

2023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

(2024年2月5日、2月6日)

物理学第二分野

# 物理学第二分野 修士論文発表会ご案内

下記の通り、修士論文発表会を開催します。

日時:2024年2月5日(月)6日(火)  
場所:理学研究科5号館 525号室  
発表時間:15分+5分(質問)

発表の順番、研究題目は下記のとおりです。

## 2月5日(月)

- カーチ・ランドールブレインのホログラフィックコンプレキシティへの寄与 石井 孝典 (9:00)
- 恒星フレアの多波長観測による大規模プラズマ噴出の発見 井上 峻 (9:20)
- 高速パルス磁場を用いた $^{57}\text{Fe}$ 核スピン操作の放射光核共鳴散乱による測定 太田 英寿 (9:40)
- 水-ニュートリノ反応の精密測定に向けた水ベース液体シンチレータ飛跡検出器の開発 恩田 直人 (10:00)
- 《 休 憩 》
- von Neumann代数を用いた無限次元量子誤り訂正としてのバルク再構成 神田 大樹 (10:30)
- 平坦背景におけるメタ弦の量子化 京 鴻一 (10:50)
- スカラー・テンソル理論におけるブラックホール摂動の有効場の理論に基づく解析 小林 元 (11:10)
- 境界上に局在するスカラー場によるAdS/BCFT対応の一般化 佐藤 政秀 (11:30)

《 午 後 》

9. JT重力とアイランド 繁村 知宏 (13:30)
10. グザイバリオン分光実験に用いるビーム粒子識別用リングイメージングチェレンコフ検出器の開発 鈴木 翔太 (13:50)
11. S-2Sを用いた $\Xi$ ハイパー核分光のためのK中間子識別手法の開発 高橋 秀治 (14:10)
12. ダークフォトン探索に向けた広帯域分光計の開発と評価 竹内 広樹 (14:30)
13. 場の理論における一般化対称性 田中 隆寛 (14:50)

《 休 憩 》

14. 酒井-杉本模型におけるバリオンのエネルギー運動量テンソルおよびD-termの数値解析 塚本 大智 (15:30)
15. T2K 実験ニュートリノ検出器SuperFGD のための信号読み出し検査システムの開発と運用 對馬 拓実 (15:50)
16. An algebraic approach to gravitational entropy 土井 一輝 (16:10)
17. SU(3)格子QCDを用いたDimensional ReductionゲージにおけるQCDの低次元的性質の解析 當銘 啓 (16:30)

## 2月6日(火)

18. 降着型パルサーにおける軟X線超過と低電離鉄輝線の系統的なスペクトル解析 永井悠太郎 (9:00)
19. J-PARC E16 実験におけるRAM機能を用いたDAQシステムの改良 長房俊之介 (9:20)
20. TA実験およびTALE実験による高エネルギー宇宙線の到来方向大角度異方性探査 難波 宏樹 (9:40)
21. 反対称化分子動力学法及び陽子拘束を用いた $^{12}\text{Be}$ の励起状態の構造研究 長谷川 稜 (10:00)

### 《 休 憩 》

22. ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索に向けた高圧XeガスTPC AXELの電離信号読み出し面の改良 疋田 純也 (10:30)
23. 重力崩壊型超新星の上限質量制限に向けた超新星残骸 G359.0-0.9 の観測研究 松永 海 (10:50)
24. 弦理論によるSpecies Boundの検証 道信 祐吏 (11:10)
25. 宇宙の大規模構造の観測から探る原始密度ゆらぎの統計的非等方性:銀河の固有形状を組み合わせた検出精度向上の可能性 湊 恵太 (11:30)

### 《 午 後 》

26. 断熱進化によるコンパクトなボゾンスターの形成の可能性 宮内 侑 (13:30)
27. 超伝導検出器MKIDの薄膜純度向上及び高感度化を目指した製作と性能評価 武藤 優真 (13:50)
28. ESPRI+実験に向けたGAGG(Ce)カロリメータの波形解析による粒子識別新手法の開発 矢野 隆之 (14:10)

# カーチ・ランドールブレンのホログラフィックコンプレキシティへの寄与

素粒子論研究室 石井孝典

**Abstract** We consider confirming the Complexity=Volume conjecture and the contribution of boundary in CFT to holographic complexity. We study the asymptotic Anti-de-Sitter spacetime into which the KR brane is inserted. We derive an equation to be solved for our purpose.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

素粒子理論の重要な課題として量子重力理論の構成がある。その問題を解決するアプローチ方法として AdS/CFT 対応を使った方法がある[1]。AdS/CFT 対応とは d+1 次元の重力理論と重力理論に現れる境界 (AdS 境界) 上の d 次元の量子論の等価性を主張したものである。AdS/CFT 対応を使用することで量子論から量子重力理論の構成を試みている。しかし現状ではその対応関係から量子重力の構成は難しい。特にブラックホールの理解は非常に難しい問題になっている。そんな中、AdS/CFT 対応の辞書の一つである Complexity=Volume 予想がブラックホールを理解する手掛かりになるとして注目されている。

本修士論文では古典重力と量子論の AdS/CFT 対応におけるコンプレキシティと体積に関する対応関係について議論した。この対応関係を Complexity=Volume (CV) 予想[2]という。CV 予想は量子論側の量であるコンプレキシティ C と重力理論側の量である体積 V、ニュートン定数 G と AdS 半径 L を使って

$$C = \frac{V}{GL}$$

と記述することができる。コンプレキシティとは量子情報理論で使用される重要な量であり、基準となる状態から考えている状態を基本的な演算子で実現しようとした時の演算子の数をカウントしたもので、状態の複雑さを推定する量として知られている。また CV 予想における体積は重力理論の AdS 境界の時間一定面を境界条件として与えた時の余次元 1 の曲面の極大体積として与えられる。CV 予想の重要な特徴として重力側にブラックホールが存在する時、極大体積はブラックホール内部を通ることが知られている。この性質から量子論側からコンプレキシティが与えられれば、ブラックホール内部についての情報を得ることができる。しかし、CV 予想は AdS/CFT 対応の辞書として比較的新しく、発見的な証拠が整っていない状況である。

本修士論文では先行研究[3]で議論されている漸近 AdS ブラックホール時空とその双対な量子状態での CV 予想に関する研究を行った。本研究のモチベーションとしては次の二つがある。第一に CV 予想の検証である。CV 予想のよく知られた性質として重力理論にブラックホールがある時その極大体積は十分時間が経ったところで時間に比例することが知られている。この性質についてブレンが挿入されたブラックホール時空について検証を試みた。第二に共形場理論中の境界の寄与について理解することである。先行研究[3]から本研究で考えている時空と双対な量子状態は境界を持った共形場理論上の Thermofield Double 状態であることが分かっている。また、AdS/CFT 対応の拡張として AdS/BCFT 対応がありブレンと共形場理論の境界の対応はよく知られているので、極大体積が得られれば極大体積へのブレンから共形場理論の境界からコンプレキシティに与える寄与について理解が得られると考えた。結果、新しい成果として、体積の計算がある種の境界値問題に帰着することを私は示した。今後はこの形式を数値的にでも解き、CV 予想のさらなる検証へと進みたい。

## References

- [1] J. M. Maldacena, *Adv. Theor. Math. Phys.* 2 (1998) 231, *Int. J. Theor. Phys.* 38 (1999) 1113
- [2] D. Stanford and L. Susskind, *Phys. Rev. D* 90, 126007.
- [3] H. Geng, *et al.*, *J. High Energ. Phys.* 2022, 56 (2022).
- [4] T. Ishii *et al.*, in preparation.

# 恒星フレアの多波長観測による大規模プラズマ噴出の発見

宇宙線研究室 井上峻

**Abstract** Effects of stellar magnetic activity, such as flares and coronal mass ejections (CMEs), on exoplanets have recently gathered attention. We detected three stellar CME candidates with X-ray and H $\alpha$  observations and confirmed that the flare-CME scaling laws can be applied to 10<sup>35</sup> erg class flares, contrary to numerical simulations[1].

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

恒星フレアは星の表面において、磁場として蓄えられたエネルギーが突発的に解放される爆発現象である。エネルギーの解放は、X線から電波までの幅広い波長帯での放射に加え、コロナ質量放出（Coronal Mass Ejection; CME）とよばれる恒星外部へのプラズマ噴出という形でも行われる。恒星フレアとCMEは、系外惑星の大気や恒星進化への影響という観点からも注目されており、その全容の解明が急務である。ところが、空間分解した観測が困難な他の恒星でのフレアでは、まだ不明な点が多い。太陽フレアは最大級のイベントであってもその解放エネルギーは $\leq 10^{32}$  ergであるのに対し、恒星の場合は、この10倍以上のエネルギーを解放する「スーパーフレア」が頻繁に観測されている。恒星で起きるスーパーフレアが、CMEを伴うと示唆する観測結果はまだ非常に少なく、その規模、頻度、物理機構を議論するには観測が足りていない現状である。特に、従来の観測では「CMEとして十分な速度（ $\geq 1000$  km/s）を持つプラズマ噴出の検出」と「CMEを伴うフレアの多波長同時検出」が欠如していた。そもそも、スーパーフレアを起こすような強い磁場を持つ恒星では、CMEは磁場からの力により抑制されるため発生しないという計算結果[1]も存在し、CMEの観測例が依然として少ないことが、観測が少ないからなのか、実際に磁場による抑制が効いているのか、不明な状況である。

本修士論文では、(i) RS CVn型連星 V1355 Orionis で起きたフレアの TESS とせいめい望遠鏡による可視光観測[2]、(ii) RS CVn型連星 IM Peg で起きたフレアの NICER による X線観測、(iii) M型星 EV Lac で起きたフレアの NICER、Swift、TESS、なゆた望遠鏡による多波長（X線/紫外線/可視光）同時観測[3]を実施した。そして、(i)と(ii)の観測では、星の脱出速度を大幅に超過する2000 km/s 近くの青方偏移をそれぞれ、H $\alpha$ 線、Fe XXV He $\alpha$ 輝線において初めて検出した。(iii)の観測では、100 km/s 近くの H $\alpha$ 線の青方偏移を伴うフレアの放射成分を多波長で同時に観測することに成功した。このことは、太陽よりも磁気活動性が高い恒星であっても[1]の議論に反し、Fig. 1. に示すような CME がスーパーフレアに伴って発生することを示唆している。さらに、これらの CME は太陽フレアと CME のエネルギー間に存在するスケール則の延長上に位置する普遍的な現象であることも明らかになった。

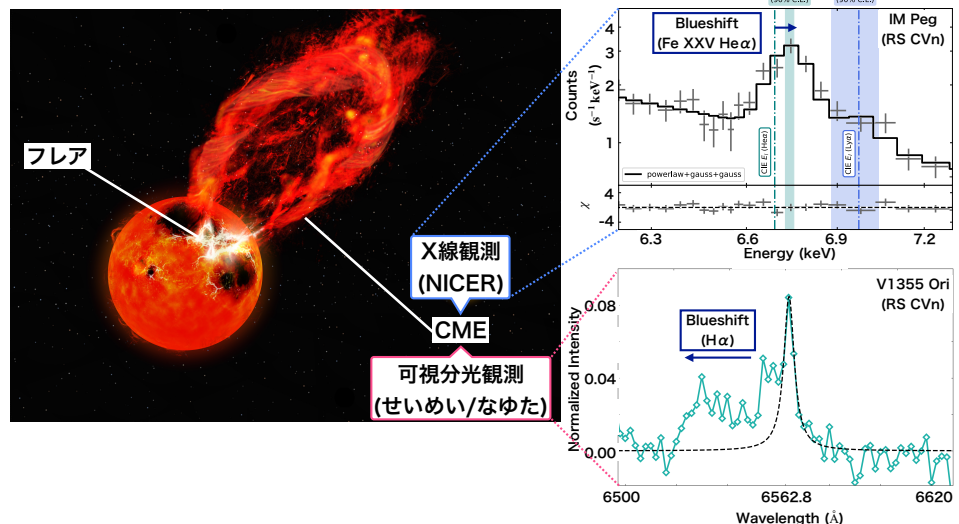


Fig. 1. The imaginary picture of the CME (© National Astronomical Observatory of Japan) reported by [2] and blue-shifted H $\alpha$  and Fe XXV He $\alpha$  spectra.

## References

- [1] Alvarado-Gomez, J. D., Drake, J. J., Cohen, O., *et al.*, ApJ, 862, 93 (2018)
- [2] Inoue S., Maehara H., Notsu Y., *et al.*, ApJ, 948, 9 (2023)
- [3] Inoue S., Enoto T., Namekata K., *et al.*, PASJ, in press (2024)

# 高速パルス磁場を用いた $^{57}\text{Fe}$ 核スピン操作の 放射光核共鳴散乱による測定

核放射物理学研究室 太田英寿

**Abstract** To develop research on gamma-ray quantum optics, we conducted research on controlling of nuclear spin of the excited state of  $^{57}\text{Fe}$  by applying a pulsed magnetic field. We also developed a switching magnetic field generator with a high-speed pulse, whose rise time is approximately three times as fast as that of previous one.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

近年、メスバウアー効果による無反跳 $\gamma$ 線を用いた電磁誘導透過現象や、コヒーレントな $\gamma$ 線波形制御といった $\gamma$ 線領域の基礎過程に着目した量子光学的な研究が盛んに行われている[1][2]。特にメスバウアー効果による無反跳 $\gamma$ 線では、核種によってエネルギー分解能が $\sim 10^{-13}$ にも達し、さらには偏光や時間領域の構造の制御に関する理論的なフレームワークの構築や実験の発展が進んでおり、従来の物性研究などへの応用にとどまらず、量子情報や量子通信といった分野への応用も期待されている[3]。本研究ではそのような $\gamma$ 線量子光学研究の発展を目指して、パルス磁場を用いて $^{57}\text{Fe}$ の励起状態の核スピン操作に関する研究を行った。

実験は大型放射光施設 SPring-8 の BL11XU で行った。分光器によって $^{57}\text{Fe}$ の第一励起エネルギーである 14.4 keV で線幅数 meV に単色化された放射光を試料に入射すると、超微細相互作用によって分裂したすべての準位が励起される。脱励起過程において前方に放射されるコヒーレントな $\gamma$ 線の時間スペクトルを測定すると、超微細相互作用を反映した干渉パターンがあらわれる。このとき、一定の弱い外部磁場に加えて放射光励起時に逆方向に印加していた 200 ns 幅の矩形パルス磁場を、励起後およそ 100 ns までの間に off になるように設定した。これにより原子核位置の磁場方向を反転させることで核スピンを反転させ、再放射される $\gamma$ 線の干渉状態を変化させることで時間スペクトルにあらわれる変化を観測した。放射光には高指向性、パルス特性、偏光などの特徴があるため、励起された $^{57}\text{Fe}$ 原子核が脱励起されるまでのタイミングを狙って磁場を反転させることは、崩壊がランダムな放射性同位体線源では困難であるが、放射光パルスによる励起では容易にタイミングをとることができ、今回の実験目的に非常に適した条件となっている。

得られた測定スペクトルを理論曲線と比較することにより、パルス磁場によってスピンの反転していることが確認された (Fig. 1)。また、パルス磁場を off にするタイミングを変化させることで、時間スペクトル上にもそれを反映した変化を観測することができた。今回の測定では使用した磁場発生装置の立ち上がり時間が遅かったため、パルス磁場を off にした状態で測定を行った。しかし、磁場発生装置を off にした立ち下がり時にはパルスにリングングが生じ、磁場のゆらぎが発生していた。このため、立ち上がり時のスイッチ速度の改善を目指してパルス磁場発生装置の開発も行った。結果として、従来のものと比べ倍以上の立ち上がり時のスイッチ速度を実現することができた。

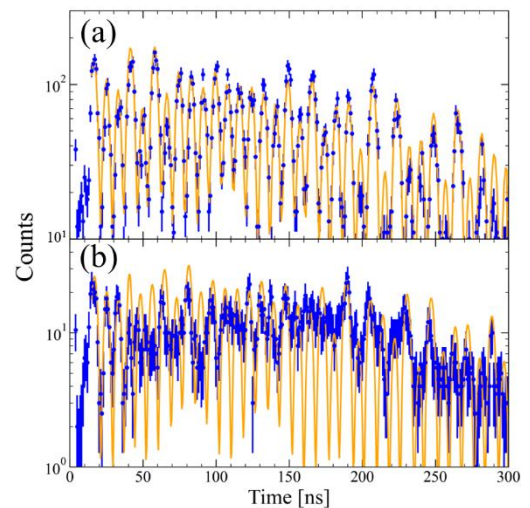


Fig. 1. Measured time spectra of forward scattering by  $^{57}\text{Fe}$  in  $\text{FeBO}_3$  shown as dots (a) without pulsed magnetic field and (b) with pulsed magnetic field turned off at 40.5 ns. Solid lines are simulated spectra.

