

解説

宇宙における大規模プラズマの動力学

牧島 一夫

(東京大学大学院理学系研究科)

Dynamics of Large-Scale Cosmic Hot Plasmas

MAKISHIMA Kazuo

Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

(Received 1 March 1999)

Abstract

X-ray emitting large-scale cosmic plasmas associated with galaxy clusters are described. Recent X-ray observations made with the Japanese X-ray observatory ASCA suggest that the plasma is being heated when the galaxies move randomly within the cluster potential, and interact with the plasma.

Keywords:

clusters of galaxies, X-ray emission, cosmic plasmas, radiative cooling, energy non-equipartition, dark matter

1. はじめに

宇宙の物質の大半はプラズマ状態にあるという表現は、決して誇張ではない。その証拠に Fig. 1 を見ていただこう。これはある銀河団、すなわち数百個の銀河が重力的に集まった巨大な天体の姿である。可視光では個々の銀河が見えるが、X線では銀河団の全体が輝いており、そのスペクトルは Fig. 2 のように、高階電離した重元素からの多くの輝線を含む。つまりX線は疑いなく高温プラズマからの光学的に薄い放射である。この「銀河団プラズマ」は、温度が $kT = 2-10$ keV 程度、電子密度が $n_e = 10^{3-4} \text{ m}^{-3}$ 程度で、銀河団の広大な空間を埋め尽くしており、その質量は銀河団に含まれる星の総和を数倍も上回る [1]。この銀河団プラズマこそ、宇宙のバリオン物質のもっとも優勢な存在形態なのである。さらに銀河団には、星やプラズマの質量をざっと10倍も上回る大量の暗黒物質が存在し、その重力により、プラズマも銀河も閉じ込められていると考えられる。こ

author's e-mail: maxima@phys.s.u-tokyo.ac.jp

れ以外にも宇宙のさまざまな階層に高温プラズマが数多く存在し、あるものは銀河団プラズマと同様に希薄だが、ブラックホール周辺の降着円盤など、密度が $n_e = 10^{26-28} \text{ m}^{-3}$ (地球大気の数) に達するものもある。本稿では、希薄なものを論じる。

このように高温プラズマが卓越する状況にもかかわらず、宇宙の高エネルギー現象をプラズマ動力学の立場から理解しようとする試みは、驚くほど遅れている。筆者の従事する宇宙X線研究の分野でも、Fig. 2のような熱的な宇宙X線スペクトルをプラズマ放射の理論コードと比較する研究は精緻な発展を続けている一方で、X線観測データをプラズマ動力学の基本的特徴、すなわち電磁場との強い相互作用、自発的な秩序パラメータの生成、それに伴うエネルギー非等分配過程などと結びつけるという発想は、皆無に近い。むしろ宇宙プラズマに関する誤解が蔓延しているとさえ言える。本稿を通じ、この魅力的なテーマをプラズマ物理学者に広く紹介するとともに

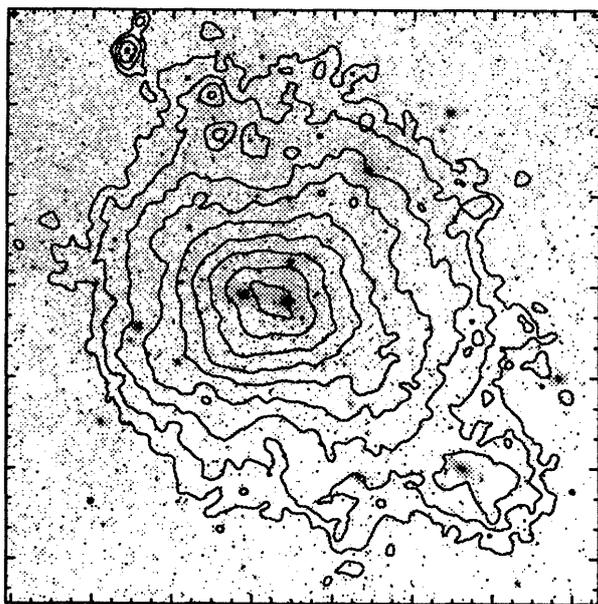


Fig. 1 X-ray surface brightness contours of the Coma cluster of galaxies, superposed on an optical image. Giant elliptical galaxies are seen at the center.

に、宇宙物理学者や天文学者の意識の変革を促したい。

2. 宇宙プラズマの基本特性 — 銀河団プラズマを例として —

2.1 宇宙プラズマの閉じ込め機構

手始めに、宇宙プラズマの閉じ込め機構を考えよう。地上で高温プラズマの閉じ込めに用いる磁場閉じ込めは、宇宙では太陽や星のコロナとして、また慣性閉じ込めは自由膨張する超新星残骸として実現されている。さらに地上にはない機構として「重力閉じ込め」があり、銀河団プラズマはその好例である。そこでX線観測により銀河団プラズマの密度と温度を測り、三次元半径 r の関数として圧力 $p(r)$ を求め、プラズマが重力ポテンシャル中で静水圧平衡にあると考え、半径 r 以内に含まれる銀河団の全重力質量を

$$M(r) = -\frac{kTr}{mG} \frac{d \ln p(r)}{d \ln r} \quad (1)$$

により計算できる[1]。ここに G は重力定数、 m は電子とイオンを平均した粒子質量である。よってX線観測は、暗黒物質を含めた全物質の分布を推定する上で貴重な役割を果たしており、たとえばFig. 3のような測定結果が得られている。

