

# 衛星搭載用 X 線 CCD カメラの 性能向上に向けた取り組み

総合研究大学院大学 修士 1 年, ISAS/JAXA  
近藤 恵介

## 概要

2014 年打ち上げ予定の次期 X 線衛星 ASTRO-H に搭載する X 線 CCD(Charge Coupled Device) カメラ SXI(Soft X-ray Imager) では、検出器として有効な空乏層を厚くすることができるため、P-channel 型<sup>\*1</sup>CCD を採用する。試作された CCD は目標の性能を満たしているが、厚い空乏層の素子ならではの課題が、未解決のまま残されている。代表的なものとして、信号電荷雲の広がりが大きく、非 X 線イベントとの区別ができないという問題がある。現在我々は、ASTRO-H 以降の X 線 CCD でその課題を解決し、さらなる性能の改善を実現すべく、取り組みを行っている。その一つとして、CCD 素子に外部磁場を印加するという方法について紹介、説明を行う。

## 1 はじめに

### 1.1 天文用 X 線 CCD の歴史

X 線は大気の窓を通過する事ができないため、天文用途の観測機器は宇宙空間で稼働させなければならない。そのため、天文用 X 線 CCD の歴史は、X 線天文用の人工衛星の歴史とほぼ重なる。X 線 CCD を搭載した、宇宙空間における主要な観測装置とこれから宇宙へ打ち上げ予定の装置を以下に紹介する。

年	衛星, 装置名	打ち上げ国	備考
1993	ASCA	日本	世界で初めて X 線 CCD カメラを搭載した衛星
1999	XMM-Newton	ESA	
1999	Chandra	NASA	
2004	SWIFT	NASA	GRB 観測に特化した衛星
2005	すざく	日本	日本では 5 番目の X 線天文衛星
2009	MAXI	日本	国際宇宙ステーション (ISS) に取り付けられている装置
(2012) <sup>*2</sup>	ASTROSAT	インド	
(2014)	ASTRO-H	日本	
(2014)	eROSITA	ドイツ	

1993 年の ASCA を初めとし、日本、アメリカ、ヨーロッパのプロジェクトとして、様々な検出器が宇宙で活躍してきた。現在日本では、2014 年打ち上げ予定の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H に向けて、CCD カメラや、

<sup>\*1</sup> 少数キャリア、すなわち信号キャリアが正孔であるものを P-channel 型素子、信号キャリアが電子であるものを N-channel 型素子と呼ぶ。

<sup>\*2</sup> 括弧付きの数字は打ち上げ予定

その駆動系、冷却系等の性能評価や環境試験が進められている。

## 1.2 X線 CCD の動作原理

CCD は、電荷結合素子とも呼ばれる半導体検出器である。CCD は、Si の結晶に、酸化物層で絶縁された電極を多数取り付け、一つ一つを 1 ピクセルに対応させる事で、位置分解能をもたせている撮像素子である。X 線 CCD は、撮像機能に加えて、光子一つ一つについてエネルギーを測定する「Photon Counting」の機能を持つという点が、可視光や赤外線用の CCD と大きく異なる。以下、X 線 CCD の動作原理について説明する。動作の概略を、図 1 に示す。

例えば、MOS(Metal Oxide Semiconductor) 接合をもつ半導体に電場をかけると、少数キャリアのほとんどない空乏層が形成される。空乏層中の Si 原子に X 線が吸収されると、入射した X 線と同じエネルギーをもつ電子が Si 原子から放出される。<sup>\*3</sup>その電子が Si 結晶内で他の Si 原子に次々衝突することで、運動エネルギーにより Si 原子が電離され、そこに電子-正孔の電荷キャリアの対が複数生成される。これを電荷雲と呼ぶ。二種類のキャリアは予めかけてある電場に従い分離され、それぞれ逆方向に移動し、少数キャリアの方の電荷雲が電極まで到達する。図 1 では省略しているが、実際は各ピクセルの電極に集められた電荷は読み出し用の電極まで転送され、そこで初めて電気信号に変換される。X 線光子が吸収されたことにより生成される電荷のペアの数は X 線のエネルギーに比例するため、各ピクセルの信号電荷の数を電位差の信号として計数することで、もとの X 線光子が持っていたエネルギーを測定する事ができる。こうして、X 線 CCD では、イメージの他にエネルギースペクトルを得る事ができる。

