

## 第7章 観測装置

ここでは、TAO 望遠鏡運用当初に搭載することを考えている観測装置について、その仕様を簡単に述べる。搭載する観測装置は、近赤外域、中間赤外域、可視域のものがあり、それぞれ最適な焦点に設置される（第6章も参照のこと）。

### 7.1 近赤外 2 バンド同時撮像分光装置

近赤外線観測装置は TAO 望遠鏡のサイエンスの大部分を担う最も重要な観測装置となる。そのため、汎用性に対する条件を満たしつつも TAO 望遠鏡の独自性を打ち出す必要がある。

そこで、我々は以下に述べる 2 バンド同時撮像分光装置を提案する。

#### 7.1.1 条件

近赤外域で、TAO 望遠鏡は以下の二つの大きな特徴を持つ。

- 高い標高と低い水蒸気量 (1.27mm 以下の日が 75%) のため、赤外バンド間の透過率が良い (図 7.1)。
- $12'\phi$  と比較的広い視野を得られる。

また、現在の技術的な要件として以下の 2 点が挙げられる。

- 近赤外波長域では  $2048 \times 2048$  ピクセルフォーマットのアレイ検出器 (HAWAII2) が利用できる。
- 近年の微細加工技術の急速な進歩で、マイクロシャッターアレイが数年内に利用できるレベルにまで到達すると予想される。

## 7.1.2 概要

一般的な赤外カメラへの要望を満たしつつもこれらの特徴を活かした観測装置として、我々は以下のような2バンド同時撮像分光カメラを考案した。

これは、赤外ナスミス焦点の $12'\phi$ の視野のうち、 $5' \times 10'$ を用い、さらに $1.37\mu\text{m}$ カットのダイクロミックミラーによって $0.7\sim 1.37\mu\text{m}$ と $1.45\sim 2.5\mu\text{m}$ の2波長帯を同時撮像/多天体分光を行うというこれまでに無いアイデアの観測装置である。図7.2に、光学系レイアウトの簡略図を示す。また、表7.1に仕様を示す。

望遠鏡から入射した光はスリットを通過してコリメータで平行光に変換された後、ダイクロミックミラーにより2個のビームに分割される。それぞれの光線は瞳像を作り、フィ

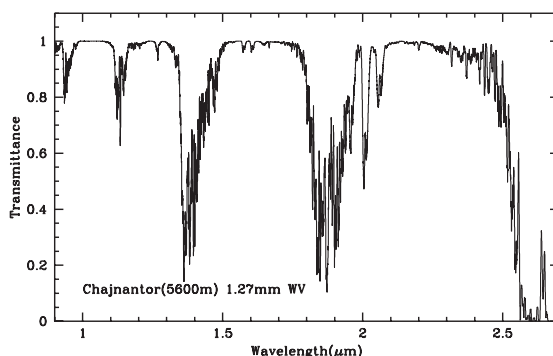


図 7.1: Chajnantor 山頂での近赤外域の大気の透過率。水蒸気量  $1.27\text{mm}$ 、標高  $5600\text{m}$  として ATRAN で計算したもの。

検出器	HAWAII2-RG $\times$ 4 個
入射 F 比	F/12
最終 F 比	F/3.9
スリット	マイクロシャッターアレイ/ロングスリット
使用波長域	$0.7 - 2.5\mu\text{m}$ (撮像時)
波長分解能	1000 (スリット幅 $1.''0$ )
ピクセルスケール	$0.''15$ /pix
視野	$12'\phi$ (撮像時) $5' \times 5'$ (多天体分光時)
設置場所	赤外ナスミス焦点
分光素子	グリズム ( $0.9 - 1.35\mu\text{m}$ , $1.45 - 2.5\mu\text{m}$ )
波長分割	ダイクロミックミラーにより $1.37\mu\text{m}$ で 2 光路に分割
多天体分光	マイクロシャッターアレイにより最大 30 天体同時分光

表 7.1: 近赤外 2 バンド同時撮像分光装置の光学レイアウトの仕様

ルター/グリズムを通過した後に検出器面上に結像される。検出器には 2K×2K フォーマットの HgCdTe アレイ検出器を用い、各焦点を 2 個ずつで覆って計 4 個用いる。また、視野の中心の 5'×5' の領域にはマイクロシャッタアレイを挿入することにより、最大で 30 天体の多天体同時分光を行うことが可能となる。

これによって得られる利点を以下に並べる。

- 多色サーベイの観測効率は実質的に 2 倍となるため、8 メートル級の望遠鏡にも劣らないサーベイ能力を得ることができる。
- 0.7 ~ 2.5 $\mu\text{m}$  の波長域を一気に分光することによってバンド間のキャリブレーションが不要となり、信頼度の高い広い波長に渡るスペクトルを得ることが可能となる。

### 7.1.3 光学系

光学系の設計案の諸元を表 7.2 に、レイアウトを図 7.3 に示す<sup>1</sup>。

また、撮像時のスポットダイアグラムを図 7.4 に、分光時のスポットダイアグラムを図 7.5~7.8 に示す。全波長に渡って良好な結像を示しているのが分かる。

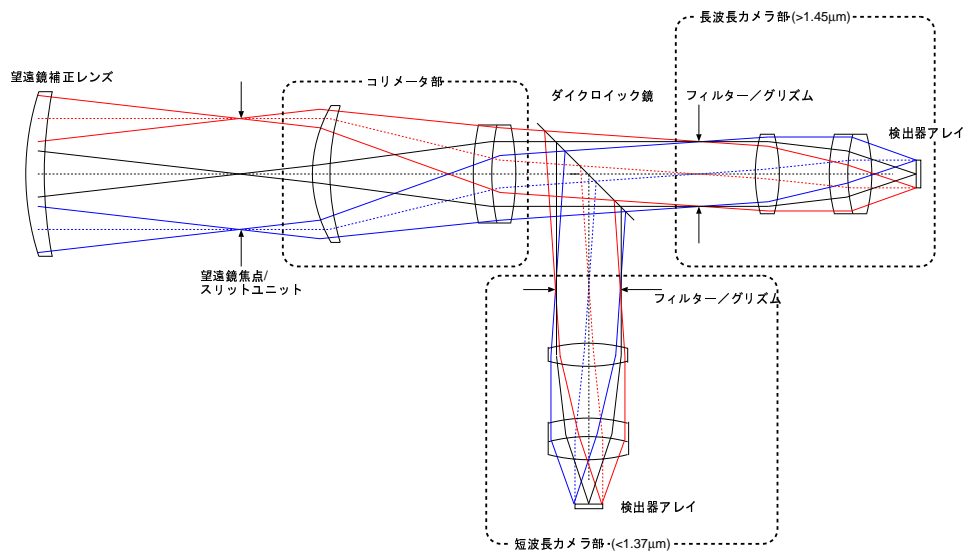


図 7.2: 近赤外 2 バンド同時撮像分光装置の光学レイアウトの概念図

<sup>1</sup>(株) Genesia 池田優二 による。

全長	1245mm (青カメラ) , 1221mm (赤カメラ)				
	焦点距離	660mm (@1.8 $\mu$ m)			
コリメータ系	有効最大径	283mm			
	構成	球面レンズ 5 枚 (CaF <sub>2</sub> , S-FPL51, ZnSe, Silica, BaF <sub>2</sub> )			
	焦点距離	220mm (@1.1 $\mu$ m)			
カメラ系 (青)	構成	球面レンズ 6 枚 (BaF <sub>2</sub> , S-TIH14, BaF <sub>2</sub> , S-TIH14, S-LAL8, S-BSM16)			
	焦点距離	220mm (@1.8 $\mu$ m)			
カメラ系 (赤)	構成	球面レンズ 6 枚 (BaF <sub>2</sub> , S-TIH14, CaF <sub>2</sub> , S-TIH14, S-BSM16, S-BSL7)			
瞳径	55mm				
		材質	溝本数	$\alpha$	$\lambda/\Delta\lambda(0.43''\text{slit})$
グリズム	(a) <i>i</i> z バンド	ZnSe	310 mm <sup>-1</sup>	9.4°	1163
	(b) <i>J</i> バンド	ZnSe	215 mm <sup>-1</sup>	10.5°	1178
	(c) <i>H</i> バンド	ZnSe	171 mm <sup>-1</sup>	10.8°	1180
	(d) <i>K</i> バンド	ZnSe	126 mm <sup>-1</sup>	11.1°	1180

