

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340074

研究課題名(和文) 磁場印可によるX線CCD検出器の性能向上

研究課題名(英文) Performance improvement of X-ray CCDs by applying a magnetic field

研究代表者

堂谷 忠靖(Dotani, Tadayasu)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：30211410

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,100,000円、(間接経費) 2,430,000円

研究成果の概要(和文)：X線CCDは、X線望遠鏡の標準的な焦点面検出器となっており、中でも空乏層の厚い背面照射型CCDが主流になりつつある。ただし、背面付近は電場が弱く電荷雲が大きく広がるため、エネルギー分解能が悪く荷電粒子バックグラウンドが高い傾向がある。そこで本研究では外部から磁場を印加する事で電荷の広がりを抑え、性能を改善する事を試みた。その結果、0.3テスラの磁場印可で、電荷の水平転送方向への分割のされ方に明確な変化が認められた。また、エネルギー分解能に有意性は低いものの改善の傾向が見られた。本研究により、磁場でCCD内の電荷の動きを制御するという画期的な手法への道が開かれたと言える。

研究成果の概要(英文)：X-ray CCDs are now regarded as a standard focal plane detector of X-ray telescopes. Among them, backside illuminated CCDs with a deep depletion layer are being most widely used. However, because the electric field is weak at the back surface and the charge clouds tend to extend largely, they have poorer energy resolution and higher charged-particle background. Thus, we tried to suppress the charge extension by applying an external magnetic field and to improve the CCD's performance. We found that only a magnetic field of 0.3T is enough to cause systematic difference in charge splitting along the horizontal direction. Furthermore, although significance was low, we found energy resolution to improve slightly with the magnetic field. These results show for the first time that we can control the movement of charges in silicon and improve the performance of X-ray CCDs by applying an external magnetic field.

研究分野：X線天文学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：X線 CCD 放射線検出器 X線望遠鏡

1. 研究開始当初の背景

宇宙観測用の X 線 CCD は、1993 年打ち上げの「あすか」衛星で初めて X 線望遠鏡の焦点面検出器として実用化された。その後、Chandra、XMM-Newton、「すざく」などの X 線衛星に使われ、現在では X 線望遠鏡の標準的な焦点面検出器になっている。また、「はやぶさ」や「かぐや」などの月・惑星探査機にも使われている。

X 線は、CCD に入射して数百から数千の電子正孔対を生成する。入射する X 線光子の数が少ない場合は、個々の X 線が作る電子雲は互いに離れているので、電子雲中の電子の数を個別に計測でき、入射 X 線のエネルギーを個別に測定することができる（光子計数モード）。また、宇宙空間で使用する場合は、荷電粒子によるバックグラウンドとの弁別が重要であるが、荷電粒子がそのトラックに沿って長い軌跡を引くのに対し、X 線による電子雲は広がり小さいため、電子雲の広がりと比較することで両者は識別が可能である。このように、光子計数モードで動作させた場合、X 線 CCD は優れたエネルギー分解能と位置分解能を示すことから X 線望遠鏡の標準的な焦点面検出器となっている。

ただ、従来多く使われてきた表面照射型の CCD では、電極構造を透過して X 線が入射するため、約 1 keV 以下の軟 X 線に対する感度が必ずしも高くはなかった。また、高エネルギー側の検出効率を高くするには、空乏層を厚くする必要がある。そこで、比抵抗の高いシリコン基板を使うことで空乏層を厚くし、電極構造のない背面から X 線を入射する背面照射型 CCD の開発が各国で進んでいる。背面照射型 CCD は、約 0.1 keV 以下の極端紫外域まで感度が延びており、高エネルギー側は空乏層を厚くする事で 20 keV 付近までカバーできる。しかしながら、軟 X 線が入射する背面付近は電場が弱いため、電極側に移動するまでに、電荷が大きく拡散するという欠点がある。このため、電荷が拡散中の再結合で失われたり、電荷の総量の再構築の際に読み出しノイズに紛れて数え落しが生じたりして、エネルギー分解能が劣化してしまう。また、電荷の広がりのために位置分解能が劣化したり、荷電粒子との区別が難しくなったりしてしまう。後者は、バックグラウンドの増加をもたらすことになる。

