

### III. 宇宙物理学グループ

助教授 梅村 雅之

助手 中本 泰史

大学院生 (2名)

梅村(計算物理学研究センター所属)は国立天文台から平成5年11月に着任し、宇宙物理学グループを新設した。また、平成6年6月に同じく国立天文台より中本が助手として着任した。中本の着任は平成6年度であるが、国立天文台当時より梅村と共同で輻射流体力学の計算手法の開発に当たったので、平成5年度当グループの研究報告として、ここに合わせて記載することとする。

本年度、当グループスタッフは、天体形成論を中心に研究を展開した。宇宙には様々な階層の構造がある。それは、太陽系のような恒星-惑星系に始まり、原始星、中性子星、超新星残骸、ブラックホール、星団、銀河中心核、銀河、銀河団、宇宙大規模構造などである。これらの構造の起源を理論的に研究するのが天体形成論である。宇宙は、非常にバリエーションに富んだ構造を呈しているが、その基礎物理過程の観点から見ると、流体、重力、輻射過程の3つであると言える。流体とは宇宙のバリオン物質の散逸過程を含めたダイナミクスであり、これは天体形成論に必需である。また、宇宙の現象では重力が本質的に重要な役割を果たしている。それは、通常ニュートン重力であるが、一般相対論効果が現れてくる現象も少なくない。もう一つ基礎過程として重要なものに輻射がある。輻射は宇宙に不変的に存在するものであり、あらゆる宇宙現象に密接に関係している。従って、輻射場と物質場の相互作用を扱うことは、宇宙現象の本質的な解明につながっていく。

我々は、この3つの基本的物理を駆使して様々な天体形成過程のメカニズムを探った。それは、基礎理論に留まらず、スーパーコンピュータによる大規模数値シミュレーションにも発展した。また、計算物理学研究センター開発中の超並列計算機 CP-PACS による宇宙流体力学、電磁流体力学、輻射流体力学等の計算宇宙物理学の総合的発展のための準備を進めた。

#### 【1】宇宙大規模構造と銀河形成論(梅村 雅之)

宇宙にニュートリノと冷たいダークマターが共存しているとき、宇宙大規模構造と銀河の形成がどのように起こるかを大規模数値シミュレーションによって調べた。宇宙における構造発生には、様々な物理過程が関与してくる。ダークマターの重力場、バリオンの自己重力及び散逸過程そして輻射過程等である。これらをすべて取り入れた計算には、自己重力系の流体力学計算が不可欠であるが、これは非常に多くの計算時間を要するため、これまで1次元系を中心としてしか調べられてこなかった。しかし、1次元の計算では、銀河形成過程を現実的に追うことは難しく、3次元系を直接数値シミュレーションすることが必要である。そこで、新たに開発した3次元自己重力系の流体力学計算コード(流体粒子法)を用いて、宇宙の大規模密度ゆらぎの非線形成長とその分裂による銀河形成過程を初めて3次元数値シミュレーションした。相互作用として、ダークマターの弱い相互作用、重力相互作用、バリオンの電磁相互作用、重力相互作用、ダークマターとバリオン間の重力相互作用を入れている。

まず、ニュートリノとバリオンからなるゆらぎの時間発展を計算した。ニュートリノゆらぎ

は、宇宙膨張による膨張と共に、その典型的ゆらぎのサイズに対応したフィラメント状の構造を作る。しかし、このフィラメントは分裂することはなく、従って、銀河形成も起こらないことが示された。2種類のダークマターとバリオンからなる宇宙の場合には、フィラメントはいくつかの塊に分かれ鎖状の構造へと発展する。塊の大きさは、ちょうど銀河程度である。そして、ダークマターの無衝突緩和により、塊は外側に加速され結果的にリング状の構造が出来上がる。このような分裂による銀河形成過程は、この研究で行なわれた3次元流体計算で初めて明らかになったものである。そして、これは同時に宇宙が2種類のダークマターによって支配されていることを強く支持するものである。

