

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2023

課題番号：19H00697

研究課題名（和文）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

研究課題名（英文）Deciphering the origin of supermassive black holes through the comprehensive study of multiple AGNs

研究代表者

梅村 雅之（Umemura, Masayuki）

筑波大学・計算科学研究センター・特命教授

研究者番号：70183754

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 36,040,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、最先端の理論と観測による多重AGNの統合研究により超巨大ブラックホールの起源を紐解くことにある。理論では、多重AGNの発現のシミュレーションのために必要な近似の無い3次元一般相対論的輻射輸送コードを開発すると共に、超エディントン降着における光子捕獲を扱うための相対論的輻射拡散の解析解の導出を行った。観測では、すばる望遠鏡主焦点超広視野カメラ（HSC）用狭帯域フィルターNB506を新たに製作し、既存のNB497、NB515、NB527フィルターと組み合わせることで、COSMOSフィールドにおいて多重AGN候補となる広輝線天体のサーベイを行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多重AGNは、超巨大ブラックホール 銀河バルジ関係を解明する鍵となる可能性があるが、本研究で行った一般相対論的輻射輸送コードの3次元への拡張ならびに光子の相対論的拡散過程の解析解の導出は、多重AGNが物理的にリンクして生まれる過程を明らかにするために必要な輻射流体プロセスを精密にシミュレーションするための基本ツールとなる。また、本研究で開発した狭帯域フィルターNB506は、既存のNB497、NB515、NB527フィルターと組み合わせることで、今後赤方偏移2～3における大規模なAGNサンプルの構築を可能にする。

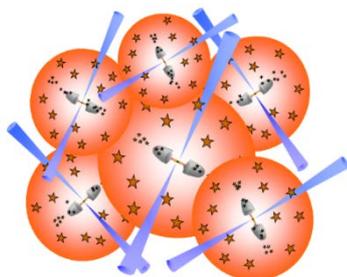
研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to unravel the origin of supermassive black holes through an integrated study of multiple AGNs using state-of-the-art theory and observation. In theory, we developed a three-dimensional general relativistic radiative transfer code without approximations, which is necessary to simulate the manifestation of multiple AGNs, and derived analytical solutions for relativistic radiation diffusion to treat photon trapping in super-Eddington accretion. For observations, we newly developed a narrow-band filter NB506 for the Subaru Telescope Prime Focus Camera (HSC) and combined it with the existing NB497, NB515, NB527 filters to perform a survey of broad line sources in the COSMOS field that are candidates for supermassive black holes.

研究分野：宇宙物理学

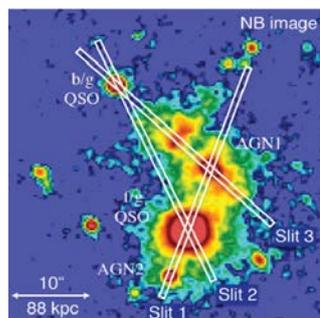
キーワード：巨大ブラックホール 活動銀河核

1. 研究開始当初の背景

銀河中心領域の星やガスの運動の観測から、銀河バルジの中心に超巨大ブラックホールが普遍的に存在し、ブラックホール質量はバルジ質量の約 1/1000 になっているという超巨大ブラックホール-銀河バルジ関係が見出されている (マゴリアン関係)。これらは、銀河形成と連動して超巨大ブラックホールを作る普遍的なメカニズムが存在したことを示唆しているが、それはまだ明らかにされていない。現在、標準的な宇宙論モデルとなっている Λ CDM 宇宙論では、銀河は階層的合体を経てボトムアップで形成されたと考えられている。この階層的合体過程では、銀河それぞれが持っている超巨大ブラックホールも取り込まれ、複数の巨大ブラックホールを持つ状態があったと考えられる。研究代表者は、複数の超巨大ブラックホールが質量降着によって、同時に活動銀河核 (AGN) になれば、多重 AGN をもつ原始銀河が存在するはずであることを理論的に予想した (下図-左)。その後、2011 年に赤方偏移 0.07 の銀河の中に 3 つの AGN が見つかったのを皮切りに、赤方偏移が 1 を超える銀河でも多重 AGN が見つかり始めた。そして、2015 年には、赤方偏移 2.04 に 4 重の AGN をもつ銀河 (Jackpot nebula) が発見された (下図-右)。現在では、ライマン α ($\text{Ly}\alpha$) 輝線の広域サーベイによって、赤方偏移 2 以上で多重 AGN が次々に見つかってきている。AGN の duty cycle を 1% 程度と考えれば、3 つの AGN がたまたま同時に発現する確率は 10^{-6} 、4 つなら 10^{-8} となり、サーベイ天体数を考え合わせると、多重 AGN は偶然ではなく、物理的にリンクしている可能性が高い。これは、AGN の活動性の発現メカニズムの解明に重要な手がかりを与える。



