

# 超コンパクト矮小銀河の起源

戸次賢治

〈ニューサウスウェールズ大学物理学科 School of Physics, University of New South Wales, Sydney 2052, NSW, Australia〉  
e-mail: bekki@bat.phys.unsw.edu.au

最近の 2dF サーベイによるろ座銀河団の観測は、サイズが 300 光年以下の非常にコンパクトな新しいタイプの銀河を発見した。ウルトラコンパクト矮小銀河と呼ばれるこの銀河の基本的な物理的性質がハッブル宇宙望遠鏡などにより明らかにされつつある。本稿ではこれら最新の観測成果を簡単にまとめ、筆者らが提唱しているこの銀河の形成モデルを紹介する。

## 1. 宇宙で最も小さな銀河の物語

われわれは数千億の星々からなる銀河系に住んでいる。その銀河系の周囲のハローと呼ばれる領域には、約 10 万個の星々からなる球状星団が存在し、銀河系の周りを軌道運動している。銀河系とその近傍のアンドロメダ (M31) 銀河は局部銀河群を形成し、その中を 30 以上もの暗く小さな矮小銀河が軌道運動している。約 1 千万から 10 億の星々で構成されるこれらの矮小銀河は、宇宙の中で最も数の多い銀河のタイプである。最近の階層的銀河形成シナリオは、このような小さな銀河が衝突合体を繰り返し銀河系のような比較的大きな銀河が形成されると予想する。局部銀河群に存在する矮小銀河の数および光度関数、近傍矮小銀河の力学構造、回転曲線などは最新の銀河形成理論モデルを検証する上で非常に重要な物理量と考えられている。本稿の主役もこの矮小銀河である。

銀河や球状星団は自分自身の重力によって束縛された系である。これらの天体はその天体を構成する星々の乱雑な運動（速度分散）または回転運動によりその自己重力に抗し力学的平衡を保っている。これらの天体の光度と速度分散との間にはある一定の関係があること、およびその関係は楕

円銀河、渦状銀河、球状星団などでは大きく異なることが観測的に明らかになっている。例えば、楕円銀河の光度はその速度分散の約 4 乗に比例する（いわゆるフェイバー-ジャクソン関係<sup>1)</sup>）が、球状星団の光度はその速度分散の約 1.7 乗に比例する<sup>2)</sup>。このような力学構造パラメーターの間の相関関係の違いは一般的にそれらの天体の形成過程の違いに起因すると考えることができる。したがって銀河や星団の基本的物理量、例えば、光度、質量、有効半径（その半径の内側の光度が全光度の約半分になる）、中心の表面輝度、速度分散などの間の相関関係を観測的に見いだすことはそれらの天体の起源を論じる上で非常に重要であると考えられている。

矮小銀河は、矮小楕円銀河 (dE)、矮小球状銀河 (dSph)、矮小不規則銀河 (dIr) の大きく三つに分類される。矮小楕円銀河はさらに、銀河中心核を持つかどうかによって有核矮小（楕円）銀河 (dE, N)、無核矮小（楕円）銀河 (dE) に分類される。

これらの矮小楕円銀河は一般的にその中心表面輝度が明るい渦状銀河よりも 1 等級以上も暗く、その有効半径は数百パーセク（1 pc は 3.26 光年）から 1 kpc 程度である。一般的に表面輝度の非常に暗い銀河は、それがごく近傍にあっても銀河とは同定されにくい<sup>3)</sup>。また遠方にある非常にコンパ

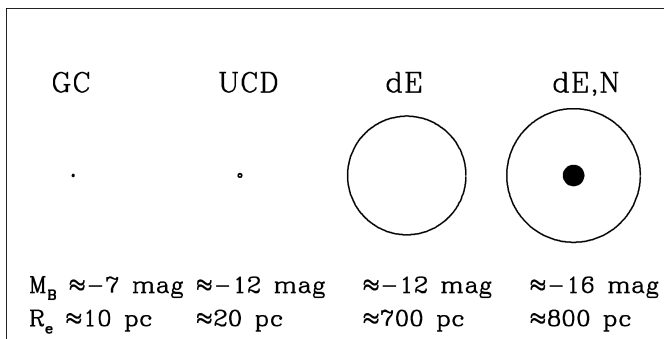


図 1 銀河と星団の大きさの比較. 左から球状星団 (Globular cluster; GC), 超コンパクト矮小銀河 (Ultra-compact dwarf; UCD), 無核矮小銀河 (Non-nucleated dwarf galaxy; dE), 有核矮小銀河 (Nucleated dwarf galaxy; dE, N). 1 pc は 3.26 光年を表し,  $M_B$ ,  $R_e$  はそれぞれ B バンド絶対等級 (mag), 有効半径を示す. 明るい矮小銀河ほど中心核をもつ傾向にある. 例えば  $M_B$  が  $-18$  等の矮小銀河の 80% は中心核をもつが,  $M_B$  が  $-12$  等の矮小銀河の 20% のみが中心核をもつ.

