第6章　東京大学アタカマ 1m 望遠鏡

6.1　1m 望遠鏡

6.1.1　1m 望遠鏡の建設

東京大学アタカマ 1m 望遠鏡 (通称 miniTAO 望遠鏡) は科研費基盤 S 「銀河系に於ける星間ガスのイオン化状態の大域的構造と星－ガス循環過程の定量的研究」(吉井 譲代表) に基づいて, 南米チリの Chajnantor 山頂に設置された光学赤外線望遠鏡である. 主鏡口径 1m, 焦点比 f/12, 視野直径 10 arcmin の Ritchey-Chretien 型であり, 西村製作所によって製作・設置された.

望遠鏡建設は西村製作所において 2008 年初旬より始められ, 5 月には仮組み, 6 月には 2 つの観測装置の取り付け試験, 電気系の仮配線が行われた. これらの試験を経て一旦分解され, 10 月にはチリに向けて発送された. 現地 Chajnantor 山頂においては 12 月下旬から基礎工事が始められ, 2009 年 2 月には西村製作所から 4 名, 東大から延べ 5 名がチリに赴き本格的に望遠鏡及びドームの設置作業を開始した. チリにおいてもまず標高の低い Calama において望遠鏡の仮組を行い, 動作試験を経て, 再度分解し 3 月初めに山頂への運搬を行った. 山頂ではまずはドーム上部のパーツを組み立て, これをドーム下部にクレーンで載せてドームを組み立てたのち, 順次望遠鏡パーツをドーム内にクレーンでつり込みながら望遠鏡の組み立て作業を行った (図 6.1). 機械的な組み立て作業ののち配線作業を行い, 発電機から配電してドームおよび望遠鏡の動作試験を行なった. 山頂は大気圧が地表の約半分の低温, 低酸素環境での困難な作業であったが miniTAO 望遠鏡の建設は進み, 2009 年 3 月 22 日にエンジニアリングファーストライトを果たした. 簡単な光学調整の結果, FWHM= 1 arcsec を切る良好な星像の画像を取得することに成功し, ハルトマンコンスタントは ~ 0.2 arcsec を達成している. 望遠鏡, ドームの他に観測コンテナ, 倉庫コンテナ, 発電機コンテナも設置された (§5.3.3).

5–6 月には望遠鏡およびドームを山頂観測室から制御できるようになり, 近赤外線カメラ ANIR をとりつけてファーストライトを果たし, 赤外線 Pa α 水素輝線 (波長 1.875 μm) での銀河中心の構造をとらえることに成功した. その後 9–11 月には望遠鏡の最終調整, ANIR による観測を押し進めるとともに, 中間赤外線カメラ MAX38 をとりつけ

図 6.1: Chajnantor 山頂における望遠鏡建設の様子.

てファーストライトを果たし, 地上から波長 38 ミクロンの光を捉えることに世界で初めて成功した. ANIR による Pa α 観測の成功と MAX38 による 30μm 帯観測の成功は, Chajnantor 山頂サイトが世界最高の赤外線観測条件を備えていることを実証したといえる. また試験用 CCD カメラや ANIR でとらえられた星像は最良で FWHM $\sim 0.5''$ に達し, シーイングについても世界有数の観測サイトであることを実証した.

これまでに 1 ラン 2 ヶ月にわたる観測を年 2 回づつ計 5 回行ってきたが, 一方で山頂へのアクセスや山頂での観測活動は大変な苦労を伴うため, 遠隔操作による観測の実現を目指し, 遠隔制御の整備を行ってきた. 2011 年 2 月には山頂, 山麓間に無線ネットワークのアンテナを設置し, 通信試験を行い, 5–6 月のランにおいて山麓からの遠隔制御試験に成功した (§5.3.4).

1m 望遠鏡完成を記念し, 平成 22 年 7 月 7 日にはサンチャゴ市において東京大学主催, チリ外務省エネルギー科学技術局およびチリ科学技術庁と共催, 在チリ日本国大使館の後援の下, 記念式典を開催した (出席者約 150 名). チリ共和国の記念切手も式典当日に発行された (p.258 図 5).

6.1.2 1m 望遠鏡仕様

miniTAO 望遠鏡は世界最高地点 5640m に設置された光学赤外線望遠鏡となり, 小口径ながらも世界最高の赤外線観測条件を生かし, 新しいユニークな研究を展開するととも

表 6.1: miniTAO 1m 望遠鏡の仕様.

パラメータ		値	備考
光学系	タイプ	Cassegrain / Ritchey-Chretien	
主鏡	外径	1,042.4mm	
	F 値	2.5	
副鏡	外径	222.88mm	
	曲率半径	-1407.673mm	
最終 F 値		12.0	
ハルトマン定数		$0.19''$	
バックフォーカス		650mm	
視野		$\phi\ 10'$	
プレートスケール		$16.644''\mathrm{mm}^{-1}$	
最大駆動速度	方位角方向	3 度 s^{-1}	
	高度角方向	2 度 s^{-1}	
	ローテーター	3 度 s^{-1}	
絶対指向精度		$2.5''$	
追尾精度		$0.2''\ \mathrm{min}^{-1}$	

に, TAO 計画の推進においてパイロット望遠鏡的役割も果たすものである.

1m 望遠鏡の架台は経緯台方式で, 高度角, 方位角には光学式エンコーダーが取り付けられており, それぞれサーボモーターによりフリクションドライブで駆動される. 方位軸の軸受けには名古屋大学 IRSF 1.4m (南アフリカ) 望遠鏡で採用された THK 社の R ガイド (円弧上に曲げられたレールガイド) が用いられており, 従来の経緯台望遠鏡に比べ小型, 軽量化がなされている. ドームの直径は 6m である. 主鏡セル下部にはインスツルメント・ローテータが取り付けられており, 観測装置としては可視・近赤外線観測装置 ANIR または中間赤外線観測装置 MAX38 が搭載される.

miniTAO 1m 望遠鏡の主な仕様を表 6.1 に示す.

6.2 近赤外線観測装置 ANIR

6.2.1 miniTAO 1m による Paα 観測

星形成活動のもっとも直接的な指標は, OB 型星の水素電離光子 (λ<912Å) によって電離された水素原子の再結合線である. その中でも最も一般的に用いられるのが Hα 6563Å であるが, この輝線はダスト吸収の影響を受けやすいだけでなく, ちょうど [N II]$\lambda\lambda$6548,6583 に挟まれているため低波長分散観測 (低分散分光や狭帯域フィルター撮像) ではそのコンタミのため定量的な評価が難しい.

