

新年特集号に寄せて

ISASニュース編集委員長 松尾弘毅

つい先だっても特集号のご挨拶をいたしたような気がしておりますが、一時代を画した“ぎんが”が天寿を全うしたとあつては、特集を組まぬわけにはまいりません。

1987年2月、Mロケット打上げの実験主任をは

じめてつとめた私自身にとっても思い出深い衛星です。

“ぎんが”のとらえた宇宙の新しい姿、皆様をX線天文学の世界へご案内致します。

X線天文学への招待

いつまでも変わることのない星空は、私達に静寂や永遠性を感じさせてくれます。古代の人々は太陽、月、惑星の運行から宇宙観を作り出しましたが、恒星界は、永遠不変のものと考えていました。古代の人々にとって、そして我々現代人にとっても、静寂な星空に宇宙のダイナミックな現象を想像することは難しいでしょう。現代の科学は、宇宙の荒々しい現象を次々に明らかにしました。

現在私達が持っている科学的宇宙観の歴史は意外に浅く、特に観測技術の進歩した1950年代から1960年代、天文学上の発見の時代に、急速に形作られました。ちょうどこの時期、人類は宇宙空間への道を歩み始めました。地球の大気は、赤外線、紫外線、X線、ガンマ線といった広い波長帯の光を吸収し、宇宙に向けた窓を閉じているのです。気球、ロケット、衛星は、新たな視野を我々に与えてくれました。1962年アメリカのマサチューセッツ工科大学の宇宙線グループは、ロケットに搭載した小さな放射線検出器により強いX線星「さそり座X-1」を発見しました。これは、太陽系外から来た宇宙X線の最初の発見です。それ以降、世界の研究者が大気の障壁を突き破り次々とX線天体の観測を行いました。

レントゲン撮影でおなじみのX線は、可視光と同じ「光」ですが、波長が可視光の数百分の1以下で、温度に換算して数千万度以上の非常にエネルギー状態の高い物質から放射されます。宇宙X線の存在は、宇宙に高エネルギー現象があることを示しています。

それでは、どのような天体からX線が観測され

るのでしょうか？代表的なX線天体は、私達の銀河系内のX線星と呼ばれる天体です。これは、二つの星がお互いに引力を及ぼし合っていて回っている連星と呼ばれる天体なのですが、一方の星は約10kmの大きさなのに質量は太陽程度の重さを持つ奇妙な星です。この小さな星にもう一方の星から物質が流れ込むと、小さな星の表面の強い重力によって物質が高エネルギー状態になりX線を放射するのです。この星が、中性子星やブラックホールなのです。中性子星、ブラックホールは太陽の質量の数倍以上の恒星の死、超新星爆発に際して、星の芯が重力収縮してできたものです。

X線星は、数秒から数ミリ秒等と言う、我々が見る夜空の静寂さからは想像もできない速さでX線の明るさを変化させ、宇宙の荒々しい現象の息吹を見せつけてくれるのです。

X線を放射する天体は、X線星ばかりではありません。我々の銀河系の中には、X線を放射する高温ガスがありますし、銀河系の外でも銀河系の集団（銀河団）やクェーサーに代表される活動的銀河中心核と呼ばれる天体などからもX線が放射されています。昨年10月号の表紙等で御存知の通り、太陽もX線を放射しているのです。現在では、X線天文学は、天体物理学の広範な分野で、宇宙の活動的な姿を明らかにしています。

古代の人々が想像もし得なかった活気に満ちた宇宙、この特集号では昨年11月1日に大気圏に突入し、使命を終えたX線天文衛星「ぎんが」が捉えた宇宙の姿の一端を御紹介致します。



「ぎんが」の生い立ち

「ぎんが」は11号科学衛星ASTRO-Cとして、1980年5月の宇宙観測委員会（現在の宇宙物理学委員会に相当）で採択されました。その頃、X線天文衛星「はくちょう」の観測が行われる一方で、ASTRO-A「ひのとり」およびASTRO-B「てんま」と二つの計画が同時進行中の多忙な時期でした。当時、X線望遠鏡を搭載した米国のX線天文衛星「アインシュタイン」が活躍中でしたが、外国の計画と比べ、独自性が高く相補的な大面積検出器をASTRO-Cに搭載することにしました。

この計画に必要なX線観測器は大面積で低雑音でなければなりません。この頃、英国から国際協力研究の要請があり、X線観測器の経験を多く持つレスター大学との共同開発が実現することになりました。ガンマ線バースト検出器は、米国ロスアラモス研究所との協力が成立しました。宇宙研では最初の本格的な国際衛星プロジェクトです。

衛星の試作は1982年から、本体の製作は1984年から、そして試験が1986年ほぼ1年かけて行われました。姿勢制御は、観測器を星の方向に固定する三軸制御が採用されました。CCDを用いたスターセンサー、太陽センサー、テープレコーダーに代わるバブルメモリーが世界に先だち開発されました。磁気トルカー、ジャイロも初めて国産品が搭載されました。それまでの経験が十分に織り込まれた総重量420kg、有効面積4000cm²のX線天文台がこうして完成しました。

1987年2月5日、やや風の強い日でしたが、予定通り15時30分にASTRO-Cは発射されました。発射後、ロケットの火炎に遮られて一時受信が途

絶え、一瞬心臓の止まる思いでした。一時間半が経ち、衛星が内之浦上空に帰ってきたところで募集した名前の中から「ぎんが」と命名され、外国の代表もまじえた晴れの記者会見となりました。

「ぎんが」の成果

「ぎんが」に搭載の宇宙X線の検出器、大面積計数管は世界最高の感度を持ち、どの天体を観測しても、新しい事実が発見される性能を有しています。打ち上げ後1ヵ月しないうちに、超新星SN1987Aの出現という予期しないできごとで急に観測が始まりました。衛星の軌道上での試験が観測に並行して2ヵ月間行われた後、4月から9月まで試験観測として、標準的なX線天体を観測して、性能を確認しました。1987年10月からは公募による観測に入りました。観測テーマの募集は国内、英国、米国、ヨーロッパで行われました。採択された観測ターゲットは全部で約400個です。観測のために、10ヵ国から延べ100人以上の外国人研究者が宇宙研を訪れました。これまでに、主要学術誌に掲載された論文130編、国際会議で発表された論文200編、など多くの成果を上げ、今後多くの成果が生み出されるでしょう。1989年イタリアのボローニヤ、1991年名古屋のX線天文学国際会議の主要論文は「ぎんが」の成果によって占められました。

「ぎんが」は、ROSATが打ち上がるまでの約3年間、世界唯一のX線天文衛星として活躍し、「ぎんが」時代とも言える一時期を画しました。



「ぎんが」の主検出器、大面積計数管。



大マゼラン星雲の超新星

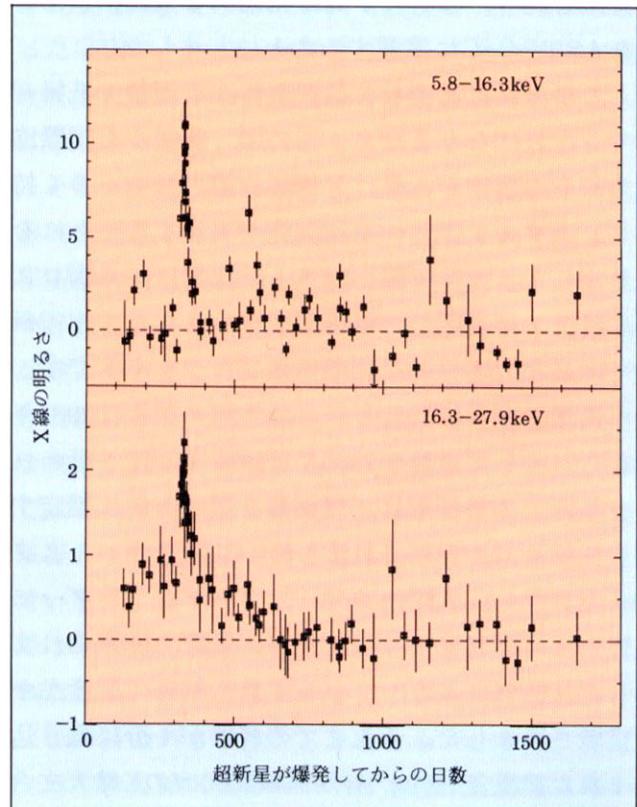
「ぎんが」が打ち上げられてまもなく、1987年2月23日、大マゼラン雲に超新星SN1987Aが出現しました。こんな間近に超新星が現れたのは実に400年ぶりだというので、その知らせはまたたく間に世界中を駆けめぐり、宇宙研にも24日深夜情報が伝わりました。打ち上がって日の浅い「ぎんが」は姿勢制御系の試験中でまだ観測装置の高圧電源に灯は入っていませんでしたが、急拠予定を変更して、2月25日には大マゼラン雲の方向にその観測装置を向けました。

