

2020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

(2021年2月3日、2月4日)

物 理 学 第 二 分 野

# 修士論文発表会

日時:2021年2月3日(水)4日(木)  
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 》

### 2月3日(水)

- 1 . 逆運動学による $^{48}\text{Ca}$ 陽子弾性散乱を用いた固体水素標的厚測定手法の確立 延與 紫世 (9:00)
- 2 . CMB偏光の超精密検査に向けた電波吸収体の開発研究 大塚 稔也 (9:20)
- 3 . ハッブルテンションの解決に向けた標準宇宙模型の修正とニュートリノ物理 大橋 智 (9:40)
- 4 .  $\Xi$ ハイパー核分光の為の機械学習を用いた運動量解析手法 大橋 翼 (10:00)

## 《 休 憩 》

- 5 . 可換射影による量子色力学のクォーク閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れの研究 大畑 宏樹 (10:30)
- 6 . FPGAを用いたHRS-HKS同時計測トリガー系の開発  
-JLabにおける高精度ハイパー核分光実験- 片山 一樹 (10:50)
- 7 . 時空に依存する質量を持つフェルミオンのカイラルアノマリー 菅野 颯人 (11:10)
- 8 . 次世代X線天文用SOIピクセル検出器の軟X線性能及びノイズ性能の定量的研究 児玉 涼太 (11:30)
- 9 . 高輝度 LHC ATLAS 実験に向けた初段ミュオントリガーアルゴリズムの改良とハードウェアへの実装 小林 蓮 (11:50)

《 午 後 》

- |   |       |         |
|---|-------|---------|
| 10 . 超伝導検出器MKIDの評価系構築とTLSノイズを抑制する研究                   | 末野 慶徳 | (13:00) |
| 11 . ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験AXELのためのバリウムイオン検出に向けた研究    | 菅島 文悟 | (13:20) |
| 12 . TeVスケールマヨロンダークマターの生成機構の研究                        | 鈴木 健太 | (13:40) |
| 13 . J-PARC E16実験におけるシリコンストリップ検出器の性能評価                | 高浦 雄大 | (14:00) |
| 14 . 共鳴取出型チャージブリーダーの原理実証機開発と性能評価                      | 高木 周  | (14:20) |
| 15 . 合体するブラックホール連星における潮汐力によるアクシオン雲の消失                 | 高橋 卓弥 | (14:40) |
| 《 休 憩 》   |       |         |
| 16 . Double Field TheoryとBorn幾何学                      | 龍澤 誠之 | (15:20) |
| 17 . レーザー誘起微細周期構造の形成過程に関する研究                          | 田中 陽平 | (15:40) |
| 18 . T2K 実験新型ニュートリノ検出器のためのシンチレータキューブ品質検査システムの開発       | 谷 真央  | (16:00) |
| 19 . 放射光メスbauer吸収分光法のためのエネルギー・時間同時測定系の開発              | 谷口 博紀 | (16:20) |
| 20 . LHC-ATLAS実験Run-3に向けたTGC検出器を用いた初段ミューオントリガーシステムの検証 | 辻川 吉明 | (16:40) |

## 2月4日(木)

- |   |         |         |
|---|---------|---------|
| 21 . JLabにおける $\Lambda$ ハイパートライトンの精密質量測定実験のためのガス標的の基礎設計 | 豊田 峻史   | (9:00)  |
| 22 . 電子対測定のための粒子識別検出器群における背景事象除去性能の評価                   | 中須賀 さとみ | (9:20)  |
| 23 . テンソルネットワークによる格子場理論の数値計算アルゴリズムとその高次元化の研究            | 中山 泰晶   | (9:40)  |
| 24 . RIプローブを用いた超微細気泡の内圧及び寿命測定                           | 林 大寿    | (10:00) |
| 25 . 集団運動量を考慮に入れた生成座標法の拡張と粒子数射影法                        | 樋沢 規宏   | (10:20) |
| 《 休 憩 》   |         |         |
| 26 . 重い大強度不安定核ビームの粒子識別に向けたキセノンガスシンチレータの開発               | 土方 佑斗   | (10:50) |
| 27 . 可積分模型の統一理論としての4次元Chern-Simons理論                    | 福島 理    | (11:10) |
| 28 . 超新星残骸Tychoにおける熱的放射と非熱的放射の時間変動観測研究                  | 松田 真宗   | (11:30) |
| 29 . $SO(N)$ とシフト変換に不変な一般化複数場ガリレオン理論                    | 間仁田 侑典  | (11:50) |

# 逆運動学による<sup>48</sup>Ca陽子弾性散乱を用いた 固体水素標的厚測定手法の確立

原子核・ハドロン研究室 延與紫世

**Abstract** The inverse-kinematics using a hydrogen target is an effective technique to carry out proton elastic scattering for unstable nuclei. Here, the method to measure a thickness of the solid hydrogen target, which produces the largest systematic error, was successfully established.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

中性子星が太陽の二倍を超えるその質量を支えられる機構は、宇宙・原子核物理分野の大きな謎の一つである。中性子物質を含んだ核物質の状態方程式 (Equation of State, EoS) は、この中性子星の半径・質量間の関係を記述する上で重要な情報であると考えられている [1]。

状態方程式解明の鍵として注目を集めているのが、系のアイソスピン非対称度に依存するエネルギー変化を表した対称エネルギーの項  $S(\rho)$  である。  $S(\rho)$  は以下の式で表される。

$$S(\rho) = J + L \frac{\rho - \rho_0}{3\rho_0} + \frac{1}{2} K_{sym} \left( \frac{\rho - \rho_0}{3\rho_0} \right)^2 + O[(\rho - \rho_0)^3]$$

この対称エネルギー項の中でも特に、核子密度に対する一次の傾きを表すパラメータ  $L$  と、中性子過剰核の表面に現れる中性子スキンの厚さとの間に強い相関があることが、平均場理論計算によって示唆されてきた [2]。この中性子スキン厚を測定する実験として、核子当たり約 300 MeV (300 MeV/A) の陽子弾性散乱を用いた、日本グループによる安定核<sup>208</sup>Pbの中性子分布・中性子スキン厚の測定 [3] は、国際的に高く評価されている。

しかしパラメータ  $L$  の定量性を向上させるためには、安定核よりもさらにアイソスピン非対称度が高く、中性子スキンが発達した系である不安定な中性子過剰核での測定が必要である。その一方で不安定核の中性子スキン厚を測定する上での課題として、原子核を標的とする従来の手法が適用できない点が挙げられる。この制約を解決するために、不安定核ビームを陽子標的に照射し逆運動学での陽子弾性散乱実験を行う、ESPRI 実験 (Elastic Scattering of Protons with RI beams) が立ち上げられた。その後 ESPRI グループは、広範囲の検出領域を持つ反跳陽子測定器と薄い大面積固体水素標的を開発し、広い運動量移行領域での高い質量欠損分解能を逆運動学陽子散乱において実現した。その一方で、設計上 1 mm 厚で作製された固体水素標的の厚さを精密測定する手法がまだ確立しておらず、精密な陽子弾性散乱断面積測定には、標的数が最大の系統誤差となることが予想された。

今回、大強度の不安定核ビームを中重核領域まで供給できる理化学研究所 RI ビームファクトリーにおいて、これらの装置を用い陽子弾性散乱微分断面積測定実験を行った。中性子過剰核研究のフラグシップである二重魔法数核<sup>132</sup>Snに対して、エネルギー約 300 MeV/A の陽子弾性散乱実験に成功した。また、<sup>132</sup>Snの微分断面積の定量性を改善するための基準核として、安定核<sup>48</sup>Caの陽子弾性散乱実験も同時・同条件下で行った。<sup>48</sup>Caは順運動学で測定された高精度の陽子弾性散乱微分断面積と、その測定データをよく再現する理論計算 [4] が存在するため、これらと比較することで本測定の定量性を確保することが可能である。本論文では取得した<sup>48</sup>Caデータから、約 290 MeV/A の<sup>48</sup>Ca陽子弾性散乱微分断面積を決定した。さらに、この微分断面積の決定も含めた固体水素標的厚の決定手法を確立し、本実験に用いた固体水素厚を 10% 以内の精度で決定することに成功した。

## References

- [1] Lattimer, J. M., *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, **62**, 485-515 (2012)
- [2] Brown, B. A., *Physical review letters*, **85**(25), 5296 (2000).
- [3] Zenihiro, J., *et al.*, *Physical Review C*, **82**(4), 044611 (2010).
- [4] Zenihiro, J., *et al.*, arXiv preprint arXiv:1810.11796 (2018).

# CMB 偏光の超精密検査に向けた 電波吸収体の開発研究

高エネルギー物理学研究室 大塚稔也

**Abstract** I developed new radio-wave absorbers which are important technology for CMB observations. The best absorber achieved very low reflectance ( $< 1\%$ ) in frequency range of 20-300 GHz. This absorber achieved 50 times lower reflectance than the absorber which has been used for current CMB projects.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の観測実験は非常に小さな信号を高精度で分析する研究である。その観測の為に外來ノイズの影響を徹底的に小さくする必要がある。主要な外來ノイズの一つが迷光と呼ばれる回折して望遠鏡に入り込む地面からの熱放射である。これを防ぐ為に、受信機の内面に電波吸収体を貼り付けて迷光を吸収・抑制する。

CMB 観測の周波数帯域は 20~300 GHz と幅広いが、低周波数での吸収性能が特に重要である。その理由は、回折は低周波数ほど大きい事と低周波数で低反射率なものは高周波数でも低反射率である事にある。以上の事から本研究では 20 GHz 付近で反射率 1% 未満を達成する電波吸収体の開発研究を行なった。

低反射率の実現には、電波吸収体に立体構造を持たせる事と、電磁波の吸収しやすさを表す消衰係数が大きい材料を使う事が不可欠である。本研究では、立体構造を持たせつつ材料の自由度が大きい製法として 3D プリンタの型に電波吸収剤を流し込む製法を採用した (Fig. 1)。この製法で立体構造はクリアできるので、残る課題である高吸収な材料を開発する事に注力した。

候補となる材料は 3 樹脂、17 粉末を組み合わせた計 52 種類用意した。それらの平板サンプルを作成して、各々の透過率の測定データから屈折率  $n$  と消衰係数  $\kappa$  を求めた。測定は常温と液体窒素温度の 2 通り行った。Fig. 2 に液体窒素温度での代表的なサンプルの測定値を示す。黄色い領域は、私が開発した幾何光学的シミュレーションから見つかった最適なパラメータ領域である。図中の  $\triangle$ ・ $\nabla$  は炭素繊維であり、特に  $\nabla$  で表したもの (K223HE を LOCTITE 社の STYCAST2850FTJ 樹脂に 0.15% 混合させたもの) が優れている。

この材料で 3D プリンタ型電波吸収体を作製し、常温で 45 度反射率測定とシミュレーションを比較したところ両者がよく一致し、作製したサンプルが理想的な立体構造を再現できている事が確認された。さらに液体窒素温度でのパラメータを入れて、より実用に近い「散乱効果あり」の条件でシミュレーションを行った。その結果、全帯域で反射率 1% を切る事も確認できた (Fig. 3)。低い周波数帯域において、達成した反射率は従来材料の約 1/50 の値である。本研究で開発した電波吸収体は今後様々な CMB 観測実験で使われていく見込みである。

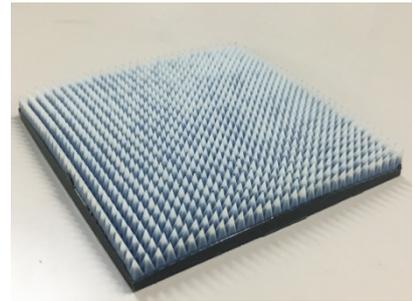


Fig. 1. A radio-absorber formed with 3D-printed mold

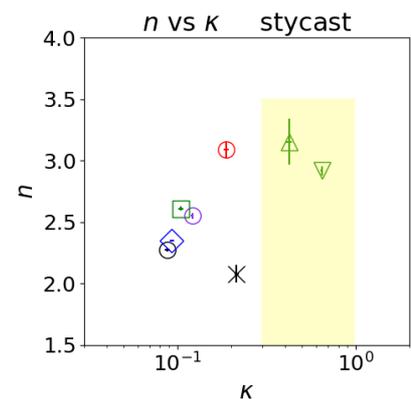


Fig. 2. Measured  $n$  and  $\kappa$  parameters at 77K

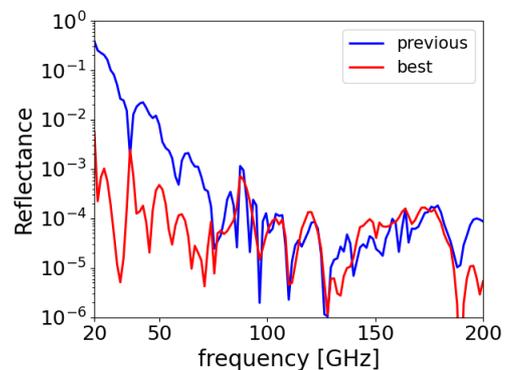


Fig. 3. Comparison of this study ("best") with previous study.

# ハッブルテンションの解決に向けた 標準宇宙模型の修正とニュートリノ物理

素粒子論研究室 大橋 智

**Abstract** This paper is a review of methods of resolving the Hubble tension by introducing new interactions of neutrinos. It increases the number of effective relativistic neutrino species or stops free streaming of neutrinos even after the weak interaction freezeout. This can alleviate the Hubble tension.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

近年、宇宙論のパラメータを測定する様々な実験が行われている。そのパラメータの一つで宇宙の膨張率を表すハッブル定数  $H_0$  には、初期宇宙の観測結果と局所的な観測結果との間に有意な差異が存在する。これをハッブルテンションという。たとえば、プランク望遠鏡を用いた宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測から得られた値は  $H_0 = 67.4 \pm 0.5$  [km s<sup>-1</sup> Mpc<sup>-1</sup>] (Planck 2018 [1]) であるのに対し、Ia 型超新星やセファイドの観測からは  $H_0 = 74.0 \pm 1.4$  [km s<sup>-1</sup> Mpc<sup>-1</sup>] (SHOES 2019 [2]) という結果が得られている。本修士論文ではこのハッブルテンションを解決するために提案されている標準宇宙模型、 $\Lambda$ CDM モデルの修正方法をレビューする。

ハッブルテンションを解決するための  $\Lambda$ CDM モデルの修正に関する研究はこれまで数多くなされており、とくにニュートリノに注目したものは盛んに議論されている。ハッブル定数の測定に影響する具体的な修正点としては、(1)ニュートリノ質量、(2)標準模型にない相互作用や粒子を加えることで生じるニュートリノ有効世代数の変化、(3)標準模型にない相互作用や自己相互作用をニュートリノに加えることによる自由流の抑制などがある。そのほか、宇宙初期のダークエネルギーに注目した議論などもなされている。

この論文ではまず、ハッブル定数の測定の背景にある理論を概観し、次に宇宙マイクロ波背景放射の温度異方性が生じる原因について議論する。最後に  $\Lambda$ CDM モデルの修正として(1)~(3)をそれぞれ考慮した場合のハッブル定数への影響を見る。

それぞれの影響は以下の通りである。(1)ニュートリノ質量を考慮すると、ニュートリノの質量が重ければ重いほど得られるハッブル定数は小さくなる。Planck 2018 の結果は最小のニュートリノ質量を仮定しているため、むしろハッブルテンションは大きくなってしまう。(2)ニュートリノと光子は宇宙の温度が  $T \sim \mathcal{O}(\text{MeV})$  のころに同じ温度ではなくなるが、その時期にニュートリノが相互作用によってエネルギーを獲得するならば、ニュートリノ有効世代数は大きくなる[3]。その場合ハッブル定数は大きくなり、ハッブルテンションは小さくなる。(3)標準模型のニュートリノは弱い相互作用が凍結した後に自由流をもち、CMB の温度異方性のパワースペクトルの音波振動の位相をずらす。この標準模型の結果はCMB の観測結果と矛盾しないが、もし標準模型にない相互作用がニュートリノに存在し晴れ上がり以前の自由流が抑制されるならば、ニュートリノが自由流をもつことによる位相のずれは生じない。このとき同時にハッブル定数を大きくとると、CMB の観測と矛盾しない結果が得られる[4]。よって、この場合にもハッブルテンションを小さくできる。

## References

- [1] N. Aghanim *et al.*, “Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters.”, *Astron. Astrophys.*, 641:A6 (2020).
- [2] Adam G. Riess *et al.*, “Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics beyond  $\Lambda$ CDM.”, *Astrophys. J.*, 876(1):85 (2019).
- [3] Miguel Escudero, “Neutrino decoupling beyond the Standard Model: CMB constraints on the Dark Matter mass with a fast and precise  $N_{\text{eff}}$  evaluation”, *JCAP*, 02:007 (2019).
- [4] Subhajit Ghosh, Rishi Khatri, and Tuhin S. Roy, “Dark Neutrino interactions phase out the Hubble tension”, *Phys. Rev. D*, 102(12):123544 (2020).