表 7.2: 光学パラメータ諸元

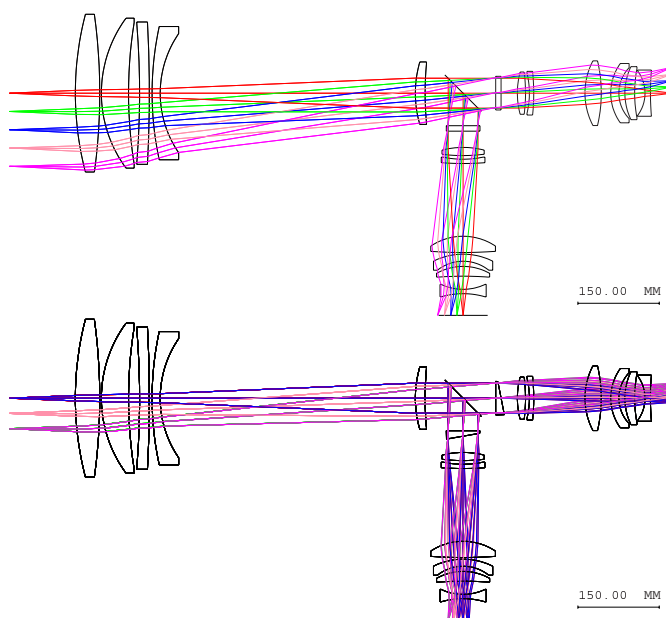


図 7.3: 撮像時 (上) と分光時 (下) の光学レイアウト



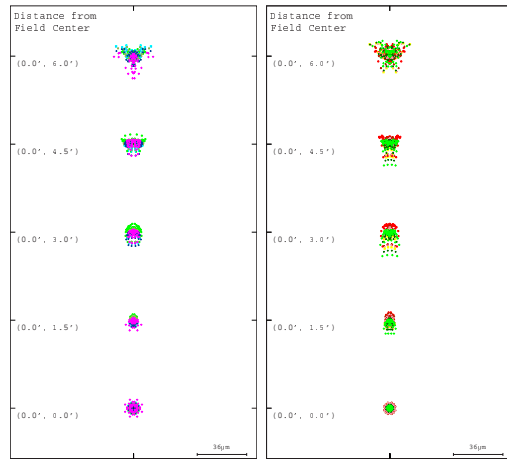


図 7.4: 撮像時のスポットダイアグラム。右が青、左が赤カメラ。

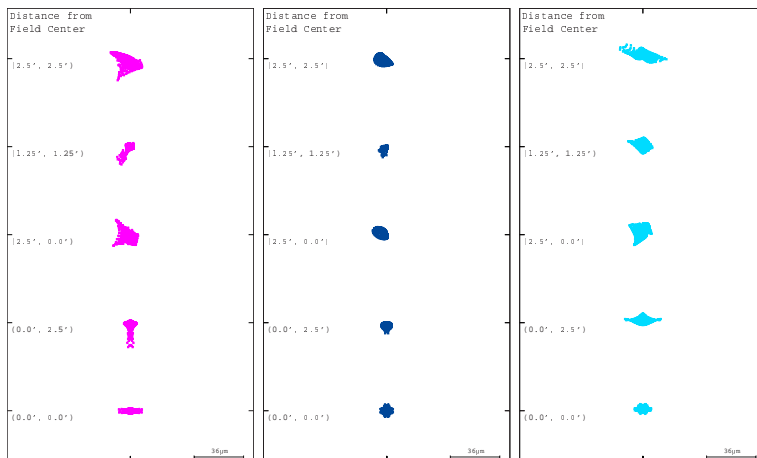


図 7.5: 青カメラで分光時のスポットダイアグラム。左から  $0.7\mu\text{m}$ 、 $0.8\mu\text{m}$ 、 $0.95\mu\text{m}$  のとき。

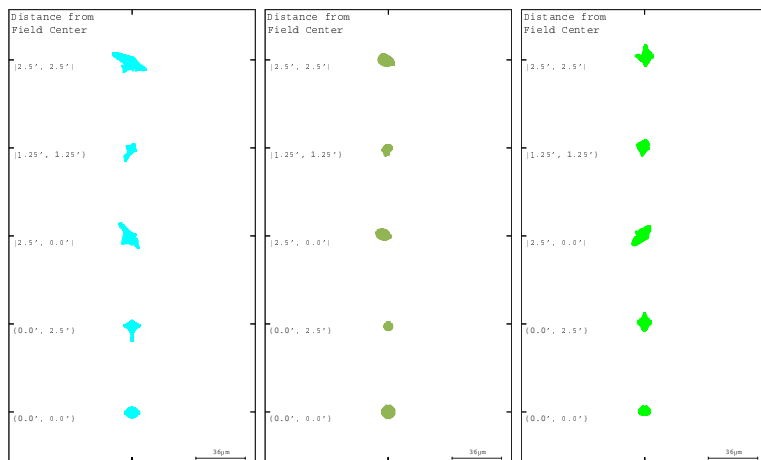


図 7.6: 青カメラで分光時のスポットダイアグラム。左から  $1.1\mu\text{m}$ 、 $1.25\mu\text{m}$ 、 $1.4\mu\text{m}$  のとき。

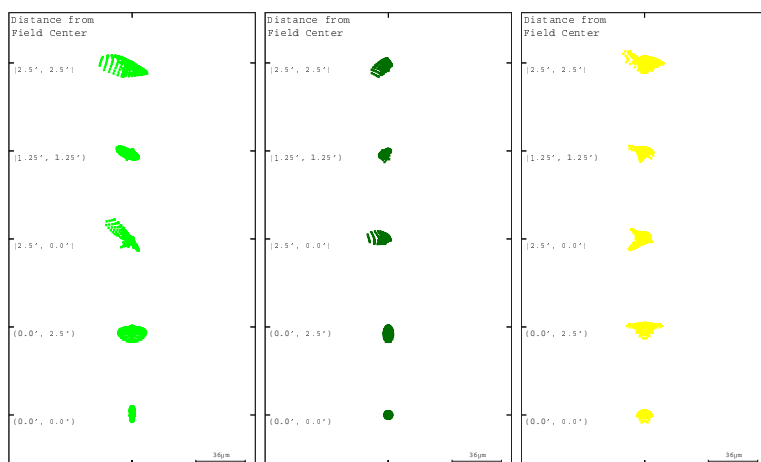


図 7.7: 赤カメラで分光時のスポットダイアグラム。左から  $1.4\mu\text{m}$ 、 $1.6\mu\text{m}$ 、 $1.8\mu\text{m}$  のとき。

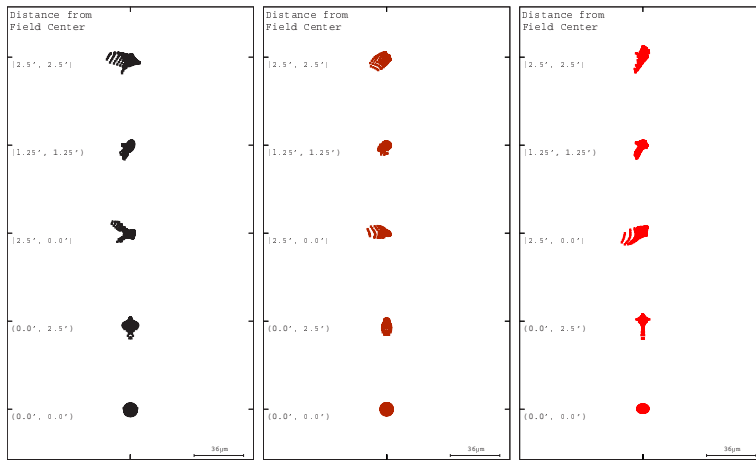


図 7.8: 赤カメラで分光時のスポットダイアグラム。左から  $2.0\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 、 $2.4\mu\text{m}$  のとき。

### 7.1.4 検出器

用いる検出器としては  $2\text{k}\times 2\text{k}$  フォーマットの HgCdTe の半導体アレイ検出器を想定しており、現時点での候補は Rockwell Scientific 社の HAWAII2-RG か Raytheon 社の VIRGO のいずれかが挙げられる。

その仕様は以下の表 7.3 の通りである。

HAWAII2-RG は短波長側の感度が非常に良く、実質的に可視カメラとして用いることも可能となる。しかし、 $2.5\mu\text{m}$  を超えて  $5\mu\text{m}$  まで感度があるために観測装置の遮光やフィルター性能への要求が大きくなって、製造コストにも跳ね返って来る。また、 $30\text{K}$  付近で駆動させる必要があるために冷凍器の性能への要求も大きい。

VIRGO は  $2.5\mu\text{m}$  より長波長の感度は無いので遮光やフィルターへの負担は少なく、

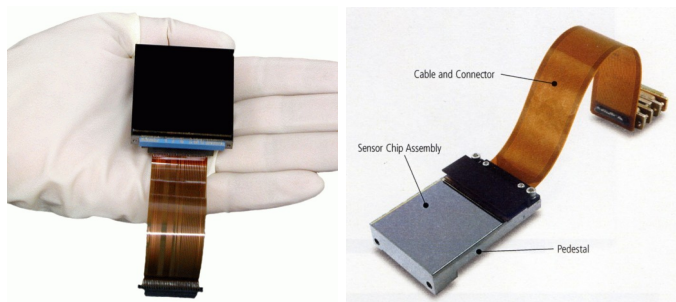


図 7.9: Rockwell Scientific 社の HAWAII2-RG (左) と Raytheon 社の VIRGO (右)

