



X線天文衛星 特集号 「すざく」

銀河系中心のX線画像
上は中性鉄原子、下は鉄イオン
(Fe^{2+}) の特性X線の強度分布。

「すざく」特集号を迎えて

満田和久

JAXA宇宙科学研究本部
高エネルギー天文学研究系
「すざく」プロジェクトマネージャ

X線天文衛星「すざく」は、M-Vロケット6号機により、2005年7月10日に打ち上げられました。大変残念なことに打上げ後の初期運用中に観測装置の一つが機能停止する問題が発生しましたが、残る二つの観測装置は予定通り、あるいはそれ以上の性能を発揮しており、平均1日1天体の割合で現在も観測を続けています。これらの観測は、厳しい審査を勝ち抜いた世界の科学者からの観測提案に基づいて行われます。観測提案者には1年間データを占有して解析する権利がありますが、これを過ぎた観測データは世界の誰もが利用できるように順次公開されています。「すざく」は、太陽系内のX線放射から100億光年遠方の大質量ブラックホールに至るまで、いろいろな階層の天体の観測を行っており、さまざまな宇宙の姿を明らかにしつつあります。

「すざく」による科学的成果としては、2年連続で出版された『日本天文学会欧文研究報告(PASJ)』の「すざく」特集号掲載の論文など、すでに100を超える学術論文が発表されています。また、2006年12月に京都、2007年12月に米国サン

ディエゴで開かれた「すざく」の国際会議では、それぞれ300人および200人を超える参加者があり、どちらも日本からと海外からの参加がほぼ同数でした。

今回の『ISASニュース』特集号では、科学的成果の一部を紹介します。特集の後半では、観測を実現するためのユニークな技術も併せて紹介しています。「すざく」には、ほかの衛星では見られないアイデア、研究者自身の手づくりの部分がいくつもあります。この特集号では前半も後半も、実際にその現場で手を動かした若手研究者を中心に執筆を依頼しました。宇宙の謎を探るために研究開発の最前線で活躍する、研究者の息吹も感じていただけるのではないのでしょうか。

「すざく」は、その前身のASTRO-E衛星以来の長年の積み重ねの結果、実現され、今、大きな観測成果が得られようとしています。この場をお借りして、あらためて宇宙航空研究開発機構(JAXA)内外の関係者の皆さまのご尽力、ご協力、ご支援に深く感謝致します。(みつだ・かずひさ)

X線天文衛星「すざく」

2005年7月10日に打ち上げられたX線天文衛星「すざく」は、9ヶ月のサイエンスワーキンググループ観測を経て、2006年4月からは世界中の研究者からの観測提案による公募観測を進めています。この項では、観測公募から実際の観測、データ処理を経て科学データが提案者に届き、公開されるまでの、JAXA宇宙科学研究本部での運用の道筋をご紹介します。

「すざく」は地上約600km、軌道傾斜角31度で、1日に地球を15周しています。望遠鏡をある天体に向けたとしても、地球に遮られてしまうこともあり、実際の観測時間は1日平均10時間強程度です。いくら大気の外に出たといっても天体からのX線は非常に微弱なため、「すざく」は一つの天体を、典型的には1日程度、長ければ1週間近く見続けます。1年間でだいたい300天体を観測するペースです。

観測提案の公募は1年ごとに行われ、日本が50%、「すざく」の開発から協力してきた米国が37.5%、そして共同観測に12.5%が割り当てられます。日本の観測枠ではヨーロッパ宇宙機関(ESA)から8%の観測を受け入れるほか、米国とESA加盟国以外のすべての国からの観測提案を受け付けています。これまでに行われた3回の公募では、9ヶ国からの提案がありました。観測提案は日本語でも英語でもよく、研究者だけでなく大学院生からの提案もOKです。ただし、観測して本当に成果が期待できるかという点は複数の審査員によって審査・採点されており、厳しい勝負の世界です。

こうして決まった観測提案について、目的の天体を「すざく」で観測できる季節(太陽や月との位置関係)、観測条件に基づいてスケジュールを立てていきます。NASAから派遣されてきているクリス・バルータさんによる最適化のおかげで、2006年度の観測は予定より3%多く行うことがで

きました。たかが3%、されど衛星を打ち上げるまでの努力と費用を考えると、予想外のボーナスです。

観測計画が決まると、次はコマンドづくりです。JAXA相模原キャンパスにある宇宙科学研究本部の研究センター棟2階に「すざく」運用室があり、毎日2人の当番がコマンドをつくっています。実際に衛星にコマンドを送ったり、データの受信をしたりという運用をするのは、鹿児島県肝付町にある内之浦宇宙空間観測所です。赤外線天文衛星「あかり」、太陽観測衛星「ひので」とアンテナを分け合って(取り合って?)、1日約5回、1回約12分の運用を行います。そこにも2人の当番がいて、毎日衛星の健康診断をしています。このような運用当番は、「すざく」を打上げ前から支えてきた大学のスタッフ、学生を含めた「すざく」チームが務めています。当番担当者140人、1年当たり延べ1600人が働き続けているのです。

運用は淡々と事件なく過ぎていくのが一番いいのですが、たまに「この天体が今、明るくなった! 急いで見なくては!」という緊急観測が入ります。例えば、ほかの衛星が検知したガンマ線バースト情報がネット経由で回覧され、「すざく」チームに届きます。その天体の観測をプロジェクトマネージャーが決断すると、当番がコマンドをつくり、確認を二重に行い、内之浦34mアンテナからコマンドを送信し、「すざく」が向きを変えます。ガンマ線バーストの検知から「すざく」の観測開始までの最短記録は3時間25分です。シンポジウムや学会期間中に突発現象が起きるという因果律があり、光速を超える何らかの力が働いているような気もしていますが……(1000年くらい運用していたら証明できるかな?)。

内之浦で受信するデータは、1日当たり1GByte程度です。「すざく」はX線の光子を1個1個数えて、いつ、どの検出



図1 衛星運用風景

図2 内之浦宇宙空間観測所の34 mアンテナ



器のどの場所に、どれだけのエネルギーの光子が来たかを記録しているため、明るい天体を見るほどデータが増えていきます。観測データは、まず衛星の姿勢や場所を決め、打上げ以前や軌道上での検出器の特性試験に基づいて補正をかけるなどの基本的なデータ処理を行ってから、宇宙科学研究本部の宇宙科学情報解析センター(Plainセンター)経由で提案者に届けられます。米国の観測提案については、NASAでも処理をします。処理用のソフトウェアは共通で、どれも検出器をよく知る「すざく」チームによってつくられたものです。このような処理によって「すざく」のデータは天文分野で標準的なファイル形式になり、もともとの光子に対しての物理量を表すものとなるのです。日々のデータ処理だけでなく、較正情報やソフトウェアを更新する作業も、ずっと続けられています。

さて、こうして研究者の手元に届けられた科学データからどんなに素晴らしい成果が出たかについては、この後の記事でお楽しみください。また、サイエンスワーキンググループ観測のデータや、公募提案者に届いてから1年を過ぎたデータは、全世界の研究者に向けて公開されています。日

本の前のX線天文衛星「あすか」をはじめ、世界のほとんどのX線天文衛星のデータはこのように公開され、提案者が予期しなかったデータの使い方・解釈、複数の天体をまとめた考察など、天文学の進歩の中で何度となく利用され、新たな成果が生まれていくのです。「すざく」の観測データも今後10年、20年と使われていくことを望みつつ、「すざく」チームは今日も運用をしています。

(やまさき・のりこ)



星から原始地球へ 重元素の輸送経路を追え

濱口健二

NASA
ゴダード宇宙飛行センター

宇宙開びやく時に合成された元素は、周期表で水素からリチウムまでの3種類だけ。それより重い、私たちの体を構成する主要元素(炭素・窒素・酸素など)は、太陽より重い星の深部で核合成されました。この生成元素がどのようにして星の外に放出され、宇宙空間を漂い、誕生間もない太陽系に取り込まれたのか、それは地球そして生命誕生の謎を解明する上で避けては通れない問題でしょう。

太陽は、宇宙に漂うガスの塊から、数多くの星の一つとして生まれたと考えられています。このいわゆる星形成領域に数百万度の高温ガスがうっすら広がっていることが、近年、X線波長域の観測によって見えてきました。その有力な生成要因は二つ。はるか昔の複数の超新星爆発でできた高温ガスが冷えずに残っているというものと、星風(星からの高速の粒子の流れ)が衝突、加熱しているというものです。高温ガスの形状、温度、明るさからでは、いずれとも判断がつけられません。

そこで重要なのは、高温ガスの成分を精度よく測定すること。ここで「すざく」が大きな威力を発揮します。ガス中に炭素・窒素・酸素・鉄があると、10~20 Å (オングストローム:1億分の1 cm)のX線波長帯で輝線を放射します。この輝線強度を測定すれば、ガス中での元素の組成比が分かるのです。「すざく」によって我々は、広がったガスに対してこの輝線を高い感度できれいに分解して測定する能力を、初めて手に入れました。

これまでに「すざく」は、2ヶ所の星形成領域を観測しました。いて座にあるM17と、南天のカリーナ星雲です。その結果、どちらの領域も200万から600万度の高温ガスを持って

いたのですが、M17は全体的に均一な元素比だったのに対し、カリーナ星雲は鉄と酸素の組成比が場所によって2倍から4倍も違いました(図3)。このような元素のガスの“かたまり”は、超新星残骸によく見られます。もしかしたら、M17にある高温ガスは星からの星風によって、カリーナ星雲の高温ガスは超新星によってできたのかもしれませんが、原始太陽がカリーナ星雲のような鉄や酸素の多いところにあったかどうか、原始地球の形成に何らかの影響を及ぼしたのかもしれない。

では、具体的にどのような機構で、生成元素は星内部から星間空間に放出されていったのでしょうか? 華々しい超新星爆発については、「超新星爆発」(9ページ)を、星末期の緩やかなガス放出に関しては「できたての炭素をとらえる」(5ページ)を参照ください。

このほかにもう一つ私たちが注目している過程、それは、太陽の数十倍の質量を持つ進化末期の大質量(ウォルフレイエ)星連星系が、お互いの星風を衝突させ激しいX線放射を繰り返しながら星の外層大気を吹き飛ばす活動です。ウォルフレイエ星はその質量の半分以上を失いながら、水素核燃焼で生成した窒素と、その後ヘリウム核燃焼で生成した炭素・酸素を含んだ大気を、星間空間に放出していきます。そのような星の一つで太陽質量の100倍以上もあるといわれるエータカリーナを、「すざく」は2年間定期的に観測してきました。2009年の初頭には、連星をなす互いの星が近星点に近づき活動の活発化が予想されます。「すざく」による星風衝突現象の解明に期待です。(はまぐち・けんじ)

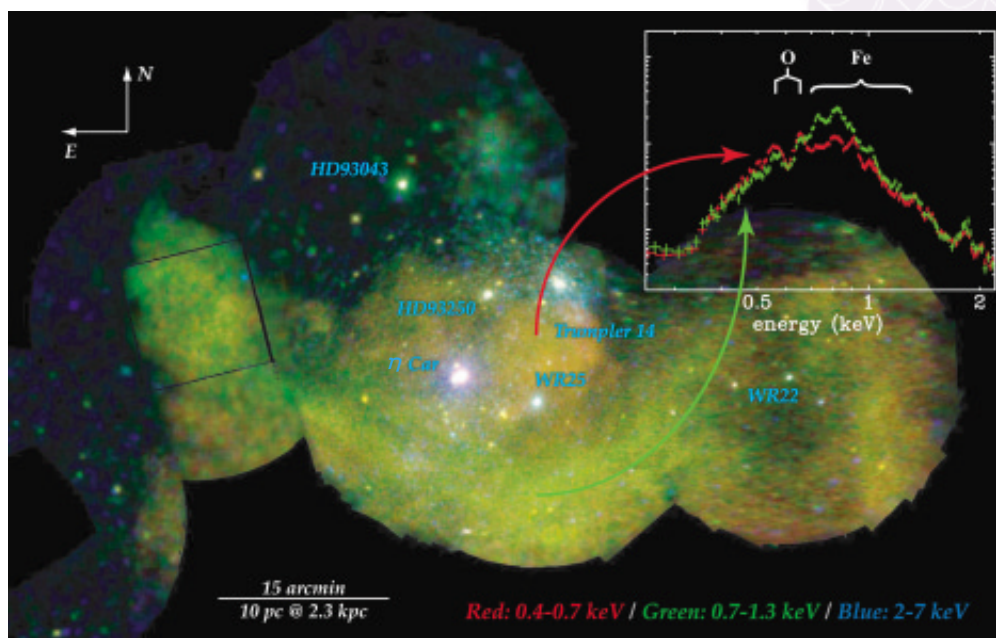


図3 カリーナ星雲のX線画像(XMMニュートン衛星)と高温プラズマのX線スペクトル(すざく衛星)

赤:長波長X線、緑:中波長X線、青:短波長X線。図の中心領域は、周囲に比べて緑色の強度が低い。そこを「すざく」で観測したところ、鉄と酸素が赤い領域で不足していることが分かった(右上のスペクトル)。中心に見える最も明るい星がエータカリーナ(η Car)。(Kenji Hamaguchi(NASA/GSFC) and ESA)

できたての炭素をとらえる 惑星状星雲からのX線

村島末生

東京大学大学院 理学系研究科

きらめくダイヤモンドも、バーベキューで使う炭も、鉛筆の芯も、すべて炭素です。私たち地上の生命にとって、炭素は重要な元素です。でも宇宙の始まりのころには、たくさんの水素と少しのヘリウムとわずかなリチウムしかありませんでした。それ以外の元素は、すべて星によってつくられたと考えられています。炭素はどこから来たのか。惑星状星雲からのX線は、その答えの一つを私たちに教えてくれます。

惑星状星雲は、太陽のような星の終末期の姿です。星は内部の核融合で輝いています。最初はほとんど水素でできており、核融合によって水素が燃焼してヘリウムになり、次にヘリウムが燃えて炭素や酸素ができます。重い星はもっと重い元素をつくりますが、太陽くらいの星は炭素でおしまい。もうそれ以上、核燃焼を起こせません。星は外側からどんどん広がって、中心の高温部分がむき出しになります。中心に残った高温の芯が周囲に広がったガスを光らせ、図4左のようなきれいなリング状の星雲として輝きます。

リングの温度は1万度、中心星の表面は約10万度。X線を出すにはもっと高い温度が必要です。実は、リングの内側は数百万度の高温ガスで満たされているのです。こんなに温度が高いのは、中心星から高速の星風が吹き出し、衝撃波が生じて加熱されるためだと考えられています。つまり、高温ガスは星が最後に放出する物質であり、私たちは、このX線を調べれば元素合成の最終段階でどの元素がどれくらいつくられるのかを知ることができると考えました。狙っている元素は、もちろん炭素です。しかし、炭素からのX線はエネルギーが低過ぎて、今までの観測機器では十分な観測ができませんでした。そこに「すざく」の登場です。

私たちは、惑星状星雲BD+30 3639を観測しました(図5)。スペクトルの0.9キロ電子ボルト(keV)に見えるのはネオンからのX線で、これは先代の「あすか」衛星が発見しています。「すざく」によって、酸素からの輝線が2本、そして最も低エネルギー側には炭素からのX線が、世界で初めて検出されました。エネルギーが低いほど検出が難しいのにはっきりと見えており、炭素が非常に多いことを示唆しています。実際に炭素と酸素の比を計算すると、普通の宇宙空間の

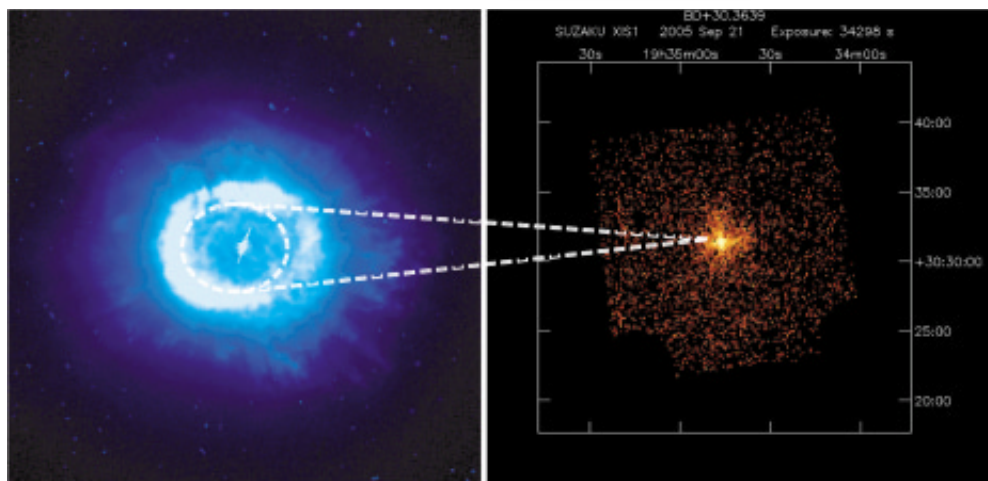


図4 ハッブル宇宙望遠鏡が撮影した惑星状星雲BD+30 3639の可視光の画像(左)と「すざく」が撮影したX線画像(右)
X線は可視光で見えるリングの内側から放射されている。

85倍も炭素が多いことが分かりました。実は、この数字は星の進化の理論からの予測と一致していました。それによると、星の元素合成の最終段階でヘリウム燃焼が爆発的に起きるときには、ちょうどそのくらい炭素が多くなると考えられています。すなわち「すざく」は、まさに炭素がつくられ放出される現場をとらえたのです。

星でつくられた炭素は星の死とともに宇宙空間へ帰っていき、やがて新しい星の材料となります。その新しい星には惑星があって、生命が誕生し、長い進化を経て私たちにたどり着きます。私たちの体や身のまわりのものを形づくる炭素は、はるか昔、地球ができるよりもずっと前に、どこかの星でつくられたものなのです。(むらしま・みお)

