

宇宙線反粒子探索 GAPS 実験計画の(特に日本チームの)現状報告

JAXA	福家英之, 小財正義, 小川博之, 岡崎峻, 西城大, 徳永翔, 吉田哲也
青山学院大	中上裕輔, 竹内崇人, 和田拓也, 吉田篤正
神奈川大	清水雄輝
長岡技術科学大	山田昇
大阪電通大	小池貴久
信州大	加藤千尋, 宗像一起
東北大	永井大樹
東海大	五味颯雅, 河内明子, 小林聖平, 近藤愛実, 水野広基, 長島弘明, 高橋俊, 竹村薫, 田邊拓哉
東京工業大	井上 剛良
Columbia Univ.	C.J. Hailey
MIT	K. Perez
Oak Ridge N.L.	L. Fabris
UC Berkeley	W. Craig
UCLA	R. Ong
UC San Diego	S. Boggs
Univ. Hawaii	P.v. Doetinchem
INFN	M. Boezio
for the GAPS collaboration	

1. 概要

GAPS (General Anti-Particle Spectrometer)実験計画の近況を報告する。GAPS は宇宙線反粒子の高感度観測を通じた暗黒物質探索を主目的とする日米伊の国際共同計画であり、南極周回気球飛翔による観測の実現を当面の目標としている。日本チームは GAPS 測定器の中核となるシリコン検出器開発のほか、計算機シミュレーションによる解析スキーム最適化検討や熱設計などの重要な役割を担っている。

2. GAPS の目指す物理

暗黒物質(DM)は宇宙における質量の大半を占め、その解明は現代の宇宙物理学・素粒子物理学における喫緊の重要課題である。DM として有力なのは通常の物質と殆ど相互作用をせず質量を持つ粒子 WIMP (Weakly Interacting Massive Particle)であり、超対称性(SUSY)や余次元など標準理論を超えた新しい物理に伴う様々な DM モデルが理論的に提唱されている。DM 解明の学術的重要性に呼応して様々な DM モデルが提唱され、また、様々な実験アプローチが世界中でなされている。どの実験手法も単独で DM モデルを 1 つに特定できるわけではなく、またどの実験も単独で全ての DM モデルを探ることはできない。DM の特定のためには多角的な調査が不可欠である。

GAPS は、WIMP-DM 探索における未開拓のプローブ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 DM の間接探索を行う[1]。宇宙線反重陽子は未発見ながら様々な理論モデルにて DM の対消滅や崩壊から生成される可能性があり、極微ながらも検出可能な量が存在しているという予測論文が数多く発表されている。

図 1 に DM モデルから期待される宇宙線反重陽子のエネルギースペクトル(大気頂上(TOA)相当)の例として、SUSY ニュートラリーノ[2], 余次元 DM[3], gravitino[4]の場合を示す。これら DM 起源の反重陽

