

特集「比較惑星系形成論」

ASTRO-F衛星による惑星系の観測

村上 浩¹

1. ASTRO-Fの概要

ASTRO-F(またはInfraRed Imaging Surveyor; IRIS)は、日本で初めての赤外線天文観測専用の人工衛星です。高度750kmの太陽同期極軌道(円軌道)を回り、赤外線天体のサーベイを目的としています。打上げは2003年夏に予定されています。

この衛星は、1983年に打ち上げられた世界初の赤外線天文衛星IRAS (Infrared Astronomy Satellite)や、1995年打上げのISO (Infrared Space Observatory)などの衛星と同様、超流動ヘリウムを使って冷却された望遠鏡です。望遠鏡の口径は70cmで合成F比は6、Ritchey-Chretienタイプの光学系です。望遠鏡の焦点には

- 1) FIS (FarInfrared Surveyor)
- 2) IRC (InfraRed Camera)

の二つの観測装置が搭載されます。

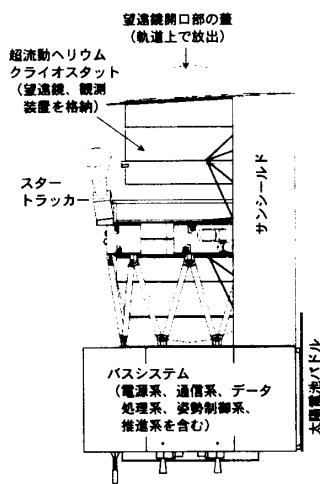


図1 ASTRO-F衛星の概観。高さ約3.5m、重量960kg。

冷媒の超流動ヘリウムは少しずつ蒸発して行き、なくなった時点で観測が終了します。現在の見積もりでは約1年半の観測が可能です。ただし冷却の補助としてスターリングサイクル冷凍機が搭載されており、IRCの近赤外線チャンネルだけは、この冷凍機が働いている限りはヘリウムがなくなっても観測が継続できます。現在、確実なヘリウム保持時間である1年間に対して、以下のような観測が想定されています。

1) FISによる遠赤外線全天サーベイ

FISは表1に示した4つの波長で全天サーベイを行います。波長150~200 μ mでのサーベイは世界初で、50~150 μ mの波長帯では、IRAS衛星によるサーベイの数十倍の感度を持ちます。

サーベイ戦略は、

■ミッション最初の半年をサーベイ期間とし、抜けた天域は次の半年で補う。1年間で全天の90%以上をカバーする。

■軌道1周回(100分)で、大円に沿って360度スキャン。掃天速度3.6arcmin/s。

■1回(軌道1周回)の観測で、2列または3列の検出器アレイにより、同一天体を複数回観測。

■同一天体を、最低でも軌道2周回にわたり観測(高黄緯ではさらに複数回観測)となっています。

2) FISによる遠赤外線撮像・分光観測

ASTRO-Fでは、積分時間を長くとりたい場合に、スキャンを止めて、1回に10分程度の露光を行うことができます。この観測では特に100 μ m以下の

表1 FISサーベイ波長と検出器アレイ構成

観測波長	ピクセルサイズ	アレイサイズ	
		掃天方向	× 垂直方向
50~70 μm	30 arcsec	2ピクセル×	20ピクセル
50~110 μm	30 arcsec	3	× 20
110~200 μm	50 arcsec	3	× 15
150~200 μm	50 arcsec	2	× 15

波長で検出限界を下げるすることができます。

またFISはフーリエ分光器を持ち、やはり望遠鏡を対象天体に固定して分光観測を行うことができます。分光観測は、表1のサーベイ波長帯の内、幅の広い50~100 μm 帯と100~200 μm 帯のチャンネルで、イメージを撮りつつ50~200 μm を一度に分光することができます。分解能は約0.2 cm^{-1} です。

1年間で1500回程度、望遠鏡を止めて観測することが計画されており、これがFIS撮像観測と分光観測に割り当てられる予定です。

3) IRC撮像・分光観測

IRCは3つの独立したカメラで構成されます。1つは近赤外線用(NIR)で412×512ピクセルのInSb検出器アレイ、あとの2つは中間赤外線用(MIR-SおよびMIR-L)で、256×256ピクセルのSi:As検出器アレイを使ったカメラです。IRCは掃天観測では使われず、望遠鏡を止めた10分程度の指向観測でのみ使われます。IRCは観測波長帯を定めるフィルターの代わりに対物プリズムあるいはグリズムを挿入することで、低分散の分光観測も行うことができます。IRCの観測波長等を表2にまとめます。IRCの視野は3つのカメラともに10'×10'です。IRCは1年間で6000回程度の観測を行うことが予定されています。近赤外線チャンネルだけは、冷却用の液体ヘリウムがなくなった後でも、冷凍機が働いている間(2年程度が目標)は、動作させることができます。

