

II. 宇宙・原子核物理研究部門

II-1. 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, 主任研究員 岡本 崇 (科研費基盤 S, HPCI 戦略プログラム)

助教 川勝 望 (理数学生応援プロジェクト)

研究員 谷川 衝 (計算科学研究センター), 川口 俊宏 (科研費基盤 A)

大学院生 8 名

4 年生 6 名

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, 宇宙論的ライマンアルファ輝線天体モデルの構築, 高赤方偏移銀河のサブミリ波特性の研究を行った。また, 銀河進化標準模型の構築を目的として, **FIRST, T2K-Tsukuba** を用いて, ライマンアルファ輝線天体とライマンブレイク銀河の理論進化模型の構築, 宇宙再電離と銀河形成・進化, 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の研究を行った。さらに, 宇宙論・銀河形成分野で, 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, 衛星銀河問題の解決, 合体銀河における星団形成, 宇宙論的銀河形成シミュレーションによるライマンアルファ銀河の研究を行った。

また, シミュレーション手法と計算機の開発として, **TREE** 構造で高速化した新たな輻射流体力学コード **START (SPH with Tree-based Accelerated Radiative Transfer)** の開発, **Tree** 法を利用した輻射輸送計算のメッシュ法への応用, **Vlasov-Poisson** 方程式系を用いた自己重力系の数値シミュレーション, **GPGPU** を用いた数値シミュレーションの開拓, **Advanced Vector eXtension** を用いた **N** 体計算の高速化を行った。また, プレ戦略イニシアティブ「アクセラレータによる銀河輻射流体力学の幕開け」(代表者 森正夫) が採択され, 輻射流体力学実現のための演算加速器を搭載した並列計算機システム構築を開始し, プロトタイプ制作を行った。

3. 研究成果

【1】 **FIRST** プロジェクト

(1) 宇宙シミュレータ **FIRST**

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。

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 10Tflops 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, 3 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 3 台で合計 15TB 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 89TB 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。

(2) 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 106 から 109 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が, 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。

我々は 1 つの銀河の中に取り込まれた複数の SMBH がどのように進化するかを, 高精度 N 体計算によってシミュレートした。その結果, 星との力学的摩擦によってブラックホール 3 体相互作用の効率が増し, 結果としてブラックホールの連続的合体成長により中心に一つの巨大ブラックホールが形成されることを明らかとなった (Tanikawa & Umemura 2011)。

(3) 宇宙論的ライマンアルファ輝線天体モデルの構築

ライマンアルファ輝線天体 (LAEs) は、活発な星形成を起こしている天体であり、赤方偏移 0 ~7 の広い範囲で観測されている。最近の観測で LAEs はその質量や色等級で多様性を示すことがわかってきた。しかし、それらが銀河進化のどのようなフェーズに対応しているのかは明らかにされていない。そこで我々は、宇宙論的計算と化学進化モデルを組み合わせ、LAE のモデルを構築した。特に、銀河内の各サブストラクチャーの星形成史・化学進化を独立な事象として扱い、スペクトル生成コード 'PEGASE' を用いて SED の計算を行った。ライマンアルファ光度については、ダスト吸収の効果も考慮した。結果として、ライマンアルファ輝線天体には、大きく 2 種類のもので存在することが明らかになった。一つは比較的質量が軽く ($\approx 10^{10} M_{\odot}$ 程度)、銀河進化の極初期の星形成フェーズにある天体であり、もう一つは質量が重く ($\approx 10^{10-12} M_{\odot}$)、初期の星形成期を終了した後、ガスが降着して星形成を誘起する天体である。前者を Type 1 LAE、後者を Type 2 LAE と名づけた。また、これら 2 つのタイプで空間相関や予想される色光度を計算した結果、Type 2 LAE は近赤外の波長で観測される天体と空間相関がよく一致する事がわかった (Shimizu & Umemura 2010)。

(4) 高赤方偏移銀河のサブミリ波特性と ALMA での検出可能性

高赤方偏移の星形成銀河のダスト放射をシミュレーションするために、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、ダスト温度の正確な決定とサブミリ波放射強度計算を行った。その結果、ダスト量は時間とともに単調に増加するのに対し、サブミリ波放射強度はライマンアルファ輝線天体の後期でピークとなることがわかった。これは、ライマンアルファ輝線天体の後期では、ダストが星形成領域に集中しダスト温度が高くなるためである。ライマンブレイク銀河期では、ダストは超新星爆発による激しいガスフローによって、星形成領域から遠ざかり、結果としてサブミリ波放射強度が減少する。また、ALMA の検出感度を想定すると、ライマンアルファ輝線天体期、ライマンブレイク銀河期共に 1 時間以内の観測で検出可能であることがわかった。

【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あっているのか？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学の探究」(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。

(2) ライマンアルファエミッター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ー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ー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ー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。

(3) 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。

(4) 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。

(5) 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開発した。銀河中心の降着円盤に対する質量供給源として力学的に安定なトーラスを想定し、そのトーラスと銀河衝突によって発生した衝撃波との衝突を様々なパラメータで数値実験を行った。その結果、衝撃波によってトーラスが破壊され、降着円盤への質量供給が抑制されるパラメータ領域を確定することに成功した。

(6) 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)構造を预言する。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より平坦に遷移しやすい事を明らかにした。しかしながら矮小銀河の観測に合うような全く平坦な質量分布を再現することはできなかった。そして、従来言われてきた質量放出仮説のみではコアカスプ問題を解決できないことを指摘した。

(7) 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。銀河風をダークマターハロー中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あ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。解析の結果、銀河風が遷音速解を持つためには、ダークマターとバリオンを含む銀河の質量分布がダークマターハローのスケール長よりも内側で距離の二乗よりも大きなべきを持つ必要があることを見出した。

(8) 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、Laumbach-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。その結果、銀河風の生成効率と、銀河形状、星形成率との間の関係を明らかにした。

【3】 宇宙論・銀河形成

(1) 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、ピ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 T2K-Tsukuba 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。また、代表的な衝突銀河団として知られ、様々な角度から研究されている弾丸銀河団 (Bullet Cluster) についてもその再現シミュレーションを行い、弾丸銀河団においても非平衡電離状態や 2 温度状態が存在することを示した。

(2) 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を示した。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明らかにした。

一方、シミュレーションで得られた衛星銀河と観測された天の川銀河のそれを光度ごとに比較した場合、シミュレーションによるものの方が力学的な質量が重いことが判明した。これは、(i) 天の川銀河のダークハローが我々が今回候補としたものよりも軽い、(ii) 衛星銀河光度関数は親銀河のダークハロー質量が同じでも様々なばらつきを持ち得る、(iii) シミュレーションでは捉えきれないバリオンの物理過程により、衛星銀河のダークハロー中心部はシミュレーションで得られたそれより密度が下がっている、等の可能性が考えられる。

(3) 合体銀河における星団形成

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 $nH \approx 0.1 \text{cc}^{-1}$ 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 nH 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団形成について調べた。その結果、合体の最終段階で銀河中心に複数の巨大星団が形成されることが明らかになった。これは赤外線で見られる銀河である ULIRG や LIRG によく見られる multiple-nuclei に酷似しており、multiple-nuclei の起源として従来考えられていた3つ以上の銀河の合体よりも自然なシナリオである。

(4) 宇宙論的銀河形成シミュレーションによるライマンアルファ銀河の研究

ガス冷却や、星形成、超新星爆発等の物理過程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、 $z=3.1$ におけるライマンアルファ銀河の性質を観測と比較した。我々は、星間ガスのクランピネスが親銀河のダークハロー内のサブハローの数に比例するという現象論的モデルを導入し、ライマンアルファ銀河の角度相関・紫外及びライマンアルファ光度関数・ライマンアルファ等価幅分布という3つの観測量を初めて同時に再現した。

