

銀河中心ブラックホール連星と楕円銀河のコアの形成

戎崎 俊一

〈東京大学教養学部宇宙地球科学教室 〒153 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

牧野 淳一郎

〈東京大学教養学部情報図形科学教室 〒153 東京都目黒区駒場 3-8-1〉

中心に巨大ブラックホールを持つ銀河どうしの合体の重力 N 体シミュレーションを行ない、合体後の銀河の構造を調べた。ブラックホールは周りの星による力学的摩擦を受けて合体銀河の中心に落下し、ブラックホール連星を作る。これが周りの粒子を弾き飛ばして、密度カスプを破壊し、密度分布を平坦化させることがわかった。最近の研究によると、楕円銀河は実は単一の種ではなく、円盤を持ち速く回転するレンズ状銀河と、円盤を持たずほとんど回転していない真性楕円銀河の二つに分けられる。ハッブル宇宙望遠鏡による、おとめ座銀河団の中の楕円銀河のコアの観測は、真性楕円銀河の構造は、上のシミュレーションで得られたのと良く似た（平坦化しているが、完全には平坦ではない）密度分布を持つことを明らかにした。このことは真性楕円銀河がブラックホールを持った銀河同士の合体でできたことを示している。

1. はじめに

楕円銀河が銀河同士の合体で作られたと考える合体仮説は、1972 年に Toomre and Toomre によって提案された¹⁾。その拠り所となったのは、数値シミュレーションによって作った合体後の銀河の動径輝度分布が楕円銀河のド・ボークルール則によく似ているという事実だった。このことは、その後の精度が高い N 体シミュレーションや解析的な考察でも確かめられている。また、楕円銀河にシェルやリップルなど合体の名残と思われる構造が発見されたことや、衝突・合体したと思われる銀河の輝度分布が確かにド・ボークルール則に従っていることなど合体仮説を支持する証拠が現れた²⁾。

しかし、問題は楕円銀河に観測されているコア半径と光度（または、銀河全体の大きさ）の関係である。ハッブル宇宙望遠鏡以前の Lauer や Kormendy による地上観測では楕円銀河は、中心に輝度が平坦になった部分（コアと呼ぶ）を持ってい

るとされていた。さらに、コア半径 r_c （中心輝度の半分の輝度を持つ場所の半径で定義する）の大きさは銀河全体の大きさ（有効半径：全光度の半分の光度が入っている半径）にほぼ比例していることが観測で示されていた^{3,4)}（図 1）。

Carlberg は次のような議論でこの正の相関が合体仮説と矛盾すると主張した⁵⁾。銀河のような

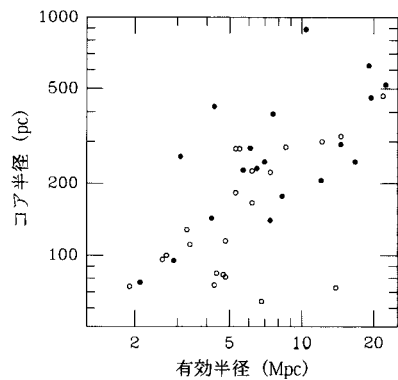


図 1 楕円銀河の有効半径とコア半径の相関。両者の間に比例関係がある。黒丸は、観測精度が良いもの、白丸は悪いものを表す。Lauer et al. 1985 より

無衝突系ではリップル定理が成り立つので、合体が起こっても、中心の位相密度

$$f_c = \alpha 1/r_c^2 \sigma_c^2 \quad (1)$$

が保存される。ここで σ_c は中心での星の速度分散である。合体の過程で f_c は保存し、しかも Faber-Jackson 関係にしたがって σ_c が少し増加するのでコア半径が少し減少するはずである。実際、N 体シミュレーションの結果はこの議論の結果と一致した。もし、もともと、正の相関を持って銀河が生まれても、合体を繰り返すにつれて相関が消えてゆくはずだというわけである。

