



Title	X線を直接検出するCCD
Author(s)	常深, 博
Citation	大阪大学低温センターだより. 2005, 130, p. 8-11
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/9814
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

X線を直接検出する CCD

理学研究科 常 深 博 (内線 5477)

E-mail: tsunemi @ess.sci.osaka-u.ac.jp

1. はじめに

我々は、これまでにないような観測や測定をするために、高性能の検出器を研究開発している。ここでは、X線天文学の発展を支えてきた検出器技術の中でも位置検出器として今や不可欠となったX線用の CCD (Charge Coupled Device) についてまとめる。

X線による宇宙観測は、ガイガー検出器で始まった。X線集光技術のないときには、大面積化の易しいガス比例計数管を使った。しかし、そのエネルギー(波長)分解能は半値幅(FWHM)で20%(6 keV)にしか過ぎない。その後、エネルギー分解能の優れたガス蛍光比例計数管や半導体検出器を経て、X線 CCD を使うようになっていく。図1には、光学的に薄い高温プラズマ(300年ほど前に爆発した超新星の残骸カシオペアA)のX線スペクトルを、いろいろな検出器で観測した結果¹⁾について示す。これから判るようにX線 CCD (あすか搭載)によって、各種の元素の電離状態などが詳しく判るようになった。

天体の画像を取得するには、優れた光学系とそれに見合う優れた検出器系とが必要である。10 keV 以下の、比較的波長の長い領域では、金属表面の全反射を利用した斜入射鏡を使い、結像性能は鏡の表面精度などで決まる。1999年に軌道に載った米国のチャンドラ衛星は、鏡の結像性能として0.5秒角(焦点面で24 μm に対応)を達成し、可視光領域の望遠鏡と肩を並べる精度を実現している。この例として、図2にはカシオペアAのX線画像²⁾を示す。チャンドラにはX線用に開発された CCD が使われている。このように CCD は優れたエネルギー分解能や高精度の位置分解能を発揮できる。しかし、他の検出器に比べると、時間分解能が悪く、工夫しても、ミリ秒程度の時間分解能を発揮させるのがせいぜいである。

