

宇宙ステーションからの天体観測 「全天 X 線監視装置 ^{マキシ} MAXI」

上野 史郎

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 ISS 科学プロジェクト室

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1 筑波宇宙センター〉

e-mail: ueno.shiro@jaxa.jp

MAXI homepage: <http://www-maxi.tksj.jaxa.jp/>

長い設計・試作・試験の歳月を経て、2006年夏、全天 X 線監視装置 Monitor of All-sky X-ray Image (^{マキシ} MAXI) の製作が本格的に始動します。スペースシャトルまたは日本の H-IIB (エイチ・ツー・ビー) ロケットで、2008 年以降に「国際宇宙ステーション」へ打ち上げる予定です。シャトルかロケットかは今年 9 月に決まります。どちらの場合でも MAXI の取付場所である日本実験棟「きぼう」を先か一緒に打ち上げる必要があります。「きぼう」の打ち上げには最低 2 回のシャトル飛行が必要です。シャトルの飛行計画は予断を許さない状況にあります。現在の打ち上げスケジュールに沿って、2008 年春には MAXI の製作と試験を終える予定です。打ち上げ後の MAXI の観測期間は 2 年以上の予定です。この機会に全天 X 線監視装置 (MAXI) とその背景を紹介します。

1. 空は大きい

月をたくさん敷き詰めて空を完全に覆うには、いったい何個の月が必要でしょう？ この問いの「空」とは地球の裏側まで含んだ空全体、すなわち天球のことで、^{ぜんてん} 全天と呼びましょう。

面積（立体角）で比較すると、全天の大きさは月の 21 万倍です。丸い月の端を少しずつ重ね合わせて敷き詰めると、より多くの個数が必要です。

宇宙からの X 線は地球大気に吸収されて地上まで届きません。天文衛星を打ち上げて観測します。最新の X 線望遠鏡衛星は一つひとつの天体や空の狭い領域をじっくり観測するのに適しており、その視野は、ちょうど月の大きさ程度です。20 万回以上観測してやっと全天を見尽くせます。たいへんな仕事です。そこで実際の全天観測には専用の衛星や装置を使います。

私たちの全天 X 線監視装置 MAXI (図 1) は全

天の観測に特化した装置で、たった 90 分の間にほぼ全天を観測します。MAXI は理化学研究所と

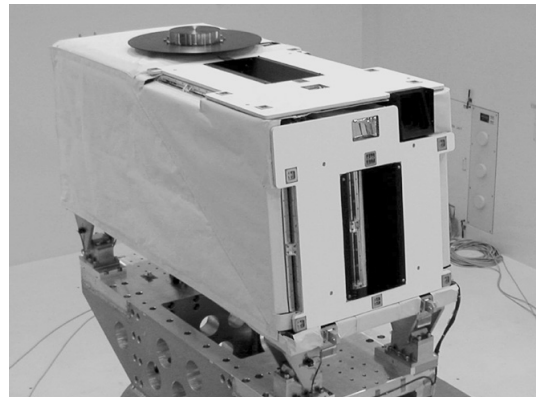


図 1 全天 X 線監視装置 (MAXI) の外観。重量 535 kg, 大きさ 180 cm×80 cm×100 cm。打ち上げ時の振動の影響や、過酷な宇宙での温度変化の影響を評価するために作った試験モデルの写真です。実際に打ち上げる装置の外観も、おおよそ同じになります。

大阪大学のグループが提案し、国際宇宙ステーションに搭載する第1期の装置として1997年4月に採択されました。

全天X線監視装置は固有名詞、全天X線モニターが総称です。「猫のタマ」に相当する言い方が、「全天X線モニターの全天X線監視装置」です。

2. MAXI は時間変化を追う

2.1 激動する宇宙

可視光しか見ることのできない人間の目には静かに映る宇宙も、X線を見る目、つまりX線天文衛星では全く違って見えます。X線を出す天体の多くが、時間とともにその明るさ(X線を出す量)を変化させます。天体の種類によっては、たった100秒で太陽の100億倍ものエネルギーがX線の明るさとして変化します。