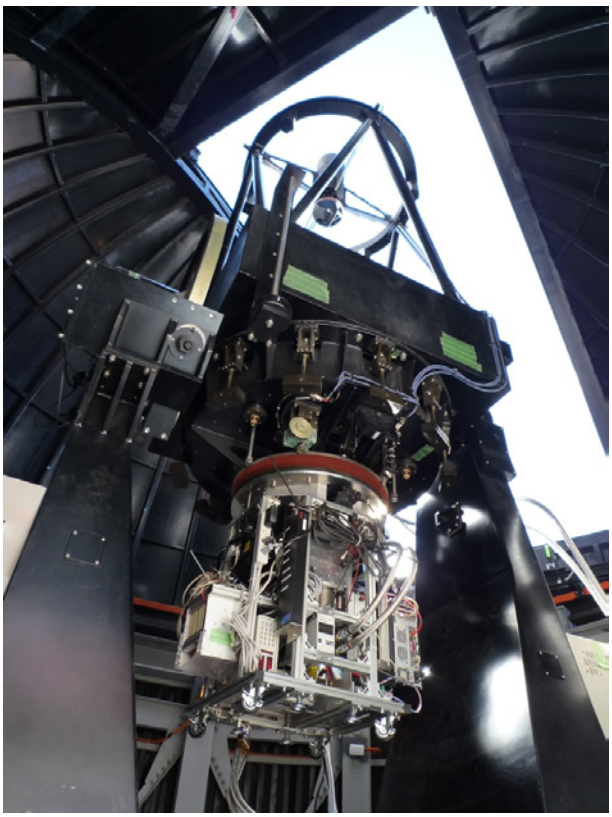

図 6.2: miniTAO 1m 望遠鏡に搭載された ANIR.

Paα は近赤外 1.8751μm ($n = 4 \rightarrow 3$) の水素輝線で, その強度は典型的な H II 領域で Hα の 0.12 倍となり, 近赤外波長域では最も明るい. また, その波長からダスト吸収の影響を受けにくく, $A_V > 3.6$ で Hα と強度が逆転する. さらに, 単独輝線であるため低分散観測でも強度を正確に求めることができるという利点ももっている. しかし, その波長は地球大気の吸収が強く, これまで地上観測はほとんど行われてこなかった.

その大気吸収の大部分は水蒸気によるもので, 高い標高 (5640m) と非常に低い水蒸気量 (PWV=0.5mm) を有する TAO サイトでは比較的容易に観測が可能となる. 図 6.3 に ATRAN によるシミュレーションの結果を示す. 南半球の典型的な観測所ではほとんど大気を透過しない 1.8751μm の光も (点線), チャナントール山頂では 50%以上が透過してくることがわかる.

ANIR(Atacama Near Infared camera) は miniTAO 1m 望遠鏡の近赤外線カメラで, この新たな窓を用い, これまで地上観測ではほとんど行われいない Paα の狭帯域フィル

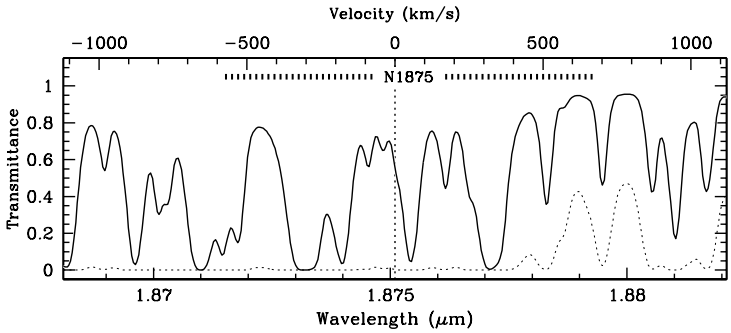

図 6.3: Paα 付近の大気透過率の ATRAN によるシミュレーション結果. 実線がチャナントール山頂 (5640m, PWV=0.5mm), 点線が 2600m(PWV=2.6mm) の環境のもの.

タ撮像観測を行うことをおもな目的としている.

6.2.2 装置概要

図 6.4 に ANIR の光学系とデュワーの断面図を示す. ANIR はメインの近赤外線光学系チャンネルと, デュワー窓前面にダイクロイックミラーを挿入することによって分離された可視光を結像する可視光学系チャンネルからなる.

6.2.3 近赤外チャンネル

近赤外線チャンネルの主な仕様を表 6.2 に示す. 望遠鏡からの入射光は焦点面直後でフィルターボックスを通過し, オフナーリレー光学系で検出器面に再結像される. 検出器は Engineering Grade の PACE HAWAII2 検出器の一コドラント/1024×1024 ピクセルを用いている.

表 6.2: ANIR 近赤外線チャンネルのスペック.

検出器	PACE HAWAII-2
ピクセルフォーマット	1024 × 1024
ピクセルスケール	0.″31/pix
視野	5.′3 × 5.′3
読み出しノイズ	<15 e^- r.m.s. (at 4μs/pix sampling)

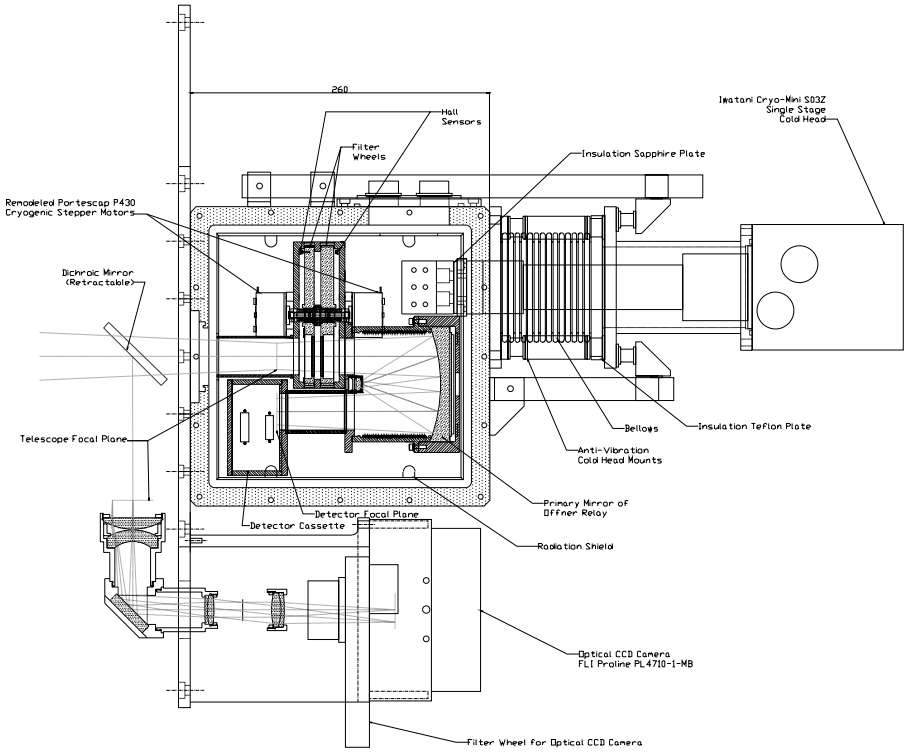

図 6.4: ANIR の断面図.