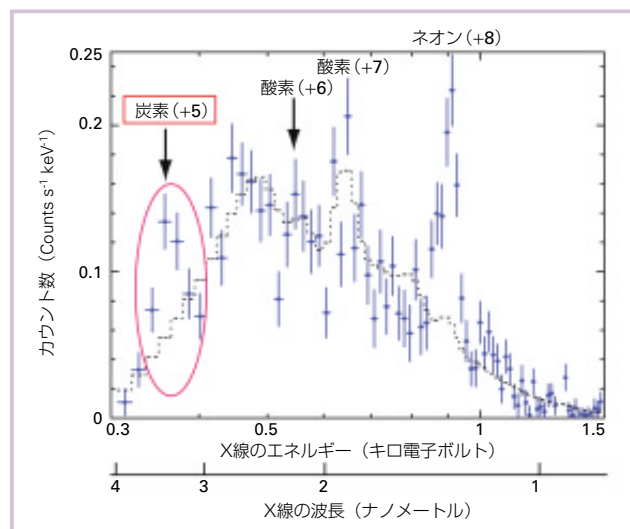


図5 「すざく」で観測したBD+30 3639のX線スペクトル

白色矮星の新たな素顔

本当は激しいやつだった

寺田幸功

埼玉大学大学院 理工学研究科

太陽程度の質量の恒星は、進化の末に核燃料を使い果たすと、星からゆっくりとガスが放出され惑星状星雲となります。白色矮星は、その中心でゆっくりと冷えて、やがて見えなくなっていく地球サイズの小さな天体です。一見静かな白色矮星ですが、「すざく」によって新たな側面が発見され、新聞やテレビで「100年来の謎に解決の糸口」と報道されました。

「100年来の謎」とは何でしょうか。宇宙には、「宇宙線」と呼ばれる高いエネルギーを持った粒子が飛び交っています。中には、人類が地上の加速器実験で到達したエネルギーの7桁も上のエネルギーを持つ粒子もいるようです。こういったエネルギーギッシュな粒子が、指先に毎秒1個程度と、普遍的に存在しているにもかかわらず、いったいどこで、どうやってつくられたか、その全貌はいまだに謎とされています。これが「100年来の謎」です。宇宙線の起源としては、銀河系内では中性子星パルサーや超新星残骸の衝撃波領域など激しい天体が候補とされ、観測的な証拠も固められています。しかし、宇宙線すべてを説明するには天体数が不足しています。すなわち、我々の知らない未知の加速源があるはずです。

未知の加速源を探す手掛かりとして、我々は、中性子星パルサーと白色矮星の類似性に注目しました。白色矮星が宇宙線加速の現場として注目されたことはほとんどありませんが、中性子星も白色矮星も、回転するコンパクトな天体であることに変わりはありません。そもそも、中性子星パルサーは、 10^{12} Gauss程度の磁石が数ミリ秒から数秒の周期でくるくると回転する系です。自転車のダイナモ発電機と同じ原理で 10^{17} ボルトもの誘導電場が発生し、まわりの荷電粒子を加速して宇宙線を生成していると考えられています。同様に、白色矮星でも磁場の強い天体なら宇宙線を生成していても不思議ではなからう、というのが我々の発想です。実際、 10^6 Gaussの磁場を持つ白色矮星では、 10^{15} ボルト程度の誘導電場が発生します。これは、宇宙線の加速源の候補としては十分です。しかも、白色矮星はやたら天体数が多いので、加速源となれば、大きなインパクトがあります。

我々は、強磁場激変星という恒星と白色矮星の連星系を、「すざく」の観測対象にしました。みずがめ座AE星は自転周期が33秒と激変星の中でも最速で、磁場は 10^6 Gauss程度なので、粒子を加速する条件は整っています。そこで、我々は2005年と2006年の2回、みずがめ座AE星を「すざく」で観測しました。

「すざく」以前のX線天文衛星によって、みずがめ座AE

星の熱いプラズマが出す軟X線が、自転とともに強くなったり弱くなったりしている様子が観測されていました。「すざく」では、こういった軟X線の上に、加速粒子がもともと出ている硬X線の信号を探す必要があります。この探査に、X線CCDカメラ(XIS)と硬X線検出器(HXD)の組み合わせが大きな威力を発揮しました。図6は自転に伴うX線の明滅を示したもので、赤で示したCCDの信号には、緑で示した軟X線の変動の上にパルス状の放射がはっきりと検出されています。これは、青で示したHXDの結果を見るとより顕著で、ほとんど硬X線のパルスしか見えていません。硬X線だけに見える鋭いパルス信号は、初めての発見です。X線分光や時系列解析など総合的に考え、我々は、この鋭いパルスは加速粒子からの信号である可能性が高いと考えています。そこで、中性子星パルサーにちなんで、「みずがめ座AE星は白色矮星版パルサーかもしれない」と考えています。

「すざく」は今回の研究で、宇宙線加速源という100年来の謎に新たな可能性を提示しました。加速現場として激しい天体に注目する時代から、白色矮星や銀河団といった静かな天体にもスポットを当てる新たな時代が拓かれようとしています。次世代のX線衛星に期待です。

(てらだ・ゆきかつ)

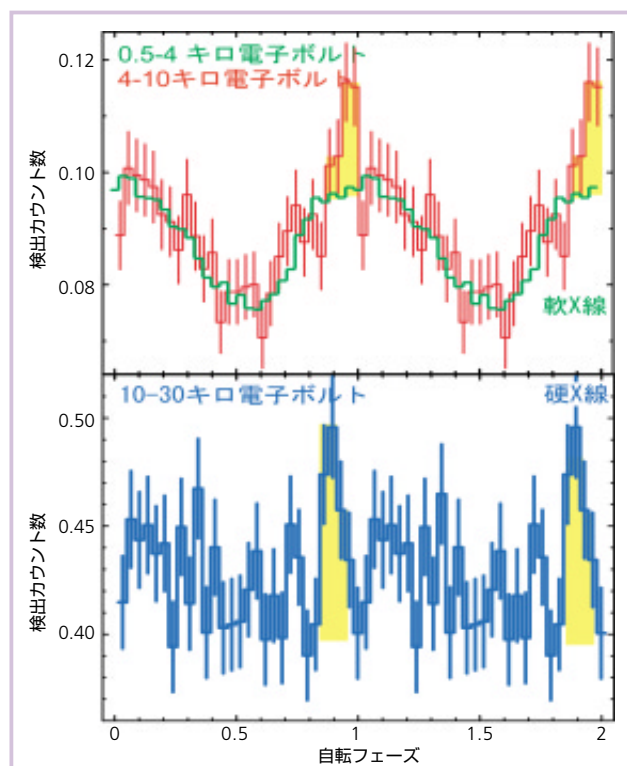


図6 白色矮星みずがめ座AE星からの自転パルス

宇宙X線で強磁場の世界へ 中性子星の電子サイクロトロン共鳴

榎戸輝揚

東京大学大学院 理学系研究科

手のひらに載せた方位磁針をくりりと回転させる地磁気。その大きさは、ただか0.2ガウス程度です。現在、人類がつくり出せる最も強い磁場は50万ガウス程度にも達しています。ところが、宇宙には我々の想像をはるかに超える強い磁場を持つ星々が輝いています。星の一生の最後、超新星爆発の後に残される高密度な星、中性子星は1兆ガウスという、地球上で人類が体感するよりも13桁も大きい磁場を持っています。「すざく」は、まさにこの極限的な磁場の世界を、直接に垣間見る観測を行っています。

中性子星の中には、通常の星とカップルを組み、お互いのまわりを回っているものがあります(連星X線パルサー)。通常の星は盛んにガスを吹き出していて、その一部は中性子星の強い重力場に引き付けられて流れ込んでいき、ちょうど地球の南極や北極に相当する磁極にガスが落ち込んで、強烈なX線を放射します(図7)。このX線が、磁力線に巻き付いてくるくる運動している電子(サイクロトロン運動)が存在している中を通過してくるとき、磁場の強さに応じたエネルギーのX線が電子によって共鳴散乱され、図8のようにX線スペクトルに吸収構造が現れます(電子サイクロトロン共鳴)。この電子サイクロトロン共鳴のエネルギーが磁場の強さに比例することを用いると、はるか彼方にある中性子星の磁場の強さを“直接的に”求めることができます。

これまでのX線観測衛星「ぎんが」「あすか」などによって、15個ほどの連星X線パルサーにサイクロトロン共鳴が観測され、その磁場は1兆~4兆ガウス($1\sim4\times10^{12}$ ガウス)に分布していることが明らかになりました(図9)。この磁場分布は中性子星の性質や進化を考える上で重要な情報となりますが、3兆ガウスを超える中性子星からのサイクロトロン共鳴は、過去の衛星では観測が難しく、いまだによく分かっていませんでした。「すざく」に搭載されている硬X線検出器(HXD)は、ちょうどこのエネルギー領域で世界最高感度を達成し、強い磁場を持つX線パルサーからのサイクロトロン

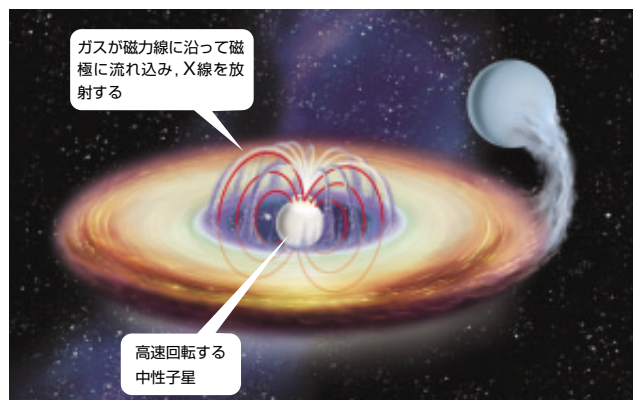
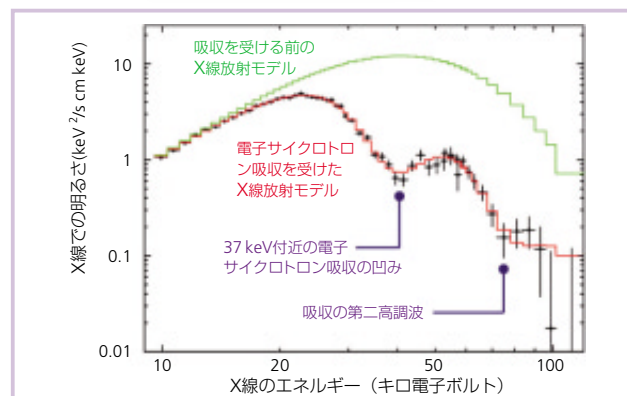


図7 中性子星の磁極にガスが流れ込んでいるイメージ図

図8 「すざく」衛星の硬X線検出器がとらえた、電子サイクロトロン吸収を受けた連星X線パルサーHercules X-1からのX線放射

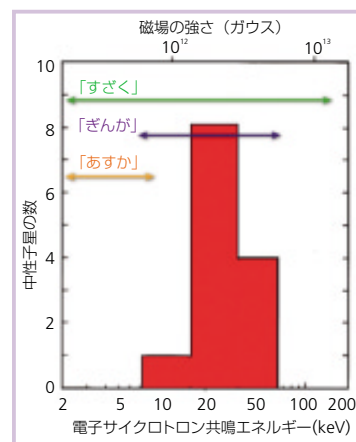


共鳴を観測できます。

連星X線パルサーA0535+262は、「すざく」打上げ直後に明るくなり、「すざく」により3.8兆ガウスに相当する45キロ電子ボルト(keV)に電子サイクロトロン共鳴が検出されました。過去の観測よりも1~2桁も暗いにもかかわらず検出されたこの共鳴は、これまでで最も強い磁場の観測例となりました。さらに、有名なサイクロトロン天体であるHercules X-1からは、長年の観測にもかかわらず確認できていなかった高調波の検出に成功しています(図8)。2007年末に突発的に明るくなった連星X線パルサーGRO J1008-57の観測では、今まで知られている中で最も高い90キロ電子ボルト付近の共鳴(7.8兆ガウス!に相当)が検出できているのではないかと期待できる観測結果があり、解析が今まさに進んでいるところです。「すざく」による連星X線パルサーの観測によって、これまで以上に強い磁場を持つ中性子星の姿が明らかになってくると同時に、詳細な観測から強磁場中を中性子星へ向けて降り積もっていくガスの振る舞いが明らかになってくることが期待されます。

最近、通常の中性子星よりもさらに1000倍近くも磁場の強い「マグネター」と呼ばれる超強磁場星が存在するのではないともいわれ始めています。宇宙X線観測を通じて、地上では誰も見たこともないエキゾチックな極限物理の世界が明らかになっていくでしょう。(えのと・てるあき)

図9 これまでの観測で見つかった連星X線パルサーの電子サイクロトロン共鳴エネルギーと磁場の分布 (Makishima et al., 1999, ApJ)



ブラックホール連星系

精度の高いX線スペクトルによって見えてきた ブラックホールに吸い込まれる物質の構造

高橋弘充

広島大学大学院 理学系研究科

X線の波長で宇宙を観測した際に、最も明るく輝いている天体のいくつかは、我々の銀河系内に存在するブラックホール連星系だと考えられています。ここで言う「ブラックホール連星系」とは、図10のように、片方が太陽の約10倍の質量を持つブラックホール、もう一方が普通の恒星、という連星系です(両者が重力で引かれ合い、お互いのまわりをグルグルと公転している)。「え、ブラックホールなら、重力が強く光さえ吸い込んでしまうから、真っ暗な天体なのでは?」と不思議に思われるかもしれません。その通りで、実はこの連星系でもブラックホール本体はまったく光を放射しておらず、X線でサンサンと輝いているのは恒星から吹き出てブラックホールに吸い込まれようとしている物質だと思われています。

ブラックホールというと、ちょっとでも近づくとその重力に捕らえられて抜け出せなくなってしまうような気がしますが、太陽の10倍の質量を持つブラックホールの場合、半径(その内側からは光すらも抜け出せなくなる距離)は、実はたったの30 km程度と推定されています。逆に言うと、30 kmより外側からは光が抜け出してくることができる、つまりブラックホールに30 kmまで近づいた物質を我々は観測することができるのです。これだけ重い天体にこれだけ近い距離まで近づくと、重力エネルギーの大きさは質量に比例し距離に反比例することから、物質が解放する重力エネルギーは膨大なものとなり、これがブラックホール連星系をX線で明るく輝かせる源となっています(地球は、質量が太陽の33万分の1、半径が6000 km。つまりブラックホールでは、地球上の

約7億倍もの重力エネルギーが解放されている!)。我々はこの周囲の物質が放射しているX線を観測することで、ブラックホール近傍での物質の振る舞い、さらにはブラックホール自体の物理状態の解明を目指しているのです。

これまでに我々は「すざく」を使って、ブラックホール連星系の中では比較的X線の光度が低い2天体(「はくちょう座X-1」とGRO J1655-40)の観測を行いました。図11に示したように、「すざく」によって約3桁にもわたる幅広いエネルギー帯域で精度よくX線スペクトルを観測できたことにより、両天体を観測している角度の違いに起因してスペクトルの形が微妙に異なることを、世界で初めて明らかにすることができました。この違いは、球形の構造では見える面積が角度によって変化しないのに対し、円盤のように平べったい構造では少しずつの方向から観測すればするほど見える面積はどんどん減っていく、という幾何学的な要因によるものだと考えられます。こうして今回の「すざく」の観測によって、「円盤のように平らな構造で落ちてきた物質が、ブラックホールの近傍でいったん膨れ上がってから吸い込まれていっている」というブラックホール周辺における物質の構造を導き出すことに成功したのです。

ブラックホールに吸い込まれる物質は、ここで紹介した物理状態のほかにも、さまざまな状態に遷移することが知られています。「すざく」、そして今後の衛星の活躍により、ブラックホールについてさらにどのような現象が明らかになっていくのか、期待が膨らみます。(たかはし・ひろみつ)



図10 ブラックホール連星系の想像図

左側の恒星から、右側のブラックホール(黒い部分にある)に物質が吸い込まれていく。ブラックホール周辺に円盤状にたまった物質が、X線で明るく輝いている。(illustration by Martine Kornmesser, ESA/ECF)

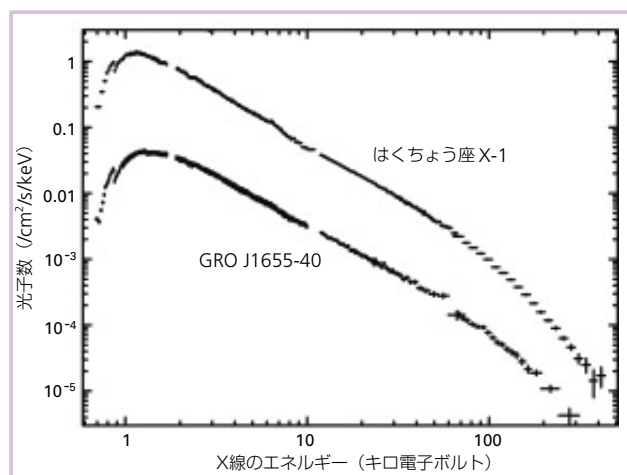


図11 ブラックホール連星系「はくちょう座X-1」およびGRO J1655-40の「すざく」によるX線スペクトル

超新星爆発

残骸から探る爆発の様子

勝田 哲

大阪大学大学院 理学研究科

常深 博

大阪大学大学院 理学研究科

星が突然明るく輝き始める現象は、古くから知られています。昼でも見えるくらい明るくなる場合もあり、歴史上も多くの記録が残されています。この現象の起源は星の進化の最終段階で起こる大爆発（超新星爆発）ですが、その爆発機構はまだよく分かっていません。超新星爆発の研究にブレークスルーをもたらしたのは、1987年に大マゼラン雲で起きた超新星爆発です。望遠鏡が発明された後、最も近い距離に出現した超新星であったため、人類にさまざまな新しい知見を与えてくれました。

その中の一つに、爆発の非等方性があります。つまり、爆発による星の破片は等方的に広がっていなかったのです。これまでの理論的研究では、第ゼロ近似として星の破片は等方的に飛び散ると仮定し計算されてきたので、それでは単純過ぎるということになります。今では、観測的には破片の広がる様子を詳しく調べること、理論的には星の破片の広がる様子を再現することが、爆発機構の解明の鍵と考えられています。

