

平成 21 年 4 月 16 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2006～2008

課題番号：18540241

研究課題名 (和文) 銀河団ガスの乱流による統計的粒子加速と非平衡放射過程

研究課題名 (英文) Stochastic Particle Acceleration and Nonequilibrium Radiation in Clusters of Galaxies

研究代表者

政井 邦昭 (MASAI KUNIAKI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：80181626

研究成果の概要：銀河団どうしの衝突・合体で予想される粒子加速の研究を行い、生成される超熱的粒子のエネルギースペクトルの特徴を明らかにした。熱的粒子と非熱的粒子の中間領域に生じる準熱的粒子に着目して熱的粒子との相互作用による非平衡放射の研究を行い、平衡にある多温度プラズマと比較して放射損失などの特性を明らかにした。これらの結果を元に銀河団の熱的進化、コア半径分布、X線光度-温度関係則などを議論した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	900000	0	900000
2007年度	700000	210000	910000
2008年度	600000	180000	780000
年度			
年度			
総計	2200000	390000	2590000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：宇宙物理学, X線天文学, 天文, 銀河団

1. 研究開始当初の背景

宇宙の構造形成において、最大の自己重力系である銀河団の形成は基本的に自己重力コラプス～ビリアル平衡として捉えられる

が、実際の形成過程では、比較的小規模の銀河群の合体、銀河団による小規模銀河群の吸収というダイナミックな進化を伴うと考えられる。この過程で銀河団ガ

スは乱流状態になりうる。実際、乱流の起こることが銀河団形成シミュレーションによって示唆されている他、Chandra X線観測によって明らかにされたサブ構造の存在や衝撃波の痕跡と見られる密度の不連続面の存在は、銀河団がダイナミックな形成過程を経ていること、合体などによる擾乱の影響が大きいことを示唆している。

乱流の存在は銀河団ガスの熱的構造に影響を及ぼす。いくつかの銀河団ではコアの放射冷却時間が宇宙年齢より短く、そのため、冷却による中心部での圧力低下に伴い外側の高温領域からのガスの流入があると考えられた。しかし、観測された低温ガスの量はいわゆるクーリングフローモデルの予想をはるかに下回るものであった。低温ガスのかなりの割合が既に星になっているとすれば銀河1個分の質量に相当し、やはり説明は困難で矛盾は解決していない。

乱流による加速では、衝撃波による加速に比べ、比較的低エネルギーの準熱的粒子が生成される。準熱的粒子と熱的粒子との相互作用による非平衡放射が支配的であれば、ガスの放射冷却時間はクーリングフローモデルが想定しているより長く、むしろ準静水圧平衡の下でガスは冷却する。銀河団の形成・進化の過程で生じたガスの乱流状態の研究は、銀河団中心部のAGN（活動的銀河中心核）活動による高エネルギー粒子の研究と相補的に、クーリングフロー問題を解決する手がかりとなる。

2. 研究の目的

本研究は、銀河団の衝突・合体に伴って生成される超熱的粒子から銀河団の進化を探ることを目的とする。銀河団の形成過程

からすれば数100km/s程度の乱流が存在するのは自然であり、そのようなダイナミクスの中でガス粒子がMaxwell分布にあると考える方がむしろ不自然である。加速機構が働いている場合の粒子のエネルギースペクトルを、熱的成分から非熱的加速粒子まで整合的に求めることが本研究における一つの課題となる。銀河団の形成過程を通して統計的な2次加速で生成される超熱的粒子、とくに準熱的粒子に着目する。

非熱的粒子はバックグラウンドの熱的粒子と殆ど相互作用しない。それゆえ加速領域に留まることができ、高エネルギーまで加速されうるが、ガスの熱的状態への寄与は小さい。一方、準熱的粒子は熱的粒子とのCoulomb散乱が効いて加速過程に留まることができない粒子群で、エネルギー分布において熱的粒子(Maxwell分布)と非熱的粒子(power-law分布)の中間領域に形成される。熱的粒子との相互作用で非平衡状態の放射をするので、ガスの放射冷却や圧力平衡などガスの熱的構造の解釈に大きな影響を及ぼす。この研究によって銀河団の熱的構造を見直し、観測や解析に対し銀河団の進化を探る新たな着眼点を提案することを目指す。