パラメータ	HAWAII2-RG	VIRGO
ピクセルサイズ	18 $\mu\text{m}$	20.0 $\mu\text{m}$
最大電荷蓄積量	$1.0 \times 10^5 \text{ e}^-$	$> 2.0 \times 10^5 \text{ e}^-$
最大読み出し速度	$< 5 \text{ MHz}$	280 kHz
読み出しノイズ (CDS)	$< 15 \text{ e}^-$	$< 20 \text{ e}^-$
量子効率	$> 65\%$	$> 70\%$
有効波長	0.3 – 5.3 $\mu\text{m}$	0.85 – 2.5 $\mu\text{m}$
暗電流	$< 0.1 \text{ e}^-/\text{sec}$ (50K)	$< 4 \text{ e}^-/\text{sec}$ (78K)
消費電力	$< 4\text{mW}$ (@ 100 kHz)	7mW (@ 280 kHz)
読出し口数	1, 4, 32	4, 16

表 7.3: Rockwell Scientific 社の HAWAII2-RG 検出器と Raytheon 社の VIRGO 検出器の性能諸元

液体窒素温度 (77K) 付近での駆動も可能で、非常に扱いやすい特性がある。しかしながら、短波長の感度は  $0.9\mu\text{m}$  足らずまでしかないために可視カメラとして用いることはできない。

### 7.1.5 マイクロシャッター

この数年の微細加工技術の進歩により、 $100\mu\text{m}$  程度のシャッターのアレイを作り、その開閉を個別に制御することが可能なマイクロシャッターアレイの製作が可能となりつつある。現時点で NASA-GSFC のチーム<sup>2</sup>の開発が最も進んでおり、実際に駆動可能なデバイスの製作も開始している。図 7.10 にそのデバイスを示す。このようなデバイスを用いることによって、現在は手動で行われている多天体スリットマスクの作成と、そのマスクの観測装置への取り付けと作業が不要となる。これにより、非常に高効率で、しかも容易に多天体分光観測を行うことが可能となる。

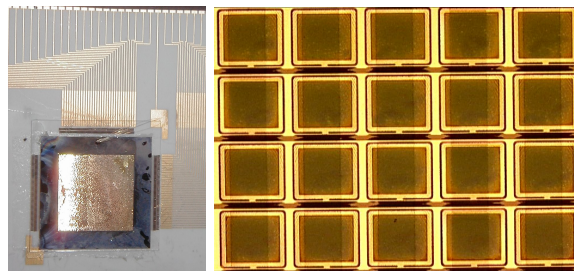


図 7.10: GSFC で開発中のマイクロシャッターアレイ (左) とその電子顕微鏡写真 (右)

<sup>2</sup>[http://bram.gsfc.nasa.gov/ms\\_webpage/](http://bram.gsfc.nasa.gov/ms_webpage/)

パラメータ	仕様値
シャッター板サイズ	100 $\mu\text{m}$ ×500 $\mu\text{m}$
アレイフォーマット	40×200
アレイサイズ	20mm × 20mm
コントラスト比	1:2000 以下
シャッタ駆動方式	静電駆動
使用波長帯	0.3 ~ 2.5 $\mu\text{m}$

表 7.4: 東大天文センター、生産研で開発を行っているマイクロシャッターアレイの仕様

しかしながら、GSFC のマイクロシャッターは衛星での利用に最適化されたものであるために地上観測装置に用いるには必ずしもベストのものであるとは癒えない。そこで、我々は、東京大学生産技術研究所の年吉グループ<sup>3</sup>と共同で、地上観測装置に最適化したマイクロシャッターアレイの開発に着手している。このマイクロシャッターは

1. 分光時のスリットの形状はロングスリットであるので、ここのシャッターの形状は正方形ではなく長方形にする。これによって開口率を大きくして、スリットの透過率を高くすることも可能となる。(図 7.11 左)
2. スリットの開閉動作は磁力を用いずすべて静電的に行う(図 7.11 右)。これによって個々のスリット板を自由に駆動できると同時に、磁石をスキャンするための大きくて複雑な機構が不要になるなど構造全体を単純化できる。

という特徴をもつ。

現在 1 回目の試作を行って、製造プロセスなどの確認を終えている。図 7.12 に試作されたシャッターアレイを掲げておく。現在想定している具体的なサイズは、シャッタ素子が 500 $\mu\text{m}$ ×100 $\mu\text{m}$  でそれを 20 個並べたものを 1 ユニット (500 $\mu\text{m}$ ×2000 $\mu\text{m}$ ) とする。

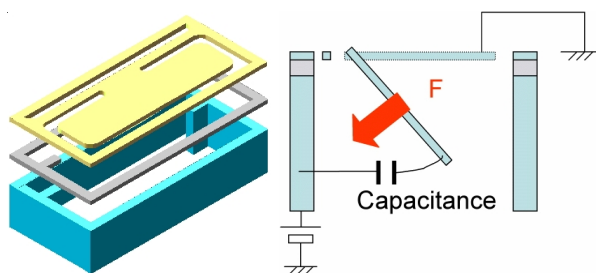


図 7.11: 東大天文センターと生産研が共同で開発しているマイクロシャッターアレイの 1 素子分の概念図 (左) と静電駆動のモデル図 (右)

<sup>3</sup><http://toshi.fujita3.iis.u-tokyo.ac.jp/home/index.html>

最終的にこのユニットを  $10 \times 40$  のアレイ ( $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ ) としたものを一パッケージとし、それを  $5 \times 5$  個焦点面に並べて  $5' \times 5'$  の視野を覆う予定としている。

シャッター板の短辺、長辺は TAO 望遠鏡に取り付けたときに  $0.''25$ 、 $1.''25$  程度となる。実際の観測時には標準で  $1'' \times 10''$  のスリットサイズを想定しており、 $4 \times 8$  個のマイクロシャッターを開いてスリットを形成することになる。図 7.13 に、マイクロシャッターアレイを使用したときのスリット面の簡単なイメージを示した。波長方向に 4 ピクセル分のスリットを開くことによって、どのような位置にある天体でも分光が可能になることが分かる。

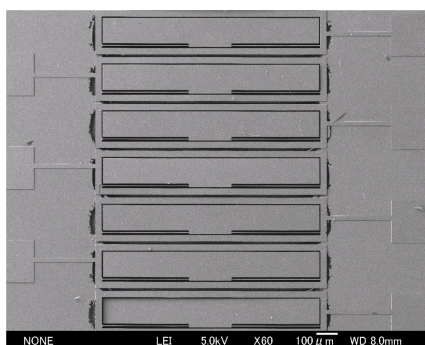


図 7.12: 生産研で製造されたマイクロシャッターアレイの試作品一号

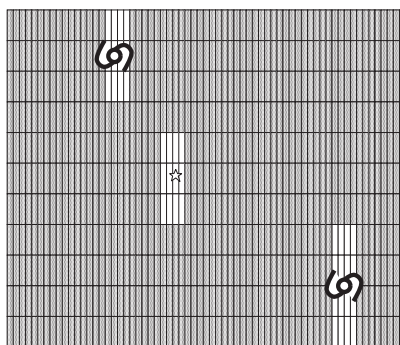


図 7.13: マイクロシャッターを用いたときの焦点面のイメージ。背景の個々の四角が  $100\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$  のシャッター板に相当する。複数のシャッター板を同時に開くことによって (白抜き四角)、任意の位置にある天体の分光を可能とする。

## 7.2 中間赤外分光撮像装置

### 7.2.1 装置概要

地上大口径望遠鏡による熱赤外觀測は、空間解像度が高いこと、また観測機会が多いことなどといった特徴を持ち、飛翔体観測装置とは相補的な関係にある。観測天文学では高解像度の観測は高感度の観測と並んで本質的に重要であり、熱赤外域での観測で地上望遠鏡の果たすべき役割は非常に大きいと言える。特に系外惑星系（残骸）円盤の研究などの星周空間の観測においては、高解像度は決定的な役割を果たすと思われる。高解像度に特化した、地上大口径望遠鏡用の熱赤外觀測装置が強く望まれる。

しかしながら、熱赤外域では大気中の分子、とくに水蒸気のラインが多数存在し、観測の精度や感度を低下させる。これは、(i) 大気中の水蒸気のラインは天体からの放射を遮り、シグナルを低下させる、(ii) 水蒸気ラインのフラックスにより背景放射量が増大し、ショットノイズを増加させる、だけではなく、(iii) 水蒸気ラインは激しく時間変動しており、チョッピングなどを用いても落せない高周波のスカイノイズがノイズとして乗ってしまう、からである。

TAO 望遠鏡は高山に建設され、また鏡面のコートとして放射率の低い銀を用いるため、熱赤外域の観測でも高い優位性を示すと考えられる。図 7.14 は大気の吸収のモデル計算の結果である。マウナケアと比較しても、N バンド（波長 8–13  $\mu\text{m}$ ）での透過率もさることながら、Q バンド（波長 16–26  $\mu\text{m}$ ）での透過率が非常によい事が分かる。また、波長 28  $\mu\text{m}$  以降には、マウナケアでは全く透過しない大気の窓が幾つか表れていることがわかる。

