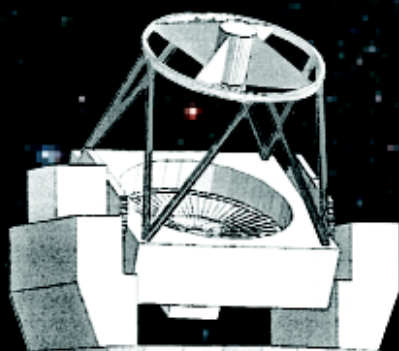


TAO PROJECT

The University of Tokyo Atacama Observatory



The 1st edition

東大アタカマ天文台計画プロジェクトブック

東京大学大学院理学系研究科 TAO 計画推進グループ

TAO 計画は、東京大学大学院天文学教育研究センターと天文学専攻が協力して推進している計画です。計画の具体的な検討は以下の天文学教育研究センターのメンバーによってなされています (2005 年 3 月現在)。

吉井讓 (計画代表者)

川良公明

田中培生

土居守

小林尚人

河野孝太郎

田辺俊彦

半田利弘

峰崎岳夫

宮田隆志

本原顕太郎

青木勉

征矢野隆夫

樽沢賢一

酒向重行

過去にメンバーとして協力いただいた方々。

片坐 宏一

大藪進喜

また、科学的検討に際しては以下の方々にも検討に加わっていただきました。

児玉忠恭

戸谷友則

長島雅裕

現地調査においては、国立天文台の多くの研究者、技術者、特に、ALMA 計画関係者に甚大な協力をいただいています。さらに、全国の多くの大学の研究者からの、計画全体に渡っての支持・協力の基に進めています。

目次

第 1 章	計画の概要と特長	1
1.1	計画の概要	1
1.2	計画の特長	2
1.2.1	口径 6.5m 赤外最適化望遠鏡	2
1.2.2	赤外透過率に優れたチリ北部アタカマの 5600m 山頂に建設	2
1.2.3	重点的なテーマに集中しつつも多くの研究者との共同研究	3
1.2.4	次世代を担う若手がのびのびと使える大学望遠鏡	3
第 2 章	21 世紀の世界及び日本の観測天文学の流れ	5
2.1	観測天文学研究の見通し	5
2.1.1	宇宙論	5
2.1.2	銀河の起源と進化	6
2.1.3	星間物質	7
2.1.4	ALMA との連携	7
2.2	世界の大型計画	7
2.3	日本の大型観測施設の中での TAO 計画の位置づけ	9
第 3 章	目指す天文学	11
3.1	宇宙論	11
3.1.1	キューサーによる宇宙年代学	12
3.1.2	Ia 型超新星による宇宙膨張測定	15
3.1.3	MAGNUM 原理による宇宙膨張測定	18
3.2	銀河の起源と進化	23
3.2.1	近赤外背景放射の探求	23
3.2.2	楕円銀河の起源	25
3.2.3	宇宙大規模構造のマッピング	27
3.2.4	銀河の質量と形態の進化	28
3.2.5	宇宙の星生成史	30

3.2.6	宇宙の化学進化	33
3.2.7	TAO による近赤外広視野サーベイ	34
3.3	星間物質	39
3.3.1	分子雲ダストの観測	39
3.3.2	ガスとの関係	43
3.4	系外惑星	44
3.4.1	高解像度観測による系外惑星系探査	44
3.4.2	食による太陽系外惑星の検出	51
3.5	その他のテーマ	56
3.5.1	銀河中心	56
3.5.2	星形成	57
3.5.3	低温度星の切れ目のないスペクトルの取得	57
3.5.4	太陽系外縁天体の搜索	57
3.6	ALMA との連携	58
3.6.1	ALMA の特徴	59
3.6.2	TAO と ALMA の連携	60
第 4 章	サイト - チリ北部アタカマ地域	69
4.1	チリの天文台と天文学研究機関	69
4.2	アタカマの地理	74
4.3	南天 5600m のサイト	76
第 5 章	サイト調査の経緯	79
5.1	現地調査	79
5.2	衛星によるチリ北部の気象調査	82
5.3	気象モニタによる地表気象条件のモニタ観測	83
5.3.1	概要	83
5.3.2	気象モニタ装置	83
5.3.3	データ解析と結果	84
5.4	赤外雲モニタによる雲量のモニタ観測	92
5.4.1	概要	92
5.4.2	雲モニタ装置	93
5.4.3	データ解析	95
5.4.4	解析結果	95
5.5	シーイングモニタ	100

