

銀河団の構造とハッブル定数の精密測定

三好 蕃

論文要旨

銀河団の構造を調べる目的でその X 線撮像データを解析する際に用いる銀河団高温プラズマガスの密度分布を表すモデル関数として、これまでよく使われてきた割りに問題の多い等温 β モデルに代わるべき新しい有力な関数を立ち上げた。その関数の観測データとの適合性は等温 β モデルを上回り、得られる質量分布も従来見られた重力レンズ効果の観測結果との不一致を解消する傾向にある。ハッブル定数の測定に関しては、投稿していた 2 編の論文の中のひとつ (Abell 773 を使って H_0 値を求めたもの) が出版された。

1. 序 論

本研究は、銀河団の X 線と電波による撮像データを用いて、銀河団の構造解析、およびそこに集積しているダークマターの正体究明、さらには光学観測と独立にハッブル定数 H_0 の値を求めることを目指すものであり、国内外の複数の大学と協力して研究を推進している。さて、銀河団からの X 線放射の源である高温プラズマガスの密度分布を表す関数としてこれまで広く使われてきた等温 β モデルが、最近、観測の精密化に伴って綻びを見せ始めたため、これに代わる新しいモデルの導入が望まれ、世界的にもいくつかの新しいモデルが提案されているが、我々も物理的根拠が明確な新しいモデルを立ち上げて、観測データとの適合性を調べている。一方、ハッブル定数の測定については、このところ研究協力先の 1 つであるケンブリッジ大学の Ryle Telescope が電波望遠鏡の感度向上のための工事に入っていて新しいデータが取得できないため、観測的には報告すべき新展開はないが、投稿していた 2 つの論文のうち、Abell 773 を使って H_0 値を求めたもの^[1]が既に出版され、他の論文^[2]は現在改訂中である。昨年度は主にハッブル定数の測定について報告したので、今回は銀河団の構造解析に焦点を絞って研究経過を報告する。

2. 銀河団高温プラズマガスの密度分布に対する新モデルの構築

銀河団は数百個から数千個の銀河が集まって重力的束縛状態にある宇宙最大規模の天体であり、その構成銀河の間の空間には温度が数千万度の高温ガスが充満していて X 線を放射している。そして、その高温ガスをその空間に閉じ込めておくために必要な束縛質量が、バリオンで構成されたガスと銀河の合計質量を数倍上回っていることから、銀河団には宇宙空間におけると全く同じようにダークマ

ター (dark matter: 暗黒物質) が大量に存在すると考えられている。ダークマターは、歴史的には既に70年前に、銀河団に含まれる銀河の速度分散からビリアル定理を使って見積もった銀河団の束縛質量が各銀河の質量の総和を数十倍から数百倍上回っていることからその存在が認識されていたが^[3]、その後、宇宙が平坦であることが観測的に明らかになる一方で、宇宙のバリオン密度が宇宙を平坦にするために必要な臨界密度の数パーセントに過ぎないことも明らかになった段階で、全宇宙的なものとなった。当初は、その臨界密度の残り全てがダークマターによって担われていると考えられたが、最近の Ia 型超新星を用いた宇宙膨張の調査や WMAP による宇宙マイクロ波の観測によって、臨界密度の約72%がダークエネルギー (Λ) によって担われ、バリオンおよびダークマターからの寄与は合わせて約28%になることが分ってきた^{[4][5]}。この数値は銀河団に含まれるバリオンとダークマターの質量比が約 1 : 6 であることと符号している。すなわち、銀河団には宇宙空間と同じ割合でバリオンとダークマターが含まれており、宇宙空間から物質が銀河団に降り落ちる時にバリオンとダークマターのいずれにも優先性がなく全く平等であることが明らかとなった。これはまた、銀河団に含まれるダークマターは宇宙空間にあるダークマターと全く同じものと考えてよいことを意味する。