しかし、銀河の中心には $10^8 M_\odot \sim 10^9 M_\odot$ の巨大ブラックホールが存在している。例えば、おとめ座銀河団の中心にある巨大銀河 M 87 の中心には、約 $2.4 \times 10^9 M_\odot$ の質量を持つブラックホールが存在していることが、ハッブル宇宙望遠鏡の観測で確かめられたのは記憶に新しい。また、活動的銀河核の中心エンジンは $10^7 \sim 10^8 M_\odot$ の質量を持つブラックホールであると信じられている。

これらのブラックホールの質量は、典型的な楕円銀河のコアの質量と同程度である。したがって、中心に巨大ブラックホールを持った銀河同士が合体する時、コアの力学的構造の変化は中心ブラックホールがない場合とはかなり違うはずである。

中心に巨大ブラックホールを持った銀河同士の合体は Begelman, Blandford, and Rees によって詳しく研究された⁶⁾。彼らによると、合体後巨大ブラックホールは銀河の中の恒星による力学的摩擦によって急速に角運動量とエネルギーを失い、銀河の中心に落ち込んでブラックホール連星をつくる。

このブラックホール連星は力学的摩擦のせいでお互いに次第に近づいていく。また、その反作用でコアの粒子は弾き飛ばされる。このブラックホール連星の軌道進化とその反作用による銀河中心コアの進化を調べるため、私たちは重力多体問題専用計算機 GRAPE による大規模な N 体シミュレーションを行なった。

このようなブラックホール連星がお互い十分に近づいた時に、重力波バーストを放出しつつ合体するかどうかについても議論が続いている。しかし、本稿では紙面の都合で、銀河中心ブラックホール連星が銀河コアの力学的構造に与える影響についてだけ述べる。ここでは、ブラックホールは母銀河の合体後まもなく合体するとして議論を進める。銀河中心ブラックホール連星そのものの進化については機会を改めて書きたい。

2. シミュレーション

まず、個々の銀河は 15872 個の粒子（フィールド粒子）で表現する。これらの粒子を無次元ポテンシャルパラメータ $W_c=5$ のキングモデルにしたがって配置した後、中心に銀河全体の質量の $1/32$ （フィールド粒子の 512 倍）の質量を持つブラックホール粒子を置いた。この系が力学的な平衡状態に達するのを待ってから、再接近距離が銀河の半質量半径の $2/3$ の軌道に乗せて衝突させた。このような衝突パラメーターが小さい衝突では銀河は最初の遭遇で合体する。

この系と現実の銀河とを比べてみよう。ブラックホールの軌道進化とコアの構造の進化はブラックホールとフィールド粒子との力学的摩擦によって進む。ブラックホールの力学的摩擦による加速度 a_{df} はチャンドラセカールの表式に従うと

$$a_{df} = - \left(1 + \frac{m_f}{m_{BH}} \right) \frac{4\pi G^2 \rho_f \ln \Lambda}{V^2} \quad (2)$$

で与えられる。ここで、 m_{BH} はブラックホール粒子の質量、 m_f はフィールド粒子の質量、 ρ_f はフィールド粒子の密度、 V はブラックホール粒子とフィールド粒子の相対速度である。 $m_{BH}/m_f = 10^{7-9}$ の現実の銀河と比べても、 $m_{BH}/m_f = 512$ の私たちのモデルは、力学的摩擦による加速度が 0.2% 程度しか変わらないはずである。つまり、力学的摩擦によるブラックホールの軌道の縮小とそのフィールド粒子に対する反作用の効果は正しく採り入れられている。ただし、私たちのモデルでは v_{BH}/v_f

$\sim \sqrt{m_j/m_{BH}}$ となると、ブラックホール粒子はフィールド粒子との衝突によるブラウン運動で、それ以上ブラックホール連星軌道が縮まない。これは、質量比が1/512と現実より大きいことによる計算誤差である。このようなブラウン運動が目立つようになってところでシミュレーションを打ち切った。

