

# フォーメーションフライトを使った硬 X 線広天走査観測衛星

常深 博\*, 小型衛星 FFAST ワーキンググループ

## Formation Flight All Sky Telescope $\Rightarrow$ FFAST

By

Hiroshi TSUNEMI\*, FFAST working group

**Abstract** : 二機の小型衛星を使い、硬 X 線領域で広い天空を観測する走査型 X 線観測衛星を提案する。一機はスーパーミラー望遠鏡を搭載した望遠鏡衛星であり、もう一方は SDCCD を搭載した検出器衛星で、80keV までのエネルギー範囲で観測する。10keV を超える領域での望遠鏡を使った走査型観測はいまだになされておらず、世界で初めての精密な観測を実行する。二衛星は20m  $\pm$  10cm の距離に制御し、ほぼ同じケプラー軌道を周回する。望遠鏡衛星はその光軸を検出器衛星上に来るように姿勢制御し、検出器衛星は大体望遠鏡衛星を向いていればよい。観測方向はケプラー軌道の接線方向に限られるが、軌道の才差運動により、かなり広い天空を走査できる。

**Key words** : 硬 X 線観測, 編隊飛行, スーパーミラー, SDCCD

### 1. はじめに

宇宙の始まりはビッグバンで、最初は超高温でほとんど一様なプラズマであった。これは2.7K の宇宙一様背景放射の観測から確認されている。その後の宇宙の発展は一様な状態からの離脱であり、その結果として、一様からはかけ離れた現在の宇宙が出現している。例えば密度で言えば、中性子星のような原子核密度からボイドと呼ばれる領域まで、40桁を越える非一様性がある。温度は、宇宙背景放射からブラックホールなど周辺まで8桁以上も違いがある。この温度とは熱平衡の結果であり、一様性の賜物と言える。ところが、熱平衡を離れて、粒子のエネルギーと言う観点で見ると、 $10^{21}$ eV にも達するような高エネルギー宇宙線の観測結果から考えると、25桁もの広がりがある。このように、間違いなく宇宙では一様からの乖離が進んでいる。

X 線天文学も熱放射する各種天体やプラズマだけでなく、非熱放射する天体が多く観測されるようになった。熱放射では10keV 以下（低エネルギー）の領域にその主要な放射を出すのが、非熱放射となると、スペクトルが熱スペクトルからずれるために10keV 以上（高エネルギー）の領域にエネルギーのべき関数として延びている。X 線天体の分布は銀河系内からいまや宇宙の果てに及び、それらの詳細な観測的研究も進んでいる。更に、X 線領域における宇宙背景放射 (CXB) のなぞも次第に明らかになって来た。特に X 線反射鏡の導入で、感度が上がり、低エネルギー領域では、CXB の75%は AGN など点源であることが確かめられるまでになった (Mushotzky, et al. 2000)。従って、低エネルギー領域では概ねその描像がはっきりして来たと言える。

---

\* Graduate School of Science, Earth and Space Science, Osaka University

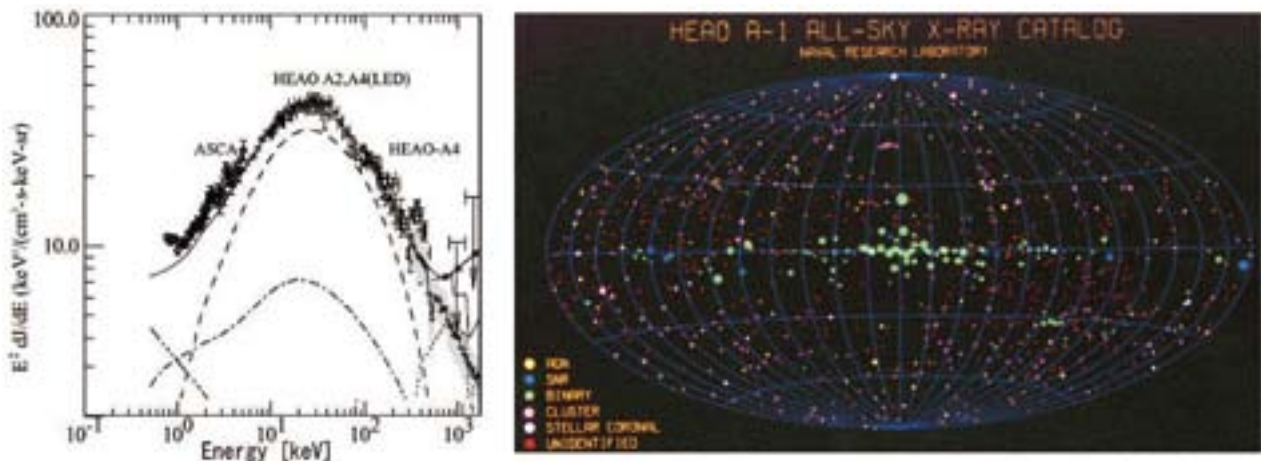


図1. (左) あすか (低エネルギー領域) と HEAO 衛星 (高エネルギー領域) によって得られた CXB のエネルギーフラックススペクトル. (右) HEAO による銀河座標で表示した全天 X 線源マップ