超新星爆発による爆風は、周囲に大きく広がります。爆風によって生じる衝撃波のために、星の破片と周囲の物質が数百万度から数千万度の高温に熱せられます。この高温ガスは爆発後1年以上にわたってX線で輝き続け、超新星残骸として観測できます。年老いた（爆発後1万年程度たつ）超新星残骸としては、はくちょう座ループが有名です（図12）。はくちょう座ループは月の視直径の6倍程度に大きく広がっていて、これまでの観測から、その中心部分には星の破片の痕跡が見つっています。

我々は今回「すざく」によって、はくちょう座ループの北東

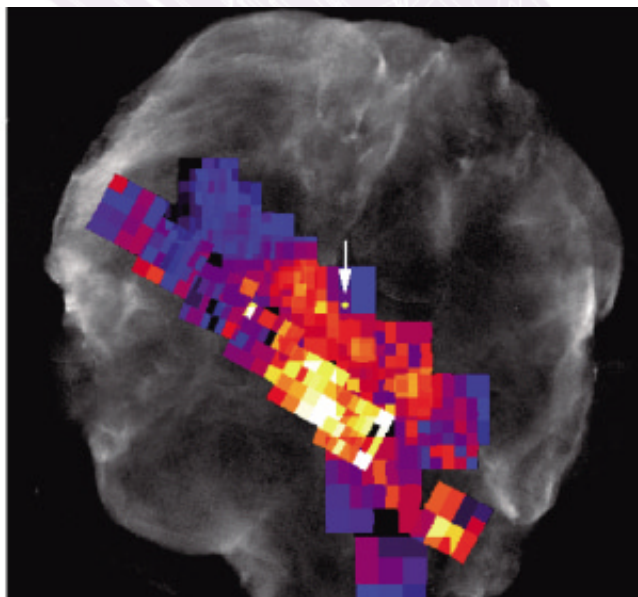
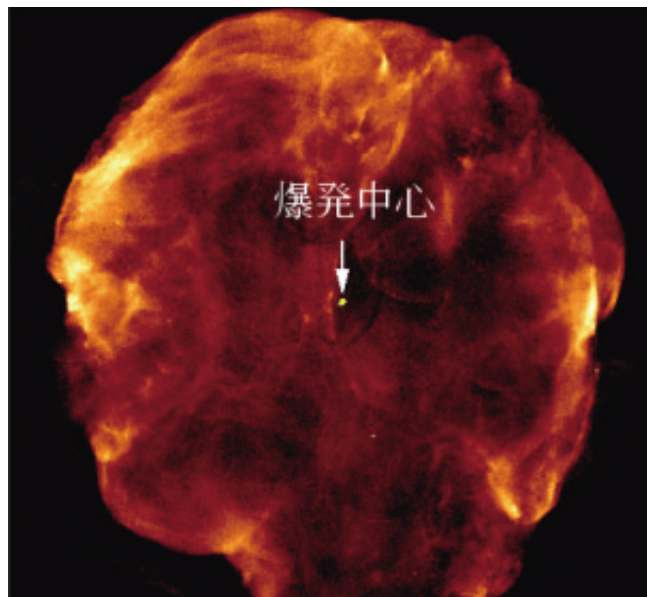
端から南西端にかけて観測を行いました。「すざく」は、さまざまな元素からの特性X線を分離する能力が非常に高いと同時に、撮像能力も兼ね備えています。そのため、各元素の分布を明らかにできます。図12右は、「すざく」が明らかにしたはくちょう座ループ内部に広がるケイ素の破片の分布を示しています。この図から、ケイ素の破片は爆発中心に対して南側に、よりたくさん分布していることが分かります。また、硫黄や鉄も似たような分布をしていることが分かりました。私たちは、この破片の非対称な分布は、爆発の非対称性を反映していると考えました。

はくちょう座ループは、太陽質量の8倍以上の重い星が爆発した残骸と考えられています。このような重い星の爆発の後には、中心に中性子星やブラックホールといった高密度星が残されます。しかし、はくちょう座ループの中心部では、いまだにそれらしい天体は見つかっていません。ここで「すざく」が明らかにした星の破片の分布の偏り（南部に偏った分布）を思い起こすと、高密度星は爆発によって破片とは反対の北側にけり飛ばされた（結果、爆発中心にはもういない）と考えるのが自然です。私たちは、今後のはくちょう座ループの北側の観測で、高密度星を発見できるのではないかと期待しています。

（かつだ・さとる、つねみ・ひろし）

図12 超新星残骸はくちょう座ループ

左：X線写真（欧州のROSAT衛星による）。爆発中心を黄色の点で示した。
右：「すざく」によって得たケイ素の破片の分布（カラー部分）。白、黄、赤、青と順にケイ素の量が多いことを示す。左と同じX線写真を白黒で示した。



超新星残骸 宇宙線の起源に迫る

田中孝明

スタンフォード大学
スタンフォード線形加速器センター

私たちの住む地球には、「宇宙線」と呼ばれる高エネルギー粒子が、宇宙から絶えず降り注いでいます。その量は、私たちの手のひらを毎秒約1個の粒子が貫いている計算となります。研究者たちは長い間、「この宇宙から降り注ぐ粒子がいったいどこで加速されているのか?」という疑問に対する答えを探し続けてきました。現在考えられている「宇宙線の起源」の筆頭候補が、重い星が一生を終えるときに起こした爆発の名残、超新星残骸です。「すざく」の先代の衛星「あすか」は、超新星残骸を観測し、宇宙線の電子によって放出されていると考えられるX線を検出しました。このX線は、超新星残骸で加速されている高エネルギー電子からのシンクロトロンと呼ばれる放射であるとする、うまく説明できることが分かっています。我々は、超新星残骸が宇宙線の起源であるという仮説を確かなものにするため、「すざく」の打上げ直後から、超新星残骸の中でも特に明るいシンクロトロンX線を放射しているRX J1713.7-3946と呼ばれる天体(図13)に注目し、観測を行いました。

「すざく」の特徴は、幅広いエネルギー帯域を観測できるところにあります。一方で、シンクロトロン放射など宇宙線からの放射は、一般的に広いエネルギー帯域にわたる放射になります。したがって、我々の「すざく」は、宇宙線の起源についての研究に最も適した天文台なのです。観測データを解析してみたところ、我々の狙い通り、今までのどのX線天文衛星よりも広い帯域で超新星残骸RX J1713.7-3946からの放射を検出することができました。

さらにスペクトルをよく調べてみたところ、図14にあるように、高エネルギー側でX線強度が急激に小さくなる「カットオフ」があることが分かりました。「カットオフ」の存在は理論的に予想されていましたが、今までのX線観測では見えていませんでした。「すざく」の広帯域観測により、「カットオフ」の存在を初めてはっきりと示すことができたわけです。スペクトルの「カットオフ」の位置(エネルギー)は、宇宙線が加速される効率のよさで決まります。そこで、この超新星残骸における宇宙線加速の効率を計算してみたところ、宇宙線が非常に効率よく加速されていて、理論の予測する限界に近いほどの高い効率であることが分かりました。

また、得られたスペクトルによって、この超新星残骸で電子だけでなく陽子も加速されていることが確かなものになりました。地球にやって来る宇宙線の主成分は電子ではなく陽子なのですが、最近まで、陽子が天体で加速されている確固たる証拠はありませんでした。欧州のグループによるガンマ線望遠鏡H.E.S.S.などの活躍によって、超新星残骸RX J1713.7-3946から、陽子からの放射でないかと思われるガンマ線が放射されていることが分かっていますが、電子からの放射であると主張す

図13 「すざく」で得られた超新星残骸RX J1713.7-3946のX線画像(カラー)とガンマ線望遠鏡H.E.S.S.によるガンマ線画像(等高線)

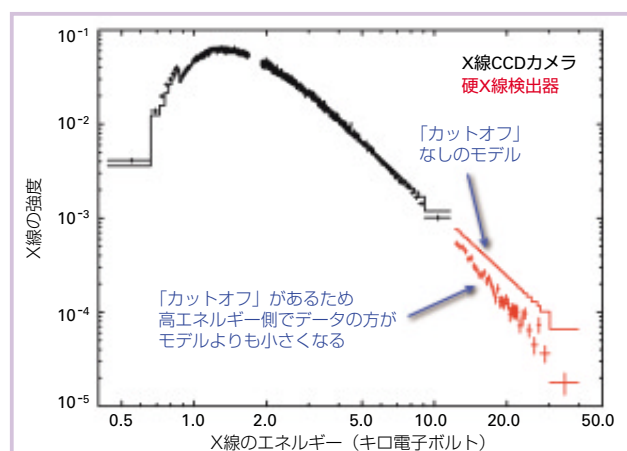
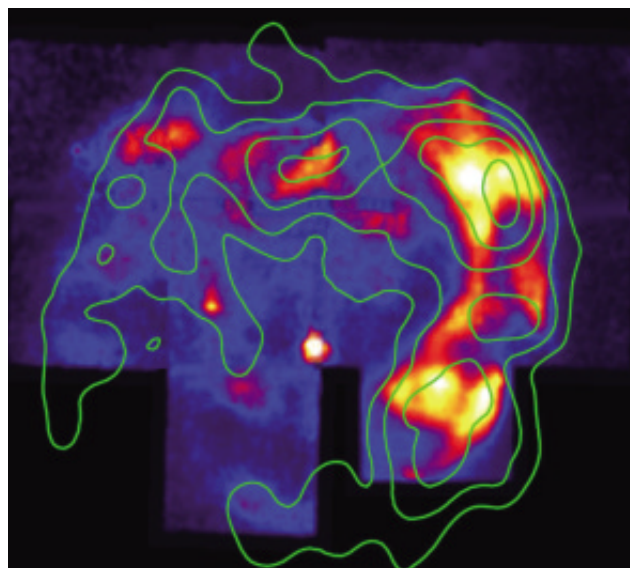


図14 「すざく」衛星による超新星残骸RX J1713.7-3946のX線スペクトル

る研究者も多く、大きな論争になっています。我々の研究により、X線スペクトルとガンマ線スペクトルの両方をうまく説明するには、ガンマ線が陽子から放射されていると考えなければならないことが分かりました。我々は、チャンドラ衛星によるX線画像から同じ結論を得ていますが(詳細は『ISASニュース』2007年12月号、内山泰伸「新星残骸で加速される宇宙線」を参照)、「すざく」の得意とするスペクトルから独立に陽子加速の証拠を得たわけです。

「すざく」衛星はほかの超新星残骸も観測しており、宇宙線の起源について非常に興味深い結果を出し続けています。また、2008年前半には、私が所属しているスタンフォード大学スタンフォード線形加速器センターを中心に開発されたガンマ線観測衛星GLASTが打ち上げられます。「すざく」とGLAST衛星の活躍で、宇宙線加速の理解は飛躍的に進むでしょう。

(たなか・たかあき)

「暗黒加速器」の謎を追え

馬場 彩

JAXA宇宙科学研 究本部
高エネルギー天文学研究系

松本浩典

京都大学大学院 理学研究科

「21世紀になってもまだ、宇宙には人類の知らない天体が存在する」。そんなエキサイティングな結果が発表されたのは、わずか3年前のことでした。ガンマ線望遠鏡H.E.S.S.がテラ電子ボルト(TeV、テラは 10^{12})で天の川の探査を行い、それまで知られていなかった天体を大量に発見したのです。TeVガンマ線は非常にエネルギーの高い光子(可視光の 10^{12} 倍)で、ほとんど光速で走っている素粒子(電子や陽子など)によって生み出されます。つまり、超高エネルギー現象がこれらの天体で起こっているのです。しかし、TeVガンマ線の情報しかないので、正体はまったく分かりません。これら「TeV未同定天体」は「暗黒加速器」などというSFまがいの名前まで付けられ、世界中の研究者がその正体を探ろうと大騒ぎになりました。

天の川、すなわち我々の銀河面は、多くのガスを含んでいます。そのため可視光などはガスに吸収散乱されてしまい、遠くまで見通すことができません。一方、レントゲン撮影からも分かるようにX線は透過力が高いため、天の川を隅々まで調べることができます。また、今まで見つかったことがなかったことから、暗黒加速器はほかの波長では比較的暗い天体であると想像が付き、低ノイズで感度のよい観測が必要です。我々の「すざく」は、暗黒加速器の正体探しに最適です。

くしくも暗黒加速器が発見された2005年、我々は「すざく」を打ち上げました。打上げからわずか2ヶ月後に「すざく」は暗黒加速器候補HESS J1616-508を観測し、X線で「本当に暗い」ことを発見しました(図15左)。X線帯での放射エネルギー(上)は、TeVガンマ線帯のそれ(下)の2%以下しかありません。一方、既知のTeVガンマ線天体はすべてTeVガンマ線帯の方がX線帯より暗いものばかりでした。我々は、「X線で見えない」ことを利用して、この暗黒加速器

が本当に新しい種族の天体であることを示したのです。

しかし、どんでん返しが待っていました。次に「すざく」が観測した暗黒加速器候補HESS J1804-216には、TeVガンマ線放射の真ん中に二つのX線天体が存在していました(図15中央)。しかも、どちらもHESS J1616-508領域のX線放射ほど暗くはありません。また、X線放射はほとんど広がっておらず、大きく広がったTeVガンマ線放射とは形状が異なります。もう一つの暗黒加速器候補HESS J1614-518の場合は、TeVガンマ線の位置に完全に一致する暗いX線天体が存在していました(図15右)。HESS J1616-508とは様相がずいぶん違うのです。

その後、「すざく」は十数個ある暗黒加速器候補を次々と観測しました。ほかのX線天文衛星も我々の成果に驚いてか、一步遅れて追観測を始めています。すると、TeVガンマ線では同じように見えていた暗黒加速器候補が、X線ではさまざまな顔を持っていることが分かってきました。TeVガンマ線と同じような形状をしたもの、それよりコンパクトなもの、明るい位置がずれているもの……。「すざく」がパンドラの箱を開けてしまったのでしょうか。状況はますます混とんとしてきました。

暗黒加速器の正体は何なのか。これを予測する理論もまた混とんとしています。年老いた超新星の残骸、ガンマ線バーストの残骸、未知のパルサー星雲、果てはダークマター対消滅現場。百家争鳴状態です。

暗黒加速器候補発見から3年。パンドラの箱から最後に出てくる「希望」をつかむのは誰か、すでに競争は始まっています。我々は、最初に暗黒加速器候補を発見したH.E.S.S.チームと協力し、「暗黒加速器の正体」という希望をつかむことを目標に、さらなる探査を効率的・系統的に進めています。

(ばんば・あや、まつもと・ひろのり)

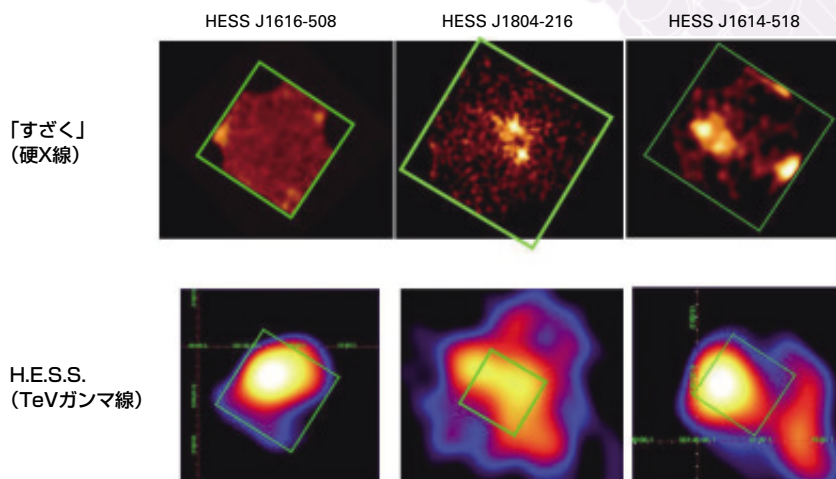


図15 「すざく」(上)とH.E.S.S.望遠鏡(下)で見た暗黒加速器候補
図中の緑四角は「すざく」の視野を表す。

我々の太陽系が属する天の川銀河。その中心約500光年にわたる広い領域から大量の鉄イオンを発見したのは、「すざく」の2代前の先輩、「ぎんが」でした。この鉄イオンは、中性の鉄原子より電子が24個も少なく(Fe^{24+})、超高温のプラズマ状態にあることが推察されます。しかし、本当にそんな高温のプラズマが存在するとしたら、その熱エネルギーは超新星爆発約1000発分と膨大なものになります。しかも、このプラズマは温度が高過ぎて銀河中心の重力でとどめておくことができないため、10万年ほどで拡散してしまいます。つまり、最近10万年の間に、超新星爆発約1000発分のエネルギーが、この領域で解放されたことになるのです。

このエネルギーはあまりに大きいので、①プラズマではなく電荷交換(18ページ「全天を覆うX線の起源を探る」参照)でも同じようなスペクトルになるのではないかと②星がたくさん集まっているのが(まるで点描画のように)広がって見えているのではないかとなどと反論する天文学者が現れました。

これまでの衛星では感度が足りず、それらの反論に答えることができませんでした。しかし、鉄の特性X線を含むエネルギー帯域での感度が高く、エネルギー分解能も優れた「すざく」ならばと思い、打上げ直後から多くの時間を天の川中心の観測に割いてきました。その結果得られた画像を表紙に、中心領域のX線スペクトルを図16に示します。表紙画像の上は中性(電離していない)鉄原子の特性X線の強度分布、下は鉄イオン(Fe^{24+})の特性X線の強度分布を表します。

中性鉄はばこばこした分布をしているのに対し、鉄イオ

ンはおおよそスムーズに分布しています。この二つの特性X線のエネルギー差は5%以下なのに、まったく異なった画像になるのは、X線CCDカメラ(XIS)の優れたエネルギー分解能のたまものです。

