2021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

(2022年2月7日、2月8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:2022年2月7日(月)8日(火) 場所:理学研究科5号館 525号室+Zoom 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7日(月)

- 1. 結合チャンネルHALQCD法を用いた T_{bb} テトラクォーク状態の研究 青木 孝史 (9:00)
- 2. 光的測地線の漸近的振る舞いと光子球面の一般化 天羽 将也 (9:20)
- 3. J-PARC E16実験での飛跡検出に用いるシリコン半導体検出器の 有水 大地 (9:40) 性能評価
- 4. 生成座標法を用いたクラスター崩壊の微視的記述 鵜沢 浩太朗 (10:00)

《 休 憩 》 15分

- 5. 粒子軌道に基づくダークマターハロー中心部の密度構造の解析 柄本 耀介 (10:35)
- 6. 陽子ドリップライン近傍核¹⁴Oにおける α クラスター状態の探索 岡本 慎太郎 (10:55)
- 豪州MeVガンマ線観測気球実験SMILE-2+における高エネルギー事象
 荻尾 真吾
 (11:15)
 解析
- 8. ガスジェット型ISOLへのレーザーイオン化法導入に向けたエアロゾルに吸 梶原 泰斗 (11:35) 着された被輸送原子の分離実験
- 9. T2K実験新型ニュートリノ検出器のための波長変換ファイバー品質管理シ 川上 将輝 (11:55) ステムの開発

10.	アノマリーの数学的基礎から現象論的応用まで	川平 将志	(13:00)
11.	宇宙最初のcold accretion発現と超大質量星形成の可能性	喜友名 正樹	(13:20)
12.	変形されたT ^{1,1} 時空における古典カオス的弦のダイナミクス	久代 翔大	(13:40)
13.	重イオン蓄積リングにおけるビームリサイクリングのための内部アクティブ 標的の開発	久世 啓太	(14:00)
14.	Horndeski理論における重力波の伝搬	窪田 圭一郎	(14:20)
15.	X線精密分光解析で明らかにする超新星残骸J0453.6-6829の特異な強度 の禁制線とその放射過程	小柴 鷹介	(14:40)
	《 休 憩 》 		
16.	74 - 110 μ eV/c ² 質量領域におけるダークマターとしてのダークフォトンの 探索研究	小髙 駿平	(15:20)
17.	超伝導ストリングの量子的安定性	佐地 宏太	(15:40)
18.	LHC-ATLAS実験Run-3に向けた中性長寿命の新粒子探索トリガーの 開発	佐野 高嶺	(16:00)
19.	SU(3)三角格子反強磁性体の非線形シグマ模型による解析	髙橋 樹	(16:20)

20. Chern-Simons理論に基づく3次元de Sitter時空のホログラフィー 瀧祐介 (16:40)

2月8日(火)

21 .	AdS/CFT対応におけるバルク時空再構築の手法の検討	竹田 大地	(9:00)
22 .	逆運動学(p,pX)反応測定に向けたGAGG(Ce)カロリーメーターの開発	辻崚 太郎	(9:20)
23.	MeVガンマ線天体観測実験SMILE-3に向けた高エネルギー分解能を目 指したMPPCシンチレーション検出器開発	津田 雅弥	(9:40)
24 .	大気チェレンコフガンマ線望遠鏡MAGICによるガンマ線バーストGRB 201015AとGRB 201216Cの観測	寺内 健太	(10:00)
25 .	CMB偏光の精密観測にむけた遠隔較正システムSparse Wire Grid Calibratorの開発研究	中田 嘉信	(10:20)
	《 1		
26.	時間およびエネルギー分析による ¹⁵¹ Euの放射光メスバウアー吸収分光法 の開発	藤原 拓	(10:55)
27.	周波数変調したγ線のメスバウアー効果によるエネルギースペクトル測定	山下 拓之	(11:15)
28 .	電子飛跡決定精度の向上を目指した新電極構造を持つガス飛跡検出器 の開発	吉田 有良	(11:35)
29.	LHC-ATLAS実験 Run-3に向けた初段ミューオントリガーアルゴリズムの開 発および性能評価	吉村 宣倖	(11:55)

結合チャンネルHALQCD法を用いた T_{bb} テトラクォーク状態の研究

基礎物理学研究所 青木孝史

Abstract We have obtained the mass of the state corresponding to the doubly-bottom tetraquark by calculating the potential between $B(B^*)$ mesons using the lattice QCD and coupled-channel HALQCD method. By comparing the results with the single-channel analysis, we found that there is a large correction to the binding energy.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

QCDは強い相互作用を記述する、クォークとグルーオンからなる理論である。QCDは漸近的自由性 によって低エネルギー領域において結合定数が大きくなり、場の理論の標準的な解析手法である摂動論 が通用しない。本研究ではその非摂動的な解析手法の一つである格子QCDを用いてハドロン散乱をコ ンピュータ上に再現する。格子QCDはQCDの第一原理計算であり、格子QCDから得られる知見は、モ デル計算に比べ不定性がなくより多くの情報をもつ。計算機の発展とともに精密な計算も可能となって おり、QCDを理解する上で理論、実験と並ぶ非常に重要な手法となっている。

本発表会では、 $I(J^P) = 0(1^+) f + v > \lambda n c b a T_{bb} = (b b u \bar{d})$ で表されるテトラクォーク状態を、B × Y > v あるいは $B^* × Y > o$ 散乱状態として捉えることで質量および散乱物理量を格子QCDから第一原理 的に算出した結果を述べる。本研究では、HALQCD法[1]にしたがって、場の理論における散乱振幅で あるNBS波動関数のふるまいから× Y > 間にはたらく相互作用を抽出し、その相互作用を用いた Schrödinger方程式を無限体積で解くことで散乱物理量を得た。本研究の特徴として、b / a - 0に非相 対論的QCD(NRQCD)を用いて、そのダイナミクスを取り入れたこと、そして、 $\mathcal{B} = B + B^*$ で表される 最低閾値をもつ散乱状態に加え、 $\mathcal{B}^* = B^* + B^*$ で表される45 [MeV]程度上に存在するチャンネルを考 慮した、結合チャンネル解析を行ったことが挙げられる。NRQCDによって動的効果が取り入れられた 結合チャンネル解析は本研究で初めて行われた。結果として、 $f + v > \lambda n$ に構成でき ないほど大きく、シングルチャンネル解析によって得られた物理量は大きな系統誤差を含む可能性があ ることがわかった。 $f + v > \lambda n$ に対して大きな補正がかかることが示されている。本研究では3種類の 異なる m_{π} に対応する配位の各々で散乱物理量が計算され、結果は $m_{\pi}^{(phys)}$ へ外挿された。得られた $T_{bb} = (b b u \bar{d})$ テトラクォーク状態の質量は $M_{bb u \bar{d}} = 10520(10)$ [MeV]であり、83(10) [MeV]の束縛エネ ルギーをもつ強い相互作用の下で安定な状態であることがわかった。

References

N. Ishii, S. Aoki, and T. Hatsuda, Phys. Rev. Lett. 99, 022001 (2007).
 P. Bicudo, J. Scheunert, and M. Wagner, Phys. Rev. D 95, 034502 (2017).

光的測地線の漸近的振る舞いと光子球面の一般化

基礎物理学研究所 宇宙グループ 天羽将也

Abstract We study the fate of photon orbits near future null infinity in general dimensions and show nontrivial behavior appearing only in four-dimensional spacetimes. As an application of these results, we introduce new concepts to link geometric structures around black holes with observation at asymptotic region and clarify their properties.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

過去数年間,電磁波と重力波によるブラックホールの観測がめざましい発展を遂げた.これを踏ま えて本論文では,ブラックホール周辺から観測者に届くまでの電磁波と重力波の大域的振る舞いを調 べ,その応用として,ブラックホール周辺の時空構造と実際の観測量の関係の理解を促進するための 理論研究をおこなう.理想的な時空においては,ブラックホールの少し外側に,観測量と結びつく特 徴的な構造である光子球面が定義される[1].光子球面を現実の時空に適用するために,より一般の時 空でも同様な特徴を持つ定義を導入し,その性質に迫る.

はじめに、ブラックホール周辺の情報と観測の関係を議論するための準備を行う.重力源から十分 離れた現実の観測者は、漸近平坦時空の未来光的無限遠に存在すると近似できる.そこで、観測で重 要となる漸近平坦時空の未来光的無限遠近傍の説明を行う.また、ブラックホール付近の時空構造の 概説として、光子球面の一般化に関する従来のいくつかの試み、および現実のブラックホールをよく 近似するKerrブラックホールの周りの光の軌道について、整理する.

電磁波と重力波の振る舞いの模型として、電磁波や重力波を粒子近似して得られる軌道である光的 測地線を扱う.光的測地線が観測者のもとに届くかどうかについて議論するために、4次元以上の漸近 平坦時空で無限遠近傍から角度方向に出した光的測地線の未来光的無限遠への到達条件に迫った[2]. 無限遠近傍は平坦時空に漸近するにもかかわらず、4次元時空でのみ、未来光的無限遠に到達しない可 能性がある、という非自明な性質を導いた.

漸近領域における測地線の振る舞いについて得られた4次元の特殊性から、4次元時空に限って光子 面が一時的に無限遠近傍に存在しうる、という非自明な性質が明らかになった[3]. 無限遠近傍におけ る光子面の存在条件と、測地線の漸近的振る舞いを特徴づけるテンソルの関係を議論し、測地線の振 る舞いの4次元と高次元の違いが、外的曲率の4次元の特殊性に起因することを見る.光子球面の一般 化の一つである動的横捕捉面についても、光子面と同様に4次元の特殊性を与えることが分かる.

その後、測地線の振る舞いについて得られた結果を用いて、ブラックホール周辺の構造と観測量と を結びつける光子球面の一般化に取り組む.理想的な時空でのみ定義される光子球面と同様、未来光 的無限遠付近と結びつくブラックホールの少し外側にある特徴的な構造を定式化した、内部暗黒地平 面・外部暗黒地平面という2つの概念を新たに導入し、その性質に迫る.特に、内部暗黒地平面と外部 暗黒地平面が実際に光子球面の一般化になっている、などといった必要とされる条件を満たすことを 確かめる.さらに、実際のブラックホールを十分良い近似で記述するKerrブラックホールにおいて、 内部暗黒地平面と外部暗黒地平面の形状を具体的に明らかにする.その結果、Kerrブラックホール周 りの光の周回軌道と結びついていることが分かり、本論文で調べた範囲では、内部暗黒地平面と外部 暗黒地平面が光子球面の一般化に相応しいことが分かった.

- [1] C. M. Claudel, K. S. Virbhadra, and G. F. R. Ellis, J. Math. Phys. 42, 818 (2001).
- [2] M. Amo, K. Izumi, Y. Tomikawa, H. Yoshino, and T. Shiromizu, Physical Review D, 104, 6 (2021).
- [3] M. Amo, T. Shiromizu, K. Izumi, H. Yoshino, and Y. Tomikawa, arXiv: 2110.10917 (2021).

J-PARC E16 実験での飛跡検出に用いる シリコン半導体検出器の性能評価

原子核・ハドロン物理学研究室 有水大地

Abstract The J-PARC E16 experiment are exploring the mechanism how hadron mass is generated. As a part of E16 detector upgrade, we introduced new SSD which is developed at GSI, and performed a test experiment to evaluate performances. In this paper, the result for the test experiment is presented. © *2022 Department of Physics, Kyoto University*

J-PARC E16 実験では、ベクター中間子である φ 中間子の原子核中での質量を測定することで、ハドロンの質量獲得機構を解明する研究を行っている。E16 実験で使用される検出器の中でも、シリコン半導体検出器(SSD)は高い質量分解能を得るために重要な役割を担う検出器である。

今回 E16 実験では、物理データ取得のためのランに向けて、GSI で開発された SSD を新たに導入した (Fig. 1.)。また、その SSD の性能評価のためのテスト実験を、東北大学電子光理学研究センター(ELPH) にて行った。このテスト実験では、E16 に合わせた仕様の読み出しシステムを作成し、GSI で開発され た SSD を E16 グループとして始めて運用し、データ取得を行うことに成功した。



Fig. 1. Newly introduced SSD.

本論文では、新たに導入した SSD の運用に関して、また、ELPH にて行ったテスト実験について示す。 SSD の時間分解能および検出効率について、E16 実験における要求性能、開発時点での想定性能、およ び今回のテスト実験での結果は、Table.1.の通り。

m 11	-	• 1	1		•	- 1						•
'l'ohio	I TOOT	DOTIN	hom: pool	nort	ormonoo	ond	10001111	t nt	tho	toot.	ovnor	mont
Laute.	TTCC	uncu.	assumeu	DCTT	ULILIANUE	anu	LCSUL	υUL			CAUCI	THETTO.
		,		F								

	要求性能[1]	想定性能	テスト実験の結果
時間分解能	4.0 ns	4 ns	$5.55\pm0.07 \text{ ns}^{*2}$
検出効率	96%	95%*1	22.89±0.45 %

*1:ただし、検出する粒子の運動量1GeV/c以上における値。

*2:ただし、この値は複数得られた時間分解能の内の1つ。

時間分解能については、5.55±0.07 ns という結果が得られた。また、検出効率については 22.89±0.4%と、要求性能 96%に比べてかなり低い結果となった。この原因としては、検出器のストリップのう ち半数でデータ取得ができていなかったこと、実験中に機器不良のため十分なバイアス電圧をかけるこ とができず、電荷の収集効率が悪かったことなどが挙げられる。今後は、今回のテスト実験の結果を基 に、新しい SSD の最適な運用条件を模索していくことが求められる。

References

[1] S.Yokkaichi, et al. Technical Design Report for the J-PARC E16. reviced in November 2016.