ところが、これまでの観測においても、幾つか特異な天体が検出されている。つまり、SN1006 (Koyama et al., 1995) に代表されるように、広がった天体で、低エネルギー領域においては熱スペクトルが優勢でも、高エネルギーの領域まで延びるべき成分を持つ天体、NGC4258 (Makishima, et al. 1994) を始めとして吸収が極めて大きく、高エネルギー領域に強い輻射を持っていそうな天体などである。CXB は X 線観測の当初から知られており、そのスペクトルは40keV あたりにピークを持つ事が分かって来た (図1左. Sreekumar, P., et al., 1998)。これは10keV 以下の帯域の背景放射を説明するのに使われた天体を仮定すると、その単純な外挿では説明がつかない。つまり、10keV 以上には、まだ知られない天体が隠れていることをうかがわせる。

比較的明るい天体に限られているが、低エネルギーから高エネルギーまでをカバーした全天観測の例 (HEAO-1) を図1右に示す。銀河面に明るい天体の多いことが判る。さらに、EXOSAT、てんまやぎんがの観測で銀河面には広がった熱輻射が低エネルギー成分を占めていることが判っている。あすかなど最近の観測によれば、さらに熱輻射成分以外で、高エネルギー領域に延びている成分の存在がわかっている。この成分が点源の集まりなのか、あるいは広がったものなのかは今後の研究課題である。

そこで、我々は10keV 以上の高エネルギー領域に感度の高い観測を世界で初めてほぼ全天にわたる広い領域を系統的に行いたい。高エネルギー領域の観測には、その X 線反射の制限で、どうしても望遠鏡と検出器との距離を大きくとる必要がある。そこで、それぞれを分離して二機の小型衛星とし、編隊飛行を利用して実現したい。

## 2. FFAST 計画

### 2.1. FFAST を取り巻く環境

X 線天文学の長期計画には、欧米の XEUS 計画があり、日本も参加する予定である。いろいろと変遷はあったものの、現状では地球-月のラグランジュ点 L2 に配置されることになっている。XEUS は望遠鏡衛星と検出器衛星とからなるもので、編隊飛行を基礎においている。望遠鏡の口径は4 m 以上にもなり、焦点距離は35m という巨大なものである。最初の計画では、この編隊飛行を低軌道地球周回衛星で実現しようとした。その時、ある天体をポインティングする必要があったために簡単な編隊飛行ではなく、編隊飛行維持には大量の燃料が必要であり現実的ではなかった。一方、L2 における編隊飛行では必要な燃料は少なくて済む。

日本の X 線天文学は、高エネルギー観測を目指した NeXT 衛星を計画している。低エネルギー範囲の従来の観測に比べ、高エネルギー領域の精度の高い観測をするためには、集光鏡の新しい技術、スーパーミラーの登場が必要であった。ところが、高エネルギー観測は、長い焦点距離が必要で、あすかの3.5m、すざくの4.5m から

大きく伸びて NeXT では12m を目指している。単一衛星で、これ以上長い焦点距離を達成するには技術的ハードルや姿勢制御に対する制限が強くなり過ぎると思われる。

焦点距離が長くなると、望遠鏡と検出器とを分離して二つの衛星にするという考えは自然である。ところが、天文で要求する観測方法（ポインティング観測）を実行する編隊飛行は、低軌道地球周回衛星では大変難しい。一方、今回提案している「小型衛星の編隊飛行による高エネルギー領域広天走査衛星（Formation Flight All Sky Telescope：FFAST）」（Tsunemi, 2005）は、高エネルギー領域の観測であり、二機の小型衛星が同一軌道を追いかける編隊飛行する。これは基本的には軌道制御を必要としないので、エネルギー的に容易な編隊飛行である。つまりポインティング観測は出来ないが、そこを逆手に取って、個々の衛星の姿勢制御だけで広天走査を行おうと言うものである。集光鏡を使った高エネルギー領域の広天走査は、世界的に見ても計画はなく、FFAST が最初である。理学的にははるかに続く NeXT や XEUS へ繋がり、工学的には編隊飛行を実現しやはり XEUS へ繋がる。このように、FFAST は極めてユニークな切り口を持っており、現在の技術的な開発路線にも乗っている計画である。

