

南極周回気球による宇宙線反粒子探索計画 GAPS

JAXA/ISAS	福家 英之, 野々村 拓, 小川 博之, 岡崎 峻, 田中 結, 吉田 哲也
東工大	安部 拓洋, 井上 剛良, 松宮 宏明, 依田 悠太郎
東北大	大丸 拓郎, 永井 大樹
東海大	河内 明子, 増山 陽介, 清水 憲政, 高橋 俊
大阪電通大	小池 貴久
福井工大	宮崎 芳郎
長岡技科大	佐藤 大輔, 高橋 克征, 山田 昇, 吉田 貴則
Columbia Univ.	荒牧 嗣夫, F. Gahbauer, C.J. Hailey, N. Madden, 森 嘉野, K. Perez
UC Berkeley	S. Boggs, J. Hoberman
LLNL.	W.W. Craig
Univ. Hawaii	P.v. Doetinchem
Oak Ridge NL.	R. Fabris, K.P. Ziock
UCLA	I. Mognet, R. Ong, J. Zweerink

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翔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 年にはプロトタイプを用いた気球実験を大樹町で実施し、GAPS 測定器の基本動作の実証に成功した。技術開発の面では自励振動ヒートパイプ (OHP) 開発に最近注力しており多くの成果を挙げている。

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 2~3 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)。

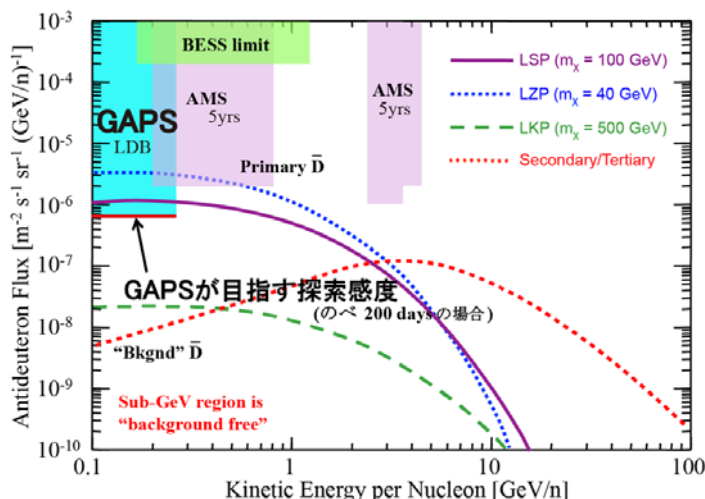


図 1. GAPS が目指す反重陽子の探索感度(南極気球気球によるのべ 200 日間の場合)、および、様々な CDM モデル起源および主要起源(宇宙線二次起源)から予測される反重陽子のエネルギースペクトル。

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 [4]。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 π 中間子や陽子などを発生する。この π/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 β 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 π/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[5]。

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 200 日間を飛翔できれば $10^{-7} [\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{GeV/n}^{-1}]$ を超える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）[6]。Si(Li)検出器は約 $2\text{ m} \times 2\text{ m} \times 10$ 層（総ウエハ数は約 1500）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、 π/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。 π/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 + π/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。

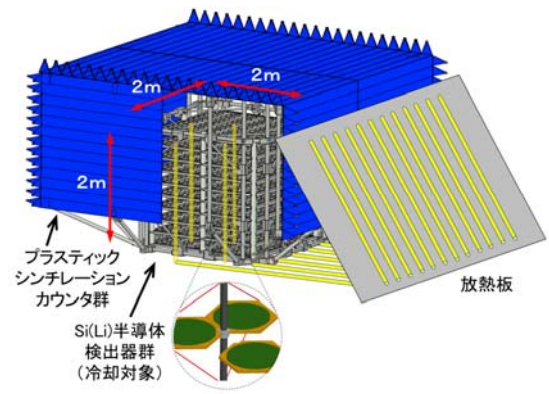


図 2. GAPS 測定器概念図

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 π/p の検知、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°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。

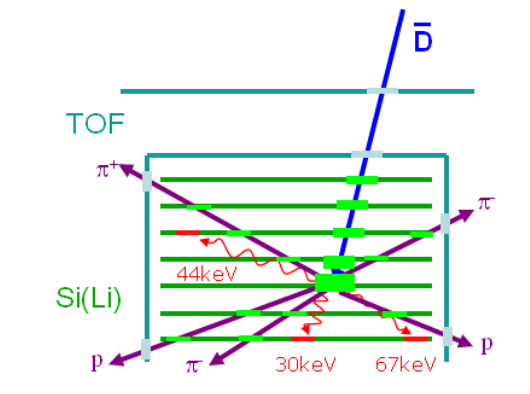


図 3. GAPS の反粒子同定法の概念図

5. 大樹町での気球フライト pGAPS

5.1. pGAPS の目的とペイロード概要

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)」を計画した[7]。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、次の 3 つの理由により宇宙線反粒子の観測は行わない（行えない）。(1) 大樹の地磁気カットオフが大きい（約 8 GV）、(2) フライト時間が短い（水平浮遊 3 時間）、(3) 測定器の面積立体角が小さい（TOF のみでも約 $0.054\text{ m}^2\text{sr}$ ）。従って、反陽子や反重陽子の観測統計量の期待値は無視できる程度に小さい。

