

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 22 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340073

研究課題名(和文) ダークマター探索のためのエキゾチック原子を用いた反粒子宇宙線測定器の開発

研究課題名(英文) Development of a cosmic-ray anti-particle spectrometer using exotic-atom physics for the dark-matter search

研究代表者

福家 英之 (FUKE, HIDEYUKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：10392820

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、宇宙線中に微量に含まれる反粒子(とりわけ未発見の反重陽子)の高感度探索を通じてダークマター等の初期宇宙物理の課題に迫ることを最終目的とする。本研究ではエキゾチック原子の崩壊過程を利用したオリジナルな粒子識別手法に基づく反粒子宇宙線測定器「GAPS」の開発を進めた。測定器の各基本構成要素の設計や開発を進め、プロトタイプ測定器の動作試験を通じて基本設計の妥当性を実証した。2012年には各構成要素のプロトタイプで構成したペイロードを気球に搭載して飛翔させ、実フライト環境下での動作実証に成功した。本研究により、GAPS測定器の実機の設計・開発・製作に向けた礎を築いた。

研究成果の概要(英文)：Development of General Anti-Particle Spectrometer, GAPS, has been carried out. GAPS is motivated to investigate the dark matter mystery and other early-universe physics discipline through unexplored highly sensitive observation of (or search for) cosmic-ray antiparticles including undiscovered antideuterons.

In preparation for the Antarctic balloon flights, prototype of each GAPS subsystem has been developed and verified by various tests. In 2012, an engineering balloon flight was successfully carried out using a prototype GAPS payload. As a consequence, the basic design and performance of each GAPS subsystem were verified.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：宇宙線 ダークマター 反粒子 反物質 反重陽子 エキゾチック原子 測定器開発 気球実験

1. 研究開始当初の背景

ダークマターの解明は現在の宇宙物理の最大の課題の一つである。有力候補である超対称性粒子ニュートラリーノなどの Cold Dark Matter (CDM)の探索は、ターゲット原子核との反跳による「直接的な」検知を目指して多くの実験が実施・計画されている。しかし、ターゲットの大型化とバックグラウンドの低減という課題があり、未だ感度は十分ではない。また、CDM の対消滅による産物を宇宙線中に観測することで CDM を「間接的に」探索する実験も、線・陽電子・反陽子などで行われている。しかし、これまでの間接探索はいずれも主要成分のエネルギースペクトルからの僅かなズレによって CDM を検出しようというものであり、未だ観測精度が不十分である。

一方、反重陽子(anti-deuteron)は、まだ宇宙線中の観測例が無いものの、魅力的な可能性を持つ。反重陽子の主要成分(二次起源)は、生成過程の運動学のため 1GeV 以下の低エネルギー領域では抑制される。ゆえに、低エネルギー領域では CDM 起源のソフトな反重陽子スペクトラムを主要成分からのズレではなく単独で観測できる可能性がある。同様の魅力はニュートラリーノ以外の様々な CDM モデルでも指摘されている。これら予測における反重陽子生成確率の計算精度は、以前は不定性が大きかったが、近年 BNL/RHIC などの加速器実験で反重陽子の人工生成例が増加したことで改善されている。反重陽子に対する探索は唯一 BESS 実験によって行われ上限値が与えられたが、反重陽子の極微な予想存在量に対してはまだ感度が 2~3 桁不足している。

そこで、従来の BESS のようなマグネット型スペクトロメータよりも比較的容易に探索感度(面積立体角×観測時間)の向上が可能な新手法に基づく GAPS (General Anti-Particle Spectrometer) 計画を推進している。低エネルギー反粒子をエネルギー損失によって測定器内のターゲット中で止めると、ターゲット原子の電子軌道に反粒子が捕捉されて励起エキゾチック原子が生成された後、反粒子が基底準位にカスケード的に落ち込み、最後は原子核と核子対消滅して中間子や陽子を発生する。この $1/p$ の生成数およびカスケード崩壊の準位に対応して放射される特性 X 線のエネルギーが捕捉反粒子の種類に依存することを利用して粒子を同定する。捕捉前のエネルギーはターゲット上流の Time-of-Flight カウンタによる dE/dx 、および反粒子の stopping depth から得られる。特性 X 線と $1/p$ とのコインシデンスを取ることにより、バックグラウンド宇宙線に対しても高い弁別能力を確保できる。この基本検出原理は、反陽子ビームによる KEK でのビームテストによって実証済みである。