生成座標法を用いたクラスター崩壊の微視的記述

原子核理論研究室 鵜沢浩太朗

Abstract We apply the generator coordinate method to the cluster decays and incorporate the dynamical effects of the pairing with BCS wavefunctions with an increased pairing strength. We show this model reproduces experimental data for the decay rates with good accuracy. We also point out the importance of the dynamical pairing.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

重い原子核が二つに分かれる核分裂は、原子核の存在限界を決める上で大きな役割を果たすとともに、 r-過程元素合成やエネルギー生産とも関わる重要な現象である。しかし、大振幅集団運動である核分裂 の微視的理論による取り扱いには多くの困難があり、現象論的仮定に基づいた模型の適用や少数の集団 変形の自由度の導入といった簡易化がなされることが多い。

Barranco らが提案したペアホッピング模型はそのような現象論的模型の一つである[1]。この模型では、バンド交差におけるクーパー対の移動(ホッピング)によって多体の波動関数の配位が遷移し、最終的に核分裂に至るという描像が単純化された対相関相互作用とフェルミの黄金律を用いて定式化された。

上述の先行研究を踏まえ、本研究では配位間の結合に着目した微視的な核分裂模型を平均場近似と生 成座標法に基づいて開発した[2]。既存の核分裂模型と異なり、この手法は集団慣性質量を陽に計算し なくてもよい、崩壊中の励起を微視的に取り入れることができる、といった利点を持つ。それに加えて 本手法では、対相関の強度を変化させて得られた BCS 波動関数を用いて Hill-Wheeler方程式を解くこ とで、核分裂中のペアリングのダイナミカルな自由度の効果を取り入れることが可能となる。この手法 は最大結合近似と呼ばれる[3]。

本研究ではこの模型を非対称性の大きい核分裂とみなせるクラスター崩壊に適用した。クラスター崩 壊ではクラスターの形成とポテンシャルバリアの透過がよく分離できると考えられる。そのため本模型 では、生成座標法を用いて分裂前の親核の量子状態を記述し、クラスター配位の生成確率を計算する。 その際に最大結合近似を用いることで、核分裂中に超流動性が強まりクラスター生成確率が大きくなる 効果を取り入れる。続いて、クラスターがポテンシャル障壁を透過する確率をクラスター模型に基づい て計算することで崩壊率を計算することができる。

この模型を²²²Ra→¹⁴C+²⁰⁸Pb、²²⁸Th→²⁰O+²⁰⁸Pb、²³²U→²⁴Ne+²⁰⁸Pbというクラスター崩壊に適用し、計算さ れた崩壊率を実験値と比較した。計算結果から、本手法が観測された崩壊率を精度よく再現すること、 最大結合近似が有効に機能し崩壊率を数倍程度変化させることを確かめた。これらの結果から、生成座 標法に基づいたクラスター形成確率の評価の妥当性と、ペアリングのダイナミカルな自由度を取り入れ ることによる断熱近似を超えた効果の重要性が結論付けられる。

References

[1] F. Barranco, G. Bertsch, R. Broglia, and E. Vigezzi, Nucl. Phys. A 512, 253 (1990).

[2] K. Uzawa, K. Hagino, and K. Yoshida, arXiv:2112.13037 (2021).

[3] K. Hagino and G. F. Bertsch, Phys. Rev. C 102, 024316 (2020).

粒子軌道に基づく ダークマターハロー中心部の密度構造の解析

天体核物理学研究室 柄本耀介

Abstract Using cosmological N-body simulations, we classify the multi-stream structure of cold dark matter haloes by tracking the motion of dark matter particles. We found that the density profile of each stream is well-described by a double-power law profile having cuspy inner and steep outer slopes. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

現在宇宙の標準モデルである ACDM モデルによると、コールドダークマター (CDM)という、重力 相互作用のみする未知の物質宇宙の主要な物質成分である。CDM の密度揺らぎが重力不安定性によっ て成長すると、ダークマターハローと呼ばれる自己重力で束縛された準平衡状態を形成する。ダークマ ターハローの内部構造の定量的理解は CDM の正体に迫る重要なファクターであり、N体シミュレーシ ョンを用いた精力的な研究が行われてきた。

CDM のダークマターハロー内には、マルチストリーム領域と呼ばれる、ハローに降着している複数 のダークマター粒子の軌道が重なり合う領域が存在し、この領域には軌道運動の遠点と近点に向かうダ ークマター粒子が混在している(e.g.,[1])。

Sugiura et al. (2019) [2]はシミュレーション粒子を遠点通過数によって分類し、マルチストリーム領域 を個々のストリームに分解する手法を確立した。これによりマルチストリーム領域の位相空間構造がハ ロー間で類似していることを発見し、その構造を自己相似解[3]と比較した[2]。ただし、彼らはハロー外 縁部の位相空間構造を主として解析したため、ハロー中心部での個々のストリームの構造や密度分布は 未だ不明のままである。

本研究では、Sugiura et al. (2019)[2]で開発された手法を、より高解像度の宇宙論的 N体シミュレーションデータに対して用いるために、新しいハロー中心決定法を開発した。さらに、非平衡ハローとサブハローを解析対象から除外することで、よりロバストにハローの中心を決定できるようになった。この手法を用いて平衡ハローにおけるマルチストリーム構造を、遠点通過数 50 以上の粒子も含めて分解することに成功した。

新たな解析手法に基づき、遠点通過数pによって分類した個々のストリームの密度分布 $\rho(r; p)$ を調べた結果、それらは以下の 3 つのパラメーター S, α, β を用いて同じ関数形で記述できることが明らかになった:

$$\rho(r;p) \propto \left(\frac{r}{s}\right)^{\alpha} \left(1 + \left(\frac{r}{s}\right)^{\alpha-\beta}\right)^{-1}$$

ここで、3つのパラメーターは以下の性質をもつ:

- ① *S*はハローの質量と*p*に依存する。
- ② 密度分布の内側の冪αは、pにもハローの質量にも依らず普遍的に-1~-2の値を持つ。

③ 密度分布の外側の冪βは、pにもハローの質量にも依らず普遍的に-8程度で一定である。

本研究では更に、このフィッティング関数の重ね合わせがダークマターハロー全体の密度分布とよく 一致することも示した。以上の結果より、NFW プロファイル[4]として知られる、ハロー中心部の密度 プロファイルのカスプ構造は、個々のストリームの密度分布が持つスロープの普遍性に起因しているこ とが示唆される。

- [1] Adhikari S., et al., 2014, JCAP, 11, 19
- [2] H. Sugiura et al., 2020, MNRAS, 493, 2765
- [3] Fillmore J. A., Goldreich P., 1984, ApJ, 281, 1
- [4] Navvaro J. F., et al., 1997, ApJ, 490, 493

陽子ドリップライン近傍核¹⁴O における α クラスター状態の探索

原子核・ハドロン物理学研究室 岡本慎太郎

Abstract We measured the α +¹⁰C resonance scattering using a radioactive ¹⁰C beam with the thick target inverse kinematics method to search the α cluster states in ¹⁴O near the proton drip line. We found several candidates of the α +¹⁰C resonances and compared the measured excitation function with the theoretical prediction.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

原子核では、複数個の核子が強く相関してクラスターを構成する状態(クラスター状態)が現れる。 特に、 α 粒子が大きな結合エネルギーを持つため、2 個の陽子と2 個の中性子の間にはたらく α クラス ター相関は、原子核において最も重要なクラスター相関である。これまで α クラスター状態の実験的研 究は安定核とその近傍核に限られており、安定性から遠く離れた原子核では研究が立ち遅れていた。理 論的には Suhara と Kanada[1][2]により、3 つの α 粒子が直線状に並ぶ直鎖状 α クラスター状態が、中 性子過剰核である ¹⁴C における α +¹⁰Be 崩壊閾値の数 MeV 上に現れると予言されていたが、近年、 Yamaguchi ら[3]により α +¹⁰Be 共鳴散乱実験が行われ、断面積の解析から ¹⁴C に直鎖状 α クラスター状 態が存在することが示された。

我々の目的は ¹⁴C の鏡映核であり陽子ドリップライン近傍に存在する ¹⁴O において α クラスター状態 を探索することである。共鳴群法(RGM)と呼ばれる微視的なクラスター模型を用いて計算した ¹⁴C と ¹⁴O におけるクラスター状態のスペクトルを Fig. 1 に示す [4]。理論的に予測された状態のうち、太線で 示した状態は α+¹⁰Be と α+¹⁰C の配位を持つ状態であるが、これらの状態のエネルギーとスピン・パリテ ィは Yamaguchi らが指摘した直鎖状 α クラスター状態と良く一致している。¹⁴O においても、α+¹⁰C 配位 を持つ同様のクラスター状態が現れると予測される。

本研究では、理化学研究所仁科センター において、低エネルギーRI セパレータ CRIB を用いた α +¹⁰C の共鳴弾性散乱実験を実施 した。本実験では Thick Target Inverse Kinematics Method を採用した。ビームに 短寿命 RI である ¹⁰C を用い、ターゲットに ¹⁰C ビームを停止させることの出来る物質 量の He ガスを用いることで、①ターゲッ トにできない短寿命 RI の測定が可能、② 散乱を起こすまでにビームがガス中で次第 にエネルギーを損失するため、1 回の初期 ビームエネルギーで広いエネルギー範囲で の同時測定が可能、③ビームをターゲット 内で停止させることができ、 θ_{cm} (質量中心 系の角度) =180 度 (直接散乱の断面積が最



Fig. 1 ¹⁴C and ¹⁴O spectra predicted by the RGM calculation [4] compared with the experiment [3]. The thick solid lines represent $\alpha + {}^{10}Be(0^+)$ and $\alpha + {}^{10}C(0^+)$ cluster states, while dotted lines represent α cluster states with ${}^{10}Be(2^+)$ and ${}^{10}C(2^+)$ cores.

小、共鳴散乱の断面積が最大)で散乱を測定可能、といった利点がある。本研究では、Thick Target Inverse Kinematic Method を用いて¹⁴Oの励起関数を測定し、理論モデルとの比較を行った。

- [1] T. Suhara and Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. C, 82:044301, (2010).
- [2] T. Suhara and Y. Kanada-En'yo, Phys. Rev. C, 84:024328, (2011).
- [3] H. Yamaguchi et al., Phys. Lett. B, 766:11, (2017).
- [4] M. Sferrazza, T. Kawabata, and H. Yamaguchi, RIBF NP-PAC-19, (2018).

豪州 MeV ガンマ線観測気球実験 SMILE-2+における 高エネルギー事象解析

宇宙線研究室 荻尾真吾

Abstract The origin of the diffuse MeV gamma-ray from the Galactic center region is one of the most important problems in astrophysics. In this study, I developed the high-energy event analysis and confirmed the radiation spreading over more than 30 degrees from the Galactic center by analyzing SMILE-2+ data of ETCC.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

銀河中心領域からの MeV ガンマ線拡散放射の起源解明は宇宙物理の 最重要課題の一つである。この放射モデルとして、宇宙線電子と光子 との逆コンプトン散乱成分が知られるが、実際の観測強度はモデル より1桁大きく、解明には MeV ガンマ線の撮像分光が必須である。 しかし、MeV ガンマ線は確立したイメージング技術が無く、広がっ た放射の観測を困難としている上、多量の雑音が存在することか ら、他波長帯に比べて2桁以上感度が悪く、COMPTELの観測[1]以 来進展していない。COMPTEL はコンプトン散乱を捉えるが、電子の反 跳方向が得られない為、ガンマ線の到来方向を円環状にしか制限でき ず、SN 比の悪い不完全な画像しか得られなかった。

我々はこの状況を打破するべく、電子飛跡検出型コンプトンカメ ラ(Electron-Tracking Compton Camera : ETCC)の開発を行っ ている。ETCC は時間射影チェンバー(TPC)とピクセルシンチレ pr ータアレイ検出器(PSA)から構成され、それぞれ反跳電子、散乱 ガンマ線を検出することで、1 事象毎に入射ガンマ線の運動量を 得られる。2018 年の豪州気球実験 SMILE-2+では、1 日の観測 +180 でありながら、銀河中心からの拡散放射を 10 σ [2]、かに星雲 からの放射を 4.0 σで検出し、ETCC の撮像分光能力の実証に成 功した[3]。但し、この時の解析対象は電子が TPC 内で止まりエ ネルギーを落とし切る事象(低エネルギー事象、Fig. 1. left) であり、反跳電子が TPC を突き抜けて PSA で検出されるような



Fig. 1. (left) low-energy event. (right) high-energy



事象(高エネルギー事象、Fig. 1. right)は解析されていなか Fig. 2. Count rate Map of high-energy events of ETCC from った。低エネルギー事象は PSA でのヒット点が 1 点であるの Galactic center.

