

遠赤外線輝線マップから見えてきた 星形成領域の構造

川 田 光 伸

〈名古屋大学大学院理学研究科 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉
e-mail: kawada@u.phys.nagoya-u.ac.jp

高 橋 英 則

〈県立ぐんま天文台 〒377-0702 群馬県吾妻郡高山村中山 6860-86〉
e-mail: nori@astron.pref.gunma.jp

岡 田 陽 子

〈ケルン大学 I. Physikalisches Institut, Universität zu Köln, Zùlpicher Str. 77, 50937 Köln, Germany〉
e-mail: okada@ph1.uni-koeln.de

安 田 晃 子

〈名古屋大学大学院理学研究科 〒464-8602 名古屋市千種区不老町〉
e-mail: yasuda@u.phys.nagoya-u.ac.jp

「あかり」には、遠赤外線天文観測用としては世界初の撮像型フーリエ分光器が搭載された。「あかり」のフーリエ分光器は、約1分角の角分解能で撮像を行いつつ、それぞれのピクセルで波数 60 cm^{-1} から 130 cm^{-1} (波長 $80\text{ }\mu\text{m}$ から $170\text{ }\mu\text{m}$) の範囲を波数分解能最高 0.2 cm^{-1} で分光する能力をもつ。これを用いて星形成領域などの分光マッピング観測を行い、炭素や酸素、窒素などのイオンが放射する禁制線の分布を描き出すことに成功した。この輝線マップと、中間赤外線や電波などの観測と併せて、星形成領域の空間構造を明らかにすることが可能となった。

1. はじめに

「あかり」衛星¹⁾には、遠赤外線のスเปクトル観測を行うためにフーリエ分光器が搭載された。本稿では、この遠赤外線フーリエ分光器を用いた観測のうち、星間物質についての研究成果を紹介する。星間物質はその名のとおりに、銀河の中の星と星との空間を満たしており、宇宙の中の物質循環に重要な役割を果たしている。特に、星形成領域のような物質循環が活発な領域は、大きなエネルギーをもった星や星団と相互作用しながら星間物

質が進化していく現場となっている。したがってそのような領域での星間物質の構造や性質を解明することは、銀河全体の進化を理解するうえで重要である。

星間物質は電波からX線までさまざまな波長で観測することができるが、観測する波長によってそれぞれ特色がある。遠赤外線観測が得意とするのは、まず分光観測によって電離ガスや比較的暖かい中性のガスに含まれる原子やイオンからの輝線を検出し、そのガスの物理状態や分布を調べることである。遠赤外波長域に存在する輝線で、

現時点で「あかり」フーリエ分光器で検出されたものは、[O III] $88\ \mu\text{m}$, [N II] $122\ \mu\text{m}$, [C II] $158\ \mu\text{m}$ などがある、そのほかにも遠赤外波長域には星間物質の状態を知るうえで重要な輝線が存在しており、それら個々の輝線強度あるいは輝線強度比は、温度、密度、紫外線放射場強度などの星間物質の物理状態を示すよい指標になりうる。これらの遠赤外線輝線は可視光より減光されにくいため、星形成領域の内部まで観測でき、また銀河面のより遠くにある領域まで見ることができる。さらに、遠赤外線の連続光放射を解析することによって、この放射を担っているダストと呼ばれる固体微粒子の温度や分布も知ることができる。

以下では、「あかり」に搭載されたフーリエ分光器について簡単に紹介した後、銀河系内の星形成領域と銀河中心領域、さらに系外銀河を対象として行われた観測研究について具体的に紹介する。

2. 「あかり」遠赤外線フーリエ分光器

「あかり」衛星には、遠赤外線の観測装置として FIS (Far-Infrared Surveyor)²⁾ が搭載されている。FIS は、波長 $50\ \mu\text{m}$ から $180\ \mu\text{m}$ を四つのバンドで測光観測するスキャナー機能に加えて、光学系を切り替えることでフーリエ分光を行う機能も持っている。FIS に組み込まれたフーリエ分光器³⁾は、偏光を利用したマーチン・パプレット型干渉光学系を採用し、2次元検出器と組み合わせることで分光撮像観測を行うことができる。図1に FIS の光学系内部の写真を示す。今年5月に打ち上げられた Herschel 衛星⁴⁾にも撮像型フーリエ分光器⁵⁾が搭載されているが、「あかり」のフーリエ分光器はこれに先んじた、天文観測用としては世界初の撮像型遠赤外線フーリエ分光器である。「あかり」のフーリエ分光器は、1分角程度の角分解能で撮像を行いつつ、それぞれのピクセルで分光を行うことができる。「あかり」のフーリエ分光器は、およそ $60\ \text{cm}^{-1}$ から $130\ \text{cm}^{-1}$ の有効波数域(波長にしておよそ $80\ \mu\text{m}$ から $170\ \mu\text{m}$)で、最

