

1. 素粒子宇宙研究部門

1.1. 素粒子分野

1. メンバ

教授 青木 慎也, 宇川 彰, 金谷 和至(共同研究員)

准教授 石塚 成人, 蔵増 嘉伸, 吉江 友照

助教 谷口 裕介

研究員 浮田 尚哉, 滑川 祐介, 山崎 剛

2. 概要

素粒子分野においては、本年度も、格子場の理論の研究を柱に活発な研究活動が行なわれ、数理物質科学研究科と密接な連携のもと、格子 QCD の大型数値シミュレーションが推進された。

筑波大学の格子ゲージ理論の研究者は、2006年7月に計算科学研究センターの次期並列計算機として PACS-CS が導入されたのを契機として新たな研究グループとして立ち上げられた PACS-CS Collaboration に参加している。PACS-CS Collaboration では、PACS-CS や T2K-Tsukuba を主要な計算機資源として、3種類 (up、down、strange) の軽いクォークをその物理的質量(物理点)において動的に扱うシミュレーションを行い、QCD に関する近似のない物理的予言を行うことを目的として、 $N_f=2+1$ QCD の大規模シミュレーションを進めている。また、これらの大規模シミュレーションのための Collaboration としての研究と並行して、核子間ポテンシャルの研究、ハドロン間相互作用の研究、核子形状因子の研究、有限温度・有限密度 QCD の研究、や、計算技術開発なども行われた。さらに、格子 QCD 配位やその他のデータを国内・外で共有する為のデータグリッド JLDG・ILDG の構築を推進した。

3. 研究成果

【1】 PACS-CS Collaboration の活動(全員)

計算科学研究センターでは、平成 17 年度から 3 ヶ年計画で特別教育研究経費(拠点形成)を受けて開発・製作が進められてきた超並列クラスタ計算機 PACS-CS(計算ノード数 2560、ピーク演算性能 14.3Tflops)が平成 18 年 7 月から稼働を開始した。PACS-CS Collaboration は PACS-CS を主要な計算設備として格子 QCD の研究を行うことを目的とし、筑波大学物理学系メンバーを中心として組織されている。その目標は、

domain-decomposed HMC (DDHMC) アルゴリズムと polynomialHMC (PHMC) アルゴリズムを組み合わせることによって3種類 (up, down, strange) の軽いクォークをその物理的質量 (物理点) において動的に扱うシミュレーションを行い、QCD に関する近似のない物理的予言を行うことである。平成 18、19 年度は物理点へ向けて up-down クォーク質量を段階的に軽くすることによって物理量のクォーク質量依存性を調べるのが主要課題であった。平成 20 年度より PACS-CS プロジェクトの目標である物理点でのシミュレーションへの取り組みを開始し、平成 21 年度 reweighting 法を用いた物理点直上でのシミュレーションに成功した。また、物理点における体積効果を調べるために超並列クラスタ計算機 T2K-Tsukuba (計算ノード数 648、ピーク演算性能 94 Tflops、平成 20 年 6 月稼働開始) を利用してより大きな空間サイズのシミュレーションを実行中である。以下に平成 21 年度における進展を述べる。

(1) 物理点直上での 2+1 フレーバー QCD シミュレーション

昨年度に引き続き、PACS-CS プロジェクトの目標である物理点直上でのシミュレーションに取り組んだ。この計算では格子サイズ $32^3 \times 64$ 、格子間隔 $a = 0.09 \text{ fm}$ の格子上で非摂動的に $O(a)$ 改良された Wilson クォーク作用と Iwasaki ゲージ作用を用いた。これらのパラメータは平成 18、19 年度に行ったクォーク質量依存性を調べるための計算に使用したものと同一である。物理点直上でのシミュレーションを行う上での最大の問題は、up-down クォーク質量および strange クォーク質量の物理点直上へのチューニングである。我々は reweighting 法を用いてこの問題を解決することに成功した (論文1)。図 1 左図は reweighting 因子の配位依存性を表している。異なる配位間のゆらぎは安定していることがわかる。図 1 右図では左図の reweighting 因子を用いて、up-down クォーク質量および strange クォーク質量の物理点へのチューニングを行った結果である。up-down クォーク質量、strange クォーク質量、格子間隔を決定するためのインプットは π メソン、K メソン、 Ω バリオンの質量である。それらのハドロン質量が誤算の範囲で実験値に正しくチューニングされていることが図 1 右図において見てとれる。本研究によって格子 QCD における物理点直上のシミュレーションという長年の課題は解決された。

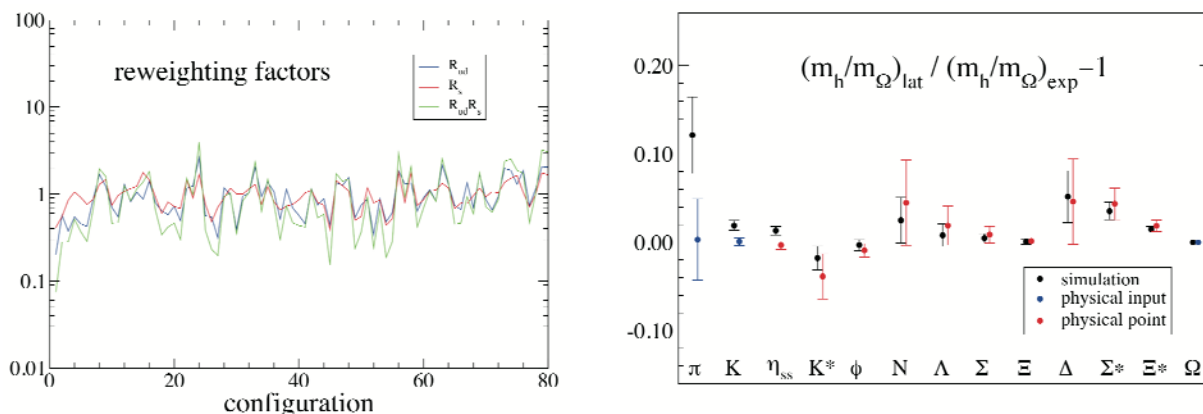


図1:物理点直上での 2+1 フレーバー QCD シミュレーション。左図:Reweighting 因子の配位依存性。Rud は up-down クォーク質量に対する Reweighting 因子を表し、Rs は strange クォーク質量に対する Reweighting 因子を表す。Rud Rs は両者の積。右図:ハドロン質量の実験値との比較。 Ω バリオンの質量で規格化されている。

黒丸は reweighting によるチューニング前の結果。赤丸は reweighting によって物理点直上にチューニングされた結果。青丸は up-down クォーク質量、strange クォーク質量、格子間隔を決めるためのインプットを表す。

(12) ρ 中間子崩壊幅の計算

これまで生成された配位を用いて幾つかの興味深い物理量の計算も行っている。特筆すべきは、 ρ 中間子崩壊幅の計算である。ハドロン共鳴状態の深い理解の為に、ハドロン散乱位相を、格子上の数値計算により定量的に評価し、実験値と比較することが本質的な重要性を持つ。本研究では、 1^{--} の共鳴状態である ρ 中間子の研究を、2 体 π の散乱位相から行った。最初のステップとして、410 MeV の π メソン質量に相当する up-down クォーク質量で生成された配位を用いて散乱位相の高精度計算を行った。これから得られた崩壊幅の値は 113 ± 22 MeV であり、実験値 150 MeV をほぼ再現している。本研究の成果は本年度論文に纏める予定である。今後より小さなクォーク質量を用いた計算を実行し、クォーク質量依存性を調べる計画である。

(13) 格子 QCD による原子核の直接構成

また、平成 21 年度は格子 QCD による原子核の直接構成という新たな研究の潮流を生み出した(論文3)。格子 QCD における原子核相関関数の評価は膨大な数のクォークダイアグラムの計算を必要とするが、我々はこの問題を解決するために計算コストを大幅に削減する方法を提案した。この方法を用いて、軽い原子核の中でも比較的大きな束縛エネルギーを持つヘリウム原子核に対して、現実世界よりも重いクォーク質量を用いた試験的計算を行った。散乱状態と束縛状態を識別するためにはヘリウム原子核と自由核子のエネルギー差の体積依存性を調べなければならないが、格子の空間サイズ L を 24 から 96 まで変化させる計算を行った結果ヘリウム原子核が束縛しているという結論が得られた(図2)。

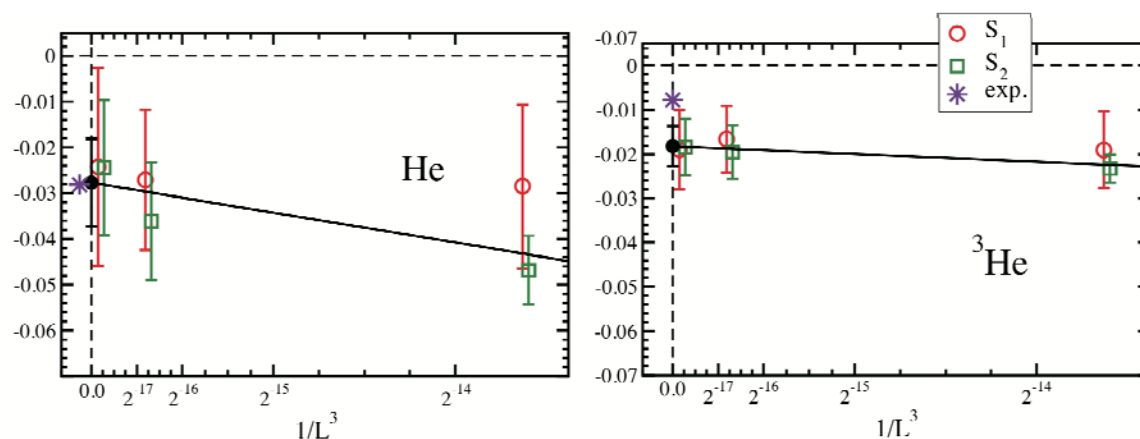


図2: 格子 QCD による原子核の直接構成。左図は He 原子核と 4 個の核子の質量のエネルギー差の体積依存性。L は格子の空間方向の長さ。S1,2 は原子核相関関数における演算子の選び方の違いを表

す。黒線は空間体積無限大への外挿の様子。右図は ${}^3\text{He}$ 原子核と3個の核子の質量のエネルギー差の体積依存性。

【2】有限温度・有限密度QCDの研究(青木、金谷、浮田 WHOT-QCD Collaboration)

金谷、青木らは、東京大学初田、新潟大学江尻、広島大学梅田らとの共同研究で、Wilson 型クォークによる有限温度・密度QCDの研究を引き続き推進した。

Wilson 型クォークによる系統的研究は世界的に見ても、1990年代前後に行われた筑波の qcdpax, cp-pacs グループ以降、ほとんど行われていなかった。そのため、有限温度の相図が既に詳細に調べられている $N_f=2$ QCD の場合について、Wilson クォークとして最初の有限密度QCD研究を実行した。有限密度に関しては、化学ポテンシャルに関するTaylor展開の手法を用いた。従来の方法に加えて有限密度の複素位相部分をガウス関数で近似して reweighting 法を用いる新しい手法による状態方程式の有限密度効果の計算や、クォーク数密度揺らぎの計算なども行った。これらの計算で、従来の Staggered クォークの計算で見つかった有限密度領域でクォーク数密度の揺らぎが増大する兆候が Wilson クォークによっても確認できた。これらの結果をまとめた本論文を投稿した。

