

# 宇宙線反粒子探索GAPS実験計画の(特に日本チームの)現状報告



福家英之, 小財正義, 小川博之, 岡崎峻, 崎本一博, 吉田哲也, 小瀬拓矢<sup>A</sup>, 竹内崇人<sup>A</sup>, 和田拓也<sup>A</sup>, 渡邊翼<sup>A</sup>, 吉田篤正<sup>A</sup>, 清水雄輝<sup>B</sup>, 山田昇<sup>C</sup>, 小池貴久<sup>D</sup>, 加藤千尋<sup>E</sup>, 宗像一起<sup>E</sup>, 永井大樹<sup>F</sup>, 河内明子<sup>G</sup>, 近藤愛実<sup>G</sup>, 宮崎耀佑<sup>G</sup>, 佐藤おかり<sup>G</sup>, 高橋俊<sup>G</sup>, 竹村薫<sup>G</sup>, 井上剛良<sup>H</sup>, C.J.Hailey<sup>I</sup>, K.Perez<sup>J</sup>, R.Fabris<sup>K</sup>, W.Craig<sup>L</sup>, R.Ong<sup>M</sup>, S.Boggs<sup>N</sup>, P.v.Doetinchem<sup>O</sup>, M.Boezio<sup>P</sup>, 他 GAPS Collaboration  
JAXA/ISAS, 青山学院大<sup>A</sup>, 神奈川大<sup>B</sup>, 長岡技科大<sup>C</sup>, 大阪電通大<sup>D</sup>, 信州大<sup>E</sup>, 東北大<sup>F</sup>, 東海大<sup>G</sup>, 東工大<sup>H</sup>, Columbia Univ.<sup>I</sup>, MIT<sup>J</sup>, Oak Ridge N.L.<sup>K</sup>, UC Berkeley<sup>L</sup>, UCLA<sup>M</sup>, UC San Diego<sup>N</sup>, Univ. Hawaii Manoa<sup>O</sup>, INFN<sup>P</sup>

## 【概要】

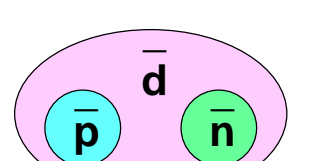
- 計画名: GAPS (General Anti-Particle Spectrometer) <http://gaps.isas.jaxa.jp/>
- 目的: 宇宙線中の反粒子の観測による「初期宇宙に関する未知の現象の探査」を主目的とする。特に、未発見の反重陽子 (antideuteron) を sub-GeV エネルギー領域に探索することで、ダークマター等の反粒子起源を探索する。併せて反陽子なども超高感度で観測し、原始ブラックホール等の反粒子起源も探る。
- 概要: NASAの南極周回気球による長時間観測(第1回)を2020年末に計画。2012月にJAXA大気球実験により基本技術の実証に成功。2019年初頭からフライトモデルの製作・組立を本格的に進める。
- 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

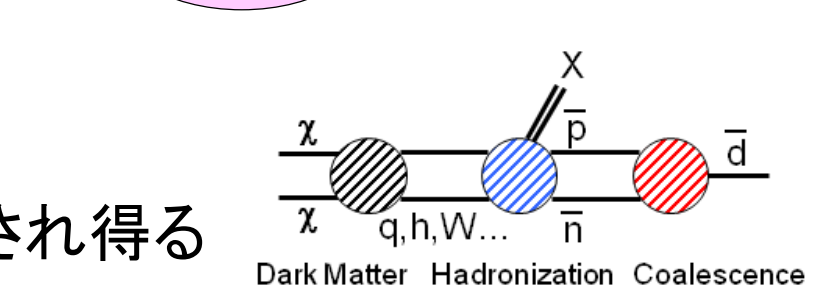


- ◆ 反重陽子  $\bar{d}$  は  $\bar{p}$  と  $\bar{n}$  から成る (anti-deuteron, 電荷-1)



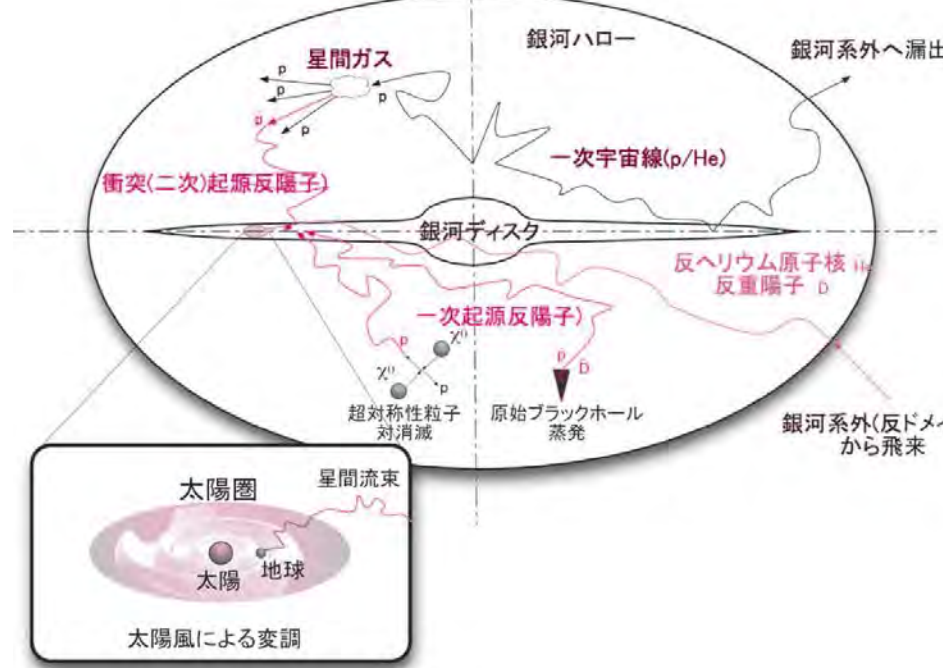
- ◆ 暗黒物質の有力候補WIMP

- 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)