に対し、高エネルギー事象は2点であること、高エネルギー事象での反跳電子は殆ど最小電離粒子であ り、低エネルギー事象解析に抵触してしまうことから、高エネルギー事象解析は低エネルギー事象解析 と全く独立になる。本研究では、この高エネルギー事象の解析手法を確立し、今まで PSA のダイナミッ クレンジにより≤2 MeV までに制限されていた ETCC の取得可能エネルギー帯域を、≤5 MeV まで拡張し た。また、TPC の静電場計算とそれを組み込んだ物理シミュレーションを行って、地上較正実験と比較 した。その結果、1 MeV における有効面積、エネルギー分解能、角度分解能はそれぞれ、0.02 cm²、30%、 10° となった。特に、角度分解能について、電子の飛跡が比較的直線になり反跳方向が精度良く決まる ため、低エネルギー事象の 20°(@1 MeV)に対し大幅に良い。更に、高エネルギー事象解析を SMILE-2+ 実験のフライトデータに適用し、銀河中心からの拡散スペクトルと放射源画像を得た(Fig. 2.)。Fig. 2. より、MeV 帯域の拡散放射は、≥ 30°以上に広がって分布することが確認された。

- [1] V. Schöfelder et al., Astron. Astrophys. Suppl. Ser. 143, 145 (2000).
- [2] T. Tanimori et al., J. Phys. Conf. Ser. 1468, 012046(2020).
- [3] A. Takada et al., arXiv:2107.00180

ガスジェット型 ISOL へのレーザーイオン化法導入に向けた エアロゾルに吸着された被輸送原子の分離実験

核ビーム物性学研究室 梶原泰斗

Abstract Preliminary experiments using a simulated gas-jet transport system have been carried out to investigate the feasibility of introducing the laser ionization method into a gas-jet type ISOL. The heating-induced evaporation of PbI_2 and indium was confirmed to be detectable by using a quadrupole mass spectrometer. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

不安定核の生成は、原子核物理学における重要なテーマの一つである。京都大学複合原子力科学研究 所ではガスジェット型オンライン同位体分離装置である KUR-ISOL (Kyoto University Reactor Isotope Separator On-Line) を用いた不安定核ビームの研究を行なっている。KUR-ISOLでの不安定核生成は、① 原子炉での²³⁵U (UF4) への中性子照射による核分裂生成物(FP)の生成、②ガスジェットを用いたFPの輸 送、③表面電離型イオン源でのイオン化、④イオンの引き出しと双極電磁石による質量分離の4段階で 行なう[1]。このうち③のイオン化では、イオン化可能な元素を広げるためにレーザーイオン源の導入 が検討されている。ガスジェット型ISOLでは、生成された不安定核をエアロゾルに吸着させることでその 輸送効率を向上させているが、レーザー照射の際には粒径の大きなエアロゾルが物理的な障害となりう る。よってレーザー照射の前段階で、エアロゾルとそれに吸着した不安定核との分離が課題となる。

ガスジェット型 ISOL ヘのレーザーイオン化法導入の実現可能性を検討するため、京都大学複合原子 カ科学研究所で開発されたガスジェットシステムの模擬装置[2]において、エアロゾル(ヨウ化鉛;PbI₂) に被輸送原子(インジウム)を吸着させて輸送した後、加熱による分離を試み、レーザー照射による被輸 送原子のイオン化の可能性を検証する。本研究では、被輸送原子の加熱による分離を検知する手法の検 討のため、吸着の前段階である PbI₂とインジウムそれぞれを加熱により蒸発させ、約 10 cm 上方に設置 した四重極型質量分析装置(QMS)で検出できるか確認した。

PbI₂はセラミックヒーターの設定値 1000℃での加熱でヨウ素 I のマスピークを検出できた。さらに連続して約 200 min の測定を行なうことで、加熱・蒸発による PbI₂の減少率を推定した(Fig. 1)。インジウムはセラミックヒーターによる加熱ではマスピークを検出できなかったが、カンタル線(鉄クロム 30) を利用したヒーターに交換し設定値 700℃まで加熱することでマスピークが検出された(Fig. 2)。

以上より、模擬装置で実際に生成された輸送物質からの被輸送原子の分離も QMS で確認できること を示唆することができた。また、レーザー照射実験を検討する上で必要な情報も提供できた。



Fig. 1. Decrease in the amount of PbI_2 detected



Fig. 2. Mass spectrum of indium at 700°C

^[1] A. Taniguchi, M. Tanigaki and Y. Ohkubo, Nucl. Instr. and Meth. **B317**, 476-479 (2013) [2] 小川雄司,京都大学大学院理学研究科修士論文 (2018)

T2K 実験新型ニュートリノ検出器のための 波長変換ファイバー品質管理システムの開発

高エネルギー物理学研究室 川上将輝

Abstract In T2K experiment, a new neutrino detector SuperFGD is being developed to search for the CP violation in neutrino oscillation. About 55000 wavelength shifting fibers are used to read out signals from the detector. I developed a system to check and control the quality of the fibers. © 2021 Department of Physics, Kyoto University

宇宙のバリオン-反バリオン非対称性は、物理学の未解決問題の一つである。この非対称性は宇宙初期に生成されたと考えられており、レプトンでの CP 対称性の破れを検証することが有力なアプローチである [1]。T2K 実験は、ニュートリノ振動の精密測定を目的としており、現在 CP 対称性が破れていることを 2σ の確度で示唆している [2]。より高精度の測定のための研究開発の一環として、新しいニュートリノ検出器 SuperFGD の導入が計画されている。Super-FGD は 1 cm3 角のプラスチックシンチレータキューブを約 200 万個からなり、そのキューブに開けられた穴に蛍光を読み出すための波長変換ファイバーが挿入されている。この検出器を建設する際、挿入したファイバーがキューブの配列の 歪みによって抗力を受け損傷することが懸念される。損傷したファイバーは検出器の性能を低下させるため、それを挿入と並行して検知し、直ちに交換しなければならない。

そこでファイバーの一方の端面から光を照射し、もう一方から光を読み出すことでその光量の減衰か らファイバーの損傷の程度を検知するシステムを開発した。この品質管理の試験は検出器建設の最中に 行われるため、検出器の外層は取り付けられておらず、遮光が施されていない状態である。そこでバッ クグラウンド光が存在する状態でも機能する光検出器と、高強度の光を発する光源の開発を行った。

光検出器にはファイバーとのアラインメントが取りやすい、SuperFGD 実機に用いられるものと同様の基板にマウントされた半導体光検出器 MPPC を利用した。MPPC は本来 106 程度の高い増倍率を持つが、印加電圧を下げて増倍率が < 100 程度の低い状態で動作させることで、本システムの光源からの 光のみを取得できる検出器として動作することを確認した。光源にはバックグラウンド光よりも高強度 でかつ立ち上がりの速いパルス状に発光することが要請される。これは市販の電源にから直接電流を供 給しても達成できないため、トランジスタを用いてスイッチングを行う LED 制御回路を設計した。 この試験は、SuperFGD に用いられる約 55000 本のファイバー全てに行う必要がある。作業性も重視し、

この試験は、Superfor に用いられる約 35000 本のファイハー主てに打り必要がある。作業性も単視し、 システムの取り付けからデータ取得までの過程を素早く行えるような手法の検討も行った。

このシステムの測定精度を検証した結果、光量の不定性の相対的な標準偏差は 17.5%であり、50%程 度の光量の減衰を引き起こすファイバーの傷を検知するのに十分な性能を持つことを確認した。また、 実際の検出器を模したモックアップにおいてこの試験が可能であることを示し、損傷したファイバーを 検知可能であることを示した。



Fig. 1. LEDs mounted on a printed circuit board. **References**

- [1] S. Pascoli et al, Physical Review D 75, 8 (2007).
- [2] K. Abe et al, Nature 580, 339 344 (2020).



Fig. 2. Whole of the system.

アノマリーの数学的基礎から現象論的応用まで

基礎物理学研究所 川平将志

Abstract Anomalies are one of the most powerful tools to analyze quantum field theories. Recently it was shown that anomalies can be classified by Anderson dual of bordism groups. We review that this fact is useful for studying phenomenological models such as the Standard Model of particle physics. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

場の量子論の非摂動効果を解析することは、クォークの閉じ込めを始めとする様々な物理現象の理解 につながるため、現代物理学における重要なテーマの1つである。特に本発表では非摂動効果の解析の 主たるツールの1つであるアノマリー(Anomaly)の最近の進展について紹介する。

アノマリーの歴史は古く、元々は Noether 保存則の量子化による破れとして発見されたが、長い歴史の中でその概念は一般化されてきた。その結果、アノマリーは主に次の3つの応用を持つに至り、現在では理論的にも・実験的にも重要な意味をもつ概念となっている。(右側は関連する理論・現象を表す。)

- 1. 理論の無矛盾性の確認(ゲージ・アノマリーの相殺)…素粒子の標準模型や超弦理論の確立
- 2. 強結合物理の解析('t Hooft アノマリー一致)…中性 π 粒子の崩壊
- 3. カレントの破れ(ABJアノマリーによる Noether 保存則の破れ)…バリオン数・レプトン数非保存

近年様々な概念的進歩があり、d 次元理論のアノマリーは d+2 次のボルディズム群の Anderson 双対と 対応することがわかった。(下式の右辺が d+2 次のボルディズム群の Anderson 双対を表す。)

$$[\text{Anomaly}]_d = (I_{\mathbb{Z}}\Omega)^{d+2}$$

この関係は、d 次元のアノマリーが d+1 次元のトポロジカルな場の量子論(TQFT)と対応するという事 実(アノマリー流入)と TQFT がボルディズム群の Anderson 双対で分類されるという事実[1]より導か れる。この関係を用いることで、あらゆるアノマリーについて系統的に取り扱うことが可能になり、近 年続々と新しい知見が得られている。また過去に知られていた事実についても、この対応関係を用いる ことで非自明な事実が発見されている。

例えば、標準模型のゲージ・アノマリー相殺にも非自明な事実が存在する。なぜなら、標準模型のゲージ群には中心で割るだけの不定性が存在するためである。この不定性は現象論的にも意味があり、例 えば大統一理論の低エネルギー理論として実現する標準模型は、特別な割り方のものに限られる。しか し、非摂動効果も含めたゲージ・アノマリーは中心によって変化するため、その相殺を系統的に確認す ることはかつて困難であった。そこで本発表では、アノマリーとボルディズム群の Anderson 双対との関 係を用いることで、中心の割り方に依存せずゲージ・アノマリーは相殺することを示す[2]。また、この 議論の詳細を追うと、背景ではコホモロジーの Steenrod 代数の加群構造が重要な役割を果たしているこ とがわかる。



Figure 1. Anomaly inflow

References

[1] D. S. Freed and M. J. Hopkins, "*Reflection positivity and invertible topological phases*", Geom. Topol. 25, 1165-1330 (2021).

[2] I. García-Etxebarria and M. Montero. "Dai-Freed anomalies in particle physics" JHEP 08, 003 (2019).