## 2.2. 科学目的と要求性能

X 線天文学のこれまでの進展は明確なステップを踏んできてきている。1970年のウフル衛星はスキャン衛星で広い天空を初めて走査した。その後、集光系を使わずガス比例計数管で全天スキャンした HEAO 衛星、集光系によるポインティング観測を目的としたアインシュタイン衛星、などが続く。それからは集光系を使った衛星が主になった。観測は既に知られていた X 線天体や、他波長で特異な天体が選ばれたが、やがて広い領域を走査して、統計学的な研究が進んだ。集光系を使った全天走査は0.1～2 keV の範囲で ROSAT 衛星によりなされた。ROSAT は、新しい天体の発見ばかりか、暗い天体までカバーすることにより CXB の解明にも寄与した。単に多

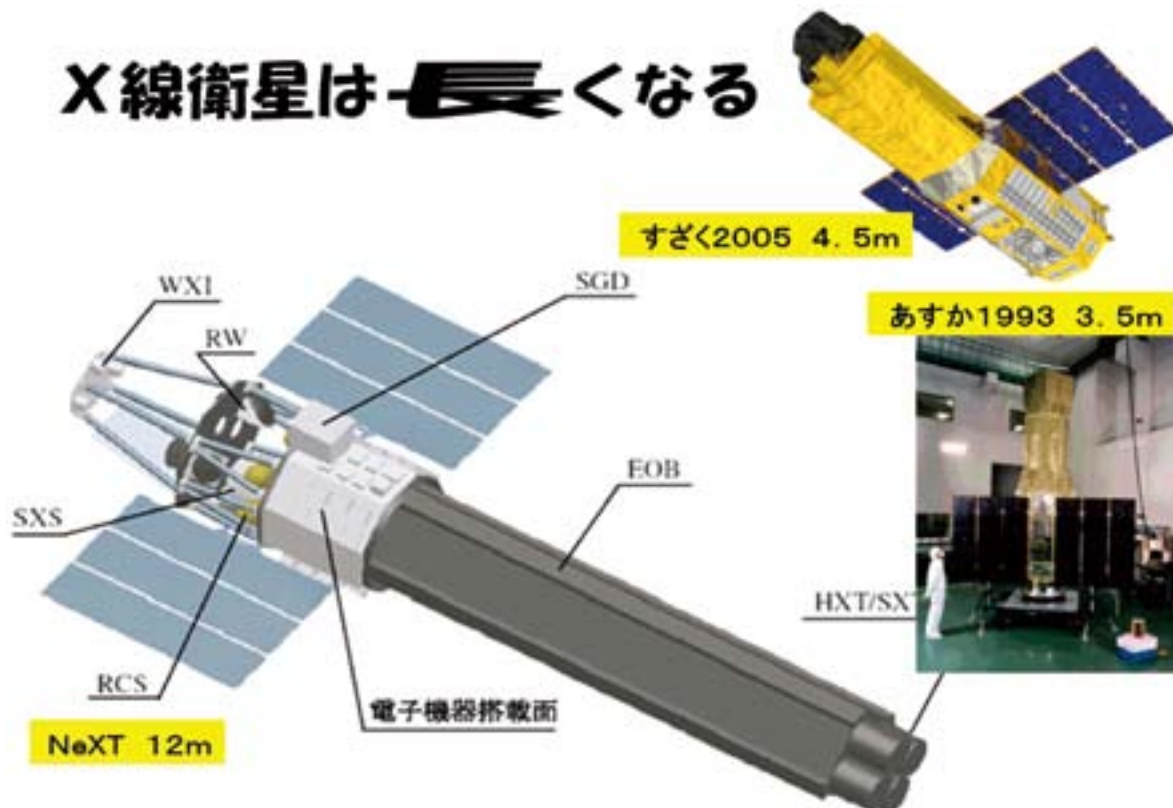


図2. 日本のX線衛星はあすか以来集光鏡を搭載し、次第に長くなってきた。NeXT衛星では、スーパーミラーの登場で、12mもの長さになり、80keVまでの観測が可能である。

数の点源を検出しただけでなく、その X 線エネルギー領域に強い輻射を出す広がった天体、新種の天体も多数見出された。2 keV を越えた 10 keV までの低エネルギー領域での観測は、あすかやチャンドラ、ニュートンで行われているが、観測領域は限られている。この 10 keV 以下のエネルギー領域での全天走査を目指して、集光系を用いた ABRIXAS 衛星が準備されたが、軌道に乗った直後の不具合で観測には至っていない。これと同等の衛星は e-ROSITA として計画が進んでいる。

10 keV を超えるエネルギー範囲での全天観測は 1970 年代の HEAO - 1, A2 の比例計数管を使ったものがあつた。有効なエネルギー範囲としては 60 keV までとなっている。その後、10 keV を超える領域での全天走査は 2008 年に国際宇宙ステーションに搭載される MAXI ミッションまで実行されない。MAXI も比例計数管であり、スラツコリメータのために、空間分解能は  $1^\circ$  程度、エネルギー範囲は 60 keV までである。

