

戦略的基礎研究 「画素の小さなX線用CCDの開発」

特集 プロジェクト研究

常 深 博*

Research and development of the X-ray CCD with small pixel size

Key Words : CCD, X-ray image, X-ray color X-ray polarization, subpixel resolution

1. はじめに

我々は、戦略的基礎研究の極限環境状態の中で「画素の小さなX線用CCDの開発」を行っている。このプロジェクトチームは大阪大学理学部宇宙地球科学科の基礎宇宙学講座(代表、常深博)、京都大学理学部の宇宙放射線講座(小山勝二)、浜松ホトニクス社の固体事業部(山本晃永)からなっており、実質上1996年度から5年計画で活動を開始している。本研究の目的は、科学技術計測を目的としたこれまでにない性能を持ったX線用CCD素子を開発することである。

2. X線によるカラー画像

CCDに代表される画像検出装置は、可視光以外の波長域にも応用範囲が広い。波長範囲が異なるために、特徴的な性能や技術が必要となる。CCDを使ったX線撮像となると、X線を可視光に変換する方法を思い起こす向きも多かろうが、CCDでX線を直接撮像する手法も広く用いられている。図1は、CCDの直前にICを置いて、疑似平行X線ビームを照射して得た画像である。ICの内部が画素の位置分解能(図の場合は $12\mu\text{m}$)で見えているのが判る。ここでは、各画素には多数のX線光子が入っているので、X線フィルムと同じ働きをしている¹⁾だけで

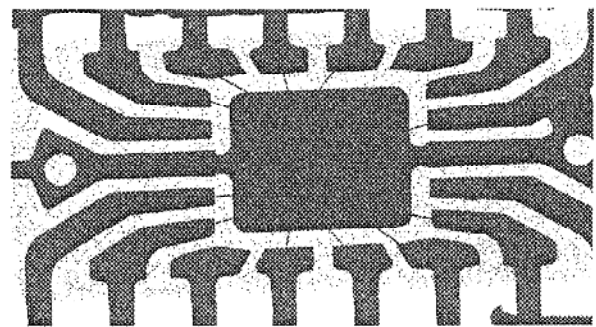


図1 CCDで撮像したICの透過像。これは、一般的なX線画像で、X線強度分布だけを表している。

ある。

さて、CCDが信号を検出する場合、X線も可視光も共に光電吸収の結果生じる電子を信号とする。X線検出が可視光と一番異なる点は、光電効果によって最終的に生じる電子数である。可視光の場合には、光子一つ当たりせいぜい1個の電子が生じるだけだが、X線のように波長が短いとそのエネルギー(波長)に比例した数の電子が生じる。X線検出器の校正に広く使われる6keVのX線では、1800個あまりの電子が作られ、文字通り電子雲を作る。この電子雲の電子数を旨く測れば、X線のエネルギー(波長)を測定できるので、入射した信号だけで、X線の色が判ると言える。X線には特性X線と連続成分とがある。X線の色が判れば、特性X線なら蛍光X線分析、つまり物質分布を知ることができるし、連続成分ならばX線発光領域の温度あるいは非熱的成分の性質を測定できる。可視光で色が判ることのネウチは、白黒写真とカラー写真との差が端的に示している。このことから推測すれば、X線で色の判る有用性⁶⁾も理解出来よう。



*Hiroshi TSUNEMI
1951年8月31日生
1978年東京大学大学院理学系研究科
物理学専攻博士中退
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、
X線天体物理学
TEL 06-6850-5477
FAX 06-6850-5539
E-Mail tsunemi@ess.sci.osaka-u.
ac.jp

3. X線光子の入射位置, 時刻, 強度, カラー, 偏光

可視光やX線等の電磁波を検出すると言うことは, その入射場所(位置), その入射時刻(到着時刻), その入射したX線光子数(強度)を測定することである. ここまでやれば, モノクロの動画を得ることができる. 更に, 可視光でもX線でも光子の種類(色)を判別することが, 画像をカラー化するわけで, 極めて有用である. X線直接撮像型CCDは正にそのような可能性を持っている. ちなみに, 可視光領域では, CCDの画素毎に異なる色フィルターを持つことにより, カラー化しているのだから, ここで言うX線領域でのカラー化とは本質的に異なる.

