

2025年度

京都大学大学院理学研究科

修士課程

修士論文アブストラクト

(2026年2月2日、2月3日)

物 理 学 第 二 分 野

# 物理学第二分野 修士論文発表会ご案内

下記の通り、修士論文発表会を開催します。

---

日時: 2025年2月2日(月)3日(火)

場所: 理学研究科5号館 525号室

発表時間: 15分+5分(質問)

---

発表の順番、研究題目は下記のとおりです。

## 2月2日(月)

- |                |   |               |
|----------------|---|---------------|
| 1.             | 大口径スペクトロメータを用いた ( $\alpha$ , ${}^6\text{He}$ ) 反応の高効率測定<br>の検討  | 石井 大智 (9:00)  |
| 2.             | $\gamma$ - $\gamma$ 摂動角相関法を用いた ${}^{111}\text{Cd}$ のスピン緩和の粘性依存性に関する研究                                     | 伊地知俊大 (9:20)  |
| 3.             | Spectral Characterization of High Harmonic Generation from Solid Targets Driven by the $\text{T}^6$ Laser | 李 成浩 (9:40)   |
| 4.             | 中赤外レーザーを用いた相対論的高次高調波発生に関するシミュレーション研究  | 上田 一心 (10:00) |
| 《 休 憩 》<br>10分 |   |               |
| 5.             | 月形成史解明に向けた月面の元素分布撮像を行う小型X線SOIカメラの開発   | 上林 暉 (10:30)  |
| 6.             | ブラックホール外層での核燃焼  | 小笠原優斗 (10:50) |
| 7.             | Simons Observatory 実験に用いる Sparse Wire Grid Calibrator の性能向上に関する研究   | 奥本 成美 (11:10) |
| 8.             | LHC-ATLAS 実験におけるタウ粒子対のスピンを活用したヒッグス粒子とZ粒子の分離に関する研究   | 鴛原 泰輝 (11:30) |

《 午 後 》

- 9 . 多周波RFQ(MRFQ)におけるベータatron共鳴を用いた  
オンライン同重体分離装置の開発 小林 大輝 (13:00)
- 10 . ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索のための  
高圧Xe ガスTPC AXEL の大型化に向けた研究 佐々木駿斗 (13:20)
- 11 . 電子ビーム変調EBIT(MEBIT)を用いた 不安定核静止  
標的の開発 鏡 鈴 (13:40)
- 12 . XRISM 衛星を用いたX 線連星のFe・Ni の輝線および吸  
収線の系統的な解析 加藤 寛之 (14:00)
- 13 . 天文用デジタルX 線SOI の内蔵制御ロジック開発 上村 悠介 (14:20)

《 休 憩 》  
20分

- 14 . 共形ブートストラップの展開 小名木俊輝 (15:00)
- 15 . JT 重力における非摂動的構造:量子化・Hilbert 空間お  
よび周期的ディラトン重力への拡張 小原 充貴 (15:20)
- 16 . 摂動QCD に基づく2フレーバーカラー超伝導相の解析 坂本コナン (15:40)
- 17 . 超小型衛星サイズの中性子検出器による月の水資源探  
査 小俣 雄矢 (16:00)
- 18 . 軟ガンマ線突発現象の観測に向けた電子飛跡検出型  
コンプトン望遠鏡のレート耐性向上と広帯域化 佐藤 太陽 (16:20)

## 2月3日(火)

19. CMB 望遠鏡GroundBIRD におけるポインティング較正と  
大気ノイズを用いた風向推定に関する研究 武市宗一郎 (9:00)
20. S-2S を用いる  $\Lambda$  ハイパー核高精度分光実験に向けた  
アクリルチェレンコフ検出器の開発 谷口 智大 (9:20)
21. 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡の有効面積拡大に向  
けたガス飛跡検出器の改良 出口 颯馬 (9:40)
22. 天体核反応領域における炭素核融合反応の微視的原子  
核模型による記述 長尾 昂青 (10:00)
- 《 休 憩 》  
10分
23. 非ユニタリな共形場理論とホログラフィ 中村 七海 (10:30)
24. ISS 搭載の中性子モニタMoMoTarO の製作と太陽中性  
子の観測シミュレーション 中山 和哉 (10:50)
25. 水ベース液体シンチレータを用いた飛跡検出器の開発  
と性能評価 林 洸樹 (11:10)
26. 高出力 3  $\mu\text{m}$  帯中赤外レーザー設計に向けた Er:YAP  
結晶の発熱量評価 比屋根総司 (11:30)



《 午 後 》

- 27 . ド・ジッター宇宙におけるホログラフィ原理と量子情報理論 藤木 恒成 (13:00)
- 28 . MARQ スペクトロメータで用いる閾値型エアロゲルチェレンコフ検出器の開発 堀 祐輔 (13:20)
- 29 . 通行可能なワームホールとホログラフィ原理 前田 陵汰 (13:40)
- 30 . Simons Observatory 実験における  
CMB 望遠鏡で用いる真空冷却槽の開発 溝添 泰隆 (14:00)

《 休 憩 》  
20分

- 31 . 高密度核物理の解明に向けた高次多重極間の普遍関係の構築 宮園 隼人 (14:40)
- 32 . J-PARC E16 実験のためのハドロンプラインド検出器運用安定化に向けた検出器開発 柳井 祥吾 (15:00)
- 33 . 初期質量関数の金属量遷移における原始星ダスト照射加熱の役割 吉田 壮希 (15:20)

# 大口径スペクトロメータを用いた ( $\alpha$ , $^6\text{He}$ )反応の高効率測定の検討

原子核・ハドロン物理学研究室 石井大智

**Abstract** For the search for Giant Pairing Vibrations, theoretically predicted collective excitation, we need a high-efficiency measurement of ( $\alpha$ , $^6\text{He}$ ) reactions. To realize such measurement using Large Acceptance Spectrograph (LAS) at RCNP, we optimize ion optics, size of stopper for beam and elastic scattering, using ion optics and orbit calculation software.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

原子核に見られる集団励起状態として巨大共鳴があり、これは光核反応や非弾性散乱において高励起状態への遷移強度のピークとして多くの原子核で発見されている。微視的描像では、粒子・空孔(ph)残留相互作用をもとにした ph 励起のコヒーレントな重ね合わせの結果として理解される。これに対し、量子多体理論の基礎的な枠組みである「粒子・空孔の対称性」を仮定し、pp/hh 相互作用による集団励起状態である巨大対振動(GPV)が存在することが理論的に予言された[1]。GPV は核子対移行反応の高励起領域への遷移強度の測定によって測定可能であり、( $p,t$ )反応などによる実験が行われてきたが、運動学的な制限から高励起領域へのアクセスが難しく、長年 GPV が観測されたことはなかった。そのような中、2015 年に( $^{18}\text{O},^{16}\text{O}$ )反応によって  $^{14}\text{C}$ 、 $^{15}\text{C}$  原子核に GPV が確認された実験が行われた[2]。2023 年、GPV の発見が強く期待される Sn 原子核に対し[3]、GPV を効率よく測定できる( $\alpha$ , $^6\text{He}$ )反応による GPV の探索実験が大阪大学核物理研究センター(阪大 RCNP)西実験室の高分解能磁気スペクトロメータ Grand Raiden を用いて行われた。結果として、理論的な予想と裏腹に GPV は確認されず、広い励起領域に分散している様子であった。これらの結果を受けて、GPV 発見のメカニズムを見直すために多くの核種に対して( $\alpha$ , $^6\text{He}$ )反応を測定することが望まれている。それにあたって測定の効率化が求められる。

そのために、Grand Raiden に代わり阪大 RCNP の大口径スペクトログラフ(Large Acceptance Spectrograph, LAS)を用いて( $\alpha$ , $^6\text{He}$ )反応を測定することを考える。実験に必要な要請を考えると、現状の LAS は角度分解能が悪い・前方角度用のファラデーカップがない・弾性散乱への対処が必要といった課題を抱えている。そこで本研究では、イオン光学・粒子軌道シミュレーションソフトを用いて、イオン光学系の最適化・前方角度用ファラデーカップの最適化・検出器面に設置する弾性散乱用ストッパーのサイズの最適化をすることを通じて LAS による( $\alpha$ , $^6\text{He}$ )反応の測定の実現方法を考案した。その結果、LAS による測定は十分可能なことがわかった。さらに、Grain Raiden による測定では 1 週間程度かかっていたものが、LAS を用いると 0.5 日程度に抑えることが出来、10 倍以上の効率化が実現できることが分かった。

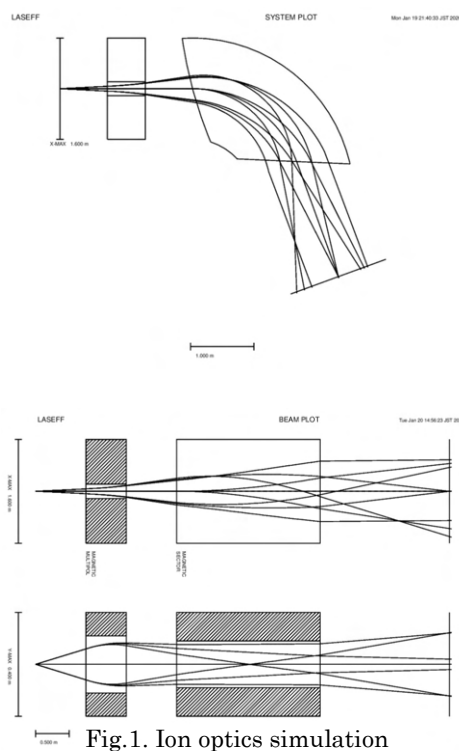


Fig.1. Ion optics simulation

## References

- [1] R. A. Broglia and D. Bes. High-lying pairing resonances. *Physics Letters B*, 69(2):129–133, 1977.
- [2] F. Cappuzzello, et al. Signatures of the giant pairing vibration in the  $^{14}\text{C}$  and  $^{15}\text{C}$  atomic nuclei. *Nature communications*, 6(1):6743, 2015.
- [3] M. Assi'e, et al. The giant pairing vibration in heavy nuclei: Present status and future studies. *The European Physical Journal A*, 55(12):245, 2019.

# $\gamma$ - $\gamma$ 摂動角相関法を用いた $^{111}\text{Cd}$ のスピン緩和の粘性依存性に関する研究

核ビーム物性学研究室 伊地知俊大

**Abstract** The correlation between  $^{111}\text{Cd}(\leftarrow^{111}\text{In})$  spin relaxation and viscosity in glycerin solutions across various concentrations and temperatures was confirmed and quantitatively characterized using perturbed angular correlation spectroscopy. This provides a foundational step for characterizing sub-100 nm droplets, although practical challenges remain for application.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

準液滴とは、直径が 100 nm 以下の極微小サイズの液滴であり、マクロな液体には見られない特性を有していることから、様々な産業への活用が期待されている。しかし、微小であるがゆえに従来の観測手法の適用が困難であり、基本的な物性の研究は進んでいない[1]。

摂動角相関(Perturbed Angular Correlation spectroscopy, PAC)は、プローブに  $10^{-15}\text{m}$  オーダーの原子核を用いること、 $10^{10}$  個/ $\text{cm}^3$  というわずかなプローブ核があれば測定可能であることから、準液滴のようなミクロな物性の研究に適している。例えば、Steffen により液体の粘性とスピン緩和の間の相関が報告されており[2]、PAC 法による準液滴の粘性の測定の可能性があるが、溶液中のプローブ核である  $^{111}\text{In}$  の化学的形態が不明であることや、1950 年代の実験であり測定の時間分解能が低いという問題がある。

本研究では、PAC による準液滴の基礎的な物性である粘性係数の測定に向け、スピン緩和と粘性の相関の精密な評価を行った。試料として濃度と温度を制御することで粘性係数を約 0.5~4000 mPa·s に調整したグリセリン水溶液を用いた。実験では  $\text{BaF}_2$  検出器を用いた高時間分解能の計測系やプローブ核として化学的形態が明らかな  $^{111}\text{InCl}_3$  の塩酸溶液を使用した。また、Demille により報告されている液中の  $\text{In}$  イオンの配位子のスピン緩和への影響[3]を排除するため、配位子の配置が対称性の良い八面体構造であり電場勾配が発生しない $[\text{In}(\text{H}_2\text{O})_6]^{3+}$ となるように、塩酸を加えて溶液の pH を 3 以下に調整した。

$^{111}\text{Cd}(\leftarrow^{111}\text{In})$ のスピン緩和の減衰定数  $\lambda$  ( $\text{sec}^{-1}$ ) は、粘性係数  $\eta = 27.7$  (mPa·s)を境に増大から減少へと転じる相関を示した。その相関は粘性係数の小さい範囲では比例関係になると主張する Abragam らの理論[4]や粘性係数の大きい範囲では反比例関係になると主張する Marshall らの理論[5]と良く一致し、

$$\lambda = (2.4 \times 10^5 \eta) / (1 + 1.3 \times 10^{-3} \eta^2) \quad (1)$$

と表すことが出来た(Fig.1)。 $^{111}\text{In}$  を準液滴に導入できれば、この相関を用いて、PAC 法による準液滴の粘性係数が決定できる可能性がある。

一方で、pH 未調整の試料での測定について pH が 3.5 以上の試料では粘性とスピン緩和に明瞭な相関が見られなかったため、今回の相関式は pH が 3 以下の場合にのみ適用可能となるが、逆にスピン緩和から準液滴の pH を推定できる可能性も示唆しているとも考えられる。

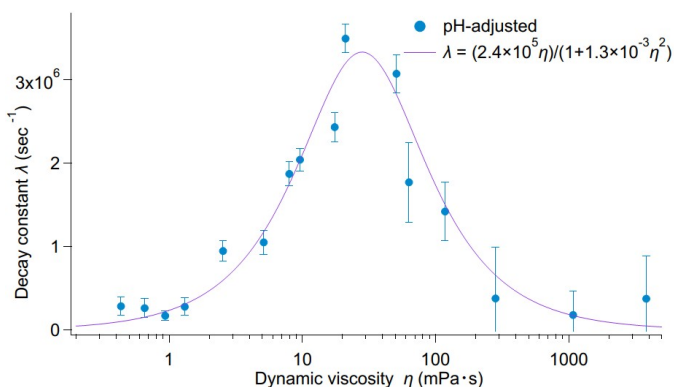


Fig. 1. Correlation between viscosity and spin relaxation

## References

- [1] Y. Tamura, M. Kawamura, T. Sato, T. Nakajima, S. Liu, T. Sato and S. Fujimura, J. Bacteriol, **206**, e00139-24 (2024).
- [2] R. M. Steffen, Phys. Rev. **103**, 116 (1956).
- [3] G. R. Demille, D. L. Livesey, Kathleen Mailer and S. P. Turner, Chem. Phys. Lett. **44**, 164 (1976).
- [4] A. Abragam and R. V. Pound, Phys. Rev. **92**, 943 (1953).
- [5] A. G. Marshall and C. F. Meares, J. Chem. Phys. **56**, 1226 (1972).

# Spectral Characterization of High Harmonic Generation from Solid Targets Driven by the T<sup>6</sup> Laser

レーザー物質科学研究室 李成浩

**Abstract** Spectral characteristics of high-order harmonic generation from solid targets driven by the T<sup>6</sup> laser were investigated. The intensity scaling and spectral decay of low-order harmonics were measured with and without a plasma mirror. These characteristics indicate that the measured harmonic emission is dominated by the CWE mechanism.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

High-order harmonic generation (HHG) driven by intense femtosecond laser pulses has been extensively studied as a source of coherent extreme-ultraviolet and soft X-ray radiation, enabling attosecond science in gas-phase media [1]. Despite these advancements, gas-phase HHG is intrinsically limited by low conversion efficiency and restricted photon flux due to the low atomic density and phase-matching constraints. HHG from solid targets has therefore attracted increasing interest as a promising alternative due to its high density and scalability [2]. However, the underlying generation mechanisms and intensity-scaling behavior of low-order harmonics remain insufficiently understood [3]. In this study, we investigate the dependence of harmonic yield on the incident laser intensity and the power-law decay characteristics of the harmonic spectrum for low-order harmonics (2nd–7th) generated from solid targets driven by the intense femtosecond Ti:Sapphire laser (T<sup>6</sup> laser), including their angular distribution and a comparison between plasma mirror on and off conditions. The experiments were performed using the T<sup>6</sup> laser to generate high-order harmonics from solid polyethylene targets. Single-shot spectral diagnostics were employed to characterize the emitted harmonics, with calibration applied to ensure quantitative reliability.

The measured harmonic yield demonstrated a weak dependence on the incident laser intensity, following a power-law scaling of the form  $I_n \propto I_0^p$ , with an exponent close to  $p \approx 1$  for low-order harmonics. The spectral decay of the harmonic intensity is consistent with predictions of the Coherent Wake Emission (CWE) mechanism. In contrast, the measured angular divergence deviates from the simple  $\theta_n/n$  scaling expected from the Relativistic Oscillating Mirror (ROM) mechanism. In addition, the use of a plasma mirror improves the stability of the measured harmonic signal by enhancing the temporal contrast of the driving laser pulse. These results indicate that the low-order harmonic emission from solid targets under the present experimental conditions is dominated by the CWE mechanism. The present study contributes to a deeper understanding of low-order harmonic generation in solid-target HHG and provides important insights for the development of compact and stable coherent short-wavelength light sources.

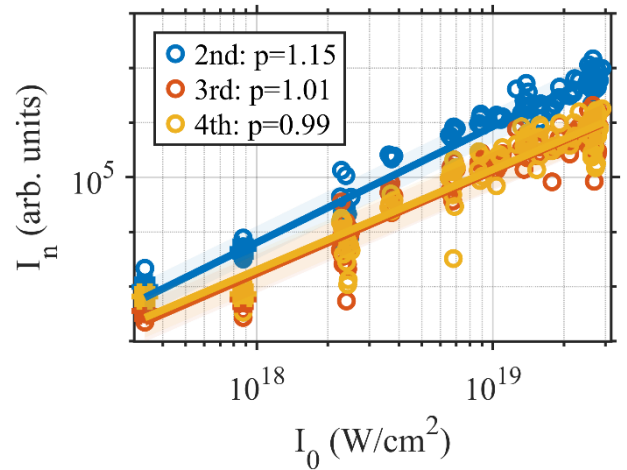


Fig. 1 Intensity scaling of low-order harmonics from solid targets driven by the T<sup>6</sup> laser.