5.5.1	概要	100
5.5.2	東大シーイングモニタ	101
5.5.3	試験観測	101
5.5.4	アタカマ本観測	104
5.6	今後の予定	107
第 6 章	望遠鏡	109
6.1	望遠鏡の基本仕様	109
6.1.1	背景	109
6.1.2	望遠鏡の概要	109
6.2	マゼラン望遠鏡	111
6.3	望遠鏡光学系	114
6.3.1	TAO 望遠鏡光学系の概念設計	114
6.3.2	望遠鏡設計案	119
6.4	望遠鏡構造体	122
6.4.1	望遠鏡仕様	122
6.4.2	マゼラン望遠鏡との違い	122
6.5	観測制御系	123
6.5.1	望遠鏡制御層	124
6.5.2	観測制御層	124
6.5.3	遠隔観測	126
6.6	リモート制御の検討	128
6.7	限界等級	129
6.7.1	主なパラメータ	129
6.7.2	望遠鏡鏡面の反射率	129
6.7.3	観測装置の効率	130
6.7.4	大気の透過率	130
6.7.5	背景放射	132
6.7.6	限界等級	133
第 7 章	観測装置	137
7.1	近赤外 2 バンド同時撮像分光装置	137
7.1.1	条件	137
7.1.2	概要	138
7.1.3	光学系	139

7.1.4	検出器	143
7.1.5	マイクロシャッター	144
7.2	中間赤外分光撮像装置	147
7.2.1	装置概要	147
7.2.2	装置の仕様	150
7.2.3	開発要素	153
7.3	可視広視野分光撮像装置	160
7.3.1	可視分光撮像装置	160
7.4	プロトタイプ分光器・カメラの開発	161
7.4.1	可視・赤外多色カメラ	161
7.4.2	赤外エシエル分光器	161
第 8 章	施設およびサイト整備	163
8.1	道路拡張	163
8.2	サイト基礎	164
8.3	ドーム下部及び制御棟 (蒸着室等を含む)	164
8.4	ドーム上部	164
8.5	発電水道施設	164
8.6	研究宿泊施設 (サンペドロ・デ・アタカマ付近)	165
第 9 章	概算要求 [予算額、年次計画]	167
9.1	予算額	167
9.2	年次計画	167
第 10 章	運用体制	169
10.1	研究・運用に必要な人員	169
10.2	TAO 天文台の運用・維持・管理	170
第 11 章	他大学との協力関係	173
11.1	大学望遠鏡の必要性	173
11.2	国内の他大学などの研究機関との協力に関する基本方針	175
11.3	本計画を支持していただいている大学	176
11.4	天文学研究連絡委員会	177
11.4.1	天文研連特別議事録	177
11.4.2	天文研連委員長談話	185
11.5	光学赤外線天文連絡会	186

11.5.1 運営委員会声明	186
付録 A 外部評価委員会報告書	189
付録 B 協定	201
付録 C 合意書	215
付録 D 世界の大型観測装置 (地上・スペース) の現状	221
D.1 運用中・建設中の地上望遠鏡	221
D.1.1 ケック望遠鏡 I、II	221
D.1.2 すばる望遠鏡	221
D.1.3 ジェミニ望遠鏡	222
D.1.4 Very Large Telescope (VLT)	222
D.1.5 マゼラン望遠鏡 I・II	222
D.1.6 Hobby-Eberly 望遠鏡 (HET)	223
D.1.7 Multi-Mirror Telescope (MMT)	224
D.1.8 South Africa Large Telescope (SALT)	224
D.1.9 Large Binocular Telescope (LBT)	225
D.1.10 カナリア大望遠鏡 (GTC)	225
D.1.11 Stratospheric Observatory for Far Infrared Astronomy (SOFIA)	225
D.2 計画中の地上望遠鏡	226
D.2.1 Thirty Meter Telescope (TMT)	226
D.2.2 Overwhelmingly Large telescope (OWL)	226
D.2.3 Euro50	226
D.2.4 Giant Magellan Telescope (GMT)	227
D.2.5 LAMA	228
D.2.6 アタカマ望遠鏡	228
D.3 宇宙望遠鏡 (HST, SST 以外は計画)	229
D.3.1 ハッブル宇宙望遠鏡 (HST)	229
D.3.2 Spitzer 宇宙望遠鏡 (SST)	229
D.3.3 James Webb 宇宙望遠鏡 (JWST)	230
D.3.4 Herschel Space Observatory	230
D.3.5 TPF	231
D.3.6 Darwin	231