【4】シミュレーション手法と計算機の開発

(1) TREE 構造を用いた高速輻射流体スキーム 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、我々はこれまで使用してきた粒子法流体力学 (SPH 法) をベースにした輻射流体力学コードの輻射輸送部分についてツリー構造によって大幅な加速を実現し、新たな輻射流体力学コード START (SPH with Tree-based Accelerated Radiative Transfer)を開発した。このコードを用いることにより、これまで正確に扱うことのできなかった散乱光子を近似なく扱うことが可能になった。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。

(2) Tree 法を利用した輻射輸送計算のメッシュ法への応用

銀河形成において、大質量星が輻射として出すエネルギーは実は超新星爆発として出すエネルギーよりも 2 桁近く大きい。この輻射によるフィードバック効果を銀河形成シミュレーションに取り入れるため、メッシュ流体に対して多数の点光源からの輻射輸送計算を Tree 法を用いて光速に計算する方法を開発した。これは粒子法である Smoothed Particle Hydrodynamic (SPH) 法に対して実装された START コードのメッシュ流体版と言える。メッシュ法の方が一般に SPH 法よりも爆発現象を扱うのに有利であり、輻射性フィードバックと超新星爆発によるフィードバックを同時に適切に扱う上でこの方法が重要な役割を果たすと期待している。

(3) Vlasov-Poisson 方程式系を用いた自己重力系の数値シミュレーション

これまでの自己重力系の数値シミュレーションでは、質量分布を粒子分布に置き換えて粒子間の重力相互作用を計算する N 体シミュレーションが広く採用されてきたが、N 体シミュレーションには人工的な二体緩和が起きたり、速度分散が大きな系については速度分散による密度揺らぎの減衰といった効果をうまく再現できなかつたりという弱点があった。我々は無衝突ボルツマン方程式 (Vlasov 方程式) を Poisson 方程式 と組み合わせて自己重力系の数値シミュレーションを実行するシミュレーションコードの開発を世界で初めて行い、様々なテスト計算を行った。その結果から、質量保存やエネルギー保存などを満足できる精度で満たしながら正しく自己重力系のシミュレーションが可能であることを示した。また、宇宙大規模構造でのニュートリノの影響を調べるシミュレーションに適用する為、宇宙論的膨張に沿った共動座標系での Vlasov 方程式を解けるよう拡張を行った。

(4) GPGPU を用いた数値シミュレーションの開拓

General Purposed GPU (GPGPU) は次世代の数値シミュレーションにおける重要な技術要素として注目されている。我々は、NVIDIA 社の GPGPU と開発言語 CUDA を用いて自己重力多体系の N 体計算と輻射輸送計算の高速化を行った。N 体計算では、FIRST に搭載されている Blade-GRAPe を凌駕する性能を得ることができたが、ホスト計算機と GPGPU の間の PCI-Express での通信によるオーバーヘッドの為に少ない粒子数では Blade-GRAPe と同様に性能の劣化が見られた。PCI-Express のコントローラが CPU に統合されている Intel の Sandy Bridge アーキテクチャのマシンに GPGPU を搭載した場合には少粒子数でもかなり性能が向上することが分かった。輻射輸送

計算では、long-characteristic 法による輻射輸送計算と化学反応計算の高速化を行い、CPU での計算と比較して輻射輸送計算を 150 倍程度、化学反応計算を 20 倍程度高速化することに成功した。

(5) Advanced Vector eXtension を用いた N 体計算の高速化

Intel 社が新しく発表した Sandy Bridge アーキテクチャに基づく CPU に実装されている Advanced Vector eXtension (AVX)命令セットを用いて、衝突系・無衝突系の N 体計算の高速化を行った。従来の Streaming SIMD Extension (SSE)命令を用いた高速化よりも、更に高速化することに成功し、1 コアでの性能は衝突系で 20Gflops、無衝突系で 80Gflops を達成した。これらの性能は GPGPU での最大性能には及ばないが、粒子数に依存せずどのような粒子数でも同じ性能が得られることから、大規模並列計算に適しているといえる。

(6) プレ戦略イニシアティブ「アクセラレータによる銀河輻射流体力学の幕開け」

宇宙論的流体力学計算と輻射輸送計算を完全に統合した自己矛盾のない銀河形成の輻射流体模型を世界で初めて構築することを目指している。このような目的のため、本年度は、高速な計算機の開発準備のための GPU による計算加速器を搭載した PC クラスターの試作機を作成した。また、その計算機の上で効率よく計算の行うことができるシミュレーションコードの開発及び最適化を行い、そのパフォーマンスの測定を行った。特に本年度集中的に行った研究は、自己重力多体問題計算コードの開発、輻射輸送コードの開発、高精度流体力学コードの開発である。

<競争的資金採択状況>

- ・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」 (1,120 万円)
- ・基盤研究 (A) : 森 正夫 (代表者) (継続)
「理論と観測の融合による銀河発生学の探求」 (560 万円)
- ・挑戦的萌芽研究 : 吉川 耕司 (代表者) (継続)
「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」 (90 万円)
- ・若手研究 (スタートアップ) : 岡本 崇 (代表者) (継続)
「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」 (60 万円)
- ・若手研究 (B) : 川口 俊宏 (代表者) (継続)
「原始活動銀河核のブラックホール・銀河共進化究明と偏光 X 線放射予測」 (80 万円)
- ・基盤研究 (C) : 川口 俊宏 (分担者) (代表者 : 峰崎 岳夫) (新規)
「活動銀河核多波長モニターデータベースと活動銀河核変光・放射機構の研究」 (10 万円)
- ・プレ戦略イニシアティブ : 森 正夫 (代表者) (新規)
「アクセラレータによる銀河輻射流体力学の幕開け」 (450 万円)
- ・研究活動スタート支援 : 川勝 望 (代表者) (新規)
「多階層連結モデルによる超巨大ブラックホール形成と進化の解明」 (146 万円)

4. 研究業績

<学位論文>

修士論文

1. 扇谷 豪
超新星爆発のガス加熱による重力場変動のダークマターハロー中心密度分布への影響
2. 中村 繁幸
銀河風と矮小銀河の形状の関係について
3. 三木 洋平
銀河衝突による銀河進化と活動銀河中心核への影響に関する理論的研究
4. 横山 貴士
非軸対称銀河ポテンシャル中における連星ブラックホールの進化

学士論文

1. 嶋田隼人
宇宙の大規模構造に対するニュートリノの影響
2. 吉次将士
非熱的電子によるスニヤエフ・ゼルドビッチ効果
3. 八重樫祥治
中心ブラックホールとダークマターハロー中の定常銀河風
4. 野口岳大
輻射優勢宇宙における原始ブラックホールの進化
5. 安部牧人
SWIFT 光度曲線データに基づくガンマー線バースト重力レンズ効果の研究
6. 齋藤祐里子
漂う巨大ブラックホールとアンドロメダストリーム

<論文>

Refereed Papers

1. Owen, P.H., Eke, V.R., Frenk, C.S., Okamoto, T., 2011, The Baryons in the Milky Way Satellites, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, submitted.
2. Okamoto, T., Yoshikawa, K., Umemura, M., 2011, ARGOT: Accelerated radiative transfer on grids using oct-tree, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, submitted.
3. T. Kawaguchi, and M. Mori, Near-Infrared Reverberation by Dusty Clumpy Tori in Active Galactic Nuclei, Astrophysical Journal, submitted.
4. Tanikawa, A. Yoshikawa, K., Okamoto, T., Nitadori, K., 2011, N-body Simulation for Self-Gravitating Collisional Systems with a New SIMD Instruction Set Extension to the x86 Architecture, Advanced Vector Extensions, New Astronomy, submitted.
5. Shimizu, I., Yoshida, N., Okamoto, T., 2011, Lyman-alpha Emitters in Cosmological Simulations I: Lyman-alpha Escape Fraction and Statistical Properties at $z=3.1$, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, submitted.