むしろ pGAPS の目的は、主に次の 3 つであった。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 ペイロードは日米共同で開発・準備した。Si(Li)検出器は 6 個搭載し、TOF カウンタは両読み出しの X-Y 状パドル 3 枚を 3 層に重ねた構造とした。Si(Li)冷却系、読み出しエレクトロニクス、データ収集計算機、などもプロトタイプが開発され搭載された。pGAPS ペイロードの重量は 510 kg（気球工学バス機器を含む）、消費電力は 530 W（気球工学バス機器は含まない）であった。

5.2. pGAPS データ解析

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[8-10]。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。

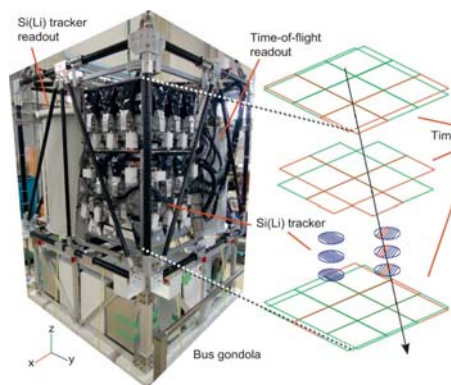


図 4. pGAPS ペイロード概観 (左)とトラックのイベントディスプレイの例(右)。

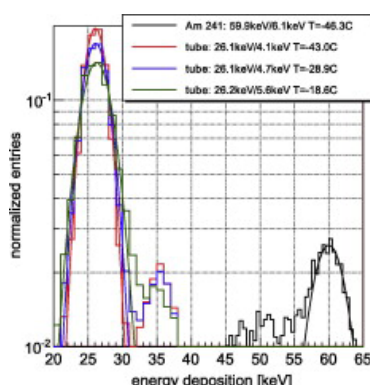


図 5. 搭載 X 線管による Si(Li) のエネルギー分解能の例。フライト前も含めた全般を通して安定して所期の $\Delta E \sim 4\text{-}5 \text{ keV}$ だった。

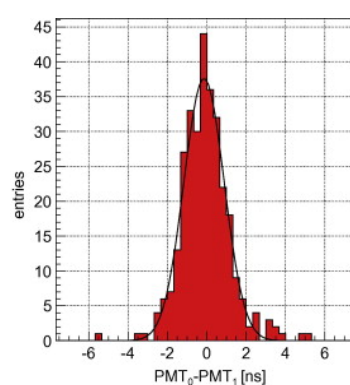


図 6. TOF 時間分解能の例。フライト全般を通して所期の $\Delta t \sim 0.6\text{-}0.7 \text{ nsec}$ を安定して得られた。

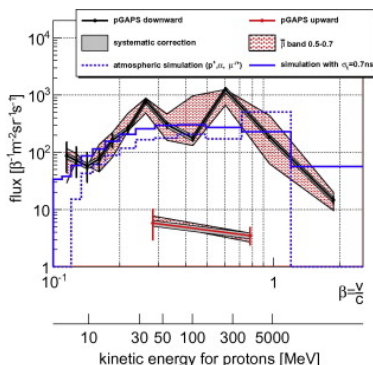
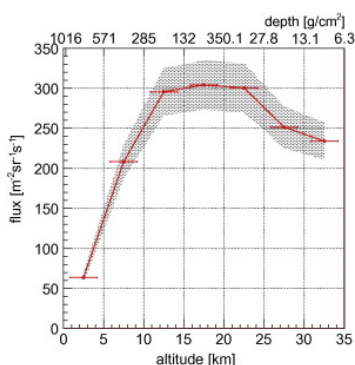


図 7. TOF カウンタのトリガレートから算出した各高度(左)と各 β (右)に対する宇宙粒子線全流束。宇宙線伝播モデル(青線)で再現されており、バックグラウンド宇宙線を正しく評価できた。

