

2019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

(2020年2月5日、2月6日)

物 理 学 第 二 分 野

修士論文発表会

日時 : 2020年2月5日(水) 9時～

2月6日(木) 9時～

場所 : 理学研究科5号館 525号室

発表時間 : 15分+5分(質問)

《目次》

2月5日(水)

- | | | |
|--|-------|---------|
| 1 . CMB 望遠鏡のためのワイヤーを用いたアンテナ角度較正装置の開発研究 | 阿部 倫史 | (9:00) |
| 2 . ILCダンピングリングにおける永久磁石を用いた補正磁石の設計 | 阿部 賢 | (9:20) |
| 3 . 豪州気球実験SMILE-2+によるかに星雲の観測とガラス基板を用いたガス飛跡検出器の開発 | 阿部 光 | (9:40) |
| 4 . 超新星残骸N49のX線精密分光スペクトルにおける共鳴散乱の兆候の発見 | 天野 雄輝 | (10:00) |
| 5 . ブラックホール soft hair に関するレビュー | 有元 大喜 | (10:20) |
| 6 . CMB 望遠鏡のデータ読み出しシステムの時刻同期と較正に関する開発研究 | 池満 拓司 | (10:40) |
| 7 . A Quantum Informational Dictionary of the AdS/CFT Correspondence | 魏 子夏 | (11:00) |
| 8 . Fast Radio Burstの曲率放射機構への電磁気学的制限 | 宇野 真生 | (11:20) |
| 9 . 偏光を利用した新しいマルチライン時間領域干渉計の開発 | 梅谷 直樹 | (11:40) |

《 午 後 》

- | | | |
|--|--------|---------|
| 10 . Kerr ブラックホール周りにおけるアクシオンのダイナミクス | 大宮 英俊 | (13:00) |
| 11 . 銀河系内宇宙線加速起源候補Boomerang領域のMAGICガンマ線望遠鏡による観測的研究 | 岡 知彦 | (13:20) |
| 12 . 原子核乾板を用いたニュートリノ反応精密測定実験のための大面積シンチレーショントラッカーの開発 | 小田川 高大 | (13:40) |
| 13 . MAGIC望遠鏡による活動銀河核S5 0716+714の超高エネルギーガンマ線フレアの観測 | 梶原 侑貴 | (14:00) |
| 14 . メッシュ実験による次世代X線天文用SOIピクセル検出器のサブピクセル性能の研究 | 佳山 一帆 | (14:20) |
| 15 . 初代星形成における星周円盤の進化 | 木村 和貴 | (14:40) |
| 16 . 高輝度LHC-ATLAS実験に向けたRPC検出器を用いたバレル部ミューオントリガーの開発 | 國吉 宏一郎 | (15:00) |
| 17 . T2K 実験における新型ニュートリノ検出器Super FGDのための研究開発 | 栗林 宗一郎 | (15:20) |
| 18 . 重力双対を持つ 2 次元共形場理論における分離クエンチ | 島地 哲平 | (15:40) |
| 19 . GSIにおける η' 中間子原子核探索実験のためのFRS-WASA用プラスチックシンチレータバレルの開発 | 関屋 涼平 | (16:00) |

2月6日(木)

- | | | |
|---|---------|---------|
| 20 . T2K実験のためのJ-PARC MRにおける16電極モニターの開発及び非破壊エミッタンス測定 | 田島 正規 | (9:00) |
| 21 . MAIKo TPCを用いた $^{12}\text{C} (n,n') ^{12}\text{C} (0_2^+)$ 反応の断面積測定に向けた実験条件の検討 | 土井 隆暢 | (9:20) |
| 22 . LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けたカロリメータトリガーの改良と性能評価 | 羽田野 真友喜 | (9:40) |
| 23 . 低質量ブラックホール・中性子星連星の合体现象に対する数値相対論的研究 | 林 航大 | (10:00) |
| 24 . Ξ ハイパー核精密分光に向けた多チャンネル有感標的の開発 | 原田 健志 | (10:20) |
| 25 . Large N極限による場の量子論の非摂動的解析とプランクスケールの物理 | 春名 純一 | (10:40) |
| 26 . J-PARC E16実験におけるスペクトロメータ電磁石の磁場測定 | 藤井 涼平 | (11:00) |
| 27 . LEPS2実験に用いる Time Projection Chamberの性能評価 | 古田 悠稀 | (11:20) |
| 28 . 物質表面周期構造形成を目指した高強度テラヘルツ波光源開発 | 細川 誓 | (11:40) |

《 午 後 》

- | | | |
|--|--------|---------|
| 29 . Witten Ansatzを用いたホログラフィックQCDにおけるバリオンの研究 | 堀 敬一朗 | (14:30) |
| 30 . Einstein-Gauss-Bonnet重力におけるエントロピーの上限と
Generalized second law | 松田 泰亮 | (14:50) |
| 31 . 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
の開発およびハードウェアへの実装 | 三野 裕哉 | (15:10) |
| 32 . HAL QCD法とall-to-all propagatorを用いたK中間子-核子相互作用の
研究 | 村上 耕太郎 | (15:30) |
| 33 . 小型永久磁石型ECR水素イオン源の特性評価 | 八子 丈生 | (15:50) |
| 34 . Bosonization duality in three dimensions | 世田 拓也 | (16:10) |

CMB 望遠鏡のためのワイヤーを用いたアンテナ角度較正装置の開発研究

高エネルギー物理学研究室 阿部倫史

Abstract It is important to calibrate polarization properties of CMB telescopes: an instrumental orientation of polarization angle, and a crosstalk from unpolarized component. I developed a calibration system for them by using sparse wire grids, and I evaluated its basic performance with one of telescopes for the Simons Array project.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の偏光観測は、インフレーション理論の直接証拠となる原始重力波、ニュートリノ質量和など、様々な新物理を探る強力なプローブである。その鍵となる偏光パターン B モードは非常に弱い信号であり、多くのプロジェクトが高性能な CMB 望遠鏡を駆使して精密観測を行っている。

しかしながら、多くの CMB 望遠鏡、特に大開口径の望遠鏡は二つの解決すべき課題を抱えている。一つは検出器の偏光角度の較正である。この較正の精度が甘いと他の偏光パターンを B モードと見誤ってしまう。結果として重力レンズ由来の小スケール B モードの系統誤差が増大し、ニュートリノ質量和の測定を困難にする。もう一つは望遠鏡を構成する反射鏡が作る偽偏光(無偏光を偏光と見誤るクロストーク)である。大気揺らぎや CMB 温度揺らぎ(共に無偏光)に由来する偽偏光は、B モードの強度に大きな系統誤差を生じる。

本研究では、ワイヤーを偏光源として用いることで偏光の角度較正を行い、かつワイヤー角度を可変にすることで反射鏡が作る偽偏光を評価することが可能な較正装置を考案・開発した。特に、この較正装置の性能を実証するために、Simons Array 望遠鏡に搭載する較正装置を実際に製作した。製作した装置はワイヤーを張ったリングとそれを望遠鏡前に設置する治具であり、ワイヤー角度を高精度でモニターするための重力加速度センサーと、ワイヤーの向きを可変にするための機構を組み込んだ(Fig.1)。

観測地であるチリ・アタカマ高地にて較正の原理検証を行った。ただし、望遠鏡の本観測が開始していない現状で行えることに注力した。具体的には、人工的な偏光源として信号を発していることを確認するための評価実験を行った。望遠鏡が設置されているチリの観測サイトにて、ワイヤーを張ったリングを望遠鏡の前にかざし、回転させることで、その偏光強度の変調をみた(Fig.2)。その結果、十分観測できる強度の偏光を観測し、装置に較正を行うための性能が備わっていることを確認した(Fig.3)。

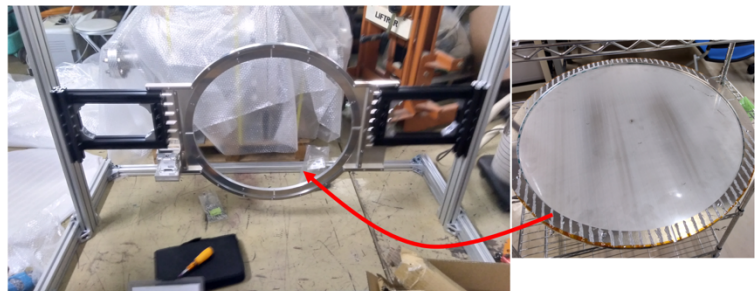


Fig.1. Wire grid calibrator for Simons Array telescope.

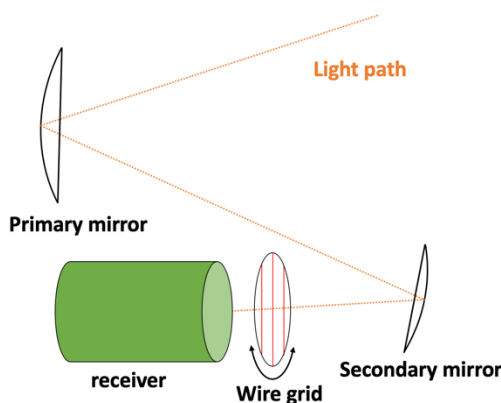


Fig.2. Test of wire grid at site.

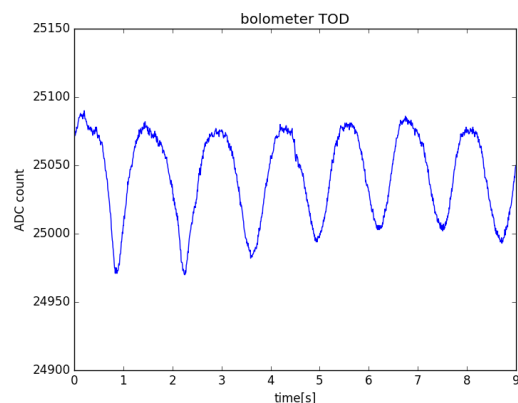


Fig.3. Polarization signal from wire grid.

ILC ダンピングリングにおける 永久磁石を用いた補正磁石の設計

ビーム物理研究室 阿部賢

Abstract We designed a bipolar correction dipole magnet by 3D simulation code CST, and fabricated a prototype. The magnetic field is generated by ferrite permanent magnet rods. The magnetic field distribution was measured and compared with the simulation results. We also investigated the demagnetization of ferrite magnet by neutron radiations.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

近年、加速器は医療や産業利用などにまで活躍の場が広がっているが、原子核や素粒子を用いた基礎科学研究を通じて、新たな粒子の発見、さらには宇宙の誕生の謎などの解明にも加速器は利用されている。これらの研究のためのプロジェクトの1つとして、大型の加速器施設を建設する国際リニアコライダー(ILC)計画が国際協力が進められており、現在日本への誘致を計画している。

ILC 計画の Technical Design Report(TDR)[1]では、ダンピングリング(DR)内の偏向磁石や集束磁石には電磁石を用いることが想定されている。そのため実際の運用時は電磁石のコイル励起のための電力費やその水冷システム、さらに電源設備などの保守コストがかかる。さらに DR 内の磁石は数百個もあり、無視できない。これを改善する方法として電磁石を永久磁石に置き換えることが考えられる。永久磁石に置き換えることで、電力費や電源保守費用が削減でき、水冷システムにおける漏水などの事故を防ぐことなどが見込める。DR 内には偏向磁石と補正磁石の 2 種類があるが、本研究では補正磁石について取り扱う。

まず、先行研究[2]から補正磁石の設計を行い、ビーム軌道面内の磁場分布の様子を三次元計算により調べた。実際には磁石の形状などにより多極成分が現れ、ビーム軌道上の磁場分布は平坦性が崩れる。そのためシミュレーションモデルの形状を改良することにより、磁場の多極成分を TDR の要求を満たすように小さくした。

補正磁石に用いる永久磁石として、必要磁場が大きくないことから比較的安価なフェライトを採用することにしたが、放射線への耐性検証が必要である。先行研究を調査したが、十分な報告を見つけることができなかったため、今回中性子照射実験によりフェライトの放射線減磁の程度を調べた。京都大学複合原子力科学研究所で行なった中性子照射実験の結果から、フェライト磁石の放射線耐性は、加速器の運用においては十分であることがわかった。最後に、補正磁石の試作機を製作し、磁場分布を測定しシミュレーションの結果と比較、検討した。

References

- [1] ILC Technical Design Report; <https://www.linearcollider.org/ILC/Publications/Technical-Design-Report>
- [2] Y. Iwashita, N. Terunuma, “Design Study of PM Dipole for ILC Damping Ring”, IPAC2018, Vancouver, BC, Canada.

豪州気球実験 SMILE-2+によるかに星雲の観測と ガラス基板を用いたガス飛跡検出器の開発

宇宙線研究室 阿部 光

Abstract To demonstrate the imaging spectroscopy capabilities of an electron-tracking Compton camera in space, we performed the SMILE-2+ balloon experiment in Australia in April 2018. In this study, we reported the first results of SMILE-2+. In order to achieve further stable operation for the next campaign, we improved the μ -PIC using a glass substrate.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

MeVガンマ線帯域 (数百 keV ~ 数十 MeV) は、原子核エネルギー準位の遷移放射を観測できる特別な帯域である。星形成・化学進化において重要となる、分子雲の電離・加熱に支配的な役割を果たす低エネルギー宇宙線の探索[1]などが、宇宙での MeV ガンマ線観測により可能となることが期待されている。1990年代にCOMPTEL[2]が全天探査を行ったが定常天体を32個発見するにとどまった。その理由は、MeV帯域特有の膨大な雑音に加えて、COMPTELでは電子の反跳方向を測れず、ガンマ線到来方向を円環状にしか制限できないため、信号の数十倍の雑音を含む不完全な画像しか得られなかったからである。また、上空での天体検出感度と地上較正試験からの予測感度が一致しないという問題もあった。

MeVガンマ線天文学を切り開くべく、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[3]。ETCCは反跳電子飛跡を測定するガス検出器 μ -PIC とピクセル型シンチレータからなる。ガス検出器で電子反跳方向を測ることで、ガンマ線の到来方向を一意に決定することができ、収束した鋭いPoint Spread Function が定義できる。これにより周囲のガンマ線源 (明るい天体、大気・装置ガンマ線雑音) からの漏れ込みを制限、正しく評価することができるため、世界初となるMeVガンマ線の定量的なイメージング分光が実現できる。

ETCCの天体撮像能力を実証すべく、2018年に豪州アリスプリングスにて気球による一日間の観測実験 SMILE-2+を行った。観測対象は MeV 帯域で明るい銀河中心領域からの電子陽電子対消滅線と、かに星雲である。1日観測でのかに星雲の検出は原理実証 ETCC (有効面積 ~数 cm²) でもCOMPTEL と同等の時間あたりの検出感度を持つこと意味しており、感度予測の正確性が確認されれば、大型 ETCC・長期間観測での科学観測の実現を担保できる。本研究では解析の第一段階として、視野に銀河面を含まない時間帯の観測データからバックグラウンドモデルを作成することで、観測イベントの超過マップを得た。結果、銀河中心領域方向とかに星雲の方向から有意な超過を確認した (Fig. 1)。検出数は当初の計画予測とおおよそ一致している。

今後の長期観測計画で懸念事項となるガス検出器動作の安定性を向上させるため高利得低電圧化を目指し、ガラス基板を用いた μ -PIC を開発した (Fig. 2)。X線源 ⁵⁵Fe を用いて性能評価を行い、結果従来のポリイミド μ -PIC に比べて同印加電圧で2倍のガス利得向上に成功した。

References

- [1] E. Orlando et al., Bulletin of the American Astronomical Society, Vol. 51, Issue 3, id. 151 (2019)
- [2] V. Schonfelder et al., Astron. Astrophys. Suppl. 143, (2000) 145-179.
- [3] T. Tanimori et al., The Astrophysical Journal, 810, (2015) 28.

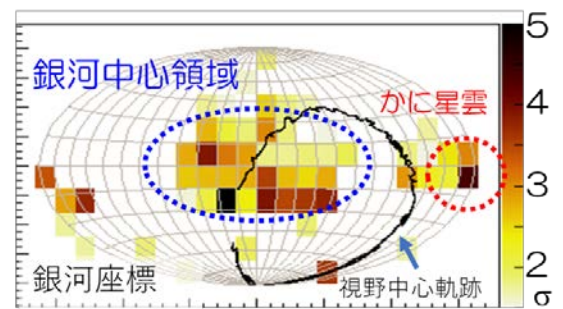


Figure 1. Significance map obtained by subtracting the background model created from high latitude observations.

