

宇宙線反粒子探索GAPS実験計画の近況報告

JAXA	福家英之, 小財正義, 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	今村光拓, 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	今西優香, 河内明子, 小林聖平, 本木誠人, 奈良祥太郎, 高橋俊, 竹村薫
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 <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

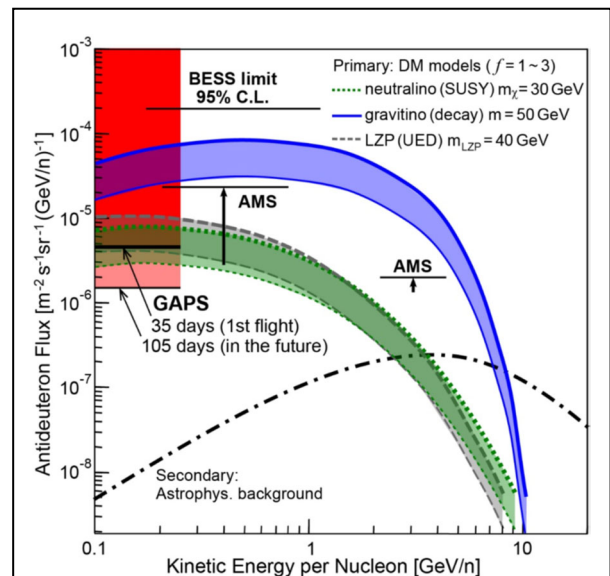


図1: TOA反重陽子エネルギー流束。3種類のDMモデル例から予測される反重陽子流束を帯で示す(帯の上端は宇宙線伝播の増幅因子 $f=3$, 下端は $f=1$ に相当)。二次起源(一点鎖線)との差異が0.1 GeV/n領域で顕著である。AMS-02 (予想, 5年間)は地磁気補正による感度悪化(矢印)を避けられない[9]。GAPSは第1回飛翔(35日間)と将来の積算(105日間)によりBESS上限値[6]を1.5~2桁上回る感度に到達し、DM探索に最適な0.1 GeV/n領域を世界最高感度で有意に探索する。

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[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る(最近、GAPSと同様のエキゾチック原子法(後述)を用いた観測計画が複数提案されるようになってきたが、いずれもまだ萌芽段階にある)。GAPSは既存の探索上限値[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、低エネルギー反陽子のかつてない高統計観測[8]や低エネルギー反ヘリウムの高感度探索によってもDMモデルの検証に貢献する。

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(図2a)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。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。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回の南極飛翔でのべ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翔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年に入り新型コロナウイルス感染拡大(いわゆるコロナ禍)によりNASA気球プログラム全体が1年延期され、また、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。今後、実機各構成要素から成る1/10スケールモデル「GFP (GAPS functional prototype)」によるシステム実証(地上試験)を2021年前半に行ったうえで、実機のフルスケール構築と各種総合試験を経て、2022年12月の第1回南極気球実験実施へと進む計画である。

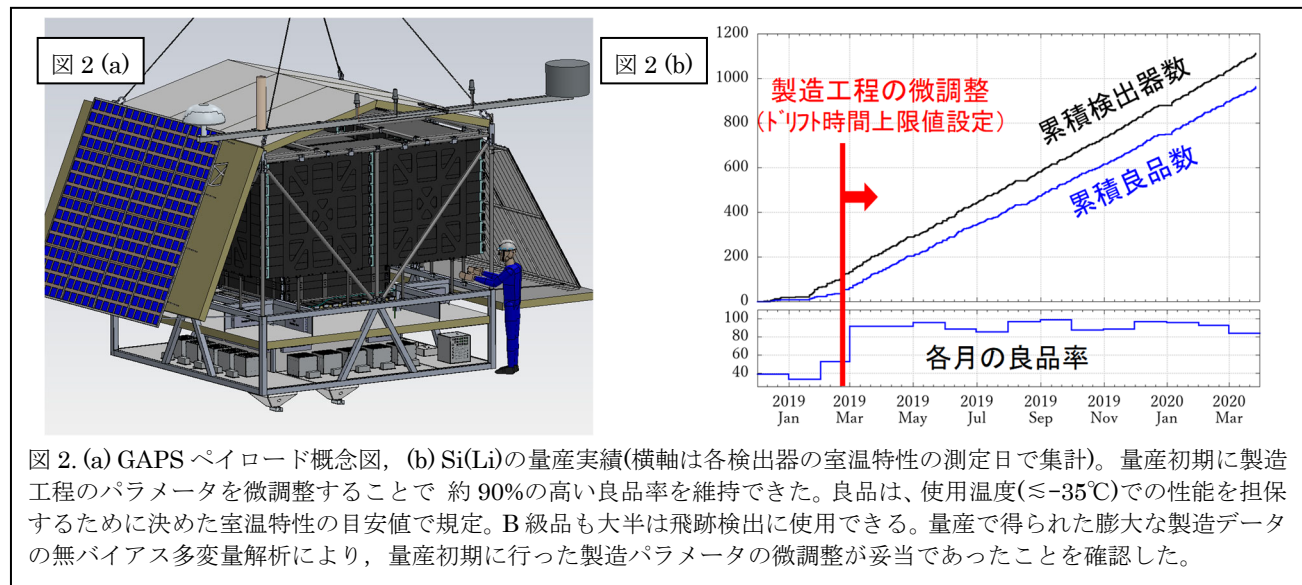
4. Si(Li)検出器の開発

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20~100 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($\geq 90\%$)、(4)液体窒素等の冷媒が不要、(5)気球飛翔の低圧環境下で放電しない印加電圧($HV \leq$ 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では良質な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した[13, 14]。

