ASTRO-H衛星搭載 硬X線軟ガンマ線検出器における BGOアクティブシールドの開発状況

大野雅功（広島大理),

徳田伸矢,中村竜,高橋弘充,深沢泰司 (広大理),

村上浩章, 小林翔悟, 櫻井壮希, 笹野理, 鳥井俊輔, 中澤和洋, 牧島一夫 (東大理),

山岡和貴, 田島宏康(名大STE研), 内山秀樹(静岡大) ,佐藤理江, 萩野浩一, 湯浅孝行,

佐藤悟朗, 渡辺伸, 国分紀秀, 高橋忠幸, 森國城 (ISAS/JAXA), 谷津陽一 (東工大),

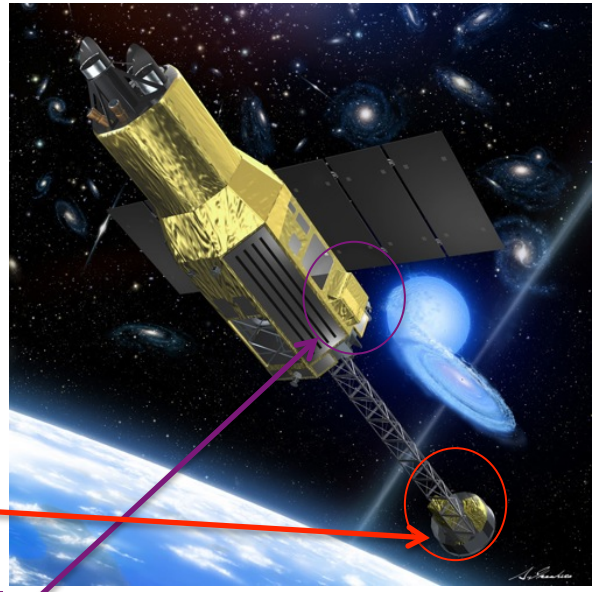
片岡淳, 齋藤龍彦, 吉野将生 (早稲田理工), 中森健之(山形大),

他HXI/SGDチーム

The ASTRO-H Mission

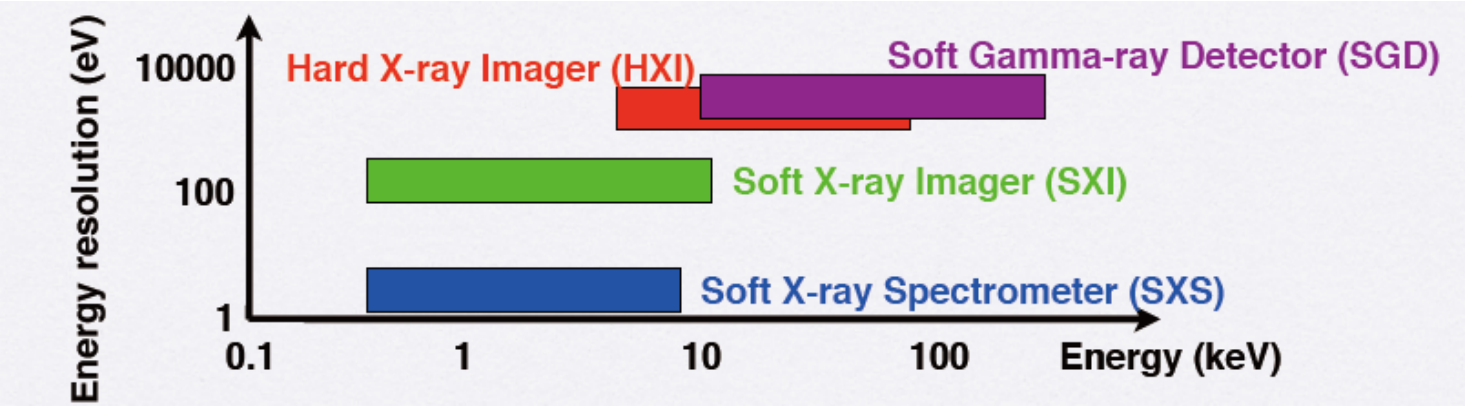
Astro-H 衛星(2015年打ち上げ予定)

1. 硬X線望遠鏡による初めての撮像分光観測
2. はじめてのマイクロカロリメータによる
   超高分解能分光観測
3. 0.3キロ電子ボルトから600キロ電子ボルトと
   ３桁以上にもおよぶ、過去最高の高感度広帯域観測



硬X線撮像検出器 (Hard X-ray Imager : HXI)

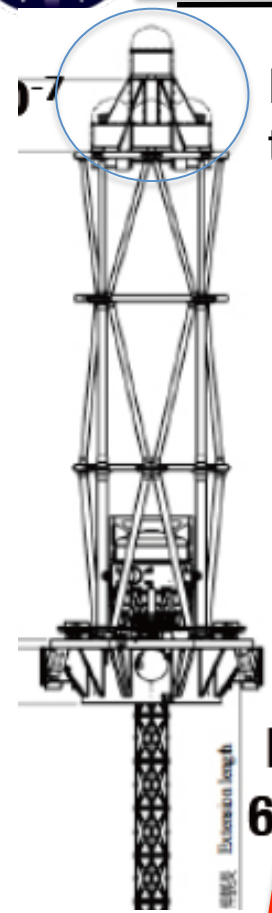
軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector : SGD)



Hard X-ray Imager (HXI)

