X線天文衛星搭載用軟X線CCDカメラの応答関数の構築

井上翔太, 林田清, 片多修平, 中嶋大, 薙野綾, 穴吹直久, 常深博 (大阪大学), 鶴剛, 田中孝明, 内田裕之,
信川久実子, 鷲野 遼作 (京都大学), 信川正順 (奈良教育大学), 森浩二, 磯田依里, 坂田美穂 (宮崎大学),
幸村孝由, 丹野憧馬, 玉澤晃希, 吉野祐馬, 近野貴博 (東京理科大学), 上田周太朗 (ISAS/JAXA)

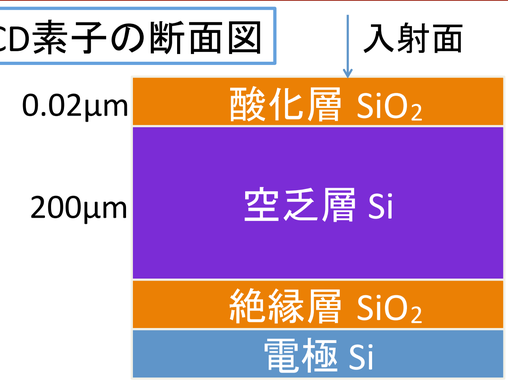
Abstract

我々は、X線天文衛星搭載用軟X線Charge-Coupled Device (CCD)カメラの開発を行っている。この軟X線CCDカメラは、4つのCCD素子をモザイク状に配置することで、38’ x 38’の広視野で0.4－12keVのエネルギー帯域の撮像と分光を行う。CCD素子はPチャンネル裏面照射型を採用している。これが200μmの空乏層厚を可能とし、低エネルギー側までの高い検出効率を実現する。単色のX線が入射した場合、CCDで取得される波高値のエネルギー分布は、そのCCD固有の確率分布に従う。これは入射X線のエネルギーに依存し、これを関数でモデル化したものが応答関数である。天体からの本来のX線の情報を正確に知るためには、精度の良い応答関数の構築が要求される。本講演では、較正実験を経て構築された軟X線CCDカメラの応答関数について報告する。

I. CCD素子の設計

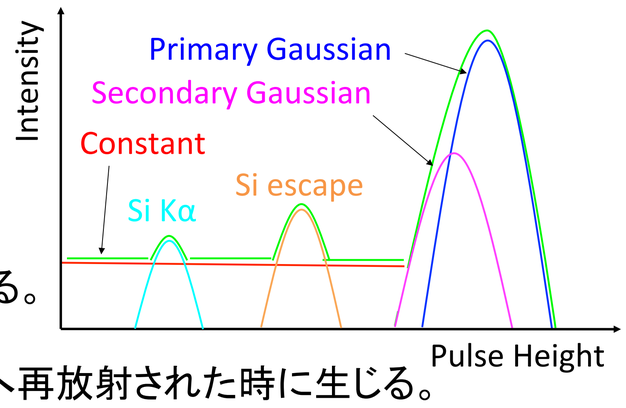
軟X線CCDカメラに搭載する4つのCCDは、裏面照射型CCD(BI-CCD)を採用している。これは、低エネルギー側の検出効率を上げるだけでなく、マイクロメテオライト対策にもなる。また、N-type Siを用いており、これが200μmの空乏層厚を実現する。

CCD素子の断面図



II. 応答関数

単色のX線が入射した際のCCDの応答



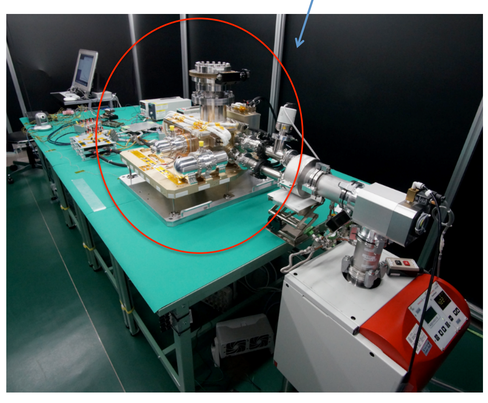
1. **Primary Gaussian**
   空乏層内で検出されたイベント
2. **Secondary Gaussian**
   隣のピクセルにまたがった電荷が閾値以下で、取りこぼされたとき生じる。
3. **Constant**
   検出された電荷が酸化層にまたがったとき生じる。
4. **Si escape**
   吸収されたエネルギーがSiKαとしてピクセル外へ再放射された時に生じる。
   ピークエネルギーはPrimary ピークからSiKαのエネルギー(1.739keV)だけ低い。
5. **Si Kα**
   (1)SiO_2で一度吸収されたX線がSiKαとして再放射された場合と
   (2)Si escapeが空乏層内で再吸収された場合に生じる。

III. 較正実験

軟X線CCDカメラ

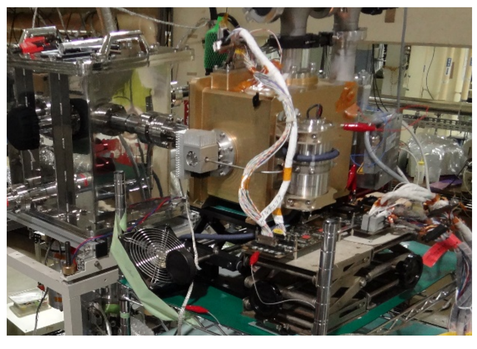
❖ Calibration test @Kyoto univ.

