

||||| 特集 2 : JEM「きぼう」船外実験プラットフォームを利用した科学 |||||
(解説)

全天 X 線監視装置搭載 X 線 CCD カメラ

富田 洋

The X-ray CCD camera onboard the MAXI mission

Hiroshi TOMIDA

Abstract

SSC (Solid-state Slit Camera) is an X-ray CCD camera onboard the MAXI mission. SSC covers the energy range of 0.5-12 keV with the energy resolution of 145 eV(FWHM) for 5.9 keV X-rays. SSC has been working well in the ISS orbit as expected. The all-sky image obtained with SSC shows many X-ray objects with various colors.

1. X 線天文学と X 線観測装置

天文学とは宇宙を調べる学問である。宇宙を調べるには宇宙を観測する必要があり、宇宙から来る情報(主に電磁波)をとらえる様々な装置がこれまで開発されてきた。

装置に必要なとされる要素は多岐にわたる。シャープな画像、広い視野、広い波長(エネルギー)帯域、高い波長分解能、高い時間分解能、高感度(暗い天体まで見えること)などである。安価であること、コンパクトであること、故障が少なくメンテナンスが簡単なこと、運用が簡単なことも重要である。これらをすべて満たすことは不可能であり、狙うサイエンスを明確にして目的・戦略をたて、予算やスケジュールなどから必要な項目を絞り出す。

全天 X 線監視装置 (Monitor of All-sky X-ray Image : 以後 MAXI と略す) は、国際宇宙ステーションに搭載された天文観測装置である¹⁾。0.5-30 keV (波長で $2.5 \times 10^{-9} \sim 8.3 \times 10^{-11}$ m) の X 線領域で全天を監視し、突発現象の発生をモニターする。X 線は大気に吸収されるため、観測を行うには気球・ロケット・人工衛星を使うのがこれまでの主流であった。これに対して MAXI は宇宙ステーションという新しいプラットフォームで観測を行う。ステーションは人工衛星に近いが姿勢が常に変動しユーザーは制御できないため、シャープな画像をとることは難しい。しかしステーションの軌道周回に伴う自転を利用することで、全天の撮影が比較的容易に行える。前にあげた要素でいうと「広い視野」を売りにできる。

MAXI には 2 種類の X 線カメラがある。比例計数管を用いたカメラ (Gas Slit Camera : GSC) と X 線 CCD カ

メラ (Solid-state Slit Camera : SSC) である。GSC は比例計数管を利用したカメラで、比較的高いエネルギー領域 (2-30 keV) をカバーする。全天モニターとしては過去最高の感度を誇る。これに対し SSC は低いエネルギー領域 (0.5-12 keV) をほどよいエネルギー分解能で観測する。エネルギー分解能を生かした X 線観測は日本が得意としてきた分野である。宇宙を構成する通常の物質(いわゆるダークマターやダークエネルギーを除いたもの)のほとんどは高温のプラズマの状態で存在していると考えられ、宇宙を知るにはプラズマ診断が欠かせない。プラズマ診断には X 線観測が必須である。また X 線で観測する宇宙は人の目で見える宇宙と異なって変化に富み、モニター観測が重要である。本稿では X 線で全天モニターを行う MAXI の X 線 CCD カメラ (SSC) の紹介と SSC で目指すサイエンス、および得られた成果を述べる。

2. X 線 CCD カメラ

2.1 X 線 CCD

CCD (Charge-Coupled Device) は市販のデジタルカメラなどでも使われている半導体素子である。CCD はピクセルと呼ばれる受光部分が並んだアレイ構造を持つ。MAXI/SSC の CCD ではおよそ 1000×1000 ピクセルである。露出中に各ピクセルに入った光は電荷(電子と正孔のペア)を生成し、蓄積した電荷は露出後にバケツリレーの様に転送され、最終的には電圧に変換される。これにより各ピクセルに入った光の量が分かる。一度の露出で各ピクセルに入る X 線 (photon) は 1 個あるいは 0

宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 ISS 科学プロジェクト室 〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1
JAXA/ISS Science Project Office, Sengen 2-1-1, Tsukuba, Ibaraki, 305-8505 Japan
(E-mail: tomida.hiroshi@jaxa.jp)

