 大輔

**Abstract** We present two studies of quantum field theory with numerical computations. In the study on lattice QCD, the method to obtain the phase shift of  $\pi\pi$  scattering in  $I = 1$  channel from the combination of the HAL QCD method and LapH smearing is considered. With the method, we extracted the signal of  $\rho$  resonance from the HAL QCD method for the first time. For the study of the chaotic solution in the classical string and BMN matrix model. We show there are chaotic solutions in these theories, and discuss the possible indication for the gauge theories in the strong coupling.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

Since the most of the study on the quantum field theory today needs non-perturbative approach, the good command on the numerical computations is being more and more important. Moreover, due to the improvement on the computational resource such as high performance CPU and large volume memories, the numerical simulation is available in the situation very close to the real world. In this sense, numerical simulation is no longer a supportive tool for the study but an important branch of science. In this thesis, we consider two studies on quantum field theory with numerical computations : (1) the phase shift of the  $\pi\pi$  scattering and extraction of  $\rho$  resonance signal and (2) chaotic solution of superstring theory and M-theory. These studies cannot be conducted without numerical simulations. In the study of scattering phase shift, the method to obtain the phase shift in  $I = 1$  channel from the combination of the HAL QCD method and Laplacian-Heaviside (LapH) smearing is considered. Before we try this method for the  $\pi\pi$  scattering in  $I = 1$  channel, we investigated the scheme independence of the HAL QCD potentials at pion mass  $m_\pi = 870$  MeV. It is found the local potentials calculated from the combination of the HAL QCD method and LapH smearing have scheme dependence while the scheme independence in the HAL QCD method is proved if non-local potential is employed. We found that the scheme dependence of the physical observables such as phase shift, resonant state mass and decay width can be reduced by considering next-to-leading (NLO) order term in derivative expansion [1]. With this knowledge, we computed the scattering phase shift of  $\pi\pi$  scattering in  $I = 1$  channel. Since the NLO potential cannot be extracted because of insufficient number of configuration, the phase shift quantitatively deviates from the one obtained from Lüscher's finite volume method. However, the phase shift have the sign of  $\rho$  resonance. The signal of mesonic resonant state is obtained from HAL QCD method for the first time [2].

In the study of the chaotic solution in the superstring theory and M-theory, we show there are chaotic solutions in a near Penrose limit of  $AdS_5 \times T^{1,1}$  and BMN matrix model with the knowledge of non-linear dynamics. According to the AdS/CFT correspondence, there is an operator in gauge theory side which is dual to the chaotic solutions in the classical string. We discuss the possible indication for the gauge theories in the strong coupling [3,4].

## References

- [1] D. Kawai *et al.* (the HAL QCD Collaboration), arXiv : 1711.01883 [hep-lat].
- [2] D. Kawai (for the HAL QCD Collaboration), accepted in EPJ Web of Conference.
- [3] Y. Asano, D. Kawai and K. Yoshida, JHEP 06 (2015) 191.
- [4] Y. Asano, D. Kawai, H. Kyono and K. Yoshida, JHEP 08 (2015) 60.

# 't Hooft anomaly, global inconsistency, and some of their applications

Nuclear Theory Group    Yuta Kikuchi

**Abstract** We study the 't Hooft anomaly and global inconsistency, which are obstructions to gauging the global symmetry, involving discrete symmetries and higher-form symmetries. Their consequences are discussed in detail via the UV/IR matching argument. Several examples are given aiming at extracting nonperturbative data of infrared structure of QCD.

©Department of Physics, Kyoto University

The 't Hooft anomaly, an obstruction to promoting global symmetries to local gauge symmetries, is one of the most powerful tools to study the infrared properties of the quantum field theories [1]. The UV/IR anomaly matching condition claims that, provided the global symmetry has an 't Hooft anomaly in the ultraviolet theory, the infrared theory reached via renormalization group flow must reproduce the same 't Hooft anomaly, and particularly, the realization of the symmetric gapped state without topological order is strictly forbidden in the infrared theory. Thus, the existence of 't Hooft anomalies, combined with the anomaly matching condition, imposes strong constraints on the low-energy effective theories. Recent remarkable developments enable us to deal with 't Hooft anomalies for wider class of global symmetries such as discrete symmetries and higher-form symmetries [2,3].

We present 't Hooft anomalies and global inconsistencies, the latter of which are other type of obstructions to gauging the global symmetry, involving discrete symmetries and higher-form symmetries. Consequences of the 't Hooft anomaly and global inconsistency are discussed in detail via the UV/IR anomaly matching argument. Several examples are given in increasing difficulty but desirability for the purpose of extracting nonperturbative data of infrared structure of quantum chromodynamics (QCD). To be specific, we deal with quantum mechanical models, the pure Yang-Mills and bifundamental gauge theories with the theta angles, and QCD and QCD-like theories at finite temperatures following our recent papers [4,5,6]. The various quantum mechanical models serve as pedagogical illustrations of 't Hooft anomalies, global inconsistencies, and their UV/IR matching arguments. Their consequences manifest themselves as level degeneracies in energy spectra, that are protected from symmetry-preserving perturbations. While the pure Yang-Mills and bifundamental gauge theories with topological terms share a lot of features in common with the quantum mechanical models, additional concepts are introduced with a tricky global symmetry: the center symmetry, which is nowadays understood as a discrete one-form symmetry [7]. To derive the 't Hooft anomaly and global inconsistency involving the center symmetry, we describe the generalized global symmetry along with certain types of topological quantum field theories. Combining all these ingredients together, we finally attack the 't Hooft anomaly in QCD. Also, massless QCD with twisted boundary conditions at finite temperatures  $T$  and chemical potentials  $\mu$  is discussed, in which, despite the appearance of anomalies in the vacuum, its existence at finite temperatures is totally nontrivial because of the circle compactification in the imaginary-time direction. The outcome is quite remarkable: the symmetric gapped phase is strictly excluded in so called massless  $\mathbb{Z}_N$ -QCD, that is the QCD with flavor-twisted boundary condition in the imaginary time direction, at any temperature and chemical potential, i.e., the persistent order is realized for this theory at finite  $(T, \mu)$ . Furthermore, it turns out that an 't Hooft anomaly and a global inconsistency for certain global symmetry are responsible for the Roberge-Weiss transition at finite imaginary chemical potential.

## References

- [1] G. 't Hooft, Recent Developments in Gauge Theories. Proceedings, Nato Advanced Study Institute, Cargese, France, August 26 - September 8, 1979, vol. 59, pp. 135–157. 1980.
- [2] A. Kapustin and R. Thorngren, *Phys. Rev. Lett.* **112** no. 23, (2014) 231602.
- [3] D. Gaiotto, A. Kapustin, Z. Komargodski, and N. Seiberg, *JHEP* **05** (2017) 091.
- [4] Y. Tanizaki and Y. Kikuchi, *JHEP* **06** (2017) 102.
- [5] Y. Kikuchi and Y. Tanizaki, *PTEP* **2017** (2017) 113B05.
- [6] Y. Tanizaki, Y. Kikuchi, T. Misumi, and N. Sakai, [arXiv:1711.10487 \[hep-th\]](#).
- [7] D. Gaiotto, A. Kapustin, N. Seiberg, and B. Willett, *JHEP* **02** (2015) 172.

# 核ガンマ線イメージングスペクトロスコピーの開拓

宇宙線研究室 岸本哲朗

**Abstract** Nuclear gamma-rays are a good probe for astrophysics. However, difficulties in sub-MeV/MeV gamma-ray astronomy hindered successful observation. Therefore, we have developed an Electron-Tracking Compton Camera to overcome the difficulties. We report the result of a beam test in which we performed to check the capability of nuclear gamma-ray imaging spectroscopy.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

核ガンマ線は、超新星爆発における元素合成などを調べるための良いプローブになるためこれまでも観測が試みられてきた。しかしながら、その観測領域となる sub-MeV/MeV 領域においては、これまで主として利用されてきたコンプトン法に問題があり、方向決定精度が低くなってしまっていた。このため、放射化した検出器からのガンマ線や、視野外から漏れこむ信号など、多量の雑音を除去できず、十分な有意度での観測をするには至っていない。そこで我々はこれらの困難を克服するために電子飛跡検出型コンプトンカメラ(以後、ETCC)を開発し、他のエネルギー領域と同様な幾何光学に基づくイメージング法を世界で初めて確立し、定量性、低雑音を実現した[1]。ETCC はガス TPC とシンチレータを組み合わせたコンプトンカメラであり、粒子識別能力及びイメージング能力を有する。我々はこれらの特性を利用すれば宇宙のような高雑音環境下でも、核ガンマ線の正確なイメージング分光が可能になると考え、その可能性を探ってきた。

第一歩として我々は 2013 年に大阪大学 RCNP にて試験を行った。140 MeV の陽子ビームと水ターゲットを利用し、高雑音環境を作り、その環境下でガンマ線源(Cs137 0.8 MBq@1m)からのガンマ線を検出することに成功している[2]。また鉄ターゲットに利用し、核ガンマ線の観測を試み、その兆候を得ることに成功している。

第二歩として我々は 2016 年 10 月に再び大阪大学 RCNP にて試験を行った。2013 年からは検出器自体の有効面積の増大が図られたほか、飛跡解析の改善によりイメージング能力が向上している。また前回ターゲットが遠すぎたためイメージングの検証としては問題があったので大幅に近づけた。セットアップを Fig. 1 に示す。我々は実際の天体を模擬すべく、鉄ターゲットを検出器正面に配置し、そこに 80 MeV の陽子ビームを照射した。これにより鉄からの核ガンマ線ガンマ線のスペクトル(Fig. 2)およびイメージ(Fig. 3)を得ることに成功している。今回はその結果について報告する。

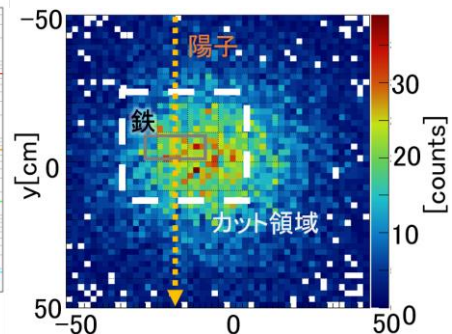
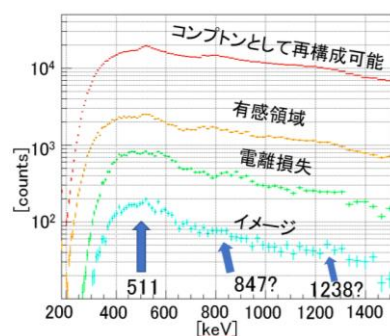
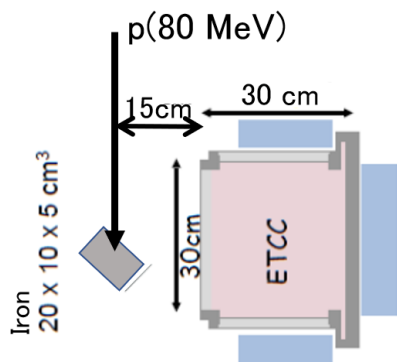


Fig. 1. Setup of the experiment.

