

「すざく」が明らかにした早期型銀河の 重元素組成／組成比



小波 さおり

〈首都大学東京理工学研究科 〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1〉

e-mail: konami@tmu.ac.jp

銀河には、綺麗な渦巻きや球状に分布している星やガスだけでなく、数百万度から数千万度にもなる高温の星間ガスが存在している。これらの高温ガスはX線で観測され、特に早期型銀河では、星の広がりよりも高温ガスがより広く分布している。この高温ガスは重元素を含み、重元素の組成や組成比から、その銀河の化学進化を探ることができる。今までのX線観測から、高温ガスの元素組成はおおよそ1太陽組成と求められてきたが、個々の元素測定においては、低エネルギー側に輝線のある酸素やマグネシウムの精度の良い測定は困難であった。それが、低い検出器由来のバックグラウンドと低エネルギー側で優れた輝線感度をもつ「すざく」衛星の登場により、酸素やマグネシウム、つまり重力崩壊型の超新星爆発から供給される元素を精度良く測定することが可能になった。ここでは、「すざく」が初めて明らかにした早期型銀河の高温ガスの重元素組成比の系統的調査について紹介し、古くから測定が行われてきた可視光観測による星の重元素組成の結果と比較する。

1. 重元素が示す宇宙の星形成史

宇宙に存在するほとんどの重元素（水素、ヘリウムより重い元素）は、宇宙が誕生したビッグバン当時は存在せず、元素はほぼ水素とヘリウムだけでした^{*1}。そこから星が誕生し、内部での核融合によって重元素が初めて生成され、星が最期に起こす超新星爆発によって宇宙空間に拡散されてきました。つまり、どの重元素も、もちろん私たちの身の回りにある物も私たち自身も、一度は必ず超新星爆発を経験してきています。超新星爆発は大きく二つのタイプに分けられ、一つは太陽の約10倍以上重い星が重力崩壊を起こす重力崩壊型超新星爆発（CC型）、もう一つは軽い星の最終形態である白色矮星に質量が降着することに

より、チャンドラセカール質量を超えて核反応が暴走して起こるIa型超新星爆発（Ia型）です^{*2}。これらの爆発は元の星が違うというだけでなく、それぞれ主に放出する重元素が異なります。CC型は酸素やマグネシウムを多くばらまきますが、Ia型はそれより重い鉄が主にばらまかれます。さらに、星は質量が重いほど一生を終えるのが早く、軽い星は長生きであるという違いがあります。星の誕生から爆発までのタイムスケールは重い星で数百万年、軽い星で数億から数十億年と見積もられています。これらのことから、どの元素がどれくらいの比率で存在するかを調べると、CC型/Ia型の割合がわかり、どのような星がどれだけ作られてきたのかという星生成史を探る大きな手がかりになるのです。

^{*1} リチウムは宇宙初期にわずかですが生成されます。

^{*2} 超新星爆発は可視光観測のスペクトル輝線によってIa, Ib, Ic, II型というように分類がされていますが、今回は爆発機構に着目して、重力崩壊型（Ib, Ic, II型）をCC型、核反応が暴走して起こるものをIa型というように呼びます。

2. 早期型銀河のX線観測

銀河は太陽のような恒星が数千から数兆個集まった宇宙の最も基礎的な構成単位であり、古くから可視光を中心にさまざまな観測が行われてきました。X線観測では、1978年に打ち上げられたX線天文衛星Einsteinによって、多くの早期型銀河にはX線を放出する高温なガスが存在することが明らかにされました¹⁾。高温ガスの温度は数百万度から1千万度程度であり、銀河の重力ポテンシャルによって束縛されています。これらの高温ガスの熱エネルギーは、星の速度分散から求められる運動エネルギーと同程度であることが示されており、さらに質量は多いものでも星の全質量の数%であることがわかっています²⁾。つまり、高温ガスの質量は晩期星からの質量放出だけで十分まかなえるため、その起源は星のガスであると考えられます。星のガスに含まれる重元素組成は、星のもととなる星間ガスの組成を反映しており、その星ができた当時までに起こった超新星爆発CC型とIa型を足し合わせた組成になります。さらに、早期型銀河は現在星生成を行っていないため、銀河を構成している星は比較的早く、これらの星がIa型超新星爆発を起こしています。よって、高温ガスに含まれる重元素の起源は「星のガスに含まれる重元素」+「現在、銀河で起こっているIa型超新星爆発でばらまかれる重元素」ということになります。