多重 AGN の理論予想図
(2010 年の講演スライドから)



4 重 AGN の発見
(Hennawi et al. 2015, Science)

多重 AGN は、ライマン α 輝線天体 (LAE) が集中したいわゆる原始銀河団領域にあり、最終的に楕円銀河に進化すると考えられている。近傍の楕円銀河において、上述のマゴリアン関係が成り立っていることを考えると、多重 AGN をもつ原始銀河は、中心に一つの超巨大ブラックホールをもつ早期型銀河となり、ブラックホール質量は銀河質量の 1/1000 にならない。多重 AGN をもつ原始銀河は、マゴリアン関係が成り立つ現場を捉えており、超巨大ブラックホール形成の謎を解く鍵となる。

2. 研究の目的

本研究では、最先端の理論計算と多波長観測を突き合わせた統合研究により、多重 AGN の物理状態と環境効果を調べ、超巨大ブラックホール形成に至るプロセスを紐解くことを目的とする。超巨大ブラックホール形成問題は、これまで主に「質量問題」として論じられてきた。高赤方偏移クェーサーの観測から、赤方偏移 7.1 に 20 億倍太陽質量の超巨大ブラックホールが発見されており (Mortlock et al. 2011)、これを初代星の超新星残骸である数 10 太陽質量のブラックホールから質量降着で作るためには、エディントン比 1.4 を超える降着率を 8 億年以上に渡って続けなければならないという問題がある。さらに、もう一つ「数合わせ問題」がある。例えば初代星残骸としてのブラックホールの数を計算したシミュレーションでは、ブラックホール数は、銀河の数の 10^4 倍と見積もられている (Ishiyama et al. 2016)。即ち、銀河中心の超巨大ブラックホールの数よりはるかに多い。一方で、高赤方偏移の超巨大ブラックホールは、初代星の超新星残骸ではなく、 10^5 太陽質量の超大質量星の重力崩壊によってできたブラックホールを起源とするという説が注目されているが、この場合のブラックホールの数は、赤方偏移 6 でのクェーサーの数程度であり、銀河の数よりもはるかに少ない (Hirano et al. 2017)。マゴリアン関係は、銀河バルジの中心にバルジ質量の 1/1000 の一つの超巨大ブラックホールができたことを示しており、この問題は、「質量問題」と「数合わせ問題」の両方を説明しなければならない問題である。数を調節できるのはブラックホール合体である。最近、aLIGO の観測で、30 太陽質量のブラックホール同士の合体が重力波の直接検出で確認された (Abbott et al. 2016)。我々は、巨大なブラックホールも合体可能なこと、そして合体するためにはどのような条件が必要かを調べてきた (Tanikawa & Umemura 2011, 2014)。多重 AGN をもつ原始銀河は、この「質量問題」と「数合わせ問題」を解明するために、鍵となる天体である。これが、一つの超巨大ブラックホールを持つ楕円銀河に進化しうるか否かは、母銀河や周辺環境を含めた詳細な観測と精緻な理論シミュレーションを組み合わせることで初めて明らかになる。

3. 研究の方法

多重 AGN をもつ原始銀河がどのように超巨大ブラックホールを持つ楕円銀河に進化し、どのようにしてマゴリアン関係が成り立つかという問題を理論的に調べるためには、AGN ブラックホールへの質量降着の一般相対論的輻射磁気流体計算、ならびに放射スペクトルの精密なモデル化、AGN と銀河の宇宙論的な共進化シミュレーション、超巨大ブラックホール合体のシミュレーションが必要である。近時のない一般相対論的輻射磁気流体計算を実現するためには、一般相対論的輻射輸送計算コードの開発が必要となる。右の表に示すように、これは世界初の試みになる。また、超エディントン降着における光子捕獲を扱うためには、相対論的な輻射拡散をサブグリッドで扱う必要があり、そのために新たな理論的枠組みを構築する必要がある。