Fig. 2. Spectrum of gamma-rayss from Fe.

Fig. 3. Reconstructed image of gamma-rays.

## References

- [1] T. Tanimori *et al.*, *ApJ*, **810** (2015) 28.
- [2] Y. Matsuoka *et al.*, 2015 *JINST* **10** C01053

# ATLAS 実験における弱ボソン対に崩壊する共鳴状態の セミレプトニック終状態での探索

高エネルギー物理学研究室 救仁郷拓人

**Abstract** Many theories proposed for extensions to the Standard Model predict diboson resonances. We present a search for a charged or neutral diboson resonance in the semileptonic final channel. The search makes use of a series of data-driven calibrations to the hadronically decaying W/Z bosons that are highly-boosted to improve sensitivity.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

標準模型における未解決の問題を解決するために提案されている多くの理論のうち、例えば複合ヒッグスモデルや余剰次元のモデルなどにおいて、2つの弱ボソンに崩壊する新粒子が予言されている。モデル毎に新粒子の崩壊モードやスピンなどが異なるため、ATLAS, CMS 実験では考えられる多くの終状態において包括的な探索を行っているが、今のところ新粒子による弱ボソン対共鳴は見つかっていない。

本講演では、WW または WZ ボソン対に崩壊する共鳴状態のうち、片方の W ボソンがレプトン崩壊をし、もう片方の W または Z ボソンがハドロン崩壊をするセミレプトニック終状態の解析結果について発表する。大きい質量の共鳴状態では W/Z ボソンは高い運動量を持っており、そのハドロン崩壊から生じる2つのクォークは近接する。この場合は2つのクォークを別々のジェットとして再構成することが困難なため、1つの大半径ジェットとして再構成する。小さい質量ではクォーク間は十分に離れているため、2本の小半径ジェットとして再構成する。このように、WW/WZ 対の質量によって2つのモードに分けて 300 GeV から 5 TeV までを探索した。講演者は、ATLAS 実験で 2015, 2016 年に取得した重心系エネルギー 13 TeV、積分ルミノシティ 36.1 fb<sup>-1</sup> のデータを用いた解析を行い、セミレプトニック終状態における弱ボソン対共鳴状態探索の最新結果を発表した [1]。新粒子に起因する顕著なイベントの超過は見つからず、系統誤差を削減することで新粒子の発見感度を向上することを目指した。

高い質量の共鳴状態探索において支配的な系統誤差は、バックグラウンドのモデリングに起因する誤差と、W/Z ボソンのハドロン崩壊により生じる大半径ジェットのエネルギー測定精度に起因する誤差である。新粒子の発見感度を改善するために実データを用いた大半径ジェットのエネルギー較正 (in-situ calibration) を進めており [2]、これによって系統誤差を削減できる。本講演では、大半径ジェットのエネルギーを精度良く測定したことで弱ボソン対共鳴探索の解析に見込まれる改善についても発表する。

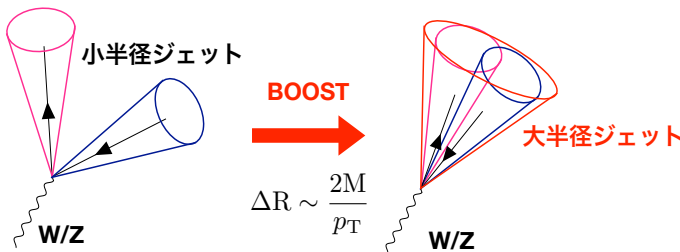
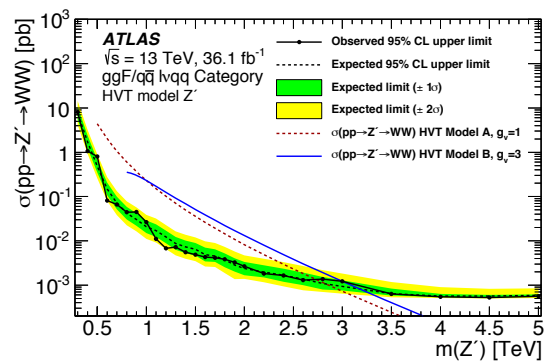


Fig. 1. Schematic view of the reconstruction of a hadronically decaying W/Z boson. In the hadronic decay of a highly-boosted W/Z boson, the opening angle between the quarks is low, thus both quarks can be identified as a single large-R jet.



References

Fig. 2. Observed and expected cross-section upper limits at the 95% confidence level for WW production as a function of the resonance mass [1].

- [1] ATLAS Collaboration, “Search for WW/WZ resonance production in  $l \nu qq$  final states in pp collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector”, CERN, 2017, arXiv: [1710.07235 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1710.07235).
- [2] ATLAS Collaboration, “In-situ measurements of the ATLAS large-radius jet response in 13 TeV pp collisions”, tech. rep. ATLAS-CONF-2017-063, CERN, 2017, url: <https://cds.cern.ch/record/2275655>.

# Study of the neutrino mass hierarchy with the atmospheric neutrino data in Super-Kamiokande IV

高エネルギー物理学研究室 江 森

**Abstract** A study of the neutrino mass hierarchy with the atmospheric neutrino data reconstructed by new algorithm in Super-Kamiokande IV is presented. The event selection is optimized for sensitivity to the neutrino mass hierarchy. Current analysis status and prospect will be presented.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

Super-Kamiokande(Super-K, SK) is a large underground water Cherenkov detector located in the Kamioka mine in Mt. Ikenoyama, Gifu Prefecture, Japan. The detector consists of a water tank holding 50 kt of ultra-pure water, and the photomultiplier tubes (PMT) lining the tank interior detect the Cherenkov radiation which is produced by charged particles which propagate in the water.

A new algorithm, named fiTQun, employs a maximum likelihood method using the charge and time information that is observed by the PMTs to reconstruct particle types and kinematics in the detector. The algorithm is based on the methods which are developed for the MiniBooNE experiment [1]. Comparing with the conventional reconstruction algorithm: APfit, fiTQun shows better performance including vertex resolution (Fig.1), PID (Fig. 2) etc.[2]

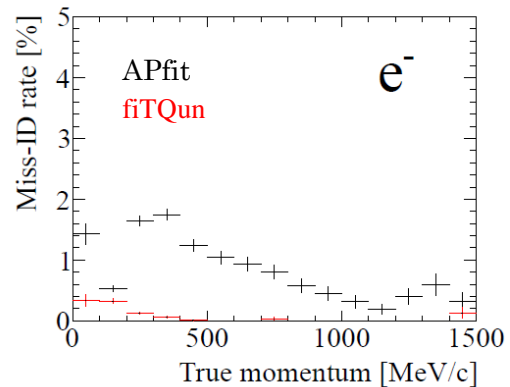
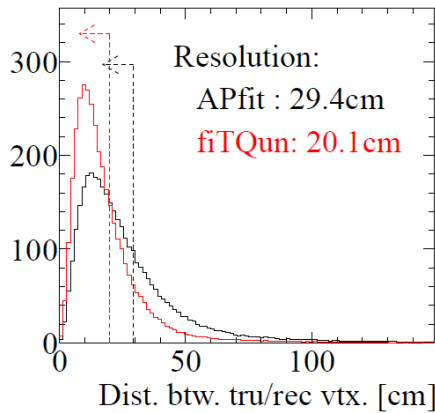


Fig. 1 Vertex resolution of single-ring electron      Fig. 2 Miss PID rate of single-ring electron

A study of the neutrino mass hierarchy (MH) with the atmospheric neutrino data reconstructed by fiTQun in Super-Kamiokande IV will be discussed in this talk. The new reconstruction algorithm fiTQun helps improve the sensitivity to mass hierarchy from two aspects: the purity of samples and statistics. Thanks to better PID ability of fiTQun, the purity of corresponding interaction channels in each subsample is increased. As for the statistics, the fiducial volume (FV) is expanded from 22.5 kton to 29.7 kton by changing the FV cut using fiTQun. In this talk, the effect of fiTQun and FV expansion on the sensitivity to MH would be discussed in detail.

## References

- [1] R. B. Patterson *et al.*, "The extended-track reconstruction for MiniBooNE". *Methods in Physics Research*, A608:206, (2009).
- [2] S. Tobayama. "An Analysis of the Oscillation of Atmospheric Neutrinos". Ph. D. Thesis, University of British Columbia, 2016



# Deformation of $\mathcal{N}=4$ SYM with space-time dependent couplings

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 崔在旺

**Abstract** We study deformation of  $\mathcal{N}=4$  SYM to have space-time dependent couplings preserving supersymmetry. This system can be interpreted as non-Abelian world-volume theory of D3-branes in general BPS background. We obtain some conditions to preserve supersymmetry with varying couplings, and apply the conditions to specific examples.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

場の理論には様々なパラメータがある。計量やゲージ結合定数、質量、湯川結合定数、 $\theta$  パラメータなど、多くの種類がある。しかし、計量が時空に依存する場の理論、即ち曲がった時空での場の理論、に比べて他の結合定数が時空依存性を持つ場合はあまり研究されていない。結合定数が位置依存性を持つ場の理論は珍しく思われるかもしれないが、超弦理論の観点からは自然に実現される。例えば、10次元の type II B の超重力理論で、 $[p,q]7$ -brane が D3-brane と交差している系を考えると、複素化したゲージ結合定数  $\tau$  にモノドロミが生じるため、 $\tau$  が定数でありえないことがわかる。従って、D3-brane 上の有効作用は、 $\mathcal{N}=4$  超対称ヤン・ミルズ理論( $\mathcal{N}=4$  SYM)からポアンカレ対称性を破り、ゲージ結合定数が位置依存性を持ちながら超対称性を保つように変形した理論になるはずである[1]。また、 $(p,q)$  5-brane と交差している D3-brane の有効作用に対応して超対称性を保ちながら結合定数が1つの方向の位置依存性を持つような  $\mathcal{N}=4$  SYM 変形の形を求めた先行研究がある[2]。

本研究では、上記の例をより一般化し、結合定数が4次元の時空の全ての方向に依存性を持ちながら超対称性を保つような  $\mathcal{N}=4$  SYM の変形を調べる[3]。また、超重力理論における一般的な背景での D3-brane 上の有効作用を求め、比較することで弦理論的観点からその対応関係の解析をする[4]。

