

### Ⅲ 宇宙物理理論グループ

#### 1. メンバー

教授	梅村 雅之
教授	相川 祐理
准教授	森 正夫
講師	吉川 耕司
助教	古家 健次
助教	Wagner, Alexander
研究員	安部 牧人(CREST)
	高水 裕一(CCS)
	田中 賢(ポスト京重点課題 9)
	三木 洋平(CREST)
	道越 秀吾(CCS)
学生	大学院生 16名, 学類生 2名

#### 2. 概要

本年度、当グループは、数値シミュレーションによる研究として、3次元輻射流体力学による球状星団形成の研究、高密度ガス中のブラックホール合体過程の研究、Cold dark matter halo における cusp-core 問題、アンドロメダ銀河のステラーハロー形成過程、重元素の超微細構造線を使った銀河間物質の観測可能性、Vlasov-Poisson シミュレーションによる大規模構造における有質量ニュートリノの影響の研究、活動銀河中心核 (AGN: Active Galactic Nuclei) フィードバックの輻射流体シミュレーション、初期宇宙における泡宇宙モデルの研究、原始惑星系円盤の多孔質ダストの力学と重力不安定、スイング増幅による渦状腕形成の物理機構、ケンタウルス族カリクローの実スケール大域シミュレーション、原始惑星系円盤乱流中のダスト成長と微惑星形成の研究、原始惑星系円盤形成期の分子組成進化、原始惑星系円盤内での重水素濃縮反応、分子雲コアから原始惑星系円盤への水の輸送過程、分子雲における重水素分別および窒素同位体分別過程の研究、を行った。宇宙・生命分野間連携として、星間ダストにおけるアミノ酸生成、惑星大気多重散乱を扱う輻射輸送モデルを用いた生命の痕跡の示唆の研究を進めた。また、数理物質融合科学センターの「宇宙史国際研究拠点」と連携し、宇宙の構造の起源、力と物質の起源、時空の起源、物質と質量の起源に関する研究を協働して推進する体制を構築した。新たな計算コード開発としては、再結合放射を考慮した輻射流体シミュレーションコードの開発、高次精度移流スキームの開発、GPU を用いた重力多体計算コード GOTHIC の開発、銀河の多成分力学平衡分布生成コード MAGI の開発、回転するブラックホール時空での一般相対論的輻射輸送シミュレーションコード

ARTIST の開発, SPH 粒子データを直接利用した Lyman alpha 光子輻射輸送計算コード SEURAT の開発を行った。

### 3. 研究成果

#### 【1】 3次元輻射流体力学による球状星団形成の研究

球状星団は、宇宙初期に形成されたと考えられ、高い速度分散を持つコンパクトな天体である。最近の観測から、宇宙は赤方偏移  $z > 6$  で電離していることが分かっており、大部分の球状星団が形成された時期には強い電離光源が存在していたと考えることができる。紫外線は、光電離・光加熱過程によってガスの重力成長を妨げ、さらに初期宇宙で重要な冷却剤である水素分子の形成を阻害する。我々は、先行研究で1次元球対称の輻射流体計算を行い (Hasegawa & Umemura 2009), ガス雲の収縮と紫外線輻射輸送を同時に解くことで、紫外線過熱を受けながら超音速で収縮するガス雲がコンパクトな星団形成につながることを示した。しかし、背景紫外線輻射場中の天体形成で重要となる自己遮蔽効果はガス密度の2乗平均に依存し、ガス雲の3次元的な非一様性に影響される。また背景輻射場が非等方的な場合は遮蔽領域も非等方的になる。そこで我々は、非一様密度構造を持つ  $10^{6.7} M_{\odot}$  ( $M_{\odot}$  は太陽質量) の低質量ガス雲を生成し、ガスの自己重力流体力学 (SPH 法), 分子の非平衡化学反応, 輻射輸送, ダークマターの重力を同時に解く3次元の輻射流体力学計算によって、等方輻射場・片側照射中でのガス雲の収縮過程, 自己遮蔽に至る過程を正確に解いた。更に紫外線を遮蔽し十分冷却したガス粒子を星粒子とみなし、重力多体計算をすることで形成された星団のダイナミクスを評価した。その結果、星形成の大半は輻射場の非等方性にあまりよらずに系の中心から  $\sim 10$  pc 程度のコンパクトな領域で行われることが分かった。また、星粒子の運動を追跡した結果、電離ガスの超音速落下によって形成される星団は、半質量半径, mass-to-light ratio, 速度分散-光度関係それぞれが球状星団の観測と矛盾しないコンパクトな星団となることが示された (Abe, Umemura, Hasegawa, 2016)。

#### 【2】 高密度ガス中の力学的摩擦によるブラックホール合体過程の研究

銀河中心には  $10^6 \sim 10^9 M_{\odot}$  を持つ超巨大ブラックホール (BH) が存在すると考えられているが、その質量獲得過程や形成過程は未だに解明されていない。その種として初代天体起源の BH が考えられているが、これまでそれらの BH が合体する条件は明らかにされてこなかった。我々は、一般相対論効果を入れたポストニュートニアン N 体計算によって、高密度ガスによる力学的摩擦を考慮して、 $30 M_{\odot}$  と  $10^4 M_{\odot}$  の 10 体の BH の合体過程のシミュレーションを行った。その結果、高密度ガス内での力学的摩擦の効果を取り入れると、100 Myr で 10 個全ての BH が合体できるパラメータがあることを示した (Tagawa, Umemura, et al. 2015)。さらに、この研究を発展させ、ガス降着を伴う  $30 M_{\odot}$  BH 多体系の計算を行った。

2016年になって、LIGOによって重力波の直接検出が報告され（GW150914）、この重力波は  $36^{+5.4}_{-4} M_{\odot}$  と  $29^{+4.4}_{-4} M_{\odot}$  のブラックホールの合体によって放出されたものであることが示された。これは、我々が想定したブラックホール質量に極めて近く、シミュレーションと突き合わせたところ、GW150914 イベントのブラックホール合体が起きるのは、密度が  $10^6 \text{cm}^{-3}$  以上のガスの中で3体相互作用が起きる場合であること、また合体が起こるまでに数  $M_{\odot}$  のガス降着があることがわかった（Tagawa, Umemura, Gouda, 2016）。さらにこの研究を発展させ、BHと中性子星の合体条件を求めた（Tagawa & Umemura, 2017）。

### 【3】 Cold dark matter halo における cusp-core 問題

現在の標準的な構造形成理論である cold dark matter (CDM) モデルは宇宙の大規模構造の統計的性質を説明することに成功した反面、1Mpc 以下の小さなスケールの構造においていくつかの問題が指摘されている。Dark matter halo (DMH) の中心質量密度は CDM 理論では、発散する cusp 構造を预言するが、観測的には中心質量密度が一定となる core 構造が多数発見されている。また、質量の中心集中度が高い DMH を持つ大質量衛星銀河が見つからない (Too-big-to-fail 問題) 等がある。本研究ではこれら二つの問題を、DMH とバリオンの力学的相互作用に起因した DMH の中心密度分布の進化過程に関わる問題として捉えて解析を行っている。活発な星形成活動が発生する以前の原始銀河の DMH は cusp 構造を持っているが、銀河形成期に発生する周期的な超新星爆発フィードバックによって core 構造へと遷移する、cusp-core 遷移過程の解析を行っている。本年度は特に、ガスの振動がランダウ共鳴を介してダークマターハローの中心部分を加熱する加熱効率について詳細な線形解析及びN体シミュレーションによる非線形解析を行った。その結果、振動の高波長モードが予想より高いエネルギー輸送効率を示すことを見出し、共鳴半径より内側の領域においても十分な加熱が起こることが分かった。

### 【4】 アンドロメダ銀河のステラーハロー形成過程

近年、ハッブル宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡に代表される大型望遠鏡を最大限活用した近傍宇宙の大規模探査により、現在も続く銀河進化の過程を垣間見ることができるようになってきた。近傍のアンドロメダ銀河においては、おびただしい数の暗い矮小銀河が発見されるとともに、それら矮小銀河の衝突によるものと思われるステラーストリームやステラーシェル、あるいは銀河円盤上で見られるリング構造等、銀河衝突の痕跡が続々と明らかにされてきている。本研究では、銀河衝突の重力多体計算及び流体力学計算による銀河衝突過程のみならず、アンドロメダ銀河に付随するダークマターハローの構造や、銀河円盤の構造、銀河ハロー中を徘徊するブラックホールの存在可能性について議論している。本年度は、アンドロメダ・ジャイアント・ストリーム及びノースウェスト・ストリームについて大規模な数値シミ

