

2022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

(2023年2月6日、2月7日)

物 理 学 第 二 分 野

修士論文発表会

日時: 2023年2月6日(月)7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)

《 目 次 》

2月6日(月)

- | | | | |
|---|--|-------|---------|
| 1 | ニュートリノと水の反応の精密測定に向けた水ベース液体シンチレータの開発 | 浅野 有香 | (9:00) |
| 2 | ハイパーカミオカンデ実験の前置検出器に向けたシンチレータの劣化評価および新開発MPPC読み出しASICの性能評価 | 有元 隼太 | (9:20) |
| 3 | 低エネルギー有効理論に対する制約条件の探索: 沼地問題および正値性条件 | 池田 賢矢 | (9:40) |
| 4 | 世代依存結合を持つ擬NG ボソンとレプトン数生成 | 伊東 利将 | (10:00) |

《 休 憩 》

- | | | | |
|---|---|-------|---------|
| 5 | 大気チェレンコフ望遠鏡の性能向上に向けた半導体光検出器SiPM カメラの基礎開発 | 岩崎 啓 | (10:30) |
| 6 | ハイパー核分光のための機械学習を用いた運動量解析手法の開発 | 江端 健悟 | (10:50) |
| 7 | Celestial HolographyのAdS/CFT 対応に動機付けられた新たな解釈の提案 | 小川 順生 | (11:10) |
| 8 | 質量比の極端な連星の自己力共鳴時の軌道進化 | 笥 嵩文 | (11:30) |

《 午 後 》

- | | | |
|---|-------|---------|
| 9．高輝度LHC-ATLAS 実験に向けた初段ミューオントリガーアルゴリズムの実装と検出器全体への拡張 | 河本 地弘 | (13:30) |
| 10．共形場理論の熱平衡化とブラックホールの動力学 | 川本 大志 | (13:50) |
| 11．銀河中心領域の陽電子起源探索に向けたMeV ガンマ線コンプトンカメラの高感度化 | 小林滉一郎 | (14:10) |
| 12．核物質中におけるラムダポテンシャルの重イオン衝突・ハイパー核データを用いた検証 | 神野朝之丞 | (14:30) |
| 13．ホログラフィ原理における因果律の諸様相:バルク因果律の下でのカオス上限の解析 | 杉浦 駿 | (14:50) |

《 休 憩 》

- | | | |
|---|-------|---------|
| 14．ホログラフィー原理及び弦理論における境界について | 鈴木 優樹 | (15:30) |
| 15．連星種ブラックホールへのガス降着と軌道進化 | 鈴口 智也 | (15:50) |
| 16．超新星残骸 G0.61+0.01 におけるジェット状爆発の痕跡の発見 | 田中優貴子 | (16:10) |
| 17．高感度宇宙sub-MeV ガンマ線観測に向けたCdZnTe 検出器による電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発 | 田原 圭祐 | (16:30) |

2月7日(火)

18．対称積共形場理論とAdS/CFT 対応	津田 崇史	(9:00)
19．次世代の極高エネルギー宇宙線観測実験のための新型大気蛍光望遠鏡の集光カメラの開発	長澤 広武	(9:20)
20．フラクトンと場の量子論	中西 泰一	(9:40)
21．星周物質のX 線精密分光による超新星残骸RCW 103 の親星推定	成田 拓仁	(10:00)
《 休 憩 》		
22．マグネター磁気圏における高速電波バーストの粒子散乱	西浦 怜	(10:30)
23．超弦理論におけるエンタングルメントエントロピー	原 健史郎	(10:50)
24．10 GHz帯におけるミリ波受信機を用いたダークマター候補としてのダークフォトンの探索研究	藤中 峻	(11:10)
25．RUNBA におけるビームダイナミックスの研究と補償装置EDC,ADC の開発	前原 義樹	(11:30)
《 午 後 》		
26．稀少不安定核での陽子弾性散乱測定に向けた新反跳陽子テレスコープの開発	八尋 寛太	(13:30)
27．J-PARC E16 実験での飛跡検出に用いるシリコンストリップ検出器の読み出し回路の開発	山口佳奈子	(13:50)
28．アイソマー弾性散乱に向けたアクティブストッパーの開発	吉田 凌祐	(14:10)
29．ホモトピー代数に基づく弦の場の理論の定式化	吉中譲次郎	(14:30)
30．ソフトヘアブラックホールからのホーキング放射の研究	脇 隆浩	(14:50)

ニュートリノと水の反応の精密測定に向けた 水ベース液体シンチレータの開発

高エネルギー物理学研究室 浅野有香

Abstract For a near detector of the Hyper-Kamiokande experiment, new Water-based Liquid Scintillator (WbLS) is developed to measure precisely the interaction of neutrino and water. Measurement with positron beam using 4×4 cells' detector indicates that the WbLS detector can be used as a tracker for the near detector.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

岐阜県神岡町に建設中の大型水チェレンコフ検出器 Hyper-Kamiokande (HK) の稼働が 2027 年に予定されている。HK での実験の 1 つにニュートリノ振動の観測があり、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC でニュートリノビームを生成し、HK で振動後のニュートリノを観測する。この観測では、ニュートリノにおける CP 対称性の破れを 5σ の信頼度で示すことを目指している。HK により統計量は前身である Super-Kamiokande (SK) と比較して約 8 倍に増やすことができる。ただし、CP 対称性の破れを示すためには統計量の増大とともに系統誤差の削減が必要であり、その中でも大きな割合を占めるニュートリノと水の反応由来の誤差の削減が求められている。本研究では、水とニュートリノの反応の精密測定を行うため、水ベース液体シンチレータ (WbLS) を用いた複数セル構造を持つ検出器(図 1)の開発を行った。WbLS とは、界面活性剤を用いて水と液体シンチレータを溶かしたものである。検出器の特徴は、反射材によって検出器に 1cm^3 のセルの構造を持たせてセル同士を光学的に分離させ、波長変換ファイバーと MPPC によってセル内の WbLS のシンチレーション光を読み出す点である。そのため、WbLS はセル内で高発光量かつファイバーで読み出し可能であることを目指して開発を行い、反射材に関して、WbLS に不溶であり、反射率の高い容器の探索を行った。

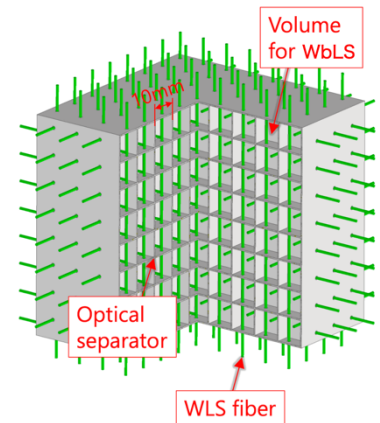


Fig. 1. Design of near detector for HK.

まず、物質の配合割合や種類を変えて WbLS を製作した。製作した WbLS は PMT による宇宙線の光量測定試験を行うことで発光を確認した。その後ファイバーと MPPC で読み出す 5cm^3 の小型容器に WbLS を封入し、宇宙線による光量測定試験を行った。WbLS のクロストークを除いた光量値はプラスチックシンチレータの約 10% から 20%であった。

さらに、新前置検出器の小型試作機として 4×4 セル検出器を新たに製作し、検出器の位置依存性やセル内の光量一様性を確認するため、東北大学 ELPH で陽電子ビームによる測定試験を行った(図 2)。WbLS の異なる 9 種類の容器を製作し、それぞれの容器で 8ch 及び 24ch の読み出しを行った。ビームのヒット位置に合わせて光量が変化することを確認し、粒子の飛跡が検出可能であることがわかった。

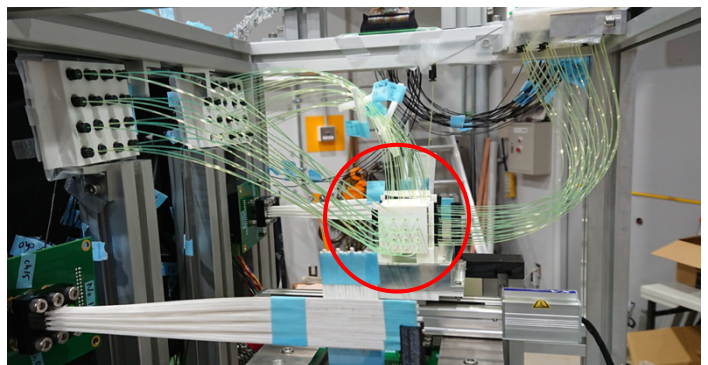


Fig. 2. Setup at beam test. WbLS detector is marked in red.

以上より、WbLS を用いた新検出器は、Hyper-Kamiokande の前置検出器として粒子の飛跡を検出可能であることを実証した。ただし光量が低く、ニュートリノと水の反応の精密測定に必要である陽子とパイ粒子を判別する点については今後詳しい解析が必要である。

ハイパーカミオカンデ実験の前置検出器に向けたシンチレータの劣化評価および新開発 MPPC 読み出し ASIC の性能評価

高エネルギー物理学研究室 有元隼太

Abstract T2K near detectors will still be used in the Hyper-Kamiokande period. Then, light yield reduction due to scintillator ageing and a breakdown of ASIC will be problems. In this thesis, I show the estimation of scintillator ageing by accelerated ageing test and the evaluation of a new ASIC.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

宇宙における物質・反物質非対称性の起源は今なお未知であり、ニュートリノにおける CP 対称性の破れがその鍵を握っているとされる。現在はニュートリノにおける CP 対称性の破れを探索すべく、J-PARC 加速器からのニュートリノビームをビーム生成点 280 m 下流の前置検出器と 295 km 下流の後置検出器スーパーカミオカンデで測定し、ニュートリノ振動を精密測定する T2K 実験が行われている。

CP 対称性の破れの発見のためには、現在の T2K 実験の統計・系統誤差では不十分であり両方を改善する必要がある。統計誤差の削減のためには、スーパーカミオカンデの約 8.4 倍の有効体積をもつ超大型水チェレンコフ検出器ハイパーカミオカンデが 2027 年に設置され、後置検出器として 10-20 年にわたり運用される予定である。系統誤差の削減のためには、2023 年から前置検出器に新型検出器 SuperFGD が導入される。

SuperFGD やニュートリノビームプロファイルを測定する前置検出器 INGRID はハイパーカミオカンデ導入後も使用が想定されるが、長期間の運用となるためシンチレータの経年劣化やシンチレーション光読み出しのためのエレクトロニクス (ASIC) の故障が問題となりうる。

INGRID のシンチレータについては 2010 年から 2021 年までの期間で経年劣化による光量の減少が報告されている。この劣化が今後も続くかある時点で劣化が止まるかを調べるため、シンチレータを高温環境下に置くことで劣化の原因であると考えられる酸化反応を促進し (加速劣化試験)、シンチレータの光量変化を確認した。また、SuperFGD についても実機での劣化が確認されていないため、加速劣化試験により同様の評価を行った。しかし光量の再現性が小さく見積もっても 10% 程度であり、想定される最大の光量減少率約 20% と比較しても不十分であったので、検出器構成要素を固定するジグを変更することで光量の再現性を約 3% にまで改善した。その結果、測定精度の範囲内で光量の減少が見られなかったため、測定精度の 3 倍の約 9% の光量減少が実際のニュートリノ振動測定に及ぼす影響を GEANT4 シミュレーションで評価した。評価項目は SuperFGD による短飛程の陽子・ π 粒子の粒子識別効率の変化と、INGRID でのミューオンの検出効率の変化であり、前者については粒子を誤認する確率が最大でも 0.05%、後者では検出効率の悪化が $0.048 \pm 0.029\%$ であり、問題にはならないと結論した。

ASIC については、現在 INGRID 等で用いられている Trip-t ASIC がハイパーカミオカンデ導入後に寿命をむかえ多くが故障する可能性がある。そのため多チャンネル MPPC 読み出し用の新 ASIC が KEK の E-Sys グループを中心に開発された。これは多くの実験での使用を目指した汎用 ASIC であるため、ハイパーカミオカンデ実験の前置検出器で用いることができるか評価する必要がある。今回はこの ASIC について、1 p. e. を十分に識別できる分解能、100 p. e. までの線形性、1% より十分小さなチャンネル間クロストークを達成できているか評価を行い、実際にこの要請を満たすことを確認した (Fig. 1)。また、前置検出器では 1 ns 程度の時間分解能をもつ TDC が必要となるので、この ASIC に接続した FPGA に TDC のプロトタイプを開発し評価を行った。

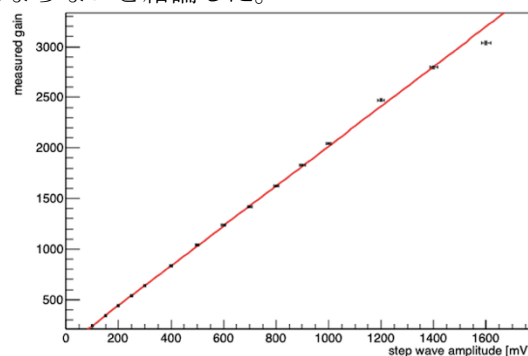


Fig. 1. Linearity of the ASIC response. The horizontal axis corresponds to the input charge and the vertical axis corresponds to the measured charge. Response is linear up to 1000 mV (~ 100 p.e.) within 1% residual.

低エネルギー有効理論に対する制約条件の探索： 沼地問題および正值性条件

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 池田賢矢

Abstract We studied the range of possible values for low-energy effective couplings of the UV complete amplitude with triple product structure in the case of two massive poles. This aims to investigate whether the allowable region of effective couplings by the positivity bounds can be entirely filled by analytical examples.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

素粒子物理学における最大の課題の一つは重力の量子化である。重力の量子論の現象論的記述には低エネルギー有効理論が用いられるが、そのような重力と結合した低エネルギー有効理論には量子重力的議論から示唆される制約条件が存在し、沼地問題と呼ばれる[1]。これに関連してより一般に、低エネルギー有効理論に対する制約条件を与える手法が近年盛んに開発されている。

その一つである正值性条件は、低エネルギー有効理論の結合定数に対する一連の制約として、理論が紫外完全化されるための必要条件を与える[2]。複数の正值性条件の組み合わせから最も強い制限を得る問題は、最適化問題の形に定式化され数値的に解くことができ、最適化された正值性条件を満たす領域として結合定数の許容領域が決定できる。ただし正值性条件を与えるのは紫外完全化の必要条件のみであり、得られた許容領域の各点に対して対応する具体的理論が常に存在することは保証されない。

一方、ユニタリ性をはじめとする基本的仮定を満たす具体的な理論モデルの散乱振幅を考えると、低エネルギー散乱振幅の高階結合定数を直接読み取ることができる。すなわち具体的な振幅について結合定数の取り得る値の範囲を解析的に調べることで、正值性条件の十分性の検証が可能となる。

基本的な例である massless スカラーの 2 体振幅の場合を考えると、高階結合定数の最初の 2 項である g_3, g_4 については、現状では数値的許容領域のうち大部分は対応する振幅が既知である。しかし g_3 が負となる境界付近の一部の領域については、対応する具体的振幅が知られていない[3]。そのため特に許容領域の境界付近の値を与える具体的なモデルを探索することが重要となる。

そのような中で、ユニタリ性を満たし、かつ重力子振幅を紫外完全化する新しいクラスのツリーレベル散乱振幅が最近提示された[4]。この振幅は三重積と呼ばれる 3 つのユニットの積の構造を持つことが大きな特徴であり、弦理論のツリーレベル振幅にも同様の構造を持つものが存在することからも興味が持たれている。

本研究では有効結合定数 g_3 を最も小さくする既知の具体例が単一の極を持つ場合の三重積振幅の形となっていることに着目し、この拡張として 2 つの極を持つ場合の三重積振幅における有効結合定数の取り得る値について調べた。追加した 2 つめの極の位置を任意に取り、低エネルギー展開により有効結合定数の値の取りうる範囲を求めた。その結果、2 つ目の極の追加はいずれの場合にも結合定数 g_3 の値を増大させるという結果を得た。よって正值性条件の十分性は、この具体例からは示唆されないことが分かった。このことから今後の課題として、ユニタリ性などの情報をより多く反映した条件を得ることで許容領域を更に狭めることが目指される。

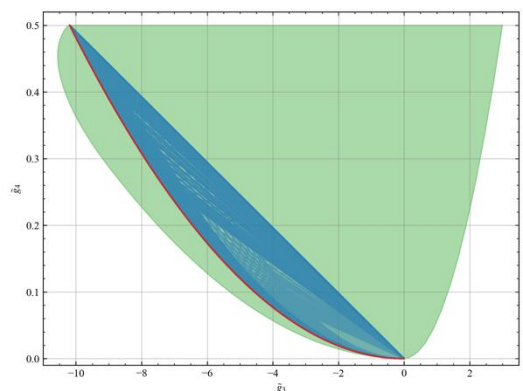


Fig. 1. Comparison between numerical allowed region and possible values for the effective couplings.

