

宇宙線反粒子探索GAPS実験用リチウムドリフト型シリコン検出器の開発

小財正義 (ISAS/JAXA)、福家英之 (ISAS/JAXA)、清水雄輝 (神奈川大)、宗像一起 (信州大)、加藤千尋 (信州大)、C. J. Hailey (Columbia Univ.)、K. Perez (MIT)

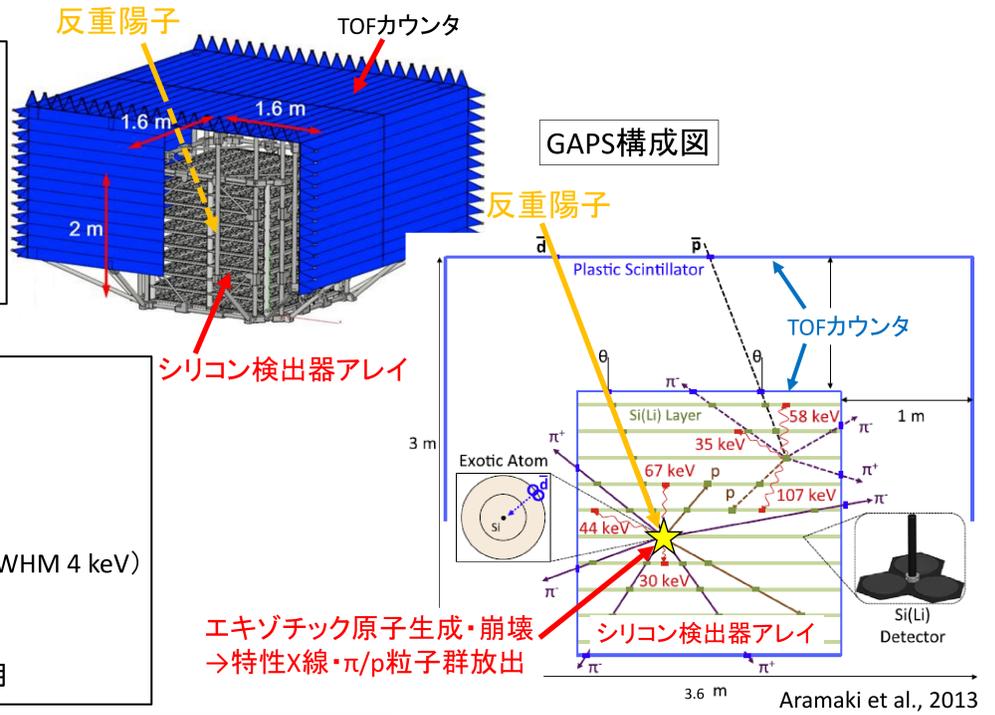
概要
暗黒物質の探索プローブとして注目される低エネルギー宇宙線反粒子を高感度で観測するため、GAPSではエキゾチック原子物理を用いた新たな反粒子識別法を採用する。GAPSのシリコン検出器アレイは反粒子の捕獲とエキゾチック原子からの放射線検出を担い、厚さ2.5 mm・直径10 cmのリチウムドリフト型シリコン素子約1400個で構成される。本講演では、これまでに無い大型素子の量産を実現する為に進めている、ノイズ低減方法などの開発状況を報告する。

GAPS (General Anti-Particle Spectrometer) 実験

- 宇宙線低エネルギー反粒子の高感度観測
 - 反重陽子初検出による暗黒物質の探索(他にも宇宙線太陽変動の解明など)
- エキゾチック原子を利用した新しい反粒子識別法を採用
 - 遮蔽物質の薄肉化(低エネルギー粒子の検出)、有感領域の大型化が可能
- NASA南極周回気球を利用して2020年観測実施予定

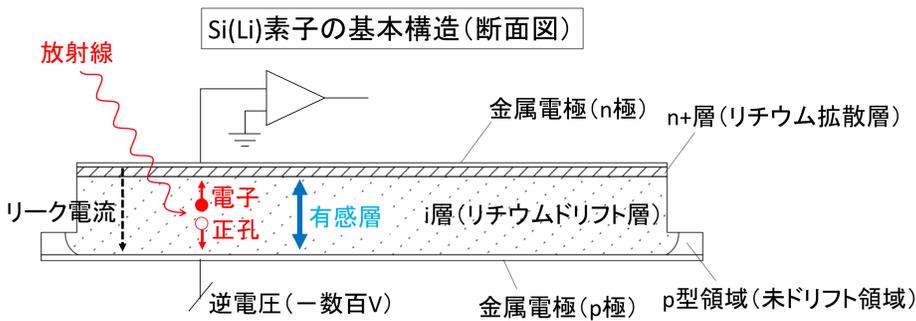
GAPSシリコン検出器

- シリコン検出器アレイで反粒子を減速・捕獲→エキゾチック原子を生成
- エキゾチック原子の崩壊 → 特性X線 + 核子対消滅による π/p 粒子群生成
 - 特性X線エネルギー、 π/p 粒子数など → 反粒子を識別
- シリコン素子の要求仕様
 - 比較的高温な環境(-35°C)でも高いエネルギー分解能(数十keV X線に対してFWHM 4 keV)
 - 厚い(2.5 mm)有感層、大口径(直径10 cm)、位置分解能(4セグメント)
 - 約1400個の素子を10層にアレイ化→製造の良品率向上が必要
- 厚い有感層=厚い真性半導体層(i層)が必要 → リチウムドリフト型シリコンを採用



