### 2020年度

### 京都大学大学院理学研究科

## D3発表会アブストラクト

(2021年2月5日)

物理学第二分野

### D3 発表会

日時:2021年2月5日(金) 9時~ 場所:理学研究科5号館 525号室+Zoom 発表時間:15分+5分(質問)

《目 次》

- レプトン対測定によるベクター中間子質量分
  足利 沙希子 (9:00)
  布測定
- 2. 原子核内におけるベクター中間子スペクトル 市川 真也 (9:20) 測定
- <sup>3</sup>. アルファ非弾性散乱を用いた<sup>13</sup>C 原子核にお 稲葉 健斗 (9:40) けるアルファ凝縮状態の探索
- 4. Multipartite, Quantum, and Classical 梅本 滉嗣 (10:00) Correlation in the AdS/CFT correspondence
- <sup>5</sup>. The relationships between neutrino Majorana 大畠隆弘 (10:20) mass and other physics
- 6. LHC-ATLAS実験における大半径ジェットを用 岡崎 佑太 (10:40)
  いた超対称性電弱ゲージーノの探索
- <sup>7</sup>. Gravitational perturbations as TT 奥村傑(11:00)
  deformations in 2D dilaton gravity systems
- <sup>8</sup> X-ray Study on Supernova Remnants Interacting with Dense Clouds

尾近 洸行 (11:20)

### 9. Analytic Conformal Bootstrap in 2D CFT 楠亀 裕哉 (11:40)

#### 《午後》

<sup>10</sup>. Brane dynamics in Fermi gas formalism 久保 尚敬 (13:00)11. 反対称化分子動力学法による低エネルギー 四方 悠貴 (13:20)双極子励起モードの研究  $12.0 \nu \beta \beta 崩壊探索のための高圧キセノンガス$ 中村 和広 (13:40)TPC大型試作機の開発 (14:00)<sup>13</sup>. ガンマ線天文台CTA大口径望遠鏡カメラ開発 野崎 誠也 と望遠鏡性能評価 <sup>14</sup>. Non-perturbative Aspects of Higgs Physics in 濱田 佑 (14:20)the Standard Model and Beyond 15.フェムト秒レーザー照射金属表層の光学特性 古川 雄規 (14:40)時間変化に関する研究 16. 線源メスバウアー分光法による希土類元素薄 (15:00)細川 修一 膜の超微細構造の原子分解能研究 17. Shear viscosity of classical fields using the 松田 英史 (15:20)Green-Nakano-Kubo formula on a lattice 18. パイ中間子精密分光によるクォーク凝縮の密 松本 翔汰 (15:40)

<sup>19</sup>. Geometry of configuration space in Markov chain Monte Carlo methods and the worldvolume approach to the tempered Lefschetz thimble method

度依存性の評価

### 松本 信行 (16:00)

20.	Long time supernova simulation and search for supernovae in Super–Kamiokande IV	森 正光	(16:20)
21.	Path optimization with neural network for sign problem in quantum field theories	森 勇登	(16:40)
22.	連続重力波の新たな全天探索手法について	山本 貴宏	(17:00)
23.	0 ν β β 探索のための高圧キセノンガスTPCの 開発: 試作機の性能評価と有感体積拡大に向 けた研究	吉田 将	(17:20)
24.	電子陽電子衝突におけるΛ(1405)粒子の直接	渡邊 憲	(17:40)

生成断面積の測定

### レプトン対測定によるベクター中間子質量分布測定

#### 原子核・ハドロン物理学研究室 足利沙希子

Abstract One experimental approach to investigate QCD structure is measure hadron property in medium. Direct measurements of Vector meson spectrum are planned at J-PARC. New beamline and spectrometer have been constructed in January 2020. The preliminary result in the first beam and spectrometer commissioning are shown and future prospect is shown.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

 - 素粒子多体系であるハドロンは QCD 真空の素励起として、真空の構造を反映した多彩なスペクトルを見せる。特にρ、ω、φ中間子といったベクター中間子に関しては、近年、スペクトルをクォーク 凝縮と関連づける理論的な研究が行われている[1]。原子核中のような異なる環境下での実験的なスペクトル測定は、QCD 真空を理解する上で重要な情報をあたえることが期待されている[2]。

高強度陽子加速器施設 J-PARC では長年、原子核中におけるベクター中間子の質量スペクトル測定 (J-PARC E16 実験)が計画されてきた。実験においては 30 GeV の高強度陽子ビームを使用し、原子核内 でベクター中間子を生成し、その電子対への崩壊を利用して核媒質中での質量スペクトル測定を行



う。

現在までに新規ビームラインとスペクトロ メータの建設を進め、2020年1月に遂に完 成させた(Fig.1)。同年6月にビームライン とスペクトロメータを合わせたコミッショ ニングを行い、2.5×10<sup>9</sup>Hzのビーム強度に おいてスペクトロメータの検出器が概ね正 しく動作していることを確認した。また、 本年2月より二度目のコミッショニングを 計画している。本発表では新規ビームライ ンとスペクトロメータのコミッショニング の暫定的な結果を見せ、今後のコミッショ ニングの見通しを発表する。

Fig. 1 Newly constructed beamline and spectrometer. References

- [1] T. Hatsuda, S.H. Lee, Phys. Rev. C 46 (1992) 34.
- [2] P. Gubler and K. Ohtani, Phys. Rev. D 90, 094002 (2014).

### 原子核内におけるベクター中間子スペクトル測定

原子核・ハドロン物理学研究室 市川 真也

Abstract An experiment to measure a spectrum of vector mesons in nuclear medium is performed as the J-PARC E16 experiment. The invariant mass of detected electron and positron pairs produced in pA reaction will be minutely investigated. A commissioning run was carried out in May 2020. The performance of the spectrometer, especially the trigger system will be presented. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

ハドロンのスペクトルは、QCD 和則のような理論的アプローチによってクォーク凝縮と関連づけることができる[1]。我々は有限密度中でスペクトルを測定することで、実験の立場から有限密度における クォーク凝縮の振る舞いを調べる。

プローブとなるハドロンには、強い相互作用を起こさないレプトン対を崩壊モードに持つ、ベクター 中間子 ( $\rho$ 、 $\omega$ 、 $\phi$ ) が用いられる。これまでに、重イオン衝突実験である NA60 実験や PHENIX 実験、 光生成反応を用いた CBELSA/TAPS 実験や CLAS 実験などで有限温度ないし有限密度環境におけるスペク トル測定が実施された。KEK-PS E325 実験では、陽子ビームを原子核標的(銅、炭素)に照射し、原子 核密度下における $\phi$ 中間子の有意な変形を観測した[2]。しかし、変形が原子核密度によるものだと結 論づけるには統計が不十分だった。

本研究(J-PARC E16 実験)は J-PARC ハドロン実験施設の高運動量ビームラインにおいて、30 GeV、 1×10<sup>10</sup>/spillの陽子ビームを銅・炭素標的に照射し、生成されたベクター中間子の電子陽電子対への 崩壊を測定する[3]。ビームの大強度化、スペクトロメータの大立体角化により、E325 実験の 30 倍の高 統計のデータを取得する。

2020 年度の5、6月に、スペクトロメータ全体のおよそ 1/4 の検出器をインストールした状態で最初の コミッショニングランを実施した (Fig. 1)。現在はさらにアクセプタンスを増やした、2020 年度の 2、3月に行う二度目のコミッショニングランに向けて検出器・ソフトウェアの準備を進めている。物 理ランは 2022 年度に開始する予定である。本発表では、J-PARC E16 実験のシステム及びコミッショニ ングランについて報告する。



Fig. 1. The overall view of the E16 spectrometer.

- [1] P. Gubler and D. Satow, Prog. Part. Nucl. Phys. 106, 1-67 (2019).
- [2] R. Muto, et al., Phys. Rev. Lett. 98, 042501 (2007).
- [3] S. Yokkaichi, et al., Technical Design Report for the J-PARC E16 (2016)

# アルファ非弾性散乱を用いた <sup>13</sup>C 原子核におけるアルファ凝縮状態の探索

原子核・ハドロン物理学研究室 稲葉健斗

**Abstract** Alpha condensation is one of the most intriguing topics in the nuclear structure. We searched for the alpha condensed state in <sup>13</sup>C using the alpha inelastic scattering. The experimental results were compared with cluster-model calculations and the existence of the alpha condensed state in <sup>13</sup>C was discussed.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

原子核内における種々の  $\alpha$  クラスター構造の発現は、原子核の性質を議論する上で非常に重要な意味 を持つ。 $\alpha$  クラスター構造を示す状態として最も有名な例は、Hoyle 状態として知られる <sup>12</sup>C 原子核の  $0_2^+$  状態である。近年の理論的研究によると [1]、 $0_2^+$  状態では多原子系における Bose-Einstein condensation (BEC) と同様に3つの  $\alpha$  クラスターが同一の最低エネルギー状態を占有する3 $\alpha$  凝縮状態が 実現しており、 $0_2^+$  状態は、その半径が基底状態の約2倍にも及ぶ希薄クラスターガス状態になってい ると指摘されている。同様の性質を持つ N $\alpha$  凝縮状態は<sup>40</sup>Caまでの自己共役なA = 4N 原子核において も存在することが予言されており [2]、これらの  $\alpha$  凝縮状態の実験的な探索が精力的に行われている。

α 凝縮状態が A ≠ 4N 原子核においても存在するのかどうかは非常に興味深い問題である。本研究で着 目している <sup>13</sup>C 原子核においては、Hoyle 状態に余剰中性子が結合した 3α + n 配位のクラスター構造が 発現すると期待される。3α + n OCM 計算 [3]や AMD 計算 [4]によると、基底状態(J<sup>r</sup> = 1/2<sup>-</sup>) は殻模 型的でコンパクトな構造を持つのに対して、1/2<sup>-</sup> 励起状態および、いくつかの 1/2<sup>+</sup> 励起状態は発達した クラスター構造を持つことが指摘されている。特に、 $E_x = 15$  MeV 近傍に現れる 1/2<sup>+</sup> 状態が、3 つの α クラスターと余剰中性子が (0s)<sup>3α</sup>(0s)<sup>y</sup>1/2 軌道を占有する 3α + n 凝縮状態の有力な候補となると提案され ている。クラスター構造を励起するためには、アイソスカラー単極子遷移及び双極子遷移が有力なプロ ーブとなることが知られており [5, 6]、実験的にこれらの遷移強度を抽出してクラスター模型計算との 比較を行うことが重要となる。