ところが, 電磁波の持つ情報は上に挙げた4つだけではない. 更に, 偏光度と言うものがあり, ここまで決めてやれば, 電磁波の持つ情報を完全に引き出したことになる. 可視光と言う偏光とは, 水面やガラス面などで反射する成分は強く偏光しているので, 偏光サングラスを掛ければ, まぶしくなくなるなどでお馴染みであろう. 可視光における偏光の有用性を考えれば, X線の偏光の有用性も推測できるであろう. 可視光では, 偏光板を通すことにより, 偏光度を測る. ところが, X線直接撮像型CCDはX線偏光も測ることが出来る. つまり, X線直接撮像型CCDは, 位置, 時刻, 強度, 色, そして偏光と全てが一時に測定できる性質を持っている.

4. X線天文衛星あすかに載ったCCD

X線用のCCDの性能は, 雑音レベルを下げるのが難しく, なかなか実用にはならなかった. それでも1980年代の中頃には, 雑音レベルを下げ, 厚い空乏層を実現することが出来るようになった³⁾. この種の装置を世界に先駆けて宇宙X線観測に使用したのは1993年に打ち上げられた日本の人工衛星『あすか』であった⁴⁾. 今後, 1999年打ち上げ予定の, AXAF(アメリカ), 2000年打ち上げ予定のXMM(ヨーロッパ), ASTRO-E(日本)などに使用され, X線用のCCDは標準的な装置になったと言える. あすかには4台のX線望遠鏡と, 2台のガス蛍光比例計数管(GIS), 2台のX線CCDカメラ(SIS)とが搭載された. SISは, 日本とアメリカの国際協力で進められたプロジェクトであったが, 使用した素子はMIT/Lincoln研究所で製作されたものである⁵⁾. その性能は, 27 μm 四角の画素を420

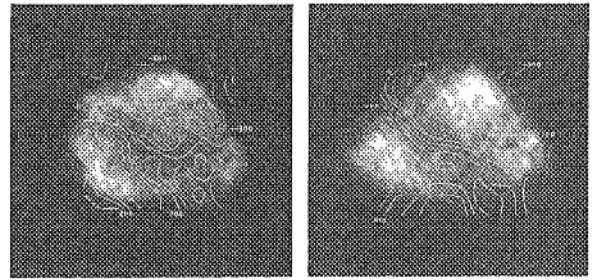


図2 あすかの撮像した超新星残骸カシオペアAの硅素の輝線による画像(左図)と鉄の輝線による画像(右図). それぞれの物質分布の差が判る.

$\times 420$ 個持った素子を4個稠密に並べた. 素子の空乏層厚さは35 μm 程度を実現している⁶⁾. 図2には, あすかによって観測した超新星残骸カシオペアAの硅素と鉄の輝線による画像を示す⁷⁾. 両者から, それぞれの物質分布の差がはっきりと判る.

5. これまでにないX線検出器を目指して

X線がCCD内で光電吸収すると, エネルギーの高い光電子が一つ飛び出す. この光電子は, 入射したX線の偏光面内に出易い. 飛び出した光電子は進行方向に二次電子を作りながらやがて停止する. つまり, 最終的に出来た電子雲はある程度, 偏光方向に細長く延びていることになる. この形状は数 μm にしか過ぎない⁸⁾が, この形状を検出すれば, 偏光面を決めることができる. 我々は, このことを世界で初めて実験的に示した⁹⁾.

X線検出を目指した素子は世界でも幾つか研究開発されている. いずれも, 空乏層を厚くして感度を上げ, 温度を下げる等で雑音レベルを下げたものである. しかし, 画素が大きくて, 詳細な電子雲形状を測定できるまでにはなっていない. これは可視光で要求されているようなHDTV等を目指した微小画素化がなされなかったからであるし, X線による電子雲はかなり広がるために, 微小化する要求もなかったからであろう. 我々は, 現在のわが国の技術を用いれば, X線に対する感度を上げることはもちろん, 画素の微小化を行うことにより, これまでにないX線検出器を作ろうとしている.

6. X線による一次電子雲の形状測定

実際にX線による一次電子雲がどんな形状をしているか, これを知らなければ, 効率的な測定は出来

そうもない。そこで、これまでの素子を使って、形状を測定する方法を考案し実行した。具体的には、画素よりも小さな穴の多数開いた金属板を CCD の直前に置くメッシュ実験である¹⁰⁾。元々は、画素内部での X 線に対する感度ムラを測定することを目的としたものであった¹¹⁾。この技術は、CCD 内部の X 線に対する応答を μm 単位で調べられる手法であるので、ただちにアメリカの X 線観測衛星 AXAF 搭載の素子の測定に使われた¹²⁾。また、ヨーロッパの X 線観測衛星に搭載する CCD 素子についての測定にも使用する予定である。この技術の応用として、X 線の一次電子雲形状を、世界で初めて実験的に決めた¹³⁾。結果の一例を図 3 に示す。これは、2.3 keV の X 線によって作られた 1 次電子雲が CCD に捉えられた時の形状である。形状は点対称ではないのだが、これは、X 線偏光によるものではない。最初にできた電子雲はたいそう小さいのだが、それが電極下に集められるまでに拡散で広がったものである。点対称でないのは CCD 内部の電場構造の非一様性によって生じたものであろう¹⁴⁾。