(1) 固定格子間隔アプローチと T-integral 法の開発

最終目標である $N_f=2+1$ QCD での有限温度・有限密度研究は、極めて多くの計算時間を要求する。従来の固定格子数(N_t)で integral 法を用いる計算方法では、ゼロ温度格子のシミュレーションを大量に要求し、それが全体の計算コストの大きな部分を占めている。それを大きく削減する方法として、固定格子間隔アプローチを提案した。また、固定格子間隔アプローチで状態方程式を計算するために、状態方程式の新しい非摂動的評価法 T-integral 法を開発した。従来の非摂動的評価法 integral 法は固定格子間隔では用いることは出来ないが、ある熱力学関係式を元に、状態方程式(圧力)をトレースアノマリーの温度積分としてあらわすと、固定格子間隔でも状態方程式の計算が可能になる。このアイデアをまずクエンチ近似 QCD の場合でテストして、従来の方法で求めた状態方程式の結果と遜色の無い結果を再現した(論文 31,34)。

現在、CP-PACS+JLQCDグループによる $N_f=2+1$ QCD の温度ゼロでの研究結果と公開されているゼロ温度ゲージ配位を利用して、固定格子間隔アプローチに基づく $N_f=2+1$ QCD の有限温度配位生成を進めている。これまでに得られた状態方程式に関する成果の一部を国際会議等で発表した。

(14) 重いクォーク間の自由エネルギーと遮蔽質量の研究

固定格子間隔アプローチで生成された $N_f=2+1$ QCD の有限温度ゲージ配位上で、重いクォーク間の自由エネルギーを研究した。固定格子間隔方法の大きな利点として、純粋に系の温度だけを変化させた研究が可能である。自由エネルギーの研究においても、くりこみの不定性無しに、温度依存性を調べることが出来る。図3の左図に、高温相における自由エネルギーの結果を示す。極めて高温でも、十分短距離にすれば、グレー

破線で示された温度ゼロでの重いクォーク間ポテンシャルに一致することが見て取れる。これは、温度効果
 は長距離のもので、十分短距離では高温相でも温度効果が無いという、理論的予想と一致しているが、従来
 の研究では、自由エネルギーの原点が温度毎に異なるくりこみを受けるために、この理論的予想を使って、短
 距離で一致するように手で調整されていた。固定格子間隔アプローチでは、くりこみが温度に依らないために
 そうした調整は不要であり、理論的予想を初めて確認することに成功した。また、長距離では、クォークの閉じ
 込めがやぶれて、自由エネルギーが一定値になる様子も確認される。図4の右図に、デバイ遮蔽質量の温度、
 及びフレーバー数依存性を示す。 $N_f=0$ の結果と比べると、 $N_f=2$ および $2+1$ の結果は有意に大きく、軽いクォ
 ークが大きな影響を持っていることが示された(論文 33,35)。

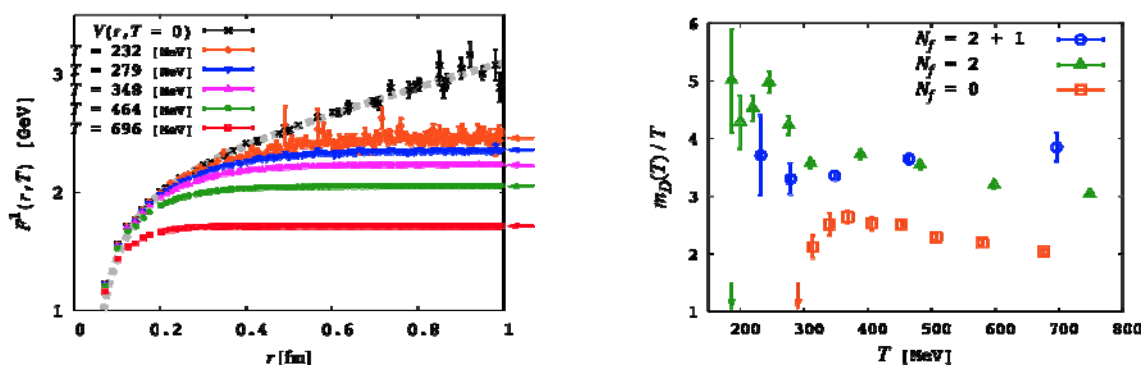


図3: 固定格子間隔アプローチによる高温相における重いクォーク間の自由エネルギーの研究。左図: ポリアコフ
 ライン相関関数から求めた重いクォーク間の自由エネルギーの温度依存性。グレーの破線は
 CP-PACS-JLQCD による温度ゼロの場合のクォーク間ポテンシャルの結果。左端の矢印は、ポリアコフ ライン
 1本の真空期待値から計算した、完全に分離した重いクォークの自由エネルギーを2倍したもの。右図: ポリア
 コフ ライン相関関数から求めたデバイ遮蔽質量の温度、及びフレーバー数依存性。右図下の矢印は $N_f=2$ 及
 び 0 の場合の相転移温度を表す。

前項の研究では、ゲージをクーロン ゲージに固定して、自由エネルギーやデバイ遮蔽質量を計算している。
 クーロン ゲージはクォークの物理描像を取り出す上で有用なゲージとして他グループの研究でも広く用いられ
 ており、同じゲージを用いた現象論的研究に有用な非摂動論的情報を提供しているが、最終的な現象はゲー
 ジの取り方には依らないので、ゲージに依存した物理量は直接の観測可能量ではない。この問題に対処す
 るために、ゲージ不変な遮蔽質量の計算方法を開発した。ゲージ不変なポリアコフ ラインを時間反転と荷電反
 転とでそれぞれ偶部分と奇部分に分類し、それらの相関関数を調べることにより、電氣的遮蔽と磁氣的遮蔽
 をゲージ不変に分離した。これらの相関関数の長距離での遮蔽を調べることにより、電氣的遮蔽質量と磁氣的
 遮蔽質量を計算した。そして、電氣的遮蔽質量と磁氣的遮蔽質量の比(スクリーニング比)が有効模型や超対
 称模型と同様な振る舞いをしていることがわかった(論文 37)。

(15) クォーク・グルオン・プラズマ相におけるチャーモニウム消失の研究

チャームクォークと反チャームクォークの束縛状態であるチャーモニウム(特に J/ψ , χ_c , ψ' 状態など)がクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)相中で消失する温度や特性を格子 QCD で研究した。我々は、対角化の方法を用いて基底状態と励起状態に対する有効質量及び波動関数を計算し、有効質量の空間方向境界条件依存性及び波動関数の空間分布を調べることでチャーモニウムの消失の有無を確かめた。シミュレーションは $O(a)$ 改良されたウィルソンクォーク作用とプラケットゲージ作用を使用し、クエンチ近似を用いて行った。その結果、少なくとも臨界温度の 2.3 倍の温度まで 1S、2S、1P、2P 状態のチャーモニウムが消失することは確認できなかった(論文 32)。

(16) QGP 有限温度相転移の次数に関する研究

QGP 有限温度・有限密度相転移の次数を判定する有効な手法の研究を行った。QGP 有限温度相転移の次数を判定する方法として、観測量のヒストグラムを用いる方法があるが、測定が容易なプラケットのヒストグラムに reweighting 法を組み合わせる研究方法が近年提案された。クォーク質量が非常に大きい領域でのシミュレーションを行い、この領域での QGP 有限温度相転移の次数について調べた。過去の研究からこの領域での相転移の概要は分かっているため、これと今回の結果を比較した。この比較から、この新しい方法が上手く機能していることを確かめた。この方法を用いることで臨界点をこれまでより容易に特定することができ、この方法が従来の方法に比べ優れていることがわかった。国際会議などで発表を行い、現在論文を準備中である。

[3] ILDG・JLDG の構築(宇川, 吉江, 浮田)

格子 QCD シミュレーションの基礎データである配位を国際規模で共有する International Lattice Data Grid プロジェクトに参加し、システムの改良に携さると共に、定例のワークショップ(テレビ会議)を2回ホストした。また、国内の格子 QCD 研究者のデータグリッド Japan Lattice Data Grid の改良に携わった。

[4] 格子 QCD によるバリオン間力の研究(青木 HAL QCD Collaboration)

2つの核子の間に働く力、核力は、中遠距離では引力、近距離では強い斥力になることが実験的に知られているが、この核力の性質、特に近距離での斥力(斥力芯と呼ばれている)を理論的に導くことは、素粒子原子核物理に残された大問題の1つである。

青木、石井らは、東京大学の初田との共同研究で、二核子系の波動関数から核子間のポテンシャルを導き出すという方法を用いて格子 QCD により計算したが、その方法のまとめの論文 14 を発表した。また、青木はポテンシャルの近距離での振舞を解析的手法で研究した(論文 16, 22)。

また、青木と学生の村野らは、ポテンシャルのエネルギー依存性及び、角運動量 L 依存性を調べ、これらのポテンシャルは少なくとも、 $E=0\sim 45$ MeV、 $L=0\sim 2$ において利用可能であることを示した(論文 28)。

青木と研究員の井上らは、格子 QCD を用いてフレーバーSU(3)対称極限な世界におけるバリオン間相互作用を調べた。彼らは S 波状態に注目し、最近に開発された方法を用いて、必要十分な6つのポテンシャルを導出した。結果を用い、相互作用のフレーバー依存性、特に短距離における違いとその起源を議論した。特筆すべき点は、フレーバー1重項チャンネルが他と異なり短距離で引力である事を示した点、ダイバリオン状態が存在する可能性がある事を示した点である。

近年、原子核や中性子星などの諸性質を理解する上で、三体力の果たす役割の重要性が指摘されている。青木と研究員の土井らは、格子 QCD による三体力の決定を目指し、今年度は三体系内での有効二体相互作用に着目した計算を行った。PACS-CS Collaboration によって生成されたパイオン質量が 700MeV に対応する 2+1 フレーバーゲージ配位を使って三重水素原子核中の有効二体相互作用計算された。三体系でも有効相互作用が精度良く決定できることを実証している。このゲージ配位では、三体系の効果は誤差の範囲内でゼロコンシステントとなった。

4. 研究業績

(1) 研究論文

1. Physical point simulation in 2+1 flavor lattice QCD: PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yamazaki, T. Yoshie, *Phys. Rev. D* 81 (2010) 074503.
2. SU(2) and SU(3) chiral perturbation theory analyses on baryon masses in 2+1 flavor lattice QCD: PACS-CS Collaboration: K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, *Phys. Rev. D* 80 (2009) 054502.
3. Helium Nuclei in Quenched Lattice QCD: PACS-CS Collaboration: T. Yamazaki, Y. Kuramashi, A. Ukawa, *Phys. Rev. D* 81 (2010) 111504.
4. Precise determination of the strong coupling constant in $N_f=2+1$ lattice QCD with the Schroedinger functional scheme: PACS-CS Collaboration: S. Aoki, K.-I. Ishikawa, N. Ishizuka, T. Izubuchi, D. Kadoh, K. Kanaya, Y. Kuramashi, K. Murano, Y. Namekawa, M. Okawa, Y. Taniguchi, A. Ukawa, N. Ukita, T. Yoshie, *JHEP* 10 (2009) 053.
5. Application of preconditioned block BiCGGR to the Wilson-Dirac equation with multiple right-hand sides in lattice QCD: H. Tadano, Y. Kuramashi, T. Sakurai, *Comput. Phys. Commun.* (in press).

