

第5章 焦点面観測装置

この章のまとめ

現段階で SPICA に搭載することを想定している焦点面観測装置は、以下の 4 つである (他にオプションとして近赤外線観測装置を検討)。これらの装置は、望遠鏡主鏡の裏側に位置する光学ベンチに取り付け、望遠鏡と同様に極低温に冷却して用いることで、他に類をみない性能を発揮する。開発あたっては、国際的な体制でのぞむ。

1. 中間赤外線観測装置：

5 ~ 40 μm 付近までの波長域を主な観測対象とした、汎用の撮像・分光観測装置である。SPICA と同世代の大型宇宙望遠鏡である NASA の JWST とくらべた場合、大幅に広い視野で (~ 20 倍)、より長波長域まで観測することが出来る。現在、韓国天文台と共同開発することを検討している。フェーズ A 期には既存の技術をもとに、SPICA 望遠鏡の性能を十分に活かすための開発 (大フォーマット検出器の実証試験、各分光方式の比較/実証、フィルター) を遂行する。

2. コロナグラフ観測装置：

太陽系外惑星の直接観測を最大の目的とした、チャレンジングな観測装置である。主星の光量を選択的に低減する光学系 (コロナグラフ) によって、5 ~ 20 μm の波長域にて 10^6 程度のコントラストでの観測を実現する。SPICA 望遠鏡の特徴である、1) 大気揺らぎの影響を受けないこと、2) 赤外線を観測対象とすること、3) 主鏡が 1 枚鏡であること、は、コロナグラフ観測に非常に大きな意味をもつ。高精度の波面制御を必要とするため、フェーズ A 期の基礎開発はコロナグラフ光学系だけでなく、極低温可変形鏡、Tip-Tilt 鏡システムの開発、衛星の姿勢安定性、振動擾乱のコントロールなども含めた総合的なものになる。

3. 遠赤外線観測装置：

50 ~ 200 μm の波長域を主な観測対象とした、汎用の撮像・分光観測装置である。ESA による Herchell 望遠鏡とくらべて、SPICA では望遠鏡の温度が低いため、2 桁以上も高感度での分光観測が可能である。Herchell の焦点面観測装置を開発した、イギリス、フランス、オランダ、ドイツからなるコンソーシアムとの協力が検討されている。フェーズ A では、検出器の性能改善、低ノイズ極低温読みだし回路の改善などを行う。

4. サブミリ波観測装置：

NASA/JPL のグループが中心となって SPICA に搭載することを検討している、200 ~ 600 μm の波長域を主な観測対象とした Background Limited Spectroscopy (BLISS) と呼ばれる分光観測装置である。検出器 (spider-web bolometer)、分光素子 (ZSpec) に関する世界トップの技術と、極低温の SPICA 望遠鏡を組み合わせることで、Herchell より圧倒的に高い感度で confusion 限界レベルの観測を実現する。フェーズ A では、実験室レベルの要素技術を成熟させ、実機の成立性を実証する。

5.1 観測装置の全体像

この節では、まず焦点面観測装置 (Focal Plane Instruments, FPI) 郡の全体像および、それらに共通する制約条件、共有するリソース、能動光学による波面補償について示す。個々の観測装置の詳細については、5.3 以降に記述する。

5.1.1 観測装置

現時点で開発することを想定している、主要な観測装置は以下の 4 種類である。

1. コロナグラフ観測装置：

太陽系外惑星の直接観測を第一の目標とした、チャレンジングな観測装置である。コロナグラフ光学系を用いて主星からのフラックスを選択的に低減することで、主星とくらべて極めて微弱な惑星からのフラックスを検出する。5 ~ 20 μm の波長域を主な観測対象とする。

2. 中間赤外観測装置：

5 ~ 40 μm の波長域を主な観測対象とした、撮像・分光観測装置である。現在、韓国天文台と共同開発することを検討している。

3. 遠赤外観測装置：

50 ~ 200 μm の波長域を主な観測対象とした、撮像・分光観測装置である。ヨーロッパ各国からなるグループと共同で検討、設計を進めている。

4. サブミリ波観測装置：

200 ~ 600 μm の波長域を主な観測対象とした、分光観測装置である。NASA と共同で検討、設計を進めている。

1 のコロナグラフ観測装置を SPICA 望遠鏡に搭載することで、大気揺らぎの影響を受けない宇宙から、(主星と惑星のコントラストが可視域にくらべて大幅に緩和される) 赤外域で太陽系外惑星の探査を行うことを目指す。また SPICA 望遠鏡の主鏡が単一鏡であることもコロナグラフ観測に有利であり、SPICA はコロナグラフ観測を行うにあたって、全くユニークな機会であるといえる。

2 ~ 4 の多目的の観測装置については、口径 3.5m と大型の冷却宇宙望遠鏡である SPICA と組み合わせることで、他に類を見ない画期的な高感度、高解像度を実現できるという特徴がある。特に分光観測の感度においては、従来と比較して、波長域にもよるが 2 桁以上の向上が期待される。

コロナグラフ観測装置は、今後の検討によっては中間赤外観測装置と一体化する可能性もあるが、本章では独立した観測装置として開発することを想定して記述する。

これらの観測装置について、現時点で想定している仕様を表 5.1 に示す。

5.1.2 共有リソース

これらの観測装置は、いずれも望遠鏡のカセグレン焦点部付近に位置する光学ベンチに取り付ける (図 5.1)。取り付けスペースは、直径 2500 mm、高さ 500 mm 程度の空間であり、これを各観測装置に分配して利用する。また、観測装置の総重量としては 200 kg を想定しているため、この値を各観測装置で分配して利用する。

各観測装置は、焦点面 (視野) を分配して利用することで共存する (すなわち、機械的な観測装置の交換は行わない)。図 5.2 に、視野分配の解の例を示す。

表 5.1: 現段階での各観測装置の仕様

項目	中間赤外線観測装置			遠赤外線観測装置			サブミリ波観測装置		
	コロナグラフ観測装置	中間赤外線観測装置	遠赤外線観測装置	サブミリ波観測装置	遠赤外線観測装置	サブミリ波観測装置	サブミリ波観測装置	遠赤外線観測装置	サブミリ波観測装置
主要波長域	5 - 28 μm	5 - 40 μm	28 - 200 μm	200 - 600 μm	28 - 200 μm	200 - 600 μm	200 - 600 μm	200 - 600 μm	200 - 600 μm
観測モード	コロナグラフ撮像、分光	撮像、分光	撮像、分光	撮像、分光	撮像、分光	撮像、分光	撮像、分光	撮像、分光	撮像、分光
検出器 (おもな候補)	Si:As (1 k \times 1k, 0.1/pix)	Si:As および Si:Sb (1 k \times 1k, 0.39/pix)	Si:As (1 k \times 1k, 0.1/pix)	Si:As (1 k \times 1k, 0.39/pix)	SW 撮像 (注 1) : Ge:Ga (256 \times 256, 1.8/pix), LW 撮像 : 圧縮型 Ge:Ga (128 \times 128, 3.6/pix), TES ポロメーター (分光)	SW 撮像 (注 1) : Ge:Ga (256 \times 256, 1.8/pix), LW 撮像 : 圧縮型 Ge:Ga (128 \times 128, 3.6/pix), TES ポロメーター (分光)	ポロメーター (Si3N4NTD Ge ポロメーター)	ポロメーター (Si3N4NTD Ge ポロメーター)	ポロメーター (Si3N4NTD Ge ポロメーター)
空間分解能	観測波長での回折限界	観測波長での回折限界	観測波長での回折限界	観測波長での回折限界	観測波長での回折限界	観測波長での回折限界	観測波長での回折限界	観測波長での回折限界	観測波長での回折限界
視野	1' \times 1'	6.6' \times 6.6'	6.6' \times 6.6'	6.6' \times 6.6'	3.8' \times 3.8' (SW) 3.8' \times 3.8' (LW)	3.8' \times 3.8' (SW) 3.8' \times 3.8' (LW)	3.8' \times 3.8' (SW) 3.8' \times 3.8' (LW)	3.8' \times 3.8' (SW) 3.8' \times 3.8' (LW)	3.8' \times 3.8' (SW) 3.8' \times 3.8' (LW)
波長選択フィルター	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
主要波長分解能	~ 200	~ 3000	~ 3000	~ 3000	~ 2000	~ 2000	~ 2000	~ 1000	~ 1000
分光方式 (おもな候補)	グレーティングなど	グレーティング、イメージスライサー、ファブリペロー、フォーリエ	グレーティング、イメージスライサー、ファブリペロー、フォーリエ	グレーティング、イメージスライサー、ファブリペロー、フォーリエ	グレーティング、ファブリペロー、フォーリエ	グレーティング、ファブリペロー、フォーリエ	グレーティング、ファブリペロー、フォーリエ	グレーティング (WaFIRS)、フォーリエ (Mach-Zehnder 型)	グレーティング (WaFIRS)、フォーリエ (Mach-Zehnder 型)
機器データ発生レート (Mbps)	0.62 (SW), 0.16 (LW)	0.62 (SW), 0.16 (LW)	0.62 (SW), 0.16 (LW)	0.62 (SW), 0.16 (LW)	0.01 (撮像), 0.30 (分光)	0.01 (撮像), 0.30 (分光)	0.01 (撮像), 0.30 (分光)	0.01 (撮像), 0.30 (分光)	0.01 (撮像), 0.30 (分光)
(注 2)									
発熱量 (計 15 mW 以下)	数 mW 以下 (TBD)	数 mW 以下 (TBD)	数 mW 以下 (TBD)	数 mW 以下 (TBD)	数 mW 以下 (TBD)	数 mW 以下 (TBD)	数 mW 以下 (TBD)	数 mW 以下 (TBD)	数 mW 以下 (TBD)
スペース (全体で 2500 x 500 mm 以内)	(TBD)	(TBD)	(TBD)	(TBD)	< R 1250 x 90 $^\circ$ x 500 mm	< R 1250 x 90 $^\circ$ x 500 mm	< R 1250 x 90 $^\circ$ x 500 mm	< R 1250 x 90 $^\circ$ x 500 mm	< R 1250 x 90 $^\circ$ x 500 mm
重量 : 全体で 200 kg 以内	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD	TBD
その他・備考	コントラスト : 10 ⁶ IWD (注 3) : 3 ~ 5 \times λ/D OWD (注 4) : 10 ~ 30 \times λ/D 補償光学 (Tip-Tilt 鏡、可変形鏡) 中間赤外線観測装置と融合する可能性あり	補償光学 (Tip-Tilt 鏡) コロナグラフ観測装置と融合する可能性あり	補償光学 (Tip-Tilt 鏡) コロナグラフ観測装置と融合する可能性あり	補償光学 (Tip-Tilt 鏡) コロナグラフ観測装置と融合する可能性あり	補償光学 (Tip-Tilt 鏡) コロナグラフ観測装置と融合する可能性あり	補償光学 (Tip-Tilt 鏡) コロナグラフ観測装置と融合する可能性あり	補償光学 (Tip-Tilt 鏡) コロナグラフ観測装置と融合する可能性あり	補償光学 (Tip-Tilt 鏡) コロナグラフ観測装置と融合する可能性あり	補償光学 (Tip-Tilt 鏡) コロナグラフ観測装置と融合する可能性あり

注 1 : SW は波長 50 μm 以下、LW は 50 μm 以上。

注 2 : 発生データは CCSDS パケットと仮定。より詳しくは表 4.2 を参照。発生レートには CCSDS パケットヘッドのオーバーヘッドを含むと仮定。

注 3, 4 : IWD, OWD はそれぞれ、遮蔽中心からの最小動作角距離、最大動作角距離。

表 5.2: 焦点面観測装置全体への制約

項目	仕様
スペース	2500mm × 高さ 500 mm
総重量	200 kg 以下
総発熱量	15 mW 以下

発熱については、焦点面観測装置全体で 15 mW 以下とすることを想定して、衛星の熱設計を進めている。もし個々の観測装置が発する熱量がこれを超える場合には、必要に応じて、観測に用いていない装置について電源をオフにする方式をとる可能性がある。

焦点面観測装置全体への制約をまとめて、表 5.2 に示す。これらのリソースを、実際に各観測装置にどれだけずつ割り当てるか具体化することは、今後の課題である。

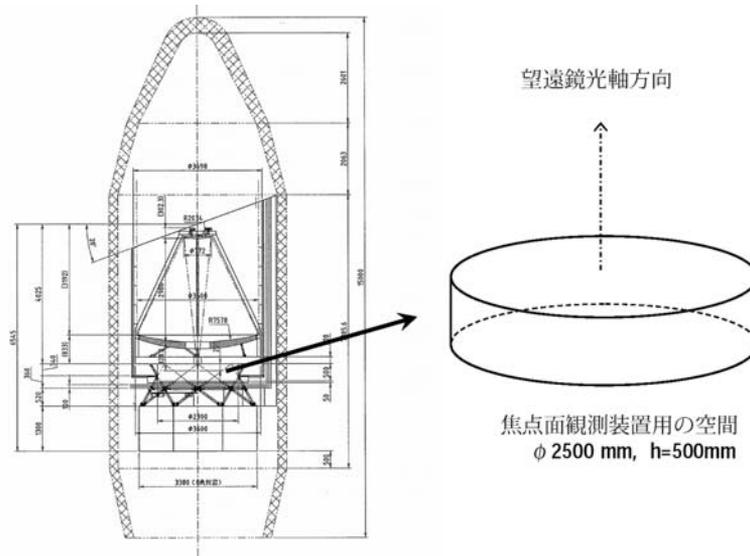


図 5.1: 焦点面観測装置と取り付け空間の外形およびその衛星における位置：焦点面観測装置用は、光学ベンチ上の直径 2500 mm、高さ 500mm の空間に納める必要がある。円柱型のと取り付け空間の軸は、望遠鏡の光軸と一致している。

5.1.3 入射波面の能動補償

焦点面観測装置は、以下のような理由により、Tip - Tilt 鏡、可変形鏡を用いて、望遠鏡からの波面を能動的に補償する。

- Tip - Tilt 鏡：

SPICA 衛星には、冷凍機、リアクションホイール、ジャイロなどがもたらす擾乱による振動が存在する。そのため、衛星の姿勢安定性は 1 arcsec(RMS) 程度にとどまる。他方、コロナグラフ観測装置および中間赤外観測装置は、これよりきびしい指向性安定性を要求する(最高で 0.03 arcsec 程度)。そこで、両者のギャップを埋めるため Tip - Tilt 鏡を用いて、像の位置を能動的に補償する。

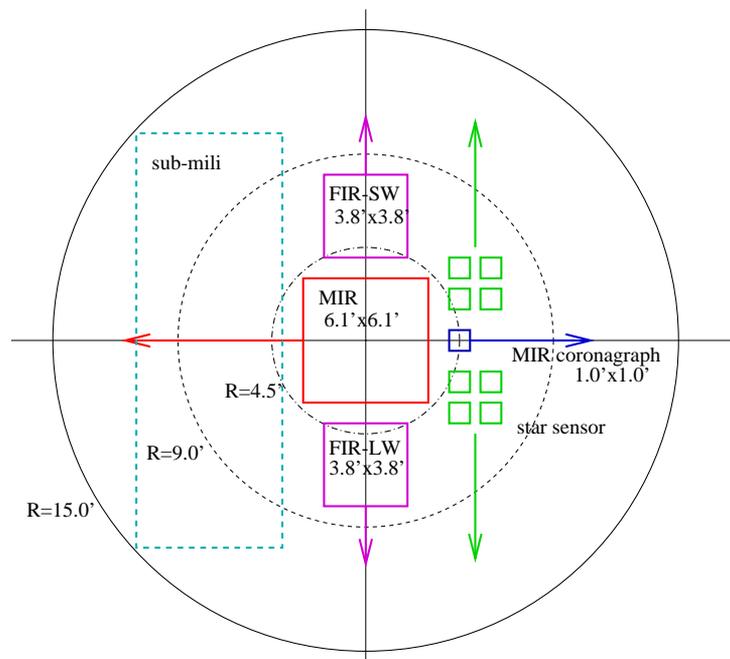


図 5.2: 焦点面の視野分配例: 矢印は折曲げ鏡による光束の引出し方向を表す。コロナグラフ観測装置は他の装置より高い波面精度を要求するが、視野が狭いため、焦点面の中心部を割り当てる必要はない。

- 可変形鏡鏡:

SPICA 望遠鏡における波面精度の仕様は、 $0.35 \mu\text{m}$ (RMS) である。他方、コロナグラフ観測を成立させるためには、(特定の空間周波数領域において) 10 nm 程度の波面精度が必要と考えている。とはいえ、望遠鏡の精度をこのレベルにまで向上させることは事実上ほぼ不可能であるので、可変形鏡を DC 的に駆動することで補償する。

図 5.3 は、各観測装置について、どのような波面補正を、どのような順序で行うかを示したものである。

従来、地上の望遠鏡、観測装置においては、これらの素子は大気揺らぎを補正するために用いられてきたが、いずれの素子においても SPICA で行う補正とは目的が異なっている。また、従来の Tip-Tilt 鏡、可変形鏡は常温環境下で用いられるものに限られていたが、SPICA ではこれらの素子は極低温 ($\sim 4 \text{ K}$) で動作する必要がある。極低温用の補償光学用素子を開発することも、観測装置開発における重要な課題となっているが、詳しくは以降の節に記述する。

5.2 中間赤外撮像分光装置

5.2.1 期待されるサイエンス

惑星系 – 我々の太陽系と系外惑星系

太陽系には数多くの小天体と惑星間空間のダストが含まれている。SPICA の中間赤外での観測により数多くの小惑星の反射率とサイズを測定し、また黄道光として見えるダスト分布状態をこれまで観測不可能であった領域まで拡大して観測することで太陽系がどのようにして形成され、現在の姿になっているのかを調べることができる。また黄道光の成分は、我々の太陽系と同じよう

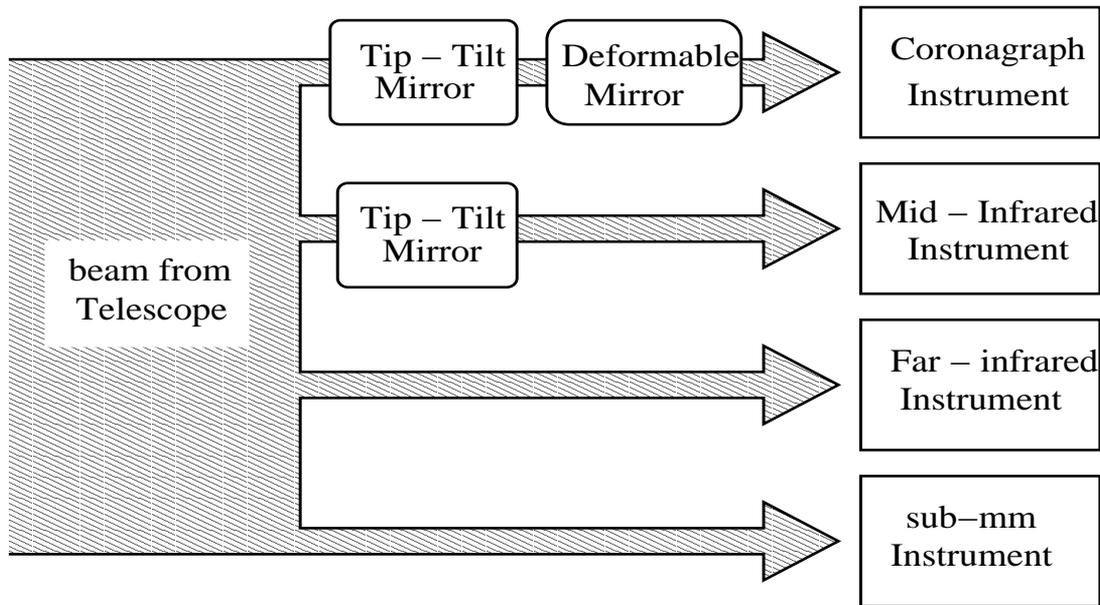


図 5.3: SPICA 焦点面観測装置における補償光学：コロナグラフ観測装置と中間赤外観測装置は一体化する可能性があるが、ここでは独立した観測装置とした場合について示す。

なものが他の天体の周囲に存在していたばあいには観測可能になってくる成分であり、太陽系類似のシステムを探索する上でも惑星間ダストの性質・成因は重要である。

そして太陽系外の天体においては、惑星系の形成段階がもっとも大きな研究対象になる。惑星系を形成しつつある原始惑星系円盤のダストの鉱物学的特徴、これらの円盤に付随するガスの分布と量の円盤進化との関係を明らかにすることで、惑星誕生のメカニズムをはっきりさせることができる。そして、既に惑星系が誕生している系においては、我々の太陽系の黄道光に対応するダスト放射成分を観測することでその系の性質を知ることができよう。

銀河系 – 星とガスとダストの物質輪廻

銀河系の内部は星間物質から星が誕生し、そして星の死とともに物質が星間空間に戻されるといふ物質の循環が起きている。

SPICA の高感度、高分解能によって個々の星まで分解したデータによって銀河中心領域における星形成、低質量まで含めた初期質量関数といった問題を調べることが可能になる。また、中間赤外領域はダストからの特徴あるスペクトルとイオン化された原子からの輝線が多くふくまれるため、ガスとダストの両面において星間空間物質の性質についてもおおくの研究ができる。これらの研究から銀河系内の物質の輪廻についての定量的な描像を得ることができる。

宇宙論 – 銀河形成、大規模構造、ダークマター

ガスとダストの両面における銀河の研究は、SPICA の高感度によって遠方の銀河、すなわち過去の銀河にむけて遡る観測が可能になる。これによって銀河の進化をこれまでにない過去にまで遡って調べることができる。

また、さらに遠方の銀河対しては SPICA の持つ高感度により赤方変位を決定しつつ、高角分解

能によって銀河形態までの研究も可能である。特に広視野での撮像を行うことで遠方銀河の大規模構造形成についての研究を進めることが可能になる。

さらには、現代天文学の大きな目標の一つである宇宙で最初の天体の検出もまた SPICA の中間赤外線観測装置のターゲットである。このような天体はまだ見つかってはいないが、SPICA によってより探査範囲を広げることで新しい発見につながると期待される。

分光観測への要求のまとめ

分光観測への要求をまとめた一覧表を以下に掲げる。

観測装置が持つべき特徴

これらのサイエンスを展開するために SPICA の中間赤外観測装置が持つべき特徴は、

1. 広視野での高感度撮像
2. 中程度～高分散の波長分解能での個別天体の分光を空間的情報と共に得ること
3. 広がった領域からの輝線の検出と空間的な分布を測定すること

である。SPICA 搭載用中間赤外装置においてはこれらの要求を満たすべく、実現可能性を考慮しながら今後の Phase-A において具体的な装置の方式の決定を行う。

5.2.2 撮像装置

特徴

SPICA は 3.5m という大口径の冷却望遠鏡を持つスペース望遠鏡であり、中間赤外域で他の衛星望遠鏡をはるかに凌駕する感度と高い空間分解能を達成するポテンシャルを持つ望遠鏡である。SPICA-MIR カメラはこれら SPICA の持つ優位性を最大限活かすための装置であり、SPICA の根幹的な装置のひとつと言える。

現在検討されている SPICA-MIR カメラは非常にシンプルであり、できるだけ広いアレイ検出器上に回折限界の像を取得する事を最優先する。例えば波長 10 μm の回折像を取得できる (ナイキストサンプリング) ような設計の場合、ピクセルスケールが $\sim 0.39 \text{ arcsec pix}^{-1}$ 、検出器フォーマットを $1\text{k} \times 1\text{k}$ だと考えると約 6.65 分四方の視野が達成できる。これは SPICA の焦点面サイズを考えればほぼ限界の広さであり、また JWST など他の装置では実現不可能な視野と言える。例えば、JWST 用に検討されている中間赤外カメラ MIRI-I は本 SPICA-MIR カメラとほぼ同じ波長帯を観測する装置であるが、その視野は $1.3' \times 1.7'$ に過ぎず、観測面積で 20 倍の差がある。よって、例えば中間赤外域での広視野サーベイなどを行う場合 SPICA-MIR カメラはもっとも有効な装置であり、その天文学的インパクトは非常に大きいと言える。

広い視野と同時に SPICA-MIR カメラとして求められるのは星周空間を観測するための高コントラストでの撮像観測能力である。これを実現するにはコロナグラフ装置が必要であるが、これについては別稿で詳しく議論するためここでは割愛する。また、グリズム等による分光機能の搭載も可能ではあるが、分光器との兼ね合いもあるためここでは議論しない事とする。

表 5.7 に、SPICA-MIR カメラの諸元をまとめると以下ようになる。

表 5.3: 20-50 μm 帯を中心とした分光観測要求

サイエンス	波長帯	$R = \lambda/\Delta\lambda$	感度	その他、コメント
赤方偏移している天体 (原子、イオンによる禁制線) 遠方星形成銀河の物理量	10-80 μm	3000-5000	10^{-20} W/m^2	多数のイオンからのライン、 ガスの運動
(水素分子輝線) $z=3$ での原始銀河雲の冷却過程 (ダスト)	8-70 μm		$0.7-1.6 \times 10^{-20} \text{ W/m}^2$	
AGN と starburst の区別 赤方偏移していない天体 (原子、イオンによる禁制線) SSC の環境依存性、進化、 様々な電離領域の物理量 (水素分子)	5-100 μm		$10 \mu\text{Jy}$	$z=1-3$ での silicate と PAH 輝線強度比が重要
分子雲形成	10-30 μm			分子雲周辺部、形成現場での 水素分子純回転遷移 水素分子ガスの速度分解
原始惑星系円盤の散逸過程 (鉱物学一般)	17 & 28 μm	10^5		星間吸収から 星周ダストの空間分解
星間ダストの組成、構造 晩期型質量放出史 超低質量天体の星周円盤 (シリケイト)	10-40 μm 10-40 μm 10-40 μm 45 μm	> 1000 > 1000 > 数百		物理状態の空間分解 起源による性質の違い 65 μm feature の同定
中質量星周円盤内ダスト分布 太陽系低温ダスト ベガ型星の組成探査 星形成領域における diopside (Water ice) Hot core, 彗星、小惑星中の 含水鉱物、太陽系低温ダスト	45 μm			

表 5.4: 5–50 μm 帯に存在する主なガススペクトル線

lines	静止波長	特徴、起源
[Ne VI]	7.65 μm	
[O IV]	25.89 μm	AGN, shock 領域
[Fe II]	17.94 μm	超新星残骸、shock 領域
[Fe II]	24.52 μm	
[Fe II]	25.99 μm	
[Fe II]	35.04 μm	
[S I]	25.25 μm	
[S IV]	10.51 μm	星形成領域の H II 領域における
[Ne II]	12.81 μm	ガス密度、励起・電離状態、紫外光の硬さのプロープ
[Ne III]	15.56 μm	
[Ne III]	36.01 μm	
[S III]	18.71 μm	
[S III]	33.48 μm	
[Ar III]	21.83 μm	
[Ar III]	8.99 μm	
[Ar II]	6.99 μm	
[Si II]	34.82 μm	光解離領域における密度、温度のプロープ
H ₂ 0–0 S(5)	6.91 μm	低金属分子雲の冷却輝線
H ₂ 0–0 S(4)	8.03 μm	
H ₂ 0–0 S(3)	9.66 μm	
H ₂ 0–0 S(2)	12.28 μm	
H ₂ 0–0 S(1)	17.03 μm	
H ₂ 0–0 S(0)	28.22 μm	
HD 0–0 R(5)	19.43 μm	[D]/[H] 比
HD 0–0 R(4)	23.03 μm	
HD 0–0 R(3)	28.50 μm	
HD 0–0 R(2)	37.70 μm	
OH	34.60, 34.63 μm	
H ₂ O	6.0 μm	ガスの chemistry
CH ₄	7.7 μm	
C ₂ H ₂	13.7 μm	
HCN	14.0 μm	
CO ₂	15.0 μm	

表 5.5: 0.7–5 μm 帯に存在する主なガススペクトル線 ($z = 6$ までで、赤方偏移したスペクトル線が 5–50 μm の範囲に入ってくるもののうち、Table 5.4 に含まれないもの)

lines	静止波長	特徴、起源
H ₂ 1–0 S(1)	2.12 μm	低金属分子雲の冷却輝線
H ₂ 1–0 Q(1)	2.34 μm	
H ₂ 1–0 O(3)	2.69 μm	

表 5.6: 5–50 μm 帯に存在する主なダストフィーチャー

materials	静止波長 [μm]	特徴、起源
PAH	3.3, 3.4, 6.2, 7.7, 8.6, 11.2, 12.7, 16.4, 17.1	炭素系物質、紫外輻射場
Silicate (amorphous)	9.7 18.0	酸素系物質、星間吸収
Silicate (crystalline)		
Forsterite	11.3, 16.3, 23.9, 27.7, 33.8, 69	鉱物学、ダスト成長、ダスト進化
Enstatite	18.5, 21.5, 24.5	太陽系
Silica	8.6	
Diopside	45, 65	
H ₂ O ice	44, 63	

表 5.7: SPICA-MIR カメラの諸元

項目	諸元
検出器	Si:As 1k × 1k 検出器 および Si:Sb
観測波長	5 - 40 μm
視野	6.65 arcmin × 6.65 arcmin
ピクセルスケール	0.39 arcsec pix ⁻¹ (10×m での回折像をナイキストサンプリング)
コロナグラフ	搭載予定 (詳細は別項参照)
分光機能	TBD

技術的課題

SPICA-MIR カメラ専用検出器を用いるかあるいは分光器と共用にするかは現在検討中であり、詳細な光学系などはまだ検討されていない。しかしながら、これまでのスペース及び地上観測装置の開発経験からカメラ自身の開発には大きな技術的困難はないと思われる。それよりも、様々な天文学的要求に答えるためのフィルターセットの整備が大きな問題となる。これについては後述する。

