

SPICA で見る近傍銀河と銀河系

江草 芙実¹

SPICA サイエンス検討会「近傍銀河・銀河系」班

〈¹ 東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター 〒181-0015 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ¹ fegusa@ioa.s.u-tokyo.ac.jp



「近傍銀河や銀河系をSPICAで観測すると何がわかるのか?」「SPICAでやるべき近傍銀河・銀河系の研究は何か?」というシンプルだけれども簡単ではない問いに答えるべく、SPICAサイエンス検討会の「近傍銀河・銀河系」班では2019年より検討活動を行ってきた。それぞれの班員がこれまでの経験を活かしつつ、新しい装置での新しいサイエンスを組み上げるといえるのは、ときに楽しくときに辛い作業でもあった。本稿によって、少しでも多くの人に近傍銀河と銀河系の研究への興味を持っていただければ幸いである。

1. はじめに

私は普段、近傍の（つまりご近所にある）渦巻銀河の研究を主に行っている。大学院生の頃は野辺山ミリ波干渉計（NMA）、卒業後の研究員時代にはThe Combined Array for Research in Millimeter-wave Astronomy（CARMA）を使い、渦巻銀河中の星間分子ガスの質量や運動について調べていた。その後も、ALMAで研究員やスタッフとして働いていたので、波長で言えば専門は電波天文学である。しかし、2010年から2015年までは、縁あって赤外線衛星である「あかり」の研究員として運用やデータ解析などに携わっていた。当時のSPICAは、「あともう少しで正式にプロジェクト」だけれども様々な要因が絡み合っかなか進まず、という雰囲気だった。当時の私は、それを「SPICA大変そうだなー」と思って横目で眺めていた。

ところが、2018年にSPICA研究推進委員会が発足する際、委員としてお声がけをいただいた。そして2019年にはSPICAサイエンス検討会が立ち上げられ、「近傍銀河・銀河系」班の班長を拝命することになった。やや大袈裟な表現ではあるが、人生なにが起きるかわからないものである*1。

班員は、各種メーリングリストでの募集に応じて参加していただいた方だけでなく、班全体としてカバーする分野がなるべく広がるように、かつこれまであまりSPICAに関わってこなかった方も巻き込みたいという方針で、私から直接一本釣りのようにお願いをして入っていただいた方もいる（表1）。皆さんそれぞれ大変お忙しい中、検討活動にご協力いただいている、どれほど感謝しても足りないくらいである。

本稿では、SPICAサイエンス検討会「近傍銀河・銀河系」班で検討したテーマやその意義をわかりやすく紹介することに主眼を置いている。そ

*1 この記事の投稿は2020年8月だったが、その後ESA側のコスト超過が明らかになり、計画の見直しを検討されていた。そして同年10月に、ESA Cosmic Vision M5選抜に向けた検討を打ち切るという判断がなされた。この決定は非常に残念であるが、この分野におけるスペース中間・遠赤外線観測のサイエンスを検討した結果を示すものとして、この記事の価値には変わりがないと考えている。

表1 近傍銀河・銀河系外の班員一覧.

氏名	所属 (2020年8月現在)
江草 芙実	東京大学
稲見 華恵	広島大学
金子 紘之	上越教育大学/国立天文台
左近 樹	東京大学
竹内 努	名古屋大学
田村 陽一	名古屋大学
中西 康一郎	国立天文台
馬場 淳一	国立天文台
本原 顕太郎	国立天文台
渡邊 祥正	芝浦工業大学

それぞれの検討項目のより詳細な内容については、ウェブで公開されているサイエンス検討会の最終報告書を参照されたい。

2. 背景: 近傍銀河と赤外線観測, それぞれの重要性

銀河の歴史 (すなわち宇宙の歴史) を理解する

ためには、「ガスやダストからなる星間物質から星が生まれ、その星の一部はまた星間物質に戻る」という星間物質の輪廻 (図1) にともなう過程を解明することが重要である。低密度なガスが自己重力により高密度コアを持つ巨大分子雲になり、やがて星が形成されると、その後は星からの紫外線によって周囲のガスを電離したり (H II 領域), 超新星爆発や星の外層がはがれる質量放出などにより星の一部が星間物質に戻る。また, 超新星爆発やアウトフローは, 周囲の星間物質を吹き飛ばしたり圧縮したりする効果もあり, これらの星が星間物質に与える影響をまとめて星形成フィードバックと呼ぶ。

このように書くと、「なんだ。もう星間物質の輪廻はだいたいわかっているじゃないか」と思われるかもしれないが, もちろんそんなことはない。図1で示した過程のひとつひとつに, まだ解

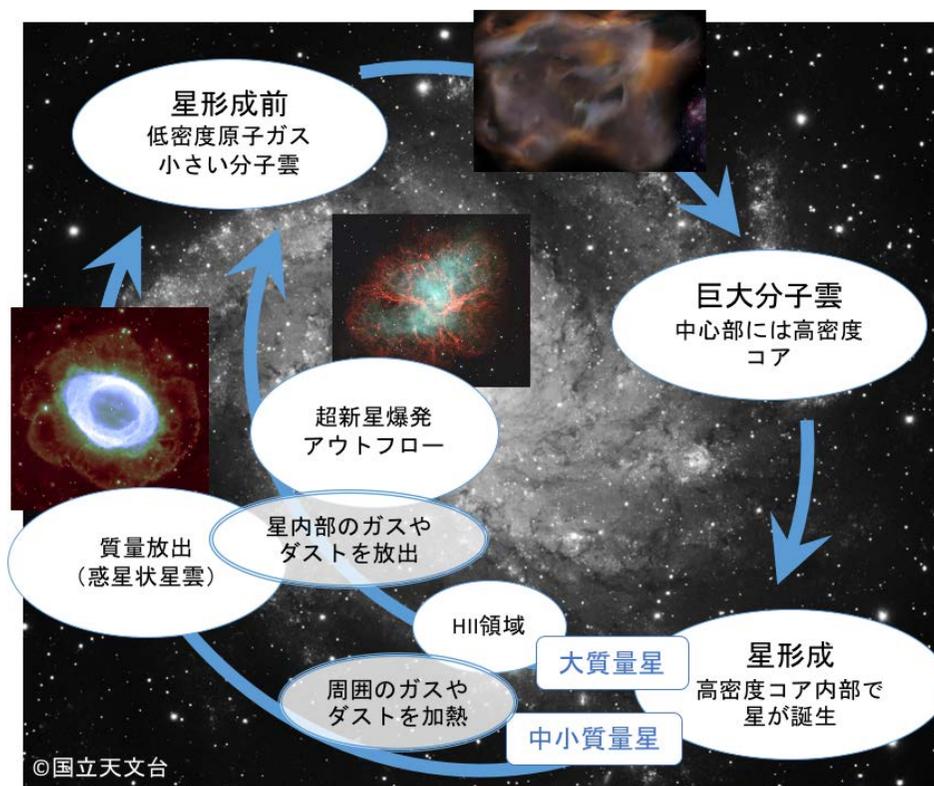


図1 星間物質 (ガス+ダスト) の輪廻の概念図.

明されていない点が多く残っているのだ。例えば、「星形成に直結すると考えられている高密度コアの多寡を決める要因は何か?」「星形成後に周囲のガスはどの範囲でどの程度電離されるのか? それにともないガスの温度や密度はどう変化するのか?」「超新星爆発や質量放出などで星間物質に放出されるダストの組成や量は?」などである。これらの疑問に答えるために、SPICAによる近傍銀河の赤外線観測が重要な役割を果たす。

近傍銀河は、その近さゆえに銀河の内部を空間分解して観測することができる。したがって、上で述べた疑問点に対応する場所に注目して観測・解析することで、それぞれの過程にともなった星間物質の状態変化を調べることができる。また、銀河内の大局的な構造(例えば渦巻腕)と上述の物理過程に直結する局所的な構造(例えばH II領域)を直接比較できるという大きな利点を持つ。さらに、近傍銀河は現在の宇宙そのものを理解するためにも欠かせない天体である。

そして、SPICAで観測できる中間-遠赤外線の波長帯は、星間物質の状態変化を調べるのに非常に有用である。星間ガスはその温度や電離度などによって様々な輝線を出す、その多くがSPICAの観測波長帯に存在する[1]ため、これらの輝線の強度比から星間ガスの物理状態を探ることができる。今回の「近傍銀河・銀河系」班による検討では、特にこれまであまり研究が進んでいなかった温度が数100 K程度の「暖かいガス」成分に着目している。一方ダストは主に連続波といくつかの特徴的な輝線で観測されるが、温度や星間輻射場の強度などによってその強度が変わる。そのため、広い波長帯域で分光データが得られることが、ダストの物理状態を知るうえで非常に重要である。さらに、これまでの観測装置と比較して感度が格段に向上するという点も、対象天体の幅や数を増やし、より包括的な理解に繋げるという観点で当然有益である。