実験室プラズマでは $\beta \equiv (\text{プラズマ圧})/(\text{磁気圧})$ が大

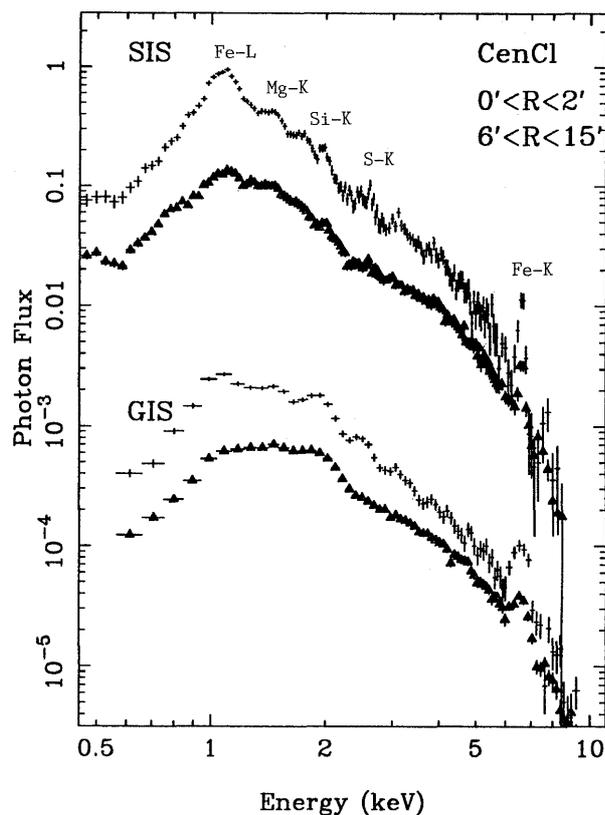


Fig. 2 X-ray spectra of the Centaurus cluster of galaxies, measured with the Soli-State Imaging Spectrometer (top two spectra) and the Gas Imaging Spectrometer (bottom two spectra), both onboard ASCA. Thin crosses represent the spectra at the cluster center, while filled triangles indicate those taken from the cluster periphery.

切なのに対し、以上のように宇宙プラズマでは、プラズマ圧、磁気圧、および重力という三者の大小関係が重要である。これは音速、アルヴェン速度、および自由落下速度の比較と言い替えてもよい。たとえばブラックホール周辺に生じる降着円盤では、この三者が複雑にからみあった現象が生じていると考えられる。さらに宇宙では慣性閉じ込めの変形として、プラズマを別のガスやプラズマの圧力で閉じ込める「圧力閉じ込め」が有効に働く場合もある。たとえば古い超新星残骸では、星間ガスの圧力による圧力閉じ込めが働いている。のちに4.2で、銀河団プラズマにも部分的にこの概念を持ちこむ。

2.2 宇宙プラズマの放射冷却

宇宙初期には微小な密度揺らぎが存在し、それが重力不安定性により成長し、銀河団や銀河が形成されたと考えられている。重力不安定性の主な担い手は暗黒物質だが、当然バリオン（水素とヘリウム）も重力の深い所に

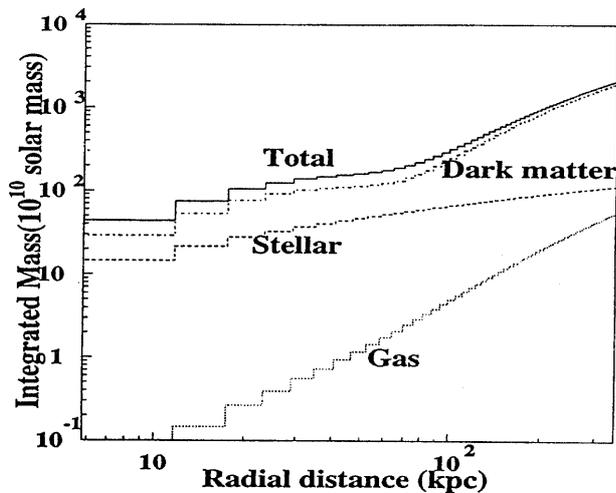


Fig. 3 Radial distributions of the stellar mass, the plasma mass, and the total gravitating mass in the Fornax cluster of galaxies, encircled within the three dimensional radius r . The stellar mass is derived with optical observations, while the plasma mass is derived from X-ray observations. The X-ray data also yield the total mass via equation (1). A bending in the total mass curve at $r \sim 70$ kpc indicates a hierarchy between the cluster potential and that of the central dominant galaxy.

