

ASTRO-F による原始惑星系円盤の観測

上野 宗孝, ASTRO-F 星形成ワーキンググループ

〈東京大学大学院総合文化研究科 〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1〉
e-mail: ueno@provence.c.u-tokyo.ac.jp

2004年2月に打ち上げが予定されている赤外線天文観測衛星 ASTRO-F による、原始惑星系円盤の観測計画を紹介します。ASTRO-F の高い感度と空間分解能は、若い天体の検出に有効であるとともに、原始惑星系円盤の進化と消失をエネルギー放射の変化というマクロな視点から描き出すことが可能です。さらに広帯域の分光観測の能力は、原始惑星系円盤のシリケートダストの組成変化という鉱物学的でマイクロなプロセスの解明にも力を発揮することが期待されます。

1. ASTRO-F と星形成に関する観測

ASTRO-F は 2004 年 3 月に打ち上げが予定されている赤外線天文観測衛星計画です。ASTRO-F の全貌¹⁾については近い将来、誌上にて紹介されることだと思いますが、観測計画を説明するにあたり簡単な紹介を行います。ただし本稿での紹介はごく一部に過ぎませんので、さらに詳しい情報には、ASTRO-F の Web page* を訪問していただくと幸いです。

ASTRO-F は赤外線波長帯においてサーベイ（掃天）観測を目指した計画であり、1983年に IRAS (InfraRed Astronomical Satellite : 赤外線天文衛星)²⁾ が赤外線の4つの波長帯 (12, 25, 60, 100 μm) で全天のサーベイ観測を行ったのと同様の観測を行います。従って ASTRO-F は Super-IRAS という位置づけを考えていただけると理解しやすいと思います。そこで何が【Super】であるかを説明するために、図1に ASTRO-F の波長毎の検出限界と IRAS の検出限界、大型地上望遠鏡であるすばる望遠鏡の典型的な検出限界を示します。観測波長に依存するものの、IRAS と比較して1~2桁の検出限界の向上を見込んでいます。さら

に ASTRO-F の【Super】な点は感度の向上だけにとどまらず、各観測波長バンドにおけるビームサイズが IRAS のものと比較して大幅に小さくなっていることがあげられます。ビームサイズが小さくなった利点として、天体のコンヒュージョンによる感度

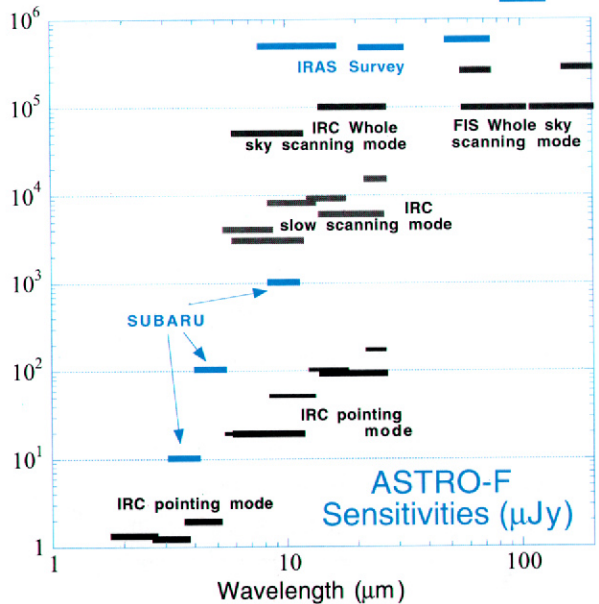


図1 ASTRO-F のサーベイモード、ポインティング（指向）観測モードの検出限界の予想値、IRAS 全天サーベイ時の感度、すばる望遠鏡を用いた場合の典型的な検出限界を示す。横軸は μm を単位とした波長、縦軸は Jy (ジャンスキー) を単位としたフラックスである。ASTRO-F の指向観測は 10 分を 1 単位としている。

* <http://www.ir.isas.ac.jp/ASTRO-F/index-j.html>

表1 ASTRO-Fの各観測波長帯の仕様一覧
(波長、空間分解能、波長分解能など)

