

色一等級関係が物語る銀河団銀河の形成史

児玉忠恭

〈日本学術振興会海外特別研究員 Institute of Astronomy, University of Cambridge, Madingley Rd., Cambridge CB3 0HA, UK〉
e-mail: kodama@ast.cam.ac.uk

同じ場所に多数の銀河が共存し、しかもさまざまな赤方偏移 (z) で観測できる銀河団は、宇宙年齢とともに銀河がどう進化してきたかを調べるのに格好の対象である。近年の宇宙望遠鏡や地上大望遠鏡の目覚ましい活躍によって、早期型 (楕円, SO) 銀河の色と明るさの間に見られる色一等級関係は、 z が 1 を超える遠方銀河団に至るまでよく成立することが確認されつつある。この関係の進化を足掛かりとして、宇宙誕生から今日に至るまで銀河団銀河がどのような形成史を辿ってきたのかを一般的に解き明かしてみよう。

1. はじめに

明るい銀河ほど色が赤いという近傍銀河団の早期型銀河において良く確立した色一等級 (以後, C-M) 関係は、ヴィスバナサン&サンデッジ¹⁾によって発見された。この関係の起源は、後の第 2 章で詳しく述べるように、質量が異なる銀河の重元素量の違いであると解釈されるのが一般的である²⁾。パウワーら³⁾は近傍の乙女座銀河団とかみのけ座銀河団の高精度の測光観測によって、C-M 関係のまわりの色分散が非常に小さいこと、両者の銀河団で全く同一の関係を持つことを示した。つまり同じ明るさの早期型銀河はその明るさに固有の色を持つのである。彼らはこのことから早期型銀河の年齢は非常に古い ($z > 1$) と主張した。なぜなら銀河が若いと、銀河同士に少しの年齢差があるだけで大きな色分散が観測されるはずだからである。さらにエリスら⁴⁾は、 $z \approx 0.54$ の 3 つの遠方銀河団について同様の解析を行い、早期型銀河の形成時期にさらに強い制限を与えた ($z > 3$)。しかしこれらの解析では、年齢は若いけれどもほとんど同時発生的に形成される場合は棄却できない。

アラゴン-サラマンから⁵⁾は、 z が 0.9 までの 10 個の遠方銀河団の地上観測によって、早期型銀河の

色が銀河の星の年齢をすべて古いとした ($z > 2$) 種族進化モデルと整合的であることを示した。しかしこのような遠方銀河団の地上観測だけでは、空間分解能の限界から形態そのものではなく色やスペクトルを用いて早期型銀河を同定せざるを得ず、その上で色を解析するのは自己矛盾的と言わざるを得ない。それが近年ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の出現で解像度が飛躍的に向上し、遠方銀河団における真の「早期型銀河」の進化を捉えることができるようになった。スタンフォードら⁶⁾は、 z が 0.9 までの 19 個の銀河団について HST で形態分類された早期型銀河の C-M 関係の進化を観測的に調べ、傾きと色分散が z と共にほとんど変化しないこと、平均の色の変化量が、星の年齢が古い銀河モデルとよくあうことを確認した。しかし強い年齢制限は与えられなかった。このように、銀河団中の早期型銀河の年齢は宇宙年齢に匹敵するほど古いことが繰り返し指摘されてきている。

しかし全ての早期型銀河はその後静的に進化してきたのであろうか? どうやらそうではなさそうである。ブッチャー&オムラー⁷⁾は $z \sim 0.5$ までの銀河団を調べ、個々の銀河団中でもっとも赤い銀河集団の色よりある一定以上青い銀河が全体に占める割合が、 z とともに単調に増加することを観測

的に示した。これがいわゆるブッチャー・オムラー現象である。近年 HST による形状の同定により、これが銀河形態の推移現象と密接に関係していることが分かってきた⁸⁾。つまり、星形成が進行中の青い晩期型銀河だったものが後に星形成を終了し、赤い SO 銀河へと形態もろとも移行して早期型銀河の仲間入りをするというのである。銀河ガスが何らかの外的作用によって急速に消費された、または失われたと考えられる⁹⁾。しかもこのような銀河の割合は、銀河全体の4分の1以上にも昇る。

またコールドダークマター (CDM) シナリオに基づく銀河の合体モデル^{10), 11)}は、多くの早期型銀河は宇宙誕生から最近までのかなり広い年齢範囲にわたって銀河同士が衝突合体を繰り返しながら形成されたと主張する。渦巻銀河の合体後の形状が楕円銀河になるという多体問題シミュレーション¹²⁾や、シェルやリップルとよばれる合体の痕跡と思われる星の成分が楕円銀河を包むように存在する場合があるなどの観測事実¹³⁾もこの考え方を支持している。この説の最大の問題点として指摘されてきたのは、銀河の合体によって測光学的特性の攪拌が起こり、C-M 関係の分散が大きくなり関係が破綻するのではないかということである。しかしカオフマン&シャーロー¹⁴⁾は銀河合体モデルに基づき、大きな銀河ほどもともと重元素量の多い大きなクランプの合体によってできる確立が高いため、色の攪拌は抑えられ C-M 関係を保持できると主張した。

