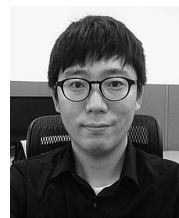


# SPICAが革新する銀河・ブラックホール 進化サイエンス



泉 拓 磨<sup>1</sup>

## SPICA サイエンス検討会銀河BH進化班

〈<sup>1</sup> 国立天文台ハワイ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: takuma.izumi@nao.ac.jp

SPICA サイエンス検討会・銀河BH進化班は2019年春の発足以来、1年以上にわたりSPICAで可能な・SPICAがやるべき（特に高赤方偏移での）系外銀河サイエンスを検討してきた。大テーマは「ダストに埋もれた活動現象の理解」。埋もれた活動銀河中心核の発掘、原始銀河団における天体進化の理解、様々な空間スケールを伝搬するアウトフロー、宇宙史にわたるダスト進化、高赤方偏移にまで至る分子ガス質量の直接測定、トリッキーには近傍宇宙で特徴付ける再電離期の銀河の性質、等々、その検討内容は多岐にわたる。SPICAの極めて高い感度とサーベイ能力、そして広い観測波長範囲を活かしたこれらのサイエンス案を本稿でお楽しみいただきたい。

### 1. 葉桜の季節の訪問者

「近々 SPICA 衛星で可能なサイエンスの検討チームを日本に立ち上げるのですが、その中の銀河・ブラックホール (BH) 進化を検討する班の班長を引き受けていただけませんか？」—2019年4月、桜の季節が終わりを迎えていた頃、私の居室を訪問された国立天文台・野村英子氏からこのような依頼を受けた。「はい、いいですよ」と完全なる二つ返事。というのも、電波天文学者である私にとって、4月上旬といえば毎年恒例、ALMA (アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計) に向けた観測提案準備の追い込み期であり、他のことには全く頭を割いていない。つまりろくに詳細を確認せずに依頼を引き受けたわけである。同室の学生に、「大事な話をよくそう簡単に引き受けられますね」と笑われてやっど、「もしかしてこれ、大変なことでは？」と思うに至った。

とはいえ、こんな若輩者にお声がけいただくの

は大変ありがたかったし、そもそも SPICA は 2020 年代末の打ち上げを予定する望遠鏡である。自分が「いいかんじのオジサン」になった時代の主力装置でやるサイエンスくらい、今のうちに自分たち世代が考えておくのが筋だろうと思い、自分なりに貢献することを決意したのであった。

かくして始まった「銀河BH進化班」であるが、幸いにも tennet/gopira/ryunet 等を通じて実に多くの班員が集まってくださった (表1)。SPICA サイエンス検討会の他班と比べると、若手の比率が高いのが特徴的だろう。もちろんベテラン研究者にも参加していただいております、的確なアドバイスを通じて本検討班が (私含め) 若手研究者の成長の場として機能したことも特筆に値する。

本稿では、これまで1年数ヶ月にわたる銀河BH進化班の活動の中で醸造されてきた大局的な“研究背景”と、検討したサイエンスのいくつかを紹介する。紙面の都合で全ては紹介しきれないので、ご興味のある方はぜひ本稿出版時には公開されて

表1 銀河BH進化班の班員構成.

氏名	所属 (2019年の班発足時のもの)
泉 拓磨	国立天文台
市川 幸平	東北大学
今西 昌俊	国立天文台
梅畑 豪紀	理化学研究所
久保 真理子	国立天文台
竹内 努	名古屋大学
田村 陽一	名古屋大学
鳥羽 儀樹	日本学術振興会/京都大学
長峯 健太郎	大阪大学
橋本 拓也	筑波大学
播金 優一	日本学術振興会/国立天文台
馬場 俊介	日本学術振興会/国立天文台
山下 拓時	国立天文台
和田 武彦	宇宙科学研究所

いるであろう我々の最終報告書をご覧ください。

## 2. 研究背景：宇宙史における塵に埋もれた活動現象の理解

「宇宙が重元素と星間塵（ダスト）により多様で豊かな世界になった」過程の解明は、SPICAの掲げる大目標の1つであるが、これは宇宙史において如何にして銀河やブラックホールが成長してきたかを解明することにも繋がる。

たとえば、宇宙の星形成活動と活動銀河中心核（Active Galactic Nucleus=AGN; 超巨大ブラックホールへの質量降着により輝く）の活動がピークを迎えるのは共に赤方偏移 $z\sim 2-3$ と考えられているが [1], この時代の星形成活動の大半はダスト放射を通じて観測される「埋もれた」星形成が担っており、静止系紫外線や可視光線で観測可能な「晴れ上がった」星形成の寄与は小さい。最近ではALMAを用いた高赤方偏移観測から、宇宙の星形成率密度が $z\sim 2-6$ において平坦である可能性も示唆されている [2]。つまり、 $z>4$ という高赤方偏移においても埋もれた星形成銀河が多数存在する可能性があり、ダスト減光に強い長波長観測への期待は高まっている。

