

X線で見える炭素合成の現場 —高速星風をもつ惑星状星雲—



村島 未生

〈アジレント・テクノロジー・インターナショナル株式会社 〒192-0033 東京都八王子市高倉町 9-1〉
e-mail: mio-murashima@agilent.com

村島

牧島 一夫

〈東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1
理化学研究所宇宙放射線研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉
e-mail: maxima@phys.s.u-tokyo.ac.jp

藤本 正行

〈北海道大学大学院理学研究科宇宙理学専攻 〒060-0810 札幌市北区北 10 条西 8 丁目〉

国分 紀秀

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部高エネルギー天文学研究系 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

松本 浩典

〈京都大学大学院理学研究科物理学第二教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

「すざく」チーム

惑星状星雲は太陽のような星の終末期の姿であり、星が一生をかけて合成した重元素の情報を豊かにもっています。中心星は秒速 1,000 キロメートルの高速の星風をもち、それによって生じる衝撃波で加熱された高温ガスから X 線が放射されると考えられています。筆者らはこの高温ガスは星の元素合成の最終段階を反映していると考え、日本の X 線天文衛星「すざく」で惑星状星雲 BD +30 3639 を観測しました。その結果、炭素および酸素の輝線を検出することに成功し、炭素と酸素の比が太陽の 85 倍という、非常に炭素の多い元素組成を明らかにしました。

1. 惑星状星雲は元素合成の メッセンジャー

惑星状星雲。地上から見るかわいらしいリング状星雲の姿は、読者の皆様には馴染みの深いものと思います。また、ハッブル宇宙望遠鏡がとらえた気持ち悪いくらい鮮明な画像の、複雑な姿もご覧になったことがあるでしょう。惑星状星雲は太陽程度の質量の星の終末期の姿と考えられていま

す。太陽と同じくらいか、せいぜい 8 倍程度の星（以下、中質量星と呼びます）が内部での核融合を終えて膨張し、高温の中心核がむき出しになって、周囲に広がるかつて星だった物質を照らしているのです。

しかしこの惑星状星雲、ただ美しいだけではなく、星の元素合成の歴史という重要な情報を豊富に含んでいます。今日では、宇宙の初期には水素とヘリウムのみが生成され、それ以外の元素（以

下、重元素と呼びます)は星の内部で生成されたと考えられています。星はその内側で核融合反応を起こすことにより輝いています。まず水素が燃焼してヘリウム(質量数4)が生成され、水素が尽きると次はヘリウムが燃焼して炭素(質量数12)と酸素(質量数16)が生成され、ヘリウムが尽きれば今度は炭素が燃焼し……というように順番に重い元素が合成されていくと考えられています。どこまで重い元素を合成できるのかは星の質量によって決まっており、惑星状星雲になるような中質量星はヘリウム燃焼までと考えられています。

中質量星の進化を極めて簡単にまとめると、水素燃焼、ヘリウム燃焼と元素合成が進み、そこで核融合反応が止まって星はエネルギーを生み出すことができなくなり、外側からしだいに膨張して高温の中心核がむき出しになったあと、冷えて白色矮星になる、というのが広く信じられているシナリオです。惑星状星雲はこのシナリオの中の、だいたい「高温の中心核がむき出し」というあたりに位置すると考えられ、この中心核によって照らし出された星雲は、水素燃焼やヘリウム燃焼によって合成された重元素を含んでいます。つまり惑星状星雲は、中質量星で元素が合成された跡を見ていることになるのです。中質量星は、超新星爆発を起こすような大質量星に比べてもとの質量が小さく、ヘリウム燃焼までなので合成できる重元素は限られますが、なにしろありふれた星ですので数だけはたくさんあります。例えば、ヘリウムの核融合反応で生成される炭素や酸素、ネオン、マグネシウムといった元素については、中質量星が重要な役割を担っていると考えられます。

きれいなだけではない重要な天体として、惑星状星雲はさまざまな波長で観測されてきました。電波、赤外線、可視光、紫外線。しかし、惑星状星雲がX線でも観測されている、言い換えると、惑星状星雲からX線が放射されていることは、あまり知られていないのではないのでしょうか。私