このように銀河を構成する星の年齢の古さとは裏腹に、早期型銀河の形態自身は比較的最近に確立したケースも実は多いのかも知れない。一見矛盾すると思われるこれら全ての観測や理論は一体どのようにしてうまく折り合いが付くのだろうか？

本稿では、まず第2章で C-M 関係の z に伴う進化から、早期型銀河における大規模な星形成期を同定する。次に第3章で、ブッチャー・オムラー現象との関連から残存する星形成について議論する。そして第4章では、C-M 関係が銀河同士の合

体をどこまで許容できるか調べる。第5章で、以上の結果を総合して銀河団銀河の形成・進化の全体像に迫る。最後に第6章で、今後の銀河団銀河の研究において注目すべき点を考える。なお第2章は児玉&有本²⁾および児玉ら¹⁵⁾、第3, 4章はパウワー, 児玉&ターレビッチ¹⁶⁾を主な出典とする。詳細についてはそれらを参照されたい。本稿を通して採用した宇宙論パラメーターは $H_0 = 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $q_0 = 0.5$ である。

2. 大規模な星形成期

光のスピードの有限性のお蔭で、遠方銀河の観測は銀河の昔の姿を直接見る機会を与えてくれる。そして遠方銀河の色(過去)を近傍銀河の色(現在)と比較することによって、銀河の年齢の情報を引き出すことができる。なぜなら色の進化量は星の平均年齢に大きく依存するからだ。この特長を利用して、まず銀河団中の早期型銀河を構成する星の年齢に制限を与えてみよう。

ここで注目するのが第1章でも紹介した早期型銀河の C-M 関係である。図1に近傍のかみのけ座(Coma)銀河団および2個の遠方銀河団の早期型銀河の C-M 図を例示してある^{3), 15), 17)}。破線が線形回帰曲線として計算したそれぞれの C-M 関係である。このように非常に遠方まで成り立つ C-M 関係は、 z の関数として銀河の進化を定量化するのにおあつらえ向きである。C-M 関係から明らかのように、早期型銀河の特性は銀河の明るさ即ち銀河質量に依る。従って年齢制限を与えるにはこの質量依存性を考慮する必要がある。そもそもこの質量依存性は何に起因するのであろうか。ここで注意してもらいたいのは、銀河のスペクトルは主に星の年齢と重元素量の両者に依存するということである。年齢が古いほど、また重元素量が多いほど銀河のスペクトルは赤くなる。しかも両者がスペクトルに及ぼす効果はほとんど完全に縮退している¹⁸⁾。即ち、あるスペクトルを説明する年齢と重元素量の組合せはいくらでもあるのだ。従ってこの両者

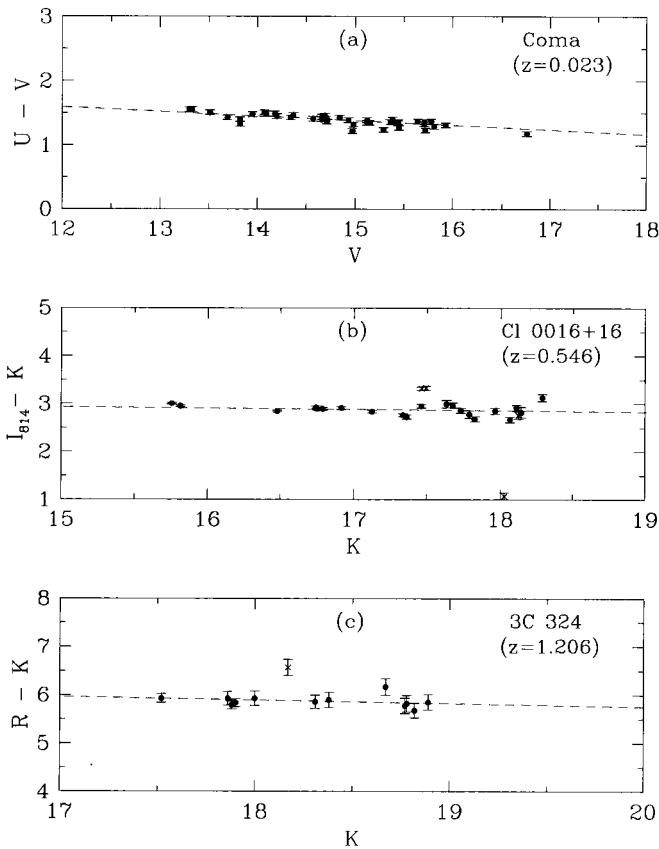


図1 C-M図。(a), (b), (c)はそれぞれ、かみのけ座(Coma)銀河団, Cl0016+16, 3C324の早期型銀河を示す。図中の括弧内は銀河団の z を示す。破線はそれぞれの銀河団のC-M関係を示す。横軸は見かけの等級、縦軸は色指数を示す。但し I_{814} はHSTのF814Wフィルターでの等級である。