X 線 CCD の撮像分光素子としての優れた性能を考えると、上記のような欠点を解消できれば、そのメリットは計り知れない。

2. 研究の目的

本研究の目的は、磁場印可という独自の手法で、CCD 内の電荷の拡散を抑制し、エネルギー分解能の向上とバックグラウンドの低減への道筋をつける事である。

X 線の光電吸収により作られた電子正孔対は、入射面に垂直な方向には電場に従ってドリフト運動をし、電場に垂直な方向（入射

面に沿った方向）には、熱運動による拡散を行う。現在開発が進められている背面照射型 CCD、たとえば、2015 年打ち上げ予定の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H に使われる CCD では、空乏層厚が 200 μm あり、電荷が数十 μm の大きさに広がってしまう。この広がりにはピクセルサイズ 24 μm より大きく、荷電粒子と区別するためのアルゴリズムが複雑になるため、ASTRO-H では 2x2 ビンまとめを行い、実効的なピクセルサイズを 48 μm として使用している。そこで、電荷の広がりをピクセルサイズより小さくできれば、荷電粒子との区別が容易になり、バックグラウンドの低減が期待できる。

電荷の広がりを抑制するには、入射位置から転送チャネルまでのドリフト時間を短くする方法もあるが、これは大幅な向上は難しい。空乏層中に強い電場を発生させるのに必要な電圧（数十 V）がすでに電極や背面にはかけられていて、大幅に高くすることはできないからである。そこで、CCD の動作に関わるパラメータとは全く独立に適用できる方法として、外部から磁場を印加するという独自の手法を採用する。シリコン中で熱運動する電子（正孔）の mean-free path はサブミクロンのオーダーであり、磁場で拡散係数を顕著に変えるには、ラーマー半径を mean-free path と同程度にする必要がある。これには、数 T の磁場が必要であり、印加するのは容易ではない。また、X 線望遠鏡の焦点面検出器として衛星に搭載することも困難になる。そこで本研究では、永久磁石を用いて印加可能な 1/2-1/3T の磁場で、多少なりとも電荷の拡散が抑制でき、エネルギー分解能やバックグラウンドの低減につながる事を検証する。

3. 研究の方法

研究は、まず X 線 CCD を用いたデータ取得を可能にするため、CCD の駆動・読み出しおよびデータ取得系の構築を行う。これには、CCD の冷却系も含まれる。つぎに、CCD に磁場を印加するための磁気回路の製作を行う。これには、一般的に入手可能で最も保持力の強いネオジム磁石を用いる。最後に、ラジオアイソトープ ^{55}Fe からの 5.9 keV の特性 X 線を CCD に照射し、磁場印可の有無での電荷の広がりやエネルギー分解能の差異を検証する。以下、順番に説明する。

(1) CCD 駆動・読み出し系の構築

X 線 CCD を用いて X 線データを取得するには、CCD の駆動回路、読み出し回路、データ取得系が必要である。特に本研究では、電荷の広がりやエネルギー分解能の微細な変化を検出するため、ノイズをできるだけ低減させた回路系が必要である。そこで、我々が ASTRO-H 衛星搭載用 X 線 CCD カメラ (SXI) の開発で得つつあるノウハウを適用し、基本的に SXI と同じアーキテクチャの駆

動・読み出し回路系を採用した。また、X線 CCD としては、SXI 用のものと同じ構造を持ち、ピクセル数のみが少ないチップを用いた。

X線 CCD は、撮像時間（4 秒）中の暗電流を無視できるくらいに抑えるため、 -120°C まで冷却する。これには、パルスチューブ冷凍機を定電力で運転し、細かな温度調整はヒーターを用いて行うようにした。

(2) 磁気回路

本実験では、できるだけ簡便なやり方で CCD に磁場を印加するため、永久磁石の中で最も保磁力の強いネオジム磁石を用いて磁場を印加する。そのためには、CCD の上下から磁石で挟めば良いが、磁力線を閉じる必要があるため、鉄材を使った磁気回路を構成し、それに磁石を組み込む構成とする。したがって、X線は磁石を避けて斜めから照射することになる。X線を斜めから入射すると、垂直入射の場合に比べて光電吸収の位置が背面に近くなる（浅い位置で吸収される）ので、磁場印加の効果がより明確になると考えられる。

