

研究種目：若手研究 (B)  
研究期間：2008 ～ 2009  
課題番号：20740166  
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) A development of a cosmic-ray anti-particle detector using exotic atoms for the dark-matter search  
研究代表者  
福家 英之 (HIDEYUKI FUKE)  
独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究本部・助教  
研究者番号：10392820

研究成果の概要 (和文)：エキゾチック原子を用いた新しい検出原理に基づく反粒子宇宙線測定器の基本設計を検討し、気球実験による技術的検証を含む今後の本格的な測定器開発への道筋をつけた。

研究成果の概要 (英文)：A novel cosmic-ray anti-particle detector utilizing exotic-atom physics was conceptually designed as the first step to its full-scale development. A plan of the future development, including a technical balloon flight to verify the detector performance, was also considered and proposed.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
平成20年度	1,200,000	360,000	1,560,000
平成21年度	1,800,000	540,000	2,340,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

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 (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数多くの実験が実施または計画されている。しかし、探索感度の向上には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、いわゆる第三世代と呼ばれる将来計画でも CDM として理論的に許容される

パラメータ空間の4割程度しかカバーできない。一方、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、ガンマ線、陽電子、反陽子などで行われており、私自身も BESS(気球搭載型超伝導スペクトロメータによる宇宙線観測)実験で反陽子探索を進めてきた。しかし、これまでに観測されてきた宇宙線(反陽子を含む)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、BESSの大面積立

体角をしても観測統計量が不十分で、さらなる高感度の実験が切望されている。

一方、まだ宇宙線中に観測されたことはないものの、反重陽子が魅力的な可能性を持つことが 2000 年に Donato らによって理論的に指摘された。主要成分のエネルギー領域が運動学的理由により高エネルギー側にシフトするため、1 GeV 以下の低エネルギー領域では CDM 起源のスペクトルを、主要成分からのズレではなく単独で観測可能であるというものである。その後、多くの CDM モデルについて理論研究がなされ、Kaluza-Klein 粒子など extra dimension モデルから期待される CDM についても SUSY-CDM と同様に反重陽子によって検知できる可能性が明らかになった。これらの反重陽子スペクトルの理論計算の絶対値が従来抱えていた反重陽子の生成確率という理論的不定性も、加速器で反重陽子の生成例が近年増加したことで精度が向上している。

以上により、この特定のエネルギー領域にて反重陽子を高感度で探索すれば、従来の間接探索実験とは全く異なる特徴と意義を持つダークマター探索が可能となる。反重陽子は宇宙線中に観測されたことが皆無で、一例でも観測されればそのインパクトは大きい。もし一定の観測数によってエネルギースペクトルが得られれば、CDM モデルのパラメータに制限を付与できる。しかも、宇宙線反粒子によって探索される CDM のパラメータ領域は直接的な探索実験と相補的な領域であることが指摘されている。また、CDM の有力候補である超対称性粒子については CERN での LHC 計画で多くのことが明らかになる可能性がある。直接的探索のみならず LHC などの加速器実験の結果も反重陽子探索の結果と融合することで CDM のパラメータを時宜的にさらに絞ることができ、ダークマター物理に対する知見を一層深めることができる。

## 2. 研究の目的

本研究の最終的な目的は、宇宙線反粒子、とりわけ反重陽子の高感度観測によるダークマターの間接探索である。そして、その実現を可能にする反粒子測定器の基本設計の検討が本研究の直接的な目的である。

反重陽子の予想存在量は極微であるため、非常に高い感度での観測・探索が不可欠である。近年の反陽子や反重陽子などの宇宙線観測は、BESS も含め、主にマグネット型スペクトロメータが用いられてきた。しかし、飛翔体としての磁石の大型化には限界があり、観測時間も冷媒の搭載量などで制約を受ける。このため、AMS-02 計画をも大幅に上回るような感度向上の実現は非常に難しかった。

そこで、極微量の反重陽子の検知が可能な、従来の手法に代替する高感度な観測手法の導入が望まれており、本研究は、それを実現できる測定器の基礎開発を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、新しい測定原理に基づく測定器 GAPS の基本設計の検討を進めた。反粒子の同定手法としては、次のような全く新しい手法を導入した。低エネルギーの反陽子や反重陽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、ナノ秒の短い時間内に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  $\pi$  中間子群を発生する。この  $\pi$  中間子の生成数、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 線のエネルギーは捕捉反粒子の種類に依存することを利用し、これら X 線と  $\pi$  中間子を測定することで、粒子を同定する。捕捉前のエネルギーはターゲットの上流に time-of-flight カウンタを設置することで  $\beta$  と  $dE/dx$  から得られる。この手法はマグネット型に比べると測定器の大型化が容易で、低エネルギー反粒子に特化した高感度探索が可能となる。反重陽子の予想存在量に比べて宇宙線陽子は 10 桁程度も多いが、特性 X 線と  $\pi$  粒子のコインシデンスを取ることで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。

測定器の設計検討は、計算機による数値シミュレーションによる評価・検討と、各構成要素の評価ピースによる実験室レベルでの性能や環境耐性の評価、という方法により実施した。計算機シミュレーションは、測定器の要求条件として、高い分解能と大面積化が実現可能なこと、飛翔体実験として軽量であり冷媒が不要なこと、読み出しチャンネル数の抑制による省電力化が可能なこと、などを挙げ、特性 X 線や  $\pi$  中間子の検出機構の設計を進めた。実験室レベルでの評価試験は、測定器およびペイロードシステムの各サブシステムに関するサンプルピースを用いて、放射線源や熱真空チェンバなどを利用した動作試験や環境耐性試験を重ねた。ペイロードサブシステムとしては、特に、熱制御系、電源系、姿勢制御系などに関して重点を置いた。

