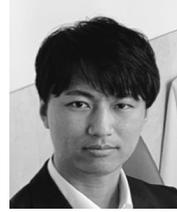


超高光度赤外線銀河における 特異に高密度な星形成領域

馬場 俊介¹・松本 光生²



馬場



松本

〈¹ 鹿児島大学理工学研究科 〒890-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-35〉

〈² 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1〉

e-mail: ¹ shunsuke.baba@astrophysics.jp, ² koseiM@ir.isas.jaxa.jp

我々は、超高光度赤外線銀河 (ULIRG) の星形成環境を調べるため、水素の再結合輝線 $\text{Br}\alpha$ ($4.05 \mu\text{m}$) および $\text{Br}\beta$ ($2.63 \mu\text{m}$) を、天文衛星「あかり」を用いて系統的に観測した。その結果、それらの強度比 $\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ が、これまで星間ガスで一般的に使われてきた「ケース B」の仮定に反する、異常に高い値となっていると判明した。この現象は、電離領域が高密度 (10^8cm^{-3}) であるためにケース B が破綻し、 $\text{Br}\alpha$ が光学的に厚くなっていることを示唆している。我々は、特に高い $\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ 比を示す ULIRG を JWST で追観測するプロポーザルを提出し、無事採択された。本稿では、「あかり」でこれまでに得た結果と、この度 JWST に提案した観測の内容を解説する。

1. 超高光度赤外線銀河の星形成

ある土地から別の土地に移り住んだとき、今まで当たり前前に受け入れていた文化や慣習が通じなくて驚く、というのはよくある話だ。銀河のスケールでもそれは同じ。自分たちの住む天の川銀河で私たちが経験的に得た「常識」が、別のもっと栄えた銀河、超高光度赤外線銀河では、予期せず通用しないかもしれない。

超高光度赤外線銀河 (Ultra-Luminous Infrared Galaxy, ULIRG^{*1}) とは、高い活動性により赤外線で見ると (太陽光度の 1 兆倍以上) 輝いている銀河の種族を指す [1]。ここでいう活動性とは、主に巨大なブラックホールへものが落ちることによる位置エネルギーの解放、そして、爆発的に大量の星が形成されることによる、核融合エネルギーの放出である。こうした活動によって放射さ

れた光が星間空間に漂っている塵 (ダスト) を温め、そのダストが熱放射をすることで、赤外線で見ると明るくなるのである。ULIRG の星形成率は年間で数十から数百太陽質量にもなり [2]、天の川銀河より 1, 2 桁高い [3]。そういう意味で、ULIRG は私たちの銀河より栄えた銀河だと言える。

ULIRG における星形成は、銀河中心周辺の半径数百 pc 以内で集中的に起きていると知られている [4]。その爆発的星形成の内部がどんな条件・環境なのか、私たちの銀河とどう異なるのか、興味の湧くところだ。しかし、ULIRG の星形成領域はダストに深く埋もれており、見通すのが難しい。そのため、まずはダストによる視線方向の光の減少 (減光) の程度を調べ、本来の姿と見かけの姿がどれだけ違っているのか把握する必要がある。

*1 「ユーラーク」と発音する。

2. ダスト減光量の求め方

ダスト減光の量を測るために広く用いられている「鉄板」の手法が、水素原子の再結合輝線の強度比に着目する方法である。再結合線のそれぞれの準位間について、遷移確率はガスの密度や温度といった環境に依らず、原子固有の性質で決まる。ゆえに、各再結合輝線の放射頻度が相対的に一意に定まるので、輝線同士の強度比は、ダストに影響される前の本来の値を、観測とは独立に計算で予測できる^{*2, *3}。一方、ダスト減光の強さは波長に対して一定ではなく、概して短波長側の方が強い [5]。波長の異なる2つの輝線がダストの影響を受けると、波長の短い方がより大きく減衰するので、それらの間の強度比は本来の値からずれ始める。逆に言えば、観測された輝線強度比が理論値からどれだけずれているのか調べれば、減光がどれだけあったのか求められるということだ。

