

GAPS プロトタイプ気球実験計画の全体報告

ISAS/JAXA	福家 英之, 坂東 信尚, 小川 博之, 岡崎 峻, 莊司 泰弘, 吉田 哲也
Columbia Univ.	荒牧 嗣夫, F.Gahbauer, C.J.Hailey, J.Koglin, N.Madden, 森 嘉野, K.Perez, G.Tajiri
UC Berkeley	S. Boggs, J. Hoberman, P.v. Doetinchem
Tech. Univ. Denmark	F. Christensen
LLNL.	W.W. Craig
Oak Ridge NL.	R. Fabris, K.P. Ziock
福井工大	河合 宏紀, 宮崎 芳郎, 大久保 卓磨
理研	小池 貴久
UCLA	I. Mognet, R. Ong, T. Zhang, J. Zweerink
京大	高田 淳史

1. 概要

宇宙線反粒子の高感度観測によるダークマター探索を主目的に、日米を中心とする国際共同実験として GAPS 計画 (General Anti-Particle Spectrometer) を推進している。GAPS は南極での長期間気球フライトによる科学観測を 2015 年~2019 年に計 3 回実施することを目指している。本報告では、GAPS の計画概要、ならびに、2012 年 5 月期に大樹町での実施を目指して準備中の GAPS 測定器のプロトタイプを用いた気球実験計画について報告する。

2. GAPS の目指す物理

ダークマターの解明は現在の宇宙物理学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、いわゆる直接探索実験や間接探索実験が数多く実施・計画されている。しかし、直接探索実験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る。また、CDM の対消滅による産物 (ガンマ線、陽電子、ニュートリノ、反陽子など) を宇宙線中に観測する間接探索も、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 を検出するには、ズレの有無と形状を決定づけるだけの高精度な観測結果が得られるに至っていない。

GAPS は、これら既存の探索手段とは異なる魅力を持つ未開拓のプロープとして、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目指す。宇宙線反重陽子は、物理バックグラウンド (宇宙線起源) のエネルギースペクトルがその生成過程の運動学のためハードになると考えられる一方で、CDM 起源ではソフトになる可能性がある。そのため、1 GeV 以下の低エネルギー領域では、CDM 起源の反重陽子スペクトル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 (図 1)。この特色は、SUSY-CDM を始め[1]とする数多くの CDM モデル (Kaluza-Klein 粒子 (universal extra dimension 模型) など) に該当し得ることが指摘されている (例えば[2, 3, 4])。

従って、宇宙線反重陽子が一例でも低エネルギー領域に観測されればその意義は大きく、CDM などの未知の物理の存在が強く示唆される。さらに、もし一定の観測数によってエネルギースペクトルを得られれば、CDM モデルのパラメータに重要な制限を付与できる。

しかも、宇宙線反重陽子によって探索される CDM のパラメータ領域は、概して、直接探索実験と相補的な領域となる (例えば[2])。ダークマターの物理に対する知見を総合的に深めるためには、直接探索や、他の宇宙線種による間接探索も含めた多角的なアプローチが必要であり、その意味においても反重陽子探索はシナジー効果が期待できる。

ただし、反重陽子の予想存在量は極微であるため、高感度な探索が必要となる。反重陽子に対して現存する唯一の流束上限値は BESS 実験による $1.9 \times 10^{-4} [\text{m}^2 \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}]$ であるが[5]、実効的な探索を行うにはまだ感度が 2~3 桁不足している。そこで、GAPS は、BESS を 3 桁程度以上上回る高感度での反重陽子探索を目指している (図 1)。