また、現実の銀河ではコアに含まれる質量は銀河全体の1000分の1程度であるのに対して、私たちのモデルでは30分の1程度である。これについては銀河の中心領域だけを取り出して計算したと考えてほしい。計算領域の外の密度が低い広がった成分は、密度が高い中心部分にほとんど影響を与えないと考えられる。

合体でできた銀河のブラックホール粒子は合体させて一つにまとめ、他のフィールド粒子は偶数番のものだけを取り出してコピーし、新しい銀河を二つ作る。これを再度衝突させた。このような階層的な衝突を4回繰り返した。また、比較のためブラックホールを入れないシミュレーションも同様に行なった。

3. 結 果

図2は中心ブラックホールを含んだ銀河の合体後の密度分布である。この場合、密度分布の形は何度衝突してもほとんど変わらない。つまり、相似性が保たれている。合体が階層的に進むにつれて、銀河の大きさ（有効半径）は増大するが、それに比例して、コア半径も増大する（図3）。一方、ブラックホールを含まない銀河の合体後の密度分布は相似性を保たない。理論の予測どおり、銀河のコア半径は合体が進んでもほとんど増加しないので、銀河の有効半径に対して相対的に小さくなる（図4）。図3を図1に比べてみよう。ブラックホールを含んだ銀河の多重合体を考えると観測された有効半径とコア半径の関係に近い関係を作り出すことが可能である。