宇宙最初の cold accretion 発現と 超大質量星形成の可能性

天体核研究室 喜友名正樹

Abstract We study when and how the "cold accretion" emerges in the early universe with analytical calculations and cosmological simulations. We show that the cold accretion first appears in the first-galaxy-scale halos, which may lead to the formation of supermassive stars that potentially seed supermassive black holes.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

近年のクエーサー観測から、z = 6-7(宇宙年齢~8億年)の宇宙初期においても $10^9 M_{\odot}$ の超大質量ブラックホールが数十例存在することが示唆されている[1]。このような宇宙初期までにどのように超大質量ブラックホールが形成されるかは、理論天文学の重要な課題の一つである。その仮説の一つに、金属元素及び水素分子のない初代銀河スケール($z = 10-20, M_{halo} \sim 10^{7-8} M_{\odot}$)のハローで、通常の初代星(~ $10^{1-3} M_{\odot}$)よりも重い超大質量星(~ $10^{5-6} M_{\odot}$)が形成され、超大質量ブラックホールへと成長するというものがある[2]。この超大質量星を形成するモデルの一つに、ハローの外から来たガス降着流がハロー外層を突き抜けて中心付近まで落ちることを仮定すればハロー中心のガス雲が高温高密になり、粒子同士の衝突によって水素分子を解離させて超大質量星が形成できるとするモデルがある[3]。

銀河形成($M_{halo} \sim 10^{10-12} M_{\odot}$)の文脈では、あるハロー質量上限($M_{halo} \simeq 10^{11} M_{\odot}$)より軽いハローでは、 ガス降着流がH,He原子などの放射冷却で効率よく冷えることで熱的圧力が失われ、ハローの中心付近ま で自由落下することが良く知られている[4]。いわゆる冷たい降着流(cold accretion)である。初代銀河ス ケール($z = 10-20, M_{halo} \sim 10^{7-8} M_{\odot}$)に関しては、先行研究の宇宙論的シミュレーションの中には cold accretionがハロー外層を突き抜けるとするもの[5,6]がある一方で、cold accretionに否定的なもの もあった[7]。そもそも、初代銀河スケールのハローにおいてcold accretionがどのように起こるのかにつ いては、これまで十分な議論がなされていなかった。

本論文では、[3]の超大質量星形成モデルの妥当性について議論するため、初代銀河スケールのハローでcold accretionが起こるための条件について議論した。まず、[4]の球対称モデルを用いて解析的な計算を行なった。この結果、cold accretionが起こる条件には、これまで知られていたハローの質量上限 $M_{halo} \leq 10^{11} M_{\odot}$ に加えてz = 10-20で $M_{halo} \geq 4 \times 10^7 - 1 \times 10^8 M_{\odot}$ の質量下限が存在することが明らかになった。但し球対称モデルでは、宇宙の大規模構造形成に伴ってガスが宇宙平均より高温高密のフィラメントを形成するなどの非球対称的効果が無視されているので、降着ガスの温度・密度をいくつか手で与えて疑似的に非球対称性を取り入れ、この場合のcold accretionが起こる質量下限も計算した。

次に、N体+SPH法のコード"Gadget-3"[8]を用いて宇宙論的シミュレーションを行なった。その結果、 z = 10-20では球対称モデルで得られた質量下限より0.3-0.5倍軽い $M_{halo} \simeq 2 \times 10^{7-5} \times 10^{7} M_{\odot}$ のハローにおいてcold accretionが起こり始めることが分かった。更にシミュレーションで得られたガス降着流の 温度・密度を球対称モデルに手で設定することで、cold accretionが起こり始める現実的な質量下限が準 解析的に得られた。この結果は、先行研究及び今回のシミュレーションの結果と非常によく一致した。 これらの結果から、 $M_{halo} \gtrsim 10^{7-8} M_{\odot}$ のハローでは[3]のモデルが成立する可能性が示唆された。

References

[1] K. Inayoshi, E. Visbal, & Z. Haiman. ARAA, 58 (2020), 27-97.

- [2] V. Bromm & A. Loeb. ApJ, 596, 1 (2003), 34-46.
- [3] K. Inayoshi & K. Omukai. MNRAS, 422, 3 (2012), 2539-2546.
- [4] Y. Birnboim & A. Dekel. MNRAS, 345, 1 (2003), 349–364.
- [5] J. H. Wise & T. Abel. ApJ, 665, 2 (2007), 899–910.
- [6] T. H. Greif et al. MNRAS, 387, 3 (2008), 1021-1036.
- [7] R. Fernandez et al. MNRAS, 439, 4 (2014), 3798–3807.
- [8] V. Springel. MNRAS, 364, 4 (2005), 1105–1134.

変形された T^{1,1}時空における 古典カオス的弦のダイナミクス

素粒子論研究室 久代翔大

Abstract We study classical string dynamics on a deformed T^{1,1} background [1]. We reduce the system to a set of ordinary differential equations with a winding string ansatz. We find a classical chaos by numerically calculating Poincaré sections and evaluate the maximally Lyapunov exponent. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

素粒子論における最も重要な研究課題の一つが AdS/CFT 対応である[2]。この対応は反 de Sitter 時空の超弦理論と超対称ゲージ理論の異なる2つの理論の等価性を主張している。この対応を用いて、量子重力理論をゲージ理論で記述できることが期待されている。この対応のうち、非常に興味深い例が「AdS₅×S⁵空間上の超弦理論」と「4 次元 \mathcal{N} = 4超対称ゲージ理論」の対応関係である。この対応は超

弦理論において、閉弦と開弦の別々の立場を考えることで考えられた。両理論とも可積分構造を持っていて厳密な解析が可能なため、対応関係の理解が進んだ。 上記の対応関係の一般化として、S⁵を佐々木-Einstein 多様体X⁵に置き換えることが可能である。特に 計量が明三的にまける例がT11でたる。AdS x T11の開上の認さ理論はX5 1の認知状態、ご理論に対

計量が明示的に書ける例が $T^{1,1}$ である。 $AdS_5 \times T^{1,1}$ 空間上の超弦理論は $\mathcal{N} = 1$ の超対称ゲージ理論に対応している[3]。 $AdS_5 \times T^{1,1}$ 空間上の弦理論の古典的可積分性も議論されてきたが、Basu と Pando Zayas によって数値的にカオスが存在することが示された[4]。

最近、Arutyunov、Bassi、Lacroix によって、変形されたT^{1,1}背景上の非線形シグマ模型が考えられた。 そして、この背景中に含まれる Kalb-Ramond 2 形式がある値(臨界値)をとるときに可積分であることが 示された[1]。一方、非臨界値の場合は可積分でないと予想されるが定かではない。我々はこの系の運動 方程式を、巻き付いた弦のアンザッツを課して、常微分方程式系に簡略化した。そして、数値的に Poincaré 断面と最大 Lyapunov 指数を計算した。非臨界値の場合は、様々な初期条件において非周期的[Fig.1]で初 期値に鋭敏[Fig.2]な結果が得られ、よってカオス的ダイナミクスの存在を示した[5]。

本修士論文では研究に必要な基礎の理解から始まり、T^{1,1}時空や変形されたT^{1,1}時空[1]のレビューを 行う。最後に我々の論文[5]の詳細について述べる。



- [1] G. Arutyunov, C. Bassi and S. Lacroix, "New integrable coset sigma models," JHEP 03 (2021), 062.
- [2] J. M. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. 2 (1998) 231 [Int. J. Theor. Phys. 38 (1999) 1113].
- [3] I. R. Klebanov and E. Witten, Nucl. Phys. B 536 (1998) 199-218.
- [4] P. Basu and L. A. Pando Zayas, Phys. Lett. B 700 (2011) 243-248.
- [5] T. Ishii, S. Kushiro, and K. Yoshida, JHEP 05 (2021) 158.

重イオン蓄積リングにおけるビームリサイクリングのため の内部アクティブ標的の開発

ビーム物理研究室 久世啓太

Abstract I developed a prototype of an Internal-Active-Target (IAT) for the RUNBA. The IAT utilizes secondary electrons emitted from a target to observe both the position and the timing when an ion-beam passes through. In this paper, I report the development process, show achieved results, and discuss a feasibility of IAT. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

不安定原子核(RI)研究、特に RI の核反応研究を行う上で今後ますます要求される一次ビームの大 強度化に伴う膨大な電力消費と高レベル放射線発生といった問題を克服し、なおかつ数えられるほどの 稀少な RI であっても精密な核反応研究を実現するための手法としてビームリサイクリングが提案され ており、京都大学化学研究所(京大化研)と理化学研究所・仁科加速器科学研究センター(理研仁科) は共同研究によりその技術確立を目指している。ビームリサイクリングとは、内部標的を搭載した蓄積 リングを周回する RI が、たとえ標的と反応せずに通過しても核反応が起こるまで何度でも標的に衝突 させる技術で、稀少 RI を無駄なく実験に用いる「有効利用」という新しい概念を RI 核反応研究にもた ら技術である。現在、ビームリサイクリングの要素開発を行うために化研で所有していた重イオン蓄積 リング sLSR を理研に移設し、Recycled-Unstable-Nucler Accumulator (RUNBA) として再建する計画が 進められている。RUNBA は ISOL 型不安定核生成分離機(ERIS)に接続され、ERIS からの1価イオンは RI イオン多価化装置 (チャージブリーダー) によって多価化されたのちに RUNBA に入射されゆっくりと 加速される。加速が完了した後に内部標的を挿入して核反応実験が行われるが、このときに標的通過の 際に生じるエネルギーロスとエネルギー分散、および角度分散を補償しなければ RI ビームは 1ms 足ら ずで失われてしまう。分散効果によるエネルギー広がりとエミッタンスの拡散を補償するには標的から ビーム情報を取得し、それを元にビームにフィードバックをかける技が必要である。そのため、内部標 的から標的通過時の「位置情報」と「時間情報」を取り出すための機構が必要である。

本研究ではそのような要求を満たす構造を有した内部標的の実現のため、イオンの位置情報と時間情報を、標的-イオン衝突時に生じる二次電子を電磁場による輸送によって検出する構造を持った内部アクティブ標的の開発と性能評価を行った。位置情報・時間情報の検出にはMicro-channel plate (MCP) と、そのアノードとして銅線ワイヤーの両端の信号時間差を利用してワイヤーのどの位置に入力信号が



Fig. 1. 2D histogram of X_layer vs Y_layer of delay-line timing information.

来たかを識別するディレイライン装置2層(X層とY層) を組み合わせた装置を作成して行った。また、二次電子 の輸送機構については平板電極を等間隔で並べることに よって生じさせた一様電場とヘルムホルツコイルによる 一様磁場によって行った。α線源を用いてビームを模擬 し、MCP-ディレイライン装置で位置検出が行われている ことと二次電子の静電磁場による輸送に成功しているこ とを確認した。Fig.1.は格子状の穴を空けたマスクを装 着した時の二次元マップでありディレイライン装置が位 置検出機能を果たしていることが確認できる。装置開発 は完成に至ってはいないが、本論文ではゼロからの開発 したそのプロセスと作り上げた装置の性能試験実験の結 果を述べ、明らかになった課題などを議論し、今後の実 用性について論ずる。

Horndeski理論における重力波の伝搬

基礎物理学研究所 窪田圭一郎

Abstract The propagation of gravitational waves is affected by the inhomogeneity of matter distribution and the non-linear nature of dark energy in the universe. We study the propagation of gravitational waves in the Horndeski theory through a background space-time fluctuating over variation scales longer than the wavelength, using the geometric optics approximation. We found that scalar and tensor perturbations are decoupled under certain conditions.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

2015年にLIGO[1]によってその存在が確かめられた連星合体起源の重力波の観測は高密度天体や強重 力場の研究のみならず宇宙論研究においても重要である.特に重力波振幅から決まる光度距離に加え て、電磁波観測などから赤方偏移が特定できる重力波源は標準音源と呼ばれ、宇宙論パラメータの測 定などに利用できるため、宇宙論研究において重要な検証手段である.多くの研究では空間的に一様 等方な FLRW 時空を背景時空とした重力波の伝搬を調べているが、現実の宇宙は少なくとも銀河団より も小さなスケールでは一様ではないため光度距離には宇宙の非一様性の寄与も入る.そのような寄与 は従来無視されてきたが、将来重力波検出器の感度が向上すれば重力波源のパラメータ推定などに影 響する可能性がある.またそのような非一様性が観測できれば、新たな重力波を用いた宇宙論の検証 手段になりえる.

数あるダークエネルギーモデルの中には一般相対性理論の拡張によって後期加速膨張の説明を試み るモデルもある.ある種の一般相対性理論の拡張では電磁波の伝搬は変更せず,重力波の伝搬のみが 変更され,重力波と電磁波それぞれから見積もられる光度距離が一致しないことを予想する.またス カラー場を加えることによって後期加速膨張を説明しようとするダークエネルギーモデルもある.そ の様なスカラー場と重力波が伝搬中に相互作用することにより,ΛCDM モデルにおける重力波の伝搬と は異なる伝搬をする可能性もある.モデルの違いによる重力波の伝搬の変化を調べる研究は数多くあ るが,そのほとんどが FLRW 時空を背景時空として行われていて,宇宙の非一様性を加味した研究は少 ない.

以上の理由により、ダークエネルギーモデルの違いと宇宙論的スケールの揺らぎの両方を考慮した した場合の重力波の伝搬を明らかにする研究が必要である.そこで本研究では多くのダークエネルギ ーモデルが含まれている Horndeski 理論[2]において、宇宙論的スケールで変化するゆらぎをもつ背景 時空を伝搬する重力波とスカラー場摂動に着目した.本研究ではまず、背景時空のゆらぎの変化スケ ールに比べて波長が短い摂動の振る舞いを調べるために幾何光学展開を行い、その最大のオーダーを 調べた.これにより一様等方でない背景時空においても、幾何光学展開の最大のオーダーではある条 件のもとでスカラー型摂動とテンソル型摂動は結合しないことがわかった.さらにそれら摂動の伝搬 速度やスカラー型計量摂動振幅とスカラー場摂動振幅の関係も導出した.

References

[1] LIGO Scientific and Virgo Collaborations, "Observation of gravitational waves from a binary black hole merger", *Physical review letters* 116 (2016) 061102.

[2] G. W. Horndeski, "Second-order scalar-tensor field equations in a four-dimensional space", *International Journal of Theoretical Physics* 10 (1974) 363.

