

銀河団・超銀河団からの X 線放出

池 内 了*

1. はじめに

銀河団からの X 線放出が発見されて以来、宇宙における最大の階層と考えられてきた銀河団の内部状態について、かなり明確なイメージを持つことができるようになった。又、超銀河団という階層が存在するかどうかについても、X 線観測によって何らかの見通しが得られそうになりつつある。

宇宙に存在するおよそ半分の銀河が、その規模の差はあれ、銀河集団に属することを考えると、銀河の誕生は単一の形としてでなく、集団の形をとったと推論してよいであろう。丁度、銀河内の星が、星団や集合（アソシエーション）の形として生まれ、その後星の系は崩れてゆくように。従って、星と異って開いた系としての要素を多分にもつ銀河にとって、銀河形成の初期条件や銀河の進化を考える上で、どのような環境下にあったかを知ることが重要である。特に、系の力学的緩和が終わっていないような、ゆるく結合した銀河団においては、その形成時の記憶を何らかの形で保っている可能性が大きい。

その一つのヒントとして、銀河団についてのいわゆる missing mass（見つからない質量——それが見えないのか、もともと存在していないのかは立場に依る）の問題がある。銀河団を重力的に結合するには、銀河として観測される質量が小さすぎるといふ問題である。これについて筆者は、その不足分が観測される質量の 10 倍以上のものについては、結合系でなく自由膨張しているとしても矛盾はないという立場をとっている。しかし、Coma や Perseus のような密に銀河が集中している銀河団では、質量の不足分はそれ程大きくなく、見つからない質量があると考えざるを得ない。もともと質量が不足していたり、進化の途中で外界へ放出したとすると、これらの系はばらばらになっているか、猛烈な膨張速度が観測されてしかるべきなのである。従って、多くの質量が私達の眼から隠されてしまっていると考えざるを得ない。

他方、超銀河団について、その存在に関する激しい議論の後、現在では、その可能性が高いという方向に傾いているが決定的な証拠は上がっていない。それも当然で、超銀河団のスケールでは、その集団としての力学的統一性を示すにはハッブル時間では短かすぎるからであ

る。つまり、物質の存在様式として一階層をなしているが、系として平衡状態に達していないと見るべきであろう。その場合、超銀河団には形成時の記憶がより明らかに保たれていると考えられ、銀河や銀河団が超銀河団という大スケールの揺動下に形成されたのかどうかについて重要な示唆を与えてくれるであろう。

一つの例証として、最近、Coma/A1367 という 2 つの密な銀河団が超銀河団をなしていると指摘された。注目すべきなのは、2 つの銀河団が近接している以外に、そのまわりの領域の銀河分布に有意な空白があるという点であろう。超銀河団という大スケールの揺動のなかで、2 つの大きな銀河団が分岐し残りは個々の銀河へ進化する。銀河団として収縮した空間には銀河分布の空白ができ、それは埋められる時間もなく現在に到ったというシナリオを描くことができそうである。

このように、銀河団又は超銀河団は宇宙の再結合後、最初に生まれた天体として——多分、クェーサーも異った初期条件下で同時期に形成されたのであろう——以後の銀河及び星の形成への重要な背景をなしていると考えられる。これら銀河団及び超銀河団について光学観測のみならず、電波や X 線による銀河間ガス＝銀河団内ガスについての情報が多く集積してきている。それらを形成時の物理的条件と結び合わされる段階には到っていないが、ここ数年で可能となるより詳細な観測によって、見つからない質量の問題や超銀河団が宇宙最大の階層をなしているかどうかについての答が得られるのではないだろうか。

以下では、これまでの観測事実の整理とその解釈を述べつつ、これらの問題の解決の手掛りがどのようなところに得られるのかを考えてみよう。

2. 銀河団内ガス

現在、約 50 個の銀河団について X 線放出が確認されている。その X 線光度 (L_x) は、 $2 \times 10^{42} \sim 5 \times 10^{45}$ エルグ/秒である。これだけのデータが揃ったことにより、いくつかの統計的分類が可能になってきた。

