III. 宇宙物理研究部門

1. メンバー

教授	梅村 雅之	
教授	大須賀 健	
准教授	森 正夫	
准教授	矢島 秀伸	
講師	吉川 耕司	
助教	Wagner Alexander	
研究員	高水 裕一	(CCS)
	福島 肇	(科研費若手研究 A)
	安部 牧人	(計算メディカルサイエンス)
	朝比奈 雄太	(CCS)
	井上 茂樹	(ALMA 共同科学研究事業)
	小川 拓未	(富岳サブ課題 C)
	菊田 智史	(科研費基盤研究 A)
学生	大学院生 18 名	
	学類生 6 名	
研究生	2 名	

2. 概要

本年度，当グループは，ブラックホール周囲の磁場構造解明に向けた一般相対論的偏光輻射輸送計算, 超巨大ブラックホールからのラインフォース型円盤風の構造と起源の研究, 超高光度 X 線パルサーで観測される X 線パルスの起源の研究, 暗黒物質サブハローと M31 恒星ストリームの相互作用, 冬眠するブラックホール, Dark Matter Sub-halo 同士の衝突頻度, 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, 遠方銀河のスターバーストと金属輝線放射の関係, 星団形成における輻射流体力学過程の研究, 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, 重元素の超微細構造線を用いた中高温銀河間物質の検出可能性, AGN feedback: The interactions of AGN radiation，jets and winds with the host galaxy, 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（宇宙生命計算科学連携）, 原始惑星系円盤乱流中のダスト成長過程の研究（宇宙生命計算科学連携）, 時間依存輻射輸送計算による生体光イメージングの理論モデル構築（計算メディカルサイエンス事業部：計算光バイオイメージング）, 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, 一般相対論的輻射磁気流体力学計算コード INAZUMA の開発を行った。

3. 研究成果

【1】 ブラックホール周囲の磁場構造解明に向けた一般相対論的偏光輻射輸送計算

事象の地平線望遠鏡（EHT）が撮影した M87 ブラックホールの壮大な画像は、ブラックホール研究に新たな時代をもたらした。次の課題の一つは、中心のブラックホール（BH）近傍の磁場構造を解明す

ることである。そのためには偏光観測が必要である。なぜなら、電波放射はシンクロトロンプロセスによって生成されるので、偏光特性はジェット基底部の磁場構造を鮮明に反映すると考えられるからである。このような観点から、我々は M87 の降着流と流出流の一般相対論的磁気流体力学（GR-MHD）シミュレーションデータに基づいて、偏光の一般相対論的放射伝達計算を行い、地平線スケールの直線偏光と円偏光のイメージを得た（図 1）。その結果、ジェット基底部と降着流内部からの直線偏光成分は、BH 周辺の磁化されたプラズマを通過する際にファラデー回転を受けるため、BH のスピンに敏感に反応することがわかった。EHT による 1.3mm の強度画像と、サブミリ波アレイによる 1.3mm の偏光度と回転測定値（RM）を比較すると、スピンパラメータが a=0.9 のモデルが、a=0.5 や 0.99 のモデルよりも観測結果に近いことがわかった。また、低温モデルでは、円偏光マップに明確なリング状のイメージが現れる。これは、直線偏光した放射光がファラデー変換されて生じたものである。この現象は、放射領域に揃った磁場が存在する場合にのみ生じるため、高温円盤モデルでは明確な像は見られない。今回の偏光シミュレーション画像と、今後の EHT による偏光観測や他の VLBI 観測との比較を通じて、磁場の構成を明らかにすることが可能である。

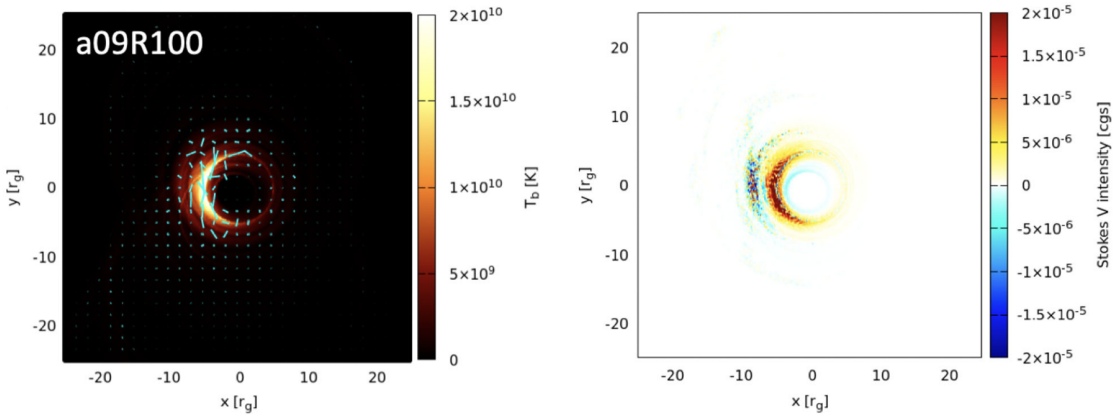


図 1　一般相対論的偏光輻射輸送計算で得られた撮像イメージと直線偏光分布（左）および円偏光分布（右）

【2】　超巨大ブラックホールからのラインフォース型円盤風の構造と起源の研究

最近の X 線観測結果から、超巨大ブラックホールからの超高速アウトフロー（Ultra Fast Outflows と呼ばれる）は、ホスト銀河に大きな影響を与えるほどのエネルギーを持つと予想されているが、その発生および加速メカニズムはよくわかっていない。本研究では、2 次元輻射流体力学シミュレーションを行い、ラインフォース駆動円盤風の質量噴出率とパワーを計算する。そのため、円盤風の質量噴出率に対応して、噴出領域より内側の質量降着率を減少させる新しい計算手法を開発した。これによって円盤の内側領域からの紫外線が弱くなるため、降着率を減少を考慮しない従来のシミュレーションに比べて、円盤風のパワーが減少することがわかった。我々のシミュレーションで再現されたライン駆動型円盤風は非常に強力であり、１億から 100 億太陽質量のブラックホールにエディントン限界の 50 から 90 %でガスが降着する場合、円盤に供給された質量の約半分が風で放出されることがわかった。超巨大ブラックホールの成長速度はこの円盤風の発生により低下することが判明した。

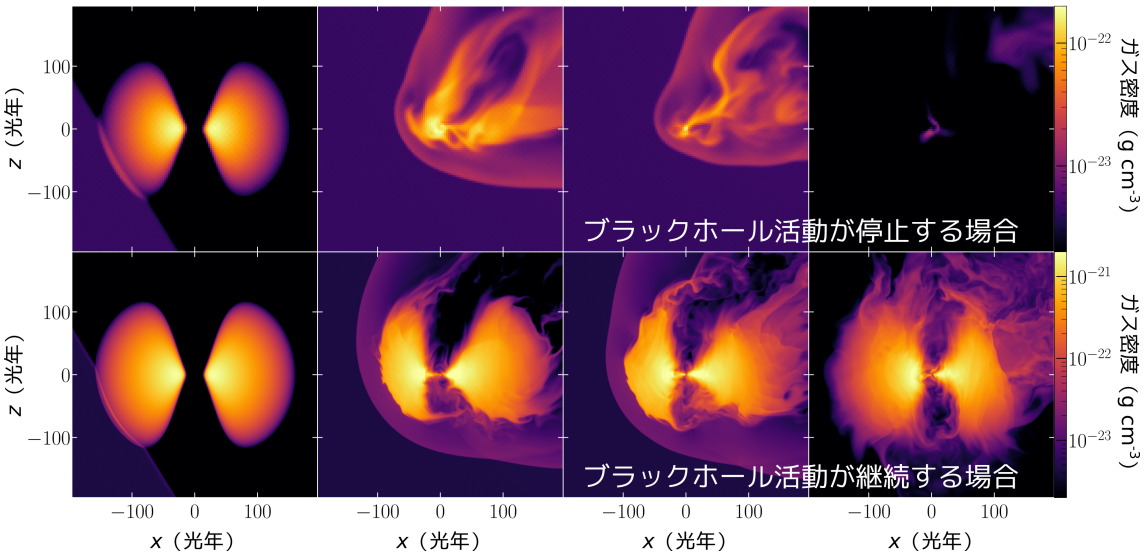
【3】 超高光度 X 線パルサーで観測される X 線パルスの起源の研究

Kawashima et al.(2016) によるシミュレーション結果に基づいて、磁軸が回転軸とずれている磁化した中性子星 (NS) への超臨界降着柱の Pulsed Fraction (PF) を計算した。具体的には、シュヴァルツシルト時空における光の測地線方程式を解き、光線の軌道を求めた。また、重力赤方偏移と降着柱におけるガスの落下運動によるドップラー効果も考慮に入れた。観測された光度は、恒星質量ブラックホールのエディントン輝度を超えており、NS の自転による降着柱の歳差運動によって周期的に変化する。そのため、パルス状の発光が観測されることになる。PF は、観測者の見込み角と回転軸から測った磁軸の角度が近いほど大きくなる傾向がある。我々のモデルでは、PF は最大で 50% 程度となり、超高光度 X 線パルサー (ULXP) の観測結果とおよそ一致する。本研究により、ULXP を NS への超臨界降着で説明可能であることがわかった。