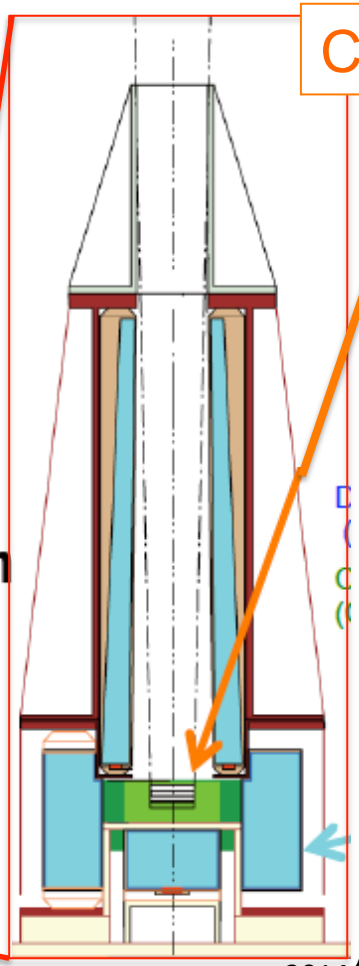
Hard X-ray telescope

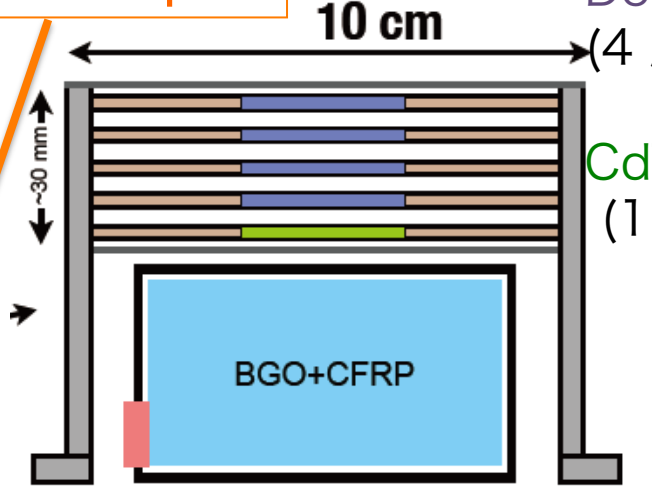
5 – 80 keV のエネルギー領域での高感度観測.
(すざく HXD の２桁高い感度)



EOB
6.3 m

Camera part

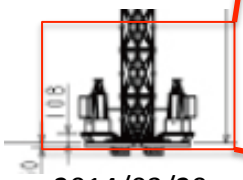




Double Side Si Strip
(4 層, E< 25 keV)

CdTe Double Side Strip
(1 層)

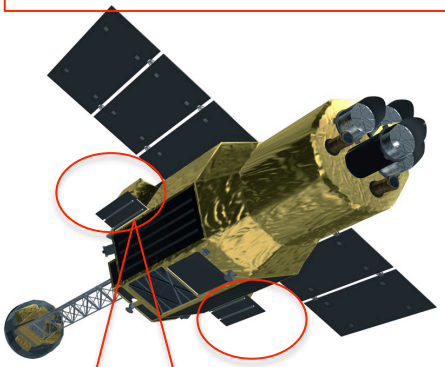
Hard X-ray Imager (HXI

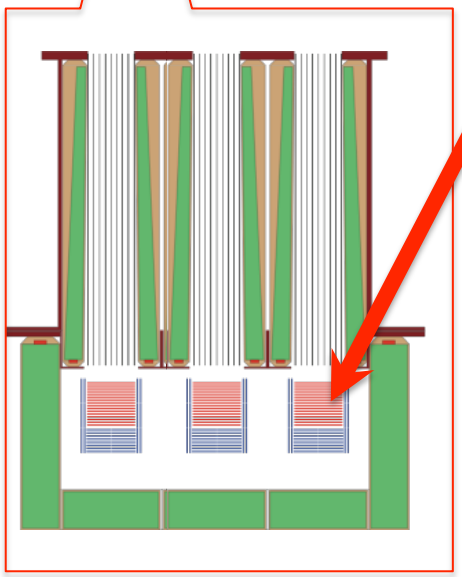


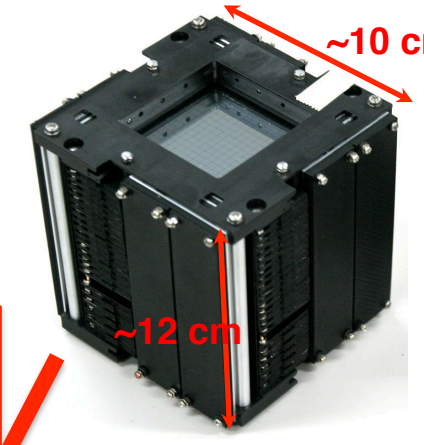
- 12 m の焦点距離で硬X線撮像
- 高い位置分解能 (250 um)
- 80 keVにまで及ぶ検出感度の保持
- BGO アクティブシールドによる
  バックグラウンド除去

Soft Gamma-ray Detector (SGD)

狭視野型コンプトンカメラ: 60 – 600 keV までの
広帯域高感度ガンマ線観測を狙う全く新しいコンセプトの検出器







Si/CdTe 多層半導体 コンプトンカメラ

- ピクセルシリコン検出器: 0.6 mmt 32層
- ピクセルCdTe検出器: 0.75mmt 8層(+2層)
- コンプトン運動学により
  光子の到来方向を制限