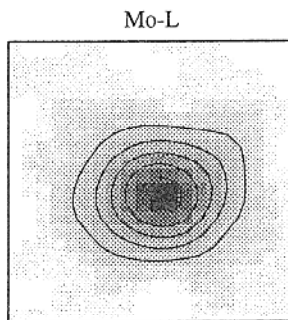


図 3 Mo-L (2.3 keV) の X 線光子によって作られた一次電子雲が CCD で検出された時の形状。12 μm 四角の中に描いてある。

X 線が CCD に入って作る信号の実例を図 4 に示す。それぞれの正方形が画素に対応する。又、ひと固まりの信号は、1 つの X 線光子によって作られた一次電子雲である。これを見ると、X 線光子は、入射場所から少し広がってしまうのではないかと思える。実際複数の画素に信号が分かると、そのどこに入ったか分からないように見える。これは、一次電子雲がある大きさを持っているからである。

ところが、この一次電子雲の形状が正確に求められるとなると、信号が複数の画素にどのように広がるかを調べれば、つまり画素のパターンを調べれば、

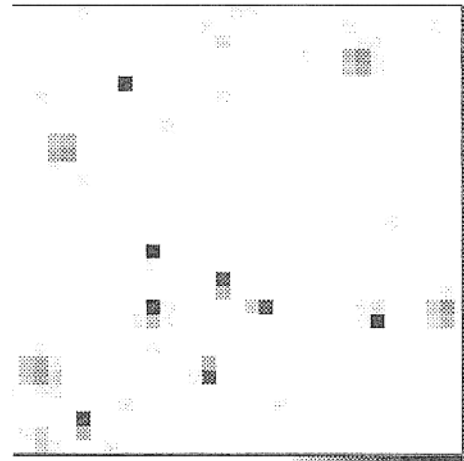


図 4 CCD 内に X 線が入射した時にできる記号の一例。一次電子雲は、ある場合には、単一画素に全ての信号が集まる (シングルイベント) し、2~4 画素に広がる (スプリットイベント) 場合もある。

X 線の入射場所を画素よりも細かい精度で決定できる¹⁵⁾。このような手法は、可視光で観測する星姿勢系が、画素で決まる精度よりも遙かに高い精度で位置決定できることと同じである。こうなると、X 線検出器としての位置分解能も μm 程度で決めることが可能になって来た。CCD は今までない位置分解能を達成できるようになったと言える。

7. ま と め

このプロジェクトで研究開発した一例として、図 5 に受光面が 1 インチ四角のフレーム転送型素子を示す。これは全ての必要端子を一辺に集めたもので、

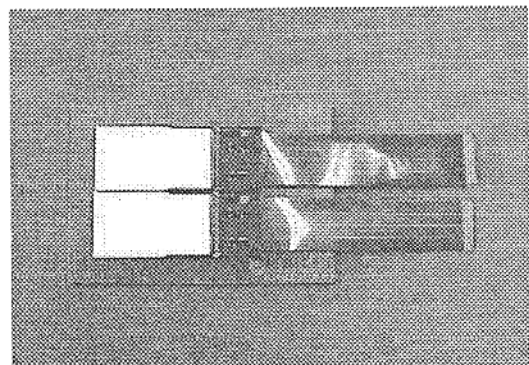


図 5 受光面が 1 インチ四角のフレーム転送型素子の試作例。これは、受光面周辺の三辺が潤密に並べられるようになっている。ここでは、2 個を並べている。

残りの三面は、他の素子と凋密に並べられるようになっていて、今後、宇宙空間での使用を考えると、各種放射線損傷に対する対策なども取り入れなければならぬなど、まだまだ解決すべき問題¹⁷⁾も残っている。