(3) X線照射実験

ラジオアイソトープ ^{55}Fe からの 5.9 keV の特性 X線を CCD に照射し、磁場の有無でのエネルギー分解能、電荷の広がり进行比较する。 ^{55}Fe を用いるのは簡便に使用できるということもあるが、CCD を含めた X線検出器の性能評価のために標準的に使われている特性 X線だからである。電荷の広がりを調べるには、グレード分岐比と呼ばれる指標を使う。電荷雲の広がりがピクセルサイズよりも小さい場合は、X線によって作られる電荷は、X線入射位置によって複数ピクセルにまたがるとしても、せいぜい 4 ピクセルに収まる。そこで、波高値の local maximum のピクセルを中心とする 3×3 ピクセル内での電荷の分布を調べ、1 ピクセルに収まっていればグレード 0、2 ピクセルに分割されていればグレード 2、3、4（縦か横か等で細分）、3 もしくは 4 ピクセルにまたがっていればグレード 6、というように 0-7 の数字で電荷分布のパターンを分類したのがグレードである。グレード 0、2、3、4、6 が X線により作られる電荷分布で、グレード 1、5、7 は X線で作られない分布、つまり荷電粒子による信号ということになる。X線天文衛星搭載の CCD カメラでは、詳細は異なるものの、全てグレードにより電荷の分布パターンを分類している。

磁気回路を用いて磁場を印加した場合と、磁場がない場合のデータを比較し、エネルギー分解能やグレード分岐比に違いがあるかどうか調べる。これにより、磁場印可で電荷の拡散が抑制されているかどうか、電荷ロスが抑えられてエネルギー分解能が向上しているかどうか、わかることになる。

4. 研究成果

本研究では、「研究の方法」で述べた (1)、(2) 項においても重要な成果をあげることができた。以下、項目毎に成果をまとめる。

(1) システムノイズの低減

当初、CCD の駆動・読み出し系のノイズレベルが高く、本来のアナログ回路系の性能が発揮できていなかった。そこで、グラウンドの取り方やシールドに関して、次のような対策を施した。ひとつ目は、シグナルグラウンドとフレームグラウンドの分離で、シグナルグラウンドは電源の根本でフレームグラウンドに一点接続した。2 番目は、アナログケーブルへのシールドの追加である。できるだけ配線を短くするとともに外側にシールドを施し、両端をシグナルグラウンドに落とす。3 番目は、デジタルラインへのバンドルシールドの追加である。デジタルラインは、ツイストペアシールド線を使っていたが、さらにバンドルシールドを施し、両端をフレームグラウンドに落とす。

これらの対策により、CCD をつながらない状態で回路系のみによるノイズ（システムノイズ）を測定した結果、電子数換算で $6e^{-}$ のシステムノイズが達成できている事が判明した。要求値 $10e^{-}$ を十分クリアすることができた。本研究で得られたノウハウは、ASTRO-H 衛星搭載の X線 CCD カメラ SXI に対しても適用され、効果を発揮した。

(2) コンタミネーション対策

X線 CCD は、暗電流低減のために -120°C 程度で動作させる必要がある。最初 CCD の冷却動作試験をした後に CCD を目視確認したところ、その表面に油分が水滴状についていることが確認された。真空槽内のアウトガスが、低温部である CCD 表面に吸着したものと推測された。真空槽内には、CCD の他にアナログ基板が置かれており、プリント基板や実装部品、計装などがアウトガス源になったものと考えられる。

CCD に付着したコンタミネーションは、軟 X線を吸収するため、X線検出効率の低下を引き起こす。この検出効率の低下が実験中に徐々に進行することになるため、磁場の有無による対照実験を行う際の障害になる。そこで、徹底的なコンタミネーション対策を実施した。

まず、CCD に対するコンタミネーション許容値を、軟 X線透過率を考慮し、 $10 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ と設定した。真空槽内では、基板や計装から出たアウトガスは、真空槽内を満たし真空ポンプにより徐々に真空槽外に排出されて行くことになる。ただし、真空槽から真空ポンプまでのコンダクタンスは必ずしも高くないため、真空槽内を満たしたアウトガスは、ほとんどすべてが冷凍機や CCD などの低温部に付着することになる。低温部の表面積と実験期間（約 1 週間）を考慮し、基板や計装か

らの単位時間当たりの（高分子化合物の）アウトガスを 3ng/sec 以下に抑える事を目標とした。

アウトガス量の測定には、TQCM を用いた。QCM は、水晶振動子にガスが吸着すると（したがって面密度が増加すると）発振周波数が変化する性質を利用して、ガスの吸着量をリアルタイムで精度良く測定するセンサーである。TQCM は、水晶振動子の温度をペルチェ素子を使って制御できるので、低温で吸着するガス量を計測するのに便利である。TQCM を備えたアウトガス測定用の真空槽を別途用意し、その中に基板や計装を入れてアウトガス量を計測した。この際には、真空槽内を満たしたアウトガスが、真空ポンプから排出される分と TQCM センサーに吸着する分に別れることを考慮して計測値の補正を行った。