早期型銀河の重元素組成は可視光観測でも調べられています。可視光では星そのものが見えるため、測定できる重元素も星の組成だけを測定することができます。しかし、可視光観測により得られるスペクトルはすべての星の放射の足し合わせであり、そこから重元素組成を求めるには星の年齢の仮定が必要で、さらにスペクトルモデルには年齢と元素組成の縮退といった不定性が存在しま

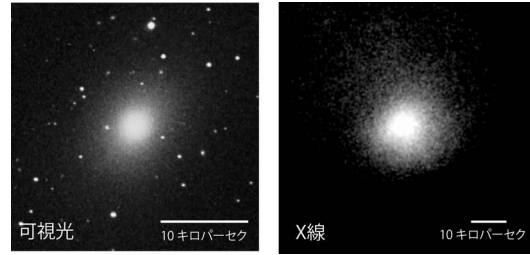


図1 可視光 (Digitized Sky Survey) とX線 (「すぎく」) で観測した楕円銀河NGC 4636.

す。また、観測的な制限で多くの銀河は有効半径 (可視光観測で銀河全体の光度の半分が放射される半径) 程度の中心領域までしか測定が困難です。

一方、X線は星の重元素組成とIa型で生成される重元素の足し合わせを見ていることにはなりますが、銀河の星がほとんど含まれる領域 (可視光で観測できる領域の数倍程度) まで測定することができます。さらに、宇宙に存在する元素は水素とヘリウムを除くと、存在度が一番高いのが酸素であり、つづく鉄、ネオン、マグネシウム、ケイ素といった元素の輝線放射がX線帯域で観測できます。また、X線帯域の輝線放射は、電子を1個や2個しかもたない水素様やヘリウム様の電離状態のイオンから発せられるため、比較的物理が単純であり、放射のモデル化が容易です³⁾。これらのことが、X線で重元素組成を測定するメリットになっています。

現在までも、日本の「あすか」衛星、欧州のXMM-Newton衛星、アメリカのChandra衛星により早期型銀河の重元素観測は行われてきました。「あすか」衛星では主に鉄のL輝線を測定することによって、元素組成がおおよそ1太陽組成⁴⁾であることが明らかにされました⁴⁾。さらに、XMM-Newton衛星やChandra衛星によって酸素、マグネシウム、ケイ素、鉄といった個々の元素の測定が可能になり、マグネシウム/鉄比やケイ素

³⁾ 天文月報103巻の佐藤浩介さんの記事にX線プラズマからの放射機構の説明が詳しく載っています³⁾。

⁴⁾ 太陽の組成を基準としています。1太陽組成は重元素と水素の個数比が太陽と同じであるということです。

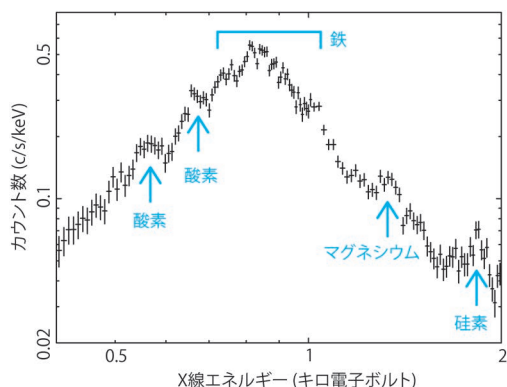


図2 「すざく」衛星による渦巻銀河NGC 4258のX線スペクトル¹⁰⁾。酸素などの輝線が検出できていることがわかる。

／鉄比はおおよそ1太陽組成と求められましたが、酸素／鉄比はしばしば1太陽組成より小さい値でした⁵⁾。酸素やマグネシウムは星の組成を反映し、その起源は同じCC型超新星爆発であることを考えると、酸素／鉄比だけ小さいのは奇妙です。さらに、高温ガスの鉄の組成も、現在起こっているIa型超新星爆発の頻度から見積もった鉄の組成は最低でも2太陽組成以上にはなるはずであり、完全に理解されているとは言えません⁶⁾。