ASTRO-H では、今までの素子と違い、検出器として有効な領域である空乏層を厚くすることができる P-channel 型の素子を採用する。ASTRO-H 用の素子では、「すざく」の素子のおよそ 4 倍の厚さの空乏層を実現している。空乏層を厚くする事で、これまでは CCD を透過してしまっていた高エネルギーの X 線も吸収出来るようになり、高エネルギー側の X 線に対して検出効率が良くなるという利点があるため、ASTRO-H 以降の X 線 CCD では厚い空乏層の素子が主流になると予想される。

---

<sup>\*3</sup> 光電吸収と呼ばれる。実際は 2 つの電子 (光電子と Auger 電子) が放出される。光電子は入射した X 線のエネルギーから電子の結合エネルギー分だけ低いエネルギーを持ち、Auger 電子は結合エネルギーと同じ大きさのエネルギーを持つ。二つの電子の運動エネルギーの和が、入射 X 線のエネルギーに等しい。Auger 電子の代わりに原子の特性 X 線が放出されることがあり、特性 X 線が検出器の外に逃げた場合、入射した X 線のエネルギーは低く検出される。Si では、特性 X 線が Auger 電子に代わる確率は 5 %程度。

X線がSi結晶に入射し、複数の  
hole-electronのペア(電荷雲)を作る

ピクセル2でX線イベントを検出!

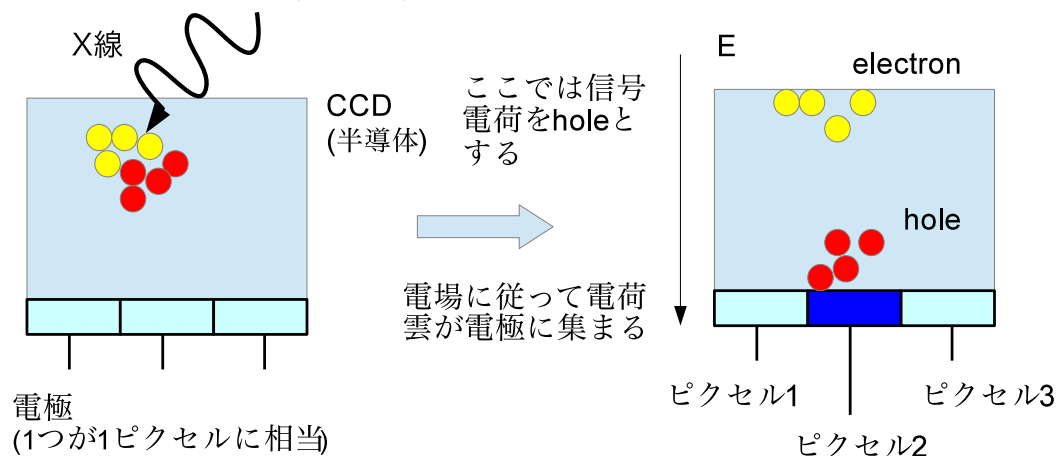


図1 X線 CCD の動作原理

## 2 研究背景

CCD 内で生成される電荷雲は、X 線光子が吸収される位置によっては複数ピクセルにまたがって検出される事がある。(図 2) また、熱運動による拡散の影響のため、電極に到達する時には電荷雲はある程度拡がっており、この場合も複数ピクセルにまたがって検出される事がある。通常は、これらの原因による電荷雲のピクセルのまたがり方はパターン化できるので、このような場合でも一つの X 線イベントとして認識する事ができる。

しかし、空乏層の厚い素子の場合には、電極から遠い場所で生成された電荷は素子の中を長距離移動するため、電極に到達する際の拡がりが大きくなってしまふ。これにより、図 3 のように、初めからある程度拡がりを持つ非 X 線によるイベントと区別ができなくなるという問題が発生する。現時点では、この二種類を区別する事ができないため、ある基準以上に拡がったイベントのデータは X 線イベントを含んでいても棄却しなければならない。X 線 CCD のエネルギー分解能は、X 線イベントのカウント数が多いほど良くなる<sup>\*4</sup>ので、このような X 線イベントを棄却しない手法を確立することで、CCD の性能を向上することができると考えられる。

