

地上からの中間赤外線観測の扉を開く COMICS

片 坐 宏 一

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部赤外・サブミリ波天文学研究系 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉
e-mail: kataza@ir.isas.jaxa.jp

COMICS はすばる望遠鏡の中間赤外線領域を担当する観測装置です¹⁾。この観測装置はすばる望遠鏡の性能と相まって 8 m 望遠鏡専用装置として世界最高の感度と空間分解能を実現しています。しかし中間赤外線領域は日本の天文学研究者にとってあまりなじみがありません。特に地上観測になると、これまでは共同利用で用いることのできる観測装置もなく観測経験のある人はごく一部に限られていました。そこで本稿では COMICS を中心に地上からの中間赤外線観測について紹介します。

1. 中間赤外領域とは

波長を区切る方法はいくつもありますが、ここでは観測に使われる検出器という観点から区切ります。5 ミクロンまでは InSb 検出器が、50 ミクロンからは Ge:Ga 検出器が用いられており、それぞれ近赤外、遠赤外領域としましょう。この中間の 5 ミクロンから 50 ミクロンまでの領域を中間赤外領域と呼びます。この中間赤外領域の大気透過率はほとんどの部分で大気が透明ではありませんが、図 1 に示したように N バンドと呼ばれる 8~13 ミクロンと Q バンドと呼ばれる 16~26 ミクロンの二つの窓では地上からの天体観測が可能です。

2. 中間赤外で見えるもの

中間赤外という波長域では何が見えるのでしょうか。まず、黒体で考えると、10 ミクロンおよび 20 ミクロンでは温度が 300 K、150 K に相当しますからこの程度の温度の黒体放射を見るのに最も適しているということになります。ですから星周円盤からのダスト放射などの検出に向いています。さらに、この波長帯での観測が真価を発揮するのはむしろこの波長帯に特徴的なスペクトルを持つものを観測する場合で、それがダストフィーチャーとガス輝線です。ダストフィーチャーは、炭素系のダストが UIR (未同定赤外) フィーチャーとして 3.3, 6.2, 7.6~7.8, 8.6, 11.3, 12.7 ミ

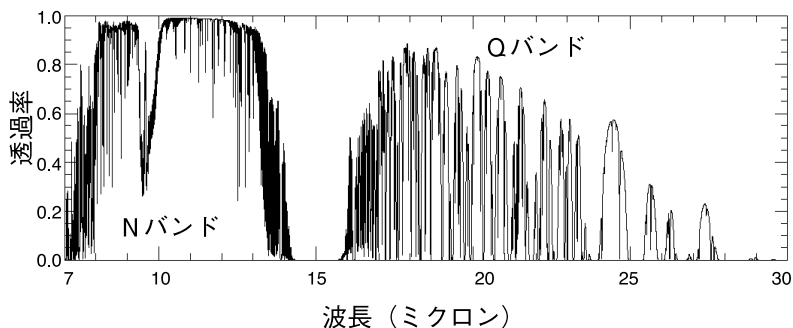


図 1 マウナケア山頂における大気透過率

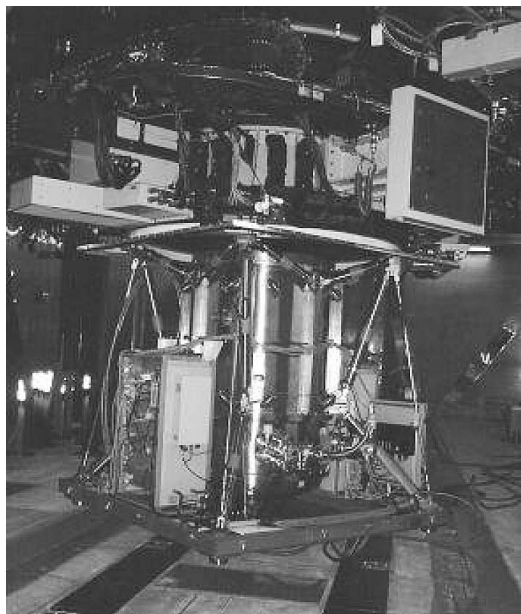


図 2 すばる望遠鏡に取り付けた COMICS

クロンに持つフィーチャーです。また、シリケート系ダストは 10 ミクロン帯と 20 ミクロン帯に成分比や結晶状態に応じて変化する特徴的なフィーチャーを持ちます。これらのフィーチャーの観測を通して、宇宙空間に存在するダストの性質を詳しく調べることができます。また、この波長帯には比較的高い電離状態にある原子の輝線や水素分子からの純回転遷移に伴う輝線が観測されます。これらの中間赤外領域の特徴を活かした研究はこの特集の中でいくつか紹介されていますが、ここでは COMICS (図 2) で取得した美しいいくつかの画像を紹介しましょう。

