

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

小財 正義^A, 浅尾 義士^B, 井上 剛良^C, 井上 拓哉^D, 大塚 壮平^E, 岡崎 峻^A, 小川 博之^A, 加藤 千尋^F, 河内 明子^D, 小池 貴久^G, 崎本 一博^A, 清水 雄輝^H, 高橋 克征^B, 高橋 俊^D, 大丸 拓郎^I, 永井 大樹^I, 橋本 岳^E, 福家 英之^A, 蓑島 温志^E, 宗像 一起^F, 山田 昇^B, 吉住 雄大^D, 吉田 篤正^E, 吉田 哲也^A, 渡邊 翼^E, 和田 拓也^E, T. Aramaki^J, S. Boggs^K, W.W. Craig^L, P.v. Doetinch^M, R. Fabris^N, F. Gahbauer^J, C.J. Hailey^J, N. Madden^J, S.A.I Mognet^O, K. Mori^J, R. Ong^O, K. Perez^P, K.P. Ziock^N, J. Zweerink^O

ISAS/JAXA^A, 長岡技科大^B, 東工大^C, 東海大^D, 青学大^E, 信州大^F, 大阪電通大^G, 神奈川大^H, 東北大^I, Columbia Univ.^J, UC Berkeley^K, LLNL^L, Univ. Hawaii^M, Oak Ridge NL^N, UCLA^O, MIT^P

1 概要

宇宙線中に僅かに含まれる反粒子の低エネルギー成分は、暗黒物質の探索プローブとして近年注目されている。GAPS (General Anti-Particle Spectrometer) は、新たな検出原理に基づく測定器を南極周回気球に搭載し、宇宙線反粒子の高感度観測を目指す実験計画である。ここでは GAPS 実験計画の現状を報告する。

2 研究背景

多くの暗黒物質モデルで、その対消滅や崩壊による低エネルギー反陽子・反重陽子の生成が予想されており、宇宙線反粒子は、各モデルの横断的な探索プローブとして注目される[e.g. 1]。例として軽い暗黒物質 (LSP neutralino、余次元 LZP の Dirac ニュートリノ、LSP gravitino) による反重陽子の予想スペクトルを、宇宙線起源 (Secondary) の予想スペクトルと共に図 1 に示す。100 MeV 付近では暗黒物質起源が宇宙線起源を卓越し、反重陽子が 1 事象でも確認されれば暗黒物質の存在を強く示唆する[2]。しかし、従来実験では低エネルギー反粒子の感度が低く、反重陽子は未発見である。現在唯一のフラックス上限値が BESS 実験で与えられているが[3]、予想フラックスと比べて 2 桁高い。AMS-02 実験は反重陽子の予想感度を公表していないが、5 年間の観測で GAPS 100 日間と同程度と推察される (図 1)。

GAPS ではエキゾチック原子を用いた新しい手法を導入する[4]。物質中で減速された反粒子は原子軌道に拘束され、励起エキゾチック原子を生成する。その崩壊により生成される特性 X 線と粒子 (π/p) 群から、反粒子を同定できる。GAPS ではシリコン検出器で反粒子を捕獲し特性 X 線・粒子群を検出する。この手法では、低エネルギー反粒子の検出とアレイ化による大型化が可能である[5]。

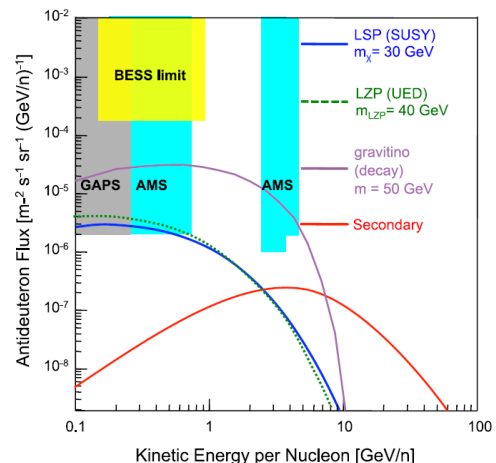


図 1: 反重陽子予想スペクトル、BESS 上限値と、AMS (5 年) 及び GAPS (100 日間) 予想感度[2]

