

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, 崎本 一博, 吉田 哲也
青山学院大	小灘 拓矢, 竹内 崇人, 和田 拓也, 吉田 篤正, 渡邊 翼
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	宗像 一起, 加藤 千尋
東北大	永井 大樹
東海大	河内 明子, 近藤 愛実, 宮崎 耀佑, 高橋 俊
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 Si(Li)検出器の開発のほか、計算機シミュレーションによる測定器設計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

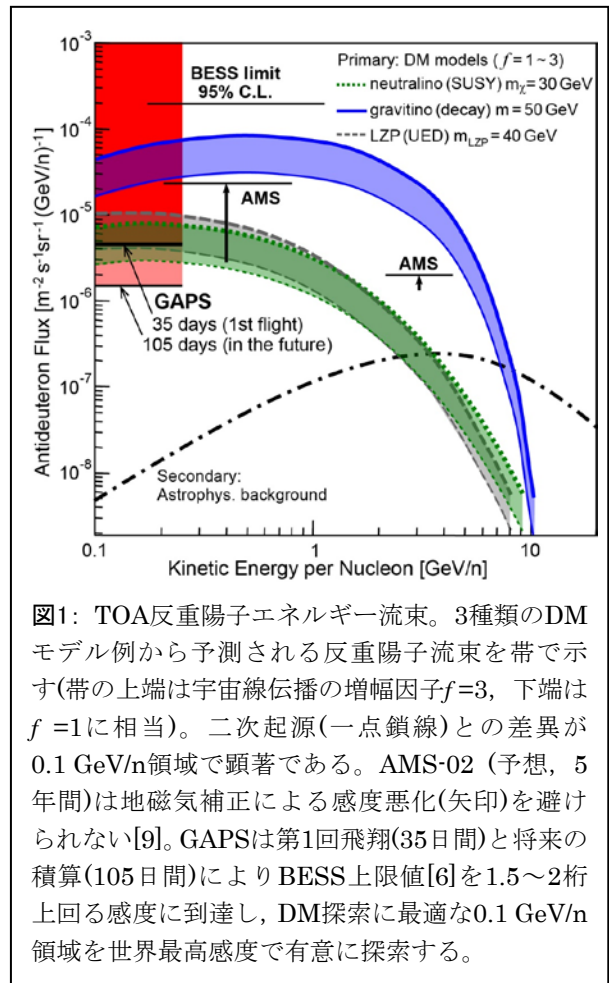


図1: TOA反重陽子エネルギー流束。3種類のDMモデル例から予測される反重陽子流束を帯で示す(帯の上端は宇宙線伝播の増幅因子 $f=3$, 下端は $f=1$ に相当)。二次起源(一点鎖線)との差異が0.1 GeV/n領域で顕著である。AMS-02 (予想, 5年間)は地磁気補正による感度悪化(矢印)を避けられない[9]。GAPSは第1回飛翔(35日間)と将来の積算(105日間)によりBESS上限値[6]を1.5~2桁上回る感度に到達し、DM探索に最適な0.1 GeV/n領域を世界最高感度で有意に探索する。

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。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)レイヤー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(通常原子の電子 1 個が他の負電荷粒子で置換されたもの)を構成する。励起状態のエキゾチック原子は nsec オーダーですぐ崩壊する。崩壊過程にてエネルギー準位の差分に相当する特性 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 生成数を測定し飛跡の vertex も特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、太陽活動が次期極小を迎える 2020 年に第 1 回の観測を予定している。計 3 回のフライトでのべ 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)。なお、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]。

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(約 6 g/cm^2)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($\sim 30\text{m}^2$)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。

図 2(a)に量産向け Si(Li)検出器開発の骨子を示す。GAPS で開発した Si(Li)検出器は直径 10 cm (4 インチ), ウェハ内セグメント数 8, 厚さ 2.5 mm, エネルギー分解能 4 keV(使用温度 -35°C , リーク電流 $<5\text{nA}$)であり, GAPS の要求を満たし量産も可能な仕様である。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(図 2(b))。過去の Si(Li)使用例では搭載数量がせいぜい数十個程度であり, 千個オーダーの大型アレイ化は GAPS が初めてである。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とで, 高い良品率と低いコストで量産する目処を立てた[13]。