我々は  $\mathcal{N}=4$  SYM にありうるゲージ不変で繰り込み可能な項を時空に依存する結合パラメータと一緒に加え、同じように拡張した超対称性変換で作用が不変になるための条件を求めた。そして、この条件をより詳しく調べるため、具体的なグローバル対称性がある系を調べた。その例として、時空の対称性が  $ISO(1,1)$  で  $R$  対称性が  $SO(3) \times SO(3)$  である場合、同様に  $ISO(1,1) \times SO(2) \times SO(4)$ 、 $ISO(3)$ 、 $ISO(2) \times SO(6)$  の場合について超対称性を持つための条件の微分方程式の解を求めた。特に、 $ISO(1,1) \times SO(3) \times SO(3)$  の例では様々な解のクラスを発見し、それが[1]と[2]の解を含んでいるより大きな解になっていることを示した。また、複数枚重ねた D3-brane が超重力理論の一般的な背景に置かれている場合に対応して非可換ゲージ群を持つ D3-brane の有効作用を求めた。これを用いて  $(p,q)$  5-brane 背景、D3-brane 背景がある時に複数枚の D3-brane 上の有効作用を求めた結果、グローバル対称性が同じになる例として、それぞれ場の理論で解析した[2]の supersymmetric Janus configuration と[3]の  $SO(1,1) \times SO(2) \times SO(4)$  場合の解析結果を再現することを確認した。

## References

- [1]E. I. Buchbinder, J. Gomis, and F. Passerini, “Holographic gauge theories in background fields and surface operators”, JHEP **04**, 018 (2008), arXiv: 0709.1482[hep-th].
- [2]D. Gaiotto and E. Witten, “Janus Configurations, Chern-Simon Couplings, And The theta-Angle in  $\mathcal{N}=4$  Super Yang-Mills theory”, JHEP **06**, 097 (2010), arXiv: 0804.2907[hep-th].
- [3]J. Choi, J. J. Fernandez-Melgarejo, and S. Sugimoto, “Supersymmetric Gauge Theory with Space-time Dependent Couplings” PTEP (accepted), arXiv: 1710.09792[hep-th].
- [4]J. Choi, J. J. Fernandez-Melgarejo, and S. Sugimoto, (In preparation).

# 場の理論におけるエントロピーの数値計算法の開発と それに基づく相対論的重イオン衝突での熱化機構の解析

原子核理論研究室 築地秀和

**Abstract** We explore thermalization in relativistic heavy ion collisions in terms of entropy production. We propose numerical methods for the semi-classical time evolution of the Husimi-Wehrl entropy in Yang-Mills field theory and show the entropy production occurs around 1 fm/c from the phenomenological initial condition mimicking glasma in the static box.

©2018 Department of Physics, Kyoto University

量子色力学 (Quantum Chromodynamics) の漸近的自由性は高エネルギー領域においてクォークとグルーオンが閉じ込めから解放されたクォーク-グルーオンプラズマ (Quark Gluon Plasma: QGP) の存在を予言する。RHIC(Relativistic Heavy Ion Collider, BNL) と LHC (Large Hadron Collider, CERN) における相対論的重イオン衝突実験では QGP 生成の様々なシグナルが観測されており、現象論的な解析の一つである流体模型は実験結果をよく再現することが知られている。そのインプットパラメータである初期時刻は衝突後  $0.6 - 1.0 \text{ fm/c}$  程度の時間で系が局所熱平衡に達することを示唆し、粒子の衝突によって熱化するというボトムアップシナリオでは説明できないほど早いことが指摘された。これは「早い熱化」の問題として多くの関心を集め (レビュー [1] を参照)、盛んに研究がなされているが未だ解決には至っていない。

この問題に対するアプローチの一つは古典場の持つ不安定性に注目するものである。衝突直後には多数のグルーオンがコヒーレント状態を形成しており、第一近似として古典ヤン-ミルズ場としての扱いがよいと考えられている。この古典ヤン-ミルズ場の現象論的な初期配位は非等方になっており、初期の量子揺らぎに対して不安定性を持つことが知られている。この不安定性によって熱化が引き起こされるというシナリオは有力であり、ゆらぎから生じる永年項を再総和する手法である古典統計近似によって熱化の指標の一つと考えられている圧力の早い等方化が示された [2]。近年では文献 [2] を超えた研究がなされており、場ではなく粒子的な取り扱いをするものと、等方化以外の熱化の指標に注目するものの二つの方向性が検討されている。本発表では半古典近似に基づいた手法を用いて、エントロピーを解析することで系の局所熱平衡化を直接議論することで早い熱化の問題に取り組むことにする。

そこで注目するのが伏見-バール (Husimi-Wehrl) エントロピーという粗視化されたエントロピーである。伏見-バールエントロピーは伏見関数から定義されるエントロピーであり、伏見関数は量子力学における密度行列の「位相空間」での定式化であるウィグナー関数をガウス関数で粗視化することで得られる。物性と素粒子の分野では基礎物理学的な興味から孤立量子系における熱化の指標として様々な粗視化されたエントロピーが調べられており、その中でも伏見-バールエントロピーは「位相空間」での伏見関数の広がり特徴づけるため、熱化の古典的な描像である非局在性が明確である。また、ウィグナー関数は初期条件として重イオン衝突初期の量子揺らぎを自然に取り入れることができ、その半古典的な時間発展も古典方程式を解くことで与えられるため、重イオン衝突初期において有効な枠組みを提供する。

本発表ではウィグナー関数の半古典的な時間発展を利用して伏見-バールエントロピーの計算法を開発する。まず、量子力学系における簡単な試験計算を行い、そこでの解析で開発手法の有効性と特徴を議論する [3]。次に、その手法を場の理論へ拡張し、数値計算結果の収束をよくするために積近似 (product ansatz) を用いた上で、ランダムな初期条件からのエントロピー生成が記述できることを示す [4]。さらに、静止系において衝突直後に妥当であると考えられているグラズマ (Glasma) 配位を似せた配位をつくり、そのまわりのコヒーレント状態を初期条件とした場合に解析し、伏見-バールエントロピー生成が  $1 \text{ fm/c}$  程度で起こることを示す [5]。圧力などの他の物理量との比較も行い、「早い熱化」についての議論を行う。

## Reference

- [1] P. F. Kolb and U. W. Heinz, In \*Hwa, R.C. (ed.) et al.: Quark gluon plasma\* 634-714.
- [2] T. Epelbaum and F. Gelis, Phys. Rev. Lett. **111**, 232301 (2013).
- [3] H. Tsukiji, H. Iida, T. Kunihiro, A. Ohnishi, and T. T. Takahashi, Prog. Theor. Exp. Phys. **083A01** (2015).
- [4] H. Tsukiji, H. Iida, T. Kunihiro, A. Ohnishi, and T. T. Takahashi, Phys. Rev. D **94**, 091502(R) (2016).
- [5] H. Tsukiji, T. Kunihiro, A. Ohnishi, and T. T. Takahashi, to be published in Prog. Theor. Exp. Phys., [arXiv: 1709.00979].



# 高強度レーザー照射による金属ワイヤー導波路上への テラヘルツ表面波発生

レーザー物質科学分科 寺本研介

**Abstract** It is possible to generate intense terahertz surface waves of MV/cm class by irradiating an intense laser pulse on a metal wire. We have investigated the characteristics of surface waves generated by time domain spectroscopy in detail.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

近年、短パルスレーザー技術の発展により単一サイクルテラヘルツ波の発生が可能となっている。特に高強度レーザー生成プラズマは高強度テラヘルツ波源として期待されている。一方でテラヘルツ波の導波技術はテラヘルツ波応用にとって非常に重要である。テラヘルツ導波路にはテラヘルツ帯全域で低損失でありかつ、単一サイクルテラヘルツ波を歪みなく伝送するために無分散が求められる。金属ワイヤーはこれらの特徴を併せ持つ優れたテラヘルツ導波路として利用可能である [1]。テラヘルツ波は金属ワイヤー導波路上で軸対称な偏光を持つ表面波として伝搬し、テーパ状のワイヤーを用いることでテラヘルツ波をワイヤー先端で極小集光することが可能である。しかし、空間を伝搬するテラヘルツ波の金属ワイヤーへのカップリング効率が悪いという欠点がある。このため、高強度なテラヘルツ波の伝送には課題があった。我々は金属ワイヤーに高強度レーザーを照射することで高強度テラヘルツ表面波を生成・伝送することに成功している [2]。高強度レーザーによって加速された高速電子が真空中に放射されることによって金属ワイヤーと電子の間に準静的な電場が発生し、テラヘルツ帯の表面波が誘起する。表面波はピーク電場が MV/cm 級の半サイクルパルスであった。このように高強度レーザー照射によって、金属ワイヤー導波路に高強度テラヘルツ波を発生させることが可能であるが、表面波の波形や電場分布、レーザーエネルギー依存性などの詳細は十分に調べられていない。筆者らはテラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) によって、レーザー生成テラヘルツ表面波の電場を直接測定し、表面波の詳細な特性を調べた。

実験では銅ワイヤー (直径 300  $\mu\text{m}$ ) に高強度レーザー (波長 810nm、集光強度  $1.8 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 、パルスエネルギー 20 mJ、パルス幅 40 fs) を照射した。発生するテラヘルツ表面波のワイヤー径方向の電場を電気光学効果によって測定し、プローブ光の光学遅延を変化させることで表面波の電場波形を測定した。電気光学結晶は GaP (厚さ 300  $\mu\text{m}$ ) を使用した。図 1 に電場測定位置を径方向 ( $r = 1 \sim 10 \text{ mm}$ ) に動かしたときに得られた波形を示す。表面波の波形はいずれもフェムト秒で鋭く立ち上がり、その後数ピコ秒で減衰している。ピーク電場はハンケル関数で  $r$  方向に減衰しており、表面波モードの理論的な空間分布と一致している。今回の計測では、ワイヤー表面でのピーク電場が 0.55 MV/cm、パルス幅 2 ps 程度の表面波が発生していることが分かった。

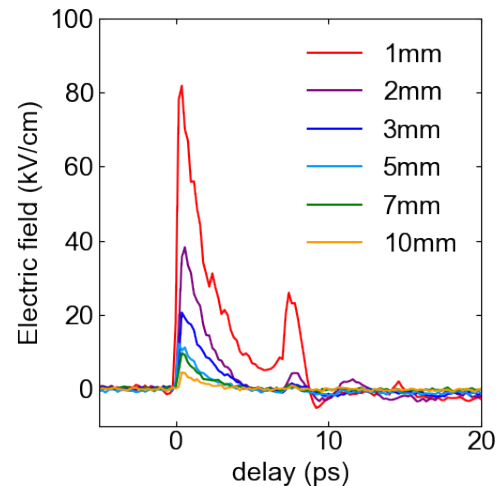


Fig. 1. Waveform for various distance  $r$ .

## References

- [1] K. Wang and D. M. Mittleman, *Nature* **432**, 376 (2004).
- [2] S. Tokita, S. Sakabe, T. Nagashima, M. Hashida, and S. Inoue, *Sci. Rep.* **5**, 8268 (2015).