ASTRO-Fのもう少し詳しい情報については、<http://koala.astro.isas.ac.jp/Astro-F/index-j.html> を御覧ください。

表2 IRCの観測波長

チャンネル	観測波長等
NIR	フィルターバンド: 2.2, 3.4, 5 μm プリズム: 2~5 μm , $\lambda/\Delta\lambda=29$ グリズム: 2.5~5 μm , $\lambda/\Delta\lambda=300$
MIR-S	フィルターバンド: 7, 9, 11 μm グリズム: 6~12 μm , $\lambda/\Delta\lambda=38$
MIR-L	フィルターバンド: 15, 20, 25 μm グリズム: 12~24 μm , $\lambda/\Delta\lambda=23$

2. 太陽系内天体の観測

世界初の赤外線サーベイ衛星であったIRASは2000個程度の小惑星、8個の新たな発見を含む彗星の観測、惑星間塵の観測を行いました。太陽系内天体の観測から得られる知識は、系外惑星系を観測するときの基礎となるという意味でも重要です。ASTRO-Fでは、IRAS衛星よりも感度が高い分だけ、より多くの太陽系天体を検出できるはずです。

2.1 小惑星

表3は、ASTRO-FのFISサーベイで、熱放射が検出できる小惑星のサイズの下限値をまとめたものです。地球から近い順に並べてあります。メインベルト及びトロヤ群では20kmサイズまで検出可能であり、FISサーベイでは15000個程度が検出され、可視光の観測だけでは決まらないアルベドやサイズについて豊富な情報が得られると思われます。

注目されるのはエッジワース・カイパーベルト天体(EKBO)が検出できるかどうかです。感度の点では、すばる望遠鏡などの大口径望遠鏡による可視光観測にはかきませんが、やはりアルベドやサイズが分かる点が重要です。ASTRO-Fで検出できるかどうかの見積もりは、EKBO表面の熱慣性がよく分からないため温度見積もりに不確定性があり、またサイズ分布も確定していませんので検出個数に不確定性があるものの、1000個程度の検出が期待されます[1]。問題はEKBOと星生

表3 FISサーベイで検出される小惑星のサイズの下限 (km)
(宇宙科学研究所 長谷川直による)

	観測波長帯			
	50- 70 μ m	50- 110 μ m	110- 200 μ m	150- 200 μ m
近地球	3	5	4	4
小惑星帯	10	20	15	20
トロヤ群	20	30	25	30
土星軌道	60	100	70	70
天王星軌道	200	200	200	200
カイパーベルト	550	550	400	400

成が活発な系外銀河の遠赤外線カラーが似ており、区別が付きにくいことです。EKBOは、ASTRO-Fの一回（数軌道周回）の観測中では見かけの位置は変わりませんが、次にASTRO-Fが同じ空を観測できる半年後には、天球上の位置が変わるので検出できます。しかし限られた時間で多様な観測が要求されているASTRO-Fは、半年後にもう一度サーベイをやり直せるという保証がありません。なんとか黄道面だけでも2度目のサーベイができるように考えたいと思います。

2.2 惑星間塵

ASTRO-Fは、彗星や小惑星だけでなく、彗星軌道に沿って延びるダストトレールや、小惑星の族に附随するダストバンドのような惑星間塵の熱放射も測定することが可能です。彗星のダストトレールでは、IRASよりも感度が良い分、近日点からより遠くの低温ダストまで検出できると考えられます。これは惑星間塵の供給源としての彗星の寄与を、より正確に推定するのに役立ちます。

またFISサーベイでは、EKBOが衝突してダストをまき散らしている現場が観測されるかも知れない、という指摘もされています[2]。もし惑星になれずに残った天体であるEKBOが数多く存在し、衝突でダストをつくっていることが確認できれば、太陽以外の星の周りに発見されているダスト円盤（後で述べるヴェガ型星）でのダスト形成メカニ