このような若い超新星から来るX線を検出することができれば大ヒットだというので、SN1987Aの観測は1～2週間に1回の割合でかなり頻繁に行われました。ソ連の宇宙ステーション・ミールに搭載されているX線検出装置「クバント」に先を越されてはと功をあせるあまり、粒子線強度の変化にだまされて国際天文連合に電報を打つ寸前まで行ったこともありました。

「ぎんが」の大面積検出器の視野では、すぐとりにある明るいX線星の影響でSN1987AからのX線をなかなかきれいに分離できないことや、SN1987AからのX線はそうすぐには明るくならないという理論的な予測がされ始めたことから、皆の熱意が少し薄れ始めた8月半ば、内之浦の「ぎんが」運用当番からSN1987AのあたりからX線が来ている可能性があるという報告がもたらされました。一見、あやしげなデータだったので、また空騒ぎだと思った人が多かったのですが、粘り強い解析の末どうやら本物らしいということになりました。さかのぼって注意深いデータ解析が行われ、SN1987AからのX線は遅くとも7月から（5～6

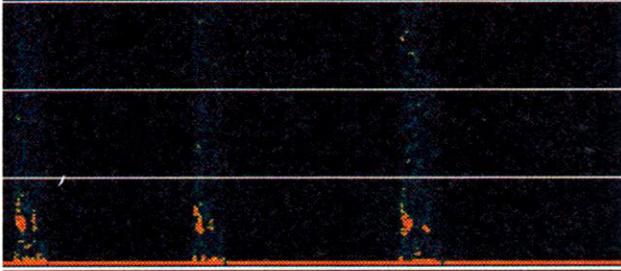
月は「ぎんが」の太陽との位置関係が悪く、十分な観測が出来ず、立ち上がりの時間を言うことは難しい）受かりはじめていたことがはっきりしました。

早速、国際天文連合に電報を打つと共に、おりから東大で開かれていた国際研究会で発表しました。結果は、ネイチャー誌にすぐに投稿され、奇しくも、「クバント」のX線検出の論文と並んで掲載されることとなりました。SN1987AからのX線を有意に検出した時期は「クバント」がわずかに遅れていましたが、互いの結果がクロスチェックとなって信頼度を大きく上げたわけです。こんな若い超新星からのX線を初めて検出した栄誉は「ぎんが」・「クバント」両グループが共に担うものでしょう。「ぎんが」によるSN1987Aの観測は、その後も1991年9月の最後の観測まで数週間に一度の割合で継続して行われました。



SN1987Aの2つのエネルギー領域のX線強度の変化。大面積比例計数管に入射してきたX線の明るさを爆発（1987年2月23日）後の日数の関数として示しました。

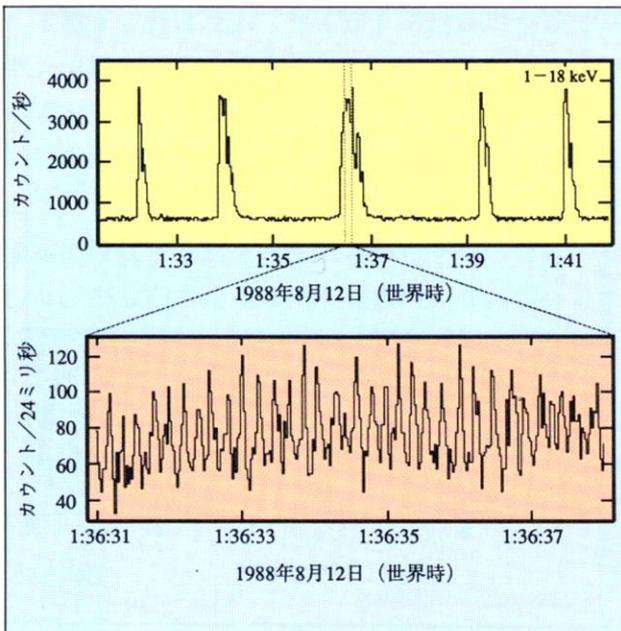
X線星の鳴き声



「ラピッドバースター」の声紋

X線星は、数秒～1/1000秒の速く激しいX線の明るさの変化を示します。このような変化の中には、X線パルサーと呼ばれる星のように、磁場の強い中性子星の自転に伴ってX線の明るさが周期的に変わる場合もありますが、一見不規則な明るさの変化が、多くのX線星に共通に見られます。

人の声を機械によって判別させるとき、最も普通に使われるのは、声紋と呼ばれる方法です（テレビの刑事物では時々使いますよね）。声紋は、声の信号を色々な周波数を持つ波に分解し、それが時間的にどう変化するか調べるという方法です。周波数への分解は、フーリエ解析等で御存知の方も多いかと思います。自然の現象を把握するときもこれと似たような方法がよく使われます。X線星が発する「鳴き声」にはいったいどのような特



「ラピッドバースター」のバースト（上図）とそのピーク付近に見られるQPO（下図）。

徴があるのでしょうか？

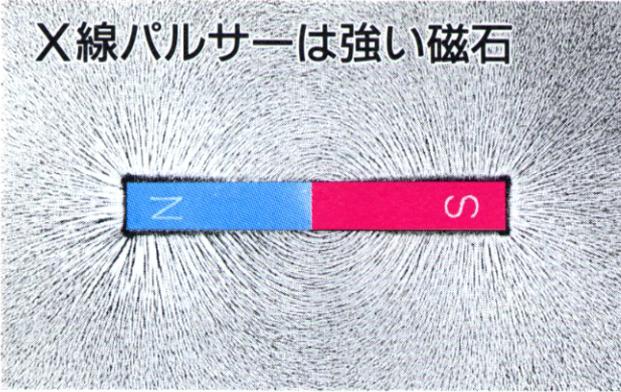
X線パルサーの声は、当然自転周期の周波数に声紋が強く現れ、言わば、楽器がある一定の高さの音を出し続けている様なものです。ところが、規則性のないX線の変化には、声紋に特に強い特徴的な周波数がなく、雑音—例えば放送の終わったテレビの音—と同じ様なものです。もっと、詳しく見ると、その変化は、自然界の現象に普遍的な雑音と同じ様な特徴を持っています。しかし、この雑音は特徴に欠けるため、そこに起きる現象の究明は厄介です（犯人の特定が難しい）。

しかし、一見不規則な変化をよく調べると、特徴がないと思われた“声”に、時々数ヘルツから数十ヘルツの振動が現れることが判明しました。この振動は、数サイクルの間に周波数が一割以上も変わってしまいます。この変動を準周期変動（QPO）と呼び、X線星で起きている現象の解明の貴重な証拠なのです（化けの皮をはがせる）。

「ぎんが」の大面积計数管はX線星の“声”を聞き分ける感度のよい“耳”を持っています。図に、「ラピッドバースター」と呼ばれる天体のX線の時間変化を示します。このX線星は短時間間隔（10から1000秒）で急激に明るくなる（バーストする）ことで知られています。この頻発するバーストは、中性子星への物質の流れが不安定で、間欠的に流れ込むことによって起きると考えられています。バーストのピークを拡大すると、そこに、はっきりとした振動が見られます。この振動がQPOです。QPOが発見されたX線星は十指に余りますが、これほどはっきりとした振動を見せたX線星はありませんでした。

このQPOは、バースト中にだけはっきりと観測されます。このことから、QPOも中性子星に物質が流れ込む時の、何等かの振動だと考えられます。これまでに、中性子星やブラックホールの周りでは、物質の流れが不安定になり振動が起き易いと予想されていましたが、それが顕著な形で現れたのがQPOと言っていいでしょう。X線星の鳴き声の正体、それは、物質が強力な重力場に落ち込む間際の断末魔のさげび声なののでしょうか。

