

X線天文学で使用している X線 CCD の開発研究



技術解説

常 深 博*

Research and development study of X-ray CCD for astronomy

Key Words : astrophysics, CCD, X-ray, satellite

1 はじめに

今年（2012年）はヘスによって宇宙線（荷電粒子）が発見 [1] されてちょうど 100 年の節目の年にあたる。そして、ロッシ指導のもとジャコニーによって宇宙 X 線（X 線星）が発見 [2] されてちょうど 50 年である。宇宙線は気球に観測装置を搭載したことに始まるし、宇宙 X 線はロケットに観測装置を搭載したことに始まる。これらはいずれも後のノーベル賞受賞につながった。現在、宇宙を観測的に研究する手段の三本柱は、電波、赤外/可視光、X 線である。このうち X 線観測は高エネルギー現象を見ているもので、ブラックホールや超新星など温度で言えば数百万度から数億度に達する高温現象に対応する。観測対象としては、近いところでは太陽コロナであり、太陽系内の惑星や彗星で見られる電荷交換反応による X 線発光から、星、原始星、中性子星、ブラックホール、銀河、宇宙最大の重力束縛系である銀河団、また活動銀河核と呼ばれる宇宙にあまねく存在する大変面白い天体まで極めて広範囲におよぶ。この X 線観測には、初期のころはガイガーカウンターあるいはガス比例計数管が使われていた。これらは、大きな有効面積が可能とは言え、撮像能力やエネルギー（波長）分解能は不十分であった。その後、X 線結像系が開発され、それにふさわしい検出器として

X 線 CCD が導入された。日本のあすか衛星（1993）[4] は世界で初めて X 線 CCD を搭載した観測衛星である。まさに、日本の X 線天文グループを世界に知らしめたと言える。X 線 CCD は高い位置分解能とエネルギー分解能、広い有効エネルギー範囲、大きな撮像面積を実現している。その後、アメリカのチャンドラ衛星（1999）や欧州のニュートン衛星（1999）、日本のすざく衛星（2005）など広く使われている。最近では、X 線 CCD よりもはるかに高いエネルギー分解能を達成する X 線カロリメータも実用化され始めている。これは、動作温度が 50mK 程度と絶対零度に近く、技術的な困難は大きい。また、大きな有効面積も難しいが、やがて宇宙 X 線観測の主力となるものである。筆者は、宇宙で使用される X 線 CCD に関して、その開発や運用に長期間携わってきた。ここでは、X 線 CCD について、技術的な側面から紹介したい。

2 X線 CCD の開発

宇宙 X 線の観測は、強度が弱いために、フォトンカウントが必要である。また対象が広がっている場合もあり分散系を使いにくいために検出器にエネルギー分解能が必要であった。そこで当初使用されていたガス比例計数管に代わり、X 線 CCD が導入された。CCD はデジカメを始めとして可視光で広く利用されてきたが、電磁波検出原理は半導体検出器 (SSD) と同じである。つまり、検出効率は、その空乏層領域の厚さで決まる。

可視光領域では数 μm の厚さの空乏層で十分であるが、X 線領域や赤外線領域では厚いものが必要となる。一方、真空紫外光となると、空乏層上面にある吸収層をどれだけ薄くできるかがキィである。CCD は可視光で実用化された後、X 線への応用も



*Hiroshi TSUNEMI

1951年8月生
 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
 修士課程 (1976年)
 現在、大阪大学大学院理学研究科 宇宙
 地球科学専攻 教授 理学博士 宇宙物
 理学
 TEL : 06-6850-5477
 FAX : 06-6850-5539
 E-mail : tsunemi@ess.sci.osaka-u.ac.jp

