

宇宙線反粒子探索GAPS実験計画の現状報告

JAXA	福家英之, 小川博之, 岡崎峻, 西城大, 徳永翔, 山谷昌大, 吉田哲也
青山学院大	中上裕輔, 和田拓也, 吉田篤正
神奈川大	入江優花, 小松明寛, 清水雄輝, 鈴木俊介
ROIS	小財正義
信州大	加藤千尋, 宗像一起
東海大	河内明子, 川俣柊介, 川本裕樹, 奈良祥太郎, 大山千晶, 鈴木直康, 高橋俊
Columbia Univ.	C.J. Hailey
INFN	M. Boezio

for the GAPS collaboration <https://gaps1.astro.ucla.edu/gaps/authors/>

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ブである宇宙線反重陽子の高感度探索によって多角的なDM研究の一翼を担う[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

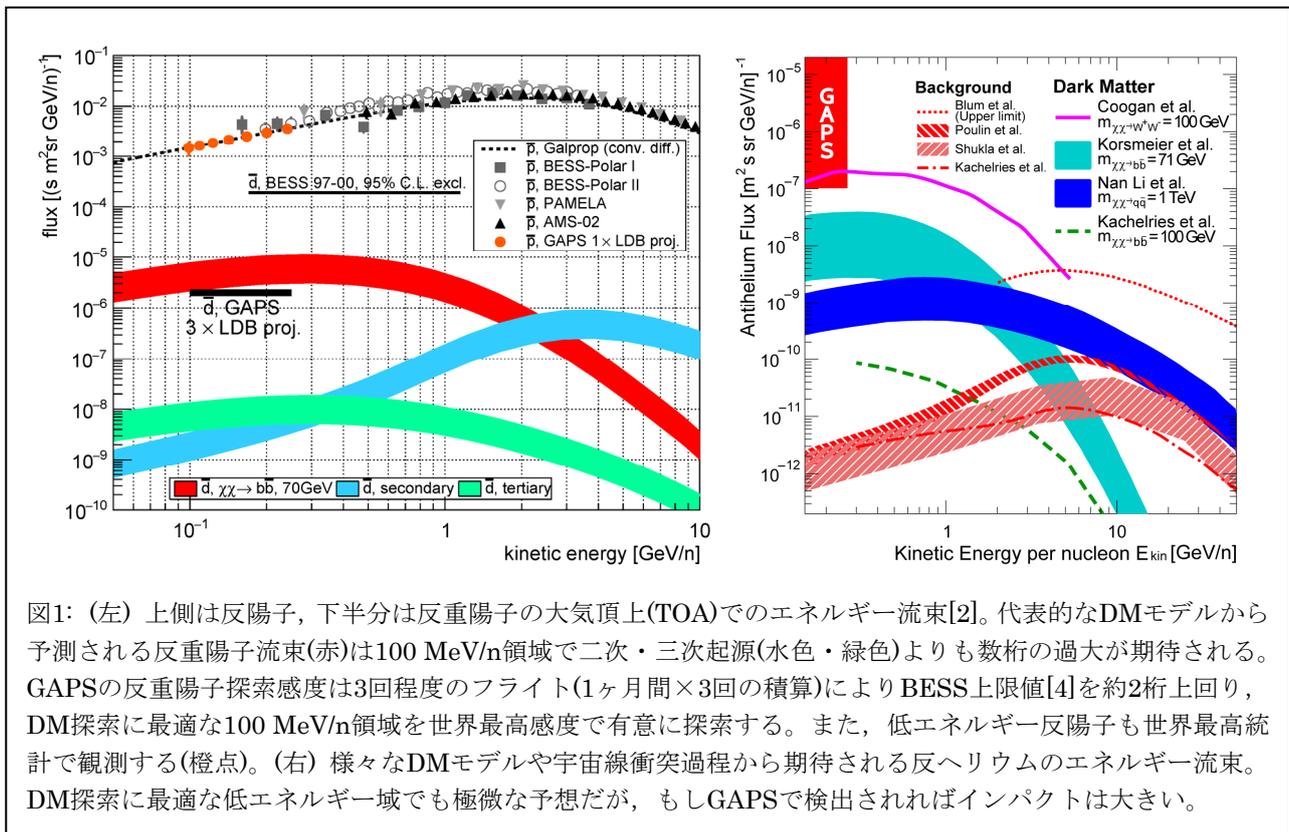


図1: (左) 上側は反陽子, 下半分は反重陽子の大气頂上(TOA)でのエネルギー流束[2]。代表的なDMモデルから予測される反重陽子流束(赤)は100 MeV/n領域で二次・三次起源(水色・緑色)よりも数桁の過大が期待される。GAPSの反重陽子探索感度は3回程度のフライト(1ヶ月間×3回の積算)によりBESS上限値[4]を約2桁上回り、DM探索に最適な100 MeV/n領域を世界最高感度で有意に探索する。また、低エネルギー反陽子も世界最高統計で観測する(橙点)。(右) 様々なDMモデルや宇宙線衝突過程から期待される反ヘリウムのエネルギー流束。DM探索に最適な低エネルギー域でも極微な予想だが、もしGAPSで検出されればインパクトは大きい。

