

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26707015

研究課題名(和文) 先進技術とエキゾチック原子法の融合による超高感度反粒子宇宙線測定器の開発

研究課題名(英文) Development of a highly sensitive cosmic-ray anti-particle spectrometer by applying advanced technologies and exotic-atom physics

研究代表者

福家 英之 (FUKE, HIDEYUKI)

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・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

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。それに向けて本研究では、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、気球実験用の測定器システムとして最適化するべく、進めた。特に、自励振動ヒートパイプという先端技術を取り込むとともに、各検出器の設計や製法の改良に成功した。これらの成果により、GAPS計画を実施フェーズに移行させるための中核技術や知見を獲得するという目標を達成した。

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 early-universe physics discipline, such as dark-matter physics, through unexplored highly sensitive observation of cosmic-ray antiparticles including undiscovered antideuterons.

To boost the GAPS project toward its Antarctic balloon flights, designs of both whole payload and subsystems were improved and optimized. To make the system more robust and efficient, a novel thermal engineering technique of the oscillating heat pipe was applied to the cooling system of the GAPS detectors. The instrument designs were upgraded, too. As the result, key technologies and essential knowledges to realize GAPS were successfully achieved.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 暗黒物質 反粒子 反物質 エキゾチック原子 測定器開発 気球実験 先端機能デバイス

## 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 1 GeV 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 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  $\Lambda p$  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  $\Lambda p$  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。

平成 20 年度~21 年度に若手研究(B)として GAPS 測定器の基礎概念検討を重ね、国内の

研究チームも立ち上げた。続く平成 22 年度~25 年度には、基盤研究(B)として、GAPS 測定器の各構成要素の基本設計検討を進めるとともに、技術実証を行った。測定器各要素のプロトタイプから成るペイロードを米国の研究協力者とともに日米共同で構築した。平成 24 年度には、プロトタイプペイロードを JAXA の大気球に搭載して北海道大樹町で気球実験を実施し、飛翔環境下での各コンポーネントの動作実証に成功した。

## 2. 研究の目的

本研究は、GAPS 計画においてこれまで重ねてきた基礎開発に先端技術を融合することで、システムとしての測定器性能や効率性を向上させつつ、計画を実機製作フェーズに高めることを目的とする。

GAPS の最終的な目的は、宇宙線中に微量に含まれている反粒子(特に未発見の反重陽子)の高感度探索を通じて CDM 等の初期宇宙物理の課題に迫ることを最終目的としている。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 CDM 候補の対消滅等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、GAPS は、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、という従来になりオリジナルな粒子識別手法を採用している。

GAPS 測定器は Si(Li)型半導体検出器とプラスチックシンチレーションカウンタ群(TOF)から構成される。Si(Li)検出器群は、掌サイズの Si(Li)検出器を大面積に敷き詰めかつ積層したものであり、減速器、depth sensing、ターゲット、エキゾチック原子崩壊起源の特性 X 線のエネルギー測定、それに引き続く核子対消滅で生成される  $\Lambda p$  の飛跡検出、の役割を兼ねる。TOF はパドル状の内外二層配置とし、トリガー生成、飛行時間(time-of-flight)測定、エネルギー損失( $dE/dx$ )測定、veto 生成、内部から抜け出る  $\Lambda p$  の検知、を担う。

GAPS は反粒子観測に南極周回気球を用いる計画である。これにより、地磁気カットオフの影響を殆ど受けずに低エネルギー宇宙線を高統計で観測できる。NASA の長時間気球を用い、複数回のフライトを次期太陽活動極小期(2020 年以降)に実施する計画である。

平成 24 年度にフライト実証したプロトタイプは縮小モデルであり、そのままでは面積立体角が圧倒的に不足する(例えば Si(Li)検出器の搭載数は、南極本番で必要な 1000 個オーダーに対して 6 個だった)。プロトタイプをそのままスケールアップすると重量や電力も比例して増加し、気球実験としての許容限界に達しやすくなる。そこで、これまでに開発した個々の測定器要素の性能を

最大限に活かしつつ測定器システム全体をスケールアップできるよう、新しい技術の取り込みや測定器設計の最適化を図り、GAPSを実機製作フェーズに移行させることを目指した。

### 3. 研究の方法

前述の目的を達成するため、自励振動ヒートパイプ(Oscillating Heat Pipe = OHP)という熱工学技術を導入した。OHPは萌芽的・先進的な熱工学技術であり、物理測定器分野に取り入れられた前例は無い。OHPは熱源と放熱部との間を多数回往復する蛇行細管と管内に封入された気液二相流体から成る。特定の条件下では細管内の流体が蒸発・凝縮を繰り返しながら加熱部と放熱部間を自発的に振動し、温度を均一化する方向へと潜熱・顕熱による熱輸送が行われる。原理的には完全にパッシブで電源が不要なうえ、通常のヒートパイプよりも重力依存性が低く配管構造も単純という利点がある。従来のOHP研究は主に卓上レベル(ターン長30cm・平面状・常温)の基礎研究であった。