ムを間近に観測することになるかも知れません。

3. 星・惑星系形成過程の観測

電波と赤外線による観測は、星と惑星系の形成について多くのことを明らかにしてきました。図2は星の形成の過程を模式的に表したものです[3]。一番上は Class 0と呼ばれる段階で、星の質量の半分以上がまだ星を取り巻くガス雲中に残っており、その放射は遠赤外線からサブミリ波にかけてのダストの熱放射のみが観測されます。星の周りには次第にガスとダストの円盤が形成され、それと垂直方向にはジェットが吹き出します。太陽と同程度の質量の星では、ガス雲の重力収縮が始まってから10万年程度でガスは降り積もり終わり、100万年程度たつと T Tauri型星と呼ばれる段階（図2の3番目の絵）になります。この段階では中心の星の光が可視光でも見えるようになります。スペクトルは、中心の原始星の光と周りのダスト放射が合わさって、波長1 μ m付近から100 μ m付近まで比較的平らなものになります。この後、円盤中の塵は凝縮して微惑星、さらには惑星へと成長して行き、また残ったダストも中心星の星風や光圧で吹き飛ばされたりして、その赤外放射は弱くなって行きます。

1983年のIRAS衛星による遠赤外線サーベイ観測では、ここまでのシナリオの最初と最後、つまり Class 0の段階と、光学的に薄くなった円盤（弱輝線 T Tauri星と呼ばれる段階）が観測できていませんでした。ASTRO-Fは、IRASよりも感度も空間分解能も高く、これらの観測の穴を埋めてくれると期待されます。Class 0の星については、ミリ波の干渉計やサブミリ波・ミリ波用に作られた大口径の地上望遠鏡による観測が進んでいますが、ASTRO-Fは、効率の良いサーベイで、これらの大口径望遠鏡による精密観測のためのデータベース

を与えてくれます。

図2の後、星は中心の温度を上げながら収縮を続け、1000万年程で水素の核燃焼が始まって主系列星となります。IRAS衛星は、主系列に達した星にもダストの熱放射を伴っているものがあることを発見しました。こと座のヴェガを感度較正のために観測しようとして遠赤外線の超過が見つかったもので[4]、以後このような赤外線超過をもつ星をヴェガ型星と呼んでいます。画架座ベータ星では、中心星の光のダストによる散乱光の画像が得られ、ダストが円盤状に星を取り巻いていることがはっきりしました[5]。原始星の頃に持っていたダスト円盤は吹き払われてしまっており、また新たに供給されたとしても光圧で飛ばされたり星に落ち込んだりして、ダストは失われて行きます。従って、ヴェガ型星のダストは、惑星にならずに残った微惑星の衝突等によりダストが供給され続けていると考えられます。ヴェガ型星のダスト円盤からの

赤外放射観測は、いまのところ太陽以外の主系列星のまわりの固体物質を直接見ることができる唯一の手段です。

ヴェガ型星の観測では、まず塵円盤の有無、あるいはその規模が、星の質量や年齢とどのような関係にあるのが問題となります。1995年に打ち上げられたヨーロッパの赤外線衛星ISOは太陽の近傍の60個程度の星を観測しました。赤外線の検出器は高エネルギーの宇宙線に叩かれると感度が変化する等、データ解析上で難しい問題があり、最終結果はまだ報告されていません。これまでに分かっているのは、A型星では約半数に遠赤外線の超過が見られたということです。しかしF, G, K型と質量が小さくなるにつれて、星が暗くなるためにしだいに確実なことは言えなくなり、例えばK型星では十数%には赤外線超過があると言えるものの、どちらとも言えない星が数十%となっているようです。

ASTRO-Fはこのような観測をやり直すことになります。国産の遠赤外線検出器（Ge:Ga半導体を用いたもの）は、宇宙での使用実績から言って、比較的宇宙線耐性が高いようです。またASTRO-Fでは観測装置、観測方法の単純さ、および注意深い較正により、放射強度測定精度は、相対値では5%以下が達成できると考えています。単純な見積もりでは、FISのサーベイで光球まで検出できる（赤外線超過がなくても検出できる）星の数は、SN比5以上で約300個（スペクトル型別の内訳は表4）、SN比20以上でも約40個と予想されます。これにより、どれくらいの割合で主系列星のまわりに