ュレーションを行い、幅広いパラメータサーベイを行って、その母銀河の性質とその生成過程について制限をつけることに成功した。

#### 【5】 重元素の超微細構造線を使った銀河間物質の観測可能性

宇宙のバリオンのエネルギー密度は宇宙全体の 5%程度であることが、宇宙背景放射 (CMB: Cosmic Microwave Background) や遠方クェーサーの吸収線系の観測からわかっているが、現在の宇宙において実際に観測的に存在が同定されているバリオンは、銀河内の中性ガス・分子ガス・銀河団内の高温プラズマガスなどを足し合わせても、全宇宙のエネルギー密度の 5%と比較して有意に少ないことが知られており、ミッシングバリオン問題・ダークバリオン問題と呼ばれている。数値シミュレーションによる研究では、現在の宇宙のバリオンの半分程度は宇宙大規模構造のフィラメントや銀河・銀河団の外縁部に希薄な高温 ( $10^5\text{K}\sim 10^7\text{K}$ ) ガスとして存在していると考えられており、Warm-Hot Intergalactic Medium (WHIM) と呼ばれている。この WHIM の観測的な検出を目指して、これまで軟 X 線・紫外線領域での重元素の輝線や吸収線の観測が行われてきた。我々は、重元素の超微細構造線での WHIM の検出可能性について調査した。超微細構造線を持つ元素の中で、Hydrogen-like または Lithium-like の窒素イオンが WHIM の観測には適していることを明らかにし、Green Bank Telescope 程度の電波望遠鏡で明るいクェーサーを背景光源とした吸収線系中に、WHIM 中の窒素イオンの超微細構造線が吸収線として検出可能であることを示した。

#### 【6】 Vlasov—Poisson シミュレーションによる大規模構造における有質量ニュートリノの影響の研究

宇宙大規模構造シミュレーションにおいて、有質量ニュートリノの効果を入れることが本研究の目的である。近年、スーパーカミオカンデによるニュートリノ振動の発見などによりニュートリノにも質量があることが示されており、また、宇宙初期のビッグバン直後に大量のニュートリノが生成されることがわかっている。有質量ニュートリノは、宇宙の構造形成においてコールドダークマターに比べて絶対質量は少ないながらも重力源として働くため、無視することはできない。しかしながら、ニュートリノの質量は非常に小さく、速度分散が大きいため従来の宇宙論的計算で行われている N 体シミュレーションでは、無衝突減衰の扱いが難しく、物理量にショットノイズが混在するなど数値的にニュートリノを計算することが困難であった。そこで我々のグループではそのような問題が原理的に発生しない Vlasov 方程式を元に、高次精度宇宙論的 Vlasov-Poisson シミュレーションコードを開発し、有質量ニュートリノが及ぼす影響の計算を行った。この手法は速度分散が大きい有質量ニュートリノは Vlasov-Poisson シミュレーションで計算し、速度分散が非常に小さいコールドダークマターは N 体シミュレーションで計算するハイブリッド計算である。二つの手法を組み合わせる

ことにより、N 体シミュレーションの高解像度を維持しつつ、ニュートリノの無衝突減衰を考慮した計算が可能となる。計算の結果、有質量ニュートリノがある場合は無衝突減衰により、細かい密度構造がかき消され、ボイド領域にもある程度質量が供給されることがわかった。密度パワースペクトルを見ると、線形理論では再現できない振る舞いが小スケールで起こることがわかった。将来的には観測結果と比較し、より正確なニュートリノの質量を宇宙論の立場から決定することを目標とする。

## 【7】 Radiation-hydrodynamical Simulations of AGN Feedback

We performed radiation-hydrodynamical simulations of radiation-driven winds in high-redshift, gas-rich galaxies. The simulation setup was idealised to test maximal coupling of radiation in a multi-phase interstellar medium. Radiative transfer was solved with the M1 scheme for 5 photon groups spanning from infrared to UV and we used a sub-grid treatment for infrared scattering on dust. We found that the mechanical advantage of the outflow generated by the radiation can reach  $L/c \sim 20$ , as seen in many recent observations by Maiolino, Ciccone et al. (2016). The outflows evolved according to optical depth of the photon groups and depended strongly on the properties of the interstellar medium. We found that all photon groups played an important role in the momentum transfer, but that the principal agent that generates the large mechanical advantage was the multiply-scattering infrared photons.

## 【8】 初期宇宙における泡宇宙モデルの研究

「宇宙史国際研究拠点」として、初期宇宙における泡宇宙モデルの考察を行った。これは重力定数、宇宙項が泡宇宙それぞれで異なる宇宙モデルである。重力と結合するスカラー場が実質的な重力定数となるので、その真空相転移により、様々な物理定数を取る宇宙が再現されるモデルとなっている。自然界には、様々な物理定数と呼ばれる基礎定数が存在し、重力や電磁気、強、弱の全ての力の大きさを決定している。例えば、宇宙生成時に、これらの物理定数がランダムな値を取る機構が存在し、ある領域において我々の定数に近い値を取った場合にだけ、似たような宇宙の構造形成、元素や分子、さらには生物の発生が許されると考えたとき、その他の領域(宇宙)では、例えば銀河などの構造ができず、そこにはある種の観測者がいない状況になるので、そもそもそのような宇宙を我々は観測し得ない(人間原理)。宇宙の進化と、そこに付随する異なる物理定数の系という世界観は、様々な真空期待値が存在する超弦理論的宇宙観においても重要となる。

本研究で得られた成果として、重力定数の異なる泡宇宙モデルの研究に進展があった。泡宇宙モデルとして、泡の内(我々の宇宙)と外で重力定数が異なっているものを考える。これを実現するために、スカラー場がアインシュタイン曲率と結合したジョルダン-ブランス

ディッケ理論を用いた。この際、内と外の時空を分けるスカラー場が泡の壁をつくり、これが内外の時空の膨張則の影響により広がる。解析ではまずこの泡の壁の軌跡がどのようになるかを調べた。さらに内側の宇宙での初期密度揺らぎはこの壁に反射されるモードと、外宇宙からの透過モードの総和によって、通常 **Bunch-Davis** 真空モードから変更を受ける。とくに外宇宙からの透過モードは、より短波長側への揺らぎの大きな変更を与える。これらの研究成果に基づき、2016年10月に開催された国際会議 第26回「一般相対論と重力」研究会(大阪市立大学にて開催)で口頭発表を行った。また12月に筑波大学で行われた宇宙史サロンでも講演を行った。

### 【9】 原始惑星系円盤の多孔質ダストの力学と重力不安定

惑星形成の初期段階において氷ダストの付着成長により非常に物質密度の低い多孔質ダストが形成されることが近年指摘されている。多孔質ダストの成長が効率的であるため、ダストの落下問題を回避しながら成長を続け、付着成長により微惑星が形成される可能性がある (Okuzumi et al. 2012, Kataoka et al. 2013)。しかし、このような多孔質ダストが乱流中においてどのような力学的な性質をもつのか詳しく検討されていなかった。そこで、乱流やダスト間の重力や衝突などを考慮してダストのランダム速度の時間発展方程式を導いた。そして、その定常解を求めてダストのランダム速度から重力不安定の指標である **Toomre** の **Q** 値を計算した。その結果、乱流が強くなければ、付着成長により微惑星が形成される前に重力不安定が発生することがわかった。重力不安定が発生した場合、微惑星形成が飛躍的に加速される可能性がある。重力不安定が発生するための乱流の強さを円盤の強さの関数として解析的に導いた。その結果、標準的に考えられる妥当なパラメータ範囲において重力不安定が発生することがわかった。

### 【10】 スイング増幅による渦状腕形成の物理機構

原始惑星系円盤、土星の環、銀河円盤など様々なスケールの円盤で渦状腕が見られるが、それらの起源を説明するメカニズムの1つにスイング増幅がある。これは、円盤中の密度パターンが速度シアによってリーディングからトレーリングに回転していく際に、自己重力の影響で密度振幅が飛躍的に増幅する現象である。Julian and Toomre (1966) や Toomre (1981) などの研究においてその物理機構の存在は示されていたが、このメカニズムにより具体的にどのような性質の渦状腕が形成されるか調べられていなかった。そこで、まず Julian and Toomre (1966) による無衝突ボルツマン方程式を基にした理論モデルを用いて、スイング増幅で形成される腕の波長やピッチ角、密度などのパラメータ依存性を検討し、フィッティング公式を導いた。そして、それらを実験系での N 体シミュレーションで検証したところ非常によく一致することがわかった。このことから無衝突系の N 体シミュレーションで形成された腕は確かにスイング増幅によって形成されているといえる。次に、スイング増幅の物

理的理解を深めるために Toomre (1981) の理論モデルを再検討した。その結果、Toomre (1981) の理論モデルはシアレイトが大きい場合に数値的取扱いが破綻することがわかったため、修正された理論モデルを提案した。それを用いてスイング増幅中の粒子のエピサイクル振動の位相を調べた。すると増幅前に異なる位相を持っていた粒子が増幅中に位相が揃うことがわかった。このことから、スイング増幅の物理的解釈を与えた。