6. Application of block Krylov subspace algorithms to the Wilson-Dirac equation with multiple right-hand sides in lattice QCD: T. Sakurai, H. Tadano, Y. Kuramashi, *Comput. Phys. Commun.* *181* (2010) 113.
7. Block BiCGGR: a new block Krylov subspace method for computing high accuracy solutions: H. Tadano, T. Sakurai, Y. Kuramashi, *JSIAM Lett.* *1* (2009) 44.
8. Physical point simulations in 2+1 flavor lattice QCD: Y. Kuramashi for PACS-CS Collaboration, *PoS(LATTICE 2009)* 110.
9. Determination of the running coupling constant α_s for $N_f=2+1$ QCD with the Schroedinger functional scheme: Y. Taniguchi for PACS-CS Collaboration, *PoS(LATTICE 2009)* 208.
10. Heavy-light mesons in 2+1 flavor lattice QCD: Y. Namekawa for PACS-CS Collaboration, *PoS(LATTICE 2009)* 111.
11. Vector and Axial Currents in Wilson Chiral Perturbation Theory: S. Aoki, O. Baer, S. Sharpe, *Phys. Rev. D* *80* (2009) 014506.
12. Pion form factors from two-flavor lattice QCD with exact chiral symmetry: S. Aoki, T.W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada (JLQCD, TWQCD collaborations), *Phys. Rev. D* *80* (2009) 034508.
13. Chiral perturbation theory in a theta vacuum: S. Aoki and H. Fukaya, *Phys. Rev. D* *81* (2010) 034022.
14. Theoretical Foundation of the Nuclear Force in QCD and its applications to Central and Tensor Forces in Quenched Lattice QCD: S. Aoki, T. Hatsuda, N. Ishii, *Prog. Theor. Phys.* *123* (2010) 89.
15. Determination of the chiral condensate from 2+1-flavor lattice QCD Simulations: H. Fukaya, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, J. Noaki, T. Onogi, N. Yamada (LQCD collaboration), *Phys. Rev. Lett.* *104* (2010) 122002.
16. Application of the operator product expansion to the short distance behavior of nuclear potentials: Sinya Aoki, Janos Balog, Peter Weisz, *JHEP* *05* (2010) 008.
17. Lattice QCD: S. Aoki, *Nucl. Phys.* *A827* (2009) 145c.
18. From Quarks to Nuclei: Challenges of Lattice QCD: S. Aoki, *Nucl. Phys. B(Proc. Suppl.)* *195* (2009) 281.
19. The vector and axial currents in Wilson chiral perturbation theory: S. Aoki, O. Baer, S. R. Sharpe, *PoS(LATTICE 2009)* 084.

20. Nucleon sigma term and strange quark content in 2+1-flavor QCD with dynamical overlap fermions: H. Ohki, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Kaneko, H. Matsufuru, J. Noaki, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada, *PoS(LATTICE 2009)* 124.
21. Pion physics on the lattice: . Aoki, *PoS(CD09)* 070.
22. The repulsive core of the NN potential and the operator product expansion: S. AOKI, J. Balog and P. Weisz, *PoS(LATTICE 2009)* 132.
23. Flavor-singlet mesons in $N_f=2+1$ QCD with dynamical overlap quarks: T. Kaneko, S. Aoki, T.W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T.H. Hsieh, J. Noaki, E. Shintani and N. Yamada, *PoS(LATTICE 2009)* 107.
24. Calculation of nucleon strange quark content with dynamical overlap quarks: K. Takeda, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Kaneko, T. Onogi, N. Yamada (JLQCD collaboration), *PoS(LATTICE 2009)* 141.
25. Chiral properties of light mesons with $N_f=2+1$ overlap fermions: J. Noaki, S. Aoki, T.W. Chiu, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. H.Hsieh, T. Kaneko, H. Matsufuru, T. Onogi, E. Shintani, N. Yamada (JLQCD, TWQCD Collaborations), *PoS(LATTICE 2009)* 096.
26. π^0 to two-photon decay in lattice QCD: E. Shintani, S. Aoki, S. Hashimoto, T. Onogi, N. Yamada (for JLQCD Collaboration), *PoS(LATTICE 2009)* 246.
27. Determination of α_s in 2+1-flavor QCD through vacuum polarizationfunction: E. Shintani, S. Aoki, H. Fukaya, S. Hashimoto, T. Onogi, N. Yamada (for JLQCD Collaboration), *PoS(LATTICE 2009)* 207.
28. Energy dependence of nucleon-nucleon potentials in lattice QCD: K. Murano, N. Ishii, S. Aoki, T. Hatsuda, *PoS(LATTICE 2009)* 126.
29. S-wave π K scattering length from lattice QCD: K. Sasaki, N. Ishizuka, T. Yamazaki, M. Oka (PACS-CS Collaboration), *PoS(LATTICE 2009)* 098.
30. Derivation of Luescher's finite size formula for N π and NN system: N. Ishizuka, *PoS(LATTICE 2009)* 119.
31. Fixed Scale Approach to Equation of State in Lattice QCD: T. Umeda, S. Ejiri, S. Aoki, T. Hatsuda, K. Kanaya, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), *Phys. Rev. D* 79, (2009) 051501(R).
32. Search for the Charmonia Dissociation in Lattice QCD: H. Ohno, T. Umeda, and K. Kanaya (WHOT-QCD Collaboration), *Nucl. Part. Phys.* 36 (2009) 064027.

33. Free energies of heavy quarks in full-QCD lattice simulations with Wilson-type quark action: Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, H. Ohno, T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), *Nucl. Phys. A* 830 (2009) 247c.
34. Fixed scale approach to the equation of state on the lattice: K. Kanaya, T. Umeda, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa, H. Ohno (WHOT-QCD Collaboration), *Nucl. Phys. A* 830 (2009) 801c.
35. Heavy-quark free energy at finite temperature with 2+1 flavors of improved Wilson quarks in fixed scale approach: Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, K. Kanaya, H. Ohno and T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), *PoS(LATTICE 2009)* 165.
36. Towards the equation of state in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks in the fixed scale approach: K. Kanaya, S. Aoki, H. Ohno, T. Umeda, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, Y. Maezawa (WHOT-QCD Collaboration), *PoS(LATTICE 2009)* 190.
37. Electric and Magnetic Screening Masses at Finite Temperature from Generalized Polyakov-Line Correlations in Two-flavor Lattice QCD: Y. Maezawa, S. Aoki, S. Ejiri, T. Hatsuda, N. Ishii, K. Kanaya, N. Ukita and T. Umeda (WHOT-QCD Collaboration), *Phys. Rev. D* 81 (2010) 091501.

(2) 学会発表

(A) 招待講演

1. Charmed mesons in lattice QCD: Y. Namekawa, KEK workshop on HEAVY QUARK PHYSICS IN QCD, (Tsukuba, Japan, Sep. 7-8, 2009).
2. Baryon interaction from Lattice QCD: S. Aoki, The miniworkshop ``Light Quark Masses and Hadron Physics (From quarks to life)`` (Universidad Complutense de Madrid, Spain, 2-5 June, 2009).
3. Pion Physics on the lattice: S. Aoki, Sixth International Workshop on Chiral Dynamics, (University of Bern, Switzerland, July 6-10, 2009).
4. Nuclear Forces from Lattice QCD: S. Aoki, KITPC Program ``Lattice Quantum Chromodynamics``, (KITPC@CAS, Beijing, China, July 6-25, 2009).
5. Baryon-Baryon-Interaction from Lattice QCD: S. Aoki, The 5-th International Conference on Quark and Nuclear Physics, (Beijing, September 21-26, 2009).
6. Baryon Interactions from Lattice QCD: S. Aoki, The 7-th Japan-China Joint Nuclear Physics Symposium, (University of Tsukuba, Tsukuba, Japan, November 9-13, 2009).

7. The repulsive core of the nucleon-nucleon potentials and the operator product expansion: S. Aoki, 2009 Taipei Workshop on Lattice QCD (National Taiwan University, Taiwan, Dec. 13-15, 2009).
8. A challenge in lattice QCD: S. Aoki, Conference on Computational Physics 2009, (Kaohsiung, Taiwan, December 15-19, 2009).
9. Computing Facilities in Japan: S. Aoki, The First ANPhA Symposium, (J-PARC, Tokai, Japan, Jan. 18-19, 2010).
10. QCD thermodynamics at zero and finite densities with improved Wilson quarks: K. Kanaya, YITP international workshop on "New Frontiers in QCD 2010 -Exotic Hadron Systems and Dense Matter-" (NFQCD2010) (YITP, Kyoto Univ., Kyoto, Japan, Mar.8-19, 2010).
11. International Lattice Data Grid: Y. Yoshie, HackLat2009 (NeSC, Edinburgh, May 06-07, 2009).
12. Nucleon structure functions from $N_f=2+1$ dynamical domain wall fermions: T. Yamazaki, The 7th Circum-Pan-Pacific Symposium on High Energy Spin Physics (Yamagata, Japan, Sep. 15-18, 2009).
13. 物理的クォーク質量における2+1フレーバー格子QCD: 蔵増 嘉伸、日本物理学会秋季大会(甲南大学、神戸、2008年9月10-13日)。
14. 重いフレーバーを含んだ領域での格子QCDによるスペクトロスコーピー: 滑川 裕介、新学術領域「新ハドロン」研究会(名古屋大学、名古屋、2009年11月27-28日)。
15. PACS-CS results for heavy quark physics in $N_f=2+1$ lattice QCD: 滑川 裕介、理研・格子QCD研究会(理化学研究所、和光、2009年12月22日)。
16. 格子QCD データグリッド ILDG/JLDG: 吉江 友照、平成21年度ITBLシンポジウム(海洋研究開発機構 横浜研究所、横浜、2009年5月29日)。
17. Hadron scattering from lattice QCD: 山崎 剛、新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物質構造の解明」A01 班「量子色力学にもとづく真空構造とクォーク力学」第一回 A01 班研究会(大阪大学、大阪、2009年9月14日)。
18. Calculation of Helium nuclei in quenched lattice QCD: 山崎 剛、理研・格子QCD研究会(理化学研究所、埼玉、2009年12月22日)。
19. 格子QCDを用いた $\Delta I = 3/2$ K 中間子崩壊行列要素の直接的計算(若手奨励賞記念講演): 山崎 剛、日本物理学会年會(岡山大学、岡山、2010年3月20-23日)