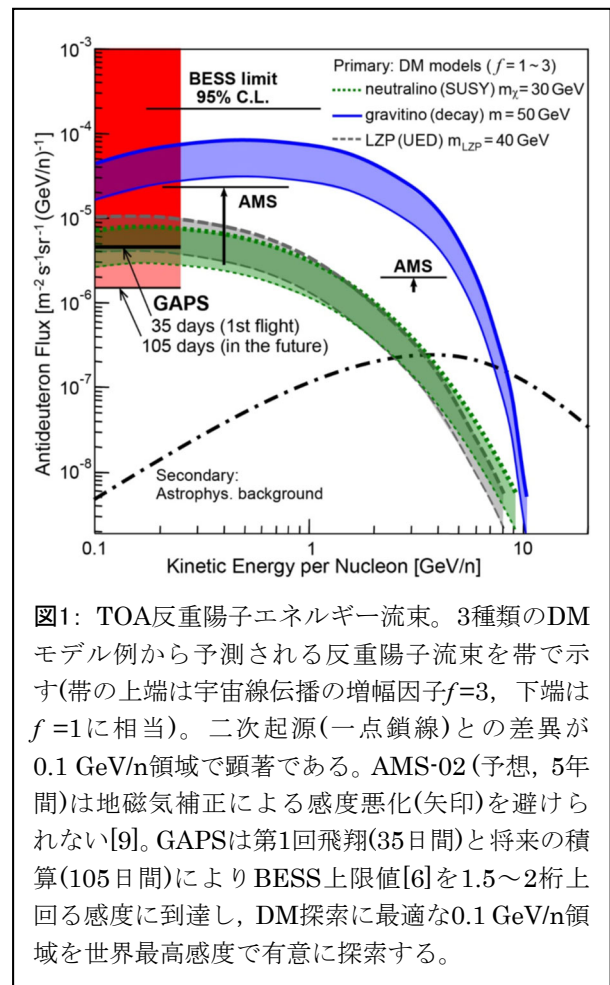


図1: TOA反重陽子エネルギー流束。3種類のDMモデル例から予測される反重陽子流束を帯で示す(帯の上端は宇宙線伝播の増幅因子 $f=3$, 下端は $f=1$ に相当)。二次起源(一点鎖線)との差異が0.1 GeV/n領域で顕著である。AMS-02(予想, 5年間)は地磁気補正による感度悪化(矢印)を避けられない[9]。GAPSは第1回飛翔(35日間)と将来の積算(105日間)によりBESS上限値[6]を1.5~2桁上回る感度に到達し、DM探索に最適な0.1 GeV/n領域を世界最高感度で有意に探索する。

子のエネルギースペクトルは 0.1 GeV/nucleon オーダーの低エネルギー領域に極大を持つと予想される。他の宇宙線種と同様に反重陽子も宇宙線物学的なバックグラウンドとして二次起源(宇宙線と星間物質との衝突起源)が存在しうが、その流束は生成の運動学により低エネルギー域で抑制される[5]。そのため、 0.1 GeV/n 付近では二次起源流束の影響を殆ど受けずに DM 起源を直接検出できる可能性がある。この言わばバックグラウンドフリーである点が宇宙線反重陽子の大きな利点であり、他の宇宙線種を用いる間接探索実験がバックグラウンドからの僅かな過剰信号を見出そうとしているのとは質的に異なる。従来は不定性が大きかった反重陽子の生成確率の理論計算も近年の加速器実験での人工生成例の急増によって精度が高まっている。従って、 0.1 GeV/n 領域に 1 イベントでも宇宙線反重陽子が観測されれば DM など未知の起源の存在を強く示唆する証拠となり、逆に観測されずとも DM モデルに大きな制約を課することができる。また、理論パラメータ空間において反重陽子で探査できる領域は直接探索実験やニュートリノ等による間接探索実験と相補的である[3]。

GAPS は世界で唯一の反重陽子探索実験であり、既存の探索上限値[6]を 2 桁程度上回る高感度探索によって幾多の DM 研究の中でもユニークかつ他実験と相補的な知見を提供できる(図 1)[7]。また、GAPS は低エネルギー反陽子をかつてない高統計で観測することでも DM モデルの検証に貢献する[8]。

3. GAPS 測定器の概要と南極周回気球観測

稀少な反粒子を高い感度で探索するため、GAPS 測定器には大きな面積立体角が求められる。そこで GAPS では、従来のマグネット型スペクトロメータ(磁場中での飛跡の曲率の正負で粒子・反粒子を判別)よりも低エネルギー宇宙線に対する透過性や面積立体角の大型化を比較的容易に実現できる手法として、エキゾチック原子を用いた新しい手法を導入する[1, 10]。