我々は TAO 望遠鏡の持つ、熱赤外域での観測ポテンシャルを最大限活かすべく、TAO 望遠鏡用の中間赤外觀測装置の検討を進めている。この装置は中間赤外の中でも特に長波長の領域である 20  $\mu\text{m}$  帯の大気の窓と、30  $\mu\text{m}$  帯の大気の窓での観測に最適化した装置であり、地上赤外觀測装置としては最も長い波長を狙う装置である。また、天文観測装置として初めて装置内に冷却チョッピングシステムを内蔵し、多点チョッピング観測によって、従来よりも高い感度での観測が可能な装置となっている。さらに、望遠鏡副鏡に装備された補償光学 (AO) システムによって、完全回折像での観測が可能になる。すなわちこの装置は、20–30  $\mu\text{m}$  の中間赤外域で、世界最高の感度をもつ高解像度カメラであると言える。

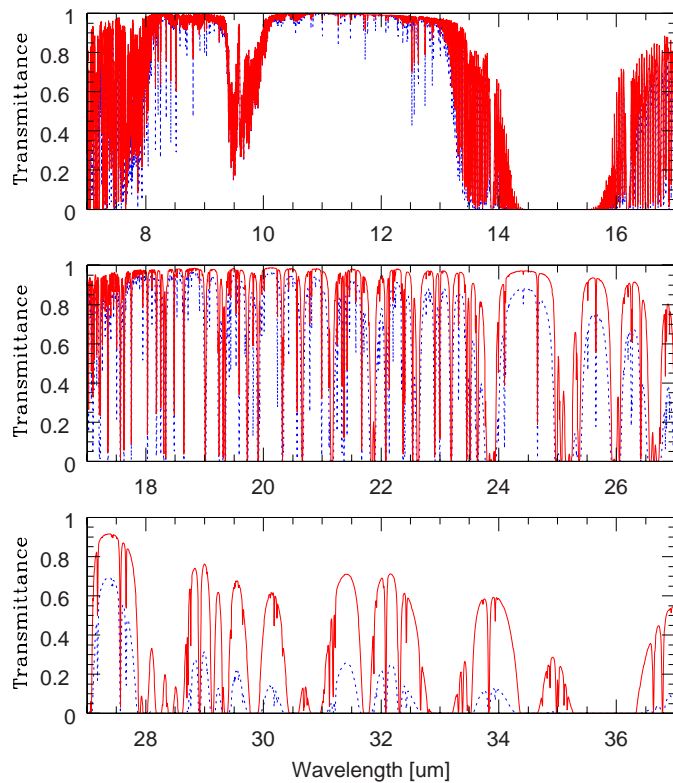


図 7.14: 大気透過率のモデル計算結果。赤が PWV=0.38mm、青が PWV=0.91mm であり、各々高度 5600m、4200m での水蒸気条件上位 10%に対応している。

### 装置の特色

本装置は中間赤外線、中でも地上から観測できる赤外線としては最も波長が長い 20–30 $\mu\text{m}$  での観測に最適化された装置であり、この波長域での観測が本装置のもっとも独創的な点である。以下では、これらの波長域での観測についてまとめる。

- 20 $\mu\text{m}$  で最高感度の高解像度観測装置

20 $\mu\text{m}$  帯は従来の望遠鏡でも観測が行われており、星周ダスト円盤残骸の直接検出など、様々な発見をもたらした波長帯である。しかしながら従来の観測地点では水蒸気の影響が大きく、観測はごく限られた明るいものだけが対象であった。特に南半球では高高度に置かれている大望遠鏡は<sup>4</sup>存在せず、南天の興味深い天体につい

<sup>4</sup>南半球に存在する 6m 以上の望遠鏡は全て 3000m 以下の地点にあり、これよりも高高度に望遠鏡を建設



ては高解像度のデータが欠落した状態になっている。

本装置は、TAO 望遠鏡の 6.5m という口径を活かし、 $0.''75$  (@ $20\mu\text{m}$ ) の空間解像度での観測を行う装置である。感度としては 1 時間の積分で  $10\text{mJy}$  (点源、 $S/N = 5$ ) が達成可能である。これは既存の高解像度観測装置の中で最も高性能なすばる望遠鏡 COMICS を約 5 倍上回る数字になっている。水蒸気変動によるデータの信頼性も考えあわせると、TAO 望遠鏡の中間赤外装置は  $20\mu\text{m}$  帯での世界最高感度を達成できる高解像度カメラ (+分光器) であると言える。

- $30\mu\text{m}$  のフロンティアを切り開く装置

$30\mu\text{m}$  帯はこれまで地上望遠鏡では観測されたことは無く、衛星や飛行機望遠鏡 (Kuiper など) でいくらか観測例があるだけで、秒スケールの解像度の画像は撮られたことはない。これはこの波長域では  $\text{H}_2\text{O}$  (水蒸気) による吸収が強くなるため、高度 4500m のハワイ マウナケア山頂においてさえ、透過率の良い波長帯を見つけることは難しいからである (図 7.18 青)。さらには、中間赤外線観測に広く使われている Si:As BIB 赤外線検出器は、 $10\text{--}20\mu\text{m}$  帯に高い量子効率を持つものの  $25\mu\text{m}$  以長で量子効率が急激に減少する (図 7.19)。これら 2 つの要因のため、地上からの中間赤外線観測は  $25\mu\text{m}$  以短の波長帯で行われてきた。口径 6.5m の TAO 望遠鏡は  $30\mu\text{m}$  帯で  $\sim 1.''5$  の高い空間分解能を達成するため、天文衛星等では分解できない細かい空間構造の観測が可能となる。現在、TAO の他に  $30\mu\text{m}$  帯が観測できる大型望遠鏡の計画は無く<sup>5</sup>、 $30\mu\text{m}$  帯の高空間分解観測は TAO でのみ実行可能な状況がしばらく続くことになる。すなわち本装置は、熱赤外線における観測天文学のフロンティアとなる装置であると言える。

この波長域は黒体放射温度で 100K 以下に相当しており、太陽系で言えばカイパーベルトに相当する領域をトレースできる。実際、ベガ型星の多くが  $25\mu\text{m}$  がそれ以上で超過を示しており、 $30\mu\text{m}$  帯での観測は星周空間の研究に重要な役割を果たすものである。本観測装置は、TAO 望遠鏡の設置高度を活かし、世界で初めてこの  $30\mu\text{m}$  帯での観測を可能にするものである。空間分解能は  $1.''4$  (@ $35\mu\text{m}$ ) であり、これまでに比べて数倍の解像度が達成できる。

---

する計画は TAO 計画だけである。

<sup>5</sup>2011 年打ち上げ予定の JWST 衛星 (口径 6.5m) は中間赤外線観測装置 (MIRI) を搭載する予定であるが、検出器に Si:As BIB を採用するため  $30\mu\text{m}$  帯に感度を持たない。現在計画されている  $30\mu\text{m}$  帯が観測可能な望遠鏡の中では、航空機上の高高度天文台である SOFIA 望遠鏡 (口径 2.7m) + 中間赤外線観測装置 (FORCAST) が最大である。

## 7.2.2 装置の仕様

本装置の仕様を表 7.5 にまとめる。なお、この装置は現在まだ概念設計を行っている段階であり、今後の検討では仕様の一部変更になることも考えられる。

装置の光学系レイアウトを図 7.15 に示す。

- 光学系

光学系は基本的に反射系を用いる。これは  $10\mu\text{m}$  帯から  $35\mu\text{m}$  までの、広い波長域で高い結像性能を確保するためである (図 7.15 では構造を理解しやすいように光学要素を透過系で書いてある)。

赤外域の観測では瞳像を冷却下に結ばせ、光路外からの光を遮断し背景光をカットするのが普通である。地上からの背景光が非常に強い熱赤外域ではこの遮光の性能は感度に直結するので、ここの瞳像の結像性能も十分に考慮して光学系を設計する