### 【11】 ケンタウルス族カリクローの実スケール大域シミュレーション

2014年にケンタウルス族の小惑星カリクローで環が発見された。その光学的厚さは土星の環に匹敵するほど高く非常に高密度の環であると考えられる。しかし、その起源や構造、進化についてはまだ検討されていない。そこで、小惑星カリクローの環のN体シミュレーションを行った。従来の土星の環のシミュレーションではシアリングボックスによる局所近似か非現実的な大きな粒子を用いるなど現実とは異なるシミュレーションとなっていたが、カリクローの系の小ささのため実スケール大域シミュレーションが可能となった。シミュレーションの結果、粒子密度がカリクロー本体の密度の50%以上の場合、環が分裂することがわかった。このことから環の粒子とカリクロー本体の物質組成が異なることがわかる。しかし、粒子密度がカリクロー本体の密度の50%以下の場合でもウェイク構造とよばれる微細構造が形成されることがわかった。この構造は環の拡散を飛躍的に早め、およそ1年から100年程度で環は拡散するという見積もりになる。もしカリクローの環が巨大惑星との近接遭遇の起きた1000万年前に形成されたとすると、環を長持ちさせるメカニズムが必要である。近傍に衛星がある場合は環の拡散が抑えられることから、環の近傍には未発見の衛星が存在する可能性がある。

### 【12】 原始惑星系円盤乱流中のダスト成長と微惑星形成の研究

原始惑星系円盤のガス乱流中のダストは円盤内で衝突・合体を繰り返して成長し、kmサイズの微惑星、そして惑星が形成されると考えられている。しかし、その過程には微惑星形成を妨げる障壁（中心星への落下問題や衝突破壊問題など）が存在し未解決である。障壁の一つである衝突破壊問題は、岩石ダストが高速衝突するため合体できずに破壊してしまい、成長できないというものである。微惑星形成過程の衝突破壊問題の解決のためには、 $St = \tau_p/T = 10^{-3} \sim 1$  ( $\tau_p$ : 粒子の制動時間,  $T$ : 乱流中の最大渦の時間スケール) のダストの乱流中の衝突速度や衝突頻度の正確な評価が必要である。近年、Pan et al. (2015) は圧縮性流体の近似計算を用いて、乱流中のダストの衝突速度等の評価を行い、惑星科学分野で従来採用されている Völk-type モデルの検証を行った。結果は、中間サイズ ( $Re^{-1/2} < St < 1$ ) で、Völk-type モデルの予測が衝突速度を若干過大評価 (2倍程度) するというものであった (ここで  $Re$  はレイノルズ数)。しかし、Pan らの計算は  $Re = 10^3$  相当の近似計算で慣性領域も狭いため、正確な検証ができていない保証はない。そこで本研究では、非圧縮ナビエ・ストークス方程

式の大規模な直接数値計算(DNS)を用いて、慣性領域がより広い高解像度な乱流場( $Re > 10^4$ )中で粒子追跡を行い、 $St \approx 0.01 \sim 0.1$ のダストの衝突速度などの評価を行い、それらの $Re$ 数依存性を調べた。DNSでは、 $St \approx 0.01 \sim 0.1$ の粒子間の相対速度、衝突速度、衝突頻度因子(相対速度と動径分布関数の積)がPanらの結果と比較してどれも大きくなるという結果を得た。また、 $Re$ が大きいほど衝突頻度因子が大きくなる傾向があった。動径相対速度の確率分布関数(PDF: Probability Distribution Function)は $St$ が大きいほど裾野が広がるが、衝突限界速度以下の粒子も多く存在していることも確認できた。

さらに、限界付着速度条件(Wada et al, 2013)などを考慮に入れた、簡易な衝突付着成長モデルを導入することにより、岩石ダストを想定した乱流中での慣性粒子の成長の数値実験を行った。その結果、ある密集領域に存在する慣性粒子が、周りの慣性粒子を巻き込み、局所的かつ急激に成長すること、また一旦急激に成長した粒子は、その後成長が緩やかになることが分かった。

### 【13】 原始惑星系円盤形成期の分子組成進化

理論モデルによると原始惑星系円盤と星は同時に形成される。しかし円盤の形成と成長は磁場とガスの相互作用に依存することも指摘されており、Class 0-I程度の若い原始星での円盤形成過程の観測は現在盛んに行われている。また円盤形成期はエンベロープからの質量降着などによって比較的高温になり、星間物質から惑星物質への物質進化においても重要な段階であると考えられる。そこで、我々はTsukamoto et al. (2015)による円盤形成の輻射流体モデルを用いて、円盤形成時のガスと氷の組成進化のシミュレーションを行った。その結果、 $H_2O$ ,  $CH_4$ ,  $NH_3$ ,  $CH_3OH$ など分子雲ですでに存在量の高い安定分子はそのまま円盤に取り込まれるが、炭化水素や大型有機分子は形成期の円盤内で多く生成されることが分かった。硫黄はコアの収縮段階では $H_2S$ として多く存在するが、円盤内では壊され、 $SO$ ,  $H_2CS$ などに変化することを示した。またALMAでの原始星コアや原始惑星系円盤の観測に共同研究者として加わり、理論モデルと観測結果の比較を行った。

### 【14】 原始惑星系円盤内での重水素濃縮反応

彗星・隕石などの太陽系資源物質や地球の水は重水素/水素比が元素存在度( $10^{-5}$ )よりも高い。これは重水素濃縮と呼ばれ、低温での化学反応に由来すると考えられている。水素を重水素で置換された分子はもとの分子よりもゼロ点エネルギーが高く、低温下ではいくつかの交換反応によって重水素濃縮が起こるのである。濃縮が起こる場としては分子雲のほかに原始惑星系円盤が考えられる。近年円盤を $DCO^+$ などの重水素化分子の輝線で空間分解観測することが可能となった。その結果、重水素化分子が従来の予想よりも円盤の内側まで分布していることや分布が円盤毎に異なることもわかった。我々は円盤内での重水素化分子の存在



量を数値計算で調べ、円盤では分子雲での主要反応とは異なる重水素化反応が効くこと等を明らかにした。

### 【15】 分子雲コアから原始惑星系円盤への水の輸送過程

太陽系内の水が持つ著しい特徴として重水素(D)に富むことが挙げられる。この事実は、太陽系の水が極めて低温な環境下(せいぜい数十ケルビン以下)で生成されたことを意味する。具体的な水の生成の場として、原始太陽系の母体となった分子雲コア、あるいは原始太陽系星雲外縁部の2つが考えられているが、未だ活発に議論が行われている。もし前者であれば、原始太陽系物質は母体分子雲コアの情報を保持していることになる。後者であれば、原始太陽系星雲において大規模に分子組成がリセットされたことになる。そのため両者の区別は、原始太陽系の物質進化を理解する上で重要である。

我々は、分子雲コアの自己重力収縮による円盤形成の2次元軸対称モデルと化学反応ネットワークモデルを用いて、形成される円盤にどの程度分子雲コア起源の水が含まれるかを調べた。円盤への輸送過程において、一部の水は中心星からの紫外線により破壊されるが、円盤に含まれる水の大部分(>50%)は分子雲コア起源であることが分かった。この結果は、彗星中のD<sub>2</sub>O, HDO, H<sub>2</sub>Oを観測することで検証可能であることを示した。

### 【16】 分子雲における重水素分別および窒素同位体分別過程の研究

隕石や彗星などの原始太陽系始原物質の起源を探るうえで、安定同位体は強力な研究手段である。隕石中には重水素(D)と<sup>15</sup>Nに富んだ同位体的ホットスポットが存在する。個々のホットスポットにおいて、有機分子中のDと<sup>15</sup>Nの濃集の程度は必ずしも相関していない。Dと<sup>15</sup>Nの濃集が、いずれも低温環境下でのイオン-分子反応に起因するならば、この非相関は説明できない。近年、<sup>15</sup>Nの濃集に窒素分子(N<sub>2</sub>)の同位体選択的光解離が重要である可能性が指摘されている。そこで我々は、低温下でのイオン-分子反応とN<sub>2</sub>の同位体選択的光解離を考慮した反応ネットワークモデルを構築し、分子雲におけるDと<sup>15</sup>Nの同位体分別過程を統合的かつ定量的に調べた。その結果、Dの濃集はイオン-分子反応、<sup>15</sup>Nの濃集はN<sub>2</sub>の同位体選択的光解離で主に引き起こされることが分かった。NH<sub>3</sub>やHCNなどの分子においてDと<sup>15</sup>Nの濃集の程度は相関しないことを示した。この結果は太陽系始原物質の分子雲起源説を支持する。

### 【17】 星間ダストにおけるアミノ酸生成

地球上の生命の起源はいまだに明らかにされていないが、これまで生命の起源は原始地球での化学進化であるとする説が有力視されてきた。しかしながら、1969年オーストラリアに落下したMurchison隕石からアミノ酸が検出され、生命は宇宙から飛来した物質を起源と考える「宇宙起源説」が浮上した。さらにMurchison隕石以外の炭素質コンドライトからもア

