

# 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

JAXA/ISAS	福家 英之, 野々村 拓, 小川 博之, 岡崎 峻, 崎本 一博, 吉田 哲也
長岡技科大	浅尾 義士, 高橋 克征, 山田 昇
東北大	大丸 拓郎, 永井 大樹
東工大	郷田 晃央, 井上 剛良
青山学院大	橋本 岳, 蓑島 温志, 和田 拓也, 吉田 篤正
東海大	井上 拓哉, 磯貝 亮, 河内 明子, 木俣 響, 高橋 俊
信州大	加藤 千尋, 宗像 一起
大阪電通大	小池 貴久
神奈川大	清水 雄輝
Columbia Univ.	C.J. Hailey, 荒牧 嗣夫, F. Gahbauer, N. Madden, 森 嘉野
UC Berkeley	S. Boggs, J. Hoberman
LLNL	W.W. Craig
Univ. Hawaii	P.v. Doetinchem
Oak Ridge NL	R. Fabris, K.P. Ziock
UCLA	S.A.I. Mognet, R. Ong, J. Zweerink
Haverford College	K. Perez

## 1. 概要

GAPS 計画 (General Anti-Particle Spectrometer) の近況を報告する。GAPS は宇宙線反粒子の高感度観測を通じたダークマター探索を主目的とする日米国際共同実験計画である。2010 年代末以降の次期太陽活動にて南極周回気球飛行を重ねて長時間観測を実現することを当面の目標としている。2012 年に大樹町でのプロトタイプを用いた気球実験によって GAPS 測定器の基本動作の実証に成功したのに引き続き、南極用実機開発に向けて各測定器構成要素のさらなる技術開発や経費獲得を目指して計画を推進している。

## 2. GAPS の目指す物理

GAPS は、ダークマターの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) 探索における未開拓のプロープとして未発見の宇宙線反重陽子に着目し、その高感度探索によってダークマターの間接探索を行う [1]。宇宙線反重陽子は、1 GeV/n 以下の低運動エネルギー領域において物理バックグラウンド (宇宙線二次起源) の流束がその生成過程の運動学によって抑制される一方で、一次起源 (CDM 起源など) のスペクトラムはソフトだと予想されることから、低エネルギー領域では一次起源を単独で検知し得る (図 1) [2]。

反重陽子の予想存在量は極微なため、高感度な探索が必要である。反重陽子に対する唯一の探索上限値 (BESS) [3] を 2 桁程度以上上回る高感度での反重陽子探索を GAPS では目指している (図 1) [4]。

また、GAPS は低エネルギー反陽子もかつてない高統計で観測でき、ダークマターモデルの検証に対して重要なデータを提供できる [5]。

## 3. GAPS の反粒子検出原理

GAPS は、従来の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) の向上が可能な反粒子宇宙線の観測手法として、エキゾチック原子を用いた新しい手法を導入する [6]。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

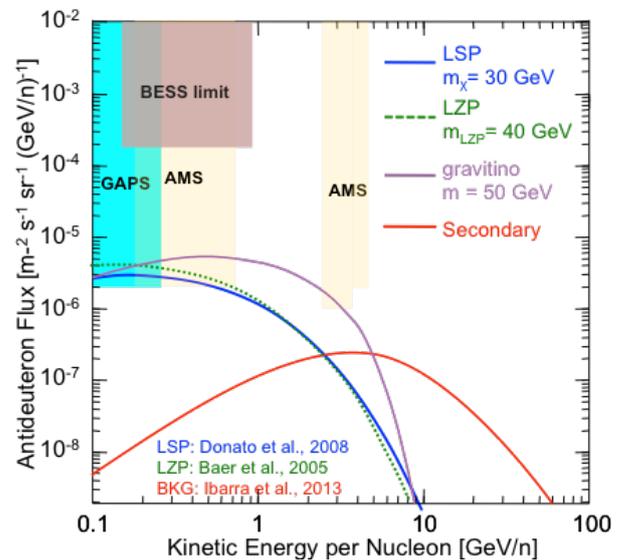


図 1. GAPS が目指す反重陽子の探索感度(南極気球気球によるのべ 105 日間の場合), および、様々な CDM モデル起源および主要起源(宇宙線二次起源)から予測される反重陽子のエネルギースペクトル。