X線精密分光解析で明らかにする超新星残骸 J0453.6-6829 の特異な強度の禁制線とその放射過程

宇宙線研究室 小柴鷹介

Abstract We perform a detailed X-ray spectral analysis of Supernova Remnant J0453.6-6829 with Reflection Grating Spectrometer onboard XMM-Newton. We find an anomalously higher forbidden-to-resonance ratio of OVII than expected from a typical thermal plasma model. The high ratio is explained by considering a charge exchange emission. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

超新星残骸 (SNR) の X 線スペクトルから元素組成比やプラズマの温度、電離状態などを正確に測定す るためには放射過程を明らかにする必要がある。近年の X 線精密分光観測によって、高い He 様イオン K α 線の共鳴線に対する禁制線の強度比 (f/r 比) が複数の SNR から報告されており[1]、これらは典型的 な SNR の熱的プラズマモデルでは説明できない。この異常に高い f/r 比の原因は、電荷交換 (CX)[2]や 共鳴散乱 (RS)[3]の影響である可能性が示唆されている。しかし、どのような SNR (周辺環境、年齢、 親星の爆発タイプ、形態など) で CX や RS が起きるのかは明らかになっていない。我々は、He 様酸素 K α 線に着目し、禁制線や共鳴線を分光できるエネルギー分解能を持つ XMM-Newton 衛星搭載の反射型回 折格子 (RGS)を用いて、SNR J0453.6-6829の解析を行った。SNR J0453.6-6829の先行研究[4]では、熱 的プラズマのみのモデルフィットにおいて禁制線に大きな残差を示した。我々は SNR J0453.6-6829の RGS スペクトル解析を行い、得られた f/r = $1.06^{+0.09}_{-0.10}$ は多温度の熱的プラズマだけでは説明がつかな いことを示した。そこで我々はまず、高い f/r 比の原因として RS の検証を行った。RS の場合、振動子 強度の大きい共鳴線が散乱されることで共鳴線の強度が小さくなり、それゆえ f/r 比が大きくなる。ま た、RS の効果は SNR の形態が非対称のときに限りスペクトルに現れる。SNR J0453.6-6829 は比較的対 称な形態をしていることから RS の可能性は低いと考えられる。次に我々は、f/r 比を説明する物理過程 として CX を検証した。CX の場合、プラズマ中のイオンが中性物質の電子と再結合することによって禁

制線の強度が大きくなる。そのため SNR に おける典型的なプラズマの熱的放射に比べ て、f/r 比が大きくなる。熱的プラズマに CX の効果を加えたモデルでフィットをし たところ、RGS スペクトルをよく再現した (Fig.1)。前述のようにプラズマと周囲の 中性物質との相互作用で CX が期待される ため、SNR J0453.6-6829の周辺環境につい て ATCA&Parkes の電波データを用いて解析 したところ、SNR J0453.6-6829 が HI 雲と 衝突していることがわかった。よって、SNR J0453.6-6829 における異常に高い f/r 比 は、密度が大きい周辺環境に存在する HI 雲 中の中性物質と SNR のプラズマ中のイオン との相互作用で生じる CX で説明できるこ とがわかった[5]。我々の結果は周辺密度が 高い環境にある SNR で CX が検出される可 能性が高いことを示唆している。



Fig. 1. The RGS spectrum of SNR J0453.6-6829. The colored curves indicate the contributions of the low-temperature (blue), high-temperature plasmas (orange), and the CX component (magenta). The middle and lower panels show residuals from the model without CX and with CX.

References

[1] Uchida, H., et al., ApJ, **871**, 234 (2019). [2] Katsuda, S., et al., ApJ, **756**, 49 (2012). [3] Amano, Y., et al., ApJ, **897**, 12 (2020). [4] Haberl, F., et al., A&A, **543**, A154 (2012). [5] Koshiba, Y., et al., submitted to PASJ

74 - 110 μ eV/c² 質量領域における ダークマターとしてのダークフォトンの探索研究

素粒子物理学研究室 小髙駿平

Abstract We search for dark photon cold dark matter (DP-CDM) in the mass range of $74 - 110 \,\mu\text{eV/c}^2$. We developed a cryogenic receiver for the detection of conversion photons from DP-CDM. We did not observe any significant signal, and we set upper limits $\chi < 0.5 - 1.6 \times 10^{-10}$ at 95% confidence level. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

宇宙の構成要素を理解することは、素粒子物理学と天文物理学において重要な課題である。宇宙の全 エネルギーの25%はダークマターと呼ばれる未知の成分が占めている。近年、ダークマターの候補とし てダークフォトンの研究が注目されている。ダークフォトンは電磁場とわずかに相互作用するという性 質を持つため、電磁場の境界面をダークフォトンが横切る際に観測可能な実光子へと転換する。ただし、 その転換光の強度は極めて小さい。本研究では、電磁場の境界面として金属板を用いてダークフォトン を実光子に転換させ、その転換光を探索することでダークフォトンを検出する実験を行った。このよう な実験により、ダークフォトンと電磁場の結合定数(χ)とダークフォトンの質量(m_{DP})の測定、もしく はそれらに制限を与えることができる。この研究のために、宇宙背景放射の観測技術を応用したミリ波 分光装置を開発した。特に、熱放射ノイズを大幅に減らす工夫により、先行実験よりも優れた感度を実 現した。2021年11月29日から2021年12月10日の間に、74 – 110 μ eV/c²の質量領域に対してダー クフォトン探索を行ったが、統計的に有意な信号は見つからなかった。この探索で、ダークフォトン信 号が無いという仮定のもと局所的 p 値が低かった質量領域について、念の為統計を10 倍に増やした追 加測定を2022年1月17日に行った。ここでも、有意な信号が得られないことを再確認した。この結果 より、結合定数に χ < 0.5 - 1.6 × 10⁻¹⁰の上限を信頼度 95%で設定した。この制限は宇宙観測から の制約を超える水準であり、これまでで最も厳しい制限値である(図 1)。



図1本研究で設定した、信頼度95%の結合定数の上限を赤の領域で示す。質量領域が近いその他の制限(宇宙論的制約(青)、太陽寿命(桃)、Haloscope実験(緑)、先行実験(黒))も示す[1,2]。

References

[1] P. Arias et al., "WISPy cold dark matter", JCAP 1206 (2012) 013, [arXiv:1201.5902].

[2] N. Tomita et al., "Search for hidden-photon cold dark matter using a K-band cryogenic receiver", JCAP 09 (2020) 012, arXiv:2006.02828 [hep-ex].

超伝導ストリングの量子的安定性

素粒子論研究室 佐地 宏太

Abstract We study the quantum stability of a superconducting string. The superconducting string can affect the cosmological evolution of the string network and allow a string loop to become a stable configuration, which is called a Vorton. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

素粒子標準模型は TeV スケールまでの物理を非常にうまく記述していることがこれまでの実験から分かっている。しかしながら未解決問題が数多く残されており、そのうちの一つとして暗黒物質問題がある。暗黒物質の候補と考えられているものとして、Vorton がある。Vorton は超伝導ストリングがループ状となっているものであって、ストリング上を流れるカレントキャリアの角運動量によってループの収縮に抵抗して安定な配位として存在できるのではないかと考えられた[1]。

超伝導ストリングや Vorton の安定性を調べることは重要である。というのも、超伝導ストリングの 存在はストリングネットワークの進化に影響を与え、Vorton が安定であった場合には暗黒物質の候補と なり得るからである[2]。

実際に、Vortonの配位の安定性に関する研究や、振動しているループ状の cosmic stringの寿命に関 する研究がなされているが[3,4]、これまでの多くの研究は古典的なアプローチにとどまったものであ った。しかし、近年超伝導ストリング上の fermion ゼロモードの安定性について新たな研究がなされた [5]。この研究は、素粒子標準模型に残された未解決問題のうちの一つである強い CP 問題に対する Peccei-Quinn 機構を実現する有力な模型として知られる Kim-Shifman-Vainshtein-Zakharov 模型 (KSVZ 模型)の枠組みで超伝導ストリング上のゼロモードを量子的に扱い、その崩壊率を計算するというもの である。超伝導ストリング上のゼロモードが安定でない場合には、ストリングは超伝導状態ではなくな り、その結果ストリングの張力によって収縮する。この意味で超伝導ストリングの安定性について調べ ることができる。この研究では超伝導ストリングが曲がっている場合には、その曲がりのモードを運動 量として獲得することでゼロモードから他のモードに変化して、その後崩壊するという過程が考えられ た。また、この結果を Vorton に適用すると超伝導ストリング上を流れる fermion ゼロモードが高エネ ルギーである場合には宇宙年齢よりも短寿命であるといった結果が得られた。この結果は Vorton が暗 黒物質であるために必要とされる安定性の条件に反し、KSVZ 模型の枠組みでは Vorton は暗黒物質と考 えることはできないということを意味している。さらに、超伝導ストリング上のチャージキャリアは fermionic なものだけではなく、bosonic なものも考えることができる。実際に近年議論されたものと して、KSVZ 模型と同じく Peccei-Quinn 機構を実現する有力な模型として知られる Dine-Fischler-Srednicki-Zhitnitsky 模型(DFSZ 模型)の枠組みで超伝導ストリングが考えられた[6]。

本修士論文では、様々な模型で考えられてきた超伝導ストリングについてまとめた後、ストリングの 意義や Vorton の古典的な安定性についての研究をまとめる。その後、超伝導ストリング上のゼロモー ドの安定性について、カレントキャリアが fermion である場合の研究をレビューする。そして最後に、 カレントキャリアが boson である場合のゼロモードの安定性について議論を行う。

References

[1] R. L. Davis and E. P. S. Shellard, COSMIC VORTONS, Nucl. Phys. B 323 (1989) 209-224.

[2] C. J. A. P. Martins and E. P. S. Shellard, Limits on cosmic chiral vortons, Phys. Lett. B 445 (1998) 43-51.

[3] J. Garaud, E. Radu, and M. S. Volkov, Stable Cosmic Vortons, Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 171602.

[4] A. Vilenkin and E. P. S. Shellard, *Cosmic Strings and Other Topological Defects*. Cambridge University Press, 7, 2000.

[5] M. Ibe, S. Kobayashi, Y. Nakayama, and S. Shirai, *On Stability of Fermionic Superconducting Current in Cosmic String, JHEP* **05** (2021) 217.

[6] Y. Abe, Y. Hamada, and K. Yoshioka, Electroweak axion string and superconductivity, JHEP 06 (2021) 172.

LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けた中性長寿命の 新粒子探索トリガーの開発

高エネルギー物理学研究室 佐野高嶺

Abstract Long-lived particles are predicted in many theories beyond the Standard Model. We developed trigger algorithms for LHC-ATLAS experiment to detect displaced vertices, arising from neutral long-lived particles. The algorithms are tested by simulations, showing that they have required performance.

© 2022 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一方でダークマターの候補粒子が含まれていないなどの問題も残されており、今後は標準模型を超えた物理(BSM)の探索が重要である。欧州原子核研究機構に建設されたLHC加速器は、世界最高エネルギーでの陽子衝突実験によってBSM事象を直接探索する。

ATLAS 実験では LHC 加速器で生成した事象を観測することで、これまでに広い範囲の BSM とそれらが 予言する新粒子を探索した。しかし BSM の兆候は見つかっておらず TeV エネルギースケールの BSM には 強い制限がかけられた[1]。一方で超対称性理論や Hidden-Sector の理論など[2]が予言する長寿命粒子 (Long-Lived Particle, LLP)については棄却しきれておらず、近年 BSM の候補として議論されている。

BSM を探索する際、興味のある事象は低確率でしか発生しないことに加え発生する陽子衝突の全ては 記録できないため、記録する事象を効率的に選ぶトリガーシステムが重要である。陽子衝突で生じるほ とんどの粒子は衝突点から飛来するため、ATLAS 実験の従来のトリガーは衝突点由来の粒子に注目して 事象を選別していた。これに対し LLP は衝突点から少し飛行した後で崩壊するため、衝突点から離れた 位置から粒子を放出する。従来のトリガーはこうした粒子に対して感度が低く、LLP 探索の感度を制限 していた。

我々は、中性のLLPの崩壊によって生じる Displaced Vertex (DV) と呼ばれる事象(Fig. 1)を直接検出 するトリガーを開発することで中性 LLP 探索の感度を上げる。トリガーでは約 400 ms 以内での高速な 選別が求められる。DV の検出において、特に陽子衝突点以外から飛来する粒子の軌跡の再構成と崩壊点 の再構成には時間がかかる。我々の DV トリガーは、まず機械学習を用いた大まかな事象選別を行い、 その後選別された事象のみで高精度な選別を行う、という2段階での選別により高速かつ高精度な選別

を目指す。本研究では1段階目の機械学習を用いた選別 アルゴリズムの開発と2段階目の選別で求められる高速 な崩壊点再構成アルゴリズムを開発し、シミュレーショ ンによる性能評価を行った。

1 段階目のアルゴリズムではどちらの再構成も要求せ ず、検出器から直接得られるヒット点の数を機械学習の 入力変数とすることで高速な選別を実現した。またシミ ュレーションによる性能評価の結果、記録レートを保ち ながら効率を従来のトリガーから 9.3 %改善したことを 示した。

2 段階目で要求される高速な崩壊点再構成アルゴリズ ムは、オフラインの崩壊点再構成アルゴリズムをベース に手順を簡略化することで高速化した。平均 150 ms で



Fig. 1. A schematic diagram of a displaced vertex.