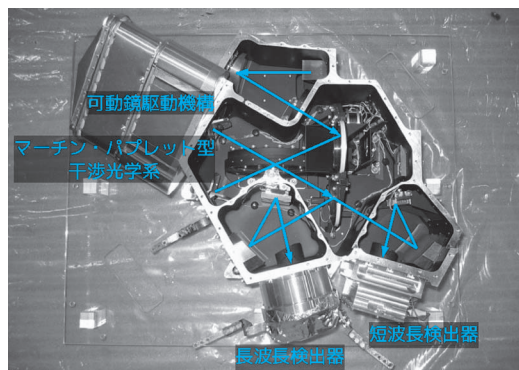


図1 遠赤外線観測装置 FIS の光学系。

高 $0.2\ \text{cm}^{-1}$ の波数分解能 ($100\ \mu\text{m}$ での比分解能 500) でスペクトルを取得できる。この分光撮像能力により、一度に 10 分角×2 分角程度の領域を分光撮像観測でき、効率良く分光マップを作成することが可能となった。この分光撮像機能の威力は、この後の章で具体的に示される。

「あかり」のフーリエ分光器は、ここで紹介するわれわれの銀河系内の星形成領域や近傍銀河の分光撮像観測のほかにも、さまざまな領域の観測を行っており、ヘリウムが枯渇するまでの約 1 年半の間に 600 回近い観測を行った。これらの観測の大部分は、近・中間赤外線カメラ (IRC)⁶⁾ が観測を行っているときに、同時にフーリエ分光器を動かして取得したデータである。この IRC との並行観測で得られたデータは、特定の天体を観測したデータではないが、銀河面や大マゼラン星雲などの広域な分光撮像データを提供している。Herschel 衛星の PACS⁷⁾ (Photodetector Array Camera and Spectrometer) が活動を始めているが、こしばらくは、この遠赤外線広域分光観測はユニークなデータとして活用されるであろう。

3. 銀河系内の星形成領域の観測

「あかり」のフーリエ分光器で観測された銀河系内の星形成領域は、いずれもライマン光子の数が 10^{50} 個/秒を超える四つの大質量星形成領域で、酸素の 2 階電離イオン (O^{2+}) からの放射 ([O III]

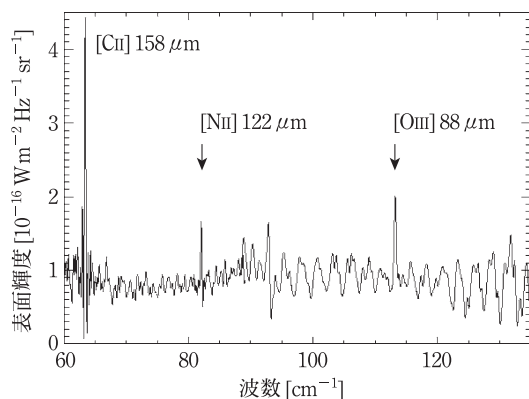


図2 「あかり」フーリエ分光器で取得した遠赤外線スペクトルの例 (G333.6-0.2).

88 μm), 窒素の1階電離イオン (N^+) からの放射 ([N II] 122 μm), および炭素の1階電離イオン (C^+) からの放射 ([C II] 158 μm) を検出し (図2), 数分角から10分角の範囲の輝線強度マップを得ることができた. また同時に, いくつかの波長における連続光強度についてもマップが得られ, これらの結果と, 「あかり」の中間赤外線全天サーベイ⁸⁾のデータおよび過去の電波の連続光観測を組み合わせ解析したところ, 以下に述べるように, 特に(柱)密度の勾配があるような場所では, [O III] 88 μm 輝線が電離源の存在を知るのに重要であることがわかった⁹⁾.