的に落ち込み、最後は原子核と核子対消滅して $\pi$ 中間子や陽子などを発生する。この $\pi/p$ の生成数およびカスケード崩壊の準位に対応して放出される特性 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、反粒子を同定する。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 $\beta$ と $dE/dx$ から得られるほか、反粒子の stopping depth からも推算できる。特性 X 線と $\pi/p$ 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ビームテスト（2004～2005 年）によって実証済みである[7]。

#### 4. GAPS 測定器の概要と南極周回気球観測

GAPS は南極周回気球による長時間観測を行う。極域の高空を飛翔することで、地磁気と大気の影響を殆ど受けずに低エネルギー宇宙線を直接観測できる。低エネルギー荷電宇宙線の観測には太陽活動極小期が適していることから、次期極小期の 2010 年代末以降に複数回の南極気球フライトの実現を目指す。大面積 GAPS 測定器を搭載してのべ 100 日間を飛翔できれば $10^{-6}$  [ $\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{GeV/n}^{-1}$ ]レベルの高流束感度に到達でき、有力なダークマターモデルの検証が可能となる（図 1）。

GAPS 測定器は Si(Li)型半導体検出器群とプラスチックシンチレーションカウンタ群から構成される（図 2）[8]。Si(Li)検出器は約 1.6 m $\times$ 1.6 m $\times$ 10 層（総ウエハ数は約 1350）に配置され、degrader、ターゲット、depth sensing、特性 X 線のエネルギー測定、 $\pi/p$  トラッカー、の役割を兼ねる。Si(Li)ターゲットからの反陽子と反重陽子の特性 X 線は約 3keV のエネルギー分解能で有意に識別できる。 $\pi/p$ は Si(Li)検出器群でトラックして運動学的トポロジーを解くことで同定できる（図 3）。「特性 X 線 1～2 本以上 +  $\pi/p$  5～6 個以上」によって反陽子と反重陽子を同定でき、なおかつ陽子などの宇宙線バックグラウンドを十分に排除できる見込みである。

Si(Li)検出器群の上方と周囲には両側読み出しのプラスチックシンチレーションカウンタ群をパドル状に配置し、トリガ生成、time-of-flight（時間分解能 1 nsec）や $dE/dx$ の測定、veto 生成、内部から抜け出る $\pi/p$ の検出、を行う。

Si(Li)検出器は、エネルギー分解能確保のため、内部発熱を測定器外壁に伝熱して輻射放熱することで $-35^{\circ}\text{C}$ に冷却する。夏季南極は白夜であるため、フライト中の測定器電力は太陽電池で賄う。測定器には 1 軸の姿勢制御（方位角制御）を施して太陽を追尾し、輻射放熱板を太陽と逆方向に、太陽電池を太陽方向に指向させる。GAPS 測定器の全重量は約 2 トン、全消費電力は約 2 kW を見込んでいる。