図16にある Fe^{24+} の特性X線は、実際には4本の微細構造輝線からなります。CCDの分解能では分解できず1本に見えますが、その起源が高温プラズマであるか、電荷交換であるかによって4本の強度比は異なります。高温プラズマでは6700電子ボルトの共鳴線が卓越し、電荷交換では6636電子ボルトの禁制線が卓越します。その結果、 Fe^{24+} の特性X線の中心値は、高温プラズマでは6680~6685電子ボルト程度、電荷交換では6666電子ボルトになります。徹底的にエネルギースケールの較正を行った結果、数電子ボルトの精度でこの輝線の中心値は6680電子ボルトと求められました。やはり、電荷交換ではなく、高温プラズマだったのです。

第二の反論を検定するために Fe^{24+} の特性X線の空間分布を調べました。表紙の下画像からも分かりますが、左側は右側よりも強度が大きいことを定量的に示すことができました。これは左右対称な星の分布とは異なります。つまり、高温プラズマの大部分は星の集まりではなく、まさに“もやっ”と広がっているのです。

さて、この膨大な量のプラズマは、どうやってできたのでしょうか？ 今度は表紙の上の画像をご覧ください。これは電離していない、つまり冷たい鉄原子の分布を表します。冷たい原子は自分でX線を放射することはできません。外部から照射されたX線を吸収し、再放射された二次的なもので

あると考えられます。このうちいくつかの天体が数年ほどのスケールで時間変動していることを最近、「すざく」は突き止めました。このことから、「300年前、銀河中心ブラックホールは非常に明るく、また暗くなりつつあった。現在は当時の100万分の1の明るさになってしまったが、冷たい原子が300年遅れて(光路差に相当する)今、ちょうどこだまのように輝いている」という描像が成り立ちます。つまり、ごく最近まで銀河中心ブラックホールは活動的だったのです。このブラックホールの爆発的なエネルギーが、高温プラズマをつくり出す原因の一つだったとも考えられます。(ひょうどう・よしあき)

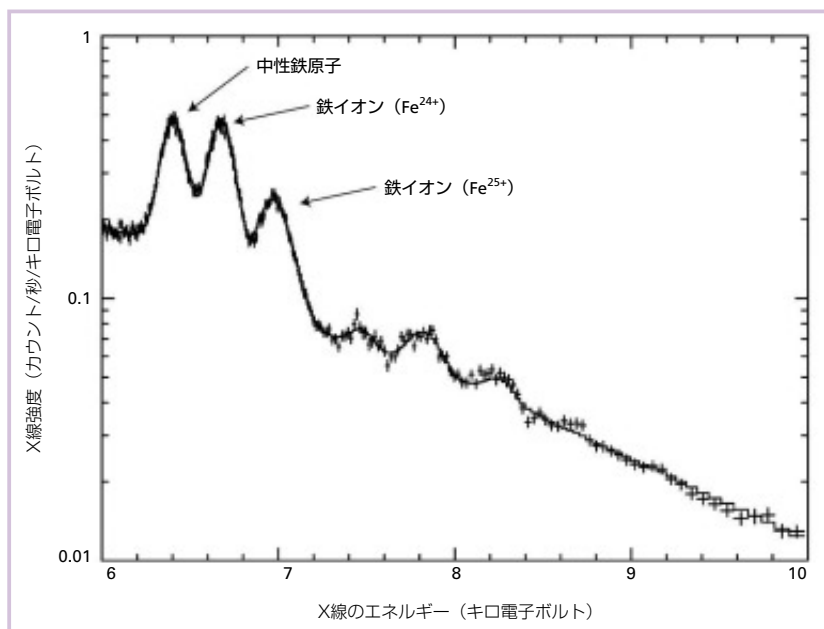


図16 銀河系中心領域のX線スペクトル

X線で暴き出す宇宙に潜む 巨大ブラックホール

寺島雄一

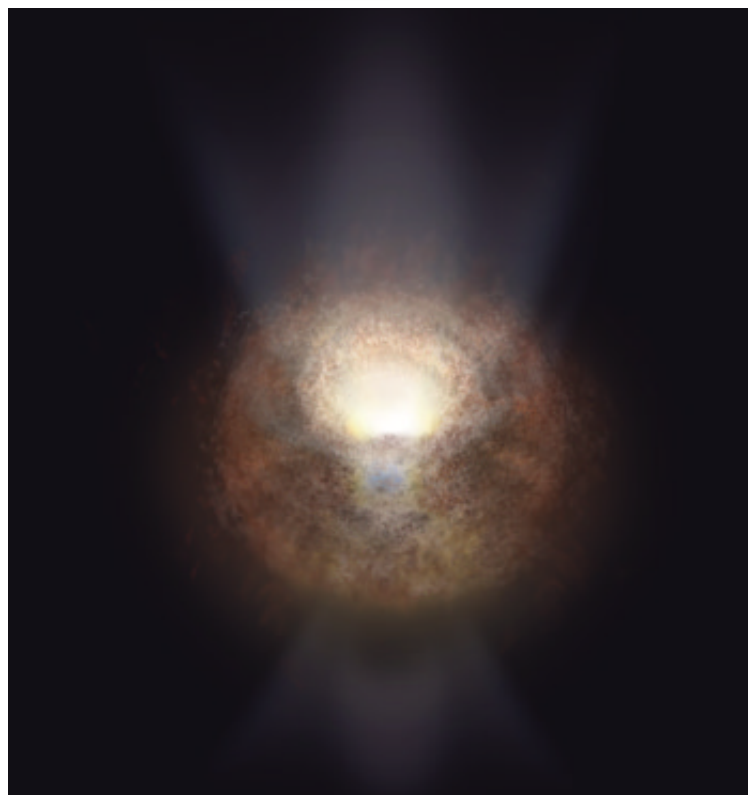
愛媛大学大学院 理工学研究科

宇宙には数多くの銀河があります。そのほとんどは中心に、質量が太陽の100万倍から1億倍という巨大ブラックホールがあると考えられています。ブラックホールがまわりにある物質を吸い込むと、物質は明るく輝き、「活動銀河核」と呼ばれる明るい銀河中心核として観測されます。巨大ブラックホールは銀河がつくられる過程とも密接に関係しているらしく、宇宙全体の進化にも重要な役割を果たしているようです。では、巨大ブラックホールはいったい宇宙にいくつあるのでしょうか。

ブラックホールに迫る強力な方法が、X線による観測です。ブラックホールの周辺につくられた超高温のガスは、X線を大量に放射します。X線を観測することで、ブラックホールのまわりの物質や強力な重力の様子をとらえることができます。また、銀河の中心部は大量の塵などで隠されていることも多いのですが、エネルギーが高く物質を透過しやすい硬X線というX線を使うと、中心核を見通すことができます。X線は、隠されたブラックホールを暴き出すことができるのです。

「すざく」と米国のスウィフト衛星との協力によって、私たちは硬X線で明るく輝く新種の銀河中心核ブラックホールを発見することに成功しました。スウィフト衛星は、硬X線で全天を観測して未知の硬X線天体のカタログをつくることが得意です。「すざく」衛星は、エネルギーの低いX線から高いX線までのX線スペクトルを精密にとらえることができます。これらの特長を組み合わせることで、濃い塵の奥深くに埋もれたブラックホールを見つけ出しました。図17は、「すざく」で得られた、銀河ESO 005-G004の中心にあるそのようなブラックホールのX線スペクトルです。低いエネルギーではX線が吸収されやすいために暗くなっていますが、高いエネルギー

図18 銀河ESO 005-G004の中心核にある巨大ブラックホールの想像図



では透過したX線が明るく見えています。これまでに知られていた隠されたブラックホールのまわりには「トーラス」と呼ばれるドーナツ型の塵が取り巻いていて、ドーナツの穴の部分から漏れた光も一部が観測者の方へ散乱されて見えました。今回発見した天体は、ドーナツの穴がとても小さく、漏れ出たX線がほとんど見えません。ブラックホール周囲の大部分が塵に覆われていたのです。その想像図を、図18に

示します。さらにスペクトルの形を詳しく調べてみると、この天体は相当に厚い塵に覆われてはいるものの、たまたま塵が薄めの方から私たちが見ていることも分かりました。もしドーナツの横方向から観測していたとしたら硬X線をもってしても見つけることができなかったでしょう。

宇宙には発見されていない巨大ブラックホールが想像以上にたくさん潜んでいることは、間違いありません。これからの「すざく」の観測によって次々に新たな巨大ブラックホールが見つかることでしょう。

(てらしま・ゆういち)

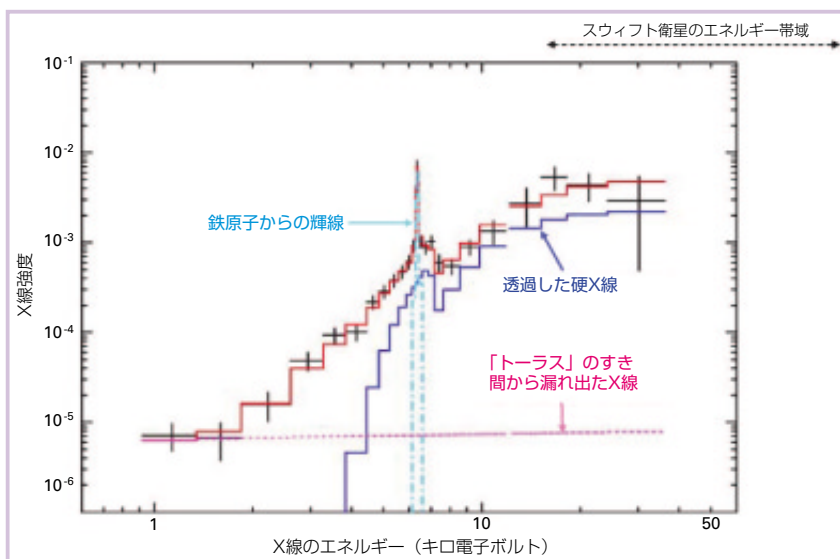


図17 「すざく」で得られた銀河ESO 005-G004のX線スペクトル

見えない陽子の尻尾をつかむ

キューサーの多波長観測で探る ジェットの組成

片岡 淳

東京工業大学大学院
理工学研究科

地球から数十億光年の彼方にありながら、銀河系の星々と同じくらい明るく輝く不思議な天体、それが「キューサー」です。その明るさは太陽の実に100兆倍にも達し、数時間で明るさが大きく変動することから、大きさは太陽系程度に小さいことが示唆されます。強い放射圧で天体がばらばらに吹き飛ばないためには、これを支える強い重力が必要です。キューサーの正体は、太陽質量の1億倍を超える巨大ブラックホールであると考えられています。近年、米国のコンプトンガンマ線天文台(CGRO)の観測で、100個近いキューサーがガンマ線でも明るく輝いていることが分かりました。もちろん、ブラックホールは光をのみ込む存在ですから、光は外に出られません。明るく輝いているのは近傍から飛び出す「宇宙ジェット」で、その速度は実に光速の99%を超えます。しかしながら、ジェットがどこでどのように生成され、何を運ぶのかといった根本的な問題が未解決なのです。これまで「ぎんが」や「あすか」の活躍により、多くのキューサーのX線放射が、ジェットで加速された高エネルギー電子(陽電子を含む)によることが明らかになりました。一方で、ここに潜んでいるはずの陽子や、大多数の低エネルギー電子については、何も情報が得られていません。

見えない陽子の存在を暴くことはできるのでしょうか？キューサーのX線・ガンマ線スペクトルは逆コンプトン散乱によるベキ関数で表されますが、ジェットと並進運動をする低エネルギー電子も降着円盤からの紫外光をたたき上げることが出来ます(これを「バルク・コンプトン散乱」と呼ぶ)。後者は1キロ電子ボルト付近にピークを持つ黒体放射で近

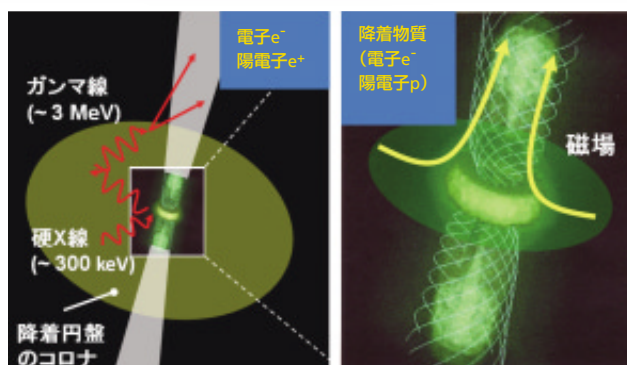


図20 キューサー天体でのジェット形成予想図

降着円盤から吹き出したプラズマがカスケードを起こし、大量の電子・陽電子ペアをつくると考えられる。

似され、逆コンプトン散乱とは明らかに異なるスペクトルとなります。さらに、バルク・コンプトン散乱は電子比率が多いほど強く、ジェットの組成に制限をつけられるはずです。

このような観点に立ち、我々は「すざく」の広帯域と1キロ電子ボルト以下の優れた感度に着目して、キューサーPKS 1510-089の観測を行いました。ここで得られた多波長スペクトルを図19に示します。「すざく」のほかに紫外波長をカバーするスウィフト衛星のUVOT検出器、世界の電波・光学望遠鏡を総動員して、10桁にわたる完全な同時観測に成功しました。「すざく」のX線スペクトルを拡大すると、1キロ電子ボルト付近に盛り上がりが見られ、ベキ成分(逆コンプトン散乱)とは明らかに異なる激しい変動を示しています。これをバルク・コンプトン放射と考えた場合、電子・陽子の個数比は10対1と見積もることができました。つまりジェットの中には、数的には電子(陽電子)よりも少ないが、エネルギー的にはこれを凌駕する陽子が潜んでいることになります。

なぜ、電子が多いのでしょうか？例えば、以下のようなシナリオが考えられます(図20)。まず、回転するブラックホール近傍で、強い磁場に巻き上げられて電子・陽子ジェットが吹き出します。膨大な磁場エネルギーはジェットの並進運動に転化し、数十億度の高温コロナを散乱して大量のガンマ線を生成します。ガンマ線とコロナの硬X線は対消滅を起こすため、もとの陽子よりたくさんの電子・陽電子が生まれます。このようなジェットの本质に迫る観測は、「すざく」が初めて切り拓いたもので、今後のさらなる発展が期待されます。

(かたおか・じゅん)

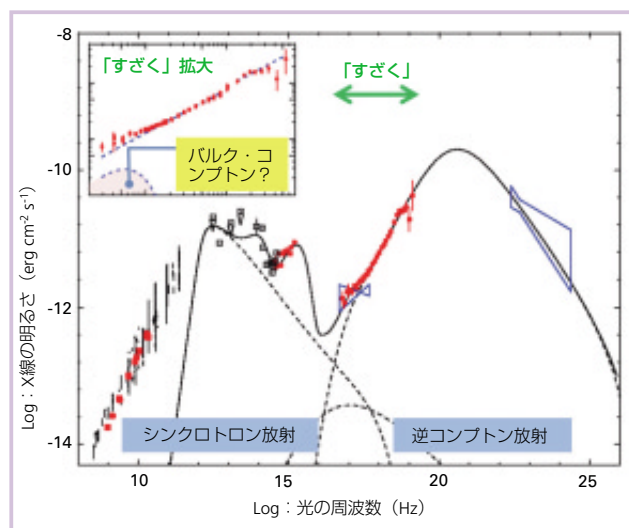


図19 「すざく」を中心とする同時観測キャンペーンで得られたキューサー天体PKS 1510-089の多波長スペクトル

X線のスペクトルは1キロ電子ボルト以下に顕著な超過があり、バルク・コンプトン放射の有力な候補と考えられる。

銀河の大爆発がつくった 巨大プラズマの「帽子」

鶴 剛

京都大学大学院 理学研究科

「すざく」衛星は、おおぐま座の銀河M82から北へ約3万8000光年離れて位置する巨大なプラズマの塊「M82の帽子」から、大量の重元素を発見しました。そして、約2000万年前にこの銀河で超新星爆発約1万個分の爆発が起こり、高速のプラズマ流を放出したことで、この「帽子」がつくられたことを解明しました。「帽子」は小さな銀河に匹敵する大きさ(約1万2000光年×約3000光年)を持っていますが、淡い構造のため、これまで十分な観測をすることができませんでした。高感度の「すざく」は鮮明な「帽子」の撮影に成功し、世界で初めて極めて高い精度のX線データをもたらしたのです(図21)。

X線データ解析の結果、巨大プラズマの温度は約700万度であり、酸素、ネオン、マグネシウム、ケイ素が大量に含まれ、鉄は相対的に半分にすぎないことを見つけました。これらは、銀河の中にのみ存在する巨大な恒星が、超新星爆発を起こしてつくった重元素です。銀河本体から約3万8000光年も離れた「帽子」の中で、それらが発見されたのは実に驚くべきことです。さらに「すざく」は、「帽子」と銀河本体の間からもX線を検出しました。両者を結んで高温プラズマが満たされていたのです。プラズマの速度は秒速数

百km、銀河本体から「帽子」に到達するには約2000万年が必要です。つまり、約2000万年前にM82銀河で大爆発が起こり、超高温プラズマの灼熱風(銀河風)が放出され、今現在、「帽子」と呼ばれる特異な構造をつくったと結論できます。

「すざく」は、天の川銀河中心で超新星爆発が連続的に起こり、巨大な超高温プラズマで満たされていることを明らかにしました。M82銀河で起こったことは、それをはるかに超えた規模の爆発だったのです。実際、現在でもこの銀河の中心には天の川銀河中心の約1万倍に近い質量の巨大プラズマが存在しています。

「あすか」の観測をきっかけに、私たちは2000年9月、このM82銀河から中質量ブラックホールを発見し、10月には電波研究者とともに、その中質量ブラックホールは約100万年前の超新星爆発約1万個の大爆発から誕生したことを明らかにしました。「帽子」も、ちょうど超新星爆発約1万個分の規模です。約100万年前と同様に、約2000万年前の大爆発でも中質量ブラックホールがつくられたらうと、私たちは考えています。