たちは、この惑星状星雲からのX線が、実は中質量星での元素合成を探るうえで重要な役割を果たしていることに注目しました。

2. 惑星状星雲からのX線

惑星状星雲からのX線の観測の歴史は、1980年代までさかのぼります。アインシュタイン衛星によって19個の惑星状星雲が観測され、そのうちの4天体からX線が検出されました¹⁾。またほぼ同時期の論文によると、エグゾサット衛星も12天体のうち8天体からX線を検出しています²⁾。このときは、惑星状星雲の中心にある白色矮星の表面は高温になっているはずなので、そこからのX線が見えているのだと考えられていたようです。宇宙X線の起源といえば、ブラックホールや超新星残骸、銀河団プラズマなどが有名どころですが、それらに比べて惑星状星雲はずいぶんおとなしい天体のような気がします。しかし、この観測よりさかのぼること10年、惑星状星雲からX線が放射されているはずと予測したモデルがすでにありました³⁾。

X線放射を予測したモデルは、Interacting Stellar Winds Model (以下、ISWモデルと呼びます)と呼ばれています。これはもともと、惑星状星雲のきれいなリング構造を説明するために考えられたモデルです。このモデルの提唱者たちは、星の外層がただぼんやりと広がっていくだけでは、密度の高い、周囲からはっきりと区別できるようなシャープな境界線をもったあのリング構造にはならないと考え、星の周りに広がった物質をさらに加速したり圧縮したりするメカニズムが必要だと考えました。

ではどのようにして、惑星状星雲のきれいなリング構造を説明できるのでしょうか。図1にISWモデルの模式図を示してあります。終末期、星の周囲にはかつて星だった物質が放出され広がっています。中心星は進化とともにしだいに高温になり、放射圧によって新たな星風が生じると考えら

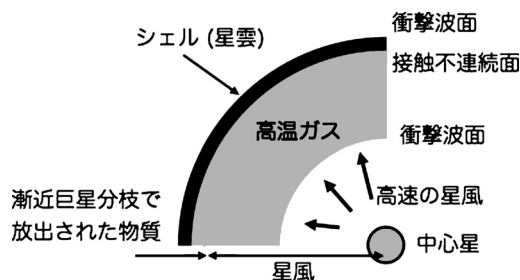


図1 ISW モデルの模式図。

れます。このときには中心星は半径が小さくなっているために脱出速度が大きくなり、秒速 1,000 キロメートル程度の高速の星風をもつようになります。この高速の星風がもともと広がっている星周物質にぶつかって、図1に示したように接触不連続面となります。星周物質は掃き集められて高密度になり、衝撃波面が形成されます。このようにして、シャープな境界線をもつリング構造となる、と ISW モデルによって説明されたのでした。

さらに ISW モデルの提唱者たちは、もしこのモデルが正しければ、(1) 惑星状星雲のリングの外側にも物質がぼんやりと広がっているはず、(2) たいていの惑星状星雲の中心星は高速の星風をもっているはず、さらに (3) 衝撃波によって加熱される高温ガスからは X 線が放射されているはず、と考えました。実際に、CCD カメラの発達によって (1) が確かめられ、紫外線領域を観測する人工衛星によって (2) も確かめられました⁴⁾。残るは (3) の X 線放射です。これが正しいのなら、可視光で見えるリング状星雲の内側全体が X 線で光っているはずで

本。本当に ISW モデルが言うように本当に惑星状星雲から X 線は放射されているのかを確かめるには、まず何よりも、とにかく X 線が放射されているかどうかを調べることです。これは、前述のとおり、インシュタイン衛星とエグゾサット衛星によって確かめられました。ではその起源は、中心星の表面なのか、それとも、衝撃波によって加熱された高温ガスからなのか？ 手っ取り早く