References

- [1] C. Vafa, arXiv:hep-th/0509212.
- [2] A. Adams, N. Arkani-Hamed, S. Dubovsky, A. Nicolis, and R. Rattazzi, JHEP 10 (2006) 014.
- [3] S. Caron-Huot and V. Van Duong, JHEP 05 (2021) 280.
- [4] Y.-t. Huang and G. N. Remmen, Phys. Rev. D 106, L021902 (2022).

世代依存結合を持つ擬 NG ボソンとレプトン数生成

素粒子論研究室 伊東利将

Abstract We consider the situation that right-handed Majorana neutrino couples to flavourful pseudo Nambu-Goldstone (NG) boson. In this paper, the possibility of leptogenesis from the decay of right-handed neutrino with pseudo NG boson is investigated.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

標準理論は電磁相互作用と弱い相互作用を統一した理論として大きな成功を収めているが、標準理論では説明出来ない物理はまだ残っている。例えばニュートリノの小さな有限の質量はその1つだが、重い右巻き Majorana ニュートリノ N を導入し、レプトン二重項 L と Higgs 場 H との相互作用ラグランジアン

$$-y_{ij}^{\nu} \bar{N}_i \tilde{H}^{\dagger} P_L L_j + h.c.$$

によって左巻きニュートリノの非常に小さい質量を説明するのがタイプ 1 シーソー機構[1]である。Majorana 性より右巻きニュートリノはレプトンにも反レプトンにも崩壊することが可能である。その崩壊幅に違いがあればレプトン非対称な宇宙を生成することが出来る。実際、ツリーレベルでは崩壊幅は同じだが、ツリーレベルとループレベルの干渉項を考えることで崩壊幅が異なることがあることが示される。そのようにして実現された有限のレプトン数を、スファレロン過程を通じてバリオン数に転化する[2]ことを考える。このようにしてバリオン優勢宇宙を説明するモデルはレプトン数生成[3]と呼ばれている。

右巻きMajoranaニュートリノは標準理論の範囲では一重項であると考えられるが、例えば、右巻きMajoranaニュートリノの大きな質量の起源を高エネルギーの対称性の自発的な破れに求めるモデル[4]が考えられている。そこで本研究では χ を擬Nambu-Goldstone (NG) ボソンとして

$$-\frac{1}{2} \chi \bar{N}_i (\xi_{ij} P_R + \xi_{ij}^* P_L) N_j$$

というラグランジアンを考え、右巻きニュートリノに関連する対称性の破れに起因する擬NGボソンがあったときに、そのカップリングがレプトン数生成にどのように影響するかを、擬NGボソンを含む右巻きMajoranaニュートリノの崩壊ダイアグラムに着目して解析した[5]。ここでは擬NGボソンの起源には言及せず、一般に複素対称なカップリングとしている。その結果は、 y^{ν} の大きさが大きくなるとwashout効果によってレプトン数が減って観測に矛盾するが、そうでない場合には十分なレプトン数が生成される ξ が存在することが示された。

References

- [1] P. Minkowski, “ $\mu \rightarrow e \gamma$ at a rate of one out of 10^9 muon decays?” , Phys. Lett. B **67**, 421-428 (1977).
- [2] W. A. Kuzmin, V. A. Rubakov and M. E. Shaposhnikov, “On the Anomalous Electroweak Baryon Number Nonconservation in the Early Universe”, Phys. Lett. B **155**, 36 (1985).
- [3] M. Fukugita and T. Yanagida, “Baryogenesis Without Grand Unification”, Phys. Lett. B **174**, 45-47 (1986).
- [4] Y. Chikashige, R. N. Mohapatra and R. D. Peccei, “Spontaneously broken lepton number and cosmological constraints on the neutrino mass spectrum”, Phys. Rev. Lett. **45**, 1926-1929, (1980).
- [5] Y. Abe, T. Ito and K. Yoshioka, “Leptonic cp asymmetry and light flavored scalar”, J. High Energ. Phys. **2023**, 19 (2023).

大気チェレンコフ望遠鏡の性能向上に向けた 半導体光検出器 SiPM カメラの基礎開発

宇宙線研究室 岩崎啓

Abstract The large-sized telescope of the Cherenkov Telescope Array observes gamma rays in the GeV-TeV range. To improve the sensitivity, we are developing a new camera module using semiconductor detector (Silicon Photo-Multiplier, SiPM). We report the performance evaluation of the new SiPM, which outputs faster signal than conventional SiPMs.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

現在、Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画と呼ばれる、口径の異なる解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (IACT) を並べ従来より一桁高い感度で、20 GeV から 300 TeV に渡るガンマ線の観測を目指す計画が進行中である。中でも最も口径の大きい大口径望遠鏡 (LST) は CTA の中で最もエネルギーの低い領域の観測を目指す。現在稼働中の LST では焦点面カメラに光検出器として光電子増倍管 (PMT) を採用している。この PMT に代わる検出器として半導体光電子増倍素子 (SiPM) の採用が検討されている。SiPM は PMT に比べ光検出効率 (PDE) が高いことや、ピクセルサイズを細かくできることで低エネルギー側の感度の向上、低エネルギー閾値化が期待できる。また、積算電流量に対して素子が劣化しないため、月光下での観測が可能であることなど様々な利点が存在し、IACT の光検出器としての採用可能性を有している。しかし、SiPM の欠点として数 10 ns から数 100 ns と信号幅が長いこと、長波長側への感度をもつため、ノイズとなる夜光を検出しやすいことがあげられる。本研究ではそれらを改善する、信号の半値全幅が 3 ns 以下の信号を出力し、さらにチェレンコフ光の波長で検出効率が高く夜光の波長帯で検出効率の低い SiPM の性能評価を 2 つの光検出セルサイズで行い、従来の SiPM と比較し LST への採用可能性と信号幅が短くなった要因を検証した。

増倍率の回復に要する時間 (回復時間) の測定の結果、時定数は $50\ \mu\text{m}$ のセルサイズの SiPM では 700 ns 程度、 $75\ \mu\text{m}$ のセルでは 2000 ns 程度となっており従来の SiPM の 10 倍程度であった。回復時間はクエンチング抵抗の大きさで決まることからクエンチング抵抗が大きくなっていることが考えられ、SiPM の等価回路を作成しシミュレーションを行なった結果、クエンチング抵抗とその寄生容量を大きくすることで波形が再現できることを示した。

この長い回復時間によって、回復時間中のセルにチェレンコフ光が入射することで検出光子数が過小評価される可能性があるが、これをシミュレーションにより評価すると 5% 以内となっていた。

月のない夜の観測では長いリカバリの影響は小さく運用上問題ないと結論づけた。ダークカウントレートやオプティカルクロストーク、夜光到来頻度 (NSBrate) からトリガー閾値をシミュレーションすると 40 p.e. 程度で現行の PMT の 2 倍程度になり、チェレンコフ光の波長帯で PDE が PMT より高いことを考慮しても、現状の読み出し回路では低エネルギー側の閾値が下がる可能性は低いことが示唆された。

また月光下では直流電流による電圧降下、空乏層内部の温度上昇、回復時間の影響により、出力が低下する。これを想定した試験とシミュレーションを行い、シミュレーションの結果と実際の測定結果が 5% の範囲内で一致した。本研究で用いた 3mm 角、 $75\ \mu\text{m}$ のセルサイズでは、月のない夜の 100 倍の NSBrate では、ライトガイドに長波長側の光を吸収するフィルタがある場合、出力が 65% 低下し、ない場合には 85% 低下する。出力低下のうち 80% が回復時間の影響であった。また PDE はフィルタありの場合約 42%、なしの場合 60% 程度低下する。また分解能も 5% 悪化する結果となり、長い回復時間によって性能が大幅に悪化することがわかった。回復時間は先行研究で用いた SiPM の方が 300 ns 程度と短く、回復時間の影響は小さいため PDE や分解能の悪化への影響は小さい。以上の結果から LST の光検出器を本研究で用いた SiPM に変える利点を有しているといえず、回復時間が短く、夜光をさらに削減できる SiPM の開発の必要性を示した。

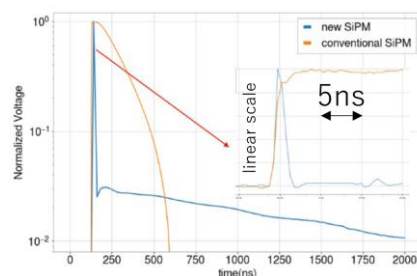


Fig 1. Waveforms of the new SiPM (blue line) and the conventional SiPM (orange line).

Ξハイパー核分光のための機械学習を用いた運動量解析手法の開発

原子核ハドロン物理学研究室 江端健悟

Abstract In J-PARC, the preparation for missing-mass spectroscopy for Ξ hypernuclei with high resolution is ongoing. A new magnetic spectrometer S-2S analyzes the momenta of K^+ 's generated via $^{12}\text{C}(K^-, K^+)^{12}\text{Be}$ reaction. I developed a method to analyze the momentum by using machine learning technique.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

J-PARC ハドロン実験施設では、 Ξ ハイパー核の高分解能分光実験がはじまろうとしている[1]。この実験では K^- 中間子を炭素標的に照射し、 (K^-, K^+) 反応を介して実験室中に Ξ ハイパー核を生成させる。 Ξ ハイパー核のエネルギーピーク [2] を世界最高分解能である $2 \text{ MeV}/c^2$ (FWHM, 半値全幅) で分光測定することで ΞN 間相互作用を調べ、核力の拡張である $S=-2$ 多体系でのバリオン間力の解明を進める。

この実験では新設された S-2S 磁気スペクトロメータを用いて粒子の運動量測定を行い、 (K^-, K^+) 反応の欠損質量分布から Ξ ハイパー核の信号を捉える。このためにエネルギー校正手法も含めた運動量解析手法の開発と実装を行う必要がある。運動量測定においては、スペクトロメータの上流・下流の検出器で捉えた飛跡情報から運動量を再構成する。再構成手法としてはルンゲクッタ (RK) 法や逆輸送行列を用いる手法 (BTM 法) が従来使用されてきた。しかしこれらは現象論的な関数による補正が必要となる問題が指摘されてきた。そこで機械学習を用いる手法 (ML 法) を採用することで、これらの補正を自動的にを行い、従来手法では取り切れない高次の相関を取り入れ、より高効率で高分解能な運動量解析を目指す。

RK 法を用いた場合スペクトロメータの磁場分布を詳細に知る必要がある。一方 ML 法や BTM 法では、磁場分布の初期の理解が不十分でも校正データを用いたパラメータ最適化により、最終的に高分解能・高精度が達成できる可能性がある。実際に JLab では BTM 法で S-2S が目指す分解能以上の高分解能が達成されている [3]。従来手法と比べ ML 法を定量的に理解した上で手法の選定と実用を行う計画である。

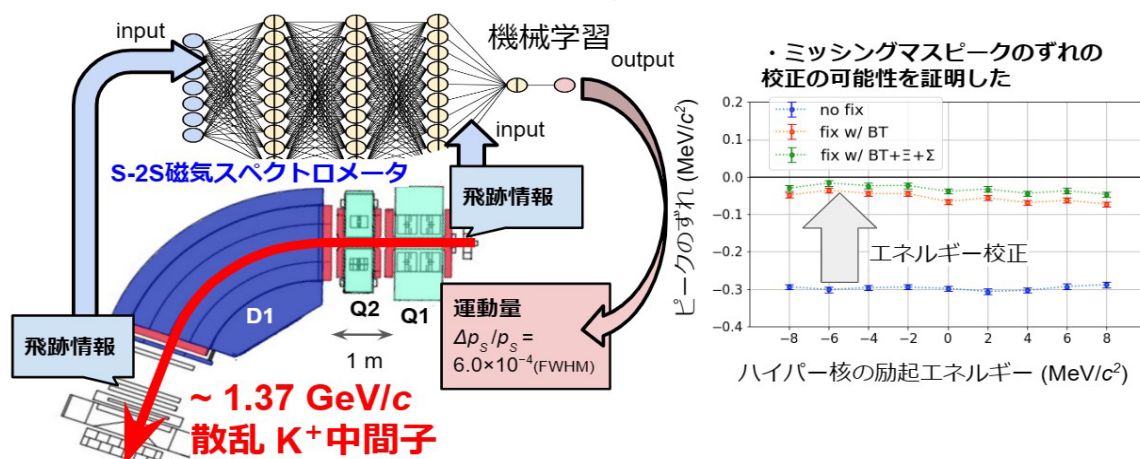


Fig. 1. Flow chart for the development of momentum analysis method by using Machine-Learning (Left) and the demonstration of energy calibration by using beam-through data, Ξ^- and Σ^- peak (Right).

本研究では GEANT4 によるシミュレーションデータを用いた ML 法による運動量解析の基礎的なフレームワーク開発に成功し、今後の詳細な検証の準備が完了した。更に本実験中の Ξ^- , Σ^- 事象を用いたエネルギー校正法の有用性の検証も行い、有用性の証明に成功した。(Fig. 1)

References

- [1] T. Nagae *et al.*, Proposal for the next E05 run with the S-2S spectrometer, Proposals for Nuclear and Particle Physics Experiments at J-PARC (2018).
- [2] T. Motoba, S. Sugimoto, Nuclear Physics A **835**, 223-230 (2010).
- [3] T. Gogami *et al.*, Nuclear Inst. and Method in Physics Research, A **900** 69-83 (2018).

Celestial Holography の AdS/CFT 対応に動機付けられた新たな解釈の提案

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 小川 順生

Abstract In this thesis, we present a new interpretation of codimension-2 flat holography as an application of Wedge Holography[1]. From this holography, we seek to explain Celestial Holography, holography in an asymptotic flat spacetime. This result is based on our paper [2].