## References

- [1] R. Röhlberger, et al., *Nature*, **482**, 199(2012).
- [2] F. Vagizov, et al., *Nature*, **508**, 80(2014).
- [3] J. Gunst, et al, *Sci. Rep.*, **6**, 25136(2016).

# 水-ニュートリノ反応の精密測定に向けた 水ベース液体シンチレータ飛跡検出器の開発

高エネルギー物理学研究室 恩田直人

**Abstract** For a new near detector to measure the water-neutrino interaction precisely in the Hyper-Kamiokande experiment, we are developing a tracking detector using Water-based Liquid Scintillator (WbLS). The result of beam test of a prototype WbLS detector and the study for improving the light yield of the WbLS detector are reported.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノ振動は、素粒子物理学における標準理論を超えた物理現象であり、現在の物理学における未解決問題の解決や新物理を探索する鍵となりうる。ニュートリノ混合行列の複素位相角 $\delta_{CP}$ によるCP対称性の破れは、宇宙の物質と反物質の非対称性を説明する有力な候補である[1]。

ハイパーカミオカンデ(HK)実験は、岐阜県飛騨市神岡町の地下に建設される大型の水チェレンコフ検出器、HK検出器を用いた実験である。CP対称性の破れを表す $\sin\delta_{CP} \neq 0$ の発見が物理目標の1つに掲げられている。HK検出器は2027年からの稼働を予定しており、現在は準備が進められている。 $\sin\delta_{CP} \neq 0$ の感度を最大限に高めるために、系統誤差の削減、特にHK実験と同じ水を標的としたニュートリノ反応の精密測定による削減が必要である。そのため、HK実験では現行のT2K実験の前置検出器に加え、新たな水標的の前置検出器の導入が検討されている。

水ベース液体シンチレータ(WbLS)は、水に界面活性剤を用いて液体シンチレータを溶かした液体である。水を含みながらシンチレーション光を観測できることから、水をニュートリノ標的としながら不感領域の少ない検出器として利用可能であり、新前置検出器の候補として開発を進めている。我々の開発するWbLS検出器(Fig 1.)は、反射材によって区切られたセルがWbLSによって満たされている。セル内で発生したシンチレーション光は3方向から通された波長変換ファイバを通して伝搬し、MPPCによって検出される。

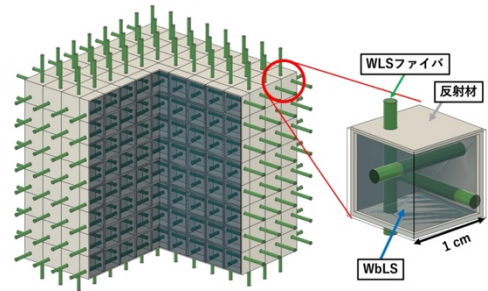
まず初めに、WbLS検出器の $4 \times 4 \times 5 = 20$ セルの小型試作機を作製し、陽電子ビームを用いた試験を行なった。その結果、荷電粒子の飛跡を確認し、飛跡検出器として使用可能であることを確認した。しかしながら、その検出光量は低く、そのままでは前置検出器として使用可能なものではないことが判明した。

そのため、WbLS検出器の検出光量の向上を目的とし、WbLSと反射材の改良を行なった。WbLSについては、使用する界面活性剤を選び直すことで、水の割合を5%の低下に抑えた上で液体シンチレータの割合を10 wt%から20 wt%まで大きくすることに成功した。このWbLSの発光量を測定したところ、従来のものより78%程度の増加が確認された。反射材については、いくつかの候補を用いて小型の容器を作製し、検出光量を測定した。シミュレーションを用いて反射率を評価し、その結果最も高い素材でも85%であり、改善の余地があることが分かった。また、シミュレーションを用いて、実際のWbLS検出器の容器の大きさにおいて検出される光量を見積もったところ、最大で1波長変換ファイバあたり $9.8 \pm 0.2$  p. e. /MeVであり、これはビーム試験時と比較しておよそ3.7倍の検出光量を達成したことになる。

本研究により検出光量が大幅に増加したことで、WbLS検出器が前置検出器として最低限の性能を持つことを示した。ただし、検出光量はシミュレーションによる評価であり、実験による実測が求められる。また、水-ニュートリノ反応測定による系統誤差の削減効果を最大にするために、WbLSの組成の最適化が必要である。

## References

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



**Fig 1. Design of the WbLS tracking detector for near detector of the HK experiment**



# von Neumann 代数を用いた 無限次元量子誤り訂正としてのバルク再構成

基礎物理学研究所素粒子論グループ 神田大樹

**Abstract** We study the quantum error-correcting properties of the bulk reconstruction of AdS/CFT correspondence using the Petz map. Petz map is a generalization of the quantum recovery channel, which is available for von Neumann algebras on infinite dimensional Hilbert spaces. In addition, we tackle the entanglement wedge reconstruction.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

重力理論と場の理論の対応を論じるホログラフィ、特に、漸近的反ドジッター (AdS) 空間上の弦理論とその漸近境界上の共形場理論 (CFT) の対応を論じる AdS/CFT 対応は、量子力学と重力理論の統合を目指した量子重力理論を解析する有力な手法になっている。また、AdS/CFT 対応は量子情報理論など様々な方面への応用が考えられており、AdS/CFT 対応におけるバルク再構成は量子誤り訂正符号として解釈できることが知られている。

量子情報理論において量子情報とは量子状態のことであり、対応する状態ベクトル、若しくは密度行列が存在する。量子誤り訂正符号は量子情報をより大きな Hilbert 空間に冗長性を持たせて符号化することによって、一部分にエラーが起きても訂正可能にする手法である。また、バルク再構成は消去エラーと呼ばれるエラーチャンネル

$$\tilde{\mathcal{E}}(\rho_a) := \text{tr}_{\bar{A}}[V(\rho_a \otimes \sigma_{\bar{a}})V^\dagger] \quad (1)$$

に対する復号チャンネルであると解釈されている [1]。これは、AdS 空間の部分領域の密度行列を CFT の部分領域の密度行列に送る量子チャンネルである (Fig. 1)。

また、最近 AdS/CFT 対応に応用がされてきた分野の一つに von Neumann 代数を用いた代数的場の理論が挙げられる。代数的場の理論は場の理論を数学的に解析する手段の一つで、ある一つの時空点上の演算子を考えるのではなく、時空の部分領域の上の代数を考えることで場の理論の発散を回避する。数学的に、von Neumann 代数は I 型、II 型、III 型の三種類に分類を出来ることが知られており、通常の量子情報理論のセットアップである、有限次元 Hilbert 空間の von Neumann 代数は I 型となる。しかしながら、場の理論を考えると、一般に Hilbert 空間は無限次元であり、部分領域の von Neumann 代数を考えると一般的には III 型になることが知られている。III 型の von Neumann 代数の顕著な特徴としては、密度行列を定義することができないことが挙げられる。つまり、バルク再構成を式 (1) のような密度行列を用いたエラーチャンネルの復号チャンネルとして考えることは適切ではない。

そこで、本論文の目的を、「量子誤り訂正符号の概念を一般の von Neumann 代数に拡張をし、さらに、AdS/CFT 対応を von Neumann 代数を用いて考えることによって、バルク再構成を正しく理解しなおすこと」とした。特に、Petz 写像と呼ばれる、復号チャンネルを構成する方法を通じてバルク再構成を定式化 [2] して、エンタングルメントウェッジ再構成と呼ばれる、CFT の部分領域に対応する AdS の部分領域が非自明に拡大したときのバルク再構成の方法を具体的に提示する。

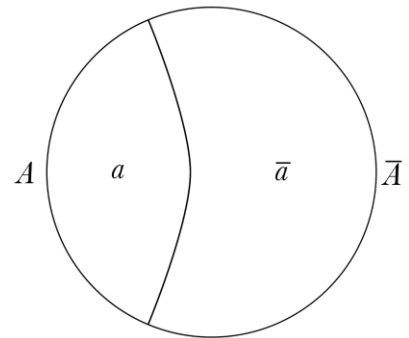


Fig. 1 : The Duality between AdS subregions and CFT subregions

## References

- [1] A. Almheiri, X. Dong, and D. Harlow, Bulk Locality and Quantum Error Correction in AdS/CFT, *J. High Energy Phys.*, April 2015.
- [2] N. Vardian, Black Hole Interior Petz Map Reconstruction and Papadodimas-Raju Proposal, *J. High Energy Phys.*, Oct. 2023

# 平坦背景におけるメタ弦の量子化

素粒子論研究室 京鴻一

**Abstract** Metastring theory is a doubled, T-duality-symmetric, phase-space-like formulation of string theory. I derived commutation relations between modes from normal ordering and gave the spectrum in flat background. Furthermore, I found world sheet Lorentz symmetry hidden in metastring non-locally.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

現在まで、重力を量子的に扱う正しい方法は分かっていない。これは基礎物理学における大きな課題である。弦理論はこの量子重力の問題に王手をかけているが、現実の宇宙を説明するのに十分な予言能力を未だ発揮できずにいる。

量子重力の問題にアプローチするに際し、L. Freidel, R. G. Leigh, D. Minic らは、時空の概念が未だ古典的である点を指摘し、量子力学の見地から時空を量子的に捉え直す必要性を訴えている [1]。そうして捉え直された時空を Modular 時空と呼ぶ。Modular 時空の考え方の肝は、時空ではなく相空間を基本的対象として捉え、位置と運動量を対等に扱うことにある。対応して、通常の計量  $g$  の代わりに位置と運動量両方の足を持つ計量  $H$  を与えることになる。運動量空間が位置の空間とは別に曲がることを許すことは、相対局所性(Relative Locality)の考え方に繋がり、どんな観測者も共通して了解する背景としての時空、という概念は解体されることになる [2]。

Modular 時空の考え方は幾何的量子化(Geometric Quantization)の立場から理解される。幾何的量子化の見方では、相空間は正準交換関係を与える二形式  $\omega$  が備わったシンプレクティック多様体であり、時空はその半分の次元を持つラグランジアン部分多様体である。この次元を半分に落とす操作を偏極(Polarization)と呼び、偏極は相空間に計量  $\eta$  を与えることで指定される。通常の量子力学で用いられている偏極を Schrödinger 偏極と呼び、「位置表示」や「運動量表示」はいずれもこれにあてはまる。実は、位置表示でも運動量表示でもない、しかしそれと等価な別の偏極が存在する。それが Modular 偏極であり、この偏極によって把握される時空こそが Modular 時空なのである。

以上に現れた三つの構造、運動量空間まで拡張された計量  $H$ 、相空間のシンプレクティック構造を与える二形式  $\omega$ 、相空間に偏極を与える計量  $\eta$  が自然に組み込まれるような弦理論の拡張として提唱されたのがメタ弦理論(Metastring Theory)である [3]。メタ弦は、標的空間が相空間であること、カイラルな理論であること、T-双対性が標的空間の対称性になることなどの特徴を持つ。また、メタ弦は  $dS$  空間と整合する余地がある点をはじめとして、いくつかの方面で現象論的な重要性も持っている [4]。ただ、そうした応用にて前提とされていながら、メタ弦の詳細な量子化は行われてこなかった。

本研究では、メタ弦理論のスペクトルの理解を目標に平坦背景でのメタ弦の量子化を行った。基本的な方針は通常の弦の量子化の手続きをなぞることである。具体的には正規順序を定め、各モード係数が満たす交換関係を導出し、その代数の表現を作成した後、Virasoro 拘束条件を課して非物理的状态を抑制した。得られた結果は期待通り通常の閉弦のスペクトルを再現するものであった。

また、メタ弦は世界面の Lorentz 対称性が古典的には破れているとされていたが、筆者はそれに相当する対称性が非局所的な対称性として隠れていることを見出した。これにより世界面のゲージ固定を通常の弦と同じように行うことが正当化され、対応して通常の弦理論と同じゴーストが現れることが分かった。加えて、ゲージ固定後の作用には on-shell で共形対称性があること示し、その生成子の OPE を計算することでメタ弦が通常の弦と同じ中心電荷をもつことを確認した。

## References

- [1] L. Freidel, R. G. Leigh, D. Minic, “Quantum spaces are modular”, Phys. Rev. D 94 (2016) 10, 104052.
- [2] G. Amelino-Camelia, L. Freidel, J. Kowalski-Glikman, L. Smolin, “The principle of relative locality”, Phys. Rev. D 84 (2011) 084010.
- [3] L. Freidel, R. G. Leigh, D. Minic, “Metastring theory and modular space-time”, JHEP 06 (2015) 006.
- [4] P. Berglund, T. Hübsch, D. Minic, “On de Sitter spacetime and string theory”, Int. J. Mod. Phys. D 32 (09) 2330002 (2023),

# スカラー・テンソル理論におけるブラックホール摂動の有効場の理論に基づく解析

基礎物理学研究所 宇宙グループ 小林 元

**Abstract** We study perturbations of black holes with a time-dependent scalar field based on the low-energy effective field theory (EFT) approach. We calculate tidal Love numbers as physical observables that quantify the deviations from general relativity (GR). Our research shows that they become nonzero in a generic non-stealth background, unlike GR.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