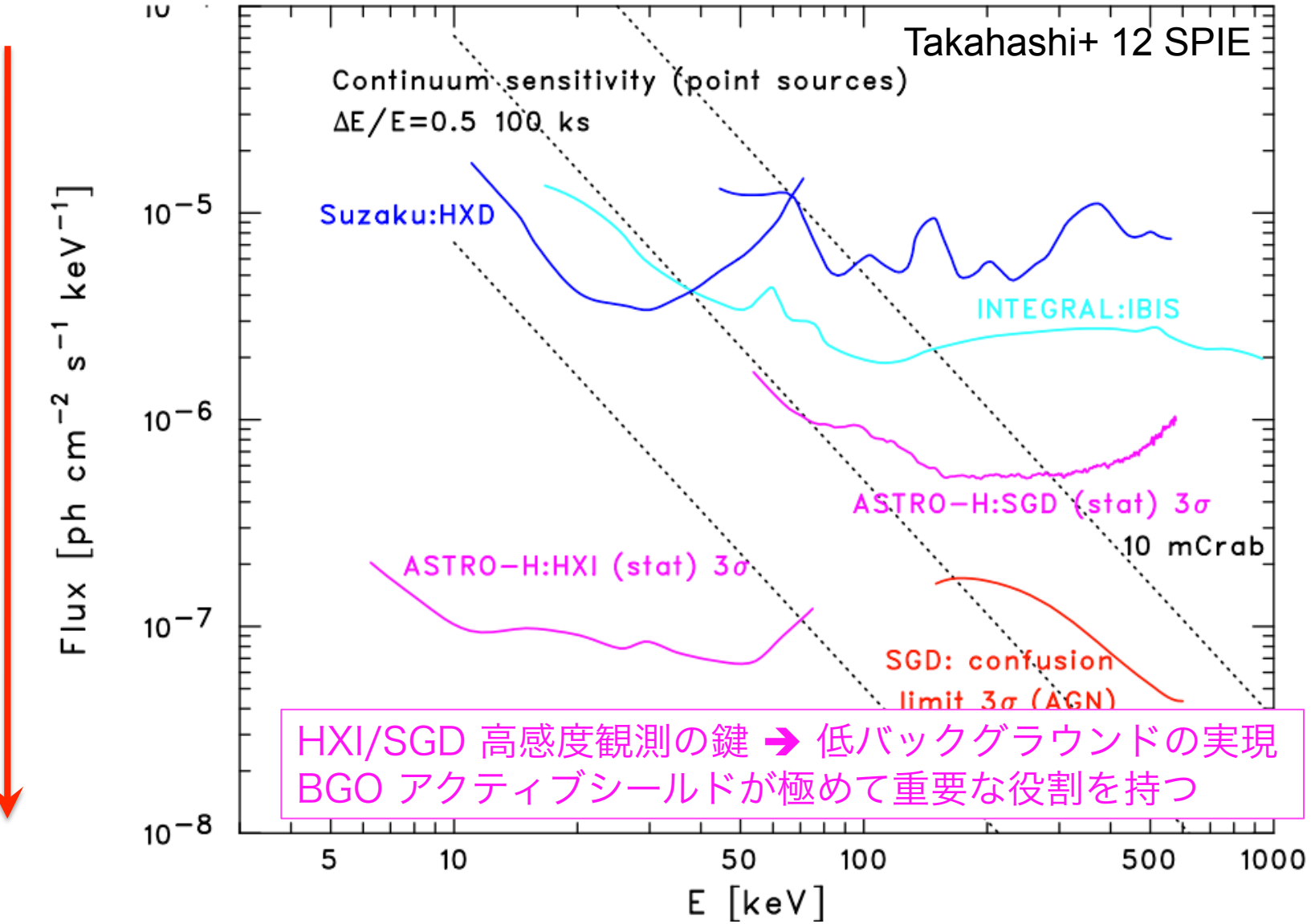
$$\cos\theta = 1 + \frac{m_e c^2}{E_1 + E_2} - \frac{m_e c^2}{E_2}$$

BGO シールド検出器

- 宇宙線に対するパッシブシールド
- 視野外からのガンマ線・放射化による
  内在バックグラウンドを反同時計数により除去

Performance of HXI/SGD

感度良い



HXI/SGD 高感度観測の鍵 ➔ 低バックグラウンドの実現
BGO アクティブシールドが極めて重要な役割を持つ

BGOシールドシステム

BGOシールドは、 HXI/SGD で共通のシステムで開発

APD-BGO ユニット

CSA+HV Box

BGO信号処理回路部
(APMU) max 13ch

BGO

APD

300-400 V

CSA
(max 7ch)

