



南極周回気球による宇宙線反粒子探索計画 GAPS

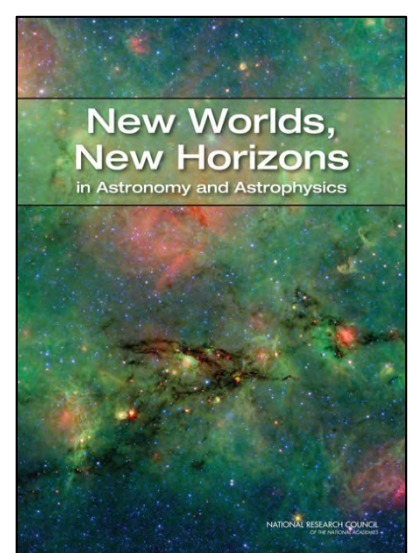
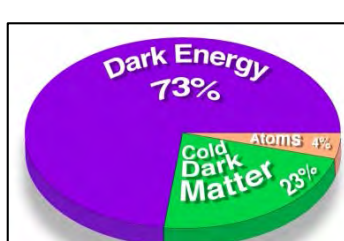
福家英之^A, 浅尾義士^A, 井上剛良^B, 井上拓哉^C, 大塚壮平^D, 岡崎峻^D, 小川博之^E, 加藤千尋^E, 河内明子^C, 小池貴久^F, 小財正義^G, 郷田晃央^B, 崎本一博^G, 清水雄輝^G, 高橋克征^A, 高橋俊^C, 大丸拓郎^H, 永井大樹^H, 橋本岳^D, 養島温志^D, 宗像一起^E, 山田昇^A, 吉住雄大^C, 吉田篤正^D, 吉田哲也^D, 渡邊翼^D, 和田拓也^D, M.Boezio^I, S.Boggs^J, P.v.Doetinchem^K, R.Fabrizi^L, C.J.Hailey^M, R.Ong^N, K.Perez^O, JAXA/ISAS,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

【概要】

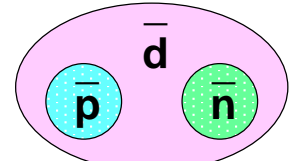
- 計画名: GAPS (General Anti-Particle Spectrometer) <http://gaps.isas.jaxa.jp/>
- 目的: 宇宙線中の反粒子の観測による「初期宇宙に関する未知の現象の探索」を主目的とする。特に、未発見の反重陽子(antideuteron)をsub-GeVエネルギー領域に探索することで、ダークマター等の反粒子起源を探索する。併せて反陽子なども超高感度で観測し、原始ブラックホール等の反粒子起源も探る。
- 概要: NASAの南極周回気球による長時間観測(第1回)を2020年末に計画。技術実証を目的とする気球実験を2012年6月に北海道大樹町にて実施し、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している。
- 体制: 日米を中心とする国際共同計画(2016年にイタリアチームが加入)。宇宙理学委員会 小規模プロジェクトワーキンググループ。
- 経費: 2016年にNASA/APRA経費に採択された。日本国内でも大型経費の獲得を目指している。