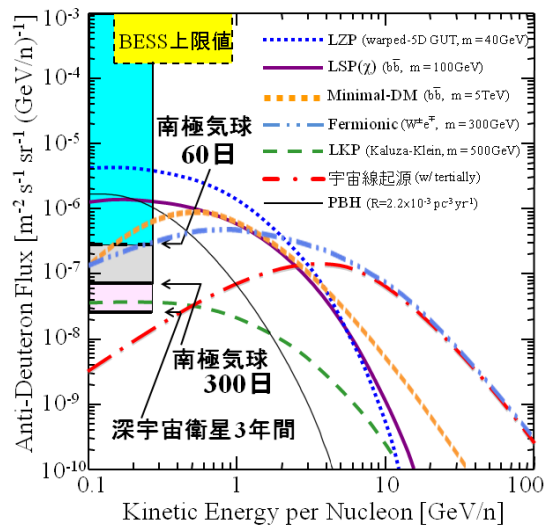


図 1. GAPS が目指す反重陽子の探索感度 (南極気球 300 日間など) と、様々な CDM モデル起源および主要起源 (宇宙線起源) から予測される反重陽子のエネルギースペクトル。

3. GAPS の反粒子検出原理

GAPS が用いる反粒子宇宙線の観測手法は、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、エキゾチック原子を用いた新しい手法である[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的に落ち込み、最後は原子核と核子対消滅して中間子群を発生する。この中間子の生成数、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ため、粒子を同定できる。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 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 線と粒子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 で目指す長時間フライト

4.1. 南極気球観測：bGAPS

GAPS は、南極周回気球による長時間観測を 2015～2019 年に計 3 回実施することを目指している。極域を飛翔することで、地磁気の影響を殆ど受けずに低エネルギー宇宙線を観測できる。約 4m^2 の大面積測定器を搭載して 3 週間程度のフライトを 3 回実施（計 60 日間）できれば $10^{-6} [\text{m}^2\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{GeV/n}^{-1}]$ オーダーの流束感度を獲得できる。また、現在 JAXA や NASA で開発中のスーパープレッシャー気球が実用化されれば積算 300 日程度のフライトで 10^{-7} を超える高感度領域に到達可能となる（図 1）。GAPS の南極気球ミッションを bGAPS と称する。

4.2. bGAPS 測定器

bGAPS 測定器の基本概念図を図 2 (a) に示す[8]。中核には $2\text{m} \times 2\text{m}$ に平面状に並べた Si(Li)型半導体検出器を 13 層重ねて配置する（総ウエハ数は約 4000）。Si(Li)は、degrader、ターゲット、depth sensing、特性 X 線のエネルギー測定、および、中間子トラッカー、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 3 keV のエネルギー分解能で有意に識別できる。中間子は、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。陽子などの宇宙線による測定器バックグラウンドは「特性 X 線 1～2 本以上 + 中間子 5～6 個以上」によって十分に排除できると見込んでいる（図 2 (b)）。

Si(Li)検出器群の上方および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 X-Y のパドル状に配置し、トリガー生成、time-of-flight（時間分解能 1 nsec）や dE/dx の測定、Veto 生成、および、内部から抜け出る中間子の検知、を行う。

Si(Li)検出器は、その内部発熱を測定器外壁に伝熱して輻射放熱する、という方法で、成層圏大気と同程度の温度（ -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。bGAPS 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。