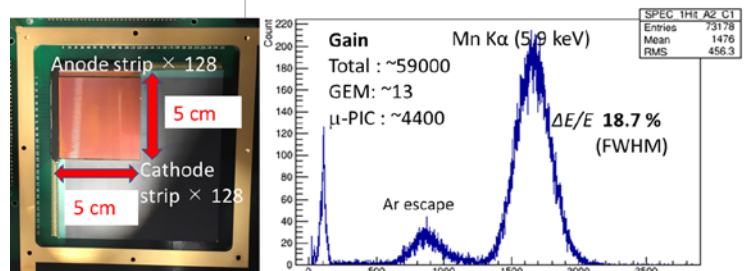


Figure 2. (Left) Photograph of the glass substrate μ -PIC. (Right) Typical energy spectrum obtained by the TGV μ -PIC irradiated X-ray from ⁵⁵Fe

超新星残骸 N49 の X 線精密分光スペクトルにおける 共鳴散乱の兆候の発見

宇宙線研究室 天野雄輝

Abstract We perform a high-resolution X-ray spectroscopy of N49 with Reflection Grating Spectrometer aboard XMM-Newton. We find the line ratios of O and Fe that cannot be explained by emission from thin thermal plasmas. These line ratios indicate the contribution of an X-ray resonance scattering in N49.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

超新星残骸(SNR)プラズマのX線スペクトルから、親星が爆発時もしくは進化の過程で撒き散らした物質の重元素量を測定し、我々は親星の進化や爆発のメカニズムに関して多くの情報を得てきた。正確な重元素量の測定には、プラズマの電離状態や放射過程への理解が必要不可欠である。近年、SNRから過電離プラズマの発見[1]、イオンと中性物質の相互作用による電荷交換反応X線の検出[2]、共鳴散乱の可能性の指摘[3]があった。これらは従来のSNRの進化の描像に反する電離状態、見過ごされてきた物理過程であり、スペクトル解析へ影響する。こうした電離状態や物理過程に加え電子の内殻電離による蛍光X線はヘリウム様イオン $K\alpha$ 禁制線/共鳴線強度比を大きくする。そのため、この輝線の分光はSNRのプラズマの診断に必須となるが、高いエネルギー分解能をもつ検出器でなければ分光できない。

N49は年齢約4800年の重力崩壊型SNRである。N49のCCDスペクトルは2温度のプラズマによる放射で説明でき、高温成分が過電離状態にある[4]。また、広範囲で中性の分子雲と相互作用している[5]という特徴をもつ。我々はヘリウム様酸素 $K\alpha$ ($O\ VII\ He\ \alpha$) 線を分光可能なエネルギー分解能を持つ、XMM-Newton 衛星搭載の Reflection Grating Spectrometer (RGS) を用いて N49 の 0.5-2.0 keV の帯域の精密分光解析を行った。SNRに一般的なプラズマからの放射モデルが期待するものに対して $O\ VII\ He\ \alpha$ の禁制線/共鳴線の強度比は高く、 $O\ VIII\ Ly\ \beta$ 、 $Fe\ XVII\ L\ \alpha$ といった輝線の強度比にも食い違いがあることを発見した(Fig. 1)。そこで我々は N49 における、内殻電離、過電離プラズマ、電荷交換反応、共鳴散乱を検討した。内殻電離、過電離プラズマは $O\ VII\ He\ \alpha$ 強度比とともにスペクトル全体の傾向を再現できない。電荷交換反応による X線放射は $O\ VII\ He\ \alpha$ の強度比を含めて、よく N49 のスペクトル全体を再現するが、 $O\ VIII\ Ly\ \beta$ 、 $Fe\ XVII\ L\ \alpha$ 強度比は依然として説明できない(Fig. 1)。これら輝線の強度比はN49の自己吸収による共鳴散乱でもっともよく説明できる(Fig. 2)。本研究で我々はSNRにおいて共鳴散乱の効果を初めて実測し、この効果が特に酸素の組成比の測定に影響することを明らかにした。重力崩壊型超新星において、酸素の質量の測定は親星の質量を決定する鍵となる[6]。本研究により我々はSNRの解析において、こうした物理過程を考慮することの重要性を示した。

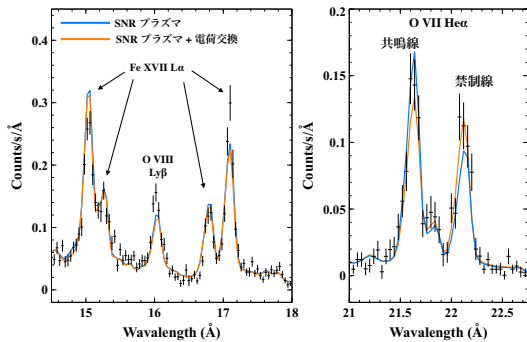


Fig. 1. $Fe\ XVII\ L\ \alpha$ and $O\ VIII\ Ly\ \beta$, $O\ VII\ He\ \alpha$ lines of RGS spectrum.

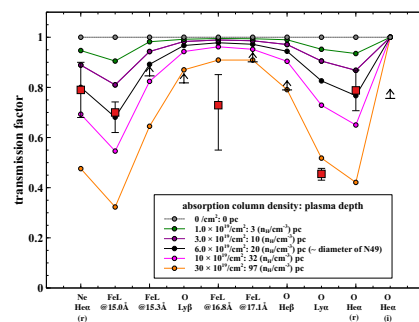


Fig. 2. Transmission factors of each line. Squares and allows are measured value. Circles are expected values.

References

- [1] Kawasaki, M. T., et al. 2002, ApJ, 572, 897. [2] Uchida, H., et al. 2019, ApJ, 871, 234. [3] Kaastra, J. S., & Mewe, R. 1995, A&A, 302, L13. [4] Uchida, H., et al. 2015, ApJ, 808, 77. [5] Yamane, Y., et al., 2018, ApJ, 863, 55. [6] Woosley, S. E., & Weaver, T. A. 1995, ApJS, 101, 181

ブラックホール soft hair に関するレビュー

素粒子論研究室 有元大喜

Abstract This paper is the review of soft hair which is introduced by S. Hawking, A. Strominger, et al. They have shown that there are in fact an infinite number of diffeomorphisms, including an antipodal subgroup of $BMS^+ \times BMS^-$, that act nontrivially on blackhole and thereby make them covered with a lot of soft hair. © 2020 Department of Physics, Kyoto University

本修士論文では、S.Hawking や A.Strominger らによって提唱されたブラックホールにおける soft hair について紹介する。soft hair とは、漸近的平坦な時空の対称性である supertransformation や large gauge symmetry に付随してブラックホール表面に生じていると考えられるゼロエネルギーの重力子や光子である。この soft hair の存在によりブラックホールの情報損失パラドックスを説明できる可能性があると考えられている。

1970年代、Hawking はブラックホールの形成と蒸発の過程で情報が損失することを示した。この結論は因果律、不確定性原理、等価原理という疑いようもない仮定から導かれたもので、避けられないことだと思われていた。しかしこれは量子論のユニタリー性を破ることになる。このことは、ブラックホールの情報損失パラドックスとして知られている。一方で、漸近的平坦な時空の対称性である BMS 対称性の存在は 1962 年に Bondi や Sachs によって示されていた[1][2]。近年になって Strominger らは、物理的な位相空間に対して BMS 変換が非自明に作用することを示し、ブラックホールがたくさんの soft hair を帯びていることを提唱した[3][4]。この soft hair の"髪型"はブラックホールが物質を吸収したときに変化する。これは、soft hair が吸収した物質の情報を担っていると考えられる。彼らは、Hawking が仮定していた

(1) ブラックホールが蒸発した後には情報を保存する場所がない

(2) ブラックホールには"毛"がない

という二つの前提が間違っていたと考えることにより、情報損失パラドックスの解決を試みている。

この論文ではまず、Hawking らにより示された情報損失のパラドックスについて説明する。次に、漸近的平坦な時空がどのような対称性を持つかを考えることで BMS 変換を導入し、その様々な性質についてみていく。特に、BMS 変換の特別な場合である supertranslation は後の soft hair の議論で重要な役割を果たす。その後、ブラックホールと supertranslation との関係を見る。ブラックホールの形成過程において shockwave を吸収した結果、ブラックホールは supertranslation 変換を受けることがわかる。これはブラックホールが supertranslation hair を持っていることを示唆しており、これにより異なるブラックホールを区別することができる。また、電磁場の場合にも似たような性質があることもみる。最後に、まとめと問題点などを提示する。

References

- [1] H. Bondi, M. G. J. van der Burg, A. W. K. Metzner, "Gravitational waves in general relativity VII. Waves from isolated axisymmetric systems", Proc. Roy. Soc. Lond. A 269, 21 (1962)
- [2] R. K. Sachs, "Gravitational waves in general relativity VIII. Waves in asymptotically flat space-time", Proc. Roy. Soc. Lond. A 270, 103 (1962).
- [3] S. W. Hawking, M. J. Perry and A. Strominger, "Soft Hair on Black Holes," Phys. Rev. Lett. 116, no. 23, 231301 (2016) [arXiv:1601.00921 [hep-th]].
- [4] S. W. Hawking, M. J. Perry and A. Strominger, "Superrotation Charge and Supertranslation Hair on Black Holes," JHEP 1705, 161 (2017) [arXiv:1611.09175 [hep-th]].

CMB 望遠鏡のデータ読み出しシステムの時刻同期と校正に関する開発研究

高エネルギー物理学研究室 池満拓司

Abstract GroundBIRD is a CMB telescope which aims to reveal the cosmic inflation. We have developed its synchronization system between detector data and telescope encoder data, and we confirmed that the synchronization system satisfies our requirements. We also applied this technique to the speed up of the detector calibration.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

インフレーション仮説は、従来のビッグバン理論では説明困難な課題、例えば地平線問題や平坦性問題など、を解決する宇宙理論である。インフレーションの一般的な予言として原始重力波の生成があり、これは宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光パターンに空間非対称の成分を作る。特に、その大角度スケールのパターンが原始重力波の証拠となる。したがって、大角度スケールの CMB の偏光観測はインフレーション理論に強い制限を与える。

GroundBIRDは大角度スケールの観測に特化したCMB望遠鏡で、全天の40%の領域をスキャンする[1]。2019年夏にスペイン領テネリフェ島でテスト観測を開始し、2020年から物理観測を予定している。この望遠鏡は、大角度スケールの観測で課題となる大気変動の影響を抑制するために、20RPM(1分間に20回転)で高速回転するスキャン変調を実装した観測を行う。高速回転スキャンを実現するために応答性の速い光検出器MKIDとそのデータ取得システムを開発している。そして、GroundBIRDでMKIDの速い応答性を活かすためには、望遠鏡の視線方向のエンコーダーデータと検出器データの間での時刻を80 ns以下の精度で同期することが求められている。本研究で、これを達成した。

時刻同期は、GroundBIRD望遠鏡の回転台の「回転継手」(Fig. 1)を介した同期信号の分配によって実現した。その評価実験で同期精度が60 ns以下であることを確認した(Fig. 2)。さらに2019年9月から行われたGroundBIRDの試験観測において、同期システムが正常に動作していることを確認した(Fig. 3)。

時刻同期と合わせて、方位角データの補間を行う必要がある。データ解析時に、時間平均によるエンコーダーデータの平滑化をして角度補間を行うことで、それを実現した。実データを用いて、この手法を評価し、エンコーダーが有する角度分解能と比べて標準偏差で1/50の分解能が得られることを確認した。これは望遠鏡と検出器の校正精度の向上に直結する。

また、本観測において課題となる読み出しシステムの環境依存性を評価し、温湿度の変化に応じた読み出し系の校正が必要であることを明らかにした。さらに、開発した時刻同期機能を応用することでMKIDの校正を高速化できることを考案した。その結果、従来手法と比較して、校正測定にかかる時間を一桁短縮することに成功した。

以上のデータ読み出し系の開発研究によって、GroundBIRD実験の観測ストラテジーを実現することが可能になった。

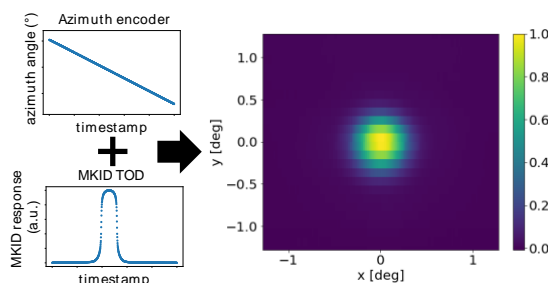
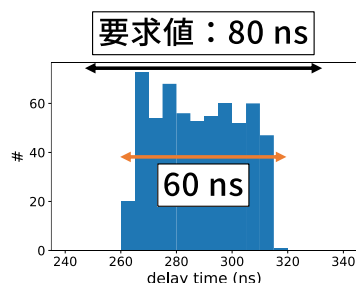


Fig. 1. The rotary joint.

Fig. 2. Accuracy of synchronization.

Fig. 3. Synchronized data taken in moon observation.

References

- [1] O. Tajima *et al*, Proc. SPIE, 8452:84521M–84521M–9, 2012.

A Quantum Informational Dictionary of the AdS/CFT Correspondence

基礎物理学研究所 魏子夏

Abstract We review quantum informational quantities including distance measures and entanglement measures, their extension to quantum field theories, and holographic counterparts via AdS/CFT. We worked out new dynamical setups of local quenches and their gravitational duals, where time evolution of the entanglement entropy plays a crucial role.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

現代の量子重力の研究において、ホログラフィー原理は重要な役割を果たす。ホログラフィー原理は、 $d+1$ 次元の量子重力理論が、 d 次元の重力を含まない場の量子論と等価であることを主張している。その一つの実例として、「 $d+1$ 次元漸近反ド・ジッター時空 (AdS) における量子重力は d 次元における共形場理論 (CFT) と等価である」という AdS/CFT 対応 [1] が知られている。今までの AdS/CFT 対応の研究は、片方の理論において難しい解析をもう片方の理論に移して行うものが多かったが、その基礎原理、つまり、AdS/CFT 対応がなぜ成立するのかは未だにわかっていない。

「 d 次元 CFT におけるエンタングルメント・エントロピーが、 $d+1$ 次元 AdS 時空における特定の $d-1$ 次元超曲面の面積に等しい」という笠・高柳の公式 [2] の発見が発端となって、量子情報理論の手法や物理量を用いた AdS/CFT に関する研究が盛んに行われていて、AdS/CFT の基礎原理の解明に対して多大な手掛かりを与えてきた。エンタングルメント・エントロピーは量子相関であるエンタングルメントを純粋状態かつ二者間に対して計る量であるが、近年では、[3]をはじめ、より広いクラスのエンタングルメント測度と AdS 中の $d-1$ 次元超曲面との関係が調べられている。これらの結果は AdS 時空が CFT のエンタングルメントから創発されていることを示唆している。更に、 $d-1$ 次元超曲面に限らず、 d 次元超曲面などの幾何学量と、複雑度やフィッシャー情報などの量子情報的な量との関係も調べられている [4, 5]。そこで、本修士論文では、AdS/CFT に関して簡単に説明した後、量子情報理論の観点からエンタングルメント測度と距離測度を解説する。その後、別の観点で、AdS における幾何学的な量と CFT における量子情報的な量の関係について解説する。

ここまでは、AdS/CFT における量子情報的な量に関する辞書を与えるが、その応用の具体例として、エンタングルメント・エントロピーが AdS/CFT のダイナミクスを調べる上で果たす役割について考えてい。特に熱化過程の代表例であるクエンチについて考える。AdS/CFT におけるクエンチは、ブラックホールが生成する過程に対応するので、重要な意味を持つ。本修士論文の後半では、特に私の共著論文である [6, 7] の結果について述べたい。元々別れている二つの系を接合して局所励起を与えるという局所接合クエンチ [8] のエンタングルメント・エントロピーの時間発展の振る舞いは、これまで解釈が困難であったが、[6] で我々は、元々繋がっている系を局所的に切り離すという局所分離クエンチを提案して、両方の対応する重力のダイナミクスを具体的に構成して比較することで、エンタングルメント・エントロピーの時間発展の振る舞いに明快な理解を与えた。更に、[7] では、二つの局所励起を同時に与えるという二重局所クエンチと対応する重力のダイナミクスを調べて、エンタングルメント・エントロピーを用いて、それが二体間の重力相互作用と解釈できることを見た。

References

- [1] J. M. Maldacena, *Int. J. Theor. Phys.* **38**, 1113-1133 (1999); *Adv. Theor. Math. Phys.* **2**, 231 (1998)
- [2] S. Ryu and T. Takayanagi, *Phys. Rev. Lett.* **96**, 181602 (2006)
- [3] K. Umemoto and T. Takayanagi, *Nature Phys* **14**, 573-577 (2018)
- [4] L. Susskind, arXiv:1402.5674
- [5] M. Miyaji, T. Numasawa, N. Shiba, T. Takayanagi and K. Watanabe, *Phys. Rev. Lett.* **115**, 261602 (2015)
- [6] T. Shimaji, T. Takayanagi and Z. Wei, *J. High Energy Phys.* 03 (2019) 165
- [7] P. Caputa, T. Numasawa, T. Shimaji, T. Takayanagi and Z. Wei, *J. High Energy Phys.* 09 (2019) 018
- [8] P. Calabrese and J. Cardy, *J. Stat. Mech.* (2007) P10004

Fast Radio Burst の曲率放射機構への電磁気学的制限

天体核研究室 宇野真生

Abstract Fast Radio Bursts (FRBs) are millisecond radio bursts that originate from as-yet-unidentified extragalactic sources. They are similar to pulses of Galactic radio pulsars, but the luminosity is of order one billion times larger than typical giant pulses. We study various effects on radiation of FRBs, including back reaction of radiation and effects of surrounding plasma. We find some constraints on parameters of FRBs.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

Fast Radio Burst (FRB)と呼ばれる、2007年に Lorimer らによって発見された GHz 帯の電波信号がある[1]。FRBの信号は放射の継続時間がミリ秒程度と非常に短いことが特徴的であり、現在では観測される dispersion measure が大きいことや、一部のイベントで母銀河が特定されたことなどから、銀河系外から飛来してきているものと考えられている。しかしながら、その放射機構や起源などはいまだに謎のままであり、これは現在の宇宙物理における大きな問題のひとつとなっている。

FRBの放射機構を考える上で重要な意味を持つ物理量として、輝度温度 T_B というものがあり、FRBの場合には輝度温度は非常に高い値 ($kT_B \sim 10^{32}$ eV) を示すことが知られている。このような高い輝度温度はFRBの放射がコヒーレントでなければならないことを示しており、パルサーのパルス放射などと類似的である。一方で、FRBのLuminosityはパルサーよりも典型的には9ケタ程度大きく見積もられており、パルサーと比べて非常に高エネルギーの現象である。

