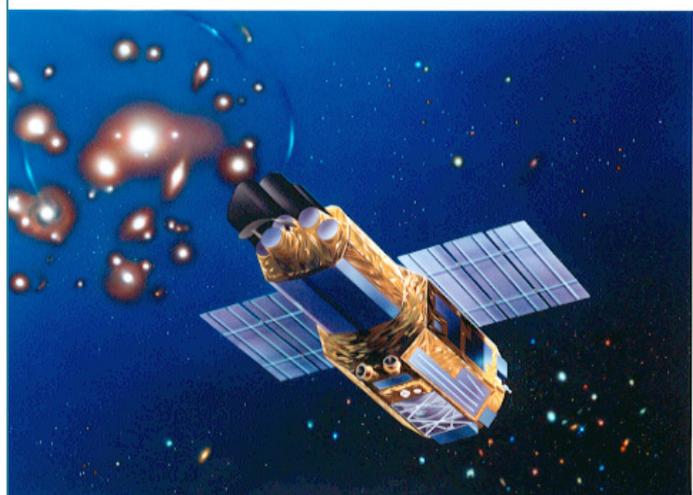


X線で探る灼熱の宇宙

—衛星観測データの解析実習で学ぶ宇宙—



制作：宇宙科学教育教材作成チーム

科学研究費基盤B（課題番号；19300270、代表者；長瀬文昭）による

2013-5-27 更新

X線で探る灼熱の宇宙

—衛星観測データの解析実習で学ぶ宇宙—

<解説の部目次>

1. はじめに
 2. X線天文学の歴史
 3. X線の特徴、X線検出器、X線観測衛星
 - 3.1 X線とは
 - 3.2 X線検出器
 - 3.3 X線観測衛星
 4. X線放射の基礎過程
 5. 本教材各章の概説
 - 5.1 X線で見える太陽—激しく活動する太陽表面
 - 5.2 原始星からのX線放射—赤ちゃん星の喚き
 - 5.3 X線で測る中性子星の半径と質量
 - 5.4 高速で回転する中性子星—パルサー
 - 5.5 見えない天体ブラックホールを見る
 - 5.6 星の終焉：超新星残骸
 - 5.7 X線で探る銀河中心—巨大ブラックホールの検証
 - 5.8 X線で見える銀河団—暗黒物質の存在を探る
 6. 本教材の利用にあたって
 7. むすび
-

1. はじめに

皆さんは宇宙に興味を持ち、宇宙の話の聞いたり、宇宙の本を読んだりして勉強していますね。そして知れば知るほどさらに謎が深まることを体験していませんか。

・私たちの地球の母ともいえるあの太陽はいつも同じ明るさで静かに光り続けています。これは太陽の表面温度が約六千度で、そこからの黒体放射だと言われます。しかし、X線で観測すると激しく活動している太陽を見つけます、なぜでしょう？

・冷たい暗黒星雲が凝縮して出来たばかりで、主系列星のように自分で光るためのエネルギーを生成できない若い原始星（赤ちゃん星）が、なぜエネルギーの高いX線を放射出来るのだろうか？

・宇宙には相対論的天体といわれる高密度星（白色矮星、中性子星、ブラックホール）があります。その代表選手が中性子星です。その中心密度は地上の物質の存在形態からは想像できない大きさです。そのような天体が本当にあるのでしょうか？

・その中性子星の多くは非常に高速で自転しているといわれます。中には1秒間に数十回転もするものもあります。岩石でできた地球の自転（地球の1日）は24時間です。太陽より重い星（ガス球）がそんなに早く回転できるのでしょうか？

・さらに奇妙な天体、ブラックホールの存在が一般相対性理論の帰結として予言されました。そしてそれが実際に宇宙に存在することが検証されました。膨大な質量が極小の宇宙に凝縮され、光（電磁波）さえそこから脱出できないこの天体をどうしたら見つけることができるのでしょうか？

・宇宙開闢後物質とエネルギーが分離した際には物質は水素原子ばかりであったと言われます。炭素、酸素、ケイ素、鉄といった重元素は大質量星の進化とともに形成されたと言われます。その痕跡は超新星爆発の残骸の中に見つかるのでしょうか？

・わが天の川銀河の中心近傍の銀河面は高温のプラズマでおおわれています。その銀河系中心には質量が太陽の300万倍もある巨大ブラックホールが存在することが現在では明らかになってきました。その影響はX線放射にも表れるのでしょうか？

・星は宇宙に一様に分布するのではなく集中して銀河を形成し、銀河自身も宇宙に一様に分布せず、数100個の銀河が集まって銀河団を形成します。この銀河団の周りを数1,000万度の高温プラズマが取り巻いています。なぜでしょう？

宇宙の構造や進化のことを勉強し始めた人はすぐにこのような疑問に突き当たるでしょう。本教材では人工衛星に搭載されたX線検出装置やX線望遠鏡で観測されたデータを用いて、用意された解析ソフトを利用して皆さん自身で解析実習を行い、その結果を考察することで皆さん自身でこれらの疑問を解いていただきます。

2. X線天文学の歴史

人類は太古の昔より夜空を見上げ、神秘的な星空に魅了されたことでしょう。ギリシャ時代の哲学者、天文学者たちは天空にちりばめられた星々を眺め、恒星の間を不思議な運行をする惑星を見つけ宇宙の構造を考えました。しかしある方向からやってくる星を見つけるにはその方向か

らの十分な光が私たちのまなこに入らなければなりません。約 400 年前にガリレオ・ガリレイは画期的な工夫をしました。当時オランダで発明された望遠鏡を天体観測に利用することです。この工夫で人類は画期的に大きなまなこを手に入れ、より遠方の暗い星や銀河、広がった星雲なども観測できるようになりました。

それ以後、20 世紀半ばまでは可視光の天体望遠鏡を用いるのが遠方の宇宙・天体を観測する唯一の方法で、人類の遠方の宇宙を見る目は電磁波の中でもごく狭い可視光の領域に限られていました。しかし第 2 次世界大戦終戦とともに科学研究が本格的に進められるようになり、ロケット、人工衛星の技術が科学研究に利用できるようになった現在では宇宙科学研究は飛躍的に発展してきました。現在では光（可視光）に加え、電波、赤外線、X線が宇宙を総合的に理解するための重要な 4 分野となりました。この中で特に X線は地球大気を通過せず、X線で天体を観測するためには大気圏外に出る必要があり、ロケット、人工衛星の発達を待たなければなりません。現在ではこれら広い電磁波領域を駆使して観測を行うことで、冷たい宇宙から熱い宇宙まで、星の誕生から終焉まで、宇宙の構造と進化の全過程を理解できるようになりました。

ところで皆さんは地球外の天体から X線が最初に観測されたのはどの星からだと思いませんか。それはもちろん太陽からです。太陽は高温のコロナを持ちそこからは X線が放射されると理論的に予想されましたが、太陽コロナから出る X線は 1940 年代後半にロケットを使って検出されました。1970 年代にはアメリカの宇宙船スカイラブを使って太陽表面の X線写真が初めて撮影されました。日本はもともと太陽研究に関しては長い伝統がありましたが、1981 年には世界に先駆けて太陽の X線観測を目的とした衛星「ひのとり」が打ち上げられました。この衛星はすだれコリメータを用いて、太陽硬 X線フレアの 2 次元像を撮像するという画期的なものでした。その後 1991 年には「ようこう」衛星、2006 年には「ひので」衛星（2010 年現在稼働中）が打ち上げられ、日本の太陽物理研究は X線を用いて太陽表面の活動的な高エネルギー現象の解明においては世界の最先端で活躍しています。

太陽 X線の強度は太陽の活動状態によって大幅に変化しますが、X線で見えた太陽の明るさ（光度；その波長域で放射されるエネルギー）は可視光で見えた光度の数万分の 1 以下です。我々地球から見て太陽の次に近い恒星ケンタウルス座の α 星は 4.3 光年の彼方（つまり地球太陽間距離、1 AU の 27 万倍の彼方）にあります。この星が太陽と同程度の X線を出していても地球で観測できる明るさは距離の二乗に反比例することを考慮すると、到底この星からの X線を観測することは当時の技術では不可能と思われました。一方、米国マサチューセツ工科大学のロッシやジャッコーニらは 1962 年に太陽からの X線が月の表面に当たりそこで反射される X線を観測することを目的として X線検出装置を搭載したロケットを打ち上げました。ところが、彼らは太陽 X線の月での反射 X線は有為には観測できませんでしたが、ロケットの姿勢制御の途上で偶然途方もなく明るい X線源を視野に捉えました。幸運にもこれは銀河中心に程近く（銀経 0 度、銀緯 30 度の方向）、今でも全天で一番明るい X線源である、「さそり座 X-1」でした。この X線源「さそり座 X-1」は、最近の感度の高い X線望遠鏡にとっては明るすぎて検出器を傷める危険があるので直視できないほどです。当時 X線用の結像望遠鏡はまだ開発されていなかったため、日本の小田稔らはすだれコリメータという特殊な技術を用いて、気球観測によりこの X線天体の位置を高精度で決定しました。しかしその方向には可視光望遠鏡では暗く青白い際立った特徴のない星が見える