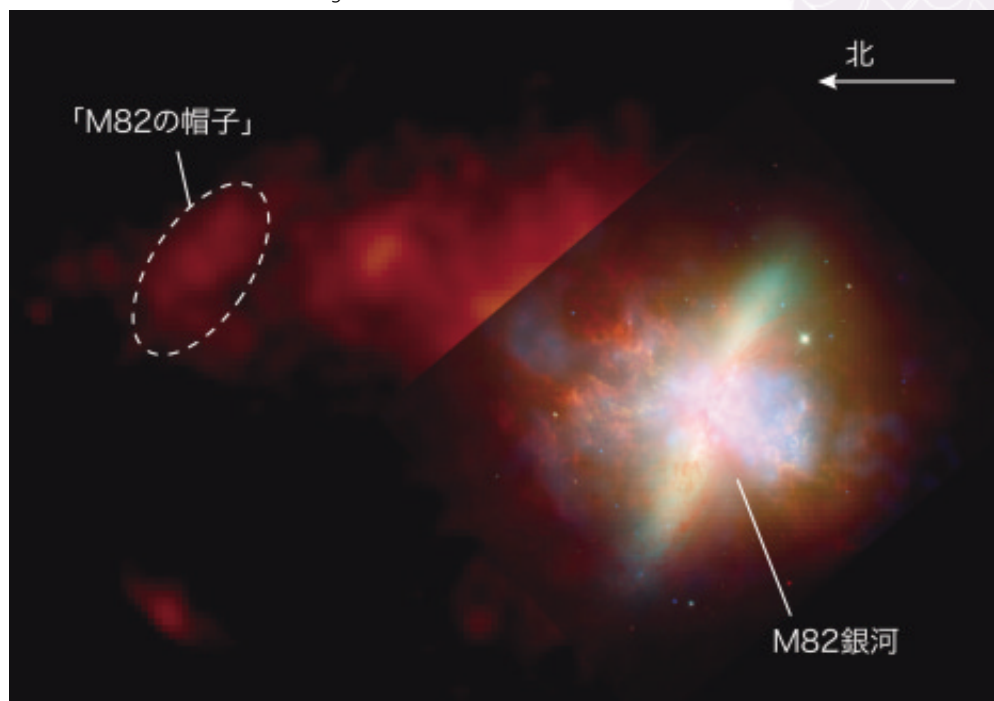
現在もM82銀河は活動を継続しています。これから大爆発を起こし、そして中質量ブラックホールもつくられていくでしょう。一方、「帽子」の巨大プラズマは簡単には冷えません。これから秒速数百kmで宇宙の旅を続けていくことでしょう。

(つる・たけし)

図21 「すざく」の裏面照射型CCDで得たX線画像

M82銀河の場所には、米国のX線天文衛星チャンドラ、ハッブル宇宙望遠鏡、赤外線天文衛星スピッツァーで取得された3色写真を重ねた。

(M82銀河の場所の3色写真は、X線：NASA/CXC/JHU/D.Strickland、可視光：NASA/ESA/STScI/AURA/The Hubble Heritage Team、赤外線：NASA/JPL-Caltech/Univ. of AZ/C. Engelbrachtによる)



銀河団中の重元素から探る 宇宙の化学進化

佐藤浩介

東京理科大学 総合研究機構

超新星爆発による重元素合成

誕生して間もない宇宙には、ほとんど水素とヘリウムしか存在していませんでした。では、私たちの体を構成し、身のまわりにある酸素や鉄といった元素（これらを「重元素」と呼ぶ）は、いったいどのようにしてつくられたのでしょうか？

現在ある重元素のほとんどは、超新星爆発によって合成され、そして宇宙空間へばらまかれました。超新星爆発には、太陽の10倍以上重い星が重力崩壊して爆発するⅡ型と、軽い星の最期である白色矮星の連星系が起すⅠa型があります。Ⅱ型は主に酸素などの比較的軽い元素を生成し、Ⅰa型は鉄などの多くの元素を生成します。よって、さまざまな重元素の量を観測することができれば、これまでⅠa型とⅡ型がどのような割合で起こったかを知ることができます。つまり、宇宙誕生以来どのような星がどのくらい生まれ、そして死んでいったのかという歴史を知ることができるのです。

「すざく」による銀河団の観測

銀河の集団である銀河団は、宇宙で最大の重力的に緩和した天体であり、その強い重力のために銀河団を構成する銀河でつくられた重元素が逃げ出せずに、すべて閉じ込められていると考えられます。また、銀河団中は強い重力で束縛された数千万度という高温のプラズマで満たされていて、図22のようにX線を放射しています。そのX線スペクトルは、図23に示されているようになります。X線スペクトルは、X線のエネルギー（横軸）とX線の強度（縦軸）の相関を示したもので、連続的に分布する成分と元素から放出される成分（線スペクトル）に分けられます。線スペクトルは、特性X線という各元素により固有のエネルギーを示します。図23に示すような特性X線の強度を測定することで、X線を放射する高温プラズマ中にどれくらい各元素が存在しているかを知ることができます。「すざく」は、これまでの衛星と比べて線スペクトルの決定精度が高く、このような観測にとても適しています。

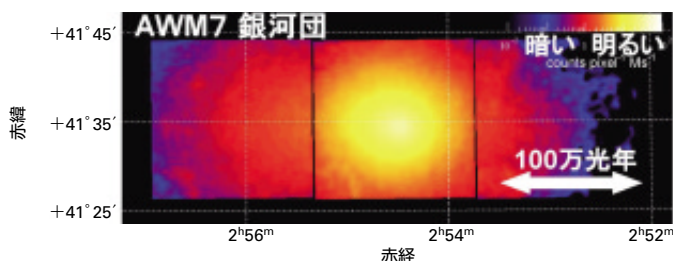


図22 「すざく」で観測したAWM7銀河団のX線強度マップ
図内の色はX線の強度（明るい—暗い）を示している。

銀河団観測から「すざく」が明らかにしたこと

私たちは、4つの銀河団（AWM7, Abell1060, HCG62, NGC507）の観測データを詳細に解析して、高温プラズマ中に含まれるⅠa型、Ⅱ型で合成された重元素の量を求めました。そして、超新星爆発の理論モデルを用いることで、Ⅰa型、Ⅱ型からどのような割合で重元素が生成されたのかを調べました。

その結果、酸素やマグネシウムがほとんどⅡ型で生成されたのに対し、鉄は主にⅠa型で生成されていることが分かりました。また、この結果から銀河団で宇宙誕生から現在までに起こった超新星爆発の総数を求めたところ、Ⅱ型がⅠa型より約3倍も多く起こっていることが分かりました（図24）。現在、銀河団中ではⅡ型はほとんど見られませんが、銀河形成期には現在よりも重い星が多くつくられ、盛んに爆発していた証拠を重元素が残っていたと考えられます。今回得られたⅡ型の回数を、銀河の明るさ当たりの爆発回数は同じとして我々の銀河系で換算してみると、宇宙が始まって以来、数億回爆発したことになります。このような大量の超新星爆発を経て、現在の宇宙は形成されてきたことが分かりました。（さとう・こうすけ）

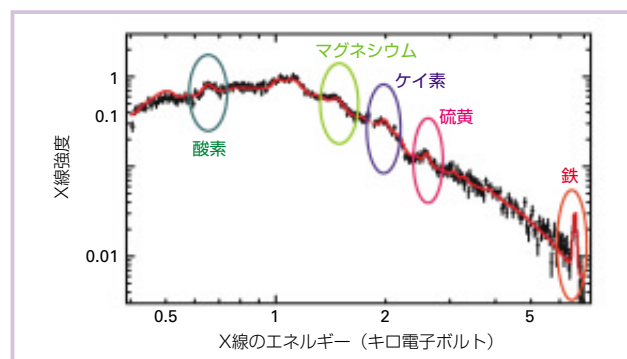


図23 銀河団を満たす高温ガスから放射されたX線のエネルギーごとの強度
丸で囲まれた各元素の特性X線から重元素量を知ることができる。

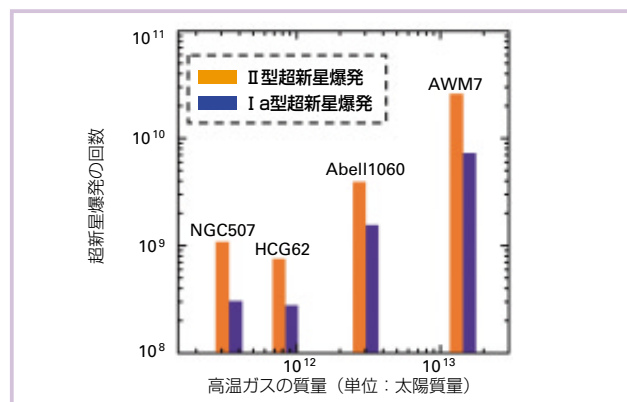


図24 4つの銀河団で求められた宇宙誕生以来のⅠa型、Ⅱ型超新星爆発の総数

宇宙最大の天体，銀河団のダイナミックな進化に迫る

太田直美

JAXA宇宙科学研究本部
高エネルギー天文学研究系

私たちの太陽系がある天の川銀河は、実は、おとめ座銀河団の一員です。では、「銀河団」とはどのような天体なのでしょう。それは、1000個もの銀河が群れをなす宇宙最大の天体です。しかも、これまでに1万個以上も発見されていて、宇宙全体の進化を調べるのになくてはならない存在になっています。ここでは、「すざく」で迫る銀河団の驚くほどダイナミックな進化について紹介します。

銀河団を目では見えないX線で観測すると、何とそこには1億度にも達する高温プラズマの塊が明るく輝いています。しかも、この高温プラズマを一つの場所に閉じ込めておくためには、銀河の重力だけでは足りません。いまだ正体不明の「暗黒物質」と呼ばれる物質が、大量に(太陽の質量の約100兆倍も)潜んでいるのです。さて、こんな巨大な天体が、いったいどうやってできたのでしょうか。

理論によると、銀河団は宇宙の100億年を超える長い歴史の中で成長を続けてきたと予想されています。そして、その成長の様子はとても激しいものです。銀河団同士が秒速数千kmもの猛スピードで衝突しては合体し、それを繰り返しながらさらに巨大な天体へと育っていくのです。衝突が起きると、銀河団中のプラズマがおよそ秒速1000kmものスピードで50億年間も運動し続けるといわれています。しかし、今のところこれを裏付ける証拠はつかめていません。そこで、

我々は優れた感度を持つ「すざく」を用いることで、その検証に挑みました。

最初に観測したのは、我々から1.6億光年の距離にあるケンタウルス座銀河団です(図25)。高温プラズマの運動の測定には、ドップラー効果を活用します。原理は、救急車のサイレンでおなじみのように、プラズマが我々から遠ざかっていけばそれから放射されるX線の波長は伸び、逆に近づいていけば縮むというものです。高温プラズマからはさまざまな元素に由来する特性X線が放射されますが、中でも鉄元素からの特性X線がこの測定に向いています。ただし、たとえプラズマが秒速1000kmものスピードで動いていても、その波長はもとの波長に比べてわずか0.3%しかずれません。

我々は「すざく」のX線CCDカメラ(XIS)検出器を用いることで、ケンタウルス座銀河団を約50個の領域に細かく分け、それぞれの領域を精密に調査していきました。そして図26のように鉄の特性X線をはっきりととらえ、波長を精度よく測定することに成功したのです。それからドップラー効果による波長のずれを調べると、高温プラズマの速度は大きくても秒速1400kmであると求まりました。これは過去の測定の2倍もよい精度を達成しています。今後もこの方法を使いながら、「すざく」により銀河団の謎を解明していきます。

(おおた・なおみ)

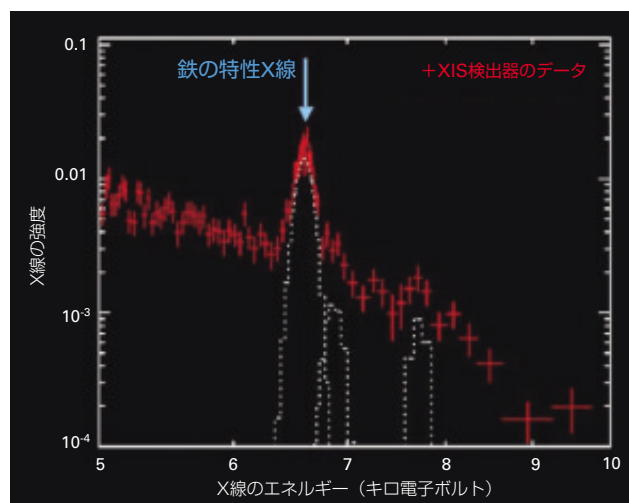
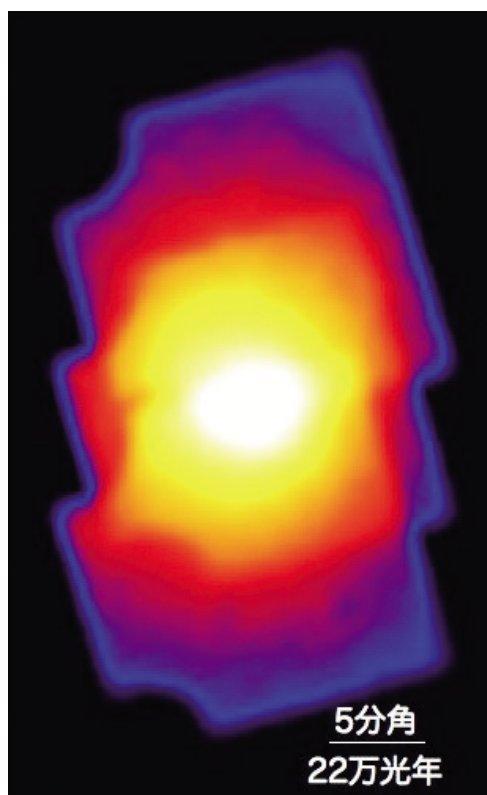


図26 ケンタウルス座銀河団中の高温プラズマからのX線スペクトル

横軸がX線のエネルギーを、縦軸がX線の強度を表す。約6.6キロ電子ボルトにある山が、鉄元素からの特性X線。なお、エネルギー(キロ電子ボルト)の逆数に約12.4を掛け算すると波長(Å)になる。

図25 「すざく」によるケンタウルス座銀河団のX線画像
4600万度の高温ガスが広がっている。

全天を覆うX線の起源を探る

竹井 洋

オランダ宇宙研究機関
高エネルギー宇宙物理学部門

観測というのはふつう、興味のある天体に望遠鏡を向けて行います。しかし、目立った天体がない場所を観測しても、視野いっぱい広がるような放射が見つかります。エネルギーが100～1000電子ボルトのX線で宇宙を見ると、全天のどこを見ても「超軟X線背景放射」と呼ばれる、この広がった放射が見えます。しかし、発見されてから30年もの間、その起源は謎に包まれていました。私たちの住む銀河（銀河系）からのX線と、はるか彼方からのX線が、両方見えているのだと考えられていますが、それぞれどの程度の割合を占めているのか、どのような物質がX線を出しているのかを知るのは、簡単ではなかったのです。

図27の中心にある画像は、超軟X線背景放射の分布です。銀河系の構造（銀河系円盤、バルジ、過去の超新星爆発の名残）が見えており、少なくとも銀河系から来るX線があることが分かります。その起源をさらに詳しく知るには、エネルギーを決めることが重要です。X線のエネルギーからは、X線を出している物質に含まれる元素の量や温度が分かるからです。これは「すざく」のX線CCDカメラ（XIS）の得意技です。図27の四隅に、四つの方向のX線のエネルギーと強さの関係を示しました。酸素、ネオン、鉄に特徴的なX線が見え、場所によって強さが違うことが一目瞭然です。さらに明るさの時間変化も調べ、「すざく」は以下のことを明らかにしてきました。

- ① 太陽風によるX線がかなり存在する：これは太陽風のイオンと地球近くの中性の粒子の間の「電荷交換」という反応によるものです。太陽活動の11年の周期に対応してX線の明るさも変化する、太陽風のフレアが起こったときには、明るさが突然数倍になることもあります。太陽系という身近な領域からのX線がこれほど多いとは驚きでした。
- ② 銀河系内（銀河系円盤、バルジ、超新星爆発の名残）には比較的熱いガスが存在し、このガス中のネオンや鉄からのX線が見えている：この熱いガスは銀河系の構造に沿って存在するようです。
- ③ 銀河系の外から来るX線は銀河系内に比べ暗い：背景放射のほとんどは銀河系内（10万光年程度）から来ており、特に太陽系の近く（100光年程度）からの割合が大きいです。

X線を使った精密な観測は、これまであまり知られていなかった高温ガスの分布を明らかにする唯一の手段です。超軟X線背景放射は、近くからのX線も遠くからのX線も足し合わされたものです。これを理解するのは簡単ではありませんが、太陽系、銀河系、そして銀河団を超える大構造まで、あらゆるスケールの高温ガスの分布を知る手掛かりとなり得るのです。まだまだたくさんの疑問が残っています。銀河で生まれた高温ガスは銀河と銀河の間にまき散らされると

考えられていますが、どの程度広がっているのかは分かっていません。また、何億光年にもわたって広がる、銀河や銀河団を結ぶ高温ガスの大構造が存在するともいわれていますが、その証拠は見つかっていません。「すざく」による観測がこういった謎に答えていくと期待して、私たちは研究を続けています。（たけい・よう）