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



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



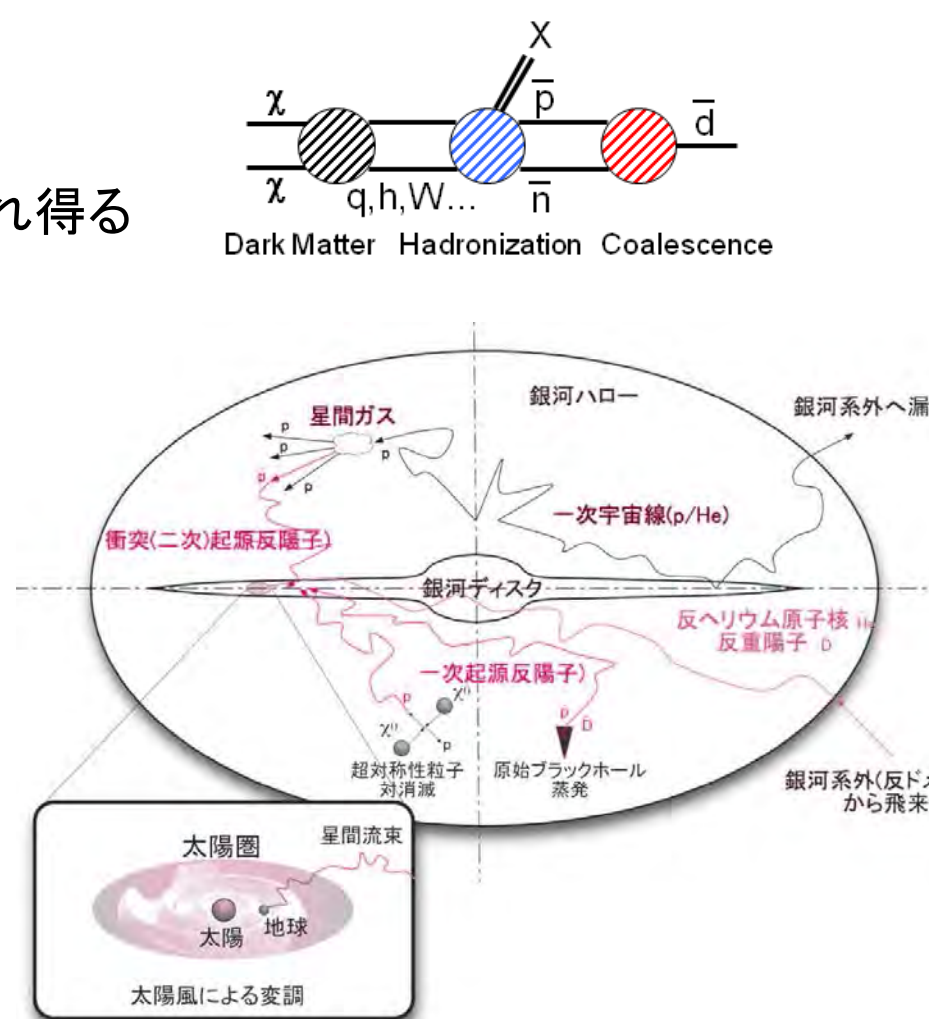
- 暗黒物質の有力候補WIMP

- 対消滅や崩壊によって様々な二次粒子が生成され得る
- 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)



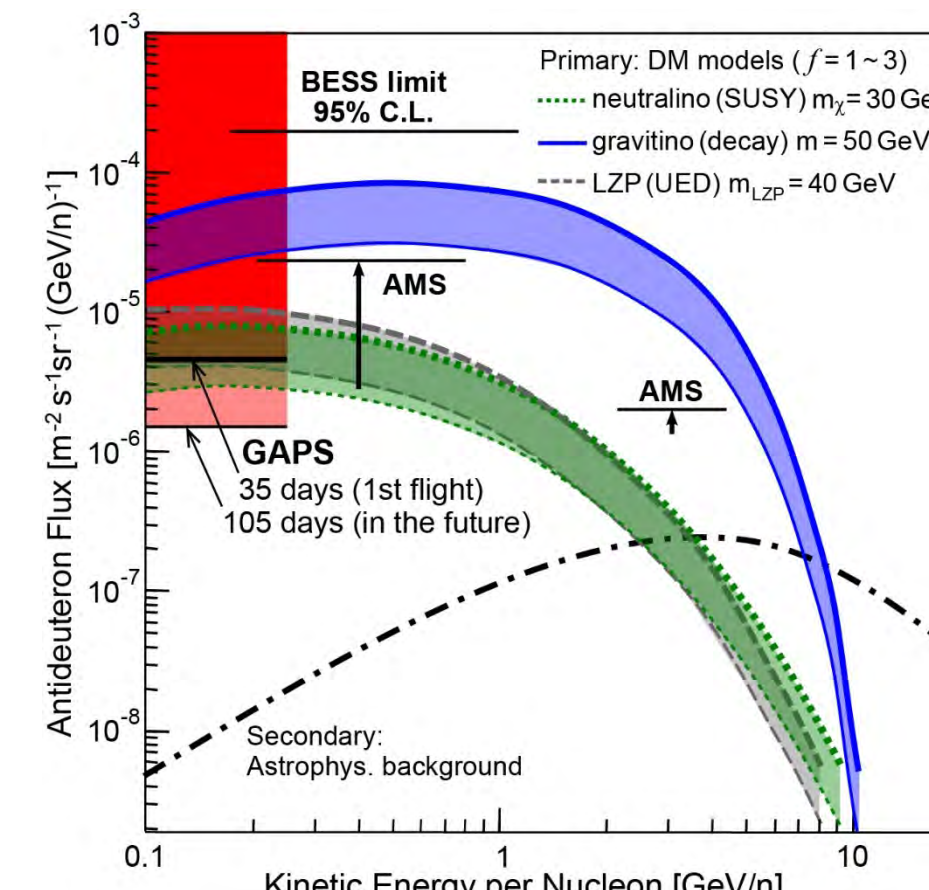
- 様々な暗黒物質モデル起源の反重陽子が理論予測されている。
⇒ 低エネルギー(sub-GeV)にピークを持つソフトなスペクトル。

- 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(γ , p , e^+ , ν 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。

