宇宙線反粒子探索計画 GAPS の 現状と プロトタイプ気球実験計画

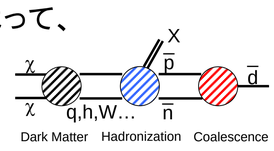
JAXA: 福家 英之, 坂東 信尚, 小川 博之, 岡崎 峻, 荘司 泰弘, 吉田 哲也； *福井工大*: 宮崎芳郎； *理研*: 小池貴久； *京大*: 高田淳史；
Columbia Univ.: 荒牧嗣夫, F. Gahbauer, C.J. Hailey, J. Koglin, N. Madden, 森 嘉野, G. Tajiri； *UC Berkeley*: S. Boggs, P.v. Doetinchem；
Technical Univ. Denmark: F. Christensen； *LLNL*: W.W. Craig； *ORNL*: R. Fabris, K. P. Ziock； *UCLA*: I. Mognet, R. Ong, T. Zhang, J. Zweerink

【概要】

- 計画名：GAPS（General Anti-Particle Spectrometer）
- 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。
- 特色： 従来のマグネット型の手法とは異なり、エキゾチック原子核の崩壊過程を利用したオリジナルで新しい測定手法を導入している。
- 研究体制： 日米を中心とする国際共同計画。コロンビア大学のC.J.Hailey教授が全体のPIを務める。
  2010年1月に ISAS/JAXA の 宇宙理学委員会にて「小規模ワーキンググループ」として承認された。
- 計画スケジュール： 2011年 8月に技術実証を目的とする気球実験 @大樹町（JAXAの大気球を使用）。
  2014～2019年に 計3回（のべ300日間）の超長時間気球による観測 @南極マクマード基地（NASAの大気球を使用）。

目的： 宇宙線中の反物質（反粒子）の観測によるダークマター等の間接探索

- ダークマターの解明は、宇宙物理学・素粒子物理学的に重要な課題である。
- GAPSは、宇宙線中の低エネルギー $\bar{d}$（反重陽子）の検出によって、ダークマター(CDM)の間接探索を目指す。



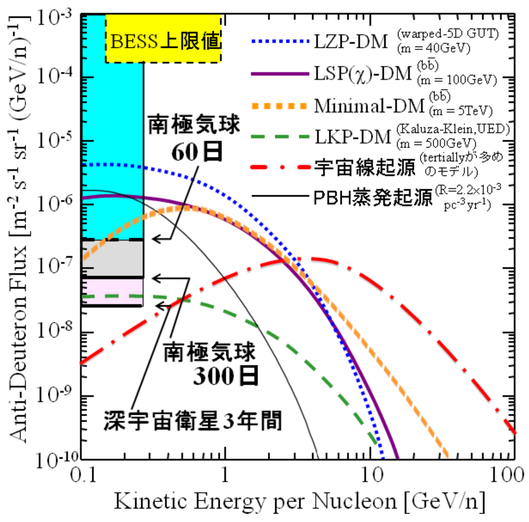
CDMの対消滅から反重陽子が生成される過程の概念図

- 反重陽子は、宇宙線中には未だ1例も観測されたことが無いが、理論的には微量に存在している可能性がある。低エネルギー領域では、ダークマターを起源とする反重陽子が最大の割合を占める可能性がある。このため、仮に1例でも観測されればインパクトは大きく、ましてや一定の統計量を観測できれば その意義は非常に大きい。

このように低エネルギー領域でダークマター起源の反重陽子が最大割合となり得る（いわばバックグラウンドフリー）いう点が、他の宇宙線種には無い反重陽子の魅力である。
（Donato et al., Phys. Rev. D, 2000）

反重陽子の探索はBESS実験により福家他が初めて行い、上限値を与えた。
（Fuke et al., Phys. Rev. Lett., 2005）

しかし、実効的な探索のためには感度をBESSよりも3桁ほど向上する必要がある。



GAPSが気球や衛星で目指す反重陽子の探索感度と、様々なCDM モデル起源 や 宇宙線起源（主要成分）からの反重陽子のエネルギースペクトル（理論予想）。

- 反重陽子を用いた探索は、他の間接探索（e^+, n, $\bar{p}$, 等）が主要成分からの僅かなズレの観測を必要とすることや、直接探索実験がバックグラウンドノイズとの戦いであることに比べ、ユニーク かつ相補的な観測対象である。
  探索によってカバーできるパラメータ空間も相補的であり、GAPSは他実験とのシナジーが期待できる（Baer&Profumo, JCAP, 2005）。
  探索パラメータ領域の範囲内には最近の他の観測結果と無矛盾なCDMモデルが多く含まれている（Ibarra&Tran, JCAP, 2009; Brauninger&Cirelli, PLB, 2009; Cui et al., 2010）。

