

# 宇宙線反粒子探索 GAPS 実験用リチウムドリフト型シリコン検出器の開発

JAXA/ISAS	福家 英之, 小財 正義
神奈川大	清水 雄輝
信州大	宗像 一起, 加藤 千尋
Columbia Univ.	C.J. Hailey
MIT	K. Perez

## 1. 概要

GAPS (General Anti-Particle Spectrometer)実験計画用のリチウムドリフト型シリコン(Si(Li))検出器の開発状況を報告する。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。GAPS 用 Si(Li)検出器は厚肉・大面積・低リーク電流の特徴を持ち、大型アレイ化により GAPS 測定器の中核を担う。アレイ化には 1000 個オーダーというかつてない多数の Si(Li)検出器が必要であり、技術・コストの両面から量産化への道筋をつけることが GAPS 実現に向けた鍵要素の一つとなっている。

## 2. GAPS の目指す物理

宇宙における質量の大半を占めながら正体不明の暗黒物質(DM)を解明すること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。近年、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、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。よって、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]。反重陽子は宇宙線中に観測された例が無く、探索されたことも BESS による一例しか無い[2]。しかし、様々な理論モデルにて DM の対消滅や崩壊から反重陽子が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[3]。

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[4]、余次元 DM[5]、gravitino[6]の場合を示す。これら 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。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[4,5]。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人工生成例が増加した

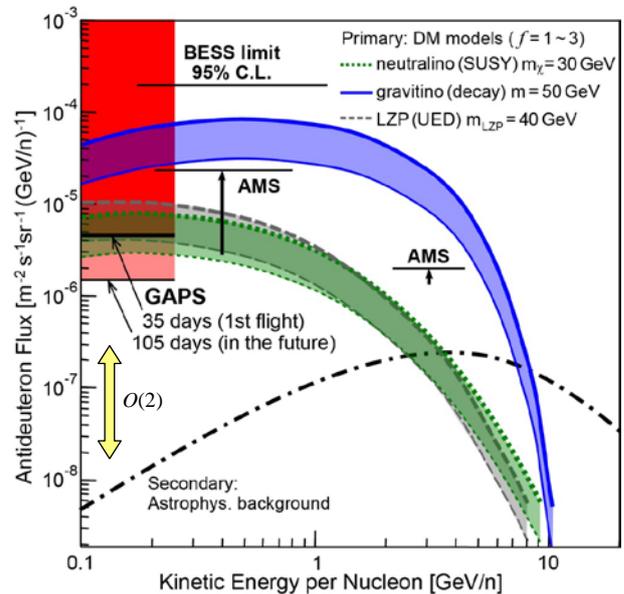


図1: TOA反重陽子エネルギー流束。3種類のDMモデル例から予測される反重陽子流束を帯で示す(帯の上端は宇宙線伝播の増幅因子 $f=3$ 、下端は $f=1$ に相当)。二次起源(一点鎖線)との比が0.1 GeV/n領域で顕著である。AMS-02 (予想, 5年間)は地磁気補正による感度悪化(矢印)を避けられない。GAPSは第1回飛翔(35日間)と将来の積算(105日間)によりBESS上限値を1.5~2桁上回る感度に到達し、DM探索に最適な0.1 GeV/n領域を世界最高感度で有意に探索する。

ことで精度が高まっている。従って、 $0.1 \text{ GeV/n}$  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し、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[5]。

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[2]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もかつてない高統計で観測でき、DM モデルの検証に対して重要なデータを提供できる[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。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)と比較して、低エネルギー宇宙線に対する透過性と面積立体角の大型化が容易な手法として、GAPS はエキゾチック原子を用いた新しい手法を導入する[9–11]。

GAPS 測定器(図 2)は Si(Li)検出器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(TOF)パドル群で構成する。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(通常の原子の電子 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 $\pi$ 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 $\pi$ と p の生成数は捕獲された反粒子の種によって固有のため、特性 X 線のエネルギーや $\pi/p$ の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(図 3)。