ミノ酸が検出され、2009年にはNASAの探査機スターダストにより彗星の塵からアミノ酸の一つであるグリシンが見つかった。2010年には、1200~1300 Kの高温環境を経験したAlmahata sitta隕石からアミノ酸が検出され、非常に高温の小惑星が冷える過程で生じる反応でアミノ酸が生成される可能性のあることがわかった。さらに2016年には欧州の彗星探査衛星ロゼッタによって、火星と木星の間にある67P/チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星でグリシンが検出された。我々は、宇宙由来のアミノ酸がどのように生成される可能性があるのか明らかにすることを目的に、分子雲から見つかっている分子から隕石や分子雲から検出された前駆体を經由するグリシン生成経路について、量子化学計算(密度汎関数理論)を用い詳細な反応機構を求めた。アミノ酸前駆体としては、Murchison隕石から検出されたヒダントインと分子雲から検出されたアミノアセトニトリルに注目した。ヒダントインとアミノアセトニトリルは加水分解によりグリシンとなる。まず、すでに判明している実験室系での生成過程に対し、反応物及び中間体の生成エネルギーから安定性を評価し、低密度かつ低温の宇宙環境で反応が起こりうるか検討した。さらに反応経路中の各反応の気相反応の遷移状態探索を行い、反応のエネルギー障壁を求めた。さらに、氷で覆われた星間ダスト表面での反応を模擬するために、水分子による触媒反応を考慮した遷移状態探索を行った。その結果、生成エネルギーの評価よりアミノ酸はほとんど発熱反応で生成されることがわかった。次に、各反応の遷移状態探索を行った結果、真空中では最大で70 kcal/mol程度の反応障壁が見つかった。水分子による触媒反応では最大55 kcal/mol程度と反応障壁が低くなった。よって、分子雲中に豊富な水は触媒として重要であることがわかった。しかしながら現実的には、50~70 kcal/molほど反応障壁があると低温の分子雲のタイムスケールでは反応が起きない。ヒダントインが隕石から検出されていることから、隕石母天体でアミノ酸生成が起きる可能性もある。そこで、惑星形成時の天体衝突による $T \sim 10^3$  K程度の温度上昇を仮定すると、70 kcal/mol程度の反応障壁でも超えることができる。また、分子雲のような低温環境での反応障壁の上限は約12 kcal/mol程度であった。水分子の触媒効果だけではなく、反応場としての氷の効果を考慮すると、より一層反応障壁が低下し反応が進む可能性もある。近傍での星形成があれば、紫外線による光化学反応を含む反応経路によるアミノ酸生成も考えられる。

### 【18】 惑星大気の多重散乱を扱う輻射輸送モデルを用いた生命の痕跡の示唆

系外惑星の観測が進み、地球以外の惑星にも生命が存在する可能性が示唆され、その探査に興味を持たれるようになった。唯一生命の存在が確認されている地球をもとに、大気分子や植生などが生命の痕跡である"バイオマーカー"として挙げられており、系外惑星において分光によるそれらの検出可能性が調べられている。本研究では、バイオマーカーの検出可能性について定量的な解析を行った。系外惑星の観測状況を模擬したモデルを作成し、地球型惑星において、輻射輸送計算によってバイオマーカーとなる大気分子や地表面の環境の観測予測をして評価した。地表面の環境の特定において、近赤外域では海、短波長側では雪・氷

の地表面で、その他の環境との違いが見られた。ハビタブルな惑星の興味である植生の環境において、レッドエッジに相当する、 $0.67\mu\text{m}$  と  $0.72\mu\text{m}$  あたりの波長域は、その特徴よりも  $\text{O}_2$ 、 $\text{O}_3$  の吸収の寄与の方が勝っていた。紫外域( $\sim 0.35\mu\text{m}$ ) は、大気中の分子のうち、 $\text{O}_2$  の吸収がほとんどである。これらの見積もりは、将来の観測計画を立てる際に重要であり、本研究の結果は、紫外域の観測が行われれば、散乱と  $\text{O}_2$  と  $\text{O}_3$  の量とを結びつけて議論できることを示している。

### 【19】 再結合放射を考慮した輻射流体シミュレーションコードの開発

輻射輸送シミュレーションやそれを流体力学シミュレーションとカップルさせた輻射流体シミュレーションは、天体形成の数値シミュレーションで多く用いられるようになってきたが、電離領域からの再結合放射などの空間的に広がった光源からの輻射輸送は計算コストが膨大であるため、これまでは無視されることが多かった。我々は、輻射輸送計算を GPU やマルチコア・メニーコアアーキテクチャに基づくプロセッサで効率的に実行するアルゴリズムを開発し実装した。このコードは、点源からの輻射輸送を解く ARGOT 法と再結合放射などの広がった領域からの輻射輸送を解く ART 法を GPU やマルチコアプロセッサにおいて実装したものである。このコードを使い、自己重力と圧力の釣り合った等温平衡球であるポナー・エバート球に一樣平行光線を入射した結果、平行光線の輻射強度と球の質量に依るが、再結合放射を考慮した計算では考慮していないものに比べ、比較的早い段階で構造が壊される傾向にあることがわかった。これは、高密度の電離水素領域が形成され、そこが新たな再結合放射源として振る舞い、再結合放射がない場合に比べ加熱されるためである。

### 【20】 高次精度移流スキームの開発

Vlasov 方程式を直接数値シミュレーションする Vlasov シミュレーションでは 6 次元位相空間を離散化してメモリに載せるため、一般的に大量の記憶容量が必要となり、数値シミュレーションの分解能を向上させるためにメッシュ数を増やすことは現実的ではない。そこで、メッシュ数を増やすかわりに、計算スキームの空間精度を向上させることで Vlasov シミュレーションの高精度化を達成することが必要である。Vlasov シミュレーションでは、位相空間の各次元方向に 6 本の移流方程式を時間発展させるため、空間高次精度の移流スキームを開発することが必要となる。また、Vlasov 方程式の物理的な要請として、数値解の単調性・正值性を保証することが重要である。このような背景をもとに、我々は、空間 5 次精度及び 7 次精度で単調性・正值性を保証する高次精度移流スキームを開発した。また、時間発展スキームについても従来から使われている TVD-Runge-Kutta スキームだけではなく、より計算コストが小さく高精度の semi-Lagrange スキームも採用することで、より Vlasov シミュレーションに適した移流スキームを開発した。

## 【21】 GPUを用いた重力多体計算コード GOTHIC の開発

宇宙物理学の研究で広く用いられている重力多体計算に用いるための Tree コード (GOTHIC: Gravitational Oct-Tree code accelerated by Hierarchical time step Controlling) を実装し, GPU を用いて高速化した。GOTHIC の実装に当たっては, block time step を採用することで全体の計算量を削減し, また複数の関数の実行時間を監視しながら動的な最適化を施すという自動最適化も実装した。特に自動最適化の採用により, 粒子分布の時間発展に応じて実行構成が自動的に更新されていくため, 実際の宇宙物理学の研究に適用しやすい実装となっている。Fermi, Kepler, Maxwell 世代を代表する GPU を用いて性能評価を行った結果, 先行研究でも採用されている一般的な実装に比べて 5-10 倍程度の高速化が確認できた。特に高速化の効果が大きかったのは block time step の採用であり, 一般的に採用されている shared time step と比較して 3-5 倍程度の高速化が達成できた。上記の成果は学術論文誌 *New Astronomy* 誌に採録済みである (Miki & Umemura 2017)。

## 【22】 銀河の多成分力学平衡分布生成コード MAGI の開発

銀河どうしの衝突・合体や銀河円盤中の渦状腕の形成などの力学進化過程を詳細に調べるために, N 体シミュレーションを用いた研究が精力的に進められている。こうした計算を行うためには適切な初期条件を生成する必要がある。しかしながら, 一般に銀河はバルジ・ハロー・円盤からなる多成分系であり, これを力学平衡状態にある粒子分布として表現することは容易ではなく, 現在も初期条件の生成方法に関する研究が続けられている。また, 天の川銀河のような円盤銀河では厚さの異なる複数の円盤成分が見つかることが多いため, 複数成分の円盤モデルを生成できることが望ましい。さらに, 銀河の質量やサイズ, 各成分の質量分布に対する依存性を調べるためには, これらを手軽に変更できることも重要であるが, こうした性質を全て備えた初期条件生成コードは存在しない。また, 得られた粒子分布は観測データのフィッティングやガス入りの計算にも利用可能であるが, 特にフィッティングに用いるためには手軽に粒子分布を変更できる必要がある。

そこで我々は, 複数の球対称成分と軸対称成分を粒子系として表現する初期条件生成コード MAGI (MAny-component Galaxy Initializer) を開発した。球対称成分については, 等方的な速度分布を仮定し Eddington formula を用い分布関数を作成, この分布関数に従う粒子分布を生成することで, Burkert, Einasto, Hernquist, King, Moore, NFW, Plummer model などの多様なモデルやその重ね合わせを力学平衡状態にある粒子分布として表現できる。また円盤成分については, potential-density pair を数値的に解くことでその分布を生成し, 厚さの異なる複数の円盤成分の生成にも対応した。生成された粒子分布の長時間の安定性についての数値実験を行ったところ, 長時間に渡る安定性も確認できた。また, MAGI の公開についても準備を進めた。