落ち込んで断熱圧縮で高温になり、銀河団プラズマを形成したのであろう。その証拠に、個々の銀河団でのプラズマの温度は、その銀河団の重力場のビリアル温度とほぼ一致する。一方でバリオンの一部は冷え、プラズマの海に浮かぶ島のごとく、銀河を形成したと想像されている。銀河の中の星によって合成された重元素の一部は、超新星爆発などで銀河間空間へと還元され、X線スペクトルの輝線 (Fig. 2) として検出されるに至っている。

このように銀河団プラズマは宇宙論的な現象であって、少なくとも宇宙年齢に匹敵する長時間にわたりX線を放射し続けてきたと考えられる。その証拠に、赤方偏移0.5 (膨張宇宙のサイズが現在の2/3だった時代) を超える遠方の宇宙にも、X線を出す銀河団が発見される。しかしX線放射によりプラズマは冷えてゆく。この冷却時間は、イオンと電子を等温とすれば、X線の体積放射率とプラズマの熱エネルギー密度の比として、

$$\tau \sim \frac{2kT}{n_e \Lambda(T, A)} \quad (2)$$

で与えられる。ここに $\Lambda(T, A)$ はプラズマの冷却関数と呼ばれる量で、温度 T とプラズマの化学組成 A にゆるく依存する。 $kT = 4$ keV, $n_e = 10^4 \text{ m}^{-3}$ で、太陽組成

の1/3の重元素を含む銀河団プラズマでは、 $\tau \sim 20$ 億年となり、宇宙年齢の100–150億年に比べ短い。このため銀河団プラズマは中心部では冷え、圧力が下がるため周辺からプラズマが流入し、密度が上がってさらに冷却が進むという熱的不安定性が、広く進行しているとされている。この考えは、「冷却流 (cooling flow)」と呼ばれ、15年にわたり銀河団の研究を風靡してきた[2]。しかし筆者らは1993年に打ち上げられた宇宙X線衛星「あすか」[3,4]を用いることで、後に4に述べるように、この考えに反する観測事実を次々に発見しつつある。

2.3 もっとも理想的な古典プラズマ

話が前後するが、 $kT = 4$ keV で $n_e = 10^4 \text{ m}^{-3}$ の銀河団プラズマを例にとって、宇宙プラズマの基礎的パラメータを概観してみよう。この場合、平均粒子間隔は $d \sim 0.1$ m, デバイ半径は $\lambda \sim 5$ km, クーロン散乱による電子の平均自由行程は実に $l \sim 1 \times 10^{21}$ m, プラズマのサイズは $L \sim 1 \text{ Mpc} = 3 \times 10^{22}$ m である。ただし1 pc (パーセク) は3.26 光年 $= 3.08 \times 10^{16}$ m にあたる。よってプラズマは完全に流体近似を満たし ($d \ll \lambda$), 無衝突で ($\lambda \ll l$), 境界が無視できる ($l \ll L$)。また高階電離した重イオンの電子準位に共鳴する特性X線を除けば、プラズマは光学的に薄く、放射圧もまったく無視できる。よって粒子の運動は、重力場、直流的な電磁場、および交流的な電磁場 (波動) のみで規定され、無衝突ボルツマン方程式が十分に適用できる。銀河団プラズマは、まさにこれ以上はない、理想的な古典プラズマとなっていることがわかる。

こうして粒子の2体衝突が無視できるので、銀河団プラズマでは古典的な電気伝導度がきわめて高く、よって磁気レイノルズ数は極端に大きくなる。しかも銀河団プラズマ中には0.1–1 nTの磁場 (β にして10–1,000) が広く見られるので、磁気乱流が非常に発達しやすいであろう。1個の銀河団に属する数百個の銀河は、プラズマに満ちた重力ポテンシャルの中をビリアル速度 $\sigma = 400$ –1,000 km s^{-1} で飛び回っているため、銀河はその背後に、カルマン渦のごとく、磁気乱流のシッポを引きずっていると予想される。

3. 宇宙プラズマに関する誤解

3.1 「プラズマと銀河は相互作用しない」か?

プラズマ中を動き回る銀河の話をする時、大半の宇宙物理学者から「プラズマは銀河と相互作用せず、銀河の星間空間をスカスカ自由に通り過ぎるはず」という反論を受ける。しかし本当にそうだろうか。たとえば楕円銀

河は冷たい星間ガスを持たない代わりに、「熱い星間プラズマ」と呼ばれる固有のプラズマをもつ[5]。この熱い星間プラズマは、温度にすると $kT = 0.5 - 1$ keV と銀河団プラズマよりやや低温で、電子密度は 10^{4-5} m^{-3} とやや高く、楕円銀河の重力で閉じ込められており、さらに蜘蛛の糸のような星間磁場と相互作用している。銀河を星に、また銀河団プラズマを星間プラズマに置き換えると、銀河団とよく似た状況が一つ低い階層である銀河においても成り立っていることがわかる。この様子を、Fig. 4 に模式的に示した。