X線パルサーは強い磁石



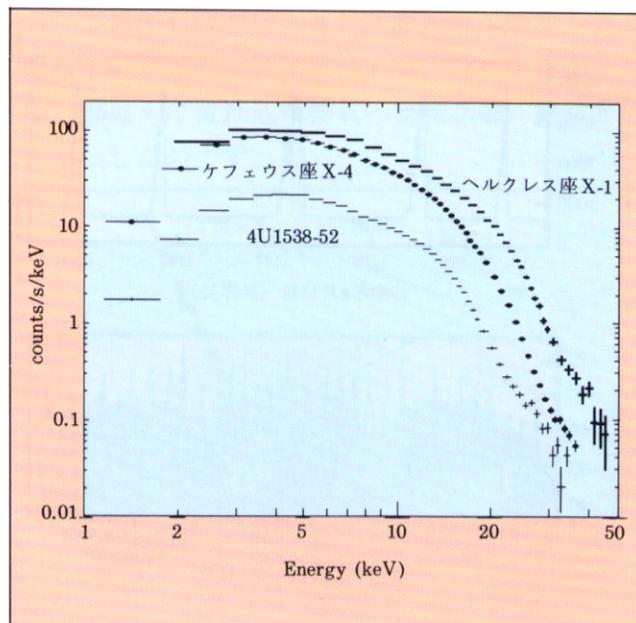
「ぎんが」誕生から約1年がたった頃。焼酎のグラス片手に、内之浦当番のX氏は、獲れたてのデータを眺めていました。今日の獲物は、「てんま」以来おなじみのX線パルサー4U1538-52。強い磁場をもつ中性子星が、連星の相棒からガスを奪いつつ、約9分の周期で自転している天体です。スペクトルの20keV付近の微妙な凹みに気づいたX氏、帰京するとS君に頼んで詳しい解析を進め、この凹みが本物であることを突き止めました。やったぞ、サイクロトロン共鳴吸収線に違いない。しかも、世界で3番目の測定例だ！

サイクロトロン共鳴とは、磁場の中の電子が磁場強度に比例した周波数でラセン運動して、それに一致した周波数の電磁波が強く放射または吸収される現象です。20keVに共鳴があるなら、パルサーの磁場の強さは 1.7×10^{12} ガウス。これは日常に出会う磁場（せいぜい1000ガウス）に比べ、とてつもなく強い値ですが、理論屋さん達が言う中性子星の磁場の値とは、良く一致します。しかも吸収線の形は、サイクロトロン共鳴の数式（T教授が「てんま」の時代に提唱されたもの）と良く合うこともわかりました。

余勢をかって翌1989年の春には、大面積計数管の観測エネルギー範囲を思い切り広くして、ヘルクレス座X-1の観測が行われました。この有名なX線パルサーには、すでにサイクロトロン共鳴線が1970年代の末に発見されています。M君は巧みなデータ解析を行い、雑音ぎりぎりのレベルでサイクロトロン吸収線を再確認し、しかもスペクトルの形が4U1538-52のときと同じ数式で表現できることを確かめました。

その頃X氏は何年もかけて（まだやってんの、と悪口をいわれつつ）「てんま」の発見したX線新星パルサーX0331+53のデータを解析し、「X0331+53では、30keVあたりにサイクロトロン吸収線があるはず」という論文を投稿していました。レフェリーS博士の暖かいコメントにより論文が受理された数日後、なんとX0331+53がまた現れたことを、「ぎんが」全天X線モニターが見つけたのです。さっそく大面積計数管で観測。28keVに堂々たるサイクロトロン吸収線が発見されるまで、さして日数はかかりませんでした。

その後「ぎんが」によるサイクロトロン吸収線の発見はあい次ぎ、9個のX線パルサーから発見、再確認されるに至りました。これと平行して、「ぎんが」ガンマ線バースト検出器も、ガンマ線バーストから数例のサイクロトロン吸収線を発見しました。これらの発見により、中性子星の磁場の値が一挙にわかってきたのです。これまで信じられていた「中性子星の磁場は数百万年で弱くなる」という学説は、「ぎんが」の活躍により根底から見直しを迫られています。中性子星は宇宙の永久磁石として、生まれたときの強い磁場をいつまでも保ち続けるのではないのでしょうか。

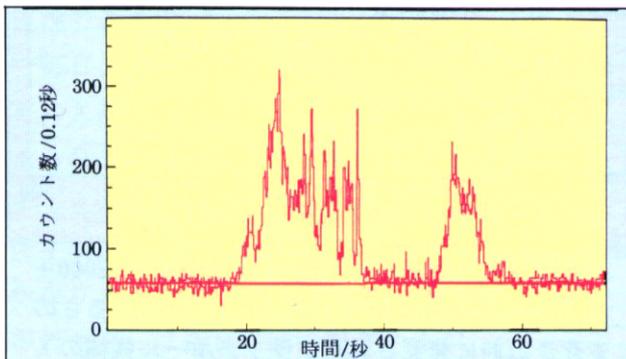


3つのX線パルサーのX線スペクトル。20～30keVの微妙な凹みが、サイクロトロン吸収線。



宇宙空間に出てガンマ線検出器を働かせていると、前触れなくガンマ線の明るさが増加する現象を検出します。このガンマ線の突然の増加（バースト）をガンマ線バーストと呼んでいます。この現象は1968年頃に発見されたものの、いまだに正体ははっきりしていません。「ぎんが」が打ち上げられる以前には、1000分の1秒もの速い明るさ変動と、非常に高いエネルギーのガンマ線を出すことから中性子星をその起源だと考える人、太陽系に対して到来方向が一様に分布することから、銀河系外の遠い宇宙から来ると考える人など様々でした。しかし決め手となる事実には乏しかったのです。我々はこの現象の解明のため、米国のロスアラモス国立研究所と共同で、ガンマ線バースト検出器を「ぎんが」に搭載しました。

4年9ヵ月に及ぶ「ぎんが」の活躍のなかで、ガンマ線バースト検出器は約100個のガンマ線バーストを検出しました。その中で幾つかのバーストで異常な形のガンマ線スペクトルにでくわしました。そのスペクトルは2～3ヵ所のエネルギー領域に吸収とも思えるへこみ構造を持ったものでした。中心のエネルギーが整数倍になっているこ



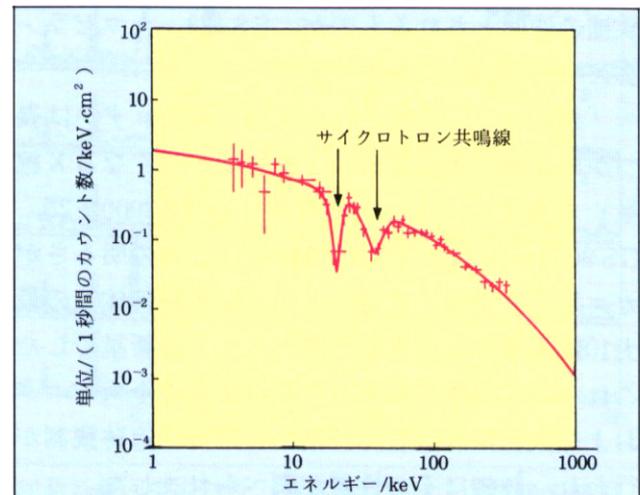
「ぎんが」が観測したガンマ線バースト

とから、我々はこれをサイクロトロン共鳴によるものと結論しました。このようなへこみ構造は大面積計数管でも、X線パルサーにも見られます。ガンマ線バーストで観測されるサイクロトロン共鳴は強い磁場(10^{12} ガウス程度)中の電子が起こす現象で、バーストの発生源は強磁場を持った中性子星と推定したのです。以前から知られた速い変動と今回のサイクロトロン共鳴はガンマ線バーストの起源を中性子星とする、最も有力な観測事実なのです。

しかしそのエネルギー源については現在も皆目分かりません。「ぎんが」ではガンマ線バーストに先だちX線が発生することが観測されていて、X線バーストと同様に熱核反応暴走を示唆しているのですが、彗星などの中性子星への落下、中性子星での地震など他の可能性も否定できません。