GAPS 測定器はリチウムドリフト型シリコン半導体検出器[Si(Li)]アレイとその周囲を二重に囲むプラスチックシンチレーションカウンタ群(TOF)で構成する(図 2a)。到来する低エネルギー宇宙線反粒子は内外二層の TOF カウンタを通過したのち、積層された Si(Li)検出器を通過中にエネルギー損失により減速・捕獲され、Si と励起エキゾチック原子を構成する。励起エキゾチック原子は nsec オーダーですぐ崩壊する。この崩壊(脱励起)過程にて特性 X 線が放出され、反粒子と Si 原子核との核子対消滅により π や p のハドロン群が放出される。励起エキゾチック原子の崩壊過程や π と p の生成数は捕獲された反粒子の種に固有のため、特性 X 線のエネルギーや π/p 生成数を測定することで入射反粒子種を同定できる。

即ち、Si(Li)は入射宇宙線の減速物質、入射宇宙線のエネルギーをカロリメトリックに知る depth sensing, エキゾチック原子を形成する標的、エキゾチック原子の崩壊に伴う特性 X 線の測定と π/p 荷電粒子の飛跡検出、の役割を兼ねる。一方、TOF カウンタは入射宇宙線に対するトリガー生成、入射宇宙線の速度を知る飛行時間測定、入射宇宙線の電荷やエネルギーを知るための dE/dx 測定、大気頂上エネルギーに外挿するための到来方向測定、二次的に生成される π/p 荷電粒子の検出、の役目を担う。この比較的シンプルな測定器設計により GAPS は測定器の大型化と長時間運用を可能にし、陽子などの通常の宇宙線に対する高い排他率や反粒子種間の高い識別能力も可能にする。

低エネルギーの荷電宇宙線に対する地磁気や大気の影響を抑制するため、GAPS は南極周回気球を観測手段とする。NASA は南極 McMurdo 基地を拠点に毎年数機の南極周回気球を運用しており、1 ヶ月規模の長期間観測を期待できる点でも GAPS に最適である。太陽活動に伴う流束変動の影響も抑制するため、太陽活動が次期静穏期を迎える 2021 年以降に計 3 回のフライトでのべ 100 日間を飛行できれば $10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{GeV/n}^{-1}$ レベルの高流束感度に到達でき、有力な DM モデルの検証が可能となる(図 1)。

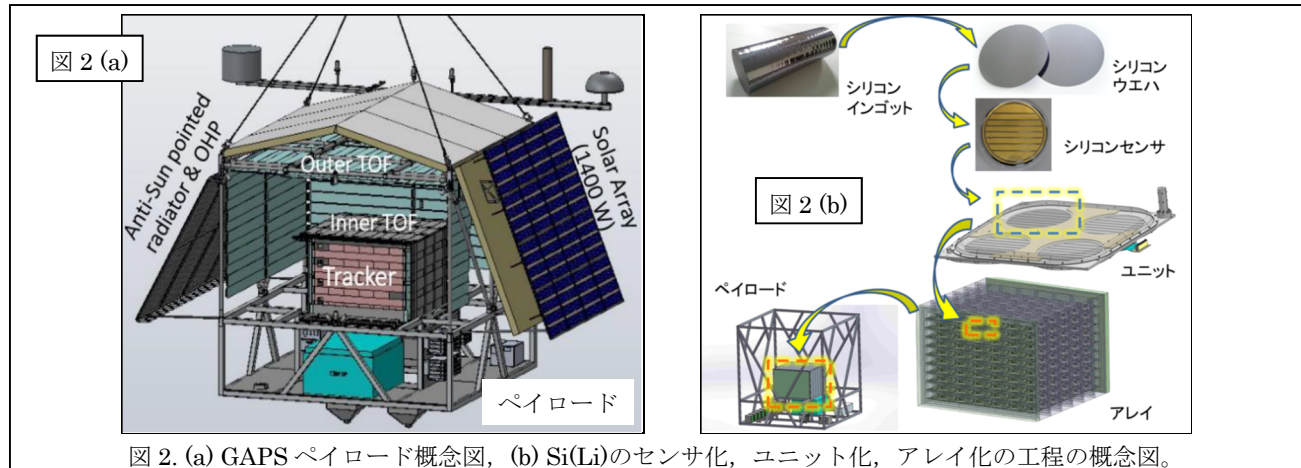
GAPS 測定器の基本構成要素が気球の実飛行環境下で動作することは 2012 年に大樹で実施した気球実験「pGAPS (prototype GAPS)」にて実証済みである[11, 12]。2019 年 1 月には外部有識者を招いた審査会を日米伊共同で自主開催し、基本設計を確認するとともに実機製作フェーズに移行した。2020 年夏に実機各構成要素から成るスケールモデル「GFP (GAPS functional prototype)」でシステム実証を図り、2021 年 12 月の第 1 回南極気球実験実施に向けて、実機のフルスケール構築へと進める予定である。