### 【23】 回転するブラックホール時空中の一般相対論的輻射輸送シミュレーションコード ARTIST の開発

ブラックホール周囲の降着流・噴出流での物理過程を理解するためには、曲がった時空中での輻射輸送の効果を正確に把握する必要がある。輻射の効果は降着流・噴出流の力学的構造や熱力学的構造に重要な影響を与えることがある上に、観測量からブラックホール近傍で起こっている物理過程を明らかにする際には輻射場の相対論効果が無視することができないためである。本研究では、回転するブラックホール時空中での輻射輸送方程式を直接数値計算することで、一般相対論的な光子輻射場を正確に解くことが可能な数値シミュレーション・コード(ARTIST)を開発した。この数値コードでは、位相空間中で定義される不変輝度を直接数値計算することで、光子の放射・吸収・散乱の全ての過程を因果律を厳密に保って解くことが可能である。また、ART法の一般化により、測地線に沿った長特性線法を用いて計算しているため、数値的な拡散がない。光学的に厚い状況では光子散乱の効果を無視することができないが、本コードでは光子の運動量空間積分を直接数値計算することで散乱過程の in-coming 光子と out-going 光子を計算した。また、光学的に薄い状況では光子球の近傍やエルゴ領域内で起こる一般相対論効果は無視することができないが、本コードは過去の一般相対論的レイ・トレーシング計算の結果を全て正確に再現することが可能である。ブラックホール近傍で光が放出される場合には、光子球近傍を回り続ける光子軌道があるために、輻射衝突が起こり続けるが、本コードではこれらの輻射衝突も計算することができることを確認した。

### 【24】 SPH 粒子データを直接用いた Lyman alpha 光子輻射輸送計算コード SEURAT の開発

Lyman alpha 輝線 (Ly $\alpha$ ) で非常に明るい高赤方偏移銀河 (Lyman alpha emitters, LAEs) の理論モデル化に向けて、流体力学計算と Monte Carlo 法を用いた Ly $\alpha$  輝線輻射輸送計算を組み合わせたシミュレーションが行われてきている。銀河形成シミュレーションの流体計算には、広いダイナミックレンジを取り扱う事ができる SPH 法が広く用いられるが、その一方で従来の Ly $\alpha$  輻射輸送コードは mesh ベースで開発されてきた。そのため、Ly $\alpha$  輻射輸送計算の際に SPH 計算データを mesh へ割り当てる必要があり、高密度領域を高解像度で分解している SPH 計算の情報を人工的に落としてしまうことが問題であった。そこで本研究では、ray-tracing の際の SPH 粒子探索法を工夫することで、SPH 粒子自身を輻射輸送計算の際のグリッドとして用いる meshfree の Ly $\alpha$  輻射輸送計算コード SEURAT を開発した。テスト計算の結果、本コードが一様ガス球からの Ly $\alpha$  光子脱出スペクトル、dusty slab からの Ly $\alpha$  光子脱出確率といった問題の解析解をよく再現することを確認し、さらに密度勾配が非常に大きな系に対しても meshfree で Monte Carlo 計算が可能である事を確かめた。

## 4. 教育

### 【学位論文】

#### <博士論文>

1. 五十嵐 朱夏

Transonic analysis of galactic outflows and its application  
(銀河風の遷音速解析とその応用)

2. 桐原 崇亘

Numerical study of internal structure of galaxies via minor merger events in M31  
(M31におけるマイナーマージャー現象を用いた銀河の内部構造の数値的研究)

#### <修士論文>

1. 久喜 奈保子

A Radiative Diffusion and Transfer Scheme for Lyman alpha Line Scattering  
(ライマン $\alpha$ ライン散乱の輻射拡散・輸送計算スキーム)

2. 楠 尚久

銀河衝突シミュレーションで探るアンドロメダ銀河のダークマターハロー外縁部構造と衝突軌道の探査

3. 佐々木 さゆり

初期宇宙における構造形成に対するダークマター・バリオン相対速度の影響

4. 柴野 祥平

M31の銀河進化における星間ガスと恒星風の相互作用

5. 古谷 眸

原始惑星系円盤における圧縮性乱流場中のダスト粒子運動

6. 石原 駿

惑星大気 of 多重散乱を扱う輻射輸送モデルを用いた生命の痕跡の示唆について

7. 横村 尚子 (神戸大学, H27.9-H28.8 筑波大学依託学生)

モンテカルロ法を用いた星間化学の数値計算

#### <学士論文>

1. 福原 葉月

重力波 GW150914: 巨大分子雲におけるBH合体の可能性

2. 宮川 銀次郎

Plane of Satellites の力学安定性について

### 【集中講義】

- 相川祐理

「理論天文学特別講義 I」 (2016年7月13日～15日, 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻)

## 5. 受賞, 外部資金, 知的財産権等

### 【受賞】

- 1) 筑波大学 BEST FACULTY MEMBER2016, 梅村雅之, 2017年2月20日
- 2) 筑波大学 BEST FACULTY MEMBER2016, 相川祐理, 2017年2月20日

### 【外部資金】

<代表者>

- 基盤研究 (B) (一般) H27年度～H30年度: 梅村雅之

「一般相対論的輻射流体によるブラックホール超臨界降着流と超大質量星の研究」  
(H28年度 120万円/全体 540万円)

- 科学技術試験研究委託事業, H28年度～H32年度: 梅村雅之

「ポスト京で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開発・研究開発」萌芽の課題, 「太陽系外惑星(第二の地球)の誕生と太陽系内惑星環境変動の解明(生命を育む惑星の起源・進化と惑星環境変動の解明)」(サブ課題 D 原始太陽系における物質進化と生命起源の探求)  
(H28年度 1,250万円/全体 4,874万円)

- 基盤研究 (C) (一般) H26年度～H29年度: 森正夫

「輻射流体シミュレーションによる銀河系統樹の構築」  
(H28年度 104万円/全体 520万円)

- 基盤研究(C) (一般) H23年度～H28年度: 相川祐理

「星・惑星系形成過程における揮発性物質の組成, 同位体比, 気相・固相分配」  
(H28年度 150万円)

- 新学術領域「宇宙分子進化」公募研究, H28年度～H29年度: 相川祐理

「星・惑星系形成過程における気相と固相の化学: 天体構造の観測指標と物質進化」  
(H28年度 180万円)

- 挑戦的萌芽研究, H28 年度～H30 年度: 相川祐理  
「計算科学によるアストロバイオロジーへの理論的挑戦」  
(H28 年度 130 万円)

<分担者>

- 基盤研究 (A) (一般) H27 年度～H31 年度: 梅村雅之 (代表者: 大内正巳)  
「すばる HSC と SDSS で探る宇宙論的スケールの物質循環」 (2.5 万円)  
(H28 年度分担金 2.5 万円/分担金全体 12.5 万円)
- 基盤研究 (C) (一般) H28 年度～H31 年度: 梅村雅之 (代表者: 高橋芳太)  
「一般相対論的 ART 法による超巨大ブラックホール形成と成長過程の研究」  
(H28 年度分担金 10 万円/分担金全体 20 万円)
- 基盤研究 (A) (一般) H27 年度～H31 年度: 森正夫 (代表者: 大内正巳)  
「すばる HSC と SDSS で探る宇宙論的スケールの物質循環」  
(H28 年度分担金 2.5 万円/分担金全体 12.5 万円)
- 戦略的創造研究推進事業 CREST, H24 年度～H29 年度: 梅村雅之 (代表者: 朴泰祐)  
「ポストペタスケール時代に向けた演算加速機構・通信機構統合環境の研究開発」  
(H28 年度分担金 1,700 万円/分担金全体 4,980 万円)
- 科学技術試験研究委託事業, H27 年度～H32 年度: 吉川耕司 (代表者: 吉田直紀)  
「ポスト京で重点的に取り組むべき社会的・科学的課題に関するアプリケーション開  
発・研究開発」, 重点課題 9 「宇宙の基本法則と進化の解明」 (サブ課題 C 大規模数  
値計算と広域宇宙観測データの融合による宇宙進化の解明)  
(H28 年度分担金 820 万円)
- 挑戦的萌芽研究, H28 年度～H30 年度: 古家健次 (代表者: 相川祐理)  
「計算科学によるアストロバイオロジーへの理論的挑戦」  
(H28 年度分担金 32.5 万円)