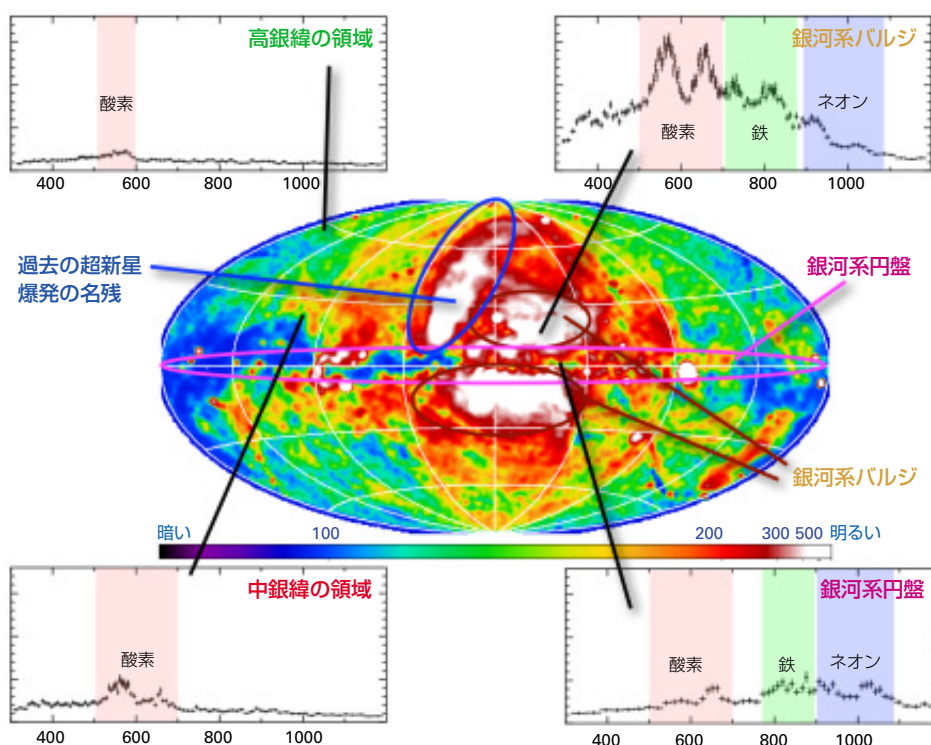


図27 超軟X線背景放射の分布とスペクトル
中心はROSAT全天探査による3/4キロ電子ボルト帯の画像（Snowden et al., 1995, ApJ, 454, 643）。色の違いは明るさの違いを表す。四隅に示したのは「すざく」のX線CCDカメラ（XIS-BI）で得られたX線スペクトル。横軸はX線のエネルギー（電子ボルト）、縦軸はX線強度。精度よくエネルギーを決めることで、各領域の放射がどのような元素によるものかがはっきりと分かる。

「すざく」で見た ガンマ線バースト

山岡和貴

青山学院大学 理工学部

ガンマ線バースト (GRB) とは、数ミリ秒から数百秒の瞬間に、数百キロ電子ボルトのガンマ線を中心とする強力な電磁波を放射する宇宙最大の爆発現象です。その全放射エネルギーは、 10^{51} エルグ以上に達し、これは太陽の放射エネルギーの100億年分に匹敵します。しかし、そもそもGRBがどのように起きているのか、どのようなメカニズムで輝いているのかは、まったくの謎に包まれています。「すざく」も、自慢の高感度広帯域望遠鏡 (X線望遠鏡 [XRT], X線CCD [XIS], 硬X線検出器 [HXD]) と、広帯域全天モニタ (WAM) を使ってこの謎に迫っています。いくつか最新の話題を紹介しましょう。

2005年9月4日、1個のGRBがアメリカのスイフト衛星で発見され、発生方向が決定されました。その情報をもとに「すばる」望遠鏡でも観測が行われ、可視光のスペクトルから、何と128億光年も彼方 (宇宙が生まれて9億年後) にあることが分かりました。これまでに距離が定まったもののの中で、最も遠方のGRBです。「すざく」に搭載されたWAMも、このGRBからの微弱な信号を検出することに成功しています。これは、「すざく」で観測された最も遠い天体です。図28に、WAMで観測されたGRBのスペクトルを、スイフト衛星やウインド衛星などのGRB検出器のデータと並べて示します。特にWAMは100キロ電子ボルト以上の信号を検出し、詳細なスペクトルを得ることに成功しました。さらに全放射エネルギーの見積もりなどから、このGRBの周辺環境は通常のGRBに比べて100倍以上も物質の密度が濃いことが明らかになりました。これは、宇宙初期に星形成が活発であったことを示すものかもしれません。このようにGRBは、銀河形成期の環境を照らすサーチライトとして、宇宙初期を探索する可能性をもたらしてくれます。

また、WAMはショートGRBの起源に迫りつつあります。GRBには継続時間の短いもの (ショートGRB) と長いもの (ロングGRB) の2種類があることが知られており、この二つの起源は異なるとされてきました。ロングGRBは超新星爆発と関連していることが明らかになっていますが、ショートGRBに関しては、まったくの謎です。WAMの大きなガンマ線検出面積によって、初めて両者のエネルギースペクトルの違いを詳細に議論できるようになりました。ショートなものは、スペクトルが硬く、メガ電子ボルト近辺をピークとして放射が起きていることが明らかになったのです。これは、ガンマ線放射に起因する相対論的電子の加速が異なることを意味します。

さらに、2005年11月3日に起きたショートGRBは、WAM

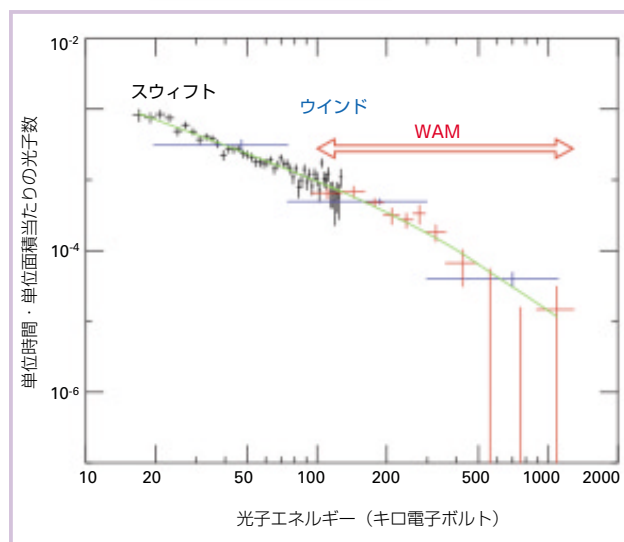


図28 最遠方のガンマ線バーストGRB050904のエネルギースペクトル
スイフト衛星 (黒)、ウインド衛星 (青)、「すざく」の広帯域全天モニタ (WAM) (赤) で検出。WAMはスイフトではカバーできない、100～1000キロ電子ボルトの詳細な情報をもたらしている。

でも観測され、発生方向が数度の誤差で決定されました。その誤差の中に近傍の銀河M81があることが分かったのです。WAMの詳細なエネルギースペクトルを解析したところ、M81から来たと考えて、全エネルギー放射量は意外に小さく 10^{46} エルグでした。これは、2004年12月27日に起きた、我々の銀河系にある軟ガンマ線リピーターSGR1806-20の巨大フレアの光度と同程度です。軟ガンマ線リピーターはマグネター天体とされ、 10^{15} ガウスというとても強い磁場を持った中性子星の候補天体です。もしかしら、ショートGRBの一部は、こうした近傍銀河に存在するマグネター天体の巨大フレアなのかもしれません。

WAMは年間140例を超えるペースで、これまでに300例以上のGRBを観測してきました。ただし、「すざく」はこれだけにとどまりません。GRBのご本尊をWAMで検出し、その爆発の後、数日から数週間にわたって輝く残光 (アフターグロー) をXISやHXDで観測することができます。X線残光観測に対しては一刻も早く観測できるような体制を整え、3例のGRBを観測しました。そのうちの一つは2007年3月28日にスイフト衛星で発見されたもので、発生後約3時間という驚異的な早さで「すざく」を向けることに成功しました。スイフト衛星が発見した、数千秒間にわたって見られる、緩やかな減光をつくり出す機構の解明に向けても、「すざく」の高い感度と、広帯域分光の力に期待が集まっています。
(やまおか・かずたか)

「すざく」の硬X線検出器

「すざく」衛星に搭載されている硬X線検出器 (Hard X-ray Detector: HXD) は、10～600キロ電子ボルトという高いエネルギーを持ったX線 (硬X線) を検出する装置です。硬X線領域の観測は、高い雑音 (バックグラウンド) 環境の中でまばらにやって来る天体からのX線光子を1個ずつとらえるという困難を伴います。しかし、ブラックホール、中性子星、超新星残骸など多くの天体は、硬X線でしか探れない、興味深い高エネルギー現象を引き起こしています。そこでHXDでは、数々の工夫でバックグラウンドを極力抑えることで、感度よく天体からの信号を検出しています。

HXDのセンサ部は、図29のように、16本のセンサユニットを20本のシールドユニットで囲った構成になっています。センサ部からの信号は、アナログ回路部とデジタル回路部に送られて処理されます。また、20本のシールドユニットは、全天モニタの機能も併せ持っています。では、これらのコンポーネントを順番に見ていきましょう。

斬新なデザインでバックグラウンド除去: センサ部

HXDは主検出器として、シリコン検出器とGSOという結晶シンチレータを用いています。天体からの硬X線のうち、より低いエネルギーのものはシリコン検出器によって、より高いエネルギーのものはGSOでカバーします。しかし、これらの検出器をむき出しに置いただけでは、検出した信号が天体からのX線か、それ以外のところから来たバックグラウンドかの区別ができません。

図30のように、HXDでは主検出器を「井戸型アクティブシールド」の底に配置して、1本のセンサユニットを構成しています。この井戸型アクティブシールドは、BGOという結晶シンチレータでできており、単に天体の方向以外から来る宇宙線やガンマ線を止めるだけでなく、止めたことを積極的に信号として知らせてくれます。そのため、宇宙線やガンマ線が検出器の中で跳ね回るときに出る二次的なバックグラウンド信号までも、ほぼ完全に検知できます。こうしてBGOの信号が同時になかった主検出器の信号を選ぶことで、バックグラウンドを徹底的に排除して、天体からの信号のみを選択できるのです。

HXDはセンサユニットを16本、4×4の形に配置し、周囲を20本の柱状のBGOで囲うことで、できるだけ多くのX線を検出するとともに、全体としてより強固なアクティブシールドを実現しています。これらの斬新なデザインにより、図31のように、HXDは実際の衛星軌道上で従来の検出器より飛躍的に低いバックグラウンドで天体を観測することに成功しています。

高感度を支える信号処理: アナログ回路部

アナログ回路部は、センサ部からランダムにやって来る116系統のアナログ信号を独立に処理します。アナログ回路部にやって来る1秒間に数千個もの信号のうち、主検出器からの信号はほんの数個で、ほかの大部分はBGOシールドから来るバックグラウンド信号です。主検出器のうちGSOからの信号は、BGOからの信号と同じ信号ラインで処理されるので、GSOの信号だけを選ばなければなりません。アナログ回路は、両者の波形の違いを見極めて巧みにGSO信号だけを取り出し、デジタル信号に変換してからデジタル回路部に送ります。

シリコン検出器からの信号は、GSOやBGOの信号とは独立に処理されて、やはりデジタル信号に変換されてからデジタル回路部に送られます。このとき、アナログ回路はBGOに同時に信号が来ていないかどうかを見ていて、シリコン検出器だけから信号が来ているものを選ぶことができます。さらに、あるユニットの主検出器に信号があったとき、周囲のユニットに同時に信号が来ていたのかも見ています。ユニット間の同時信号があった場合は、それを除くことで、さらに低いバックグラウンドを実現しています。

これらの複雑な処理を、アナログ回路部はわずか27ワットの電力で行っています。衛星は太陽電池で動いていて電力が限られていますから、家庭の電球より少ない電力で働かなければなりません。それでもセンサ部の性能を最大限に引き出すべく、アナログ回路部は手際よく働いています。

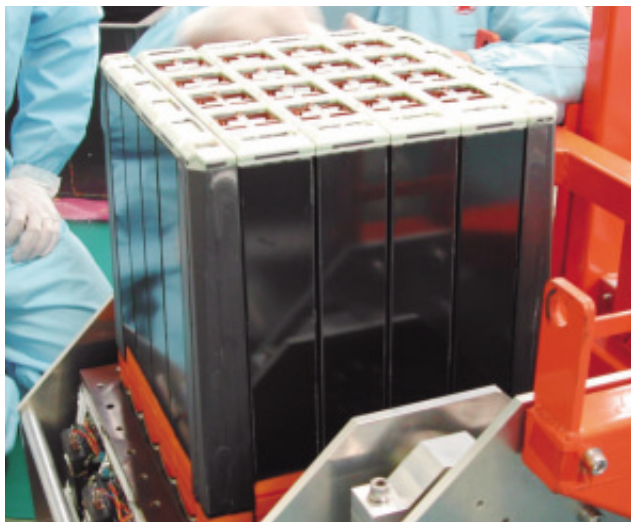


図29 組み上げ作業中の硬X線検出器 (HXD) センサ部

16本のセンサユニットが20本のシールドユニットで囲まれている。シールドユニットが黒く見えているのは、BGO結晶を補強するための強化プラスチック。ユニット上部に見える緑と黒のしまは、防振用のゴムである。

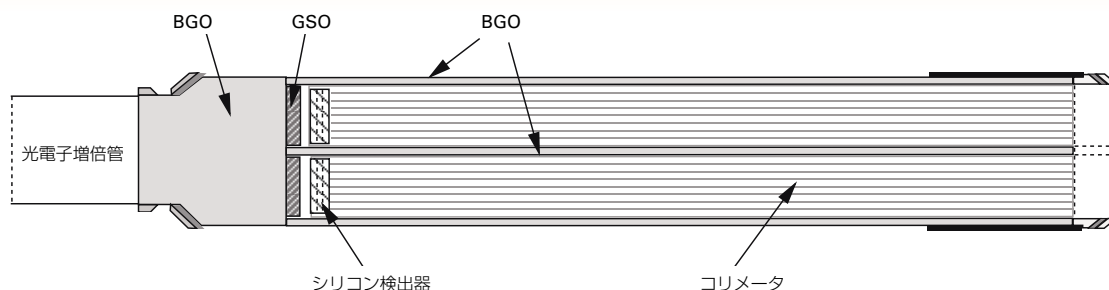
理化学研究所

広島大学大学院 理学研究科

スタンフォード大学
スタンフォード線形加速器センター

日本大学 理工学部

広島大学大学院 理学研究科



効率的なデータ編集：デジタル回路部

HXDのデジタル回路部は、HXDのコンポーネント中で唯一CPU（中央処理装置）を持っており、毎秒数千個にも達するランダムな信号をアナログ回路部から受信し、そのデータを編集した上で衛星本体に送信しています。

CPUと聞くと、クロック数が超高速(数ギガヘルツ)で、ファンで空冷している最新型を思い浮かべる方もいるでしょう。しかし衛星で使うCPUは、壊れにくいことはもちろん、省エネなども重要です。太陽電池の発電量は限られていますし、真空中ではファンで空冷できないので発熱量を抑えなければならないためです。そこでデジタル回路部では、80386というCPUを12メガヘルツ(メガはギガの1/1000)のクロックで駆動させることで、消費電力をわずか5ワットに抑えています。これだけ発熱量が少ないと、ファンを付けなくても宇宙で正常に動作させられます。

CPUが低クロック数であっても、デジタル回路部はプログラムを最適化し、データ処理を高速化することで、ランダムで高いレートの入力信号に対処しています。また、1つのX線光子の検出位置や時刻、エネルギーといった情報を2バイトに抑えることで、扱うデータサイズ自体もコンパクト

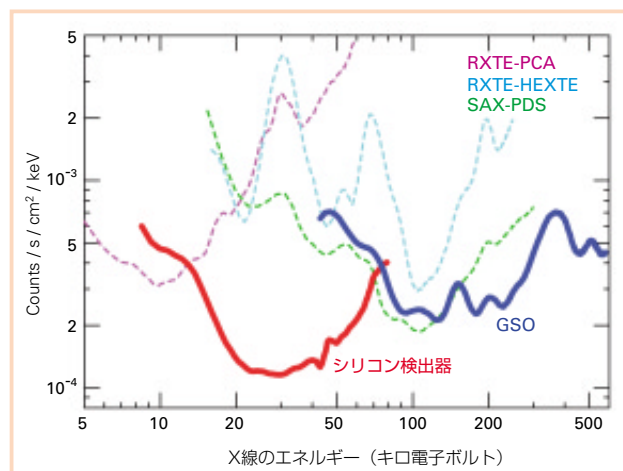


図31 HXDのバックグラウンドレベル

赤線がシリコン検出器で、青線がGSOのバックグラウンドレベル。点線で示した過去の衛星の検出器に比べて、低いバックグラウンドレベルを達成している。

図30 HXDのセンサユニット1本の断面図

天体からのX線は図の右側から入ってきて、シリコン検出器か、GSO結晶シンチレータで検出される。

にしています。2バイトは、普通のパソコンなら日本語たった1文字の情報量です。衛星という電力と資源の限られた環境に適応すべく、デジタル回路部は効率的にデータ編集をしているのです。

もう一つの観測装置：広帯域全天モニタ

広帯域全天モニタ(Wide-band All-sky Monitor:WAM)とは、センサユニットの周囲に配置されている20本のシールドユニットの総称です。WAMはセンサユニットに対するシールドの役割のほかに、明るい天体に対する全天モニタとしての機能もあります。つまり、HXDのもう一つの観測装置でもあるのです。

WAMは宇宙線にさらされているため、バックグラウンド信号のレートだけでも毎秒数万個にもなります。これほど高いレートでは、光子ごとのデータ取得は困難なので、1秒ごとに積算したデータを取得するようになっています。非常に厚いBGO結晶を使っているため、WAMがカバーするエネルギー帯域は50～5000キロ電子ボルトと広く、エネルギーの高いガンマ線にまで及びます。WAMのアナログ回路では、回路の雑音を限界まで抑えて高エネルギー光子のデータを取得できるように工夫がなされています。

WAMは、宇宙のあらゆる方向からの光子に感度があり、海外の衛星では観測できない高エネルギー光子の観測を大面積で行うことができます。暗い天体の観測はできませんが、いつでも起きるか分からないガンマ線バースト、軟ガンマ線リピーター、太陽フレアなど、突発的に明るくなる天体現象を観測するには最適です。WAMは現在、1年間に約140個のペースでこのような天体現象を見つけており、海外の衛星と協力しつつ研究を進めています。

(かわはらだ・まどか、たなか・たかあき、たかはし・ひろみつ、
おおの・まさのり、こう・ひでよし)