HV-APD

Analog
+ADC

FPGA

Data/
CMD

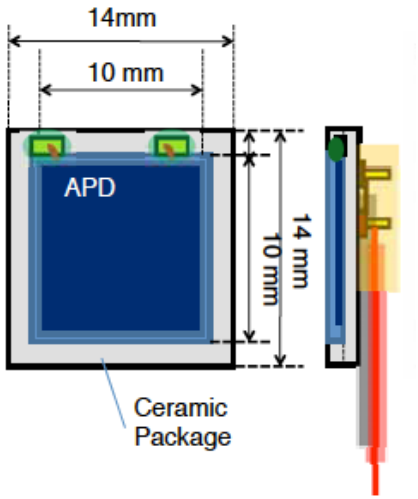
MIO

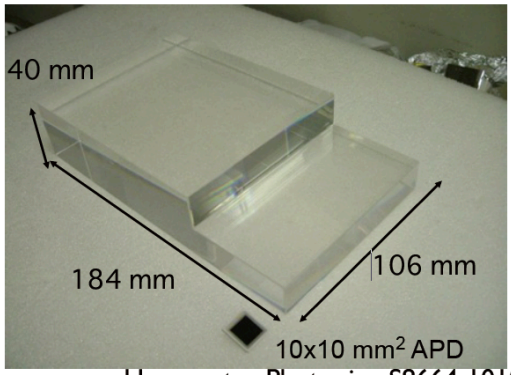
MDE

to
S/C

SpW

9BGOs+11APDs for HXI
25BGOs+25APDs for SGD





Hamamatsu Photonics: S8664-1010

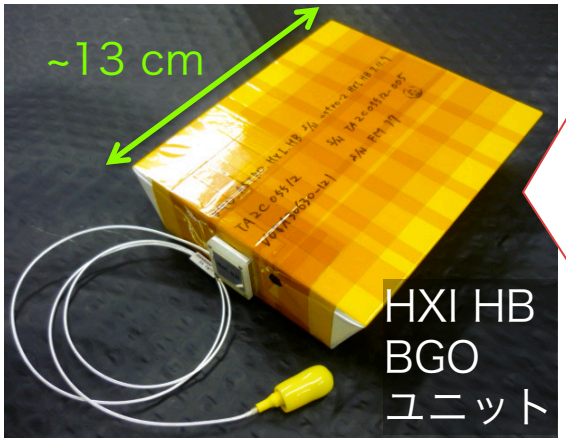
Trigger
signals

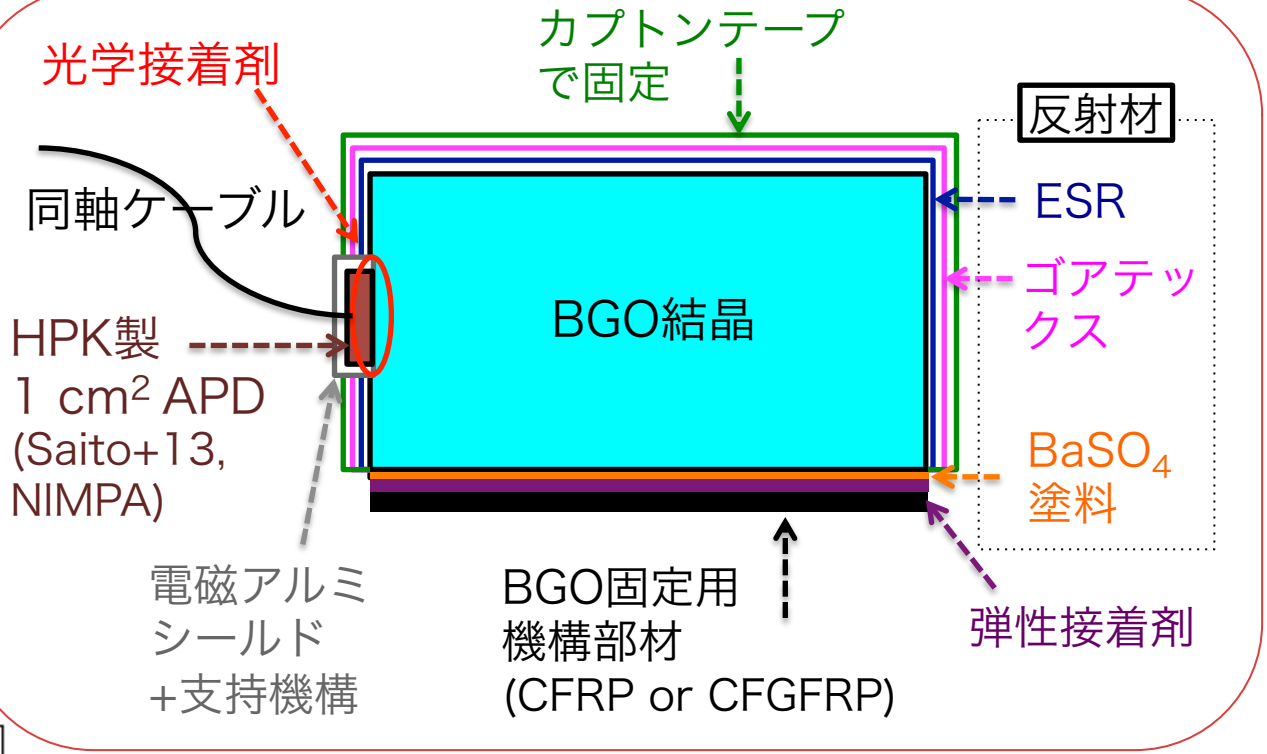
Camera

MIO
(Camera)

