

## II. 宇宙物理研究部門

### 1. メンバー

教授	大須賀 健
准教授	森 正夫、矢島 秀伸、吉川 耕司
助教	Wagner Alexander、福島 肇、朝比奈 雄太
研究員	小川 拓未、曾我 健太、Park Hyunbae、堀江 秀、 Huang Jiahui、松木場 亮喜、小幡 真弓、 Hu Haojie (JSPS 外国人特別研究員)
学生	大学院生 22 名、学類生 1 名、研究生 1 名

### 2. 概要

本年度、当グループは、ブラックホール超臨界降着流の大局構造の研究、一般相対論的ボルツマン輻射輸送計算を用いた超臨界降着流の X 線時間変動の研究、星間空間を浮遊するブラックホールへのガス降着の研究、キラル有機分子の鏡像異性体過剰を引き起こす紫外線円偏光波生成の研究、ライマン  $\alpha$  光の円偏光生成とホモキラリティ問題、原始惑星系円盤における乱流とダスト成長、暗黒物質サブハローと M31 恒星ストリームの相互作用、Dark Matter Sub-halo の力学進化、ダークマターサブハロー衝突によるダークマター欠乏銀河の形成過程、原始銀河団形成シミュレーション、生体光拡散トモグラフィーの数値的研究、スーパーコンピュータ富岳を用いた宇宙大規模構造におけるニュートリノの数値シミュレーション、宇宙大規模構造形成に対するニュートリノの力学的影響、星団形成における輻射流体力学過程の研究、を行った。

### 3. 研究成果

#### 強磁場ブラックホールジェットの電波イメージの研究

活動銀河核 (AGN) のジェット形成機構は長年の研究対象であるが、磁場による加速メカニズムの有効性が示唆されている一方で、決定的な証拠は得られていない。本研究では、強磁場ジェットを電波で観測した際にどのような撮像イメージが得られるかを明らかにするため、準解析的に構築した強磁場ジェットモデルに対して、我々が独自に開発した一般相対論的輻射輸送計算コード RAIKOU を用いて模擬観測を実施した。その結果、ジェット根本に 4 つのリング構造が現れることを初めて明らかにした。明るいリングはジェットの分離面 (物質の生成面) に対応しており、将来の高解像度電波観測で検出できれば、ジェットの加速機構とジェットへの物質の供給機構の理解を大きく前進させると期待される。

### 超エディントン降着によるブラックホール成長の可能性の研究

銀河中心に存在する巨大ブラックホールの形成機構の一つとして、ブラックホールへの超エディントン降着が提案されているが、Ly  $\alpha$  光による輻射圧が降着を妨げる可能性があり、その影響は十分に理解されていない。そこで本研究では、ボンディ降着流における Ly  $\alpha$  光の輻射輸送を考慮した計算を行い、輻射力の影響を定量的に評価した。その結果、超エディントン降着を成立させるために必要なガス密度とブラックホール質量の積の下限値が、Ly  $\alpha$  光を無視した場合に比べて数倍から数十倍に増加することが判明した。これは、Ly  $\alpha$  光の影響により超臨界降着によるブラックホールの急速成長が起こりにくくなることを示しており、ブラックホール形成初期段階における重要な制約となる。

### 超高輝度 X 線パルサー (ULXP) の磁場構造の研究

超高輝度 X 線パルサー (ULXP) は、磁化された中性子星への超エディントン降着によって駆動されると考えられているが、磁場構造や降着流の詳細は未解明である。本研究では、双極子および四重極子磁場を持つ中性子星への超エディントン降着流を対象に、一般相対論的輻射磁気流体力学 (GR-RMHD) シミュレーションを実施した。その結果、双極子磁場が卓越する場合には極付近に降着柱が、四重極子磁場が卓越する場合には赤道面付近に降着帯が形成されることが判明した。観測との比較から、系内の ULXP Swift J0243.6+6124 は約  $2 \times 10^{13} \text{G}$  の四重極子磁場を持ち、双極子磁場は  $4 \times 10^{12} \text{G}$  以下である可能性が示唆された。

### ミッシングサテライト問題とダークマターサブハローの衝突頻度

銀河形成の標準モデルであるコールドダークマターによる階層的構造形成論では、銀河には恒星質量の約 100 倍以上のダークマターが存在していると考えられており、膨大な観測結果がそれを示唆している。一方で、コールドダークマターモデルには、理論と観測の深刻な矛盾が指摘されている。最新の宇宙論的銀河形成シミュレーションによると、銀河スケールのハローには、恒星成分をほとんど有しないダークサテライトの存在が示唆されている。しかしながら、そのような天体は未だ観測されていない。本研究では、解析的モデルと数値シミュレーションを用いてダークマターサブハロー同士の衝突現象がそのようなダークサテライトの存在を示す可能性を検討した。高精度宇宙論的  $N$  体シミュレーションを用いた解析では、銀河系程度の質量をもつ宿主ハローに付随するサテライトハローでは、100 Myr あたり数回程度のサブハロー衝突が発生することを示した。

### ダークマターハローのカスプコア問題とユニバーサルスケーリング則

銀河をとりまくダークマターハローは、さまざまな観測パラメータ間で強い相関関係を示しており、「ダークマターハローのスケーリング関係」として知られている。しかし、その起

源は未解明のままである。我々は、コールドダークマターモデルに基づく宇宙論的  $N$  体シミュレーションから導かれるダークマターハローの中心集中度とダークマターハロー質量の相関関係 ( $c$ - $M$  関係) を利用して、ダークマターハローの表面質量密度、最大回転速度、スケール半径などの他の物理量間の理論的なスケールリング関係を導き出した。そして、理論的なスケールリング関係とさまざまな質量スケールでの観測されたスケールリング関係を比較することにより、矮小銀河や通常の銀河で観測されるスケールリング関係がダークマターハローの  $c$ - $M$  関係に由来することが分かった。さらに、この理論的なスケールリング関係は、銀河団でも成立することを予測した。さらに、我々はコールドダークマターハローで起こると考えられている「カuspからコアへの遷移」の影響を組み込んだ新しい理論的なスケールリング関係を導きだした。この遷移は、星形成や超新星爆発、その他のバリオン過程によるフィードバックメカニズムによって引き起こされ、その遷移はダークマターハローの質量が  $10^{11}$  太陽質量程度で発生することが明らかになった。

### Simultaneous Formation of the Andromeda Giant Southern Stream and S substructures

近年の高精度な大規模イメージングと分光観測により、Andromeda Giant Southern Stream (AGSS) を含む M31 のハロー領域における重元素の空間分布が明らかになってきた。AGSS は中心から 100 kpc 以上にも渡って恒星が細長く分布する巨大な構造である。本研究では、progenitor の衝突前の重元素量の空間分布を仮定した  $N$  体シミュレーションの結果を用いて、AGSS 内の重元素量の空間分布を調査した。M31 中心から AGSS の動径方向に沿った重元素の分布に関する解析を行った結果、動径方向に関しては金属量勾配は認められず、progenitor が元々持っていた金属量勾配の制限はつけられなかったが、平均金属量に関しては  $[\text{Fe}/\text{H}] \approx -0.5$  という制限をつけることができた。AGSS の奥行き空間への拡がりや視線方向速度、それらとの重元素量分布との対応を解析した結果、AGSS とは別に Eastern Extent 及び Stream Cr に対応するような構造が見つかった。AGSS と Eastern Extent 及び Stream Cr の関係性については、Fardal et al. (2008) や、Kirihara et al. (2017) で議論されているが、今回の解析によりこの 2 つの構造が同じ衝突現象で形成された可能性を強く示唆するという結果をみいだした。

### Godunov Density Independent Smoothed Particle Hydrodynamics 法の開発

SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法は圧縮性流体を粒子法を用いて解く数値計算手法である。元々宇宙物理学分野で開発された手法だが、現在では宇宙物理シミュレーションだけではなく工学や医療、CG にも応用例がある。SPH 法では衝撃波を伴う流れを解くために、人口粘性という基礎方程式には表れない非物理的な項を導入する必要性があり、計算結果が人口粘性に大きく左右される場合がある事が本質的な問題とされている。Godunov SPH

(GSPH) 法は、SPH 法の相互作用計算の際に Riemann Solver (RS) を組み込んだ手法で、人工粘性を必要としないように SPH 法を改良したものである。さらに、SPH 法のデメリットとして、導出の際に密度が空間微分可能であると仮定しているため、物理的に密度不連続となる接触不連続面をうまく扱えずに非物理的な表面張力を発生させてしまうことが挙げられる。GSPH 法の場合でもこの問題は完全には解消されないことが我々の実験でわかっている。このデメリットへの対処法の一つとして、密度の代わりに圧力が空間微分可能であることを仮定している Density-Independent SPH (DISPH) 法が挙げられるが、依然として人工粘性項が必要である。そこで本研究では、DISPH 法に我々のオリジナルの方法で RS を組み込んだ Godunov Density-Independent SPH (GDISPH) 法を開発し、典型的なテスト問題を解くことで、その性能を調べた。結果、GDISPH 法が DISPH 法と同様に、接触不連続面の扱いが優れている事と、強い衝撃波も人工粘性項を導入する必要なく対処可能である事がわかり、その結果を学術論文に投稿した。