観測装置	IRC (Infrared Camera)			FIS (Far-Infrared Surveyor)			
	NIR	MIR-S	MIR-L	N60	WIDE-S	WIDE-L	N170
チャンネル名							
ピクセルピッチ (秒角)	1.46	2.34	2.06	29.5	29.5	49	49
フィルターチャンネルと波長域 (μm)	N2: 1.8-2.7 N3: 2.7-3.7 N4: 3.7-5.05	S7: 5.5-8.5 S9W: 6.0-11.5 S11: 8.5-13.0	L15: 12.5-18.0 L20W: 14.0-26.0 L24: 22.0-26.0	50-75	50-110	110-200	150-200
分光機能 (波長分解能)	$\lambda/\Delta\lambda\sim 30$ $\lambda/\Delta\lambda\sim 180$	$\lambda/\Delta\lambda\sim 40-60$	$\lambda/\Delta\lambda\sim 40$	-	0.2cm^{-1}	0.2cm^{-1}	-

ただし、空間分解能は望遠鏡の回折限界で決定するため波長に依存する。

の低下が改善され、特に星生成領域においては、分子雲中で小さなコントラストを持つ若い天体の検出に飛躍的な向上が期待されます。表1にASTRO-Fの各観測波長帯の仕様一覧をまとめておきます。ASTRO-Fのサーベイ観測波長は当初の50～200 μm 帯だけではなく、データレートの許容する範囲において、全天に近い規模のサーベイを9, 20 μm の2つの波長帯で行うことも計画しています。この結果9～200 μm という非常に広い波長範囲で完結したデータベースを得ることが可能となります。IRASの長波長側の限界が100 μm であったことから、星形成領域中でIRAS点源として検出された天体は概ね30 Kを上回る温度を持つものに制限されていましたが、ASTRO-Fサーベイではこの限界を15K程度まで引き下げることができます。これを一般的な星形成分子雲の温度である10～20Kと照らし合わせて考えると、分子雲に対して非常に小さな温度差を持った物体からの放射を捉えることが可能となることを意味しています。

ASTRO-Fを用いた科学的な観測プログラムの検討は一昨年からはテーマ毎、および全分野に及ぶワークショップという形態で進められてきており、星形成関係でも様々なテーマの観測研究計画が提案されています。本稿では系外惑星との関係が深い、原始惑星系円盤の観測的研究に重点を置いて紹介しますが、太陽系の鉱物学的な研究に基づいて惑星系の研究の将来を展望する紹介は本特集号の

山本の記事に、また黄道光ダストの観測の重要性は石黒の記事にまとめられています。またサーベイ一般に関しては天文月報の長田らの記事に詳しくまとめられています³⁾。またその文中でも紹介されていますがIRASを含めたサーベイに関してはPriceによって書かれていた痛快な論文があります⁴⁾。これらのサーベイに関する著述は非常に良くまとまっておりますので、今後何らかのサーベイ観測を志す人は是非ご一読下さい。

2. 原始惑星系円盤の観測

Tタウリ型星のような原始惑星系円盤と β ピクトリス(がが座 β 星)のようなヴェガ型星(残骸円盤を持つ恒星)、そして我々の太陽系のような惑星系がどのようにして生まれるのかについては1980年代からの観測および理論の急速な進展の結果、次のような作業仮説を持つに至っています。星は分子雲とよばれるガス(大部分は水素ガス)とダスト(星間塵)の集まりから生まれてきます。分子雲中で高密度なコアが自己重力で収縮をはじめ、その過程で重力エネルギーを解放して原始星が誕生します。その後は準静的に収縮が進み、中心温度が1千万度に到達するあたりで水素の核融合反応が始まり、いわゆる恒星となります。主系列になる前の段階の星はTタウリ型星として知られており、Tタウリ型星のまわりには、物質の降着と回転により生じた円盤が存在し、ほぼ太陽系の