- 話題のLight DMも検知可能。
- 他実験と相補的な探索手段。



2. 探索できる暗黒物質モデルの例

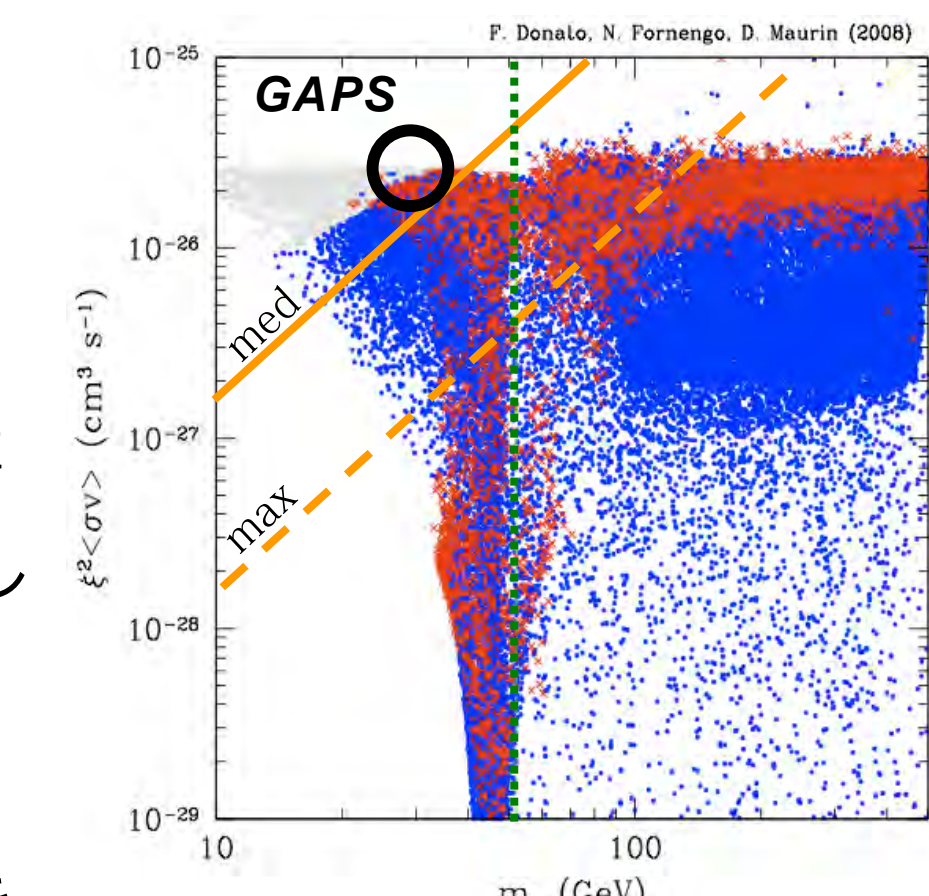
- 最近話題の軽い暗黒物質モデル($m \approx 10 - 30$ GeV)

- 直接探索実験のCDMS-II, DAMA, CoGeNTが候補事象を報告。一方で、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の銀河ハローガンマ線過剰 → 軽い暗黒物質?
- AMS-02反陽子にも過剰有? → 軽い暗黒物質?