図3は, G3.270-0.101 という星形成領域における結果で, グレースケールがフーリエ分光器で観測された [O III] 88 μm 輝線強度, コントアが VLA Sky survey によって観測された電波の連続光 (1.4 GHz) の強度である¹⁰⁾. これを見ると, [O III] 88 μm 輝線のピークは, 電波の連続光のピークより東側にずれていることがわかる. 電波の連続光は, 主に水素の電離によって放出された電子からの放射なので, 電離領域全体から放射されるのに対し, [O III] 88 μm 輝線を放射する O^{2+} を生成するには, 水素を電離するエネルギーの2.6倍のエネルギーが必要であるため, [O III] 88 μm 輝線は電離源のより近傍に集中すると考えられる. したがって, 電波の連続光のピーク付近は電子の

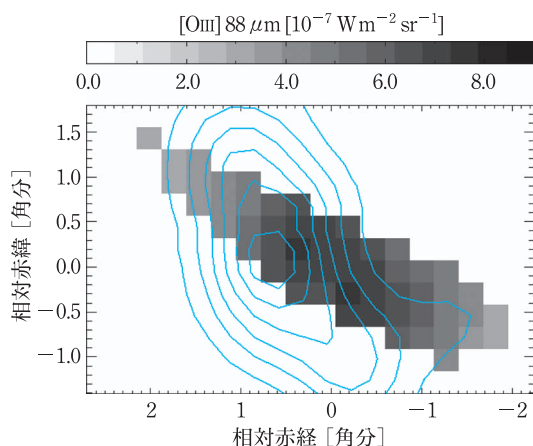


図3 G3.270-0.101 における [O III] 88 μm 輝線強度マップ (グレースケール) と, 電波の1.4 GHz 連続光強度 (コントア).

(柱) 密度が高いガス雲であり, 電離源は [O III] 88 μm 輝線のピーク付近にあって, そのガス雲を外から照らしていると解釈できる. 他の波長の観測においても, この解釈を支持する結果が得られている. 「あかり」中間赤外線全天サーベイの18 μm の連続光強度は, 電波の連続光強度のピークから [O III] 88 μm 輝線のピークまで広がった領域で強くなっており, 温度の高いダストが電離源のそばに分布していることと矛盾がないし, Spitzer 望遠鏡¹¹⁾による中間赤外線の輝線観測¹²⁾では, やはり電離エネルギーの高いイオンからの放射が [O III] 88 μm 輝線のピーク付近に集中しているという結果が得られている.

図4は, G333.6-0.2 という星形成領域の観測結果である. グレースケールがフーリエ分光器で観測された [O III] 88 μm 輝線強度, コントアは「あかり」中間赤外線全天サーベイの (a) 9 μm と (b) 18 μm の強度を示している. 領域全体の電離源となる星団は, 図の座標で (0, 0) にあり, 残念ながら強度が強すぎてフーリエ分光器では観測できていない. ここで注目したのは, 図の座標で (2.5', 2') 付近にある [O III] 88 μm 輝線のピークである. これは電波の連続光には見られない構造だが, 18 μm 強度には対応する構造が見て取れる.

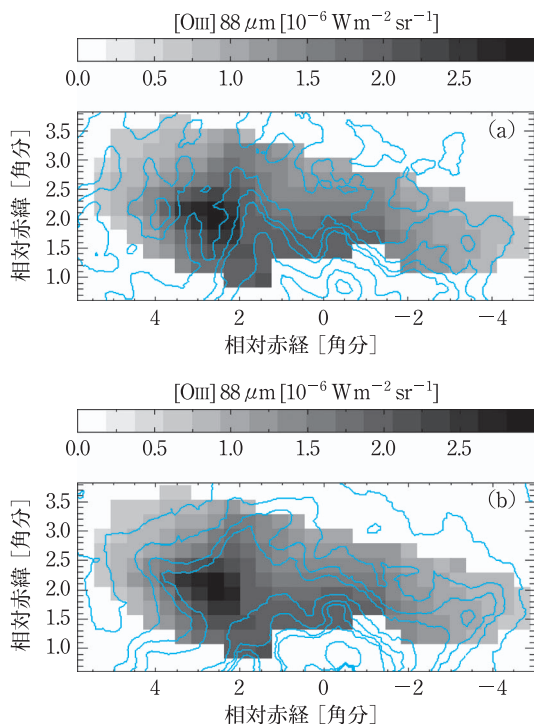


図4 G333.6-0.2における[O III] 88 μm 輝線強度マップ(グレースケール)と、あかり中間赤外カメラによる全天サーベイの(a) 9 μm と(b) 18 μm の強度(コントア)。