動作し、DVの崩壊点を高い効率で再構成できることをシミュレーションによって確認した。

これにより 2022 年 5 月からの Run-3 では LLP の探索感度の拡大が期待できる。今後はこれらのアル ゴリズムを実装し、データを取得するための検証を進める。

References

[1] A Ventura and on behalf the ATLAS Collaboration, 2020, J. Phys.: Conf. Ser. 1586 012029.

[2] Juliette Alimena et al 2020 J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 47 090501

SU(3) 三角格子反強磁性体の非線形シグマ模型による解析

原子核理論研究室 髙橋 樹

Abstract We study antiferromagnetic SU(3) spins on the triangular lattice by field-theoretic techniques. We compute the topological "Berry phase" factor, and show that the low-energy effective theory is described by $SU(3)/U(1)^2$ nonlinear sigma model with monopoles. The nature of the quantum phase transition between Néel and valence-bond-solid order is discussed. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

2次元空間の格子上に反強磁性的な相互作用をする量子スピン系が配置された模型は、SU(2)スピン系 を中心に、ここ 40 年ほどの間に研究されてきた。多くの場合、反強磁性体は量子効果のために、ハミ ルトニアンに依存した非自明な基底状態を持つ。代表的なものに、Néel 状態(Fig. 1(a)) と、valence bond solid (VBS) 状態 (Fig. 1(b)) が挙げられる。Néel 状態では隣接する格子点で異なる状態が互い違いに実 現するのに対して、VBS 状態では格子点のいくつかがスピン一重項を形成する。ハミルトニアンに含ま れるパラメータを変化させると、ゼロ温度で量子揺らぎに起因する量子相転移が起こる。特に Néel-VBS 相転移は、古典的な相転移の枠組みでは説明できない直接 2 次相転移が起き得ることが指摘され、その 理論は deconfined criticality として注目を集めている[1]。

本研究では、SU(3)スピンが三角格子の格子点上に配置された「SU(3)三角格子反強磁性体」について、 モノポールを含む有効理論の構築を行った。三角格子上のSU(3)スピン系は、フラストレーションが生 じることなく、Néel 状態を実現することが可能である。Néel 状態からの低エネルギー励起の有効理論が、 モノポール項を伴うSU(3)/U(1)² 非線形シグマ模型で記述されることを導出した。SU(2)スピン系で既に 指摘されているように[2]、スピン系が格子上で定義されていることの帰結として、モノポール(インス タントン)配位を考慮する必要がある。有効理論に含まれるモノポール項の形は、Berry 位相と呼ばれ る位相因子から制限を受ける。我々はSU(3)スピン系でスキルミオン配

位を構成する方法を考案し、モノポールから生じる Berry 位相を具体的 に計算することに成功した[3]。その結果、スピン表現に依存して、モ ノポール項に違いが現れるという、SU(2)正方格子反強磁性体と類似の 規則が得られた。

相転移点の解析では、理論が持つ対称性とその破れが、重要な役割を 果たす。Néel 相はスピン回転対称性が、VBS 相は格子の対称性が、そ れぞれ自発的に破れた相に対応する。Berry 位相を注意深く調べること により、格子の対称性変換は、モノポール演算子の位相変換として作用 することが明らかになった。さらに、モノポールが凝縮したモノポール ガスの半古典的解析によって、特定のスピン表現に対して、モノポール 演算子から VBS 秩序変数を構成できることを示した。これにより、VBS 相はスキルミオン数の保存に関係するトポロジカル対称性が破れた相 として解釈できる。アノマリーマッチングの議論から、スピン回転対称 性とトポロジカル対称性の両方を保つ相は、出現が禁止されることが分 かる。以上の結果は、SU(3)三角格子でも SU(2)正方格子の場合と同様に、 deconfined criticality による Néel-VBS 相間の直接 2 次相転移の可能性を 示唆するものである。



Fig. 1. An example of (a) Néel state and (b) VBS state.

- [1] T. Senthil, L. Balents, S. Sachdev, A. Vishwanath, and M. P. A. Fisher, Phys. Rev. B 70, 144407 (2004).
- [2] F. D. M. Haldane, Phys. Rev. Lett. 61, 1029 (1988).
- [3] I. Takahashi and Y. Tanizaki, Phys. Rev. B 104, 235152 (2021).

Chern-Simons 理論に基づく 3 次元 de Sitter 時空のホログラフィー

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 瀧祐介

Abstract We propose that the holographic dual of classical gravity theory on a three-dimensional de Sitter space is given by a Wess-Zumino-Witten model at an appropriate limit. Our discussion is based on the gravity description by Chern-Simons theory. We check our duality by comparing the partition functions.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

現代物理学の最も重要な課題のひとつは量子重力理論を解明することである.量子重力理論を定式化 するためのひとつのアプローチとして、ホログラフィック原理が盛んに研究されている.ホログラフィ ック原理は量子重力理論が1次元低い空間上の場の量子論と等価であるという双対性である.このよう な双対性の最も有名な例は、AdS/CFT対応と呼ばれるd+1次元漸近的Anti-de Sitter(AdS)時空上の量子 重力理論とd次元共形場理論(Conformal Field Theory, CFT)の間の双対性である[1]. AdS/CFT対応以外 の例として、de Sitter(dS)時空とCFTの間のdS/CFT対応[2]も提案されているが、AdS/CFTに比べると 未知な部分が多いのが現状である.dS時空は膨張宇宙を説明する模型の候補であるため、dS/CFT対応を 研究することは宇宙論的にも重要な意味を持つと考えられる.本研究の目的は、dS時空に双対なCFTを 構築することである.本研究では、扱いやすい例である3次元の重力理論に着目することにする.

本研究では、主に次の2つの事実を用いた.1つ目は、3次元重力理論がChern-Simons理論と呼ばれる一種のゲージ理論を用いて記述できるという事実である[3].特にゲージ群がSL(2,R)のときはAdS重力を, SU(2)のときはEuclidean dS重力を記述する.2つ目は、Chern-Simons理論がWess-Zumino-Witten (WZW) 模型と呼ばれる一種のCFTと等価であるという事実である[4].特にゲージ群がSU(2)のときはこの対応 を用いることでChern-Simons理論の分配関数を比較的容易に計算することができる.その結果 Chern-Simons理論で様々な物理量を計算することが可能である.そのひとつの例として、我々は[5]でエ ンタングルメントエントロピーのある種の一般化である擬エントロピー[6]を計算した.

上で述べた2つの事実を組み合わせると、Euclidean dS重力理論の分配関数をSU(2) WZW模型を用いて 評価できることがわかる.以上の議論から、我々は3次元dS重力理論に双対なCFTはSU(2) WZW模型で 表されると考え、[7]において具体的に分配関数を調べることでこれらの2つの理論の対応を調べた.そ の結果、重力側の分配関数の古典極限がWZW模型の適切な極限をとることで再現されることがわかっ た.この極限の取り方が一見すると従来のdS/CFT対応とは大きく異なることに注意が必要である.さら に、WNミニマル模型と呼ばれるクラスの理論の間に存在する双対性を用いることで、我々の提案した 対応が裏付けられることも議論した.

References

[1] J. M. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. 2, 231 (1998); Int. J. Theor. Phys. 38, 1113-1133 (1999).

- [2] A. Strominger, JHEP 10, 034 (2001).
- [3] S. Deser, R. Jackiw, G. 't Hooft, Ann. Phys. 152, 220-235 (1984); E. Witten, Nucl. Phys. B 311, 46 (1988).
- [4] E. Witten, Commun. Math. Phys. 121, 351-399 (1989).
- [5] T. Nishioka, T. Takayanagi, <u>Y. Taki</u>, JHEP 09, 015 (2021).
- [6] Y. Nakata, T. Takayanagi, Y. Taki, Z. Wei, Phys. Rev. D 103, 026005 (2021).
- [7] Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi, <u>Y. Taki</u>, arXiv:2110.03197 [hep-th].

AdS/CFT 対応におけるバルク時空 再構築の手法の検討

素粒子論研究室 竹田大地

Abstract In AdS/CFT correspondence, the reconstruction of the bulk geometry from the boundary theory is an important subject to address the quantum theory of gravity. In this study, we see that the bulk geometry is reconstructed from the boundary entanglement entropy, in the special case of AdS_3/CFT_2 .

AdS/CFT 対応とは、漸近的反ド・ジッター時空上の重力理論(バルク)と、その時空の境界上で定義された重力を含まない場の量子論の等価性のことである. AdS/CFT 対応では両者の理論が等価であるため、 原理的にはバルクの物理量を境界の場の量子論から構成することが可能であり、その取り組みをバルク 再構築と呼ぶ.特にバルクの重力場の動力学を境界から決定する、つまり境界の場の量子論の物理量に よってバルクの計量を再定義するという試みは、重力の量子論を境界の場の量子論によって定式化でき る可能性を秘めていて、近年活発に研究されてきた.しかし、境界の場の量子論によるバルクの計量の 完全な再定義は、低次元の AdS₃/CFT₂ 対応においても未完成である.

そこで低次元の AdS₃/CFT₂対応においてバルク時空の再構築の手法を一般に与えることはできないで あろうか.この問いに答えるため、本研究では光円錐切断の手法[1]、および hole-ography[2]という2つ の手法に着目した.光円錐切断の手法は、境界の場の量子論の相関関数の発散を用いてバルクの計量を 定義する方法である.しかし相関関数の発散は、本質的にはバルクにおけるヌル測地線の情報と密接に 関わっているため、再構築できるのはバルクの因果構造のみとなってしまう.これは計量に局所的なス ケール因子を乗じる不定性が残ったままになることを意味し、完全に計量を決定することができない. 一方で hole-ography は境界のエンタングルメント・エントロピーを用いてバルクの計量を定義する.し かしエンタングルメント・エントロピーは境界の空間的領域に対して定義され、バルクに時間一定面を 取ることが必要となるため、その時間一定面上の計量しか定義できない.言い換えると、hole-ography によって計量の時間的な成分を決定することができないのである.

私の研究[3]においては、これらの2つの手法をうまく組み合わせることでそれぞれの欠点を克服し、 AdS₃/CFT₂においてエンタングルメント・エントロピーから計量を与える手法を提唱した.この手法に よって、AdS₃時空、AdS₃ソリトン時空、およびBTZブラックホール時空という3つの時空を具体的に 構成することに成功した.ただしその手法はバルクが静的で、entanglement wedge と causal wedge が一致 するという制約を設けて正当化される.本研究では[3]で提唱した手法の解説を主たる目標とするが、上 記の制約を取り除こうとした際の困難を明らかにし、その解決についても議論を展開する.