- GAPSは上記の候補モデルを探索範囲に包含。

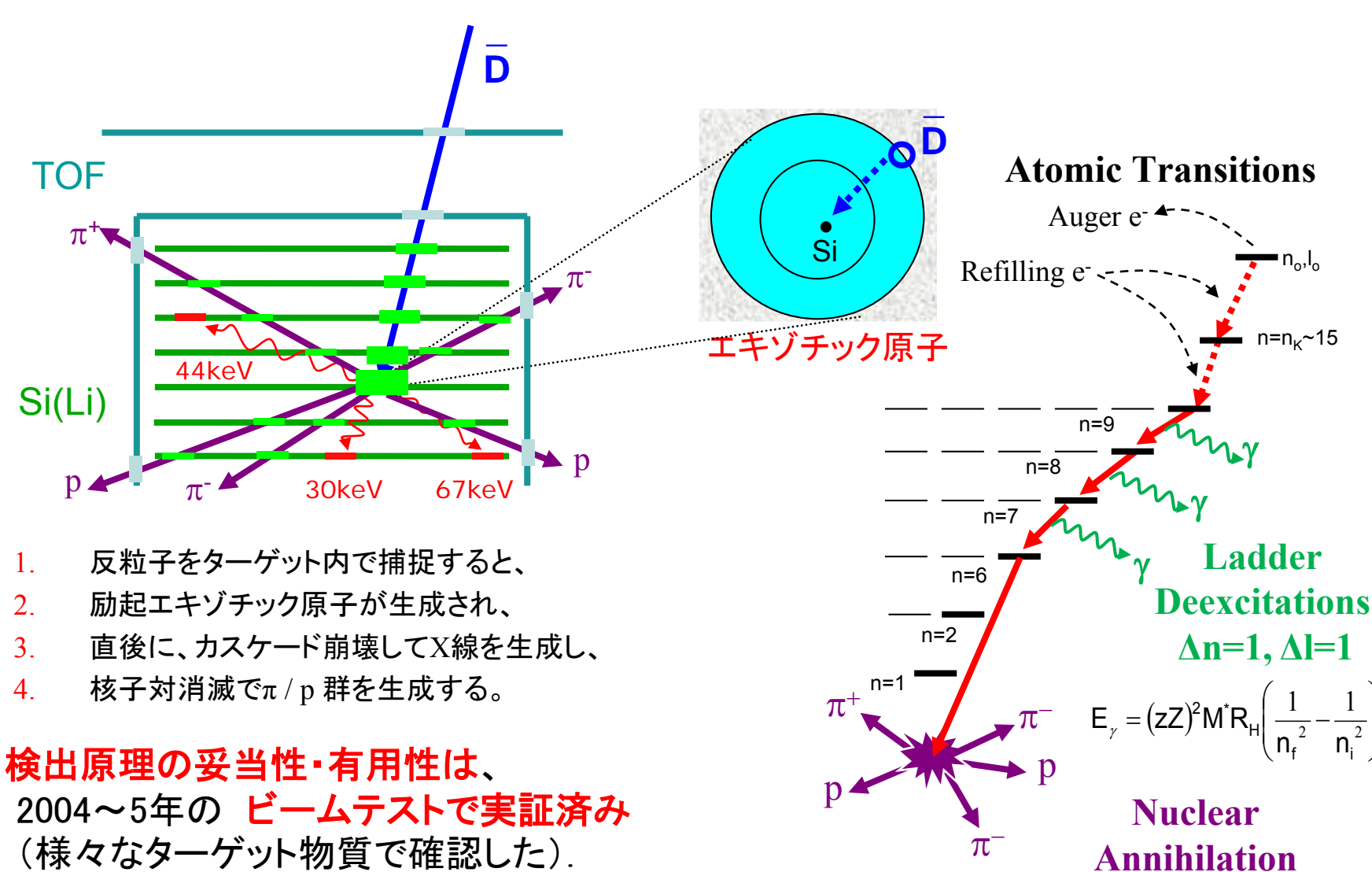
- 検知可能な重い(TeVスケール)暗黒物質モデルやGAPSのみが検知可能な暗黒物質モデルもある。



Red: WMAP-preferred density range
Blue: thermally generated neutralino subdominant
Gray: ruled out by current anti-proton data
Non-universal gaugino Minimal SUSY high-mass neutralino

3. 反粒子検出原理、測定器設計

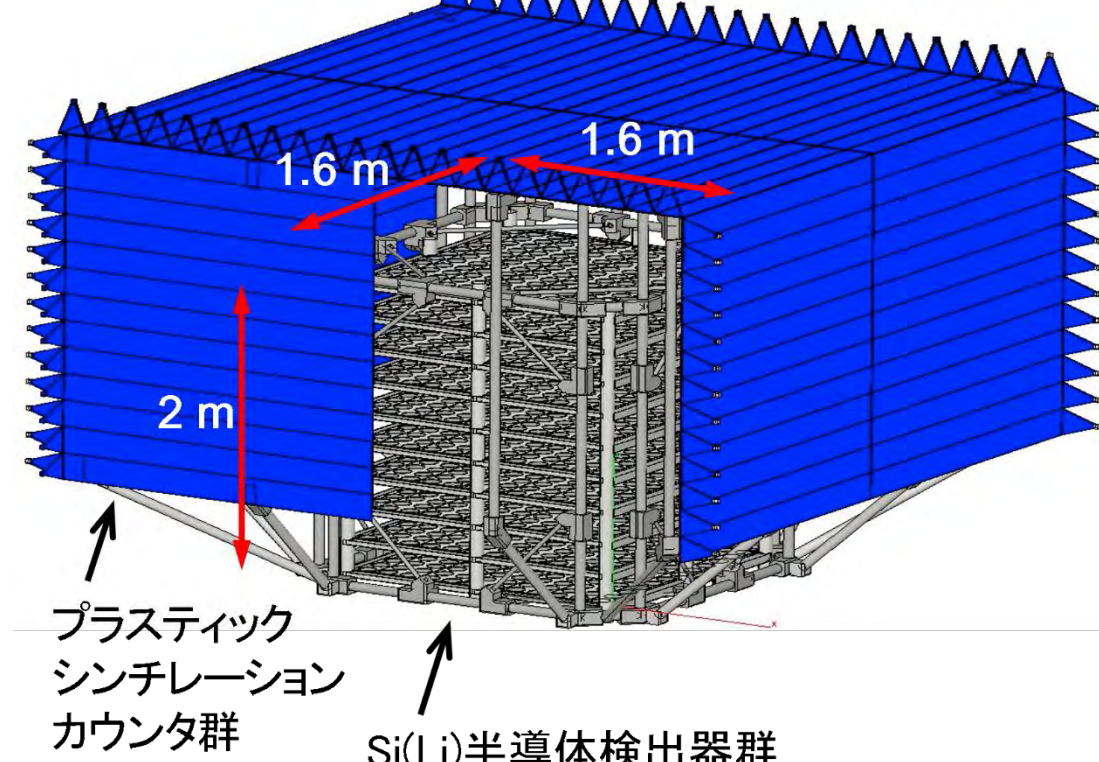
- カリリメータ(飛跡検出型 兼 全吸収型)により低エネルギー反粒子を捕獲し、二次生成される**励起エキゾチック原子の崩壊過程**を利用した新しい検出手法を導入。



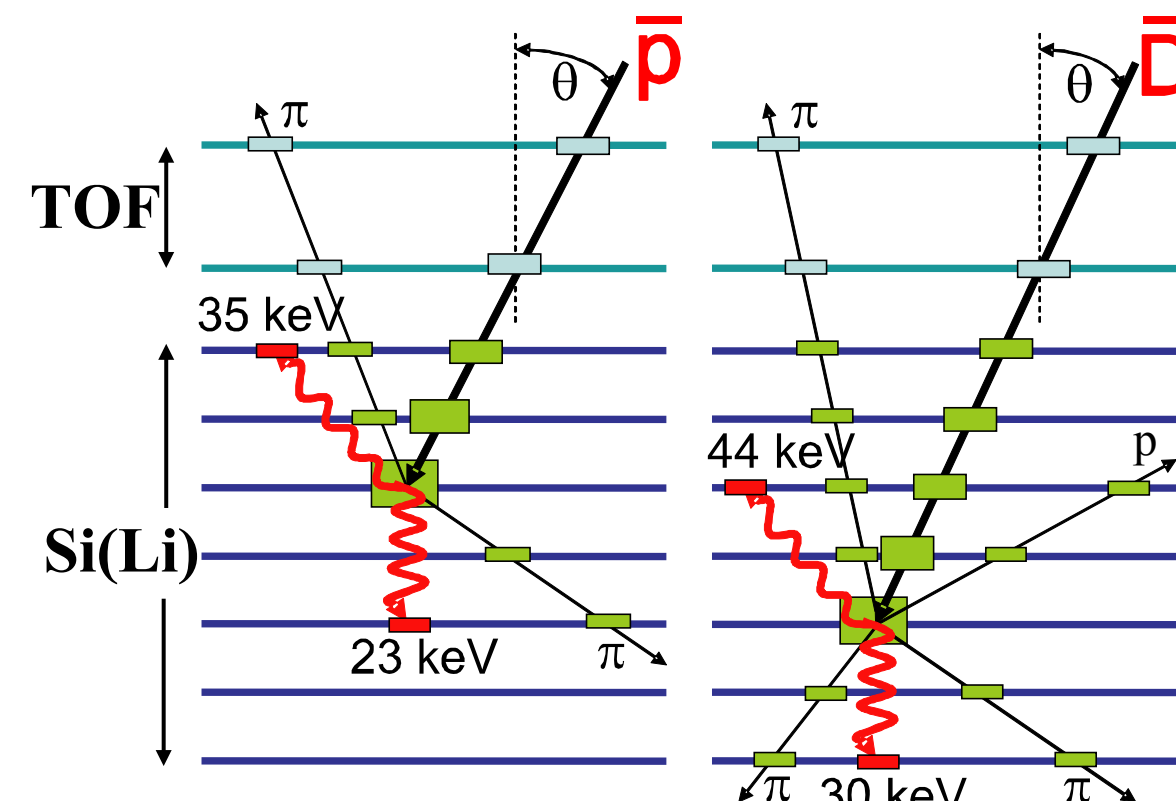
- 検出原理の妥当性・有用性は、2004~5年の**ビームテスト**で実証済み(様々なターゲット物質で確認した)。

- Si(Li)型半導体検出器

- 手の平サイズのウエハ×1350個、1.6m×1.6m×2m/10層、 $\Delta E \sim 3$ keV, degrader, depth sensing, ターゲット、特性X線(20~70keV)測定、 π/p 飛跡。
- プラスチックシンチレーションカウンタ
- バドル状、XY両読み出し、 $\Delta t \sim 0.5$ nsec.
- トリガー、Time-of-flight, dE/dx測定、入射方向、 π/p 検知, Veto。