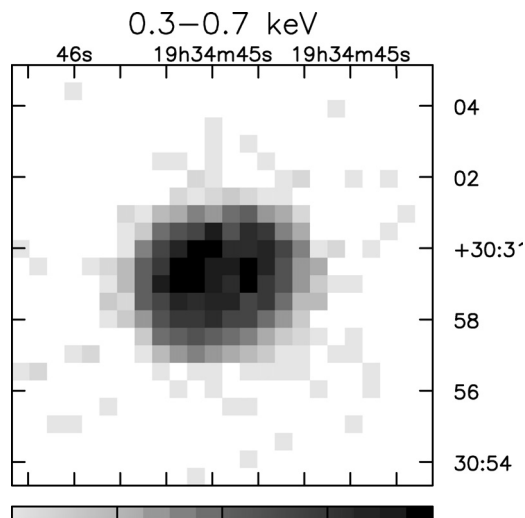


図2 チャンドラ衛星による BD+30 3639 の 0.3–0.7 keV のイメージ。

確かめるには、X 線放射が空間的に広がっているかどうかを調べるという方法があります。もし ISW モデルのとおりなら、可視光のリングくらいに広がっているはずで、これを初めて確かめたのがローサット衛星です。1992 年に発表された最初の論文⁵⁾では、5 個の惑星状星雲から広がった X 線放射が検出されたと報告されました。もっとも、いくつかはフライングで、実は広がっているとは言えないと後になって判明したのですが、NGC 6543 だけは確かに広がっていると結論されました⁶⁾。NGC 6543 はキャッツアイ星雲という名前でも有名な惑星状星雲です。

2000 年代に入ると、めざましい観測機器の発展とともに、惑星状星雲の X 線観測も飛躍的に進みました。とくにアメリカのチャンドラ衛星は、それまでとは桁違いに優れた空間分解能によって、キャッツアイ星雲以外にも数個の惑星状星雲に広がった X 線放射があることを発見しました。図2に、本記事で主役となる惑星状星雲 BD+30 3639 のチャンドラの画像を示してあります。この X 線放射の広がり可視光で見える星雲とほぼ一致しており、ISW モデルがだいたい正しいこ

とを示しています。

無事に X 線放射が発見され、空間的に広がっていることも確かめられ、一件落着といった感があるでしょうか。いえむしろ、ここからが本題なのです。ISW モデルがほぼ正しそうだ、ということが X 線観測からもわかってきました。このことの意味を、もう少し深く考えてあげる必要があります。ISW モデルに沿って考えれば、X 線を放射しているのは高速の星風を構成する物質であり、いちばん最後に中心星から放出される物質ということになります。ということは X 線で観測することにより中質量星の元素合成の最終段階を取り出せるかもしれない、と私たちは考えました。

3. X 線分光のけわしい道のり

私たちは、惑星状星雲の X 線を放射する物質の元素組成比を調べることは、中質量星の元素合成の最終段階を調べることになると考えました。元素とその電離状態ごとにある特定のエネルギー（波長）の X 線が放射されるので、X 線を分光して、どのエネルギーの X 線光子がどのくらい放射されているのかを調べれば、X 線を放射する物質の元素組成比がわかります。

惑星状星雲からの X 線放射について、初めて元素組成比の情報をもたらしたのは、日本の 4 番目の X 線天文衛星「あすか」です。「あすか」は X 線で最も明るい惑星状星雲 BD+30 3639 を観測し、極めて特異なスペクトルを得ました⁷⁾。X 線スペクトルの 0.9 キロ電子ボルト (keV) の位置に、非常に強い輝線が観測されたのです。そのエネルギーから、ヘリウム様にまで電離した、すなわち、電子が 2 個しか残っていない状態までイオン化されたネオンからの放射と考えられます。これほど強くネオンばかり見えるということは、惑星状星雲の X 線放射物質は、例えば太陽のようなありふれた元素組成では説明できないということです。X 線放射物質が元素合成後の極端な組成

比を反映していることが、ますます確からしくなってきました。

前章までで説明したように、私たちは惑星状星雲からの X 線は中質量星の元素合成の最終段階、すなわちヘリウム燃焼の情報を多く含んでいる可能性が高いと考えています。ヘリウム燃焼によって合成されるのは、炭素、窒素、酸素といった元素です。しかし、実は、これらの元素からの X 線を観測することは、そんなに簡単なことではありません。これらの元素からの X 線は、ネオンからの X 線よりも低エネルギー側にあります。X 線は低エネルギーであるほど吸収を受けやすくなり、「あすか」の検出器では、炭素・酸素・窒素といった元素からの X 線は、残念ながらほとんど観測できませんでした。

