

南極周回気球による宇宙線反粒子探索実験 GAPS の現状報告

神奈川大	清水雄輝, 入江優花, 橋本航征, 鈴木俊介
青山学院大	和田拓也, 吉田篤正
JAXA	福家英之, 水越慧太, 小川博之, 岡崎峻, 白鳥弘英, 徳永翔, 山谷昌大, 吉田哲也
ROIS	小財正義
信州大	加藤千尋, 宗像一起
東海大	新垣翔太, 平井克樹, 河内明子, 川俣佟介, 川本裕樹, 奈良祥太郎, 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)は、NASAの南極周回気球を用いた宇宙線反粒子探索実験であり、エキゾチック原子崩壊過程を利用した独自の検出原理による宇宙線中の反原子核の測定を目的としている。GAPSは日米伊の国際共同研究として進められており、日本チームでは主に測定器の中核となるシリコン検出器の開発や熱設計、計算機シミュレーションによるデータ解析手法の研究を行ってきた。本発表では、日本チームの活動状況を中心に、GAPS計画の現状について報告する。

2. GAPS 計画の目的

銀河系内を往来する反粒子は、暗黒物質や原始ブラックホール等の未解明の物理現象を起源としている可能性がある。このうちの暗黒物質は、宇宙全体の物質・エネルギー組成の約27%を占めることが分かっており、これは「通常物質」であるバリオン成分の約5倍の質量に相当する。その正体は依然不明であるが、通常物質とほとんど相互作用をしない粒子(Weakly Interacting Massive Particle, WIMP)として存在する可能性が高い。WIMPを対象とした暗黒物質の探索は地下実験による直接探索が主流であるが、WIMPがマヨラナ粒子である可能性や、寿命を持ち得ることが理論的に示唆されており、その対消滅や崩壊で生じる観測可能な反粒子に着目した間接探索が近年注目されている。これまでのWIMP間接探索の例として、FermiやAMS-02による宇宙線電子・陽電子測定における陽電子過剰の報告等があるが[1,2]、太陽系近傍パルサー等を起源とする陽電子である可能性も否定できず、WIMPの存在を裏付ける決定的な証拠は現時点で見つかっていない。一方で、WIMPに由来する反粒子のうち、反重陽子以上の質

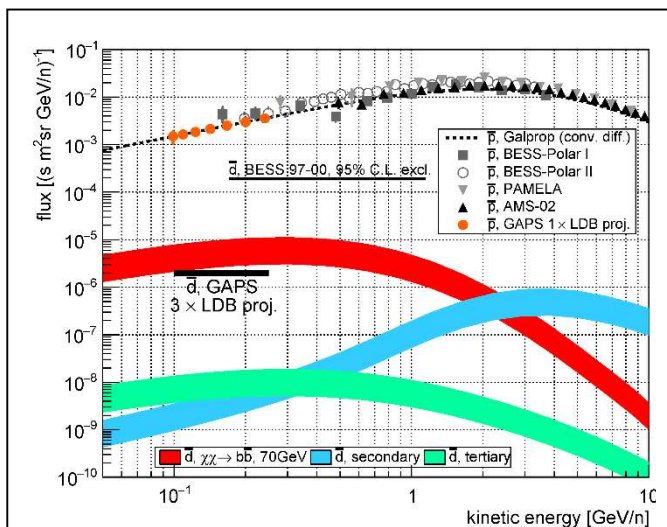


図1 反陽子フラックス測定値および反重陽子の予想フラックス(赤: WIMP対消滅で生成される反重陽子の理論モデルによる予想値、青: 高エネルギー宇宙線による二次成分、緑: 三次成分)[2]。

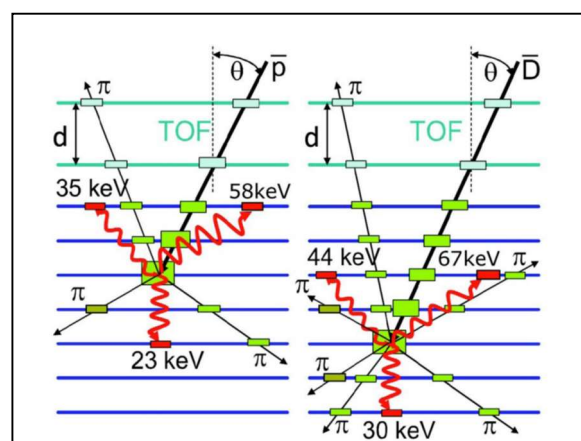


図2 GAPSの反粒子検出原理(左: 反陽子、右: 反重陽子)。TOFカウンタの通過による飛行時間測定の後、入射反粒子はSi(Li)検出器アレイ内で減速して捕獲される。形成されたエキゾチック原子の崩壊過程により特性X線が放出されるとともに、その後の核子対消滅によってハドロン粒子群が生成される。