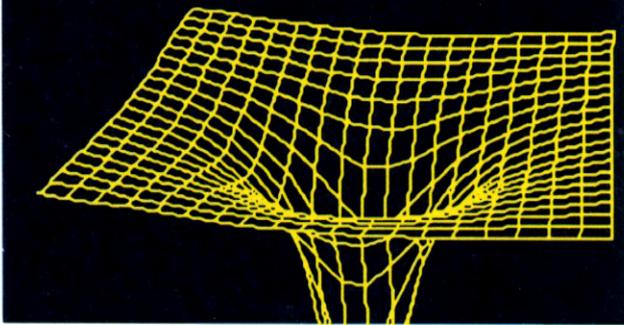
最近、米国のガンマ線観測衛星の結果から、ガンマ線バーストの到来方向が銀河面や銀河中心への偏りが全く見られないと報告され、遠い宇宙の起源も指摘されています。銀河系内の中性子星ならば、銀河面への集中が見られると期待されていたのです。しかし、暗い（遠い）ガンマ線バーストの数が少ない事も確認されており、起源が銀河系の近傍と考えるのが妥当なのでしょう。

「ぎんが」はガンマ線バーストに挑み、その起源が中性子星である証拠をつかみ、重要な足跡を残しました。しかし、ガンマ線バーストの正体はまだ解釈に余地を残しています。



ガンマ線バーストのサイクロトロン共鳴

ブラックホールを巡って



闇夜のからすは見えませんが、暗黒の宇宙に浮かぶ、光さえも吸い込むブラックホールは果たして見えるのでしょうか。以前、小学生にブラックホールは何色に塗ったら良いのでしょうかと質問され、大変困った覚えがあります。

X線で観測される銀河系内のブラックホールは、他の明るいX線星同様に連星を形作り、相手の星からガスが流れ込み、そのガスがブラックホール近傍の強い重力で高温状態となりX線を放射しているのです。連星の運動から質量が推定できるのですが、これが中性子星の質量の理論的限界と考えられている太陽の質量の3倍を遥かに越えているものは確かなブラックホール候補と考えられ、他の中性子星が形作るX線星とは区別されます。これまでに銀河系内で発見されたX線星のうち、ブラックホール候補と考えられているものは十指にも満たません。白鳥座X-1、大マゼラン雲X-3、X線新星A0620-00の3個がこれに該当します。その他に質量やX線放射の性質からブラックホール候補の仲間とされるものが、SS433、大マゼラン雲X-1、GX339-4などです。

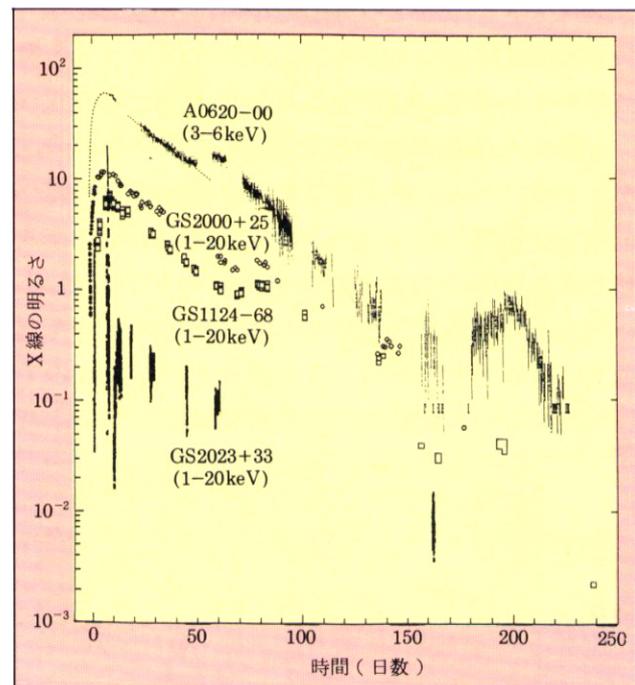
「ぎんが」に搭載されたX線全天モニターは幾つかのX線新星（急激にX線強度が強くなるX線星）を発見しました。その中でもGS2000+25、GS2023+33およびGS1124-68はX線の明るさがカニ星雲（全天で2番目に明るいX線天体）の最大10倍前後にも達する、際だったX線新星でした。これらのX線新星はその発見以後X線全天モニターおよび大面積計数管で長期にわたって追跡観測が行われ、詳細にその性質が調べられました。

この3個の「ぎんが」X線新星は、GS2023+33

が短い時間尺度のX線の明るさの時間変化を伴う点を別にすれば、いずれも約1ヵ月の半減期でX線強度が減衰しています。この変化は、以前発見されたブラックホール候補のX線新星A0620-00と良く似ています。特にGS2000+25及びGS1124-68は減衰の途中で再び明るくなる点までA0620-00と酷似しています。またこれら3個の「ぎんが」X線新星は、X線スペクトルやX線強度の時間変化の性質も他のブラックホール候補達と似た性質を示します。一部のX線スペクトルの性質は、銀河系外のブラックホール、活動的銀河中心核とも類似しているのです。

このような性質から、「ぎんが」が発見した3つの明るいX線新星が、新たな銀河系内のブラックホール候補ではないかと考えられるに至りました。

「ぎんが」はこのようにその4年9ヵ月にわたる観測期間に新たに3個のブラックホール候補となるX線新星を発見しました。今後も我々の銀河系内からたくさんのブラックホール候補が見つかるものと期待されます。



「ぎんが」が発見した3個のX線新星、GS2000+25、GS2023+33及びGS1124-68のX線の明るさの変化。以前に発見されたブラックホール候補のX線新星A0620-00のX線の変化も示した。



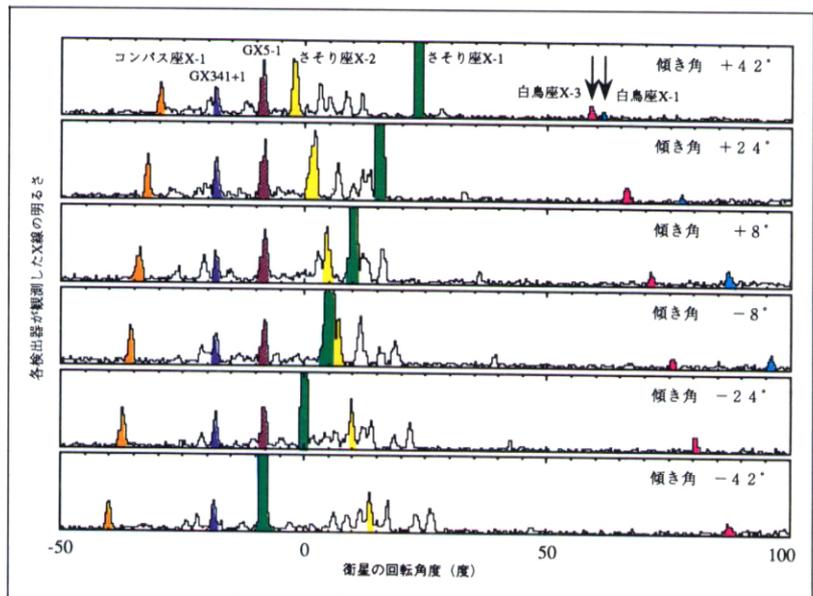
我々の目に見える星々は、いつの日にも変らぬ姿を見せますが、X線星の明るさの変化は激しく、日々その姿を変えと言っても過言ではありません。X線新星はその典型的な例でしょう。「ぎんが」は、大面積計数管の他に、長期間のX線星の明るさの変化を観測するために全天X線モニターを搭載しています。

全天X線モニターは、大面積計数管とは趣が異なり細長く広い視野(45度×1度)を持つ6個のX線検出器から成り立っています。衛星を1回転させて、この検出器で広い領域(全天の三分の二)を偵察してX線新星の出現など突発現象を即座に捉えようという訳です。ただし、観測は衛星を回転させて行うため、一つの天体を凝視する大面積計数管の観測とは両立しません。毎日20分だけ衛星を回し、広い領域での突発現象を監視していました。6個ある検出器は各々の視野が異なっており、衛星回転中にX線星が視野を横切る時間差でX線星の位置を0.5度以下の精度で決定できます。余り暗いX線天体は見えないのですが、視野が広いため、沢山のX線星を同時に監視できます。

毎日このような観測を続けると、多くのX線星の長期間にわたる変動が捉えられます。大面積計数管は一つの星を1ミリ秒までの時間分解能で観測しますが、観測期間はせいぜい数日にしかありません。これに対して、全天X線モニターは毎日一回の観測ですが、たくさんのX線星の数年にわたる長期