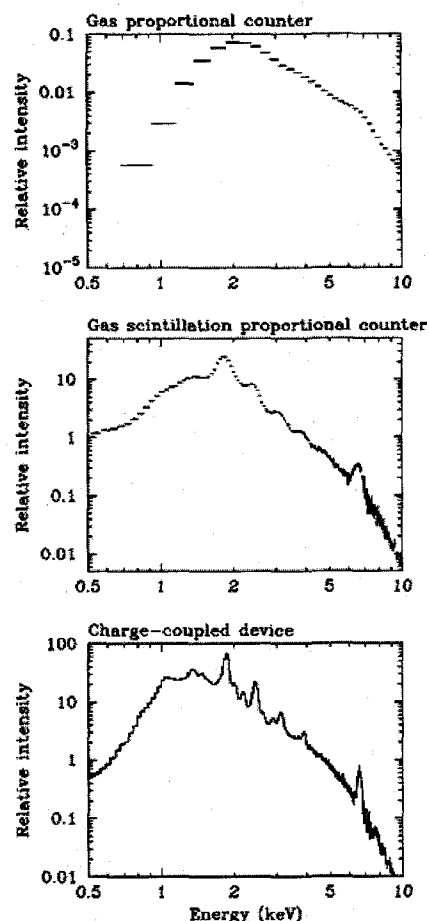


図1：上から順番にガス比例計数管(上)、ガス蛍光比例計数管(中)、X線 CCD (下)によるカシオペアAのスペクトル。分解能の改善に従って詳細構造が判ってきた。

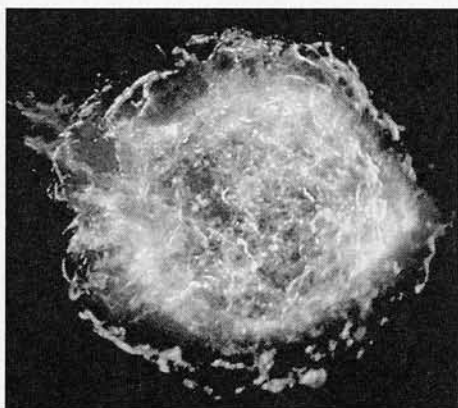


図2：X線観測衛星チャンドラによるカシオペアAのX線像。可視光に匹敵する解像度で、中心には中性子星が見えている。

2. X線用 CCD の開発

我々は可視光用の CCD 素子を X 線に応用することから始め³⁾、X 線用に用いる CCD の開発研究を続けてきた。最近では、実験室でも X 線画像取得には広く CCD が使われるようになっている。X 線画像取得と言っても普通は、X 線の光量を測定するもので、検出器そのものが X 線のエネルギー(波長)を測定することはない。我々の開発している X 線 CCD は、X 線光子の光子計数を目指したもので、エネルギー毎の画像取得を可能にする。

X 線光子が CCD で光電吸収された場合、光子のエネルギーを E とすると、 $(E/3.76\text{eV})$ 個の電子-正孔対(電荷雲)を作る。この電荷雲の電荷量をいかに正確に測定するかが検出器のエネルギー分解能を決める。そのためには低雑音読み出しが必要であり、素子を -100°C 前後に冷却して実現する。読み出し速度(100kHz 程度)によるが、今では、読み出し雑音は電子個数換算で三個程度(標準偏差)を実現している。ここまで低雑音を実現すれば、X 線のエネルギー分解能は、珪素のファノ因子で決まる(130eV @ 6keV)。図 3 には ^{55}Fe からの X 線測定のスเปクトル例を示す。

CCD で X 線など電磁波を検出するには、電磁波が CCD の空乏層中で光電吸収される必要がある。空乏層は CCD の動作電極(ゲート)構造の下に生成される。CCD には、素子のゲートのある表面から X 線を入れる形式(表面照射型: F I 型)と、その反対から入れる形式(裏面照射型: B I 型)とがある。一般に、ゲートの下に空乏層が作られると、そのさらに下には、中性領域が広がる。普通は F I 型素子が広く用いられているが、B I 型素子にはいろいろとメリットが多い。しかし、技術的に B I 型素子の製造は厄介である。X 線の珪素中での平均吸収距離を考えると、1keV

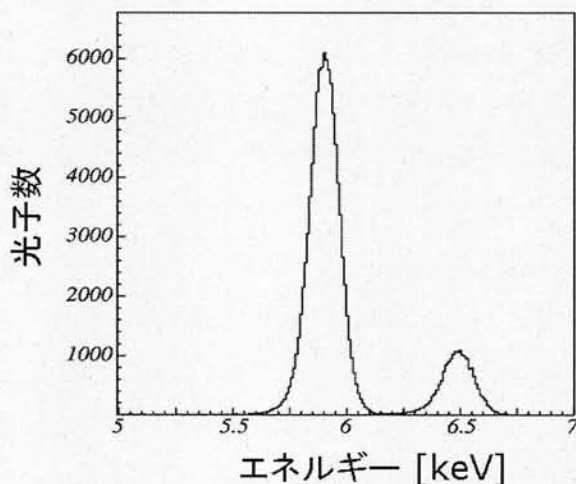


図3：我々の開発した MAXI 搭載の CCD による ^{55}Fe からの X 線スเปクトル測定結果

以下のエネルギー領域の検出効率は、空乏層に入る前のゲートなどによる吸収をどのようにして減少させられるかが重要である。一方、3keV 以上のエネルギー領域の検出効率は、空乏層の厚さで決まる。10keV の X 線に対する珪素の平均吸収距離は $100\mu\text{m}$ ほどあるから、高エネルギー領域での検出効率を上げるのは、これまた技術的にかなり難しい。