こうして、本研究開始以前までに GAPS 測定器の基礎検討が重ねられてきた。

2. 研究の目的

本研究は、宇宙線中に微量に含まれている反粒子(とりわけ未発見の反重陽子)の高感度探索を通じてダークマター等の初期宇宙物理の課題に迫ることを最終目的とする。前述のとおり、宇宙線反重陽子は超対称性粒子ニュートラリーノを始めとするダークマター候補の対消滅を起源として極微量が存在している可能性がある。その検出に最適な低エネルギー領域(運動エネルギー = 数 100MeV)にて最高の観測感度を得るため、宇宙線反粒子と測定器ターゲットとが形成するエキゾチック原子の崩壊過程から生ずる特性 X 線や荷電粒子を利用する、という従来にはないオリジナルな粒子識別手法を用いた反粒子宇宙線測定器 GAPS の開発を進めている。GAPS は日米国際共同実験計画であり、低エネルギー反粒子の観測に適した南極周回長時間気球実験を次期太陽活動極小期にあたる 2020 年前後に複数回実施することを当面の目標としている。

本研究は、南極気球で飛翔させる GAPS 測定器のプロトタイプを開発・製作し、その性能を実証することを目的とする。

3. 研究の方法

本研究開始以前に重ねてきた測定器の構成要素単体での試験やシミュレーションによって見込まれる動作を実証するため、プロトタイプを開発し、その基本動作を確認する。測定器としては、特性 X 線や中間子の検出には Si(Li)型半導体検出器、その周囲の TOF (Trigger/Veto)カウンタにはプラスチックシンチレーションカウンタを用い、放射線源や宇宙線 μ 粒子などで各サブシステムとしての基本動作を確認する。

また、気球フライト時の上空での低温・低圧な環境での各構成要素の動作を、真空チェンバなどを用いた地上での環境模擬試験によって実証する。特に、Si(Li)半導体の性能のために重要な冷却機構や、エレクトロニクスの真空対策などを、重点的に試験する。

さらに、各基本構成要素のプロトタイプで気球搭載型プロトタイプペイロードを構築し、実際に気球に搭載飛翔させての気球実験を実施する。気球実験は JAXA の大気球を用いて北海道で実施する。この気球実験では地磁気のカットオフが大きく飛翔時間も 3 時間程度と短いため反粒子を実際に検出することは困難だが、各要素が所期の動作をすることの実証やバックグラウンドレートの確認などを行う。

4. 研究成果

平成 22 年度は、それ以前に行った基礎検討を踏まえて、測定器の各基本構成要素のプロトタイプ的设计や開発を進め、実験室レベルでの評価試験を重ねた。特にペイロード全体のシステム開発に重点を置き、姿勢制御システムに関しては方位角センサや駆動モ-

夕の選定、真空低温環境での動作試験などを行った。また、ペイロードの各構成要素のスケールモデルで構成されるプロトタイプ測定器を気球の実フライト環境下で動作させて技術試験を行うべく、北海道大樹町での気球実験の実実施計画を立案し、その準備を行った。

平成 23 年度は、プロトタイプ気球実験の実現を目指し準備を進めた。GAPS 測定器の各構成要素のスケールモデルから成るプロトタイプ測定器の開発と製作を平成 23 年度内にほぼ終えた。また、前年度に引き続き GAPS 測定器の設計開発も進め、Si(Li)型半導体検出器の設計改良や量産化方法の検討、姿勢制御系・熱制御系・電源系などのペイロードのシステム設計、などを行った。熱制御系に関しては、熱輸送方法の候補である自励振動ヒートパイプに関して、世界に先駆けて立体配管化・低温環境への適用・大型化に成功するなど、本研究以外にも応用可能な工学的な成果も得た。

