

III. 宇宙物理グループ

助教授 梅村 雅之
助手 中本 泰史
学振研究員 (PD) 中村 文隆
大学院生 (6名)

本年度、当グループスタッフは、初期宇宙における巨大ブラックホール形成とその宇宙論的効果、並びに星・惑星系の形成論を中心に研究を展開した。前者のテーマに関しては、米国プリンストン大学、ハーバード大学との間で、学振日米科学協力事業を推進した。

また、輻射場と物質場の相互作用を自己矛盾なく扱う輻射流体力学計算法の開発も進めた。これは、計算物理学研究センターで製作された超並列計算機 CP-PACS による実現を目指すものである。

【1】 初期宇宙における巨大ブラックホールの形成 (梅村 雅之)

キューサーや活動銀河中心核からは膨大なエネルギーが放出されているが、その源として巨大なブラックホールとその周りの降着円盤が考えられている。このモデルは、いろいろな点で観測事実とよく符合するが、巨大なブラックホールがどのようにして出来たかについてはまだ定説がない。我々は、宇宙初期の背景輻射場とガスとの間の輻射摩擦相互作用によるブラックホール形成の可能性をいろいろな角度から調べた。これまで、3次元の宇宙論的流体力学計算を行い、輻射場とガスのコンプトン摩擦は原始ガス雲が一般相対論的不安定を起こすまで効率良く働くことを示し、ブラックホール形成が実際に可能であるモデルを作り上げた。この計算で、ガスの流体力学的振舞いについては、確かな解析を行うことができたが、輻射場の取扱い近似的であった。そこで、輻射場を正確に取り扱うためにトムソン散乱を入れた輻射輸送方程式を完全に解くことにより、ブラックホール形成初期における輻射摩擦の効果を正確に押さえる計算を行った。この計算でわかったことは、輻射摩擦においては、光子拡散はほとんど効かず、摩擦効果は光学的厚さに対し指数関数的に減少するということである。この解析の結果により、3次元宇宙論的流体力学計算で行った輻射摩擦に関する近似的仮定が正当であることが示された。この成果は現在論文としてまとめられている。

また、ブラックホール周りの降着円盤の進化に関して解析を行い、宇宙背景輻射による摩擦が働く場合の定常ガス降着の解析解を見いだした。さらに、ガスの降着が進み、ブラックホール近傍からの輻射による圧力及び摩擦が効きだす時期の進化についても定常解を見いだした。これらは、共に論文として発表された。また、外部輻射摩擦が働く場合の球対称ガス降着に関しての自己相似解析を行い、解析解を見いだすことができた。この成果も、論文として発表されている。さらに、輻射摩擦が効く場合の光学的に厚い降着円盤の安定性解析を行った結果、ブラックホール近傍のケプラー回転円盤は、輻射摩擦に対して安定であることが示され、その成果は論文として発表された。

一方、高赤方偏移キューサーの形成との関連で、冷たいダークマター支配の宇宙で、初期密度ゆらぎの進化を輻射摩擦ならびに乱流粘性を入れた球対称モデルで数値シミュレーションした。これを、観測されているキューサーの光度と比較することで、輻射摩擦が与える影響を詳しく解析した。その結果、輻射摩擦はキューサー光度をかなり早い時期に上げる効果があることがわかり、観測されているキューサーの光度を説明するためには、乱流粘性係数は0.01程度でよいことがわかった。この成果は、現在論文としてまとめられている。

【2】 宇宙初期のブラックホールの宇宙論的効果 (梅村 雅之)