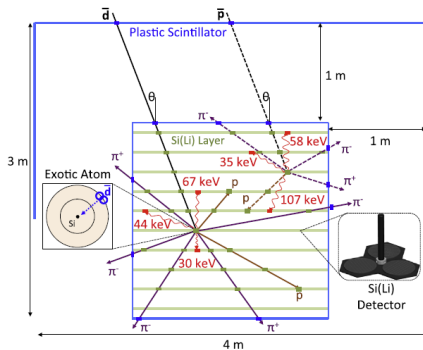


図 2: GAPS の反粒子検出原理。緑で示されたシリコン検出器アレイと青で示された TOF カウンタから成る[13]。

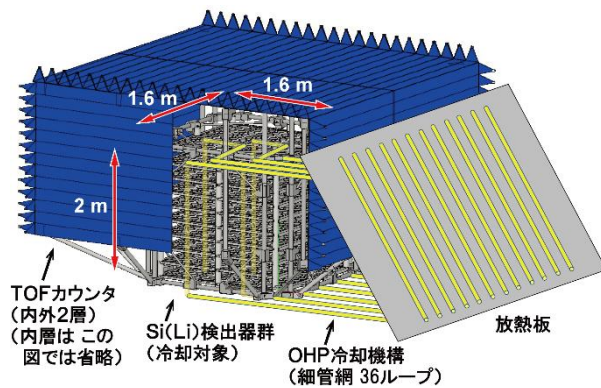


図 3: GAPS 測定器概念図

3 GAPS 測定器

GAPS 測定器はシリコン検出器アレイと TOF (time-of-flight) カウンタで構成される (図 2、3)。シリコン検出器アレイは反粒子のエネルギー吸収とトラッキング、特性 X 線のエネルギー測定、 π/p のトラッキングを担う。TOF カウンタはシリコン検出器アレイを 2 重に囲むプラスチックシンチレータ群から成り、トリガー生成と入射粒子の速度測定を担う。

測定器はトリガーに従い、TOF カウンタ及びシリコン検出器アレイでの吸収エネルギーと位置を記録する。反陽子・反重陽子はその TOF と飛程、特性 X 線エネルギー、 π/p 群の multiplicity から識別する。この手法により、図 1 の感度へ到達できる[6]。

エネルギー分解能維持のため、シリコン検出器アレイの発熱 (約 100 W) を OHP (Oscillating Heat Pipe) でラジエータへ輸送する。ラジエータ面の反対側には太陽電池を配置し、1 軸制御でラジエータを反太陽方向、太陽電池を太陽方向に指向させる[7-9]。

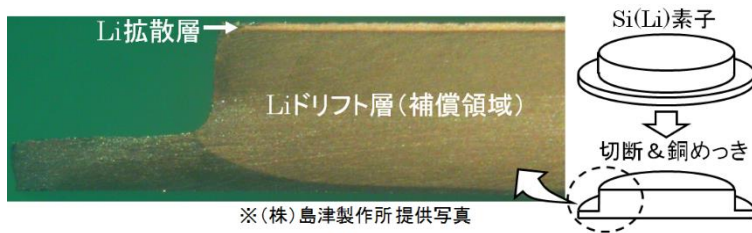
これまでに加速器実験[10-13]やプロトタイプ測定器 pGAPS の気球実験[14-19]を実施し、各要素の基本動作を実証した。現在は GAPS の実機製作へ向けた開発を進めている[20,21]。

4 各要素の開発状況

4.1 シリコン検出器

シリコン検出器アレイには、反粒子の減速材を兼ねる厚い有感層と統計を稼ぐための広い検出面積が求められる。検出器数を抑制しながらこれらを満たすため、大型 (厚さ 2.5 mm・直径 4 inch) のリチウムドリフト型シリコン (Si(Li)) 素子を 1350 個敷き詰めて 10 層のアレイとする。Si(Li)素子製造では P 型シリコンにリチウムを拡散・ドリフトしてアクセプタを補償する。厚い有感層が得られるが、直径 10 cm 以上の大型 Si(Li)素子はこれまで良品率が悪く、単体レベルでしか製造の実績が無い[22,23]。1000 個レベルでの量産を実現するため、(株)島津製作所の支援のもと、量産化に耐えうる製造法の開発を進めている。

