

「すざく」で探る銀河団ガスの重元素進化

下田 優 弥*

〈埼玉大学大学院理工学研究科 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255〉

e-mail: shimoda@heal.phy.saitama-u.ac.jp



下田

川原田 円

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 相模原市中央区由野台3-1-1〉

e-mail: kawahard@astro.isas.jaxa.jp

田代 信

〈埼玉大学大学院理工学研究科 〒338-8570 さいたま市桜区下大久保255〉

e-mail: tashiro@phy.saitama-u.ac.jp

宇宙最大の天体である銀河団には、数千万度にも及ぶ高温ガスがその内部に閉じ込められています。X線帯域で輝くこのガス中には、超新星爆発により生成された重元素が含まれており、その量と組成は、銀河団が形成されてからの星生成の歴史を反映しています。そのため、さまざまな距離に位置する銀河団ガス中の重元素組成比を調べることができれば、重元素を生成している星たちが、いつどのくらい作られ死んでいったのかを知る重要な手掛かりになります。銀河団のX線観測では、これまでに、近傍銀河団ガスの重元素組成比は詳細に測定されてきましたが、遠方の銀河団については、観測機器の限界から測定ができませんでした。そのような状況下で、日本のX線天文衛星「すざく」は、銀河団のような低表面輝度の天体に対して、かつてない高感度の観測能力をもつため、中距離までの銀河団ガス中の重元素組成を測定することが初めて可能になりました。私たちは、「すざく」で観測した $0.016 < z < 1.160$ の62個の銀河団について、銀河団ガス中の重元素量を詳細に測定したところ、Ia型超新星爆発に対する重力崩壊型超新星爆発の回数比が、赤方偏移に対する有意な依存性はないものの、大きな銀河団ほど高いという結果を得ました。これは「あすか」で指摘されていた、重力崩壊型超新星爆発による生成物の、銀河団の外への逃避を支持するものです。本稿では、「すざく」を使った、銀河団ガスの重元素進化についての研究を紹介します。

1. 星生成と銀河団ガス中の重元素

宇宙には、数えきれないほどの星が輝いています。それらの星々は、いったい、いつ生まれそして死んでいったのでしょうか。この問題へ切り込む

には、星が残していった遺産である重元素の量を測定することが有効です。というのも、星が寿命を迎えるときその一部は超新星爆発によって重元素を生成し、それを宇宙空間へとばらまいて死んでいくからです。

* 現在の住所: 株式会社ウェルリサーチ 〒299-0102 千葉県市原市青柳2-12-11

星が超新星爆発で生成する重元素の種類は、元となる星の質量によって大きく2種類に分けられます。伴星から白色矮星への質量降着が一定量を超えることで起こるとされているIa型超新星爆発(SN Ia)では、主に鉄・ニッケルといった鉄族の重元素が合成されます。一方、太陽質量の8倍以上をもつ重い星では、重力崩壊(CC)型超新星爆発(SN CC)と呼ばれる星の中心核崩壊による爆発で、酸素・ネオン・マグネシウム・シリコンなどの α 系列の重元素が合成されます。

銀河団と呼ばれる、銀河が数個~数千個集まってできている宇宙最大の天体の中で星が超新星爆発を起こすと、生成・拡散された重元素は最終的に銀河団の巨大な重力ポテンシャル中に閉じ込められると考えられています。銀河団の構成要素を質量でみると、およそ8割は質量のみがわかっている暗黒物質、2割が温度1,000万度以上に及ぶ水素とヘリウムのガス(銀河団ガス)です。大量の恒星を含む銀河は可視光では目立つ要素ですが、質量比でみると、実は数パーセントにすぎません。宇宙空間へばらまかれた重元素は、高温の銀河団ガス中で、高階に電離したイオンの状態で存在します。重元素イオンからの放射は、X線スペクトル中で輝線として観測されます。その結果から、銀河団ガス中の重元素濃度は、太陽近傍のガスの組成(太陽組成)と比較して、3割程度だということがわかっています。

銀河団ガス中に観測される重元素の量と組成は、星生成活動によって生み出されてきた重元素を、過去から積み上げていったものであるはずで、一方の重元素濃度の分母となる水素ガスは、もともと銀河の質量に比べて圧倒的なので、銀河団の誕生からほとんど変化しないはずで、ですから、さまざまな距離(赤方偏移)に存在する銀河団を観測し、そのガス中に含まれる重元素の量と組成を測定することができれば、ある宇宙年齢において、どのような質量の星がどれくらい生まれ、そして死んでいったのか、という星の生成史