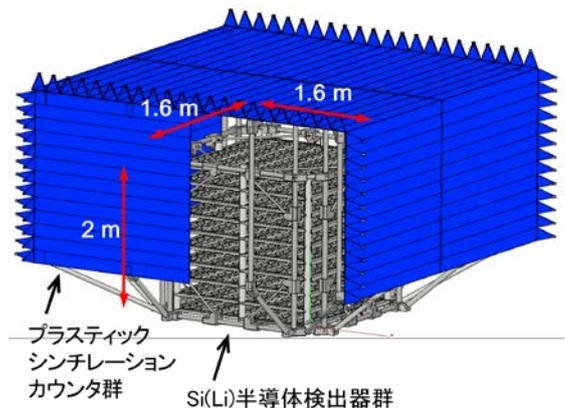


図 2. GAPS 測定器概念図

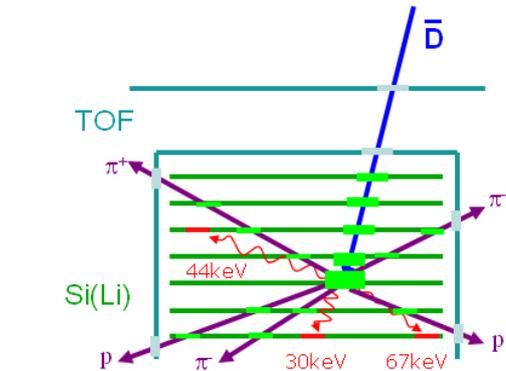


図 3. GAPS の反粒子同定法の概念図

#### 5. 大樹町での気球フライト pGAPS による技術実証

南極での科学観測に先立ち、気球の実飛翔環境下にて各測定器要素の基本動作を実証することを目的に、大樹での気球実験「pGAPS (prototype-GAPS)」を実施した[1, 9]。pGAPS は南極用測定器の各構成要素のスケールダウンプロトタイプから成るペイロードを飛翔させる技術試験であり、主に次の 3 項目を目的とした。① Si(Li)や TOF の測定器システムの気球フライト環境下での動作による、真空対策の実証やノイズレベルの確認。② Si(Li)の冷却システムの気球フライト環境下での動作実証。③ 気球フライト環境下でのインコヒーレントバックグラウンドレベルの測定。

pGAPS フライトは JAXA 大樹航空宇宙実験場にて 2012 年 6 月 3 日に実施された。フライトのほぼ全般に亘って pGAPS の測定器を動作させ、のべ 100 万事象を超えるデータを取得した。水平浮遊到達後にペイロードの方向制御が効かなくなり放熱面を所期の方角に向けられなくなるという不具合は発生したが、その他のシステムは概ね問題無く動作した。その結果、Si(Li)検出器や TOF カウンタはフライト全般を通じて安定して所期の性能を示した。また、TOF カウンタのトリガレートから算出した各高度・各 $\beta$ に対する宇宙粒子線全流束は、バックグラウンド宇宙線の大气伝播モデルと無矛盾であった。冷却

機構がフライト中に正常に動作していたことも確認された。以上により、各測定器が低ノイズで安定的な動作を示していること、冷却系が動作していること、温度データやバックグラウンドレートデータなどの熱設計やトリガ設計に係るデータを取得していることなど、事前に掲げた成功基準をいずれも達成したことが確認された[1, 10 – 12]。

## 6. 最近の進捗

### 6.1. Si(Li)検出器の量産化法の開発

Si(Li)検出器の基本性能は pGAPS 搭載したプロトタイプ (図 4b) 6 台により実証された。それを踏まえ、プロトタイプの性能を維持・向上させつつ南極フライト用の実機へとスケールアップするために、実機に必要な 1350 個の Si(Li)検出器の量産方法の確立を目指している。第一義的には製造コストの抑制が重要であり、そのためには、原材料費の圧縮、製造工程の簡略化・スピード化、歩留まりの向上、などが求められる。現在、主な改良点として、(A) シリコン素材の最適化、(B) リチウム蒸着やリチウムドリフトの均質化と高効率化、(C) セグメント等の加工法の最適化・簡素化、を目指している (図 4a)。実機用にはプロトタイプと同様の直径 4 インチのものが求められるが、それに先立ち直径 2 インチのものを試作し評価しているところである (図 4c)。

