

楕円銀河は合体でできた

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〉

楕円銀河が銀河の衝突によってできたとする合体仮説は 1978 年に Toomre が提出して以来、大きな議論を巻き起こしてきた。賛否両論を調べた結果、合体仮説を強く否定する根拠は今のところ一つもないとの結論を得た。この小論ではまず 1 節で合体仮説を支持する観測事実を挙げる。次に 2 節でこれまで合体仮説では説明できないとされていた観測事実をあげそのそれぞれについて検討する。その結果、大部分は合体仮説をむしろ支持することが分かる。その後で今後どのような研究をするべきか議論したい。

1. 合体仮説を支持する観測事実

銀河が衝突・合体したあと楕円銀河や S0 銀河なることは今や動かし難い。衝突の際に発生する爆発的な星生成で完全にガスを消費した場合は楕円銀河に、少量のガスが生き残った場合は S0 銀河になると思われる。今後の議論で主には楕円銀河について議論する。最近衝突・合体したと思われる銀河(NGC 7252, ES 0341-IG 04, NGC 2623, ARP 220)の光度分布は有名な楕円銀河のド・ポークルール法則を満たすことが最近の観測により分かってきた(Schweizer 1982; Bergvall, Ronnback, and Johansson 1989; Write et al. 1990)。また、N 体シミュレーションでも合体後の銀河はド・ポークルール法則を示すことが示されている(White 1979; Negroponte 1984; Faurouki and Shapiro 1982; Barns 1989)。これは Makino, Akiyama, Sugimoto (1989) による解析的な研究でも裏付けられている。

では逆は真だろうか？ つまり、楕円銀河はみな合体でできたのだろうか？ 最近の CCD カメ

ラによる高感度観測は合体仮説を支持しているように思われる。優等生の楕円銀河だと信じられてきた銀河の中に衝突・合体の名残だと思われる構造(コアの中のコア、逆回転している核、シェル、リップル)が見つかった。詳しいことは Kormendy and Djorgovski (1989) が議論しているのでそちらを見てほしい。

楕円銀河にこれから進化しそうな天体もある。Shakhbazyan (1973) や Hikson (1982) によってカタログされた密小銀河群がそれである。密小銀河群のなかでは銀河間距離が銀河の大きさと同程度なので、数 G 年程度で合体し楕円銀河に進化する(Barnes 1989)。このような密小銀河群が宇宙年齢の間定常的につくられ、楕円銀河に進化しているとすると現在ある楕円銀河の数をほぼ説明できる(Barnes 1989)。密小銀河群は孤立しているとされている。したがって、従来合体仮説の問題点の一つとされていた孤立した楕円銀河もうまく説明できる。

2. 合体仮説への批判と反論

合体仮説への批判は大きく 3 つに分けられる。まず、楕円銀河内部の力学構造をうまく説明でき

ないという批判。次に、楕円銀河を構成する星の種族に関する量（色、球状星団の数など）についての性質が説明できないという批判である。それぞれについて紹介し、反論する。

2. 1) 楕円銀河の力学的構造

まず、楕円銀河内部の力学構造をうまく再現できるかという問題を考えてみよう。回転速度の問題、コア半径・光度関係、Faber-Jackson 関係の3つの点について問題が指摘されていた。

2. 1. 1) 回転速度

楕円銀河の長軸に沿って星の平均速度を求めて、中心からの距離に対してプロットすると回転曲線が得られる。これから、楕円銀河の回転速度の最大値 V_{max} を求めることができる。これを、銀河の中心近くで星の速度分散 σ_0 で割った値 V_{max}/σ_0 は回転が銀河の力学構造にどれだけ重要かを示す指標になる。横軸に V_{max}/σ_0 を取って楕円銀河の頻度分布を取ったのが図1である。この図が示すように、楕円銀河の V_{max}/σ_0 分布には0.7付近に鋭い切断がある。つまり、0.7を超える V_{max}/σ_0 を持った楕円銀河はほとんどない。

White (1979 b) は合体仮説ではこの切断がうまく説明できないと主張した。彼は色々な軌道からの銀河の合体断面積を計算し、合体の過程で角運動量とエネルギーが保存するとして合体後の銀河の V_{max}/σ_0 を推定した。彼の計算によれば、 V_{max}/σ_0 が0.7を超える合体をした銀河が相当多くあると期待されるのに、現実の楕円銀河の分布には $V_{max}/\sigma_0 = 0.7$ 付近に鋭い切断があって矛盾すると言うのである。