【4】 暗黒物質サブハローと M31 恒星ストリームの相互作用

本研究では，M31 のハロー領域に存在する恒星ストリームである North–Western（NW）ストリームに注目し，NW ストリームと DM サブハローの近接遭遇時の痕跡を理論・観測両側から調べることで，DM サブハロー数の評価を目指している。我々は NW ストリームに注目した研究に継続的に取り組んでおり，NW ストリームの 3 次元構造を N 体計算を用いて再現済みである（Kirihara et al. 2017; Komiyama et al. 2018)。本研究では，NW ストリームと DM サブハローの衝突実験を N 体計算を用いて遂行し，DM サブハローの質量が $10^9 M_\odot$ 程度以上の近接遭遇時においては位相空間上に明確な痕跡が残ることを示した。さらに，衝突位置と衝突角度，ストリームの運動方向等のパラメータによってはストリーム自身が並行する二本の細長いストリームに分裂する現象が発生する事を見出した。M31 のハロー領域で観測されているステラーストリームでは，複数のストリームがほぼ平行に位置する場合が複数発見されているが，その生成メカニズムとしての可能性について解析を進めた。

【5】 冬眠するブラックホール



宇宙には太陽質量の 100 万倍を超える大質量ブラックホールが遍く存在する。ごく一部の大質量ブラックホールは落ち込む物質をエネルギー源にして明るく輝き，激しい活動性を示すが，そのほとんど

は銀河の中心でひっそりと佇んでいる。しかし，こうしたブラックホールの活動と休眠の間の状態変化をつかさどるメカニズムは，未だ完全には解明されていない。我々は，Oakforest-PACS 等のスーパーコンピュータを駆使し，銀河衝突と銀河中心ブラックホールの活動性の関係を詳細に調べた。これまで，銀河衝突で銀河中心ブラックホールは激しく活動すると信じられてきた。衝突によって銀河円盤の物質が中心に落下し，ブラックホールに落ち込むことでその活動が活性化するのである。しかし，銀河衝突が中心で起こった場合には事態は全く異なる。矢が正鵠を射ぬくがごとく，中心に衝突した銀河がブラックホール周辺のガスを持ち去ってしまい，エネルギー源を失ったブラックホールは活動を停止し，静かに眠りにつくのである。最近の観測によって，銀河中心ブラックホールの活動が急停止した兆候を示す新種族の天体群も見つかっており，本研究が明らかにしたブラックホール活動性の休眠メカニズムとの関連について検討をはじめた。

【6】 Dark Matter Sub-halo 同士の衝突頻度

コールドダークマターモデルを基礎とした銀河形成シナリオで葉，銀河系ほどの大きさを持った銀河に付随する矮小銀河の総数に関する理論予測が，実際の観測と大きく食い違っている，いわゆる Missing Satellite Problem が未解決問題として指摘されている。この解決案として，観測が不可能なほどに暗い sub-halo(Dark Satellite) の存在が考えられており，先行研究からこの Dark Satellite の存在を観測可能な Bright Satellite との衝突から間接的に示せる可能性が示唆された。本研究では，宇宙論的 N 体シミュレーションの 1 つである Phi-1(Ishiyama et al. 2015) の結果を用いて，Milky Way サイズの Host 銀河に付随した (Bright, Dark を含む)sub-halo 同士の二体衝突の頻度を，Host 銀河が時間進化する系の中で詳細に調べた。その結果，宇宙年齢の間に sub-halo 同士の正面衝突が数回以上，また弱い相互作用は少なくとも数千回は生じていることを突き止め，矮小銀河の観測を通して Dark Satellite の存在を観測的に見極める可能性を示した。

【7】 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

銀河形成の標準模型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いる。しかし，楕円銀河 NGC1052 に付随する衛星銀河 NGC1052-DF2 が，理論的に予測されるダークマター質量の 1/400 程度しかないダークマター欠乏銀河であることが発表された (vanDokkum et al.2018)。また，その近傍の NGC1052-DF4 もダークマター欠乏銀河であることが確認された (van Dokkum et al. 2019)，さらには，HI リッチな 6 つの UDGs (Mancera Pi naet al. 2019) や，バリオンが支配的な 19 個の矮小銀河 (Guo et al. 2020) が報告されている。このような銀河が存在することは，現在のコールドダークマターを基本にした標準銀河形成論では非常に困難であり，それらの形成シナリオを検討する必要がある。我々は，ガスとダークマターの物理的性質の違いに着目し，ガスを含んだダークマターサブハロー同士の衝突によってダークマター欠乏銀河が形成される可能性を調査している。一次元流体モデルを用いた解析によって，通常の矮小銀河が形成される衝突速度条件とダークマター欠乏銀河が形成される衝突速度条件を見出した。更に，この解析モデルを発展させ，3 次元銀河形成シミュレーションを実行することにより，その正当性について検証を行った。

【8】 遠方銀河のスターバーストと金属輝線放射の関係

近年の観測により，遠方銀河が多数観測されている。それらは主に，アルマ望遠鏡による炭素や酸素の輝線検出によって同定が行われている。同時に，これら金属輝線は星間ガスの状態に強く依存するため，銀河内のガスの状態，星形成を明らかにするための強力な研究手法として注目されている。しかしながら，銀河の星形成，ガスの構造と金属輝線の定量的な関係性は明らかになっていない。我々は宇宙論的流体計算と輻射輸送計算を組み合わせる事で，初代銀河の物理状態と金属輝線の関係を明らかにした。結果として，スターバーストの初期フェイズでは星形成領域付近の酸素ガスが電離され [OIII] 輝線が明るくなり，その後フィードバックによってガスが排出されると，相対的に炭素の [CII] 輝線が明るくなることを示した。この関係は最近のアルマ観測による遠方銀河の酸素，炭素輝線比を見事に再現している (Arata, Yajima, Nagamine, Khochfar, Abe, 2020, MNRAS, 498, 5541)。

また，星形成ガス内の高密度領域では CO 分子が形成され，冷却の際に輝線を放射する。この CO 分子輝線は，星形成の材料となる水素分子と関係しているため，星形成の材料を探る上で重要視されている。しかし，CO 分子と水素分子の間の定量的な関係性に不定性があり，長年問題となっていた。我々はシミュレーションで得られたモデル銀河に対してサブグリットモデルの星間ガス多相モデルを作成し，観測の CO 光度関数を再現する事に成功した。この計算をもとにして CO 分子と水素分子量の関係性を銀河の物理量の関数としてモデル化を行った (Inoue, Yoshida, Yajima, 2020, MNRAS, 498, 5960)。このように，銀河の物理状態とアルマ望遠鏡の観測データを結ぶモデルを大規模な数値シミュレーションにより構築をする事が出来た。

【9】 星団形成における輻射流体力学過程の研究

分子雲内の星団形成は宇宙全体や銀河の星形成史を決める重要なプロセスである。しかしながら，星団形成は非一様なガスの構造における輻射フィードバックを考慮する必要があることから，その複雑さのために未だ理解が進んでいない。我々は適合格子法を使った輻射流体シミュレーションにより，分子雲から分子雲コアまでを同時に分解して星団形成過程を調べた。結果として，脱出速度が電離ガスの音速を大きく下回るような分子雲では，数%のガスが星に変わった段階で輻射フィードバックによってガス雲が破壊されることが分かった。一方で，コンパクトな大質量ガス雲では輻射フィードバックが効かず，数十%のガスが星へと変わり，高密度星団が形成されることが分かった。また，これらの輻射フィードバックの効果は，金属量にも依存し，金属量が大きい場合には，フィラメント構造のダストの減光により星形成効率が大きくなることを示した (Fukushima, Yajima, Sugimura, Hosokawa, Omukai, Matsumoto, 2020, MNRAS, 497, 3830)。

【10】 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

ブラソフ方程式の直接数値シミュレーションを用いて，質量を持つニュートリノの宇宙大規模構造形成に対する影響の研究を行った。2020 年度は，CDM の初期条件をより second order lagrangian perturbation theory (2LPT) という精度の高いものに改良し、富岳を用いて様々なニュートリノ質量について多くの realization の数値シミュレーション結果を得た。今後はこのデータを用いて，ニュートリノとダークマターの相対速度に起因するニュートリノ航跡がどのようにダークマターハローや銀河の分布に影響するかを調査する。また、これまでの研究で採用されてきた N 体シミュレーションと Vlasov シミュレーションを同じ初期条件から始めて結果を詳細に比較することによって、N 体シミュレーショ