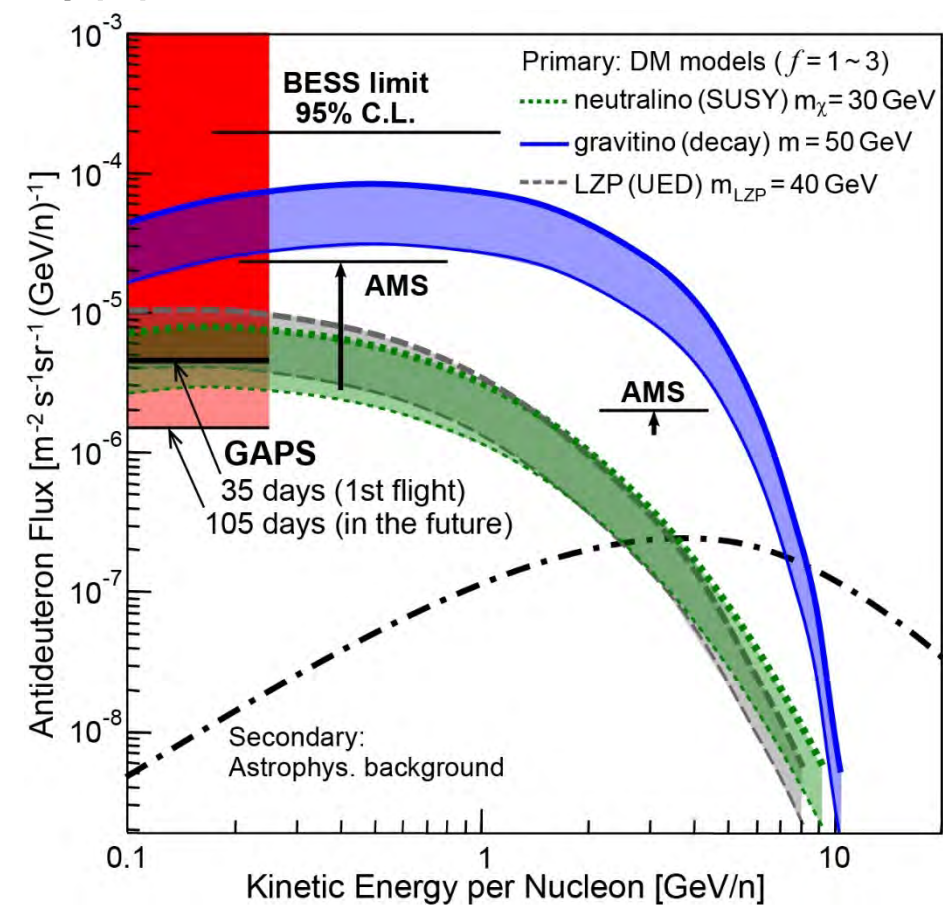
- ◆ 様々な暗黒物質モデル起源の反重陽子が理論予測されている  
⇒ 低エネルギー (sub-GeV) にピークを持つソフトなスペクトル

- ◆ 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 ( $\gamma$ ,  $\bar{p}$ ,  $e^+$ ,  $\nu$  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