## References

- [1] F. Krausz and M. Ivanov, “Attosecond physics,” *Rev. Mod. Phys.* **81**, 163–234 (2009).
- [2] U. Teubner and P. Gibbon, “High-order harmonics from laser-irradiated plasma surfaces,” *Rev. Mod. Phys.* **81**, 445–479 (2009).
- [3] F. Quéré, C. Thaury, P. Monot, S. Dobosz, P. Martin, J.-P. Geindre, and P. Audebert, “Coherent wake emission of high-order harmonics from overdense plasmas,” *Phys. Rev. Lett.* **96**, 125004 (2006).

# 中赤外レーザーを用いた相対論的高次高調波発生に関するシミュレーション研究

レーザー物質科学研究室 上田一心

**Abstract** Mid-infrared lasers achieve the same normalized vector potential at lower focused intensity than near-infrared lasers, enabling relativistic high-order harmonic generation at lower cost. We performed simulations of femtosecond mid-infrared laser interaction with a solid thin film and found that optimized plasma scale lengths yield harmonics exceeding 14% of the incident energy.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

集光強度が  $10^{18}$  W/cm<sup>2</sup> を上回るフェムト秒高強度レーザーを固体物質に照射することで表面に臨界密度を超える高エネルギー密度プラズマが生成される。このプラズマ表面の電子がレーザー場によって相対論的速度で振動することで、振動数もとのレーザー場の数十倍に達する高次高調波が発生する。この現象は相対論的高次高調波発生と呼ばれ、アト秒パルス源としての観点から世界的に研究が展開されている。相対論領域での高次高調波発生では、生成される高調波の強度と次数はレーザーの規格化強度  $a_0 \sim 8.55 \times 10^{-10} \sqrt{I} \lambda$  ( $I$ : 集光強度  $\lambda$ : レーザー波長) とともに増大[1]する。そのため  $a_0$  向上のためのレーザーの高強度化が重要な課題と位置付けられているが、レーザー装置の大型化が必要となり、莫大なコストがかかる。

一方で、 $a_0$  が集光強度の 1/2 乗、波長の 1 乗に比例することに注目すると、波長を大きくすることでより低強度で高い  $a_0$  を達成できる。例えば、同一の  $a_0$  を実現するために必要なレーザー強度は波長が 5 倍になれば 1/25 で済むため、波長  $\lambda \sim 4 \mu\text{m}$  のレーザーを使用することで、より簡易なレーザー装置で高効率な高次高調波発生が期待できる。

本研究では、相対論的電磁粒子コード EPIC3D[2]を用いて、指数関数状の密度勾配を付与した固体ケイ素薄膜（初期プラズマのスケール長  $L_s/\lambda = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0$ ）に高強度レーザーを+y 方向に照射する 2 次元粒子シミュレーションを実施し、入射レーザーに対する高次高調波の変換効率を調べた。レーザーパラメータは、規格化強度  $a_0$  の値を 24.5 に固定して、パルス幅 100 fs (FWHM)、波長  $0.8 \mu\text{m}$ 、直線偏光で集光強度が  $1.25 \times 10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> の近赤外レーザーと、当研究室で開発を進めている波長  $4.0 \mu\text{m}$ 、直線偏光で集光強度が  $5.0 \times 10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> の中赤外レーザーを想定して設定した。

その結果、スケール長を適切に選択することで、波長  $0.8 \mu\text{m}$  を用いた場合の入射レーザーエネルギーに対する高次高調波のエネルギーの変換効率は 6% を下回る値であったのに対し、波長  $4.0 \mu\text{m}$  を用いた場合の変換効率は 14% を上回り、同一の  $a_0$  においても、変換効率は 2 倍以上増加 (Fig. 1) することが分かった。理由として、波長  $0.8 \mu\text{m}$  の場合は  $4.0 \mu\text{m}$  の場合と比較して集光強度が 25 倍大きいいため、レーザーとの相互作用により生成される電子のエネルギー密度も増大する。その結果、高速電子が-y 方向に噴き出すことで形成される静電場の強度も増大し、この電場強度の大小が電子のダイナミクスに影響を及ぼしたことで、変換効率に差が生じたと考えられる。

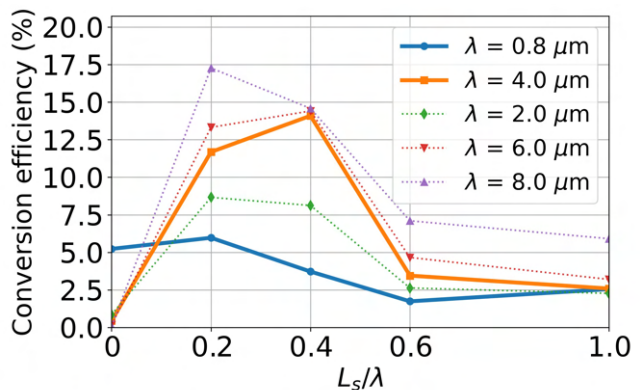


Fig. 1 Scale-length dependence of the high-order harmonic conversion efficiency relative to the incident laser energy for different wavelengths.

## References

- [1] M. R. Edwards and J. M. Mikhailova, Sci. Rep. 10, 5154 (2020).
- [2] Y. Kishimoto *et al.*, J. Plasma Phys. 72, 971(2006).



# 月形成史解明に向けた月面の元素分布撮像を行う 小型 X 線 SOI カメラの開発

宇宙線研究室 上林暉

**Abstract** To understand lunar formation history, we developed a compact camera using an X-ray SOI sensor and a coded mask for 1-km resolution elemental mapping from a 100-km lunar orbit. Simulations and experiments demonstrated its imaging capability. Additionally, thermal and structural verifications confirmed the design's feasibility for CubeSat deployment.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

月はその形成史として、巨大衝突の後に、全球的な溶融を経験したと言われている。これがマグマオーシャン仮説である。月の起源と進化を解明する上で、このマグマオーシャンの分布や固化過程の特定は重要な課題である。カリウム(K)、希土類元素(REE)、リン(P)に富んだ岩石の総称である KREEP は、マグマオーシャンが冷えて固体化する際に、最後に結晶化した層であり、含まれる放射壊変系から、結晶化した年代を推定できる。これは月がそれ以前に形成されたことを裏付ける証拠となる。またその年代と分布から、マグマオーシャンの形成過程を巡る仮説の検証にも資する[1]。こうした KREEP の分析には、ローバーによる試料採取が不可欠であり、その前提としてローバーの活動可能範囲内に着陸地点を決定するためのリモート観測による高精度な月面の X 線元素マッピング(Fig. (a))が必要である。

従来の軌道上からの X 線観測では、X 線 CCD の読み出し速度(数 s)と衛星の運動による被写体のブレが、空間分解能の主要な制限要因となっている。これにより、従来の X 線観測は試料採取に必要な 1 km の解像度を満たしていなかった[2]。そこで本研究では、10  $\mu$ s 以下の高い時間分解能を持つ X 線 SOI センサ「XRPIX」と、コードドマスクを組み合わせ、小型衛星に搭載可能な新規観測システムを提案する。

まず、観測実現性の検証として、M1.3 クラスの太陽フレア照射下における月面からの蛍光・散乱 X 線スペクトルシミュレーション(Fig. (b))を行い、KREEP 濃集域の検出に必要な観測条件を明らかにした。また、コードドマスク撮像系を試作し、Am241 線源を用いた実証実験を行った。取得データに対して画像再構成を行い、明瞭な線源像の取得および近接二線源の分離に成功した。

さらに、6U サイズの CubeSat への搭載を想定したカメラ全体の熱・構造設計を行った(Fig. (c))。月周回軌道環境を模擬した熱解析に基づき設計の最適化を行い、筐体や回路系を常温付近で、センサ部を推奨動作温度付近(約-12  $^{\circ}$ C)で運用可能な熱設計解を得た。また、重要コンポーネントであるループヒートパイプ単体での振動試験を実施し、打ち上げ環境への十分な機械的強度があることを確認した。

以上より、本研究で開発した小型 X 線 SOI カメラは、月面の高解像度元素マッピングを実現しうるものであり、将来の月科学探査に貢献する実現可能なシステムであることを示した。

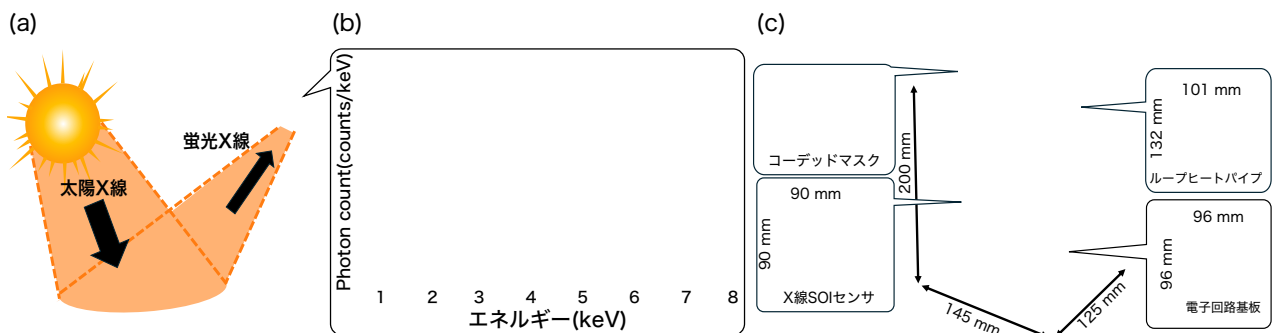


Fig. (a) Fluorescent X-ray mapping of the lunar surface from orbit. (b) Spectral simulation results. (c) Designed and developed compact X-ray SOI camera

## References

- [1] P. H. Warren, Ann. Rev. Earth Planet. Sci. 13, 201-240 (1985).
- [2] S. Narendranath et al., Icarus 411, 115934 (2024).

# ブラックホール外層での核燃焼

基礎物理学研究所 宇宙グループ 小笠原 優斗

**Abstract** Little red dots may be powered by black-hole envelopes. We compute 1D envelopes including black-hole heating and nuclear energy generation with radiative and convective transport. For  $M_{\text{BH}} = 10^6 M_{\odot}$  and  $T_{\text{ph}} = 6000 \text{ K}$ , nuclear burning can exceed Eddington luminosity at high  $M_{\text{env}}$ , removing hydrostatic solutions; equilibrium requires  $M_{\text{env}} \lesssim 10^5 M_{\odot}$  or an inner disk within a few times Schwarzschild radius.

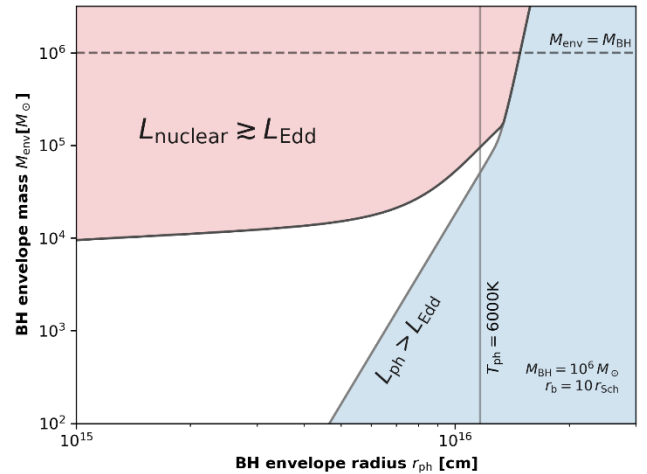
© 2026 Department of Physics, Kyoto University

Little red dot (LRD) は、JWST により赤方偏移  $z \gtrsim 4$  にて発見された、V 字型のスペクトルを示す天体群である [1]。その起源候補の一つとして、ブラックホールが厚いガスに覆われたブラックホール外層モデルが提案されている [2]。この系を支えるためのエネルギー源は中心ブラックホール近傍で解放された重力エネルギーだと考えられているが、外層領域における核燃焼エネルギーの議論はなされていない。

本研究では、外層での核燃焼の影響を調べることを目的とし、静的かつ一次元球対称のモデルを構築した。ブラックホールから外層に与えられるエネルギーに加えて、核燃焼で生成されたエネルギーが輻射および対流によって輸送されるとし、外層の内部構造を数値的に計算した。

その結果、外層質量  $M_{\text{env}}$  が大きい場合、中心付近の温度が上昇し核燃焼により Eddington 光度を超えるエネルギーが生成されるため、系に平衡解が存在しないことが明らかになった。例えばブラックホール質量が  $M_{\text{BH}} = 10^6 M_{\odot}$ 、外層の表面温度が  $T_{\text{ph}} = 6000 \text{ K}$  のとき、平衡解を持つためには  $M_{\text{env}} \lesssim 10^5 M_{\odot}$  であるか、あるいは中心ブラックホール近傍 ( $r \lesssim 10 r_{\text{Sch}}$ ; 10 倍の Schwarzschild 半径) が静的かつ一次元球対称でない可能性 (例えば降着円盤など) が示唆された。この結果は大質量ブラックホールの起源および LRD の観測においてひとつの重要な制限を与える。

Fig. 1. Region of parameter space in which hydrostatic envelope solutions are expected. In addition to the Eddington limit on the envelope luminosity (blue region), nuclear burning introduces an additional constraint (red region). At low photospheric temperatures ( $T_{\text{ph}} \sim 6000 \text{ K}$ ), the allowed envelope mass is restricted.



## References

- [1] Kido, D., Ioka, K., Hotokezaka, K., Inayoshi, K., & Irwin, C. M. 2025, MNRAS, 544, 3407
- [2] Matthee, J., Naidu, R. P., Brammer, G., et al. 2024, ApJ, 963, 129

# Simons Observatory 実験に用いる Sparse Wire Grid Calibrator の性能向上に関する研究

高エネルギー物理学研究室      奥本成美

**Abstract:** The Simons Observatory aims to observe the  $B$ -mode polarization of the CMB and detect primordial gravitational waves. To calibrate the polarization angle of the detectors, we use the sparse wiregrid. We measured its wire deflection and reduced it, and evaluated a tilt sensor to be installed with the wiregrid.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)はビッグバンの熱放射であり、私たちが観測できる宇宙最古の光である。そこには初期宇宙から現在に至るまでの様々な情報が含まれており、これまでにCMBの観測によって様々なことが明らかになってきた。現在はその偏光パターンの精密測定が注目されている。CMBの偏光パターンには $E$ モードと $B$ モードの二種類があり、 $B$ モードは原始重力波の証拠となる。もし原始重力波による $B$ モードが発見されれば、インフレーション理論を裏付ける証拠となる。

Simons Observatory実験では、海拔5200mのチリ・アタカマ砂漠に設置した複数の望遠鏡を用いてCMB偏光の観測を行う。3台の小口径望遠鏡(SAT)と1台の大口径望遠鏡(LAT)のうちSATは大角度スケールのCMB観測に最適化してある。SATの焦点面には約1万個のTES検出器が設置され、アンテナによってそれぞれの検出器が特定方向の偏光角に対して感度を持つ。 $B$ モードの観測によって原始重力波を検出するには、この検出器の偏光角の感度方向を $0.1^\circ$ 以下の精度で構成する必要がある。この要求を達成するため、スパースワイヤーグリッドを用いた偏光角校正システムがSATに搭載されている[1]。

ワイヤーグリッドはワイヤーが張られた方向と同じ方向の直線偏光を生むため、ワイヤーの方向の測定精度が校正の精度に直結する。そのため張られたワイヤーがたわんでいると系統誤差を生む。そこで、ワイヤーのたわみを自動で測定する装置(Fig1)を開発し、その測定結果を用いてワイヤーを張り直すことでたわみ量を $0.05^\circ$ から $0.02^\circ$ まで削減することに成功した[2]。本論文では、ワイヤーの素材と張力を変更することで、たわみ量をさらに $0.015^\circ$ まで削減した。

ワイヤーグリッドの設置平面と水平面との間の角度を把握するために重力参照角度計を用いる。しかし先行研究で選定した角度計は時間経過によって角度のオフセットも $0.3^\circ$ 変動することが判明した[3]。この問題を解決するため本研究では新たな候補となる4つの角度計(Fig2)に対して、温度依存性・湿度依存性・長期間安定性の3つの観点から評価を行い、要求精度である精度を概ね満たす角度計を選定した。

今後、変更後のワイヤーグリッドの性能評価や角度計の更なる評価を行えば、スパースワイヤーグリッドを用いた偏光角校正の誤差について目標である $<0.1^\circ$ を達成することができると期待され、原始重力波の強さの指標であるテンソルスカラー比 $r$ にして、現在与えられている上限値 $r<0.032$ を一桁向上するの探索感度を実現する。

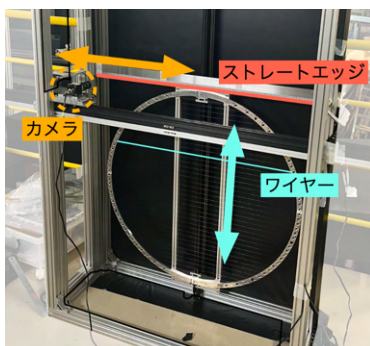


Fig 1. A system to evaluate the wire sag automatically.



Fig 2. A system to evaluate the tilt sensors.