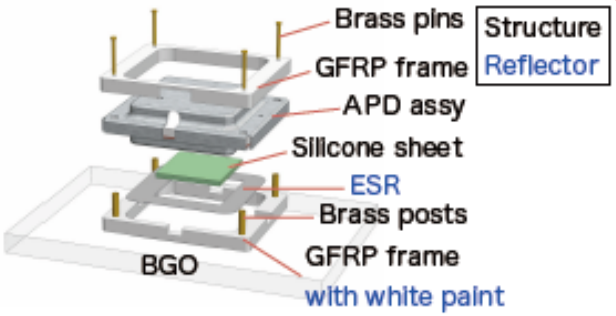
VETO

APD-BGO ユニットの開発





読み出し用APDの最終デザイン

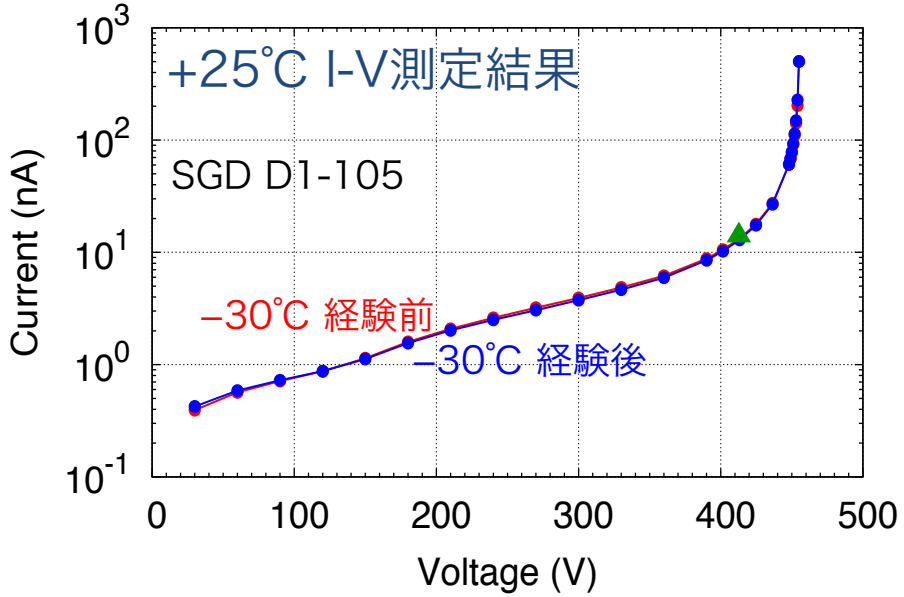


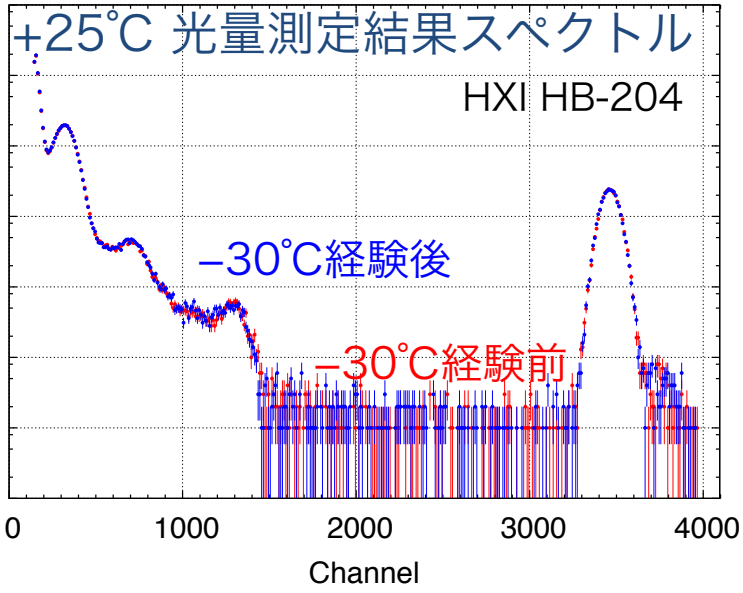
- ✓ HXI/SGD で計68個 (3 types + 6types) の開発
- ✓ 試作品に基づくAPD/BGO単体基礎評価は完了
- ✓ 現在、APD-BGOアセンブリのフライト品を製造中
  39/68 (~60%) の製造、評価が完了

FM BGOユニット受け入れ試験

- APDの正常動作：暗電流-電圧 (I-V) 関係を測定
  - APD単体試験時との特性の比較
  - –30℃経験前後での特性の比較
- BGO光量の確認：較正ガンマ線源を使い、光量を測定
  - –30℃経験前後での光量の比較
  - 光量の製造ばらつきの確認
  - 観測時温度 (–20℃) での光量 (=検出しきい値) の確認

APD動作、BGO光量特性はいずれも良好
5月中に全てのユニット完成予定





APD-CSA+HV Box の開発

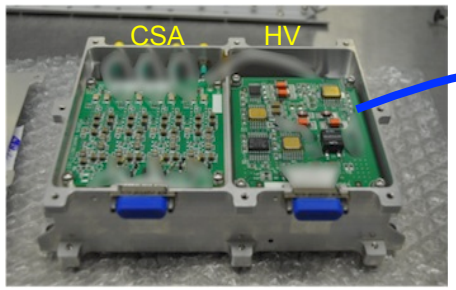
- ❖ CSA：低雑音、低消費電力かつ、宇宙用途に適した回路構成
  - Feイオン相当の超大信号へのCSAの耐性: CSA帰還容量の検討
  - 陽子相当の大信号に対して早い回路応答: 後段回路の時定数検討