最も初期に行われたものは、 L_x と銀河団内での銀河の速度分散 ΔV との関係である。X 線放出機構を、高温電子の熱的制動輻射によるとすると、ほぼ 1 億度の熱いプラズマが存在することになる。このプラズマ温度は、銀河団内で重力平衡にあるとすると $(\Delta V)^2$ に比例する。プラズマの質量が系のヴィリアル質量に比例するとすれば、それはやはり $(\Delta V)^2$ に比例する。X 線放出の領域

* 北海道大学・理学部 S. Ikeuchi: X-ray Emission from Clusters of Galaxies and Superclusters

が銀河団のコア領域とすれば、コアの半径はどの銀河団でもほぼ一定であることがわかっている。以上より、 $L_x \propto (AV)^3$ という関係が得られる。しかし、速度分散の不定性が大きく、現在のところベキの値は、 5 ± 2 くらい範囲でしか決まっていな。又、果たしてこのような単純な考えでよいかどうかは不明である。

次に多く試みられている分類は、銀河団の型と L_x の関係である。銀河団の分類は、アーベルがカタログを作った時の最も直観的な richness (銀河団コアの銀河密度) や銀河団にどのような型の銀河が多いかによる分類とか、銀河分布の中心集中度による分類とかのいろいろな尺度によってなされてきた。はっきりしている事實は、X線強度の大きいものについて、richness が大きいとか、cD 銀河 (E型銀河で 100 kpc 以上の外層部を持つ巨大銀河) を中心にもつとか、E型銀河がS型に比べ圧倒的に多いとかの特徴がはっきりしている。むしろ例外もあるが、銀河団の性質として共通性が多い。しかし、X線強度の小さいものでは、このような共通性は見出し難い。一方、X線放出についての熱的モデルに対し、相対論的電子と銀河団内赤外線光子の逆コンプトン散乱によってX線が放出されるとするモデルも考えられてきた。これは、E型銀河はシンクロトロン放射による電波銀河になる傾向が大きく、相対論的電子が銀河団内を漂っていることが予想されたからである。この非熱的モデルは3つの理由で斥けられている。一つは、X線観測のバンドが広がると共に、かなり詳細なスペクトルが得られるようになり、それが熱的制動放射のそれとよく一致すること——現在、約 20 の銀河団についてプラズマの温度の推定が可能になっている——。第2に、約 10 の銀河団について、鉄の 24 又は 25 価イオン特有の線スペクトルが 7 KeV 付近に発見されており、これは熱的モデルでなければ説明しえない。第3に、銀河団内に熱いプラズマがあると、宇宙を満たしている 2.7 K のバック・グラウンド放射が熱的電子にたたかれ、黒体放射からずれる効果の測定である。電波観測の技術向上によって、温度にして 3 mK 程度のずれが4つの銀河団について測られている。以上より、数密度にして 10^{-8} 個/cm³、温度が $(0.5 \sim 3) \times 10^8$ K のプラズマの存在が確立された。

銀河団内ガスの存在は、他の観測事実にとっても都合がよい。一つは、X線を放出する銀河団内に、シンクロトロン放射で銀河の前部から後方へすそを引くような形の電波放出をしている head-tail 銀河が発見されていることである。これは、高速 (数千 km/s) で運動する銀河から放出された高エネルギー電子が、まわりのガスの動圧を受けて前方には拡がらず後方へ押し流されていると考えることができる。もう一つは、一般にX線を放出する銀河団には、ガスを多くもつS型銀河が少なく、又、

形態的にはS型銀河であるがガスがその 1/100 しか存在しない貧血の銀河が見出されている。この型の銀河は、銀河団に属さない銀河では見つかっていない。この説明として、銀河団内ガスに対し数千 km/s で運動する銀河には、まわりのガスの動圧がかかり銀河内ガスをはぎとってしまったと考える。以上2点は、銀河団内ガスの存在の傍証であるが、銀河活動や銀河の進化に影響を与える程度には存在していることを示唆している。