3. 「すざく」衛星による早期型銀河の重元素観測

3.1 銀河の高温ガスの重元素測定

2007年、日本が打ち上げた「すざく」衛星⁷⁾により、私たちは広がった暗い天体の酸素やマグネシウムの量を求めることができるようになりました^{3), 8)}。「すざく」に搭載されているX線CCDカメラ⁹⁾は、他のX線衛星に比べて酸素輝線エネルギー帯での高い感度と低い検出器由来のバックグラウンドが大きな特徴です。この特徴により、銀河の高温ガスなど輝度があまり高くなく、かつ空間的に広がった放射を捉えることが可能になり、さらに酸素やマグネシウムを精度良く求め

ることができるようになりました。さらに、一般的な可視光望遠鏡CCDの視野が数分角であることに比べると、「すざく」のX線CCDは17分×17分であり、かなり広いと言えます。

私たちは「すざく」衛星を使って、いくつかの銀河の高温ガスの元素組成を明らかにしてきました。例えば、われわれの天の川銀河と同じ種類の渦巻銀河の高温ガスの重元素組成は「すざく」の登場によって、初めて測定することができました^{10), *5)}。図2に「すざく」で観測された渦巻銀河NGC 4258のX線スペクトルを示します。図に示したように、0.5-0.7キロ電子ボルト付近に酸素の輝線が盛り上がりが見えるのがわかります。XMM-Newton衛星やChandra衛星は軌道上でのバックグラウンドが高く、さらに、X線CCDの輝線応答関数の形がシャープでないため、輝線が低エネルギー側にぼやけてしまい、連続X線から分離することが難しくなっています。このことから、銀河のように低輝度で広がった天体の酸素輝線を捉えることは非常に困難です。したがって、特に酸素の量を精確に見積もれるのは、「すざく」だけということになります。

さらに私たちは、「すざく」衛星により観測された早期型銀河17天体のデータを用いて、高温ガスの重元素組成や組成比を求めました¹⁴⁾。解析は銀河中心から4倍の有効半径以内の領域で行いました。この領域は可視光観測による測定領域に比べ十分広く、また数分程度の広がりのため、「すざく」のX線CCDカメラの1視野にすっぽりとおさまります。そのため、バックグラウンド成分を同じ視野から抽出、見積もることができ、より精確に重元素の測定ができるのです。

3.2 重元素組成／組成比と高温ガスの温度

スペクトル解析により、銀河中心から4倍の有効半径以内の酸素、マグネシウム、ケイ素、鉄の組成と、酸素、マグネシウム、ケイ素の鉄に対す

*5 渦巻銀河のほかにも星生成を激しく起こしているスターバースト銀河の研究においても、「すざく」は銀河の外へ“今”まさに逃げ出しているガスの元素組成を求めることに成功しています¹¹⁾⁻¹³⁾。