また、冷たい暗黒物質が支配する階層的構造形

成においては、銀河同士の合体時に中心ブラックホールへガスが流入することでAGNが発現してブラックホール成長が進み、かつ、AGNに駆動された銀河風（アウトフロー）を介したフィードバックで銀河の星形成活動を抑制するという天体進化モデルが有力視されている [3]。このモデルは近傍宇宙で観測されている銀河とブラックホールの質量間の強い相関関係（共進化関係）も再現しており、銀河進化・ブラックホール進化の両面から興味深い。一方でこのシナリオに基づく、フィードバック前段階ないしは初期段階の若いAGNは銀河中心部でガスやダストに深く埋もれていて、静止系紫外線や可視光線の観測では見落としてしまうおそれがある。しかるに「AGNの発現環境・発現条件」や「フィードバック機構」の詳細を調べるにも、やはり長波長観測が重要となる。

紫外線や可視光線を遮蔽するダスト自体の研究も宇宙のバリオン進化の理解に欠かせない。なぜなら、ダストの生成・破壊には星形成活動が密接に関わるし、ダスト放射は銀河のエネルギー収支を通じてスペクトルエネルギー分布にも影響を及ぼすからだ [4]。既に宇宙誕生から10億年以内にできたクエーサー（高光度AGN）やサブミリ波銀河（爆発的星形成銀河）には大量のダストが存在することが知られており、宇宙初期のダスト形成過程の解明は重要課題である。また、銀河内におけるダストを含む星間物質の分布は、大質量星からの電離光子が銀河間空間にどう脱出するか、すなわち宇宙再電離を考える上でも重要となる。

これらの課題の解決に向けて、これまでIRAS, Spitzer, あかり, Herschel, WISEといった赤外線衛星が様々な観測を行ってきた。たとえば多バンド撮像観測からは星形成率（Star formation rate=SFR）やブラックホール降着率、ならびにその赤方偏移進化が論じられてきた [5, 6]。一方で詳細な分光観測に基づく星間物質の密度・温度・電離度・化学組成といった性質の議論や熱源（AGN vs

爆発的星形成)の診断は、検出感度の制限から  $z < 1$  の低赤方偏移のものが多く、SPICAを用いた遠方宇宙観測が望まれている。

この状況を念頭に置いた上で、以下に我々銀河BH進化班が検討したサイエンスをいくつか紹介する。検討内容はSPICAの観測装置の中でもSMIとSAFARIを用いるものが多い。いずれもSPICAの圧倒的な感度・幅広い観測波長・高いサーベイ能力を活かした内容、かつ、多くは欧州側では検討されていなかった＝日本の独自性が色濃く出た内容であり、日欧で協力してSPICA計画を推進するにあたり強い訴求力を持つだろう。

### 3. 検討したサイエンス

#### 3.1 埋もれた熱源の診断と広域サーベイへの適用

冷たい暗黒物質に基づく銀河形成においては銀河合体は普遍的である。こうした合体銀河が大量の星間物質を伴っている場合は、そのダスト量ゆえに紫外線・可視光線ではなく、その再放射である赤外線で明るい天体として観測される。このとき、銀河中心には大量の物質が流れ込んでいる。これは言い換えると、中心ブラックホールが急成長を遂げる重要な進化段階であると期待されるが、ブラックホール (AGN) は空間的に小さいため、銀河中心部の大量の高密度ガスやダストにほぼ全立体角が覆われるだろう。この場合は空間的に広がった低密度ガスの電離状態へのAGNの影響は限定的で、これまで中間赤外線帯で培われてきた高階電離禁制線を使った熱源診断 [7] を適用してその天体の熱源が爆発的星形成かAGNかを判断するのは難しい (図1)。

そこで今西氏は、芳香族炭化水素 (Polycyclic Aromatic Hydrocarbon=PAH) 放射の低分散 ( $R=50-100$ ) 中間赤外線分光に着目した。PAHは紫外光で励起されるため、星形成銀河で卓越して観

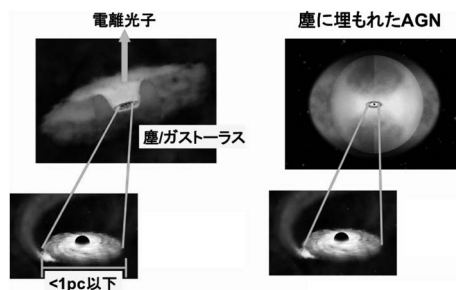


図1 (左) トーラス状の星間物質に囲まれたAGN. AGN由来の電離光子が周囲のガス雲に抜け出て特徴的な電離状態を作るので、禁制線強度比からAGNの有無を決定できる。(右) ほぼ全方向が星間物質に覆われた「埋もれた」AGN. 従来の禁制線を用いた分光診断では見落としてしまう。(クレジット: 国立天文台, NASA).