そこで、本研究では0度を含む前方角度において、 $E_{\alpha}$ =388 MeV の  $\alpha$  粒子と<sup>13</sup>C 原子核の弾性・非弾性散乱の断面積を測定した。測定は大阪大学核物理研究センターにて実施された。散乱された  $\alpha$  粒子の運動量と散乱角度の再構成は、高分解能磁気スペクトロメータ Grand Raiden 及び焦点面に設置されている multi-wire drift chamber (MWDC) によって行われた。前方の散乱角度における測定では、<sup>13</sup>C 標的に付着している水由来の水素弾性散乱事象が、 $\alpha$  非弾性散乱の測定に深刻な影響を及ぼす。そこで、本測定のために新たに開発した反跳陽子検出器を用いて、水素弾性散乱によるバックグラウンドを除去した。

測定された断面積を folding model 及び巨視的遷移密度を用いた歪曲波ボルン近似によって計算され た断面積と比較することで、低エネルギー離散状態に対するアイソスカラー多重極遷移強度を決定した。 また、得られた断面積を移行角運動量ごとの寄与に分解する多重極分解解析を行うことで、移行角運度 量が ΔL = 0-3 までのアイソスカラー遷移強度分布を抽出した。

本発表では、実験の概要と得られた結果を紹介する。また、抽出された遷移強度に関して AMD, OCM 計算及び殻模型計算の結果と比較しながら<sup>13</sup>C 原子核における a 凝縮状態の存否について議論する。

- [1] T. Yamada and P. Schuck, Euro. Phys. J. A 26, 185 (2005).
- [2] T. Yamada and P. Schuck, Phys. Rev. C 69, 024309 (2004).
- [3] T. Yamada and Y. Funaki, Phys. Rev. C 92, 034326 (2015).
- [4] Y. Chiba and M. Kimura, Phys. Rev. C 101, 024317 (2020).
- [5] T. Kawabata et al., Phys. Lett. B 646, 6 (2007).
- [6] Y. Chiba, M. Kimura and Y. Taniguchi, Phys. Rev. C 93, 034319 (2016).

### Multipartite, Quantum, and Classical Correlation in the AdS/CFT correspondence

#### Yukawa Institute for Theoretical Physics Koji Umemoto

**Abstract** A variety of correlation measures in quantum information theory are discussed in the context of the AdS/CFT correspondence. This provides a toolkit for studying the relationship between boundary correlations and bulk spacetime geometries. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

Many of the tools and ideas of quantum information theory have been employed to shed light on the holographic principle. The entanglement entropy in the AdS/CFT correspondence tells us that information of the bulk geometries is encoded in the boundary correlations. This thesis is aimed to deepen our understanding of this direction by studying various correlation measures in holography. We first derive a generalization of the holographic entanglement of purification conjecture for multipartite states. It turns out that this proposal is consistently supported in arbitrary n-partite states. We next study the entanglement of purification in quantum many body systems by numerical methods. That reveals a remarkable non-monotonicity of the entanglement of purification, attributed to the different sensitivities to quantum and classical correlations. We finally discuss the holographic duals of two classes of correlation measures: optimized correlation measures and axiomatic entanglement measures. The results suggest that classical correlation also plays an important role in encoding the geometrical information.

#### References

[1] Koji Umemoto, Yang Zhou, "Entanglement of Purification for Multipartite States and its Holographic Dual", JHEP, **10** (2018) 152.

[2] Arpan Bhattacharyya, Alexander Jahn, Tadashi Takayanagi, Koji Umemoto, "Entanglement of purification in many body systems and symmetry breaking", Phys. Rev. Lett. **122** (2019) 201601.

[3] Koji Umemoto, "Quantum and classical correlations inside the entanglement wedge", Phys. Rev. **D 100** (2019) 126021.

## The relationships between neutrino Majorana mass and other physics

素粒子論研究室 大畠隆弘

**Abstract** The Seesaw models are well-known ones which derive the neutrino Majorana masses. Throughout this thesis, we show the relationships between neutrino Majorana mass and other physics, for example the muon g-2 anomaly [1], the observed dark matter relic density [2, 3] and the strong CP problem [3].

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

素粒子標準模型(SM)は、加速器などの実験結果をほぼ無矛盾に説明する。しかしながらSMで説明 できない現象も幾つか存在する。例としては、暗黒物質の存在、ニュートリノ振動、強いCP問題、 ミューオンg-2 アノマリー、バリオン優勢宇宙などが挙げられる。本博士論文では特にニュートリノ振 動に着目した。

ニュートリノ振動を説明する方法としては、ディラック質量で説明する方法、及び、マヨラナ質量で 説明する方法の2通りが知られている。このうち、本博士論文では後者の方法を考える。シーソー模型 と呼ばれる模型が、ニュートリノのマヨラナ質量を与える模型としてよく知られている。本博士論文で は、こうしたニュートリノマヨラナ質量と、SM で説明できない他の現象との関係性を調べた。

[1] では、シーソー模型の一つであるタイプII シーソー模型を用いて、ミューオンg-2 アノマリー (ミューオンの磁気双極子モーメントの、理論値と実験値の差)を説明する方法を考察した。これまで は、タイプII シーソー模型ではミューオンg-2 アノマリーを説明できないと考えられていたが、本研究 では二重荷電スカラー場を導入することでそれを説明した。レプトンフレーバーを破る過程からの制 限により、離散的なフレーバー対称性の存在が示唆されることもわかった。

[2]では、マヨロン模型に含まれるマヨロンという素粒子が暗黒物質の候補となるかどうかについて 調べた。マヨロンとは、シーソー模型におけるレプトン数対称性の破れの起源を、複素スカラー場の 真空期待値で説明した模型である。本研究では特に、陽電子宇宙線の実験から示唆されるTeV 質量の マヨロン暗黒物質の生成シナリオを、3種類提案した。1つ目のシナリオはマヨロン模型に、レプト ン数をソフトに破る右巻きニュートリノを加え、右巻きニュートリノの崩壊によりマヨロンを生成させ た。2つ目のシナリオでは、ヒッグス粒子2つからマヨロン2つへの散乱過程を用いて、マヨロンを 生成した。3つ目のシナリオでは、右巻きニュートリノ2つからマヨロン2つへの散乱過程を用いてマ ヨロンを生成した。このシナリオで暗黒物質を生成するには、マヨロンを含む複素スカラー場の実部 の質量が軽いこと、もしくは右巻きニュートリノがインフラトンから直接生成することのどちらかを 仮定しないといけないことがわかった。

[3] では、マヨロン模型におけるマヨロン、及び、レプトン数対称性の破れを、アクシオン模型にお けるアクシオン、及び、Peccei-Quinn 対称性の破れと同一視するような最小限の模型を、以下のように 構築した。まず、輻射シーソー模型という模型をマヨロン模型として拡張した。輻射シーソー模型にも 幾つか種類があるが、ニュートリノ質量を与えるループダイアグラムのルーブ部分の粒子に標準模型の カラー8表現をもたせた模型を用いた。このカラーを持った粒子を、アクシオン模型におけるカラーを 持った粒子と同一視することで、最小限の模型の構築に成功した。

#### References

[1] Nabarun Chakrabarty, Cheng-Wei Chiang, Takahiro Ohata, and Koji Tsumura. JHEP, 12:104, 2018.

[2] Yoshihiko Abe, Yu Hamada, Takahiro Ohata, Kenta Suzuki, and Koichi Yoshioka. JHEP, 07(07):105, 2020.

[3] Ernest Ma, Takahiro Ohata, and Koji Tsumura. Phys. Rev. D, 96(7):075039, 2017.

### LHC-ATLAS 実験における大半径ジェットを用いた 超対称性電弱ゲージーノの探索

高エネルギー物理学研究室 岡崎 佑太

Abstract Supersymmetry (SUSY) can extend the Standard Model to solve various problems. I present a search for supersymmetric-electrowikinos with a large mass difference between the lightest SUSY particle and the next to lightest SUSY particle, utilizing large radius jets from the decay of bosons in data collected by the ATLAS detector.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

超対称性模型は標準模型の拡張として有力な候補の1つである。超対称性模型では、標準模型の粒子の対となる SUSY 粒子を導入することで、ヒッグス粒子の質量階層性や宇宙物理最大の謎の1つである 暗黒物質の起源などの標準模型では解決できない謎を説明できる可能性がある。

*R*-parity が保存し、最も軽い SUSY 粒子(LSP)と次に軽い SUSY 粒子(NLSP)が標準模型の電弱ボソンや ヒッグス粒子の超対称性パートナー(電弱ゲージーノ)の場合、最も軽い SUSY 粒子が暗黒物質の良い候 補となり得る[1]。LSP が bino(U(1)ゲージボソンの超対称性パートナー)で NLSP が wino(SU(2)ゲージボ ソンの超対称性パートナー)の場合、未だ棄却されていない 800 GeV 以上の大きい質量差の領域[2]で探 索を行うことが重要である。また、NLSP が higgsino(higgs 粒子の超対称性パートナー)の場合など、他 のモデルを考慮して包括的に探索を行っていく必要がある。





Fig 1. Fynman diagram for hadronic decay modes of  $\tilde{\chi}_{h} \rightarrow \tilde{\chi}_{l}$  via bosons. *q* represents light-flavor (anti-) quarks.

Fig 2. Large radius jets generated by boosted boson decaying hadronically.