3次元輻射流体計算: 世界におけるこれまでの取り組み年数

| | 輻射計算 | | | |
|-------|---------------------------------|------------------------------------|---------------|------------|
| | Optically-thin または ポルトローブ | FLD (Flux Limited Diffusion) | M1 Closure | 6次元輻射輸送 |
| 非相対論 | 40年 | 20年 | 10年 | 10年 |
| 特殊相対論 | 30年 | 10年 | 数年 | 数年 |
| 一般相対論 | 30年 | 数年 | 数年 | 本研究 |

さらに、多重 AGN のシミュレーションと観測を突き合わせるために、すばる望遠鏡主焦点超広視野カメラ (HSC) による赤方偏移 2~3 の AGN サーベイを行う。最近の観測で、赤方偏移 2~3 で多重 AGN の観測例が増えてきており、また AGN の光度関数の観測から、宇宙全体での大質量ブラックホールへの質量降着率が赤方偏移 3 から 2 にかけて大きく増加し、赤方偏移 2 付近でピークとなること (Madau & Dickinson, 2014) を勘案し、高い検出確度が期待できる赤方偏移 2~3 において、多重 AGN の狭帯域 (NB) フィルターを用いた広域サーベイを実施する。AGN 検出確率を上げるために、(1) Ly α 輝線に加えて AGN に特徴的な CIV, HeII 輝線のコンビネーションを使う、(2) 狭帯域 (NB) フィルターを並べて 1 型 AGN に特徴的な速度幅の広い輝線を捉える、という 2 つの戦略を実施する。この目的のため、新たな HSC 用 NB フィルター (NB506) を製作する。NB フィルターと各輝線中心の赤方偏移の関係は下表の通りである。この表で NB506 以外は、既に開発され HSC に搭載されているフィルターである。各フィルターがカバーできる帯域幅は赤方偏移にして $\Delta z \approx 0.07$ であることを考えると、NB506 を新たに開発することで、表からわかるように Ly α /CIV/HeII のコンビネーションで観測できる赤方偏移が連続的につながる。また、NB497, NB506, NB515, NB527 を並べることで $z=3.1-3.3$ の 20,000km/s 以上の線幅をもつ Ly α 輝線も漏らさず検出することができる。 $z=2.1-2.3$ については、NB387, NB395, NB400 を並べることで検出可能である。

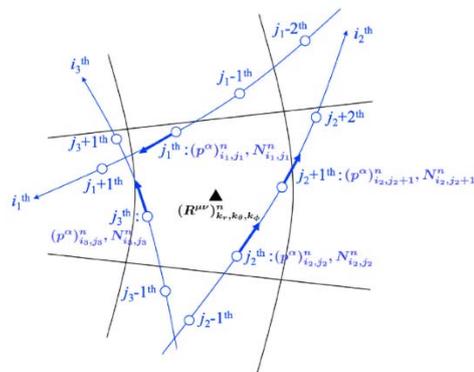
フィルターと輝線中心赤方偏移の関係

| フィルター名 | Ly α 1216Å | CIV 1549Å | HeII 1640Å |
|--------------|-------------------|-------------|-------------|
| NB387 | 2.18 | 1.50 | 1.36 |
| NB391 | 2.22 | 1.52 | 1.38 |
| NB395 | 2.25 | 1.55 | 1.41 |
| NB400 | 2.29 | 1.58 | 1.44 |
| NB468 | 2.85 | 2.02 | 1.85 |
| NB497 | 3.09 | 2.21 | 2.03 |
| NB506 | 3.16 | 2.26 | 2.09 |
| NB515 | 3.23 | 2.32 | 2.14 |
| NB527 | 3.33 | 2.40 | 2.21 |