観測波長域 観測モード	N バンド ( $8\text{--}13\mu\text{m}$ ) / Q バンド ( $16\text{--}26\mu\text{m}$ ) / $29\text{--}38\mu\text{m}$ 撮像 : バンドパスフィルターによる撮像 分光 : ロングスリット低分散分光 ( $R \sim 200$ )
ピクセルスケール	$0.''10/\text{pix}$
視野	回折限界での観測が可能 撮像 : $25'' \times 25''$ 分光 : $\sim 25''$ (ロングスリットによる)
到達感度 (1h 積分、 $S/N = 5$ )	$10\mu\text{m}$ 帯撮像 : $\sim 1.5\text{mJy}$ $20\mu\text{m}$ 帯撮像 : $\sim 10\text{mJy}$ $30\mu\text{m}$ 帯撮像 : $\sim \text{mJy}$ $10\mu\text{m}$ 帯分光 ( $R = 500$ ) : $\sim 20\text{mJy}$ $20\mu\text{m}$ 帯分光 ( $R = 900$ ) : $\sim 75\text{mJy}$
光学系	前光学系/NQ チャンネル/ $30\mu\text{m}$ チャンネルの 3 つの部分からなる 光学系は全て反射光学系 前光学系には冷却振動鏡を実装し装置内でチョッピングが可能
冷却系	分光系はグリズム+長スリットによる分光 機械式冷凍器を 2 台使用し、全光学系を 20K まで冷却 冷却時には補助冷媒として液体窒素を併用
検出器	Si:As BIB 検出器 1 台 (NQ チャンネル) フォーマットは $256 \times 256$ またはそれ以上 Si:Sb BIB 検出器 1 台 ( $30\mu\text{m}$ チャンネル) フォーマットは $256 \times 256$ またはそれ以上
制御系	Linux+PCI 高速読みだしシステムによる検出器制御 オンボードでのデータ演算により、データフローを軽減

表 7.5: TAO 望遠鏡用中間赤外装置の仕様 (概要)

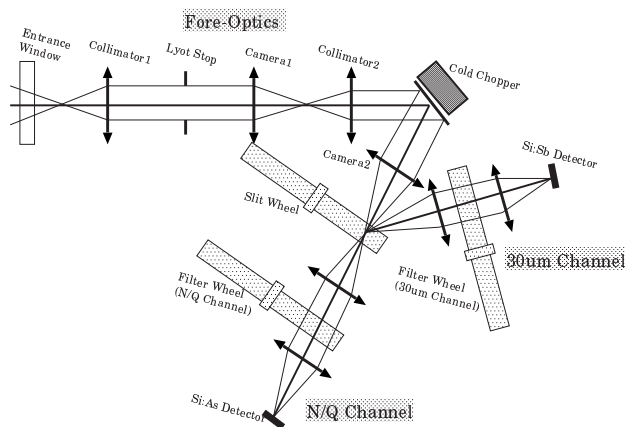


図 7.15: 中間赤外装置の光学系レイアウト

必要がある。また、後述する冷却振動鏡を使うには実効的に 2 度角程度の視野を持つ光学系を構築する必要がある。これら全てを満たすような光学系の設計は現在検討中である。

- 冷却振動鏡

地球大気や望遠鏡からの熱赤外背景放射は不規則に時間変動し、中間赤外線観測の測定精度に大きな影響を与える。地上中間赤外線観測では、この大気放射の変動を計測、除去するために、頻繁に視野の切替えをするチョッピングと呼ばれる観測手法をとる。高精度の観測を行うには、数 Hz の周波数で天空上の  $\sim 1'$  離れた間を交互に観測 (チョップ) する必要がある。これまでのチョッピング観測は、望遠鏡の副鏡を振ることによって実現されてきた。しかし、近年の望遠鏡の大型化に伴い副鏡を高速・高精度に振動させるのが困難になりつつある。TAO 望遠鏡は補償光学 (AO) 副鏡を採用するため、副鏡による  $\sim 10''$  のチョッピングは可能であるが、大きく広がった天体を観測するには不足である。TAO 用中間赤外線観測装置では、チョッピング機能を観測装置内の真空冷却部 (20K) に持つことによって望遠鏡への負担を軽減する。

チョッピング機能を持った冷却振動鏡は、望遠鏡の副鏡と光学的に等価である観測装置内の瞳位置に設置される。冷却振動鏡は直径約 50cm と小型軽量なため、望遠鏡の振動副鏡に比べより高速に駆動し、その機敏性は多点チョッピングという高感度な観測手法を可能にする。これまでのチョッピング観測は天体と近傍の背景の 2 視野を数 Hz で交互に切替えて観測し、各々で得られた画像の差分をデータとしてきた (図 7.16)。この観測手法では、差分時に天体画像に背景画像のノイズが付加

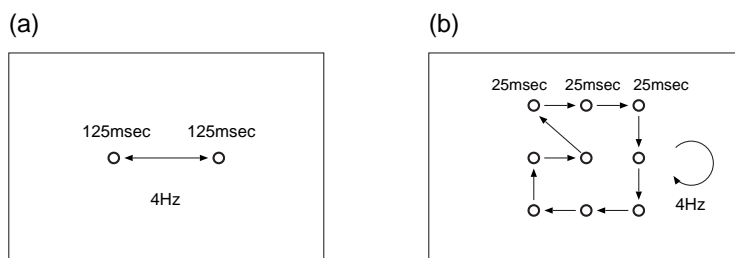


図 7.16: チョッピングによる星像の移動シーケンス。(a) 従来のチョッピング観測。星像は往復運動をする。(b) 多点チョッピング観測。星像は 9 点を順に移動する。

されるため、両方の画像に写っている天体を重ね合わせる処理を行なっても、原理的に  $\sqrt{2}$  倍の感度の劣化がおきる。これに対し、数 10Hz で視野の切替えを行い、1 つの天体画像に対して複数の背景画像を取得する多点チョッピングの手法を用いれば、背景画像は複数の画像から生成されるため低ノイズとなり、天体画像と背景画像の差分によって発生する付加ノイズの量を実質ゼロにすることが可能となる。このように、冷却振動鏡の導入は、チョッピング観測による望遠鏡への負担を低減するとともに、多点チョッピングによって  $\sqrt{2}$  倍の感動向上をもたらす利点を持つ。冷却振動鏡の詳細については後の主たる開発要素の項に述べる。

- 冷却系

本装置は最長で  $35\ \mu\text{m}$  の波長までカバーする装置であり、検出器 (Si:Sb) 自身は  $40\ \mu\text{m}$  超まで感度を持つ。これらの波長域で光学系からの背景熱放射を十分下げるために、本装置は入射窓以降の全光学要素を 20 K まで冷却する。冷却には 4K の機械式冷凍機を 2 台用いる。冷却時には補助冷媒として液体窒素を用い、24 時間程度で冷却が完了するようにする。これらの基礎技術はすばる望遠鏡用 COMICS などで培ったものがそのまま流用できる。

- 機械駆動系

装置トラブルを減らし観測の精度をあげるため、本装置は機械駆動部分の数を極力減らしてある。具体的には、(i) チャンネル前にあるスリットホイール、と、(ii) 各チャンネルのフィルタホイール  $\times 2$ 、計 3 つが駆動する部分である。スリットホイールには NQ チャンネルと  $30\ \mu\text{m}$  チャンネルの切替え、分光用のスリット、2 波長同時観測用のダイクロイックミラーなどを装着し、どのチャンネルに光を導入するかを切替えられるようにする。各チャンネルのフィルターホイールには、撮像観測用のバンドパスフィルターの他、分光用のグリズムを入れる。NQ チャンネルの

フィルターホイールには瞳撮像用の小型レンズも入れ、装置光軸の調整に利用する。なお、光軸調整は装置全体をかたむけて行う。

- 検出器および検出器制御部

本装置の検出器としては Boeing の Si:As 検出器 (256×256 画素) と Si:Sb BIB 検出器 (256×256 画素) を想定している。これら 2 つの検出器は同じ読み出し回路 (MUX) 部を持つため、同じ検出器制御システムを使ってオペレーションが可能である。この制御部は、強い背景光による検出器の飽和を防ぐため、1 画像あたり 25–50 msec 程度の読み出し速度が必要になる。さらには、多点チョッピングを行うために、発生するデータは従来の観測よりも大量かつ複雑な処理を必要とする。これらを高速に処理できるようなオンボード処理系が必要であり、既存の処理システムを元に開発を行う予定である。

## 7.2.3 開発要素

### 冷却振動鏡

冷却振動鏡は低温下の瞳位置においた平面鏡を高速で駆動し、多点チョッピングを可能にする装置である。常温での振動鏡 (ティップティルト鏡) は天文観測用に多数の例があるが、低温環境化での振動鏡の実装例はなく、基礎レベルからの実験開発が必要となる。

本装置に実装予定の冷却振動鏡は直径約 50mm の平面鏡を背面から 2 本のアクチュエータで支え、角度を制御する構造を持つ (図 7.17)。アクチュエータには発熱が少なく、真空低温環境下でも高いストロークで動作する積層型 piezo 素子アクチュエータの用いる。冷却振動鏡に必要とされる仕様を表 7.6 にまとめる。最大で 250msec (4Hz) の間に 9 回の視野移動 (チョッピング) をおこなう。1 つの視野における滞在時間は 28msec となる。視野移動中は星像が歪むため観測 (積分) は一時中断される。このデッドタイムを 5%以下にするためには  $\ll 1\text{msec}$  で視野が移動・静定する必要がある。アクチュエータには  $>10\text{kHz}$  の応答速度が要求されることになる。チョッピングの最大幅は  $1'$  をめざす。また、星像間の相対位置精度は TAO における波長  $20\mu\text{m}$  の回折限界である  $\sim 1''$  よりも十分に小さな  $<0.''1$  が必要である。これにより、アクチュエータには、最大  $\sim 20\mu\text{m}$  のストローク、 $\sim 10^6$  の分解能と  $<10\text{nm}$  の安定性が要求される。また、長時間積分の観測に耐えるために、検出器上での位置安定性は  $\sim 1$  時間の観測中に  $<0.''1$  が必要となる。piezo 素子は低温においてストロークが減少する特性を持ち、高速駆動時には少量の発熱が予想される。また、振動鏡全体の固有振動数は視野移動後の星像の静定時間に影響を与える。これらの問題に対しては、低温下における振動鏡の駆動試験を重ねることに