この星間プラズマの圧力 ($\sim 7 \times 10^{-12} \text{ Jm}^{-3}$) は、 $n_e \sim 10^{3.5} \text{ m}^{-3}$ の銀河団プラズマの中を銀河が速度 $\sigma \sim 700 \text{ km s}^{-1}$ で走るときに受ける動圧と、ほぼ拮抗する大きさである。したがって銀河団プラズマは決して容易に銀河の中へは侵入できず、銀河の周辺では複雑な相互作用が発生すると期待される。たとえば、地球磁気圏と太陽風の相互作用に見られるように、大規模な電流系、磁気中性面、磁気リコネクションなどが生じるかもしれない。さらに太陽風が超音速なのに対して、銀河の相対速度 σ は遷音速であり、また銀河団では磁気レイノルズ数がきわめて大きいので、磁気乱流的な特徴が強調され、古典的な電気抵抗をはるかに上回る異常抵抗が発生する可能性が高い。これはプラズマ中に大規模な電場を生み出すので、粒子加速の絶好の舞台となる。

3.2 「磁気エネルギーは重力に比べ無視できる」か？

より一般に宇宙の研究者からは「宇宙では重力が主役で、電磁力は従に過ぎない」という反論を受けることが多いが、はたしてこの主張は本当に正しいだろうか。いま半径 R で質量 M の、ほぼ球形の水素天体を考える。素電荷を e 、陽子質量を m_p 、真空誘電率を ϵ_0 、全陽子数を $N = M/m_p$ とすると、この天体の自己重力エネル

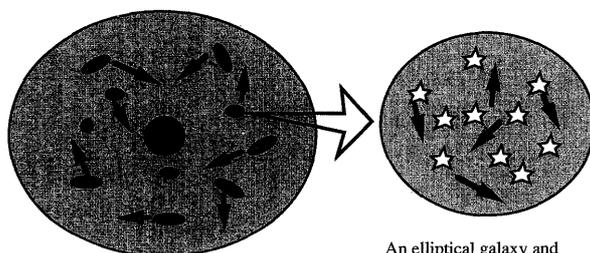


Fig. 4 An illustration of a galaxy cluster and its member galaxies. The cluster is filled with intra-cluster plasma of temperature 2–10 keV, while elliptical galaxies are often filled with inter-stellar plasma of temperature 0.5–1 keV. Both these plasmas are confined by the gravity of respective systems.

ギー U_G および自己静電エネルギー U_E は、およそ

$$U_G \sim \frac{GM^2}{R}, \quad U_E \sim \frac{(\eta Ne)^2}{4\pi\epsilon_0 R} \quad (3)$$

となる。 η は電荷の中性を表す無次元量で、陽子の全電荷 Ne が電子の負電荷により打ち消され、 ηNe だけ残ったと考える。当然 η はたいへん小さい。(3)式の比を作ると、

$$\frac{U_E}{U_G} \sim \eta^2 \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G} \right)^2 = 1.23 \times 10^{36} \eta^2 \quad (4)$$

という美しい形になる。 $\alpha_E = e^2/2\epsilon_0 hc = 1/137$ は微細構造定数、 h はプランク定数、 c は光速、また $\alpha_G = 2\pi G m_p^2 / hc = 5.9 \times 10^{-39}$ は重力の強さを表す無次元の定数である。天体で重力エネルギーが静電エネルギーに勝るという一般的な事実は、(4)式で η が $\ll 10^{-18}$ という小さい値であること、すなわちマクロな電気的中性が、きわめて高い精度で実現されていることの結果である。

次に磁気的なエネルギー U_M を考える。系の代表的なバルク速度を v とし、電子とイオンのバルクな運動が微小な割合 f ($0 \leq f \leq 1$) だけずれているとすると、電流密度は $\mathbf{j} \sim en_e f \mathbf{v}$ となり、磁場 \mathbf{B} は真空透磁率を μ_0 とし $\mu_0 \mathbf{j} = \text{rot} \mathbf{B}$ を満たすから、ごく大雑把に

$$\mathbf{B} \sim \mu_0 R \mathbf{j} \sim \mu_0 R n_e f \mathbf{v} \sim \mu_0 R^{-2} N e f \mathbf{v}$$

を得る。すると $U_M \sim R^3 \cdot (B^2/2\mu_0) \sim \mu_0 (N e f v)^2 / 2R$ となり、これより $U_M/U_E \sim 4\pi (f/\eta)^2 (v/c)^2$ という、これも美しい関係が導かれる。これと(4)式から直ちに

$$\frac{U_M}{U_G} \sim 4\pi f^2 \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G} \right)^2 \left(\frac{v}{c} \right)^2 = 1.5 \times 10^{37} f^2 \left(\frac{v}{c} \right)^2$$

を得る。 $v \sim 1 \text{ km s}^{-1}$ という宇宙では「超低速」であってさえ、磁気エネルギーが無視できるのは $f < 10^{-13}$ の場合に限られる。一般に電子とイオンの相対速度がここまで厳密に一致するとは期待できないので、「磁気エネルギーは重力に比べ無視できる」と決めつけることは無理である。