をうまく分離してやらない限り、年齢の議論には常に不定性が付きまってしまう。質量が異なる早期型銀河同志は重元素量が異なるのか？ それとも年齢が異なるのか？ そして一体年齢の絶対値は？ C-M関係の進化の解析はこの問題の解決への鍵を握っている。

このようなC-M関係の解析には重元素量の効果を考慮した銀河のスペクトル進化モデルが必要不可欠である。児玉&有本²⁾は銀河の星形成史に伴う化学進化を整合的に繰り込んだ、楢岡銀河の進化モデルを構築した。銀河形成の描像はラーソン¹⁹⁾有

本&吉井²⁰⁾を踏襲した。即ち初期の爆発的星形成の後、超新星爆発のエネルギーによる銀河風が残存ガスを吹き飛ばし星形成を終了させる。星形成の時間尺度は典型的な力学的時間尺度である1億年程で、銀河風は形成開始後10億年以内に吹き荒れる。

児玉ら¹⁵⁾はこのモデルを用いて、 z が0.3から1.27に至る17個の遠方銀河団についてC-M関係の進化を解析した。この銀河モデルでは星の平均重元素量と銀河年齢を自在に調整することができる。そこで近傍のかみのけ座銀河団のC-M関係³⁾の明るい側3等級幅を $z=0$ で再現するような次の三通りのモデル系列を構築した。

- (1) 重元素量系列モデル：質量依存性は重元素量の違いにあるとする。星の平均重元素量は暗い側に向かって約2分の1に減る。銀河年齢は全ての質量の銀河で一定であるとする。この一定値は120億年から90億年までを考える。
- (2) 年齢系列モデル：質量依存性は年齢の違いにあるとする。銀河年齢は暗い側へ向かって120億年から約50億年と若くなる。重元素量は太陽組成の約1.2倍に固定する。

- (3) 混合モデル：質量依存性の大半は重元素量が担っているが、質量が異なる銀河間で少しの年齢差を許す。3等級幅での年齢差は10億年または20億年とし、暗い銀河ほど少しずつ若い。それぞれの場合で、 z とともにC-M関係がどう変化するかシミュレーションを行った。

その結果を、サンプル中最も遠い銀河団4個もしくは5個のC-M関係と比較してみよう。図2はC-M関係の進化の様子を(a)傾きと(b)ゼロ点に分けて表示したものである。まず(a)の傾きに注目してみよう。年齢系列(一点破線)の予測は明らか

