



宇宙線反粒子探索GAPS実験計画の近況報告

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, 中上裕輔^A, 和田拓也^A, 吉田篤正^A, 今村光拓^B, 清水雄輝^B, 山田昇^C, 小池貴久^D, 加藤千尋^E, 宗像一起^E, 永井大樹^F, 今西優香^G, 河内明子^G, 小林聖平^G, 本木誠人^G, 奈良祥太郎^G, 高橋俊^G, 竹村薫^G, 井上剛良^H, C.J.Hailey^I, K.Perez^J, T.Aramaki^K, L.Fabris^L, W.Craig^M, R.Ong^N, S.Boggs^O, P.v.Doetinchem^P, M.Boezio^O, 他 GAPS Collaboration
JAXA/ISAS, 青山学院大^A, 神奈川大^B, 長岡技科大^C, 大阪電通大^D, 信州大^E, 東北大^F, 東海大^G, 東工大^H, Columbia Univ.^I, MIT^J, Northeastern Univ.^K, Oak Ridge N.L.^L, UC Berkeley^M, UCLA^N, UC San Diego^O, Univ. Hawaii Manoa^P, INFN^O

【概要】

- 計画名: GAPS (General Anti-Particle Spectrometer) <http://gaps.isas.jaxa.jp/>
- 目的: 宇宙線中の反粒子の観測による「初期宇宙に関する未知の現象の探査」を主目的とする。特に、未発見の反重陽子 (antideuteron) を sub-GeV エネルギー領域に探索することで、ダークマター等の反粒子起源を探索する。併せて反陽子なども超高感度で観測し、原始ブラックホール等の反粒子起源も探る。
- 概要: NASAの南極周回気球による長時間観測 (第1回) を2022年末に計画。2012月にJAXA大気球実験により基本技術の実証に成功。2019年からフライトモデルの製作・組立を本格的に進めている。
- 特色: エキゾチック原子核の崩壊過程を利用した新しい反粒子検出方法を導入。
- 体制: 日米伊を中心とする国際共同。
- 経費: 2017年 NASA/APRA 経費 採択。2017年 JAXA/ISAS 小規模計画経費 採択。その他 経費申請中。

1. 反粒子 (特に反重陽子) 探索の意義

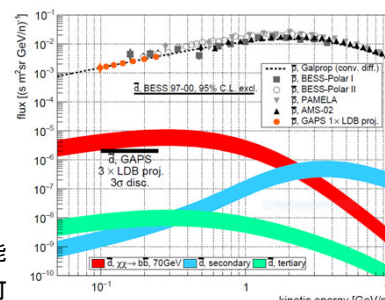
- ◆ GAPSの主目的は**宇宙線反粒子の観測による暗黒物質の探索**
- ◆ 暗黒物質や反物質は宇宙物理学・素粒子物理学的に重要かつ喫緊の課題
- ◆ 宇宙科学・探査ロードマップでも当該分野の将来ビジョンの柱
- ◆ NASA Astronomy & Astrophysics Decadal Survey 等でも同様の位置づけ
- ◆ 暗黒物質の解明には多角的なアプローチが不可欠であり、GAPSは独自の視点で探求する



- ◆ 宇宙線反粒子は暗黒物質の有力候補WIMPの対消滅や崩壊によって生成され得る
- ◆ 宇宙線**反重陽子** \bar{d} (anti-deuteron, 電荷-1) は**未発見 (未開拓)** だが、**魅力的なプローブ**
- ◆ 宇宙線**反ヘリウム** ${}^3\bar{\text{He}}, {}^4\bar{\text{He}}$ も未発見だが、AMS-02による候補事象の報告を契機に理論考察が白熱している
- ◆ 宇宙線**反陽子** \bar{p}
 - 低エネルギー域の観測例はまだ限定的 (統計不足)
 - AMS-02観測データにおける暗黒物質の兆候の指摘アリ

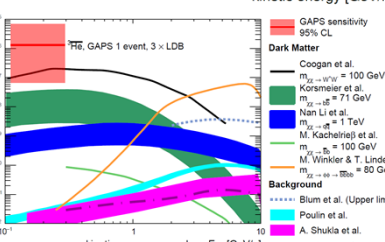


- ◆ 様々な暗黒物質モデル起源の反重陽子が理論予測されている ⇒ 低エネルギー (sub-GeV域) にピークを持つソフトなスペクトル
- ◆ 一方、バックグラウンドとなる通常の宇宙物理起源 (secondary, tertiary) ⇒ 低エネルギーで運動学的に抑制
- ◆ **Background Free**
 - 他の間接探索宇宙線 ($\gamma, \bar{p}, e^+, \nu$ など) には見られない有利な特徴
 - **1イベント検出でも未知の起源を強く示唆**
 - ただし、予想存在量が極微
- ◆ 他実験と相補的なパラメータ領域を探索可能
- ◆ 原始ブラックホール等も探索可