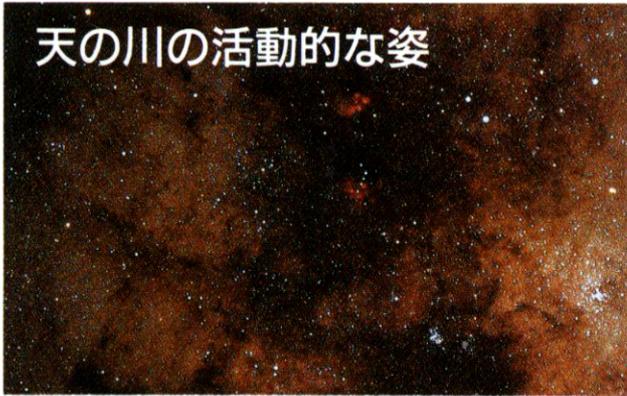
の明るさの変化を観測できますし、広い空を常時偵察できるのです。もちろん、全天X線モニターでX線新星を発見すれば、大面積計数管の観測計画を変更して、詳細な観測を行います。全天X線モニターの発見したX線新星の中でひとときわ明らなかったのがGS2000+25, GS2023+338, GS1124-683の3個で、最大強度がカニ星雲(全天で2番目に明るいX線天体)の10~20倍と全天で最も明るい星の一つとなりました。発見後ただちに大面積計数管による詳細な観測を行う一方、国際天文連合の電報を通じて、電波、可視光による同時観測も始まり、いずれも有力なブラックホール候補である事が判明しています。全天X線モニターの有効性が発揮された場面です。このような明るいX線新星は年に1個程度出現するようです。

この他、既知のX線星の突然のフレアなども多数捉えています。さらに、全天モニターの長期間にわたる観測結果は、過去の衛星の観測結果の延長上にあり、X線星の明るさの長期変動の研究を広く国際的に進めています。全天X線モニターは大面積計数管の観測を補い、連係プレーをするばかりか、世界的に見ても「ぎんが」が活躍した時期の唯一の全天モニターであり、過去と未来の衛星によるX線星の長時間の明るさの変動観測をつなぐ役割を果たしました。



全天モニターが見た銀河中心付近。検出器によってX線星の検出時間が異なっていることに注目。

天の川の活動的な姿



私たちの銀河系（天の川）は外からみると半径約5万光年の円盤状をしておりその中に1000億個をこえる恒星やガス雲が分布しています。太陽は中心から3万光年離れたところに位置します。太陽系の内部から見ると円盤に沿う方向が明るくみえます。これが天の川です。銀河中心は天の川の最も華やかないて座の方向です。しかし、銀河内に存在するチリのため可視光では銀河全体を見渡すことはできません。比較的太陽系に近い領域が観測されるのみです。

下の図のうち上例は、銀河面に沿って観測したX線強度分布を示したものです。銀河面とところどころにみえるピークはX線星です。これら明るいX線星がめだって、銀河系全体のX線像は浮かんでできません。一方、銀河中心の方向は小さなピークがありますが、銀河中心のX線天体でなく、少しはなれたところにあるX線星なのです。「ぎんが」以前には、X線では銀河中心は実に静穏だと考えられていました。これは、電波や赤外線の見測結果とはまったく正反対でした。

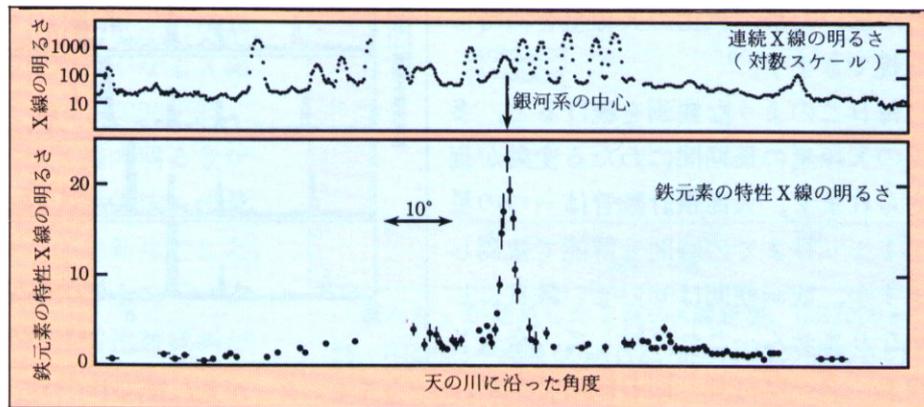
「ぎんが」は従来とは全く異なった観測を行いました。希薄な高温ガスは中に含まれる元素特有の波長のX線（特性X線）を強く放射します。そこで特性X線のみを向け観測することによって高温ガスの分布を選択的に調べることができます。図（下例）は天の川にそって観測した鉄元素の特性X線の強度分布を示したものです。上の

図と比較して見ると、その様子が全く違うことに気がつくでしょう。

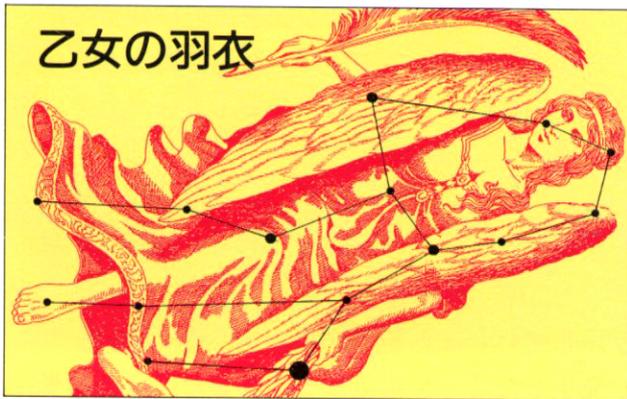
この観測から天の川全体にわたって約1億度の希薄な超高温ガスが分布していることが明確になりました。このような高温ガスはどのように作られたのでしょうか？超新星爆発による加熱はもっとも可能性が高い説です。しかし観測されたX線の明るさを説明するには10年に約1個の超新星爆発が必要です。これは従来の定説の3～10倍も高い頻度です。別の言い方をすれば、我々の銀河内に約1000個ものX線を放射する超新星の跡が存在していなければなりません。今まで観測された超新星残骸の総数の10倍以上です。最近のX線天文衛星ROSATは、低いエネルギーのX線の観測なので銀河の一部しか観測出来ないのですが、続々と超新星の残骸を発見しているのです。

銀河中心に目を向けましょう。驚くべきことに鉄元素の特性X線が他に比べ約10倍も強いのです。銀河中心のX線の活動性がはじめて見つかったのです。詳しく観測してみるとこの特性X線を出す高温ガスは銀河中心から長軸半径500光年、短軸半径300光年の楕円形の巨大な高温ガス球を形作っています。ガス球全体のエネルギーは超新星約1000個分に相当します。この高温ガスの広がりから推定すると、大爆発は約10万年前におこったことが示唆されます。

我々の銀河中心はときどき大爆発を繰り返していたようです。鉄元素の特性X線で観測された高温プラズマは最も最近の大爆発の名残ではないでしょうか。

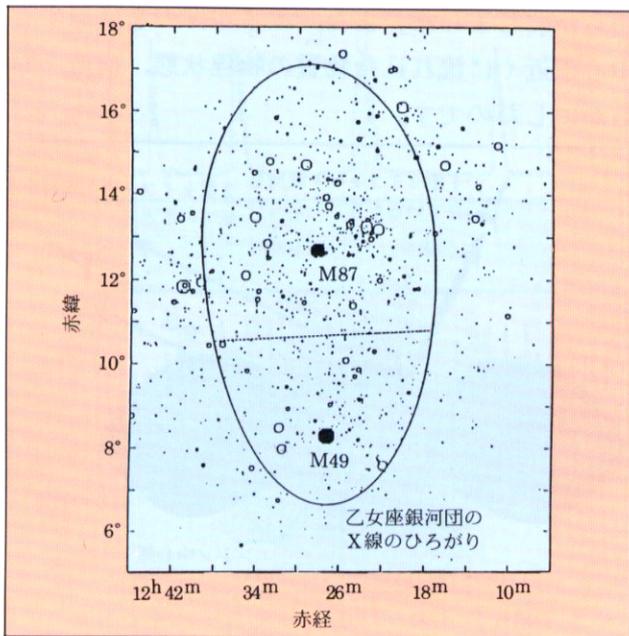


天の川に沿ったX線(上)と鉄元素の特性X線(下)の明るさの分布。



宇宙の天体は、お互いの重力によって群れたがる性質を持ちます。銀河もそのほとんどが“群”を作ります（我々の銀河系も小規模な“群”の一員です）。このような、お互いの重力で結び付いた銀河の“群”が銀河団です。X線天文学の最大の成果の一つは、銀河団全体を包む約1億度の高温ガスの存在を発見したことです。この高温ガスの質量は銀河団内の銀河全てを足し合わせた質量より大きいことすらあり、銀河団の正体は銀河の群ではなくて、高温ガスのかたまりといったほうが事実に近いとさえ思われます。このような大量の高温ガスはどのようにできたのでしょうか？