よって対応していく必要がある。

また、冷却振動鏡は観測装置内の瞳位置に設置されるため、望遠鏡の副鏡を振るのと等価であるが、観測装置の冷却槽の入射窓より内側に設置されるという点で、これまでの例と異なる。このため、入射窓上のパターン（付着ゴミ等による）は冷却振動鏡によるチョッピングでは除去できない。副鏡や望遠自体を僅かに動かすこと（ノッキング）によって入射窓上のパターンを除去できると考えられるが、副次的な悪影響を生む可能性はゼロではない。従って、冷却振動鏡搭載のテスト観測装置による、実際の天体を用いた試験観測を行うことが重要である。このように冷却振動鏡は技術的検討項目を多く含むものの、その開発/実装は地上中間赤外線観測装置のありかたを大きくかえると期待さ

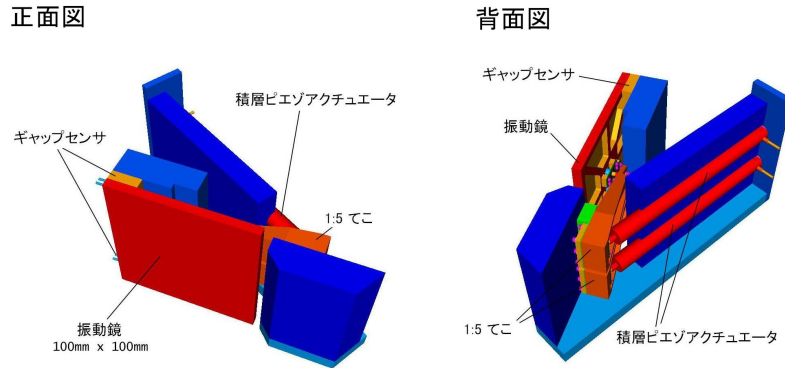


図 7.17: 冷却振動鏡の概観

チョッピング周波数	最大 28 msec/pos で 9 pos (1 シーケンス 4 Hz)
チョッピング幅	最大 1'
移動速度	< 1 msec
相対位置精度	≪ 1 pix (0."1)
絶対位置再現性	~1 時間の観測中に ≪ 1 pix (0."1)
アクチュエータ	構成要素： 低温ピエゾ素子 × 2 個、容量型ギャップセンサ × 2 個、固定点、押しバネ × 2 個から構成。
	ストローク： 最大 ~ 20 μm
	分解能： ~ 10 <sup>6</sup>
	安定性： ≪ 10 nm
	移動速度： 1 msec
	応答速度： > 10 kHz
	発熱： < 数 10 mW

表 7.6: 冷却振動鏡の仕様

れる。冷却振動鏡は TAO 用中間赤外線観測装置の主開発要素である。

### 30 $\mu\text{m}$ 用検出器

一般に中間赤外線検出器として使われる Si:As BIB 検出器は 25 $\mu\text{m}$  以上に感度を持たないため、30 $\mu\text{m}$  帯の観測には Si:Sb BIB 検出器が使われる。図 7.19 に、Boeing 社の Si:Sb BIB 検出器と Si:As BIB 検出器の detective quantum efficiency ( $DQE$ )<sup>6</sup>の波長依存性を示す。Si:Sb BIB 検出器は 25 $\mu\text{m}$  以下で Si:As BIB 検出器の半分以下の  $DQE$  しか持たないが、38 $\mu\text{m}$  付近の長波長まで感度が持続する。35 $\mu\text{m}$  以上で感度の低下が見られるため、37、38 $\mu\text{m}$  帯の観測に影響が出る可能性があるが、20 – 35 $\mu\text{m}$  では  $DQE \sim 0.3$  と高感度な観測が期待できる。Si:Sb BIB 検出器は Boeing 128 $\times$ 128 アレイが Spitzer 望遠鏡 IRS に、Boeing 256 $\times$ 256 アレイが SOFIA 用中間赤外線装置 FORCAST に実装の経験がある。中でも、FORCAST に搭載されている Boeing Si:Sb BIB 256 $\times$ 256 検出器は、 $10^7 e^-$  と大きなウェルを持ち、強い背景光の中で行う地上 30 $\mu\text{m}$  観測にも耐えうる性能をもつ。Si:Sb BIB 256 $\times$ 256 検出器と、同じく Boeing 社の Si:As BIB 256 $\times$ 256 検出器の基本性能を並べて表 7.7 に示す。両検出器は同じ読み出し回路部を持つため、同じ検出器制御システムを使ってオペレーションが可能である。Si:As BIB については Raytheon 社の 320 $\times$ 240 検出器も候補にあるが、TAO 用中間赤外線観測装置では Boeing Si:Sb BIB 256 $\times$ 256 検出器との同時運用をめざすため、フォーマットがやや小さいものの安定なシステムの構築という観点で Boeing Si:As BIB 256 $\times$ 256 検出器を 10、20 $\mu\text{m}$  帯検出器として採用する予定である。

検出器	Si:As BIB	Si:Sb BIB
高感度波長域	5 – 25 $\mu\text{m}$	5 – 38 $\mu\text{m}$
ピクセル数	256 $\times$ 256	256 $\times$ 256
ピクセルサイズ	50 $\mu\text{m}$	50 $\mu\text{m}$
ウェル容量 (大容量モード時)	$1.6 \times 10^7 e^-$	$1.6 \times 10^7 e^-$
読み出しノイズ	$\sim 2400 e^-$	$\sim 2400 e^-$

表 7.7: Boeing 256  $\times$  256 Si:As BIB および、Si:Sb BIB 検出器の基本性能 (Keller et al. 2003, SPIE Vol. 4857, p29)

<sup>6</sup>BIB 検出器はランダムな感度ゆらぎを持つため、 $S/N$  は量子効率  $\eta$  の 1/2 乗に比例せず、ゆらぎ項  $\beta$  で補正した Detective quantum efficiency ( $DQE$ ) =  $\eta/\beta$  の 1/2 乗に比例する。従って、BIB の場合、感度計算には  $\eta$  のかわりに  $DQE$  を使う必要がある。



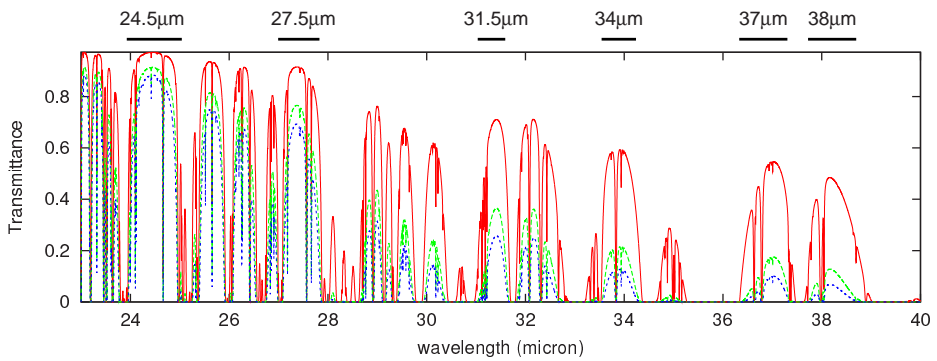


図 7.18: 23 – 40 $\mu\text{m}$  帯の大気透過率曲線。(赤) チャナントール (TAO サイト) の水蒸気量の少ない日、上位 10% のデータ; PWV = 0.38mm。(緑) チャナントール、上位 50% のデータ; PWV = 0.85mm。(青) ハワイ マウナケア、上位 10% のデータ; PWV = 0.91 %。上部の黒線は、チャナントールにおいて 30 $\mu\text{m}$  帯で比較的大気透過率の良い波長帯 (大気の窓) を示している。

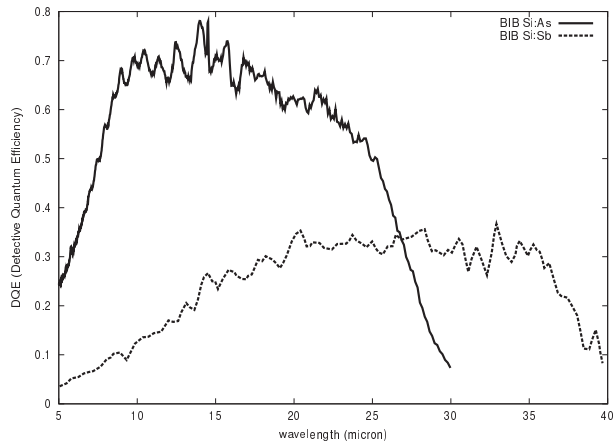


図 7.19: Boeing 256 $\times$ 256 Si:As BIB および 256 $\times$ 256 Si:Sb BIB の Detective Quantum Efficiency (DQE)。Boeing 社測定。SOFIA FORCAST チーム Web サイトより。両検出器は anti-reflection (A/R) コート処理を行なえば、この図よりも量子効率が向上しフリンジ強度が減少することが報告されている (Heter et al. 1998, SPIE 3354, 109)。