個の場合がほとんどである．よって CCD を X 線観測に用いる場合は電荷(電圧)は X 線のエネルギーを示す．X 線観測用 CCD の観測原理は目に見える光をとらえる CCD と同じであるが、ノイズが小さい、CCD の受光部分(空乏層)が厚い、などの特徴がある．天文学に限ればこれらの需要は X 線も可視光・赤外線も同様である．望遠鏡(デジタルカメラでいえばレンズに相当する)を取り付ければカラー画像の取得も行える．

CCD を用いて宇宙からの X 線を photon 毎に観測したのは日本の「あすか」衛星が初めてである．あすかの X 線 CCD カメラは Solid-state Imaging Spectrometer (SIS) と呼ばれ、X 線 CCD は米国の開発による²⁾．SIS は従来の宇宙観測用 X 線カメラに比べると高いエネルギー分解能をもち、画像能力(ピクセルサイズで決まる位置分解能力)も優れている．X 線 CCD は X 線天文学に革命をもたらし、X 線天文学は新しい時代に突入した．あすか以後の X 線天文衛星では CCD を搭載することがもはや標準となっている．米国のチャンドラ衛星、ヨーロッパの XMM/ニュートン衛星などにも X 線 CCD が搭載されている．現在活躍中の日本の X 線天文衛星すざくにも X 線 CCD カメラが搭載されており、次期 X 線天文衛星 (ASTRO-H プロジェクト) にも X 線 CCD カメラが搭載される．

Fig. 1 は MAXI の X 線 CCD の写真である．「あすか」「すざく」は日本の衛星であるが CCD は海外に頼った．しかし MAXI では日本の CCD を使用している．これは浜松ホトニクス社が大阪大学などと共同で開発してきたもので、ASTRO-H にはさらに性能を高めた CCD が搭載される．CCD は受光面積が大きくとれないため、大きな望遠鏡で光 (X 線) を集めてその焦点に CCD を置くのが主流であったが、MAXI は望遠鏡を持たないため、CCD

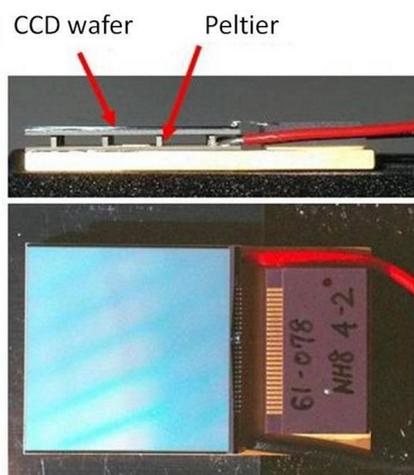


Fig. 1 Photograph of X-ray CCD employed in MAXI/SSC. The square region is X-ray detection area whose size is 25×25 mm.

素子をたくさん並べることで面積を確保している．そのため 32 個もの CCD を使用しており、過去の X 線天文衛星と比較すると群を抜いて数が多い．32 個もの CCD を確保できたことは国内での共同開発の大きな成果である．

2.2 CCD の冷却

X 線 CCD はエネルギー分解能をあげるために可能な限りノイズを低くする必要がある．そのためには冷却が必須である．MAXI/SSC ではラジエタおよびループヒートパイプを用いてカメラボディを -20 程度に冷却し、そこからペルチェ素子を用いて CCD の X 線受光部分 (ウェハ) を約 -60 まで冷却している．温度はもっと低い方がよいが、電力や廃熱、CCD の個数のバランスから MAXI ではこれが限界である．

Fig. 1 に示す素子には冷却に関する工夫が多数ある．熱伝導による熱流入をできるだけ抑えるために CCD ウェハはペルチェ素子のみで支えられ、CCD の駆動と読み出しに必要なケーブルも細いボンディングワイヤを使用している．ペルチェ素子はあすか・すざく両衛星の CCD の冷却にも使用された．しかし機械的に壊れやすいという欠点もあり、ASTRO-H の CCD カメラではペルチェ素子は使わず機械式冷凍機を使って -120 を目指した冷却をおこなう．今後はこちらが主流となるであろう．