## 【知的財産権】

なし



## 6. 研究業績

### (1) 研究論文

#### A) 査読付き論文

- 1) Takahashi, R., Umemura, M., 2017, “General Relativistic Radiative Transfer Code in Rotating Black Hole Spacetime: ARTIST”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 464, 4567-4585
- 2) Tagawa, H., Umemura, M., Gouda, 2016, “Mergers of accreting stellar-mass black holes”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 462, 3812-3822
- 3) Namekata, D., Umemura, M., 2016, “Subparsec-scale dynamics of a dusty gas disk exposed to anisotropic AGN radiation with frequency dependent radiative transfer”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 460, 980-1018
- 4) Abe, M., Umemura, M., Hasegawa, K., 2016, “Formation of globular clusters induced by external ultraviolet radiation II: Three-dimensional radiation hydrodynamics simulations”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 463, 2849-2863
- 5) Momose, R., Ouchi, M., Nakajima, K., Ono, Y., Shibuya, T., Shimasaku, K., Yuma, S., Mori, M., Umemura, M., 2016, “Statistical properties of diffuse Ly $\alpha$  haloes around star-forming galaxies at  $z\sim 2$ ”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 457, 2318-2330
- 6) Miki, Y., Umemura, M., 2017, “GOTHIC: Gravitational oct-tree code accelerated by hierarchical time step controlling”, New Astronomy, 52, 65-81
- 7) Miki, Y., Mori, M., Rich, R.M., 2016, “Collision tomography: Physical properties of possible progenitors of the Andromeda stellar stream”, The Astrophysical Journal, 827, 82, 11 pp
- 8) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., & Rich, R. M. 2017, “Formation of the Andromeda Giant Stream: Asymmetric Structure and Disc Progenitor”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 464 (3): 3509-3525
- 9) Sakai, Nami, Oya, Yoko, López-Sepulcre, Ana, Watanabe, Yoshimasa, Sakai, Takeshi, Hirota, Tomoya, Aikawa, Yuri, Ceccarelli, Cecilia, Lefloch, Bertrand, Caux, Emmanuel, Vastel, Charlotte, Kahane, Claudine, Yamamoto, Satoshi, 2016, “Subarcsecond Analysis of the Infalling-Rotating Envelope around the Class I Protostar IRAS 04365+2535”, The Astrophysical Journal Letters, 820, L34, 6 pp
- 10) Walsh, Catherine, Loomis, Ryan A., Öberg, Karin I., Kama, Mihkel, van 't Hoff, Merel L. R., Millar, Tom J., Aikawa, Yuri, Herbst, Eric, Widicus Weaver, Susanna L., Nomura, Hideko, 2016, “First Detection of Gas-phase Methanol in a Protoplanetary Disk”, The Astrophysical Journal Letters, 823, L10, 7 pp
- 11) Shimonishi, Takashi, Onaka, Takashi, Kawamura, Akiko, Aikawa, Yuri, 2016, “Detection of a hot molecular core in the Large Magellanic Cloud with ALMA”, The Astrophysical Journal, 827, 72, 20 pp

- 12) Walsh, C., Juhasz, A., Meeus, G., Dent, W.R.F., Maud, L., Aikawa, Y., Millar, T.J., Nomura, H., 2016, “ALMA reveals the anatomy of the mm-sized dust and molecular gas in the HD 97048 disk”, *The Astrophysical Journal*, 831, 200, 15 pp
- 13) Nishimura, Y., Shimonishi, T., Watanabe, Y., Sakai, N., Aikawa, Y., Kawamura, A., Yamamoto, S., 2016, “Spectral Line Survey toward a Molecular Cloud in IC10”, *The Astrophysical Journal*, 829, 94, 8 pp
- 14) Imai, M., Sakai, N., Oya, Y., López-Sepulcre, A., Watanabe, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Sakai, T., Hirota, T., Aikawa, Y., Yamamoto, S., 2016, “Discovery of a Hot Corino in the Bok Globule B335”, *The Astrophysical Journal Letters*, 830, L37, 7 pp
- 15) Yoneda H., Tsukamoto, Y., Furuya, K. & Aikawa, Y. 2016, “Chemistry in a forming protoplanetary disk: main accretion phase”, *The Astrophysical Journal*, 833, 105, 17 pp
- 16) Ziurys, L. M., Halfen, D.T., Geppert, W. & Aikawa, Y., 2016, “Following the Interstellar History of Carbon: From the Interiors of Stars to the Surfaces of Planets”, *Astrobiology*, 16, 997
- 17) Harada, N., Hasegawa, Y., Aikawa, Y., Hirashita, H., Liu, H. B., Hirano, N. 2017, “Effects of Grain Growth on Molecular Abundances in Young Stellar Objects”, *The Astrophysical Journal*, 837, 78, 17 pp
- 18) Oya, Y., Sakai, N., Watanabe, Y., Higuchi, A. E., Hirota, T., López-Sepulcre, A., Sakai, T., Aikawa, Y., Ceccarelli, C., Lefloch, B., Caux, E., Vastel, C., Kahane, C., Yamamoto, S., 2017, “L483: Warm Carbon-chain Chemistry Source Harboring Hot Corino Activity”, *The Astrophysical Journal*, 837, 174, 15 pp
- 19) Michikoshi, S., Kokubo, E., 2017, “Simulating the Smallest Ring World of Chariklo”, *The Astrophysical Journal Letters*, 837, Issue 1, article id. L13, 7 pp
- 20) Huang, J., Oberg, K.I., Qi, C., Aikawa, Y., Andrews, S., Furuya, K., Guzman, V.V., Loomis, R.A., van Dishoeck, E.F., Wilner, D.J., 2017, “An ALMA survey of DCN/H<sup>13</sup>CN and DCO<sup>+</sup>/H<sup>13</sup>CO<sup>+</sup> in protoplanetary disks”, *The Astrophysical Journal*, 835, 231, 29 pp
- 21) Yamauchi, D., Ichiki, K., Kohri, K., Namikawa, T., Oyama, Y., Sekiguchi, T., Shimabukuro, H., Takahashi, K., Takahashi, T., Yokoyama, S., Yoshikawa, K., 2016, “Cosmology with the Square Kilometre Array by SKA-Japan”, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 68, id.R2 19 pp
- 22) Bieri, R., Dubois, Y., Rosdahl, J., Wagner, A. Y., Silk, J., & Mamon, G. A. 2017 “Outflows Driven by Quasars in High-Redshift Galaxies with Radiation Hydrodynamics” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 464, 1854–1873,
- 23) Drozdovskaya, M. N., Walsh, C., van Dishoeck, E. F., Furuya, K., Marboeuf, U.,

- Fakultat, P., Thiabaud, A., Harsono, D., Visser, R., 2016, “Cometary ices in forming protoplanetary disc midplanes”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 462, 977-993
- 24) Michikoshi, S., Kokubo, E., 2016, “Galactic Spiral Arms by Swing Amplification”, *The Astrophysical Journal*, 821, 35
- 25) Michikoshi, S., Kokubo, E., 2016, “Swing Amplification of Galactic Spiral Arms: Phase Synchronization of Stellar Epicycle Motion”, *The Astrophysical Journal*, 823, 121
- 26) Michikoshi, S., Kokubo, E., 2016, “Planetesimal Formation by Gravitational Instability of a Porous-Dust Disk”, *The Astrophysical Journal Letters*, 825, 28
- 27) Michikoshi, S., Kokubo, E., “Dynamics of Porous Dust Aggregates and Gravitational Instability of Their Disk”, *The Astrophysical Journal*, in press
- 28) Mukherjee, D., Bicknell, G. V., Sutherland, R., Wagner, A., 2016, “Relativistic jet feedback in high-redshift galaxies – I. Dynamics,” *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 461, 1, 967–983
- 29) Furuya, K., Drozdovskaya, M. N., Visser, R., van Dishoeck, E. F., Walsh, C., Harsono, D., Hincelin, U., Taquet, V., 2017, “Water delivery from cores to disks: Deuteration as a probe of the prestellar inheritance of H<sub>2</sub>O”, *Astronomy and Astrophysics*, 599, A40
- 30) Akamatsu, H., Fujita, Y., Akahori, T., Ishisaki, Y., Hayashida, K., Hoshino, A., Mernier, F., Yoshikawa, K., Sato, K., Kaastra, J.S. “Properties of the cosmological filament between two clusters: A possible detection of a large-scale accretion shock by Suzaku”, *Astronomy & Astrophysics*, in press
- 31) Kitayama, T., Ueda, S., Takakuwa, S., Tsutsumi, T., Komatsu, E., Akahori, T., Iono, D., Izumi, T., Kawabe, R., Kohno, K., Matsuo, H., Ota, N., Suto, Y., Takizawa, M., Yoshikawa, K., “The Sunyaev-Zel'dovich Effect at Five Arc-seconds: RXJ1347. 5-1145 Imaged by ALMA”, *Publications of Astronomical Society Japan*, in press.
- 32) Taquet, V., Furuya, K., Walsh, C., van Dishoeck, E. F., “A primordial origin for molecular oxygen in comets: A chemical kinetics study of the formation and survival of O<sub>2</sub> ice from clouds to disks”, accepted by *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*

## B) 査読無し論文

- 1) Tagawa, H., Umemura, M., 2017, “Rapid Mergers in a Mixed System of Black Holes and Neutron Stars”, 14th International Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC2016) 020803
- 2) Kirihara, T., Miki, Y., Mori, M., Kawaguchi, T., & Rich, R. M. “Multilateral Study of the Andromeda Giant Stream: Implications for the progenitor, its MBH, and the M31 halo”, 2016, accepted to proceedings of IAU Symposium 321

