

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 10 月 27 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04002

研究課題名（和文）南極周回気球実験による宇宙線反重粒子探索

研究課題名（英文）Search for cosmic-ray heavy antiparticles with Antarctica balloon

研究代表者

清水 雄輝（Shimizu, Yuki）

神奈川大学・工学部・教授

研究者番号：60434320

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：WIMP暗黒物質の間接探索を目的として、宇宙線反粒子測定実験GAPSによる反重陽子、反ヘリウム3の検出のための粒子識別手法の研究を行った。反粒子やそのバックグラウンドとなる他の粒子をGAPS測定器内で引き起こす反応パターンから高精度で識別するため、各種の機械学習アルゴリズムを利用した判別手法を開発・評価した。GEANT4シミュレーションで生成した模擬観測データを用い、三次元畳み込みニューラルネットワークと全結合型ニューラルネットワークを組み合わせたモデル、イベント再構成と機械学習を組み合わせたモデルを学習させることで、これまでの解析手法と比較して高いバックグラウンド除去性能を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在WIMP暗黒物質の探索は、地下からの直接探索や対消滅・崩壊で生じる粒子を利用した間接探索を含めて様々な試みがなされている。しかし、従来の実験ではWIMPとその他のバックグラウンドイベントとの識別が原理的に困難であり、決定的な結果は得られていない。本研究では、GAPS実験によるWIMP由来の宇宙線反粒子の検出を目的として、反粒子と誤認する可能性のあるバックグラウンドを除去するためのデータ解析手法の開発を行い、近年発展の著しい機械学習の応用によって高い識別性能を得た。この手法を2023年度以降に実施予定の南極フライトで得られるデータに適用することで、高感度での反粒子探索を実現できる。

研究成果の概要（英文）：GAPS is a dedicated balloon experiment designed for the indirect search of WIMP dark matter. We have developed analysis methods for the identification of anti-particles, such as anti-deuterons and anti-helium3. To eliminate background events caused by other particles, we have utilized machine learning algorithms. We have developed and evaluated learning models that combine a three-dimensional convolutional neural network and a fully-connected neural network, using large volumes of data generated by GEANT4. Multivariate learning models incorporated with the event reconstruction are also used. With these models, we have achieved better background rejection capabilities.

研究分野：宇宙線・宇宙物理実験

キーワード：反粒子 暗黒物質 特性X線 機械学習

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

銀河内を往来する反粒子は、暗黒物質や原始ブラックホール等の未解明の物理現象を起源とする可能性がある。その観測的な研究により、宇宙・素粒子物理学における重要課題の解決につながることを期待される。

暗黒物質は、宇宙の「目に見える成分」であるバリオン成分の約5倍の質量を持ち、その正体は依然不明であるが、通常の物質とほとんど相互作用をしない粒子(Weakly Interacting Massive Particle, WIMP)として存在する可能性が高い。これまでにその探索のため、地下での直接探索や、WIMP の対消滅・崩壊を捉える間接探索が世界中で行われてきた。未だどの実験も検出に至っていないが、直接探索では他粒子との識別が原理的に難しいこと、間接探索ではWIMP に由来しない同種粒子バックグラウンドの存在が主な原因と言える。

一方、WIMP からの生成粒子のうちで反重陽子以上の質量を持つ反重粒子は、宇宙線が星間ガスと衝突して生じる二次成分バックグラウンドが十分少ないと予想され、WIMP 探索の最有力チャンネルとなり得る。反重粒子は、RHIC 等の加速器で反ヘリウム 4 まで生成されているが、自然界では未発見である。宇宙線観測の代表格であり、2011 年から稼働する AMS-02 は、数 GeV の反重陽子、反ヘリウム 3, 4 候補の存在を発表した。現時点では、陽子やヘリウム等の誤認を否定できないものの、真偽や起源について議論を呼んでいる。仮にこれらが WIMP 起源の場合、各種 WIMP モデルでフラックスのピークとなる sub-GeV 領域を観測することで、より確実な検出を期待できるとともに、モデル検証の実現が現実味を持つ。

### 2. 研究の目的

本研究は、GAPS(General Anti-Particle Spectrometer)実験により宇宙線反重粒子を検出し、銀河中の WIMP 対消滅・崩壊の間接的証拠を得ることを目指し、計算機シミュレーションを利用した観測データ解析手法の研究開発を目的としている。