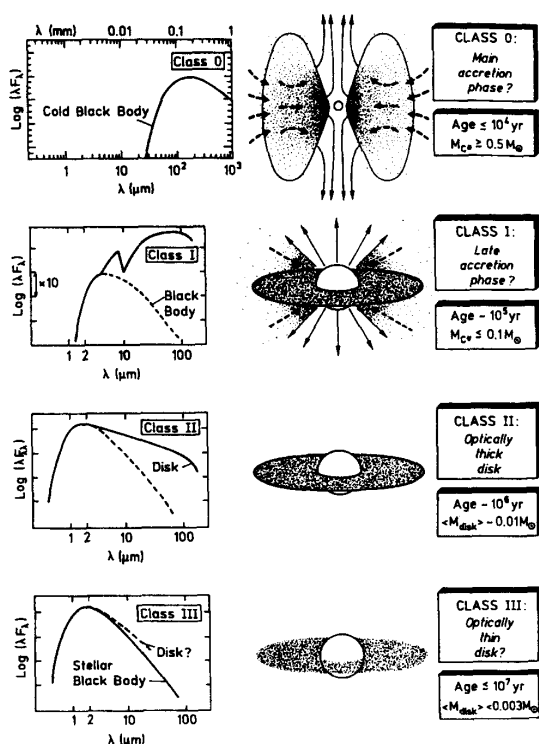


図2 原始星の進化段階と赤外スペクトル。
R. Bachiller (1996) [3]

表4 FISサーベイでSN比5以上で検出される星の数

スペクトル型	検出できる距離	星の数
A	40 pc	120個
F	23 pc	120個
G	14 pc	50個
K	8 pc	20個
		計310個

ダスト円盤が附随しているのかがはっきりすると
思われます。

さて次は、星の年齢との関係です。図3は、サブ
ミリ波の観測から見積もったダスト円盤の質量と
星の年齢の関係をプロットしたものです。この図
では、星の年齢が大きくなるにつれてダスト円盤
の質量は減って行く様に見えます。しかしまだサ
ンプル数が少なく、ダストの質量、星の年齢とも
に不確定性があるため、確実なことは言えないの
が現状です。ASTRO-Fの観測目的の一つはより確
実なサンプルを増やすことです。ただこの観測に
は、星の年齢の推定という、難しい問題が付きま
といます。ねらい目は、HR図から年齢が推定でき
る散開星団の観測です。散開星団には数十億年の
年齢のものまでありますが、FISサーベイで検出す
るには太陽からの距離が近い必要があるため、年
令を広くカバーするのはなかなか難しくなります。
いくつかの星団を選んで望遠鏡を止め、長い積分
時間をとる必要があると思われま。

散開星団の観測では、FISサーベイだけでなく、
赤外線カメラIRCも活躍します。IRCでは、10分間
の露光でS/N比20を要求しても、波長 $25\mu\text{m}$ におい
てA型星で太陽から700 pc近く、K型星でも130 pc
の距離まで星の光球を観測できます。FISのように
全天を観測することは出来ず、またIRCのデータ

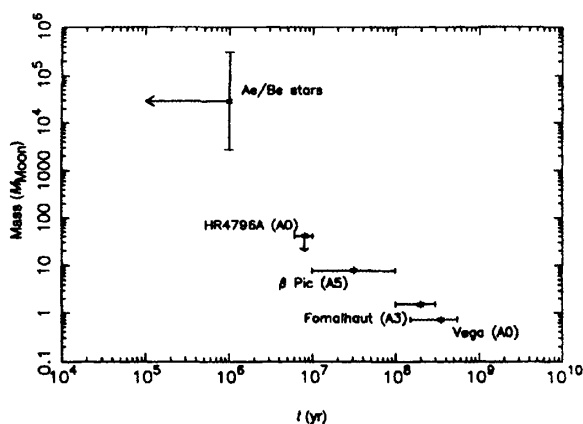


図3 ヲェガ型星のダスト円盤中のダストの量と星の年齢の
関係。Holland et al. 1998[6]による。

だけからはダスト量を見積もることは出来ませ
んが、赤外線超過を検出するだけなら、より遠くの
星まで可能です。

IRCでは $30\mu\text{m}$ 以下の波長のデータが得られ、ど
れくらい高温のダストまで存在するかが分かりま
す。この情報からはダスト円盤の内側の半径を推
定することができます。ヴェガ型星のダスト円盤
には、惑星が形成されたときに掃き清められたと
思われる穴が開いています。この穴の大きさを見
積もることができるわけです。この穴の大きさが
星によって違っているのか、年齢と共に変化する
のか、等も興味のある問題です。

最近では、地上の大口径望遠鏡による波長 $10\mu\text{m}$
帯やサブミリ波帯の観測、あるいはハッブル宇
宙望遠鏡の近赤外線観測によって、画架座ベータ
星以外にもヴェガ型星のダスト円盤の画像が得ら
れるようになってきました。これらの観測ではダ
スト円盤の広がりや、惑星形成による穴が直接観
測でき、単に赤外線超過を測る観測にくらべると
格段に多くの情報を得ることができます。残念な
がらASTRO-F衛星は口径が小さいので、遠赤外線
での解像度30秒では不十分です。やはりすばる望
遠鏡のような大口径望遠鏡に期待することになる
でしょう。ただし、円盤の外縁部に広がる低温ダ
ストからの熱放射は、地上からは観測できません。
もしASTRO-Fでも分解できるくらい広がった円盤
を持つ星があればASTRO-Fも貢献できる可能性が
あります。