大型 Si(Li)素子の製造では、リチウムの均一なドリフトが第一の課題となる。小型素子用の拡散・ドリフト装置を大型素子用へ改造し、大型素子の最適なドリフト方法を研究している (図 4)。次の課題がノイズの主要因となるリーク電流の削減である。まずは 2 inch 素子を用いて、ガードリングの作成など、リーク電流対策の最適化を進めている (図 5)。



※(株)島津製作所提供写真



図 4: 4 inch Si(Li)素子の破壊検査結果。切断面に銅めっきを施す事で、Li ドリフト層 (補償領域) を目視検査できる。

図 5: 2 inch Si(Li)素子へ設けたガードリング (円形の溝)

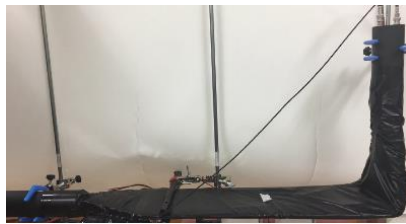


図 6: ストレート型 (左端) とカーブ型 (右端) のライトガイドを取り付けた評価試験用シンチレータ [26]

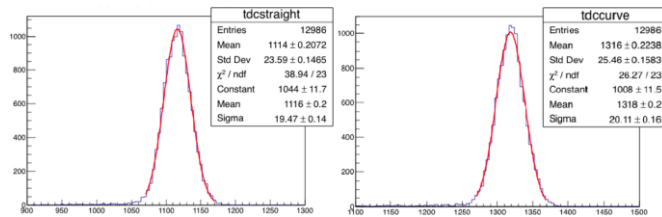


図 7: ストレート型 (左) とカーブ型 (右) のライトガイドでの TDC 値分布 [26]

4.2 TOF カウンタ

シミュレーションでの最適化に基づき [24,25]、TOF カウンタには幅 16 cm・長さ 1.6～1.8 m・厚さ 5 mm のパドル状プラスチックシンチレータを用いる。両端に取付けた PMT の出力の時間差で粒子通過位置を特定する。シンチレータ 2 層間の TOF から粒子速度を決め、反陽子・反重陽子を識別するには、0.5 ns の時間分解能が求められる。

シンチレータに対してストレートにライトガイドと PMT を取付けると、その部分がデッドスペースとなってしまう。そこで直角に湾曲したカーブ型ライトガイドの使用も検討しており、両形状の比較実験を行っている (図 6)。長さ 50 cm のシンチレータで試験した結果、光量、時間分解能ともにカーブ型の方が数%程度劣っていたが、デッドスペースの差に比べれば僅かな違いであった [26] (図 7)。但し、カーブ型でのマルチヒットなど検証すべき課題はまだ残されている。現在実験とシミュレーションの双方から研究を進めている。

また、実機で用いる大量の PMT の効率的な評価試験方法の開発も進めている。

4.3 熱制御システム

OHP は高温領域と低温領域を往復するループ型細管と内部の作動流体で構成される。両領域での蒸発と凝縮を繰り返す事で作動流体が自動的に流れ、温度を均一化する。原理的には電力不要、多点冷却に有利、などの長所を持つが、本格的な実用化はなされていない。GAPS で要求される、立体的な構造を持つ大型 (数 m) OHP も研究の実績が無い。

そこで、立体的な大型 OHP (図 8) を製作し、実証実験を進めている [27-33]。リザーバと逆止弁を用いた作動流体の制御により、安定性と熱輸送量を向上できる事が確認された。過熱が起きる問題を解消するため、現在はサブヒータやポンプの使用、管面の粗さ調節などを研究している。シミュレーションによる過熱機構の解明も進めている。

5 まとめ

低エネルギー反粒子の高感度観測を目指して、GAPS 測定器の開発を進めている。開発課題はあるものの、解決の糸口は見えてきている。

地磁気と大気の影響を避けるため、GAPS は南極周回気球で運用する。反粒子フラックスが極大となる太陽活動極小期の 2020 年に第 1 回の観測を実施する事を目指している。