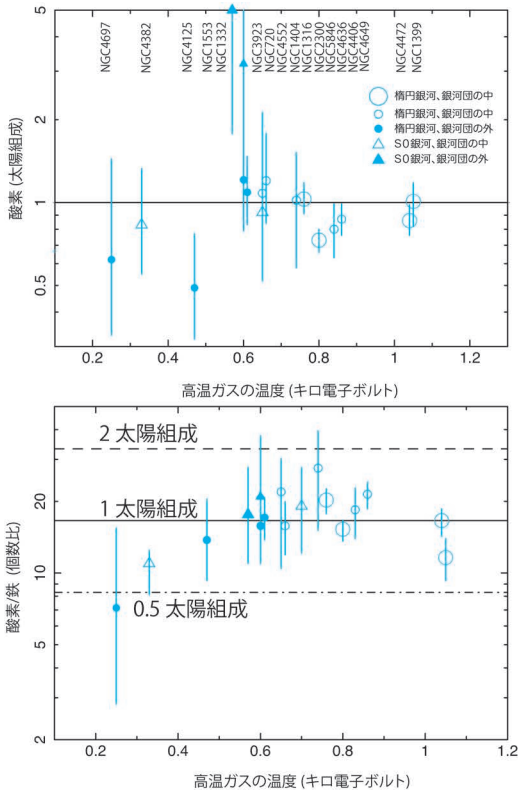


図3 高温ガスの酸素の組成 (上図) と酸素と鉄の組成比 (下図) を高温ガスの温度に対してプロットしたもの¹⁴⁾。上図の縦軸は太陽組成を1としたときの元素組成。下図の縦軸は個数比そのものを表している、図中の線は上から2, 1, 0.5太陽組成に対応 (つまり、太陽の酸素と鉄の個数比はおよそ16.6¹⁵⁾)。エラーバーは90%信頼区間。1キロ電子ボルトはおよそ1千万度。

る組成比を求めました。図3にすべてのサンプルの重元素組成 (酸素) と組成比 (酸素/鉄) を高温ガスの温度に対してプロットした図を示します。2天体ほど統計があまりよくないために誤差が大きなものがありますが、ほぼすべての天体において、組成/組成比ともに1太陽組成であるという結果を得ました。私たちのサンプルは、早期型銀河の中でも形態で分類される楕円銀河とS0銀河の両方の種類を含み、さらに銀河団中に存在するものと、銀河団の外に存在するものがありました。しかし、これら形態や環境に対しても特別な傾向

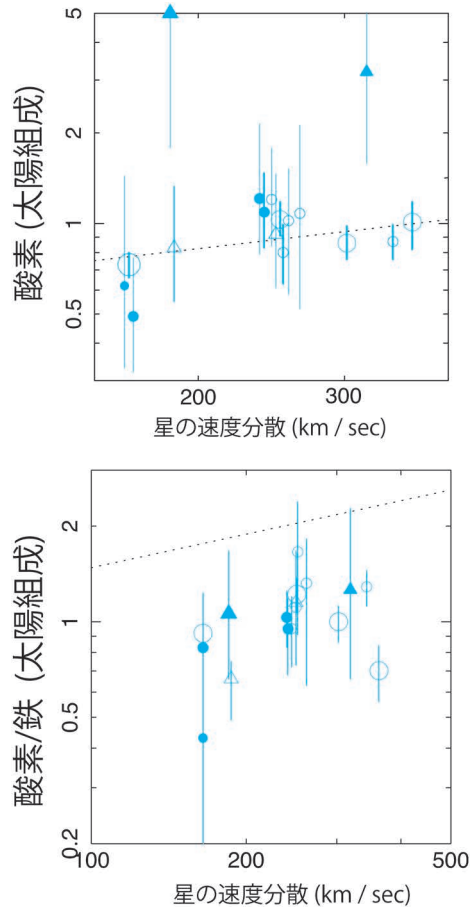


図4 高温ガスの酸素の組成 (上図) と酸素と鉄の組成比 (下図) を星の速度分散に対してプロットしたもの¹⁴⁾。縦軸は太陽組成を1としたときの組成/組成比。点線は可視光観測により求められた元素組成、または組成比と星の速度分散の関係¹⁶⁾。

は見られず、高温ガスの温度、形態、環境によらず重元素組成/組成比ともにほぼ太陽組成である、という結果になりました。

3.3 重元素組成と星の速度分散の関係

さらに、求めた重元素組成を可視光観測により求められた星の速度分散に対してプロットしました。図4上図には代表して酸素の図を載せています。星の運動エネルギーは銀河のポテンシャルと釣り合っているため、より大きな星の速度分散をもつ銀河は系の質量も大きいと見なせます。図中

の点線は可視光観測から求められた重元素組成と星の速度分散の関係です¹⁶⁾。元素組成は星の速度分散(系の質量)と正の相関をもっており、さらに可視光観測で求められた結果とも一致しています。この結果は、元素組成と星の速度分散(系の質量)の関係が銀河の中心領域(可視光)だけでなく、銀河全体(X線)で成り立っていることを示しています。また、全く異なる系統誤差をもつ可視光観測とX線観測の結果が一致するというのも重要な結果です。