のみでした。つまりこの「さそり座 X-1」が放射するX線光度は太陽とは逆に可視光で見た光度の10万倍も大きいのです。以後このような星はX線星と呼ばれるようになりました。

この不思議なX線星の発見は世界の天体物理学者を沸き立たせました。これに刺激された実験家たちは気球やロケットを用いて第2、第3のX線天体の探査を開始し、白鳥座 X-1（最初のブラックホール天体候補）やおうし座のかに星雲（その中心には33ミリ秒という高速で自転する中性子星、つまりパルサーを含む）などからのX線放射を次々に発見しました。一方、理論家たちはこの予想もしなかった強いX線放射を可能とする天体について思索し、まもなくこれは中性子星やブラックホールを含む近接連星系（今ではこれをX線連星という）であると考えに至りました。ここに私たちは初めて、中性子星やブラックホールという、当時は理論的な可能性としてのみ議論されていた相対論的な高密度星を観測的に探査する手段を得たのです。こうしてX線天文学は幕を開けました。ジャッコーニらはこのX線源発見の数年前（1957年）に成功していた人工衛星に注目し、衛星搭載用X線観測器を製作し、これを人工衛星に搭載して全天のX線天体を探査することを計画しました。この計画は1970年12月のウフル（Uhuru）衛星の打ち上げとなって実現しました。そしてウフル衛星はその後数年にわたり全天を隈なく走査し、400個以上のX線源を観測し、初めての全天X線カタログを作成しました。ここにX線天文学が本格的な研究分野としてスタートしたのです。

ウフルの成果に刺激され1970年代は米国を中心に世界中でX線観測衛星の打ち上げ競争が展開されました。X線検出器の大型化や検出感度の向上が進みましたが、特筆すべきことは1978年にX線で天体画像を撮像できるX線反射集光型望遠鏡であるEinstein衛星が打ち上げられたことです。当初気球やロケットでX線天体の観測研究を続けていた日本が、人工衛星を用いた観測に参入したのは1979年に打ち上げられた「はくちょう」衛星以来です。その後「てんま」衛星（1983年）、「ぎんが」衛星（1987年）を経て、日本でも1993年には撮像型のX線望遠鏡を搭載した「あすか」衛星を打ち上げました。しかも「あすか」は焦点面にX線CCDを搭載することで、撮像と高分解能の分光（エネルギースペクトルの測定）を両立して観測できる画期的なものでした。このCCD検出器をX線望遠鏡の焦点に配置して撮像を行う手法は以後の大型X線望遠鏡の基本システムになりました。1990年代の世界のX線天文学は1990年にドイツが打ち上げた軟X線撮像望遠鏡ROSAT衛星とこの「あすか」衛星によって支えられたといえます。2010年現在稼働中の主要X線望遠鏡システムは米国のChandra衛星、ヨーロッパのXMM-Newton衛星及び日本の「すざく」衛星です。

最初は高密度天体（白色矮星、中性子星、ブラックホール）を構成員とする近接連星（すなわちX線連星）を観測する手段としてスタートしたX線天文学は、観測装置の性能向上に伴って、

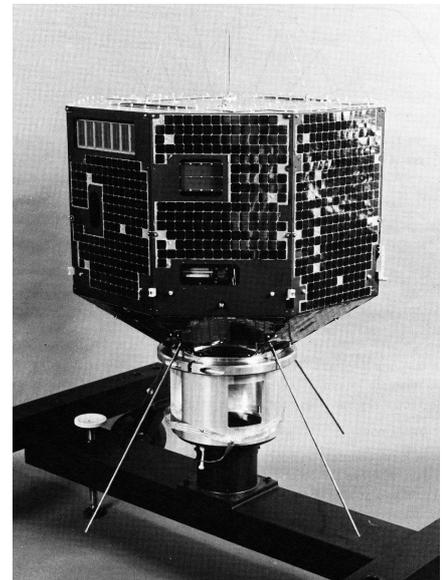


図1 日本初の天文衛星「はくちょう」の写真。上面と側面にX線を検出する比例計数管が取り付けられています。

X線で探る灼熱の宇宙

広く高温の天体プラズマや磁場中での高エネルギー荷電粒子の運動に係る天体现象全般の観測的研究を可能としました。大質量星が進化の終焉で爆発し広がった残骸は銀河系の中でX線連星とともに明るいX線源として観測されました。今では超新星に伴って高速で宇宙に飛び散った星の外縁物質が周辺のガスをかき集め、加熱しているありさまが CCD 搭載X線望遠鏡でX線画像として観測され、その CCD 検出器で観測された局所的なエネルギースペクトルの変化から超新星残骸の詳しい構造も解明されるようになりました。

検出感度の向上とともにより銀河系外の遠方の天体がX線で見えてきました。近傍の銀河からは銀河内に散らばる星たちのX線放射の集合として銀河全体がX線で輝く姿が見えたりしました。より遠方の電波銀河、クエーサー、セイファート銀河など活動的銀河といわれる天体からは膨大なエネルギーのX線がその中心部から集中的に放射されていることが発見され、その中心に巨大なブラックホールが存在することが明らかになりました。多数の銀河の集団である遠方の銀河団ではその中の銀河の分布には関係なく銀河団全体を数千万度の高温プラズマが囲んでいることが発見され、その解析から銀河団には暗黒物質が付随している（実際には密度むらのある暗黒物質に付随して銀河が形成され、そのまわりを高温プラズマが囲んでいると解釈すべきでしょう）ことが明らかになりました。Einstein 衛星や ROSAT 衛星では通常の星や銀河から放射されるX線も観測されるようになりました。「あすか」衛星は冷たくて電波（サブミリ波）や赤外線でしか観測できないとされていた、暗黒星雲中で誕生したばかりの若い原始星からX線が放射されることを発見しました。X線天文学が始まった当初宇宙のあらゆる方向から一様に飛来するX線背景放射が謎として話題になりました。今ではこれは当時は分解できなかった遠方の銀河からのX線放射の集積と判明しました。それとは別にわが銀河系ハローは高温のガスに包まれていること、特に銀河中心方向の銀河面や銀河バルジ領域にはより高温のプラズマで満たされていることなどがわかってきました。

3. X線の特徴、X線検出器、X線観測衛星

3.1 X線とは

まずX線とは何か復習しておきましょう。電子線や α 線と違って非常に透過力の強い放射線であるX線を発見したのはドイツの物理学者、ウィルヘルム・C・レントゲンです。彼は1895年にこのX線を発見を発表しましたが、その論文では未知の放射線という意味を込めて“X-ray ; X線”と呼びました。これがX線の名前の由来ですが、ドイツでは今でもこのX線のことをレントゲン線と呼びます。X線は電磁波の仲間です。そもそも電磁波は電磁気学の集大成ともいえるべきマクスウェルの方程式から導き出され、これが媒質のない真空中を光速で伝搬するなど電磁波の基本的な性

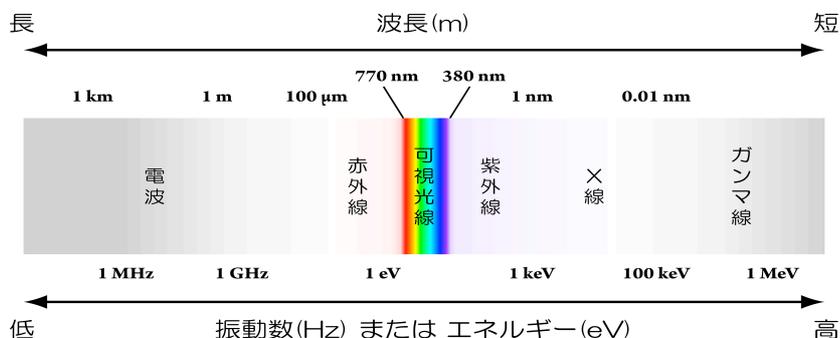


図 2 電磁波の種類とその波長、振動数(又はエネルギー)の概略を示す。

X線で探る灼熱の宇宙

質はその波動方程式の解として求められます。その電磁波を波長の長いほうから書けば、電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線となります。X線の典型的な波長は0.1-1 ナノメートル ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) です。エネルギー単位で表せば1-10 キロ電子ボルト (keV) となります (波長 λ_0 ナノメートルとエネルギー $E \text{ keV}$ の間には $\lambda_0 E = 1.24$ の関係がある)。また、電磁波には波長 $\lambda \text{ m}$ (メートル) と振動数 $\nu \text{ Hz}$ (ヘルツ) の間には $\lambda \nu = c$ (c は真空中の光速; $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$) の関係があります。一般的にはもう少しエネルギー範囲を拡大して0.1-100 keV をX線領域と定義します。ここでX線を波長で呼んだり、エネルギーで呼んだりするのは、現代の量子力学では電磁波は波動性と粒子性の両方の性質を兼ね備えると考えられているからです。そして、エネルギーの高い電磁波であるX線やガンマ線は粒子的な性質を強く表します。そこで私たちはX線を観測する際はそのX線光子 (photon) の数を計測する検出器を用います。