ダークマターは宇宙における質量物質のうちの約6/7を占めているにも関わらず、その正体については、現在までのところ、光との相互作用が非常に弱く直接観測できないこと以外は全く分っていない。当然のことながら、ダークマターは各銀河にも大量に含まれているはずであるが、銀河の場合、光度が小さくて直接観測されにくいコンパクト星 (white dwarf, neutron star, black hole など) や小質量星もかなりの程度存在しており、これらとダークマターとを区別するのは相当難しい。それ故、ダークマターの物理的性質を細かく調べるためには、そうしたものの寄与が相対的に小さい銀河団を使うのが最も良い方法となる。

各銀河団におけるダークマターの質量分布や速度分散についての情報は、X線観測データや重力レンズ効果の観測データから得られる。このうち、重力レンズ効果については、観測データから質量分布を得る過程は直線的で、観測精度さえ上げればそれに応じてより正確な質量分布の情報が手に入る。しかし、X線観測データを用いる場合は、まず高温プラズマガスの密度と温度の分布を求め、それで決まる圧力勾配に釣り合う束縛質量を求め、次いでそれからガスと銀河の質量を差し引いて、最終的にダークマターの質量分布を求めるという手順を経る。もしも X線観測装置の性能が十分高く X線表面輝度分布が十分に滑らかな関数として得られれば、モデルに依存しない形でプラズマガスの密度分布を得ることができるが^[6]、通常は観測データにデコボコがあるため、その(微分操作を含む)数学的に厳密な方法は適用できず、適当なモデルを設定して途中を繋ぎ合わせるをえない。

さて、銀河団に含まれるプラズマガスの密度分布 $\rho_g(r)$ を求めるためには、銀河団内重力場の主たる担い手であるダークマターの密度分布 $\rho_{DM}(r)$ を知っておく必要がある(簡単のため銀河団は球対称とする)。この $\rho_{DM}(r)$ に対する理論的モデルを考える場合、通常はダークマター間には相互作用

用がないものとする（一部に相互作用があると主張する人もいる^[7]）。これにより、問題は重力のみを考慮した無衝突粒子系の熱平衡形状を求めることに帰着する。これは（実質的には衝突のない）星の集団である楕円銀河の平衡形状を求める問題として古くから知られ、多くの楕円銀河の観測によく合う解として King モデル^[8]が有名である。ところで、もしもガス温度が場所によらず一定で、ダークマターの速度分散が一樣等方的であれば、簡単な計算から $\rho_g(r) \propto \rho_{\text{DM}}^{\beta}(r)$ の関係が導かれる。ここで $\beta = \sigma_r^2 / (kT_g / \mu m_H)$ で、 σ_r^2 はダークマターの速度分散の 1/3、そして k , T_g , μ , m_H はそれぞれボルツマン定数、ガス温度、ガスの平均分子量、水素原子質量である。銀河団高温プラズマガスの温度は中心部を除いてほぼ一定であることが観測的に分っているので、殆どの場合、この $\rho_g(r) \propto \rho_{\text{DM}}^{\beta}(r)$ の関係を使って $\rho_g(r)$ の関数形を決めている。ただ、 $\rho_{\text{DM}}(r)$ は重力場を決めるポアソン方程式を変形して得られる微分方程式の解で、その具体的な形は数値積分でしか得られないが、実はそれが $[1 + (r/a)^2]^{-3/2}$ (a はパラメータ) に近似できることを King 自身が見つけている^[9]。この近似式を $\rho_{\text{DM}}(r)$ に用いたものが等温 β モデルと呼ばれ^[10]、これまで銀河団の X 線観測データの解析で世界的に広く用いられてきた。