3.4 重元素組成比と星の速度分散の関係

続いて、重元素組成比(酸素/鉄)を可視光観測により求められた星の速度分散に対してプロットしたものが図4下図です。元素組成の図と同様に、図中の点線は可視光観測から求められた重元素組成比と星の速度分散の関係です¹⁶⁾。高温ガスの元素組成比は星の速度分散に関係なくほぼ1太陽組成であることがわかります。一方、可視光観測で求められた星の組成比(図4下図の点線)は高温ガスの組成比より有意に大きいことがわかります。

高温ガス中の重元素の起源は、2章で述べたように、星からの質量放出と現在起こっているIa型超新星爆発でした。そのことを踏まえると、高温ガスの酸素/鉄比から以下のことがわかります。

$$\left[\frac{\text{O}}{\text{Fe}} \right]_{\text{高温ガス}} = \frac{\text{O}_{\text{星}}}{(\text{Fe}_{\text{星}} + \text{Fe}_{\text{現在のIa}})} \sim \left[\frac{\text{O}}{\text{Fe}} \right]_{\text{太陽組成}}$$

$$\left[\frac{\text{O}}{\text{Fe}} \right]_{\text{星}} > \left[\frac{\text{O}}{\text{Fe}} \right]_{\text{太陽組成}}$$

このように、高温ガスから求められる星の重元素組成比(酸素/鉄)も太陽組成よりも大きくなります。この関係式も可視光観測の結果と一致し、銀河の中心領域だけでなく、銀河全体で成り立っている関係であると言えます。

では、星の酸素/鉄比が太陽組成より大きいということから何がわかるのでしょうか。1章で述べたように、星の元素組成は、その星が作られた

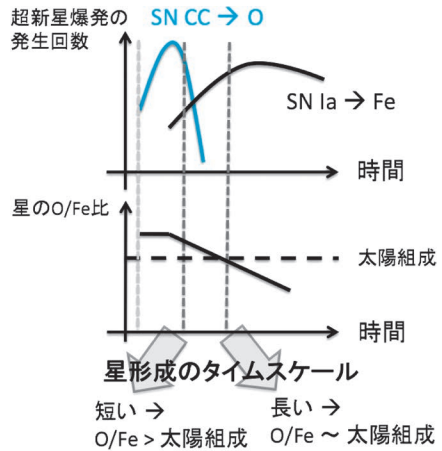


図5 早期型銀河中で星が生成された後、超新星爆発CC型、Ia型それぞれの発生回数の変化(上図)とそのとき生成される星に取り込まれるO/Fe比(下図)を模式的に表したもの。一番左にある灰色の縦線が星生成の始まりを表す。

当時の組成を反映しています。つまり、その星が作られた当時に、銀河のガス中にどれくらいの割合で酸素/鉄が放出されたかがわかります。さらに、酸素と鉄を主に供給する星は質量が異なるだけでなく、爆発するタイムスケールも異なります。このことから、その銀河での星形成のタイムスケールを推測することができます。図5は、超新星爆発が起こるタイムスケールとその時点で生成される星に含まれる酸素/鉄比を表したものです。まず、ある時点でさまざまな質量の星が一度に生成され始めたとします(図5、左側の灰色の縦線)。はじめは、質量の重い星から爆発していきます(CC型)、軽い星はそのあと徐々に爆発していきます(Ia型)。最初の早い段階で星生成がストップしたとすると、まだ重い星しか爆発しておらず、CC型の元素(酸素やマグネシウム)が有意に多いので、その当時にできた星の酸素/鉄比は大きくなります。一方、比較的長く星生成が続く、Ia型もある程度起こった後に星生成が終わると、星のもとになるガスに鉄が供給されるため、酸素/鉄比は相対的に小さくなると考えられます。

