

宇宙最大の天体と高温ガス



研究ノート

藤田 裕*

The Biggest Objects in the Universe and the Hot Gas

Key Words : Astronomy, Astrophysics, Galaxies, X-ray

1. 宇宙の歴史と銀河団

我々が存在する宇宙は137億年前に誕生した。生まれたばかりの宇宙はほぼ一様で、天体は存在しなかった。しかし密度が周囲より少しだけ大きい領域は、重力が強いので、周囲の物質を集め、さらに密度が高くなっていった(重力不安定)。その密度が高くなった領域は、最終的には重力で固まった塊(天体)となった。それらの初期天体は周囲の天体を重力でさらに集め、より大きく重い天体へと成長する。やがてそれらの天体は宇宙に無数に存在する銀河になり、さらにそれらが集まって銀河団となった。このように、小さい天体から大きい天体へと成長してきたのが宇宙の天体形成の歴史である。銀河団は現時点で宇宙で一番大きい天体であり、宇宙に広く存在している。それらはやがてより大きい天体(超銀河団)へと成長するのであろう。

2. 銀河団ガス

銀河団の大きさは1千万光年ほど、質量は太陽の 10^{14} 倍ほどである。すばる望遠鏡などの可視光の望遠鏡で観測すると、銀河団は文字通り銀河の集団として観測される(図1左)。ところがこの銀河団をX線で観測すると、様相は一変する(図1右)。銀

河はほとんど目立たず、代わりにX線を放射する高温ガスで覆われていることが分かる。このガスは銀河団ガスと呼ばれ、温度は1億度ほどであるが、密度はおよそ 10^{-3}cm^{-3} しかなく、とても希薄なガスである。しかし銀河団が巨大であるために全体の質量は莫大で、銀河団中の銀河をすべてあわせた質量よりも一桁大きい。ただそれでも銀河団の質量を説明するには至らない。銀河団の質量の大部分を占めるのは銀河団ガスではなく、未知の物質「ダークマター」であり、その質量は、銀河団ガスの質量より、さらに一桁ほど大きい。



図1.(左)可視光で見た銀河団(エイベル2670)。白い点のほとんどは銀河団に属する銀河。(右)同じ銀河団をX線で観測した場合。全体が銀河団ガスからの放射で覆われている。

銀河団ガスはなぜこのように高温なのだろうか。上で述べたように、銀河団の質量の大部分を占めるのはダークマターである。まずこのダークマターが重力で固まり、銀河団の骨格(重力場)を作る。次にその重力に引かれたガスが、このダークマターの塊に向かって周囲から落下するのであるが、そのときガス同士が衝突することにより、ポテンシャルエネルギーを放出する。それにより銀河団ガスは高温になっていると考えられている。つまり銀河団ガスの温度は、銀河団の重力ポテンシャルの深さを表しているのである。



* Yutaka FUJITA

1968年12月生
京都大学大学院 人間・環境学研究所 博士課程終了(1997年)
現在、大阪大学、大阪大学大学院理学研究科、宇宙地球科学専攻、准教授、京都大学博士(人間・環境学)天文学、宇宙物理学

TEL : 06-6850-5484

FAX : 06-6850-5504

E-mail : fujita@vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp

3. 銀河団ガスの冷却流問題

銀河団ガスは高温なのでプラズマ化している。X線は電子がほかの荷電粒子からのクーロン力によって軌道を曲げられることで発生している（制動放射）。この制動放射によるX線のエネルギー放射率は、密度の2乗に比例する。銀河団ガスはX線を放出しているのでエネルギーを失っているのではあるが、平均的には密度がとても小さいので、エネルギーの損失（冷却）はとても小さく、宇宙の年齢（137億年）の時間をかけても冷却はほとんど無視できる。ただし例外的な領域がある。銀河団ガスの密度は、銀河団の外側から内側に向かって大きくなる。したがってX線の放射率は銀河団の中心部では大きくなり、冷却が無視できなくなる。一方、中心部を除けば銀河団ガスは冷却しないとみなせるので、このままの状態でおいておくと、中心部の圧力が下がるのにもかかわらず、その外側の圧力が変わらないので、中心部がそこを囲む領域のガスの圧力を支えきれなくなり、ガスが銀河団の中心部に向かって冷えながら流れ込むようになるはずである（図2）。これを冷却流と呼ぶ。X線によるエネルギーの損失率から、流れ込んでいるガスの割合は、一年間に100から1000太陽質量にもなると見積もられた。