6. Matusi, H. Saitoh, T.R., Makino, J., Wada, K., Tomisaka, K., Kokubo, E., Daisaka, H., Okamoto, T., Yoshida, N., 2011, ORIGIN OF MULTIPLE NUCLEI IN ULTRALUMINOUS INFRARED GALAXIES, *Astrophysical Journal*, submitted.
7. Tanikawa, A., Umemura, M., 2011, Successive Mergers of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, *Astrophysical Journal*, 728, L31-L35.
8. Matsuda, Y.; Yamada, T.; Hayashino, T.; Yamauchi, R.; Nakamura, Y.; Morimoto, N.; Ouchi, M.; Ono, Y.; Kousai, K.; Nakamura, E.; Horie, M.; Fujii, T.; Umemura, M.; Mori, M., 2011, The Subaru Ly α blob survey: a sample of 100-kpc Ly α blobs at $z = 3$, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 410, L13-L17.
9. Hasegawa, K., Umemura, M., 2010, START: Smoothed particle hydrodynamics with tree-based accelerated radiative transfer, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 407, 2632-2644.
10. 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.
11. Kawaguchi, T. and Mori, M., 2010, Orientation Effects on the Inner Region of Dusty Torus of Active Galactic Nuclei, *Astrophysical Journal*, 724, L183-L187.
12. Mori, M., Umemura, M., and Yajima, H., 2010, A Supernova-driven Wind Model for High- z Galaxies, *AIP Conference Proceedings*, 1269, 430-432.
13. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2010, Collision Tomography: the Progenitor of the Andromeda Stellar Stream and the Metallicity Gradient, *AIP Conference Proceedings*, 1269, 400-402.
14. Ogiya, G., Mori, M., 2010, The Core-Cusp Problem in CDM Halos and Supernova Feedback, *AIP Conference Proceedings*, 1269 (Osaka), 421-423.
15. Akahori, T., Yoshikawa, K., 2010, Hydrodynamic Simulations of Merging Galaxy Clusters: Non-Equilibrium Ionization State and Two-Temperature Structure, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 335-345.
16. Prokhorov, D.A., Colafrancesco, S., Akahori, T., Yoshikawa, K., Nagataki, S., Seon, K.-I., 2011, Can electron distribution functions be derived through the Sunyaev-Zel'dovich effect?, *Astronomy and Astrophysics*, 529, A39.
17. 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.
18. 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.
19. Imanishi, M., Ichikawa, K., Takeuchi, T., Kawakatu, N., Oi, N., Imase, K., 2011, Infrared 3-4 μ m Spectroscopy of Nearby PG QSOs and AGN-Nuclear Starburst Connections in High-luminosity AGN Populations, *Populations, Publ. Astron. Soc. Japan*, 63 (Subaru special issue), 447-456.
20. Ito, H., Kino, M., Kawakatu, N., Yamada, S., 2011, Evolution of Non-Thermal Emission from Shell Associated with AGN Jets, *The Astrophysical Journal*, 270, 120-131.

21. Tanikawa, A., Fukushige, T., 2010, Mass-Loss Timescale of Star Clusters in an External Tidal Field. II. Effect of Mass Profile of Parent Galaxy, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 62, 1215-1230.
22. Nagamine, K., Choi, Jun-Hwan, Yajima, H., 2010, Effects of Ultraviolet Background and Local Stellar Radiation on the H I Column Density Distribution, *Astrophysical Journal Letters*, 725, L219-L222.
23. Yajima, H., Choi, Jun-Hwan, Nagamine, K., 2011, Escape fraction of ionizing photons from high-redshift galaxies in cosmological SPH simulations, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412, 411-422.
24. Prokhorov, D.A., Dubois, Y., Nagataki, S., Akahori, T., Yoshikawa, K., Unveiling the 3D temperature structure of galaxy clusters by means of the thermal SZ effect, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, accepted.
25. Yoshida, T., Ebisawa, K., Matsushita, K., Tsujimoto, M., Kawaguchi, T., 2010, Long-Term Spectral Variations of Ultraluminous X-ray Sources in the interacting galaxy systems M51 and NGC4490/85, *Astrophysical Journal*, 722, 760-773

Non-Refereed Papers

1. Saitoh, T.R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomisaka, K., Wada, K., Yoshida, N., 2011, Shock-induced star cluster formation in colliding galaxies, *Computational Star Formation, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 270*, 483-486.
2. Yajima, H., Umemura, M., Mori, M., 2010, Ultraviolet and Infrared Radiation from Protogalaxies, *American Institute of Physics Conference Series 1294*, 295-296.
3. Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., 2010, The Impact of Ultraviolet Radiation on Secondary Pop III Star Formation, *American Institute of Physics Conference Series 1294*, 262-263.
4. Tanikawa, A., Umemura, M., 2010, Successive Mergers of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, *American Institute of Physics Conference Series 1294*, 242-245.
5. Umemura, M., 2010, First Stars and GRBs, and their Cosmological Impacts, *American Institute of Physics Conference Series 1279*, 97-102.
6. Mori, M., Umemura, M., Yajima, H., 2010, Metal enrichment in supernova-dominated high-z galaxies, *American Institute of Physics Conference Series 1279*, 52-59.
7. Mori, M., Umemura, M., Yajima, H., 2010, A Supernova-driven Wind Model for High-z Galaxies, *American Institute of Physics Conference Series 1269*, 430-432.
8. Hasegawa, K., Umemura, M., Suwa, T., 2010, Impacts of diffuse UV radiation on the secondary Population III star formation, *American Institute of Physics Conference Series 1238*, 107-110.
9. Umemura, M., Suwa, T., Susa, H., 2010, The Collapse of First Objects driven by Dark Matter Cusps, *American Institute of Physics Conference Series 1238*, 101-106.

10. Mori, M., Umemura, M., and Yajima, H., 2010, Metal enrichment in supernova-dominated high-z galaxies, American Institute of Physics Conference Series 1279, 52-59.
11. Miki, Y., Mori, M., Rich, R. M., 2010, Collision Tomography: the Progenitor of the Andromeda Stellar Stream and the Metallicity Gradient, American Institute of Physics Conference Series 1279, 382-384.
12. Ogiya, G., Mori, M., 2010, The Core-Cusp Problem in Cold Dark Matter Halos and Supernova Feedback, American Institute of Physics Conference Series 1279 (Kyoto), 403-405.
13. Ohashi, T. et al., 2010, DIOS: the diffuse intergalactic oxygen surveyor: status and prospects, Space Telescopes and Instrumentation 2010: Ultraviolet to Gamma Ray, Proceedings of SPIE, 7732, 77321S-77321S-9.
14. Ito, H., Kino, M., Kawakatu, N., Yamada, S., 2010, Nonthermal Emissions from Shocked Shells Driven by Powerful AGN jets, International Journal of Modern Physics D, 19, 893-899.