6.2.3.1 光学系

再結像光学系には, シンプルに構成できるオフナー光学系を採用した. 光学系のミラーとフィルターボックス, 検出器ボックスは一体となり, ハンドリングが容易な構造となっている (図 6.5).

図 6.6 に最終像面でのスポットダイアグラムを示す. 視野中心 (中央右) から視野端にかけて, ほぼ一ピクセル以下の像が得られる. また, 視野端でも像面の歪曲は一ピクセル以下となっている.

6.2.3.2 フィルター

フィルターホイールは ϕ38mm のフィルタを 4 枚収納できるホイール 2 枚から構成されており, 冷却ステッピングモーターで駆動される. このモーターは市販の常温用モー

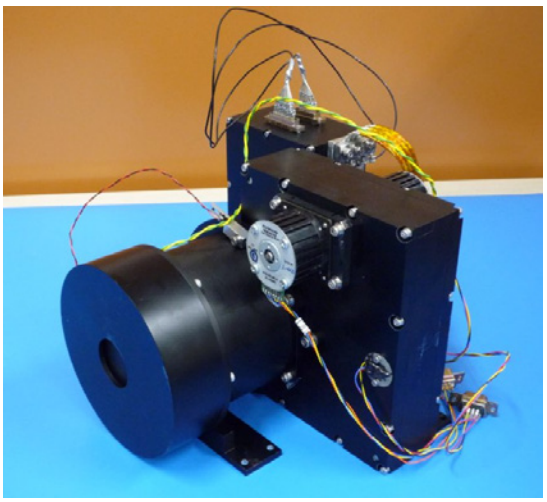

図 6.5: ANIR 近赤外チャンネルの光学系ユニット．左側がオフナー光学系のミラーを収める鏡筒, 右手前がフィルターボックスでその奥に検出器ボックスがある．

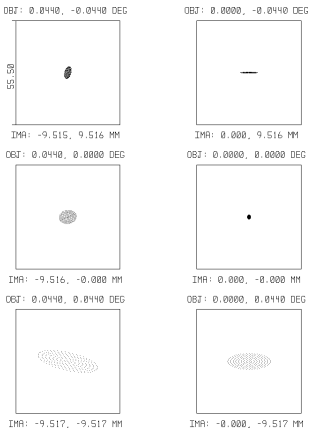

図 6.6: ANIR 近赤外チャンネルのスポットダイアグラム．四角の一辺が 3 ピクセルに相当する．

ターを改造し, ベアリングを MoS_2 スパッタのオイルレスボールベアリングに交換したものである．

ホイールにはネオジム磁石が埋め込まれており, ホールセンサを用いて位置検出を行う．ホームポジションのみ極性を逆にすることで, 初期位置の検出も可能である．

表 6.3 に近赤外チャンネルに装備されているフィルターを示す．4 枚の Mauna Kea フィルターセット (Tokunaga et al. 2002; Simons et al. 2002) の広帯域フィルターと, 4 枚の狭帯域フィルタからなる．

表 6.3: ANIR 近赤外線チャンネルのフィルターリスト.

名称	$\lambda(\mu\mathrm{m})$	$\Delta\lambda(\mu\mathrm{m})$
Y	1.038	0.0993
J	1.275	0.1586
H	1.673	0.297
K_s	2.149	0.3215
$N128$	1.2813	0.0214
$N1875$	1.8754	0.0079
$N191$	1.910	0.033
$N207$	2.074	0.041

6.2.3.3 検出器

検出器には Teledyne 社製, Engineering Grade の PACE HAWAII-2 を用いる. これは 0.9–2.5μm に感度をもつ HgCdTe の 2048×2048 フォーマットのアレイ検出器であり, そのコドラントの一つ (1024×1024 ピクセル) のみを用いる.

検出器の読み出しは, 中間赤外線カメラ MAX38 のアレイ検出器制御のために開発された TAC (University of Tokyo Array Controller Sako et al. 2008) を, HAWAII-2 にあわせて改造して用いる.

6.2.3.4 デュワー

これら各コンポーネントは, 一辺 260mm のデュワーに収められ (図 6.7), 岩谷瓦斯製のシングルステージの GM サイクル冷凍機 (Cryo-Mini S03Z, 25W@77K) を用いて 70K 以下にまで冷却される. 常温からの冷却時間はおよそ 24 時間である. 検出器からの読み出しノイズを抑えるため, 熱パスに 3mm 厚の人造サファイアプレートを挟むことにより, コールドヘッドと内部のコンポーネントは電気的に分離されている.

6.2.4 可視チャンネル

ANIR は近赤外チャンネルのデュワー窓直前にダイクロイックミラーを挿入し, 反射した可視光を再結像光学系で引き出すことにより, 可視赤外の同時撮像が可能である. 表 6.4 に仕様を, 表 6.5 に搭載されているフィルターを示す.

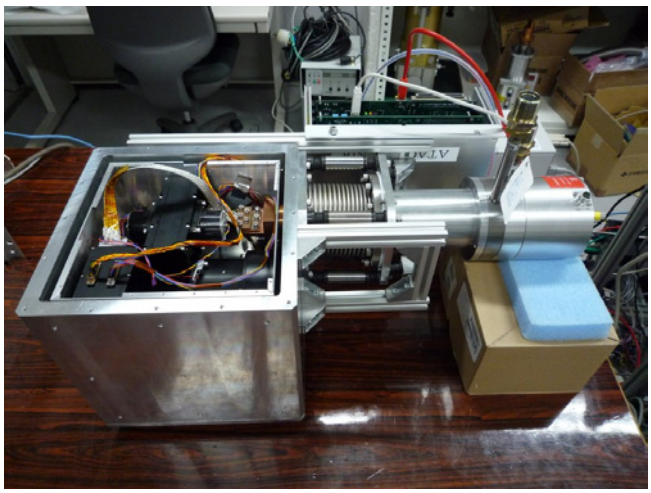

図 6.7: ANIR 近赤外チャンネルのデュワー.