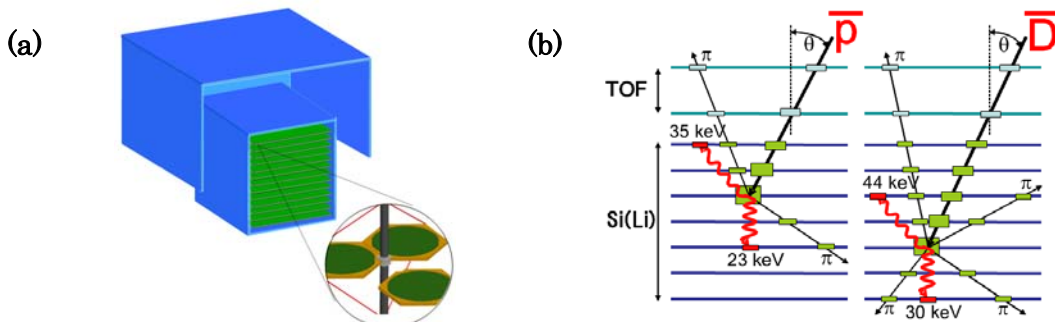


図 2. (a): bGAPS 測定器の中核の概念図。Si(Li)群（13 層）と、それを囲む TOF カウンタ群で構成している。(b): 反陽子（左）と反重陽子（右）に対する粒子識別原理の概念図。特性 X 線のエネルギー、中間子の生成数、TOF カウンタからの dE/dx 情報、入射反粒子の測定器内での停止位置（stopping depth）などにより両者を同定できる。

5. 大樹町での気球フライト pGAPS：計画内容と準備状況

bGAPS による科学観測に先立って気球フライトの実環境下にて各測定器要素の基本動作実証を図ることを目的に、大樹での気球実験“pGAPS（prototype-GAPS）”を計画している。

pGAPS フライトは、当初は 2011 年第 2 次実験での実施を計画していたが、測定器の準備の遅れ（後述）に伴い計画を延期し、2012 年の第 1 次実験（5～6 月）での実施を計画・希望している。

5.1. pGAPS の計画と意義

pGAPS は、南極用 bGAPS 測定器の各要素のプロトタイプから構成したペイロードを飛行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 (レベル 3 時間を希望)、(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 つである。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バックグラウンドレベルの測定。

特に②に関しては、「低温」「低圧 (ほぼ真空)」「太陽光」「地球赤外」の総合環境を地上の実験室レベルで模擬するのが容易ではないため、各条件に対する地上試験を別個に実施し推察したうえで、実際の気球フライトによって確認することが必要である。また、①や③に関しても、事前の環境試験でのノイズレベルや計算機シミュレーションによるバックグラウンド見積りの妥当性を気球環境下で確認することは、bGAPS 測定器の詳細設計という次のステップに進むうえで非常に重要な情報となる。

検出器開発の観点からは、輻射冷却のみによって気球環境で Si(Li)を動作させて所期の高分解能を目指すこと自体が挑戦的であり意義が大きい。また、エキゾチック原子を利用した測定原理による反粒子測定器が飛翔された前例は無く、その意味でも pGAPS には技術的な意義がある。

図 3 (a) に pGAPS ペイロードの構成概念図を示す。ペイロードは主に 2 つのセクションから構成し、上段に pGAPS 測定器 (PI 機器) を、また、下段には PI 機器用の電池、熱制御系の一部機器、および気球工学バス機器を格納する。上段は Si(Li)検出器や TOF カウンタのプロトタイプ、および、エレクトロニクス機器などで構成する (図 3 (b))。上段とパラシュート荷姿の間にはペイロードの方位を制御するためのモータを配する。pGAPS ペイロードの重量は 450 kg (下段の構造体と気球工学バス機器は含まない)、消費電力は 530 W (気球工学バス機器は含まない) を見込んでいる。フライト中の機器と地上との間の送受信には、ISAS 大気球実験室が現在開発を進めている新テレメトリ・コマンドシステムを用いる [9]。

