



# 宇宙線反粒子探索GAPS実験計画の近況報告

福家英之, 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<sup>A</sup>, 和田拓也<sup>A</sup>, 吉田篤正<sup>A</sup>, 入江優花<sup>B</sup>, 小松明寛<sup>B</sup>, 清水雄輝<sup>B</sup>, 鈴木俊介<sup>B</sup>, 小財正義<sup>C</sup>, 加藤千尋<sup>D</sup>, 宗像一起<sup>D</sup>, 河内明子<sup>E</sup>, 川俣将介<sup>E</sup>, 川本裕樹<sup>E</sup>, 奈良祥太郎<sup>E</sup>, 大山千晶<sup>E</sup>, 鈴木直康<sup>E</sup>, 高橋俊<sup>E</sup>, C.J.Hailey<sup>F</sup>, M.Boezio<sup>G</sup>, 他 GAPS Collaboration  
JAXA/ISAS, 青山学院大<sup>A</sup>, 神奈川大<sup>B</sup>, ROIS<sup>C</sup>, 信州大<sup>D</sup>, 東海大<sup>E</sup>, Columbia Univ.<sup>F</sup>, INFN<sup>G</sup>, (他 MIT, ORNL, UCB, UCLA, UCSD, 等)

## 【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。未発見の反重陽子 (antideuteron) を sub-GeV エネルギー領域に探索するほか、反陽子や反ヘリウムも超感度で観測・探索し、ダークマターや原始ブラックホール等の反粒子起源を探査する。併せて太陽変動などの宇宙線物理学的課題も探る。
- ▶ 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。現在、フライトモデルの製作・組立・試験など、観測実施に向けた最終準備を進めている。
- ▶ 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: 米国: NASA/APRA経費 採択(2017~2021, 2022~)。日本: JAXA/ISAS小規模計画経費 採択(2017~)。その他 経費申請中。

## 1. 反粒子(特に反重陽子)探索の意義

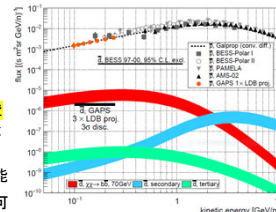
- ◆ GAPSの主目的は**宇宙線反粒子の観測による暗黒物質の探索**
- ◆ 暗黒物質や反物質は宇宙物理学・素粒子物理学的に重要かつ喫緊の課題
- ◆ 宇宙科学・探査ロードマップでも当該分野の将来ビジョンの柱
- ◆ NASA Astronomy & Astrophysics Decadal Survey 等でも同様の位置づけ
- ◆ 暗黒物質の解明には多角的なアプローチが不可欠であり、GAPSは独自の視点で探査する



- ◆ 宇宙線 反粒子は暗黒物質の有候補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あり

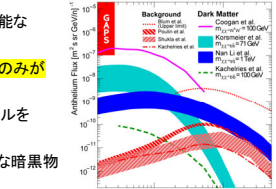


- ◆ 様々な暗黒物質モデル起源の反重陽子が理論予測されている → 低エネルギー(sub-GeV域)にピークを持つツツナスペクトル
- ◆ 一方、バックグラウンドとなる通常の宇宙物理起源(secondary, tertiary) → 低エネルギーで運動学的に抑制
- ◆ **Background Free**
  - ▶ 他の間接探索宇宙線( $\gamma$ ,  $\mu$ ,  $e$ ,  $\nu$ など)には見られない有利な特徴
  - ▶ **1イベント検出でも未知の起源を強く示唆**
  - ▶ ただし、予想存在量が極微
- ◆ 他実験と相補的なパラメータ領域を探索可能
- ◆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

- ◆ **軽い暗黒物質モデル**(質量  $m =$  数 10 GeV)をGAPSは探索可能
  - ▶ 直接探索実験の CDMS-II, DAMA, CoGeNT は 軽い暗黒物質を観測? 一方, XENON100, LUX, SuperCDMSは棄却! しかし, 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(右上图)
- ◆ **グラビティオン**など**GAPSのみ**が検出可能なモデルもある
- ◆ 反陽子でも暗黒物質モデルを探索可
- ◆ **反ヘリウム**でも探索可能な暗黒物質モデルがある(右図)