# J-PARC KOTO 実験における $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊探索の 背景事象の研究

高エネルギー物理学研究室 中桐 洸太

**Abstract** The KOTO experiment aims to study the  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  decay at J-PARC, which is a rare direct CP-violating decay. The status of the analysis on the data taken in 2015 will be presented focusing on the background study.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

CP 対称性の破れの存在は素粒子標準理論では確立されているが、物質優勢宇宙を定量的に説明するには破れの程度が小さく、標準理論を超えた CP 非保存過程が必要とされている。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊は CP を直接的に破る崩壊であり、未知の CP 非保存機構が存在すると崩壊分岐比が標準理論予測値からずれを生じる。未だ観測されていないこの崩壊は標準理論での崩壊分岐比が  $3 \times 10^{-11}$  と小さく、理論的不定性も 1% と小さい[1]ため、CP 破れを引き起こす新物理の効果を見る良いプローブである。

KOTO 実験は J-PARC において行われている  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  探索実験である。KOTO 実験では 30 GeV 陽子ビームを固定標的に当てて生成した  $K_L$  中間子をコリメーターによって細いビームとして検出器領域まで輸送する。検出器はビーム軸を囲うように設置されており、下流エンドキャップ部分の CsI カロリメータで  $\pi^0$  から生じる 2 光子を捕え、かつ他の検出器で検出可能な粒子がないことをもって信号事象の候補とする (Fig. 1)。

KOTO 実験は 2013 年に初めての物理ランを行い、先行実験と同等の感度 ( $1.28 \times 10^{-8}$ 、標準理論崩壊分岐比を仮定するとシグナル期待値 0.002 に相当する感度) を達成した[2][3]。しかしビーム外縁部に分布するハロー中性子がカロリメータに当たってハドロンシャワーを作り、さらにそこで生じた中性子がカロリメータ中を通過し、離れたところでハドロンシャワーを起こして 2 つのクラスターを作る“ハドロンクラスター事象”が全背景事象予測値 0.34 の内 0.18 を占める大きな寄与を持つことが判明した。

2015 年に物理ランを行い、2013 年に行ったランの約 20 倍の統計量のデータを収集した。このデータをもって 2013 年の一桁上の  $1 \times 10^{-9}$  の感度で  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊探索を行う。統計量に伴って増大する背景事象を抑制することが必須であるので、上記のハドロンクラスター事象の研究のためのコントロールサンプルの取得も行った。

本発表では 2015 年に取得したデータの解析状況について、特に背景事象の研究に重点をおいて報告する。

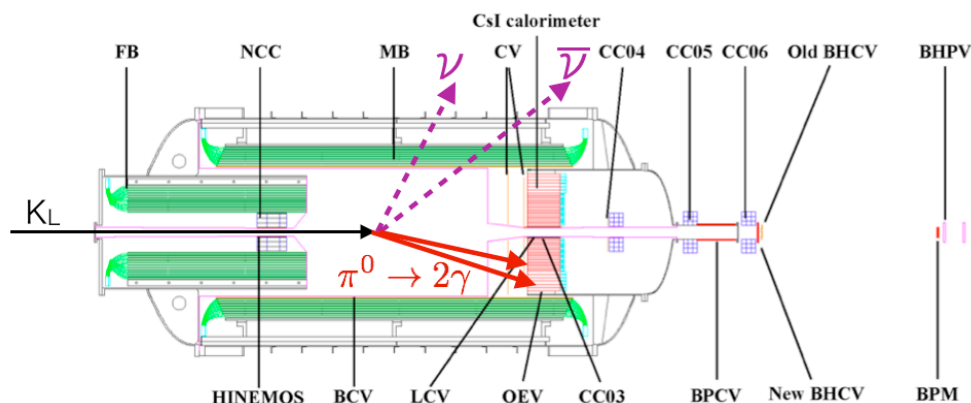


Fig. 1. A cross-sectional view of the KOTO detector and a conceptual view of the signal detection.

## References

- [1] A. J. Buras, *et al.*, *Journal of High Energy Physics* **11**, 033 (2015).
- [2] J. K. Ahn *et al.*, *Phys. Rev. D*, **81**, 072004 (2010).
- [3] J. K. Ahn *et al.*, *PTEP*, 021C01 (2017).

# ニュートリノ振動におけるニュートリノ反応モデルの 系統誤差の評価と振動パラメータの精密測定

高エネルギー物理学研究室：仲村 佳悟

**Abstract:** T2K experiment is a long baseline neutrino oscillation experiment searching for CP violation in lepton sector with neutrino oscillation. In the neutrino oscillation analysis, understanding of neutrino-nucleus interaction modeling and its uncertainties are important to predict number of events at the far detector precisely.

We will report the evaluation of the systematics uncertainties on the oscillation parameters estimation from neutrino interaction modeling. The oscillation analysis results used the data until 2017 summer will also be reported in this presentation.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

T2K 実験は茨城県東海村にある J-PARC でニュートリノビームを生成し、岐阜県飛騨市神岡町にあるスーパーカミオカンデで測定する長基線ニュートリノ振動実験である。ニュートリノと反ニュートリノでの振動確率の違いを調べることでレプトンにおける CP 対称性の破れの観測を目指して実験を行っている。ニュートリノ振動は PMNS 行列で記述でき、電子ニュートリノ出現から ( $\theta_{13}, \delta_{CP}$ )、 $\mu$  ニュートリノ消失から ( $\theta_{23}, \Delta m^2_{23}$ ) のパラメータの測定ができる。T2K 実験ではこれらのモードと反ニュートリノでの電子ニュートリノ出現、 $\mu$  ニュートリノ消失を同時に解析することでこれらのパラメータの測定を行っている。

現在のニュートリノ振動解析で問題になっているのはニュートリノ-原子核反応のモデルとその不定性による系統誤差である。ニュートリノ反応モデルの違いによって、予測されるスーパーカミオカンデでのエネルギー Spektrum やイベント数が異なってくるためニュートリノ振動パラメータの測定に多大な影響を及ぼす。

そこでニュートリノ振動解析における反応モデルの影響を調べるために、異なった構造関数モデル [2] [3] や原子核効果の計算が異なるモデル [4] [5] 等様々な反応モデルを模したシミュレーションデータを用いて、振動パラメータ測定における反応モデルの違いによる系統誤差を調べた。

CP 位相に於いてはニュートリノ反応モデルの影響は CP 位相の信頼区間を 2% 程度しか変化させないことを確認し、2017 年夏までのデータを用いて振動解析を行い  $2\sigma$  の信頼度で CP 対称性が破れていることを確認した。

一方 ( $\theta_{23}, \Delta m^2_{23}$ ) パラメータについては反応モデルによってシミュレーションから予想される不定性に対して最大で  $0.5\sigma$  程度のズレが現れることがわかった。これらのパラメータは T2K 実験が最大混合 ( $\theta_{23}=45^\circ$ ) を示唆しているのに対しアメリカで行なわれている NOvA 実験は  $2.6\sigma$  で最大混合を棄却しており、系統誤差の正確な見積もりが必要になっている。そのため現在反応モデルに起因する不定性を考慮に入れた解析を行っている。

本発表ではこれらのニュートリノ振動解析結果と現状について報告する。

## References

- [1] K. Abe et al. (T2K Collaboration), Nucl. Instrum. Meth. A 659 106 (2011)
- [2] C. Adamuscin, E. Tomasi-Gustafsson, E. Santopinto, and R. Bijker. Phys. Rev., C78:035201 (2008)
- [3] Bhuvanjyoti Bhattacharya, Richard J. Hill, and Gil Paz. Phys. Rev., D84:073006 (2011)
- [4] J. Nieves, I. Ruiz Simo, and M. J. Vicente Vacas. Phys. Rev., C83:045501 (2011)
- [5] M. Martini, M. Ericson, G. Chanfray, and J. Marteau. Phys. Rev., C80:065501 (2009)

# 加速膨張宇宙とブレーンワールドモデル

素粒子論研究室      西 雅人

**Abstract** We study the de Sitter brane world models on the basis of the Randall-Sundrum model. The models can naturally explain the hierarchy between the Planck scale and the weak scale, and describe the acceleratively expanding universe. In addition, we discuss the possibilities of realizing the time-dependent Hubble parameter.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

標準模型は、予言されていた Higgs 粒子の発見など、非常に大きな成功を収めている。しかし、未解決な問題も存在しており、本研究では特に Planck scale と weak scale の間の非常に大きな階層性 ( $M_{\text{pl}}/M_{\text{w}} \sim \mathcal{O}(10^{17})$ ) の存在に着目した。1999 年に提唱された Randall-Sundrum モデル[1]は、この 4 次元の階層性を 5 次元の理論として比較的 naturally 説明可能であるとして注目を集めた。このモデルでは、5 次元方向を  $S^1/\mathbb{Z}_2$  でコンパクト化することにより、張力のみを持つ 2 枚のブレーンを自然に導入し、5 次元の  $\mathcal{O}(10)$  の階層性によって 4 次元の  $\mathcal{O}(10^{17})$  が実現される。

一方で、このモデルでは 4 次元時空は定常であり、加速膨張宇宙を再現することはできない。これを解決するための最も簡単な方法は、計量の 4 次元部分を de Sitter 時空に変更するものである：

$$ds^2 = A^2(y)\{-dt^2 + B^2(t)\delta_{ij}dx^i dx^j\} + dy^2 \quad (1)$$

ここで、 $y$  は余剰次元方向、 $A(y)$  と  $B(t)$  はそれぞれ warp factor と scale factor を表す。このようなモデルはすでに提唱されていたが[2-3]、当時は Hubble 定数の正確な値が知られていなかったこともあり、議論は不完全なままで終わっていた。そこでまず本研究では、(1) 式を基にしたバルクに matter のないモデル(de Sitter thin brane model)において、上記の階層性問題がどのように説明されるかを検証し、コンパクト化によって生じる Kaluza-Klein モードの解析を行った。その結果、4 次元の非常に大きな階層性は 5 次元の  $\mathcal{O}(10^2)$  の階層性で説明され、また、Kaluza-Klein モードの mass が weak scale 程度のオーダーであることが分かった。更に、Hubble 定数が Planck スケールに比べて非常に小さいこと ( $M_{\text{pl}}/H \sim \mathcal{O}(10^{61})$ ) も、上記の 5 次元の階層性で表されることも分かった[4]。

このように、ブレーンワールドを用いることによって、階層性問題へのアプローチと加速膨張宇宙の再現の両立が可能であることが示された。しかしながら、このモデルでは Hubble 定数が時間に依存せず、手で与える量でしかない。そのため、ビッグバン以降の宇宙の複雑な時間発展を記述することができない。そこで、様々な計量の形やバルクに matter (スカラー場) を導入することを考えた。その結果、4 次元時空が時間依存した加速膨張をし得るためには、時間  $t$  に依存するスカラー場をバルクに導入しなければならず、さらにそのスカラー場の運動項の符号が逆、即ちゴースト場にならざるを得ないことが分かった。当然ながら、ゴースト場は理論を不安定にするため、ブレーンワールドを用いた加速膨張宇宙の実現が不可能であるように思われる。一方で、Weyl モデルという、計量条件を課さない重力理論を用いることにより、この問題の解決できるのではないかという提案もある[5]。