4. 研究成果

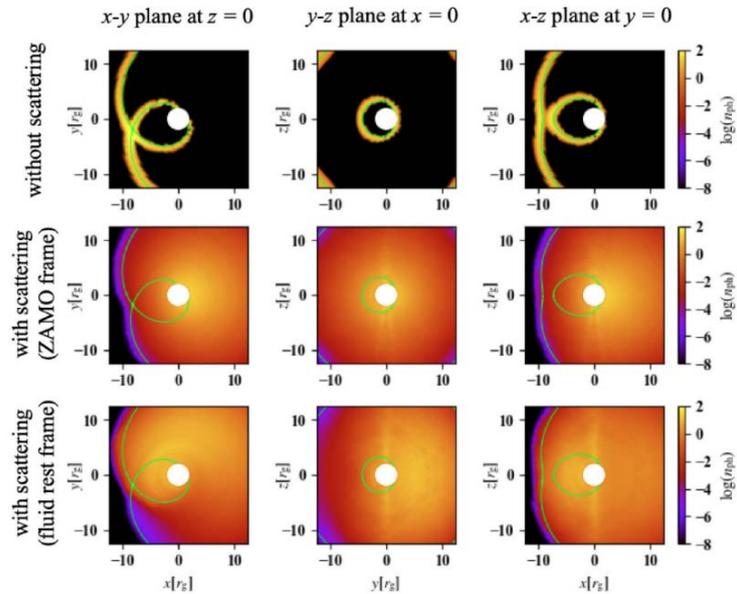
(1) 一般相対論的輻射輸送計算コードの開発

多重 AGN の発現のシミュレーションのためには、一般相対論的輻射磁気流体コードによって、ブラックホールへの超エディントン降着、亜エディントン降着、ホイール・リットルトン降着の計算を行う必要がある。特にブラックホールへの質量降着が超エディントンになると、拡散によって光子が降着円盤から脱出する前にブラックホールに吸い込まれる光子捕獲が起きる。これらを正確に計算するためには、一般相対論的な輻射輸送計算が必要になる。これまでは FLD 法 (フラックス制限拡散近似) や、M1 クロージャー近似を用いた計算が世界で行われてきたが、我々は世界に先駆けて近似



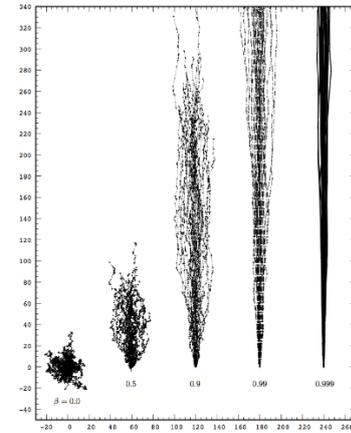
の無い一般相対論的輻射輸送計算コード ARTIST (Authentic Radiative Transfer In Space-Time)を開発した (Takahashi & Umemura 2017)。ARTIST は、測地線に沿って光の軌跡を時間依存で解くため、因果律が厳密に満たされ、光線の湾曲、時空の引きずり、重力赤方偏移などの一般相対論効果を正確に扱うことができる。ただし、光子数の保存は保証されておらず、特に散乱がある場合には光子数非保存の効果が強く表れるという問題があった。さらに、ARTIST は

2次元コードであるため、ブラックホール降着の現実的なシミュレーションのために、3次元への拡張が課題となっていた。本研究では、ARTIST コードを基にして、測地線に沿って光子数を保存しながら一般相対論的輻射輸送方程式を解く改良を行い、さらに3次元への拡張を行って、新たな一般相対論的輻射輸送計算コード"CAROON"を開発した。このコードを用いて、ブラックホール周りの光の波面の伝播計算を行い(右図)、実際に光子数が保存され波面が正確に計算できることを確認した。この成果は、学術論文として発表した(Takahashi, M. et al. 2022)。