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

近年、量子重力理論の理解へのアプローチとしてホログラフィー原理が注目されている。これは「ある時空において定義された量子重力理論は、より次元の低い重力を含まない場の理論によって記述することができる」という予想である。特に曲率が負である時空 (AdS 時空) に対するホログラフィー対応である AdS/CFT 対応は 1998 年に J. Maldacena によって提唱され現在に至るまで目覚ましい発展を遂げてきた。この応用として対象とする時空を曲率が正の時空 (dS 時空) や平坦な時空などの AdS 時空以外の時空に拡張しようとする試みがなされている。本修士論文では漸近的に平坦な時空におけるホログラフィー対応である Celestial Holography を本題として扱う。

Celestial Holography は重力理論における低エネルギー領域での構造から予言されるものである。この低エネルギーの構造は重力波の Memory 効果の観測による検証が期待されており、LIGO/Virgo での観測データより検証可能性が高いことがわかっている。ここで、Celestial Holography は $d+1$ 次元の漸近的平坦な時空における散乱振幅が $d-1$ 次元の共形場理論の相関関数に対応するというものである (Fig. 1)。特に $d=3$ の場合は時空の漸近的な対称性の性質から散乱振幅に二次元共形場理論の対称性 (Virasoro 対称性) があることが示されている [3]。

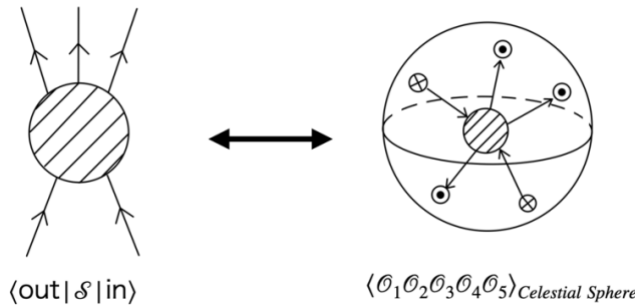


Fig.1 Scattering Amplitude and Celestial Amplitude

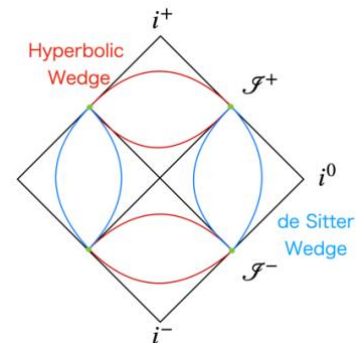


Fig.2 Wedge in flat spacetime

本修士論文のメインテーマは Celestial Holography を AdS/CFT 対応の変形として理解することにある [2]。Celestial Holography の大きな特徴は量子重力理論に対応する場の理論の次元が重力理論よりも 2 つ低いということである。このようなホログラフィー対応は AdS/CFT 対応の文脈でも知られており、Wedge Holography と呼ばれる [1]。この Wedge Holography を平坦な時空に応用することにより、平坦な時空で Codimension 2 であるホログラフィー対応を作ることができる (Fig. 2)。このようにして作ったホログラフィー対応とこれまでに調べられている Celestial Holography の性質を比較することにより AdS/CFT 対応を用いて Celestial Holography が説明できているかを検証する。

References

- [1] I. Akal *et al.*, *Phys. Rev. D*, Vol. 102, No. 12, p.126007, 2020.
- [2] N. Ogawa *et al.*, *Phys. Rev. D*, Vol. 107, No. 2, p.026001, 2023.
- [3] D. Kapec *et al.*, *JHEP*, Vol. 08, p.058, 2014.

質量比の極端な連星の 自己力共鳴時の軌道進化

基礎物理学研究所 宇宙グループ 笥嵩文

Abstract Extreme mass ratio inspirals (EMRIs) are attractive gravitational wave sources. Self-force resonance occurs in EMRI under certain conditions, but its full theoretical calculation has not been performed. In this study, we numerically implemented a toy model in which the gravitational field is replaced by a scalar field.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

銀河中心に偏在する太陽の数百万倍の質量の超大質量ブラックホールと太陽と同程度の衛星ブラックホールからなる、質量比が極端な連星 (EMRI) からの重力波は、高精度観測が可能なことと、銀河中心の情報をもたらすことから注目されており、2030年代打ち上げの宇宙重力波望遠鏡LISAにより観測されることが期待されている。重力波観測においては理論波形の作成が欠かせない。重力波理論波形の作成には軌道進化の計算が必要であり、EMRIの軌道進化は質量比で摂動展開するブラックホール摂動法により行われてきた。

EMRIの衛星ブラックホールがしたがう基礎方程式[1]は、衛星を質点近似することで得られている。衛星は自身の作り出す自己場により軌道進化するが、質点近似により自己場は衛星直上で発散するため、適切な正則化を行う必要がある。正則化の手法は理論的には確立されているものの、数値計算への実装は難しく、様々な技術的な困難に直面してきた。長い研究の歴史の中で多くの困難が克服され、EMRIの軌道進化の計算の枠組みはブラックホール摂動の最低次では確立しつつある。

一方、実際の観測と比較する上で必要な高精度の波形を生成するには、非線形効果や共鳴効果といった考慮にいれねばならない効果が多数あるが、それらの計算法はまだ確立していない。本研究では未確立の計算手法のうち、自己力共鳴効果に焦点を絞り研究をおこなった。自己力共鳴は衛星の動径、極角の振動数比が簡単な有理数になることで生じる効果であり、非共鳴時とは定性的に異なる軌道発展をするため、その効果は従来の非共鳴時の軌道発展計算とは異なる枠組みで行う必要がある。

本研究では、EMRI軌道進化を取り扱う枠組みの一つであるHamilton形式[2]を使った。Hamilton形式による軌道進化実装は、従来とられてきたゲージに依存する自己力を評価する方法とは異なり、ゲージ不変量を評価し、計算効率の面で優れていると期待され注目されている方法である。Hamilton形式で、重力場をスカラー場に置き換えて単純化したトイモデルで共鳴軌道の軌道進化を計算する方法は[3]により提案された。[3]は自己場を正則化する新手法も提唱しており、本研究ではこの新手法の有効性も調査した。

数値実装は大きく分けて、

- (i) モード分解されたハミルトニアン の計算
- (ii) 発散部分をモードごとに差し引く正則化

という二つの部分からなる。(i)では精度と計算速度が両立するように、漸近展開を用いた解析的なフィッティング公式を導出した。(ii)では、複雑に振動する級数の収束を早めるために、その振動の物理的原因を明らかにし、それに基づいた対処法を明らかにした。なお、これらの対処法はスカラー場トイモデルだけでなく、重力場でも問題の原因が共通しているために有効であろうと考えられる。

これらの努力を行ったが、数値誤差を必要な程度まで抑えることができなかったため、軌道進化の結果を正しく得ることはできず、この手法の数値計算上の実装には更なる工夫が必要であることが明らかになった。

References

- [1] Yasushi Mino, Misao Sasaki, and Takahiro Tanaka. Gravitational radiation reaction to a particle motion. Phys. Rev. D, Vol. 55, pp. 3457–3476, 1997.
- [2] Ryuichi Fujita, Soichiro Isoyama, Alexandre Le Tiec, Hiroyuki Nakano, Norichika Sago, and Takahiro Tanaka. Hamiltonian Formulation of the Conservative Self-Force Dynamics in the Kerr Geometry. Class. Quant. Grav., Vol. 34, No. 13, p.134001, 2017.
- [3] Soichiro Isoyama, Ryuichi Fujita, Hiroyuki Nakano, Norichika Sago, and Takahiro Tanaka. Evolution of the Carter constant for resonant inspirals into a Kerr black hole: I. The scalar case. PTEP, Vol. 2013, No. 6, p. 063E01, 2013.

高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた初段ミュオントリガー アルゴリズムの実装と検出器全体への拡張

高エネルギー物理学研究室 河本地弘

Abstract We have been developing a new muon hardware trigger system that can cope with many more background events at the High-Luminosity LHC-ATLAS experiment. We report the status of development, integration of the sequence, and expansion of trigger logics to the entire detector region.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

Large Hadron Collider (LHC) は、欧州原子核研究機構 (CERN) に設置された世界最高エネルギーの陽子陽子衝突型円形加速器である。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ことで、ヒッグス粒子の精密測定や標準模型を超えた新物理の兆候の探索を行なっている。

2029 年より、ビーム輝度をそれまでの約 3 倍に増強した高輝度 LHC の運転が予定されており、豊富な統計量を利用した標準理論の更なる精密検証や生成断面積の小さい新粒子の探索を行う。一方で、1 度のバンチ交差あたりの陽子の衝突数の増加に伴って背景事象のレートが大幅に増加し、興味のある物理事象をデータ取得時に選別する「トリガー」に対する要求がより厳しいものとなる。特に高輝度 LHC の環境下においては、既存のトリガーでは物理として興味のある事象に対する感度が著しく下がってしまうため、トリガーの大幅なアップグレードを行う必要がある。

本研究では、高輝度 LHC-ATLAS 実験においてミュオンを崩壊過程に含む事象のトリガーを扱う。ATLAS 実験のトリガーはハードウェアを用いた高速な初段トリガーとソフトウェアを用いたより高精度な後段トリガーで構成される。エンドキャップ部初段ミュオントリガーでは、磁場の外部に設置された Thin Gap Chamber (TGC) 検出器及び磁場内部に設置された複数の検出器の情報を用いて飛跡の横運動量 (p_T) を判定し、これに基づいてトリガーを発行する。高輝度 LHC では TGC 検出器の回路系を刷新して、全てのヒット情報を大規模 FPGA に送り、アップグレードにより増加したレイテンシーを活用して磁場内部検出器の情報と合わせて統合的に高速処理することでトリガー性能を向上させる。

本研究では、TGC 検出器のヒット情報から再構成した飛跡を磁場内部検出器の情報と組み合わせコインシデンスをとることで背景事象を削減し、その p_T をより高精度に判定するアルゴリズムを開発した。開発したアルゴリズムは閾値以上の p_T を持つミュオンに対して 99.7% の検出効率をもち、これを含めたエンドキャップ部初段ミュオントリガー全体は、閾値以上の p_T を持つミュオンに対し 94% の高い検出効率を保ちながら、閾値以下の p_T を持つミュオン及び背景事象を大きく削減することを確認した。

さらに、開発した個々のトリガーアルゴリズムについて、ファームウェアとして一連の処理を接続して実装し、シミュレーションを用いた動作試験を行うことで、ファームウェアが正しく動作することを確認した。また、アルゴリズムの最適化を行い、FPGA のリソースやトリガー判定時間等の制約をクリアした上で一つの FPGA が担う領域全体へとアルゴリズムを拡張し、全領域でのトリガー判定を可能にした。

また、実装したファームウェアについて動作試験を行い、正しくトリガー判定ができていることを確認した。これにより、高輝度 LHC で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でトリガー判定を行うことができることを示した。

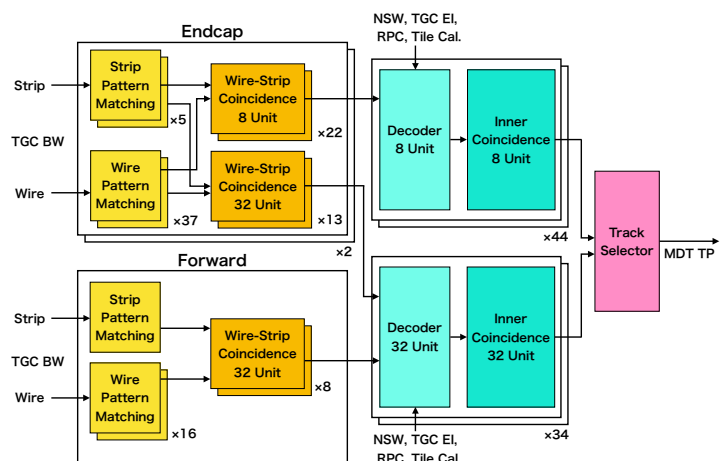


Fig. 1. Overview of integrated trigger logic scheme on an FPGA.

共形場理論の熱平衡化とブラックホールの動力学

基礎物理学研究所素粒子論グループ 川本 大志

Abstract We study dynamics of blackholes from holographic CFTs. One topic is the ETH ansatz for CFTs, which gives the sufficient condition for thermalization. The other is moving mirror models, giving toy models for dynamical blackholes and more general spacetime. We classify the moving mirror models into 4 classes.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

重力と量子論を統合する試みは高エネルギー物理における最大の問題の一つである。特に準古典的な重力理論におけるブラックホールの蒸発に伴う情報喪失と量子重力理論のユニタリー性の矛盾は完全な重力理論を得るために解かれなくてはならない問題である。このような情報喪失問題への有効なアプローチとしてホログラフィ対応がある。これの最もよく知られた実現例である AdS/CFT 対応では、 $(d+1)$ 次元 Anti-de Sitter (AdS) 時空上の量子重力理論と、あるクラスの d 次元共形場理論(CFT)が、見かけの異なる同一の理論であることが予想されている。

この対応を用いると、ブラックホールの形成などのダイナミクスを共形場理論のダイナミクスの解析を通じて調べることができる。ブラックホールは熱力学の法則に従う熱力学的物体であるので星などが重力崩壊を起こしブラックホールを形成する過程は熱平衡化過程である。重力理論において初期状態としてこのような高エネルギーな純粋状態を取りその時間発展を考えるとユニタリー性のために純粋状態であり続けるといけな。そのような純粋状態の熱平衡化は自明ではなく **Eigenstate Thermalization Hypothesis (ETH)**と呼ばれる条件がその必要条件として知られている。本講演の前半では共形場理論における ETH に概説する[1]。

本修士論文の後半ではムービングミラーモデルとそのホログラフィ対応についての著者の研究[2]について概説する。ムービングミラーモデルは Hawking 放射などの重力理論のダイナミクスをモデルする重力のない場の理論である。その特徴として、非自明な時間発展を行う境界を考えることで、状態が非自明な時間発展をし、Hawking 放射などに対応するエネルギーフラックスを吐き出す。特定のミラーの軌跡を考えることで、ブラックホールの形成や蒸発するブラックホールの Hawking 放射の過程と同じ Bogoliubov 係数を持つムービングミラーモデルを構成できる。ムービングミラーモデルの場の理論を重力理論と双対な Boundary Conformal Field Theory(BCFT)に取ることもできる。AdS/CFT 対応の拡張である Island/BCFT 対応を用いると、ムービングミラーモデルはミラーの軌跡を境目にした AdS 重力理論と共形場理論が結合した理論と等価であることが分かる[3]。つまり、このセットアップではムービングミラーモデルは単なる重力理論のトイモデルではなく本質的に重力理論と等価となる。この事実はムービングミラーモデルの解析を通じ、蒸発するブラックホールなどの重力理論の非自明なダイナミクスを論ずることを可能にする。

以上のモチベーションから、筆者は二次元のムービングミラーモデルについての体系的な理解を進めた。その結果、ムービングミラーモデルは二次元の Minkowski 時空の Penrose 図に注目することで、大きく4つのクラス Type A、B、C、D に分けられることが判明した。さらにこの4つの各クラスはその時刻の大きいところでのふるまいから3つのサブクラスに分けられる。エネルギーフラックスやエンタングルメントエントロピーなどの物理量の振る舞いは各クラスごとに普遍的なふるまいを見せる。例えば Type A₀クラスは蒸発するブラックホールに相当しておりエンタングルメントエントロピーは Page 曲線に従うことが知られている。さらに AdS/BCFT 対応を用い、各クラスのムービングミラーモデルの1次元高い重力双対を構成し、これもまた各クラスごとに普遍的なふるまいを見せることを明らかにした。

References

- [1] N. Lashkari, A. Dymarsky and H. Liu, Eigenstate Thermalization Hypothesis in Conformal Field Theory, J. Stat. Mech. (2018) 033101
- [2] Ibrahim Akal, Taishi Kawamoto, Shan-Ming Ruan, Tadashi Takayanagi, Zixia Wei, “Zoo of holographic moving mirrors”, J. High Energy. Phys. **2022**, 296
- [3] A. Almheiri, R. Mahajan, J. Maldacena and Y. Zhao, The Page curve of Hawking radiation from semiclassical geometry, J. High Energ. Phys. **2020**, 149 (2020).