表 6.4: ANIR 可視チャンネルのスペック.

検出器	E2V BI-CCD
ピクセルフォーマット	1056 × 1027
ピクセルスケール	0.″30/pix
視野	5.′0 × 5.′0
読み出しノイズ	14 e^- r.m.s.

表 6.5: ANIR 可視チャンネルのフィルターリスト. 中心波長, および波長幅は CCD の量子効率, およびダイクロイックミラーを含めた値である.

名称	$\lambda(\mu\mathrm{m})$	$\Delta\lambda(\mu\mathrm{m})$
B	0.4391	0.100
V	0.5352	0.082
R	0.6439	0.119
I	0.8063	0.166
Gr	-	-

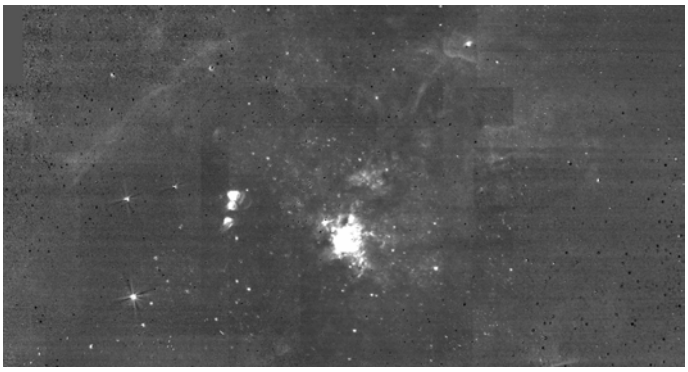

図 6.8: 銀河中心 SgrA の Paα 輝線画像.

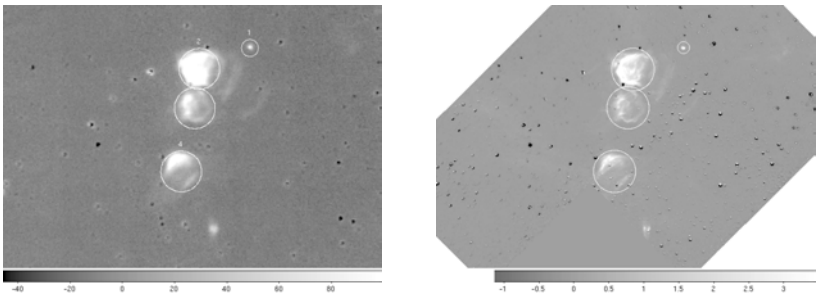

図 6.9: Sgr A 近くの H II 領域を拡大したもの. 左が ANIR/miniTAO 1.0m で 1080 秒積分したもの, 右が NICMOS/HST 2.4m で 191 秒積分したもの.

6.2.4.1 Paα 撮像

6.2.5 装置性能

ANIR は 2009 年 6 月 8 日に miniTAO 1m 望遠鏡でのファーストライト観測に成功し, その後観測を続けている. 以下, その観測データから測定された装置性能を示す.

N1875 フィルターを用いた Paα 輝線観測のファーストライトは 2009 年 6 月 10 日に行われた. 図 6.8 にその際得られた銀河中心の SgrA 周辺領域の画像を示す. これは, 地上観測では初めての Paα 輝線画像である.

この画像の中央左の HII 領域を拡大し, HST/NICMOS による画像と比較したのが図 6.9 である. この図の白丸で示されたアパーチャーのカウントから Paα 光子に対する大気透過率を算出した所, 15~50%という値が得られた. この結果は, PWV=0.5mm が程度であると仮定し輝線雲の速度幅やオフセットが数十 km/s 程度はあることを考えると,

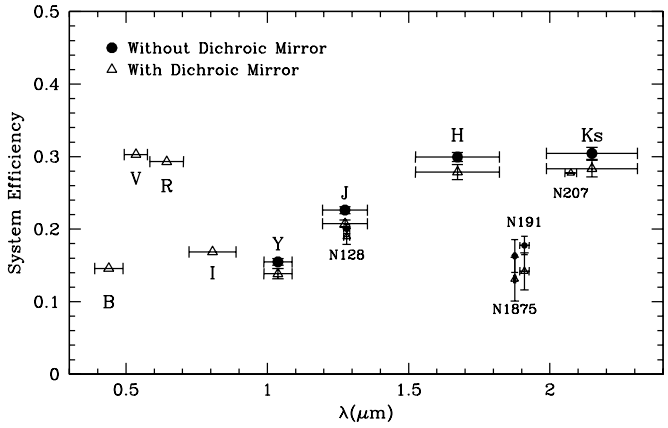

図 6.10: ANIR のシステム効率. 近赤外波長域については, 取得した全データに写っている 2MASS カタログ星を, 可視波長域は測光標準星のデータを用いた. 測定値の 1σ のバラツキを誤差棒で示している. 黒丸がダイクロイックミラーを入れない時, 白三角はダイクロイックミラーを入れて同時撮像した時.

図 6.3 に示した ATRAN のシミュレーション結果と合致し, チャナントール山頂で Paα 輝線観測が十分に可能であることを示している.

6.2.5.1 システム効率

大気圏外から入射した光子のうち検出器で電子に変換されて検出されたものの割合である, システム効率を図 6.10 に示す. 赤外チャンネルでは 1.5μm を切るあたりから効率が低下しているが, これは検出器の量子効率の低下によるものであると考えられる. また, N1875 と N191 の測定値のばらつきが大きいが, これは大気吸収の量が, 水蒸気量 (PWV) の変動によって大きく変わっているためであると考えられる.

6.2.5.2 PWV とシステム効率

そこで, チャナントール山麓の 5100m 地点にある APEX で測定された PWV とシステム効率をプロットしたのが図 6.11 である. これを見ると, PWV とシステム効率に良い相関が見える一方で, PWV が大きいにもかかわらずシステム効率が比較的良い場合もあることがわかる. これは, 山頂 5640m と PWV を測定した標高 5100m の間に大部分の水蒸気が集積した状況を示しているのではないかと考えられる. 今後のより詳細な測定が必要であろう.