5.2.3 分光方式の検討

次期赤外線天文衛星 SPICA は、3.5m の大口径と大型アレイの搭載により広視野で高空間分解能の観測が実現される。搭載装置の分光ユニットをデザインする際、これらの特徴が最大限に活きる分光方式を採用することが重要である。天文観測で使われる分光方式で代表的なものに、グレーティング(回折格子)分光、ファブリ・ペロー分光、フーリエ分光がある。特にグレーティング分光方式では、スリットを使うことにより生じる空間情報の損失を克服するため、マルチスリット方式やイメージスライス方式が実用化されている。本章では、各種分光方式の特性と原理にふれると共に SPICA への搭載可能性と各方式が得意とするサイエンスについて述べる。

ロングスリット・グレーティング分光方式

特徴

グレーティング分光方式は回折格子を用いた分光方式である。回折格子は通常ガラスや金属等の板に溝を刻んだもので、溝による回折を用いて光を波長毎にわけることができる。溝間隔は使用波長、次数、分解能等によって異なるが、中間赤外波長では数 10 本/mm の物が良く使われる。回折格子は製作が比較的容易であり、また安定であることから、スペースを含めた天体用分光素子として広く使用されている。

グレーティング分光では光を 1 次元的に分離する事になるので、長スリットを併用する事で、波長情報に加え空間情報も取得することができる。観測できる空間スケールは検出器のフォーマットにおおきく左右され、例えば 5 μ m 回折像をナイキストサンプルするように設計された 1k \times 1k 検出器の場合は、最大 6 arcmin の視野を確保できる。クロスディスペルザを使用すれば、空間スケールを減らして観測波長範囲を広げるような設計も可能である。

グレーティング分光による波長分解能は、次数 m とビーム中に含まれる溝本数 N に比例する。

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mN \quad (5.1)$$

したがって、グレーティング分光で高波長分解能を達成するためには、高次数を使うか溝本数を増やす、あるいは入射ビーム径をおおきくする必要がある。これは装置の大型化を招くデメリットを持つ。これを解消するために、回折格子の反射面側にゲルマニウム等の高屈折率物質を張り付けたイメージング回折格子等も開発・研究されている。

長スリット・グレーティング分光方式の分光器を SPICA に搭載する場合の利点をまとめると以下のとおり。

1. 比較的広い波長範囲を短い積分時間で覆える。観測対象が点源の場合には後で述べる 2 次元分光に比べ効率的な観測が可能となる。また、背景光の影響を小さくして観測できるので、感度の点でも有利である。

2. 回折格子は非常に良く用いられている素子であり、その開発は他の方式にくらべ遥かに容易である。
3. 他方式よりも駆動部分が少なく、装置の安定性が高い。光学パス等の構造も非常に単純である。特に低分散等で観測波長を固定できるならば駆動部分を無くすことも可能であり、コンパクトかつ安定な装置とすることができる。

また、この方式の欠点は以下のとおりである。

1. 取得できる情報が空間的には1次元であるため、広がった天体の観測では観測効率が悪い。また高い空間分解能を達成するには観測波長によってスリット幅を変えなければならず、広がった天体の観測ではライン強度比較などで問題を起こす可能性がある。
2. 高分散を達成するにはビーム径や回折格子を大型化する必要があり、全体的な装置サイズがおおきくなってしまふ。これはイマージョングレーティングなどを用いることができれば解消が可能である。
3. 回折格子およびスリットによって観測波長・分散が決まってしまうため、観測パラメータの変更には回折格子の交換を行う必要がある。そのため観測波長・分散を観測天体ごとに細かく選択するような、フレキシブルな運用はのぞめない。
4. 観測対象をスリットに落とす必要があるため、1arcsec以上の指向方向制御が必要となる。これは衛星姿勢制御だけでは難しいが、低温ティップティルトなどを用いることで回避できる。

技術的課題

既出のようにグレーティング分光方式は衛星装置を含め広く用いられている分光方式であり、回折格子自身の開発に大きな技術的困難はない。高次光を避けるためのオーダーソータフィルタやビームスプリッタの開発は必要であるが、これらは他の方式でも問題になる項目でもある。その意味で、グレーティング方式固有の技術的な課題は特にないと言える。ただし高分散観測を行うためには、イマージョングレーティングなどの開発が必要となる。このような研究は理化学研究所を中心に行われている。

ロングスリット・グレーティング分光方式が得意とするサイエンス

グレーティング分光方式は非常に一般的な分光方式であり、広いサイエンスに対応できるデータが取得できる。特にフーリエなどの方式と比べた場合、空間スケールの小さい天体(あるいは点源)で、広い波長範囲をカバーする観測に向いており、選択した点源天体を詳しく調べる上で有効となる。例えば従来の観測装置ではとても分光ができなかった、遠方のフェイントな銀河を選択し詳しく観測研究するなどの場面に有効に使うことができる。また、1次元とは言え空間方向の情報も取得できるので、ライン・ダストフィーチャの空間的差異を調べる等にも使うことができる。

あるいは別の方向として、高分散分光を高い感度で行うことも可能である。高分散のグレーティング分光では背景光ノイズをおおきく下げることができるので、フーリエ方式に比べ深い観測が可能となる。また、クロスディスペルザなどを併用すれば、ファブリペロー方式よりも格段に広い波長範囲を覆う事ができる。したがって、例えば星周ガスやダストの研究のために、分散が1万を越えるような分光をフェイントな点源天体について行うには、グレーティング方式を採用することが望ましい。

イメージスライサー方式

特徴

イメージスライサーとして、瞳の再結像までを考慮したものを Advanced Image Slicer (AIS) といい、The Durham Astronomical Instrumentation Group が提唱した。AIS の原理と構成は以下のようなものである。

1. 前置光学系 (Fore-optics) を最初におく。これはイメージスライサーへの入射光線の F 比を調整するだけでなく、瞳面の位置を調整する役割も果たす。
2. スリットと同じような細長い形状のミラーを複数本、すこしずつ角度を変えながら焦点面に並べて置く。これを Slicing mirror と呼び、この鏡によって像を分割する。
3. Slicing mirror 自体は平面または凹曲面である。この鏡と前置光学系とをあわせて、瞳像を次の Pupil mirrors 上につくる。
4. Pupil mirrors は Slicing mirror のそれぞれのがスライスした像を一系列のスリット像として結像する。
5. 分光系に入る前に Slit mirrors をおく。この鏡により出射光線の傾きを補正し Pupil mirrors 上にあった瞳像が一つの瞳位置から出射してきたものと同等なものにする。
6. Slit mirrors にスリット幅方向にパワーを持たせて拡大するアイデアもある。これにより、Slicing mirror の幅をスリット縦方向のピクセルと同じにしておき、これが出射スリットでは 2 ピクセル相当になるようにすることで、空間のサンプリングスケールを縦横でそろえることもできる。

AIS の構成を図 5.4 に示す。ここで天体からの光に対応する像の光線と、瞳位置を示すための光線を共に示している。

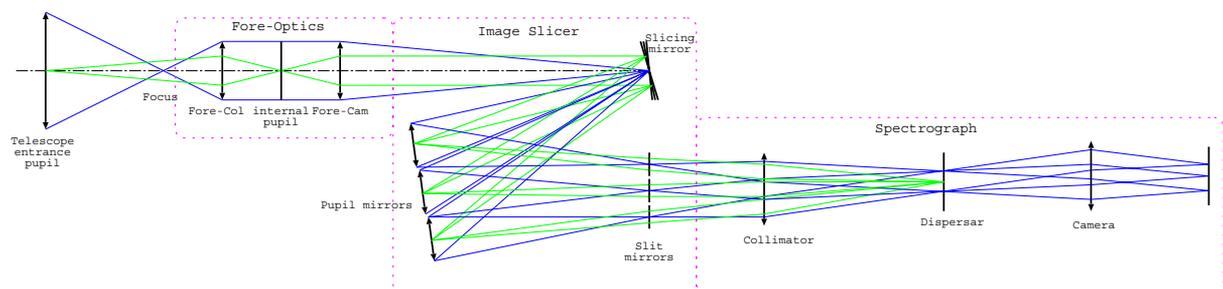


図 5.4: Image Slicer 構成図

● 3D 分光器としての性質

イメージスライサーは面分光を行う装置である。この装置はロングスリット分光におけるスリット走査での分光マッピングをスライス鏡による画像分割でおきかえることになる。しかしスライスミラーによる回折によってビームの外にエネルギーがいくばくか失われるという点ではロングスリット分光器と同じ特性を持っている。

最終的に検出器の上には、空間位置毎に波長に分割されたスペクトル像が得られるので、装置の視野を越える範囲の 3 次元マッピングをおこなうのであればロングスリット分光器と

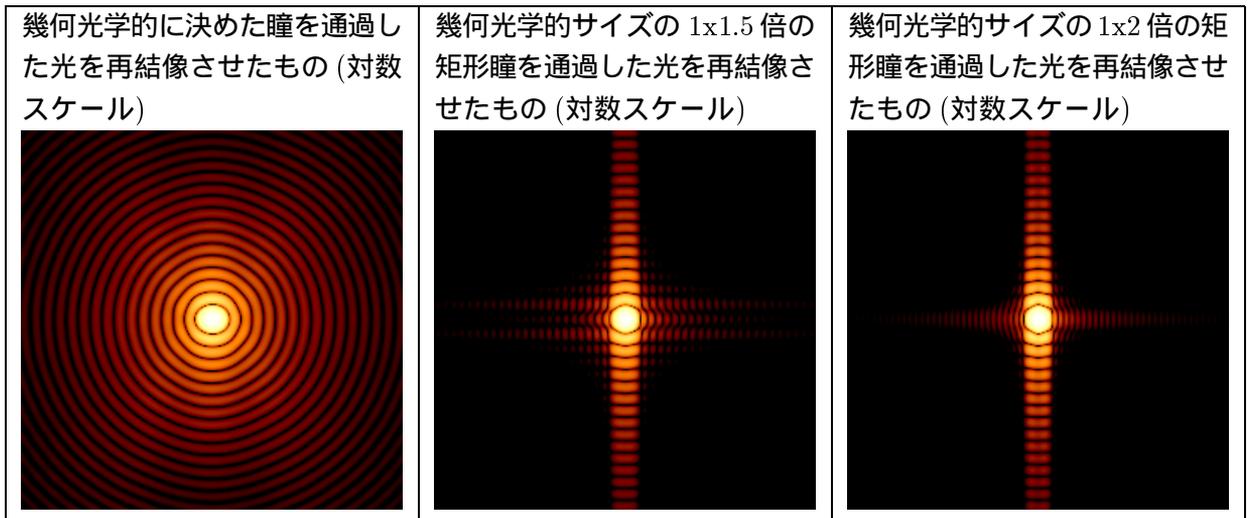


図 5.5: 点光源をイメージスライサーで観測するときにおける回折の効果

まったく同じ観測時間が必要になる。しかしある程度コンパクトな天体を観測する場合には、ロングスリット分光が天体の無い部分の情報までスリットが長すぎることで取得しているのに対し、イメージスライサーでは必要な部分だけを観測していることになり効率的になる。

また、ロングスリット分光器ではスリット位置の不定性の影響が大きい。点源の観測ではスリット通過光量を最大にするためのピーキングとよばれる予備観測が必要になる。しかもこの作業は長時間積分して初めて有意な信号が検出されるような天体ではとても効率の悪いものになる。この点、イメージスライサーであればスライス鏡の視野範囲内であればいいという格段に緩い条件で指向位置を決めれば良い。

以上をまとめると、イメージスライサーは基本的にはロングスリット分光器でのスリット走査による分光マッピングをスリット本数を増やして効率的に行うものであるが、コンパクトな天体や点源に対しては実際上の観測効率を大きく増大させるものであるといえる。

- 回折の効果

点光源であるような天体をイメージスライサーで観測するときにおける回折の効果は、スライス鏡を反射する光が幾何光学的な範囲の外に広がり、見かけ上スライス鏡の反射が少なくなるように見える。この効果を以下に示す。

点源像とスリットの位置関係を dx (0 だと中心、 1 だとピークがスリット端) とし、スリット通過後のビームを幾何光学的サイズの $1 \times p$ 倍の矩形領域まで利用する場合に再結像した像のスリット幅に相当する部分に含まれるエネルギーを横軸を p にし、縦軸を最初にスリットに入射するエネルギーに対する比として計算したものが次の図である。

スリット中心に点源がいるときには高い透過率になっているが、点源位置がずれてくると著しく透過率が低下する。しかも、ある程度大きく離れると逆に透過率が上昇する場合もある。

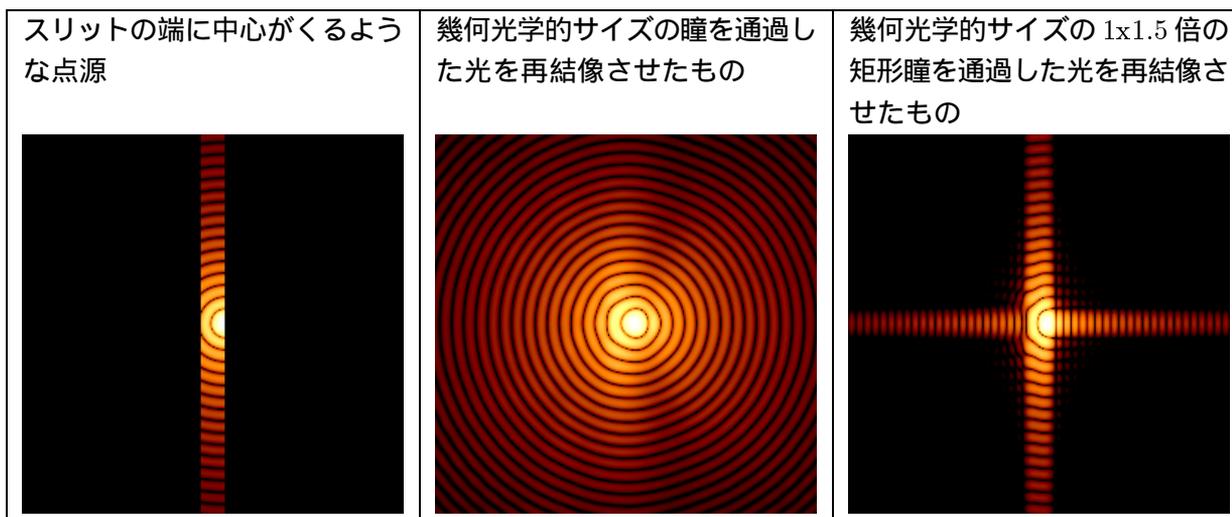


図 5.6: 点光源をイメージライザーで観測するときにおける回折の効果

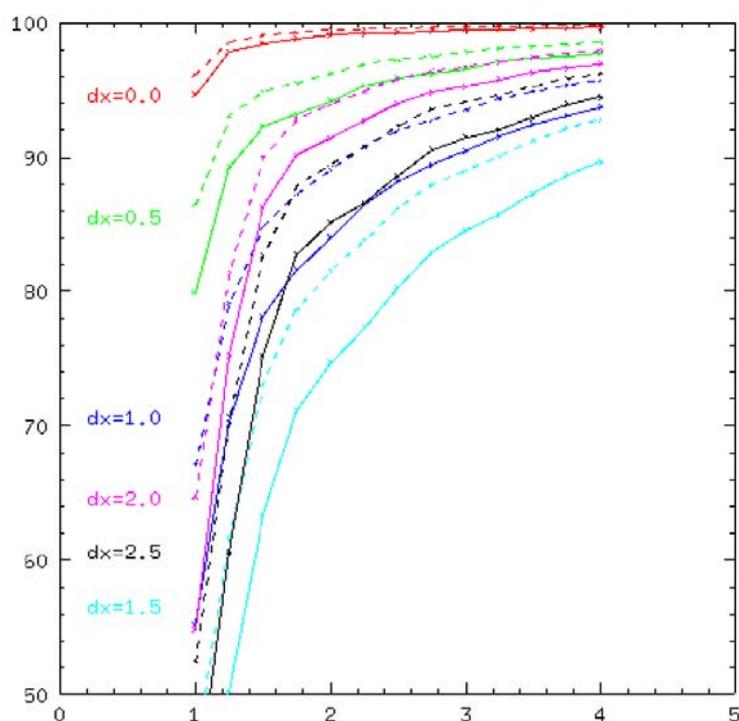


図 5.7: 点源像とスリットの位置関係を dx (0 だと中心、 1 だとピークがスリット端) とし、スリット通過後のビームを幾何光学的サイズの $1 \times p$ 倍の矩形領域まで利用する場合に再結像した像のスリット幅に相当する部分に含まれるエネルギーを横軸を p にし、縦軸を最初にスリットに入射するエネルギーに対する比

表 5.8: スリット幅に関連するパラメーターの組み合わせ

検出器	空間サンプリングピッチ	スリット幅×長さ×本数	波長サンプル数×出射スリット列数	視野
1024 × 1024	$p=\lambda/2D$	$2p \times 128p \times 32$ 本	256×4	$64 \times 128 p$
256 × 256	$p=\lambda/2D$	$2p \times 32p \times 8$ 本	256×1	$16 \times 32 p$
128 × 128	$p=\lambda/2D$	$2p \times 16p \times 8$ 本	128×1	$16 \times 16 p$
128 × 128	$p=\lambda/2D$	$2p \times 32p \times 4$ 本	128×1	$8 \times 32 p$

パラメータの検討と技術的課題

• 画素の分配

- 検出器フォーマットは以下のものが考えられる。
 1. $1K \times 1K$ Si:As。 JWST で開発中のもの。 $27\mu\text{m}$ 以下の波長用。
 2. 128×128 DRS で作っている Si:Sb。 SPITZER で使用された。 Si:Sb で現在利用可能なのはこれだけ。 将来的には 256×256 の可能性がある。 波長は $38\mu\text{m}$ まで使える。
 3. 遠赤外ではもっと小さく、将来でもせいぜい $32 \times 32 \sim 128 \times 128$ 程度
- 波長 λ 、望遠鏡口径を D とする。空間的なサンプリングは回折限界 λ/D の $1/2$ か $1/3$ にとるのが普通。
- スリット幅は回折限界 λ/D ちょうどくらいに。
- スリット長さは、地上からの観測の場合には空の背景をとるために長くする必要がある。天体がスリット長さより大きいと観測は難しくなる。
- スリット本数は多い方がよい。できれば全体で四角い視野。ただしこれは望遠鏡の走査を少なくして観測時間を稼ぐためのものだと思えば妥協できる。

以上の条件を考慮すると、以下のようなバリエーションが考えられる。

• イメージスライサーのサイズ

イメージスライサーのサイズを考える上でもっとも重要になるのはスライス鏡の幅 (W) である。この幅は製作可能性の観点からある程度大きくならざるを得ない。幅 W が回折限界と同じ視野になるようにすると、スライス鏡への入射 F 比は $\frac{\lambda}{D} \times f = \lambda \times F = W$ であるので、 $W=1\text{mm}$ で波長が 10 ミクロンとすれば F が 100 になる。 $W=0.3\text{mm}$ くらいまでが製作可能な範囲であり、この場合ならば $F=30$ となる。

• スライス鏡の製作

イメージスライサーの技術的課題はスライス鏡の製作と光学調整にある。現在、国立天文台と共同でスライスミラーの試作をおこなっており、 0.3mm 幅のミラーを目標に開発をすすめている。今後はイメージスライサーをテストベンチ上で組み上げて性能を確認していくことで搭載観測装置に進むための技術開発を進める予定である。

イメージスライサー方式が得意とするサイエンス

イメージスライサーはロングスリット・グレーティング分光方式においてスリット本数を増やしたものであり、ロングスリット分光器が得意とするサイエンスの全てが得意なものとしてあてはまる。すなわち、空間スケールの小さい天体（あるいは点源）で、広い波長範囲をカバーする観測に向いており、選択した点源天体を詳しく調べる上で有効となる。例えば従来の観測装置ではとても分光ができなかった、遠方のフェイントな銀河を選択し詳しく観測研究するなどの場面に有効に使うことができる。さらにイメージスライサーはロングスリット分光器のデメリットであった細かいスリットという点を改善しているため、2次元の空間的情報とともに波長情報を取得することができ、惑星系形成の研究や大質量形成領域の研究、遠方銀河の研究においても有効である。

ファブリ・ペロー分光方式

特徴

ファブリ・ペロー分光は2枚の向かい合った高反射率の平行平面基板間の干渉を利用した分光法である。この平行平面基板はエタロンと呼ばれる。エタロンの間隔を固定した場合はその間隔で決まる波長に対する狭帯域フィルタとして働く。エタロンの間隔を変化させることにより、2次元スペクトルを得られることが特徴である。

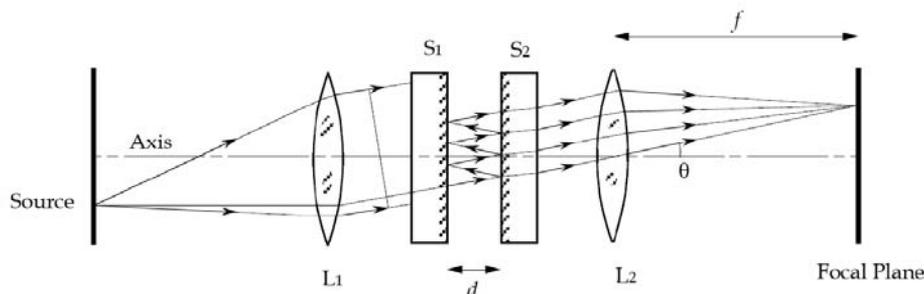


図 5.8: ファブリ・ペロー分光器の概念図

また分光器としての波長分解能は、

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = mF \quad (5.2)$$

と表される。 F はフィネスと呼ばれ、エタロンの特性をあらわすパラメーターである。したがって、ファブリ・ペロー分光器では、フィネスの大きいエタロンが手に入れば簡単に大きな分解能が得られる、また分解能を下げることなく広い視野がとれるなどの利点がある。実際には、フィネスはエタロンの平面度、平行度に敏感に影響されるため、エタロンの設計には細かい技術的配慮が必要である。

ファブリ・ペロー分光方式の分光器を SPICA に搭載する場合の利点を以下にまとめる。

1. 分光器の波長分解能は、分光方式によらず、干渉光の光路差をいかに大きくできるかによって決定される。ファブリ・ペロー分光器では、干渉光を何重にもおりまげての光路を稼いでいるため、極めて小型ながら高い波長分解能を得ることができる。例えば $\lambda=12.8 \mu\text{m}$ で $\lambda/\Delta\lambda=10^4$ の分解能をえようとすると、フィネス $F=40$ として

$$d = \frac{m\lambda}{2} = \frac{R\lambda}{2F} = 1.6 \text{ mm} \quad (5.3)$$

よりエタロン間隔はわずか 1.6 mm である。

2. ファブリ・ペロー分光器では入射光の平行性に制限がつくが、その制限はグレーティング分光器の場合と比べると極めてゆるい。一般に出(入)射孔の面積とこれから出入りする有効な光束の立体角との積、または出(入)射のコリメーター鏡の面積とこれからみた出(入)射孔の立体角との積をスループット L といい分光器の明るさを示す尺度となるが、分解能 R との積 $L \times R$ は、分光器の種類によってほぼ決まってしまう。ファブリ・ペロー分光器の $L \times R$ は、グレーティング分光器に比べると約 100 倍大きく極めて明るい分光器であることが知られている (Jacquinot 1954)。この特性を生かして、広視野のカメラと結合する用いられることある。
3. ファブリ・ペロー分光器はその動作原理からもわかるように基本的には単色フィルターである。したがって、測定に関係しない光は通さず、背景放射を小さくすることができる。対象天体が特定のスペクトル線の場合で、しかも背景放射の光子雑音によって検出限界が決まってしまう場合は、この特徴により検出限界を大幅に向上できる。

また、この方式の欠点は以下のとおりである。

1. 対象が連続スペクトルの場合、同時には天体からの放射スペクトルの $1/R$ しか観測できないので必ずしも有利とは言えない。また特に検出器雑音で感度が規定されている場合には不利になる。
2. 一度に観測できる波長範囲が極めて狭い。高波長分解能で高い次数を用いるほど波長範囲は狭くなる。さらにエタロンの精度に対する要求が厳しいことも欠点である。その他にも、必要とする次数以外の光も混入するので、それらをカットするための次数選択用フィルターが必要になる。それには、低次数のファブリ・ペローや、狭帯域フィルターが用いられる。

技術的課題

ファブリ・ペロー分光器の開発課題を以下にあげる。

- エタロンの材質

エタロンの基板材質には、これまでの実績から ZnSe, KBr, KRS-5, KCL などがあげられる。使用する波長範囲、製作における加工のしやすさ、表面反射コーティング・裏面反射防止コーティングなどの可否などを検討する必要がある。宇宙線の影響による基板組成の変化をも考慮すべきである。5–30 μm すべての波長範囲を一律の反射率でカバーするのは現在のところ難しいが、イオンプレーティング、CVD などを用いれば、技術的に実現の可能性がある。

- エタロンの駆動機構

エタロンの駆動機構には、低発熱、駆動速度の安定性、高ストローク、駆動の平行性が要求され、かつ極低温環境下で動作しなければならない。このような駆動機構を実現するのは容易ではないが、低温で十分なストロークを持つピエゾ素子を開発できれば、安定で精度の良い駆動制御が可能となる。

- 次数選択用フィルター

ファブリ・ペロー分光器には、次数選択用フィルターが必須であり、小型で高い効率を持つユニットの開発が必要である。次数選択用フィルターには主に以下の2つの手法がある。

1. ファブリ・ペロー タンデム式

主のファブリ・ペロー分光器と同等のもので、initial gapのみ異なるファブリ・ペロー分光器を用いることで、主ファブリ・ペロー分光器の次数を選択する。波長を走査することが可能であるが、システムの大型化がデメリットである。

2. 狭帯域フィルタ

タンデム式と並び、次数選択用フィルターとして一般的に用いられるのが狭帯域フィルタである。素子そのものの製作はやや難しいが、小型で安定である。波長が固定のため走査できないのがデメリットである。

- ギャップセンサー

エタロンの間隔と変位量を正確に制御するのに、ギャップセンサーの使用は大変有効である。ギャップセンサーには電荷容量の変化を利用するものや、干渉光を用いたものなどがある。低温環境で安定に動作するギャップセンサーの開発が重要である。

ファブリ・ペロー分光方式のパラメータ

- 視野：ピクセルスケールは0.3秒角で全体は5分角
- 波長分解能：比較的lowめの200から400で広い範囲をカバーするのが一つの案
- 波長範囲：5-30ミクロン

ファブリ・ペロー分光方式が得意とするサイエンス

ファブリ・ペロー分光方式は高い波長分解能で2次元スペクトルを取得できるため、広がった輝線天体の観測や、輝線天体のサーベイ観測に効果的である。一度に観測できる波長範囲が非常に狭いため、天体の連続波を観測するには不向きであるが、特定の波長のラインに対しては、後述するフーリエ分光方式よりも高感度である。赤方偏移の影響の少ない系内天体および近傍銀河に対しての、特定ラインの空間/速度構造の観測に適した分光方式である。

フーリエ分光方式

特徴

フーリエ分光法は、光を2つに分け互いに光路差をつけた後に干渉させる2光束干渉計である。原理は図5.9に示すような構造である。フーリエ分光法の分解能は鏡の移動距離が最大Lのとき、次のように書ける。

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} (\text{cm}^{-1}) \sim \frac{L}{\lambda} (\text{cm}) \quad (5.4)$$

望遠鏡からの光はレンズなどを通して平行光線にされた後、ビームスプリッターで2方向に分割される。各々の光は、反射鏡M1、M2で反射された後、再びビームスプリッターを透過或いは反射して混合され、検出器に入射する。反射鏡の一方(M1)は固定され、他方(M2)は移動できるようになっている。検出器に集められる光線は、異なる光路を通った光線が干渉したもので、こ

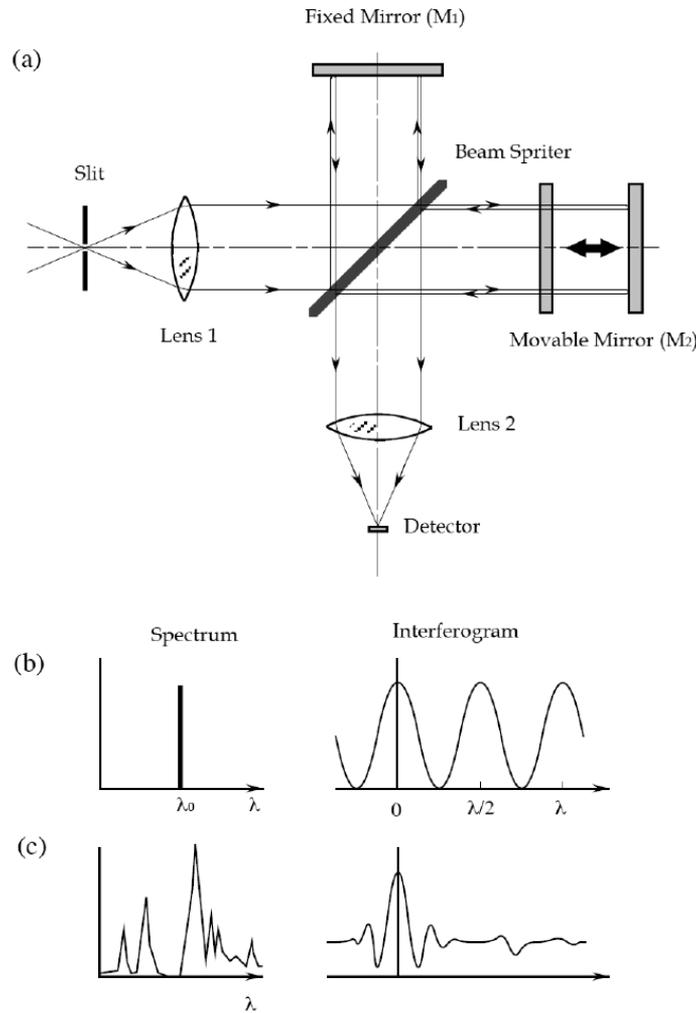


図 5.9: フーリエ分光器の概念図

の光路差は、可動鏡の位置変化によって作りだすことができる。最終的な干渉光には、多くの波長が混ざっているが、各波長の成分の強度に比例した信号が検出器に現われる。この図形はインターフェログラムと呼ばれる。インターフェログラムの形は、入射光に含まれる波長の成分とその強度によって、一意的に決まるものであり、得られたインターフェログラムをフーリエ変換することによって、もとのスペクトルを求めることができる。