# 三ハイパー核分光の為に 機械学習を用いた運動量解析手法

原子核・ハドロン物理学研究室 大橋 翼

**Abstract** In the J-PARC E70 experiment aiming for  $\Xi$  hypernuclei spectroscopy via the  $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$  reaction, it is a key to have a good calibration method to realize high energy resolution. We adopted a new method by using machine learning and evaluated its performance on various learning conditions.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

通常原子核を構成する核力については、現在に至るまでに高統計で系統的な数多くの核子散乱実験データが存在し、中間子交換モデルを下にした現実的な核力モデルが構築されてきている。しかし、これをストレンジネス自由度(S)を持ったハイペロンと核子との相互作用に拡張するのは単純ではない。ハイペロンが短寿命であるために核子との散乱データを取得するのは困難であり、これまで  $S = -1$  の系については  $\Lambda$ 、 $\Sigma$  ハイパー核の構造研究により相互作用の実験情報を引き出し、中間子交換モデルをフレーバーSU(3)に拡張することで理解されてきた。 $S = -2$  の系では、実験情報はさらに不足しており、 $\Xi$  粒子と核子の相互作用は未解明である。現在準備が進んでいる J-PARC E70 実験では、 $^{12}\text{C}(K^-, K^+)$  反応により  $^{12}_{\Xi}\text{Be}$  の欠損質量スペクトルを  $2 \text{ MeV}_{\text{FWHM}}$  の高分解能で測定することを目標としている。運動量解析には、入射 K-ビームラインスペクトロメータ ( $\Delta p/p = 1 \times 10^{-3}$ ) と散乱 K+スペクトロメータ S-2S ( $\Delta p/p = 5 \times 10^{-4}$ ) が用いられる。束縛状態のピークが観測できれば、 $\Xi$  粒子ポテンシャルの実部や虚部の情報が得られる。

E70 と同じビームラインで先行して行われた J-PARC E05 実験では、散乱粒子の運動量解析に Runge-Kutta 法を用いた SKS スペクトロメータ ( $\Delta p/p = 3 \times 10^{-3}$ ) と 3 次の輸送行列を用いたビームラインスペクトロメータにより、素過程  $p(K^-, K^+) \Xi^-$  の欠損質量スペクトルが  $5.4 \text{ MeV}_{\text{FWHM}}$  の分解能で得られた。これはこれまでで世界一のエネルギー分解能である。この測定では散乱運動量が散乱角度などの観測量と相関を持ち、運動量を補正する必要があることがわかった。現在、この補正手法は解析者に依存しており多項式による補正のように現象論的に行われている。そこで、機械学習の適用による、解析者に依存しない広範の効果を考慮した解析を検討した。このような運動量解析に機械学習を適用した例は乏しく、手法としての適用可能性から調べる必要がある。

本研究では、機械学習を適用した運動量解析を新たに導入し、E05 実験のデータに対して適用する。 $K^-p \rightarrow \pi^+ \Sigma^-$ 、 $K^-p \rightarrow K^+ \Xi^-$  反応を使って、欠損質量の解析値と PDG value [1] との平均二乗誤差で与えられる損失関数が最小値をとるように学習 (Fig. 1) させることで欠損質量スペクトル (Fig. 2) を得る。この手法を様々な条件下で行い、学習条件に対する本手法の依存性を評価する。

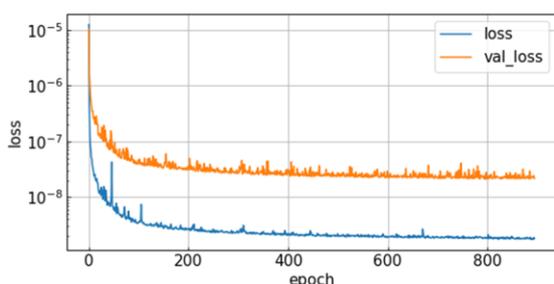


Fig. 1 An example of a machine learning convergence situation

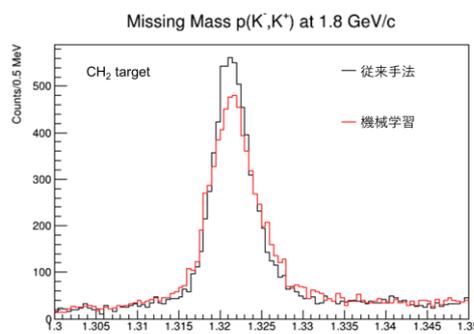


Fig. 2 Missing-mass spectrum for the  $p(K^-, K^+)X$  reaction in J-PARC E05

## References

- [1] M. Tanabashi *et al.*, Phys Phys. Rev. D 98, 030001 (2018)

# 可換射影による量子色力学の クォーク閉じ込めとカイラル対称性の自発的破れの研究

基礎物理学研究所 原子核理論研究室 大畑宏樹

**Abstract** We present numerical studies of quark confinement and spontaneous chiral-symmetry breaking in terms of Abelian projection using lattice QCD. We find Abelian dominance for quark confinement in excited states of the static quark-antiquark system and chiral condensate in the chiral limit in the Maximally Abelian gauge at the quenched level.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)は, そのSU(3)非可換性ゲージ対称性より漸近的自由性をもつために, 高エネルギー領域では摂動展開が有効であるが, 低エネルギー領域では有効ではない. QCDに基づいて強い相互作用の低エネルギー領域を解析する手法としては, 格子上に定義されたQCDの経路積分の, Monte Carlo法による数値計算(格子QCDシミュレーション)が存在する. 1980年より始まった格子QCDシミュレーションは様々な低エネルギー領域の物理量の計算を可能にした. しかし, 非摂動的諸現象の発現機構等は単にシミュレーションを行うだけでは不明である.

クォーク閉じ込めの機構としては1970年代に南部・'t Hooft・Mandelstamらが唱えた双対超伝導描像が存在する. これは我々の真空がモノポールの凝縮によって, 双対超伝導状態となっているために, 双対Meissner効果によって, フラックス・チューブが1次元的に引き絞られ, 線形のポテンシャルが現れるという描像である. しかし, QCDの基本的自由度はクォークとグルーオンであり, モノポールは存在しない. また, QCDは電磁気学とは異なり非可換ゲージ理論であるにも関わらず, 双対Meissner効果が生じるのかという問題もある. 't Hooftによる可換射影は非可換ゲージ対称性を部分的にゲージ固定することで, この2つの問題の突破口を同時に開いた. 特に最大可換ゲージを用いた可換射影はクォーク閉じ込めのみならず, より一般にQCDの低エネルギー領域の現象を大まかに保つ(これをAbelian dominanceとよぶ)事ができることが, 1990年以降の格子QCDシミュレーションによって明らかになってきている.

本修士発表会では, QCDの最大可換ゲージを用いた可換射影に関する2つのオリジナルな研究[1, 2]を紹介する.

まず, この可換射影を静的なクォークと反クォークの系の励起ポテンシャルおよび, グルーオン励起エネルギーに適用した研究[1]を紹介する. QCDの励起現象の可換射影に対する応答が調べられたのはこれが初めてであり, 系の励起状態においても, クォーク閉じ込めについて, Abelian dominanceが成立することがわかった. また, 0.7 fm程度以上の遠距離であれば, 1 GeV程度の大きさのグルーオン励起に対して, Abelian dominanceが成立し, 2 GeV程度の大きさの励起に対しては成立しないことがわかった.

次に, 可換射影に対する, カイラル凝縮の応答をクエンチ近似の下で調べた研究[2]を紹介する. SU(3)の場合はほぼ最初の研究であり, Banks-Casher関係とカイラル外挿という2つの異なる手法より, カイラル極限でのカイラル凝縮に対してAbelian dominanceが成り立つことを示した. さらに, モノポールがカイラル凝縮と密接な関係にあることを, 配位のモノポール・フォトン部分への分解と, 局所的な相関という観点から示した.

## References

- [1] H. Ohata and H. Suganuma, Phys. Rev. D **102**, 014512 (2020), arXiv:2003.05203 [hep-lat].
- [2] H. Ohata and H. Suganuma, arXiv:2012.03537 [hep-lat].

# FPGA を用いた HRS-HKS 同時計測トリガー系の開発 -JLab における高精度ハイパー核分光実験-

原子核・ハドロン物理学研究室 片山一樹

**Abstract** Hypernuclear spectroscopy provides important experimental data for understanding strong interactions. We are planning to perform a hypernuclear precision spectroscopy using the  $(e, e'K^+)$  method. In this study, I estimated the background rate of this experiment and constructed a trigger system for efficient data acquisition.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

ラムダハイパー核質量分光実験は、原子核構造やバリオン間相互作用、さらには中性子星のようなエキゾチックな高密度核物質の内部構造の解明のための重要なデータを与える。

我々国際研究共同グループは、2000年代初頭より米国ジェファーソン研究所 (JLab) において連続電子線加速器 CEBAF を用いて  $(e, e'K^+)$  反応分光実験を行っている。 $(e, e'K^+)$  反応分光実験は、電磁相互作用によってハイパー核を生成し、散乱電子と  $K^+$  中間子の運動量を同時に測定することで、欠損質量法によりハイパー核の質量を測定する。CEBAF による高品質・大強度な電子ビームと、高分解能スペクトロメータを用いることで 1 MeV (FWHM) を切るような高質量分解能と 100 keV 程度の高い確度を持ったハイパー核の質量分光を実現してきた。

我々は現在、ラムダ-核子-核子相互作用のアイソスピン依存性を調べるための  $^{40,48}\Lambda\text{K}$ ,  $^{208}\Lambda\text{Tl}$  の質量分光実験を計画している。さらに厳密理論計算と比較可能な少数系ハイパー核の基礎データとなる  $^{3,4}\Lambda\text{H}$  の質量分光実験も計画している。これらはそれぞれ標的に  $^{40,48}\text{Ca}$ ,  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{3,4}\text{He}$  を用い、JLab Hall A において、同じセットアップで実験を行う予定である。

$(e, e'K^+)$  反応分光実験の課題点は、電磁生成起因の背景事象が大量に発生し、信号ノイズ比が小さいことである。これらの背景事象は標的の原子番号の 2 乗に比例して急激に増加するため、特に  $^{208}\text{Pb}$  で大量の背景事象が発生すると予想される。また、 $^{3,4}\text{He}$  は気体標的であり、気体を封入するためのセル (Al) が  $0.3\text{ mm}\times 2$  (セルの入り口と出口) と他の個体標的と比べて厚く、セル起因の背景事象が大量に発生する可能性があるため、特に注意が必要であるこれらの背景事象は、入射電子エネルギーが増加するほど前方に放出される。この性質を利用し、次世代実験では従来実験よりビームエネルギーを高め、前方を避けてスペクトロメータ (HRS-HKS) を設置することによって (Fig.1)、これらの背景事象を抑え、効率的なデータ収集を行う予定である。

本研究では、現実的な物理インプットと磁場・磁石形状等のビーム光学性質を組み込んだモンテカルロシミュレーションを構築し、それを用いて本実験セットアップにおける背景事象計数率を見積もった。その結果、個体標的についてはシンチレーションカウンタのみの信号損失が少ないアンバイアストリガーのみで十分データ収集が可能であることが明らかになった。一方、気体標的についてはセル起因の背景事象が多く、トリガー段階でチェレンコフ検出器を用いた背景事象の除去を行う必要があることが判明した。そのため、標的とその背景事象の状況によって柔軟にトリガー条件を切り替えて測定をする必要がある。また、これまでトリガー回路を構築していた FPGA モジュールがレガシー化してしまい、現在のスタンダードな PC では制御が困難であるため、新たな FPGA モジュールを検討し、実動作試験を行った上でトリガー回路を構築した。さらに、実際の実験における具体的な運用方法についても議論し、効率的なデータ収集を円滑に行うためのシステムについてまとめた。

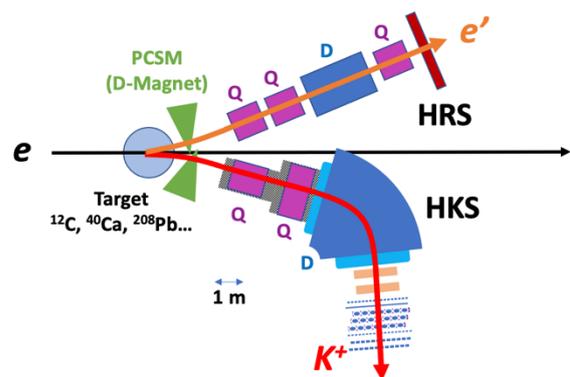


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup using the HRS-HKS system.

この図は、実験装置の概略を示しています。左から電子ビーム (e) が入射し、ターゲット (12C, 40Ca, 208Pb...) を通過します。その後、PSCM (D-Magnet) を通過し、散乱電子 (e') は HRS (High Resolution Spectrometer) で検出されます。一方、生成された K+ 中間子は HKS (High Kinematics Spectrometer) で検出されます。ターゲットと HKS の間の距離は 1 m と示されています。

# 時空に依存する質量を持つフェルミオンの カイラルアノマリー

基礎物理学研究所 菅野颯人

**Abstract** We study chiral anomaly of a fermion with spacetime dependent mass. We study  $U(1)_V$  anomaly of a Dirac fermion with  $U(N)_L \times U(N)_R$  background gauge fields, and show that the anomaly has nontrivial contribution of the "mass." We also show that the anomaly can be written by superconnection.  
© 2021 Department of Physics, Kyoto University

場の理論を理解するために、「アノマリー(anomaly)」は重要な概念である。アノマリーとは、古典的な作用には存在する対称性が量子論に移行した時に破れてしまう現象であり、量子論を考えることで初めて見える性質である。アノマリーの中でも「ゲージアノマリー」は理論の無矛盾性の確認に使われ、ゲージアノマリーが存在しないという条件によって弦理論や素粒子模型の形が制限される。また、「't Hooft アノマリー」と呼ばれるアノマリーは't Hooft アノマリーマッチングという手法を通して近年広く応用されており、低エネルギー有効理論の形を制限する際に有用な手法である。アノマリーは実験的にも重要であり、特に  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  の崩壊はアノマリーの効果によるものである。また、標準模型はアノマリーによってバリオン数・レプトン数が保存しないため、宇宙論で物質を生成する際にも重要な効果になっている。

アノマリーには摂動的なアノマリーと非摂動的なアノマリーがあるが、特に摂動的アノマリーは古くから研究されている。摂動的アノマリーを求める手法として、三角ダイアグラムで知られる Feynman ダイアグラムのループ計算をする手法と、藤川の手法として知られる経路積分の Jacobian を計算する手法[1, 2]の 2 通りが知られている。本研究ではこのうち藤川の手法を用いて、摂動的アノマリーの計算を行った。

近年、理論に含まれる結合定数などの「定数」を時空に依存させた場合のアノマリーに関する研究が行われた[3]。本研究ではこれを受け、fermion が入っている系で質量  $m$  が時空に依存する場合の摂動的アノマリーについて調べた。特に  $U(N)_L \times U(N)_R$  のカイラル対称性が入っているような系を考え、その系での  $U(1)_V$  アノマリーについて計算を行った。通常、質量を dynamical な場であると捉えると Higgs 場に対応するが、Higgs 場を fermion の理論に加えてもカイラルアノマリーは出ないことが知られており、これは Higgs 場を含んだカイラルな理論である標準模型にアノマリーが存在しないことにも関連する。しかし、時空に依存する質量  $m(x)$  の配位として特定の物考えた場合、新たなアノマリーへの寄与が出るということを示し、更に、この場合のアノマリーは次元に依らず superconnection を使って書くことが出来るということも示す。

また、このアノマリーを使った応用例についても議論する。特にこの応用例として、質量  $m(x)$  が domain wall のような配位を持つ場合を考えた時に、低次元のカイラルアノマリーを導くことを示す。

## References

- [1] K. Fujikawa, "Path Integral Measure for Gauge Invariant Fermion Theories," Phys. Rev. Lett. **42** (1979), 1195-1198
- [2] K. Fujikawa, "Path Integral for Gauge Theories with Fermions," Phys. Rev. D **21** (1980), 2848 [erratum: Phys. Rev. D **22** (1980), 1499]
- [3] C. Cordova, D. S. Freed, H. T. Lam and N. Seiberg, "Anomalies in the Space of Coupling Constants and Their Dynamical Applications I," SciPost Phys. **8** (2020) no.1, 001 [arXiv:1905.09315 [hep-th]].