を間接的に知ることができるのです。

2. これまでのX線による研究

銀河団ガス中の重元素の観測的研究は、日本のX線天文衛星「あすか」で大きく進展しました。「あすか」に搭載されたX線CCDカメラで、近傍の銀河団の鉄とシリコンの空間分布が調べられ、前者は中心でピークをもち外側に行くにつれて数分の1に下がっており、後者は動径方向に対して平坦なプロファイルをもっていることが明らかにされました¹⁾。これは、両者の生成源が異なっており、それぞれ、銀河団の中で活発に生成される場所と時期が異なるためだと考えられます。

近年になると、大きな集光面積をもつXMM-Newton衛星と角分解能に優れたChandra衛星の活躍により、鉄のみですが、赤方偏移 $z=1$ を超える遠方の銀河団ガス中の組成比を観測できるようになりました。これらの衛星で100個を超える銀河団($0.3 < z < 1.3$)を観測し、銀河団ガス中心部の鉄の組成比を測定した結果、 $z > 0.5$ の遠方銀河団では太陽組成の約0.25倍、近傍の銀河団になると太陽組成の0.4倍と高くなることがわかりました²⁾。これは、鉄の生成源であるIa型超新星爆発が、過去から最近まで、比較的コンスタントに継続していることを示唆しています。また、鉄の組成比を動径方向に空間分解して、場所ごとの赤方偏移依存性を調査する研究も試みられていますが、いまだ統計的に有意な結果は得られていません³⁾。このような研究のためには、大集光面積だけでなく低バックグラウンド雑音の観測装置が必要になります。

日本で5番目のX線天文衛星「すざく」に搭載されているX線CCDカメラであるXISは、他の衛星に搭載されたCCDカメラに比べて、バックグラウンドが低く再現性も高いため、銀河団ガスのように、表面輝度が低い天体の観測に威力を発揮します。また、 α 元素由来のX線輝線が、従来よりもシャープに観測されるため、これまで鉄と

シリコンに限定されていた重元素測定が、酸素・ネオン・マグネシウムなど他の α 系列重元素を含めて測定できるようになりました。銀河団ガス中に含まれるさまざまな重元素の研究を進めるうえで、最適な観測装置といえます。実際、近傍の銀河団では、 α 系列重元素の空間分布が求められ、銀河団ガスの中心から外縁部にかけて、ほぼ一様に分布していることがわかりました⁴⁾。

「すざく」を含め、現存するX線天文衛星では有効面積や解像度が不足しているため、残念ながら、いまのところ、遠方の銀河団を空間分解したり、 α 系列重元素を精度良く観測することはできません。銀河団中の星の生成史を包括的に理解する研究は、将来の衛星ミッションに譲るしかないでしょう。それでも、「すざく」を使えば、中距離($z \sim 0.3$)の明るい銀河団であれば、鉄と α 系列重元素の組成比を測定し、これまでの衛星では得られなかった知見を得ることが可能です。実際、われわれは今回、いくつか興味深い結果を得ることができました。それらについて、これから解説していきます。

3. 「すざく」による観測結果

3.1 ターゲット選択

私たちは、「すざく」によって観測された銀河団のうち、最低でも銀河団の0.3ビリアル半径*1までの観測データがあるものを選びました。銀河団ガスの平均温度や重元素組成を求めるためには、中心部だけではなく、広い範囲の観測が必要だからです。その中から、銀河団の近くに活動銀河核などのX線で明るい天体がないものを選び、さらにChandra衛星による観測データも存在しているものに絞りました。「すざく」は空間分解能が良くないので、X線に対する正確な応答関数を作成したり、視野内に混入している銀河系内の天体の影響を取り除くために、空間分解能に

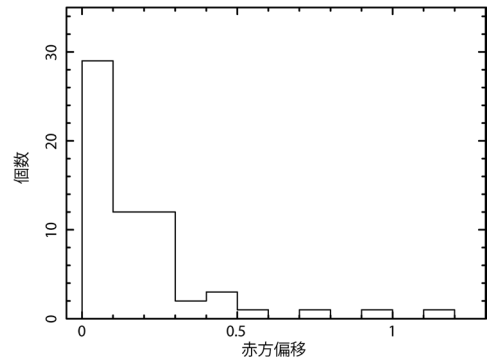


図1 今回用いた62天体の赤方偏移分布。

優れたChandra衛星の観測データを補助的に使うことにしたのです。

結果として、62天体の銀河団が残りました。図1に赤方偏移に対する銀河団の個数分布を示します。近傍の銀河団が多いですが、 $z=0.3$ を超えるような中距離～遠方の銀河団のサンプルも数個含まれています。