フーリエ分光器の信号雑音比 (SNR) は、一般に以下の式で与えら得れる (Bennett 2000, ASP Conf. 195, 58)。

$$SNR = \frac{\frac{\sqrt{N}}{M} \left(\int \frac{S_\nu}{N} d\nu \right)}{\left[2(N_R^2 + I_{dark} \frac{t}{N}) n_{psf}(\lambda) + \left(\int S_\nu \frac{t}{N} d\nu \right) + \int B_\nu \frac{t}{N} n_{psf}(\lambda) d\nu \right]^{1/2}} \quad (5.5)$$

ただし、ここで、 S_ν は、全体の効率を含んだ検出される天体からの信号 (photocurrent)、 B_ν は、背景光の photocurrent、 N_R は読み出し雑音、 I_{dark} は暗電流、 t は全積分時間、 N はインターフェログラム中のサンプル数、 n_{psf} は PSF 中のピクセル数、 M は与えられた波数分解能を得るために必要なスペクトルチャンネル数である。

図 5.10 に式 5.5 を用いて計算した $S/N=10$ の場合の検出限界を示す。ただし、背景放射は黄道光とし、266K で emissivity が 10^{-7} の黒体放射で近似した。また読み出し雑音は $10e$ 、暗電流を 10 es^{-1} とし、全積分時間は 50000 秒とした。左の軸に波数分解能 2500 の場合を右の軸に 2.5 の場合（撮像モード）を示した。検出限界はほぼ波数分解能に比例する。波長範囲は、検出器、ビームスプリッターを考慮し、5–22 μm (Si:As を想定) と 20–38 μm (Si:Sb を想定) の 2 つに分けた。ピクセルは前者を 0.2'', 後者を 0.8'' とした。図から明らかなように、中間赤外域のフーリエ分光器の検出感度は、背景放射（太線）が支配的である。したがって、検出限界にはピクセルサイズが大きく影響する。図 5.10 よりわかることは、上記のパラメータでは、検出器による雑音（破線）は背景放射の雑音の 1/10 であることである。背景放射はバンド幅の平方根に比例して減少する。したがって、検出器の雑音・暗電を上記の値とすると、分解能 100 程度の分光器では検出器の雑音が検出限界に影響を与えることになる。

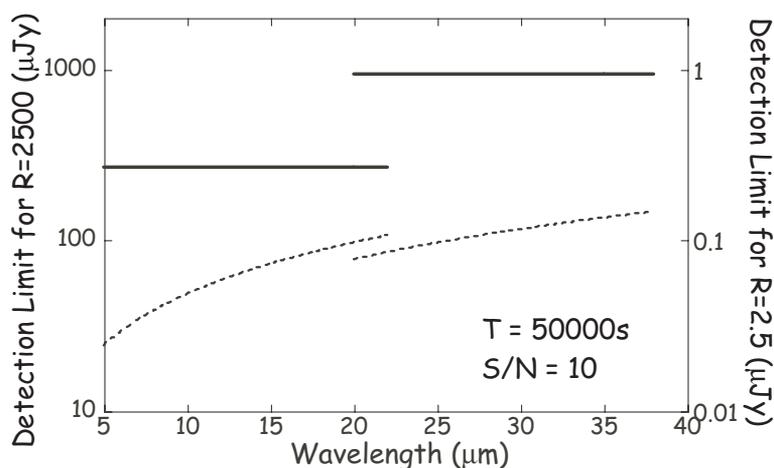


図 5.10: SPICA に搭載した場合の中間赤外フーリエ分光器の予想感度 ($S/N=10$, 50000 秒積分)。太線が背景放射（黄道光）による限界を表し、波線が検出器による限界を示す。波長範囲は、検出器（Si:As と Si:Sb）を想定して分け、一部重複するようにしてある。

フーリエ分光器の検出限界を下げるには、分散素子を導入することが有効であるが、分解能の平方根でしか改善されない。特定の波長のラインあるいはバンドに絞る場合は狭帯域のフィルターを導入することが考えられる。

以下にフーリエ分光器の利点をまとめる。

1. フーリエ分光器の最大の特徴は、2次元面分光が精度よく行えることである。これは、特に広がった天体の分光に重要である。回折格子を用いたスリット分光器では波長によりスリット幅を変える必要があり、広い波長帯の観測が必要な研究には観測領域の差の不定性は常に大きな問題となっている。具体的にはたとえば広がった天体の [SIII] の 2本の禁制線（18.7 と 33.5 μm ）から電子密度を求める場合や、 H_2 の純回転遷移線から温度やオルソ・パラ比を導く場合、スリット幅（観測領域の大きさ）が異なると、その不定性を正確に見積もることは不可能に近い。この点、フーリエ分光器の場合、2次元でのスペクトルが得られるため、定量的な評価を行うことが可能となる。
2. フーリエ分光器では、波数分解能は駆動距離で調整が可能であり、最大駆動距離を確保しておけば、いろいろな分解能の観測を行うことができる。分解能 100 から数万の観測を一つの

装置で行うことも、原理的には可能である。さらにもし、カメラと分光器を一つの装置として組み込む場合には、単純な2次元カメラとしても用いることができるという特徴がある。

3. どのようなビームスプリッターが使用可能かに依存するが、1オクターブ内に限定される回折格子による分光器に比べて、原理的には非常に広い波長帯の観測が一つの装置で可能である。上記の例では検出器により波長帯を分けているが、想定している波長帯をカバーする常温用のビームスプリッターは容易に入手可能である。この特徴は、広い波長帯をカバーする必要がある場合、回折格子では切り替えが必要であることに比べて大きな利点である。
4. スリット分光器と異なり、対象天体は視野内に納めればよいので、絶対姿勢精度の要求は低い。相対的な姿勢安定性の要求はほぼ同じではあるが、原理的には積分時間内にジッターしなればよいので、長時間安定性の要求も多少緩和される。また、自分自身で撮像しているので、スリットビューワーは必要ない。
5. 背景放射により検出限界が決まっているため、検出器への要求精度は低い。
6. 広帯域であることから、輝線サーベイなどのスペクトルサーベイに有効である。また2次元データスペクトルデータが常に得られることから、広がった天体の分光の他、特定の天体の分光よりは、サーベイ要素の強い観測・サイエンスに適している。この点で、回折格子を用いた分光器とは異なった特徴を持っており、運用面でも特徴を出すことができる。JWST/MIRIとは、この意味で本質的な相違がある。たとえば、スピッツァー望遠鏡の最近の結果では、 $100 \mu\text{mJy}$ 以上の天体は1平方分内に10個程度存在する。検出限界が下がった場合、どの程度増加するかはモデルによる外挿しか手段がないが、分解能100程度で受かる天体はこれよりさらに多くなると予想される。このような場合、フーリエ分光器によるサーベイ観測は非常に有効になると考えられる。

一方、フーリエ分光器の欠点としては以下のことが考えられる。

1. 広帯域であるため、背景放射により観測限界が決まり、暗い天体の分光ができない。分散素子を挿入することにより、この点のある程度改善することは可能であるが、構成が複雑になる可能性があり、フーリエ分光器の特徴を軽減させることになりかねない。ただし、特定のライン・バンドに目標がある場合、その波長帯だけを抜き出すような分散素子を用意することは可能と考えられる。たとえば水素分子のラインにあわせた狭帯域のフィルターを挿入するような構成は可能であろう。必要な波長範囲にも依存するが、図5.10の見積もりによると、現状の検出器の性能では分解能数百程度のフィルターを用意できれば、背景放射の影響は検出器による限界に近づく。
2. 可動鏡が必要であり、かなりの回数動くパーツが必要である。可動鏡の信頼性については、十分な検討・開発が必要である。しかし、以下に記述するように、すでにいくつかのフーリエ分光器は、衛星に搭載されており、可動部分については、これまでの実績を有効に反映させることが可能である。
3. 小型化が難しいことがデメリットである。前述のファブリペロー分光器と比較するために、 $=12.8 \mu\text{m}$ で分解能 10^4 の場合を考えると、鏡の移動距離の最大 L は6.5cmとなる。衛星搭載として極低温、省スペースという要求を考えると、この大きさを実現する駆動機構の開発は精度的にも熱設計的にも容易ではない。

4. おそらく、フーリエ分光器の最大の問題は、較正にあると考える。特にスペクトル線のプロファイルを議論するようなサイエンスに対して、どの程度正しいプロファイルを再現できているかを較正する手段を、十分に検討する必要がある。スペクトル全体に対する感度については黒体光源などを用いた較正が可能と思われるが、スペクトル線に対する較正は、単純ではない。

技術的課題

フーリエ分光器の技術的な課題は以下の点にあると考える。

1. 低温で使用可能な、ビームスプリッター、位置センサー、及び可動機構の開発。上記したようにすでに ASTRO-F/FIS あるいは Cassini/CIRS など、衛星に搭載された冷却型のフーリエ分光器は存在するので、これらの実績を有効に利用・開発することが可能である。
2. 背景放射をある程度軽減させるために、分散素子あるいはフィルターを挿入することが考えられる。フィルターの場合には（他の分光器でも同様であるが）、中間赤外域で低温で性能のよいものを開発することが重要である。また、構成が複雑になる可能性もあるが、回折格子と組み合わせるような設計も検討すべきである。

フーリエ分光方式が得意とするサイエンス

フーリエ分光方式は、ファブリ・ペロー分光方式と同じく高い波長分解能で2次元スペクトルを取得できるメリットを持つ。また、波長分解能が可変であり、観測波長範囲が広いことから、ラインだけでなく連続光の観測も可能である。したがって、フーリエ分光方式による分光サーベイ観測は、通常の広帯域測光観測では検出できない特徴的なラインやダストフィーチャを持つ天体の検出に効果的である。フーリエ分光方式は、ファブリ・ペロー分光方式に比べ低感度であるが、観測波長範囲が広く連続光が観測できることがメリットである。

マルチスリット分光方式

特徴

ロングスリット・グレーティング分光方式は製作が容易で安定性が高く、高感度な分光方式であるが、スリットを使うことにより、空間情報の大部分を失ってしまうデメリットがある。この損失を克服するため、視野内に複数のスリットを設けた方式をマルチスリット分光方式と呼ぶ。あらかじめ天体の位置に合わせてマスクにスリットを切り、観測直前に装置内に設置する方式が主流である。これにより、視野中の多数の天体を一度に（マルチオブジェクト分光）かつ、高感度に分光することが可能となる。マスク交換式のマルチスリット分光器は近年大きな成果を上げており、その有用性と安定性が認められはじめている。しかし、宇宙望遠鏡において、このようなマスクの製作や交換を行うことは非現実的である。

現在、視野中の任意の位置に複数のスリットを開閉できるマルチシャッターアレイ (MSA) の開発が行われている。MSA が実現すれば、マスクの製作/交換ができない宇宙望遠鏡であっても、マルチオブジェクト分光観測が可能となる。MSA によるマルチスリット分光方式は、一度に視野中の多数の天体を分光できるため、スリット・グレーティング分光方式のデメリットを克服する分光方式である。デメリットとしては構造上 MSA は、シャッターを閉めた状態で光洩れがおきるた

め、従来のロングスリット分光に比べ背景光が大きくなる問題がある。洩れ光対策は、シャッターの開閉の安定性と並んで、MSA の重要な開発項目となっている。

技術的課題

マルチシャッターアレイは活用範囲が広い技術であり、光通信その他多くの分野で既に実用化がなされている。ただし、赤外天文観測のように高効率かつ低温で駆動するものについては、世界的にもまさに開発がスタートした段階にあると言える。中でももっとも進んでいるのは Goddard Space Flight Center(GFSC) が開発しているマルチシャッターアレイである (Moseley et al. 2004)。これは 37K での駆動が可能な 384×175 素子のアレイであり、JWST の NIRSpec での利用を想定したものである。その諸元・性能を以下に示す。

- Random Access Addressing
- ピクセルフォーマット 384×175 これを 4 個使用
- 開口率 $> 80\%$
- 駆動温度 37K
- 駆動可能回数 10^5 回以上
- Power Dissipation 40 mW
- コントラスト 2000 を達成

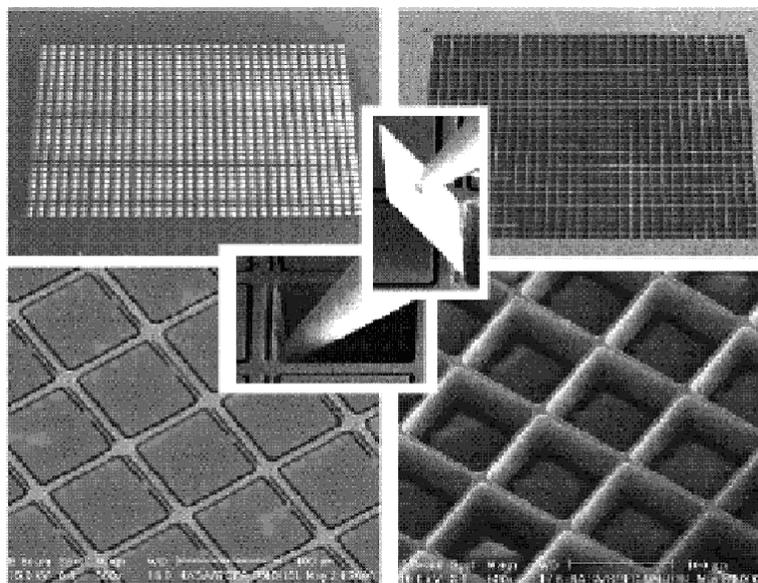


図 5.11: Goddard Space Flight Centre で開発中の MSA の写真。

諸元の表を見れば分かる通り、GFSC の MSA はピクセルフォーマットがやや小さいことと駆動温度が高いことを除けば、以下に示す我々の仕様をほぼ満たすものである。信頼性などを含めまだまだ考えるべき要素は多いが、SPICA 用の MSA は現存技術の延長で充分開発可能であると考

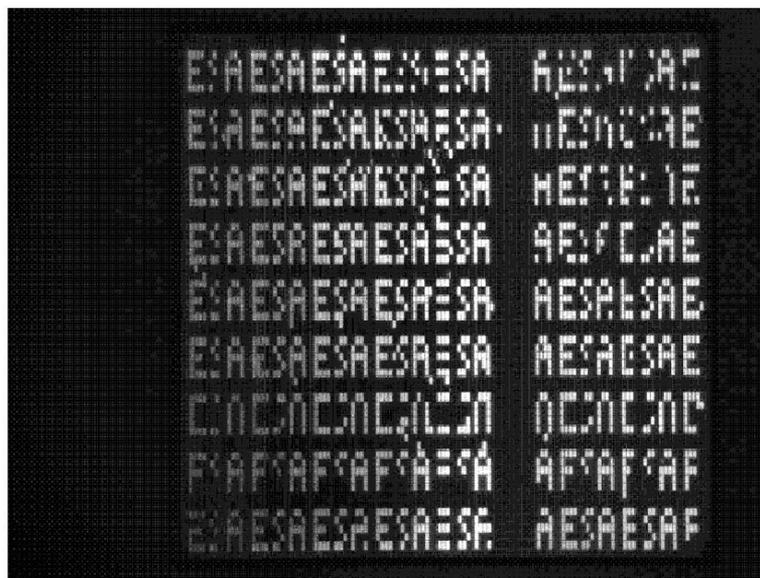


図 5.12: GSFC-MSA で書いた”ESA”の文字列

えている。

日本国内でも、東大天文センターが東大生産研究所と協力して、赤外観測用のマルチシャッターアレイを開発している。これはスリット開閉を全て静電的に行うものであり (GFSC のものは磁気によるラッチ式)、従来のもよりも開口率を上げられる可能性を持つ。現在は地上望遠鏡での実用化を目指して開発を行っているためこれがそのまま SPICA で利用できるとは限らないが、今後はスペース観測も視野にいれて検討を進める。

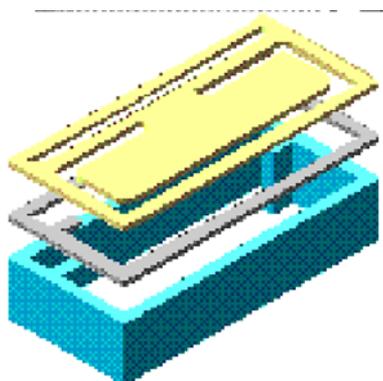


図 5.13: 東大天文センター/生産研で開発中のシャッターアレイ 1 素子分の簡易図

MSA モジュールは小型のスリットの集まりであり、全てのピクセルを開放しても正確な測光は行えない。本装置は MS A モジュールをメカニカルにフィールドレンズモジュールと切り替える、あるいは光路を切替えることによって標準撮像も可能にする計画である (*1)。この際、検出器は共有する。

(*1) 正確な測光を行う別案としては、スリットに対する天体像の位置を正確に制御することで複数枚画像を取り、スリットの効率をキャンセルするという方法も検討している。この像位置制御には低温 Tip-Tilt 鏡を使用し、スリット幅の 1/5 以上の精度で位置を制御する。

SPICA 搭載 MSA の要求仕様は以下の通り。

- Random Access Addressing
- 視野 $6' \times 6'$
- ピクセルフォーマット トータルで最大 $1k \times 1k$ のピクセルが必要
- 512×256 素子のものを複数個並べる
- ピクセルオープン/クローズでの入射光コントラスト 10,000 以上
- 開口率 $> 80\%$
- 駆動温度 4 K
- 駆動可能回数 10^5 回以上
- Power Dissipation 40 mW

マルチスリット分光方式が得意とするサイエンス

MSA の採用により、視野中の多数の天体を一度にかつ、高感度に分光することが可能となる。SPICA 用中間赤外線観測装置の焦点に 1024×1024 の Si:As 検出器を 1 個使用した場合、およそ 3 分角の視野 ($5\mu\text{m}$ 回折限界を想定) が実現される。マルチスリット分光方式は、その機能・特徴から、観測的宇宙論分野で最も活躍が期待される。最近の銀河カウントのモデル計算によれば、波長 $15\mu\text{m}$ において、SPICA の検出限界である $1\mu\text{Jy}$ レベル以上の銀河は、1 平方度あたり 100,000 個と見積もられている (Peason 2000)。この数は 3 分角の視野では ~ 250 個もの銀河に相当し、このうちの約半数が赤方偏移 $z > 1$ にあると予測されている。これら遠方の銀河のようなコンパクトで孤立した天体を多数分光観測するのに、MSA を使ったマルチスリット分光方式は効果的である。また JWST の持つ近赤外線マルチスリット分光器 NIRSpec とは波長域を分担し、良い相補関係が築けると期待される。

5.2.4 関連する開発要素

冷却振動鏡による高精度天体導入

概要

天文観測において、望遠鏡の指向安定性は、もっとも基本的かつ根元的な要求性能のひとつである。衛星望遠鏡では、姿勢をジャイロ、スターセンサとリアクションホイールを組み合わせたシステムで測定・制御しており、その性能が望遠鏡全体の指向安定性能を決めている。このような姿勢制御系では、指向精度は $\sim 1\text{arcsec}$ 程度であり、また、制御可能な帯域も 0.1Hz までである。これまでの赤外線観測衛星は望遠鏡の口径が 1m 以下と小さく、回折による影響で星像サイズが数秒～数十秒まで広がる。これは姿勢制御の精度より充分大きいので、この口径では既存の方法だけで十分な指向性能を確保することができていた。

しかしながら、次世代計画である SPICA はこれがあてはまらない。SPICA の観測する中間赤外波長帯では回折像のサイズが口径に反比例して小さくなるため、従来の姿勢制御だけでは像を

安定することができなくなるのである。例えば、SPICA で 10 ミクロンの赤外線を観測した場合、回折像の広がりも 0.7 秒角程度になるので、最低でも 0.1 秒角の安定精度が必要になる。さらに、このような望遠鏡にコロナグラフを搭載する場合を考えると、星位置のずれを可能なかぎり小さくする必要があり、0.01 秒角オーダーの精度が必要となる。さらに、冷凍機その他の擾乱源による振動は $> 10\text{Hz}$ にもパワーを持つと考えられるので、既存の姿勢制御システムだけでは十分な精度を確保することが難しい。SPICA の性能をフルに発揮し十分な成果を出すためには、姿勢制御に加えて、望遠鏡の指向性能を向上できるような、高精度広帯域の擾乱補償システムが必要である。

このような擾乱補償システムとして、我々は冷却振動鏡による像補正システムを検討し開発を進めている。これは高速 ($\sim 100\text{Hz}$) で駆動する平面鏡を光軸内に置き、それを正確に制御することで像の揺れを抑えると言うものである。同種の振動鏡システムは地球大気による星のゆらぎを抑えるために、地上望遠鏡でよく用いられており、基礎技術は確立されたものである。しかしながら、現存するものは全て常温で駆動するシステムであり、赤外線衛星に搭載できるような低温で動くシステムはまだ実用化されていない。また、衛星独自の問題、例えばシステムの小型軽量化や他の姿勢制御系との切り分けなどは、十分な研究がなされているとは言い難い。

本節ではまず SPICA に必要な冷却振動鏡システムの仕様をまとめ、現在開発の開発状況を述べる。また、今後このシステムを完成させるにあたって必要となる技術要素についても議論する。

冷却振動鏡のシステム仕様

現在考えられている冷却振動鏡はおおよそ以下のような物である。

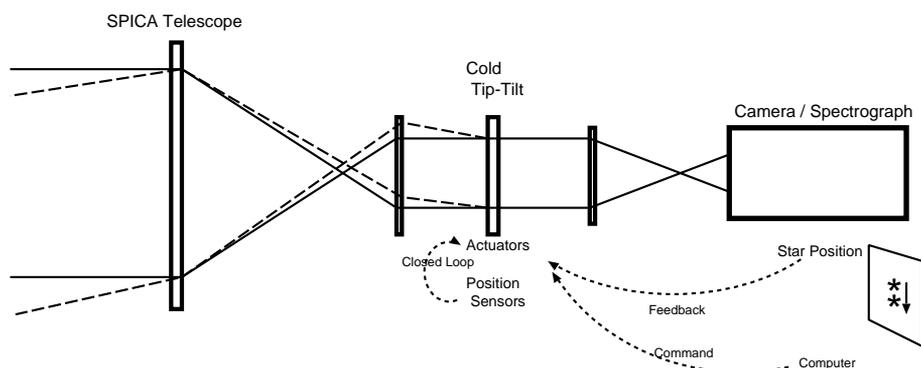


図 5.14: 冷却振動鏡による像補正システム概要

冷却振動鏡は望遠鏡と装置の間に置かれる。この部分に瞳をつくる光学系を置き、傾きを正確に制御できる鏡 (平面鏡) をその瞳上におく。これを動かすことで星の像位置を正確に制御する、というものである。鏡の制御には鏡位置に置かれたポジションセンサーの他に、星の像位置もリアルタイム処理して利用する。

要求される性能は観測装置のモードによって変わって来る。

- 直接撮像、普通の固定スリットによる分光など

この場合、冷却振動鏡は衛星姿勢のふらつきを像サイズが大きくなならない範囲で補正すれば良い。もっとも波長が短い $5\ \mu\text{m}$ での観測を考えると、その回折像サイズは約 0.35 秒角となる。この $1/5$ が許容精度だと思つと、約 0.07 秒角の精度が要求される。制御帯域は冷凍機その他の振動による影響を加味し 100Hz 程度がのぞまれる。

表 5.9: 冷却振動鏡システムへの要求仕様

項目	要求仕様
鏡面傾きの制御精度	0.07 秒角 (標準観測装置のみの場合) 0.03 秒角 (コロナグラフ、IFU、MSA 搭載の場合)
鏡面傾きの最大値	± 2 秒角以上
制御帯域	最大 100Hz
熱的特性	4.5 K にて動作すること 発熱量 数 mW 以下

なお、冷却振動鏡を活用すれば、衛星姿勢をかえないまま指向方向を変更調整する事が可能となる。これはスリット導入や天体のディザリング観測に多いに役立つ機能である。

- コロナグラフ コロナグラフを使用する場合、許される星像のふらつきは単純な撮像/スリット分光に比べて小さくなる。詳細はコロナグラフ検討の部分に譲るが、その精度は回折限界のおおよそ 1/10 かそれ以下である。よって、必要な精度は 0.03 秒角になる。
- イメージスライサーによる (簡易) 測光

イメージスライサー (IS) は面分光に使用される装置であり、回折限界幅程度の反射型スリットを多数並べたような構成になっている。これを分光に用いると、空間のある面積がすべて分光できるのだが、そのスルーブットはスリットへの入り方によって位置ごとに異なってしまう。従って、単純にイメージスライサーを用いただけでは空間ごとの強度の比較は行えない。

冷却振動鏡を用いれば、このスルーブットの違いを (原理的に) 補正し、イメージスライサーによる観測だけで測光ができるようになる。冷却振動鏡によって星の位置を正確に動かして複数画像 (スペクトル) を取り、それを重ね合わせ補正すればスルーブットの場所による違いを消すことができるためである。これを実現するには、冷却振動鏡はスリット幅の 1/10 程度の精度で制御しなければならない。これはおおよそ 0.03 秒角に相当する。

なお、これまでの天体観測では地上、飛翔体を問わずこのような補正は行われて来ていない。有効性を担保するには実験や観測による実証が必要である。

- マルチシャッターアレイによる (簡易) 測光

マルチシャッターアレイ (MSA) は多天体同時分光を可能とする素子であり、SPICA の中間赤外装置として搭載が検討されている。この素子もスリットを多数並べた形の素子であり、IS 同様普通の観測だけではスリットスルーブットを補正することができず、測光は行えない。しかしながら、これまた IS 同様、冷却振動鏡で像を正確に制御すれば測光的な測定は可能となる。この位置精度も 0.03 秒角程度である。

冷却振動鏡システムへの要求仕様をまとめると、以下のようになる。

現在の開発状況

上で述べたように、冷却振動鏡は衛星観測にとって大変有用である。また同種のシステムは地上望遠鏡での熱赤外観測のチョッパーとしても利用できるため、その応用範囲は広い。我々東大天

表 5.10: 試作中の冷却振動鏡のおもな仕様

項目	仕様
駆動軸	直行 2 軸
アクチュエータ	極低温ピエゾ (Piezo Jena 社製)
位置センサー	コンデンサー型ギャップセンサー (Queensgate 社製)
鏡	アルミ切削ミラー 100mmx100mmx6mm、120g
鏡面の傾き最大	ミラー鏡面で 0.239 度角 天球上で 12 秒角に相当
鏡面の傾き精度	ミラー鏡面で 0.9 秒角 天球上で 0.012 秒角に相当
制御帯域	> 100Hz
電流量	最大 1A
発熱量	不明 (TBD)
駆動温度	20K (TBD)

文センターのグループは、東大天文教室および JAXA と協力しながら、このような冷却振動鏡システムの開発をスタートさせている。

現在開発を行っているシステムの仕様を表にまとめる。またシステムの機械設計案を図で示す。

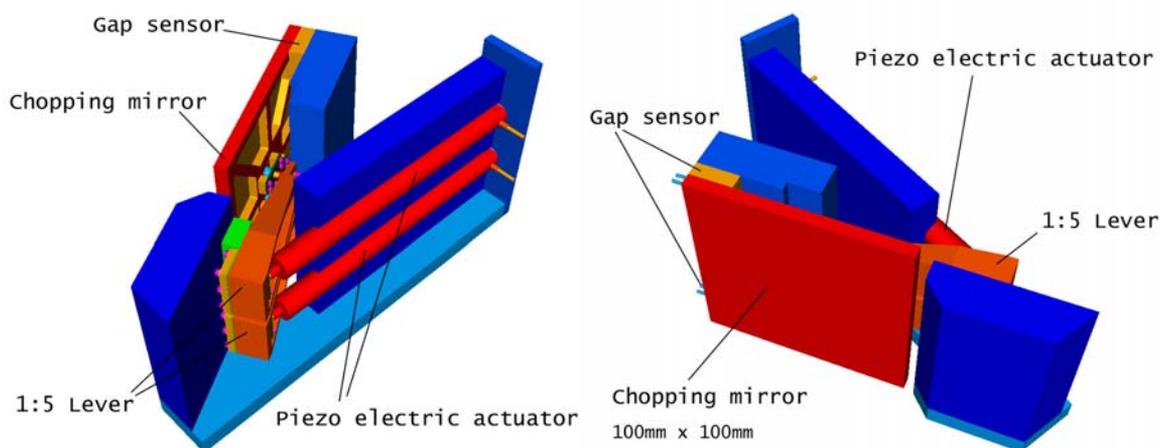


図 5.15: 冷却振動鏡システム機械設計例: 鏡面後ろから見た図 (左側) および鏡面前から見た図 (右)。

現在のシステムでも振幅や速度などは SPICA での仕様を満たしており、これを実現すれば衛星搭載モデルにかなり近付くことができる。ただし、現システムでは発熱が非常に大きい。これは鏡の傾き量を稼ぐために、大容量 (12.6 μ F) のピエゾ素子を使用しているためである。高ストロークでかつ電荷容量が少ない (=発熱が少ない) 低温ピエゾの開発が必要であろう。