本発表では、de Sitter thin brane model に対する研究結果を述べ、Hubble 定数に時間依存性を持たせる方法について紹介する。

## References

- [1] L. Randall and R. Sundrum, Phys. Rev. Lett. **83** 3370 (1999), Phys. Rev. Lett. **83** 4690 (1999)
- [2] N. Kaloper, Phys. Rev. D **60** (1999) 123506.
- [3] M. K. Parikh and S. N. Solodukhin, Phys. Lett. B **503** (2001) 384.
- [4] M. Nishi, “De Sitter thin brane model”, PTEP (2016) 073B08.
- [5] M. Gogberashvili and D. Singleton, Mod. Phys. Lett. A **25** (2010) 2131

# Black hole microstates with a new constituent

YITP   High Energy Physics Group   Minkyu Park

**Abstract** Microstate geometry program is a conjecture about black hole microstates that typical microstates are described as smooth and horizonless supergravity solutions which have the same mass, angular momentum, and charges as that of black holes. We present a new class of microstate solutions of black holes.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

One interesting property of black holes is that they obey thermodynamic laws. The entropy of black holes is given by the area of the horizon and it is naturally expected to be understood from the statistical mechanical viewpoint. However there has not been many things known about black hole microstates in the gravity, even though their holographic understanding has been well-known. In microstate geometry program, e.g., [1], which is a conjecture about black hole microstates, typical microstates are described as smooth and entropyless (i.e., horizonless) supergravity solutions which have the same mass, angular momentum, and charges as that of black holes. In this thesis, a new class of black hole microstates are suggested and studied in addition to the known microstate solutions and discussed in the context of microstate geometry program. The thesis is based on the work [2, 3] which I was involved.

For supersymmetric three- and four-charge black holes, five-dimensional  $\mathcal{N} = 2$  supergravity coupled to vector multiplets is a very useful framework to construct a family of their microstate solutions as smooth and horizonless geometries. They are represented by a set of harmonic functions on  $\mathbb{R}^3$  with codimension-3 sources. However the entropy of these solutions seems not enough to account for the entropy of the corresponding black holes [4, 5]. In this thesis, we present another possible microstate solutions given by harmonic functions having codimension-2 sources and study some explicit examples. In general, they exhibit non-Abelian U-duality monodromies around them and are involved with non-geometric exotic brane charges. We expect that these new class of microstate solutions shed some light on the understanding of microstructure of black holes.

## References

- [1] I. Bena and N. P. Warner, 1311.4538.
- [2] M. Park and M. Shigemori, JHEP **10** (2015) 011, [1505.05169].
- [3] J. J. Fernández-Melgarejo, M. Park and M. Shigemori, JHEP **12** (2017) 103, [1709.02388].
- [4] J. de Boer, S. El-Showk, I. Messamah and D. Van den Bleeken, JHEP **02** (2010) 062, [0906.0011].
- [5] I. Bena, N. Bobev, S. Giusto, C. Ruef and N. P. Warner, JHEP **03** (2011) 022, [1006.3497].

# Toward a precision cosmological test of gravity from redshift-space bispectrum based on perturbation theory

基礎物理学研究所 宇宙グループ 橋本一彦

**Abstract** Based on perturbative calculations, we develop an improved theoretical model for redshift-space bispectrum of large-scale structure, which will be used to probe gravity on cosmological scales. We test the model against simulations, and show that combining with power spectrum, robust test of gravity is made possible, reducing the statistical errors.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

Despite the success of the standard cosmological model that consistently explains the observation of the cosmic microwave background and large scale structure traced by galaxies, cosmology still faces several fundamental problems. One such problem is the origin of late-time cosmic acceleration. To clarify this, in precision cosmology era, a gigantic data will be obtained from upcoming surveys, and measurement of statistical quantities will be made very precisely. Toward future cosmological analysis, improving the accuracy of theoretical template is rather essential for robust constraint and/or parameter estimation.

So far, the cosmological constraints on gravity and/or dark energy, obtained from large-scale structure observations, has been mainly made with the theory and measurement of the two-point statistics. However, the large-scale galaxy distribution in the late-time universe exhibits gravity-induced non-Gaussianity, and the bispectrum, three-point cumulant is expected to contain significant cosmological informations together with power spectrum (e.g., [1]). In particular, the measurement of the bispectrum helps to tighten the constraints on dark energy and modified gravity through the redshift-space distortions (RSD). In this thesis, extending the work by Taruya, Nishimichi & Saito [2], we present a perturbation theory (PT) based model of redshift-space bispectrum that can keep the non-perturbative damping effect under control [3]. Characterizing this non-perturbative damping by a univariate function with single free parameter, the PT model of the redshift-space bispectrum is tested against a large set of cosmological N-body simulations, finding that the predicted monopole and quadrupole moments are in a good agreement with simulations at the scales of baryon acoustic oscillations (well beyond the range of agreement of standard PT). The validity of the univariate ansatz of the damping effect is also examined in the case of matter bispectrum, and with the PT calculation at next-to-leading order, the fitted values of the free parameter is shown to consistently match those obtained from the PT model of power spectrum by Taruya, Nishimichi & Saito [2].

Toward a practical application of our template, we have also developed several techniques suited for cosmological data analysis, i.e., fast bispectrum estimation with fast Fourier transform and accelerated calculations for PT template. Applying these methods to the matter and halo catalogs and employing the Markov-chain Monte Carlo technique, we demonstrate that our improved bispectrum template reproduces the fiducial value of the growth rate, the key parameter to probe gravity on cosmological scales, well within 3% accuracy. Combining the bispectrum data with power spectrum data, the constraint on the growth rate is shown to be tightened, compared to the cases with power spectrum or bispectrum alone.

## References

- [1] Y.-S. Song, A. Taruya, and A. Oka, *JCAP*, 1508(08):007, (2015).
- [2] A.Taruya,T.Nishimichi,andS.Saito, *Phys. Rev.*, D82:063522, (2010).
- [3] Ichihiko Hashimoto, Yann Rasera, and Atsushi Taruya, *Phys. Rev.*, Vol. D96, No. 4, p. 043526, (2017).

# 反ミューオンニュートリノと核子のパイ中間子の生成を伴わない荷電カレント反応断面積の測定

高エネルギー物理学研究室 林野 竜也

**Abstract** We measured the cross section of the charged-current interaction of muon antineutrino and nucleus without pions in the final state by the T2K on-axis near detector. The current analysis status and the prospect will be presented.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

T2K 実験はニュートリノフレーバーの変化の精密測定を行う長基線ニュートリノ振動実験である。これは、茨城県東海村にある大強度陽子加速器研究施設 J-PARC で生成されたミューオンニュートリノを生成点から 280m 離れた前置検出器と、295km 離れた後置検出器スーパーカミオカンデで観測し、結果を比較することでニュートリノ振動パラメータを測定する。[1]

T2K 実験は 2017 年 8 月に新たな結果を発表し、ニュートリノの CP 位相角、 $\delta_{CP}$  が 0 でないことを 95% の信頼度で示した。現在の最大の誤差は統計誤差であるが、今後統計がたまるにつれ系統誤差の削減が重要となる。そこで私は主要な系統誤差であるニュートリノ反応モデルの不定性をより良く理解するため反ミューオンニュートリノのパイオンを伴わない荷電カレント反応(以下、CC0 $\pi$ 反応)の反応断面積の測定に取り組んできた。

CC0 $\pi$ 反応は荷電カレント準弾性散乱反応( $\bar{\nu}_{\mu} + p \rightarrow \mu^+ + n$ 、以下 CCQE 反応)を主とする反応であり、

T2K 実験のニュートリノ振動測定のシグナルモードである。ニュートリノの荷電カレント準弾性散乱反応は複数の実験で測定されているが[2][3][4]、すべての実験を統一的に説明できるモデルが存在しない。近年、ニュートリノが 2 つの核子と反応する 2p-2h 反応[5]などが一部の実験の CCQE 反応の測定に影響している可能性が指摘されている。そこで、私は CC0 $\pi$ 反応の反応断面積を測定し CCQE 反応や 2p2h 反応などのモデルの検証をおこなう。

T2K 前置検出器ホールのビーム軸上に置かれた Proton Module はプラスチックシンチレータからなる全感知型飛跡検出器であり、この検出器をニュートリノ標的と飛跡再構成に用いる。また Proton Module のすぐ下流にある、鉄とシンチレータのサンドイッチ構造の INGRID 検出器でミューオンを同定し運動量を測定する(Fig. 1)。

本発表では、これらの検出器を用いた CC0 $\pi$ 反応の断面積測定について発表する。

- [1] K.Abe et al, Nucl.Instrum.Meth.A 659 106 (2011)
- [2] A.A. Aguilar-Arevalo et al., Phys. Rev. D88, 032001 (2013)
- [3] G.A. Fiorentini et al., Phys. Rev. Lett. 111, 022502 (2013)
- [4] V. Lyubushkin et al., Eur. Phys. J. C63, 355 (2009).
- [5] R. Gran, J. Nieves, F. Sanchez, and M. J. Vicente Vacas. Phys. Rev. D 88, 113007 (2013)

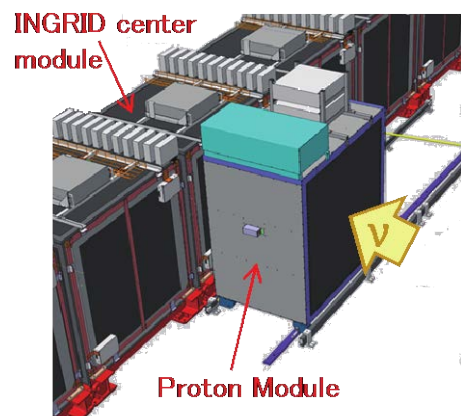


Fig. 1 Proton Module and INGRID

# Simulating Extreme Spacetimes on the Computer

Yukawa Institute for Theoretical Physics    Joseph M. Fedrow

**Abstract.** Having entered the new epoch of gravitational wave astronomy, numerical relativity is now more necessary than ever before. In this thesis we develop the tools necessary to explore this new field with one eye on the computer and the other eye on the Universe.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

The main results of this thesis are those recently published in *Physical Review Letters* where we investigated the gravitational wave signature of binary black holes (BBHs) merging inside of a collapsing star. This investigation was motivated by the proposed stellar core fragmentation scenario for BBH formation and the associated possibility of an electromagnetic counterpart to a BBH GW event. We employ full numerical relativity coupled with general-relativistic hydrodynamics and set up a  $30 + 30$  solar mass BBH (motivated by GW150914) inside gas with realistic stellar densities.