<解説記事>

1. 川勝 望, 和田 桂一 (2011), 銀河中心における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～, 日本物理学会誌, 66, 285-289

<研究会開催>

1. 『初代星・初代銀河研究会』2011年 1月26～28日, 愛媛大学, 松山市
世話人: 長尾透 (愛媛大), 谷口義明 (愛媛大), 梅村雅之 (筑波大), 大向一行 (京大), 須佐元 (甲南大), 冨永望 (甲南大), 森正夫 (筑波大), 吉田直紀 (東大)

<座長>

1. 川勝望
日本天文学会"活動銀河核"日本天文学会秋季年会, 金沢大学, 2010年9月13～16日

<国際会議発表・海外講演>

1. Umemura, M., First Stars and GRBs, and their Cosmological Impacts, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (19-23 April 2010, Kyoto, Japan) (Invited)
2. Mori, M., Metal Enrichment in a Supernova-dominated High-z Galaxies, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (19-23 April 2010, Kyoto, Japan) (Invited)
3. Ogiya, G., and Mori, M., The Core-Cusp Problem in Cold Dark Matter Halos and Supernova Feedback, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (April 19-23, 2010, Kyoto, Japan)(Poster)
4. Miki, Y., Mori, M., and R. Michael Rich, Deciphering the Ancient Universe with Gamma-Ray Bursts (19-23 April 2010, Kyoto, Japan)
5. T. Yoshida, K. Ebisawa, K. Matsushita, M. Tsujimoto, and T. Kawaguchi, A statistical study of long-term variabilities of ultraluminous X-ray sources, Ultra-Luminous X-ray sources and

- Middle Weight Black Holes (May 23-25, 2010, Madrid)
6. Kawakatu, N., Wada K, What determines AGN activity ?: Important of circumnuclear disk, Central Massive Objects: The Stellar Nuclei-Black Hole Connection (Jun.22-25, 2010, Munich, Germany)
 7. Mori, M., Chemical and dynamical evolution of high-z galaxies, Probing the High Redshift Universe in COSPAR Scientific Assembly (18-25 July 2010, Bremen, Germany)
 8. Mori, M., Chemical and dynamical evolution of Lyman alpha emitters and Lyman break galaxies, 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos (19-23 July 2010, Heidelberg, Germany)
 9. Miki, Y., Mori, M., and R. Michael Rich, The 4th Japan-Korea Young Astronomers Meeting 2010 (26-28 August 2010, Kanagawa, Japan)
 10. Umemura, M. Yoshikawa, K., Hasegawa, K. and FIRST Project Team, 6-Dimensional Numerical Astrophysics by Next Generation Supercomputing, 4th East Asia Numerical Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
 11. Tanikawa, A. and Umemura M., Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy, 4th East Asia Numerical Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
 12. Ogiya, G., and Mori, M., Dynamical response of CDM halo to mass-loss driven by supernova feedback, 4th East Asia Numerical, Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
 13. Miki, Y., Mori, M., and R. Michael Rich, The 4th East Asian Numerical Astrophysics Meeting (Nov 2-5, 2010, Taipei, Taiwan)
 14. Umemura, M., Computational Astrophysics with a Hybrid Simulator "FIRST", Collaboration Meeting Lawrence Berkeley National Laboratory and University of Tsukuba, Japan (Feb. 24-25, 2011, Berkeley, USA) (Invited)

<国内講演>

招待講演

1. 梅村雅之, 「6次元計算宇宙物理学」, 日本地球惑星科学連合2010年大会 (2010年5月23日～5月28日, 千葉市幕張メッセ国際会議場)
2. 谷川衝, 「球状星団で形成されたコンパクト天体からなる連星の合体率」, 国立天文台理論研究部高エネルギーセミナー (2010年5月27日, 国立天文台, 三鷹市)
3. 川勝望, 「銀河中心に潜む超巨大ブラックホール形成はどこまで分かったのか?」, 第40回天文天体物理若手夏の学校, (2010年8月2日～5日, ホテル日航豊橋, 豊橋市)
4. 川勝望, 「ALMA-AGN サイエンス」, ALMA-近傍AGN観測検討会,(2010年8月23日, 国立天文台, 三鷹)
5. 梅村雅之, 「今後の共進化研究の戦略」, 超広域サーベイで明かす巨大ブラックホールと銀河の共進化: 理論モデルと観測戦略 (2010年9月6日～9月8日, 東北大学, 仙台市)
6. 岡本崇, 「AGN フィードバックと銀河形成」, 超広域サーベイで明かす巨大ブラックホールと銀

河の共進化：理論モデルと観測戦略（2010年9月6日～9月8日，東北大学，仙台市）

7. 梅村雅之，「銀河と巨大ブラックホールの形成史」，ALMA-Subaru Workshop 2010（2010年9月29日～10月1日，国立天文台，三鷹）
8. 川口俊宏，「活動銀河核中心100pc領域に迫る」，"TMTで切り拓く2020年代の新しい天文学"研究会（2010年10月4-5日，国立天文台，三鷹市）
9. 梅村雅之，「ダークマター問題と初代星の誕生」，金沢大学物理教室コロキウム（2010年10月22日，金沢大学，金沢市）
10. 谷川衝，「Successive Merger of Multiple Massive Black Holes in a Primordial Galaxy」，国立天文台光赤外研究部 Galaxy Workshop Subaru (galshop) (2010年10月27日)
11. 梅村雅之，「初代天体・銀河形成論」，2010年度理論懇シンポジウム「林忠四郎先生と天文学・宇宙物理学」（2010年12月20日～22日，京都大学基礎物理学研究所，京都市）
12. 梅村雅之，「初代星形成における輻射流体力学過程」，恒星進化・星形成から探る銀河の形成・進化の研究- 宇宙最初の星から太陽系形成まで（2011年3月2日～4日，北海道大学，札幌市）
13. 岡本崇，「Formation of the Local Groups satellite galaxies」，恒星進化・星形成から探る銀河の形成・進化の研究- 宇宙最初の星から太陽系形成まで（2011年3月2日～4日，北海道大学，札幌市）
14. 川勝望，「ガス降着による超巨大ブラックホール形成理論の現状と今後の課題」，日本天文学会春季年会予稿集（2011年3月15日～19日，筑波大学，つくば市）

一般講演

1. 梅村雅之，「多成分自己重力系の緩和過程」，第一回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」シンポジウム～ポストペタスケールコンピューティングへの学際計算科学の展開～（2010年5月7日，筑波大学計算科学研究センター，つくば市）
2. 川口俊宏，森正夫，「降着円盤の非等方性放射が活動銀河核ダストトーラス内縁構造に与える影響」，Grain Formation Workshop・銀河のダスト研究会（2010年9月2-4日，神戸大学，神戸市）
3. 三木洋平，森正夫，R. Michael Rich，「N体シミュレーションによるアンドロメダ・ストリームの解析:矮小銀河の金属量分布」，日本天文学会秋季年会（2010年9月22日～24日，金沢大学，金沢市）
4. 吉川耕司，吉田直紀，梅村雅之，「6次元位相空間上でのVlasov方程式の直接計算による自己重力系の数値シミュレーション」，日本天文学会秋季年会（2010年9月22日～24日，金沢大学，金沢市）
5. 岡本崇，「ハロー星の性質と起源」，日本天文学会秋季年会（2010年9月22日～24日，金沢大学，金沢市）
6. 扇谷豪，森正夫，「断熱的重力場変動に対するダークマターハローの力学応答」，日本天文学会秋季年会（2010年9月22日～24日，金沢大学，金沢市）
7. 川口俊宏，森正夫，「降着円盤の放射の非等方性がダストトーラス内縁構造に与える影響」日本天

文学会秋季年会 (2010 年 9 月 22 日～24 日, 金沢大学, 金沢市)