「あすか」の次の世代のチャンドラ衛星やニュートン衛星に搭載された CCD カメラは、性能が向上し、より低エネルギー側まで観測できるようになりました。図 3 にチャンドラ衛星がとらえた BD+30 3639 の X 線スペクトルを示してあります。0.9 keV に見えるのが、「あすか」が発見したネオンからの放射です。これとは別に、「あすか」では見えていなかった 0.3–0.7 keV の領域に、幅の広い構造が見られます。これはエネルギーからいって、炭素・酸素・窒素からの X 線がそれぞれの輝線に分解できず混ざったものだと考えら

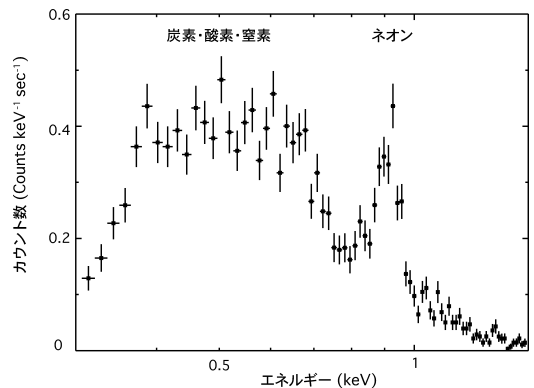


図3 チャンドラ衛星による BD+30 3639 のスペクトル。

れ、惑星状星雲にはこうした元素も存在しているようだとわかりました。そうすれば次は、いよいよ本題、これらの元素がどんな割合で存在するかを調べる段階になります。しかし何しろ、少なくとも3種類の元素からの輝線が混ざっているので、どれか一つは仮定を置かないと、炭素・窒素・酸素の組成比を決めることができません。なかでも最もエネルギーの低い炭素の組成を仮定する必要があります。やはり各元素からの輝線の一つひとつを分解する必要があります。

BD+30 3639 は X 線で最も明るい惑星状星雲なので、まずはこの天体の分光を試みるのが自然です。私たちの目的を達成するためには、低エネルギー側の X 線に十分な感度を持ち、かつ、混み込んだ輝線を分解できる優れたエネルギー分解能が必要です。チャンドラ衛星とニュートン衛星には、低エネルギーの X 線を精密に分光できるグレーティングが搭載されているので、それらを使えば惑星状星雲の元素組成はすぐにわかりそうなものです。しかし、惑星状星雲は X 線天体としては非常に暗く、にもかかわらずグレーティングは光を分散させるのでどうしても有効面積が小さくなり、分光に十分な X 線光子を集めるには時間がかかります。BD+30 3639 といえど、チャンドラ衛星で観測しようとする、X 線観測としては比較的長い2-3日分の観測時間が最低でも必要となります。ニュートン衛星の方が有効面積が大きいのでもう少し現実的な観測時間で済むはずですが、よりによって衛星の軌道条件が悪く、もっとも状況の良いときですら2日のうち10時間程度しか観測できません。そんなわけで、惑星状星雲の X 線分光はなかなか進みませんでした。そこへ「すざく」の登場です。

4. 「すざく」による BD+30 3639 の観測

2005年7月10日に打ち上げられた日本の5番目の X 線天文衛星「すざく」には、「あすか」、

チャンドラ、ニュートンと同様に、X 線 CCD カメラ (XIS) が搭載されています。4台の XIS のうちの1台、XIS1 は裏面照射型の CCD を採用し、低エネルギー側での高感度を達成しています。それだけならチャンドラ衛星やニュートン衛星にも同種の CCD カメラが搭載されていますが、XIS1 の大きな特徴の一つは、エネルギー分解能が従来の CCD より優れている点にあります⁸⁾。これこそ惑星状星雲の X 線分光に適した検出器です。言い換えれば、惑星状星雲は XIS のそうした性能を活かせる良いターゲットの一つでした。