ンと Vlasov シミュレーションの数値シミュレーションとしての性質の違いや長所・短所を系統的に調査した。

【11】 重元素の超微細構造線を用いた中高温銀河間物質の検出可能性

現在の宇宙のバリオンの大半は，希薄で温度が 10^5 から 10^7 K 程度の銀河間ガスの状態で存在していることが知られている。これらの銀河間ガスは宇宙の質量の大半を占めるダークマターの分布の良いトレーサーであると考えられているが観測手段が極めて限られており，現在のところ X 線で明るく輝く天体と我々の間にある銀河間ガスをその影として検出することしかできていない。本研究では，銀河間ガスの新たな観測手段として銀河間ガスに含まれる重元素 (窒素) の超微細構造線を用いることを提案し，宇宙論的構造形成シミュレーションによってこの手法による銀河間ガスの観測可能性を輻射輸送方程式を解くことで調査し、次世代の大型電波干渉計である Square Kilometre Array や ngVLA などの観測によって温度が 10^6 K 程度の WHIM の検出が可能であることを示した。更に、現在までに X 線観測で吸収線が同定されている WHIM についてその観測可能性を調査し、これらの WHIM についても X 線の観測で用いられているのと同じ背景天体のスペクトル中に窒素イオンの超微細構造遷移の吸収線を観測可能であることが分かった。

【12】 AGN feedback: The interactions of AGN radiation，jets and winds with the host galaxy

The supermassive black holes in the centers of galaxies accrete gas and launch jets，fast winds，or emit copious amounts of radiation. The jets，winds，and radiation may impact the gas in host galaxy on scales ranging from fractions of parsecs to hundreds of kiloparsec. This cycle of matter and energy affects the evolution of galaxies and is termed the “feedback cycle of galaxy formation” . It leads to a regulated history of star-formation，evidenced through the luminosity functions of galaxies，and to the co-evolution of the central supermassive black hole and the galaxy，evidenced through the scaling relations such as the Magorrian relation. We are pursuing a numerically intensive project running 3-dimensional relativistic hydrodynamic and radiation-hydrodynamic simulations with multiphase gas aimed at elucidating the physics of the mass and energy transfer in the feedback cycle and the effects of jets，winds，and radiation on star-formation and black hole accretion. In recent work we:

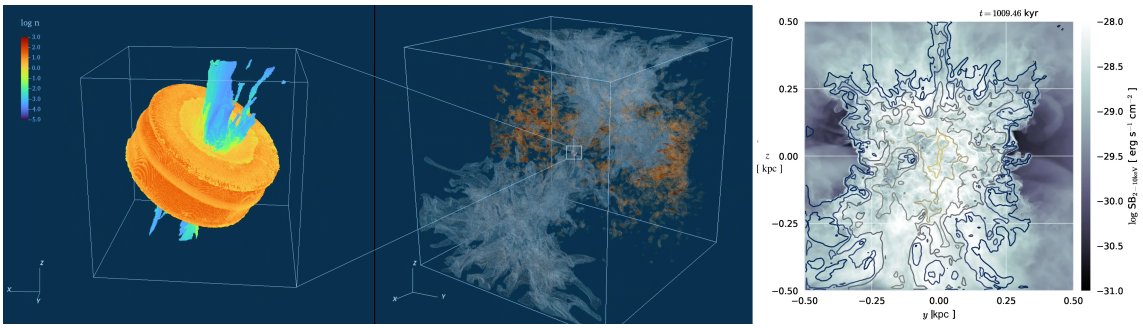


図 2 Left and middle: Volume renderings of a simulation of the Milky Way AGN jet emerging from the circumnuclear disc (left) and propagating into the interstellar medium of the Milky Way disc (middle). Right: Predicted hard X-ray surface brightness (colormap) and radio surface brightness (contours).

1. constructed models of the putative Milky Way AGN jet that is thought to have inflated the FERMI bubbles (See Fig. 2). We identify vestiges of the interaction of the jets with the circumnuclear disc as well as clouds on ~ 100 pc scales. We have constructed the first models to reproduce the new MeerKAT radio data and eROSITA X-ray data of the inner regions of the FERMI bubble. (Preliminary results presented at the 43rd COSPAR Scientific Assembly, G. N. Cecil, A. Y. Wagner, et al.);
2. obtained new, spatially resolved [CI]1-0, [CI]2-1, CO(7-6), and dust continuum observations of 4C 41.17 at $z = 3.8$, one of the best candidates of jet-triggered star formation at high redshift. The gas mass, densities and star-formation rates found are comparable to those in other populations of massive, dusty star-forming galaxies in this redshift range, suggesting that the jet does not currently enhance the efficiency with which stars form from the gas. This is consistent with expectations from our simulations, where radio jets may facilitate the onset of star formation in galaxies without boosting its efficiency over longer timescales, in particular after the jet has broken out of the interstellar medium, as is the case in 4C 41.17. (Nesvadba et al., including Wagner, 2020);
3. performed, using optical integral field spectroscopy, an analysis of the ISM conditions in Minkowski's object ($z = 0.0189$), a peculiar star-forming dwarf galaxy located in the path of a radio jet from the galaxy NGC 541. We confirmed the young age of the stellar population that suggest that Minkowski's object was formed from a recent interaction with the jet. With our new data and our understanding of jet-cloud interactions, we invalidate several formation mechanisms previously proposed in the literature, while proposing two new, more detailed, scenarios. (Zovaro et al., including Wagner, 2020)

【13】 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（宇宙生命計算科学連携）

星形成領域におけるダスト粒子光散乱による円偏光波生成過程について明らかにするため,「ストークルパラメータを含むモンテカルロ輻射輸送コードの開発」を継続して行い、以下の二つの成果を得た。これにより、星形成領域には、アミノ酸のホモキラリティ生成を誘発する紫外線波長領域にも高円偏光波が存在することを明らかにした。

(1-a) ストークスパラメータを含むモンテカルロ輻射輸送コードの拡張

扁球ダスト粒子による散乱過程における偏光波生成について計算する、モンテカルロ輻射輸送計算コードの開発を継続して行った。特に、任意の位置に観測者がいる場合に対応できるように計算コードの拡張を行った。これにより、円偏光波生成における光源や散乱体の配置に対する依存性を調べることが可能となった。

(1-b) 星形成領域の紫外線波長における高円偏光波生成について

紫外線における円偏光波は、円二色性によりアミノ酸の鏡像異性体過剰を誘発する。一方、宇宙空間における円偏光波は近赤外線波長でのみ観測されており、紫外線波長で存在するかは謎であった。これを解明するために、開発したコードを使用して星形成領域について輻射輸送計算を行った。今回は、光源の周囲に光学的厚みが１となるようにダストシェルを配置し、ダストサイズが MRN 分布となる場

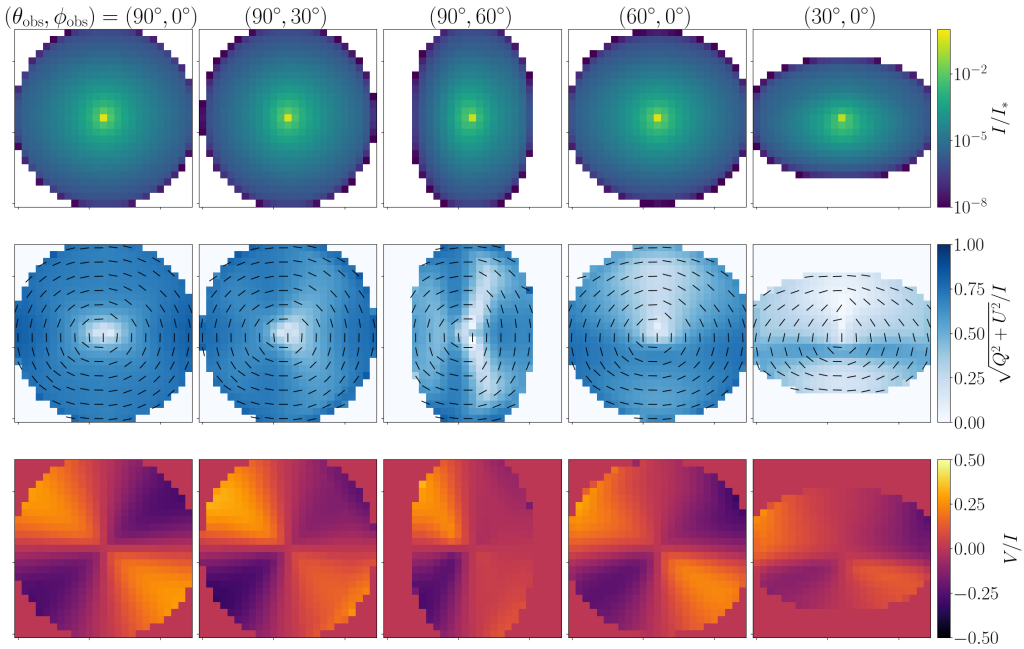


図 3　紫外線波長における輝度（上図）と線偏光度（中図），円偏光度（下図）。ダストシェルは yz 平面上にある。各図は左から観測者が $(\theta_{\rm obs}, \phi_{\rm obs}) = (90, 0), (90, 30), (90, 60), (60, 0), (30, 0)$ にいる場合を示す。