4. Si(Li)検出器の開発

GAPS 測定器の中核となる検出器アレイに求められる条件は (1) ターゲットとして反陽子と反重陽子から生成する特性 X 線エネルギーが $20 \sim 100 \text{ keV}$ 域に適度に分布、(2) その特性 X 線を識別可能(分解能約 4 keV)、(3) 減速材としての肉厚と高い有感領域($\approx 90\%$)、(4) 液体窒素等の冷媒が不要、(5) 気球飛行の低圧環境下で放電しない印加電圧($HV \leq \text{数百 V}$)、(6) 大面積化[$O(10\text{m}^2)$]しても製造コストや読出チ

チャンネル数が現実的な範囲内、等である。Si(Li)検出器はP型シリコン素材に含まれるホウ素をリチウムで補償して得られる高比抵抗部分を利用する半導体検出器であり、これらの条件を満たし得る。

以上の要求を満たすべく GAPS で開発した Si(Li)検出器は 直径 10 cm (4 インチ)、ウエハ内セグメント数 8、厚さ 2.5 mm、エネルギー分解能 4 keV(使用温度 $\leq -35^{\circ}\text{C}$ 、リーク電流 $<5\text{nA}$)である。Si(Li) 4 素子毎にユニット化し、縦 6×横 6 の 36 ユニットの平面状に連結し、それを 10 層に組み上げることで検出器アレイを構築する(図 2b)。千個規模での大型 Si(Li)の使用は過去に他実験よりも 2~3 桁多く前例が無い。そこで、良質な Si 基材を(株)SUMCO との協力で実現し、センサ化の各工程を(株)島津製作所と共同で最適化した。これにより高い良品率と低いコストによる量産に道筋をつけた[13, 14]。Si(Li)センサの量産は 2019 年 1 月から本格的に開始しており、2 年余をかけてアレイ化を進める予定である。

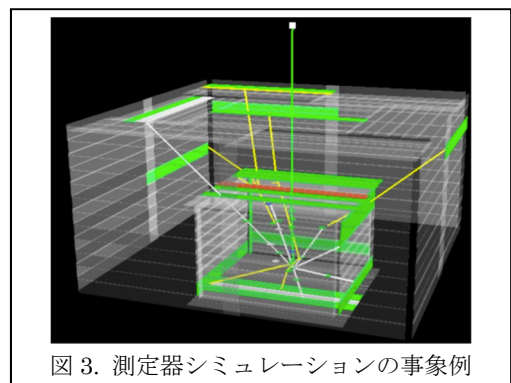


5. 測定器設計の最適化検討

Si(Li)と並ぶ主要構成要素の TOF カウンタに関しては、実寸大モデルの試作と GEANT4 によるモンテカルロ・シミュレーションの相互フィードバックを重ね、寸法や形状の最適化を図った[15]。また、光検出器を多数同時に校正する装置を開発した[16]。使用する光検出器は、従来の光電子増倍管(PMT)と新しいデバイスであるシリコン光電子増倍管(SiPM)とを比較検討した結果、SiPMを採用することとした。