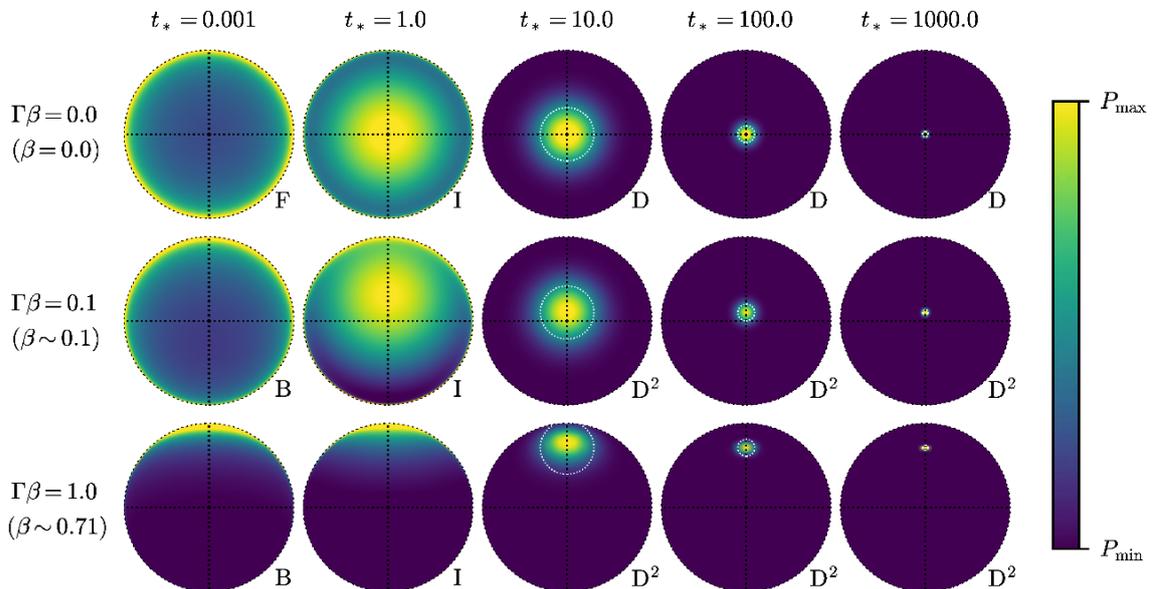


(2) 光子捕獲計算のための相対論的輻射拡散の定式化

超エディントン降着における光子捕獲を扱うためには、サブグリッドでの相対論的輻射拡散をどのように扱うかという問題がある。散乱による光子の拡散は、非相対論的な場合には、輻射拡散方程式に従うことが分かっているが、ローレンツ・ブーストを伴う相対論的な拡散については、これまで定式化がなされてこなかった。流体速度が輻射拡散の速度よりも遅い場合は、右図の左端のように、非相対論的な輻射拡散が起こるが、ローレンツ因子の増加と共に(右図の左から右)ローレンツ・ブーストの効果によって、前方集中が起こり、最終的にはローレンツ・ブーストのみで、輻射が伝播することになる。



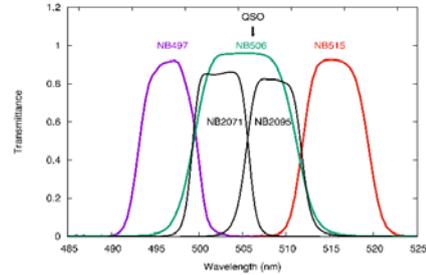
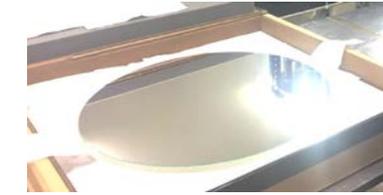
我々は、相対論的な流れの中で多重散乱する光子の確率密度分布関数に対する解析解を導出することに成功した。導出した3次元空間の確率密度分布関数は、固定時間面では変数分離形で表すことができる。下図は、この解析解を用いた光子の確率密度分布関数の変化を示す。上段が速度0 ($\Gamma\beta=0$)、中段が中間速度 ($\Gamma\beta=0.1$)、下段が高速 ($\Gamma\beta=1$) の場合(左から右に時間が経過)。速度0の場合は、最初の自由流(F)から中間状態(I)を経て拡散状態(D)となる(白の点線は拡散波面 \sqrt{t} を表す)。速度が大きくなると、自由流(F)から中間状態(I)を経て、ローレンツ・ブースト効果を伴う動的拡散状態(D²)となる。この解析解は、光子の自由流状態から動的に拡散するまでの状態を正確に表現することができることを確認した。これによって、超エディントン降着における光子捕獲の正確な扱いが可能となる。本成果は、学術論文として発表した(Takahashi, R. et al. 2024)。



(3) 多重 AGN の観測

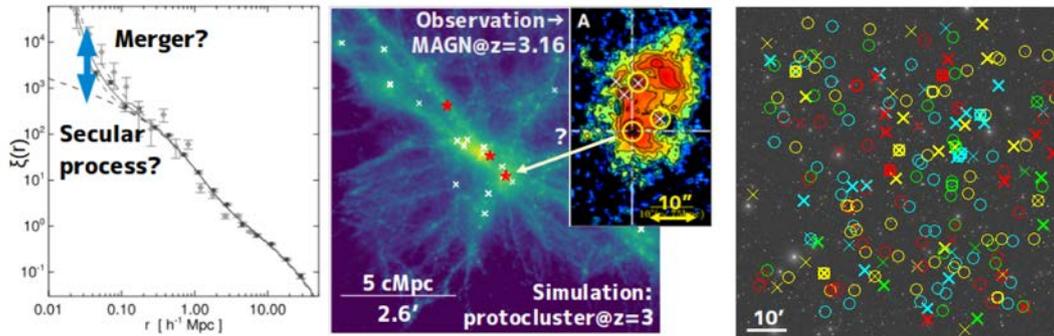
○ 新規狭帯域 (NB) フィルターの製作

本研究では、 $z=3.1-3.3$ の $20,000\text{km/s}$ 以上の線幅をもつ $\text{Ly}\alpha$ 輝線を漏らさず検出するために、既存の NB497, NB515 の間の波長帯に対応する新たな NB フィルター NB506 を製作した。製作は、朝日分光株式会社に発注し、2020 年 2 月に完成した。右図は製作された NB506 フィルター (上) とその透過率曲線 (下) である。下図に示されている通り、NB506 フィルターは、NB497, NB515 の間をつなぐなめらかで精度の良い透過率が達成できている。NB506 フィルターの製作費は、7,920,000 円である。本フィルターはハワイに移送され、すばる望遠鏡 HSC 用の新たなフィルターとして搭載された。