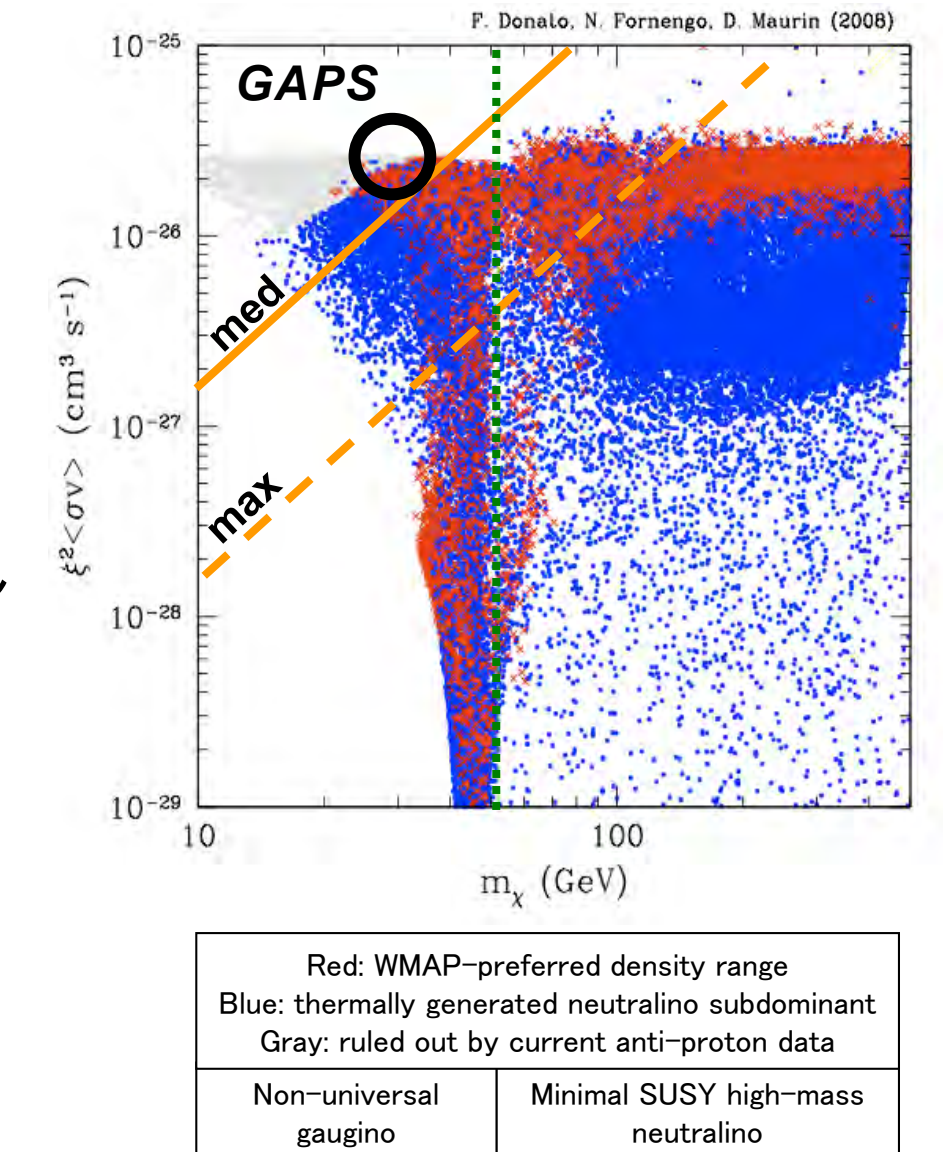
- ◆ 他実験と相補的なパラメータ領域を探索可能



## 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, 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?



- ◆ 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

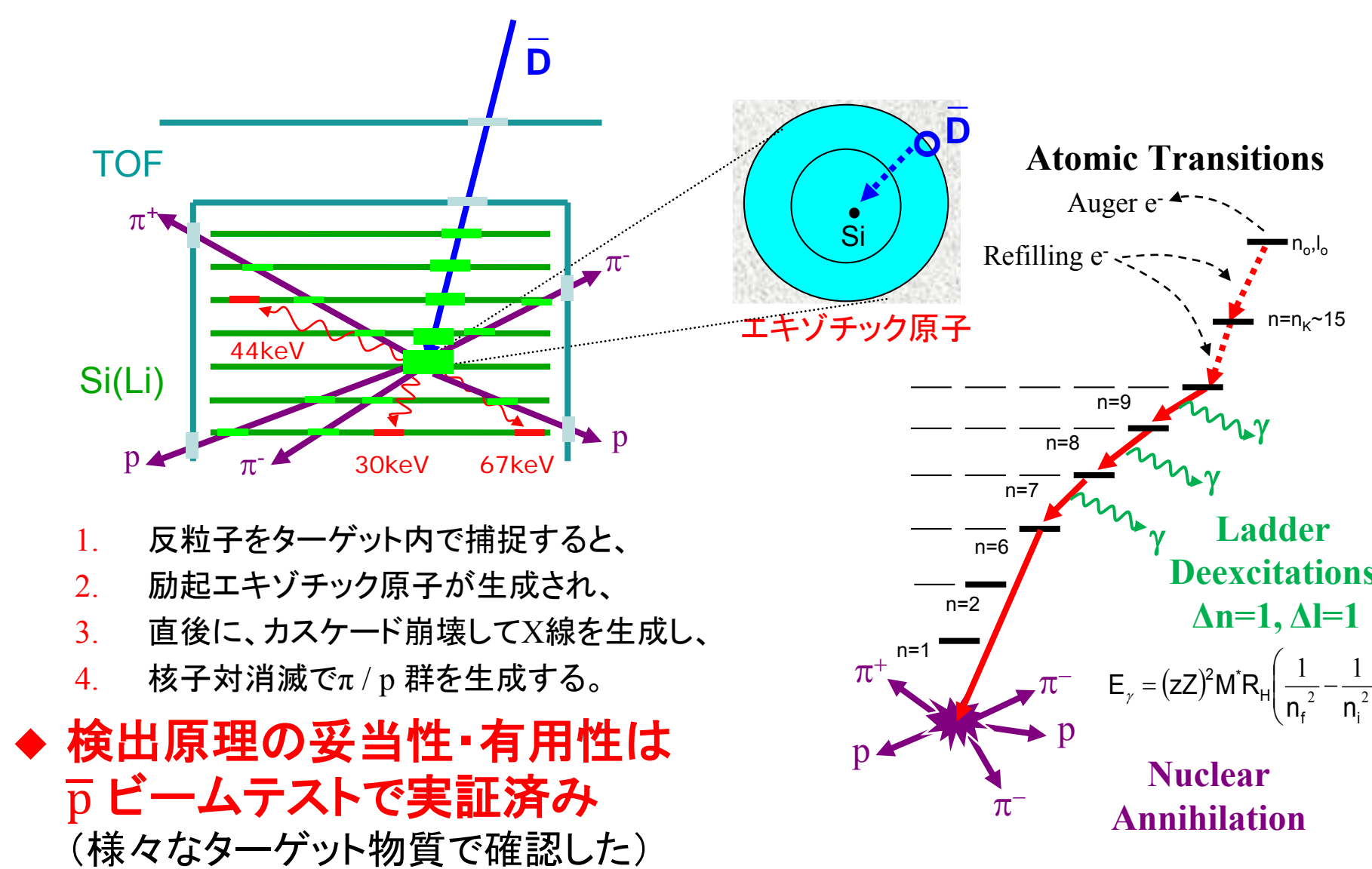
## 最近の発表論文, 謝辞

- 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.
- GAPS progress report : Fuke et al., JPS Conf. Pro. 18 (2017) 011003.
- Si(Li) detector development : Perez et al., NIMA 905 (2018) 12.
- Cooling technology : Okazaki et al., App. Thermal Eng. 141 (2018) 20; Fuke et al., JAL 6(2) (2017) 1740006; Fuke et al., Trans. JSASS 14 (2016) Pi17.