Si(Li)検出器アレイは約  $1.6 \text{ m} \times 1.6 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  の大型なものであり、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、同じく二次的に生成される $\pi/p$  荷電粒子の飛跡検出、の役割を兼ねる。Si(Li)検出器の温度環境はパッシブな冷却機構[12]により $-35^\circ\text{C}$ 以下に保たれる予定であり、反陽子と反重陽子に起因する特性 X 線の識別のためエネルギー分解能  $4 \text{ keV}$  をこの温度環境下で有する必要がある。一方、TOF カウンタは入射宇宙線に対するトリガ生成、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 $\pi/p$  荷電粒子の検出、の役目を担う[13]。GAPS のこの同定手法は陽子などの通常の宇宙線に対する高い除去率を持つほか、反重陽子より 3 桁以上多い反陽子に対しても十分に高い識別能力を見込める。GAPS の測定器設計は比較的シンプルであり、測定器の大型化と長時間運用を可能にしている。

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 日間を飛行できれば  $10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{GeV/n}^{-1}$  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にて実証済みである[14]。

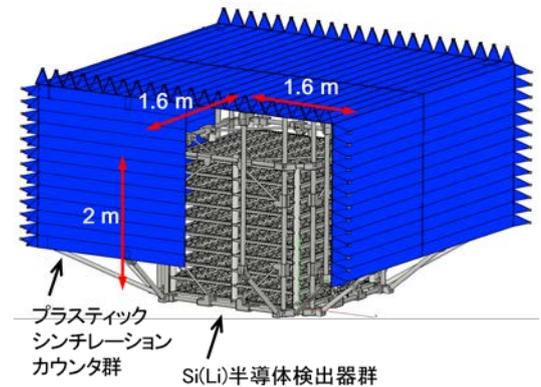


図 2. GAPS 測定器概念図

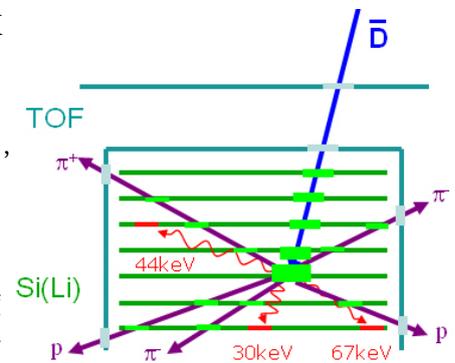


図 3. GAPS の反粒子同定法の概念図

#### 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) 反陽子と反重陽子に起因する特性 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(計 6 g/cm<sup>2</sup>)と 高い有感領域(90%以上), (4) 液体窒素等の冷媒が不要, (5) 大面積化(20~30m<sup>2</sup>)しても製造コストやチャンネル数が現実的な範囲内, 等である。高純度の Si や Ge を用いた半導体検出器は厚肉化に限界があるほか, 高価であり, Ge は原子番号が大きいために特性 X 線のエネルギーも高くなって測定が難しい。NaI 等のシンチレーション検出器では特性 X 線の弁別にはエネルギー分解能が不足, 条件を満たさない。一方, Si(Li)検出器 (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)は, 先行研究の実績により, これらの条件を満たし得る。これまでの検討に基づき, GAPS 用 Si(Li)検出器は 直径 10 cm (4 インチ), ウェハ内セグメント数 4, 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<10nA), を予定している。約 1350 個の Si(Li)検出器を 1.6m×1.6m×10 層に組み上げることで検出器アレイを構築する。

Si(Li)検出器の基本製法は主に 6 段階から成る(図 4) : (A) Si 基材の調達, (B) Si 基材への Li 蒸着拡散と n 面電極蒸着, (C) Si(Li)ウェハへの機械加工, (D) Li のドリフト(Si(Li)ウェハの作成), (E) p 面電極蒸着等の表面処理(Si(Li)素子の作成), (F) 素子をプレアンプ回路や保持フレームと機械的・電気的に接続(Si(Li)検出器の作成)。この Si(Li)検出器の基本製法は 1980 年頃以前に確立され, 以後, 「大型化・厚肉化による宇宙放射線測定」と「小型・高性能化による蛍光 X 線分析」に二極化して用いられている。前者に関しては, 直径 10 cm 程度, 厚さ数 mm のものが主流であり, ETS-VI, GEOTAIL, かぐや等の日本の観測衛星にも少数個が搭載された。概して, Si(Li)検出器の大型化・厚肉化に伴って面内や厚さ方向の均質性の確保が難しくなり, 歩留まりが悪くなりやすい。その問題回避のために, 大きめ・厚めの Si(Li)ウェハを作ってからその中の均質な領域のみを削りだす, という方法が取られたこともあったが, 原材料や工程数に無駄が多い。大型・厚肉の Si(Li)検出器は量産された前例が無く, その製造を高い良品率と低いコストで実現することは GAPS 用の量産に向けて重要である。一方, 後者の小型 Si(Li)に関しては, 直径 1 cm 程度以下の製品として産業用に量産されている。