宇宙初期のブラックホールが及ぼす宇宙論的効果について、まずブラックホールによる宇宙再加熱をガン・ピーターソン効果との関連で調べた。この解析では、冷たいダークマター支配の宇宙で密度ゆらぎの階層的進化を Press-Schechter-formalism によって記述し、輻射摩擦によるブラックホール形成をモデル化し、これらが放出する輻射による宇宙の熱史の変化を数値計算で調べた。その結果、初期密度ゆらぎのフーリエ・パワースペクトルの冪乗指数が-1.7程度のときに、ガン・ピーターソンの中性水素の光学的厚さと無矛盾になり、宇宙紫外線背景輻射とも整合することが示された。この成果は、論文としてまとめられ出版が予定されている。次に、残存ブラックホールに対する遠方銀河内の星の重力レンズ効果を調べた。ここでは、銀河内の星のポピュレーションとして太陽系近傍のものを仮定し、残存ブラックホールの宇宙における全質量密度をパラメータとして解析を行った。その結果、宇宙のバリオン物質の大部分がブラックホールとなり、銀河などのハローを構成しているとすると、見かけの等級 23 等で、1 平方度当たり 1 つの事象が検出される確率になることがわかった。また、重力レンズ特有の光度変化が数カ月の時間スケールで起こりうることを示された。現在、アメリカと日本の共同プロジェクトとして進められているスローン・デジタル・スカイ・サーベイ計画では、およそ 23 等級までの天体を、1000 平方度に亘って観測することが予定されており、この観測でこのような重力レンズ効果が検出されるか否かは、残存ブラックホールの宇宙における全質量密度に強い制限を与えることになる。これらの解析結果は、現在論文としてまとめられている。

【3】 輻射流体力学計算法の開発 (梅村 雅之、中本 泰史)

輻射を含む流体の場合にはその取り扱いが難しいため、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。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行っている。この計算は、重力場、流体、電磁輻射場を同時に解くものであり、最大で6次元の問題になる。このような、高次元問題を扱うために、我々は計算物理学研究センターで製作された超並列計算機 CP-PACS を用いて、並列型輻射流体力学計算法の開発に取り組んでいる。これまでの基礎的研究により、短特性線法と Variable Eddington Factor 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。その一方で、関連する輻射輸送計算法の基礎的検討も進めた。

【4】 星・惑星系の形成 (中本 泰史、中村 文隆)

星間雲中の密度の高い部分である分子雲コアが重力収縮することにより、恒星や惑星系が形成される。分子雲コアの収縮の際、角運動量を持ったガスは中心星にまで一気に落下することは出来ず、その周囲に円盤状天体を形成する。

まず、中心星に向かって動的に落下している円盤の重力安定性について調べた。この状態は分子雲コアの収縮・星の形成の初期段階に相当する。この段階では磁場の影響も無視できないと思われるので、これも考慮した。計算に際しては、動的に収縮する円盤を正確に計算するために共動座標系を用いた。円盤が軸対称ではなく、回転角方向に $m = 2$ の揺らぎを持っている場合には、この揺らぎは成長することが数値計算の結果わかった。このような bar mode の不安定によって、円盤は棒状になりやすそうである。形成されるであろう棒状構造の長さは、初期の円盤の半径のおよそ百分の一、幅はさらに短い。従って、このような棒状構造は最終的にはいくつかの高密度の塊に分裂することが期待される。この過程は、連星系の形成過程を示し

ている可能性があると思われる。

一方、動的収縮中に bar mode 不安定が発生しなかった場合には、中心星の周囲に遠心力と重力とで力学平衡に達している円盤が形成される。このような円盤の中から最終的に惑星が形成されると考えられるので、この円盤を原始惑星系円盤と呼んでいる。そこで次に、原始惑星系円盤の重力安定性を調べた。特に注目したのは、非軸対称モードである。原始惑星系円盤の力学的進化を支配する重力トルクを生み出すモードだからである。非軸対称自己重力不安定を左右する物理量は、中心星の質量、円盤の質量、円盤の温度、である。原始惑星系円盤の形成過程を考慮すると、原始惑星系円盤は重力不安定になりやすいことがわかった。定量的に正確に、重力不安定の程度、重力不安定の結果励起される構造の形・振幅、などを求めるためには、特に温度を正確に求める必要があることもわかった。今後は、輻射などによるエネルギー輸送を正確に考慮して、原始惑星系円盤の温度を正確に求める計算を実行する予定である。