されている[2]。図1に例を示すとおり、DM起源の反重陽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。一方、他の宇宙線種と同様に反重陽子も宇宙線物理学的なバックグラウンドとして二次・高次の起源(宇宙線と星間物質との衝突起源)が存在しうるが、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。そのため、0.1 GeV/n付近では宇宙線衝突起源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ことができる。理論パラメータ空間に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は既存の探索上限値[4]を約2桁上回る高感度探索[5]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。また、低エネルギー反陽子の高統計観測[6]や低エネルギー反ヘリウムの高感度探索[7]によってもDMなどの宇宙物理の諸課題に貢献する(いずれも図1参照)。

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, 2, 8]。

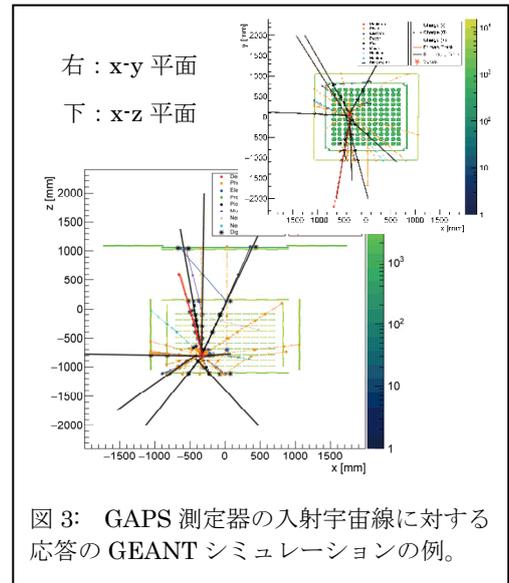
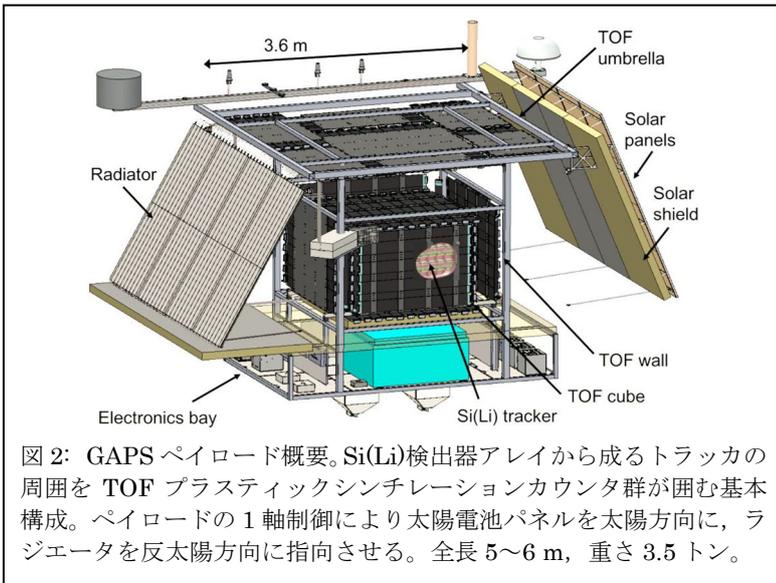
GAPS測定器(図2)はリチウムドリフト型シリコン半導体検出器[Si(Li)]アレイとその周囲を二重に囲むプラスチックシンチレーションカウンタ群(TOF)で構成される。到来する低エネルギー宇宙線反粒子は内外二層のTOFカウンタを通過したのち、積層されたSi(Li)検出器を通過中にエネルギー損失により減速・捕獲され、Siと励起エキゾチック原子を構成する。励起エキゾチック原子はナノ秒オーダーですぐ崩壊する。この崩壊(脱励起)過程にて特性X線が放出され、反粒子とSi原子核との核子対消滅により π や p のハドロン群が放出される。励起エキゾチック原子の崩壊過程や π と p の生成数は捕獲された反粒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。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は南極マクマード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の抑制には太陽活動静穏期での観測実施が望ましい。計3回の南極飛行でのべ100日間を飛行できれば $10^{-6} (\text{m}^2 \text{s sr GeV/n})^{-1}$ 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)」にて確認した[9, 10]。その後、詳細設計を進め、2019年から実機製作フェーズに移行した。2020年に入り新型コロナウイルス感染拡大により日米伊とも計画の遅滞を余儀なくされるなど困難に直面しているが、各機関での開発・準備は粛々と進めている。実機各構成要素から成る1/10スケールモデル「GFP (GAPS functional prototype)」での確認試験(地上試験)を経て、フルスケール実機の構築や各種総合試験を進め、2022年12月の第1回南極気球実験実施を目指す計画である。