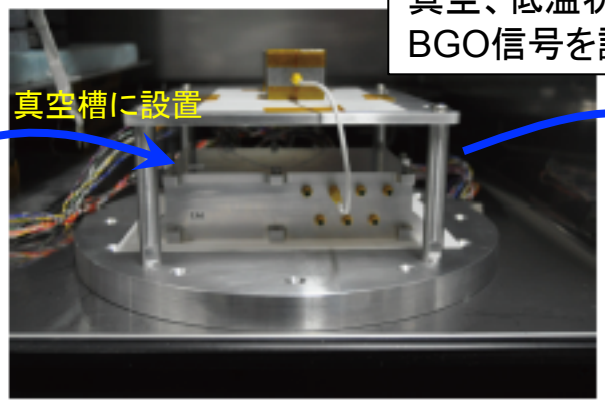
CSA性能をできるだけ損なわないように

- ❖ HV: SITAEL社製高圧出力モジュールを搭載

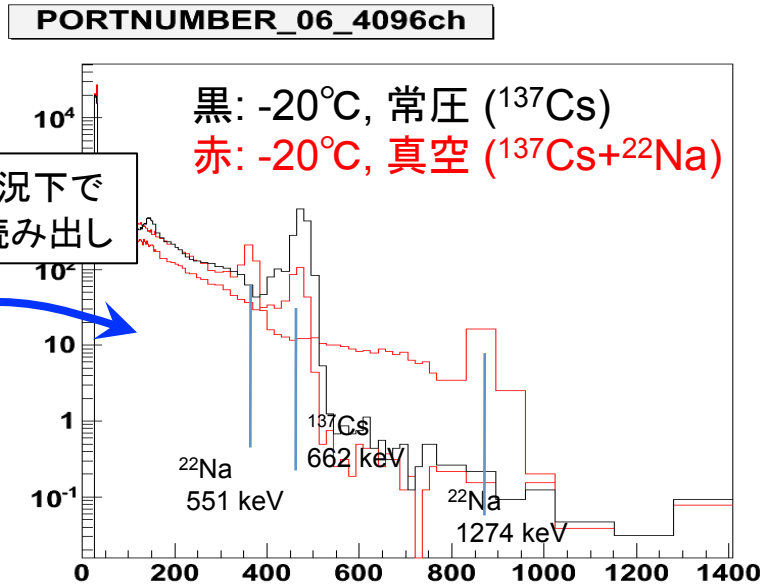
APD-CSA+HV Box としてアセンブリ

✓試作品による単体評価を完了
✓ EM CSA+HV Box アセンブリの性能評価、環境試験で問題ないことを確認 (2013/12)
✓現在、フライト品の製造が進められている
(HXI : 2/4, SGD: 2/8 が完成)





真空、低温状況下で
BGO信号を読み出し



BGO 読み出し回路の開発

APDで読み出したアナログ信号を処理し、カメラ部への反同時計数信号を生成

極めて限られたリソース (電力、実装面積、FPGA容量など) で実現する

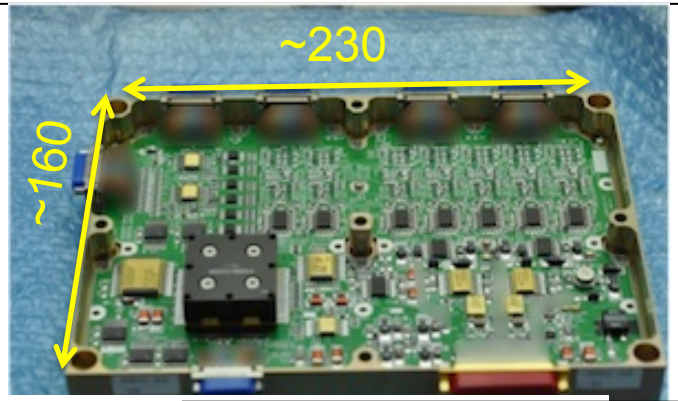
- ❖ アナログ処理は最小限 (増幅バッファ+1段積分回路+BLR)
- ❖ 0.937 Msps で AD変換したアナログ波形を取り込み
- ❖ FPGA 内でデジタルフィルターにより、波形整形し、各種トリガー信号出力処理

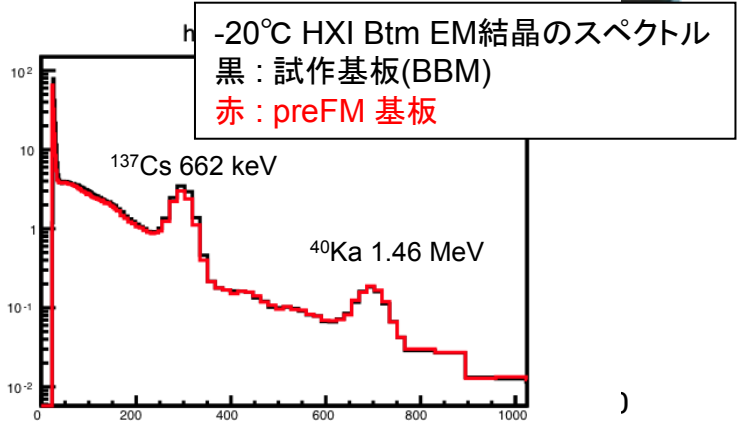
✓ 試作基板でデジタルフィルターの性能を実証 (Ohno, goto, saito+13 NIMA)

✓ preFM基板を開発、実際の基板実装面積で試作基板と同等の性能を確認

~140mA で最大13ch のアナログ信号処理
A4サイズ以下の基板実装面積で実現

✓ 現在、フライト品の製造を進めている

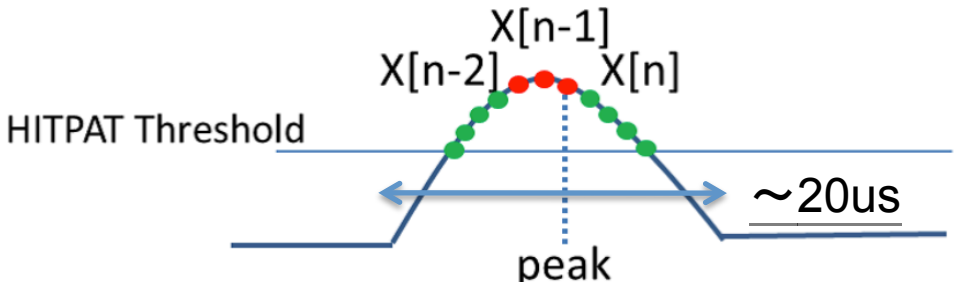




信号処理ファームウェアの開発

- ❖非常に限られた FPGA リソース　(RT AX2000S 2,000,000 ゲート,)
- ❖13ch 分のデジタルフィルター、トリガー信号生成など、処理は多岐にわたる
- ❖トリガー信号タイミングがノイズ・波高値の違いで揺らがないような工夫も必要