クトな銀河は, 銀河系内の星々と見かけ上区別がつきにくくなる<sup>3)</sup>. この二つの“選択効果”により, 銀河天文学者は正確な矮小銀河の数および種数を完全には把握していない. 局部銀河群においていまだに暗い矮小銀河の発見が相継ぐのは, これらの選択効果によるものと考えられる<sup>4),5)</sup>.

さてオーストラリアの 3.9 m アングロオーストラリア望遠鏡を用いた 2dF (Two Degree Field) サーベイが最近終了し, その成果に関する論文が多く出版された. 筆者の共同研究者の一人である Drinkwater 博士は, その 2dF サーベイによって得られたろ座銀河団方向にある天体 (恒星, 銀河) のすべての赤方偏移 (距離) を調べあげ, 従来の観測では銀河系の星々とみなされていた中の五つが実はろ座銀河団の距離に位置していることを発見した<sup>6)</sup>. これら五つの新天体はそのコンパクトさゆえに 6,000 万光年離れたろ座に位置してもほとんど点状にしか見えず銀河系内の星々と考えられていたのである. その後の観測によりこのコンパクトな天体は矮小銀河ほどの光度をもち, そのサイズが 100 pc 以下であることが解明された (図 1 に星団と矮小銀河とのサイズが比較されている). 21 世紀になって発見されたこの天体はそのコンパクトさゆえに Ultra-compact dwarf (UCD) と名づけられ, 新しい銀河のタイプと認識される

ようになってきている. 筆者のグループは 5 カ国から集まった 12 人の天文学研究者からなるとても小規模でコンパクトな集団ではあるが, ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) や大型地上望遠鏡 (Keck, VLT など) などの観測的成果と数値シミュレーションに基づく理論的成果とを比較検討することにより UCD の基本的性質の導出, 理解を目指している. 本稿ではこの新しいタイプの銀河に関する筆者の最新の成果を解説する.

## 2. 銀河? それとも巨大星団?

UCD は “The Fornax Cluster Spectroscopic Survey” (FCSS) という 2dF のファイバー分光器を用いたサーベイ観測によって発見された. この観測では, ろ座銀河団中心を囲む約 12 平方度の領域にある見かけの B バンド等級 (限界等級) が 19.8 等より明るい約 14,000 個の天体のすべての赤方偏移 (距離) が調べられた. それらの天体には銀河系の星々, ろ座銀河団銀河などが含まれていたが, 五つだけが, ろ座銀河団内に存在する “恒星状天体” であることが判明した. 見かけの等級とろ座銀河団までの距離とから, この “恒星状天体” (すなわち UCD) の B バンド絶対等級は  $-13$  等から  $-11$  等の範囲にあることがわかった<sup>6)</sup>. したがって UCD は最も明るい銀河系の球

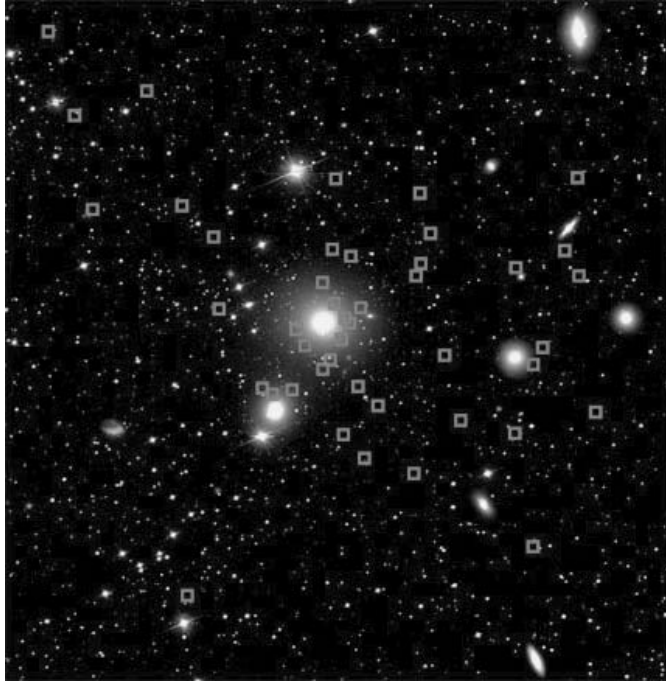


図 2 ろ座銀河団中心部での UCD の空間分布. 小さな四角が UCD の位置を示す. 銀河団中心には楕円銀河 (NGC1399) が位置している. 銀河団中心では UCD の数が楕円銀河や渦状銀河の数を圧倒している (Drinkwater 博士提供).

状星団 ( $\omega$  Cen) よりも 2 等級以上も明るく、比較的低光度の矮小銀河ほどの光度をもっていることになる. さらにこれら五つの UCD のすべてが銀河団中心から 200 kpc 以内に存在することも解明された. 以前の観測より 1 等級ほど暗い UCD の探査が最近行われ、新たに約 50 の UCD が発見された. 図 2 はそれら UCD の空間分布を示している. この図から UCD の分布は銀河団銀河の比較的明るい銀河の分布とは少々異なり、扁平な分布をしていることが見てとれる. また UCD の光度関数は球状星団、矮小銀河の光度関数とは大きく異なることが解明されている.

