

論文の内容の要旨

Evolution and Statistics of Non-sphericity of Galaxy Clusters from Cosmological Simulations

(宇宙論的シミュレーションによる銀河団の非球対称性の進化と統計)

氏名 須藤 大地

現代の標準宇宙モデルにおいて、銀河や銀河団などの宇宙に存在する構造は冷たいダークマター(cold dark matter, CDM)が重力的に集まって形成されたと考えられている。このCDMパラダイムはこれまでに宇宙マイクロ波背景放射や大規模構造の観測など、数多くの観測事実と整合してきた。一方で、サブハロー問題のように、CDMパラダイムでは説明ができない観測事実も存在する。したがって、CDMパラダイムがどのようなスケールでどのように不合理が生じるのかを詳しく検証することは、標準モデルを超えた構造形成の歴史を探るうえで非常に重要な課題である。

本論文では、銀河団の非球対称性に基づいた CDM パラダイムの検証の可能性に着目する。銀河団は、質量関数を測定による宇宙論パラメータ推定など、宇宙論的応用がなされてきたが、従来は球対称の仮定に頼る解析が多かった。しかし、近年の観測データの質的向上によって、球対称の仮定に頼らない解析可能になってきた。

それに伴って、宇宙論的シミュレーションを用いた銀河団の非球対称性に関する研究も近年盛んになっている。本論文では特に、Jing & Suto (2002) (以下 JS02)の研究に着目する。彼らはシミュレーション中の DM ハローの密度を三軸不等楕円体で近似し、その短軸と長軸の比が普遍的な確率密度分布(probability distribution function, PDF)を持つことを示した。このことは、軸比の PDF を観測とシミュレーションとの間で比較することで CDM パラダイムの検証が原理的には可能であることを示唆している。

軸比の PDF の比較はすでに行われては始めている。Oguri et al. (2010)は、18 個の銀河団の弱い重力レンズ効果によるシアの分布を楕円で近似し、軸比の PDF を計算した。そして、JS02 に基づいた、射影密度分布の軸比の PDF と比較した。また、Kawahara (2010)は、70 個の銀河団の X 線表面輝度の分布に楕円をフィットし、その軸比の PDF を作成した。

その PDF を、JS02 に基づいた、重力ポテンシャル分布の射影の軸比の PDF と比較した。Oguri et al. (2010) および Kawahara (2010) はどちらも、観測による不定性が大きいながら、観測とシミュレーションは辛うじて整合しているという結果が得ている。

以上のように、現在解析されている観測データはまだ少ないが、近い将来このようなデータは大幅に増大すると期待される。例えば、すばる望遠鏡の Hyper Prime-Cam によって重力レンズ効果の解析が多くの銀河団に対し行われる予定である。また、X 線表面輝度は銀河団の X 線観測における一次的観測量であるから、非球対称性の解析がなされていないにしても、データ自体はすでに多くある。

したがって、シミュレーションによる銀河団の軸比の PDF の予測も正確に、信頼できる手法で行われなければならない。ところが、Oguri et al. (2010) や Kawahara (2010) によって用いられた、JS02 に基づく射影軸比の PDF は、観測との精密な比較においては不十分であると考えられる。なぜなら、JS02 は DM ハローの密度分布が自己相似な(等密度面が共通の軸比、中心を持つ)形をしていると仮定している。しかし、これは簡単のための仮定であって、JS02 自身が、密度分布は必ずしも自己相似ではないと指摘している。一方、観測量は射影量(二次元量)であるから、比較対象としての射影軸比を計算する際に、JS02 による密度場に関する自己相似性の仮定は不適切となる可能性がある。

本論文では、宇宙論的シミュレーションから取り出した DM ハローを解析することで、JS02 が採用した密度場の自己相似性の仮定が射影密度分布の軸比の予測にどのような影響を及ぼすかを示した。そして、重力レンズ効果と X 線観測を念頭に置いて、自己相似性の仮定を置かない、より信頼性の高い射影軸比の PDF を導出した。