ただ、再結合輝線強度比の理論計算にはもう1点、放射された輝線が電離領域をどう脱出するのかに関して仮定を置く必要がある。通常使われる教科書的な仮定が「ケースB」と呼ばれる条件である [6]。この仮定では、基底状態（主量子数 $N=1$ ）への再結合・遷移に伴う一連の輝線、ライマン (Lyman) 系列は、すぐに周囲の中性水素原子の電離・励起に使われ、領域を脱出できない（光学的に厚い）とみなされる。この考えは、中性水素はほぼ全て基底状態として存在しているという近似に基づいている。同時に、励起状態 ($N \geq 2$) への遷移に伴う輝線は完全に外に出てくる（光学的に薄い）とみなされる。なるほど、水素原子が押し並べて基底状態にあり、励起状態にほとんどいないのなら、放射された光子を吸収し

うる担い手がない、しかるに輝線は他の水素原子に邪魔されず自由に領域を移動できるということなので、そう考えるのも道理に思える。実際、ケースBの仮定のもとで予測される理論的な輝線比は、銀河系内の星形成領域で観測される輝線比を、とてもよく説明している。ケースBに基づく減光量測定は信頼を得ており、その例は枚挙に暇がない。

具体的な輝線としては、可視光域に存在するバルマー (Balmer) 系列の、 $H\alpha$ 線 ($N=3 \rightarrow 2$, 656 nm) や $H\beta$ 線 ($N=4 \rightarrow 2$, 486 nm) がよく使われる [7]。しかし、ULIRGのようなダスト減光が強い天体では、これらの輝線でさえ暗くなることもある。そこで白羽の矢が立つのが、近赤外線領域で見られるブラケット (Brackett) 系列の $Br\alpha$ 線 ($N=5 \rightarrow 4$, 4.052 μm) および $Br\beta$ 線 ($N=6 \rightarrow 4$, 2.626 μm) だ。可視Vバンドでのダスト減光量 (A_V で表す) が10等のとき、 $H\alpha$ の強度は1/1,000以下まで減光されるが、 $Br\alpha$ の強度は70%ほどになるだけである。 $Br\alpha$ 、 $Br\beta$ の波長は地球大気の透過率が悪く地上からの観測はできないが、人工衛星に搭載された望遠鏡で宇宙から観測することは可能である。特に、日本の天文衛星「あかり」は波長2.5-5.0 μm の分光機能を備えているので、両輝線を同時に観測できる [8]。

$Br\alpha$ 、 $Br\beta$ による減光量測定を、「あかり」が観測した銀河系内の星形成領域 [9] で試験してみよう。図1は典型的なスペクトルの例である。 $Br\alpha$ と $Br\beta$ が明確に観測されている。両輝線の強度を様々な星形成領域で比較したものが、図2である。観測結果はケースBでの予測強度比 ($Br\beta/Br\alpha = 0.565^{*4}$) を示す実線より総じて下側にあり、その位置関係は矢印が示すダスト減光の影響の向

*2 正確に言うと、ここでは原子同士の衝突による電離や遷移励起、脱励起を無視している。後述の $Br\alpha$ 、 $Br\beta$ 輝線の場合、衝突が影響するのは水素ガスの数密度が 10^{11} cm^{-3} 以上という極めて高いときのみである。

*3 電子がまずどの準位に再結合するかの確率は温度に弱く依存するが、その効果も比を取ると分母分子でほぼ打ち消し合う。

*4 ガス温度10,000 Kでの値。

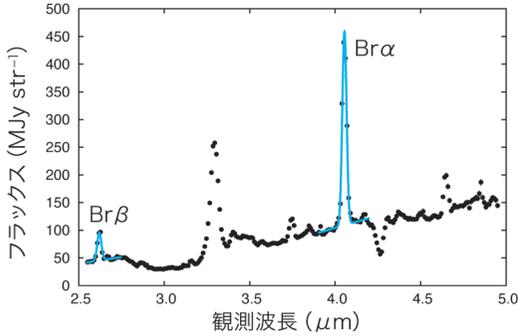


図1 系内星形成領域の「あかり」スペクトルの例 [10]. Br α , Br β 線が同時に観測されている.

