



# 南極周回気球による宇宙線反粒子探索計画 GAPS

福家英之, 井上剛良<sup>A</sup>, 井上拓哉<sup>B</sup>, 大塚士平<sup>C</sup>, 岡崎峻, 小川博之, 加藤千尋<sup>D</sup>, 河内明子<sup>B</sup>, 小池貴久<sup>E</sup>, 小財正義, 近藤愛美<sup>B</sup>, 崎本一博, 清水雄輝<sup>F</sup>, 高橋克征<sup>G</sup>, 高橋俊<sup>B</sup>, 竹内崇人<sup>C</sup>, 大丸拓郎<sup>H</sup>, 永井大樹<sup>I</sup>, 橋本岳<sup>J</sup>, 兼島温志<sup>K</sup>, 宗像一起<sup>B</sup>, 山田昇<sup>A</sup>, 吉田篤正<sup>C</sup>, 吉田哲也, 渡邊翼<sup>C</sup>, 和田拓也<sup>C</sup>, M.Boezio<sup>L</sup>, S.Boggs<sup>L</sup>, P.v.Doetinchem<sup>K</sup>, R.Fabrizi<sup>L</sup>, C.J.Hailey<sup>M</sup>, R.Ong<sup>N</sup>, K.Perez<sup>O</sup>  
 JAXA/ISAS, 東工大<sup>A</sup>, 東海大<sup>B</sup>, 青山学院大<sup>C</sup>, 信州大<sup>D</sup>, 大阪電通大<sup>E</sup>, 神奈川大<sup>F</sup>, 長岡技科大<sup>G</sup>, 東北大<sup>H</sup>, INFN, UC San Diego<sup>L</sup>, Univ. Hawaii<sup>K</sup>, Oak Ridge N.L.L., Columbia Univ.<sup>M</sup>, UCLA<sup>N</sup>, MIT<sup>O</sup>

## 【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査する。併せて反陽子なども超高度で観測し、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2020年末に計画。技術実証を目的とする気球実験を2012年6月に北海道大樹町にて実施し、事前に掲げた3つのサクセスクライテリアを全て達成した。
- ▶ 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な課題
- ◆ 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

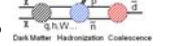


### ◆ 反重陽子 $\bar{d}$ は $\bar{p}$ と $\bar{n}$ から成る (anti-deuteron, 電荷-1)



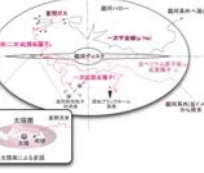
### ◆ 暗黒物質の有力候補WIMP

- ▶ 対消滅や崩壊によって様々な二次粒子が生成される
- ▶ 反重陽子もそのうちの1つ



### ◆ 銀河系ハロー-WIMP起源の反重陽子

- ▶ 地球に到達し得る
- ▶ 質量凝縮箇所(銀河中心)のみならずハロー全体



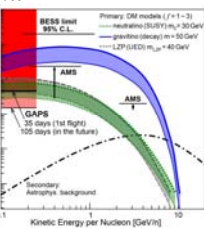
### ◆ 宇宙線 $\bar{d}$ は未発見(未開拓)

## ◆ 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) にピークを持つソフなスペクトル

## ◆ 一方、バックグラウンドとなりえる二次起源 (宇宙線と星間物質の衝突起源)

⇒ 低エネルギーで運動学的に抑制



## ◆ Background Free

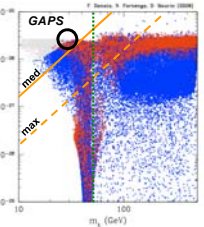
- ▶ 他の間接探索宇宙線 ( $\gamma$ ,  $\nu$ ,  $e^-$ ,  $\nu$  など) には見られない有利な特徴
- ▶ 1イベント検出でも未知の起源を強く示唆
- ▶ ただし、予想存在量が極微

## ◆ 他実験と相補的なパラメータ領域を探査可能

## 2. 探索できる暗黒物質モデルの例

### ◆ 最近話題の軽い暗黒物質モデル ( $m \approx 10 - 30$ GeV) を GAPSは探索範囲に包含

- ▶ 直接探索実験の CDMS-II, DAMA, GeANTII は 軽い暗黒物質を探索? XENON100, LUX, SuperCDMS は 素粒子 (直接探索実験の低エネルギー-間接探索実験の低エネルギー) 間接探索実験の低エネルギー-間接探索実験の低エネルギー
- ▶ Fermi衛星LATの銀河ハローガンマ線過剰? ⇒ 軽い暗黒物質?
- ▶ AMS-02反陽子にも過剰あり? ⇒ 軽い暗黒物質?