では、密度分布そのものを観測と比較してみよ

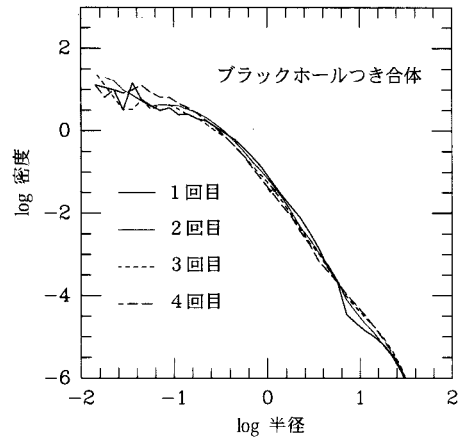


図2 合体銀河の密度分布 (BH つき)。相似性が保たれる。

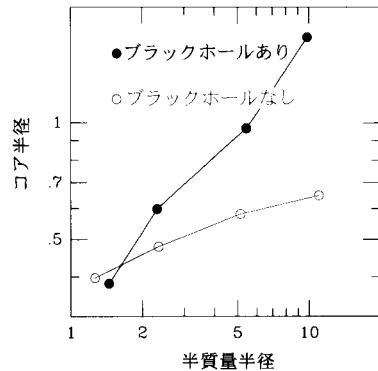


図3 合体銀河のコア半径と半質量半径の関係、BHがあると両者は比例するが、BHがないとそうはならない。

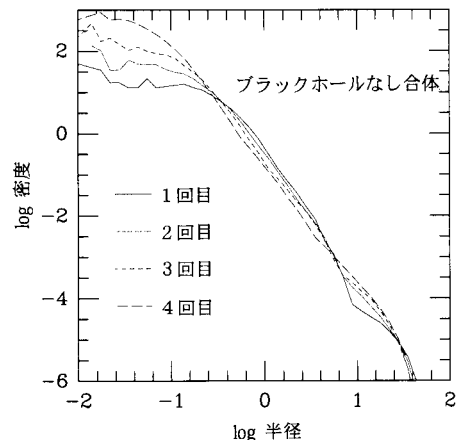


図4 合体銀河の密度分布 (BH なし)。相似性が保たれない。

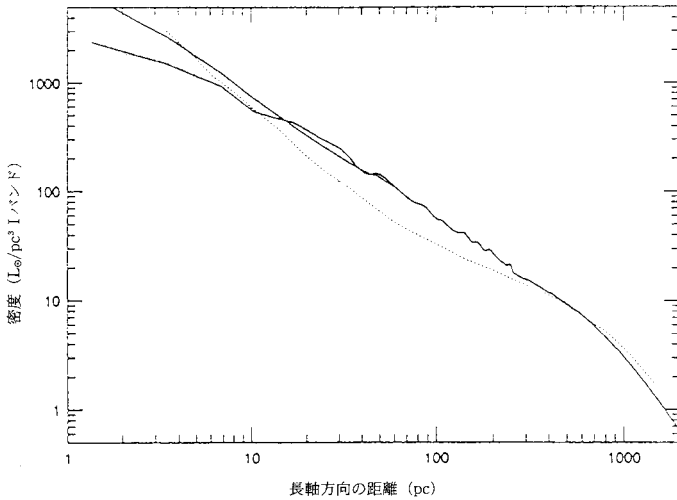


図5 楕円銀河 M87の中心部の三次元輝度分布。2つの実線は観測値と指数 -0.26 のべき関数モデルを表す。点線が断熱モデル。Lauer et al. 1992より。

う。図5は巨大銀河 M 87 で観測された輝度分布から球対称性を仮定して求めた星の光の光度分布を表している。中心の非熱的な点源の寄与は差し引いてある⁷⁾。この分布は中心から 1000 pc の場所より外は指数 -2 程度のべき関数で、中心から 300 pc の場所より内側では分布が平坦化するが完全には平坦にはならず、指数 -0.3 程度の弱いべき関数で表される。図5には中心に $2.6 \times 10^9 M_{\odot}$ のブラックホールが存在する断熱モデルの密度分布が点線で表されている。このモデルでは輝度分布は完全に平坦なコアの中に断熱的に（コアの力学的な時間に比べてゆっくりと）中心ブラックホールが成長したと仮定して作られている。これまで、ブラックホールを持つ銀河中心コアの星の分布はこの断熱モデルでフィットされてきた。しかし、断熱モデルでは、ブラックホールの重力が支配的になっている領域では、星の密度分布の傾きが再び急にならなければならない。

一方、合体モデルでは、ブラックホール連星の形成により、星が弾き飛ばされるので、カスプが破壊される。その結果、星の分布は断熱モデルが予想するものとは違うものになる。シミュレーションの結果を見ると、合体後の密度分布は二つの

べき関数で表され、外側では指数 -2 程度、ある半径より内側では平坦化されて、指数 -1 程度になっている。これは、M 87 の中心部の値より少し小さいが、精度を考えるとよく一致していると考えられる。つまり、ブラックホール付の合体では、M 87 で観測された密度分布に近い密度分布が自然に作られる。この一致は、M 87 がブラックホール付きの銀河の合体で作られたことを示している。M 87 はおとめ座銀河団の中心に位置する cD 銀河的な銀河で、銀河の合体で作られたと広く信じられている。

4. 二種類の楕円銀河

最近の詳しい研究によると、現在の楕円銀河は真性楕円銀河とレンズ状銀河の2種類に分類できる^{8,9,10,11)}。

真性楕円銀河は比較的大きくて明るく ($M_t < -20$)、円盤がなく、回転していたとしても、ゆっくりである ($V_m/\sigma_c < 0.2$: ここで V_m は最大回転速度、 σ_c は中心での速度分散)。また、X線や電波が強く、中心核の活動性が高い。一方、レンズ状銀河は比較的小さくて暗く ($M_t > -21$)、大なり小

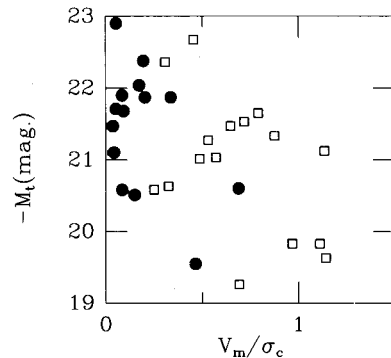


図6 楕円銀河の V_{\max}/σ_c と絶対等級の平面上での分布。白い四角はレンズ状銀河、黒い丸は真性楕円銀河を表す。Bender 1988より

なり円盤を持っていて、速く回転している ($V_m/\sigma_c=0.5\sim 0.7$)。レンズ状銀河は S0 銀河と連続的につながる一つの銀河種族を構成する。楕円銀河を V_m/σ_c と絶対等級 (M_i) の平面上でプロットしてみると、真性楕円銀河とレンズ状銀河がかなりかなりはっきり分離する (図 6)。