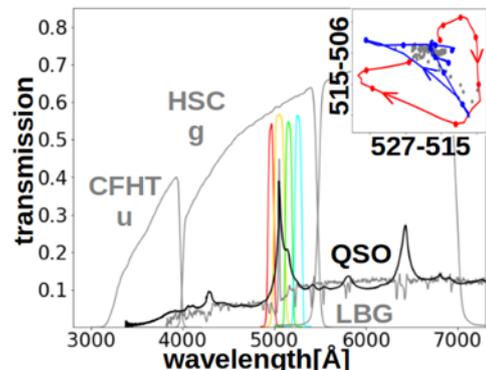
○ 多重 AGN の観測提案とデータ取得

本研究では、AGN の小スケールと大スケールの集中に注目した新たな視点から、COSMOS 領域で、すばる HSC による狭帯域 (NB) 撮像サーベイ提案を行った。Hennawi et al. (2006) は、 $z \sim 2$ における高光度の SDSS QSOs の相関関数が大スケールのべき乗勾配の外挿から予想されるよりも、小スケール (< 数 100 kpc) で過剰になっていることを発見した (下図-左)。近年発見された多重 AGN は、AGN の duty cycle が 1% 程度であることを考えると、数 100 kpc スケールで著しい集中を示唆している (Hennawi et al. 2015, Arrigoni-Battaia et al. 2018)。このような多重 AGN は、すべて Mpc スケールの密度超過領域に存在し、著しく明るく ($L_{\text{Ly}\alpha} > 10^{44} \text{erg s}^{-1}$)、巨大な (> 200 kpc) $\text{Ly}\alpha$ 星雲に埋め込まれているが、現在のシミュレーションでは、このような系が再現されるのは極めて稀である (下図-中央：白十字と赤い星は、質量が $10^8 M_{\odot}$ 以上の SMBH とエディントン比 > 0.5 のものを示す (Yajima et al. 2022))。このことは、環境に関連した未知のメカニズムが働いていることを示唆している。COSMOS 領域では、これまで X 線や電波で検出された AGN について、NB フィルターによって $\text{Ly}\alpha$ 線が捉えられている (下図-右：X 線 (×) と電波 (○) で検出された AGN の分布。赤、黄、緑、シアンは、これまで $\text{Ly}\alpha$ 線をとらえた NB フィルター NB497, NB506, NB515, NB527 を表す)。我々は、新たに開発した NB506 を含む隣接する 4 つの NB フィルター (NB497, NB506, NB515, NB527) を用いたサーベイにより、環境の効果を詳細に調べる観測提案を行った。



この 4 つの NB を用いることで「低分解能分光法」 ($\Delta z \leq 0.05$) により、 $3.05 < z < 3.36$ の $\text{Ly}\alpha$ 線を連続的に調べ、幅の広い $\text{Ly}\alpha$ 線を正確に見つけることができる (右図)。COSMOS で検出できる AGN の予想値は 300 個を超え、それらがランダムに分布していると仮定しても、約 30 組の AGN のペアが得られることになる。実際には、集中度に応じてこの数は増えることになる。また、LAE および LBG の赤方偏移も、ライマンブレイクや $\text{Ly}\alpha$ の放射・吸収による隣接する NB の色でよりよく決定することができる。この観測では、約 4000 個の $L_{\text{Ly}\alpha} > 10^{42} \text{erg} \cdot \text{s}^{-1}$ の LAE を検出することができ、相互相関解析や環境効果の解析に十分である。これにより、AGN のトリガー機構を解明するための非常にユニークな方法を提供することができる。

観測提案は S22B に行い、COSMOS NB506 観測提案が採択された。観測を実施した結果、積分時間 5.1h で、 5σ で 26.8 等までのデータが取得できた。現在データを詳細に解析中である。