## References

- [1] M.Murata. Et al, Rev. Sci. Instrum. 94, 124502 (2023).
- [2] 星野大輝. 修士論文 (2025).
- [3] 飯島健五. 修士論文 (2023)



# LHC-ATLAS 実験におけるタウ粒子対のスピンを活用したヒッグス粒子と $Z$ 粒子の分離に関する研究

高エネルギー物理学研究室 鴛原泰輝

**Abstract** In the LHC-ATLAS experiment, we developed a new method to distinguish the Higgs boson from the  $Z$  boson using the spin of tau particle pairs via machine learning. As a result, combining this method with current analysis can improve sensitivity by 10%.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

ヒッグスポテンシャルの形状は真空の安定性や電弱相転移と密接に関係しており、その詳細な理解は標準模型の検証や新物理の探索において重要である。しかし、その形状は未だ実験的に決定されておらず、ヒッグス自己結合定数の精密測定が鍵となる。自己結合定数を測定するためには、ヒッグス粒子 ( $h$ ) が 2 つ同時に生成されるヒッグス粒子対生成過程を観測し、その信号強度や力学的分布を測定する必要がある。片方のヒッグス粒子がボトムクォーク対、もう片方のヒッグス粒子がタウ粒子対に崩壊するモード ( $hh \rightarrow b\bar{b}\tau\tau$ ) はヒッグス粒子対生成の中でも崩壊分岐比が比較的高く、背景事象も少ないため発見および精密測定を行う上での最有力候補として注目されている。[1] 一方で、ヒッグス粒子対生成の断面積は単一ヒッグス生成と比べて極めて小さく、探索は依然として困難である。現在のヒッグス粒子対生成事象の探索では、ヒッグス粒子と背景事象 (主に  $Z$  粒子) を区別するために、タウ粒子対の不変質量やタウ粒子の力学的特徴を使って分離してきた。[2]

本研究では、これらとは独立な情報であるヒッグス粒子 (スピン 0) と  $Z$  粒子 (スピン 1) のスピンの違いに着目し、その差異から生じるタウ粒子のヘリシティ情報を用いた新たな識別手法を開発した。親粒子のスピン情報はタウ粒子対の崩壊構造に反映されるが、この情報は従来の解析ではほとんど活用されていない。本研究では、スピンの違いのみに起因する情報を抽出し、それを用いた分離アルゴリズムの開発と、その分離性能を評価した。

機械学習の訓練には  $h \rightarrow \tau\tau$  および  $Z \rightarrow \tau\tau$  の MC シミュレーションサンプルを使用し、Boosted Decision Tree (BDT) と Graph Neural Network (GNN) を適用した。タウ粒子の崩壊モードごとに個別に訓練を行い、それぞれの分岐比で重み付けを行うことで総合的な分離性能を評価した。その結果、信号効率を 70 % に設定した場合、背景事象を約 47 % 除去できることが示された。( Fig. 1 )

さらに、より現実的な ATLAS 検出器の検出器シミュレーションを含んだサンプルも使った性能評価も行った。その結果、タウ粒子の崩壊モードを誤って判定する事象がノイズとなり分離精度が低下することが判明した。

LHC では、2030 年から高輝度 LHC の運転が予定されており、大幅な統計量の増加が見込まれており、ヒッグス対生成の発見と測定が実施されることが期待されている。高輝度 LHC におけるヒッグス粒子対生成事象の探索予測[3]に、本研究の手法を組み合わせることで、タウ粒子対が共にハドロンに崩壊する事象において、約 5 % の感度向上が見込まれる。これは、11 % のデータ増加つまり、約 1 年分の運転に相当する改善である。

## Reference

- [1] ATLAS Collaboration, Phys. Rev. Lett. 133, (2024)
- [2] ATLAS Collaboration, JHEP 07 (2023) 040
- [3] ATLAS Collaboration, ATL-PHYS-PUB-2018-053 (2018)

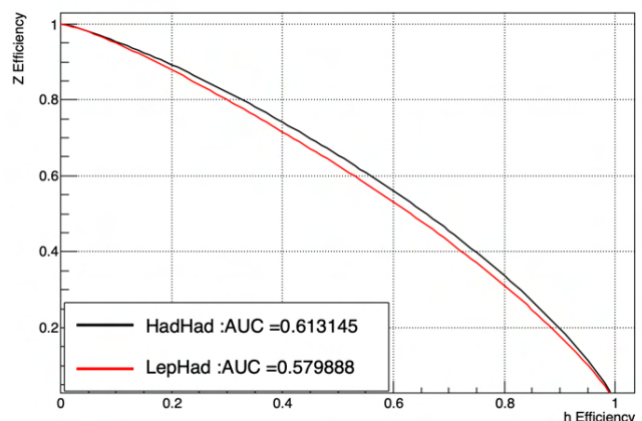


Fig. 1. ROC curve of training results using GNN

# 多周波 RFQ (MRFQ) におけるベータトロン共鳴を用いた オンライン同重体分離装置の開発

ビーム物理学研究室 小林大輝

**Abstract** We investigated the feasibility of isobar separation using a multi-radio-frequency quadrupole (MRFQ) for the SCRIT facility. Numerical simulations and prototype experiments were carried out to study ion stability near betatron resonance. Resonance-induced ion loss was observed, suggesting the potential of MRFQ as an online preseparator for radioactive ion beams.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

我々の研究グループでは、SCRIT (Self-Confining RI Ion Target) 法という、電子蓄積リング内に不安定核静止標的を作製する手法を開発し、2022 年には  $^{137}\text{Cs}$  を標的とした電子散乱実験に成功した[1]。現在は、二重魔法核である  $^{132}\text{Sn}$  を標的とした電子散乱実験の実現を目指しているが、同重体混入を抑えつつオンラインで高強度ビームを供給するために、分解能  $4 \times 10^4$  以上、標的純度 99% 以上、処理能力  $10^8$  ions/s 以上などの要件を満たす同重体分離装置が必要となる。一方で既存の分離手法では、分解能・処理量・効率・設置規模といった要件を同時に満たすことが困難であり、新たな分離手法の導入が求められている。

そこで本研究では、多周波 RFQ (MRFQ: Multi-Radio Frequency Quadrupole) を用いた同重体分離手法を提案する。MRFQ は RFQ の四重極電場によるイオンの横方向運動制御を基礎とし、複数の周波数成分をもつ RF 電圧と DC 電圧を組み合わせることで動作点の自由度を拡張したものである。さらに、電極配置により主軸に対して回転した四重極成分 (skew 成分) を導入し、鋭い 2 次のベータトロン共鳴を励起することで、通常の RFQ 質量分離器よりも遥かに高い分解能により質量分離を行い、同重体の除去を可能にする。

本修士論文では、その第一段階として、数値計算と原理実証実験の二つの方法から MRFQ の基礎的特性を評価した。数値計算では、MRFQ 内におけるイオン運動方程式と一周期輸送行列に基づき安定領域図を作成し、2 次ベータトロン共鳴が現れるパラメータ領域の探索と、共鳴近傍での安定性 (生存率) の変化を調べ、質量選択性が得られる条件を調べた。実験では、四重極電極 (main 電極) と skew 電極からなる MRFQ プロトタイプおよび RF/DC 電圧を印加する高周波回路を製作した。試験実験システムは、イオン源として EBIT、分析磁石、MRFQ、チャンネルトロンから構成

されるビームラインである。実験では、EBIT からのイオンビームを分析磁石を通して、特定の  $m/q$  のイオンだけを MRFQ に導入する。そして、イオンを MRFQ 内に 1 ms トラップした後には排出し、その収量を計数する手法を用いて RF 条件に対するイオン挙動を調査した。その結果を Fig.1 に示す。2 次ベータトロン共鳴条件に対応する領域で排出イオン収量の減少が観測され、鋭い共鳴励起が実験的に確認され、高分解能質量分離の手がかりを得た。一方、本実験条件では、skew 電極への RF 印加の有無による収量変化に顕著な差は確認されなかった。定量的な分解能評価には今後の検討が必要であるものの、本研究により MRFQ を用いた同重体分離に向けた基礎的有効性が示された。本手法は、SCRIT 実験におけるオンライン RI ビーム前処理技術としての応用が期待される。

## References

[1] K. Tsukada et al, Phys. Rev. Lett. 131, 092502 (2023)

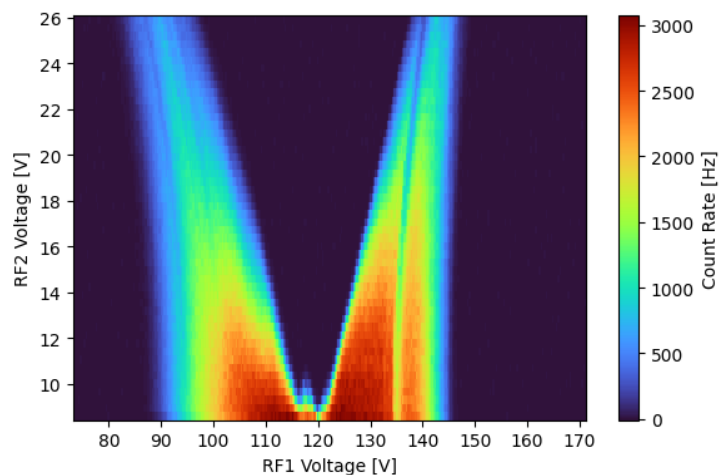


Fig. 1. Ion count rate map after 1 ms trapping in the MRFQ

# ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索のための 高圧 Xe ガス TPC AXEL の大型化に向けた研究

高エネルギー物理学研究室 佐々木駿斗

**Abstract** AXEL experiment aims at observing neutrinoless double beta decay with a xenon gas TPC. We have improved the energy resolution by a new correction method. We also have developed a voltage distribution system and a field cage made of FPC, which are important to enlarge the detector.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノの質量が他の素粒子と比較して非常に小さい理由や、宇宙のバリオン数非対称の起源は、ニュートリノが粒子と反粒子の同一性であるマヨラナ性を有するならば解明できると考えられている。ニュートリノのマヨラナ性を実証するには、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) を観測する必要があるが、これは起きるとしても非常に稀な事象である。そのため、高エネルギー分解能、背景事象排除、大質量の崩壊核という条件を満たすことが高感度な  $0\nu\beta\beta$  探索のために重要である。

AXEL 実験ではこれらの条件を満たすことができる、 $0\nu\beta\beta$  探索のための高圧キセノンガスを用いた Time Projection Chamber を開発している。AXEL 検出器は ELCC という独自の検出面を備えており、電離電子から Electroluminescence (EL) 過程により複数の光子を発生させて検出している。これにより高い分解能でベータ線のエネルギーを測定できる。また、ベータ線の飛跡を再構成し、この形状を用いて環境放射線背景事象を排除することも可能である。今後は大質量の崩壊核を用いるために検出器を大型化し、実際の  $0\nu\beta\beta$  探索を計画している。これに向けて本研究では、エネルギー分解能向上のための解析手法改善と、大型化に向けた技術開発に取り組んだ。

$0\nu\beta\beta$  探索の上でのエネルギー分解能の目標値は  $0\nu\beta\beta$  のエネルギーで半値全幅 0.4% であるが、まだ達成できていない。この原因の 1 つに、検出チャンネル間の ELgain (電離電子 1 つから発生する光子数) を揃える補正の誤差がある。これを改善するため、従来は 3 時間程度のランごとに行なっていた ELgain 補正に加え、全てのランを統合したデータで ELgain 補正を行う解析手法を導入し、補正に用いる  $K\alpha$  特性 X 線の統計数を増加させた。過去の測定データに対して解析手法変更前後でエネルギー分解能を比較し、1593keV において  $0.218 \pm 0.056\%$  分のエネルギー分解能の改善を確認した。

現在 ELCC では、検出面全体に 1 枚の電極を用いて高電圧を印加している。しかし、AXEL 検出器を大型化し、安定かつ効率的に運用するには、ELCC のユニットごとに電圧を印加・制御することが望まれる。100 ユニット以上に対して、電圧調整の精度が高く、高電圧を落とさずに調整でき、ユニット数の増加に対応しやすいという条件を満たした電圧制御を行うため、スライドディバイダーという手法を考案した。試作機を実際に製作し、想定通りの電圧調整が行えることを確認した。

電離電子を ELCC へと運ぶドリフト電場を形成するフィールドケージは、従来のものでは背景事象を生じる放射能が多い・加工コストが莫大で大型化が難しいなどの問題があった。本研究では、低放射能と大型化を両立可能なフレキシブルプリント基板 (FPC) を用いた新型のフィールドケージを考案した。放電・チャージアップを防止できるように、また、FPC 同士を安定して導通できるように支持構造と FPC を設計した。製作した FPC フィールドケージで耐電圧試験を行い、キセノンガス 5.68bar 中において、ドリフト電場の目標値である  $100\text{V/cm/bar}$  達成に必要な電圧値に対して 98.1% への到達を確認した。

FPC フィールドケージにおいてチャージアップによるドリフト電場への影響があるかどうかを評価するため、180L 試作機を用いて測定を行なった。解析の結果、チャージアップから予想されるものと一致する傾向があったものの、電離電子の拡散による影響もあると思われるため、明確には結論できなかった。今後更なる評価を行なっていく。

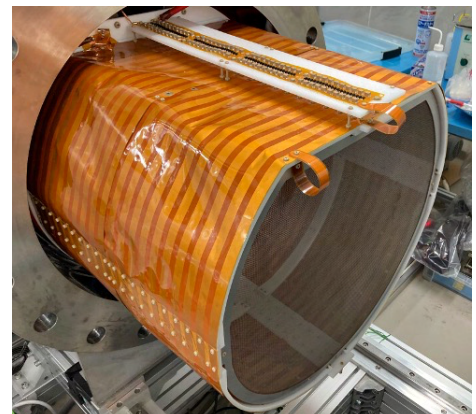


Fig 1. Field Cage made with FPC



# 電子ビーム変調 EBIT (MEBIT) を用いた 不安定核静止標的の開発

ビーム物理学研究室 鏡鈴

**Abstract** A modulated electron beam ion trap (MEBIT) was constructed to explore a portable static target for radioactive nuclei. Electron beam modulation and basic operational characteristics were experimentally demonstrated, providing a foundation for future studies toward static target applications.  
© 2026 Department of Physics, Kyoto University

不安定原子核を用いた核反応研究は、核構造や天体核物理過程の理解において重要であるが、現在主流である逆運動学による測定手法では、反応生成粒子の運動学シフトや厚い標的に起因するエネルギー分解能の制限が避けられず、高精度測定に本質的な困難が存在する。これらの問題を克服する手法として、不安定核そのものを静止標的として用い、良質なプローブビームを照射する順運動学による測定方式が提案されてきた。不安定核静止標的の実現例としては、SCRIT (Self-Confining RI Ion Target) 法が知られており、電子蓄積リング内で電子ビームの空間電荷ポテンシャルを利用して不安定核イオンを閉じ込めることで、世界で初めて不安定核静止標的を実用化した。一方で SCRIT は、電子蓄積リング施設に依存する点や、トラップ中における標的イオンの多価化、残留ガス起因のバックグラウンドといった課題を有しており、より可搬で汎用性の高い静止標的技術への発展が求められている。

本研究では、これらの課題を踏まえ、イオンの過剰な多価化の抑制や残留ガスの影響低減を可能にする不安定核静止標的の実現を目指した。目標とする静止標的の性能は、標的厚  $10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 、純度 90% 以上、トラップ時間 1 s における生存率 95% 以上である。具体的な手法として、電子ビームに時間変調を導入した電子ビームイオントラップ (Modulated Electron Beam Ion Trap, MEBIT) を用いた不安定核静止標的の概念を提案した。MEBIT は、電子ビームの空間電荷による径方向トラップと電極による軸方向トラップを基本とする EBIT 構成に、電子ビーム電流の時間変調を組み合わせた装置であり、電子ビームによるトラップ力に周期性を持たせることで、質量電荷比  $A/q$  に依存したトラップ安定性の制御を目指すものである。

本修士論文では、MEBIT 概念の実現可能性を検討する第一段階として、MEBIT システムの構築および基礎的な動作確認を行った。構築した装置は、電子銃、ソレノイド電磁石、トラップ電極群、電子ビームコレクタ、ならびに下流の分析磁石およびチャンネルトロン検出器から構成されている。電子銃から放出された電子ビームはソレノイド磁場によって軸方向に集束・輸送され、径方向には電子ビームの空間電荷ポテンシャル、軸方向には電極電位による井戸型静電ポテンシャルによってイオンが三次元的にトラップされる。電子銃のグリッドに高周波電圧を印加することで、時間変調を加えた電子ビームを生成し、変調条件を変化させながら電子ビームの輸送・回収特性および変調波形の周波数特性を測定した。さらに、MEBIT から流出したイオンを下流の分析磁石によって質量電荷比  $A/q$  ごとに選別し、磁場を掃引しながらチャンネルトロン検出器でイオン数を測定することで、電子ビーム変調条件下におけるイオンの挙動を調べた。

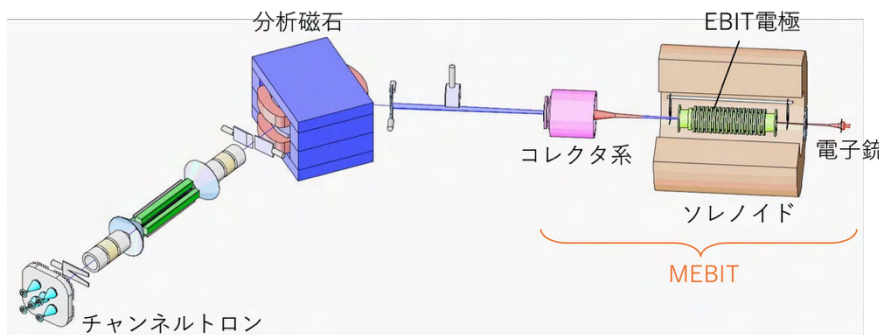


Fig. 1. Systematic diagram of the experimental system.