# 次世代 X 線天文用 SOI ピクセル検出器の軟 X 線性能及びノイズ性能の定量的研究

宇宙線研究室 児玉涼太

**Abstract** We evaluate the soft X-ray performance of a new type of X-ray astronomical SOI pixel sensors, which are sensitive to X-rays down to 1 keV. We successfully detect 1.5 keV X-rays and find that the lowest available threshold energy of 1.1 keV is determined by circuit noise and dark current noise.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

ほとんどの銀河の中心に超巨大ブラックホールが存在するが、それがどのように形成され、進化してきたのかは未だ解明されていない。これを解き明かす鍵は、塵やガスに埋もれた活動銀河核の高感度・広帯域 (1-80 keV) 観測である。我々はその実現を目指し、次世代 X 線天文衛星「FORCE」計画を推進している。FORCE 計画では、過去最高の検出感度を実現するために、高エネルギー粒子由来の非 X 線バックグラウンド (NXB) を反同時計数法により除去する。そのため、検出器には  $\sim 10 \mu\text{s}$  よりも高い時間分解能が要求される。しかし、現在主力の X 線 CCD では時間分解能が数秒程度にすぎない。そこで、我々は SOI 技術を用いた次世代の X 線ピクセル検出器「XRPIX」を開発している[1]。その最大の特徴は各ピクセルに実装したトリガ回路である。これにより、トリガ出力したタイミングでヒットピクセルを読み出す「イベント駆動読み出し」が可能で、 $< 10 \mu\text{s}$  の時間分解能を達成する。

従来の素子では、トリガを用いない「フレーム読み出し」と比較して、イベント駆動読み出しの分光性能が著しく劣化する問題があった。先行研究から、この原因はトリガ回路とセンサ部の容量結合にあると突き止めた[2]。そこで、我々は新たに PDD (Pinned Depleted Diode) 構造[3]を導入した XRPIX6E を開発した[4]。PDD 構造は静電シールドとして作用する固定電位層を持つ。これにより、問題の容量結合を断ち切り、187 eV (FWHM) @ 6.4 keV という過去最高のエネルギー分解能を達成した。

我々はこの XRPIX6E を用いてイベント駆動読み出しで軟 X 線性能評価を行い[5]、Al-K (1.5 keV) の初検出に成功した。しかし、その検出効率もフレーム読み出しよりも低く (Fig. 1)、1.1 keV 未満の X 線はノイズに埋もれて検出できないことを発見した。そこで、我々はトリガ性能に寄与するノイズの定量的評価を行った。その結果、トリガ回路のノイズに加え、ピクセル内部の電荷有感アンプ (CSA) ノイズや暗電流ノイズといった基本的なノイズ低減が最重要課題であることがわかった。

一方、根本的な問題として、XRPIX6E は低い逆バイアス電圧 ( $V_{\text{BB}}$ ) では動作しないことが判明していた。それを解決する素子として、我々は PDD 構造を改良した新素子 XRPIX8 を開発した。低い  $|V_{\text{BB}}|$  でも動作することに成功し、問題を解決したことを示した。これを用い、あらためて CSA ノイズと暗電流ノイズの測定条件を変更し定量的評価を行った。その結果、 $V_{\text{BB}}$  に依存して CSA ノイズが著しく増加し、分光性能が劣化することを発見した (Fig. 2)。この理由は、 $|V_{\text{BB}}|$  を低くするとセンサ部の容量が大きくなるためであることを明らかにした。

**References** [1] T. G. Tsuru *et al.*, SPIE, 10709, 11 (2018). [2] A. Takeda *et al.*, POS (TIPP2014), 138 (2014). [3] H. Kamehama *et al.*, Sensors, 18, 27 (2018). [4] S. Harada *et al.*, NIM A, 924, 468 (2019). [5] R. Kodama *et al.*, NIM A, 986, 164745 (2021).

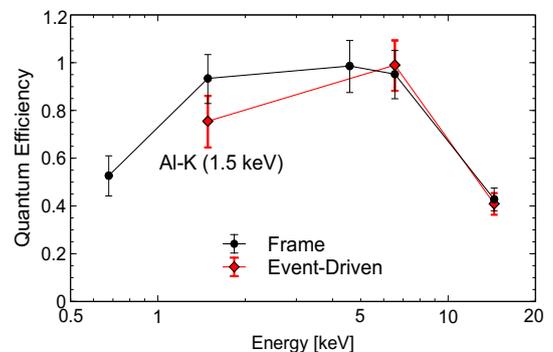


Fig. 1. Quantum efficiency as a function of X-ray energy obtained with XRPIX6E in the Frame and Event-Driven readout modes.

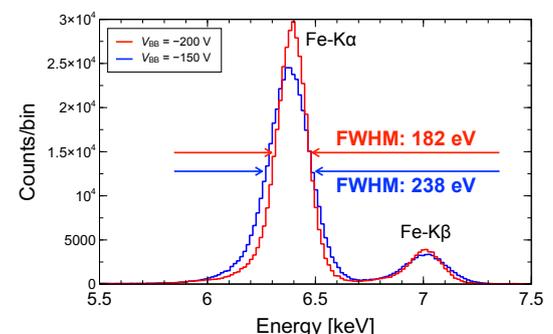


Fig. 2. X-ray spectra obtained with XRPIX8 in different back-bias voltages. Both spectra were taken in the Event-Driven readout mode.

# 高輝度 LHC ATLAS 実験に向けた初段ミュオントリガー アルゴリズムの改良とハードウェアへの実装

高エネルギー物理学研究室 小林蓮

**Abstract** ATLAS Level-0 Endcap muon trigger system will be upgrade to deal with higher luminosity at High Luminosity LHC. We have developed new trigger logic, implemented on an FPGA in the new system and shown its expected performance, which is using information from muon detectors.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

Large Hadron Collider (LHC)は欧州原子核機構(CERN)に建設された世界最高エネルギーの陽子陽子衝突型加速器である。ATLAS 検出器はLHC の衝突点の1つに設置された大型汎用検出器であり、陽子同士の衝突事象を捉えることで、新物理の兆候を探索している。

2027年には標準理論の精密測定や新物理探索を目的として、ビーム強度をこれまでの約3倍に向上させた高輝度LHCが運転予定である。高統計を活かして生成断面積の小さい新粒子の検出や湯川結合の精密測定を目指す。豊富な統計量が期待される一方で、データの記録速度はあまり変わらないため、物理として重要な事象に対する取得効率を維持しつつ、より高い事象選別能力を持つトリガーの開発が必要である。

本研究では、ミュオンの信号を用いたトリガーを扱う。ミュオンは多くの重要な事象で高い横運動量( $p_T$ )を持つものが生成され、陽子衝突における主な背景事象であるQCD事象に含まれないため、新物理を探索する上で良いプローブとなる。ATLAS 検出器のエンドキャップ部では磁場領域の外側に設置されている全7層のThin Gap Chamber (TGC) 検出器と内側にある複数の検出器のヒット情報を組み合わせてミュオントリガーの判定を行う。高輝度LHCでは、TGCのヒット情報全てをトリガー判定回路に送り、全7層のヒット情報を同時に用いた飛跡再構成(Fig. 1)を行うことで、今までよりもミュオンの検出効率と $p_T$ 分解能を向上させる。低運動量のミュオンや衝突点由来でない荷電粒子によるトリガーを削減するため、TGCで再構成した飛跡の位置・角度情報と、磁場領域の内側に設置されている検出器であるNew Small Wheelなどの情報を組み合わせてトリガーを判定する。高輝度LHCに向けて磁場領域の内側の検出器はアップグレードされ、測定分解能が向上する。十分なトリガー性能を得るために、検出器のアップグレードに合わせてトリガーアルゴリズムの開発を行った。モンテカルロシミュレーション(MC)とデータサンプルを用いて開発したトリガーアルゴリズムの性能を確認した結果、高い $p_T$ を持つミュオンの検出効率を現行のシステムの85%から94%に向上させつつ、現行のシステムと比べて47%のトリガーレートの削減が可能であることを示した。

また、開発したトリガーアルゴリズムを実際のデータ取得に使用する際、TGCの設置位置のズレや歪みにより、MCでの想定よりも検出効率が悪化する事が考えられる。そこで、今までに取得したデータサンプルを用いて、測定したTGCの設置位置に合わせてTGCでの飛跡再構成の手法を最適化する方法を開発した。この方法を用いることで、実際のデータ取得においても、MCにおける想定に近い検出効率でトリガー判定を行うことができることを確認した。

さらに、開発したトリガーアルゴリズムを、トリガー判定ボードに搭載する為のファームウェアとして実装し、シミュレーションを用いた動作試験において作成したファームウェアが正しくトリガー判定できていることを確認した。これにより、開発したトリガーアルゴリズムを用いることで、高輝度LHCにおいてもエンドキャップ部のミュオントリガーは十分に高い性能を持ってトリガー判定を行うことができる。

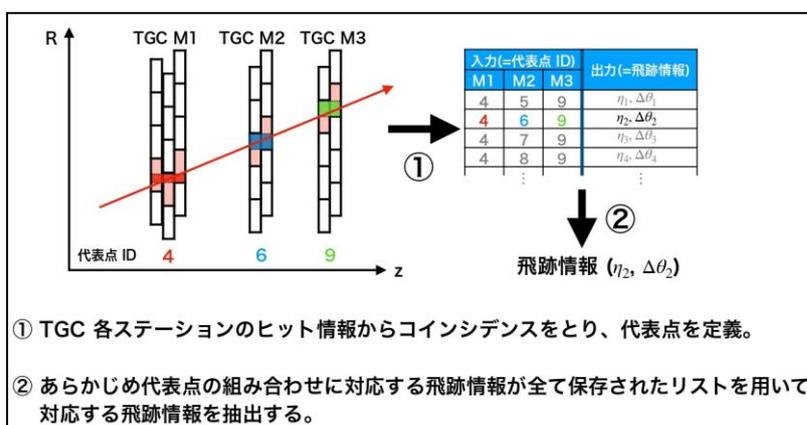


Fig.1. Overview of track reconstruction

# 超伝導検出器 MKID の評価系構築と TLS ノイズを抑制する研究

高エネルギー物理学研究室 末野慶徳

**Abstract** I developed a characterization system for a cutting-edge superconducting detector, MKID. Using this system, I successfully demonstrated to measure basic parameters of MKID as well as its noise properties. I also developed a design of MKID for CMB observation using GroundBIRD telescope.  
© 2021 Department of Physics, Kyoto University

宇宙背景放射(CMB)の偏光観測は宇宙の成り立ちを解明する強力なプローブであり、特に大角度スケール( $\geq 10^\circ$ )の観測はインフレーション理論の検証や、ニュートリノ質量和の測定精度向上に寄与する。GroundBIRDは大角度スケール観測に特化した地上実験である。観測の妨げとなる大気の揺らぎの影響を抑制するために、GroundBIRDは望遠鏡を高速回転させる独自の観測スキュンストラテジーを採用する(回転周期0.3 Hz)。そのため、比較的早い時間応答性を持つ超伝導検出器 MKID(Fig. 1)を採用している。

作製した MKID の性能を、観測に先立って把握していることは重要である。MKID の性能を評価するには、周波数 Sweep による共振状態の測定、温度変化による応答性の評価、時系列データを用いたノイズ評価を行う必要がある。評価系はその機能を有することと、評価系のノイズが検出器固有のノイズよりも十分に低いことが要求される。本研究で、これらの要求を満たす評価系を構築した。

クライオスタット内部の読み出し線による熱流入と信号の減衰を考慮して配線することで、冷却性能と低ノイズ環境を両立することに成功した。実際に MKID を用いて評価系の機能と性能を確認した。まず、MKID の共振状態の測定手法である周波数 Sweep を行い、共振を正しく測定をできることを確認した。続いて、搭載したヒーターを使って MKID の温度を変化させて応答性の評価ができることを確認した。最後に、1 MSPS までの様々なサンプリングレートで時系列データの測定を行い、MKID のノイズ特性の評価を行った。readout 由来のノイズが MKID 固有のノイズの 1/30 程度であることを確認した(Fig. 2)。

大角度スケールの CMB 観測の天敵が、観測信号のベースライン揺らぎ( $1/f$ ノイズ)である。そのため、MKID 固有の $1/f$ ノイズである TLS ノイズの knee frequency が、GroundBIRD のスキュン周期(0.3 Hz)以下となることが要求される。構築した評価系を用いて TLS ノイズの定量評価を行い、従来のデザインの MKID では TLS ノイズの寄与は大きく、要求を満たさないことを確認した。そこで、TLS ノイズを低減させるためのデザインを考案した。新デザインの MKID を評価した結果、TLS ノイズの低減を確認した(Fig. 3)。TLS ノイズをさらに抑制するため、共振パラメータの最適化も行った。

以上、MKID を効率的に開発研究をするための評価系を構築し、GroundBIRD の要求を満たす検出器デザインを確立した。

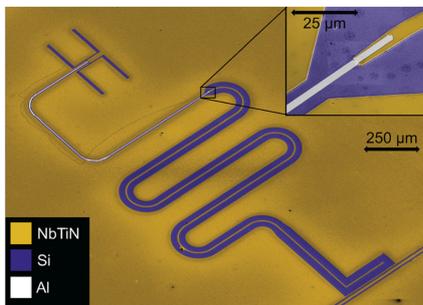


Fig. 1. Micrograph of MKID[1].

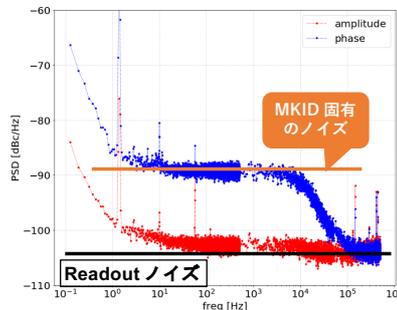


Fig.2. Power Spectrum density of MKID.

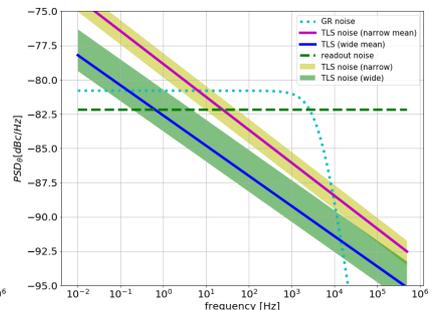


Fig. 3. Prospect of TLS noise in the condition of CMB observation.

## References

[1] R.M.J. Janssen, *et al*, Appl. Phys. Lett.103, 203503 (2013).

# ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索実験 AXELのための バリウムイオン検出に向けた研究

高エネルギー物理学研究室 菅島文悟

**Abstract:** In search for neutrinoless double beta decays, a Barium ion tagging method can reject every other background than double beta decays accompanied by two neutrinos. Here we observed current, from a Ba ion source which would be used in a test set-up for ion tagging, depending on the source temperature.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

中性レプトンであるニュートリノは既に発見された素粒子で唯一マヨラナ粒子たり得る粒子である。ニュートリノがマヨラナ粒子であればその異常に小さな質量の起源となる可能性があり、さらには大統一理論への手がかりとなると目されている。ニュートリノのマヨラナ性の確認のための実験手法が「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ )」[1]の探索である。AXEL 実験はガスキセノンタイムプロジェクトチャンバーを用いて $^{136}\text{Xe}$ の  $0\nu\beta\beta$  の探索を目指している。 $^{136}\text{Xe}$ の  $0\nu\beta\beta$  の半減期は  $1 \times 10^{26}$ 年以上であり[2]、非常に稀なこの現象を観測するためには高い効率の背景事象除去が必要になる。そこで我々はバリウムイオン検出[3]に挑戦する。バリウムイオン検出は $^{136}\text{Xe}$ の二重ベータ崩壊によって生成される娘核 $^{136}\text{Ba}$ を検出する試みで、成功すれば通常二重ベータ崩壊以外の背景事象の除去が可能となる。

崩壊で生成されたバリウムは気体キセノン中では閉殻状態の $\text{Ba}^{++}$ として存在するため可視光による分光が困難であり、一価のイオンまたは中性の原子に変化させて観測する必要がある。我々は気体キセノン中に生成した固体キセノンの結晶にバリウムイオンを拘束させることで中性化したバリウムに対する分光が可能になると期待している[4]。まずはイオン源から供給したバリウムイオンの検出に取り組むため、イオン源由来のイオンを固体キセノン中に誘導するテストセットアップが必要となる。本研究で行ったのは、固体キセノンの生成とイオン源の動作確認である。

約 1 atm のキセノンを導入したチャンバー内においてガラスで囲まれた銅の電極を冷却することで、電極の先端にのみ局所的に固体キセノンを生成することに成功した。

イオン源は本来真空中で動作するよう設計されているが、我々は固体表面電離式のイオン源を直接キセノンガス中で運転する計画を立てた。シミュレーションに沿った設計により安全にイオン源を約 1100°Cまで加熱することに成功し、イオン源の温度に依存する電流を検出することができた。(Fig.1)

イオン源内のイオンの運動をボルツマン分布と仮定したモデルによる計算ではこの曲線はイオン化エネルギー約 3.9 eV の振る舞いに相当し、今後気体分析系も用いて観測された電流がバリウムイオンによるものであるかどうかを明らかにしてゆく方針である。

## References

- [1] M. Goepfert-Mayer, Phys. Rev., vol. 48, no. 6, pp. 512516, 1935
- [2] A. Gando, et al. Phys. Rev. Lett., Vol. 117, p. 082503, Aug 2016
- [3] M.K. Moe, Phys. Rev. C 44, R931(R) (1991)
- [4] B. Mong, et al., Phys. Rev. A.91.022505

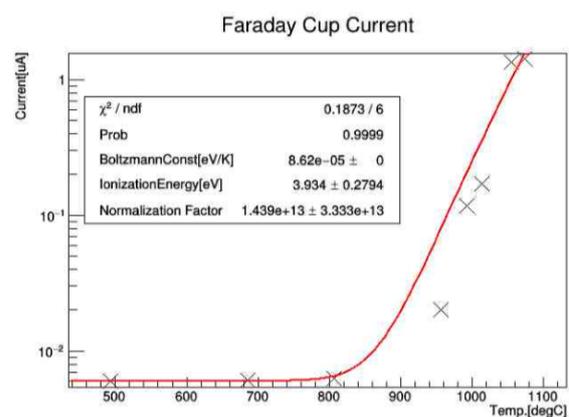


Fig.1 the relation between the ion source temperature and Faraday cup current.

# TeV スケールマヨロンダークマターの生成機構の研究

物理学第二教室 素粒子論研究室 鈴木健太

**Abstract** The Majoron model is motivated by the origin of Majorana masses of right-handed neutrinos which induce type-I-seesaw mechanism. We show that it is difficult to create Majoron, which is the Nambu-Goldstone boson associated with lepton number symmetry, as heavy dark matter. We discuss several extensions of the Majoron model to generate TeV-scale dark matter through freeze-in process.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

素粒子標準模型は多くの物理現象を説明することに成功している一方で、ニュートリノの質量問題、ダークマターの正体など、その枠組みで説明できない問題が残されている。

ニュートリノの質量問題に対しては、シーソー機構が有力な機構としてよく知られている。これは標準模型にマヨラナ質量を持った右巻きニュートリノを導入し、それとディラック質量との比によって小さなニュートリノ質量を説明している。しかしながら重いマヨラナ質量の起源は明らかになっていない。そこでさらに新たな複素スカラー場を導入し、レプトン数対称性を自発的に破ることで右巻きニュートリノにマヨラナ質量を生成させる模型が考え出された。この自発的対称性の破れに伴い現れる南部-ゴールドストーンボソンはマヨロンと呼ばれ、この模型はマヨロン模型と呼ばれている [1]。

一方で、ダークマターは宇宙の組成の約 23% を占める正体不明の物質である。通常物質よりはるかに多く存在しているにもかかわらず、その素粒子的な性質はほとんどわかっていない。その性質を間接的に調べる方法として、宇宙線観測が行われている。ダークマターが相互作用によって標準模型粒子に崩壊するとすれば、それに由来する宇宙線が痕跡として観測されるはずである。逆に宇宙線の観測から、過剰な宇宙線源となってしまうようなダークマター模型は排除することができる。このようにして宇宙線観測からダークマターの性質に迫ることができる。その中にはダークマターが TeV スケールの粒子であることを示唆するものもある [2]。

本論文ではマヨロンが TeV スケールのダークマターである可能性を追求し、その生成機構についての研究を行った [3]。先行研究において TeV スケールマヨロンダークマターとして生成する際の制限として、新スカラー場の真空期待値は大きい値をとる必要があること、右巻きニュートリノとの結合定数が小さいことが明らかにされた。それを踏まえるとダークマター生成機構としてよく議論されているフリーズアウトの方法では生成が困難であることをみる。そして模型を改良することで問題を回避し、TeV スケールのマヨロンダークマターが生成できることを示す。また現在の宇宙のダークマター残存量を説明するために模型に含まれるパラメータがどのような制限を受けるのかを明らかにする。本論文では 3 つの改良案を提案し、それぞれの生成機構や結果の特徴についての考察をした。

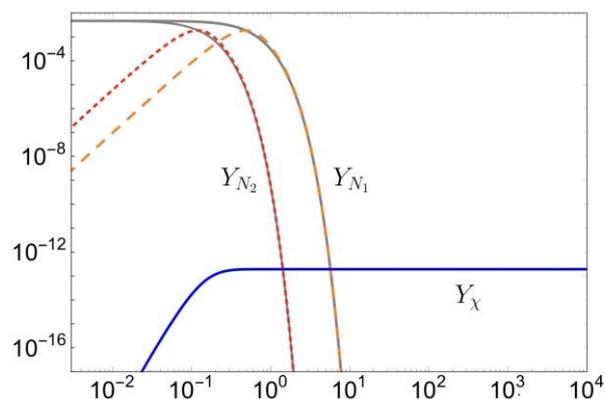


fig. 1 Evolution of Majoron dark matter abundance (blue line)

## References

- [1] Y. Chikashige, R.H. Mohapatra and R.D. Peccei, “Spontaneously Broken Lepton Number and Cosmological Constraints on the Neutrino Mass Spectrum”, *Phys. Rev. Lett.* 45 (1980).
- [2] C. Patrignani *et al.* (Particle Data Group), “30 Cosmic Rays,” *Chin. Phys. C*, 40, 100001 (2016).
- [3] Y. Abe, Y. Hamada, T. Ohata, K. Suzuki and K. Yoshioka, “TeV-scale Majorogenesis”, *JHEP*07(2020)105

# J-PARC E16 実験における シリコンストリップ検出器の性能評価

原子核・ハドロン物理学研究室 高浦雄大

**Abstract** To investigate the spectral change of vector mesons and the chiral symmetry restoration, we performed the J-PARC E16 experiment. It is important to realize the good mass resolution to examine the spectral modification. The performance of the Silicon Strip Detector placed in the innermost area of the spectrometer is evaluated.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

本研究では、2020年6月に初のコミッショニングとしてデータ取得を行った J-PARC E16 Run0a にて粒子位置検出器として使用したシリコンストリップ検出器(SSD)の性能評価を行った。この実験ではベクトル中間子である  $\phi$  中間子の電子・陽電子対崩壊チャンネルにおける運動量測定から  $\phi$  中間子の質量再構成を行うことで、原子核内部に実現される高密度環境下でのカイラル対称性の自発的破れの回復事象を質量スペクトル変化から観測する。QCD 和則を用いた計算により  $\phi$  中間子の質量変化は原子核内でのストレンジクオークのクオーク凝縮期待値と関連しており[1]、質量変化の測定によってその値に対して制限を与えることが可能である。本実験の先行研究にあたる KEK-PS E325 実験では原子核内での密度効果に起因すると考えられる  $\phi$  中間子の質量スペクトルの変化が報告されている[2]。

電子・陽電子対の運動量は、飛跡測定領域に印加された高磁場下での飛跡の曲率を求めることで測定する。そのため、質量スペクトル変化の検証には荷電粒子の正確な飛跡の測定が不可欠である。E16 実験では1層の SSD と3層の GEM 飛跡検出器(GTR)がその役割を担っている。

本実験は  $1.0 \times 10^{10}/\text{spill}$  の陽子ビーム(スピル長は約2秒)を合計0.2%の相互作用長を有する実験標的に照射して行う。10MHzの高計数率環境下での実験が想定されており、その場合の p+A 反応の平均的な相互作用の時間間隔は100nsecである。ガス検出器である GTR の時間分解能の下限は100nsec程度であり、GTR から取得した時間情報による時間整合性を用いるだけでは、バックグラウンド抑制能力として不十分である。そのため、高い時間分解能を持つと期待されるシリコンを用いた飛跡検出器である SSD の時間情報を用い、効率的なバックグラウンドの除去を実現する。トリガー判定の時間分解能などから、SSD に対して4nsecの時間分解能が要求されている。

本研究ではコミッショニングランで6台の SSD を使い、SSD 及び GTR での取得データから荷電粒子の飛跡の再構成を行うことで、E16 実験環境下で SSD が実現した時間分解能の評価を行った。この解析には磁場のない場合の校正データを用いた。まず GTR で飛跡解析を行い、GTR の位置分解能を評価した。また、標的で発生した二本の飛跡を同定することで、効率的にバックグラウンドが除去できることを示した。GTR で同定した標的由来の飛跡データを用い SSD の波形解析を行った結果、SSD が  $1.91 \pm 0.24\text{nsec}$  の時間分解能を達成していることが確認できた。これにより、E16 実験環境下で SSD が時間分解能の要請を達成していることが示された。また、GTR で同定した飛跡に対して位置の相関があり、期待される残差に収まっていることが確認された。

今後、荷電粒子の飛跡を再構成し、既知の粒子に対して質量分布を評価することで、スペクトロメータ全体の質量分解能評価を行うことができると期待される。

## Reference

- [1] Philipp Gubler and Keisuke Ohtani, Phys. Rev. Lett 90, 094002 (2014)
- [2] R Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98, 042501 (2007)

# 共鳴取出型チャージブリーダーの 原理実証機開発と性能評価

ビーム物理研究室 高木周

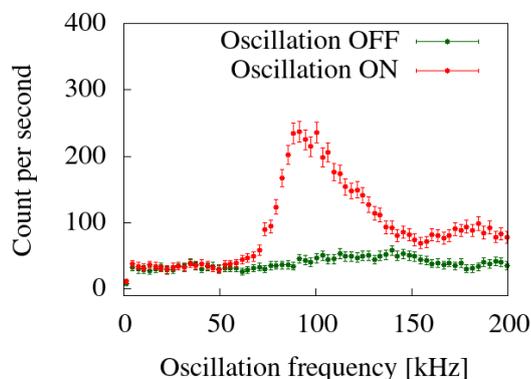
**Abstract** We developed prototype of Resonant Extract Charge Breeder (RECB) which selectively extracts unique charge-state ions by oscillating the trap potential with certain frequency while keeping other charge-state ions confined. We succeeded in the resonant extraction of  $C^{4+}$  and found charge-state selection is possible and their pulse length is highly controllable.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

近年の不安定原子核 (RI) ビーム供給施設における一次ビーム強度の増強は著しいが、それに伴う膨大な電力消費と放射線強度の問題も限界に近い。理化学研究所 (理研) と京大化学研究所 (化研) は生成した希少な RI を無駄なく核反応実験に用いる手法としてビームリサイクル技術を提案し、共同研究をしている。ビームリサイクル技術とは、内部標的を備えた蓄積リングに RI を蓄積し、核反応が起きるまで標的を何度も通過させることによって一次ビーム強度の増強と等価な効果を実現する技術である。この要素技術開発のための R&D 機として化研の重イオン蓄積リング sLSR を理研仁科に移設し、Recycled-Unstable-Nuclear Beam Accumulator (RUNBA) として建設が計画されている。RUNBA は理研の低エネルギー不安定核生成分離器 (ERIS) に接続され、生成された RI ビームを蓄積および加速する。そのため、ERIS から供給される 1 価 RI イオンを加速に適した多価イオンに高効率で変換して入射する必要がある。この多価化を行う装置はチャージブリーダー (CB) と呼ばれ、RUNBA に接続される CB には特定価数への 100% の変換効率が望まれる。

世界中で運用されている Electron Beam Ion Trap (EBIT) 型 CB は電子ビームによる負のポテンシャルと電極により形成したポテンシャルでイオンを閉じ込め、electron impact ionization による優れたイオン多価化能力を備える。一方で、多価イオン化と、他の中性原子等との電荷交換反応の平衡状態における有限なイオンの価数分布により、従来の手法では取り出したイオンビームの一部 (20% 程度) しか後段の加速等に利用できていないのが現状である。そこで、本研究では共鳴取出という「特定の価数のみを取り出す」新たな手法を提案する。EBIT 型を踏襲した共鳴取出型 CB (Resonant Extract Charge Breeder: RECB) の設計開発を行い、この新手法の原理の実証と実用可能性の検証を行う。

共鳴取出原理はトラップイオンの縦方向運動が  $m/q$  に応じた固有の振動数を持つよう、二次関数型ポテンシャルでトラップし、ポテンシャルに振動を与えることで共鳴するイオンのみを励振し、取り出しを行う。非共鳴なイオンはトラップし続けるが、やがて共鳴する価数となり、結果的に全てのイオンを特定の価数にして取り出すことができる。つまり、RECB は原理的に 1 価のイオンを 100% の効率で特定価数に変換することが期待できる。



図：ポテンシャルの振動に対する  $C^{4+}$  の周波数スペクトル。

本研究における原理実証実験では 20 個の電極が作るトラップポテンシャルに振動を与えて、残留ガスイオン中の  $C^{4+}$  を選択的に取り出すことに成功した。図は取り出した  $C^{4+}$  の周波数スペクトルで、90 kHz 近傍で共鳴的に取り出されていることが分かる。また、取り出されたイオンはパルス化していることが判明し、トラップポテンシャルの振動振幅を制御すればパルスの時間幅を自由に調節できることが分かった。これらは共鳴取出の有用性を裏付ける結果である。

本論文ではこれらの共鳴取出原理の実証実験を実現するために製作した装置および実験結果からこの新しい手法の実用性について論じる。

# 合体するブラックホール連星における潮汐力による アクシオン雲の消失

天体核研究室 高橋卓弥

**Abstract** We investigate whether the axion cloud around a black hole in a binary system disappears or not in a wide parameter range. We create the map that can be used to read how depletion occurs and find that the cloud disappears in most cases.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