8. 川勝望, 白川友紀, 本多正尚, 戸田さゆり, 「筑波大学「理数学生応援プロジェクト」における最先端研究体験企画」, 日本天文学会秋季年会 (2010 年 9 月 22 日～24 日, 金沢大学, 金沢市)
9. 谷川衝, 関口雄一郎, 牧野淳一郎, 「球状星団中で形成された連星中性子星の合体率」, 日本天文学会秋季年会 (2010年9月22日～24日, 金沢大学, 金沢市)
10. 川勝望, 平下博之, 梅村雅之, 「Blue Compact矮小銀河中心の巨大ブラックホール探査」, ALMA-Subaru Workshop 2010 (2010年9月29日～10月1日, 国立天文台, 三鷹)
11. 谷川衝, 「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」, TMTで切り拓く2020年代の新しい天文学 (2010年10月4日～5日, 国立天文台, 三鷹市)
12. 川口俊宏, 「JASMINEによるCyg X-1の軌道測定」, JASMINEサイエンスワークショップ-10uasで切り拓く天文学新時代-研究会 (2010年12月1日, 国立天文台, 三鷹市)
13. 谷川衝, 「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の構造進化」, JASMINEサイエンスワークショップ-10 μ asで切り拓く天文学新時代- (2010年12月1日, 国立天文台, 三鷹市)
14. 川口俊宏, 「活動銀河核の近赤外線放射モデル」, 宇宙科学研究所 コロキウム (2010 年 12 月 3 日, 宇宙科学研究所, 相模原市)
15. 岡本崇, 吉川耕司, 梅村雅之, 「スーパーメッシュを用いた高速輻射輸送法」, 理論懇シンポジウム (2010年12月20日～22日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都市)
16. 扇谷豪, 森正夫, 「質量放出による重力場変動の DM ハロー中心密度分布への影響」, 第 23 回理論懇シンポジウム, (2010 年 12 月 20 日～22 日, 京都大学, 京都市)
17. 三木洋平, 森正夫, R. Michael Rich, 「Collision Tomography: the Progenitor of the Andromeda Stellar Stream」, 第 23 回理論懇シンポジウム (2010 年 12 月 20 日～22 日, 京都大学基礎物理学研究所, 京都市)
18. 川口俊宏, 「活動銀河核の近赤外線放射モデル」, 京都大学宇宙物理学教室 談話会 (2011 年 1 月 7 日, 京都大学, 京都市)
19. 谷川衝, 「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-相対論的効果の影響-」, 初代星・初代銀河研究会2011 (2011年1月26日～28日, 松山市)
20. 川口俊宏, 「活動銀河核の近赤外線放射モデル」, 東京大学天文学教育研究センター 談話会 (2011 年, 2 月 10 日, 東京大学, 三鷹市)
21. 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成長と銀河の進化」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
22. 横山貴士, 梅村雅之, 「非軸対称銀河ポテンシャル中における連星ブラックホールの進化」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
23. 森正夫, 「アンドロメダ銀河と矮小銀河の衝突シミュレーション」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)
24. 三木洋平, 森正夫, 川口俊宏, 「銀河衝突による活動銀河中心核への影響」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日～19日, 筑波大学, つくば市)

25. 濟藤祐理子, 三木洋平, 川口俊宏, 森正夫, 「Wandering Blackhole and Andromeda Stellar Stream」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日~19日, 筑波大学, つくば市)
26. 岡本崇, 吉川耕司, 「スーパーメッシュを用いた輻射輸送計算の加速法」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日~19日, 筑波大学, つくば市)
27. 扇谷豪, 森正夫, 「バリオン重力場変動へのダークマターハローの力学応答」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日~19日, 筑波大学, つくば市)
28. 川口俊宏, 森正夫, 「活動銀河核からの近赤外線放射の時間変動モデル」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日~19日, 筑波大学, つくば市)
29. 諸隈智貴, 峰崎岳夫, 小坂文, 川勝望, 川口俊宏, 長尾透, 松岡健太, 今西昌俊, 美濃和陽典, 大井渚, 今瀬佳介, 「赤方偏移3のSDSSクェーサーで探る超巨大ブラックホール・バルジ関係の宇宙論的進化」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日~19日, 筑波大学, つくば市)
30. 土屋聖海, 森正夫, 新田伸也「球対称定常銀河風の解析: 遷音速解の発見とその条件」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日~19日, 筑波大学, つくば市)
31. 中村繁幸, 森正夫「銀河風と矮小銀河の形状の関係について」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日~19日, 筑波大学, つくば市)
32. 桐原崇亘, 三木洋平, 森正夫「アンドロメダストリームとダークマターハローの構造」, 日本天文学会春季年会予稿集 (2011年3月15日~19日, 筑波大学, つくば市)

< 社会・国民への発信 >

1. 梅村雅之, 「宇宙に生まれる最初の星」, 全国同時七夕講演会 (2010年7月3日, 筑波大学, つくば市)
2. 川口 俊宏, 書評(「巨大ブラックホールが引き起こす AGN 現象のすべて」, 丸善), 天文月報, 2011年1月号
3. 川口 俊宏, 寄稿(「私の研究」), 青山学院大学 総合研究所 News SOKEN, 2010年10月号, Vol.10-1, p15

II-2. 原子核分野

1. メンバ

教授 矢花 一浩

講師 橋本 幸男

2. 概要

当グループは、量子多粒子系のダイナミクスに対する計算科学的アプローチを主要な方法論として、原子核物理から物質科学、光科学にわたる広範な分野に対し研究を展開している。

原子核物理学では、陽子と中性子の多体系として捉えた原子核、特に陽子数と中性子数が異なる不安定原子核に対し、量子ダイナミクスの観点から研究を進めている。不安定核の構造と反応は、星の構造や元素の起源を巡り宇宙物理学に密接に関連しており、中長期的に宇宙分野と連携した活動に発展させたいと考えている。

本グループではまた、原子核物理学と共通する方法論を用い、物質科学分野において電子ダイナミクスの量子シミュレーション法に基づく研究を展開している。特に、時間依存密度汎関数理論を用いたシミュレーションに関して多くの経験と実績を有しており、本年はコヒーレントフォノンの生成機構に関する研究及び磁気円二色性に関する研究で成果を挙げるとともに、新たな取り組みとして、高強度パルス光と物質の相互作用を第一原理計算的に記述し非線形電子励起を伴う光伝播を記述することができる、マクスウェル-TDDFT マルチスケール・シミュレーション法の開発に着手した。

3. 研究成果

【1】時間依存密度汎関数理論による物質中の電子ダイナミクス計算

(1) 強パルス光の物質中伝播を記述するマルチスケール・シミュレータの開発 (矢花、杉山、篠原、乙部 (原研)、G.F. Bertsch (Univ. Washington))

固体中の光の伝播や、表面での反射などの現象は、通常は屈折率を用いて記述される。しかし、今日の光科学のフロンティアで用いられる高強度・超短パルスレーザーでは、強い光電場に起因する非線形な電子応答がもたらす様々な現象が問題となっている。このような高強度パルス光と物質の相互作用を理解するためには、従来の電磁気学の枠組みを超えたアプローチが必要とされる。

原理的には、高強度パルス光のもたらす電子ダイナミクスは時間依存シュレディンガー方程式で記述され、光電磁場は、電子の密度やカレントをソースとして持つマクスウェル方程式で記述されるため、両者を結合した方程式を解けばよい。しかし、可視光領域の光の波長が μm 程度であるのに対し、光電場が誘起する電子ダイナミクスの空間スケールは、原子サイズと同程度の nm 程度であり、異なる空間スケールの問題を扱うためマルチスケール・シミュレーション法を開発

することが必要とされる。

我々は、電子ダイナミクスに対して時間依存密度汎関数理論を用い、電子の運動を記述する時間依存コーン・シャム方程式と光電磁場の伝播を記述するマクスウェル方程式に対して、どのようにすればマルチスケール・シミュレーションが可能となるかを検討した。そして、得られた方程式系に対して摂動論を用いると、誘電率を介してマクスウェル方程式と時間依存コーン・シャム方程式が分離されることを確認した。さらに、マルチスケール・シミュレーション法のプログラムを作成し、予備的な計算を遂行し、結晶表面に電子・ホールプラズマが生成されることを確認した。

(2) 磁気円二色性の実時間計算 (李、矢花、G.F. Bertsch (Univ. Washington))

静磁場中に置かれた原子や分子の右円偏光と左円偏光に対する光吸収の差は、磁気円二色性と呼ばれる。この量に対する計算は古くから行われているが、摂動論で扱う場合は光電場と静磁場に対する2次の量になることから、複雑な計算が必要とされてきた。最近、応答関数理論を用いた枠組みなどにより、様々な量子化学手法に基づく計算が盛んに行われている。