- Prototype flight : Fuke et al., Adv. Space Res. 53 (2014) 1432; Doetinchem et al., AstroPart. Phys. 54 (2014) 93; Moguet et al., NIMA 735 (2014) 24.

- ◆ GAPSは科研費 (2074016, 22340073, 26707015, JP17H01136, JP17K14313, JP18K13928), ISAS宇宙物理学委員会経費, JAXA小規模計画経費, 住友財団, NASA APRA, NSF, INFN, ASI, Heising-Simons財団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を導入



- ◆ 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)

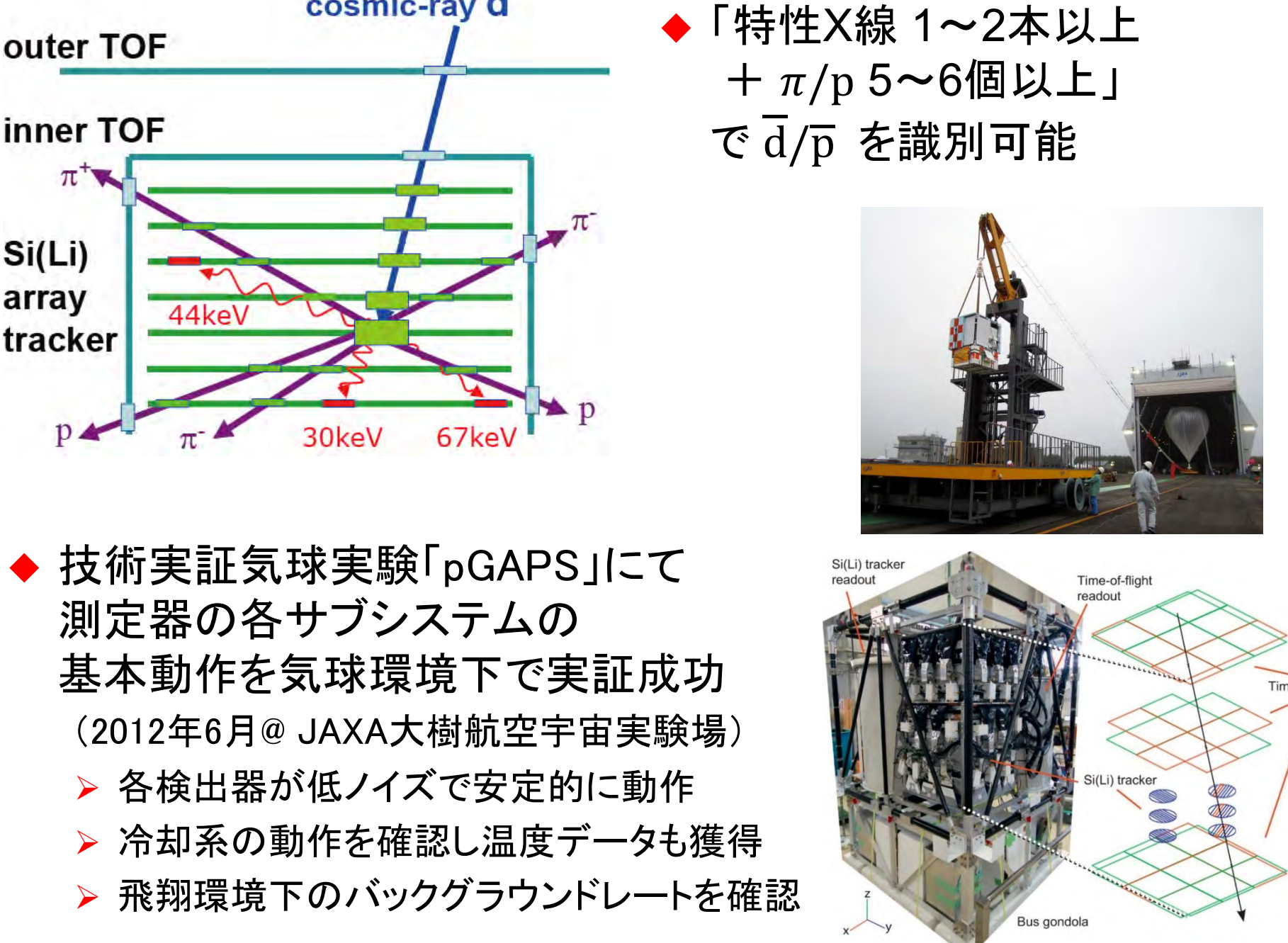
- ◆ トラック (Si(Li)検出器アレイ)