3.3 「プラズマは中性ガスと同じ」か？

プラズマと中性ガスは同じ古典理想気体の状態方程式に従うので、同じものと考えられがちだが、じつは大きく異なる。本稿の読者には釈迦に説法であろうが、プラズマの特徴は何と言っても、電磁場との緊密な相互作用にある。しかもプラズマは外場に敏感だけでなく、電磁場を自ら作り出し自縄自縛になるところがポイントである。

プラズマを制御システムとして見るなら、電荷・電流分布が電磁場を生成し、その電磁場がプラズマの運動を決めるという、閉ループが形成されていることになる。宇宙物理学でおなじみの「自己重力系」という表現を借りるなら、プラズマは「自己電磁力系」であり、電磁場がベクトル場である分、重力よりずっと複雑である。統計物理学の立場で言えば、プラズマ中の空間電荷や電流は、ミクロな荷電粒子が作り出すマクロな秩序パラメータと見なせ、それは電荷保存を司るゲージ変換に対して、系の対称性が自発的に破れることにより出現する。場の理論のコトバで言えば、この対称性の破れの結果、プラズマ中では光子が有限の質量を持ち、真空中では存在しなかった電磁場の縦波モードがプラズマ振動として登場する。これは、素粒子論における「ヒッグスの機構」のお手本となっている。

プラズマのこうした特徴がもっとも如実に現れるのは、宇宙プラズマにおける加熱や粒子加速現象であって、温度 6,000 K の太陽表面の上空に 3 桁も高温のコロナが維持されているのは、その好例である。こうした場合、系の温度差が増大したりエネルギーが非等分配されたりして、結果として自発的な秩序形成が行われることが多い。これは中性ガスではほとんど見られない特徴である。星などの自己重力系は自発的にエントロピーの減少する開放系であることはよく知られているが、自己電磁力系としてのプラズマにも、同様な性質がそなわっているように思われる。

3.4 ほかに多くの誤解が...

宇宙プラズマに関してはほかにも「磁力線はどこかにアンカーされねばならない」「磁気圧がプラズマの数パーセントなら電磁相互作用は無視できる」「種磁場が非常に弱ければ磁気圧がプラズマ圧に近づくことはない」「大規模な電場は存在しえない」など、数多くの誤解がある。いちいちあげつらう代わりに、簡単な例題をやってみよう。

いま星間プラズマの中に半径 a の仮想的な細長いチューブを考え、その軸方向に、電子がイオンに対してバルクな相対流速 u を持つとする。この u はポロイダル磁場を作るので、そのポロイダルベータ = (プラズマ圧) / (ポロイダル磁気圧) を β_p とすれば、

$$\begin{aligned} 1/\beta_p &\sim \left(\frac{u}{w}\right)^2 (\omega_p t)^2 \\ &= 1 \times 10^{17} \left(\frac{u}{w}\right)^2 \left(\frac{n_e}{10^4 \text{ m}^{-3}}\right) \left(\frac{a}{100 \text{ au}}\right)^2 \end{aligned}$$

が成り立つことが計算できる。ここに ω_p はプラズマ振動数で数 kHz、 $t = a/c$ はチューブ半径を光が伝播する時間、 w は電子のランダムな熱運動速度、また $a = 100 \text{ au} = 1.5 \times 10^{13} \text{ m}$ (au は天文単位で太陽と地球の距離) は典型的な星の磁気圏の半径である。よってもし温度勾配や天体の運動により、半径 100 au 程度にわたって $u/w > 10^{-8}$ 程度のきわめて微小な電子の流れがあれば、 $1/\beta_p$ はすぐ 1 を上回ってしまい、磁気圧が優勢な状況になってしまう。もちろんそうなればソーセージ型やキンク型の不安定性で電流チューブは壊れるだろうが、ともかく宇宙ではいとも簡単に、どこにもアンカーせず、プラズマ圧に匹敵する磁場が生じるのである。銀河団プラズマは a が大きいから、この傾向はより極端になると想像される。

4. 銀河団プラズマのプラズマ物理的な解釈

4.1 プラズマの多温度構造

いよいよ、銀河団プラズマの最新の結果を説明する段階になった。銀河団の X 線スペクトルには強い鉄の K 輝線が見え、銀河団の中心部分に近づくにつれ、しばしばシリコンやマグネシウムの K 輝線、鉄の L 輝線群などが強くなる (Fig. 2)。これらの輝線は $kT \sim 1 \text{ keV}$ の低温プラズマに特有なので、いっぽんに銀河団の中心付近には、周辺より低温のプラズマ成分がいることを意味する。その領域では X 線の輝度も鋭いピークを示し、プラズマ密度が集中的に高くなっていることも知られる。従来これらの現象は、プラズマが放射冷却で低温となり、そのため密度が上がって X 線放射率が増すためと解釈されてきた。2.2 で述べた冷却流のアイデアである [2]。