開発が進み [3]、低雑音化が可能となった。既に述べたように X 線集光鏡の開発と相まって、日本のあすか衛星は世界で最初に光子計数する X 線 CCD カメラを搭載した。この時に使用した X 線 CCD はアメリカの MIT で作られたもので、空乏層厚さが $30\ \mu\text{m}$ 程度であった。それまで使用されてきたガス比例計数管に比べると、エネルギー分解能が 10 倍程度改善された。初めて見た超新星残骸 W49B のエネルギースペクトルには林立する各種元素からの輝線が見え、文字通り見惚れたものである。その後の X 線観測衛星には X 線 CCD が搭載されている。図 1 上には日本のあすか衛星に搭載された 4 台の X 線 CCD カメラを示す。これも、やはり MIT と共同で開発したもので、空乏層の厚さは $90\ \mu\text{m}$ 程度になった。現在、我々は 2014 年度に打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星を準備しており、図 1 下には搭載する CCD カメラ [12] を示す。この X 線 CCD は浜松ホトニクス社と共同で開発したもので空乏層厚さが $200\ \mu\text{m}$ あり、裏面照射型素子として動作する。CCD 素子はコールドプレート上に 4 枚配置され、全体が冷凍機により -120°C まで冷却できる。また、その受光面の面積は素子あたり $3\text{cm} \times 3\text{cm}$ ある。4 個の素子は望遠鏡と組み合わせ、満月より一回り大きい有効視野 ($38'$ 角) を持つ。

3 CCD による X 線検出方法

X 線 CCD の X 線検出原理は、SSD と同じで、空乏層内の光電吸収で発生した信号電荷を読み出す。素子は $10\ \mu\text{m}$ 四角程度の多数の画素からなっており、発生した電荷を逐次転送する。そのために、読出し部から見た検出器 (容量) は、実際の検出器の大きさに関係なく、一般には大変小さい。液体窒素温度で動作させる SSD に比較すると、CCD は少し冷却すれば低雑音を達成できる。

今では、いろいろなタイプの X 線 CCD 素子が開発されている。宇宙 X 線観測で使用するには、検出効率を高くし、読出し雑音を減少させてエネルギー分解能の高いものが望まれる。検出効率を高くするには、例えば 10keV 以上の高エネルギー側では空乏層を厚くすることが必要であり、 1keV 以下の低エネルギー側では吸収層を薄くすることが必要である。空乏層を厚くすることは、使用するウェーハ

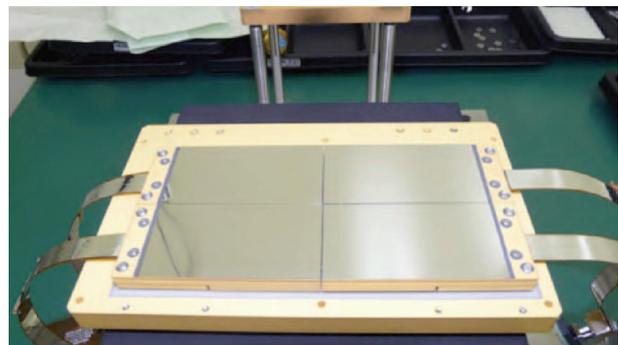


図 1: 上: あすか衛星に搭載した 4 台の X 線 CCD カメラ。CCD 素子や冷却のペルチェ装置は MIT で準備された。下: ASTRO-H に搭載する X 線 CCD 素子。4 素子をモザイク状に並べている。

の大きさと比抵抗の限界、並びに内部で発生する電荷が広がり過ぎても困るので、限度がある。また、使用するのが珪素基板であることから、高エネルギー側の感度を改善することは本質的には難しい。これまでの開発では、CCD 内部に作られる空乏層は $300 \sim 400\ \mu\text{m}$ まで可能になっている。これにより 20keV 程度までの X 線を実用的に検出できる。また、この程度まで厚くなると、空乏層以外を除去し、完全空乏化も容易になる。完全空乏化すれば、裏面照射型が容易に実現でき、真空紫外光の感度も上げられる。我々は、完全空乏化素子を利用して、高エネルギー領域での感度を向上させるために、薄いシンチレータを CCD 裏面に完全密着させる技術 (SDCCD) を開発した [13]。図 2 上には、SDCCD の検出効率を空乏層とシンチレータとに分けて示した。シンチレータで検出される X 線は、そこで一旦可視光に変換し、それを改めて CCD で検出するものである。X 線が空乏層で検出されたか、シンチレータで検出されたかは、信号分布により容易に区別できる。こうして、 100keV まで CCD の高い位