重力波の観測が始まり、天体物理学のみならず素粒子物理学を知ることのできる新しい窓が開けた。本研究ではアクシオンのような超軽量スカラー場をブラックホールと重力波を用いて探査する試みに注目した。例えば、超弦理論からたくさんのアクシオンのような粒子の存在が予言され、またアクシオンはダークマターの候補ともなっており、アクシオンの検出は標準模型を超える物理を探る上で強い動機がある。このような  $10^{-20} \sim 10^{-10} \text{eV}$  程度の超軽量スカラー場はブラックホールの周りに束縛され、超放射という機構によりブラックホールから回転エネルギーを引き抜き成長し、アクシオン雲を形成する。このアクシオン雲からの重力波や、超放射のためにブラックホールの質量対スピンプロット上に存在が禁止される領域が生じることが、観測的なアクシオン検出の手段となると期待されている [1]。

現在地上重力波干渉計LIGO/Virgoで観測されている重力波はコンパクト天体の連星合体を波源とするものである。そこでブラックホールとアクシオン雲の系が、他の伴星と連星系を成している状況を考える。アクシオン雲は超放射により、成長率の一番早い束縛状態が支配的になっている。しかし、連星の軌道角速度が重力波放射に伴い速まるinspiralにおいて、伴星からの潮汐力が時間変化する摂動としてアクシオン雲に作用し、成長モードから別のモードへの共鳴的な遷移を引き起こす [2]。このような共鳴的な遷移は注目する成長モードと、他のモードのエネルギー差と角運動量差の比が軌道角速度と一致するとき起こる。アクシオンと重力の結合が小さい非相対論的な近似の下では、成長モードから崩壊モードに移り、アクシオン雲はinspiralの早い時期に消えてしまうことが知られている [3]。

束縛状態のエネルギー準位は、非相対論的な近似では水素原子とよく類推できるのに対し、重力との結合が強い領域ではFig. 1のように近似から大きくずれ始め、数値計算でしか分からない。成長率が最も早くなるような興味のある領域は結合の強い領域であり、成長モードからどのモードへの遷移が起こるか非自明である。連星系からの重力波観測でアクシオン雲の存在を探査するにあたり、雲が連星合体まで残る場合があるか、あるいはいつ消えるかを把握することが重要になる。

そこで、本研究では広いパラメーター領域で各モードの束縛エネルギーを数値計算で網羅的に求め、共鳴が起こる振動数を比較することで、どの遷移が起こるかを調べた。そして、成長モードがパラメーター平面上でどのモードへ遷移するかを表す地図を作成した。その結果、アクシオン雲は非現実的な場合を除くほぼ全ての領域で消失してしまうことが確認できた。また、この図を用いて消失が起こる共鳴振動数を読み取ることができる。

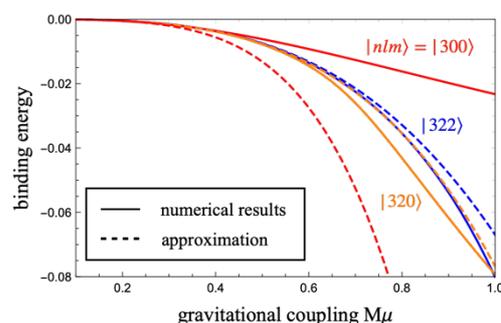


Fig.1 Energy levels of bound states

## References

- [1] A. Arvanitaki *et al.*, Phys. Rev. D, **83**, 044026 (2011).
- [2] D. Baumann *et al.*, Phys. Rev. D, **99**, 044001 (2019).
- [3] D. Baumann *et al.*, Phys. Rev. D, **101**, 083019 (2020).

# Double Field TheoryとBorn幾何学

素粒子論研究室 龍澤誠之

**Abstract** Double Field Theory is a reformulation of supergravity theory which realizes the T-duality of string theory in a manifest form. We review Double Field Theory and the Born geometry which gives mathematical foundation of the former.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

本修士論文では、T-dualityを時空の対称性として組み入れたDouble Field Theory (DFT) とその幾何学として考えられるBorn幾何学について紹介する。

弦理論におけるT-dualityとは、閉弦の持つwindingモードとmomentumモードの双対性である。その最も簡単な例は、次元の一つが半径Rの円へとコンパクト化された背景時空中のボソン閉弦である。この理論は、windingモードとmomentumモードの入れ替えによって半径1/Rに比例する円上の理論と等価になることが示される[1]。さらに、T-dualityは超弦理論などのより複雑な理論へ拡張される。

このように、T-dualityは別々の幾何学の上での弦理論を結びつける。一方、DFTの着想はT-dualityを時空の対称性として明確に持つような一つの幾何学の上で超重力理論を再定式化することにある。このような幾何学を考えるために、DFTではmomentumモードに共役な通常の座標に加えwindingモードに共役な双対座標を導入する。これによって座標が倍化された空間では、Lie bracketや共変微分、曲率などの幾何学的な量がT-dualityを持つように通常のものから変更を受ける[2, 3, 4, 5]。DFTによる再定式化によって、T-foldなどといった通常の幾何学では考えにくい特殊な空間を記述できると考えられている[6]。

このDFTに基づく幾何学として注目を受けているのがBorn幾何学である。Born幾何学は、いわば倍化されたRiemann幾何学であり、L. Freidel, R. G. Leigh and D. Minicらによって提唱された[7, 8]。この幾何学の最大の特徴は、Riemann幾何学の基本定理と同様に、幾何学的によい条件を満たす接続が一意的に存在するという点である[9]。この接続は倍化されていないRiemann幾何学へ制限した際にLevi-Civita接続を誘導するという性質を持っており、Born幾何学の自然さを証明していると言えるだろう。このことから、Born幾何学はDFTを発展させる上での強力な道具となり得ると期待されている。

## References

- [1] A. Giveon, M. Porrati and E. Rabinovici, “Target Space Duality in String Theory,” *Phys. Rept.* **244** (1994) 77-202.
- [2] C. Hull and B. Zwiebach, “Double Field Theory,” *JHEP* **09** (2009) 099.
- [3] B. Zwiebach, “Double Field Theory, T-Duality, and Courant Brackets,” *Lect. Notes Phys.* **851** (2012) 265-291.
- [4] O. Hohm, C. Hull and B. Zwiebach, “Background independent action for double field theory,” *JHEP* **07** (2010) 016.
- [5] O. Hohm, C. Hull and B. Zwiebach, “Generalized metric formulation of double field theory,” *JHEP* **08** (2010) 008.
- [6] C. M. Hull, “Doubled Geometry and T-Folds,” *JHEP* **07** (2007) 080.
- [7] L. Freidel, R. G. Leigh and D. Minic, “Born Reciprocity in String Theory and the Nature of Spacetime,” *Phys. Lett. B* **730** (2014) 302–306.
- [8] L. Freidel, R. G. Leigh and D. Minic, “Quantum Gravity, Dynamical Phase Space and String Theory,” *Int. J. Mod. Phys. D* **23** (2014) 12, 1442006.
- [9] L. Freidel, F. J. Rudolph and D. Svoboda, “A Unique Connection for Born Geometry,” *Commun. Math. Phys.* **372.1** (2019) 119–150.

# レーザー誘起微細周期構造の形成過程に関する研究

レーザー物質科学研究室 田中陽平

**Abstract** We have spatiotemporally observed a forming process of the fine periodic structures on silicon induced by irradiation of the long-wavelength infrared free-electron laser. The reflectivity patterns produced on the silicon surface indicates that the excited free electrons form surface plasma wave with the density of  $\sim 10^{22}\text{cm}^{-3}$ .

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

材料の損傷閾値フルーエンス近傍の短パルスレーザーを材料に照射すると微細な周期構造 (Laser-Induced Periodic Surface Structures; LIPSS) が誘起される[1]。特に、周期間隔 $\Lambda$ が照射レーザーの波長 $\lambda$ の半分よりも小さい LIPSS は「High Spatial Frequency LIPSS (HSFL)」と呼ばれ、回折限界よりも小さな構造の制御手法として注目されている。しかしながら、HSFL はその微細さ、そしてパルス幅がピコ秒以下のレーザーによってしか形成されないという特徴のために形成過程についての直接的な情報がなく、形成機構は理解されていない。

本研究では HSFL 形成過程についての具体的な描像を得るため、可視光の短パルスレーザーを用いたポンプ・プローブイメージングによって HSFL 形成中の材料の表面状態を時間・空間分解観察（その場観察）することを目標とした。可視光レーザーによるその場観察により、LIPSS 形成に関連すると考えられている自由電子の粗密波についての情報が得られると期待できる。

我々は、LIPSS 形成を行う短パルスレーザーの波長が可視光よりも十分に長ければ、形成される HSFL が可視光で観察可能であることに着目した。現在利用可能な長波長・短パルスの光源で、材料が損傷するほど高強度のものは非常に少ないが、自由電子レーザー (FEL) はその一つである。本研究では THz-FEL (中心波長  $82\mu\text{m}$ ) により Si に周期間隔  $4\mu\text{m}$  の HSFL が形成された報告[2]を参考にし、長波長赤外の FEL (LWIR-FEL; 中心波長  $11.4\mu\text{m}$ ) を用いて 8 種類の半導体基板 (Si, Ge, ZnO, SiC, GaN, GaP, CdTe, SiO<sub>2</sub>) への HSFL 形成実験を行い、このうち、Si、Ge、SiC 及び GaN の表面に、可視光で観察できる大きさ ( $\Lambda=1.5\sim 3.2\mu\text{m}$ ) の HSFL が形成できることを明らかにした。なお、長波長赤外帯 (波長  $8\sim 15\mu\text{m}$ ) での HSFL 形成は世界初の報告である。

さらに、その場観察のプローブとして Nd:YAG レーザーを用いることで、Si 表面での HSFL 形成過程を世界で初めて示し、過渡的な反射率の空間変調を捉えた (Fig. 1 参照)。この結果により自由電子の粗密波が波長約  $3\mu\text{m}$  の定在波として Si 表面に過渡的に形成されることが示唆された。また、反射率の値を Drude model[3]を用いて解析することで、定在波を形成する自由電子の密度が  $10^{22}\text{cm}^{-3}$  程度であることが明らかになった。

本研究で実証された手法はさらに短い時間でのその場観察にも応用できるため、HSFL の形成過程について詳細なデータを提供できる非常に有用な手法となり得る。

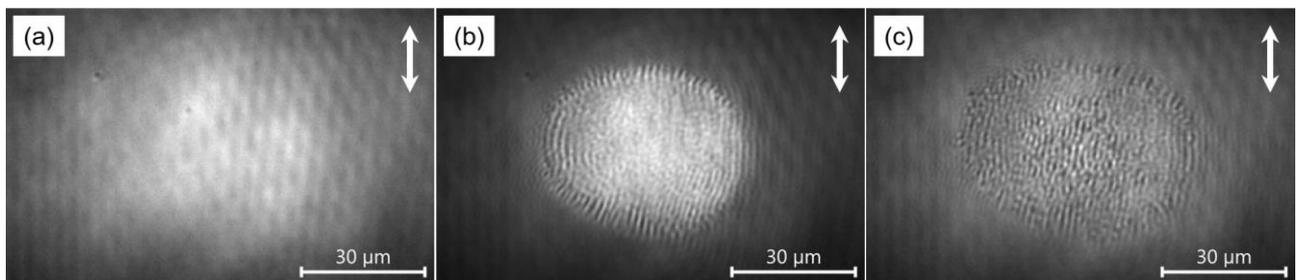


Fig. 1 : Luminance images on silicon substrate (a) before, (b) during, and (c) after an FEL irradiation. White arrows indicate the direction of the LWIR-FEL beam polarization.

## References

- [1] Buividas R. *et al.*, Recent advances. Prog Quantum Electron. 38, 3, 119-156(2014).
- [2] A. Irizawa *et al.*, Appl. Phys. Lett. 111, 251602 (2017).
- [3] A. J. Sabbah *et al.*, Phys. Rev. B 66, 1–11 (2002).

# T2K 実験新型ニュートリノ検出器のための シンチレータキューブ品質検査システムの開発

高エネルギー物理学研究室 谷 真央

**Abstract** Super FGD is a new neutrino detector for the T2K experiment. It consists of two million scintillator cubes, 60 thousand wavelength-shifting fibers and photodetectors. Because those cubes have individual differences in their shape, they must be checked before the construction. We developed an automatic quality-check system using image analysis technique.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

**T2K 実験**は、J-PARC 加速器で生成されたニュートリノビームを、生成点から 280 m の位置に置かれた前置検出器および 295 km 離れた後置検出器スーパーカミオカンデで測定する長基線ニュートリノ振動実験であり、**ニュートリノにおける CP 対称性の破れの発見**等を目標としている。

ニュートリノにおける CP 対称性の破れの検証のために、ニュートリノ・原子核反応の不定性の削減が重要課題であり、これを解決するため前置検出器のアップグレードが行われる[1]。その際に新たに導入される **Super FGD は、約 1 cm<sup>3</sup> のキューブ状のプラスチックシンチレータ (図1左) を 3 次元方向に約 200 万個並べたニュートリノ検出器**であり、ニュートリノ反応で生成される荷電粒子によるシンチレーション光を、各シンチレータキューブに 3 方向から開けられた穴に通した波長変換ファイバーと光検出器 MPPC で読み出す。従来の飛跡検出器 FGD に比べ、大角度に散乱した荷電粒子の飛跡や、低運動量粒子の短い飛跡に対しても高い感度をもつ。

Super FGD を構成する **シンチレータキューブは製造時に形状の個体差が生じる**。特に、大きさには約 20 μm、ファイバーを通す穴の位置には約 80 μm のばらつきがある。このシンチレータキューブを 3 次元的に大量に積層し Super FGD を組み上げる際、単に並べるだけでは**穴の位置が揃わず全てのファイバーを通すことができない**。そこで組み上げる前に形状について**品質検査を行う必要がある**。現在、人の手による品質検査が行われているが、この検査では定量的な評価を行うことができず、また膨大な時間と労働力が必要になるという問題がある。

そこで、**シンチレータキューブを撮影し、その画像解析に基づいて自動で品質検査を行う手法**を開発した。まず、再現性の高いシンチレータキューブ撮影台の製作と、1 つのシンチレータキューブにつき **5 秒程度の短時間で 6 面の撮影、画像解析、分類までを自動で行う検査システムの開発**を行った。また、**シンチレータキューブの大きさと穴の位置を 10 μm 程度の精度で抽出し、それをもとに使用可能なシンチレータキューブを選別する独自の画像解析アルゴリズムを開発**し、試運転により有用性を実証した (図1右)。

さらに、現在、進行中の検出器の組み上げ手法ではシンチレータキューブとファイバーが互いに支え合うような状態となり、ファイバーに大きな応力がかかり折れてしまうおそれがある。そのため、薄いシートにシンチレータキューブを並べて固定し板状にしたものを積層し、最後にファイバーを通すという**新しい組み上げ手法を開発**している。この手法ではシンチレータキューブが固定され独立には動かないので、ファイバーに大きな応力がかからないことが期待される。ただし、はじめにシンチレータキューブを固定してしまうので、予めそれらの穴の位置を揃えなければファイバーを通すことができない。そこで、**開発した自動システムによる品質検査の結果をもとに、隣り合うシンチレータキューブでの穴の位置が揃うような並べ方を検証した**。

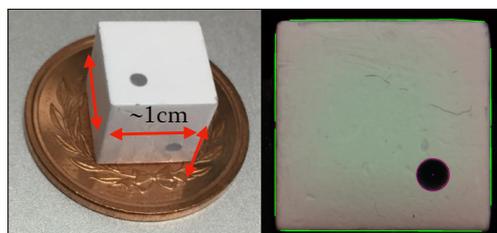


Fig.1. A plastic scintillator cube for Super FGD (left) and an example of image analysis (right).