2005年9月21日、衛星打ち上げから約70日後という早い時期に「すざく」によって BD+30 3639 の観測が行われました。観測時間はたったの10時間。チャンドラ衛星で必要な時間に比べればずいぶん短く、「すざく」の観測のなかでも短いほうです。XIS1 は 0.3 keV という低いエネルギーの X 線まで観測が可能です。私たちが狙っている炭素の輝線は 0.37 keV なので、本当に炭素が多ければ、XIS1 のスペクトルにははっきりと現れるはずですが。

図4に示したのが、「すざく」で得た BD+30 3639 の X 線スペクトルです。0.9 keV に「あすか」が発見したネオンの輝線が強く見えています。

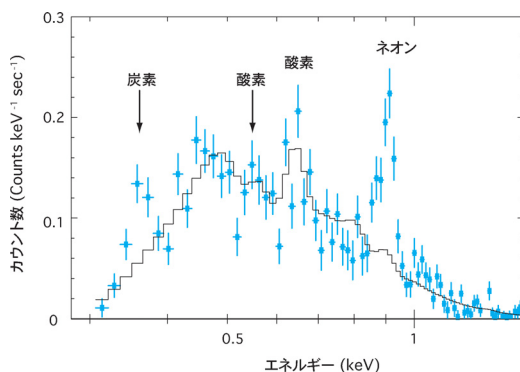


図4 「すざく」 XIS による BD+30 3639 の X 線スペクトル。青で示してあるのが観測されたデータ。黒の実線は太陽と同じ組成比を仮定した場合のスペクトル。

す。0.65 keV と 0.56 keV の位置に見えているのは酸素からの輝線です。これらの酸素の輝線がきれいに分離できたので、高温ガスの温度は約 220 万度であるとわかります。そして最も低エネルギー側、0.37 keV に炭素の輝線がはっきりと検出されました。X 線検出器はすでに述べたように、低エネルギー側ほど検出が難しくなるので、これだけはっきりと輝線が見えているということは、炭素が非常に多いことを示唆しています。

もし太陽と同じような割合で炭素・窒素・酸素などが存在していると仮定すると、図 4 に実線で示したようなスペクトルになるはずですが、観測されたスペクトルは、明らかに炭素やネオンからの放射が多すぎます。X 線領域には水素やヘリウムからの輝線が存在せず、元素量の絶対値を決めることはできないので、酸素を基準にした元素組成比で議論を進めます。BD+30 3639 の元素組成比が具体的にどれくらいなのかを調べると、ネオンと酸素の比は太陽の 5.8 倍、炭素と酸素の比にいたっては太陽での値の 85 倍という非常に大きな数値が得られました⁹⁾。

私たちは炭素が多いのではないだろうかとは予想していましたし、予想どおり輝線を検出できたことは心底うれしかったのですが、正直なところ、この結果は炭素があんまり多すぎるのではないかと思いました。「すざく」打ち上げ直後で検出器もまだ調整段階だったこともあり、また低エネルギー側は検出器応答の定量化が難しいこともあるので、よく知られている天体の X 線スペクトルを解析して応答関数の正しさを吟味しました。対象天体からの X 線を取り出すためには天体以外からの X 線を取り除く必要があるのですが、そこで引き算しすぎたり、誤差が大きかったりしないかも調べました。解析に用いた X 線放射モデルでは組成比が極端な場合を正しく扱っていないかもしれない、温度が一定の高温プラズマを仮定しているけれど本当は多温度かもしれない、プラズマは電離平衡に達していないのかもしれない

い。さまざまな可能性を考慮しましたが、見かけ上の炭素が多くなるような原因はなく、どうやら炭素は酸素や他の元素に比べて本当に突出して多いのだという結論に達しました。この観測結果は何を意味しているのでしょうか。

5. 「すざく」は炭素合成の現場をとらえた

ここでもう一度、中質量星の進化と元素合成についておさらいをしておきましょう。星の中心で水素が核融合反応を起こし、そのエネルギーによって星は輝いています。水素燃焼では、星にもともと含まれている炭素・窒素・酸素が触媒の役割を果たし、ヘリウムが生成されます。炭素・窒素・酸素のうち、反応が進むにつれて反応速度のもっとも遅い窒素の割合が多くなります。やがて星の中心の水素が枯渇しヘリウム核が形成されると、ヘリウム核の周囲の水素が核融合反応を起こすと考えられています。これは水素殻燃焼と呼ばれ、このとき、星は外側から膨張し始めていますと考えられています。この水素殻燃焼によってますますヘリウムの生成が進み、やがてヘリウム核の中心が十分に高温高密度になって、次はヘリウムが核融合反応を起こします。ヘリウム三つから炭素が生成され、その炭素がヘリウム 1 個を捕捉すると酸素が生成され、炭素と酸素からなる中心核が生成され、今度はその周囲でヘリウム殻燃焼が起きることになります。このように順に元素合成が進み、図 5 に単純化して示したようなたまねぎ