しかし、われわれが数値実験してみると事情がかなり違っていることが分かった (Okumura, Ebisuzaki, and Makino 1991)。まず、無限遠点での銀河の相対速度が銀河内の速度分散に対して無視できる場合を考えよう。銀河の合体には軌道角運動量の大きさによって正面衝突型と連銀河型の二つの型がある。軌道角運動量が小さくて、銀河同士の最接近距離が銀河の半質量半径（全質量

の半分の質量が入っている半径）の3倍より小さい時 ($J < 3$) は、正面衝突型となる。正面衝突型では最初の最接近で直ちに合体する。合体残骸の形はプロレート（葉巻形）になり、その角運動量は最初に持っていた角運動量にほぼ比例する（図2）。つまり、正面衝突型では一定の割合の角運動量が逃げる粒子によって持ち去られる。

軌道角運動量が大きくて、銀河同士の最接近距離が銀河の半質量半径の3倍より大きいとき ($J > 3$) 連銀河型となる。この場合は最初の接近で、ある程度エネルギーを失い、いったん連銀河を形成する。その後銀河は長い時間をかけてゆっくりとエネルギーと角運動量を失って接近して行く。ある程度まで近づくと一種の不安定が発生し連銀河が一気に合体する。この過程を経て合体する合体残骸の形と回転速度は不安定のオンセットの条

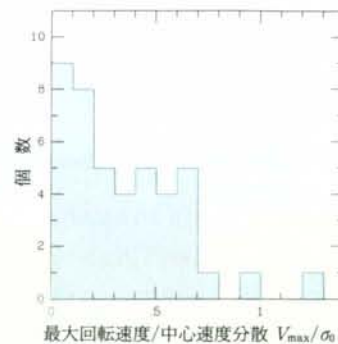


図1 楕円銀河の V_{max}/σ_0 分布 (Davis et al. 1983)。

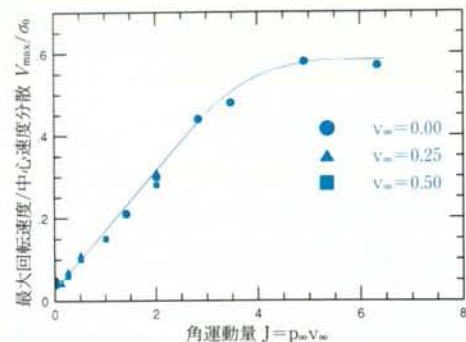


図2 数値実験で得られた合体銀河の V_{max}/σ_0 を軌道角運動量に対してプロットした。

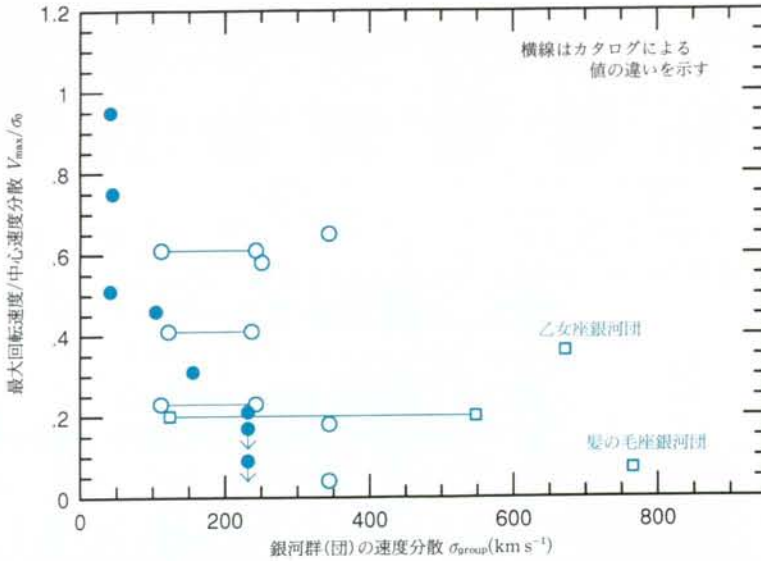


図3 楕円銀河の V_{max}/σ_0 をその銀河が属する銀河群・団の銀河間の速度分散 σ_{group} に対してプロットした (Huchra & Geller 1982; Geller & Huchra 1983; Tully 1987)。両者の間に負の相関があるように見える。黒丸は、銀河群内の銀河の数が10個以下、白丸は100個以下、白抜き四角はそれ以上のものである。直線で結んだ2点は、カタログにより σ_{group} が異なることを示す。なお、乙女座銀河団の点は、13個の楕円銀河の平均、髪のマゼ銀河団の点は2つの代表的な楕円銀河の値である。