ところが「あすか」で多くの銀河団を、世界で初めて精密に撮像分光観測したところ、たとえば Fig. 2 のケンタウルス座銀河団では、中心部の X 線スペクトルは 1.4 keV と 4.0 keV の 2 温度でよく記述でき、それ以外の温度成分は必要とされなかった。プラズマが連続的に冷えているというより、高温と低温の 2 成分が混在し、低温成分は銀河団の中心部にのみ存在するのである [6]。他の銀河団でも状況はほぼ同じであった。さらに (1) 式で重力ポテンシャルを計算したところ、銀河団の全体を現わす大規模なポテンシャルの凹みに、中心銀河のもつポテンシャルの凹みが重なり、階層構造を作っている例が、いくつも発見された [7, 8]。中心で X 線輝度が鋭くピークするのは、この余分なポテンシャルの凹みがプラズマの密度を上げるためだったのである。さらに多くの

銀河団の中心部で、プラズマの重元素組成が、周辺部に比べて増加していることが明らかになった。

ここまでくれば答えは明らかで、じつは高温成分が銀河団プラズマ、低温成分が中心の巨大銀河の星間プラズマで、両者はほぼ圧力平衡にあると考えられるのである。この新解釈は国内ではかなり理解を得つつあるが、国外ではまだ冷却流の信奉者が圧倒的に多い。

4.2 プラズマの熱的安定性

ではいったい、温度 1.4 keV と 4.0 keV の 2 種のプラズマは、銀河団の中心付近でどのように混在しているのだろう。低温成分は高密度なので、(2)式によれば宇宙年齢の約 1/100 の時間で冷却しつぶれてしまう。かといって高温成分と低温成分の熱的な結合を強めると、2.3 で述べたように (異常抵抗があるとはいえ) 熱伝導が効いて、2 つのプラズマはより短い時間で等温になってしまう。2 成分が安定に共存するのは不思議であり、これまで冷却流の考えが信じられていたのも、それなりの理由があったことがわかる。

そこで悩んだ末に思い至ったのが、Fig. 5 のような磁気配置モデルである。ここでは中心銀河が大規模な磁場を持ち、太陽と同様に、その一部が閉じたコロナを作り、残りは銀河間空間に向けて開いていると仮定する。コロナ領域は、重元素に富んだ中心銀河の星間プラズマで満たされるだろう。筆者はこれを太陽コロナとの類推で「中心銀河コロナ」と呼んでいる。いっぽう磁力線の開いたコロナルホール領域には、高温の銀河団プラズマが侵入して 2 相共存状態を作る。2 相は磁場で隔てられているため、その間の熱伝導は無視できる。中心銀河は重力ポテンシャルの底に静止しているので、銀河団プラズマの動圧は受けない。低温成分は、中心銀河の重力に加えて、外部から高温成分の圧力により閉じ込められる。よって平均磁場は ~ 0.3 nT ($\beta \sim 100$) という弱いものでも十分と思われる。

中心銀河の周辺には、小ぶりの多数の銀河が速度 σ で飛び回っており、コロナをかすめて磁気リコネクションを起こしたり、開いた磁力線を刺激してアルヴェン波を励起し、中心銀河コロナを加熱していると想像される (Fig. 5)。銀河団の中心付近のアルヴェン時間は宇宙年齢の 1/10 程度なので、この間に周辺銀河のもつ運動エネルギー (1×10^{54} J 程度) が磁気流体的なメカニズムで散逸されれば、 2×10^{37} W 程度の加熱源となる。これは低温成分の典型的な放射光度 1×10^{35} W を 2 桁しのごので、アルヴェン時間より 2 桁ゆっくりエネルギー散逸が起きてても、低温成分を維持するには十分である。

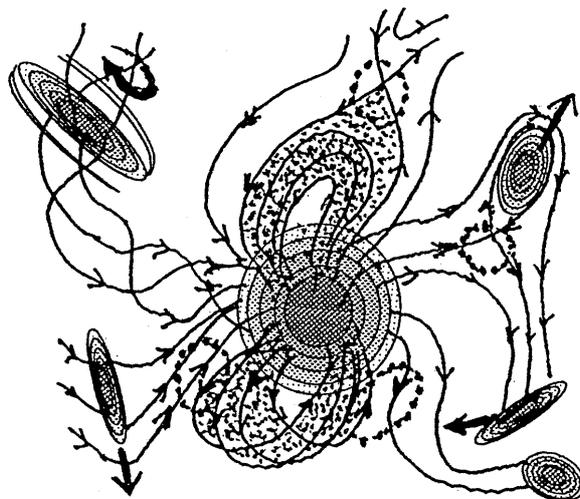


Fig. 5 An speculative view of the central region of a cluster of galaxies. The big circle at the center indicates the central dominant galaxy, while smaller ellipses show other galaxies of which the motion is indicated by arrows. Curves represent magnetic field lines, which may reconnect in regions indicated by dotted circles. The dotted region is the corona associated with the central galaxy, where the cooler plasma component is confined.