平成 24 年度は、それまでの研究成果を発展させ、プロトタイプ測定器による技術実証を目的とした気球実験を実施した。プロトタイプ測定器は GAPS 測定器の各構成要素のスケールモデルから構成し、およそ 1.4m×1.6m×高さ 2.2m の気球搭載型ゴンドラに組み上げた。気球実験は 6 月 3 日に北海道の JAXA 大樹航空宇宙実験場にて実施し、30km 以上の高高度での 3 時間を含む計 6 時間という当初の計画通りのフライトを実現した。このフライトの全般に亘って測定器は動作し、その結果、のべ 100 万事象を超えるデータを取得した。これにより、技術実証試験の 3 つの主目標であった、GAPS 測定器要素が気球の実飛翔環境下で期待通りに動作することの確認、冷却系の動作確認と熱データの取得、飛翔環境下でのバックグラウンドデータ取得、をいずれも達成し、実験は成功した。GAPS のような検出手法を用いた測定器や GAPS 熱制御系への採用を検討している自励振動ヒートパイプが飛翔環境下で動作したのは、いずれも世界に先駆けての成果である。

平成 25 年度は、これまでの研究成果をさらに発展させ、GAPS 測定器の詳細設計や要素技術の改良を進めた。前 24 年度に実施したプロトタイプ気球実験のデータ解析をより詳細に行い、測定器性能や環境バックグラウンドへの理解を深めた。そのほか実験室レベルでの各種実験データや計算機シミュレーションも交えて、測定器設計の詳細検討を一層進めた。GAPS 熱制御系への採用を検討している自励振動ヒートパイプの更なる改良に成功するなど、要素技術開発も一層進めた。

以上により GAPS 測定器の実機的设计・開発・製作に向けた礎を築いた。

得られた成果は順次、学会や学術論文にて発表した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

(雑誌論文)(計 10 件)

T.Aramaki, S.E.Boggs, P.von Doetinchem, H.Fuke, C.J.Hailey, S.A.I.Mognet, R.A.Ong, K.M.Perez, J.Zweerink, "Potential for Precision Measurement of Low-Energy Antiprotons with GAPS for Dark Matter and Primordial Black Hole Physics", *Astropart. Phys.* (in press), 査読有, 10.1016/j.astropartphys.2014.03.011
H.Fuke, R.A.Ong, T.Aramaki, N.Bando, S.E.Boggs, P.v.Doetinchem, F.H.Gahbauer, C.J.Hailey, J.E.Koglin, N.Madden, S.A.I.Mognet, K.Mori, S.Okazaki, K.M.Perez, T.Yoshida, J.Zweerink, "The pGAPS experiment: an engineering balloon flight of prototype GAPS", *Adv. Space Res.* 53 (2014) 1432-1437. 査読有, 10.1016/j.asr.2013.06.026
P.von Doetinchem, T.Aramaki, N.Bando, S.E.Boggs, H.Fuke, F.H.Gahbauer, C.J.Hailey, J.E.Koglin, S.A.I.Mognet, N.Madden, S.Okazaki, R.A.Ong, K.M.Perez, T.Yoshida, J.Zweerink, "The flight of the GAPS prototype experiment", *AstroPart. Phys.* 54 (2014) 93-109. 査読有, 10.1016/j.astropartphys.2013.11.009
S.A.I.Mognet, T.Aramaki, N.Bando, S.E.Boggs, P.vonDoetinchem, H.Fuke, F.H.Gahbauer, C.J.Hailey, J.E.Koglin, N.Madden, K.Mori, S.Okazaki, R.A.Ong, K.M.Perez, G.Tajiri, T.Yoshida, J.Zweerink, "The prototype GAPS (pGAPS) experiment", *Nucl. Instr. and Methods A* 735 (2014) 24-38. 査読有, 10.1016/j.nima.2013.08.030
C.J.Hailey, T.Aramaki, S.E.Boggs, P.v.Doetinchem, H.Fuke, F.Gahbauer, J.E.Koglin, N.Madden, S.A.I.Mognet, R.Ong, T.Yoshida, T.Zhang and J.A.Zweerink, "Antideuteron based dark matter search with GAPS: Current progress and future prospects", *Adv. Space Res.* 51 (2013) 290-296. 査読有, 10.1016/j.asr.2011.04.025
T.Aramaki, S.E.Boggs, W.W.Craig, H.Fuke, F.Gahbauer, C.J.Hailey, J.E.Koglin, N.Madden, K.Mori, R.A.Ong, and T.Yoshida, "Antideuterons as an indirect dark matter signature: Si(Li) detector