私たちが求めた高温ガスの酸素／鉄比から推測される星の酸素／鉄比は太陽組成より大きかったため、早期型銀河の星形成のタイムスケールはわれわれの天の川銀河（渦巻銀河）に比べて短かったと考えられます。では、同じ早期型銀河同士ではどうでしょうか。図3の下図に高温ガスの温度に対する各銀河の酸素／鉄比をプロットしましたが、高温ガスの温度が低い（系の質量が小さい）ほうで少し酸素／鉄比が下がっているように見えます。これは、同じ形態をもつ早期型銀河でも系の大きさによって星形成のタイムスケールが異なることを示唆しているのかもしれませんが。

3.5 鉄の組成

求めた重元素組成比をすべてのサンプルに対して重み付き平均をとったものを図6にプロットしました。同じ図中に、理論計算から求められたCC型、Ia型超新星爆発がそれぞれ供給する重元素組成比のパターン^{17), 18)}と、実際に測定された太陽組成比のパターン¹⁵⁾を示しています。図からわかるように、重元素組成比の重み付き平均値

は太陽組成とよく一致しました。さらに、これらの組成比のパターンとIa型、CC型のパターンの比較から、鉄組成のうち、70%がIa型、30%がCC型から供給されたことがわかりました。また、私たちは重元素組成についても重み付き平均値を計算し、鉄は0.8太陽組成であるという結果を得ました。ここから、X線観測で得られた高温ガスの鉄のうち、0.6太陽組成がIa型から供給されたと考えることができます。

ここで、現在早期型銀河で起こっているIa型超新星爆発が供給する鉄の量を計算してみます。可視光観測によるIa型超新星爆発の発生頻度¹⁹⁾を使って計算した現在のIa型超新星爆発で供給される鉄は²⁰⁾、最低でも2-3太陽組成となります。この値は先ほどの計算で求めた高温ガス中のIa型から供給されたとされる0.6太陽組成より、数倍大きな値になっています。この原因として考えられるのは、現在のIa型超新星爆発で供給されている鉄は、高温プラズマ中で十分混ぜられ、暖められる前に銀河の外に逃げているということです。実際、理論計算によるシミュレーションで、超新星爆発後、アウトフローが起こり銀河の外へ運ばれている鉄が再現されています²¹⁾。

4. まとめと今後の展望

本研究では、「すぎく」衛星を用いて早期型銀河の高温ガスの重元素組成／組成比の系統的な測定を行いました。その結果、組成や組成比は高温ガスの温度、銀河の形態、環境への依存性はありませんでしたが、元素組成は星の速度分散（系の質量）と正の相関をもっており、可視光の観測結果とも一致しました。高温ガスの元素組成比から見積もった星の酸素／鉄比は太陽組成よりも大きくなり、早期型銀河の星形成のタイムスケールを反映していると考えられます。太陽組成比との比較から、早期型銀河の星形成のタイムスケールはわれわれ天の川銀河のものより短かく、さらに同じ早期型銀河同士では系の質量が小さい

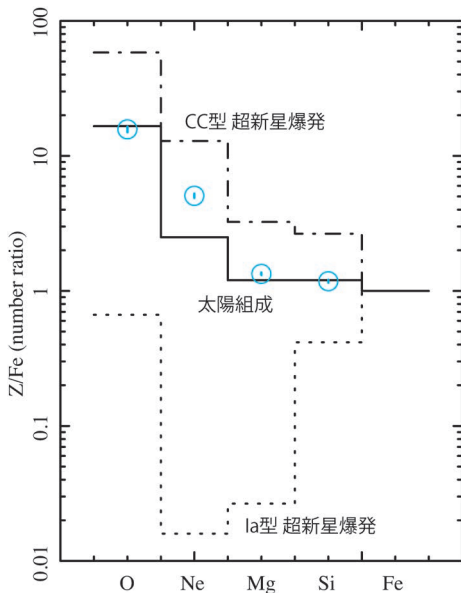


図6 重み付き平均値をとった重元素組成比¹⁴⁾。図中の線は一番上から順にCC型¹⁷⁾、太陽組成¹⁵⁾、Ia型¹⁸⁾を表す。

ものほど星形成が早く終了したのかもしれませんが、高温ガスの鉄の組成は、現在のIa型超新星爆発の発生頻度から見積もられる鉄よりも少なく、これらの鉄はアウトフローなどにより銀河の外まで運ばれたと考えられます。

