

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究

研究期間：2022～2023

課題番号：22K14065

研究課題名（和文）宇宙線反粒子の超高感度観測計画GAPSによるダークマター探索

研究課題名（英文）The GAPS Project for Ultra-High Sensitivity Observation of Cosmic Ray Antiparticles in the Search for Dark Matter

研究代表者

山谷 昌大（Masahiro, Yamatani）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・招聘職員

研究者番号：80896275

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：南極気球実験GAPSによる宇宙線反重陽子の識別能力向上を目指し、BDTの最適化と新たな機械学習技術を導入した。学習変数の拡充と学習パラメータの精密調整により、反陽子や反ヘリウム探索に対する有用性を確認した。また、低エネルギー反粒子の速度再構成の精度を向上させるため、回帰型ニューラルネットワークを改良し、バイアスを抑制した。Bragg curve fittingによって得られた特徴量を統合することで、反重陽子の識別能力も向上した。さらに、データ解析の効率を高めるための機械学習フレームワークを開発し、解析速度と精度を同時に向上させた。これにより、今後の研究に対する堅固な基盤が確立された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ダークマターは宇宙の質量の大部分を占めるとされながら、その正体は未解明であり、宇宙の根本的な理解を深める上で非常に重要な意義を持つ。そのような課題を解決するには、ダークマターが関わるエネルギーの大きさ、既知物質との相互作用などに関する多種多様な仮説に基づく観測手法を用いた、多角的なアプローチを取ることが求められる。本実験の宇宙線反重陽子を用いたダークマターの間接探索実験は、これまで確認されなかったエネルギー領域をターゲットにしており、ダークマター探索実験の中でも重要な位置を占める。またこの研究は先端技術の開発を促進し、計測技術やデータ解析技術の向上をもたらす。

研究成果の概要（英文）：We have significantly improved the understanding capability of cosmic ray antideuteron for the Antarctic balloon experiment GAPS. This progress was achieved by optimizing Boosted Decision Trees (BDT) and incorporating novel machine-learning methodologies, containing the augmentation of learning variables and the meticulous adjustment of learning parameters. Notably, this approach has demonstrated considerable usefulness in identifying antiprotons and antihelium. Furthermore, enhancements to the precision of velocity () reconstruction for low-energy antiparticles have effectively mitigated bias. Integrating features derived from Bragg curve fitting has also strengthened antideuteron's discrimination capability. Moreover, developing a machine learning framework has notably increased the efficiency of data analysis, concomitantly elevating both the celerity and accuracy of the analyses. These substantial strides represent a foundational achievement for prospective research endeavors.

研究分野：宇宙線物理実験

キーワード：反重陽子

1. 研究開始当初の背景

ダークマターは渦巻銀河の回転速度や重力レンズ現象、宇宙の大規模構造の観測結果からその存在は確実視されているが、正体は不明のままであり、ダークマターの正体を特定することが素粒子物理学及び宇宙物理学における大きな課題となっている。これまでCDMSやダークマター対消滅由来の宇宙線 γ 線・陽電子・反陽子を利用する間接探索が数多く行われてきた。しかし、直接探索は他粒子との識別が原理的に難しいこと、間接探索は同種粒子の背景事象の存在から未だその検出には至っていないのが現状である。

一方、反重陽子を用いた間接探索はこれらの問題の観点からは有望である。背景事象由来の反重陽子は運動学的制限によりsub-GeV領域では抑制される。特に0.5 GeV/n以下では背景事象由来の反重陽子数は無視できるほど小さいため、ダークマター起源の反重陽子スペクトルを単独で観測できる可能性がある。このようなsub-GeV領域の反重陽子スペクトルは、SUSYニュートラリーノやLSPグラヴィティーノ、余剰次元モデルなど多岐に渡るダークマターモデルに感度がある。また、sub-GeV領域での反重陽子スペクトルの大きな超過が、AMS-02の反陽子超過観測や銀河系中心のガンマ線観測結果を説明するダークマターモデルから予言されており (Phys. Rev. D 99 (2019) 10, 103026)、この領域の反重陽子の更なる検証・観測結果が待たれる。AMS-02やBESSといった、既存実験では達成できないsub-GeV領域の高精度な反重陽子観測は、種々のダークマターモデルに感度がある未開拓領域の探索だけでなく、近年の宇宙線観測結果に対する相補的な解を提供する重要な役割も担う。Sub-GeV領域の反重陽子は、「直接探索」「間接探索」問わず近年の多角的なダークマター探索における重要な鍵となる。