3. 研究の方法

本研究での定量的計算には、粒子の分布関数を求めるコード、相互作用による放射を計算するコードが必要となる。また、銀河団の熱的進化に伴う力学平衡や衝突・合体の影響を調べるために3次元流体力学コードも用いる。

乱流による 2 次統計加速の Fokker-Planck 方程式による定式化を行い計算コードを作成した。これは、空間的には一様等方と仮定し、運動量空間における advective および diffusive な輸送を考えて分布関数の時間発展を断熱的に追いかけるものである。乱流に伴う磁場などの散乱体が無い場合は定常解として Maxwell 分布が実現されることを確かめたうえで、加速の計算に適用した。この計算スキームでは、バックグラウンド熱的粒子の初期密度・温度と、散乱体の速度の 2 乗 / 平均間隔の比が粒子のスペクトルを決める主要因である。銀河団形成のシミュレーションや衝突・合体のシミュレーション、間接的な観測事実などを参考にして、銀河団ガスで期待される乱流の物理量やガスの密度・温度の範囲を絞り込み、上記のコードを用いて粒子スペクトルの計算を行った。

次の課題は放射の計算である。超熱的粒子が混在する場合でも、熱的粒子との相互作用による非平衡放射は多温度プラズマからの熱的放射のように見える。また、非熱的粒子の寄与は極めて小さく power-law スペクトル成分は殆ど見えないとの見通しがあった。観測でも実際、銀河団ガスの放射は熱的なモデルで解析されている。全体的なスペクトルで超熱的粒子の存在を言うのは難しいため、非平衡放射の特徴を示す輝線に着目して研究を行った。

これらを総合し、乱流の物理量の推定、それによって加速・生成される準熱的粒子のスペクトル、熱的粒子との相互作用による非平衡放射の計算、それをもとに推定されるガスの密度・温度からガスの熱的構造や放射冷却問題を見直す、という流れで銀

河団の研究を進めた。

4. 研究成果

銀河団の熱的状态・進化を調べる目的で、初期に自己相似性を持つモデル銀河団の進化をシミュレーションし、放射冷却に伴って、銀河団は小さなコア半径の重力平衡分布へと推移して行くことを明らかにした。しかし、クーリングフローのような大規模なガスの中心部への流入は起きず、銀河団形成時の密度・温度によって決まる固有の冷却時間スケールまで、静水圧平衡を保ちながら緩やかに質量分布が変わっていくことが分かった。一方、比較的大きなコアをもつ銀河団では、コア半径とビリアル半径の間に自己相似性が見られ、放射冷却が未だ効いておらず、重力コラプスによる形成時の特性が残されていると解釈される。

シミュレーションから得たコア半径分布は、観測されている分布の基本的な特徴である ~ 60 kpc と ~ 220 kpc の 2 つのピークを再現することを示した。しかし、 ~ 220 kpc ピークの裾に広がるコア半径 > 400 kpc の少数の銀河団を、シミュレーションでは再現し得ないという結果も得た。このことは、単一の銀河団の熱的・力学的進化では説明できないことを意味しており、銀河団の合体など大規模な進化の過程を経た可能性が示唆される。実際、これらの銀河団では、放射冷却時間スケールが宇宙年齢より十分長い一方で、自己相似性が失われていることを示した。

銀河団の合体が放射冷却の抑制に関わっている可能性を理論的に裏付けるため、

合体に伴う粒子の加熱・加速過程を調べた。銀河団 - 小規模銀河団（銀河群）衝突では、小規模銀河団のガス温度が低く、相互作用が密度の低い周縁部で起こるので粒子は高エネルギーまで加速されやすい。しかし、非熱的粒子は熱的粒子と殆ど相互作用せず、また、周縁部であるためコアの熱的状态に及ぼす影響は小さい。しかし、小規模銀河団との衝突の名残と考えられるコールドフロントが比較的内部に見つかっている銀河団もあるので、結論づけるにはさらに検討を要する。