3. 検討結果の紹介: 銀河の中から銀河の外まで

ひとことで銀河といっても、その大きさや形状は様々である。また、どこまでが銀河の中でどこからが銀河の外なのかの基準も様々である。そこでここでは、銀河中心に次いで星形成活動の活発な銀河円盤に着目し、その内部と外部を銀河面内(3.1節)・銀河面外(3.2節)として、それぞれの場所で重要となるトピックを紹介する。そして最後に、近傍銀河が集団としてどのような性質であるかを調査する研究について紹介する(3.3節)。これらの検討項目の概略図を図2に示す。この図からも明らかのように、他の班(特に「銀河ブラックホール進化」班と「星形成・星間媒質」班)との関わりも非常に重要である。

3.1 銀河面内でのサイエンス

まずは銀河円盤内で起きる物理過程についての研究を紹介する。ここでは、イメージがつかみやすいように対象としている過程の空間的スケールがだんだん大きくなるように並べている。

3.1.1 大質量星によるダスト供給

天の川銀河の星間ダストの供給源は、これまで中小質量星からの質量放出が主であると考えられていた。しかし近年の観測で $z \geq 6$ の銀河にも星間ダストが大量にあることがわかってきた[2]。

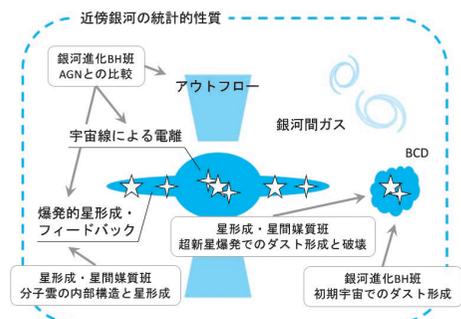


図2 「近傍銀河・銀河系」班での検討項目の概略図。灰色の矢印は、他の班での検討項目との関連性を示す。

この時代は宇宙年齢で1 Gyr (10億年) 以下に相当するが、多くの中小質量星が生まれてから質量放出するまでにかかる時間はそれよりも長い。ため、中小質量星以外のダスト供給源が必要となる。そこで候補に挙げられているのが、より寿命の短い大質量星である。大質量星と中小質量星では、供給するダストの組成が違うという示唆もあり [3], それぞれの寄与を正しく把握することが、銀河の化学進化を理解するうえで重要となる。

ダストに関わりの深い物理量として、金属量がある。金属量は、水素とヘリウム以外の元素の存在比で定義されるが、これらの元素の多くは星の内部でしか合成されないため、星間ガス中の金属量はこれまでの星形成史を反映していると考えられている。初期宇宙におけるダストの供給過程、すなわち、大質量星が銀河環境をダストで「汚染」する過程を調べるには、星形成史が浅く、金属量もダストの存在量も低い銀河が適している。特に、近傍の青色コンパクト矮小銀河 (Blue Compact Dwarf galaxy; 以下BCD銀河) は数千もの大質量星を含む巨大星団があり、宇宙初期の銀河とも関連する環境であると考えられる。

図3はHenize 2-10というBCD銀河のすばる望遠鏡を用いた中間赤外線分光観測の結果である [4]。#Aから#Eが巨大星団に対応しており、この場所では波長11.2 μm にある多環芳香族炭化水素 (PAH) に由来する放射が弱いことがわかる。この観測的事実の解釈として、巨大星団中に大質量星から供給されたダストが豊富にあり、それによってPAHを励起する紫外光が吸収されている可能性が示唆されている。しかし、星団中のダストの組成やその起源の詳細は未解明である。

本研究では、巨大星団内で観測されたダストの特徴量の中から、大質量星によって供給されたダストの痕跡を見出すことを狙う。大質量星によって供給されるダストが100-200 Kに冷えたときに波長20 μm より長い波長で効率的に観測されるようになるが、その波長域でのダスト放射の化学組