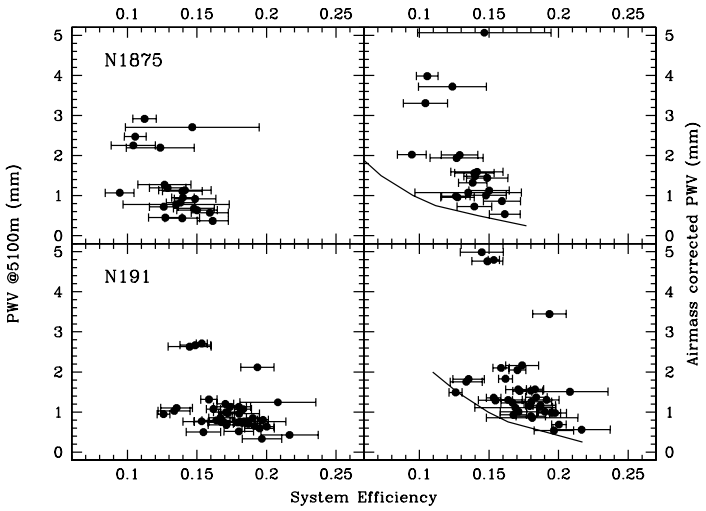

図 6.11: システム効率と 5100m で測定された PWV との関係. 上段が $N1875$, 下段が 191 フィルターのものである. 左側が測定された PWV を用いた時で, 右側は観測時の airmass の分だけ PWV を増やした. 実線は ATRAN によるシミュレーションから予想される関係.

6.2.5.3 シーイング

図 6.12 に赤外チャンネルでのこれまでのシーイング統計を示す. 中央値はどのバンドでも $\sim 0.''8$ 程度であるが, 回折像のサイズとハルトマン定数 ($0.''19$) を考慮すると, 実シーイングは $0.''76 - 0.''64$ に相当する. また, 可視チャンネルでのベストシーイングも $0.''6$ 以下という値が得られている. これらの結果は, DIMM シーイングモニタによる結果 (V バンドで $0.''69$) とも合致する.

その一方で, ダイクロイックミラーを挿入した際のシーイングは良くなく, $1''$ を切ることはまずない. 光学設計ではすくなくとも視野中心では Strehl 比は 0.6 以上になって, ダイクロイックミラーなしとあまり変わらない像が得られると想定されてたが, 今のところ原因は不明である.

6.2.5.4 限界等級

観測データから得られた限界等級を表 6.6 に示す.

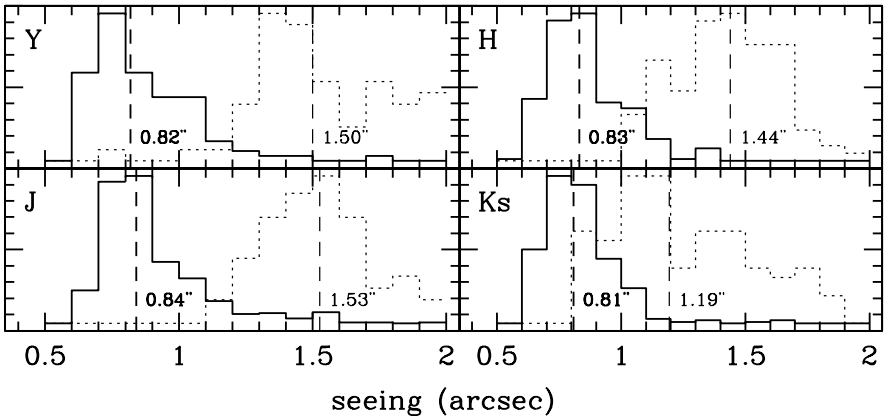

図 6.12: ANIR/miniTAO 1.0m で実測された Y, J, H, Ks バンドのシーイングのヒストグラム. 実線がダイクロイックミラーを入れない時, 点線がダイクロイックミラーを入れて可視赤外同時撮像を行ったとき. 縦破線はそれぞれの中央値を示している.

表 6.6: ANIR の限界等級. 5σ, 600 秒積分, $1.''5$ ϕ アパーチャでの値で, 等級は全て AB システムで表示した.

バンド	限界等級	背景放射 (Mag/$''^2$)
Y	20.3	15.9
J	20.6	15.7
H (high background)	20.4	14.5
H (low background)	20.9	15.5
K_s (high background)	20.5	15.0
K_s (low background)	20.8	15.5
$N128$	18.9	14.8
$N1875$	17.7	14.3
$N191$	19.5	16.1
B	23.3	21.8
V	23.2	20.9
R	23.0	20.1
I	21.3	17.0

6.3 中間赤外線観測装置 MAX38

6.3.1 装置概要

MAX38(Mid-infrared Astronomical eXplorer 38) は miniTAO 望遠鏡に搭載される中間赤外線カメラである.. この装置の最大の特徴はその観測波長にあり, 8–38μm の広い範囲での撮像観測が可能である. 特に 26–38μm の 30μm 帯は他のサイトからは観測が不可能であり, miniTAO/MAX38 だけが唯一地上観測に成功している波長帯である.

装置全体については Miyata et al. 2008 を参照のこと.

MAX38 のスペックを表 6.7 に示す. また搭載されているフィルターとその感度の一覧を表 6.8 に示す.

表 6.7: miniTAO/MAX38 の装置スペック

観測波長域	8–38 μm	3–8μm も低感度ながら観測可能
検出器	Si:Sb BIB array detector	mnufactured by DRS
フォーマット	128x128	
ピクセルスケール	1.26 arcsec/pix	
観測視野	160arcsec x 80arcsec	
フィルター	(別表を参照)	
分光モード	グリズムによる低分散分光 R∼100	

表 6.8: MAX38 に搭載されているフィルターとその感度

フィルター名	中心波長 μm	透過幅 μm	感度 1sig1sec Jy	解像度 arcsec	備考
干渉フィルター					
8.9um	8.9	0.8	1.5	2.1	
9.8um	9.8	0.9	1.5	2.3	
10.6um	10.6	0.4	2.0	2.5	
12.2um	12.2	0.5	1.5	2.9	
18.7um	18.7	0.9	2.5	4.4	
24.5um	24.5	2.0	5.4	6.1	テスト中
Ldash	3.8	0.7	—	—	テスト中
メッシュフィルター					
31um	30	3	7.4	7.4	
37um	37	2	25	8.8	
分光グリズム					
NL-grism	10.5	5 (7.5-13.5)	10	∼3	テスト中