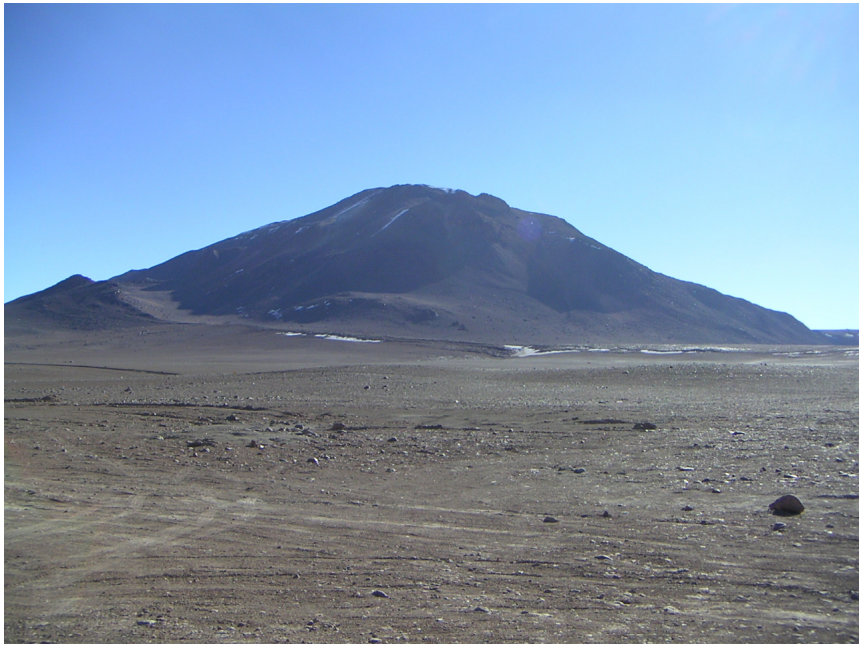


図 1: 快晴のアタカマ高原にて。背景がチャナントール山。

第1章 計画の概要と特長

1.1 計画の概要

野辺山電波望遠鏡、すばる望遠鏡、X線天文衛星シリーズなど、日本の観測天文学は今や完全に世界の第1線といえる観測装置を独自に運用する時代を迎えている。しかし、それ以外の望遠鏡については不十分であると言わざるを得ない。第1線の観測装置が有効に利用されるためには、それらを学術的に支援できる世界的に見て優秀な観測装置・望遠鏡群が存在することが本質的に重要である。

このような望遠鏡の1つとして、東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センター（以下、天文センターと略す）では、南米チリ北部アタカマ地方に口径6.5mの赤外線望遠鏡（以下、TAO望遠鏡と称す）を設置する計画を検討している。本書はその計画内容について紹介するものである。

天文センターでは、これまでに数多くの重要な研究が行われてきた。そのなかでも、「高赤方偏移クェーサーによる宇宙幾何構造の決定」、「銀河の形成と進化」、「褐色矮星の大気構造」などは、大きな赤方偏移であったり、恒星としては低温であったりすることにより、赤外線観測が重要な鍵を握るという点で共通している。これらの研究成果を拡大発展させるために、赤外線観測を自ら推進することが必要となってきた。しかしながら、大きな発展を期待するには、汎用の大型望遠鏡を使用する公募観測だけでは不十分であり、特定の研究テーマについて集中的な観測時間の割り当てを必要とする。従来、このような集中観測には専用の小口径望遠鏡が適切と考えられてきた。実際に、その考えに基づいて建設されたMAGNUM2m望遠鏡、東大60cm電波望遠鏡などの望遠鏡群は期待された成果を挙げている。しかしながら、世界の第1線の光学赤外線望遠鏡が10mを超える規模へと移行しつつある現状を考えると、1-2m級では、厳選された少数のテーマに目的を限っても、もはや全く不十分な時代を迎えつつある。

我々はこの状況を勘案し、国家プロジェクトとはならない規模の計画として、このような望遠鏡の建設の必要性と可能性について検討を続けてきた。その結果、観測装置に対して大幅に矛盾した要求にならないような、いくつかの研究テーマに最適化した観測装置を開発することでコストを最小限に抑えながらも、基本性能では既存の8-10m級の望遠鏡に匹敵する性能を持つ赤外線望遠鏡を建設することは可能であるとの結論に達し