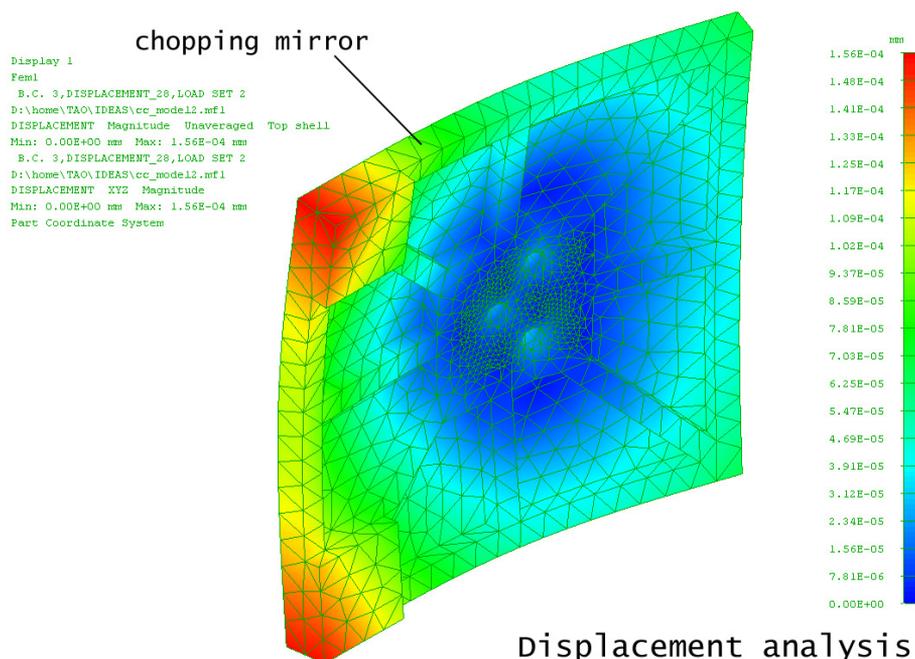


図 5.16: 冷却振動鏡を固定ばねで引っ張った場合の鏡面精度解析。この例では最大変位は $0.15\mu\text{m}$ 程度であり全く問題にならない。

開発要素

冷却振動鏡の開発はまだスタートしたばかりであり、衛星に搭載できるレベルの素子を開発するにはまだまだ多くの技術的要素をつめていく必要がある。ここでは、現在の時点で明らかな開発要素について列挙しておく。

- 高ストローク+低発熱の低温 piezo 素子の開発

現在使用している piezo はストロークこそ長いものの、必要以上に電荷が大きくこれが発熱を大きくしてしまっていた。衛星搭載を考えた場合発熱は致命的な問題になるので、これをクリアできるような低発熱の piezo 素子、あるいは同等のアクチュエータを開発する必要がある。

- 信頼できる”てこ”機構の開発

piezo などの素子は低温でそのストロークが減少するものが多く、ある程度のストロークを稼ぐには”てこ”的な機械機構が必要となる。現在開発中の冷却振動鏡でも約 5 倍の”てこ”を用いている。このような機構を低温下で、信頼できるレベルで完成させることがのぞまれる。

- 軽量平面鏡の開発

冷却振動鏡の駆動速度は非常にはやく、鏡や”てこ”の固有振動数近くまで制御をかける必要も生じる。したがって、振動させる鏡もできるだけ軽く、また変形し難いものが必要となる。現在の計算ではアルミ合金でもなんとか満足できるレベルの鏡がつけられるが、カーボン系素材などの軽量素材を用いた鏡も検討しておく必要がある。

表 5.11: N バンド 'Silicate Set' フィルター一覧

フィルター通称	中心波長 [μm]	透過幅 (半値全幅) [μm]
Silicate-N	7.8	0.7
Silicate-O	8.7	0.8
Silicate-P	9.8	0.9
Silicate-Q	10.3	1.05
Silicate-R	11.6	1.1
Silicate-S	12.5	1.15

中間赤外フィルター

良いフィルターをそろえることは、撮像観測のみならず分光観測でも非常に重要である。特に SPICA 望遠鏡は従来の小型望遠鏡に比べて大型であり、その搭載装置にも多くのフィルターを載せることができる。これはフィルター選定の幅が広がることを意味しており、地上望遠鏡用装置のように多様なフィルターで多様な観測が可能になるものと思われる。逆に言えば、多様なフィルターを装置開発の一貫として用意する必要がでて来るのである。一方、中間赤外域ではフィルターの開発も容易ではなく、思った通りのフィルターを入手することはかなりの時間と労力を必要とする。したがって、装置開発の初期段階からフィルターの開発を行い、その準備を進める事が望ましい。ここではフィルターの現状を簡単にまとめ、必要な開発について述べる。

現状

中間赤外域は近赤外域のように定まった共通バンドシステムは存在しないが、多くの地上装置では Silicate Set と呼ばれるフィルター群が広く用いられている。これは 7.5-13.5 μm のいわゆる N バンド帯を覆うような 6 枚組のフィルターセットであり、各々がおよそ 1 μm の透過幅をカバーする。製造会社は OCLI 社¹ である。

1998 年には A. Glasse が中心となり、地上中間赤外装置用のフィルター開発コンソーシアムを立ち上げた。製造者は Univ. of Reading の Infrared Multilayer Labo.² であり、8 μm 付近から 26 μm まで 23 種類のフィルターが開発されている。これには SUBARU-COMICS をはじめ、Keck、VLT、Gemini、GTC など主要な地上望遠鏡のメンバーが加わっており、事実上の分野標準を設定する物となっている。

この他にも Barr Associates³ や ORT などの会社が天文用中間赤外フィルターの開発を行っている。

開発要素

中間赤外域の中でも、特に 20 μm より長い波長域で使用できるフィルターの開発が急務である。既存のフィルターの substrate としては、14 μm までではおもに Zinc Sulphide (ZnS 'Cleartran') を、14-20 μm では Zinc Selenide (ZnSe) を使用しており、高い透過率を持つフィルターが作られている。しかしながら、20 μm より長い波長では substrate として使用できる材質にあまり良いものがない。CsI や CsBr はこの波長帯で比較的透明であるが、潮解性を持つ。KRS-5, KRS-6 も

¹<http://www.ocli.com/>

²<http://www.irfilters.reading.ac.uk/>

³<http://www.barrassociates.com/>

表 5.12: Filter Consortium で開発されたフィルター

フィルター通称	中心波長 [μm]	透過幅 (半値全幅) [μm]
N-band	10.36	5.2
SiC	11.75	2.5
PAH1 ref	8.15	0.16
PAH1 (ArIII ref)	8.60	0.43
ArIII	8.99	0.13
ArIII ref	9.2	0.14
SIV ref	10.2	0.15
SIV	10.52	0.16
PAH2 ref = SIV ref	10.85	0.22
PAH2	11.3	0.6
NeII	12.81	0.2
NeII ref	13.1	0.2
Q0	16.5	0.4
QH2	17.0	0.4
Q1	17.65	0.9
Q2	18.75	0.85
Q3	19.5	0.4
Q4	20.5	1.0
Q5	21.5	0.4
Q6	22.2	0.6
Q7	23.1	0.8
Q8	24.5	0.8
Q9	25.6	0.5

20 μm より長い波長で透明ではあるが、取り扱いに難点を持つ。唯一 CdTe は 32 μm 付近まで充分使用できる substrate であり、上の Filter Consortium の Q3-Q8 はこの材質で作られている。ただ、CdTe は軟らかいため、フィルターとした時の透過率が下がってしまう傾向にある。さらに、20 μm -30 μm 帯では反射防止コーティングの技術も (10 μm 帯、あるいはより短波長帯に比べ) 完成されていない。これらを克服し、天文学的に興味がある場所に高い透過率を持つフィルターを開発する事が必要である。

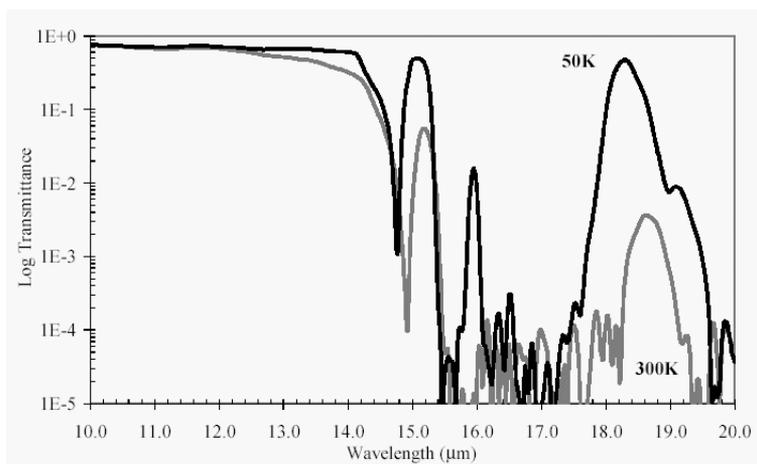


図 5.17: Thick multi-spectral CVD ZnS (Cleartran) の中間赤外帯での透過率。厚さ 3.7mm。温度は 300K と 50K (Hawkins et al. 2004)。

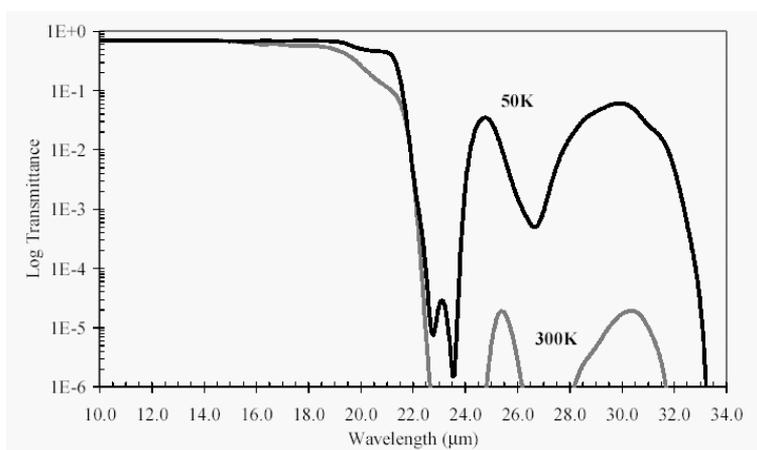


図 5.18: 同じく ZnSe の中間赤外帯での透過率。

検出器

搭載検出器の選択/開発は観測装置の性能と方向性に直接的な影響を与える重要な要素である。観測装置が一度により多くの情報を取得するためには、観測波長帯を広く覆い高感度な大フォーマット 2 次元アレイ検出器の搭載が必要である。

代表的な半導体赤外線検出素子を表 5.13 にまとめる。中間赤外線帯では Si 系および Ge 系、遠赤外線帯では Ge 系半導体素子が中心となる。中でも高い量子効率と広い波長感度域を持つ半導体

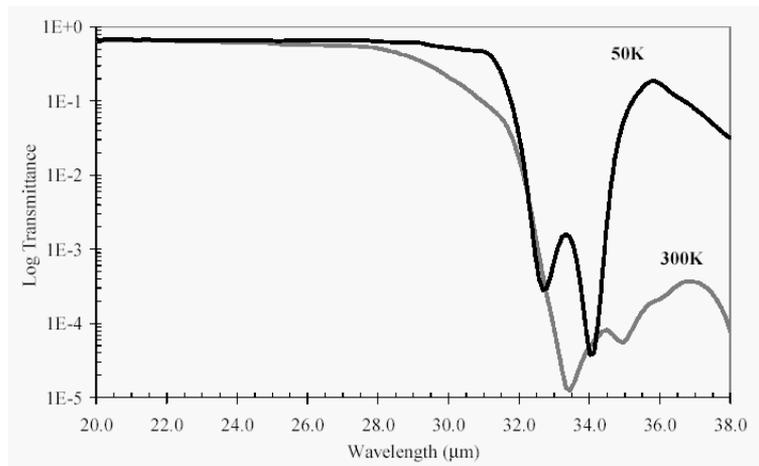


図 5.19: 同じく CdTe の中間赤外帯での透過率。

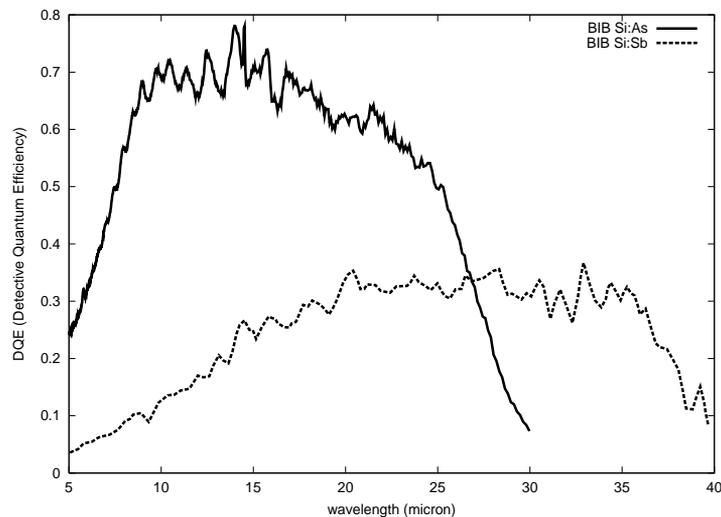


図 5.20: DRS 256×256 Si:As BIB(太線) および 256×256 Si:Sb BIB(点線) の DQE(Detective Quantum Efficiency)。DRS 社測定。SOFIA FORCAST チーム Web サイトより。両検出器は anti-reflection(A/R) コート処理により、量子効率が向上しフリッジ強度が減少することが報告されている (Heter et al. 1998, SPIE 3354, 109)。

素子は天文用検出器としてアレイ化されている。近年に開発された代表的な中間赤外線アレイを表 5.14 にまとめる。1990 年代後半より高感度な BIB 型検出器 (プロッキングレイヤーを設けることにより、ダークカレントを減らす構造を持つ検出器) への移行と、2 次元アレイの大フォーマット化が進んだ。中間赤外線観測では、広い波長範囲で高い DQE(Detective Quantum Efficiency; 2 次電子による超過ノイズを考慮した実効的な感度をあらわす値) を持つ Si:As BIB 検出器 ($\lambda=5\text{-}27\mu\text{m}$) が最もよく使われている。図 5.20 に DRS Si:As BIB 256×256 検出器の DQE の波長特性をしめす。Si:As のエネルギーギャップよりも低い $\lambda=27\mu\text{m}$ 以長では、Si:Sb BIB ($\lambda=10\text{-}40\mu\text{m}$) が高い DQE を持つ (図 5.20)。Si:Sb BIB は、Spitzer-IRS や SOFIA-FORCAST で実践的な経験があり、大フォーマット 2 次元アレイ化も成功している。 $\lambda=40\mu\text{m}$ 以長では、ISO-SWS に搭載された Ge:Be 素子 ($\lambda=25\text{-}50\mu\text{m}$) や SOFIA 用に開発された Ge:Sb ($\lambda=40\text{-}125\mu\text{m}$) がある。両者とも

表 5.13: 代表的な半導体赤外線検出素子。E:エネルギーギャップ。 λ_c :カットオフ波長。T:典型的な駆動温度。

検出素子	E(meV)	λ_c (μm)	T(K)
GaAs	1500	0.84	300
Si (PV) CCD	1100	1.125	215-300
Ge (PV)	670	1.85	77-100
PbS	440	2.8	77-300
InAs	350	3.5	77
InSb	200	6.25	12-77
Si:In	160	7.75	30-77
Ge:Au	150	8.25	20-77
PbSnTe (PC)	100	12.4	4.2-77
Ge:Hg	91	13.6	25-60
HgCdTe (PV)	88	14	65-90
Si:Ga	72	17	6-10
Ge:Cd	55	22.5	6-10
Si:As	54	23	4.2-10
Si:Sb	43	29	4.2-8
Ge:Cu	43	29	4.2-10
Ge:Zn	30	41	4.2-8
Ge:Be	24	52	4.2-8
Ge:Ga	11	113	2-4.2
Ge:B	10.6	118	2-4.2
Ge:Al	10	124	2-4.2
Ge:Sb	9.2	135	2-4.2
Stressed Ge:Ga	6.2	200	1-3

表 5.14: 近年に開発された代表的な中間赤外線アレイ。

検出素子	フォーマット	背景強度	波長 (μm)	製造元	搭載装置	搭載年
Si:Ga	32×32	low	4-17	ESA	ISO-ISOCAM	1995
Si:Ga	1×1	low	4-17	ESA	ISO-ISOPHOT-C	1995
Si:Ga	64×1	low	4-17	ESA	ISO-ISOPHOT-S	1995
Si:Ga	12×1	low	4-12	ESA	ISO-SWS	1995
Si:As	12×1	low	12-29	ESA	ISO-SWS	1995
Ge:Be	12×1	low	29-45	ESA	ISO-SWS	1995
Si:Sb	2×1	low	11-26	ESA	ISO-SWS	1995
Ge:Be	2×1	low	26-45	ESA	ISO-SWS	1995
Si:As BIB	256×256	high	5-27	DRS	Ground-based (MICS)	1996
Si:As BIB	320×240	high	5-27	Raytheon	Ground-based (COMICS)	1999
Si:As BIB	128×128	low	5-27	DRS	Spitzer IRS/IRC/MIPS	2003
Si:Sb BIB	128×128	low	10-40	DRS	Spitzer IRS	2003
Si:As BIB	512×412	low	5-27	Raytheon	for Space/High-disp.(IRHS)	2005
Si:As BIB	256×256	medium	5-27	DRS	SOFIA-FORCAST	2005
Si:Sb BIB	256×256	medium	10-40	DRS	SOFIA-FORCAST	2005
Si:As BIB	256×256	low	5-27	Raytheon	Astro-F	2006

$\lambda=40\text{-}50\mu\text{m}$ 帯で天文観測に十分な感度を持っておらず、大フォーマット 2 次元アレイ化もされていない。Ge:Be 素子は放射線による影響を大きくうけることが報告されている。

次世代検出器の開発状況を表 5.14 にまとめる。Si:As BIB 検出器はいつその大フォーマット化が進められており、特に JWST 用の 1024×1024 アレイは重点的な開発がおこなわれている (図 5.21)。一方、検出器の感度波長をより長波長へ広げる試みも行われている。Si:As BIB 検出器の一

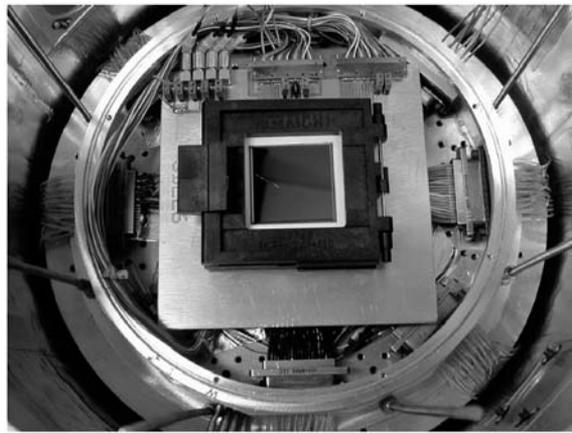


図 5.21: 試験デューアにインストールされた JWST 用 Raytheon 1024x1024 Si:As BIB 検出器 (Ennico et al. 2003 SPIE Vol. 4850, 890)。

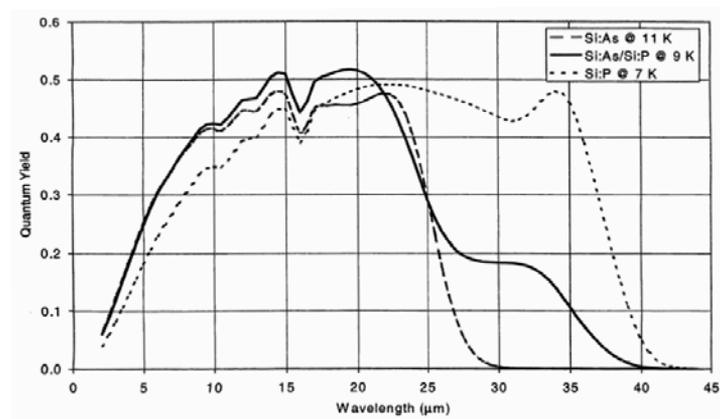


図 5.22: Si:As/Si:P BIB 検出器の量子効率 (計算値) (Hogue et al. 2003 SPIE Vol. 4850, 880)。

表 5.15: 開発中の中間赤外線アレイ。参考文献: (1)Mason et al. 2003 SPIE Vol. 4857, 183 (2)Ennico et al. 2003 SPIE Vol. 4857, 155 (3)Ennico et al. 2003 SPIE Vol. 4850, 890 (4)Hogue et al. 2003 SPIE Vol. 4850, 880

検出素子	フォーマット	背景強度	波長 (μm)	製造元	搭載予定装置	Ref
Ge:Sb	2×24	medium	40-125	NASA	SOFIA-AIRES(canceled)	1
Si:As BIB	1024×1024	medium	5-27	Raytheon	SOFIA-like-application	2
Si:As BIB	1024×1024	very low	5-28	Raytheon	JWST-MIRI(2015)	3
Si:As BIB	1024×1024	very low	5-27	DRS	JWST-MIRI(2015)	4
Si:As/Si:P BIB	—	—	5-33	DRS	—	4
Ge:B BIB	—	—	-100	DRS	—	4

部を、よりカットオフ波長が長い Si:P ($\lambda_c=40\mu\text{m}$) に置き換えることにより、感度波長を $5-27\mu\text{m}$ から $5-33\mu\text{m}$ にまで拡張する研究がおこなわれている (Hogue et al. 2003; 図 5.22)。また、より長波長における高感度検出器の開発をめざし、Ge 系 BIB 検出器の研究もおこなわれている (Hogue et al. 2003)。

広視野観測をめざす SPICA 中間赤外線観測装置には、大フォーマット検出器の搭載は必須で

ある。既に JWST 用に開発が始まっている 1024×1024 Si:As BIB 検出器は、現在開発中の中間赤外線検出器の中で最大のフォーマットを持ち、中間赤外線帯の広い波長範囲 ($\lambda=5\text{-}28\mu\text{m}$) にわたって高い感度を持つ検出器である。従って、 1024×1024 Si:As BIB 検出器は、SPICA 中間赤外線観測装置用の検出器の最有力候補である。SPICA 冷却望遠鏡は $\lambda=30\mu\text{m}$ 以上で JWST に対し感度的に有利となる。この特性を活かすために、 $\lambda=29\text{-}50\mu\text{m}$ 帯の検出器を搭載することは大きな意味がある。 $\lambda=40\mu\text{m}$ まで感度を持つ Si:Sb BIB 検出器は、現在、SOFIA 用の 256×256 アレイが最大のフォーマットである。 $\lambda=29\mu\text{m}$ 以上でも広視野/他天体分光観測を行うには、SPICA 用に新しく Si:Sb BIB の 1024×1024 アレイを開発することが重要となってくる。また、現在、研究中である Si:As/Si:P BIB 検出器の開発を強くサポートし、SPICA 用に $\lambda=5\text{-}33\mu\text{m}$ に感度を持つ 1024×1024 Si:As/Si:P BIB アレイを実現するのも 1 つの解である。Ge:Be にかわる $\lambda=40\text{-}50\mu\text{m}$ 帯で高感度で安定な検出素子は現在のところ開発されていない。Ge 系遠赤外線検出器の BIB 化をすすめると同時に短波長側の感度を伸ばす研究が必要となってくる。

5.2.5 技術成熟度および フェーズ A での開発課題

技術成熟度

関連する開発要素について、現時点での技術成熟度およびフェーズ A 終了時の見通しを表 5.16 に示す。

表 5.16: 中間赤外線観測装置に関連する技術の成熟度

項目	現時点での状況	フェーズ A 完了時の見通し	備考
検出器 $5 \sim 28\mu\text{m}$ 帯	4	6	大フォーマット (利用予定)
	8	8	中フォーマット
検出器 $10 \sim 40\mu\text{m}$ 帯	3	5	中フォーマット (利用予定)
	8	8	小フォーマット
波長帯選択フィルター	8	8	地上望遠鏡でも観測可能な一部
	2	5	上記以外の波長帯
冷却 tip-tilt 鏡	3 ~ 4	6	
撮像装置部分	9	9	上記の検出器、フィルター、冷却 tip-tilt 鏡以外について
分光装置部分			
ロングスリット分光	9	9	高分散は現状でレベル 4
イメージスライサー分光	4	6	
ファブリペロー分光	3	6	限られた波長にて現状でレベル 9
フーリエ分光	4	6	
マルチスリット分光	4	6	JWST 用

フェーズ A での開発課題

- 検出器 $5 \sim 28\mu\text{m}$ 帯 :
大フォーマットのものでのシステムとしての実証モデル試験

- 検出器 10 ~ 40 μ m 帯 :
中規模フォーマットのものでシステムとしての実証モデル試験
- 波長帯選択フィルター :
実際に利用するものについて実証レベルのものを開発
- 冷却 tip-tilt 鏡 :
システムとしての実証モデル開発
- 撮像装置部分 :
SPICA 用のシステムデザイン
- 分光装置部分
 - ロングスリット分光 :
SPICA 用の最適設計
 - イメージスライサー分光 :
トレードオフのための実証モデルの試験 (レベル 5) と SPICA 用の最適設計
 - ファブリペロー分光 :
全波長域での実証モデルの試験 (レベル 5) と SPICA 用の最適設計
 - フーリエ分光 :
トレードオフのための実証モデルの試験 (レベル 5) と SPICA 用の最適設計
 - マルチスリット分光 :
トレードオフのための実証モデルの試験 (レベル 5) と SPICA 用の最適設計

5.3 ステラコロナグラフ観測装置

5.3.1 背景・目的

「我々の住む地球を含む太陽系は、宇宙で唯一無二のものなのであるだろうか？それとも、同様の惑星系はありふれて存在するのだろうか？そして生命は...？」これは、21 世紀の宇宙科学が回答すべき、もっとも重要な命題の 1 つである。太陽系外の惑星について、大気の組成など多くの重要な性質を把握するためには、惑星自体を主星から分離して直接観測することが不可欠である⁴。しかし、そのような直接観測は、ごく近傍に存在する主星の圧倒的なフラックスが邪魔になるため、これまでに成功例がない。それゆえ、太陽系外惑星の直接検出は、惑星科学における重要なマイルストーンであり、技術的に大変チャレンジングな課題となっている。

ステラコロナグラフ (以下コロナグラフ) とは、惑星の存在領域において主星からのフラックスを選択的に低減し、極めて高いコントラストの観測を実現することを目的とした特殊な光学システムである。SPICA では、コロナグラフの大敵である大気揺らぎが存在しない宇宙空間から、太陽系外惑星の検出に有利な中間赤外線波長域 (必要なコントラストが可視域にくらべて 3 ~ 4 桁も緩和される。図 5.23 も参照) で観測を行うことを計画している。我々は SPICA の特長を最大限に活かし、画期的な太陽系外惑星の直接観測 (およびその他の研究) を遂行するため、SPICA 望遠鏡にコロナグラフ観測装置を搭載することを提案する。

⁴主星のスペクトルの変動を観測するドップラー法、惑星による掩蔽によって生じる主星の減光を観測するトランジット法などの間接的手法によってなら、すでに 150 個以上の太陽系外惑星の存在が確認されている

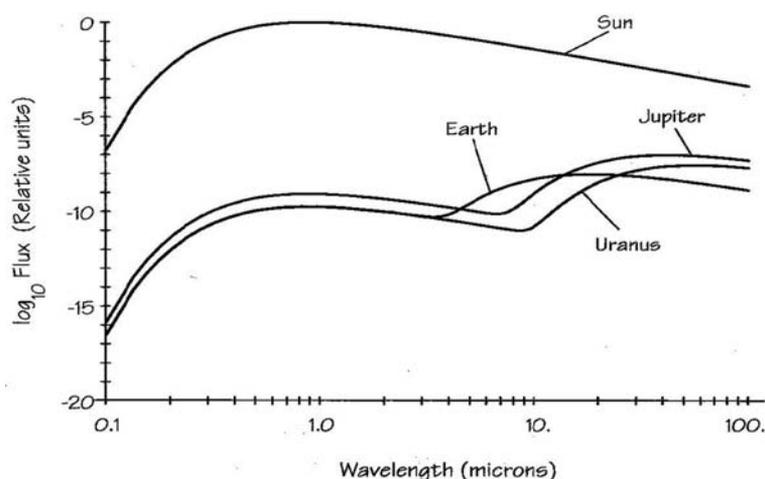


図 5.23: 太陽および太陽系の惑星を、遠方から観測した場合のそれぞれのスペクトル (Burke et al. 1992)

5.3.2 世界の天文学における位置づけ・意義

他のコロナグラフ観測装置

(ステラ) コロナグラフ観測装置およびその開発計画は、SPICA で検討しているもの以外にも存在する。それらは、運用環境や目指す性能によって、1) 地上望遠鏡用、2) 既存の宇宙望遠鏡用、3) コロナグラフ用に最的化された将来の宇宙望遠鏡用、に分類することができる。以下に示すように、最新のコロナグラフのアイデアを生かした、高コントラストを追求した狭義のコロナグラフ観測は、達成されていないのである。

1. 地上望遠鏡用観測装置：

これまでも、地上望遠鏡にコロナグラフ観測装置を搭載し、高コントラストの観測を迫及することがなされてきた。たとえば、すばる望遠鏡用にはコロナグラフ機能をもつ近赤外線観測装置 CIAO が開発されている。この装置では、主星の像のコアを隠蔽することで検出器の飽和などを防ぐことに成功している (広義のコロナグラフ)。しかし、すばるの補償光学をもってしてもなお残存する大気ゆらぎの影響のため、伴星の背後に広がる主星のハロー成分を大幅に低減する (狭義のコロナグラフ) にはいたっていない。

