

惑星系円盤と衛星赤外線観測

尾中 敬¹・石原 大助²

〈東京大学大学院理学系研究科・天文学教室

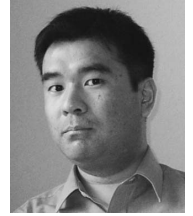
〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

¹ e-mail: onaka@astron.s.u-tokyo.ac.jp

² e-mail: isihara@astron.s.u-tokyo.ac.jp



尾中



石原

惑星系円盤の研究には赤外線、特に波長 10 ミクロンから数百ミクロンにかけての中間・遠赤外線が温度構造・円盤を形成している成分の解明に鍵となる情報をもたらす。本稿では、最近の「あかり」衛星の全天サーベイ観測の結果を中心に、赤外線による惑星系円盤の衛星観測の現状をまとめる。

1. 中間赤外線とは

普通、波長 10 ミクロンから数十ミクロンあたりの赤外線を指し、遠赤外線とはそれから数百ミクロンあたりの光を指す。さてこの波長で天体を見ると何が見えるのであろうか？

われわれの地球の表面は、ご存じのように太陽光を吸収して摂氏 10–20°C くらいの人肌の温度になっている。この温度のものは、10 ミクロンくらいの中間赤外線を一番強く放射している。もう少し太陽から遠ざかると、太陽光が弱くなるので温度が少しずつ下がり、だんだん長い波長の赤外線に放射のピークが移っていく。惑星だけでなく、惑星よりずっと小さい惑星になれなかった数ミクロン以下の大きさの固体の粒も、同じように太陽の光を吸収して 10 ミクロンから 100 ミクロンくらいの赤外線で光っている。惑星が作られる星の周りの円盤も同じように中間赤外線から長い波長の光でよく観測することができる。このため、波長の長い赤外線の観測は惑星系円盤の研究に重要な役割を果たす。

しかし、書くことはたやすいが、赤外線の、特に波長の長い赤外線の観測は易しくない。一つに

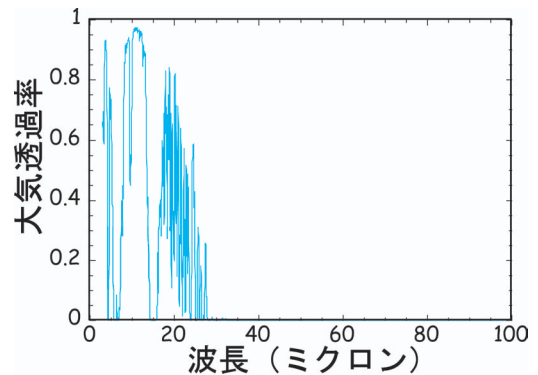


図1 すばる望遠鏡高度での大気の透過率、
ATRAN²⁾による計算

はわれわれの地球自身が同じ赤外線で光っているため、前景の放射となって邪魔をするためである。感度のよい検出器を実現するには、検出器を−270°C以下にすることが必要条件である。また波長の長い赤外線の観測のためには、望遠鏡も同じくらいの温度に冷却することが望まれる。さらに地球の大気はこれらの赤外線観測に優しくない。図1に示すようにわずかな波長の赤外線を除き、ほとんどの赤外線が吸収されてしまう。このため、地上からだけではなく、惑星系円盤の研究には大気圏外での観測が大いに切望される。大気