3.2 X線スペクトル解析

天体解析の第一段階として、「すざく」の観測結果から、慎重にノイズや視野中に混入している天体の影響を差し引き、それぞれの銀河団のX線スペクトルを求めました。図2に例として、MS 1512.4+3647銀河団($z=0.372$)のX線スペクトルを載せました。 α 元素はネオン・マグネシウム・シリコン・硫黄の四つの輝線が、鉄族は鉄とニッケルの輝線が見えているのがわかります。このスペクトルに、X線放射モデル(熱的制動放射+重元素輝線)を当てはめることで、各重元素の組成比を求めました。このように中距離の銀河団ガスで α 元素の組成比を求められたのは初めてで、「すざく」ならではの成果です。

ただし、 α 元素の組成比を求めることができたのは $z=0.372$ のこの天体まででした。より遠方の銀河団では、信号が弱くなることと、高温で明るい天体が選択的に観測されているために、 α 元

*1 銀河団の大きさの指標としてよく使われる、銀河団のビリアル平衡が成り立っている範囲の半径。

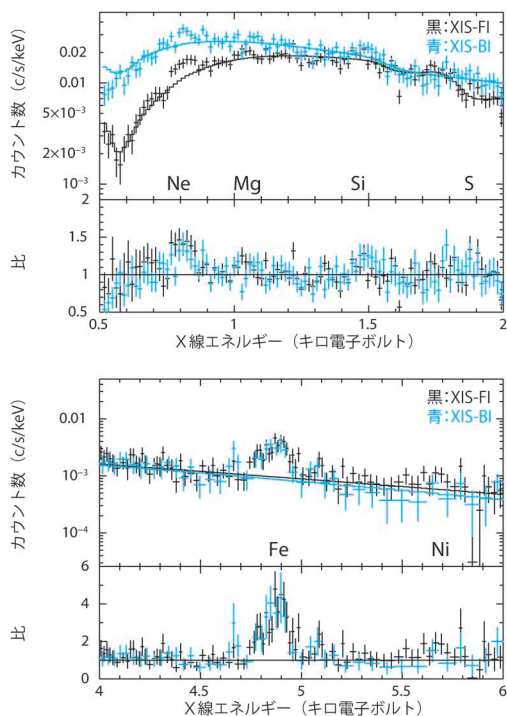


図2 「すざく」で得られたMS 1512.4+3647銀河団のX線スペクトル。ネオン，マグネシウム，シリコン，硫黄（上図），鉄，ニッケル（下図）からの輝線が確認できる。実線は、連続成分である熱的制動放射のモデル。

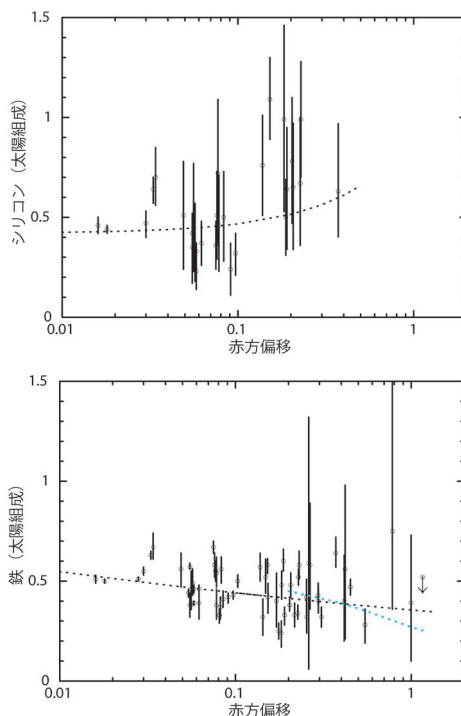


図3 シリコンの赤方偏移分布（上図）および鉄の赤方偏移分布（下図）。黒点線はそれぞれ、べき関数のベストフィットを示す。また、青色点線は、Balestraらが示した、Chandra衛星とXMM-Newton衛星の結果²⁾。