development and a GAPS balloon mission", Adv. Space Res. 46 (2010) 1349-1353. 査読有, 10.1016/j.asr.2010.06.036

[学会発表](計 46 件)

福家英之, 岡崎峻, 宮崎芳郎, 小川博之, 山本未知彦, 河内明子, 松宮宏明, 井上剛良,

"宇宙線反粒子探索計画 GAPS の冷却機構の開発",

日本物理学会第 69 回年次大会,

28aTS-10, 2014, 3/27-3/30, 東海大.

Shun Okazaki, Hideyuki Fuke, Hiroyuki Ogawa, Yoshiro Miyazaki,

"Development of Meter-scale O-shaped and U-shaped Oscillating Heat Pipes for GAPS",

2014 IEEE Aerospace Conf., 8.1009,

2014 3/1-3/8, Montana.

福家英之, 坂東信尚, 小川博之, 岡崎峻, 柴野靖子, 莊司泰弘, 吉田哲也,

河内明子, 中村史彦, 小池貴久, 宮崎芳郎, 荒牧嗣夫, F.Gahbauer,

C.J.Hailey, J.Koglin, N.Madden, 森嘉野, K.Perez, D.Stefanik, G.Tajiri,

S.Boggs, J.Hoberman, P.v.Doetinchem, F.Christensen, W.W.Craig, R.Fabris,

K.P.Ziock, I.Mognet, R.Ong,

J.Zweerink,

"GAPS プロトタイプ気球実験データ解析", 第 14 回宇宙科学シンポジウム,

P2-42, 2014 1/9-1/10, JAXA/ISAS.

KERSTIN PEREZ, TSUGUO ARAMAKI,

NOBUTAKA BANDO, STEVEN BOGGS, PHILIP VON DOETINCHEM, HIDEYUKI FUKE,

FLORIAN GAHBAUER, CHARLES HAILEY,

JASON KOGLIN, NORM MADDEN, S. A. ISAAC MOGNET, KAYA MORI, SHUN OKAZAKI, RENE ONG, GORDON TAJIRI, TETSUYA YOSHIDA,

JEFFREY ZWEERINK,

"The GAPS Experiment: Hunting for Dark Matter with Antideuterons",

33rd International Cosmic Ray Conf., icrc2013-0648, 2013 Jul./2-Jul./9,

Rio de Janeiro.

福家英之, 荒牧嗣夫, 坂東信尚, S.Boggs, F.Christensen, W.W.Craig, R.Fabris,

F.Gahbauer, C.J.Hailey, J.Hoberman, 河内明子, J.Koglin, 小池貴久, N.

Madden, 宮崎芳郎, I.Mognet, 森嘉野, 中村史彦, 小川博之, 岡崎峻, R.Ong,

K.Perez, 柴野靖子, 莊司泰弘, D.

Stefanik, G.Tajiri, P.von Doetinchem, 吉田哲也, K.P.Ziock, J.Zweerink,

"宇宙線反粒子探索計画 GAPS のプロトタイプ気球実験フライト報告",

日本物理学会第 68 回年次大会,

29aBF-13, 2013 3/29, 広島大学東広島キャンパス.

