

氏名	下田 優弥
博士の専攻分野の名称	博士 (理学)
学位記号番号	博理工甲第 955 号
学位授与年月日	平成 26 年 3 月 24 日
学位授与の条件	学位規則第 4 条第 1 項該当
学位論文題目	X-ray Study of Heavy Element Evolution in Hot Plasmas Associated with Clusters of Galaxies (X 線による銀河団ガス中の重元素進化の研究)
論文審査委員	委員長 教授 田代 信 委員 教授 井上 直也 委員 准教授 大朝由美子 委員 准教授 寺田 幸功

論文の内容の要旨

銀河団は宇宙最大の自己重力系を形成する天体であり、その巨大な重力で宇宙初期からのさまざまな情報を保存していると考えられる。特に、銀河団を取り巻いている高温ガス (~1000 万 [K]) 中には、星で生成され、銀河風などにより宇宙空間へと拡散されたさまざまな重元素 (Ne, Mg, Si, S, Fe, Ni など) が蓄積されており、その進化を見ることで、いつの時代にどれくらいの星が生成されてきたのかという歴史を知ることができる。本研究では、日本の X 線天文衛星「すざく」を用いて、さまざまな距離にある銀河団 (赤方偏移: $0.08 < z < 1.16$) 62 天体を系統的に解析し、銀河団ガス中に閉じ込められている重元素量の測定を行った。サンプルの選定条件として、「すざく」の欠点である位置分解能の悪さを補うためにアメリカの X 線天文衛星 Chandra での観測があるものを選んだ。

Chandra 衛星の画像を元に「すざく」の視野内に存在する銀河団由来ではない天体を慎重に除去し X 線スペクトルを解析した結果、銀河団ガス中の Fe アバundance (Fe/H の比) は、どの天体でも太陽の Fe アバundance の 0.5 倍程度 (~0.5 [solar]) となることがわかった。これに対して、 α 元素 (Ne, Mg, Si, S) アバundance は $0.4 < \alpha / H < 1.0$ [solar] の範囲で分散していた。これは、Ia 型超新星に由来する鉄族の元素と II 型超新星に由来する α 系列の元素の生成レートや銀河団ガス中での広がり方に違いがあることを示しており、さまざまな物理量との相関をみてその違いの原因を調べた。

はじめに、銀河団の年齢の指標となりうる物理量 (赤方偏移、ガスの温度、暗黒物質を含む全質量、Abell richness class、Bautz-Morgan タイプ、銀河光度) と金属アバundance との相関をみた。結果、 α 元素アバundance は古い銀河団 (=規模の大きい系) ほど大きくなる傾向があり、もっとも小さい天体と大きな天体の間では 2 倍程度の差があった。対して、鉄アバundance は系の規模が大きくなるにつれて 30% 程度減少していることがわかった。続いて、銀河団の状態をあらわす物理量 (衝突/緩和、cool core/non-cool core、AGN/non-AGN) と金属アバundance との相関をみた。結果、Si アバundance は cool core や AGN の状態によらず 0.5 [solar] の値を示したが、Fe アバundance は cool core、衝突、AGN 銀河団のそれぞれで、そうでないものよりも 30% 程度大きな値を示すことがわかった。これは、Fe アバundance は Si ア

バンドの広がりに対してより中心集中しており、銀河団の中心部の状態変化による影響を受けやすいことを示唆している。

以上より、 α 元素は銀河団ガスと同程度に広がりを持っており、かつて、II 型超新星を発生させた重い星を大量に含む銀河は、銀河団空間にガスと同程度に広がっていたということを示している。これに対して、銀河団ガスと同程度に広がっていた銀河が、ガス中を運動することによるラム圧で速度を落として時間とともに中心へ落ち込んできたと考え、II 型よりも長い間続いていると考えられる Ia 型超新星は、より中心で多く起こっていると考えられる。つまり、Ia 型由来の Fe は、銀河団ガスに対してより中心に集中していると考えことができ、上記の観測結果を説明できる。銀河の中心への落ち込み説は、牧島らによって提唱されており、本研究の結果はこの説を支持するものとなった。

論文の審査結果の要旨

本論文は、遠方銀河団の X 線観測にもとづき、宇宙史における銀河団中の化学進化について、観測的な研究を行ったものである。

銀河団は、観測されている天体としては、宇宙最大の自己重力系であり、その巨大な重力ポテンシャルによって銀河団ガスとよばれる銀河間空間にひろがる高温ガスを抱えている。銀河の中の星で生成され、銀河風などにより宇宙空間へと拡散されたさまざまな重元素 (Ne, Mg, Si, S, Fe, Ni など) は、この銀河団ガスの中に蓄積されており、その進化を見ることで、いつの時代にどれくらいの星が生成されてきたのかという宇宙史上の化学進化を知ることができる。本論文では、日本の X 線天文衛星「すざく」を用いて、さまざまな距離—すなわち時間軸上—にある銀河団 (赤方偏移: $0.08 < z < 1.16$) 62 天体を系統的に解析し、銀河団ガス中に閉じ込められている重元素量の測定を行った。