まず、DM ハローの密度分布の軸比の PDF を検証した(5章)。ここでは、DM のみを含むシミュレーションから取り出したハローの三次元密度分布に、質量テンソルによって三軸不等楕円体を割り当てた。同様に、ハローの射影密度分布に質量テンソルによって(二次元の)楕円を割り当てる。密度分布の自己相似性の仮定がどのように破れるかを確認するため、ハローのビリアル質量、ビリアル質量の半分、ビリアル質量の 1/10 を含むような楕円体、楕円を求めた。

結果、三次元密度分布から求めた楕円体の短軸と長軸の軸比の PDF は、ハローの内側と外側とで形が有意に異なることを示した。具体的には、ビリアル質量のスケールでは軸比の平均値がおおよそ 0.5 であるのに対し、ビリアル質量の 1/10 ではおおよそ 0.4 となる。これは密度分布が自己相似的でないことを顕著に表している。

一方、ハローの射影密度分布に割り当てた楕円の軸比はいずれの質量スケールにおいても平均的におおよそ 0.6 となる。密度分布が射影されることで丸く見えるということである。また、シミュレーションから得られた PDF はベータ分布でよく近似できることを示した。このフィッティング公式は将来的に観測データと比較する際に便利だろう。

重要なことに、シミュレーションから得た射影軸比の PDF は、JS02 の三軸不等楕円体に対する軸比の PDF を射影して得られた PDF と異なる形状を持つ(図 1 の黒線と青線)。

本論文で得られた PDF は、三次元密度分布が自己相似であるという仮定を含まないため、より信頼のできる射影軸比の PDF であるといえる。ただし、Oguri et al. (2010)が行ったように、軸比推定の典型的誤差を考慮して、PDF を $\sigma=0.15$ のガウス関数と畳み込み積分すると、本研究による PDF を JS02 に基づく PDF は観測データの誤差の範囲で区別がつかない。したがって本研究による PDF の有用性はより多くの、より高精度の観測データが集まったときに証明されると期待する。また、Oguri et al. (2010)の解析は、三次元空間において銀河団の密度が自己相似的であると仮定しているため、得られる楕円は射影面上で自己相似である。より多くの観測データを最大限活かすためには、密度場の自己相似性を仮定しない解析手法を確立する必要がある。

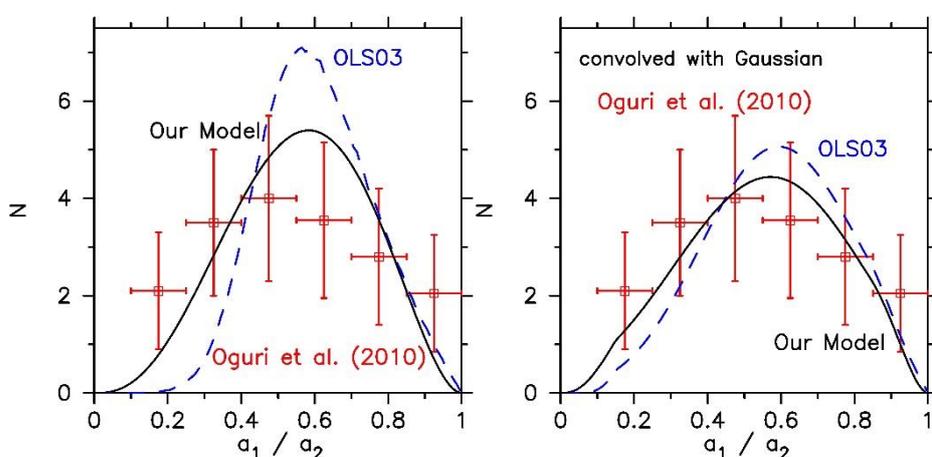


図 1 左: 本研究で得られた DM ハローの射影軸比の PDF(黒)、JS02 の三軸不等楕円体の軸比の PDF を射影することで得られる PDF(青)、および Oguri et al. (2010)による弱い重力レンズ効果の解析によって得られたデータ(赤)。右: 左パネルの黒線、青線で描かれた PDF を $\sigma=0.15$ のガウス関数で畳み込み積分したもの。赤のデータ点は左パネルと同じ。