これまでの 10 keV を超える高エネルギー領域の観測には、集光鏡が使えなかった。そのため、広視野観測はコリメータで視野を絞るものか符号化マスクを使うものに限られている。代表的なものは HEAO 1 A-4 (13-180 keV) で、全天走査を行い (Levine, et al. 1984)、そのカタログには 17 mCrab までの完全なサンプル、約 70 個の天体を含んでいる。それに続く衛星では、100 ks の観測時間で 1 mCrab 以下の検出感度を持つ (例えば Ebisawa, et al. 2003) INTEGRAL などがある。しかし、INTEGRAL には全天走査の観測計画はない。一方、SWIFT 衛星 (Gehrels, et al. 2004) では、広い視野を持つ観測装置 BAT により 15~150 keV 領域で広い天空を走査し、高銀緯では 1 mCrab に達する感度を持っている。これは符号化マスクを使った二次元検出器であるために、多数の X 線源が同時に視野内に入る場合、例えば銀河面領域では数倍感度が落ちると見積もられている。

### 2.3. FFAST 衛星に対する要求性能

FFAST は、高エネルギー X 線領域での反射鏡による撮像が最大の特徴であり、コリメータや符号化マスクに比較してバックグラウンドを低くすることができるので、小型で高い感度を実現する。また、直接撮像しているため、銀河面や大小マゼラン雲等の天体の密集した領域や、超新星残骸の非熱的放射等の広がった放射源の場合に特に威力を発揮する。観測精度は望遠鏡の有効面積と観測時間で決まる。スーパーミラーでは有効視野が狭いので、当初は小型衛星枠一杯の望遠鏡衛星を作り、それに 9 台の望遠鏡を搭載する計画であった。しかし、実現性の観点から言えば、まずは 1 台の望遠鏡に絞ったほうが実現しやすいと判断している。この場合には、望遠鏡の口径を少し大きくするなど改良を加える。全天を一様に走査すると考え、視野が地没する可能性のないことを考慮し、X 線光子スペクトルが  $-1.5$  のべき関数型のスペクトルとすると、1 年間の走査により任意の天体は約 10 秒間観測され、10 mCrab の天体に対して 30 イベントを得る。高エネルギー X 線領域のカタログに基づいた  $\log N$ - $\log S$  関係 (Ebisawa, et al. 2003) によれば、この強度 (10 mCrab) を検出感度の目安として、これから見積もると 150 個以上の天体が検出できる。観測期間を二年間とすれば、さらに暗い天体までカバーできることになる。しかし、当初もくろんでいたレベルには到達しないので、観測方法を変更する必要がある。これについては、後で述べる。

高エネルギー領域の集光撮像には、いろいろな工夫があるものの、集光鏡表面での反射角度が  $0.3$  度以下と小さい。また、集光鏡と検出器との間隔が大体焦点距離となる。あすかの焦点距離は 3.6 m で 10 keV までカバーしたが、さらに高エネルギーを狙う NeXT では 12 m となる。このように、焦点距離は長いほうが有利である。その究極の形として、望遠鏡衛星と検出器衛星とを別々に作り、編隊飛行させるという考えは当然のことであり、焦点距離 35 m を目指す XEUS 計画において検討されている。我々の計画 FFAST は、二機の小型衛星の編隊飛行ではあるが、XEUS 計画で検討されたようなポインティングではなく、広天走査である。従って、衛星を軌道に保持するために必要なエネルギーで言えば、かなり緩い制限の下に実現できる計画である。



### 3. ミッション設計と搭載科学観測機器

#### 3.1. X線望遠鏡

高エネルギー領域の集光望遠鏡としては、名古屋大学で開発の進んでいるスーパーミラー（Okajima, et al., 2002）を採用し、衛星に搭載する。表1のようなスペックを基本とする。ここでは、比較のために FFAST で使用する望遠鏡と、現在提案されている次期 X 線観測衛星 NeXT で使用するものとを並べて記す。

表 1, FFAST-s と NeXT における高エネルギー X 線望遠鏡の比較

	直径	焦点距離	重量	搭載数	エネルギー範囲
FFAST-s	45cm	20m	93kg/台	1	10~80keV
NeXT	45cm	12m	66kg/台	2	0.5~80keV

FFAST 計画では、高エネルギー領域すなわち10keV を越える領域に焦点を当てるために、10keV で500cm<sup>2</sup>、20keV で400cm<sup>2</sup>、40keV で250cm<sup>2</sup>を確保する。このときの望遠鏡の視野は FWHM で10分角程度になる。