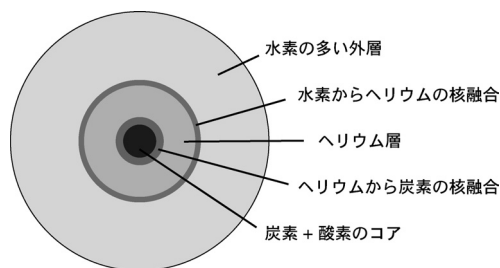


図 5 中質量星の構造の模式図。

構造になっていると考えられます。

中質量星での核融合はここまでで、炭素燃焼は起きないといわれています。ヘリウム燃焼段階では、星の外層はますます広がり、徐々に中心がむき出しになっていくと考えられています。そしてむき出しになった高温の中心星の表面から高速の星風が生じ、もともと周囲に広がっていたガスを掃き集めて衝撃波を形成、星風が加熱されてX線が放射されるというシナリオでした。ではX線を放射する物質は、星のどの部分が放出されたものなのでしょうか。

「すざく」の結果のなかで何よりも特徴的なのは、酸素に対する炭素の存在比率が突出して大きいということです。ヘリウム燃焼の段階での炭素と酸素の比率は、ヘリウムから炭素が生成される反応と、炭素から酸素が生成される反応の進み具合によります。BD+30 3639 で明らかになった太陽の85倍という大きな値は、実はヘリウム殻燃焼の段階でヘリウム・フラッシュが起き、核融合が暴走したときの値に一致するのです¹⁰⁾。このことから私たちは、X線放射物質を構成するのは、やはり主にヘリウム燃焼生成物であると考えました。

炭素だけでなく、ネオンもまた酸素に対する比率が太陽の5.8倍と大きくなっています。炭素ほどではないにしても、そこそこ大きな値です。このネオンはどこからきたのでしょうか？ヘリウム燃焼の延長で、酸素とヘリウムが反応するとネオンが生成されるのですが、実際には、この反応は遅いため恒星内部では起きないと考えられています。上述の水素燃焼のなかで、触媒となる炭素・酸素・窒素については反応速度の遅い窒素の割合が大きくなると説明しました。この窒素がヘリウムと核融合反応を起こすと、ネオンが生成されるのです。このルートなら、酸素を経由しないでネオンが生成されます。「すざく」で見えたネオンはこの経路で作られたものと考えられます。つまり、水素燃焼によって作られた窒素が

ヘリウム燃焼に巻き込まれてネオンを生成し、それがX線で光っていると解釈できるのです。

窒素の酸素に対する比率は太陽の3.2倍であり、炭素やネオンに比べれば小さい値です。ネオンについての解釈から、X線で観測された窒素は、水素燃焼で作られたヘリウム層のうちヘリウム燃焼に巻き込まれなかった部分が見えていと考えられます。さらに踏み込むと、ヘリウム核燃焼が起きている最中の層からはネオン、核融合の起きていない静かなヘリウム層からは窒素が供給されるので、X線放射物質にどちらがどれくらい寄与しているのかは、ネオンと窒素の存在比から推測することができます。ただし、窒素の輝線は酸素や炭素ほどには分解できなかったため、とくにこの点に関してはさらなる観測が必要です。

以上のように星の進化の理論と併せて考えると、BD+30 3639からのX線は中質量星でヘリウム燃焼が起きた場所そのものから放射されていると説明できます。すなわち「すざく」は、炭素が合成された現場を世界で初めてとらえたのです。