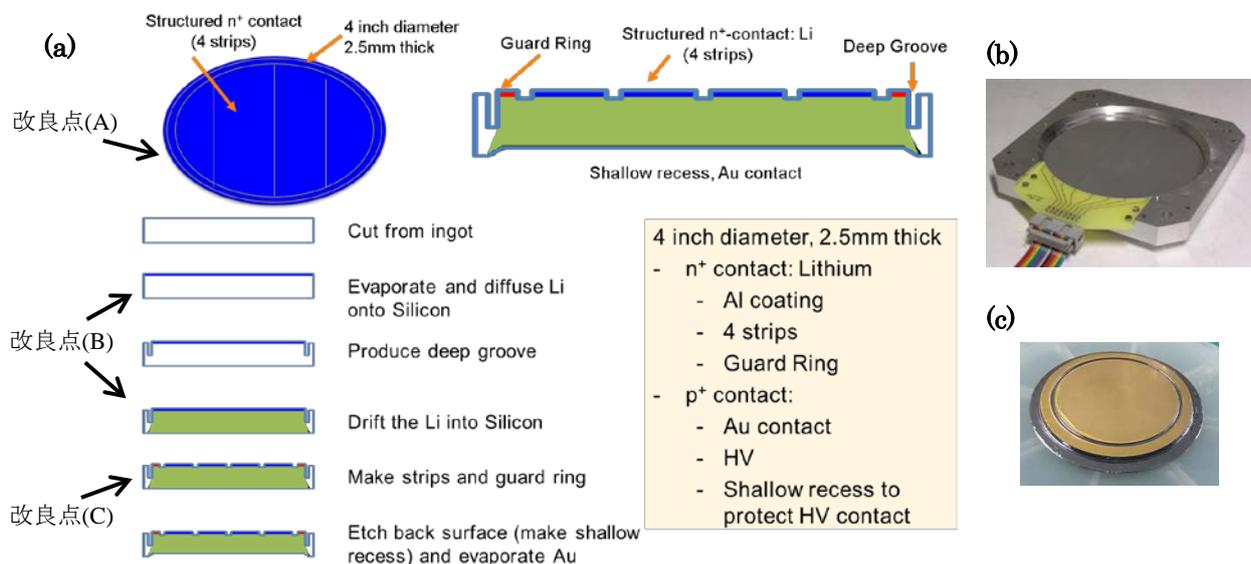


図 4. (a) Si(Li)検出器の外観や断面の概観図、製造手順における主な改良点、表裏電極の諸元。(b) プロトタイプ 4 インチ Si(Li)検出器。(c) 量産化法の開発過程にて試作した 2 インチの Si(Li)検出器。

### 6.2. TOF カウンタの設計最適化と量産化法の開発

TOF カウンタもまた、プロトタイプの性能を維持・向上させつつ量産化する方法を検討中である。プロトタイプを単純に量産して並べると測定器視野内のデッドスペースが数量に比例して生じてしまう。そのため、性能を維持しつつデッドスペースの最小化と有効視野の最大化を図るべく、実モデルによる評価と GEANT4 モンテカルロシミュレーションの双方のアプローチにより、シンチレータやライトガイドの形状設計や読み出し光センサの選定の最適化を目指している。また、量産時のテストベンチ環境の整備検討も進めている。

