

氏名（本籍） ^{ふく} ^{しま} ^{こうたろう}
福 島 光太郎（東京都）
学位の種類 博士（理学）
学位記番号 甲第 1312 号
学位授与の日付 2024 年 3 月 18 日
学位授与の要件 学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目 **Supernova nucleosynthesis and chemical
enrichment explored by X-ray observations
of the hot gas in galaxies**
(X 線観測で探る銀河の超新星元素合成と化
学進化)

論文審査委員 (主査) 教授 松下 恭子
教授 鈴木 克彦 客員教授 玉川 徹
准教授 加瀬竜太郎 教授 幸村 孝由

論文内容の要旨

現代の標準的な宇宙論では、宇宙誕生から数十秒–20 分程度の間起こったビッグバン原子核合成により水素とヘリウム、ごくわずかなリチウムとベリリウム原子核が合成されたと考えられている。ベリリウムより重い全ての原子核、すなわち酸素やケイ素、カルシウム、鉄といった生命や人類の文明に必須の元素は、ビッグバン元素合成後の長い宇宙史の中で生まれたものである。これらの重元素は、水素やヘリウムを主とする始原ガスから生まれた恒星の内部核融合、および恒星が最期に起こす超新星爆発における元素合成で生成される。小中質量星が誕生後から数億年以上かけて白色矮星となり起こす Ia 型超新星や、大質量星 ($> 8M_{\odot}$) が数千万年程度で起こす重力崩壊型超新星により星間にばらまかれた元素は、新たな恒星の材料である星間ガスとなり、あるいは複数の超新星で形成されるスーパーバブルやスターバースト銀河からの銀河風で銀河外に拡散される。このような宇宙の元素合成と拡散の歴史、つまり宇宙の化学進化を解明することは、現代天文学の最重要課題のひとつである。銀河団は早期型銀河を主とする数百の銀河で形成された宇宙最大の自己重力束縛天体である。銀河間や銀河を満たす高温ガスには、化学進化の過程で放出された元素が大量に含まれている。これらの高温ガスにとりこまれた物質は数 keV (数千万 K) に熱せられて、元素ごとに固有の特性 X 線を放射するため、高温ガスからの X 線スペクトルを調べる

ことによりガスの元素組成が測定できる。本論文では公開された X 線データを用いて銀河団ガスやスターバースト銀河の高温ガスにおける元素組成比の測定をおこなった。

1. ケンタウルス座銀河団中心領域の化学進化

ケンタウルス座銀河団クルコアにおける元素組成比とその分布についての解析結果を報告している。ケンタウルス座銀河団のコア（早期型銀河 NGC 4696）を *Chandra* と *XMM-Newton* により観測したデータ（500 ks）を用いた。この研究では、CCD 撮像検出器に加えて *XMM-Newton* 搭載の反射型回折格子検出器（RGS）も使用した。RGS は分散方向への空間分解能力を持たない代わりに、CCD による分光・検出が困難な窒素、酸素、ネオン輝線が存在する < 2 keV の X 線において、高いエネルギー分解能を有する。

これらの検出器を相補的に利用して、窒素、酸素、マグネシウム、ケイ素、硫黄、アルゴン、カルシウム、クロム、マンガン、鉄、ニッケルの元素組成とその空間分布を測定した。観測からは先行研究と同様に、検出器や原子コードの違いによる違いはあるものの、どの元素も 18° 程度の中心領域で組成比が減少する傾向がえられた。RGS による酸素/鉄、ネオン/鉄、マグネシウム/鉄比は平坦な半径方向分布を示した。反応性に乏しい希ガス元素であるネオンが他の元素と同様の分布を持つという結果は、先行研究で提唱された冷たい星間塵への元素貯蔵が中心での組成比減少をもたらす、という仮説からは説明が難しい。

中心領域全体の元素組成比は、太陽組成比を超える窒素/鉄とニッケル/鉄、太陽組成比を下回るネオン/鉄とマグネシウム/鉄を除き、他の元素/鉄比は太陽組成比に一致した。この組成比パターンは、最新の Ia 型および重力崩壊型超新星の元素合成モデルを組み合わせたものであろうと再現実験することができなかった。一方で、高い窒素/酸素比は漸近巨星分枝に達した古い恒星からの質量放出が NGC 4696 周辺への元素供給に重要であることを示唆する。また太陽組成に近いクロム/鉄とマンガン/鉄比は、Ia 型の親星がチャンドラセカール限界質量付近であったものと、それ以下であったものの両方が必要であることを示す。