銀河中心領域の陽電子起源探索に向けた MeV ガンマ線コンプトンカメラの高感度化

宇宙線研究室 小林滉一郎

Abstract In the next experiment SMILE-3, we plan to change the scatterer gas to CF_4 in order to improve the effective area. The gain exceeded the required value with the CF_4 main gas at 2 atm, and the first ETCC imaging with the gas was successful.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

銀河中心領域における電子・陽電子対消滅線は 1970 年代に気球実験により発見されて[1]以降、現在も陽電子の起源は不明なままである。SPI/INTEGRAL の観測から推察された空間分布モデルでは、バルジ領域に数十度と大きく丸く分布するとされており[2]、他波長で観測される放射強度分布とは大きく異なる。陽電子起源が天体活動にあれば銀河面に沿った強度分布が期待される一方、暗黒物質の対消滅や原始ブラックホールの Hawking 放射が起源であれば質量分布に依存する強度分布となるため、電子・陽電子対消滅線の空間分布は陽電子の起源探索に大きく影響する。しかしながら、sub MeV における観測は雑音優位でかつ光子の到来方向も決まらないため、大きな空間広がりをもつ放射を精度よく測定できていない。我々はこの状況を打開するため電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC : Electron-Tracking Compton Camera) を開発している。ETCC は MeV で優位なコンプトン散乱を捉える検出器であり、散乱体としてガス飛跡検出器 (TPC) を、散乱ガンマ線の吸収体としてシンチレーション検出器 (PSA) を使用しており、2 度の気球実験で雑音を強力に排除でき、広い視野で天体観測できることを実証した。現在次期計画 SMILE-3 に向け検出器開発を行っており、前回の SMILE-2+ から有効面積 5 ~ 10 倍、空間分解能 (PSF) 2 ~ 3 倍を目標にしており達成できれば、約 1 カ月の観測で対消滅線の空間分布から陽電子起源が解明できると期待されている。

有効面積向上のためには ETCC の TPC 充填ガスの選択が重要であり、雑音事象となる光電吸収を低減かつコンプトン散乱確率を上げる、軽元素分子ガスが望ましいため CF_4 ガスが 1 つの候補となっている。一方 CF_4 は非弾性散乱断面積が大きく電子吸着が起きやすいというデメリットがありゲインが出にくい。今回は軽元素で高利得が狙える Ne- CF_4 (50:50) 2 気圧で動作条件を洗い出し、初の信号取得に成功、ゲイン測定では最小電離粒子の飛跡が見えるという要求値以上のゲインが確認できた (図 1)。また、ETCC の測定を行ったところ、Ne- CF_4 2 気圧で初めてのガンマ線イメージングに成功した (図 2)。PSF を定義する指標の 1 つである散乱角の決定精度 (ARM) は $\sim 7.6^\circ$ を達成し、SMILE-2+ よりも約 1.5 倍良くなったが、もう 1 つの指標である散乱平面の決定精度 (SPD) はあまりよくない結果となった。これは、本実験で用いた μ -PIC の検出面積が小さく反跳方向の決定が難しい短い飛跡しか検出できなかったためと考えている。今後、大面積の μ -PIC を使用することで、ARM に加え SPD と PSF についても SMILE-2+ と比較・評価を行う。

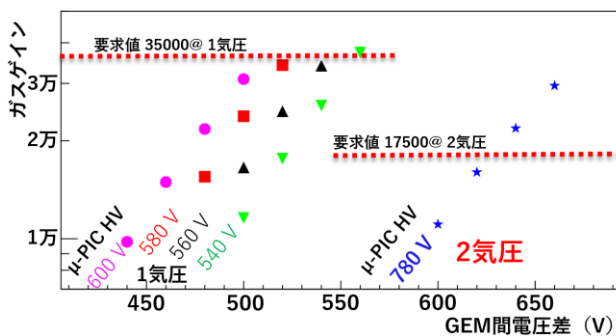


Fig. 1. Gain curve (Ne- CF_4 gas)

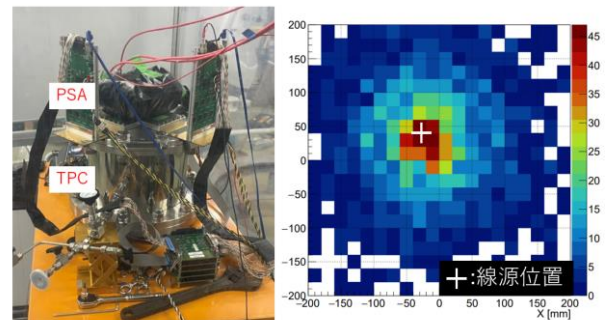


Fig. 2. Overall photo of ETCC (left) and Imaging (right)

References

- [1] N. Prantzos +, Rev. Modern Physics, 83, 1001 (2011)
- [2] T. Siegert et al., A&A 586, A84 (2016)

核物質中におけるラムダポテンシャルの 重イオン衝突・ハイパー核データを用いた検証

原子核理論研究室 神野朝之丞

Abstract We verify a repulsive Λ potential that can solve the hyperon puzzle of neutron star using heavy-ion collision and hypernuclear data. We find that this Λ potential is consistent with these experimental data. We also discuss about the result the new type of Λ potential can explain the hypernuclear data.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

20世紀にはハイパー核データの分析と高密度中性子星物質の現象論から、2から4倍の通常の原子核密度において、中性子星物質中にラムダ粒子などのハイペロンが現れると考えられていた。しかし、ハイペロンを含む状態方程式の多くが柔らかくなりすぎてしまい、2010年に発表された太陽の約2倍という大質量を持つ中性子星を支えられないことが明らかとなった。この問題はハイペロンパズルと呼ばれ、解決に向け現在まで議論が活発に行われている。

ハイペロンパズルを解決する有力な機構の一つに、ラムダ粒子と媒質核子との斥力的な ΛNN 3体力がある。例えば、decuplet saturationという近似を用いたカイラル有効場理論の計算から、 ΛNN 3体力の効果を含む核物質中のラムダポテンシャルが計算されている[1, 2]。Gerstungらの計算結果[1]によると、 ΛNN 3体力が斥力的に作用することにより、高密度領域においてもラムダ粒子が核物質中に現れないことで、ハイペロンパズルを回避できるシナリオが提案された。ただ、このラムダポテンシャルの妥当性について、実験データを用いた検証は行われてこなかった。

そこで本研究では、重イオン衝突とラムダハイパー核という2つの異なる実験データを用いて、カイラル有効場理論から得られたラムダポテンシャル[1]が実験データを再現するか調べた。これにより、上述のシナリオの妥当性を検証した。重イオン衝突におけるラムダ側方フロー[3]及び、ハイパー核におけるラムダ束縛エネルギー[4]を調べた結果、モデルの不定性の範囲内で、Fig. 1とFig. 2に示す通り、 ΛNN 3体力の効果を含む斥力的なラムダポテンシャルは両方の実験データを説明した。したがって、 ΛNN 3体力によるハイペロンパズル回避シナリオは、これらの実験データと矛盾しないという結論を得た。

さらに、我々は、過去ハイパー核データを説明したラムダポテンシャルがハイペロンパズルを引き起こしていたという事実と、今回の結果が一見矛盾する点に着目した。モデルに依存せず様々なラムダポテンシャルを与え、ラムダ束縛エネルギーの再現性を調べた結果、従来のハイペロンパズルを引き起こすものと、高密度領域で斥力的なものの2つの領域がデータをよく再現した[4]。したがって、ラムダ束縛エネルギーを再現するラムダポテンシャルとして、ハイペロンパズルを回避する領域のものを、今まで見落としていた可能性を示唆した。

References

- [1] D. Gerstung, N. Kaiser, and W. Weise, Eur. Phys. J. A **56**, 175 (2020).
- [2] M. Kohno, Phys. Rev. C **97**, 035206 (2018).
- [3] Y. Nara, A. Jinnō, K. Murase, and A. Ohnishi, Phys. Rev. C **106**, 044902 (2022).
- [4] A. Jinnō, K. Murase, Y. Nara, and A. Ohnishi, in prep.

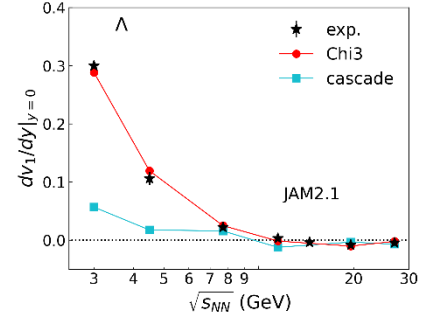


Fig. 1. The slope of the directed flow v_1 at midrapidity for Λ at collision energy $\sqrt{s_{NN}} = 3.0 - 27.0$ GeV. [3]

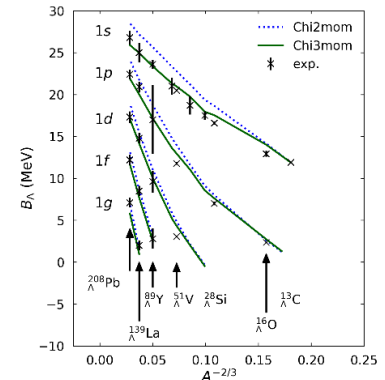


Fig. 2. Λ binding energy as a functions of $A^{-2/3}$ where A is the mass number of hypernuclei [4].

ホログラフィ原理における因果律の諸様相： バルク因果律の下でのカオス上限の解析

素粒子論研究室 杉浦駿

Abstract We attempt to understand some aspects of causality in the holographic description of gravity. We study chaos in geodesic motions in curved spacetimes and show that the MSS bound can be violated, even with bulk causality. This suggests that causality is not strong enough to make sure the holographic principle.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

量子重力理論の構築に向けた近年の発展においては、ホログラフィ原理が中心的な役割を果たしている。しかしながら、その対応関係のほとんどはいまだに解明されていない。どのような重力理論がホログラフィックな記述を持ちうるのか？ 反対に、与えられた量子論と双対な重力理論はどのようなもので、重力の情報はどのようにエンコードされているのか？ このような本質的な問題設定からホログラフィ原理の全貌を明らかにすることは、今なお最重要課題として残されている。

本研究では、物理学におけるもっとも基本的な原理のひとつである因果律の観点から、こうした問題にアプローチすることを試みた。因果律がホログラフィックにはどう記述されるのかを調べることで、双対な理論に対してどのような制限が課されるのかを探ることが目的である。我々は「境界から見たバルク因果律」[1]および「バルクから見た境界因果律」[2]という互いに相補的な2つの観点から解析を行ったが、発表ではとくに前者について述べる。

我々は[1]において、バルクの重力理論における因果律が曲がった時空上の粒子の古典カオスにどのような影響を与えるのかを明らかにした。近年、ホログラフィ原理の文脈においては、境界の量子論における量子カオスが盛んに研究されている。とくに、大自由度の有限温度量子系においては、そのカオス性に普遍的な上限が存在することが分かっている。具体的には、系のカオス性を測る Lyapunov 指数 λ が系の温度 T によって

$$\lambda \leq \frac{2\pi T}{\hbar}$$

と押さえられる[3]。Maldacena, Shenker, Stanford により発見されたこのカオス上限は、MSS 上限と呼ばれる。興味深いことに、AdS/CFT 対応[4]によれば、ブラックホール時空と双対な非重力系の量子論の Lyapunov 指数はこの上限を飽和する。ブラックホールは「世界で最もカオス的な系」なのである。そこで、この MSS 上限の飽和はホログラフィック双対の存在条件として機能するものと期待されている。

このような量子系のカオス性は、双対な重力理論におけるカオスからも読み取れるはずである。そこで我々は、古典的なバルク時空中の粒子の Lyapunov 指数を境界の MSS 上限と比較することで、どのような背景時空がホログラフィックな記述を持ちうるのかを調べた。とくに、バルクの重力理論において因果律を破りうるようなセットアップを構成し、因果律の影響を明示的に考察することで、バルクでは完全に因果的なセットアップであっても、境界の MSS 上限は破れるような場合が存在しうることを示した。このような背景時空はホログラフィック双対を持たないものと考えることができる。このことは、バルクの因果律はホログラフィ原理を正当化するには不十分であり、より厳しく適用範囲を制限するようなホログラフィックな原理が存在することを示唆する。

References

- [1] K. Hashimoto and K. Sugiura, *Causality bounds chaos in geodesic motions*, arXiv:2205.13818.
- [2] K. Sugiura and D. Takeda, *Bulk reconstruction of AdS_{d+1} metrics and developing kinematic space*, arXiv:2212.10065.
- [3] J. Maldacena, S.H. Shenker and D. Stanford, *A bound on chaos*, *JHEP* **08** (2016) 106, arXiv:1503.01409.
- [4] J.M. Maldacena, *The Large N limit of superconformal field theories and supergravity*, *Adv. Theor. Math. Phys.* **2** (1998) 23, arXiv:hep-th/9711200.

ホログラフィー原理及び弦理論における境界について

基礎物理学研究所素粒子論グループ 鈴木優樹

Abstract In this thesis, we consider the role of the boundaries in holography and in string theories. We firstly review the basic facts in this direction and then we present our own recent works on entanglement wedges, AdS/BCFT correspondence and boundary states.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

近年、Hawking radiationのエントロピーの時間発展(ページ曲線)を境界付きホログラフィーのテクニックを応用して説明するという仕事が多くなり、以前にも増して境界の働きを理解する事が量子重力への理解につながると考えられ、重要視されている。この修士論文では量子重力理論の重要な候補である弦理論及びそこから予言されるホログラフィー原理において境界が理論のスペクトルにどのような条件を課すかを述べる。

まず初めにホログラフィー原理などの事実を振り返り、その後境界を新たに導入した場合の構成法(境界条件など)について述べる。これはAdS/BCFT対応(Anti-de-Sitter/Boundary Conformal Field Theory)と呼ばれており2011年に定式化された[1]。本論文ではその基礎的研究としてOne-loop補正[2]や背景場の摂動[3]などを筆者の論文に基づいてまとめた。さらにAdS/BCFT対応の応用として次元削減によってブレーンが生成される例[4]について述べる。

一方、弦理論においては境界の候補としてD-braneがある。時空の観点から言うと境界ではないが、世界面の観点ではboundary states(境界状態)と呼ばれる状態で表される。境界状態について弦理論が満たすべき対称性(モジュラー不変性)などから理論のスペクトルに制限がつけられることが知られており、この意味でも境界の果たす役割は大きい。本論文では弦理論やD-braneについて基礎的な事項をレビューした後、最近の筆者らの研究[5]に基づいて量子情報分野で用いられる物理量を用いて境界状態において距離(Boundary Information Metric)を定義し、さまざまな例で計算し、また繰り込み群での振る舞いを数値的に計算した。ホログラフィー原理における対応物も予言し、ブレーン上のスカラー場の作用を計算することで予言を確かめた。このBoundary Information MetricはPage Curveの導出においてブラックホールの微視的状態の距離を定義すると言う点で重要と考えられる。

本発表では時間の都合上、修士論文の中から選んだ一部を紹介する。特にBoundary conformal field theory(BCFT)とBoundary states(境界状態)について紹介した後、筆者らの仕事[5]についても触れる。

References

- [1] T. Takayanagi, “Holographic Dual of BCFT,” Phys. Rev. Lett. 107, 101602 (2011) doi:10.1103/PhysRevLett.107.101602.
- [2] Y. k. Suzuki, “One-loop correction to the AdS/BCFT partition function in three-dimensional pure gravity,” Phys. Rev. D 105, no.2, 026023 (2022) doi:10.1103/PhysRevD.105.026023.
- [3] Y. k. Suzuki and S. Terashima, “On the dynamics in the AdS/BCFT correspondence,” JHEP 09, 103 (2022) doi:10.1007/JHEP09(2022)103.
- [4] S. Sugimoto and Y. k. Suzuki, “Branes from Dimensional Reduction,” to appear.
- [5] K. Suzuki, Y. k. Suzuki, T. Tsuda and M. Watanabe, “Information metric on the boundary,” [arXiv:2212.10899 [hep-th]].