HST による撮像観測、および Keck, VLT による分光観測が行われ<sup>7)</sup>, UCD の力学構造に関する以下の 3 点が明らかになった. 第一に、UCD の有効半径は 10 pc から 30 pc 程度であり、その密度構造はキング分布で最もよく記述される. このキング分布は球状星団の密度分布を正確に表す分

布として知られ、指数分布が矮小銀河の密度構造をうまく記述すると観測されている. したがって UCD は構造的には矮小銀河よりも球状星団に類似しているといえる. しかし、UCD の有効半径が最も明るい球状星団の有効半径 (約 5 pc) の数倍程度あるという点では、UCD と球状星団は異なる. 第二に、UCD の有効半径内での速度分散は  $20 \text{ km s}^{-1}$  から  $40 \text{ km s}^{-1}$  程度である. 得られた UCD の速度分散から UCD の光度-速度分散関係を作ってみると (図 3), それは、球状星団の光度-速度分散関係とは大きく異なることが見てとれる. むしろ、UCD は楕円銀河の光度-速度分散関係の延長線上にあるとも見てとれる. 第三に、速度分散と有効半径から評価した UCD の質量はその光度の 2~4 倍程度である. この質量光度比は球状星団のそれ (1~2) の 2 倍程度であるが、(質量光度比が観測されている) 矮小銀河のそれ (~10) よりは数分の 1 と小さい.

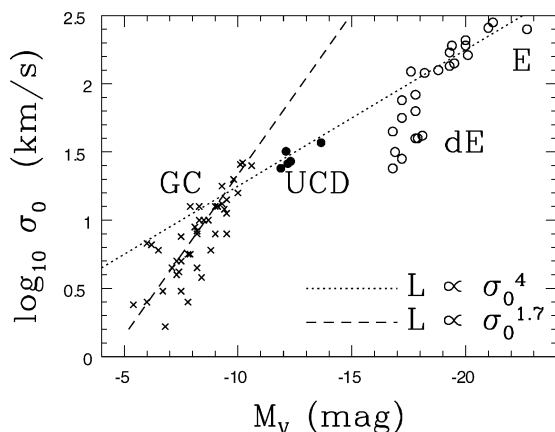


図3 球状星団 (GC), UCD, 矮小銀河 (dE), 楕円銀河 (E) の速度分散の絶対等級依存性. V バンド等級, 光度, 速度分散はそれぞれ,  $M_V$ ,  $L$ ,  $\sigma$  と表されている. 球状星団, 銀河団矮小銀河, 楕円銀河, UCD のデータなどは文献 2, 7, 26, 27 からのものである. 比較のため観測される楕円銀河, 球状星団の光度-速度分散関係がそれぞれ点線および破線で示されている.

このように, UCD は, そのサイズ, 光度, 質量光度比などの物理量が球状星団のそれとは異なる. また UCD は, その密度構造, サイズ, 質量光度比などの物理量が矮小銀河のそれとも異なる. 球状星団の多くは銀河の周りに存在するが, UCD は銀河団銀河に束縛されることなく銀河団そのものが作る重力ポテンシャルの中を運動しているようである. UCD の光度-速度分散関係は球状星団のそれとは異なり, むしろ巨大楕円銀河のそれに類似している. UCD の典型的なサイズ, 光度は有核銀河の中心核もしくは低光度渦状銀河の中心核のサイズ, 光度と同程度である. さて, このような観測事実を前にして天文学者はこの UCD を銀河とみなすか星団とみなすのか? UCD の発見によって銀河と星団の区別が以前ほど明確ではなくなったのである.

### 3. “脱穀” モデルの誕生

それではいったいこの特異な“銀河”はいった

いどうやってできたのであろうか? いくつか可能なモデルが存在するであろうが, 本稿では筆者らが提唱している“銀河脱穀” (Galaxy threshing) モデル<sup>8), 9)</sup>について詳しく議論したい. このモデルは UCD はかつては有核銀河の銀河中心核であったと予言する. この脱穀シナリオにおける UCD の形成過程は以下のとおりである. 銀河団の中を有核銀河が軌道運動するうちに銀河団の強い潮汐力が有核銀河の外側の星々を効率的にはぎ取り始める. 有核銀河のコンパクトな中心核は強い自己重力のため破壊されず, 最終的には銀河本体のみが選択的に破壊される. 残った“裸の中心核”が UCD として観測される. 稲穂から米を抜き取るように有核銀河からその中心核が抜き取られるのである. 矮小銀河中心核が球状星団になるというシナリオは約 15 年前に Zinnecker らによって提唱され<sup>10)</sup>, その後このシナリオは銀河系の巨大球状星団  $\omega$  Cen の起源を説明するモデルとして採用されている<sup>11)</sup>. 銀河脱穀モデルは基本的にはこの Zinnecker のアイデアと同じである. われわれの仕事は最も現実的な有核銀河の力学モデルを構築し, どのような物理的条件の場合に有核銀河が UCD に“変態”するのかを解明することにある. この仕事の本質は有核銀河の破壊過程を系統的に調べることであるゆえ, 数値シミュレーションが強力かつ不可欠な理論的道具になるのである.