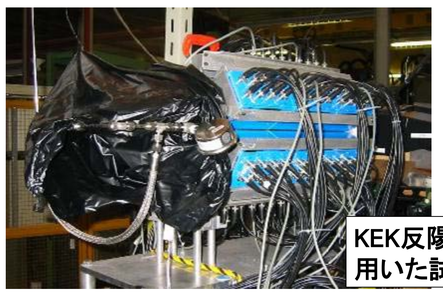
GAPSの反粒子検出方法

- 従来よく使われていたマグネット型スペクトロメータの手法（BESS実験を含む）では、観測感度（面積立体角×観測時間）を 3～4桁も向上させるのは難しい。
- そこで、GAPSは、マグネット型とは全く異なる新しい反粒子検出手法を導入した。
  宇宙線反粒子が飛来すると：
  (i) 入射反粒子が測定器内で捕捉され、
  (ii) ターゲット原子と入射反粒子が結合して励起エキゾチック原子が生成された後、
  (iii) その直後に基底状態へのカスケード崩壊（右下図）の過程で特性X線と、
  (iv) 核子対消滅によるπ中間子群を発生する。

この過程で発生するX線のエネルギーとπの生成数は入射反粒子の種類に固有な値を持つので、その測定によって反粒子を同定する、というのがGAPSの手法である。

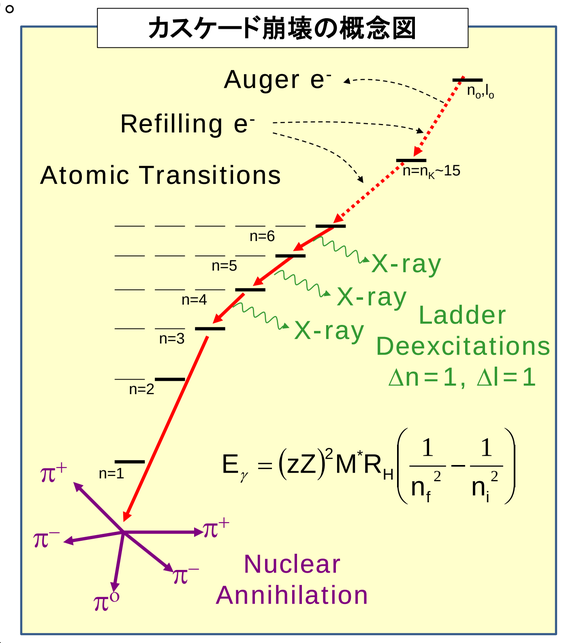
- この手法の原案は2002年に発案された。
  （Mori et al., ApJ. **566** (2002) 604）

そして、2005年に反陽子ビームテストによって検出原理の妥当性・有用性が実証された。
（Hailey et al., JCAP. **0601** (2006) 007）



KEK反陽子ビームを用いた試験の様子

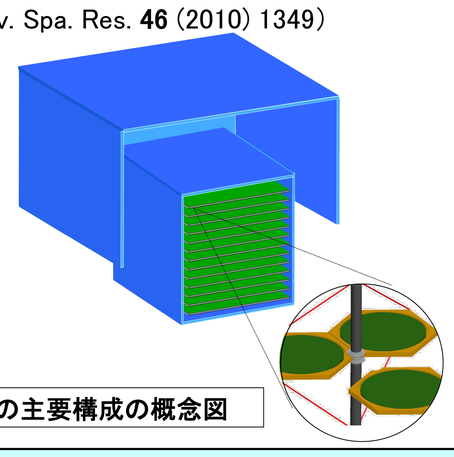
カスケード崩壊の概念図



- なお、地磁気の影響を受けずに低エネルギーの荷電粒子を観測するためには、極域の高空、または、地磁気が無視できる程度の深宇宙に行く必要がある。
  そこで、GAPSは、極域周回の気球、および、深宇宙衛星による観測を目指している。

GAPS測定器の主要構成

- 測定器の基本設計は以下のとおり。（概念図を右下に示す）
  （Fuke et al., Adv. Spa. Res. **41** (2008) 2056； Aramaki et al., Adv. Spa. Res. **46** (2010) 1349）
  - コア部分にはSi(Li)型半導体検出器を採用。
    2m×2mの平面状のSi(Li)検出器を13層 積層。
    Si(Li)は宇宙線反粒子に対する degrader、ターゲット、特性X線のエネルギー測定、π中間子のトラッキングの役割を兼ねる。
  - Si(Li)の周囲とその上方にプラスティックシンチレーションカウンタを配置し、トリガー発生、Time-of-Flight測定、Veto発生、の役割を兼ねる。