素は完全電離する割合が高く、輝線が弱くなるため、残念ながら鉄の組成比しか決定することができませんでした。

3.3 重元素進化

スペクトル解析から求めた重元素のうち、CC型生成物の代表としてシリコン、Ia型生成物の代表として鉄の赤方偏移に対する依存性を図3にプロットしました。比較のため、Chandra衛星とXMM-Newton衛星で得られた結果も示してあります。今回「すざく」で得られた鉄の組成比は、これまでのX線天文衛星で得られた結果と矛盾なく、赤方偏移が大きくなるにつれて、わずかに小さくなっていることがわかります。これに対して、シリコンは、赤方偏移に対してほぼ一定か、高い赤方偏移に向かって高くなっている傾向

が見えます。これは、Ia型とCC型の超新星爆発の活動度が、異なる進化をたどってきたということを示唆しています。

つづいて、赤方偏移に代わって、銀河団規模の指標として銀河団ガスの温度を横軸にとってみましょう。一般に、銀河団は規模が大きくなると重力ポテンシャルが深くなるため、ガスの温度も高くなります。図4にガスの温度に対する鉄とシリコンの組成比をプロットしました。比較のため、「あすか」の結果⁵⁾も載せています。結果、「すざく」の値は「あすか」で得られていたものと矛盾なく、CC型生成物は銀河団の規模が大きくなるにつれて多くなり、Ia型生成物はほとんど変わらないという傾向が得られました。これは、「あすか」の結果である、CC型生成物は、規模の小

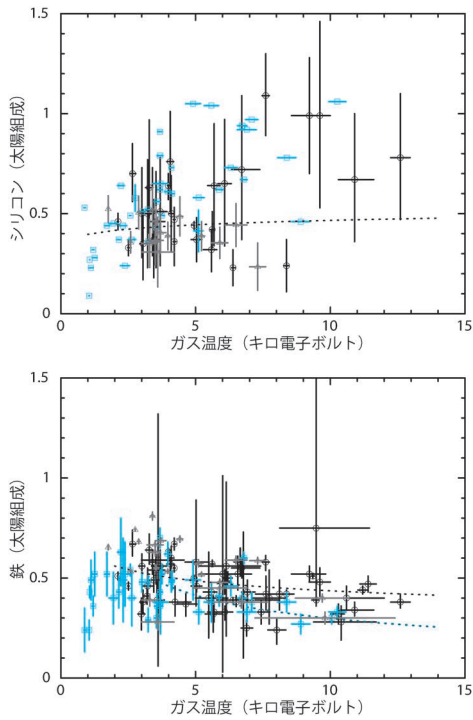


図4 シリコンの銀河団ガス温度に対する分布（上図）と鉄の銀河団ガス温度に対する分布（下図）。それぞれ、黒色が「すざく」、青色が「あすか」⁵⁾、灰色がXMM-Newton⁶⁾の結果を表す。ただし、「あすか」の結果は見やすさのためエラーを表示していない。

さい銀河団では一部が銀河団の外へ逃げているという説⁵⁾を支持するものです。また、図3でシリコンが、高い赤方偏移に向かって高くなっているように見えますが、これは詳細に検討してみると、高い赤方偏移では温度の高い銀河団が選ばれているために、見かけ上そうになっているだけで、実際は有意な赤方偏移依存性はないという結論に至りました。ただし、完全電離温度が高い鉄については、そのような選択効果を気にする必要はありません。

これらの結果から、CC型の超新星爆発は、ほとんどが $z=1$ よりも以前に起こり、小さな銀河団からは、シリコンなど生成物の一部が系の外に逃げ出したと考えられます。これに対して、Ia型

の超新星爆発は、比較的コンスタントな割合で現在まで続いて、鉄を供給してきており、その多くは銀河団の中にとどまっていると考えられます。「あすか」で見つかった、鉄の空間分布がより中心に集中している傾向と併せて考慮すると、銀河は、銀河団の形成期にCC型の超新星爆発が活発だったころは、銀河団の中に一様に分布していた、その後しだいに、中心に向かって集まってきたのかもしれませんが。実際、銀河の分布を赤方偏移に対して調査した最近の研究で、中心に移動していったことを示唆する結果が得られています⁷⁾。