連星種ブラックホールへのガス降着と軌道進化

天体核研究室 鈴口智也

Abstract We explore the accretion and the orbital evolution of binary seed black holes for the purpose of solving the origin of supermassive black holes. We find that merger time-scale is comparable to accretion time-scale. This suggests the equal contribution of merger and accretion in the growth of seed black holes.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

銀河中心には普遍的に超巨大質量ブラックホール（Supermassive black Hole, SMBH）が存在するがその起源は未だにわかっていない。加えて近年の観測により、宇宙開闢から 10 億年程度といった初期宇宙にも $10^7\text{--}10^8 M_\odot$ 程度の SMBH が見つかったが、これらの起源についても謎のままである[1]。

このような早期段階での重いブラックホール（black hole, BH）形成を考える際の難点は、元になる種 BH を急速に成長させなければならないという点である。このようなシナリオの 1 つとして、初代星起源の種 BH をガス降着によって成長させるという説がある。しかし、ガス降着によって持ち込まれる重力エネルギーは輻射に変換され、輻射圧や電離によってガス降着が自己抑制され得るため、ガス降着による成長率には限界があるというのが通説である。近年の研究により、初期宇宙で銀河合体等によって実現され得る高密度環境下では、輻射による影響が抑制され、種 BH が超臨界的に成長できる可能性が示唆されている[2]。これらは単独の種 BH に関して精力的に調べられてきたが（[3]等）、銀河合体で形成されると考えられる連星種 BH の場合について調べられた研究は非常に限られている。

我々の研究では、SMBH 形成過程の解明に向けて、連星種 BH のガス降着による成長と軌道進化について数値シミュレーションを用いて調べた。まずは輻射が効かない状態でケプラー回転する等質量連星を考え、準定常状態時のガス降着率と種 BH の減速率を連星間距離の関数として求めた。その結果、ガス降着率は連星間距離が離れている場合には単独種 BH の場合と同様になり、十分近づくと単独の場合の 2 倍になることがわかった。また、種 BH の減速率に関しては、種 BH がガスから受ける重力だけでなく、降着するガスによって持ち込まれる運動量フラックスも重要であることがわかった。種 BH の減速率はこれらの和によって評価される。これについて調べると、連星間距離が離れている場合にはほぼゼロとなり、連星間距離が近づくにつれて大きくなることがわかった。

これらの結果をもとに種 BH のガス降着と軌道進化の時間スケールを見積もると、共に 10 万年程度でほぼ同じになることがわかった。この結果から、種 BH の成長においてガス降着と軌道進化の結果起こる合体が共に重要になることが示唆された。

References

- [1] Inayoshi, K., Visbal, E., Haiman, Z., ARA&A, 58, 27 (2020).
- [2] Inayoshi, K., Haiman, Z., Ostriker, J., P., MNRAS, 459, 3738 (2016).
- [3] Toyouchi, D., Hosokawa, T., Sugimura, K., Kuiper, R., MNRAS, 496, 1909 (2020)

超新星残骸 G0.61+0.01 における ジェット状爆発の痕跡の発見

宇宙線研究室 田中優貴子

Abstract While recent theories predict jet-like explosions for explaining gamma-ray bursts, no clear sign has been found in supernova remnants (SNRs). Here we present X-ray/radio observations of a Galactic SNR G0.61+0.01, and show evidence for a bipolar motion, which may support the existence of the jet-like explosion in our Galaxy.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

ロングガンマ線バーストまたは極超新星のようにジェット爆発を示唆する超新星が存在し、理論的モデルとして通常の爆発ではなくジェット爆発が提案されている [1] 一方で、系内の超新星残骸について 極超新星の残骸である可能性を指摘している観測研究があるが [2]、運動方向はわかっておらずジェット超新星爆発の決定的な証拠はこれまで発見されていない。そこで我々は銀河中心領域に位置する超新星残骸 G0.61+0.01 の赤緯方向に広がった He-like 鉄輝線放射 [3]、多くの超新星残骸でみられるシェル構造が検出されていない放射構造の特異性に注目し、X 線観測による本天体の解析と電波観測による周辺ガスの運動状態の調査を行なった。

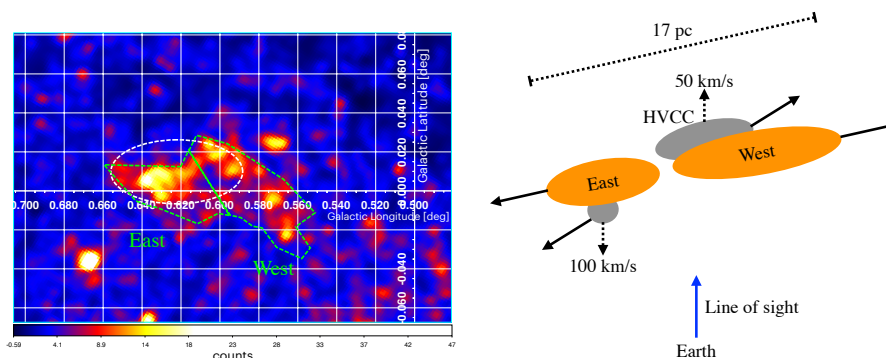


Fig. 1. Left: He-like Fe image (6.6-6.8 keV) of G0.61+0.01. The white dotted ellipse represents the shape of G0.61+0.01 suggested by a previous study [3]. The green dotted lines cover entire region of G0.61+0.01 revealed by our observation. Right: Schematic view of G0.61+0.01 (orange) and surrounding molecular clouds (grey). Black arrows represent the directions of their motions with estimated velocities.

XMM-Newton 衛星によるイメージングの結果、G0.61+0.01 は Fig. 1. 左のように東西に分離したプラズマを有することが判明し、スペクトル解析から温度約 3 keV、年齢 $(4-6) \times 10^3$ 年で太陽組成の 6 倍程度の多くの鉄を含む熱的プラズマであり、 10^{49} erg 程度のエネルギーをもつことがわかった。また、周辺領域の電波観測結果から東部、西部のプラズマ (Fig. 1. の East, West) にそれぞれ反対方向の視線速度帯で SNR プラズマとの相互作用を示唆する高温、高密度の分子ガスが付随していることを発見した。これは、Fig. 1. 右のように G0.61+0.01 のイジェクタが双極的な運動をしている証拠となる。そしてプラズマの運動状態、エネルギー、鉄の存在量などから G0.61+0.01 は過去に発生したジェット状爆発の中でも通常よりエネルギーが一桁低い “Faint SN” とよばれる種族の痕跡である可能性が高いと結論付けた。本研究で我々はイジェクタの双極的な運動の証拠を提示し観測的なアプローチから初めて銀河系内でジェット状爆発が起きたことを支持する結果が得られた。

References

- [1] Ramirez-Ruiz *et al.*, ApJ, Vol 716, Issue 2, pp. 1028-1039 (2010).
- [2] Miceli *et al.*, Advances in Space Research, Vol 41, Issue 3, pp.390-395 (2008).
- [3] Koyama *et al.*, PasJ, Vol 59, No.SP1, pp.221-227 (2007).

高感度宇宙 sub-MeV ガンマ線観測に向けた CdZnTe 検出器による電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発

宇宙線研究室 田原圭祐

Abstract Gamma-ray imaging polarimeter is a unique tool to search for the magnetic structures of gamma-ray bursts, which will lead to reveal their emission mechanism. In this study, I developed a new electron-tracking Compton camera using the CdZnTe detector for better precision in determining the incident direction of sub-MeV gamma rays.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

ガンマ線バーストは、中心エンジンをエネルギー源とした相対論的ジェットを伴う宇宙で最も激しい爆発現象である。その放射機構は衝撃波で加速した電子によるシンクロトロン放射であると考えられている [1] が、未だ謎に包まれている。放射機構の解明のためには磁場の構造を解き明かす必要があり、エネルギーフラックスのピークがある MeV 帯域 (0.1 – 100 MeV) における偏光観測が重要である。しかし、MeV ガンマ線は確立されたイメージング手法がなく、有意な偏光検出例はごくわずかに留まっている。この現状を打破すべく、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 はガスを用いた Time Projection Chamber (TPC) とピクセルシンチレータアレイ (PSA) から構成され、コンプトン散乱における全物理量を取得する。従来法で取得していなかった電子飛跡の情報により、光子のエネルギーだけでなく到来方向も事象ごとに決定できる。さらに、コンプトン散乱における散乱ガンマ線の異方性を利用した偏光の検出も可能である。

コンプトン散乱を利用した偏光観測に有利な 100-200 keV のガンマ線を現行の ETCC で検出するには、シンチレータのエネルギー分解能の低さが散乱角の決定精度に大きく影響し、障壁となる。そこで、高エネルギー分解能、高阻止能を持ったピクセル型の CdZnTe (CZT) 半導体検出器を PSA の代わりに用いることで sub-MeV 帯域での角度分解能の向上を図った。この新しい ETCC では、従来用いていたトリガー方式 (Common-Start 型) のような PSA でトリガーを生成し、TPC のデータを待ち受けるという論理は、CZT のキャリアの輸送能力の低さから利用できない。そのため、TPC と PSA または CZT の双方に信号がある時のみトリガーを生成する Common-Stop 型のトリガー方式を開発した。開発したトリガー回路を PSA と TPC による ETCC に実装することでその健全な動作を確認し、かつ、Common-Start 型 ETCC で問題となっていた PSA と TPC のヒットレートの違いに起因する大きな不感時間を 1 桁以上削減することに成功した。また、CZT 検出器には散乱角の決定に大きく影響する散乱ガンマ線のエネルギーと、TPC でのコンプトン散乱点の決定に使用される時間情報とを精度よく取得することが求められる。CZT の陽極と陰極の双方の信号を用いた解析手法を開発し 166 keV における CZT のエネルギー分解能は FWHM で 2.0%、時間分解能は 60 ns を達成した。新たなデータ収集システムと CZT 検出器の評価を基に CZT と TPC による ETCC を作製し、ガンマ線の検出に初めて成功した (Fig. 1.)。この ETCC の散乱角の決定精度 (ARM) は 166 keV の FWHM で 7.8 度であり (Fig. 2.)、従来の PSA と TPC による ETCC での値 20 度から大幅に改善した。

References

[1] P. Mészáros, *Science*, **291**, 79-84 (2001).

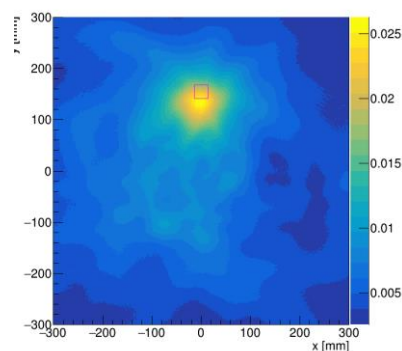


Fig. 1. Gamma ray image of ^{139}Ce (166 keV) obtained by the new ETCC (open square : original source position)

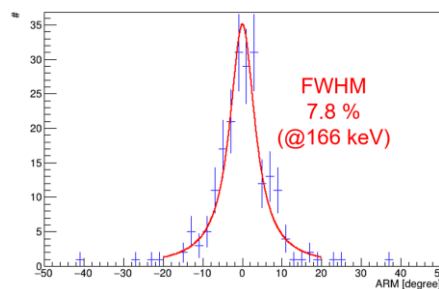


Fig. 2. The ARM distribution of the new ETCC

対称積共形場理論と AdS/CFT 対応

基礎物理学研究所素粒子論グループ 津田崇史

Abstract One of the keys to understand $\text{AdS}_3/\text{CFT}_2$ correspondence is symmetric orbifold CFT. We provide a new method to translate the analysis in this theory into an analysis of cyclic orbifold CFTs. By using this method, we find that free fermion symmetric orbifold CFT with N fermions has $\exp N$ real-time periodicity.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

ビッグバンやブラックホールといった極限的な物理現象の理解のため、量子重力理論の定式化は現代物理学の重要な課題のひとつである。この指針のひとつに、AdS/CFT 対応[1]がある。AdS/CFT 対応によって、 $d + 1$ 次元の AdS 時空における量子重力理論を、その境界に住む d 次元の共形場理論(CFT)によって定式化できる可能性がある。

超弦理論によるトップダウン的構成や、超弦理論に頼らないボトムアップ的アプローチの研究によって、AdS/CFT 対応が成立することは広く受け入れられている。一方で、この対応が成立するメカニズムは明らかではなく、これを明らかにするためさらなる研究が必要である。3 次元 AdS 時空の重力理論と 2 次元 CFT の対応である $\text{AdS}_3/\text{CFT}_2$ 対応については、2 次元 CFT に特別に備わる無限次元の対称性のため、その理解が進んでいる。

この $\text{AdS}_3/\text{CFT}_2$ 対応を理解する上では、対称積共形場理論(symmetric orbifold CFT)と呼ばれる CFT が鍵となる。というのも、超弦理論による $\text{AdS}_3/\text{CFT}_2$ 対応の実現[1]における 2 次元 CFT は、特別な対称積共形場理論の変形によって再現できるとされる。ほかにも、ボトムアップ的な $\text{AdS}_3/\text{CFT}_2$ 対応の研究により明らかになった 2 次元 CFT 側の必要条件のうち、多くを満たすことが知られている[2]。さらに、このような望ましい性質を持ちながら、対称積共形場理論は厳密な解析と相性がよい。以上の事実から、対称積共形場理論は $\text{AdS}_3/\text{CFT}_2$ 対応の研究において重要な位置を占めている。

本研究では、このような背景を持つ対称積共形場理論について、Hecke 演算子と呼ばれる演算子に着目し、新たな解析手法を提案した。一般に、orbifold CFT の状態にはツイスト・セクターと呼ばれる励起が存在し、対称積共形場理論においても例外ではない。対称積共形場理論におけるツイスト・セクターの構造は Hecke 演算子によって与えられることが知られていたが[3]、Hecke 演算子を評価する方法は明確に与えられてこなかった。我々は[4]において、Hecke 演算子の評価が対称積共形場理論よりも単純な orbifold CFT である cyclic orbifold CFT の解析に帰着できることを示した。

さらに、具体的なモデルとして、自由フェルミオンの対称積共形場理論を用いて計算を行った。自由フェルミオン cyclic orbifold CFT は、通常の自由フェルミオン CFT の N 倍の時間的周期性を持つことが計算により確認できる。この事実と上述の Hecke 演算子の議論により、自由フェルミオンの対称積共形場理論の時間的周期性が 1 から N までの全ての整数の最小公倍数となることが導かれた。これは N が十分大きな極限で $\exp N$ となり、 $\text{AdS}_3/\text{CFT}_2$ 対応との新たな関連が示唆される。

References

- [1] J. M. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. **2**, 231 (1998); Int. J. Theor. Phys. **38**, 1113-1133 (1999).
- [2] S. El-Showk and K. Papadodimas, JHEP **10** 106 (2012).
- [3] R. Dijkgraaf, G. W. Moore, E. P. Verlinde, and H. L. Verlinde, Commun. Math. Phys. **185** 197–209 (1997).
- [4] T. Takayanagi and T. Tsuda, JHEP **12** 004 (2022).