本講演では、Fig.1 に示すような電弱ゲージーノの崩壊で生じた電弱ボソンがハドロン崩壊をする終 状態を用いた探索手法を発表する。この終状態では QCD による背景事象が多いため、効率的に電弱ボソ ンを同定する手法の開発が必須となる。

質量差が大きい領域では、崩壊で生じた電弱ボソンが高運動量を持つため、実験室系ではFig.2に示 すように電弱ボソンの崩壊で生じた2つのクォークが近接するため2つのジェットが重なってしまい、 それぞれのクォークを正しく再構成できない。そこで2つのクォークをまとめて電弱ボソンとして再構 成できるように大半径ジェットを用いる。大半径ジェットのエネルギー分布や付随するトラックの数な どを用いて電弱ボソンを同定する手法の研究を行なった。今回はATLAS検出器で2015-2018年に収集し た139 fb<sup>-1</sup>のデータに新たな電弱ボソン同定手法を適用した場合の電弱ゲージーノの探索感度を見積も った。この結果について報告する。

#### References

[1] J. Hisano, S. Matsumot, O. Saito and M. Senami, Physics Letters B 646 (2007) 34

[2] ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C 80 (2020) 691

### Gravitational perturbations as TT -deformations in 2D dilaton gravity systems

素粒子論研究室 奥村傑

**Abstract** We investigate a gravitational perturbation of 2D dilaton gravity with an arbitrary dilaton potential. As a special case, we consider a Liouville gravity with a negative cosmological constant. In this case, a finite  $TT^-$ -deformation of the matter action is realized as a gravitational perturbation on AdS<sub>2</sub>. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

近年、TT-変形と呼ばれる 2 次元の場の理論の変形が提唱され[1,2]、大きな注目を集めている。 ここで T や T-は系のエネルギー・運動量テンソルの成分を表し、TT-変形はエネルギー・運動量テンソ ルの複合演算子によって誘起される変形として定義される。この変形はくりこみ群の観点からは irrelevant、つまり赤外領域から紫外領域へのフローである。通常 irrelevant なフローは紫外領域に行くに つれ無限個の相互作用項を誘起するため、系統的な解析が困難である。しかし、TT-変形は元の理論の 可積分性を保つ変形(可積分変形)であり、変形後のエネルギースペクトルや分配関数などが計算可能 である。さらに驚くべきことに、TT-変形は重力や弦理論と密接に関係していると考えられている。例 えば自由スカラー場の理論に対して TT-変形を実行すると南部・後藤作用が得られる。TT-変形と重力 の関係を調べることで、紫外領域における重力の振る舞いに対して新しい知見が得られると期待される。

TT-変形と重力の関連を示す重要な成果として、Dubovskyらによる2次元ディラトン重力系の議論が挙げられる[3]。彼らはJackiw-Teitelboim (JT) 模型と呼ばれる、AdS時空を背景に持つ2次元ディラトン重力模型から出発して、その平坦時空極限(flat-space JT模型)を解析した。その結果、flat-space JT 模型と任意の物質場とが結合した系における重力摂動が、元の物質場理論のTT-変形として解釈可能であることが示された。つまり、古典的な重力摂動による場の理論への補正を議論することができ、実際に重力摂動によるS行列への補正が評価されている。しかし、この議論は平坦時空周りかつ特定のディラトン重力模型に対してしかなされていなかった。

本発表ではDubovskyらによる先行研究を、一般の模型に対して拡張する。はじめに、一般のディラトンポテンシャルを持つ2次元のディラトン重力模型と物質場が結合した系における重力摂動を解析する。2次のon-shell作用を計算することで、重力摂動が物質場理論のTT-変形として解釈されるためには、ディラトンポテンシャルと物質場に一定の条件が課されることを示す[4]。また、JT模型と共形対称な物質場が結合した系を詳しく解析し、我々が構成した具体的な重力解を示す。

しかしJT模型の場合は、無限小変形の場合にのみこの議論が適用できる。なぜならばTT-変形は irrelevantであり、物質場の共形不変性を破ってしまうためである。この問題を回避する模型として、負 の宇宙項を持つLiouvilleディラトン重力系を提案する[5]。この模型は真空解としてAdS時空を含むこと が知られている。この系における重力摂動を解析することで、物質場理論が共形不変であるかによらず、 重力摂動がAdS時空上でのTT-変形として解釈できることを示す。

- [1] F. A. Smirnov and A. B. Zamolodchikov, Nucl. Phys. B 915 (2017) 363.
- [2] A. Cavaglià, S. Negro, I. M. Szécsényi and R. Tateo, JHEP 1610 (2016) 112.
- [3] S. Dubovsky, V. Gorbenko and M. Mirbabayi, JHEP 1709 (2017) 136
- [4] T. Ishii, S. Okumura, J. Sakamoto and K. Yoshida, Nucl. Phys. B 951 (2020) 114901
- [5] S. Okumura and K. Yoshida, Nucl. Phys. B 957 (2020), 115083

### X-ray Study on Supernova Remnants Interacting with Dense Clouds

宇宙線研究室 尾近 洸行

**Abstract:** We perform spectroscopy of X-rays from Supernova remnants (SNR) and reveal that both thermal conduction and adiabatic expansion are responsible for recombining plasmas in SNRs, with the dominant channel depending on the evolutionary stage. We also model line structures as evidence for sub-relativistic particles accelerated in SNRs, using atomic-collision data. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

A supernova remnant (SNR) is the astrophysical object resulting from an explosion of a star, and acts as the major energy source in the Universe. We study X-rays from SNRs interacting with dense clouds, which are ideal targets to investigate injection process of energy released in the explosions into the interstellar space. We perform spatially resolved spectroscopy of thermal X-rays from the SNRs, W44 and IC 443, with *XMM-Newton*, and construct a model to predict X-ray line emission from dense clouds bombarded by sub-relativistic particles accelerated in SNRs.

Previous observations of SNRs interacting with clouds, including W44 and IC 443, unveiled the presence of peculiar plasmas in "recombination dominant phase", so-called over-ionized recombining plasmas (RPs) (e.g., [1]). Such plasma is not anticipated in the standard picture of SNR evolution. Although the physical process of the over-ionization has not yet been fully understood, a key seems to be an efficient dissipation of internal energy of SNR plasma into ambient clouds e.g., [2–3]. We compare spatial variations of plasma parameters of RPs in W44 and IC 443 with distributions of clouds hit by their blast waves. We find that combination of lower electron temperature and shorter recombination timescale is achieved in the region interacting with the clouds [4]. Moreover, a clear anticorrelation between the electron temperature and the recombination timescale is found. The results indicate that the plasma was overionized by rapid cooling of electrons through thermal conduction with the clouds. Given that a few other overionized SNRs show evidence for adiabatic expansion as the major driver of the rapid cooling [5], our new result indicates that both processes can contribute to overionization in SNRs, with the dominant channel depending on the evolutionary stage.

Our recent X-ray studies revealed the presence of the neutral Fe K $\alpha$  line emission from dense gas in the vicinity of some SNRs, which can be best interpreted as K-shell ionization of Fe atoms in the gas by sub-relativistic particles accelerated in the SNRs e.g., [6]. The results indicate that the Fe K $\alpha$  line is a new diagnostic tool to probe sub-relativistic particles, which were almost unexplored until recently. Information on such particles is important to estimate total energy transferred into accelerated particles in SNRs and to consider the injection mechanism of thermal particles into the acceleration process. We construct a model for the Fe K $\alpha$  line structures by various projectile ions using atomic-collision data. When energetic heavy ions collide with target atoms, their strong Coulomb field can easily cause simultaneous ejection of multiple electrons of the target. This results in shifts in characteristic X-ray line energies, forming distinctive spectral structures [7]. Detection of such structures in the neutral Fe K $\alpha$  line strongly supports the particle ionization scenario, and furthermore provides direct evidence of heavy ions in the accelerated particles. An ~ eV energy resolution by X-ray micro-calorimeters onboard future X-ray satellites e.g., [8] will be able to resolve the structures.

- [1] H. Yamaguchi, et al., ApJ, 705, L6, (2009)
- [2] H. Itoh & K. Masai, MNRAS, 236, 885, (1989).
- [3] G.-Y. Zhang., et al., ApJ, 875, 2, (2020).
- [4] H. Okon, et al., ApJ, 890, 62, (2020).
- [5] H. Yamaguchi, et al., ApJL, 868, L35, (2018).
- [6] H. Okon, et al., PASJ, 70, 35, (2018).
- [7] H. Okon, et al., PASJ, 72, L7, (2020).
- [8] M. Tashiro, et al., Proc SPIE 10699, 1069922 (2018)

### Analytic Conformal Bootstrap in 2D CFT

素粒子論研究室 楠亀 裕哉

**Abstract** We study the conformal bootstrap in 2D CFT. The problem is that we cannot solve the bootstrap equation because of the complicated structure of Virasoro block. In this thesis, we give new approaches to investigate the Virasoro block and apply them to solving of the conformal bootstrap equation. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

The AdS/CFT correspondence provides remarkable progresses in understanding of the quantum gravity. Nevertheless, there are still many black boxes, and they are thought to be the greatest mysteries in modern theoretical physics. For example, we do not know how to construct a CFT dual to a pure gravity theory (so-called the holographic CFT). The conformal bootstrap is useful tool to reveal unknown data of a given CFT, like the holographic CFT. One example of remarkable accomplishments is the Cardy formula, which tells us the entropy at high energy in CFT. The surprising point is that this entropy completely matches the Bekenstein Hawking entropy. It means that the thermodynamics of the black hole is really `` thermodynamics", not just a coincidence. As in this example, the conformal bootstrap provides a lot of developments for the understanding of the AdS/CFT.

In this thesis, we develop the conformal bootstrap technique in two dimensional CFT. The problem is that we have no simple closed form of the Virasoro block, which is the fundamental object to solve the equation. One approach to overcome this problem is to consider the semiclassical limit (large c limit), which corresponds to the large degrees of freedom limit. In this limit, there are some simple closed forms of the Virasoro block. One of techniques to evaluate the semiclassical Virasoro block is known as the ``monodromy method''. In this thesis, we develop this monodromy method to give the light-cone limit of the semiclassical Virasoro block beyond the known limit (i.e. heavy-light limit) [1]. We can find an interesting transition of the Virasoro block in regard to the intermediate state. In the bulk side, this transition can be interpreted as the BTZ black hole formation from a two-pthesis state.