筆者らの脱穀モデルでは, 有核銀河は, 暗黒物質 (ダークマター) で構成された広がったハロー, 星々で構成された有核銀河本体, および中心核の 3 成分からなると仮定される. 本稿では B バンド絶対等級が約 -16 等, ダークマターの質量が  $4 \times 10^9$  太陽質量 (質量光度比が 10 に相当), 中心核の質量が  $4.4 \times 10^7$  太陽質量の有核銀河の進化のみを紹介する. この銀河は約  $7 \times 10^{13}$  太陽質量をもつろ座銀河団の中を軌道運動すると仮定される. 図 4 は脱穀モデルに基づいた典型的な UCD の形成過程を示している. 有核銀河が銀河団中心



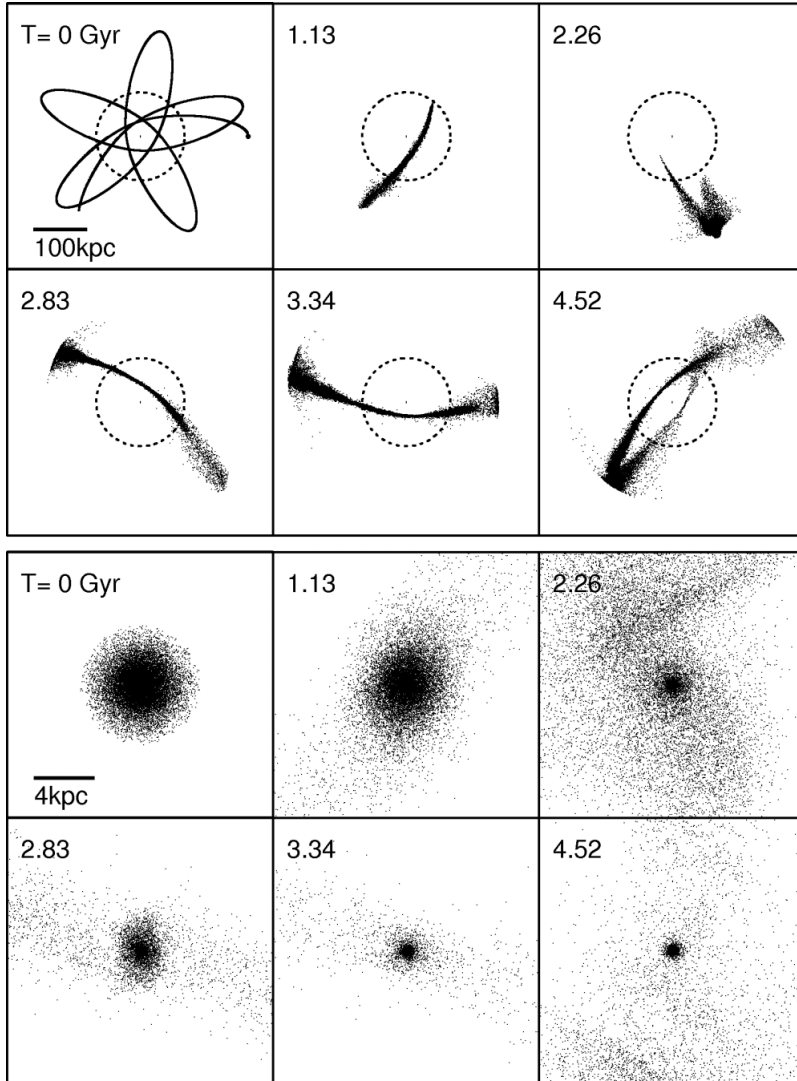


図 4 脱殻モデル数値シミュレーションによって得られた有核銀河が破壊される様子。上段各パネルの中心は銀河団中心に一致し、有核銀河の軌道運動がわかるように各パネルの枠を大きく (500 kpc) とってある。下段各パネルの中心は有核銀河の中心に一致する。各パネルの左上には経過した時間が Gyr (1 Gyr は 10 億年に相当) の単位で示されている。有核銀河の軌道が上図の時刻 0 ( $T=0$ ) のパネルに描かれている。上段、下段の時刻 0 のパネルにある棒はそれぞれ、100 kpc、4 kpc のスケールを表し、銀河団のコア半径が点線で上段の時刻 0 のパネル内に示されている。銀河本体の破壊される様子をより明確に示すため、粒子数の多いダークマター粒子はプロットしていない。

の密度の高いコアを通過するにつれ、銀河団の強い潮汐力は銀河の自己重力を上回り、その銀河を軌道方向に引き伸ばし始める。その結果、ダークマターハロー、銀河本体を構成する星々は銀河から効率的にはぎ取られる。この最初のコア通過に