本研究ではまず、コヒーレント放射の機構として、コンパクト星の強力な磁場に沿って多数の荷電粒子の“bunch”を運動させて放射を起こす、所謂 bunch モデルと呼ばれるもののレビューを行った[2]。このとき放射の周波数は粒子が沿う磁力線の曲率によって決まり、適当な曲率に対してFRBの周波数 \sim GHz を得ることは可能である。また、このモデルから得られるLuminosityは、適切なパラメーターに対して、観測から示唆されているFRBのLuminosityを再現できるということも[2, 3]によって示されている。

FRBの放射機構としてこのようなモデルを仮定した上で、本研究では放射の back reaction 及び、bunch内の粒子が互いにCoulomb反発することによる、コヒーレンスへの影響についての議論を行った。一般に多数の粒子がコヒーレントに放射を行う場合には、出ていくエネルギーがコヒーレント放射でない場合に比べて大きくなるため、粒子がエネルギーを失う時間、すなわち冷却時間が非常に短くなることが示される。ここで冷却時間は放射の back reaction が影響を及ぼすタイムスケールにもなっているため、コヒーレント放射の back reaction は bunch のコヒーレンスに対して無視できない影響をもたらす、その結果ソースのパラメーターに対して強い制限を与えるかもしれないということがわかった。

また、コンパクト星の周りには一般にプラズマが存在しているために、bunchによるコヒーレント放射はプラズマの影響を受けなければならない。本研究では[2]において考えられていたプラズマ効果について詳しく掘り下げたことに加えて、粒子のドリフト運動による効果や Razin effect と呼ばれるプラズマ効果などについての議論を行い、放射のパラメーターに対してどのような制限が得られるかを考察した。最後に、これらの back reaction やプラズマからの条件などを統一的に扱い、どのようにパラメーターに条件が加わるかを考察した。

References

- [1] Lorimer D. R., Bailes M., McLaughlin M. A., Narkevic D. J., Crawford F., 2007, *Science*, 318, 777
- [2] Kumar P., Lu W., Bhattacharya M., 2017, *MNRAS*, 468, 2726
- [3] Kashiyama K., Ioka K., Mészáros P., 2013, *ApJ*, 776, L39

偏光を利用した新しいマルチライン時間領域干渉計の開発

核放射物理学研究室 梅谷直樹

Abstract Multi-line time-domain interferometry (TDI) of Mössbauer gamma rays allows us to measure microscopic atomic dynamics. We developed a new multi-line TDI system using circular dichroism of nuclear excitation phenomenon. The performance of the new system was found to be two times higher compared with the conventional TDI.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

放射光などの高指向性 X 線により ^{57}Fe 原子核を励起し、脱励起の際に前方方向に指向性をもって放射される狭線幅 (4.7 neV) の 14 keV ガンマ線を試料に照射し、レイリー散乱されたガンマ線のエネルギー幅の広がり調べると散乱試料中の分子やイオンなどの微視的な運動の時間スケールについての情報を得ることができる。このような実験法は準弾性散乱法と呼ばれ、 $\text{\AA} \sim \text{nm}$ の構造の緩和時間を $\text{ns} \sim \mu\text{s}$ の時間スケールで決定できる大変ユニークなもので、ガラスやソフトマターなどの研究に対し広く用いられている。この準弾性散乱を時間領域で行う時間領域干渉計法では、試料からの散乱ガンマ線を参照ガンマ線と干渉させて、線幅広がり時間スペクトル上で読み取ることで、エネルギー領域で線幅広がりを測定するよりも高効率に測定することができる [1]。これまで本研究室では、複数の波長の単色ガンマ線を同時に用いて時間領域干渉計を構築するマルチライン法などを開発し、大きく測定の効率向上を実現している [2]。しかし、より高精度測定のためにはさらなる測定効率の向上が求められている。本研究では、時間領域干渉計法の測定効率を向上させることを目的として、原子核励起現象における円二色性を利用した新しい時間領域干渉計法を開発しその実証実験を行った。この干渉計では、これまでの手法と異なり、入射光の波数ベクトルに水平な成分を有する磁場を ^{57}Fe 原子核に印加して放射光で励起することで、核励起現象に円二色性が発現し前方方向に入射光と異なる偏光成分のガンマ線が放射される条件を作り出している (Fig. 1)。このとき、2つの干渉用ガンマ線生成のための原子核に反平行に磁場をかけるなど、ある特定の条件下では測定精度が向上することが予測された。この新しい測定法に対し実証実験を行い、その性能の評価を行った。

実験は大型放射光施設 SPring-8 の核共鳴散乱ビームライン (BL09XU) にて行った。スチレンブタジエンゴム試料を対象に、室温での高分子鎖の鎖間構造ダイナミクスを測定するため、鎖間構造の相関情報を持つ散乱角において準弾性散乱測定を行った。得られたスペクトルを Fig. 2 に示す。スペクトルは理論的に予測されたガンマ線干渉関数により大変よく解析でき、その結果鎖間構造の緩和時間として、既存の結果とコンシステントな約 100 ns の緩和時間を得ることができた。このことから、本研究によりこの新方式の実証に成功したと考えられる。さらなる精査により、新方式は従来の測定系に比べて二倍程度の測定精度があることが実証できた。また、このような測定精度向上の要因の評価と考察も行った。

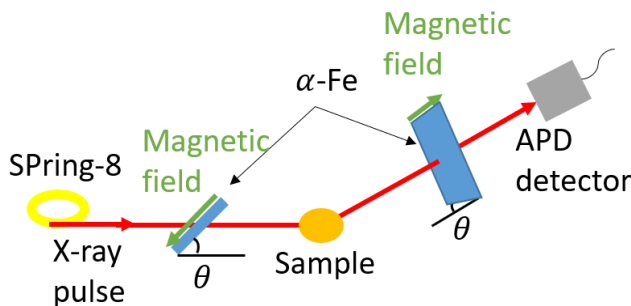


Fig. 1. Schematic picture of the experimental setup.

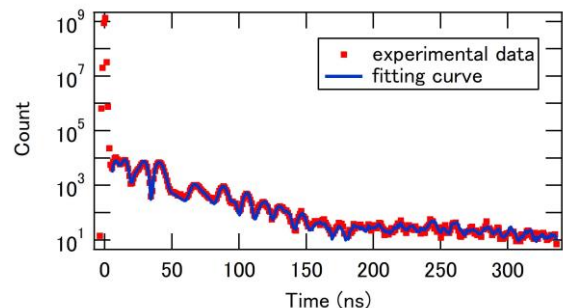


Fig. 2. Example of TDI time spectrum.

References

- [1] A. Q. R. Baron, H. Franz, A. Meyer, et al., Phys. Rev. Lett. **79** 2823 (1997).
- [2] M. Saito, R. Masuda, Y. Yoda and M. Seto, Sci. Rep. **7** 12558 (2017).

Kerr ブラックホール周りにおける アクシオンのダイナミクス

天体核研究室 大宮英俊

Abstract We study dynamics of string axion around Kerr black hole in weakly non-linear regime without using non-relativistic approximation. We find that axion could become a quasi-stationary state after sufficiently long time.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

超弦理論を仮定すると、4次元の世界にはアクシオン(典型的には質量が $10^{-10} \sim 10^{-30}$ eV程度)がたくさん現れる。このようなシナリオはAxiverseと呼ばれ、ここで現れるアクシオンを天体物理的・宇宙論的な現象の観測により検出しようという試みがある[1]。ここでは、それらのうちブラックホールと重力波を用いたものを考える。

回転するブラックホールとアクシオンの系を考えると、ペンローズ過程と類似の超放射機構により、アクシオンはブラックホールからエネルギーを引き抜く。しかし、アクシオンに質量があるためエネルギーを引き抜いたアクシオンは無遠方に脱出することはできず、ブラックホールに束縛される。このようにして、ブラックホールの周りにはアクシオンの雲が生じる。このアクシオン雲の存在により、特有の重力波放射やブラックホールのスピン対質量プロットに禁止領域が生じるといった現象が引き起こされ、これらの観測によりアクシオンを検出できる[2]。

アクシオン雲が成長を続けると、次第にアクシオンの自己相互作用による非線形性が重要になり、最終的には自己相互作用によりアクシオン雲は崩壊すると考えられている。この崩壊過程はボーズノヴァと呼ばれ、爆発的な重力波放射が期待されている。ボーズノヴァによる重力波は、銀河系の近傍で起こった場合は観測が可能である[3]。

しかしながら、先程述べたように、ボーズノヴァが起こるためにはアクシオン雲が十分に成長し非線形性が強く効くようにならなければならない。自己相互作用には雲を崩壊させる以外にも、アクシオンの放射によるアクシオン雲の成長を阻害する効果も含まれる。そのため、自己相互作用による成長の阻害に打ち勝って、アクシオン雲が十分に振幅の大きいところまで成長できるかは不明である。特に、アクシオン雲は量子ゆらぎといった振幅が非常に小さいところから生成されると考えられるから、非線形性が弱い場合に、ボーズノヴァが生じるところまでアクシオン雲が成長できるか、ということをも明らかにしたい。

そこで、本研究では、非線形性が弱い場合におけるアクシオン雲のダイナミクスを、相対論的効果も含めて調べた。その結果、アクシオン雲は放射と成長が釣り合う準定常状態に落ち着き、際限なく成長しないことが示唆された。また、ブラックホールのスピンの場合にもっとも不安定なアクシオンのパラメータを用いて計算すると、準定常状態に落ち着いた際にアクシオン雲は中心ブラックホールの数%程度の質量を持つことが分かった。

References

- [1] A. Arvanitaki *et. al.*, Phys. Rev. D, **81**,123530 (2010).
- [2] A. Arvanitaki *et. al.*, Phys. Rev. D, **83**, 044026 (2011).
- [3] H. Yoshino *et. al.*, Class. Quantum Gravity, **32**, 214001 (2015).

銀河系内宇宙線加速起源候補 Boomerang 領域の MAGIC ガンマ線望遠鏡による観測的研究

宇宙線研究室 岡 知彦

Abstract To clarify origins of gamma rays emitted from one of the “PeVatron” candidates, named Boomerang, I have analyzed gamma-ray data observed with an unprecedented angular resolution and radio data. The origin of gamma rays higher than 10 TeV is most likely a proton acceleration in a supernova remnant.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

天の川銀河系内には $3 \text{ PeV} (= 3 \times 10^{15} \text{ eV})$ 程度まで宇宙線陽子を加速する天体（以下、陽子ペバトロン）が存在すると考えられているが未発見である。 γ 線は荷電粒子と異なり星間磁場の影響を受けないため放射領域の特定が可能である。従って、陽子ペバトロンの探索には、加速された陽子が天体に付随した星間ガスと衝突した際に生成される π^0 中間子の崩壊時に放射される γ 線を観測することが有効である。ただし、 γ 線は電子による逆コンプトン散乱過程によっても生成されるため、エネルギースペクトルの情報のみで放射起源を断定することは難しいが、陽子起源放射は電子起源放射と異なり星間ガス密度に依存するため、 γ 線放射とガス密度分布の空間的相関を明らかにできれば放射起源の断定が可能になる。現状、10 TeV 以上の帯域で高感度を誇る HAWC、および、Milagro 実験による γ 線観測により、陽子ペバトン候補は既に 40 天体近く見つかったが、 γ 線観測の角度分解能（10 TeV 付近で約 1 度）がガス密度分布との相関を調べるのに十分でなく、その多くは放射起源を断定できていない[1][2]。

本研究では、陽子ペバトン候補の 1 つに挙げられる Boomerang 領域に着目した。この領域には、視直径 0.2 度以上に広がった高密度ガスの存在が示唆されており[3]、陽子起源の γ 線を検出できる格好の場となる。しかし、半径 0.1 度より高い角度分解能での γ 線観測がないこと、天体に付随する高密度ガスを特定できておらず、ガスの空間的広がりを定量的に評価できていないことから、 γ 線放射起源は未解明であった。また、他の超新星残骸の観測から、ガス密度が高い領域では磁場増幅が起こり陽子の侵入長が変化することで、1 TeV 以下で微分スペクトルが -2 より硬くなる特徴が得られている[4]。従って、1 TeV 以下の帯域での高感度観測が放射起源の解明に重要なヒントを与えられ得る。

そこで、0.1 度より優れた角度分解能と 100 GeV 程度のエネルギー閾値を同時に達成する γ 線望遠鏡 MAGIC を用いて観測した。これまでで最も詳細な γ 線放射の空間分布から、2 つの放射ピークをもつ構造が初めて明らかになり、かつ、それら 2 つの領域のエネルギースペクトルは異なる冪指数を持つ冪関数に従うことが分かった。また、先行研究[3]で得られていた全域における γ 線強度は、2 領域の γ 線強度の足し合わせで説明できることが分かった。さらに、高密度ガスをトレースできる電波輝線データの解析を行い、 γ 線放射の空間的広がりと比較することで、2 つの γ 線放射領域の内、1 つの放射領域で高密度ガスとの空間的相関を初めて明らかにすることができた。

高密度ガスが存在しない放射領域からの γ 線放射スペクトルは電子起源で説明することができた。一方、高密度ガスとの空間的相関が明らかな領域での γ 線放射は、Boomerang 領域全域における 10 TeV 以上の γ 線放射の主成分であると考えられ、さらに、 γ 線放射の空間分布のエネルギー依存性と電波対応天体から、超新星残骸で加速された陽子起源であると説明できた。今後、より優れた角度分解能を持つ γ 線望遠鏡計画 CTA が実現できれば、本研究で行った解析手法を他の陽子ペバトン候補に適用できるようになり、新たな系内陽子加速天体の発見・銀河系内宇宙線起源の解明が期待される。

References

- [1] HAWC, A.U. Abeysekara et al., *Astrophys.J.* 843, no.1, 40 (2017)
- [2] Milagro, A.A. Abdo et al., *Astrophys.J.* 700, L127 (2009)
- [3] VERITAS Collaboration (V.A. Acciari et al.), *Astrophys.J.* 703, L6 (2009)
- [4] T. Inoue et al., *Astrophys.J.* 744, 71 (2012)

原子核乾板を用いた ニュートリノ反応精密測定のための 大面積シンチレーショントラッカーの開発

高エネルギー物理学研究室 小田川高大

Abstract The NINJA experiment aims to precisely measure neutrino-water interaction using emulsion, which is one of the major sources of systematic uncertainty in the T2K experiment. This thesis focuses on the development, the construction, and the operation of the new scintillator tracker used in the NINJA experiment.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

T2K 実験は J-PARC 加速器で生成したニュートリノビームを生成点直後の前置検出器、および 295 km 離れた後置検出器スーパーカミオカンデで観測することでニュートリノ振動の精密測定を行う長基線ニュートリノ振動実験である。現在、T2K 実験における系統誤差の大きな要因となっているのがニュートリノと原子核との反応の不定性であり、特に原子核内の複数の核子とニュートリノが反応する 2p2h 反応が問題となっている。2p2h 反応の終状態では低運動量の陽子が出てくるが、現在の前置検出器である ND280 では位置分解能が十分でなくこのような陽子はほとんど観測できない。そのため、2p2h 反応の存在や理論モデルには大きな不定性が残っている。

この問題を解決するために J-PARC において、原子核乾板を用いたニュートリノ反応精密測定実験である NINJA 実験が進行している。原子核乾板はサブミクロンという圧倒的な位置分解能を持つため、ND280 では観測できないような 200 MeV/c 程度の低運動量の陽子も捉えることが可能である。

原子核乾板は優れた位置分解能を持つ一方で時間分解能を持たず、実験中の全飛跡が蓄積されたデータを一度に解析する必要がある。そのため、下流のミュオン検出器と直接飛跡マッチングを行おうとすると、乾板内の飛跡候補が $O(10^4)$ 本ほどにもなりマッチングができない。マッチングができなければミュオンの運動の情報は得られないため、物理測定は難しい。NINJA 実験ではミュオン検出器より優れた位置分解能と時間情報を持ったトラッカーを間に配置することでこの問題を解決する。2019 年 11 月からの物理ランにおいては標的質量が前回ランの 4 kg から 75 kg へと大きくなったため、それに伴って 1 m × 1 m を覆う大型のトラッカーを開発する必要があった。

そこで我々は、Figure 1 のようにプラスチックシンチレータのバーを相互に重ね合わせた新たなデザインのトラッカーを開発した。シンチレータのヒット情報に加えて非ヒット情報も積極的に活用することで、チャンネル数を 248 に抑えつつ要求される位置分解能 4 mm を達成する手法を開発し、シミュレーションを用いて実証した。また、物理測定に際してこのようなトラッカーを製作し (Figure 2)、地上での宇宙線を用いた性能評価の後、前置検出器ホールにインストールを行った。NINJA 実験は 2019 年の 11 月からおよそ 3 ヶ月間の物理ランを行い、現在は解析の準備が行われている。

本論文では、このトラッカーの開発について報告する。トラッカーのデザインの決定、製作、インストールを物理ランまでに行った。また、物理測定と並行して下流のミュオン検出器との飛跡マッチングを行った。

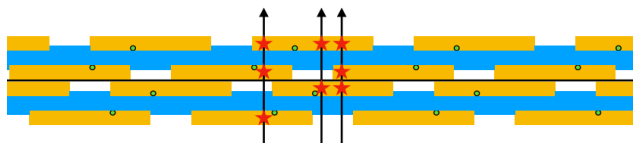


Figure 1: Design of the new scintillator tracker



Figure 2: The scintillator tracker

MAGIC 望遠鏡による活動銀河核 S5 0716+714 の 超高エネルギーガンマ線フレアの観測

宇宙線研究室 梶原 侑貴

Abstract I analyzed the data on the gamma-ray flare of the active galactic nuclei S5 0716+714 observed in 2017 with the MAGIC telescope, and an intra-night activity was seen for the first time for this source.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