Moreover, we introduce another method to investigate the Virasoro block, based on the ``fusion matrix approach" [2]. We show that the fusion matrix can be utilized to study the light-cone asymptotics. This result completely matches the result from the monodromy method.

Applying this result to the conformal bootstrap equation, we can show that the twist spectrum at large spin can be realized by the fusion rules of the Liouville CFT, which is the two-dimensional counterpart of the statement that the twist spectrum in any higher-dimensional CFTs can be approximated by that of a generalized free field theory in that limit. From this view point, this large spin twist spectrum has a natural bulk interpretation. We also consider the application of the result from the monodromy method to give the Cardy-like formula for the OPE coefficients.

Finally, we give the light-cone asymptotics for more general Virasoro blocks [3]. In the above, we only focused on the 4-point Virasoro block. But we can generalize this result to higher-point Virasoro block. Moreover, in the same logic, we can also give the Regge limit asymptotics of the Virasoro block. These results can be applied to investigate the dynamics of quantum information.

- [1] Yuya Kusuki, JHEP 1808 (2018) 161
- [2] Yuya Kusuki, JHEP 1901 (2019) 025
- [3] Yuya Kusuki, Masamichi Miyaji, JHEP 1908 (2019) 063

#### Brane dynamics in Fermi gas formalism

第二分野 基礎物理学研究所 久保尚敬

**Abstract** We study dynamics of the D-branes by using a matrix model computing the partition function of their worldvolume theory. We successfully applied a computation technique called Fermi gas formalism to a broad class of matrix models. As a result, we find new dynamics of D-branes. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

The original motivation of study in this thesis is to investigate the M-theory and especially M2-branes. The M2-branes are believed to be reduced to D3-branes in type IIB string theory by taking a dimensional reduction and a T-dual. Therefore, the dynamics of D-branes are very important. We study their worldvolume theory because the IR duality of worldvolume theories reveals the dynamics of D-branes. We particularly focused on its non-perturbative aspects.

More explicitly, we study a three-dimensional  $\mathcal{N}=3$  supersymmetric Yang-Mills-Chern-Simons theory with a circular quiver diagram. We also study its IR theory, which is generally three-dimensional  $\mathcal{N}=4$  superconformal Chern-Simons theory with the same quiver diagram. The partition function of the gauge theory on the round three-sphere can be reduced to a matrix model by using so-called supersymmetric localization technique [1]. Though the matrix model is finite-dimensional integral, they are still difficult to study, especially non-perturbatively. However, a novel formalism called Fermi gas formalism [2] made it possible to study the matrix model in various aspects. For example, the technique allows us to access a parameter region called the M-theory region and can be used to study instanton effects in the region.

However, the Fermi gas formalism has only been applied to specific matrix models. One main purpose of this thesis is to apply the Fermi gas formalism to more general matrix models. We also discuss the application of the Fermi gas formalism mainly in two ways. First, we obtain exact (and therefore non-perturbative) results on relations between matrix models coming from the brane dynamics such as Hanany-Witten transition. This result implies supersymmetry breaking and duality cascade in the gauge theory. Second, we relate the matrix model to an operator called quantum curve. Motivated by this relation, we study the symmetry of the quantum curve. We then return to the brane dynamics and find that the symmetry of the quantum curve implies new dynamics of D-brane.

#### References

[1] V. Pestun, "Localization of gauge theory on a four-sphere and supersymmetric Wilson loops", Commun. Math. Phys. 313, 71 (2012), arXiv:0712.2824 [hep-th].

[2] M. Marino and P. Putrov, "ABJM theory as a Fermi gas", J. Stat. Mech. 1203, P03001 (2012), arXiv:1110.4066 [hep-th].

### 反対称化分子動力学法による 低エネルギー双極子励起モードの研究

原子核理論研究室 四方 悠貴

**Abstract** We apply variation after *K*-projection in the framework of antisymmetrized molecular dynamics with the  $\beta$ -constraint to investigation of the low-energy dipole excitation. It is found that the cluster structure plays an important role in LED excitations in light nuclei. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

中性子過剰核に現れる新奇な現象の一つに、dipole 応答において巨大共鳴よりも低いエネルギー領域 に出現する low-energy dipole (LED) がある. LED は isovector (IV) 型と isoscalar (IS) 型の強度が同じエ ネルギー領域に混在しており、複雑な isospin の性質を示すことが特徴的である. LED における複雑な 性質がどのような励起モードによって生じているのかは未だに明らかとなっていない. 励起モードの候 補として、N=Z コアに対して余剰中性子が逆位相で振動する pygmy モード, 渦的な励起を生じる toroidal dipole (TD) モード、およびクラスター励起モードなどが考えられてきた. 特に軽い原子核においては、 基底状態や低励起状態に多様なクラスター構造が存在するため、クラスターモードが LED に重要な寄 与をもたらすと考えられる. しかし、これまでの理論研究ではクラスター励起を適切に記述できる手法 で行われたものは少なく、現状として LED とクラスター励起が関連付けられた研究はほとんどない. 本研究の目的は軽い原子核における LED 励起モードをクラスター励起の観点から明らかにすることで ある.

未知の構造を持つ不安定核に対して LED 励起モードの研究を行うために、本研究では反対称化分子 動力学 (AMD) 法を LED 励起の記述に適した形式へと拡張を行った.近年、変形核において K 量子数 と LED 励起の関係が注目されていることや、クラスター模型を用いた先行研究[1]の結果から、LED 励 起の記述には K 量子数ごとに適した状態を記述する必要があると考えられる.そこで、本研究では K=0 と K=1 量子数に対して射影した状態に対して変分を行い、さらに四重極変形度 β に対して拘束条件を課 した K-projected AMD 法を構築した[2]. K-projected AMD 法は <sup>10</sup>Be へと適用した結果、K 量子数ごとの 励起成分を適切に得られ、変形度拘束によってクラスターの発達した状態も記述できるという利点から、 LED 状態に重要となる励起配位を効率的に記述できることが確認できた. K-projected AMD 法を <sup>16</sup>O と <sup>18</sup>O に適用した結果、クラスター励起が LED 状態の形成および強度の起源として重要な役割を果たすこ とが明らかとなった[2,3]. <sup>16</sup>O と <sup>18</sup>O では、低エネルギー領域に二つの LED 状態が得られ、低いエネル ギー状態は変形の小さい殻模型的な状態、高いエネルギー状態は発達した α クラスター状態であった. 殻模型的状態は K=0 と K=1 成分を同程度持つ状態であり、K=0 と K=1 で異なるモードを示すような K 量子数に応じた二面性をもつことがわかった.また、二つの LED 状態は互いに成分が大きく混合して いるために、励起モードが分離していないという結果が得られた.

本研究では LED 励起モードは K 量子数によって特徴づけられること,および軽い核ではクラスター 励起が LED の記述に重要な役割を果たすことを明らかにした.特に,現実的な LED 状態の記述には *K*-mixing や変形共存による励起モードの混ざりが重要であり,変形の大きい核では状態ごとにモードが 分離しやすく,変形の小さい核では分離しにくく励起モードが混ざって出現する傾向にあるという可能 性を示した.

- [1] Y. Shikata, Y. Kanada-En'yo, and H. Morita, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 063D01 (2019).
- [2] Y. Shikata and Y. Kanada-En'yo, Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 073D01 (2020).
- [3] Y. Shikata and Y. Kanada-En'yo, arXiv:2011.00821 [nucl-th].

### 0 *ν* β β 崩壊探索のための高圧キセノンガス TPC 大型試作機の開発

高エネルギー物理学研究室 中村 和広

**Abstract** We are developing a high-pressure xenon gas TPC for neutrinoless double-beta decay search. Our detector has a unique readout structure that uses electroluminescence light to detect ionization signals with high energy resolution. We developed a large-sized prototype detector (180L detector) to get a know-how of enlargement. We obtained a high energy resolution of 0.8% (FWHM) at Q-value by the prototype detector.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリのマヨラナ性の検証は現代物理学に残された重要な問題のひとつであり、物質優勢宇宙や ニュートリノの質量起源を解明するための大きな鍵となっている[1, 2]。ニュートリノのマヨラナ性を 検証するほぼ唯一の方法がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊( $0 \nu \beta \beta$  崩壊)を観測することで ある。我々は高圧キセノンガス Time Projection Chamber (TPC)を用いてこの観測を目指している。こ の検出器の最大の特徴は、我々が独自に開発している読み出し機構(ELCC)にある。セル化された穴の 中には強い電場がかけられており、 $0 \nu \beta \beta$  崩壊によって生じた電離電子がセルの中に引き込まれると、 線形蛍光過程である EL 過程によって光に変換・増幅される。これを光検出器 MPPC で正確に読み出すこ とで、高エネルギー分解能の達成が可能である。我々は 8 bar のキセノンガスを用いて、 $0 \nu \beta \beta$  崩壊 Q 値である 2.5 MeV において、エネルギー分解能 0.5%の達成を目指している。

現在我々は、大型化の技術獲得と 2.5 MeV 付近での性能評価を目的として、大型試作機 (180L 試作機) を開発している (Fig. 1)。180L 試作機は段階的に大型化を進めており、156 チャンネルの MPPC を用い た 1st phase では、キセノンガスへの大気混入や放電、DAQ トラブル等の多くのトラブルに見舞われた が、3.8 bar のキセノンガスに<sup>137</sup>Cs の 662 keV のガンマ線を照射した性能評価では 0 v β β 崩壊 Q 値換 算で 0.8% (FWHM) のエネルギー分解能が達成される見込みであることを示した (Fig. 2)。2nd phase では MPPC を 672 チャンネルに拡張し、さらにガス圧を 8 bar に上げることで有効体積の拡大と密度を 上げ、0 v β β 崩壊 Q 値の 2.5 MeV 付近で性能評価を行う。本発表では 1st phase で見舞われたトラブ ルをどのように克服してきたかを紹介し、2nd phase に向けた取り組みについても述べる。



Fig.1 180L large sized prototype detector.