太陽コロナなど、細長い磁気ループを満たすプラズマでは、加熱が放射や磁力線に沿う熱伝導とつりあっているとき、Rosner-Tucker-Vaiana (RTV) スケーリングという現象論的な関係式

$$T_{\max} = 3.3 \times 10^3 (pL)^{0.39} \text{ [K]}$$

が成り立つと考えられる [9]。ここに L [m] はループの長さ、 p [Nm^{-2}] はループの圧力、 T_{\max} は内部のプラズマの最高温度である。そこで p に銀河団の高温成分の典型値 ($kT = 4$ keV, $n_e = 3 \times 10^3 \text{ m}^{-3}$) を代入し、 L としては低温成分が見られる典型的な半径 $30 \text{ kpc} = 9 \times 10^{20} \text{ m}$ を用いると、 $T_{\max} = 1.7 \times 10^7 \text{ K} = 1.5 \text{ keV}$ と計算され、ケンタウルス座銀河団で実測された低温成分の温度 1.4 keV がよく再現できる。しかも 10 個ほどの銀河団のデータは RTV スケーリング則にはほぼ乗るので、低温成分が細長い形をもち、高温成分の圧力で閉じ込められていることが示唆される。

4.3 銀河団での粒子加速

もし銀河団の中でリコネクションなどのプラズマ現象が起きているなら、単なる磁気流体的な加熱のみならず、2.3 で触れたように粒子加速も起きている可能性が高く、実際そのような証拠が得られつつある。 $kT \sim 150$ keV の硬 X 線まで観測できるイタリアの BeppoSAX 衛星は、

いくつかの銀河団で、熱的プラズマ放射に重なって、非熱的とおぼしき硬X線成分を検出している。「あすか」はエネルギー範囲が0.5–10 keVに限られているものの、10個を超える銀河群から、やはり非熱的と思われる硬X線を検出している。銀河群とは、もっとも小規模な銀河団をいい、高温プラズマ成分の温度が1–2 keVと低いため、熱的放射のスペクトルが柔らかく、よって硬X線成分が検出しやすいと考えられる。

これら硬X線の放射機構は定かではないが、たとえば太陽フレア硬X線放射のように、銀河間の空間で電子が数百 keVの準相対論的なエネルギーにまで加速され、それらが熱的イオンを標的として制動放射を行っているのかもしれない。これが普遍的な現象ならば、非熱的電子のもつ圧力はプラズマ圧に匹敵するので、(1)式で p が増殖し、そのため全重力質量 M が、よってその主成分である暗黒物質の推定量が、倍増する可能性がある。これは宇宙物理学にとって、きわめて大きなインパクトとなる。

さらに興味あるのは、銀河団の中で、粒子が超高エネルギーにまで加速されているという可能性である。地上に降り注ぐ宇宙線のうち 10^{15} eV程度のものであれば、最近の「あすか」の成果により、超新星残骸の中で加速されていることが確実となった[10]。しかし 10^{20} eVに達する最高エネルギーの宇宙線の起源は謎のままである。何となく、銀河団がその加速現場かもしれない、と思い始めている人も少なくない。そこでFig. 6を見ていただこう。これは筆者の独断と偏見で、プラズマ実験装置や地球磁気圏から宇宙まで、粒子加速の現場で到達されているエネルギーをまとめたもので、それは系のサイズ L 、磁場強度 B 、そして代表速度 v の三者の積に、けっこうよく相関していることがわかる。もしこの相関が正しいなら、銀河団では $L \sim 1 \text{ Mpc} = 3 \times 10^{21} \text{ m}$ 、 $v = \sigma \sim 700 \text{ km s}^{-1}$ 、 $B \sim 0.3 \text{ nT}$ なので $vBL \sim 10^{18} \text{ V}$ となり、最高エネルギーに近いところまで加速が可能かもしれない。

このように今後の研究の鍵は、硬X線から γ 線にかけての宇宙観測である。このため私たちは東京大学と宇宙科学研究所を中心に、10–700 keVに感度をもつ硬X線検出器(HXD; Hard X-ray Detector)を開発中である[11]。HXDは「あすか」の後継機として2000年の冬に打ち上げ予定のASTRO-E衛星に搭載され、従来にない感度で宇宙硬X線の探査を行う。銀河団からの非熱的放射をキャッチすることが、その重要な目的の一つであることはいうまでもない。

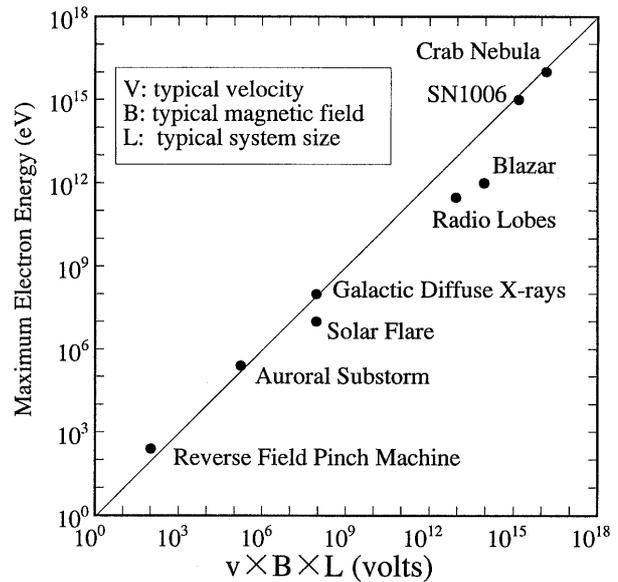


Fig. 6 The maximum particle energies measured at various particle acceleration sites, plotted as a function of $v \times B \times L$. Here v , B , and L are the typical velocity, the representative magnetic field, and the linear size of the system, respectively.