2014年8-9月、軟X線CCDカメラを用いた較正試験を京都大学で実施。^{241}Amから放射されるα線をターゲットに照射し、蛍光X線を発生させる。CCDへ照射した蛍光X線は、MnKα(5.9keV)とGeKα(9.9keV)、GeLα(1.2keV)、FKα(0.68keV)である。



❖ KEK実験

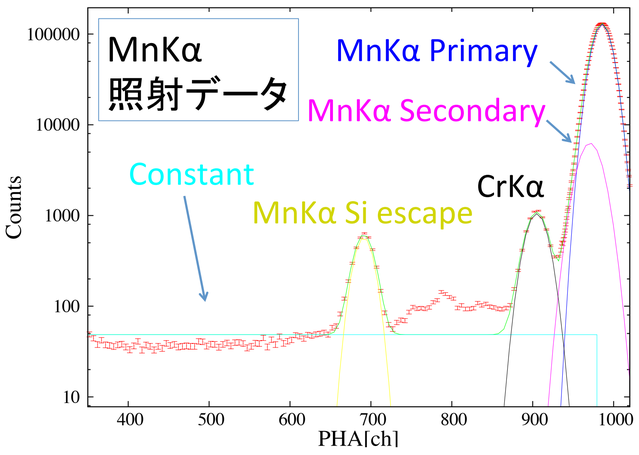
2014年12月、較正実験を放射光施設KEKにて実施。分光器を用いてX線を取り出すため、単色性に優れている。この実験では性能が同等のmini素子を用いた。

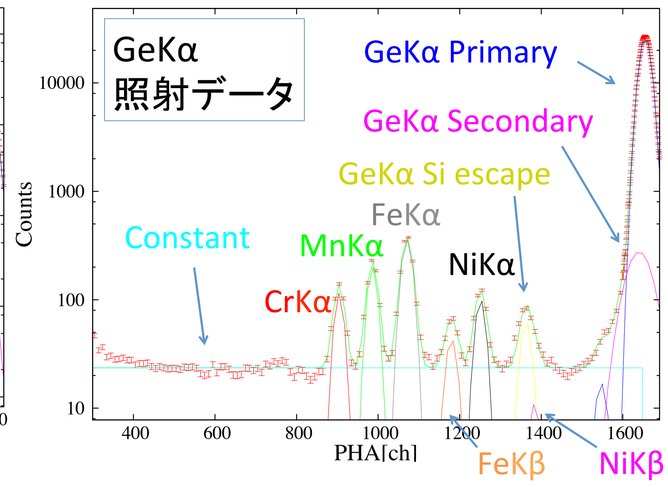


IV.応答関数の構築

◆STEP1 5成分フィッティング

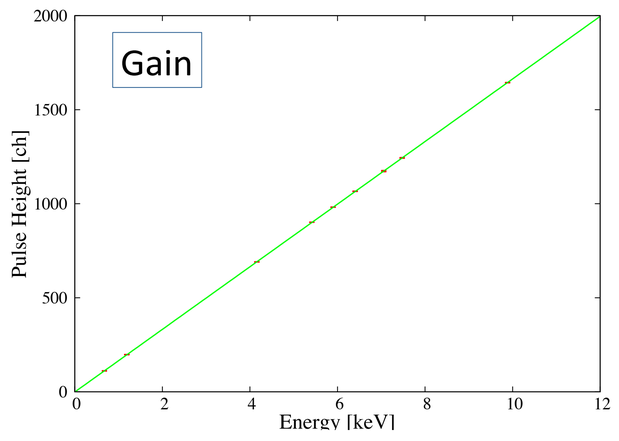
照射したX線に対して、上記の5成分を見積る。例としてMnKαとGeKαを照射したデータを示す。
※照射装置由来のバックグラウンド輝線も含まれている (e.g. CrKα, FeKα)

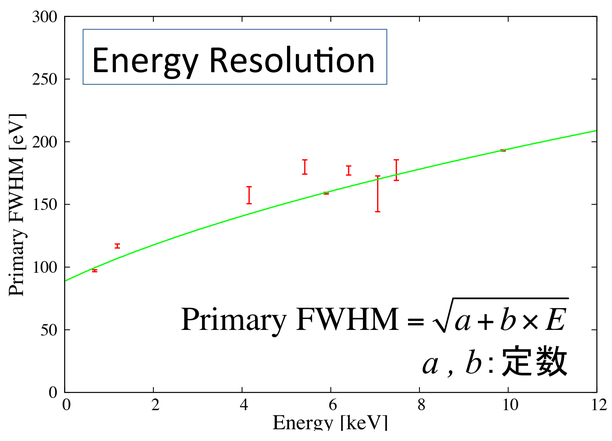




◆STEP2 各パラメータのエネルギー依存性モデル化

見積ったパラメータのエネルギー依存性をモデル化する。
例として、モデル化したPrimary Peak channel (gain)とPrimary FWHM (energy resolution)のエネルギー依存性を示す。