(B)その他の学会発表

1. Physical Point Simulations in 2+1 Flavor Lattice QCD: Y. Kuramashi, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Peking, China, July 25-31, 2009).
2. Determination of running coupling α_s for $N_f=2+1$ QCD with Schroedinger functional scheme: Y. Taniguchi, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Peking, China, July 25-31, 2009).
3. Nucleon axial charge in 2+1 flavor lattice QCD with $O(a)$ improved Wilson quark action: N. Ukita, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Peking, China, July 25-31, 2009).
4. Heavy-light mesons in 2+1 flavor lattice QCD: Y. Namekawa, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Peking, China, July 25-31, 2009).
5. Non-perturbative renormalization of $N_f=2+1$ QCD with Schroedinger functional scheme: Y. Taniguchi, 2009 Taipei Workshop on Lattice QCD (National Taiwan University, Taiwan, Dec. 13-15, 2009).
6. Repulsive core of the NN potential and operator product expansion: S. Aoki, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Peking, China, July 25-31, 2009).
7. Derivation of Luescher's finite size formula for N π and NN system: N. Ishizuka, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Peking, China, July 25-31, 2009).
8. Fixed scale approach to the equation of state on the lattice: K. Kanaya, The 21st International Conference on Ultrarelativistic Nucleus-Nucleus Collisions (Quark Matter 2009) (Knoxville, TN, USA, Mar.30-Apr.4, 2009).
9. Towards the equation of state in 2+1 flavor QCD with improved Wilson quarks in the fixed scale approach: K. Kanaya, The XXVII International Symposium on Lattice Field Theory (Peking, China, July 25-31, 2009).
10. Site Report on Physics Plan from Japan: Y. Kuramashi, ILDG14 (TV workshop hosted by CCS, Tsukuba, June.05, 2009).
11. Site Report on Physics Plan from Japan: N. Ukita, ILDG15 (TV workshop hosted by CCS, Tsukuba, Dec.04, 2009).
12. Metadata Working Group report: T. Yoshie, ILDG15 (TV workshop hosted by CCS, Tsukuba, Dec.04, 2009).
13. $N_f=2+1$ 格子 QCD による重-軽中間子スペクトル及び崩壊定数: 滑川 裕介、日本物理学会秋季大会(甲南大学、神戸、2008年9月10-13日).

14. クローバーフェルミオンを用いた $N_f=2+1$ 格子 QCD での核子の軸性ベクトル結合定数: 浮田 尚哉、日本物理学会秋季大会(甲南大学、神戸、2008年9月10-13日).
15. 核子-中間子、核子-核子散乱位相の格子 QCD 計算のための有限体積公式の導出: 石塚 成人、日本物理学会秋季大会(甲南大学、神戸、2008年9月10-13日).
16. QCD at finite temperatures and densities on the lattice with improved Wilson quarks: 金谷 和至、KEK 理論研究会 2010 (高エネルギー加速器研究機構, 茨城, Mar.11-12, 2010).
17. Hepnet-J/sc 報告: 吉江 友照、Hepnet-J ユーザー会(KEK、つくば、2009年10月2-3日).

5. シンポジウムの開催

1. 青木 慎也 他、研究会「バリオン間相互作用に基づく核物質の構造」(つなぎ温泉、ホテル紫苑、盛岡、2009年6月25日-27日)、参加者 約40名.
2. 青木 慎也 他、次世代スーパーコンピュータ戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」科研費新学術領域研究「素核宇宙融合による計算科学に基づいた重層的物质構造の解明」合同シンポジウム「次世代スーパーコンピュータでせまる物質と宇宙の起源と構造」(東京ステーションコンファレンス 605 A+B+C、東京 2010年3月15日、東京大学 理学部一号館 小柴ホール、東京、2010年3月16日)、参加者 約100名.

特記事項

次世代スーパーコンピュータ戦略プログラム分野5「物質と宇宙の起源と構造」の活動を計算基礎科学連携拠点(筑波大学計算科学研究センター、KEK、国立天文台)が中心となって開始した。

6. 受賞

山崎 剛、日本物理学会 第四回若手奨励賞(素粒子論領域)「格子 QCD 数値計算による K 中間子崩壊過程の解析」、2010年3月.

1.2. 宇宙分野

1. メンバ

教授 梅村 雅之

准教授 森 正夫

講師 吉川 耕司

助教 岡本 崇(科研費基盤S)

助教 川勝 望(理数学生応援プロジェクト)

研究員 長谷川 賢二(科研費基盤S), 谷川 衝(計算科学研究センター)

川口 俊宏(科研費基盤A)

2. 概要

本年度, 当グループスタッフは, FIRST プロジェクトを推し進めると共に, これを用いた大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長, 高赤方偏移銀河における電離光子脱出確率の質量依存性, TREE 構造を用いた高速 Radiation Smoothed Particle Hydrodynamics 法の開発, 三次元輻射輸送から探る相対論的ジェット構造, 衝突銀河団における重元素の電離状態と電子・イオン温度の研究を行った。また, 銀河進化標準モデルの構築を目的として, FIRST, T2K-Tsukuba を用いて, ライマンアルファエミッタとライマンブレイク銀河の理論進化モデルの構築, 宇宙再電離と銀河形成・進化, ライマンアルファエミッタとサブミリ銀河との関係, 銀河衝突とダークマターハローの構造, 銀河衝突と銀河中心の巨大ブラックホールの活動性, ダークマターハローの力学構造の安定性解析, コールドダークマターハロー中の銀河風の定常解, 超新星爆発と銀河進化, 降着円盤の輻射磁気流体力学モデル, 恒星進化と質量放出過程の研究を行った。さらに, 宇宙論・銀河形成分野で, Baryon Acoustic Oscillation の非線形成長, 衛星銀河問題の解決, 合体銀河における爆発的星形成の研究を行った。

3. 研究成果

【1】FIRST プロジェクト

(1) 概要

文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(S)「第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明」(平成20年度～平成24年度, 代表 梅村雅之)に基づき, 宇宙第一世代天体および原始銀河形成に関する大規模なシミュレーションを実行するプロジェクト(FIRST プロジェクト)を推進した。

(17) 宇宙シミュレータ FIRST

宇宙第一世代天体の形成過程について大規模な輻射流体力学シミュレーションを行うためには, 物質と光の作用および重力相互作用を極めて高速に計算する必要がある。目的とするシミュレーションのためには, 物質・光の計算性能が数 Tflops, 重力計算性能が数 10 Tflops の計算機を必要とする。我々は, これを実現するために, PC クラスタに新規開発したサーバ組み込み型の**重力計算専用ボード Blade-GRAPE**を埋め込んだ**宇宙シミュレータ FIRST**を完成させた。

FIRST は, 256 の計算ノード, 2 つの管理ノード, 2 つのファイルサーバ, および Gfarm ファイルシステムからなる。計算ノードのうち, 16 ノードは 32 ビット型 Blade-GRAPE を有し, 224 ノードは 64 ビット型 Blade-GRAPE X64 を有する。ファイルサーバは 2 台で合計 4.5TB の容量をもつ。Gfarm ファイルシステムは, ネットワーク共有ファイルシステムであり, 分散したローカルディスクから一つの共有ファイルシステムをつくる機構である。これにより, 総計 22TB の共有ファイルシステムが構築されている。FIRST の総演算性能は, 36.1TFLOPS であり, 内ホスト部分 3.1TFLOPS, Blade-GRAPE 部分 33TFLOPS である。また, 主記憶容量は総計 1.6TB である。

(18) 大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長

多くの銀河中心には 10^6 から 10^9 太陽質量の大質量ブラックホール(SMBH)が存在する。銀河はより小さな銀河同士の衝突合体によって形成されたため, その中にあるブラックホールも合体成長した可能性がある。それらのブラックホールの合体成長過程は明らかになっていない。

SMBH 同士が合体するにはそれぞれの軌道角運動量を抜く必要がある。2つの SMBH だけで合体することは難しい。SMBH の軌道角運動量を抜く機構の1つは銀河の星による力学的摩擦であるが, 2つの SMBH 間距離が収縮すると, SMBH の間を通る星がなくなるため力学的摩擦が効かなくなり, SMBH 間距離の収縮が止まるからである(Begelman et al.1980; Makino, Funato 2004)。もう1つ SMBH が銀河内に存在すると, その SMBH が2つの SMBH の軌道角運動量を持ち去るため, 2つの SMBH は合体できる(Iwasawa et al.2006)。より多くの SMBH が銀河内に存在する場合, いくつかの SMBH は合体することが予想される。しかし, 合体過程が落ち着いた後の SMBH の質量関数は自明ではない。

我々は1つの銀河の中に 10 個の等質量の SMBH が存在する場合に, SMBH の合体を通して, SMBH の質量分布がどのように進化するかを N 体シミュレーションによって調べた。その結果, 5つの SMBH が合体して1つになった。一方, 残りの SMBH は一度も合体を経験しなかった。合体に寄与した SMBH の軌道角運動量を奪う機構は, それらが銀河中心にないときは銀河の星からの力学的摩擦であり, 銀河中心にあるときは SMBH 同士の三体相互作用である。1つの SMBH だけが合体成長するのは, 質量の大きい SMBH 程, 銀河の星から

の力学的摩擦や SMBH の三体相互作用を通して軌道角運動量を奪われやすいからである。この結果は、SMBH の成長過程の1つに SMBH 多体系があった可能性を示唆する。

(19) 高赤方偏移銀河における電離光子脱出確率の質量依存性

高赤方偏移の星形成銀河から放射される電離光子は、紫外線背景放射強度を決め宇宙暗黒時代における銀河間ガスの電離史を大きく左右する。この電離光子放射率を決める上で重要なのが銀河内で生まれた全電離光子数の内、銀河の外へ脱出する電離光子数の割合を示す電離光子脱出確率である。我々はこれまで Mori & Umemura (2006) の高精度流体計算による銀河進化のシミュレーション結果に対して3次元輻射輸送計算を行い、超新星爆発が活発的に起きている銀河が非常に高い電離光子脱出確率を持つことを示した (Yajima et al. 2009)。

我々はさらに、SPH 法による宇宙論的流体計算の結果から得られるさまざまな質量の銀河に対して輻射輸送計算を行い、電離光子脱出確率の質量依存性を調べた。結果として電離光子脱出確率は、質量に対して非常に強い依存性を持っており銀河の質量が小さくなるにつれ脱出確率は非常に大きくなることが分かった。これは質量が大きくなるにつれ銀河内のガスの構造はサブハローの集合、合体を繰り返しているため非常に clumpy な構造になっており、そのため電離光子は生成された高密度領域を脱出しても他の高密度ガス領域にトラップされてしまうためである。これらの結果により宇宙暗黒時代では、低質量の星形成銀河が宇宙再電離の電離源として有力であることが示唆された。