- $\phi 100\text{mm} \times 1440$ 個,  $1.6\text{m} \times 1.6\text{m} \times 10$ 層
- degrader, depth sensing, target.
- $\Delta E \leq 4\text{ keV}$  (20 - 100 keV),  $\pi/p$ 飛跡.

- ◆ TOFシステム (プラスチックシンチレーションカウンタ)

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

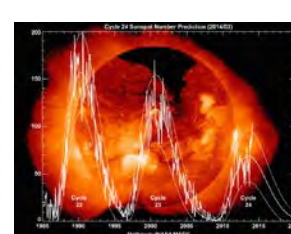
- ◆ 「特性X線 1~2本以上 +  $\pi/p$  5~6個以上」で  $\bar{d}/\bar{p}$  を識別可能



## 4. 南極周回気球

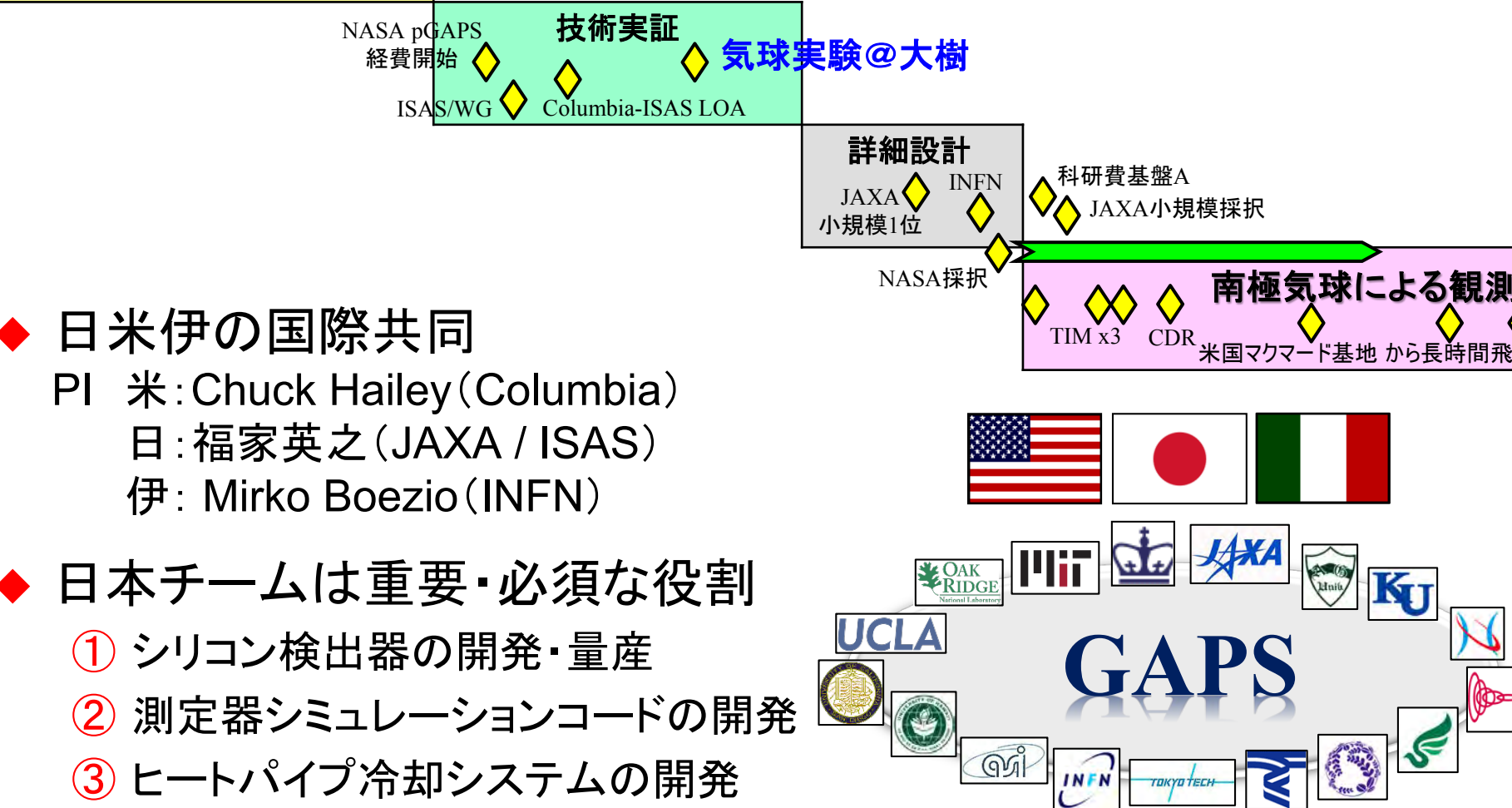
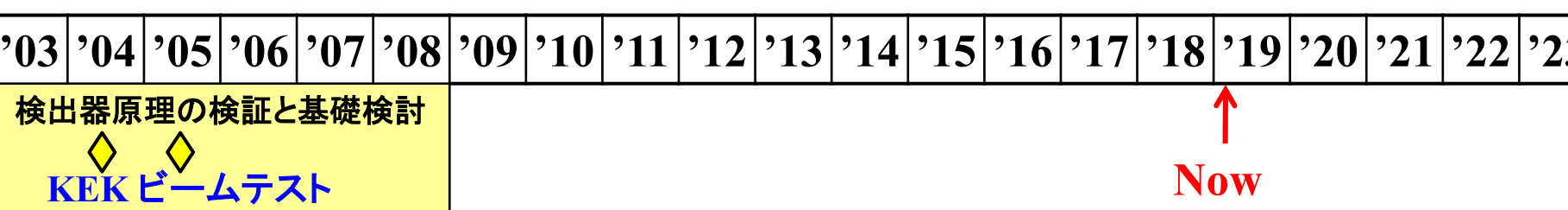
- ◆ 磁極域を長時間飛翔する NASAの南極周回気球を利用 (周回衛星やISSよりも低エネルギー荷電粒子の観測に適した飛翔体)