一方、同規模の銀河団 - 銀河団衝突では、ガス温度が比較的高いため発生する衝撃波が弱く 1 次の粒子加速は期待できないが、緩やかな 2 次の加速が起きる：衝撃波が伝播した後不規則な磁場が残され、それによって熱的粒子が散乱される。加速された粒子は熱的粒子と相互作用して一部は準熱的分布を形成し、非熱的粒子は殆ど生成されない。銀河団中心部の温度に近い ~ 1 keV のガスでこのような粒子加速が起きると、熱的 - 準熱的粒子相互作用によって非平衡放射となり 4-5 keV の“熱的”放射のように見えることを示した。これは銀河団ガスから観測されている典型的温度である。また、この非平衡状態では、放射される K 輝線は衝突励起によるものでなく再結合 - カスケードによるものなので放射損失には全く寄与しないこと、L 輝線放射が強く抑制されることによって、平衡にある熱的放射に比べ著しく放射冷却率が小さくなることを示した。銀河団ガスの実際の放射冷却時間スケールは、観測で平衡を仮定して得た温度・密度から推定されているものよりずっと長い可能性がある。

生成される準熱的粒子の分布がバックグラウンドの熱的粒子にどのように依存するか、温度 $kT = 0.3-1.0$ keV の範囲の Maxwell 分布について調べた。その結果、何れの温度でも普遍的に、バックグラウンド粒子の 5 倍程度の温度の Maxwell 分布で近似される準熱的粒子が形成されることが確かめられた。

最近の銀河団の観測からは以下のような知見が得られる：電波ハローは一定期間だけ活動しており、大規模な銀河団合体で加速された電子によるものと解釈するのが自然である。電波放射と X 線放射ガスの温度には相関が見られ、合体は加速だけでなくガスの加熱にも効いていると考えられる。以上の結果は本研究課題の見通しどおりであるが、バックグラウンドの熱的電子を高エネルギー電子の種としてきた本研究に対し、観測的研究からは、過去に加速された高エネルギー陽子衝突による 2 次電子が種となる可能性も示唆される。これは今後の研究で考慮すべき点である。また、本研究では超熱的粒子の生成過程を調べてきたが、一度生成された高エネルギー電子の時間発展が解釈の争点になっている。今のところ理論計算でも全く対照的な結果が出されており、生成過程から整合的に時間発展を追うことで決着をつけることも今後の課題である。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計 8 件）

(1) N. Ota, T. Kitayama, K. Masai, Lx-T Relation and Thermal Evolution of Galaxy Clusters, Chinese J. Astron. Astrophys. Suppl., 8, 2008, 84-92.

(2) E. Miyata, K. Masai, J.P. Hughes, Evidence for Resonance Scattering in the Suzaku X-Ray Spectrum of the Cygnus Loop, Publ. Astron. Soc. Japan, 60, 2008, 521-526.

(3) T. Akahori, K. Masai, Core Structure of Intracluster Gas: Effects of Radiative Cooling on Core Sizes, ESO Astrophysics Synposia, 2007, 39-41.

(4) V.A. Dogiel, K. Masai, C.M. Co, P. Kuo, C. Hwang, W. Ip, Continuum and Line Emissions from the Galactic Ridge and Clusters: Problems of Interpretation and Ways of Solution, Prog. Theor. Phys. Suppl., 169, 2007, 131-135.

(5) K. Masai, Suprathermal Electrons in Hot Interstellar/Intracluster Media, Prog. Theor. Phys. Suppl., 169, 2007, 41-44.

(6) T. Akahori, K. Masai, Core Structure of Intracluster Gas: Cooling Effects of Radiative Cooling on Core Sizes, 58, 2006, 521-527.

(7) N. Ota, T. Kitayama, K. Masai, M. Mitsuda, Lx-T Relation and Related Properties of Galaxy Clusters, Astrophys. J., 640, 2006, 673-690.

[学会発表] (計 4 件)

(1) 赤堀卓也, 太田直美, 政井邦昭, β モデルに基づいた中心ガス / 質量比の放射冷却による熱的進化, 日本天文学会 2007年春季年会, 2007年3月28-30日, 東海大学.

(2) 政井邦昭, X線によるプラズマ診断, シンポジウム: すぎく衛星の拓く高エネルギー宇宙物理学, 日本物理学会 2007年春季大会, 2007年3月25-28日, 首都大学東京.

(3) 赤堀卓也, 政井邦昭, 銀河団ガスのコア構造: ガス質量比の熱的進化と自己重力の影響, 日本天文学会 2006年秋季年会, 2006年9月19-21日, 九州国際大学.

(4) 政井邦昭, 高エネルギー宇宙プラズマの放射過程, 日本地球惑星科学連合 2006年大会, 2006年5月14-18日, 幕張メッセ.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

政井 邦昭 (MASAI KUNIAKI)

首都大学東京・大学院理工学研究科・教授

研究者番号: 80181626

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし