

研究種目：若手研究（スタートアップ）

研究期間：2007～2008

課題番号：19840008

研究課題名（和文） 宇宙論的なバリオン進化の理論的研究

研究課題名（英文） Theoretical studies on the evolution of the cosmic baryons.

研究代表者

吉川 耕司（YOSHIKAWA KOHJI）

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・講師

研究者番号：70451672

研究成果の概要：

宇宙最大の天体である銀河団外縁部やその周囲の銀河間空間には、まだ観測的に同定されていないバリオン（陽子・中性子からなる物質）が極めて希薄なプラズマガスの形で大量に存在すると考えられている。本研究では、その様な観測的に未同定のバリオンの物理的諸性質を将来の観測において調べる際に重要となる、プラズマのイオンと電子の温度が異なる二温度状態や非平衡電離状態を数値シミュレーションによって調べ、衝突中の銀河団や銀河団外縁部の衝撃波においてプラズマの電離状態が電離平衡から逸脱することがわかった。またプラズマの二温度状態が起きる場合には電離平衡からのずれがより大きくなることが分かった。特に、A399 と A401 という実際に観測された衝突銀河団を再現するシミュレーションでは、観測的に発見されていない衝撃波において非平衡電離状態と二温度状態が発生していることを予測し、この結果をもとに Suzaku 衛星に観測提案を行った。更に、様々な衝突条件での衝突銀河団の数値シミュレーションを行った結果、衝突条件に強く依存せず非平衡電離状態や二温度構造が普遍的に発生することも発見した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,220,000	0	1,220,000
2008 年度	1,350,000	405,000	1,755,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,570,000	405,000	2,975,000

研究分野：宇宙物理学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理（4301）

キーワード：数値シミュレーション、銀河団、銀河間物質

1. 研究開始当初の背景

宇宙マイクロ波背景放射の観測やビッグバン元素合成理論から、我々の宇宙に存在する

バリオンが宇宙全体のエネルギー密度に占める割合は4%程度であることが分かっている。しかしながら、現在の我々の宇宙で観測的に同定できているバリオンのエネルギー

一密度は、上記の値の半分以下しかない。この未同定のバリオンはダークバリオンと呼ばれ観測的宇宙論における重要な未解決問題の一つである。宇宙大規模構造形成の数値シミュレーションによれば、このダークバリオンは、温度が10万度から1000万度の希薄なプラズマガスとして銀河団外縁部や宇宙の大規模構造に沿って広がった分布をしていると考えられているが、次世代のX線観測衛星でこのダークバリオンの同定を行うことが計画されている。

一方、ダークバリオンのような希薄なプラズマでは、その密度の低さの為にプラズマを構成するイオンと電子が異なる温度を持つ二温度状態やプラズマ中のイオンの電離状態が電離平衡状態から逸脱する非平衡電離状態が生じていることが指摘されていた。将来の観測計画でダークバリオンが同定された際に、温度・密度・重元素量などの物理的な諸性質を明らかにするには、このようなプラズマの二温度状態や非平衡電離状態を考慮する必要があるが、これまではこれらの効果が観測に及ぼす影響を数値シミュレーションで理論的に予想した研究はなく、その実現が期待されていた。

2. 研究の目的

本研究では、高い分解能で非平衡電離状態やプラズマのイオン・電子間の熱的緩和過程などの詳細な物理過程を考慮した数値シミュレーションを用いて宇宙論的文脈でのバリオンの熱的・化学的な進化を調べることにある。特に、プラズマの非平衡電離状態と二温度状態はお互いに密接に関連していると予想されるが、この二つの効果を同時に考慮した数値シミュレーションを世界で初めて行うことにある。

次に、得られたシミュレーション結果から、プラズマガスの非平衡電離状態や二温度状態がX線観測にどのような影響を与えるか、逆にX線観測からどのようにプラズマガスの非平衡電離状態や二温度状態を検出するか、といった課題に取り組むことも重要な目的である。特に、後者の目的は純粋なプラズマ物理学の問題としても重要である。というのも、希薄なプラズマにおける二温度状態は流体としての衝撃波によって生じ、イオンと電子の間のエネルギー緩和がどのような物理過程を通じて起きるかに強く依存するからである。エネルギーの緩和過程として、イオンと電子の間のクーロン散乱だけを考慮した場合は二温度状態が実現されるが、何らかのプラズマとしての緩和過程が働く場合にはエネルギー緩和がクーロン散乱よりも極めて短いタイムスケールで進むため二温度

状態にはならないと考えられる。このため、将来のX線観測によってプラズマガスが二温度状態にあるか否かを調べることは、即ち希薄なプラズマにおける熱的緩和過程を調べることになる。

また、以下に述べるように、本研究の数値シミュレーションには、バリオンを流体として Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を採用するが、この SPH 法を高速に計算するために Intel 社や AMD 社のプロセッサで利用可能な Streaming SIMD Extension (SSE) と呼ばれる浮動小数点演算を通常の数倍の速さで行うことが可能な命令セットを使って実装することも研究目的とする。

3. 研究の方法

本研究の研究手法は銀河団や宇宙の大規模構造中のバリオンの力学的・熱的進化の数値シミュレーションである。

数値シミュレーションは、ダークマターとバリオンの2成分を粒子法によって表現し、それらの自己重力計算はN体シミュレーションで解き、流体力学計算は Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法で解く。更に、プラズマの二温度構造を調べるために、イオンと電子はその平均温度を持つ一つ流体として表現しその内部でのエネルギー緩和を解くこととした。また、非平衡電離状態の計算は、各 SPH 粒子について水素・ヘリウム他に酸素・炭素・ケイ素・鉄などの重元素の電離状態の属性を持たせ、衝突電離・光電離・再結合過程による電離状態の時間発展を解いた。