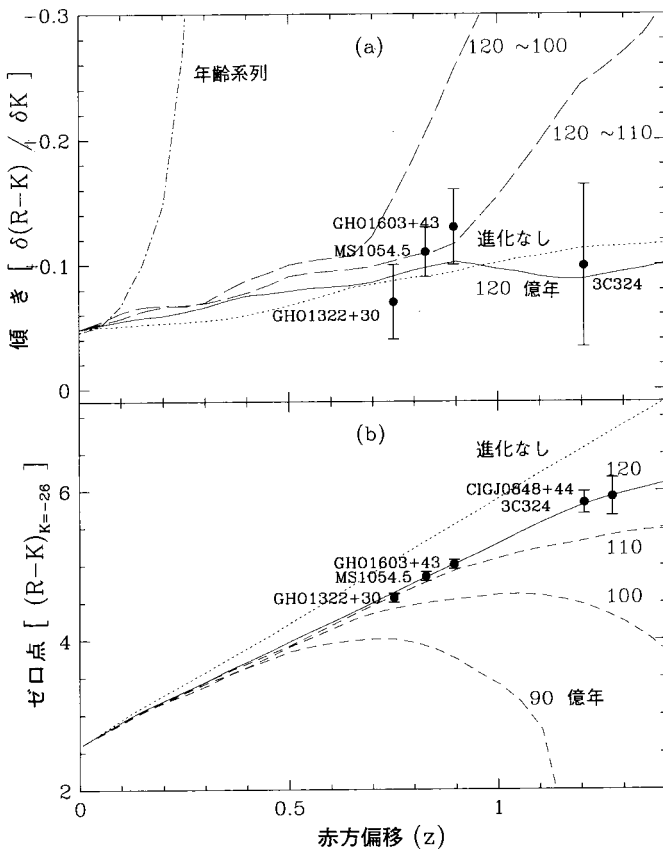


図2 C-M関係の進化。(a), (b)はそれぞれ傾きとゼロ点の進化を z の関数として表示したものである。ゼロ点は K バンドでの絶対等級が -26 等のところでの色である。実線と破線は重元素量系列モデルを表す。実線は現在($z=0$)での銀河年齢が120億年の場合、短い破線はそれぞれ110, 100, 90億年の場合である。銀河形成期の赤方偏移はそれぞれ4.5, 2.5, 1.7, 1.2に対応する。点破線は年齢系列モデルを示す。長破線は混合モデルで、3等級の範囲で10億年(120~110), または20億年(120~100)の年齢差を与えた場合を示す。点線は銀河スペクトルが過去に向かって変化しないモデルである。観測点は銀河団サンプル中最も遠方のもの4個ないしは5個の銀河団を示す。

に観測と矛盾する。なぜならこの場合は小さな銀河ほど若く進化量が大きくなるので、 z とともにC-M関係の勾配が急速に大きくなってしまいうからである。これに対して年齢が古くて一定な重元素量系列(実線)はどうだろうか? この場合傾きは、考えている z の範囲ではほとんど変化しない。このことは進化なしのモデル(点線)との比較か

らも分かる。この重元素量系列の予測は全ての観測点と驚くほどよく合う。さらに混合モデル(長破線)も調べてみよう。年齢差が僅か20億年あるだけでやはり傾きが急になり過ぎて観測と矛盾することが分かる。質量の異なる早期型銀河間の年齢差はあってもたかだか10億年ほどしか許されないのだ。以上の比較から早期型銀河のC-M関係を支配している主要なパラメーターは重元素量であることが強く結論される。ここでは扱わなかったが残り12個の銀河団についても、ほとんど全て同一の古い年齢を持つ重元素量モデル系列で説明できる。銀河団早期型銀河は質量の関数として普遍的な重元素量系列を成しているようだ。では(b)のゼロ点に目を移してみよう。これはC-M関係上のほぼ中間点で定義されており、(a)の結果も合わせて考えると、銀河団中の早期型銀河全体の色を代表すると思ってよい。それを4通りの年齢の重元素量系列(実線と短破線)と比較しよう。図から明らかなように、 z が0.7を超えるような遠方ではわずか10億年刻みの年齢の違いでも、C-M関係のゼロ点は大きく異なってくる。観測やモデルの誤差が0.1~0.2等程度あったとしても、なお年齢に強い制限を与えられるのだ。

実際遠方銀河団5個についてみると、銀河年齢が110億年以上でなければならないという非常に強い制限がつく。このような遠方では結果が宇宙論パラメーターに若干依存する。しかし銀河が形成された赤方偏移でいうと、2より大きいという結果はゆずれない。

ここでCDMに基づく銀河合体モデル²¹⁾からの

批判を2つ挙げておく。1つは、 z の大きな時点では銀河団は稀な存在であり、より加速的に銀河形成が行なわれた地点を見ているというバイアスの可能性があることだ。もう1つが、銀河の星の大部分は大昔に生まれたにしても、その後の合体によって銀河の質量は比較的最近まで成長しうることである。この点については第4章でふれる。上述のC-M関係の進化の解析はあくまで銀河を構成する星の種族についての解析であるから、その結論は次のようにまとめられる。

「銀河団中の早期型銀河における大規模な星形成は赤方偏移が2より大きい時代に起こった。」

3. ブッチャー・オムラー現象

前章で、銀河団中の早期型銀河はその大部分の星が初期に爆発的に形成され、その後静的な進化をすることが分かった。しかし、今日のすべての早期型銀河がこのような穏やかな進化をしてきたのではなさそうである。第1章で紹介したブッチャー・オムラー現象に見られるように、比較的最近に渦巻銀河が星形成を終えSO銀河として早期型銀河の仲間入りをしてくる場合もよくあるようだ。これが本当なら、ではなぜ今日の早期型銀河は分散の小さなC-M関係を保存できているのであろうか？割と最近になって早期型に移行した銀河は、以前から早期型であった銀河と比べて系統的に青色を持ち、C-M関係の分散を大きくしてしまうことはないのだろうか？