一般相対論と場の量子論の不整合性は、「一般相対論の繰り込み不可能性」として知られている。このことから一般相対論は究極の物理法則ではなく、ブラックホール (BH) 内部のような重力と量子論の両方が効いてくる状況において一般相対論を超える効果が現れることが期待される。連星ブラックホール合体由来の重力波 GW150914 の最初の検出 ([1]) 後、検出器感度の向上や新しい望遠鏡による将来の観測を通じて、最も基本的な疑問の一つである「強重力領域において一般相対論はどの程度正しいのか/どのように破れるのか」という疑問に対する決定的な答えを提供する期待が高まっている。観測信号に含まれる一般相対論からのずれを見逃さないためにも、観測に先立って一般相対論からのずれが BH 連星合体由来の重力波の波形にどのように現れるか理論的に予言する必要がある。理論の効率的な検証という観点から、多くの理論を統一的に扱う枠組みを構築し、その枠組みに基づいて予言される物理量を観測と比較することが好ましい。本研究では、そのような枠組みとして「有効場の理論 (EFT)」のアプローチに着目する。EFT の枠組みでは、対称性の自発的破れのパターンと理論の力学的自由度さえ仮定すれば、長波長の摂動のダイナミクスが普遍的に記述される。

EFT の手法は、スカラー・テンソル理論への文脈で、一様等方宇宙のような対称性の高い時空の下での摂動の解析に用いられてきた。特にスカラー場に時間依存性を持たせることで、加速膨張する宇宙の普遍的な記述が可能になる。近年[2]において、EFT の定式化が任意の背景時空へと拡張された。この一般化を通じて、非一様な時空に対しても有効理論に基づく摂動の解析が可能になり、特にコンパクト天体起源の重力波現象を用いた重力理論の検証への応用が期待されている。

本研究では、定常な背景BH時空との整合性からスカラー場にシフト対称性を課し、スカラー場の非自明な背景として時間に対して線形な配位を持つ場合を考えた。背景スカラー場の時間依存性を通じて、時間方向の座標変換に対する対称性が自発的に破れる。この対称性の仮定を満たす一般的な作用の摂動展開をもとに[3, 4]で導出された、計量の摂動の従う波動方程式の解析を行った。特に、BH連星合体のインスパイラル過程の重力波に影響する量であるBHの静的な潮汐力に対する応答係数として、外場に対する変形度合いを記述する潮汐Love数を計算した。背景時空はSchwarzschild BHだが非自明なスカラー場を帯びたステルス解の場合には、一般相対論と同様に潮汐Love数が0になる一方で、計量に非自明なスカラー場の寄与が現れる例であるHayward BHの場合には、潮汐Love数が非零になることを示した。結果として、BH連星合体由来の重力波を用いた非ステルス解の配位の検証のためには、インスパイラル過程における軌道進化と重力波波形の計算において、潮汐変形の効果を取り入れて計算する必要があることが分かった。

## References

- [1] LIGO Scientific, Virgo Collaboration, B. P. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **116**, no.6, 061102 (2016).
- [2] S. Mukohyama and V. Yingcharoenrat, JCAP **09**, 010 (2022).
- [3] S. Mukohyama, K. Takahashi and V. Yingcharoenrat, JCAP **10**, 050 (2022).
- [4] S. Mukohyama, K. Takahashi, K. Tomikawa and V. Yingcharoenrat, JCAP **07**, 050 (2023).

# 境界上に局在するスカラー場による AdS/BCFT 対応の一般化

基礎物理学研究所 素粒子論グループ 佐藤政秀

**Abstract** We study gravity theory on Anti de Sitter spacetime with an end-of-the-world brane and a brane-localized scalar field as a gravity dual of boundary conformal field theory. This setup enables us to construct various new gravity solutions with interesting phase transitions which are dual to boundary RG flows.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

素粒子理論における重要な課題である量子重力理論の構築をホログラフィー原理と呼ばれるアイデアが可能にすると期待されている。ホログラフィー原理とは、 $d + 1$ 次元量子重力理論は $d$ 次元の重力を含まない理論と等価であるという主張であり、実際にAdS/CFT対応なる、 $d + 1$ 次元Anti de Sitter (AdS)時空における重力理論と $d$ 次元Conformal Field Theory (CFT)の等価性[1]が数多くの検証から明らかになっている。

AdS/CFT対応を出発点として、より多様な時空における重力理論のホログラフィック双対を考察する試みは多数存在するが、代表的なものの一つにAdS/BCFT対応なるモデルが挙げられる[2]。BCFT (Boundary Conformal Field Theory)とは境界付き多様体上で定義されるCFTであり、この境界に対応してAdS時空にEnd-of-the-world (EOW)ブレーンなる物体を導入してバルクの一部を取り除くことでBCFTと等価になる重力理論を構成できる。このブレーンは力学的自由度としてふるまうことが可能であることからAdS時空では多様な物理が実現されるため、AdS/BCFT対応それ自身が興味深い対象であるとともに、宇宙論や物性物理にまたがる幅広い物理の解析をAdS/BCFT対応を用いて行える。また、ブラックホールの情報喪失問題のAdS/BCFT対応を用いた取り扱いは近年大きな注目を集めた。一方で、従来のAdS/BCFT対応の解析の多くは共形境界条件が課された単独の境界が存在する場合にとどまっており、より多様な境界が存在するモデルの解析によりAdS/BCFT対応やホログラフィー原理の理解を深められると期待される。

そこで本修士論文では筆者らによるEOWブレーン上にスカラー場が局在する場合のAdS/BCFT対応の研究結果[3]について解説する。このスカラー場はBCFTにおける境界上に挿入されたスカラー演算子の重力双対と解釈される。スカラー場の存在は帯状領域で定義されたBCFTの重力双対や半球面型、円錐型、アニュラス型といった多様な形状のブレーンを含む重力解の構築や境界上の繰り込み群の重力双対、有限温度における相転移の実現を可能にする。更に、EOWブレーン上にスカラー場が存在する時空を実時間で解析すると開放系に相当する物理が現れ、測定誘起相転移[4, 5]に類似した現象が起こることが量子情報理論を援用した解析から示唆される。

## References

- [1] J. M. Maldacena. Adv. Thor. Math. Phys. Vol 2, 231-252, (1998)
- [2] T. Takayanagi. Phys. Rev. Lett. 107, 101602, (2011) 10.1103/PhysRevLett.107.101602
- [3] H. Kanda, M. Sato, T. Takayanagi Y. Suzuki, and Z. Wei. JHEP, 03, 105, (2023), 10.1007/JHEP03(2023)105
- [4] B. Skinner, J. Ruhman and A. Nahum. Phys. Rev. X, 9, 3, 031009, (2019), 10.1103/PhysRevX.9.031009
- [5] Y. Li, X. Chen and P.A.M. Fisher. Phys. Rev. B, 100, 13, 134306 (2019), 10.1103/PhysRevB.100.134306

# JT重力とアイランド

素粒子論研究室 繁村知宏

**Abstract** In extreme spacetimes like black holes, general relativity fails, prompting a search for a quantum gravity theory. The focus is on entanglement entropy in Hawking radiation. By dynamically altering the region around a black hole, a replica wormhole or "island" configuration is calculated, aiding understanding through JT gravity.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

宇宙の初期やブラックホールなどの極限的な時空では一般相対論は破綻し、そのような状況を説明する手段の一つとして重力と量子論を統合した量子重力理論の構築が考えられる。しかし、場の量子論の通常の枠組では重力の量子化は成功していない。よって重力の量子化とは何かを原点に立ち返って考える必要がある。重力の量子化を考えるにはまず重力の量子力学的な自由度を知る必要がある。

そのために、量子論的な自由度に関係する量であるEEに着目し、これが重力がもつと思われる量子論的な効果による補正を受ける場合を考える。具体的には、ブラックホールのエネルギー放射(ホーキング放射)のエントラングメントエントロピー(EE)を対象とする。

ホーキング放射のEEは以下のようにして求める。まずFig. 1のようにある時間一定面でブラックホールの遠方の領域にカットオフを設けて時間一定面をA, Bの2つに分ける。ここで点線はブラックホールのホライズン、青色の領域がA, 灰色の領域がBである。ホーキング放射はBを通過してAに「貯まる」と考えてAとBのEEがホーキング放射のEEだと考える。ここでBはブラックホールが存在する領域であり、Bに対して量子重力の効果を場の量子論の範疇で取り入れる。そのためにBの領域をカットオフを境界としてダイナミカルに変化させる。具体的には経路積分を考えて、Bの部分のトポロジーと計量を変化させる。

このような状況でEEを計算するためにレプリカトリックという手法を用いるとFig. 2のようなレプリカワームホールとよばれる配位が現れる[1]。この配位の寄与は見方によってはFig. 3のようにあたかもブラックホールの内側にAとみなせる領域があるように見えて、これをアイランドという[2]。

上述の議論に基づいて実際にホーキング放射のEEを計算するのは一般には難しいが、2次元ディラトン重力であるジャッキウ・テイテルボイム重力(JT重力)については詳細に計算することができる。JT重力はより高次元のブラックホールのホライズン近傍での近似から得られる理論であり[3]、JT重力によるホーキング放射のEEの計算結果はより高次元のブラックホールに対する知見を与える。

今後の展望としてはより高次元のブラックホールに対する計算や、EE以外の量によるホーキング放射の量子力学的自由度の評価を行いたい。

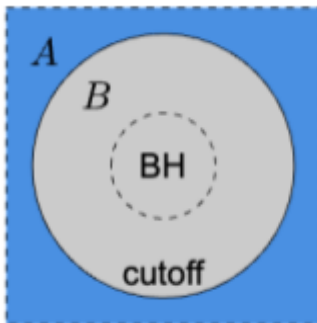


Fig.1 Black Hole

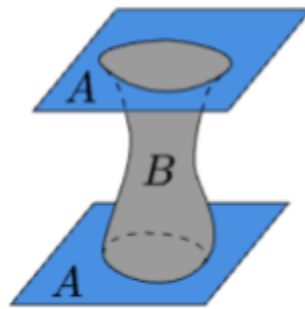


Fig.2 Replica Wormhole

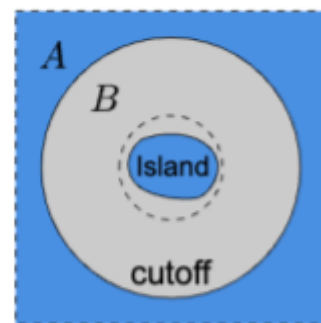


Fig.3 Island

## References

- [1] A. Almheiri, T. Hartman, J. Maldacena, E. Shaghoulian, and A. Tajdini, "Replica Wormholes and the Entropy of Hawking Radiation," *J. High Energy Phys.*, vol. 2020, no. 5, p. 13, May 2020, doi: 10.1007/JHEP05(2020)013.
- [2] A. Almheiri, T. Hartman, J. Maldacena, E. Shaghoulian, and A. Tajdini, "The entropy of Hawking radiation," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 93, no. 3, p. 035002, Jul. 2021, doi: 10.1103/RevModPhys.93.035002.
- [3] P. Nayak, A. Shukla, R. M. Soni, S. P. Trivedi, and V. Vishal, "On the dynamics of near-extremal black holes," *J. High Energy Phys.*, vol. 2018, no. 9, p. 48, Sep. 2018, doi: 10.1007/JHEP09(2018)048.

# グザイバリオン分光実験に用いるビーム粒子識別用 リングイメージングチェレンコフ検出器の開発

原子核・ハドロン物理学研究室 鈴木翔太

**Abstract** We plan spectroscopy of cascade baryons at the J-PARC pi20 beamline. To identify  $K^-$  among unseparated beam particles, we have developed a Beam Ring Imaging Cherenkov (Beam-RICH) detector. Results of the test experiment at ELPH and expected performance at the pi20 beamline will be reported.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

バリオンの基底状態の性質はクォーク模型によって非常に良く記述されるが、クォーク模型で予測されるバリオンの励起状態の中で実験的に発見されていない状態が多く存在する。この問題を解決するものとしてダイクォーク模型が提唱されている[1]。バリオン内部でのクォークの自由度を解明するにあたり、励起状態についての詳細な実験が期待されている。特に  $u, d$  クォークより質量の大きい  $s$  クォークを2つ含むグザイバリオンはダイクォーク模型を検証する非常によいプローブである。グザイバリオンの励起状態について精密分光を行われることで、バリオン内部の構造を明らかにすることができる。と期待される。

グザイバリオン分光実験 (J-PARC E97 実験) では  $K^-$  ビームを液体水素標的に照射し、グザイバリオンの励起状態の質量スペクトルを測定する[2]。欠損質量法により、 $2.3 \text{ GeV}/c^2$  までの各励起状態の存在を  $5\sigma$  の有意性で確立し、各状態の質量を  $0.1 \text{ MeV}/c^2$  の精度で決定することが目的である。

J-PARC E97 実験は2次粒子ビームラインである  $\pi 20$  ビームラインにおいて行われる。用いる  $K^-$  ビームの運動量は  $5.0 \sim 8.5 \text{ GeV}/c$  である。しかし、 $\pi 20$  ビームラインではバックグラウンドとなる  $\pi^-$  が  $K^-$  の100倍程度あり、粒子弁別機能がないため、検出器によって  $\pi^-$  と  $K^-$  の識別を行うことが重要となる。J-PARC E97 実験では  $\pi^-$  を  $K^-$  と誤認する確率を  $0.03\%$  以下にすることが要求される。本研究では飛行時間 (Time-Of-Flight) 法による  $\pi^-$  と  $K^-$  の識別が難しい  $5.0 \sim 8.5 \text{ GeV}/c$  運動量領域でのビーム粒子識別用検出器としてリングイメージングチェレンコフ (Beam-RICH) 検出器の実機を開発を行った。

RICH 検出器はチェレンコフ光の放出角 (チェレンコフ角) を測定する検出器である。他の検出器によって測定された粒子の運動量と RICH 検出器によって測定されたチェレンコフ角を用いて粒子の質量を求めることで粒子識別を行うことができる。Beam-RICH 検出器の実機の製作に当たり光学系の最適化を行い、チェレンコフ角を求める方法、粒子識別方法を新たに開発した。実機として新たに製作した Beam-RICH 検出器の性能評価試験を ELPH において陽電子ビームを用いて行った。チェレンコフ光によるリングを測定し (Fig. 1)、チェレンコフ角の角度分解能の評価を行った。得られたチェレンコフ角の分布には原因の特定できないテール成分があったが、ピーク部分では十分な分解能が得られた。ピーク部分の分解能を用いた  $\pi 20$  ビームラインでの粒子識別能として、全運動量領域において誤識別率  $0.03\%$  以下で  $K^-$  の検出効率  $96\%$  以上を達成した。また、チェレンコフ角の分布におけるテール部分の粒子識別に対する影響についても評価した。