- ◆ 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



- ◆ 日米伊の国際共同

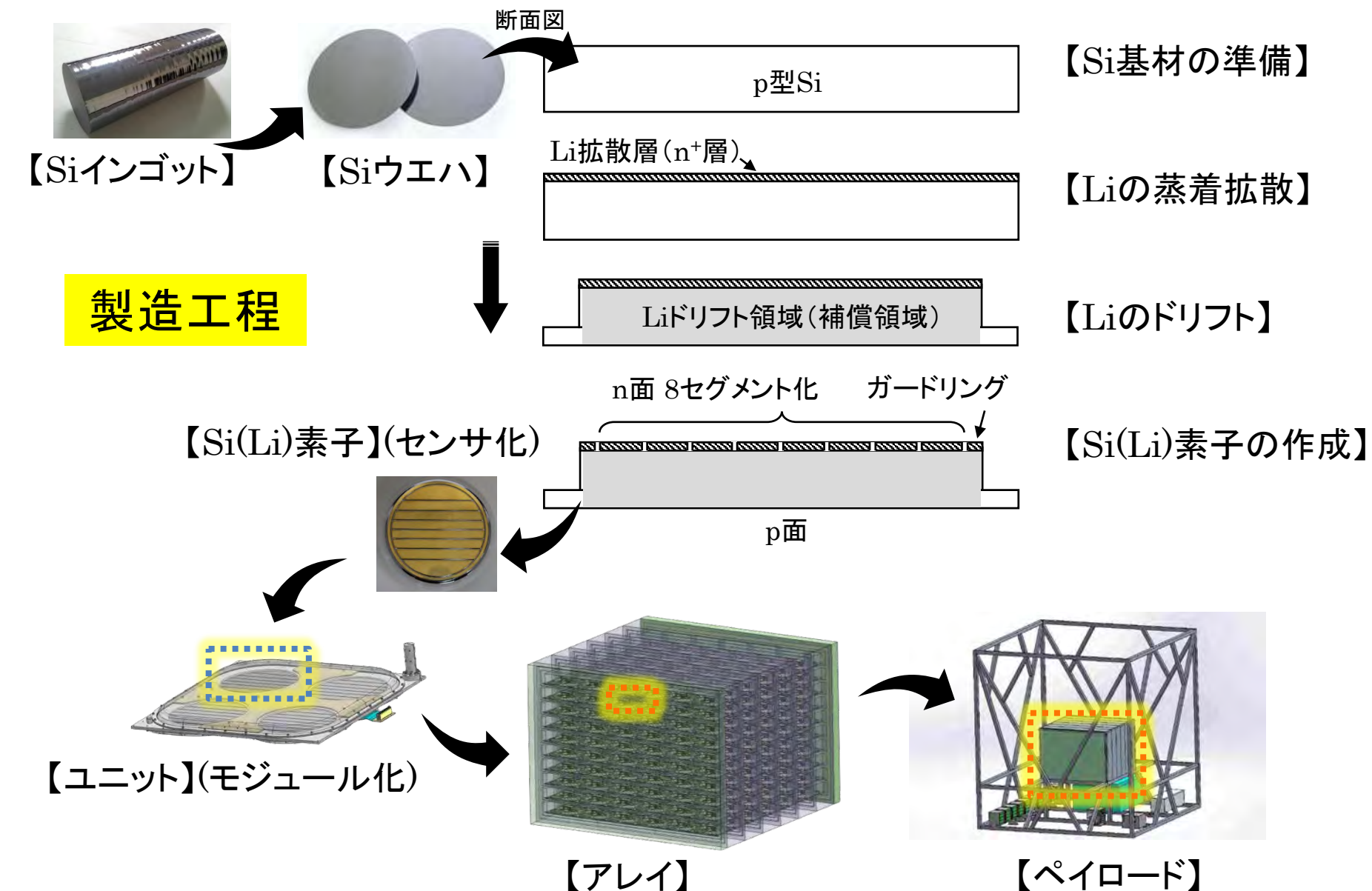