そこで我々は産業界の知見を取り込みながら量産向け大型 Si(Li)検出器の開発を進めており, 原材料費の圧縮や製造工程の簡略化によって製造コストの抑制と高品質の維持の両立を目指している[15]。図 4(A)の Si 基材に関しては, (株)SUMCO の協力により, 世界的にシェアを独占している Topsil 社(デンマーク)の製品と同等の高性能を保ちつつ価格を抑えた Si 基材を開発した。同等の性能を持つことは両社の Si 基材の化学分析, ならびに, 実際に Li をドリフト浸透させることによって確認した。図 4(B)や(D)の工程に関しては, (株)島津製作所の協力により, 均質な基材と均質な加熱源の確保によって均質な Li 浸透を実現できることを銅メッキ検査で確認した(図 5)。島津製作所は産業用の小型 Si(Li)の量産実績が豊富な稀少メーカーであり, 機械加工等を含む製造工程全般に亘り量産ノウハウの提供を頂いている。

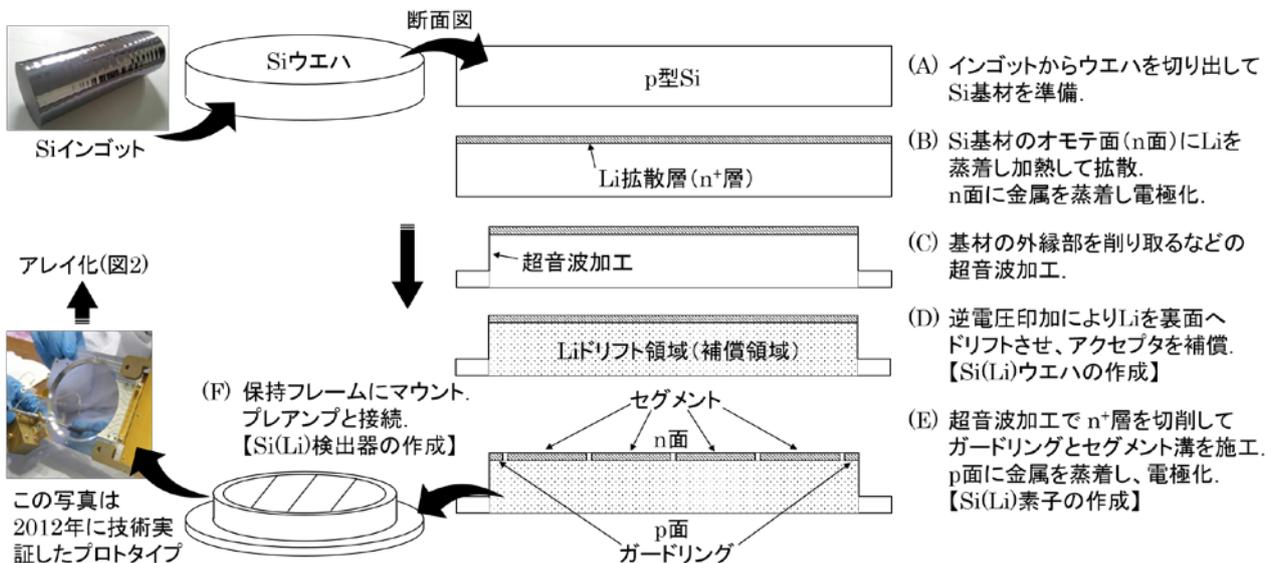


図 4. Si(Li)検出器の製造工程の概念図

Si(Li)検出器が所期のエネルギー分解能 4 keV を達成するには、リーク電流が小さい(10 nA 程度以下)必要がある。リーク電流の抑制に際して鍵となる技術要素は (i) Li 蒸着プロファイル, (ii) Li ドリフトプロファイル, (iii) ガードリング, (iv) 表面状態等である。そこで、多数の Si(Li)ウエハを試作してこれら要素のパラメータスタディを行っている。試作品は主にリーク電流や容量の温度依存性やバイアス電圧依存性で評価しており、エネルギー分解能測定には主に  $^{241}\text{Am}$  源を用いている。リーク電流は条件次第で3桁程度の悪化も起こり得るため慎重な見極めが必要だが、これまでに良好な試作品(図6)を得ており、リーク電流の抑制と製造工程の簡素化の両立は可能であると見込んでいる。このほか、製造後の経年劣化を抑制するための耐環境性向上やプレアンプ読み出し回路との結合インターフェースの最適化などの検討も進めている。これらの知見を組み合わせることで、来春までに量産法を確立したい。