GEANT シミュレーションは測定器全体の詳細設計にも用いており、各要素の形状や配置の最適化検討を進めている。また、トリガー設計の検討も進め、TOF カウンタの測定 dE/dx やヒット数のみを用いたシンプルなトリガースキームによって陽子・ヘリウム等のバックグラウンド宇宙線(約 100 kHz)の大幅な抑制($\leq 1\%$)と反粒子に対する高いトリガー効率を両立できる目途を立てた[17]。

GEANT シミュレーションをより詳細化し、反粒子識別のための飛跡再構成などの観測データ解析スキームの構築も進めている。また、機械学習(深層学習)技術を導入して反粒子識別能力の更なる発掘・向上も模索しており、特定の条件下では機械学習の効果を既に確認している[18]。



6. ヒートパイプ冷却システムの開発とペイロード熱設計

Si(Li)検出器を低消費電力かつ高効率で約 -40°C 以下に冷却するため、独自のヒートパイプ技術を開発している。自励振動ヒートパイプとサーモサイホンの熱工学技術を融合し、多ループ構成の細管中に封入した作動流体のパッシブな気液二相の均質流を誘起することで、顕熱と潜熱による高効率な熱輸送を実現した[19]。実機スケールのエンジニアリングモデルや独自開発のシミュレーションを用いた詳細検討を続けており、作動流体の最適化検討などによる沸騰時の過熱の抑制や、リザーバ温度や補助ヒータの最小限なアクティブ制御を通じて、パッシブな全系における均温性や信頼性の強化を目指している[20, 21]。

ヒートパイプが輸送する検出器発熱は測定器外壁のラジエータから輻射放熱される。GAPS 用ラジエータに求められる約 -55°C 以下へのパッシブな冷却は熱モデルの数値解析上では確認済みだが、気球実験としては前例の無い低温域であり、熱解析の高精度な検証が求められる。pGAPS 気球実験で実証したラジエータも -55°C 以下を狙ったものではなかった[12]。そこで、ラジエータのスケールモデルを気球に搭

載して実フライト環境下でのラジエータの熱収支を高精度で検証するべく、日米双方にて飛翔機会を探った。日本では大樹での B18-04 および B19-01 (気球 VLBI 実験) [22]への相乗り機会を頂き準備を進めたが、飛翔機会に恵まれなかった。米国では Ft. Sumner の NASA #689N (SIFT)実験への相乗り機会を頂き 2018 年 9 月 8 日夕方に放球されたが、気球に不具合があり、水平浮遊に到達することなく高度が失速して夜間に着地した。データは無事に回収され、ラジエータ温度が約 -70°C 以下に達したことは確認されて、ラジエータ冷却能力の最低限の実証には成功した[23]。しかし、日照が無く、高度や姿勢も安定ではなかったことから、より望ましい飛翔実証を図るべく、再実験を計画した。その結果、Ft. Sumner での NASA#700NT (LDB test flight)の相乗り機会を頂き(図 4)、2019 年 9 月 23 日朝に放球された。飛翔中、高度約 38km での水平浮遊中に約 3 時間の安定した反太陽方向指向が実現され、必要なデータを得ることができた[24]。フライトデータの詳細は現在解析中である。

7. 南極実験の実現に向けて

以上のように GAPS は南極実験に向けた開発準備を着実に重ねている。測定器各構成要素のフライトモデルの製作を引き続き進め、測定器インテグレーションや各種環境試験を順次行う計画である。

謝辞

GAPS 計画推進にあたり技術協力を頂いている(株)島津製作所、(株)SUMCO、千代田空調機器(株)、(株)冷熱研に感謝申し上げます。ラジエータ飛翔試験計画にご協力頂きました VLBI 気球実験チーム、ISAS 山田和彦研究室チーム、ISAS 大気球実験グループ、NASA BPO、NASA CSBF の関係各位に感謝申し上げます。本研究の一部は科研費(26707015, JP17H01136, JP17K14313, JP18K13928, JP19H05198)、ISAS 理学委員会経費、JAXA 小規模計画経費、住友財団基礎科学研究助成費、三菱財団自然科学研究助成費、NASA APRA、NSF、INFN、ASI、Heising-Simons 基金の各経費を受けて実施しました。