Fig.2 Evaluation of the performance of 180L prototype detector Blue line is fitted by  $a\sqrt{E}$  and green line is fitted by  $a\sqrt{E+bE}$ .

#### References

[1] T.Yanagita, Prog. Theor. Phys. 64 (3): 1103–1105 (1980)

[2] M. Fukugita and T. Yanagida. Phys. Lett. B 174: 45-47 (1986)

### ガンマ線天文台 CTA 大口径望遠鏡 カメラ開発と望遠鏡性能評価

宇宙線研究室 野崎 誠也

**Abstract** We have developed a focal plane camera of the first Large-Sized Telescope (LST) of the Cherenkov Telescope Array which is the next generation very-high-energy gamma-ray observatory. We have also developed an analysis method for monoscopic observations and evaluated the telescope performance with the observations of the Crab Nebula. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

次世代ガンマ線天文台 Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画[1]は、口径の異なる三種類の望遠鏡を 南・北サイトに計約百台設置して、20 GeV から 300 TeV のエネルギー帯域を現行の望遠鏡より1 桁良い 感度で全天観測する国際共同計画である。20 GeV から数 TeV の低エネルギー側に最適化している口径 23 m の大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope, LST)の 1855 ピクセル焦点面カメラは、低消費電力で GHz 波形サンプリングを可能とするアナログメモリ DRS4 チップ[2]を搭載した信号読み出し回路を使用して いる。これにより、数 ns の大気チェレンコフ信号と数百 MHz の夜光背景事象を切り分け、低エネルギ ー閾値を実現することができる。2018 年 10 月に、LST 初号機がスペイン・ラパルマ島で完成した。

本研究では、LST 初号機の焦点面カメラ開発、及び性能評価を行った。まず、データ解析のために DRS4 チップ特有の電圧補正・サンプリング間隔の不均一性の較正手法を開発した。そして、この較正手法を 光検出器モジュールの全数性能評価試験のデータに適用し、線形性や電荷分解能の要求値を満たすモジ ュールを焦点面カメラに搭載した。望遠鏡搭載後には、キャリブレーションレーザー(80-90 光電子相 当)のデータを取得し、全ピクセルに対して電荷均一性 2%、時間分解能 0.4 ns であることを確認した (Fig. 1)。イメージクリーニングの最適化に向けて、様々な夜光下でのノイズレベルの評価も行い、 ノイズレベルが PMT アノードカレントの平方根に比例することを明らかにした。

さらに、望遠鏡1台による観測でも100 GeV 以下の低エネルギー帯で高い性能を持つ解析手法を開発 し、望遠鏡性能を評価した。この手法では、解析対象を点源天体に絞って、期待される到来方向を仮定 したパラメータを追加し、機械学習の入力として用いる。この手法により、ガンマ・ハドロンシャワー 弁別能力が向上することをシミュレーションデータで確認した。そして、LST 初号機で観測したかに星 雲から有意なガンマ線信号(100分で18σ)を検出するとともに(Fig. 2)、口径17 m 望遠鏡2台で 構成される MAGIC 望遠鏡で得られているスペクトル[3]と誤差の範囲内で一致することを確認した。本 解析では、MAGIC 望遠鏡の閾値(50 GeV)よりも低い、約40 GeV の閾値を実現した。





Nebula observed with the first LST.

- [2] S. Ritt et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 623, 486-488 (2010).
- [3] J. Aleksic et al., Astropart. Phys., 72, 76–94 (2016).

<sup>[1]</sup> The CTA consortium, *Exp. Astron.*, **32**, 193–316 (2011).

### Non-perturbative Aspects of Higgs Physics in the Standard Model and Beyond

素粒子論研究室 濱田佑

**Abstract:** Firstly, we study the Nambu monopole in two Higgs doublet models (2HDM). It is a magnetic monopole-like soliton accompanied by two vortex strings containing Z boson fluxes. We present some cosmological consequences. Another important soliton in Higgs physics is the sphaleron. We propose a novel method to obtain the sphaleron solution. It would enable accurate calculations of baryon asymmetry in the universe.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

After the results of the Large Hadron Collider Run II, the success of the Standard Model (SM) of particle physics is established whereas new physics beyond the SM has not yet been discovered. In this situation, it may be important to look at the SM and its extensions from a different perspective.

In this work, we study solitons in Higgs physics towards revealing the whole structure of the Higgs sector. Solitons are non-perturbative and coherent configurations of fields and can provide non-trivial predictions that are not seen in the perturbative approach. Firstly, we consider the Nambu monopole [1,2] in two Higgs doublet models (2HDM), in which an additional Higgs doublet is added into the SM Higgs sector. The Nambu monopole is a magnetic monopole-like soliton accompanied by two vortex strings containing Z boson fluxes. This monopole is topologically stable when the 2HDM Higgs potential has two global symmetries in contrast to a counterpart in the SM, which is unstable because it is pulled by a single Z string. Furthermore, we study a more realistic case without the symmetries and present some cosmological consequences. The monopole would be useful to probe non-perturbative physics in 2HDM. Another important soliton in Higgs physics is the sphaleron [3], which is an unstable soliton. We propose a novel method to obtain the sphaleron solution based on the gradient flow. It would work well for the SM and some extended models and enable accurate calculations of baryon asymmetry in the universe.



Fig.1: Plots of energy density and gauge fluxes of Nambu monopole in two Higgs doublet models

- [1] Y. Nambu, Nucl. Phys. B130 (1977) 505.
- [2] T. Vachaspati, Phys. Rev. Lett. 68 (1992) 1977.
- [3] N. S. Manton, Phys. Rev. D28 (1983) 2019.

### フェムト秒レーザー照射金属表層の光学特性時間変化に関 する研究

レーザー物質科学研究室 古川雄規

**Abstract** To study the formation mechanism of nanostructures on metal target by femtosecond laser ablation, we have proposed a new method to measure the transient optical property of titanium surface irradiated by a femtosecond laser with below-ablation-threshold fluence. Several hundred picosecond after the irradiation, increase in absorption coefficient has been discovered. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

短時間幅に大きいエネルギーが集中した高強度短パルスレーザーが物質に照射されると、物質表層の 温度は急速に上昇する。レーザー照射により物質の破壊閾値(Fth)を超えるレーザーフルーエンス(F:単 位面積当たりに照射されるエネルギー)が供給されると、物質表層が融解(または蒸発やイオン化)し 雰囲気へと剥離、飛散する「アブレーション」が起きる。2000年頃、F~Fthのフェムト秒レーザーを固 体に数回から数百回繰返し照射すると標的表面にレーザー波長以下の周期性を持つナノ構造(周期構造) が形成されることが発見された。周期構造を形成することで反射率などの光学特性に加え、摩擦などの 機械特性、撥水性や生体親和性などの材料特性を制御(または付与)できるため、アブレーションによ る表面加工は物質表面の形状をナノレベルで制御し有益な特性を付与した次世代材料を作る手法とし て実用化が切望されている。レーザー特性や標的、雰囲気など非常に多くの条件を"網羅的に"変えて 最適な加工条件を見出すことは困難であり、ナノ構造の形成機構解明が求められる。本研究では、従来 の実験手法における課題を克服した、従来法と異なる原理の手法を提案してナノ構造の形成機構解明に 取り組んだ。以下に、形成機構解明のために求められる実験(第二段落)、従来法の課題(第三段落)、 本研究手法の概要と結果(第四段落)を述べる。

未だ解明されていない形成機構を定性的に説明する多くのモデルでは、電子が、アブレーションの起因となるエネルギー吸収[1]や周期構造形成の起因となるプラズマ波励起[2]を司ると考えられており、その運動(電子密度空間分布の時間変動)を明らかにすることが形成機構解明に繋がる。実験的には、電子密度と強く相関する屈折率、吸収係数などの光学特性の標的深さ方向分布の時間変化を、レーザーエネルギーが侵入できる標的表層から深さ数+nmの空間領域、かつ、アブレーションが進展するフェムト秒からナノ秒にわたる幅広い時間領域、について測定することが望まれている。

従来、表面研磨された標的表面にポンプレーザーを照射し、続けて照射したプローブ光の反射から光 学特性が測定されてきた(光プローブ法:Fig.1(a))。しかし、光プローブ法には二つ課題がある。① レーザー侵入の深さが波長に依存するため深さ分布を測定するには光源が多数必要となり容易でない。 ②複数回照射によりナノ構造が形成された表面ではプローブ光が散乱してしまい測定が困難である。

本研究では、これらの課題を克服し光学特性の深さ分布とその時間変化を明らかにするための新しい 手法を開発した(Fig. 1(b))。ポンプレーザーが照射された標的表面に時間差( $\Delta t$ )をつけてプローブ レーザー( $F = F_2$ )を照射し、形成される加工痕の深さを測定する。 $F_2$ が大きくなるとより深部までフ ルーエンスが供給され加工痕は深くなるが、その深さ増量は単位長さ当たりのフルーエンス吸収率(吸 収係数)に依存する。 $F_2$ を詳細に変えて加工痕の深さを測定することで、吸収係数の深さ分布が求めら れる。本手法では、 $F_2$ は容易に制御でき(①の解決)、また、反射光ではなく加工痕の深さを測定する ため粗い表面であっても測定できる(②の解決)。 $F \leq F_{th}$ であるポンプレーザーが照射されたチタン 表層の吸収係数の深さ方向の分布を時間分解測定したところ、 $\Delta t \sim 100 \text{ ps}$ では表層(<20 m)の吸収係数 が増加することなどを新たに発見した[3,4]。本手法により測定される吸収係数の時間変化から電子密度 の時間変化を求め、ナノ構造の形状との比較を行うことで形成機構の解明が進展すると期待される。



References

B.N. Chichkov *et al.* Appl.
 Phys. A 63, 109-115 (1996).
 S. Sakabe *et al.* Phys. Rev.
 B 79, 033409 (2009).