我々はこの磁気円二色性に対し、時間依存コーン・シャム方程式の実時間解法を用いた新たなアプローチを開発した。それは、有限の強度の静磁場中で双極場による摂動を加え、非線形な時間依存コーン・シャム方程式を非線形のまま解くものである。静磁場と双極場の強度を十分弱くとることにより、2次の微小量として磁気円二色性の強度関数を得ることが可能になる。

この枠組みを、いくつかの小さな有機分子とC60分子に対して適用した。我々の枠組みではノルム保存擬ポテンシャルを用いるが、そのために和則が大きく破れることが見出された。また、実験値との比較では、計算結果は定性的には磁気円二色性の符号などを再現するものの、強度の絶対値に関しては数倍の差異が見出される場合が多いことが見出された。このことから、時間依存密度汎関数理論は、原子や分子の振動子強度に対して定量的に信頼できる結果を与えてきたが、磁気円二色性に対しては、得られた結果の信頼度に関し、慎重に判断することが必要であることが分かった。

(3) コヒーレントフォノンの生成機構に対する時間依存密度汎関数理論による研究 (篠原、矢花、乙部 (原研)、G.F. Bertsch (Univ. Washington))

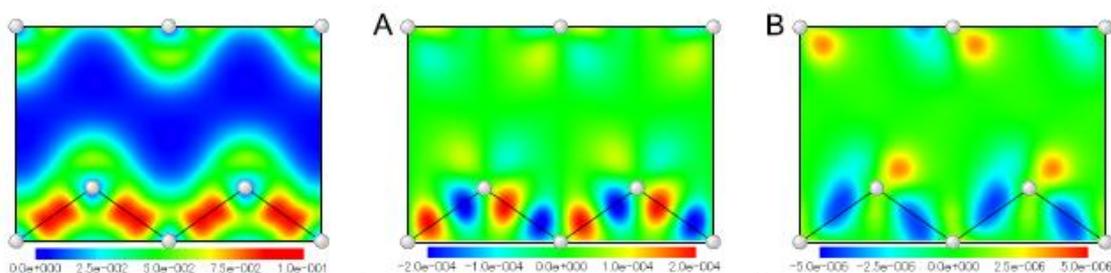
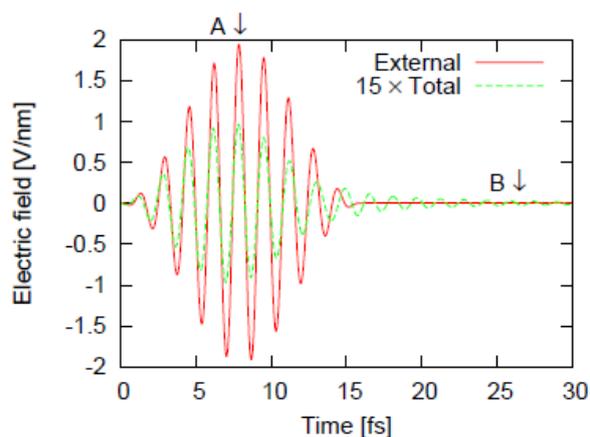
固体中の光学フォノンの振動数に比べてパルス長の短い超短パルスレーザーを照射した際に起こる現象の一つにコヒーレントフォノンがある。これまでその生成メカニズムに関し現象論に基づいて調べられてきており、ISRS (Impulsive Stimulated Raman Scattering) と DECP (Direct Excitation of Coherent Phonon) と呼ばれる2つのメカニズムの存在が議論されてきた。

我々は、時間依存密度汎関数理論に基づき、第一原理からコヒーレントフォノンの生成起源を解明することを試みた。まず、半導体であるSiを例に、異なる振動数を持つパルス光を照射した

計算結果を調べることで、時間依存密度汎関数理論が ISRS、DECP の 2 つのメカニズムを含むことが明らかになった。直接バンドギャップよりも小さい振動数のパルス光を照射したところ、パルスの照射中のみだけ起こる電子励起により力が働く ISRS 機構によるコヒーレントフォノンの生成が見出された。一方、直接バンドギャップを越える振動数のパルス光を照射した場合は、パルス照射後に実励起が起こり、パルス光が照射した後も継続して力が働く、DECP 機構によるコヒーレントフォノンの生成が見出された。このように、時間依存密度汎関数理論により第一原理からコヒーレントフォノンの記述が可能であることを初めて明らかにした。

コヒーレントフォノンの実験的測定は、Sb 等の半金属物質に対して数多く行われており、その場合にはフォノンのモードに応じて ISRS 型と DECP 型が混在するなど興味深い現象が報告されている。また、同じく半金属である Bi では極めて大きな振幅を持つコヒーレントフォノンが、その振幅の絶対値を含めて測定されている。これらに対する計算が進行中である。

図 1 : Si 結晶にパルス光を照射した場合の計算結果。右は、外部から加えた電場 (赤線) と分極を含めた全電場 (緑線)。下は電子密度を表し、左は基底状態。中央及び右は、右図の時刻 A 及び B における、基底状態からの密度変化 (赤は電子の増加、青は減少) を表す。A では電場による一時的な励起、B では実励起が見られる。



【2】原子核集団運動の理論、不安定核の構造

(1) BCS 形式による時間依存密度汎関数理論の拡張 (江幡、中務 (理研)、稲倉、橋本、矢花)

核子多体系である原子核のダイナミクスを微視的に記述する場合、超流動性を考慮した取り扱いが重要になる。超流動性を取り入れた量子ダイナミクス理論として、時間依存 Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 理論が知られているが、数値的な取り扱いが極めて難しく、3次元実空間差分法を用いたダイナミクスの記述は未だ成功していない。そこで我々は、正準基底表示を用いることにより、BCS 近似に基づく対相関効果を取り入れた枠組みを開発しており、この

枠組みを正準基底表示時間依存 Hartree-Fock-Bogoliubov 理論(Cb-TDHFB)と呼んでいる。昨年度までは現実的な Skyrme 有効相互作用を用いた軽い原子核に対する計算を行い、先行研究との比較を行った。その結果、より現実的に対相関を扱った HFB 理論に基づく研究と非常に近い結果を与えることが明らかになった。今年度は重い核種(172Yb)における計算を行い、Cb-TDHFB は従来に比べ 1000 倍程度小さい計算コストでほぼ同等の結果を与えることが分かった。また、系統的計算を開始し、軽い核の電気双極子振動(E1)モードに対する結果を蓄積しており、対相関の E1 モードにおける対相関の効果を系統的調べている。

(2) 原子核の三次元的回転運動の理論 (橋本、堀端 (青森大))

原子核の回転運動は、さまざまな原子核集団運動の中でも最も顕著な例である。原子核平均場の回転運動は内部核子によるコヒーレントな運動の現れであり、その背後には、原子核平均場と密度分布が緊密に関係しているという原子核の自己無撞着性 (nuclear self-consistency) がある。原子核の回転運動の研究は、主に軸対称変形をした核の主軸まわりの定常回転を対象にしてクラッキング模型に基づいて行われている。一方、理論的な立場からは、より一般的な回転運動の存在が期待されている。たとえば、原子核が軸対称から離れ、三軸非対称変形をすると、“主軸まわりの定常的な回転”という基礎の上に一種のフォノンが生じたような運動モードが起こることが Bohr と Mottelson の教科書でも指摘されている。この運動は、ウォブリング(wobbling)と呼ばれ、回転軸が平均場の主軸から離れて才差運動のような振る舞いをする。本研究では、ウォブリング運動を含めた三次元的な回転運動が原子核においてどのように生じるかを徹視的に理解することを目的としている。