合について調べた。図 3 に示すように、赤外線波長で観測されている、円偏光波の四重極構造が紫外線波長でも同様に見られることを示した。また、この四重極構造については、どの位置にいる観測者からも確認できることも示した。円偏光度についてはダスト粒子からの後方散乱が卓越する角度において、より上昇することが明らかとなった。この際、円偏光度は 30% まで到達する。前回の研究より、今回用いた MRN 分布のダスト粒子では、近赤外線波長においては数 % 程度の円偏光波しか生成することができない。このことから、近赤外線観測では円偏光波が確認されていない星形成領域でも、紫外線波長においては高円偏光波が存在していることを示した。

【14】　原始惑星系円盤乱流中のダスト成長過程の研究（宇宙生命計算科学連携）

ナビエ・ストークス方程式の直接数値計算を行い，非圧縮性及び圧縮性乱流場の違いがレイノルズ数にどのように依存するかを明らかにし，この中での慣性粒子の振る舞いを調べることで，非圧縮性及び圧縮性乱流場中のダストの衝突付着の比較を行った。

まず，圧縮性乱流の直接数値計算における外力項の取り扱い方の見直しを行い，圧縮性乱流場の統計的な準定常性を向上させ，信頼性の高い比較を可能にした。圧縮性乱流場の計算の結果得られた速度 divergence 分布関数は，マッハ数が大きくなるにつれて速度 divergence の裾野が広がると共に，レイノルズ数が増大によっても裾野は広がっていくことが分かった。また，マッハ数が１を超える弱い衝撃波領域が現れ，慣性が小さい粒子の衝突付着の統計がわずかに影響を受けること，及び，慣性の大きい粒子においても衝突速度分布がわずかに変化することが明らかとなった。

そして，非圧縮性及び圧縮性乱流場中のダストの衝突付着の比較を行った結果，衝突付着確率はレイノルズ数および圧縮性に依存し，レイノルズ数が大きくなると衝突付着確率が小さくなること，圧縮性の影響を受けて衝突付着確率が若干大きくなることを示した。よって，これまで行われてきた，非圧縮

の取り扱いは，ダスト粒子の衝突付着確率については概ね妥当だと結論される。ただし，弱い衝撃波領域が現れる場合には，慣性が小さい粒子の衝突付着の統計がわずかに影響を受けること，及び，慣性の大きい粒子においても衝突速度分布がわずかに変化し，付着率が若干高まることが明らかとなった。これらの結果は，論文としてまとめられ，出版された（Sakurai et al. 2021, ApJ, 911, 140）

【15】 時間依存輻射輸送計算による生体光イメージングの理論モデル構築 (計算メディカルサイエンス事業部：計算光バイオイメージング)

波長 700-1000 ナノメートルの近赤外光は，X 線 CT や MRI に次ぐ新たな医療診断法として注目されている。しかしながら，近赤外光は生体内を散乱しながら複雑な経路で伝播していくため，診断には輻射輸送シミュレーションによる光伝播のモデルがあらかじめ必要となる。特に，生体光イメージングではピコ秒オーダーの高時間分解能，強い非等方散乱，反射，屈折の効果を取り入れる必要がある。我々は，これらの効果を全て導入した新しい輻射輸送計算コード TRINITY の開発した（Yajima, Abe, Umemura, Takamizu, Hoshi, JQSRT 誌に投稿中)。この計算コードを用いてポリウレタン製の生体模擬物質ファントムに対する光パルス照射実験を比較したところ，見事に検出波形を再現する事に成功した(図 4)。

また，輻射輸送シミュレーションのモデルと光計測を繋ぐ逆問題解析として，TensorFlow を用いて機械学習によるモデルを構築した。学習は、シミュレーションデータに人工的なノイズを付加し、教師データとして用いている。結果として，教師データとして与えていない位置に異常部位を置いたとしても，90% 以上の高い判定制度で異常部位の位置を正解出来る事を示した（図 5, Takamizu, Umemura, Yajima, Abe, Hoshi, Medical Physics 誌へ投稿中)。今後はこれらの輻射輸送シミュレーション，機械学習のモデルをベースにして，甲状腺，脳などのより複雑な構造での計算に挑戦する。

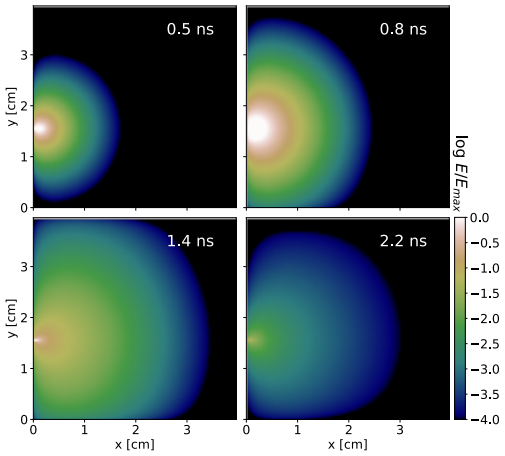


図 4　生体模擬物質ファントムへの近赤外光パルス照射のシミュレーション。色は光のエネルギー密度を示している。

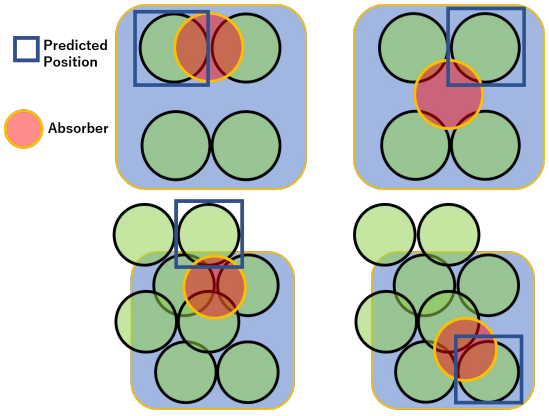


図 5　機械学習による吸収体の位置の判定テスト。赤丸が教師データとして与えていない位置の吸収体位置。四角が判定結果。

【16】 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

スーパーコンピュータ京の後継機として開発されたスーパーコンピュータ富岳において，宇宙大規模構造におけるニュートリノの力学的影響を計算する N 体シミュレーションと Vlasov シミュレーションのハイブリッドコードの最適化を行った。昨年度は、富岳の約 27000 ノードのシステムにおいて最適化を行ったが、本年度は富岳の全システムである約 150000 ノードを使った最適化を実施し、重力計算における高速フーリエ変換や MPI 通信の改良を行うことで、strong scaling で 85%、weak scaling で 70% という高い並列化効率を達成した。また、この最適化によって得られたコードで富岳の約半分の 75000 ノードを用いて世界最大規模の Vlasov シミュレーションを実現することに成功した。(図 6)

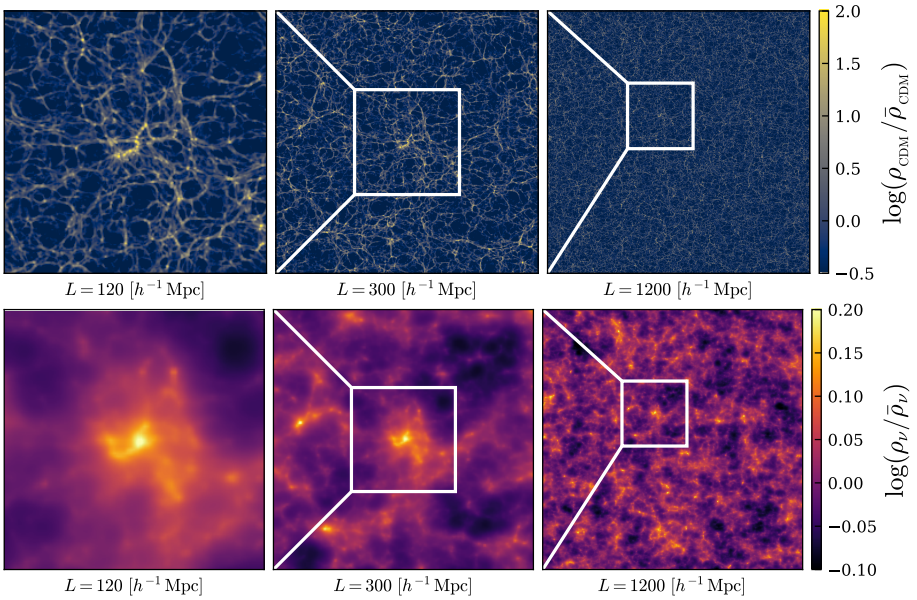


図 6　富岳で実行した世界最大規模の Vlasov シミュレーションで得られた、CDM(上段) とニュートリノ (下段) の密度分布。

【17】 一般相対論的輻射磁気流体力学計算コード INAZUMA の開発

ブラックホールや中性子星の周囲の構造を調べるために必要な，一般相対論的輻射磁気流体力学 (GR-RMHD) 計算は，そのほとんどが M1-closure 法にと呼ばれる近似法に基づいて輻射場を解いている．この方法では，非一様性が激しい場合や，光学的厚みが１程度の状況で正しい輻射場を計算できないことが知られている．降着円盤の回転軸付近に輻射が到達しにくいということも示されており，より正確な GR-RMHD 計算が要求されている．そこで本研究では，輻射ボルツマン方程式を解くことで，輻射 intensity の角度分布からエディントンテンソルを求める手法を開発した。これにより，輻射場の非等方性をより正確に扱うことが可能となり，円盤の回転軸付近の輻射場も正しく解けるようになった。実際のブラックホール周囲の降着円盤への適用が今後の予定である．