サンプルの選定においては、混入天体を正確に排除するために、角度分解能にすぐれた X 線天文衛星 Chandra も用いた。Chandra 衛星の X 線画像を元に「すざく」の視野内に存在する銀河団由来ではない天体を慎重に除去し X 線スペクトルを解析した結果、銀河団ガス中にふくまれる Fe の H に対する組成比 ($[Fe/H]$) は、どの天体でも太陽近傍の 0.5 倍程度 ($\sim 0.5 [Fe/H] \text{ [solar]}$) となることがわかった。これに対して、恒星中の核融合に由来する α 粒子元素 (Ne, Mg, Si, S) の H に対する組成比は、 $0.4 < [\alpha/H] < 1.0 \text{ [solar]}$ の範囲で分散していた。これは、Ia 型超新星に由来する鉄族の元素と II 型超新星に由来する α 系列の元素の生成レートや銀河団ガス中での広がり方に違いがあることを示している。

本論文は、上述の違いが何によるものか、さまざまな物理量との相関をみてその原因について議論している。はじめに、銀河団の年齢の指標となりうる物理量 (赤方偏移、ガスの温度、暗黒物質を含む全質量、Abell richness class、Bautz-Morgan タイプ、銀河光度) と上述の元素組成比との相関をみた。結果、 α 元素の組成比は、規模の大きな古い銀河団ほど大きくなる傾向があり、もっとも小さい天体と大きな天体の間では 2 倍程度の差があることを見いだした。これに対して、鉄の組成比は、系の規模が大きくなるにつれて逆に、30%程度減少していることを示した。

続いて、銀河団の状態をあらわす物理量 (衝突/緩和、低温コアをもつかどうか、活動銀河核を含むかどうか) と上述の元素組成比との相関を調べている。Si アバundanceは低温コアや活動銀河核の状態によらず 0.5 [solar] の値を示したが、Fe 組成比は、低温コア、衝突、活動銀河核を含む銀河団のいずれの分類でも、そうでないものよりも 30%程度大きな値を示すことがわかった。これは、Fe 組成比は、Si 組成比の広がりに対してより中心集中しており、銀河団の中心部の状態変化による影響を受けやすいことを示唆している。

これらの分析をうけて、本論文では、銀河団の状態ごとに分けた上で、銀河団の年齢と元素組成比の相関を調べた。結果として、Fe の有意な赤方偏移依存性は、衝突/冷却コアなし/活動銀河核なしという、緩和過程に至っていない進化途上にある銀河団のみにみられ、年齢そのものより銀河団の緩和状態に依存していることが明らかになった。一方、 α 元素については、状態に依らず有意な赤方偏移依存性はみられなかったが、その他の年齢の指標に対しては、正の相関がみられた。以上から本論文では、Fe の生成源である SN Ia の発生率は、緩和した銀河団においては、すでにピークを過ぎており、Fe 組成比がある一定値に

達している。一方、衝突銀河団では、銀河内で起きている星生成活動によって SN Ia 発生率は高く、結果として Fe 組成比が増加傾向にあるものと解釈している。これに対して Si を多く生成する SN II については、観測上の選択バイアスの影響を排除できず、赤方偏移に対する依存性について結論をえられないとしている。最後に、他の年齢の指標に対する依存性については、従来からある説のうちから、小さな銀河団からの散逸効果と、星生成活動による銀河風などによる銀河団の外への放出のいずれによる説明も否定しないことを指摘している。

以上、述べてきたように本論文は、遠方の銀河団についての系統的な X 線観測をもとに、Fe と α 元素の宇宙史における化学進化について研究をすすめている。この領域の研究はこれまで、観測装置の感度による制限などから、Fe にのみ偏っていたが、低輝度天体の X 線スペクトル観測能力にすぐれた「すぎく」衛星のデータを注意深く解析することで、特に α 元素の進化について、非常に興味深い結果を新たに得ることに成功している。

本論文の主要部分は、査読制度のある国際的学術誌である Publications of Astronomical Society of Japan に英文で掲載され、国際会議で 2 編のポスター発表がなされている。また国内学会においても、2 度にわたって口頭発表されている。このほか本論文に密接に関係する研究として、次世代の高精度 X 線分光器の開発に関わる研究が査読付き学術誌に主著として公表されている。以上の実績をふまえ、本論文は学位論文に十分に値すると判断され、学位論文審査委員会は全員一致で合格と判定した。