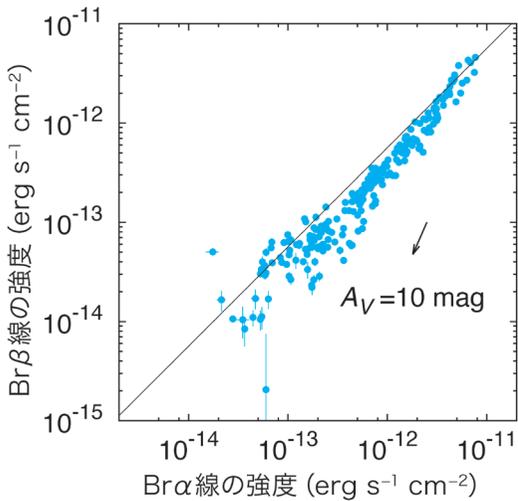


図2 系内の星形成領域におけるBr α , Br β 強度の関係 [10]. 実線はケースBでの予測強度比 (Br β /Br α = 0.565) を示す. 矢印は A_V が10等のとき各輝線強度がどれだけ減少するかを表す.

きと同じである. すなわち, 系内星形成領域の Br β /Br α 比はケースBとダスト減光に整合しており, 問題はない. では本番. ULIRGで同様の調査を行おう.

3. ULIRGでのBr β /Br α 強度比

図3は, ULIRGの1つであるMrk 273のスペクトルである. 勘のよい方はこの時点で「おや?」と思うかもしれない. 系内の星形成領域 (図1) と比べると, Br β に対するBr α の強度がかなり弱

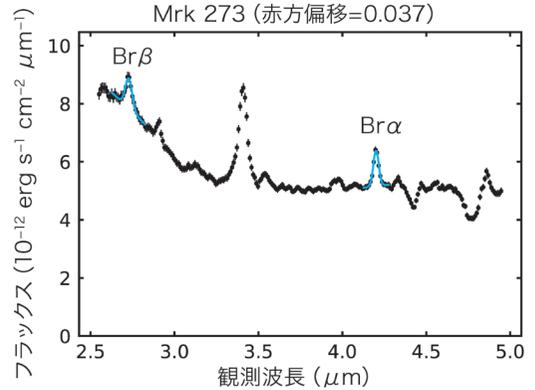


図3 ULIRG Mrk 273の「あかり」スペクトル [10]. Br α , Br β 輝線の相対的な強度は, 系内の星形成領域 (図1) と大きく異なる.

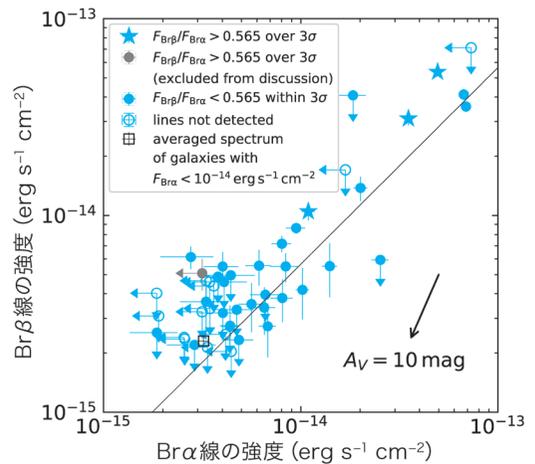


図4 ULIRGにおけるBr α , Br β 強度の関係 [10]. 実線はケースBでの強度比を, 矢印は $A_V=10$ 等での減光量を示す. 観測結果は全体的にケースBの理論線より上にあり, 減光とは逆の傾向である. 星印の3点は特に有意に高い強度比を示している.

表1 異常が顕著な3天体のBr β /Br α 強度比.