次世代の極高エネルギー宇宙線観測実験のための 新型大気蛍光望遠鏡の集光カメラの開発

宇宙線研究室 長澤広武

Abstract Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST) is the next-generation experiment to observe ultra-high energy cosmic rays. For an installation of next telescope and its stand-alone operation, I evaluated the basic characteristics of photo-multiplier tubes and developed a new data acquisition system.

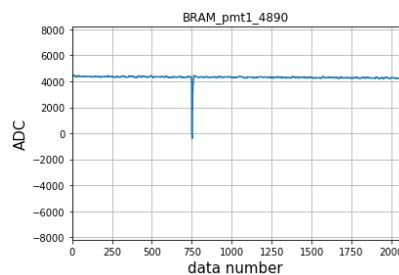
© 2023 Department of Physics, Kyoto University

最近の観測により、地上の粒子加速器の加速限界をはるかに凌駕するエネルギーを持つ粒子、極高エネルギー宇宙線（UHECR）が到来していることが明らかになってきた。この UHECR は銀河磁場で曲げられずに地球まで到来していると考えられており、その起源・加速機構を研究することで宇宙の爆発的な極高天体現象を解明できることが期待される。現行の実験により、57 EeV 以上の宇宙線における到来方向の異方性の兆候が報告されている。しかし、UHECR の到来頻度は、1 km² あたり 1 世紀にわずか 1 粒子と極端に少ないため、起源・加速機構の研究には年間観測事象を一桁増やす必要がある[1]。

Fluorescence detector Array of Single-pixel Telescopes (FAST) 実験は、UHECR への感度を飛躍的に高める次世代の宇宙線観測実験である。観測手法としては、UHECR が大気中で発する紫外線蛍光を地上に設置した光学系で集光し、焦点面にある光電子増倍管（PMT）で撮像する大気蛍光法を用いる。FAST 実験では、直径 1.6 m の小型光学系と 4 本の直径 20 cm の PMT から成る、30° × 30° の視野角を持つ低コスト型の新型大気蛍光望遠鏡を三角形グリッド上に間隔 20 km でアレイ状に展開し、現状よりも一桁多い年間観測事象数を実現する。FAST 実験の開発研究として、これまでに米国ユタ州のテレスコープアレイ実験（TA）サイトに新型大気蛍光望遠鏡を 3 基、アルゼンチン・メンドーサのピエールオージェ観測所（Auger）サイトに 1 基設置し、現在 Auger サイトに 2 基目の建設へ向けた準備が進行中である[2, 3]。

本論文では、設置予定の新型大気蛍光望遠鏡で使用する 4 本の PMT に対して、実験室にて実施した基礎特性評価について報告する。図 1 の左に示すように、暗箱内にロボットアームを設置し、その先端に取り付けたレーザー光源によって PMT の応答を調査した。PMT R5912-03 について、増幅率（ゲイン）測定と非一様性測定を行った。また、磁気シールドを取り付けた PMT R5912-03 と、新型 PMT R14688 についても同様の非一様性測定を行った。

FAST 実験の大規模化を目指すにあたって必要となる、新データ波形収集回路の開発についても報告する。この回路では、太陽光パネルによる自立稼働を見据えて低消費電力での稼働や、FAST 実験の将来的な運用に対応したチャンネル数などが要求される。本研究では、最適なトリガー条件を見積もるためのシミュレーションや、完成した試作基板に実装されている Zynq のファームウェアの構築を行った。また、TA サイトで新データ波形収集回路の運用試験を実施し、図 1 の右に示すように、宇宙線由来の可能性のある信号を検出した。



References

- [1] R.U. Abbasi et al., ApJ Letters, 790, L21 (2014)
- [2] M. Malacari et al., Astropart. Phys., 119, 102430 (2020)
- [3] T. Fujii et al., Astropart. Phys., 74, 64 (2016)

Fig. 1.

(Left) The experiment setup in a black-box for the test of basic characteristics of photo-multiplier tubes.

(Right) The example of the event signal by the observation test at TA. The width of this waveform is about 250 ns.

フラクトンと場の量子論

基礎物理学研究所素粒子論グループ 中西泰一

Abstract Fractons are quasi-particles which appear in condensed matter physics and quantum information. Fractons have attracted attention from high energy physics recently, because they have something to do with the gravity theory and new kinds of symmetries. In this thesis, I focus on the field theoretic description of fractons.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

本研究では、フラクトンと呼ばれるタイプの物性理論において現れる準粒子について主に連続場の理論による記述に主眼を置いて解析した。フラクトンと呼ばれる準粒子は様々な物性物理学のモデルにおいて現れていたが、2011 年の Haah' s code [1] や 2016 年の X-cube モデル [2] などの量子誤り訂正機構を記述するスピモデルにおいて現れることが分かってから、特に注目を集める分野となった。さらに近年では、重力理論との関連 [3] や様々な新しい種類の対称性との関連が見いだされ、高エネルギー物理学からの関心も寄せられている。

フラクトンには様々な種類があるが、その特徴的な性質は単独で空間中を移動できる励起が存在しないことである。例えば、Haah' s code に現れるフラクトンの励起はフラクタル構造を持った演算子の錘の頂点に現れ、フラクタル構造を保つようにしか動くことができない。このため、移動するときは頂点に現れるフラクトンが同時に動かなければならない。また、X-cube モデルに現れるフラクトンの励起は単独では移動することができず、ダイポールを形成することで動くことができるようになる (Fig. 1 参照)。これらの中でも特に注目されているのは X-cube モデルのフラクトンである。

フラクトンを記述する場の理論は格子上のフラクトンが持つ特徴的な性質を再現するように様々なモデルが考えられている。例えば、ある種類のフラクトンは部分系対称性と呼ばれる対称性を持つモデルに現れることが分かっているため、場の理論でこの部分系対称性を再現するような理論が考案され、研究が進められている。また、X-cube モデルは多様体の葉層構造と深い関係を持っていることが知られている。このため、トポロジカル相を記述する位相的な場の理論のように、葉層構造で特徴づけられる相を記述するような場の理論が様々な考案されている。さらに、X-cube モデルではフラクトンは単独では動くことができないが、ダイポールを形成することで移動可能になるような励起として現れるという性質に着目して、ダイポールモーメントの保存則を導くような“テンソルゲージ理論”という場の理論が考案され、解析が進められている。

本論文ではこれらのフラクトンを記述する場の理論についての近年の進展をまとめ、さらに自身の研究結果として、部分系対称性を持つ理論のカイラル理論の提案、アノマリーの構造、真空の縮退度と対称性の関係などの解析を行い [4]、葉層構造によって定まる相を記述する新しい種類の場の理論の提案や、テンソルゲージ理論の対称性の自発的破れから現れる Goldstone モードと部分系対称性を持つ場の理論の関係などについて論じた。

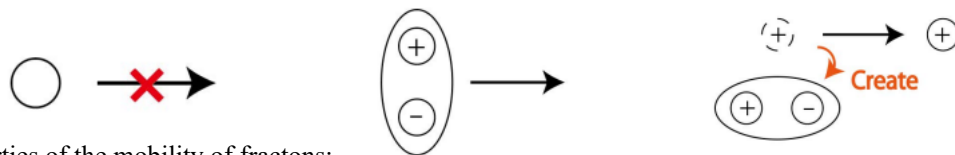


Fig. 1 Properties of the mobility of fractons;

1) they cannot move alone, 2) they can move as fracton dipoles, 3) they can move creating dipoles from the vacuum.

References

- [1] J. Haah, Phys. Rev. A **83**, 042330 (2011).
- [2] S. Vijay, J. Haah, and L. Fu, Phys. Rev. B **94**, 235157 (2016).
- [3] M. Pretko, Phys. Rev. D **96**, 024051 (2017).
- [4] M. Honda and T. Nakanishi, arXiv:2212.13006 (2022).

星周物質の X 線精密分光による 超新星残骸 RCW 103 の親星推定

宇宙線研究室 成田拓仁

Abstract Circumstellar material (CSM) around supernova remnants (SNRs) reflects the progenitor history since CSM contains the elements produced in progenitors and blown out by stellar winds. I obtained CSM abundances of the SNR RCW 103 for the first time with high-resolution spectral analyses and established the progenitor constraint methodology with CSM.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

大質量($\geq 10 M_{\odot}$)の恒星は進化の最期に重力崩壊型の超新星爆発を起こし、中心にはコンパクト天体が残ると考えられているが、どのような星がどのような爆発を起こしてどのようなコンパクト天体を残すのかは、まだ分かっていない。超新星爆発の残骸(超新星残骸)には、爆発で親星から噴出した物質(爆発噴出物)と、進化の途中で親星から吹き出していた星風が周囲に溜まった物質(星周物質)などが含まれる。さらに付随するコンパクト天体が観測されることもある。そのため、超新星残骸は親星の進化途中と爆発時の物質、コンパクト天体の全ての情報を含んでおり、非常に重要な観測対象であるといえる。爆発噴出物の元素組成は親星の質量に依存することが分かっており[1]、現在の超新星残骸の親星推定に広く使われてきた。星周物質には恒星進化の途中で合成された元素が含まれ、特に炭素(C)、窒素(N)、酸素(O)の組成比は親星の初期質量に加えて、回転速度、対流層の状態も反映している[2]。しかし、今まで超新星残骸の観測に広く使われてきた CCD 検出器では、低エネルギー(≤ 1 keV)でのエネルギー分解能が足りず、星周物質の窒素や炭素の輝線からその元素組成を測定することは難しかった。

そこで本研究では、点源において低エネルギー側の精密分光解析に適した、XMM-Newton 衛星搭載の反射型回折分光器(RGS)を、コンパクトな構造を持つ超新星残骸 RCW 103 に応用し、低エネルギー側(≤ 1 keV)の精密分光解析を行なった。その結果、この天体で初めて窒素の輝線を検出し、星周物質特有の元素組成比($N/O = 3.8 \pm 0.1 (N/O)_{\odot}$)を得た。また、恒星進化シミュレーションを使って様々な親星の星周物質の N/O を計算し、親星の初期状態と星周物質の N/O の関係を調べた。Fig. 1 にシミュレーションと観測結果の比較を示す。この比較と爆発噴出物の情報と合わせることで、RCW 103 の親星の初期質量($10 - 12 M_{\odot}$)と初期回転速度($\leq 100 \text{ km s}^{-1}$)を制限することに成功した。超新星残骸の

星周物質観測から親星の初期回転速度を制限できたのは初めての例であり、最後にこの結果を使って中心のコンパクト天体の形成過程についての制限を行なった。今回の研究で確立された星周物質を用いた親星推定の手法は、今後打ち上げ予定の X 線天文衛星 XRISM や Athena によって適用可能な天体が増えるため、様々な超新星残骸の親星の物理量を制限して爆発と親星の関係を探る上で非常に有用な手法になると期待される。

References

- [1] Katsuda, S., et al., ApJ, 863, 127 (2018).
- [2] Maeder, A., et al., A&A, 565, A39 (2014).

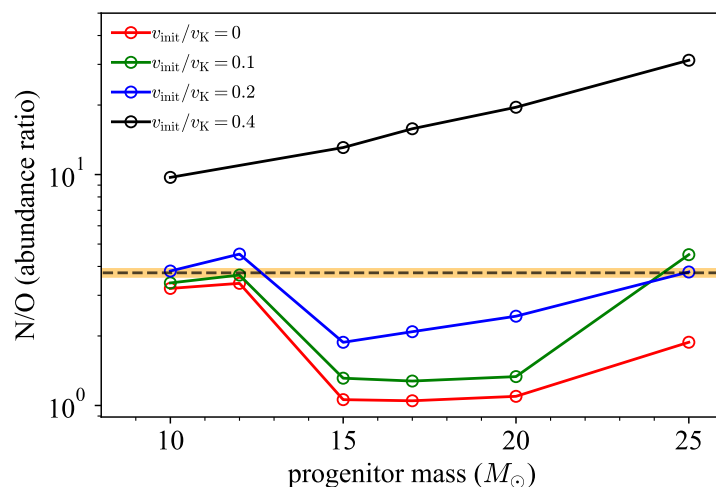


Fig. 1. Relationship between N/O of CSM and progenitor mass (Natita, T., et al. in prep). Black dashed line and orange hatched region show measured N/O of RCW 103. v_{init}/v_K is the ratio of the initial rotation velocity to the Kepler velocity. Colors correspond to models with different v_{init}/v_K .

マグネター磁気圏における高速電波バーストの粒子散乱

天体核研究室 西浦 怜

Abstract Fast radio bursts produced in a magnetar magnetosphere can be scattered by particles during propagation, which greatly constrains the emission mechanism. We calculate the effects of magnetized plasma and the phase cancellation of scattered waves in electron and positron plasma, and suggest that the latter dramatically reduces Thomson cross section.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

高速電波バースト (Fast Radio Burst, FRB) とは宇宙で最も明るい電波パルスである。FRB の大多数は銀河系外で発生しており、その起源は完全には分かっていない。2007 年に初めて発見されて以降[1]急速に検出数が増加し、現在までに 800 個以上もの FRB が見つかった[2]。さらに 2020 年、銀河系内のマグネターと呼ばれる強磁場を持つ中性子星のバースト現象に付随して FRB が観測され[3]、本観測で起源天体の 1 つが明らかになった。また FRB の伝搬過程で遠方の銀河間物質と相互作用した痕跡を観測することで、宇宙論への応用もなされており、宇宙の研究で重要な天体現象となっている。

このように FRB の観測や応用が進んでいる一方で、発生機構に関しては未解明であり様々なモデルが提唱されている。観測事実により、単独のマグネターで FRB を発生させるモデルが盛んに議論されているが、マグネターのどの領域で FRB が発生するのか何桁にも渡って分かっていない。マグネターにおける FRB の発生領域として、磁気圏の中で FRB が発生する磁気圏モデルと磁気圏外部の物質との相互作用で発生する相対論的衝撃波モデルの 2 つが有力である。

観測されるいくつかの特徴的な FRB の性質から、相対論的衝撃波モデルは観測事実と整合しないのではないかと議論される場合がある。相対論的衝撃波モデルはミリ秒程度の強く直線偏光した FRB を予言する[4]。しかし観測される FRB の中には、ナノ秒程度の非常に短い持続時間のものや[5]強く円偏光しているもの[6]など、いくつか相対論的衝撃波モデルの単純な予言と整合しない観測例がある。

一方で、磁気圏モデルで発生する FRB はマグネター磁気圏の電子・陽電子プラズマと誘導コンプトン散乱と呼ばれる散乱過程によって強く散乱され、磁気圏外部まで伝搬できない場合があることが示唆されている[7]。相対論的衝撃波モデルでは、磁気圏外部のプラズマ密度が磁気圏内部に比べて十分小さいため FRB の散乱は問題にならない。

本研究では磁気圏モデルにおける FRB の伝搬に対して、誘導コンプトン散乱の反応率を決める基礎過程の 1 つであるトムソン散乱を再考した。具体的にトムソン散乱において強磁場中における(1)背景プラズマ応答効果 (2)散乱波の位相相殺効果、を考慮して散乱断面積がどのように変更されるかを確かめた。(1)の効果は曲率放射という別の放射素過程に対して過去に考えられており[8]、反応率が大きく抑制されることが示されていた。我々はトムソン散乱においては、散乱断面積が抑制されないことを示し新たな物理的解釈を得た。(2)の効果として、強磁場中で電子と陽電子が電磁波と散乱を起こした場合、支配的な運動が電荷の符号に依らず同じであることに注目した。そして、互いに近接した電子と陽電子が同じ電磁波と散乱を起こした場合、1 粒子単体に比べて 1 粒子当たりの散乱断面積が遥かに小さくなることを示し、マグネター磁気圏において FRB が従来よりも減衰せずに伝搬できることが分かった。

References

- [1] Lorimer, D. R. *et al.*, 2007 Science 318, No. 5851, 777.
- [2] Spanakis-Misirilis, A. 2021 Astrophysics Source Code Library, record ascl:2106.028.
- [3] CHIME/FRB Collaboration *et al.*, 2020 Nature 587, No. 7832, 54-58.
- [4] Beloborodov, A. M. 2020 ApJ 896, No. 2, 142.
- [5] Nimmo, K., Hessels, J. W. T *et al.*, 2022 Nature Astronomy 6, 393-401
- [6] Chime/FRB Collaboration *et al.*, 2022 Nature 607, No. 7918, 256-259.
- [7] Beloborodov, A. M. 2021 ApJ 922, No. 1, L7.
- [8] Gil *et al.* 2004 ApJ 600, No. 2, 872-882.