(20) TREE 構造を用いた高速 Radiation Smoothed Particle Hydrodynamics 法(START)の開発

輻射は物質との相互作用を通じて、ガスの化学進化や力学進化に影響を与える。このような過程を矛盾無く解く為には、輻射輸送計算と流体力学計算をカップルさせた輻射流体計算が必要となる。そのような輻射流体計算法の一つに Radiation Smoothed Particle Hydrodynamics(RSPH)法というものがある(Susa 2006)。この手法では、放射源一つにつきおおよそ $O(N)$ (N は SPH 粒子数) の計算量で輻射輸送計算が可能となる。我々は、この計算法を用いて種族 III 星からの紫外線フィードバックに関する研究を行ってきた(Hasegawa, Umemura and Susa 2009 など)。この RSPH 法を含め多くの輻射輸送計算では輻射性再結合による放射はすぐその場で吸収されるという近似(On the spot 近似)を用い、実際にはそれらの光子の輻射輸送計算を行ってはいない。これは、再結合光子の輻射輸送を計算する事はすべての粒子を放射源として扱う事と同等であり、計算量が $O(N \times N)$ と膨大となり、実現が非常に困難となる為である。また同様の理由により、星などの放射源の数が多数の場合にも計算を実行することが困難となってしまう。そこで、我々は重力多体計算でよく用いられる TREE 法の概念を適用する事により、高速化された新たな RSPH 法を開発した。この手法では、放射源の数を N_s とした場合、1ステップ当たり $N \log(N_s)$ のオーダーの計算量で輻射流体計算をする事が可能となる。これにより、これまで非常に困難であった散乱光を考慮した輻射流体計算や多数の星からの輻射性フィードバックを同時に取り扱った計算を可能とした。この手法を用いて、光電離に対する散乱光の役割を解析した結果、吸収体の大きさが電離光子の平均自由行程と同程度になる場合、On the spot 近似が適当でないことを明らかにした。

(21) 三次元輻射輸送から探る相対論的ジェットの構造

活動銀河核やマイクロクエーサーでは、相対論的速度($\sim 0.999c$)で加速するジェットが見つまっているが、ジェットの収束、加速メカニズムはまだ解明されていない。最も有力視されている磁氣的加速モデルでも、 $0.5c$ を超えるジェットの速度は完全には説明できていない。一方、ジェット天体の中には、エディントン光度を超える非常に明るい天体が見つまっているため、輻射力によるジェットの収束、加速の可能性が考えられる。近年、輻射力と磁気力の両方の効果を取り入れた輻射磁気流体の研究が注目され始めている。しかし、これまでの計算では、輻射輸送を近似的に取り扱っているため、輻射フラックスや輻射ストレステンソルを正しく求めることができず、輻射力を正確に評価できない。例えば、Ohsuga et al.(2009)の2次元輻射磁気流体計算では、光束制限拡散(FLD)近似を用いているが、光学的に薄い($\tau < 1$)場所では輻射場が正しく求まっている保証がない。本研究では、Ohsuga et al.(2009)の計算結果を用いて、三次元輻射輸送計算を行い、FLD 近似の妥当性を検証した。また、FLD 近似では正確に求められない輻射ストレステンソルや輻射フラックス等を計算し、円盤からの輻射が、どの程度ジェットの収束、加速に影響を与えるかを調べた。

(22) 衝突銀河団における重元素の電離状態と電子・イオン温度の研究

銀河団の銀河は銀河団が銀河や銀河群の度重なる衝突合体で成長するときに力学的・熱的影響を強く受け形成・形態進化を遂げ、その過程で銀河団ガスに重元素を供給してきた。重元素の量と分布はこれらの形成進化をひもとく鍵であり、それは数千万度の温度にある銀河団ガスから放射される X 線を分光し、輝線を調べることで分かる。これまでに多くの銀河団で重元素の組成や量、空間分布が X 線観測の研究によって調べられてきた。これらの研究においては重元素は衝突電離平衡にあり電子・イオンは温度平衡にあると仮定されるが、これは銀河団中心部ではこれらの平衡状態に達する時間スケールが十分短いと考えられるだけガスの密度が高いからである。しかしながら、ビリアル半径にせまる希薄な周縁領域や衝突加熱領域では平衡状態に達していない可能性を我々は注目している。もしそうであれば、平衡を仮定した解析結果は誤った重元素量を推定しかねない。そこで我々は FIRST シミュレータを用いて鉄などの主要な重元素の衝突電離平衡と電子・イオンの温度平衡を仮定せず時間進化を解くダークマターとガスを含めた様々な衝突条件下(質量比・インパクトパラメータ)での衝突銀河団の 3 次元数値実験を世界で初めて行った。その結果、銀河団外縁部と銀河団中心部でそれぞれ特徴的な衝撃波が非平衡電離状態・2 温度状態を伴って形成されることが分かった。更に、観測時の衝撃波面に対する角度によって非平衡電離状態や 2 温度状態の観測可能性が大きく変わることもわかった。実際の衝突銀河団における物理状態は、将来の X 線観測衛星でその詳細が明らかになることが期待される。

【2】銀河進化標準モデルの構築

(1) 概要

飛躍的な観測技術や検出装置の進歩により、それまでは全く知り得なかった宇宙の深遠部で、活発な星形成の兆候を示すライマンアルファエミッター、ライマンブレイク銀河、サブミリ銀河等、莫大な数の銀河が観測されている。しかしながら、そういった天体が、我々の住む現在の宇宙に存在し、ハッブル系列などで分類され研究

されてきた近傍銀河とどのように関連しているのか？これらは非常に基本的な問いかけにもかかわらず、明確な答えを我々はもっていない。文部科学省科学研究費補助金 基盤研究(A)「理論と観測の融合による銀河発生の探究」(平成21年度～平成24年度, 代表 森正夫)に基づき、銀河の標準進化モデルを構築すべく銀河形成・進化の理論研究を推進している。

(23) ライマンアルファエミッタとライマンブレイク銀河の理論進化モデルの構築

本研究では、ライマンアルファエミッタやライマンブレイク銀河に代表される高赤方偏移で発見されている天体が、近傍宇宙のハッブル系列を構成する銀河の進化経路の一側面を見ているに過ぎないという仮説を掲げ、銀河の化学力学モデルを駆使して、銀河の発生について詳細な理論モデルを構築している。さまざまな質量のスケールで化学力学シミュレーションを行った結果、ライマンアルファエミッタとライマンブレイク銀河が原始銀河の進化系列であることを見出すことができた。またライマンアルファエミッタで放射されるライマンアルファエミッションの光度は、原始銀河の質量および星形成率と密接な相関があることを示した。さらにその放射の物理的な起源として従来から考えられてきたメカニズムに加えて、衝撃波で加熱されたガスの放射冷却に起因するものが大きな影響を及ぼすことが分かった。

(24) 宇宙再電離と銀河形成・進化

赤方偏移 $z \sim 1100$ で一度中性化を迎えた宇宙は、その後形成される天体からの紫外線光子によって再び電離状態へと引き戻され、現在まで高度に電離した状態を維持している事が分かっている。この宇宙再電離に関しては、近年のクエーサー観測や WMAP による観測によってその電離史に大まかな制限はつけられてきた。しかしながら、宇宙再電離を引き起こした電離源に関しては未だ理論的にも観測的にもまったく分かっていない。これら電離源や電離史の研究では、これまでいつも銀河の電離光子脱出確率の不明瞭さが解析を困難にしていた。この電離光子脱出確率は銀河内の星から放射される全電離光子数のうち銀河間空間へ脱出する割合で、これによって銀河の電離光子放射率、紫外線背景輻射強度は大きく左右される。我々は宇宙論的流体計算により計算された多数の星形成銀河に対して、3次元輻射輸送計算を行う事により、銀河内の電離構造、電離光子脱出確率を見積った。結果として、赤方偏移 $z=3-6$ においては星形成銀河により銀河間ガスを電離する事が可能である事が示された。さらに電離源解明の鍵を握る電離光子脱出確率についての質量依存性やそのメカニズム、電離源を担う銀河の典型的質量について議論した。

(25) ライマンアルファエミッタとサブミリ銀河との関係

近年、ライマンアルファエミッタやライマンブレイク銀河の観測研究の分野では、従来からの可視光波長のみならず X 線、サブミリ等の多波長観測が行われはじめている。我々は Mori & Umemura (2006)における銀河風によるライマンアルファエミッタの理論モデルが現実的であるか検証すべく、星間ダストによる紫外線の吸収を詳細に扱うことで、赤外線特性を調べた。その結果、銀河進化と共にダストの温度分布、赤外線分布、赤外線光度の時間的変化が分かった。この結果を用いて、ALMA 等に代表される将来の大型観測装置による高赤方偏移天体のサブミリ波観測に対する理論的な示唆を与えた。

(26) 銀河衝突とダークマターハローの構造

現在の標準的な宇宙構造形成論では、小質量銀河が衝突合体を繰返しながら成長し階層的に構造形成をおこなうことにより、現在の銀河の姿を構築したと考えられている。近傍銀河 M31 においても、アンドロメダストリームやシェルといった銀河衝突の痕跡が発見されており、ストリームの速度構造が詳細に観測・解析されている。一方、理論的には N 体シミュレーションを用いた研究により、観測されている空間構造を再現することに成功しているが、ストリームの速度構造についてはこれまで調べられてこなかった。そこで我々は、観測されている空間構造を再現できる計算結果を用いてストリームの速度構造を観測結果と比較し、多くの観測結果が説明できることを明らかにした。宇宙論的 N 体シミュレーションを用いた構造形成では、ダークマターハローの密度分布がハローの外縁部で半径の -3 乗となることが示唆されており、ダークマターハローの“ユニバーサルプロファイル”として知られている。このプロファイルが現実の銀河でも成り立っていることを検証するためには、星の運動を観測し、これを解析することでダークマターハローの作るポテンシャルを調べ、これと“ユニバーサルプロファイル”の作るポテンシャルを比較することが有力な手段となる。銀河衝突の痕跡は銀河外縁部においても明るく、痕跡を形成している星の運動を観測することが可能であるため、銀河外縁部でのダークマターハローのプロファイルを観測的に調べるために適している。M31 のアンドロメダストリームを用いればそのダークマターハローの外縁部の構造に迫ることができる。我々の N 体シミュレーションでは、M31 のダークマターハローのプロファイルとして半径の -3 乗という密度分布を仮定し、その結果観測されているストリームの速度構造をよく再現できた。これは、半径の -3 乗というダークマターハローの密度分布が実際の銀河でも成り立っていることを示唆する重要な結果である。

(27) 銀河衝突と銀河中心の巨大ブラックホールの活動性

これまでの研究では銀河衝突現象の解析を重力多体系として解析してきたが、今後は銀河衝突に対するガスやダストの力学的な応答を調べる必要がある。特に銀河衝突と銀河中心ブラックホールの活動性との物理的な関係は大変興味深い。銀河衝突過程によっては、ブラックホールの活動性を際立たせる場合とその活動性を著しく減衰させる効果が予想される。我々はそのような状況を正確に解析する為、N 体シミュレーションでは取り入れられないガスの効果を取り入れるための銀河衝突の流体モデルの構築に取り組み、HLLC 法を採用した 3 次元並列流体コードの開発を行った。