4. 教育

【学位論文】

＜修士論文＞

1. 和間 雄司
   ISM における AGN ジェット駆動による乱流
2. 山本 剛大
   星間ガスの多相構造と塊状分布を考慮した AGN モレキュラーアウトフロー形成過程の探索
3. 倉西 嶺人
   相対論的輻射流体計算による相対論ジェットの終端速度の光学的厚み依存性評価
4. 大滝恒輝
   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
5. 井上壮大
   一般相対論的輻射輸送・輻射磁気流体力学計算による超臨界中性子星降着流の構造の解明
6. 内海碧人
   一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションによるカー・ブラックホール周りの超臨界降着円盤の解明
7. 高橋幹弥
   Ray-tracing 法に基づく一般相対論的輻射輸送コードの開発

＜学士論文＞

1. 須永泰聖
   Galactic Chemical Evolution and Habitable Zone
2. 田中駿次
   銀河系衛星銀河の潮汐効果
3. 人見拓也
   一般相対論的輻射輸送計算によるブラックホールへ落下するガスの放射特性の研究
4. 山本 昌平
   原始惑星系円盤における乱流とダスト成長
5. 坂和 孝英
   星形成領域における酸化プロピレンのキラリティ生成過程
6. 益川 洋武
   アミノ酸ホモキラリティに関わる星間円偏光の生成

【集中講義】

1. 大須賀健. 計算物理学特別講義 *IV*「降着円盤理論と輻射流体力学の基礎」, 千葉大学大学院. Dec. 11–12, 2020.

5. 受賞・外部資金・知的財産権等

【外部資金】

＜代表者＞

- 基盤研究 (A)（一般）H31 年度〜R5 年度：梅村雅之
  「多重 AGN の統合研究で紐解く超巨大ブラックホールの起源」
  （R2 年度 930 万円／全体 3460 万円）
- 基盤研究 (C)（一般）H30 年度〜R2 年度：大須賀健
  「輻射磁気流体力学計算と輻射スペクトル計算で解明する超高光度 X 線源の起源」
  （R2 年度 110 万円／全体 290 万円）
- 基盤研究 (C)（一般）R1 年度〜R3 年度：Wagner Alexander
  「Interstellar Turbulence by Supermassive Black-Hole Jets, Winds, and Radiation」
  （R2 度 70 万円／全体 260 万円）
- 基盤研究 (C)（一般）R2 年度〜R5 年度：森正夫
  「ダークサテライトは存在するか？—コールドダークマターモデルにおける諸問題の解明」
  （R2 度 100 万円／全体 330 万円）
- 若手研究 (A) H29 年度〜R2 年度：矢島秀伸
  「高分解能数値シミュレーションで迫る初期宇宙の銀河進化メカニズム：多様性の解明へ」
  （R2 年度 360 万円／全体 1400 万円）
- 新学術領域研究（研究領域提案型）R2 年度〜R3 年度：矢島秀伸
  「輻射流体計算で解き明かす初期宇宙の高密度星団形成」
  （R2 年度 190 万円／全体 370 万円）
- ALMA 共同科学研究事業（区分 A）H31 年度〜R3 年度：矢島秀伸
  「ALMA 観測と数値シミュレーションの融合で解き明かす大規模構造，原始銀河団，サブミリ波銀河の階層的構造」
  （R2 年度 100 万円／全体 300 万円）
- 若手研究 H30 年度〜R3 年度：朝比奈雄太
  「宇宙ジェットの加速・収束・相互作用の統一的な数値実験による全容の解明」
  （R2 年度 50 万円／全体 200 万円）

＜分担者＞

- 基盤研究 (B)（一般）R2 年度〜R3 年度：梅村雅之（代表者：石原 卓）
  「乱流の大規模直接数値計算から探る原始惑星系円盤のダスト成長の新シナリオ」
  （R2 年度分担金 10 万円／分担金全体 40 万円）
- 高性能汎用計算機高度利用事業，R2 年度〜R4 年度：大須賀健（代表者：牧野淳一郎）
  「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」（サブ課題 C ブラックホールと超新星爆発における高エネルギー天体現象の解明）
  （R2 年度 527 万円／分担金全体 898 万円）
- 基盤研究 (A)（一般）H29 年度〜R3 年度：大須賀健（代表者：大向一行）
  「理論シミュレーションで解明する巨大ブラックホールの起源」

（R3 年度分担金 30 万円／分担金全体 195 万円）

- 高性能汎用計算機高度利用事業，R2 年度〜R4 年度：吉川耕司（代表者：牧野淳一郎）
「富岳」成果創出加速プログラム「宇宙の構造形成と進化から惑星表層環境変動までの統一的描像の構築」（サブ課題 A　大規模数値計算と大型観測データのシナジーによる宇宙の進化史の解明）
（R3 年度 24 万円／分担金全体 894 万円）
- 基盤研究 (A) H29 年度〜R2 年度：矢島秀伸（代表者：井上昭雄）
「すばる狭帯域深宇宙探査で暴く宇宙再電離：CHORUS プロジェクト」
（R2 年度分担金 66 万円／分担金全体 280 万円）
- 基盤研究 (A) H30 年度〜R4 年度：矢島秀伸（代表者：児玉忠恭）
「銀河形成の加速と減速を司る物理過程の実証的解明」
（R2 年度分担金 5 万円／分担金全体 40 万円）

6. 研究業績

(1) 研究論文

A) 査読付き論文

1. N. P. H. Nesvadba, G. V. Bicknell, D. Mukherjee, and A. Y. Wagner. "Gas, dust, and star formation in the positive AGN feedback candidate 4C 41.17 at z = 3.8". *A&A* 639, L13 (July 2020), p. L13. DOI: 10.1051/0004-6361/202038269.
2. Takashi Kojima, Masami Ouchi, Michael Rauch, Yoshiaki Ono, Kimihiko Nakajima, et al. "Extremely Metal-poor Representatives Explored by the Subaru Survey (EMPRESS). I. A Successful Machine-learning Selection of Metal-poor Galaxies and the Discovery of a Galaxy with $M^* < 10^6$ $M_\odot$ and 0.016 $Z_\odot$". *ApJ* 898.2, 142 (Aug. 2020), p. 142. DOI: 10.3847/1538-4357/aba047. arXiv: 1910.08559 [astro-ph.GA].
3. Taichi Igarashi, Yoshiaki Kato, Hiroyuki R. Takahashi, Ken Ohsuga, Yosuke Matsumoto, et al. "Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Sub-Eddington Accretion Flows in AGNs: Origin of Soft X-Ray Excess and Rapid Time Variabilities". *ApJ* 902.2, 103 (Oct. 2020), p. 103. DOI: 10.3847/1538-4357/abb592.
4. Kohji Yoshikawa, Satoshi Tanaka, Naoki Yoshida, and Shun Saito. "Cosmological Vlasov—Poisson Simulations of Structure Formation with Relic Neutrinos: Nonlinear Clustering and the Neutrino Mass". *ApJ* 904.2, 159 (Dec. 2020), p. 159. DOI: 10.3847/1538-4357/abbd46. arXiv: 2010.00248 [astro-ph.CO].
5. Yuta Tarumi, Naoki Yoshida, and Shigeki Inoue. "R-process enrichment in ultrafaint dwarf galaxies". *MNRAS* 494.1 (Mar. 2020), pp. 120–128. DOI: 10.1093/mnras/staa720. arXiv: 2002.06913 [astro-ph.GA].
6. Yuexing Li, Ming F. Gu, Hidenobu Yajima, Qirong Zhu, and Moupiya Maji. "ART^2: a 3D parallel multiwavelength radiative transfer code for continuum and atomic and molecular lines". *MNRAS* 494.2 (May 2020), pp. 1919–1935. DOI: 10.1093/mnras/staa733. arXiv: 2001.11146 [astro-ph.GA].
7. Ryota Tomaru, Chris Done, Ken Ohsuga, Hirokazu Odaka, and Tadayuki Takahashi. "The thermal-radiative wind in low-mass X-ray binary H1743-322 - II. Iron line predictions from Monte Carlo

radiation transfer". *MNRAS* 494.3 (Apr. 2020), pp. 3413–3421. DOI: 10.1093/mnras/staa961. arXiv: 1911.01660 [astro-ph.HE].