天体名	Br β /Br α
Mrk 273	1.09 \pm 0.05
IRAS 10565+2448	0.88 \pm 0.09
IRAS 10494+4424	0.96 \pm 0.12
ケースBの理論値 (参考)	0.565

いのである。図2と同様のプロットをULIRGについて作成したものが図4である。系内の場合と違い、観測されたデータ点はケースBの理論線よりも上にある。これは減光の影響とは逆向き、無理に解釈すると「負の減光」となってしまう、異常な事態だ。特に、表1の3つのULIRGが示す強度比は、ケースBからの乖離が有意に大きい。この結果はどう解釈すればよいのだろうか。

4. 異常の原因は何か？

まず考えるのは、別の輝線が混入していてBrβの強度が過大評価されている可能性である。実際、近くに分子水素の輝線H₂(1,0) O(2) (2.627 μm)が存在するので、その影響はありうる。しかし、我々が表1の3天体で分子水素の補正を行ったところ、異常は依然として有意なままだった。

では、ケースBの仮定が間違っているのだろうか。たとえば、励起状態にいる水素原子の数が割合として少なくとも、水素ガスの奥行きが長ければ、視線に沿って積分した総数(柱密度)は多くなり、光学的に厚くなるはず、すなわち、光子が外側に出て来なくなり、強度がケースBより弱くなるはずだ。Bra、Brβの光学的厚みはともにN=4である水素原子の柱密度に比例するが、比例係数はBraの方が1桁大きく、Braの方が先に厚くなる。そうすると、分母が弱まることで、Brβ/Bra強度比はケースBより高くなるのではないか。

どういった場合に柱密度が大きくなるのか検討しよう。単一の星で電離されている球対称な水素ガスを考える。電離領域の半径をR、星の単位時間あたりの電離光子数をQ(H)とする。ガスの数密度をnとすると、柱密度はN=nRである。ここで、電離と再結合の平衡を考える。単位体積あたりの再結合の頻度が陽子と電子の密度の積n²に比例するので、Q(H)∝n²R³の比例関係が得ら

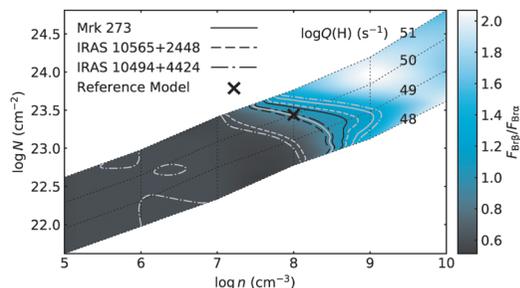


図5 CloudyによるBrβ/Bra強度比の計算結果 [10]。様々なガス密度n、電離光子数Q(H)で比を計算し変化を調べている。黒線は表1の3天体で観測された強度比を、灰線はそれらの不確かさ(3σ)を表す。X印は観測値を再現する代表的なモデル。

れる。以上の2式から、 $N \propto (nQ(H))^{1/3}$ が導かれる。次に、水素がN=4にいる割合がどう定まるのか調べる。上の準位からN=4へ落ちてくる頻度と、N=4から下へ落ちていく頻度との釣り合いをとる。前者は(途中どんな遷移を辿ろうと結局は)出発点である再結合の頻度に比例、すなわちn²に比例する。後者は、N=4である水素の数密度(n₄とする)に比例する。ゆえにn₄∝n²であり、N=4である割合はn₄/n∝nである。この割合と先ほどの柱密度の関係から、N=4が占める柱密度について、 $N_4 \propto n^{4/3}Q(H)^{1/3}$ が成り立つ。要するに、ガスが高密度であるほど、そして電離光子数が多い(紫外光が強い重たい星である)ほど、件の柱密度は大きくなり、それに比例して光学的厚みも大きくなる。ここまでは定性的に話を進めたが、真面目に比例係数を計算すると、星が大質量星であるO型星(典型的にQ(H)=10⁴⁹ s⁻¹)の場合、密度n=10⁸ cm⁻³あたりで、Braが光学的に厚くなるとわかる*5。