件だけで決まってい、最初の軌道パラメーターにはよらない (Sugimoto and Makino 1989)。形はオブレート (パンケーキ形) で、 V_{max}/σ_0 は約0.6となる。したがって、測定誤差を考えると $V_{max}/\sigma_0 = 0.7$ 付近に存在する分布の切断は合体仮説で大変うまく説明できる。

次に、無限遠点での速度が銀河の内部速度と同程度の場合を考えよう。この場合は連銀河型の合体は起こらなくなる。と言うのは一回の接近では軌道運動の運動エネルギーを散逸して束縛状態に落ち込むことができなくなるからである。無限遠点での速度が増加するにつれて、合体した銀河の V_{max}/σ_0 は減っていく。正面衝突に近いほど、つまり角運動量が小さいほど、一回の衝突で散逸できる運動エネルギーが増加するので、高速衝突が頻繁に起こる銀河団中では V_{max}/σ_0 が小さい銀河が選択的にでき易い。実際、銀河が属している銀河

群・団の銀河間の速度分散はその銀河の V_{max}/σ_0 と負の相関がある (図3)。

また、 V_{max}/σ_0 が小さい銀河は多重合体でも作られる。合体を繰り返すと銀河の束縛エネルギーはスカラー量として質量にほぼ比例して単調に増加する。一方、角運動量はベクトル的に加えられる。合体でランダムな方向の角運動量が持ち込まれる場合、ほぼ質量の平方根に比例してしか増加しない。このため、合体を繰り返すにつれて銀河の V_{max}/σ_0 は平均的には減少していくはずである。銀河の絶対光度と V_{max}/σ_0 に負の相関があることはこの描像とコンシステントである。(Davis 1983 et al.)

2. 1. 2) コア半径・光度関係

Kormendy (1985) と Lauer (1985) の観測によると大きな楕円銀河ほど大きなコアを持つ (図4)。つまり、楕円銀河の絶対光度とコア半径には

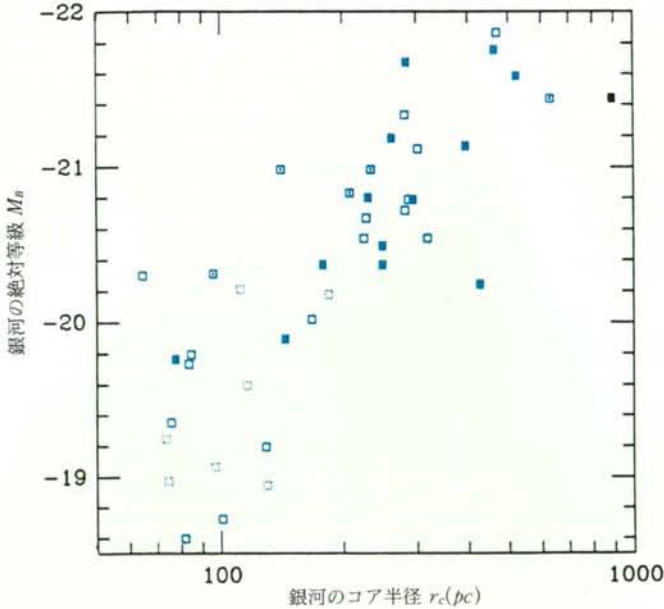


図4 銀河の絶対等級とコア半径の関係

正相関がある。Carlberg (1986) は次のような議論でこの正相関が合体仮説とは矛盾すると主張した。銀河のような無衝突系では、リップル定理が成り立つので合体が起こっても、中心位相密度

$$f_c = (M/L)_{RL} / (\sigma_c)^{3/2} \propto 1 / (r_c \sigma_c^2)$$

が保存する。合体の過程で f_c が保存し、しかも Faber-Jackson 関係に従って σ_c が増加する (次節参照) と、コア半径 r_c が少し減少することになる。実際、N体シミュレーションはこの議論を支持する。したがって、観測された正相関は合体仮説では説明できない。