ヴェガ型星の観測でもう一つ面白いのは、遠赤
外線のスเปクトルの観測です。図4は、ISO衛星に
よって得られたHD142527というHerbig Ae/Be星に
分類される星の遠赤外線スเปクトルです。Herbig
Ae/Be星は、太陽よりも数倍重い星の主系列以前の
段階、太陽質量程度の星で言えばT Tauri型星に対
応する段階にある星です。年齢は10万年程度です。
FISのフーリエ分光器を使うと、鉱物に特徴的なス

ベクトルを見分けることが出来ます。図4では、45 μm 付近と、60 μm 付近に水の氷に特徴的な放射があることが分かります。FISの観測波長は設計では50 μm からであり、45 μm の放射は観測できるかどうか微妙ですが、60 μm の方は観測できます。また100 μm 付近にもfeatureが見えており、Malfait等によればmontmorillonite（含水シリケートの一種）に同定されています。これまでヴェガ型星のダストのモデル計算は、いくつかの波長での測光データに基づいていましたが、図4のような情報が得られると、組成、サイズ、温度等、様々なパラメータの決定精度が上がることになり、非常に重要です。また、星によって低温ダストの組成に差があるのか、等の研究も行うことが出来るようになります。図4のような遠赤外線スペクトルは、今後数年間、観測できるのはASTRO-Fだけです。

またこのような星では、高分解の分光観測により、彗星のような天体が星に落ち込んで蒸発していること等、大変興味深いことがわかってきています。ASTRO-Fでは残念ながら高分解能の分光器は搭載されていませんが、地上望遠鏡との連携による研究が楽しみです。

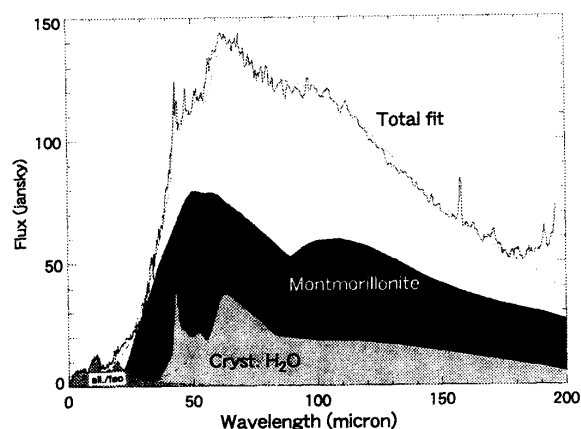


図4 Herbig Ae/Be星の一つHD142527の遠赤外線スペクトル。ISO衛星により得られたもの。Malfait et al., 1999[7]による。

4. ASTRO-Fに参加しませんか？

ASTRO-Fは現在プロトモデルの製作段階にあります。ハードウェアの設計はほぼ固まっていますが、運用・観測のためのソフトウェアの開発、具体的な観測計画の立案はこれからです。

ASTRO-Fは液体ヘリウムが残っている間に効率良くサーベイを行う必要があります。打上げ前あらかじめ決められた計画に従って観測します。このような観測計画をたてるため、ASTRO-Fでは観測テーマ毎にプロジェクトチームを作る予定です。これらのプロジェクトチームでは、運用やソフトウェア開発で貢献していただける方を歓迎します。チームメンバーは、一般に公開される前にデータにアクセスすることが出来ます。観測に加わってみたい方、よいアイデアをお持ちの方は、ぜひ御参加ください。

参考文献

- [1] 長谷川直, 平成10年, ASTRO-F (IRIS) サイエンスワークショップ集録, p.99
- [2] 中村 良介・他, 平成10年, ASTRO-F (IRIS) サイエンスワークショップ集録, p.103
- [3] Bachiller, R. 1996, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 34, 111-152
- [4] Aumann, H. H. et al. 1984, *Astrophys. J.*, 278, L23
- [5] Smith, B. A. & Terrile, R. 1987, *Science*, 226, 1421-1424
- [6] Holland, W. S. et al. 1998, *Nature*, 392, 788
- [7] Malfait, K. et al. 1999, *Astron. Astrophys.* 345, 181