## 【2】宇宙初期のブラックホール形成（梅村 雅之）

大質量ブラックホール形成を調べるために、宇宙晴れ上がり直後の密度ゆらぎの非線形成長を3次元流体計算コードを用いてシミュレートした。この計算では、宇宙論的降着円盤の形成と分裂、そしてコンプトン粘性による角運動量輸送を計算しなければならないため、3次元流体粒子法を用いた。この力学系では、熱制動放射、共鳴線遷移、コンプトン散乱、輻射性再結合などのバリオンガスの熱力学的効果だけでなく、ダークマターやガスの自己重力が重要な役割をする。また、電離過程の時間発展も、進化に大きな影響を与えるため、これらの物理過程を採り入れた計算を行なった。宇宙モデルはバリオンのみの場合とバリオンとダークマターが共存する場合の両方を調べた。

この計算によって明らかにされた大質量ブラックホール形成のシナリオは以下のようなものである。まず、宇宙初期の密度ゆらぎは、重力不安定性によって高密度ガス雲に成長する。このとき、ゆらぎは角運動量を獲得するため、1点に凝縮することではなく、回転降着円盤ができる。この降着円盤の内部では、局所的重力不安定が起こるため、そこで第1世代の星が誕生する。ガス円盤の約10%が星に転換されると、残りのガスは星からの紫外線によって完全電離状態となる。すると、この電離プラズマと宇宙背景放射の間のコンプトン摩擦が急激に強くなり、プラズマから宇宙背景放射へ角運動量の輸送が起こる。その結果、降着円盤は急速に凝縮していき、非常にコンパクトな系が出来上がることになる。このコンパクトなガスコアは一般相対論的に不安定となり、宇宙年齢の10万分の1程度の時間で大質量ブラックホールへと進化することが示された。(図1)

## 【3】輻射流体力学計算法の開発（梅村 雅之、中本 泰史）

宇宙における諸構造・諸天体は、流体力学的運動・重力相互作用・輻射過程など多くの物理過程が関与した結果として存在している。このうち、重力を含む流体力学的運動については従来から詳しく調べられてきており、数値計算法も発達している。特に宇宙物理学的状況では流体速度が超音速になることが多く、衝撃波を伴う流れを精度良く安定に解くための方法が精力的に開発されてきている。現在では、比較的一般的な状況を数値的に調べることができるようになってきている。

一方、輻射を含む流体の場合にはその取り扱いが格段に難しくなるため、これまでのところはまだ十分な数値計算法が開発されていない。輻射を含む場合に取り扱いが難しくなるのは、光子の分布関数の等方性が一般には保証されないために、光子については配位空間と運動量空間の合計6次元の位相空間を全て扱う必要があるからである。ちなみに、通常の場合には分布関数の等方性（局所的平衡）がなりたっているために「流体近似」によって取り扱うことができ、扱う空間は3次元の配位空間だけと小さくなっているのである。こういった理由によ