- N. Engelhardt and G.T. Horowitz, "Towards a Reconstruction of General Bulk Metrics" (Class. Quant. Grav. 34 (2017) 015004)
- [2] B. Czech and L. Lamprou, "Holographic definition of points and distances" (Phys. Rev. D 90 (2014) 106005)
- [3] D. Takeda "Light-cone cuts and hole-ography: explicit reconstruction of bulk metrics" (arXiv: 2112.11437)

逆運動学(*p*, *p*X)反応測定に向けた GAGG(Ce)カロリーメーターの開発

原子核・ハドロン物理学研究室 辻崚太郎

Abstract We have launched the ONOKORO project to understand cluster formation phenomena in nuclei and nuclear matter from the (p,pX) reactions. We have developed the TOGAXSI telescope consisting of Si trackers and GAGG(Ce) calorimeters. I simulated experimental requirements and performed the test experiment of the GAGG(Ce) calorimeter at HIMAC, QST. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

近年の理論的な研究により核物質は均質な構造ではなく、密度やアイソスピン自由度に応じて自発的 に *d*や *t*、³He、*a*粒子といったクラスターが形成されることが予言されている[1]。また有限系である原 子核中でも同様の現象が生じることもが示唆されており、今までの平均場的な原子核の描像に変更を迫 る可能性がある[2]。またこの研究は*a*崩壊のメカニズム、核子の短距離相関の解明や中性子星の構造や 超新星爆発といった天体核現象の理解に繋がる。この現象を比較的クリーンに観測する実験手法として、 我々は原子核内のクラスターX (X=*d*, *t*、³He、*a*)を陽子との散乱によって弾き出す(*p*,*pX*)反応に注目し た。(*p*,*pX*)反応測定では弾き出されたクラスターと反跳陽子の角度・エネルギーを測定し、質量欠損法 を用いてクラスターの分離エネルギースペクトルを算出する。この結果を近年発展の著しい DWIA に基 づいた反応論による理論値と比較することでクラスター形成率についての情報が得られることが期待 される。パイロット実験として阪大 RCNP で順運動学法による¹¹²⁻¹²⁴Sn の(*p*,*pa*)反応の測定が行われ、 原子核中に*a*クラスターが存在する可能性や反応断面積のアイソトープ依存性が確認された[3]。アイソ トープ依存性の傾向は理論値と一致し、この実験で(*p*,*pX*)反応測定の有効性が示されたと言える。

そこで我々はこの手法を α 以外のクラスターについても拡張し、不安定核を含む様々な核種で系統的 に調べることで、クラスター形成機構を総合的に理解することを目的とした ONOKORO プロジェクトを開 始した。不安定核での実験や複数のクラスターの同時観測を実現するためには逆運動学法での実験が必 須である。そこで逆運動学実験のためのテレスコープとして GAGG (Ce) カロリーメーターと Si ストリッ プを用いたトラッキング検出器からなる通称 TOGAXSI アレイを新規開発中である。本論文では、まず理 研 RIBF で実験が計画されている 250*A* MeV の ⁵²Ca 不安定核ビームを用いた (*p*, *p*X)反応測定について TOGAXSI アレイのシミュレーションを行い要求性能を求めた。その結果、断面積測定に必要な分離エネ ルギー分解能 2 MeV (rms)を満たすための要求性能はカロリーメーターで 1*A* MeV (rms)のエネルギー分 解能、トラッキング検出器では 3 mrad(rms)の角度分解能となった。またクラスター側の検出器には 50 kcps 程度の高いカウントレートで粒子が入射することが予想され、レート耐久性も重要な課題である。

今回は主に GAGG (Ce) カロリーメーターの開発を行い、エネルギー分解能や時間分解能などの基本性能の評価を行った。フォトセンサーには量子効率の良い APD と量子効率は悪いがゲインが高く応答の早い PMT を検討した。特に APD については高速応答の電圧増幅型の回路を新規に開発した。性能評価は HIMAC で行なわれ 100A MeV の陽子・ α 粒子に対するエネルギー分解能約 1%以下を達成できた。 また発光量や分解能の位置依存性やレート依存性、センサーや読み出し方法の比較などの性能評価を行なった。 これらの結果を用いてクラスター側には高分解能の APD を、反跳陽子側については取扱の容易な PMT を用いることに決定した。また位置依存性についてはフォトセンサーの立体角に起因する発光量の変化が見られたが補正関数を用いることでエネルギー分解能を全領域で要求性能を満たすことができた。結晶の端では本来のエネルギー分解能よりも2倍程度悪化しており、さらに高レートによる発光量の変化も確認された。今後はこれらの改善を行い、より良いエネルギー分解能を目指す予定である。

- [1] S. Typel, J. Phys. Conf. Ser. 420, 012078 (2013).
- [2] S. Typel, Phys. Rev. C 89, 064321 (2014).
- [3] J. Tanaka, Z.H. Yang, S. Typel, et al., Science 371, 6526 (2021).

MeV ガンマ線天体観測実験 SMILE-3 に向けた 高エネルギー分解能を目指した MPPC シンチレーション検出器開発

宇宙線研究室 津田雅弥

Abstract For the next balloon experiment SMILE-3, we need the scintillation camera that has a high energy resolution, a broad dynamic range, and a good time resolution. Then I developed the MPPC photo readout system. I evaluated performance of this system and constructed an electron-tracking Compton camera using this system.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

銀河中心領域からは電子・陽電子対消滅線の強い放射がある[1]。しかし、現在も陽電子の起源は解 明されていない。陽電子の起源の解明には対消滅線の空間分布が重要であるが、詳細な分布はまだ得ら れていない。この原因は、宇宙線と衛星筐体の相互作用により MeV 帯域に大量の雑音が発生するためで ある。また、従来の望遠鏡ではガンマ線の到来方向を一意に決めることができず、光学的なイメージン グができない。そのため、観測領域外からのガンマ線との切り分けができず、SN 比を向上できない。こ の現状を打開するため、我々は電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)を開発している。ETCC は前段の ガス飛跡検出器(TPC)と後段のシンチレーション検出器(PSA)を使用し、コンプトン散乱後の全物理量を 取得することにより、コンプトン運動学を再構成し、入射ガンマ線の到来方向を一意に決定できる。そ のため、従来の方法と違い、光学的なイメージングが可能である。このことにより、他波長の望遠鏡同 様の point spread function(PSF)を定義し、雑音が除去できる。

ETCC による天体観測実験:SMILE 計画の次期実験 SMILE-3 では、長期間気球により、対消滅線分布等 を観測する。対消滅線の詳細な空間分布を取得し、陽電子起源に制限を与えるため、SMILE-2+から有効 面積約 5~10 倍、空間分解能 (PSF) 2~3 倍改善、エネルギー分解能 8~9 % (511 keV、FWHM) の性能を必

要とする。これらを実現すべく、PSA の開発を行った。光検出器 を光電子増倍管から Multi Pixel Photon Counter (MPPC) に変更 し、量子効率を上げることでエネルギー分解能を改善し、高利 得アンプと低利得アンプを搭載し、ダイナミックレンジを拡大 した。また、ETCCの不感時間削減のために common stop トリガ ーを使用する際に必要なサンプリング式 ADC を採用した。この 方式では TPC のコンプトン散乱点のドリフト方向は PSA の時間 情報を使用するため、時間分解能は TPC の二次元方向の空間分 解能と同程度になる 20 ns が要求される。波形の解析方法を考 案し、実際に製作した MPPC 読み出し回路で性能評価をおこなっ た結果、一度に9個の MPPC 全てで 662 keV のエネルギー分解能 が7%台(FWHM)を達成し、初めて読み出し回路として正常に動 作する回路製作に成功した。また、時間分解能は ADC のサンプ リングレートを 4.375 MHz に上げたことで、15 ns まで改善し た。これらの性能評価後、ETCC としての動作試験のために京都 大学複合原子力科学研究所の原子炉(KUR)内の観測をおこなっ た。511 keV や⁴¹Ar の 1293 keV の輝線の観測や⁴¹Ar の輝線の時 間変化が確認できた。また、ダイナミックレンジは 40 keV~4 MeV となり、SMILE-2+の 150 keV~2 MeV から拡大していることを確 認した。これにより PSA は SMILE-3 への準備ができた。

References

[1] N. Prantzos et al., Rev. Mod. Phys. 83, 1001-1056 (2010).



Fig. 1. MPPC photo readout system





大気チェレンコフガンマ線望遠鏡 MAGIC による ガンマ線バースト GRB 201015A と GRB 201216C の観測

宇宙線研究室 寺内健太

Abstract Ground-based gamma-ray telescopes MAGIC followed up gamma-ray bursts GRB 201015A and GRB 201216C. A hint of gamma-ray signal is found from GRB 201015A and gamma-ray signal is detected from GRB 201216C. From GRB 201015A analysis, relatively large amount of the jet's total energy is inferred.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

ガンマ線バースト(GRB)は太陽がその一生をかけて放出するエネルギーをわずか数ミリ秒から数十秒 で放出する、宇宙最大の爆発現象である。発見されてから約 60 年経ってもなお、その膨大なエネルギ ーを生み出す中心エンジンやガンマ線の放射機構は謎に包まれている。2019 年には地上の大気チェレン コフガンマ線望遠鏡 MAGIC によって GRB から初めて数百 GeV 以上の高エネルギーガンマ線が検出された [1]。これにより、残光放射には逆コンプトン散乱成分が含まれていることが観測的に明らかになった。 しかし、この高エネルギーガンマ線放射がどの GRB にも普遍的に備わっているのかどうかは観測例がま だ少ないため、定かではない。

2020年10月15日に発生したガンマ線バースト GRB 201015A を MAGIC 望遠鏡はバースト発生から33 秒後に観測を開始できた。本研究で、ガンマ線検出有意度を算出した結果約3σとなり(図1)、高エネ ルギーガンマ線の兆候を得ることができた。しかし、観測時の大気透過度について情報がなく、ガンマ 線のエネルギーが正しく推定されているのかを判断することができなかった。そこで本論文では、まず 背景事象であるハドロンによる大気シャワーの事象頻度を用いて、大気透過度によるエネルギースケー ルへの影響を見積もる手法を考案および評価した。次にGRB 201015A の観測データに適用し大気透過度 による影響が小さいことを確認した。

多波長にわたって GRB 201015A の光度変動を調べると、残光の開始とみなせる可視光光度曲線のピークに合わせて、ピーク前後でガンマ線の超過イベント数が増加していることが分かり、有意度は低いが高エネルギーガンマ線残光の開始を捉えることができた。

今回観測された高エネルギーガンマ線は逆コンプトン放射によるものだとして、X 線とガンマ線の 光度比を用いてモデリングした結果、相対論的衝撃波が残光初期に持つ運動エネルギーは即時放射でガ ンマ線として放ったエネルギーの約 30 - 100 倍多いことが示唆された。これは即時放射におけるジェ ットの運動エネルギーからガンマ線への変換効率が数%程度であり、効率が悪いことを意味している。 他の GRB では、観測的には即時放射での変換効率は数%から 60 ~ 70%のものまで存在する[2]。それ

に対して理論的には変換効率は 1%程度で悪いと考えられて おり[3]、本論文の結果は理論的予言を支持する結果となっ た。この GRB は他の GRB に比べて比較的暗めだが、相対論的 衝撃波のパラメータは典型的な値をとっているため、この GRB と同様に変換効率が悪い GRB には高エネルギーガンマ線 放射は普遍的に存在することが示唆される。他にも本研究で は 2020 年 12 月 16 日に発生したガンマ線バースト GRB 201216C を MAGIC 望遠鏡でバースト発生から 56 秒後に観測 し、ガンマ線検出有意度は 5 σ を超えて検出となった。

- [1] MAGIC Collaboration, 2019, Nature, 575, 459-463
- [2] Zhang et al., 2007, ApJ, 655, 989-1001
- [3] P. Kumar, 1999, ApJ, 523, 113-116



Fig. 1. Significance sky map

CMB 偏光の精密観測にむけた遠隔較正システム Sparse Wire Grid Calibrator の開発研究

高エネルギー物理学研究室 中田嘉信

Abstract For precise measurements of polarization patterns in Cosmic Microwave Background, it is necessary to calibrate orientations of polarization response for each detector within 0.1-degree accuracy. We developed a calibration system by using a Sparse Wire Grid for CMB telescopes, and we confirmed its optical performance and remote-control capability. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光観測は宇宙の起源を解き明かす最良のプローブであり、インフレーション理論が予言する原始重力波の検出をはじめとする様々な宇宙の謎に迫る実験研究である。 Simons Observatory実験は、アタカマ高地(海抜 5200 m)において、合計4台のCMB 望遠鏡に約6万個もの超伝導検出器 TES を搭載して観測を行う実験である。4台のうち3台の小口径望遠鏡は原始重力波に由来する偏光信号の測定に最適化している。そして、原始重力波に由来するCMBの偏光信号を捉えるためには、検出器アンテナの偏光応答軸の向き(偏光角)を0.1度もの精度で較正せねばならない[1]。



本研究で、この偏光角を較正する装置 Sparse Wire Grid Calibrator を開発した。これは金属 ワイヤーグリッドによって偏光信号を作り出 す装置である[2]。較正時には、ワイヤーグリ ッドを望遠鏡の視線軸上に置く。一方、CMB 観 測時には、ワイヤーグリッドを視線軸上から取 り除かねばならない。系統誤差の低減のために は、高頻度で較正を行わないといけないので、 ワイヤーグリッドの出し入れの自動化が必須 である。またワイヤーの向きを高い角度精度で 理解する必要がある。この2つの要求を達成す るために、高い分解能を持つエンコーダと読み 出しエレキからなる回転角モニター、回転制御 ソフトウェア、および装置の出し入れを行うロ ボット機構を構築した(Fig1)。

Fig1. (Left) 3D Drawing of a telescope with Sparse開発した装置が要求を満たしていることをWire Grid Calibrator & (Right) Photo of the Calibrator確認するため、より負荷のかかる姿勢で装置の運用を試験し、動作を確認した。さらに遠隔制御によって高頻度に望遠鏡の自動較正を行うためのソフトウェアも開発した。これらの統合試験によって、望遠鏡較正のリモート化も実証した。

また、望遠鏡受信機との統合試験でも Sparse Wire Grid Calibrator を用いて偏光角を較正できることを実証した。リモート制御によりワイヤーグリッドを回転し、受信機の偏光応答が回転と共に変調されることを確認した。

References

[1] Peter Ade. et al, "The Simons Observatory: science goals and forecast", J. Cosmol. Astropart. Phys., Vol. 2019 (2019)

[2] O. Tajima, "Novel Calibration System with Sparse Wires for CMB Polarization Receivers", J Low Temp Phys **167**, pages936–942 (2012)