上記 TQCM によるアウトガス計測を、基板や計装のベーキングのあとに測定し、どのような条件でベーキングすれば設定した規定値を満たすことができるか、条件出しを行った。その結果、宇宙用として一般的に認められた材料を使うという前提のもと、80°C で 1 週間ほどのベーキングを行えば、要求仕様を満足できる事がわかった。なお、宇宙用として認められた材料というのは、total mass loss (TML) が 1% 以下、Collected Volatile Condensable Material (CVCVM) が 0.1% 以下という条件である。TML や CVCVM については、米国規格 ASTM E595 に規定されている。

本研究で確立したアウトガス量推定の考え方およびベーキング条件の導出方法は、ASTRO-H 衛星にも適用され、搭載されるミッション機器に対するコンタミネーションを要求以下に抑えるためのベーキング条件の算出に使われた。

(3) 磁場印可実験

ネオジウム磁石と鉄材を用いた磁気回路を製作し、CCD 挿入位置における磁束密度を測定した。磁束密度は、磁石の表面付近で 0.33 T であった。

この磁気回路を使って、ラジオアイソトープ ^{55}Fe を CCD に照射してデータを取得した。この時、磁気回路は CCD が S 極に面するような配置になっていた。また、 ^{55}Fe は磁石を避けるようにして斜めから約 15 度の入射角で照射した。CCD の読み出しに当っては、ASTRO-H での標準的な駆動読み出し方式に習って、チップ上で 2x2 ピクセル加算を行った。これは、実質的なピクセルサイズが 48 μm になった事を意味する。X 線 CCD からのデータの標準的な処理方法に従い、ダークフレームを差し引き、イベント抽出を行って、イベントリストを作成した。これを用い、グレード分岐比およびグレードゼロのイベントに対するエネルギー分解能を算出した。また、縦転送に対する電荷転送効率の評価も行った。

同様に、磁場がない場合について、斜め照射した ^{55}Fe からの X 線データを取得した。取

得したデータは、磁場を印加した場合と同一の方法で解析した。これらの結果を、表 1、図 1 に示す。縦転送の電荷転送効率については、ほぼ 1×10^{-5} で有意な違いはなかった。

表 1、 ^{55}Fe K_{α} (5.9 keV) に対するエネルギー分解能 (FWHM)

	ゲイン (eV/ADU)	分解能 (eV)
磁場なし	5.24	238 \pm 5
磁場有り	5.23	225 \pm 6

注：誤差は、信頼区間 90%。

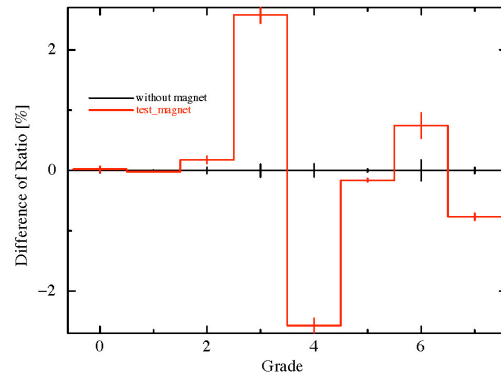


図 1、磁場印可なしの場合のグレード分岐比を基準に、磁場印可した場合のグレード分岐比を示す。

これらの結果をみると、エネルギー分解能にはわずかながら磁場印可による改善の傾向が見えている。ただし、有意性が低く、今後さらなる検証が必要と考えられる。一方、グレード分岐比については、グレード 3（水平転送方向に電荷が分割されたイベント）が増え、グレード 4（水平転送とは反対方向に電荷が分割）が減るという予想外の結果が得られた。グレード 6 や 7 という電荷が大きく広がったグレードが減っているという傾向は見えていない。電荷転送効率については、磁場印可による影響は受けないという予想とは矛盾しない結果であった。

磁場印可により、縦転送中の電荷はローレンツ力を受けるので、水平転送方向に電荷を移動させようとする力が働く。しかし、CCD の各カラムにはチャンネルストップがあり、これを越えて電荷がはみ出すとは考えにくい。また、水平転送中は、垂直転送方向にローレンツ力が働くので、グレード 3、4 に差が出る理由にはならない。ひとつの可能性として考えられるのは、垂直転送路から水平転送レジスタへ電荷を転送する際に、ローレンツ力により電荷が隣のピクセルに漏れるということである。この場合は、水平レジスタの電極によるポテンシャルを越えるだけで良いので、隣のピクセルに電荷が漏れ易いと考えられる。