3.4 CC型とIa型超新星爆発の回数比

さていよいよ重元素組成の観測結果から、CC型超新星とIa型超新星の発生数の比を求めてみましょう。スペクトル解析を行った天体のうち、 α 元素（ネオン、マグネシウム、シリコン、硫黄）を求めることができた、 $z=0.372$ までの26天体について、それぞれの天体で、各重元素の鉄に対する相対量（元素数比）をプロットしたものを図5(上)に示します。比較のために、XMM-Newton衛星で得られた22個の銀河団の平均値⁶⁾も、同図上にプロットしています。

図5(上)から、中距離銀河団までを含むこれら26天体の間で、鉄に対する各重元素の相対量には目立った差はないことがわかります。ここで、1度の超新星爆発で生成されると予想される重元素量の理論値を導入しましょう。Ia型のモデルは岩本らの値⁸⁾を、CC型のモデルは野本らの値⁹⁾を用いることにします。この理論モデルと、銀河団内の重元素の絶対量を比較すれば、銀河団内で起こったSN IaとSN CCの回数（SN CCの一部が銀河団から逃げたとすると、銀河団内に残っている生成物に対する回数）を求めることができます。しかし、重元素の絶対量を求めるには銀河団ガスの正確な質量が必要です。一般にX線観測から求めたガス質量には、比較的大きな系統誤差が含まれるので、ここではSN CC/SN Iaという比で議論を進めていきます¹⁰⁾。図5(上)に、

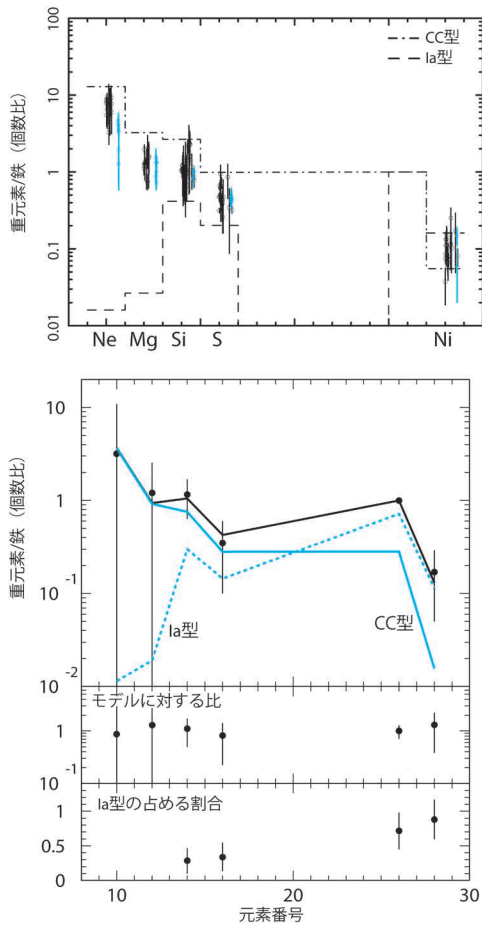


図5 (上) 鉄を1としたときの、各重元素の元素数比。比較のため、XMM-Newton衛星による近傍銀河団の結果もプロットしている(青色)。一点鎖線はSN CC、破線はSN Iaによる重元素生成の理論モデルをそれぞれ表している。(下) MS 1512.4+3647銀河団の重元素の鉄に対する個数比に、理論モデルを当てはめた結果。青実線がSN CC、青点線がSN Iaによる重元素生成の理論モデルをそれぞれ表している。また、中段はモデルに対するデータの比を、下段はそれぞれの重元素生成においてSN Iaが寄与した割合(回数比)を表している。

理論から予想されるSN IaとSN CCの組成比パターンをそれぞれプロットすると、観測値はIaとCCの理論値の間に存在していることがわかります。このサンプルでは、銀河団の赤方偏移によらず、それぞれの重元素の生成に、IaとCC型の

両方が、それぞれ一定の割合で寄与しているというを示しています。

個々の天体に対する解析の例として、MS 1512.4+3647銀河団の重元素組成比に、理論モデルをあてはめた結果を図5(下)に示しました。黒線がベストフィットを表しており、青色実線がSN CCを、青色点線がSN Iaの寄与をそれぞれ表しています。結果、SN CCのSN Ia超新星爆発の回数比はSN CC/SN Ia=3.6±2.9と求まりました。「すぎく」の26サンプル全体では、SN CC/SN Ia~3.5になります。これは、これまでにXMM-Newton衛星や「すぎく」の近傍銀河団の観測結果から得られた値と一致します。また、元素ごとにみると、銀河団ガス中にあるα重元素のうち、元素数比で約7割がSN CC由来、鉄族では、元素数比で約7割がSN Ia由来であることがわかります。