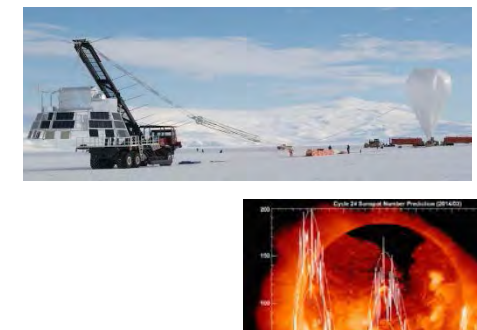
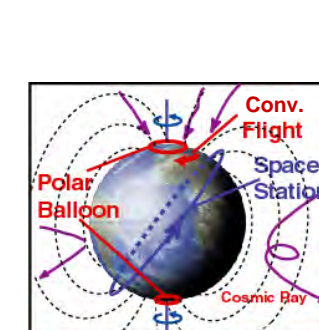


- 「特性X線1~2本以上 + π/p 5~6個以上」で \bar{d}/\bar{p} を識別可能



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)

- 唯一の探索上限値(BESS)よりも2桁以上の高感度。
- ISS上のAMS-02はISS軌道の故に低エネルギー宇宙線観測に不適。

- GAPSは実効的な反重陽子探索を見込める唯一の実験計画。

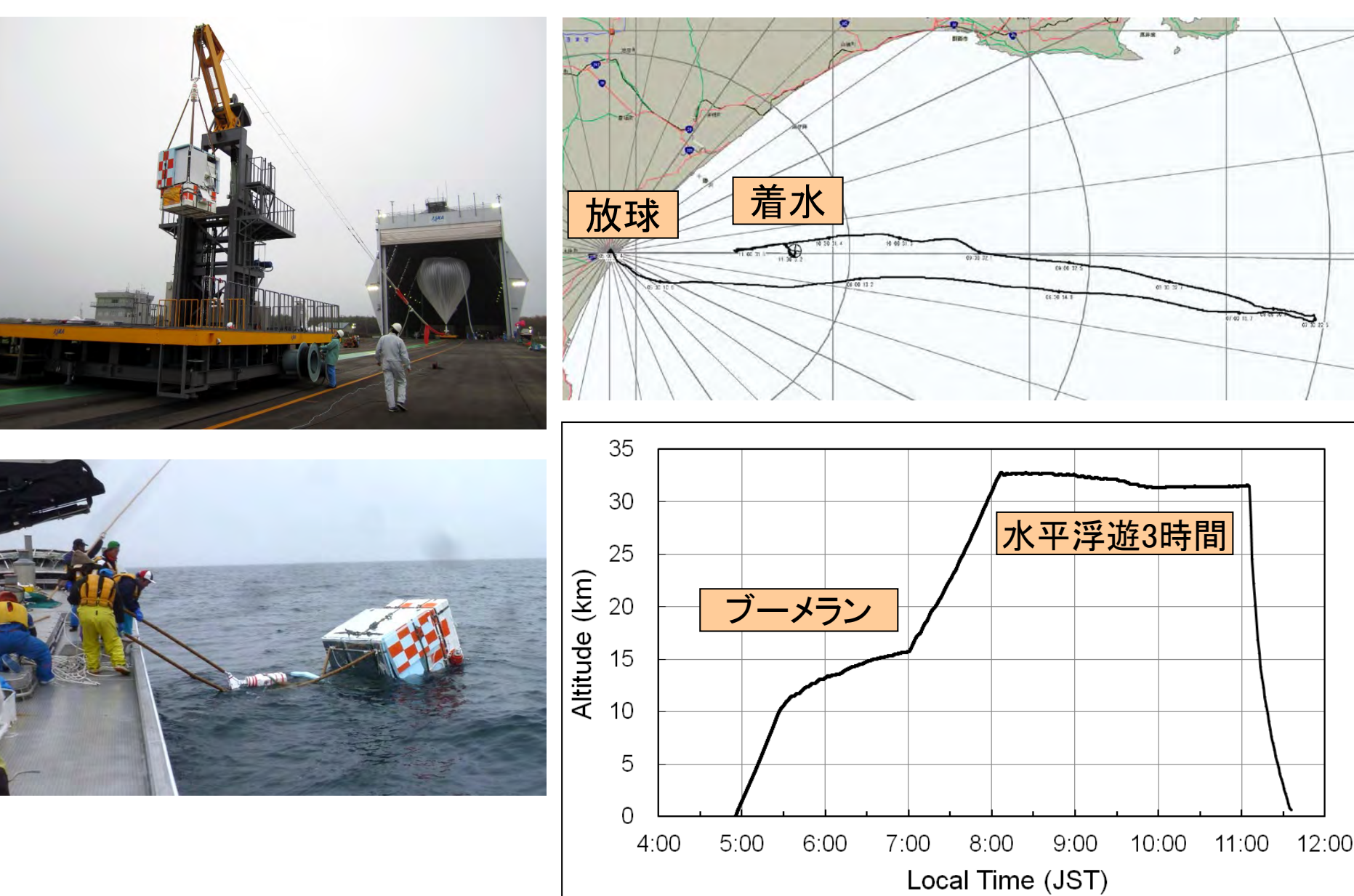
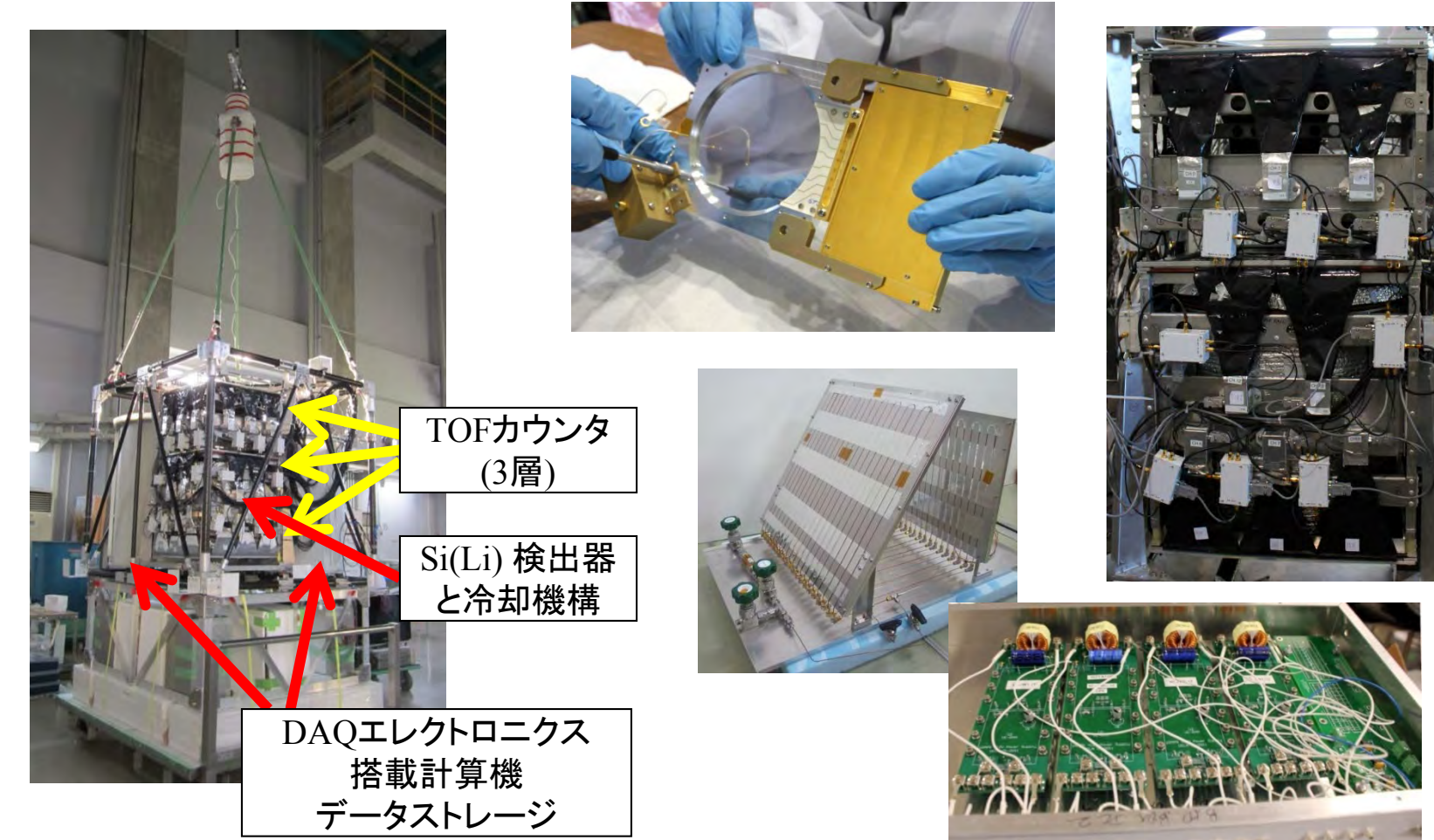
- 最近の論文発表の例

- 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.
- Cooling technology: Fuke et al., Trans. JSASS 14 (2016) Pt17; Okazaki et al., JAI 3(2) (2014) 1440004.

