

論文内容の要旨

論文題目 Environmental Effects on Galaxy Evolution
(環境効果が銀河進化に及ぼす影響の解明)

氏名 後藤友嗣

銀河団中では、数百ないし数千の銀河が約 1Mpc 立方の空間に重力的に束縛された状態で存在するが、銀河団中の銀河がフィールドの銀河（銀河団領域以外に存在する銀河）に比べ、その形態（渦巻き型、楕円型等）、星形成率、質量において著しく異なる性質を示すということは、特筆すべき事実である。このことは、これら性質の違いは銀河団中において、フィールドとは明らかに異なる物理が銀河に作用していることを強く示唆する。本研究では、この銀河団という環境が銀河の進化に及ぼす物理作用をスローンデジタルスカイサーベイで得られたデータを手がかりに探求した。

スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) は全天の約 4 分の 1、1 万平方度にわたる、撮像及び分光サーベイ観測である。その撮像観測部分は可視 5 色 (u, g, r, i, z) による限界等級 $r \sim 22.2$ 等までの CCD 撮像データを生み出す。分光観測部は撮像観測のデータより選ばれた $r < 17.77$ 等より明るいすべての銀河と、約 10 万個の $r < 19.5$ 等より明るい楕円銀河について、分光観測を行う。本研究では主にこの SDSS の撮像及び分光データを解析する。

過去、銀河団銀河の進化についての研究は盛んに行われてきたが、いずれの研究も、中小望遠鏡で観測された近傍の銀河団と、大望遠鏡で観測された遠方の銀河団という質の異なるサンプルを比較し、進化を議論するという本質的な問題を抱えていた。近傍の銀河団サンプルと遠方の銀河団サンプルの抽出が均一でなかったならば、進化の議論は根底か

ら覆る恐れがある。近傍遠方共に同じデータから同じ方法によって検出された銀河団を用いることは進化の議論をする上で不可欠である。過去そのような研究が困難を極めた理由は、偏にそのような大規模かつ均一なデータが存在しなかったからである。本研究では、第 3 章において色選択法を用いた銀河団検出法を新たに開発し、SDSS のデータに適用することで、過去最大、かつ最も均一な 4000 個の銀河団のカタログを作成した。その規模のみならず、モンテカルロ法により詳細に決定された選択関数を持つこと、他の銀河団検出法との比較結果が明らかにされていることにおいてこの銀河団カタログは過去に類をみない。本研究ではこの銀河団カタログを主に銀河団銀河の進化の研究に用いるが、宇宙論定数の決定、超銀河団探査等、この銀河団カタログは様々な天文学研究の基礎に用いられることが期待され、現に世界の研究者により利用されている。

第 4 章ではこの銀河団カタログを用い銀河団銀河の光度関数を明らかにした(図 1)。銀河団銀河の光度関数はフィールド銀河のそれに比べて明るく、暗い側の端はより平坦になっていた。また銀河の形態別に分割して銀河団銀河の光度関数を作ってみると、明るい側は早期型銀河が支配的であり、暗い側は渦巻き型銀河が支配的であることがわかった。これら二つの結果は、銀河団の中心部は明るい早期型銀河が支配的であること、それらの銀河はフィールド銀河とは大きく異なる進化をしてきたものと考えて矛盾しない。銀河団銀河の光度関数の研究は過去にも行われてきたが、本研究は過去最大 204 個の銀河団を用いて統計制度を飛躍的に向上させたこと、銀河団のサンプルを均一に選択したことにおいて画期的である。

第 5 章では、同じ銀河団カタログを用いて、銀河団中の青い銀河の割合の進化を調べた(図 2)。左下のパネルでは静止系 $g-r$ の色においてその赤方偏移 (z) における楕円銀河よりも 0.2 等級以上青いものを青い銀河と定義し、その全銀河における割合を縦軸にとってある。実線はメジアンを結んだもので破線は一次式による最善フィットである。各赤方偏移において大きなばらつきがみられるが、高赤方偏移に向けて緩やかな増加傾向があることが見て取れる。左上のパネルでは $u-r < 2.2$ を青い銀河の定義としているが、同様な増加傾向が見える。これら二つの事実は銀河団の銀河は色を赤く変えて進化していることを物語っている。さらに右側のパネルには形態に敏感な、中心集中度 (右下)、銀河プロファイル (右上) を使って選び出した晚期型銀河の割合をプロットした。どちらのパネルも $0 < z < 0.3$ の間において、20~30%の銀河が晚期型から早期型へと形態を変化させていることがわかる。すなわち銀河団銀河はその形態においても、進化していることがわかる。図 2 は 514 個という過去最大数の銀河団を用いている点、さらに、それらの銀河団は遠方のものも近傍のものも同じ望遠鏡のデータから同じ銀河団検出法で見つけられたものである点において、過去の研究を凌駕している。