逆に9 μm では、その場所で強度が落ちていて、穴のような構造になっている。9 μm の連続光は主に非常に小さな炭素系ダスト(芳香族炭化水素; PAH)から放射され、強い電離源のそばではそのダストが破壊されると考えられる。一方18 μm 放射は高温のダストから放射されると考えられる。したがって、これらの結果は[O III] 88 μm 輝線のピーク場所に局所的な電離源があることを示唆している。

これらの二つの領域はいずれも可視光では減光が強すぎて見えない星形成領域であり、高い空間分解能で遠赤外線輝線の強度マップが得られたのも初めてのことである。これらの結果は、[O III] 88 μm 輝線強度が電離源の場所をよく表し、星形成領域の構造を知るうえで重要な役割を果たしていることを示している。

4. 銀河系中心領域の観測

「あかり」のフーリエ分光器では、系内の星形成領域のほかに、われわれの銀河系中心も詳しい観測を行った。銀河系中心からの光は、銀河面に存在するダストで減光されてしまい、可視光では見ることができない。しかし、遠赤外線では減光の影響を受けにくいので、非常に明るく見えることが知られている。

銀河系中心領域の中でも、二つの若い星形成集団(Arches クラスタ、Quintuplet クラスタ)を含む領域の観測を行った。この観測では、「あかり」の撮像分光機能の特徴を存分に活かし、少ない時間で効率よく分光マッピング観測を行うことができた。この領域でもまた、 O^{2+} からの[O III] 88 μm 輝線、 N^+ からの[N II] 122 μm 輝線、 C^+ からの[C II] 158 μm 輝線を検出し、これらの輝線を使って、約5分角 \times 10分角の領域の輝線強度マップを得ることができた(図5)。

図5の(a)図は、[O III] 88 μm 輝線マップにMidcourse Space Experiment (MSX)¹³⁾で得られた12 μm のデータのコントアを重ねたものであるが、[O III] 88 μm 輝線は12 μm の放射と非常に良い相関を示す。すでに述べられているように、[O III] 88 μm 輝線を放射するには非常に高い電離エネルギーを必要とするので、電離源の近傍で放射が強くなると考えられる。一方、12 μm 放射は主に温度の高いダストからの放射を見ている。ダストは紫外線によって暖められることから、ダストが暖かいということは、放射場が強いと考えられ、12 μm 放射もまた電離源の近くで強く観測される傾向にある。[O III] 88 μm 輝線と12 μm 放射の示すクラスター回りのピークは、クラスターを電離源とする電離領域であるということを示している。

一方、[N II] 122 μm 輝線や[C II] 158 μm 輝線は、12 μm 放射とはほとんど相関がなかった。[O III] 88 μm 輝線が強い紫外線にさらされる電離