今回の記事では触れませんでしたでしたが、このように銀河から銀河間空間への重元素供給過程も銀河の歴史を考えるうえで非常に重要です。銀河団に付随する高温ガスの観測からも、さまざまな大量の元素が見つかっており^{3), 8)}。この起源が銀河なのは確かですが、それらがいつどのように供給されてきたかは解明されていません。これらの研究に大きなインパクトをもたらすと期待されているのが、2015年度に打ち上げが予定されているASTRO-H衛星²²⁾搭載のマイクロカロリメーター検出器です。マイクロカロリメーターは従来のX線CCDカメラの10倍以上のエネルギー分解能をもち、輝線の中心エネルギーや幅などの詳細な測定ができるようになります。それらの輝線情報から、高温ガスや元素そのものがまさに銀河から銀河団へと流出する様子が直接捉えられるようになるでしょう。

謝 辞

本研究は筆者の博士論文の一部が基になっています。学部4年から多くの指導をしていただいた玉川 徹教授（理化学研究所／東京理科大学）、松下恭子准教授（東京理科大学）に心から感謝いたします。また、同じく学部4年から初歩的な解析を含め、さまざまなことを教えてくださった佐藤浩介助教（東京理科大学）にも御礼申し上げます。本稿執筆の機会を与えていただき、有益なコメントをいただいた馬場 彩准教授（青山学院大学）にも感謝します。本稿の科学的な内容は、2014年に筆者らが発表した投稿論文¹⁴⁾に基づいているので、詳しくはそれらをご覧ください。なお、本研究は日本学術振興協会の援助を受けて行われました。

参考文献

- 1) Forman W., et al., 1985, ApJ 293, 102
- 2) Matsushita K., 2001, ApJ 547, 693
- 3) 佐藤浩介, 2010, 天文月報103, 34
- 4) 例えば, Matsushita K., et al., 2000, PASJ 52, 685
- 5) 例えば, Ji J., et al., 2009, ApJ 696, 2252
- 6) 例えば, Konami S., et al., 2010, PASJ 62, 1435
- 7) Mitsuda K., 2007, PASJ 59, S1
- 8) 松下恭子, 2007, 天文月報100, 385
- 9) Koyama K., et al., 2007, PASJ 59, S23
- 10) Konami S., et al., 2009, PASJ 61, 941
- 11) Tsuru T., et al., 2007, PASJ 59, S269
- 12) Konami S., et al., 2011, PASJ 63, S913
- 13) Konami S., et al., 2012, PASJ 64, 117
- 14) Konami S., et al., 2014, ApJ 783, 8K
- 15) Ladders K., 2003, ApJ 591, 1220
- 16) Kuntschner H., et al., 2010, MNRAS 408, 97
- 17) Nomoto K., et al., 2006, NuPhA 777, 424
- 18) Iwamoto K., et al., 1999, ApJS 125, 439
- 19) 例えば, Mannucci F., et al., 2008, MNRAS 383, 1121
- 20) Ciotti L., et al., 1991, ApJ 376, 380
- 21) Tang S., Wang Q. D., 2010, MNRAS 408, 1011
- 22) Takahashi T., et al., 2012, SPIE 8443, 84431Z

Abundance Patterns in the ISM of Early-type Galaxies Observed with Suzaku

Saori KONAMI

Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-Osawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan

Abstract: We have analyzed 17 early-type galaxies observed with Suzaku, and investigated metal abundances (O, Mg, Si, and Fe) and abundance ratios (O/Fe, Mg/Fe, and Si/Fe) in the interstellar medium (ISM). We accumulated on-source spectra for each galaxy within 4 times the effective radius, r_e centered on each galaxy. These abundances show no significant dependence on the morphology and environment. The derived O and Mg abundances in the ISM agree with the stellar metallicity within an aperture with a radius of one r_e derived from optical spectroscopy. From these results, we discuss the past and present SN Ia rates and star formation histories in early-type galaxies.