た。具体的には、赤外線観測に最適化した主鏡口径 6.5m の望遠鏡を赤外線透過率が一段と高い 5000m 級の高山山頂に設置し、副鏡による補償光学系、スパッタリングによる銀メッキ主鏡など革新的技術を取り入れることで、在来型の同口径鏡を遙かに凌ぐ望遠鏡を建設することである。

1.2 計画の特長

1.2.1 口径 6.5m 赤外最適化望遠鏡

現在、世界最大クラスの可視赤外望遠鏡は 8–10m の主鏡（例えば、「すばる」）を持つ。これらと比べると 6.5m は多少口径は小さいが、次項で述べる赤外性能を考慮すると、赤外域では、世界最高性能（地上望遠鏡で）が実現できる。これを基に、宇宙論的天体の、探索（サーベイ観測）から詳細な物理の解明（分光観測）までの一貫した天文学を行う。これまでは、大学が持つ望遠鏡は中小口径に限られていたため、あるテーマの観測的研究のうち、サーベイ観測のみを大学望遠鏡で行い、研究の詰めとなる詳細な分光観測は共同利用望遠鏡で行わざるを得なかった。その結果、観測時間が限られ、結局大問題に結論を出すことが困難であった。これを改め、結論までを 1 台の望遠鏡で追求するには、6.5m 級の口径が必要である。主鏡は、アリゾナ大学ミラーラボでの製造を予定している。ミラーラボは、2 台のマゼラン望遠鏡（チリ・ラスカンパナス天文台）と新 MMT 望遠鏡の 3 枚の 6.5m と、LBT（大双眼望遠鏡）の 2 枚の 8.4m 鏡を磨いた実績がある。我々は、光学系の詳細な検討と共に、主鏡の銀コートや副鏡での補償光学（AO：アダプティブ・オプティクス）などの新しい試みを取り入れ、赤外望遠鏡としての最適化を目指している。総合的に、8–10m 望遠鏡と比べて、大変コストパフォーマンスの高い望遠鏡である。

1.2.2 赤外透過率に優れたチリ北部アタカマの 5600m 山頂に建設

赤外線の波長域は、大気の水蒸気、CO₂ などの吸収によって、必ずしもすべての波長帯の光が地上まで到達するわけではない。そこで、できるだけ高地から観測することで、大気吸収の影響を小さくしたい。ハワイ・マウナケア天文台は 4200m の高度にあり、大気吸収はかなり小さいが、ここで考えているアタカマ地域は、アンデス山脈にあり、高度 5000m を越える。その中のチャントール山（高度 5600m）山頂は、気圧が 0.5 気圧を下回り、湿度は大変低く、晴天率も高い、天文学、特に赤外線観測には最適地である。一方、チリは南半球に位置しているため、北半球からでは決して見ることのできない天

文学上重要な天域 [特に南銀極、大小マゼラン銀河など] の観測が可能となる。これはまた、日本の X 線衛星、赤外衛星との強力な共同観測を可能にする。さらにこの場所は、現在、日米欧の国際協力で建設が進行している ALMA 計画 (大電波干渉計) のサイトでもある。電波で発見された天体の迅速な確認観測などによって、日本の観測天文学を有機的に発展させる一つの鍵となることは間違いない。

1.2.3 重点的なテーマに集中しつつも多くの研究者との共同研究

この計画では、望遠鏡の運用方法も従来の共同利用や大学専有望遠鏡とは若干異った形態を検討していることも特長の1つであるといえる。通常的共同利用望遠鏡の細切れの観測時間割り当てに対して、この望遠鏡の運用方針と特徴を明確にした観測テーマにそって十分な観測時間を割り当てることを考えている。その上で、観測計画の決定過程を透明にし、さらに、観測者は、単に自分の観測を行うのみでなく、望遠鏡・観測装置の運用にも共同で責任を持つ体制にする。全国の大学の研究者に共同研究の場としてを解放し、TAO での共同研究が、それぞれの大学の研究基盤の発展に貢献するように、視野の広い、そして、長期の展望を持った運用を目指す。

1.2.4 次世代を担う若手がのびのびと使える大学望遠鏡

望遠鏡が大型になればなるほどその維持は大変になり、効率的な運用には専任のエンジニアが必要になる。そして、通常、まだあまり経験のない大学院生などが望遠鏡に触れられる機会が減ってしまう。しかしながら、できるだけ若手の研究者が望遠鏡に触れ、望遠鏡・観測装置の開発・維持の経験を積むことは、望遠鏡の能力を最大限発揮した観測を行うためのみならず、次世代の特長ある様々な計画を推進していくためには不可欠である。限界に挑戦した観測を行い、さらに新しいプロジェクトを進められる人材の育成が可能なのが大学望遠鏡であり、この点を重視することが一つの重要な特徴である。