望遠鏡の結像性能は現状では1分角程度であるが、出来るだけの向上を目指す。気球実験 SUMIT のために作られている望遠鏡では、結像性能を表す Point Spread Function (PSF) には20秒角程度の細いシャープなコアのあることが知られている。PSF のシャープなコアは高い分解能と点源に対する高い感度を発揮できることに繋がる。焦点距離が20m の場合、1分角は6mm に相当する。望遠鏡の F 数は100であることから、ピントに相当する検出器上での像の広がりやを1mm と設定すれば、焦点深度として±100mm となる。つまり、この範囲が焦点面領域(焦点深度)となる。また、望遠鏡で決まる有効な撮像領域は10分角程度であるので、必要な焦点面検出器の大きさは60mm 四角となる。スーパーミラーを使った望遠鏡の視野は FWHM で10分角である。

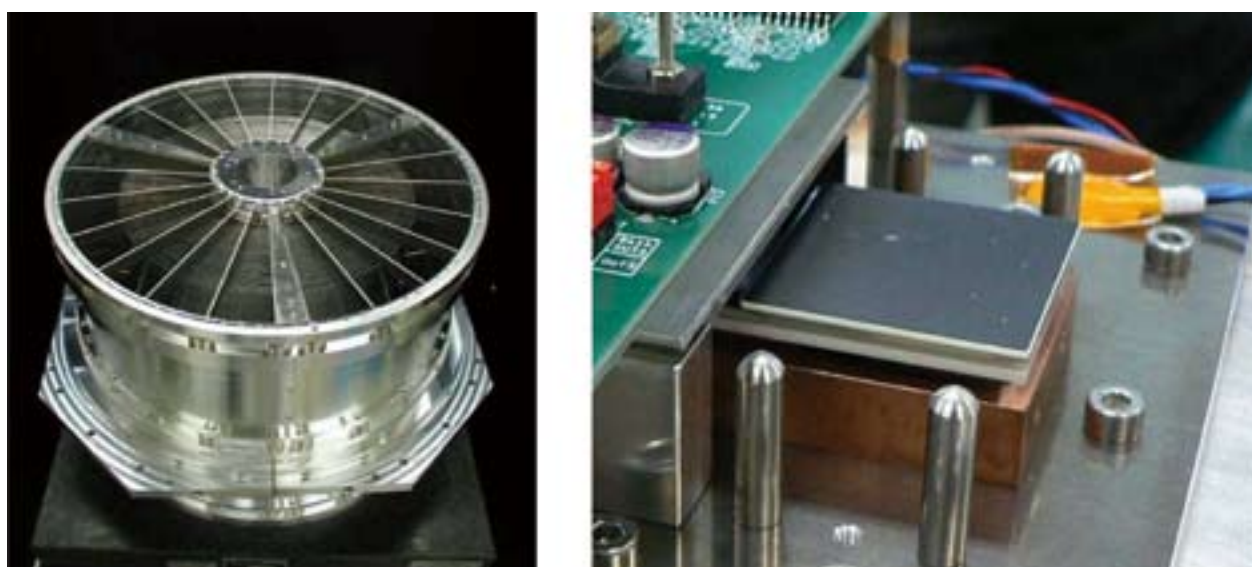


図3、(左) 気球実験 SUMIT に使用したスーパーミラー、直径40cm、焦点距離 8 m である。  
(右) SDCCD とその周辺。30mm 四角の受光部分だけが見えている。

#### 3.2. X線検出器

検出器衛星に搭載する検出器に求められる性能を検討する。FFAST の検出器衛星には10~80keV の範囲を精度よく捉える検出器を搭載する。当然この領域で検出効率の高いことが求められる。位置分解能としては、PSF のシャープなコアを十分にサンプルできる条件として、0.2mm 以下が必要である。既に述べたように検出器の有効な大きさとして、60mm 四角は欲しい。次に、FFAST は広い天空を走査観測するために、星は視野内のある方向へ移動する。その移動速度は速くても視野内を星像が3秒掛かって通り過ぎていく程度である。この条件で、

必要な位置分解能，時間分解能が決まる。

これまで大阪大学では X 線検出を目指して CCD を研究開発 (Tsunemi et al., 2005) して来た。あすか，Astro-E，すざくの CCD カメラから，MAXI 搭載の CCD カメラ，はやぶさ搭載の CCD を使った X 線スペクトロメータを開発した。CCD は珪素で作られているので，10keV を越える X 線に対しては，検出効率が急激に下がる。CCD の検出効率を決めるのは空乏層の厚さであるが，あすかで $35\mu\text{m}$ ，MAXI に使用する素子で $80\mu\text{m}$ ，NeXT 用に開発中のものは $200\mu\text{m}$  を越えるまでになっている。この場合でも検出効率は20keV において20%である。これは，珪素そのもので高エネルギー X 線を検出することは原理的に難しいことに起因する。これに対して，高エネルギー領域での高い検出効率を達成するものとして，大阪大学で開発が進んでいる SD-CCD (Miyata et al., 2003) がある。これは，シンチレータを直接 CCD 表面に密着させたものである。SD-CCD では低エネルギー X 線は CCD で直接検出し，高エネルギー X 線はシンチレータで発光した可視光を CCD で検出するようになっていて，つまり高エネルギー X 線の検出効率はシンチレータで決まる。高エネルギー側でのシンチレータの威力が判る。SD-CCD の入射位置決定精度は，CCD の位置分解能で決まるので，0.2mm を遥かに凌ぐことになる。エネルギー分解能は CCD ではなくシンチレータで決まる。