前に本格的なX線天文観測は人工衛星の科学利用が可能になるまで待たなければならなかったと書きましたが、なぜなのでしょう？ これはX線を観測するためには、地球大気吸収を避けてはるか上空の宇宙空間で行う必要があるから

です。地球大気には窒素、酸素、水蒸気などが含まれています。地球大気圏外からやってくる電磁波は波長によってこの厚い地球大気をすりぬけて地表に達するものと、大気中の元素との相互作用で地球大気によって吸収・散乱されるものがあります。一般に水素原子の電離ポテンシャル (13.6 eV

または 91 ナノメートル [nm]) より波長の短い紫外線、X線、ガンマ線は地球大気による吸収を強く受けます。そのため典型的な波長領域でX線を地球大気に妨害されることがなく観測するためには、

少なくとも地上 100 km 以上の上空に検出器または望遠鏡を持ち上げる必要があります。

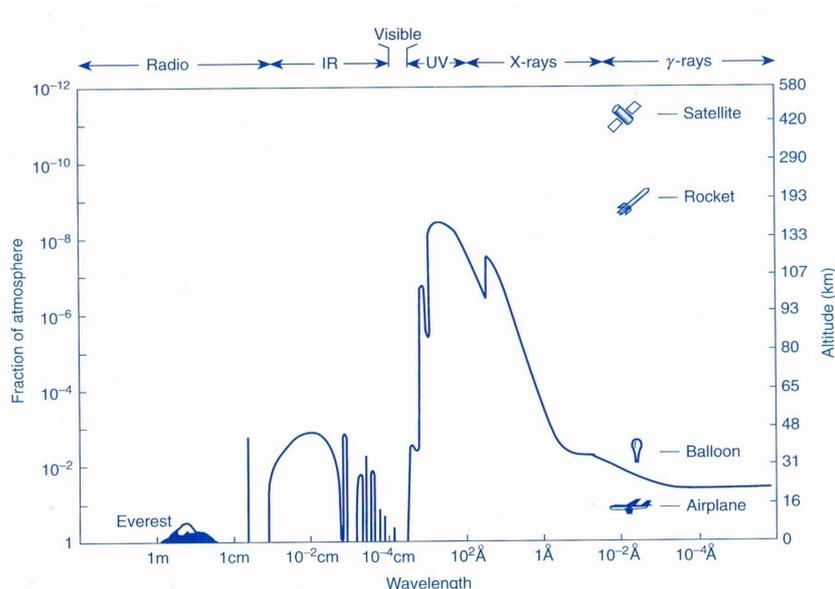


図 3 地球大気による電磁波の吸収。横軸下は波長 ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)、横軸上には電磁波の種類を示す。縦軸左は大気圧、縦軸右は地表からの高度。グラフは上空から入射した電磁波が 90% 吸収される高度を示す。電波や可視光が地表まで届くのに対して、紫外線やX線は地球大気に上空で吸収されることが分かる ("Exploring the X-ray Universe" P.A.Chaeles and F.D.Seward 1995 より転載)。

3.2 X線検出器

X線検出器には様々な種類がありますが、これらの多くは放射線計測や物理実験において使わ

X線で探る灼熱の宇宙

る荷電粒子の検出器を改良したものです。前に電磁波は波動性と粒子性の両方の性質をもつと述べましたが、X線はエネルギーの高い電磁波であり粒子性が卓越しております。そこでX線の検出においては1粒1粒のX線光子の入射方向とエネルギー（波長）を測定することになります。といっても上記の荷電粒子検出器はX線には感度がありませんから、X線入射窓付近や検出器内でX線光子を荷電粒子(主に電子)に変換する必要があります。その変換の物理過程は電離や光電効果です。ここでは様々なX線検出器のうち、初期のX線天文衛星で多用された比例計数管、半導体検出器、および最近X線望遠鏡の標準的な焦点面検出器として用いられている CCD カメラについてその検出原理を簡単に説明します。

比例計数管は、金属の円筒（角筒でもよい）を陰極とし、中心に張った直径 $50\mu\text{m}$ 程度のきわめて細い金属線を陽極とした電離箱です。内部にはアルゴン(Ar)またはゼノン(Xe)などの不活性ガスにメタン(CH₄)または炭酸ガス(CO₂)のような多原子分子（クエンチングガスという）を5～10%ほど混合したガスを封入します。円筒の外径は数ミリメートルから10 cm以上まで用途によって様々です。芯線には1000～2000 V程度の高電圧が印加されています。カウンター内の電場は芯線の中心からの距離に反比例しますから細い芯線の周りの電場は非常に大きくなります。比例計数管をX線検出器として用いるためにはX線入射窓にはX線を透過しやすい薄板を用います。一般的に原子番号の小さい元素ほどX線を良く透過します。代表的なX線入射窓の例はベリリウム(Be)の50-100 μm の薄板でこれは1 keV以上のX線を透過します。さらに $1\mu\text{m}$ 程度の導電性を持たせたプラスチックフィルムを使用すると0.1 keV以上の軟X線の観測が可能になります。

ガス中に入射したX線により電離された電子(これを1次電子という)は電界で加速され芯線の方へ向かいます。イオンは円筒（または角筒）に向かって移動しますが、イオンの移動速度は電子に比べて遅く、信号の形成にはほとんど寄与しません。芯線の近傍では電界が強いので、電子は原子と衝突するまでに、原子を電離できるほどのエネルギーを得ます。ちょうど質量は大きい半径の小さい中性子星やブラックホールの近傍では物質が大きな重力加速度を受けるのと同じです。衝突による電離電子も加速され、この電子がさらに電離を行い鼠算式に電子数が増加します(2次電子という)。これをガス増幅過程といいます。増殖した電子数は、増殖前の電子数との比例性を保持しているため、これを比例計数管といいます。電子は計数管ガス内の多原子分子との衝突で振動や回転のエネルギー準位を励起してエネルギーを失い、移動速度を早くするのに役立ちます(重原子との散乱では跳ね返される)。また多原子分子はガス増幅の際に発生する紫外線を吸収して、不安定な電子の増殖を抑制します。ガス増幅率は100～5000程度です。このガス増幅で発生した大量のイオンが陰極へ移動することによる誘導電荷として信号電流が発生します。これを電子回路に寄りその波高が入射X線のエネルギーに比例するパルス状信号として取り出します。エネルギー分解能はX線の場合、⁵⁵Fe 同位元素が放射する5.9 keVのX線で18%程度です。これは電離電子数とガス増幅の揺らぎによる広がりです。入射窓の種類とガスの圧力により、100 eVから60 keV以上のX線を観測する装置を製作することができます。「ぎんが」衛星では大型の角型の管内を細い陰極線で仕切って多層多重のセルを構成し、その中心に多数の陽極芯線張った複雑で大型の比例計数管が主力計測器となりました。

比例計数管に比べてエネルギー分解能の良いのが半導体検出器です。半導体は金属と絶縁体の

中間の性質を示す物質で、電気抵抗率は $10^4 \sim 10^7 \Omega \text{m}$ であり、ゲルマニウム(Ge) やシリコン(Si) がよく知られています。半導体の特徴は、電子が結晶原子と結合した状態である価電子帯と自由電子になっている伝導帯のエネルギー差 (バンドギャップという) が、絶縁体に比べてシリコンで 1.1 eV、ゲルマニウムで 0.7 eV と非常に小さいことです (金属はこれが重なっているため、常に自由電子が存在する)。従って、半導体の電離エネルギーは絶縁体の電離エネルギーに比べ、10 分の 1 以下ですので、同じエネルギー損失であれば、10 倍以上の電離電子が発生することになります。さらに、比例計数管などではイオンはほとんど信号の発生に寄与しないのに対し、半導体では、電子が自由電子となって抜けた孔は正電荷の電子と同じような振る舞いをします。これはイオンが動くのではなく、近くの電子が次々にこの孔を埋めるので、あたかも正の電荷が動くように見えるのです。これを正孔とよび、上記の現象を放射線によって電子-正孔対が生成されるといいます。正孔も電流として信号に寄与するので、電子数は倍加されることになります。これらのことにより、半導体カウンターのエネルギー分解能は著しく向上します。X線検出器としてはシリコンドリフト検出器 (SDD)、Li ドリフト Si 検出器、高純度の Si 検出器、および高純度の Ge 検出器などが製品化されています。これらの半導体X線検出器でその性能を十分に引き出すためには、その温度を電子冷却器などで -60°C 以下に冷却して使用する必要があり、検出器の受光面積に比して装置全体が大型になるのが欠点です。