銀河、銀河団を形作った宇宙初期のガス（始原ガス）と、銀河から放出されたガスがその起源として考えられています。始原ガスは、水素、ヘリウム元素のみで構成されますが、銀河から放出さ



乙女座銀河団とX線の広がり。丸は、銀河。

れるガスは星で生成される鉄元素などの重元素を含みます。高温ガスの中の重元素はその元素固有の波長のX線（特性X線）を放射しますから、この特性X線の強さを観測すればその起源が特定できます。

我々から最も近い銀河団は乙女座銀河団です。近いといっても約6000万光年という途方もない距離です。それでも、この銀河団は視直径が12度にも広がり、スケールの巨大さに圧倒されます。このように乙女座銀河団は見かけ上大きいためこれまでX線の全体像の解明ができませんでした。我々は乙女座銀河団のX線の全体像を「ぎんが」のこれまでにない高い感度で観測しました。

この観測によって、高温ガスの鉄元素からでる特性X線の分布の解明というこれまでの銀河団の観測ではできなかった研究ができ、乙女座銀河団のまん中では鉄元素が多いのに、周辺ではそれが大変少ないことを発見したのです。これは、銀河団のまん中では高温ガスのほぼ半分が銀河から供給されていますが、銀河団全体では、大半が始原ガスが起源であることを示しています。

始原ガスはもとはそんなに高温ではなく、重力で銀河団程度の大きさに圧縮されて高温になったのでしょうか。それでも、X線や可視光で観測される物質のさらに10倍の質量を持つ未知の物質（暗黒物質）の重力がないと、現在ほど高温にはなりません。

乙女座銀河団のX線の光度とガス温度は他の多くの銀河団と比較するとかなり低い部類に属します。乙女座銀河団はまだ形成の途中の若い銀河団なのです。乙女座銀河団の高温ガスの温度分布を調べてみると、温度の異なる二つのガス雲に分かれていることがわかりました。やがて二つのガス雲は重力によって合体し、より集中度の高い銀河団に進化するのでしょうか。そのときガスは1億度近くになり、明るさも現在の100倍以上になると推定されます。それは全天で最もスペクタキュラーなX線天体になっていることでしょう。乙女が成長して絶世の美人になるのです。ただ残念なことに、何十億年もの遠い未来のことです。

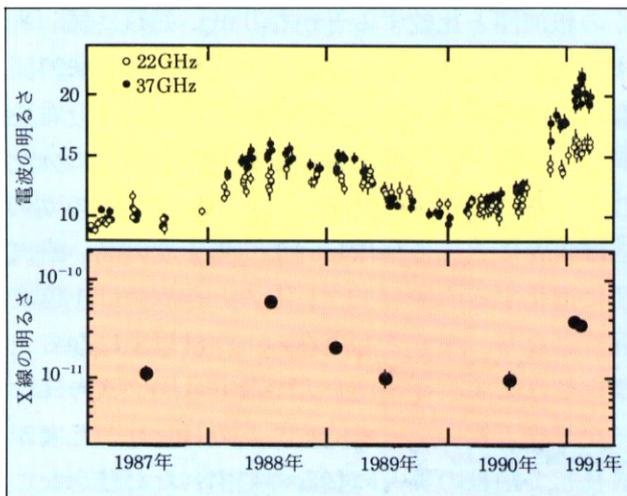
宇宙の巨大エンジンの謎



宇宙には、中心部が異常に明るく、活発な活動をしている銀河があります。クェーサーと呼ばれる遠方の銀河では、銀河の形はよく見えず、異常に明るい中心部が、星のように見えます。このような異常に明るく活動的な銀河中心部を活動的銀河中心核と総称しています。そこでは、太陽の百億倍以上もの明るさの光が太陽系程度の大きさの「エンジン」から放射されているのです。

活動的銀河中心核は、太陽の1億倍程度の巨大質量のブラックホールに物質が流入し、強い重力によって莫大なエネルギーを発生すると考えられていますが、そのメカニズムは完全には理解されていません。活動的銀河中心核は、X線でも明るく、そのX線は、巨大エンジン中心部で発生します。「ぎんが」が垣間見た非常に活発な姿の一端をここに紹介しましょう。

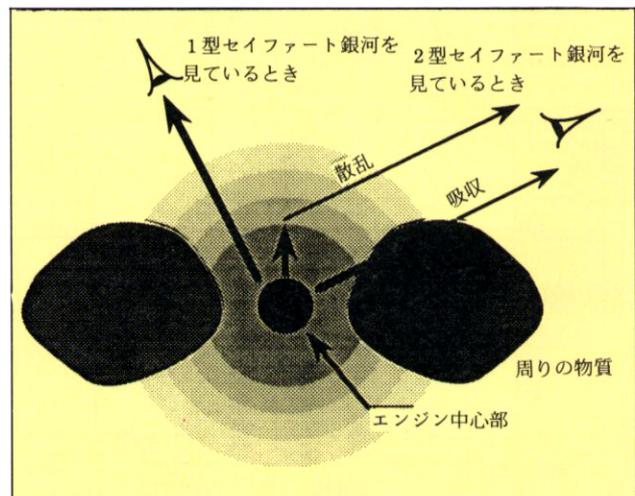
活動銀河核の活動は、ジェットと呼ばれる、高エネルギー物質が中心核から飛び出して行く現象にその片鱗が見られます。クェーサー3C 279は、



「ぎんが」が観測した3C279の明るさの変化。

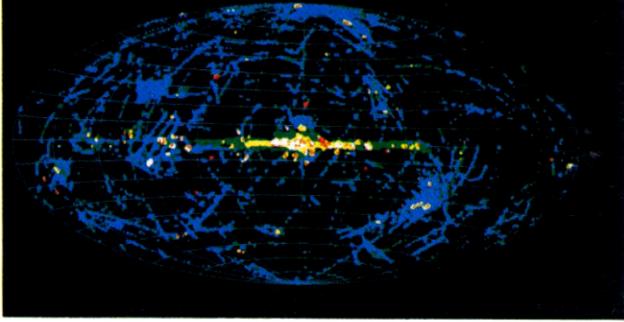
1970年代初頭にジェットが光速に近い速さで飛び出して行く様が電波干渉計で初めて観測された天体です。1988年2月、3C 279が赤外線ですら急激に明るくなったとの報を受け、7月に「ぎんが」はその目を向けました。3C 279は1年前より6倍もX線が明るくなっていました。データを詳しく解析すると、高エネルギー物質が光速に近い速さで飛び出していることを示しており、新たなジェットが発生したことを物語っていました。この結果は、まだ解明されていないジェット発生メカニズムにメスを入れる貴重なデータです。

セイファート銀河と呼ばれる我々の銀河系近傍の活動的銀河核は、可視光の観測によって1型、2型に分類されます。これまでの観測では、1型は、X線でも明るいことが知られていましたが、2型は暗く、多くの人が観測が困難であると考えていました。ところが、高感度な「ぎんが」は、はっきりとその姿を捉えることが出来たのです。X線スペクトルの解析から、セイファート2型銀河は、X線を発生する「エンジン」が周りの物質によって隠され、X線が吸収され他のX線天文衛星では見え難くなっていたのだと分かったのです。推定すると、2型の「エンジン」の元々のX線の明るさは、1型に匹敵し、この二つの型のセイファート銀河が同様なエンジンを持っていることを明らかにしました。また、エネルギーを供給する中心部近くに流れ込む物質の物理状態、構造を明らかにしたのです。