GAPS では、反粒子と原子核が形成するエキゾチック原子の脱励起過程で生じる特性 X 線と、その後の核子対消滅で生じる中間子や陽子のハドロン粒子群を捉えるユニークな検出原理により、高精度で反粒子を同定する。特性 X 線やハドロン粒子の測定に、専用に開発した大容量リチウムドリフト型シリコン検出器(Si(Li))アレイを用いることで、AMS-02 等で利用するマグネットスペクトロメータ方式と比較し、粒子識別性能を保ちながら測定器の大型化を実現できる。この検出原理により、GAPS は未だ検出例のない反重陽子に対して Sub-GeV 領域で高い感度を持つのが特徴である。GAPS 実験では、NASA 南極周回気球を用いて、フライト 3 回で計 100 日程度となる長期間観測を予定している。

GAPS の反粒子検出原理は、より大きな質量を持ち、宇宙線二次成分のさらに少ない反ヘリウムにも利用できる。WIMP 由来の反ヘリウムは、GAPS が感度を持つ sub-GeV 領域にピークを持つと予想され、現状で GAPS が最も反ヘリウム検出の実現可能性が高いと言える。一方で、反ヘリウムは反重陽子と比較してさらに希少と予想されるため、測定器の検出効率の向上が求められる。

本研究では、これまで開発を進めてきた粒子識別手法のさらなる改良を通して、GAPS 実験による sub-GeV 領域の反重陽子、反ヘリウムの検出感度の最適化を図る。

### 3. 研究の方法

本研究では、GAPS による極めて希少な宇宙線反重粒子の検出のため、バックグラウンド弁別や検出感度向上のためのデータ解析手法の研究を行う。

GAPS の測定器では、全体を囲むように配置された内外 2 層のプラスチックシンチレーション Time-of-Flight (TOF) カウンタによる入射粒子の飛行時間や  $dE/dx$  の測定、中央の Si(Li) アレイによる反粒子の捕獲後に生じる特性 X 線とハドロン粒子群の測定を行う。これらのデータに対して多変量解析を行うことによって、高精度での反粒子同定を行う。GAPS の主な観測対象である反重陽子では、その 3 桁以上の存在量である反陽子が主なバックグラウンドとなる。これまで、反重陽子の解析を中心に GEANT4 によるシミュレーションを用いた解析手法の研究を行ってきた。反陽子の混入率は、特性 X 線エネルギー、侵入深さ、ハドロン粒子生成数などを用いた粒子識別により、計 100 日間の観測で 0.01 イベント以下を見込む。今後、反重陽子・反陽子識別手法のさらなる最適化を行うとともに、より希少な反ヘリウムの検出に適した解析手法の研究を進める必要がある。本研究では、これまでに開発してきた解析手法をさらに発展させる方法として、各種の機械学習アルゴリズムによる多変量解析や深層学習によるパターン認識の応用を試み、GAPS による反粒子測定の感度最適化を図る。

### 4. 研究成果

(1) GAPS による反重陽子測定の感度向上のため、近年パターン認識のアルゴリズムとして著しい成果を上げている深層学習の一種、畳み込みニューラルネットワークを用いた手法の開発を進めた。GEANT4 を用いたモンテカルロシミュレーションによって模擬観測データを大量に生成し、GAPS の主要検出器である Si(Li) アレイのデータを用いて、反陽子・反重陽子の識別手法の

開発・評価を行った。Si(Li)アレイは、検出器素子を三次元的に配置した構造であり、入射反粒子およびその対消滅によって生じる多数のハドロン粒子の飛跡を捉えることができる。そこで、学習モデルとして三次元畳み込みニューラルネットワークを構築し、GPU 計算機による並列計算によって反陽子・反重陽子のデータパターンを学習させることで、粒子識別を行った。最も簡単な試行条件として、測定器上方からの垂直入射の場合の識別性能を評価し、反陽子に対して 5 桁程度の除去性能を得た。