2.1 星周円盤の黒体放射

HR4796A はベガ型星と呼ばれる天体で、主系列星でありながらその周囲にダスト円盤を持っています。表紙の図 (左上) は円盤のダストが中心天体からの放射を受けて温められ、赤外からミリ波にかけて放射しているものをほぼ真横から見たものです。24.5 ミクロンではコンパクトな中心天体はほとんど見えず、周りのダスト成分だけが見えるようになっています。ベガ型星のダストの起

源についてはまだはっきりしたことは明らかにはなっていませんが、惑星系形成後の彗星活動に伴ってまき散らされた 2 次的なダストではないかと考えられています。

2.2 オリオン星形成領域

オリオン BN/KL 天体は、太陽系から最も近くにある形成中の大質量星で、大質量星形成の典型的な天体としてこれまでに多くの研究がなされてきました。表紙の図 (右) はこの領域の励起源であると思われるソース I を中心とした領域の中間赤外線画像です。COMICS/すばる望遠鏡で取得した画像ではこれまでになく高い解像度の画像を得ることができ、特に IRC2 から励起源 I に向けての構造をこの波長帯で初めて明らかにしました。北東から南西にかけて、高密度の円盤に対応すると思われるダークレーンが見られます。

2.3 銀河中心

多くの銀河の中心には大質量ブラックホールがあると考えられており、われわれの銀河系の中心部は最も近い銀河中心の例としてそのエネルギー収支や星形成史が詳しく研究できる良いサンプルです。しかし、銀河系中心までの減光は可視で 30 等もあり可視光では見通せませんが、中心領域のダストは 100 K 程度の温度を持っており、中間赤外で観測すると²⁾表紙図 (左下) のように非常に明るく観測されます。図で明るく写っている点源のような赤外線源の中には晩期型星や青色超巨星があり、これらを取り巻く広がった成分は、銀河系中心領域に見られる何本かのストリームの一部でガスやダストが流入しているのではないかと考えられています。中間赤外線観測からは、広がった成分の熱源が個々の赤外線源だけでなく、図の中心付近の暗い場所にある星団と考えられることがわかりました。一方、大質量ブラックホールがあると考えられる力学中心は、図の中心付近の星団のごく近傍にあります。中間赤外では信頼のおける検出はされていません。予測される質量に対して光度が小さいのは、ブラックホールへの降

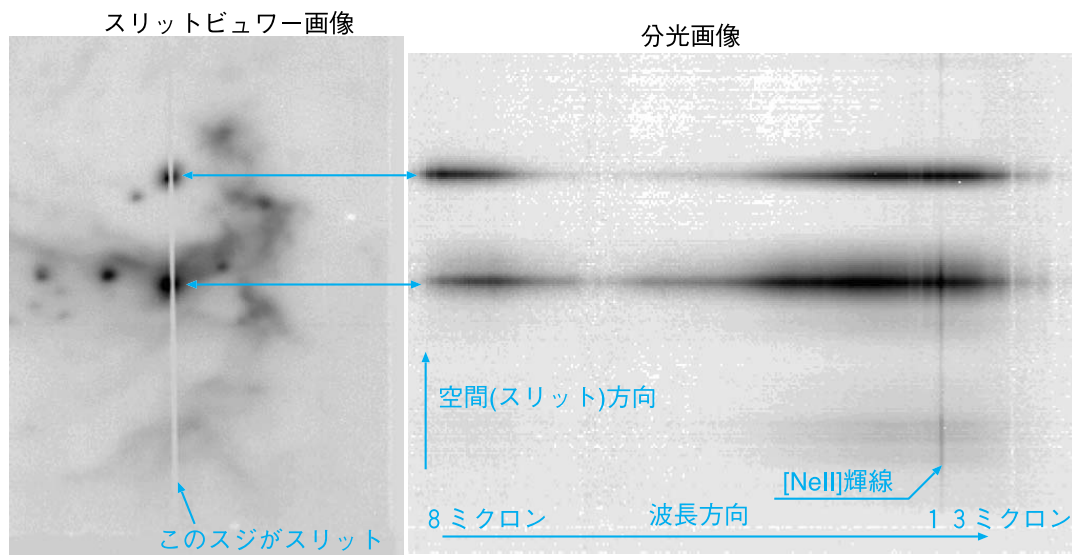


図 3 左はスリットビューワの画像で右は分光画像。これは同時に取得されたもので左の像で抜けになっているスリット部分の光が分光によって右の像として検出されている。ここでは全体の視野より大きくチョッピング（後述）して差引きを行い、観測中にこのような画像を見ることができる。