これら銀河団銀河の進化の原因についてさらなる手がかりが図 3 から得られる。図 3 では、青い/晚期型銀河の割合から赤方偏移依存性を取り除き、第 2 のパラメタを探るべく銀河団のリッチネスに対してプロットしてある。わずかながらリッチネスの大きい銀河団では青い/晚期型銀河の割合が少ないことが見て取れる。この結果は物理的示唆に富んで

おり、ラムプレッシャーによる剥ぎ取りはリッチな銀河団においてほど強いことは理論的によく知られているので、観測結果はラムプレッシャーによる剥ぎ取り起因と考えて矛盾しない。

第 6 章では、この銀河団銀河の進化の様子を詳しく調べるために、SDSS の分光データを用いて近傍の銀河についてその形態と環境（銀河団中心からの距離）の関係を調べた(図 4)。銀河団中心距離を調べる際に分光データを用いて背景銀河の混入を防いでいる点、銀河の形態分類を測光パラメタによる客観的な方法で行っている点において図 4 の結果は過去の研究で疑問視された点を払拭している。図 4 から、ビリアル半径の 2 倍以遠では形態と環境の間に相関関係がなくなることがわかる。これは銀河団銀河の形態進化を担う物理現象はビリアル半径の 2 倍以遠の環境では作用しないことを示している。ビリアル半径の 0.3~2 倍の銀河団周辺領域では、S0 銀河 ($-0.8 < T_{\text{auto}} < 0.1$) の割合が急上昇し、逆に Sc 銀河 ($1.0 < T_{\text{auto}}$) の割合が銀河団中心部に向けて下がっている。我々の銀河分類は T_{auto} パラメタに依っているが、このパラメタが銀河の形状を現すよい指標であるとする、これは Sc 銀河が銀河団から何らかの作用を受けて S0 銀河へと形態を変えていることを示唆している。第 7 章では、渦巻き構造をその形態に持ちながら星形成を全く行っていない不活性渦巻き銀河と呼ばれるという特殊な銀河の環境を調べたところ、これらの不活性渦巻き銀河は、銀河団周辺領域に選択的に存在することを発見した(図 5)。不活性渦巻き銀河の環境を調べた研究は本研究以前にはなかったため、その存在環境を特定した意義は大きい。これら不活性渦巻き銀河は、力学的構造を変えることなく静かに星形成を止めたと推察される。過去提案されていたような重力的相互作用では銀河の渦巻き構造が破壊されてしまうために、本研究の観測結果を説明できない。最後に、ビリアル半径の 0.3 倍以内の銀河団中心部領域では、楕円銀河の割合が急激に上昇し、S0 銀河の割合は今度は減少している。これは銀河団周辺部とは別の物理作用がこれらの領域で支配的であることを示唆している。さらに $z \sim 0.5$ のハッブル宇宙望遠鏡のデータの再解析により(図 6)、 $z \sim 0.5$ の時代にすでに多くの楕円銀河が銀河団中心に存在することが見つかったが、これらの楕円銀河は古く $z \sim 1$ まで遡って見つかっており、銀河団中心の楕円銀河はより古い過去に銀河-銀河相互作用等を通し、形成されたものと推察される。

第 8 章では、得られたすべての観測結果を説明すべく、銀河団にフィールドから降着する渦巻き銀河について以下のようなシナリオを提案する。フィールド銀河は銀河団中心まで約 2 ビリアル半径の距離に至るまでは銀河団からの作用を受けない(図 4)。ビリアル半径の 2~0.3 倍の銀河団周辺部においては、主として銀河団中の高温ガスからの作用（ラムプレッシャーによる剥ぎ取り、ガスの蒸発等）を受ける。この作用により銀河は星形成の源であるガスを剥ぎ取られ、その星形成率を下げる。円盤部は星が年をとるにつれて次第に暗くなり、渦巻き銀河はその形態を Sc から S0 へと徐々に変えていく。この進化の過程の途中にあるのが、渦巻き形態を保ちながら星形成を全く行っていない不活性渦巻き銀河である(図 5)。よりリッチな銀河団に青い銀河が少ないという傾向も(図 3)、高温ガスの作用がリッチな銀河団においてより強いことを考慮すると自然に説明される。最後に