色付曲線は左から NB497, NB506, NB515, NB527, グレーは ugr ブロードバンドの透過率曲線。黒線は、 $2.1 < z < 3.5$ の QSO の合成スペクトル (Harris et al. 2016)。右上の挿入図は、広い $\text{Ly}\alpha$ 線を持つ QSO (赤) と LBG (青) 異なる振る舞いとなることを示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計16件（うち査読付論文 16件 / うち国際共著 7件 / うちオープンアクセス 12件）

| | |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名 Takahashi Rohta, Umemura Masayuki, Ohsuga Ken, Asahina Yuta, Takeda Rintaro, Takahashi Mikiya M., Kawanaka Norita, Konno Kohkichi, Nagasawa Tomoaki | 4. 巻 967 |
| 2. 論文標題 A Relativistic Formula for the Multiple Scattering of Photons | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters | 6. 最初と最後の頁 L10 ~ L14 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ad409b | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |
| 1. 著者名 Xu Yi, Umemura Masayuki, et al. | 4. 巻 961 |
| 2. 論文標題 EMPRESS. XII. Statistics on the Dynamics and Gas Mass Fraction of Extremely Metal-poor Galaxies | 5. 発行年 2024年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 49 ~ 63 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ad06ab | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Isobe Yuki, Umemura Masayuki, et al. | 4. 巻 951 |
| 2. 論文標題 EMPRESS. IX. Extremely Metal-poor Galaxies are Very Gas-rich Dispersion-dominated Systems: Will the James Webb Space Telescope Witness Gaseous Turbulent High-z Primordial Galaxies? | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 102 ~ 119 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/accc87 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |
| 1. 著者名 Matsumoto Akinori, Ouchi Masami, Umemura Masayuki, et al. | 4. 巻 941 |
| 2. 論文標題 EMPRESS. VIII. A New Determination of Primordial He Abundance with Extremely Metal-poor Galaxies: A Suggestion of the Lepton Asymmetry and Implications for the Hubble Tension | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 167 ~ 180 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac9ea1 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Takahashi Mikiya M, Ohsuga Ken, Takahashi Rohta, Ogawa Takumi, Umemura Masayuki, Asahina Yuta | 4. 巻 517 |
| 2. 論文標題 3D photon conserving code for time-dependent general relativistic radiative transfer: CARTOON | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | 6. 最初と最後の頁 3711 ~ 3722 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stac2822 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