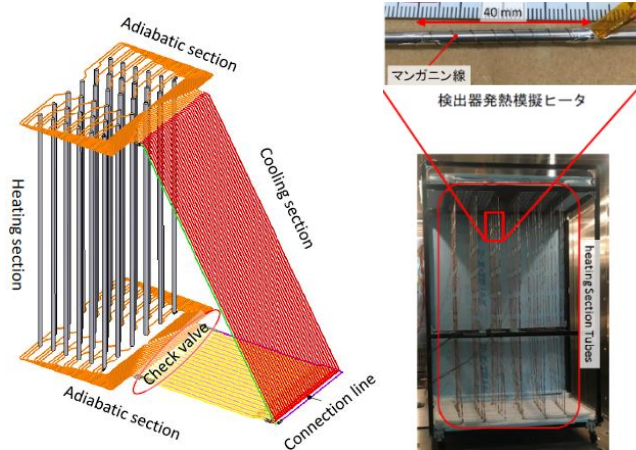


図 8 : 製作した OHP 実証試験モデルの概念図 (左) と Heating Section (右) [岡崎,内部資料]

謝辞

本研究の一部は科研費 (20740166, 22340073, 26707015), ISAS 理学委員会経費, NASA APRA Flight Program (NNX09AC13G, NNX09AC16G), NSF Award (1202958) を受けて実施しました。pGAPS 実験では、JAXA が提供する大気球による飛行機会を利用しました。

参考文献

1. F. Donato et al., 2000, Phys. Rev. D **62**, 043003.
2. T. Aramaki et al., 2016, Phys. Rep. **618**, 1-37.
3. H. Fuke et al., 2005, PRL **95**, 081101.
4. K. Mori et al., 2002, ApJ, **566**:604-616.
5. T. Aramaki et al., 2010, Adv. Space Res. **46**, 1349-1353.
6. T. Aramaki et al., 2016, Astropart. Phys. **74**, 6-13.
7. 坂東信尚 他, 2011, 平成 23 年度大気球シンポジウム.
8. 坂東信尚 他, 2012, 平成 24 年度大気球シンポジウム.
9. 坂東信尚 他, 2015, 航空宇宙技術 **14**, 59-65.
10. C. J. Hailey et al., 2004, NIM B **214**, 122-125.
11. C. J. Hailey et al., 2006, JCAP **0601**, 007.
12. H. Fuke et al., 2008, Adv. Space Res. **41**, 2056-2060.
13. T. Aramaki et al., 2013, Astropart. Phys. **49**, 52-62.
14. 福家英之 他, 2011, 平成 23 年度大気球シンポジウム.
15. 福家英之 他, 2012, 平成 24 年度大気球シンポジウム.
16. C. J. Hailey et al., 2013, Adv. Space Res. **51**, 290-296.
17. P. von Doetinchem et al., 2014, Astropart. Phys. **54**, 93-109.
18. H. Fuke et al., 2014, Adv. Space Res. **53**, 1432-1437.
19. S. A. I. Mognet et al., 2014, NIM A **735**, 24-38.
20. 福家英之 他, 2014, 平成 26 年度大気球シンポジウム.
21. 福家英之 他, 2015, 平成 27 年度大気球シンポジウム.
22. T. Aramaki et al., 2012, NIM A **682**, 90-96.
23. K. Perez et al., 2013, IEEE NSS/MIC.
24. 蓑島温志, 2015 年度 青山学院大学卒業論文.
25. 和田拓也, 2015 年度 青山学院大学卒業論文.
26. 橋本岳, 2015 年度 青山学院大学卒業論文.
27. 岡崎峻 他, 2011, 平成 23 年度大気球シンポジウム.
28. 岡崎峻 他, 2012, 平成 24 年度大気球シンポジウム.
29. 岡崎峻 他, 2013, 平成 25 年度大気球シンポジウム.
30. S. Okazaki et al., 2014, J. Astron. Inst. **3**, 1440004.
31. S. Okazaki et al. 2015, Proc. 30th ISTS, 2015-i-08.
32. H. Fuke et al., 2015, Proc. 30th ISTS, 2015-i-10.
33. H. Fuke et al., 2016, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan **14**, Pi_17-Pi_26.