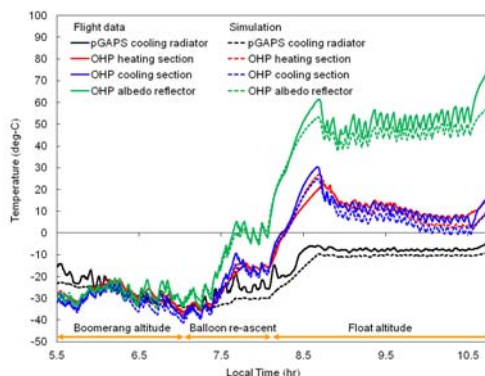


図 8. フライト中の冷却機構各所の温度実測値(実線)が FEM 熱モデル過渡解析(破線)でよく再現できた。

図 4 はトラックのイベントディスプレイの 1 事象例である。Si(Li)検出器はフライト前およびフライト中の全般を通じて安定して所期のエネルギー分解能 $\Delta E \sim 4\text{-}5 \text{ keV}$ を示した (図 5) (僅かな変動はフライト中に方向制御できずに Si(Li)自身の温度が上昇したことに起因する)。TOF カウンタはフライト全般を通して所期の時間分解能 $\Delta t \sim 0.6\text{-}0.7 \text{ nsec}$ を示した (図 6)。図 7 は TOF カウンタのトリガレートから算出した各高度・各 β に対する宇宙粒子線全流束であり、誤差は大きいもののバックグラウンド宇宙線の大気伝播モデルで再現されている。図 8 はフライト中の冷却機構各所の温度実測値と FEM 熱モデル過渡解析との比較である。熱モデルでよく再現できており、冷却機構がフライト中に正常に動作していたことが確認された (これが世界初の OHP の飛行環境下での動作実証となった)。

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[11]。これら pGAPS で得られたデータや知見は南極用 GAPS 測定器の開発に反映させる所存である。

6. 技術開発の例 — 自励振動ヒートパイプ —

GAPS の測定器開発に付随して進めている技術開発の例として自励振動ヒートパイプ (OHP) を紹介する。先述の通り Si(Li)検出器は -35°C 程度に冷却する必要がある。冷却方法としては单相流体をポンプで強制対流させる手法が有力で手堅いが、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 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 では現在 OHP の技術開発を精力的に進めており、立体配管 OHP の動作・常温から -50°C までの広温度範囲での動作・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、など世界初の成果を挙げており、学会や論文の発表もここ 3~4 年で約 30 件に及ぶ[12]。

今 2014 年度は図 9 に示す体制を組んで開発を加速させている。詳細は他所での成果発表に委ねるが、メートル級 OHP の初の可視化実験(図 10)などを通じた OHP 駆動力の定量的理解の深化、発展途上である OHP 数値シミュレーションの開拓、高耐久 SUS 製逆止弁コンポーネツツの開発(図 11)、作動流体やシステム設計の最適化、などの成果を挙げつつある。OHP を実用化できれば GAPS 以外の実験(人工衛星を含む)のみならず民生分野へのスピノフなど幅広い応用が可能になると期待されている。



図 10. OHP 内の作動流体の可視化映像の例

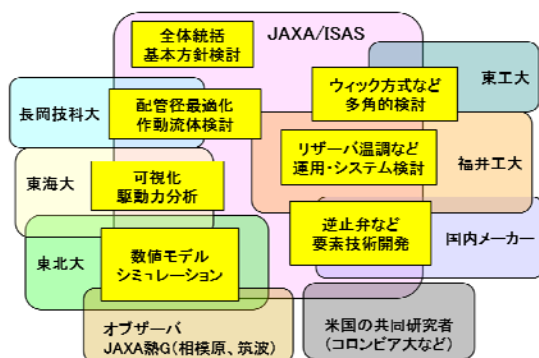


図 9. 今年度の OHP 開発体制概要

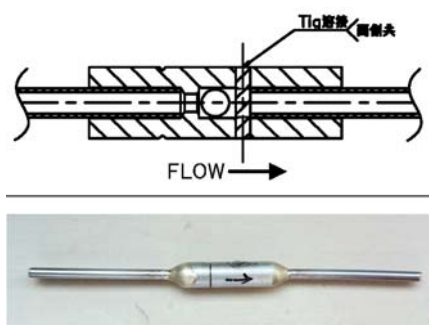


図 11. 高耐久 SUS 製逆止弁の模式図

謝辞

pGAPS 実験実施に際し ISAS 大気球実験室を始めとする皆様から多くのご支援を頂きましたことに感謝申し上げます。本研究の一部は NASA APRA Flight Program (NNX09AC13G、NNX09AC16G)、科研費(20740166、22340073、26707015)、ISAS 経費(搭載機器基礎開発実験費・WG 旅費・国際共同ミッション推進研究経費)を受けて行いました。

参考文献

1. 例えば：福家英之 他, 大気球シンポジウム (H18 年度) 146-149.
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. K. Mori *et al.*, Astrophys. J. **566** (2002) 604.
5. C.J. Hailey *et al.*, Nucl. Instr. Meth. B **214** (2004) 122;
C.J. Hailey *et al.*, JCAP. **0601** (2006) 007.
6. 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.
7. 福家英之 他, 大気球シンポジウム (H23 年度) isas-11-sbs-016.
8. 福家英之 他, 大気球シンポジウム (H24 年度) isas-12-sbs-018;
福家英之 他, 宇宙科学シンポジウム (第 13 回) P4-023.
9. 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.
10. 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.
11. Fuke *et al.*, Adv. Spa. Res. **53** (2014) 1432;
Magnet *et al.*, NIM A **735** (2014) 24;
Doetinchem *et al.* Astropart. Phys. **54** (2014) 93.
12. 例えば：S.Okazaki *et al.*, J. of Astronomical Instrumentation (in press).