<論文>

1. T. Tsuribe, M. Umemura, and J. Fukue, Self-Similar Spherical Accretion via External Radiation Drag, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **47**, 73-79 (1995).
2. A. Takahashi, J. Fukue, K. Sanbuichi, and M. Umemura, Dynamical Stability of Cosmological Accretion Disks Embedded in External Radiation Fields, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **47**, 425-428 (1995).
3. J. Fukue and M. Umemura, Accretion Disks driven by External Radiation Drag around Central Luminous Sources, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **47**, 429-437 (1995).
4. S. Sasaki and M. Umemura, Reionization of the Universe due to Early-Formed Massive Black Holes, *Astrophysical Journal*, **462**, in press (1996).
5. I. Murakami and M. Umemura, Dynamical Heating and Metallic Gas Supply by Elliptical Galaxies in Rich Clusters, *Astrophysical Journal*, submitted (1995)
6. M. Umemura, Cosmological Accretion Disks driven by Radiation Drag, *Basic Physics of Accretion Disk*, in press (1996)
7. T. Tsuribe and M. Umemura, Rapid Mass Accretion by Background Radiation Force, *Basic Physics of Accretion Disk*, in press (1996)
8. T. Tsuribe and M. Umemura, Radiation-Hydrodynamical Evolution of the Cosmological Accretion Disks, *Cosmological Constant and the Evolution of the Universe*, 307-308 (1996)
9. M. Umemura, Radiation Hydrodynamics on a Massively Parallel Supercomputer, *NAP96*, in press (1996)
10. T. Tsuribe and M. Umemura, Radiation-Hydrodynamical Evolution of the Cosmological Accretion Disks, *NAP96*, in press (1996)
11. 梅村雅之, 宇宙の巨大ブラックホール, 日本物理学会誌「*butsuri*」, Vol.50, No. 7, 562-565 (1995)
12. 岩崎洋一、宇川彰、梅村雅之, 計算物理学と CP-PACS 計画, 情報処理学会誌「情報処理」,

Vol 37, No. 1, 11-17 (1996)

13. Taishi Nakamoto and Yoshitsugu Nakagawa, Growth of Protoplanetary Disks around Young Stellar Objects, *Astrophysical Journal*, 445, 330-336, (1995).
14. Taishi Nakamoto, Radiation Hydrodynamics for Star and Protoplanetary Disk Formation, *NAP96*, in press (1996)
15. 中本泰史, Active Disk としての原始惑星系円盤, 日本惑星科学会誌「遊星人」, Vol. 4, No. 4, 239-247 (1995).
16. F. Nakamura, T. Hanawa, and T. Nakano, Fragmentation of Filamentary Molecular Clouds with Longitudinal Magnetic Fields: Formation of Disks and Their Collapse, *Astrophysical Journal*, 444, 770-786 (1995).
17. F. Nakamura, and T. Hanawa, Non-axisymmetric Evolution of Dynamically Contracting Disks and Its Implication for Binary Formation, *Astrophysical Journal Letters*, submitted (1996).
18. F. Nakamura, and T. Hanawa, Non-axisymmetric Evolution of Dynamically Contracting Disks and Formation of Binary Stars, *NAP96*, in press (1996)
19. T. Matsumoto, T. Hanawa, and F. Nakamura, Self-similar Collapse of Rotating Isothermal Clouds, *NAP96*, in press (1996)

<集中講義>

梅村雅之「宇宙の大規模構造と銀河形成」

お茶の水女子大学 (1995年7月6、7、8日)

<非常勤講師>

梅村雅之「天文学」

気象大学 (1995年4月~9月、12回)

<講演>

1. 梅村雅之「QSO/AGN の形成」(レビュー)
京都大学基礎物理学研究所短期研究会「銀河形成」(1995年6月)
2. 釣部通、梅村雅之、中本泰史「宇宙論的輻射輸送：層状ガスと背景輻射場の相互作用」
日本天文学会 (1995年10月)
3. 吉田宏、梅村雅之、吉井讓「銀河の光度関数と宇宙論的パラメータ」
日本天文学会 (1995年10月)
4. 梅村雅之、「Cosmological Accretion Disks driven by Radiation Drag」
国際会議「*Basic Physics of Accretion Disk*」(1995年10月)