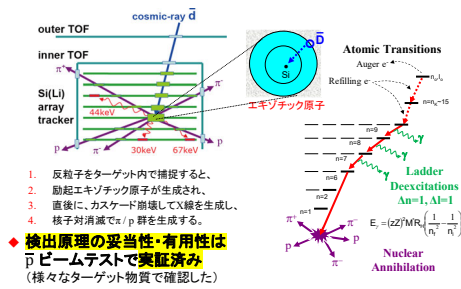


## 発表論文の例, 謝辞

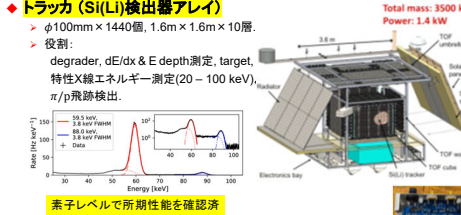
- Anti-nuclei review paper: Doetinchem et al., JCAP 06 (2020) 035.
- Anti-proton observation potential: Aramaki et al., Astropart. Phys. 59 (2014) 12.
- Anti-deuteron sensitivity: Aramaki et al., Astropart. Phys. 74 (2016) 6.
- Anti-helium sensitivity: Saffold et al., Astropart. Phys. 130 (2021) 102580.
- Si(Li) detector development: Kozai et al., NIMA A (submitted).
- Saffold et al., NIMA A 997 (2021) 165015.
- Rogers et al., JINST 14 (2019) P10003.
- Kozai et al., NIMA A 947 (2019) 1662695.
- Okazaki et al., App. Thermal Eng. 141 (2018) 20.
- Fuke et al., JAI 6(2) (2017) 1740006.
- Muniri et al., Astropart. Phys. 133 (2021) 102640.
- Wada et al., Trans. JASST 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 A 735 (2014) 24.
- GAPSは科経費(JP17H01136, JP17K14313, JP19K13928, JP19K05198, 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

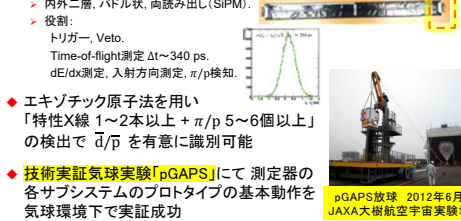
- ◆ カロリメータ(飛跡検出型 兼 全吸収型)により 低エネルギー反粒子を捕獲し、二次生成される励起エキゾチック原子の崩壊過程を利用した**新しい検出手法「エキゾチック原子法」**を導入



- ◆ **トトラク (Si(Li)検出器アレイ)**
  - ▶  $\phi 100\text{mm} \times 1440$ 個,  $1.6\text{m} \times 1.6\text{m} \times 10$ 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),  $\pi/p$ 飛跡検出。
- ◆ **検出原理の妥当性・有用性は  $\bar{p}$  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)

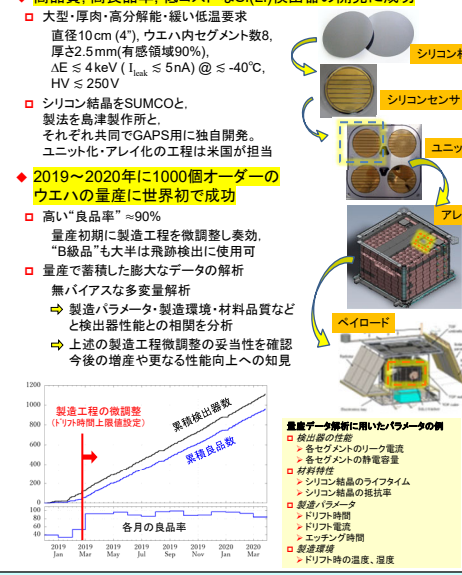


- ◆ **TOFシステム(プラスチックシンチレーションカウンタ)**
  - ▶ 内外二層, バドル状, 両読み出し(SIPM)。
  - ▶ 役割: トリガー, Velo, Time-of-flight測定  $\Delta t \sim 340$  ps, dE/dx測定, 入射方向測定,  $\pi/p$ 検知。
- ◆ エキゾチック原子法を用い「特性X線 1~2本以上 +  $\pi/p$  5~6個以上」の検出で  $\bar{d}/\bar{p}$  を有意に識別可能
- ◆ **技術実証気球実験「pGAPS」にて 測定器の各サブシステムのプロトタイプの基本動作を気球環境下で実証成功**