2.3 放射線の影響

CCD に限らず半導体を用いた電子機器を宇宙空間で使用する場合は放射線の影響が問題になる．よくあるのは Single Event Latch-up (SEL) や Single Event Upset (SEU) であるが、CCD では性能が徐々に劣化していく．具体的には暗電流の増加と電荷転送効率の低下が大きい．

暗電流とは入射する photon がないときでも各ピクセルに発生する電荷である．主に熱エネルギーを元に発生するため冷却を十分に行えば増加は抑えられるが、MAXI では CCD 温度は -60 程度であり十分とは言えない．暗電流が増えるとゼロレベル (入射 X 線がない場合のピクセルの波高値) が変化するため、常にその変化をモニターし、露出毎に全ピクセルのゼロレベルを推定する必要がある．この計算が CCD の読み出し速度を制限する要因の一つとなっている．

電荷転送効率は各ピクセル間での電荷をバケツリレーする際の効率を示す．1つのピクセルで電荷を失う割合が 10^{-5} であったとしても、MAXI の CCD では平均 1000 回のピクセル転送を行うため、平均で 10^{-2} (1%) の電荷を失うことになる．エネルギー分解能が 2%程度であるのでこれは無視できない．電荷を失うのは電荷を吸い込んでしまう落とし穴のようなものが各ピクセルにできてしまうためである．MAXI/SSC の CCD では電荷が通るチャンネルを細くしてこの落とし穴に遭遇する確率を減らすことや、落とし穴は1つの電荷で満たされてしまうため人為的に電荷を注入して穴をふさいでしまう方法な

どが導入されている。宇宙ステーションは「あすか」や「すざく」に比べて高緯度を通過するため放射線環境が悪いが、上記で述べた対策によって性能劣化を小さく抑えられている。

CCD は当然ながら可視光(及び赤外線の一部)にも感度がある。X 線観測にとっては可視光はノイズであり除去すべきものである。これに対し「あすか」「すざく」では X 線を通すが可視光を遮断するフィルターを使用している。このフィルターは厚いと X 線も吸収するため、できるだけ薄い必要がある。しかし薄いフィルターは扱いが難しく、打ち上げ時の振動に耐えるためにカメラ内部を真空にして打ち上げ、軌道上でカバーを開ける必要があった。SSC では CCD 表面に直接アルミニウムを蒸着し可視光の遮断を行っている。これにより SSC の構造は非常に簡単になっている。

CCD は 2 次元のピクセルアレイであるが、SSC は全天をスキャン観測するため、1 次元の位置情報があれば十分である。よって SSC では X 方向のみの位置情報を取得し、Y 方向はピクセルの電荷を加算したあとに読みだしている。これにより全 CCD の読み出し周期(露出時間に相当)も短くなり、画像のクオリティも向上している。

SSC の 32 個の CCD は 16 個ずつに分けられ 2 つの独立したカメラとして観測を行う。Fig. 2 は MAXI 構体に取り付ける前の SSC である。地上試験では CCD には不良ピクセルはほとんどなく、エネルギー分解能が 145 eV (-70 まで冷却した場合の 5.9 keV での半値幅)であった。Fig. 3 は SSC で取得した各種蛍光 X 線のエネルギースペクトルである。これらはサイエンスに必要な要求を十分満たしている。

3. MAXI/SSC での観測

3.1 SSC の運用

MAXI/SSC は 2009 年 8 月に観測を開始した。32 個の CCD は全て動作し、冷却も地上試験で予想された通りの性能が出ている。ただし問題がないわけではない。太陽が視野に近い場合に各 CCD 画像の端の部分が明るいことが初期チェックで明らかになった。CCD の表面にはアルミコーティングを行って可視光・赤外線を遮断するよう

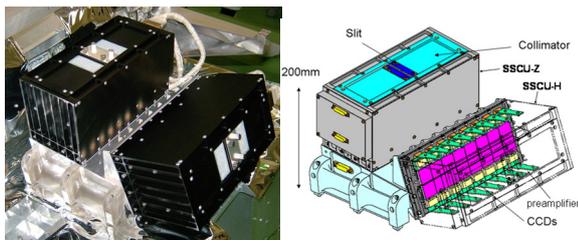


Fig. 2 Photograph (right) and bird's eye view (left) of MAXI/SSC.