2. 既存の宇宙望遠鏡用コロナグラフ：

スペース用途のコロナグラフとしては HST に搭載されたもの (STIS, NICMOS, ACS) があるが、もとより太陽系外惑星の直接検出を意図して最適化されておらず、やはり広義のコロナグラフの域にとどまっている。

3. 宇宙望遠鏡を用いた将来計画：

太陽系外の地球型惑星を直接検出することを目指した、NASA による TPF (Terrestrial Planet Finder) -C, TPF-I のようなスペース天文学の計画もある。この計画では、可視域で $10^9 \sim 10^{10}$ という極端に高いコントラストをもつ主星と惑星を分解して、太陽系外の地球型惑星を直接観測することを目指している。ただし、これらの計画で必要な開発要素の技術的なハードルは高く、時期的には実現は SPICA よりも後になる見通しである。

SPICA コロナグラフ観測装置の特徴・位置づけ

SPICA におけるコロナグラフ観測の主要な特徴は、1) 大気揺らぎのない宇宙空間からの観測が可能であること、2) 観測波長域として中間赤外域を利用すること、3) 主鏡が一枚鏡のため瞳がシンプルなこと、の3点である。

大気揺らぎはコロナグラフ観測の大敵である。地上からの観測においては、現代の補償光学を用いても残存する波面誤差がコロナグラフの性能を大幅に制限してしまうため、数多くの一般的な太陽系外惑星を直接検出することは期待できない。⁵ SPICA にコロナグラフ観測装置を搭載すれば、大気揺らぎの影響は完全に回避できる点で、地上からの観測にくらべて非常に有利である。

さらに、SPICA が観測対象とする中間赤外線波長域においては、太陽系外惑星と主星のコントラストが、可視域にくらべて大幅に緩和されるという非常に大きな利点がある。これは、可視域においては惑星からのフラックスはおもに主星からの反射光からなっているが、中間赤外域では自発的な熱輻射の割合が顕著になるからである(図 5.23)。具体的には、可視域では $10^9 \sim 10^{10}$ 程度であった主星と惑星との明るさのコントラストが、惑星の年齢にもよるが中間赤外域では「3 ~ 4 桁も」緩和され、 $10^6 \sim 10^7$ 程度になる。

ただし中間赤外域では可視域にくらべて、同じ口径の望遠鏡を用いた場合、回折限界は1桁程度悪くなってしまう。そのため SPICA では地球型の太陽系外惑星の検出はおそらく困難であり、木星型の太陽系外惑星が観測の対象になると考えている。

大気揺らぎの影響をうけず、中間赤外域を観測対象とする SPICA は、コロナグラフ観測装置を搭載するにあたって、またとないユニークな位置にあるといえる。SPICA ではこれらの利を最大限に活かし、初めて狭義のコロナグラフを開発・搭載する予定である。必ずしも地球型惑星の検出までは要求せず、木星型惑星の観測を獲得目標とすることで feasibility を高め、TPF などに先がけて太陽系外惑星の直接観測および大気分光を狙う、という戦略である。

太陽系外惑星の直接観測計画におけるロードマップ

日本における太陽系外惑星の直接観測による研究においては、I) すばる + 次世代補償光学 + コロナグラフ観測装置による特殊な木星型(巨大)惑星の直接撮像、II) SPICA による、より一般的な木星型(巨大)惑星の直接撮像と大気分光、III) JTPF 計画による地球型惑星の直接撮像と大気分光、というロードマップを想定することができる。多くの共通点をもちながらも、立ち上げ時期および最重要とする観測対象が異なるこれらの計画が相補的に機能することで、そこから得られる惑星の起源および特徴に関する情報を、より価値の高いものにしていけると考えられる。

5.3.3 サイエンス面から要求される性能

この節では、本観測装置を設計するために必要となる、天文学研究の面から要求される性能について簡単にまとめる。

太陽系外惑星の直接観測以外にも、高コントラスト観測、すなわち、明るい天体の近傍の暗い天体を観測する要求は、天文学の多くの分野で存在する。例えば、太陽系内惑星の衛星、晩期型星および若い星の星周構造と質量放出現象、多様な天体の伴星(褐色矮星や系外惑星の観測を含む)、活動銀河の核周構造、重力レンズ、クエーサーの母銀河などがある。従来、天文学では、波長・感度・解像度が重視されていたが、高コントラストはそれらとは異なる次元であり、実現する

⁵現在のシステムでは、主星から離れた若い惑星の検出に限られる。次世代の多素子補償光学と差分光学系を用いた場合には地上 8-10m クラス望遠鏡によって、より一般的な若い(年齢一千万年以下の)巨大惑星が検出できると期待されている

ためには新たな工夫が必要となる。とりわけ有望な工夫が、狭義のコロナグラフ、すなわち、明るい天体の回折光・散乱光の影響を除去し、調べたい領域における中心天体像のハローの効果を最小限に抑える技術である。SPICA は、中間赤外から遠赤外において比類の無い解像度と感度を実現する。これに加え、高コントラスト性能を実現するためには、専用のコロナグラフ機能の実現が必要となる。ここでは、いくつかの天文分野を例にとり、必要とされる SPICA コロナグラフの仕様要求を表 5.17 に示す。

- 赤色巨星については、星周縁の包括的深探査が大きなテーマとなる。ターゲットとなり得る典型的な天体は、距離 1000pc 以内の約 100 個の星 (例: Cet, R Hya, W Hya, OH231.8+4.2, IRC+10216, AFGL3068, CRL2688, V Hya, BM Gem) である。注目する中心星からの距離 (離角) は $10 \sim 10^4$ AU ($0.1 \sim 100$ arcsec @ 100pc) となる。そこで必要なコントラストは、4-5 桁 (5 arcsec) \sim 5 桁 (100 arcsec) @ 20 μ m と予想される。観測モードとしては、撮像/分光/偏光の組み合わせで、撮像観測はダストからの連続波放射、分光観測は MOLsphere からの分子輝線・吸収線を検出する。
- 円盤に関しては、中間赤外域での円盤散乱光の検出、進化した円盤の構造の NIR コロナグラフ撮像による観測が大きなテーマとなる。注目する中心星からの距離は、数から 1000AU のうちできるだけ内側 100AU 以内である。撮像が基本で、さらに波長分解能 R が数百の分光でダストが観測可能となる。オプションとして、(i) R が数十の分光で散乱光の波長依存性を調べること、(ii) 偏光観測、などが考えられる。
- 系外惑星については、太陽系のように年齢が大きいものは低温度すぎて感度的にも難しい。そこで、年齢 1-5 Gyr 程度の自ら赤外線ではおのやかに輝く、主星から比較的離れた惑星の検出を狙う。ガス惑星・岩石惑星は問わない。撮像だけでなく、惑星大気分光を目標とする。

以上の要求は、撮像、分光 ($R > 50$)、偏光のそれぞれの観測モードに対して実現されることが望ましい。表 5.17 からわかるように、最もチャレンジングな装置への要求は系外惑星である。また、サイエンス的にも系外惑星の大気分光は SPICA にユニークなものである。そこで、SPICA コロナグラフは、系外惑星観測を実現できるものを目指して設計を行う。すなわち、「主星からの離角が $a \text{ few } \times \lambda/D$ (λ は波長、 D は口径) において 10^6 のコントラスト」を実現することを開発目標とする。

表 5.17: コロナグラフ観測装置のサイエンスターゲットと、それらの観測に必要な性能

テーマ	波長 (μ m)	角距離 (arcsec)	コントラスト	備考 (対象天体など)
赤色巨星	20	5	4-5 桁	1kpc 以内の 100 個の星
	20	100	5 桁	1kpc 以内の 100 個の星
原始惑星系円盤	5 \sim 10	1	≥ 2 桁	~ 100 pc 以内の YSO
残骸円盤	5 \sim 20	0.3	3 桁	太陽系類似黄道光 ベガ型星
系外惑星	10 \sim 20	~ 1	1 \sim 2 桁	太陽系類似黄道光 ベガ型星
	5 20	1	5 \sim 8 桁	~ 30 個の G-M 型星
	20	3	4 \sim 6 桁	~ 150 個の G-M 型星

5.3.4 コロナグラフ光学系の方式

コロナグラフ光学系は、望遠鏡などによって集光された波面を入力とし、高コントラストの結像を生成する光学システムである。コロナグラフ光学系の方式としては、もっとも古典的な Lyot 型のほか、近年、原理的には 10^{10} 程度の非常に高いコントラストを実現し得るさまざまな方式が、おもに理論研究の視点から提案されている。ただし、一般にコロナグラフ光学系の性能は波面誤差などの擾乱要因に極めて敏感であり、かつ擾乱要因の影響は現時点では十分に評価されていない。したがって、SPICA におけるコロナグラフ観測装置の設計・開発にあたっては、独自に擾乱の影響を考慮し、また必要におうじて望遠鏡や衛星の姿勢系など他のコンポーネント (より詳しくは次節を参照のこと) の仕様に要求を出す必要がある。この節では、まず、これまでに提案されている代表的なコロナグラフの方式について示す。次に、擾乱要因に対する感度も考慮した上でそれらと比較し、SPICA におけるコロナグラフ光学系としてどのような設計を行うか、現時点での見解を示す。

これまでに提案されているコロナグラフ光学系

- Lyot 型コロナグラフ：

これはもっとも古典的なコロナグラフの 1 つである。図 5.24 に模式図を示したように、望遠鏡によって収束された主星の像の中心部は、焦点面上にあるマスクによって隠蔽される。焦点面を通過した主星のフラックスは、以降に設けた瞳面においては、周辺部に比較的集中して分布する。ここで周辺部で透過率が低くなっているマスク (アポダイザー) を適用することで、主星からのフラックスのハロー成分も低減する。他方、焦点面上のマスクによって隠蔽されない伴星からのフラックスは、瞳面上でほぼ一様な強度を持つので、大半がアポダイザーマスクを通過する。

- 4 分割マスクによるコロナグラフ：

図 5.25 に模式図を示す。このコロナグラフでは、焦点面に配置する、位相を制御する素子 (4 分割マスク) が要となる。具体的には、この素子は図 5.25 で と記した領域では通過する波面の位相を 180 度反転させ、 0 と記した領域では波面をそのまま通過させる。観測にあたっては、主星の像がこれらの領域の中心に位置するようにポインティングする。この状況において、以降に設けた焦点面では 180 度だけ位相がずれた波面が相殺し合うので、原理的には主星の像を完全に消すことが可能である。4 分割された焦点面マスクのうち、どれかの領域を通過した伴星からのフラックスは、再結像させた焦点面においても相殺されないのので、主星のごく近傍にあっても観測可能となる。

- 瞳マスクによるコロナグラフ

一般に、光学系における瞳の形状を変化させると、焦点面における point spread function (PSF) はその影響をうけて変化する。瞳マスクによるコロナグラフでは、瞳の形状を特集なものにすることで PSF を制御し、主星のフラックスのハロー成分を大幅に低減する。この方式のコロナグラフでは、伴星の PSF も主星のものと同様の形状になるが、主星の像のうちハローが低減された領域に伴星が存在するがぎり、高コントラストの像が実現されるわけである。図 5.26 の上段に、瞳マスクの例を示す。このマスクを用いた場合の PSF は図の下段のようになる。図 5.27 は、副鏡による中心遮蔽および副鏡を支持する支持するスパイダーの影響を回避するために考案された瞳マスクと、対応する PSF を示したものである。このほかにも、様々な形の瞳マスクが提案されているが、PSF を制御してハローを低減するという意味では同様であることもあり、ここでは省略する。

- phase induced amplitude apodization (PIAA)

図 5.28 に模式図を示す。2 枚の鏡の面形状を調整することでアポダイゼーションを実現し、原理的には焦点面上で主星からの距離 $\lambda/D = 1 \sim 2$ において $10^9 \sim 10^{10}$ のコントラストを得ることが可能である。

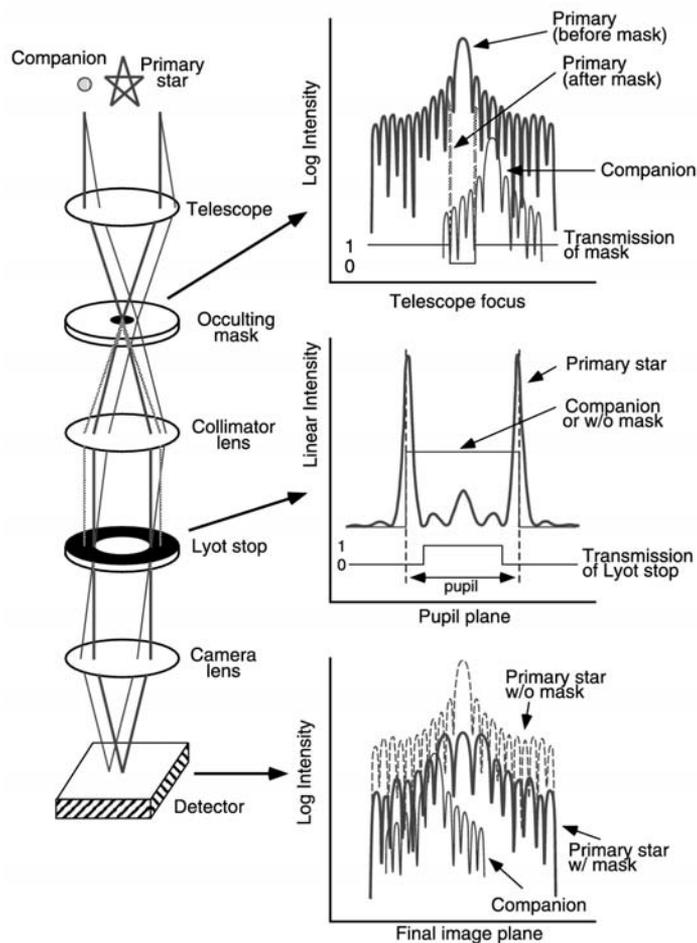


図 5.24: Lyot 型コロナグラフの原理を示す模式図 (Murakawa et al. 2004)

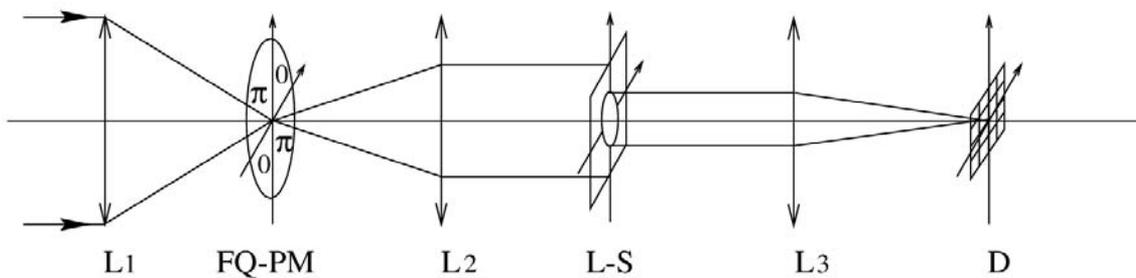


図 5.25: 4 分割位相マスクによるコロナグラフの原理を示す模式図 (Rouran et al. 2000)

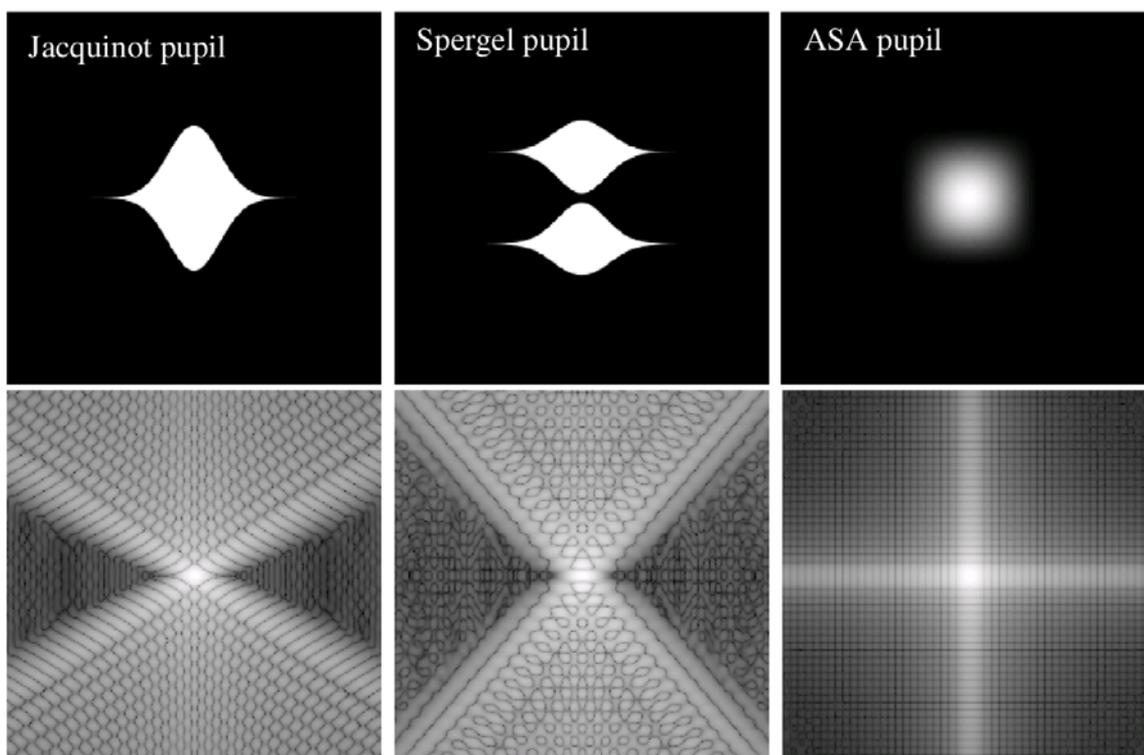


図 5.26: 様々な瞳マスク (上段) とそれによる PSF(下段)。(Jacquinot & Roizen-Dossier 1964, Spergel 2001, Niesenson & Papaliolios 2001。図は Guyon et al.2003 より),

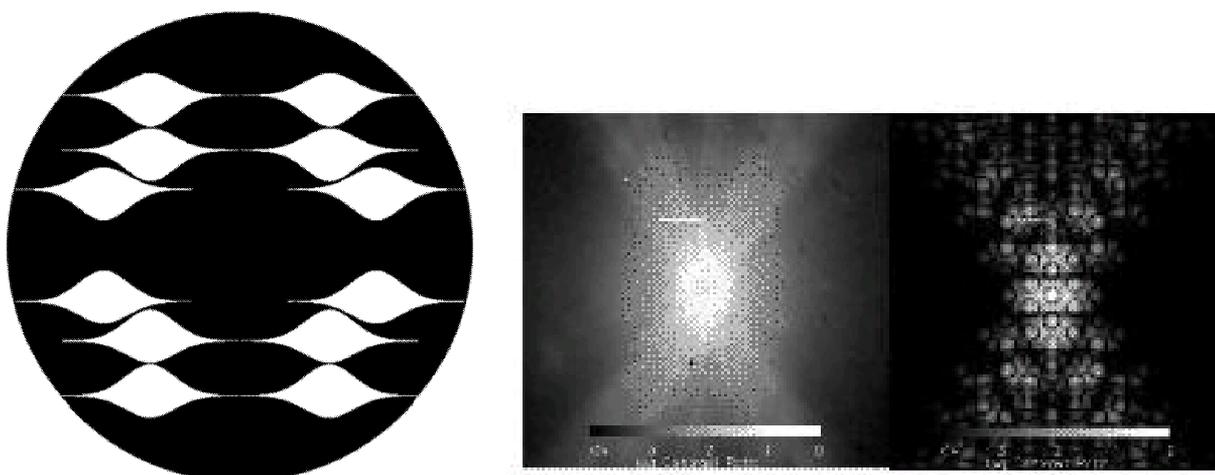


図 5.27: 副鏡、スパイダーの遮蔽を回避した瞳マスク (左) と、それによる PSF(左からそれぞれ実測、シミュレーションによるもの)。(Debes et al.(2000)

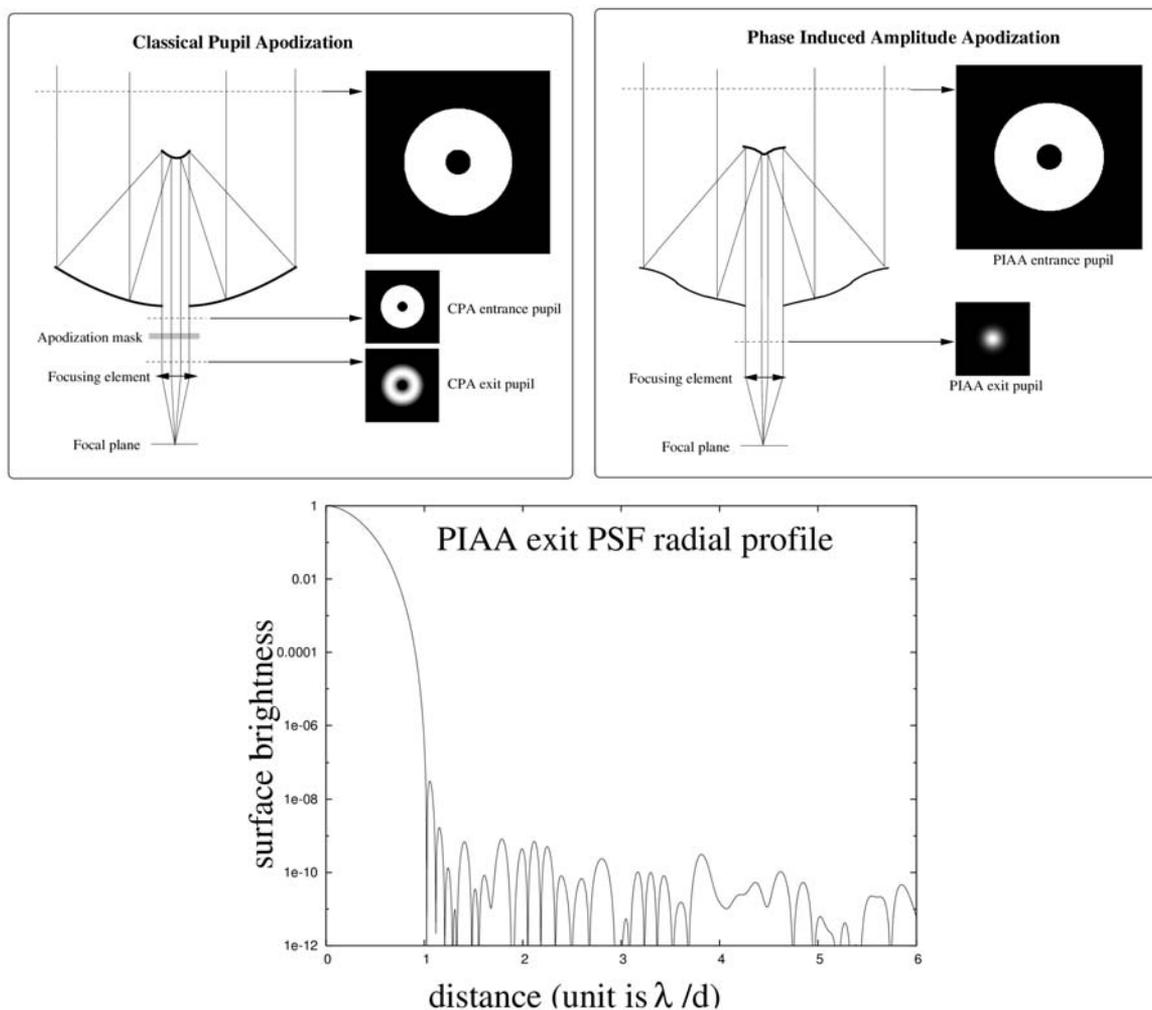


図 5.28: 従来型の望遠鏡 (上段左) および PIAA (上段右) による結像の特徴。下段は PIAA によって生成される PSF の例。

コロナグラフの方式の比較・選定

以上に示したコロナグラフの性能は、擾乱要因を考慮しない理想系においては提示されており、基本的に主星からの距離 $\lambda/D \sim \text{a few}$ において 10^{10} 以上のコントラストが得られることがわかっている。しかし、コロナグラフ光学系の性能は擾乱要因に極めて敏感なため、評価・選定にあたっては擾乱要因をとりいれた計算を行うことが重要である。SPICA におけるコロナグラフの主な擾乱要因としては、波面誤差 (望遠鏡の仕様は RMS で $0.35 \mu\text{m}$ 。ただし後述する可変形鏡で補正)、ポインティングの安定性の限界 (後述する Tip-Tilt 鏡による補正済みの状態で $0.''03$) などがある。

現在のところ、擾乱を考慮してなされたコロナグラフの性能評価の結果は乏しいので、我々は独自にシミュレーションを開始したところである。また SPICA で採用するコロナグラフには、何らかの方式による分光観測を目指す以上、(少なくとも全観測波長域の数分の1の波長範囲にわたって) achromatic であることが求められる。そのほか実際に制作するにあたっては、透過型素子の使用を極力避けることを考えている。透過型素子によるコロナグラフでは、厚さ、透過率、屈折率の一様性に非常に高い精度が必要であり、多重反射によるゴーストなどの問題があるからである。

表 5.18 は、主なコロナグラフの特徴をまとめたものである。擾乱要因にたいする感度解析は現在遂行中であるため、ここでは推測の結果を記してある。この表からも、実際に効くコロナグラフを実現することが、たいへんチャレンジングな試みであることが解る。とはいえ、我々は既に擾乱要因を考慮した上でなお、可変形鏡による波面補正のシミュレートのもとで、主星からの距離が $\lambda/D \sim 1.5$ において 10^6 のコントラストを実現する解を見出している(現時点では未公開の成果のため、ここでは具体情報は省略する)。今後も表 5.18 をより具体的に埋めるべく、系統的なシミュレーションを継続し、SPICA で採用するにあたってより優れた方式を追求する予定である。

5.3.5 観測システムの全体構成

現時点で構想している観測機器の構成について、図 5.29 に示す。コロナグラフ光学系の性能は、入射波面の質に極めて敏感であり、またコロナグラフが機能した像は、散乱、ゴーストなどを生じさせることなく撮像、分光しなければならない。そのため、実際に効くコロナグラフを実現するためには、コロナグラフ光学系だけでなく、前置光学系から撮像・分光器まで、一貫して考慮した設計が不可欠である。この説では、望遠鏡から波面補正システム、検出器までの各部分について述べる。

望遠鏡および姿勢系

SPICA 望遠鏡は、口径 3.5m のリッチークレチアン光学系であり、4K 程度の極低温に冷却して運用するものである(詳細については本プロポーザルの望遠鏡に関する章を参照のこと)。望遠鏡をコロナグラフの前置光学系とみなした場合、擾乱要因としては波面精度(仕様では RMS で $0.35 \mu\text{m}$ 以下)、および姿勢安定性の限界に起因するポインティングの誤差(姿勢安定性の仕様は $1''$ 程度)が重要である。これらはいずれも、それだけでコロナグラフの性能を決定的に悪化させる程度のものであることが、これまでに行ったシミュレーションによってわかっている。しかし望遠鏡や衛星自体を、単体でコロナグラフ側の要求を満たすまでに改善しようとするのは非現実的である。そこで SPICA におけるコロナグラフ観測装置では、ポインティングの誤差を Tip-Tilt 鏡で、波面誤差を可変形鏡で相殺する。

極低温 Tip-Tilt 鏡

望遠鏡から出た光束は、Tip-Tilt 鏡で反射させる。この鏡はアクチュエーターで支持された、向きを変化させることが可能な平面鏡であり、衛星の姿勢安定性の限界に起因するポインティングの誤差を相殺する。Tip-Tilt 鏡の用途としては、太陽観測衛星 SOLAR-B で開発が進められているものと同様だが、SPICA における Tip-Tilt 鏡は極低温で駆動でき、低発熱(数 mW 程度以下)である必要がある。チャレンジングな開発ではあるが、 $1''$ 程度のポインティング誤差を相殺して $0.03''$ のポインティング安定性を実現する見通しを得ている(詳細については、中間赤外観測装置の節を参照)。

表 5.18: 様々な方式のコロナグラフの比較

	古典的 Lyot 型	4 分割位相マスク	瞳マスク	PIAA
理想系における				
コントラスト	(やや不十分)	(主星像の完全な消去)	($\lambda/D \sim 3$ で 10^{10})	($\lambda/D \sim 1$ で 10^{10})
Acromatism	(波長依存性あり)	(波長依存性あり)	(原理的に acromatic)	(原理的に acromatic)
透過型素子の有無	(撤廃可能)	(透過素子の使用が前提)	(撤廃可能)	(撤廃可能)
製造誤差にたいする	(比較的堅牢)	(非常にシビア)	(シビア)	(非常にシビア)
robustness	(影響をうける)	(極めてシビア)	(比較的堅牢)	(比較的堅牢)
波面誤差に	比較的堅牢	(シビア)	(シビア)	(シビア)
製造の困難さ	(比較的容易)	(おそらく非常に困難)	(高精度微細加工が必要)	(おそらく非常に困難)
SPICA の time line	可能と判断	おそらく非常に困難	可能と判断	おそらく困難
での実現可能性	(設計解あり)		(設計解あり)	(検討は継続する)

記号の意味については、(および) ... 問題がないことが原理的に理解できるもの、... シビアではあるが、実験・開発によってクリアできる可能性がある(あるいは、クリアすべきと考えられる)もの、... シビアであり、それゆえコロナグラフの方式を棄却する可能性があると考えているもの。