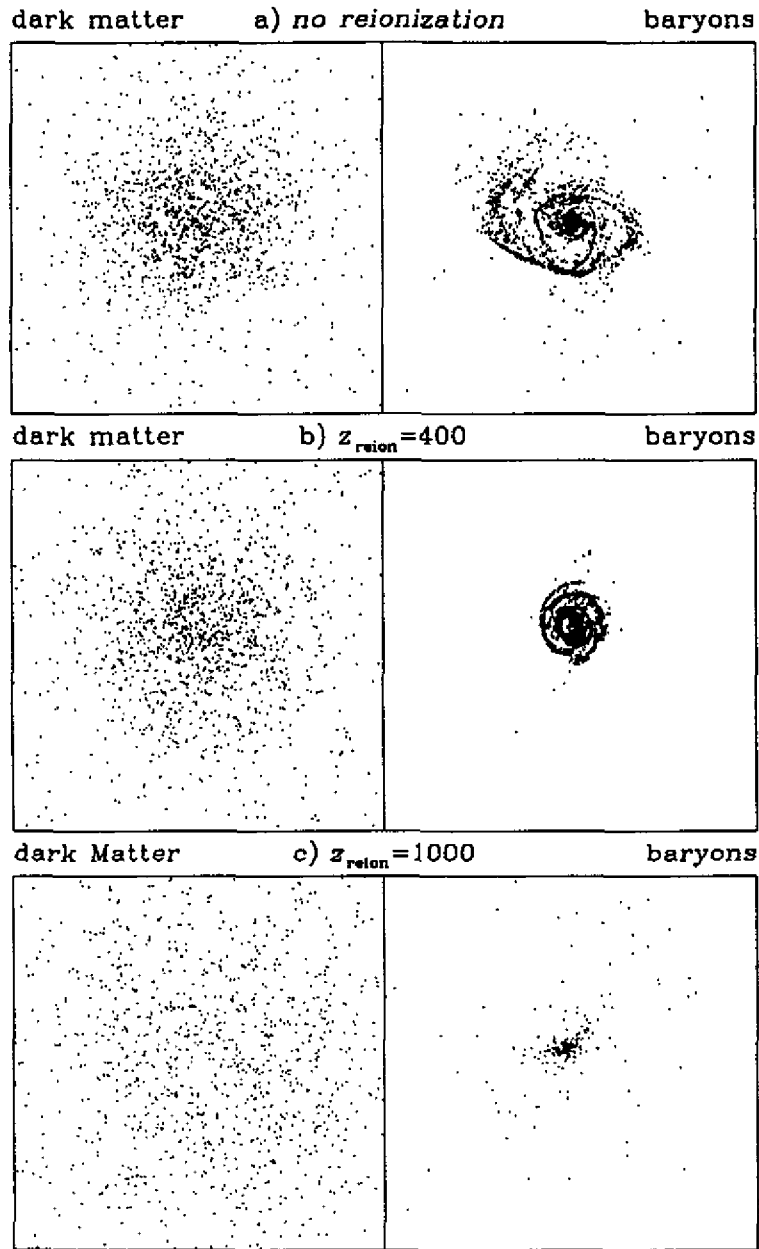


図 1: 宇宙初期のプラズマと宇宙背景放射とのコンプトン摩擦による巨大ブラックホール形成の 3次元数値シミュレーション。左はダークマターの分布、右はバリオンの分布を表す。a) は再電離が起こらなかった場合で、b) は再電離が赤方偏移 400 で起こった場合、c) は再電離が赤方偏移 1000 で起こった場合である。再電離の時期が早いと、ブラックホールへの進化も早い。

り、従来行なわれてきた輻射を含む流体計算は (i) 高い配位空間対称性 (1次元平行平板、1次元球対称) を持つ場合、(ii) 光学的に厚い状況 (局所的平衡がなりたっている)、などの特殊な場合に限られていた。しかし、宇宙物理学的な状況においてはこれらの特殊な条件を満たさない場合の方がはるかに多い。そこで我々は、より一般的な状況を扱えるような数値計算法の開発を試みることにした。

輻射流体力学における困難はその高次元性に依る。これを克服するためには、大容量のメモリと高速の演算器を用いれば良い。例えば、大型の並列計算機を利用することによりこの困難を克服することが出来ると思われる。そこで我々は、超大型並列計算機 (具体的には筑波大学計算物理学研究センターで開発中の CP-PACS) の利用を念頭において、並列計算に適した輻射流体力学計算法の開発に着手した。これまでの基礎的研究により、短特性線法と Variable Eddington Factor 法と呼ばれる方法の組み合わせが、並列計算には最も適しているということがわかった。さらにこの方法の基本的特徴についても調べ、その長所・短所・適用限界などを明らかにし、短所を克服する方法についても検討を進めている。また、実際に並列計算機に実装する場合のノウハウも収集中である。CP-PACS が実際に利用できるようになるまでには、プロダクトランが行なえる状態までもって行きたいと考えている。