この銀河団内ガスのすべてが熱いプラズマかどうかのチェックとして、中性水素の 21 cm の吸収が、約 15 の銀河団について測られた。(X線を放出する銀河団も含む。) 結果はどの銀河団についても上限値しか得られず、低温のガスとは考えにくいようである。なお、最近、銀河団の中心部からX線カウンターの視野を広げてゆくとX線強度がふえてゆくことが見出された。この事實は、熱いプラズマが銀河団のコア部分 (約 300 kpc) のみでなく、その 10 倍もの領域に広く分布していることを意味している。

推定されるガスの総質量は、高々銀河の総質量と同じで、その 1/10 としてもX線強度を説明することができる。光学観測では見つけられなかった質量がX線観測で見つかったのであるが、missing mass の問題を解決する程ではなかった。

3. 銀河団内ガスの起源とその運動

ガスの起源については、2つのモデルが提案されてきた。一つは、宇宙の再結合後に生じた大スケールの揺動から銀河団が形成され、その際とり残された始原ガスが銀河団へふり積もってきたというモデル。もう一つは、銀河団を構成する各銀河から吹き出された、又は、はぎとられた銀河内ガスが銀河団を満たすというモデルである。前者は、銀河団形成と密接に関係し、後者は銀河の進化と深く関わっている。いずれにしても、ガスは銀河団の重力エネルギーを得て加熱され、一部は中心部へ溜まり一部は銀河団の外へ逃げてゆく。X線を放出するコア部分をとり出せば、ほぼ銀河団重力場に静的平衡になっているとしてよい。

先に述べた鉄イオンの線スペクトルの発見は、ガスの起源として銀河から放出された成分を含まねばならないことを示している。始原ガスは重元素を含まないからである。しかし、始原ガスが全くないとは考えにくいから、2成分モデルとするのが常識的であろう。互いにどの程度の寄与をしているかを定めるめやすとして、鉄の線スペクトルの等価幅があげられる。等価幅は、鉄の存在量とガスの温度で決まるが、ガスの温度は、銀河団内のポテンシャルと2成分ガスの相対存在比で決まる。一般に、始原ガスの方が重力エネルギーを多く得て、銀河から放出されたガスよりも高温になるためである。従っ

て、各銀河団について、鉄の等価幅の分布を観測することができるなら、2成分ガスの相対存在比を推測することが可能になる。又、鉄の線スペクトルは、ガスの温度が $5 \times 10^7 \text{ K}$ 以下になると急速に弱くなるので、線スペクトルの mapping によってガス温度の大局的分布が得られることに注意すべきである。

以上のようにして銀河団内ガスの起源が定量的に明らかにされると、銀河団形成時の揺動についての情報や銀河系内でのガスの運動、進化についての情報を引き出すことが可能になる。例えば、私達の銀河内ガスは平均として 10^4 K 程度であり、銀河団に属する銀河も同様とすると、まわりを 10^8 K の高温ガスに囲まれた銀河内ガスという描像が得られる。銀河内ガスは蒸発してしまうのか、逆に銀河外ガスを冷却してしまうのか。銀河を孤立した閉じた系としてではなく、外界と相互作用する開いた系として考えねばならぬ好例である。

一方、銀河団内ガスの運動はどのようになっているであろうか。コア領域では、ほぼ重力平衡が達成されているが、中心から数 Mpc 離れたところでは、始原ガスの初期分布や銀河から放出される際の内部エネルギーの大きさによって、膨張する速度は異ってくる。従って、熱いプラズマがどの程度まで拡がった分布になるかも異ってくる。銀河団の中心部に比べ、ガスの密度は3桁以上も下がるのでこれまで余り問題にされなかったが、視野を変えたX線観測が積み重ねられると、このような大スケールでのプラズマの分布や運動が問題になってくる。

始原ガスの初期分布が一様で半径が 10 Mpc 以内の場合、 $1 \times 10^7 \text{ K}$ 以上に高温になる領域は、ほぼ銀河団のサイズの 6 Mpc 程度であり、ガスの膨張速度は 5,000~10,000 Km/s にも達する。銀河からのガス放出のみの場合は、重力エネルギーの解放は比較的少なく、4 Mpc 程度しか 10^7 以上に加熱されず、膨張速度も 3,000 Km/s 程度である。いずれの場合も、ガス密度は中心部より3桁程下がっている。一方、始原ガスの初期分布が 10 Mpc 以上の場合、定在的な衝撃波が中心から約 4 Mpc のところに形成され、熱いプラズマはそれ以上に拡がらない。この領域では、ガスは $5 \times 10^7 \text{ K}$ 以上に加熱され、かつ密度も中心より2桁程度しか下がらず、比較的なだらかなX線分布になる。始原ガスの分布の差が、大スケールでのX線分布として現われる点に注目したい。