測される (ゆえにSFRの指標となる)。一方で埋もれたAGNの場合だと、PAHはAGNの強いX線放射で破壊されて光らない。また、AGNの場合は高温ダスト ( $>100$  K) の熱放射による連続光が卓越する。埋もれたAGNは中心核より手前に大量の低温ダストも存在するので、往々にしてこの高温ダスト連続光に対する低温ダストの吸収フィーチャー<sup>\*1</sup> (静止系  $9.7 \mu\text{m}$  のシリケート吸収等) も確認することができる。これらの輝線やフィーチャーは、波長的には静止系  $5.5-13.2 \mu\text{m}$  あたりに広がる「幅の広い」構造である点特徴的だ。しかるに、i) 広い波長範囲を ii) 低分散分光することで、精度良くフィーチャーを決定し、星間物質に富む天体中に埋もれた熱源 (AGN vs 爆発的星形成) を決定することができる (図2)。

ただし、現在のSPICA/SMIの仕様では、低分散スペクトルを一度に取得可能な波長範囲は  $18-36 \mu\text{m}$  となっている。これだと熱源診断に有用な静止系  $5.5-13.2 \mu\text{m}$  程度の全範囲のスペクトルは  $z \sim 1.7$  天体のみに関して取得可能と物足りない。SMIの短波長側を  $\sim 12 \mu\text{m}$  程度まで伸ばすことで  $z \sim 1$  の天体も観測できるよう、本検討会から

\*1 ダスト組成に応じて生じる特徴的な放射または吸収スペクトルのこと。

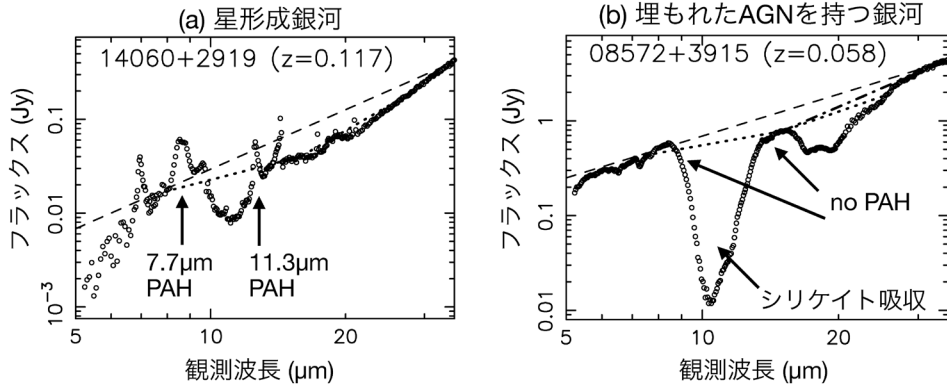


図2 Spitzer衛星の低分散分光観測による合体赤外線銀河の中間赤外線スペクトル例 [8]. (a) 星形成活動が支配的な銀河. 顕著なPAH輝線が確認できる. (b) 埋もれたAGNが支配的な銀河. PAH放射は見えない一方で, AGNに加熱された高温ダストの連続光放射が強い. 手前にある低温ダストによる吸収フィーチャー (ここではシリケートフィーチャー) も見てとれる\*2.

SPICA計画へ提言していきたい. 特に12-18  $\mu\text{m}$ 帯は, 2021年頃の打ち上げを予定している赤外線天文衛星James Webb Space Telescopeの低分散分光機能ではカバーされない波長帯なので, ここを抑えることはSPICAの独自性向上に繋がる. また, PAH輝線は他にも6.2/7.7/8.6  $\mu\text{m}$ の放射を持つ. これら様々な波長のPAH放射と, より長波長帯をカバーできるSAFARIを用いることで, さらに遠方 ( $z \geq 2$ ) の天体についても同様の研究が展開可能だろう.

これを踏まえて, 市川氏・梅畑氏・久保氏・山下氏はこのPAH熱源診断法を遠方宇宙のサーベイ観測へ適用することを考えた. 1つの興味深い観測対象は初期宇宙で最も天体進化が進んだ「環境」である原始銀河団だ. 既に名古屋大・金田氏らにより, SMIを用いた一般領域への無バイアスサーベイ [9] が検討されており\*3, この原始銀河団探査は「埋もれた活動現象」を含めて, いったいどういった活動が高密度領域で発露するのか

を, 一般領域と比較して包括的に解明する良い実験となる. SMIでの低分散分光撮像観測を想定する場合, 特に $z=2-3$ 程度の原始銀河団だと, 6.2/7.7/8.6  $\mu\text{m}$  PAH放射のいずれかは観測波長帯に赤方偏移してくるので都合が良い.

実際,  $z=3.1$ の原始銀河団であるSSA22 [10]の中心領域では, 一般領域に対して $\sim 100-1000$ 倍にも達する赤外線光度超過が確認されている. 同様の赤外線光度超過は近年すばる望遠鏡Hyper Suprime-Cam (HSC)の超広域サーベイで続々と発見されつつある $z \sim 4$ の原始銀河団でも(過去の赤外線衛星の観測データを足し合わせることで)確認されており [11], ダストに埋もれた何らかの活動現象が原始銀河団で卓越していることは間違いない(図3). SPICAの圧倒的な感度を用いて多数の原始銀河団で個別銀河観測を推進し, 熱源診断や赤外線光度を用いたSFR測定を進める—しかもそれを原始銀河団中で発達しつつある大規模構造 [10]と紐づけて理解する—ことで, 宇宙

\*2 Imanishi et al. 2007, ApJS, 171, 72 (A Spitzer IRS Low-Resolution Spectroscopic Search for Buried AGNs in Nearby Ultraluminous Infrared Galaxies: A Constraint on Geometry between Energy Sources and Dust; Published in July 2007)の図3, 4を改変.