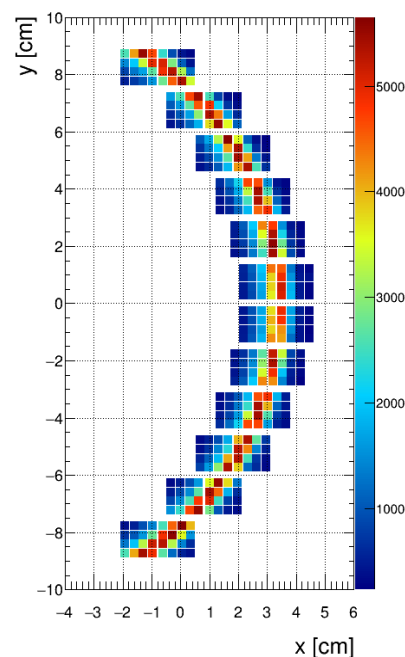


Fig. 1. Cherenkov ring observed in the test experiment

## References

- [1] M. Anselmino *et al.*, Rev. Mod. Phys. **65**, 1199 (1993).
- [2] M. Naruki *et al.*, J-PARC E97 proposal (2022)

# S-2S を用いたΞハイパー核分光のための K 中間子識別手法の開発

原子核ハドロン物理学研究室 高橋秀治

**Abstract** The high-resolution spectroscopy for  $\Xi$  hypernuclei will be performed in J-PARC. It is necessary to distinguish signal kaons from huge background particles. We developed an analysis procedure to identify the kaons by using S-2S system. We found that background particles can be reduced to  $3 \times 10^{-6}$ , and the experiment is feasible.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

ストレンジネス核物理はバリオン間相互作用や高密度核物質の理解において重要な役割を果たしているものの、特に  $\Xi N$  相互作用を含む  $S = -2$  系の実験情報はまだまだ不足している。そこで大強度陽子加速器施設 (J-PARC) において ( $K^-, K^+$ ) 反応による欠損質量法を用いた  $\Xi$  ハイパー核の精密分光実験 (J-PARC E70 実験) が準備されている。J-PARC が供給する大強度 K 中間子ビームを用いて十分な統計量を確保しつつ、高運動量分解能の磁気スペクトロメータ S-2S や有感標的を用いることで世界最高のエネルギー分解能 (2 MeV) での分光測定が実現可能となる [1]。

( $K^-, K^+$ ) 反応のイベント同定には入射粒子及び散乱粒子の識別が不可欠である。特に標的からの散乱粒子は背景事象である  $\pi^+$  や陽子が合わせて  $K^+$  の約 300 倍検出される。それら背景事象はトリガーレートの上昇を招き DAQ 効率の低下に繋がる上、 $\Xi$  ハイパー核のエネルギースペクトラムに漏れ込みピーク構造の弁別に悪影響を及ぼす。これを解決するため、本研究では  $K^+$  の識別手法の開発、及びその識別能力の評価を行った。オンライントリガー段階における粒子識別には屈折率  $n = 1.05-1.06$  のエアロゲルチェレンコフ検出器 (AC)、 $n = 1.33$  の水チェレンコフ検出器 (WC) を組み合わせ、データ取得後のオフライン解析ではチェレンコフ検出器に加え散乱粒子の再構成質量を用いる。

2023 年に取得したコミッションングのデータ解析から、各手法の粒子識別性能を評価した (Table. 1)。オンライン解析において目標となるトリガー要求レートは DAQ 効率の面から  $3k/\text{spill}$  である。これに対しビームトリガーと TOF 検出器のトリガーで約  $2k/\text{spill}$ 、チェレンコフ検出器導入時で約  $100/\text{spill}$  と求められ、いずれも目標値を満たす。一方、ESC08a という相互作用モデルに基づく歪曲波インパルス近似 [2] に基づいた  $\Xi$  ハイパー核のエネルギーピーク構造のシミュレーションを行った。その結果弁別に必要な性能として背景事象の残存率は  $10^{-4}$  以下に抑える必要がある。本識別手法ではオフライン解析により背景事象の残存率を  $3 \times 10^{-6}$  にまで抑えることが可能であり、目標値を達成できている (Fig. 1)。以上により開発した粒子識別手法は分光実験の実現にあたって十分な性能を有していることが判明した。

データ取得後、 $\Xi$  ハイパー核の束縛エネルギー決定の際にはピークのフィッティングを注意深く行う必要があることをデモンストレーションした。

## 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).

Table. 1. Survival ratio of signal kaon and background particles pions and protons by each method.

残存率	$K^+$	$\pi^+$	陽子
質量再構成	0.975	$1.52 \times 10^{-4}$	$< 10^{-5}$
AC	0.954	$1.57 \times 10^{-2}$	0.992
WC	0.996	0.999	$9.87 \times 10^{-2}$
全て導入した場合	0.926	$2.39 \times 10^{-6}$	$< 10^{-6}$

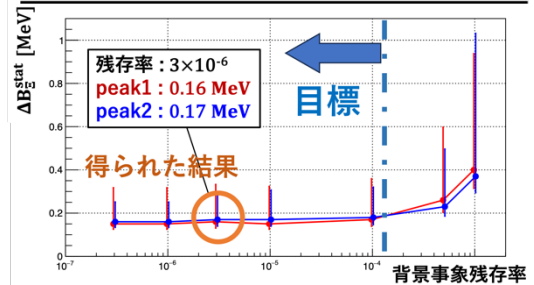


Fig. 1. Expected statistical error on the  $\Xi$  binding energy. The horizontal axis represents the survival ratio of background particles.

# ダークフォトン探索に向けた広帯域分光計の開発と評価

高エネルギー物理学研究室 竹内広樹

**Abstract** Understanding the nature of dark matter is important in both astrophysics and particle physics. Dark photon is a candidate for dark matter. Thus far, the speed of dark photon search is limited by the bandwidth of the spectrometer. For solving this difficulty, I developed a spectrometer with 4 GHz bandwidth.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

宇宙のエネルギー密度のうち、およそ 1/4 はダークマターと呼ばれる未知の物質が占めていると考えられている。ダークマターはその存在が確信されているものの、エネルギー密度を除いてほとんど性質がわかっておらず、ダークマターの正体解明は宇宙物理学、素粒子物理学双方で重要な課題である。

近年、ダークフォトンと呼ばれる粒子が注目されている。特に、 $10\text{--}1000 \mu\text{eV}/c^2$  の質量を持つダークフォトンはダークマター候補 (DP-CDM) として一部のインフレーションモデルや弦理論からの動機がある [1][2]。ダークフォトンは電磁場と結合定数  $\chi$  でわずかに相互作用し、質量  $m_{\text{DP}}$  に比例した周波数の転換光子を放出するという性質を持つ。そのため、転換光をアンテナ等で受信し分光計で周波数ピークを探すという実験方法が有効である。

これまで、様々な質量領域でダークフォトンの探索が行われ、私の所属する研究グループでも既に  $10\text{--}26.5 \text{ GHz}$  帯 ( $41\text{--}110 \mu\text{eV}/c^2$ ) での探索を行ってきた [3][4]。しかし、これらの実験では分光計の帯域幅がアンテナや RF 回路が対応している周波数領域よりも狭いため、分光計の帯域幅が実験の探索速度を制限している。探索速度の向上と統計量の増加による  $\chi$  の感度の向上のため、より広帯域を一度に分光できる分光計が求められる。

そこで、4 GHz の帯域幅をデッドタイムなしに分光できる分光計を新たに開発した。周波数  $f$  の転換光の周波数ピークの幅  $\Delta f$  は典型的に  $\Delta f/f \sim 10^{-6}$  と極めて狭いため、ピーク検出できるよう 16 kHz の周波数分解能を確保した。実装においては RFSoc と呼ばれる ADC や CPU, FPGA などが 1 つのチップにまとめられた SoC を使い、FPGA 上に構築した FFT 回路によって分光処理を実行した。FFT 回路の設計にあたっては、

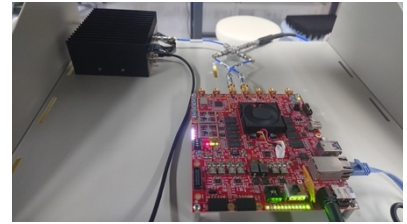


Fig. 1. The new spectrometer.

16 並列の FFT 回路を利用することで 4 GSPS の ADC 入力を絶え間なく処理できるようにした。回路を並列化すると回路規模が拡大してしまうが、回転演算回路の改良による省メモリ化や、回転演算回路の必要数を削減できるアーキテクチャの採用によって規模の増加を低減した。これらの設計の工夫により設計通りの動作クロックで FPGA への回路実装に成功し、実際に分光計を制作することができた。

さらに、制作した分光計について性能評価試験を行った。まず、単色 RF 源を入力して予想通りのスペクトルが得られているかを確認したほか、入力電力の大きさを変えて電力を測定し、0.5%未満の精度で線形性を確認した。また、24時間に渡って連続してデータ取得を続けられるか検証し、分光計の安定性を確認した。さらに、データ取得にかかった時間の計測と黒体放射の測定から、分光計が実際にデッドタイムなしで分光できていることを確認した。これらの測定により、この分光計がダークフォトン探索に有用であることを実証できた。

この分光計を使うことでダークフォトン探索の感度向上が見込まれる。例えば、先行実験 [3] から分光計を差し替えるだけで 4 倍以上  $\chi$  の感度を向上できる見込みである。さらに、今後探索を計画している  $170 - 260 \text{ GHz}$  帯においても、既存の実験よりも 2 桁程度良い感度で探索できる見込みである。

なお、開発した分光計および FFT 回路に関して特許出願中である (特願 2023-209086)。

## References

- [1] Peter W. Graham, *et al.*, Phys. Rev. D **93**, 103520 (2016)
- [2] Paola Arias, *et al.*, J. Cosmol. Astropart. Phys. 2012, **06** 013 (2012)
- [3] Shumpei Kotaka, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **130**, 071805 (2023).
- [4] Shunsuke Adachi, *et al.*, arXiv 2308.14656v4 (2023).



# 場の理論における一般化対称性

基礎物理学研究所素粒子論グループ 田中隆寛

**Abstract** The concept of symmetry, which is a powerful tool for analyzing a quantum field theory (QFT), has been generalized and new symmetries have appeared. In this thesis, we discuss ways to construct the generalized symmetries of famous QFTs and some applications including the restriction of renormalization group flow.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

場の理論を解析するうえで、「対称性」に注目することは非常に大切である。ある理論についての情報を引き出す、例えば何らかの物理量を計算するとき、それを摂動的に求められる場合がある。量子電磁力学はその成功例であり、電子と光子の相互作用についての実験結果を精度良く再現する。しかし、この摂動論はいつでも使えるわけではない。なぜなら、摂動論は理論に含まれる結合定数についてのべき展開であるが、我々の観測できるエネルギースケールにおける結合定数がべき展開できないほど大きい場合があるからである。このケースに当てはまる例が量子色力学である。このような状況でも、何かしらの情報を得るための強力な手段が「対称性」である。

近年、[1]をはじめとして対称性の概念が一般化され、今までに知られていなかった対称性が議論されている。現代的な対称性は作用の不変性というより、トポロジカルな対称性演算子の存在として捉えられる。Fig. 1. のように対称性演算子の余次元や融合則などのいくつかの観点の一般化の方向性によって、高次対称性、高次群対称性、非可逆対称性などと呼ばれる。

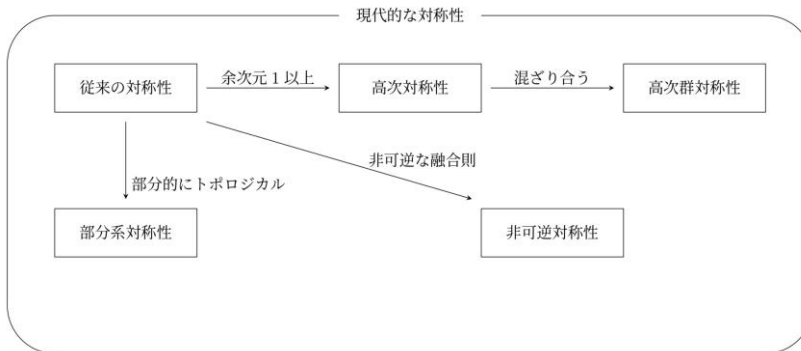


Fig. 1. 一般化対称性の関係性。一般化の方向性によって、様々な対称性が生まれる。

本修士論文では、場の理論における一般化対称性の構成と応用についてまとめた。まずは高次対称性について、様々な理論の持つ高次対称性の特定を遮蔽と呼ばれる方法を用いて行ったあと、4次元の非可換ゲージ理論はCP対称性と電氣的1次対称性との間のアノマリーを持つことを見る[2]。次に高次群対称性について、複数の対称性がどのようにして混ざり合って新たな対称性ができるのかを連続的な場合と離散の場合とで分けて議論する。最後に非可逆対称性について、代表的な3つの構成法を紹介し、融合則の計算を行う。また応用として、繰り込み群のフローに関する制限[3]なども議論する。

## References

- [1] Davide Gaiotto, Anton Kapustin, Nathan Seiberg, and Brian Willet, “Generalized Global Symmetries,” *JHEP*, 02:172, 2015.
- [2] Davide Gaiotto, Anton Kapustin, Zohar Komargodski, and Nathan Seiberg. “Theta, Time Reversal, and Temperature,” *JHEP*, 05:091, 2017.
- [3] Yichul Choi, Clay Córdova, Po-Shen Hsin, Ho Tat Lam, and Shu-Heng Shao, “Non-invertible Condensation, Duality, and Triality Defects in 3+1 Dimensions,” *Commun. Math. Phys.*, 402(1):489-542. 2023.