8. Mariko Nomura, Ken Ohsuga, and Chris Done. "Line-driven disc wind in near-Eddington active galactic nuclei: decrease of mass accretion rate due to powerful outflow". *MNRAS* 494.3 (Apr. 2020), pp. 3616–3626. DOI: 10.1093/mnras/staa948.
9. Hajime Fukushima, Hidenobu Yajima, and Masayuki Umemura. "High circular polarization of near-infrared light induced by micron-sized dust grains". *MNRAS* 496.3 (June 2020), pp. 2762–2767. DOI: 10.1093/mnras/staa1718. arXiv: 2006.06370 [astro-ph.GA].
10. Hajime Fukushima, Takashi Hosokawa, Gen Chiaki, Kazuyuki Omukai, Naoki Yoshida, et al. "Formation of massive stars under protostellar radiation feedback: very metal-poor stars". *MNRAS* 497.1 (July 2020), pp. 829–845. DOI: 10.1093/mnras/staa1994. arXiv: 2004.02364 [astro-ph.GA].
11. Hajime Fukushima, Hidenobu Yajima, Kazuyuki Sugimura, Takashi Hosokawa, Kazuyuki Omukai, et al. "Star cluster formation and cloud dispersal by radiative feedback: dependence on metallicity and compactness". *MNRAS* 497.3 (Aug. 2020), pp. 3830–3845. DOI: 10.1093/mnras/staa2062. arXiv: 2005.13401 [astro-ph.GA].
12. Ryota Tomaru, Chris Done, Ken Ohsuga, Hirokazu Odaka, and Tadayuki Takahashi. "The thermal-radiative wind in the neutron star low-mass X-ray binary GX 13 + 1". *MNRAS* 497.4 (Aug. 2020), pp. 4970–4980. DOI: 10.1093/mnras/staa2254. arXiv: 2007.14607 [astro-ph.HE].
13. Shohei Arata, Hidenobu Yajima, Kentaro Nagamine, Makito Abe, and Sadegh Khochfar. "Starbursting [O III] emitters and quiescent [C II] emitters in the reionization era". *MNRAS* 498.4 (Nov. 2020), pp. 5541–5556. DOI: 10.1093/mnras/staa2809. arXiv: 2001.01853 [astro-ph.GA].
14. Shigeki Inoue, Naoki Yoshida, and Hidenobu Yajima. "The CO universe: modelling CO emission and H_2 abundance in cosmological galaxy formation simulations". *MNRAS* 498.4 (Sept. 2020), pp. 5960–5971. DOI: 10.1093/mnras/staa2744. arXiv: 2008.12484 [astro-ph.GA].
15. W. E. Banda-Barragán, M. Brüggen, C. Federrath, A. Y. Wagner, E. Scannapieco, et al. "Shock-multicloud interactions in galactic outflows - I. Cloud layers with lognormal density distributions". *MNRAS* 499.2 (Sept. 2020), pp. 2173–2195. DOI: 10.1093/mnras/staa2904.
16. Henry R. M. Zovaro, Robert Sharp, Nicole P. H. Nesvadba, Lisa Kewley, Alexander Y. Wagner, et al. "Unravelling the enigmatic ISM conditions in Minkowski's object". *MNRAS* 499.4 (Oct. 2020), pp. 4940–4960. DOI: 10.1093/mnras/staa3121. arXiv: 2010.03139 [astro-ph.GA].
17. Yuh Tsunetoe, Shin Mineshige, Ken Ohsuga, Tomohisa Kawashima, and Kazunori Akiyama. "Polarization imaging of M 87 jets by general relativistic radiative transfer calculation based on GRMHD simulations". *PASJ* 72.2, 32 (Apr. 2020), p. 32. DOI: 10.1093/pasj/psaa008. arXiv: 2002.00954 [astro-ph.HE].
18. Akihiro Inoue, Ken Ohsuga, and Tomohisa Kawashima. "Pulsed fraction of super-critical column accretion flows on to neutron stars: Modeling of ultraluminous X-ray pulsars". *PASJ* 72.2, 34 (Apr. 2020), p. 34. DOI: 10.1093/pasj/psaa010. arXiv: 2003.07569 [astro-ph.HE].
19. Yohei Miki, Masao Mori, and Toshihiro Kawaguchi. "Destruction of the central black hole gas reservoir through head-on galaxy collisions". *Nature Astronomy* 5 (Jan. 2021). DOI: 10.1038/s41550-020-01286-9. arXiv: 2012.05700v1 [astro-ph.GA].

20. Hidenobu Mitsuhashi Ikki et al. incl. Yajima. "FIR-luminous [C II] Emitters in the ALMA-SCUBA-2 COSMOS Survey (AS2COSMOS): The Nature of Submillimeter Galaxies in a 10 Comoving Megaparsec-scale Structure at z ~ 4.6". *MNRAS* 907.2 (Feb. 2021), p. 122. DOI: 10.1038/s41550-020-01286-9.
21. Misaki Mizumoto, Mariko Nomura, Chris Done, Ken Ohsuga, and Hirokazu Odaka. "UV line-driven disc wind as the origin of UltraFast Outflows in AGN". *MNRAS* 503.1 (May 2021), pp. 1442–1458. DOI: 10.1093/mnras/staa3282. arXiv: 2003.01137.
22. Akio K. Inoue, Satoshi Yamanaka, Masami Ouchi, Ikuru Iwata, Kazuhiro Shimasaku, et al. "CHORUS. I. Cosmic HydrOgen Reionization Unveiled with Subaru: Overview". *PASJ* 72.6 (Dec. 2020), p. 101. DOI: 10.1093/pasj/psaa100.
23. Yuta Asahina, Hiroyuki R Takahashi, and Ken Ohsuga. "A Numerical Scheme for General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Based on Solving a Grid-based Boltzmann Equation". en. *ApJ* 901.2 (Sept. 2020), p. 96. ISSN: 0004-637X. DOI: 10.3847/1538-4357/abaf51. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/abaf51/meta.

(2) 国際会議発表

A) 招待講演

1. **菊田智史**. "Lyman-alpha halos of Lyman-alpha emitters across environments at z=2.84". Subaru Users Meeting FY2020 (**オンライン**, Mar. 3–5, 2021). URL: https://subarutelescope.org/Science/SubaruUM/SubaruUM2020/index.html.
2. **大須賀健**. "Numerical simulations of super-critical accretion flows and accretion columns". European Astronomical Society Annual Meeting 2020 (virtual meeting, June 29–July 3, 2020).
3. H. R. Takahashi, K. Ohsuga, T. Kawashima, N. Nomura, Y. Asahina, et al. "Relativistic radiation magnetohydrodynamic simulations of accretion disks". Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).

B) 一般講演

1. **朝比奈 雄太**. "GR-RMHD simulations of black hole accretion flows". 12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (**オンライン開催**, Oct. 6, 2020).
2. Yuta Asahina, Hiroyuki R. Takahashi, and Ken Ohsuga. "GRRMHD simulations of black hole accretion flows solving Boltzmann equation". Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).
3. **森 正夫**. "Formation of local galaxies". 12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (**オンライン開催**, Oct. 6, 2020).
4. **井上壮大**, **大須賀健**, and **川島朋尚**. "Pulsed fraction of super-critical column accretion flows on to neutron stars: Modeling of ultraluminous X-ray pulsars". European Astronomical Society Annual Meeting 2020 (virtual meeting, June 29–July 3, 2020).