活動銀河核は宇宙で最も高エネルギーな天体の一つであり、天文学的にも重要な天体である。しかし詳しい構造や放射機構など未だ解明されていないことも多い。活動銀河核の研究において、放射領域の高エネルギーな状態が反映される超高エネルギーガンマ線での観測は非常に重要であるが、フレアと呼ばれる突発的な増光時以外の観測は難しく、観測データは多くない。

活動銀河核の中には、中心ブラックホールからジェットと呼ばれるプラズマ流を双方向に噴射するものがあり [1]、ジェットからは激しい強度変動をする非熱的な放射が見られる。この放射強度変動はジェット内の衝撃波の衝突によるもの(内部衝撃波モデル)と考えられてきたが [2]、標準的な内部衝撃波モデルでは説明ができないほど速い放射強度変動が超高エネルギーガンマ線で観測されるようになった [3]。しかしこのような速い放射強度変動は数分スケールであり、現行望遠鏡で観測するには、フレアが強いこと、近傍の天体であること、観測時の天候が良好であることなど好条件が揃わなければ難しい。そのため数例しか報告されておらず、観測バイアスの少ない系統的な研究のためには更なる観測・解析が必要であった。

本研究では 2017 年に起きた S5 0716+714 のフレアに着目した。S5 0716+714 は広い波長帯での激しい放射強度変動が特徴の活動銀河核で、超高エネルギーガンマ線での観測もすでに報告されているが [4] [5]、放射強度変動は日毎でしか捉えられていなかった。また 2015 年のフレア観測を元にした先行研究では、内部衝撃波モデルを前提とした、低周波数側のシンクロトロン放射と高周波数側のシンクロトロン自己コンプトン散乱の放射で多波長放射スペクトルを完全に再現することはできなかった [5]。

本研究では 2017 年 12 月 28 日-29 日に起きた S5 0716+714 のガンマ線フレアの、超高エネルギーガンマ線天文台 MAGIC の観測データを解析し、この天体として初めて 1 日以内の短い時間スケールでの放射強度変動を観測した。さらにこれを精密に解析した結果、約 15 分で強度が 2 倍になる速い放射強度変動が S5 0716+714 にもあったことを発見した。このような 1 日以内の短い時間スケールでの放射強度変動を確認したのは、この天体では初めてのことである。これは先行研究での想定より約 1/100 以下の領域からの放射であったことを示唆する。

さらに本研究では、同時期に観測された 0.1-100 GeV の *Fermi*-LAT のデータを解析し、*Fermi*-LAT と MAGIC の解析結果を合わせた放射スペクトルには、特徴的な折れ曲がった構造が見られることを発見した。これは先行研究である 2015 年フレアの報告で内部衝撃波モデルを前提としたシンクロトロン・シンクロトロン自己コンプトン散乱の放射スペクトルからずれていた部分と類似した構造であることを確認した。

References

- [1] C.M. Urry & P. Padovani, *PASP*, **107**, 803 (1995).
- [2] R. D. Blandford & A. Konigl, *ApJ*, **232**, 34 (1979).
- [3] J. Aleksic et al., *Science*, **346**, 1080-1084 (2014).
- [4] H. Anderhub et al., *ApJ*, **704**, L129-L133 (2009).
- [5] M.L. Ahnen et al., *A&A*, **619**, A45 (2018).

メッシュ実験による次世代 X 線天文用 SOI ピクセル検出器のサブピクセル性能の研究

宇宙線研究室 佳山一帆

Abstract We have been developing X-ray SOI pixel sensors, “XRPIX”, for X-ray astronomy. We apply “mesh experiments” in order to examine the response of the devices at the subpixel level. We find the spectral line profiles are skewed with low energy tails and the line peaks shift near the pixel boundaries.
© 2020 Department of Physics, Kyoto University

我々は、2020 年代後半に打ち上げ予定の次世代型 X 線天文衛星 FORCE 計画に向けた半導体検出器の開発を進めている[1]。殆ど全ての銀河の中心に「銀河中心巨大ブラックホール(BH)」が存在することが解っているが、その起源の確立した描像は存在しない。FORCE 計画では、その起源の候補とされる「中間質量 BH」を探索し、宇宙形成史の解明を目標としている。これらからの X 線放射は 1-80 keV の広帯域で放射されるため、探索にはこれをカバーする観測が必要である。しかし、5 keV 以上の帯域では、宇宙線由来の非 X 線バックグラウンド (Non X-ray Background: NXB) が高いという問題点がある。FORCE 計画では、検出器をアクティブシールドで囲み、双方で検出したイベントを NXB として除去する反同時計数法を検討しているが、現行の主検出器である X 線 CCD では時間分解能が数秒程度と遅いため、これを用いることは不可能である。そこで、我々は数 μs の時間分解能と、優れた分光性能を併せ持つ X 線 SOI ピクセル検出器「XRPIX」の開発を進めている。

従来素子では、回路層と読み出しノードの間に寄生容量が存在し、干渉することで分光性能を劣化させていた[2]。また、回路素子がセンサー層の電場を歪めることに起因した電荷収集効率の悪化も、分光性能を劣化させていた[3]。そこで、新たにセンサー層と絶縁層の界面に固定電位層を持つ PDD (Pinned Depleted Diode) 構造[4]を採用した XRPIX6E を開発した[5]。PDD 構造は、固定電位層が静電シールドとして作用し、寄生容量を抑制する。また、電場構造を改良することで電荷損失を抑制し、電荷収集効率を改善した。その結果、6.4 keV に対して 176 eV のエネルギー分解能を達成した (Fig. 1)。

Fig. 1 に示すように、ピークより低エネルギー側にテール構造が見つかった。高エネルギーの X 線で生じたテールに埋もれてしまい、低エネルギー側の X 線の観測が困難になる。我々は、同ピクセル内でも X 線の入射位置によって電荷収集が不十分になる領域があることが原因だと考えた。そこで、我々は「メッシュ実験[6]」と呼ばれる手法を適用し、サブピクセル性能評価を行なった[7]。その結果、ピクセル境界付近に入射した X 線イベントに著しいテール構造と、ピーク位置のシフトが見られた (Fig. 2)。これはセンサー層での電荷損失を示唆するもので、今後の検出器開発の重大な課題を発見した。

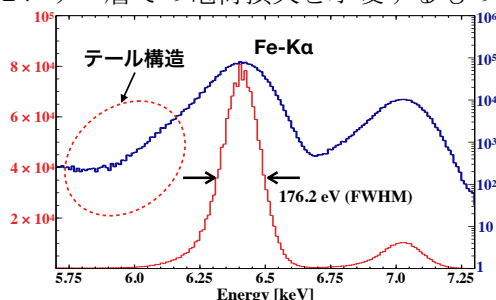


Fig. 1. X-ray spectra of Fe-K α , plotted in linear scale (red) and log scale (blue).

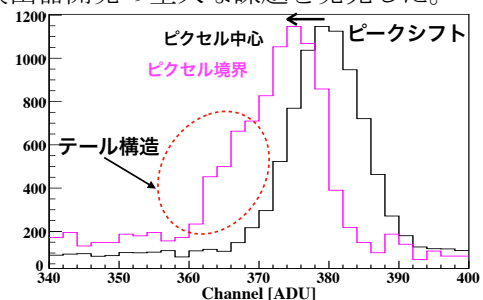


Fig. 2. X-ray spectra of W-L α . Note that the black and magenta lines denote the spectra obtained at pixel center and pixel corners, respectively.

References

- [1] T. G. Tsuru *et al.*, Proc. SPIE 9144, 914412 (2014).
- [2] A. Takeda *et al.*, PoS (TIPP2014), 138 (2014)
- [3] H. Matsumura *et al.*, NIM A 794, 255 (2015).
- [4] H. Kamehama *et al.*, Sensors 19, 27 (2017).
- [5] S. Harada *et al.*, NIM A 924, 468 (2019).
- [6] H. Tsunemi *et al.*, J. Appl. Phys. 36, 2906 (1997).
- [7] K. Kayama *et al.*, JINST 14 (2019).

初代星形成における星周円盤の進化

基礎物理学研究所 木村和貴

Abstract We develop a non-steady one-dimensional disk model considering the effect of mass supply from the surrounding envelope onto the disk in the situation of first star formation. We find that the disk is unstable due to the infall from the envelope and that rotation of the cloud stabilizes the disk.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

金属が存在しない宇宙初期に形成された星は初代星と呼ばれる。初代星は自身の輻射あるいは超新星爆発や γ 線バーストなどの突発現象を通じて、宇宙再電離や銀河の熱化学進化に影響を与える。そのため、初代星の初期質量関数(IMF)を明らかにすべくこれまで多くの研究が行われてきた。初代星形成は銀河系における星形成と異なり金属による冷却が効かず温度が高いため、重力収縮をするためにはより大きな質量が必要となる。結果として初代星は典型的に太陽の数十倍~数百倍の質量を持つ大質量星となることがわかっている。さらに近年は重力波によって太陽の数十倍の質量を持つような連星ブラックホールが数多く観測されており、起源天体の候補としてこのような大質量の初代星が考えられている。実際に宇宙論的初期条件からガス雲の進化を追うことで、星周円盤の分裂により連星を含めた多重星が形成されることが多くの数値計算によって示唆されている[2]。一方で、最終的に形成される初代星のIMFについてはまだ議論が収束していない。原因としては、円盤が分裂して多重星を形成するような系は非常に複雑な進化をすること、あるいは計算資源の問題で適切なスケールを分解して最終的な星質量が決定するまで計算を追えないことがあげられる。

本研究の目的は、初代星周りに形成される円盤の1次元準解析的モデルを作成することによって円盤がどのように進化していくのかを調べることである。1次元モデルの利点は結果の物理的な見通しが良く、3次元の数値計算に比べ円盤の中心星付近の構造を分解しつつ長時間計算できることやパラメータサーチを行えることである。初代星周りの円盤についてのモデル化は既に為されているが[2]、定常円盤を仮定しており、3次元数値計算における円盤分裂との比較も為されていない。今回は Takahashi et al. (2013) [3]のモデルを基にエンベロープから円盤へのガス降着を考慮したより現実的な非定常円盤モデルを作成した。さらに、初期のガス雲が持っている角運動量の大きさを変えることで回転の強さが円盤に与える影響も調べた。

その結果、初代星周りに形成される円盤はエンベロープからの降着により重たくなり、中心星の質量が小さい段階で自己重力的に不安定になることがわかった。これは、星形成の初期段階で円盤が分裂することを示唆しており、多くの3次元数値計算と同様の傾向を示している。さらに今回の計算結果は、これまで定常モデルで述べられていた円盤が不安定になる条件は満たしておらず、円盤構造は定常モデルと大きく異なる。また、初期のガス雲の回転が強くなると円盤の最も不安定な場所が外側へ移動することや、円盤が不安定になるまでより長い時間が必要であることがわかった。

References

- [1] Greif, T. H., Bromm, V., Clark, P. C., et al., MNRAS, 424, 399 (2012).
- [2] Matsukoba R., Takahashi S. Z., Sugimura K., Omukai K., MNRAS, 484, 2605 (2019).
- [3] Takahashi, S. Z., Inutsuka, S.-i., & Machida, M. N., ApJ, 770, 71 (2013).

高輝度 LHC-ATLAS 実験に向けた RPC 検出器を用いた バレル部ミュオントリガーの開発

高エネルギー物理学研究室 國吉宏一郎

Abstract The ATLAS muon trigger system in the Barrel region will be upgraded to cope with the higher luminosity in HL-LHC. We have developed a new trigger algorithm using information from a new RPC detector which will be installed in HL-LHC. The design of the new system and performance are presented.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

ATLAS 検出器は、欧州原子核研究機構 (CERN) の陽子陽子衝突型加速器、Large Hadron Collider (LHC) の衝突点の 1 つに設置された汎用検出器である。LHC は最大重心系エネルギー 13 TeV または 14 TeV で 10^{11} 個の陽子バンチ同士を 40 MHz という高頻度で衝突させ、TeV 領域までの新粒子の直接探索やヒッグス粒子の精密測定等の手法で標準模型を超えた物理にアプローチしている。

ATLAS 実験ではデータ記録速度の限界により、LHC での全陽子衝突事象を記録することはできない。また新物理に由来するような事象は稀にしか起きないため、全衝突事象の中から興味のある事象を選別 (トリガー) し記録する必要がある。本研究で扱うミュオントリガーは、ミュオンの横運動量 (p_T) に閾値を設けて事象の選別を行う。現在は高速処理が可能なハードウェアで実装された Level-1 トリガーと、ソフトウェアで実装された精密なトリガー判定が可能なハイレベルトリガーの 2 段階に分けて選別が行われている。

LHC は 2024-2026 年にアップグレードを行い、瞬間ルミノシティを現在の約 5 倍の $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ に増加させて運転する予定である (「高輝度 LHC 実験」と呼ぶ)。ルミノシティの増加に伴いイベントレートが増加するため、トリガーレートの許容値が 100 kHz の Level-1 トリガーを刷新し、1 MHz まで対応可能な Level-0 トリガーを導入する予定である。また現在のトリガーロジックのままではトリガーレートが許容値を超えてしまうため p_T の閾値を上げるなどの対策が必要になり、その場合物理に対する感度を失ってしまい高輝度環境を活かすことができない。そのため、より高い p_T 分解能を持ったトリガーアルゴリズムを開発することが必要である。そこで私は p_T 分解能の改善のために、高輝度 LHC 実験から新たに ATLAS 検出器バレル内部領域に導入される Resistive Plate Chamber (RPC) の情報を用いたトリガーアルゴリズムの開発を行った。

1 つ目の研究として、シミュレーションデータを使用し RPC のヒットから飛跡に対して磁場中での円軌道を仮定してフィッティングを行う新しいアルゴリズム (「円フィッティング」と呼ぶ) を開発し性能評価を行った。高輝度 LHC 実験で現在採用予定のアルゴリズム [1] (「ヒットファインダー」と呼ぶ) に対して円フィッティングを適用することで、20 GeV 以上の領域の相対効率を 98 % 以上に保ちながら、20 GeV 以下のミュオンを約 60 % 以下に削減できることを示した。

2 つ目の研究として、円フィッティングを回路設計の変更が容易な集積回路 FPGA (Field-Programmable Gate Array) にパターンマッチングという手法を用いて実装する方法を考案した。パターンマッチングでは事前に RPC のヒット位置と p_T を対応付けるパターンリストを作成しておき、実際のヒットとパターンリストを照らし合わせることでトリガー判定を行う。円フィッティングで得られるヒットパターンをパターンリストに変換することでパターンマッチングの実装を行った。その結果、20 GeV 以上の領域の相対効率を 99% 以上に保ちながら、20 GeV 以下のミュオンを約 83% に削減できることを示した。パターンマッチングで円フィッティングの性能を完全に再現することはできなかったが、ハードウェアにおいて低 p_T のミュオンを大きく落とすことができることを示した。

References

[1] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS TDAQ System, 2017.

