

Study of Dry Minor Mergers and Size Evolution of Early-Type Galaxies

(銀河合体による早期型銀河のサイズ進化に関する研究)

学位論文内容の要旨

1. 背景

銀河のサイズは、質量とともに銀河の力学的性質を特徴づける最も重要な観測量の一つである。高赤方偏移銀河観測の進展により、赤方偏移 $z \sim 2$ (現在から約 100 億年前) の銀河のサイズが定量的に求まりつつある。観測から、高赤方偏移の大質量早期型銀河は、近傍の同質量程度の楕円銀河に比べサイズが $1/5$ から $1/3$ 程度であり、密度では $1\text{--}2$ 桁程度も高いという特徴をもつことが分かってきた。また、速度分散は、近傍銀河に比べ非常に高い。一方で、このようなコンパクトかつ大質量の早期型銀河は近傍宇宙にはほとんど存在しない。したがって、これらのコンパクトな早期型銀河は現在に至るまでに何らかの物理過程によってサイズを増加させ、速度分散を減少させなければならない。これらのコンパクトかつ大質量の銀河の近傍宇宙までの進化の謎は、早期型銀河のサイズ進化問題として知られている。

これまでの研究から、サイズ進化には星間ガスの放射によるエネルギー散逸を伴わない早期型銀河同士の合体 (以後 **dry merger** と呼ぶ) が効果的であることが示唆される。また、ビリアル定理に基づく簡単な考察から、質量比の大きい銀河同士の合体 (以後 **minor merger** と呼ぶ) の方がより大きなサイズ増加を引き起こすと考えられる。しかし、実際にコンパクトかつ大質量の早期型銀河のサイズ・速度分散が、**dry minor merger** によって変化する過程を詳細に調べた研究はほとんど無い。

そこで本論文では、**dry minor merger** がコンパクトかつ大質量の早期型銀河のサイズ・速度分散に与える影響について N 体シミュレーションを用いて詳細に調べた。特に本論文では、宇宙論的な銀河合体史を解析して継続的な **dry minor merger** が多いことを示し、この場合の影響について注目した。

2. モデルと手法

本論文では、コンパクトかつ大質量の早期型銀河を恒星系とダークマターの 2 成分系でモデル化し、それを N 体粒子で再現した。コンパクトかつ大質量の早期型銀河の力学的タイムスケールは、銀河の衝突合体のタイムスケールの $1/1000$ 程度であり、非常に短い。このため、個々の銀河内部の運動を正確に解きつつ銀河合体による系の力学進化を解くには、時間的・空間的に高精度の計算法が求められる。我々は十分な粒子数と適切な重力ソフトニング、系の局所的なタイムスケールに合わせた独立時間刻み法を用いることにより、これらを正確に解くことを可能にした。

Minor merger は、コンパクトかつ大質量の親銀河の周りに、低質量の衛星銀河をランダムに分布させ、親銀河に衝突させるというモデル化を行った。我々は **minor merger** の初期条件のパラメータとして、銀河合体で多く見られる継続的な **minor merger** モデルと、それよりも短いタイムスケールで多数の **minor merger** が起こる、同期した **minor merger** モデルという 2 つの典型的な場合を考えた。また、衛星銀河モデルとして、高密度なものと低密度なものの 2 種類を仮定した。

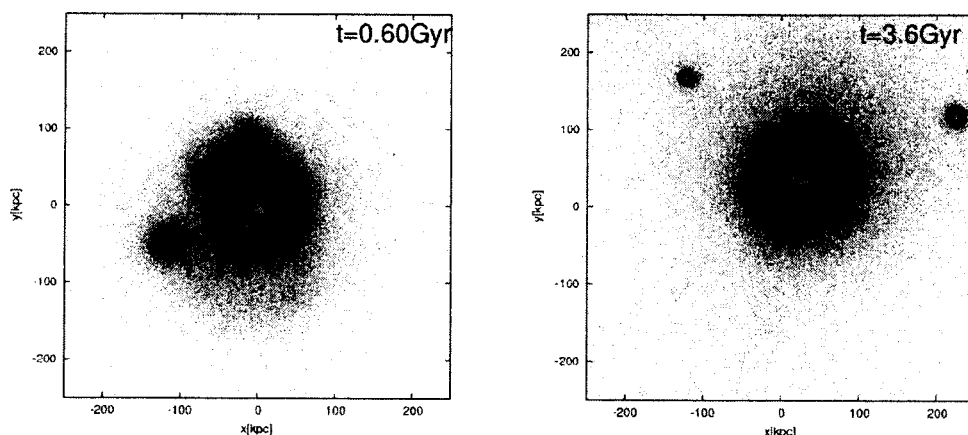


図 1: 高密度な衛星銀河の継続的な **dry minor merger** によるサイズ増加の様子(左: 計算開始から 0.6Gyr 後。右: 計算開始から 3.6Gyr 後)。図の濃い灰色はダークマター粒子を、薄い灰色は星粒子を表している。