時間およびエネルギー分析による ¹⁵¹Euの放射光メスバウアー吸収分光法の開発

核放射物理学研究室 藤原拓

Abstract We developed time and energy discriminated ¹⁵¹Eu synchrotron-radiation-based Mössbauer spectroscopy. We also reconstructed Mössbauer spectra in specific energy windows, and obtained the information of electronic states with different depths. © 2022 Department of Physics, Kyoto University

放射光メスバウアー吸収分光法は、従来のメスバウアー分光法で用いられるγ線源の代わりに放射光 を用いた実験手法として知られている[1]。放射光をモノクロメータにより測定対象とする原子核の共 鳴励起エネルギー付近で単色化して基準試料に照射し、透過したγ線を測定試料で共鳴散乱させる (Fig.1)。この時、基準試料に速度を与えることで照射するγ線のエネルギーがドップラーシフトを起 こし、基準試料と測定試料の共鳴吸収エネルギーが一致した時にγ線が大きく吸収される。これにより 散乱試料からの散乱強度が低下するので、速度ごとの強度を測定することで吸収スペクトルが得られる。

従来のメスバウアー分光法では、複数の検出素子からの信号を単純に足し合わせ、Multi-Channel Analyzer (MCA) に入力してカウントとして蓄積することにより吸収スペクトルを測定する。しかし、この方法では検出素子ごとの情報が失われ、いずれかのチャンネルで異常があると吸収スペクトルに大きな影響を与えてしまう。また、検出されたγ線の絶対時間やエネルギーの情報も失われる。実際には測定試料から放出されるのはγ線だけでなく蛍光 X線や内部転換過程に伴う電子もあり、これらが共鳴吸収のイベントの結果に含まれているが、エネルギーが異なるためエネルギー情報によって弁別できる。

本研究では、各チャンネルに Amplitude-to-Time Converter (ATC) という波高を時間差に変換するモジ ュールを導入し[2]、それらの信号を高速 Multi-Channel Scaler (MCS) に時系列で記録を行う多チャンネ ル測定回路系を開発した。これにより、チャンネルごとで時間・エネルギー・ドップラー速度の3次元 情報が得られ、測定効率の向上とともに多角的な解析を可能にした。測定後に任意の時間・エネルギー 領域での吸収スペクトルの再構成が可能となり、特にエネルギー領域での分別は検出されたγ線と蛍光 X線を区別して異なる情報が得られる。γ線やX線のエネルギーの情報はその透過能との関係から、イ ベント発生場所の試料表面からの深さの情報を反映しており、深さの分解測定を可能とする。今回はモ デル試料として Eu および EuF3を異なる積層条件で作成した薄膜基板を用い、本測定系で得られたデー タから解析によってエネルギーごとに吸収スペクトルを再構築した(Fig. 2)。これにより、同一試料中 の深さの異なる位置情報の抽出が可能であることが実証された。今後、本測定系の応用により時間・エ ネルギー情報の分析によるメスバウアー分光を用いた応用研究を発展させることが期待できる。



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

- [1] M. Seto et al., Physical Review Letters 102, 217602 (2009).
- [2] T. Masuda et al., Nucl. Instrum. Methods A 913, 72-77 (2019).

Fig. 2. Mössbauer spectrum of the Eu and EuF_3 deposited sample for energy below 13 keV.

周波数変調したγ線のメスバウアー効果によるエネルギー スペクトル測定

核放射物理学研究室 山下拓之

Abstract We demonstrated the frequency modulation of the 14.4-keV gamma ray by the Mössbauer spectroscopy and measured the lifetime of the first excited state of ⁵⁷Fe by the time-delayed coincidence counts of the sequentially emitted 122-keV and 14.4-keV gamma rays. These results lead to the study for the quantum gamma-ray optics.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

物質中の同位体原子核が、励起状態にある同種の原子核からのγ線を無反跳で共鳴吸収および散乱す る過程は Mössbauer 効果として知られている。特に、⁵⁷Co同位体が⁵⁷Feへ崩壊し、その第1励起状態か ら基底状態へ遷移する際に放出される14.4 keV のγ線の場合、その線幅(4.7 neV)はγ線のエネルギー と比較して極めて狭く高い単色性を示す。この共鳴散乱過程は電磁場と物質の相互作用で記述できるこ とから、この過程で放出されるγ線(核共鳴散乱γ線)を用いて、量子光学における様々な概念と発想 を10-100keV のエネルギー領域のγ線に拡張した量子γ線光学の研究が可能となる。

この量子 γ 線光学の研究を行うべく、本研究では ⁵⁷Co 線源から放出される 14.4 keV の γ 線の周波数変 調の実現を目標とした。 γ 線源に対して共鳴吸収体が一定の周波数で振動するとドップラー効果に起因 して γ 線のエネルギースペクトルが周波数変調し、複数のエネルギーの γ 線が吸収体に入射することに 相当する。周波数変調した γ 線が吸収体を透過するとその振幅・位相が変化する。その結果、透過 γ 線 の検出確率の時間発展は透過しなかった場合と異なり、ある時間領域では大きくなり、またある時間領 域では小さくなるようなものとなる[1]。そしてこの時間波形は振動の振幅や周波数そして位相により操 作できることから γ 線の波形をコヒーレントに操作できる。この手法は γ 線を使った時間ビン量子ビッ トへの応用や γ 線と集団原子核との相互作用についての基礎的な研究へつながる。

Fig. 1 と Fig. 2 はそれぞれ ⁵⁷Co 線源を使ったメスバウアー分光法にて測定した、静止状態のステンレ スの吸収スペクトルと、水晶振動子によって 20 MHz の周波数で振動するステンレスの吸収スペクトル である。Fig.1 のようにステンレス中の ⁵⁷Fe 核は、本来は一つの共鳴エネルギーしか持たないが、振動 させることで Fig. 2 のような複数の吸収ピークを示した。これは ⁵⁷Co 線源から放出される 14.4 keV のγ 線が周波数変調していることに相当していることを示す。加えて、水晶振動子で振動させた吸収体の振 動振幅の分布についての解析も行った。また、⁵⁷Fe 核が第二励起状態から第一励起状態へ遷移する際に 放出する 122 keV のγ線と、第一励起状態から基底状態へ遷移する際に放出する 14.4 keV のγ線の検出 時刻の時間差を測定するコインシデンス測定を行う事で、時間領域スペクトルも得られた。本研究を、 核共鳴散乱γ線を用いた量子γ線光学の研究への足掛かりとする。





Fig.2 Absorption spectrum of the stainless-steel foil vibrated with 20MHz frequency.

^[1] F. Vagizov, V. Antonov et al., Nature 508, 80-83(2014)

電子飛跡決定精度の向上を目指した 新電極構造を持つガス飛跡検出器の開発

宇宙線研究室 吉田有良

Abstract We developed a μ -PIC of three electrodes to improve the tracking accuracy of a recoil electron. At first we tested a fundamental features of this μ -PIC and successfully get signals and the ratio of signal heights is 2:1:1, and we have drastically decreased false track, which result matches simulation.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

MeV ガンマ線領域では例えば電子・陽電子対消滅線の観測による 陽電子起源の解明が期待される一方、CGRO 衛星に搭載された COMPTEL の9年間に渡る観測によって検出できた MeV ガンマ線領 域における定常天体は30天体にとどまっており[1]、必要とされ る空間分解能には及んでいない。この状況を打破するため、我々 は電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)を開発している。ETCC は1光子に対してエネルギーと到来方向を一意に決定することが でき、コンプトン散乱によって生じる反跳電子の飛跡を用いた、 強力なバックグラウンド除去能力を持つコンプトンカメラであ る。我々は反跳電子飛跡の検出に micro pixel chamber(μ-PIC) を用いている。µ-PICはmicro pattern gas chamberの一つで あり、μ-PIC を用いた Time projection chamber によって得ら れる2方向からの投影画像をもって、荷電粒子の3次元の飛跡を 検出することができる。しかしこの手法では、特定の条件を満た した飛跡に対して不定性が残り、時間同時計数法により3次元飛 跡を再構成すると虚像が生成される問題がある。このことは MWPC でもright-left ambiguity としてよく知られた問題点となってい る。この問題の解決手法として MWPC では読み出し電極を2軸読み 出しから3軸読み出しにする手法が用いられてきた。そこで我々 はこのことに着想を得て、1 つの飛跡に対し3 方向からの投影画 像を得ることができる、3つの電極を持つ μ -PIC (3 軸 μ -PIC) を開発した(図1)。この3軸µ-PICは1つのアノードと2つの カソードから成り、1つのピクセルに着目すると従来のµ-PICの





図2オシロスコープで取得した 3軸µ-PICの各電極の信号

上に更にもう一つの電極が重なっているような構造を持つ。3 枚の投影画像を得るには3 つの電極の波 高値の比が数倍以内に収まるような信号が検出でき、約 15000 倍のガス利得を達成する必要がある。3 軸 μ -PIC のシミュレーションを行うと、2 つのカソードの電圧が 0V の場合、アノード、上カソード、 下カソードで検出される信号の波高値は2:1:1 であることが予想された。そして実際に3 軸の μ -PIC を 製作し、その動作を確認した。実験では,製作した3 軸 μ -PIC の動作に成功し,最大利得約 30000,5.9keV においてエネルギー分解能21% (FWHM) を達成した。また、図2に示すように、全ての電極の信号の取 得に成功し、アノード、上カソード、下カソードの信号の大きさの比率は2:1:1 となった。さらに飛跡 の不定性削減の評価を行うため、2クラスターイベントの飛跡の再構成を試みた。その結果、3 軸 μ -PIC は2 軸 μ -PIC と比較したときに期待される、飛跡の不定性削減に99.96%成功し、シミュレーションと振 る舞いが一致した。

References

[1] V. Schonfelder et al., A&AS 143, 145-179 (2000).

LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けた初段ミューオントリガー アルゴリズムの開発および性能評価

高エネルギー物理学研究室 吉村宣倖

Abstract The ATLAS Level-1 muon trigger system will be upgraded for LHC Run-3. We report the result of development and performance study of the Level-1 muon trigger algorithm for Run-3, which utilizes information from newly installed detectors. Also, we present the validation of the firmware for the algorithm, implemented on a trigger decision board.

© 2022 Department of Physics, Kyoto University

Large Hadron Collider (LHC) は、スイス・ジュネーブ近郊の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、TeV エネルギー領域の新粒子の直接探索やヒッグス粒子の精密測定を 行うことで素粒子標準理論を超えた新物理の発見を目指している。

LHC における陽子陽子衝突の頻度は 40 MHz であるが、ATLAS 実験ではデータ記録速度や容量の制限 のため全事象を記録することはできない。そのため、物理として興味のある事象を選択(トリガー)し、 データを取得する必要がある。トリガーは 2 段階に分けられ、ハードウェアベースの初段トリガーで は高速にトリガー判定を行い、ソフトウェアベースの後段トリガーではより精密なトリガー判定が行わ れる。また、初段トリガーでは全事象に対して 100 kHz 以下までイベントレートを落とすことが要求さ れる。

LHC は 2018 年から 2022 年までアップグレードをおこない、アップグレード後の Run-3 では重心系 エネルギー 13.6 TeV、瞬間最高ルミノシティ 2.0×10³⁴ cm⁻²s⁻¹ で運転する。エネルギーの増強と高い ルミノシティでの安定した運転がおこなわれることに伴って、ATLAS 実験初段トリガーに関しても新検 出器の導入と電子回路の改良を行う必要がある。

本研究で扱うミューオントリガーは、ミューオンの横運動量に閾値を設けることで、高運動量のミュ ーオンを終状態に含む事象を選択する。Run-2 までの初段ミューオントリガーは、磁場領域外側にある Thin Gap Chamber (TGC) (Fig. 1) のヒット情報と磁場領域内側の TGC や Tile カロリメータの情報を用 いて、ミューオンの横運動量を判定しトリガーしていたが、衝突点由来でない荷電粒子によるフェイク トリガーや低い横運動量のミューオンを完全には排除できずトリガーレートを上げる原因となってい た。Run-3 へ向けて、物理に対するアクセプタンスを維持しながら不要な事象によるトリガーを削減す る必要がある。これに対して Run-3 から新たに磁場領域内側に導入される New Small Wheel (NSW) や RPC BIS 78 の詳細な飛跡情報と TGC のヒット情報を組み合わせてコインシデンスをとることで、フェ イクトリガーと低い横運動量のミューオン削減のための研究を行った。

本研究で開発した新しいトリガーアルゴリズムは、ミューオンの横運動量が 20 GeV 以上であると判定されたトリガーにおいて高い検出効率を維持しつつ、衝突点由来でない荷電粒子による背景事象を大幅に削減することができる。この結果、Run-2 と比較して同じ瞬間ルミノシティにおいて約 60 % のトリガーレートを削減できることを示した。

また、このトリガーロジックを実装する New Sector Logic ボード(NSL) における検証試験をおこなった。TGC と NSW や RPC BIS 78 の情報を元にしてトリガー判定デー タを作成することで、NSL が想定された時間内に正しくト リガー判定を行うことを確認した。



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