5. 釣部通、梅村雅之「Rapid Mass Accretion by Background Radiation Force」
国際会議「*Basic Physics of Accretion Disk*」(1995年10月)
6. 梅村雅之「QSO/AGN 物理過程の概観」
筑波大学計算物理学研究センター研究会「滞在型ワークショップ・銀河形成」
(1995年12月)
7. 釣部通、梅村雅之「QSO/AGN の物理」
筑波大学計算物理学研究センター研究会「滞在型ワークショップ・銀河形成」
(1995年12月)
8. 釣部通、犬塚修一郎「星形成：分子雲の分裂過程」
筑波大学計算物理学研究センター研究会「滞在型ワークショップ・銀河形成」
(1995年12月)
9. 梅村雅之「銀河形成の物理」(レビュー)
第8回理論天文学懇談会シンポジウム「宇宙の階層構造」(1995年12月)
10. 釣部通、梅村雅之「Radiation-Hydrodynamical Evolution of the Cosmological Accretion Disks」
第8回理論天文学懇談会シンポジウム「宇宙の階層構造」(1995年12月)
11. 梅村雅之「輻射流体力学による宇宙物理学I」
数値シミュレーションによる天文学シンポジウム(1996年1月)
12. 釣部通、梅村雅之「輻射流体力学による宇宙物理学II:散乱の取り扱い」
数値シミュレーションによる天文学シンポジウム(1996年1月)
13. 梅村雅之「輻射流体力学の定式化と線形波動」(レビュー)
京都大学基礎物理学研究所短期研究会「宇宙における構造形成と輻射輸送」
(1996年2月)
14. 釣部通「反復法による輻射輸送問題の解法」
京都大学基礎物理学研究所短期研究会「宇宙における構造形成と輻射輸送」
(1996年2月)
15. 嶺重慎、釣部通、梅村雅之「ハイ z クェーサーディスクの構造」
日本天文学会(1996年3月)
16. 中村文隆、梅村雅之「原始ガス雲の熱的進化とその分裂」
日本天文学会(1996年3月)
17. Taishi Nakamoto and Yoshitsugu Nakagawa, Growth of Protoplanetary Disks around Protostars (poster presentation), Gordon Research Conference "Origins of Solar Systems", in NH, USA, 1995 June.
18. 中本泰史「冷たいガス円盤における自己重力不安定 (I) 計算法」
日本惑星科学会(1995年11月)
19. 中本泰史「星周円盤の形成と円盤の重力不安定性」

筑波大学計算物理学研究センター研究会「滞在型ワークショップ・銀河形成」
(1995年12月)

20. 中本泰史「原始惑星系円盤の形成と円盤の自己重力不安定性」
総研B研究会「星の誕生」(1995年12月)
21. 中本泰史「ガス円盤における重力不安定 — 局所近似・非線型計算」
第8回理論天文学懇談会シンポジウム「宇宙の階層構造」(1995年12月)
22. 中本泰史「輻射流体力学による宇宙物理学 III : 星・原始惑星系円盤の形成」
数値シミュレーションによる天文学シンポジウム(1996年1月)
23. 中本泰史「短特性線法による多次元輻射輸送方程式の解法と輻射流体力学」
京都大学基礎物理学研究所短期研究会「宇宙における構造形成と輻射輸送」
(1996年2月)
24. 中本泰史「ガス円盤における非軸対称自己重力不安定 — 局所近似・非線型計算 —」
日本天文学会(1996年3月)
25. 中村文隆、花輪知幸「動的に収縮する円盤の分裂と連星系の形成」
日本天文学会(1995年10月)
26. 松本倫明、花輪知幸、中村文隆「回転しているガス円盤の相似的収縮」
日本天文学会(1995年10月)
27. 中村文隆「磁気雲の重力収縮と動的に収縮する円盤の進化」(レビュー)
滞在型研究会「星の形成」(1995年10月)
28. 中村文隆「動的に収縮する円盤の分裂」
重点領域研究「星間物質とその進化」大研究会(1995年10月)
29. 中村文隆「動的に収縮するガス円盤の分裂と連星系の形成」
第8回理論天文学懇談会シンポジウム「宇宙の階層構造」(1995年12月)
30. 中村文隆「回転しながら動的に収縮するガス円盤の分裂と連星系の形成」
NROワークショップ「星の誕生」大研究会(1995年12月)
31. 中村文隆「動的に収縮するガス円盤の分裂と連星系の形成」
数値シミュレーションによる天文学シンポジウム(1996年1月)
32. 松本倫明、花輪知幸、中村文隆「収縮する回転ガス円盤の振動とそのメカニズム」
日本天文学会(1996年3月)
33. 中村文隆、花輪知幸「磁気雲の重力収縮について」
日本天文学会(1995年10月)
34. 中村文隆、花輪知幸「回転しながら動的に収縮する円盤の進化と連星系の形成」
日本天文学会(1996年3月)