最近の反射結像型のX線望遠鏡の焦点面検出器としてはX線検出用の CCD (Charge Coupled Device : 電荷結合素子)が標準的に使用されます。CCD 素子は光の撮像素子として量産され、最近流行のデジタルカメラ等に使用されている Si 半導体ですが、この空乏層を $20 \sim 80 \mu\text{m}$ と厚くしたものはX線に十分な感度があり、しかも高分解能の撮像と高分解能のスペクトル測定が同時にできるという極めて優れた性能を持っています。いわばデジタルカメラで撮影したカラー写真のX線版です。エネルギー分解能は ^{55}Fe 同位元素の放射する 5.9 keV のX線に対して 136 eV、ピクセル (画素) の大きさ $24 \mu\text{m}$ 、ピクセル数 420×420 、空乏層の厚さ $80 \mu\text{m}$ というのが標準的な X線 CCD カメラです。一方 X線 CCD カメラは -60°C 以下で使用する必要があります。また、CCD はフォトダイオードで発生した電荷をまず X 方向、次に Y 方向と順次転送して直列的に読み出すので、高速計数ができません。この 2 点が CCD カメラ欠点であり、装置を複雑にします。この X線 CCD カメラを衛星搭載用に改良し、初めて本格的に CCD カメラを斜入射型 X線反射結像鏡の焦点面検出器として利用したのが「あすか」衛星です。

3.3 X線観測衛星

前に述べたようにX線天体を観測するためには地球大気圏の外に出なければなりません。長期間安定に観測を続けるためにはX線観測装置を搭載した人工衛星を宇宙空間に打ち上げる必要があります。これまで各国でたくさんのX線天文衛星が打ち上げられましたが、大別してX線反射結像鏡を使わないで、コリメータを用いて特定の方向のX線天体の強度とスペクトルのみを観測する Non-mirror 型のX線観測衛星とX線天体の撮像も同時に行うX線結像望遠鏡を用いたX線天文台に分類できます。前者の代表にはウフル、OSO8、EXOSAT、「ぎんが」、RXTE があります。後者の代表には Einstein、ROSAT、「あすか」、Chandra、XMM-Newton があります。ここでは前者の例として「ぎんが」衛星、後者の例として「あすか」衛星を紹介します。

1987年2月5日に鹿児島宇宙観測所(内之浦)より打ち上げられた「ぎんが」衛星は「はくちょう」、「てんま」に続く日本の3代目のX線天文衛星でした。この衛星は縦・横・高さが1m×1m×1.5mの直方体の構造を持ち、その重量は420 kgでした。この「ぎんが」衛星には主検出器として大面積比例計数管(LAC)、副次的検出器として全天ガンマ線バースト検出器(GBD)が搭載されたが、LACは英国レスター大学と、GBDは「米国ロスアラモス大学との国際協力によって開発されました。このうち大面積比例計数管は1本の有効受光面積が500 cm²、8本の合計が4000 cm²と、当時のX線天文台

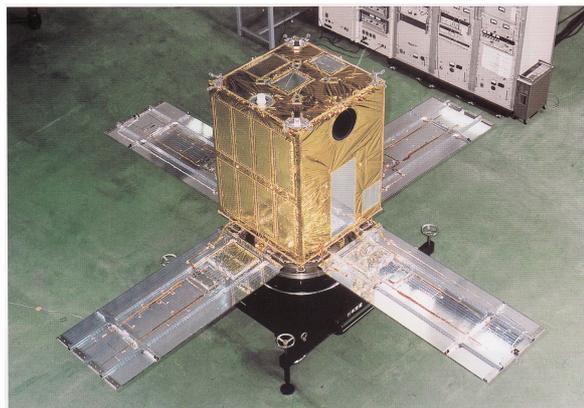


図4 打ち上げ前に太陽パドルを展開した状態で撮影された「ぎんが」衛星。左側面に大面積比例計数管が8台取り付けられた様子がわかる。

としては世界最大のものでした。この大面積比例計数管の開発には英国レスター大学のターナー(Martin Turner)博士の貢献が大きかった。このLACでは宇宙線などに起因する雑音(計数管のバックグラウンド)極力抑えて高い検出感度を得る工夫がなされていました。こうして「ぎんが」衛星は大面積、高感度のX線天文台として、観測対象を銀河系内のX線天体から一挙に遠方の活動的銀河核や銀河団にまで広げました。また「ぎんが」衛星は画像の解像度はないものの30 keVの高エネルギーまで広いエネルギー帯域でX線観測できるのが特徴でした。

「あすか」衛星は「ぎんが」その使命を終えた後1993年2月20日に打ち上げられました。この衛星は日本では始めて斜入射型のX線望遠鏡を採用した汎用X線天文台でありました。この衛星では宇宙からのX線の画像を撮ると同時に、その画像中の個々の領域(または点源)のエネルギースペクトルを高い精度で測定する事が可能でした。特に、EinsteinやROSATではできなかった高エネルギーのX線(2~10 keV)で宇宙X線源を撮像できる能力を実

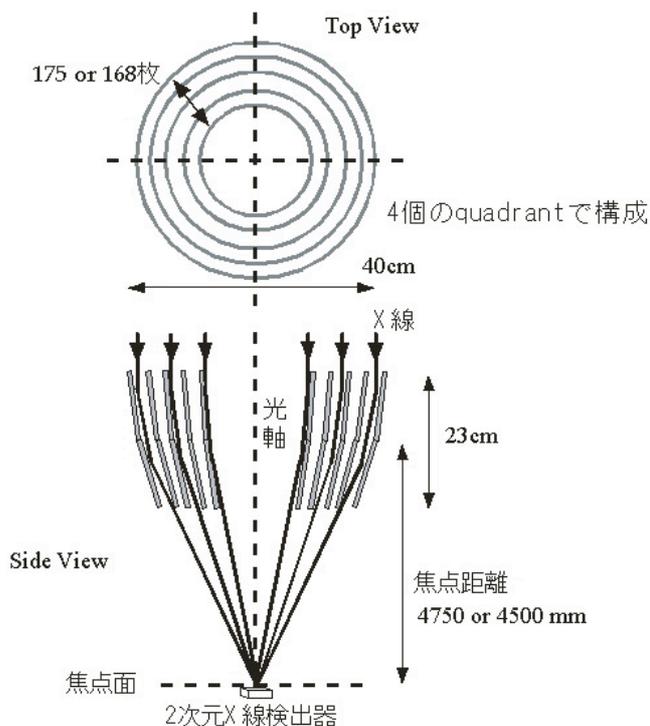


図5 「あすか」に搭載されたX線望遠鏡の構造模型を示す。X線望遠鏡では通常反射鏡として法物面と双曲面を組み合わせたウォルタータイプIといわれる光学系を用いるが、X線は鏡面に対する入射角が1°以下という極端な斜入射でないと全反射しない。そのため有効な受光面は細いリング状となり、あまり大きくできない。「あすか」では受光面を大きくするために図のように反射鏡をたくさん重ねて、それらが同一の焦点面に像を結ぶよう工夫されている。

現したのが「あすか」の特徴で、これにより宇宙の奥深くまで精度よく観測することが可能になり、従来得られなかった新しい成果を多く挙げました。「あすか」を特徴づけるのは、「多重薄膜鏡による、軽量でかつ大面積のX線望遠鏡」と「高いエネルギー分解能を持つ焦点面検出器」です。「あすか」は4台のX線望遠鏡(XRT)を用