T2K 実験における新型ニュートリノ検出器 Super FGD のための研究開発

高エネルギー物理学研究室 栗林 宗一郎

Abstract Super FGD is a new-type neutrino detector made of two million scintillator cubes. It is being developed to reduce systematic errors in the T2K experiment. There are challenges in the signal readout. This thesis discusses the development and performance test of the readout system with prototype and evaluation with simulation.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

T2K 実験は、J-PARC 加速器施設で生成するニュートリノビームを、標的から 280 m 離れた前置検出器 ND280 および 295 km 離れた後置検出器スーパーカミオカンデ(SK)により測定する長基線ニュートリノ振動実験である。ニュートリノ混合角 θ_{23} の精密測定や、CP 対称性の破れの発見を目標としている。

現在 T2K 実験では 2021 年度からの統計量増大が計画されており、ニュートリノの CP 対称性の破れの証拠を掴むためには、系統誤差削減が重要課題となっている。系統誤差の主要因はニュートリノと原子核の反応の不定性である。この問題を解決するために ND280 に新型ニュートリノ検出器 Super FGD を導入する研究が進められている^[1]。Super FGD は 1 cm³ のキューブ型のプラスチックシンチレータを 200 万個積層し、その蛍光を 3 方向から波長変換ファイバーと光検出器 MPPC で読み出す検出器である。ニュートリノ反応由来の荷電粒子を測定するためにガス検出器 TPC に 3 方向を囲まれており、これまでの ND280 では測定できなかった、大角度に散乱した、あるいは低運動量の荷電粒子(特に 300 MeV/c までの陽子)にも高い感度がある。

本論文では新しい構造を持った Super FGD の約 6 万チャンネルにもなる読み出し部の開発と性能評価を行った。最初に、波長変換ファイバーと MPPC を光学的に接続するインターフェース部分のプロトタイプを製作した。実機において、約 4 cm という Super FGD と TPC のわずかな隙間において 1 チャンネル/cm² という高密度のチャンネルを精密に読み出すため、プロトタイプを用いた性能評価をもとに、その要求を満たすようにデザインを最適化した。特に粒子識別や検出効率の上で重要な荷電粒子のエネルギー損失による光量が各チャンネルで光量が平均が 70 光子で標準偏差も 5 %と十分かつ一様になるように改善した。

次に実機で使用予定のエレクトロニクスの性能評価を行った。現状、取得されたデータの一部において信号の波形の閾値を超えている時間(TOT)とその波高について相関が見えていないという問題があった。この問題を解決するためにエレクトロニクスの試験システムを構築し、その試験結果から TOT および波高の使用可能性の評価と改善を行った。

さらにいままでの測定結果から得た光量と TOT に関連して、読み出しと逆側のファイバー端への処理について検討した。ファイバー端に反射率の高い物質があると光量が増加するが、ファイバー端で反射した光の経路が長いことにより信号の波形をゆがませる可能性がある。したがって、ファイバー端処理によって光量を正確に測定できない可能性もあった。そこでまずいくつかのファイバー端処理で波高と TOT を測定し、波形がゆがまされているのかどうかを評価した。これらの結果をもとにファイバー端を処理した際、光量にどのような影響を与えうるのかを評価した。

また、陽電子ビームを用いた試験と光学シミュレーションにより、先述した MPPC インターフェースの性能が十分であることを確認し、キューブ型シンチレータ内の光量の位置依存性についても評価した。

最後にこれらの効果について Geant4 を用いた検出器シミュレーションで物理測定への影響を評価し、性能が十分であることを確認した。

References

- [1] K. Abe et al T2K ND280 UPGRADE TECHNICAL DESIGN REPORT arXiv:1901.03750

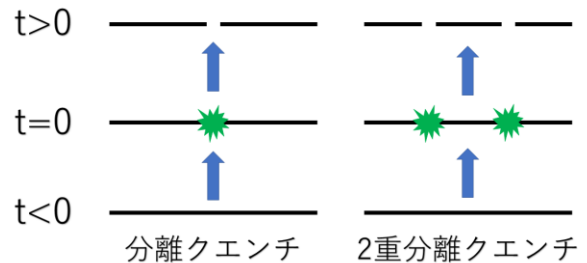
重力双対を持つ 2 次元共形場理論における分離クエンチ

基礎物理学研究所素粒子論研究室 島地 哲平

Abstract We study the dynamics of entanglement entropy (EE) for excited states in 1+1 dimensional conformal field theory (CFT) which are created by instantaneous splitting local quenches at one or two different points. Especially, we interpret the dynamics of EE in holographic CFT by dual gravity picture.
© 2020 Department of Physics, Kyoto University

近年、実験技術の発展により冷却原子系における熱平衡化が実験で観測され、理論と実験の両方から量子系の非平衡過程への理解が進んでいる。量子系での非平衡過程を理論的に取り扱うことは、エンタングルメントと呼ばれる量子情報理論的な現象により相互作用が弱い場合でさえも容易ではなく、量子情報理論的なアプローチから非平衡過程を理解する理論研究が活発になされている。そこで我々は新たに、強結合でカオス性の強い 1+1 次元共形場理論を①分離クエンチをしたときの②エンタングルメントエントロピー(EE)の時間発展を計算した。

① クエンチとは、ある量子系のハミルトニアンを基底状態を用意して、瞬時にハミルトニアンを変化させることを指す。用意された基底状態はクエンチによって励起状態となり、クエンチ後のハミルトニアンを基底状態へと熱平衡化していく。とくに N 重分離クエンチとは、ある N 点での相互作用を“切る”ことで、瞬時に量子系を N+1 個に分離するクエンチのことであり、[1]では二重井戸型ポテンシャルを用いて 1 次元冷却原子気体を 2 つに分離する実験がなされている。



② エンタングルメントエントロピー(EE)とは注目系とそれ以外の系との量子的なもつれの度合いを測る量であり、これを用いることでエンタングルメントに起因する量子系の非平衡過程を調べることができる。超弦理論から予想された AdS/CFT 対応を用いることで、AdS 時空に双対となるような共形場理論 (CFT) での EE を、AdS 時空内の測地線の長さを用いて計算することができる[2]。AdS 時空に双対となる共形場理論は、強結合でカオス性が強い量子系の臨界点での物理を記述する理論であると考えられており、冷却原子系への応用を考える上でも興味深い。

我々は新たに[3][4]で、AdS 時空に双対となる共形場理論の真空に対して分離クエンチと 2 重分離クエンチをしたときの EE の時間発展を、AdS 空間内の測地線の長さを計算することで解析した。その結果、二つの興味深い結果を得た。

一つ目はカオス性の強い非平衡系での EE の振る舞いである。カオス性が強いために、カオス的でない可積分な共形場理論に比べて急速に熱平衡化することが分かった。また、分離した系にまたがるような注目系を考えたときに、可積分な系とは全く異なる振る舞いをする事が分かった。

二つ目は AdS/CFT 対応の検証や応用という理論的側面である。分離した系にまたがるような注目系を考えたときに、EE に対応する測地線が AdS 空間の Poincare 座標で覆える領域の外に出ることが分かった。したがってこのときの EE は時空の大域的なトポロジーに関係しており、AdS/CFT 対応を考える上で興味深い具体例となっている。また、[3][5]では分離クエンチの他に、ある時刻で量子系を接合するクエンチも考えており、そこで用いた解析手法はブラックホール蒸発過程のモデル[5]にも利用されている。

References

- [1] M. Gring *et al.*, Science 337.6100, 1318–1322 (2012).
- [2] S. Ryu and T. Takayanagi, Phys. Rev. Lett. 96, 181602 (2006).
- [3] T. Shimaji, T. Takayanagi, and Z. Wei, JHEP 03, 165 (2019)
- [4] P. Caputa, T. Numasawa, T. Shimaji, T. Takayanagi, and Z. Wei. JHEP 09, 018 (2019).
- [5] A. Almheiri, R. Mahajan, J. Maldacena, Y. Zhao, arXiv: 1908.10996

GSI における η' 中間子原子核探索実験のための FRS-WASA 用プラスチックシンチレータバレルの開発

原子核・ハドロン物理学研究室 関屋 涼平

Abstract. We have developed a plastic scintillator barrel (PSB) for spectroscopy of η' -mesic nuclei. The PSB will be installed in the WASA central detector and is required of time resolution of 100 ps (σ) and high-rate capability. We constructed and tested a prototype and found that the performance matches the requirement.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

η' (958)中間子はカイラル対称性が部分的に回復した有限密度下では質量が減少すると理論的に予想されており、原子核と束縛状態を形成する可能性がある[1]。この束縛状態を観測し、質量の減少を測定することは、 η' 中間子が擬スカラー中間子の中で特異的に大きな質量を持つ理由とされる $U_A(1)$ 量子異常及びカイラル対称性の破れを定量的に理解する上で重要である。2014年にドイツ重イオン研究所GSIで行われた先行実験では η' 中間子原子核の観測を目指したが、背景事象により生成事象が埋没し観測には至らなかった[2]。我々は新たに η' 中間子原子核の生成事象を選択し抽出することで、より背景事象を棄却する形で探索実験を実施する。

新しく実施する実験はGSIのフラグメントセパレータ(FRS)において2.5 GeV陽子ビームを用いた $^{12}\text{C}(p, d)$ 反応により、質量欠損計測による η' 中間子原子核の分光・観測を行う。 η' 中間子原子核の崩壊事象を選択するために、標的付近にWASA中央検出器(Fig. 1)を設置する。WASA中央検出器は複数の検出器と装置から構成されるが、このうちプラスチックシンチレータバレル(PSB)は100 psの時間分解能と高い検出レートにおけるゲインの安定性が求められる。既存のPSBは、プラスチックシンチレータの片側にライトガイドを接続して光電子増倍管(PMT)で読み出していたが、これでは要求性能を満たさないことが分かっている。

本研究では、全く新たな設計によってPSBを刷新し、要求性能の達成を目指した。シンチレータの両端にMulti-pixel photon counter (MPPC)を直接配置する設計にしたことで、高い時間分解能を得ることに成功した。Fig. 2. は新たに作成したPSBのシンチレーションカウンターを試作機である。PSBは50枚のシンチレーションカウンターがバレル状に配置さ

れる。我々は β 線および陽子ビームを用いて試作機のテストを行った。取り付けるMPPCの個数、MPPCに与える電圧、荷電粒子の照射位置、入射角度などを変化させ、各条件に対する時間分解能を評価した。この結果、使用するMPPCの個数が2個以上で印加電圧が十分に高ければ、100 psの時間分解能を達成できることが分かった。また、LEDを高周波で点滅させてMPPCの高検出レート(~ 1 MHz)におけるゲインの変化を評価し、PMTとの比較を行った。この結果、高検出レート下におけるゲイン変化は、低検出レート(~ 100 Hz)下のゲインを基準として、PMTが8%だったのに対し、MPPCでは前置増幅器内部における電圧供給回路部分の抵抗を小さくすることで、10%程度まで抑えられることが分かった。さらに前置増幅器の回路や他の要素を開発することで、ゲイン変動をより抑制できる可能性を見出した。

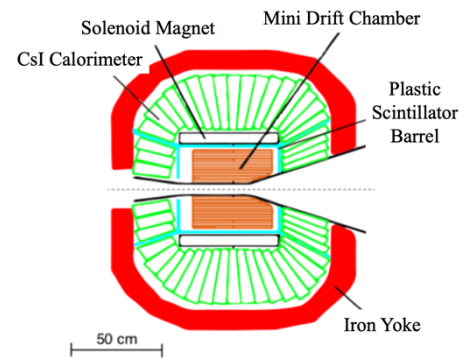


Fig. 1. The WASA central detector

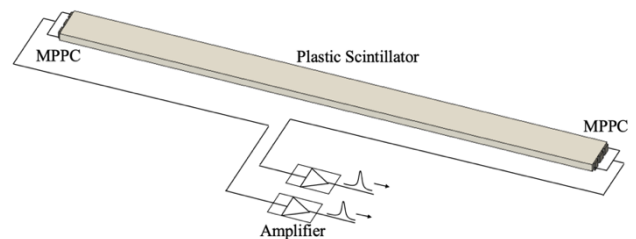


Fig. 2. The prototype of the scintillation counter

References

- [1] H. Nagahiro, M. Takizawa, and S. Hirenzaki, Phys. Rev. C **74**, 045203 (2006).
- [2] Y. K. Tanaka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **117**, 202501 (2016).

T2K 実験のための J-PARC MR における 16 電極モニターの開発及び非破壊エミッタンス測定

高エネルギー物理学研究室 田島 正規

Abstract To increase the beam power of the T2K experiment, the diagnosis of the beam is essential. We installed the 16-electrodes monitors at J-PARC MR to measure the injection mismatches about Twiss parameters between MR and 3-50 BT. The emittances and the Twiss mismatches were successfully measured. The 16-electrodes monitors is planned to be used to adjust the parameters in 3-50 BT.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

長基線ニュートリノ振動実験 T2K では茨城県東海村にある大強度加速器 J-PARC から発射されたミュオンニュートリノビームを、生成点直後の前置検出器と 295km 先のスーパーカミオカンデで観測することによって、ニュートリノ振動パラメータの精密測定を行っている。特にニュートリノと反ニュートリノにおける振動確率の違いを測定することで、ニュートリノにおける CP 対称性の破れを 3σ で発見することを目指している。このためには統計量の増大、すなわちビームの大強度化が必須である。

J-PARC MR では電源のアップグレードなどによって、T2K 実験に用いているビーム強度を現在の 496kW から 1.3MW へ増強することを計画している。このためには、ビームの大強度化に伴って増加する加速器内のビームロスを低減することが重要課題になる。その手段の一つとして、MR と上流の輸送ライン(3-50 BT)における Twiss パラメータのミスマッチによって生じるビームサイズの振動を抑制することが挙げられる。現在、MR の既存のビームサイズモニターは大強度ビームの測定に課題を抱えており、上記の振動を抑制するための測定が困難な状況となっている。

そこで大強度下でビームサイズの振動を測定する新たな検出器として、2016 年夏に 16 電極モニターが MR にインストールされた[1]。16 電極モニターは鉛直方向と水平方向のビームサイズの差である四重極モーメントを測定することができ、ベータ関数の異なる 2 地点で測定を行うことで、ビームに影響を及ぼすことなく(非破壊)エミッタンス測定(鉛直方向及び垂直方向)が可能である。

本研究では、2 台目の 16 電極モニターと T2K 実験のビーム強度に合わせた減衰器及びローパスフィルターをインストールすると共に、ワイヤーとビームを用いたキャリブレーション、エミッタンス測定を行った。さらに、Twiss パラメータのミスマッチを意図的に増大させた状態で、ビームサイズの振動とミスマッチが大きい軸のエミッタンス増加の観測に成功した。これによって、16 電極モニターが大強度ビームにおける Twiss パラメータの調整に貢献し得ることを示した。また、これは空間電荷効果がビームに及ぼす影響など、ビームの大強度化に重要な情報を提供するものである。

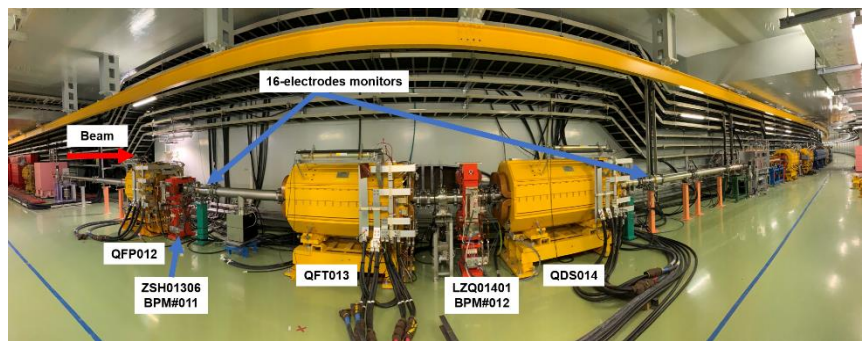


Fig. 1 The setup of 16-electrodes monitors in Main Ring

References

- [1] 中西芳枝, T2K 実験のための J-PARC MR における多電極ビームモニターの開発, 京都大学修士論文 (2016)
- [2] 宇野亘, J-PARC MR 加速器における 16 電極モニターの処理回路データ取得システムの開発, 京都大学修士論文 (2017)

MAIKo TPC を用いた $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ 反応の 断面積測定に向けた実験条件の検討

原子核・ハドロン物理学研究室 土井隆暢

Abstract It is suggested that the triple alpha reaction is enhanced by the particle-induced deexcitation of $^{12}\text{C}(0_2^+)$ in high-density environments around $\rho = 10^6 \text{ g/cm}^3$. However, the cross section of the $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}(0_2^+)$ reaction must be measured to calculate the enhancements. We examined the feasibility of an experiment to measure the cross section with the MAIKo TPC.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

宇宙元素合成において、 ^{12}C 原子核はFig. 1 に示すように3つの α 粒子から直接合成される (トリプルアルファ反応)。トリプルアルファ反応では主に 3α 崩壊閾値近傍に位置する 3α 共鳴状態である 0_2^+ (7.65 MeV) 状態 (Hoyle 状態)を経由する。大半の 0_2^+ 状態は3つの α 粒子に崩壊するが、稀に γ 線を放出して脱励起をすることで、安定した ^{12}C 原子核となる。トリプルアルファ反応は ^{12}C より重い元素を合成するための戸口反応であり、宇宙元素合成において最も重要な原子核反応のひとつである。しかし、 $\rho = 10^6 \text{ g/cm}^3$ のような高密度環境下では、 γ 崩壊に加え、他の粒子との非弾性散乱による脱励起が増加しトリプルアルファ反応を劇的に促進することが指摘されている [1]。特に中性子は電荷をもたずクーロン力の効果を受けないため、脱励起を促進する効果が大きいと考えられている。

脱励起の反応率の計算には、 ^{12}C が中性子との散乱により $^{12}\text{C}(0_2^+)$ へ励起する断面積が必要となる。特に、 0_2^+ 状態へ励起させることができる中性子エネルギーの閾値付近 ($E_{\text{lab}} = 8.30 \text{ MeV}$) における断面積が重要となる。しかし、 $E_{\text{lab}} = 8.30 \text{ MeV}$ 付近におけるg.s. $\rightarrow 0_2^+$ 状態の断面積は測定されていない。そこで、我々は中性子ビームを用いて $^{12}\text{C}(0_2^+)$ へ励起し、 $^{12}\text{C}(0_2^+)$ から崩壊した3つの低エネルギー α 粒子を測定することで、崩壊元の状態を特定しg.s. $\rightarrow 0_2^+$ 状態反応の断面積を決定することを計画している。このためには、3つの α 粒子をすべて測定するための大きな立体角を覆い、低エネルギー α 粒子を効率的に検出することのできる検出器が必要となる。この要求を満たす検出器にMAIKo TPC [2] がある。

MAIKo TPC では、検出器のガス中を通過した荷電粒子の飛跡が画像として検出される。検出器中での飛跡の長さや方向から荷電粒子のエネルギーと運動量を決定するため、画像から α 粒子の飛跡を正しく抽出することが必要となる。MAIKo TPC で検出される飛跡の分解能が検出ガスの種類によって大きく変わる。そこで、どのような検出ガスが測定に適しているか、その時の検出効率や十分か、 0_2^+ 状態を識別するのに十分な分解能が達成できるかを現実的な実験条件を仮定して検討する必要がある。

本研究では、MAIKo TPC で用いる検出ガスの候補を複数選出し、 α 線源を用いて性能試験を行った。また、それらの検出ガスについて、中性子との散乱で ^{12}C 原子核が3つの α 粒子に崩壊するイベントの画像を、シミュレーションによって生成した。さらに、シミュレーションで生成した画像に対して解析を行い、検出効率、エネルギー分解能、角度分解能を評価した。シミュレーションによる検討の結果、100 hPa の iso- C_4H_{10} (1) + H_2 (9) を検出ガスに用いれば、計画中的実験を遂行するのに十分な検出効率および ^{12}C の励起エネルギー分解能を実現できることが推定された。

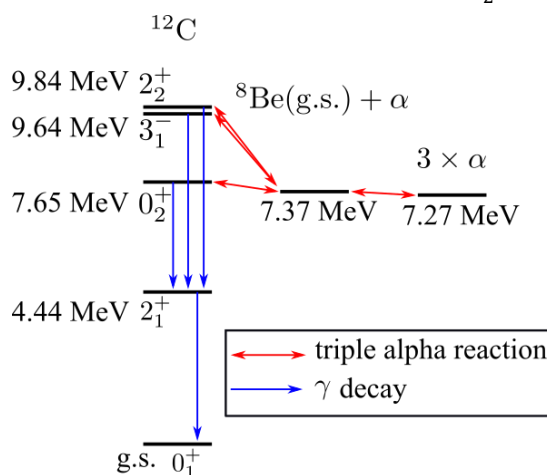


Fig. 1. Schematic diagram of the triple alpha reaction.