Our results are the first of their kind and show that at high enough densities dynamical friction between the BHs and gas changes the coalescence dynamics and the GW signal in an unmistakable way. We show that for GW150914, LIGO observations conclusively rule out BBH coalescence inside stellar gas of typical stellar densities. This excludes the fragmentation scenario for the formation of GW150914.

The results of this thesis show how numerical relativity allows us to use computers to discover new insights about the most extreme spacetimes in the Universe.

## References

- [1] Fedrow et al. Gravitational Waves from Binary Black Hole Mergers Inside of Stars Phys. Rev. Lett. **119**, 171103



# 超新星残骸 $\gamma$ -Cygni からのガンマ線放射の観測

宇宙線研究室 増田周

**Abstract** Supernova remnants are one of candidates of the source of Galactic cosmic rays. We observed the middle-aged supernova remnant  $\gamma$ -Cygni with MAGIC telescope and Large Area Telescope on board *Fermi* satellite and detected very high energy gamma rays. We found a hint of escaping cosmic rays from the shock front.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

超新星残骸は銀河系内の宇宙線加速源の有力な候補である。宇宙線は星間磁場により進路を曲げられるため到来方向の情報を失う。一方、宇宙線の加速現場、あるいはその近傍ではガンマ線が放射されるため、加速源を探るための重要なプローブとなる。これまで *Fermi* 衛星の観測により、中年期の超新星残骸 W44 と IC443 から、加速陽子と星間物質との衝突で生じた中性パイオン崩壊を起源とするガンマ線放射が検出されている [1]。さらに加速現場の超新星残骸から脱出した陽子が近傍の分子雲等に衝突して放射されたガンマ線が *Fermi* や H. E. S. S. 望遠鏡によって観測されている [2], [3]。

超新星残骸  $\gamma$ -Cygni は中年期 ( $\sim 8$  kyr) で、電波で明るいシェル(衝撃波面)を持つ。この天体が位置する Cygnus 領域は星形成領域で濃い星間物質が存在しており、陽子起源のガンマ線の検出が期待できる。これまでに *Fermi* と VERITAS 望遠鏡によってこの天体が観測されており、数 GeV で超新星残骸全体を覆う  $\sigma \sim 0.6^\circ$  に、数十 GeV 以上で北西シェルに狭く  $\sigma \sim 0.2^\circ$  に広がったガンマ線放射を検出している [4], [5], [6]。しかし、その放射機構は明らかになっていない。

2015、2017 年に MAGIC 望遠鏡で  $\gamma$ -Cygni を計 116 時間観測した。VERITAS で検出した北西シェル上の狭い領域のガンマ線放射を確認し、さらにそこからシェルの外縁に沿って南西の方向に広がったガンマ線放射を検出した (Fig. 1)。これは衝撃波面で加速され脱出した陽子が、周囲の星間物質に衝突し、中性パイオン崩壊によりガンマ線で光っているものと考えられる。年齢を 8 kyr、距離を 1.7 kpc と仮定すると、拡散係数は  $D \sim 2.8 \times 10^{26} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$  となり、これは銀河系内の  $E = 20 \text{ TeV}$  における値よりも 300 倍程度低い値である。

本発表では MAGIC、*Fermi* によるガンマ線観測の解析結果を述べるとともに、 $\gamma$ -Cygni におけるガンマ線放射起源の解釈について多波長の観測結果を踏まえて議論する。

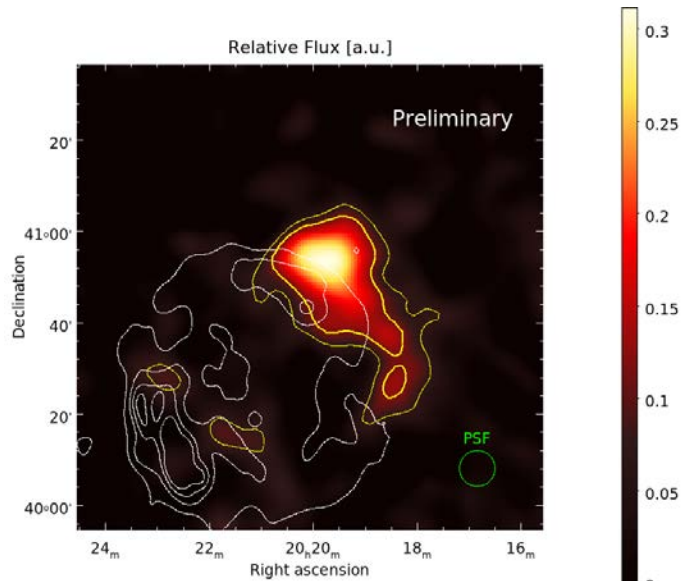


Fig. 1. Gamma-ray flux map with MAGIC ( $E > 200 \text{ GeV}$ ), overlaid on the test statistic count contours at 3 and  $5\sigma$  in yellow. White contours show the CGPS 408 MHz radio continuum [7].

## References

- [1] M. Ackermann *et al.*, *Science* **339**, 807 (2013)
- [2] Y. Uchiyama *et al.*, *ApJL* **749**, L35 (2012)
- [3] H.E.S.S. Collaboration, *A&A*, in press; arXiv:1609.08671.
- [4] J. Lande *et al.*, *ApJ* **756**, 5 (2012)
- [5] N. Fraija and M. Araya, *ApJ* **826**, 31 (2016)
- [6] E. Aliu *et al.*, *ApJ* **770**, 93 (2013)
- [7] A. R. Taylor *et al.*, *AJ* **125**, 3145 (2003)

# Investigation of the Formation Process of Recombining Plasmas in the Galactic Supernova Remnants with Suzaku X-ray Observatory

宇宙線研究室 松村英晃

**Abstract** We performed spatially resolved spectral analyses of X-ray emissions in the Galactic supernova remnants, and investigated the origin of recombining plasmas (RPs). The analyses reveal good correlations between the electron temperatures of the RPs and locations of molecular clouds. The RPs can be explained well by the thermal conduction scenario.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

In a supernova remnant (SNR) plasma, ions are gradually ionized by collisions with electrons. The plasma reaches a collisional ionization equilibrium (CIE) after  $\sim 10^5$  yr. Since most of SNRs have an age of  $\lesssim 10^4$  yr, SNR plasmas are naturally expected to have an ionization degree below the equilibrium and to be in an ionization-dominant state. It was found that many SNRs indeed have ionization-dominant plasmas through X-ray observations.

Recent observations with Japanese X-ray satellite, ASCA and Suzaku, however, revealed peculiar plasmas in some SNRs, which have higher ionization degree than expected in a CIE [1–3]. The plasmas are thought to be in a recombination-dominant state, and thus called recombining plasmas (RPs). Such plasmas are not anticipated in the standard picture of the SNR plasma evolution described above. Although some scenarios are proposed to explain the RPs, the formation process of the RP is not fully understood yet. In any scenario, a key seems to be interactions between the SNR and ambient dense gas [1][4].

To understand the formation process of RPs, we perform spatially resolved spectroscopic analyses of X-ray emissions from the Galactic SNRs, G166.0+4.3 [5], IC 443 [6], W44, and W49B with Suzaku. We compare spatial variations of physical parameters of the RPs with distributions of the ambient gas. In all the remnants, the spectral analyses reveal good correlations between locations of plasmas with lower electron temperatures and those of surrounding dense molecular clouds. The lower electron temperatures of the RPs can be explained well by the thermal conduction between an SNR plasma and a molecular cloud. For a more quantitatively investigation, we estimated cooling timescales of the thermal conduction in each remnant. In all the remnants, the conduction timescales are shorter than a characteristic timescale for a plasma to reach CIE. Therefore, we conclude that the RPs can be realized by the thermal conduction scenario.

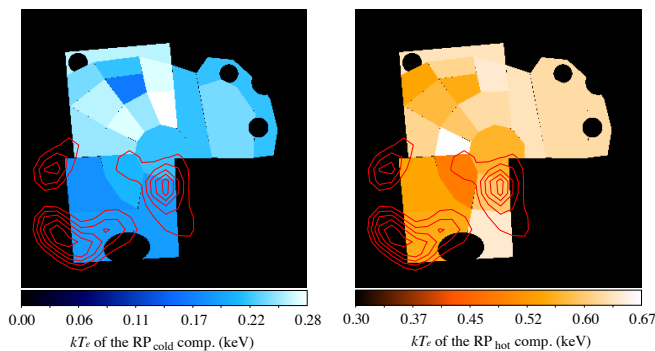


Fig. 1: Maps of the electron temperatures ( $kT_e$ ) of RP components with lower (left) and higher (right)  $kT_e$  bands in IC 443 [6]. The red contours indicate a  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$  to  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  intensity ratio map [7].

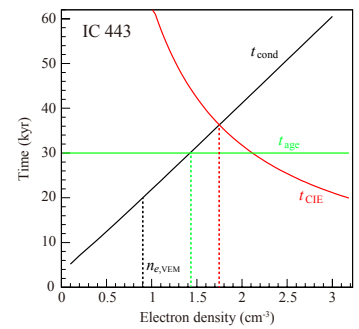


Fig. 2: A conduction timescale of IC 443 as a function of electron density (black solid line). The green and red solid lines show the age of IC 443 [8] and the characteristic timescale for a plasma to reach CIE [9].

## References

- [1] M. Kawasaki *et al.*, ApJ, 572, 897 (2002).
- [2] H. Yamaguchi *et al.*, ApJL, 705, L6 (2009).
- [3] M. Ozawa *et al.*, ApJL, 706, L71 (2009).
- [4] H. Itoh & K. Masai, MNRAS, 236, 885 (1989).
- [5] H. Matsumura *et al.*, PASJ, 69, 30 (2017).
- [6] H. Matsumura *et al.*, ApJ, 851, 73 (2017).
- [7] S. Yoshiike, PhD thesis, Nagoya Univ. (2017).
- [8] C. M. Olbert *et al.*, ApJL, 554, L205 (2001).
- [9] K. Masai, ApJ, 437, 770 (1994).