(2) 前述の研究では、簡易的な粒子入射条件にて畳み込みニューラルネットワークの粒子識別への利用可能性を確認したが、より一般的な条件となる一様等方入射の粒子については十分な粒子識別性能が得られなかった。識別性能の向上のため、測定器全体を囲う TOF カウンタのデータの学習モデルへの取り込みを試みた。TOF カウンタは Si(Li)と同様のアレイ構造ではないため、Si(Li)のデータはこれまで通りに畳み込みニューラルネットワークへ、TOF カウンタは全結合ニューラルネットワークに入力してそれぞれ並列に処理し、最終的に両ネットワークを全結合する混合モデルを構築した。また、ネットワークの多層化のため、残差ネットワークを導入した。この学習モデルにより、測定器に一様等方の条件で粒子を入射させた場合でも反重陽子に対する反陽子バックグラウンドの高い除去性能を得た。図 1 に、この学習モデルによる反陽子除去性能を示す。反重陽子の検出効率として 7 割を維持しながら、5 桁程度の反陽子除去を実現できた。また、学習用データを増やすことにより、識別性能の向上が見られることを確認した。

(3) 反重陽子に対するバックグラウンド事象の研究として、同様の反粒子である反陽子に加えて、さらに存在量の多い通常の宇宙線陽子、ヘリウムの影響を評価した。これまで開発を進めてきたイベント再構成手法によって TOF カウンタおよび Si(Li)アレイのデータから算出される入射粒子の や二次粒子生成数などの物理量について、各種の機械学習アルゴリズムを利用した多変量解析に基づき、バックグラウンド識別に効果的なものを検証した。GEANT4 により生成した模擬観測データを利用して、選定した物理量を用いた学習の最適化を行った。機械学習の一種、Boosted Decision Tree を用いた反陽子・反重陽子の学習結果を図 2 に示す。主要なバックグラウンドとなる反陽子については十分な除去率が得られた。また、生成する二次粒子が多くなり得る の大きいヘリウムがバックグラウンドとして影響が大きいことを確認した。これは外層付近でヘリウムが起こすハドロン相互作用によって生じる二次粒子を入射粒子と誤認することが主要因であり、相互作用の位置による事象選別を今後行っていく必要がある。

(4) GAPS 測定器による反ヘリウム 3 の観測性能を評価するため、反重陽子に対する評価と同様に GEANT4 シミュレーションにより模擬観測データを生成して解析を行った。反重陽子において主要なバックグラウンドとなる反陽子については、反ヘリウムとの電荷の違いから  $dE/dx$  が異なるため、比較的除去が容易である。これまでに開発をしたイベント再構成手法と log-likelihood 解析を用いて、バックグラウンドとなる陽子、ヘリウム、反陽子の除去のための解析手法の研究を行った。各粒子のバックグラウンド除去率と反ヘリウム 3 検出効率を最適化および反ヘリウム 3 の観測感度の評価を行い、100 日の気球観測によって  $10^{-7} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \text{ GeV/n}^{-1}$  の感度が得られることを確認した。

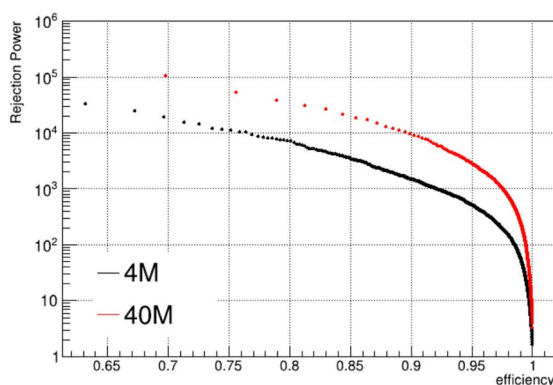


図 1 混合ニューラルネットワークによる反重陽子測定における反陽子除去性能。学習に用いたイベント数  $4 \times 10^6$  イベント(黒)、 $4 \times 10^7$  イベント(赤)。