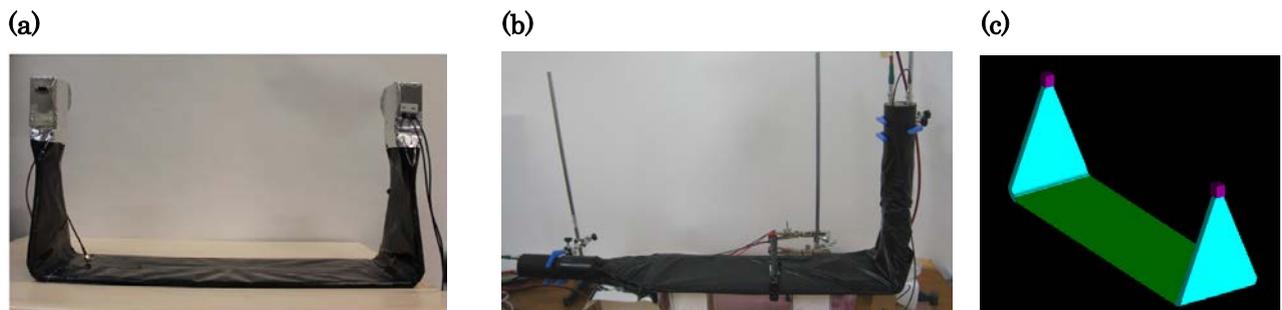


図 5. (a) TOF カウンタのプロトタイプ。(b) 設計改良に向けた評価モデルの例。(c) プロトタイプの GEANT4 モデル。

### 6.3. 自励振動ヒートパイプ (OHP) の開発

Si(Li)検出器を $-35^{\circ}\text{C}$ 程度に冷却するとしては、単相流体をポンプで強制対流させる手法が技術的には手堅いが、ポンプの消費電力が無視できないため、よりエコな手法として自励振動ヒートパイプ (Oscillating Heat Pipe = OHP) を用いた冷却機構の開発を進めている。OHPは低消費電力・抗重力・大熱輸送能力など多くの魅力を持つ先進的な熱工学技術だが、新規的ゆえに実用化への課題も残されている。GAPSで進めたこれまでの技術開発により、立体配管 OHP の動作実証、常温から $-50^{\circ}\text{C}$ までの広温度範囲での動作実証、pGAPSによるフライト実証、ターン長 6m の U 字型やループ長 8m の O 字型という大型 OHP の動作実証、大型 OHP の内部流動の可視化、OHP の主駆動力が重力の場合に関する定常状態の数値モデル化、高耐久逆止弁の開発、など世界初の成果を多く挙げてきた[13]。実用化に向けて OHP の動作条件の拡大や安定性の向上を図るべく、現在も開発を進めている。

### 6.4. 南極実験の実現に向けて

2014年6月、GAPSメンバーが発起人となり、第1回の宇宙線反重陽子ワークショップが米国にて開催された。反重陽子や反物質を共通の切り口として、宇宙線実験分野のみならず加速器実験や理論など幅広い分野から多くの講演発表があり、GAPS 実験実現への高い期待も多く寄せられた。ワークショップで討議された内容はレビュー論文にまとめられた[14]。

このようなコミュニティからの後押しも受け、南極実験の実機開発や実施に向けて経費獲得を目指しているところである。

### 謝辞

本研究の一部は科研費 (20740166, 22340073, 26707015), ISAS 理学委員会経費, NASA APRA Flight Program (NNX09AC13G, NNX09AC16G), NSF Award (1202958) を受けて実施しました。

### 参考文献

1. 例えば：福家英之 他, 大気球シンポジウム (H26 年度) isas14-sbs-002.
2. 例えば：F. Donato et al., Phys. Rev. D **62** (2000) 043003.
3. H. Fuke et al., Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 081101.
4. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. (in press), doi: 10.1016/j.astropartphys.2015.09.001.
5. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **59** (2014) 12-17.
6. K. Mori et al., Astrophys. J. **566** (2002) 604.
7. C.J. Hailey et al., Nucl. Instr. Meth. B **214** (2004) 122;  
C.J. Hailey et al., JCAP. **0601** (2006) 007.
8. H. Fuke et al., Adv. Space Res. **41** (2008) 2056;  
T. Aramaki et al. Adv. Space Res. **46** (2010) 1349;  
C.J. Hailey et al., Adv. Space Res. **51** (2013) 290.
9. 福家英之 他, 大気球シンポジウム (H23 年度) isas-11-sbs-016;  
福家英之 他, 大気球シンポジウム (H24 年度) isas-12-sbs-018.
10. 岡崎峻 他, 大気球シンポジウム (H23 年度) isas-11-sbs-017;  
岡崎峻 他, 大気球シンポジウム (H24 年度) isas-12-sbs-019;  
岡崎峻 他, 大気球シンポジウム (H25 年度) isas-13-sbs-003.
11. 坂東信尚 他, 大気球シンポジウム (H23 年度) isas-11-sbs-022;  
坂東信尚 他, 大気球シンポジウム (H24 年度) isas-12-sbs-006;  
坂東信尚 他, 日本航空宇宙学会論文集 航空宇宙技術 14 (2015) 59-65.
12. H. Fuke et al., Adv. Spa. Res. **53** (2014) 1432;  
S.A.I. Mognet et al., NIM A **735** (2014) 24;  
P.v. Doetinchem et al. Astropart. Phys. **54** (2014) 93.
13. S. Okazaki et al., J. of Astronomical Instrumentation 3(2) (2014) 1440004;  
H. Fuke et al., Proc. 30th Intl. Symposium Space Technology and Science (2015) 2015-i-10;  
S. Okazaki et al., Proc. 30th Intl. Symposium Space Technology and Science (2015) 2015-i-08.
14. T. Aramaki et al., submitted to Physics Reports, arXiv:1505.07785.