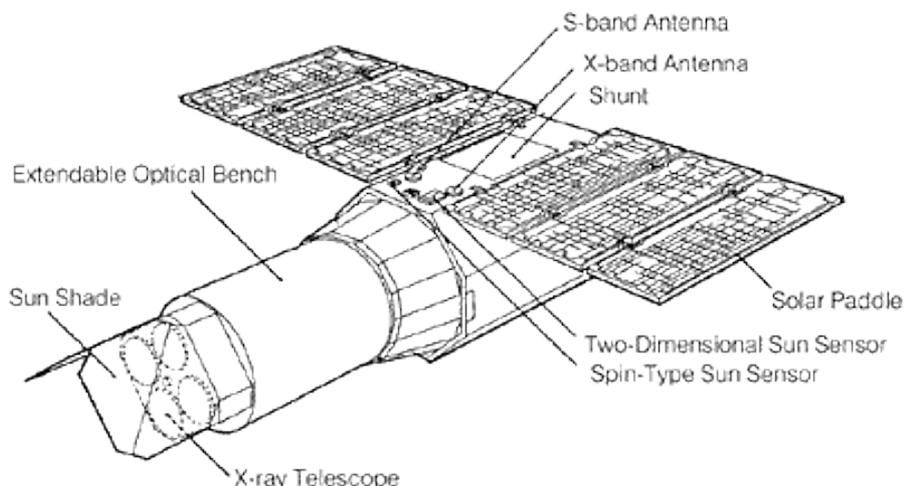


図 6 「あすか」衛星の構造モデル。左端に4台のX線望遠鏡(XRT)の入射口が見られる。CCD検出器は右端内部に収められている。望遠鏡を搭載した光学台は打ち上げ前には胴体部に収められており、衛星打ち上げ後の図のように伸展される。

い、その焦点面に2種類の異なるタイプの検出器、X線 CCD カメラ (SIS) と撮像型蛍光比例計数管 (GIS) が焦点面に配置されました。これら2つの検出器は、X線分光と撮像を相補的に行う撮像センサです。「あすか」の4つのX線望遠鏡のうち2つは SIS と組み合わせられ、他の2つは GIS と組み合わせられました。

「あすか」のX線望遠鏡 (XRT) は、0.5 から 12 キロ電子ボルトまでの広いエネルギー範囲のX線を効率よく集光する工夫がされていた。これにより「あすか」では多くの天体から始めて高エネルギー領域のX線像が得られることになった。また、「あすか」によって初めて画像を得ることができるようになった4 keV以上のX線は非常に透過力が強いのが特徴で、これまでは厚いガスに遮られて観測することができなかつた天体も、「あすか」を使えば精密に観測することが可能となった。高エネルギーのX線を全反射させるためには鏡面に対してきわめて斜め(1°以下)にX線を入射させなければならないといった技術的困難がX線反射集光鏡にはあるが、その困難を克服してかつ衛に星搭載可能な軽量を確保するのがこの「あすか」のX線望遠鏡の特徴である。「あすか」では非常に薄いアルミニウムの板を特別なめらかな面に成型し、金を精密にコーティングした反射鏡を沢山集積したものが使用された。この「多重薄板鏡」は、NASA/GSFCのPeter Serlemitsos博士のグループと名古屋大学グループとの共同開発で行われた。この望遠鏡は、画像解像度ではEinsteinやROSAT衛星に劣るものの、高エネルギーまで適用でき、また望遠鏡の大きさに比べ有効面積の割合が大きいことが特徴である。

「あすか」の焦点面検出器の1つであるX線 CCD カメラは、X線源の画像とエネルギーを同時に高分解能で撮像観測のできる優れた検出器です。このX線 CCD カメラを人工衛星に搭載したのは「あすか」が初めてでした。X線 CCD カメラを用いることで、SIS 検出器は5.9 keVのX線に対して半値幅(FWHM)が約2%という優れたエネルギー分解能(波長分解能)を実現しました。この「あすか」の成功によりX線 CCD カメラは以後のX線天文衛星では標準検出器として使用されるようになりました。もう一方の焦点面検出器である撮像型蛍光比例計数管(GIS)は、SIS

に比べて、広い視野を一度にカバーし、かつ高い時間分解能で観測をするために搭載されたものです。これは「てんま」衛星に搭載された蛍光比例計数管を位置検出型に改良したもので、銀河団などの広がった天体を観測するのに欠かせない大きな検出面積を持つのが特徴でした。また、この GIS 検出器はX線 CCD にはない高い時間分解能をもっており、そのパルス周期が数 10 ミリ秒程度のX線パルサーなど、X線天体に特有の短い時間観測には欠かせないものでした。このようにX線観測においてGISはSISと相補的な役割を果たしました。

4. X線放射の基礎過程

次に、X線の放射についてです。X線放射の基礎過程 (1) 熱的な放射と (2) 非熱的な放射に大別できます。(1) の熱的な放射というのは、電子やイオンのような荷電粒子が高温のために大きな平均速度の周りで個々の荷電粒子が様々異なった(ランダムな)速度を持って運動(これを熱運動と呼びます)をすることが原因でX線を放射する現象です。たとえば、熱運動している荷電粒子が他の粒子と衝突したりして加速度を受けて放射する熱制動放射があります。束縛電子のエネルギー準位は元素の種類により、あるいはイオン化状態により決まった飛び飛びの値を取りますが、熱運動している原子と電子が衝突した場合、そのエネルギー準位間で遷移をしたり、あるいは、電子が電離状態から束縛状態になったりしてX線を放射します。元素の種類やイオン化状態に従ってさまざまな輝線や吸収線等の構造が見られます。これらはその天体に含まれる元素組成やその物理状態を知る貴重な手がかりとなります。荷電粒子が磁場の中で、回転(ジャイロ)運動または螺旋運動を伴った熱運動している場合は、そのジャイロ運動で生じる加速度のために放射をします。これは熱的なシンクロトロン放射と呼ばれます。シンクロトロン放射は電波領域の電磁波も放射しますが、エネルギーが非常に大きく相対論的な速度で運動をしている電子が強い磁場の中でシンクロトロン放射を発するとそれはX線・ガンマ線領域での放射となります。

黒体放射も熱的な放射の代表です。黒体放射とは、はじめの放射はなんであろうと、熱運動している原子や電子等と何度も衝突して吸収や放射を繰り返して、平衡状態になった場合に実現する放射の形態です。放射光子の波長分布

(あるいはエネルギー分布)は熱運動している原子や電子の温度だけで決まります。太陽のような恒星は、内部で作られた放射が原子等と何度も衝突を繰り返し、表面から出てくる時には、ほ

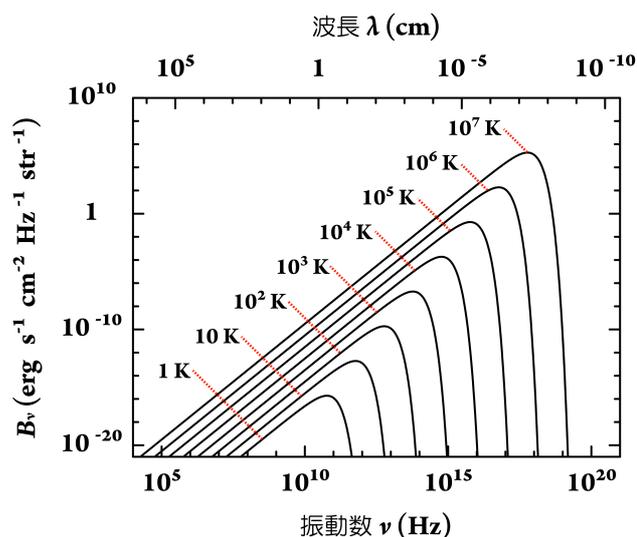


図7 黒体放射のスペクトルをしめす。横軸は波長と振動数両方示されており、それぞれに対応する表面輝度が左右の縦軸に示されている。この図から放射のピークは温度の上昇とともに増加し、そのピーク波長も電波領域からガンマ線領域に移動することが分かる。例えば表面温度が6000°Kの太陽からの黒体放射は可視光領域に放射のピークを持つ。

ば黒体放射となっています。太陽の場合表面温度は約六千度であり、その黒体放射のピークはちょうど可視光領域となります。放射のピークがX線領域に来るためにはその黒体放射の温度は1,000万度～1億度という超高温にならなければなりません。宇宙・天体でガスを加熱してX線を放射するほどの高温のガスを作る効率の良い過程は、そのガスを中性子星やブラックホールのような強い重力を持った天体のごく近傍に近づき、その高密度星の強い重力場で加速し、その加速された運動エネルギーを熱エネルギーに変換することです。高密度天体と普通の星との近接連星系で相手の星から出たガスが渦巻状になって高密度天体に引き込まれる際に、そのガスは円盤状になって中心の高密度天体に吸い込まれます。これが降着円盤と呼ばれますが、通常の星と高密度星が近接連星系を構成する場合には、相手の星から内部ラグランジ点を通して高密度星へ流入するガスは、連星系の回転角運動量のために必ず渦巻状の回転しながら高密度星の重力で引き込まれ、降着円盤が形成されます。降着円盤の中心近くでは重力加速を受けた物質の運動エネルギーが熱エネルギーに変換され、降着物質は高温のガスとなりX線を放射します。