超弦理論におけるエンタングルメントエントロピー

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 原健史郎

Abstract Recent progress in the study of entanglement entropy in string theory is reviewed. For open and closed strings and their respective sectors, we show how to explicitly define the entanglement entropy in string perturbation theory in the form of a series expansion using the orbifold method, and provide a discussion.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

近年、場の理論におけるエンタングルメントエントロピーは、ホログラフィー原理の文脈でその重要性が認識され、盛んに研究されている分野である[1]。一方で弦理論においてもエンタングルメントエントロピーを定義・評価しようとする試みがなされてきた。本稿では弦理論におけるエンタングルメントエントロピーに関する研究の最近の進展をレビューする。

場の量子論におけるエンタングルメントエントロピーは、その部分空間上の密度行列のフォンノイマンエントロピーとして定義されるが、この定義は場の量子論のヒルベルト空間の局所性を利用している。一方、弦理論は長さスケールをもつ対象を記述する、非局所性を持つ理論である。そのため、場の理論のような方法で自然にエンタングルメントエントロピーを定義することには根本的な疑問が含まれている。しかし、そうした疑問はあるものの、形式的には場の理論におけるエンタングルメントエントロピーのレプリカ法による計算を拡張することで一つの明確な定義が可能である[2]。

場の理論におけるエンタングルメントエントロピーはレプリカ法を用いて計算される。しかし弦理論では、原点上で分岐した R^2 上の N -fold cover に対する共形場理論が知られていないため、レプリカ法をそのまま適用することはできない。そこで、整数の N に対して R^2/Z_N オービフォールド空間を考え、 $\text{Tr } \rho^{1/N}$ を計算する手法が知られている。 $\text{Tr } \rho^{1/N}$ に対して奇数の N から解析接続し、最終的に $N = 1$ で微分してエントロピーを計算する。本稿では、最も簡単な開弦の問題として、世界体積がリンドラー地平面を横切る Dp ブレーンの場合を見る。ブラックホール時空では、地平面を横切る時空の地平面近傍での幾何はリンドラー時空となる。リンドラーエントロピーは、地平面の面積が無限大の極限におけるブラックホールエントロピーの量子補正とみることができる。

具体的には、奇整数 N に対して開き角 $2\pi/N$ の円錐空間上の 10 次元 Type-IIB 弦を C/Z_N オービフォールドと見なして 1 ループ分配関数を計算する。ニュートン級数を用いてオービフォールドの分配関数を N で解析接続し、エンタングルメントエントロピーの級数展開を得る。こうして 10 次元の Type-IIB 弦についてエンタングルメントエントロピーを陽に評価することができ、モジュラー不変な級数が得られる。この級数の収束性については明らかではないが、AdS/CFT の文脈では、物理的推論からエントロピーの有限性が期待される[3][4]。

References

- [1] S. Ryu and T. Takayanagi, “Holographic Derivation of Entanglement Entropy from the anti-de Sitter Space/Conformal Field Theory Correspondence”, Phys. Rev. Lett. 96, 181602 (2006); JHEP 0608, 045(2006).
- [2] P. Calabrese and J. Cardy, Entanglement entropy and conformal field theory, J.Phys.A 42 (2009) 504005.
- [3] E. Witten. “Open Strings On The Rindler Horizon.” JHEP, 126, 2019.
- [4] A. Dabholkar. “Quantum Entanglement in String Theory.” 7 2022. arXiv:2207.03624.

10 GHz 帯におけるミリ波受信機を用いた ダークマター候補としてのダークフォトンの探索研究

高エネルギー物理学研究室 藤中峻

Abstract We search for dark-photon cold-dark-matter (DP-CDM) using a millimeter-wave receiver for ~ 10 GHz. To suppress artificial noise, we developed a millimeter-wave dark box covering the whole setup. We did not find any significant signal. However, we set an upper limit of $\chi < 0.8 \sim 1.8 \times 10^{-10}$ at 95% confidence level.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

宇宙全体のエネルギーのうち、約 $1/4$ はダークマターと呼ばれる「質量は持つが光学的に観測できない物質」と考えられている。ダークマターの候補として近年注目されているダークフォトン、電磁氣的境界である金属板表面でわずかな効率で光に転換される性質があり、その転換効率はダークフォトンと電磁場の結合定数 χ の 2 乗に比例する [1]。その転換光を光受信機で捉えることで探索が可能となる。転換光の周波数はエネルギー保存則によってダークフォトンの質量に対応した周波数となる。特にミリ波に対応する質量領域は、宇宙観測による制限が弱く、また地上実験による探索が少ない。本研究では 10 GHz 帯での探索を行い、ダークフォトンの結合定数 χ と質量 m_{DP} の測定、またはこれらの制限値を与えることを目的とする。

特に、本実験の探索領域である 10 GHz 帯には人工的なミリ波のノイズが存在する。これらを取り除いた環境を実現するため、図 1 に示す暗箱を作製した。本セットアップを用いて、14.0~14.1 GHz (質量に変換して $57.9 \sim 58.3 \mu\text{eV}/c^2$) において、ダークフォトンを探した。発見には至らなかったが、結合定数 $\chi < 0.8 \sim 1.8 \times 10^{-10}$ の上限を信頼度 95 % で設定した (図 2)。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 本実験のセットアップ

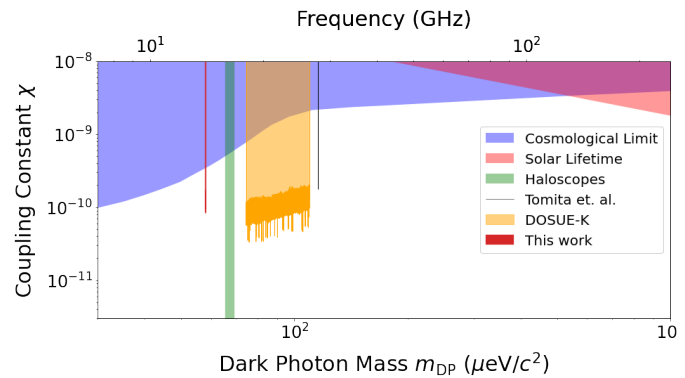


図 2 本研究で設定した、ダークフォトンの結合定数 χ に対する制限 (赤)。横軸はダークフォトンの質量 m_{DP} (下部) とそれに対応する転換光の周波数 (上部)。

References

- [1] P. Arias et al., “WISPy cold dark matter”, JCAP 1206 (2012) 013.

RUNBA におけるビームダイナミックスの研究と 補償装置 EDC, ADC の開発

ビーム物理学研究室 前原義樹

Abstract We analyzed particle motion using Fokker-Planck equation to confirm the reliability of RUNBA's operation. We estimated corrector parameter at each corrector. We developed a prototype of Angular-Diffusion-Corrector (ADC) and Energy-Dispersion-Corrector (EDC) for the RUNBA. I report the development process and show achieved results.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

不安定原子核 (RI) 研究の研究領域は、より短寿命で稀少な RI へと広がってきている。RI は天然に存在せず、それらを対象にした研究を行うためには RI を生成する必要がある。研究対象である RI の生成数を増加させるには一次ビームの大強度化が要求されているが、膨大な電力消費と高レベルの放射線発生という問題が伴う。近年 RI を用いた核反応研究では、たとえ稀少であってもより精密な測定が要求される。精密さは統計量と分解能により保証される。稀少 RI の場合逆運動学反応実験においては十分な統計精度を得るためには標的を厚くしなければならない。しかし、標的を厚くすると分解能が低下し、高精度化が困難である。分解能を低下させないように標的を薄くすると、核反応を起こさず標的を素通りしてほとんどの RI が廃棄される。これを克服し稀少な 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技術が提案されている。京都大学化学研究所 (京大化研) と理化学研究所・仁科加速器科学センター (理研仁科) で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技術とは、内部標的を搭載した蓄積リングを周回する稀少 RI が標的と反応せずに通過しても、再び標的に入射させ核反応を起こすまで周回させることで稀少 RI を無駄なく実験に用いる技術である。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、RUNBA (Recycled-Unstable-Nuclear Beam Accumulator) [1]として再建する計画が進められている。RUNBA において、標的通過時に生じるエネルギーロスとエネルギー分散、角度分散により何もしなければ RI ビームは 1ms 足らずで失われてしまうため、エミッタンス拡大を補償する EDC (Energy dispersion corrector) および ADC (Angular diffusion corrector) を開発する。この補償技術とそれを伴うビーム運動学は決して自明ではなく、理論的にも技術的にも検証・確立する必要がある。

本研究では、内部標的、EDC、ADC を導入した RUNBA におけるビームダイナミックスを記述する

Fokker-Planck 方程式を導出し、これを活用して RUNBA の動作原理の検証および EDC, ADC に要求される補償量の推定とビーム運動の時間発展を明らかにした。また EDC, ADC のプロトタイプ機 (Fig. 1) を開発して、内部標的通過時に得られた時間情報と位置情報を元に必要な補正信号を高速で整形するための回路を作成し、適切な補正信号を計算が示す要求を満たして EDC, ADC 印加できることを実証した。本論文では、ビームリサイクリング技術が、稀少 RI の精密核反応研究を実現する有効な手段であることを示すと共に、作成した装置の性能評価実験の結果を述べ、明らかになった課題について議論する。

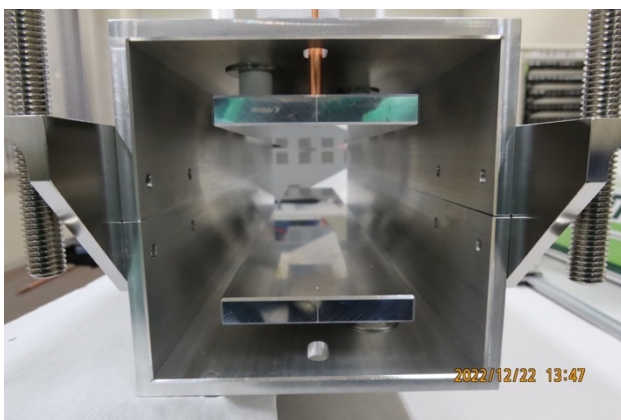


Fig. 1. Angular Diffusion Corrector

References

- [1] M. Wakasugi et al., J. Particle Accelerator Society of Japan, Vol. 4, No. 2, (2022)

稀少不安定核での陽子弾性散乱測定に向けた 新反跳陽子テレスコープの開発

原子核・ハドロン物理学研究室 八尋寛太

Abstract To determine the nucleon density distributions in ^{52}Ca , we plan to perform the precise measurements of proton elastic scattering at RIKEN, RIBF. We now develop a new telescope with GAGG(Ce) calorimeters and SSDs. I report results of the simulation and of the test experiment at QST, HIMAC in 2023.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

陽子や中性子といったハドロンを構成要素とする核物質の状態方程式(EOS)を決定することは原子核物理分野における至上的命題の一つである。EOS の解明は、近年発見された二倍の太陽質量をもつ中性子星の質量機構の解明などをはじめとして、宇宙物理分野に対する波及効果も大きい[1]。EOS は核子あたりのエネルギーを核子密度 ρ とアイソスピン非対称度 δ で展開した形で表現できる。EOS の中でも、 δ 依存項である対称エネルギー $S(\rho)$ は高密度物質である中性子星の内部構造を理解する上で不可欠であるため、近年注目されている。 $S(\rho)$ の一次項の係数である傾きパラメータ L は有限系である原子核での中性子スキン厚と強い相関があることが知られている。つまり、中性子スキン厚を測定することは、EOS の傾きパラメータを制限することができるため、EOS 解明につながる有効な研究手法である[2]。我々のグループでは、不安定核ビームを用いた逆運動学陽子弾性散乱測定計画(ESPRI 計画)を進めている。この測定から、アイソスピン非対称度の大きい原子核の陽子・中性子密度分布精密決定を目指しており、2019 年には中性子過剰核 ^{132}Sn での陽子弾性散乱測定を成功させた[3]。更にアイソスピン非対称度の大きい原子核での陽子弾性散乱測定を計画しており、そのフラグシップとして ^{52}Ca の陽子弾性散乱測定(ESPRI+)を理研 RIBF で予定している。しかし ^{52}Ca は、世界最大の不安定核ビーム強度を誇る理研 RIBF においても、散乱実験でのビーム強度が非常に小さい ^{132}Sn の場合に比べて 1 桁以上少ない稀少な不安定核である。このため、従来の ESPRI 実験で用いられた検出器群では十分な収量が見込めず、統計誤差の観点から、精密な核子密度分布の決定を行うことができない。そこで、我々は ESPRI+実験と称して、新たに GAGG(Ce)カロリメータと Si ストリップ検出器から構成された反跳陽子テレスコープと、多層化固体水素標的システムの開発を進めている。このアップデートにより、稀少不安定核 ^{52}Ca においても、従来と同程度の励起エネルギー分解能と収量を達成し、核子密度分布の精密決定を行うことが可能であると考えている。

本研究では、運動学による新テレスコープに対する要求性能の確認と、上で挙げた個々の検出器の性能評価を行った。その性能をもとに、陽子弾性散乱測定を再現するシミュレーションツールを Geant4 により構築し、 ^{52}Ca での ESPRI+実験で想定される励起エネルギー分解能と収量を確認し、新テレスコープのセットアップ最適化を行った。最適解でのセットアップでは、励起エネルギー分解能 $\Delta E_x \leq 0.6 \text{ MeV}$ 、収量は重心系最後方(運動量移行 $q = 2.5 \text{ fm}^{-1}$)でも統計誤差 30%以上が見込めることから、要求性能を満たしていることを確認した。

上記の試算をもとに、新反跳陽子テレスコープの一部をデザインし、 ^{16}O ビームを用いた性能評価実験を QST HIMAC で 2023 年 1 月に行った。測定では、複数の光センサーと読み出し回路を用いて、弾性散乱事象の弁別を行い、励起エネルギー分解能と収量の評価を行った。エネルギーキャリブレーション方法に改善の余地はあるものの各散乱角度に対して励起エネルギー分解能 $\Delta E_x = 1.3 \text{ MeV}$ 以下、収量については開発したシミュレーションツールにより想定した収量と同程度であることが確認できた。今後は、本実験データのさらなる解析と実験データのキャリブレーション方法の確立、S/N が小さくなる重心系後方用の多層固体水素テストを行い、ESPRI+実験完遂に向け新反跳陽子テレスコープのフルアレイを完成させる予定である。

References

- [1] Lattimer, J. M., Annual Review of Nuclear and Particle Science, 62, 485-515 (2012).
- [2] H. Sakaguchi and J. Zenihiro, Progress in Particle and Nuclear Physics 97 (2017) 1.
- [3] J. Zenihiro *et al.*, Riken Accelerator Progress Report (2019).