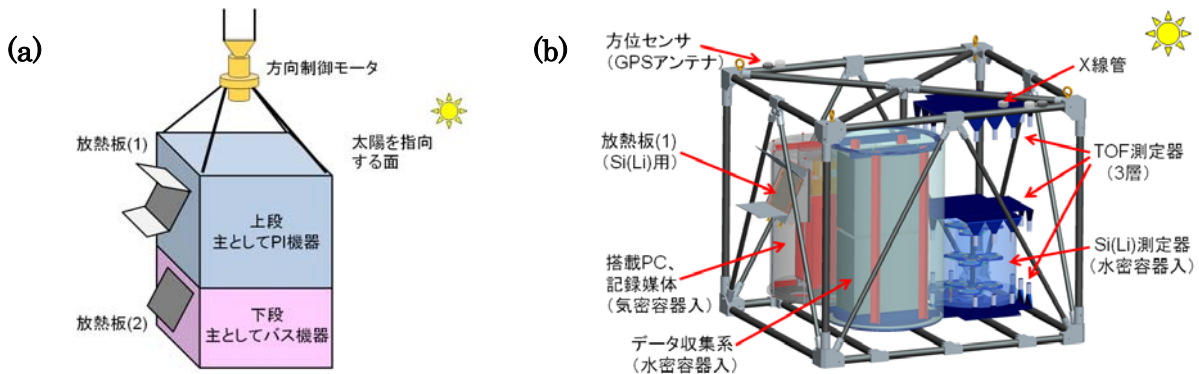


図 3. (a) pGAPS ペイロードの構成概念図と、(b) 上段 (pGAPS 測定器部分) の構成概念図。

5.2. pGAPS に向けた準備状況

5.2.1. Si(Li)検出器

bGAPS 測定器には約 4000 個の Si(Li)ウエハを搭載予定であるが、pGAPS には 9 個を搭載する (9 個のうち 3 個はダミー) (図 4 (a))。Si(Li)検出器単体が所期の性能を有していることは真空恒温槽を用いた個別試験で確認済みだったが、今夏のペイロード総合インテグレーション後にエネルギー分解能が悪化してしまった。調査の結果、次節で述べる熱制御系のポンプに伴う電気ノイズが原因と判明したが、十分な対策を施すには時間が不足していると判断した。これにより、2011 年第 2 次実験での pGAPS フライトの実施は見送ることとした。その後に重ねた対策によって現在はノイズをほぼ抑制することに成功しており、Si(Li)のエネルギー分解能も、 -35°C で平均値 $E \sim 5.6 \text{ keV}$ (最良値は $E < 3 \text{ keV}$) という、フライトに供し得るレベルにまで回復している。

5.2.2. 熱制御系

Si(Li)検出器の冷却系として「①単層流体ループ方式」と「②OHP (自励振動ヒートパイプ) 方式」の 2 案を並行して開発しており、pGAPS には双方のプロトタイプを搭載して基礎データを取得する。方式①は、技術的なハードルは比較的低いものの、流体ポンプの駆動に一定の電力を要するうえに、前述のようにノイズの

要因ともなり得る。一方、方式②は、消費電力が非常に少ないという魅力を持つが、新しい技術方式であるため実用例に乏しく、開発要素も多い。図 4 (b) に方式②の搭載用プロトタイプを示す。詳細は文献[10]を参照。

5.2.3. 方向制御系

熱制御系の輻射放熱板を太陽と逆方位に指向させるため、ペイロード全体を 1 軸で方向制御する。制御には振り戻しモータを、方位センサーには GPS コンパスを用い、制御則はゴンドラを吊っての実試験 (図 4 (c)) とシミュレーションとを組み合わせる開発中である。既に方位指向精度 ± 5 度は達成しているが、更なる制御則ソフトウェアロジックの改善を進めている。詳細は文献[11]を参照。

5.2.4. その他のサブシステム

pGAPS の TOF カウンタは、両読み出しのパドル 3 枚を X-Y 状に配し、それを 3 層に重ねた構造である。既に pGAPS 測定器にインテグレーションされており、所期の時間分解能 (約 0.6 nsec) を得ている。