活動的銀河中心核の構造の想像図。

遠い宇宙からのX線のささやき



1962年にX線星を発見した小さな放射線検出器は、空全体にX線が明るく光っていることも発見していました。このX線の明るさはあらゆる方向で一定で、遙か遠方の宇宙に起源があると考えられ、宇宙X線背景放射と呼ばれるようになりました。そこに、遠い宇宙のささやきが聞き取れるのでは、と期待できるのです。

この特集号でも紹介したように、銀河系外の天体からも、強いX線が放射されています。宇宙X線背景放射の起源は、まだ分解されていない遠方の天体、特に活動的銀河中心核のX線の足し合わせであると考えられています。実際、遠方まで見通せるアインシュタイン衛星などで随分暗いX線天体が見つかっており、宇宙X線背景放射の明るさの30%が現在知られているX線天体で説明できます。このまま、もっと遠くの暗いX線天体を加算すれば、全てが説明できるという訳です。

ところが、事情はそれほど楽観的ではありません。「ぎんが」が観測した遠方の活動的銀河中心核は宇宙X線背景放射のX線スペクトルとは随分違った顔立ちなのです。つまり、単純に加算しても宇宙X線背景放射のスペクトルは再現できません。

「ぎんが」より遠方が見通せるアインシュタイン衛星などは、「ぎんが」より低いエネルギーのX線しか観測できませんから、はたして高いエネルギーのX線では、暗いX線天体が宇宙X線背景放射にどの程度効くのか気になります。

「ぎんが」の視野には、沢山の遠くの暗いX線天体が入ってしまい、これらの天体を分離することは得意ではありません。しかし、「ぎんが」は非常に高い感度を持っています。視野の中の暗いX

線天体の数は、確率的にゆらぎます。このため、宇宙X線背景放射の明るさも方向によって微妙にゆらぐはずですが、この明るさのゆらぎから、逆に暗いX線天体の個数が推定できるのです。

「ぎんが」が観測した空のデータを沢山集めるという大変な作業の後、「ぎんが」の検出できる数十分の1の明るさの天体の個数を見積もることができました。その結果、「ぎんが」が観測している高いエネルギーのX線でも宇宙X線背景放射の少なくとも30%は遠くのX線天体から来ていることが分かったのです。これで、宇宙X線背景放射の起源が少しは見えてきたようです。

しかし、依然宇宙X線背景放射と遠くの天体のX線スペクトルが違った顔をしているという問題は解決されません。

宇宙には、多くの恒星が銀河を作り、銀河が銀河団を作り、銀河団が宇宙の大きな構造を作る、と言った、群れる性質があります。当然、X線天体も群れる性質があるはずですが、この性質は隣り合った空の宇宙X線背景放射の明るさの関係に影響を及ぼすはずですが、この性質を利用して、「ぎんが」が観測した空を詳細に調べてみました。すると、宇宙の大きさの5分の1程度の距離の範囲に明るいX線天体は意外に少なく、この状態が宇宙全体に成り立つなら、到底宇宙X線背景放射の明るさが説明できないことが分かったのです。光速は有限ですから、宇宙の距離は過去に遡る時間と同じ意味です。つまり、「ぎんが」が観測できないような遠い初期の宇宙には、もっと明るいX線天体が多くなければ宇宙X線背景放射は説明できないわけです。

可視光の観測などでも、初期の宇宙には明るい活動的銀河中心核が多いことが分かっており、天体が活発な活動をしていたことが想像できます。そこでは、どのような現象が起きていたのか分かれば、本当に宇宙X線背景放射の起源が分かったことになるのでしょう。この問題はASTRO-Dの宿題として残しましょう。秘かに新しい性質の天体が見つかるのではと期待しながら、今は、星空のささやきに耳をかたむけるとしましょう。



「ぎんが」は世界中の多くの研究者にも利用され、寿命を終えた今も、解析のため宇宙研を訪れる外国人研究者が絶えません。「ぎんが」によって日本のX線天文学は世界の最前線に立ったといって過言ではないでしょう。そして「ぎんが」を継いで、X線天文学の最前線をさらに大きく切り開くだろうと期待されるのがASTRO-Dです。

ASTRO-Dは、1993年2月、宇宙科学研究所M-3S II型ロケットにより、高度およそ550kmの円軌道に投入される予定です。ASTRO-Dは、広いエネルギー範囲にわたってX線天体の撮像と分光を同時に行う高性能のX線天文台であり、1990年代における重要なX線天文学ミッションとして世界的に大きな期待を持たれています。ASTRO-Dには0.5keVから10keVまでの広いエネルギーにわた



試験中の次期X線天文衛星ASTRO-D。

って大きな有効面積を持つ多層薄膜型のX線反射望遠鏡が4台搭載されます。焦点距離は3.5m、角分解能は2分角が目標とされています。X線望遠鏡の焦点面には、2種類の撮像型X線検出器が2台ずつおかれます。ひとつは、撮像型蛍光比例計数管で、もうひとつは、X線CCDカメラです。これらの観測装置は日米両グループの国際協力開発・製作が進められています。

ASTRO-DのX線望遠鏡は、これまでのX線天文衛星に比べ広いエネルギー範囲のX線に対して撮像能力を有します。多くの天体のX線像がはじめて3~10keVのエネルギー範囲で得られるのです。さらに、ASTRO-D衛星搭載X線望遠鏡の感度は、これまでの衛星搭載のX線望遠鏡をはるかにしのぐもので、いままで見ることでできなかった暗い天体まで見ることができるようになります。ASTRO-Dの感度をもってすれば、宇宙のはてにある未知の原始天体を見つけることができるかもしれません。そうすれば、ビッグバンからはじまった宇宙に、いつ、どのようにして星や銀河が現れてきたかを知る貴重な手がかりが得られることになりましょう。

そして、ASTRO-Dの次には、わが国第5のX線天文衛星としてDUET計画が提案されています。宇宙研の新しいロケットM-Vの開発が始まり、今やわれわれにも1トンクラスの衛星を持つ機会が巡ってきました。数10keV以上の高エネルギーのX線による天体の精密観測装置など重量の大きな装置が初めて搭載することができます。DUETではこれまでにない感度の高エネルギーX線観測装置をX線反射望遠鏡と共に搭載することを考えています。高エネルギーのX線領域は天文学の中では未開拓の領域であり、広いエネルギー領域にわたる高い感度で遠方の宇宙の探査は、これまでにない特徴あるミッションとなるでしょう。

日本のX線天文グループは幸運にもほぼ5年に一度の割合で衛星を持つ機会を与えられ着実に成果をあげることができました。これからも、常に宇宙を眺める新しい切り口を提供できるよう、着実な歩みを進めき行きたいものです。

世界の仲間の声

「ぎんが」は英米両国との国際協力の上に、多大な成果を納めました。ここに、「ぎんが」プロジェクトに参加された海外の仲間のメッセージを紹介致します。

レスター大学 K.A. Pounds 教授

We have learned of the re-entry of GINGA with mixed feelings. It is, of course, sad that this mission, which has been such a significant part of our scientific lives over the past almost 5 years, has now come to an end. However, we join you in looking back with great satisfaction at the tremendous contribution made to high-energy astrophysics. GINGA has been, without doubt, one of the most productive space projects to date, greatly increasing our knowledge of the physical state of a wide variety of astrophysical sources. It is particularly gratifying for us in the UK, to recall our own contribution in helping to build the primary instrument on GINGA, namely the Large Area Counter (or LAC). The uniquely large area of the LAC has provided timing and spectral information which has qualitatively changed our views in many areas of astronomy, and has also provided, for us a first and most rewarding scientific collaboration between the UK and Japanese communities.

The re-entry of GINGA is not, of course, the end of our collaboration, since we and other astronomers throughout the world can look forward to making good use of rich data archives, in the years ahead, that GINGA has left behind. In the meantime, however, I would like, on behalf of my colleagues at Leicester and other astronomers throughout the UK, to acknowledge the active end of the GINGA Mission and congratulate to on maintaining this operation at such high level of efficiency throughout its 4.5 years in orbit.