### 検出器読み出しシステム

高レートで発生する画像データを効率的に処理するため、オンボードメモリ上での複雑な画像演算機能と、高速な逐次転送機能を持つ検出器読み出しシステムの開発を行う。10–20 $\mu\text{m}$  帯の撮像観測 ( $R \sim 10$ ) の場合、強い背景光による検出器の飽和を防ぐため、1 画像あたり 25–50 msec で積分を切り上げる必要がある。30 $\mu\text{m}$  帯では 20 $\mu\text{m}$  帯よりも多くの背景フォトン (単位波長あたり) が入射するが、30 $\mu\text{m}$  帯の大気の窓は狭く、観



測には狭帯域フィルターが使用されるため、検出器の飽和時間は  $20\mu\text{m}$  帯観測時と同程度の  $\sim 50\text{msec}$  と推定される。したがって、 $10\text{--}20\mu\text{m}$  帯観測用の検出器読み出しシステムと同じシステムを使って、 $30\mu\text{m}$  帯観測が可能である。

$256 \times 256$  ピクセルの検出器を 16-bit A/D コンバータで読み出す場合、データ発生レートは  $5\text{--}10$  Mbyte/sec ( $18\text{--}36$  Gbyte/hour) となる。このような高いレートで発生する画像データ全てを計算機へ断続的に転送するには、非常に高速なバスを必要とし、また、計算機自身にも大きな負荷を与える。そのため TAO 用中間赤外線装置の検出器読み出しシステムでは、検出器読み出しボードにメモリ上でチョッピング画像の差引や加算等の 1 次処理を行う機能を持たせることにより、計算機へ転送するデータレートの低減を実現する。更に、データ転送のために 1 時的に観測 (積分) が中断しないよう、画像取得中であっても画像データ発生レートよりも速いレートで、読み出しボードから計算機へデータ転送が可能な逐次転送機能を実装する。これらは COMICS 用に開発した読み出しシステムを発展させて開発を行う。

中間赤外線の分光観測では、大気輝線の波長帯がいち早く飽和するため、他の波長ピクセルに十分な光電子が蓄積される前に積分を切り上げなければならないという問題がある。これに対し TAO 用中間赤外線装置の分光観測モードでは、複数回の非破壊読み出し (マルチサンプリング) を行い、飽和データを除いたシグナルデータ間の変移  $dv/dt$  から測定量を導出することにより、大気輝線を飽和させることなく、大気連続光で決まる時間まで積分が可能な検出器オペレーションを行う。

## 長波長用光学素子

TAO 用中間赤外線観測装置の光学系は大部分が反射系で構成されるが、入射窓・フィルタ・ダイクロイック鏡・グリズムには透過光学材料が必要となる。図 7.20 に中間赤外線帯で透過な光学材料の透過率特性をまとめる。

これまでの中間赤外線観測装置では、一般に  $10, 20\mu\text{m}$  帯兼用の入射窓の光学材料に KBr が使われてきた。KBr は可視から  $20\mu\text{m}$  帯までの広い波長域において高い透過率を示す光学材料であるが、 $22\mu\text{m}$  以長で吸収が効きはじめる。TAO 中間赤外線装置の主観測波長帯である  $24\mu\text{m}$  においては、入射窓に厚み  $2\text{cm}$  の KBr を使用した場合、その透過率は  $\sim 60\%$  まで落ち込む<sup>7, 8</sup>。従って、 $24\mu\text{m}$  帯以長の観測のために KBr 以外の窓材を選定する必要がある。 $24\text{--}40\mu\text{m}$  で透過する窓材の候補として、CsI、KRS-5、ポリエチレンが挙げられる。CsI は吸湿性が強く、吸湿による光学性能の劣化が問題となる。KRS-5 は界面での反射損失が比較的大きい。ポリエチレンは強度が十分でないため窓材

<sup>7</sup>COMICS による実測値

<sup>8</sup>透過率  $T$  は、反射率  $R$ 、吸収係数  $\alpha$ 、材質の厚さ  $d$  とした時、 $T = (1 - R)e^{-\alpha d}$  と表される。

として使う場合は補強が必要となる。実験室測定を重ね、光学的に安定で窓材として十分な強度を持つ材料を選定する必要がある。

中間赤外用フィルタには、鋭い波長特性と、透過波長帯が大気の窓にフィットしていることが要求される。これまでに 10–20 $\mu\text{m}$  帯のフィルタの実績はあるが、30 $\mu\text{m}$  帯の大気の窓に合わせた狭帯域フィルタ ( $R \sim 50$ ) の開発例は無い。Astro-F、Spitzer、SOFIA 等での中-遠赤外線フィルタの経験を基に、地上用 30 $\mu\text{m}$  フィルタの開発を進めていく。

10–20 $\mu\text{m}$  帯と 30 $\mu\text{m}$  帯の同時観測、および分光時のスリットビューを行うためにダイクロイック鏡による波長分割が必要となる。波長特性の異なる複数種類のダイクロイック鏡を用意し、観測用途にあわせ選択する。20 $\mu\text{m}$  と 30 $\mu\text{m}$  を分割するダイクロイック鏡は FORCAST で開発例がある (Keller et al. 2000, SPIE 4014, 86)。FORCAST のダイクロイック鏡は MgO (酸化マグネシウム) を基板として使い、17–24 $\mu\text{m}$  を透過し、25–40 $\mu\text{m}$  を反射する。17–24 $\mu\text{m}$  と 30–40 $\mu\text{m}$  の各々において  $\sim 80\%$  の効率を達成している。

TAO 用中間赤外線装置では分光素子に 10–20 $\mu\text{m}$  帯において  $R \sim 250$ –1000 のグリズムを用いる。中間赤外線帯のグリズムは、Astro-F が KRS-5 を使い  $R \sim 23$ –38 で効率  $\sim 28\%$  の開発例がある。また、比較的効率の良い中間赤外用シリコングリズムの開発も報告されている (Ershov et al. 2003, SPIE, 4850, 805 等)。いずれの場合も、高い分散を実現することが課題となる。

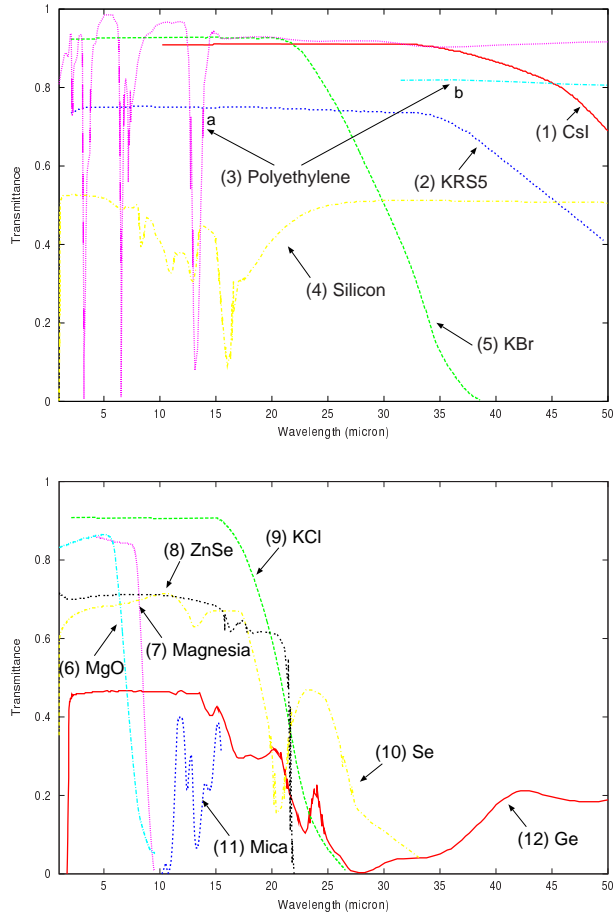


図 7.20: (上)  $30\mu\text{m}$  帯を透過する物質の透過率。(下)  $10\text{--}20\mu\text{m}$  帯を透過する物質の透過率。(1) CsI 5mm 厚。(2) KRS-5 2mm 厚。(3) ポリエチレン。a:0.1mm 厚。b:1.02mm 厚。(4) シリコン 2mm 厚。(5) KBr 5mm 厚。(6) MgO 5.5mm 厚。(7) マグネシア 10mm 厚。(8) ZnSe 6mm 厚。(9) KCl 10mm 厚。(10) Se 1.69mm 厚。(11) マイカ  $8\mu\text{m}$  厚。(12) Ge 2mm 厚。(3) は基礎物性図表、それ以外は Handbook Of Infrared Optical Materials より。