一方、(2)の非熱的放射とは、ランダムな運動ではなく、何らかの方法で加速されて大きな運動エネルギーを持った荷電粒子がかかわる現象や、外からやってきた光子等が原因の放射です。たとえば熱運動していないけれど高速の荷電粒子が衝突等によって加速度を受けると制動放射を起こしX線を放射します。また、磁場中で回転（ジャイロ）運動をするとシンクロトロン放射を起こします。また、どこかで作られたX線が原子と衝突することで原子に束縛された電子を弾き飛ばして、その結果、蛍光X線が放射される場合があります。もともと低エネルギーの光子が非常にエネルギーの高い相対論的な電子と衝突して、その電子のエネルギーをもらって高エネルギーのX線・ガンマ線に生まれ変わる現象である逆コンプトン効果も非熱的放射のひとつです。

以上のごとく、宇宙・天体からのX線放射を観測することは非常に高温のプラズマ、極端に強い磁場や重力場、相対論的エネルギーを持つ電子など、地上の実験室では実現不可能な極限的な物理状態を探索する手段となるのです。そしてそのような状況にある場所は常に激しい変化を伴う活動的な宇宙であり、また極端に高温のプラズマ、高エネルギーの荷電粒子を含む灼熱の宇宙です。従って、X線による観測では電波や可視光・赤外線とは異なる「激しく活動する灼熱の宇宙」を見ることが出来るのです。これらX線放射のメカニズムについてはテキストの中で詳しく学びます。

5. 本教材各章の概説

5.1 X線で見える太陽—激しく活動する太陽表面

太陽は目で見える可視光線以外にも、X線・紫外線・赤外線・電波などの電磁波を放射しています。可視光線ではみなさんもよく知っている黒点を観測することができます。ところが、X線で太陽を観測すると、これまでは皆既日食の時にしか見ることができなかった太陽コロナを直接観測することができるようになりました。太陽表面は光球・彩層・コロナといった階層構造をしています



図 8 「ようこう」の軟 X 線望遠鏡で撮影されて太陽表面の X 線画像。激しく変化する複雑なループ状の構造が見える。これは黒点から噴き出したループ状の磁場に巻きついて加熱された高温のプラズマからの X 線放射です。

が、太陽コロナはそのもっとも外層に存在する約 100 万度という非常に高温のガス、つまり高温プラズマです。この太陽コロナを観測するために、日本は 1991 年に「ようこう」、2006 年に「ひので」といった太陽観測衛星を打ち上げてきました。「ようこう」は太陽活動の 11 年周期のほぼ 1 周期にあたる約 10 年にわたり太陽コロナの観測を続け、これを引き継いだ「ひので」は現在も観測を行っています。

これらの衛星観測によって、太陽コロナは非常にダイナミックで、変化に富んだ構造であることがわかってきました。X 線で観測される太陽コロナは細かいループ構造をしており、これを磁気ループと呼んでいます。太陽コロナの X 線で明るい領域を活動領域と呼んでおり、これは可視光で観測できる黒点に対応した構造になっています。従って、太陽コロナは太陽磁場と密接な関係があることがわかります。太陽は黒点数の増減から 11 年の活動周期があることがよく知られています。その太陽活動が活発な時期には、太陽フレアという爆発現象が太陽表面で頻繁に発生します。太陽 X 線画像の動画を見ていると、急に活動領域が明るくことがあります。これが太陽フレアで、太陽コロナ中の磁場のエネルギーが解放される現象だと言われています。

ここでは、「ようこう」に搭載されている軟 X 線望遠鏡の太陽 X 線画像を使って、太陽の自転周期、太陽活動周期、可視光など他の波長で見た太陽との違いを学習し、太陽コロナについて理解を深めます。

5.2 原始星からの X 線放射—赤ちゃん星の大きな産声

星は、暗黒星雲と呼ばれる漆黒の闇の中で生まれます。そこは何もないから暗いのではなく、零下 250 度の極寒の中で分子ガスや塵がぎっしりと詰まっている場所なのです。可視光線では暗い暗黒星雲も、電波で観測すれば明々と輝いています。それは、可視光を遮る極低温の塵自身が電波を放出するためです。このような冷たい物質の中で生まれる星の赤ちゃんはどんな姿で

何をしているのでしょうか？ 実は残念ながら、星の誕生の瞬間とその後しばらくは降り積もり、吹き荒れるガスで幾重にも遮られ、ほとんど見ることはできません。電波や赤外線で見えるのはその中心にある「新生児」でなく周辺のガス、いわば「ゆりかご」にすぎないのです。

赤ちゃん星(原始星)はその成長に伴ってクラスⅠ、クラスⅡ、クラスⅢ、クラスⅣと分類され、最初は電波で周辺ガスが観測され、次第に赤外線で中心の星の核に集まる降着ガスが観測され、クラスⅢ以降によりやく中心の原始星が可視光で見えるようになるといわれます。このような極低温の環境の中で星が誕生する舞台は、X線を放つような高エネルギー現象とは無縁に思えます。したがって、このような環境の中で育つ原始星やその周辺を、あのレントゲン診断に使われるX線で観測したら星の赤ちゃん達は見る事ができるのでしょうか？ とても見えないように思われます。

ところがX線天文衛星「あすか」はこのように生まれたばかりの赤ちゃん星(原始星)がX線を放射する様を見つけたのです。実際にこの星の誕生の現場をX線で見てみることにしましょう。

5.3 X線で測る中性子星の半径と質量

質量の大きな星は、最後に大爆発(超新星爆発)を起こしてその一生を閉じます。大爆発の時に、星を構成していた物質の一部は吹き飛ばされますが、一部は別の形の小さな天体として残される場合があります。それが、ブラックホールであったり、中性子星と呼ばれる天体であったりします。この章では中性子星を扱います。普通の星(恒星)は、熱により広がろうとする力と、自分自身の重力で縮もうとする力が釣り合い、球状の形態をした電離ガスとして安定に存在します。

ところが中性子星は普通の星とは異なり、主に中性子と呼ばれる素粒子が隙間なくぎっしり詰まってしまふことで、重力で縮もうとする力と釣り合っています。中性子星の質量は太陽の質量より大きいにもかかわらず半径は大変小さく 10 km 程度と理論的には推定されています。この章では、中性子星の質量(下限値)と半径を実際のX線観測データを使って、導き出してみましよう。その過程で、万有引力、光の圧力、黒体放射について学ぶことになります。そして、求め

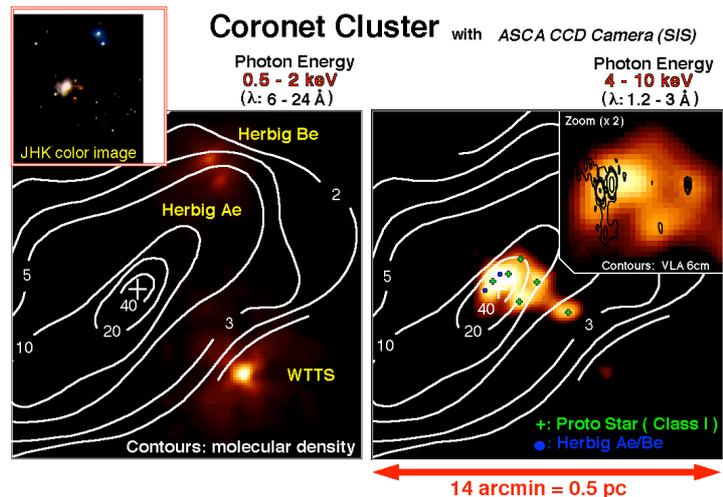


図 9 「あすか」で見た「みなみのかんむり座R星」付近の暗黒星雲の様子。この暗黒星雲の中心では星が生まれつつあります。左の軟X線(0.5-2 keV)では暗黒星雲の中心(図の中心の十字印付近)には何も見えないが、面白いことに右側の硬X線(4-10 keV)で撮った写真では、みごとに原始星の集団からのX線をとらえています(上野史郎他作成、原論文は、Koyama et al. 1996, PASJ, 48, 87)。