[3] Y. Furukawa *et al*. Appl. <sup>5</sup> Phys. Lett. 108, 264101 (2016).

[4] Y. Furukawa *et al.* Appl. Surf. Sci. 515, 146047 (2020).

Fig. 1. schematic charts of (a) conventional optical probe method and (b) our new method to measure the transient optical property of the laser irradiated metal surface.

### 線源メスバウアー分光法による希土類元素薄膜の 超微細構造の原子分解能研究

核放射物理学研究室 細川修一

Abstract The investigation methods with atomic resolution of thin lanthanoid films has been developed using neutron-irradiated films as a Mössbauer source. Thin films of lanthanoids were deposited by electron beam gun. By introducing specific isotope into the atomic layers as a probe, Mössbauer spectra of a specific isotope can be obtained.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

固体中の原子核が同種の励起核からのγ線を反跳なしに吸収/放出する現象は、無反跳核γ線共鳴効 果(メスバウアー効果)と呼ばれる。反跳を無視できることで原子核の励起準位の neV 程度の線幅がそ のままγ線に保持され、これにより原子核の励起準位に影響を与える核の電気四極子モーメントによる 四極子分裂や、核ゼーマン分裂、異性体シフトなどの超微細構造を極めて高精度に観測することが出来 る。これがメスバウアー分光法である[1,2]。

原子核の励起準位の変化を高い分解能で測定することの出来るメスバウアー分光法は、物質の電子系 や磁性を調べるために有効な手法である。薄膜の磁性研究においてもまた有効であり、同位体置換など により界面などのより限定的な物性を測定することも期待されている。特に希土類元素は4f電子のた めに高い磁気異方性を有することが多く、磁性体材料として有望であり様々な応用がなされている物質 である。しかし希土類元素の電子系や磁性を原子分解能メスバウアー分光法で測定したい場合、通常の 吸収分光法では有効厚の小ささから十分なS/Nが得られず測定が困難であった。

本研究では、線源である放射性同位体から出る特定のエネルギーを持ったγ線を試料に照射し共鳴吸 収させる通常の方法ではなく、試料を中性子照射で放射化して線源とし、既知の吸収体に照射すること で共鳴効果を見る線源メスバウアー分光法を用いた。試料となる希土類薄膜は電子ビーム(EB)ガン式薄 膜蒸着装置を使用して作成し、これを京都大学複合原子力科学研究所の研究用原子炉(KUR)での中性子 照射を用い、測定試料の核変換により試料内部にメスバウアー親核をドープし線源とした。その親核か ら放出される試料薄膜の環境を反映した超微細構造を示すγ線のエネルギープロファイルを、単純なエ ネルギープロファイルをもつ吸収体を使い分析した。

中性子照射による放射化断面積は核種ごとに大きく異なるため、ある特定の核種を薄膜中の目的の位置に挿入し放射化させることで、ある特定の原子層に着目した超微細構造の情報を得ることが可能になる。また、線源から放出される放射線の角度分布を測定することで、ホログラフィ原理を用いた原子構造の情報を取得することも可能になる[3]。本研究では、これらの手法を用いて、薄膜中の原子分解能での超微細構造の研究手法の開発を目的として実験を進展させた。

本研究により、薄膜試料を中性子照射により線源として用いることで、原子分解能での超微細構造の研究が可能であることが実証され、今後の研究により、多様な分野への応用が期待される。

#### References

[1] N.N. Greenwood, T.C. Gibb, "Mossbauer Spectroscopy", (Chapman and Hall Ltd, 1971).

- [2] 佐野博敏, "メスバウアー分光学-その化学への応用-"(講談社, 1972).
- [3] P. Korecki, J. Korecki, and T. Slezak, Phys. Rev. Lett. 79, 3518 (1997).

# Shear viscosity of classical fields using the Green-Nakano-Kubo formula on a lattice

原子核理論研究室 松田英史

**Abstract** We investigate the shear viscosity of the classical Yang-Mills field based on the linear response theory. We find that its coupling dependence is weaker than the leading-order perturbative calculation. We also discuss its magnitude by comparing with that extracted in expanding geometry. © 2020 Department of Physics, Kyoto University

The perturbative calculations based on the quantum chromodynamics (QCD) predict that a matter produced in relativistic heavy-ion collisions is initially in the form of a highly occupied and weakly coupled system consisting of gluons, which is called glasma. Due to the high occupancy and the weak coupling, quantum fluctuations give only a sub-leading effect in the state of the glasma. The real-time lattice simulation of the classical Yang-Mills (CYM) field therefore provides important insights into the space-time evolution of the glasma. For example, it has been suggested that the instabilities of the CYM field drive the thermalization of the glasma. Recently, the CYM description is also used to obtain initial conditions for subsequent hydrodynamic evolution.

The shear viscosity extracted by the hydrodynamic analysis is found to be close to the lower bound predicted by the superstring theory. The underlying mechanism for such a small shear viscosity has been studied from various points of view.

The main purpose of this presentation is to extract the shear viscosity in the CYM theory that is the framework giving the hydrodynamic initial condition in the current analysis. It may be worth investigating how the transport properties of the CYM field are reflected in the initial condition of hydrodynamics. We extract the shear viscosity from the time correlation function of the energy-momentum tensor, via the Green-Nakano-Kubo relation. We examine the time correlation function on a lattice by using many thermal configurations as an ensemble. Our studies are based on the scaling property of the CYM theory, which allows us to represent the shear viscosity on the lattice unit by a function of  $g^2T$ ,  $\eta = Tf_{\eta}(g^2T)$ .

We show the scaling function  $f_{\eta}$  determined by the numerical calculations. It rapidly increases with decreasing  $g^2T$  at small  $g^2T$  and its g dependence,  $f_{\eta} \propto g^{(1.10-1.88)}$ , is found to be much weaker than the leading-order perturbative calculation. This weaker dependence is consistent with the g dependence of the anomalous viscosity under the strong disordered field [1]. The obtained value of the shear viscosity based on the linear response theory is found to be roughly consistent with that extracted from the evolution of the glasma energy density in a longitudinal expanding geometry [2]. This presentation is based on Ref. [3].

#### References

[1] M. Asakawa, S. A. Bass and B. Müller, Phys. Rev. Lett. 96, 252301 (2006); Prog. Theor. Phys. 116, 725 (2006).

[2] T. Epelbaum and F. Gelis, Phys. Rev. Lett. 111, 232301 (2013).

[3] H. Matsuda, T. Kunihiro, B. Müller, A. Ohnishi and Toru T. Takahashi, Phys. Rev. D 102, 114503 (2020).

### パイ中間子原子精密分光による クォーク凝縮の密度依存性の評価

原子核・ハドロン物理学研究室 松本翔汰

**Abstract** An established approach for quantitative investigation of the partial restoration of chiral symmetry in finite density is study of deeply bound pionic atoms. We plan to perform spectroscopy of pionic atoms via  $(d, {}^{3}\text{He})$  reaction at RIBF. A newly developed focal-plane tracking detector system will allow us to achieve more precise measurement.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

クォークから成るハドロンは、カイラル対称性の自発的破れにより質量を得る。カイラル対称性が自 発的に敗れた真空では、クォークと反クォークが対になってクォーク凝縮が形成されている。クォーク 凝縮は有限温度・密度中において減少し、カイラル対称性が部分的に回復すると考えられている[1]。

有限密度中におけるカイラル対称性の部分的回復を定量的に検証する方法として、パイ中間子原子の 分光実験がある。パイ中間子原子とは、負電荷パイ中間子が原子核との引力的なクーロン力と斥力的な 強い力によって原子軌道に束縛された系であり、パイ中間子と原子核の波動関数が部分的に重なってい る。パイ中間子原子における強い力は光学ポテンシャルによって記述され、その中のアイソベクトル散 乱長がクォーク凝縮と理論的に関係づいている[2]。そのため、実験によって測定したパイ中間子原子の 束縛エネルギーを再現するように光学ポテンシャルを決定することにより、原子核密度中におけるクォ ーク凝縮を定量的に評価することができる。これまでに、理化学研究所 RIBF においてパイ中間子原子 の1s 状態と 2p 状態の同時測定に成功している[3]。有限密度中におけるクォーク凝縮に 1s 状態が関係 するのに対し、2p 状態は強い力の影響をほとんど受けないため、2p 状態をエネルギー較正にもちいる ことで、系統誤差を削減することができる。

本研究では、クォーク凝縮の密度依存性を実験的に探ることを目標とする。有限密度中におけるクォ ーク凝縮の値は、既にドイツ重イオン研究所 GSI において評価されている[4]。この先行研究により、標 準各密度の約 60%の密度においてクォーク凝縮は、真空中に比べて約 20%減少していることが明らかと なった。この結果は不定性が大きく、さらに真空中と有限密度中の1点のみで比較するに止まっている。

異なる密度におけるクォーク凝縮を評価するために、複数の同位体を標的として用いる。パイ中間子 がプローブする原子核密度は、原子核の質量数に応じて変化すると理論的に示唆されている[5]。本研究 では、安定同位体が多く存在するスズから、質量数 112, 115, 119, 124 の 4 つを選ぶ。中性子数の違 いによるパイ中間子と原子核に働く斥力の強度の変化から、10%程度の密度の変化が得られる。

本研究では、(*d*, <sup>3</sup>He) 質量欠損分光という実験手法で測定する。加速器から供給される重陽子をスズ標 的に照射し、パイ中間子原子を生成する。同時に生成されたヘリウムを RI 生成分離装置の運動量分散 焦点面でトラッキングし、通過位置と角度からヘリウムの運動量を再構成する。エネルギー保存則から パイ中間子原子の束縛エネルギーが求まる。

クォーク凝縮の密度依存性を評価するために必要な実験精度は、分解能と統計制度の向上から実現さ せる。トラッキング検出器を真空中で動作させることにより多重散乱を抑制し、エネルギー分解能を改 善した。分解能への寄与は標的の厚さによる反応点の不定性が支配的である。申請者は、データ収集の 効率化を図ることにより、標的を薄くしても先行研究と同等の統計精度を保ちながら、最終的に先行研 究の2倍の分解能を実現させることを目指す。

- [1] W. Weise, Nucl. Phys. A 553, 59 (1993).
- [2] T Hatsuda and T. Kunihiro, Phys. Rep. 247, 221 (1994).
- [3] T. Nishi et al., Phys. Rev. Lett. 120, 152505 (2018).
- [4] K. Suzuki et al., Phys. Rev. Lett. 92, 072302 (2004).
- [5] N. Ikeno et al., Prog. Theor. Phys. 126, 483 (2011).