そこでこのような銀河を記述するのに適当な、比較的最近まで星形成を続ける銀河モデルを考えてみよう。星形成は宇宙誕生時(130億年前)に始まり、その後時間尺度 τ で指数関数的に形成率が減少し、今から t_{stop} 前に終了する。ここでは簡単のためにすべての星の化学組成を太陽と同じと仮定する。図3(a)はこのような銀河の現在($z=0$)の色が t_{stop} と共にどのように変わるかを示したものである。三本の実線は τ がそれぞれ、20, 50, 100億年の場合である。比較のため、星形成がすべて

t_{stop} の瞬間に起こるとした単一バーストモデルを点線で示してある。単一バーストモデルでは現在での銀河の色が t_{stop} に大きく依存するが、一方 τ モデルでは t_{stop} が10億年程度とかなり最近の場合でも、最終的な現在での色はかなり赤くなることが分かる。すなわち現在の銀河の色は、大規模な星形成の時期には大きく依るが、その後残存していた星形成がいつ終了したかにはあまり依らないのだ。従って大部分の星の年齢が古い限り、ブッチャー・オムラー銀河のように最近に星形成を終える銀河が混在しても、現在の早期型銀河の小さな色分散とさして矛盾しないであろう。このことをもっと定量的に調べてみよう。ブッチャー・オムラー銀河の割合は、 $z=0$ から $z=0.5$ までで約2%から25%まで増える⁷⁾。これは大雑把に渦巻銀河の割合の変化とみなすことができる。また遠方銀河団のブッチャー・オムラー銀河のスペクトル解析(水素バルマー線)から、質量にして10%程度の星形成バーストが最近起こったとすると都合がいいことが指摘されている²²⁾。これらの状況を再現するために、次のような仮説を置いてみよう。半数の早期型銀河(主に楕円銀河)は大昔に星形成を終了して形成される。残りの半数(主にSO銀河)は宇宙誕生から現在までの間の任意の時間にそれまで続いていた星形成を終了して早期型に移行してきたものとする。ただし星形成を終了する直前に星形成バーストを伴うとする。渦巻銀河の星形成の時間尺度 τ は50億年²³⁾を採用し、 t_{stop} に10%の星形成バーストが起こったとすると、現在の銀河の色は t_{stop} の関数として図3(a)の破線のようになる。このモデルをもとに現在の早期型銀河の色のヒストグラムを作ってみよう。銀河の総数は30個とし、そのうち半数は100億年から130億年の間の t_{stop} をもち、残りの半数は0から130億年の間のランダムな t_{stop} をもつとする。図3(b)がモンテ・カルロ数値シミュレーションによって構築した色のヒストグラムの一例である。同様のシミュレーションを千回行い、色の分散をバイウエイ法²⁴⁾と呼

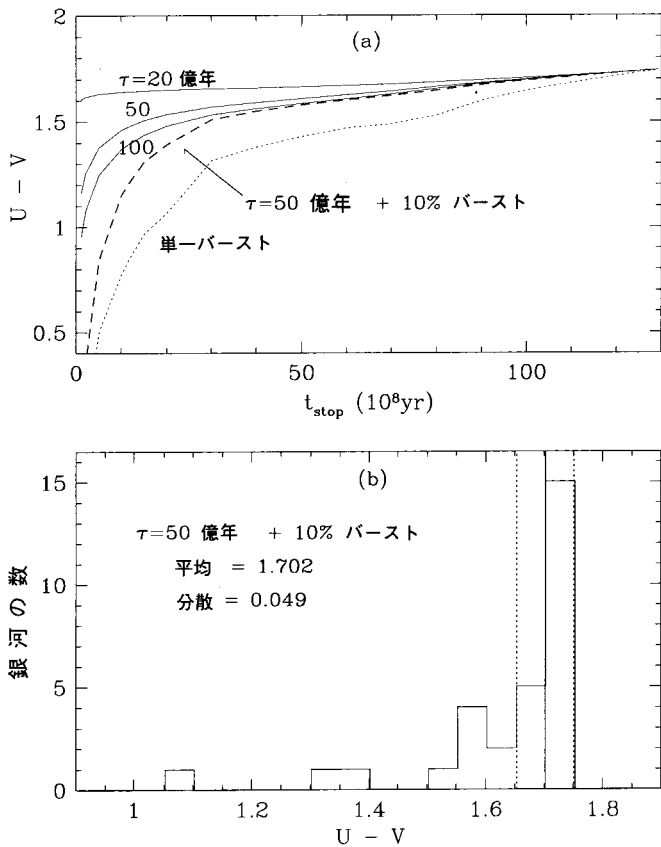


図3 (a) 現在 ($z=0$) の銀河の色。星形成が終了する時間 t_{stop} の関数として表示した。点線は単一バーストモデル、実線が星形成率が時間尺度 τ で指数関数的に減少するモデル、破線が τ が 50 億年かつ t_{stop} に 10% の星形成バーストを伴うモデルをそれぞれ表す。(b) 現在 ($z=0$) の銀河の色のヒストグラム。ブッチャー・オムラー現象を記述するようにモデルのパラメータを選んでいる。縦の実線と破線はそれぞれ平均値と分散を表す。詳しくは本文を参照。