### ◆ TeVスケールを検知可能な暗黒物質モデルもある

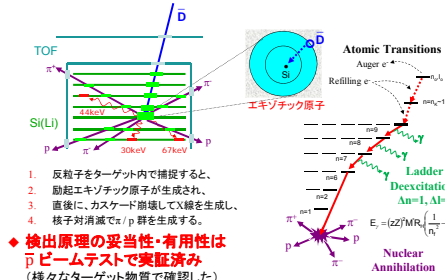
### ◆ GAPSのみが検知可能な暗黒物質モデルもある

## 最近の発表論文, 謝辞

- Dbar review paper : Aramaki et al., Phys. Rep. 618 (2016) 1.
- Dbar sensitivity update : Aramaki et al., Astropart. Phys. 74 (2016) 6.
- Pbar observation potential : Aramaki et al., Astropart. Phys. 59 (2014) 12.
- Prototype flight : Fuke et al., Adv. Space Res. 53 (2014) 1432; Doetinchem et al., Astropart. Phys. 54 (2014) 93; Moguet et al., NIM A 735 (2014) 24.
- GAPS progress report : Fuke et al., JPS Conf. Proc. 18 (2017) 011003; Ong et al., ICRC (2017) 914.
- Cooling technology : Fuke et al., JAI 6(2) (2017) 1740006; Fuke et al., Trans. JASASS 14 (2016) P117; Okazaki et al., JAI 3(2) (2014) 1440004.
- ◆ GAPSは科研費(20740166, 22340073, 26707015, JP17H01136, JP17K14313), ISAS宇宙物理学委員会経費, JAXA小規模計画経費, NASA APRA / NSF / INFN 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を導入。

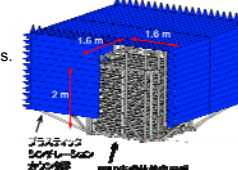


### ◆ Si(Li)型半導体検出器

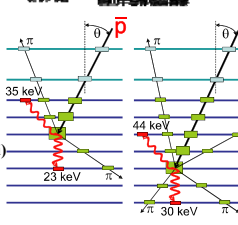
- ▶  $\phi$  4 inch  $\times$  1350個, 1.6m  $\times$  1.6m  $\times$  2m / 10層.
- ▶ degrader, depth sensing, target.
- ▶ 特性X線 (20~70 keV) 測定,  $\Delta E \sim 4$  keV,  $\pi/p$  飛跡.

### ◆ プラスティックシンチレーションカウンタ

- ▶ バドル状, 両読み出し.
- ▶ トリガー, Veto.
- ▶ Time-of-flight  $\Delta t \sim 0.5$  ns.
- ▶ dE/dx測定, 入射方向,  $\pi/p$  検知.



### ◆ 「特性X線 1~2本以上 + $\pi/p$ 5~6個以上」で $\bar{d}/\bar{p}$ を識別可能



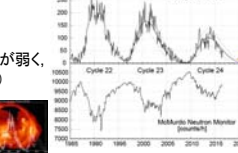
## 4. 南極周回気球

### ◆ 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体)



### ◆ 次期太陽活動極小期に複数回の飛翔観測。(2020年頃。太陽風の影響が弱く、低エネルギー観測に最適)



### ◆ GAPSは実効的な反重陽子探索を見込める唯一の実験計画。

## 5. スケジュール, 研究体制

03|04|05|06|07|08|09|10|11|12|13|14|15|16|17|18|19|20|21|22|23

抽出原理の検証と基礎設計  
KEK ビームテスト

NASA GAPS 技術実証  
ISAS 東工大 東海大 青山学院大 信州大 大阪電通大 神奈川大 長岡技科大 東北大 INFN UC San Diego Univ. Hawaii Oak Ridge N.L.L. Columbia Univ. UCLA MIT

技術実証 気球実験の大樹

詳細設計  
JAXA/ISAS 小規模計画 科研費 東工大 東海大 青山学院大 信州大 大阪電通大 神奈川大 長岡技科大 東北大 INFN UC San Diego Univ. Hawaii Oak Ridge N.L.L. Columbia Univ. UCLA MIT