\*4 理論的な上限値に近づく

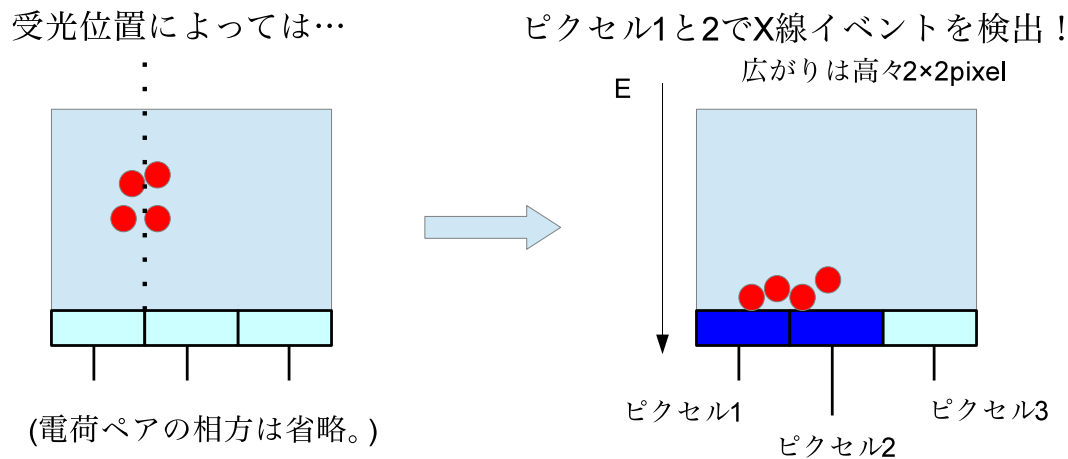


図2 イベント検出手法

### 3 手法

電荷雲の拡がりを抑えることができれば、X線由来のイベントを棄却しなければならないという問題を解決出来る。そこで、CCD素子に外部から磁場を印加することで電荷雲の拡がりを抑制する方法を検討した。

#### 3.1 磁場印加による電荷雲拡散の抑制

荷電粒子が磁場の中を運動するとき、進行方向及び磁場に垂直な方向にローレンツ力を受ける。このため、図4のように、電場と平行に、すなわちCCD入射面に対して垂直に磁場を印加すると、CCDの空乏層中を移動する電荷は、電場に従う方向にらせん運動をしながら電極まで移動する。磁場が無い場合に比べてまっすぐに電極へ向かうので、電荷雲の拡がりを抑えることができる。しかし、実際はこのようなきれいならせんを描く事は無く、電荷雲は一定距離進んだところで散乱を受け、方向をその都度変えながら電極まで運動する。散乱から散乱までの運動に関しては、らせん運動を行うので、結果として拡散する方向の運動は抑制されると考えられる。