## References

[1] K. Abe *et al.*, T2K ND280 Upgrade — Technical Design Report, arXiv:1901.03750 (2019).

# 放射光メスバウアー吸収分光法のための エネルギー・時間同時測定系の開発

核放射物理学研究室 谷口博紀

**Abstract** We measured three-dimensional information on energy, time, and Doppler velocity in synchrotron-radiation-based Mössbauer spectroscopy. We also developed a multi-element avalanche photodiode detector to improve measurement efficiency.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

メスバウアー分光法における $\gamma$ 線源の代わりとして放射光を用いた「放射光メスバウアー吸収分光法」が知られている[1]。この手法では、放射光をモノクロメータにより原子核の共鳴励起エネルギー付近で単色化し、基準となる共鳴核を含む試料を透過後に測定試料による共鳴散乱を検出している (Fig. 1)。基準試料を振動させることで、照射 $\gamma$ 線の相対エネルギーをドップラーシフトさせている。ここで、基準試料の共鳴吸収エネルギーと測定試料の共鳴吸収エネルギーが同じになった時に、 $\gamma$ 線が基準試料で大きく吸収されるため散乱試料からの共鳴散乱強度が低下し、速度ごとに強度をプロットすることで吸収スペクトルが得られる。

従来の放射光メスバウアー吸収分光法では、検出器からの信号をマルチチャンネルスケaler (MCS) に入力して吸収スペクトルを測定していたが、 $\gamma$ 線の絶対検出時間やエネルギーは記録されない。しかしながら、試料内での共鳴吸収イベントの結果として $\gamma$ 線だけでなく内部転換過程に伴う電子や蛍光 X 線も放出される。そして、これらはそのエネルギーの違い等を反映してイベントが起きた箇所が試料表面からどれだけの深さにあるかの情報を反映することになる。よって、これらの情報も取り入れることが出来れば、深さ分解測定等のさらに進んだ測定が可能となる。

本研究では、エネルギー分解に Amplitude-to-Time Converter (ATC) という信号の入力時間に対し波高に比例した時間差でデジタル信号を出力するモジュールを使用し[2]、高速 MCS に $\gamma$ 線の検出を時系列に記録することで、エネルギー・時間・ドップラー速度の 3 次元情報測定を可能とする測定系を開発した。これにより、測定後に任意のエネルギーおよび時間領域での解析が可能となった。また、多素子 Avalanche Photodiode (APD) 検出器を開発し、多チャンネル測定によって測定効率を向上させた。開発した測定系を利用して、2 種類の Eu 化合物を重ねた試料のエネルギー・時間に対する吸収スペクトルの変化を解析した (Fig. 2)。その結果、時間領域によってスペクトルの形状が変化することや、エネルギー領域によって 2 つの化合物の吸収スペクトルの深さの比率に違いがあることが確かめられた。

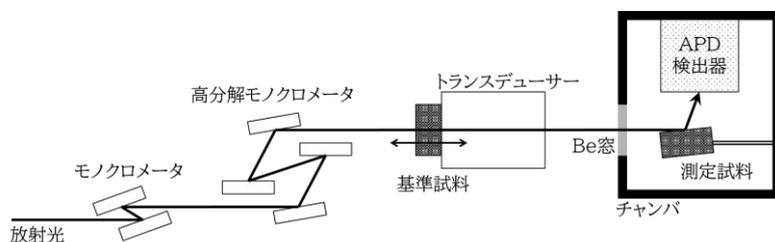


Fig. 1. Setup of synchrotron-radiation-based Mössbauer spectroscopy

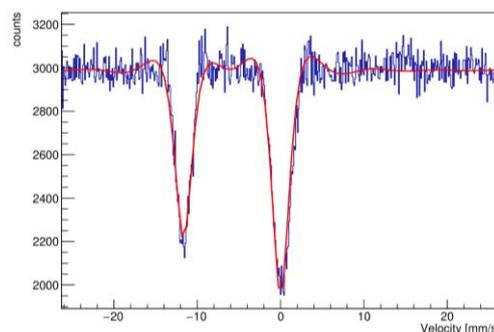


Fig. 2. Example of Mössbauer spectrum measured in this research

## References

- [1] M. Seto *et al.*, Physical Review Letters **102**, 217602 (2009).
- [2] T. Masuda *et al.*, Review of Scientific Instruments **88**, 063105 (2017).

# LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けた TGC 検出器を用いた初段ミュオントリガーシステムの検証

高エネルギー物理学研究室 辻川吉明

**Abstract** The ATLAS Level-1 muon trigger system will be upgraded to cope with the higher luminosity and energy in LHC Run-3. We report the result of commissioning of the new Level-1 muon trigger system including a newly developed trigger decision board for TGC.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

Large Hadron Collider (LHC)は、欧州原子核研究機構(CERN)に建設された世界最高エネルギーの陽子陽子衝突型加速器であり、40 MHz で  $10^{11}$  個の陽子バンチ同士を衝突させる。ATLAS 検出器は LHC の衝突点の一つに設置された大型汎用検出器であり、陽子衝突により発生する粒子を観測する。LHC-ATLAS 実験は、TeV 領域までの新粒子の直接探索やヒッグス粒子の精密測定を行うことで、標準模型を超えた新物理の発見を目指す。

データ記録速度・容量の限界により、LHC での 40 MHz の陽子同士の衝突の全事象を記録することはできない。また新物理に由来するような事象は稀にしか起きないため、全衝突事象の中から興味のある事象を選別し記録するために2段階のトリガーシステムを使用している。本研究で扱うのは初段の Level-1 ミュオントリガーである。ここでは  $2.5 \mu\text{s}$  以内に事象選別を行う必要があるためハードウェアで実装され、ミュオンの横運動量に閾値を設けて高速な事象選別を行う。

LHC-ATLAS 実験では2010年から2012年までのRun-1期間において重心系エネルギー 7-8 TeV での測定を行い、ヒッグス粒子を発見した。また、2015年から2018年までのRun-2期間において、Run-1より重心系エネルギーを約2倍(13 TeV)、取得データ量を約6倍でヒッグス粒子の精密測定などを行った。現在LHCはより多くのデータを得るための改良中であり、2022年以降のデータ取得(Run-3)では重心系エネルギーを14 TeVに増強し、バンチに含まれる陽子の数が2倍近くなる。加速器の性能向上に伴いトリガーレートが増加するが、Level-1 トリガーのレートは100 kHzのままに抑えなければならない。重要な物理事象を最大限有効に集めるために、対象となる物理事象の取得効率を維持したまま、より多くの背景事象の除去が可能な新しいLevel-1 ミュオントリガーの開発を行った。

現在のミュオントリガーではThin Gap Chamber (TGC)検出器の情報を用いてトリガー判定を行っているが、開発した新しいトリガーアルゴリズムではRun-3からATLAS検出器に導入されるNew Small Wheel(NSW)、RPC BIS 7/8の情報とTGCの情報を組み合わせて、衝突点由来でない荷電粒子や閾値以下のミュオンによるトリガーを削減する(Fig. 1)。このトリガーロジックは、新しく開発したLevel-1 ミュオントリガー判定ボードであるNew Sector Logicに実装する。New Sector Logicは、回路設計の変更が容易なFPGA(Field-Programmable Gate Array)を搭載しており、そこに実装するファームウェアによりトリガー判定を行う。

本研究では、TGCからの情報をNew Sector Logicに入力し、入力信号の受信における安定性試験や各部分からの信号のタイミング調整を行った。そして、それらの入力信号を元にしてトリガー判定データを作成し、実装されたトリガーアルゴリズムが正しく機能していることを確認した。これらの試験はNew Sector Logicを含むRun-3のためのLevel-1 ミュオントリガーシステムを用いて行ったものである。検出器からのヒット情報やトリガー判定データの読み出しも正しく行っていることを確認した。これによって、Run-3の新たなトリガーシステムが正しく機能していることを初めて検証することができた。これによって、Run-3において設計通りのトリガー性能の改善が得られると期待される。

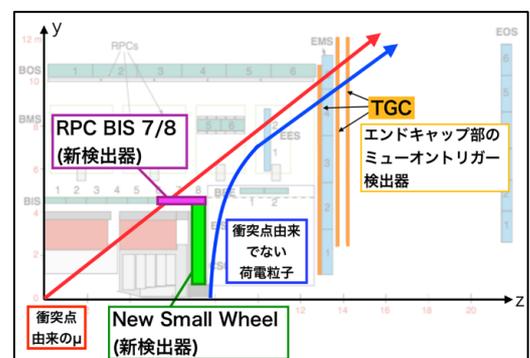


Fig.1. Cross-Section of the ATLAS muon system

# JLab における $\Lambda$ ハイパートライトンの精密質量測定実験のためのガス標的の基礎設計

原子核・ハドロン物理学研究室 豊田峻史

**Abstract** The JLab C12-19-002 experiment aims to accurately measure the mass of  ${}^3\Lambda\text{H}$  with the total error of  $< 100$  keV via the  ${}^3\text{He}(e, e' K^+){}^3\Lambda\text{H}$  reaction. Basic design of gas targets that needs to be combined with various solid targets was made considering mechanical, physical and thermal requirements.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

$\Lambda$  ハイパートライトン ( ${}^3\Lambda\text{H}$ ; 中性子、陽子、 $\Lambda$  で構成される粒子) はハイペロンを含む最も単純な束縛ハイパー核である。しかし、 ${}^3\Lambda\text{H}$  の実験的に得られている  $\Lambda$  束縛エネルギーと寿命は無矛盾的に同時に理解できず、「ハイパートライトンパズル」と呼ばれ、ハイパー核物理で特に優先度の高い解決すべき問題として注目されている。我々のグループは、近年確立した電子線を用いたハイパー核分光法を用いて  $\Lambda$  束縛エネルギーを高精度で決定し、パズルを解決へと導くことを目指す (JLab C12-19-002 実験)。

我々は米国・ジェファーソン研究所 (JLab) において本実験を計画している。4.24 GeV の電子ビームを極低温ヘリウムガス標的に照射し、 ${}^3\text{He}(e, e' K^+){}^3\Lambda\text{H}$  からの散乱電子と  $K^+$  をそれぞれ高分解能磁気分光器 HRS、HKS で測定し欠損質量分光する (Fig. 1)。本実験では、 $\Lambda$  束縛エネルギーのトータルの誤差 (統計、系統誤差を考慮して) を 100 keV を切ることを目指している。

本研究では、極低温ガス標的の設計を行った。ガス標的はセルに封入し、その標的セルを真空チェンバにインストールしてビームを照射する。標的ガス密度の不定性やセルの厚さの一様性 (不定性) は信号の統計量だけでなく最終的な物理結果に誤差を生じさせる大きな要因の一つとなるため、注意して押さえるべき仕様、特にガス標的セルの形状や大きさ、セル厚を決める必要がある。私は以下の三つの要素を考慮して基本設定を決定した: (1) 標的系物質による計測の誤差への影響、(2) 真空中での熱伝導を用いた除熱性能、(3) 耐圧や他のコンポーネントとの物理的干渉やビーム光学アクセプタンス等の機械的要求。(1) (3) の評価については Geant4 モンテカルロシミュレーションを使用し、(2) の評価には 3次元有限要素法解析ソフト ANSYS を用いた。本研究により、ガスセルを「ツナ缶タイプ」、大きさを「 $\phi 200$  mm」、セル厚を「0.3 mm」と決定した。また、本実験ではヘリウムガス以外にも他の固体標的を使用する計画であり、それらの標的も同システムで実験に使用できるような統合的システムの概念的設計も決定した (Fig. 2)。本研究で基礎設計を決定したことにより、JLab の標的グループと詳細設計を進めることが可能となった。

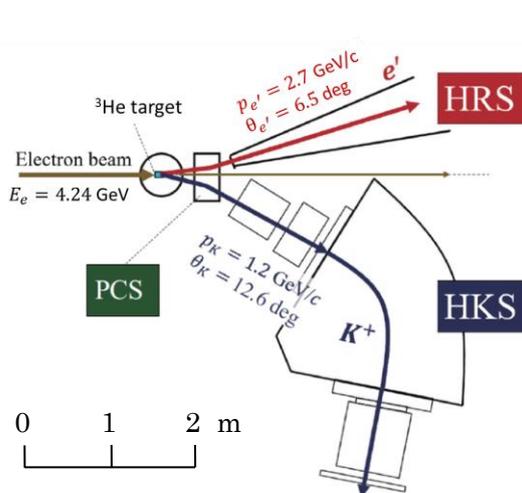


Fig.1. A schematic of the C12-19-002 experiment at JLab Hall A.

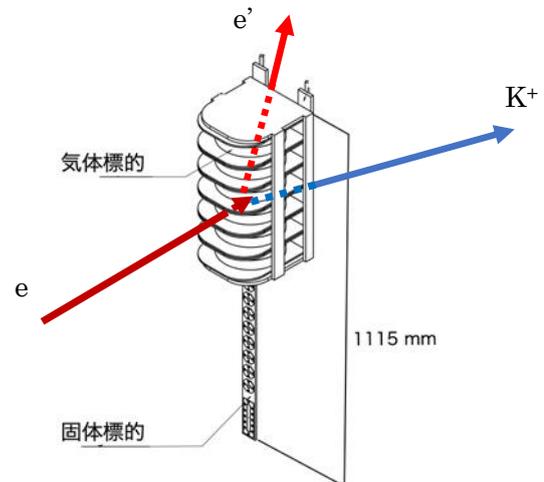


Fig.2. Conceptual design of gas and solid targets.

# 電子対測定のための粒子識別検出器群における 背景事象除去性能の評価

原子核・ハドロン物理学研究室 中須賀さとみ

**Abstract** For the spectrum measurement of vector mesons in medium, we plan to detect electron-positron pairs at the J-PARC E16 experiment. We use two-stage detectors developed individually to separate electrons from huge hadronic backgrounds. The purpose of the thesis is to evaluate the combined performance of two detectors.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

我々は核物質中におけるベクター中間子の質量スペクトルを測定する J-PARC E16 実験を開始した。QCD 真空中に凝縮するクォーク凝縮量は、QCD 和則[1]の手法を用いることで質量などの観測可能な物理量と結びつけることができる。クォーク凝縮量は高温・高密度環境下で減少すると予想されているため[2]、原子核中で崩壊したハドロン質量の測定から、核物質中のクォーク凝縮量を知ることができる。先行研究である KEK-PS E325 実験では、原子核中における  $\phi$  中間子の質量変化の兆候が初めて観測された[3]。E16 実験は、大立体角を覆うスペクトロメータの開発と J-PARC の高強度陽子ビームラインによって先行研究の 100 倍の統計量を達成し、 $\phi$  中間子の質量変化を理論と比較する際に重要となる分散関係を導出する。

陽子ビームを原子核標的に照射し、pA 反応から生成した  $\rho/\omega/\phi$  中間子の電子陽電子対崩壊を検出し不変質量を測定する。レプトンをプローブとして用いることで、終状態が原子核との相互作用の影響を受けない測定が可能となる。

実験では電子の 100 倍程度存在するハドロンの背景事象を抑える必要がある。粒子を識別する検出器として、ガスケレンコフ検出器であるハドロンブラインド検出器 (HBD) と鉛ガラス電磁カロリメータ (LG) を用いる。E16 実験に使用する検出器はそれぞれ開発、性能評価がなされ、2020 年 6 月に行われたビームタイムにてスペクトロメータのコミッショニングを実施した。特に本論文では、 $\pi$  中間子に対する HBD と LG の応答の相関が十分小さく、総合性能を単独性能の積で評価してよいことを確認することを主眼とした。このためコミッショニングと並行して、専用のセットアップを用いて (図 1 参照) HBD と LG を同時にオペレーションしたときの総合的な性能を初めて評価した。HBD 及び LG を実機と同じ位置関係で配置し、 $\pi$  中間子を同定するためのガスケレンコフ検出器を 2 台設置した。また検出器を通過する粒子を同定するために、シンチレーションカウンターを 7 台導入した。

HBD と LG の応答の相関は、実際に E16 スペクトロメータで物理データ取得を行う場合の動作閾値付近で評価する。HBD で  $\pi$  中間子除去率 98%、LG で  $\pi$  中間子除去率 73%を満たす閾値において、両者の単独性能の積は  $99.44 \pm 0.05\%$ と見積もられる。このとき 2 台の検出器で測定した性能は  $99.42 \pm 0.10\%$ であり、両者の値は統計誤差の範囲で一致した。これにより、HBD と LG における  $\pi$  中間子に対する応答の相関は十分小さいことが確認された。

LG では、電子検出効率と  $\pi$  中間子除去性能の関係は過去の測定と無矛盾であった。一方 HBD では、98%の  $\pi$  中間子除去が期待される閾値に対して、実際の性能は  $95.2 \pm 0.3\%$ であった。性能の悪化については高計数率による信号パイルアップの影響が考えられる。これは専用セットアップで用いた読み出し装置に特有の問題であり、今後実機 HBD および LG を用いた詳細な性能評価を実施する予定である。

## References

- [1] T. Hatsuda and S.H. Lee. Phys. Rev. C 46, R34 (1992).  
[2] W. Weise et al., Nucl. Phys. A 553, 59(1993). [3] R. Muto et al., Phys. Rev. Lett. 98, 042501 (2007).