3. 結果および結論

本論文では、それぞれのモデルについて N 体シミュレーションを行い、合体後の銀河を解析した。その結果、高密度な衛星銀河の継続的な **dry minor merger** が最も効果的なサイズ増加、速度分散の減少を引き起こすことが分かった。この結果について詳細に解析し、これらの進化は以下の二つの過程によって決まることを明らかにした。一つは衛星銀河からの力学的摩擦による親銀河の膨脹である。これは、衛星銀河が高密度であるときに効果的に働き、親銀河の速度分散を減少させる。もう一つは衛星銀河の質量降着の位置である。継続的な **dry minor merger** の場合、質量は親銀河の中心から離れたところに降着する。一方で、同期した **dry minor merger** の場合、親銀河の中心近くまで質量降着が起こるため、サイズ増加および速度分散の減少が抑制される。質量降着の位置を決める要因の一つとして、合体の際の‘激しい緩和’過程の強さの違いによる可能性を示した。

さらに本論文では、**minor merger** による単位質量増加当たりのサイズ増加を、サイズ増加効率として定量化した。その結果、継続的な **dry minor merger** によるサイズ増加効率のベキ指数は ~ 2.7 となることを明らかにした。これは、従来の単純なモデルの予想 ~ 2.0 に比べ非常に大きい。

次に、本論文では、 Λ コールドダークマター(CDM)宇宙モデルに基づいて、早期型銀河の銀河合体史を求めた。コンパクトかつ大質量の早期型銀河の候補として、我々は、赤方偏移 $z \sim 2$ で 10^{11} 乗太陽質量以上のバルジ質量をもつものを抽出し、これらの銀河の $z \sim 2$ から現在までの合体史を追跡した。特に、**minor merger** によるサイズ増加を見積もるため、 $z \sim 2$ から現在までの **minor merger** による星質量増加を求めた。この結果に N 体シミュレーションから求められたサイズ増加効率を適用し、 $z \sim 2$ から現在に至るまでの早期型銀河の平均的なサイズ増加を見積もった。その結果、 $z \sim 2$ から現在まで平均的に ~ 4 倍のサイズ増加を起こすことが分かった。この結果は、早期型銀河のサイズ進化の観測結果から求められるサイズ増加と非常に良く一致する。

以上の研究は、宇宙論的銀河形成において大きな問題であった早期型銀河のサイズ進化問題の解決に大きく寄与するものである。

学位論文審査の要旨

主査	教授	羽部朝男
副査	特任教授	藤本正行
副査	教授	小笹隆司
副査	教授	鈴木久男
副査	助教	徂徠和夫
副査	助教	Elizabeth Tasker

学位論文題名

Study of Dry Minor Mergers and Size Evolution of Early-Type Galaxies

(銀河合体による早期型銀河のサイズ進化に関する研究)

膨張宇宙における銀河形成進化過程は、ビックバンで誕生した一様で構造のない宇宙から現在の多様な宇宙への進化の理解にとって極めて重要であるにもかかわらず、その詳細や物理過程に関して不明な点が多い。最近、観測によって $z=2$ の遠方宇宙における早期型銀河のサイズが現在のものと比べて著しく小さく、 Λ CDM宇宙で単純に予想されていた進化と大きく異なることが報告された。そこで本論文において申請者は、銀河合体過程による早期型銀河のサイズ進化に注目して大規模高精度数値シミュレーションを行ない、最近の観測結果を説明可能な銀河合体過程を見いだした。

本学位論文では、著者は Λ CDM宇宙モデルにおける銀河ダークハローの形成合体過程を、世界最大級の空間領域の宇宙論的数値シミュレーションで作られた Millennium Simulation Data Baseを詳細に解析し、銀河の合体進化過程において合体銀河の質量比が大きい、いわゆる minor merger が銀河合体進化にとって重要であり、しかも、著者の研究以前で仮定されていた集中的な minor merger はほとんど起こらず、むしろ、ある程度の時間間隔をおいた継続的な minor merger が多数であることを明らかにした。Millennium Simulation はダークマターしか計算していないため、minor merger で銀河のサイズ進化を計算していない。そこで、申請者は銀河のサイズ進化を明らかにできるよう、新たにダークマターと星の系の2成分系の高精度数値シミュレーションを、継続的な minor merger の場合について世界で初めて行なった。その結果、従来予想されていなかった「質量比の大きな銀河合体 (minor mergers)」が早期銀河のサイズの大きな増加をもたらすことを見だし、この解析から得られた「質量増加－サイズ進化」予測を適用すると、観測で報告されているサイズ進化を十分説明可能であることを明らかにした。

これを要するに、本論文で著者は従来の Λ CDM宇宙モデルで解明できていなかった、早期型銀河のサイズ進化を継続的な minor mergers によって説明可能であることを高精度数値シミュレーションによって初めて示し、膨張宇宙における銀河形成進化について新たな知見をもたらすものであり、当該分野の研究に対して貢献するところ大なるものである。よって著者は、北海道大学博士(理学)の学位を授与される資格があるものと認める。