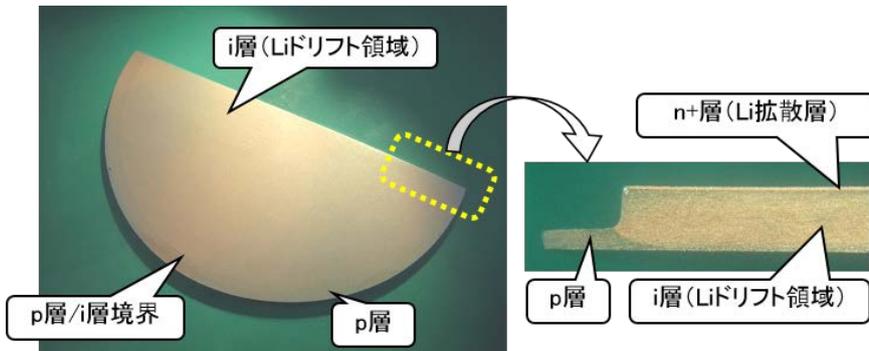


図5. Si(Li)ウエハの銅メッキ法による破壊検査。(左) 半分に割ったウエハのp面の銅メッキ結果。(右) 半分に割った断面の銅メッキ結果の例。いずれの写真からも、Li 拡散層やLi ドリフト領域の良い面内均一性を確認できる。

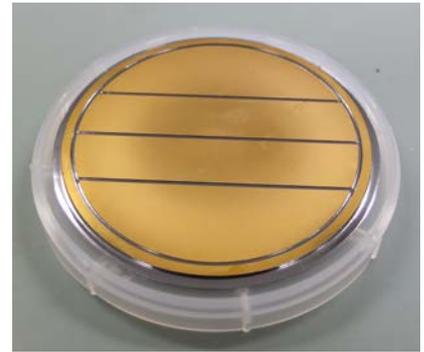


図6. Si(Li)ウエハの試作例。面積で4等分された各セグメントの容量は約 75 pF である。

## 5. 南極実験の実現に向けて

GAPS は 2017 年度 JAXA 小規模計画に採択され、日米伊の国際チームによる開発・準備を加速している。Si(Li)検出器に関しては 2018~2019 年度に量産・アレイ化を行い、南極実験に備える計画である。

### 謝辞

本研究の推進にあたり(株)島津製作所、(株)SUMCO に多大な技術協力を頂いており、感謝申し上げます。本研究の一部は科研費(JP26707015, JP17H01136, JP17K14313)、ISAS 理学委員会経費、JAXA 小規模計画経費、NASA APRA Flight Program (NNX17AB44G) を受けて実施しました。

### 参考文献

1. 福家英之 他, 大気球シンポジウム (H27 年度) isas15-sbs-045.
2. H. Fuke et al., Phys. Rev. Lett. **95** (2005) 081101.
3. T. Aramaki et al., Phys. Rep. **618** (2016) 1.
4. Donato et al., Phys. Rev. D **78** (2008) 043506.
5. Baer et al., JCAP **512** (2005) 8.
6. Dal et al., Phys. Rev. D **62** (2014) 103504.
7. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **74** (2016) 6.
8. T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **59** (2014) 12.
9. K. Mori et al., Astrophys. J. **566** (2002) 604.
10. C.J. Hailey et al., Nucl. Instr. Meth. B **214** (2004) 122;  
C.J. Hailey et al., JCAP. **0601** (2006) 007.  
T. Aramaki et al., Astropart. Phys. **49** (2013) 52.
11. H. Fuke et al., Adv. Space Res. **41** (2008) 2056;  
T. Aramaki et al. Adv. Space Res. **46** (2010) 1349;  
C.J. Hailey et al., Adv. Space Res. **51** (2013) 290.
12. 岡崎俊 他, 宇宙科学シンポジウム (第 17 回, H29 年) P-032.  
近藤愛美 他, 本シンポジウム抄録 (H29 年度).
13. 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, 本シンポジウム抄録 (H29 年度).
14. 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.
15. 小財正義 他, 宇宙科学シンポジウム (第 17 回, H29 年) P-034.