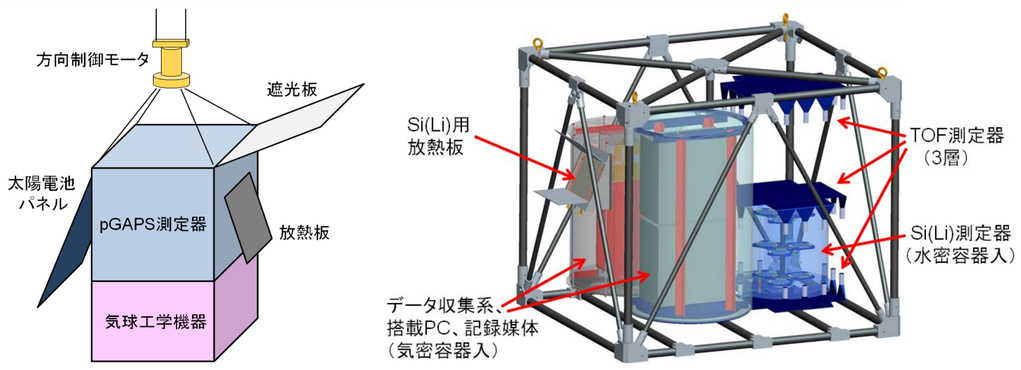


測定器の主要構成の概念図

プロトタイプによる気球実験計画

- 計画時期： 2011年8月@北海道大樹町。
- 目的： 南極実験に先立ち、測定器の各要素の基本動作を気球フライト環境下で実証する。
  （地磁気緯度が低く 観測時間も短いので、反粒子そのものの観測は行わない（行えない））。
  ① Si(Li)やTOFの気球環境下での動作による、真空対策の実証やノイズレベルの確認。
  ② Si(Li)の冷却システムの気球環境下での動作の検証。
  ③ 気球環境下でのインコヒーレントなバックグラウンドレート等に関する基礎データの取得。

プロトタイプ気球実験用ペイロードの概念図（左） と 測定器部分の拡大図（右）

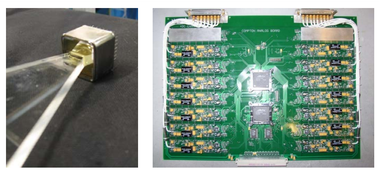
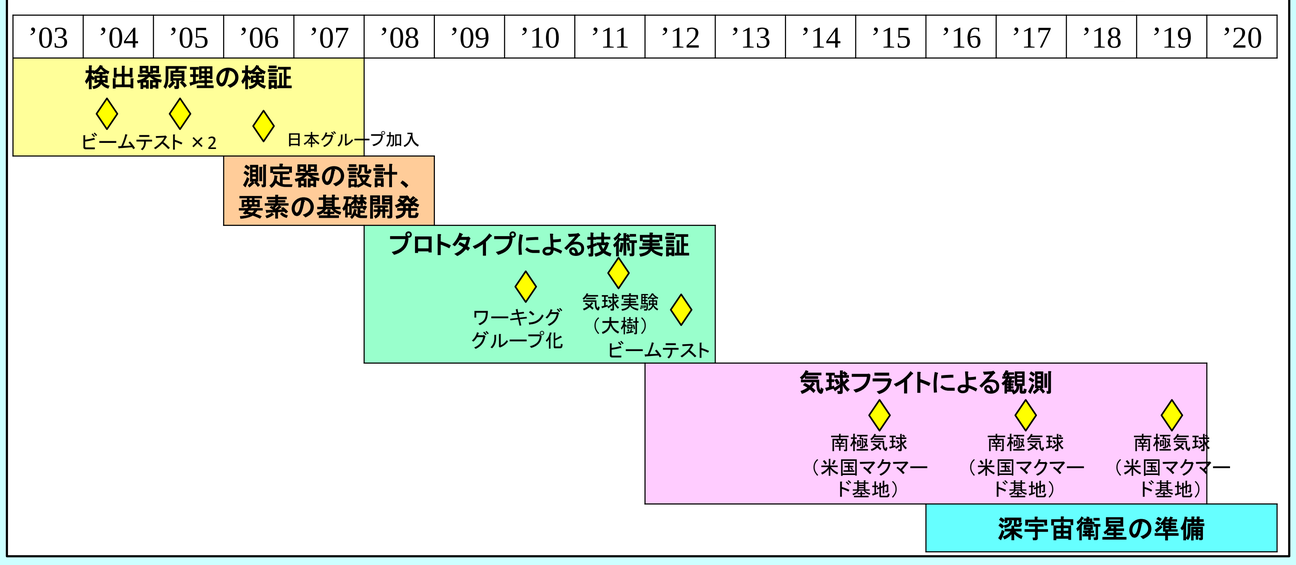


- 現在、各担当機関にてフライトの準備を進めている。
  - Si(Li)： ウエハ単位での評価試験を実施中。
    将来の量産化に向けた準備も進めている。
  - Si(Li)の冷却システム： OHPなど複数の伝熱方式を日米で並行して開発検討中。排熱は成層圏大気への輻射放熱によって行う。
    （ポスター発表P3-210）
  - ペイロードの方向制御： 撚り戻しモータを用いた1軸制御によって、放熱板を太陽と逆指向、太陽電池を太陽方向に指向させる。制御則の最適化設計を図っている。（ポスター発表P3-212）
  - その他、TOFカウンタ、データ収集系エレクトロニクス、HKモニターシステム、地上系などの開発や、測定器動作のシミュレーションによるトリガー設計の最適化も進行中である。
  - 今年4月から測定器の総合組立・総合試験を行い、8月のフライトに備える予定である。

Si(Li)の評価モデル（左） と 試験の様子（右）

インハウスでのSi(Li)量産化に向けた試作作業

TOF用PMT（左） と 読み出し回路の試作機（右）



計画スケジュール