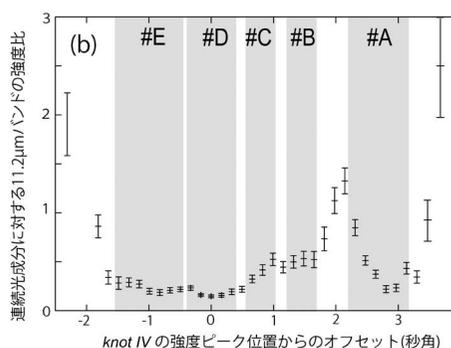
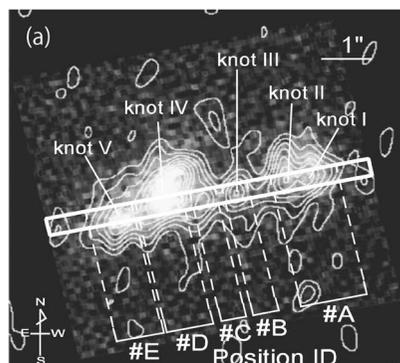


図3 近傍のBCD銀河のひとつであるHenize 2-10。(a)の実線はすばる望遠鏡での分光スリット位置を示し、(b)はその結果得られた11.2 μm バンドと連続波の強度比である。

成に基づく理解は不完全である。したがって、大質量星によって供給されるダストの化学組成を明らかにすることで、大質量星で供給されたダストがBCD銀河内の巨大星団内の星間環境をいかに特徴付けるかを観測的に理解すること、の両側面からのアプローチが必要となる。そこで、波長20 μm より長い波長に感度を持つSPICAの広帯域分光観測の出番となる。

3.1.2 渦巻銀河での星形成フィードバック

星形成が星間空間に与える影響は、上述のガスやダストの放出だけでなく、星からの紫外線によるガスの電離や、超新星爆発による分子雲の破壊・星間ガスの圧縮など多岐にわたる。これらの星形成フィードバックは周囲の星間ガスの状態を変化させ、次世代の星形成を抑制したり促進した

りしていると考えられている。つまり、銀河の進化において重要な指標のひとつである星形成効率も、この星形成フィードバックがコントロールしている可能性が高いのである。

銀河進化の研究において、観測結果を銀河形成シミュレーションと比較して議論するのはいまや常套手段である。しかし、星形成の起きる空間スケール ($\lesssim \text{pc}$) と銀河全体のサイズ ($\geq 10 \text{ kpc}$) には大きな乖離があり、ひとつのシミュレーションで両者を同時に正しく計算することは (少なくとも現在は) 難しい。そこで、空間分解能以下のスケールでの星形成についてはモデルを介する必要がある。モデルによって銀河の進化は大きく変わる [5] ため、観測からモデルに制限を加えることが求められている。

SPICA で観測できる数多くの輝線のうち、ここでは数 100 K 程度の「暖かいガス」から出る禁制線に着目する。星形成活動による 2 階電離した酸素からの輝線 ([O III], $88 \mu\text{m}$) や 1 階電離した窒素からの輝線 ([N II], $122 \mu\text{m}$) などが有名だが、より電離度の高いガスから出る輝線 (例えば [Ne V], $24 \mu\text{m}$) や中性でやや高密度なガス中の酸素からの輝線 ([O I], $63 \mu\text{m}$) などもある。このように、密度や温度などによってそれぞれの輝線の強度が変わるため、より多くの輝線を観測することでガスの物理状態をより正確に把握できる。SPICA の SMI と SAFARI の波長帯 ($18\text{--}220 \mu\text{m}$) には主要な禁制線が 15 本程度あり、得られる輝線比の組み合わせは 100 程度にのぼる。これまでの Spitzer や Herschel で観測された輝線がそれぞれ 5 本程度であった [6, 7] ことを考えると、情報量が格段に飛躍することがわかる。この多輝線観測から得られるガスの物理状態をもとにして、星形成フィードバックのモデルに制限を加えられると期待している。

この研究の対象は、近傍のいわゆる普通の渦巻銀河である。渦巻銀河の円盤内にはその名の通り渦巻腕があり、そこでは活発な星形成をしてい

る。その一方で腕以外の場所ではガスも若い星の量も少ない。そのため、円盤内での星形成活動にコントラストがあり、星形成フィードバックによる星間ガスへの影響を切り分けやすいという利点がある。SPICA (特に SMI) は広視野での分光マッピング観測が可能であり、この研究を進めるためには最適な望遠鏡である。

3.1.3 高光度赤外線銀河

高光度赤外線銀河 (Luminous Infrared Galaxies, 以後 LIRGs) は、近傍宇宙においてはその名の通り赤外線の光度が普通の銀河よりも高く、活発な星形成をしている (星形成率は $\geq 100 M_{\odot}/\text{yr}$) 銀河である。しかし宇宙が最も活発に星形成をしていた時期 ($z=2\text{--}3$) においては、このような銀河が「普通」であったと考えられている [8]。これら遠方の普通の銀河は Star Formation Main Sequence (SFMS) と呼ばれる系列に乗っている [9]。そのため、これらの銀河の進化は比較的穏やかであり、銀河衝突などの時間スケールの短い現象が星形成活動の主要因になっている例は少ないと考えられている。しかし遠方の銀河を空間分解して観測することは難しいため、どのようにしてこの高い星形成率を維持できるのかがわかっていない。

そこで、遠方の「普通」の銀河と似た性質を持つと考えられる近傍の LIRGs を観測することで、高い星形成率の原因を解明するというのが本研究の目的である。LIRGs にはダストが多く含まれるため、その減光の影響を強く受ける紫外線や可視光での観測は難しい。したがって、赤外線での観測が必須となる。

観測・解析手法は前述の渦巻銀河と同様で、銀河全体を分光マッピング観測して銀河内部のそれぞれの場所での多輝線データを取得する。そしてその輝線比から、銀河内部でガスの物理状態がどう変化しているかを探る。それを普通の渦巻銀河と比較することで、高い星形成率の原因を解明できるだろう。また、LIRGs では輝線強度比だけで

なく、輝線の数値情報も重要だと考えている。銀河面におけるガスの流入や流出、衝撃波といった現象も星形成活動と深く関わっていると考えられているが、十分な観測的証拠は得られていないからである。

3.1.4 宇宙線による分子ガスの電離

上の2つの研究は主に暖かい原子ガスを対象としていたが、この研究の対象は分子ガスである。分子雲内部はガスの密度が高いため、一般的な電離源である紫外線は届かない。しかし宇宙線は届くため、微かに電離している。これによりガスと磁場との相互作用が発生し、その後の星形成活動に影響を与えると考えられている [10]。特に分子ガスの電離度が高くなると磁場との相互作用がより強くなり、分子雲の収縮や星形成過程が変化することが予想されている。また、宇宙線強度が強ければ、分子雲の温度が上昇し形成される星質量の分布が変わるという示唆もある [11]。

図4は、Herschelによる2つの近傍銀河 (Arp 220とNGC 4418) でのイオン分子吸収線の観測結果 [12]である。この観測結果とモデルを使い見積もられた分子ガスの電離度は、太陽近傍の値と比較して3-4桁高い値であった [13]。この結果は、Arp 220では中心領域の星形成活動にともなう超新星爆発などによる宇宙線密度の増加と矛盾しないものである。一方で、NGC 4418では活動銀河核 (Active Galactic Nucleus, AGN) からのX線による電離が支配的であると考えられる。さらに、Arp 220にもAGNが存在するためX線による電離の寄与もあり、宇宙線とX線の電離の切り分けは難しい。

SAFARIの観測波長帯にはイオン分子の回転遷移が数多くあるため、多輝線観測による励起解析から正確に分子の存在量と電離度を推定できる。また、SPICAの高い感度によってこれまでよりも暗い天体も観測できるため、AGNと爆発的星

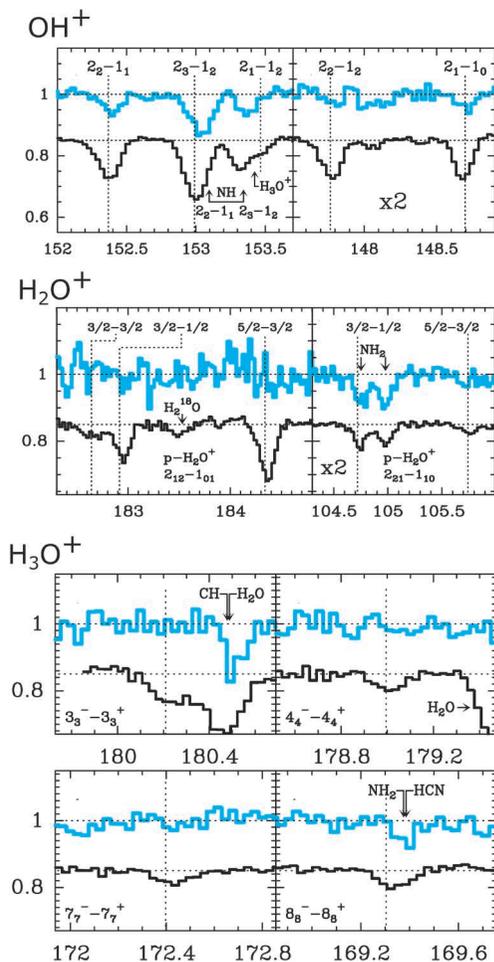


図4 Arp 220 (青太線)とNGC 4418 (黒細線)での分子イオンによる吸収線。横軸は波長(μm)で縦の点線がそれぞれの遷移の位置を表す*2。

形成 (つまり、X線と宇宙線による電離) の切り分けができると期待される。観測対象は、距離 ≤500 MpcにあるAGNを持つ銀河、爆発的星形成をする銀河、およびLIRGよりもさらに明るいUltra Luminous Infrared Galaxies (ULIRGs)の中心領域である。望遠鏡自体の空間分解能は ≥1 kpcに相当するが、この観測は銀河中心の非常に狭い領域からの連続波を背景光源とした吸収線の観測なので、実効的な分解能が背景光源のサイズ程度

*2 文献[13]の図を改変 (González-Alfonso et al., A&A, 550, A25, 2013, reproduced with permission © ESO).

となり、結果として非常に高分解能な観測を実現できることも利点である。さらに、ALMAで近年研究が進んでいる星間化学や遠方銀河への発展も期待できる。

3.2 銀河面外でのサイエンス

星間物質は、銀河面内にずっととどまっているわけではなく、星形成活動やAGNなどによって一部が銀河面外に放出される。その一方で、銀河間空間からの流入もある。また、銀河団では銀河間ガスの圧力によって銀河面内のガスを剥ぎ取りたり圧縮したりする。このように、銀河面外のガスも銀河進化にとって重要な役割を果たしている。

3.2.1 活動銀河からのアウトフロー

AGNや爆発的星形成によってアウトフローは起こる。このアウトフローによって星間物質が銀河面外へと放出され、その後の星形成を抑制する負のフィードバックが銀河進化において重要だと考えられている。

銀河からのアウトフローは、ガンマ線・X線から、可視光赤外線、電波まで、あらゆる波長の観測で検出されている[14]。多波長観測の進展は、アウトフローが様々な温度・密度・電離度のガスに加えてダストも含むことを明らかにした。その構造は複数の層からなる円錐状をしていて、内側ほど温度が高く外側に行くにつれて温度が低くなっていると考えられている。なかでも低温の星間物質は塊状になっていて、これらがアウトフローのエネルギーで破壊されないためには磁場が重要だという示唆もある一方で、磁場の寄与は限定的という報告もある[15, 16]。磁場はアウトフローそのものの駆動にも関わっていると考えられているが、その観測例は限られている。

遠赤外線での偏光観測ができるB-BOPは、低温のダストに関わる磁場構造を検出するのに最適な装置である。Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy (SOFIA) のHAWC+と比較して感度が100倍以上向上するうえ、視野も広

く、近傍銀河の広がったアウトフロー構造を捉えるのに適している。

観測対象は、NGC 253などのアウトフローをもつことがわかっている近傍銀河である。B-BOPの観測から、まずダストの空間分布が得られ、円錐状の多層構造が普遍的かを検証できる。そして、偏光成分の解析からダストに付随する磁場構造が得られる。シンクロトロン放射の偏波観測からは高温プラズマに付随する磁場構造が得られているので、それと合わせてアウトフロー中の磁場の包括的な描像が得られると期待できる。

3.2.2 銀河群や銀河団空間のガス

銀河間空間への星間物質の供給は、上述のアウトフローや銀河衝突などによって起きる。X線観測からは高温プラズマ成分、HI観測からは原子ガス成分が調べられていて、銀河団空間には高温プラズマガスが豊富に存在すること[17]、原子ガスは銀河衝突によって引き伸ばされやすい一方で銀河団内のガスによる剥ぎ取りの影響を受けやすいこと[18]などがわかっている。その一方で、分子ガスが銀河間空間でどのように分布しているかについては不明な点も多い。