- 3) Igarashi, A., Mori, M., Nitta, S., “A new concept of transonic galactic outflows and its application to the Sombrero galaxy”, accepted to Proceedings of IAU Symposium 321 "Formation and evolution of galaxy outskirts"
- 4) Furuya, K., Drozdovskaya, M. N., Walsh, C., van Dishoeck, E. F., “Water transport from collapsing prestellar cores to forming disks: evolution of the HDO/H<sub>2</sub>O ratio”, EAS publication series, 75-76, 259-263 (2016)

## (2) 国際会議発表

### A) 招待講演

- 1) Umemura, M., “HPC at CCS and Latest Outcomes in Computational Astrophysics”, Edinburgh EPCC-Tsukuba CCS Collaboration Workshop, June 16-17, 2016, Edinburgh, UK
- 2) Furuya, K., “Formation and isotope fractionation of interstellar ices, and their delivery to a forming disk”, Workshop on Interstellar Matter 2016, October 19-21, 2016, Hokkaido, Japan
- 3) Aikawa, Y. “Chemical modelling of protoplanetary disks”, European Conference on Laboratory Astrophysics ECLA2016 “Gas on the Rocks”, November 21 - 25, 2016, CSIC, Madrid, Spain
- 4) Furuya, K. “Water delivery from cores to disks”, ISSI meeting “From qualitative to quantitative: Exploring the early solar system by connecting comet composition to protoplanetary disk models”, December 5-9, 2016, Bern, Switzerland
- 5) Furuya, K. “Isotopic fractionation in interstellar molecules”, IAU symposium 332 Astrochemistry VII-Through the Cosmos from Galaxies to Planets”, March 20-24, 2017, Puerto Varas, Chile
- 6) Umemura, M., "Novel Challenge for Radiative Transfer Solver in Astrophysics", Inverse Problems and Medical Imaging, Feb 13-17, 2017, University of Tokyo, Japan
- 7) Wagner, A. Y., “Triggering Star-formation” 2016 Oort Workshop: AGN Feedback, May 30 – June 1. 2016 Leiden Observatory, Leiden, Netherlands

### B) 一般講演

- 1) Miki, Y., “GOTHIC: Gravitational Oct-Tree code accelerated by Hierarchical time step Controlling”, Perspectives of GPU computing in Science, September 26-28, 2016, Rome, Italy
- 2) Michikoshi, S., “Planetesimal Formation by Gravitational Instability of a Porous Dust Disk”, Japan-Germany Planet and Disk Workshop, September 25-30, 2016, Okinawa, Japan

- 3) Yoneda, H., Tsukamoto, Y., Furuya, K., Aikawa, Y. "Chemistry in a forming disk: main accretion phase", Workshop on Interstellar Matter 2016, October 19-21, 2016, Hokkaido, Japan
- 4) Tanaka, S., "Higher order advection scheme for Vlasov Simulation", The 7th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, October 24-28, 2016, Beijing, China
- 5) Kobayashi, N., Enohata, K., Ishihara, T., Shiraishi, K., Umemura, M. "Rapid Dust Coagulation expedited by Turbulent Clustering in Protoplanetary Disks", Formation of the Solar System and the Origin of Life, Feb 20-24, 2017, Leiden, Netherlands
- 6) Sato, A., Shigeta, Y., Shoji, M., Kamiya, K., Shiraishi, K., Yabana, K., Umemura, M. "Ly alpha Irradiation in the Early Phase Milky Way Galaxy Responsible for Initiating Homochirality", Formation of the Solar System and the Origin of Life, Feb 20-24, 2017, Leiden, Netherlands

### (3) 国内学会・研究会発表

#### A) 招待講演

- 1) 相川祐理「ALMA 観測でとらえた原始星コアと原始惑星系円盤の揮発性物質」, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 / アルマによる惑星科学の新展開 (2016 年 5 月 22 日, 幕張メッセ)
- 2) 相川祐理「星・惑星系形成領域の分子進化: 星間物質から惑星物質へ」, 日本地球惑星科学連合 2016 年大会 スペシャルレクチャー (西田賞受賞記念講演) (2016 年 5 月 24 日, 幕張メッセ)
- 3) 森正夫, "Numerical simulations of galaxy formation and evolution", Tsukuba CCS-LBNL Collaboration Workshop (2016 年 6 月 12~13 日, 筑波大学計算科学研究センター)
- 4) 梅村雅之, 「Mergers of Accreting Stellar Mass Black Holes and Implications for GW150914」, 新学術領域「重力波天体の多様な観測による宇宙物理学の新展開」研究会 (2016 年 7 月 30 日, 広島大学, 東広島)
- 5) 相川祐理「デブリ円盤での化学反応」(招待講演) ALMA ワークショップ: デブリ円盤から太陽系へ」研究会 (2016 年 8 月 8~9 日, 千葉工大東京スカイツリータウンキャンパス)
- 6) 梅村雅之「巨大ブラックホール起源と重力波観測」, 企画セッション「重力波初検出の意義と重力波天文学の幕開け」, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14-16 日, 愛媛大学, 松山)

- 7) 相川祐理「星・惑星系形成領域の星間化学」, シンポジウム「ダスト形成から惑星の多様性へ: 宇宙の物質進化における物理と化学のカップリング」(2017年3月8日~9日, 東京大学小柴ホール)
- 8) 吉川耕司「「多次元ブラソフソルバーの開発」, JICFuS シンポジウム「素粒子・原子核・宇宙「京からポスト京に向けて」」(2017年2月16~17日, 筑波大学東京キャンパス文京校舎)

## B) その他の発表

- 1) 相川祐理「原始惑星系円盤の化学組成: 最近の ALMA 観測の成果」宇宙生命計算科学連携拠点第2回ワークショップ(2016年4月27~28日, 筑波大学計算科学研究センター)
- 2) 古家健次「星・惑星系形成領域における水の重水素比」宇宙生命計算科学連携拠点第2回ワークショップ(2016年4月27~28日, 筑波大学計算科学研究センター)
- 3) 安部牧人, 3次元輻射流体力学による球状星団形成モデルの研究, 第三回銀河進化研究会(2016年6月1~3日, 東北大学)
- 4) 藤原隆寛, 銀河形成シミュレーションに向けて: SPH法の性能比較, 第三回銀河進化研究会(2016年6月1~3日, 東北大学)
- 5) 相川祐理「惑星系形成領域の有機物進化」, 日本地球惑星科学連合2016年大会/計算科学による惑星形成・進化・環境変動研究の新展開(2016年5月24日, 幕張メッセ)
- 6) 相川祐理「Molecular evolution in a forming disk」新領域「宇宙分子進化」研究会(7月11~12日, 北海道大学低温科学研究所)
- 7) 道越秀吾, 小久保英一郎, 「低密度ダストの重力不安定による微惑星形成」, 日本惑星科学会2016年秋季講演会(2016年9月12~14日, ノートルダム清心女子大学, 岡山)
- 8) 古家健次, Water deuteration as a probe of the origin of H<sub>2</sub>O in protoplanetary disks, 日本天文学会2016年秋季年会(2016年9月14~16日, 愛媛大学, 松山)
- 9) 道越秀吾, スイング増幅による渦状腕構造の形成とエピサイクル運動の位相同期, 日本天文学会2016年秋季年会(2016年9月14~16日, 愛媛大学, 松山)
- 10) 五十嵐朱夏, 遷音速銀河風モデルによる星形成率と銀河風速度の関係, 日本天文学会2016年秋季年会(2016年9月14~16日, 愛媛大学, 松山)

- 11) 桐原崇亘, M31 North-Western ストリームの母矮小銀河の軌道探査, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 12) 加藤一輝, Cusp-core 問題における周期的な SN フィードバックによる重力場変動と DMH の中心密度分布の関連性, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 13) 藤原隆寛, MUSCL 法を用いた Godunov SPH 法の高次精度化, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 14) 高橋芳太, 梅村雅之, 「ARTIST コードによるブラックホール時空での一般相対論的輻射輸送シミュレーション」, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 15) 小林直樹, 江野畑圭, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 「微惑星形成過程解明のための乱流の大規模直接数値計算と粒子追跡」, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 16) 濱端航平, 江野畑圭, 石原卓, 白石賢二, 梅村雅之, 「乱流の直接数値計算を用いた原始惑星系円盤ダストの衝突付着成長シミュレーション」, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 17) 郷田直輝, 小林行泰, 辻本拓司, 矢野太平, 上田暁俊, 宇都宮真, 鹿島伸悟, 亀谷收, 浅利一善, 山田良透, 吉岡諭, 穂積俊輔, 梅村雅之, 西亮一, 浅田秀樹, 長島雅裕, 石村康生, 中須賀真一, 酒匂信匡, ほか JASMINE ワーキンググループ一同, 「Nano-JASMINE と小型 JASMINE の進捗状況概要」, 日本天文学会 2016 年秋季年会 (2016 年 9 月 14~16 日, 愛媛大学, 松山)
- 18) 藤原隆寛, 森正夫, 「MUSCL-Godunov-SPH 法への流速制限関数の実装」, 日本流体力学会 2016 年会 (2016 年 9 月 26~28 日, 名古屋工業大学, 名古屋)
- 19) 梅村雅之, 「CCS におけるポスト「京」重点課題・萌芽的課題について」, 第 8 回「学際計算科学による新たな知の発見・統合・創出」ー発展する計算科学と次世代の計算機ー, 2016 年 10 月 17 日~18 日, 筑波大学 大学会館, つくば市
- 20) 高水裕一, 前田恵一, Bubble universe, 第 26 回一般相対論および重力」研究会 (2016 年 10 月 24 日~28 日, 大阪市立大学, 大阪)
- 21) 櫻井 幹記, 古谷 眸, 岡本 直也, 石原 卓, 圧縮性乱流直接数値シミュレーション手法の検討, 第 30 回数値流体力学シンポジウム(2016 年 12 月 12~14 日, タワーホール 船堀, 東京)