南極気球による観測  
NASA 2020年度から開始される冷気球観測

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 TOFカウンタの開発・PMTの校正  
③ ヒートパイプ冷却システムの開発

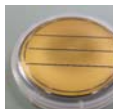
## 6. 技術実証気球実験「pGAPS」

- ◆ 2012年6月: 気球実験@JAXA大樹航空宇宙実験場
- ◆ フルサクセスを達成 (各サブシステムの基本動作を気球環境下で実証)
  - ▶ 各検出器が低ノイズで安定的に動作
  - ▶ 冷却系の動作を確認し熱データも取得
  - ▶ 飛翔環境下のバックグラウンドデータを取得

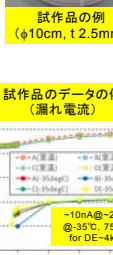


## 7. 開発状況① Si(Li)検出器の量産

- ◆ リチウムドリフト型シリコン半導体検出器
  - ▶ P型Si中のB-をLi+で補償した高比抵抗膜。
  - ▶ 高純度のSiやGeよりも厚膜化が容易で安価。
- ◆ 大型Si(Li)検出器の量産実績は無い
  - ▶  $\phi \leq 1$ cmの小型Si(Li)は産業界で量産実績アリ

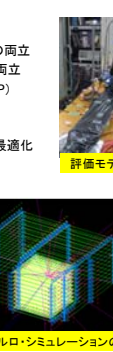


- 成果(i): 低コストで均質な国産Si基材
  - ▶ 世界的独占Topsil製と同等な特殊F-Z-Si材を開発
- 成果(ii): Li浸透の均質化(面内&厚さ方向)
  - ▶ 浸透工程の調整により大型化に目処
- 成果(iii): 表面加工等の最適化
  - ▶ 多数の試作による詳細パラメータスタディ
  - ▶ 各工程のカイゼンによる良品率の向上
- ◆ 進行中: 耐環境性向上, I/F最適化
- ◆ 2018年度から量産開始予定 (協力: 島津製作所, SUMCO)



## 8. 開発状況② TOF&Trigger設計最適化

- ◆ プラスティックシンチレーションカウンタ
  - ▶ 相反する要求事項の両立が必要
    - ▶ 宇宙線透過性(薄肉)と時間分解能(光量)の両立
    - ▶ 大面積立体角と読み出しチャンネル抑制の両立
  - 成果(i): 時間分解能  $\Delta t \leq 0.5$  nsに目処 (with MIP)
    - ▶ 薄肉 5mm, バドル状 16cm幅  $\times$  1.8m長
    - ▶ 低p (0.2~0.6)なら  $\Delta t$ さらに向上
  - 成果(ii): GEANT数値シミュレーションによる設計最適化
  - ◆ 進行中: 最適化モデルの実証評価試験
  - ◆ 2018年度から量産開始予定 (約450個)
- ◆ トリガースキーム
  - ▶ バックグラウンド(p, He)の高効率排除
  - ▶ 反粒子 ( $\bar{p}$ ,  $\bar{d}$ ) の高効率取得の両立
  - ▶ シンプルなトリガー設計
  - 成果: GEANT数値シミュレーションによる概算見積可能
  - ◆ 進行中: 詳細設計, ハードウェア設計



## 9. 開発状況③ ヒートパイプ熱設計

- ◆ Si(Li)検出器の冷却
  - 軽量, 低消費電力, パンプ, ロバストなシステム
  - 成果(i): 独自のヒートパイプシステムの構築
    - ▶ 既存の様々な技術の長所を融合 (自動振動ヒートパイプ, サーモサイホン, 可変コンダクタンス, リザーバ制御, ポンプetc)
  - 成果(ii): 高効率相変化による冷却均一化
    - ▶ 作動流体(二相流)の最適選定
    - ▶ 沸騰促進機構の開発
  - ◆ 進行中: システム詳細設計, さらなる低減化
- ◆ ペイロード熱設計
  - ▶ 各サブシステムの多様な熱要求
  - ▶ 南極気球特有の熱環境
    - ▶ 白夜と高アルベドによる高熱入力
    - ▶ 局所環境の幅広い変動
  - 成果: シミュレーションによる概算見積可能
  - ◆ 進行中: 詳細設計