ばれる方法で測定してみよう。その結果は驚くほど小さく、わずか 0.05 ± 0.02 等級にしかない。これは、近傍のかみのけ座銀河団の早期型銀河で同様のバイウエイト法で測定されている C-M 関係の周りの色分散の上限値 0.04 等級²⁵⁾と整合的である。一見相矛盾するかと思われたブッチャー・オムラー現象と現在の小さな色分散は、実際は相容れる結果となった。遠方銀河団で観測される過去の活発な出来事と近傍銀河団にみられる現在の穏

やかな姿との間のつながりが理解できた。多くの早期型銀河は大昔に形成されるには違いないが、一部の早期型銀河（主に SO 銀河）は過去 60 億年以内 ($z < 0.5$) の最近でも渦巻銀河から二次的に形成されるようである。

4. 銀河の合体

強い C-M 関係の存在は、星の形成史だけでなく早期型銀河の合体史についても制限を与える。CDM に基づく銀河の合体モデル^{10), 11)}は、銀河は初め小さな塊に分かれており、ダークマターハローの合体の中で塊同士が衝突合体して次第に大きな銀河が作られてくると予測する。しかし近傍での C-M 関係の小さな分散と C-M 関係の進化の解析とから、大部分の星は大昔に生まれなければならないことは既に議論した。従って最近の銀河の合体は、大量の星形成を伴うことは極めて稀で、既に大方星形成を終了したほとんど星系同士のものでなければならない。すると合体によって作られる新たな銀河は、合体前の 2 つ（ないしは複数）の銀河の平均された色、スペクトルを持つことになる。このような合体による銀河の色の平均化が起り続けると、たとえそれまでに C-M 関係が成立していても、次第にならされて関係は破綻してしまうであろう。そこでこのような星形成を伴わない銀河の合体がどの程度まで許されるのか調べてみよう。

銀河の合体史はバウら²⁶⁾が CDM シナリオに基づいて準解析的にシミュレーションした、ダークマターハローの合体史とその中での銀河片の合体史を利用する。銀河団に注目するので、最終的な回転速度が 1000 km/s を越えるダークマターハローに存在することになる銀河だけを選び出し、それらの合体史を遡る。ある時期に銀河の祖先である全ての

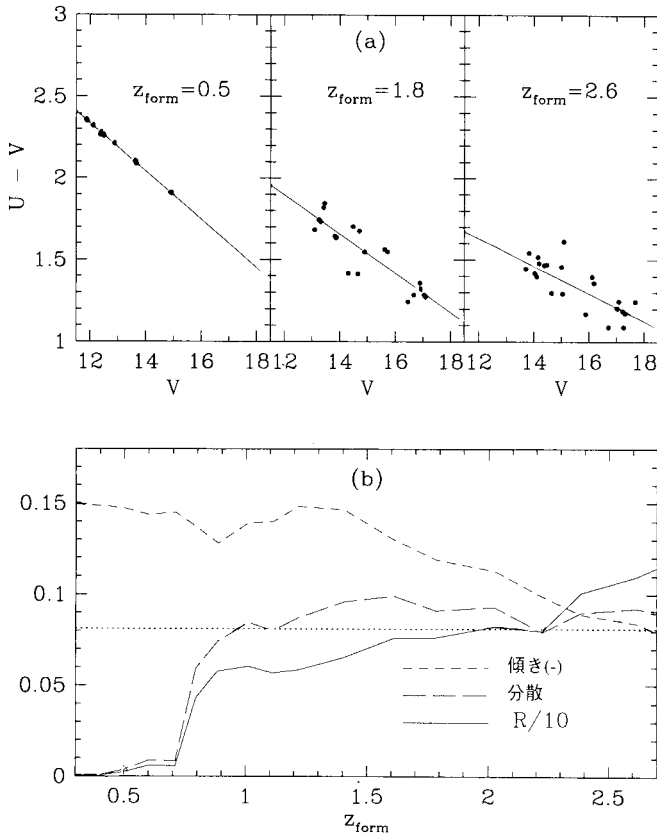


図4 (a) 銀河の合体モデルに基づく現在の C-M 関係。 z_{form} は分散ゼロの C-M 関係を与えた赤方偏移。その後は星形成を伴わない銀河の合体を繰り返す。(b) 同モデルによる現在の C-M 関係の分散、傾き、その比 (R) を z_{form} の関数として表したもの。点線は、かみのけ座銀河団での R の観測上限値を示す。

銀河片に分散がゼロで、ある傾きを持った完璧な C-M 関係を与えることにしよう。この時点で残存するガスは全て星にかえる。この時の赤方偏移を z_{form} とする。これは銀河が大部分の星形成を行った直後に対応するとみなすことができよう。そしてその後の銀河の合体は、星形成を伴わない単なる星系同士の合体であると仮定する。またこの解析では銀河の形態は考えないものとする。以上の仮定のもと合体史に従って個々の銀河の色を現在に至るまで合成すると、いったい今日の C-M 関係はどのように観測されるであろう。分散と傾きはどうかであろうか？