今年度は昨年度の引き続いてオスミウム 182Os の傾斜角回転 (tilted axis rotation; TAR) モードを含む励起状態について生成座標法 (GCM) を用いて調べた。平均場近似では、オスミウムは prolate 変形 (レモン型) をしているため、主たる回転軸が乗っている“赤道”から見て“北緯”方向と“南緯”方向に対称にクラックハートレーフォックボゴリュボフ (CHF B) 解が存在する。理論的なアイデアは、これらの対称な平均場解の間に量子力学的なトンネル効果のために結合が生じ、北緯領域の解と南緯領域の解で縮退していたものが分離するという点である。われわれは、P.M.Walker らの実験で得られた K 量子数が 8 のバンドにおいて、基底状態のバンドとのバンド交差後の“シグネイチャ・スプリッティング”と呼ばれる現象がこのトンネリングのアイデアで説明できると期待している。GCM 計算で得られるスプリッティングの値は約 150keV から 250keV であるが、GCM 波動関数に期待される対称性の精度が十分ではないという問題点がある。そのために、GCM 計算の基礎となる HFB 波動関数の精度を上げ、また、GCM のコードの大幅な見直しを進めている。

(3) Gogny 力を用いた時間依存 HFB コードの開発 (橋本、三藤)

我々は、Gogny 力を用いた時間依存 HFB (TDHFB) 方程式を数値的に解く方法を開発・展開している。微小振幅の撃力を与えた波動関数を初期条件にした場合にはこの方法は準粒子 RPA になる。一方、非線形効果は振幅の増大とともに重要になってくる。昨年度は、球形のチタン (Ti) 52 の原子核について、軸対称変形の範囲内で大振幅振動運動の緩和現象を扱った。今年度は、非軸対称な振動も考慮した場合へと拡張した TDHFB 計算を実行した。四重極型の非軸対称性振動運動の場合でも、巨大共鳴領域のエネルギーに相当する高い振動数の振動運動をしつつ、その振動中心はゆっくりと緩和して最終的に球形を振動中心とする大振幅の運動へと落ち着いていく。その運動においては、軸対称運動の場合と同じように、 $p3/2$ 軌道内での対相関力による占有数の変動を見ると、粒子状態の占有のされ方は断熱的であるように見える。同様な計算を、たとえばチタン 44 においても行い、緩和を伴う大振幅運動の際に、パリティの異なる $f7/2$ 軌道と $d3/2$ 軌道との間でも対相互作用によって粒子の占有状態の変化が起こることがわかった。その過程は断熱的と見える。一方、対相互作用の働かない変形領域においては、ハートレーフォックの局小点がポケットのようになってその近傍の軌道を一定の領域に閉じ込めることも明らかになった。これらの非線形大振幅運動の内容を、モード間結合の効果という視点から理解していくことが今後の方向である。

(4) 多 Slater 行列式の重ね合わせによる軽い原子核の記述 (福岡、船木、矢花、中務 (理研))

非経験的に原子核の性質を理解することは、今日の原子核理論分野における大きな目標となっている。12C 核の基底状態まで生の核力に基づいた記述が可能となっており、励起状態に現れるクラスター状態に対する非経験的な記述が大きな目標となっている。本研究では、核子間相互作用としては、幅広い核種の基底状態や応答関数を平均場模型の範囲で記述する Skyrme 相互作用を用い、乱雑な初期波動関数から虚時間法を用いて多数の Slater 行列式を生成し、それらを重ね合わせることで、与えられたハミルトニアンに対して収束した励起スペクトルの記述を行おうというものである。

12C 核に対する記述を行ったところ、励起スペクトルに関しては概ね満足のいく結果が得られたものの、 $02+$ 状態の半径は従来クラスター模型で記述されたものに比べて小さく、基底状態と大差ない結果となった。このため、本計算に用いている枠組みで、クラスター模型の波動関数を用いた計算を行った。その結果、クラスター模型波動関数では $02+$ 状態に対して大きな半径を持つ結果が得られた。しかし、クラスター模型波動関数と、乱雑な初期波動関数から生成した波動関数の両方を用いて重ね合わせたところ、 $02+$ 状態にクラスター模型波動関数はほとんど混ざらず、小さい半径となる結果が得られた。実験的には、基底状態から $02+$ 状態への遷移行列要素が得られているが、それらはクラスター模型による予測と今回の計算との中間にある。

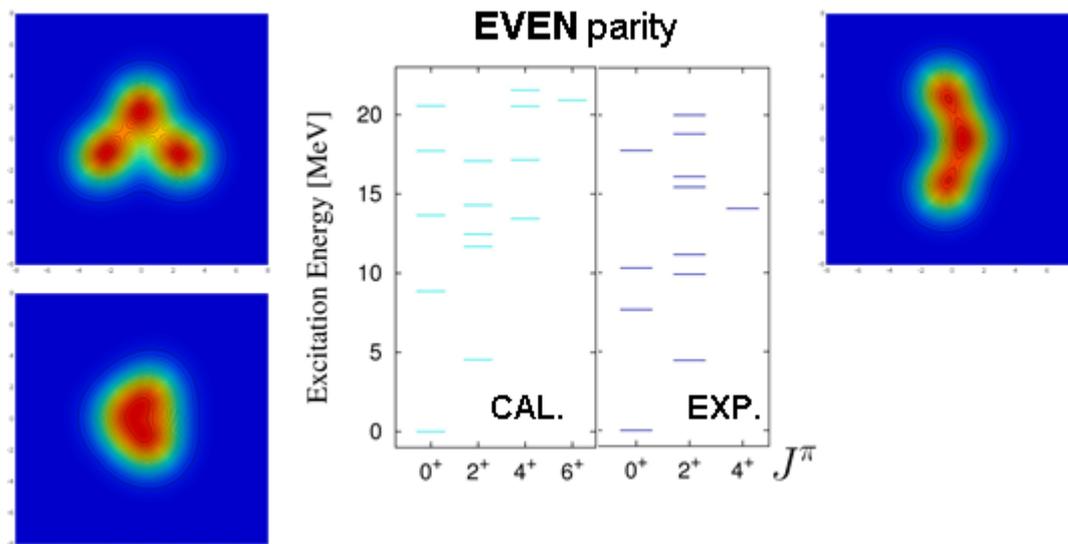


図2：多スレーター行列式の重ね合わせによる ^{12}C 原子核構造の計算。低励起領域のスペクトルが精度よく再現されるとともに、励起構造に現れる様々なクラスター構造が非経験的に記述されている。

4. 研究業績

(1) 研究論文

1. Magnetic Circular Dichroism in Real-time Time-Dependent Density Functional Theory
K.M. Lee, K. Yabana, G.F. Bertsch
J. Chem. Phys. 134, 144106 (2011).
2. Coherent phonon generation in time-dependent density functional theory
Y. Shinohara, K. Yabana, Y. Kawashita, J.-I. Iwata, T. Otobe, G.F. Bertsch
Phys. Rev. B82, 155110 (2010).
3. First-principles Calculation of Coherent Phonon Generation in Diamond
Y. Shinohara, Y. Kawashita, J.-I. Iwata, K. Yabana, T. Otobe, G.F. Bertsch,
J. Phys. Cond. Matter 22, 384212 (2010).
4. A Massively-Parallel Electronic-Structure Calculations Based on Real-Space Density Functional Theory
J.-I. Iwata, D. Takahashi, A. Oshiyama, T. Boku, K. Shiraishi, S. Okada, K. Yabana
J. Comp. Phys. 229, 2339-2363 (2010).
5. Canonical-basis time-dependent Hartree-Fock-Bogoliubov theory and linear-response calculations
S.Ebata, T.Nakatsukasa, T.Inakura, K.Yoshida, Y.Hashimoto, K.Yabana
Phys. Rev. C 82 (2010), 034306
6. Canonical-basis TDHFB を用いた線形応答計算
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 吉田 賢市, 橋本 幸男, 矢花 一浩

素粒子論研究 119 No.1 (電子版)(p.154-161), 大振幅集団運動の微視的理論

7. Linear Response Calculation Using Canonical-Basis TDHFB with a schematic pairing functional
S.Ebata, T.Nakatsukasa, T.Inakura, Y.Hashimoto, K.Yabana
Mod. Phys. Lett. A25 (2010), 2001-2002
8. A description of t-band in 182Os within the fully microscopic calculation,
Y. Hashimoto and T. Horibata,
INFORMATION Vol. 13, 569-575(2010).
9. Quantum mechanical effects in tilted axis rotations in 182Os,
Y. Hashimoto and T. Horibata,
AIP Conference Proceedings Vol. 1235, 91-95 (2010).