続いて、X 線表面輝度の分布の軸比の PDF を求めた(6 章)。ここでは、5 章とは異なり、Dubois et al. (2014)による、バリオンを含むシミュレーションを用いた。このシミュレーションはガスの放射冷却、星形成、紫外放射・超新星・AGN によるフィードバックを考慮しており、現在最も高精度で信頼性の高いシミュレーションである。

Kawahara (2010)の観測データと比較するため、彼と全く同様の手法によって、シミュレーションから取り出した銀河団の X 線表面輝度の軸比を計算した。その軸比の PDF を図 2 に示す(赤のヒストグラム)。重要なことに、X 線表面輝度の軸比の PDF は JS02 に基づいて作られた等ポテンシャル面の射影軸比の PDF(黒線)と大きく異なる。これは、静水圧平衡の仮定、および、JS02 が仮定した密度場の自己相似性が必ずしも正しくないことに起因する。本研究によって得られた X 線表面輝度の軸比の PDF は以上の仮定を採用せず、シミュレーションデータから計算した X 線表面輝度から直接計算して得られたため、JS02 に基づ

く PDF よりも信頼できるといえる。

結果的に、本研究で得られた PDF は JS02 に基づくポテンシャルの軸比の PDF に比べて Kawahara (2010) によって解析された観測データとの一致が著しく向上した。ただし、Kolmogorov-Smirnov 検定によると、統計的一致具合は 10% に過ぎない。不一致の原因は観測での選択効果や楕円フィット手法の妥当性による可能性を含め、将来的により多くの観測データ、シミュレーションデータを用いて検証されねばならない。

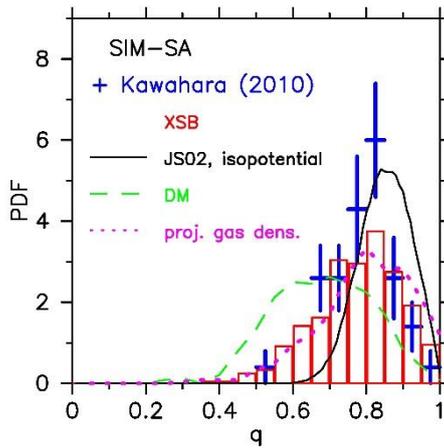


図 2 本研究で得られたシミュレーション銀河団の X 線表面輝度の軸比の PDF(赤)、DM の射影密度分布の軸比の PDF(緑)、JS02 に基づく等ポテンシャル面の射影軸比の PDF(黒)ガスの射影密度分布の軸比の PDF(マゼンタ)および Kawahara (2010) によって解析された観測データ(青)。

また、DM の密度分布の形状は、シミュレーションに含まれるバリオン物理、特に AGN フィードバックの有無によって大きく異なることが分かった。ただし、ビリアル質量付近のスケールでは AGN フィードバックを含むシミュレーションと DM のみのシミュレーションとの間で、DM の密度分布の形状にあまり違いがないため、5 章のこのスケールに関する結果(図 1 の結果も含む)はバリオン物理を考慮してもあまり変更はないと考えられる。一方で、より小さい質量スケール(ビリアル質量の 1/5 など)では DM の形状はバリオンによって強い影響を受ける。したがって、小さい質量スケールの DM の密度分布の非球対称性をより精細に調べるためには、バリオン物理を含んだシミュレーションが必須となる。

本研究で行われた、シミュレーションと観測の比較は未だ予備的なものであり、CDM パラダイムの検証のためには上で述べたように多くの課題が残っている。ただし、X 線表面輝度の軸比を扱ったときのように、「観測とシミュレーションとで同じ手法で軸比推定をする」という方法論はどのような観測、どのようなデータに対しても一般に適用可能で、簡単なモデル(JS02 に基づく PDF など)を用いるのに対し、どの程度のメリットがあるのかを本論文で示したといえる。この点は、将来的に標準モデルを超えた宇宙論を探るうえで重要である。