X線で見た宇宙では、ブラックホールが突然明るさを何千倍にも増してその姿を現したり、中性子星が1秒よりずっと短い周期で明るさを変化させたり、生まれたての赤ちゃん星が太陽の何万倍もの爆発現象を起こしX線をまき散らしたりします。そのX線放射のエネルギー源は重力、核融

合、磁場などさまざまです。

X線で見た宇宙で特に目立つのは重力エネルギーです。例えば、X線を出す天体の代表である中性子星は、太陽より重いのに半径がたった10kmしかないため、星表面での重力が地球の2,000億倍もあります。中性子星の表面に立ちコップ一杯の水を頭の高さから落とすだけで、平均的家族が1年間に使用する電力を水力発電で賄えます¹⁾。このような莫大な重力エネルギーが、中性子星やブラックホールに落ち込んでいく物質(ガス)を数千万度にも熱し、熱くなったガスはX線を放射します。

このように激動する宇宙の姿を人類が知るのには、1962年にR. ロッシらがロケット観測によって太陽系外の天体から強力なX線放射を発見してからの話です(X線天文学の誕生)。一方、宇宙にある無数の天体は、人類によるX線の発見(W. C. レントゲン1895年)よりはるか昔、地球が誕生するより前からX線で輝き、激動するX線宇宙を構成しているのです。

2.2 MAXI の目的

MAXIの目的は「激動するX線宇宙を史上最高の感度で研究」することです。MAXIの狙う時



図2 全天X線監視装置 (MAXI) で観測できる範囲。MAXI以前の全天X線モニターでは、われわれの銀河系内にある天体が主な観測対象でした。感度の良い装置を搭載したMAXIの登場により、銀河系内にある天体をより精度良くモニターできるようになります。同時に、われわれの銀河系の外にある多くの超巨大ブラックホールが初めて全天モニターの観測対象になります。

間変化のタイムスケールは1時間から数年です。特に数日より長いスケールでの研究は過去あまりされておらず MAXI の活躍が期待されます。どれだけ暗い天体まで観測できるかを表す検出感度は1軌道(90分間)で8 mCrab, 1日かけると2 mCrab までよくなります。mCrab(ミリ・クラブ)はX線の強度の単位で、2, 3節に補足説明があります。MAXIは、これまでの全天X線モニターに比べ10倍以上良い感度をもちます。主に私たちの銀河系内に限られていた観測対象を、銀河系外天体にまで広げます(図2)。MAXIが監視する天体は1,000個を超えます。こうしてまとまった数(100個以上)の超巨大ブラックホールの時間変化の研究を初めて可能にします。

2.3 補足: カニ星雲のX線強度

カニ星雲(Crab Nebula)は地球から6,500光年離れた天体です。地球大気の外では、カニ星雲に向けた平面1 cm²には毎秒3個のX線がカニ星雲から飛来します。このX線強度を1Crabと呼び、その千分の1の強度が1 mCrabです。

3. なぜ時間変化を追うのか?

3.1 静止画だけからでは得られない情報がある

ブラックホール、中性子星、赤ちゃん星を、まるで見てきたような書き方を前節でしました。実際には最新のX線望遠鏡衛星を使っても、これらの天体は遠すぎて点にしか見えません。研究者はいったい何から天体の様子を読み取ったのでしょうか? 答のひとつは、X線強度の時間変化から読み取りました。

ブラックホール候補天体の発見の多くはX線強度の時間変化に基づきます。詳しく知りたい方は参考文献に挙げた3冊をご一読ください¹⁾³⁾。時間変化の観測は、静止画だけからでは得られない情報、例えば天体の大きさの情報を与えます。

地上では、わざと変化を起こして結果を観測(計測)することができます。実験がそうです。宇宙でもテンペル1彗星の場合、ディープリンパク

ト探査機で重さ370 kgの弾丸を撃ち込んで、吹き出た物質を望遠鏡で観測しました。

ところが太陽系外の天体は遠すぎて(また巨大すぎて)、人間が刺激を与えて変化を起こすことは不可能です。できることは、天体が勝手に時間変化するのを見逃さずに観測することです。