高密度条件の影響をより詳細に、光電離コードCloudy [11]で確かめた結果が、図5である。様々なn、Q(H)でBrβ/Bra比を数値計算した*6。

*5 輝線の線幅には温度10,000 Kでの熱速度を仮定。

*6 星のスペクトル形状は40,000 Kの黒体放射を仮定。

比は低密度ではケースBでの値に近い。しかし、やはり $n=10^8 \text{ cm}^{-3}$ あたりで上昇し始め、観測値とも一致する。すなわち、観測された異常な $\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ 比は、高密度条件で増加した光学的厚みの効果として説明できると確かめられた。

以上のようなケースBの破れは、 $\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ だからこそ観測できた現象だ。 $\text{H}\beta/\text{H}\alpha$ のようなより短波長での再結合線強度比は、ダスト減光を受けるとより鋭敏に低下する。ゆえに、光学的厚みの効果で比が上昇しても、その変化は減光によってすぐに打ち消されてしまう。波長 $2.5\text{--}5.0 \mu\text{m}$ という、減光の小さい帯域の恩恵である。

5. JWSTによる追観測

ULIRGで示唆された 10^8 cm^{-3} という密度は、天の川銀河で言うと、コンパクト電離水素領域の中でも特に高密度な部類に相当する [12]。つまり、私たちの近所ではレアな形態の星形成領域が、ULIRGでは、ごく普通のものとしてありふれて存在しているのかもしれない。それを確かめられれば、ULIRGの星形成の姿を新たな切り口から明らかにできる。高密度な星形成領域が大量に分布しているとすれば、それはこれまで言われてきた核近傍の爆発的星形成（数百pcスケール）よりもさらに極端に中心に集中しているのではと思われるが、この予想は正しいだろうか？ また、高密度による強度比異常は、星間ガスの基礎仮定として従来用いられてきたケースBの妥当性に対し、警鐘を鳴らしている。もしケースBが破れているなら、ULIRGで過去に行われたダスト減光測定・補正も見直しを迫られる。この疑義は果たして真か？ 早急に確認しなければならない。以上の理由から、ULIRGにおける $\text{Br}\alpha$, $\text{Br}\beta$ 輝線の追観測には、非常に大きなインパクトがある。

両輝線の波長帯はこれまで、「あかり」によって2010年に観測されたきりであった*7。そこへ満を持して登場するのが、JWSTなのである。宇宙空間で展開される口径6.5 mの望遠鏡がもたらす感度は驚異的だ。近赤外線分光器NIRSpecは「あかり」より1桁高い波長分解能を持っており、そればかりか面分光（空間の各点ごとにスペクトルを得ること）の機能も有している。これらの特長を活かせば、「あかり」より正確に $\text{Br}\alpha$, $\text{Br}\beta$ の強度を測定でき、また、強度比異常がどこで生じているのか、空間分布を調査できる。

我々のJWSTサイクル1観測プログラム (ID: GO 2186) では、5つのULIRGで $\text{Br}\alpha$, $\text{Br}\beta$ を分光観測する。ターゲットの内訳は、「あかり」で有意な強度比異常を示した表1の3天体、および、議論からは除外したが強度比異常の有力な候補である2天体*8である。異常を示す領域の範囲を調べるため、観測はNIRSpecの面分光モードで行う。各空間要素のサイズは0.1秒角であり、ターゲットにおいては典型的に100 pcに相当する。「あかり」分光観測の空間分解能が約7秒角で、スペクトルを銀河全体でまとめて得ていたことを考えると、飛躍的な進歩である。 $\text{Br}\alpha$, $\text{Br}\beta$ は2枚のフィルター (F290LP, F170LP) でそれぞれカバーし、それらに中分散の分光素子 (G395M, G235M) を組み合わせる*9。得られる波長分解能は約1,000であり、星形成銀河の再結合輝線（線幅が数百 km s^{-1} ）は十分に分解できる。なお、これらのセットアップでは波長 $1.7\text{--}5.1 \mu\text{m}$ が連続的にカバーされ、芳香族炭化水素などの他の有用なスペクトル特徴も副産物として観測できる。

目標とする感度は、銀河中心から半径500 pcの点で、 $\text{Br}\beta/\text{Br}\alpha$ 強度比を、ケースBからの乖離が 5σ レベルになるように観測することである。