2. 早期型銀河における高温ガス中の重元素組成比

ケンタウルス座銀河団で用いた RGS の解析手法を、14 個の早期型銀河からなるサンプルに適用している。本研究でも、酸素、マグネシウム、ネオン、鉄の空間分布を調べた結果、ケンタウルス座銀河団コア（NGC 4696）の場合と同様に、ほとんどの天体で酸素/鉄、ネオン/鉄、マグネシウム/鉄比がきわめて平坦な分布を示した。これは CCD による組成比減少の報告の有無や、原子放射コードの違いによらなかった。つまり、多くの天体では化学反応性が低いネオンさえも通常元素と同様の分布を持っている。やはり銀河中心の組成比減少を説明するには、星間塵貯蔵説の他に、中心の巨大ブラックホール活動による元素運搬などを検討する必要がある。中心 60° 領域全体に注目すると、ガス質量/銀河光度比が高い銀河団中心銀河では、ガス温度が 2 keV 以上と高く、太陽組成比に近い窒素/鉄、酸素/鉄、ネオン/鉄、マグネシウム/鉄、ニッケル/鉄比を示す傾向があった。それに対して、孤立銀河や銀河群中心銀河のような 1 keV 以下の低温系では、太陽組成比を超える窒素/鉄、ニッケル/鉄およびネオン/酸素、マグネシウム/酸素比がえられた。とくに銀河団中心銀河でみられた太

陽に近い組成比は、最新の Ia 型および重力崩壊型モデルの足し合せにより再現できた。これらの古い系や天の川銀河では、すでに長寿命の軽い星による Ia 型も含めて、ある程度の星が超新星爆発済みであることを示唆する。

3. スターバースト銀河 M82 における元素組成比

活発な星形成が進行しているスターバースト銀河 M82 の中心では、多数の大質量星による重力崩壊型超新星が強力な銀河風を引き起こす。RGS データは 14 観測 (300 ks) で、それぞれの観測で分散方向と垂直に 80" の幅からスペクトルを作成した。分散光を利用する RGS では、光源の空間的な広がりによる輝線形状の変化を考慮する必要がある。ヘリウム状酸素イオン輝線帯域 (0.55–0.60 keV) の CCD 画像は、水素状酸素イオン帯域 (0.64–0.67 keV) や鉄 L 帯域 (0.7–1.2 keV) の画像よりも広がった分布を示していた。水素状酸素イオン帯の画像を RGS の分散方向で積算しカウント分布を作ると、M82 からの北向き銀河風と南向き銀河風に対応して顕著な 2 重ピーク構造を示した。それに対して、鉄 L 帯域画像のカウント分布は M82 中心にピークを持っており、広がりやヘリウム状酸素、水素状酸素よりも狭かった。この結果は、ヘリウム状酸素、水素状酸素、および鉄 L の放射に寄与する異なる温度のガスが、それぞれ異なる空間分布を持つことを意味する。

スペクトルを再現するために、複数温度の衝突電離平衡プラズマ成分を仮定し、それぞれの成分のモデルはヘリウム状酸素、水素状酸素、鉄 L 輝線帯域の画像で畳み込んだ。その結果、ヘリウム状酸素イオンからの輝線は 0.1 keV の平衡プラズマでよく再現できた。M82 のヘリウム状酸素イオン輝線では禁制線が強く見えるという先行研究の指摘にしたがい、平衡プラズマに電荷交換反応由来の放射モデルを組み合わせても、ヘリウム状酸素輝線は再現できた。しかし、これら 2 成分の強度比は、RGS の分散方向によって大きく変化しており、物理的に不自然であった。水素状酸素イオンからの輝線は、銀河風に対応する 2 重ピーク構造を示し、水素状酸素帯域の画像で畳み込んだ 0.4 keV の平衡プラズマで再現できた。広エネルギー帯域 (0.45–1.75 keV) のスペクトルは、それぞれの空間分布を考慮した 0.1、0.4、0.7 keV の 3 温度の平衡プラズマ成分のみを足し合わせることで近似できた。

広エネルギー帯域のスペクトルフィットからえられた M82 銀河の組成比は、ネオン/酸素とマグネシウム/酸素が太陽と同程度、鉄/酸素比は太陽の 1/2 程度であった。これは重力崩壊型のモデルとおおむね一致しており、M82 では天の川銀河に比べ、短寿命の星による重力崩壊型超新星が重要な元素供給源である。とくにネオン/酸素とマグネシウム/酸素比を太陽組成の 1.5 倍以上と報告していた先行研究 (電荷交換反応の寄与を主張していた) と比較すると、電離平衡プラズマと適切な空間分布のみを仮定することで、よりもっともらしい組成比をえられることがわかった。