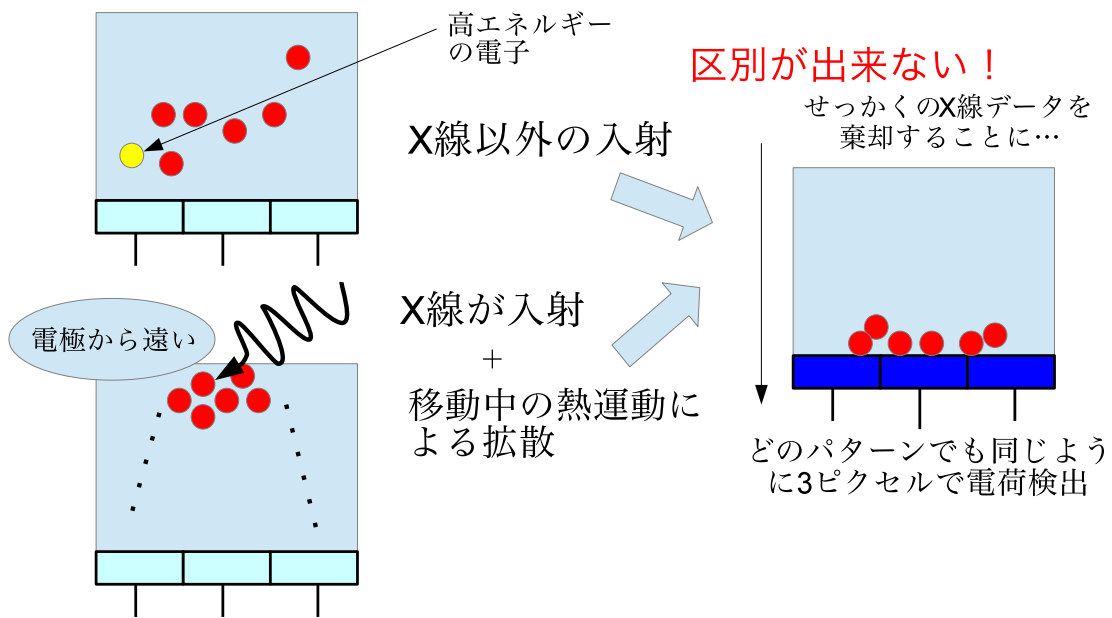


図3 空乏層が厚い素子での課題

### 3.2 印加する磁場強度の見積もり

X線入射時の電荷雲拡散を抑制するために必要な磁場の大きさの見積もりを以下に示す。

ローレンツ力=遠心力として得られる、磁場強度と回転運動の半径の関係は、次のようになる。

$$R = \frac{m^*v}{qB} \quad (1)$$

ここで、 $m^*$  は電荷キャリアの有効質量、 $q$  は電荷量、 $v$  は速度。キャリアが散乱を受けるまでに進む距離  $\lambda$  は、次のようになる。

$$\lambda = v\tau = \frac{vm^*\mu}{q} \quad (2)$$

$\tau$  は粒子が最後に散乱されてから、次に散乱されるまでの平均時間を表し、 $\mu$  は移動度であり、物質によって特徴的な量を表す。

長さのスケールとして、 $R = \lambda$  とすると、

$$B = \mu^{-1} \quad (3)$$

となる。Si 中の、電子における  $\mu$  の代表的な値  $\mu = 1500[\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}]$  を代入すると、

$$B = 6.666 \dots \simeq 7[\text{T}] \quad (4)$$

となり、1T オーダーの磁場を印加する必要があることがわかる。

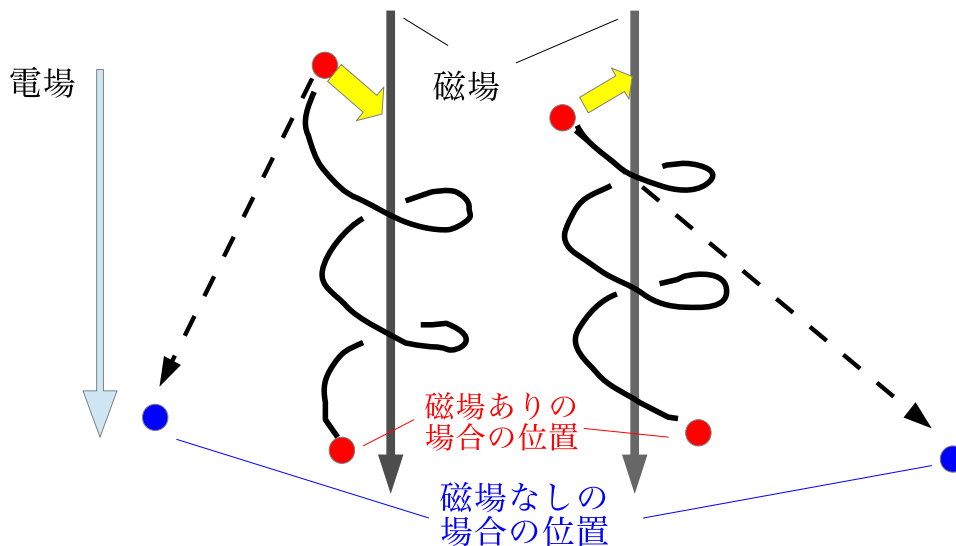


図4 磁場を印加したときの電荷の定性的な運動. ローレンツ力により、横方向へ拡がる運動を抑制出来ると考えられる

### 3.3 先行研究

森尾一徹 (2003, 修士論文 [1]) は、現在問題となっている素子よりも空乏層の薄い CCD に、入射面に垂直な磁場をかける実験を行った。次の図 5 は、実験の様子である。CCD 素子をチラー及び一段のペルチェ素子を用いて  $-40^{\circ}\text{C}$  まで冷却し、永久磁石を用いた磁気回路で  $0.6\text{T}$  の磁場を印加した。実験の結果、1 ピクセル以内に収まるイベントの割合が増加し、基準以上に拡がっているイベントの割合は減少した。しかし、統計の上では良くなったが、ノイズレベルが大きいため、解析結果 (エネルギースペクトル) で、分解能が良くなったことは確認出来なかった。問題となるノイズは、CCD の冷却が十分でないために暗電流が大きいということと、駆動回路等のエレクトロニクスに起因するものが主要原因となっていた。また、空乏層の薄い素子では、電荷の拡がり大きな問題とはならないため、効果が現れにくいということも、具体的な改善が確認出来なかった一因として挙げられる。しかしながら、この実験により、外部から磁場を加えることで、CCD 中の電荷雲を制御できる可能性が示された。