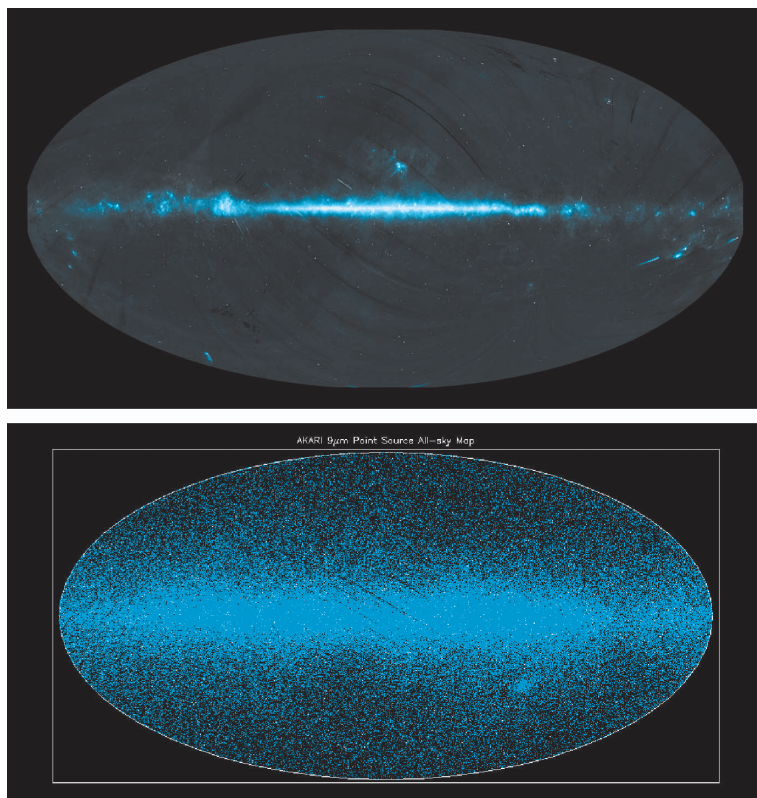


図2 (上)「あかり」中間赤外線全天サーベイの波長9マイクロンと18マイクロンの観測から作成したカラー合成図。9マイクロンをグレー、18マイクロンを青で示した。黄道光は差し引いている。太陽系内天体等移動しているものが線となってみられる。(下)波長9マイクロンで検出された赤外線天体の銀河座標上のプロット。各点の色は、青から白になるほど、その天体が明るいことを示す。銀河系内の成熟した星の分布が、天の川に沿って遠赤外線の結果に比べ、より太い帯となって見えている(JAXA提供)。

圏外にできれば、大気による熱伝導がなくなるので、望遠鏡を望む極低温に冷却することもできるようになる。

その効能は十分に期待できたとしても、冷却した望遠鏡を衛星軌道に上げることは容易ではない。実際、このような赤外線望遠鏡が実現したのは、紫外線・X線の衛星に比べて10年以上遅れた1983年であった。米・英・蘭の共同で打ち上げられた世界初の天文赤外線衛星IRASは、期待にたがわず、多くの天文学の分野に大きな影響を与える全天の赤外線サーベイデータをもたらした³⁾。惑星系円盤に限って言えば、IRASは、普通の恒星の周りにもデブリ円盤と呼ばれる固体の小

さな粒子が存在することを初めて明かにし、デブリ円盤という新しい研究分野を切り開いた。IRASはこのほかのさまざまな天文学の分野にも大きなインパクトを与える観測データを生んだが、その観測からすでに25年がたち、この間に観測装置の技術も大きく発展してきた。

2. 「あかり」衛星は

このIRAS衛星の全天サーベイデータを20年ぶりに更新することを大きな目標に計画された日本初の本格的な赤外線衛星である⁴⁾。宇宙航空研究開発機構(JAXA)・宇宙科学研究本部(ISAS)が中心となり、欧州宇宙機構(ESA)および日本、

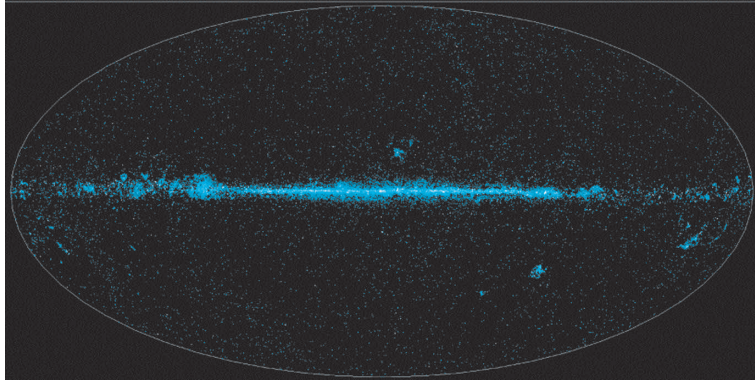


図3 「あかり」遠赤外線全天サーベイ波長90マイクロンで検出された、赤外線天体の銀河座標上のプロット。各点の色は、青から白になるほど、その天体が明るいことを示す。銀河面から外れてまばらに散らばる天体のほとんどは、星生成が活発な遠方の銀河である（JAXA 提供）。

韓国、欧州の大学・研究所が協力し、計画を推進している。主鏡約700mmの炭化ケイ素軽量鏡による望遠鏡が搭載され、液体ヘリウムと機械式冷凍機により望遠鏡は約 -267°C に冷却された。2–26マイクロンの赤外線を観測する近・中間赤外線カメラ（IRC）と50–180マイクロンの赤外線を観測する遠赤外線サーベイヤ（FIS）の二つの観測装置を搭載した「あかり」衛星は、2006年2月22日の未明に内之浦宇宙空間観測所からM-Vロケット8号機により打ち上げられた。「あかり」は太陽同期極軌道と呼ばれる、地球の昼・夜の境界線上を回る軌道に投入された。この軌道上の衛星は、常に望遠鏡を地心と反対方向に向ける姿勢をとれば、太陽・地球からの光を避けながら半年で全天を観測することができる。