しかし、銀河の中心に $10^8\text{--}10^9 M_\odot$ 程度の巨大なブラックホールがあると上の議論はすべて成り立たなくなる (Ebisuzaki, Makino, and Okumura 1991)。クエーサーなどの活動的銀河核のエネルギー源は $10^8 M_\odot$ 程度の巨大ブラックホールだと思われるし、明るい楕円銀河は、かなりの割合でかつてのクエーサー活動の名残だと思われる双極電波源を持つ。したがって、楕円銀河の中心に巨大ブラックホールがあると仮定することはきわめて自然である。このような巨大なブラック

ホールは銀河のコア質量と同程度であるから、銀河の衝突・合体過程でコアのダイナミクスに大きな影響を与え得る。

銀河が衝突し合体しつつあるとき、2つの銀河が持っていた巨大ブラックホールは dynamical friction により急激に中心部に落ち込む。さらにエネルギーを失って連星系となり、最後に合体する。この過程のシミュレーションを GRAPE-2 で行ってみた (Ebisuzaki, Makino, and Okumura 1991)。合体した後の銀河のコア半径は少し増加した。中心位相密度は有意に減っている。比較のためにブラックホールを入れないでシミュレーションすると中心位相密度はほぼ保存されており、その結果としてコアは少し小さくなっている。これは巨大なブラックホールのペアが発生する重力エネルギーがコア周辺の星に与えられコアが膨張するためである。このことは解析的な議論からも確かめられた (Fukushige, Ebisuzaki, and Makino 1992)。もとの銀河の小さな核 (カスプ) などはブラックホールが合体する過程で粉々に破壊され、ほぼ等温ののっぺりしたコアが残される。このようなほぼ等温のコアは楕円銀河の特徴とされてい

る。合体仮説は楕円銀河の等温コアをうまく説明する。一方、暗い渦巻銀河やわい小楕円銀河は非常に小さな核を持つことが知られている (Kormendy and Djorgovski 1989)。これらの銀河は合体・衝突を経験していないため小さな核が生き残るのだと思われる。

2. 1. 3) 速度分散

楕円銀河には有名な Faber-Jackson 関係がある。すなわち楕円銀河の速度分散 σ_0 は銀河の絶対光度 L の 0.25 乗に比例する ($\sigma \propto L^{0.25}$)。N 体数値シミュレーションをしてみると衝突・合体の後、銀河の速度分散が少し増加することが分かった。増加量は Faber-Jackson 関係とほぼ一致する (Farouki, Shapiro, and Duncan, 1983; Okumura, Ebisuzaki, and Makino 1991)。

2. 2) 星の世代

銀河が衝突・合体しても銀河を構成する星自身の性質が変化することはない。いわゆる星の世代を特徴づける性質、例えば金属量や色などは大ざっぱに保存すると考え仮説の是非を問うことができる。合体仮説に関し 3 つの議論が存在する。

2. 2. 1) 色・光度関係

楕円銀河の色と光度の間には正の相関があるこ

とが知られている (Visvanathan and Sandage 1977)。つまり、大きく明るい銀河は赤い。この色の差は星に含まれる金属量の差のせいだと考えられている。合体で色が変わらないならば銀河の合体により質量や光度が大きく変わると色・光度関係が壊されてしまう。

まず、色・光度関係にはかなり大きな分散があることに注意してほしい。同じ色を持った銀河の光度方向の分散は 2 等もある。したがって、合体で光度が数倍になっても特に色・光度関係を壊すことはない。むしろこの大きな分散は銀河の合体のせいかも知れない。

また、プアクラスターの中心にある cD 銀河はリッチクラスターの同じ明るさの cD 銀河に比べて系統的に青いと言う報告がなされている (Lugger 1979, 図 5)。つまり、合体によって非常に大きくなったと考えられている cD 銀河では色・光度関係が壊されている。プアクラスターの cD の青さは合体仮説で大変うまく説明できる (Hausman and Ostriker 1978)。