(2)学会発表

(A)招待講演

1. First-principles theoretical description for many-electron dynamics induced by ultrashort laser pulses
K. Yabana, Symposium at PACIFICHEM 2010, Honolulu, U.S.A., Dec. 15-20, 2010.
2. Dynamical Role of Halo Nucleons in Nuclear Reactions
K. Yabana, Halo 2010 Symposium, Shonan Village Center, Japan, Dec. 6-9, 2010.

(B)その他の学会発表

1. Ab-initio description for laser-induced electron-phonon dynamics in dielectrics
K. Yabana, 7th Int. Symp. on Ultrashort Surface Dynamics, Brijuni Isrand, Croatia, Aug. 22-26, 2010.
2. Systematic study of E1 mode using Canonical-basis TDHFB
S. Ebata, T. Nakatsukasa, T. Inakura, K. Yoshida, Y. Hashimoto, K. Yabana, French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems, RIKEN, Jan.5-8, 2011.
3. The research of E1 mode using Canonical-basis TDHFB
S. Ebata, T. Nakatsukasa, T. Inakura, K. Yoshida, Y. Hashimoto, K. Yabana, JAPAN-ITALY EFES Workshop on Correlations in Reactions and Continuum, Torino, Sept. 6-8, 2010.
4. Linear Response Calculation using Canonical-basis TDHFB with a schematic pairing functional
S. Ebata, T. Nakatsukasa, T. Inakura, Y. Hashimoto, K. Yabana, Second EMMI-EFES Workshop on Neutron-Rich Nuclei (EENEN10), RIKEN, June 16-18, 2010.
5. Nonlinear collective oscillations of light nuclei in TDHFB with Gogny force
Y. Hashimoto, Second EMMI-EFES Workshop on Neutron-Rich Exotic Nuclei (EENEN 10)
RIKEN, June 16 – 18, 2010.
6. Description of t-band in 182Os with HFB+GCM,
Y.Hashimoto, University of Aizu-JUSTIPEN-EFES symposium “Cutting-Edge Physics of Unstable Nuclei”,

- U. Aizu, Nov. 10-13, 2010.
7. Theoretical investigation for generation of coherent phonon in bulk Si
Y. Shinohara, K. Yabana, Y. Kawashita, J.-I. Iwata, T. Otobe, G. F. Bertsch, 7-th International Symposium on Ultrafast Surface Dynamics USD7, Brijuni Islands, Croatia, Aug. 22-26, 2010.
 8. Description of Coherent Phonon Generation in Dielectrics based on Real-Time TDDFT calculation
Y. Shinohara, K. Yabana, Y. Kawashita, J.-I. Iwata, T. Otobe, G. F. Bertsch, Int. Conf. on Core Research and Engineering Science of Advanced Materials, Osaka Univ. May 30-June 4.
 9. 原子核移行反応・分解反応の視点
矢花一浩, RCNP 研究会「重イオン蓄積リングの物理」、阪大 RCNP、2010 年 9 月 24-25 日
 10. 時間依存密度汎関数理論による高強度パルス光伝播の記述
矢花一浩、篠原康、杉山健、G.F. Bertsch, 日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学中百舌鳥キャンパス、2010 年 9 月 24 日
 11. 実時間・実空間 TDDFT 法を用いた磁気円二色性の第一原理計算
李畊旻、矢花一浩、G.F. Bertsch, 日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪大学中百舌鳥キャンパス、2010 年 9 月 24 日
 12. TDHF による多核子移行反応の記述に向けて
矢花一浩、核反応研究会、阪大 RCNP、2010 年 8 月 2-4 日
 13. Canonical-basis TDHFB を用いた線形応答計算
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 吉田 賢市, 橋本 幸男, 矢花 一浩
「大振幅集団運動の微視的理論」研究会、京大基研、2010 年 10 月 24-26 日
 14. CbTDHFB による A=50 近辺までの E1 モードの研究
江幡 修一郎, 中務 孝, 稲倉 恒法, 橋本 幸男, 矢花 一浩、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学、2010 年 9 月 11-14 日
 15. Gogny-TDHFB による原子核の非線形振動と緩和
橋本幸男, 「大振幅集団運動の微視的理論」研究会、京大基研、2010 年 10 月 24-26 日
 16. HFB+GCM による指標分離の記述、
橋本幸男、堀端孝俊、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学、2010 年 9 月 11-14 日
 17. 多スレーター行列式の重ね合わせによる 12C 励起構造の記述
福岡 佑太, 船木 靖郎, 矢花 一浩, 中務 孝、日本物理学会 第 66 回年次大会、新潟大学、2011 年 3 月 28 日
 18. Skyrme 力を用いた多スレーター行列式による軽い核の励起状態の記述
福岡 佑太, 船木 靖郎, 矢花 一浩, 中務 孝
日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学、2010 年 9 月 11-14 日
 19. 軸対称調和振動子基底を用いた時間依存密度汎関数による軽い核の線形応答、

三藤竜也、橋本幸男、矢花一浩、日本物理学会 2010 年秋季大会、九州工業大学、2010 年 9 月 11-14 日

20. TDHFB による非軸対称非線形振動の研究

三藤竜也、橋本幸男、矢花一浩、日本物理学会 2011 年年会、新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日

21. 高強度超短パルスレーザーに誘起される誘電体の直流電流の絶対位相依存性

篠原康、乙部智仁、矢花一浩、日本物理学会 66 回年次大会、新潟大学 2011 年 3 月 25 日-28 日

22. 高強度短パルスレーザーに誘起される電子-格子ダイナミクスの第一原理計算

篠原康、乙部智仁、岩田潤一、矢花一浩、G.F. Bertsch、物性研・CMSI・次世代ナノ情報 合同研究会「計算物質科学の課題と展望」、東大物性研 2011 年 1 月 5 日-7 日

23. 時間依存密度汎関数理論による半導体コヒーレントフォノン生成の振動数依存性の分析

篠原康、矢花一浩、川下洋輔、岩田潤一、乙部智仁、日本物理学会 2010 年秋季大会、大阪府立大学 2010 年 9 月 23 日-26 日

24. 高強度パルス光を伝搬を記述するマルチスケール・シミュレータの開発

矢花一浩、杉山健、篠原康、乙部智仁、G.F. Bertsch

物性研・CMSI・次世代ナノ情報合同研究会「計算物質科学の課題と展望」、東大物性研、2011 年 1 月 5-7 日

25. 高強度パルス光伝搬を記述するマルチスケール第一原理シミュレータの開発

杉山健、篠原康、乙部智仁、矢花一浩、G.F. Bertsch、日本物理学会第 66 回大会、新潟大学、2011 年 3 月 25-28 日

5. 連携・国際活動・社会貢献、その他

時間依存密度汎関数理論に基づく研究で、物質科学に関してはワシントン大(Bertsch 教授)、バスク大(Rubio 教授)、分子研(信定准教授)と、原子核物理に関しては理化学研究所(中務准主任研究員)と密接な協力を行っている。

本グループでは、実時間・実空間法に基づく時間依存コーン・シャム方程式の数値解法を主要な方法論として用いている。同様な方法は国内外で開発が進んでいるが、本グループで最近進展させた結晶中の電子ダイナミクスを記述する計算法に関してはまだ例が少なく、計算コードの公開に向けた準備を進めている。