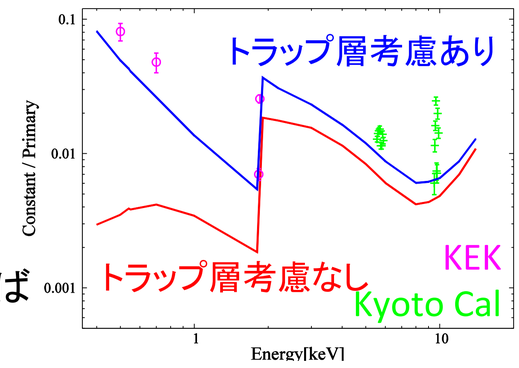




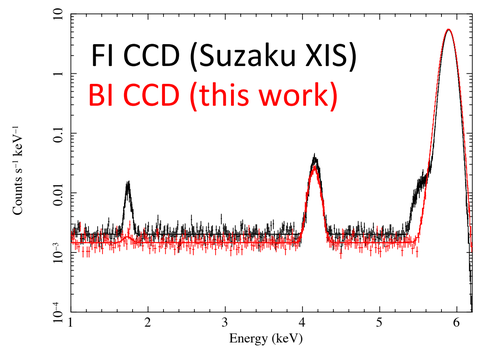
V. 応答関数構築の過程でわかったこと

❖ 表面トラップ層の存在

Constant成分の強度が、CCDの設計から予想されるモデルと低エネルギー側で一致しない。
これは、空乏層と酸化層(SiO_2)の間に20nmの電荷のトラップ層があるとすれば データを再現できることがわかった。



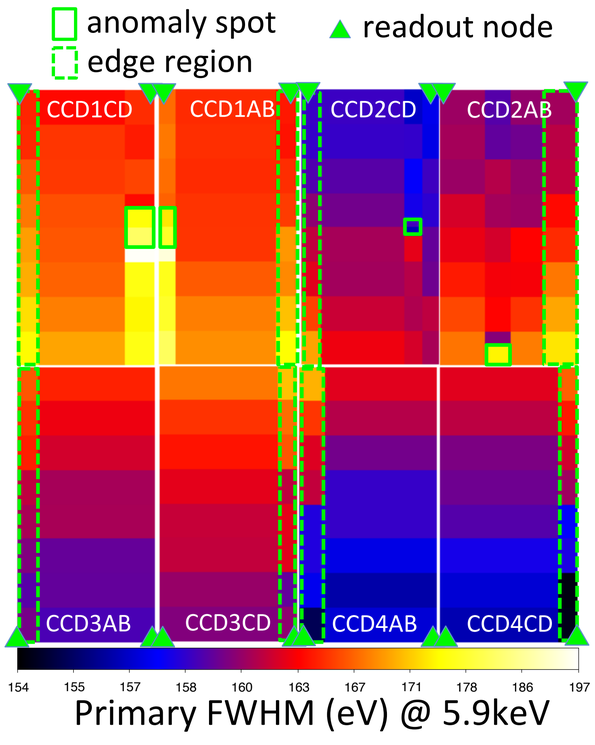
❖ Si Kα輝線について



従来のFI-CCD (e.g. すざくXIS)に比べて、BI-CCDで検出されるSi Kα輝線の強度は小さい。これは、①BI-CCDなので入射面に電極や絶縁層(~μm)がないことと、②実効的なピクセルサイズが大きくなったことが理由である。

※図は応答関数でシミュレーションした単一輝線(5.9keV)のスペクトル

❖ Primary成分のFWHMの空間依存性



軟X線CCDカメラには、電荷転送効率の異常に悪いスポットの存在が確認されている(Anomaly spot)。また、CCDの物理的な縁でも効率が悪くなることがわかっている(edge領域)。そのため、Primary成分のFWHMの空間依存性を調査した。解析の結果、以下の様な性質が確認できた。

1. edge領域のPrimary FWHMは、その他の領域と比べて大きい。
2. 縦転送回数が多いほど、Primary FWHMは大きい。
3. Anomaly Spot付近では、Primary FWHMは大きい。

VI. まとめ

我々は、Pチャンネル CCD素子を採用した軟X線CCDカメラの応答関数を構築した。その結果、以下のことがわかった。

1. コンスタント成分のデータから、CCD表面に電荷トラップ層が存在する。
2. BI-CCDで検出されるSi Kα成分の強度は、従来のFI-CCDに比べて小さい。
3. Primary成分のFWHMは、電荷転送効率と相関し、空間依存性がある。