\*3 特定の天体を事前選択することなく, とある天域を網羅的に観測する計画.  $10' \times 12'$ のSMI 1視野を20時間かけて低分散分光撮像する場合, 期待される $z=2.0-3.0$ の $L_{\text{IR}} > 10^{11} L_{\odot}$ なる赤外線銀河の総検出数は130個にもなる.



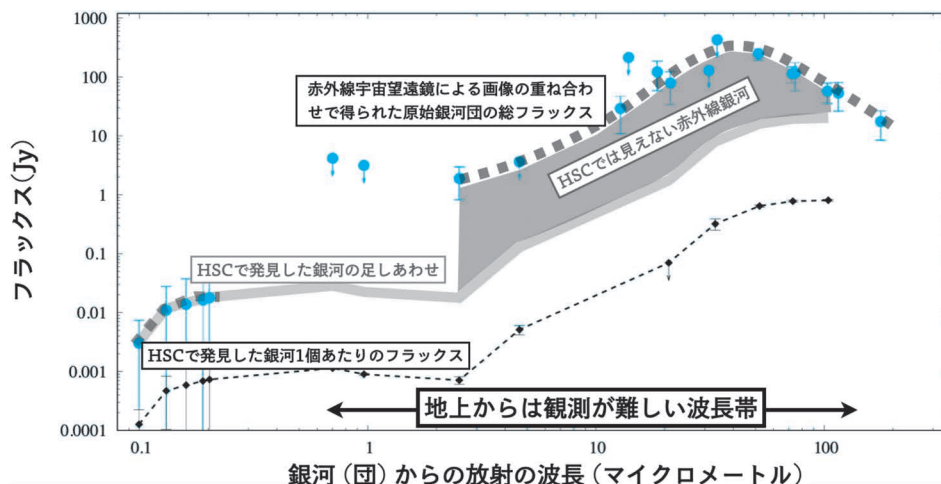


図3 HSC戦略枠観測で発見された $z\sim 4$ の原始銀河団約200天体における、Planck・あかり等の赤外線アーカイブデータを足し合わせた結果の、原始銀河団「まるまる1つ」あたりの平均的スペクトルエネルギー分布 [11]. HSC可視光観測から期待される赤外線フラックス (薄灰色の太線) よりも実際の観測値 (青点) ははるかに大きく、埋もれた活動現象の存在を示している\*4.

史における「活動現象と大規模構造の共進化」を統計的に理解できるだろう。

### 3.2 様々な空間スケールのAGNアウトフロー

2章で述べたように、特にAGNが駆動するアウトフローは銀河進化に多大な影響を与えるものとして重要視されている。既にHerschelを用いたOH吸収線 (119  $\mu\text{m}$ 線, 79  $\mu\text{m}$ 線等) の分光観測からP-Cygniプロファイル\*5を検出し、銀河内ガスの密度分布をモデル化することで、銀河スケールでのアウトフローの諸量 (アウトフローレート等) が $z\lesssim 0.2$ 程度の天体 (AGNと星形成銀河の両方) について測定されてきた [12]. この手法は近年ではALMAを用いて初期宇宙天体 ( $z\geq 5$ だと地上から観測可能な波長帯にOH吸収線が赤方偏移してくる) にも適用されているが [13], 近傍宇宙と遠方宇宙を繋ぐ中間赤方偏移の探査はHerschelの検出感度の問題から進んでいない。SPICA/

SAFARIによる中分散観測 ( $R\sim 2,000$ ) を駆使すれば、同様のOH吸収線観測が銀河形成最盛期の $z\sim 2$ まで拡張できるのは非常に魅力的である。一方でOH吸収線が捉えるのは基本的には母銀河スケールでのアウトフローだと考えられるため [12], 銀河中心の活動現象 (特にAGNは1 pc以下の非常にコンパクトな構造) と大スケールのアウトフローを一足飛びに結びつけるのは難しいというのが正直な印象だろう。

そこで馬場氏・長峯氏はなるだけ中心核近傍のアウトフロー、しかも一般にアウトフローガス質量の大半を担う分子アウトフローを探る案を検討した。利用するのはCO振動回転遷移線である。特に注目しているのは $v=1\leftarrow 0$ の振動遷移に $\Delta J=\pm 1$ の回転遷移が付随するもので、中心波長4.67  $\mu\text{m}$  界限に $\sim 0.01 \mu\text{m}$  間隔で多数の回転遷移線が現れる。これを吸収線として観測してやろうとい

\*4 Kubo et al. 2019, ApJ, 887, 214 (Planck Far-infrared Detection of Hyper Suprime-Cam Protoclusters at  $z\sim 4$ : Hidden AGN and Star Formation Activity; Published in December 2019) の図8を改変。

\*5 銀河の静止系を中心波長とする輝線成分に加えて青方偏移した吸収線があるプロファイル。OH吸収線の場合だと銀河のダスト放射を背景光としてアウトフロー成分が青方偏移成分として観測されていることに相当する。