References

- [1] M. Beard, S. M. Austin, and R. Cyburt, Phys. Rev. Lett. **119**, 112071 (2017).
- [2] T. Furuno, et. al. Nucl. Inst. Meth. Phys. Res. A **908**, 215 – 224 (2018).

LHC-ATLAS 実験 Run-3 に向けた カロリメータトリガーの改良と性能評価

高エネルギー物理学研究室 羽田野 真友喜

Abstract In the calorimeter trigger system of LHC-ATLAS, events are selected based on clustering of the minimum calorimeter unit ("cells"). A new correction for the cell energy is implemented in 2018 for offline analysis. We present our implementation of the same correction on the trigger part, and its expected performance.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

LHC-ATLAS 実験では、欧州原子力研究機構 (CERN) の世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突型加速器 LHC の衝突点の一つに設置された ATLAS 検出器を用いて精密測定や標準模型を超えた新物理で予言されている新粒子の発見を目指している。

ATLAS では 2010 年から 2012 年までの Run-1 期間において衝突の重心系エネルギー 7-8 TeV で測定を行い、ヒッグス粒子を発見した。また、2015 年から 2018 年までの Run-2 期間において重心系エネルギー 13 TeV で測定を行った。現在はこれらのデータを用いた解析が進められている。また、2021 年からの Run-3 に向けて検出器のアップグレードを進めている。

LHC では 40 MHz で陽子衝突を行っているが、これらの事象を全て記録することはハードウェアの制限より不可能である。そのため、ATLAS では初段ハードウェアトリガーと後段ソフトウェアトリガーの二段階のトリガーシステムを用いて重要な事象を高速で選別しデータを取得している。なお、データ取得後に精密に事象の再構成を行うことをトリガーに対して、オフライン解析と呼ぶ。

初段のカロリメータトリガーにおいては、カロリメータの最小読み出し単位であるセル単位のエネルギー情報がある程度の広い領域で和をとったトリガータワーと呼ばれる単位を用いてトリガーの判定を行う。後段のカロリメータトリガーは、初段トリガーを通過したイベントに対して、セル単位での読み出しを行い、エネルギー情報の再構成を行う。その後、セルのエネルギーを基に三次元トポロジカルクラスタリングというアルゴリズムを実行する。このアルゴリズムによって生成されたセルの集合であるクラスター (「トポクラスター」と呼ぶ) を基に、ジェットの再構成や電子・光子の再構成などを行う。

本研究では、Run-2 期間におけるカロリメータトリガーで得られたエネルギーとオフラインとの比較を行い、トポロジカルクラスタリングアルゴリズムの性能評価を行った。その結果、Fig. 1. に示したように、Run-2 の後半においてオフラインとのズレが大きくなっていることを発見した。これはオフラインでのセルエネルギー再構成に際して、実データによるセルエネルギーの補正が導入されたためである。この補正がカロリメータトリガーの側には導入されていないため、同様の補正で後段カロリメータトリガーが使用する計算時間内で処理が可能なものを考え、実装を行い、性能の評価を行った。

今回の実装による補正の処理時間による処理時間の大きな増加は見られず、適当な実装であることが確認できた。また、トポクラスターの性能としてオフラインとのズレが Run-2 の前半と同程度までに改善していることを確認した。

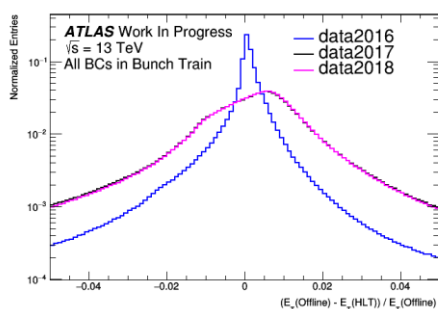


Fig. 1. The transverse energy resolution for trigger topo-clusters with respect to offline topo-clusters in Run-2.

低質量ブラックホール・中性子星連星の合体现象に対する 数値相対論的研究

基礎物理学研究所 宇宙分野 林航大

Abstract We investigated properties of accretion disk and material ejected dynamically in the merger of low-mass black hole-neutron star binaries by three-dimensional general relativistic simulation. We focused on the dependence of accretion disk mass and ejecta mass on the mass ratio of the binary and equation of state.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

2015年、Advanced LIGOが連星ブラックホールを波源とする重力波の検出に初成功した[1]。更に2017年、重力波イベントGW170817が検出された[2]。この重力波イベントに伴い、電磁波によるショートガンマ線バーストGRB170817Aやキロノバ/マクロノバAT 2017gfoの観測も行われた[3]。解析の結果、このイベントは連星中性子星の合体を波源とするものだと考えられている。現在は重力波検出器の感度向上に伴い、重力波イベントの検出数が増加している。特に、ブラックホール・中性子星連星(ブラックホールと中性子星からなる連星)の合体を波源の候補とする重力波も検出されている。しかし、波源となる天体を確定するには至っていないイベントが多いのが現状である。

重力波やその電磁波対応天体の観測を通して波源の性質を明らかにするためには、理論的に系の振る舞いを理解することが必須である。しかし、従来のブラックホール・中性子星連星の合体についての研究は、ブラックホールの質量が4太陽質量や、それよりも大きいものに注目したものが主である[4]。ブラックホールと中性子星の質量が比較的近い場合に注目した研究例は少ない[5]。これは、X線で観測されたブラックホールの質量が20太陽質量から5太陽質量程度であり、4太陽質量を下回るような質量を持つブラックホールの存在はあまり期待されていないことによるものである。しかし、5から3太陽質量程度の質量を持つコンパクト天体の存在を示唆する重力波イベントも検出されており、波源の理解を深めるために理論的な研究の必要性が高まっている。

そこで、本研究では低質量ブラックホール・中性子星連星の合体について数値相対論シミュレーションを実行した。ここで、ブラックホールの質量は4、3.5、3、2.5、2太陽質量の5種類、中性子星の質量は1.35太陽質量の1種類、中性子星の状態方程式は3種類、系統的に変化させてシミュレーションを行い、系の振る舞いの質量比依存性と状態方程式依存性を明らかにした。特に、電磁波対応天体の観測の可否につながる、合体後のブラックホール周りに形成される降着円盤の質量と、系から非束縛となり放出される物質の質量に注目した。この結果、連星の質量比(Q =ブラックホールの質量/中性子星の質量)がある値より小さい場合は降着円盤の質量は Q に依存せずほぼ一定となること、境界となる Q の値は中性子星の状態方程式に依存することが分かった。また、系から放出される物質の質量は Q が小さくなるに従って小さくなるという依存性があることが分かった。以上の依存性は本研究で初めて明らかになったものである。加えて、合体现象における中性子星の構成物質の運動をトレーサー粒子を用いて解析し、Lagrange的な振る舞いを明らかにした。潮汐トルクにより角運動量輸送がおり、潮汐破壊が起きることで降着円盤の形成や物質の放出が起こることを示唆する結果が得られた。

References

- [1] B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, 061102 (2016).
- [2] B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **119**, 161101 (2017).
- [3] B. P. Abbott *et al.*, The Astrophysical Journal **848**, L12 (2017).
- [4] K. Kyutoku *et al.*, Phys. Rev. D **92**, 044028 (2015).
- [5] T. Hinderer *et al.*, Phys. Rev. D **100**, 063021 (2019).

Ξハイパー核精密分光に向けた 多チャンネル有感標的の開発

原子核・ハドロン物理学研究室 原田 健志

Abstract A new active fiber target (AFT) is developed for the J-PARC E70 aiming for a Ξ hypernuclei spectroscopy via (K^-, K^+) reaction. AFT will realize good energy resolution of $2 \text{ MeV}_{\text{FWHM}}$. By using a prototype, we have carried out a test beam experiment at Tohoku, ELPH.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

u, dクォークで構成される核子に対し、それらに次いで軽いsクォークを構成要素に持つ粒子をハイペロンという。核子やハイペロンの間に働くバリオン間相互作用のモデルは、これまで主に、ストレンジネス量子数 $S = -1$ の系である Λ (Σ) ハイパー核から得られる実験事実を基に構築されてきている。これには、核力のモデルとして導入された中間子交換モデルをフレーバーSU(3)に拡張することで理解が進められてきた。一方 $S = -2$ の系では、数例のダブル Λ ハイパー核事象と、 Ξ ハイパー核の存在を示唆する事象が知られている程度と実験情報は極めて乏しく、バリオン間相互作用の理論モデルの不定性の持つ大きな要因となっている。そのため、 Ξ ハイパー核の存否の決定ならびに Ξ ハイパー核分光は急務となっている。J-PARC E70 実験では、 (K^-, K^+) 反応を用いた欠損質量法による Ξ ハイパー核の精密分光を準備している。実験は大強度 K^- ビームを有する J-PARC K1.8 ビームラインにて行い、新設した高分解能磁気スペクトロメータ S-2S を駆使することにより高統計・高エネルギー分解能の測定を実現する。これらに加え、アクティブファイバー標的 (AFT) を導入することにより (Fig. 1)、精密分光に対するさらなる感度向上を目指す。

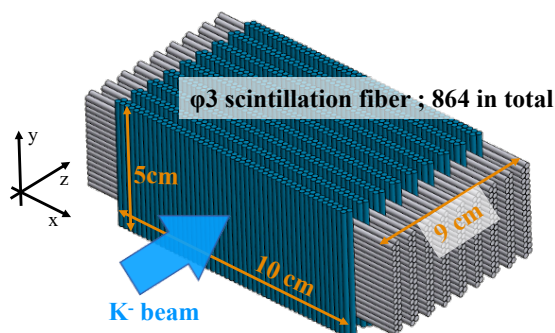


Fig.1 Active Fiber Target (AFT)

AFT は 3mm 径のシンチレーションファイバーから構成され、ファイバー中の炭素を標的として用いる。ファイバーは入射 K^- ビームと直交するように配置され、 xx' yy' を 1 セットとした、計 9 セット・900 本からなるマルチファイバー標的である。シンチレーション光はファイバー両端から読み出し、総チャンネル数は 1800ch に上る。AFT を導入することにより、シンチレーションファイバーの発光量から K^\pm 粒子の標的中でのエネルギー損失をイベントごとに直接測定することが可能となる。その結果、エネルギー分解能 $2\text{MeV}_{\text{FWHM}}$ での測定が実現できる。先行研究[1]から、ファイバー1本あたりのエネルギー分解能は J-PARC E70 実験で要求される $\Delta E/E < 10\%$ を満たすことが示されている。

本研究では、E70 実験で用いる実機の 1/3 にあたる 3 セット分を試作し (Fig. 2)、東北大学電子光理学研究センター (ELPH) にて $800\text{MeV}/c$ の陽電子ビームを用いたマルチファイバー性能試験を行った。AFT の各ファイバーへの陽電子の入射位置・角度を測定するため、AFT の前後に 1mm 径のファイバーからなる粒子飛跡検出器を設置した。シンチレーション発光量と検出効率の入射粒子位置・角度依存性やファイバーごとのばらつき、また、ファイバー組み立て精度、位置分解能などの諸性質について報告する。

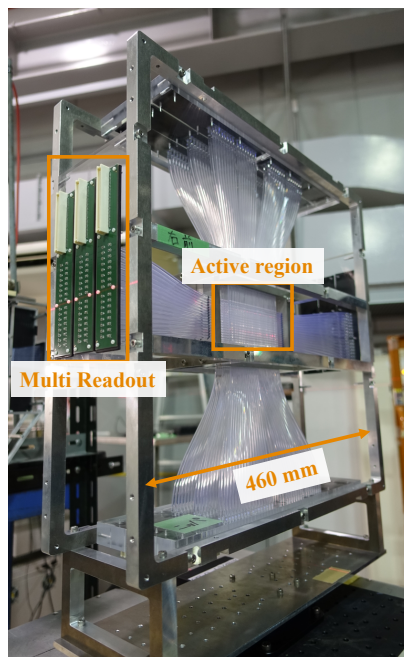


Fig.2 AFT prototype

References

- [1] A. Koshikawa, MS thesis, Kyoto University, 2018 (unpublished).

Large N 極限による場の量子論の非摂動的解析と プランクスケールの物理

素粒子論研究室 春名純一

Abstract We focus on the large N method to study non-perturbative aspects of quantum field theory. We investigate the possibility that the electroweak scale is generated from Planck scale by dynamics of dark matter. We also examine an irrelevant deformation, called “ $T\bar{T}$ -deformation”, for a clue to quantum gravity.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

プランクスケール物理の解明は素粒子論における最大の課題である。素粒子標準模型は摂動論の範囲内では理解が進み、電弱相互作用・強い相互作用に関する実験結果をよく説明している。しかし暗黒物質の存在を説明できない、プランクスケールと電弱スケールの上に極端に大きな開きがある、そして重力が量子化されていないといった諸問題を含んでいる。これらの課題を克服しプランクスケールの物理を解明するには場の量子論の非摂動的側面の理解が重要であると考えられる。

我々はこれらの問題に取り組むにあたり、場の量子論の非摂動的解析手法の 1 つである large N 極限に注目した。large N 極限とは内部対称性として $O(N)$ 対称性や $U(N)$ 対称性を持つ理論に対して、結合定数を N の適当なべき乗に反比例させながら $N \rightarrow \infty$ の極限をとることを表す。この極限をとった理論は一般に結合定数による摂動展開を行わなくとも物理量を厳密に計算できるという特徴を持つ。我々は $O(N)$ vector model と呼ばれる $O(N)$ 対称性をもつ実スカラー場の理論を用い、①暗黒物質の dynamics により電弱スケールがプランクスケールから自然に得られる可能性の探索、②量子重力理論構築の手がかりとしての $T\bar{T}$ 変形の研究を行った。

まず①に取り組んだ。電弱スケールは標準模型における質量次元を持つ唯一のパラメータであり、すべての素粒子の質量の大きさを定めているが、その起源は未だ不明である。我々は電弱スケールがプランクスケールから非摂動的に生成される可能性を探るために、質量スケールがカットオフから dynamical に生成される最小限の模型として古典共形な $Z_2 \times Z_2$ 対称性を持つ 2 実スカラー模型を考察した。この模型において large N 極限の方法により有効ポテンシャルを計算して真空を調べた結果、Coleman-Weinberg 機構 [1] により一方のスカラー場が Z_2 対称性を輻射補正によって自発的に破り、カットオフから指数関数的に suppress された真空期待値を持つことを発見した。またこの模型を標準模型の Higgs 場と結合させることで Higgs 場の質量項と真空期待値(電弱スケール)を再現できるかについても調べた。その結果これらを再現するパラメータが存在し、 Z_2 を破らないスカラー場が適当なパラメータでは数 TeV 程度の質量を持ち暗黒物質の候補となり得ることも発見した。

次に②に取り組んだ。 $T\bar{T}$ 変形 [2, 3] は 2 次元の場の理論のくりこみ不可能な変形の一つであり、その微小変形はラグランジアンにエネルギー運動量テンソルの行列式を加えることで与えられる。近年 [4] によってこの変形は理論を Jackiw-Teitelboim 重力と結合させることと古典的には等価であることが示された。したがって $T\bar{T}$ 変形された理論の量子論的性質を理解できれば量子重力理論の手がかりを得られる可能性がある。我々は free $O(N)$ vector model を微小 $T\bar{T}$ 変形した理論について、large N 極限における 1-loop 有効作用を計算し、場の量子論としての整合性(くりこみ可能性および状態空間の正定値性)を調べた。この結果、有効作用に現れる発散をくりこむことは不可能であること、そして高エネルギーの粒子が負のノルムを持ち、状態空間の正定値性が破れていることを発見した。さらに我々は理論をエネルギー運動量テンソルから作られる一般のスカラーによって変形した際に、状態空間の正定値性が保たれるためには、理論が微分同相変換対称性を持つ必要があることを議論した。これらの結果は弦理論の必然性を示唆するものである。

References

- [1] S.R.Coleman and E.J.Weinberg, Phys.Rev.D **7** 1888 (1973).
- [2] F.A.Smirnov and A.B.Zamolodchikov, Nucl.Phys.B **915**, 363 (2017).
- [3] A.Cavaglià, S.Negro, I.M.Szécsényi and R.Tateo, JHEP **1610**, 112 (2016).
- [4] S.Dubovsky, V.Gorbenko and M.Mirbabayi, JHEP **1709**, 136 (2017).