CCD の画素($10\mu\text{m}$ 程度の大きさ)にはいくつかのゲートが複雑に重なり合っており、ゲートに印加する電圧によって、その下に広がる空乏層厚さが異なるので、検出効率を精度よく調べるのは難しい。これを正確に測定するために、メッシュ実験⁴⁾を考案した。一個の X 線光子が作る電荷雲は、必ずしも一つの画素に集まるわけではなく、2~4 画素に広がることが多い。メッシュ実験

の応用として、この電荷雲の大きさを直接測定できること⁵⁾が判った。その結果、電荷雲の形状は概ねガウス分布に従い、その大きさ（標準偏差）は、素子やX線エネルギーに依存し、F I型では $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ⁵⁾、B I型では $5 \sim 9 \mu\text{m}$ ⁶⁾である。B I型の場合、電荷の広がりを画素（ $24 \mu\text{m}$ 四角）の個数で表すと、ほぼ全てが四画素あるいはそれ以上に広がることが判る。

メッシュ実験の結果、X線光子の作る電荷雲形状が精密に測定でき、X線光子が画素のどの部分に入ればどんな風に電荷（信号）が複数の画素に振り分けられるかが判った。すなわちX線入射エネルギーが判れば、電荷雲形状が判り、信号がどのように複数の画素に分かれているかは測定できるので、X線光子の入射位置を画素よりもはるかに高い精度で決定できる⁷⁾。どこまで精度が上がるかは、画素の大きさ（ $12 \mu\text{m}$ とか $24 \mu\text{m}$ など）に依存するが、大体画素の大きさの $1/10 \sim 1/20$ の精度で決められることが判った。つまり、X線光子計数のできるCCDはX線入射位置を $1 \mu\text{m}$ 程度で決めることができる⁸⁾。この技術をチャンドラ衛星搭載のCCDに適用した。それまでは、CCDの画素の大きさが画像精度を決め、 0.7 秒角であった。ところが、我々の技術を適用してデータ解析した結果、画像精度は 0.5 秒角になり、X線鏡で決まる精度まで実現できた⁹⁾。

3. 人工衛星に搭載する素子の開発

世界最初のX線光子計数型のCCDを搭載したのは1993年に軌道に載った日本の人工衛星「あすか」であった。搭載した素子はアメリカのMITで開発されたばかりの素子（SIS）であった。我々はSISに搭載された素子の性能を参考にして、浜松ホトニクス社の協力の下に開発を進めた。読み出し雑音レベルを下げる、大きな素子を歩留まり良く作ること、空乏層を厚くすることなどを次第に克服できた。そこで、これを宇宙X線観測に利用するために、人工衛星搭載条件を満たす素子を開発した。それは、画素の大きさは $24 \mu\text{m}$ 四角、画素数は 1024×1024 からなる素子で、図4に示す。その目標は二つあった。ひとつは、小惑星観測のための探査体「はやぶさ」に搭載した蛍光X線測定装置（XRS）である¹⁰⁾。もう一つは、国際宇宙ステーションに搭載する日本の有人モジュール（きぼう）の外の曝露部に設置する観測装置（MAXI）に使用するX線カメラ（SSC）である¹¹⁾。宇宙観測に使用するとすると、低雑音、高検出効率だけでは済まない。周辺電子回路は当然として、素子の冷却や、機械環境試験に耐える構造が必要である。はやぶさは地球からはるかに離れるので、省電力や軽量化が重要だし、MAXIは低高度地球周回衛星なので、冷却が困難などの問題があった。

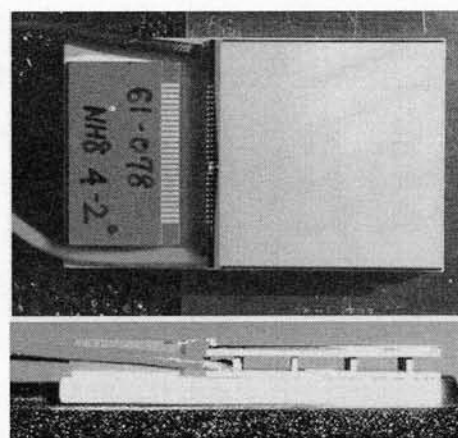


図4：MAXIのCCD概観。表面はアルミ蒸着、ペルチェ素子の上に直接CCDウェハーを貼り付けている。

4. 新たな地平を求めて

宇宙X線の観測で、 10keV 以下の領域は、光学的に薄く、何千万度にもなる高温プラズマからの輻射等が見えている。そこには、宇宙に大量にある種々の元素からの輝線がはっきり検出された。