論文審査の結果の要旨

惑星や生命の元となる様々な元素の多くは恒星内部や超新星爆発での核融合により合成されてきた。星形成からまもなく寿命の短い大質量星は重力崩壊型超新星爆発を起こし、主に酸素やネオンなどの α 元素を星間空間に供給する。大量の超新星により加熱された星間ガスは銀河風として銀河間空間に元素とエネルギーを供給することもある。星形成から長時間が経過すると白色矮星が限界質量に近づくか白色矮星同士の合体により炭素爆燃型超新星を起こし、鉄やニッケルなどの重元素を合成する。星間空間に放出された重元素はその後生まれる恒星や星間ガスに銀河間空間に放出された重元素は銀河間物質に取り込まれることになる。銀河や銀河間空間を満たす高温には大量の重元素が含まれている。これらの重元素量の測定は宇宙の重元素合成史だけではなく、星形成史や超新星爆発メカニズムの解明につながる。

論文は英文で全6章から構成されている。第一章は本論文の導入部であり第二章で宇宙の化学進化、銀河と銀河団を概観し、研究の背景を解説している。また、研究に用いたX線天文台の特徴を述べている。XMM衛星搭載回折格子はエネルギー分解能と空間分解能に優れているものの、エネルギー情報と空間情報が縮退している。論文申請者はCCD検出器に加え回折格子検出器の特長を生かし、高温プラズマの温度や高温ガスに含まれる重元素の空間分布を詳細に調べた。なおこの解析手法は先例が少なく、論文申請者が独自に開発したものも含まれる。

第三章では、ケンタウルス座銀河団中心領域における元素組成比とその空間分布についての解析結果の報告を行なっている。銀河団は宇宙最大の自己重力系であり、暗黒物質の重力により多数の銀河と銀河の10倍の質量の数千万度の高温ガスが閉じ込められている。銀河団の重力ポテンシャルの底には巨大楕円銀河が存在することが多く、これまでに銀河において合成された重元素の多くが高温ガスに閉じ込められている。ところが、現在においても重元素の供給が続いているはずの中心領域における重元素の組成比の低下が問題となっていた。高密度の高温ガスが放射によりエネルギーを失い、星間塵が形成されているという仮説が提案されていた。すると、重元素組成比の測定にもバイアスが生じることになる。申請者は回折格子検出器を用いて、星間塵に取り込まれないネオンの空間分布を調べることにより星間塵説に否定的な結果を得た。酸素、ネオンなどの α 元素、クロム、マンガン、鉄の組成比が太陽に近いことを導いた。マンガン、ニッケルと鉄の組成比からは爆発した白色矮星の質量分布に制限をかけることができる。炭素爆燃型超新星の光度は宇宙のパラメータの測定にも重要な役割を果たしており、貴重な成果となる。窒素は酸素に比べて太陽組成比より高い値が得られた。銀河団中心領域においては中心銀河の恒星からの質量放出の寄与が大きいことを示唆する。

第四章では第三章で行われた回折格子検出器の解析手法を14個の早期型銀河に適用した。銀河団中心銀河と銀河群中心銀河、それ以外の早期型銀河が含まれる。銀河団

中心銀河の酸素、ネオン、ケイ素、鉄の組成比はケンタウルス座銀河団と似た結果が得られた。早期型銀河と渦巻銀河である天の川銀河での元素合成史に何らかの共通点があったことを示唆する重要な結果である。例えば、恒星の初期質量分布が早期型銀河でも渦巻銀河でも共通であり、多くの超新星が爆発済みであれば、似た組成比となるのは不思議ではない。早期型銀河の進化の解明につながる重要な結果である。一方、高温ガスの温度が数百万度である早期型銀河では、ネオン過剰な結果が得られた。

第五章では、回折格子検出器の特性を生かすことにより、スターバースト銀河である M 8 2 の高温銀河風の温度構造や重元素組成比を調べた。O VII 輝線における禁制線の強度超過より、スターバースト銀河において冷たい星間ガスと高温ガスの接触面において電荷交換反応が起こっていると解釈されていたが、特異な酸素やネオンの組成比が問題となっていた。申請者は回折格子の分散方向が異なる複数の観測データを比較することにより、温度が低い 100 万度ぐらいの高温ガスが数百万度のガスより広がっているとすると電荷交換反応は不要であり、さらに重元素組成比は重力崩壊型超新星爆発により予想される比と近いことを発見した。スターバースト領域で起こる大量の重力崩壊型超新星が星間ガスを加熱し、銀河風を引き起こしていること、銀河風が冷えながら噴き出しているとする、もっともらしい結論が得られたことになる。

本論文では銀河の高温ガスの重元素組成比について新たな知見をもたらしたことより、博士(理学)の学位論文として十分に価値あるものと認められる。