2. 探索できる暗黒物質モデルの例

- ◆ 近年話題の軽い暗黒物質モデル (質量 $m \approx$ 数10 GeV) をGAPSは探索範囲に包含
 - 直接探索実験のCDMS-II, DAMA, CoGeNTは軽い暗黒物質を観測? XENON100, LUX, SuperCDMSは棄却 (直接探索実験の低エネルギー閾値付近での論争)
 - Fermi衛星LATの銀河中心ガンマ線過剰? → 軽い暗黒物質?
 - AMS-02反陽子にも過剰有? → 軽い暗黒物質?
- ◆ **TeVスケールにも検出可能なモデルがある**
- ◆ **GAPSのみが検出可能なモデルもある**
- ◆ 反陽子や反ヘリウムでも探索可

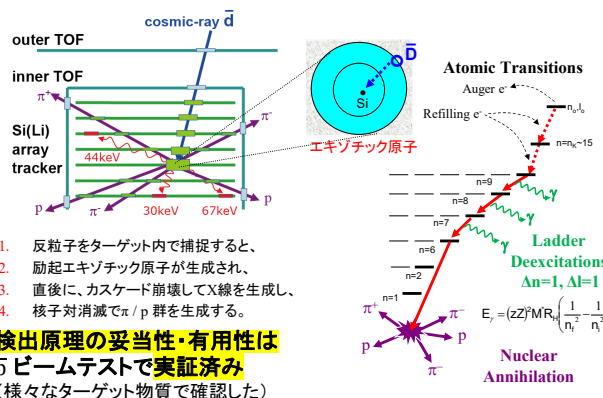


最近の発表論文, 謝辞

- Anti-nuclei review paper: Doetinchem et al., JCAP 08 (2020) 035.
- Anti-proton observation potential: Aramaki et al., Astropart. Phys. 59 (2014) 12.
- Anti-deuteron sensitivity: Aramaki et al., Astropart. Phys. 74 (2016) 6.
- Anti-helium sensitivity: Saffold et al., arXiv:2012.05834 (submitted to Astropart Phys)
- Si(Li) detector development: Saffold et al., NIMA (submitted).
- Rogers et al., JINST 14 (2019) P10009.
- Kozai et al., Trans. JSASS 18(3) (2020) 44.
- Perez et al., NIMA 905 (2018) 12.
- Okazaki et al., App. Thermal Eng. 141 (2018) 20.
- Fuke et al., JAI 6(2) (2017) 1740006.
- Fuke et al., Trans. JSASS 14 (2016) P117.
- Wada et al., Trans. JSASS 18(3) (2020) 44.
- Fuke et al., Adv. Space Res. 53 (2014) 1432.
- Doetinchem et al., AstroPart. Phys. 54 (2014) 93.
- Mognet et al., NIMA 735 (2014) 24.
- GAPSは科研費 (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基金の各経費を頂いています。

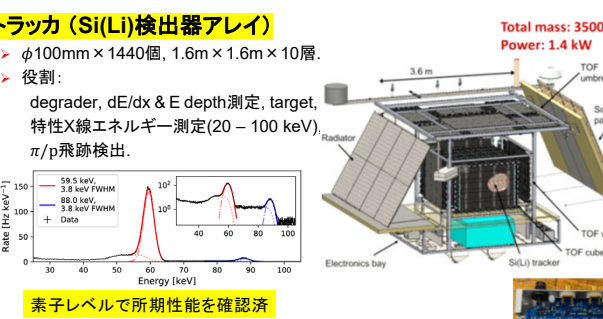
3. 反粒子検出原理、測定器設計

- ◆ カロリメータ (飛跡検出型 兼 全吸収型) により低エネルギー反粒子を捕獲し、二次生成される励起エキゾチック原子の崩壊過程を利用した**新しい検出手法「エキゾチック原子法」を導入**



1. 反粒子をターゲット内で捕獲すると、励起エキゾチック原子が生成され、直後に、カスケード崩壊してX線を生成し、核子対消滅で π/p 群を生成する。
- ◆ **検出原理の妥当性・有用性はpビームテストで実証済み** (様々なターゲット物質で確認した)