ビリアル半径の 0.3 倍以内では、銀河同士の相対速度が大きくなっているため、効率的な衝突・合体が頻繁に起こることは難しいと思われる。この領域にある明るい楕円銀河(図 1)は古く銀河団形成初期にすでに形成されていたと思われる(図 6)。

この様に、本研究では SDSS の良質かつ大規模なデータを詳細に解析することにより、過去の研究が陥りがちであった現象の有無の議論から脱却し、銀河団銀河の進化を支配する物理的メカニズムにまで一步踏み込んだ知見が得られた。

なお、Appendix では、長く銀河団環境に起因するとされてきたポストスターバースト銀河について詳細な解析を行い、その起源が銀河団環境ではなく、どの環境でも起こりうる伴銀河との重力相互作用にあることを発見した。銀河団環境とポストスターバースト銀河は直接関係しないことが示されたので、結果は本編でなく Appendix にまとめることとした。

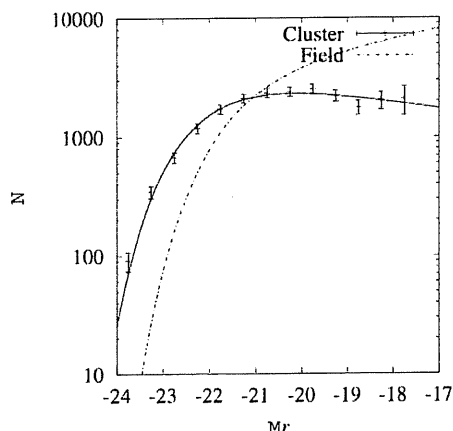


図1 銀河団銀河の光度関数。実線はSchechter 関数の fit、点線はフィールド銀河の光度関数。

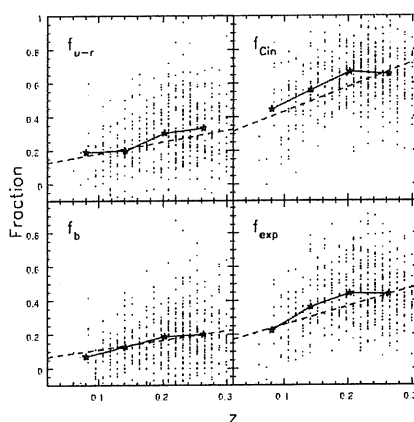


図2 赤方偏移の関数としての銀河団中の青い/渦巻き銀河の割合。実線はmedian値を結んだもの、点線は直線fit。

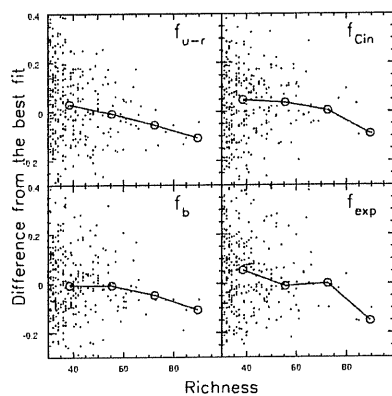


図3 銀河団の Richness の関数としての、青い/渦巻き銀河の割合。赤方偏移依存性は図2を利用して除去してある。実線はmedian値を結んだもの。

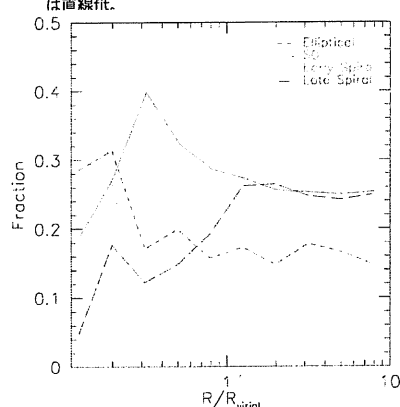


図4 銀河団中心距離の関数としての、各形態別銀河の割合。