### 初期宇宙における大質量銀河のクラスタリング特性

本研究では、宇宙論的流体力学シミュレーションと輻射輸送計算を用いて、赤方偏移  $z = 14$  から  $z = 6$  にかけてのコマ型銀河団の前駆体における星形成および密度超過 ( $\delta$ ) の進化を調査した。シミュレーション結果は、これらの赤方偏移における観測された星質量-星形成率 ( $M_{\star}$ -SFR) 関係および  $\delta$  をよく再現している。原始銀河団シミュレーション解析によって以下のことがわかった。(1) 原始銀河団 (protocluster: PC) と平均密度場 (mean field: MF) の銀河は類似した  $M_{\star}$ -SFR 関係を示すが、PC 銀河はより高い  $M_{\star}$  および SFR を示す傾向がある。(2) 紫外線で明るい PC 銀河 ( $M_{UV} = -20$  mag) は、MF 銀河に比べて 2 等級以上高い UV 減光と、より浅い UV スロープを持つ。(3)  $\delta$  は赤方偏移とともに増加し、観測パ

ラメータに依存する (例: 観測体積  $\sim 3000$  cMpc<sup>3</sup>、観測感度  $M_{UV} = -17$  mag の場合、 $z = 14$  で  $\delta \sim 50$ 、 $z = 6$  で  $\delta \sim 3$ )。これらの結果は、PC 環境における星形成の増加が高い sSFR によるものではなく、大質量銀河の過密な分布によるものであることを示唆している。シミュレーションによる  $\delta$  は観測されている PC 候補 (コマ銀河団の前駆体の可能性あり) と整合する一方で、一部の MF 銀河も同程度の  $\delta$  を示す。そこで、 $\delta$  と最も質量の大きい銀河の  $M_{\star}$  を用いた、よりロバストな PC 同定手法を提案した。コマ型銀河団の前駆体に必要な  $M_{\star}$  の閾値は、 $z = 14$  で  $10^{7.1} M_{\odot}$  から  $z = 6$  で  $10^{10.2} M_{\odot}$  と推定される。最後に、JWST 観測との比較により、現在知られている最も高赤方偏移の銀河である GS-z14-0 および GS-z14-1 は、コマ型銀河団の前駆体である可能性が高いと結論づけた。

### 高精度な近赤外線癌診断に向けた円偏光輻射輸送シミュレーション

胃癌に着目し細胞のサイズ分布と時間依存性、線偏光、円偏光成分の変化を考慮した 3 次元輻射輸送モンテカルロ計算コードを開発した。胃癌の治療法として内視鏡治療を選択するかを決める際に、胃癌の浸潤深さが 1.5 mm を超えているかどうか重要な要素となるため、偏光を用いて胃癌の浸潤深さ 1.5 mm 以上を判別することを一つの目標として研究を進めた。偏光を用いて癌の浸潤深さをどの程度判別できるのかを調べるために、偏光の入射面からある厚さをもつ癌層を配置し、それより深い部分は正常層を配置するような 2 層構造を考えてシミュレーションを行った。入射波長  $1.0 \mu\text{m}$  で計算した結果、基本的には時間経過とともに DOCP は減少する傾向にあるが、ある時点で増加傾向に転じることが分かった。そのタイミングは癌層の厚みによって異なるので、その傾向を用いることで癌の浸潤深さを測定できることが確認できた。定量的に評価するために、計算ボックス内が全て癌細胞の場合と正常細胞の場合の計算結果の中間線と 2 層構造の計算結果の線の交点を調べた。結果として、癌層の厚みと DOCP の時間変化に相関が見られ、癌層の厚み  $d$  は中間線と交わる時間  $t$  に対してほぼ比例的な振る舞いを示すことが分かった。さらに、入射波長  $1.0 \mu\text{m}$  では胃癌の浸潤深さを 2.5 mm まで判別できることが分かった。

### GPU 上で稼働する AMR 法による自己重力流体コードの開発

星形成などの宇宙における天体形成の現象には、物理的な距離スケールが何桁も変わるものが多い。これらの現象をシミュレーションするために、格子法を用いた数値計算では、適宜格子を配置することで必要な場所の解像度を上げることができる、適合格子細分化法 (Adaptive mesh refinement: AMR 法) がひろく用いられている。一方、近年多くのスーパーコンピュータが搭載している GPU に対応した AMR 法を用いた計算コードは、現状ほとんどない。このような状況に対応するために、本研究では星・星団形成に関するシミュレーションを GPU 上で実行可能な、AMR 法を採用した自己重力流体コードの開発を行っている。このコードは、AMR 法を採用した自己重力磁気流体コードである SFUMATO (Matsumoto 2007) を基に再設計したコードである。本年度は、昨年度から引き続き開発を継続し、Multigrid 法を用いた自己重力計算や光速制限法とモーメント法を用いた輻射輸送計算、陽的な時間発展を採用した非平衡化学計算、星粒子などのシミュレーションに必要なモジュールを各々開発した。これにより、星団形成シミュレーションを実施する準備が整ったため、次年度には Miyabi などの GPU を搭載したスーパーコンピュータでの成果創出を実施する予定である。

### 星形成領域における Ly $\alpha$ 円偏光波生成 (宇宙生命計算科学連携)

アミノ酸には、鏡像異性体である L 型と D 型が存在し、実験においては等量が生成される。しかし、生命を構成するアミノ酸は L 型に限定されており、その理由は生命起源ともに、長年謎のままとなっている。その起源の候補として、先行研究において水素ライマン  $\alpha$  円偏光下の反応において、L 型もしくは D 型が選択的に生成される可能性が指摘されている。そこで、水素ライマン  $\alpha$  円偏光が宇宙空間でどれくらい存在するのか解明するために、星間空間中の磁場により整列したダスト粒子による光散乱について研究を進めている。本年度は昨年度から引き続き、実際の星形成環境で Ly $\alpha$  円偏光波が生成されるかを調べた。星団形成についての輻射磁気流体シミュレーションから得られた、ガス密度と磁場、そして電離水素の空間分布を用いて、偏光波生成を含んだモンテカルロ輻射輸送計算を行い、雲内部の各点を受ける円偏光波強度について導出することを可能とした。結果として、電離領域が拡大する段階において、雲内部の高密度ガス構造について、最大 1 パーセント程度の円偏光波を受けることが判明した。今後は、各時刻のスナップショットについても計算を行い、流体素片が受ける円偏光度の時間進化についても導出する予定である。

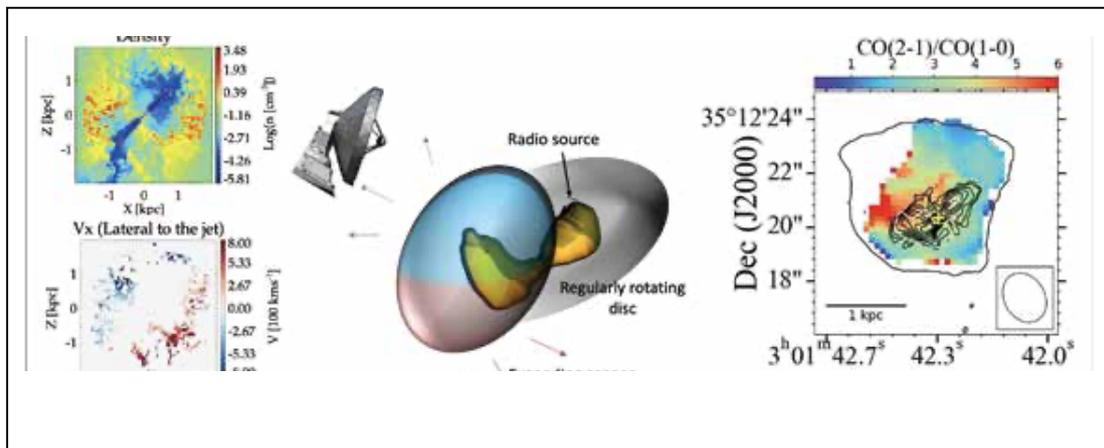
### Deducing the origin and nature of the fast knots in 3C 84 from magnetohydrodynamic considerations

We used observations of the Very Long Baseline Array (VLBA) to track the movement of the smallscale jet launched by the central supermassive black hole of the radio galaxy 3C 84. These observations were conducted at a frequency of 43 GHz over a period from November 2003 to June 2022. Based on these observations and insights from previous hydrodynamic simulations, we proposed various interpretations for the movements of components in the jet.

We focused on a bright knot in the jet called the C3 component, which appeared at the end of a jet section that was launched from the galaxy's core in 2003. We found that this C3 knot moved at a steady apparent speed of about 26% the speed of light ( $0.259 c$ ) during the entire observation period. Interestingly, we also discovered four new, smaller knots emerge from this C3 component. These new knots appeared to be moving faster than the original C3 knot. The last two of these new knots seemed to be moving faster than the speed of light, with apparent speeds up to about  $1.22 c$ . Our calculations show that the new knots are intrinsically moving faster than C3, rather than this being an effect of viewing angle.

