

論文内容の要旨

Chemodynamical Evolution of Dusty Star Forming Galaxies at High Redshift

(ダストで覆われた高赤方偏移にある
星形成銀河の化学力学進化)

氏名 伊吹山 秋彦

近年、遠方銀河の観測が進み、遠方には近傍の銀河とは異なる銀河種族が存在することが明らかとなってきた。これらの銀河はその観測的な特徴から、極赤天体 (ERO)、BzK 銀河 (BzK)、遠方赤色銀河 (DRG)、サブミリ銀河、ライマンブレイク銀河 (LBG) などに分類されている。こういった銀河の一部は合体衝突をへて成長する途上にあると考えられている。そのため、非常に不規則な形状をもち、また強いダストによる吸収をうけることがある。このような銀河種族に対しては、既存のダストを考慮しないモデル、あるいはダストの吸収を考慮したもののダストの空間分布に対称性を仮定したモデルでは、観測結果を理論的に解釈することは困難である。したがって遠方の銀河種族間はお互いにどのような関係にあるのか、またそれぞれの遠方銀河種族は近傍のどのような銀河へ進化するのかという点は未解明である。

また銀河形成理論においては宇宙の初期ゆらぎが重力による合体成長を経て銀河へ成長するという概要こそ明らかであるものの、実際の化学力学進化をモデル化して数値実験をおこなうと、以下の2点において観測事実を再現できない。第一に、銀河の周辺構造について、モデルからは典型的な銀河の周辺に1000個程度の小規模な衛星銀河が存在することが予言される。しかし銀河系の周囲には矮小銀河は40個程度しか発見されておらず、大きな矛盾をきたしている。これはミッシングドワーフ問題と呼ばれている。また、既存のモデルでは銀河内星間ガスの冷却が急速に進むため、超新星爆発によって放出されたガスから新たな世代の星が効率的に形成され、早期型銀河でも星形成が現在まで継続することが予言される。そのために既存のモデルは観測される早期型銀河の色等級図を再現できず、これはオーヴァークーリング問題と呼ばれている。このような問題を解決する方法として近年提唱されて

いるのがこれまで無視されてきた紫外線の効果を銀河モデルにとりいれることにより、銀河内のガスが光電離によって加熱される過程をモデル化しようという考え方である。現在のところ、紫外線を扱ったモデルによりミッシングドワーフ問題が解決される可能性が示唆されているが、これは一様な紫外線を仮定しなおかつダストの吸収を無視するというあまり現実的とはいえない仮定を置いている。

このように、既存のモデルは近傍の銀河の観測を再現できず、また遠方にしばしばみられるような不規則な形状をもちダストの吸収を受けた銀河の観測を解釈できないという限界を抱えている。これを克服するためわれわれは新たに銀河内輻射輸送を考慮した化学力学進化モデルを構築した。本モデルは銀河の形成、進化において基礎となる物理過程である星形成、構造形成および銀河内輻射輸送を全て整合的にモデル化したものである。われわれのモデルはN体SPH法により宇宙論的な枠組内での構造形成を計算する。本モデルでは銀河内でガスが冷却、収縮しジーンズ不安定になると、ガス密度の1.5乗に比例するような形で星が形成される。このようにして形成された星は、銀河内で進化し、恒星風あるいは超新星爆発の形で星間空間にガス、エネルギーおよび重元素を再放出する。さらにわれわれは銀河内輻射輸送をモデル化することにより、OB型星による星間ガスの加熱効果を考慮した。OB型星から放射される放射のスペクトルを恒星種族合成モデルから導いた上で、その放射と周囲の星間物質の相互作用として、中性水素の紫外線による電離、電離された水素の再結合、ダストによる紫外線の吸収という3つの物理過程をモデル化した。OB型星の放射する紫外線は中性ガスを光電離するため、ガスの冷却は妨げられる。さらに銀河内の輻射輸送をモデル化したことから、銀河内が合体衝突の仮定にあり、不規則な形をしているときでもダストによる吸収を正確に計算して銀河のスペクトルエネルギー分布を導出することが可能となる。

われわれは初期条件として、宇宙背景放射のゆらぎの強度スペクトルを再現するような領域を生成し、9通りの数値実験を行った。その数値実験の結果に対し、銀河の形状、質量形成史、合体衝突の歴史、ガスの銀河への流入とガスの流出、密度プロファイルの進化、星形成史、スペクトル進化および金属量分布の進化を議論した。紫外線による星間ガスの加熱を考慮した場合、紫外線を考慮しなかった場合には見られなかったガスの銀河からの流出が見られる。星形成は $z = 3$ 付近で顕著であり、もっとも星形成活発な時期には $80M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ に達する。その後 $z = 2$ から $z = 1$ の間では星形成は断続的であり、 $10M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ 程度の星形成をおこなう期間と星形成率が $1M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ 以下となる静穏な時期とを往復する。また紫外線を考慮すると $z < 1$ での星形成が抑制される。

われわれのモデルは $z = 0$ で星形成率が低く、Hernquist分布で近似できるような密度分布を示している。これは近傍楕円銀河の性質と一致している。

さらにモデルと近年の遠方銀河との詳細な比較を行った。近年の遠方銀河の観測との比較からは次のような進化経路が示唆される。われわれの数値計算の結果、代表的なモデルでは、銀河は当初、 $z = 4.5$ 、 3.0 および 2.8 で LBG となる。さらに $z = 3.0$ から $z = 1.8$ にかけては BzK となる。その後 $z = 1.6$ での星形成の低い ERO の時期を経て、近傍楕円銀河へと進化する。すべての数値実験において $z = 4$ 付近の LBG から $1.8 < z < 3$ の BzK を経て楕円銀河へ進化するという経路は一致している。 $2.5 < z < 4$ の時期では可視光や紫外光がダストによる強い吸収を受ける場合には銀河は DRG となるが、吸収が弱い場合は LBG となる。 $1 < z < 1.8$ の時期での進化もダストの吸収に依存し、星形成率が低く古い星が多い ERO となる場合と、ダストに覆われ星形成中の ERO となる場合の両者がある。われわれのモデル銀河はどれも遠方のサブミリ銀河の観測に見られるような $850\mu\text{m}$ での強い輻射は示さなかった。通常、サブミリ銀河の星形成率は $1000M_{\odot}\text{yr}^{-1}$ 程度と見積もられていることから、この矛盾はわれわれの選んだ初期条件が星形成の高い環境を再現できないことではないかと考えられる。また、この矛盾点はダストの取り扱いをより精密化すること、またモデルの分解能をより高くすることでも改善される可能性がある。

構造形成、星形成、輻射輸送をすべて統合的に扱うことによって始めて、遠方銀河の進化に対してモデルを観測と比較し、その進化経路を詳細に議論することが可能となった。われわれは、ライマンブレイク銀河が BzK 銀河となり、最終的に楕円銀河へ進化する、という結果を得た。

本論文の構成は下記の通りである。第一章で近年の遠方銀河の観測とそれに付随する未解決課題について概観する。第二章では銀河の理論モデルについて歴史的背景を踏まえ概説する。第三章で、本研究で新たに構築したモデルの構築を行い、第四章で数値実験の結果を述べるとともに輻射輸送をモデル内で考慮したことの効果について述べる。さらに第五章で最新の遠方観測の結果と数値実験の結果を比較し、第六章で最終的な議論の結果を述べる。