着が弱いのではないかと考えられています。

3. 地上からの中間赤外線観測

さて、地上からの中間赤外線観測が大きく進展する転機となったのは 8 m 級望遠鏡時代の到来とこの波長帯での 2 次元アレイ検出器の登場です。地上から中間赤外線領域を観測するには大きな制限があります。大気や望遠鏡自身の熱放射のピークがちょうどこの波長域にきて大きな背景放射となり、観測を難しく、観測限界を低いものにしていくのです。しかし大口径望遠鏡であれば、天体、特に点光源の像をよりシャープに結ぶことができるので、その像に重なる背景放射成分を相対的に小さくして感度を向上させることができます。また 2 次元アレイ検出器は大口径望遠鏡の持つ解像力を活かした撮像観測にもってこいであると同時に、スリット分光器等の多彩な観測を可能とする観測装置の製作を容易にしました。そこで世界中の 8 m 級望遠鏡計画において中間赤外の観測装置が企画され開発されることになったのです。

4. 中間赤外線撮像分光装置 COMICS

COMICS (COoled Mid-Infrared Camera and Spectrometer) はすばる望遠鏡の中間赤外観測装置として筆者らが提案し、開発してきました。そのコンセプトは

- 1) 回折限界の高解像度での撮像観測
- 2) 多彩な分解能でのスリット分光観測

を可能にするということでした。また筆者らのグループでは COMICS の開発に先駆けてプロトタイプ観測装置として MICS という撮像と分光のできる観測装置を開発し、これを既存の 1.3 m から 4 m クラスの望遠鏡に搭載して観測経験を積むことで地上からの中間赤外線観測に必要な技術を習得してきました。この経験を活かしてつくられた COMICS では以下のような特徴があります。

- 1) 中間赤外でのスリットビューワの搭載

中間赤外での天体の様子はそれ以外の波長での様子とは大きく異なっており、COMICS 自身で観測しなければどのように見えるのかがよくわか

らない天体がほとんどです。そこで観測を効率的に進めるためにスリットビューワの搭載は必須と筆者らは考えました。また、このスリットビューワの搭載によって広がった天体放射の分光データにおけるスリット位置の正確な決定が可能になり、スリット走査による観測を高い信頼度で行えるようになりました(図3)。

2) 波長カバー範囲を重視した分光

COMICSの分光における大きな特徴は、2次元アレイ検出器を5個、波長分散方向に並べて細長い焦点面をカバーしているところにあります。検出器を並べるときにはすき間が空きますが、回折格子の設定をすき間を埋めるようにすれば2回の設定で広い波長範囲のスペクトルを一気に得られます。

5. COMICSの観測能力

COMICSの観測能力については、すばる望遠鏡の公式ウェブサイトからたどることができます。それを簡単にまとめると表1のようになります。

観測限界は実観測時間を1時間とし、すべて点源と考え、 5σ に対応する明るさを概算しています。実際に観測を計画するときには公式webページにある計算式を用いて計算しなおす必要があります。また空間分解能はほぼ回折限界値である0.3秒角(10ミクロン帯)、0.6秒角(20ミクロン

表1 COMICSの観測モードと検出限界

モード	観測限界
10 μm 撮像	6 mJy
20 μm 撮像	80 mJy
10 μm $R=250$ 分光	30 mJy
10 μm $R=2,500$	200 mJy
10 μm $R=10,000$	500 mJy
20 μm $R=2,500$	300 mJy
20 μm $R=5,300$	700 mJy

*1 <http://canadia.ir.isas.jaxa.jp/comics>

*2 COMICS Users' Guide から Utilities をたどると COMICS observation planning applet というものがあります。

帯)が達成されます。ちなみに、IRAS 全天サーベイにおける検出限界は500 mJy程度でしたので、すべてのIRAS点源は、8 m望遠鏡で見ても広がっていない点源であるならば、分光ができるということになります。