高エネルギー側の検出効率は，シンチレータで決まるが，更に優れたものを模索中である。現在使用しているシンチレータは厚さ $300\mu\text{m}$  の CsI で，その実績は確立している。スーパーミラーの集光能力と，SDCCD の検出効率を下図に示す。より高い検出効率を実現するには，厚いシンチレータを接着するか，原子番号の大きな原子を使ったシンチレータが必要である。いずれにせよ，位置分解能の劣化を招くことのない設計が必要である。

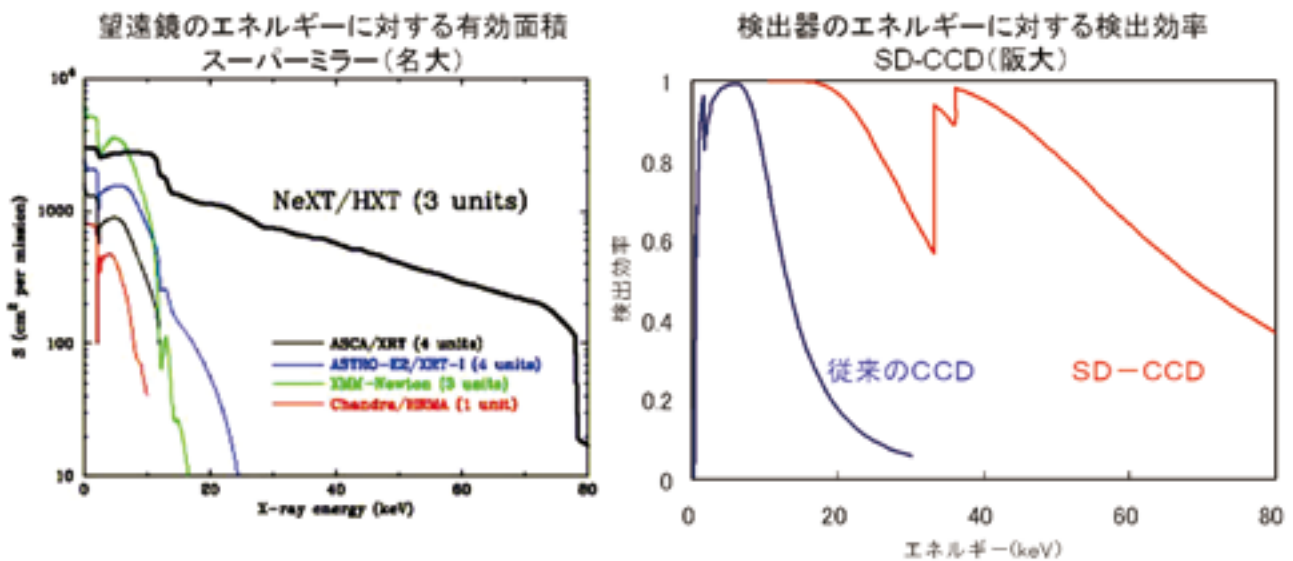


図4。(左) これまでの各種衛星搭載の X 線鏡とスーパーミラーの有効面積のエネルギー依存性を示した。NeXT 搭載のスーパーミラーは高エネルギーまで集光できる。(右) 従来までの CCD と SDCCD との検出効率のエネルギー依存性。

CCD による観測の欠点の一つは読み出し時間の掛かること，つまり時間分解能の低いことにある。ところが，FFAST では CCD の時間分解能でも十分であることが以下のように判る。既に述べたが，星像はせいぜい3秒掛かって検出器上を移動する。この像の移動に影響されないような露光時間はミリ秒程度となり，普通では実現できない。しかし，星像の移動方向を CCD の縦読み出し方向に一致するように設定すれば簡単に解決できる。こうすると，読み出し速度を調整すると，星像の移動を縦転送でキャンセルできる (いわゆるドリフトスキャン方式である)。ここで使用する読み出し方法としては，フルフレーム転送方式で十分であることが判る。これは，ポインティング衛星に必要なフレーム転送方式に比べると動作方法などが容易，有効面積を大きく出来るなどの特徴がある。以上のことから，われわれのデザインしている CCD 素子は十分に FFAST の焦点面検出器として採用で