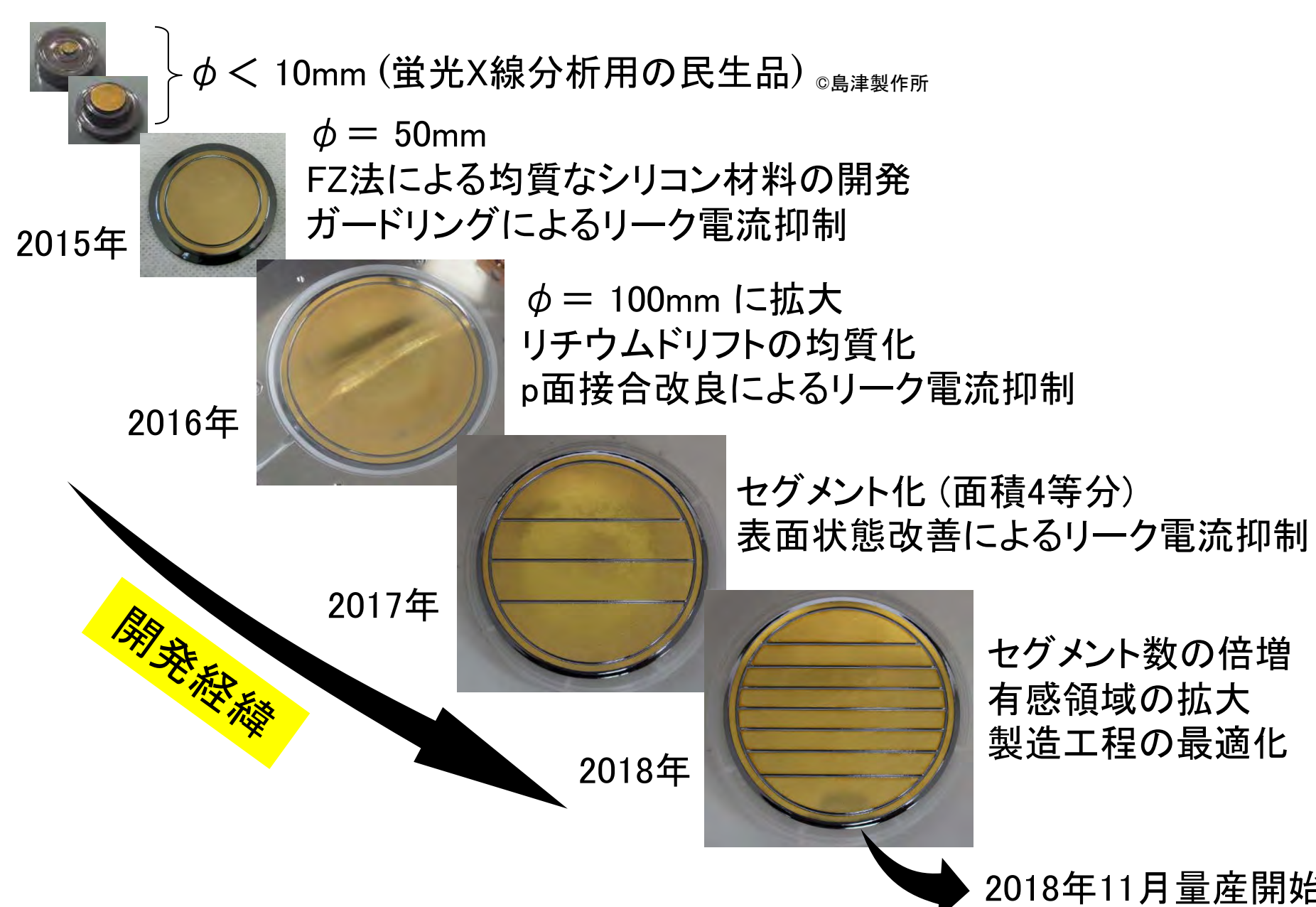
- PI 米: Chuck Hailey (Columbia)
- 日: 福家英之 (JAXA / ISAS)
- 伊: Mirko Boezio (INFN)