(28) ダークマターハローの力学構造の安定性解析

宇宙の構造形成のパラダイムとなっているコールドダークマター(CDM)シナリオは、N 体シミュレーションによるとダークマター(DM)ハロー中心部で質量密度が発散する(カスプ)構造を予言する。DM が力学的に主たる役割を果たし、カスプを持つことが期待される天体として矮小銀河が挙げられる。その観測結果によると、矮小銀河は中心部で密度は発散せず、一定となる(コア)ことが報告されている。この理論と観測の不一致はコア-カスプ問題として知られ、CDM シナリオの未解決問題の一つである。コア-カスプ問題を解決するモデルとして、“かつて矮小銀河で大量の超新星爆発によるバリオン(ガス)の放出が起こり、その結果の重力場変動によりカスプがコアへと遷移した”というものがある。本研究では、これまで無視されてきた質量放出の起こる時間スケール

ルに注目し、DM ハローの力学応答への依存性を調べた。その結果、他の条件が同じであっても、”放出時間が短いほどカスプはコアに遷移しやすい”事を明らかにした。特に放出時間が DM ハロー中心部の力学時間に比べ十分に長い場合について、DM ハローの力学応答を断熱不変量を用いて解析的にモデル化した。

(29) コールドダークマターハロー中の銀河風の定常解

銀河風は超音速で流れる宇宙流体の1つとして知られている。銀河の中心付近で超新星爆発などにより星間ガスにエネルギーが放出されると星間ガスは銀河の外側に向かって超音速で流出するが、常に超音速で流れる場合だけではなく亜音速から始まって連続的に加速して超音速となって流れる遷音速流も存在する可能性がある。しかし先行研究では遷音速解が見つかっていなかった。本研究ではコールドダークマターハロー中の銀河風の遷音速流を発見することに成功した。恒星風を点源重力場における球対称定常流であると仮定すると、内側では重力の効果が効いているために亜音速流は加速し、外側では膨張の効果が効いているために超音速流が加速するので、膨張の効果と重力の効果が釣り合っている点をちょうど音速で流れる場合は亜音速から超音速への連続的な加速が実現でき、遷音速流となることがわかった。

(30) 超新星爆発と銀河進化

銀河形成・進化過程で爆発的な星形成に伴って発生する多重超新星爆発は、銀河内のガスに多大なエネルギーを供給する。超新星爆発によって生成された衝撃波から高温の銀河ガスを生成し、やがて銀河からのアウトフロー(銀河風)を形成することになる。このような銀河風生成メカニズムの研究は、計算機性能の飛躍的な向上と近年の高精度銀河観測データの蓄積に後押しされながら、現在も精力的に行われているが、未だ明確な答えを我々は持っていない。そこで本研究では、軸対称密度場中での衝撃波の伝播を扱う事ができる、Laubach-Probstein 法と呼ばれる強力な近似解法を用いて、銀河風生成メカニズムの理論的研究を行った。

(31) 降着円盤の輻射磁気流体力学モデル

本研究ではアルファ粘性モデルを用いず、輻射輸送と磁場の進化を正確に解く輻射磁気流体シミュレーションによって、スリム円盤、標準円盤、RIAF に対応する降着円盤の三つの状態を再現することに成功した。そして降着円盤のガス密度を変えることによって輻射冷却・輻射圧の効き方が変化して円盤の多様性が生み出されるため、一つの数値計算コードで三つの降着モードを再現することに成功した。その結果、(1) 超臨界降着流(スリム円盤に対応)の場合、輻射力と重力が釣り合った分厚い円盤の上空に、輻射力で加速されたアウトフローが発生する。また、円盤部の磁場エネルギーがガスの内部エネルギーを凌駕する、すなわちガスの内部エネルギーでリミットされないという新たな知見を得た。これはガスの回転運動によりトロイダル磁場が増幅されたことが原因と考えられる。ガスの温度は、円盤部では輻射の温度とほぼ等しいが、アウトフロー領域では輻射の温度よりはるかに高くなる。(2) 質量降着率が臨界値を下回る(標準円盤に対応)と、鉛直方向の構造はおおよそ静水圧平衡に近く、磁気圧がわずかに重力に勝るためアウトフローが発生する。この場合も円盤上空でのガス温度は輻射温度よりはるかに高くなる。(3) 質量降着率が臨界値よりはるかに小さい状況(RIAF に対応)では、主にガス圧が重力と釣り合った分厚い円盤が形成される。円盤上空では磁気圧がわずかに重力に勝り、

ガスが加速されてアウトフローとなる。ガス温度は領域全体で輻射温度よりはるかに高くなる。輻射圧加速アウトフローがおよそ定常であるのに対し、磁気圧加速アウトフローは激しく時間変動する。

(32) 恒星進化と質量放出過程

本研究では、惑星状星雲の形態が恒星風と星間空間ガスとの間に発生した衝撃波面に対応しているという立場の下、衝撃波面の流体力学的な挙動を追うことで、惑星状星雲の形態進化過程を詳細に調べた。衝撃波の伝播の様子は背景の密度分布に大きく左右される。つまり、惑星状星雲の形態進化も星間空間の密度分布に大きく依存していると考えられる。そこで本研究では、惑星状星雲の形態を議論するために軸対称非一様密度場中での衝撃波の伝播の様子を Laubach-Probstein 近似により解析し、背景密度場について制限を加える事で惑星状星雲の形態を再現することに成功した。

【3】宇宙論・銀河形成

(1) Baryon Acoustic Oscillation の非線形成長

Baryon Acoustic Oscillation (BAO) は宇宙晴れ上がり以前のバリオン・光子混合流体の音波振動が、晴れ上がり以後にバリオンとダークマターの重力相互作用によって現在の宇宙大規模構造に伝搬したものである。この BAO の振動スケールは宇宙晴れ上がり時のサウンドホライズンの大きさで決まるため理論的に計算可能である。従って、宇宙の大規模構造の観測によって BAO の振動スケールを観測することができれば、それを物差しとして大規模構造のスケールを測定することが可能になる。また、様々な赤方偏移での BAO の観測から宇宙の膨張の履歴を測定することが可能になり、宇宙論パラメータ、特に暗黒エネルギーの状態方程式への制限が可能になると考えられている。

BAO の振動スケールは $100h^{-1}\text{Mpc}$ 程度であるので、その時間的な成長は線形理論が適用可能な範囲ではあるが、宇宙論パラメータや暗黒エネルギーの状態方程式のパラメータを高い精度で決定するためには、非線形な効果を取り入れたモデル化が必要となる。一般に、摂動論による弱非線形成長の取扱いが行われるがその適用範囲については必ずしも明らかでは無かった。我々は宇宙論的な N 体シミュレーションを用いて BAO の非線形成長のシミュレーションを行い、様々な摂動論的な取扱いの適用可能範囲を明らかにした。

(33) 衛星銀河問題の解決

構造形成の標準的な理論となっているコールドダークマターモデルは、我々の天の川銀河のような銀河が数百から数千もの衛星銀河を持つことを予言する。一方、現在まで天の川銀河の周囲には 20 程度の衛星銀河しか発見されていない。この理論と観測の矛盾は「衛星銀河問題」と呼ばれ、標準モデルのもつ大問題とされてきた。一方、この問題はダークマターのみを考慮した宇宙論的シミュレーションによって指摘されているものである。そこで我々は、宇宙背景放射や超新星爆発による星間ガス加熱の影響を取り入れた宇宙論的な銀

河形成シミュレーションを行い、コールドダークマターモデルが予言する「目に見える」衛星銀河の数やその性質を調べた。

その結果、超新星爆発によるガスの加熱が十分に効けば、衛星銀河の光度関数は再現可能であること示した。このような加熱は衛星銀河の光度-金属量関係も同時に再現することも示した。さらに、衛星銀河の中心密度が数桁の光度に渡ってほぼ一定であり、コールドダークマターモデルと一見矛盾するという観測結果も自然に再現できることを明らかにした。これは、宇宙再電離の影響により、ある中心密度以下のダークマターハローでは銀河が形成されないからであることを示した。

(34) 合体銀河における爆発的星形成

従来の銀河形成シミュレーションは数値的分解能が足りないため、銀河内での星形成領域を直接取り扱うことは出来ず、温度 10^4 度、密度 $n_H \approx 0.1 \text{cc}^{-1}$ 程度の温かいガスで星形成が起こると仮定していた。そこで、 100 度以下、密度 n_H が 100cc^{-1} 以上の低温高密度ガスを扱える高分解能シミュレーションを行い、銀河の合体時に励起される星形成について調べた。その結果、このような低温高密度ガスでの星形成を仮定すると、従来のシミュレーションでは再現されなかった、銀河と銀河の衝突面での爆発的星形成が自然に生じることが分かった。この爆発的星形成ではダークマターハローを持たない星団も多数形成されることが明らかになった。

4. 科研費採択状況

・基盤研究(S):梅村 雅之 (代表者)(継続)

「第一世代天体から原始銀河に至る宇宙暗黒時代の解明」(2,700 万円)

・基盤研究(A):森 正夫 (代表者)(新規)

「理論と観測の融合による銀河発生学の探求」(440 万円)

・挑戦的萌芽研究 :吉川 耕司 (代表者)(新規)

「6次元ボルツマン方程式による自己重力系の数値シミュレーション」(110 万円)

・若手研究(スタートアップ):岡本 崇 (代表者)(新規)

「三次元輻射流体シミュレーションで探る銀河形成の物理」(90 万円)

・日本学術振興会特別研究員奨励費:川勝 望(代表者)(継続)

「巨大ブラックホールとその周辺空間との物質・エネルギー収支から探る銀河中心核形成」

(80 万円)

・日本学術振興会特別研究員奨励費：秋月 千鶴（代表者）(継続)

「相対論的輻射輸送から探る活動天体と宇宙ジェットの構造」(90万円)

5. 学位論文

博士論文

1. 秋月 千鶴

The Structure of a Slim Disk Outflow Explored by Three-Dimensional Radiation Transfer

(三次元輻射輸送から探るスリム円盤アウトフローの構造)

2. 佐久間 優

Feedback Effects of First Supernovae on the Subsequent Population III Star Formation

(連続的種族 III 星形成に対する初代超新星のフィードバック効果)

3. 佐藤 大介

The Effect of Partial Redistribution on the Escape of Lyman alpha Photons from Subgalactic Clouds

(銀河内ガス雲からのライマンアルファ光子の脱出における部分再分配の効果)

4. 矢島 秀伸

Ultraviolet Radiation Transfer in Dusty Primordial Galaxies

(ダスト形成中の原始銀河における紫外線輻射輸送)

修士論文

1. 青山 浩之

高赤方偏移ガンマー線バーストによる宇宙背景放射の減衰

学士論文

1. 田中 賢

銀河間ガス雲の重力収縮シミュレーション

2. 田口 政樹

銀河風生成における輻射の役割

3. 遠藤 圭介

ブラックホール連星系からの重力波放出

4. 寺部 佑基

Laubach-Probstein 近似による惑星状星雲の形態解析

5. 土屋 聖海

コールドダークマターハロー中の銀河風の定常解

6. 研究業績

(1) 研究論文

Refereed Papers

1. Tanikawa, A., Umemura, M., 2010, Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, *The Astrophysical Journal Letters*, submitted.
2. Hasegawa, K., Umemura, M., 2010, START: Smoothed particle hydrodynamics with tree-based accelerated radiative transfer, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, in press.
3. Mori, M., Umemura, M., Yajima, H., 2009, A Supernova-driven Wind Model for High-z Galaxies, *The proceedings of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2010 (OMEG10)*, AIP Conference Proceeding, in press.
4. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2010, Collision tomography: the progenitor of the Andromeda stellar stream and the metallicity gradient, *The proceedings of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2010 (OMEG10)*, AIP Conference Proceeding, in press.
5. Ogiya, G., & Mori, M., 2010, The core-cusp problem in CDM halos and supernova feedback, *The proceedings of the International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2010 (OMEG10)*, AIP Conference Proceeding, in press.
6. Shimizu, I., Umemura, M., 2010, Two types of Lyman alpha emitters envisaged from hierarchical galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406, 913-921.
7. Okamoto, T., Frenk, C. S., Jenkins, A., Theuns, T., 2010, The properties of satellite galaxies in simulations of galaxy formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 406, 208-222.