福家英之, 坂東信尚, 小川博之, 岡崎

峻, 柴野靖子, 莊司泰弘, 吉田哲也,

荒牧嗣夫, F.Gahbauer, C.J.Hailey,

J.Koglin, N.Madden, 森嘉野, K.Perez,

D.Stefanik, G.Tajiri, S.Boggs,

J.Hoberman, P.v.Doetinchem,

F.Christensen, W.W.Craig, R.Fabris,

K.P.Ziock, 河内明子, 中村史彦, 小池

貴久, 宮崎芳郎, I.Mognet, R.Ong,

T.Zhang, J.Zweerink,

"GAPS プロトタイプ気球実験「pGAPS」フライト報告",

第 13 回宇宙科学シンポジウム, P4-023, 2013 1/8-1/9, JAXA/ISAS.

岡崎峻, 宮崎芳郎, 小川博之, 福家英之,

"pGAPS 搭載 U 字型 OHP のフライト実験報告",

第 13 回宇宙科学シンポジウム, P4-024, 2013 1/8-1/9, JAXA/ISAS.

坂東信尚, 福家英之, 莊司泰弘,

P.v.Doetinchem, I.Mognet, C.J.Hailey, 中村史彦,

"pGAPS 気球実験における姿勢制御システムの概要と実験結果",

第 13 回宇宙科学シンポジウム, P4-025, 2013 1/8-1/9, JAXA/ISAS.

Hideyuki Fuke, Tsuguo Aramaki,

Nobutaka Bando, Steven E. Boggs, Finn E. Christensen, William W. Craig,

Philip von Doetinchem, Lorenzo Fabris, Florian H. Gahbauer, Charles J. Hailey,

Jason E. Koglin, Takahisa Koike, Norm Madden, Yoshiro Miyazaki, Isaac

Mognet, Kaya Mori, Hiroyuki Ogawa,

Shun Okazaki, Takuma Okubo, Rene A.

Ong, Kerstin Perez, Yasuhiro Shoji,

Gordon Tajiri, Tetsuya Yoshida, Klaus

P. Ziock, Jeffrey Zweerink

"The GAPS project: An indirect search for dark matter using antideuterons",

39th COSPAR Scientific Assembly,

E1.15-0042-12, 2012 Jul./18, Mysore.

Hideyuki Fuke, Shun Okazaki, Takuma

Okubo, Yoshiro Miyazaki, Hiroyuki

Ogawa,

"Development of an Oscillating Heat Pipe System for GAPS",

39th COSPAR Scientific Assembly,

PSB.1.0012-12, 2012 Jul./18, Mysore

S.Okazaki, H.Fuke, H.Ogawa, T.Okubo, Y.Miyazaki,

"Development of a meter-scale

U-shaped Oscillating Heat Pipe for GAPS",

AIAA 42nd Intl. Conf. on Environmental Systems, 2012-3499, 2012 Jul./15, San

Diego.

福家英之, 坂東信尚, 小川博之, 岡崎

峻, 莊司泰弘, 吉田哲也, 荒牧嗣夫,

F.Gahbauer, C.J.Hailey, J.Koglin,

N.Madden, 森嘉野, K.Perez, G.Tajiri, S.Boggs, J.Hoberman, P.v.Doetinchem, F.Christensen, W.W.Craig, R.Fabris, K.P.Ziock, 河合宏紀, 宮崎芳郎, 大久保卓磨, 小池貴久, I.Mognet, R.Ong, T.Zhang, J.Zweeerink, 高田淳史, "宇宙線反粒子探索計画 GAPS 全体報告", 第 12 回宇宙科学シンポジウム, P4-481, 2012, 1 月, JAXA/ISAS.