た半径や質量で、中性子星がどれくらい小さくてどれくらい質量が大きいのか、さらにこれらから導かれる中性子星の平均密度がいかに大きいか実感してみてください。

本章では太陽程度の小質量の恒星と中性子星が近接連星を構成している小質量X線連星が時々喚き声のように発生するX線バーストを使って中性子星の特性を暴きだします。

5.4 高速で回転する中性子星—パルサー

パルサーとは、ちょうど灯台のあかりのように、特定の方向に光を出しながら回転している天体です。私たちから見ると、パルサーは回転周期に従って点滅しているように見えます。その正体は前章でも扱った中性子星と呼ばれる、とても小さくて高密度の星です。半径は10 kmくらい、平均密度は、1立方cmあたり約10億トンにもなります。パルサーには電波でしか観測されない電波パルサー（これが一番多いのでこれを通常パルサーと呼びます）、X線でしか観測されないX線パルサーがありますが、中には電波、可視光、X線、ガンマ線と、広い範囲にわたってパルス状に電磁波を放出パルサー（カニパルサーなど）もあります。すなわちパルサーの点滅周期は中性子星の自転周期、つまりその中性子星の一日なのです。

ここではパルス状にX線を放射する天体のX線データを解析してその周期を見つけてみましょう。パルサーからの周期的な強度変化は、ちょうど波動や振動のように考えることができますが、波動や振動を物理的に扱うときには、「位相」という考え方が重要になってきます。高速で回転するパルサーを観測するとき、一周周期だけを見ても、その短い間に検出できるX線光子の数はわずかなので、パルサー

が点滅している様子ははっきりとはわかりません。しかし、パルサーを長時間観測し、X線光子の「位相」を合わせて何周期も重ね合わせることによって、パルサーが点滅する様子がはっきりと見えてくるのです。

ここではパルサーが点滅する様子実際のX線データを使って確認してみましょう。また、正確な周期がわかっていないパルサーについて、与えられたデータからどうすればそれを求めることができるか？どの程度の精度で周期を決めることができるのか、一緒に考えてみましょう。

5.5 見えない天体ブラックホールを見る

ブラックホールという名前は多くの人が知っていますが、この概念は1916年にカール・シュ

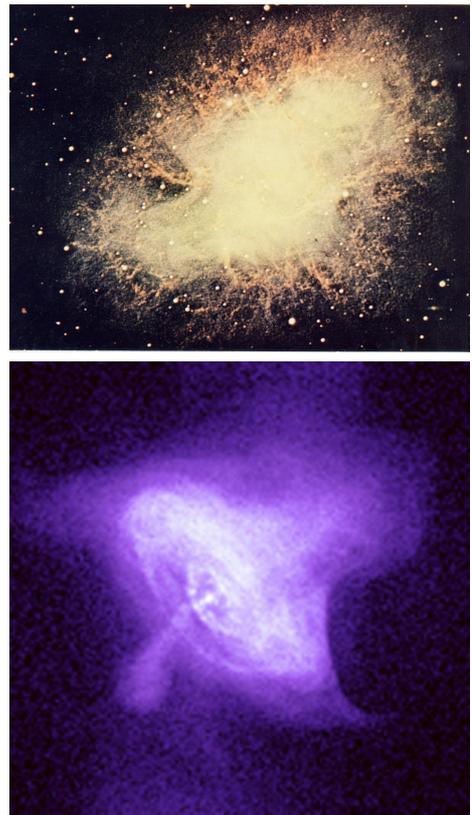


図10 上図は1054年の爆発した超新星の残骸「カニ星雲」の画像（パロマ天文台撮影）。下図はその中心に位置する中性子星、カニパルサーの周りを回転する高温プラズマのX線画像（チャンドラ衛星撮像）。この中性子星は33ミリ秒という高速で自転している。

バルツシルトが アインシュタインの一般相対性理論から重力場を記述する 最初の解を見つけたことに始まります。それは、ある質量をもつ「もの」の大きさをどんどん小さくしていき、「シュバルツシルト半径」と呼ばれる大きさ以下にすると、そこからは 光さえも脱出することができなくなる、というものでした。つまりブラックホールとは、強大な重力により物質はもとより、「X線を含めてどんな波長の光でさえも逃げ出せない」という特徴を持った天体なのです。ブラックホールが実際に宇宙に存在しても、光さえも脱出できないのですからこれを直接見ることはできないので、そこにブラックホールが存在することさえ認識できないはずで

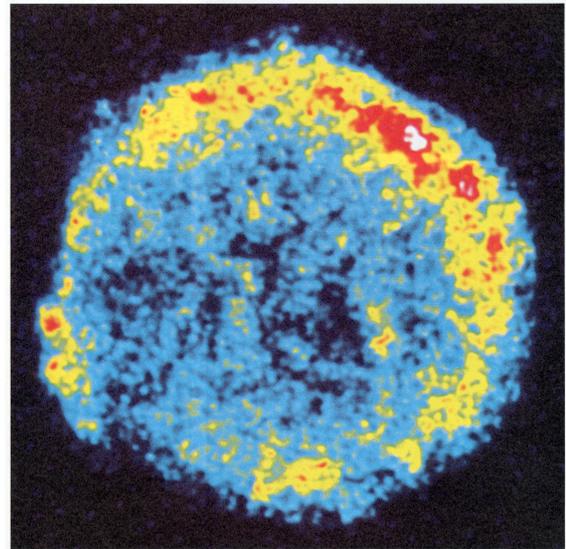
しかしブラックホールに物質が吸い込まれるとき、強い重力の影響で降着物質は高温になり、X線が放出されます。中性子星の近傍でも同じようにX線が放出されますが、ブラックホールの場合、「天体の表面」が存在しない、という点が大きく異なります。つまり、ブラックホール近傍からのX線は、物質がブラックホールに吸い込まれる直前に、その消えゆく終焉に私たちに届く断末魔の悲鳴といえるのです。こうしたX線天体を観測することで、吸い込まれる直前の物質が「ブラックホール特有の性質」を示すことがわかってきました。実際、X線観測からこの「ブラックホール特有の性質」を見いだすことで、天の川銀河の中だけでも、20個以上のブラックホールないしその候補天体が発見されています。

では、「ブラックホール特有の性質」とは一体どんなものなのでしょうか？実際にX線データを触って、見えないはずのブラックホールを一緒に解き明かしましょう。

5.6 星の終焉：超新星残骸

星には、私たちと同じように、「誕生」と「死」があります。星の寿命は様々で、数百万年から百億年程度だと言われています。我々の太陽は現在50億歳、あと50億年で死んでしまうのです。爆発はあまりに凄まじいので、数千光年離れた星の爆発でも地球から肉眼で見えることがあります。星が新しく現れたかのように見えるので、「新星」と呼ばれ、その爆発を「超新星爆発」と呼んでいます。後に残るのは、秒速数千キロで膨張し続ける数千万度のガス球です。これが、「超新星残骸」と言われている星の死骸です。爆発の膨張は数万年も続き、隣の星をのみこむくらいにふくらみます。まさに、この世の終わりの光景です。

速数千キロで膨張し続ける超新星残骸は周辺の星間ガスと衝突し衝撃波を形成します。その衝



星の中には、死に際に大爆発を起こすものが

図 11 アインシュタイン衛星で撮影されたカシオペア超新星残骸の X線画像。超新星爆発で吹き飛ばされ、超音速で広がるガスによりその衝撃波面に掃き集められた星間ガスが加熱され、球殻状の領域から X線を放射する。これを視線方向に見とおすと図のようにリング状に見える (Seward, Gorenstein, Tucker, 1983, ApJ, 266, 287 より転載)。

衝撃面でガスは数千万度まで加熱され、熱いガスの球殻が形成され、このガス球殻はX線で明るく輝いています。地球から見とおした超新星残骸がリング状に見えるのはX線で輝いているのが衝撃波前面の球殻状の部分だからです。ところで星は最初に形成されたときはその元素の大部分は水素ですが、中心で核融合反応が進むに従って次第に重元素が形成されます。大質量の星では超新星爆発する直前には芯に鉄元素までも形成されます。この超新星爆発の残骸をX線で調べることで、星が死に際して宇宙に振り撒いた物質にどんな元素が含まれているか調べることが出来ます。そこに生命の形成に必要な様々な重元素が含まれていることが分かります。実は、星の死は、私達の生につながっているのです。

ここではあの天文学者ティコ・プラエの名前が冠せられた、「ティコの新星」と呼ばれる400年前に爆発した超新星残骸をX線で調べ、含まれている元素を一緒に調べましょう。