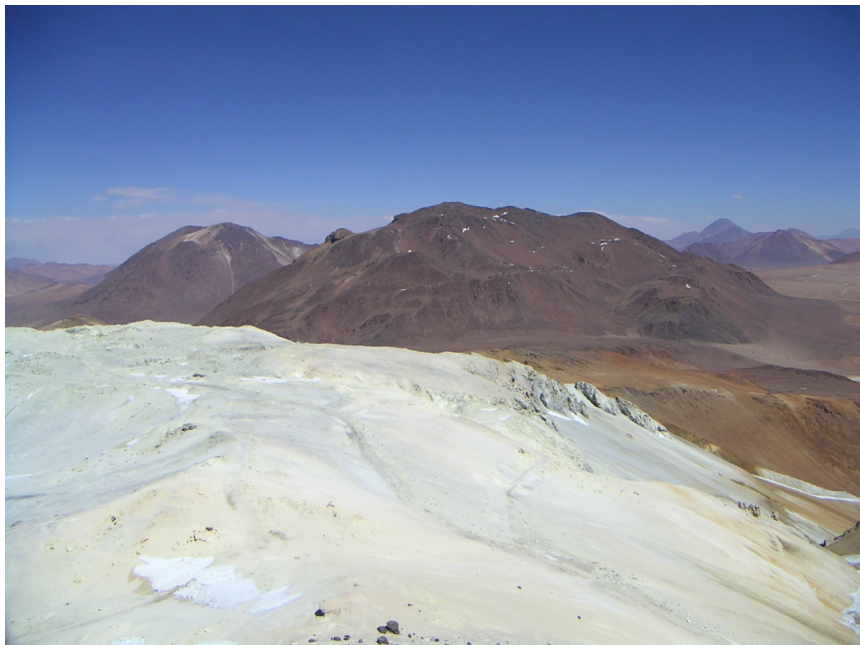


図 1.1: チャナントール山を望む。手前の黄白色の山は硫黄の露頭。

第2章 21世紀の世界及び日本の観測天文学の流れ

2.1 観測天文学研究の見通し

学術研究の発展の方向を正確に予言するのは、学術研究というものの本質から考えて、ほとんど不可能といってもよいが、新しい望遠鏡を計画するに際しては、関連する分野の研究動向や今後の発展の方向をある程度は見透しておくことが必要である。そこで、赤外線天文学の中でも、TAO計画と特に関係が深くなるのが確実な分野について、その展望を、ここで概観することにする。

その中でTAO計画推進メンバーが追究しようと現時点で考えている具体的な研究テーマについては、次章で紹介するので、そちらをご覧いただきたい。

2.1.1 宇宙論

宇宙の起源進化を対象とする学問は宇宙論と呼ばれ、万物の起源に直接関連することから太古から人々の興味を中心であった。宇宙論を直接観測で研究するのは、宇宙背景放射の観測を除けば長らく困難な状況にあったが、20世紀末の観測技術の急速な進歩により、宇宙論パラメータと直接関係する観測データを得ることが可能となった結果、観測的宇宙論は新たな段階を迎えている。

1990年代には議論的であったハッブル定数は、ハッブル宇宙望遠鏡による近傍銀河のセファイド型変光星から得られる $z \sim 0$ での測定値とWMAP衛星による宇宙背景放射のゆらぎに簡単な仮定をすることから得られる $z \sim 1000$ での測定値がほぼ 70 km/s/Mpc で一致したことにより、議論は一段落したと言える。一方、1990年代初めに行なわれた暗い銀河の計数から示唆された正の宇宙項は、Ia型超新星を使った宇宙膨張測定の結果、大半の研究者がその存在を信じるようになった。また、インフレーション宇宙モデルで予言され、WMAP衛星による宇宙背景放射の精密なゆらぎ測定により、宇宙はほぼ平坦であることが高い精度で示された。これと銀河団、あるいは銀河サーベイの銀河分布やライマン α の森の分布、あるいは超新星の測定結果とあわせると、宇宙の曲率をゼロ