# 酒井-杉本模型におけるバリオンのエネルギー運動量テンソルおよび D-term の数値解析

素粒子論研究室 塚本 大智

**Abstract** The gravitational form factor, especially the quantity called the D-term has recently attracted attention as an important index for describing the internal structure of hadrons. We numerically construct a baryon with baryon number 1 in the Sakai-Sugimoto model and obtain its energy-momentum tensor and the D-term, which is about -2.05.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

エネルギー運動量テンソルの行列要素である gravitational form factor はハドロンの構造を記述する重要な指標として近年実験、理論どちらの分野からも注目を集めている。Gravitational form factor にはさまざまな項が存在し、それぞれがハドロン内部のエネルギー分布やスピン分布などを表現している。その中でも D-term と呼ばれる物理量はハドロン内部の応力分布に対応した量であり、質量、スピンとならぶハドロンの基本的な量である一方で、その値が知られていない ” the last unknown global property ” として重要な研究対象となっている。実験分野では  $\gamma^* + \gamma \rightarrow \pi^0 + \pi^0$  や  $n + \gamma^* \rightarrow n' + \gamma$  といった非弾性散乱実験からパイオンや陽子の D-term が測定されている。一方で理論分野では Skyrme 模型や格子ゲージ理論など、さまざまな理論でハドロンの D-term が計算され、その値が予言されている [Polyakov]。

ハドロンの物理を記述する模型にはさまざまなものがあるが、本論文では酒井-杉本模型に基づき、バリオンの D-term を計算する。酒井-杉本模型は、ゲージ/重力対応を用いて QCD の非摂動的側面を調べるホログラフィック QCD の代表的な例である [2]。酒井-杉本模型は  $S^1$  に巻きついた  $N_c \gg 1$  枚の D4-brane と、 $S^1$  に直交する  $N_f$  組の D8- $\overline{D8}$ -brane から構成され、開弦の有効理論として large  $N_c$  massless QCD を持つ。一方で重力理論による記述では d4-brane が black brane 重力解として記述され、D8 brane たちはその背景重力中を probe する。したがってその有効理論は 1+4 次元  $U(N_f)$  Yang-Mills 理論と Chern-Simons 項からなる。  $U(N_f)$  ゲージ場はパイオンと(軸性)ベクトルメソンに対応しており、そのスペクトルをはじめとするメソンの物理が再現される [2]。一方でバリオンはソリトン解として記述され、バリオン数は第二 Chern 数で定義される [3]。先行研究では主に原点近傍では平坦時空中のインスタントン解による近似を行い、十分遠方では漸近系による近似に基づきスペクトルや各種 form factor, D-term などが計算されている [3] [4] [5]。しかし、D-term の計算には平坦時空近似や漸近系による近似が成り立たない領域の寄与も十分にあるため、全空間に渡って数値的に解を求めることが必要になる。

本論文では酒井-杉本模型でバリオン数 1 のバリオンを球対称な ansatz の下で数値的に構成し、さらに global ゲージ変換対称性を spin/isospin の自由度と同一視して集団座標量子化することで、バリオンのエネルギー運動量テンソルと D-term を求めた。パイオンの崩壊率と  $\rho$  メソンの質量を再現するようパラメータを設定すると D-term の値はおよそ -2.05 であり、他のハドロン有効模型と比較して同程度の値になっていることを確認した。

## References

- [1] Maxim V. Polyakov and Peter Schweitzer. Forces inside hadrons: Pressure, surface tension, mechanical radius, and all that. International Journal of Modern Physics A, 33(26):1830025, September 2018.
- [2] T. Sakai and S. Sugimoto. Low energy hadron physics in holographic qcd. Progress of Theoretical Physics, 113(4):843–882, April 2005.
- [3] H. Hata, T. Sakai, S. Sugimoto, and S. Yamato. Baryons from instantons in holographic qcd. Progress of Theoretical Physics, 117(6):1157–1180, June 2007.
- [4] K. Hashimoto, T. Sakai, and S. Sugimoto. Holographic baryons: Static properties and form factors from gauge/string duality. Progress of Theoretical Physics, 120(6):1093–1137, December 2008.
- [5] Mitsutoshi Fujita, Yoshitaka Hatta, Shigeki Sugimoto, and Takahiro Ueda. Nucleon d-term in holographic quantum chromodynamics. Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2022(9), August 2022.

# T2K 実験ニュートリノ検出器 SuperFGD のための 信号読み出し検査システムの開発と運用

高エネルギー物理学研究室 對馬拓実

**Abstract** In the T2K experiment, a new neutrino detector, SuperFGD, has been constructed and put into operation. About 56000 channels will be used for data-taking and it is important to identify and fix problematic channels. I show the methods and results of channel checking during the assembly and operation stages.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

T2K 実験は、ニュートリノ混合行列の CP 位相の測定を主な目的とした長基線ニュートリノ振動実験である。茨城県東海村にある J-PARC で生成された大強度のニュートリノビームを、岐阜県旧神岡鉱山にあるスーパーカミオカンデで測定する。

T2K 実験では、CP 位相測定における系統誤差削減を目的に、前置検出器群の改良が行われた。その中の一つに SuperFGD というニュートリノ反応標的兼飛跡検出器がある。SuperFGD は、1 cm 角のプラスチックシンチレータ 200 万個とそれらすべてを 3 方向から貫く 5.6 万本の波長変換ファイバー、そして 5.6 万個の光検出器から構成されている。ニュートリノ反応によって生じた荷電粒子によるシンチレーション光は、波長変換ファイバーを通り、その一端に設置された光検出器で測定する。

SuperFGD の 5.6 万チャンネルのうち、信号を正常に読み出すことのできないチャンネルが多数存在してしまうと、荷電粒子の飛跡を再構成することができなくなる。そのため、検出器の建設時と運転時において、問題のあるチャンネルの把握と適切な対処によって、99%以上のチャンネルで正常にデータ取得が可能である状態にする必要があった。

建設時には、検出器全体の遮光と約 900 本の信号読み出しケーブルの接続作業を行った。この際、最終的に信号ケーブルが表面を覆うため、後戻りして作業を行うことができない。そのため、接続と遮光を確認する試験を並行して行う必要があった。この確認試験を効率的・定量的に行うために、安定的に正確かつ素早い動作をする検査システムを開発した。そして、開発したシステムを用いて問題を発見・改善し、5.6 万個すべてのチャンネルで正常にデータ取得を行える状態にした。

運転時には、検出器の整備と監視、さらに増倍率校正のために、チャンネルの信号分布の情報自体から正常かを検査した。そのために、データ取得やエレクトロニクスの設定、さらには光量設定に問題のあるチャンネルについて、5 つの分類を考案し、分類に応じて対処を行った。そして、地上での試運転から実際のニュートリノビームデータ取得において、チャンネルの健全性を確認した。その結果、約 95%のチャンネルでデータを正常に読み出すことができ、エレクトロニクスや光量を適切に設定することで 99.85%のチャンネルについてもデータ取得に問題のない状態とした。

そして、SuperFGD は 2023 年 11 月から行われたニュートリノビームデータ取得においても 99%以上のチャンネルを安定的に動作させ、ニュートリノ反応による荷電粒子の飛跡を観測することに成功した(Fig. 1)。

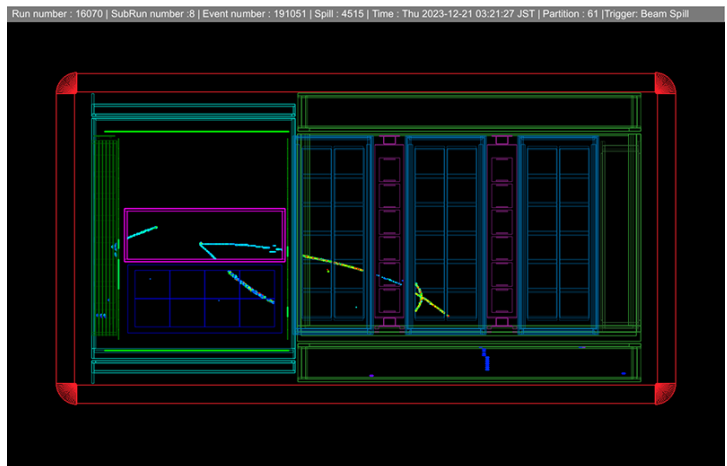


Fig. 1. An example of neutrino events in SuperFGD [1].

## References

[1] “T2K experiment enters a new phase with significantly improved sensitivity for its world leading neutrino oscillation research”, [https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2024/01/pr20240117T2K\\_en.pdf](https://www.kek.jp/wp-content/uploads/2024/01/pr20240117T2K_en.pdf). Accessed January 19, 2024.

# An algebraic approach to gravitational entropy

Center for Gravitational Physics and Quantum Information (CGPQI),

Yukawa Institute of Theoretical Physics, Kyoto University,

Kazuki Doi

**Abstract** We give an account of recent developments in algebraic quantum field theory and how its techniques have been applied to study the operator algebras of black holes. We also touch on my previous work on timelike entanglement entropy, a related concept thought to be relevant in understanding dS/CFT holography.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

Entropies of gravitational systems have been a mystery for quite some time. Ever since Bekenstein introduced the notion of viewing black holes as thermodynamic objects roughly fifty years ago, we have only had limited progress in understanding what gravitational entropy of causal horizons really means and how the following expression for the generalized entropy works and can be more or less “derived” in generality. We have

$$S_{gen} = \frac{A}{4G} + S_{out}$$

where the first term is the entropy associated to the horizon and the second term  $S_{out}$  is the ordinary entropy of matter/radiation outside the horizon. We now know that  $S_{out}$  should be correctly interpreted as the entanglement entropy, which is a measure of quantum entanglement between the horizon interior and exterior, and that the inclusion of gravity somehow regulates the equation to be finite as the ultraviolet divergent quantum corrections to both terms somehow cancels out. Obviously, the naïve information theoretic construction of density matrices and entanglement entropy for finite-dimensional factorizable Hilbert spaces does not work for a multitude of reasons. Our systems of interest do not even feature factorizable Hilbert spaces, and even if they could be factorized, the usual definition of density matrices does not naturally extend to infinite dimensions.

Algebraic quantum field theory provides us with a framework in which an alternative formulation of entropy becomes possible (for some systems) by shifting our attention to bounded operators, i.e. von Neumann algebras, that act on Hilbert spaces, rather than looking at spaces themselves and their states. In recent years, von Neumann algebras of gravitational systems such as de Sitter space and black holes in asymptotically anti-de Sitter space have been explored by the likes of Witten, Chandrasekaran, Penington, and others [1,2]. Algebraic quantum field theory is the cornerstone for understanding how information theory should properly be developed on a spacetime.

In this thesis, we first review the mathematical tools that are relevant and necessary in understanding the current status of algebraic quantum field theory. A particular emphasis is placed on the physical motivation of von Neumann algebras. We then demonstrate how the developed machinery is applied to physical systems by reviewing the works by Witten and others. Finally, we introduce our work on the timelike entanglement entropy [3], which we believe is important in understanding de Sitter entropy from a holographic perspective.

## References

- [1] E. Witten, “Gravity and the crossed product,” JHEP 10 (2022) 008.
- [2] V. Chandrasekaran, R. Longo, G. Penington, and E. Witten, “An algebra of observables for de Sitter space,” JHEP 02 (2023) 082.
- [3] K. Doi, J. Harper, A. Mollabashi, T. Takayanagi, and Y. Taki, “Timelike entanglement entropy,” JHEP 05 (2023) 052.

# SU(3) 格子 QCD を用いた Dimensional Reduction ゲージにおける QCD の低次元性の解析

原子核理論研究室 當銘啓

**Abstract** We propose a new gauge fixing of "dimensional reduction (DR) gauge" and investigate its properties using analytic arguments and SU(3) lattice QCD calculations. In the DR gauge, only two-dimensional gluons are found to be responsible to quark confinement, and 4D QCD can be described as an ensemble of interacting many 2D QCD-like systems.

© 2023 Department of Physics, Kyoto University

クォークの閉じ込めは、クォーク間の線形ポテンシャルで特徴づけられ、それにはカラー電束が 1 次元的に絞られた「フラックス・チューブの形成」が本質的に重要と考えられている。1 次元的なフラックス・チューブ形成は、4D QCD における「低次元化」の可能性を示唆しており、この「低次元性の性質」を浮き彫りにする目的で、我々は「Dimensional Reduction (DR) ゲージ」という新しいゲージ固定を考案した [1]。DR ゲージは

$$R_{DR} \equiv \int d^4s \text{Tr}[A_x^2(s) + A_y^2(s)] \quad (1)$$

を最小にするゲージと定義する。この DR ゲージでは、ゲージ関数が  $\Omega(t, z)$  の場合の (2D QCD と同じ) ゲージ対称性が残留し、従って DR ゲージの 4D QCD は 2D QCD と類似のゲージ系になると期待される。

本研究では、解析的議論と SU(3) 格子 QCD 計算 [ $\beta=6.0$ (格子間隔  $a \approx 0.1$  fm), クエンチ, 格子サイズ  $24^4$ ] を用いて DR ゲージの性質を調べ、以下のような結論を得た。

1) DR ゲージではグルーオン場の  $x, y$  方向成分  $A_x, A_y$  が抑制されるので、それらを格子 QCD 配位から取り除く「 $tz$ -射影」

$$A_{x,y} \rightarrow 0 \quad (2)$$

を考え、それによりクォーク間ポテンシャルがどのような影響を受けるかを SU(3) 格子 QCD 計算で調べた。その結果、Fig. 1 のように DR ゲージではクォーク間ポテンシャルが  $tz$ -射影で変化せず、グルーオン場の 2 次元的成分のみによって再現されることが分かった。これは「長距離の物理量が 2 次元的自由度のみで再現できる」という可能性を示唆する。

2) 解析的議論からは、DR ゲージで  $tz$ -射影した 4D QCD は、「近接相互作用をする 2D QCD の類似系のアンサンブル」という Fig. 2 のような描像が得られる。

3) この描像に現れる 2D QCD 類似系間の相関を格子 QCD を用いて調べた。2D QCD 系間には  $\exp(-mr)$  [ $m \approx 0.6$  GeV] という指数関数的に減衰する相関が見られ、従って 2D QCD 系間の相関長は  $\xi := 1/m \approx 0.3$  fm という結果が得られた。

4) この  $\xi \approx 0.3$  fm 以上で 2D QCD 系間の相関が  $\theta$  関数的に切れるという非常に大まかな近似の下では、4D QCD が「結合定数が  $g_2 := gm$  の 2D QCD 系」のアンサンブルとして記述できる可能性を指摘した。

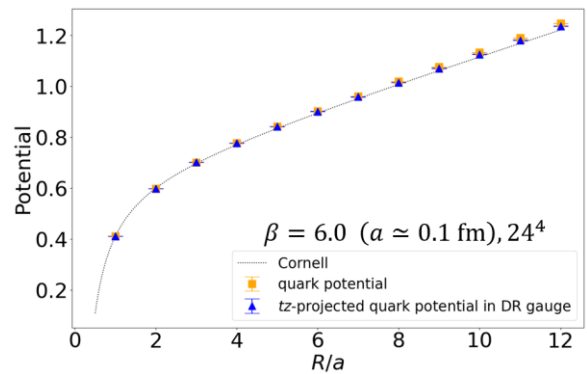


Fig. 1: Quark potential in lattice QCD in the DR gauge with  $tz$ -projection of  $A_{x,y} = 0$ .

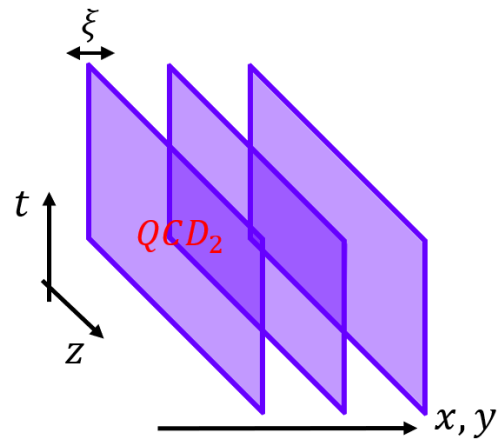


Fig. 2. A schematic diagram of 4D QCD in the DR gauge, of which structure is approximated to be interacting many 2D QCD systems.

[1] 當銘啓、菅沼秀夫「Dimensional Reduction Gauge and Confinement Analysis in SU(3) Lattice QCD」日本物理学会 第 78 回年次大会, 東北大学, 口頭発表 および 概要集 (2023).

# 降着型パルサーにおける 軟 X 線超過と低電離鉄輝線の系統的なスペクトル解析

宇宙線研究室 永井悠太郎

**Abstract** Some X-ray spectra of accretion-powered pulsars exhibit the so-called soft X-ray excess and low-ionized iron line, in addition to the continuum emission. The emission location of these components is still under debate. Here we performed a systematic X-ray analysis of accretion-powered pulsars and investigated the emission locations of these components.

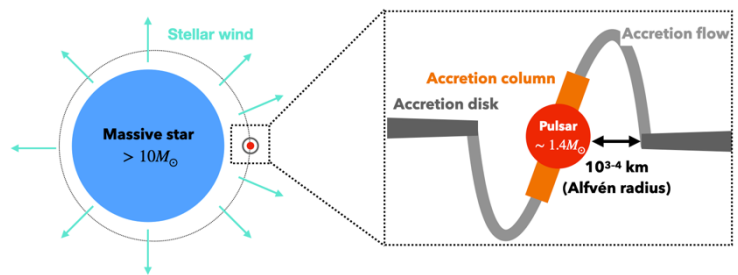
© 2024 Department of Physics, Kyoto University

近接連星では進化の過程で星風などにより質量輸送が生じる。この仕組みの解明は重力波イベントを起こす連星への進化の理解にも関わり、重要性は増している。ここで、降着型パルサー (Fig 1) はこれを調べるのに適した天体である。この天体では星風やロッシュローブオーバーフローにより中性子星が質量降着を受け、X 線で明るく輝くため、スペクトルや光度曲線からは質量降着や輸送に関する情報を得ることができる。例えば、多くの降着型パルサーで観測される低電離の鉄輝線 (~6.4 keV) からは、輝線の広がりや中心エネルギーを用いて放射場所の運動速度や温度、電離状態などを推定でき、降着機構の解明に対する強力な診断ツールとなる。これに加えて、いくつかのパルサーでは、温度 0.1 keV ほどの黒体放射で近似できる軟 X 線超過が存在することが知られている。しかし、2000 年代に ASCA 衛星などを用いた研究 [1] が行われて以降は、この成分の系統的な研究は行われておらず、その起源は決着がつかない。この低電離の鉄輝線と軟 X 線超過の 2 つの放射成分は、星風による成分を別にすれば、パルサーの磁極付近にある降着円筒からの強力な X 線がその周辺環境を照らした再放射というのが、一つの有力な仮説である。しかし、放射場所には複数の候補があり、パルサー近くのパルサーの降着円筒の内縁や、降着流といったアルフベン球の付近、パルサーから遠方の星風の寄与も考えられ、これまでに統一的な描像は確立していない。

そこで本研究では、鉄輝線と軟 X 線超過の放射場所や放射機構を調べるため、複数の降着型パルサーで両成分の比較研究を系統的に行った。2017 年に国際宇宙ステーション (ISS) に搭載された X 線望遠鏡 NICER は、約 1.5 keV で史上最大の有効面積 (1900 cm<sup>2</sup>) を持ち、軟 X 線超過の検出に最適な観測装置となる。また、6 keV で CCD カメラと同程度のエネルギー分解能 (~130 eV) をもつため、低電離の鉄輝線の観測にも十分な成果を期待できる。さらに、X 線衛星 Suzaku および XMM-Newton も加え、37 天体の降着型パルサーのアーカイブデータから広帯域 X 線スペクトルを系統的に解析した。このスペクトル解析から、星間吸収の小さな 19 天体で軟 X 線超過を検出でき、23 天体から鉄輝線を検出できた。そして、10 天体で両成分が検出できた。軟 X 線超過のスペクトルは黒体放射でよく近似でき、その放射半径を推定できる。鉄輝線は有意な広がりを持つ天体も多いことから、輝線幅を降着円盤のケプラー回転によるドップラー広がりとして解釈した場合に、中心天体からの距離を算出できる。この軟 X 線超過の半径と、ドップラー回転地点の半径を比較すると、ロッシュローブオーバーフローで円盤が形成されるタイプの多くの天体では、両成分が中心天体から同一の距離から放射されていると考えて矛盾ない結果が得られた。一方で、星風降着によって質量輸送が行われる天体では鉄輝線が軟 X 線超過に比べて非常に離れた星風などで放射されているという描像に合致する。2023 年に打ち上がった精密 X 線分光衛星 XRISM は鉄輝線のスペクトル分光で過去最高性能を実現でき、本研究を発展させ、さらに詳細な結果が得られると期待される。

## References

[1] R. C. Hickox *et al.*, *ApJ*, **614**, 881-896 (2004).



**Fig 1. Image of accretion-powered X-ray pulsars**

# J-PARC E16 実験における RAM機能を用いたDAQシステムの改良

原子核・ハドロン物理学研究室 長房俊之介

## Abstract

The systematic measurement of vector meson masses is being performed in the J-PARC E16 experiment. A data buffering system using the RAM was implemented for the bottleneck of the E16 DAQ system, the waveform digitizer of the GEM Tracker. The DAQ efficiency was found to be greatly improved by three times.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

ハドロンの質量の大部分はカイラル対称性の自発的破れとそれに伴うクォーク凝縮により発生すると考えられている。このカイラル対称性は有限温度、有限密度環境下で回復し、対称性の秩序変数であるクォーク凝縮量が減少することによってハドロンの質量が減少すると期待される。クォーク凝縮量は直接観測出来ないが、QCD和則の方法により質量分布の積分値という観測可能な物理量と結びつけられる[1]。

J-PARC E16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て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。これにより、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[2]。原子核中という有限密度環境下でのベクター中間子の質量を測定し、真空中の質量からの変化を測定することでハドロンとクォーク凝縮の関係を調べる事が出来る。先行研究であるKEK-PS E325実験では原子核中の $\phi$ 中間子の質量ピークに有意な変化を認めた[3]。E16実験ではE325実験の30倍の統計量、2倍の質量分解能でデータ取得を行い、核物質中のベクター中間子の質量変化について系統的な情報を得る事で、質量変化についての確定的な情報を得ることを目指す。

2021年に行われたコミッショニングランでのデータ取得でDAQ効率が15%と非常に低い値に留まる事が判明していた。高運動量ビームラインのビームに周期的な時間構造が存在し、これによりトリガーレートの瞬間的な増加が起こる事に起因することが分かっている。このビームの時間構造の改善策が加速器グループにより実施・検討されているが、実験グループ側の改善策としてDAQ性能の向上を図りDAQ効率を回復する計画を立てた。

E16実験の目指す高統計のデータ取得のため、高い係数率耐性のある飛跡検出器、GEM Trackerを用いる。E16実験のDAQのボトルネックとなっていたのはこのGEM Trackerに用いる波形デジタイザのネットワーク転送部である。本研究ではこの波形デジタイザのRAM機能を用いたデータバッファリングシステムの実装によりデータ転送の平滑化によるボトルネックの解消を行った。また、当システムおよびE16実験のDAQシステム全体の性能評価を行った。性能評価の結果この開発による物理データ取得時のDAQ効率が3倍程度改善されることが分かった。

## References

- [1] T. Hatsuda and S.H. Lee. Phys. Rev. C 46, R34 (1992).
- [2] S. Yokkaichi *et al.* J-PARC E16 proposal (2006).
- [3] R. Muto *et al.* Phys. Rev. Lett. 98, 042501(2007).

# TA 実験および TALE 実験による高エネルギー宇宙線の 到来方向大角度異方性探査

宇宙線研究室 難波宏樹

**Abstract** Utilizing the TA (Telescope Array) experiment and the TALE (Telescope Array Low energy Extension) experiment, we investigated large-angle anisotropies of arrival directions from the “2nd knee” to the “ankle” where the origin of cosmic rays is thought to transition from galactic to extragalactic sources.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

宇宙線は V.F. Hess による発見以来 100 年を超える歴史を持つが、高エネルギー宇宙線については到来数の少なさから未だに起源、組成、加速機構ともに謎である。これまでの観測から得られたエネルギースペクトルによると  $10^{15.5}$  eV 付近に「ニー」、 $10^{17}$  eV 付近に「セカンドニー」、 $10^{18.5}$  eV 付近に「アングル」と呼ばれるスペクトルの折れ曲がりがあることがわかっている。この折れ曲がりには宇宙線の起源が銀河系内から銀河系外へ遷移し、発生源の物理が変化することによるものであるとするのが現在の定説であるが、確証は得られていない。高エネルギーでは、近年の南半球の先行研究により、 $8 \text{ EeV}$  ( $8 \times 10^{18}$  eV) 以上で銀河系外起源を強く示唆する結果が得られている [1]。しかし、PeV ( $10^{15}$  eV) から EeV ( $10^{18}$  eV)、最高エネルギーにかけて宇宙線の起源やその遷移は明らかではない。我々はセカンドニー以上の到来数の少ない高エネルギー宇宙線を観測するために、アメリカのユタ州で広大な検出面積を持つ TA (Telescope Array) 実験およびその低エネルギー拡張実験計画である TALE (Telescope Array Low energy Extension) 実験を稼働して観測を続けている。TALE 実験では、約  $21 \text{ km}^2$  のサイトに  $400 \text{ m}$  または  $600 \text{ m}$  間隔で 78 台の地表粒子検出器を設置し、10 基の大気蛍光望遠鏡とのハイブリッド観測を行っている。TA 実験では、約  $700 \text{ km}^2$  のサイトに  $1.2 \text{ km}$  間隔で 507 台の地表粒子検出器を設置し、38 基の大気蛍光望遠鏡とのハイブリッド観測を行っている。

本研究では、地表粒子検出器から得られた TA 実験 14 年、TALE 実験 3 年のデータをもとに、およそ  $100 \text{ PeV}$  から  $100 \text{ EeV}$  の高エネルギー領域において北半球ではじめて統一的に大角度異方性探査を行った。それぞれのエネルギー範囲における大角度異方性解析を行い、解析手法や大気による系統的な影響を見積もった。図 1 は、エネルギーに対する双極子振幅であり、矢印で 99% 上限値を表している。また、残差解析、レイリー解析、東西解析における結果を示しており、解析手法による系統誤差は誤差の範囲内で一致していることを確かめた。概ね 10% 以下の振幅であることがわかり、最高エネルギーでは振幅が上昇している傾向も確認した。さらに  $8 \text{ EeV}$  以上の高エネルギー領域では、銀河系内から離れた方向に位相が遷移している傾向が見られ、北半球においても EeV 以上で起源が系外へ遷移する説と矛盾はないことを確かめた。

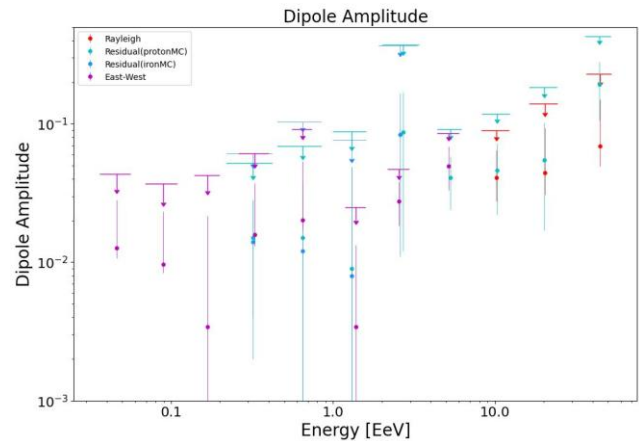


Fig. 1. Dipole amplitude projected onto the equatorial plane.

## References

[1] Pierre Auger Collaboration, A. Aab et al, Observation of a Large-scale Anisotropy in the Arrival Directions of Cosmic Rays above  $8 \times 10^{18}$  eV, Science 357 (2017)



# 反対称化分子動力学法及び陽子拘束を用いた<sup>12</sup>Be の励起状態の構造研究

原子核理論研究室 長谷川稜

**Abstract** We investigated the structure of <sup>12</sup>Be using a constrained antisymmetrized molecular dynamics method with proton constraints. We identified four states for both positive and negative parity. Aligning six states with prior research, we obtained new insight into the internal structure of one state.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

1980 年代以降、実験技術の向上に伴い、中性子過剰核の研究が理論・実験の両面から行われてきた。中性子過剰核には、それまで知られていた安定核とは異なるいくつかの興味深い性質がある。その 1 つに、魔法数の破れがある。魔法数とは核子数が特定の数であるときに原子核が安定性を示すという性質で、安定核ではこの性質が広く認められていた。この魔法数の 1 つである  $N = 20$  が破れていることが判明してから、他の魔法数の破れの有無を調べる研究が進められている[1]。

魔法数が破れていることが知られている原子核の 1 つに <sup>12</sup>Be がある。<sup>12</sup>Be の中性子数は 8 であるが、 $N = 8$  の魔法数が破れており、他の isotone に比べて励起エネルギーが小さいことが分かっている[2, 3]。また、陽子数が 4 の倍数の原子核は、その構造が複数のサブユニットに別れるクラスター構造が発達しやすいことが知られているが、陽子数が 4 である <sup>12</sup>Be もまた、発達したクラスター構造を持つ。<sup>12</sup>Be の場合は 2 つのサブユニットが  $\alpha$  粒子を基本とする  $\alpha$  クラスター構造を持つ。

<sup>12</sup>Be の構造については理論・実験の両面で、いくつかの研究が行われてきた。これらの研究では low energy 状態は様々な研究で共通の見解が得られている。一方で、high energy の励起状態は研究によって見解が異なる、その内部構造が詳しく調べられていないなどの課題も残されている。

そこで本研究では反対称化分子動力学法 (AMD) および Taniguchi らが提案した配位の拘束方法[4]を改良した手法を用いて <sup>12</sup>Be の (特に high energy の) 励起状態を研究した。結果として、正パリティ・負パリティにそれぞれ 4 つの状態を確認し、うち 6 つの状態について先行研究との対応が理解できた。そのうちの 1 つは先行研究では自然には得られていないものであった。

本論文では、魔法数の破れや <sup>12</sup>Be のクラスター構造についてのレビューを行う。さらに、先行研究で行われた構造研究を詳しく紹介する。次いで今回用いた AMD および陽子拘束の定式化を行い、結果として得られた状態について議論を行う。

## References

- [1] O. Sorlin and M.-G. Porquet, Prog.Part.Nucl.Phys.61:602-673,2008
- [2] S. Shimoura et al, Phys.Lett.B 654 (2007) 87-91
- [3] H. Iwasaki et al, Phys.Lett.B 491 (2000) 8-14
- [4] Y. Taniguchi, M. Kimura, and H. Horiuchi, Prog. Theor. Phys. 112, 475 (2004)

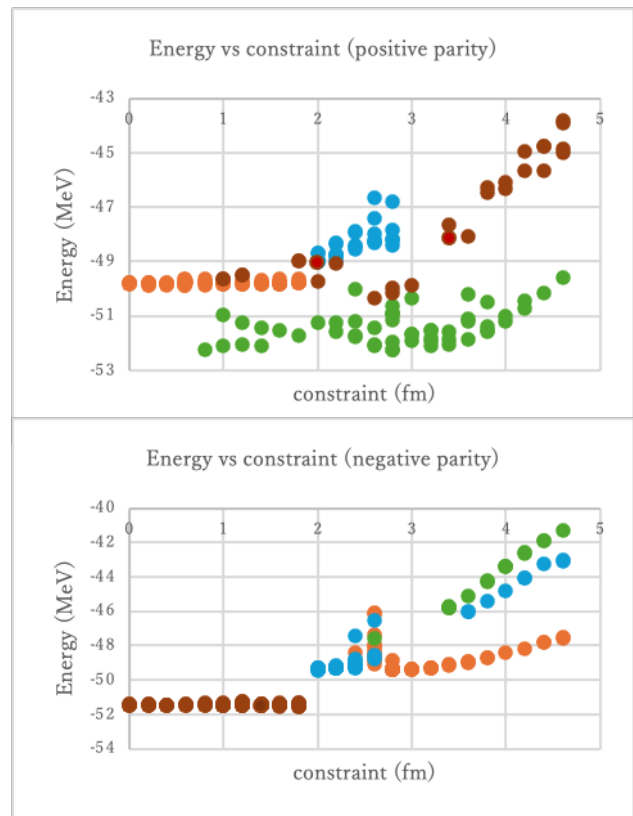


Fig. 1. Above is the positive parity, and below is the negative parity energy surface. Four states were obtained for each.

# ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索に向けた 高圧 Xe ガス TPC AXEL の電離信号読み出し面の改良

高エネルギー物理学研究室 疋田純也

**Abstract** AXEL experiment aims to search for neutrinoless double beta decay from  $^{136}\text{Xe}$  using a xenon gas TPC. We are developing a special readout system of ionized electrons to achieve high energy resolution. To improve the readout system, we have evaluated the characteristics of large-area MPPC and produced discharge-resistive structures.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

ニュートリノ振動の発見によりニュートリノは質量を持つことが明らかになったが、その質量は不自然なほどに軽い。ニュートリノが自身の反粒子と同一視できるマヨラナ粒子である場合には、この問題を解決できると同時に、現在の宇宙の物質反物質非対称性を説明できる可能性がある。ニュートリノのマヨラナ性は、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊( $0\nu\beta\beta$ )を観測することで実証でき、観測のためには大量の二重ベータ崩壊核を用いて低背景事象かつ高エネルギー分解能で測定を行う必要がある。

AXEL実験は、上記の条件を満たす高圧XeガスTPCを用いた $0\nu\beta\beta$ 探索実験である。検出器の電離信号読み出し面であるELCCは複数のセルを持っており、各セルにドリフト電場よりも強い電場を印加することで、電離電子をセルに引き込み加速する。加速された電子は、エレクトロルミネセンス(EL)過程を起こし、光子を発生させる。EL過程は増幅揺らぎが小さいため、発生した光子をMPPCで検出することにより高い分解能でエネルギーを測定できる。

AXEL実験では、 $0\nu\beta\beta$ のQ値において0.5%半値全幅のエネルギー分解能を目標に開発を進めているが、まだ達成できていない。その原因として、EL光の統計揺らぎがある。そこで、AXEL実験ではEL光の検出効率を高めるために、受光面積を大きくしたMPPCを開発し、本研究ではその性能評価を行なった。その結果、ゲインや光子検出効率が現在使用しているMPPCと誤差の範囲で一致すること、およびダークカレントによるエネルギー分解能への影響は目標値に比べて二桁以上小さいことを確認できたため、AXEL実験での使用条件を満たしていると判断した。

EL光の光量が増加すると、MPPCの非線形性が大きくなり、エネルギー分解能に影響を与える可能性がある。本研究では、非線形性を抑制する方法を探索するために、受光面積サイズやピクセルピッチ、信号読み出し抵抗の値を変えて大光量下におけるMPPCの応答を測定した。それぞれの条件で得られた結果を比較したところ、信号読み出し抵抗の値を下げることで、光量が増加した場合でも現在と同程度の非線形性に抑制できることを確認した。

また、これまでELCCにおける沿面放電により、目標電圧の12 kVを安定して印加できないことが問題になっていた。本研究では沿面放電を対策したELCCとして、高抵抗電極ELCCと十字蓋型ELCCを製作した。それぞれについて放電耐性を試験した結果、前者では期待していたほどの放電耐性は確認できなかったが、後者では空气中で目標電圧近くまで電圧を印加することに成功した。その一方で、高抵抗電極ELCCでは放電痕が残ることから、放電経路を詳細に観測することができ、今後の開発にとって重要な知見を得ることができた。

高抵抗電極ELCCについて、エネルギー分解能への影響を評価した。180L試作機での測定の結果、1461 keVにおいて(0.96±0.10)%のエネルギー分解能を得た。この結果を測定条件の違いを差し引いた上で先行研究[1]と比較したところ誤差の範囲で一致したため、高抵抗電極によるエネルギー分解能への影響は小さいと考えられることを確認した。

このように、本研究ではELCCの改良に向けて様々な項目について性能評価を行った。今後は本研究で得られた知見を活かし、次期検出器におけるELCCの製作に向けて、更なる改良を行っていく計画である。

## Reference

[1] M. Yoshida et al., Progress of Theoretical and Experimental Physics, **2024**(1), 013H01 (2024)

# 重力崩壊型超新星の上限質量制限に向けた 超新星残骸 G359.0-0.9 の観測研究

宇宙線研究室 松永海

**Abstract** Stellar nucleosynthesis processes affect the possibility of a core-collapse supernova explosion. We found the elemental composition of a supernova remnant G359.0-0.9 can be explained by shell-merger processes. The stellar processes allow even super-massive stars above 20 solar masses to explode.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

10 太陽質量以上の大質量星は、その進化の最後に重力崩壊型の超新星爆発を起こすと考えられている。理論的には約 20 太陽質量以下の大質量星は中性子星を残して爆発する一方、それ以上の超大質量星は爆発せずにブラックホールに崩壊するとされる。しかし観測的には超大質量星の爆発を示唆する研究もあり、超新星を起こす星の「上限質量」は確定していない。近年の理論研究は星が爆発する/しないという爆発可能性は、重力崩壊直前の星中心付近の密度構造によって決まることを示唆するが[1]、星内部の密度構造を観測から直接制限することはできない。そこで本研究では、密度を決定する恒星内元素合成過程に着目した。特に Ne や Mg の生成過程は爆発可能性に大きく影響し、これらの元素組成は超新星爆発の痕に残る超新星残骸の X 線観測によって測定可能である。観測例として、Ne に対して Mg の輝線が強い“Mg-rich 超新星残骸”が 2 例報告されており[2][3]、我々はこれらの燃焼過程が親星によって大きく異なることを予想した。

本研究では XMM-Newton 衛星を用いて超新星残骸 G359.0-0.9 の観測を行い、高い Mg/Ne 比 (= 1.9 solar) を検出し、3 例目の Mg-rich 超新星残骸であることを発見した。その成因を恒星進化モデル[4]を用いて探ると、限られた質量範囲の星で起きる燃焼殻融合[5]によって説明できることがわかった。これは恒星進化段階において通常なら層状に分離している燃焼殻が、対流などの作用によって融合する現象であり、観測的に示されたのは本研究が初である。恒星進化モデルと観測結果を比較するために超新星元素合成計算を実施し、その結果 G359.0-0.9 の親星の初期質量は 15 太陽質量以下であると制限した。恒星進化モデル解析によって得られた重要な知見として、本来爆発しにくい超大質量星であっても燃焼殻融合を経れば爆発可能で、その場合 Si/Mg 比と Mg/Ne 比の高い残骸を形成することがわかった。このような残骸を今年度打ち上がった XRISM 衛星で観測し、親星質量とよく相関する Fe/O 比[6]を測定すれば、その起源が超大質量星であるかどうかを検証できる。この手法により、超新星残骸観測による上限質量制限が可能になる。

## References

- [1] Ertl, T., *et al.*, 2020, ApJ, 890, 51,
- [3] Williams, B. J., *et al.*, 2015, ApJL, 808, L19
- [5] Yadav, N., *et al.*, 2020, ApJ, 890, 94

- [2] Park, S., & Bhalerao, J. 2017, ApJ, 834, 189
- [4] Sukhbold, T., *et al.*, 2018, ApJ, 860, 93
- [6] Katsuda, S., *et al.*, 2018, ApJ, 863, 127

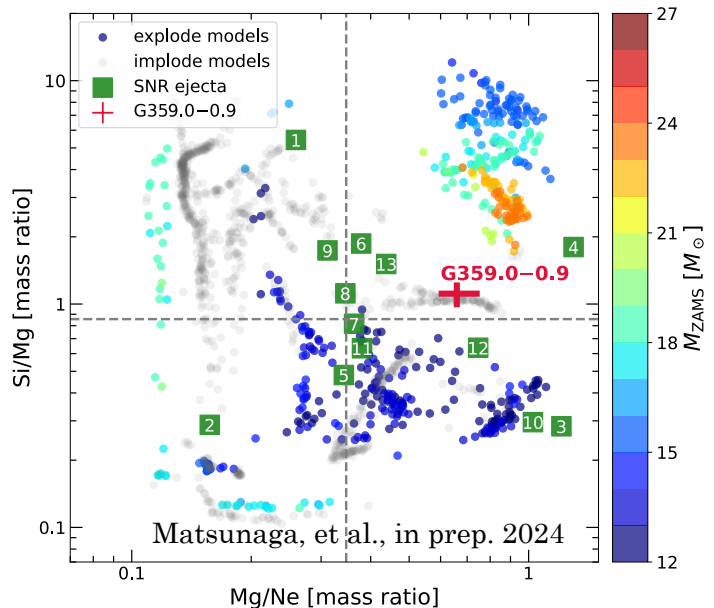


Fig. 1 Parameter distribution of Mg/Ne and Si/Mg expected from stellar models [4] and obtained from previous observations of SNRs (green squares). The colored and gray circles represent explosion and implosion cases, respectively. The result of G359.0-0.9 is shown by the red cross. The gray dashed lines represent the solar values. The numbers correspond to the targets as references in my thesis.

# 弦理論による Species Bound の検証

基礎物理学研究所 宇宙グループ 道信祐吏

**Abstract** In this thesis, we show for 5D and 4D extremal black holes in string theory that the species bound, one of the swampland conjectures, can be verified from the Bousso bound. As a byproduct, this implies that the species scale determines the minimal Hawking temperature of the black hole.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

量子重力理論と整合的な低エネルギーの有効理論の集合にある隠れた規則を探求するのが沼地予想の目的である。近年、沼地予想の一つである species bound が大きな注目を集めている[1]。Species bound は量子重力の効果が効いてくるカットオフスケールに関する予想である。量子重力が効いてくるとは、そこで重力が強結合になり、摂動論的な記述が破綻することを意味する。従って、素朴に Einstein 理論を考えれば、量子重力のカットオフは Planck スケールで与えられる。しかし、Dvali は、重力理論と膨大な数の非常に軽い粒子が結合した系ではそれらが重力理論に補正を加え、Planck スケールよりも小さい species scale で与えられると考えたのである。

Species bound の検証とは、本当に量子重力理論において species という概念が存在するのか、そして存在するならばそれはどのような物理的な意味を持つのかを真に明らかにするということである。その検証方法には摂動論的な方法と非摂動論的な方法の二つがある。摂動論的な検証は、弦理論の低エネルギーの有効作用の高階微分補正を調べることにより行われ、非常によく整備されている。一方、非摂動論的な検証では様々な方法が提案されているが、それぞれのつながりは十分には理解されていない。このような状況にあるのは、そもそも非摂動論的な species scale が明確に定義されていないためである。

非摂動論的な検証の一つであるブラックホールを用いた検証は主に Bousso bound を念頭において行われる。Bousso bound を species number に適用することの妥当性は多くの議論で確かめられている。しかし、これまでの検証では、最も小さいブラックホールが bound を saturate することを仮定して議論されていた[2,3]。その仮定は必ずしも必要ではないため、従来とは異なる検証方法を案出するのが有用である。

そこで、本論文ではそのような仮定を課すことなく、Bousso bound だけから species bound が成り立つことを 5次元と 4次元の extremal ブラックホール[4,5]に対して示した。また、これに伴って、これまでとは異なる species scale (正確には粒子の数を表す species number) の定義も提案した。この定義はブラックホールの微視的な理論から自然に定まるため、多くのブラックホール解に普遍的に適用できる。このとき、near-extremal ブラックホールの最小 Hawking 温度[6]が species scale だけから決まることも分かった。

## References

- [1] G. Dvali, Black Holes and Large N Species Solution to the Hierarchy Problem, Fortsch. Phys. 58 (2010) 528–536, arXiv:0706.2050 [hep-th].
- [2] D. van de Heisteeg, C. Vafa, M. Wiesner, and D. H. Wu, Moduli-dependent Species Scale, arXiv:2212.06841 [hep-th].
- [3] N. Cribiori, D. Lüst, and G. Staudt, Black hole entropy and moduli-dependent species scale, Phys. Lett. B 844 (2023) 138113, arXiv:2212.10286 [hep-th].
- [4] C. G. Callan and J. M. Maldacena, D-brane approach to black hole quantum mechanics, Nucl. Phys. B 472 (1996) 591–610, arXiv:hep-th/9602043.
- [5] J. M. Maldacena and A. Strominger, Statistical entropy of four-dimensional extremal black holes, Phys. Rev. Lett. 77 (1996) 428–429, arXiv:hep-th/9603060.
- [6] J. Preskill, P. Schwarz, A. D. Shapere, S. Trivedi, and F. Wilczek, Limitations on the statistical description of black holes, Mod. Phys. Lett. A 6 (1991) 2353–2362.