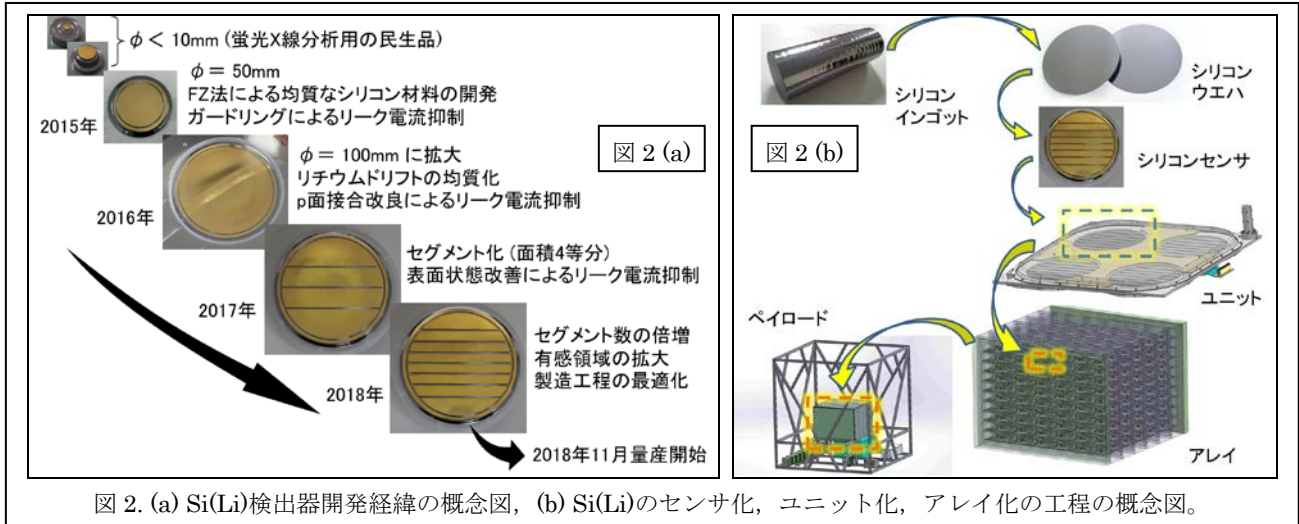


図 2. (a) Si(Li)検出器開発経緯の概念図, (b) Si(Li)のセンサ化, ユニット化, アレイ化の工程の概念図。

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 TOF カウンタの試作と 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[14]。

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, 各要素の配置最適化や反粒子識別のための飛跡再構築のアルゴリズム最適化に加え, トリガー設計検討も進めている。測定器の面積立体角は反粒子の高感度探索のために約 $20\text{ m}^2\text{sr}$ と大きい, フライト中のデータ処理緩和のためには陽子・ヘリウム等のバックグラウンド宇宙線(約 100 kHz)のトリガーレートを 1 kHz 以下に(即ち 1%以下に)抑制したい。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を設計し, 反粒子に対する高いトリガー効率とバックグラウンドの高い排他率を両立可能な目処を立てた[15]。そのほか, 機械学習(深層学習)技術の活用による反粒子識別能力の更なる向上も模索している。