現在の C-M 関係の様子を三通りの z_{form} について示したのが図 4 (a) である。 z_{form} が大きいほど傾きは均され現在の分散が大きくなる様子がわかる。合体による銀河質量の増大の割合がまして色の攪拌が進むからである。定量的に調べた結果を図 4 (b) に示す。さてこの結果を実際の観測データと比較するのであるが、このシミュレーションでは傾きが一定でないため、分散の値はそのままでは比較できない。なぜなら傾きが大きいほどそれに応じて分散が大きくなるからだ。そこで分散を傾きで割った値で比較しよう。この比を R と定義する。実線が $R/10$ を示す。観測値は、かみのけ座銀河団で銀河の形態を区別しない場合の C-M 関係の分散の上限値 0.05 等²⁵⁾を用いる。これも傾きで割って $R = 0.81$ に焼き直す(点線)。比較の結果は、 z_{form} が約 2 以下の場合にのみ観測を満たすほど R を小さく保てることがわかる(実線)。これを z_{form} から現在までの合体による銀河質量の平均成長率(質量で重みをつけた平均値)への制限に焼き直すと約 2 倍以下となる。初期の C-M 関係の分散が、ここで仮定したようにゼロではありえないこと

を考えると、この制限はかなり強い上限を与える。つまり星形成を終了した銀河がその後の銀河同士の合体によって質量を約 2 倍以上に成長させることは許されないのである。大規模な星形成期が z で 2 以上という第 2 章の結果と比較すると、 z_{form} が 2 近辺で整合的な解を見つけることができそうである。しかしブッチャー・オムラー銀河によってさらに分散が大きくなることも考えると、実際のところ銀河合体モデルは銀河の合体頻度を若干過大評価してしまっている恐れがあるのかもしれない。

5. まとめ

銀河団中の早期型銀河に成り立つ C-M 関係のさまざまな角度からの考察によって、早期型銀河の形成と進化について制限を与えた。C-M 関係の z に伴った進化から銀河の大部分の星が $z > 2$ の大昔に生まれたことが分かった。しかしブッチャー・オムラー現象にみるように一部の早期型銀河は比較的最近 ($z < 0.5$) にも誕生する。現在の小さな色分散とも整合的であることが分かった。 $z < 2$ での星形成を伴わない銀河の合体による質量の成長は約 2 倍が強い上限である。今日の CDM 型銀河合体モデルが小さな色分散を保つことができるかについては非常に際どい結果を得た。

以上の結果をもとにいささか著者の主観も交えて銀河団中の早期型銀河の形成・進化をまとめると次のようになる。

「早期型銀河は、 $z > 2$ に原始銀河雲の自己冷却収縮または衝突合体過程において大規模な星形成を行なう。この時、大きな銀河ほど単位質量当たりのポテンシャルエネルギーが大きいので、超新星爆発によるガスの再加熱に対して銀河ガスを長くとらえておくことができ、化学進化がより進む。その結果、この時点で銀河質量と星の平均重元素量の関係が樹立し、広範囲の赤方偏移で C-M 関係として観測される。渦巻銀河のバルジもその特性の類似性から同様の形成史を経たであろう。その後楕円銀河とバルジは静的な進化をする。矮小銀河などを捕獲して二次的な星形成を行うこともあるがほとんどの場合小規模である。一方 SO 銀河はバルジ成分が卓越した渦巻銀河がディスクでの星形成を終了して誕生する。その半数近くは過去 60 億年以内の比較的最近に誕生する。この移行現象が遠方銀河団でのブッチャー・オムラー現象として観測される。銀河同士の新たな星形成を伴わない合体はある程度は許されるが質量の成長は約 2 倍を越えない。」

6. 今後の戦略

赤方偏移が 1 を超えるような遠方銀河団の C-M 関係の解析は、早期型銀河の形成期の同定に極めて有効な手段である (第 2 章, 図 2 参照)。しかし残念ながらこのような遠方には、現在ではまだほんの数個の銀河団しか発見されていない。大きな赤方偏移のため可視光領域は実際には紫外領域に対応し、銀河の光度が下がってしまうのが困難の一つだ。大フォーマットの近赤外カメラの出現によってこのような遠方銀河団探査が効率よく行えるようになると期待される。そして候補天体の静止座標での 4000 Å ブレイクをとらえる可視光と近赤外の非常に深い測光観測を行うことによって、上で行った C-M 関係の解析をより遠方へより統計的にと進めることができるであろう。この目的には今夏にもファーストライトを迎える日本の地上大望遠鏡すばる (口径 8 m) をはじめとする超巨大望遠鏡が大きな役目を果たしてくれるであろう。C-M 関係の進化に関してさらに注目すべき点は、いったいどの時点で色分散が大きくなってこの関係が破綻するかである。なぜならその時点こそが早期型銀河が形成されつつある現場または直後だからである。