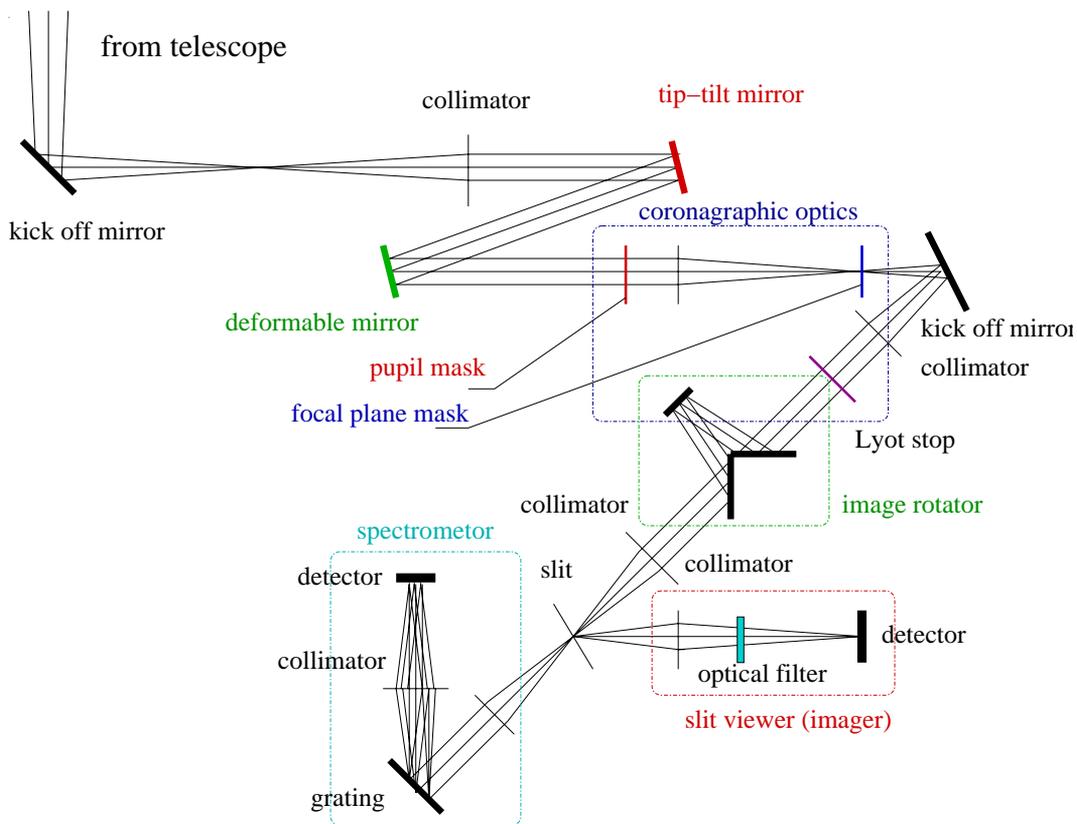


図 5.29: コロナグラフ観測装置の構成。

極低温可変形鏡

可変形鏡は、Tip-Tilt 鏡からの光を反射し、コロナグラフ光学系に入射させる位置に設置する。可変形鏡では多数のアクチュエーターによって、鏡面の形状を制御することができる。ここでは望遠鏡の製造誤差、重力開放による静的な波面誤差を相殺することが目的であるため、高速駆動は不要である。これまでに行ったシミュレーションから、SPICA のコロナグラフでは 20×20 素子程度の可変形鏡が機能すればよいことがわかっている（この計算結果も現時点では非公開のものであるので、ここでは具体的には掲載しない）。この鏡も極低温条件下での駆動が可能である必要があるが、近年、従来のものとはちがって冷却に起因するストロークの低減を解消したピエゾ素子を実現することで、JWST 用の極低温仕様の可変形鏡が開発されつつある（図 5.30）。SPICA においても同様の技術は有効であるので、既存の技術を流用しながら SPICA 向けの試験、開発を行うことで、フェーズ A の開発スケジュールのなかで必要な可変形鏡が得られるものと考えている。

極低温赤外コロナグラフ光学系

詳細については第 3 節を参照のこと。波面誤差およびポインティングの誤差の補正を受けた光束を受け、高コントラスト化した像を出射する。

撮像・分光システム

コロナグラフ光学系より以降に配置して、撮像・分光の機能を有するシステムの構成については、現時点では大きな不定性が残っている。すなわち、設計が（現時点では確定していない）コロ

ナグラフの方式に依存することに加えて、そもそもコロナグラフ観測装置が、独自に撮像・分光システムをもつのか、高コントラストかした像を中間赤外観測装置に受け渡すのか、も未定である。したがって、撮像分光システムについては、ここでは一例としてコロナグラフ観測装置がスリット分光を独自に行う場合について、簡単に紹介するとどめる(図 5.29)。どのような方式を採用するにしても、撮像分光システムは、既存の技術をベースとして極力確実に実現する予定である(詳細については、次節を参照)。

- イメージローテーター

コロナグラフ観測において、惑星など興味のある天体が、主星にたいしてどのような位置にあるかはまったく様々である。他方、SPICA において視野内の天体の向きを調整するため、衛星自体や衛星における観測装置を回転させることは不可能である。そこで本観測装置では、図 5.29 に示したような、3 枚の鏡からなるイメージローテーターを採用する予定である。これらの鏡の組を低温モーターで回転させることで、以降の分光素子、検出器上の像を任意の向きに調整することができる。

- スリット

コロナグラフ観測においては、惑星などの点光源だけでなく、星周円盤など広がりをもった天体も重要な観測対象である。したがって、その分光特性を調べるさいには、スリット分光が有効な手段のひとつとなり得る。ただし、今後の検討結果によっては、通常のスリット分光を採用しない可能性も残っている。

- 光学フィルター

撮像モードに用いる。フィルターの切り替えは、低温モーターでタレットを回転させることで行う。

- 分光素子

波長分解能が 200 程度の分光機能を、できるだけシンプルに実現する。図ではグレーティング素子を利用することを想定している。

- 検出器

既存の素子を用いる。Si : As を利用することを想定している。

5.3.6 技術成熟度および フェーズ A での開発課題

コロナグラフ観測を実現するための開発は、通常の単体の観測装置を開発するのとは異なり、衛星の姿勢制御、望遠鏡の性能、極低温能動素子による補償光学、高コントラストを実現する高精度のコロナグラフ光学系などの開発を含む総力戦となる。このような非常にチャレンジングな開発を的確に進めるため、フェーズ A 期において、これらの全てにおいて「実現性を立証」することを獲得目標に定めている。具体的には、以下のような課題を遂行する

- コロナグラフ光学系(シミュレーション)：

システムの要となるコロナグラフ光学系については、原理的には(無限大の精度を仮定した場合には)十分な性能が得られることが示されているので、あとは誤差にたいする感度の評価が重要となっている。しかし、一般にコロナグラフ光学系は波面誤差、素子の製造誤差に極めて敏感であり、また SPICA 望遠鏡は必ずしもコロナグラフ観測に最的化されていない

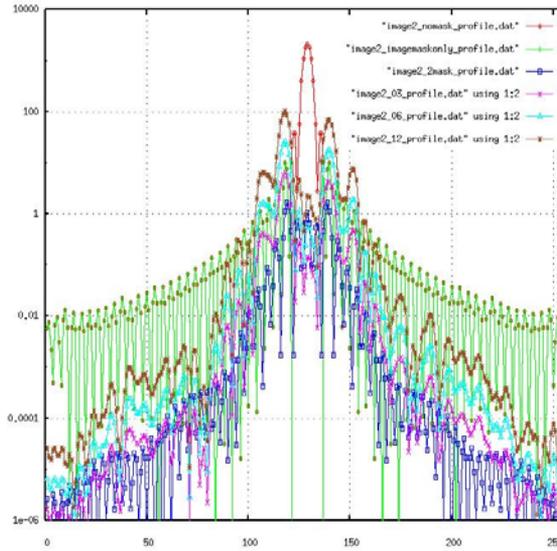


図 5.30: 波面誤差によるコロナグラフ性能の劣化の計算例。ここでは Lyot 型のコロナグラフについて、焦点面に半径 $r = 3\lambda/D$ のマスク、第 2 瞳面に中心から $0.8 r$ までを完全に透過し、 $0.8 < r < 1.0$ にかけて直線的に透過率が 0 まで減少するアポダイザーを想定している。右上に示したシンボルは、上から順に、1) 焦点面マスク、アポダイザーなし、波面誤差なし、2) 焦点面マスクあり、アポダイザーなし、波面誤差なし、3) 焦点面マスク、アポダイザーあり、波面誤差なし、の場合に対応する。1) および 2) プロットの凹凸が、回折リングに相当する。power spectrum(-2 乗則) で特徴づけられる波面誤差を導入し、RMS が 0.3, 0.6, 1.2 μm とした場合の結像性能を 4) ~ 6) に示す。SPICA 望遠鏡における波面誤差の仕様は 0.35 μm (RMS) なので、可変形鏡が有効であることがわかる。



図 5.31: 米国 Xinetics 社で開発中の極低温可変形鏡 (Ealey et al. 2002)。

ので⁶、開発の初期の段階では特に、それらを考慮したシミュレーションが重要である。この段階で、コロナグラフの方式について、採用の可能性があるものと棄却できるものに分類し、また SPICA の仕様に合わせて設計の最適化を行う。

- コロナグラフ光学系 (実験) :

他方、コロナグラフ光学系の性能を、実験によって検証することも不可欠である。実験は、まずは常温、大気中にて可視光を用いて開始するが、最終的には中間赤外波長域において、低温 (したがって真空) 環境下で行う必要がある。仕様を満たす性能を持ち、中間赤外域・極低温で機能するコロナグラフ光学系の実現性を立証するために必要な測定系をフェーズ A 期に構築し、実験を遂行する。

- 極低温可変形鏡 :

極低温で動作する可変形鏡は、これまでも JWST での使用を想定した開発が試みられてはいるものの、現段階では技術的試作の段階にある。また、素子数、ストローク、発熱量の低さなどにおいて、SPICA の仕様に見合う可変形鏡は、現時点ではそもそも存在しない。そのため、そのような可変形鏡を開発し、実現性を実証することは、フェーズ A における重要な課題である。製作自体はメーカーが行い、開発の途中および最終段階において、自前で要素試験、総合試験を行い、フィードバック、評価することを計画している。

- 極低温 Tip-Tilt 鏡 :

現在、すでに試作版の設計を行い、製作をはじめている。フェーズ A の期間に、低温条件下での駆動性、制御の精度、発熱量を評価、改良し、成立性を実証する。

- そのほか :

そのほか、衛星の姿勢制御、擾乱管理などの工学分野の課題についても、それぞれの担当グループと協力して検討、フィードバックを行い、開発を進める。具体的には、姿勢制御と Tip-Tilt 鏡が吸収する周波数分担などの制御方式の設計、冷凍機の低振動化、振動吸収機構の開発、振動伝達特性についての検討、などの課題がある (より詳細については、それぞれについて記述した章を参照)。

また、望遠鏡の光学性能にたいして要求する仕様の詳細を確定することも、フェーズ A での課題である。現時点では波面誤差、鏡面の粗さについては仕様値が存在するが、波面誤差の空間分布や反射率の一様性については制限が課されていない。フェーズ A ではコロナグラフ観測に必要十分な望遠鏡の光学性能を定義し、必要に応じて望遠鏡開発とも協調しながら開発を進める。

技術成熟度

この節では、本観測装置のサブシステムの技術的成熟度についてまとめ、NASA で利用されている TRL レベルを用いて表現する。TRL レベルの評価では、それぞれのシステムを、レベル 1 に相当する「原理的な可能性が示されている」から、レベル 9 に相当する「フライトモデルが打ち上げられ、実際のフライトによって性能が確認されている」の 9 段階への分類を行う。TRL レベルの定義については、第 1 章を参照のこと。

表 5.19 に、各サブシステムの現時点での評価およびフェーズ A 完了時の到達レベルの見通しを示す。表からわかるように、撮像・分光システム以外については、現時点では 3 ~ 4 のレベル

⁶ 本来、コロナグラフ観測を行うには、望遠鏡副鏡およびその支持機構による、入射瞳の遮蔽は存在しないことが望ましい。そのため、コロナグラフ観測を目的とした TPF などの次世代ミッションでは、望遠鏡に軸外し光学系を採用することが計画されている。

にあるが、フェーズ A における検討・開発によって、TRL レベル 5 以上に到達できると考えている。ここで撮像・分光システムについては、基本的に既存の技術を用いるので、現時点でもレベル5にあると判断している。

表 5.19: コロナグラフ観測装置に必要な各技術の成熟度

項目	現時点での状況	フェーズ A 完了時の見通し	備考 (主な開発目標)
姿勢制御安定性	3	5	1 arcsec @ 1 h
望遠鏡	4	5	WFE < 0.35 μm @ RMS。 鏡面粗さ < 20 nm @ RA。
極低温 Tip-Tilt 鏡	3 ~ 4	6 ~ 7	4 K にて運用可能。 発熱量 数 mW 以下。
極低温可変形鏡	4	6 ~ 7	4 K にて運用可能。 20 x 20 素子、 駆動精度 8 nm @ RMS
極低温・赤外 コロナグラフ光学系	3	7	擾乱を考慮してなお 10^6 程度の コントラスト、ある程度の achromatism。
撮像・分光システム	5	5	基本的に既存の技術。

フェーズ A での開発課題

● コロナグラフ光学系

- SPICA の仕様を満たす設計解を得る (波面誤差、副鏡関連の遮蔽のもとで 10^6 のコントラスト、ある程度の achromatism)
- 真空チャンバー、光学ベンチを中心とする試験環境の構築
- 性能の実証 (PSF/コントラスト、誤差感度、波長依存性、極低温での成立性など)

● 極低温可変形鏡

- 設計、とくに駆動方式の (候補の) 選定
- 試作版の製作
- デュワーと干渉計を中心とする 試験環境の構築
- 性能の実証 (極低温での鏡面の制御精度、粗さ、ストローク、発熱、面安定性、耐久性など評価)

● 極低温 Tip-Tilt 鏡

- 試作版の製作
- デュワーその他による試験環境の構築
- 性能の実証 (像安定化精度、ストローク、発熱、耐久性など評価)

● 衛星姿勢安定性との関連

- 姿勢制御開発と連携しながら、擾乱が許容範囲に納まるようにする
- 望遠鏡との関連
 - 望遠鏡開発と連携しながら、望遠鏡に要求する光学仕様の詳細を確定する

5.4 遠赤外線観測装置

5.4.1 設計方針

これまでの赤外線天文衛星の観測データを見た場合、他の波長域に対する最大の弱点は角分解能にある。赤外線の波長域は可視・近赤外線大型望遠鏡と電波の干渉計の狭間にあつて、角分解能という観点で大いに遅れを取っている。星間空間のエネルギーの流れに重要な役割を果たすダストは、遠赤外線領域にその放射のピークを持つ。ダストの温度分布と質量分布を明らかにすることが、星間空間におけるエネルギーの流れを解明する重要な要素となるが、星間ガスや加熱源などの分布と同じ空間分解能で議論できないところに理解を困難にする要因がある。また、系外惑星探査においても遠赤外線は非常に重要であるが、ここにおいても角分解能が極めて重要なファクターとなる。近傍の天体に対しても、原始惑星状円盤などを分離するには高い角分解能が要求されるためである。一方遠方銀河の探索を考えた場合にも、遠赤外線は重要な役割を演じる。すなわち、遠方銀河においては星生成活動が活発になっていることが明らかになってきているが、活発な星生成活動のエネルギーがダストによって遠赤外線領域にシフトした銀河（高光度赤外線銀河）が多数観測されている。これまでの赤外線天文衛星により、遠方銀河を探索する上で遠赤外線が非常に有効であることが示されているが、同時に現状の望遠鏡では角分解能が不十分で、銀河のコンフュージョンによって観測限界が規定されている状況である。これは本質的な問題であり、観測時間や検出器の性能改善では解決できない。遠方銀河を観測するに適した波長帯である遠赤外線は、角分解能の低さによりその潜在能力を発揮できていないのが現状である。

望遠鏡の角分解能は、波動光学で良く知られた回折限界によって規定される。すなわち、2つの天体を分離できる限界は、観測する波長に比例し、望遠鏡の直径に反比例する。可視光よりも100倍以上波長の長い遠赤外線では「すばる」望遠鏡と同じ角分解能を得ようとすれば、直径数100mもの望遠鏡が必要となる。あるいは電波観測で利用されている干渉計の技術を導入する必要がある。いずれの方法も、地上での観測ができない遠赤外線の波長域では極めて実現困難である。これまでの赤外線天文衛星では1mに満たない直径の望遠鏡が搭載されており、これによって期待される角分解能は可視光における人間の瞳と同じ程度（1分角程度）である。このように小型の望遠鏡しか実現できていない理由はいくつかあるが、大きな理由は、望遠鏡自身の熱放射を嫌う遠赤外線の観測では望遠鏡を冷却し望遠鏡自身の熱放射を抑える必要があるためである。ここで提案しているSPICA衛星の望遠鏡の最大の売りは、画期的な手段により3mクラスの大型冷却望遠鏡を実現している点である。この特徴を活かすためにも、搭載される遠赤外線観測装置は望遠鏡の回折限界を達成できる装置とすべきである。

望遠鏡が大型化され、角分解能が向上すると、同じフォーマットの検出器では視野角が狭くなる。これは一度に観測できる領域が狭くなることを意味する。近傍の分子雲など立体角の大きな天体を観測する場合や、広い領域に渡って遠方銀河を探索する場合など、一度に観測できる領域の広さが観測効率にリニアに効いてくる。従って高角分解能を目指した観測装置では、大規模なアレイ検出器が必須となる。遠赤外線領域における撮像観測においては、大規模アレイ検出器の実現がもっとも大きな開発要素となる。

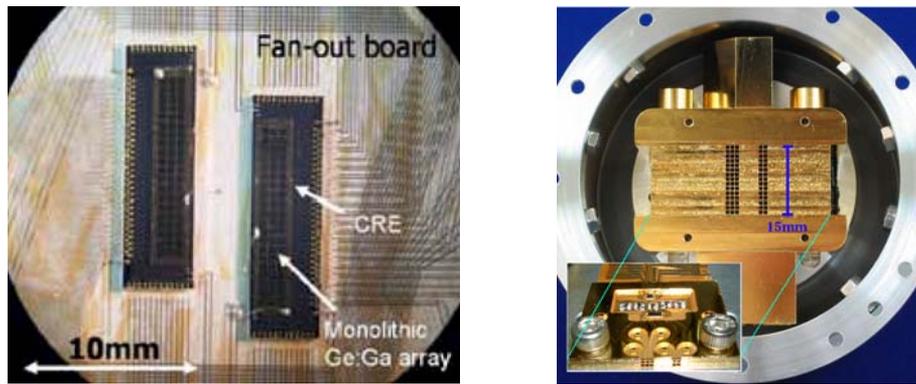


図 5.32: ASTRO-F/FIS 用検出器：(左) モノリシック Ge:Ga 素子と極低温読み出し回路を In パンプで接合した短波長検出器。(右) 5 素子のプレートを 15 段スタックしたコンパクトな圧縮型 Ge:Ga 検出器。(情報通信研究機構/宇宙科学研究所/東京大学)

5.4.2 基本設計

表 5.20: 検出器の主要諸元

	SW 検出器	LW 検出器	備考
検出素子タイプ	Ge:Ga	圧縮型 Ge:Ga	
波長帯	50 – 110 μm	110 – 200 μm	
動作温度	2.5K	1.7K	
アレイフォーマット	256 × 256	128 × 128	128 × 128 × 4 units for SW 検出器
物理ピクセルサイズ	0.5mm 角	1.0mm 角	64 × 64 × 4 units for LW 検出器
ピクセルサイズ (回折限界)	1.8 秒角 (3.6 秒角)	3.6 秒角 (7.2 秒角)	for 50 μm & 100 μm
視野角	7.7 分角	7.7 分角	

遠赤外線 of 撮像観測用に、2 種類の検出器を搭載する。1 つは Ge:Ga アレイ検出器であり、もう 1 つは圧縮型 Ge:Ga アレイ検出器である。いずれも量子型である光電導型検出器で、それぞれ波長 50 μm から 110 μm と 110 μm から 200 μm をカバーする。これに、各検出器あたり 3 種類のフィルタを用いて測光バンドを構成する。長波長側を担当する圧縮型 Ge:Ga アレイ検出器 (LW 検出器) と短波長側を担当する Ge:Ga アレイ検出器 (SW 検出器) は 2 色性ビームスプリッタにより光を波長方向で分割し同時に同じ空を観測するが、測光バンドはフィルターホイールにより選択的に観測される。使用するアレイ検出器は、対応する波長域での最短波長に対する Airy Disk を十分にサンプリングできるものとする。すなわちピクセルサイズは、SW 検出器では 1.8 秒角 (50 μm での回折限界は 3.6 秒角) LW 検出器では 3.6 秒角 (100 μm での回折限界は 7.2 秒角) に設定し、アレイフォーマットとして視野角 5 分角以上を確保するために、SW 検出器で 256 × 256 ピクセル、LW 検出器で 128 × 128 ピクセルを目指す。検出器はいずれも ASTRO-F 衛星の遠赤外線観測装置 FIS に搭載したものと同一タイプである。FIS で使用した検出器アレイは、この時点では最大規模のアレイであるが、それでも SW 検出器タイプで 3 × 20 ピクセル、LW 検出器タイプで 5 × 15 ピクセルに過ぎない (図 5.4.1 参照)。現時点でのアレイ検出器の開発状況を考えると、このサイズのアレイを開発するためには非常に大きなジャンプが必要である。しかしながら次世代の大型天文台を考える場合、最低でも 128 × 128 (SW 検出器)、64 × 64 (LW 検出器) を

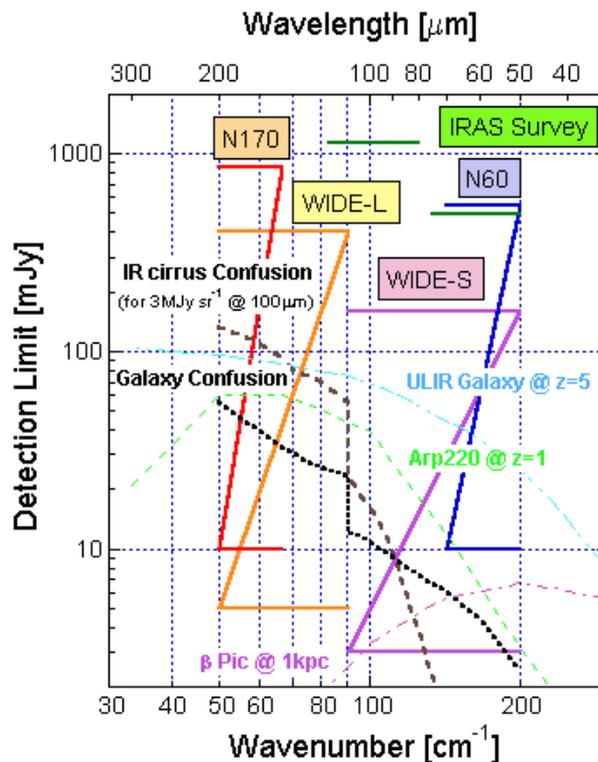


図 5.33: ASTRO-F/FIS の点源に対する観測限界：各測光バンドの Z 型のラインの上側が全天サーベイでの検出限界に対応し、下側のラインが $4''/\text{sec}$ のスロースキャンでの検出限界に対応する。スロースキャンのピクセルあたりの積分時間は約 10 秒に相当する。

達成することは必須であろう。大型のアレイ検出器の開発が困難な場合は、複数の小型アレイを搭載し複数測光バンド同時観測など光学系の設計を工夫する必要がある。

検出器の基本仕様を表 5.4.2 に示す。

ASTRO-F の遠赤外線観測装置 FIS において、我々は同種の検出器として現時点における最大規模のアレイを実現した。この装置の測光モードでは、10 秒程度の積分時間で銀河によるコンフュージョン限界に達する性能を実現している（図 5.4.2 参照）。検出器のピクセルサイズを望遠鏡の回折限界になるように選んだ場合、スループットは望遠鏡の口径によらず一定となる。FIS ではピクセルサイズは回折限界と同じサイズに設定している。この点を考慮し、かつ図 5.4.2 に示すように、SPICA の望遠鏡に対応したコンフュージョン限界に達する積分時間を推定すると、LW 検出器で約 20 分程度と現実的な値になるが、SW 検出器では約 2 日となりあまり現実的では無い。LW 検出器は角分解能が悪いためコンフュージョンの影響が大きい。このため、長波長側の測光バンドは比較的容易にコンフュージョン限界に達するが、短波長側ではコンフュージョン限界が低く、暗い銀河まで原理的には検出可能となる。従って、SW 検出器の性能改善は遠方銀河を観測する上で非常に重要となる。

大規模アレイを搭載する場合、波長の長い遠赤外線では物理ピクセルサイズが大きくなるためアレイ全体のサイズが大きくなる。約 7.7 分角をカバーする SW 検出器及び LW 検出器の物理サイズはおよそ $130 \times 130 \text{mm}^2$ となる。これを平面的に配置した場合焦点面の弯曲が問題となる。現在実現されているアレイフォーマットサイズなども考えると、いくつかのユニットに分割して、焦点面の弯曲を考慮して配置するのが現実的であろう。

測光バンドは可能な限り光学効率が高くなるように設計する。測光バンドの設計は、今後観測

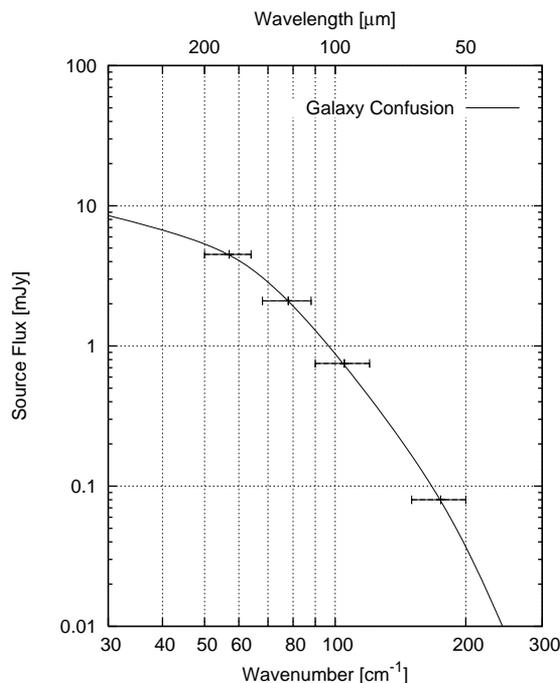


図 5.34: SPICA 望遠鏡での銀河によるコンフュージョンの影響

対象も含めて検討されるべきであるが、基本的には検出器の波長感度に合わせた広帯域測光バンドと、長波長側および短波長側の狭帯域測光バンドの3種類とし、これに遮光フィルタを加えた4種類をフィルタホイールにて切替える構成とする。SW 検出器およびLW 検出器それぞれ3種類の測光バンドが設定されるため全体では6種類の測光バンドが構成される。SW 検出器とLW 検出器は同時に同じ空を観測するので、3回のフィルタホイール切替えで全測光バンドについて観測できる。

5.4.3 遠赤外検出器の開発状況

以下では、日本国内における SPICA 搭載を目指した遠赤外検出器の開発状況を示す。SPICA 望遠鏡は、4.5 K まで冷却することにより、熱放射が充分低いレベルにおさえられる仕様となっている。また、その大口径は赤外域でこれまでにない空間分解能を提供する。このため、検出器の性能が充分高ければ、広域での測光撮像観測に対して究極的な性能を与え、宇宙初期にまで達する遠方天体の微かな放射をも検出することが可能である。つまり、この望遠鏡の能力を最大限に発揮するには、検出器に対して従来にない高感度と撮像性能が要求される。すでに前項までに示された遠赤外検出器の仕様である、 128×128 素子の 2 次元アレイフォーマットと $NEP \sim 10^{-19} \text{ W/Hz}^{1/2}$ の感度が、その数値目標である。以下では、国内で開発された現行の遠赤外検出器の概要を述べた後、SPICA 搭載仕様を満たすための開発課題と、その打開が見込まれる新型検出器の国内での開発状況を示す。

ASTRO-F 搭載 Ge:Ga 検出器

現在のところ、遠赤外領域における最も高感度な検出器は、外因性半導体光伝導素子である。その原理は、半導体の不純物準位から赤外線により励起されたキャリアを印加されたバイアス電場

により光電流として検出する、いわゆる量子型光検出である。その特長は、光の吸収効率が高く熱雑音が小さいため、比較的高い温度範囲でも容易に高感度が得られることである。このタイプの検出器では、半導体内を走行するキャリアの散乱を最小限にすることが高感度につながるため、できるだけ純度の高いバルク半導体が必要となる。高純度のゲルマニウムに微量のガリウムをドーブした Ge:Ga 検出器は、良質の半導体バルク材料が得られるため、過去の多くの赤外線天文衛星に搭載されてきた。ASTRO-F 衛星においては、Ge:Ga の 2 次元アレイ検出器を主たる焦点面装置として採用している。これは、平行平板の Ge:Ga 単結晶を網目状電極で素子に区切った構造をもつ、この波長域では世界初のモノリシックアレイである。この構造では、一様な特性をもつ大規模な素子数の 2 次元アレイが容易に作成可能である。我々は ASTRO-F 検出器として 60 素子 × 2 のモノリシックアレイを製作した。

光伝導素子の不純物準位の励起エネルギー、つまり、赤外線に対する有感波長の上限值（カットオフ波長）は、バルク半導体とドーブ不純物材料の組み合わせにより選択可能である。当然ながら、より長いカットオフ波長の検出器は、不要な熱励起キャリアの発生を抑制するために、より低い動作温度を必要とする。Ge:Ga のカットオフ波長は 110 μm であるが、これに、一軸性のストレスを印加すると、カットオフ波長が 200 μm まで伸展することが知られている。圧縮型 Ge:Ga は、2 次元アレイ化されて ASTRO-F に搭載されている。このタイプの検出器は強力な加圧機構を必要とするため、大規模な 2 次元アレイの製作が困難であると考えられている。しかし、我々は、複数の検出素子を同時に加圧するコンパクトな構造を採用することにより、高い開口効率を有する素子数世界最大の 75 素子アレイを実現した。