サイズ (100AU) を持っています (このサイズが比較的揃っている機構については天文月報に大橋らの指摘⁵⁾があります)。この円盤こそが惑星系形成の場であり、原始惑星系円盤と呼ばれています。この中でダストから微惑星、原始惑星をへて惑星が生まれているとともに円盤の物質は消失してゆくと考えられています。一方 IRAS の観測により、比較的重い質量を持つ主系列星のまわりにもダストが遠赤外線を放出している例が太陽系近傍だけでも多数発見されています (ヴェガ型星)。しかしながら、ダスト構造そのものを撮像することに成功したのは、 β ピクトリス

をはじめ2-3例にしかすぎず、数年前になってようやくサブミリ波や中間赤外線でいくつかのヴェガ型星のまわりでリングディスクに見える構造が発見されました。このダスト円盤は、当初は惑星系形成の残骸と提案されましたが、最近では太陽系外縁部天体に対応するものと考えられており、太陽のような質量の小さい主系列星の周りにも普遍的に存在し、ASTRO-Fのように長波長の赤外線波長帯で高い検出感度を持つ観測によりサンプルを大幅に増やすことが期待されています。

若い星のまわりの原始惑星系円盤から年老いた主系列星のまわりの星周円盤に至る進化プロセスは未だ解明されていない事実です。今後の円盤の観測は、この作業仮説に基づいた進化プロセスを実証することが大切になります。従ってさまざまな年齢の円盤を検出し、その詳細な構造を描きだし、円盤の進化を追及することが重要な観測となります。若い星のまわりの原始惑星系円盤はガスやダストなどの物質が多く存在し比較的観測がしやすいため、従来は (主として古典的な) Tタウリ型星のまわりの原始惑星系円盤が観測されてきまし

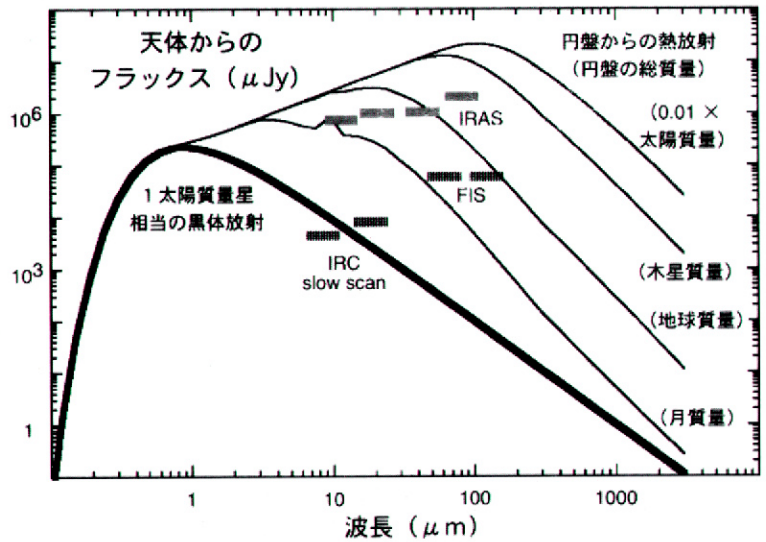


図2 原始惑星系円盤を持つ1太陽質量の星のSEDのモデル (距離150pc)。ただし円盤による中心星の減光は考慮していない。ダストのサイズ分布は通常のべき乗則。

た。特に IRAS の検出限界は牡牛座分子雲を始めとする近傍の星生成領域において、古典的なTタウリ型星 (CTTS : Classical - T Tauri Star) をちょうど検出する感度を持っていたため、惑星形成時の初期フェイズにおける天体のサンプルを多数検出し、この分野での研究にブレークスルーをもたらしました。しかし原始惑星系円盤も後期のステージに入ると円盤からの熱放射が減少していくため IRAS では検出することができませんでした (後期のステージのTタウリ型星：弱輝線Tタウリ型星：WTTS : Weak Line - T Tauri Star は主として可視光の輝線星サーベイや近年ではX線観測により検出されている。X線による若い天体の観測は天文月報に坪井による記事⁶⁾がある)。このたの進化後期のプロセスを解明するためには、より高感度の赤外線観測が必要となります。ASTRO-FはIRASと比べて1桁以上高い感度で観測を行うことが可能であり、近傍の星形成領域において若い天体から主系列星にいたるまでの全てのステージの円盤を検出することが可能となります (図2)。つまり ASTRO-F の観測だけでも、初期の原始惑星系円