にしたが、側面にはコーティングがないため、そこから赤外線が侵入していると考えている。これは MAXI の観測だけでなく、ASTRO-H の CCD カメラ開発に向けて大きな課題となっている。現在 SSC は夜を中心とした観測を行っている³⁾。

3.2 SSC で取得した全天画像

Fig. 4 は SSC で得られた全天画像である。エネルギー領域が GSC と重なっている部分もあることから、全天画像も GSC のものに近い。しかし SSC は低エネルギー領域で感度がよいので比較的低温(といっても温度は 10^6 K を超える)のプラズマを見るのに適している。具体的には年老いた超新星の残骸がよい観測対象である。超新星とは年老いた超新星の残骸がよい観測対象である。超新星とは可視光で急激に明るくなる星(現象)で、実際にはある程度の質量の星(恒星)がその一生の最後に起こす大爆発である。爆発で生み出される運動エネルギーは 10^{44} ジュール程度と考えられており、これをエネルギー源として発生するプラズマの温度は 10^7 K を超える。しかし加熱されたプラズマは輻射などで温度が下がり、年齢が 1 万年を超えるようになると GSC では見えず SSC だけに見えるようになる。Fig. 5 は帆座/とも座方向にある超新星の残骸の MAXI で得た画像である。GSC では暗いが、SSC ではクリアにとらえている。大きく広がったこの超新星残骸の全構造を X 線 CCD がとらえたのは MAXI が初めてである。

Fig. 4 をみると天の川銀河の中心から上下に広がった構造が見て取れる。太陽系近傍(あるいは太陽系自身を含む)に大きく広がった超新星の残骸や天の川銀河に付随する大構造などが考えられるが、正体はまだ分かっていない。この研究にはエネルギースペクトルの解析が有効である。次章ではいくつかの天体の X 線 CCD のスペクトルを紹介する。

3.3 エネルギースペクトル

超新星残骸の高温プラズマが出す X 線は電子がイオンの電場の影響で出す制動放射と各元素(イオン)から出る

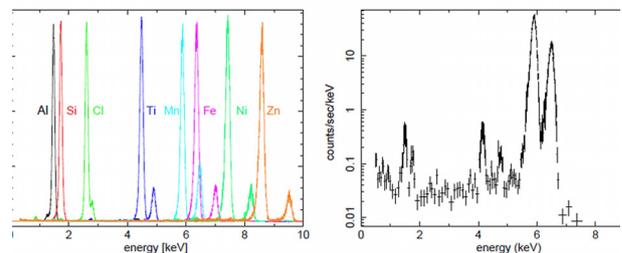


Fig. 3 X-ray spectra obtained with MAXI/SSC. In the right figure, fluorescent X-rays from Al, Si, Cl, Ti, Mn, Fe, Ni, and Se are irradiated to CCDs. In the left figure X-rays from Fe^{55} (5.9 and 6.4 keV) are irradiated.