### Geometry of configuration space in Markov chain Monte Carlo methods and the worldvolume approach to the tempered Lefschetz thimble method

素粒子論研究室 松本信行

Abstract We develop the Markov chain Monte Carlo method in two directions. The first direction is to define a distance between configurations, which enumerates the difficulty of transitions between configurations. The second is to develop the tempered Lefschetz thimble method, which an algorithm towards solving the sign problem. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

The Markov chain Monte Carlo (MCMC) method has been an important tool in theoretical physics, as it enables non-perturbative calculations of expectation values from first principles. In this work, we develop MCMC methods in two directions, aiming to investigate still unknown aspects of physical systems.

The first direction is to define a distance between configurations [1,2], which enumerates the difficulty of transitions between configurations. Such distance enables us to investigate relaxation processes in a MCMC algorithm in terms of the geometry of the configuration space, and further to adjust parameters in the algorithm in a purely geometrical way. On the other hand, since our distance gives a way to define geometry from a stochastic process, we can regard it as a novel mechanism for the emergence of spacetime geometry from randomness [3]. As an example, we apply our formalism to a tempered stochastic process of an eigenvalue of a U(N) matrix, where we argue that a Euclidean anti-de Sitter space emerges in the configuration space.

The second direction is to develop the tempered Lefschetz thimble method (TLTM) [4], which is an algorithm for solving the sign problem. The TLTM is a parallel tempering algorithm, in which we use the flow time of the antiholomorphic gradient flow as the tempering parameter, and prepare copies (or replicas) of the configuration space for each flow time. We first develop the TLTM by proposing an algorithm to evaluate expectation values precisely with a criterion ensuring global equilibrium and the sufficiency of the sample size [5]. We then implement the Hybrid Monte Carlo (HMC) algorithm on the TLTM [6], in order to reduce computational costs for transitions on the flowed surface compared to the Metropolis algorithm. Finally, we propose a novel HMC algorithm, where molecular dynamics is performed on a continuum set of the flowed surfaces, which we call the worldvolume of the flowed surface [7]. This algorithm solves the sign and ergodicity problems simultaneously without preparing replicas. Furthermore, one no longer needs to compute the Jacobian of the flow in generating a configuration, and only needs to evaluate its phase upon measurement.

#### References

[1] M.Fukuma, N.Matsumoto and N.Umeda, JHEP 12, 001 (2017) [arXiv:1705.06097 [hep-lat]].

[2] M.Fukuma, N.Matsumoto and N.Umeda, JHEP 1811, 060 (2018) [arXiv:1806.10915 [hep-th]].

[3] M.Fukuma and N.Matsumoto, PoS CORFU2019, 180 (2020) [arXiv:2004.00975 [hep-th]].

[4] M.Fukuma and N.Umeda, PTEP 2017, no. 7, 073B01 (2017) [arXiv:1703.00861 [hep-lat]].

[5] M.Fukuma, N.Matsumoto and N.Umeda, Phys.Rev.D100, no.11,114510(2019)[arXiv:1906.04243 [cond-mat.str-el]].

- [6] M.Fukuma, N.Matsumoto and N.Umeda, arXiv:1912.13303 [hep-lat].
- [7] M.Fukuma and N.Matsumoto, arXiv:2012.08468 [hep-lat].

### Long time supernova simulation and search for supernovae in Super-Kamiokande IV

高エネルギー物理学研究室 正光 森

Abstract Supernovae are one of the most energetic explosions in the universe and release neutrinos. We simulated a supernova model up to 20 s. Next we apply this model for Super-Kamiokande to search distant supernovae and obtain the upper limit of the supernova rate of 0.36[SN/year]. (45 words) © 2021 Department of Physics, Kyoto University

本研究は超新星爆発について理論と観測の両面から研究を行ってきた。超新星爆発は太陽の8倍以上 の質量をもつ恒星がその一生の最期起こす宇宙でも最も激しい爆発の1つである。超新星爆発は自然界 の4つの力がすべて関わる複雑な現象であり、盛んに理論計算が行われてきた。理論計算は主に爆発す るかを決める1秒以内に集中している。しかし、超新星爆発ニュー

トリノの唯一の観測例である SN 1987A[1]からは 10 秒以上にわり 11 個のニュートリノイベントが水チェレンコフ検出器である Kamiokande 検出器に観測された。Kamiokande の後継機である Super-Kamiokande (SK)では銀河中心で超新星爆発が起きた場合、数 千個のニュートリノイベントが 10 秒以上にわたって観測されるこ とが SN 1987A の観測より予測される。そこで超新星爆発の長時間 計算を行い、Fig.1 のように 20 秒に達する長時間の計算に成功し た。このモデルを使い SK での総イベント数を見積もると 2,000 個 が観測されることが予想される。これは、SN 1987A と比較しても 無矛盾な値であることを証明した。



次に観測面について述べる。SK では超新星爆発が観測された場合に通常の 22.5 kton の有効体積だけ でなく内部検出器の 32.5 kton の全体積を解析に使うより情報が得 られると期待できる。しかし、有効体積の外側では、背景事象の増 大とイベントの再構成精度の低下によりどこまでイベントが使える かどうかは定かではない。そこで本研究では、自ら開発した長時間 計算(森モデル)を使用して有効体積の外側を解析に使う条件を明 らかにした。その結果、外側でも 15MeV 以上では背景事象はほぼな くまた再構成精度も悪くなく解析に使えることを明らかにし、有効 体積の拡大を達成した。

最後に理論と観測の研究の応用として、SK における遠い超新星爆 発探索を行った。SK には 24 時間体制で超新星爆発を監視するモニ



Fig. 2. Detection probability

ターが搭載されているが、このモニターは超新星爆発が比較的近くて イベント数が多い場合にしか反応しない。SK の観測データには遠い超新星爆発が記録されている可能性 があると考えられる。それを、オフライン解析で詳細に解析を行った。この解析のイベントのカット条 件の決定には森モデルと SK での背景事象解析を応用した。本探索の探索感度を Fig. 2 に示す。本探索 の感度は森モデルに対して 100kpc、中里モデル[2]に対しては 150kpc、Failed モデル[3]に対しては 300 kpc までの 100%の観測確率を達成した。2008 年から 2018 年の 3384 日の観測時間のデータを解析して 1 個の物理事象が発見されたが、詳細でこれは超新星爆発によるものでないと結論付けた。よって 100% の観測確率の距離で 0.36[SN/year] (90% C.L.) という上限を付けた。

- [1] K.Hirata et al. Phys. Rev. Lett. 58, (1987)1490
- [2] K.Nakazato et al. Astrophys. J. Supp. 205 (2013) 2
- [3] K.Nakazato et al.Astrophys. J. 804 (2015) 75

### Path optimization with neural network for sign problem in quantum field theories

原子核理論研究室 森勇登

**Abstract** We propose a new method, the path optimization method, to avoid the sign problem which appears in some field theories, such as finite density lattice QCD. In this talk, we discuss the application of this method to low dimensional gauge theory with a serious sign problem. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

符号問題は、有限密度フェルミオンを含む場の理論をはじめとする様々な量子多体理論に現れる数値 的な障害である。特に有限密度格子 QCD では、高バリオン密度領域でのシミュレーションを妨げている。 この重要な問題に対して、位相再重み付け法、Taylor 展開法、虚数化学ポテンシャル法など様々な手法 が提案されているが、これらの手法は低密度領域でしか有効ではない。近年では、積分変数の複素化を 利用した 2 つの手法、複素 Langevin 法および Lefschetz thimble 法が注目されている。しかしこれら 2 つの方法は作用の正則性を前提としているため、作用に特異点や cut がある場合には、その有効性は自 明ではない。

本研究では、Lefschetz thimble 法に着想を得た新しい手法である経路最適化法を提案する。この方 法では、変数を複素化し、その積分経路を試行関数で表現する。その際に試行関数を変分し、符号問題 の程度を表す関数である目的関数を最小にすることで、適切な経路を得る。このようにして、符号問題 を最適化問題に帰着することができる。今までに一次元積分 [1]、1+1 次元の有限密度複素スカラー場 の理論 [2]、0+1 次元の有限密度 QCD [3] に適用し、その有効性を確かめている。

本発表ではゲージ理論への応用として、U(1)ゲージ模型への経路最適化法の適用について議論する。 この模型は作用にプラケットが一つのみ含まれており、結合定数が複素数であるゲージ理論である。こ の模型において効率的に経路を最適化する方法を検討した結果として、ゲージ自由度が固定されている 場合や、ニューラルネットワークへの入力にゲージ不変量を用いた場合に、符号問題が改善されること が明らかとなった。また最適化された経路とLefschetz thimbles との比較も行った(図 1)。また、予備 的な結果として、このゲージ処方箋を 1+1 次元格子上のU(1)ゲージ理論に適用した結果(図 2)を報告す

る。



図 1. ゲージ固定を行い、最適化して得られた経路(散布 図)と Lefschetz thimbles(実線)。青色(赤色)の点は結合 定数が β =0.5i (2i)の時の結果を示す。



