

論文内容の要旨

論文題目:

The Build-up of the Colour-Magnitude Relation (銀河の色・等級関係の形成)

氏名： 田中賢幸

我々は $z < 1.3$ における銀河の性質の環境依存性を議論する。赤い早期型銀河は高密度環境に多く存在し、青い晩期型銀河は低密度環境に多く存在する。このように、銀河の性質は環境に依存するが、そういった依存性を作り出した物理機構は未だ明らかになっていない。銀河の性質を環境・質量・時間の関数として定量化することにより、我々は銀河の性質がいつ、どのように変わったのかを調べ、その背景にある物理機構を明らかにすることを目的とする。

まず、スローンデジタルスカイサーベイのデータを用いて、我々は近傍銀河の形態・星形成の環境依存性を定量化した。銀河の性質は明らかに局所的な環境に依存することがわかった。赤い早期型銀河は高密度環境に多く、青い晩期型銀河は低密度環境に多い。興味深いことに、 $M_r^* + 1$ よりも暗い銀河は環境への依存性にブレイク (急激な変化) を示す。これは、赤い早期型銀河の割合は低密度環境ではほぼ一定であるが、ある密度を境に高密度環境では急激に変化する、といったものである。一方、明るい銀河にはこのような急な変化は見られず、赤い早期型銀河の割合は銀河密度のスムーズな関数になる。このブレイク密度は、銀河群・団といった銀河集団の広がりや裾野に対応する。これはより暗い銀河の進化は、環境により強く影響を受けていることを示唆する。

銀河の性質は大きいスケールの環境 (銀河集団の大きさ) にも依存する。赤い早期型銀河の割合は、より大きな集団でより大きくなる。 $\sigma > 400 \text{ km s}^{-1}$ より大きな集団では、その割合が一定になるのかもしれないが、誤差が大きいのははっきりしない。フィールドと比較すると、 $\sigma \sim 200 \text{ km s}^{-1}$ のような非常に小さな銀河群でも、赤い早期型銀河が多い。これは銀河の環境依存性を引き起こす物理機構は、銀河団のような巨大な集団でのみ有効な機構ではない、とい

うことを示唆する。むしろ、銀河同士の(低速度での)相互作用や、ストランギュレーションといった、小さな銀河群やフィールドで有効な機構が有力であろう。

我々はさらに銀河の環境依存性の起源を調べるために、遠方宇宙に注目する。すばる望遠鏡の主焦点カメラとイギリス赤外線望遠鏡のWFCAMで、CL0016 ($z = 0.55$)、RXJ0153 ($z = 0.83$)、RDCSJ1252 ($z = 1.24$)の三つの銀河団領域を観測した。これらのデータに我々は測光的赤方偏移を適用し、銀河団と同じ赤方偏移にいたると思われる銀河を抽出した。そうして選んだ銀河の分布から、実に10Mpcを超える大規模構造を発見した。CL0016とRXJ0153については分光フォローアップ観測が行われ、それらの構造は分光的に確認されている。

次に、構造に属する銀河の性質に注目する。まず、データクオリティの高い、SDSS、CL0016、RXJ0153に着目すると、銀河の色、特に $M_V > M_V + 1$ の銀河の色は高密度領域に行くに従って、急激に青から赤に変化することがわかった。この傾向は我々の注目している赤方偏移全てで見られる。それより明るい銀河はこのようなブレークは示さない。次に、大きいスケールと小さいスケールの2種類の銀河密度から、我々は、フィールド、銀河群、銀河団の三つの環境を定義した。そこから $z = 0.83, 0.5, 0$ のフィールド、銀河群、銀河団の色等級図を調べた。銀河団中の赤い銀河はタイトな色・等級関係をなす事が知られていたが、我々は初めてこの関係ができあがっていく様子を明らかにした。銀河団銀河の色・等級関係は明るい側では $z = 0.83$ ですでに出来ていて、暗い側がまだ形成過程にあるかも知れないことがわかった。銀河群銀河は $z = 0.83$ では $M_V < -20$ のみはっきりとした色・等級関係をなすが、より暗い側ではほとんどみられない。暗い側は $z = 0.55$ までに形成される。これらとは対照的に、フィールド銀河の色・等級関係は $z = 0$ にかけて明るい側で急激に出来上がるが、暗い側の形成は $z = 0$ でも未だ始まっていない。つまり、銀河の色・等級関係は明るい側が先に出来て、暗い側が後に出来るようである。興味深いことに、この色・等級関係の形成は低密度環境で遅れている。