機械式冷凍機の効能は顕著で、わずか180リッターの液体ヘリウムを打ち上げ後550日目の2007年8月26日まで保ち、この間、9マイクロンから160マイクロンの間の遠・中間赤外線の六つの波長で全天のサーベイ観測と、波長2マイクロンから180マイクロンまでの指向観測が行われた。IRASが500リッターの液体ヘリウムを約300日で消費してしまったことと比べてわかるように、この20年間の衛星軌道上の冷却技術の進歩は著しい。液体ヘリウム消失後も、機械式冷凍機の力により、

望遠鏡は約 -230°C に保たれ、現在も「あかり」は波長2マイクロンから5マイクロンまでの観測を続けている。

「あかり」衛星による全天サーベイの結果を図2および3に示す。図2には、中間赤外線による全天の9マイクロンと18マイクロンから作ったカラー合成図と9マイクロンで検出された点光源の図が示されている。中間赤外線のサーベイでは、およそ70万個の点光源が検出されている⁵⁾。図3には遠赤外線90マイクロンで検出された点光源がプロットされている。遠赤外線では約6万個の明るい点光源のカタログが用意されている。今後、データ整約が進めばさらに検出される点光源が増えることが期待される。

「あかり」衛星の全天サーベイとIRASのデータの比較を図4に示す。「あかり」衛星の全天サーベイの大きな特徴の一つは、空間分解能の大きな向上である。図4上(a)に示すように、1桁近い改善がある。これは特に、遠赤外線の点源を可視のカタログと比較し、確実な天体の同定をする際に重要であるばかりでなく、複雑な構造をもつ天体の明るさを正確に見積もるうえでも大きな利点となっている。

図4下(b)は検出感度を表し、よく知られたデブリ円盤をもつ星 β Picを100pcの距離に置いた

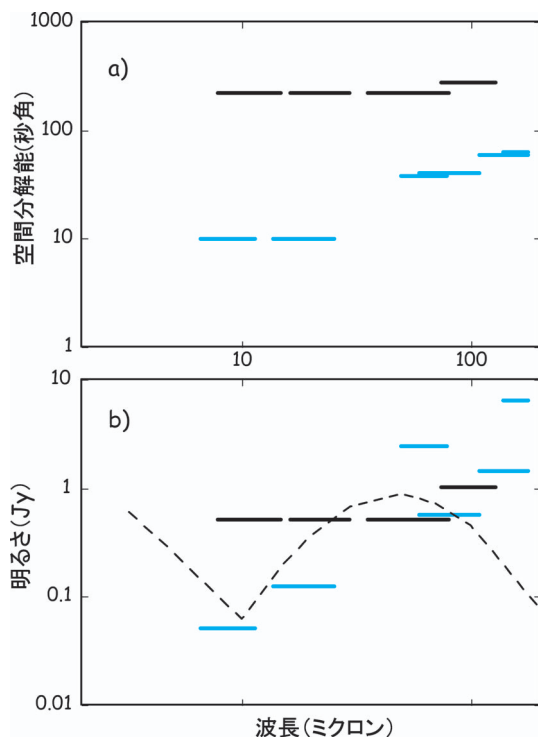


図4 「あかり」全天サーベイ（青）とIRAS全天サーベイの性能比較（黒）. (a) 空間分解能 (b) 検出感度. 破線はデブリ円盤をもつ β Pic星を100 pcの距離に置いた場合の予想スペクトルを示す.

ときの予想フラックスを破線で重ねて示した。「あかり」の全天サーベイの一つの大きな特徴は、IRASより広い波長範囲を六つのバンドでカバーしていることにある。特に100マイクロンより長い波長に二つのバンドをもっているため、円盤からの光のエネルギースペクトルをきちんと評価することができる。また、遠赤外線での感度はIRASと比較し大きな改善はないものの、9マイクロン、18マイクロンでは1桁以上暗い円盤まで検出できる。このためIRASでは困難であった、中間赤外帯で放射している中心星に近い暖かい円盤からの赤外線を精度良く見積もることができ、新しい発見の窓を与えている。図4(b)が示すように「あかり」の中間赤外線サーベイでは、100 pc程度の距離までの恒星の円盤を十分に見つけることができ