我々は、X線を直接 CCD で検出すると言う技術開発を通じ、X線のカラー画像と言う概念を提唱¹⁸⁾して来た。更に、実験を通じて、X線の偏光測定が可能であることも示した。つまり、CCD は X 線のカラー画像と偏光情報とを同時に測定できるこれまでにない画期的な検出器となり得ることが判った。更に、実験を通して X 線が作る一次電子雲の形状を実測するに至った。これを使えば、検出器の位置分解能は画素よりも遙かに小さいものになる。このように、X線直接撮像型 CCD は、いろいろな意味で画期的な検出器となり得る。そもそも、CCD 製作となると、そう簡単には手が出ないと思われて来た。つまり、このような装置の実現は、ちょっとできそうもないと諦めかけていた。しかし戦略的基礎研究と浜松ホトニクス社との協力の下に、永年の夢がようやく実現しかかっている。

参 考 文 献

- 1) H. Tsunemi, K. Mizukata, 1988, Application of a Frame Transfer Type CCD as an X-ray Image Sensor, *Jpn. J. Appl. Phys.* 27 2404
- 2) H. Tsunemi, K. Mitsuda, 1993, X線検出器としての CCD の応用, *物理学会誌* 48, 264
- 3) G. W. Frazer : 1989, *X-ray Detectors in Astronomy* (Cambridge University press, Cambridge)
- 4) Y. Tanaka, H. Inoue and S. S. Holt, 1994, The X-Ray Astronomy Satellite ASCA, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* 46 L37
- 5) B. E. Burke, R. W. Mountain, P. J. Daniels, M. J. Cooper, and V. S. Dolat, 1994, Soft X-ray CCD imagers for AXAF, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 44, 375
- 6) H. Tsunemi, 1993, 直接 X 線撮像型 CCD, *応用物理学会誌* 62, 718
- 7) S. S. Holt, E. V. Gotthelf, H. Tsunemi and H. Negoro, 1994, ASCA Observations of Cassiopeia A, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* 46 L151
- 8) J. Janesick, T. Elliott and G. Garmire, 1985, CCD advances for X-ray scientific measurements in 1985, *Proc. SPIE* 597 364
- 9) H. Tsunemi, K. Hayashida, K. Tamura, S. Nomoto, M. Wada, A. Hirano and E. Miyata, 1992, Detection of X-ray Polarization with a Charge Coupled Device, *Nucl. Instrum and Meth.* A321, 629
- 10) H. Tsunemi, K. Yoshita and S. Kitamoto, 1997, New Technique of the X-Ray Efficiency Measurement of a Charge-Coupled Device with a Subpixel Resolution, *Jpn. J. Appl. Phys.* 36, 2906
- 11) K. Yoshita, H. Tsunemi, K. C. Gendreau, G. Pennington and M. W. Bautz, 1998, Direct Measurement of the Subpixel Level X-ray Detection Efficiency of the CCD on Board the ASCA Satellite, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 45, 915
- 12) M. Pivovarov, S. Jones, M. Bautz, S. Kissel, G. Prigozhin, H. Tsunemi and E. Miyata, 1998, Measurement of the Subpixel Structure of AXAF CCD's, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 45, 164
- 13) H. Tsunemi, J. Hiraga, K. Yoshita, E. Miyata and K. Hayashida, 1998, Measurement of the charge cloud shape produced by an X-ray photon inside the CCD using mesh experiment, *Nucl. Instrum. and Meth.* in press.
- 14) J. Hiraga, H. Tsunemi, K. Yoshita, E. Miyata and M. Ohtai, 1998, How Big Are Charge Clouds inside the Charge-Coupled Device Produced by X-Ray Photons?, *Jpn. J. Appl. Phys.* 37, 4627
- 15) H. Tsunemi, J. Hiraga, K. Yoshita and S. Kitamoto, 1998, Where are the X-ray event grades formed inside the pixel of the charge coupled device?, *Jpn. J. Appl. Phys.* 37, 2734
- 16) H. Tomida, H. Matsumoto, M. Ozaki, Y. Tazawa, H. Awaki, T. Tsuru, K. Koyama, H. Tsunemi and K. Yamamoto, 1997, Radiation Damage on X-ray CCDs and Restora-

- tion Technique for Space Astronomy, Pub. Astr. Soc. Japan 49,405
- 17) A. Yamashita, T. Dotami, M. Bautz, G. Crew, H. Ezuka, K. Gendreau, T. Kotani, K. Mitsuda, C. Otani, A. Rasmussen, G. Ricker and H. Tsunemi, 1997, Radiation Damage to Charge Coupled Devices in the Space Environment, IEEE Trans. Nucl. SCI. 44, 847
- 18) H. Tsunemi, M. Woda, K. Hayashida, and S. Kawai, 1991, X-ray Color Movie Using the Charge-Coupled Device with a Direct Detection Method, Jpn. J. Appl. Phys. 30, 3540