J-PARC E16 実験におけるスペクトロメーター電磁石の 磁場測定

原子核・ハドロン研究室 藤井涼平

Abstract The J-PARC E16 experiment aims to measure the vector meson spectra with dileptons. A magnetic field plays an essential role in achieving good mass resolution. In this thesis, method and result of the measurement of magnetic field, analysis of measured map, and its effect on the mass resolution are described.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

核子を構成するクォークは数MeV程度のヒッグス質量しかもたないのに対し、核子の質量は1GeV程度もある。この大きな質量の差を説明する機構の1つが、カイラル対称性の破れである。高温、または高密度中では、カイラル対称性が回復すると予想されている。そのため、高密度下では物質は質量が減少されることが予想される。

J-PARCで行われるE16実験では、炭素などの標的に30GeVの陽子を当てることで ρ, ω, ϕ などのベクター中間子を生成する。これらのベクター中間子は、ある分岐比でレプトン対へ崩壊する。レプトンは強い相互作用をしないため、崩壊したときの運動量を保ったまま検出器に到達する。そのため、レプトン対の運動量から不変質量を再構成することで、ベクター中間子が崩壊したときの質量を直接測定することができる。ベクター中間子が標的の原子核中で崩壊したときは、不変質量は真空中に比べて小さくなることが予想されるが、実際の実験では原子核中で崩壊したベクター中間子と、原子核外で崩壊したベクター中間子の質量スペクトルを重ね合わせたものが得られる。質量の減少の影響は、先行研究の結果によれば ϕ 中間子で3.4%程度と小さく、有限密度における質量スペクトル測定のためには、高い質量分解能が必要となる。E16実験で目標とする質量分解能は6.4MeV程度である。

レプトンの運動量は、磁場によりその軌道を曲げ、位置分解能のよい検出器で位置を検出することで得られる。高い質量分解能を達成するには、磁場分布を正確に知る必要がある。E16実験で要求される質量分解能を達成するためには、粒子の軌道変化に寄与する $\int \mathbf{B} \times d\mathbf{l}$ の精度が0.1%以内でなければならないことが、過去のシミュレーションからわかっている。粒子の飛跡を解析するために、検出器のある領域における磁場を計算する必要があるが、そのときに用いる鉄のBH曲線は2Tを超える領域では実測することが難しく、実験で使われる電磁石のBH曲線にもその領域のデータは存在しない。また、スペクトロメーター電磁石付近には鉄遮蔽体や他の実験で用いられる電磁石が配置されている。このような状況をふまえて、実際に用いる電磁石ヨークの内外で磁場を実測し、実測値に合うようにBH曲線等を最適化して計算磁場を作ることとした。本研究では、電磁石のつくる磁場のうち位置分解能の高い検出器が置かれる半径700mm以内の領域を0.1%の精度を目指して測定し、それ以遠の半径1500mm以内の領域の一部を1%の精度を目指して測定した。本論文では、測定手法、空間的な補正パラメータの評価について説明した上で、測定磁場の整合性評価と、補完法など計算磁場実装に向けた戦略を述べる。現状では測定磁場の再現性が1%程度であることが分かっており、その原因と、質量分解能への影響、および今後の展望を述べる。これにより、将来的にBH曲線を最適化して実用的な計算磁場を作成することができると考えている。

LEPS2 実験に用いる Time Projection Chamber の性能評価

原子核・ハドロン研究室 古田悠稀

Abstract LEPS2 is a photon beam facility to search for new exotic hadrons, Θ^+ and $\Lambda(1405)$. Before starting experiment, gas properties of the central tracking detector was changed likely due to gas leakage. In the article, drift velocity, position resolution and optimization of energy loss measurement under this condition are described.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

兵庫県西播磨郡に位置する大型放射光施設 SPring-8 [1]において LEPS2 (Laser Electron Photon experiment at SPring-8) 実験が進められている。LEPS2 実験は専用ビームラインにて、 $3\sim 5 \times 10^6$ cps、3 GeVの高エネルギー γ 線を標的に照射し、光生成反応を測定する実験であり、ペンタクォークハドロンとされている Θ^+ の探索及び、メソンバリオン束縛状態である可能性が示唆されている $\Lambda(1405)$ の構造解析を主たる目的としている。

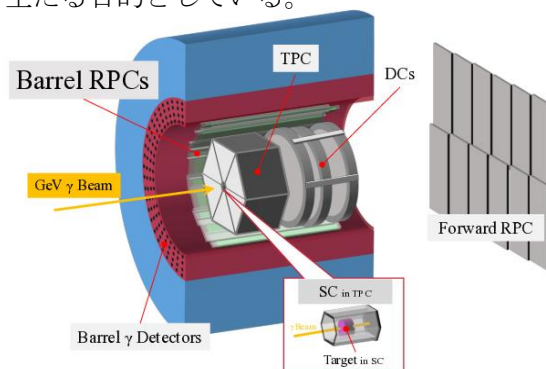


Fig. 1. LEPS2 Solenoid Spectrometer

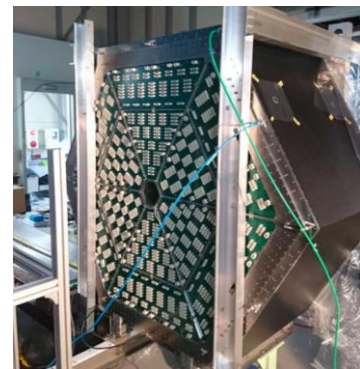


Fig. 2. TPC operated at LEPS2

$\gamma p \rightarrow K^* \Lambda(1405)$ 反応における K^* 及び $\Lambda(1405)$ の崩壊や、 $\gamma n \rightarrow K \Theta^+$ 反応における K^- 及び Θ^+ の崩壊により生成される遅い π などの、大散乱角に放出される粒子を全て検出するため、ほぼ 4π の立体角を覆う内径 2.2 m の大型ソレノイド型スペクトロメータ (Fig 1.) を設計し、各検出器の開発を進めている。

前方に放出された荷電粒子は Drift Chamber (DC) 及び Forward Resistive Plate Chamber (FRPC) で検出する。側方に放出された荷電粒子は Time Projection Chamber (TPC), Barrel RPC (BRPC), Aerogel Cherenkov Counter (AC) 及び Barrel γ Counter で検出する。本研究では TPC (Fig 2.) の性能評価を行った。

TPC は 3 次元的に荷電粒子の飛跡を検出する検出器である。本実験での運用に当たって、TPC には $\Theta^+ \rightarrow K_s^0 p$ の不変質量分解能が $6 \text{ MeV}/c^2$ 以下という性能が要求されている。それを満たすためには、読み出しパッド面上で $150 \mu\text{m}$ 、ドリフト方向で $700 \mu\text{m}$ の位置分解能が要求される [2]。位置分解能の評価実験は、本実験にも用いられる 3 GeV γ 線ビームを CH_2 標的及び Cu 標的に照射して行った。

データ取得直前、ガスの汚染を原因としたドリフト速度異常が発生し、正常な TPC のデータを取ることができなかった。しかし、本来の性能を発揮していない状態でもオペレートは可能であるため、ドリフト速度が遅い状態でも LEPS2 実験において要求される性能を満たしているか確認する価値があると考え、性能評価を行った。TPC のドリフト速度が正常時よりも半分近く遅い状態ではあったが、位置分解能の評価及び TPC における荷電粒子のエネルギー損失の計算方法の最適化を行った。本論文では TPC の構造、3 GeV γ 線を用いた実験の詳細及び性能評価の手法と結果について述べる。

References

[1] <http://www.spring8.or.jp/>

[2] Ryo Kobayakwa, Kyoto Univ., Master Thesis (2017).

物質表面周期構造形成を目指した 高強度テラヘルツ波光源開発

レーザー物質科学研究室 細川誓

Abstract We have developed an intense terahertz wave source aiming at in-situ measurement of periodic surface structures induced by terahertz waves on solid materials with high-spatiotemporal resolution. An intense terahertz wave of 1.6 mJ was generated from a Lithium Niobate crystal induced with an intense laser by tilted pulse front method.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

高強度レーザーを物質に照射した時に、表面に数十～数百 nm の間隔の周期構造が形成される。この構造形成はピコ秒程度の時間に生じると言われている。周期構造は LIPSS (Laser Induced Periodic Surface Structure) と呼ばれており形成メカニズムは明らかにされていない。その形成過程を高時間分解で観測することでメカニズム解明の手掛かりを得たいが、レーザーによる LIPSS は構造が微細であるため可視光では観測が困難である。一方テラヘルツ波で LIPSS を形成した場合、格子間隔が数 μm で観測が容易になることが期待されるため、テラヘルツ波に完全同期したプローブレーザーで LIPSS 形成過程の高時間分解観測を行い、メカニズムの解明につなげたい。そのためには LIPSS 形成可能でレーザーに完全同期可能な高強度のテラヘルツ波が必要であり、まずは光源開発を行った。テラヘルツ波発生には効率が良くとされる LiNbO_3 結晶を用いたパルス面傾斜法 (Fig.1.) を採用し、高強度化へ向けて高エネルギー Ti:sapphire レーザー (T⁶ レーザー) と大型の結晶 (19×20×20 mm のプリズム型) を使用した。

テラヘルツ波は非線形結晶の差周波発生により生じる。その際位相整合条件を満たさなければならず、グレーティングによりレーザーパルス面を傾斜させることでそれを達成する。レーザーパルス速度のパルス面に対する垂直成分と、テラヘルツ波の位相速度が等しくなるように傾斜角を設定する必要があり、グレーティングへの入射角、レンズと結晶の配置を調整して最適化を行った。T⁶ レーザーは中心波長 810 nm、最短パルス幅 35 fs、繰り返し周波数 5 Hz、エネルギーは大気中で 40 mJ、真空中で 500 mJ まで使用することができる。まず大気中でテラヘルツ波光源を構築し、テラヘルツ波の放射特性について調べた。テラヘルツ波パルスの時間波形とスペクトルの測定、エネルギーのレーザーフルエンス依存性測定とチャープレーザーパルス幅依存性測定を行った。 LiNbO_3 結晶は 2 種類あり、それぞれ SLN (定比組成)、CLN (一致融溶組成) と呼ばれる。SLN は大型化が困難で CLN は大型化が容易、SLN は CLN よりも非線形光学係数が高いといった特徴がある。非線形光学係数の影響を見積もるため、同じサイズの SLN と CLN でテラヘルツ波の出力を比較した。発生したテラヘルツ波の周波数はピーク周波数 0.7 THz (ピーク波長 430 μm)、エネルギーはレーザー 40 mJ に対して SLN で 119 μJ 、CLN で 110 μJ となった。また、ネガティブチャープかつパルス幅 82 fs で SLN、72 fs で CLN からのテラヘルツ波が最大となった。次に真空中で光源を構築し、さらに高エネルギーのレーザーを使用できるようにした。結晶は SLN を使用し、テラヘルツ波エネルギーのレーザーエネルギー依存性を測定した結果 (Fig.2)、最大で 1.6 mJ のテラヘルツ波を得ることができ、パルス面傾斜法においては世界最大のエネルギーを達成した。

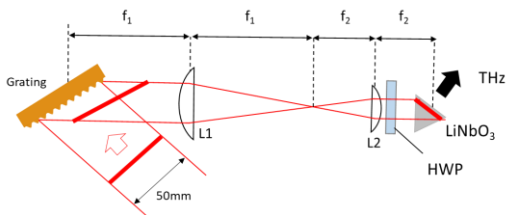


Fig. 1. Optical layout of tilted pulse front method. f_1 and f_2 are the focal lengths of L1 and L2 respectively.

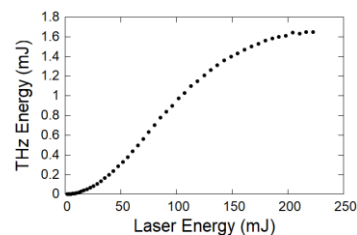


Fig. 2. Terahertz energy dependence on laser energy.

Witten Ansatz を用いた ホログラフィック QCD におけるバリオンの研究

原子核理論研究室 堀敬一郎

Abstract We study baryons in holographic QCD, or the Sakai-Sugimoto model, where QCD is described as a 1+4 dimensional theory with a background gravity and baryons originate from instantons. Using the Witten Ansatz, we reduce the theory into a 1+2 dimensional Abelian-Higgs theory with a gravitational background, and investigate baryons numerically.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

量子色力学(QCD)は $SU(3)$ ゲージ理論で記述され、その非可換性から低エネルギーにおいてはカラーの閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れなど興味深い非摂動的な現象が現れる。これらの非摂動的現象は解析が困難であり、数値的な格子 QCD 計算や、様々な解析的なモデルにより研究されてきた。

その中でもホログラフィック QCD は、超弦理論の D ブレーンを用いて非摂動的 QCD を解析する比較的新しい枠組みである。そこでは AdS/CFT 対応(ゲージ/重力対応)[1]が重要な役割を果たしている。これはゲージ理論と高次元の重力理論が等価な記述を与えるというもので、一方の強結合領域が他方の弱結合領域に対応しているため、QCD の強結合領域における非摂動的効果を古典的な重力理論から調べることが可能になっている。歴史的には Witten が超対称性を持たない pure Yang-Mills 理論に対応するものを構成し、グルーボールの性質などを調べた[2]。次いで、酒井・杉本モデルと呼ばれる massless QCD に対応するものが提案され、カラーの閉じ込めやカイラル対称性の自発的破れ、現象論的に知られていた法則やメソンのスペクトルなどが統一的に導かれた[3]。

酒井・杉本モデルでは、QCD の低エネルギー有効理論は、 $1/N_c$ 展開の leading では 5 次元時空におけるフレーバー空間のゲージ理論で記述される。ただし、そこには非自明な背景重力場が現れる。この理論では直接的な自由度はメソンであり、バリオンは陽に現れずメソン場のソリトンとして記述される。このソリトンの構成には、4 次元の有効理論に射影しカイラル・ソリトンとして記述する方法[4]とゲージ場がつくるインスタントン解をバリオンとみなす方法[5,6]が使われてきた。後者の解析方法においては t Hooft coupling λ の leading である Yang-Mills 項のみではインスタントンのサイズは 0 になり、next leading の Chern-Simons 項を含めると有限のサイズのものが得られることが示された。しかし、非自明な重力場により厳密に解を求めることは困難であり、背景重力場に対する近似が使われている。

本修士論文では Witten Ansatz[7]を用いたホログラフィック QCD におけるバリオンの解析方法を提案する。Witten Ansatz とは 3 次元空間における回転対称性を持ったインスタントン解を求める手法である。これにより 1+4 次元の Yang-Mills 理論は 1+2 次元の Abelian-Higgs 理論に変換され、それに伴いバリオンを記述するトポロジカル・オブジェクトは 4 次元のインスタントンから 2 次元のボルテックスに変わる。さらに低次元化したことで非自明な背景重力場を正しく取り込んだ直接的な計算が容易になる。我々はこの方法を用いてホログラフィック QCD におけるバリオンの $1/N_c$ leading, $1/\lambda$ の next leading, までの exact な計算を行い、バリオンに関する諸物理量を求めた[8]。

References

- [1] J.M. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. **2**, 231 (1998).
- [2] E. Witten, Adv. Theor. Math. Phys. **2**, 505 (1998).
- [3] T. Sakai and S. Sugimoto, Prog. Theor. Phys. **113**, 843 (2005).
- [4] K. Nawa, H. Suganuma and T. Kojo, Phys. Rev. **D75** 086003 (2007).
- [5] H. Hata, T. Sakai, S. Sugimoto and S. Yamato, Prog. Theor. Phys. **117**, 1157 (2007).
- [6] D. K. Hong, M. Rho, H. U. Yee and P. Yi, Phys. Rev. **D76**, 061901 (2007).
- [7] E. Witten, Phys. Rev. Lett. **38**, 121 (1977).
- [8] H. Suganuma and K. Hori, Talk at 8th Int. Conf. on New Frontier in Physics (2019).