## References

- [1] K.Tsukada *et al.*, Phys. Rev. Lett. 131, 092502,(2023)

# XRISM 衛星を用いた X 線連星の Fe・Ni の輝線および吸収線の系統的な解析

宇宙線研究室 加藤寛之

**Abstract** Previous studies suggested Ni abundance excess at some binaries. At this thesis, systematically measured Ni/Fe abundance ratios in several X-ray binaries using high-resolution XRISM/Resolve spectroscopy. Diagnostics of K $\alpha$  lines from low-ionization Fe and Ni and absorption lines from highly ionized ions, show Ni/Fe abundance ratios of 0.79-1.72, consistent with solar.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

コンパクト天体（中性子星やブラックホール）と恒星からなる X 線連星では、恒星からの質量降着に伴い強力な X 線を放射する。この X 線が周辺物質（伴星表面、降着円盤、恒星風など）を照射することで、中性・低電離元素の蛍光輝線や電離イオンの吸収線が生じる。X 線連星の蛍光輝線の研究は主に Fe K $\alpha$  輝線が着目され、微弱な Ni の輝線の検出例は少なく、OA0 1657-415[1]や GRO J1655-40[2]などの数例に限られていた。輝線と吸収線を生じる物質は、主として伴星表面や恒星風など恒星起源と考えられる。恒星の Fe と Ni の存在比は一般に太陽組成であり[3], 特別な元素合成過程が関与しない限り、X 線連星で観測される Ni/Fe 存在比も太陽組成比( $\sim 0.053$ [4])に近い値が期待される。しかし、X 線連星 GRO J1655-40 では太陽組成比[4]に比べて高い Ni/Fe 比( $\text{Ni/Fe}=6.7\pm 3.7$ )が報告された[2]。このような X 線連星の異常な Ni/Fe 比の原因として爆発的元素合成[2]や s プロセス[5]、rp プロセス[6]の寄与が示唆されているが、さらなる観測が必要な研究テーマになっている。本研究では、このような Ni 過剰が他の X 線連星でも観測されるかを調べるため、X 線天文衛星 XRISM に搭載されたマイクロカロリメータ Resolve の高いエネルギー分解能を用い、従来は検出が困難であった微弱な Ni 輝線および吸収線の検出を試み、複数の X 線連星で Fe と Ni の輝線・吸収線の分光解析から Ni/Fe 比を系統的に測定した。低電離状態の Fe と Ni の 6.4 keV と 7.5 keV の K $\alpha$  蛍光輝線は、中性子星をもつ X 線連星 Vela X-1、GX 301-2、GX 1+4、Cen X-3 の 4 天体にて検出でき、それぞれの輝線フラックスを測定した。蛍光収率や光電吸収の断面積の Fe、Ni 間の違いをも考慮して補正した結果、蛍光輝線から導出された Ni/Fe 比は太陽組成比[4]と一致した。さらに、高階電離状態の Fe および Ni の吸収線を示す、Her X-1 を選び、He 様 Fe の 6.7 keV の He  $\alpha$  吸収線、H 様 Fe の 6.9 keV の Ly  $\alpha$  吸収線、H 様 Ni の 8.1 keV の吸収線を解析した。吸収線の解析では、イオンの電離状態や、複数の連続成分の寄与が混ざる効果、イオン柱密度による吸収線の飽和を適切に考慮しなければ、吸収線の強度比を元素存在比に正しく変換することができない。そこで本研究では、イオン柱密度に対する吸収の等価幅の変化を解析する成長曲線を考慮し、吸収線の微細構造から適切な遷移を選ぶことで吸収量から元素存在比を推定する手法を提案した。その手法を Her X-1 に適用した結果、 $\text{Ni/Fe}=0.79\pm 0.73$  と太陽組成比[4]で規格化した Ni/Fe 存在比を求めることができた。したがって、今回対象とした天体では先行研究で示唆された Ni 過剰を引き起こす物理過程は特殊な生成過程は必ずしも必要としないと考えられる。

## References

- [1] Pradhan, P. *et al.*, Mon. Not. R. Astron. Soc., **483**, 5687–5693 (2019)
- [2] N. Keshet *et al.*, Astrophys. J., **966**, 211 (2024)
- [3] Bensby, T., *et al.*, Astron. Astrophys., **562**, A71 (2014)
- [4] Asplund, M. *et al.*, Annu. Rev. Astron. Astrophys., **47**, 481–522 (2009).
- [5] Daiki Matsuo, Bachelor's thesis, Meiji University (2024).
- [6] P. Medvedev *et al.*, Astronomy Letters **44**, 390–410 (2018).

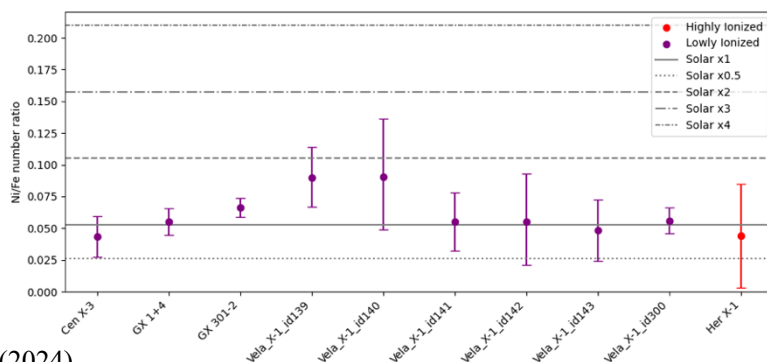


Fig.1. Ni/Fe number ratios of X-ray-binaries. with the solar abundance ratio from Ref. [4].

# 天文用デジタル X 線 SOI の内蔵制御ロジック開発

宇宙線研究室 上村悠介

**Abstract** We developed a pattern generator enabling semi-autonomous control of digital XRPIX detectors. This approach enables a significant reduction in the number of digital I/O lines, supporting future large-area detector systems. Emulated on an FPGA and tested with XRPIX12, event-driven readout was successfully achieved by adopting appropriate operational procedures.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

約  $10 M_{\odot}$  を超える大質量星は、恒星進化の果てに超新星爆発を起こす。近年の II 型超新星の早期観測から、爆発の直前(数ヶ月～数年)に、 $\sim 10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$  に達する大規模な質量放出が生じている可能性が示唆されている[1]。これは赤色超巨星の典型的な星風を数桁上回る質量損失率であり、この質量放出によって形成された星周物質の密度や空間分布は、親星の活動を反映する直接的な情報源である。その有力な探査手法として、爆発直後に衝撃波と星周物質が相互作用し、加熱された高温プラズマから放射される X 線の観測が挙げられる。1～数十 keV にわたる広帯域スペクトルからプラズマ温度および周囲物質による吸収量を推定し、それらの時間変化を追跡することで、爆発直前の質量放出履歴を遡ることが可能となる。しかし、従来の観測装置では、約 10 keV 以上の硬 X 線帯域において、筐体を貫通する宇宙線に起因するバックグラウンドが卓越する。このバックグラウンドの効率的な低減にはアクティブシールドを用いた反同時計数が有用である。しかし、シールドのイベントレートは 1–10 kHz と高く、従来の主力検出器である X 線 CCD の時間分解能(約 1 s)では対応できない[2]。

そこで我々は新型の X 線 SOI(Silicon-on-Insulator)ピクセル検出器「XRPIX」を開発している。各ピクセルが閾値回路によるイベント判定とタイミング信号生成を可能とし、波高値に加えてイベントの位置と時刻を読み出せる。この機能を活用した「イベント駆動読み出し」によって、XRPIX は高い時間分解能(約 1  $\mu\text{s}$ )と CCD に並ぶエネルギー分解能を達成する[3]。その一方で、動作に複数系統の電圧・電流源や外部 ADC などを用意し、衛星搭載時の実装スペースを圧迫することが課題であった。この解決のため、我々は ADC や DAC、BGR(基準電圧生成回路)を同一 SOI チップ上に集積した「デジタル XRPIX」の開発を進めている。回路のオンチップ化は周辺回路の削減のみならず、アナログ信号がチップ内で完結することによるノイズ耐性向上ももたらす。これを実用的なものとするには、機能集積に付随して増大する制御信号線の効率化が不可欠である。そこで本研究では、チップ内部で半自律的に制御信号のシーケンスを生成する PG(Pattern Generator)を開発した。PG の搭載により、必要な信号線を従来の 121 本から 37 本にまで削減できる。ただしイベント駆動読み出しはイベントの有無によって制御を切り替える複雑なフローを含むため、実装に先立って PG を FPGA 上に再現し、既存の XRPIX を制御する設計検証を実施した(Fig. 1)。結果、一部の信号生成機能において設計意図と異なる挙動を発見したが、特殊な動作手順を踏むことで PG の設計変更を伴わず回避可能であることを確認した。実際にこの手順を適用したチップ制御によって X 線スペクトルの取得に成功し、PG を用いたイベント駆動読み出しが正常に動作することを実証した。これにより、PG を搭載する次世代の XRPIX13 チップにおいても同様の方式で制御可能である見通しを得た。

## References

- [1] O. Yaron, et al, Nat. Phys., 13, 510 (2017)
- [2] M. Kokubun, et al., PASJ, 59, S53 (2007)
- [3] T. Narita, et al., Proc. SPIE, 13103, 131031L (2024)

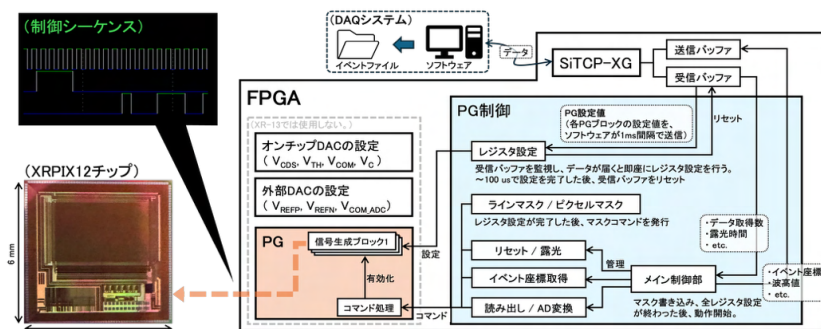


Fig. 1. Setup of the verification system. The XRPIX chip was controlled and read out using a pattern generator emulated on an FPGA.



# 共形ブートストラップの展開

基礎物理学研究所

素粒子論グループ

小名木俊輝

**Abstract** We review the theoretical foundations of the conformal bootstrap method, which has undergone remarkable development in recent years, and describe its applications to various physical systems.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

場の量子論において、臨界現象はスケール不変性によって特徴付けられ、共形場理論 (Conformal Field Theory, CFT) によって記述される。近年、ラグランジアン of 具体的な形に依存せず、共形対称性、ユニタリ性、および交差対称性という基本的な要請のみから物理量を決定する「共形ブートストラップ法」が目覚ましい発展を遂げている[1]。

本修士論文では、まず共形ブートストラップの基礎となる高次元共形場理論の基本的な性質をレビューし、最も簡単な例である3次元臨界イジング模型の臨界指数をどのように決定するのかを説明する。また、反強磁性体のNéel-VBS相転移などで重要になる双対性のウェブと創発的対称性の問題[2]にどのように共形ブートストラップが応用されてきたのかを説明する。

その上で本研究独自の試みとして、2次元イジング模型のもつ双対性に着目し、この双対性が示唆するフュージョンルールをブートストラップ方程式に新たな制約条件として取り入れる手法を提案した[3]。従来の共形ブートストラップ研究では考慮されてこなかったこの制約条件を課すことによって理論の存在可能なパラメータ領域に対し、従来よりも強い制限を与えられる可能性について議論する。

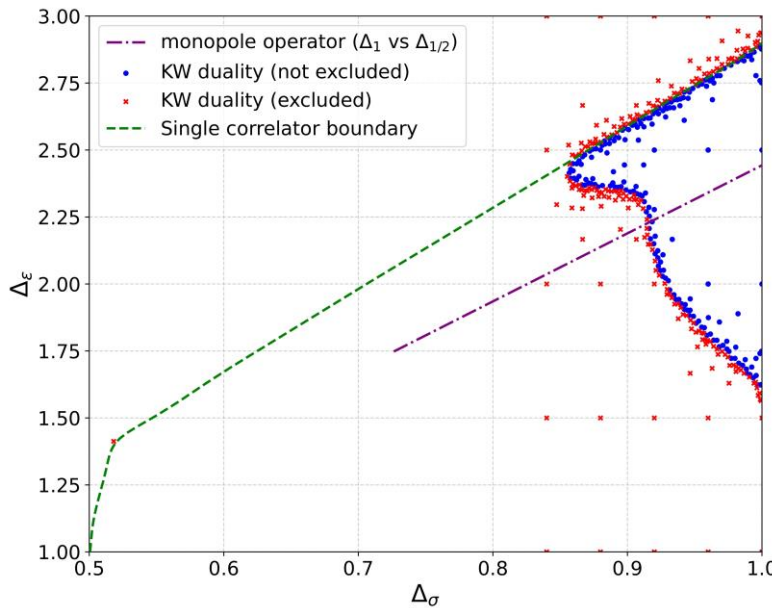


Fig. 1. Bootstrap constraints from duality-inspired fusion rules.

## References

- [1] S. El-Showk, M. F. Paulos, D. Poland, S. Rychkov, D. Simmons-Duffin, and A. Vichi, Solving the 3D Ising Model with the Conformal Bootstrap, Phys. Rev. D 86 (2012) 025022.
- [2] N. Seiberg, T. Senthil, C. Wang, and E. Witten, A Duality Web in 2+1 Dimensions and Condensed Matter Physics, Annals Phys. 374 (2016) 395–433.
- [3] Y. Nakayama and T. Onagi, Conformal Bootstrap with Duality-Inspired Fusion Rule, arXiv:2511.00386.

# JT 重力における非摂動的構造： 量子化・Hilbert 空間および周期的ディラトン重力への拡張

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 小原充貴

**Abstract** Quantum gravity is expected to arise from a path integral over geometries. We review Jackiw–Teitelboim gravity as a two-dimensional framework realizing this idea, and discuss a non-perturbative inner product built from geodesic length states, including matter. We then explain how DSSYK is captured by quantum-group dynamics and motivates sine-dilaton gravity as its dual.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

一般相対性理論は現実の宇宙を高い精度で記述できる理論として広く認められている。特に質量の大きい物体は重力崩壊を起こしてブラックホールになることが知られているが、このような極限的な状況を議論するには不十分で、重力の量子的な扱いが必要になると考えられる。量子力学の経路積分から類推すると重力の経路積分とはあらゆる時空の足しあげによって実現するはずである。本修士論文の前半では、次元を 2 次元に落として自由度を下げることで、この意味での経路積分を実現した Jackiw-Teitelboim (JT) 重力[1, 2]について解説する。

重力理論は  $d$  次元の座標変換不変性に対応して  $d$  個の拘束条件が存在し、 $d(d-3)/2$  自由度を持つことになる。 $d=2$  の時、実質  $-1$  自由度系になってしまうので JT 重力ではリッチスカラーと結合したディラトン場を追加することで、実質  $0$  自由度の位相的な理論にしている。さらにディラトンは時空を AdS 時空に固定する役割も果たす。そのおかげで、2 次元リーマン面に関する幾何学が時空に対して適用できて、あらゆる時空の足しあげが可能になった[3]。

ところでハートルとホーキングの計算[4]に代表されるように、量子重力が計算するのはある空間から別のある空間への遷移であり、始め/終わりの空間を決めることが始/終状態を決めることに対応する。2 次元重力の場合は一次元空間の長さがこれに相当する。この長さの決まった状態を核にして JT 重力における状態が、物質のある場合にも構成できる。本修士論文ではこれらの状態の張る空間に時空の足しあげを含めた非摂動的な内積を定義する方法について議論している。

実質  $0$  自由度と言ったのは本当は  $0$  ではないからである。ディラトンによって曲率は  $-2$  に固定されているが、JT 重力で考える時空はこの AdS 時空においてある境界に囲まれた部分空間である。そしてその境界の形も足しあげの対象である。したがって理論は、この形を変える自由度の力学を記述するシュワルツ理論として書き換えることもできる。このシュワルツ理論はランダム性を持った Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) モデルの中で低エネルギー有効理論として現れることが知られており[5]、2 次元重力と 1 次元量子系の間のホログラフィとして研究されてきた。

ところが SYK モデルは高エネルギーでは解析的に解くことができず、それゆえ重力理論の対応物も解明されていない。そこで近年は、SYK モデルを全てのエネルギー領域で解析的に解けるように変形した Double-Scaled (DS) SYK モデルと、対応する重力理論であるサインディラトン重力の間の関係が注目されている[6]。本発表では DSSYK モデルの力学が量子群によって記述できることを確かめ、それを境界で実現するような二次元重力としてサインディラトン重力が現れることを概説する。時間が許せば、3 段落目に述べたように、長さの決まった状態を使ったサインディラトン重力の適切な量子化が、DSSYK モデルの物理量を再現することも説明する。

## References

- [1] R. Jackiw, Nucl. Phys. B 252 (1985) 343.
- [2] C. Teitelboim, Phys. Lett. 126B (1983) 41.
- [3] P. Saad, S. H. Shenker, D. Stanford, arXiv:1903.11115 [hep-th].
- [4] J. B. Hartle, S. W. Hawking, Phys. Rev. D, 28 (1983) 2960.
- [5] J. Maldacena, D. Stanford, Phys. Rev. D, 94 (2016) 106002.
- [6] A. Blommaert, T. G. Mertens, S. Yao, JHEP 02 (2024) 067.



# 摂動 QCD に基づく 2 フレーバーカラー超伝導相の解析

基礎物理学研究所原子核理論研究室      坂本コナン

## Abstract

In high energy regions, Quantum Chromodynamic(QCD) systems behaves perturbatively. This paper will introduce the dynamics seen in dense QCD phases and derive the scale of cooper pairing gaps of quarks in this region using the renormalization method. The result holds heavy implications for the symmetry structure realized in extreme densities. © 2026 Department of Physics, Kyoto University

クォークとグルーオンの間に働く強い力を記述する  $SU(3)$  ゲージ理論である量子色力学 (QCD) は非摂動的な側面が強く、直接的な解析が困難な理論となっている。低密度高温領域での QCD は格子上のモンテカルロ法数値シミュレーションが有効であり、定量的な解析が進んでいる一方、sign problem のある高密度領域における解析には謎が多く残っているままである。一方で、高温、高密度の高エネルギースケールにおいてはカップリング定数の値が十分小さく、摂動的な解析が可能であることが知られており、直接的な計算が可能となっている。高密度領域ではクォークがクーパー対を形成してカラー超伝導相へと相転移することが予想されており、さらにこれは中性子星コアにみられるような密度でも実現し得ることが示唆されている [1]。中性子星内で実現しうるシナリオとしてアップクォークとダウンクォークの 2 フレーバー対称性が成り立つ中で現れるカラー超伝導相 (2SC 相) があるが、その具体的な構造については未だ改良の余地が残っている [2]。ここでは、高密度領域におけるフェルミ面近傍に存在するクォークの性質について紹介し、クーパー対形成の解析において強力な手法である繰り込み方程式を用いた解析を導出する。この手法から、フェルミ面近傍のクォークの運動はグルーオンの magnetic mode にから現れる長距離間相互作用が重要な役割を果たすことがわかる。さらに、本論文ではこのような相互作用が高い軌道角運動量をもつクーパー対形成を誘発させることを示す。この事実は 2SC における対称性の構造と密接に関わっており、今後の中高密度領域における QCD 相の解析にとって非常に重要な意味を持つ。

## References

- [1] Mark G. Alford *et al.*, Rev. Mod. Phys. 80, 1455 (2004).
- [2] Yuki Fujimoto *et al.*, Rev. D 101, 094009 (2020).