より詳しくみるために、図6に、SN CC/SN Iaを赤方偏移(上図)と、ガス温度(下図)に対してそれぞれプロットしました。赤方偏移に対する有意な依存性は見られません。他方でガス温度に対する依存性をみると、温度が高い(規模の大きい)天体ほどSN CC/SN Iaが大きい値になる傾向があることがわかります。これは、シリコンの組成比の温度依存性で見られた傾向と同じで、小さな銀河団からは、CC型生成物が一部逃げたことを反映していると考えられます。また、誤差が大きくて有意ではありませんが、高い赤方偏移に対して、SN CC/SN Iaが高くなる傾向があるようにも見えるのは、シリコンの組成比の赤方偏移依存性に見られたのと同様で、高い赤方偏移で温度の高い銀河団が選択的に観測されていることによる、見かけの効果です。

図6(下)をみると、10キロ電子ボルトにもなるような高温の(規模の大きい)銀河団では、SN CC/SN Iaが10を超えています。もし、小さな銀河団からは、CC型生成物が一部逃げ、大きな銀河団ではすべて閉じ込められているのだとす

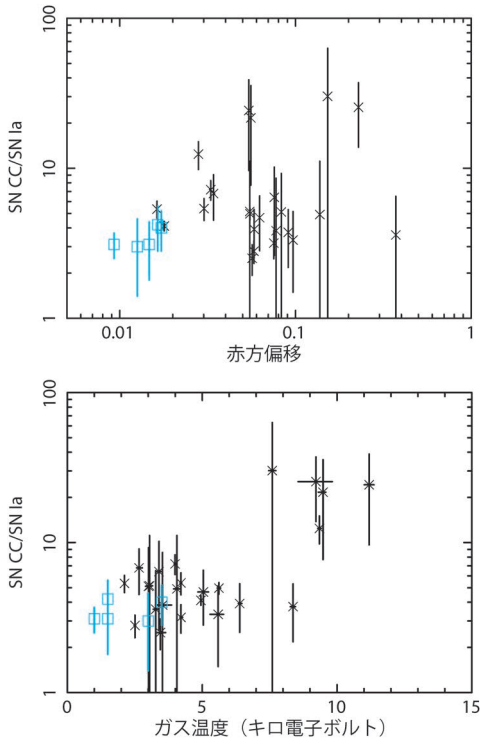


図6 SN CC/SN Iaの赤方偏移に対する分布（上図）と銀河団ガス温度に対する分布（下図）. 黒色が今回の結果で、青色は「すざく」による近傍銀河団の結果を表す.

ると、銀河団の形成時から $z < 0.372$ の時代までの、SN CC/SN Iaの真の値は ~ 10 で、CC型生成物が逃げた効果によって小さな銀河団では ~ 3.5 に見えているのかもしれませんが、これは非常に興味深い示唆ではありますが、将来、中距離から遠方の銀河団のサンプルを増やして検証する必要があります。

4. まとめと今後

今回われわれは、「すざく」で観測した62個の銀河団を解析し、 α 元素と鉄族の重元素組成比を個別に求めました。 $z=0.372$ までの22天体については、ネオン、マグネシウム、シリコン、硫黄の組成比を個別に求めることができました。重元素組成比を赤方偏移に対してプロットすると、主

にCC型に由来するシリコンはほぼ一定な値を示すことから、SN CCは $z=1$ よりも過去に多く起こっていたことが示唆されます。温度に対してプロットすると、CC型生成物は増加の傾向があることから、「あすか」の時代から言われているように、規模の小さな銀河団では重元素の流出が起きているのかもしれませんが、Ia型に主に由来する鉄については、Chandra衛星やXMM-Newton衛星で得られていた結果と矛盾なく、低赤方偏移に向かって緩やかに上昇していくことが確認できました。