水素分子ガスは低温では輝線を出さないために、一般的にはCOなど別の分子からの輝線がその指標として用いられる。しかし銀河同士の衝突によって温度が高くなると、赤外線波長帯にある水素分子の回転遷移輝線での観測が可能となる。図5の右は、コンパクト銀河群として知られるステファンの五つ子をSpitzerで中間赤外線観測して得られた、暖かい水素分子ガスの分布を示している[19]。これを見ると、銀河間空間に暖かい水素分子ガスが広がっていることがわかる。それだけでなく、COで観測される低温分子ガス(図5左, [20])と共存しているほか、銀河間空間にはH α 線で観測される星形成領域も存在している[20]。ただし、このように銀河間ガスを空間分解して観測された例は限られている。

そこで、近傍の銀河群や銀河団に対するSPI-

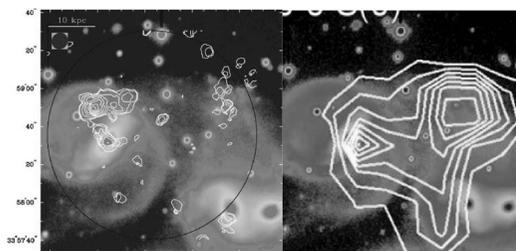


図5 ステファンの五つ子の可視光画像（グレースケール）に、（左）低温分子ガスをトレースするCO ($J=1-0$) 輝線と（右）温かい水素分子ガスH₂(0-0)S(1) 輝線を白い等高線で重ねたもの*³.

CA/SMIでの分光マッピング観測が有効となる。観測対象の赤方偏移を適切に選ぶことで、水素分子の回転遷移輝線を複数観測することができ、それにより銀河間水素分子ガスの物理状態（温度と密度）の空間分布が得られる。H₂輝線は冷却時間が非常に短いため、その場での加熱が必要となるが、この観測で得られる温度や速度幅の分布からその加熱メカニズムの特定ができると考えられる。さらに、銀河群と銀河団では銀河の密集度や銀河間ガスの密度などが異なるため、このような環境の違いが暖かい分子ガスとその後の銀河進化に与える影響を調査できると期待している。

3.3 機械学習による近傍宇宙の解明

これまででは特定の種類の天体に対する研究だったが、ここでは最後に近傍宇宙で観測された全ての銀河についての研究を紹介する。多数の銀河を集団として扱い、いくつかの特徴的な物理量を用いて記述する手法は広く用いられており、前述のSFMS（星形成率と星質量の関係）やそれに金属量を加えた基本平面などが有名である。しかし現在の多波長サーベイからは、ひとつの天体に対して数多くの観測量が得られるため、そのデータは高次元空間をなす。その高次元空間の中で銀河が

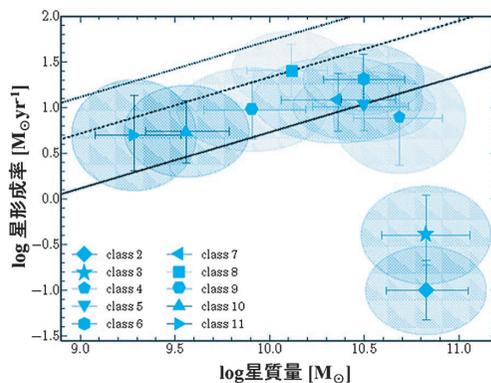


図6 機械学習によって分類された近傍銀河の11のクラスを星形成率と星質量の平面に射影したもの*⁴。実線は $z=0.7$ でのSFMSで、破線と一点破線はそれぞれ実線の星形成率を4倍と10倍にしたもの。

占める多様体を「銀河多様体」と呼ぶが、この多様体を適切に表現する関係式を見つけることが求められている。多くのパラメータの中から主要な物を見つける手法には主成分解析（PCA）があるが、線形関係しか扱えないという課題があった。

しかし近年、機械学習アルゴリズムを紫外線から近赤外線（波長150 nm–2.2 μ m）にわたる12波長で測定した光度と赤方偏移の13次元空間データに適用したところ、近傍銀河を11のクラスに分類することができた[21]。またその一部がいわゆるSFMSをなすこともわかった（図6）。

そこで本研究ではこれを発展させ、銀河を分類するだけでなくその多様体を表現する関係式を導くことを目標とする。そのために用いるのが、位相的データ解析（topological data analysis; TDA [22]）のひとつである多様体学習である。この手法により、高次元データからデータの類似性や多様体の連結性をもっとも効率的に記述できるパラ