盤から主系列に至るまでの天体の見かけ (SED: Spectral Energy Distribution) の変化を追いかけることができ、若い天体の ASTRO-F ダイアグラムの構築という大目標を実現できるのではないかと考えています。特に SED を統計的に見た場合の変化から、円盤の消失と惑星系の形成プロセスおよびそれぞれのステージにおける典型的な滞在時間、そして質量のバリエーションなどを定量的に議論できるようにすることを期待しています。

さらに ASTRO-F は、サーベイ観測を中心とする望遠鏡であるものの、その指向観測の能力を用いると、大幅に高い感度を得ることができるとともに低分散ながらも分光観測が可能となります。この分光能力は星周円盤を構成するダスト組成の情報を得るのに便利であり、大気の影響を受けない $3\ \mu\text{m}$ 波長帯の広帯域分光観測では、若い天体のまわりの氷の観測が期待されます。さらに $10\ \mu\text{m}$ 帯と合わせて $20\ \mu\text{m}$ 帯の分光観測が可能であることから原始惑星系円盤のシリケートの分類が可能となります⁷⁾。特に $20\ \mu\text{m}$ 波長帯の観測が加わることにより、シリケートダストがアモルファス構造を持つか結晶化構造を持つかの分類が可能であり、統計的に十分なサンプルの観測を行うことにより、結晶化が促進される時期を明らかにすることができることを期待しています。このことは惑星系の形成過程のプロセスを考える上で非常に重要な情報となるでしょう。

3. ASTRO-F 後

ASTRO-F は若い星から主系列星までの広範囲なサンプルをもたらします。ASTRO-F により、惑星形成過程のダストディスクの進化過程をマクロな観点で解明していくことが予想されます。しかしながら ASTRO-F の決定的な弱点は、望遠鏡の口径が小さいことによる空間分解能の不足であり、このため検出されたダストディスクの詳細構造に関する情報は、観測された SED からモデルフィッティングを行うという手法が必要となります。この情報と相補

的かつ重要な観測は、やはりダストディスクの直接撮像および分光マッピング観測です。このためには SPICA 計画のように、ASTRO-F よりも大きな口径の望遠鏡を用いて近傍の T タウリ型星のダストディスクを空間的に分解できる観測装置が必要となります。また ALMA 計画のような電波の干渉計には、分子ガス輝線とダストからの連続波観測によりディスクの詳細な構造を描き出すことが期待されます。ASTRO-F 全天サーベイで検出された天体 (ASTRO-F 天体) は、従来の IRAS 天体に代わって、これらの研究を支える重要な標準サンプルとなることを信じています。

ASTRO-F 星形成 WG は宇宙科学研究所、国立天文台、東京大学、名古屋大学、ソウル大分校をはじめとする多くの大学/研究機関のメンバーにより推進されています。

参考文献

- 1) Shibai H., 2002, *Advances in Space Research*, 30(9), 2089-2097
- 2) Beichman C. A., *Ann. Rev. 1987, Astr. Ap.*, 25, 521
- 3) 長田哲也, 佐藤修二, 1997, *天文月報* 90, 568
- 4) Price S. D., 1988, *PASP* 100, 171
- 5) 大橋永芳, 1988, *天文月報* 91, 99
- 6) 坪井陽子, 2002, *天文月報* 95, 77
- 7) 例えば van den Ancker et al., 2000, *Astron. Astrophys.* 357, 325

Observations of proto-planetary disks with ASTRO-F

Munetaka UENO

Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro, Tokyo 155-8902, Japan

Abstract: Study on formation of planetary system is one of the key science of ASTRO-F which is an infrared astronomical satellite scheduled to be launched in February 2004. Its sensitivities and spatial resolution will enable us to trace the whole process in the formation and dissipation of proto-planetary disk as well as to make spectroscopic observations of dust particles in the disk.