私共は「ぎんが」の消滅を知り複雑な思いであります。5年間にわたる活動の主要な部分が終わったことは悲しいことではありますが、しかし、高エネルギー天文学に多大の貢献をしたことに大きな満足をおぼえたいものであります。「ぎんが」は間違いなく最も成果を挙げた宇宙計画の一つであり、各種の天体の物理学的な知識の飛躍的な進展をもたらしております。英国側としましては、主観測器である大面積計数管の製作に貢献できたことに特に満足しております。この大面積計数管は従来とは質的に異なるスペクトルや強度変化の

情報をもたらすと共に、最初のそして最も実りの多い英日科学協力となりました。

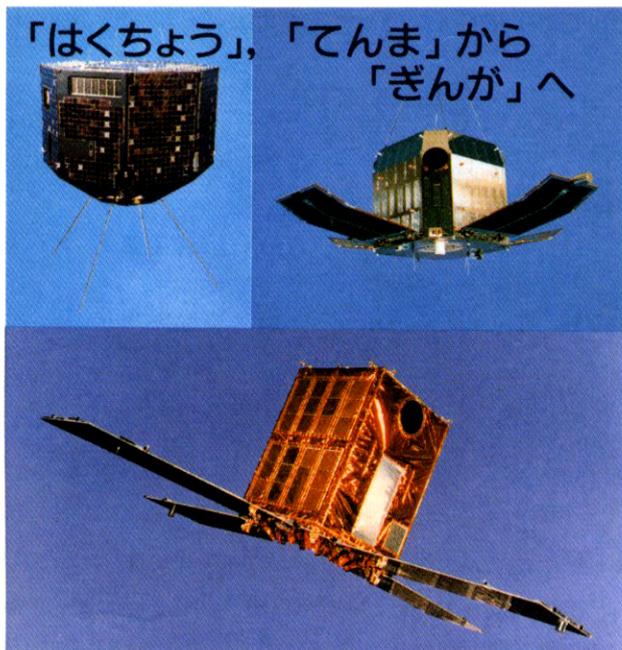
「ぎんが」の消滅はもちろん協力の終わりではありません。我々も含めて世界の天文学者は「ぎんが」の残した豊富なデータを将来も利用することを期待しているからであります。ここに私はレスター大学及び英国の天文学者にかわり「ぎんが」の活躍に祝辞を送ると共に4年半にわたる「ぎんが」の高度で有効な運用に感謝するものであります。

ロスアラモス研究所 E.E. Fenimore 博士

The Los Alamos National Laboratory was proud to participate in the Ginga Gamma Burst Detector (GBD) experiment. The four and one half years of flawless operation have provided crucial insight into the oldest high-energy astrophysical mystery, gamma-ray bursts. The influence of Ginga observations of the X-ray mission and harmonically spaced cyclotron lines has been pivotal: there is a growing consensus that gamma-ray burst originate from near-by highly magnetized neutron stars. The archival data will, undoubtedly, continue to provide unique insights for years to come. However, the success of Ginga should not only be measured in discoveries made, but in the friendships made, the exchanges of ideas and students, and in the future collaborative experiments now being planned. Thus, even though gone from the skies, Ginga's influence will last lifetime.

ロスアラモス国立研究所はガンマ線バースト検出器の実験に参加できたことを誇りに思っております。4年半にわたる完璧な運用は最も古い高エネルギー天文学のミステリー、ガンマ線バーストに決定的な情報をもたらしました。「ぎんが」が観測した(ガンマ線バーストの)X線放射と等間隔に並んだサイクロトロン吸収線は最も肝要な点であります。つまりガンマ線バーストは近傍の強い磁場を持つ中性子星から発生するという学説が定着しつつあります。蓄積されたデータは将来にわたって重要な情報をもたらすことでしょう。「ぎんが」の成功はこのような発見だけで測られるべきではありません。友好関係、アイデアの交換、学生の交換また将来に計画されている共同研究ももたらしました。大空から消えても「ぎんが」の影響は長く生き続けることでしょう。

(訳: 榎野文命)



我々の希望の星「ぎんが」は5年近い健闘の後ついに燃え尽きた。毎日のように新しい驚きや興奮をもたらしてくれた「ぎんが」、その成果を思えば正に完全燃焼しつくしたといえよう。予想されていた大往生とはいえ大事なものを失った深い寂しさは禁じ得ない。

思えば、わが国のX線天文学はよくここ迄成長出来たと感慨深い。アメリカが巨大なアインシュタイン衛星を打ち上げた翌年1979年、大きく水を開けられるのに焦りを感じつつ全員が祈る思いで打った「はくちょう」、二人で抱えられるほどの小さな衛星だった。自然も我々に味方した。図体の大きいアインシュタイン衛星には不向きだが、八方にらみの「はくちょう」には持ってこいのX線バーストと呼ばれる奇妙な現象が発見されたのである。「はくちょう」は次々に新しいバースト源を発見、全員で初めて活きたデータの有難味を、それこそ1ビットずつ噛みしめたものである。日本のX線天文グループの意気はにわかには上がった。その勢いで取り組んだのが「てんま」である。

この頃から我々の戦略が練られ始めたように思う。何か一つ性能上誇れる特徴を持たせること、リソースを分散せず集中的に使うこと、そして連続性を保つことである。そうすれば衛星が小型であっても十分太刀打ち出来る。この考えはその後ずっと生かされている。「てんま」では独自に開発した波長分解能の優れた蛍光比例計数管を主力にし、これを積めるだけ積んだ。「てんま」は期待通りの威力を発揮した。同じ年、ESAのX線天文衛星 EXOSAT が打ち上げられ、期せずして競争相手となった。1984年ボローニャで開かれた国

際会議では「てんま」の成果を引っ提げた若武者が大いに気をはいた。X線天体のスペクトルの精密観測で「てんま」の威力は明らかであった。会議の後この分野の生みの親の一人Giacconiが“日本が勝った”と言ってくれたのが印象に残っている。この会議の直後「てんま」は電源に故障を起こし、短命で終わってしまったのは大変残念であった。

それに先立つ1980年のことだったと思う。イギリスからASTRO-C(「ぎんが」)への協力を希望してきた。ASTRO-Cには宇宙の果てのキューサーまでも観測できる $1/2\text{m}^2$ (「はくちょう」の30倍、「てんま」の5倍)もの大面積比例計数管を積む計画を決めていたが、これを日英協力で作らないかというのである。この案に当初は賛否両論があった。海を越えた協力の難しさを危慮する声もあったし、独力でやりたいという意見も強かった。しかし思い切って協力に踏み切った。但し、欧米型の分業ではなく、設計から試験に至るまで日英科学者が一つのチームを組んで、つまり国籍を忘れて、実行することを主張した。いささか理想主義的なこの協力形態はイギリス側の十分な理解もあって思いの他見事に運んだ。更に全天X線モニターと、アメリカとの協力で作ったガンマ線バースト検出器が加わり、大変高性能のX線天文台が完成した。

今やX線の観測は電波、光学と並んで天文学全体にとって是非とも必要になっている。しかし、欧米では計画が大幅に遅れ、「ぎんが」は1980年代後半世界で唯一のX線天文台として重責を担うことになった。沢山の発見や成果をここで取り上げる余裕はないが、やはり一番印象に残っているのは打ち上げ直後に起きた大マゼラン星雲の超新星である。わが国はこの超新星からのニュートリノの検出に続き「ぎんが」が予想より早いX線の出現をいち早く捉える目ざましい成果を挙げた。

又「ぎんが」では観測の機会を国際的に提供し、これまで多数の欧米研究者が我々と共同研究を行っている。これは当然我々の負担を増しはしたが、一方国際的に「ぎんが」の評価を高める結果になった他、大きなメリットがあったと信じている。

先日、或る国際会議の閉会の辞で“X線天文学の発展を支えた「ぎんが」に感謝しよう”との賛辞を聞き、報われた気持ちに思わず目頭が熱くなった。次はASTRO-D、その成功を世界が目している。

終わりに、ここまでの発展は工学をはじめ多くの人達の計り知れぬ熱意と協力、支援の賜であり、あらためて厚く御礼申し上げます。

(田中靖郎)

ISASニュース

No.130 1992.1.

ISSN 0285-2861

発行：宇宙科学研究所(文部省) ☎229 神奈川県相模原市由野台3-1-1 TEL 0427-51-3911

The Institute of Space and Astronautical Science

◆ ISASニュースに関するお問い合わせは、庶務課法規・出版係(内線2210)までお願いいたします。