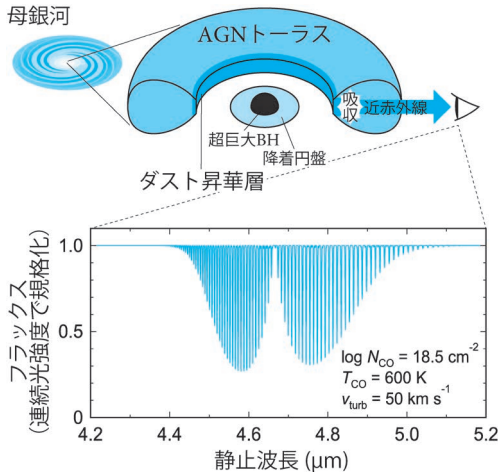


図4 (上) CO振動回転吸収線によるAGNトーラス領域観測の概念図。(下)期待されるCO吸収線の様子。ここではCO柱密度 $10^{18.5} \text{ cm}^{-2}$ 、ガス温度600 K、乱流由来の速度幅 $50 \text{ km s}^{-1}$ を仮定している。多数の吸収線が櫛状に並んでいる。

うアイデアである (図4)。

吸収線が生じるためには背景光源が必要だが、この $4.67 \mu\text{m}$ 線の場合はAGNのダストトーラスの内縁部分から放射される近赤外連続光がそれに相当する。この内縁半径はダストの昇華温度で決まり、一般に $\lesssim 1 \text{ pc}$ と非常に小さい。確率論的に考えて、吸収体もこの小さい光源の近傍に存在する—たとえば $\sim 10 \text{ pc}$ スケールのAGNトーラスに付随する高密度分子ガス—と考えるのが妥当だろう。すなわち、この近赤外線吸収線観測では実効的に非常に高い空間分解能を得ることができるのが特徴である。多数のCO吸収線を同時観測できる点も重要で、その強度比の解析から星間物質の温度や密度を精度良く導出できる。吸収線のP-Cygniプロファイルから調べたアウトフローの速度構造と組み合わせて、中心核の性質と紐づけたアウトフローの物理的性質の議論(エネルギーや運動量の伝達具合の調査等)が可能だ。もちろんSPICA自身によるOH吸収線観測や、ALMAによるミリ波・サブミリ波CO回転遷移線の観測から導出される母銀河スケールでのアウトフロー

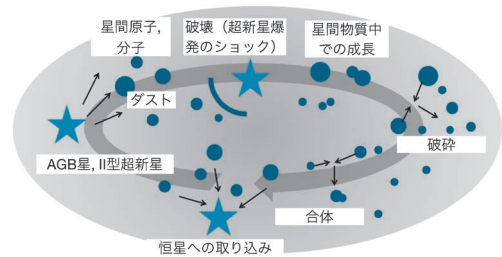


図5 ダストの様々な生成・破壊・成長過程の概念図。

との関連も調べることで、AGNアウトフローが本当に星形成の抑制に有効なフィードバック機構なのか否かにも結論を出せるだろう。

観測概略を述べると、SMIの高分散分光モードでは波長範囲 $12\text{--}18 \mu\text{m}$ がカバーされるため、 $z > 1.6$ の銀河が観測対象となる。波長分解能は $R = 33,000$ と非常に高く、問題なく振動回転遷移線を分別できる。もちろん高分散モードでは連続光に対する感度が低下することは事実だが、多数ある回転遷移線をスタックすることでこの問題を克服できることも確認できた。

### 3.3 中-高赤方偏移天体のダスト・ガス観測

ダストは宇宙のバリオン進化と密接に関わる銀河の重要構成要素であり、ダスト形成進化の理論構築は宇宙進化の理解のために不可欠である(2章参照)。ダストは漸近巨星分枝星や超新星の質量放出に伴って星間空間に放出された重元素が凝縮して形成されたり、高密度ガス中ではダスト粒子に重元素が降着してダスト自身が成長したり、はたまた超新星爆発の衝撃波で破壊されたりと、極めて複雑な生成・破壊・成長過程を辿る(図5)。

近年ダストの化学進化も取り入れた包括的な理論モデル(浅野モデル)が構築され[4, 14]、この分野は著しく進展した。浅野モデルは図5の複雑な過程を網羅した銀河進化理論初めての枠組みであり、ダストの関連する現象について強力な予言力を持つが、組み込まれた素過程の妥当性の検証や高精度化には詳細な観測的調査が求められる。そこで、竹内氏・鳥羽氏はSPICAを用いた広い

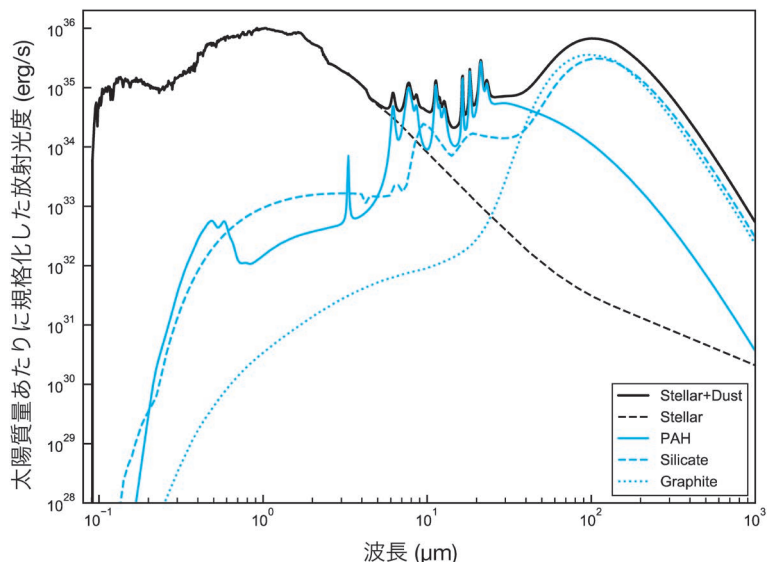


図6 浅野モデルに基づく輻射輸送で計算した天の川銀河を模した天体のSED. 恒星(黒鎖線), PAH(青実線), シリケート系ダスト(青鎖線), 炭素系ダスト(青点線)のそれぞれの寄与, ならびにそれらを合計したSED(黒実線)を示した.

波長範囲にわたるダスト放射観測から導かれるサイエンス案を検討してきた。

「ダストの進化」とそれを宿す「銀河の進化」を観測的に明らかにする。これを考えたときに有効なアプローチの1つは、現実的な銀河の星間物質の様子(たとえばクランプ状の分布)に立脚した輻射輸送スキームを構築し、それを(i)銀河の化学進化、(ii)浅野モデルのダスト進化と(iii)その帰結である減光曲線進化、の全てに整合的に組み込んで予測したスペクトルエネルギー分布(spectral energy distribution=SED)を、観測されたSEDと比較することだろう。この考えに則り計算した、天の川銀河に類似する銀河の理論SEDを図6に示す。この理論SEDには様々なダストフィーチャーが現れているが、これらは決して自明なものではない。よって、SPICAがもたらす高精度分光観測と付き合わせることで、個々のフィーチャーを生むに至った要因(ダスト質量、サイズ分布、組成、および星形成史との関係)を明確にできるのである。この研究はSPICAの幅広

い観測波長のおかげで銀河進化最盛期の $z \sim 2-3$ まで伸展可能と考えられ、いよいよ宇宙史におけるダスト進化や重元素進化を体系的に、確固たる観測的根拠を持って議論できる時代が来ると期待している。

ダストだけでなく、SPICAは遠方宇宙の分子ガスの直接検出にも威力を発揮する。恒星は分子ガスから誕生するため、宇宙の古今にわたる分子ガス量の正確な測定は、天文学の最も基本的かつ重要な課題の1つだ。たとえば赤外線連続光観測等から導出したSFRで分子ガス質量を割った値のgas depletion time ( $t_{\text{dep}}$ )は「星形成効率」の指標であり、当時の銀河の平均的な分子ガス密度や星形成をトリガーする機構を議論するための重要な観測量である [15]。

ところが、残念ながらこれまでの研究では遠方宇宙の分子ガスの性質についてのコンセンサスを得るには至っていない。その要因の1つは分子ガス質量(ここでは簡単のため $H_2$ 質量 $M_{H_2}$ を考える)の測定が元来困難なことにある。 $H_2$ 分子は

永久双極子モーメントを持たないため、通常の間転遷移を行わない。よって星間空間でH<sub>2</sub>に次いで豊富なCO分子輝線をM<sub>H<sub>2</sub></sub>のプロープに使うことが多い。ところが、CO輝線はどの回転準位を使うかに依存して励起を解くというステップが入るし、そもそもCO光度からM<sub>H<sub>2</sub></sub>への変換係数も、高赤方偏移ではきちんと制限できていない。

この状況を踏まえて、播金氏はH<sub>2</sub>分子の四重極放射に注目した。これは静止系波長10-30 μmに存在するH<sub>2</sub>の純回転遷移線だが、四重極放射ゆえ暗く、これまではz=0.3天体での検出が最遠方記録だった [16]。SPICA/SAFARIによる中間赤外線分光はこの四重極放射をz=2-7の遠方天体においても検出可能とする。ただし、正攻法の観測ではさすがに暗すぎる。どうするか？ 天然の望遠鏡である重力レンズ効果を利用するのである。図7に既知の遠方銀河の予想されるH<sub>2</sub>輝線光度を示す。ご覧の通り、SPICAの超高感度と重力レンズ効果のおかげで、多くの銀河で10時間

未満の観測で有意な検出が見込める。また、z=2-3に絞ると、(増光補正をすると)当時の宇宙の典型的な銀河=銀河光度関数の肩(L\*)に位置するような銀河においても、H<sub>2</sub>輝線の直接検出が可能と予測されている。中間赤外線H<sub>2</sub>放射は比較的高温(>100 K)のガス成分に感度を持つが、複数遷移輝線を観測して強度比から温度を導出することで、より低温成分も含めた分子ガス総量を推定する方法も提案されている [17]。すばる望遠鏡HSCのサーベイ観測等で今後も重力レンズ天体は続々と発見されるので、これは強力な遠方宇宙の分子ガス探査法になると期待している。