より銀河は約 40% の質量を失い、自己重力による束縛が弱くなり、銀河団の潮汐作用をより強く受けるようになる。有核銀河は、2 度、3 度と銀河団中心部を通過するにつれ、暴走的にその質量を失い、最終的にはそのほとんどのダークマターハ

ローおよび本体をはぎ取られる。はぎ取られた星々は銀河団間空間にまき散らされるが、その多くが破壊された有核銀河の初期の軌道に分布する。銀河中心核はそのコンパクトさゆえ破壊されず、最後まで自己重力によって束縛された恒星系として生き残る。この生き残った銀河中心核は銀河団間空間をさまよう UCD として観測される。有核銀河の軌道にもよるが、この脱殻モデルによる UCD の形成タイムスケールは数十億年程度である。

このように形成された UCD は、その母銀河のダークマターハローの大部分を失うため、小さな質量光度比をもつようになる。また、有核銀河破壊過程において中心核はせいぜい 10% の質量しか失わない。したがって形成された裸の中心核（すなわち UCD）の質量は、母銀河が破壊される前の中心核質量とほぼ同程度 ( $4 \times 10^7$  太陽質量) である。中心核の速度分散は有核銀河破壊過程においてほとんど変化せず ( $\sim 20 \text{ km s}^{-1}$ )、形成された UCD の有効半径は 20 pc 程度である。これらの結果は脱殻モデルにおいて形成された UCD の物理的性質が前述した UCD の観測的成果と整合的であることを意味する。また筆者らの系統的なパラメーターサーベイにより以下三つの UCD 形成条件が解明された。第一に、銀河団中を軌道運動する有核銀河の軌道離心率は 0.7 以上でありその軌道のペリセンター（銀河と銀河団中心との間の最接近距離）が 50 kpc 程度以下である必要がある。これは銀河団の潮汐作用の強い銀河団中心部を通過する有核銀河のみが UCD に変態できることを意味する。第二に、比較的明るい有核銀河（B バンド絶対等級が  $-16$  より明るい銀河）のみが UCD に変態可能である。銀河中心核の明るさは典型的にはその母銀河の明るさの 2% である<sup>12, 13)</sup>。したがって暗い有核銀河から裸の中心核が形成されてもその光度は観測される UCD の光度とは整合的にはならない。第三に、UCD はより質量の大きな銀河団でより形成されやすい。銀

河団自身の物質分布が銀河団の質量にそれほど強く依存しないとすると、その潮汐力の強さはより重い銀河団ほど強くなる。したがって銀河群や小さな銀河集団の中では UCD は形成しにくくなるであろう。

#### 4. 銀河中心核の形成過程

脱殻モデルは、数十億年以上もの昔には UCD は有核銀河の中心核であったと予言する。それではその有核銀河の重々しい中心核そのものはいったいどのようにできたのであろうか？ この問題は 1970 年代にすでに Tremaine ら<sup>14)</sup>によって議論され、高密度な銀河中心核は多くの高密度星団の合体によって形成されるという基本的アイデアが提案された。当然のことながら 1970 年代当時には系外渦状銀河の中心核に関する（HST などによる）観測結果、UCD の観測結果は存在しなかったため、このアイデアに基づく銀河中心核形成の詳しい理論的研究はつい最近まで行われなかった。21 世紀を生きるわれわれは、このような基本的アイデアがどれほど最新の観測成果を説明するのかを数値シミュレーションなどを用いて検証する必要がある（まさに温故知新である）。特に HST や Keck などの最新観測成果から明らかにされた銀河中心核や UCD の物理量間の相関関係（例えば速度分散と光度の比例関係など）を理論モデルによって説明を試みることは重要なことである。本稿では、上記の星団合体による銀河中心核形成モデルに焦点を当てる。

矮小銀河はその明るさに比べ星団の数が非常に多い<sup>15)</sup>。一般的に比較的明るい矮小銀河の単位光度あたりの球状星団の数は渦状銀河のその 5 倍程度であり、これは銀河団楕円銀河のそれに匹敵する。例えば B バンド絶対等級が  $-16$  等の矮小銀河は約 20 個の球状星団をもちうる。また矮小銀河はその速度分散が非常に小さいため、星団と銀河の間の力学的摩擦 (Dynamical Friction) が効率よく働き、星団はその力学的摩擦のため力学エ

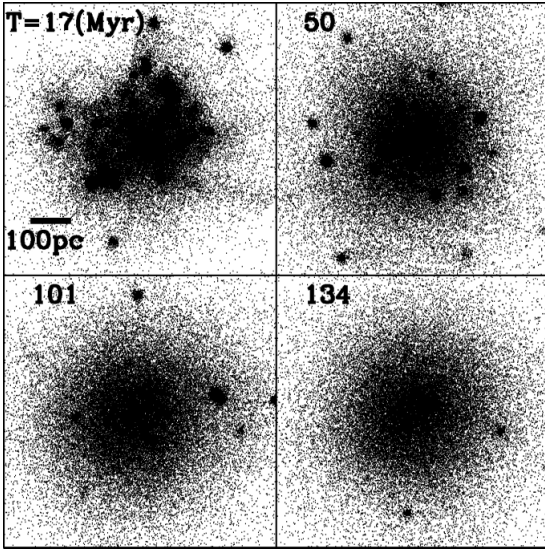


図 5 約 100 の小さな星団の合体により銀河中心核が形成される様子. 各パネルの左上には経過した時間が Myr (1 Myr は 100 万年に相当) の単位で示され, 左上パネル内にある左下の棒は 100 pc のスケールを表す. 最初は星々の分布は非常に不均一であるが, 星団の合体が繰り返されるに従い, 徐々に球状の大きな中心核が形成されていく.