図2. 冷却流の模式図。密度の高い中心部は冷えるが、密度の低い外周部は冷えない。結果として圧力のバランスが崩れ、ガスは中心部に向かって冷えながら流れ込む。

ところが不思議なことに、観測では流れ込んだはずのガスが見つからないのである。一年間に100太陽質量のガスが、銀河団の年齢（およそ100億年）の間、中心部に流れ込み続けたとすると、銀河団の中心には1兆太陽質量ものガスが存在するはずであるが、さまざまな観測装置を使っても発見されなかった。この問題は冷却流問題と呼ばれ、多くの天文学者を悩ませてきた。この問題の解決の糸口を見つけたのが1993年に打ち上げられた日本のX線天文衛星「あすか」である。この衛星により、銀河団中心

部のガスは何らかのエネルギー源により、冷却を妨げられていることが明らかになった。つまりX線放射で失ったエネルギーを補うように、どこからかエネルギーが供給されているというのである。このエネルギー供給により、銀河団の中心部はその周囲のガスからの圧力を支えており、冷却流は実は存在しないというのである。こうして、冷却流問題の解決の糸口は見つかったが、残念ながら肝心のエネルギー源の正体は分かっていない。多くの銀河団の中心には、太陽の質量の1億倍もの重さの巨大ブラックホールがある。このブラックホールにガスが落ち込むときに、一部はブラックホールに飲み込まれず、逆に高速で外側に吹き飛ばされることがある（ジェットと呼ばれる）。このブラックホールの活動で生成されたエネルギーが未知のエネルギー源という考え方が今のところ最も多くの天文学者に信じられているようである。

4. 宇宙最大の加速器

銀河団ガスからはX線のみならず、電波も放射されていることが分かっている。この電波放射の源は、光速に近い速度を持った電子（高エネルギー電子）であると考えられている。こういった電子が銀河団ガスの中に存在する磁力線の周りを回転するときに電波が出るのである（シンクロトロン放射）。地球上では粒子を光速に近い速さまで加速し、物質を構成する素粒子の性質を調べる加速器が建設されている。一方、高エネルギー電子の存在より、銀河団も同様に粒子を光速に近い速さまで加速していると考えられている。つまり宇宙で一番大きい天体である銀河団は、宇宙で一番大きい加速器なのである。

残念ながらどのように粒子が加速されているのかよく分かっていない。一番有力とされるのは衝撃波である。銀河団はときどき衝突、合体を行う。このとき衝撃波が銀河団ガスの内部に発生し、銀河団の中を伝播していく。衝撃波は交通渋滞の最後尾によくたとえられる。交通渋滞の最後尾では車は速度を落とすので、前の車との間隔は狭くなる。このときもし渋滞の最後尾を挟んで前後の車でピンポンをしたとしよう。ただしラケットは固定したままで、ボールは単純に弾性反射するものとする。車の間隔が次第に狭くなっていくので、その狭くなっていく速

度に対応する運動エネルギーがボールに与えられ、次第にボールの速度は大きくなっていくはずである。これが衝撃波での粒子加速でのメカニズムである。銀河団の場合はラケットに対応するのは、細かな磁場の乱れと考えられている。このような衝撃波での粒子加速は銀河団のみならず、宇宙のさまざまな天体で行われていると考えられている。ただその多くは星（ブラックホールを含む）の周囲などの狭い領域で行われており、銀河団のような、巨大な天体の広い領域で行われているとしたら驚くべきことである。

5. 銀河団の研究の将来

銀河団は、もともとは銀河の集団としての性質を調べるためのサンプルとして研究の対象となっていた。ところが銀河団ガスの発見により、地球上では

再現できない、高温希薄プラズマの実験場としての役割を果たすようになってきた。銀河団ガスは、これからも高温希薄プラズマの性質を明らかにするさまざまな手がかりを与え続けるであろう。

参考文献

- 1) 藤田 裕 (2002) 「チャンドラで見た銀河団」日本天文学会天文月報 2002年 9月号 p.418-425.
- 2) 藤田 裕 (2003) 「チャンドラで探る銀河団プラズマとダークマター」日本物理学会誌2003年 6月号 p.398-405
- 3) Fujita, Y., Sarazin, C. L. and Sivakoff G. L. (2004) "Chandra Observations of A 2670 and A 2107: A Comet Galaxy and cDs with Large Peculiar Velocities" Publications of the Astronomical Society of Japan, 58, 131-141

この記事をお読みにになり、著者の研究室の訪問見学をご希望の方は、当協会事務局へご連絡ください。事務局で著者と日程を調整して、おしらせいたします。

申し込み期限：本誌発行から2か月後の月末日

申し込み先：生産技術振興協会 tel 06-6944-0604 E-mail seisan@maple.ocn.ne.jp

必要事項：お名前、ご所属、希望日時（選択の幅をもたせてください）、複数人の場合はそれぞれのお名前、ご所属、代表者の連絡先

著者の都合でご希望に沿えない場合もありますので、予めご了承ください。