# 連星中性子星合体 GW170817 は r プロセス元素の起源となりえるか?

天体核研究室 松本達矢

**Abstract** We discuss the possibility that the Macronova in GW170817 is powered by the central engine activities after the binary merger. We find that the engine activities can reproduce the Macronova by ejecta with the solar abundance pattern, which suggests that binary neutron star mergers can be an origin of r-process elements.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

2017 年 8 月 17 日に連星中性子星合体によって放射される重力波が検出された[1]。連星中性子星合体は重力波以外にも様々な波長の電磁波を放射すると期待されていたため、ガンマ線から電波に至るあらゆる波長で追観測が行われた。特に、可視・近赤外線で観測された天体はマクロノバ(またはキロノバ)と呼ばれており、多くの観測グループが検出を報告した[2]。

マクロノバは連星合体で放出される物質中の r プロセス元素が放射性崩壊して輝く現象だと考えられてきた(以下、r プロセスモデルという)。放出される物質は中性子過剰であるため、r プロセスによって重元素が合成されると考えられる。これら r プロセス元素が放射性崩壊して放出物質自体を加熱し、可視から近赤外線で輝くのである。8 月に観測されたマクロノバは r プロセスモデルにもとづいて説明することはできるが、必要な重元素量が太陽組成と整合的かよくわかっていない。

そこで我々は r プロセス元素の加熱に代わり、中心エンジンによりマクロノバを駆動するモデルを提案する。本モデルでは、合体後に形成されるブラックホールからなる中心エンジンがエネルギーを放出物質に注入することでマクロノバを説明する。我々は観測的に示唆される中心エンジンの活動を用いて、観測されているマクロノバを説明できることを見出した(Fig. 1)。さらに、本モデルは放出物質の量や組成を太陽系での値としても観測を説明できるので、連星中性子星合体が r プロセス元素の起源であることと整合する。

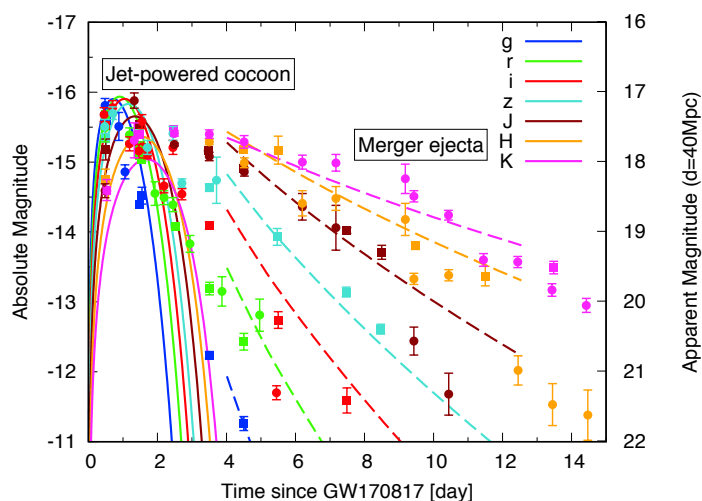


Fig 1. The light curves of Macronova associated with GW170817. Each color represents the light curve in each band. The solid and dashed curves show the light curves of the jet-powered cocoon and the reprocessed emission from the merger ejecta, respectively. The data points are taken from [2].

## References

- [1] Abbott, B. P., et al. 2017, Physical Review Letters, 119, 161101
- [2] Kasliwal, M. M., et al. 2017, Science, 10.1126/science.aap9455, Drout, M. R., et al. 2017, Science, eaaq0049

# Analysis of $\Lambda(1405)$ based on chiral SU(3) dynamics

Nuclear Theory group      Kenta Miyahara

**Abstract** We develop the reliable  $\bar{K}N$  and  $\bar{K}N-\pi\Sigma$  potentials based on the chiral SU(3) dynamics. The potential construction method and the new treatment of the resulting energy-dependent potential are established in this thesis. Applying them, we analyze the  $\Lambda(1405)$  and the related  $\bar{K}$  nuclear systems.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

In recent hadron physics, one of the most active works is the search for exotic hadrons with different structure from the ordinary meson (quark-antiquark) or baryon (three-quark) states. The  $\Lambda(1405)$  baryon resonance is a promising candidates, expected to be the molecular state of an antikaon ( $\bar{K}$ ) and a nucleon ( $N$ ) decaying to a pion ( $\pi$ ) and a Sigma baryon ( $\Sigma$ ). This picture leads to the prediction of related interesting states,  $\bar{K}$  nuclei, consisting of an antikaon and nuclei. Thanks to the recent precise experiment by the SIDDHARTA Collaboration, we are at the stage of quantitative discussion to elucidate the nature of these states. However, the two-body potential, which is the fundamental building block for the theoretical study, has not been constructed in a realistic form. In this thesis, we construct reliable potentials between the meson and baryon which compose the  $\Lambda(1405)$ .

In the former part of this thesis, we first establish the potential construction procedure. To theoretically extrapolate the experimental data to the  $\Lambda(1405)$  energy region directly inaccessible by the  $\bar{K}p$  scattering experiments, we employ the chiral unitary approach which respects the chiral SU(3) symmetry in quantum chromodynamics and the unitarity of S matrix of the two-body scattering. Next, we construct the local potential used in the Schrodinger equation which equivalently reproduces the results of chiral unitary approach. Here, the quantitative reproducibility is necessary not only on the real energy axis but also in the complex energy plane, because the essential information of the  $\Lambda(1405)$  is included in the complex plane as a resonance pole. With the newly developed procedure, we obtain the energy-dependent complex and real potentials in the  $\bar{K}N$  and  $\bar{K}N-\pi\Sigma$  systems, respectively. The results for the  $\bar{K}N$  and  $\bar{K}N-\pi\Sigma$  potentials are respectively summarized in Refs. [1] and [2].

As the first application of the simpler single-channel potential, we calculate the  $\bar{K}$  nuclei up to seven-body systems with the accurate few-body calculation method [3]. In the  $\bar{K}NN$  system, relatively small binding energy is obtained, and in seven-body system, the possibility of the inversion of the level ordering is predicted. For more detailed discussion of some states near the  $\pi\Sigma$  threshold, the explicit treatment of lower channels like the  $\pi\Sigma$  would be necessary. Next, we theoretically predict the  $\bar{K}p$  correlation function in heavy-ion collisions [4,5]. We find the unique isospin combination in the correlation function, which would lead to complementary information of the  $\bar{K}N$  interaction to the ordinary  $\bar{K}p$  scattering amplitudes.

In the latter half of this thesis, we discuss how to analyze the wave function from the resulting energy-dependent potential which breaks the essential requirements of the quantum mechanics, the norm conservation and the orthogonality relation [1, 2]. To recover them, we derive the new normalization scheme in the non-Hermitian system with the energy-dependent potential, respecting the continuity equation. Furthermore, interpreting the origin of the energy dependence in terms of the channel elimination, we reveal the meaning of the new scheme in association with the compositeness and the elementariness [2]. With this new formulation, we analyze the compositeness and the spatial structure of the  $\Lambda(1405)$  to confirm the  $\bar{K}N$  molecular picture.

- [1] K. Miyahara and T. Hyodo, Phys. Rev. **C93**, 015201 (2016).
- [2] S. Ohnishi, W. Horiuchi, T. Hoshino, K. Miyahara and T. Hyodo, Phys. Rev. **C95**, 065202 (2017).
- [3] K. Miyahara, T. Hyodo and W. Weise, in preparation
- [4] A. Ohnishi, K. Morita, K. Miyahara and T. Hyodo, Nucl. Phys. **A954**, 294 (2016).
- [5] ExHIC, S. Cho *et al.*, Prog. Part. Nucl. Phys. **95**, 279 (2017).

# $\Lambda_c N$ interaction from lattice QCD and its application to $\Lambda_c$ hypernuclei

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 宮本貴也

**Abstract** We investigate the two-body interaction between  $\Lambda_c$  and a nucleon (N) in the (2+1)-flavor lattice QCD on a  $(2.9 \text{ fm})^3$  volume at  $m_\pi \sim 410, 570, 700 \text{ MeV}$ . We also study possible  $\Lambda_c$  hypernuclei from obtained potentials. Our results suggest that  $\Lambda_c$  hypernuclei can exist for  $A \geq 12$  with the binding energies of a few MeV.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

Understanding the baryon-baryon interactions is one of the most important topics in hadron physics. The meson-exchange models are good descriptions for the baryon-baryon interactions and it has been constructed successfully to reproduce the properties of the low-energy nucleon-nucleon (NN), hyperon-nucleon (YN) scattering and the finite (hyper-) nuclei. The constituent quark models have also been developed to investigate the baryon-baryon interactions. In general, these two approaches give coincident results.

Recently, these two approaches are applied to charmed baryon systems [1,2]. In Ref. [1],  $\Lambda_c N$  interaction is investigated with the one-boson-exchange potential (OBEP) model based on the heavy quark effective theory, and the authors claim that the  $\Lambda_c N$  interaction is strong enough to form a two-body bound state though the results are rather sensitive to the model parameters. On the other hand, the study within a framework of the constituent quark model [2] suggests that the  $\Lambda_c N$  two-body bound state is not likely.

The aim of this work is to shed a new light on the problem of the  $\Lambda_c N$  interaction from first-principles lattice QCD simulations. For this purpose, we employ the HAL QCD method [3] in the (2+1)-flavor lattice QCD on a  $(2.9 \text{ fm})^3$  volume at  $m_\pi \sim 410, 570, 700 \text{ MeV}$ . We first calculate the  $\Lambda_c N$  central and tensor potentials from Nambu-Bethe-Salpeter wave functions, which is faithful to the QCD S-matrix below the inelastic threshold, so that we can correctly calculate the  $\Lambda_c N$  elastic scattering phase shift. We find that the  $\Lambda_c N$  interactions are attractive at low-energies but they are not strong to form the two-body bound state at least  $m_\pi > 410 \text{ MeV}$  [4,5,6]. We also find that the phase shift and the scattering length in  $^1S_0$  channel are very similar to those in the  $^3S_1$ - $^3D_1$  channels, which imply that the  $\Lambda_c N$  interaction is almost spin-independent [6].

We next consider an application of the HAL QCD potentials to possible  $\Lambda_c$  hypernuclei. We construct a single-folding potentials for  $\Lambda_c$  hypernuclei and estimate the binding energies of  $\Lambda_c$  with several light- and heavy-nuclei, by using the Gaussian expansion method. Our results suggest that the  $\Lambda_c$  hypernuclei can exist for  $A \geq 12$  with the binding energies of a few MeV [6].

## References

- [1] Y. R. Liu, M. Oka, Phys. Rev. **D85** (2012) 014015.
- [2] H. Huang, J. Ping and F. Wang, Phys. Rev. **C87** (2013) 034002.
- [3] N. Ishii, S. Aoki and T. Hatsuda, Phys. Rev. Lett. **99** (2007) 022001.
- [4] T. Miyamoto *et al.* [HAL QCD Collaboration], PoS LATTICE **2015** (2016) 090.
- [5] T. Miyamoto *et al.* [HAL QCD Collaboration], PoS LATTICE **2016** (2017) 117.
- [6] T. Miyamoto *et al.* [HAL QCD Collaboration], [arXiv:1710.05545 [hep-lat]].

