

論文審査の結果の要旨

氏名 平居 悠

本論文は、銀河における重元素の組成の進化やばらつきを主に矮小銀河の化学力学進化モデルを用いて調べ、更にそのモデルと観測を比較することにより銀河内の元素の混合効率や銀河形成史に制限を加えたものである。

本論文は7章からなる。第1章は序章であり、本論文の背景や研究動機そして共同研究者により開発され、本論文の主な計算で使われているN体/SPHコードであるASURAコードの概説が記されている。本論文では重元素としてr過程元素とZnに着目しているが、これらの元素はMgやCaなどの通常の超新星による元素合成で説明されるものと異なった化学進化やばらつきをしており、その起源を明らかにすることが重要であることが述べられている。近年の研究によりBaなどのr過程元素の起源として連星中性子星の合体時に放出されたものが有力視されているが、2017年に発見された中性子星合体に伴う重力波と電磁波の初観測は、この説と矛盾しないと考えられている。一方、中性子星合体によってr過程元素の化学進化に関する観測事実を説明できるかどうかの議論は続いている。本論文は、これまでの化学進化モデルを見直し、現実的な星形成率や元素混合率を採用し、より高分解能なN体/SPHシミュレーションを行い、それを観測と比較することによりr過程元素やZnの化学進化を明らかにし、また銀河形成史に制限を与えることを主な目的としている。

第2章では、矮小銀河の化学力学進化計算を観測と比較することにより、中性子星合体がr過程元素の起源を説明出来ることを示した。幾つかの先行研究においては中性子星合体のタイムスケールが長いため、鉄と水素の存在比が現在の1/100以下の金属欠乏星にr過程元素が多い星が存在することを説明するのは困難だと主張されていた。本章では、これらの結論を得た仕事は一定の星形成率を仮定して現実的でないことに着目し、より現実的な仮定のもとでシミュレーションを行えばそのような問題が起きないことを示した。このような結果はワンゾーン近似を仮定した計算では示唆されていたが、詳細なシミュレーションを行ってこの結論に至ったのは、この仕事が初めてであり学術的価値は高い。

第3章では2章で行った計算と同様な計算を矮小銀河の初期密度と全質量を変化させて行い、その影響を調べた。一般に初期密度の高い銀河ほど進化のタイムスケールが短く、金属量が早く増加する。そのため初期密度の大きいモデルでは中性子星合体が起きるときにすでに金属が多く、r過程元素の多い金属欠乏星を説明できない。本章ではこのような計算を定量的に行い、初期密度の変化が星形成率の進化及び金属欠乏星の組成にどのように影響を及ぼすか明らかにした。また、この計算は矮小銀河についての計算であるが、我々の銀河も矮小銀河を取り込みながら進化してきており、将来の金属欠乏星の詳細観測によって、我々の銀河の成り立ちについても制限が加えられることが議論されている。

第4章は同様な手法を用いてZnの起源について議論している。我々の銀河でも矮小銀河でもZn/Fe比は低金属な星ほど増える傾向があるが、この理由はまだ完全には理解され

ていない。本章では最近計算された電子捕獲型超新星（ECSN）の元素合成計算の結果を紹介し、ECSN では鉄の生成量が少なく Zn/Fe 比が大きいいため上記の傾向が説明できるのではないかと考え、計算を行った。結果として、ECSN となる親星の質量範囲が十分大きければ観測を再現できることを示した。その質量範囲は理論的に極めて不定性が大きいため、実際に ECSN の寄与が大きいのかどうかを決めることは現時点では困難であるが、このような計算は過去に無く学術的価値は高いと認められる。

第 5 章は 2 ～ 4 章の計算で仮定されていた元素の銀河内の混合効率を変える事が結果に及ぼす影響について詳しく調べた。混合効率を小さくすると元素組成比のばらつきが大きくなり、例えば Ba/Fe 比などが大きい星が生まれる。矮小銀河では極端に Ba/Fe 比の大きい星は見つかっておらず、このことから混合効率に下限をつけることができる。このように得られた混合効率の制限は乱流混合の理論から予測される値と矛盾しないことが示されている。

第 6 章は我々の銀河の化学進化を調べることを念頭に、より大きな空間範囲を含む宇宙論的なサイズから計算を始めた銀河のシミュレーションを行った。この計算では 3 章で議論されたような、矮小銀河で生まれた星を大きな銀河に取り込むという現象を調べることができる。単独の銀河の計算を行った場合に 5 章で得られた混合効率を仮定すると、矮小銀河及びそれより大きい銀河では Ba/Fe 比の大きい星は現れない。一方で普通の矮小銀河より更に小さい UFD と呼ばれるサイズの銀河では組成比のばらつきが大きくなり、 Ba/Fe 比の大きい星が含まれる事もある。本章の計算は、UFD で生まれた Ba/Fe 比の大きい星は実際に大きな銀河に取り込まれ現在観測され得るということを示しており、それは実際の観測とも一致している。

第 7 章には本論文のまとめと将来の展望が述べられている。

本論文は長年懸案となってきた金属欠乏星の r 過程元素の起源が中性子星合体によって説明できることを詳細な N 体/SPH シミュレーションを用いて初めて示したものであり高く評価できる。また金属欠乏星における重元素の組成比とそのばらつきから銀河の形成史や元素の混合効率に制限をつけられる事を定量的に示した点は学術的価値が高く銀河形成論の発展に寄与すると認められる。

なお、本研究は斎藤貴之・石丸友里・藤井通子・和南城伸也・日高潤・梶野敏貴との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。