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。我々は2019年1月からSi(Li)センサの製作を本格的に開始し、2020年春までに1100個超を、しかも約90%の高い良品率で量産することに成功した(図2b)。現在、センサ表面の保護膜塗布[15]とユニット化・アレイ化を進めている。

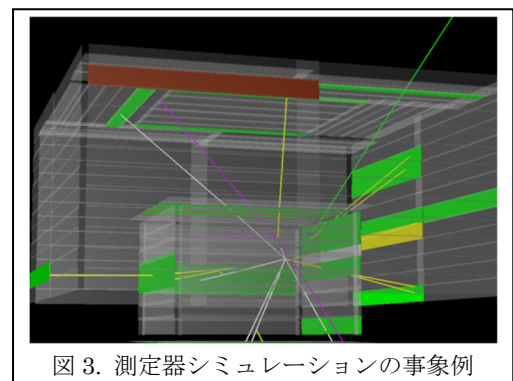


5. 測定器設計の最適化検討

Si(Li)と並ぶ主要構成要素のTOFカウンタに関しては、GEANT数値シミュレーションによる設計最適化[16]などの基礎検討を踏まえ、実機の製作を進めている。光検出器にはシリコン光電子増倍管(SiPM)を採用している。

GEANTは測定器全体の詳細設計やトリガー設計[17]にも用いている。GEANTソースコードチームと共同で特性X線のシミュレーション精度の大幅向上も達成した。ポストフライトを見据え、飛跡再構成アルゴリズムの詳細検討による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]。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[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(図4上)。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、米国Ft. SumnerでのNASA #689N (SIFT) 実験(2018年9月8日夕方に放球)およびNASA#700NT (LDB test flight)実験(2019年9月23日朝に放球)に

ラジエータのスケールモデルをピギーバックとして搭載する機会を得て、気球飛翔の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した。2018年の飛翔時は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ものの、ラジエータ温度は約 -70°C 以下に達し、ラジエータ冷却能力の最低限の実証には成功した[22]。2019年の飛翔時は、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て、より高質なデータを得ることができ、期待通りのラジエータ冷却能力を確認できた[23]。

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。フライトに先立つペイロードの動作確認時にSi(Li)検出器アレイを実験室にて簡易的に冷却するため、冷凍機(チラー)を用いてラジエータを電氣的に冷却することでアレイ冷却を実現する地上冷却系の開発も進めている(図4下)[24]。

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 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

- H. Fuke et al., JPS Conf. Proc. **18** (2017) 011003;
福家英之 他, 大気球シンポジウム (2019 年度) isas19-sbs-039;
福家英之 他, 宇宙科学シンポジウム (第 20 回, 2020 年) P2-43.
- Donato et al., Phys. Rev. D **78** (2008) 043506.
- Baer et al., JCAP **512** (2005) 8.
- Dal et al., Phys. Rev. D **62** (2014) 103504.
- Donato et al., Phys. Rev. D **62** (2000) 043003.
- H. Fuke et al., Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 081101.
- T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **74** (2016) 6.
- T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **59** (2014) 12.
- T. Aramaki et al., Phys. Rep. **618** (2016) 1;
P.v. Doetinchem et al., JCAP **08** (2020) 035.
- T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **49** (2013) 52.
- 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.
- H. Fuke et al., JAI **6**(2) (2017) 1740006.
- 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., NIM A **905** (2018) 12.
- M. Kozai et al., NIM A **947** (2019) 1662695;
F. Rogers et al., JINST **14** (2019) P10009.
- N. Saffold et al., NIM A (submitted).
- 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.
- 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.
- T. Wada et al., Trans. JSASS, Aerospace Tech. Japan **18**(3) (2020) 44;
和田拓也 他, 宇宙科学シンポジウム (第 20 回, 2020 年) P2-45.
- S. Okazaki et al., Applied Thermal Engineering **141** (2018) 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.
- 竹村薫 他, 宇宙科学シンポジウム (第 19 回, H31 年) P-145.
- 岡崎峻 他, 大気球シンポジウム (H30 年度) isas18-sbs-008.
- 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.
- 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.

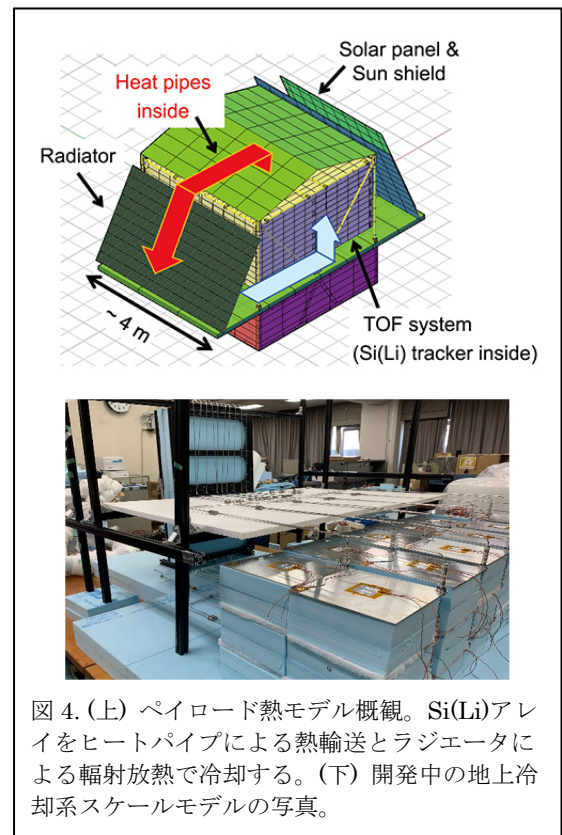


図 4. (上) ペイロード熱モデル概観。Si(Li)アレイをヒートパイプによる熱輸送とラジエータによる輻射放熱で冷却する。(下) 開発中の地上冷却系スケールモデルの写真。