福家英之, 荒牧嗣夫, 坂東信尚, S.Boggs, F.Christensen, W.W.Craig, P.v.Doetinchem, R.Fabris, F.Gahbauer, C.J.Hailey, J.Koglin, 小池貴久, N.Madden, 宮崎芳郎, I.Mognet, 森嘉野, 小川博之, 岡崎峻, R.Ong, 莊司泰弘, G.Tajiri, 高田淳史, 吉田哲也, T.Zhang, K.P.Ziock, J.Zweeerink, "宇宙線反粒子探索計画 GAPS のプロトタイプ気球実験の現状報告", 日本物理学会 2011 年秋季大会, 16aSY-1, 2011, 9 月, 弘前大学.

福家英之, 荒牧嗣夫, 坂東信尚, S.Boggs, F.Christensen, W.W.Craig, P.v.Doetinchem, R.Fabris, F.Gahbauer, C.J.Hailey, J.Koglin, 小池貴久, N.Madden, 宮崎芳郎, I.Mognet, 森嘉野, 小川博之, 岡崎峻, R.Ong, 莊司泰弘, G.Tajiri, 高田淳史, 吉田哲也, T.Zhang, K.P.Ziock, J.Zweeerink, "宇宙線反粒子探索計画 GAPS のプロトタイプ気球実験計画", 日本物理学会 第 66 回年次大会, 28aGR-7, 2011, 3 月, 新潟大学五十嵐キャンパス

福家英之, 坂東信尚, 小川博之, 岡崎峻, 莊司泰弘, 吉田哲也, 荒牧嗣夫, F.Gahbauer, C.J.Hailey, J.Koglin, N.Madden, 森嘉野, G.Tajiri, S.Boggs, P.v.Doetinchem, F.Christensen, W.W.Craig, R.Fabris, K.P.Ziock, 小池貴久, 宮崎芳郎, I.Mognet, R.Ong, T.Zhang, J.Zweeerink, 高田淳史, "宇宙線反粒子探索計画 GAPS の現状とプロトタイプ気球実験計画", 第 11 回宇宙科学シンポジウム, P3-211, 2011, 1 月, JAXA/ISAS.

Hideyuki Fuke, Tsuguo Aramaki, Nobutaka Bando, Steven E. Boggs, Finn E. Christensen, William W. Craig, Philip von Doetinchem, Lorenzo Fabris, Florian H. Gahbauer, Charles J. Hailey, Jason E. Koglin, Norm Madden, Isaac Mognet, Kaya Mori, Rene A. Ong, Atsushi Takada, Tetsuya Yoshida, Tracy Zhang, Klaus P. Ziock, Jeffrey Zweering, "A prototype flight planned for the GAPS project", 38th COSPAR Scientific Assembly, PSB1-0053-10, 2010, July, Bremen.

C.J.Hailey, T.Aramaki, S.E.Boggs, P.v.Doetinchem, H.Fuke, F.Gahbauer, J.E.Koglin, N.Madden, S.A.I.Mognet, R.Ong, T.Yoshida, T.Zhang, J.A.Zweeerink, "Antideuteron-based Dark Matter Search with GAPS: Current Progress and Future Prospects", 38th COSPAR Scientific Assembly, E18-0007-10, 2010 July, Bremen.

P.v.Doetinchem, S.Boggs, T.Aramaki, C.Hailey, J.Koglin, N.Madden, K.Mori, F.Gahbauer, H.Fuke, T.Yoshida, W.Craig, I.Mognet, R.Ong, T.Zhang, J.Zweeerink, "The General Antiparticle Spectrometer (GAPS) - Hunt for dark matter using low energy antideuterons", Identificatiton of Dark Matter, 2010 July, Montpellier.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福家 英之 (FUKE, Hideyuki)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号: 10392820

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

吉田 哲也 (YOSHIDA, Tetsuya)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号: 50222394

高田 淳史 (TAKADA, Atsushi)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号: 90531468

坂東 信尚 (BANDO, Nobutaka)

宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号: 10415896

小池 貴久 (KOIKE, Takahisa)

大阪電気通信大学・工学部・非常勤講師

研究者番号: 20391948