例えるなら、地上の実験は「こちらから質問をして相手の回答を聞く」ようなもので、天体観測は「相手が勝手に話すのを聞く」ようなものです。

時間変動するX線天体は、積極的な話したがかり屋です。ただし、いつ大きな声で話し始めるかわからない人(例: X線新星)や、話すテンポがゆっくりの人(例: 超巨大ブラックホール)が大勢います。そんなX線天体の声を聞きもらさないために全天の時間変化をつねに監視するMAXIが必要です。

MAXIで発見したX線強度の急激な変化は、0.1度より正確な位置情報と一緒に、世界中の希望者にインターネット配信します。それを受け価値あると判断した研究者は地上の望遠鏡や天文衛星をそちらに向け、詳細な観測を開始します。

3.2 明るいときが天体観測のチャンス

天気のよい日に外で撮った写真の画質が良いのと同じで、天体が明るいときほど質の良い観測データが得られます(ただしサイエンスの質とは必ずしも1対1に対応しません。別の話です)。

4. 全天サーベイと全天モニター

サーベイという言葉をご存知でしょうか? サーベイには「決めた領域を調査して地図を作る」という意味があり、モニターには「規則的に何かをチェックする」という意味があります。全天サーベイでは、全天をひととおり観測し尽くして天体の分布地図やカタログを作ります。一方、全天モニターでは、全天を繰り返し観測して変化をとらえることに重きを置きます。

約25年前にX線天文衛星HEAO-1(ヒエオ・ワン)が全天サーベイを行いX線天体のカタロ

グを作りました。それに掲載されている超巨大ブラックホール（活動銀河の中心）を最近の X 線望遠鏡衛星で観測すると、ほとんどの場合カタログに記載された明るさより暗くなっています。25 年前にたまたま明るかった超巨大ブラックホールだけがカタログに載っているとすれば説明がつかず、ということはカタログに載ってなくても、今現在、明るくなっている超巨大ブラックホールもあるはずで、MAXI ではそれらを見つけ毎週、毎月、毎年、刻々と変化するカタログを作ります。

5. 国際宇宙ステーション

MAXI を取り付ける日本実験棟「きぼう」（図 3）は国際宇宙ステーションの一部です。船内実験室では材料や生物などの実験を実施します。MAXI は船外実験プラットフォームに取り付けます。

宇宙ステーションは高度 350-400 km を飛びます。地球半径が 6,400 km なので地球表面すれすれです。飛行機のように腹面をつねに地球に向けた姿勢で、約 90 分かけて地球を 1 周します。それに伴い宇宙ステーションに固定した装置は 90 分に 1 回でんぐりがえし（自転）します。この自転を利用し全天をぐるっと見渡すのが MAXI です。

宇宙ステーションの自転は滑らかではなく「ぶらぶら」揺れます。さらに乗組員の運動や多くの

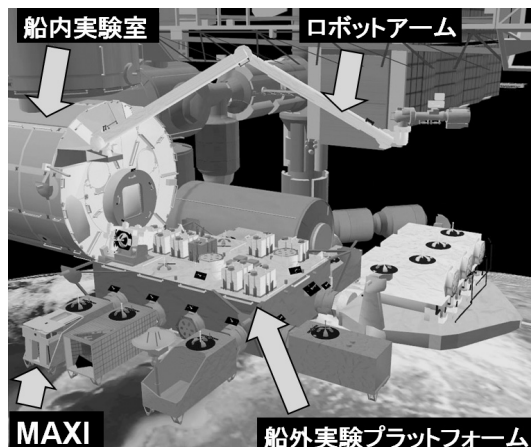


図 3 宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」。MAXI は日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに取り付けます。