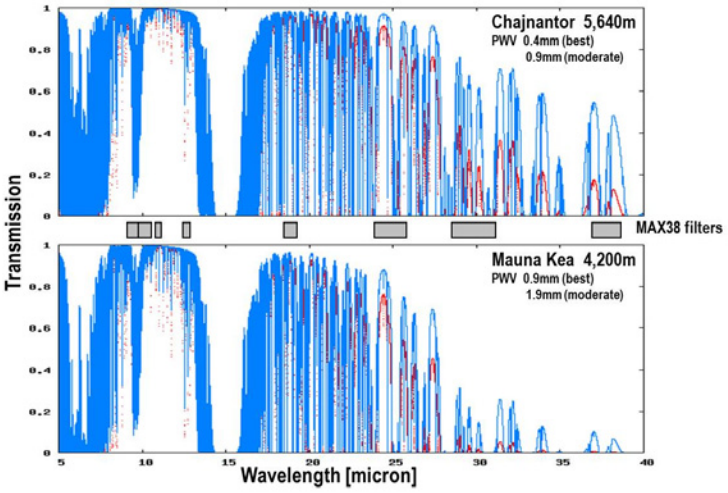

図 6.13: MAX38 フィルターと大気透過率の関係.

6.3.2 光学系・真空冷却系

MAX38 の光学系は 2 つのリレー系から構成されている. 1 つ目のリレー系は瞳位置に低温チョッパー (後述) を持っており, 望遠鏡視野を 1:1 でフィールドストップ上に再結像する. フィールドストップの像は 2 つ目のリレー系で検出器に像を結ぶが, その瞳にはストップ及びフィルターが置かれ, 不要な光を最大限除去する. 光学系はすべて反射系で構成されており, 非球面鏡にはアルミ合金切削鏡を用いている.

MAX38 の冷却には住友重機械工業製の GM 冷凍機が用いられる. 冷凍機の排熱能力

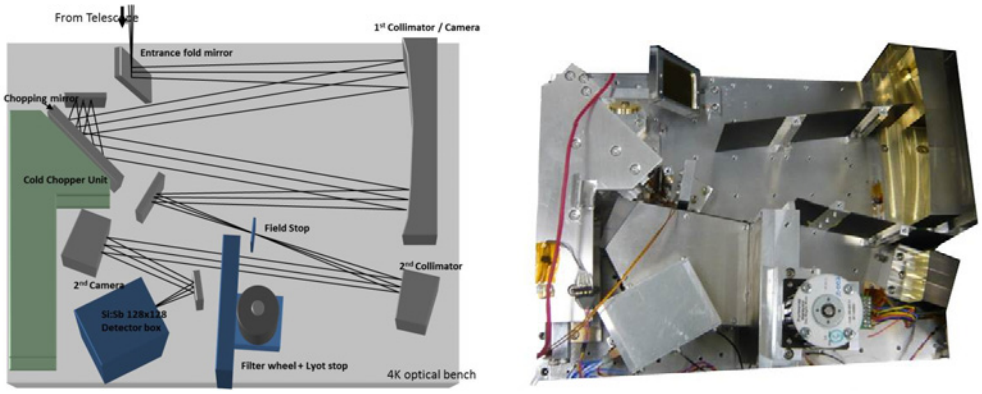

図 6.14: MAX38 光学系のイラストと実物写真.

は 4K で 1W である．これを用いて光学系全体を 7K 程度まで冷却する．検出器ユニットは光学系ユニットと熱的に同じ部分に設置されており, 同じ熱ルートを伝って同時に冷却される．

なお miniTAO の置かれている TAO サイトの温度は非常に低く, 場合によっては-20 度以下にもなる．さらに観測運用時には強い西風が当たることもある．これらによって冷凍機ヘッドとコンプレッサーを結ぶ He 配管がかなり低温になることがある．He 配管が低温になるとヘッドに供給されるヘリウムガスが低温になり, 冷凍機ヘッドのパッキンの性能を劣化させ冷凍機性能が十分に発揮されない, という現象が起きる．MAX38 ではこれを避けるため, He 配管をラバーヒータで覆い, 周囲を温めることで対応をしている．

6.3.3 検出器および制御回路

MAX38 の検出器としては DRS 社製の Si:Sb 128x128 検出器を用いている．この検出器は 38μm 付近まで感度を持っており, また well も 1e7 と非常に深いため, 地上からの 30mum 帯観測に非常に適した検出器である．検出器諸元を表 6.9 にまとめる．

MAX38 の検出器制御回路は図 6.16 のようになっている．特徴的なのは, デジタル部分に専用回路を置かず, RTOS を搭載した Linux と市販の DIO ボードを用いている点である．これによってデジタル部分の開発費を抑えるだけでなく, メンテナンス性にも優れたシステムを構築している．またこの部分の入出力には LVDS を用いている．全てのシステムはネットワーク経由で制御が可能である．

検出器駆動システムについては Sako et al. 2008 を参照のこと．

表 6.9: MAX38 搭載の Si:Sb 検出器諸元

検出器種類	Si:Sb BIB	
フォーマット	128x128	
ピクセルサイズ	75μm	
出力数	4	
フレームレート	up to 500 frame/sec	=2msec frame sample
ダークカレント	4.4e6 e/sec	@8K, bias 1V
キャパシティ	$\sim$ 1e7 e-	
製作会社	DRS	

図 6.15: MAX38 検出器マウントに搭載された Si:Sb 検出器

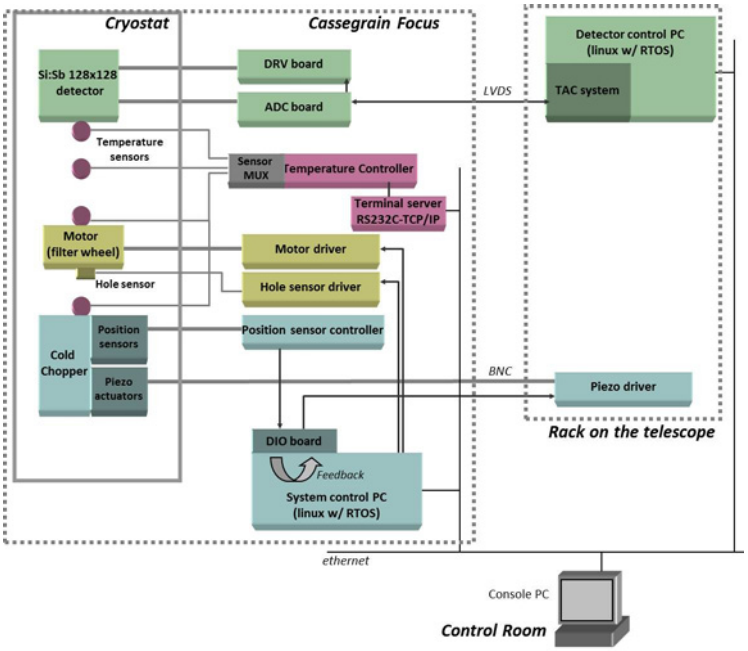

図 6.16: MAX38 エレクトロニクスブロック図.