「すざく」のX線CCDカメラ

残らず集めて漏れなく運ぶ：電子のバケツリレー

最先端の成果は、最先端の観測装置から生まれます。「すざく」搭載X線CCDカメラ(X-ray Imaging Spectrometer: XIS)も例外ではありません。X線CCDカメラ自体は実用化されてからすでに十数年たちますが、XISはさまざまな工夫により世界最高の性能を発揮しています。XISの特徴について紹介しましょう。

X線CCDカメラといっても、その原理は市販のデジタルカメラと基本的に同じです。入射した光が空乏層で光電吸収され、その際に生成された電子正孔対のうち、電子を読み出すことにより光を検出します。CCDの表面には、電子を移動させるための電極が実装されており、周期的に変化する電圧を印加することで生成された電子を読み出し口まで転送し、電気信号に変換して出力します。ただ、可視光用のCCDとX線CCDでは、その動作に大きな違いがあります。可視光では、光の粒子(光子)が1個入射すると、電子正孔対が1対だけ生成されます。通常、1画素に多数の光子が入射するので、画素中の電子の数を数えることは、入射光の強度を測定することに対応します。一方、X線光子ははるかに大きなエネルギーを持つので、空乏層で光電吸収されると、そのエネルギーに比例して何千という電子正孔対をつくります。したがって、電子の個数を数えることにより、入射X線のエネルギーを測定することができるわけです(これを天文用語で「分光」という)。そのためには、1画素に入射するX線光子は1個でないといけません。幸か不幸か、天体からやって来るX線は大変弱く、通常はいくら望遠鏡で集めても1画素に複数のX線光子が入ることはありません。つまり、X線CCDカメラは撮像と同時に分光ができ

るわけです。

このようなX線CCDカメラは、1993年に打ち上げられた「あすか」で初めて用いられました。その結果、従来使われていたガス検出器と比べて、1桁近くエネルギー分解能を改善できました。その特長を活かして、「あすか」は数々の素晴らしい成果を挙げました。X線CCDカメラは、今や撮像分光観測に必須の機器となっており、「すざく」のほか、欧米のチャンドラ衛星やXMMニュートン衛星にも搭載されています。図32が、「すざく」に使われているCCDの写真です。「すざく」には、このようなCCDを用いたX線カメラが4台搭載されています。

さて、本題であるXISの特徴について、以下に紹介しましょう。

背面照射型CCD

X線というと透過力が強いというイメージがあるかもしれませんが、実は軟X線は大変吸収されやすく、その精度よい検出には工夫が必要です。CCDの表面にある電荷転送用の電極、これは厚さが $1\mu\text{m}$ 足らずのものですが、このわずかな層が軟X線の検出には邪魔になります。そこで、CCDの反対側の面、つまり電極のない面(これを背面と呼ぶ)から光を入射させるよう工夫したのが「背面照射型CCD」です。背面には複雑な電極構造がなく、空乏層がむき出しに近い形になっているので、軟X線も効率よく検出することができます。ただし、背面照射型CCDは製作が難しく、また、光電吸収により生成された電荷の収集が不完全になりがちで、表面照射型CCDと同じエネルギー分解能を達

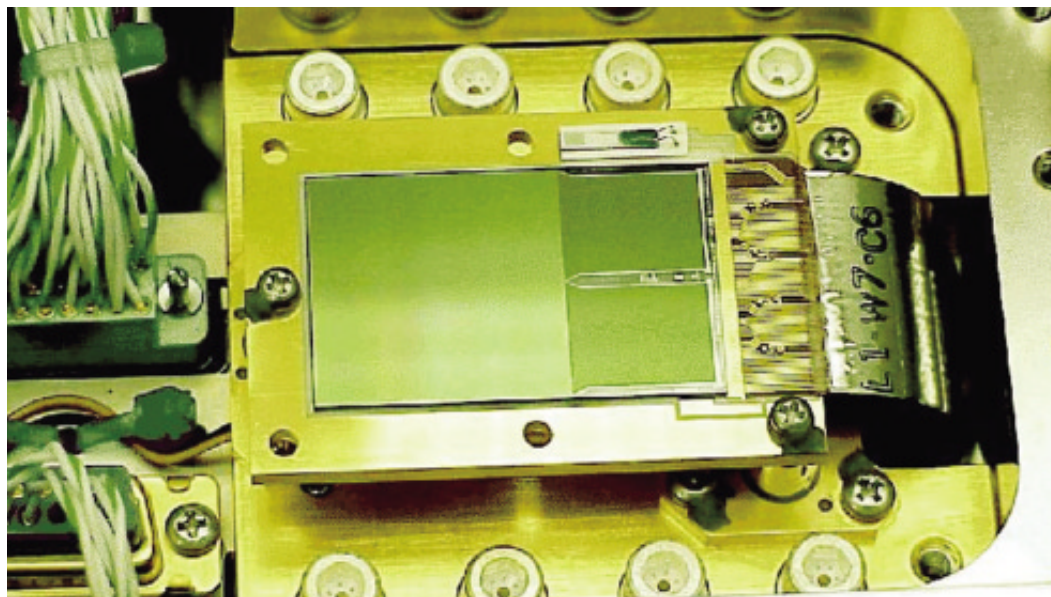


図32 「すざく」搭載X線CCDカメラ(XIS)のCCDチップ

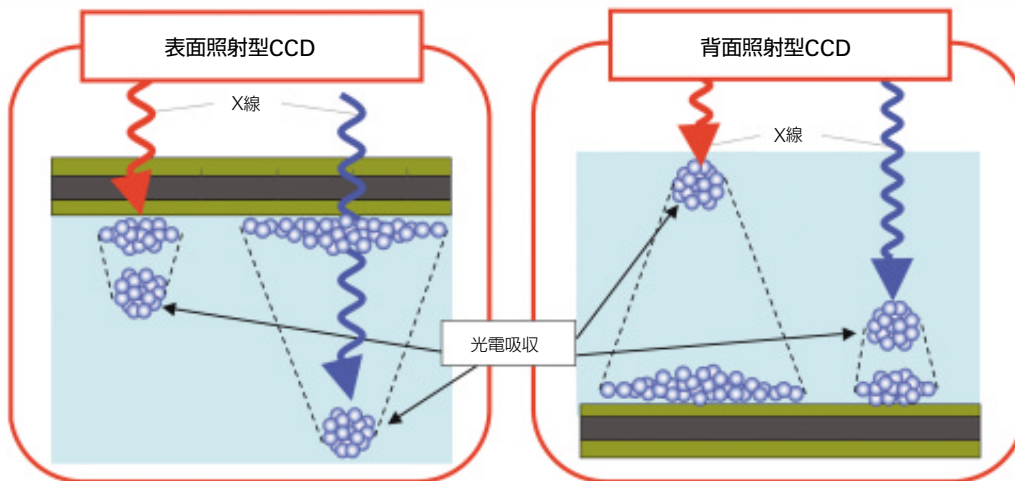


図33 表面/背面照射型CCDにおけるX線の光電吸収の様子
グレーおよび抹茶色の層が電極構造を示す。赤色が軟X線、青色が硬X線。

成するのが困難でした。

電荷の収集が不完全になる理由の一つとして、背面付近では電場が弱いことが挙げられます。表面にある電極に徐々に電圧をかけていくと、空乏層が表面から成長し、やがて背面にまで到達してCCD全体が完全空乏化します。ただし、背面付近は電極から最も遠いため、必然的に電場も弱くなります。したがって、軟X線の光電吸収により生成された電子が背面付近でもたもたしているうちに、その一部が再結合などで失われて、電荷収集が不完全になってしまいます(図33)。これを防ぐには、背面付近の電場を強くすればよいわけです。XISでは背面の化学処理により、酸素の陰イオンを含む数ナノメートルの層をつくり付け、これにより電子の収集効率を改善しました。その結果、背面照射型CCDとしては世界最高のエネルギー分解能を達成しています。XIS全4台のうち1台で背面照射型CCDが用いられています。

図34 電荷注入の仕組み
四角がCCDのピクセルを表す。



電荷注入機能

宇宙空間は、電子機器にとって大変過酷な環境ですが、特にCCDにとって問題になるのは宇宙線です。これは、宇宙空間を飛び交う高エネルギーの荷電粒子(主に陽子)で、CCD素子に入射すると、半導体結晶中に格子欠陥をつくってしまいます。この格子欠陥は、転送中の電荷の一部をとらえてしまうことから、「電荷トラップ」とも呼ばれます。衛星が地球を周回し続ける限り、電荷トラップは時間とともに増加していき、転送中の電荷損失も徐々に大きくなっていきます。電荷が転送中に失われてしまうと、入射X線のエネルギーが正確に測定できなくなるので大問題です。

XISは、電荷転送効率を回復する目的で、衛星搭載用CCDとしては世界初となる電荷注入機能を実装しています。これは、あらかじめ制御された量の人工電荷を撮像領域に注入する、というものです。撮像開始前に、この機能を用いて人工電荷を54行ごとに撮像領域に配置しておきます。撮像終了後、人工電荷はX線がつくる電荷とともに

転送されますが、このとき自らの電荷を犠牲にして電荷トラップを埋める働きをします(図34)。人工電荷によってならされた後の道を通るので、X線がつくる電荷は損失なく読み出し口まで到達できるようになります。

私たちは2006年8月に機上での動作試験を行い、電荷注入によって電荷転送効率が打上げ直後の水準にまで回復することを実証しました。この成功を受けて、現在では定常的に電荷注入を実施しており、常に最高の性能で観測ができるようになっています。

(もり・ひでゆき、どうたに・ただやす)

X線マイクロカロリメータ

X線天文学の未来を切り拓く 分光技術の最前線

X線マイクロカロリメータ(X-Ray Spectrometer:XRS)は、「X線微少熱量計」と呼ばれるセンサを用いたX線分光装置です。日米国際協力によって開発が進められました。その特長は分光能力、つまり「X線のエネルギー(波長)を見分ける能力」が非常に優れていることです。X線CCDカメラ(X-ray Imaging Spectrometer:XIS)のようなシリコン半導体を用いたセンサと比べて20倍以上、チャンドラ衛星やXMMニュートン衛星に搭載されている回折格子を利用した分光装置にも負けない分光性能を持っています^{*1}。XRSで観測を行えば、従来は1本に見えていた輝線の細かな構造を分離することができ、X線天体の温度、密度、元素組成や運動の様子をこれまでとは質的に異なる精度で求めることが可能になります。それ故に、X線天文学の新時代を切り拓く観測装置として、世界中の天文学者から期待されていました。残念ながら不具合があって天体観測を行うことはできませんでしたが^{*2}、人工衛星上でX線マイクロカロリメータの動作を世界で初めて実証し、今後につながる大きな成果が得られました。本記事では画期的な性能を持っていたXRSのセンサと冷却装置についてお話しします。

X線のエネルギーを温度上昇として測る——XRSの動作原理

X線マイクロカロリメータでは、非常にユニークな方法でX線を検出しています。X線光子がセンサで吸収されると、吸収されたX線光子のエネルギーに応じて素子の温度が少しだけ上昇します。X線マイクロカロリメータではその温度上昇を正確に測定することで、入射したX線光子1個1個のエネルギーを求めているのです(図35左)。ただし、温度上昇はごくわずかなので、普通の方法では分かりません。そこで、センサの温度を極低温に冷やします。そうする

ことによって、温度変化が相対的に大きくなります。XRSの場合にはセンサの温度を絶対温度0.06度(K)にまで冷却します^{*3}。もちろん、温度計も感度の高いものが必要です。

実際のセンサは、シリコン基板を加工して製作します。XRSではセンサ部分をシリコンの細い梁で支える構造にしています(図35中)。それにより、X線光子を吸収した際にセンサ部分の温度だけが上昇し、やがて梁を通してその熱が逃げることで元々の温度に戻ります。温度計は、センサ部のシリコンにリンとホウ素を不純物として打ち込んで製作します。打ち込み量を絶妙の値に設定することで、0.06 K付近で感度の高い温度計を実現するのです。さらに、X線を吸収するための「X線吸収体」を接着剤で貼り付けます(図35右)。大きさ約0.6 mm四方、厚み8 μ mのX線吸収体をすき間15 μ m間隔で貼り付けていくのは、まさに職人技です。

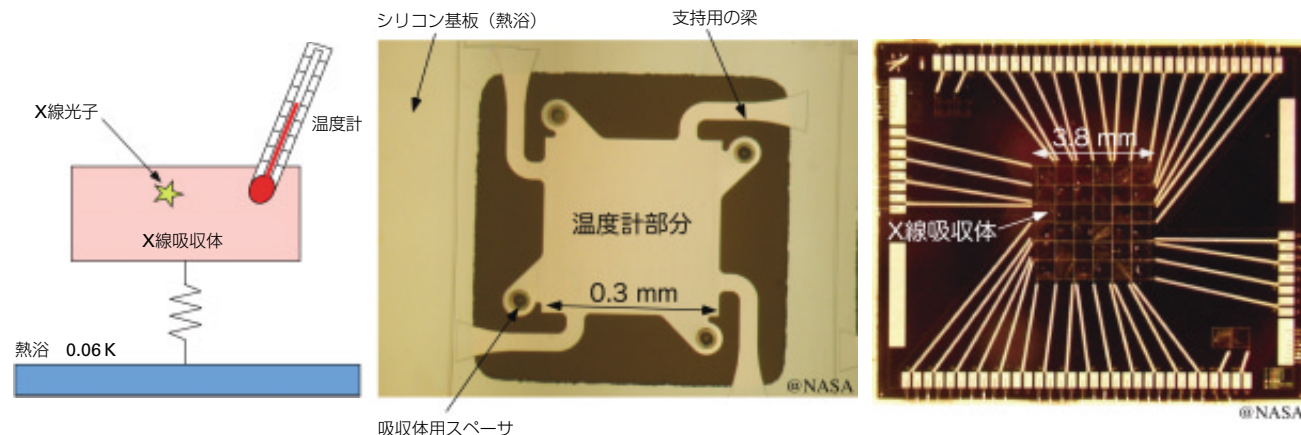
センサを0.06 Kに冷やす——XRSの冷却装置

XRSではセンサを0.06 Kにまで冷却するために、液体ヘリウムと断熱消磁冷凍機を使用しています。さらに、液体ヘリウムの寿命を延ばすために、固体ネオンと機械式冷凍機も採用しました(図36上)。

ヘリウムはすべての元素の中で最も沸点が低い元素です。1気圧下では4.2 Kで液化しますが、真空ポンプでヘリウムを引くことでさらに温度を下げるができます。宇宙空間は非常によい真空ポンプですから、これを利用することによって液体ヘリウムの温度は1.3 K程度にまで冷却され、その状態で少しずつ蒸発していきます。断熱消磁冷凍機はこの温度からスタートして、さらに低温をつくり出します。超伝導磁石を使って磁性体に数テスラの強い磁場をかけて磁性体を磁化させ、次に外部との熱のやりとりを断った状態で磁場を弱めます。そうすると磁性体の磁化がなくなり、その際に熱を吸って磁性体の温度が下がります。大学の熱力学の教科書に出てくる断熱消磁冷却の原理が、そのまま宇宙用の極低温冷凍機として応用されているのです。

液体ヘリウムは数Kの極低温を必要とする人工衛星(「すざく」や

図35 左：X線マイクロカロリメータ(XRS)の模式図。X線光子がX線吸収体で吸収された際の温度上昇を高感度温度計で計測しエネルギーを求める。吸収した光子のエネルギー(熱)はある時間がたつと熱浴に逃げていく。
中：XRSの1素子。シリコン基板を加工して、細長い梁でX線検出部を支える構造をつくっている。温度計部分には不純物が打ち込まれている。
右：XRSセンサ。XRSは6×6のアレイで、36個のX線吸収体がそれぞれの温度計に貼り付けられている。受光部分の1辺は3.8 mm。



藤本龍一

金沢大学大学院 自然科学研究科

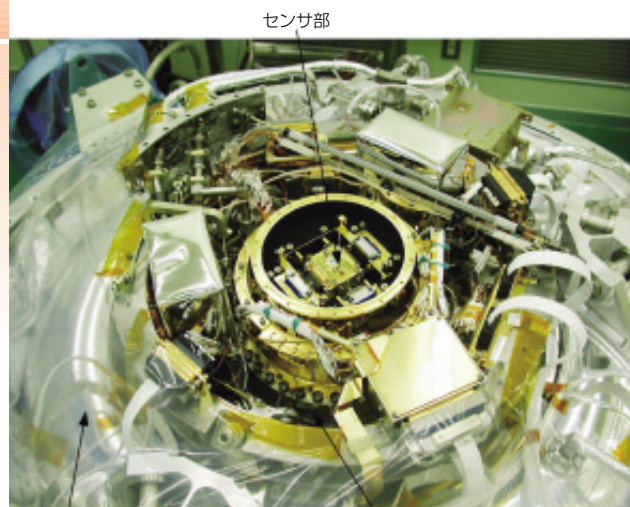
「あかり」などで広く使われていますが、液体ヘリウムが徐々に蒸発してなくなってしまうとそこで低温が維持できなくなり、その装置を使った観測が終了してしまいます。したがって、液体ヘリウムの寿命を極力延ばすことが重要です。一つの方法は大量の液体ヘリウムを持っていくことで^{※4}、もう一つの方法はヘリウムの蒸発量を減らしてヘリウムの量は少なくともそれを長持ちさせる方法です。「すざく」ではヘリウム容器のまわりを固体ネオンで覆って保護し、さらにその外側を機械式冷凍機で冷却することで、わずか30リットル強の液体ヘリウムを3年以上持たせることを目指していました。