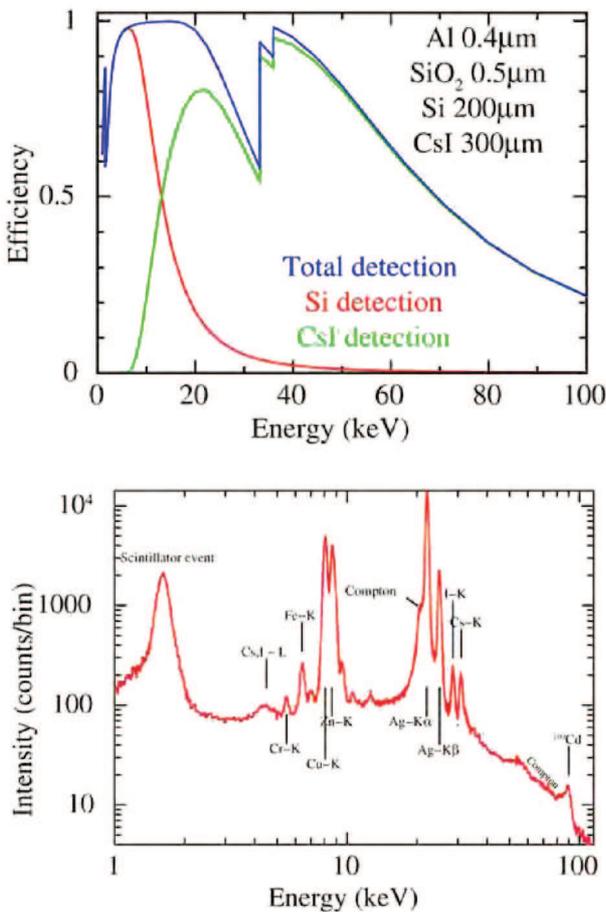


図2: 上: 検出効率を改善のためにシンチレータと合わせた CCD の検出効率。 下: CCD による X 線輝線の検出例。校正線源は ^{109}Cd である。

置分解能を高い検出効率で達成できる。

図 2 下には SDCCD の校正試験により得られたエネルギースペクトルを示す。校正線源には ^{109}Cd を利用し、校正線源周辺に置いた各種金属からの特性 X 線が多数見えている。空乏層で検出された X 線に対するエネルギー分解能は、通常の X 線 CCD と同じで各種金属からの特性 X 線を完全に分離できる。ただし、シンチレータで検出された X 線に対するエネルギー分解能はシンチレータで制限される。

4 宇宙で使用する X 線 CCD

X 線 CCD の動作には、読み出し速度にも依存するが、ある程度の冷却が必要である。実験室で使用する場合に比べると、人工衛星で使用する場合には重量、電力、信頼性、機械環境などクリアすべき項目が多い。図 3 上には国際宇宙ステーションに搭載した

32 個の X 線 CCD[15] の一つを示す。これは、ペルチェ素子を利用した冷却系を採用している。ペルチェ素子の能力を最大限に利用するために、ペルチェ素子が CCD ウェーハだけを機械的にも保持する構造となっている。一段ではあるがペルチェ素子だけで温度差 40°C を達成し、放射冷却板と共に、CCD 素子温度を -60°C 以下に保持している。