以上のように、銀河団全体の大きさでのX線分布は、熱いプラズマの密度分布を示すから、鉄の線スペクトルの mapping から温度分布が得られれば、銀河団内のガスの状態について信頼できる答が得られるのである。

これまで、銀河の運動について何ら考慮してこなかった。銀河団の平均の自由落下時間は、ハッブル時間の $1/3$ 程度であり、力学的な緩和をして何らかの斉一性あ

る運動をしていると考えられる。ペルセウス銀河団の場合、銀河分布は鎖状であり、力学的緩和をしているとするなら、銀河団としての回転円盤を横から見ていると想定せざるを得ない。とすると、銀河団全体の回転をも考慮したガス分布を考えねばならない。それを明確に支持する事実は、銀河分布の短軸方向と長軸方向の比は、1:2 であるが、X線分布のその比は、約 1:4 になっている点である。もし、ガスが回転運動をしていないとすると、X線分布は銀河分布以上に球対称的になる。つまり、ペルセウス銀河団の場合、熱いプラズマは銀河分布と同程度に歪んだ分布をしている筈であり、それは回転運動によると考える他はない。これは、銀河団全体の回転運動を強く示唆している。こうして、X線分布の形態より銀河全体の運動状態を推測することが可能になる。現在のところ、ペルセウス以外明白にX線分布と銀河分布の双方が測定されている銀河団はないが、銀河団の運動と連結したガスの運動については、X線分布の詳細な観測は欠かせないものである。

4. 超銀河団について

E型銀河の銀河風の理論や銀河初期の活動的進化の時代の研究が、銀河からのガスの流出、それが銀河団にふり積もってX線を放出するというモデルを自然に導き出す源となった。同様に、銀河団スケールでのガスの運動についてかなりのことが明らかになった現在、それらを基にして超銀河団というより大きな階層の存在をチェックすることができないであろうか。

この点の一つの手掛りは、超銀河団起源と思われるX線が存在するという指摘である。必ずしも最終結論として確定しているわけではないが、そのようなX線放出が期待しうるかどうか、集団としての超銀河団が存在した方がX線放出に有利かどうかを理論的におさえることは意味のあることと思われる。

超銀河団のサイズを 30 Mpc、全質量を $10^{16} M_{\odot}$ とすると、自由落下時間はハッブル時間よりも長く、超銀河団全体の重力場中でのガスの運動としてとらえることはできない。(ガスの質量が、この 10 倍あって超銀河団がそれで結合されているとするなら別だが、その立場は今とはとらないことにする。) 従って、各銀河団から高温になったプラズマが逃げ出して超銀河団を満たし、ガス密度の高いところからX線放出をすると考えた方がよさそうである。X線観測でその可能性が指摘されているのは、銀河団の対であり、この場合、2つの銀河団の間の領域でガスが最も集積する。2つの銀河団各々のX線分布の形態およびその中間の領域のX線分布を比較すれば、ガスの運動状態を系の状態と関係させて明らかにできるであろう。

そこでガスの起源をすべて始原ガスとし、それが各銀

河団の大きさ程度にしか分布していなかった場合——2つの銀河団が偶然に近接しているモデル——と、2つの銀河団をおおよう広く分布している場合——超銀河団スケールでの初期の揺動を考えるモデル——を比較することにする。前者の場合、各銀河団から 5,000 Km/s 以上の速度でガスは放出され、2つの銀河団の間で衝突してプラズマが溜まる。2つの銀河団の距離が、20 Mpc 以上の場合は、X線バック・グラウンドのゆらぎ以下になってしまうが、20 Mpc 以下になると急速にその量はふえて、充分観測にかかる量になる。そして各銀河団のX線分布は、中心部から外へ急速に減少する。