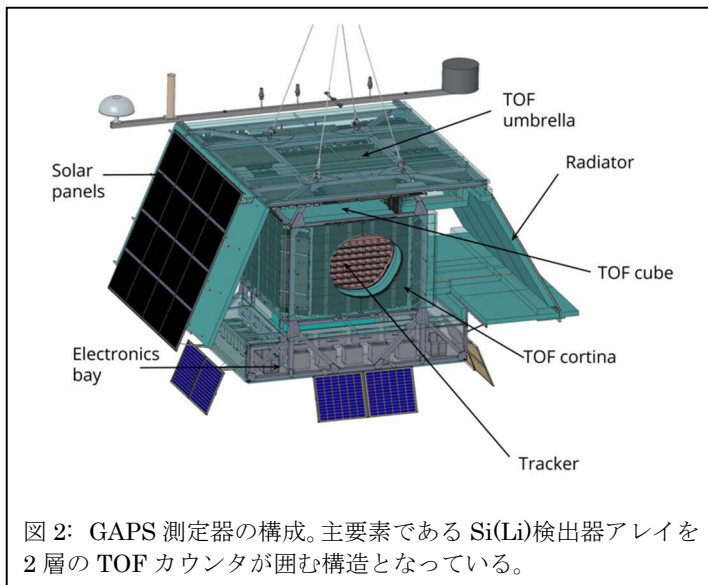


図2: GAPS 測定器の構成。主要素である Si(Li)検出器アレイを2層の TOF カウンタが囲む構造となっている。

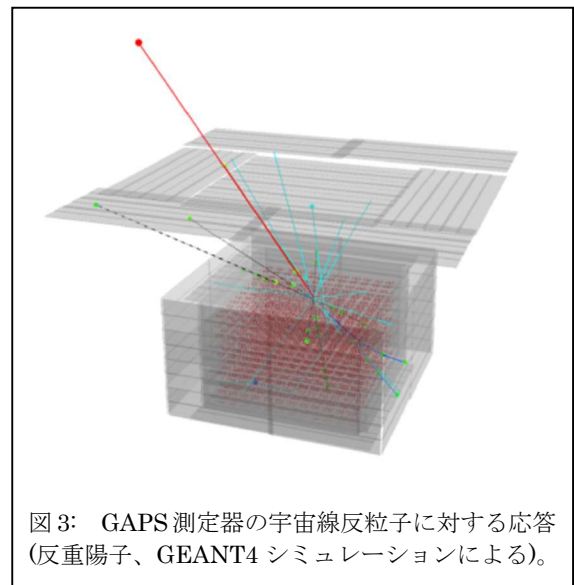


図3: GAPS 測定器の宇宙線反粒子に対する応答(反重陽子、GEANT4 シミュレーションによる)。

量をもつ反原子核は、陽子などの高エネルギー宇宙線が星間ガスと衝突して生じる二次成分バックグラウンドが十分に少ないことが予想される[3,4]。図1に、代表的なWIMP理論モデルから予想される反重陽子フラックス、および高エネルギー宇宙線に由来する二次・三次成分バックグラウンドを示す。WIMPから生じる反重陽子は、sub-GeV領域にてバックグラウンドと比較して2桁以上のフラックスがあり、WIMP探索における最有力チャンネルとなり得る。これまでに観測例はなく、1イベントの観測であっても大きなインパクトとなる。しかし、その存在量は極めて希少であることが予想されるため、観測にはこれまでにない高い検出感度と粒子識別能が求められる。