5. 大須賀 健. “Structure Formation in the Universe using Radiation Hydrodynamic Simulations”. 12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (オンライン開催, Oct. 6, 2020).
6. A. Utsumi, K. Ohsuga, H.R. Takahashi, and Y. Asahina. “General relativistic radiation magnetohydrodynamics simulations of super-critical accretion disks around Kerr black holes”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).
7. T. Kawashima, K. Ohsuga, and H. R. Takahashi. “A general-relativistic, multi-wavelength study of accretion flows and relativistic jets”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).
8. T. Igarashi, Y. Kato, H. R. Takahashi, K. Ohsuga, Y. Matsumoto, et al. “Radiation magnetohydrodynamic simulations of black hole accretion flows during hard-to-soft state transitions”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).
9. M. Nomura, K. Omukai, and K. Ohsuga. “Radiation hydrodynamic simulations of line-driven disk winds: Metallicity dependence and SMBH growth”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).
10. M. Takahashi, K. Ohsuga, R. Takahashi, T. Ogawa, and M. Umemura. “Development of general relativistic radiative transfer code based on ray-tracing”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).
11. A. Inoue, K. Ohsuga, H. R. Takahashi, and Y. Asahina. “General relativistic radiation-MHD simulations of supercritical accretion flows and outflows around magnetized neutron stars”. Black Hole Astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (Online, Jan. 18–20, 2021).
12. 井上茂樹, 松尾宏, 吉田直紀, 矢島秀伸, and 森脇可奈. “A method to constrain black hole models using ratios of line emission”. Galaxy Evolution Workshop 2020 (オンライン, Feb. 2–5, 2021).
13. 矢島 秀伸. “Time-dependent radiative transfer for in-vivo bioimaging”. 12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (オンライン開催, Oct. 6, 2020).
14. 矢島秀伸 and 福島肇. “Radiation-hydrodynamic simulations of star clusters in GMCs”. Gravitational wave physics and astronomy: Genesis 4th annual symposium (オンライン, Feb. 22–24, 2021).
15. 吉川 耕司. “Performance Evaluation of Electron Dynamics Simulation in Supercomputer Fugaku”. 12th symposium on Discovery, Fusion, Creation of New Knowledge by Multidisciplinary Computational Sciences (オンライン開催, Oct. 6, 2020).

(3) 国内学会・研究会発表

A) 招待講演

1. 菊田智史. “淡く広がった天体の撮像データ解析について”. 2020 年度光赤天連シンポジウム「データ解析の新展開 2020」(オンライン開催, Sept. 14–17, 2020).
2. 井上茂樹. “あえて銀河を分解しない輝線研究とその理論モデル + (時間があれば) 少し磁場の話”. 国立天文台研究集会「(サブ) ミリ波単一鏡の革新で挑む, 天文学の未解決問題」(オンライン, Mar. 29–31, 2021).

3. 矢島秀伸. “銀河形成シミュレーションのブレイクスルーと今後の展開”. 第 33 回 理論懇シンポジウム (オンライン, Dec. 23–25, 2020).

B) その他の発表

1. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “輻射輸送方程式を解く一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA によるブラックホール降着流計算”. 第 33 回 理論懇シンポジウム (オンライン, Dec. 23–25, 2020).
2. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA を用いたブラックホール降着流シミュレーション”. CfCA ユーザーミーティング (オンライン, Jan. 19–20, 2021).
3. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “GR-RMHD コード INAZUMA によるブラックホール降着流シミュレーション”. ブラックホール降着流ミニ研究報告会 (オンライン, Mar. 1–2, 2021).
4. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA によるブラックホール降着流シミュレーション”. 多波長・時間軸天文学の時代の FORCE 〜広帯域 X 線で迫るコンパクト天体の世界〜 (オンライン, Mar. 4–5, 2021).
5. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “輻射輸送方程式を解く GR-RMHD コード INAZUMA によるブラックホール降着流シミュレーション”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).
6. 阿左美進也, 安部牧人, and 梅村雅之. “原始ガス雲の進化における Ly α輻射の水素分子抑制効果について”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
7. 阿左美進也, 安部牧人, and 梅村雅之. “1 次元球対称計算を用いた原始ガス雲進化に対する Lyα 輻射 の効果について”. 初代星初代銀河研究会 2020 (東北大学, Online, Nov. 16–18, 2020).
8. 阿左美進也, 安部牧人, and 梅村雅之. “Lyα 輻射による原始ガス雲中での水素分子形成抑制効果の質量依存性”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).
9. Hajime Fukushima, Hidenobu Yajima, and Masayuki Umemura. “Radiation transfer simulation of circular polarization at the NIR/UV wavelengths”. JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (オンライン会議, July 16, 2020).
10. 福島肇, 矢島秀伸, 杉村和幸, 細川隆史, 大向一行, et al. “星団形成における輻射フィードバックについて”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
11. 福島肇 and 矢島秀伸. “輻射流体シミュレーションによる星団形成”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
12. 福島肇 and 矢島秀伸. “モーメント法による輻射流体シミュレーションを用いた低金属量星団形成”. 初代星初代銀河研究会 2020 (東北大学, Online, Nov. 16–18, 2020).
13. 福島肇 and 矢島秀伸. “星団形成における輻射フィードバックについて”. 分子雲から原始星誕生までを追う 新時代の星形成モデル構築に向けて (オンライン開催, Dec. 1–3, 2020). URL: https://tok339.wixsite.com/clouds2protostars20.
14. 福島肇 and 矢島秀伸. “星団形成における輻射フィードバック”. 第 33 回 理論懇シンポジウム (オンライン, Dec. 23–25, 2020).
15. 福島肇 and 矢島秀伸. “輻射流体シミュレーションによる星団形成に関する研究”. CfCA ユーザーミーティング (オンライン, Jan. 19–20, 2021).

16. 福島肇 and 矢島秀伸. “輻射流体シミュレーションによる星団形成に関する研究”. CfCA ユーザーズミーティング (オンライン, Jan. 19–20, 2021).
17. 福島肇 and 矢島秀伸. “モーメント法を用いた輻射流体シミュレーションによる星団形成の解明”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).
18. 井上茂樹, 吉田直紀, and 矢島秀伸. “The CO universe: Modelling CO emission and H_2 abundance in cosmological galaxy formation simulations”. Nobeyama Science Workshop 2020 (オンライン開催, Sept. 15–16, 2020). URL: https://sites.google.com/keio.jp/nobeyama-science-workshop2020/%E3%83%9B%E3%83%BC%E3%83%A0?authuser=0.
19. 井上茂樹, 吉田直紀, and 矢島秀伸. “宇宙論的シミュレーションを用いた CO 分子輝線疑似観測”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
20. 菊田智史. “HSC と ALMA で探る z=2.84 原始銀河団での銀河形成”. 銀河・銀河間ガス研究会２０２０ (オンライン開催, Aug. 3–5, 2020).
21. 菊田智史. “Ly-alpha halos around LAEs at z=2.84 across environments”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
22. 倉西嶺人. “相対論的輻射流体計算による相対論ジェットの終端速度の光学的厚み依存性の研究”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
23. 益川洋武. “アミノ酸ホモキラリティに関わる星間円偏光の生成”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
24. 五十嵐朱夏, 森正夫, and 新田伸也. “遷音速アウトフローモデルによる高赤方偏移星形成銀河の mass loading factor の推定”. 銀河・銀河間ガス研究会２０２０ (オンライン開催, Aug. 3–5, 2020).
25. 大滝恒輝 and 森正夫. “ダークマター欠乏銀河の形成シミュレーション”. 銀河・銀河間ガス研究会２０２０ (オンライン開催, Aug. 3–5, 2020).
26. 大滝恒輝 and 森正夫. “銀河衝突によるダークマター欠乏銀河の形成シミュレーション”. 日本流体力学会年会 (山口大学, オンライン開催, Sept. 18–20, 2020).
27. 五十嵐朱夏, 森正夫, and 新田伸也. “遷音速銀河風モデルによる星間ガス流出量の推定”. 日本流体力学会年会 (山口大学, オンライン開催, Sept. 18–20, 2020).
28. 大滝恒輝 and 森正夫. “銀河衝突によるダークマター欠乏銀河の形成：衝突速度依存性について”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
29. 大滝恒輝 and 森正夫. “銀河衝突によるダークマター欠乏銀河の形成：質量依存性について”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
30. 田中駿次 and 森正夫. “天の川銀河衝突シミュレーションに向けて”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
31. 須永泰聖 and 森正夫. “Galactic Habitable Zone について”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
32. 大滝恒輝 and 森正夫. “銀河衝突によるダークマター欠乏銀河形成の解析”. 初代星初代銀河研究会 2020 (東北大学, Online, Nov. 16–18, 2020).
33. 大滝恒輝 and 森正夫. “銀河衝突によるダークマター欠乏銀河の形成シナリオ”. 第 33 回 理論懇シンポジウム (オンライン, Dec. 23–25, 2020).
34. 数野優大 and 森正夫. “Milky Way like な銀河に付随する Dark Matter Sub-halo の衝突頻度”. 第 33 回 理論懇シンポジウム (オンライン, Dec. 23–25, 2020).
35. 大滝恒輝 and 森正夫. “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”. 日本天文学会 2021 年 春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).