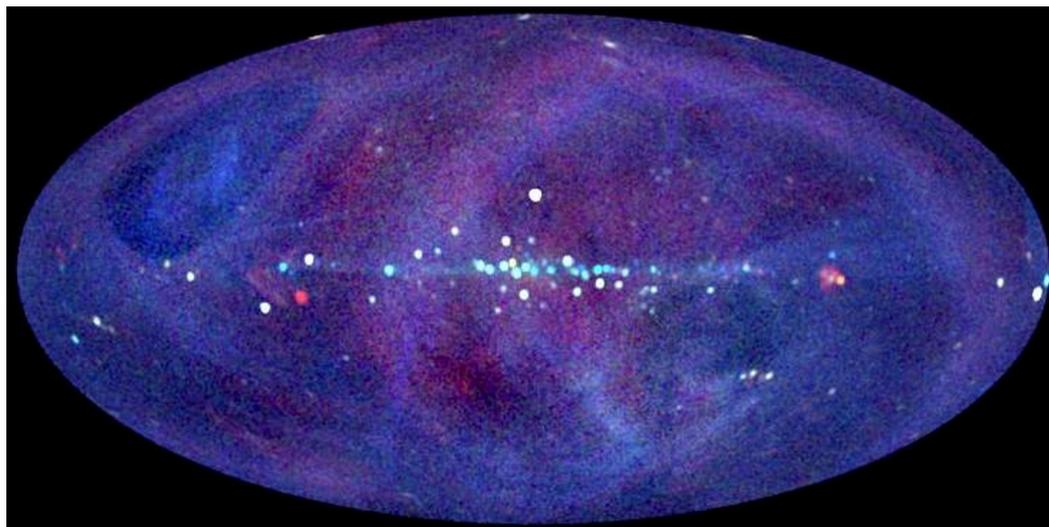


Fig. 4 All-sky image obtained with MAXI/SSC. The center of the milky-way galaxy is located at the center of the figure. The color is as follows; red:0.7–1.8 keV, green:1.8–4.0 keV, blue:4.0–8.0 keV.

特性 X 線が主である。これらをスペクトル解析することでプラズマの電子温度やイオンの電離状態、元素組成、年齢、密度などが推定できる。プラズマは密度が薄く電離非平衡状態である場合も多く、地球上では再現が難しい物理状態の観測対象でもある。また特性 X 線が見えない場合はシンクロトロンのような別の輻射機構が考えられ、宇宙線の加速機構や磁場の推定などが行える。このような天体の物理的な詳細を知るには X 線でのエネルギースペクトルの解析が欠かせない。

Fig. 6 は **Fig. 5** にみえる 2 つの超新星残骸の SSC スペクトルである。ケイ素や硫黄、マグネシウムの輝線がクリアに見えており、鉄やネオンの輝線も検出しているようである。これらはすべて 2 keV 程度かそれ以下で GSC では検出されないが、SSC では観測レンジ内でピーク構造の分離も十分可能である。超新星残骸のスペクトルは爆発から間もない頃は超新星自身が出す元素組成を反映する。しかし年月がたつとプラズマは星間物質を取り込

み、元素組成が変化する。超新星残骸の X 線観測は宇宙の元素組成が変化する現場を見せてくれる。**Fig. 6** は比較的若い超新星と年老いた超新星のブレンドと考えられる。

スペクトル解析の別の例として白鳥座にあるブラックホール候補天体も紹介しよう。ブラックホールは光さえも脱出できないほど強い重力の天体で、単独で存在する場合は観測は難しい。しかしブラックホールと通常の星で連星系をなす場合は、通常の星からのガスがブラックホールに吸い込まれる前に高温の円盤を形成し、その円盤からの黒体輻射が見える場合がある。円盤の温度は数 100 万 K 程度で、SSC のよいターゲットである。またブラックホールのまわりにはさらに高温のコロナがあり、そこでコンプトン散乱した X 線は GSC でも観測可能である。

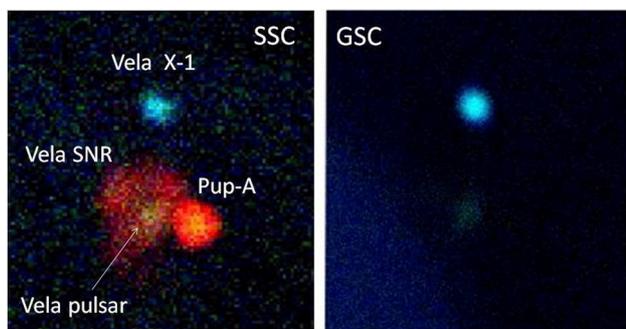


Fig. 5 Expanded image around the constellation Vela and Pup. The left is the SSC data, and the right is GSC. The color is same as that of **Fig. 4**

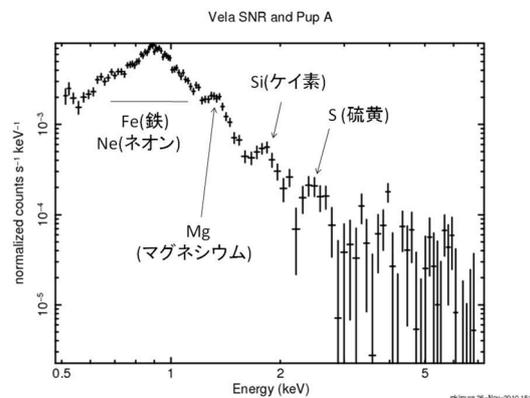


Fig. 6 X-ray spectrum of supernova remnants in the constellation Vela and Pup obtained with MAXI/SSC.