8. Bett, P., Eke, V., Frenk, C. S., Jenkins, A., Okamoto, T., 2010, The angular momentum of cold dark matter haloes with and without baryons, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 404, 1137-1156
9. Hasegawa, K., Umemura, M., Susa, H., 2009, Radiative regulation of Population III star formation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 395, 1280-1286.
10. Hasegawa, K., Umemura, M., Kitayama, T., 2009, Formation of globular clusters induced by external ultraviolet radiation, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 397, 1338-1347.
11. Susa, H., Umemura, M., Hasegawa, K., 2009, Formation Criteria and the Mass of Secondary Population III Stars, *Astrophysical Journal*, 702, 480-488.
12. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., Nakamoto, T., 2009, The escape of ionizing photons from supernova-dominated primordial galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 398, 715-721.
13. Kato, Y., Umemura, M., Ohsuga, K., 2009, Three-dimensional radiative properties of hot accretion flows on to the Galactic Centre black hole, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 400, 1742-1748.
14. Iliiev, Ilian T., Whalen, Daniel, Mellema, Garrelt, Ahn, Kyungjin, Baek, Sunghye, Gnedin, Nickolay Y., Kravtsov, Andrey V., Norman, Michael, Raicevic, Milan, Reynolds, Daniel R., Sato, Daisuke, Shapiro, Paul R., Semelin, Benoit, Smidt, Joseph, Susa, Hajime, Theuns, Tom, Umemura, Masayuki, 2009, Cosmological Radiative Transfer Comparison Project II: The Radiation-Hydrodynamic Tests, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 400, 1283-1316.
15. Ohsuga, K., Mineshige, S., Mori, M., Kato, Y., 2009, Global Radiation- Magnetohydrodynamic Simulations of Black-Hole Accretion Flow and Outflow: Unified Model of Three States, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61, 7-11
16. Nishimichi, T., Shirata, A., Taruya, A., Yahata, K., Saito, S., Suto, Y., Takahashi, R., Yoshida, N., Matsubara, T., Sugiyama, N., Kayo, I., Jing, Y.P., Yoshikawa, K., 2009, Modeling Nonlinear Evolution of Baryon Acoustic Oscillations: Convergence Regime of N-body Simulations and Analytic Models, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61, 321-332.
17. Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomisaka, K., Wada, K., Yoshida, N., 2009, Toward First-Principle Simulations of Galaxy Formation: II. Shock-Induced Starburst at a Collision Interface during the First Encounter of Interacting Galaxies, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61, 481-486

18. Okamoto, T., Frenk, C. S., 2009, The origin of failed subhaloes and the common mass scale of the Milky Way satellite galaxies, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 399, L174-L178
19. Kawakatu, N., Nagao, T., Jong-Hak, W., 2009, Exploring the disk-jet connection from the properties of narrow line regions in powerful young radio-loud AGNs, *The Astrophysical Journal*, 693, 1686-1695.
20. Kino, M., Kawakatu, N., Nagai, H., 2009, New prediction of extragalactic GeV gamma-ray emission from radio lobes of young AGN jets, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 395, L43-L47.
21. Kawakatu, N., Kino, M., Nagai, H., 2009, On the Origin of Fanaroff-Riley Classification of Radio Galaxies: Deceleration of Supersonic Radio Lobes, *The Astrophysical Journal Letter*, 697, 173-176.
22. Watabe, Y., Kawakatu, N., Imanishi, M., Takeuchi, T.T., 2009, Supermassive Black Hole Mass Regulated by Host Galaxy Morphology, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 400, 1803-1807.
23. Kawakatu, N., Wada, K., 2009, Formation of High-redshift ($z > 6$) Quasars Driven by Nuclear Starbursts, *The Astrophysical Journal*, 706, 676-686.
24. Tanikawa, A., Fukushige, T., 2009, "Effects of Hardness of Primordial Binaries on Evolution of Star Clusters", *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61, 721-736
25. Sakuma, M., Susa, H., 2009, Feedback Effects of First Supernovae on the Neighboring Dark Matter Halos, *Astrophysical Journal*, 698, 155-162.
26. Akizuki, C., Fukue, J., 2009, Black-Hole Winds with a Variable Eddington Factor, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 61, 543-548.

Non-Refereed Papers

1. Okamoto, T., 2010, Dark Satellites of the Milky Way, in "Hunting for the Dark: The Hidden Side of Galaxy Formation", Malta, 19-23 Oct. 2009, eds. V.P. Debattista & C.C. Popescu, *AIP Conf. Ser.*, in press
2. Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., 2009, The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps, *Proceedings for Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII*, 101-106
3. Hasegawa K., Umemura M., Suwa T., 2009, Impacts of diffuse UV radiation on the secondary Population III star formation, *Proceedings for Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII*, 107-110
4. Umemura, Masayuki, 2009, Computational Astrophysics with a Hybrid Simulator FIRST, *Association of Asia Pacific Physical Societies, Research Activities on Astronomy and Astrophysics in Japan*, 19, 36-42

5. Kawakatu N., Wada, K., 2009, Co-Evolution Model of AGNs and Nuclear Starbursts, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 408, 148.
6. Kawakatu, N., Nagai, H., Kino, M., 2009, A New Evolution Scenario of Compact Symmetric Objects, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 402, 299.
7. Kawakatu, N., Nagai, H., Kino, M., 2009, Fate of baby radio galaxies: Dead or Alive ?, To be appeared the 4th GPS and CSS workshop (*Astronomische Nachrichten*), 330 , 283.
8. Kino,M., Kawakatu,N., Ito,H., Nagai, H., 2009, High energy emission from AGN cocoons in clusters of galaxies, To be appeared the 4th GPS and CSS workshop (*Astronomische Nachrichten*), 330, 257.

(2) 国際会議発表・海外講演

1. Mori, M., Umemura, M., 2009, Evolution of Lyman-alpha Emitters, Lyman-break Galaxies and Elliptical Galaxies, *OPEN PROBLEMS IN GALAXY FORMATION*, (May 12-15, Potsdam, Germany)
2. Mori, M., Rich, R. M., 2009, The once and future Andromeda stream, *Tidal Dwarf Galaxies: Ghosts from structure formation*, (May 25-29, Bad Honnef, Germany)
3. Mori, M., Yajima, H., Umemura, M., 2009, Formation and Evolution of Lyman-alpha Emitters, *The Lyman alpha universe*, (July 6-10, Paris, French)
4. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., The escape of ionizing photons from high-z Lyman alpha emitters, *The Lyman alpha universe*, (July 6-10, Paris, French)
5. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2009, Possible progenitors of the Andromeda stellar stream, *The 3rd Korea-Japan Young Astronomers Meeting*, (Aug 19-21, 2009, Gwacheonsi, Korea)
6. Mori, M., Rich, R. M., 2009, The once and future Andromeda stream, *The Milky Way and the Local Group - Now and in the Gaia Era*, (Aug 31- Sep 4, 2009, Heidelberg, Germany)
7. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2009, Possible Progenitors of the Andromeda Stellar Stream, *The Milky Way and the Local Group - Now and in the Gaia Era*, (Aug 31- Sep 4, 2009, Heidelberg, Germany)
8. Okamoto, T., 2009, Dark satellites of the Milky Way, *Hunting for the Dark: The Hidden Side of Galaxy Formation*, (Oct 19-23, 2009, Malta)
9. Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps, *Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII*, (Nov 16-20, 2009, Kobe, Japan)

10. Hasegawa K., Umemura M., Suwa T., 2009, Impacts of diffuse UV radiation on the secondary Population III star formation, Tours Symposium on Nuclear Physics and Astrophysics VII, (Nov 16-20, 2009, Kobe, Japan)
11. Kawakatu, N., Wada, K., Formation of High-redshift ($z>6$) Quasars Driven by Nuclear Starbursts, MPE seminar, (Nov. 13, Munich, Germany)
12. Mori, M., Yajima, H., Umemura, M., 2010, Theoretical study of dust emission from high- z starforming galaxies, Infrared Emission, ISM and Star Formation, (February 22-24, Heidelberg, Germany)
13. Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., The Impacts of Ultraviolet Radiation on Secondary Population III Star Formation, First Stars and Galaxies: Challenges in the Next Decade, (March 8-11, 2010, University of Texas, Austin, USA)
14. Tanikawa A., Umemura M., 2010, Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, First Stars and Galaxies: Challenges in the Next Decade, (March 8-11, 2010, University of Texas, Austin, USA)
15. Mori, M., Yajima, H., Umemura, M., 2009, A Supernova-driven Wind Model for High- z Galaxies, The 10th. International Symposium on Origin of Matter and Evolution of the Galaxies, (March 8-10, Osaka, Japan)
16. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2010, Collision tomography: the progenitor of the Andromeda stellar stream and the metallicity gradient, 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2010, (Mar 8-10, 2010, Osaka, Japan)
17. Ogiya, G., & Mori M., The core-cusp problem in CDM halos and supernova feedback, 10th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies 2010 (OMEG10), (Mar 8-10, 2010, Osaka, Japan)

(35) 国内講演

(A)招待講演

1. 森正夫

「宇宙の果てと七夕の夜空」

世界天文年 全国同時七夕講演会(2009年7月4日, 筑波大学, つくば)

2. 梅村雅之

「6次元計算宇宙物理学の展開」

重力多体系とプラズマ系におけるシミュレーション研究会

(2009年9月10日～12日, 国立天文台, 三鷹)

3. 川勝望

「高赤方偏移クェーサーから探る超巨大ブラックホールの成長過程」

超広域サーベイによる巨大ブラックホール進化の研究: 観測と理論の連携

(2009年10月15～17日, にぎたつ会館, 松山)