以上まとめると、0.33 T という比較的弱い磁場の印可にも関わらず、エネルギー分解能が改善している可能性が示唆された。ただし有意性が低く、今後さらなる実験が必要であ

る。電荷の広がりについては、水平転送方向への電荷の広がりに差が出るという予想外の結果が得られた。垂直転送路から水平転送レジスタへ電荷を転送する際に、電荷が水平方向に広がっている可能性が考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ① K. Mori, Y. Nishioka, S. Ohura, Y. Koura, M. Yamauchi, H. Nakajima, S. Ueda, H. Kan, N. Anabuki, R. Nagino, K. Hayashida, H. Tsunemi, T. Kohmura, S. Ikeda, H. Murakami, M. Ozaki, T. Dotani, Y. Maeda, K. Sagara, “Proton radiation damage experiment on P-Channel CCD for an X-ray CCD camera onboard the ASTRO-H satellite”, Nuclear Instruments & Methods in Phys. Res. A, 査読有, vol. 731, pp. 160-165 (2013), DOI:10.1016/j.nima.2013.05.052
- ② K. Hayashida, H. tsunami, T. G. Tsuru, T. Dotani, (他 22 名)” Soft X-ray Imager (SXI) onboard ASTRO-H”, SPIE, 査読無, vol. 8443, article id. 844323 (9 pp.) (2012), DOI:10.1117/12.925095
- ③ 堂谷忠靖、「X線天文衛星のコンタミネーション対策」、日本空気清浄協会機関誌、査読無、49 巻、No.4, pp.34-44 (2011)

[学会発表] (計 14 件)

- ① K. Kondo, T. Dotani, M. Ozaki, M. Iwai, Performance Improvement of x-ray CCDs by applying a magnetic field, Astronomical Telescopes & Instrumentation, SPIE, June 22-26, 2014, Montréal (Canada)
- ② 村上弘志, 堂谷忠靖, 尾崎正伸(他 20 名)、X線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X線 CCD カメラ SXI の開発の現状 VII、日本物理学会、2014 年 3 月 27-30 日、東海大学 (神奈川県)
- ③ 近藤恵介, 堂谷忠靖, 尾崎正伸, 岩井將親、磁場印可による X線 CCD の性能向上、日本天文学会、2014 年 3 月 19-22 日、国際基督教大学 (東京都)
- ④ 平賀純子, 常深博, 林田清, 穴吹直久, 中嶋大, 薙野綾, 堂谷忠靖, 尾崎正伸(他 15 名)、Astro-H 搭載軟 X線撮像検出器 SXI の開発の現状、日本天文学会、2014 年 3 月 19-22 日、国際基督教大学 (東京都)
- ⑤ 堂谷忠靖, 山崎典子, 馬場勸, 美浦由佳, 宮崎英治、ASTRO-H 衛星のコンタミネーション管理、第 57 回宇宙科学技術連合講演会、2013 年 10 月 9-11 日、米子コンベンションセンター (島根県)
- ⑥ 岩井將親, 藤永貴久, 井澤正治, 堂谷忠靖, 尾崎正伸 (他 6 名)、荷電粒子バック

グラウンドの除去効率を高めた X 線 CCD 検出器の開発、日本天文学会、2013 年 3 月 20-23 日、埼玉大学 (埼玉県)

- ⑦ 井澤正治、堂谷忠靖、藤永貴久、岩井將親、尾崎正伸 (他 3 名)、ASTRO-H 搭載軟 X 線撮像検出器 SXI のコンタミネーション対策、日本天文学会、2013 年 3 月 20-23 日、埼玉大学 (埼玉県)
- ⑧ 岩井將親、藤永貴久、堂谷忠靖、尾崎正伸、夏莉権、穴吹直久、ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) 用小型素子評価システムの開発、日本天文学会、2012 年 3 月 19-22 日、龍谷大学 (京都府)
- ⑨ T. Fujinaga, N. Anabuki, S. Aoyama, H. Kawano, S. Ikeda, M. Iwai, M. Ozaki, T. Dotani (他 14 名), Development of the data acquisition system for the x-ray CCD camera (SXI) onboard ASTRO-H, Astronomical Telescopes & Instrumentation, SPIE, August 21-24, 2011, San Diego (USA)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

堂谷 忠靖 (DOTANI, Tadayasu)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授
研究者番号：30211410

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

尾崎 正伸 (OZAKI, Masanobu)
宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教
研究者番号：90300699

馬場 彩 (BAMBA, Aya)
青山学院大学・理工学部・准教授
研究者番号：70392082