- 22) 五十嵐朱夏, 星形成銀河からのアウトフローの理論モデル, Galaxy-IGM 研究会(2016年 12月 5~7日, 信州大学, 長野)
- 23) 梅村雅之, 久喜奈保子, 安部牧人, Ken. Czaprynski, 「Hybrid Scheme of Ly $\alpha$  Radiative Diffusion and Transfer」, Galaxy-IGM 研究会 (2016年 12月 5~7日, 信州大学, 長野)
- 24) 安部牧人, SEURAT: SPH scheme extended with UV line radiative transfer, Galaxy-IGM 研究会 (2016年 12月 5~7日, 信州大学, 長野)
- 25) 田川寛通, 梅村雅之, 「多重 BH の合体による GW150914 の説明」, 理論懇シンポジウム(2016年 12月 20~22日, 東北大学, 仙台)
- 26) 桐原崇亘, 「M31 におけるマイナーマージャー現象を用いた銀河の内部構造の研究」, 理論懇シンポジウム(2016年 12月 20~22日, 東北大学, 仙台)
- 27) 吉川耕司「重元素の超微細構造線によるダークバリオンの観測可能性」, 第4回「銀河進化と遠方宇宙」研究会, (2017年 1月 7日~9日, アーデンホテル阿蘇, 熊本)
- 28) 道越秀吾「Chariklo の二重環の構造と衛星との相互作用による長期進化」, 第5回衛星星系研究会: 冥王星系の起源 (2017年 1月 25~26日, 東京工業大学, 東京)
- 29) 道越秀吾, 小久保英一郎, 「ケンタウルス族 Chariklo の環の構造」, 日本天文学会 2017年春季年会 (2017年 3月 15~18日, 九州大学, 福岡)
- 30) 五十嵐朱夏, 森正夫, 新田伸也, 「銀河風の遷音速モデルと星形成銀河への応用」, 日本天文学会 2017年春季年会 (2017年 3月 15~18日, 九州大学, 福岡)
- 31) 渡邊歩, 吉川耕司, 岡本崇, (「重元素の超微細構造線を用いた中高温銀河間ガスの観測可能性について」, 日本天文学会 2017年春季年会 (2017年 3月 15~18日, 九州大学, 福岡)
- 32) 藤原隆寛, 森正夫, 「Integral Approach による, Density Independent SPH 法と Godunov SPH 法の改良」, 日本天文学会 2017年春季年会 (2017年 3月 15~18日, 九州大学, 福岡)
- 33) 井上昭雄, 長谷川賢二, 石山智明, 矢島秀伸, 清水一紘, 梅村雅之, 今野彰, 播金優一, 澁谷隆俊, 大内正己, 「宇宙再電離期のライマン  $\alpha$  輝線銀河シミュレーションとすばる Hyper Suprime-Cam 探査結果の比較」, 日本天文学会 2017年春季年会 (2017年 3月 15~18日, 九州大学, 福岡)
- 34) 安部牧人, 「高赤方偏移宇宙の Ly $\alpha$  輝線銀河と Ly $\alpha$  光子の輻射輸送」, 第2回宇宙史サロン (2017年 3月 21日, 筑波大学, 茨城)



#### (4) 著書, 解説記事等

- 1) 梅村雅之, 福江純, 野村英子著, シリーズ<宇宙物理学の基礎>「輻射輸送と輻射流体力学」, 日本評論社, P1-P396, 2016年12月25日
- 2) 梅村雅之, 「超巨大ブラックホール」, Newton 別冊シリーズ, 2016, 8月25日
- 3) 相川祐理, 「水素の科学 第1回水素とは何か?」, Newton 11月号, 2016年9月26日
- 4) 田中賢, 「宇宙の大規模構造の謎に迫る「宇宙論的ブラソフシミュレーション」の高次精度化に挑戦」月刊 JICFuS, 2016年11月22日
- 5) 相川祐理, 「ALMA による原始惑星系円盤の観測」, 天文月報 4月号, 2016年3月20日

#### 7. 異分野間連携・国際連携・国際活動等

##### 【宇宙生命計算科学連携 (CAB)】

##### 1) 星間アミノ酸部会

宇宙・生命分野間連携により, 星間空間におけるアミノ酸前駆体ならびにアミノ酸の生成過程についての量子力学計算を進めた。

##### 2) 宇宙乱流部会

名古屋大学工学研究科乱流グループとの協働により, 原始惑星系円盤におけるダストと乱流の相互作用による微惑星形成過程を, ナビエ・ストークス方程式の直接計算により探究した。

##### 【国際連携】

- 1) CCS-LBNL Lawrence Berkeley National Laboratory Joint Meeting 2016, CCS, University of Tsukuba, Tsukuba, Japan (May 12-13, 2016) (Umemura, Mori)
- 2) Edinburgh EPCC-Tsukuba CCS Collaboration Meeting 2016, EPCC, University of Edinburgh, Edinburgh, UK (June 16-17, 2016) (Umemura)

#### 8. シンポジウム, 研究会, スクール等の開催実績

- 1) 「宇宙生命計算科学連携拠点 第2回ワークショップ」, 2016年4月27日, 28日, 筑波大学計算科学研究センターワークショップ室, つくば
- 2) ポスト京・萌芽的課題「惑星科学」キックオフWS  
2016年9月19日, 神戸大学 先端融合研究環統合研究拠点, 神戸

3) 「天体形成研究会」

2016年10月21日～22日，つくば国際会議場 小会議室 303，つくば



4) “Workshop on Interstellar Matter 2016”, 2016年10月19日～21日

北海道大学低温科学研究所，札幌

5) 「銀河・銀河間物質に関するワークショップ」

2016年12月5日～7日，信州大学，松本

6) 「初代星・初代銀河研究会 2016」

2016年10月25日～27日，金沢歌劇座，金沢市

7) 「超巨大ブラックホール研究推進連絡会」第4回ワークショップ

2016年12月9日～10日，東京大学天文学教育研究センター，三鷹市

8) ポスト「京」萌芽的課題・計算惑星 第1回 公開シンポジウム

「惑星の起源・進化と環境変動の解明を目指して」

2017年3月9日，神戸大学 先端融合研究環統合研究拠点，神戸

## 9. 管理・運営

組織運営や支援業務の委員・役員の実績

・梅村雅之

【本部】

教育研究評議会委員

人事企画委員会委員  
任用部会委員  
研究推進会議委員  
情報環境委員会委員  
全学年俸制教員評価実施委員会委員

【系・センター】

計算科学研究センター センター長  
計算科学研究センター 運営委員会委員長  
計算科学研究センター 人事委員会委員長  
計算科学研究センター 宇宙物理研究部門主任  
計算科学研究センター 運営協議会委員  
計算科学研究センター 研究企画室委員  
数理物質系人事委員会総会委員  
物理学域 運営委員会委員  
物理学域 宇宙物理理論グループ長

・相川祐理

【系・センター】

計算科学研究センター 運営委員会委員  
計算科学研究センター 人事委員会委員  
物理学域 運営委員会委員

・森正夫

【全学】

ハラスメント防止対策委員

【系・センター】

計算科学研究センター 共同研究委員会学内委員  
計算基礎科学連携拠点企画チーム  
学際計算科学連携室  
JCAHPC 技術審査委員会委員  
PPX システム調達仕様策定委員  
物理学域図書委員会委員

## 10. 社会貢献・国際貢献

・梅村雅之

竹園東小学校講演会「宇宙の旅」，2016年11月29日  
日本天文学会欧文研究報告編集顧問

国立天文台理論専門委員会委員長

・相川祐理

日本天文学会代議員

日本天文学会欧文研究報告編集員

IAU Organizing Committee Member of Commission H2 Astrochemistry

“Early Phase of Starformation 2016” Scientific Advisory Committee

“Water in the Universe” SOC

## 11. その他

海外長期滞在, フィールドワークなど