### 3.4 近傍宇宙で特徴付ける宇宙再電離

初期宇宙を研究する天文学者の最大公約数的興味の1つは宇宙再電離だろう。宇宙誕生後およそ2-10億年時(z~6-20)に起きた銀河間空間の最後の相転移である。再電離は波長912 Å以下の電離光子(以下Lyman continuum光子; LyC)によって引き起こされたが、その主たる放射源は初代星や初代銀河だと考えられている。この再電離の過程を定量評価する上で重要なのは、ある光度の銀河がどれだけのLyCを生成し、そのうち何割が銀河間空間に脱出するかを調べることである [18]。ところが、残念ながらこのLyC脱出率(f<sub>esc</sub>)には観測的制限がほとんどついていない。理想的には再電離が完了する前のz>6において、直接LyCを観測したいが、実際にはz>4だと銀河間物質によりLyCは吸収されて我々に届かず、その観測は事実上不可能である。

そこで橋本氏・田村氏が検討したのが、LyCの検出が可能なz=0-4宇宙において、(LyC観測から測定された)f<sub>esc</sub>と「良く相関する」物理量を特定することだ。この種の相関を発見できれば、同じ物理量の観測をz>6天体にも実施することで、実際の初期宇宙の再電離過程を詳しく調べられるだろう。彼らが特に注目したのは、電離光子放射天体であるLyC emitterに対する遠赤外線微細構造輝線 [O III] 88 μmと [C II] 158 μmの強度

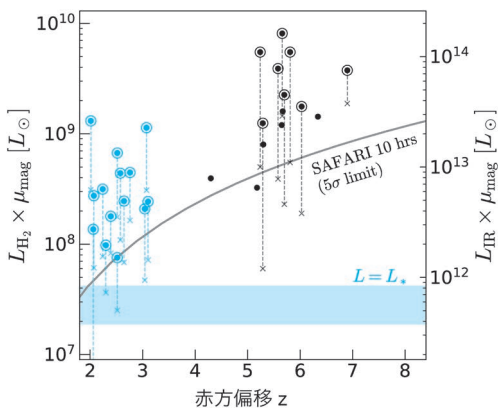


図7 予想される遠方銀河のH<sub>2</sub> S(1)輝線光度と赤外線光度。黒丸はz>4のダストに富む星形成銀河を、青丸はz~2-3の星形成銀河を、共にいくつかの文献から選んできて示した。重力レンズ天体に関しては(μ<sub>mag</sub>倍の)増光前の光度をばつ印で記した。SPICA/SAFARIによる10時間積分で到達する輝線検出感度(5σ)を灰色の実線で記す。帯部分はz~2-3銀河の典型的な赤外線光度。



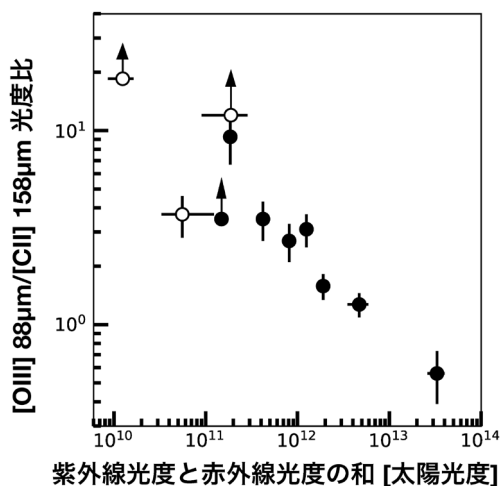


図8 ALMAが観測した遠方銀河の  $[\text{O III}] 88 \mu\text{m}/[\text{C II}] 158 \mu\text{m}$  光度比を銀河の全輻射光度の関数として表示したもの [19]. 黒(白)丸のデータ点はダストの連続光放射を検出できた(できていない)天体. 強度比が3を超える高い値を示す天体は全て, 再電離期の典型的な星形成銀河である \*6.

比の測定である. 既に  $z > 6$  の星形成銀河では, この  $[\text{O III}]/[\text{C II}]$  強度比が非常に高いことが知られている (図8). もちろんこの比は様々なパラメータに依存するが,  $z \sim 8-9$  銀河に見られる極めて高い比 ( $\geq 10$ ) については, 電離光子源に対する中性ガス被覆率が小さいか, そもそも電離パラメータが高い状態にあるか, のどちらかの可能性が高いことが星雲輝線モデルの解析から示されている [20]. これらはいずれも電離光子脱出に適した状況であり,  $[\text{O III}]/[\text{C II}]$  光度比が  $f_{\text{esc}}$  の指標になる可能性を示唆している.

これを踏まえて, 低赤方偏移宇宙にいる LyC emitter を片っ端から  $[\text{O III}]$  と  $[\text{C II}]$  で観測することを計画している. 既知の LyC emitter の多くは  $z < 0.4$  にいるため, 「もうそんな観測あるでしょう?」と思うかもしれない. しかし意外なことに

データが存在するのは, かつて Herschel で観測された1天体のみである. ほとんどの LyC emitter の発見が, Herschel が退役した2013年以降になされているため, 実は低赤方偏移天体でありながらも手付かずの「フロンティア」なのである. 遠赤外線観測の多くが恒久的運用が困難な衛星観測に依存していることの弊害とも言えよう. とはいえおかげで SPICA/SAFARI で狙うべき重要ターゲットとして生き残っているのである. 果たして本当に  $[\text{O III}]/[\text{C II}]$  比と  $f_{\text{esc}}$  には良い相関関係が見られるのか, 今から結果が楽しみである.