図 2. 最適化前後における平均位相因子の値。青色が最 適化前で赤色が最適化後の結果。格子サイズは2×2。

- [1] Y. Mori, K. Kashiwa, and A. Ohnishi, Phys. Rev. D, 96(11), 111501 (2017).
- [2] Y. Mori, K. Kashiwa, and A. Ohnishi, PTEP, 2018(2), 023B04 (2018).
- [3] Y. Mori, K. Kashiwa, and A. Ohnishi, PTEP, 2019(11) (2019).
- [4] K. Kashiwa and Y. Mori, Phys. Rev. D, 102(5), 054519 (2020)

### 連続重力波の新たな全天探索手法について

天体核研究室 山本貴宏

Abstract We develop and examine a new, computationally cheap method to detect continuous gravitational waves. Our method can detect monochromatic signals with 32% larger amplitudes than the coherent matched filtering, with a reasonable computational cost. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

非常に長い継続時間、小さな周波数変動、ほぼ一定の振幅を持つ重力波を総称して、連続重力波と呼ぶ。連続重力波の重力波源としては、回転する歪んだ中性子星、回転するブラックホール周りのアクシオン雲などが挙げられる。連続重力波は宇宙物理的・素粒子物理的に重要な知見をもたらすと期待されている。([1]などを参照)

ここでは周波数が一定の連続重力波を考える。地球の公転および自転により、重力波源は検出器に対して相対的に運動している。そのため、放出された重力波が単色波であっても、観測される重力波信号は重力波源の位置に依存して位相変調を受ける。重力波波形が理論的にモデル化できる場合は、観測された信号と理論波形との相関をとる、マッチドフィルタと呼ばれる手法が標準的である。連続重力波の場合は理論波形が重力波源の位置にも依存しているため、様々な方向を想定した多数の理論波形それぞれに対して相関をとる必要がある。1年の観測データをコヒーレントに解析しようとすると、1TFLOPSの計算機で計算時間はおよそ 2.2×10<sup>11</sup>秒にもなってしまう。

我々は、excess power 法とニューラルネットワークを組み合わせて、計算量的に効率的な検出手法 を開発した[2]。我々の手法は、1) 観測された信号に対して前処理を施す、2) excess power 法を用い てイベント候補を絞り込む、3) ニューラルネットワークを用いて重力波源の方向をさらに絞り込む、 4) 得られた候補に対してコヒーレントなマッチドフィルタを適用する、の4段階に分けられる。excess power 法およびマッチドフィルタについては解析的に、ニューラルネットワークについては模擬信号を 用いて、計算時間および検出能力を評価した。その結果、現実的な計算時間を仮定すると、コヒーレン トなマッチドフィルタによる全天探索の場合に比べて、32%程度大きな信号であれば検出できることが わかった。



Fig1. Computational cost as a function of minimum detectable amplitude with 95% detection probability. If a 1TFLOPS computational power is available, we can detect signals with 32% larger amplitudes than the matched filtering.

#### References

[1] Keith Riles, "Recent searches for continuous gravitational waves", Mod. Phys. Lett. A 32 (2017) 39, 1730035

[2] Takahiro S. Yamamoto and Takahiro Tanaka, "Use of excess power method and convolutional neural network in all-sky search for continuous gravitational waves", arXiv: 2011.12522.

### 0vββ 探索のための高圧キセノンガス TPC の開発 : 試作機の性能評価と有感体積拡大に向けた研究開発

高エネルギー物理学研究室 吉田将

**Abstract** We are developing a high-pressure xenon gas TPC to search for the neutrinoless double-beta decay of  $^{136}$ Xe. We showed that the prototype detector is expected to achieve a good energy resolution of 0.8% FWHM at the Q-value. Development to enlarge the sensitive volume of the prototype detector is also conducted.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノ質量の異様な軽さや宇宙における物質反物質非対称性などの素粒子物理学における謎 を解く手がかりとして、ニュートリノがマヨラナ粒子、すなわち粒子と反粒子を同一視できるフェルミ オンである可能性が示唆されている。ニュートリノのマヨラナ性は、ニュートリノを伴わない二重ベー タ崩壊(0vββ)の探索により検証することができる。我々は<sup>136</sup>Xeの0vββを探索すべく、高圧キセノンガ スを検出媒体とする Time Projection Chamber(TPC)を開発しており、<sup>136</sup>Xeの0vββにおけるQ値(2458 keV) での検出器性能の評価を目指して試作機を製作・運用している。

エネルギー分解能のエネルギー依存性を評価するため、 φ16 cm x L10 cm の有感領域を持つ試作機に 3.8 気圧のキセノンを封入し、複数のガンマ線源(<sup>133</sup>Ba,<sup>22</sup>Na,<sup>137</sup>Cs)由来のガンマ線を照射して測定を行な った。温度による出力信号の変動や、ガス中をドリフトすることによる電離電子数の減少などの効果を 補正したうえでエネルギースペクトルを取得し、各ガンマ線ピークの幅からエネルギー分解能を評価し た。この結果、先行研究[1]で起源が未解明となっていた、エネルギー分解能のうちエネルギーに比例し て増大する成分は実際にはほぼ存在せず、Q 値に外挿して 0.8% FWHM という高いエネルギー分解能が 見込めるという結果を得た(Fig. 1)。

Q値付近のより高いエネルギーでの検出器性能を直接評価するためには、検出器の有感体積を拡大し て高いエネルギーの事象の飛跡が有感領域内に収まるようにする必要がある。これには、キセノンガス 圧力の向上と、広い領域で一様な電場を形成できるドリフト電場形成電極の開発が必要である。キセノ ンガス圧力が増えれば検出器に必要な電圧も高くなる。高電圧を直接圧力容器外から導入することによ る導入部での放電を避けるため、圧力容器内で使用可能なフレキシブル基板(FPC)上で構成された昇圧 回路(Cockcroft-Walton 回路、CW 回路)を開発した。5 枚の FPC を連結することで目標電圧の-65 kV が生 成可能であることを示し、また、CW 回路運用中の AC 的な電位の振動が検出器の光検出素子 MPPC に ノイズとして重畳せず、検出器性能に悪影響を与えないことを示した。ドリフト電場形成電極について は、有限要素法による電場計算に基づき、圧力容器体積を最大限有感領域として利用しつつ放電を避け られる構造を考案し製作した(Fig. 2)。CW 回路ではなく直流電源で直接電圧を付与する方式で実装して 測定を試みたが、電圧を与えるケーブルと干渉する点からの放電が生じたため安定した測定はできなか った。この知見を元に設計を変更し、大体積での試作機性能評価に向けて開発を進行中である。



Fig. 2 Measured energy resolution



Fig. 2 Developed drift field cage

#### References

[1] S. Ban et al., PTEP 3 033H01 (2020).

### 電子陽電子衝突における A (1405) 粒子の 直接生成断面積の測定

原子核・ハドロン物理学研究室 渡邊 憲

**Abstract** Production rate of a hadron in  $e^+e^-$  annihilation may reflect the inner structure of the hadron. On the expectation, we are analyzing the production rate of  $\Lambda(1405)$  using data of BELLE experiment. In this presentation, I will report the overview and the current status of the analysis. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

ARGUS, CLEO, Belle 実験などで電子陽電子衝突におけるハドロンの生成断面積は測定されてきた [1]。その生成率は、スピンに関する位相空間の影響を除き、ハドロン質量に伴い指数関数的に下がる ことが知られている:

 $\langle n \rangle / 2J + 1 \propto \exp(-\alpha m)$ 

ここで、n は生成率、J はスピン、m は質量である。興味深いのは生成率減少の程度を表すパラメータ αがバリオンの方がメソンより大きくなっていることである。これはαが構成子クォーク数に依存して おり、その数が増えるほどαが増加することを示唆している。もしこれが事実ならば、構成子クォーク が4つ5つであるようなエキゾチックハドロンの生成率は通常のバリオン・メソン曲線上の値よりも低 くなると考えられる。

我々はこの予想のもと、Λ(1405)の断面積測定に着目した。Λ(1405)は単純なクォーク模型では質量の再現が難しく、古くからK中間子と核子の準束縛状態である可能性が指摘されてきた粒子である[2]。 近年の理論研究でもそれを支持する結果が報告されており(例えば[3][4])、有望なエキゾチックハドロン候補の一つである。

Belle 実験のデータを用いて、電子陽電子衝突から直接  $\Lambda$  (1405) が生成される e<sup>+</sup>e<sup>-</sup> →  $\gamma * \rightarrow \Lambda$  (1405) X + c. c. の反応断面積を調べる。  $\Upsilon$  (4S) からの混入を避けるため、その質量より 60 MeV 低い、 重心エネルギー 10.52 GeV (ルミノシティー 79.3 fb<sup>-1</sup>)のデータを使用する。解析では崩壊チャンネ ル  $\Lambda$  (1405) →  $\pi^{-}\Sigma^{+} \rightarrow \pi^{-}p\pi^{0}$  および、 $\pi^{0}\Sigma^{0} \rightarrow \pi^{0}\Lambda\gamma$  の二つのチャンネルを調べる予定であ る。また、ここでは blind analysis を採用し、 $\Lambda$  (1520)を参照の基準としている。現在は $\Lambda$  (1405) →  $\pi^{-}\Sigma^{+}$ のチャンネルについて解析を進めている。イベント選別の条件の最適化と同時に、 $\Lambda$  (1520)の断 面積の先行研究の値[5]と比較し、解析の妥当性を確認している。本発表では解析内容の概要と現状に ついて述べる。

#### References

[1] P.A. Zyla et al. (Particle Data Group), Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).

[2] N. Isgur and G. Karl, Phys. Rev. D 18, 4187 (1978).

[3] T. Hyodo and D. Jido, Prog. Part. Nucl. Phys. 67, 55-98 (2012).

[4] J.M.M.Hall, W.Kamleh, D.B.Leinweber, B.J.Menadue, B.J.Owen, A.W.Thomas, R.D.Young, Phys. Rev. Lett. 114, 132002 (2015).

[5] M. Niiyama et al., Phys. Rev. D 97, 072005 (2018)