課題としては、ノイズを低減するという事が挙げられる。また、磁気回路の設計が不十分な箇所があり、磁場の強さが目標の  $1\text{T}$  よりも小さくなってしまったことも、改善すべき点の一つといえる。

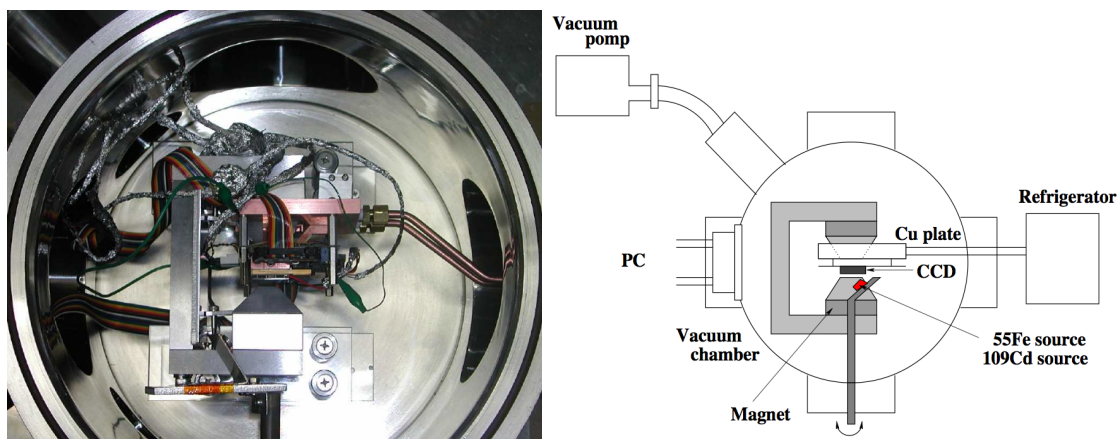


図5 永久磁石を用いた実験の概略図(右)と、実際の様子(左)

### 3.4 今後の方針

本研究では現在、電荷雲の拡がり結果に顕著に現れる空乏層の厚い素子に、磁場を印加する実験の準備を進めている。冷却系として、機械式冷凍機を採用し、 $-120^{\circ}\text{C}$ まで冷却を行う。また、駆動回路等のエレクトロニクスは、ASTRO-H用 CCD カメラ向けに作られた試作品を使用する。十分な冷却と最新のエレクトロニクスにより、低ノイズな環境での測定を実現する。さらに、磁気回路にも改良を加え、より強力な磁場をかけられるようにする予定である。

## 4 まとめ

ASTRO-H 以降で主流になるであろう、空乏層の厚い素子を用いた CCD カメラは、高エネルギー側で検出効率が優れているが、電荷の拡がりによって、非 X 線由来のイベントと区別が出来なくなる場合があるという問題が残されている。X 線由来の電荷雲の拡がりには、磁場を入射面に垂直に印加することで制御可能である事が、過去の研究で示唆されている。本研究では、空乏層の厚い素子を用いて、磁場の印加によって電荷雲の拡がりを抑え、検出性能を向上させる実験を計画している。今後、先行研究よりも低ノイズでの実験環境を用意し、印加する磁場もより強力にすることで、さらなる検出効率の向上を目指す。

## 参考文献

- [1] 森尾 一徹, 修士論文, 2003  
[http://www.astro.isas.jaxa.jp/~ccd/m\\_thesis/morio\\_mron.pdf](http://www.astro.isas.jaxa.jp/~ccd/m_thesis/morio_mron.pdf)
- [2] 井上 一, 小山 勝二, 高橋 忠幸, 水本 好彦, "シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測 III - 高エネルギー天文学 -", 日本評論社