One possible origin of the new knots is that the jet might be rapidly changing its direction, either randomly or due to precession. Another possibility is that the jet may have collided with a cloud of gas and may thereby have been split and deflected into several jet streams. Finally, it is also possible that the knots were launched by magnetic reconnection events.

This work was published in Kam et al. (2024, doi:10.3847/1538-4357/ad51dc).



☒ 1. Comparison of simulations and observations of the radio source B2 0258+35. The jet is blowing a strong bubble into the southern parts of the galaxy, increasing the CO(2-1) / CO(1-0) ratio there. Left: snapshots of simulation showing density (top) and velocity (bottom). Center: The geometry of the jets, radio bubbles, and galactic disc, with respect to the observer (telescope). Right: Observations of the CO(2-1) / CO(1-0) ratio.

### Deducing the origin and nature of the fast knots in 3C 84 from magnetohydrodynamic considerations

We used the NOEMA telescope to look at a nearby, young, and faint radio source B2 0258+35 by observing emission from CO(2-1) and interpreted these new observations with our state-of-the-art relativistic hydrodynamic simulations that match the jet orientation and power of the radio source. We had previously looked at this source using a different frequency (CO(1-0)) and found strong evidence that the powerful jets from the center of the galaxy were colliding with the surrounding gas. This collision was causing a large amount of the gas, about 75% of it near the center, to be pushed outwards in an outflow.

Our new observations with CO(2-1) showed even more complicated dynamics of the gas. We discovered that the jet on the southern side of the radio source is pushing out the molecular gas in the shape of a rapidly growing bubble. The gas in this bubble is moving at speeds up to  $400 \text{ km s}^{-1}$ .

We also noticed that the ratio of the light intensity between the CO(2-1) and CO(1-0) observations was much higher for the gas in this bubble and also in areas farther away from the jets. Other studies have shown that the central engine of the galaxy, the active galactic nucleus (AGN), in the host galaxy

NGC 1167, is not very active and is consuming very little material. Because of this, we believe that the high light ratios are due to the jets colliding with the gas and heating it up significantly.

Even though the radio jets are not very bright (with a power of  $1.3 \times 10^{44}$  erg s<sup>-1</sup>), they are the sole cause of these extreme gas motions. This is one of the clearest examples we have seen of a bubble of cold gas being pushed outwards in this type of object.

Our findings add to the growing evidence that even faint radio sources can significantly impact the dynamics and conditions of the cold gas in their host galaxies, which, in turn, can impact the conditions for forming new stars, highlighting the importance of faint, but very common radio sources.

This work was published in Murthy et al. (2025, doi:10.1051/0004-6361/202453139).

### **Self-Interacting Dark Matter (SIDM) の Boltzmann シミュレーション**

宇宙の構造形成における標準的なダークマターモデルであるコールドダークマターモデルの問題点を解決するための手段として、ダークマター同士の衝突・散乱を考慮した自己相互作用ダークマター (self-Interacting Dark Matter:SIDM) モデルが有力な候補として考えられている。SIDM モデルでは、ダークマターに相対速度に依存した散乱断面積を持たせることでダークマターハローの質量に応じてその密度プロファイルが観測に合うようになるが、既存の N 体シミュレーションでは速度空間のサンプリングが不十分なために散乱・衝突の効果を正確に取り入れた計算をすることが出来ていない。

衝突項をショットノイズの影響を受けずに数値計算するために、有限体積法に基づいて離散化したダークマターの分布関数を用いて衝突項を計算する必要があるが、速度空間の 5 重積分で表現されるため計算コストが極めて大きくなる。我々はこの衝突項の計算を高い計算性能・メモリバンド幅をもつ GPU を用いて高速化する研究を従来から行っている。2024 年度は分布関数の形状に応じて計算コストを最適化するための adaptive precision control の仕組みを導入し大幅な計算性能の向上を実現した。更に、ダークマターの分布関数を無衝突 Boltzmann 方程式 (Vlasov 方程式) に従って数値的に解く Vlasov シミュレーションのコードと組み合わせることで、世界で初めて 6 次元位相空間での Boltzmann 方程式の数値シミュレーションを実現し、ショットノイズの影響を受けない SIDM の数値シミュレーションが可能となった。

### **プラズマシミュレーションにおける量子計算の利用**

宇宙プラズマ現象の数値シミュレーションでは、大規模スーパーコンピュータを用いた高解像度・高精度な数値シミュレーションが行われてきた。しかし、大小さまざまな特徴的な空間的スケールが存在するため空間グリッドのステンシル数に対して必要となる計算資源が高次にスケールすることが根本的な課題である。

この問題を根本的に解決するための試みとして、量子アルゴリズムを用いた Vlasov 方程式の数値シミュレーションの研究を行った。具体的には Vlasov 方程式における多次元での数値移流スキームを量子特異値変換 (Quantum Singular Value Transformation; QSVT) を用いて量子計算のハミルトニアンに埋め込むことで、量子計算によって Vlasov 方程式の数値シミュレーションを行い、2 流不安定性などの計算することに成功した。

### 歳差運動する超臨界降着円盤の研究

恒星質量ブラックホールのエディントン光度を超える明るさで輝く、超大光度 X 線源 (ULXs) で 1-100 秒程度の光度の準周期振動が観測されており、その原因の 1 つとして歳差運動する超臨界降着円盤が考えられている。先行研究では降着率が低いことを仮定しており、ULXs のような明るい天体には適用できない。そこで、本研究では歳差運動する超臨界降着円盤の長時間計算を実施した。その結果、ジェットや輻射の放出方向が降着円盤の歳差運動とともに、歳差運動することを示した。その歳差運動の周期は約 10 秒程度であり、ULXs で観測された準周期振動を説明できる可能性を示した。また、光度が時間とともに、最大で数十倍以上大きくなり、その後減光していく様子も長時間計算によって確認することができた。

## 4. 教育

### 【学位論文】

#### <博士論文>

##### 1. 尾形絵梨花

Three-dimensional Radiation Hydrodynamics Simulations of Wandering Black Holes: Effects of Anisotropic Radiation Feedback in Dusty-Gas

#### <修士論文>

##### 1. 黒田裕太郎

輻射流体シミュレーションによる降着円盤の熱的不安定とラインフォース駆動型円盤風の時間変動の研究

##### 2. 上野航介

深層学習を用いたエディントンテンソルの推定：一般相対論的輻射磁気流体力学計算の高精度・高速化

##### 3. 松本凜

原始惑星系円盤への外部輻射の影響

4. 市村一晟  
近赤外線癌診断の高精度化に向けた時間依存型円偏光波輸送シミュレーション
5. 近藤謙成  
機械学習を用いた近赤外線イメージングによる脳出血診断の限界深度に関する研究
6. 山口未沙  
Simultaneous Formation of the Andromeda Giant Southern Stream and Eastern Extent
7. 湯浅拓宏  
Problems of Smoothed Particle Hydrodynamics and Approaches Towards Their Solutions
8. 山菅翔太郎  
GPU を用いた 6 次元 Boltzmann シミュレーションの高速化
9. 伊藤圭汰  
GPU と不揮発性メモリを用いた Vlasov シミュレーションの高度化

#### < 学士論文 >

1. 松藤勇希  
機械学習による輻射スペクトルからのブラックホール物理量の推定
2. 中尾颯吾  
一般相対論的輻射磁気流体力学計算による超臨界低角運動量ブラックホール降着流の研究: スリム円盤モデルとの比較
3. 小嶺龍生  
一般相対論的輻射輸送計算を用いたブラックホール降着円盤と相対論的ジェットが作り出す偏光 X 線の研究
4. 岩崎翔流  
ライマンアルファ輝線マップによる宇宙大規模フィラメント構造と矮小銀河形成の研究
5. 岡野海生  
グリア細胞アストロサイトの近赤外線反応特性の解明
6. 伊達皓星  
機械学習を用いた高赤方偏移銀河の物理量解析モデルの構築
7. 竹内大晟  
銀河衝突と流体力学相互作用の研究に向けて
8. 加藤杏実  
宇宙大規模構造における重力波の伝播

9. 東佑輝

Meshless 法を用いた数値流体力学計算の SIMD 並列化による高速化

**【集中講義】**

1. 大須賀健. 集中講義「降着の物理と輻射流体力学の基礎」、総合研究大学院大学. Oct. 21–22、2024.