各種エレクトロニクスに関しては、Si(Li)や TOF の読み出し機器、ハウスキーピングモニター系、機上搭載計算機 (PC/104+) によるデータの集約・記録・地上との通信系、これらエレクトロニクスの収納容器 (気密容器と水密容器)、および、地上用モニター系 (GSE) などが、いずれもほぼ完成している。pGAPS の電源系は、一括電源 (リチウム一次電池) と分電用 DC/DC コンバータ群から構成され、これもほぼ準備済みである。

pGAPS のフライト中の Si(Li)のキャリブレーションのため、X 線管を搭載する (ラインエネルギー 22 keV)。トリガは TOF による外部トリガ、Si(Li)のセルフトリガ、および周期的トリガを実装しており、シミュレーションや実際のデータランを基に、現在、フライト中のトリガ設計の最適化を進めている。

5.2.5. 測定器インテグレーションと、今後の予定

pGAPS 測定器は、上段 (図 4 (d)) は UC Berkeley にて、下段 (図 4 (c)) は ISAS にてインテグレーションし、準備を進めてきた。いずれもほぼ完成しており、細部の調整を残すのみとなっている。上段に関しては、近々に場所を Columbia Univ.に移して更なる調整・準備を進める。そして、来春に全てを日本に輸送し、米国メンバーも来日して、ISAS 相模原キャンパスと大樹で最終準備を行ってフライトに備える予定である。

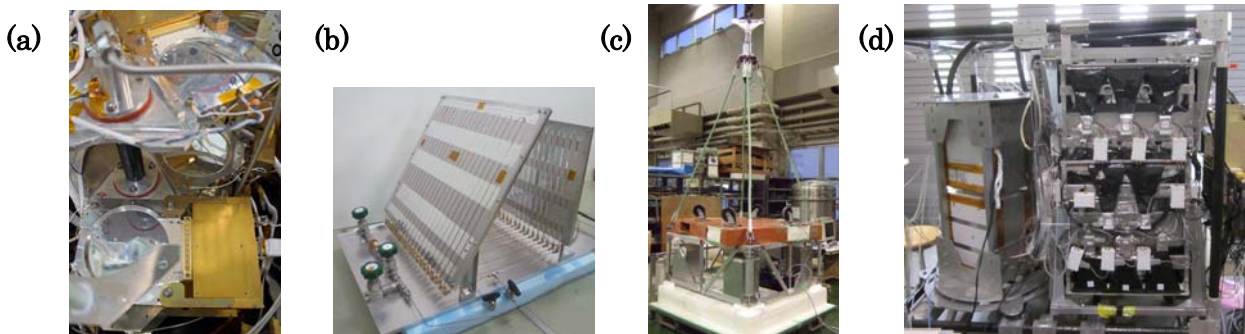


図 4. (a) Si(Li)検出器群、(b) OHP プロトタイプ、(c) ペイロード下段を用いた吊下制御試験、(d) ペイロード上段。

謝辞

本研究の一部は NASA APRA Flight Program (Award Number NNX09AC16G)、科研費 (基盤 B 22340073)、ISAS 戦略的開発研究費・搭載機器基礎開発実験費を受けて行っている。

参考文献

1. F. Donato *et al.*, Phys. Rev. D **62** (2000) 043003.
2. H. Bear and S. Profumo, JCAP. **12** (2005) 008
3. J. Edsjo *et al.*, JCAP. **09** (2004) 004; S. Profumo and P. Ullio, JCAP. **0407** (2004) 006.
4. A. Ibarra and D. Tran, JCAP **06** (2009) 004, arXiv:0904.1410v2; C.B. Braunerger and M. Cirelli, Phys. Lett. B **678**, 20-31 (2009) 0904.1165; Y. Cui *et al.*, (2010) arXiv:1006.0983v1.
5. H. Fuke *et al.*, Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 081101.
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. (2011) in press.
9. 田村啓輔 他, “新テレメトリ・コマンドシステムの開発・計画と現状”, 本シンポジウム抄録.
10. 岡崎峻 他, “自励振動ヒートパイプを用いた GAPS 測定器冷却機構の開発”, 本シンポジウム抄録.
11. 坂東信尚 他, “GAPS 気球実験のためのゴンドラ方向制御システムの開発”, 本シンポジウム抄録.