従来の検出器の信号読出しには、 $\sim 100\text{ K}$ の温度下で低ノイズ性能を発揮する J-FET が広く使われてきた。しかし、このような系は、極低温で動作する検出器とこれらアンプ系との熱絶縁を必要とし、検出器素子数が増加するに従ってワイヤ本数や発熱量の点において、実現が困難となる。我々は、このような事情を鑑みて、ASTRO-F 検出器の読出し回路として、MOSFET を用いた検出器と同じ温度下で動作する極低温アンプを開発した。ASTRO-F 検出器では、この極低温アンプが Ge:Ga、加圧型 Ge:Ga の両者に採用されている。特に、Ge:Ga モノリシックアレイは、極低温アンプの 2 次元アレイを Ge:Ga にインジウム接合するという世界初の試みにより実現された。

今後の課題

ASTRO-F 検出器の素子数は、現存する遠赤外検出器では最大級の約 100 素子であり、その感度は $\text{NEP} \sim 10^{-17} \text{ W/Hz}^{1/2}$ を達成しているが、この仕様は SPICA 検出器としては不十分である。また、不純物半導体は後述するような複雑な光応答特性を示すため、現状のデバイス構造では、理想的な検出器とは言い難い。以下には、これらの開発課題の具体的項目を示す。

1. アレイ素子数：

ASTRO-F 検出器のモノリシック Ge:Ga アレイでは、平面的構造を持つため、素子数の拡大が容易に可能である。しかし、圧縮型 Ge:Ga アレイでは、同時に加圧できる素子数は現状が最大と見られ、加圧機構による開口率のロスなしにこれ以上の拡張は難しい。加圧機構等の大きな構造を必要とせず 100 μm を超える有感波長を持つ検出器を新たに開発することが望まれる。ASTRO-F 検出器の素子数制限は低温部での発熱量にも由来している。我々の採用した極低温読出しアンプは、系の単純化のため常時電源供給され、1 素子あたりの発熱は $\sim 10 \mu\text{W}$ であり、アレイ全体では $\sim 1 \text{ mW}$ である。この発熱量は ASTRO-F の液体ヘリウム寿命に大きなインパクトを与えない程度の負荷であるが、2 桁の素子数増加を仕様とする SPICA 検出器では低発熱化が必要である。

2. 検出感度：

検出器の感度、つまり、信号対ノイズ比を向上させるには、第一に低ノイズ性能が要件となる。ASTRO-F 検出器の感度は、主に極低温アンプの信号読み出しノイズにより制限されているが、これらのデータと開発経験から、同じ MOSFET アンプを用いたとしても、設計が最適化されたものでは現行よりも 1 桁ほど低ノイズ化できる、との見とおしが立っている。他方、信号強度を決定する光伝導素子の光応答は、一般的には、キャリア移動度と電極間距離とで決まるキャリア走行時間に反比例して、また、キャリア寿命に比例して大きくなる。キャリア移動度はバルク半導体の純度に大きく依存するが、ASTRO-F 検出器に使用されている Ge:Ga はすでに高い純度を有し、この大幅な改善は容易ではない。この改良には別種の半導体材料の開発が必要であろう。電極間距離に関しては、後述するようなデバイスの縮小化による、1 桁ほどの大幅な感度向上の余地がある。

3. スローレスポンスと放射線の影響：

Ge:Ga のような不純物半導体では、特に低背景放射環境において、光応答速度が非常に遅いことが知られている。これはスローレスポンスと呼ばれ、半導体内に生じた不均一な電荷分布が緩和する時間に由来するものである。その時定数は数分～数時間にまで達することもあり、測光精度の低下を招く。また、検出器に宇宙放射線が入射する際にも半導体内の状態変化を生じ、光応答が大きく変化することが知られている。このため、光変動や放射線の影響が速やかに緩和するとともに、小さな素子サイズの検出器開発が望まれる。

4. 光吸収効率：

Ge や Si などの不純物半導体材料は屈折率が高いため、そのままでは多くの光（～30%）が表面反射で失われてしまう。また、遠赤外に相当する浅いエネルギーの不純物準位が形成されるためには不純物ドーパ量を高くできない（濃度 10^{14} cm^{-3} ）ため、光吸収係数はせいぜい $\sim 0.5 \text{ mm}^{-1}$ である。このため、多くの遠赤外検出器では集光ホーンと光キャビティを採用して実効的な吸収効率を上げている。ASTRO-F の圧縮型 Ge:Ga アレイ検出器でもこのような構造を採用しているが、さらに大規模なアレイの製作は容易ではない。ASTRO-F の Ge:Ga モノリシックアレイ検出器では、平行平板 Ge:Ga の光入射面と裏面間の複数回反射により、キャビティ構造を用いることなく実効的な吸収効率を上げる工夫がなされている。しかし、このような場合、波長感度特性にはファブリペロー干渉フリンジによる鋭いピークと不感帯とが現れるため、高分解の分光観測には不都合である。検出器表面に無反射コートを実施することができれば、吸収効率を格段に向上させることができるが、遠赤外域でのコーティング技術は未だ確立したものになっていない。

バルク型半導体光伝導素子の開発

以下では、現行の Ge:Ga 光伝導素子に代わる高感度アレイ検出器の新規開発状況について述べる。ここで述べられる新型検出器は国内の研究グループが独自に開発を進めているものである。

前節で述べた Ge:Ga 検出器は、赤外線波長より十分な大きさを持った半導体バルクが赤外線吸収とキャリア走行をともに担う光伝導素子である。このタイプの検出器は構造が単純であり、良質な結晶が得られさえすれば高感度が容易に得られる。また、多くの衛星での使用実績があるため信頼性が高く、SPICA 検出器としても有望であることに変わりない。しかし、SPICA 検出器では、素子数、感度ともに、ASTRO-F 検出器より 2 桁の性能向上が期待されており、これに見合った能力のデバイス開発が急務である。

1. Ge:Ga 検出器：

Ge:Ga 検出器については、前節で挙げられた技術課題をクリアすべく、改良型検出器の開発

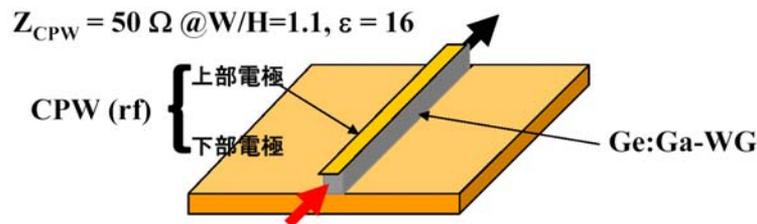


図 5.35: 光導波路型 Ge : Ga 検出器

が進められている。その一つは、情報通信研究開発機構（NICT）のグループにより提案された、Ge:Gaを遠赤外波長以下サイズの矩形導波路形状に形成したデバイスである（図 5.35）。赤外線は導波路の断面から入射され、導波路内で十分な光吸収長（ $> 2\text{mm}$ ）をとることができる。導波路に沿って作成された電極間隔は、ASTRO-F 検出器の 0.5mm に対し、その10分の1の $50\mu\text{m}$ 程度である。つまり、従来のデバイスと比較して1 - 2桁ほど大きな光応答が期待できる。波長以下のサイズの導波路断面への光結合は、Ge や Si のエマルジョンレンズを用いることで可能となる。さらに、素子サイズが小さいため、宇宙使用の際の放射線ヒット確率が低い。このようなデバイスは1枚のGeウェハの機械加工により1次元アレイ化が容易であり、これをスタックすれば2次元アレイが構成できる。すでに試作デバイスの評価が進められており、現在は本格的なアレイ検出器の製作段階に入っている。また、 SiO_2 による無反射コーティング技術も同時に開発が進められており、これが実現すれば、最終的には現状の検出器より2桁の感度向上が期待できる。もう一つは、JAXA 宇宙科学研究本部で開発を計画している、BIB 構造を持つ Ge:Ga 検出器である。BIB（Blocked Impurity Band）構造とは、高い赤外吸収係数を有する高ドープ層とそこからのキャリア漏れ出しをブロックする高純度絶縁層とからなるものである（図 5.36）。

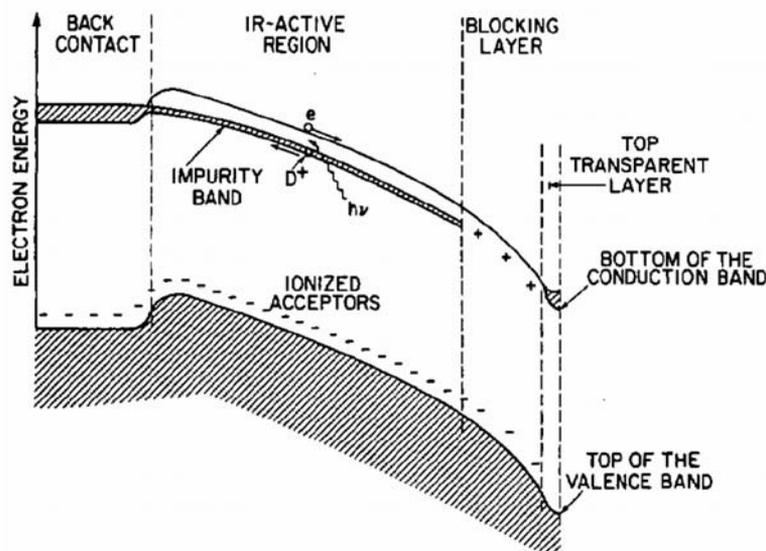


図 5.36: BIB 検出器のエネルギーバンド構造

高ドープ層では通常の Ge:Ga の 1000 倍もの濃度の不純物がエネルギーバンドを形成している。赤外吸収領域が局在化するため、デバイスサイズを小さくしても吸収効率が高い上に、光応答速度や放射線耐性などの特性にも優れる。平面構造の半導体プロセスにより製作できるため、2次元モノリシックアレイの構成に理想的である。BIB 構造は Si を用いた中間赤外検出器ですでに多大な成功を収めているが、Ge を用いた遠赤外域 BIB 検出器の実現には絶縁層の純度をいかに高くできるかがキーポイントとなっている。現在のところ、BIB 検出器製作の準備段階として、高ドープ Ge と高純度 Ge の材料評価を進めている。この開発が成功すれば、現行 Ge:Ga の 1 ~ 2 桁高感度の大規模な 2 次元アレイが実現できる。

2. GaAs 検出器：

Ge:Ga 検出器の有感波長は圧縮型でも $200\mu\text{m}$ が上限であり、さらに長波長の赤外検出には別の半導体基材を用いる必要がある。その最も有力な候補が GaAs である。Ge:Ga と同様に、高純度 GaAs に微量の ? をドープすると不純物準位が形成され、有感波長の上限は $300\mu\text{m}$ となる (図 5.37)。

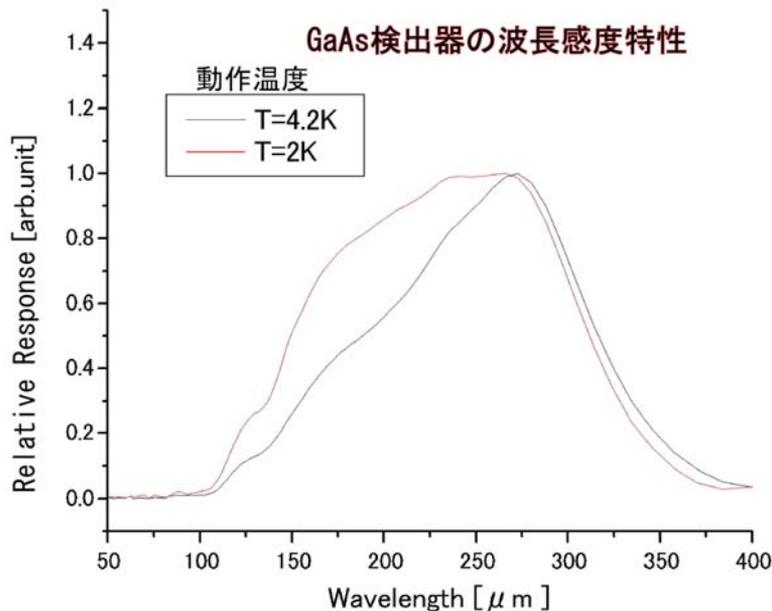


図 5.37: Ga : As 検出器の波長感度特性

この場合のキャリアは電子であり、ホールをキャリアとする Ge:Ga と比較して高い移動度が得られるため、より高い感度が得られるとともに応答速度が大きいことが期待され、SPICA 搭載検出器として非常に有望である。最終的な感度は Ge:Ga と同等の性能が期待されるが、長波長をカバーできる意義はそれにも増して大きい。通信等の一般・産業用高速デバイスが GaAs を採用する理由もまた、その移動度の高さによるところが大きい。しかし、Ge や Si と比較して、赤外検出器に必要とされる超高純度の GaAs 結晶の一般的ニーズは低いため、その製造技術は確立したものではない。そこで、JAXA 宇宙科学研究本部では、独自に GaAs 結晶を製造するところから開発をスタートし、多くの結晶試作の結果、現在では、赤外検出できるレベルに至った。試作された単素子 GaAs 検出器は、現行の Ge:Ga 検出器と同レベルの光応答を示すことがわかっており、近い将来の高感度 2 次元アレイ実現に十分な期待を抱かせるものである。ただし、現行の結晶純度は最終的な目標値に達しておらず、このためダークカレントが大きいことやそれに伴うノイズ性能の低下が見られる。しかし、結晶の高

純度化への方策はすでに立てられており、見通しは明るい。SPICA 搭載へむけて、開発体制の増強が望まれる。

超伝導検出器の開発

1. 超伝導フォトン検出器：

超伝導体-絶縁体-超伝導体といういわゆる SIS 構造を持つ素子は、電波のヘテロダイン受信機用超伝導ミキサとして使用されることが一般的であるが、高感度のフォトン検出器として DC 動作させることも可能である。つまり、SIS 素子は半導体と同様のエネルギーギャップを有し、超伝導体内にある電子がそのギャップ以上のエネルギーのフォトン入射により励起されると、絶縁層を透過するトンネル電流の増加として検出される (図 5.38)。

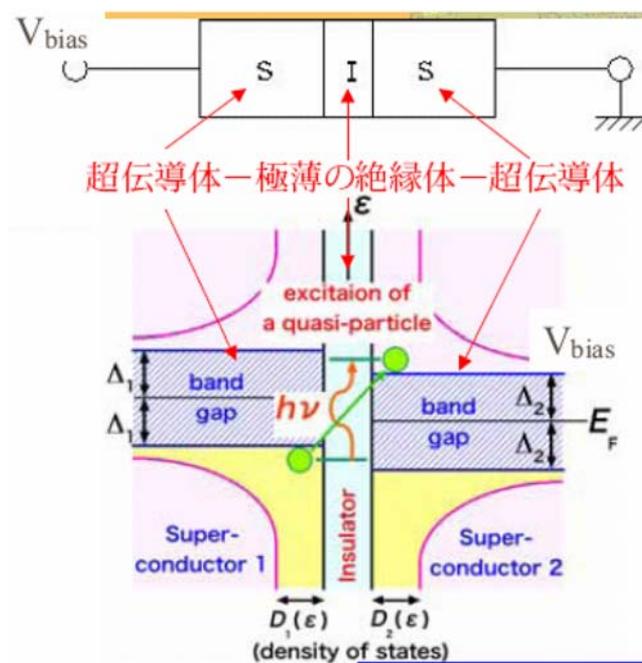


図 5.38: 超伝導 フォトン検出器の原理

ただし、SIS 素子では、そのエネルギーギャップが数 meV 程度と小さく、より長波長の遠赤外 ~ サブミリ波でのフォトン検出に適している。また、低いギャップエネルギーに対応して、動作温度は ~ 0.7K を必要とする。SIS 素子のサイズは入射電磁波の波長よりもはるかに小さい数 μm 程度であるため、電磁波結合にはアンテナを用いる。国立天文台は理化学研究所と共同で、Nb/Al-AlO_x/Al/Nb の接合を用いた $450\mu\text{m}$ 帯の超伝導フォトン検出器を開発している。現在の感度はトンネルリーク電流によるショットノイズでリミットされ、NEP ~ $10^{-16} \text{ W/Hz}^{1/2}$ であるが、絶縁膜質の改良によるリーク電流の低減によってさらに向上することが期待できる。この検出器の利点の一つは、波長帯がアンテナ構造により選択でき、半導体検出器が到達し得ない長波長にまで感度を有する点である。デバイス製作はリソグラフィによるため大規模アレイ化が容易であることも有利な点である。実際、国立天文台は南米チリの ASTE 望遠鏡に、1000 素子の同検出器の搭載を計画している。

2. 超伝導ボロメータ：

ボロメータは入射した赤外エネルギーを吸収体の温度変化として計測する最も古くから用いられてきた赤外検出器である。ボロメータは原理的には波長によらずエネルギー検出が可能であるため、広帯域の分光器との組み合わせや良い半導体検出器の存在しない領域での需要が高い。従来は Ge や Si を用いた半導体温度計を用いたボロメータが用いられてきた。その感度は赤外吸収体と熱浴との熱結合により大きく変化し、最も感度の高いものでは $NEP \sim 10^{-18} \text{ W/Hz}^{1/2}$ が得られている。しかし、近年、半導体に代わって、より敏感な超伝導体の温度計が用いられるようになってきた。これは、超伝導 ~ 常伝導の臨界温度近傍での非常に大きな抵抗変化を利用するものである。超伝導ボロメータは、国内では、JAXA 宇宙科学研究本部と都立大との共同で X 線カロリメータとしての開発が進められ、世界的に見ても進んだ開発レベルに達している。現行のデバイスは Ti/Au を 0.1K で動作させ、吸収体に Bi を用いるものである。その開発は、X 線の入射パルス信号からエネルギースペクトルを検出することを目的としているため、高速応答するよう熱結合パラメータが設定されている。しかし、仕様を若干変更すれば、赤外検出に転用することが容易に可能である。その場合の期待される感度は、 $NEP \sim 10^{-17} \text{ W/Hz}^{1/2}$ となり、すでに赤外検出器としても高いレベルにある。超伝導ボロメータのインピーダンスは $\sim 1 \Omega$ と非常に低いため、SQUID による電流読出しとなっている。多素子の信号を読み出すために、各国で SQUID の時間領域や周波数領域でのマルチプレクシングが研究されており、国内では 4 素子の読出しに成功している。今後は、256 素子の読出しに発展させる見通しとなっている。

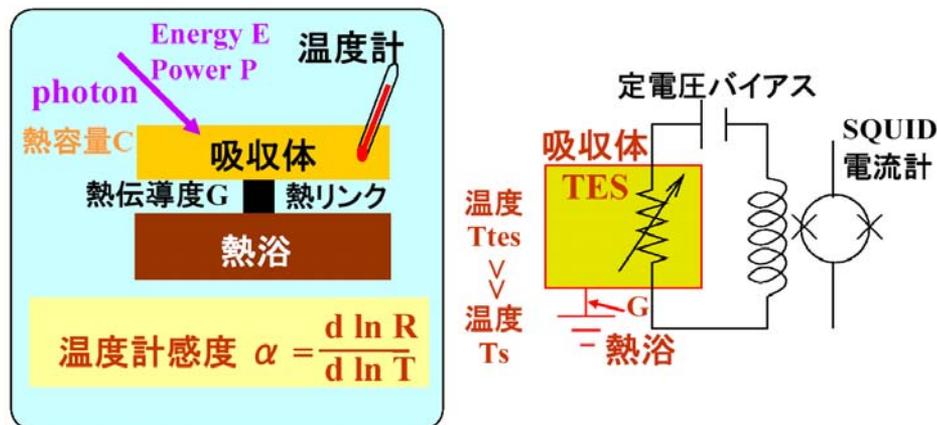


図 5.39: 超電導 TES ボロメータと SQUID 読みだし

量子ドット検出器の開発

近年の MBE によるデバイス作成技術やナノテクノロジーの進歩は、量子効果を積極的にデバイス機能として発現させる新たな道を拓いた。東大の小宮山グループは、これらの技術を駆使して GaAs 量子ドットを形成し、そのエネルギー準位を利用して遠赤外光子をカウントすることに成功した。このデバイス構造は、一種の単一電子トランジスタとなっており、1 個の電子遷移が大きな信号として現れるため、感度の点では究極とも言えるフォトンカウントを達成している (図 5.40)。

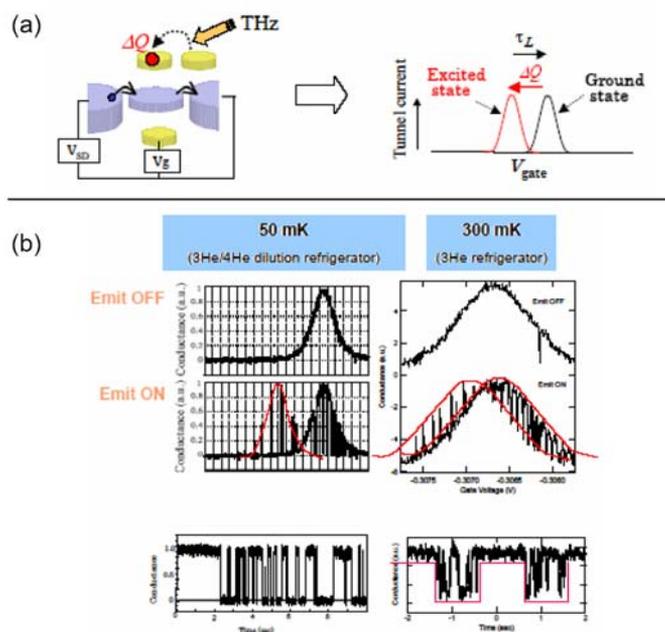


図8: 量子ドットフォトンカウンタの原理(a)、得られた遠赤外フォトンカウント信号(b)

図 5.40: 量子ドットフォトンカウンタの原理 (a)、および得られた遠赤外フォトンカウント信号

実際に用いられたドットのサイズは $1 \mu\text{m}$ 程度であり、遠赤外に相当するエネルギー準位は外部磁場の印加によるサイクロトロン準位となっている。磁場をかけない場合はプラズマ振動の準位となり、サブミリ波のフォトンカウンタとなる。もちろん、デバイスは波長よりもはるかに微小であるため、アンテナ結合型の検出器となっている。アレイ化に際しては、リソグラフィーによる平面構造のデバイスであるため、困難は見当たらない。一つの懸念は、動作に $\sim 0.1\text{K}$ の温度環境と $\sim 3 \text{ T}$ の磁場とを必要とすることである。もう一つは、他のフォトン検出器と同様、カウントレートが大きすぎると不感状態に陥るため、ダイナミックレンジが制限されることである。一般的な SPICA 搭載検出器としては、感度を多少落としてでも多数のフォトン进行处理できる方法の確立、あるいは、デバイス構造の変更が急務であろう。ただし、分散型分光器との組み合わせでは、その超高感度を発揮できる可能性がある。国内で発明された究極の感度を有するこの赤外検出器は、わが国の SPICA 衛星で天文応用の道筋をつけることが望ましい。

極低温読出し回路の開発

大規模検出器アレイの開発に伴って、極低温読出し回路、あるいは、極低温マルチプレクサの開発が必須である。近・中間赤外検出器に用いられるマルチプレクサや ASTRO-F 搭載遠赤外検出器では、極低温で動作することから MOSFET が採用されている。SPICA 搭載検出器においても、MOSFET の読み出し回路は高インピーダンスである光伝導素子とのマッチングが良く、依然として有力な候補である。しかし、遠赤外域の検出器の信号レベルは、そのフォトンエネルギーから考えられるように非常に弱いため、要求される読出しノイズもまた非常に低い。一般的に、MOSFET は J-FET などと比べるとノイズが大きいため、すでに述べた高感度の遠赤外検出器の能力を最大限に引き出せない可能性もある。NICT (旧 CRL) のグループは、より低ノイズ性能を目指して、極低温で動作する GaAs J-FET を用いた読出し回路の開発を進めている。現在まで

の評価では、MOSFETのアンプと同程度の消費電力の動作で、良好な静特性を示し、MOSFETと比較して1桁近くノイズが小さい、との結果が得られている。GaAs 検出器との熱的マッチングも良いと考えられ、大規模アレイへの採用に大きな期待が持たれる。超伝導 TES ボロメータはインピーダンスが低いため、信号読出しには SQUID が用いられている。将来の超高感度検出器では、より微細な構造のデバイスが登場することは疑いない。その場合、電磁波結合には波長に応じたサイズのアンテナが用いられ、デバイスはアンテナインピーダンスにマッチしたものとなる可能性が高い。そこでは、ノイズ性能の観点から、極低温ステージのアンプは電流アンプとすることが得策であろう。この意味でも、SQUID 読出し回路の開発は、次世代の検出器開発の要件である。量子ドット検出器はフォトンによりコントロールされる単一電子トランジスタ (SET) の一種と考えられる。単一電子トランジスタは、量子ドットのような微小な構造では、静電エネルギー (e^2/C) が非常に大きくなり、単一電子電荷でも系をコントロールするに充分である。しかも、このような状況では熱ゆらぎが影響しにくいことから、究極のノイズ性能が期待される。また、このようなフォトン/単一電子カウントの手法を用いれば、これまで常温回路で行ってきた A/D 変換が極低温ステージの検出器部ですでに済んでしまっていることもわかる。ただし、フォトンカウントの読出し速度の制限によりダイナミックレンジが制限されるため、莫大なフォトン数が望遠鏡により集められる SPICA 検出器への適用では何らかの工夫が必要である。横浜国大をはじめとするグループではジョセフソン素子 (超伝導素子) を用いた単一磁束量子 (SFQ) 回路を開発している。通常の電気回路では達成し得ない低消費電力で高速の回路を構成することができるため、近未来の IT として開発が進められている。すでに極低温において 200GHz で動作する論理回路が実現している。SFQ の超高速スイッチングとフォトンカウンタとの組み合わせで新しい光検出方法の創出が期待される。また、このような極低温高速回路の採用により、上に述べたようなフォトンカウンタの読出し速度制限によるダイナミックレンジの問題を打開できるであろう。

まとめ

ASTRO-F 搭載 Ge:Ga 検出器などの現行デバイスは、そのままでは SPICA 搭載検出器の仕様を満たさないため、これらに代わる高感度大規模アレイ検出器の開発が急務である。実際、その基礎開発は国内で着実に進みつつある。我々は、これらの成果を SPICA 搭載機器の開発につなげるため、遠赤外サブミリ波検出器ワークショップを不定期に開催している。上述の新型検出器はこれまでのワークショップにおける各グループからの提案内容であり、いずれも SPICA 搭載検出器の仕様を満たす可能性が高いものである (表 5.21)。

ここでは述べなかったが、上記以外にも、この波長域における新しい計測技術の提案がなされている。今後、SPICA への搭載という動機が加われば開発がさらに加速するであろう。SPICA ミッションのスタートとともに、各提案はさらに搭載機器として実用的な開発へと移行してゆく必要がある。

5.4.4 遠赤外線分光器

SPICA 遠赤外線分光器の特長

口径 3.5m という大型の冷却望遠鏡である SPICA を用いた遠赤外域での分光観測では、他のミッションでは到底得られない感度を実現することができる。具体的には、すでに図 1.4 に示したように、SPICA とほぼ同世代の赤外線望遠鏡である Hershell と比較して、感度において 2 桁以上も上回ることが期待される。Herschell も口径 3.5m の望遠鏡ではあるが、その温度は 70 K 程度であり、SPICA と比較して高温である。この「望遠鏡の温度の違い」が、非常に大きな、遠

表 5.21: 国内の遠赤外線検出器開発状況

	現在の感度 (NEP[W/rHz]) (期待される感度)	現在の素子数	動作温度
Ge:Ga (NICT、東大、ISAS)	-17 (-18)	100	2K
導波路型Ge:Ga (NICT)	- (-19)	1	2K
GaAs光伝導素子 (ISAS、東海大)	-16 (-17~-18)	1	1.5K
SISフォトン検出器 (国立天文台、理研)	-16 (-17)	9	0.7K
超伝導ボロメータ (ISAS線G、都立大)	-17 (-19)	4	0.1K
量子ドットフォトンカウンタ (東大)	-22~-21	1	0.3K

赤外域での感度の差をもたらしている。遠赤外線分光装置を開発する目的は、このような利を活かして、従来とくらべて全くクオリティの異なるサイエンスを展開することである。

遠赤外域を対象とする分光装置の開発では、推進体制にも特長がある。現在、Herschellの焦点面観測装置であるSPIREを開発したグループが中心となり、イギリス、フランス、オランダ、ドイツの4か国からなるコンソーシアムを形成して、検討をすすめている。遠赤外線分光装置に実績のあるグループが中心になって、より強力な望遠鏡であるSPICAに搭載する装置を開発することは、より確実に、効率的に開発を進める上でたいへん有益である。

光学系

表 5.22: 遠赤外分光器における分光方式の比較表。

Spectrometer type	Low/medium resolution	Wide Instantaneous Bandwidth	High Resolution	Imaging	Flight Heritage
Grating	Yes	Yes	By inserting F-P	Image slicer with small FOV	ISO LWS and SWS Herschel PACS
FTS	Yes	Yes	Yes Possibly with insertion F-P	Yes large FOV	Astro-F SPIRE
Tandem F-P	Yes	No	Yes	Yes	None (except KAO)