ハッブル宇宙望遠鏡によるおとめ座銀河団の中の銀河のコアの構造の解析結果が最近報告された^{9,10,11)}。その結果、コアの性質も真性楕円銀河とレンズ状銀河でははっきりと違うことが分かった。真性楕円銀河は M 87 のように輝度分布が中心で平坦化している。ただし、以前から考えられていたのとは違って完全には平坦にはならない。この平坦化した部分を「コア」と呼ぶことにしよう。このコアはブラックホールつきの銀河合体の結果できたブラックホール連星が作ったのだと考えられる。

指数が変わる折れ曲がりの半径をコア半径と考えて有効半径に対してプロットするとほぼ比例関係があることがわかった。これは Lauer や Kormendy が地上観測で発見したコア半径と有効半径の相関は、真性楕円銀河についてのみ成立すると考えられる。実際、ハッブル望遠鏡で観測された 4 つの真性楕円銀河ではコア半径が有効半径に

ほぼ比例していることがわかる (図 7)。

これに対し、レンズ状銀河のコアの輝度分布はほぼ単一のベキ関数で表すことができる。つまり、コアのような構造は存在しない。その代わり、外の大きな円盤とは力学的には独立の小さな円盤が存在することが多い。これらの銀河の中心にも多分ブラックホールが存在しているかも知れない。しかし、ブラックホールつき合体を経験していないので、ブラックホール形成の名残である、密度カスプや小円盤が残っていると考えられる。

これらの二種類の楕円銀河の違いは、ブラックホールつきの合体を経験しているかどうかで説明できる。真性楕円銀河の密度構造は、この種の銀河が中心ブラックホールを持ったほぼ同じ大きさの銀河の衝突で作られたことを示している。実際、これらの真性楕円銀河の多くは、銀河団の中心近くにある cD 型または cD 型に近い銀河で、銀河団の中の銀河がたくさん衝突合体してできたものと広く信じられている。銀河団の中心部のような銀河同士の相対速度が大きい環境では、合体でゆっくり回転する銀河が作られ易い¹³⁾。

これに対し、レンズ状銀河は中心ブラックホールをもった合体を経験していないと考えられる。このため、もともと存在する密度カスプや、ブラックホール形成の名残の小円盤がそのまま残っているのであろう。

ほとんどのレンズ状銀河が速く回転している事実はこれらのレンズ状銀河の前身がほぼ同程度の銀河 2 つがお互いの周りを公転する連銀河だと考えると説明できる。このような連銀河は粒子を巻き散らしながら角運動量とエネルギーをゆっくり失って次第に軌道が小さくなり、最後に近づき過ぎて、力学的な不安定を起こして一気に合体する^{13,14)}。この結果できた銀河の力学構造は不安定のオンセット条件で決まっており、初期条件にはほとんどよらない。この合体銀河はすべて最大回転速度 V_{max} と中心速度分散 σ_c の比が $0.6\sim 0.7$ の速く回転しているものとなる。

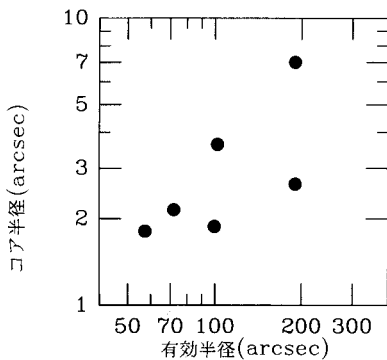


図 7 おとめ座銀河団の中の真性楕円銀河の有効半径とコア半径の関係。 r_c は Ferrarease et al. 1994 および、Lauer et al. 1992 から、 r_e は de Vaucouleurs 1991¹²⁾よりとった。