**5. 受賞、外部資金、知的財産権等**

**受賞**

1. 大須賀健、第 29 回日本天文学会欧文研究報告論文賞、“The origins and impact of outflow from super-Eddington flow”、Takaaki Kitaki and Shin Mineshige and Ken Ohsuga and Tomohisa Kawashima、2025 年 3 月 18 日
2. 大須賀健、筑波大学 2024 Best Faculty Member、2025 年 2 月 17 日
3. 矢島秀伸、第 4 期 TRiSTAR フェロー、(研究課題: 大規模シミュレーションと AI の融合で創る革新的光医療診断)

**外部資金**

**<代表者>**

1. 富岳成果創出加速プログラム R5 年度～R7 年度：大須賀健  
「シミュレーションと AI の融合で解明する宇宙の構造と進化」  
(R6 年度 2709 万円／全体 8100 万円)
2. JST 創発的研究支援事業 R3 年度～R9 年度：矢島秀伸  
「宇宙物理輻射輸送計算で拓く新しい生体医用光学」  
(R6 年度 850 万円／全体 5916 万円)
3. 基盤研究 (A) (一般) R3 年度～R7 年度：大須賀健  
「超大規模計算と超高精度観測で解き明かすブラックホールジェットの駆動機構と多様性」  
(R6 年度 949 万円／全体 3256 万円)
4. 基盤研究 (A) R3 年度～R7 年度：矢島秀伸  
「高精度原始銀河団シミュレーションによる銀河形成と宇宙再電離研究の新展開」  
(R6 年度 793 万円／全体 3210 万円)
5. 基盤研究 (B) (一般) R3 年度～R6 年度：吉川耕司「宇宙大規模構造からひも解く CDM パラダイムを超えたダークマター」  
(R6 年度 140 万円／全体 1150 万円)

6. 基盤研究 (C) (一般) R6 年度～R9 年度：森正夫  
「Hunting Dark Satellites Problem: ダークマターパラドクスの解明」  
(R6 年度 120 万円／全体 360 万円)
7. 基盤研究 (C) R5 年度～R7 年度：朝比奈雄太  
「一般相対論的輻射磁気流体力学計算による歳差ジェットと周期的光度変動の解明」  
(R6 年度 70 万円／全体 210 万円)
8. 若手研究 R5 年度～R8 年度：福島肇  
「高赤方偏移銀河における球状星団形成過程の研究」  
(R6 年度 80 万円／全体 360 万円)

#### <分担者>

1. 基盤研究 (B) R6 年度～R9 年度：大須賀健 (代表者：高橋博之)  
「2 温度一般相対論的輻射磁気流体計算で解くブラックホール流の構造・電子温度・放射」  
(R6 年度分担金 30 万円／分担金全体 120 万円)
2. 基盤研究 (B) R3 年度～R6 年度：大須賀健 (代表者：高橋芳太)  
「高精度一般相対論的輻射輸送で探る超巨大ブラックホールの時空構造と起源」  
(R6 年度分担金 70 万円／分担金全体 190 万円)
3. 基盤研究 (B) R3 年度～R6 年度：朝比奈雄太 (代表者：高橋芳太)  
「高精度一般相対論的輻射輸送で探る超巨大ブラックホールの時空構造と起源」  
(R6 年度分担金 20 万円／分担金全体 80 万円)
4. 基盤研究 (B) R3 年度～R6 年度：矢島秀伸 (代表者：伊王野大介)  
「超高分解能サブミリ波観測による大質量銀河の形成過程の解明」  
(R6 年度分担金 10 万円／分担金全体 77 万円)
5. 基盤研究 (A) R4 年度～R8 年度：矢島秀伸 (代表者：大向一行)  
「宇宙初期の星団形成過程から解明する初代銀河の性質と巨大ブラックホールの起源」  
(R6 年度分担金 10 万円／分担金全体 250 万円)
6. 基盤研究 (B) R6 年度～R9 年度：矢島秀伸 (代表者：尾崎忍)  
「超大型望遠鏡での広視野面分光による宇宙構造進化の新描像獲得へ向けた先駆的技術開発」  
(R6 年度分担金 5 万円／分担金全体 20 万円)
7. 特別推進研究 R6 年度～R12 年度：矢島秀伸 (代表者：児玉忠恭)  
「究極のすばる望遠鏡へ：広視野補償光学による近赤外深探査で解明する銀河宇宙史」  
(R6 年度分担金 40 万円／分担金全体 280 万円)

8. 基盤研究 (B) R6 年度～R8 年度：森正夫（代表者：千葉証史）  
「銀河の恒星系動力学理論とその応用に基づく銀河暗黒物質の解明」  
(R6 年度分担金 80 万円／分担金全体 180 万円)
9. 富岳成果創出加速プログラム R5 年度～R7 年度：吉川耕司  
「シミュレーションと AI の融合で解明する宇宙の構造と進化」サブ課題 A-2「Vlasov シミュレーションによる宇宙大規模構造に対するニュートリノの力学的影響」（代表者：大須賀健）  
(R5 年度 25 万円)

## 6. 研究業績

### (1) 研究論文

#### A) 査読付き論文

1. Rohta Takahashi, Masayuki Umemura, Ken Ohsuga, Yuta Asahina, Rintaro Takeda, et al. “A Relativistic Formula for the Multiple Scattering of Photons”. *ApJ* 967.1, L10 (May 2024). P. L10. doi: [10.3847/2041-8213/ad409b](https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad409b). arXiv: [2405.10484\[astro-ph.HE\]](https://arxiv.org/abs/2405.10484).
2. Taichi Igarashi, Hiroyuki R. Takahashi, Tomohisa Kawashima, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, et al. “Radiation MHD Simulations of Soft X-Ray Emitting Regions in Changing Look AGN”. *ApJ* 968.2, 121 (June 2024). P. 121. doi: [10.3847/1538-4357/ad4703](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad4703).
3. Taiki Ogihara, Tomohisa Kawashima, and Ken Ohsuga. “Radio Images inside Highly Magnetized Jet Funnels Based on Semianalytic GRMHD Models”. *ApJ* 969.1, 22 (July 2024). P. 22. doi: [10.3847/1538-4357/ad429a](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad429a).
4. Kazuyuki Sugimura, Massimo Ricotti, Jongwon Park, Fred Angelo Batan Garcia, and Hidenobu Yajima. “Violent Starbursts and Quiescence Induced by Far-ultraviolet Radiation Feedback in Metal-poor Galaxies at High Redshift”. *ApJ* 970.1, 14 (July 2024). P. 14. doi: [10.3847/15384357/ad499a](https://doi.org/10.3847/15384357/ad499a).
5. Minchul Kam, Jeffrey A. Hodgson, Jongho Park, Motoki Kino, Hiroshi Nagai, et al. incl. Alexander Y. Wagner. “Evolution of the Termination Region of the Parsec-scale Jet of 3C 84 Over the Past 20 yr”. *ApJ* 970.2, 176 (Aug. 2024). P. 176. doi: [10.3847/1538-4357/ad51dc](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad51dc).
6. Yuta Asahina and Ken Ohsuga. “General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Simulations of Precessing Tilted Super-Eddington Disks”. *ApJ* 973.1, 45 (Sept. 2024). P. 45. doi: [10.3847/1538-4357/ad6cd9](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad6cd9).
7. Hiroto Yanagisawa, Masami Ouchi, Kimihiko Nakajima, Hidenobu Yajima, Hiroya Umeda, et al. incl. Hidenobu Yajima. “Balmer Decrement Anomalies in Galaxies at  $z \sim 6$  Found by

- JWST Observations: Density-bounded Nebulae or Excited H I Clouds?” *ApJ* 974.2, 180 (Oct. 2024). P. 180. doi: [10.3847/1538-4357/ad7097](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad7097).
8. Hiroto Yanagisawa, Masami Ouchi, Kuria Watanabe, Akinori Matsumoto, Kimihiko Nakajima, et al. incl. Hajime Fukushima, Hidenobu Yajima. “Strong He I Emission Lines in High N/O Galaxies at  $z \sim 6$  Identified in JWST Spectra: High He/H Abundance Ratios or High Electron Densities?” *ApJ* 974.2, 266 (Oct. 2024). P. 266. doi: [10.3847/1538-4357/ad72ec](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad72ec).
  9. Yi Xu, Masami Ouchi, Hidenobu Yajima, Hajime Fukushima, Yuichi Harikane, et al. “Dynamics of a Galaxy at  $z > 10$  Explored by JWST Integral Field Spectroscopy: Hints of Rotating Disk Suggesting Weak Feedback”. *ApJ* 976.1, 142 (Nov. 2024). P. 142. doi: [10.3847/1538-4357/ad82dd](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad82dd).
  10. Akihiro Inoue, Ken Ohsuga, Hiroyuki R. Takahashi, Yuta Asahina, and Matthew J. Middleton. “GR-RMHD Simulations of Super-Eddington Accretion Flows onto a Neutron Star with Dipole and Quadrupole Magnetic Fields”. *ApJ* 977.1, 10 (Dec. 2024). P. 10. doi: [10.3847/1538-4357/ad8885](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad8885).
  11. Takuhiro Yuasa and Masao Mori. “Novel hydrodynamic schemes capturing shocks and contact discontinuities and comparison study with existing methods”. *New A* 109, 102208 (July 2024). P. 102208. doi: [10.1016/j.newast.2024.102208](https://doi.org/10.1016/j.newast.2024.102208).
  12. Shogo Yoshioka, Shin Mineshige, Ken Ohsuga, Tomohisa Kawashima, and Takaaki Kitaki. “Radiation and outflow properties of super-Eddington accretion flows around various mass classes of black holes: Dependence on the accretion rates”. *PASJ* 76.5 (Oct. 2024). Pp. 1015–1025. doi: [10.1093/pasj/psae067](https://doi.org/10.1093/pasj/psae067).
  13. Yuka Kaneda, Masao Mori, and Koki Otaki. “A universal scaling relation incorporating the cuspto-core transition of dark matter halos”. *PASJ* 76.5 (Oct. 2024). Pp. 1026–1040. doi: [10.1093/pasj/psae068](https://doi.org/10.1093/pasj/psae068).
  14. Hajime Fukushima and Hidenobu Yajima. “Impacts of stellar wind and supernovae on star cluster formation: Origins of extremely high N/O ratios and multiple stellar populations”. *PASJ* 76.5 (Oct. 2024). Pp. 1122–1130. doi: [10.1093/pasj/psae074](https://doi.org/10.1093/pasj/psae074).
  15. Yuh Tsunetoe, Tomohisa Kawashima, Ken Ohsuga, and Shin Mineshige. “Survey of non-thermal electrons around supermassive black holes through polarization flips”. *PASJ* 76.6 (Dec. 2024). Pp. 1211–1227. doi: [10.1093/pasj/psae083](https://doi.org/10.1093/pasj/psae083).
  16. Takuya Mushano, Takumi Ogawa, Ken Ohsuga, Hidenobu Yajima, and Kazuyuki Omukai. “Impact of the  $\text{Ly}_\alpha$  radiation force on super-Eddington accretion on to a massive black hole”. *PASJ* 76.6 (Dec. 2024). Pp. 1260–1269. doi: [10.1093/pasj/psae086](https://doi.org/10.1093/pasj/psae086).