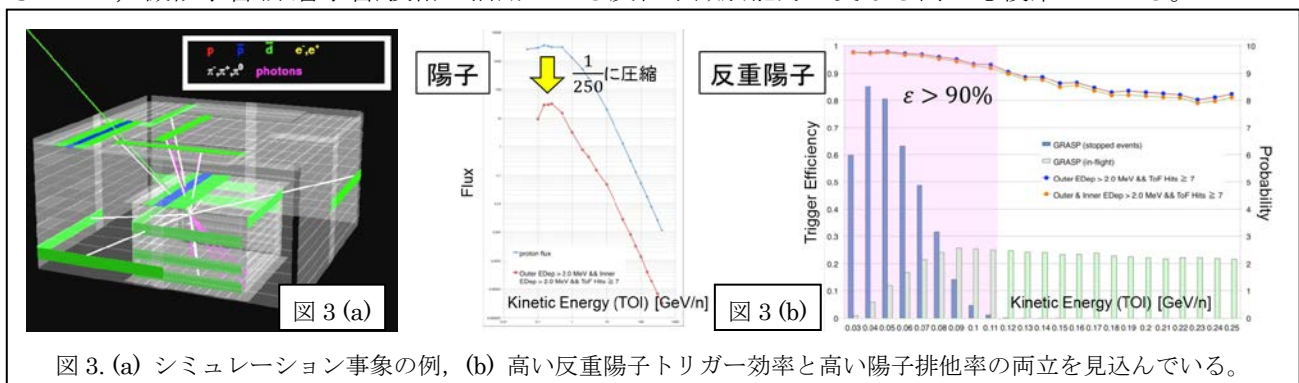


図 3. (a) シミュレーション事象の例, (b) 高い反重陽子トリガー効率と高い陽子排他率の両立を見込んでいる。

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 -35°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[16]。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を強化している[17]。

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 -50°C 以下へのパッシブな冷却は熱解析シミュレーション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る。pGAPS 気球実験で実証したラジエータも -50°C 以下を狙ったものではなかった[12]。そこで、気球フライトの実環境下でのラジエータの冷却能力を実証するべく、日米双方にて飛翔機会を探っている。日本では大樹での B18-04 (気球 VLBI 実験) [18]への相乗り機会を頂き準備を進めた(図 4)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(図 5)。データは無事に回収され、ラジエータ温度が約 -70°C 以下に達したことや熱解析と整合することは確認された[19]。これによりラジエータ冷却能力の最低限の実証には成功した。ただし、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、日米双方にて 2019 年の再フライト実施を目指している。

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。2019 年は測定器各構成要素のフライトモデルの量産を進め、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 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 SIFT チーム、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)、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、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 (H27 年度) isas15-sbs-045;
福家英之 他, 宇宙科学シンポジウム (第 18 回, H30 年) S09-001.
- 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.
- T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **49** (2013) 52.
- 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.
- H. Fuke et al., J. of Astronomical Instrumentation **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., Nucl. Instr. Meth. A **905** (2018) 12.
- 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.
- 蓑島温志 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.
- 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.
- 土居明広 他, 大気球シンポジウム (本抄録) isas18-sbs-002.
- 岡崎峻 他, 大気球シンポジウム (本抄録) isas18-sbs-008.

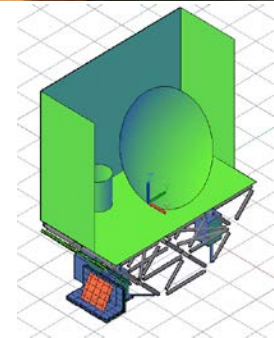
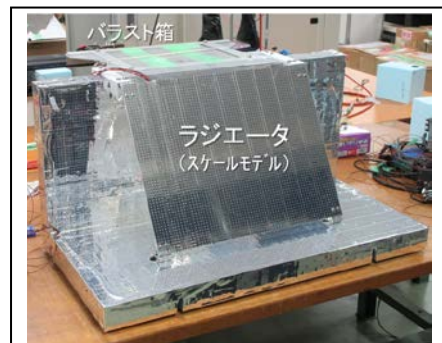


図 4. B18-04 に搭載予定だったラジエータの写真と熱モデル

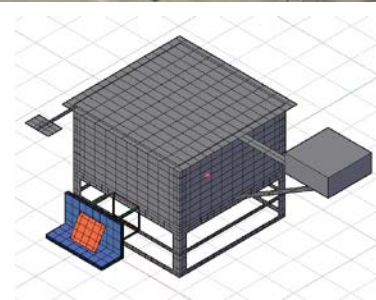


図 5. NASA #689N に搭載したラジエータの写真と熱モデル