参考文献

1. H. Fuke et al., JPS Conf. Proc. **18** (2017) 011003;
福家英之 他, 大気球シンポジウム (H30 年度) isas18-sbs-007;
福家英之 他, 宇宙科学シンポジウム (第 19 回, H31 年) P-037.
2. Donato et al., Phys. Rev. D **78** (2008) 043506.
3. Baer et al., JCAP **512** (2005) 8.
4. Dal et al., Phys. Rev. D **62** (2014) 103504.
5. Donato et al., Phys. Rev. D **62** (2000) 043003.
6. H. Fuke et al., Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 081101.
7. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **74** (2016) 6.
8. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **59** (2014) 12.
9. T. Aramaki et al., Phys. Rep. **618** (2016) 1.
10. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **49** (2013) 52.
11. H. Fuke et al., Adv. Spa. Res. **53** (2014) 1432;
S.A.I. Moguet et al., NIM A **735** (2014) 24;
P.v. Doetinchem et al. Astropart. Phys. **54** (2014) 93.
12. H. Fuke et al., J. of Astronomical Instrumentation **6**(2) (2017) 1740006.
13. 小財正義 他, 宇宙科学シンポジウム (第 17 回, H29 年) P-034;
福家英之 他, 大気球シンポジウム (H29 年度) isas17-sbs-029;
小財正義 他, 宇宙科学シンポジウム (第 18 回, H30 年) P-056;
K. Perez et al., Nucl. Instr. Meth. A **905** (2018) 12.
14. M. Kozai et al., Nucl. Instr. Meth. A **947** (2019) 1662695;
F. Rogers et al., Journal of Instrumentation (JINST) **14** (2019) P10009.
15. 和田拓也 他, 宇宙科学シンポジウム (第 17 回, H29 年) P-033.
橋本岳 他, 大気球シンポジウム (H29 年度) isas17-sbs-030.
16. 渡邊翼 他, 宇宙科学シンポジウム (第 19 回, H31 年) P-038.
17. 養島温志 他, 宇宙科学シンポジウム (第 18 回, H30 年) P-057;
和田拓也 他, 日本物理学会 (2018 年秋季大会) 14as37-7.
18. T. Wada et al., Trans. JSASS, Aerospace Tech. Japan (in press).
19. S. Okazaki et al., Applied Thermal Engineering **141** (2018) 20.
20. H. Fuke et al, Trans. JSASS, Aerospace Tech. J. **14** (2016) Pi17;
岡崎峻 他, 宇宙科学シンポジウム (第 17 回, H29 年) P-032;
近藤愛美 他, 大気球シンポジウム (H29 年度) isas17-sbs-031;
岡崎峻 他, 宇宙科学シンポジウム (第 18 回, H30 年) P-058.
21. 竹村薫 他, 宇宙科学シンポジウム (第 19 回, H31 年) P-145.
22. 土居明広 他, 大気球シンポジウム (H30 年度) isas18-sbs-002;
河野裕介 他, 大気球シンポジウム (本抄録) isas19-sbs-030.
23. 岡崎峻 他, 大気球シンポジウム (H30 年度) isas18-sbs-008.
24. 小財正義 他, 大気球シンポジウム (本抄録) isas19-sbs-040;
岡崎峻 他, 大気球シンポジウム (本抄録) isas18-sbs-041.



図 4. NASA#700NT に搭載されたラジエータスケールモデルの写真。(上)ラジエータおよび周辺の断熱壁の拡大写真。(下) ペイロード全体写真(ラジエータには地上待機時用の桃色の保護カバーが掛かっている)。