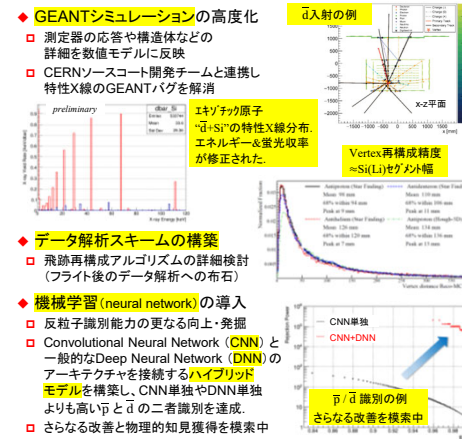
## 6. 開発状況① Si(Li)検出器の量産

- ◆ **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"), ウェハ内セグメント数8, 厚さ2.5mm(有感領域90%)
  - ▶  $\Delta E \leq 4\text{keV}$  ( $E_{\text{max}} \leq 5\text{Na}$ ) @  $\sim -40^\circ\text{C}$ , HV  $\leq 250\text{V}$
  - ▶ 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。ユニティ化・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  $\rightarrow 90\%$ 
  - ▶ 量産初期に製造工程を微調整し実施。
  - ▶ 「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
  - ▶ 無バイアスな多変量解析
  - ▶ 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



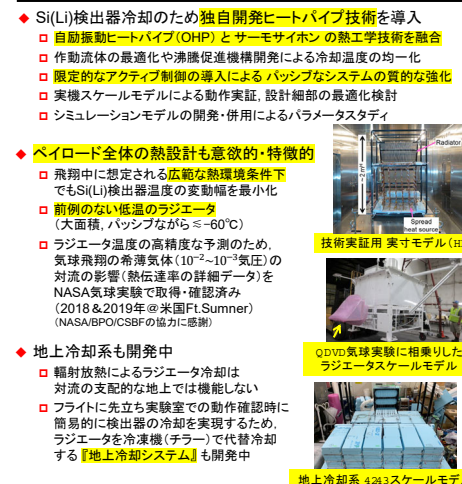
## 7. 開発状況② シミュレーションコード等の開発

- ◆ **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宇宙線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
  - ▶ Convolutional Neural Network (CNN) と一般的なDeep Neural Network (DNN) のアーキテクチャを接続する**ハイブリッドモデル**を構築し、CNN単独やDNN単独よりも高い  $\bar{p}/\bar{d}$  の二者識別を達成
  - ▶ さらなる改善と物理的知見獲得を模索中



## 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<sup>®</sup>の熱工学技術を融合
  - ▶ 作動流体の最適化と沸騰促進機構開発による冷却温度の均一化
  - ▶ 定動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, 設計部品の最適化検討
  - ▶ 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図的・特徴的**
  - ▶ 飛翔中に想定される**広範囲熱環境条件下**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, パンパンながら  $\sim -60^\circ\text{C}$ )
  - ▶ ラジエータ温度の高精度な予測のため, 宇宙飛行中の希薄気体 ( $10^{-2} \sim 10^{-3}$  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/CSFB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



## 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 測定器設計・数値シミュレーション開発
  - ③ 熱設計・冷却システムの開発
- ◆ **コロナ禍に伴い, NASAが南極気球事業を2年順延(2020年12月 & 2021年12月の不実施)を決定**
  - ▶ NASAと相談の結果, 第1回 南極実験実施時期を **2022年12月** に設定。
  - ▶ フライト用の実機の一部を利用した「**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(地上試験)を行ったうえで, **実機フルスケール**の構築・試験など最終準備の追い込み中。