# 超小型衛星サイズの中性子検出器による月の水資源探査

宇宙線研究室 小俣雄矢

**Abstract** A scintillator-based neutron detector has been developed for lunar water exploration. The detector demonstrates high sensitivity to hydrogen within lunar simulant, even at extremely low water content. Additionally, a spectral reconstruction algorithm for multi-layered detectors was developed to estimate the vertical distribution of subsurface hydrogen.

© 2025 Department of Physics, Kyoto University

近い将来の有人月面活動や月面拠点の構築において、水資源の確保は最優先課題の一つである[1]。これまで周回機により様々な観測が行われてきたが[2]、推定された含水率は観測手法間でばらつきがあり、資源利用の閾値とされる 0.5 wt%(重量比)の含水率の領域が実際に存在するかは定かでない。また、水資源の鉛直分布に関する不定性も主要な課題として残されている。本研究の目的は、銀河宇宙線が月面に衝突して生じる中性子を水資源のトレーサーとして着目し(Fig. 1a)、月面ローバーや着陸船に搭載できる小型で振動耐性に優れ、省電力なシンチレータ方式の中性子検出器を開発し、その測定原理を実証することである。さらに、地下の水素分布の推定に向け中性子分光の手法を改良し、含水率測定精度向上と鉛直分布の推定を目指す。

本研究では、熱中性子、高速中性子、ガンマ線に感度をもつ  ${}^6\text{Li}$  含有の有機シンチレータ(EJ-270)を用いて、段階的に検証を行った。まず、シンチレータ単体の評価のため  ${}^{252}\text{Cf}$  中性子源を照射し、中性子とガンマ線の弁別性能の最適化と熱中性子の検出レートの解析手法を開発した。さらに、実測データと Geant4 シミュレーションを比較し、両者が 5.7 %以内で一致することを確認した。次に、土木現場での  ${}^3\text{He}$  ガス中性子水分計の較正用の設備を用い、5~90 wt%までの含水率での模擬実験を行い、熱中性子検出数の水素量依存性を評価した。結果から、シンチレータ方式と  ${}^3\text{He}$  ガス検出器と比較して矛盾のない応答を示すこと確認した。最後に、0.5 wt%付近の極低含水率の月の模擬土壌を用いた実験を行い、シミュレーションと 8%以内での一致を示す(0.1 wt%での測定時を除く)とともに、極低含水率における微量な水素に対しても十分な検出感度を持つことを確認した(Fig. 1b)。将来の分光性能の向上に向けて、EJ-270 を 8 個積層させた検出器を使って、月面で想定される中性子スペクトルで熱・熱外・高速中性子の強度比を多層のシンチレータの検出レートから推定できる解析手法を提案した(Fig. 1c)。

本研究により、資源利用の指標となる 0.5 wt%での極低含水率に感度をもつシンチレータ方式の中性子モニタを提案した。また、EJ-270 の積層検出器により、中性子スペクトル推定ができる手法を考えた。

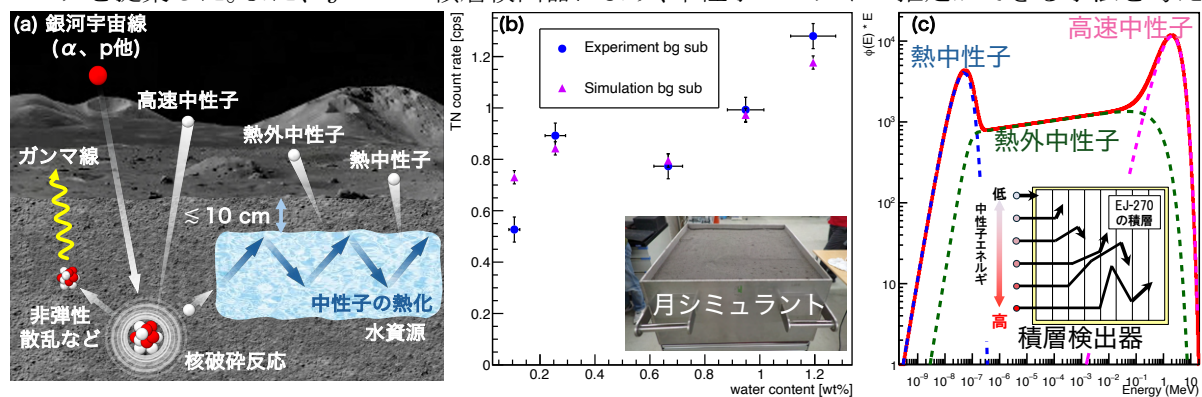


Fig. 1. (a) Processes for neutron or gamma-ray production on the lunar surface, by interaction between cosmic rays and lunar regolith. (b) Measured and simulated thermal neutron detection results for the lunar simulant experiment. (c) Reconstruction of the incident neutron spectrum in Geant4 simulations.

## References

- [1] 宇宙航空研究開発機構. “国際宇宙探査シナリオ 2025”. 2025.
- [2] A.B.Sanin et al, 2017, Icarus 283, 20-30.

# 軟ガンマ線突発現象の観測に向けた電子飛跡検出型 コンプトン望遠鏡のレート耐性向上と広帯域化

宇宙線研究室 佐藤太陽

**Abstract** It is important to solve the emission mechanism of GRB prompt emission of the energy flux has a peak at 1 – 50 MeV. For future observation, we upgraded a trigger system for ETCC and developed point-cloud tracking to identify pair-production events.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

ガンマ線バーストは宇宙最大の爆発現象として知られており、エネルギーフラックスのピークを MeV 帯域に持つ。1 - 50 MeV 帯の軟ガンマ線で初期放射を高時間分解能で分光・偏光観測することは、その放射機構・エネルギー散逸過程を解明するうえで重要であると期待されている[1, 2]。一方で、従来の観測機器ではこの帯域で十分な感度を持つ広視野の撮像分光・偏光観測は達成されておらず、また大規模な突発現象の観測では高事象率環境下での不感時間も無視できない。電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC) は、ガスを用いた Time Projection Chamber (TPC) とシンチレータから構成され、入射ガンマ線によるコンプトン散乱事象を完全に再構成可能である。ETCC を搭載した気球実験 SMILE-2+ では、0.2 - 2.1 MeV のエネルギー帯域でのガンマ線観測に成功している[3]。本研究では、次期気球実験 SMILE-3 を念頭に、レート耐性を高めるデータ収集系の再設計と、1 MeV 以上での感度向上を目的とした、対生成事象の飛跡情報を用いた識別・再構成手法の開発を行った。

現行のデータ収集システムではトリガー方式に起因する高レート時のデッドタイム増加（気球フライト中で約 15 %）という問題があるほか、検出器の大型化に伴う運用性低下の懸念があった。そこで不感時間を抑える新トリガー方式（同条件で数 %）への対応や外部クロック配布による時刻同期。入出力の拡張性を持つ設計を持つトリガーコントロールユニットを含む新構成を設計し (Fig. 1)、プロトタイプを製作した。新データ収集系を用いて TPC、シンチレータを運用し、評価を行った。

対生成事象解析について、SMILE-3 では高エネルギー事象解析[4]によって観測帯域を 5 MeV まで拡張できると見込まれている。この領域ではコンプトン散乱に加えて電子・陽電子対生成事象が無視できない割合で混入しバックグラウンドとなるが、従来の簡易的な飛跡パラメータに基づく手法では高エネルギーのコンプトン散乱事象との混同が避けられず、感度低下の一因となっていた。そこで本研究では、分子科学研究所の UVSOR BL1U ビームラインでガンマ線を照射する実験を行い、点群解析での 2 トラック構造の検出による対生成事象の識別・再構成手法を構築した。到来方向の再構成により、ビームラインのガンマ線由来の対生成事象を再構成できることを確認した (Fig. 2)。

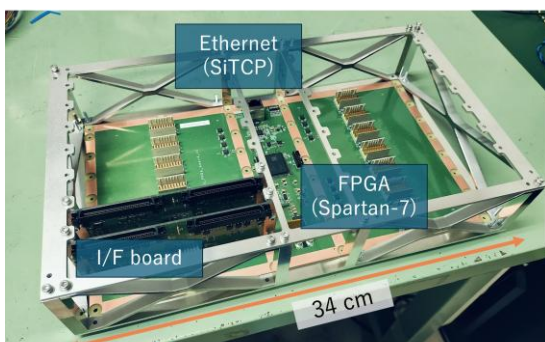


Fig. 1. Designed Trigger control unit.

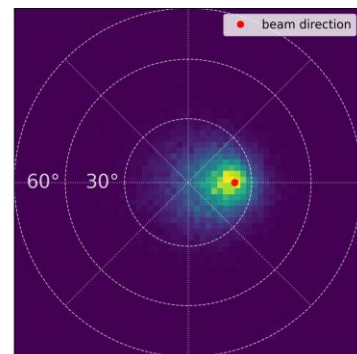


Fig. 2. Reconstructed Image of 6.6 MeV pair creation gamma-ray.

## References

- [1] Ackermann M. et al. ApJ. 716(2):1178–90. (2010) [2] 1. Toma, K. et al. ApJ 698, 1042–1053 (2009).
- [3] Takada, A. et al. ApJ 930, 6 (2022). [4] Oka, T. et al. NIM A, 169242 (2024).

# CMB 望遠鏡 GroundBIRD におけるポインティング校正と大気ノイズを用いた風向推定に関する研究

高エネルギー物理学研究室 武市宗一郎

**Abstract** The GroundBIRD telescope, located on Tenerife Island in Spain, aims to observe the CMB polarization on large angular scales. We completed pointing calibration for full-array systems. We also developed an analysis method for temporal variations in the atmosphere.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) は人類が観測できる最古の光であり、特に視野角  $1^\circ$  以上の大角度スケールにおける CMB 偏光のパターンは、インフレーション宇宙論を支持する原始重力波の探索[1]や、宇宙の再電離度を表す光学的厚み  $\tau$  の測定[2]など、宇宙論の研究に大きな寄与を与えることが期待されている。

スペイン領テネリフェ島に設置された GroundBIRD 望遠鏡は、大角度スケールに特化した観測装置である。毎分最大 20 回転という高速スキャンにより、大気放射の揺らぎの影響よりも早く視野変調することで、その影響を抑制する観測ストラテジーを実現している。

CMB の精密観測には、望遠鏡の視線が宇宙のどこを向いているかを精密に校正する「ポインティング」が必要不可欠である。先行研究[3]によって、焦点面中心付近の検出素子に対する校正手法は開発されたが、全ての検出素子 (full-array) に対する校正手法は確立していなかった。本論文では、この手法を full-array に拡張し、視線方向の校正の検証と校正パラメータを得た。

ポインティング校正を達成したことで、CMB を測定する際の外来ノイズ源である大気をモデル化する研究が可能になった。本論文では、大気放射の影響を見積もる手法を開発した。その結果、Fig. 2 に示すように GroundBIRD 望遠鏡がその高速回転による広域スキャン観測から、大気の流れによる構造的な時間変化を捉えていることを発見した。

以上の結果から、本研究では GroundBIRD 望遠鏡における視線方向の校正を full-array へと拡張し、大角度スケール CMB 偏光観測に要求される精度での校正が可能であることを示した。さらに、高速回転によるスキャン観測という GroundBIRD 望遠鏡の観測手法の強みを活かし、大気放射の時間変化を捉える新たな解析手法を開発した。本研究で大気放射の時間変動と気流の関係を明らかにしたことで、将来的な流動する大気モデルを用いたノイズ抑制による観測精度の向上が期待できることとなった。

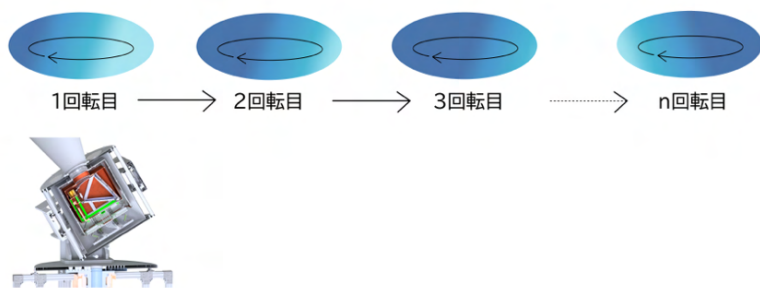


Fig. 1. Variations in atmospheric radiation

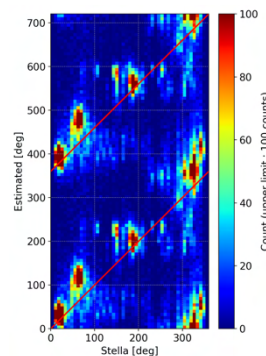


Fig. 2. Two-dimensional histogram comparing the estimated wind direction with the wind direction observed at the Stella observatory, using only data with PWV < 7.

## References

- [1] M. Kamionkowski, A. Kosowsky, A. Stebbins, A Probe of primordial gravity waves and vorticity, Phys. Rev. Lett. 78 (1997) 2058–206 <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.78.2058>
- [2] K. Lee et al 2021 ApJ 915 88 <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac024b>
- [3] Y.Sueno, Development of calibration and noise characterization methods for a CMB telescope, GroundBIRD, using its commissioning observation data. 京都大学理学研究科 博士論文 2024.



# S-2S を用いる $\Lambda$ ハイパー核高精度分光実験に向けた アクリルチェレンコフ検出器の開発

原子核・ハドロン物理学研究室 谷口智大

**Abstract** This research focuses on the development of an acrylic Cherenkov detector for use in high-precision spectroscopic experiments on hypernuclei. The role of this detector is to achieve efficient data acquisition by removing background protons and by identifying kaons from hypernuclear production reactions.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

本検出器の主な使用先である J-PARC E94 実験はストレンジネスクォークを含むバリオンであるハイペロン( $\Lambda$ )が含まれる原子核、ハイパー核を観測する実験であり、 $\Lambda$  粒子と原子核の束縛エネルギーが鏡像核(陽子と中性子の数を入れ替えた核)で異なるという核力の荷電対称性の破れ(Charge Symmetry Breaking (CSB))の解明を研究対象としている。E94 実験では  $^{10}\text{B}(\pi^+, K^+)^{10}_{\Lambda}\text{B}$ ,  $^{12}\text{C}(\pi^+, K^+)^{12}_{\Lambda}\text{C}$  反応を用いて  $p$ -殻系における束縛エネルギーをエネルギー分解能 1 MeV (FWHM), 確度 100 keV の高分解能・高確度で測定することで, CSB に関する新たなデータを提供し, バリオン間相互作用の理解を深めることを目指す。

E94 実験ではビーム粒子の  $\pi^+$ , 散乱粒子の  $K^+$  の運動量を測定し, ハイパー核の質量を求める欠損質量法を用いて束縛エネルギーを求めるのだが, この際に散乱粒子として  $K^+$  以外の粒子が背景事象として検出器を通過する。渡辺氏[1]によると散乱粒子のレートはデータ収集システムの上限レートの 10 倍あり, 効率的にデータを取得するには背景事象を抑制する必要がある。そこで背景事象となる陽子を除去するための閾値型のアクリルチェレンコフ検出器を開発し性能評価を行った。

チェレンコフ検出器とは物質が媒質の光速を超えて運動する際に発生するチェレンコフ光を検出する機器であり, その中でも閾値型とは粒子通過時に閾値を超えた信号を受信したか否かで粒子を識別する検出器である。E94 実験における散乱粒子の運動量は 0.61 ~ 0.83 GeV/ $c$  であり, この運動量でアクリル(屈折率 1.49)を通過すると  $K^+$  はチェレンコフ光が発生し陽子は発光しない。この差を利用して陽子を除去することができる。J-PARC において 実験本番で想定する粒子に対応するハドロンビームを用いて材質の異なる複数の試作機に対する性能評価を行った。これにより  $K^+$  に対して 99% 以上の検出効率を達成する材質を発見することができた(Fig. 1.)。今後は本検出器の実機作成を行い, ラムダハイパー核の束縛エネルギーの高精度測定が開始されることが期待される。

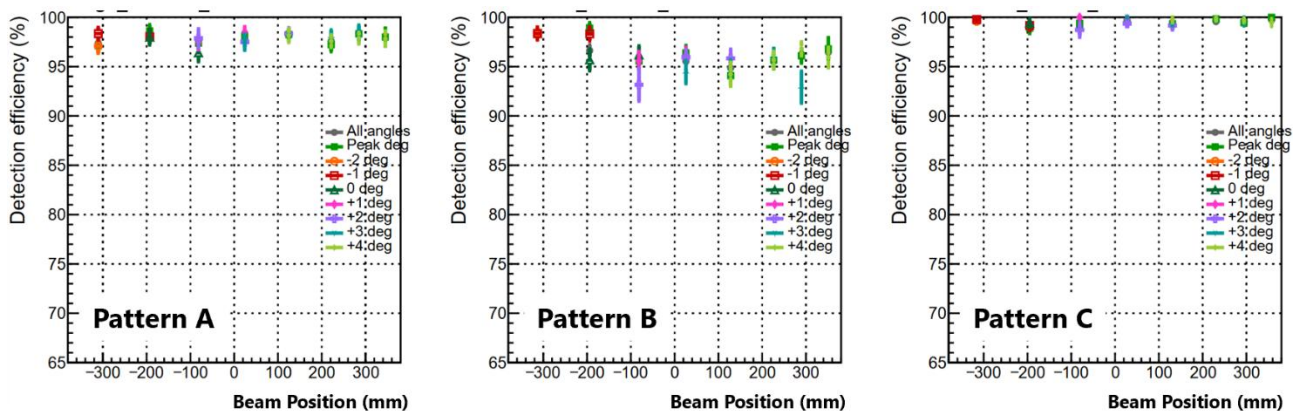


Fig. 1. Evaluation of detection efficiency when changing the beam irradiation position. Pattern C achieves 99%.

## References

[1] Daigo Watanabe, “S-2S スペクトロメータを用いた高精度  $\Lambda$  ハイパー核分光実験の設計”, Master Thesis (Tohoku University) 2024.