まとめると、色・光度関係は分散が大きすぎて数回程度の合体を棄却することができない。また、色・光度関係上で明らかに異常があるはずの cD

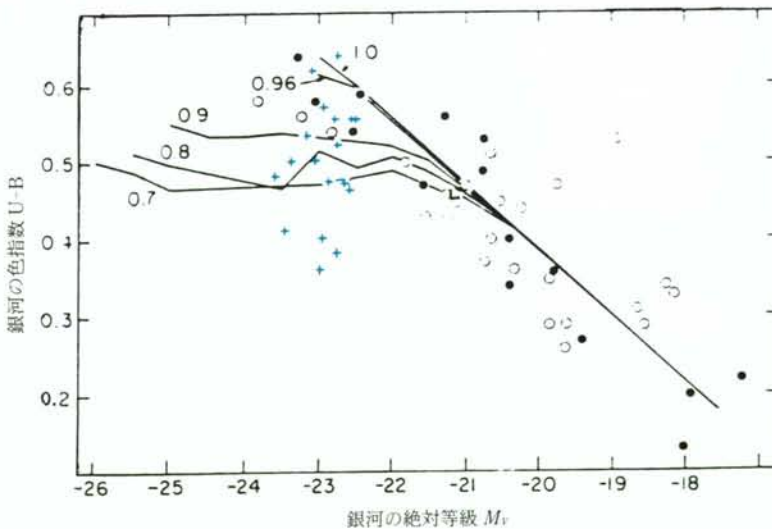


図 5 プアクラスター(+)は Virgo や Coma クラスターの同じ明るさの銀河より青い。

銀河ではちゃんとコンシステントに関係が壊されている。つまり、銀河の色はむしろ合体仮説を支持するものだと言える。

2. 2. 2) 色勾配

楕円銀河の中心部分は周縁部より赤いことが知られている。この様な色勾配は銀河の衝突・合体時の violent relaxation で打ち消されてしまうに違いないと漠然と考えられてきた。これは間違いである。N体シミュレーションによると元々中心部近くにいた星は合体後の中心部近くに、周縁部にいた星はやはり周縁部に存在する傾向がある (Funato, Makino, and Ebisuzaki 1991)。つまり、violent relaxation は不完全にしか起こらず、もともと持っていた束縛エネルギーについての情報は完全にはかき消されない。

2. 2. 3) 球状星団

楕円銀河には球状星団が渦巻銀河より単位質量当り 10 倍近く多いとされている。球状星団が銀河形成初期にしか作られないとすると渦巻銀河から楕円銀河ができたとは考えられなくなる。

しかし、マゼラン銀河では現在でも球状星団が作られている。マゼラン銀河はわれわれの銀河による潮汐力や大小マゼラン銀河同志の衝突により強い擾乱を受けていることが知られている。強い擾乱によって生ずる分子雲同志の大きな速度分散が球状星団形成を引き起こしていると考えられる (Fujimoto 1989)。もしそうなら、衝突・合体によって引き起こされる爆発的な星生成では大量に球状星団が作られるのかも知れない。この様に楕円銀河に球状星団が多い事実はむしろ合体仮説を支持しているように思われる。

3. 議 論

今まで見てきたように、楕円銀河が合体でできたとする合体仮説に明らかに矛盾する事実はなく、それを支持する証拠がたくさんある。私は今年1月にプリンストン大学で上の議論を中心にオストライカーの前で1時間しゃべった。オスト

ライカーは反合体仮説派の急先鋒である。彼は銀河の力学構造の議論 (2. 1 節) に関してわれわれに完全に合意した。しかし、彼は「われわれの銀河のような典型的な渦巻銀河同志の合体では、M 87 の様な典型的な楕円銀河の赤さを説明できない。」と繰り返して主張していた。どうも話がすれ違うのである。議論がかみ合って生産的になるために、Toomre の合体仮説を二つの独立の仮説に分割することを提案したい。

仮説 1 : 楕円銀河は合体でできた。

仮説 2 : 合体の元となる基本要素は普通の渦巻銀河である。

これまで仮説 1 の正しさも疑われてきたが、われわれの研究でその疑惑はすべてのはずれであることが明らかになったのは既に述べた通りである。そこで、仮説 1 の正しさは確定したものとした上で、仮説 2 の妥当性を検討してみよう。

仮説 2 については議論の余地がある。ただし、仮説 2 を決定的に否定する根拠もあるとは思えない。少なくとも、仮説 1 への疑惑が一掃された今、仮説 2 についての疑惑も上に書いたオストライカーの主張も含めて総点検するべきである。特に銀河の色に関する理論は星の IMF (初期質量関数)、赤色巨星分枝、水平分枝の HR 図上での位置 (赤さ) など不確定な要素をたくさん持っている。これらの不確定性を全部考慮しても明らかに仮説 2 が否定できるのかどうか定量的に検討しなければならない。具体的に次のような研究を提案したい。

1. 渦巻銀河が合体してできた楕円銀河の 10^9 年後の色指数

理論的に合体後の銀河の色を定量的に計算する。 10^9 年前に合体してスターバーストを起こし、ガスを消費し尽くした銀河を考えよう。新しくできた星はスターバーストによって生産された金属を取り込んでいるので、金属量が多く、赤いはずである。 10^9 年後 HR 図の転回点は A 型星ぐらいまで降りて来る。このときの銀河全体の色指数は幾らになるのか、それはスターバースト中の IMF