(平坦) にしている総エネルギー量の 3 割は物質エネルギーであり、残りの 7 割は宇宙項に起因する「ダークエネルギー」と呼ばれる未知のエネルギーであるという仮説が標準的に受け入れられるようになった。大量の「ダークエネルギー」が宇宙膨張を加速させたことにより、宇宙年齢はほぼ 140 億年となり、球状星団の年齢が宇宙年齢よりも長くなる可能性のあった、いわゆる年齢問題も一応の解決が得られた。

宇宙を天体の容れ物として考え、膨張する宇宙のパラメータを決めることだけが観測的宇宙論であるならば、現在までに得られているモデルは、現象を比較的良く説明する。しかしながら、これらが確定してくると、天体物理学の観点からは、むしろ問題が増えたと思うべきであろう。1930 年代にツビッキーがかみのけ座銀河団で指摘した、見えない質量、つまり「ダークマター」(暗黒物質)は、電磁相互作用はしないが重力相互作用をする仮定の粒子として説明される。この「仮想粒子」を高エネルギー加速器によって発見しようという試みは行われているが、ツビッキーの指摘後 70 年以上たった今でもまだ正体がわかっていない。「ダークエネルギー」はさらに謎が深く、その正体はもとより、宇宙膨張によらず密度が一定で、遠方からの光がちょうどまっすぐ(平坦な曲率で)進む量になるように現在宇宙に満ちている理由は全く見当もつかない状況である。これらは残された些細な問題と見る向きもあるかも知れないが、20 世紀初頭の物理学発展の歴史と同じように、21 世紀の物理学の大発展の糸口となる可能性を秘めていると見るべきであろう。現在の観測的宇宙論の主題は、「ダークマター」および「ダークエネルギー」の正体の解明へと移りつつあると言える。そのためには、むしろ“近くの宇宙”を観測することが重要となる。というのは、赤方偏移が 1000 を越えるような時期には、物質密度が現在の 10^9 倍にもなり、ダークエネルギーが宇宙の曲率に及ぼす影響はごく僅かなものとなるため、精密な宇宙背景放射の測定を行なっても、そこからダークエネルギーの寄与だけを的確に取りだすのは極めて困難だからである。

一方、この見方の前提となっている“標準的な宇宙論”が正しいことを手放しで認めるのは決して科学的な態度とは言えない。その正しさを従来とは異った方法やレベルで検証することは、その説を補強するばかりでなく、時にはその限界を明示することにほかならないからである。宇宙背景放射による検証が高精度になればなるほど、新たな手法で宇宙膨張率の変遷を捕える観測や宇宙の年齢を直接測定する観測も一層重要性を増すと考えられる。

2.1.2 銀河の起源と進化

天体の容れ物としての宇宙のパラメーターが分ってくると、その中で天体の進化に関心が寄せられるのは当然であろう。この方向での研究は、主に、計算機シミュレーシ

ンに基づいた CDM (cold dark matter = 冷たい暗黒物質) モデルである程度は説明可能であることが分ってきた。宇宙初期に存在した微小な密度揺らぎが成長して、銀河より小さなサイズのダークマターハローが形成され、それらが互いに合体を繰り返し成長していくというのが、その大筋である。これを“階層的銀河形成シナリオ”と呼ぶ。

しかしながら、“真の”原始銀河、すなわち、原始的なガスから形成中の銀河として明確にそうだと言える天体は未だに発見されていない。また、それが見つかったとしても、その後、どのような進化を経て、現在見られるような銀河になるのか、階層的銀河形成シナリオはどこまで(あるいは、どれが)正しいのかについては、観測結果があまりに不足しているために、ほとんど未解明である。宇宙の大規模構造を従来にない広い領域に渡って描き出すことや、種々の銀河の特徴と分布との関係を明らかにするなど、従来から研究が進められて来たテーマについても、量的に画期的な進歩をもたらすことで新たな展開が期待できよう。

2.1.3 星間物質

星間物質は恒星とならぶ宇宙の主要構成物質であり、主に電波から赤外線領域および X 線領域で観測するのが有効である。このうち、赤外線では固体成分であるダストの観測に適している。これに関連した研究テーマとしては、今後、ダストの形成に関する研究および系外惑星の探査と形成に関する研究が注目すべき分野であると考えられる。

2.1.4 ALMA との連携

これらと別の観点として、ALMA によるミリ波・サブミリ波観測の展開も十分に考慮する必要がある。これは、ALMA が 21 世紀初頭の天文学に於いて画期的な成果を期待されている装置であることのみならず、そのターゲットとする研究テーマに関連して重要となる赤外線観測が多数想定されることと、設置場所が地理的に隣接していることなどが大きな要素となる。そこで、ALMA との連携については改めて項を立てて検討する必要がある。