本研究からも示唆されるように、銀河団の早期型銀河は形成途上に非常に莫大な星形成バーストを起こした可能性が強い。今日この大規模な星形成期を直接捉えるようとする努力が精力的になされている。しかしこれまでに z が 2 ~ 4 で観測されたいわゆるライマンブレイク銀河からの見積もりでは、星形成率が桁で少ない²⁷⁾。まだ単に形成期に辿りついていないだけなのか？ それとも大量のダストによる光の吸収のせいなのか？ はたまた CDM モデルが予測するように銀河形成初期はまだ細かな小銀河片に分かれているからなのか？ この新たな大きな謎に答えるには、ダストの吸収光の再放射を遠赤外線領域で検出できるかどうか大きな鍵を握っている。観測の始まった

スペース赤外望遠鏡 ISO やサブミリメートル望遠鏡 SCUBA, 次世代の宇宙科学研究所のスペース赤外望遠鏡 IRIS などの活躍が期待される。

謝辞

本稿の半分は著者の博士論文が基礎になっている。その時の指導教官であった有本信雄東大助教授にお礼申し上げる。また共同研究者として特に世話になっている英国ケンブリッジ大のアラゴン-サラマンカ博士ならびに同ダーラム大のパウワー博士に心より感謝する。最後に、博士課程/ポスドクと経済的に支援して頂いている日本学術振興会の特別研究員/海外特別研究員制度に感謝する。

参考文献

- 1) Visvanathan N., Sandage A., 1977, ApJ 216, 214
- 2) Kodama T., Arimoto N., 1997, A&A 320, 41
- 3) Bower R.G., Lucey J.R., Ellis R.S., 1992, MNRAS 254, 601
- 4) Ellis R.S., et al., 1997, ApJ 483, 582
- 5) Aragón-Salamanca A., et al., 1993, MNRAS 262, 764
- 6) Stanford S.A., Eisenhardt P.R.M., Dickinson M., 1998, ApJ, 492, 461
- 7) Butcher H., Oemler A., 1984, ApJ 285, 426
- 8) Dressler A., et al., 1997, ApJ 490, 577
- 9) Larson R.B., Tinsley B.M., Caldwell C.N., 1980, ApJ 237, 692
- 10) Cole S., et al., 1994, MNRAS 271, 781
- 11) Kauffmann G., White S.D.M., Guiderdoni B., 1993, MNRAS 264, 201
- 12) Barnes J. M., Hernquist L., 1992, ARA&A 30, 705

- 13) Kormendy J., Djorgovski S., 1989, ARA&A 27, 235
- 14) Kauffmann G., Charlot S., 1997, preprint, astro-ph/9704148
- 15) Kodama T., et al., 1998, A&A, in press
- 16) Bower R.G., Kodama T., Terlevich A., 1998, MNRAS, submitted
- 17) Dickinson M., 1996, in Fresh Views of Elliptical Galaxies, ed. Buzzoni A., Renzini A., Serrano A., ASP Conf. Ser. Vol. 86, p. 283
- 18) Worthey G., 1994, ApJS 95, 107
- 19) Larson R.B., 1974, MNRAS 166, 585
- 20) Arimoto N., Yoshii Y., 1987, A&A 173, 23
- 21) Kauffmann G., 1996, MNRAS 281, 487
- 22) Barger A.J., et al., 1996, MNRAS 279, 1
- 23) Shimasaku K., Fukugita M., 1997, ApJ, submitted
- 24) Beers T.C., Flynn K., Gebhardt K., 1990, AJ 100, 32
- 25) Terlevich A., et al., 1998, MNRAS, submitted
- 26) Baugh C.M., et al., 1998, ApJ, in press
- 27) Steidel C.C., et al., 1996, ApJ 462, L17

The Colour-Magnitude Relation as a Constraint on Galaxy Formation in Clusters

Tadayuki Kodama

*JSPS Postdoctoral Fellow for Research Abroad
Institute of Astronomy, University of Cambridge,
Madingley Rd., Cambridge CB3 0HA, UK*

Abstract: Thanks to the Hubble Space Telescope and the large ground telescopes, the existence of strong correlation between colour and luminosity of early-type galaxies in clusters is now well established over the wide range of redshift out to ~ 1 . In this article, we present quantitative analyses of the evolution of the colour-magnitude relation as a function of look-back time using spectral synthesis models of galaxies. We reveal how the early-type galaxies has formed and evolved in cluster environment.