17. Yudai Kazuno, Masao Mori, Yuka Kaneda, and Koki Otaki. “Cosmological evolution of dark matter subhaloes under tidal stripping by growing Milky Way-like galaxies”. *PASJ* 76.6 (Dec. 2024). Pp. L39–L45. doi: [10.1093/pasj/psae098](https://doi.org/10.1093/pasj/psae098).
18. Suma Murthy, Raffaella Morganti, Tom Oosterloo, Dipanjan Mukherjee, Suude Bayram, et al. incl. Alexander Y. Wagner. “Cold gas bubble inflated by a low-luminosity radio jet”. *A&A* 694, A110 (Feb. 2025). A110. doi: [10.1051/0004-6361/202453139](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202453139).
19. Shingo Nozaki, Hajime Fukushima, Kazuki Tokuda, and Masahiro N. Machida. “Tracking Starforming Cores as Mass Reservoirs in Clustered and Isolated Regions Using Numerical Passive Tracer Particles”. *ApJ* 980.1, 101 (Feb. 2025). P. 101. doi: [10.3847/1538-4357/ada602](https://doi.org/10.3847/1538-4357/ada602).
20. Itsuki Ogami, Mikito Tanaka, Yutaka Komiyama, Masashi Chiba, Puragra Guhathakurta, et al. incl. Masao Mori. “The structure of the stellar halo of the Andromeda galaxy explored with the NB515 for Subaru/HSC - I. New insights on the stellar halo up to 120 kpc”. *MNRAS* 536.1 (Jan. 2025). Pp. 530–553. doi: [10.1093/mnras/stae2527](https://doi.org/10.1093/mnras/stae2527). arXiv: [2401.00668](https://arxiv.org/abs/2401.00668)[astro-ph.GA].
21. Nozomi Ishii, Takuya Hashimoto, Carl Ferkinhoff, Matus Rybak, Akio K. Inoue, et al. incl. Hidenobu Yajima. “Detection of the [O I] 63  $\mu\text{m}$  emission line from the  $z = 6.04$  quasar J20540005”. *PASJ* 77.1 (Feb. 2025). Pp. 139–148. doi: [10.1093/pasj/psae105](https://doi.org/10.1093/pasj/psae105).

## B) 査読無し論文

該当なし

## (2) 国際会議発表

### A) 招待講演

1. K. Ohsuga, A. Inoue, A. Utsumi, S. Yoshioka, H.R.Takahashi, et al. “Numerical Simulations of super-Eddington flows around BHs and magnetized NSs”. *Accretion Disks: The First 50 Years* (Bern, Switzerland, June 17–21, 2024).
2. T. Kawashima, Y. Tsunetoe, K. Ohsuga, M. Kino, Y. Mizuno, et al. “Horizon Scale Science with BHEX I”. *Black Hole Explorer Japan Workshop* (Tokyo, Japan, June 24–25, 2024).
3. Y. Tsunetoe, T. Kawashima, K. Ohsuga, M. Kino, Y. Mizuno, et al. “Horizon Scale Science with BHEX II”. *Black Hole Explorer Japan Workshop* (Tokyo, Japan, June 24–25, 2024).
4. T. Kawashima, K. Ohsuga, and H. R. Takahashi. “Multi-Wavelength Radiation Properties of Black Hole Accretion Flows and Relativistic Jets”. *AAPPS-DPP 2024* (Malacca, Malaysia, Nov. 3–8, 2024).

5. Hidenobu Yajima. “Bright Galaxies and Giant HII Bubbles in Protocluster Regions”. Galaxies and diffuse gas in large-scale overdense environments at high redshift (Sesto, Italy, July 15–19, 2024).
6. Hidenobu Yajima. “Protocluster Simulations: Formation of Bright Galaxies, Massive Black Holes, and Giant Ionized Bubbles”. ILR Workshop (Osaka, Japan, Sept. 25–27, 2024).

## B) 一般講演

1. Yuta Asahina, Ken Ohsuga, Takumi Ogawa, Akihiro Inoue, and Hiroyuki R. Takahashi. “General Relativistic Radiation MHD simulation of Precessing Tilted Super-Eddington Disks”. 16th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba International Congress Center, Oct. 7–8, 2024).
2. Hajime Fukushima and Hidenobu Yajima. “Formation of massive star cluster under radiative and stellar wind feedback: origins of extremely high N/O ratios and multiple stellar populations”. Cosmic Dawn at High Latitudes Conference (Stockholm University, Sweden, June 24–28, 2024).
3. Haojie Hu, Kohei Inayoshi, and Zoltan Haiman. “The evolutionary trend of high- $z$  SMBHs in coevolution with host galaxies regulated by super-Eddington accretion and outflows”. Probing the Genesis of Supermassive Black Holes: Emerging Perspectives from JWST and Expectation toward New Wide-Field Survey Observations (Lecture Hall, Kavli IPMU, Kashiwa, Japan, Nov. 18–21, 2024).
4. Michi Shinozaki, Masao Mori, and Yuka Kaneda. “Physical Conditions for the Cusp-Core Transition in Dark Matter Halos”. 16th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba International Congress Center, Oct. 18, 2024–Feb. 19, 2019).
5. A. Inoue, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, and Y. Asahina. “GR-RMHD Simulations of SuperEddington Accretion Flows onto a Neutron Star with Dipole and Quadrupole Magnetic Fields”. Black Hole Explorer Japan Workshop (Tokyo, Japan, June 24–25, 2024).
6. K. Akiyama et al. incl. K. Ohsuga. “The Japanese Vision for the Black Hole Explorer Mission”. SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation (Yokohama, Japan, June 16–21, 2024).
7. T. Kawashima et al. incl. K. Ohsuga. “Black Hole Spacetime and Properties of Accretion Flows and Jets Probed by Black Hole Explorer — Science Cases Proposed by BHEX Japan Team —”. SPIE Astronomical Telescopes + Instrumentation (Yokohama, Japan, June 16–21, 2024).

8. M. Takahashi, T. Kawashima, and K. Ohsuga. “Black hole spin estimation with time-variable observed image”. Black Hole Explorer Japan Workshop (Tokyo, Japan, June 24–25, 2024).
9. R. Kobayashi, H. R. Takahashi, A. Nukada, Y. Asahina, T. Boku, et al. “Accelerating General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamic Simulations with GPUs”. HPC ASIA 2025 (Taipei, Taiwan, Feb. 19–21, 2025).
10. E. Ogata, K. Ohsuga, and H. Fukushima. “Bondi-Hoyle-Lyttleton Accretion onto Seed Black Holes in the Early Universe”. Elucidating the Material Circulation in the Early Universe (Tokyo, Japan, Mar. 10–12, 2025).
11. Hyonbe Park and Hidenobu Yajima. “Impact of self-shielding minihalos on the Lya forest at high redshift”. Cosmic Dawn at High Latitudes Conference (Stockholm University, Sweden, June 24–28, 2024).
12. A. Y. Wagner. “Relativistic jet simulations of black-hole feedback”. 1st U IISc-Tsukuba Joint Workshop for Computer Sciences (HPC) (online, Mar. 26, 2025). url: <https://www.ccs.tsukuba.ac.jp/ut-iisc-ws/>.
13. H. Yajima. “Bright Galaxies and Giant HII Bubbles in Protoclusters at the Epoch of Reionization”. 10th Galaxy Evolution Workshop (Taipei, Taiwan, Aug. 6–9, 2024).
14. Hidenobu Yajima. “Development of the near-infrared imaging technique for cerebral hemorrhage by radiative transfer calculations”. 16th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (Epochal Tsukuba International Congress Center, Oct. 7–8, 2024).
15. Hidenobu Yajima. “Giant HII bubbles in protocluster regions”. Hongo 21cm workshop (Tokyo University, Oct. 3–4, 2024).
16. Hidenobu Yajima. “Radiative Transfer Simulations: Applications to Cosmic Reionization, Astrobiology, and Medical Science”. CCS-LBNL collaboration meeting (Lawrence Berkeley National Laboratory, Nov. 7–8, 2024).
17. Kohji Yoshikawa. “SIMD Acceleration of Particle-based hydrodynamic Simulation”. CCS-LBNL collaboration meeting (Lawrence Berkeley National Laboratory, Nov. 7–8, 2024).