#### 【4】星・惑星系の形成論 (中本 泰史)

星・惑星系形成過程に関する理論的研究を行ない、成長中の原始惑星系円盤の諸性質を明らかにし、また成長の終りかたに関する研究にも着手しはじめた。

星・惑星系は、星間雲の重力収縮によって形成される。収縮の際、角運動量を持ったガスは中心まで収縮することはできずに円盤状の天体を作る。これを原始惑星系円盤と呼ぶ。この原始惑星系円盤の中でガスとダストの分離が起こり、さらに重力不安定による微惑星の形成、微惑星同士の衝突・合体による惑星の成長、といった過程が続き最終的に惑星系が形成されると考えられる。このうち原始惑星系円盤は (i) 比較的初期から存在し以後の過程の初期条件・境界条件を与える、(ii) 最近の天文観測により実際に観測されるようになってきた、という理由から、それを詳しく調べることは星・惑星系形成過程を解明する上で重要な意味を持つ。

まず最初に、原始惑星系円盤の形成モデルを理論的に構築した。このモデルには理論的には決定できないパラメータがいくつか含まれる。はじめに、このパラメータに対する原始惑星系円盤モデルの基本的振舞いを調べ、重力安定性、初期条件に対する依存性、などを明らかにした。次に、複数の観測量と理論モデルの結果を比較することにより、理論に含まれている不定パラメータのもっともらしい値を決定した。さらに、決定された値のパラメータを用いて計算を行なった結果、原始惑星系円盤の質量増加は時間に対し約2乗の依存性を持つことがわかった。この原始惑星系円盤の非線型成長は、別の観測からの示唆とも調和的である。

一方、成長中の原始惑星系円盤の周囲にはまだ収縮しきっていない星間雲のガスが存在している。当然我々はそのガスを通して成長中の原始惑星系円盤を観測していることになる。この場合、観測されるスペクトルを調べることにより周囲に存在しているガスの温度・密度などを知ることが出来るはずである。これを明らかにすれば星間雲の重力収縮過程について多くの情報を得ることができ、ひいては星・惑星系形成過程に残されている大問題である、星の質量を決定する機構の解明に対して手がかりが得られると思われる。

このような動機のもとに、星+原始惑星系円盤+周囲のガスという系を観測したときに期待されるスペクトルを理論的に求める試みを行なった。まだ最終的な結論は得られていないが計算手法はほぼ確立した。具体的な観測結果との比較を数多く行なうことが今後の課題である。

<論文>

1. M. Umemura, Three-Dimensional Hydrodynamical Calculations on the Fragmentation of Pancakes and Galaxy Formation, *Astrophysical Journal*, **406**, 361-382 (1993).
2. M. Umemura, T. Fukushige, J. Makino, T. Ebisuzaki, D. Sugimoto, E. L. Turner and A. Loeb, Smoothed Particle Hydrodynamics with Using GRAPE-1A, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **45**, 311-320 (1993).
3. T. Hasegawa and M. Umemura, Luminosity Dependence of Galaxy Clustering in Extinction Corrected CfA Data, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **263**, 191-210 (1993).
4. M. Umemura, A. Loeb, and E. L. Turner, Early Cosmic Formation of Massive Black Holes, *Astrophysical Journal*, **419**, 459-468 (1993).
5. J. Fukue and M. Umemura, Cosmological Accretion Disks via External Radiation Drag, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **46**, 87-95 (1994).
6. M. Umemura, A. Loeb, E. L. Turner, and S. Sasaki, The Formation of Massive Black Holes in High Redshift and the Cosmological Consequences, The 37th Yamada Conference (1993), *Evolution of the Universe and its Observational Quest*, pp303-308.
7. J. Fukue and M. Umemura, Cosmological Accretion Disks, The 37th Yamada Conference (1993), *Evolution of the Universe and its Observational Quest*, pp.427-428.
8. T. Hasegawa and M. Umemura, Luminosity Dependence of Galaxy Correlation Function, The 37th Yamada Conference (1993), *Evolution of the Universe and its Observational Quest*, pp445-446.
9. T. Nakamoto and Y. Nakagawa, Formation, Early Evolution, and Gravitational Stability of Protoplanetary Disks, *Astrophysical Journal*, **421**, 640-650 (1994)
10. S.M. Miyama, T. Nakamoto, N. Kikuchi, S. Inutsuka, K. Kobayashi, and T. Takeuchi, Stability of Circumstellar Disks, *Numerical Simulations in Astrophysics*, (1994) in press.