# 宇宙の大規模構造の観測から探る原始密度ゆらぎの統計的非等方性：銀河の固有形状を組み合わせた検出精度向上の可能性

天体核研究室 湊恵太

**Abstract** While homogeneity and isotropy are fundamental principles in modern cosmology, CMB anomalies imply a violation of these principles. To investigate deviations in isotropy within the large-scale structure of the universe, we leverage the intrinsic shapes of galaxies. Through Fisher analysis, we examined the precision of parameter estimation.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

現在標準的な宇宙モデルである  $\Lambda$ CDM モデルでは、宇宙の統計的一様・等方性（宇宙原理）に基づくフリードマン宇宙モデルをもとに宇宙膨張を記述する。また、観測される密度ゆらぎについても、宇宙原理をもとに一様・等方性を仮定してその形成・進化を記述する。ただ、その妥当性については検証が必要である。

宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測によると、CMB の温度ゆらぎのデータの中に、宇宙原理の綻びを示唆する CMB アノマリと呼ばれる観測シグナルが複数発見されている。その中のひとつに、南天・北天の非対称性がある。これは天球面を 2 つの領域に分け、それぞれで温度ゆらぎの相関を測定した場合、北天においては南天よりも相関が小さくなるというアノマリであり、その統計的有意性は  $2-3\sigma$  程度と言われている [1]。このようなアノマリは、温度ゆらぎに双極的な非等方性があることを意味し、原始密度ゆらぎにもそうした非等方性が存在していることを示唆している。このシグナルを一様・等方性を仮定する標準宇宙モデルのみから説明することは難しく、もしその存在が確証されると、標準宇宙モデルの綻びとして、原始ゆらぎの起源・生成に関する重要な示唆を与え、初期宇宙のインフレーションモデルを峻別する手がかりにもなる。したがって、今後も観測からこれらのアノマリを調べ、その原因を追究していくことが宇宙論において重要となる。ところが、宇宙マイクロ波背景放射の観測はこれまでに高い精度で行われており、その誤差はすでに、観測できる宇宙がひとつしかないことに由来するコスミックバリエーションに近づいている。そのため、これ以上観測精度を改善したとしても統計精度を挙げた検証を行うことは難しい。

本研究では、宇宙の構造形成を通じて宇宙マイクロ波背景放射と密接に関係する、宇宙の大規模構造の観測を使って、原始密度ゆらぎのアノマリ（双極的非等方性）を検証する手段を考える。文献 [2] では、フィッシャー解析にもとづき、銀河サーベイから得られる銀河の 3 次元分布から原始ゆらぎの双極的および四重極的な非等方性の検出精度を評価している。その結果、将来の銀河サーベイ観測では、従来の銀河サーベイ観測に比べて非等方性の振幅の決定精度が 2-3 倍改善されることが示された。本修士論文では、銀河の 3 次元分布に加えて、さらに個々の銀河がもつ形状・向きの相関情報を取り入れることで、非等方性の振幅に対する推定がどれだけ改善するか、定量的な考察を行った。双極的非等方性に特に焦点をあて、銀河の固有形状・向きの観測情報を加えてフィッシャー解析を行なった結果、銀河の 3 次元分布だけでなく銀河の固有形状・向きを組み合わせることで、非等方性の振幅の推定精度が向上することが明らかになった。ただし、推定精度の改善は、スケール依存性の強さにあまり依らずに、銀河の 3 次元分布の観測情報のみを用いた場合に比べて 4% 程度にとどまることが示された。また、銀河形状を解析に取り入れることによる非等方性の振幅の推定精度の改善度合いとバイアスパラメータの関係も調べ、その結果銀河バイアスが小さく形状バイアスの絶対値が大きい観測ほど銀河形状を解析に取り入れる恩恵が得られやすいことも明らかになった。

## References

- [1] J. Schwarz *et al.*, *Class.Quant.Grav.* 33 (2016) 18, 184001 (arXiv:1510.07929 [astro-ph.CO])
- [2] Shiraishi *et al.*, *Phys.Rev.D* 95 (2017) 6, 063508 (arXiv:1612.02645 [astro-ph.CO])

# 断熱進化によるコンパクトなボゾンスターの形成の可能性

天体核研究室 宮内侑

**Abstract** We investigate the formation of compact boson stars, formed by self-gravitating scalar fields. Focusing on adiabatic evolution, we introduce a scalar field influencing the compactness of boson stars. We find that the adiabatic evolution of external field can lead to the growth of more compact boson stars.  
© 2024 Department of Physics, Kyoto University

ボゾンスターとは、スカラー場が自己重力によって形成される未知の天体である。例えば、クラインゴルドン方程式とアインシュタイン方程式の連立微分方程式の定常解が最も簡単なコンパクトなボゾンスターの例である[1]。ここで、コンパクトネスと呼ばれる、その星の質量におけるシュワルツシルト半径をその星の半径で割った量が1のオーダーのとき、その天体はコンパクトであるとする。

ボゾンスターを構成するスカラー場として、例えばダークマターの候補の一つであるアクシオンが考えられている。このアクシオンは幅広い質量スケールが考えられており、したがって、これが構成するボゾンスターも恒星スケールから銀河スケールのもので考えられる[2]。さらに、中性子星などのコンパクト天体と違って硬い表面を持たないことから、ブラックホール擬似天体と言われるホライズンを持たないコンパクト天体として、一般相対論におけるブラックホールとの区別をX線や重力波による観測で試みる研究が多く行われている[3]。このように未知の天体であるコンパクトなボゾンスターは、その存在そのものの検証だけでなく、ダークマターの候補となるスカラー場のパラメーターの制限や強い重力下における物理の検証など新しい物理につながることを期待できる。

このようにコンパクトなボゾンスターを用いた研究は多くなされている。しかし、これらの先行研究はコンパクトなボゾンスターの存在を仮定したものであり、この形成シナリオはわかっていない。特に、非相対論的なボゾンスターはスカラー場の密度揺らぎの重力散乱によって生成されると考えられているが[4]、生成後もこの方法による成長が続くとすると[5]、宇宙年齢内にコンパクト天体として成長するのは不可能であることが示唆される。

本研究では、コンパクトなボゾンスターの形成過程のシナリオの1つとして、ボゾンスターの断熱進化に着目した。ボゾンスターを構成するスカラー場 $\Phi$ に加えて、ボゾンスターを構成するスカラー場のモデルパラメータを断熱的に変化させるバックグラウンド場としてスカラー場 $\chi$ を導入した。そして、系をボゾンスターの内側と、それを囲む外側の領域に分け、外側におけるバックグラウンド場 $\chi$ の時間変化がボゾンスターへのコンパクトネスに及ぼす影響を数値的に調べた。そのために、従来のアインシュタイン-クラインゴルドン方程式にスカラー場 $\chi$ を加え、これを数値的に解くことによってボゾンスターの定常解の系列を得た。特に、外側のバックグラウンド場の値は定常解の外側の境界条件とみなせ、断熱的な進化をこの境界条件の値の変化と考えることができる。そこで、この境界条件を変化させることによるボゾンスターの定常解の変化から、内側でのバックグラウンド場 $\chi$ やコンパクトネスの変化を追った。

その結果、外側のバックグラウンド場の断熱進化によって、ボゾンスターがよりコンパクトになる方向へ成長できることがわかり、宇宙年齢内にコンパクトなボゾンスターが形成されるモデルとなりうることを示唆された。

## References

- [1] D. J. Kaup, Phys. Rev. 172 (1968) 1331.
- [2] L. Hui, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 59 (2021) 247 [2101.11735].
- [3] S. L. Liebling and C. Palenzuela, Living Rev. Rel. 26 (2023) 1 [1202.5809].
- [4] D. G. Levkov, A. G. Panin and I. I. Tkachev, Phys. Rev. Lett. 121 (2018) 151301.
- [5] J. H.-H. Chan, S. Sibiryakov and W. Xue, 2207.04057.

# 超伝導検出器 MKID の薄膜純度向上及び高感度化を目指した製作と性能評価

高エネルギー物理学研究室 武藤優真

**Abstract** MKID is a superconducting detector that has attracted much attention because of its advantages such as simple multiplexing and fast time response. MKID sensitivity depends on fabrication procedures and methods, and properties of the superconductor material. I fabricated MKIDs made of niobium and tantalum and evaluated their characterization.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

超伝導検出器の高い感度を活かし、暗黒物質探索や宇宙マイクロ波背景放射観測への応用が進んでいる。超伝導検出器の中でも MKID は、多重化の簡便性や時間応答の速さなどの利点により注目を集めている。MKID は超伝導膜で構成された共振器からなる検出器で、入射エネルギーによるクーパー対の崩壊をインピーダンス変化として読み出す。MKID の感度は製作手順・方法と超伝導体材料の性質に大きく依存する。また MKID の主要なノイズに二準位系 (TLS) ノイズというものがあり、これらは超伝導薄膜や誘電体基板のアモルファス構造に由来する。

MKID はシリコンなどの誘電体基板に超伝導薄膜を製膜し、パターンに沿って薄膜を削り取ることで共振器回路を形成することで製作される。高純度な薄膜を作製することで共振の Q 値の向上による感度向上や TLS ノイズの低減が期待できる。

MKID の高感度化及び TLS ノイズを低減するデザインの一つに、センサー部分と読み出し部分で異なる超伝導体を用いるハイブリッド MKID というものがある [1]。本研究ではハイブリッド MKID の製作を見据え、ニオブ及びタンタルを超伝導体として用いた MKID をそれぞれ製作し、その性能評価を行った。性能評価は主に転移温度測定、共振パラメータ測定、時系列データ取得によるノイズ測定の 3 測定をもとに行なった。

ニオブを用いた MKID では、蒸着条件による Nb の純度向上と転移温度 7.9 K で  $0(10^5)$  の Q 値を持つ MKID の作成に成功した。TLS ノイズの低減は依然として課題であり、いくつかの改善案を考察した。タンタルを用いた MKID では、転移温度が約 0.5 K の MKID の作成に成功し、 $0(10^4)$  の Q 値を持つことを確認した。またこれらを用いたハイブリッド MKID を製作した場合の期待される性能についても議論した。例として CMB 地上観測実験である GroundBIRD 実験での利用を想定すると、ニオブについては TLS ノイズの影響が大きいため要求性能に満たないが、タンタルについてはハイブリッド MKID のセンサー部分としての要求性能をおおむね満たしていることがわかった。

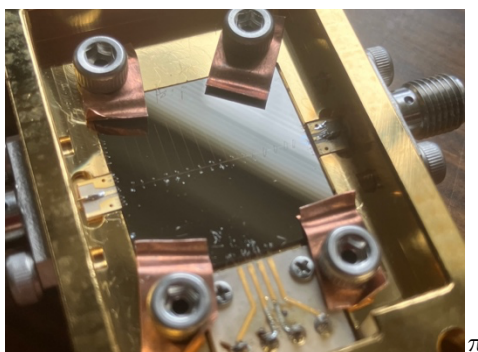


Figure 1: MKID in the sample holder for the evaluation

## References

[1] . M. J. Janssen, J. J. A. Baselmans, A. Endo, L. Ferrari, S. J. C. Yates, A. M. Baryshev, and T. M. Klapwijk. High optical efficiency and photon noise limited sensitivity of microwave kinetic inductance detectors using phase readout. Applied Physics Letters, Vol. 103, No. 20, p. 203503, 11 2013

# ESPRI+実験に向けた GAGG (Ce) カロリメータの 波形解析による粒子識別新手法の開発

原子核・ハドロン物理学研究室 矢野隆之

**Abstract** To determine the neutron skin thickness of  $^{52}\text{Ca}$ , which is important to constrain the symmetry energy of the nuclear matter EoS, we plan to perform proton elastic scattering at RIBF. We have developed a new telescope and a new particle identification method by pulse-shape analysis with GAGG(Ce) calorimeter.

© 2024 Department of Physics, Kyoto University

核子無限系である核物質の状態方程式(EoS; Equation of State)の解明は現代の原子核物理分野の至上命題の一つである。EoS は核物質の最も基本的な物性を規定する基本式であり、中性子星の構造や超新星爆発のダイナミクスを決定づける重要な方程式でもあるため、宇宙物理学分野においても最重要課題として認識されている。アイソスピン非対称度 $\delta$ の依存項である対称エネルギー項 $S(\rho)$ は中性子物質( $\delta = 1$ )の理解において重要となるが、その密度 $\rho$ の依存性は十分に理解されておらず、特に中性子星内部で実現されているとされる高密度領域において不定性が大きい。中性子過剰核で発達する中性子スキン構造は $S(\rho)$ を反映したものであるため、EoS 研究の良いプローブとなる。特に二重魔法核のスキン厚は $S(\rho)$ の1次の $\rho$ 依存項である傾きパラメータ $L$ との強い相関が示されており、我々は陽子弾性散乱実験から  $^{208}\text{Pb}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  のスキン厚の直接決定を行い、 $L$ に制限を付与してきた[1]。さらに本手法をよりアイソスピン非対称度の大きい不安定核領域へ拡張し、不安定核ビームを用いた逆運動学による  $^{132}\text{Sn}$  の陽子弾性散乱実験(Elastic Scattering of Protons with RI beams; ESPRI 実験)を世界で初めて成功させた[2]。しかし、これらの核種のスキン厚は0.2 fm程度と薄く、測定精度に限界があり、より高い精度での $L$ への制限が求められている。

そこで、 $^{52}\text{Ca}$  電荷半径の測定[3]や近傍の  $^{51}\text{Ca}$  の反応断面積の測定結果[4]から非常に厚いスキン厚(約0.4 fm)を持つことが示唆されている  $^{52}\text{Ca}$  に注目し、 $^{52}\text{Ca}$  の逆運動学陽子弾性散乱精密実験(ESPRI+実験)を理研 RIBF で計画している。しかし、RIBF における  $^{52}\text{Ca}$  のビーム強度は10 kcps以下であり、 $^{132}\text{Sn}$  のビーム強度に比べて1桁以上小さい。このため、 $^{132}\text{Sn}$  の陽子弾性散乱実験に用いた検出器群では精密な核子密度分布決定に必要な収量を実現できない。この問題を解決するために、GAGG(Ce)カロリメータとSiマイクロストリップ検出器から構成される大立体角を覆う新たな反跳陽子テレスコープの開発を進めている。この新規テレスコープの導入と水素標的の多層化によって必要なルミノシティが達成される見込みである。新反跳陽子テレスコープの基礎設計は完成しており、励起エネルギー分解能 $\Delta E_x < 600$  keVと十分な収量の達成が Geant4 を使ったシミュレーションによって確認されている。

新テレスコープでは、大立体角を実現するために、水素標的近くに検出器が設置される。広い散乱角度領域のために測定する反跳陽子のエネルギー範囲は10 MeVから100 MeVに及ぶ。その結果、特に高エネルギー領域において、飛行時間や $\Delta E-E$ を使った従来手法による粒子識別が困難であることが予想される。そこで、我々は GAGG(Ce)結晶の発光波形の時間特性の粒子種依存性に注目した新たな粒子識別手法の開発を進めている。波形情報を使った粒子識別能力評価のデータ取得を目的として、大阪大学 核物理研究センター サイクロトロン実験施設において GAGG(Ce)カロリメータへの陽子、重陽子照射実験を行った。測定データから GAGG(Ce)カロリメータの応答の粒子種依存性を評価し、波形解析によって粒子識別が可能なることを示した。さらに、その識別能力の定量的な評価を行い、 $E_p = 50$  MeVから130 MeVの領域において、 $AZ^2$ で $3\sigma$ 以上の精度で陽子、重陽子を分離できることを明らかにした。

## References

- [1] H. Sakaguchi and J. Zenihiro, Prog. Part. Nucl. Phys **97**, 1 (2017).
- [2] J. Zenihiro *et al.*, RIKEN Accel. Prog. Rep. **53**, 54 (2019).
- [3] R. F. Garcia *et al.*, Nature Phys. **12**, 594 (2016).
- [4] M. Tanaka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **124**, 102501 (2020).