URL: <https://lambda.phys.tohoku.ac.jp/strangeness/gakui-ronbun-j.html> (accessed 2026-01-19).

# 電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡の 有効面積拡大に向けたガス飛跡検出器の改良

宇宙線研究室 出口颯馬

**Abstract** We studied a TPC gas for an electron-tracking Compton camera using  $\text{CF}_4$ -based mixtures. By measuring gas gain using alpha-particle at low voltages applied to the  $\mu$ -PIC and GEM, we evaluated the gas gain dependence of  $\text{CF}_4$  mixing-ratio. We also conducted XPS analysis to investigate electrode surface discoloration under  $\text{CF}_4$  operation.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

銀河中心領域で観測される電子陽電子対消滅線を生じさせる陽電子の起源については、天体から暗黒物質まで多様な起源が提唱されているが、いまだ特定には至っていない[1]。その要因の一つは、観測における空間分布の不定性が高いことである。MeV ガンマ線は光子の透過力が高いため遮蔽が難しく、コンプトン散乱優位なため筐体自体が雑音源となるため観測が難しい。従来の MeV ガンマ線観測手法では入射ガンマ線の到来方向を一意に決定できないため、観測領域外からの大量の雑音ガンマ線の漏れ込みの除去が十分でないことが問題であった[2, 3]。

我々が開発する電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (electron-tracking Compton camera: ETCC) は、コンプトン散乱時の電子の反跳方向を測定することで入射ガンマ線の到来方向を一意に決定できる望遠鏡である。これにより到来方向を用いた雑音ガンマ線の除去が可能になる。我々は ETCC を用いた MeV ガンマ線観測実験 SMILE (Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on balloon Experiments) を実施しており、次期科学観測実験 SMILE-3 に向け装置開発を進めている。SMILE-3 の科学目標は長期間気球観測による電子陽電子対消滅線の空間分布取得及び系内拡散ガンマ線、系外拡散ガンマ線観測による暗黒物質探査である。電子陽電子対消滅線や系内拡散ガンマ線の空間分布は天体起源では他波長での天の川銀河の観測と同様銀緯数度、暗黒物質起源では質量分布に従い天の川銀河で銀緯数十度に広がることが想定され、一か月の飛翔で空間分布モデルを区別するために角度分解能は前回実験に対して 2~3 倍、有効面積は 5~10 倍向上させることを目指している。

本研究では有効面積の拡大を目指し、散乱体ガスの調査を行った。コンプトン散乱確率向上や比例計数管での使用実績[4]といった観点から軽元素で構成された分子である  $\text{CF}_4$  を主成分としたガスの使用が望ましいが、 $\text{CF}_4$  はガスゲインが小さく測定が難しいといった欠点があった。そこでエネルギー損失の大きい  $\alpha$  線を用いたガスゲイン評価手法を構築した。 $\text{CF}_4$  混合ガスのガスゲインを測定し (図 1)、ETCC への適用可能性を議論するための混合率とガスゲインの関係を評価した。

一方で、ETCC の運用においては、ガス検出器の長期安定性も重要な課題となる。 $\text{CF}_4$  運用中に GEM と  $\mu$ -PIC が白く変色していることを確認した (図 2)。X 線光電子分光 (XPS) による表面分析を行った。その結果、 $\text{SiO}_2$  や炭素化合物の付着が示唆された。一方で運用時に顕著なガスゲインの劣化は見られなかったため、ガス探索実験の運用時間スケールではその影響はないことが分かった。

## References

- [1] N. Prantzos, et al., Rev. Mod. Phys., 83, 1001 (2011)
- [2] G. Weidenspointner, et al., A&A, 368, 347–368 (2001)
- [3] E. Churazov, et al., Nature, 512, 7515, 406-408 (2014)
- [4] Ju. M. Gavriljuk, et al., Instrum. Exp. Tech., 46:26-31 (2003)

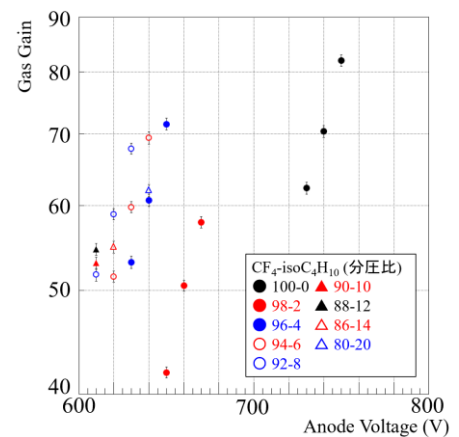


Fig. 1. Gain of  $\text{CF}_4$ -iso $\text{C}_4\text{H}_{10}$  mixture 1 atm measured by alpha-particle.

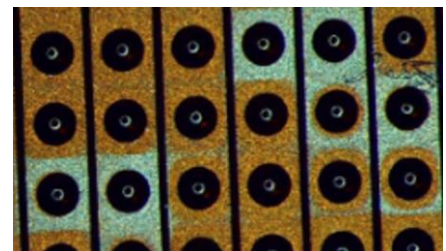


Fig. 2. White discoloration observed on the  $\mu$ -PIC.

# 天体核反応領域における炭素核融合反応の微視的原子核模型による記述

原子核理論研究室      長尾昂青

**Abstract** We calculated fusion cross sections for the  $^{12}\text{C}+^{12,13}\text{C}$  systems at astrophysical energies. Using a microscopic reaction model that explicitly includes compound states configurations, we computed fusion cross sections for these two systems within the same framework. With this framework, we successfully reproduced the distinct differences observed in the experiments for the two systems.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  核融合反応は、大質量星の進化や X 線スーパーバースト、Ia 型超新星爆発などの天体現象において重要な役割を担うと考えられている。しかし天体核反応のエネルギー領域ではクーロン障壁のトンネリングを伴う反応となるため反応率が極めて小さく、核融合断面積の直接測定は非常に困難である。さらに、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  核融合断面積には低エネルギーでは明瞭な共鳴構造が多く現れ、実験データの低エネルギー側への外挿は大きな不定性を伴う。したがって、直接測定が困難な天体核反応領域における反応率評価のために、核融合反応断面積を原子核理論に基づき高い信頼度で計算することが強く求められている。

その一方で、片方の原子核に中性子を一つ加えた系である  $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$  核融合反応は、天体核反応領域において  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  核融合反応のような顕著な共鳴構造は見られず、滑らかなエネルギー依存性を示すことが知られている。この両者の差は、反応で形成される複合核状態である  $^{24}\text{Mg}$  と  $^{25}\text{Mg}$  における準位密度と崩壊幅の違いに起因するものと C. L. Jiang らによって指摘された [1]。天体核反応領域における  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  核融合反応により生じる  $^{24}\text{Mg}$  は、対応する励起エネルギー領域において励起準位の密度が低く崩壊幅が小さいため、共鳴構造が現れる。一方で天体核反応領域における  $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$  核融合反応により生じる  $^{25}\text{Mg}$  は励起準位の密度が高く、崩壊幅が大きいため個々の共鳴構造は見えず、断面積が滑らかに見える [1]。また、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  核融合断面積のいくつかの共鳴ピークが  $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$  核融合断面積に一致し、 $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$  核融合断面積が、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  核融合断面積の上限を与えるという振る舞いを示すことも知られている [2]。しかしながら現状では、複合核状態を陽に含む同じ枠組みで  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  核融合反応と  $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$  核融合反応を取り扱った研究は行われていない。

本研究の目的は、実験で直接測定が困難な低エネルギー側での計算が可能な模型を構築すること、ならびに  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  核融合反応と  $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$  核融合反応の断面積を同じ枠組みで計算し、実験で確認されている振る舞いの違いを再現することである。そのために、複合核状態を陽に含む反応模型を構築した。具体的には、複合核状態の励起スペクトルを核子自由度に基づいた殻模型計算により用意しその崩壊幅を統計模型により見積もった。そして、散乱状態である  $\text{C}+\text{C}$  の相対運動と複合核状態を結合させることで、複合核状態と散乱状態とを同時に記述できる模型を構築し、核融合断面積を計算した。 $\text{C}+\text{C}$  状態と  $\text{Mg}$  状態との結合強度は二つの系で独立なフィッティングパラメータとして残るが、広いパラメータ範囲において、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  核融合反応では断面積に共鳴構造が現れ、 $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$  核融合反応では断面積は滑らかなエネルギー依存性を見せるような、二つの系における振る舞いの違いを同じ枠組みで再現することができた。また、 $^{12}\text{C}+^{13}\text{C}$  核融合断面積が  $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  核融合断面積の上限を与えるという実験的知見に基づいて両系の結合強度の比を決定することで、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  系に対して追加のフィットを行わずに断面積を評価する手順を与えることに成功した。そこで、全体の振る舞いを詳細に再現するには至らないものの、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$  核融合反応では実験データが得られているエネルギー範囲においては実験データと同じ程度の大きさの共鳴構造を再現することができ、また、実験データが得られていないエネルギー範囲において共鳴構造はさらに発達し大きくなることを見出した。

## References

- [1] C. L. Jiang *et al.*, Phys. Rev. Lett. **110**, 072701(2013).
- [2] M. Notani *et al.*, Phys. Rev. C **85**, 014607(2012).

# 非ユニタリな共形場理論とホログラフィ

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 中村七海

**Abstract** The holographic principle relates quantum gravity to boundary QFTs. AdS wormholes dual to deformed CFTs reveal traversability when non-Hermiticity of density matrices occur. PT-symmetric holographic models exhibit phase transitions, NEC violation, and novel intermediate phases, offering insights into non-Hermitian extensions of holography.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

重力の量子論を解明する有力な候補としてホログラフィ原理がある。これは  $d+1$  次元の重力理論が、その境界にある  $d$  次元の場の量子論と対応するというものである。その代表例は、 $d+1$  次元の負の宇宙定数を持つ反ドジッター時空 (AdS) と  $d$  次元の共形場理論 (CFT) が対応するという AdS/CFT 対応である。

この対応の別の例として、ワームホール解とその双対な場の量子論がある[1]。ワームホールとは離れた点をトンネルのようにつなぐ構造であり、通常は因果的につながらない二点を結ぶ可能性を持つ。[1]では、3次元時空で BTZ ブラックホールからの変形として得られる AdS ワームホール解を考えた。BTZ ブラックホールに双対な CFT が二つ存在するように、このワームホール解に双対な場の量子論は二つの CFT からの変形となる。具体的には、ダブルトレース変形によるワームホール[2]と、純虚数のヤヌス変形によるワームホールを扱い、ワームホールの渡航可能性は双対な場の理論では密度行列の非エルミート性として現れるということを示した。また、密度行列の非エルミート性をはかる量  $\text{imagitivity}$  を導入し、渡航可能性を定量的に評価した[3]。これらワームホールに双対な調和振動子モデルを構築してその結果をまとめ、ワームホールに双対な場の理論特有の性質について追及した。

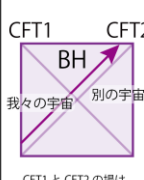
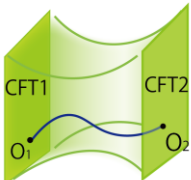
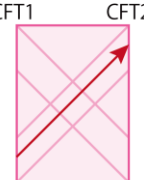
	ブラックホール	double trace 型	ヤヌス型
重力	 <p>CFT1 CFT2 BH 我々の宇宙 別の宇宙 CFT1 と CFT2 の間は因果的に繋がらず、 渡航不可能</p>	 <p>CFT1 CFT2 境界の演算子の相互作用 <math>\int d^2x O_1(x) O_2(x)</math> により渡航可能</p>	 <p>CFT1 CFT2 重力理論に純虚のスカラー場を加えたことにより渡航可能</p>
場の量子論	ユニタリ	ユニタリ	非ユニタリ
一般化された密度行列	エルミート	非エルミート	非エルミート

Fig 1: Two types of wormholes and dual CFT behavior [1]

$PT$ (パリティ・時間反転)対称な理論は、ハミルトニアンが非エルミートであっても正のエネルギー固有値を持つことが知られている。この性質は量子力学系でよく知られているが、場の量子論においても同様のことが成り立つ。ここでは、 $PT$ 対称なモデルのホログラフィ的な構成とその性質をレビューする[4]。 $PT$ 対称な理論には相転移が存在し、相転移点以降は計量が複素になり NEC(null energy condition)が破れた  $PT$  broken 相に移る。さらに有限温度では  $PT$ 対称性が回復するように、相転移点が移動する。このときの  $PT$ 相と  $PT$ broken 相の間に NEC は成立しないが計量は実になるような新しい相が生まれる。この新しい相はホログラフィ原理を非エルミートに拡張する重要な手掛かりになる可能性がある。

## References

- [1] T. Kawamoto, R. Maeda, N. Nakamura and T. Takayanagi, *Traversable ads wormhole via non-local double trace or janus deformation*, Journal of High Energy Physics 2025 (2025).
- [2] P. Gao, D. L. Jafferis and A. C. Wall, *Traversable Wormholes via a Double Trace Deformation*, JHEP 12 (2017) 151 [1608.05687].
- [3] J. Harper, T. Kawamoto, R. Maeda, N. Nakamura and T. Takayanagi, *Non-hermitian Density Matrices from Time-like Entanglement and Wormholes*, 2512.13800.
- [4] D. Arean, K. Landsteiner and I. Salazar Landea, *Non-hermitian holography*, SciPost Physics 9 (2020).



# ISS 搭載の中性子モニタ MoMoTarO の製作と 太陽中性子の観測シミュレーション

宇宙線研究室 中山和哉

**Abstract** This thesis presents the development and performance evaluation of the neutron and gamma-ray detector MoMoTarO-ISS for solar neutron observations. Ground tests and Geant4 simulations demonstrate its environmental robustness and capability to detect solar neutrons in the ISS orbit, contributing to studies of particle acceleration in solar flares.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

太陽フレアは太陽表面で発生する爆発現象であり、磁気リコネクションに伴って電子や陽子などの粒子が高エネルギーまで加速される。これらの加速機構は宇宙線加速とも深く関係するが、荷電粒子は太陽磁場や惑星間磁場の影響を受けるため、生成時の情報を直接得ることは困難である。そこで、磁場の影響を受けず直進する太陽中性子の観測が、イオン加速機構を解明するための有力な手法として注目されている (Fig.1a)。しかし、太陽中性子は電荷を持たず他の物質と相互作用しにくいいため検出が難しく、また地球大気や中性子自身の崩壊による減衰のため、観測例は極めて限られてきた [1]。

我々は月面や月周辺での放射線測定を軸にした多分野連携プロジェクトとして、中性子・ガンマ線検出器 Moon Moisture Targeting Observatory (MoMoTarO) [2] を開発しており、2026 年に国際宇宙ステーション (ISS) で宇宙実証を行う (MoMoTarO-ISS, Fig.1b)。MoMoTarO-ISS はプラスチックシンチレータと SiPM で 8 ch 同時読み出しが可能な CubeSat 1.5U サイズの軽量・小型の検出器で、ガンマ線と中性子を波形で弁別できる。本研究では MoMoTarO-ISS の製作および初期性能評価、環境試験を行うとともに、太陽中性子の観測シミュレーションを実施した。

エンジニアリングモデル (EM) で、バックグラウンド測定および放射線源を用いた性能評価実験を行い、8 ch 同時読み出し・ガンマ線と中性子の波形弁別ができることを実証した。さらに、ISS での運用を想定した陽子照射試験、振動試験、熱真空試験を実施し、MoMoTarO-ISS が 10 krad の放射線耐性、ロケット打ち上げ時のランダム振動耐性、真空下での 10 – 60°C の熱耐性を持つことを確認した。

加えて、Geant4 を用いて MoMoTarO-ISS の中性子応答、バックグラウンドをモデル化し、太陽中性子の観測シミュレーションを行った。ISS 軌道上では地球アルベド・宇宙線起源のバックグラウンドが支配的となるが、8 ch 同時読み出しを活かした反同時計数を行うことで、160 MeV 以下の太陽中性子を  $3\sigma$  以上の有意度で検出可能であることを示した (Fig.1c)。

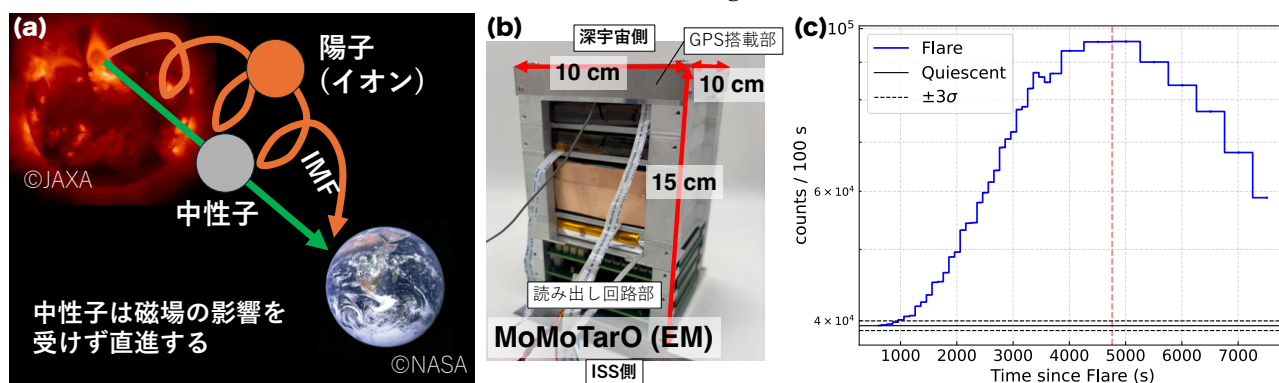


Fig. 1. (a) The particle-flying process in solar flares. (b) MoMoTarO-ISS (EM). (c) Light curve estimated by Geant4. The red dashed line represents the theoretical peak time. This shows the results after data screening, and the X28 flare on 2003/11/4 [3] is used in the simulation.

## References

- [1] 松原豊, RADIOISOTOPES, 68, 12, 907-915 (2019).
- [2] N. Tsuji *et al.*, Proc. SPIE, 13093, 1309379 (2024).
- [3] K. Watanabe *et al.*, Advances in Space Research, 38, 3, 425-430 (2006).