の仮定にどれくらい依存するのかを定量的に明らかにする。IMF によっては転回点付近の A 型星とそれが進化した赤色巨星が銀河の色を決めている時期があるはずである。スターバースト時の IMF は定常的な渦巻銀河のそれとは違うことを示した Tanaka, Hasegawa, and Gatley (1991) や Tanaka, Hasegawa, and Hayashi (1990) などの仕事を考慮しなければならない。

2. シェルやリップルを持っている銀河の色指数は正常か？

上の理論的な研究と対をなす観測的な研究である。シェルやリップルは合体後 10^9 年ぐらいしか存在しないと考えられる。したがって、これらが観測されている楕円銀河は約 10^9 年前に合体した可能性が強い。これらの色を観測し、他のもつと前の合体でできたと考えられる楕円銀河とシステムティックな差があるか検討する。また、上で計算した理論的な値と比較して仮説 2 の是非を問う。

参 考 文 献

- Barnes 1989, *Nature*, **338**, 123.
 Bergvall, Ronnbeck, and Joansson 1989
 Carlberg, R. L. 1986, *Astrophys. J.*, **310**, 593.
 Davies, R. L. Efstatiou, G. Fall, S. M., Illingworth, G., and Schechter, P. L. 1983, *Astrophys. J.*, **266**, 41.
 Ebisuzaki, T., Makino, J., and Okumura, S. K. 1991 *Publ. Astron. Soc. Japan.*, **43**, 781.
 Farouki, R. T., Shapiro, S. L. Duncan, M. J., 1983, *Astrophys. J.*, **265**, 597.
 Fujimoto, M and Kumai 1990, 日本天文学会秋季年会.
 Fukusige, T., Ebisuzaki, T. and Makino, J. 1992. *Publ. Astron. Soc. Japan*, **44**, 281.
 Funato, Y. Makino, J. and Ebisuzaki, T. 1991 submitted to, *Publ. Astron. Soc. Japan*.
 Tanaka, M., Hasegawa, T. and Gatley, I. 1991, *Astrophys. J.*, **394**, 516.
 Haussman, M. A. and Ostriker, J. P., 1978, *Astrophys. J.*, **224**, 320.
 Heggie, D. C. and Mathieu, R. D. 1986 in *the Use of Supercomputer in Stellar Dynamics*, ed. S. McMillan and P. Hut., (Springer Verlag Berlin), p. 233.
 Hickson, P. 1982, *Astrophys. J.*, **255**, 382.
 Kormendy, J. 1985, *Astrophys. J.*, **295**, 73.
 Lauer, T. R. 1985, *Astrophys. J.*, **292**, 104.
 Lugger, P. M. 1979, *Astron. J.*, **84**, 1677.
 Makino, J. Akiyama, K., and Sugimoto, D. 1990, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **42**, 205.
 Ostriker, J. P. 1980, *Comments on Astrophys.*, **8**, 177.
 Schweizer, F. 1982, *Astrophys. J.*, **252**, 455.
 Shakhbazyan, R. K. 1973, *Astrophysika*, **9**, 495.
 Tanaka, M., Hasegawa, T. and Hayashi, S. 1990, 日本天文学会秋季年会.
 Toomre, A. and Toomre, J. 1972, *Astrophys. J.*, **178**, 623.
 Toomre, A. 1977, In *the Evolution of Galaxies and Stellar Populations* (eds. Tinsley, B. M. and Larson, R. B.), 401-416. (Yale University Observatory, New Haven)
 Visvanathan, N. and Sandage, A. 1977. *Astrophys. J.* **216**, 214.
 White, S. D. M. 1979a, *Monthly Notices Roy. Astron. Soc.*, **189**, 831.
 White, S. D. M. 1979b, *Astrophys. J.* **229**, L9.
 Write, G. S. James, P. A., Joseph, R. D., and McLean, I. S. 1990, *Nature*, **344**, 417.
 Huchra, J. P. and Ieller, M. J. 1982, *Astrophys. J.*, **257**, 423.
 Geller, M. J. and Huchra, J. P. 1983, *Astrophys. J. Suppl.*, **52**, 61.
 Tully, R. B. 1987, *Astrophys. J.*, **321**, 280.