3. GAPS 測定器と計画の概要

GAPSでは、WIMP探索において有利となるsub-GeV領域での反粒子測定を実現するため、反粒子が形成するエキゾチック原子を利用した独自の検出原理を採用する[5,26]。原子が反粒子を捕獲して形成するエキゾチック原子の脱励起で生じる特性X線と、その後の反粒子と原子核中の核子との対消滅によって生じる π 中間子や陽子のハドロン粒子群を捉えることにより、高精度で反粒子の同定を行うことができる。この方法では、反粒子測定で従来使用されてきたマグネットスペクトロメータと比較して、検出器の積層により比較的容易に面積立体角の大型化を実現可能である。図2にGAPS測定器の構成を示す。測定器は、専用に開発した大容積リチウムドリフト型シリコン(Si(Li))検出器と、それを囲むプラスチックシンチレーションTime-of-Flight(TOF)カウンタから構成される。1000個以上のSi(Li)素子を積層したSi(Li)検出器アレイによって、入射反粒子を減速・捕獲し、その後放出される特性X線およびハドロン粒子群の測定を同時に行う。この検出方法により、反重陽子に対してSub-GeV領域で高い検出感度と粒子識別能を両立できることがGAPSの特徴である。

GAPS計画ではこれまで、測定器の主要素であるSi(Li)検出器の開発を行い、要求されるエネルギー分解能4 keV以下を実現するとともに[6,7]、高い良品率でその量産に成功した[8-12]。Si(Li)検出器は漏れ電流による熱雑音を抑えるために冷却が必要であり、大型ラジエータパネルとマルチループ型ヒートパイプからなる専用の熱制御システムの研究開発を並行して進めてきた[14-22]。また、計算機シミュレーションを通して測定器設計の最適化し、主観測対象である反重陽子[23]に加えて、GAPSによりフラックスの精密測定が可能な反陽子[24]、反重陽子同様に観測例のない反ヘリウム[25]に対する観測感度の評価を行ってきた。現在は測定器フライトモデルの組み立てを進めている段階である。2023年度以降、NASAの南極周回気球に測定器を搭載し、南極上空高度35km以上での3回の長期間観測フライト(計100日程度)を予定している。

4. 計算機シミュレーションに基づくデータ解析手法の最適化

粒子相互作用を計算するフレームワークGEANT4を用いたモンテカルロシミュレーションにより、観測データ解析手法の最適化の研究を進めている。測定器内で反粒子の引き起こす反応や各検出器での信号等を再現した模擬観測データを生成し、入射粒子の速度・運動エネルギーや粒子種を判定するアルゴリズムの開発を行っている。GEANT4により計算した、GAPS測定器の入射反粒子に対する応答を図3に示

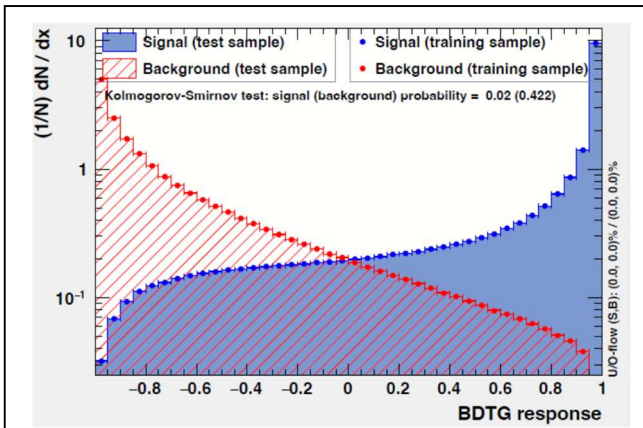


図4 Boosted Decision Treeによる反陽子バックグラウンドからの反重陽子の弁別(青：反重陽子、赤：反陽子)。横軸の判定基準値の1付近を取ることで、反陽子を除去できる。

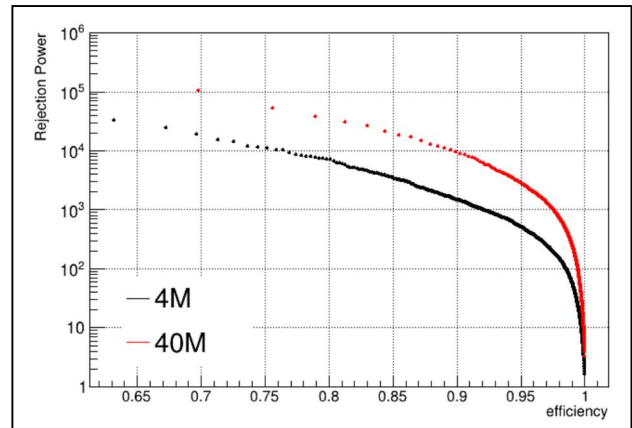


図5 畳み込みニューラルネットワークと全結合ニューラルネットワークの組み合わせによる、反重陽子測定における反陽子バックグラウンド除去性能。学習にそれぞれ400万(黒)、4000万(赤)イベントを使用。