J-PARC E16 実験での飛跡検出に用いるシリコンストリップ 検出器の読み出し回路の開発

原子核ハドロン物理学研究室 山口佳奈子

Abstract

The experiment aiming at systematic measurement of vector meson mass is carried out as the J-PARC E16. We adopted the silicon tracking system developed by the CBM experiment at FAIR. The readout system is adapted to the high interaction rate expected in E16. Performance of the modified system is reported.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

J-PARC E16 実験では、原子核中でのベクター中間子の質量スペクトルとその変化を測定する[1]。ハドロンはQCD真空中のクォーク凝縮と相互作用し質量を獲得すると考えられている。クォーク凝縮量は高温・高密度環境下では減少すると予想されており、このような環境下でハドロンの質量を測定することでハドロン質量とクォーク凝縮の関係を明らかにすることが出来る。先行実験であるKEK-PS E325 実験は ϕ 中間子について有意な質量ピークの変化を確認した [2]。本実験では、E325 実験の 100 倍の統計量、また質量分解能 5MeV を目標とし、ベクター中間子の質量スペクトルの系統的測定を行う。

実験では大強度陽子加速器施設 J-PARC の高運動量陽子ビームを原子核に照射し、生成されたベクター中間子の電子・陽電子対への崩壊を測定する。運動量測定のために用いられる飛跡検出器の 1 つがシリコンストリップ検出器(SSD)である。SSD は 2023 年のビームタイムから新たに運用を開始する予定で、検出器及び読み出し回路を GSI-FAIR の CBM 実験と共同で開発中[3]である。読み出し回路は、セルフトリガーで動作する連続読み出し用の STS-XYTER ASIC をフロントエンド回路として用いることが特徴である。

読み出し回路については、E16 実験の要求を満たす開発がいくつか必要となる。まず、SSD が電磁石中に設置されるのに対し、読み出し回路は十分磁場の弱い場所に置かなければならない。回路を磁場外に置くために 10m 以上の長距離のデータ伝送手段について検討を行った。データは 320Mbps という高レートで送られるため、これに対応したケーブルを選定し、また LVDS リピーターの製作を行った。セルフトリガーの回路を用いるためノイズレベルが検出効率に大きく影響することから、長距離のデータ伝送に伴うノイズレベルの変化についても評価を行った。

また、ビームとして 30GeV、 1×10^{10} の高運動量・大強度の陽子ビームを用いるため、標的での反応レートは 10MHz、SSD でのカウンティングレートは 1 モジュールあたり最大 128MHz と予想されている。このハイレートのデータを転送することが必要であるが、CBM 実験で開発されたプロトタイプの回路では下流へ転送するデータ帯域の制限から全てを PC まで転送することが出来ない。これに対処するため読み出し回路の FPGA ファームウェアを更新し、回路下流へのデータ量の削減を行った。このファームウェアを用いてレート耐性の評価を行った結果、約 135MHz まで検出効率 95%で下流にデータを転送できることが確認された。

References

- [1] S.Yokkaichi *et al.* J-PARC E16 proposal (2006).
- [2] R.Muto *et al.* Phys. Rev. Lett. **98**, 042501(2007).
- [3] J.Heuser *et al.* GSI Report 2013-4(2013).

アイソマー弾性散乱に向けたアクティブストッパーの開発

原子核・ハドロン物理学研究室 吉田凌祐

Abstract We are developing a new isomer tagging technique for elastic scattering measurements with isomers. The new detector consists of CeBr₃ scintillator and MPPCs. To optimize performances of MPPCs, a new optical system based on a fast response laser and LED has been developed. I report the details of the system.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

原子核の性質は陽子数、中性子数、励起エネルギーによって劇的に変化する。これらの変数を変え、様々な原子核を調べることは、その性質の理解に重要である。例えば、密度分布は原子核の性質を特徴づける重要な指標の一つである。安定核の密度分布は弾性散乱により測定され、原子核構造理論の発展に重要な寄与をしてきた。近年では、RI ビーム技術の発展、逆運動学条件下での弾性散乱測定手法の確立[1]により、不安定核の密度分布測定も可能となった。しかし、励起状態の弾性散乱実験は、その極短寿命な性質のため、これまで実現されていない。我々は準安定な励起状態であるアイソマーを用いて、この課題を克服できることに思い至った。しかし、アイソマー弾性散乱の実現には高効率なアイソマーの同定手法の確立が必須である。我々は実験的に扱いやすい ¹⁶N(0⁻) アイソマーを用いて、新しいアイソマー同定手法の確立を目指している。¹⁶N(0⁻) アイソマーは中性子ハロー構造が強く示唆され[2]、非一様ビッグバン元素合成模型で重要な役割を果たす[3]ため、物理的にも興味深い対象である。

一般に(飛行)アイソマーの同定は、ストッパーにアイソマーを埋め込み、遅れて放出される遅延放射線を周辺に配置した検出器で検出することで行われる。したがってこの検出効率を上げることが効率的なアイソマー同定の鍵となるが、従来の手法ではストッパーによる放射線の吸収や検出器の配置の制限によりその値は低い(典型的には10%程度[4])。そこで、我々は新手法「アクティブストッパー」を考案した。この手法では、放射線検出器をストッパーとしても用いることで、放射線の吸収がなく、全立体角を覆うことができるため、原理的には100%の検出効率を達成できる。一方、実用上はアイソマー埋め込み時のエネルギーが遅延放射線のエネルギーより 10⁴ オーダー大きいことにより不感時間の問題とフォトセンサーへの課題が生じる。不感時間は、アイソマー埋め込み時のシンチレーション光がバックグラウンドとなり、遅延放射線を検出できない時間である。高い検出効率(95%)を得るためには、減衰時間 30 ns の高速応答により不感時間を短くすることが求められる。フォトセンサーには、遅延放射線より 10⁴ 倍大きい光量でも安定な動作が求められる。これらの要求を満たすアクティブストッパーとして CeBr₃ シンチレータ(時定数 19 ns)と MPPC を採用することにした。MPPC の時間応答が、アクティブストッパーの時間応答を決定する。そのため、MPPC の時間応答を最適化することが重要である。

そこで、本研究では MPPC を最適化するための光学系セットアップを構築した。具体的には、アイソマー埋め込みと遅延放射線の放出のシンチレーション光を模擬するものである。そのためには、それぞれ 5 × 10⁴ 光子/mm²、4 光子/mm² の光量を持った、数十 ns の短パルス光源が必要である。そこで、サブナノ秒パルスレーザーと LED をそれぞれの模擬光源として用いることにした。

本研究では、実際に構築した光学系セットアップが要求性能を満たしていることを調査した。レーザーおよび LED の光量と時間応答の測定には PMT を用いた。PMT で 1 光子のゲインを測定し、ゲインの校正を行った。校正結果を用いて検出光子数を求め、レーザーと LED がともに光量、時間応答の要求を満たすことを確認した。今後は、本セットアップを用いて MPPC の最適化を行い、アクティブストッパーに採用する MPPC を決定する予定である。

References

- [1] Y. Matsuda *et al.*, Phys. Rev. C **87**, 034614 (2013).
- [2] T. L. Tang *et al.*, arXiv 2112.10742v1 (2021).
- [3] L. H. Kawano *et al.*, Astrophys. J **372**, 1 (1991).
- [4] K. Wimmer *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **769**, 65 (2015).

ホモトピー代数に基づく弦の場の理論の定式化

素粒子論研究室 吉中譲次郎

Abstract Homotopy algebra is an essential concept for understanding modern string field theory. In recent years, a partial formulation of superstring field theory, which has been difficult to achieve for many years, has been developed using the homotopy algebra. We review this formulation and discuss its extension.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

弦理論は、自然界の全ての物質とその間の相互作用を統一的に記述する究極理論の有力候補である。この弦理論では、様々な粒子が弦のいろいろな励起モードとして統一的に記述される。弦理論は無数の摂動的真空を持ち、それぞれが異なる時空構造に対応している。こういった摂動論の枠組みを超えて、非摂動的に安定な真空を見つけ出すことは、弦理論を究極理論として完成させるためには必要不可欠である。ところが、現在の弦理論は特定の真空からの摂動的な振る舞いしか分かっていない。弦理論の真空の構造を解明するためには、弦理論を非摂動的に定式化し、弦の非摂動的ダイナミクスを理解する必要がある。

弦理論の非摂動的定式化の候補の1つに弦の場の理論がある。この理論は場の量子論のように弦を第二量子化することによって弦理論の非摂動的定式化を与える。弦の場の理論の作用は、摂動展開により弦の散乱振幅を与えるように構成され、この作用を非摂動的に解析することで、弦の非摂動的ダイナミクスが理解できると期待されている。

弦の場の理論の定式化にはいくつか流派があるが、本論文では近年注目されているホモトピー代数に基づく定式化について紹介する。この定式化では、弦の場の理論の作用の構成要素である写像が持つべき特有の代数構造に注目する。この定式化は作用のゲージ不変性が自明であること、量子化が比較的容易であることといった利点がある。ボソン弦の場の理論については、このホモトピー代数に基づいて定式化する方法が古くから知られていた[1]。一方で、超弦の場の理論についてはボソン弦の場合とは異なり、作用の構成要素である写像に対して、ピクチャー数と呼ばれる超弦理論特有の量子数についての拘束条件を課す必要がある。このことと特定の代数構造を持つことを両立させることは容易ではなく、長らく定式化は未完成であった。近年になって、部分的にこの問題を克服し、ツリーレベルでコンシステントな超弦の場の理論の作用を与える手法が開発された[2]。この手法はミュンヘン構成法と呼ばれている。ミュンヘン構成法では、構成課程においてラージヒルベルト空間と呼ばれる、物理的なヒルベルト空間よりも大きな空間を用いることで、ピクチャー数についての拘束条件と代数構造を両立させた写像を構成している。

我々はこのミュンヘン構成法を拡張し、ループレベルでコンシステントな作用を与えるために必要な代数構造とピクチャー数についての拘束条件を両立させた写像を構成する手法を開発した[3]。この手法で構成される写像をそのまま用いて作用を構成すると、その作用から計算される散乱振幅はループに余分な自由度が回り、弦の散乱振幅を正しく与えない。弦の散乱振幅を正しく与える弦の場の理論の作用を構成するためには、ループを回る自由度を制限する必要があるが、この自由度を制限する方法についても議論する。

References

- [1] B. Zwiebach, “Closed string field theory: Quantum action and the B-V master equation”, Nucl. Phys. B 390 (1993), 33-152 [arXiv:hep-th/9206084 [hep-th]]
- [2] T. Erler, S. Konopka and I. Sachs, “Resolving Witten’s superstring field theory”, JHEP 04 (2014), 150 [arXiv:1312.2948 [hep-th]]
- [3] H. Kunitomo and J. Yoshinaka, “Quantum action for heterotic string field theory with Loop homotopy algebra structure”, in preparation

ソフトヘアブラックホールからのホーキング放射の研究

基礎物理学研究所宇宙グループ 脇隆浩

Abstract It was recently discovered that black holes have infinite hairs other than mass, angular momentum, and charge. These new hairs are called "soft hair". We studied Hawking radiation emitted from black holes with soft hair and showed that Hawking radiation was not changed by soft hair.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

ブラックホールは光でさえも抜け出すことができない領域であり、その特異な性質から、理論的に興味深い天体である。また、ブラックホールは、熱力学法則に類似した性質を持つことが知られている。実際、Hawkingによって発見されたように、ブラックホールは温度を持つ、つまり、「ブラック」ではなく、その温度に応じた光を放出する[1]。Hawkingはこの現象を発見した後、情報喪失問題[2]と呼ばれる現在においても重要な未解決問題を提起した。情報喪失問題は「どのような天体が重力崩壊によってブラックホールになったとしても、Hawking放射により完全に蒸発した後は温度のみによって特徴づけられる黒体放射になることにより、天体が持っていた情報が失われてしまう」という問題である。

また、近年Stromingerによって、重力理論を含むゲージ理論において普遍的に見られる赤外三角形と呼ばれる関係が発見された。これは重力波検出機間の距離の永続的な変化(メモリー効果)、低エネルギーの粒子を含む散乱振幅に成り立つ定理(軟定理)、時空の無限遠における対称性(漸近的対称性)がそれぞれ関係するというものである。さらに、Hawking Perry Stromingerらによって赤外三角形をブラックホールに適用することで、ブラックホールは質量、角運動量、電荷といった「毛」に加え、ソフトヘアと呼ばれる無数の「毛」を持つということが発見された[3]。これは漸近的対称性(ホライズンや、漸近領域に対して非自明に作用する微分同相写像)が状態を物理的に異なる状態(ヒルベルト空間で直行する状態)へと写すという事実による。すなわち、ブラックホールを特徴づけるのは角運動量や質量のみであるという「無毛定理」はある意味間違っているということになる。ソフトヘアはブラックホールのホライズンの状態が、例えば真空であっても、それまで考えられていたよりも豊富であるということを示唆しており、潜在的に情報喪失問題になんらかの貢献をすることが期待されている。現在のところ、ブラックホールのエントロピーの起源に対しては、3次元の場合において興味深い指摘[4]がなされているが、情報喪失問題についてはいくつかの研究(例えば[5])がなされているものの、核心には至っていない。

本研究における問は、半古典ホーキング放射がホライズンのソフトヘアの効果によって変化することによって、ホライズンのソフトヘアが漸近領域のソフトグラビトン(BMS ソフトヘア)へ伝達されるのか、ということである。言い換えれば、漸近的領域にいる観測者はホーキング放射を見ることで、ホライズンソフトヘアがどのようなものかを少しでも知ることができるのだろうか？もし知ることができれば、情報喪失問題の解決への糸口が見つかるかもしれない。しかし、残念ながら、この研究の結果は否定的である。すなわち、ホーキング放射は漸近領域のBMS ソフトヘアには依存するが、ホライズンソフトヘアには依存しない。つまり、半古典ホーキング放射は、ホライズンソフトヘアの情報を持っていない。したがって、量子重力効果、あるいは時空のかなり非自明な逆反応による補正が、情報喪失問題の解決のためには何らかの意味で必要であると結論する。

References

- [1] S.W.Hawking, "Particle Creation by Black Holes"(1975)
- [2] S.W.Hawking "Breakdown of Predictability in Gravitational Collapse"(1976)
- [3] S.W.Hawking,M.J.Perry,A.Strominger"Soft Hair on Black Holes"(2016)
- [4] H.Afshar *et.al.*"Soft Heisenberg hair on black holes in three dimensions"(2016)
- [5] S.Paterski *et.al.*"HPS meets AMPS "(2020)