6. 地上からの観測方法とその支援

背景放射成分の大きな地上からの観測ではチョップ・アンド・ノッドという観測方法が用いられます。電波観測でいうならビームスイッチに相当するものです。

チョップというのは望遠鏡の副鏡の向きをわずかに変えてほんの少しだけずれたところを観測するものです。副鏡の駆動は画像の取得とタイミングを合わせており、何度も繰り返して2カ所の画像をとります。これによって一つのピクセルには空の2カ所の画像が交互に入ってくるようになります(図4ア, イ)。これらの差をとれば(ア, イ)、空の2地点の信号強度の差を取り出すことができ、図4ウのように天体が正負両方の画像として見えるものができます。チョップでは副鏡を駆動するために、望遠鏡としての光学系全体はわずかにその構成を変化させることになります。このためチョップの差引画像ではオフセット成分が残る場合があります。すばる望遠鏡ではこの効果は少なく分光観測では無視できる程度ですが、深い撮像観測ではこれを取り除いた方が良いでしょう。そのために行うのがノッドと呼ぶ手法で、望遠鏡全体の方向をわずかに移動させてまた別のチョップ画像(図4エ, オ, カ)を取得して差し引きをし、最終的には図4キのように背景のオフセットも含めてきれいに除去された画像を得ます。

このような観測を実施するために、筆者らは観測プラン支援ソフトを作成しました(図5)。COMICS ウェブページ*1の下にあります*2。これ

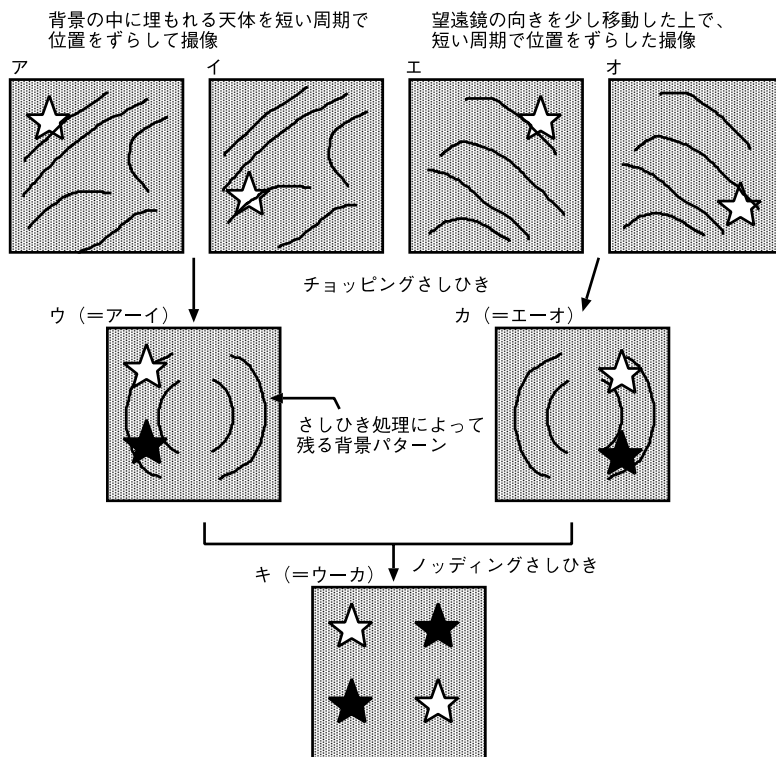


図 4 チョップ・アンド・ノッド

を用いれば、チョップ・アンド・ノッドの指定を天体がどのように見えるのかをグラフィカルに見ながら調整することができます。またこの支援ソフトではほかにも COMICS で設定が必要なフィルターや検出器の設定などがすべて手軽に行えるようになっています。このウェブページにはこのほかにも COMICS を使う上で必要な情報がまとめてあります。

データの解析という点では、チョップ・アンド・ノッドの引き算をするという以外には可視や近赤とは大きな差はありません。筆者らのグループでは独自に開発したソフトウェアと IRAF を組み合わせてデータ解析をしています。

7. 地上観測と衛星観測との比較

中間赤外観測は、地上観測とともに、IRAS, IRTS, ISO, MSX などの衛星観測で発展してきました。ここで、8 m 級地上望遠鏡による中間赤外

線観測と、NASA のスピッツァー宇宙望遠鏡や日本の ASTRO-F 衛星などによる衛星冷却望遠鏡との役割分担を考えてみましょう。

撮像観測では、大気などからの背景赤外線がない分、感度では衛星観測がかなり有利ですが、空間分解能は望遠鏡の口径が大きい分、回折限界が小さな地上観測が圧倒的に有利です。一方、分光観測では、波長分解能を上げるほど背景からの赤外線の影響が低くなるため、点光源に対しては地上からの観測が有利になります。具体的には波長分解能が数千を超える観測では、地上 8 m 級の望遠鏡が 1 m 程度の衛星望遠鏡より感度が良くなります³⁾。したがって、一般に高い解像度の観測や高い波長分解能の観測には大口径望遠鏡による地上からの観測が有利であり、暗く広がった天体の観測は衛星に任せるのが得策です。衛星による観測機会は限られており、その特質を活かした地上からの中間赤外線観測の重要性は、今後ともま