更に、N体シミュレーションによる自己重力計算やSPH法による流体力学計算を加速するために、Intel社やAMD社のプロセッサで利用可能な Streaming SIMD Extension (SSE) と呼ばれる浮動小数点演算を通常の数倍の速さで行うことが可能な命令セットを利用した数値計算ライブラリを開発し、それを用いて数値シミュレーションを行った。

実際の数値シミュレーションは、筑波大学計算科学研究センターの FIRST システム及び T2K-Tsukuba システムを利用した。

4. 研究成果

本研究では、プラズマの二温度構造と非平衡電離状態を同時に考慮した自己重力流体シミュレーションをおこなうコードを世界で初めて開発し、数値シミュレーションを行った。これにより、これまで電離平衡状態および一温度流体を仮定して行われてきた銀河

団や宇宙大規模構造形成の数値シミュレーションとは質的に異なる数値シミュレーションが可能になった。

また、数値シミュレーションを高速化するため、自己重力計算と Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)法を Streaming SIMD Extension (SSE) 拡張命令セットを用いて通常の数倍まで高速化することに成功し、本研究で行った数値シミュレーションでも利用した。

上記の数値シミュレーションコードを用いて、有名な衝突銀河団である Abell1399 と Abell1401 を再現する数値シミュレーションを行った。この衝突銀河団はほぼ等質量の二つの銀河団の外縁部が接触した段階にあり、この接触領域ではX線観測によって鉄の輝線が検出されている。我々は観測を再現する自己重力流体シミュレーションを行い、得られたバリオンの力学的・熱力学的情報と重元素の電離状態を用いて、接触領域内で非平衡電離状態やプラズマの二温度状態が起こりうる個所を調べた。その結果、二つの銀河団の接触領域の外縁部の衝撃波面でプラズマの二温度状態や非平衡電離状態が起きているという予測が得られた。この結果をもとに、Suzaku 衛星にこの衝突銀河団外縁部の観測提案を行っている。

また、様々な衝突銀河団でプラズマの二温度状態や非平衡電離状態がどこでどのように生じるかを調べるため、様々な条件(相対速度・インパクトパラメータ・質量比)での衝突銀河団で同様の数値シミュレーションを行った。その結果、衝突条件に関わらず、銀河団同士の外縁部が接触する衝突の初期段階において、接触領域で発生した衝撃波面でプラズマの電離状態が電離平衡から有意に逸脱することがわかった。更に、二つの銀河団中心が交差する衝突後期段階において、銀河団ガスのコア付近の衝撃波でも非平衡電離状態が発生することが分かった。銀河団コア付近での非平衡電離状態の発生は、これまで予測されなかったもので本研究の数値シミュレーションで初めて明らかになったものである。また、銀河団プラズマが二温度状態を生じる場合には、上で述べた電離平衡状態からのずれは有意に大きくなることが分かった。

更に、毎秒約 5000 km という極めて大きな相対速度で衝突している 1E0657-56 という衝突銀河団における非平衡電離状態及びプラズマの二温度構造の数値シミュレーションや、宇宙論的初期条件を用いた宇宙論的な構造形成シミュレーションでも、本研究で開発し

た非平衡電離状態とプラズマの二温度構造を計算するコードを用いて数値シミュレーションを続行中である。

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 2 件)

- ① Ota, N., Murase, K., Kitayama, T., Komatsu, E. Hattori, M., Matsuo, H., Oshima, T., Suto, Y., Yoshikawa, K., “Suzaku broad-band spectroscopy of RX J1347.5-1145: constraints on the extremely hot gas and non-thermal emission”, *Astronomy & Astrophysics*, 2009, 491, 363-377
査読有
- ② Akahori, T., Yoshikawa, K., “Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure in the Linked Region of Abell 399 and Abell 401”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 2008, 60, L19-L22
査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ① 赤堀卓也、「衝突銀河団 1E0657-56 における非平衡電離・2 温度状態の数値実験」、日本天文学会 2009 年秋季年会、2009 年 3 月 26 日、大阪府立大学
- ② Kohji Yoshikawa “Warm-Hot Intergalactic Medium”, The 3rd East Asian Numerical Astrophysics Meeting, November, 10, 2008, Nanjing, China
- ③ 赤堀卓也、「Suzaku 衛星で探る衝突銀河団の非平衡電離・2 温度プラズマ状態」、日本天文学会 2008 年秋季年会、2008 年 9 月 13 日、岡山理科大学
- ④ Takuya Akahori, “Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure in the Linked Region of Abell 399/401”, *The Warm & Hot Universe*, 2008 年 5 月 7 日、Columbia University, New York, USA
- ⑤ 赤堀卓也、「衝突銀河団における非平衡電離・2 温度プラズマの 3 次元流体数値実験」、日本天文学会 2008 年春季年会、2008 年

3月24日、国立オリンピック記念青少年総合センター

- ⑥ 赤堀卓也、「銀河群衝突における2温度プラズマ形成と電離非平衡の数値実験」、理論天文学宇宙物理学懇談会、2007年12月25日、京都大学
- ⑦ 吉川 耕司、「x86プロセッサのSIMD拡張命令を用いたSPH法の高速度化」、日本天文学会 2007年秋季年会、2007年9月26日、岐阜大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉川 耕司 (YOSHIKAWA KOHJI)
筑波大学・大学院数理物質科学研究科・講師
研究者番号：70451672