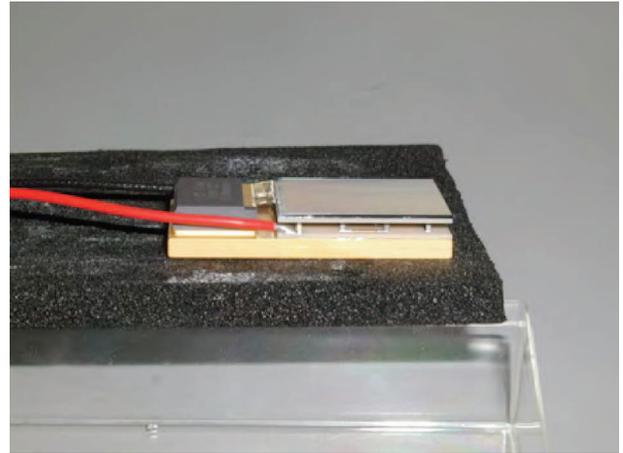


図3: 上: 軽量化と高効率化のために、X 線 CCD をペルチェ素子だけで冷却と機械強度とを持たせたもの。 下: 宇宙空間における X 線 CCD の生画像。細長く伸びた軌跡は荷電粒子によるもので、点に見えるものは X 線による。左端に多数並んでいる横縞は固定パターンである。

図 3 下は国際宇宙ステーションで実際に取得した生画像 [10] である。この画像は 25mm 四角に対応し、素子の空乏層厚さは $90\ \mu\text{m}$ である。ここには、宇宙空間にある荷電粒子と、X 線とによる信号が見え

ている。荷電粒子が素子の空乏層を通過すると、そのパスに沿って電荷群を残す。一方、X線は光電吸収のために、発生する信号電荷が一点に集まっている。従って、信号電荷のパターンから、荷電粒子とX線とは容易に区別できる。荷電粒子でCCDの空乏層を横に走った場合には、長い飛跡を残す。これに対して、空乏層を縦に走った場合には、飛跡だけではX線と区別しにくくなるが、空乏層が厚いのでその時に発生する電荷量は異常に多くなるために、やはり区別可能な場合が多い。なお、長い飛跡が生じた場合、その電荷が読み出されるまで、飛跡部分はX線に対して不感領域となる。つまり、電荷を読み出す頻度が速ければそれだけ不感領域の減少は少なくなる。

我々は、検出感度を向上させようと、厚い空乏層を持ったX線CCDを開発してきた。空乏層が厚くなると、高エネルギー側感度が向上し、裏面照射型素子が容易になるために、低エネルギー側感度も向上する。さらに、宇宙ではもう一つ重要な要因のあることを紹介する。これまで宇宙X線観測に使用されているX線CCD素子で、軌道上で不具合を起こしたことがある。その中のいくつかは、宇宙デブリと呼ばれる μm サイズの微小固体が 10km/s 程度で素子に飛び込んで壊したものである。X線CCDの場合、観測方向から入ってくるデブリに対しては防護する手段がない。CCDに衝突した時、かなり強く発光するためにデブリであることが判った。大抵の場合、デブリは素子に衝突し、ある深さまで潜りこみ、電氣的に短絡させたりして不動作となる。CCDの場合、電極部分が短絡してしまうと回復不能になる。CCDには表面照射型素子と裏面照射型素子とがある。裏面照射型素子の場合、電極は入射面から深いところにあるので、デブリに対して高い耐性を示している。つまり、デブリが衝突した場合、表面照射型素子は全損に繋がり易いが、裏面照射型素子是对応する画素だけが損傷する場合が多い。このような観点からも、厚い空乏層、そして裏面照射型素子が宇宙では有用であることが判った。

5 X線CCDによる観測を支える周辺技術

X線CCDを低雑音で動作させるためには、動作温度の制御、ならびに低雑音アナログ回路が必要であ

る。読出し雑音としては、電子数換算でせいぜい数個には押さえない。これに必要な動作温度は、読み出し速度に依存するが、 -40°C 以下にはしておきたい。CCDの場合、素子内部で電子雪崩を起こさないために、高いエネルギー分解能を達成するには、低雑音システムが必要である。CCDを動作するドライブ信号は 10V 程度のパルスであるが、読み出される信号は大変小さい。半導体検出器並みの性能を発揮するには、数十 μV 以下の雑音レベルが必要である。我々は、これを実現するためのアナログASICを開発[14]した。図4上には、その例を示す。3mm四角のチップに、CCDのためのアナログ回路が4系統入っており、読出し雑音レベルとして $20\mu\text{V}$ を達成している。これは従来までの個別部品で作った衛星搭載回路と同程度であり、さらに消費電力は桁で低くなっている。

宇宙空間で使用する電子回路は宇宙線の影響を受けて次第に劣化する。特に宇宙X線観測のためのX線CCDは観測方向からはX線に限らず、あらゆる種類の宇宙線が素子に直接入ってくるので、放射線損傷を受けて次第に性能低下を起こす。CCDの場合には、典型的には暗電流が増加することと、電荷転送効率の低下によりエネルギー分解能の悪化が起こる。暗電流の増加は、動作温度を下げることである程度対応できる。電荷転送効率の低下は、荷電粒子により、素子内部に電荷トラップが作られることによる。これに対しては、素子の製造段階で、ノッチと呼ばれる電荷転送路を制限する工夫により、実測値で2~3倍改善できる[8]。また、軌道上では、CCDに人工的に電荷を注入することでトラップを埋めてやる手法があり、かなり防ぐことができる[9]。図4下には実際に電荷転送した場合の画像を示す。横筋は人工的に注入した電荷である。これらの技術により、宇宙空間での有効観測寿命を数倍伸ばすことが可能になった。

図4下には電荷注入の他に、X線光子によってCCD内に生じる電荷の様子が判る。このCCDの画素の大きさは $24\mu\text{m}$ であり、画素毎にどの程度電荷が溜まっているかが見える。つまり、X線により発生する電荷は空乏層内である程度広がり、X線の画素内での入射場所により、その画素だけでは留まらず、場合によっては4画素にまで広がっていることが判る。これは、可視光の場合には、1光子が作

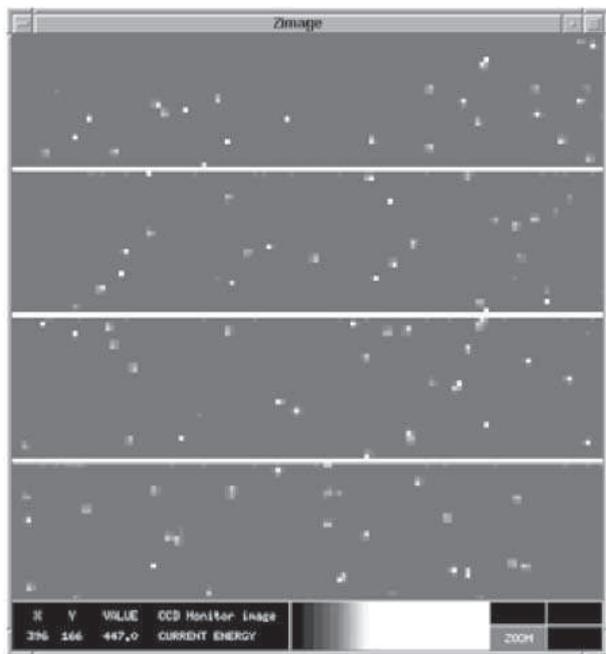
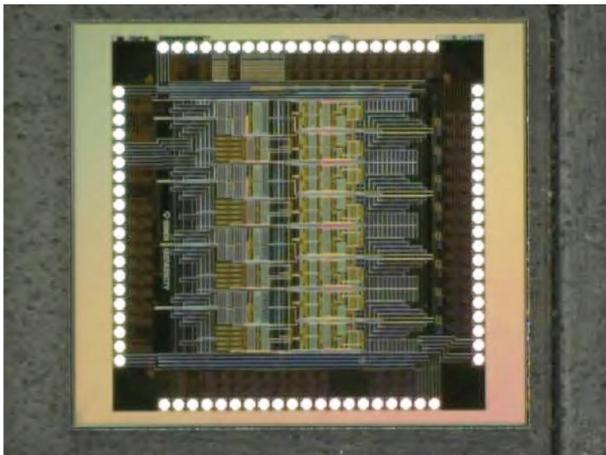


図4: 上: 低雑音を実現したアナログ ASIC。CCDからの信号はこの3 mm角のチップ内でデジタル化される。下: 宇宙空間における X線 CCD の性能劣化を防ぐために電荷注入した X線画像。横縞が注入電荷行で、それ以外は X線により 1~4 画素に広がった信号が見えている。

る電荷数はせいぜい 1 個であるが、6keV の X線では 1600 個ほどになる。つまり、光子計数する X線 CCD の場合には、像がボケることに対応する。一般に、画素の中には幾つかの電極が重なり合っているために、X線に対する検出感度や電荷の広がり、画素内部の入射場所によって異なる。これを実測する技術 [5] がメッシュ実験と呼ぶもので、X線の較正に使用されている。そして、このボケをちゃんと調べていけば、画素の中のどの部分に X線が入ったかが判り、結果として位置分解能が向上

し、サブ μm の精度も可能になる [7]。この応用として、アメリカのチャンドラ衛星では、X線 CCD の画素よりも高い位置分解能を発揮させることができ、X線望遠鏡の究極の像分解能を実現 [6] できるようになった。

6 まとめ

X線 CCD が宇宙 X線の観測に使用されてからほぼ 20 年が経過した。CCD はその間に、空乏層がいつそう厚くなり、工夫がなされて、観測エネルギー範囲が広がった。その後、CCD を上回る検出器として、より高いエネルギー分解能、より高エネルギーの観測領域、高い時間分解能などを特徴としたものが開発され、実用に供されようとしている。しかし、CCD のように、比較的簡単に大面積化が可能で、高い位置分解能を実現し、手軽に使用できる X線検出器は他にはない。我々はこれまで MIT と共同で研究開発を進め、あすか、すざく衛星に搭載する X線 CCD を開発し観測に供した。それとともに、国内でも浜松ホトニクス社と共同で開発を進めた。その結果、小惑星イトカワを観測したはやぶさに、小惑星表面からの蛍光 X線を観測するための X線 CCD カメラ、宇宙 X線観測のために国際宇宙ステーションに搭載した全天 X線 CCD カメラを開発した。現在は、2014 年度に打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星に搭載する X線 CCD カメラを準備中である。さらに、小型科学衛星 FFAST [11] に搭載する SDCCD の開発を進め、従来にはなかった観測を実行したい。我々は、光子計数の必要な宇宙 X線観測を通して X線 CCD を開発し、その応用技術も研究してきた。これらを用いる分野は宇宙以外にもたくさんあるだろう。そのような方面にも目を向けて行きたい。今後も、X線 CCD の開発を通してこれまでにない観測や測定が可能になり、新たな事実にわくわくすることができると思っている。

References

- [1] V. F. Hess, 1912, *Physikalische Zeitschrift*, **13**, 1084
- [2] R. Giacconi et al., 1962, *Phys. Rev. Lett.*, **9**, 439
- [3] J. Janesick, T. Elliott and G. Garmire, 1985,

- Proceedings of the SPIE*, **597**, 364
- [4] Y. Tanaka, H. Inoue and S. S. Holt, 1994, *Publ. Astr. Soc. Jpn.*, **46**, 37
- [5] H. Tsunemi, K. Yoshita and S. Kitamoto, 1997, *Jpn. J. Appl. Phys.*, **36**, 2906
- [6] H. Tsunemi, et al., 2001, *Astrophysical Journal*, **554**, 496
- [7] E. Miyata, et al., 2003, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A513**, 322
- [8] H. Tsunemi, M. Miki, E. Miyata, 2004, *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, **51**, 2288
- [9] H. Uchiyama et al., 2009, *Publ. Astr. Soc. Jpn.*, **61**, S5
- [10] H. Tsunemi, et al., 2010, *Publ. Astr. Soc. Jpn.*, **62**, 1371
- [11] H. Tsunemi, et al., 2010, *Transaction of JSASS Aerospace Tech Japan*, **8**, To_4_7
- [12] H. Tsunemi et al., 2011, *Proceedings of the SPIE*, **8145**, 814505
- [13] H. Tsunemi, et al., 2011, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A652**, 508
- [14] H. Nakajima, et al., 2011, *Nucl. Instr. and Meth.*, **A632**, 128
- [15] H. Tomida, et al., 2011, *Publ. Astr. Soc. Jpn.*, **63**, 397