また、 α 元素の組成比が個別に求められた $z=0.372$ までの銀河団について、各重元素生成に対する超新星爆発の寄与を調べたところ、 α 元素に対してはCC型が7割程度、鉄族に対してはIa型が7割程度で、天体によらず同じような値を示すことがわかりました。SN Iaに対するSN CCの回数比を求めると、 ~ 3.5 になり、近傍銀河団に対する先行研究の結果と一致しますが、10キロ電子ボルト付近になるような高温の（規模の大きい）銀河団では、この回数比が10を超えるものがあることが今回あらたにわかりました。もし、小さな銀河団からはCC型生成物が一部逃げ、大きな銀河団ではすべて閉じ込められているのだとすると、銀河団の形成時から $z < 0.372$ くらいの時代までの、SN CC/SN Iaの回数比の真の値は ~ 10 で、CC型生成物が逃げた効果によって小さな銀河団では ~ 3.5 に見えているのかもしれませんが、そうすると、まだまだ検証が必要ではありますが、銀河団の形成時にSN CCによって主に α 元素が生み出されたが、その7割近くは銀河団の外に逃げて、残りが銀河団ガス中に残った。その後、SN CCの回数の $\sim 1/10$ のSN Iaによって、主に鉄族が供給されてきたというシナリオを、今後の作業仮説としてたてることができます。

以上、「すざく」によって得られた成果をまとめてきましたが、中距離よりも遠い銀河団の α 元素に関する研究はまだ不十分ですし、 $z > 1$

を超えて銀河団形成期のあたりまで重元素組成がどのように変化するのか、興味深いところです。2015年度にも打ち上げが予定されているAS-TRO-H衛星でもさらに研究は進められるでしょうが、10年、20年先に大有効面積のX線天文衛星が打ち上げられ、この研究を完成させる日がくることを期待します。

謝 辞

本研究は、下田の博士論文¹¹⁾の一部が元になっており、共著の川原田と田代の両名が研究指導をしました。本稿執筆の機会を与えてくださった馬場 彩准教授(青山学院大学)に感謝いたします。本稿の科学的内容は、2013年に筆者らが発表した投稿論文¹²⁾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会の援助を受けて行われました。

参考文献

- 1) Fukazawa Y., Makishima K., Tamura T., Nakazawa K., Ezawa H., Ikebe Y., Kikuchi K., Ohashi T., 2000, MNRAS 313, 21
- 2) たとえば, Balestra I., Tozzi P., Ettori S., Rosati P., Borgani S., Mainieri V., Norman C., Viola M., 2007, A&A 462, 429
- 3) Baldi A., Ettori S., Molendi S., Balestra I., Gastaldello F., Tozzi P., 2012, A&A 537, 1
- 4) たとえば, Matsushita K., et al., 2007, PASJ 59, S327
- 5) Fukazawa Y., Makishima K., Tamura T., Ezawa H., Xu H., Ikebe Y., Kikuchi K., Ohashi T., 1998, PASJ 50, 187
- 6) de Plaa J., Werner N., Bleeker J. A. M., Vink J., Kaastra J. S., Mendez M., 2007, A&A 465, 345
- 7) Gu L., Yagi M., Nakazawa K., Yoshida M., Fujita Y., Hattori T., Akahori T., Makishima K., 2013, ApJ 777, 36
- 8) Iwamoto K., Brachwitz F., Nomoto K., Kishimoto N., Umeda H., Hix W. R., Thilemann F.-K., 1999, ApJ 125, 439
- 9) Nomoto K., Tominaga N., Umeda H., Kobayashi C., Maeda K., 2006, Nucl. Phys. A 777, 424
- 10) Sato K., et. al., 2007, PASJ 59, 299
- 11) Shimoda Y., 2014, Ph.D. thesis, Saitama University
- 12) Shimoda Y., Kawaharada M., Sato K., Ohashi T., Ishisaki Y., Mitsuishi I., Akamatsu H., Tashiro M. S., 2013, PASJ 65, 111

X-Ray Study of Heavy Element Evolution in Hot Plasmas Associated with Clusters of Galaxies

Yuya SHIMODA, Madoka KAWAHARADA and Makoto S. TASHIRO

Department of Physics, Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura, Saitama 338-8570, Japan

Abstract: Clusters of galaxies are the largest virialized structures in the universe, and the intracluster medium keeps the information since the early universe. Especially, the gravitationally bounded thermal hot plasmas have been enriched with metals having been synthesized in stars and supernovae in the member galaxies. A systematic analysis of the metal abundances in the ICM show footprints of starformation. Japanese X-ray observatory Suzaku provides a good sensitivity for the atomic lines in the X-ray spectra with the good line spread function and low particle background level. According to the observed results, the large abundance of SN CC are observed in the larger clusters. It suggests that the product elements escape from shallower potentials of smaller systems.