す。各検出器の応答として、TOFカウンタにおける損失エネルギーおよび粒子通過時刻、Si(Li)検出器アレイにおける損失エネルギーが計測され、これらのデータから入射粒子や二次粒子の飛跡を踏まえたイベント再構成を行うことで、イベントごとに各種の物理量を得る。観測データ解析においては、反陽子バックグラウンドイベントと反重陽子候補イベントの識別が特に重要となるが、得られた物理量を用いた多変量解析によって行う。多数の物理量を用いながら識別能力の最適化を図るため、Boosted Decision Treeなどの機械学習アルゴリズムを用いた解析手法の開発を行っている(図4左)[27,28]。また、イベント再構成により算出される物理量に基づく解析と並行して、近年様々な分野にて発展の著しい深層学習の一種である畳み込みニューラルネットワークを応用したパターン認識手法の利用を試みている。立体的に配置されたSi(Li)検出器アレイの信号を三次元畳み込みニューラルネットワーク、TOFカウンタの信号を全結合ニューラルネットワークにそれぞれ入力して結合する手法を開発し、実用可能なレベルでの粒子識別性能を実現している(図4右)[29-32]。

5. GAPS 測定器の組み立てと Si(Li)検出器冷却システムの設置

現在、カリフォルニア大学バークレー校宇宙科学研究所内にて、GAPS測定器フライトモデルの組み立てが進められている。日本から輸送されたSi(Li)検出器を、ポリエチレンフォームで保持しながら積層し、測定器の中核をなすSi(Li)検出器アレイを構築した。Si(Li)検出器は、ノイズ低減のために専用の熱制御システムにより約-40℃以下に冷却して使用する。中央部に位置するSi(Li)検出器からの排熱のため、測

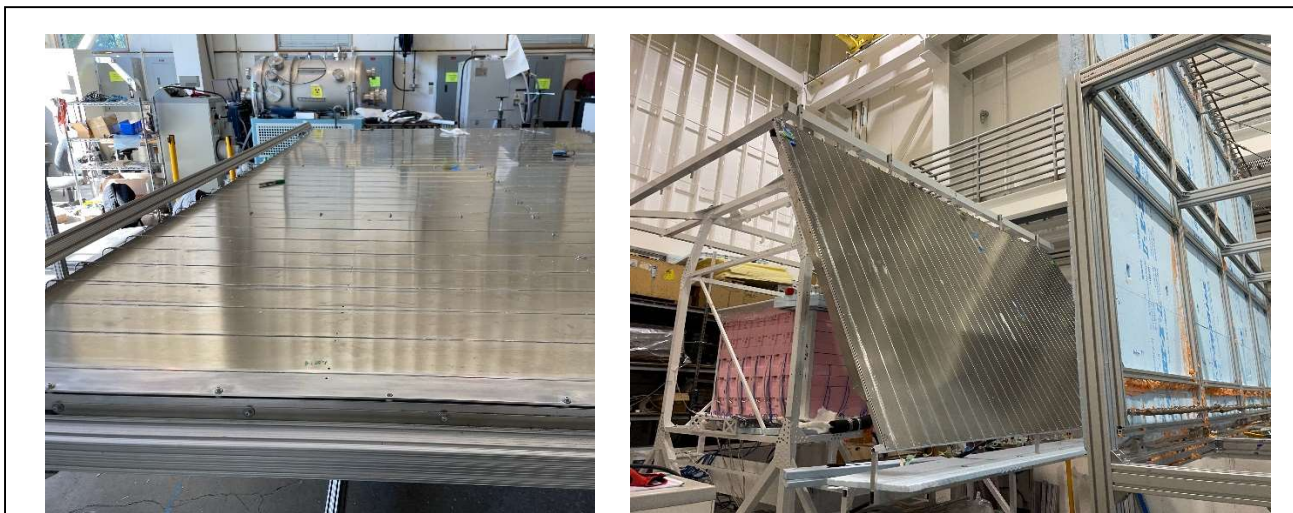


図5 ラジエータパネル(左)および測定器への熱制御システムの組み込みの様子(右)。測定器中央にはポリエチレンフォームで保護されたSi(Li)検出器アレイがあり、その側面にラジエータパネルが配置される。Si(Li)検出器アレイとラジエータパネルはヒートパイプにより接続されている。地上試験時には専用の冷却システムによりラジエータパネルを冷却することで、Si(Li)検出器を冷却する。