GAPS測定器の中核となるSi(Li)検出器は、要求エネルギー分解能確保のためには-35以下に冷却する必要がある。Si(Li)検出器のプレアンプ回路は、個々の局所的な発熱量は微小であるものの、搭載数が1000個オーダーであるため、発熱総量は100Wオーダーに達する。このように熱流束は小さく総量が大きい熱源をパッシブに冷却するにはOHP技術が適していると見込んだ。これまでのGAPS基本設計では、Si(Li)冷却法として、ポンプを用いた閉ループ単相流体方式を採用していた。しかし、この方式だとSi(Li)発熱量と同規模の電力をポンプの駆動に要するうえに、単相流体だと潜熱を利用できないために冷却効率がOHPほど良くなかった。Si(Li)の冷却にOHPを導入することで冷却効率や消費電力を劇的に向上させることができ、システムの軽量化も期待できる。これらにより、ペイロードシステムの設計マージンを確保・創出でき、本研究の目的を達成できると見込める。

ただし、約2m立方の広い空間内に分布するSi(Li)検出器に対処するため、GAPS用OHPには従来よりも1桁以上大きい数メートル級のサイズが求められる。また、Si(Li)検出器の視野を遮るOHP配管を最小限に抑制したり、Si(Li)発熱を気球飛翔環境から宇宙空間へと輻射排熱するための放熱板(ペイロードの側壁に設置)へと熱輸送したりするためには、従来のOHPとは異なり、3次元的で複雑な配管経路が求められる。動作温度範囲も常温だけでなく、-35前後の低温環境でも動作する必要がある。

そこで、以前に行い成果を挙げていたOHP技術に関する様々な基礎実験結果を基盤としつつ発展させ、実機スケールのOHPを実際に設計・開発した。大型恒温槽内で温度環境

を模擬し、ヒータでSi(Li)の局所的な熱源を模擬することで、動作試験を繰り返し実施し、OHPとしての性能を評価した。OHP内に封じる作動流体として複数の物質を試験したり、OHP配管の管径や逆止弁等の要素部品の設計パラメータの最適化を図ったりした。OHPは新規技術であるがゆえに計算機シミュレーションが発展途上であるため、シミュレーションコードの開発も進めた。気球実験に搭載して実用化するためにはシステムとしての堅牢さも求められることから、ポンプやヒータ等のアクティブな手法と組み合わせることでOHPの動作条件範囲を拡大できることも検証した。

なお、OHP冷却システムのみならず、GAPSの他の構成要素に関しても実験と計算機シミュレーションの双方から開発を進め、GAPS測定器の詳細設計の最適化を進めた。

### 4. 研究成果

平成26年度は、Si(Li)検出器用のOHP冷却システムの技術開発を進めた。実機と同程度の大きさを持ち、ターン数をスケールダウンしたプロトタイプモデルを開発した。OHPの内部流動の可視化を実現し、温度や圧力のデータに可視化の結果を融合して詳細に分析し、OHPの挙動に対する理解を深めた。

Si(Li)検出器そのものに関しても、実機に向けた量産化法の開発に着手し、研究協力者の拡充やメーカーとの調整を進めた。

GAPSのもう一方の主要測定器であるプラスチックシンチレータ型TOFカウンタに関しては、GEANT4シミュレーションを用いた測定器形状設計の最適化を進めた。

また、GAPSのホームページを開設し、以降、継続的に情報発信に務めた。

平成27年度は、前年度に引き続き、OHP技術の開発を進めた。前年度に実施した実機スケールの大型OHPプロトタイプモデルによる試験を発展させるべく、大きさだけでなくターン数や配管構成も実機を模したOHPエンジニアリングモデルを開発し、評価試験を重ねた。とりわけ、不均一な冷却が生じうること、および、その問題への対策を実験的に見出した。シミュレーションコードの改良によってこの温度不均一を再現することにも成功し、OHPの挙動をより深く理解するとともに、GAPSへのOHPの適正を示した。

Si(Li)検出器そのものに関しても、前年度に着手した量産化法の開発を、産業界の知見も融合してさらに進めた。

TOFカウンタに関しては、前年度に行ったシミュレーションを発展させつつ、実際にTOFカウンタモデルを製作・評価し、シミュレーションとの相互フィードバックをかけることで、測定器形状設計の最適化を進めた。

平成28年度は、前年度に開発した大型OHP

エンジニアリングモデルを活用・発展し、冷却の均一性を予見し向上させるための試験を重ね、OHP の実用化に向けた重要かつ系統的なデータを蓄積した。これにより、GAPS 用 OHP に求められる要求性能を満たす見通しを得るという成果を挙げた。本研究で獲得した OHP 技術は、GAPS のみならず他用途にも適用可能なものである。物理測定器分野のみならず建築など幅広い分野への応用も期待され、実際に工業分野からの引き合いも受けている。