## 7.3 可視広視野分光撮像装置

可視光領域の運用当初の観測装置として、視野約 15′ 角の分光撮像装置を計画している。マゼラン望遠鏡では視野 30′ の可視多天体分光器 IMACS が稼働をしているが、TAO 望遠鏡では大気の透過率の差が大きい近赤外線から中間赤外線の装置に重点を置き、可視領域では基本的な観測ができる装置をまず製作し、予算に応じて拡張していく。望遠鏡の視野は 15′ より広いので、将来的には望遠鏡の視野を活かすような多天体ファイバース分光器などを追加する可能性もありうる。

### 7.3.1 可視分光撮像装置

ナスミス焦点に取り付け、視野直径約 15′ の光を一度コリメートし、瞳位置付近にグリズムやフィルターが配置できるようにする。カメラレンズは F/2.5 とし、15 分角を 4096×2048 画素、画素サイズ 15 $\mu$ m 角 (0.″20/画素) の CCD 2 個で覆う。将来的に観測効率をあげるため入射光をダイクロイックミラーで 2 方向に分けられるようにしておき、可視波長域をほぼ二分割して、それぞれを別の CCD 2 個に結像させるような拡張性も残す。拡張すれば、例えばすばる望遠鏡の低分散分光器 FOCAS (視野 6′ $\phi$ ) に比べ、視野の広さの点で 8 倍、2 バンドの同時性で約 2 倍、高い効率となる (ただし積分時間は主鏡の面積比に応じて約 1.6 倍余分に必要である)。高いサーベイ効率は、近赤外線サーベイを行った際に行うことが必要となる、可視光領域の分光観測の際に重要となる。

波長域としては 365nm~1000nm 程度とし、分散素子としては 2 種類のグリズム (波長分解能は低分散グリズム:  $\lambda/\delta\lambda = 1000$ 、中分散エシエル:  $\lambda/\delta\lambda = 10000$ 、いずれも 0.″4 スリット幅の時) を用意し、中・低分散の観測に対応する。スリットについてはロングスリットその他、マイクロシャッターを使った多天体マルチスリット機構を用意し、低分散モードでは 100 天体以上の同時分光観測が行えるようにする。

観測モードの拡張性としてはファブリペローエタロンと次数選択フィルターを追加して狭帯域撮像を可能としたり、スリット部分にイメージスライサーを設置して面分光できるようにする可能性を検討中である。これらはいずれもすばる望遠鏡の共同利用観測装置にはない観測モードであり、すばる望遠鏡と相補的な観測を可能にする。

## 7.4 プロトタイプ分光器・カメラの開発

以下に述べる2つの観測装置は、元々は別の観測計画を目的として開発され、観測に用いられているが、その性能は5000mの高地での観測に適しており、TAO望遠鏡の性能評価及び観測条件の測定などにも有効である。そこで、我々の機器開発の現状と実績を紹介する意味も兼ねて、簡単に述べる。

### 7.4.1 可視・赤外多色カメラ

これはハワイマウイ島の2m望遠鏡(MAGNUM望遠鏡)の観測装置として開発された、可視から近赤外にかけての多色カメラであり、現在、MAGNUM計画に沿って、活動銀河核の多波長モニター観測を1年以上にわたって継続している。

このカメラの特徴は可視光と赤外線をビームスプリッターで分けそれぞれの検出器を搭載することで、可視と赤外線の同時撮像が行なえることである。可視用検出器にはSiTe CCD(1024×1024画素)、赤外線検出器にはSBRC InSb(256×256画素)、を採用している。これにより観測波長範囲は0.35～2.2 $\mu\text{m}$ と1桁近い広さをもち、目的とする活動銀河核の降着円盤起源の放射とその周辺の高温ダスト起源の放射の両方を同時にとらえることができる。

また無人自動観測、リモート制御の実現を前提としてこのカメラは開発されている。そこで多種類のステータスを取得し監査することで常にカメラの動作状態を把握し、さらに停電およびその後の復旧に備えて真空装置を同架し完全なリモート制御によって観測準備をすることができるようになっている。観測ソフトウェアは望遠鏡やドーム、カメラの2つの検出器を統合的に制御し、スケジューラと合わせて円滑な自動観測を実現している。

### 7.4.2 赤外エシェル分光器

4台のクロスディスペルザを切り替えることで、0.9–2.5 $\mu\text{m}$ の全波長域のデータを切れ目なく取得するために開発された分光器である。検出器としてはNICMOS3アレイ(256×256素子)を用いている。図7.21に主要仕様、内部構造、効率等を示す。

# 近赤外エシエル分光器 NICE

## 特徴

- エシエルによる波長分解能  $\lambda/\Delta\lambda \sim 5000$  の分光 → 60km/s の速度分解能で line を観測可能
- 波長域 0.9 ~ 2.4  $\mu\text{m}$  を途切れなく分光 → 広い波長域にわたって外挿のない continuum を観測可能
- 透過光学系 → 安定した結像性能を実現し、かつ装置を小型軽量化
- NICOS-3 + MESSIA-IV (CIC) + PCボードで制御 → 実績のある検出器と汎用PCボードの組み合わせで制御を実現

## 主要仕様

- 分光方式 エシエル+クロスディスパーザによるスリット分光
- 波長域 0.9 ~ 2.4  $\mu\text{m}$  を隙間なく4分割して分光観測可能
- スリット 1"×9" or 2"×9" (切替式)
- 波長分解能 1"スリット時 5300 (pix. limit), 2"スリット時 3000 (slit width limit)
- 受光効率

構成要素	波長 [ $\mu\text{m}$ ]				備考	
	1	1.25	1.45	2.2		
望遠鏡	80%	80%	80%	80%	*1	
スリット透過	50%	50%	50%	50%	*2	
NICE光学系	34%	29%	28%	42%	*3	
検出器量子効率	40%	46%	60%	60%		
理論値	計	5.40%	5.30%	6.70%	10.10%	
実測値	HR130	5.10%	4.20%	6.10%	11.70%	2002.2.22観測
	HR1203	-2.20%	4.70%	5.60%	9.40%	2002.2.21観測 *4
	HR1903	4.70%	4.70%	3.40%	5.70%	2002.2.21観測
	HR2004	4.50%	1.90%	3.80%	4.00%	2002.2.21観測
理論値に基づく限界等級	9.5mag	9.2mag	9.0mag	9.0mag	*5	

- \*1: 主鏡・副鏡の反射率は仮定 (実測値ではない)
- \*2: シーイングFWHM=3arcsec, スリット幅=2arcsec の場合の理論値
- \*3: NICE内の全レンズ、平面鏡、グレーティング効率を含めた透過効率
- \*4: 1.00  $\mu\text{m}$  の観測データに検出器bad pixelの影響あり
- \*5: 口径1.5m望遠鏡、積分時間100秒、S/N=100の場合の限界等級 (リドノイズリミット)

- 検出器 NICOS-3 (HgCdTe 256x256,  $\phi 40 \mu\text{m}/\text{pix}$ )
- 制御 VME-PC (intel ベース, Windows2000) + MESSIA-IV (CIC)
- 撮像モード スリット表面で反射した光をNICOSで撮像可能 (分光用クロスディスパーザをミラーに切り替えて撮像)



赤外シミュレータに取り付けたNICE



NICEに組み込まれているレンズ



グレーティング (クロスディスパーザ)



カセグレン焦点部拡大



検出器

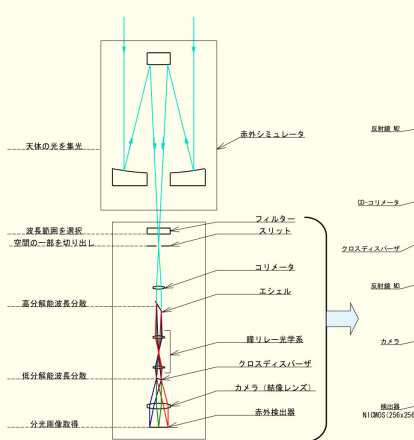


NICE 内部構造



NICEで得られた画像

## NICEの光学系構成



## NICEの内部構造

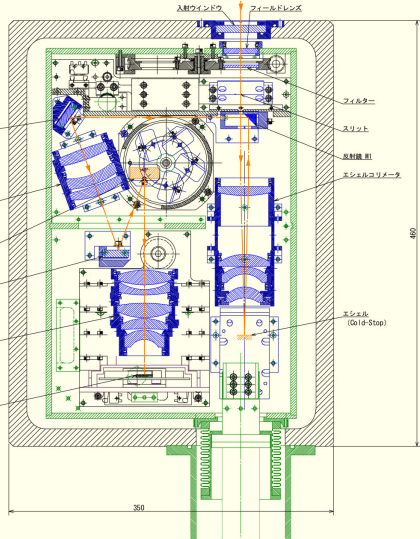


図 7.21: 赤外エシエル分光器の仕様など