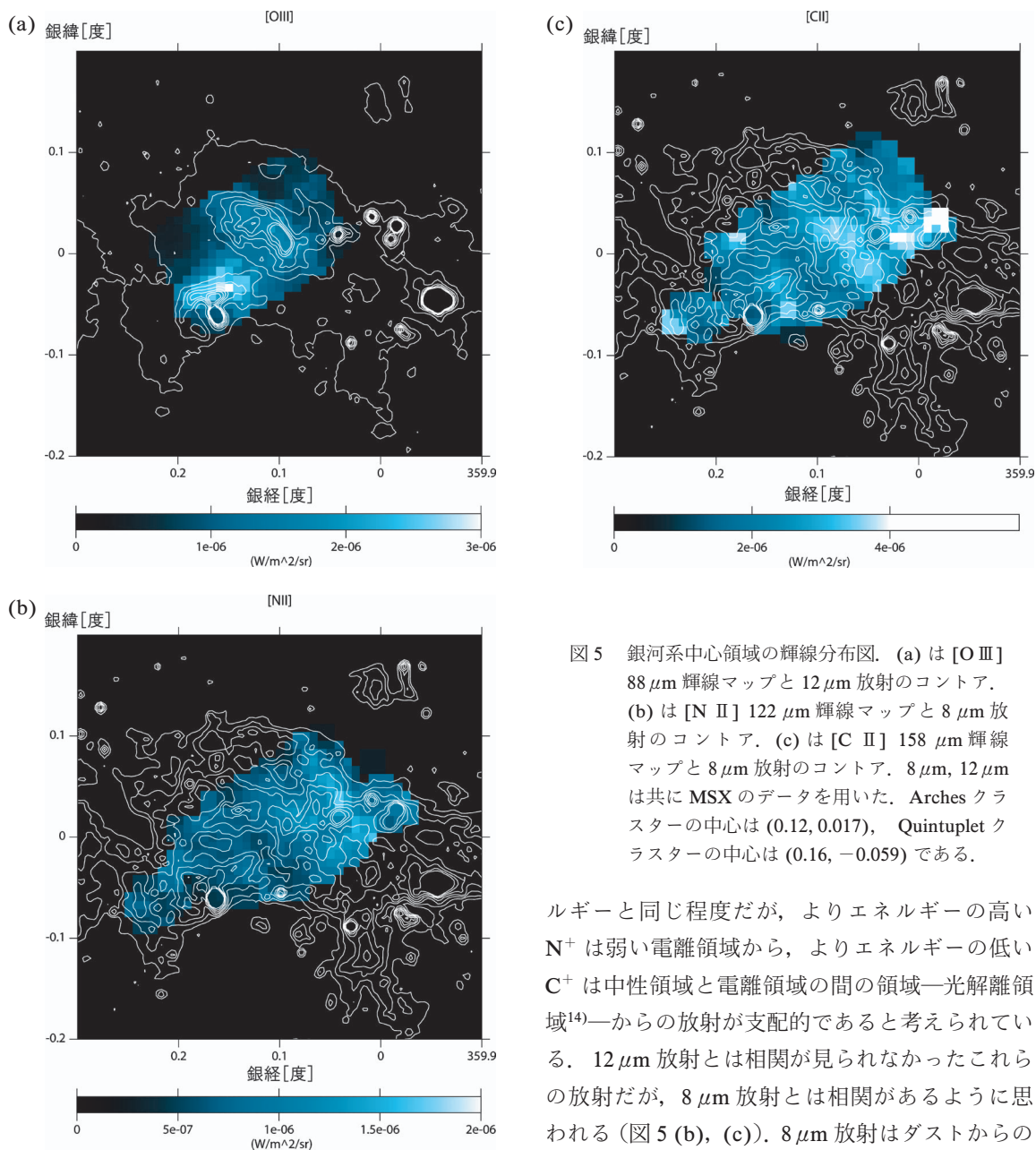


図5 銀河系中心領域の輝線分布図. (a) は [O III] 88 μm 輝線マップと 12 μm 放射のコンタ. (b) は [N II] 122 μm 輝線マップと 8 μm 放射のコンタ. (c) は [C II] 158 μm 輝線マップと 8 μm 放射のコンタ. 8 μm , 12 μm は共に MSX のデータを用いた. Arches クラスタの中心は (0.12, 0.017), Quintuplet クラスタの中心は (0.16, -0.059) である.

領域からの放射であるのに比べ、[N II] 122 μm 輝線や [C II] 158 μm 輝線はより電離度の低い領域から放射されるからである。[N II] 122 μm 輝線を放射する N^+ 、[C II] 158 μm 輝線を放射する C^+ を生成するには、それぞれ 14.5 eV、11.3 eV のエネルギーが必要となる。これは水素の電離エネ

ルギーと同じ程度だが、よりエネルギーの高い N^+ は弱い電離領域から、よりエネルギーの低い C^+ は中性領域と電離領域の間の領域—光解離領域¹⁴⁾—からの放射が支配的であると考えられている。12 μm 放射とは相関が見られなかったこれらの放射だが、8 μm 放射とは相関があるように思われる (図 5 (b), (c))。8 μm 放射はダストからの放射のほかに、光解離領域に存在する芳香族炭化水素 (PAH) からの放射も含まれていることが知られており、ダストの放射よりも PAH からの放射が卓越していると考えられている。実際、Arches クラスタ領域をこの波長域でスペクトル観測した MSX のデータを見ると、PAH が卓越していることがわかる¹⁵⁾。これらのことを総合して考