2.2 世界の大型計画

新しい望遠鏡を建設するに際しては、国家的規模の計画ではなくとも、その完成想定時に、世界の天文観測施設の水準がどのようになっているはずなのかを知っておく必要がある。そこで、可視および赤外線天文学における現在の大型望遠鏡の状況と、TAO

完成想定時における状況がどのようになっているのかを推測を交えてまとめてみた。

受光装置が写真乾板や単画素検出器から CCD などの固体撮像素子へと改良が進む間、可視・赤外線望遠鏡の主鏡口径は長らくヘール 5m 鏡、ゼレンツクスカヤ 6m 鏡が限界であるとされ、その最大サイズは長らく進歩が見られなかった。しかしながら、20 世紀末に、口径 10m のケック望遠鏡ができ、ハッブル宇宙望遠鏡が運用を始めると、この限界は一気に破られ、2005 年現在、口径 8m 超の望遠鏡だけで、10 基以上が運用を行っている。そして、より巨大な地上の望遠鏡や軌道上の望遠鏡も多数計画されている。今や、すばる望遠鏡もこれら巨大望遠鏡群の 1 つに過ぎず、日本の可視赤外線天文学は、少なくとも観測装置の面では安閑としていられない状況にある。

この状況を具体的に認識するために、ここでは、可視赤外線域で現在運用中および計画中の主な大型望遠鏡、宇宙望遠鏡についてまとめる。

8-10m 級が可能となった技術的背景としては、主鏡の軽量化と経緯台の実用化、および短焦点主鏡によるドームの小型化の 3 点が挙げられる。

主鏡の軽量化は、構造強度をガラス材とは独立することによって達成された。ガラス材の形状によって薄メニスカス、ハニカム、分割鏡の 3 方式が実用化されたが、主鏡面形状を保持する構造強度をガラス材とは独立とし、そこからの能動支持によって保つという基本的な考え方は共通している。薄メニスカス鏡はガラス材単独時の取り扱い、ハニカム鏡はガラス材鋳造工程の複雑化、分割鏡は要素鏡境界線による星像や赤外線放射率の悪化という問題点をそれぞれ持つが、互いに他にはない長所もあり、8-10m 級では甲乙つけがたい。とはいえ、30m 超級ではいずれも分割鏡を採用している。このサイズでは一体のガラスを製造することが不可能であるためと考えられる。

可視赤外線望遠鏡は高い角分解能で撮像素子を用いた観測を行うため、非等速回転と像回転が発生する経緯台式望遠鏡を可視赤外線用で実用化するためには、高度な精密制御が必要であったが、コンピュータ制御技術の発展により、1980 年頃には充分実用の域に達した。経緯台式の場合、重力に対する大型構造物支持が自然な形状となる。また、ドーム形状も最小限のクリアランスを確保すればよいので、同じサイズの望遠鏡に対して赤道儀よりも若干小型化することが可能となる。

短焦点主鏡を製造するには、曲率半径が小さな深い主鏡が必要であり、平板ガラス材から製造するには、多くの切削量と十分な精度が必要となる。ガラス鋳造技術とコンピュータを利用した光学設計技術の進歩、およびレーザー干渉測定による高精度測定技術が実用化したことで、主鏡の比焦点（口径に対する焦点距離）を非常に小さくすることが可能となった。その結果、主焦点または副鏡位置を主鏡面に近くして、鏡筒長を口径に比べて短くすることが可能となった。これにより望遠鏡の回転モーメントを小さくして、望遠鏡駆動装置への負担を軽減することができた。また、望遠鏡を収容するドーム径も小さくすることができるようになった。

これらの技術は、実際に 8–10m 級望遠鏡を運用した結果のフィードバック及びコンピュータ制御技術・精密測定技術のさらなる進歩によって発展を続けており、今後、10 年程度で、国家プロジェクトあるいは国際共同プロジェクト規模で建設可能な可視赤外線望遠鏡の口径は 30–100m 級に達することが予想される。