5.7 X線で探る銀河中心—巨大ブラックホールの検証

ブラックホールには、質量が太陽の数百万倍から数億倍にもなるような巨大なものもあります。活動的銀河と呼ばれる多くの銀河の中心にこの種の巨大ブラックホールが見つかってきました。そして私たち太陽系（地球）がある天の川銀河（銀河系）でも、中心核付近の星の運動を観測することによって太陽の250万倍程度の重さのブラックホールが潜んでいることが確実となっています。このような巨大なブラックホールは通常周辺の物質をどんどん引きつけて加熱しX線で非常に明るく輝く（このような銀河を活動的中心核をもつ銀河といいます）ものです。ところが、天の川銀河は中心に巨大ブラックホールが発見されたとはいえ、現在その銀河系中心からは大変弱いX線しか出ていません。中性子星や白色矮星からのX線放射にも負けてしまう明るさで、長い間ブラックホールの存在自体が怪しまれていたほどです。

しかし、その一方で銀河中心方向をX線で観測すると銀河バルジといわれる銀河中心付近から銀河面にわたって非常に高温で希薄なガス（高温プラズマ）が広がっていることが分かりました。それは高温で希薄なガスに特徴的な高電離

した鉄からの蛍光輝線が観測されたからですが、その高温ガスの起源は今もって謎です。その上、銀河中心付近に点在する暗黒星雲を観測すると、わたしたちの銀河系の中心には、過去に銀河系中心の巨大ブラックホールの激しい活動があり、そこから強力なX線が放射されていた時期があ

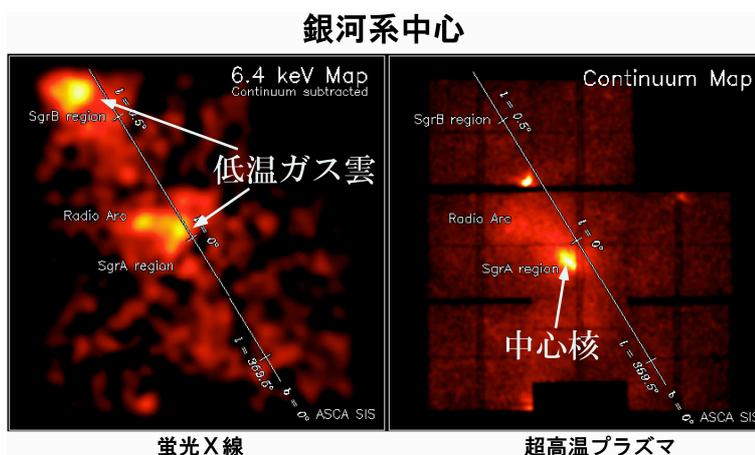


図12 「あすか」で撮影された銀河系中心500光年四方のX線画像。右図は超高温プラズマが放射するX線成分の画像で、中心核のまわりに広がっている。ところが左図のように鉄の蛍光輝線（6.4 keV）によるX線写真では、銀河中心よりも中心核から300光年離れた左上の低温ガス雲が特に明るく光っていることがわかります（Koyama et al. 1996, PASJ, 48, 249）。

ったとしか考えられない痕跡が残されています。

銀河系中心に存在すると考えられる巨大ブラックホールはずっと暗かったのでしょうか。それとも現在はたまたま暗いだけで、明るく輝いていた時期もあったのでしょうか。銀河系の中心領域のX線写真から昔の活動の痕跡を探し出し、過去にさかのぼって巨大ブラックホールの活動を調べてみましょう。

5.8 X線で見える銀河団—暗黒物質の存在を探る

銀河が数百個から数千個集まった銀河団では、実は、物質のほとんどは銀河と銀河の間の空間に存在します。銀河と銀河の間を数千万度の高温のガス（銀河団ガス）が埋めつくしています。銀河団ガスの質量は銀河の質量の数倍にもなります。銀河団では普通の物質のほとんどは、星ではなく、銀河団ガスとして存在しているのです。このような大量のガスがかつて銀河の中に存在したとは考えられません。つまり、銀河団ガスのほとんどは、一度も星にも銀河にもなったことのない宇宙のはじまりの時そのままの原始ガスなのです。

では、この銀河団ガスの温度はなぜ、これほど高いのでしょうか。銀河団ガスは銀河団に重力によって閉じ込められています。したがって、ガスの温度や密度を測定し、重力と圧力のつりあいを仮定することで、銀河団の質量を求めることができます。銀河団ガスの温度が数千万度になるためには、銀河団の質量は銀河団ガスよりもずっと大きくなければなりません。銀河団には、ガスでもなく星でもなく、見えない物質が大量に存在するのです。この見えない物質の正体は普通の物質ではない未知の物質だと考えられており、暗黒物質と呼ばれています。この暗黒物質が重力により集まり、周囲の普通の物質を重力でひきよせて、銀河や銀河団のような天体を形成します。つまり、暗黒物質を調べることは、宇宙での天体の形成の歴史を調べることでもあるのです。

それでは、実際にX線衛星により観測された銀河団ガスの温度と密度から、圧力を計算し、重力とのつりあいから、銀河団の質量を求めてみましょう。

6. 本教材の利用にあたって

本教材の特徴は、研究者が使っているデータを実際に解析して学習を進めることです。データを解析するために、(1) パソコン、(2) 解析ツール、(3) 解析データが必要です。

(1)については、windows (XP)を標準端末としてサポートします。ただし、解析ツールの大部分

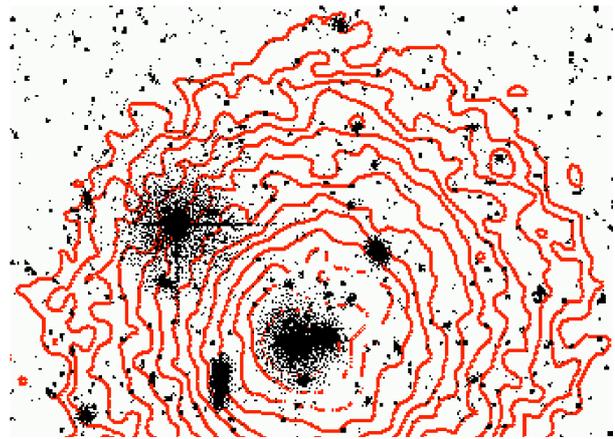


図 13 うみへび座銀河団 A1060 の可視光の写真にX線画像(赤の等高線)を重ねたもの。可視光写真では個々の銀河が点在していますが、X線画像では多数の銀河が集まっている領域を中心にして、銀河団全体を満たすように高温ガスが存在し、X線で輝いています。この写真は一辺が35分角、およそ2千万光年に相当します。

は、windows(Vista)、windoes7、Mac などの他の OS でも利用できます。

(2) は課題ごとに異なります。ただし、FITS データを処理するための fv、および FITS 画像を表示するための ds9 は、ほぼ全ての課題で利用します。添付する CD にはこれらのソフトの windows 版が入っています。課題によっては、エクセル (マイクロソフト) を用いることもあります。工夫しだいでは、Open Office などのフリーソフトでも代用可能です。

(3) については、全ての実習課題に対応する解析データが解析に必要な前処理をした上で CD に収められています。また、JAXA/ISAS の DARTS あるいは NASA などから自分でデータをダウンロードして、応用課題に挑戦することもできます。

以上が揃っていれば、インターネットへの接続されていなくても、課題を進めることができます。また、この教材は、JAXA/ISAS の DARTS にもインストールされており、インターネット経由でも学習できます。なお、本教材の最新の情報は、以下のサイトを参照してください。

「衛星観測データを用いた宇宙科学」のページ

(URL: <http://www.isas.jaxa.jp/home/ttamura/classroom/>)

7. むすび

本教材は科学研究費基盤 B「科学衛星観測データベースの宇宙科学教育への活用」(課題番号 ; 19300270、代表者 ; 長瀬文昭) によって開発されたものです。本教材は宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部を中心に、立教大学、青山学院、東京理科大、中央大学、日本福祉大の各大学の研究分担者が製作を担当し、その担当者の指導のもとで学生、大学院生やが製作の協力参加し、芝浦工大、東海大、桜美林大等の研究者や高校教諭、天文台学芸員等が議論に加わり、幅広いネットワークの下で開発されました。

この教材は解説の部と実習本テキストで構成され、解析ソフトや実習用データは付録の CD に収容されています。またこの教材は PC(Windows) をお持ちのかたは付録の CD を使って自己完結的に学習できます。また同内容の学習指導書が宇宙航空開発機構宇宙科学研究所が運用するデータベースシステム DARTS に収容されており、この DARTS にアクセスすることによりオンラインでの学習も可能です。

さらに、DARTS システムには質問コーナーを設け、科研費による開発期間を終了した後も、上記開発チームのネットワークを通して皆さんの質問にお答えします。皆さんは解析実習の過程で困難に直面し、自分で解けない疑問が湧きあがった時は、この質問コーナーに質問を寄せることにより、本教材の製作にあたった研究者とネットワークを通して質疑の交流をすることができます。

本解説書での図について。特に記載していない場合は、図の提供は、JAXA/ISAS です。