#### 4. ま と め

本稿では我々「銀河BH進化班」のこれまでの検討内容のいくつかを紹介させていただいた. 様々な天体種族に対する多様なサイエンス案が提示されているが, これこそが SPICA の圧倒的な能力への期待の顕れである. 紙面の都合で紹介しきれなかった提案も複数あるので, ご興味のある方はぜひ「SPICAサイエンス検討会・最終報告書」をご覧ください. また, 天文月報来月号には近傍宇宙での系外銀河サイエンスの話題が提供されるので, そちらもお楽しみに.

さて, 最後に強調しておきたいのは, SPICA は先代の赤外線衛星たる Herschel に比べて, 感度がなんと2桁も (!) 向上する観測衛星である. 「〜が10倍良くなった」というフレーズはたまに聞くが, 「2桁の向上」は天文学史上でもそうそう起きない一大事だろう. 直近でこのレベルの性能向上を達成した例は ALMA であり, それが天文業界にどれほどのインパクトをもたらしたかは明々白々だ. 筆者は大学院入学時に ALMA データに触れることができた最初の世代で, 日々それがもたらすワクワク感を天文業界全体に感じながらこれまで過ごしてきた. この SPICA 計画の実

\*6 Tom J. L. C. Bakx et al. 2020, MNRAS, 493, 4294 (ALMA uncovers the  $[\text{C II}]$  emission and warm dust continuum at  $z=8.31$  Lyman break galaxy; Published in April 2020) の図3を改変.

現をもって、ぜひあのワクワク感を（今いる天文学者の皆さんはもちろん）これから天文学を始める方々にも感じてほしい。それを成し遂げるための努力を惜しまぬ決意を新たに、ここに筆を置くことにする。

## 謝 辞

まず班長として、これまで長期間サポートしていただき、また、素晴らしいサイエンス案をたくさん出してくださった班員の皆様に心より感謝申し上げます。素晴らしい仲間恵まれて貴重な経験をさせていただき、幸運でした。こんな若輩者を信じて班長の機会を与えてくださった SPICA サイエンス検討会の長尾透・野村英子両氏にも大変感謝しております。最後になりますが、この原稿を作るにあたっては、市川幸平氏をはじめとする天文月報編集委員の方々に大変お世話になりました。こちらも併せて御礼申し上げます。

## 参考文献

- [1] Madau, P., & Dickinson, M., 2014, *ARA&A*, 52, 415  
 [2] Gruppioni, C., et al., 2020, *A&A*, accepted (arXiv: 2006.04974)  
 [3] Hopkins, P. F., et al., 2006, *ApJS*, 163, 1  
 [4] Asano, R. S., et al., 2013, *Earth Planets Space*, 65, 213  
 [5] Mullaney, J. R., et al., 2011, *MNRAS*, 414, 1082  
 [6] Rowan-Robinson, M., et al., 2016, *MNRAS*, 461, 1100  
 [7] Spinoglio, L., & Malkan, M. A., 1992, *ApJ*, 399, 504  
 [8] Imanishi, M., et al., 2007, *ApJS*, 171, 72  
 [9] Kaneda, H., et al., 2017, *PASA*, 34, e059  
 [10] Umehata, H., et al., 2019, *Science*, 366, 97  
 [11] Kubo, M., et al., 2019, *ApJ*, 887, 214  
 [12] González-Alfonso, E., et al., 2017, *PASA*, 34, e054  
 [13] Spilker, J. S., et al., 2018, *Science*, 361, 1016  
 [14] Asano, R. S., et al., 2013, *MNRAS*, 432, 637  
 [15] Tacconi, L. J., et al., 2013, *ApJ*, 768, 74  
 [16] Egami, E., et al., 2006, *ApJ*, 652, L21  
 [17] Togi, A., & Smith, J. D. T., 2016, *ApJ*, 830, 18  
 [18] Robertson, B. E., et al., 2015, *ApJ*, 802, L19  
 [19] Bakx, T. J. L. C., et al., 2020, *MNRAS*, 493, 4294  
 [20] Harikane, Y., et al., 2020, *ApJ*, 896, 93

## SPICA Revolutionizes Extragalactic Astronomy

### Takuma IZUMI, SPICA GalBH evolution working group

*National Astronomical Observatory of Japan, Hawaii Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Since 2019 spring, our SPICA Galaxy-BH evolution working group has worked for more than a year to create extragalactic science cases that SPICA can and should do. Our main theme is “understanding dust-obscured activities”. We have discussed identifying obscured active galactic nuclei, understanding rapid galaxy evolution in protocluster regions, multi-scale outflows, evolution of dust itself over the cosmic history, precise measurements of H<sub>2</sub> mass toward high-redshifts, characterization of galaxy properties in the reionization era with nearby galaxies...and many others. We wish you enjoy these ideas that exploit the extremely high sensitivity, survey power, and the wide wavelength coverage of SPICA.