きることがわかる。検出器衛星のピッチ，ヨー角精度は大して高くないが，ロール角精度要求は高い。これは，星像の流れる方向と CCD の縦読み出し方向とを一致させる必要で決まっている。

CCD を正常に動作させるためには，冷却する必要がある。動作温度としては  $-100^{\circ}\text{C}$  程度が望ましいが，あすか，Astro-E 2，すざく，MAXI-SSC など日本の衛星ではそこまでは実現していない。素子を出来るだけ冷却することは必要であるが，シンチレータを貼り付けた SDCCD の場合，シンチレータの特性から  $-60^{\circ}\text{C}$  程度が最適温度となっている。しかし，検出器衛星のロール角は星の移動方向にあわせなければいけないことから，冷却には，効率の高い機械式冷凍機を使う必要がある。これはすでにすざく衛星での使用実績などもあり，十分に実現可能であると判断している。

### 3.3. 共通計器部分

望遠鏡一台当たりに必要な CCD の有効面積は  $60\text{mm}$  四角であり，約 3 秒毎に一画面の読み出しとなる。画像データとしては，画素の大きさに依存するが，全てをダウンロードできる見込みはない。これは，これまでの CCD を搭載した X 線観測衛星と同じである。そこで，機上データ処理装置によって，意味のあるイベントだけを送ることになる。例えば荷電粒子イベントは，そのパターン識別から，X 線イベントとは区別できる。かりに，センサーの感度として，高エネルギー X 線 ( $10\text{keV}$  以上) だけに感じるとすれば，イベント数はかに星雲が視野に入ったとしても，700 イベント/画面 (3 秒) である。従って，500 イベント/秒処理できれば十分であろう。SD-CCD の場合，イベント情報として， $5 \times 5$  モード，もしくはさらに広い  $7 \times 7$  モードが必要になろう。 $7 \times 7$  モードの場合，49 画素の情報が必要で，各画素は 12 ビットからなる。大雑把に計算すると，600 ビット/イベントとなる。実際には，いつも望遠鏡に明るい点源が入ることはないから，この値はかなりオーバースペックと言える。望遠鏡の性能をさらに詰め，検出器の検出感度をどの程度広げるかなどを検討して詳細を決める。バックグラウンドや検出器の詳細な軌道上での性能評価には，荷電粒子情報も取り込む必要があるが，ダウンロードできるデータ量から決まってくる。

衛星の観測モードは従来の X 線観測衛星と同様であるから，一日分のデータをコンタクトパス中に全てダウンロードできれば良い。検出器に直接接続する FPGA や CPU ソフトによって，共通バス系に許されるデータ量にまで必要に応じて圧縮するが，今後検討して詰めていく必要がある。これらの必要な機能はモジュール化され，分散処理する。それらのモジュール間のデータ転送は衛星内データ転送のために標準化された高速シリアルリンク SpaceWire を用いる。

### 3.4. 編隊飛行の軌道と制御部

我々の必要とする二機の小型衛星は共に，軌道傾斜角  $30 \sim 40^{\circ}$ ，高度  $500\text{km}$  程度の軌道を回る。検出器衛星は望遠鏡衛星とは  $20\text{m} \pm 10\text{cm}$  の距離を維持していずれもケプラー軌道を周回する。これを実現する軌道の組み合わせは少なくとも二つは知られている。一つは，二機の衛星がともに同じ円軌道を  $20\text{m}$  離れて周回するもので，極めて判りやすい。二機の衛星を結ぶ望遠鏡の視野方向は，円軌道の接線方向であり，従って視野は円軌道に沿っての大円となる。軌道の才差運動により，この大円が移動することにより，広い天空を走査することになる。

もう一つは，レコード盤軌道などと呼ばれるものである。この場合には，一方の衛星は円軌道を周回し，もう一方の衛星は，遠地点で  $20\text{m}$  高く，近地点で  $20\text{m}$  低い楕円軌道を周回する。この二衛星が同じ軌道傾斜角だと，編隊飛行をしても二衛星の距離は一定にならず，後者は前者の衛星を中心にした楕円を描く。そこで，わずかに軌道傾斜角を変えてやることにより，後者は前者を中心にした円軌道を描くことが可能になる。詳細な計算は省略するが，この軌道の場合，比較的狭い天空内を一般的には八の字を描いて走査する。もちろん，これが才差運動で移動するので，やがて広い領域を走査することになる。

以上のような観測方法は，いずれの衛星もケプラー運動をするので，それからの摂動による軌道のずれを補正

する程度であるから、軌道修正の燃料は少なく済む。しかし、これ以外に新星の発見などの場合、走査観測ではなく、ポインティング観測をやる必要のある場合もある。これに備えて、ある程度の時間にわたりポインティング観測できる能力も欲しい。つまり、それに必要なスラスターであり、燃料である。このあたりについては、今後さらに検討を進める必要がある。