Einstein-Gauss-Bonnet 重力におけるエントロピーの上限と Generalized second law

基礎物理学研究所 松田泰亮

Abstract In General relativity, it is proved under some assumptions that an entropy of matters is bounded by black hole entropy of the surface which surrounds the matters. We provide a similar bound in Einstein-Gauss-Bonnet gravity and provide supporting evidence for the proposal.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

Hawking *et al.* [1]はブラックホールを持つ時空において計量の変分を考えたとき、その変分が引き起こすブラックホールの表面積 A の変化を、時空の二つの保存量 M 、 J （それぞれ時空全体の質量および角運動量と呼ばれる）の変化の線型結合によって表すことが可能であることを示した。この A 、 M 、 J の変化の間の関係式は熱力学第一法則に類似している。また、この類推におけるブラックホールの温度は Hawking 放射 [2] をブラックホールの黒体放射と解釈したときの温度と一致している。これらの発見を受けてブラックホールを熱力学的存在であると解釈することが提唱された。

ブラックホールが一つの熱力学系であると認めると宇宙全体を一つの孤立系としてみなしたとき熱力学第二法則からその全てのエントロピーは増大するべきである。これを一般化された第二法則 (Generalized second law: GSL) と呼ぶ。Bekenstein は GSL の成立を仮定した上でブラックホールに物質を投入する事を考え、物質のエントロピーの上限が、物質を覆う球の面積 A を用いて $A/4$ で表せる事を主張した。 $A/4$ はちょうど面積 A を持つブラックホールのエントロピーであり、ある領域に物質を投入し続ける事でブラックホールになることと合致している。Bousso [3] はこの主張をより一般にブラックホールが存在しない時空でも成り立つ性質ととらえて、 D 次元時空中の面積 A を持つ $D-2$ 次元曲面 B について、 B から内側に向かって発せられる $D-1$ 次元光的超曲面 L 上に存在する物質のエントロピーの上限が、 B がブラックホールとなったときのエントロピー $A/4$ である事を主張した (Bousso bound)。この主張は Flanagan *et al.* [4] によっていくつかの仮定の元で証明されている。

以上の主張は Einstein-Hilbert 作用 (EH 作用) を用いた解析によるものであったが、EH 作用は低エネルギー理論であり、重力を記述する完全な理論ではないと言われている。したがって以上で述べた仮説やその主張を裏付ける様々な思考実験や具体的な系での計算が他の重力理論でも成立する事を確かめることは重要である。Wald [5] は一般の重力理論 (微分同相変換で不変的な理論一般) に対していくつかの保存量の間には第一法則と類似する関係式が存在するを見出し、静的な時空においてはブラックホールエントロピーに相当する量をラグランジアンから直接計算出来る事を示した。したがって一般の重力理論においてもブラックホールの熱力学性質が成立することが期待される。

今回我々は一般相対論以外の重力理論においても Bousso bound と同様の主張が成立するのか考えた。一般に静的でない時空においては Wald が存在を示したブラックホールエントロピーを計算することは困難である。我々は特に Einstein-Gauss-Bonnet 重力に注目した。この重力理論の特徴として、静的な時空からの線型摂動の範囲で GSL が証明されているブラックホールエントロピーの候補が存在している。今回我々はこの候補を採用し、球対称な時空で Flanagan *et al.* [4] と同様の解析を行った。結果として物質のエントロピーに対して、採用されたブラックホールエントロピーを用いて上限をつけることはできたが、Bousso bound と完全に対応する上限ではなかった。しかしながら構成された上限を Event horizon 上で用いると静的な時空の摂動の範囲外でも GSL の成立を示すことができた。

References

- [1] Bardeen, J. M.; Carter, B.; Hawking, S. W.. *Comm. Math. Phys.* **31** (1973), no. 2, 161—170
- [2] Hawking, *Commun. Math. Phys.* **43**, 199 (1975)
- [3] R. Bousso, *JHEP* **9907** (1999) 004
- [4] E. E. Flanagan, D. Marolf and R. M. Wald, *Phys. Rev. D* **62** (2000) 084035
- [5] V. Iyer and R. M. Wald, *Phys. Rev. D* **50** (1994) 846–864,

高輝度 LHC ATLAS 実験に向けた初段ミュオントリガー アルゴリズムの開発およびハードウェアへの実装

高エネルギー物理研究室 三野裕哉

Abstract The trigger system in LHC-ATLAS will be upgraded to cope with the higher luminosity at High Luminosity LHC. We have developed a new trigger logic using information from the muon detectors and implemented the new logic on a programmable chip. The design and expected performance are presented.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

Large Hadron Collider (LHC) は、スイス・ジュネーブ郊外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の円形加速器である。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、未知の粒子の探索やヒッグス粒子の精密測定を行うことで標準模型を超えた新たな物理の発見を目指している。

2027 年には標準模型の精密測定や物理探索を目的としてビーム輝度をこれまでの約 3 倍に向上させた高輝度 LHC が運転開始予定であり、高統計を活かして生成断面積の小さい新粒子の検出やヒッグス粒子の精密測定を行う。豊富な統計量が期待される一方で、衝突で生じる高レート事象を全て記録するのはデータ記録速度や容量の点で不可能である。そのため、衝突頻度の増強に伴って増加する背景事象を排除しつつ、興味のある事象をより正確に選別 (トリガー) し、データを取得する必要がある。

本研究では、ミュオンを崩壊過程に含む物理解析で不可欠となるミュオントリガーを扱う。ミュオントリガーはミュオンの横運動量 (p_T) に対して閾値を設けることでトリガー判定を行っている。ATLAS 検出器のエンドキャップ部では、Fig. 1 に示すように磁場の外部に設置されている 7 層の Thin Gap Chamber (TGC) 検出器と磁場内部に設置されている 4 種類の検出器のヒット情報を組み合わせてミュオンのトリガー判定を行う。現行のトリガーシステムでは段階的に精度の粗いコインシデンスをとることでトリガー判定を行っていたため、ミュオンの検出効率と p_T 分解能に限界があった。高輝度 LHC では、ミュオントリガーシステムのアップグレードとして、TGC のヒット情報を全てトリガー判定回路に転送し、全 7 層のヒット情報を同時に用いた飛跡再構成を行うことで検出効率と p_T 分解能を向上する予定である。この新システムにおいて、 p_T 閾値を超えるミュオンの検出効率の向上と p_T 閾値以下の低い p_T のミュオンの削減を目的として、新しい飛跡再構成アルゴリズムを開発した。さらに、衝突点由来でない荷電粒子によるトリガーレートを削減するため、磁場内部に設置されている複数の検出器の情報を、TGC で再構成した飛跡の位置・角度情報と組み合わせるトリガーアルゴリズムを開発した。

本研究で開発したトリガーアルゴリズムは、閾値以上の p_T を持つミュオンに対して 94% (現行システムのままでは 87%) と高い検出効率を持ちつつ、閾値以下の p_T を持つミュオンと背景事象を大きく削減することで 20 kHz (現行システムのままでは約 60 kHz) というトリガーレートを達成した。さらに開発したトリガーアルゴリズムをトリガー判定ボードに搭載するためのファームウェアとして実装し、シミュレーションを用いた動作試験において作成したファームウェアが正しくトリガー判定できていることを確認した。

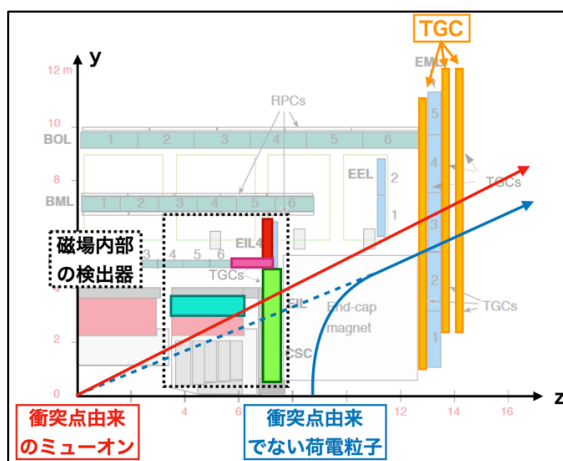


Fig.1. Cross-Section of the ATLAS muon system [1]

References

- [1] ATLAS Collaboration, Technical Design Report for the Phase-II Upgrade of the ATLAS Muon Spectrometer (2017)

HAL QCD 法と all-to-all propagator を用いた K 中間子-核子相互作用の研究

基礎物理学研究所 村上 耕太郎

Abstract We examine whether all-to-all propagators can be applied to the HAL QCD method for meson-baryon systems. We analyze s-wave kaon-nucleon scatterings and discuss the effectiveness of this combination comparing the results with the experimental data and the previous results without all-to-all propagators.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

時空を離散化した QCD 理論である格子 QCD[1]での数値計算は、QCD 理論の非摂動計算が可能である。格子 QCD からハドロン 2 体散乱の情報を得る方法として、Lüscher 法[2]と HAL QCD 法[3]の 2 つが存在する。しかし、バリオンを含んだ系のエネルギーを相関関数から精度よく取り出すことが困難であるため、Lüscher 法でのバリオンを含んだ系の散乱の高精度の解析は難しい。HAL QCD 法ではこの問題を回避することが可能であり、現在まで様々なバリオン 2 体散乱の解析が行われている。

空間の任意の点から任意の点への伝播関数 (all-to-all propagator) は、ハドロン物理の様々な局面で用いられている。これにより、クォーク対生成、対消滅の計算や、特定の角運動量のハドロン散乱状態の解析ができ、様々な共鳴状態の解析が可能となる。さらに、wall source を用いた解析では不可能である operator smearing を行うことができ、励起状態の寄与からくる系統誤差を軽減することができる。ただし、all-to-all propagator の計算には膨大な計算量を必要とするので、現在は近似を用いて計算されている。

Lüscher 法では現在、all-to-all propagator を用いて $I=3/2$ のパイオン-核子散乱から Δ 共鳴状態が調べられている[4]が、統計誤差、系統誤差のため、良い精度の散乱位相差は得られていない。一方、HAL QCD 法ではこの問題を回避できることから、HAL QCD 法を用いたパイオン-核子散乱の解析から Δ 共鳴状態に関する精度が良く信頼できる結果が得られると考えられる。しかしながら、メソン-バリオン 2 体散乱の HAL QCD 法と all-to-all propagator を組み合わせた計算方法は未だ確立されておらず、その有効性の検証が喫緊の課題である。

本研究では、HAL QCD 法を用いて、K 中間子-核子 2 体系の NBS 波動関数からポテンシャルを導出し、それを用いて K 中間子-核子の散乱位相差を計算した。この系にはクォーク対生成、対消滅は存在しないが、K 中間子の source operator に対して運動量がゼロの演算子を用いたため、all-to-all propagator が必要になる。そこで、one-end trick と呼ばれる近似計算法[5]を用い、さらに、source operator に含まれるクォーク場に対して smearing を適用して、計算を行った。そして、得られた散乱位相差の結果と実験値[6]および HAL QCD 法で wall source を用いた先行研究[7]の結果との比較検討を行なった。本研究の結果は、先行研究の結果とは無矛盾であり、実験値の振る舞いを定性的に再現することが確認できた。しかしながら、系統誤差の詳細な評価などにより、この結果が定量的にどの程度正しいのかを、今後詳しく調べる必要がある。K 中間子-核子 2 体系のチャンネルには $\Theta^+(1540)$ と呼ばれるペンタクォークの存在が一部の実験で主張されている[8]が、本研究結果では、相当する共鳴状態および束縛状態の存在は確認できなかった。

References

- [1] K. G. Wilson, Phys. Rev. D **10**, 2445 (1974).
- [2] M. Lüscher, Nucl. Phys. B **354**, 531 (1991).
- [3] N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, Phys. Rev. Lett. **99**, 022001 (2007).
- [4] S. Paul et al., PoS LATTICE2018, 089 (2018).
- [5] M. Foster, C. Michael, Phys. Rev. D **59**, 074503 (1999).
- [6] K. Hashimoto, Phys. Rev. C **29**, 1377 (1984).
- [7] Y. Ikeda, for HAL QCD Collaboration, PoS LATTICE2011, 159 (2011).
- [8] T. Nakano et al. [LEPS Collaboration], Phys. Rev. Lett. **91**, 012002 (2003).

小型永久磁石型 ECR 水素イオン源の特性評価

ビーム物理学研究室 八子丈生

Abstract A compact ECR H^+ ion source using permanent magnet is under development. We measured the extracted ion beam current and ion species with mass spectrometer and optimized parameters. We have successfully extracted 1mA H^+ ion source at a peak.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

近年、中性子は寿命測定や EDM 測定などの素粒子物理学の基礎物理研究だけでなく、がんのホウ素中性子捕捉療法 (BNCT) や中性子イメージングなど、医療・産業の分野に応用され、重要な役割を担っている。日本国内にも Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) や京都大学研究用原子炉 (KUR) をはじめとする大型、中型中性子実験施設があり、様々な研究に利用されている。しかしこれらは共同利用施設であり、利用に際して小回りがきかないなど、研究の初期段階における試行実験や教育を目的とした実験、検出器の試験などの利用に適していない。そのため、それらの用途に合う中小規模中性子源の開発の重要性が高まっている。

当研究室では、陽子加速器ベースの小型中性子源の開発を行なっている。そこでまず 1 次ビームである陽子ビームを取り出すための小型 ECR H^+ イオン源の開発を行なっている [1]。ECR イオン源は他の H^+ イオン源よりもプラズマ温度を高くできるため、 H^+ の比率を H_2^+ や H_3^+ のような分子状イオンに比べて大きくできることが期待される。 H^+ の比率が大きければ、分子状イオンが初段加速器である RFQ 内でのエネルギー浪費や、中性化による真空排気系への負荷を減らすことができる。発生させる磁場を電磁石ではなく永久磁石を用いることで、電磁石用の電源や冷却設備等の削減、省スペース化が可能である。本 ECR イオン源は J-PARC と同じ繰り返し 25Hz のパルス運転を前提としている。また、共振周波数を 6GHz 付近で設計しており一般的な 2.45GHz のものよりもチャンバーの体積が小さく、単一モードで運転する。RF だけでなく供給する H_2 ガスもパルス化することで、プラズマ生成やビーム引き出し時以外のガス供給を無くし、RFQ などの後段の加速器の真空排気系の負荷が低減され、排気ポンプの簡素化が期待される。

ECR イオン源はチャンバー内の磁場強度で決まるサイクロトロン周波数とチャンバーの共振周波数を一致させることで、電子が効率的にエネルギーを吸収し、中性原子をプラズマ化させるが、プラズマが生成されると高周波の反射の様子も変化していく。単一モードに合わせた磁場設計をしているため、動作がそれらの周波数のズレに敏感である。そこで外部からチャンバー内の磁場強度を可変させることのできる調整機構を搭載したイオン源試作 5 号機を製作した。 H^+ の電流量や比率が大きくなるような磁石配置を、リアルタイム質量分析器 [2] を用いて引き出しビームの電流量やイオン種を測定し、最適化を行なった。また RF パワー、ガス圧など種々のパラメータも同様に最適化し、本イオン源の特性評価を行なった。現時点で、イオン源の引き出し電圧 25 kV、パルス幅 2 ms で H^+ ビーム電流値 1.1 mA を確認している。

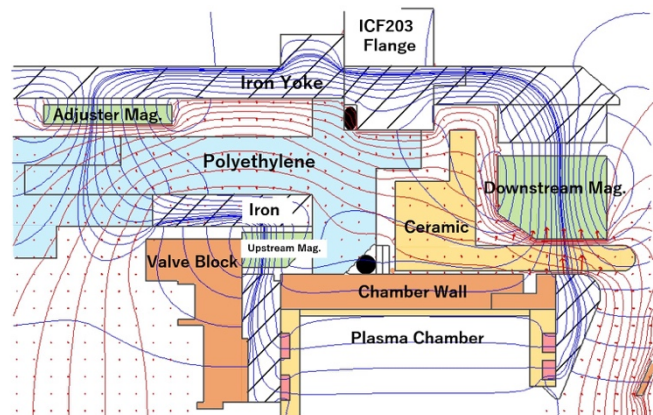


Fig. 1 Magnetic flux(blue) and equipotential surface(red) in the ECR ion source.

References

- [1] Y. Iwashita, H. Tongu, Y. Fuwa, and M. Ichikawa, Review of Scientific Instruments 87, 02A718 (2016)
- [2] Y. Takeuchi, Y. Iwashita, and H. Tongu, Proceedings of 9th IPAC(2018)

Bosonization duality in three dimensions

Theoretical particle physics group, Takuya Yoda

Abstract We review dualities in lower dimensional field theories, especially bosonization dualities in three dimensions. And we report on our research in progress to study a duality in the Chern-Simons vector model at finite temperature and in the presence of a background field.

© 2020 Department of Physics, Kyoto University

Non-perturbative behaviors of strongly coupled field theories are not yet fully understood. An important way to approach the problem is to study on dualities of field theories. If two different theories predict the same observables, the pair of theories is called to be dual. The electromagnetic duality is one of the examples. In this type of duality, a strongly coupled field theory corresponds to a weakly coupled theory. This correspondence enables us to compute perturbatively the observables of a strongly coupled field theory. In this sense, duality is a useful tool to study strongly coupled field theories.

However, the number of known dualities are too limited to apply to real physical systems, and we do not necessarily have strong evidence of those dualities. One of the examples is the bosonization duality. The bosonization duality maps a fermionic theory to a bosonic theory. Theories of the bosonization duality are exactly solvable in two dimensions due to conformal symmetry. However, in many cases, real systems we are interested in are not two dimensions. In three or four dimensions, theories are not exactly solvable unless we take certain limits or unless theories are supersymmetric. Therefore, it is an important task to find many types of dualities and to collect pieces of evidence to support those dualities.

Recently, a new type of bosonization duality is found in a certain class of three dimensional theories. The class of theories is called the Chern-Simons vector model. The model consists of a fermion or a boson both coupled to the Chern-Simons gauge field. The Chern-Simons vector model is interesting in the following three points. The first point is that the observables can be exactly computed without supersymmetry nor conformal symmetry. The second point is that a particle in one theory corresponds to a particle of another theory. The third point is that the Chern-Simons model is in close relation to condensed matter systems.

Although we have many pieces of strong evidence to support the duality in the Chern-Simons vector model, it is still open to question. One good test to confirm the duality is observing the response of dual theories to a common background associated with a shared global symmetry. There are prior researches on the Chern-Simons vector model in the presence of a background [1,2,3]. However, computations are not yet completed in the full parameter regions. Also, we still face following two puzzles. One of the puzzles is that how the fermionic and the bosonic theories become dual across phase transitions. When we turn on a magnetic background, we face another puzzle of what is the counterpart, for bosons, of the Zeeman energy. Therefore, we need to complete evaluation of observables in the full parameter regions, and to find physical interpretations for these puzzles.

In order to solve these problems, Shuichi Yokoyama and the author of this thesis are studying on the Chern-Simons vector model in the presence of a background. A task of the research is to compute the free energy of dual theories in the full parameter regions. The free energy is a thermodynamic quantity which is useful across phase transitions. Thus, it is expected that we can find good physical interpretations for those puzzles. We report preliminary results obtained so far.

References

- [1] Sachin Jain, Shiraz Minwalla, and Shuichi Yokoyama. Chern Simons duality with a fundamental boson and fermion. JHEP, 11:037, 2013.
- [2] Sayantan Choudhury, Anshuman Dey, Indranil Halder, Sachin Jain, Lavneet Janagal, Shiraz Minwalla, and Naveen Prabhakar. Bose-Fermi Chern-Simons Dualities in the Higgsed Phase. JHEP, 11:177, 2018.
- [3] Indranil Halder and Shiraz Minwalla. Matter Chern Simons Theories in a Background Magnetic Field. JHEP, 11:089, 2019.