エネルギーを失い銀河中心に落下する. 星団の質量にもよるが, 銀河中心数百 pc 以内にある星団は 1 億年から 10 億年のタイムスケールで銀河中心に落ち込む. 銀河中心では外側からのガスの流入により爆発的星形成が起こりそれに伴い多くの若い球状星団が形成することが観測的, 理論的に示唆されている<sup>16)~19)</sup>. このような矮小銀河の物理的状況を考慮すると, 矮小銀河中心部では多くの星団が合体衝突を繰り返し, より大きな星団が形成されることが容易に想像できる. 特に銀河形成初期の, 若い星団が多く生まれている銀河中心部では, 星団の合体により巨大銀河核が生まれやすいであろう.

図 5 は約 100 の星団の合体による銀河中心核形成過程を示している<sup>20)</sup>. この力学モデルでは現実的な球状星団の光度関数, サイズ分布, 光度-速度分散関係などを考慮している. この図から小さな

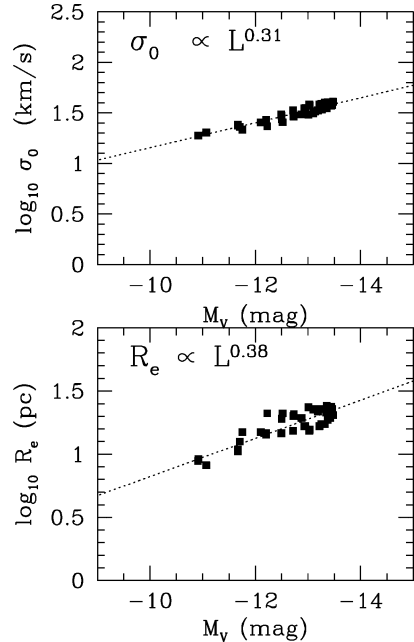


図 6 星団合体モデルによって形成された銀河中心核の光度 ( $L$ ) と速度分散の相関関係 (上) および光度と有効半径の相関関係 (下). 各モデルの速度分散 ( $\sigma_0$ ) および有効半径 ( $R_e$ ) が B バンド絶対等級 ( $M_B$ ) に対して四角で示されている. 各パネル内の点線は最小 2 乗法で最適フィットされた相関関係を示し, 各パネル左上にはその簡単な関係式が表記されている.

星団が次々と衝突合体し, より大きな恒星系を形成していく様子が見てとれる. このようにして形成された銀河中心核には果してどのような構造パラメーター間の相関関係があるのでしょうか? 図 6 は, 数値シミュレーションで形成された銀河中心核の光度 (B バンド絶対等級;  $M_B$ ), 有効半径 ( $R_e$ ), 速度分散 ( $\sigma_0$ ) などの相関関係を示している. 形成された銀河中心核がもつ相関関係は小さな星団がもっていたオリジナルの相関関係とは異なったものとなる. 例えばシミュレーションで形成された中心核の光度はその速度分散の約 3 乗に比例するが球状星団モデルの光度はその速度分散の 1.7 乗に比例する. 得られた相関関係が観測と整合的であるかどうかの確認は今後の課題である

が、UCDの観測成果に関する限り、上記シミュレーションの結果は観測事実と定性的には整合する。この星団合体による銀河中心核形成は可能な銀河中心核形成モデルの一つにしかすぎないことを強調しておきたい。エネルギー散逸を伴った星間ガスの中心核への流入により一気に銀河中心核が形成される可能性がある。この可能性についての議論は本稿では割愛することにする。

## 5. 銀河団間恒星状天体の世界

UCDは銀河団銀河の重力よりも銀河団そのものが作る重力に強い影響を受け軌道運動していると考えられている。このような銀河団銀河に束縛されず、銀河団間を“さまよう”天体をここでは銀河団間恒星状天体 (Intracluster stellar objects) と呼ぶことにする。2003年のシドニーで開かれた国際研究会“銀河間及び星間物質のリサイクリング”(IAU217)では、この銀河団間恒星状天体の起源が一つの大きなテーマであった。この分野は比較的新しいが、いくつかの銀河研究グループが銀河団間空間に潜む球状星団、惑星状星雲、赤色巨星、星形成領域(HII領域)などを発見し、その物理的性質を詳しく調べ始めている<sup>21)~25)</sup>。銀河系の周辺に薄く広がったハローは主に古い星々で構成され、その星々の力学構造、金属量分布、速度場を解明することが銀河系そのものの形成過程の解明につながると考えられている。同様に、銀河団間に薄く広がって存在する銀河団間恒星状天体は銀河団銀河の進化を解明する上で重要な天体であると現在では考えられている。銀河団では小さな銀河はより大きな銀河と相互作用をし、時にはその潮汐力により破壊され、その破壊された星々が銀河団間恒星状天体となる。また比較的銀河の外側に位置する球状星団は、銀河団自身の強い潮汐作用を受けその母銀河からはぎ取られ、銀河団間空間にまき散らされ、最後には銀河団間恒星状天体になる。したがって、銀河団間恒星状天体の物理的性質を解明することは銀河団における