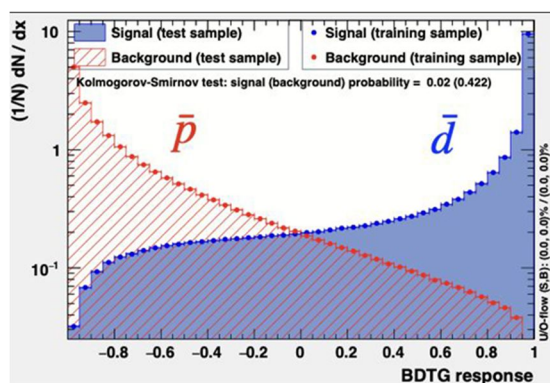


図 2 Boosted Decision Tree による反陽子・反重陽子の学習結果。各スコアごとの反陽子イベント数(赤)、反重陽子イベント数(青)。

S. Ting, Latest Results from the AMS Experiment on the International Space Station, CERN Colloquium, 2018.

E. Carlson et al., Antihelium from dark matter, Physical Review D 89 076005, 2014.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 N. Saffold, et al.	4. 巻 130
2. 論文標題 Cosmic antihelium-3 nuclei sensitivity of the GAPS experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astroparticle Physics	6. 最初と最後の頁 102580 ~ 102580
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.astropartphys.2021.102580	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 N. Saffold, F. Rogers, M. Xiao, R. Bhatt, T. Erjavec, H. Fuke, C.J. Hailey, M. Kozai, D. Kraych, E. Martinez, C. Melo-Carrillo, K. Perez, C. Rodriguez, Y. Shimizu, B. Smallshaw	4. 巻 997
2. 論文標題 Passivation of Si(Li) detectors operated above cryogenic temperatures for space-based applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 165015 ~ 165015
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2020.165015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Kozai Masayoshi	4. 巻 1468
2. 論文標題 The GAPS experiment - a search for cosmic-ray antinuclei from dark matter	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012049 ~ 012049
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012049	査読の有無 無
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 -
1. 著者名 F. Rogers et al	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 102791 ~ 102791
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

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 9~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 中上裕輔, 福家英之, 清水雄輝, 和田拓也, 河内明子, 小財正義, 山谷昌大, 吉田篤正, 吉田哲也
2. 発表標題 宇宙線反粒子探索計画GAPSにおける深層ニューラルネットワークを用いた反粒子識別法の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中上裕輔, 和田拓也, 小財正義, 清水雄輝, 福家英之, 山谷昌大, 吉田篤正, 吉田哲也
2. 発表標題 GAPSにおける畳み込みニューラルネットワークを用いた粒子識別法の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山谷昌大, 小財正義, 福家英之, 吉田哲也, 清水雄輝, 中上裕輔, 吉田篤正, 和田拓也, Philip von Doetinchem, Riccardo Munini
2. 発表標題 宇宙線反粒子観測計画GAPSによるダークマター間接探索のための反粒子識別能力向上の研究
3. 学会等名 日本物理学会 第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木俊介, 清水雄輝, 入江優花, 橋本航征, 福家英之, 岡崎峻, 水越慧太, 小財正義, 河内明子, 新垣翔太
2. 発表標題 宇宙線反粒子探索実験GAPSにおける熱制御システムの開発
3. 学会等名 第23回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福家英之, 水越慧太, 小川博之, 岡崎峻, 白鳥弘英, 徳永翔, 山谷昌大, 吉田哲也, 和田拓也, 吉田篤正, 入江優花, 橋本航征, 清水雄輝, 鈴木俊介, 小財正義, 加藤千尋, 宗像一起, 新垣翔太, 平井克樹, 河内明子, 川俣柊介, 川本裕樹, 奈良祥太郎, 高橋俊, C.J.Hailey, M.Boezio, for the GAPS Collaboration
2. 発表標題 宇宙線反粒子探索GAPS実験計画の現状報告
3. 学会等名 第23回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水雄輝, 入江優花, 橋本航征, 鈴木俊介, 和田拓也, 吉田篤正, 福家英之, 水越慧太, 小川博之, 岡崎峻, 白鳥弘英, 徳永翔, 山谷昌大, 吉田哲也, 小財正義, 加藤千尋, 宗像一起, 新垣翔太, 平井克樹, 河内明子, 川俣柊介, 川本裕樹, 奈良祥太郎, 高橋俊, C.J.Hailey, M.Boezio, for the GAPS Collaboration
2. 発表標題 南極周回気球による宇宙線反粒子探索実験GAPSの現状報告
3. 学会等名 2022年度大気球シンポジウム
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
研究協力者	福家 英之  (Fuke Hideyuki)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	山谷 昌大  (Yamatani Masahiro)		
研究協力者	小財 正義  (Kozai Masayoshi)		

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