等温 β モデルのパラメータ a および β の値を適当に選んで実際の銀河団の X 線表面輝度分布に合わせてみると、中には 1 つの銀河団全体にわたってよく合うものもあるが、多くの場合、銀河団中心部で観測値に届いていない。Fabian & Nulsen (1977) や Jones & Forman (1984) は、これをクーリングフローのせいであるとして説明した^[11]。すなわち、中心部ではガス密度が大きいためガスの冷却時間が短く、従ってガス温度が外層部より低くなり（ただし、圧力的な釣り合いは保たれる）、結果的に X 線輝度が上がっているというのである（因みに、ガスの単位体積当たりの X 線放射率は $\rho_g^2 \sqrt{T_g}$ に比例する）。以後しばらくの間、この等温 β モデルとクーリングフロー・モデルが銀河団研究で中心的な役割を果たしてきたが、銀河団の重力レンズ効果が精度よく測られるようになり、また角度分解能を格段に向上させた米国の X 線天文衛星 Chandra による銀河団中心部の詳細観測が続々と報告されるにつれて、等温 β モデルとクーリングフロー・モデルがともにその信頼度を失ってきている。クーリングフロー・モデルについては、それが予言する低温ガスを銀河団中心部で発見できないという批判であり^[12]、等温 β モデルについては、重力レンズ効果の観測から得られる銀河団質量が X 線観測データを等温 β モデルを用いて解析した結果得られる銀河団質量に比べて約 2 倍大きいという批判である^[13]。

上述のように、もともと等温 β モデルは X 線観測結果にそれ程よく合っていなかった。その食い違いをカバーする形でクーリングフロー説が提唱されたが、それも怪しくなった今、等温 β モデルに代わる新しい銀河団高温ガスの密度分布のモデルの確立が急務である。それで、最近いくつかのモデルが提案されているが、例えば、等温 β モデル 1 つでは合わせられないので全体を 2 つの等温 β モデルで合わせようとするダブル β モデル^[14]や、冷たいダークマター (cold dark matter, CDM)

を使った構造形成の数値シミュレーションの結果から「経験式」として得られた NFW モデル^[15]などである。しかし、いずれについても物理的根拠はそれほど明確ではないため、観測結果とモデルが合ったからといって、そこから物理を読み取るのは容易ではない。

我々が導入した銀河団高温プラズマガスの密度分布のモデルは、 $\rho_{DM}(r)$ として微分方程式の解をそのまま採用するものである。我々のモデルでは、等温 β モデルには見られない中心部のふくらみが最初から備わっているため、中心部でも観測結果によく合わせることができ、従ってクーリングフローのような余計なものを導入する必要がない。また、モデルに付随するパラメータ全ての物理的意味が明確であるため、データ解析の結果から観測対象の銀河団の構造を導く際に不定要素の入る余地がない等のメリットを持っている。試しに、3つの異なるタイプの銀河団 (A383, A2163, A2390) について、その X 線観測データを我々のガス密度モデルを用いて解析したところ、銀河団の最外層部でわずかな不一致が見られるだけで、ほかは中心部までよく観測データと合わせることができただけでなく、質量分布についても重力レンズ効果の観測結果と殆ど矛盾しない程度にまで再現できていることがわかった。最外層部において小さい不一致が生じたのは、銀河団の外からの物質の流入を考慮していないため (King モデルは無衝突粒子の自己重力平衡形状を与えている)、それを勘定に入れると、X 線観測結果と重力レンズ効果の観測結果との一致度はさらに改善される。現在、これらの結果を論文^[16]にまとめて投稿中である。

3. 今後に残された課題

上記の投稿論文^[16]へのレフェリーコメントに対する回答書を作っている段階で、レフェリーコメントには触れられていない箇所に問題があることが判明し、現在それについて精査している。原理的な問題ではなく、極めてテクニカルな範疇に属する問題なので、これは近いうちに解決する見通しである。現在、アメリカの Chandra やヨーロッパの XMM-Newton といった高性能 X 線天文衛星の観測データが続々と公開されているので、今後、これらの観測データを我々のモデルを使って次々に解析して、その適合性を細かくチェックしてゆく。ただ、現時点では我々の密度分布モデルを観測結果に合わせる場合、パラメータの値を変える度にいちいち微分方程式を解く必要があるため、ベストフィットの解を得るまでにかなりの時間を要している。そのため、このモデルをより使い易くするためには、この部分の自動化は不可欠であり、これも今後解決すべき課題の1つである。

参考文献

- [1] Saunders, R., Kneissl, R., Grainge, K., Grainger, W. F., Jones, M. E., Maggi, A., Das, R., Edge, A. C., Lasenby, A. N., Pooley, G. G., Miyoshi, S. J., Tsuruta, T., Yamashita, K., Tawara, Y., Furuzawa, A., Harada, A., & Hatsukade, I., MNRAS, 341, 937 (2003).