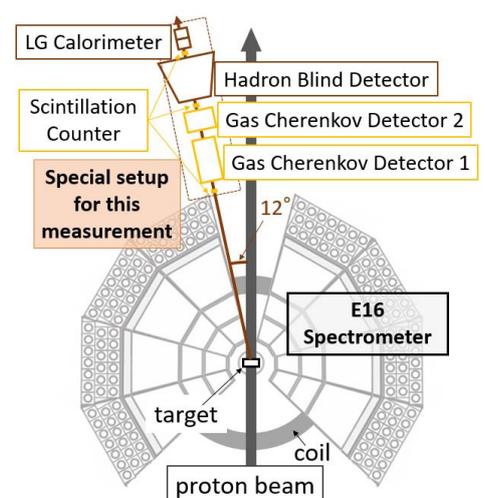


Fig. 1. Experimental setup dedicated to evaluate the overall performance of the electron identification system.

# テンソルネットワークによる格子場理論の数値計算アルゴリズムとその高次元化の研究

素粒子論研究室 中山 泰晶

**Abstract** Tensor Renormalization Group (TRG) has no critical fixed point. Tensor Network Renormalization (TNR) resolved this problem, but it has been studied only in two dimensions. We review TRG, TNR and Higher Order TRG towards constructing Higher Order TNR algorithm to calculate higher dimensional theory (such as 4D gauge theory) accurately.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

物質の臨界点付近での秩序変数や比熱などのふるまいは、理論の詳細に依らず、次元や場の種類、対称性を与えれば決まるという普遍性を持つ。この普遍的性質を調べることは理論物理の興味深い問題の一つである。時空を格子状に区切り、格子上に場を乗せる格子場理論を、モンテカルロ法により数値計算で研究するというのが、非摂動的に計算する有効な手法となっている。しかし有限密度格子 QCD などの様々な系ではボルツマン分布が負になるという符号問題が現れる。そこで、モンテカルロ法以外にも数値計算手法が多く提案されてきた。その一つがテンソルネットワークによる数値計算手法である。本論文では特にテンソルくりこみ群(TRG)、テンソルネットワークくりこみ(TNR)、TRG の高次元化である HOTRG についてレビューする。

TRG は、2007 年に Levin と Nave によって提唱された、格子場理論をテンソルネットワークで表現し、そのテンソルをくりこむという手法である[1]。分配関数は、各格子点上のテンソルの縮約で表される。そのテンソルを特異値分解し、特異値をある一定数のみ用いて残りを落とすことでくりこみを行うが、これでは UV の自由度を選択的に落とすことにはなっていないように見える。実際、TRG 変換を繰り返したとき、テンソルの固定点が存在しないことがわかっている。これは TRG がくりこみ群的なものではないことを意味する。

上に述べた TRG の困難は、近距離相関を残したままブロック変換を行ったことが原因であった。そこで、近距離相関を切りながら粗視化を行う手法がテンソルネットワークくりこみ(TNR)である[2, 3]。TNR では隣接したテンソルのボンドに、「ボンド次元を制限するための isometry」だけでなく、「ボンド間の相関を切る役割をする disentangler」も挿入し、元のテンソルネットワーク表示を最も良く近似するように isometry と disentangler を最適化するという方法で計算する。これにより、TRG では現れなかったテンソルの固定点が回復し、RG flow を実現することができる。

TNR は 2 次元系に対しては調べられているが、高次元化はまだなされていない。これに対し、TRG の高次元化の研究は TNR 以前からなされていて、HOTRG と呼ばれる[4]。これはテンソルの高次特異値分解(HOSVD)による粗視化の方法で、テンソル固定点は持たない理論である。我々は TNR の高次元化を目指していて、HOTRG の手法についても調べてきた。そこで本論文の最後に HOTRG についてもレビューする。

TNR の高次元化の手法を開発することで、今までモンテカルロ法だけで計算されてきた高次元格子理論を、テンソルネットワークくりこみでも精度良く計算できるようになり、有限密度格子 QCD の相構造などの興味深い問題に取り組むための新たな武器を提供することになると期待している。

## References

- [1] M. Levin and C. P. Nave, Phys. Rev. Lett. 99, 120601 (2007) [arXiv: cond-mat/0611687]
- [2] G. Evenbly and G. Vidal, Phys. Rev. Lett. 115, 180405 (2015) [arXiv: 1412.0732]
- [3] G. Evenbly, Phys. Rev. B 95, 045117 (2017) [arXiv: 1509.07484]
- [4] Z. Y. Xie, J. Chen, M. P. Qin, J. W. Zhu, L. P. Yang and T. Xiang, Phys. Rev. B 86, 045139 (2012) [arXiv: 1201.1144]

# RI プローブを用いた超微細気泡の内圧及び寿命測定

核ビーム物性学研究室 林 大寿

**Abstract** With the technique of perturbed angular correlation, the inner pressure and the lifetime of Xe-Ultra Fine Bubble were studied. The respective values obtained were  $1.64_{-0.28}^{+0.35}$  atm and  $(1.3_{-1.3}^{+5.2}) \times 10^4$  h. The latter has a large uncertainty, because of the short length of our experiment.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

直径 1  $\mu\text{m}$  未満の気泡であるウルトラファインバブル(Ultra Fine Bubble :UFB)は、幅広い分野で応用が進んでいる。しかしサイズが可視光波長より小さく従来の気泡の研究手法である光学的観察が困難であり、基礎的な性質についてはあまり研究が進んでいない。そこで今回、一昨年度の先行研究[1]を基に、ガス中プローブ核の  $A_{22}G_{22}$  と圧力の依存性[2]を利用して摂動角相関(Perturbed Angular Correlation, PAC)測定から UFB の内部圧力を再測定した。さらに線源強度の時間変化の追跡から UFB の寿命を合わせて測定した。

今実験では天然 Xe により粒径平均約 100 nm の Xe-UFB 溶液と Xe 飽和溶液の組を 4 つ用意し、一組ずつ数日ごとに京都大学原子炉で中性子照射した。 $^{124}\text{Xe}(n, \gamma)^{125}\text{Xe}$  で得た  $^{125}\text{Xe}$  の EC 壊変によりプローブ核  $^{125}\text{I}$  を得た。 $^{125}\text{I}$  の励起準位の 55-188 keV カスケード  $\gamma$  線の角度依存性と計数の経時変化を測定した。典型的なカスケード  $\gamma$  線の角度依存性を Fig. 1. に示す。今回、気泡のみに含まれる Xe の放射化で生成される  $^{125}\text{Xe}$  を観測するので、従来の観測手法のように不純物に左右されることはない。

サンプルごとの計数の時間変化を Fig. 2. に示す。先行研究[1]ではサンプル開封後 3 日で溶存 Xe は殆ど抜けていたと報告があり、今回も約 50 時間で計数の急激な減少が見られ、溶存 Xe が抜けていることが示唆される。また、最近、気体の溶解する溶液の加減圧で溶液内に UFB が生じるという報告があり[3]、今回サンプルは生成後に保存、輸送の為に数度加減圧がなされていたことから、Xe 飽和サンプル中にも UFB が発生していた可能性がある。

そこで Xe が UFB としてのみ存在していると考えられる 50 時間以降について考察した。溶存状態では核スピンの緩和時間が長く  $G_{22} \sim 1$  になることが知られており、 $A_{22}G_{22}$  は  $0.235 \pm 0.005$  になると予想される。しかし 50 時間以降の Xe 飽和溶液の  $A_{22}G_{22}$  は  $0.059 \pm 0.007$  となり、Xe-UFB 溶液での  $A_{22}G_{22}$  の値  $0.059 \pm 0.001$  と誤差の範囲で一致した。このことから Xe は UFB としてのみ存在すると考えられる。

これらの加重平均を用いて内部圧力  $1.64_{-0.28}^{+0.35}$  atm を得たが、この値は先行研究[1]で得られた値と誤差の範囲で一致した。一方で、UFB の寿命は  $(1.3_{-1.3}^{+5.2}) \times 10^4$  h となり、より長い時間経過観察の必要がある。

## References

- [1] 山倉拓也, 京都大学理学研究科物理学第二教室 2018 年度修士論文
- [2] U.Berek et al., Phys. Lett. **53A** (1975) 251.
- [3] 寺坂宏一ほか, Japanese J of Multiphase Flow, 10.3811/jjmf.2020.030

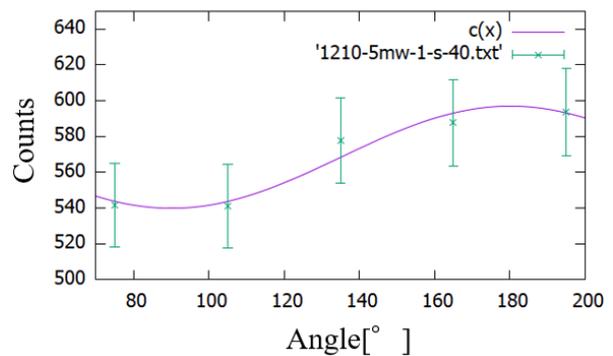


Fig.1. A typical PAC result for the 55-188keV cascade of  $^{125}\text{I}$  arising from  $^{125}\text{Xe}$ .

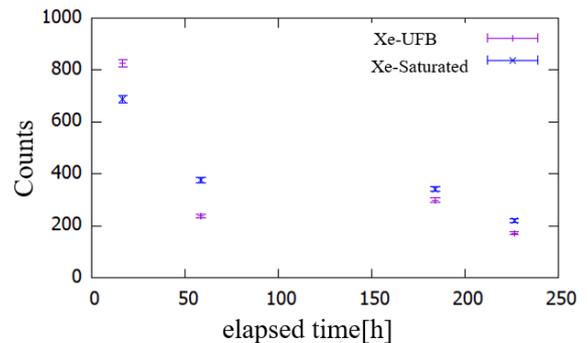


Fig.2. The time dependence of the 55-188keV cascade events of  $^{125}\text{I}$ .

# 集団運動量を考慮に入れた生成座標法の拡張と 粒子数射影法

原子核理論研究室 樋沢規宏

**Abstract** As an extension of the generator coordinate method (GCM), the dynamical GCM has been developed. We apply this to the particle number of BCS states. We show that the ground state energy is significantly lowered, especially for magic nuclei for which the pairing gap is zero in the BCS approximation.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

生成座標法(GCM)による平均場近似を越えた原子核集団運動の微視的計算が、近年急速に発展している。しかし、よく行われている GCM では、最も単純な集団運動である並進運動を正しく記述できないという問題が古くから知られている[1]。この問題を解決するために、集団座標を複素数に拡張する Complex GCM など、様々な方法がこれまでに提案された。Reinhard らはこの問題の原因が集団座標に共役な物理量が考慮されていないことを指摘した[2]。彼らは集団座標だけでなくその共役運動量も集団座標として導入し、それらを混ぜ合わせる手法を開発し、Dynamical GCM (DGCM) と呼んだ。しかしその定式化の煩雑さから、DGCM に基づく具体的な数値計算は、これまで行われたことはなかった。

本研究では粒子数とそれに共役な gauge angle を集団変数とした場合での DGCM を考え、具体的な数値計算を遂行した[3]。この時、DGCM 波動関数が以下のような配位混合の形で書けることを見出した。

$$|\Phi_{N_0}\rangle = \int dN f(N) \hat{P}^{N_0} |\phi_N\rangle$$

ここで多体の波動関数  $|\phi_N\rangle$  は一般には粒子数演算子  $\hat{N}$  の固有状態にはなっていない。本研究では BCS 波動関数を用い、 $\langle\phi_N|\hat{N}|\phi_N\rangle = N$  という拘束条件により座標  $N$  を生成した。また、 $\hat{P}^{N_0}$  は粒子数  $N_0$  の固有状態への射影演算子である。また  $f(N)$  は重み関数で、エネルギー変分から決定される。このようにして得られた波動関数は、粒子数に共役な量である gauge angle のゆらぎの効果だけでなく、BCS 波動関数の粒子数ゆらぎの効果を取り込んでいる。

本研究ではこれを  $^{16,18}\text{O}$ ,  $^{40,42}\text{Ca}$ ,  $^{56,58,64}\text{Ni}$  に適用した。 $^{56,58}\text{Ni}$  に関して、DGCM で得られた基底状態のエネルギーを混ぜ合わせる BCS 波動関数の数の関係として Fig. 1 に示した。ただし縦軸は BCS 波動関数が 1 つだけの場合を基準にしている。図によると pairing energy の発達に伴い、total energy が大きく下がっている様子が見取れる。また、少ない BCS 波動関数を混ぜ合わせるだけで、十分大きくエネルギーが下がることも分かった。特に、 $^{58}\text{Ni}$  に比べ  $N = 28$  の魔法核である  $^{56}\text{Ni}$  の方が大きくエネルギーが下がる事がわかった。 $^{16,18}\text{O}$  や  $^{40,42}\text{Ca}$  に対しても同様の傾向が見られた。これは魔法核においては、BCS + 粒子数射影では取り込めない粒子数ゆらぎの効果が重要になることを意味している。

## References

- [1] P. Peierls and D. Thouless, Nucl. Phys. **38**, 154 (1962).
- [2] K. Goeke and P.-G. Reinhard, Ann. Phys. (N. Y.) **124**, 249 (1980).
- [3] N. Hizawa, K. Hagino, and K. Yoshida, arXiv:2012.11123 (2020).

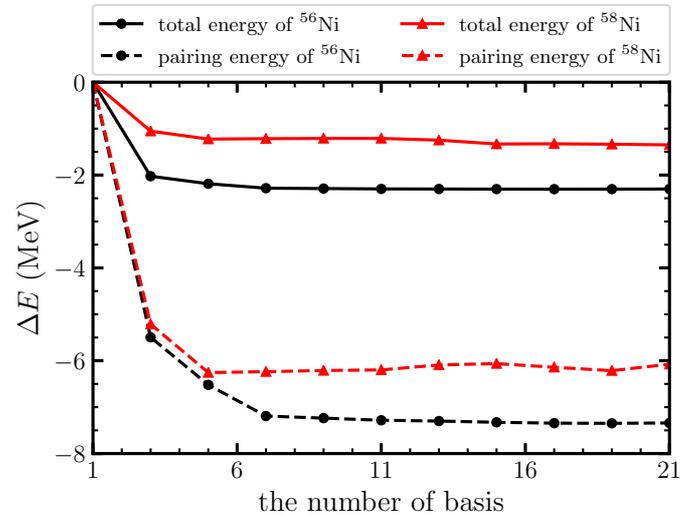


Fig. 1. The energy gain in the  $^{56,58}\text{Ni}$  nucleus as a function of the number of basis states  $N_{\text{DGCM}}$  in the DGCM method. It is plotted with respect to the energy of  $N_{\text{DGCM}} = 1$ , which is equivalent to the variation before projection method.