2. 研究の目的

本研究では、解析手法の研究によるGAPSが探索可能な反重陽子フラックス及びエネルギー領域の拡大と、2022年度南極気球飛翔実験での観測データの確実な取得を行う。開発した解析手法により未開拓sub-GeV領域の高精度ダークマター間接探索を実現し、世界初の宇宙線反重陽子の検出を目指す。sub-GeV領域のような低エネルギー領域の高精度観測は、従来のマグネット型検出器では困難であったが、GAPSは宇宙線反粒子と測定器ターゲットから形成されるエキゾチック原子を利用した独自の手法を用いることでそれを可能にした。GAPS検出器はTOF (Time-Of-Flight) カウンタ2層 (Outer/Inner) が、崩壊粒子の飛跡再構成用シリコン検出器を覆うようにして構成される。まず宇宙線反粒子がシリコン検出器にトラップされ励起エキゾチック原子を生成し、特性X線を放出しながら反粒子が基底準位に落ちていくことで最終的に原子核と核子対消滅する。この過程で生ずる二次粒子及び特性X線が検出器に残す情報から事象再構成を行い、信号識別をする。観測手法の原理自体はKEKのビームテストで実証済みであり (Aramaki et al, Astropart.Phys.49(2013)52)、これにより単独観測の可能性を持つsub-GeV領域の反重陽子の高感度な探索が可能となった。GAPSは0.1-0.25 GeV/n以下の領域で、有意な感度をもって宇宙線反重陽子を検出する可能性を持つ唯一の実験である。

GAPSは反重陽子だけではなく他の反粒子観測にも大きな意義を持つ。例として反陽子の場合、AMS-02がダークマター対消滅で説明可能な20 GeV/n付近のデータ超過を報告しており、100 GeV/n以上にも有意な超過が観測されている。GAPSによりsub-GeV領域における反陽子エネ

ルギースペクトルを補填することで、ダークマターモデルに対する棄却領域の拡大が期待される。sub-GeV領域でデータ超過が観測された場合、AMS-02の結果も考慮したダークマターモデルの詳細な考察が可能となる (Aramaki et al, Astropart. Phys. 59 (2014) 12)。反重陽子/反陽子に限らず、GAPSは未開拓領域における反粒子観測を行うという点で、既存の観測結果や将来のダークマター探索計画に対して大きなインパクトを持つ。

3. 研究の方法

sub-GeV領域におけるダークマター由来の反重陽子検出を達成するため、機械学習を用いた宇宙線反粒子の粒子識別手法の開発を行う。これによりGAPS検出器内の複雑な粒子相互作用の様相を効率的に捉える解析手法を開発し、探索可能な反重陽子フラックス及びエネルギー領域の拡大を目指す。その後、2022年予定の南極長時間気球飛翔実験による宇宙線反粒子観測データ取得を行い、未踏の低エネルギー領域における反重陽子探索を行う。

入射粒子の再構成はまずTOFカウンタのヒット情報から入射粒子の飛跡を再構成し、シリコン検出器の情報と合わせて崩壊点及び二次粒子の飛跡を再構成する。従来解析では飛跡や崩壊点から求めた物理量を基に粒子識別を行っていた。しかし物理量の相関関係は複雑なため、従来解析ではその特徴が十分に捉えられておらず、これによりGAPSの探索可能領域が制限されてしまっていた。申請者は事象選別最適化及びパターン認識能力に優れる機械学習を従来解析に融合した粒子識別手法を開発することで、反重陽子フラックス及び反重陽子エネルギーの2つの側面から探索領域拡大にアプローチする。具体的な手法としては、決定木を弱分類器とするブースティング手法を利用した機械学習モデルBDT (Boosted Decision Tree) と従来の物理量を組み合わせることで、より柔軟な粒子選別を行う。BDTに用いる特徴量の選定や学習条件最適化を進めることで、探索可能な反重陽子フラックスの下限をこれまでの半分以下にまで押し下げる。先述の解析手法は反粒子がSi(Li)ターゲットに捕獲されて対消滅することを前提としている。しかし、反粒子のエネルギーが100 MeV/nを下回ると、TOFカウンターで対消滅する事象が支配的になることが判明している。従来解析ではこのような事象の識別は困難であり、GAPSの探索領域の下限が100 MeV/nである原因でもあった。この根本的問題を解決する為に、3次元畳み込みニューラルネットワーク (CNN) を用いた粒子識別手法の開発を行う。検出器の3次元ヒット情報をCNNに入力することでヒット位置の相関関係を効率的に学習する。これにより対消滅の位置に依らない無バイアスな解析を実現する。例えば100 MeV/nの反重陽子候補が従来解析で観測された場合、TOFで対消滅を起こす反重陽子数はその2倍以上期待される。このような事象をCNNで捉えることによって、探索可能なエネルギー領域の下限を100 MeV/nから20 MeV/nまで拡大する。