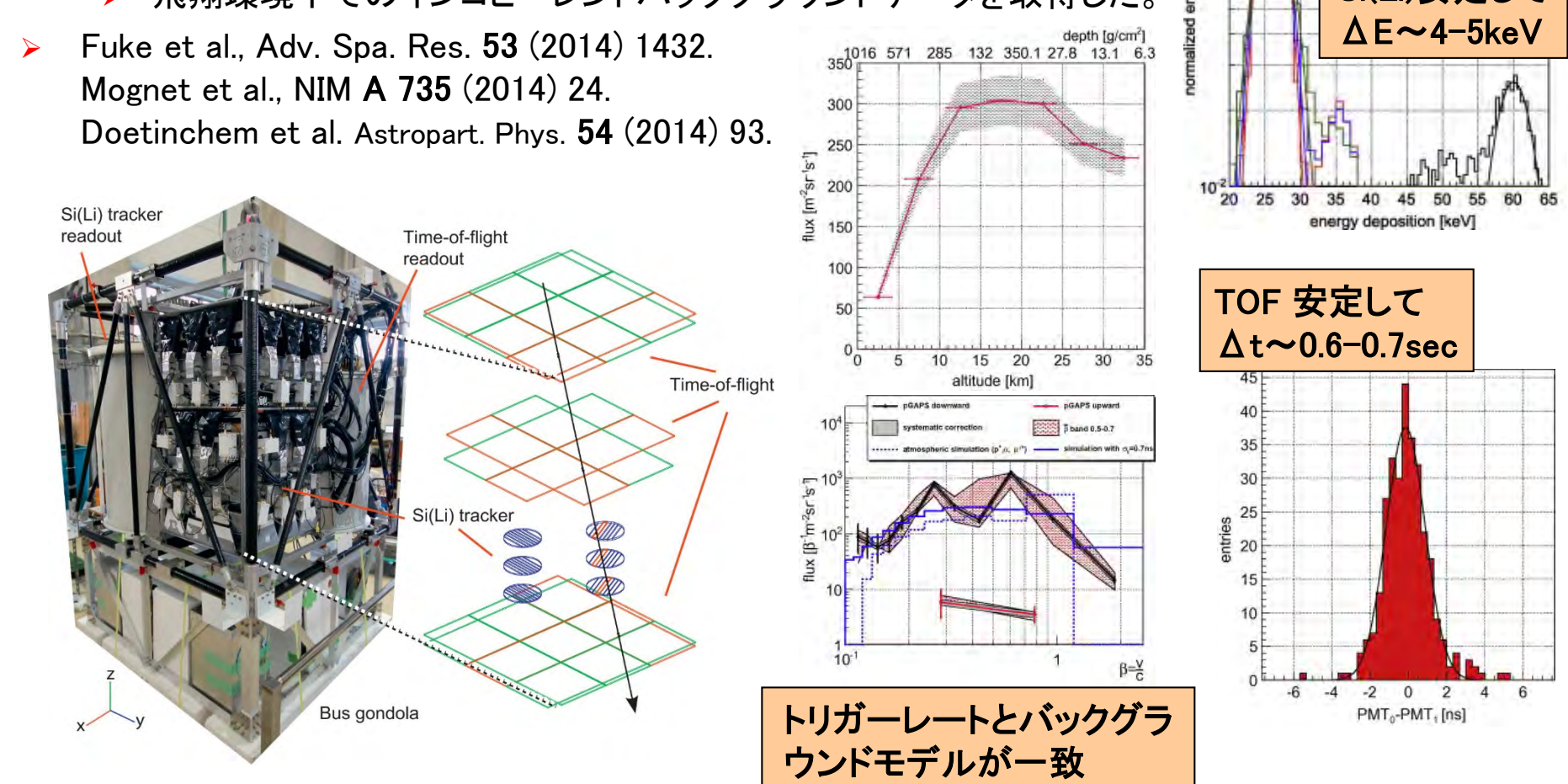
- GAPSは科研費(20740166, 22340073, 26707015), ISAS理学委員会経費, NASA APRA Flight Program (NNX09AC13G, NNX09AC16G), NSF Award(1202958)を頂いています。

5. 技術実証気球実験「pGAPS」

- pGAPSの目的: 南極用 GAPS測定器の各サブシステムの基本動作を気球環境下で実証すること。
- 2012年6月3日に JAXA大樹航空宇宙実験場にて実施し、フルサクセス達成。



- フライト全般に亘って測定器を動作させ、のべ100万事象を超えるデータを取得した。
- 掲げていた成功基準を全て達成した。
- Si(Li)やTOFは低ノイズで安定的に動作した。
- 冷却系の動作を確認し熱データも取得した。
- 飛翔環境下でのインコヒーレントバックグラウンドデータを取得した。



6. スケジュール、研究体制