る。

Spitzer宇宙望遠鏡は⁶⁾、目星をつけた主系列星の指向観測を行い、デブリ円盤の質量が星の年齢とともに減少する傾向を示した。一方、年齢を限ってもデブリ円盤の質量には大きなばらつきがあることもはっきりしてきた。このことは、デブリ円盤を構成する物質は比較的短い時間で消失していて、供給が間欠的に起きていると解釈されている。年齢に従い質量が減少する傾向は、供給源の減少によるものと考えられる。「あかり」の全天サーベイのデータ解析はまだ端緒についたばかりであるが、100 pc程度の距離の恒星の周りの暖かい円盤まで検出できる無バイアスサーベイになっている点、9マイクロン、18マイクロンでの超過を検出できる感度をもつ点が大きな特徴で、新たな円盤の発見が大いに期待できる。実際、すでに9マイクロン、18マイクロンでの赤外線超過を示す主系列星が「あかり」の全天サーベイにより発見されている。これまでの限られた数の円盤の観測から、惑星系円盤は非常に多様性に富むことが明らかになっていることを考えると、「あかり」の全天サーベイは、多数の新しいタイプの円盤の検出から、その多様性を統計的に議論する初めての機会を与えることが期待される。「あかり」の中間赤外線サーベイで検出された天体は、地上からの詳しい観測が十分に行える明るさにあり、円盤の形態・進化の研究に新しい展開を与える重要な対象となる。

3. 衛星による赤外線観測は

このように非常に感度が高く、円盤の研究に新しい情報をもたらすものであるが、一方、これまでの衛星冷却望遠鏡は、クライオスタットと呼ぶ巨大な魔法瓶の中に望遠鏡を入れて冷やさなければならぬため、大きさが極度に制限されていた。これまで一番大きな口径のSpitzer望遠鏡でも850 mmであった。赤外線では、光の波動性に起因するいわゆる回折限界により空間分解能が制限されることが多い。特に口径の小さな衛星望

遠鏡ではこの傾向は強く、中間赤外線で数秒角が限度となっている。実際、「あかり」の全天サーベイでは、中間赤外線で10秒角、100ミクロンを超える遠赤外線では1分角程度である(図4a)。100pcの距離にある円盤では10秒角は1,000AUにあたるので、円盤の内部構造を議論することは不可能である。地上の8mクラスの望遠鏡を用いれば、「あかり」で検出された円盤天体を秒角以下の分解能で観測し、数十AUの構造まで詳しく調べることができる。地上観測では広い空の領域にわたっての中間赤外線でのサーベイ観測は不可能に近いが、一方、円盤の構造を解明しその成因や物理状態に迫る観測は得意である。このように、衛星観測と地上観測は相互の協力のもと、円盤の研究を進めるうえで良好な関係になっている。

円盤の観測を大きく進展させる期待がもたれる大型の衛星計画も準備が進んでいる。本年ヨーロッパ宇宙機構が打ち上げる予定のHerschel衛星は、魔法瓶をはずして自然冷却に頼って遠赤外線より長い波長の観測を目指した望遠鏡で、3.5mの口径をもつ⁷⁾。自然冷却のため感度は多少犠牲になるが、空間分解能では大きな改善が得られる。中間赤外線まででは、NASAが2013年の打ち上げを目指し、同じく自然冷却で、展開型の6.5mの主鏡をもつJWSTの計画を進めている⁸⁾。わが国では、中間赤外線から遠赤外線までの高感度観測を目指し、冷凍機を使用した3.5mの冷却望遠鏡SPICAの計画を進めている⁹⁾。これらの衛星計画が実現されれば、円盤から惑星系への進化の研究が大きく進展することが期待される。

「あかり」はESAの協力の下、JAXAが行っている計画である。本原稿への「あかり」関係者の皆様の支援に深く感謝する。全天サーベイのデータ解析はJAXA/ISASの山村一誠准教授らの国際チームが中心となって行っている。また中間赤外線全天サーベイのデブリ円盤のデータ解析には東京大学大学院生の藤原英明さんの寄与が大きい。ここに感謝する。

参考文献

- 1) 尾中 敬, 2004, 天文月報 97, 209
- 2) Lord S. D., 1992, NASA Technical Memorandum 103957
- 3) <http://irsa.ipac.caltech.edu/IRASdocs/iras.html>
- 4) Murakami H., et al., 2007, PASJ 59, S369
<http://www.ir.isas.jaxa.jp/AKARI/>
- 5) Ishihara D., et al., 2006, PASP 118, 324
- 6) <http://ssc.spitzer.caltech.edu/>
- 7) <http://herschel.esac.esa.int/>
- 8) <http://www.jwst.nasa.gov/>
- 9) <http://www.ir.isas.jaxa.jp/SPICA/>

Planetary Disks and Infrared Observations from Space

Takashi ONAKA and Daisuke ISHIHARA

Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan

Abstract: Infrared observations from 10 to several 100 microns provide crucial information for the study of thermal structures and material compositions of planetary disks. This report briefly summarizes the present status of infrared observations of planetary disks from space with a particular emphasis on the latest all-sky survey observations carried out by the AKARI satellite.