えると、輝線放射する原子を電離あるいは励起するエネルギー源はクラスターであると考えられる。すなわち、 O^{2+} を生成するような電離エネルギーの高い光子 (≥ 35 eV) は、クラスター周辺のガス雲表面で消費されてしまうが、C や N を電離できる程度のエネルギーの低い光子 (~ 11 – 14 eV) はガス雲内部まで届いていることがわかる。この現象は Arches クラスターの領域 (Arches クラスターから銀河系中心側) においてより顕著に見られる。

さらに、Arches クラスターを通る直線で輝線強度プロファイルを作成し、その結果と過去の観測結果を用いて、Arches クラスターのガスの有効温度が約 34,000 K であることを得た。これは過去の観測から推測された温度とほぼ一致している。しかし、過去の観測から得られた電子密度¹⁶⁾を用いて見積った電離領域の大きさ ($\sim 60^\circ C$) は、今回の観測から推測される大きさ (~ 16 pc, N^+ の領域を電離領域と仮定) と大きく食い違った。このことから、この領域におけるガスの密度は一樣ではないということが示唆される¹⁷⁾。

この領域を遠赤外線線で連続的に分光マッピング観測を行ったのは「あかり」が初めてで、クラスター周辺のガスの状態の空間的な変化を知ることができた。今後は、ガスの分布の様子を知るために、分子の放射する輝線など他波長の観測結果を用いて議論を深める予定である。

5. 遠赤外分光観測で探る近傍銀河

これまで述べてきたように、遠赤外線での分光観測は星間物質の物理状態を知るうえで非常に有効なツールとなる。これは、星周辺から系内星形成領域、銀河中心領域、系外近傍天体 (大マゼラン銀河)、そして空間的階層構造の上位である銀河においても適用できる。つまり、同じ観測的ツールを用いることで、対象天体を銀河の大きさに拡大しても、系内の (物理的に) 小さな星形成領域と同様にその物理を考えることができる。

これまで近傍銀河の遠赤外線分光観測は Kuiper Airborne Observatory (KAO)¹⁸⁾ や Infrared Space Observatory (ISO)¹⁹⁾ によって行われてきた。しかし機器あるいは観測時間の制約により、十分な観測が行われてきたとは言えない。ISO は人工衛星の利点を活かした、高い感度の観測を行ったが、空間的な走査効率が高いとは言えず、さまざまな銀河について全体にわたる空間構造を十分議論するには至っていない。これに対して、撮像と分光を同時に行うことができる「あかり」のフーリエ分光器では、輝線の面分光が可能になり、銀河の空間構造を理解することが可能になった。

われわれはいくつかの近傍銀河について「あかり」のフーリエ分光器による分光撮像観測を行い、遠赤外輝線マップを得た (図 6)。これに加えて、多波長の観測を併せて考えることで、さらにさまざまな情報を引き出すことができる。例えばサブミリ波から電波域にある CO 分子輝線の強度や強度比は、円盤領域に広がった分子ガスの温度、密度、さらには星形成効率を示す。つまりそれは星形成の「源」を表している。一方、遠赤外線は、形成された星が暖めたダスト放射や、星の紫外光によって電離された領域からの輝線放射である。つまり、星形成の「結果」ととらえることができる。これらの組み合わせたうえで、銀河の中心部と外縁部での星形成活動度の違いはどうなっているのか、腕部と腕間部での星とガスの分布の違い、中心から周辺領域に向けての元素組成比の分布がどうなっているのか、さらには銀河スケールでの星形成の進化過程の診断などの研究が現在進行中である。

6. ま と め

～遠赤外分光撮像観測の今後～

遠赤外分光撮像観測は、他の波長と比べると観測の困難さや、技術的側面で発展が遅れている。具体的には、地上から観測できない波長帯であること、可視光や近赤外に比べ波長が長いと高い