## 4. 研究成果

平成 20 年度は、測定器の基本的な設計検討として、特に、計算機による数値シミュレーションを用いて測定器中の X 線検出器、荷電粒子用シンチレータ、ターゲット物質などに要求される性能条件を詳細に調べ、粒子測定器の構成、バックグラウンドリジェクション、探索感度、などに関する検討を行った。

これにより、測定器の粒子検出器部分に関する概念設計を固め、その妥当性を確認することができた。また、X線検出器や太陽電池電源システムに関する熱設計を行うとともに、放熱機構の候補材料を購入し、放射線源や熱真空チェンバを用いて、その基本特性を実験室レベルで評価検討した。

平成 21 年度は、前年度の研究結果も踏まえ、特に、気球搭載型 GAPS 測定器のペイロードシステムに関する検討を行った。ペイロードの姿勢制御に必要な絶対方位角センサを、GPS を活用して開発を進めた。GPS 信号の処理システムとそれを格納するハウジングの開発を、その他のサブシステムのエレクトロニクスとも共用できるように配慮しつつ行い、熱真空チェンバなどを用いて気球環境への耐性を実験室レベルで評価検討した。この他、ペイロード各サブシステムの技術的な評価試験としての気球実験を立案し、その実験内容の具体的な検討も進めた。

また、両年度とも、米国の共同研究者や国内の同分野研究者との研究打合せを行った。これにより、今後の研究の進め方に関する知見を獲得し、また、国内外の研究者との連携を深めることで今後の研究体制の構築・強化も可能とした。その他、技術評価試験として立案した気球実験の実施候補地の下見も行った。

以上により、反粒子宇宙線測定器 GAPS の基本設計を固めることができ、気球実験による技術的検証を含む今後の本格的な開発への道筋をつけることができた。この科研費が、この反粒子観測計画 GAPS に対して日本国内で得た最初の研究経費であり、これにより、日本での計画推進を開始することができた。

研究の内容や成果は学術雑誌、国際学会、国内学会にて発表した。

#### 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 2 件)

- ① H. Fuke, J. E. Koglin, T. Yoshida, T. Aramaki, W. W. Craig, L. Fabris, F. Gahbauer, C. J. Hailey, F. J. Jou, N. Madden, K. Mori, H. T. Yu and K. P. Ziock, “Current status and future plans for the General Antiparticle Spectrometer (GAPS)”, *Advances in Space Research*, 査読有, 41 (2008) 2056–2060
- ② J. E. Koglin, T. Aramaki, S. E. Boggs, W. W. Craig, H. Fuke, F. Gahbauer, C. J. Hailey, N. Madden, K. Mori, R. A. Ong, T. Yoshida, H. T. Yu and K. P. Ziock,

“Antideuterons as an Indirect Dark Matter Signature: Design and Preparation for a Balloon-borne GAPS Experiment”, *Journal of Physics (Conference Series)*, 査読無, 120 (2008) 042011

[学会発表] (計 5 件)

- ① Jason Koglin, Hideyuki Fuke, Tetsuya Yoshida, Steven Boggs, Tsuguo Aramaki, Rene Ong, Charles Hailey, Kaya Mori, William Craig, “ANTIDEUTERONS AS AN INDIRECT DARK MATTER SIGNATURE: SI(LI) DETECTOR DEVELOPMENT FOR A GAPS BALLOON MISSION”, 37th COSPAR Scientific Assembly, 2008 年 7 月 16 日, カナダ・モントリオール
- ② 福家英之, 荒牧嗣夫, S. E. Boggs, F. Christensen, W. W. Craig, L. Fabris, F. Gahbauer, J. E. Koglin, C. J. Hailey, N. Madden, K. Mori, R. A. Ong, 吉田哲也, H. T. Yu, K. P. Ziock, 「GAPS 計画: エキゾチック原子を用いた宇宙線反粒子探索の計画概要」, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 30 日, 東京都豊島区
- ③ 荒牧嗣夫, S. E. Boggs, F. Christensen, W. W. Craig, L. Fabris, F. Gahbauer, 福家英之, J. E. Koglin, C. J. Hailey, N. Madden, K. Mori, R. A. Ong, 吉田哲也, H. T. Yu, K. P. Ziock, 「GAPS 測定器の設計」, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月 30 日, 東京都豊島区
- ④ 福家英之, 高田淳史, 坂東信尚, 吉田哲也, C. J. Hailey, 荒牧嗣夫, 森嘉野, W. W. Craig, K. P. Ziock, S. Boggs, R. Ong, F. Gahbauer, F. Christensen 他 GAPS Collaboration, 「宇宙線反粒子探索計画 GAPS の現状と計画」, 第 10 回宇宙科学シンポジウム, 2010 年 1 月 8 日, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部 (相模原市)
- ⑤ 福家英之, 荒牧嗣夫, 坂東信尚, S. E. Boggs, F. Christensen, W. W. Craig, L. Fabris, F. Gahbauer, C. J. Hailey, J. E. Koglin, N. Madden, I. Mognet, 森嘉野, R. A. Ong, 高田淳史, 吉田哲也, T. Zhang, K. P. Ziock, J. Zweering, 「宇宙線反粒子探索計画 GAPS の現状と計画」, 日本物理学会 第 65 回年次大会, 2010 年 3 月 23 日, 岡山大学 津島キャンパス (岡山市)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔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 (HIDEYUKI FUKE)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙  
科学研究本部・助教

研究者番号：10392820

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：