- ◆ 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

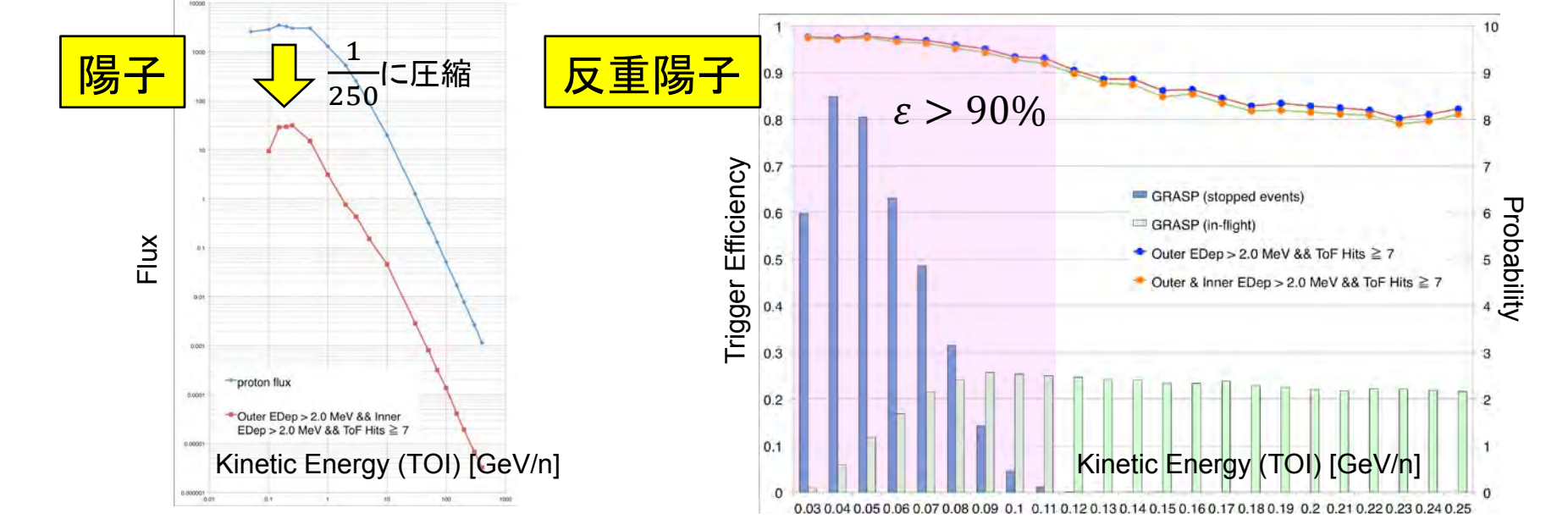
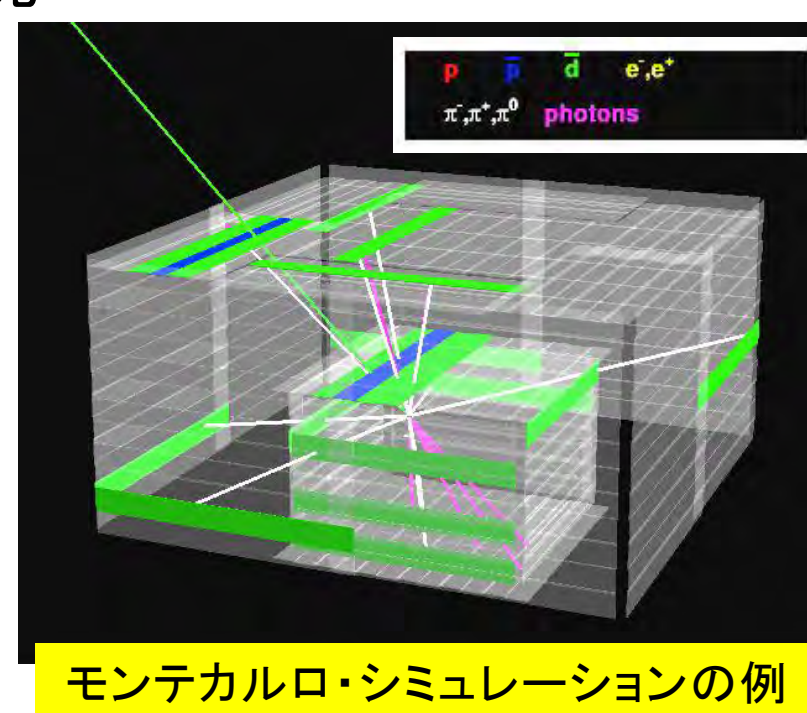
## 6. 開発状況① Si(Li)検出器の量産

- ◆ 高品質, 高良品率, 低コスト, 量産可能なSi(Li)検出器開発に成功
- FZ製法による良質なSi材料の開発 with SUMCO
- 各工程のカイゼン・最適化による良質なセンサ化 with 島津製作所
- 耐候, アレイ化, 評価試験の各工程を組織的に開発 with 米国チーム
- 2018年11月から量産開始(～2020年3月 見込)



## 7. 開発状況② シミュレーションコード等の開発

- ◆ TOFカウンタの設計最適化
- ◆ TOFカウンタ光検出の較正装置開発
- ◆ GEANTシミュレーションの詳細化
- ◆ 機械学習の活用
- 反粒子識別能力の更なる向上検討
- ◆ トリガースキームの最適化
- シンプルなトリガースキームの構築成功



## 8. 開発状況③ ペイロード熱設計

- ◆ Si(Li)検出器冷却用ヒートパイプの開発
- 軽量, 低消費電力
- 既存技術の長所を融合した独自の熱工学技術 (自動振動ヒートパイプ, サーマライズン, 可変コンダクタンス, リザーバ制御, ポンプetc)
- 相変化の高効率化による冷却温度の均一化
- 最小限の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
- 実寸モデルとシミュレーションの開発・併用による動作実証, システム細部の最適化



- ◆ ラジエータの冷却能力の実証

- $\leq -55^\circ\text{C}$  への冷却の成立性を 熱解析で確認済みだが 気球実験での前例は無い
- 気球環境での実証のためNASA気球実験 #689N(SIFT)にビギー搭載@Ft. Sumner (NASA/BPO/CSBFの協力に謝意)
- 2018年9月8日に放球され, 上空での  $\leq -70^\circ\text{C}$  への冷却実証に成功. ただし NASA気球の不具合のため 日照・高度安定・姿勢安定を得られず
- より高信頼度な実証のため 2019年に 日米の飛翔機会を用いた再実施を予定