6.3.4 新規開発技術

6.3.4.1 冷却チョッパー

地上望遠鏡による中間赤外線観測では大気放射の影響が非常に大きく，これを精度よく補正することが精密観測には必須である．これを実現するのがチョッピングと呼ばれ

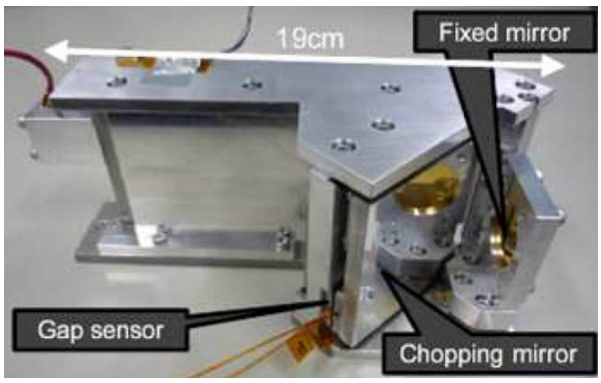

図 6.17: MAX38 冷却チョッパー写真.

表 6.10: MAX38 冷却チョッパー諸元

駆動素子	種類	低温用ピエゾ素子	富士セラミックスとの共同研究
	ストローク	$\sim 10\mu$m	@7K
	物理サイズ	L=150mm, ϕ 12mm	
位置センサー	種類	静電容量式ギャップセンサー	QueensGate 社製
	測定レンジ	250–750mum	
	測定精度	0.0075 $nm/Hz^{1/2}$	rms
最大チョッピング振幅		50arcsec	天球上
		0.18deg	実角度
チョッピング周波数		最大 6Hz	
位置静定制度		<< 1pix	

る観測手法である．これは高速で検出器上の天体位置を動かし, 大気条件が変わる前に背景放射を取る技術であり, 通常は望遠鏡副鏡を振動させることで実現する．しかしながら TAO 計画やそれ以後の超大型望遠鏡計画を鑑みたときに, 副鏡を振動させることは必ずしも得策ではない.

振動副鏡に代わる機構として我々が開発したのが冷却チョッパーである．これは瞳部分においた可動式の平面鏡であり, 傾きを高速で変化させることで検出器上 (像上) の星像位置を変化させるものである．MAX38 用の冷却チョッパーは駆動に低温用ピエゾ素子を用いている．これは我々のグループが圧電素子メーカと共同で開発したものであり, 市販の低温ピエゾ素子に比べて格段に長いライフタイムを実現している．また瞳そのものに可動鏡を置くのではなく, 手前に可動鏡を置き 2 度反射させることで, ストロークを 2 倍にするなどの工夫もしている．完成した低温チョッパーの諸元を表 6.10 にまとめる．詳しくは Nakamura et al. 2008 を参照のこと.

6.3.4.2　メッシュフィルター

MAX38 の 30μm 帯観測を可能にした, もう 1 つの要素はメタルメッシュによるバンドパスフィルターである．これは 25μm 以降の長波長では, 多くの光学材料が不透明になる為, 従来の誘電体多層膜法ではメタルメッシュフィルターとは金属格子の光干渉や金属表面プラズモン・ポラリトン効果を用いて選択的な波長透過特性を実現したものである．このようなメッシュによるフィルターは今までも電波波長や遠赤外線領域では用いられてきたが, 近年の微細加工技術の発達により, 中間赤外線波長でも製作が可能になった．我々のグループでは 2006 年度よりこのようなフィルターの開発研究をスタートさせ, 金膜 (厚さ 2μm 程度) に格子状のパターンをくりぬいた自立型メッシュフィルターを完成させた．このようなメッシュフィルターは短波長側にリークが出やすいのでこれをブロックするため 4 枚を非平行に重ね合わせて用いている．

MAX38 では 31μm を中心としたフィルターと, 37μm を中心としたフィルターの 2 種類をインストールして観測に利用している．なおメッシュフィルターは透過波長とサイズに単純な関係があり, 違う透過波長のフィルターもサイズをスケールするだけで容易に製作が可能であることを付記しておく．

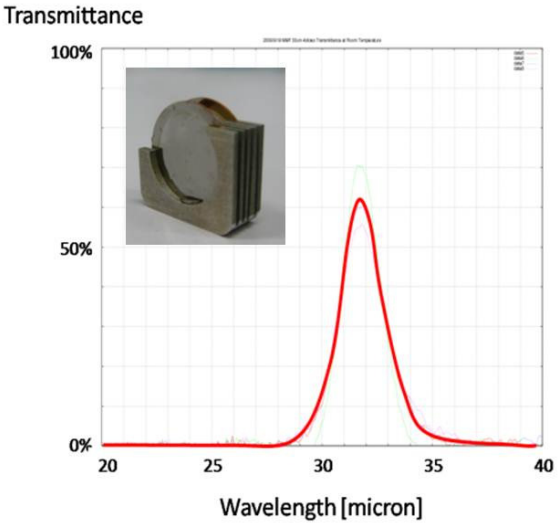

図 6.18: MAX38 に搭載されているメタルメッシュフィルター (31μm フィルター) の写真と 4 枚重ねの透過率曲線.

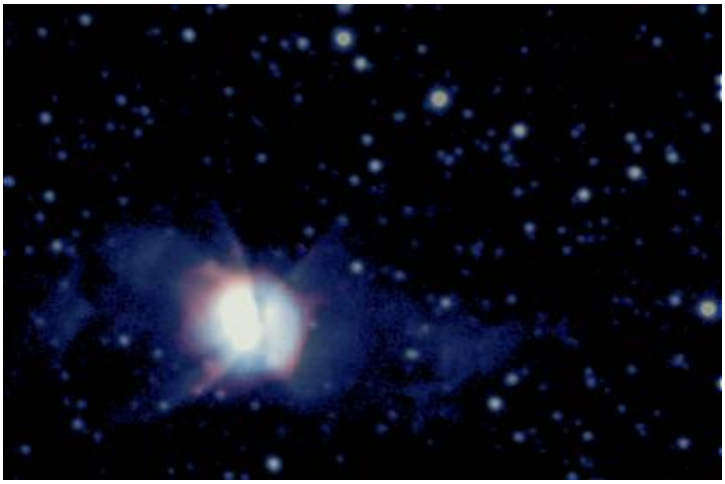

図 6.19: 惑星状星雲 NGC6302 の赤外線画像. 青が ANIR で得られた Paβ 画像, 赤が MAX38 で得られた 31μm 画像. 惑星状星雲を取り巻くトーラスからの 30μm 放射が明瞭にとらえられている.