6. これから

「すざく」がとらえた惑星状星雲の炭素からのX線。また、酸素・窒素・ネオンの元素組成比。こうした観測結果と星の進化の理論を組み合わせると、例えば、高速の星風は元素合成のどのタイミングで起きるのか、何が原因となって高速の星風が起きるのか、そういった手がかりを得ることもできます。また、重い元素がどこまでどれくらい生成されたのかは、惑星状星雲になる前は、もともとどれくらいの体重でどれくらい金属を含んだ星だったのかを知る重要な手がかりとなります。惑星状星雲からのX線は、星の進化の理論を探るための新しい観測手法であることを「すざく」は示したのです。

チャンドラ衛星、ニュートン衛星が観測した 21

の惑星状星雲のうち、14天体からX線が検出されています。BD+30 3639のように空間的に広がった放射があれば、中心星の極めて近傍からと思われる点状のX線放射もあります¹¹⁾。いくつかの惑星状星雲のX線スペクトルから元素組成比を調べれば、その共通点や相違点から、どんな惑星状星雲でもX線を放射するのか、ある決まった進化の段階でX線が放射されるのか、X線を放射する惑星状星雲はみんな同じような重さ・金属量の星だったのか、さらにいろいろなことがわかるでしょう。しかし、BD+30 3639はX線で突出して明るい惑星状星雲なので「すざく」でとらえることができたが、残念ながら他の惑星状星雲は暗すぎて、現状の観測装置ではX線分光はたいへん難しくなります。将来、観測技術がさらに進展し、「すざく」が先鞭をつけた惑星状星雲のX線分光が、私たちに星の進化を語ってくれることを期待しています。

謝 辞

Astro-E, Astro-E2, 「すざく」の開発および運用にかかわるすべての皆様、打ち上げ実現のためにご協力いただいたすべての皆様に、この場を借りて心より感謝を申し上げます。適切な助言をくださった林田 清氏、松下恭子氏、村上弘志氏、古徳純一氏に感謝いたします。筆者の初歩的な質問に丁寧な解説をくださった中田好一氏、理論的側面からアドバイスをいただいた須田拓馬氏に感謝を申し上げます。また、「すざく」特集の一部として本研究を紹介する機会を得られたことは大きな喜びです。関係者の皆様に深く感謝いたします。

本研究は、村島未生の博士学位論文として行われました¹¹⁾。5年間にわたりご指導いただいた牧島一夫教授に、深い感謝を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Tarafdar S. P., Apparao K. M. V., 1988, ApJ 327, 342

- 2) Apparao K. M. V., Tarafdar S. P., 1989, ApJ 344, 826
 3) Kwok S., et al., 1978, ApJ 219, L125
 4) Cerruti-Sola M., Perinotto M., 1989, ApJ 345, 339
 5) Kreyling H. C., et al., 1992, A&A 264, 623
 6) Chu Y. H., et al., 1993, AJ 106, 650
 7) Arnaud K., et al., 1996, ApJ 462, L75
 8) Koyama K., et al., 2007, PASJ 59, S23
 9) Murashima M., et al., 2006, ApJ 647, L131
 10) Suda T., et al., 2004, ApJ 611, 476
 11) Murashima M., 2006, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo

X-Rays Reveals Helium-burning Products in Planetary Nebulae with Fast Stellar Winds

Mio MURASHIMA

Agilent Technologies International Japan, Ltd., 9-1 Takakura-cho, Hachioji-shi, Tokyo 192-0033, Japan

Kazuo MAKISHIMA

Department of Physics, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0011, Japan and Institute of Physical and Chemical Research (RIKEN), 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Masayuki FUJIMOTO

Department of Physics, Faculty of Science, Hokkaido University, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

Motohide KOKUBUN

Institute of Space and Astronautical Science, JAXA, 3-1-1 Yoshinodai, Sagami-hara-shi, Kanagawa 229-8510, Japan

Hironori MATSUMOTO

Department of Physics, Kyoto University, Kitashirakawa, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Suzaku Team

Abstract: Suzaku observed the X-ray brightest planetary nebula BD+30 3639, and obtained the C/O, N/O, and Ne/O abundance ratios. The C/O and Ne/O abundance ratios exceed the solar value by factors of 85 and 5.8, respectively. These results indicate that the X-rays are emitted mainly by helium-shell-burning products.