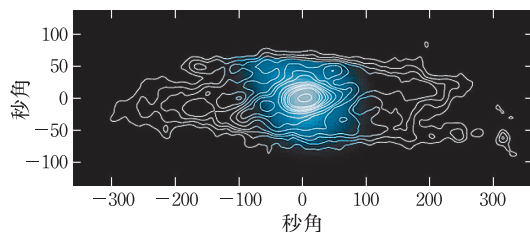


図6 NGC253の[C II] 158 μm 輝線強度マップ。
 コントアはCO分子輝線 (^{13}CO (2-1))。

空間分解能を得るのが難しいこと、望遠鏡や周囲からの熱放射によって検出感度が制限されること、大規模なアレイ検出器が開発途上であること、などがその原因である。しかしながら先に述べたように、この波長域には星間物質を探る重要な情報が隠されている。今後、高い空間分解能で広い領域を遠赤外線分光観測し、他の波長で得られた同等の空間分解能の結果と比較することで、星間物質のより深い理解が得られると期待される。ここで示した「あかり」の遠赤外線分光観測の成果は、その可能性の一端を示すものである。このほかにも「あかり」は、小規模ながら、われわれの銀河面や大マゼラン星雲、近傍銀河などの分光マッピング観測を多数行っている。「あかり」による遠赤外線の分光マッピング観測のデータは、この5月に打ち上げられた *Herschel* 衛星や、「あかり」の次の赤外線衛星として計画されている *SPICA* 衛星²³⁾による観測の先駆けであり、これらにつながるデータとして、現在精力的に解析を進めている。

参考文献

- 1) Murakami H., et al., 2007, PASJ 59, S369
- 2) Kawada M., et al., 2007, PASJ 59, S389
- 3) Kawada M., et al., 2008, PASJ 60, S389
- 4) Pilbratt G. L. 2008, SPIE 7010, 701002
- 5) Griffin M., et al., 2008, SPIE 7010, 701006
- 6) Onaka T., et al., 2007, PASJ 59, S401
- 7) Poglitsch A., et al., 2008, SPIE 7010, 701005
- 8) Ishihara D., et al., 2007, PASJ 59, 443
- 9) Okada Y., et al., 2009, A&A accepted
- 10) Condon J. J., et al., 1998, AJ 115, 1693
- 11) Werner M. W., et al., 2004, ApJS 154, 1
- 12) Okada Y., et al., 2008, ApJ 682, 416
- 13) Mill J. D., et al., 1994, J. Spacecraft Rockets 31, 900
- 14) Tielens A. G. G. M., Hollenbach D., 1985, ApJ 291, 722
- 15) Simpson J. P., Witteborn F. C., Cohen M., Price S. D., 1999, in ASP Conf. Ser. 186, The Central Parsecs of the Galaxy, ed. H. Falcke, A. Cotera, W. J. Duschl, F. Melia, M. J. Rieke (San Francisco: ASP), 527
- 16) Cotera A. S., Colgan S. W. J., Simpson J. P., Rubin R. H., 2005, ApJ, 622, 333
- 17) Yasuda Y., et al., 2009, PASJ 61, 511
- 18) Gillespie, C. M. Jr. 1981, SPIE 265, 1
- 19) Kessler M. F., et al., 1996, A&A 315, L27
- 20) Neugebauer G., et al., 1984, ApJ 278, L1
- 21) Murakami H., et al., 1996, PASJ 48, L41
- 22) Mather J. C., 1993, Proc. SPIE 2019, 146
- 23) Swinyard B., et al., 2009, Experimental Astronomy 23, 193

A View of Star Forming Regions through the AKARI Far-Infrared Line Maps

Mitsunobu KAWADA

Graduate School of Science, Nagoya University,
 Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Hidenori TAKAHASHI

Gunma Astronomical Observatory, 6860-86
 Nakayama, Takayama, Agatsuma, Gunma 377-0702, Japan

Yoko OKADA

I. Physikalisches Institut, Universität zu Köln,
 Zùlpicher Str. 77, 50937 Köln, Germany

Akiko YASUDA

Graduate School of Science, Nagoya University,
 Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

Abstract: We have the first imaging Fourier transform spectrometer in the world dedicated for an far-infrared astronomy on the AKARI satellite. It can take spectral images with the angular resolution of about 1 arcminute and the spectral resolution of 0.2 cm^{-1} as the maximum resolution for the 60 to 130 cm^{-1} in wavenumber (80–170 μm in wavelength). We detected several forbidden lines from ionic carbon, oxygen, and nitrogen in star-forming regions and derived line intensity maps. Together with mid-infrared and radio observations, we investigate the spatial structure and the physical condition of star-forming regions.