- [2] Jones, M. E., Edge, A. C., Grainge, K., Grainger, W. F., Kneissl, R., Pooley, G. G., Saunders, R., Miyoshi, S. J., Tsuruta, T., Yamashita, K., Tawara, Y., Furuzawa, A., Harada, A., & Hatsukade, I., submitted to MNRAS (2004) (astro-ph/0103046).
- [3] Zwicky, F., *Helv. Phys. Acta*, 6, 110 (1933).
- [4] Perlmutter, S., Aldering, G., Goldharber, G., Knop, R. A., Nugent, P., Castro, P. G., Deustua, S., Fabbro, S., Goobar, A., Groom, D. E., Hook, I. M., Kim, A. G., Kim, M. Y., Lee, J. C., Nunes, N. J., Pain, R., Pennypacker, C. R., Quimby, R., Lidman, C., Ellis, R. S., Irwin, M., McMahon, R. G., Ruiz-Lapuente, P., Walton, N., Schaefer, B., Boyle, B. J., Filippenko, A. V., Matheson, T., Fruchter, A. S., Panagia, N., Newberg, H. J. M., & Couch, W. J., *ApJ*, 517, 565 (1999).
- [5] Spergel, D. N., Verde, L., Peiris, H. V., Komatsu, E., Nolta, M. R., Bennet, C. L., Halpern, M., Hinshaw, G., Jarosik, N., Kogut, A., Limon, M., Meyer, S. S., Page, L., Tucker, G. S., Weiland, J. L., Wollack, E., & Wright, E. L., *ApJS*, 148, 175 (2003).
- [6] Miyoshi, S. J., *in Clusters of Galaxies*, eds. Durret, F. A., Mazure, A. and Trân Thanh Vân, J., Editions Frontiers, France, p.187 (1994).
- [7] Spergel, D. N., & Steinhardt, P. J., *Phys. Rev. Lett.*, 84, 3760 (2000).
- [8] Michie, R. H., *MNRAS*, 125, 127 (1963); King, I. R., *AJ*, 71, 64 (1966); *QJQAS*, 22, 227 (1981).
- [9] King, I. R., *ApJ*, 174, L123 (1972).
- [10] Cavaliere, A., & Fusco-Femiano, R., *A & A*, 70, 677 (1978).
- [11] Fabian, A. C., & Nulsen, P. J. E., *MNRAS*, 180, 479 (1977); Jones, C., & Forman, W., *ApJ*, 276, 38 (1984).
- [12] Lewis, A. D., Stocke, J. T., & Buote, D. A., *ApJ*, 573, L13 (2002).
- [13] Miralda-Esquadé, J., & Babul, A., *ApJ*, 449, 18 (1995).
- [14] Xue, Y.-J., & Wu, X.-P., *MNRAS*, 318, 715 (2000).
- [15] Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M., *ApJ*, 462, 563 (1996); *ApJ*, 490, 493 (1997).
- [16] Miyoshi, S. J., & Yokoi, M., submitted to MNRAS (November 2003).

Structure of Clusters of Galaxies and Precise Measurement of Hubble Constant

S. J. Miyoshi (Principal Investigator)

In order to investigate the detailed structure of clusters of galaxies, we established a new, promising model function of the density distribution of intracluster hot plasma, which is used in the analysis of clusters' X-ray image data. Our new function would take the place of the isothermal β model which has been widely used so far but includes some controversial points. Our model is much better than the isothermal β model in the degree of agreement with observational results. The total mass distribution in each cluster of galaxies obtained using our model function seems to solve the troublesome discrepancy between the X-ray and gravitational-lensing mass estimates. Concerning the measurement of the Hubble constant, our paper on the value of H_0 for the cluster Abell 773 has been published.