また、相対的に円盤が大きい S0 銀河は、合体に至らない近接遭遇や、小さな伴銀河の落下、銀河団内のガスによる星間ガスのはぎとりなど、比較的弱い外乱によってできたのかも知れない。

レンズ状銀河は合体や外乱で大部分のガスを失ったが、その名残のガスが円盤を作ったのだろう。また、合体の衝撃で星間ガスが中心部に落ちてブラックホールが断熱的に作られ、その結果として密度カスプや小さな円盤が作られると考えられる。このレンズ状銀河がさらに合体すると真性楕円銀河になると考えられる。

5. 今 後

重力多体問題専用計算機 GRAPE の開発で、数万個の粒子を定常的に扱えるようになり、N 体シミュレーションの空間分解能は飛躍的に向上した。この空間分解能は、奇しくもおとめ座銀河団銀河を観測する時のハッブル宇宙望遠鏡のそれとほぼ一致していた。

現在、世界最初の Tflops マシン GRAPE-4 が組み立ての最終段階を迎えている。GRAPE-4 が完成すればさらに分解能を 1 桁向上させることができるだろう。それはコースターの装着で乱視が直ったハッブル宇宙望遠鏡の空間分解能に再びほぼ一致するだろう。今後、GRAPE-4 による大規模シミュレーションの結果と、ハッブル宇宙望遠鏡の結果を比較しつつ、楕円銀河の中心核に潜むブラックホールの振る舞いとその進化を明らかにしていきたい。

ここで使ったシミュレーションの一部は国立天文台で共同利用に供された GRAPE-3 を使って行なわれた。

参 考 文 献

- 1) Toomre, A. and Toomre, J. 1972, ApJ, **178**, 623.
- 2) Barnes, J. E. and Hernquist, L. E. 1992, Ann. Rev. Astron. Astrophys. **30**, 705.
- 3) Kormendy, J. 1985, ApJ, **295**, 73.
- 4) Lauer, T. R., 1985, ApJ, **292**, 104.
- 5) Carlberg, R. G., 1986, ApJ, **310**, 593.
- 6) Begeleman, M. C., Blandford, R. D., and Rees, M. J., Nature, **287**, 307.
- 7) Lauer T. R. et al. 1992, AJ, **103**, 703.
- 8) Bender, AAp, **193**, L7.
- 9) van den Bosch, F. C. 1994, AJ, **108**, 1579.
- 10) Ferrarese, L. 1994, AJ, **108**, 1598.
- 11) Jaffe, W. et al. 1994, AJ, **108**, 1567.
- 12) de Vaucouleurs, G. et al. 1991, 'Third Reference Catalogue of Bright Galaxies', Springer-Verlag.
- 13) Okumura, S. K., Makino, J., and Ebisuzaki, T. 1991 PASJ, **43**, 781.
- 14) Sugimoto, D. and Makino, J. 1989, PASJ, **41**, 1117.

Black Hole Binaries and the Formation of the Cores of Elliptical Galaxies

Toshikazu EBISUZAKI and Jun-ichiro MAKINO

Abstract: We performed a series of N-body simulations of merging of galaxies with central supermassive blackholes and studied the structures of merger remnants. The blackhole particles lose their energy through dynamical friction by field particles and make a binary. The field particles around the binary are expelled and density cusp at the center is destroyed to make a flattened core. Recent observational study suggests that elliptical galaxies are divided into two families: true ellipticals and lenticular galaxies. The observations of ellipticals in Virgo cluster with Hubble Space Telescope showed that true elliptical galaxies have light distributions similar to those obtained by our simulations. This fact strongly suggests that these true elliptical galaxies are merger remnants of galaxies with central black holes.