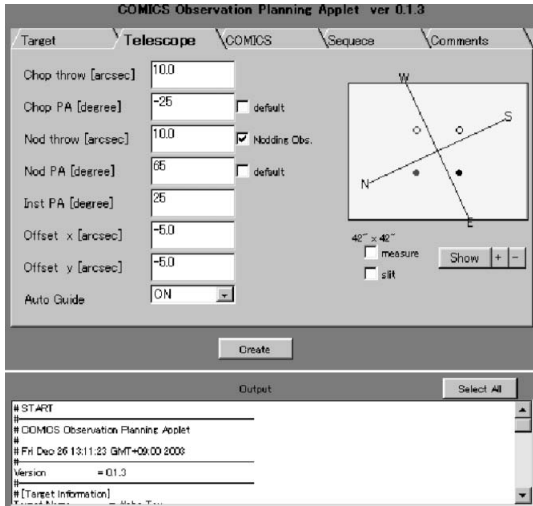


図 5 COMICS 観測プラン支援ソフト

すます増すものと考えられます。

8. 将来計画と COMICS

日本の光学赤外線天文学の将来計画が議論され、ISAS/JAXA を中心とするグループでは冷却 3.5 m 望遠鏡衛星 SPICA 計画を推進しています。2010 年ごろ実現を目指した計画ではアメリカを中心とする JWST 計画が近赤外領域において、また、サブミリ波領域ではヨーロッパを中心とする Herschel 計画が成果を上げていくものと期待されます。日本の SPICA 計画はこの両者と相補的な位置を占めるべく、冷却望遠鏡のメリットを活かして中間～遠赤外領域において最高の性能を目指しています。COMICS による中間赤外観測は、地上の観測装置でいろいろと試してみることができるという利点を活かして、この SPICA 計画への良いステップになります。是非、多くの研究者の方がこの波長帯での研究を積み重ね、将来へつなげていくことを希望してやみません。

謝 辞

COMICS の開発は多くの方々の協力の上に成り立ったプロジェクトです。これは、COMICS 開発チームメンバーだけでなした仕事ではなく、

すばる望遠鏡の立ち上げを遂行してこられた国立天文台をはじめとする多くの研究機関の皆様のおかげでここまですることができました。今回の特集のほかの記事の著者にはなっていませんが、COMICS 開発メンバーとして国立天文台の中村京子さんにはソフトウェアの開発で多大な貢献をしていただきました。また、研究機関をすでに離れましたが、田窪信也さん、高橋理恵さんの貢献も非常に大きなものがありました。また、今回の表紙に用いた画像は、天文台の山下卓也さん、東京大学の酒向重行さん、岡田陽子さんに提供していただいたものです。さらに、COMICS という観測装置はすばる望遠鏡のスタッフのみなさんの成果でもあります。この場を借りて皆さんに感謝いたします。

参考文献

- 1) Kataza H., Okamoto Y., Takubo S., Onaka T., Sako S., Nakamura K., Miyata T., Yamashita T., 2000, Proc. SPIE 4008, 1144
- 2) Okada Y., Onaka T., Miyata T., et al., 2003, Astron. Nach. 324, 567
- 3) Hayashi S. S., Okamura S., Shibai H., 1992, NAOJ Pub. 2, 547

COMICS: Abra Kadabra, Open the Door to Ground-based Mid-Infrared Observations

Hirokazu KATAZA

*Institute of Space and Astronautical Science,
Japan Aerospace Exploration Agency, 3-1-1
Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-8510*

Abstract: COMICS is an instrument to operate in the mid-infrared spectral region for the Subaru telescope. Thanks to the Subaru telescope capability, COMICS currently achieves the highest performance among mid-infrared instruments with other telescopes. Mid-infrared observations are a rather new field in astronomy. In the present article, an overview of mid-infrared observations with ground-based telescopes is given based on COMICS observations, which provide us with a new eye to look at the universe.