- ◆ **トラック (Si(Li)検出器アレイ)**
 - ϕ 100mm x 1440個, 1.6m x 1.6m x 10層.
 - 役割: degrader, dE/dx & E depth測定, target, 特性X線エネルギー測定 (20 - 100 keV), π/p 飛跡検出.
- ◆ **TOFシステム (プラスチックシンチレーションカウンタ)**
 - 内外二層, バドル状, 両読み出し (SIPM).
 - 役割: トリガー, Veto, Time-of-flight測定 $\Delta t \sim 340$ ps, dE/dx測定, 入射方向測定, π/p 検知.
- ◆ エキゾチック原子法を用い「特性X線 1~2本以上 + π/p 5~6個以上」の検出で \bar{d}/\bar{p} を有意に識別可能
- ◆ 技術実証気球実験「pGAPS」にて 測定器の各サブシステムのプロトタイプの基本動作を気球環境下で実証成功



4. 南極周回気球

- ◆ 磁極域を長時間飛翔するNASAの南極周回気球を利用 (周回衛星やISSよりも低エネルギー荷電粒子の観測に適した飛翔観測手段)
- ◆ 太陽活動静穏期を含む期間に複数回の飛翔観測
 - 太陽活動の極大/極小による低エネルギー反重陽子の流量変動は4倍程度
- ◆ GAPSは実効的な反重陽子探索を見込める唯一の進行中の計画
 - 大面積立体角の測定器で長時間飛翔 ⇒ 世界最高感度での \bar{d} 観測 (未踏の 10^{-6} オーダー)

5. スケジュール, 研究体制

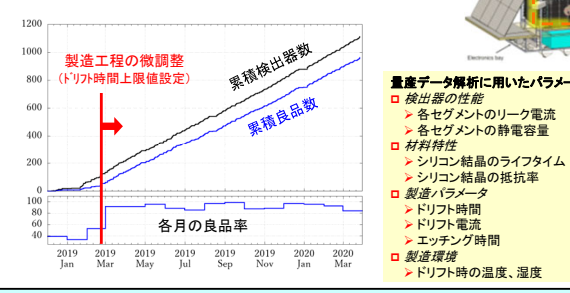
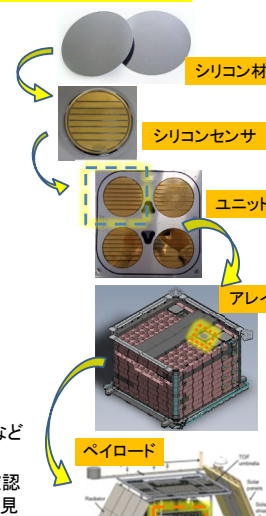


- ◆ 日米伊の国際共同
 - PI 米: Chuck Hailey (Columbia)
 - 日: 福家英之 (JAXA / ISAS)
 - 伊: Mirko Boezio (INFN)
- ◆ 日本チームは重要・必須な役割
 - ① シリコン検出器の開発・量産
 - ② 測定器シミュレーションコードの開発
 - ③ ヒートパイプ冷却システムの開発
- ◆ コロナ禍に伴い、NASAが南極気球事業の1年順延 (今冬不実施) を決定。日米伊のGAPS活動も遅滞を余儀なくされている。
 - 第1回南極実験実施時期を2022年12月に変更。
- ◆ フライト用のフルスケール実機の構築を進めつつ、先んじて2021年には『**実機 1/10スケールモデル**』(GAPS Functional Prototype = GFP) による end-to-endでのシステム動作実証も行う (地上試験)。