ネオンは、1気圧下では27 Kで液体に、24 Kで固体になります。減圧すると凝固温度はさらに下がり、17 K程度になります。したがって、ヘリウムのまわりに固体ネオンを配置することによって17 Kの温度で保護することができ、ヘリウム容器に流れ込む熱量を抑えることが可能になるのです。XRSで使用した固体ネオンの容量は約120リットル、重量にすると約200 kgです。ところで、固体ネオンをどうやって容器の中に入れたのでしょうか。そもそもヘリウム同様、ネオンも日本ではほとんど採れません。「すざく」で使用したネオンはすべて、液体の状態でアメリカから輸入したものです。ちょうど液体ヘリウムを転送するように、ネオン容器に液体ネオンを転送します(図36下)。次に、ネオン容器のまわりにある配管に液体ヘリウムを流し、それによってネオンの温度を徐々に下げて固化させます。この作業にはまる1週間かかりました。ネオンはとても高価で、しかも固化させるのに大変な手間と時間がかかるので、一度固化したネオンはそのまま封じ切り、打上げまでその状態を維持します。その間約10ヶ月。ほっておくとネオンは融けて容器からあふれてきますから、固体ネオンのまわりに液体ヘリウムを流して冷却するという作業を、打上げまで定期的に続けました。

最後の大仕事、「冷たいヘリウム」の充填

1気圧下で液体ヘリウムを転送し、真空ポンプで引くと、温度が下がると同時にヘリウムの量も減ってしまいます。そこで打上げ直前に、「トップオフ」呼ばれる、冷たいヘリウムの充填作業を行います。まずヘリウム容器を4.2 Kの液体ヘリウムで満タンにし、容器を真空ポンプで引いて温度を下げます。この状態でヘリウムの量が半分くらい減ってしまいます。次に液体ヘリウムを供給する側の容器をやはり真空ポンプで引き、温度を下げます。そして冷たいヘリウムを転送するのです。この作業を何回か繰り返すことにより、ヘリウム容器を冷たいヘリウムで満たすことができます。この作業は打上げの前夕日に、衛星がロケットの先端に載っている状態で行われました。文字通り、打上げ直前の最後の大仕事です。

以上、XRSのセンサと冷却装置について見てきました。打上げ



断熱消磁冷凍機と液体ヘリウム容器 (写真では見えない)



図36 上：XRS冷却装置の内部の様子。写真中央にセンサが入ったケースがあり、断熱消磁冷凍機と液体ヘリウム容器はその下にある(写真では見えない)。その周囲にあるビニールシートでカバーされているところが固体ネオン容器。下：液体ネオン転送の様子。写真左がXRS冷却装置で、右後方に見えるパイプがネオン転送管。手前は冷却用のヘリウム配管。

後、センサは無事に0.06 Kまで冷却され、試験用の放射線源を使って、所期の性能を達成していることも確認できました。しかしながら観測開始には至らなかったことは、最初に述べた通りです。X線マイクロカロリメータによる観測は、次期X線天文衛星NeXTに持ち越されました。不具合発生原因も徹底的に究明され、XRSで得られたさまざまな教訓がNeXT衛星に反映されます。機械式冷凍機の進歩に伴い、NeXT衛星では固体ネオンが機械式冷凍機に置き換わり、液体ヘリウムは使用するもののその寿命は大幅に延びる予定です。次の機会にはぜひ、NeXT衛星による観測成果について報告させていただきたいと思います。(ふじもと・りゅういち)

※1 回折格子はX線のエネルギーが低くなる(波長が長くなる)ほど有利になるのに対して、X線マイクロカロリメータはエネルギーが高くなる(波長が短くなる)ほど有利である。また、回折格子では観測対象が広がっている場合に性能が劣化するという欠点があるのに対して、X線マイクロカロリメータでは観測対象が広がっていても性能は変化しない。

※2 不具合原因については、JAXAプレスリリース
http://www.jaxa.jp/press/2006/01/20060125_sac_suzaku_j.html
に報告されている。

※3 Kは「ケルビン」と読み、絶対温度の単位。絶対温度(K) = セ氏温度(℃) + 273.15。0 Kが最も低い温度。

※4 例えば、1995年に打ち上げられたヨーロッパの赤外線天文衛星ISOでは、2000リットルもの液体ヘリウムが搭載された。

もっと光を！ 世界で最も軽く安いX線望遠鏡

岡島 崇

NASA
ゴダード宇宙飛行センター
ジョンズ・ホプキンス大学

天体望遠鏡は、天体からの光を曲げて(集光して)検出器面上に天体の画像をつくるための道具です。しかし、X線といえば「レントゲン」。人体を貫いて真っすぐ突き進むことができるほど透過力の強い光。そんなX線をいったいどうやって曲げるのでしょうか？

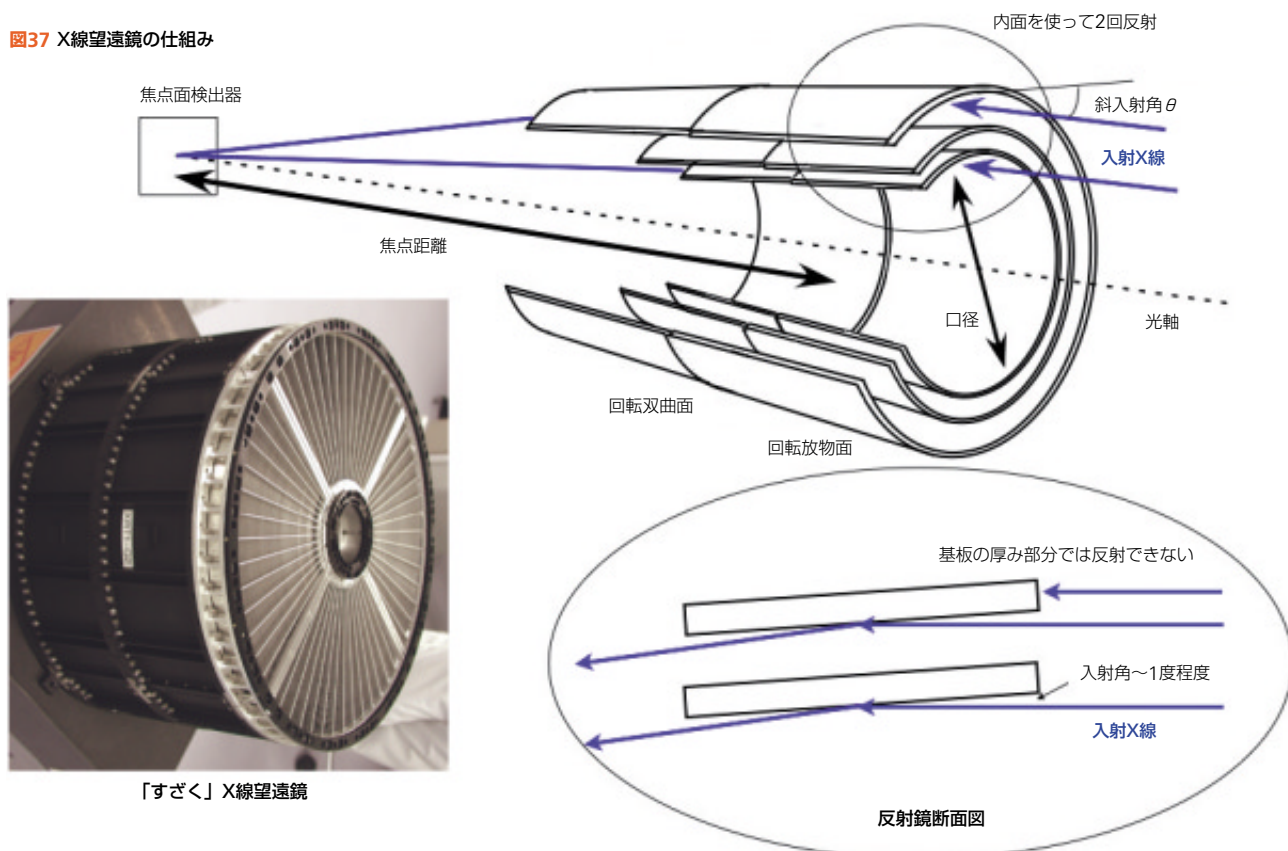
実はX線は非常に滑らかな金属鏡面(凹凸の高低差がわずか数千万分の1cm)に、鏡面すれすれ(鏡面から1度程度)に入射したときのみ、効率よく反射できます。川や湖の水面に石を投げて何度もジャンプさせる遊びに似ています。この性質を利用してX線の進行方向を曲げます。そのため望遠鏡内部の反射鏡は、鏡面を入射X線に向けているというよりも、むしろ横を向いています(図37)。また、バウムクーヘンのように鏡を同心円状に配置して、より多くのX線を集めています。各反射鏡は、すでにしたような滑らかな鏡面を持ち、かつ、シャープな画像を撮るために精密な形状を持っていなければいけません。このような反射鏡は通常、数cm厚の反射鏡基板を磨いてつくります。しかし、重量が増え、コストも大幅に増加します。それだけではなく、基板の厚み部分ではX線を反射できないため(図37)、集光能力が低下します。人工衛星に搭載する観測装置は、小さく、軽く、できるだけ低予算でつくり上げることが必要不可欠です。その限られた条件の中で十分な観

測性能を達成したい。反射鏡基板の厚さをできるだけ薄くし、それこそペラペラの反射鏡にしたいと考えました。

そこで、NASAのゴダード研究所のセレミトス博士らが考えた出したのが「レプリカ法」です。この方法では、鏡面が十分滑らかで円柱状のガラスの「型」を用意し、その表面に金の薄膜(0.02 μm)を成膜し、さらにエポキシ接着剤をスプレーして、その上に厚さわずか150 μm 厚のアルミ板を貼り付けます。接着剤硬化後、アルミ板をはがすと、金の薄膜がアルミ板上に写し取られます。つまり、滑らかなガラスの表面がザラザラだったアルミ板上に写し取られる(レプリカされる)わけです。この方法によって「ペラペラのX線反射鏡」をつくることに成功しました。「すざく」のX線望遠鏡(XRT)は、直径40 cm、その重量わずか20 kg。米国のチャンドラ衛星の望遠鏡と比較すると、直径3分の1、重量80分の1、数百分の1という低予算です。さらに、ペラペラの反射鏡であるため画像解像度は劣ってしまうものの、チャンドラとほぼ同じ集光能力を達成しています。

天体からの光は非常に微弱であるため、多くの光を集めることがサイエンスを引き出すために必要不可欠です。「すざく」のXRTは「少しでも多くの光を集める!」ことを目指して、限られた条件の中で開発された、まさに最高のアイデア望遠鏡なのです。
(おかじま・たかし)

図37 X線望遠鏡の仕組み



迷光を防ぐ手づくりレンズフード プリコリメータ

森 英之

京都大学大学院 理学研究科

デジタルカメラのレンズ同様、透過力の強いX線を集光するのがX線望遠鏡(X-Ray Telescope:XRT)です。ところが、集光能力の高いレンズなので、視野外の天体からのX線も一部焦点面検出器に届いてしまいます。非正規の経路で検出器面に入ってくるこれらのX線は迷光と呼ばれ、像のコントラスト低下の原因になります。X線天体の光度は数桁の範囲にわたることも多く、視野外の極めて明るいX線源からの迷光によって、観測天体が覆い隠されることも珍しくありません。

迷光フリーな望遠鏡を実現したいという私たちの願いは、

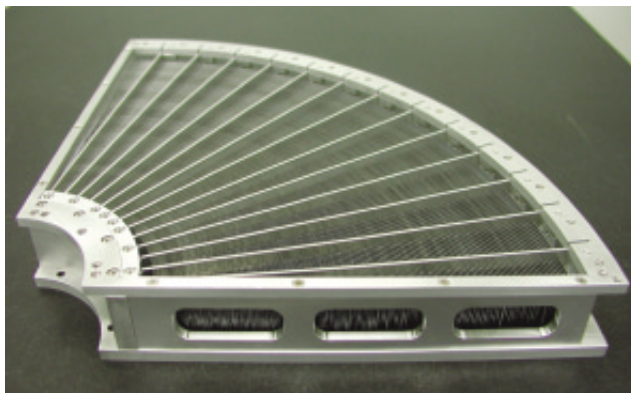


図38 「すざく」X線望遠鏡のプリコリメータ

手づくりの「プリコリメータ」として結実しました。プリコリメータとは、要するに、望遠鏡入射側に実装されるアルミニウム製の遮光用レンズフード(高さ30 mm, 厚み120 μ mの円筒)です。ただし、X線を集光する反射鏡1枚1枚にフードを配置します。反射鏡はわずか15 cmのすき間に175枚という稠密さで同心円状に積層されているため、プリコリメータはさながらアルミニウムでつくったバウムクーヘンのようです(図38)。

プリコリメータ製作も、お菓子同様、時間と手間がかかります。円筒フードについては特に、円筒金型に押し付けたまま180℃に加熱すること(熱成形)で真円度を高める工夫がなされており、望遠鏡5台分、計3500枚の製作に1年近くを費やしました。ほかにも、厚み180 μ mの各反射鏡の真上に10~20 μ mの精度でフードを配置する位置調節方法や、望遠鏡1台当たりわずか2.7 kgという驚きの軽さでありながら十分な機械強度を有するハウジング設計など、プリコリメータには「すざく」独自のノウハウがたくさん詰め込まれています。今日も「すざく」の「目」は、外乱に惑わされることなく、観測対象だけを真摯に見続けていることでしょう。

(もり・ひでゆき)

凍てつく寒さから 望遠鏡を守るサーマルシールド

古澤彰浩

名古屋大学大学院 理学研究科

「すざく」のX線望遠鏡(XRT)に使われている反射鏡は、温度にとっても敏感です。温度が変わると変形して望遠鏡の性能が低下してしまうので、反射鏡の温度は20℃前後に保たなくてはなりません。しかし、衛星は極寒の宇宙空間を飛んでおり、さらに望遠鏡は太陽の光が当たらない日陰に置かれているので、赤外線の放射によって熱がどんどん宇宙空間に捨てられて温度が下がってしまいます。それを防ぐために望遠鏡をヒータで温め、さらに断熱シートで覆って熱が捨てられにくくしています。

ところが、X線を遮ってしまうようなシートで、X線が入ってくる側(入射側)を覆うわけにはいきません。外国の巨大な衛星では入射側から捨てられる熱の分をヒータで温めて補っていますが、日本の衛星ではとても電力が足りません。



図39 「すざく」X線望遠鏡(XRT)の入射側に取り付けられたサーマルシールド

そこで、入射側には「サーマルシールド」と呼ばれる特別に薄い断熱フィルムを取り付けています(図39)。このフィルムは、ペットボトルでおなじみのポリエチレンテレフタレート(PET)でできており、直径40cmという大ききで、X線を透過させるためにできるだけ薄く、なおかつロケット打上げ時の激しい振動と音

響に耐える、という数々の厳しい要求に対して東レ(株)が特別に開発した、厚み0.2 μ mという世界最薄のPETフィルムです。

サーマルシールドは、今も極寒の宇宙にさらされながら望遠鏡を守り続けています。

(ふるざわ・あきひろ)

ヘルプデスク 「すざく」解析なんでも相談室

寺田幸功

埼玉大学大学院 理工学研究科

「すざく」衛星は、公開天文台として広く観測を公募し、採択された天体の観測を行います。2006年5月、検出器開発チームによる試験観測が終了し、公募観測が始まった直後、「すざく」ヘルプデスクは立ち上がりました。

当時、検出器の較正作業や日々の運用、解析ソフトウェアの整備など、「すざく」チームとしてやるべきことが山積みでした。そんな中、ゲスト観測者(以下、GO)のサポート体制も整えるべしとの正義感を抱いたメンバーを募り、X線グループの支持も受け

つつ、自主的に、理化学研究所(以下、理研)の中に立ち上げられたのが「すざく」ヘルプデスクでした。

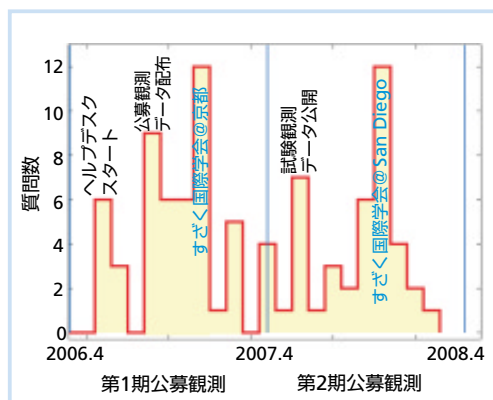
やるべき仕事は明確です。GOからの質問を受ける窓口となり、各検出器チームやソフトウェア、運用チームと強く連携し、その解決に努めること。米国ユーザーをサポートするNASAとは相補的に、日本、欧州、アジア枠のGOを対象に、2年間で90件の質問を処理しました。図40に示した質問数の推移には、観測データ配布の直後や国際会議の直前に質問が殺到する傾向が現れており、GOからの反応が肌で感じられます。また、よくある質問をユーザーに分かりやすくまとめ、超初心者向けマニュアルなどの整備も行いました。

理研メンバーだけでスタートしたヘルプデスクも、今や理研、埼玉大学、JAXA宇宙科学研究本部、つくば、日本大学、金沢大学、名古屋大学と、多機関にわたる大ボランティア集団となっています。もし「すざく」の解析に興味を持ったなら、ぜひ「すざく」ヘルプデスクも利用してみてください。

<http://cosmic.riken.jp/suzaku/help>

(てらだ・ゆきかつ)

図40 「すざく」ヘルプデスクへの質問数



編集後記



「すざく」に育てられた研究者の一人として、本特集号の編集を担当できたことは光栄です。原稿を執筆してくださった日本のX線天文グループの皆さまに深く感謝します。「すざく」は、まだ観測を始めたばかりです。今まで知らなかった宇宙が、これからの観測で次々に明らかになると思うとわくわくします。気の早い話ですが、集大成の成果は、また別の特集号でご紹介したいと思います。(前田良知)

※表紙などで用いられている「すざく」衛星の線画は、元宇宙研の大学院生、大貫宏祐さんにより製作されました。

ISASニュース No.324 2008.3 ISSN 0285-2861

発行／独立行政法人 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究本部
〒229-8510 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL: 042-759-8008

本ニュースは、インターネット(<http://www.isas.jaxa.jp/>)でもご覧になれます。

デザイン／株式会社デザインコンピビア
制作協力／有限会社フォトンクリエイト

*本誌は再生紙(古紙100%)、大豆インキを使用しています。

100
古紙配合率100%再生紙を使用しています

PRINTED WITH
SOYINK
Trademark of American Soybean Association