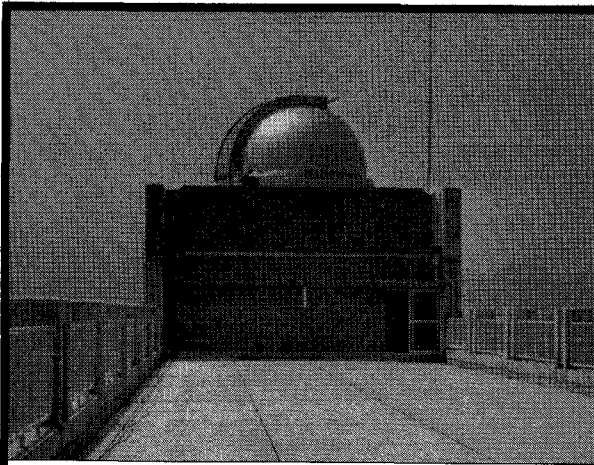
一方、後者の場合、始原ガスの分布が 10 Mpc 以上と考えられるから、各銀河団内で定率的な衝撃波になって、銀河団の距離が 10 Mpc 以上の場合、ガスの衝突が起こらない。従って、超銀河団成分のX線は期待されない。各銀河団内でのX線分布は比較的なだからである。以上の差違は、現状ではまだ観測的にチェックしうる程大きくはない。しかし、Coma/A1367 銀河団対は、2つの間の距離が大体 20 Mpc 前後であり、超銀河団成分のX線が有るか無いかのみを調べればよいので格好のものである。

5. ま と め

以上のように、銀河団、超銀河団の研究は、X線観測を手掛りにして銀河の進化や銀河団の形成の問題に切りこめる側面が出てきている。可能性の高い観測として、①銀河団の数 Mpc に広がる熱いプラズマの分布の様子、②銀河団の間の空間からのX線放出、③鉄の線スペクトルの mapping、④各銀河団での銀河分布とX線分布の相関等があげられる。

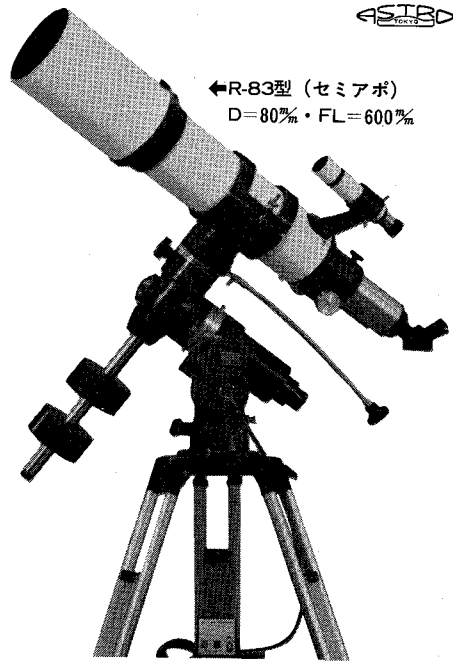
一方、銀河団内ガスの存在と missing mass の問題を結合させて、見つけられていない質量がどのような形で存在し、それはまわりのガスとどのような相互作用をするかという観点からの研究も大切であろう。X線のみならず他の観測技術も銀河団の内部の様子を探ることができるようになるであろうし、全くガスと独立に存在するものは考えにくいからである。

むろん、ガスとの相互作用だけでなく、銀河間相互作用の結果、中心部に質量が集中し cD 銀河や巨大ブラック・ホールが形成されるとするモデルも提案されている。この方向は、密な銀河団の研究にとって欠くことはできない。おそらく、上記と両輪で進むべき方向と思われる。



★営業品目★
天体望遠鏡と双眼鏡
各種部品と撮影用品
ドームの設計と施工

★新総合カタログご希望の方は切手300円を同封下さい。
★全国有名デパート・光学品取扱店でお買い求め下さい。



ASTRO 光学工業株式会社

〒170 東京都豊島区池袋本町2-38-15
☎03(985)1321 振替口座東京5-52499番