| | |
|--|-------------------------------|
| 1. 著者名 Yajima Hidenobu, Abe Makito, Umemura Masayuki, Takamizu Yuichi, Hoshi Yoko | 4. 巻 277 |
| 2. 論文標題 TRINITY: A three-dimensional time-dependent radiative transfer code for in-vivo near-infrared imaging | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer | 6. 最初と最後の頁 107948 ~ 107959 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.jqsrt.2021.107948 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|-----------------------|
| 1. 著者名 Kojima Takashi, Umemura Masayuki, et al. | 4. 巻 913 |
| 2. 論文標題 EMPRESS. II. Highly Fe-enriched Metal-poor Galaxies with ~ 1.0 (Fe/O) _{sun} and 0.02 (O/H) _{sun} : Possible Traces of Supermassive ($>300 M_{\text{sun}}$) Stars in Early Galaxies | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 22 ~ 41 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abec3d | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Kojima Takashi, Umemura Masayuki, et al. | 4. 巻 898 |
| 2. 論文標題 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 $M^* < 10^6 M_{\text{sun}}$ and 0.016 Z_{sun} | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 The Astrophysical Journal | 6. 最初と最後の頁 142 ~ 171 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aba047 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 該当する |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Fukushima Hajime, Yajima Hidenobu, Umemura Masayuki | 4. 巻 496 |
| 2. 論文標題 High circular polarization of near-infrared light induced by micron-sized dust grains | 5. 発行年 2020年 |
| 3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | 6. 最初と最後の頁 2762 ~ 2767 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1718 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|---------------------------|
| 1. 著者名 Kirihara Takanobu, Hasegawa Kenji, Umemura Masayuki, Mori Masao, Ishiyama Tomoaki | 4. 巻 491 |
| 2. 論文標題 Discrimination of heavy elements originating from Pop III stars in z=3 intergalactic medium | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society | 6. 最初と最後の頁 4387 ~ 4395 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stz3376 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である) | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 曾我健太, 梅村雅之 |
| 2. 発表標題 原始銀河とAGNの共進化過程と宇宙再電離への寄与 |
| 3. 学会等名 ブラックホール大研究会 - 星質量から超巨大ブラックホールまで - |
| 4. 発表年 2024年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 梅村雅之 |
| 2. 発表標題 21世紀の宇宙物理学へ |
| 3. 学会等名 研究会「宇宙天体形成史 - 初代星から生命の起源まで - 」 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 竹田麟太郎 , 大須賀健, 高橋劣太, 梅村雅之 |
| 2. 発表標題 相対論的流体中から放出された光子の多重散乱効果 ; 数値計算によるアプローチ |
| 3. 学会等名 日本天文学会 2022 年秋季年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高橋劣太, 梅村雅之, 大須賀健, 朝比奈雄太, 竹田麟太郎, 高橋幹弥, 川中宣太 |
| 2. 発表標題 相対論的流体中から放出された光子の多重散乱効果 |
| 3. 学会等名 日本天文学会 2022 年秋季年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|-------------------------------------|
| 1. 発表者名 高橋劣太, 梅村雅之, 大須賀健, 朝比奈雄太 |
| 2. 発表標題 相対論的流体中での因果律を保った光子多重散乱効果 |
| 3. 学会等名 日本天文学会 2022 年春季年会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高橋幹弥, 大須賀健, 高橋劣太, 小川拓未, 梅村雅之 |
| 2. 発表標題 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 |
| 3. 学会等名 日本天文学会 2021 年春季年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 阿左美進也, 梅村雅之, 安部牧人 |
| 2. 発表標題 Ly 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 |
| 3. 学会等名 日本天文学会 2021 年春季年会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 阿左美進也, 安部牧人, 梅村雅之 |
| 2. 発表標題 原始ガス雲の進化における Ly 輻射の水素分子抑制効果について |
| 3. 学会等名 日本天文学会 2020 年秋季年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 曾我健太, 梅村雅之 |
| 2. 発表標題 高赤方偏移銀河の Ly 表面輝度に対する多重 AGN の影響 |
| 3. 学会等名 日本天文学会 2020 年秋季年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 阿左美進也, 安部牧人, 梅村雅之 |
| 2. 発表標題 原始ガス雲内部から放出される Ly 光子による水素分子形成抑制効果 |
| 3. 学会等名 日本天文学会 2020 年春季年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 高橋幹弥, 高橋芳太, 大須賀健, 朝比奈雄太, 梅村雅之 |
| 2. 発表標題 ARTIST コードを元にした空間3次元一般相対論的輻射輸送コードの開発 |
| 3. 学会等名 日本天文学会 2020 年春季年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 桐原崇亘, 長谷川賢二, 梅村雅之, 森正夫, 石山智明 |
| 2. 発表標題 宇宙論的シミュレーションで探る $z=3$ の銀河間物質における初代星起源重元素 |
| 3. 学会等名 日本天文学会 2020 年春季年会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 梅村雅之 |
| 2. 発表標題 Mergers of accreting multiple BHs leading to SMBH formation in galactic nuclei |
| 3. 学会等名 The 30th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

〔図書〕 計3件

| | |
|----------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 梅村雅之, 福江純, 野村英子 | 4. 発行年 2024年 |
| 2. 出版社 日本評論社 | 5. 総ページ数 416 |
| 3. 書名 輻射輸送と輻射流体力学 [改訂版] | |

| | |
|----------------------------|-----------------|
| 1. 著者名 福江 純、和田 桂一、梅村 雅之 | 4. 発行年 2022年 |
| 2. 出版社 日本評論社 | 5. 総ページ数 416 |
| 3. 書名 宇宙流体力学の基礎 [改訂版] | |

| | |
|--|-----------------|
| 1. 著者名 中村 文隆、鶴 剛、長田 哲也、藤沢 健太、梅村 雅之、福江 純 | 4. 発行年 2022年 |
| 2. 出版社 日本評論社 | 5. 総ページ数 384 |
| 3. 書名 放射素過程の基礎 | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------|--|---|----|
| 研究分担者 | 長尾 透 (Nagao Tohru) (00508450) | 愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授 (16301) | |
| 研究分担者 | 松田 有一 (Matsuda Yuichi) (20647268) | 国立天文台・アルマプロジェクト・助教 (62616) | |
| 研究分担者 | 高橋 労太 (Takahashi Rohta) (40513453) | 苫小牧工業高等専門学校・創造工学科・教授 (50102) | |

6. 研究組織（つづき）

| | 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|-------------------|---|---|----|
| 研究 分 担 者 | 大内 正己 (Ouchi Masami) (40595716) | 東京大学・宇宙線研究所・教授 (12601) | |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
| | |