<講演>

1. 梅村雅之, A. Loeb, E. L. Turner 「Early Cosmic Formation of Massive Black Holes」  
日本天文学会 (1993年5月)
2. 佐々木伸、梅村雅之 「Reionization of the Universe due to the Early Formation of Massive Black Holes」  
日本天文学会 (1993年5月)
3. 村上泉、梅村雅之 「楯円銀河の X 線ハローと銀河間ガスの相互作用」  
日本天文学会 (1993年5月)
4. 梅村雅之, A. Loeb, E. L. Turner, and S. Sasaki 「The Formation of Massive Black Holes in High Redshift and the Cosmological Consequences」  
第 37 回 山田財団国際会議 (1993年6月)

5. 福江純、梅村雅之「Cosmological Accretion Disks」  
第 37 回 山田財団国際会議 (1993 年 6 月)
6. 長谷川隆、梅村雅之「Luminosity Dependence of Galaxy Correlation Function」  
第 37 回 山田財団国際会議 (1993 年 6 月)
7. 千葉尚志、佐々木伸、梅村雅之「大質量ブラックホールによる再イオン化宇宙モデルでの背景輻射の非等方性」  
日本天文学会 (1993 年 10 月)
8. 中村信一、梅村雅之「High  $z$  に形成されたブラックホールへのインフォール」  
日本天文学会 (1993 年 10 月)
9. 福江純、梅村雅之「外部輻射粘性を受けた降着円盤：ベータモデル」  
日本天文学会 (1993 年 10 月)
10. 釣部通、福江純、梅村雅之「コンプトン粘性によるガス円盤収縮の自己相似会」  
日本天文学会 (1993 年 10 月)
11. 吉田宏、梅村雅之「Press-Schechter formalism に基づく N-m Relation」  
日本天文学会 (1993 年 10 月)
12. 梅村雅之「Exterme Microlensing due to Cosmic Massive Black Holes」  
重力レンズ研究会 (1993 年 12 月)
13. 梅村雅之「大質量ブラックホールによる強い重力レンズ効果の観測可能性について」  
観測的宇宙論研究会 (1994 年 1 月)
14. 梅村雅之「超並列計算機による輻射輸送問題」  
計算物理学研究センターシンポジウム (1994 年 3 月)
15. 中本泰史「原始惑星系円盤の形成」  
日本天文学会 (1993 年 10 月)
16. 中本泰史、中川義次「原始惑星系円盤形成の初期角運動量分布依存性」  
日本惑星科学会 (1993 年 10 月)
17. 中本泰史、横野安則、梅村雅之、小笠原隆亮、近田義広、観山正見「Radiation Hydrodynamics の試み」  
数値シミュレーションによる天文学の発展 研究会 (1993 年 11 月)
18. 中本泰史「Formation of Protoplanetary Disks and Ratios of Disk to Star Mass」  
NASA TOPS II Planetary Systems Conference (1993 年 12 月)
19. 中本泰史、千葉博嗣、横野安則、観山正見「末期原始星／初期 T Tauri 型星からの輻射エネルギースペクトル」  
日本惑星科学会 (1994 年 3 月)
20. 中本泰史、横野安則、梅村雅之、小笠原隆亮、近田義広、観山正見「Radiation Hydrodynamics の一つの試み」  
計算物理学研究センターシンポジウム (1994 年 3 月)