装置が振動を発生します。空の一方方向を長時間にわたって見続ける必要のある X 線望遠鏡の設置に宇宙ステーションは不向きです。

MAXI は「きぼう」の標準装置サイズの制限内で、大きさ重さともに世界最高の全天 X 線モニターです。姿勢のふらつきや振動も許容できるため、宇宙ステーションに適した装置といえます。

6. MAXI の全天監視の方法

MAXI は宇宙ステーションの自転を利用し全天をぐるっと観測します。視野方向は二つです

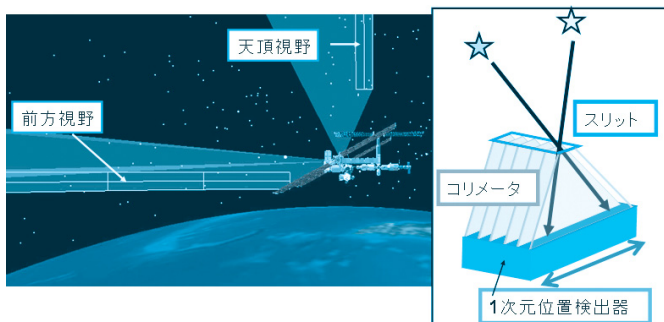


図 4 MAXI の視野と、画像取得の原理。左図：地球上空 350-400 km を飛行する国際宇宙ステーション（想像図）に MAXI の視野（実際には目に見えない）を重ねて表示しました。右図：スリットとコリメーターによる 1 次元撮像原理です（本文を参照してください）。

(図4左). それぞれの視野は厚み3度, 広がり160度の扇形です. この扇形視野の丸い縁の部分が90分に1回ほぼ全天を観測します.

扇形の視野は, 図4右のように, 検出器にコリメーター(金属の板の集まり)とスリット(細長い隙間)を組み合わせて作ります. 検出器だけを宇宙に向けるといろいろな天体からのX線を同時に受けることができますが, どのX線がどの天体(どの方向)からきたのか区別が付きません. そこでコリメーターを検出器の前に置いて空の一部を遮蔽して細長い領域だけ見るようにします. 深い井戸の底から空を見上げると空の一部しか見えないのと同じ原理です. コリメーターだけだと, まだ, 細長い空の領域のどこからX線がやってきたのか区別できません. そこでコリメーターの上にスリットを加え(図4右), 空の右方向からきたX線は検出器の左側へ, 空の左方向からきたX線は検出器の右側へいくようにします. 左右どの位置でX線が受かったか計測できる検出器(1次元位置検出器)を使えば, X線が飛んできた方向がわかります.

この方法で瞬時に得られる画像は, 写真をカッターで細い短冊に切り分けたときの一片に相当します. 宇宙ステーションが自転することによって, 短冊が貼り合わされ全天のX線画像が得られます.

7. MAXI 搭載の X 線を見る目

図5はMAXI内部の装置が見えるようにした絵です. 2種類のカメラで宇宙からやってくるX線を見ます. 大きなカメラが「X線比例計数管カメラ(GSC)」, 小さなカメラが「X線CCDカメラ(SSC)」です. 「X線を見る」とはどういうことをGSCを例に少し詳しく説明しましょう.

7.1 X線比例計数管カメラ(GSC)

X線比例計数管カメラ(GSC)を使うと, 宇宙を旅してきたX線を1個1個数え上げ, 1個1個のX線のエネルギーを計測することができます.

X線は, 電波, 赤外線, 可視光(人間の目に見える光), 紫外線の仲間です. よって周波数や波長で表すこともできますが, 普通は「エネルギー〇×のX線」という言い方をします. エネルギーの単位は日常よく使うカロリーやワット時ではなく, keV(キロ・エレクトロンボルト)です. 1keVのX線の周波数は 2.4×10^{17} ヘルツ(24の1億倍のそのまた1億倍ヘルツ)で, 波長は 12.4×10^{-8} cm(12.4cmの1億分の1)です.

X線比例計数管カメラ(GSC)を構成するのは, 図5左下写真の「一次元位置検知型比例計数管」計12台です. 名前の末尾は管ですが, 形は箱型です. これで2keVから30keVのエネルギーをもったX線を見ます. GSCは理化学研究所がガンマ線バースト衛星HETE2(ヘティー2)に搭載した装置を発展させたものです.

写真に写った障子の棧のような枠にベリリウム(Be)という金属の0.1ミリ厚の膜を張り, 内部にキセノン(Xe)ガスと二酸化炭素を99対1の割合で詰め1.4気圧にしています.

宇宙を旅してきたX線が1個, ベリリウム窓を透過し, 比例計数管の中のキセノン原子にぶつかったとします. するとX線はそこで消えてなくなり, 代わりにキセノン原子から電子が飛び出します(光電吸収). 飛び出た電子が周りのキセノン原子に衝突しさらに電子をたたき出すなどして, 最終的には, 最初に吸収されたX線のエネルギーにはほぼ比例した個数の電子(1次電子雲)がキセノン原子からたたき出されます. 比例計数管の内部には16本のプラス電極線(太さ0.01mm程度)と, 105本のマイナス電極線が張っており, 約1,500ボルトの電圧をかけています. 1次電子雲はプラス電極線に引き寄せられ移動し, 電子を失ったキセノン原子(正イオン)はマイナス電極線に移動します. プラス電極線近傍の強い電気力で, 電子は急激な加速とキセノン原子への衝突を繰り返し, さらに多くの電子をたたき出します. こうしてネズミ算式に増殖した電子(2次電子)

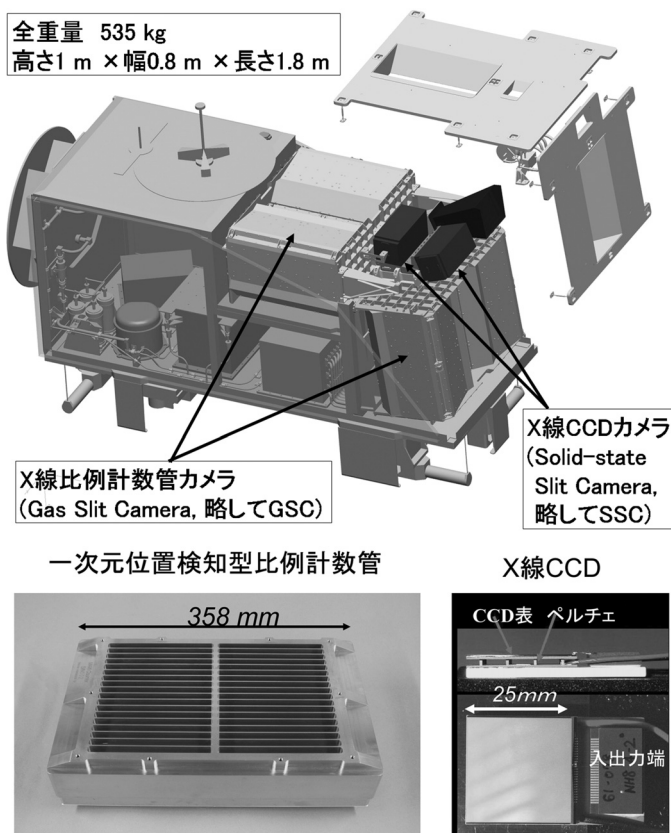


図5 全天 X 線監視装置 MAXI と搭載の X 線検出器. MAXI の目は 2 種類の X 線カメラ, X 線比例計数管カメラ (GSC) と X 線 CCD カメラ (SSC) です. GSC には左下の, 一次元位置検知型比例計数管を計 12 台, SSC には右下の X 線 CCD を 32 枚使っています.

がプラス電極に到達すると電気信号（電気パルス）になります。この電気信号を電子回路で読み取り、MAXI のコンピュータで処理したあと、観測データとして地上に伝送します。1 次電子の数と 2 次電子の数は比例します。これが「比例計数管」の名の由来です。結果として宇宙からやってきた X 線 1 個 1 個のエネルギーの大きさを、1 個 1 個の電気信号の大きさとして読み出すことができます。

以上が X 線を見るということです。私たちの目でも、目に入った光が視細胞に「吸収」され、それが視神経を伝わる「電気信号」として脳に伝えられます。よく似た仕組みです。

MAXI の比例計数管の場合、図 5 左下写真の左

右方向に電極線を張っていて、左右両端から電気信号を読み出します。左右の信号の大きさを比較して、1 個 1 個の X 線が左右方向どの位置で吸収されたか約 1 mm の精度で推定します。一方、写真の上下方向のどの位置で吸収されたかは決定できません。左右 1 方向のみで位置が決まるので「1 次元位置検知型比例計数管」と呼びます。

7.2 X 線 CCD カメラ (SSC)

X 線 CCD カメラ (SSC) では 0.5 keV 以上 10 keV 以下のエネルギーをもった X 線を見ます。SSC の検出器は図 5 右下写真の「X 線 CCD 素子」で計 32 枚搭載します。大阪大学が開発してきた国産の 1 インチ (25 mm) CCD で、1 枚当たりの画素数は 1,024 × 1,024 (つまり 100 万ピクセル)

です。

「**CCD**で**X線**を見る仕組み」の詳しい説明は省略します。**X線**が1個吸収されると、電子と正孔(比例計数管の正イオンに相当)の組が**X線**のエネルギーに比例した個数でき、それを電気信号として読み出します。**X線**を見ていないときでも熱エネルギーでどんどん電子と正孔の組ができます。宇宙からの**X線**のエネルギーを精度良く測るためには、熱エネルギーを小さくする、つまり**CCD**を十分に冷やす必要があります。**MAXI**では -60°C に冷やします。

CCDの特徴は、エネルギー計測精度が良いことです。 6 keV 程度のエネルギーをもつ**X線**を例にとると、比例計数管ではエネルギー計測精度が 0.9 keV なのに対し、**CCD**はかなり優れていて 0.14 keV です(このことを、**CCD**はエネルギー分解能が優れていると言います)。このエネルギー分解能を活かし、**X線 CCD**カメラ(**SSC**)は、全天のどの方向にどんな元素(酸素や鉄など)が分布しているかを調べ、元素分布地図を作ります。

7.3 見える**X線**のエネルギー範囲を決めるもの

エネルギーの低い**X線**は物質にとっても吸収されやすいです。**MAXI**の比例係数管カメラ(**GSC**)の 0.1 mm 厚のベリリウム窓の場合、エネルギーの高い 10 keV の**X線**だと100個に99個が通過できます。ところが 2 keV の**X線**は4個に1個、そして 1 keV の**X線**は10万個に1個しか通過できません。ベリリウム膜に吸収されキセノンガスに到達できなかった**X線**は電気信号として読み出せないの、見ることができなかったこととなります。これが比例計数管カメラ(**GSC**)が見ることのできる**X線**のエネルギーの下限 2 keV を決めます。**MAXI**では何十億光年もの彼方にある天体からやってきた**X線**も観測します。何十億年も旅してきて、あと 0.1 mm というところでベリリウム膜に吸収されてしまう**X線**のことを考えると、センチメンタルな気分にも

なります。裏をかえせば**X線**が何十億年も旅できるほど宇宙は透き通っています。

逆にエネルギーが高い**X線**は透過力が強すぎて、比例計数管カメラ(**GSC**)に詰めたガスに吸収されずに通過してしまう場合がほとんどです。やはり電気パルスとして読み出せません。これが比例計数管カメラ(**GSC**)で見ることのできる**X線**のエネルギーの上限 30 keV を決めます。

CCDの場合、比例係数管のガスの部分に相当するのは、**CCD**の空乏層と呼ばれる部分です。同様にして見えるエネルギー範囲が決まっています。

8. 筑波宇宙センター

これまで実用衛星の開発が専門であった筑波宇宙センターで天体観測装置の開発を行うのは**MAXI**が初めての試みです。鳥居研一氏(現在大阪大学助手)の努力で長い間放置されダンゴ虫の巣となっていたクリーンルームも立派な実験室に生まれ変わりました。まさにゼロからの出発でした。そこでは、**X線**を照射し検出器の特性取りや各種の試験を行っています。**MAXI**の開発には理化学研究所、大阪大学、東京工業大学、青山学院大学、日本大学のスタッフと学生が参加しています。

9. **MAXI**で**X線**天文の一般普及

MAXIの全天**X線**画像または動画(図6)を地球儀上に表示しインターネットで公開したいと考えています。

現実離れしているがゆえに人気のブラックホールを、誰にでも身近な空の上の実際の位置に表示してみせることで「ブラックホールって実在するんだ!」と感じさせたいと思っています。東京お台場の日本科学未来館に、巨大な球形カラーディスプレイ**Geo-Cosmos**(ジオ・コスモス)があります。そこでも上映したいと密かに企てています。

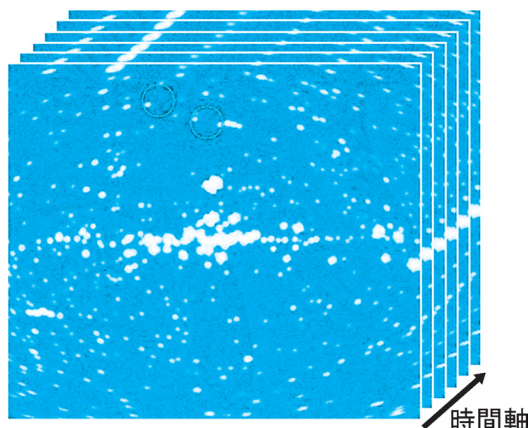


図6 MAXIで得られる全天X線画像（予想図）。白いのがブラックホールや中性子星などX線で光っている天体です。中心を横に走る明るい部分が天の川（私たちの銀河面）です。この図は2色ですが、1個1個のX線のエネルギー（色）と到着時間も記録するので、全天の「X線カラー動画」を作成できます。

のに時間がかかる（例えば静止衛星は1日で月は約1カ月）」というのが理解のヒントです。

全天X線画像と、宇宙で働くMAXIの姿が、宇宙ステーションから配信される日をお楽しみに！

参考文献

- 1) 松岡 勝, 1986, X線でみた宇宙（共立出版）
- 2) 小山勝二, 1992, X線で探る宇宙（培風館）
- 3) 北本俊二, 1998, X線でさぐるブラックホール（裳華房）

Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) on the International Space Station

Shiro UENO

ISS Science Project Office, Institute of Space and Astronautical Science, Japan Aerospace Exploration Agency, 2-1-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-8505, Japan

Abstract: The fabrication of Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) fully starts in the summer of 2006. MAXI is transported to the International Space Station (ISS) on a space shuttle or a Japanese H-IIB rocket in 2008 or later. Whichever launcher is selected, MAXI needs its platform, the Japan Experiment Module (JEM) Kibo, first on the ISS. To place the JEM Kibo in orbit, we need at least two shuttle flights. Although the schedule of shuttle flights is still in flux, we aim to finish the integration and testing of the MAXI flight hardware by the spring of 2008. MAXI will monitor the whole sky in X-rays for more than two years. In this article, I describe MAXI and its background for non-specialists.

10. 宇宙ステーションを見よう

肉眼でいつどの方向に見えるかの予報はページ <http://kibo.tksc.jaxa.jp/> で得られます。お勧めは、宇宙ステーションとスペースシャトルのランデブー飛行です。夜空を横切る明るい二つの点（ステーションとシャトル）を同時に観測できます。

シャトルが宇宙ステーションに追いつこうとすると、シャトルは進行方向（前方）にエンジンを噴いて“減速”します。逆に宇宙ステーションに追いついてもらいたいときは後方にガスを噴いて“加速”します。一見逆に感じます。「エンジンを進行方向に噴くと飛行高度が落ち地球に近づく」と「高度が高いほど地球の周りを1周する