銀河相互作用、銀河-銀河団間相互作用の歴史を紐解くことにつながる。

脱殻モデルの記述するように有核銀河の破壊によってUCDが形成されるのであれば、銀河団間空間にはその破壊によって形成された“潮汐尻尾”(Tidal tails)が存在するはずである。この長く引き延ばされた“尻尾”は主に金属量の小さい古い星々から構成され、その表面輝度はB等級で26~30等級/平方秒程度である。したがってこの“尻尾”は銀河団間恒星状天体で構成されたサブストラクチャーとして銀河団間空間に観測されるであろう。矮小銀河には光度と金属量との間に強い相関関係があるので、そのサブストラクチャー内にある星々の金属量から破壊された有核銀河の質量や光度を推測できる。脱殻モデルは有核銀河の軌道離心率がかなり大きい(0.7程度)ときのみUCDが形成されると予想する。したがってすべてのUCDが銀河脱殻過程によって形成されるならば、(ある銀河団内の)UCD種族の視線速度のばらつきが小さくなり、これはUCD種族の小さな速度分散として観測される。銀河団内にあるUCDの銀河団中心に対する視線速度を調べ、その速度分散、平均などを調べることによって脱殻モデルの検証ができるのである。55個のUCDに関する最新の分光観測は、ろ座銀河団のUCD種族の速度分散は他の明るい銀河のそれに比べかなり小さいことを明らかにした。この観測事実は定性的には脱殻モデルと整合的であるが、定量的に説明できるかどうかは今後の課題となっている。UCDに限らず、他の銀河団間恒星状天体に関する観測的研究は今後大きく進展するであろう。

## 6. 黎明期の終わりに

現在のUCDをめぐる研究状況は1970年代の巨大楕円銀河をめぐるそれに類似している。1970年代には銀河形成を論じる上で重要な色光度関係およびフェイバー-ジャクソン関係が発見され、その起源は1970年代から現在に至るまで多くの



天文学者によって議論されてきた。21世紀を迎え新しいタイプの銀河UCDが発見され、そのUCDの基本的物理量（例えば、色、光度、速度分散、表面輝度など）の間の相関関係が今明らかになりつつある。そこで最後にUCDに関する未来の重要課題を筆者なりに以下にまとめる。第一の課題はUCDの詳細な形態、力学構造の観測的解明とその理論的説明である。UCDの形態、詳細な内部力学構造に関する観測データはまだ得られていない。したがって、UCDが銀河系やM31に存在する巨大球状星団G1や $\omega$  Cenのように扁平な形をしているのかなどはまだよくわかっていない。またKeckによる分光観測によって有効半径内の（平均の）速度分散は得られたが、UCDが主に速度分散で支えられているのか回転で支えられているのかはまだよくわかっていない。星団合体モデルはサブストラクチャーをもち回転によって扁平な形をしているUCDも存在すると予言する。将来のHST ACSなどによるUCDの高精度な測光観測などはこれら理論モデルの予言を確認もしくは否定することになるであろう。

第二の課題はUCDの数、光度関数の環境依存性である。今までのところ座銀河団と乙女座銀河団に対してUCD探査が行われたのみである。局部銀河群にはUCDは存在しないが、UCDが銀河群などの比較的小さな銀河集団には一般的に存在しないのかはまだよくわかっていない。UCDの数と光度関数が銀河団ごとに異なるのか、またそれらが銀河団の大局的な物理量（例えばX線の強さなど）と相関しているのかなどもわかっていない。UCDの発見には多天体分光器による銀河団および銀河群の系統的な大規模サーベイが不可欠である。将来のこのようなサーベイがUCDの宇宙における“居住地域”を教えてくれるであろう。第三の課題はUCDを構成する星々（星種族）の年齢、金属量の評価である。UCDはどれくらい昔に生まれたのか、2次的なスター

バーストを経験したのか、明るいUCDほど金属量が大きいのか、といった基本的な問題はまだ解決されていない。これらの問題は巨大楕円銀河形成を議論する上で非常に重要であったが、UCD形成を議論する上でも重要である。現存の8~10 m級の大型望遠鏡によるUCDの星種族の年齢、金属量の測定は、UCDがかつては矮小銀河の中心部で形成、成長してきたという観測的証拠を明示する可能性がある。