### 3.5. 各衛星の姿勢制御について

望遠鏡衛星は、三軸制御が必要で、表2に示すように指向精度はピッチ、ヨーが1分角である。望遠鏡を複数台搭載する場合にはロール角制御は1°が必要だが、一台の場合には不要となる。いずれの場合も、その決定精度はそれぞれの1/10程度は必要である。望遠鏡そのものは重いものの、そこからのデータはほとんどない。温度などの衛星のHK、姿勢情報である。姿勢制御装置は不可欠で、あすかを始めとする衛星で使用した三軸制御が必要である。望遠鏡から出てくるデータは温度などのHK程度である。望遠鏡の性能維持のために、ヒーターを使った温度制御が必要である可能性はある。望遠鏡は1台搭載する場合、その重量は100kg弱と推定している。

検出器衛星は、三軸制御が必要で、指向精度はピッチ、ヨーが1°、ロールは1分角、その決定精度はそれぞれの1/10程度は必要で、望遠鏡衛星とは対照的な要求となる。ロール角は視野内での星の動きをCCDの縦転送方向に一致させるために必要である。検出器そのものは重くはないが、冷却の必要があり、多量のデータが出る。また、検出器は3台のSD-CCDを搭載し、冷却系を含めて40kgである。

二機の衛星がその間隔を±10cmの精度で20mに保持するには、軌道修正のためのスラスターが必要である。どちらかの衛星にスラスターを搭載すればよい。望遠鏡衛星では反射面の表面が汚染されないこと、検出器衛星では冷却した検出器表面が汚染されないことが重要なので、どちらに搭載するか、あるいはコールドガスを含めてどのような燃料を使用するかは慎重に検討を進めたい。また、姿勢にはいろいろと制限があるために、太陽電池パドルをどうするか、放熱対策をどうするかなど検討課題がある。

表2, 望遠鏡が一台の場合の二衛星の姿勢制御の指向精度（決定精度はその1/10）と距離精度

	ピッチ角	ヨー角	ロール角	距離
望遠鏡衛星	1分角	1分角	-----	-----
検出器衛星	1°	1°	1分角	20m ± 10cm

## 4. まとめ

FFAST衛星で行う10–80keV領域の集光系を用いた広天走査観測はこれまでに行われていない新しい挑戦であり、先に述べたように、このエネルギー帯域から得られる情報は単に低エネルギー領域からの延長ではなく、非熱的現象や、極めて強い星間及び自己吸収のためにこれまで観測されなかった天体などが捉えられる。したがって、FFASTによって得られる高エネルギー全天（広域天空）マップは、宇宙物理学において高い科学的価値を有するとともに、予想外の新しい発見も期待できる。また、現在計画しているNeXT衛星とは相補的な観測となる。工学的には編隊飛行を実用化する最初のミッションで、将来の高精度編隊飛行技術へのステップとなる。何とか、近い将来に実現したいと願っている。

## 参考文献

- [1] Ebisawa, K., et al. “High-energy sources before INTEGRAL. INTEGRAL reference catalog”, *Astron. & Astrophy.*, 411,L59, (2003)
- [2] Gehrels, N., et al. “The Swift Gamma-Ray Burst Mission”, *Astrophys. J.*, 611, 1005, (2004)



- [3] Koyama, K., et al., "Evidence for Shock Acceleration of High-Energy Electrons in the Supernova Remnant SN : 1006", *Nature*, 378,255 (1995)
- [4] Levine, et al. "The HEAO 1 A-4 catalog of high-energy X-ray sources", *Astroph. J. Suppl.*, 54,581, (1984)
- [5] Makishima, K., et al. "Discovery of an obscured low luminosity active nucleus in the spiral galaxy NGC 4258", *Publ. Astron. Soc. Japan.*, 46, L77, (1994)
- [6] Miyata et al., "Novel Photon-Counting Detector for 0.1-100 keV X-Ray Imaging Possessing High Spatial Resolution", *Jpn. J. Appl. Phys.*, 42, L1201, (2003)
- [7] Mushotzky, R., et al., "Resolving the extragalactic hard X-ray background", *Nature*, 404,459, (2000)
- [8] Okajima, et al., "Characterization of the supermirror hard-x-ray telescope for the InFOCuS balloon experiment", *Applied Optics*, Vol.41, No.25, 5417 (2002)
- [9] Sreekumar, P., et al., "EGRET Observations of the Extragalactic Gamma-Ray Emission", *Astroph. J.*, 494,523, (1998)
- [10] Tsunemi, H., et al., "Formation Flight All Sky Telescope (FFAST)", *SPIE* 5900,184, (2005)
- [11] Tsunemi, H., et al., "Development of the X-ray CCD in Japan", *Nucl. Instr. & Meth. A*541,295, (2005)