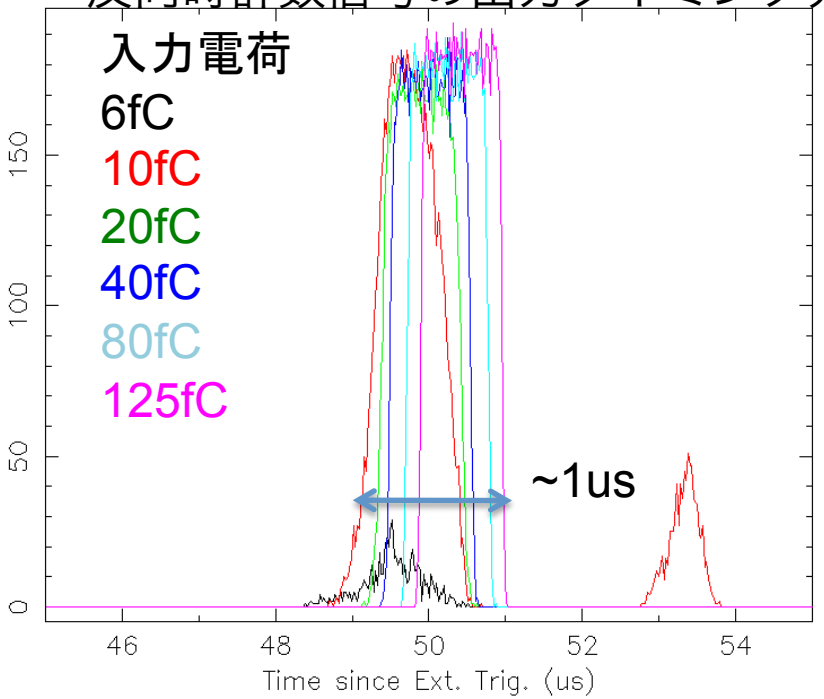
例) ピーク検出回路の導入 (Tokuda 13 修士論文)



X[n-1] >= X[n-2] && X[n] < X[n-1]
でピーク判定

最低限のロジックでピーク検出回路を導入
波高値の違いにかかわらず、安定した
トリガー出力タイミングを達成

反同時計数信号の出力タイミング分布



FPGA ロジックの開発、デバッグは完了、現在フライト品の製造を行っている

End-to-End 試験による検証

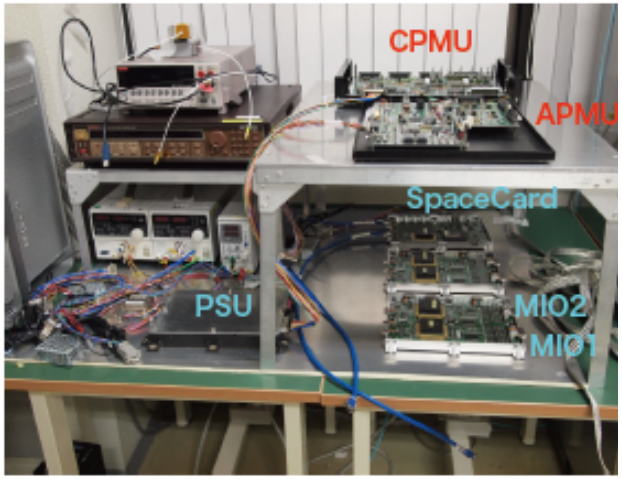
これまでコンポーネントレベルで開発したBGOシールドシステムを全系通して動作検証

HXI full EM 試験 (2013/10~2014/02)
- FMと同等デザインBGOの複数読みだしによる性能検証
- FPGA ロジックの機能検証、初めての反同時計数による
  バックグラウンド除去機能検証