# 重い大強度不安定核ビームの粒子識別に向けた キセノンガスシンチレータの開発

原子核・ハドロン物理学研究室 土方佑斗

**Abstract** New xenon gas scintillator (XGS) was developed for particle identification (PID) of heavy radioisotope beams. We performed test of evaluating the XGS's PID ability in RIKEN RIBF, and the detector showed good energy resolution comparable to that of standard detector. Additionally, good time and position resolution was also achieved.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

核物質の状態方程式における対称エネルギーは、中性子過剰な原子核の成り立ちを理解する上で重要であるだけでなく、中性子星などの天体核現象を解明する上でも重要な役割を担っている[1]。しかし、対称エネルギーは未だ不定性が大きく、その決定が急務となっている。実験的に対称エネルギーを決定する有力な手法の一つは、中性子過剰核に対して陽子弾性散乱の微分断面積測定を行い、核子の密度分布を決定する手法である。特に、アイソスピン非対称度が大きくなるほど対称エネルギーの決定精度は向上するため、不安定核の密度分布の測定は極めて重要となる。そこで我々は、不安定核ビームを固体水素標的に入射する、逆運動学での陽子弾性散乱実験の計画を進めてきた。

散乱実験においては統計量が非常に重要となってくる。ただし、測定の要求精度が高く、標的を厚くすることはできないため、大強度ビームの利用が不可欠である。理研 RIBF をはじめとする加速器施設では、近年の技術開発により大強度の不安定核ビームが生成可能となっている。しかし、現状では生成された不安定核ビームの粒子識別 (PID) を行う検出器の強度耐性がボトルネックとなり、ビーム強度を下げて実験せざるを得ない。そこで我々は、特に、エネルギー損失 ( $\Delta E$ ) から原子番号 ( $Z$ ) を決める検出器として、キセノンガスを用いたシンチレーション検出器の開発を行っている。キセノンガスは、ガス状態であるため放射線損傷がほとんどない。加えて、キセノンガスのシンチレーションプロセスは比較的速く[2]、一つのシンチレーション光の生成に必要なエネルギーが小さい[3]という特徴を持っている。

先行研究[4]において、キセノンガスシンチレータは  $Z$  が 50 周辺の不安定核ビームに対し、 $\Delta Z = 0.2$  の分解能を達成している。ただし、この測定にて用いられた検出器は全長約 10 cm で、キセノンガスを 4 気圧で封入し、ビーム窓には 1 mm 厚のアルミを使用している。このときの物質厚の合計は非常に大きく、多くの不安定核実験において標的に設置することは困難である。そこで、先行研究で用いたものに対して、4 分の 1 以下の物質厚であり、かつ、十分なシンチレーション光の収量を確保可能な新しい検出器筐体を製作した。

本研究では理研 RIBF にて、 $Z = 35, 55, 85$  周辺の不安定核ビーム及び  $^{238}\text{U}$  ビームを新しいキセノンガスシンチレータに入射し、PID 性能を評価した。 $Z = 35, 55$  それぞれについて、 $\Delta Z = 0.20, 0.29$  という高い分解能が確認できた。この結果は、従来の損失エネルギー検出器であるイオンチェンバと同程度の性能となっている。

また、 $^{238}\text{U}$  ビームでの結果から、時間分解能と位置分解能はそれぞれ、36 ps ( $\sigma$ )、0.60 mm ( $\sigma$ ) (リファレンス検出器の分解能を含む)であった。通常、PID には、 $\Delta E$ に加えて時間や位置情報の測定が必要であり、それぞれ別の検出器を用いて測定しているが、本検出器はそのすべてにおいて高い分解能が期待できることがわかった。

## References

- [1] M. Oertel, *et al.*, Rev. Mod. Phys. **89**, 015007 (2017).
- [2] T. D. Bonifield, *et al.*, J. Chem. Phys. **72** (1980) 2914.
- [3] M. Mimura, *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **48** (2009) 076501.
- [4] J. Zenihiro, *et al.*, RIKEN Accelerator Progress Report **51** (2018) 156.

# 可積分模型の統一理論としての 4 次元 Chern-Simons 理論

素粒子論研究室 福島 理

**Abstract** We develop derivations of integrable field theories from the 4d Chern-Simons theory, a unifying framework of integrable models. From this perspective, we show that appropriate conditions reproduce the Yang-Baxter-deformed sigma models. Other conditions allow us to discover the new-type Yang-Baxter deformation and a trigonometric deformation of the Faddeev-Reshetikhin model.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

可積分模型は理論物理のいたるところに現れ、それらを系統的に扱うことは重要な課題である。一般に可積分模型は多数の(しばしば無限次元の)対称性を持ち、その対称性により厳密に解くことができる。Liouville の定理によると、系の自由度と同じ数の独立な保存チャージが存在し、それらが全て Poisson 可換であるとき系の運動は求積法により厳密に求めることが出来る。場の理論は無限自由度の系とみなすことが出来るため、Liouville の定理の考え方を応用するためには無限個の保存チャージが必要になる。これを実現する手法として、Lax pair を用いるものがある。Lax pair とは、その平坦性条件と系の運動方程式が等価になるような接続である。この接続のホロノミーを計算することにより、無限個の保存チャージを構成することが出来る。このように構成された保存チャージが Poisson 可換であることは古典 Yang-Baxter 方程式から従う。

AdS/CFT の文脈においても可積分性は重要な役割を果たしてきた。最も基本的な実現例である、「 $\text{AdS}_5 \times S^5$  を背景時空にもつタイプ IIB 超弦理論」と「 $\mathcal{N}=4$  超対称 Yang-Mills 理論」の対応では、2つの理論がともに可積分な構造を持っていることが知られている。さらに、可積分系の手法を超対称性や共形対称性の破れた系に対しても適用するために、可積分性を保った理論の変形(可積分変形)が調べられてきた。

近年 Costello らにより、可積分な系を統一的に扱う枠組みとして 4 次元 Chern-Simons (CS)理論が提案された[1]。4 次元 CS 理論は 4 次元空間  $\mathcal{M} \times C$  上で定義されたゲージ理論であり、これを 2 次元空間  $\mathcal{M}$  に簡約することにより可積分模型が得られる。この際、ゲージ場  $A$  が Lax pair と関連付き、 $\mathcal{M}$  方向の位相不変性が Yang-Baxter 方程式を導く。この理論の著しい点は、Riemann 面  $C$  のトポロジーとツイスト関数、表面欠陥上での境界条件を指定することにより、可積分変形を含む様々なクラスの可積分模型が導出されることである[2]。

我々は第一に主カイラル模型に対する trigonometric 処方の変形を導出した[3]。Trigonometric 処方は Riemann 面  $C$  のトポロジーが円柱であることに対応し、表面欠陥上で古典  $r$ -行列を用いた境界条件を課すことにより理論の変形が導かれる。さらに構造群を拡張することにより新しいタイプの Yang-Baxter 変形が構成され、その可積分性が証明された。[4]では対称コセットシグマ模型と  $\text{AdS}_5 \times S^5$  超弦理論の Yang-Baxter 変形を導く境界条件を同定した。これらのコセット構造は  $C$  上に  $\mathbb{Z}_2/\mathbb{Z}_4$ -grading を導入することによって得られる。

上記の模型が non-ultralocal と呼ばれる可積分系であるのに対し、ultralocal と呼ばれる量子可積分性との相性が良い系を 4 次元 CS 理論の立場から扱うことも意義深い。Faddeev-Reshetikhin (FR)模型はその例であり、量子逆散乱法を用いて厳密な S 行列を計算できることが知られている。[5]において FR 模型とその trigonometric 変形が 4 次元 CS 理論から導出された。以上の結果よりストリングシグマ模型をはじめとする non-ultralocal な系と扱いやすい Poisson 構造を持つ ultralocal な系が 4 次元 CS 理論という 1 つの枠組みによって取り扱えることが明らかになった。

## References

- [1] K. Costello, E. Witten, M. Yamazaki, ICCM Not. **06** no.1, 46-119 (2018).
- [2] F. Delduc, S. Lacroix, M. Magro, B. Vicedo, Lett. Math. Phys. **110**, 1645-1687 (2020).
- [3] O. Fukushima, J. Sakamoto, K. Yoshida, Nucl. Phys. B **957**, 115080 (2020).
- [4] O. Fukushima, J. Sakamoto, K. Yoshida, JHEP **09**, 100 (2020).
- [5] O. Fukushima, J. Sakamoto, K. Yoshida, [arXiv: 2012.07370].

# 超新星残骸 Tycho における 熱的放射と非熱的放射の時間変動観測研究

宇宙線研究室 松田真宗

**Abstract** With Chandra observations of Tycho's SNR, we discover time variability of flux of thermal plasma and the synchrotron radiation. In the thermal time-variable emission, the electron temperature has increased. The time variability of the synchrotron radiation indicates acceleration of electron and synchrotron cooling.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

宇宙における衝撃波は、太陽風や超新星残骸（SNR）、衝突銀河団、ガンマ線バーストなど、様々な場所で普遍的に観測されている。これらの衝撃波では粒子の加熱や加速が起きていることがわかっているが、その物理過程は未だわかっていない部分も多い。本修士論文では、Tycho の SNR（以下、Tycho）において、熱的プラズマと非熱的放射の時間変動を発見した (Fig. 1)。これらは、熱的プラズマの変動は加熱、非熱的放射の変動は加速が進行するまさにその過程を捉えたことを意味する。

## 1. 熱的プラズマにおける温度上昇の発見 (Fig. 1 左)

衝撃波によって加熱を受けた電子は、陽子との相互作用によってエネルギーを受けてさらに高温になるとされる。しかし、この加熱過程を観測した例は非常に少ない。本論文で発見した熱的放射の時間変動は、Tycho 北東部のリム付近に位置する。スペクトル解析の結果、12 年の間に約 0.4 keV から約 0.7 keV まで電子温度が上昇していることが明らかになった[1]。これにより、衝撃波によって星間ガスが加熱される過程を捉えることができた。これは Cassiopeia A に続き 2 例目となる[2]。また、温度変化のタイムスケールから、衝撃波による電子加熱機構に制限を与えることに成功した。

## 2. 縞状非熱的放射の時間・空間変動観測 (Fig. 1 右)

Tycho 西部に存在する縞状の非熱的放射は他の SNR には見られない特異なものであり、高エネルギーの陽子加速が示唆されている[3]。本論文では、この縞状構造全体が時間変動していることを発見した。この変動は、電子の加速やそれと競合するシンクロトロン冷却が進む過程を捉えたことを意味する。そのタイムスケールから、数 100  $\mu\text{G}$  の磁場増幅の示唆を得た。また、縞状構造と同じく非熱的放射が明るい衝撃波面との比較を行ったところ、縞状構造の方が硬い放射を放っていることが明らかになった[4]。これらの結果は、磁場増幅や粒子加速によって、縞状構造における電子のエネルギー分布が衝撃波面とは異なるものになったことを示唆する。

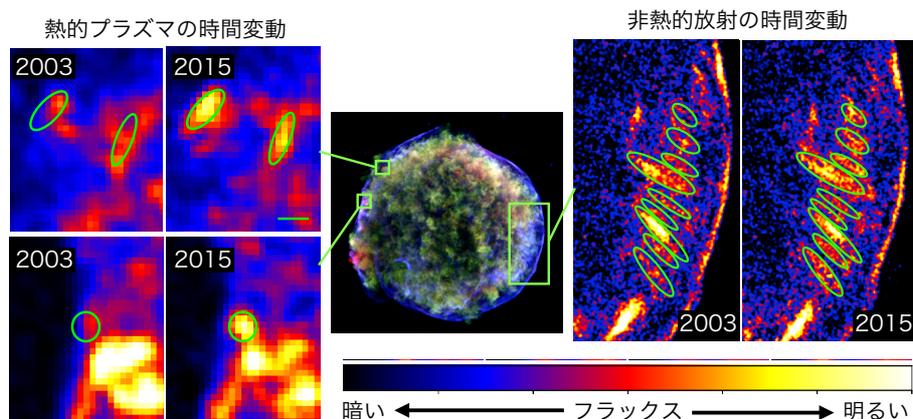


Fig. 1: Time variabilities of Tycho's SNR

## References

- [1] Matsuda, M., *et al.*, in prep.
- [2] Patnaude, D. J. and Fesen, R. A., *AJ*, 133, 147 (2007).
- [3] Eriksen, K. A., *et al.*, *ApJL*, **728**, L28 (2011).
- [4] Matsuda, M., *et al.*, *PASJ*, **72**, 85 (2020).

# SO(N) とシフト変換に不変な一般化複数場ガリレオン理論

天体核研究室 間仁田侑典

**Abstract** We study a class of multi-field extensions of the generalized Galileon theory. By imposing shift and SO(N) symmetries on all the currently known multi-Galileon terms in general dimensions, we find that the structure of the Lagrangian is uniquely determined and parameterized by a series of coupling constants.

© 2021 Department of Physics, Kyoto University

超新星や宇宙マイクロ波背景放射等、様々な観測により現在の宇宙の加速膨張が支持されている。加速膨張を駆動する物質は、エネルギー密度の比で 70% を占めることが観測から示唆されており、ダークエネルギーと呼ばれているが、正体は未だ明らかではない。最も単純なシナリオでは、ダークエネルギーの正体は宇宙項であるが、宇宙項以外の可能性も否定できない。赤外領域における重力の修正もダークエネルギーの候補となり得る。

本研究では、ガリレオン理論[1]と呼ばれる修正重力理論に着目した。ガリレオン理論はラグランジアンが場の高階微分を含む非線形自己相互作用を持つスカラー場理論である。長距離では重力理論を大きく修正しながらも、近距離では自己相互作用の非線形性が強く効くために、一般相対性理論に帰着する。この性質のおかげで、少なくとも太陽系スケールでの重力理論は、高精度で一般相対性理論とみなせるという観測事実と整合性を保つことができる。

ところで、高階微分を含むラグランジアンを持つ系は、Ostrogradski ゴーストと呼ばれる余分な自由度によって不安定となることが知られている。ガリレオン理論は、ラグランジアンが場の高階微分を含むが、運動方程式を 2 階までとすることで Ostrogradski ゴーストを回避しているため、安定である。ガリレオン理論のこの性質に着目した一般化、すなわち、ラグランジアンが 2 階までの高階微分を含みながら、運動方程式が 2 階までとなる最も一般的なスカラー場理論は一般化ガリレオン理論と呼ばれている。単一スカラー場に対する一般化ガリレオン理論の作用はわかっており、一意性も示されている。一方、複数スカラー場に対する一般化ガリレオンに対するラグランジアンは、候補はある[2]が、一意性は示されていない。実は、複数場の一般化ガリレオン理論のラグランジアンには、単一場の一般化ガリレオンのものに対応しない項が存在することが明らかとなっている[3]。本研究では、複数場ガリレオン理論をより簡単な状況で調べるために、SO(N)対称性とシフト対称性を順に要請し、ラグランジアンがどのように制限を受けるか調べた。実は、ブレーンワールドシナリオで余次元 2 以上のブレーンを考えるとき、ブレーン上に誘導される一般化複数場ガリレオン理論は、これらの対称性を持つことが知られており[4]、これも研究のモチベーションとなる。これらの対称性を課した結果、これまでに知られている複数場ガリレオン理論は強く制限され、場の 1 階微分の次数毎に一意に決まることを発見した。さらに、シフトと SO(N)不変な一般化マルチガリレオンラグランジアンの交差対称性や流体の有効場理論など、いくつかの意味合いについても研究を行った。

## References

- [1] A. Nicolis, R. Rattazzi and E. Trincherini, Phys. Rev. D 79 (2009) 064036.
- [2] V. Sivanesan, Phys. Rev. D 90 (2014) 104006.
- [3] E. Allys, Phys. Rev. D 95 (2017) 064051.
- [4] K. Hinterbichler, M. Trodden and D. Wesley, Phys. Rev. D 82 (2010) 124018.