### (3) 国内学会・研究会発表

#### A) 招待講演

1. 福島肇. “高赤方偏移銀河におけるクランプ構造内部の星・星団形成解明にむけて”. 銀河 IGM 研究会 2024 (弘前大学, 弘前, Aug. 19–22, 2024).
2. 大須賀健, 高橋博之, 川島朋尚, 朝比奈雄太, 井上壮大, et al. “ブラックホール (or 中性子星) 降着流と噴出流の数値シミュレーション～最近の成果と今後の発展～”.

- Exploring Extreme Transients: Emerging Frontiers and Challenges (京都大学, Aug. 5–9, 2024).
- 野村真理子, 大須賀健, 水本岬希, 工藤祐己, 和田桂一, et al. “X 線観測と理論研究の比較による円盤風の加速メカニズムと構造の解明に向けて”. 第 24 回高宇連研究会 + 博士論文発表会「XRISM の初期成果と未来への期待」(大阪大学, Mar. 5–7, 2025).
  - 矢島秀伸. “Research Frontier of Galaxy Formation and its Future”. TMT-ACCESS2024 (東北大学, June 10–12, 2024).
  - 矢島秀伸. “光輸送シミュレーションと AI による生体イメージング技術の開拓”. 脳機能とイメージングワークショップ (筑波大学, June 12, 2024).
  - 矢島秀伸. “Formation of super-distant galaxies with stellar feedback”. 高エネルギー宇宙物理学研究会 2024 (東北大学, Oct. 21–23, 2024).
  - 矢島秀伸. “原始銀河団シミュレーション: 大質量銀河形成, AGN, フィードバックについて”. AGN Feeding and Feedback in Massive Galaxies at the Centers of Galaxy Clusters (鹿児島大学, Nov. 11–13, 2024).
  - 矢島秀伸. “超遠方銀河形成メカニズム: シミュレーションの現状と問題”. 南極 12m テラヘルツ望遠鏡で明らかにする銀河とブラックホールの形成と進化 (国立極地研究所, 東京, Mar. 13–14, 2025).
  - 吉川耕司. “SIMD acceleration of particle-based simulation and Vlasov simulation on A64FX processor”. 第 14 回 A64FX 向けチューニング技術検討会 (オンライン, June 4, 2024).

## B) その他の発表

- 朝比奈雄太, 上野航介, 栗城琉偉, 松藤勇希, 大須賀健, et al. “機械学習を用いた一般相対論的輻射磁気流体力学計算の高速化”. 名大 ISEE 研究集会「情報科学技術との融合による太陽圏物理学の新展開」(名古屋大学, Sept. 9–10, 2024).
- 朝比奈雄太 and 大須賀健. “超臨界降着円盤の歳差運動による光度の時間変動”. 日本天文学会 2024 年秋季年会 (関西学院大学, Sept. 11–13, 2024).
- 朝比奈雄太 and 大須賀健. “歳差運動する超臨界降着円盤の一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーション”. 日本流体力学会年会 2024 (フォレスト仙台, Sept. 25–27, 2024).
- 朝比奈雄太 and 大須賀健. “歳差運動する超臨界降着円盤の長時間シミュレーション”. 令和6年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (国立天文台, Nov. 25–26, 2024).

5. 朝比奈雄太 and 大須賀健. “General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Simulations of Precessing Super-Eddington Disks”. 「富岳」成果創出加速プログラム・基礎科学合同シンポジウム 2024 (アーバンネット神田カンファレンス, Jan. 8–10, 2025).
6. 朝比奈雄太 and 大須賀健. “歳差運動する超臨界降着円盤の GR-RMHD 計算：トーラスサイズ依存性”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
7. 松本凜 and 福島肇. “原始惑星系円盤への外部輻射の影響”. 日本天文学会 2024 年秋季年会 (関西学院大学, Sept. 11–13, 2024).
8. 野崎信吾, 福島肇, 徳田一起, and 町田正博. “トレーサー粒子を実装した 3 次元流体力学数値計算に基づく星形成分子雲コアの同定とその時間発展”. 日本天文学会 2024 年秋季年会 (関西学院大学, Sept. 11–13, 2024).
9. 福島肇 and 松本倫明. “GPU 上で動く AMR 流体計算コードの開発と現状について”. 初代星・初代銀河研究会 2024 (信州大学, Nov. 11–13, 2024).
10. 福島肇 and 松本倫明. “GPU 上で実行可能な AMR 法による流体コードの開発”. 令和6年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (国立天文台, Nov. 25–26, 2024).
11. 松本凜 and 福島肇. “原始惑星系円盤の外部輻射への影響”. 令和6年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (国立天文台, Nov. 25–26, 2024).
12. 福島肇 and 松本倫明. “GPU 上で動く AMR 自己重力流体計算コードの開発”. 第37回理論懇シンポジウム (国立天文台, Dec. 24–26, 2024).
13. 松本凜 and 福島肇. “原始惑星系円盤への外部輻射の影響”. 第37回理論懇シンポジウム (国立天文台, Dec. 24–26, 2024).
14. 福島肇. “GPU を用いた AMR 法による自己重力流体計算コードの開発”. 次世代サブミリ波観測・シミュレーション計画検討会 2025 (御殿場, Feb. 19–21, 2025).
15. 福島肇. “GPU 上で稼働する輻射流体計算コードの開発と星団形成シミュレーション”. 第24回 High Performance Computing Physics (HPC-Phys) 勉強会 (オンライン, Mar. 7, 2025).
16. 福島肇 and 松本倫明. “GPU 上で動く AMR 法による自己重力流体コードの開発”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
17. 野崎信吾, 福島肇, 徳田一起, and 町田正博. “3 次元磁気流体数値計算で探る原始星への質量降着過程の定量的評価”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
18. 佐々木誇虎, 久野成夫, 福島肇, 藤田真司, and 野崎信吾. “分子雲の構造進化の理解に向けたシミュレーションと観測データの解析”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).

19. 堀江秀 and 矢島秀伸. “脳出血の自動診断に向けた機械学習アルゴリズムの開発”. *Optics & Photonics Japan 2024* (電気通信大学, Nov. 29, 2024).
20. 堀江秀. “数値シミュレーションで探る分子雲衝突による星形成と銀河進化”. 次世代サブミリ波観測・シミュレーション計画検討会 2025 (御殿場, Feb. 19–21, 2025).
21. 市村一晟, 矢島秀伸, and 曾我健太. “がん細胞のサイズ分布を考慮した近赤外円偏光波数値シミュレーション”. *Optics & Photonics Japan 2024* (電気通信大学, Nov. 29, 2024).
22. 市村一晟, 矢島秀伸, and 曾我健太. “近赤外線癌診断の高精度化に向けた時間依存型円偏光波輸送シミュレーション”. 計算メディカルサイエンス事業部公開シンポジウム 2024 (筑波大学, Dec. 23, 2024).
23. 近藤謙成, 矢島秀伸, and 福島肇. “機械学習による散乱光シグナルを用いた吸収体の逆問題解析”. *Optics & Photonics Japan 2024* (電気通信大学, Nov. 29, 2024).
24. 森正夫 and 金田優香. “Characteristic Mass Scale for the Cusp-Core Transition in Dark Matter Halos”. 日本天文学会 2024 年秋季年会 (関西学院大学, Sept. 11–13, 2024).
25. 山口未沙, 森正夫, 桐原崇亘, 小上樹, 千葉柁司, et al. “Formation of the Andromeda Giant Southern Stream and Eastern Extent”. 日本天文学会 2024 年秋季年会 (関西学院大学, Sept. 11–13, 2024).
26. 森正夫. “Once upon a time in Andromeda”. *The Violent Universe* (国立天文台, Oct. 2–3, 2024).
27. 山口未沙, 森正夫, 桐原孝亘, 三木洋平, 小上樹, et al. “重元素量分布で探るアンドロメダストリームと Eastern Extent の形成過程”. *The Violent Universe* (国立天文台, Oct. 2–3, 2024).
28. 篠崎倫, 森正夫, and 金田優香. “ダークマターハローのカस्पコア遷移における物理条件”. 天体形成研究会 (筑波大学, Oct. 18–19, 2024).
29. 山口未沙, 森正夫, 桐原孝亘, 三木洋平, 小上樹, et al. “Formation Scenarios of the Andromeda Giant Southern Stream and Eastern Extent predicted by metallicity distribution”. 天体形成研究会 (筑波大学, Oct. 18–19, 2024).
30. 湯浅拓宏, 森正夫, and 三木洋平. “Symplectic Individual Integrator in SPH”. 天体形成研究会 (筑波大学, Oct. 18–19, 2024).
31. 高山暁史 and 森正夫. “超巨大ブラックホールの活動性と銀河衝突”. 天体形成研究会 (筑波大学, Oct. 18–19, 2024).
32. 金田優香 and 森正夫. “Stellar stream に残る痕跡を用いた dark matter halo 探索”. スクール型研究会：宇宙における暗黒物質とその探査 (横浜国立大学, Nov. 5–8, 2024).