*7 それはそれで日本の独自性・優位性ではあったのだが。

*8 これらの天体では、「あかり」スペクトルのアーティファクトなどにより、輝線強度の測定に系統的な不定性が残った。

*9 高分散（分解能およそ3,000）の素子もあるが、これを使うと $\text{Br}\alpha$ は検出器間のギャップにきてしまって観測できない。

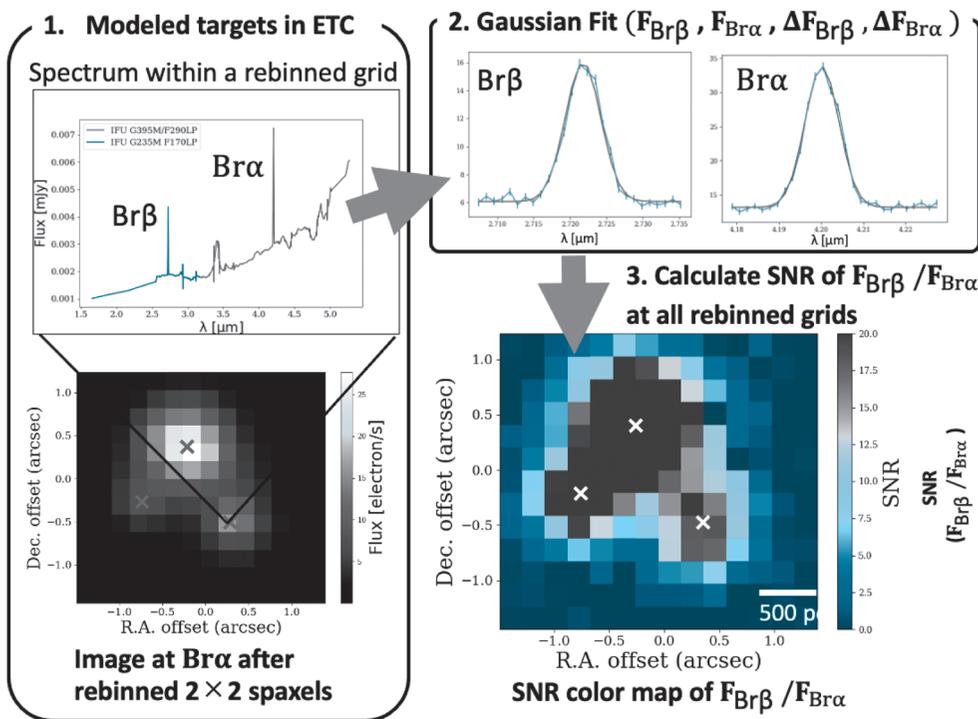


図6 ETCによって観測時間を見積もる手順の概略. ターゲットの例としてMrk 273を示している.

必要な観測時間は、JWSTから公式に提供されているExposure Time Calculator (ETC) を使って見積もった。手順の概略は図6に示したが、ETC上でターゲットをモデル化したのち、観測セットアップを試行錯誤しながら擬似観測を繰り返し、得られる感度、検出器の飽和、宇宙線イベントに対する安全性を考慮して、最適な観測設定を決定している。最終的に、我々が獲得したJWSTの時間は合計6.7時間となっている。ただその大半(90%)は望遠鏡の姿勢変更などの時間で、実際に科学観測に使われるのは0.7時間である。過去の観測を凌駕するデータがこれだけの時間で得られるとは、JWST, 恐るべしである。

6. おわりに

さて、ULIRGの星形成を調べるためにまずはダスト減光を測りたい、という導入から始まり、途中思わぬ回り道をしたものだが、結果として水

素のBrα, Brβ再結合輝線は、意外な形でULIRGの星形成に重大な示唆を与えてくれた。ULIRGにおけるそれらの強度比Brβ/Brαは天の川銀河の星形成領域とは異なる系統的に高い値を示しており、それは私たちがこれまで当たり前のように受け入れ使ってきたケースBの仮定のもとでは説明ができない。異常に高いBrβ/Brα強度比を再現するには、電離領域が高密度となりBrαが光学的に厚くなる必要がある。そして、それはULIRGが起こしている星形成の様相が天の川銀河のそれと全く違うこと、さらに、これまで基礎として仮定してきたケースBが実は成り立たない場合があることを意味している。