4. Si(Li)検出器の開発

GAPS特有の諸条件を満たすべく我々が開発したSi(Li)検出器は大型(直径10 cm, ウェハ内セグメント数8), 肉厚(厚さ2.5 mm), 高エネルギー分解能(使用温度 ≤ -35 °Cにて20~100 keVのX線に対して4 keV)という特色を持つ。Si(Li) 4素子毎にユニット化し、縦6×横6の36ユニットを平面状に連結し、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。GAPSは、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することで、千個以上のSi(Li)センサを約90%の高い良品率で量産することに成功した[11, 12]。この前例の無い大型Si(Li)の量産で得られたデータの解析も進めており、Si(Li)センサの設計・製法の妥当性の検証や将来への指針の獲得を目指している[13]。また、Si(Li)センサの他用途への応用検討も行っている[14]。



5. 測定器設計の最適化検討

GEANTモンテカルロ数値シミュレーションを用いて測定器の設計最適化やトリガー設計, フライト後を見据えた飛跡再構成アルゴリズムや反粒子識別スキームの詳細検討を進めている[15]。

また, 機械学習(深層学習)技術の導入による反粒子識別能力の更なる発掘・向上も模索している。既に特定の条件下では機械学習の効果を確認しており, 適用条件の拡大を図っている[16]。

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[17]。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系における均温性や信頼性の強化を狙っている点も特徴的である[18]。

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。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、気球の実フライト環境下にて希薄気体の対流などがもたらすラジエータの熱収支を高精度で検証する必要がある。我々は大樹での2012年のpGAPS気球実験[10]、米国Ft. Sumnerでの2018年のNASA #689N実験[19] および 2019年のNASA#700NT実験[20]にラジエータのスケールモデルをビジーバックとして搭載することで、検証データを取得し、ラジエータの冷却能力を確認した。また、数値流体力学(CFD)を用いてヒートパイプ配管内の流動への理解を深める研究も進めている[21]。

なお、輻射放熱によるラジエータ冷却は対流の支配的な地上では機能しない。フライトに先立つ地上でのペイロードの動作確認時にSi(Li)検出器アレイを実験室で簡便に冷却するため、冷凍機(チラー)を用いてラジエータを電氣的に冷却してアレイ冷却を実現する地上冷却系も開発している(図4)[22]。

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。前述のとおり1/10スケールモデルGFPでの測定器各構成要素の確認試験(図4)を経て、フルスケールの測定器フライトモデルのインテグレーションや各種環境試験を順次行い、南極気球実験実施に向けた準備を進める。

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 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, JP20K04002, JP20K14505)、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. M. Kozai et al., J. Phys. Conf. Series, **1468** (2020) 012049;
福家英之 他, 大気球シンポジウム (2020 年度) isas20-sbs-006;
福家英之 他, 宇宙科学シンポジウム (第 21 回, 2021 年) Pb-05;
福家英之, 日本物理学会誌 **76**(9) (2021) 601.
2. T. Aramaki et al., Phys. Rep. **618** (2016) 1;
P.v. Doetinchem et al., JCAP **08** (2020) 035.
3. Baer et al., JCAP **512** (2005) 8.
4. H. Fuke et al., Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 081101.
5. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **74** (2016) 6.
6. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **59** (2014) 12.
7. N. Saffold et al., Astropart. Phys. **130** (2021) 102580.
8. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **49** (2013) 52.
9. 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.
10. H. Fuke et al., JAI **6**(2) (2017) 1740006.
11. 福家英之 他, 大気球シンポジウム (H29 年度) isas17-sbs-029;
K. Perez et al., NIM A **905** (2018) 12.
12. M. Kozai et al., NIM A **947** (2019) 1662695;
F. Rogers et al., JINST **14** (2019) P10009.;
13. N. Saffold et al., NIM A **997** (2021) 165015.
14. M. Kozai et al., IEEE NSS/MIC (2021) N-28-196.
15. H. Fuke et al., IEEE NSS/MIC (2021) N-09-123.
16. 山谷昌大 他, 日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021 年), 13aW3-4;
T. Wada et al., Trans. JSASS, Aerospace Tech. Japan **18**(3) (2020) 44;
今福拓海 他, 宇宙科学情報解析シンポジウム (2020 年度);
中上裕輔 他, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 15aT4-3.
17. S. Okazaki et al., Applied Thermal Engineering **141** (2018) 20.
18. H. Fuke et al, Trans. JSASS, Aerospace Tech. J. **14** (2016) Pi17;
近藤愛実 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.
19. 岡崎峻 他, 大気球シンポジウム (H30 年度) isas18-sbs-008.
20. 小財正義 他, 大気球シンポジウム (2019 年度) isas19-sbs-040;
岡崎峻 他, 大気球シンポジウム (2019 年度) isas18-sbs-041.
21. 竹村薫 他, 宇宙科学シンポジウム (第 19 回, H31 年) P-145;
奈良祥太郎 他, 数値流体シンポジウム (第 34 回, 2020 年) C01-2.
22. 竹内崇人 他, 宇宙科学シンポジウム (第 20 回, 2020 年) P2-44;
小林聖平 他, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 14pSN-9.