*³ (左) 文献[20] (Gao & Xu 2000, ApJ, 542, L83, “CO in Stephan’s Quintet: First Evidence of Molecular Gas in the Intra-group Starburst”) の図を改変。(右) 文献[19] (Cluver et al. 2010, ApJ, 710, 248, “Powerful H₂ Line Cooling in Stephan’s Quintet. I. Mapping the Significant Cooling Pathways in Group-wide Shocks”) の図を改変。

*⁴ 文献[21] の図を改変 (Siudek et al., A&A, 617, A70, 2018, reproduced with permission © ESO)。

メータを探ることができる。また、機械学習は近年発展が目覚ましく、SPICA運用開始までにより洗練された方法論の開発も並行して進める。

SPICAで得られるのは、近傍銀河を空間分解した測光と分光データである。これまでのサーベイは測光データが主だったため、これに分光データが加わることで、情報量は飛躍的に増加する。特に輝線データはより短い時間スケールでの星形成活動を反映するため、図6には現れなかった爆発的星形成をする銀河も適切に記述できると考えられる。また、これまでの主要なサーベイとは異なり空間分解データが得られることから、銀河多様体だけでなく星間物質多様体も定義できると期待される。星間物質の進化(輪廻)の時間スケールは、銀河進化に比べて短いため、ここでも分光データが重要になると考えられる。近年精力的に調べられている、空間分解されたSFMSとのシナジーも興味深い研究テーマである。

4. おわりに

私がこれまで研究に使ってきた望遠鏡のうち、NMAとCARMAと「あかり」は、残念ながらもう運用を終了している。運用前のプロジェクトとそのサイエンス検討に関わるのは初めての経験で、責任の重さを感じつつ班長を努めさせていただいた。

赤外線分光観測についてはほぼ素人ということもあり、感度の計算(特に分光マッピング観測の場合)に四苦八苦した。2020年3月の日本天文学会春季年会用の発表資料の感度が間違っていることに、7月になって気づいたり……サイエンス検討会の最終報告書もこの記事も、SPICAプロジェクトやサイエンス検討会のメンバーを含む多くの方にぎりぎりまでサポートしていただき、感謝しかありません。

参考文献

[1] van der Tak, F. F. S., et al., 2018, PASA, 35, e002

[2] Venemans, B. P., et al., 2017, ApJ, 851, L8
 [3] Galliano, F., et al., 2008, ApJ, 672, 214
 [4] Sakon, I., 2008, Ph.D. dissertation, The University of Tokyo
 [5] Hopkins, P. F., et al., 2012, MNRAS, 421, 3488
 [6] Dale, D. A., et al., 2009, ApJ, 703, 517
 [7] Parkin, T. J., et al., 2013, ApJ, 776, 65
 [8] Madau, P., & Dickinson, M., 2014, ARA&A, 52, 415
 [9] Schreiber, C., et al., 2016, A&A, 589, A35
 [10] Wurster, J., et al., 2018, MNRAS, 475, 1859
 [11] Hocuk, S., & Spaans, M., 2010, A&A, 522, A24
 [12] González-Alfonso, E., et al., 2012, A&A, 541, A4
 [13] González-Alfonso, E., et al., 2013, A&A, 550, A25
 [14] Rupke, D., 2018, Galaxies, 6, 138
 [15] Banda-Barragán, W. E., et al., 2018, MNRAS, 473, 3454
 [16] Cottle, J., et al., 2020, ApJ, 892, 59
 [17] Gursky, H., et al., 1971, ApJ, 167, L81
 [18] Cayatte, V., et al., 1990, AJ, 100, 604
 [19] Cluver, M. E., et al., 2010, ApJ, 710, 248
 [20] Gao, Y., & Xu, C., 2000, ApJ, 542, L83
 [21] Siudek, M., et al., 2018, A&A, 617, A70
 [22] Wasserman, L., 2018, Annu. Rev. Stat. Appl., 5, 501

The Galaxy and Nearby Galaxies with SPICA

Fumi EGUSA, SPICA “The Galaxy and Nearby Galaxies” Science Working Group

*Institute of Astronomy, the University of Tokyo,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan*

Abstract: “What will be understood if SPICA observes the Galaxy and nearby galaxies?” “What kind of research should be done with SPICA?” In order to answer these simple but not-so-easy questions, we have worked hard and discussed a lot since 2019. Establishing new sciences with new instruments based on each one’s expertise has been sometimes fun and sometimes tough. We hope this article will help more people become interested in research of the Galaxy and nearby galaxies.