UCDの研究は黎明期を経て興隆期を今迎えようとしている。今年度中にはHST ACSの観測によりUCDの密度構造、色勾配に関するデータが得られる予定であり、UCDの形成過程に関して観測的に強い制限が与えられるであろう。またVLT FLAMESによるUCDの分光観測はUCDを構成する星々の金属量、年齢に関する貴重なデータをもたらすであろう。GEMINIを用いたろ座銀河団の銀河団間恒星状天体に関する研究は銀河団の重力場によって破壊されたUCDの親銀河の痕跡を発見するかもしれない。筆者のグループによる銀河中心核の形成に関する大規模かつ系統的な数値シミュレーションは巨大星団形成の詳細のシナリオを描き出すであろう。UCDは巨大ブラックホールをもっているのか？UCDの数や光度関数は時間とともに進化するのか？UCDの形態は進化するのか？次世代大型望遠鏡による近傍および遠方のUCDの観測的研究がこれらの基本的な問いに答を出してくれるだろう。宇宙で最も暗く小さな銀河の未来はどうやらかなり明るいようである。

## 謝 辞

この研究はオーストラリアの2dFグループとの共同研究です。特に筆者との議論に毎日のように付き合っていたいただいたW. Couch教授（ニューサウスウェールズ大学）に感謝します。またUCD形成に関する貴重なコメントをしていただいたK. Freeman教授（マウントストロモ天文

台), D. Forbes 教授 (スインバーン大学), M. Drinkwater 博士 (クインズランド大学) に感謝します。また図の掲載を許可して下さった, M. Drinkwater 博士および A. Karick さん (メルボルン大学) に感謝します。銀河進化全般の議論に付き合っていたいただいた千葉柁司教授 (東北大), 塩谷泰広博士 (東北大) に感謝します。本研究の数値シミュレーションは国立天文台解析計算センターの GRAPE システム上で実行されました。

### 参考文献

- 1) Faber S. M., Jackson R. E., 1976, ApJ 204, 668
- 2) Djorgovski S. G., et al., 1997, ApJ 474, L19
- 3) Disney M. J., 1976, Nature 263, 573
- 4) Armandroff T. E., et al., 1998, AJ 116, 2287
- 5) Martin N. F., et al., 2004, MNRAS 348, 12
- 6) Drinkwater M. J., et al., 2000, PASA 17, 227
- 7) Drinkwater M. J., et al., 2003, Nature 423, 519
- 8) Bekki K., Couch W. J., Drinkwater M. J., 2001, ApJ 552, L105
- 9) Bekki K., et al., 2003, MNRAS 344, 399
- 10) Zinnecker H., et al., 1988, Globular cluster systems in Galaxies, ed. Grindlay J. E., Davis Philip A. G., Dordrecht, Kluwer, p. 603
- 11) Bekki K., Freeman K. C., 2003, MNRAS 346, L11
- 12) Freeman K. C., 1993, in The globular clusters-galaxy connection, ed. Graeme H. Smith, and Jean P. Brodie, ASP Conf. ser. 48, p. 608
- 13) Binggeli B., Sandage A., Tammann G. A., 1985, AJ 90, 1681
- 14) Tremaine S. D., Ostriker J. P., Spitzer L. Jr., 1975, ApJ 196, 407
- 15) Harris W. E., 1991, ARA & A 29, 543
- 16) Holtzman J. A., et al., 1992, AJ 103, 691
- 17) Whitmore B. C., Schweizer F., 1995, AJ 109, 960
- 18) Bekki K., Couch W. J., 2001, ApJ 557, L19
- 19) Bekki K., et al., 2002, MNRAS 335, 1176
- 20) Bekki K., et al., 2004, submitted to ApJL
- 21) Arnaboldi M., 2003, preprint (astro-ph/0310143)
- 22) West M. J., et al., 2004, Nature 427, 31
- 23) Bassino L. P., et al., 2003, A & A 399, 489
- 24) Gregg M. D., West M. J., 1998, Nature 396, 549
- 25) Ryan-Weber E., Webster R., Bekki K., 2003, in The IGM/Galaxy Connection: The Distribution of Baryons at  $z=0$ , ASSL Conference Proceedings, Vol. 281. ed. Rosenberg J. L., Putman M. E., Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 223
- 26) Drinkwater M. J., Gregg M. D., 1998, MNRAS 296, L15
- 27) Geha M., Guhathakurta P., van der Marel R. P., 2002, AJ 124, 3073

### Origin of Ultra-Compact Dwarf Galaxies

Kenji BEKKI

*School of Physics, University of New South Wales, Sydney 2052, Australia*

Abstract: Recently a new type of sub-luminous and extremely compact dwarf galaxy has been discovered in an all-object 2dF spectroscopic survey centred on the Fornax Cluster. Physical properties of these ultra-compact dwarf (UCD) galaxies are now being investigated extensively by the Hubble Space Telescope (HST) and large ground-based telescopes. I here present a brief summary of recent observational results of UCDS and introduce our new theoretical model of UCD formation.