4.4 プラズマから銀河への反作用

以上で述べたアイデアの骨子は、暗黒物質の作る重力ポテンシャルの中で、銀河が徐々に運動エネルギーをプラズマ加熱や粒子加速に費やすというものである。よって当然ながら、銀河の運動に反作用が及ぼされるだろう。まさにこの期待どおり、銀河団での銀河(あるいは星)の分布は一般に、プラズマの質量分布よりも中心に集中しており(Fig. 3)、宇宙年齢の間に銀河が徐々にポテンシャルの底に沈んできたことを示唆している。

銀河団の中心付近ではプラズマ密度が高いため、渦巻銀河の自転によりラセン状のアルヴェン波がプラズマ中へ伝わり、それを通して銀河の自転角運動量が、プラズマへと輸送されるだろう。また銀河団の中で一對の銀河が「連銀河」の状態にあるとき、その軌道角運動量もプラズマにより抜き取られ、2個の銀河は速やかに合体するだろう。一般に渦巻銀河が角運動量を失ったり合体したりすると、楕円銀河になると考えられている。すなわち銀河団の中心では楕円銀河が多く、銀河団の周辺やその外では、渦巻銀河が多いことが予想される。これはまさに光学観測で古くからよく知られた事実であって、銀河とプラズマとの相互作用を考えることにより、少なくとも定性的には説明が可能である。

さらに決定的な証拠が、ハッブル宇宙望遠鏡で得られ

た。すなわち赤方偏移が0.5程度 (2.2参照) にある遠方の銀河団では、近傍の銀河団に比べて明らかに渦巻銀河が多く、しかも銀河どうし強く相互作用している様子が発見されたのである[12]。遠方ということは昔の姿であるから、実際銀河団の中で、渦巻銀河が楕円銀河へと変身してきたことは疑いないと考えられる。

5. おわりに

以上、いささか筆者の独断に走った部分もあるが、宇宙とプラズマ動力学を結びつけ、さらにそれを物理学の基本に還元するという試みが、21世紀の大きな潮流となることを期待したい。著者の浅学非才のため誤りも少なくないと思われるので、読者諸氏のご指摘をいただければ幸甚である。

筆を置くにあたり、プラズマ研究の指導を賜った吉川庄一先生 (プリンストン大学) と遠山潤志先生 (東京大学)、同じハンゴーの飯を食った仲間としてこの執筆を助めてくれた筑波大学の市村 真氏、プラズマ界の畏友である伊藤公孝 (核融合科学研究所) ・早苗 (九州大学) 夫妻、RTV スケーリングを教えて下さった天文台の常田佐久氏、銀河団での粒子加速をいち早く提唱されている京都大学の小山勝二氏、いつも刺激的な議論を下さる田嶋俊樹氏 (テキサス大学)、寺沢敏夫氏 (東京大学)、柴田一成氏 (京都大学)、そして「あすか」とHXD のチームメイトに感謝したい。

参考文献

- [1] C.R. Sarazin, *X-ray emission from Clusters of Galaxies* (Cambridge University Press, 1988).
- [2] A.C. Fabian, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* **32**, 277 (1994).
- [3] Y. Tanaka, H. Inoue and S.S. Holt, *Publ. Astron. Soc. Japan* **46**, L37 (1994).
- [4] 牧島一夫, 井上 一, 田中靖郎: 日経サイエンス 1994年1月号, p.23.
- [5] W. Forman, C. Jones and W. Tucker, *Astrophys. J.* **293**, 102 (1985).
- [6] Y. Fukazawa, T. Ohashi, A.C. Fabian, C.R. Canizares, Y. Ikebe, K. Makishima, R.F. Mushotzky and K. Yamashita, *Publ. Astron. Soc. Japan* **46**, L55 (1994).
- [7] Y. Ikebe, H. Ezawa, Y. Fukazawa, M. Hirayama, Y. Ishisaki, K. Kikuchi, H. Kubo, K. Makishima, K. Matsushita, T. Ohashi, T. Takahashi and T. Tamura, *Nature* **379**, 427 (1996).
- [8] 牧島一夫: 科学 **66**, 353 (1996).
- [9] R. Rosner, W. Tucker and G. Vaiana, *Astrophys. J.* **220**, 643 (1978).
- [10] K. Koyama, R. Petre, E.V. Gotthelf, U. Hwang, M. Matsuura, M. Ozaki and S.S. Holt, *Nature* **378**, 255 (1996).
- [11] T. Takahashi *et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl.* **120**, 645 (1996).
- [12] A. Dressler, A. Oemler Jr., W.B. Sparks and R.A. Lucas, *Astrophys. J. Lett.* **435**, L23 (1994).