33. 篠崎倫, 森正夫, and 金田優香. “Characteristic Mass Scale for the Cusp-Core Transition in Dark Matter Haloes”. スクール型研究会 : 宇宙における暗黒物質とその探査 (横浜国立大学, Nov. 5–8, 2024).
34. 金田優香, 森正夫, 桐原孝亘, 三木洋平, and Andreas Burkert. “パラレルステラーストリームを用いたダークマターサブハロー探索”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
35. 山口未沙, 森正夫, 桐原孝亘, 三木洋平, 小上樹, et al. “Simultaneous formation of the Andromeda Giant Southern Stream and Eastern Extent”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
36. 林航平, 金田優香, 森正夫, and 篠崎倫. “銀河スケールにおけるダークハローのカस्प-コア遷移とその起源”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
37. 篠崎倫, 森正夫, 金田優香, and 林航平. “ダークマターハローのカस्प-コア遷移における臨界条件”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
38. 金田優香, 森正夫, and 天笠俊之. “CNN を用いた潮汐ストリームによるダークマターハローの密度分布推定”. DEIM2025 第 17 回データ工学と情報マネジメントに関するフォーラム (第 23 回日本データベース学会年次大会) (福岡国際会議場, Feb. 27, 2025).
39. 芳岡尚悟, 嶺重慎, 大須賀健, 高橋博之, and 川島朋尚. “一般相対論的輻射磁気流体力学計算で探る超臨界降着流の大域的ジェット”. 日本天文学会 2024 年秋季年会 (関西学院大学, Sept. 11–13, 2024).
40. 黒田裕太郎, 大須賀健, 野村真理子, and 渡會兼也. “輻射流体計算による ultra fast outflow の時間変動の研究～XRISM での観測に向けて～”. 日本天文学会 2024 年秋季年会 (関西学院大学, Sept. 11–13, 2024).
41. 五十嵐太一, 町田真美, 古山泰成, 山田真也, 高橋博之, et al. “XRISM に向けた SS433 の輻射磁気流体シミュレーション”. 日本天文学会 2024 年秋季年会 (関西学院大学, Sept. 11–13, 2024).
42. 芳岡尚悟, 嶺重慎, 大須賀健, 川島朋尚, and 北木孝明. “超臨界降着流の大局的アウトフローの質量降着率依存性”. Exploring Extreme Transients: Emerging Frontiers and Challenges (京都大学, Aug. 5–9, 2024).
43. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 福島肇. “Dusty gas 中を漂う種ブラックホールの Bondi-Hoyle-Lyttleton 降着過程”. Exploring Extreme Transients: Emerging Frontiers and Challenges (京都大学, Aug. 5–9, 2024).

44. 小嶺龍生 and 大須賀健. “一般相対論的輻射輸送計算で探るブラックホール降着円盤の偏光 X 線の起源”. 天体形成研究会 (筑波大学, Oct. 18–19, 2024).
45. 中尾颯吾, 大須賀健, and 朝比奈雄太. “一般相対論的輻射磁気流体計算で探る超臨界低角運動量降着流 ; 角運動量と光度の関係”. 天体形成研究会 (筑波大学, Oct. 18–19, 2024).
46. 松藤勇希, 朝比奈雄太, and 大須賀健. “LightGBM を用いたブラックホール降着円盤の SED の推定”. 天体形成研究会 (筑波大学, Oct. 18–19, 2024).
47. 上野航介, 朝比奈雄太, 大須賀健, 矢島秀伸, and 福島肇. “機械学習を用いたエディントンテンソルの推定”. 天体形成研究会 (筑波大学, Oct. 18–19, 2024).
48. 黒田裕太郎, 大須賀健, 野村真理子, and 渡會兼也. “機械学習を用いたエディントンテンソルの推定”. 天体形成研究会 (筑波大学, Oct. 18–19, 2024).
49. 黒田裕太郎, 大須賀健, 野村真理子, and 渡會兼也. “輻射流体計算による ultra fast outflow の時間変動の研究”. 令和6年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (国立天文台, Nov. 25–26, 2024).
50. 上野航介, 朝比奈雄太, 大須賀健, 矢島秀伸, and 福島肇. “機械学習を用いたエディントンテンソルの推定”. 令和6年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (国立天文台, Nov. 25–26, 2024).
51. 芳岡尚悟, 嶺重慎, 大須賀健, 高橋博之, 川島朋尚, et al. “Global jets from super-Edd. flows based on the GRRMHD simulations”. 令和6年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (国立天文台, Nov. 25–26, 2024).
52. 朝比奈雄太 and 大須賀健. “一般相対論的輻射磁気流体計算で解明するブラックホール降着円盤と準周期振動”. 第11回「富岳」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (THE GRAND HALL, Oct. 24–25, 2024).
53. 大須賀健. “シミュレーションと AI の融合で解明する宇宙の構造と進化”. 第11回「富岳」を中核とする HPCI システム利用研究課題成果報告会 (THE GRAND HALL, Oct. 24–25, 2024).
54. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 福島肇. “Dusty-gas 中を漂う中間質量ブラックホールへの超臨界降着流”. 2024(令和6)年度国立天文台 CfCA ユーザーズミーティング (国立天文台, Nov. 25–26, 2024).
55. 野村真理子 and 大須賀健. “Line-driven disc winds from supercritical accretion flow: implications for BH growth”. 初代星・初代銀河研究会 2024 (信州大学, Nov. 11–13, 2024).

56. 大須賀健. “シミュレーションと AI の融合で解明する宇宙の構造と進化”. 「富岳」成果創出加速プログラム・基礎科学合同シンポジウム 2024 (アーバンネット神田カンファレンス, Jan. 8–10, 2025).
57. 黒田裕太郎, 大須賀健, 野村真理子, and 渡會兼也. “輻射流体計算による ultra fast outflow の時間変動の研究”. 第 37 回理論懇シンポジウム (国立天文台, Dec. 24–26, 2024).
58. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 福島肇. “三次元輻射流体力学計算で探る巨大ブラックホールの形成過程: 種ブラックホールへの Bondi-Hoyle-Lyttleton 過程”. 第 37 回理論懇シンポジウム (国立天文台, Dec. 24–26, 2024).
59. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 福島肇. “Dusty-gas 中を漂う孤立ブラックホールの Bondi-Hoyle-Lyttleton 降着”. ブラックホール探査研究会 2025 (東京都立大学, Mar. 4–6, 2025).
60. 大須賀健. “機械学習を用いたシミュレーション天文学「富岳」成果創出加速プログラム”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
61. 高橋幹弥, 朝比奈雄太, 大須賀健, 高橋芳太, 小川拓未, et al. “ブラックホールスピンを推定するための機械学習モデルの構築”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
62. 芳岡尚悟, 嶺重慎, 大須賀健, 高橋博之, 川島朋尚, et al. “一般相対論的輻射磁気流体計算に基づく高/低光度 AGN ジェットの収束機構”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
63. 黒田裕太郎, 大須賀健, 野村真理子, and 渡會兼也. “降着円盤とライnfォース駆動型円盤風の同時計算による ultra fast outflow の時間変動の研究”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
64. 小嶺龍生, 竹林晃大, 川島朋尚, and 大須賀健. “一般相対論的輻射輸送計算で探るブラックホール降着円盤の偏光 X 線の起源”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
65. 五十嵐太一, 町田真美, 古山泰晴, 山田真也, 高橋博之, et al. “超臨界降着流ジェットの長距離伝搬シミュレーション”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
66. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈優太. “3次元一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションによる磁化中性子星への超臨界降着流”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).

67. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 福島肇. “降着円盤放射を伴う浮遊する中間質量ブラックホールの超臨界降着プロセス”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
68. Hu Haojie, Kohei Inayoshi, Zoltan Haiman, Rolf Kuiper, Eliot Quataert, et al. “Simulating super-Eddington accretion of seed BHs at high redshift and their co-evolution with host galaxies”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
69. ペレスアルバート健, 大須賀健, 川島朋尚, and 芳岡尚悟. “輻射輸送計算を用いた超臨界降着円盤の模擬観測”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
70. 中尾颯吾, 大須賀健, 高橋博之, 朝比奈雄太, and 島田悠愛. “一般相対論的輻射磁気流体力学計算による超臨界低角運動量ブラックホール降着流の研究-スリム円盤モデルとの比較-”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
71. 松藤勇希, 大須賀健, and 朝比奈雄太. “機械学習による輻射スペクトルからのブラックホール物理量の推定”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
72. 上野航介, 朝比奈雄太, 大須賀健, 矢島秀伸, and 福島肇. “深層学習を用いた一般相対論的輻射磁気流体力学計算の高精度・高速化”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
73. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “3次元一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションによる磁化中性子星への超臨界降着流”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
74. 小嶺龍生, 大須賀健, and 川島朋尚. “一般相対論的偏光 X線輻射輸送計算によるジェットに沿った偏光 X線の生成機構”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
75. 芳岡尚悟, 嶺重慎, 大須賀健, 高橋博之, 川島朋尚, et al. “一般相対論的輻射磁気流体計算に基づく高/低光度 AGN ジェットの収束形状”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
76. 黒田裕太郎, 大須賀健, 野村真理子, and 渡會兼也. “降着円盤とライnfォース駆動型円盤風の同時計算による ultra fast outflow の時間変動の研究”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).

77. 五十嵐太一, 町田真美, 古山泰成, 山田真也, 高橋博之, et al. “大領域を用いた輻射磁気流体シミュレーションによる超臨界降着流ジェットの大局的構造”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
78. Jiahui Huang, Ken Ohsuga, Hua Feng, and Hui Li. “Moving-mesh Hydro-dynamic Simulation of Wind/Jet Driven ULX Bubbles”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
79. 小川拓未, 朝比奈雄太, 高橋博之, 川島朋尚, and 大須賀健. “ボルツマン放射輸送計算とコンプトン散乱を組み込んだ二温度一般相対論的磁気流体計算 ; 低光度降着円盤の電子温度分布”. 日本天文学会 2025 年春季年会 (水戸市民会館, Mar. 17–20, 2025).
80. 小川拓未, 朝比奈雄太, 高橋博之, 川島朋尚, and 大須賀健. “ボルツマン放射輸送計算とコンプトン散乱を組み込んだ二温度一般相対論的磁気流体計算”. ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025 (名古屋市立大学, Mar. 5–7, 2025).
81. 小林諒平, 高橋博之, 額田彰, 朝比奈雄太, 朴泰祐, et al. “GPU 演算加速による一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションコードの性能評価”. 第 198 回 HPC・第 14 回 QS 合同研究発表会 (東北大学, Mar. 17–19, 2025).
82. 曾我健太 and 矢島秀伸. “非一様媒質中における近赤外円偏光波の輻射輸送計算”. Optics & Photonics Japan 2024 (電気通信大学, Nov. 29, 2024).
83. 矢島秀伸. “シミュレーションと宇宙線観測, 実験の融合で挑む生命の起源”. 「宇宙線学」の共創: 宇宙線をつなぐ天体と生命の共進化の多角的研究 (大阪公立大学, May 9–11, 2024).
84. 矢島秀伸. “宇宙物理輻射輸送計算で拓く新しい生体医用光学”. 創発的研究支援事業 2024 年度創発の場 (L stay & grow 南砂町, June 26–27, 2024).
85. 矢島秀伸, 曾我健太, and 安部牧人. “原始銀河団周囲に形成される巨大電離バブルとクラスターリングの影響”. 日本天文学会 2024 年秋季年会 (関西学院大学, Sept. 11–13, 2024).
86. 石田怜士, 安部牧人, 矢島秀伸, and 大向一行. “初代銀河形成過程における種族 II 星の初期質量関数とその影響”. 日本天文学会 2024 年秋季年会 (関西学院大学, Sept. 11–13, 2024).
87. 矢島秀伸. “アストロバイオロジーシミュレーションの現状と計画”. 宇宙線冬合宿 2024 (筑波大学, Dec. 16–17, 2024).
88. 矢島秀伸. “計算アストロバイオロジー: マルチスケールの観点から”. ハビタビリティ x 宇宙線・放射線ワークショップ (京都大学, Feb. 6, 2025).

#### (4) 著書、解説記事等

該当なし

### 7. 異分野間連携・産学官連携・国際連携・国際活動等

#### 異分野間連携（センター内外）

1. 高性能計算システム研究部門と輻射輸送シミュレーションコードの開発において連携
2. 高性能計算システム研究部門と一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションコードの開発において連携
3. 生命科学研究部門生命機能情報分野との宇宙生命連携（CAB）
4. 計算メディカルサイエンス事業部における連携

#### 産学官連携

該当なし

#### 国際連携・国際活動

1. NASA 次世代スペース VLBI 計画 (Black Hole Explorer) における連携

### 8. シンポジウム、研究会、スクール等の開催実績

1. 福島肇. 研究会開催：「初代星・初代銀河 2024」(信州大学, Nov. 11–13, 2024).
2. 矢島秀伸. 国際会議開催：「ILR wokshop」(大阪大学, Sept. 25–27, 2024).
3. 矢島秀伸. 「宇宙線学」の共創: 宇宙線でつなぐ天体と生命の共進化の多角的研究 (大阪公立大学, May 9–11, 2024).
4. 矢島秀伸. 国際会議開催：10th Galaxy Evolution Workshop (台北, 台湾, Aug. 6–9, 2024).
5. 矢島秀伸. 国内会議開催：銀河銀河間ガス研究会 2024 (弘前大学, Aug. 19–21, 2024).
6. 大須賀健. 研究会開催, 「富岳成果創出加速プログラム」基礎科学合同シンポジウム 2024 (アーバンネット神田カンファレンス, Jan. 8–10, 2025).
7. 大須賀健. 研究会開催：「ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2025」(名古屋市立大学, Mar. 5, 2025).
8. 大須賀健 (富岳成果創出加速プログラム). 国際会議共催：AstroAI Asian Network (A3 Net) (Osaka University, Sept. 2–6, 2024).
9. 大須賀健 (富岳成果創出加速プログラム). 国内会議共催：情報科学技術との融合による太陽圏物理学の新展開 (名古屋大学, Sept. 9–10, 2024).

10. 矢島秀伸. 研究会開催:「次世代サブミリ波観測・シミュレーション計画検討会 2025」  
(御殿場時之栖, Feb. 19–21, 2025).

## 9. 管理・運営

- 大須賀健

### 学内

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  
計算科学研究センター大学教員業績評価委員会委員  
計算科学研究センター共同利用委員会委員  
計算科学研究センター研究倫理委員会委員  
計算科学研究センター宇宙物理研究部門主任  
物理学域運営委員会委員  
物理学域宇宙理論グループグループ長  
理工学群物理学類4年担任  
理工学群物理学類キャリア支援担当  
理工学群物理学類理論グループ議長

### 学外

日本天文学会代議員  
計算基礎科学連携拠点 (JICFuS) 副拠点長  
「富岳」成果創出加速プログラム「シミュレーションと AI の融合で解明する宇宙の構造と進化」代表  
神戸大学大学院理学研究科付属惑星科学研究センター協力研究員

- 森正夫

人間総合科学学術院教育学学位プログラム兼任  
理工学群長候補者及び副学群長候補者意向調査管理委員会委員長

- 矢島秀伸

### 学内

物理学域カリキュラム委員会委員  
物理学域博士論文評価委員会委員  
物理学域入試実施委員  
理工学群物理学類1年担任  
宇宙史研究センター連携教員

学外

国立天文台すばる観測時間割当委員会委員

- 吉川耕司

学内

計算科学研究センター計算機運用委員会委員

計算科学研究センター先端計算科学推進室委員

計算科学研究センター情報セキュリティ委員会委員

最先端共同 HPC 基盤施設スーパーコンピュータシステム仕様策定委員会委員

学外

日本天文学会欧文研究報告編集委員

## 10. 社会貢献・国際貢献

1. 大須賀健. 一般向け講演, シミュレーションと AI で解明する宇宙の構造と進化, スーパーコンピュータ「富岳」第四回シンポジウム富岳百景. Dec. 25, 2024.
2. 大須賀健. パネリスト, 科学は AI でどう進化する? ~ AI for Science ~, スーパーコンピュータ「富岳」第四回シンポジウム富岳百景. Dec. 25, 2024.
3. 大須賀健. 平沢小学校ようこそ先輩集会, 「ブラックホールってなんだろう? ~天文学者になる夢を追いかけて~」. Nov. 5, 2024.
4. 大須賀健. 東北学院大学第 2 回情報学シンポジウム「シミュレーションで迫るブラック, ホールの真の姿」. Dec. 21, 2024.
5. 大須賀健. 朝日カルチャーセンター新宿公開講座, 「ブラックホール研究の最前線 2025 (第 3 回担当)」. Feb. 1, 2025.
6. 吉川耕司. 第 15 回七夕講演会「スーパーコンピュータ富岳 × 宇宙大規模構造 × ニュートリノ」. July 6, 2024.

## 11. その他

1. 朝比奈雄太 and 大須賀健. プレスリリース「ブラックホールの自転による超高光度円盤の歳差運動を世界で初めて実証」. Sept. 20, 2024.