このような知見を与えてくれた「あかり」の分光観測データは、ユニークな波長帯を抑えており、確かに素晴らしかった。しかし研究のフェーズが現在の段階にくると、いささか物足りなさを感じてしまうのも事実である。この度打ち上がる

JWSTは、2.5–5.0 μm の波長帯をいよいよ再訪する。JWSTが新時代の性能で一体どんな世界を見せてくれるのか、期待に胸が躍って仕方がない。

最後に身の上話を少々。筆者(馬場)は院生の頃から「あかり」を使っており、JWSTへはかねてより期待を寄せていた。打ち上げが延びるたびにそれを待つ首が長くなっていったが、ついにその時がきて感無量だ。また、観測公募に向けては、ESAの講習会に参加させていただいたり、その内容を日本向けに伝えるワークショップを開かせていただいたりした。それらの活動が実を結んで安堵している。筆者(松本)は、普段の研究では輻射輸送計算による分子線スペクトルの理論的な推定を行っている。今回の修士2年時に訪れたJWSTプロポーザル作成という貴重な経験は、今後理論ベースで新たな事象の観測提案を行うための糧になるに違いない。ともかく、JWST時代の幕開けはすぐそこだ。人類の新しい挑戦がまずは無事に空へ打ち上がることを、切に祈っている。

謝 辞

水素輝線強度比異常の内容は、筆者らの共同研究者である矢野健一氏の博士論文 [13] および査読論文 [10] が基になっている。筆者らは、民間に移られた氏からこのテーマを引き継ぎ、観測を立案した。氏の解析と考察に賛辞を送りたい。プロポーザルの作成では、共同提案者である中川貴雄氏、磯部直樹氏、大西崇介氏に大変お世話になった。中川氏には本稿でも助言を頂いた。皆様に改めてお礼を申し上げる。最後に、執筆の機会をくださった月報編集部の皆様、特に、担当してくださった市川幸平氏に、深く感謝を申し上げます。

参考文献

- [1] Sanders, D. B., et al., 1988, ApJ, 325, 74
- [2] U, V., et al., 2012, ApJS, 203, 9
- [3] Chomiuk, L., & Povich, M. S., 2011, AJ, 142, 197
- [4] Imanishi, M., & Wada, K., 2004, ApJ, 617, 214
- [5] Draine, B. T., 2003, ARA&A, 41, 241
- [6] Osterbrock, D. E., & Ferland, G. J., 2006, *Astrophysics of gaseous nebulae and active galactic nuclei* (University Science Books, Mill Valley, CA)
- [7] Veilleux, S., et al., 1995, ApJS, 98, 171
- [8] Baba, S., et al., 2016, PASJ, 68, 27
- [9] Mori, T. I., et al., 2014, ApJ, 784, 53
- [10] Yano, K., et al., 2021, ApJ, 922, 272
- [11] Ferland, G. J., et al., 1998, PASP, 110, 761
- [12] Churchwell, Ed, 2002, ARA&A, 40, 27
- [13] 矢野健一, 2017, 博士論文, 東京大学

High-density Star-forming Regions in Ultra-luminous Infrared Galaxies

Shunsuke BABA and Kosei MATSUMOTO
Kagoshima University, 1-21-35 Korimoto,
Kagoshima, Kagoshima 890-0065, Japan

Abstract: We observed the Br α and Br β lines in ultra-luminous infrared galaxies (ULIRGs) with AKARI to investigate their starburst environment. The Br β /Br α ratio is found to be unusually high, contradicting the conventional Case B assumption. This suggests that the ionized region is so dense (10^8 cm^{-3}) that Br α becomes optically thick and Case B breaks down. Our approved JWST program will follow up ULIRGs with particularly high Br β /Br α ratios. We here describe the results from AKARI and our proposal for JWST.