4. 川勝望

「超巨大ブラックホール形成の解明に向けて～多階層モデル構築の重要性～」

GCOE 研究会: 宇宙ジェットのエンジンとしてのブラックホールとその進化

(2010年2月25～26日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都)

5. 梅村雅之

「宇宙の旅をして宇宙の大きさを知ろう」

竹園東小学校講演会 (2009年11月25日, 竹園東小学校, つくば)

(B) 一般講演

1. 三木洋平

「Possible progenitors for reproducing the Andromeda stellar stream」

第39回 天文天体物理若手 夏の学校

(2009年7月27日～30日, 群馬県草津温泉ホテル櫻井, 草津)

2. 扇谷豪「矮小銀河のバリオン重力場が及ぼすダークマターハロー中心密度分布への影響」,

第39回 天文天体物理若手 夏の学校

(2009年7月27日～30日, 群馬県草津温泉ホテル櫻井, 草津)

3. 川勝望, 紀基樹

「相対論的ジェットの力学エネルギー源と粒子加速の理解に向けて: -VSOP-2 への展望と期待-」

VSOP-2 Workshop 2009: VSOP-2 で狙うキーサイエンス

(2009年9月4日～5日, 国立天文台, 三鷹)

4. 秋月千鶴, 梅村雅之, 大須賀健, 加藤成晃

「三次元輻射輸送から探る相対論的ジェットの構造」

日本天文学会秋季年会(2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)

5. 森正夫, 矢島秀伸, 梅村雅之

「ライマンアルファエミッターの化学力学進化モデル II」

日本天文学会秋季年会(2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)

6. 矢島秀伸, Choi Jun-Hwan, 長峯健太郎, 梅村雅之, 森正夫

「高赤方偏移銀河における電離光子脱出確率の質量依存性」

日本天文学会秋季年会(2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)

7. 長谷川賢二, 梅村雅之

「TREE 構造を用いた高速 Radiation Smoothed Particle Hydrodynamics 法の開発」

日本天文学会秋季年会(2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)

8. 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich

「N 体シミュレーションを用いたアンドロメダ・ストリームの速度構造の解析」

日本天文学会秋季年会(2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)

9. 吉川耕司, 赤堀卓也, 北山哲, 小松英一郎

「衝突銀河団における Sunyaev-Zel'dovich 効果」

日本天文学会 2009 年秋季年会(2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)

10. 赤堀卓也, 吉川耕司

「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 II」

日本天文学会 2009 年秋季年会(2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)

11. 岡本 崇

「天の川銀河の衛星銀河の最小ハロー質量と, ダークサテライトの起源」

日本天文学会秋季年会(2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)

12. 川勝望

「超巨大ブラックホール進化の多階層理論モデルの構築に向けて」

日本天文学会秋季年会(2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)

13. 川勝望, 和田桂一

「超新星爆発駆動ガス降着過程における超巨大ブラックホールの最大質量」

日本天文学会秋季年会(2009年9月14日～16日, 山口大学, 山口)

14. 紀基樹, 川勝望, 高原文朗

- 「AGN ジェットの力学:陽子卓越か?ペアプラズマ卓越か?」
日本天文学会秋季年会(2009年9月14日~16日, 山口大学, 山口)
15. 伊藤裕貴, 紀基樹, 川勝望, 山田章一
「AGN ジェットが駆動するシェルからの非熱的放射」
日本天文学会秋季年会(2009年9月14日~16日, 山口大学, 山口)
16. 中村繁幸, 森正夫
「超新星爆発と銀河風」
宇宙磁気流体力学のフロンティア(2009年11月16日, 京都大学, 京都)
17. 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich
「Collision tomography: physical properties of possible progenitors for the Andromeda stellar stream」
第22回理論懇シンポジウム「2010年代の理論天文学」
(2009年12月20日~22日, 名古屋大学, 名古屋)
18. 扇谷豪, 森正夫
「矮小銀河のバリオン重力場変動が及ぼすダークマターハロー中心密度への影響」,
第22回理論懇シンポジウム「2010年代の理論天文学」
(2009年12月20日~22日, 名古屋大学, 名古屋)
19. 谷川衝, 岩澤全規, 牧野淳一郎
「恒星の軌道運動の観測による球状星団中心の中間質量ブラックホール検出」
大望遠鏡による高分散分光観測の展望
(2010年, 2月12日~13日, 国立天文台, 三鷹)
20. 梅村雅之
「セッション III サマリー-」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日~20日, 筑波大学, つくば)
21. 岡本 崇
「宇宙論的シミュレーションによる巨大ブラックホールと銀河の共進化」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日~20日, 筑波大学, つくば)
22. 川勝望, 和田桂一, 大須賀健

- 「超巨大ブラックホール形成の鍵を握る AGN トーラスについて」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日～20日, 筑波大学, つくば)
23. 谷川衝, 梅村雅之
「大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日～20日, 筑波大学, つくば)
24. 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich
「Collision tomography: physical properties of possible progenitors for the Andromeda stellar stream」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日～20日, 筑波大学, つくば)
25. 扇谷豪, 森正夫
「銀河風による矮小銀河からの質量流出とダークマターハロー中心質量密度分布」
巨大ブラックホールと銀河の共進化ワークショップ
(2010年, 2月18日～20日, 筑波大学, つくば)
26. 梅村雅之
「巨大ブラックホールと銀河の共進化ー現状と課題ー」
JASMINE ワークショップ (2010年, 2月22日～23日, 国立天文台, 三鷹)
27. 谷川衝, 梅村雅之
「大質量ブラックホール多体系でのブラックホール合体成長に伴う銀河中心構造の進化」
JASMINE ワークショップ
(2010年, 2月22日～23日, 国立天文台, 三鷹)
28. 岡本 崇
「円盤銀河のバルジ - 銀河形成シミュレーションから」
JASMINE ワークショップ
(2010年, 2月22日～23日, 国立天文台, 三鷹)
29. 梅村雅之, 松元亮治
「研究開発課題(天文・宇宙分野)の紹介」
シンポジウム「次世代スーパーコンピュータでせまる物質と宇宙の起源と構造」

(2010年, 3月15日, 東京ステーションコンファレンス, 東京)

30. 梅村雅之

「レビュー1: 初代星」

初代星・初代銀河研究会(2010年, 3月17日～19日, 長崎大学, 長崎)

31. 長谷川賢二, 梅村雅之, 須佐元, 諏訪多聞

「初代星からの輻射性フィードバックと次世代星形成」

初代星・初代銀河研究会(2010年, 3月17日～19日, 長崎大学, 長崎)

32. 矢島秀伸; Jun-Hwan Choi; 長峯健太郎; 梅村雅之; 森正夫

「高赤方偏移銀河による宇宙再電離とクエーサー吸収線系への寄与」

初代星・初代銀河研究会(2010年, 3月17日～19日, 長崎大学, 長崎)

33. 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich

「Collision tomography: the progenitor of the Andromeda stellar stream and the metallicity gradient」

初代星・初代銀河研究会(2010年, 3月17日～19日, 長崎大学, 長崎)

34. 扇谷豪, 森正夫

「銀河風による矮小銀河からの質量流出とダークマターハロー中心質量密度分布」

初代星・初代銀河研究会(2010年, 3月17日～19日, 長崎大学, 長崎)

35. 谷川衝, 梅村雅之

「大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長」

初代星・初代銀河研究会(2010年, 3月17日～19日, 長崎大学, 長崎)

36. 谷川衝, 梅村雅之

「大質量ブラックホール多体系におけるブラックホールの合体成長」

日本天文学会春季年会(2010年3月24日～27日, 広島大学, 東広島)

37. 川勝望, 大須賀健

「近赤外線光度の極端に低い活動銀河核は Super-Eddington 天体か?」

日本天文学会春季年会(2010年3月24日～27日, 広島大学, 東広島)

38. 矢島秀伸; Jun-Hwan Choi; 長峯健太郎; 梅村雅之; 森正夫

「Damped Lyman Alpha Systems における星の紫外線輻射と背景輻射場の影響」

日本天文学会春季年会(2010年3月24日～27日, 広島大学, 東広島)

39. 大須賀健; 嶺重慎; 森正夫; 加藤成晃; 竹内駿; 富田賢吾

「降着円盤の輻射磁気流体力学モデル;円盤およびアウトフローの力学構造」

日本天文学会春季年会(2010年3月24日～27日, 広島大学, 東広島)

40. 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich

「N体シミュレーションを用いたアンドロメダ・ストリームの速度構造の解析とその時間発展」

日本天文学会春季年会(2010年3月24日～27日, 広島大学, 広島)

41. 扇谷豪, 森正夫

「矮小銀河からの銀河風が及ぼすダークマターハロー中心質量密度分布への影響」

日本天文学会春季年会(2010年3月24日～27日, 広島大学, 広島)

7. 連携・国際活動・社会貢献、その他

(1) センター内連携

超高速計算システム研究部門と連携し, FIRST プロジェクトを推進し, 重力専用計算ボードを PC クラスタに組み込んだ**宇宙シミュレータ FIRST**”を超高速計算システム研究部門と共同で完成させた。そして, 超高速計算システム研究部門で開発されたグリッドファイルシステム Gfarm を FIRST シミュレータに導入することで, ローカルディスクをインターコネクトで接続した共有ファイルシステム(89.2TB)を実現した。

さらに, 超高速計算システム研究部門と連携し, エクサスケール計算の礎となる演算加速器搭載の計算機システム(**FCS**:フロンティア・コンピューター・システム)の提案を行った。

(2) 解説記事

1. 森正夫, 「銀河形成の流体力学模型」, 日本流体力学学会誌“ながれ”, 2010年2月, 29巻 39-44
2. 岡本 崇, 2009, 「紫外背景輻射による銀河形成の抑制」, 天文月報, 102, 759-768

(36) 国際会議座長

・ Masayuki Umemura

"First Stars and Galaxies: Challenges in the Next Decade"

March 8, 2010, University of Texas, Austin, USA

(37) 研究会開催

1. 「巨大ブラックホールと銀河の共進化」ワークショップ
2010年, 2月18日～20日, 筑波大学, つくば市

世話人: 谷口義明(愛媛大), 嶺重慎(京大), 和田桂一(鹿児島大), 松元亮治(千葉大), 上田佳宏(京大), 中井直正(筑波大), 郷田直輝(国立天文台), 長尾透(愛媛大), 村山卓(東北大), 梅村雅之(筑波大), 森正夫(筑波大), 岡本崇(筑波大)

2. 超広域サーベイによる巨大ブラックホール進化の研究: 観測と理論の連携

2009年, 10月15日～17日, にぎたつ会館, 松山市

世話人: 今西昌俊(国立天文台), 柏川伸成(国立天文台), 川勝望(国立天文台), 谷口義明(愛媛大), 寺島雄一(愛媛大), 長尾透(愛媛大), 長島雅裕(長崎大), 和田桂一(鹿児島大)