36. 五十嵐太一, 松元亮治, 加藤成晃, 高橋博之, 松本洋介, et al. “Changing Look AGN における軟 X 線放射領域の輻射磁気流体シミュレーション”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
37. 朝比奈雄太, 高橋博之, and 大須賀健. “ブラックホール降着流の一般相対論的輻射磁気流体計算:質量降着率依存性”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
38. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “超臨界中性子星降着流の降着率依存性および磁場強度依存性の研究”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
39. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “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カー・ブラックホール周りの超臨界降着流の研究”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
40. 水本岬希, 野村真理子, Chris Done, 大須賀健, and 小高裕和. “XRISM observations of a UV line driven disc wind in AGN”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
41. 恒任優, 嶺重慎, 大須賀健, 川島朋尚, and 秋山和徳. “輻射輸送シミュレーションの新地平 EHT 偏波イメージ予測で探る磁場構造”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
42. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 矢島秀伸. “Super-Eddington 天体に対する dusty-gas の Hoyle-Lyttleton 降着過程”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
43. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “カー・ブラックホールをもつ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”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
44. 武者野拓也, 大須賀健, 矢島秀伸, and 小川拓未. “ライマンアルファ光子の輻射圧を考慮した輻射流体力学シミュレーションに向けて”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
45. 高橋幹弥, 大須賀健, 高橋労太, 梅村雅之, and 小川拓未. “ブラックホール周囲の測地線に基づく一般相対論的輻射輸送コードの開発”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
46. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “超臨界中性子星降着流の一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーション”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
47. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 矢島秀伸. “Super-Eddington 天体に対する dusty-gas の Hoyle-Lyttleton 降着過程”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
48. 高橋幹弥, 大須賀健, 高橋労太, 梅村雅之, and 小川拓未. “Ray-tracing 法に基づく一般相対論的輻射輸送コードの開発”. 第 33 回 理論懇シンポジウム (オンライン, Dec. 23–25, 2020).
49. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “超臨界中性子星降着流の一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーション ～アウトフローの磁気圏半径依存性について～”. 第 33 回 理論懇シンポジウム (オンライン, Dec. 23–25, 2020).
50. 武者野拓也, 大須賀健, 矢島秀伸, and 小川拓未. “Ly α 光子の輻射圧を考慮したガス降着シミュレーションに向けて”. 第 33 回 理論懇シンポジウム (オンライン, Dec. 23–25, 2020).
51. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 矢島秀伸. “dusty-gas 中で浮遊するブラックホールの成長過程の解明に向けて”.「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム (オンライン, Jan. 28–29, 2021).
52. 小川拓未, 大須賀健, and 嶺重慎. “一般相対論的ボルツマン輻射輸送計算による X 線フレアの研究”.「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム (オンライン, Jan. 28–29, 2021).

53. 川島朋尚, 秋山和徳, 大須賀健, and 他. “一般相対論的・多波長輻射輸送コード RAIKOU で探るブラックホール時空および降着流・噴出流構造”. ブラックホール降着流ミニ研究報告会 (オンライン, Mar. 1–2, 2021).
54. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “一般相対論的輻射磁気流体力学計算による ULX パルサーの構造の解明；アウトフローの構造と起源について”. 多波長・時間軸天文学の時代の FORCE 〜広帯域 X 線で迫るコンパクト天体の世界〜 (オンライン, Mar. 4–5, 2021).
55. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションによる超臨界降着円盤のブラックホールスピン依存性の研究”. 多波長・時間軸天文学の時代の FORCE 〜広帯域 X 線で迫るコンパクト天体の世界〜 (オンライン, Mar. 4–5, 2021).
56. 小川拓未, 大須賀健, and 嶺重慎. “一般相対論的ボルツマン輻射輸送による超臨界降着流の輻射スペクトル計算”. 多波長・時間軸天文学の時代の FORCE 〜広帯域 X 線で迫るコンパクト天体の世界〜 (オンライン, Mar. 4–5, 2021).
57. 高橋幹弥, 大須賀健, 高橋労太, 小川拓未, and 梅村雅之. “Ray-tracing 法に基づく、空間 3 次元一般相対論的輻射輸送コードの開発”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).
58. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “一般相対論的輻射磁気流体計算を用いたカー・ブラックホールへの超臨界降着の研究”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).
59. 井上壮大, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “超臨界磁化中性子星降着流のアウトフロー；構造と起源の磁気圏半径依存性について”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).
60. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 矢島秀伸. “Super-Eddington 天体に対する dusty-gas の Hoyle-Lyttleton 降着：角度依存性と定常構造”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).
61. 小川拓未, 大須賀健, 牧野芳弘, and 嶺重慎. “一般相対論的ボルツマン輻射輸送による超臨界降着流の輻射スペクトル計算”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).
62. 五十嵐太一, 松元亮治, 加藤成晃, 高橋博之, 松本洋介, et al. “AGN における準周期的な短時間変動の 3 次元大局的輻射磁気流体シミュレーション”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).
63. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “General relativistic radiation magnetohydrodynamics simulations of super-critical accretion disks around kerr black holes”. CfCA ユーザーズミーティング (オンライン, Jan. 19–20, 2021).
64. 内海碧人, 大須賀健, 高橋博之, and 朝比奈雄太. “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超臨界降着円盤のブラックホールスピン依存性の研究”. 第 33 回 理論懇シンポジウム (オンライン, Dec. 23–25, 2020).
65. 尾形絵梨花, 大須賀健, and 矢島秀伸. “Super-Eddington 天体に対する dusty-gas の Hoyle-Lyttleton 降着過程”. 第 33 回 理論懇シンポジウム (オンライン, Dec. 23–25, 2020).
66. 小川拓未, 大須賀健, and 嶺重慎. “Study of Comptonized X-ray Spectra of Super-Eddington Accretor with Boltzmann Radiation”. 第 33 回 理論懇シンポジウム (オンライン, Dec. 23–25, 2020).
67. 大須賀健. “サブ課題 C 状況報告”. 富岳計算宇宙惑星・計算資源利用に関する課題内ワークショップ (神戸大学/オンライン会議, June 5, 2020).
68. 坂和孝英. “星形成領域における酸化プロピレンのキラリティ生成過程”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).

69. 井上茂樹, 吉田直紀, and Lars Hernquist. “Fragmentation of ring galaxies”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
70. 井上茂樹, 松尾宏, 吉田直紀, and 矢島秀伸. “[OIII] 輝線比によるブラックホール理論モデルへの制限”. 初代星初代銀河研究会 2020 (東北大学, Online, Nov. 16–18, 2020).
71. 井上茂樹, 吉田直紀, and 矢島秀伸. “The CO universe: modelling CO emission and H_2 abundance in cosmological galaxy formation simulations”. 分子雲から原始星誕生までを追う 新時代の星形成モデル構築に向けて (オンライン開催, Dec. 1–3, 2020). URL: https://tok339.wixsite.com/clouds2protostars20.
72. 井上茂樹 and 矢島秀伸. “Modelling line emission of galaxies: Connecting cosmological simulations with ALMA”. ALMA Grant Fellow Symposium 2020 (オンライン開催, Dec. 8–15, 2020). URL: https://researchers.alma-telescope.jp/e/event/2020/alma_grant_fellow_symposium_2020.html.
73. 井上茂樹, 松尾宏, 吉田直紀, 矢島秀伸, and 森脇可奈. “高赤方偏移銀河の [OIII] 輝線比で探るブラックホールによる星形成抑止効果”. ALMA 高周波バンドを用いた星形成研究を考える 2021 (オンライン, Mar. 2, 2021).
74. 井上茂樹, 松尾宏, 吉田直紀, 矢島秀伸, and 森脇可奈. “[OIII] 輝線比によるブラックホール理論モデルへの制限”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).
75. 曽我健太 and 梅村雅之. “高赤方偏移銀河の Ly α 表面輝度に対する多重 AGN の影響”. 日本天文学会秋季年会 (弘前大学, オンライン開催, Sept. 8–10, 2020).
76. 高水裕一, 梅村雅之, 矢島秀伸, 安部牧人, and 星詳子. “多次元時系列データの機械学習分類によるガン細胞位置の検出手法開発”. 日本光学会年次学術会議 2020 (Online 開催, Nov. 14–17, 2020).
77. 石原卓, 森中宏樹, 奥住聡, and 梅村雅之. “原始惑星系円盤の高レイノルズ数乱流中でのダスト成長”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).
78. 和間雄司. “ISM における AGN ジェットによる乱流駆動”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
79. 山本昌平. “原始惑星系円盤における乱流とダスト成長”. 天体形成研究会 2020 (筑波大学, Online, Nov. 6–7, 2020).
80. 吉川耕司. “Vlasov-Poisson Simulation of Cosmological Relic Neutrinos on FUGAKU”.「富岳で加速する素粒子・原子核・宇宙・惑星」シンポジウム (オンライン, Jan. 28–29, 2021).
81. 吉川耕司. “富岳による宇宙論的ニュートリノの Vlasov シミュレーション”. 日本天文学会 2021 年春季年会 (オンライン, Mar. 16–19, 2021).

(4) 著書・解説記事等

A) 著書

1. 高水裕一. 時間は逆戻りするのか. 講談社ブルーバックス, July 2020.

B) 記事

1. 森正夫. “銀河同士の大衝突”. *Newton* 別冊 宇宙の終わり. ニュートンプレス, Jan. 2021. Chap. 5, pp. 94–103.