# MAIKo アクティブ標的を用いた巨大双極子共鳴領域における $^4\text{He}$ 光分解反応の断面積測定

原子核・ハドロン物理学研究室 村田求基

## Abstract

The photodisintegration of  $^4\text{He}$  has been investigated, but its cross section in the giant dipole resonance (GDR) region is still unclear. We developed an active target system, MAIKo to measure the two dominant reaction modes,  $^4\text{He}(\gamma, pt)$  and  $^4\text{He}(\gamma, ^3\text{He})n$  in the energy range from the decay threshold to the GDR region.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

$^4\text{He}$  は最も軽い自己共役 ( $A=Z$ ) な閉殻原子核であり、その単純な組成からより複雑な核子多体系を理解するためのベンチマークとしての役割を果たしている。また、原子核の 10~20 MeV 程度の  $\gamma$  線吸収反応は、陽子と中性子が逆位相で振動するアイソベクター型巨大双極子共鳴 (GDR) への励起が支配的であるという描像が確立され、多くの安定原子核で系統的な理解がなされている。

しかしながら、 $^4\text{He}$  原子核の GDR 領域 ( $E_\gamma=20\sim30$  MeV) における光分解反応に関する実験データには未だ大きな不定性が残されている。 $^4\text{He}$  原子核の光分解反応測定実験は 1960 年代以来行われてきた。多くのグループによって報告された反応断面積は、 $E_\gamma=30$  MeV 以上の領域では互いに整合的である。一方、 $^4\text{He}$  の 2 体崩壊閾値エネルギーである 20 MeV から 30 MeV までのエネルギー領域の反応断面積は、 $E_\gamma=25$  MeV 付近に GDR のピークを持つ傾向こそ一致するものの、絶対値は最大で約 2 倍異なっている。さらに、近年  $^4\text{He}$  ガスを用いたアクティブ標的による実験により報告された反応断面積は、20~30 MeV には GDR のピークがなく、このエネルギー領域で単調増加するという、従来のどの実験結果とも異なる傾向を示した[1]。この実験の結果は、現実的核子間相互作用をもとにした第一原理理論計算とも一致しない[2]。

GDR 領域における  $^4\text{He}$  光分解反応は少数核子系の統一的な理解のために重要であるだけでなく、ビッグバン元素合成や超新星爆発によって放出されるニュートリノが引き起こす元素合成過程[3]のシナリオの確立にも重要であると考えられている。そのため、実験手法を改善して再測定を行い断面積の不定性を小さくすることが重要である。

こうした先行研究の状況に鑑み、 $^4\text{He}$  原子核の GDR 領域である 20~30MeV までの  $\gamma$  線による光分解反応を測定することを目的とする研究を計画した。

本研究では、 $^4\text{He}$  主体のガスを粒子検出のために用いる TPC (Time Projection Chamber) を反応の標的としても用いる MAIKo アクティブ標的というシステムを開発し、光分解反応の測定を実施する。TPC は飛跡検出器であるため、このエネルギー領域で支配的な  $^4\text{He}(\gamma, pt)$  反応と  $^4\text{He}(\gamma, ^3\text{He})n$  の 2 つの反応と背景事象を飛跡の形状によって区別することができる。そのため、背景事象を排除して 2 種類の反応を同一セットアップで同時に測定することが可能である。また、アクティブ標的は標的自身が検出器となるため、通常の検出器系では困難な標的中で全運動エネルギーを損失し静止する低エネルギー荷電粒子の検出ができる。そのため、光分解反応閾値近傍のエネルギー領域での測定が可能である。

実験はニュースバル放射光施設の BL01[4]で実施予定である。このビームラインでは、電子シンクロトロンに蓄積された、 $T = 0.5\sim1.5$  GeV までの電子にレーザー光を入射し、180 度方向に散乱された光子を用いるという逆コンプトン散乱によって準単色な  $\gamma$  線ビームを生成することができる施設である。ニュースバル放射光施設 BL01 において MAIKo アクティブ標的を用いてテスト実験を実施した。

本発表では、テスト実験のデータの解析状況と来年度実施予定の本実験への展望について述べる。

## References

- [1] T. Shima et al., Phys. Rev. C **72**, 044004 (2005).
- [2] W. Horiuchi et al., Phys. Rev. C **85**, 054002 (2005).
- [3] T. Suzuki and T. Kajino, J. Phys. G: Nucl Part. Phys. **40**, 083101 (2013).
- [4] S. Amano et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, **602**, 337 (2009).

# Role of axial anomaly and nesting in the inhomogeneous chiral phase

Nuclear Theory Group      Ryo Yoshiike

**Abstract** Axial anomaly and nesting are elucidated in the context of the inhomogeneous chiral phase. Using the Nambu-Jona-Lasinio models in 1+1 dimensions, we shall discuss them from two different points of view: one is inhomogeneous chiral phase and the other is the Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov state of superconductivity.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

Inhomogeneous chiral phase (iCP) has been expected to appear in the moderate density region in the QCD phase diagram, where chiral condensate is spatially modulating. If iCP is realized, it may give rise to various phenomenological consequences such as spontaneous magnetization, fast cooling in compact stars or anomalous entropy production in the course of heavy-ion collisions.

It has been known that axial anomaly and nesting play important roles for iCP. Axial anomaly drastically changes the properties of iCP through anomalous particle production and the extension to the low density region for iCP [1]. Nesting, which is well-known in condensed matter physics as the driving mechanism for spatially nonuniform structures such as charge and spin density waves, may be responsible for formation of iCP as well [2]. To get deeper understanding of those prominent concepts in iCP, we use the Nambu-Jona-Lasinio model in 1+1 dimensions; since these concepts are essentially based on symmetry itself and geometry of the Fermi surface, one may discuss them more clearly without loss of generality. Then we can utilize the duality transformation in 1+1 dimensions. Thies has pointed out that there is a duality relation between chiral transition and a kind of superconductivity [3]. After the duality transformation, chemical potential can be regarded as an effective magnetic field. It is well known in condensed matter physics that the BCS state changes to the Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov (FFLO) state, beyond the lower critical magnetic field ( $h_c$ ), where the Cooper pair condensate is spatially modulating [4]. Thus iCP at finite density is mapped into the problem of the FFLO state [5]. For example, chiral spiral phase, a kind of iCP, is mapped into Fulde-Ferrell (FF) state. In the following, we briefly describe our result for this case.

First, we discuss how axial anomaly is mapped by the duality transformation. After the duality transformation, we see a different manifestation of axial anomaly: anomalous magnetization is generated in the FF state instead of anomalous particle number. Furthermore, due to axial anomaly, the phase diagram becomes much different from the one for the FF state in condensed matter physics, where  $h_c > 0$ . The FF state develops, once the magnetic field is applied, i.e.,  $h_c = 0$ .

Next we discuss how nesting plays in the context of iCP, compared with the anomaly-free model. In the anomaly-free model, we can see nesting works for iCP in the same way of charge and spin density waves. After the duality transformation, we show that the different type of nesting works in the FF state as in the condensed matter physics. However, axial anomaly conceals nesting effect; it brings about the chiral spiral or the FF state irrespective of nesting effect. Therefore, the result implies the possibility of the new type of superconductivity.

## References

- [1] T. Tatsumi, K. Nishiyama, and S. Karasawa, Phys. Lett. **B743**, 66 (2015).
- [2] E. Nakano and T. Tatsumi, Phys. Rev. **D71**, 114006 (2005).
- [3] M. Thies, Phys. Rev. **D68**, 047703 (2003).
- [4] P. Fulde and R. A. Ferrell, Phys. Rev. **A135**, 550 (1964); A. I. Larkin and Y. N. Ovchinnikov, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **47**, 1136 (1964).
- [5] R. Yoshiike and T. Tatsumi, arXiv:1711.11425 [hep-ph] (2017).



# Scrambling and Complexity in AdS/CFT and Black Holes

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 渡邊 賢人

**Abstract** Recent collaborations of quantum information theory with AdS/CFT and black holes have opened up new horizons of physics. We discuss fast scrambling in AdS/CFT and black holes. And we proposed a definition of complexity of states in CFTs based on “optimization” of Euclidean path-integrals.

© 2018 Department of Physics, Kyoto University

近年、量子情報理論の場の理論や双対重力理論への応用は様々な興味深い発展を生み出し続けている。その発展の中で、ブラックホールは常に極めて重要な役割を果たしてきた。例えば、量子情報のスクランブリング（擾乱）や量子状態の計算複雑度の時間発展は、ブラックホール情報問題を動機とした様々な思考実験により理解が進み、その速度の上限がブラックホールにより満たされることが予想された[1]。その予想は AdS/CFT 対応を用いた研究[2]において確認された後、場の理論の量子カオス的な性質と結び付けられ、最近の研究の潮流を生んでいる[3]。

このような発展の中、我々は、[2]において重力側で計算された相互情報量を対応する共形場理論での計算により、ブラックホールの満たす速いスクランブリング時間が再現できることを示した[4]。

また、スクランブル時間以降の時間の物理においても、ブラックホールは大きな示唆を与えている。擾乱により部分系での熱化が起これば、エントロピーの観点からは系のダイナミクスが平衡に達する。しかしながら、重力側ではブラックホールの内部の体積が増加し続けることが知られていた。その時間発展を検知するにはより解像度の高い指標が必要となる。最近、量子状態の計算複雑度をその指標の候補として、その重力双対の提案がなされた。その重力双対は余次元 1 の曲面の最大体積[5]、もしくは、余次元 0 の因果的円錐中の作用[6]という量で、すぐさま様々な研究がなされるようになった。

重力双対の理解が進む一方、計算複雑度は場の理論でのよい定義の仕方が見つかっていない状況にある。そこで、我々は「経路積分の効率化」という新しい方法を用いて、共形場理論において量子状態の計算複雑度を定義し、単純な状態に対してその性質を調べた[7]。

本発表では、量子情報のスクランブリング（擾乱）や量子状態の計算複雑度に関する我々の仕事[4, 7]について議論を行う。

## References

- [1] Y. Sekino and L. Susskind, JHEP **0810**, 065 (2008); P. Hayden and J. Preskill, JHEP **0709**, 120 (2007).
- [2] S. H. Shenker and D. Stanford, JHEP **1403**, 067 (2014).
- [3] J. Maldacena, S. H. Shenker and D. Stanford, JHEP **1608**, 106 (2016);  
J. Maldacena and D. Stanford, Phys. Rev. D **94**, no. 10, 106002 (2016).
- [4] P. Caputa, J. Simón, A. Štikonas, T. Takayanagi and K. Watanabe, JHEP **1508**, 011 (2015).
- [5] L. Susskind, Fortsch. Phys. **64**, 24 (2016).
- [6] A. R. Brown, D. A. Roberts, L. Susskind, B. Swingle and Y. Zhao,  
Phys. Rev. Lett. **116**, no.19, 191301 (2016).
- [7] P. Caputa, N. Kundu, M. Miyaji, T. Takayanagi and K. Watanabe,  
Phys. Rev. Lett. **119**, no. 7, 071602 (2017); JHEP **1711**, 097 (2017).