4. 研究成果

2023年度は、宇宙線反重陽子の識別能力向上のために機械学習を用いた解析手法の研究開発を行なった。BDT (Boosted Decision Tree) を導入し、学習変数及び学習パラメータの最適化を行うことで、従来の解析と比較して反重陽子に対する感度が向上することを示した。この手法は反重陽子だけでなく反陽子や反ヘリウムの探索にも利用できる可能性がある。

また、従来の再構成アルゴリズムではプラスチックシンチレータ通過時のエネルギー損失による入射粒子速度 (β) への影響が顕著になり、低エネルギー反粒子の β が上手く再構成できない問題が顕になった。このような再構成精度の芳しくない変数に対し、時間を含めたヒット情報を入

力変数とした回帰型ニューラル ネットワークを用いることで、従来の再構成アルゴリズムに存在したバイアスを抑制した β を推定することが可能となった。

従来の特徴量による事象選別だけでなく、検出器の粒子ヒット情報を3次元のデータとして3次元畳込みニューラルネットワークに学習させる研究も推進した。3次元畳込みニューラルネットワークに加え、特徴量を入力変数とした全結合型ニューラルネットワークの出力も最終的に結合することで、特徴量のみでの識別よりも粒子識別能力が改善される可能性があることを示した。この成果は国際学会で発表し、学術論文としても執筆済みである。MCシミュレーションデータ及び観測データのデータパイプラインの整備作業は継続中である

2024年度においても、宇宙線反重陽子の識別能力向上を目指した機械学習手法の改良を継続した。今年度は、BDT(Boosted Decision Tree)の最適化に加え、さらなる機械学習技術を導入し、反重陽子の感度を一層高めることを目指した。具体的には、学習変数の拡充および学習パラメータの精密調整を実施し、反陽子や反ヘリウムの探索に対する有用性を確認した。低エネルギー反粒子の速度(β)再構成に関する課題に対しては、昨年度導入した回帰型ニューラルネットワークをさらに改良し、プラスチックシンチレータ通過時のエネルギー損失に起因するバイアスを一層抑制しつつ、より精緻な β 推定を実現した。特に、時間を含む ヒット情報の詳細な解析を通じて再構成精度を向上させ、従来手法に比して低エネルギー領域における性能を著しく改善した。また、今年度の新たな試みとして、Bragg曲線フィッティングにより得られた特徴量を統合することで、反重陽子の識別能力を向上させた。この手法により、従来の特徴量のみを用いた手法に比して、より高精度な粒子識別が可能となり、反陽子や反ヘリウムの識別にも有用な結果を得ることができた。加えて、MCシミュレーションデータおよび観測 データの効率的な解析を目的として、グループ全体で利用可能な機械学習フレームワークを開発した。このフレームワークは、データ処理の効率を向上させ、解析の速度と精度を同時に高めることに貢献した。総じて、本年度の研究開発により、宇宙線反重陽子の識別技術は大幅に向上し、今後の研究に対する堅固な基盤が確立された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Masahiro YAMATANI, Yusuke NAKAGAMI, Hideyuki FUKE, Akiko KAWACHI, Masayoshi KOZAI, Yuki SHIMIZU, Tetsuya YOSHIDA	4. 巻 1
2. 論文標題 New Particle Identification Approach with Convolutional Neural Networks in GAPS	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Evolving Space Activities	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.57350/jesa.9	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 F. Rogers, T. Aramaki, M. Yamatani, 他（53人中47番目）	4. 巻 145
2. 論文標題 Sensitivity of the GAPS experiment to low-energy cosmic-ray antiprotons	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.astropartphys.2022.102791	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 M. Yamatani
2. 発表標題 Antiparticles identification for the GAPS experiment
3. 学会等名 RIKEN iTHEMS Dark Matter Workshop（国際学会）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masahiro Yamatani
2. 発表標題 New Particle Identification Approach with Convolutional Neural Network in GAPS
3. 学会等名 The 33rd International Symposium and Space Technology and Science（国際学会）
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------