Si(Li)検出器に関しては、前年度に引き続いて量産化法の開発を進め、試作と評価試験を重ねた。これにより、検出器性能を維持しつつ大幅なコストカットを実現するなど、GAPS 実現に向けた実用的な成果も挙げた。

TOF カウンタに関しては、GEANT4 シミュレーションコードのさらなる改良を進めた。さらに、それを GAPS 測定器全体のシミュレーションに適用することで、GAPS 測定器全体の設計最適化を進めた。

以上により、GAPS 実験計画を実施フェーズに移行させるための中核技術や知見を獲得した。

本研究で獲得した成果を踏まえ、GAPS 実験の実実施計画書を立案した。日本国内のチーム体制を段階的に強化したほか、米国に加えてイタリアとも協力体制を固めるなど、実施フェーズに移行する実務的準備も進めた。

本研究で得られた成果は適宜、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 6 件)

H.Fuke, S.Okazaki, H.Ogawa, and Y.Miyazaki,

“Balloon Flight Demonstration of an Oscillating Heat Pipe”,  
J. of Astronomical Instrumentation 6(2) (2017) 1740006; 査読有;

doi: 10.1142/S2251171717400062

Hideyuki FUKU, Takumi ABE, Takuro DAIMARU, et al. (23人中1番目),

“Development of a Cooling System for GAPS using Oscillating Heat Pipe”,  
Transactions of JSASS (The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences), Aerospace Technology Japan 14 (2016) No. ists30 Pi17-Pi26; 査読有;

doi: 10.2322/tastj.14.Pi\_17

T.Aramaki, S.Boggs, H.Fuke, et al. (27人中8番目アルファベット順),

“Review of the theoretical and experimental status of dark matter identification with cosmic-ray antideuterons”,

Phys. Reports 618 (2016) 1-37; 査読有;  
doi: 10.1016/j.physrep.2016.01.002

T.Aramaki, C.J.Hailey, H.Fuke, et al. (9人中5番目),

“Antideuteron Sensitivity for the GAPS Experiment”,

Astropart. Phys. 74 (2016) 6-13; 査読有;

doi: 10.1016/j.astropartphys.2015.09.001

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

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

J. of Astronomical Instrumentation 3(2) (2014) 1440004; 査読有;

doi: 10.1142/S2251171714400042

T.Aramaki, S.E.Boggs, H.Fuke, et al. (9人中4番目),

“Potential for Precision Measurement of Low-Energy Antiprotons with GAPS for Dark Matter and Primordial Black Hole Physics”,

Astropart. Phys. 59 (2014) 12-17; 査読有;

doi: 10.1016/j.astropartphys.2014.03.011

[学会発表](計 48 件)

福家英之 他,

「宇宙線反粒子探索計画 GAPS の進捗と展望」,

日本物理学会 第72回年次大会, 大阪大学, 2017年3月18日.

福家英之 他,

「南極周回気球による宇宙線反粒子探索計画 GAPS」,

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所宇宙科学シンポジウム(第17回), 宇宙科学研究所, 2017年1月6日.

H.Fuke et al.,

“Development of a Cooling System for GAPS using Oscillating Heat Pipe”,  
Scientific Ballooning Technologies Workshop 2016, 米国 Minneapolis, 10th/May/2016.

H.Fuke,

“GAPS antiproton and antideuteron measurement for indirect dark matter search”,

LEAP (Low Energy Antiproton Physics) 2016, 金沢歌劇座, 7th/Mar./2016.

福家英之 他,

「南極周回気球による宇宙線反粒子探索計画 GAPS の近況報告」,

日本物理学会 第71回年次大会, 東北学院大学, 2016年3月19日.

福家英之 他,

「南極周回気球による宇宙線反粒子探索計画 GAPS」,

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所宇

宙科学シンポジウム (第16回), 宇宙科学  
研究所, 2016年1月7日.

福家英之 他,

「南極周回気球による宇宙線反粒子探索  
計画 GAPS の現状報告」

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所大  
気球シンポジウム (平成27年度), 宇宙科  
学研究所, 2015年11月6日.

Hideyuki FUKUE et al.,

“Development of an Oscillating Heat  
Pipe Cooling System for GAPS”,  
30th ISTS (International Symposium on  
Space Technology and Science), 神戸国  
際会議場, 10th/Jul./2015.

福家英之 他,

「南極周回気球による宇宙線反粒子探索  
計画 GAPS の現状報告」,

日本物理学会 第70回年次大会, 早稲田大  
学, 2015年3月23日.

福家英之 他,

「南極周回気球による宇宙線反粒子探索  
計画 GAPS」,

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所宇  
宙科学シンポジウム (第15回), 宇宙科学  
研究所, 2015年1月7日.

福家英之 他,

「南極周回気球による宇宙線反粒子探索  
計画 GAPS」,

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所大  
気球シンポジウム (平成26年度), 宇宙科  
学研究所, 2014年11月6日.

他 37 件

〔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

GAPS 実験計画ホームページ

<http://gaps.isas.jaxa.jp/>

## 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

### (4) 研究協力者