定器側面に配置された大型ラジエータパネルと検出器をヒートパイプで結合し、専用に開発した制御ボードによりモニタリングしながら冷却を行う[33,34]。日本側で開発・製造した冷却システムをカリフォルニア大学に輸送し、測定器への組み込みおよび冷却試験を行った。図4に、ラジエータパネルおよび冷却システムの測定器への組み込みの様子を示す。気球高度では熱放射によって冷却が行われるが、地上試験時には利用できないため、別途開発を行った地上冷却システムによりラジエータパネルを冷却することでSi(Li)検出器を冷却する方式をとっている[35,36]。

6. 南極での観測フライトに向けて

現在GAPS計画は、南極における観測フライト実施に向けて、測定器の組み立てを行っている段階である。世界的なコロナ禍により、電子部品の調達遅延や国際輸送の遅延の影響を受けながらも、実験準備を着実に進めている。測定器フライトモデルの完成後、機能・性能試験としての宇宙線ミュオン測定、NASAの熱真空チャンバーによるフライト前の熱真空試験の実施を予定している。2023年度の初回フライトによる約1ヶ月の観測による宇宙線反粒子測定を皮切りに、合計3回の観測フライトを継続して行い、前例のない反重陽子や反ヘリウムを検出することで暗黒物質などの未解明の物理現象の解明を目指していく。

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。本研究の一部は科研費(JP17H01136, JP17K14313, JP18K13928, JP19H05198, JP20K04002, JP20K14505, JP22H00147, JP22KK0042, JP22K14065, JP22K20375), 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. S. Abdollahi et al., Phys. Rev. D **95**, 082007, 2017
2. M. Aguilar et al., Phys. Rev. Lett. **121**, 051102, 2018)
3. T. Aramaki et al., Phys. Rep. **618** (2016) 1
4. P.v. Doetinchem et al., JCAP **08** (2020) 035
5. 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 (2021 年度), isas21-sbs-027
福家英之 他, 宇宙科学シンポジウム (第 22 回, 2022 年) P-128
福家英之, 日本物理学会誌 **76**(9) (2021) 601
6. K. Perez et al., NIM A **905** (2018) 12
7. F. Rogers et al., JINST **14** (2019) P10009
8. M. Kozai et al., NIM A **947** (2019) 1662695
9. N. Saffold et al., NIM A **997** (2021) 165015
10. M. Kozai et al., IEEE NSS/MIC (2021) N-28-196
11. H. Fuke et al., IEEE NSS/MIC (2021) N-09-123
12. M. Kozai et al., NIM A **1034** (2022) 166820
13. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **74** (2016) 6
14. S. Okazaki et al., Applied Thermal Engineering **141** (2018) 20
15. H. Fuke et al, Trans. JSASS, Aerospace Tech. J. **14** (2016) Pi17
16. 近藤愛実 他, 大気球シンポジウム (H29 年度) isas17-sbs-031
17. 岡崎峻 他, 宇宙科学シンポジウム (第 18 回, H30 年) P-058
18. 岡崎峻 他, 大気球シンポジウム (H30 年度) isas18-sbs-008
19. 小財正義 他, 大気球シンポジウム (2019 年度) isas19-sbs-040
20. 岡崎峻 他, 大気球シンポジウム (2019 年度) isas19-sbs-041
21. 竹村薫 他, 宇宙科学シンポジウム (第 19 回, H31 年) P-145
22. 奈良祥太郎 他, 数値流体シンポジウム (第 34 回, 2020 年) C01-2
23. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **59** (2014) 12
24. F. Rogers et al., Astropart. Phys. In Press, 102791
25. N.Saffold et al., Astropart. Phys. **130** (2021) 102580
26. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **49** (2013) 52
27. 山谷昌大 他, 日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021 年), 13aW3-4
28. M. Yamatani et al., DM3 Workshop (2022)
29. T. Wada et al., Trans. JSASS, Aerospace Tech. Japan **18**(3) (2020) 44
30. 今福拓海 他, 宇宙科学情報解析シンポジウム (2020 年度)
31. 中上裕輔 他, 日本物理学会 2021 年秋季大会, 15aT4-3
32. Y. Nakagami and M. Yamatani et al., 33rd ISTS (2022) 2022-m-08
33. 小財正義 他, 日本物理学会第 77 回年次大会(2022), 17aA431-2
34. M. Kozai et al., COSPAR 2022 44th Scientific Assembly, TF-278
35. 竹内崇人 他, 宇宙科学シンポジウム (第 20 回, 2020 年) P2-44
36. 小林聖平 他, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 14pSN-9