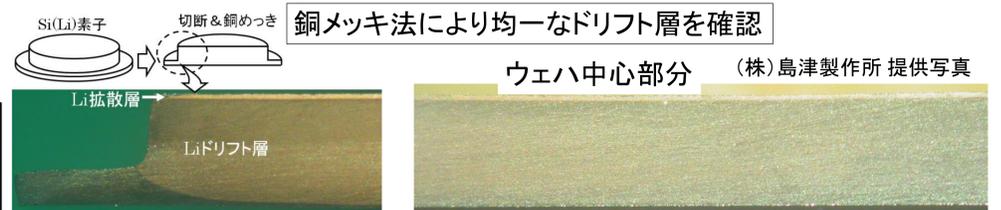
リチウムドリフト型シリコン(Si(Li))

- p型シリコンウェハの片面にリチウムを蒸着・拡散(高濃度n型=n+層を形成)
 - 加熱・逆電圧印加によりリチウムをドリフトさせ、アクセプタを補償する(i層を形成)
- ドリフト層がi層となる → 厚い有感層が得られる
 - 厚さ数mm・直径約1 cm、液体窒素冷却(-150°C程度)で動作する素子は既に量産化
 - 技術実証pGAPS実験(2012年)により、気球飛翔環境でも機能することを実証
 - 開発課題
 - 大口径化(10 cm)、高温(-35°C)でのエネルギー分解能向上、コストダウン・良品率向上



Si(Li)素子の大型化

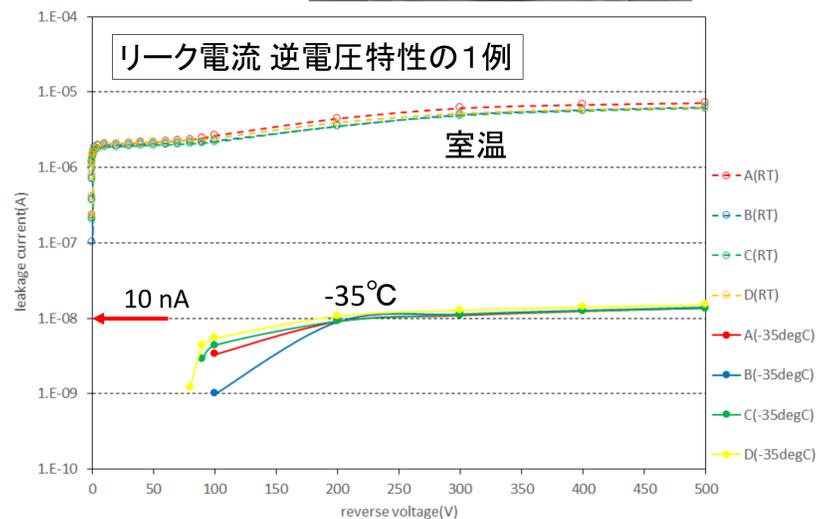
- 高品質かつ大口径のシリコン素材と、均一なリチウムドリフト方法が必要
- 高品質・大口径シリコン素材の開発
 - Floating Zone法で直径約10 cmのp型シリコンインゴットを製作
 - 高純度(酸素濃度 $10^{16}/\text{cc}$ 以下)、長ライフタイム(~800 μs)、高比抵抗(~1 k $\Omega\cdot\text{cm}$)、比較的低コストのシリコン素材開発に成功
- 大型ウェハへのリチウム拡散・ドリフト方法を開発
 - 大型・高品質素材に対応したドリフトのパラメータ最適化
 - リチウムを均一にドリフトできる事を確認



試作Si(Li)素子

セグメント x 4 (A~D)

ガードリング



高温環境でのエネルギー分解能の向上

- 大型かつ使用温度が高い
 - リーク電流(逆電圧印加時にn極からp極へ流れる微小電流)がノイズの主要因
- 1セグメントあたりリーク電流を~10 nA以下(@-35°C)に抑える必要
- ガードリングによるリーク電流削減の実証
 - 素子周縁は格子欠陥や不純物のためにリーク電流の発生源・経路となる
 - n面にn+層より深く溝を切り、センサ領域を周縁領域(ガードリング)から電気的に分離
 - リーク電流が大きく(~3桁)削減されることを実証

まとめ

- GAPSシリコン検出器
 - 反粒子減速材 兼 エキゾチック原子生成放射線の測定
 - これまでに無い厚肉・大口径かつ高性能なシリコン素子の量産が必要
 - 厚肉素子の実績があるリチウムドリフト型シリコンを採用
- 高品質な大口径シリコン素材を(量産に見合うコストで)得ることに成功
- 大型素子への均一なリチウムドリフト法を開発
- リーク電流削減方法も実証・開発を進め、目的が立ちつつある
- 進行中の研究・計画
 - 良品率の向上
 - さらなるリーク電流削減による平均レベルの底上げ
 - 特性ばらつき等の主要因の特定(レーザー顕微鏡による観察など)
 - 耐環境性の向上・経時劣化の抑制
 - エネルギー分解能など評価システムの構築
 - 2018年量産開始・2020年第一回南極フライト予定

謝辞
本研究の一部は科研費(20740166, 22340073, 26707015, JP17H01136, JP17K14313)、JAXA理学委員会経費、JAXA小規模計画経費を受けて実施しました。
シリコン素子の開発では、株式会社SUMCOと株式会社島津製作所に多大なるご協力を頂いております。ここに謝意を表します。