# 水ベース液体シンチレータを用いた飛跡検出器の開発と性能評価

高エネルギー物理学研究室 林 洸樹

**Abstract** We are developing a new tracking detector using Water-based Liquid Scintillator (WbLS) for precise measurements of the leptonic CP-violating phase in the Hyper-Kamiokande experiment. In this thesis, I report the light yield improvements of the WbLS detector, simulations, and performance evaluation with detector prototypes using an electron beam.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノ振動は、現在の素粒子標準模型を超える物理現象であり、多くの未解決問題が残る素粒子物理の理解を進める契機となることが期待される。この振動を記述する位相 $\delta_{CP}$ はレプトン CP 対称性の破れを表すパラメータで、宇宙の物質数と反物質数の不均衡を説明する有力な候補である[1]。

ハイパーカミオカンデ(HK)実験は、加速器で生成したニュートリノビームを直後の前置検出器と 295 km 離れた HK 検出器で観測するニュートリノ振動実験で、CP 対称性の破れを表す $\sin\delta_{CP} \neq 0$ の発見を目指す。HK 検出器が水標的を用いてニュートリノを測定するのに対して既存の前置検出器は炭素標的を用いて測定する。この標的原子核の差から大きな系統誤差が生じることが分かっており、本研究では水標的を用いた新たな前置検出器、水ベース液体シンチレータ検出器 (WbLS 検出器) の開発を行う。

本検出器が用いる WbLS は、水と液体シンチレータを界面活性剤で混合したものであり、主成分が水でありながら荷電粒子の通過時に発光する特性を持つ。WbLS 検出器 (Fig. 1) はこの WbLS を光反射壁でキューブ状に区切って形成したセルが 3 次元格子状に並ぶ構造をしており、各セルでの発光は内部に通された波長変換ファイバーを用いて光子を外部に伝搬した後に MPPC で検出する。本検出器は荷電粒子による各セルの発光をほとんど独立して認識可能な飛跡検出器であり、1 cm 程度の短い飛跡を検出できて全方向に同等な検出特性を持つことが強みである。

従来の開発では読み出し光量が目標に対して 4 倍程度不足することが分かっておりその改善が最重要課題であった。本研究はこの光量改善のために、セルの内部に反射シートを貼り付ける、波長変換ファイバーの読み出しを行わない端面に反射加工を行う、MPPC を改善する、ファイバーの直径を 1 mm から 2 mm に変更するといった工夫を行った。そして宇宙線を用いた擬似モデルの光量測定とシミュレーションから 6.1 倍の光量向上が期待できることを確認した。

この結果を受け、実際の検出器と同じ大きさのセルを再現した WbLS 検出器試作機 (Fig. 2) を作製し、電子ビームを用いた性能評価テストを 2 度実施、従来の状態から最大 7.1 倍の大幅な読み出し光量増加を確認した。また光量がセル内での荷電粒子の通過位置によって変動する傾向、光が隣のセルに漏れ出す比率など検出器の重要な特性を明らかにした。この結果を用いて検出器の性能シミュレーションを行い、現在の読み出し光量が飛跡検出性能および粒子識別能力において十分な性能を達成できる水準にあることを示した。

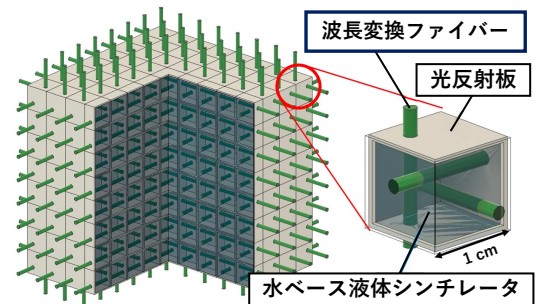


Fig. 1. The design of the WbLS detector



Fig. 2. The prototype of the WbLS detector used in a beam test

## References

[1] Y. Hamada et al., JHEP, 2018, 178 (2018).

# 高出力 3 $\mu\text{m}$ 帯中赤外レーザー設計に向けた Er:YAP 結晶の発熱量評価

レーザー物理学研究室 比屋根総司

**This study experimentally evaluates heat generation in Er:YAP crystals for high-power 3  $\mu\text{m}$  lasers. Thermal imaging is used to quantify absorbed heat and estimate thermal lens focal length. The agreement between experimental results and theoretical models provides design guidelines for stable resonator operation under strong continuous-wave pumping at room temperature.**

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

高出力 3  $\mu\text{m}$  帯中赤外レーザーは、分子分光や医療応用に加え、超短パルスレーザーの励起光源としても重要性が高まっている。Er:YAP 結晶はこの波長帯において高効率動作が報告されている[1]。一方で、高励起条件下では結晶内の発熱に起因する熱レンズ効果が顕在化し、出力安定性や共振器設計を制限する要因となる。しかし、 $\text{Er}^{3+}$  のエネルギー準位構造は複雑であり、交差緩和、再吸収、励起状態吸収などがどの程度発熱に寄与しているのかは十分に明らかになっていない。

本研究では、これらの発熱過程を定量的に評価するため、サーマルカメラを用いた熱量測定により、連続発振および非発振条件下における Er:YAP 結晶の発熱量を定量的に測定した。その結果、励起光吸収に対する発熱割合はおおよそ 55.8 % であり、吸収された光の約 56 % が熱へ変換されることが分かった。Fig. 1 には、発熱量から推定した熱レンズの焦点距離と発熱量の関係を示す[2]。本実験条件において、熱レンズの焦点距離は励起光吸収 0.61~28.64 W に対しておおよそ 29.3~114.8 mm の範囲にあると推定された。

さらに、光線行列によるビーム安定性解析を行い、熱レンズ効果を考慮した共振器設計指針を得た。Fig. 2 は平面 - 平面型共振器において、熱レンズの焦点距離が小さい領域では共振器長を増加することができないが、平面 - 凹面型共振器 ( $R=100\text{mm}$ ) にすることで共振器長を増加させた際にもレーザー発振可能領域が出現した。その結果を共振器に応用することで、本来は熱レンズ効果を考慮しなければ発振しない共振器構成においても、安定なレーザー発振を実現した。本研究の結果は、Er:YAP レーザーにおける発熱起源の理解に重要な知見を与えるとともに、高平均出力中赤外レーザーの共振器設計への応用が期待される。

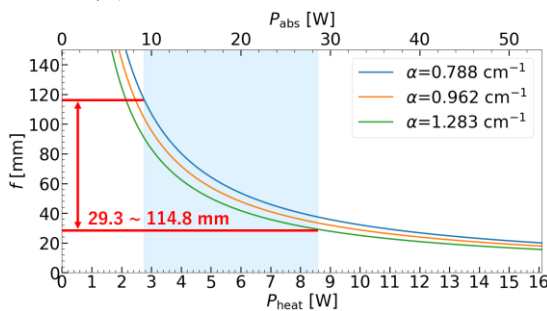


Fig 1. Thermal lens focal length in an Er:YAP crystal as a function of heat power for different absorption coefficients. The shaded region indicates the experimentally relevant heat load range, where the focal length varies from 29.3 to 114.8 mm.

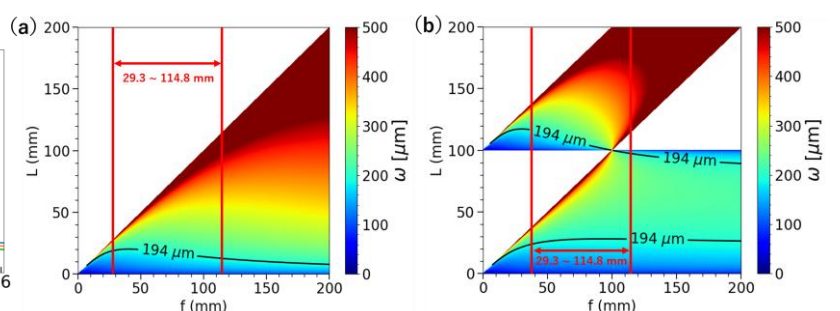


Fig. 2. (a) Beam radius stability map of a plane-plane resonator as a function of thermal lens focal length and cavity length. (b) Corresponding stability map of a plane-concave resonator, showing an extended stable region even under strong thermal lensing.

## References

- [1] W. Yao et al., Opt. Express 28, 19000–19007 (2020).
- [2] M. E. Innocenzi et al., Appl. Phys. Lett. 56(19), 1831–1833 (1990).

# ド・ジッター宇宙における ホログラフィ原理と量子情報理論

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 藤木恒成

**Abstract** We explore new aspects of the holographic principle in de Sitter spacetime, which is expected to describe our universe. After reviewing several types of the holographic principle from quantum information perspectives, we present our works on perturbed de Sitter branes and the duality of Einstein equation in the dS/CFT correspondence.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

量子重力理論の構築は素粒子理論分野において最も重要かつ挑戦的な問題の一つである。その解決に向けた幅広いアプローチの中でも特に「ある時空における量子重力理論は、その境界における一つ次元の低い場の量子論と等価である」というホログラフィ原理が注目を集め、盛んに研究されている。その中でも最も成功している例として、AdS/CFT 対応が知られている[1]。反ド・ジッター (Anti-de Sitter, AdS) 時空の量子重力理論とその境界に住む共形場理論 (Conformal Field Theory, CFT) の等価性を主張するこの対応関係によって、これら両方の理論の相補的な解析が可能になった。また、境界 CFT における部分系のエンタングルメントエントロピーを重力理論における適切な極小曲面の面積で計算できるという笠-高柳公式が提唱されたことによって、ホログラフィ原理における量子情報理論的な理解の重要性が明らかになった[2]。さらに、このような AdS 時空における双対性を、我々の宇宙に近いと考えられているド・ジッター (de Sitter, dS) 時空に拡張しようという試みがなされている[3]。dS/CFT 対応と呼ばれるこの双対性は基本的に AdS/CFT 対応からの解析接続で考えることができるが、そこには dS 時空特有の様々な問題が残されている。

本修士論文の前半では AdS/CFT 対応の基礎から量子情報理論的な側面までを整理し、そこから境界付き共形場理論 (Boundary Conformal Field Theory, BCFT) に対する双対性に拡張して AdS/BCFT 対応を説明している。さらには、dS/CFT 対応の構成方法とその応用例を整理した上で、双対な CFT に現れる非ユニタリー性などの問題点について言及している。後半では、これらの前提知識を踏まえた上で、筆者らの研究について紹介する。それは大きく分けて二つあり、一つ目は摂動された dS ブレーンの解析についてである[4]。AdS/BCFT 対応を実現する方法として AdS 時空に End-of-the-World (EOW) ブレーンと呼ばれる時空の境界を挿入することが提唱されている。timelike に挿入した EOW ブレーンに局在したスカラー場を導入することによって dS ブレーンに摂動を与えることができる。このようにして構成されたモデルを用いて、ブレーン上の dS/CFT 対応におけるスカラー場の共形次元が実になり、双対な CFT がユニタリー性を保つことを示した。さらにはこのモデルを用いて timelike  $g$  定理の証明や様々な宇宙論モデルの構成を行っている。二つ目は、線形化アインシュタイン方程式とエンタングルメントエントロピーの第一法則という二つの基礎方程式の間に成り立つ双対性を、dS/CFT 対応の文脈で示している[5]。この際に、dS/CFT 対応における笠-高柳公式において、極小曲面を複素平面へと拡張するといった新たな計算手法を提唱した。

## References

- [1] J.M. Maldacena, *The Large  $N$  limit of superconformal field theories and supergravity*, Adv. Theor. Math. Phys. 2 (1998) 231 [hep-th/9711200].
- [2] S. Ryu and T. Takayanagi, *Holographic derivation of entanglement entropy from AdS/CFT*, Phys. Rev. Lett. 96 (2006) 181602 [hep-th/0603001].
- [3] A. Strominger, *The dS / CFT correspondence*, JHEP 10 (2001) 034 [hep-th/0106113].
- [4] K. Fujiki, H. Kanda, M. Kohara and T. Takayanagi, *Brane cosmology from AdS/BCFT*, JHEP 03 (2025) 135 [arXiv: 2501.05036].
- [5] K. Fujiki, M. Kohara, K. Shimyo, Y.-k. Suzuki and T. Takayanagi, *Entropic Interpretation of Einstein Equation in dS/CFT*, [arXiv: 2511.07915].



# MARQ スペクトロメータで用いる 閾値型エアロゲルチェレンコフ検出器の開発

原子核・ハドロン物理学研究室 堀祐輔

**Abstract** We are developing the MARQ spectrometer for hadron spectroscopies at the J-PARC  $\pi 20$  beamline. The threshold type Aerogel Cherenkov detector (thAC) will be used to identify kaons from pions. We report the performance of the prototype thAC and optimization of its design.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

多彩なハドロンの構造を説明する理論に構成子クォークモデルがある。構成子クォークモデルは基底状態のハドロンをよく記述する一方で、構成子クォークモデルで予想されているにもかかわらず実際に見つかっていない励起状態や、逆に構成子クォークモデルで説明できない励起状態が存在するなどの問題がある。これらを解決する理論モデルの一つにダイクォークモデルがある[1]。ダイクォークモデルではハドロン内のクォーク対が励起状態を説明する有効自由度になっていると考えられているがその存在を裏付ける実験結果は得られていない。

J-PARC E50 実験は、J-PARC ハドロン実験施設で現在建設中の新たなビームラインである  $\pi 20$  ビームラインと新たな汎用スペクトロメータである MARQ スペクトロメータを用いた、総称「MARQ 実験」と呼ばれる実験の 1 つで、重いクォーク(c クォーク)を 1 つ含むバリオンの励起状態の精密分光を行うことでその生成比からダイクォーク相関の検証を行う実験である[2]。

この MARQ スペクトロメータを構成する各種検出器のうち、運動量 2-4 GeV/c までの散乱  $\pi$  中間子と K 中間子の粒子識別を行うのが閾値型エアロゲルチェレンコフ検出器(thAC)である。thAC はチェレンコフ光を用いて粒子識別を行う。屈折率 1.007 のエアロゲルを輻射体とすることで、運動量 2-4 GeV/c の領域の  $\pi$  中間子はチェレンコフ光を発生し、K 中間子はチェレンコフ光を発生しないため、チェレンコフ光の有無で  $\pi$  中間子と K 中間子の粒子識別を行う。

屈折率の小さい輻射体では放出されるチェレンコフ光子数が少量である。そのため thAC の実用化に向けては微量の光子を効率良く検出する仕組みが重要である。本研究では透過長 20 mm の透明度の高いエアロゲル、光子検出効率の高いシリコン半導体光検出器、発生したチェレンコフ光を光検出器へ導く集光器を用いた試作機の性能を SPring-8/LEPS2 ビームラインの陽電子ビームを用いて評価した。さらに実験で得られた検出光子数やバックグラウンドのデータをもとに Geant4 シミュレーションを用いて  $\pi$  中間子と K 中間子の識別性能を評価し、目標性能を達成する見込みがあることを示した。また集光器デザインの再検討を行い、より光子検出効率の高い集光器のデザインを決定した。最後に実機設計に向けた大型化による識別能力の一様性についても検討を行った。

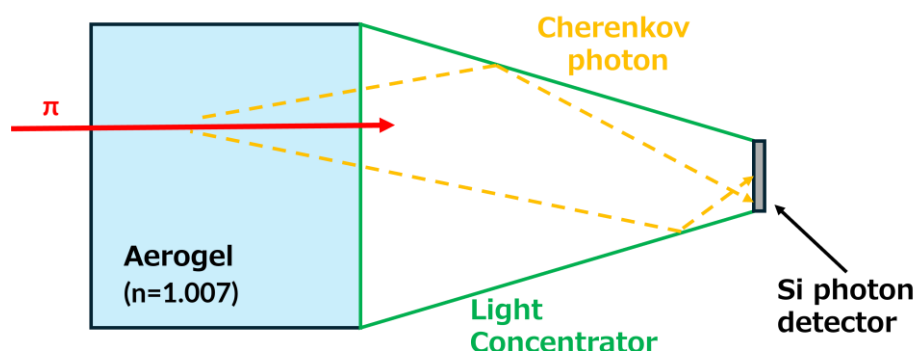


Fig. 1. Design of the threshold type Aerogel Cherenkov detector (thAC).

## References

- [1] M. Anselmino *et al.*, Rev. Mod. Phys. 65, 1199 (1993).
- [2] H. Noumi *et al.*, J-PARC E50 proposal (2012).