遠赤外線分光装置においても、他の波長域の焦点面観測装置と同様に、分光方式には複数の候補がある。具体的には、グレーティング分光器、フーリエ分光器ファブリ-ペロー分光器などがあるが、これらの分光方式の原理については、中間赤外線観測装置について述べた節を参照されたい。

遠赤外線分光装置で採用する分光方式について、これまでに行った比較検討の結果を、図 5.22 にまとめる。ここに示したうち、現段階では、フーリエ分光方式を最有力候補と考えている。その理由としては、比較表からわかるように期待できる原理的な性能が優れていること、フライト実績があること、に加えて、開発母体となるグループにHerschell/SPIRE、ASTRO-Fの開発経

験があること、が挙げられる。

現段階における遠赤外分光器の光学系の設計案、および望遠鏡、光学ベンチとの位置関係を、図 5.41 に示す。

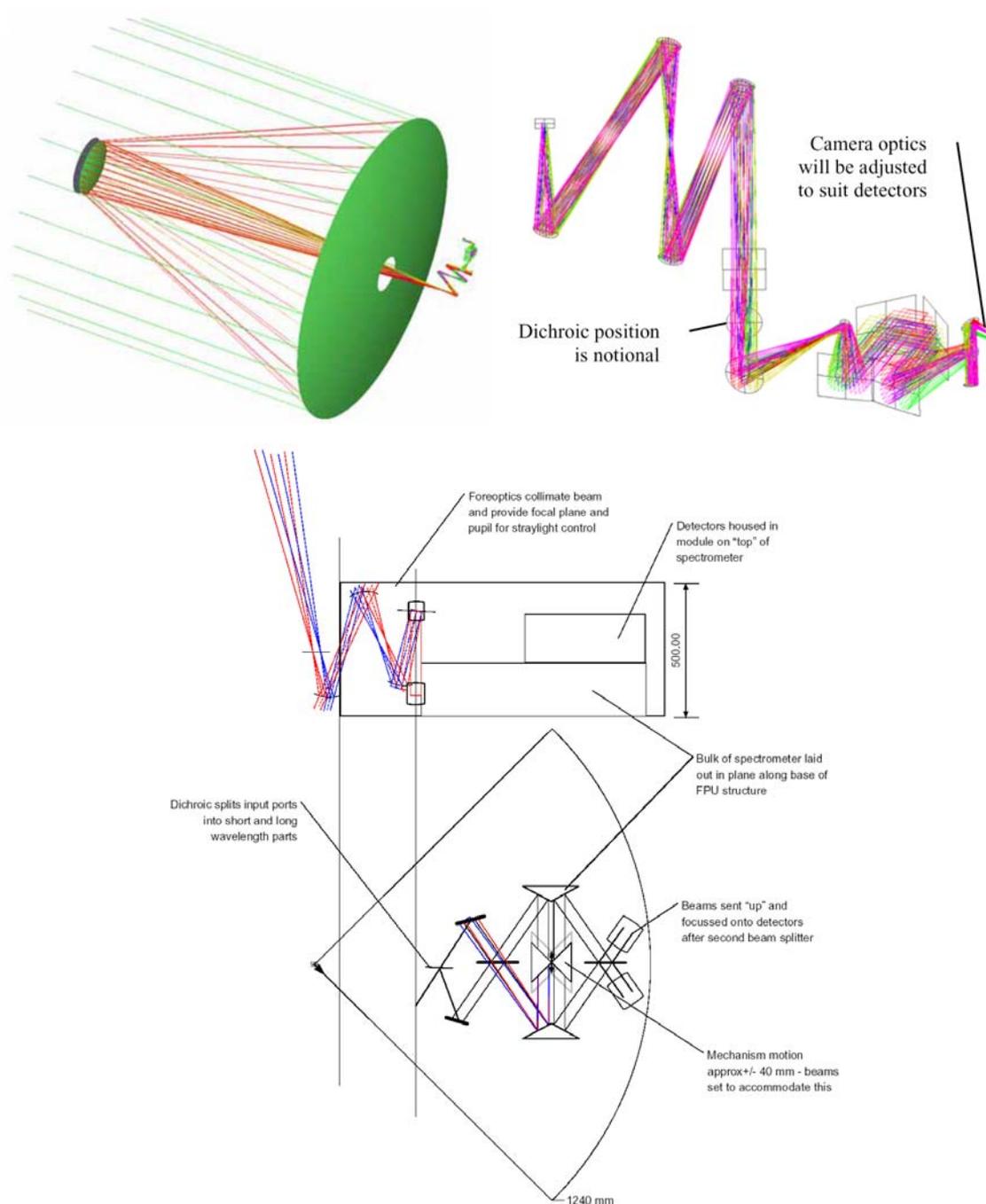


図 5.41: 遠赤外分光器の光学系、望遠鏡/光学ベンチとの位置関係

表 5.23: これまでに測定された遠赤外線検出器の感度

Detector	NEP (W/√Hz)	τ	Operating T (K)	Heritage
Photoconductor (e.g. Ga:Ge)	10^{-18}	~ 1 ms	< 2 K	ISO, Spitzer
Semiconductor bolometer	10^{-17}	~ 1 ms	300 mK	HERSCHEL
TES bolometer	$\sim 10^{-18}$	~ 1 μ s	100 mK	SCUBA2
Kinetic Inductance Detector	$< 10^{-16}$	~ 1 μ s	100 mK	None
Cold Electron Bolometer	$< 10^{-18}$	~ 10 ns	300 mK	None

検出器

極低温望遠鏡である SPICA では、検出器自体に起因するノイズが、観測能力の限界に大きく影響する。おもな遠赤外線検出器の候補について、これまでに計測された感度を、図 5.23 に示す。

観測対象となる波長域で、開発、運用が進んでいる検出器としては、Ge: Ga など不純物半導体を利用した光電導型検出器、あるいは TES (Transition Edge Superconducting) ボロメーターなどの超電導素子が挙げられる。前者は ISO、Spitzer、ASTRO-F、Herschellなどで実績がある。後者は、より大規模で高感度な検出器となり得るが、宇宙望遠鏡用に実用化するためには、さらなる開発が必要であり、実際にヨーロッパで開発が進められている。

5.4.5 技術成熟度および フェーズ A での開発課題

多くの基本的な技術は ASTRO-F で開発されており、SPICA ではこれを発展させることで目標を達成することになる。ただし、大規模アレイの開発においてはこれまでとは異なるアイデアが必要と考えられ、最大の開発項目となる。いくつかのアイデアを元に現在開発を進めているが、要求仕様を満たすフォーマットを実現する目処はまだ得られていない。一方検出器の感度であるが、ASTRO-F/FIS で採用した検出器で LW 検出器はほぼ要求を満たしているが、SW 検出器については 1 桁以上の性能改善が必要となる。FIS で採用した検出器の性能は、読み出し回路の性能が支配的になっているため、読み出し回路の改良が重要である。これは大規模アレイの実現とも関連する問題で、並行して低ノイズ極低温読み出し回路の開発を進めている。一方、観測装置全体の光学系も大型化される。これにより、フィルタ類も大型になり、強度的にも性能的にも優れたフィルターの開発が必要である。

検出器のアレイフォーマット、ピクセルサイズがほぼ確定しているので、この条件に従って光学系の設計を進めることが可能である。回折限界の結像性能を実現しつつコンパクトな光学系を実現するよう、まず光学設計ソフトなどを利用して基本設計を始める。

表 5.24 は、各要素技術について、現時点での技術成熟度および フェーズ A 完了時の見通しを評価してまとめたものである。あわせて、開発項目のまとめを以下に示す。

技術成熟度

フェーズ A での開発課題

- 検出器 50 - 110 μ m 帯 :
大フォーマット化可能なデザインの検証モデル試験
- 検出器 110 ~ 200 μ m 帯 :

表 5.24: 遠赤外線観測装置に関連する技術の成熟度

項目	現時点での状況	フェーズ A 完了時の見通し	備考
検出器 50 - 110 μm 帯	3	5	ASTRO-F/FIS の改良型 (大フォーマット化)
検出器 110 ~ 200 μm 帯	2	5	ASTRO-F/FIS の改良型 (大フォーマット化)
極低温読出し回路	3	5	ASTRO-F/FIS の発展型 (低雑音、大フォーマット化)
波長帯選択フィルター	5	7	基本は ASTRO-F/FIS、大型化が必要
撮像装置光学系	5	7	回折限界を実現する光学系、フィルター面の反射の影響評価
分光装置光学系	5	7	ASTRO-F、Herschel/SPIRE の実績

大フォーマット化可能なデザインの検証モデル試験

- 極低温読出し回路 :
低雑音化のための回路設計と検証モデル試験および大規模アレイ化のためのマルチプレクサ等の設計
- 波長帯選択フィルター :
実際に利用するものについて実証レベルのものを開発
- 撮像装置光学系 :
SPICA 用のシステムデザイン

5.5 サブミリ波観測機器

これまでに述べた波長域 ($\leq 200\mu\text{m}$) だけでなく、サブミリ波 ($200\text{--}600\mu\text{m}$) も我々の宇宙を理解する上で決定的に重要である。サブミリ波における分光撮像装置については、米国 NASA では 2004 年夏に Origins Probe Program の 9 つのミッションの一つとして採択され、2005 年 4 月期限で概念設計がすすめられている。検討チームは、NASA/JPL 及び ARC、カルテク、コロラド大学、コーネル大学などの数 10 名からなり、日本・韓国との隔週電話会議を通じて精力的に設計が進められている。本節ではこのチームで提案されている遠赤外・サブミリ波分光装置 BLISS (Background-Limited Infrared Submillimeter Spectrograph) の概要を説明する。

5.5.1 冷却望遠鏡の威力

SPICA は、 $\sim 4\text{K}$ まで冷却された望遠鏡を用いる。これは NASA が中心に計画されている JWST や、ESA が中心に進められている Herschel に比べて、極めてユニークな特長である。この特長は、もちろん広帯域フィルターによる撮像観測においても、高感度を実現するのに有利に働き、例えば Herschel 搭載の撮像装置にくらべて、極めて速くコンフュージョン限界に到達できる。しかしながら冷却望遠鏡の最大の威力は、分光分解能 $R \simeq 1000$ 程度の中分散分光観測において発揮さ

れる。なぜならば、回折格子による波長分散を利用する分光観測装置の場合、検出器上に到達する背景放射光子量は、 R に反比例して極めて狭い波長帯域に絞られているおかげで極めて少なくすることができ、そのショット雑音が無視できるほどになる。従って、もしそれにみあう高感度センサーが実装できれば、これまでの観測装置では到底不可能な極めて高い感度が実現できるのである。

図 5.42 に、SPICA にこのような分光装置を搭載した場合の予想されるスペクトル線に対する感度を、他のミッションのそれと比較したものである。一番下の赤い実線が、1 時間の露光観測で到達できる（検出器雑音がゼロの場合の）究極の検出限界、その上の橙色の破線は、検出器の雑音等価電力（NEP）が、それぞれ 3×10^{-19} , $1 \times 10^{-19} \text{ W Hz}^{-1/2}$ の場合の到達できる検出限界である。ただ、分光系を回折格子ではなく、フーリエ分光のような広い波長帯域を同時分光している場合は、回折格子の場合と比較して 1 - 2 桁感度が下がることになる。それでも、Herschel の装置や、Spitzer（NASA が 2003 年 8 月に打ち上げた 85cm の冷却赤外線望遠鏡）や SOFIA（飛行機天文台）の装置が達成する感度に比べてはるかに高い。なお、 $R \simeq 1000$ の分光能力があれば、複数の天体が同じ方向に重なって見えている場合でも、赤方偏移で区別することが可能になるので、基本的にコンヒュージョン限界で制限されないと考えられる。

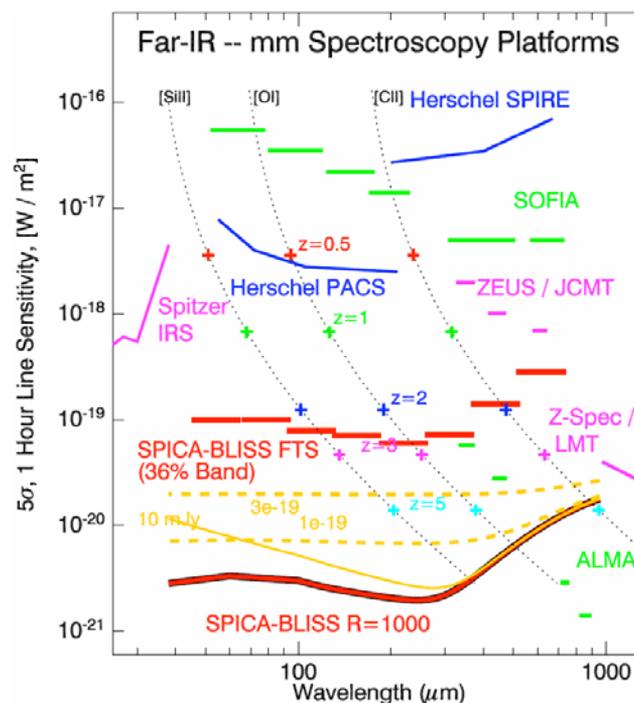


図 5.42: SPICA 搭載遠赤外サブミリ波分光装置のスペクトル線検出感度と他のスペース・地上の分光装置のそれとの比較。スペースで冷却望遠鏡を用いて観測する SPICA では、圧倒的に高い感度が得られる。

5.5.2 BLISS の概要

BLISS は、上述の SPICA の特長を活かし、波長 40 - 600 μm という遠赤外・サブミリ波において背景放射限界で決まる超高感度分光を、できるだけ広い波長域を同時に分光する、という基本コンセプトに基づいてデザインされている。

5.5.3 BLISS 検出器系

まずサブミリ波における検出器技術としては、電磁波を光子として検出する Direct Detection 方式と波として検波する Heterodyne 方式がある。後者は、非常に高い波長分解能を得ることができ、微弱で大変細い星間スペクトル線を検出する場合には有利であるが、一般に、量子雑音という原理的限界が、冷却望遠鏡の背景放射限界よりもはるかに高く、かつ同時に広帯域を分光することにも適さない（最大でも波長の 2% 程度の帯域幅しか実現できていない）ので、BLISS のコンセプトを満たさない。次に、Direct Detection 方式の場合、以下のような検出器が想定される：

- 光電導型検出器： Ge:Ga など半導体の不純物伝導を利用するもの。必要な光学的厚みを得るために比較的大きな体積が必要で放射線ヒットに比較的弱い。波長 $200\mu\text{m}$ までならば、実在し、衛星搭載実績もあるが、それ以上の波長については基礎開発が必要となる。
- BIB 型検出器： 光電導型の不純物ドーパ量を増やして吸収率をあげる一方で、ホッピング電流をブロックするための純粋半導体層を組み合わせたもの。この波長域において、低暗電流かつ十分な光応答をしめす検出器は未だ実現されておらず、基礎開発が必要である。
- ボロメータ： 温度変化に対する抵抗率の変化の極めて大きい物質により、赤外線光量に応じた微小な温度変化を測定する方式。赤外線に対する吸収率の良い物質を選べば原理的にはどの波長域でも使えるという利点があるが、検出感度を上げるには、超低温 ($<0.1\text{K}$) が必要である。

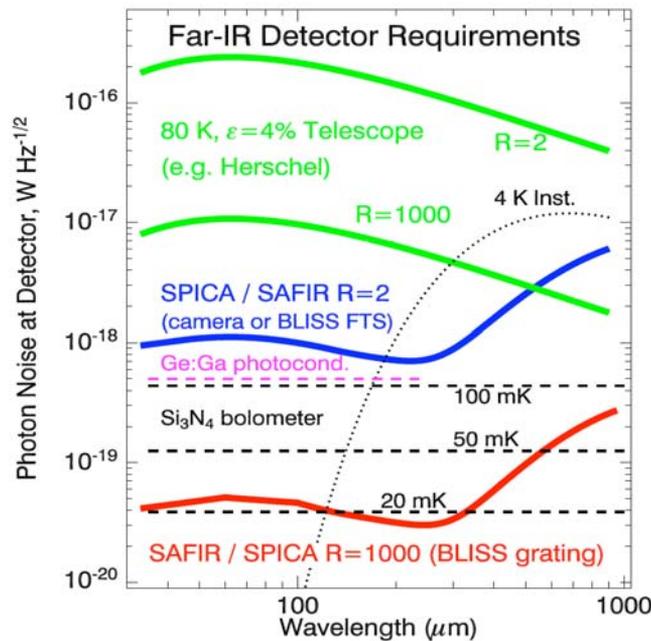


図 5.43: BLISS に用いられる検出器に必要な性能（縦軸は、雑音等価光量 $[\text{W Hz}^{-1/2}]$ ）。暖かい望遠鏡である Herschel（緑線）に比べて超低背景放射環境の SPICA の場合、特に分光分解能 $R=1000$ の場合に、極めて高い検出器性能が要求される。

このように、BLISS がめざす波長帯すべてをカバーできるような検出器としては、ボロメータ以外には現状ではありえない。さらに、前節で述べたように他のミッションにはない SPICA の最大の魅力は、この波長域での超低背景放射環境にある以上、これまでになく高い検出器性能

が要求される。これを定量的に示したのが、図 5.43 である（縦軸は、検出器での雑音等価光量：NEP [$\text{W Hz}^{-1/2}$])。光学系案によって要求される検出器性能は異なり、フーリエ分光装置案の場合で、 $\text{NEP} \leq 1 \times 10^{-18} [\text{W Hz}^{-1/2}]$ 、回折格子分光装置案の場合 $\text{NEP} \leq 0.5 \times 10^{-19} [\text{W Hz}^{-1/2}]$ となる。

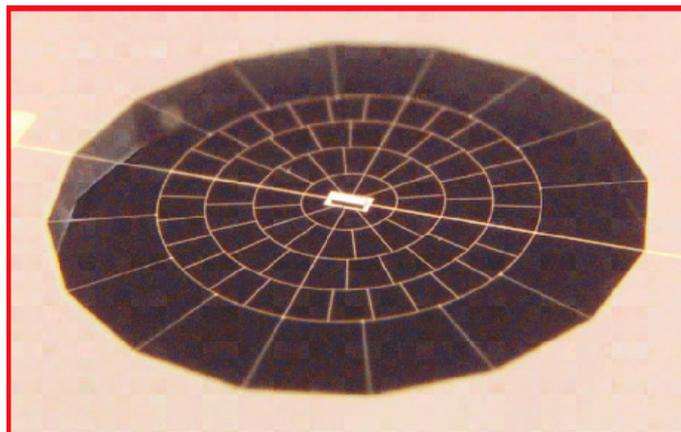


図 5.44: SPIDER web 型の bolometer

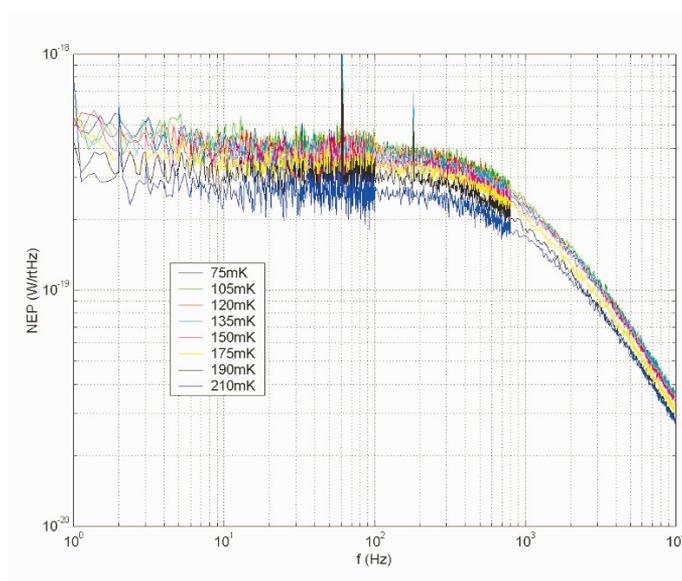


図 5.45: TES 型 bolometer で達成された NEP

SPICA 用 bolometer として提案されている spider web bolometer の構造を図 5.44 に示す。これは、赤外線に対しては十分な吸収効率をもちながら、cosmic ray に対しての反応断面積を大幅に低減させたものである。この方式の吸収体を TES (Transient Edge Sensor) と組み合わせて作動させ、図 5.45 のように、すでに $3 \times 10^{-19} \text{ W Hz}^{-1/2}$ という非常にすぐれた NEP を達成している。

図 5.43 に示したように、SPICA-BLISS では、20-50mK という超低温にボロメータを冷却する補助冷却系の開発が必須となる。方式としては、X 線天文衛星等用に開発実績のある断熱消磁冷凍機を 2 段構成にするか、あるいは He^3 吸着冷凍機と断熱消磁冷凍機を組み合わせた方式が考えられる。これらの方式を衛星搭載を前提として技術実証していくことがフェーズ A での重要な課題となる。

5.5.4 BLISS 光学系

BLISS の光学系案には、大きくわけて 2 種類が考えられている。一つは回折格子を使用するコンセプト、もう一つはフーリエ分光装置案である。どちらの案でも 40-600 μm という広い波長域で同時に分光スペクトルを取得できる。

回折格子を使用するコンセプトとして、従来の Echelle 反射型回折格子はもちろん一つの候補であるが、SPICA 焦点面で割り当て可能な空間体積の制約から、搭載はかなり困難であると考えられる。そこで、BLISS では、WaFIRS (Waveguide Far-Infrared Spectrometer; 導波路型遠赤外分光) というコンセプトを検討している。WaFIRS は、入射スリットからの光を曲線回折格子で分散させ各波長毎に円状焦点面に結像するシンプルな光学系 (Rowland 1883) を、2 枚の導体に挟まれた 2 次元平面における電磁波伝播に応用したものである (詳しくは、Bradford et al. 2003)。これにより光学系が平面状となるので必要な体積が画期的に小さくなる。すでに、NASA/JPL を中心として波長 1-1.6mm での地上観測用広帯域分光撮像装置が開発され、分光分解能 350、回折効率 60% という性能が実現されている (Naylor et al. 2003)。WaFIRS は、このプロトタイプの実績をもとに、波長 40-600 μm を 6 つの波長帯域に分割し、それぞれに、Waveguide タイプ光学系と検出器アレイを配置する。この概念図を図 5.46 に示す。

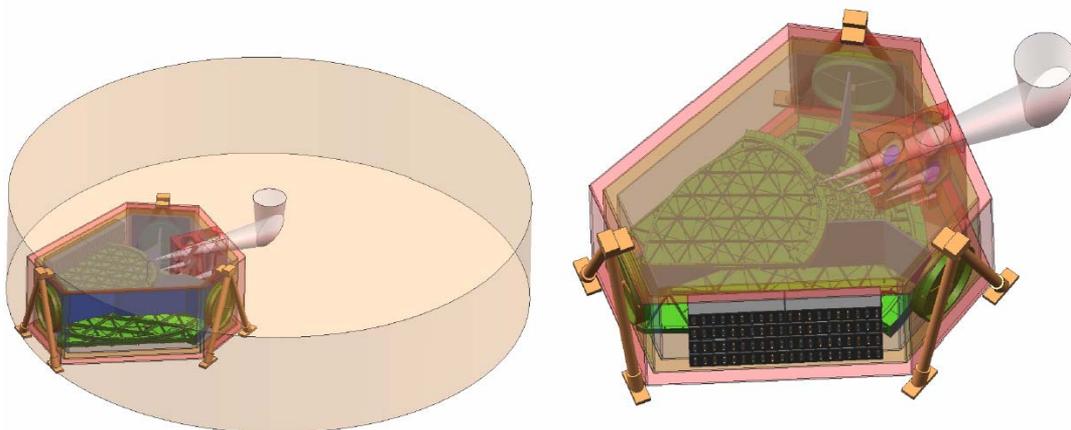


図 5.46: SPICA 搭載遠赤外サブミリ波分光装置 (BLISS) の光学系案 (1)。回折格子を使用するコンセプトに 2 種類あるが、ここでは Waveguide (導波路) タイプ光学系の場合のデザインを示す。図中の円柱は、焦点面観測装置の取り付けスペースを表しており、そのサイズは 2500 mm, 高さ 500 mm である。

もう一つはフーリエ分光装置案は、Herschel/SPIRE で用いられた Mach-Zehnder 型フーリエ変換分光系である (Swinyard et al. 2003)。この案の強みは、既に衛星搭載用の開発実績があることだが、検出器に対する背景放射量が回折格子案に比べて非常に大きく、従って検出感度は比較的低い。しかし 2 次元検出器アレイと併用することで、天空の視野領域全体を一挙に分光する、という長所がある。従って技術的なトレードオフだけでなく目標とするサイエンスからも、どちらを目指すべきかを判断する必要がある。この案の概念図を図 5.47 に示す。フーリエ分光法は、ASTRO-F にも採用された方式で、我々 SPICA プロジェクト推進チームもなじみの深いものであり、広帯域かつ高効率という課題はあるものの実現性はかなり高い。

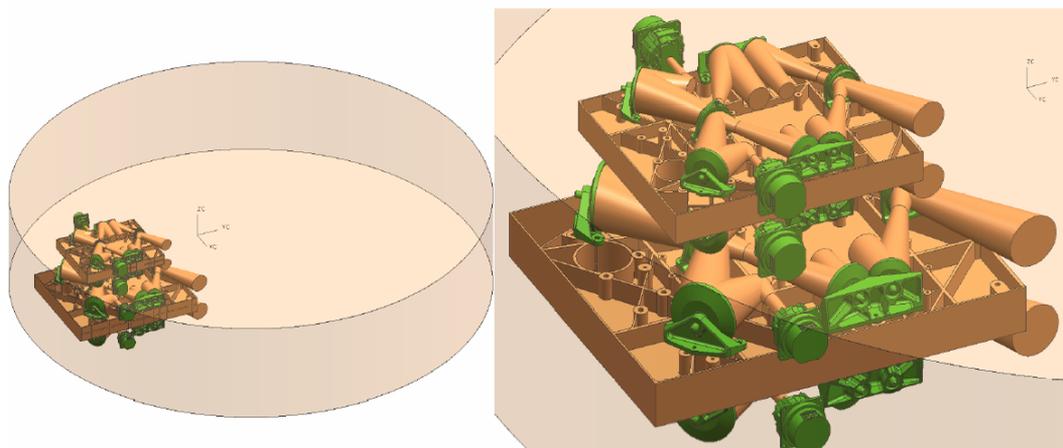


図 5.47: SPICA 搭載遠赤外サブミリ波分光装置 (BLISS) の光学系案 (2)。フーリエ分光案。長波長帯 (下段) 用と短波長帯用それぞれ独立な分光装置である。図中の円柱は、焦点面観測装置の取り付けスペースを表しており、そのサイズは 2500 mm, 高さ 500 mm である。

5.5.5 技術成熟度およびフェーズ A での課題

技術成熟度

検出器方式はボロメータ方式に特化すれば、必要なレベルへの道筋は見えてきているが、さらにもう一桁上の性能へ達することを実証する必要がある。分光・光学系は、フーリエ分光法については、ほぼ問題なく搭載品を開発できる目処がたっているが、さらに高感度が得られる回折格子タイプ WaFIRS については未だデザインも含めてこれからの課題である。サブミリ波観測装置に関連する技術の成熟度を、表 5.25 に示す。

表 5.25: サブミリ波観測装置に関連する技術の成熟度

項目	現時点での状況	Phase-A 完了時の見通し	備考
検出器 40-200 μm 帯	5	5	ISO,SST,ASTRO-F Heritage
検出器 200-600 μm 帯	4	5	あと一桁感度をあげる必要
観測装置用補助冷却系	5	5	X 線衛星では技術実証済み
分光・光学系 FTS 型	5	5	Herschel,ASTRO-F Heritage
分光・光学系 Grating 型	4	5	この波長での実証が必要

フェーズ A での開発課題

BLISS は米国の計画であり、SPICA が、我が国で Phase-A に進むことが認められれば、ほぼ確実に米国での予算獲得が見込まれている。特に課題としては、超高感度の検出器系と、装置全体や検出器に最適な温度を実現する冷却系の具体案の開発が挙げられる。次に、分光・光学系については、ここ 1 - 2 年以内に NASA/JPL において開発された WaFIRS のプロトタイプが地上望遠鏡に取り付けられ実際に観測が行われると思われ、デザインの実証はされると考えられるので、

これを BLISS の観測波長域にスケールリングできるか否かがフェーズ A での重要な課題となる。主な開発項目を、以下にまとめる。

- 超高感度検出器系の開発:
現状で最も有望なボロメータアレイで、現在達成できている感度のさらに一桁上をめざす。
- 装置全体・検出器に最適な温度を実現する冷却系の具体化:
断熱消磁冷凍機 / He³ 吸着冷凍機を併用し 20mK 達成をめざす。
- 分光・光学系の開発:
Waveguide 回折分光方式を、遠赤外線波長で実用化すること。

5.6 近赤外線撮像装置

波長 2-5 μm の近赤外線波長域は、赤方偏移した遠方銀河の星の成分を調べるには最も適した波長域である。過去の宇宙望遠鏡 HST では、望遠鏡が常温にあったため、この波長域では、あまり感度の良い観測はできなかった。

SPICA は口径 3.5m という大口径の冷却望遠鏡であり、近赤外線領域においても大きな威力を発揮する。例えば、現在可視光線で見えている最遠の銀河の位置 ($z\sim 7$) においても、銀河を構成しつつある $10^9 M_{\odot}$ 程度の質量の要素 (building blocks) の分解が可能になる。

そこで、近赤外線の観測装置を SPICA に搭載する可能性を、オプションとして検討している。

ただし、この波長域の観測を本格的に行なうためには、現在想定しているよりも高精度の望遠鏡と姿勢制御とが必要となる。さらに JWST の観測波長域とも重複することになる。したがって、JWST よりも、かなり広い視野の観測を可能にするなど、なんらかの特色を持たせる必要がある。