最近の観測によれば、10keV 以上の領域で非熱成分と見られる輻射の卓越していることが判ってきた。非熱成分はX線パルサーとなっている中性子星や超新星残骸周辺に広がる衝撃波面などでの粒子加速を示している。この研究には、10~100keV（硬X線）の領域での観測が重要であるが、硬X線での集光や撮像はできなかったため、精度の高い観測は難しかった。しかし、最近の人工多層膜を応用したスーパーミラーの技術¹²⁾は硬X線の撮像を可能にした。

スーパーミラーに対応する検出器は硬X線を効率よく検出できればいけない。X線 CCD は珪素で出来ているので、空乏層をいくら厚くしても実用上は硬X線を検出できない。CCD 以外の検出器としては、シンチレータと光電管、CdTe 検出器などが考えられるが、CCD ほどの位置分解能は達成できない。最近、CCD にシンチレータを直接蒸着させた素子 (SDCCD) が考案された¹³⁾。硬X線はシンチレータ (CsI) で検出し、そこからの発光 (可視光) を CCD で受ける。10keV までのX線は CCD で直接検出する工夫も可能であるため、これらを合わせると、0.1~100keV のX線を単一の検出器で検出できることになる。現在、SDCCD とスーパーミラーとを組み合わせた装置を完成させ、大気球を使った観測計画を進めている。大気球の場合、20~80keV の範囲での撮像を目指すことになる。

我々は宇宙X線観測を目指して、低雑音読み出し技術、大面積化を可能にする実装技術を開発してきた。天体からのX線はきわめて微弱であり、光子を一つずつ丁寧に調べる必要があるので、超高感度ではあっても、読み出し速度は遅い。宇宙X線観測以外へ応用するためには、読み出し速度の高速化が必要である。具体的には、雑音レベルを悪くせずに、読み出し速度を速くするには、一素子あたりの読み出しノード数を増やすことが必要である。しかし、ノードを増やすと、周辺の読み出し回路も多数必要になる。今後は、読み出し速度向上のために、ASIC 等を使った多チャンネル技術を導入するつもりである。今後の応用範囲としては、宇宙X線観測にとどまらず、X線顕微鏡や医療診断などを含めて広く地上実験での利用を目指したい。

参考文献

- 1) H. Tsunemi, The Century of the Space Science, (2001), 937
- 2) NASA/CXC/GSFC/U.Hwang et al., <http://chandra.harvard.edu/photo/2004/casa/>
- 3) H. Tsunemi et al., Jpn. J. Appl. Phys. **27**, (1988), 670
- 4) H. Tsunemi et al., Jpn. J. Appl. Phys. **36**, (1997), 2906
- 5) J. Hiraga et al., Jpn. J. Appl. Phys. **37**, (1998), 4627
- 6) E. Miyata et al., Jpn. J. Appl. Phys. **42**, (2003), 7135
- 7) H. Tsunemi et al., Nucl. Instrum. And Meth. **A477**, (2002), 155
- 8) E. Miyata et al., Jpn. J. Appl. Phys. **41**, (2002), L500
- 9) H. Tsunemi, et al., Astrophysical Journal, **554**, (2001), 496
- 10) T. Okada et al., Advances in Space Research, **30**, (2002), 1908
- 11) E. Miyata et al., Nucl. Instrum. and Meth. **A488**, (2002), 184
- 12) 柳原美広、山下広順、放射光、**17**, (2004), 270
- 13) E. Miyata and K. Tamura, Jpn. J. Appl. Phys. **42**, (2003), L1201