6.3.5 ファーストライト観測および初期成果

MAX38 は 2009 年 9 月に TAO サイトに輸送され, 11 月に初観測を行った. 初観測では冷凍機の性能劣化や光学系のトラブルなどもあったが, 天体からの 30μm 帯赤外線を地上から受けることに成功した. これは世界で初めての快挙であり, 新聞各紙での記事のほか, NHK でも番組として取り上げられた.

ファーストライト観測以降も装置の調整を続け, 2010 年度秋からは本格的な科学観測も可能となった. 特に 20μm 帯では見えないような低温度 (<100K) の領域探査に威力を発揮している. 現在の主な観測テーマは Luminous Blue Variables と呼ばれる大質量星進化末期天体や中質量末期天体, 星形成領域などである. 一例として中質量星末期天体である惑星状星雲 NGC6302 の観測画像を図 6.19 に示す. 赤色で示したのが MAX38μm で得られた低温ダストトーラスであり, 可視近赤外線では暗くなっている領域にある低温ダストからの放射が捉えられていることがわかる.

MAX38 での 30μm 帯観測は他に例のないものであるので, その解析方法も自分自身で開拓していく必要がある. 初期の観測データの解析によって, 30μm 帯では天体の明るさが短いタイムスケールで大きく変動し, 場合によっては 3 時間程度で 7 倍も明るさが変化することが明らかとなった. 一方, 観測される天体の明るさと, 同時に測定される大気の明るさの間には非常に良い相関があることも分かった (図 6.20. これは天体の明るさ変動の原因が大気透過率の変化にあり, 大気透過率の変化は大気の明るさの変化を引き起こす

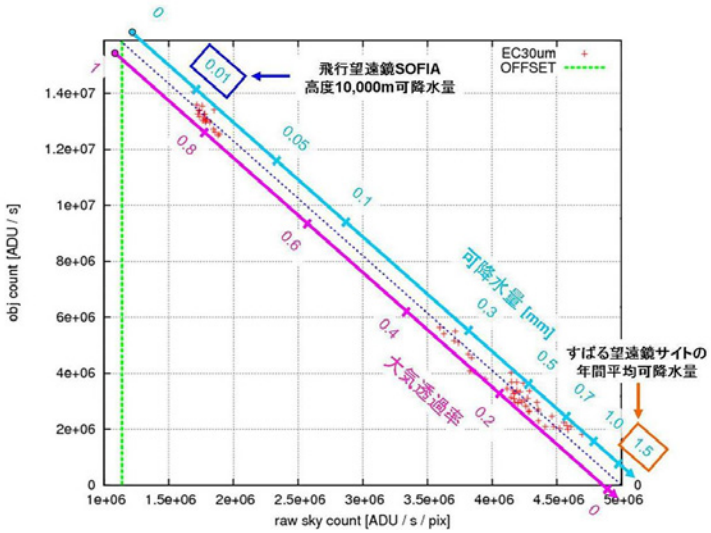

図 6.20: MAX38 で得られた, 大気放射と天体の観測される明るさの関係.

ことを示している. 逆に言えば大気の明るさから大気透過率は推定可能である. MAX38 ではこの関係を用いて大気透過率の変化を補正する, self sky calibration の方法を現在開発中である. なお, 大気透過率がわかれば大気モデルを介してその視線方向の可降水量を推定することができる. 図には各地点での可降水量も示してある. 驚くべきことに, 大気の状態が良いときには 31μm での透過率は 80%, 可降水量は 0.02mm 以下になることがわかる. これは飛行機望遠鏡 SOFIA の高度での大気水蒸気量 7μm) に匹敵する環境であり, TAO サイトが 30μm 帯観測に非常に有望なサイトであることを示している.

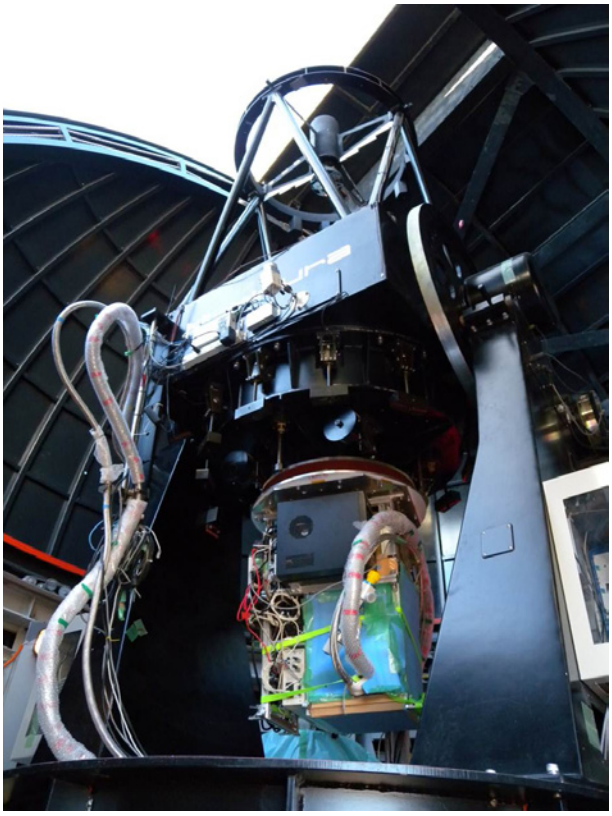

図 6.21: miniTAO 望遠鏡に搭載された MAX38.

関連図書

Miyata S., et al., 2008, Proc. SPIE, 7014, 73

Nakamura S., et al., 2008, Proc. SPIE, 7018, 142

Sako S., et al., 2008, Proc. SPIE, 7021, 67

Simons D. A., & Tokunaga A. T., 2002, PASP, 792, 169

Tokunaga A. T., Simons, D. A, & Vacca W. D., 2002 ,PASP, 792, 180

図 4: 東京大学アタカマ 1m 望遠鏡 (miniTAO) 完成.