6. 開発状況① Si(Li)検出器の量産

- ◆ 高品質, 高良品率, 低コストなSi(Li)検出器の開発に成功

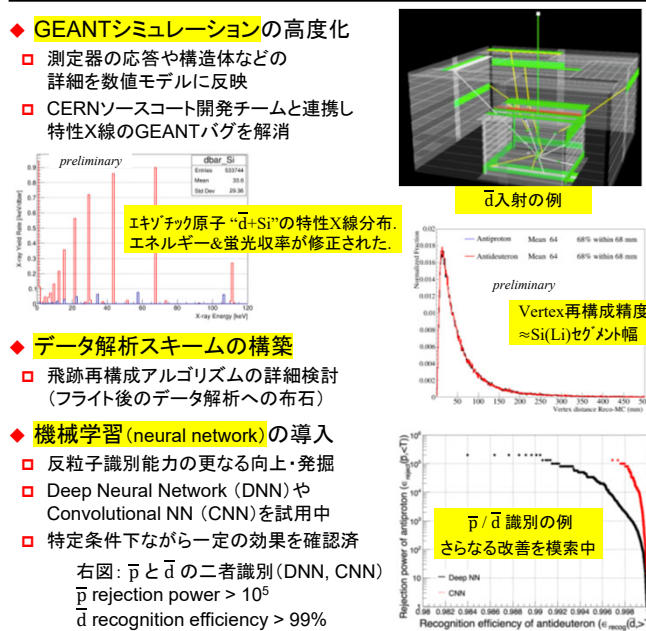
- 大型・厚肉・高分解能・低い低温要求
 - 直径10cm (4"), ウエハ内セグメント数8, 厚さ2.5mm (有感領域90%), $\Delta E \leq 4$ keV ($I_{leak} \leq 5$ nA) @ $\leq -40^\circ\text{C}$, HV ≤ 250 V
- シリコン結晶をSUMCOと、製法を島津製作所と、それぞれ共同でGAPS用に独自開発。ユニット化・アレイ化の工程は米国が担当
- ◆ 2019~2020年に1000個オーダーのウエハの量産に世界初で成功
- 高い「良品率」 $\approx 90\%$
 - 量産初期に製造工程を微調整し奏効, 「B級品」も大半は飛跡検出に使用可
 - 量産で蓄積した膨大なデータの解析 無バイアス多変量解析 ⇒ 製造パラメータ・製造環境・材料品質などと検出器性能との相関を分析 ⇒ 上述の製造工程微調整の妥当性を確認 今後の増産や更なる性能向上への知見



- ◆ 量産データ解析に用いたパラメータの例
 - 検出器の性能
 - 各セグメントのリーク電流
 - 各セグメントの静電容量
 - 材料特性
 - シリコン結晶のライフタイム
 - シリコン結晶の抵抗率
 - 製造パラメータ
 - ドリフト時間
 - ドリフト電流
 - エッチング時間
 - 製造環境
 - ドリフト時の温度、湿度

7. 開発状況② シミュレーションコード等の開発

- ◆ GEANTシミュレーションの高度化
 - 測定器の応答や構造体などの詳細を数値モデルに反映
 - CERNソースコード開発チームと連携し 特性X線のGEANTバグを解消
- ◆ データ解析スキームの構築
 - 飛跡再構成アルゴリズムの詳細検討 (フライト後のデータ解析への布石)
- ◆ 機械学習 (neural network) の導入
 - 反粒子識別能力の更なる向上・発掘
 - Deep Neural Network (DNN) や Convolutional NN (CNN) を試用中
 - 特定条件下ながら一定の効果を確認済
 - 右図: \bar{p} と \bar{d} の二者識別 (DNN, CNN) \bar{p} rejection power $> 10^5$ \bar{d} recognition efficiency $> 99\%$



8. 開発状況③ ペイロード熱設計

- ◆ Si(Li)検出器冷却のため独自開発ヒートパイプ技術を導入
 - 自動振動ヒートパイプ (OHP) とサーモサイホン熱工学技術を融合
 - 作動流体の最適化や沸騰促進機構開発による冷却温度の均一化
 - 限定的なアクティブ制御の導入によるパッシブなシステムの質的な強化
 - 実機スケールモデルによる動作実証, 設計細部の最適化検討
 - シミュレーションモデルの開発・併用によるパラメータスタディ
- ◆ ペイロード全体の熱設計も意欲的・特徴的
 - 飛翔中に想定される広範な熱環境条件下でもSi(Li)検出器温度の変動幅を最小化
 - 前例のない低温のラジエータ (大面積, パッシブながら $\leq -60^\circ\text{C}$)
 - ラジエータ温度の高精度な予測のため, 気球飛翔の希薄気体 ($10^{-2} \sim 10^{-3}$ 気圧) の対流の影響 (熱伝達率の詳細データ) をNASA気球実験で取得・確認済み (2018&2019年@米国Ft.Sumner) (NASA/BPO/CSBFの協力に感謝)
- ◆ 地上冷却系も開発中
 - 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
 - フライトに先立ち実験室での動作確認時に簡易的に検出器の冷却を実現するため, ラジエータを冷凍機 (チラー) で代替冷却する『**地上冷却システム**』も開発中