さらに我々は、RDCSJ1252銀河団のデータに基づいて、 $z = 1.24$ における銀河の色の環境依存性を調べた。測光的赤方偏移により発見した銀河団・群では、フィールドと比べ赤い銀河の割合が大きいことがわかった。これは赤い銀河が、 $z \sim 1.2$ ですでに銀河集団における主な銀河種族になっていたことを示唆する。すなわち、銀河の星形成の環境依存性は(少なくとも定性的には)、 $z \sim 1.2$ でできあがっていたことになる。

次に我々は銀河のスペクトルを用いて、明るい赤い銀河の星形成をより詳細に調べた。 $z \sim 0.8$ と $z \sim 0.5$ の銀河団、銀河群、フィールドにいる赤い銀河のスペクトルを平均化して作った、典型的なスペクトルを $z = 0$ の銀河と比較すると、星形成率の環境依存性がはっきりと見える。銀河団の赤い銀河はどの赤方偏移でも[OII]輝線を出さないが、銀河群の赤い銀河は $z \sim 0.8$ で弱い[OII]輝線を出す。 $z \sim 0.5$ にはその輝線は無くなっている。フィールドの赤い銀河はやや強い[OII]輝線を $z \sim 0.8$ では示すが、 $z \sim 0.5$ にかけて弱くなる。この傾向はまさに銀河の色・等級関係の形成とよく一致する。

平均的なスペクトルから4000Åブレークの強度(D_{4000})とH δ 吸収線の強度を測り、それらをモデル予想と比較した。 D_{4000} は銀河の星形成活動を長いタイムスケール(>10億年)でトレースするが、一方H δ は、より最近の星形成活動を反映する(≤ 10 億年)。すなわち、これらの指標を組み合わせることで、銀河の最近の星形成活動を調べることが出来る。 $z \sim 0.8$ の銀河群の赤い銀河と、 $z \sim 0.5$ のフィールドの赤い銀河は、 D_{4000} に対してH δ 吸収線が強い。これらの環境は色・等級関係の形成が見られたところである。すなわち、これらの環境にいる銀河の

星形成活動は、つい最近弱まったといえる。星形成がゆっくり止まったと考えると、このような強い H δ 吸収線は説明がつかず、これは星形成が比較的短いタイムスケール (< 10 億年) で止まったことを示唆する。ストランギュレーションは星形成をゆっくりと止めるので、この機構が原因ではないようだ。したがって、銀河の星形成は、短い時間で星形成の止まる、銀河同士の相互作用により終息したのかもしれない。

以上の結果の解釈の一つとして、銀河はダウンサイジング的な進化をした、と考えることが出来る。すなわち、重い銀河が始めに星形成をやめて、時間とともにより軽い銀河が星形成をやめていく、という描像である。色・等級関係の形成が低密度環境で遅れることから、このダウンサイジングは環境に依存しているようである。つまり、銀河の進化は大質量で高密度環境にいる銀河が最も速く、低密度環境・小質量銀河では遅れている、ということの意味する。平均的な銀河スペクトルによると、星形成は比較的短いタイムスケールで終息したことが示唆される。銀河同士の相互作用が銀河の星形成を止め、色・等級関係を形成させた物理機構なのかも知れない。しかしながら、銀河同士の相互作用のみでは星形成のダウンサイジングは説明しにくい。最近の銀河形成モデルによると、活動銀河核からのエネルギー放出が、ダウンサイジングを再現する重要な要素であることが示唆されている。活動銀河核がダウンサイジングを引き起こす上で、何か役割を果たしているのかも知れない。