# 通行可能なワームホールとホログラフィ原理

基礎物理学研究所 素粒子論グループ

前田陵汰

**Abstract** We consider a traversable wormhole in AdS spacetimes and explore the properties of the dual field theory using AdS/CFT correspondence. We compare two different wormhole models and see the common behavior on the correlation functions, although they have completely different origin for their traversabilities.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

現時点で重力現象を最もよく記述している一般相対論は、水星の近日点移動を見事に説明し、またブラックホールや重力波の存在を予言するなど、これまでに輝かしい成功を収めてきた。次の段階としては重力を量子化し、他の3つの相互作用と合わせて統一的に理解することが望まれる。しかしながら一般相対論は素朴に量子化するとくりこみができず、予言能力を持たないことが知られている。この現状を打破する可能性を秘めているのが、ホログラフィ原理、そしてその具体例である AdS/CFT 対応である。これは  $d+1$  次元の Anti-de Sitter (AdS) 時空の重力理論と  $d$  次元の共形場理論(CFT)の等価性を主張するもので、重力現象を場の理論を用いて解析する手段として現在精力的に研究が進められている。

本論文のテーマは、この AdS/CFT 対応と通行可能なワームホールである。通行可能なワームホールとは、時空内の異なる二つの領域を因果的につなぐトンネル構造のことを指し、時空の因果構造と深く関わっている。このようなワームホールの存在可能性や性質について絵は古くから議論がなされてきたが、特に重要な特徴として、古典的一般相対論のもとでエネルギー条件の破れが避けられないことが挙げられる。本論文の前半では、これら通行可能なワームホールに関する基本的性質をレビューする。

さらに近年では、ワームホールの通行可能性が量子情報の伝達可能性とも関係することが明らかになり、単なる幾何学的対象としてだけでなく、量子情報的側面からも理解が進められている。AdS 時空中にワームホールが存在する場合、その境界は二つに分かれるため、AdS/CFT 対応においては二つの CFT の複合系が双対な場の理論として現れる。本論文の目的はこのような系において、ワームホールの通行可能性がどのように CFT 側に反映されるのかを明らかにすることである。

AdS/CFT 対応の枠組みにおいて通行可能なワームホールを構成した研究として、CFT のダブルトレース変形を用いたものがよく知られている[1]。このモデルは量子テレポーテーションの AdS/CFT 対応における実現として注目を集めている。これに加えて著者らは、ヤヌス変形を用いて通行可能なワームホール解を構成する新たな手法を提案した[2]。本研究ではこれら二つのモデルを解析し、それぞれに双対な場の理論が持つ共通点と相違点を明らかにする。

共通点として、いずれのモデルにおいても CFT の二点相関関数にワームホールの因果構造が反映されることが挙げられる。一方で、通行可能性が実現される機構は両者で本質的に異なっている。ダブルトレース変形は CFT に相互作用を導入することにより二つの境界理論の因果的つながりを生み出しているのに対し、ヤヌス変形ではハミルトニアンの方非エルミート性を通じて、相互作用のない独立な CFT の間に因果関係が発現する。このような変形では CFT の状態を表す密度演算子もまた非エルミート性を示し、これが通行可能性の直接的な起源となっている[3]。

本発表では AdS/CFT 対応と通行可能なワームホールについてそれぞれ簡単に紹介したのち、著者らが提案したヤヌスワームホール解の特徴やダブルトレース変形モデルとの相違点を中心に述べる。

## References

- [1] P. Gao, D. L. Jafferis, A. C. Wall, “Traversable Wormholes via Double Trace Deformation”, JHEP 12 (2017) 151
- [2] T. Kawamoto, R. Maeda, N. Nakamura, T. Takayanagi, “Traversable AdS wormhole via non-local double trace or Janus deformation”, JHEP 04 (2025) 086
- [3] J. Harper, T. Kawamoto, R. Maeda, N. Nakamura, T. Takayanagi, “Non-hermitian Density Matrices from Time-like Entanglement and Wormholes”, [arXiv:2512.13800]

# Simons Observatory 実験における CMB 望遠鏡で用いる真空冷却槽の開発

高エネルギー物理学研究室 溝添泰隆

**Abstract** We have been developing SAT-LF, a new CMB telescope for low-frequency observations at the Simons Observatory. In this study, we focused on developing the cryostat used to cool the SAT-LF detectors. We ensured its structural stability and evaluated its cooling performance, estimating that the cryostat can reach the target temperatures. © 2026 Department of Physics, Kyoto University

宇宙創生は、現代物理学における最大の問いである。その核心に迫る手がかりとして注目されているのが、宇宙最古の光である宇宙マイクロ波背景放射(CMB)に刻まれた偏光パターンである。特にインフレーション仮説は初期宇宙に原始重力波が生成されると予言し、それはCMB偏光にBモードと呼ばれる特有の空間パターンを刻印する[1]。Simons Observatory 実験はチリ・アタカマ(海拔 5,200 m)にてCMB偏光を精密観測する実験である。具体的には、6 台の小口径望遠鏡 SAT による 10 年間の観測で、原始重力波の強度指標であるテンソルスカラー比  $r$  を  $\pm 0.001 (1\sigma)$  の精度で測定することを目指している[2]。

この観測目標を達成するには、観測信号に混入する銀河からの前景放射を分離・除去することが不可欠であり、特に低周波(27~45 GHz)で支配的なシンクロトロン偏光を正確に取り除く必要がある。そのための新しい小口径望遠鏡 SAT-LF は、現在日本グループ主導で開発が進められている。この帯域で安定した観測を行うためには、検出器を低雑音に保つための極低温クライオスタット(真空冷却槽)の構造安定性と十分な冷却性能が重要である。特に SAT-LF は他の SAT に比べて観測波長が約 3 倍長いため、それに比例して光学素子が厚く重くなる。ここに、従来の SAT とは異なる、構造強度の確保と熱伝導性能の両立という開発要素がある。本研究では SAT-LF のクライオスタット開発に焦点を当て、構造安定性の強化と、冷却性能を向上させるためのヒートリンク(冷却経路)を開発し、その性能評価を行った。

まず、大気圧が真空槽に与える変形によっても構造的な安定性を保つため、支持構造体を真空槽へ組付ける時に発生する初期応力を低減する改良を行った。レーザートラッカーで各構成部品の形状を精密測定し、組付け面の隙間解析に基づくシムプレートを設計・実装した。これにより組付け面の相対精度を  $50\mu\text{m}$  未満にすることを達成し、初期応力を低減した。そして真空試験を行い、支持構造体に損傷や歪みが生じないことを確認した。

次に、クライオスタットへの主な 2 つの入熱源を冷凍機へ熱的に接続して冷却するためのヒートリンクを開発した。異種金属間の熱収縮率の違いが引き起こす変位を吸収するために、ヒートリンクに  $\text{MoS}_2$  コーティングを施したスライド機構を採用した。この機構を確認するために液体窒素を用いて冷却試験を行い、冷却・昇温サイクルを通じて変位が連続的かつ可逆的に吸収されることを確認した。さらに、試作したヒートリンクをクライオスタットに搭載して冷却試験を行い、熱回路モデルを用いて熱伝導性能の評価を行った。これにより設定した温度目標値に対する熱伝導性能を定量化することができた。この結果に基づき、追加実装すべきヒートリンクの量を温度ステージごとに見積もり、目標達成の実現性を検討した。これによって、SAT-LF の安定冷却に向けた見通しを示した。

以上の成果より、SAT-LF の要求温度と構造的安定性を満たし、低周波帯域の観測運用を安定して行える見通しを立てた。SAT-LF の観測により、Simons Observatory の CMB 偏光 B モード探索における系統誤差を低減し、原始重力波探索という物理目標の実現に貢献する。

## References

- [1] U. Seljak and M. Zaldarriaga, Phys. Rev. Lett. 78, 2054 (1997).
- [2] The Simons Observatory Collaboration; I. Abril-Cabezas et al., arXiv:2512.15833 (2025).

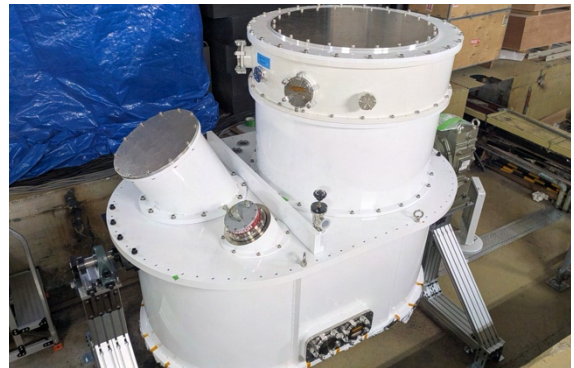


Fig 1. Exterior view of the SAT-LF cryostat developed and performance-tested in this study.

# 高密度核物理の解明に向けた 高次多重極間の普遍関係の構築

基礎物理学研究所 宇宙グループ 宮園 隼人

## Abstract

Equation-of-state-insensitive universal relations (URs) among physical quantities of neutron stars and quark stars are essential for reducing systematic errors in gravitational wave observations. We derive URs between higher-order multipoles and tidal deformability that hold to  $O(1)$  % accuracy. We also investigate the nature of these URs by performing analytic Newtonian calculations.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

核物質の低温高密度下における圧力  $P$  と密度  $\rho$  を結ぶ状態方程式の制限は、原子核物理、天文物理にとって重要な課題である。それには、連星中性子星（やクォーク星）からの重力波観測による星が潮汐力で変形される度合い（潮汐変形率  $\lambda$ ）の推定が有力な手段である。実際に 2017 年に観測された連星中性子星合体由来の重力波 GW170817 の情報から四重極の潮汐変形率  $\lambda_2$  に上限が定められ、硬すぎる状態方程式は棄却された[1]。重力波観測においては、星の質量や四重極モーメント  $M_2$  などの推定するパラメータが多いと、それらの推定の精度が低下する。この問題は、 $\lambda_2$  と  $M_2$  の間に成り立つ「状態方程式によらない  $M_2 - \lambda_2$  普遍関係[2]」を用いてパラメータ数を減らすことで改善された。

本研究の目的は、高次多重極（八重極・十六重極）量の間の普遍関数を構築し、今後稼働予定の第 3 世代の検出器での観測の精度向上にこれが貢献できるか調べることである。そのために、重力-磁氣的八重極モーメント  $S_3$ 、八重極・十六重極の潮汐変形率  $\lambda_3$ 、 $\lambda_4$  を自転が遅い近似のもと計算した。

代表的な結果として、重力-磁氣的八重極モーメント  $S_3$  と十六重極の潮汐変形率  $\lambda_4$  との間には、2-3 % の誤差の普遍関係が成り立つことが分かった (Fig. 1.)。また、 $M_2$  と  $\ell'$  次の潮汐変形率  $\lambda_{\ell'}$  の普遍関係に関して、 $\ell' = 2, 3$  は同程度に 1-2 % で成り立つが、 $\ell' = 4$  では 3-4 % と精度が下がった。一方  $S_3$  と  $\ell'$  次の潮汐変形率の普遍関係は、 $\ell' = 2$  の時に 9-10 % と最も悪く、 $\ell' = 3$  で 5-6 %、 $\ell' = 4$  で 2-3 % と、 $\ell'$  の次数が上がるごとに精度が上がった。

加えて、本研究では Newton 極限において一般の次数  $\ell$ 、 $\ell'$  の多重極量  $M_\ell$ 、 $S_\ell$ 、 $\lambda_{\ell'}$  間の関係を解析的に計算し、普遍関係の誤差の大小と多重極の次数の大小の関係を調べた。

$M_\ell - \lambda_{\ell'}$  間には、 $\ell$  の次数が低い時には  $\ell = \ell'$  の時に状態方程式依存性が弱まる（つまり、普遍性が高まる）ことが分かった。一方、 $\ell$  の次数が上がるとこの関係は崩れ、 $\ell \gtrsim 10$  ではすべての  $M_\ell$  に対し高次の  $\ell'$  の潮汐変形率ほど誤差が小さくなった。また、 $S_\ell - \lambda_{\ell'}$  間には、 $\ell$  の次数が低い時から  $\ell = \ell'$  の時に状態方程式依存性が弱まるという関係は発見されず、 $\ell \gtrsim 5$  で高次の  $\ell'$  の潮汐変形率ほど誤差が小さくなることが分かった。

## References

- [1] LIGO Scientific, Virgo Collaboration, B. P. Abbott et al., Phys. Rev. X, 9, 011001 (2019).
- [2] K. Yagi and N. Yunes, Phys.Rev.D 88, 2, 023009 (2013)

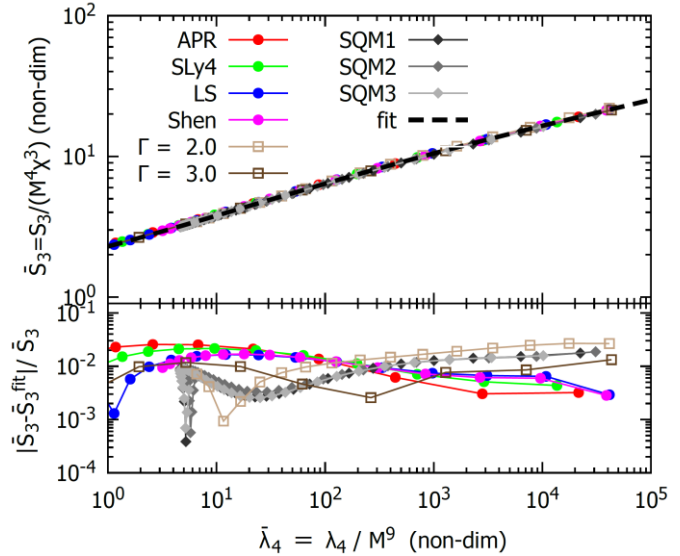


Fig. 1. (Top) The value of gravito-magnetic octupole moment  $S_3$  for a given tidal hexadecapole deformability  $\lambda_4$ . (Bottom) Fractional errors from the fit. Different colors correspond to different equation of state (EoS). Observe that each relation is almost EoS-insensitive (Universal Relations), within 2-3 % for all EoS, including polytropic EoS.



# J-PARC E16 実験のための ハドロンブラインド検出器運用安定化に向けた検出器開発

原子核・ハドロン研究室      柳井祥吾

**Abstract** We conduct J-PARC E16 experiment to investigate QCD condensation through hadron mass measurement. In this experiment, the Hadron Blind Detector (HBD) plays a critical role by identifying electron pairs while suppressing pion backgrounds. We evaluated the impact of structural modifications to HBD on its performance to ensure stable operation.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

QCD 真空ではカイラル対称性が自発的に破れ、クォーク対が凝縮している。クォークの複合粒子であるハドロンの質量の大部分は、クォーク凝縮との相互作用により生ずると考えられている。また、NJL 模型の計算では、高温・高密度環境でカイラル対称性の破れが部分的に回復し、クォーク凝縮が減少すると予想されており [1]、これに伴ってハドロンの質量が減少すると考えられる。J-PARC E16 実験では高密度環境での  $\phi$  中間子の質量スペクトル測定を行う。QCD 和則を用いて、ストレンジネス凝縮量と  $\phi$  中間子の質量変化間の関係が計算されている [2] ため、測定した  $\phi$  中間子の質量変化からクォーク凝縮量を導出することが可能である。

E16 実験では、 $\phi$  中間子の崩壊により生ずる電子・陽電子対の飛跡情報を用いて  $\phi$  中間子の質量スペクトルを求める。レプトンである電子対は強い相互作用の影響を受けないため、中間子の質量を測定するための手段として適している。ハドロン反応において多数発生する  $\pi$  中間子を除去し、粒子識別の目的で用いられる検出器の一つがハドロンブラインド検出器 (Hadron Blind Detector, HBD) である。HBD はガスチェレンコフ検出器であり、検出器内で輻射されたチェレンコフ光を光電面で電子に変換した後、3 段ある電子増幅装置 (GEM) により増幅した信号を検出する。

2026 年 1 月現在まで、E16 実験では 5 回のコミッショニングランが行われてきた。コミッショニングランで HBD を運用する際、ビーム強度の揺れによる一時的な高計数率によって HBD 内の GEM が導通し、電子増幅の機能を失うケースが多く見られた。これを受け HBD の運用安定化のため、GEM 間の間隔を広げることで導通による破損を抑制する試みを行った。

GEM 間の間隔を広げたことで運用が安定化すると考えられる一方で、GEM 間の電場が弱められることが懸念される。電場の低下に伴い、電子増幅性能が低下し、電子対検出効率に影響を与える恐れが存在していた。そこで本研究では、HBD1 モジュール間における検出効率の比較を行い、上記の構造変更が検出器性能に与える影響について評価した。ビームの時間構造の問題により、解析対象のランでは評価にあたり十分な量の電子のデータを得ることができなかったため、電子の代わりに  $\pi$  中間子検出効率を求め、評価を行った。増幅元の電子がチェレンコフ光によるものか  $\pi$  中間子によるガスの電離によるかを問わず、GEM を通り増幅される機構は同一であるため、電子増幅効率を調べる上では問題ないと判断した。

性能評価の結果、両モジュールの  $\pi$  中間子の検出効率は誤差の範囲で一致した。構造変更は HBD の電子増幅率に影響を与えないことが確認され、行った施策が HBD の運用安定化のために有用であると示された。

## References

- [1] W.Weise, Nucl. Phys. A553 (1993) 59c-79c.
- [2] P.Gubler and K.Ohtani, Phys. Rev. D 90, 094002 (2014).

# 初期質量関数の金属量遷移における 原始星ダスト照射加熱の役割

天体核研究室 吉田壮希

**Abstract** We investigate how stellar characteristic masses depend on metallicity by modeling both pre-stellar cloud collapse and post-formation accretion heating. We find that protostellar radiative dust heating becomes effective only above  $10^{-4}$  solar metallicity, increasing stellar masses by up to an order of magnitude.

© 2026 Department of Physics, Kyoto University

ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡によって、宇宙初期に存在した銀河が高精度で観測されるようになり、金属量の少ない環境で星がどのように生まれたのかが急速に明らかになりつつある。理論的には、金属量が低いほど大質量の星が生まれやすくなると考えられており、金属量の変化に応じて星の質量分布がどのように変化するのかを理解することが重要な課題となっている。

星の典型的質量を決める仕組みについては、これまでに大きく分けて二つの考え方が提案されてきた。一つ目は、星が生まれる前のガス雲が収縮する過程で温度が最も低くなる点があり、そのときのガス雲の大きさが最終的な星質量を決めるという考え方である[1, 2]。二つ目は、星が生まれた後、その星からの放射によって周囲のガスやダストが温められ、ガスが分裂しにくくなることで、星の質量が決まるという考え方である[3, 4]。近年の研究[4]では主に後者の仕組みに基づいて、金属量と星質量の関係が議論されてきた。しかし、極めて金属量が低い場合にはダストがほとんど存在しないため、星からの放射による加熱は十分に働かないと考えられる。この点を踏まえると、金属量が非常に低い環境では、星質量を決める仕組みそのものを改めて検討する必要がある。

本研究では、星が生まれる前後の両段階を考え、金属量を変えた理論計算を行った。まず、星が誕生する前のガス雲がどのように加熱と冷却を経て収縮するのかを計算した。次に、その結果をもとに、星が生まれた後のガス降着過程をモデル化し、星の周囲の温度構造が時間とともにどのように変化するかを調べた。その結果、星からの放射によるダスト加熱が星の質量決定に重要な役割を果たすのは、金属量が太陽の約 1 万分の 1 以上の場合に限られることが分かった。また、この条件を満たす環境では、星が生まれる前の過程だけを考えた場合と比べて、星の典型的な質量が最大で約 10 倍大きくなることが示された。これらの結果は、近年の数値シミュレーション結果[5]とも概ね一致している。

## References

- [1] Omukai, K., ApJ 534, 809–824 (2000).
- [2] Larson, R. B., MNRAS 359, 211–222 (2005).
- [3] Krumholz, M. R., ApJ 743, 110 (2011).
- [4] Sharda, P., & Krumholz, M. R., MNRAS 509, 2758–2775 (2022).
- [5] Chon, S., Hosokawa, T., Omukai, K., & Schneider, R., MNRAS, 530, 2453–2474 (2024).