X線の観測で決められる重要なパラメータの一つがブラックホール質量である。ブラックホール周辺では安定した軌道が保てる半径の限界があり、高温の円盤は穴のあいたドーナツ型となる。円盤が十分に発達しての内側半径が限界まで到達した場合は、理論値と比較することでブラックホール質量の推定が可能で、中性子星の上限質量や連星の公転軌道から推定される質量などとの比較ができる。しかしながらブラックホール候補天体の数は少なく、また円盤の発達が必要な時期は短く、さらにその変化の予想もできない。ブラックホール周囲の円盤の観測は他のX線衛星でも可能で実績もあるが、常にブラックホール天体を観測することはできず、変化を追うことはできない。MAXIはX線の集光能力が十分ではないが、モニター観測を行っているためその変化をとらえることができる。

2010年6月末にMAXIはブラックホール候補天体「白鳥座X-1」が明るくなっていることを発見した。Fig. 7は通常期 (low state) と明るくなった時 (円盤が発達した時=high state) のそれぞれX線スペクトルである。円盤内

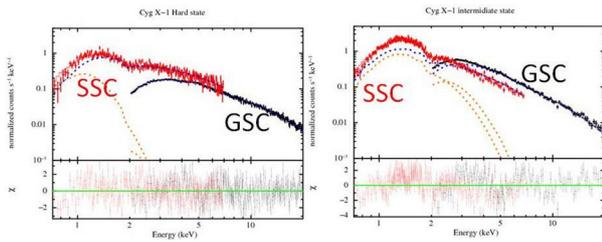


Fig. 7 X-ray spectrum of Cygnus X-1. The left was taken in Feb-May 2010 (low state), and the right was taken in Jun-Jul 2010 (high state). The red is SSC data, and the black is GSC. 緑の温度は low state で 2×10^6 K, high state では 4×10^6 K 程度であった。high state では太陽の 12 倍程度の

質量と推定したあすかの結果⁴⁾に近く、円盤内縁は限界に達するかそれに近い状態と判明した。こうなるとより詳細な観測が必要である。MAXIの結果を受けて「すざく」が緊急観測を行うなど、世界中の望遠鏡がMAXIでのモニター結果を注視している。

MAXIは観測から1年以上が経過した。SSCも少しづつ成果を出しつつある。しかし暗い天体、特にSSCが目指す大きく広がった天体のスペクトル解析を行うにはまだ十分な統計が得られていない。今後もMAXI/SSCは新しい発見を求めて観測を続ける予定である。

参考文献

- 1) M. Matsuoka, K. Kawasaki, S. Ueno, H. Tomida, M. Kohama, M. Suzuki, Y. Adachi, M. Ishikawa, T. Mihara, M. Sugizaki, N. Isobe, Y. Nakagawa, H. Tsunemi, E. Miyata, N. Kawai, J. Kataoka, M. Morii, A. Yoshida, H. Negoro, M. Nakajima, Y. Ueda, H. Chujo, K. Yamaoka, O. Yamazaki, S. Nakahira, T. You, R. Ishiwata, S. Miyoshi, S. Eguchi, K. Hiroi, H. Katayama, K. Ebisawa, *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **61** (2009) 999.
- 2) B. E. Burke, R. W. White, D. C. Harrison, M. W. Bautz, J. P. Doty, G. R. Ricker, P. J. Daniels, *IEEE Trans.*, **ED-38** (1991) 1069.
- 3) H. Tsunemi, H. Tomida, H. Katayama, M. Kimura, A. Daikyuji, K. Miyaguchi, K. Maeda, and the MAXI team, *Publ. Astron. Soc. Jpn.*, **62** (2010) 1371.
- 4) T. Dotani, H. Inoue, K. Mistuda, F. Nagase, H. Negoro, Y. Ueda, K. Makishima, A. Kubota, K. Ebisawa, Y. Tanaka, *Astrophys. J.*, **485** (1997) L87.

(2010年12月20日受理)