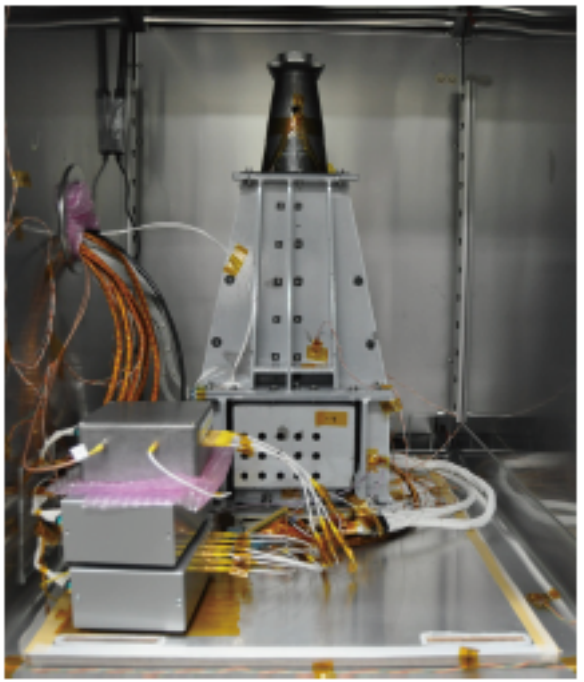
詳細は次の村上講演

テレコマ系

HXI-DE, DPU, AE



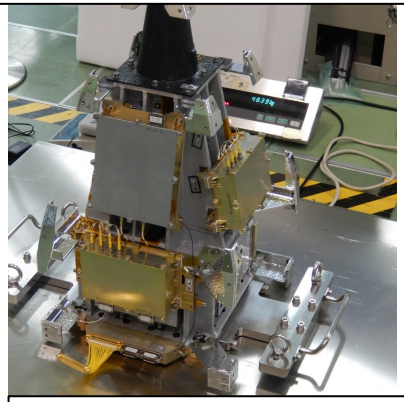
HXI-SフルEM



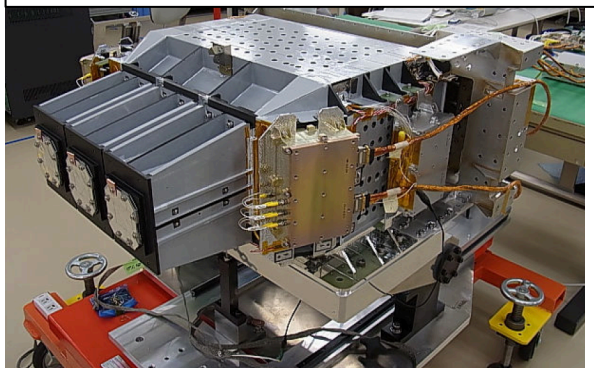
End-to-End 試験による検証

HXI1-S, SGD1-S が FM 品として完成。全系を通した動作検証
HXI1-S については、低温環境下での動作試験も実施。大きな問題は見つかっていない

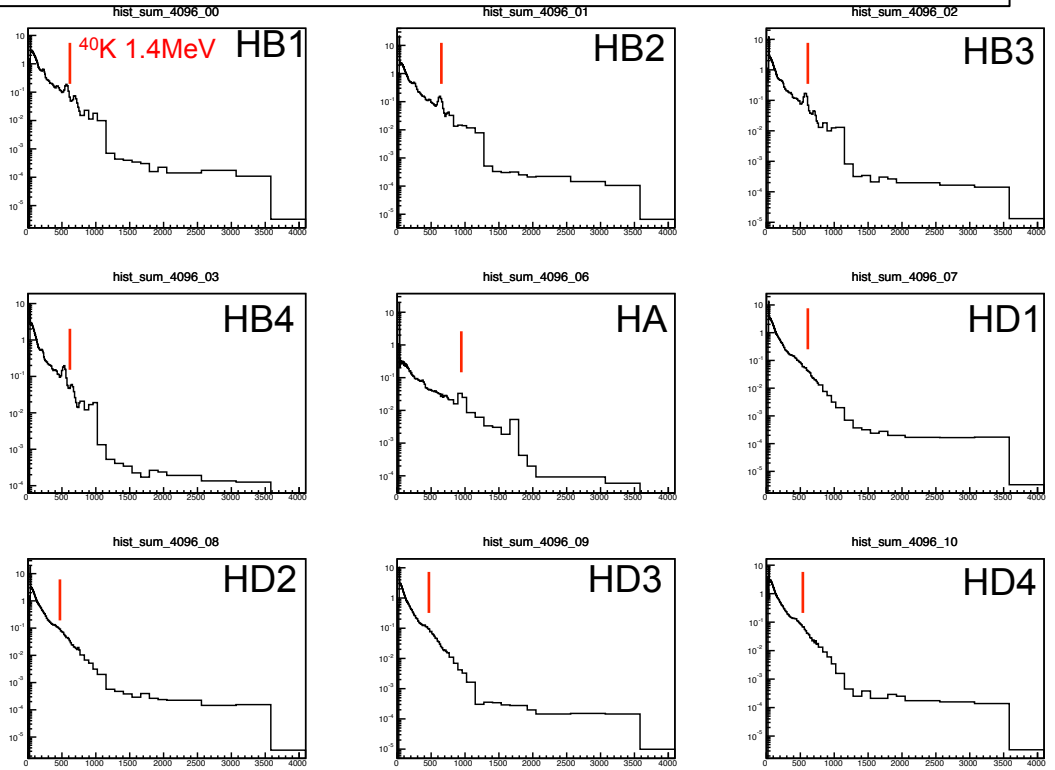
HXI1-S FM (2014/02/17 完成)



SGD1-S FM (2014/03/19 完成)



HXI1-S FM 低温動作試験でのBGOバックグラウンドスペクトル



今後, 衛星との噛み合わせ試験が進められる

まとめ

ASTRO-H HXI/SGD による高感度観測には、BGOアクティブシールドによるバックグラウンド低減が重要な鍵。

BGOシールドシステムの各コンポーネントは、EM相当の検証が完了し、フライト品の製造を完了、製造中。

❖ APD+BGOユニット
HXI/SGD 1 台分は完成。受け入れ試験でも問題は起こらず。
残りは5月ごろ完成予定

❖ APD-CSA+HV Box
EMでの検証を完了。FMを製作。4台のFM品が完成。HXI/SGD-S に搭載
残りも順次製作

❖ BGO信号処理回路(APMU)
試作品で検証した設計が、preFM基板で問題ないことを確認。FM製作中

HXI/SGD の FM 一号機がそれぞれ完成。サブシステムレベルで
BGOシールドの動作確認を進めており、今後、衛星との噛み合わせ試験に進む。