目を宇宙に向けると、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の次世代として計画されている NASA の J. Webb 宇宙望遠鏡 (JWST) がある。2002 年まで、次世代宇宙望遠鏡 (NGST) として検討されていたものである。JWST は、口径 6m だが、観測条件が地上とは比較にならない宇宙空間に設置されるため、カタログ仕様では他の望遠鏡計画の追随を許さない。HST に比べて赤外線性能の向上を優先課題としたため、HST のような機器更新の可能性を捨て、地球からの放射を避け、地球–太陽が作る L2 点に設置することになっている。国家プロジェクト以上の規模として検討されている地上望遠鏡の口径が 30–100m 級となっているのは、JWST の撮像能力に対応する分光能力を目標としているためでもある。

JWST の観測能力が落ちてくる遠赤外線に的を絞ったのが宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究本部 (JAXA-ISAS) で検討している SPICA である。口径 8m の主鏡冷却望遠鏡を JWST と同じく L2 に設置することを予定している。遠赤外線観測を狙った天文衛星は、これに先駆けて進んでいるハーシェル宇宙望遠鏡 (旧称 FIRST) や 2005 年度冬期に打ち上げ予定の JAXA の ASTRO-F、2003 年に運用を開始した Spitzer Space Telescope (旧称 SIRTF) がある。宇宙望遠鏡は、衛星寿命や搭載できる観測装置が限られることから、勢い、特定の研究テーマに的を絞ったものが多くなる。地上から観測困難な遠赤外線域での主要研究テーマとして現在世界的に注目されているのは宇宙背景放射と太陽系外惑星である。

したがって、共同利用を行い汎用の観測を目的とした地上望遠鏡を新規に建設するとすると、口径 10m を大きく上回らないと世界の観測天文学の水準から大きく後れをとることとなる。これより口径が小さな望遠鏡を建設するには観測条件が格段により場所に、最低 6m 以上、できれば 10m 級の口径を持つ望遠鏡を建設し、観測テーマを絞り、望遠鏡の仕様や観測時間を戦略的に集中させるなどの対策を立てる必要がある。

主な望遠鏡計画についての具体的な仕様などをまとめて Appendix D に付録に掲載した。また、計画の実現想定時期の概略を図 2.1 に掲載した。

2.3 日本の大型観測施設の中での TAO 計画の位置づけ

日本の大口径光赤外望遠鏡としては、国立天文台が建設し 2000 年より共同利用観測を行なっている「すばる」望遠鏡がある。これは北半球に建設されており、我々の TAO 望

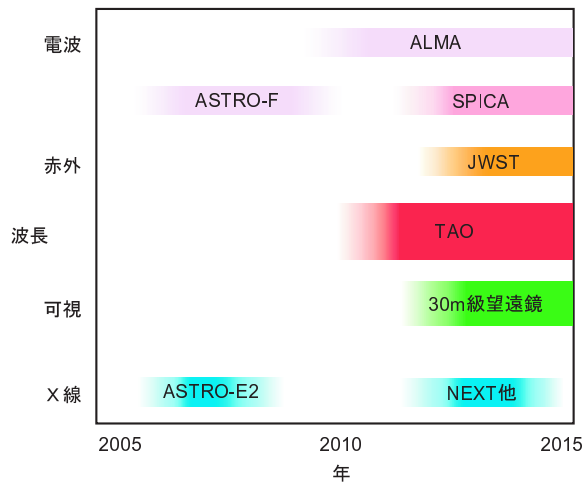


図 2.1: 世界の主要望遠鏡計画の実現時期と TAO

望遠鏡と合わせると、宇宙論及び銀河形成・星形成の研究分野での最重要な5つの天域 [2つの銀極、大小マゼラン銀河、銀河中心、オリオン星雲] がカバーできる。さらに、国立天文台は北米連合、ヨーロッパと共同で ALMA (大規模ミリ波干渉計) をアタカマに建設しており、この ALMA で検出された未知の天体の同定、詳細な観測が TAO 望遠鏡を用いて日本独自に行える。さらに、日本の X 線、赤外線観測衛星の打ち上げが 2005-2006 年にかけて予定されており、これらとの共同観測がすばるでの観測が可能な北天に限られることなく、全天にわたって行える。また、以上の大望遠鏡、衛星天文台はすべて国立共同利用機関 (国立天文台と宇宙科学研究所) が建設・運用し、国際共同利用が行われているが、さらなる 21 世紀の日本の大型計画を科学的にも技術的にも推進していく若手の育成のためには、TAO のような大学固有の望遠鏡が大きな役割を果たすのは疑う余地がない。

第3章 目指す天文学

21世紀の観測天文学では、前章で概観したような分野の研究が活発に進められるものと予想される。そのような状況を考えた上で、TAO望遠鏡は、その特徴を活かした、少数のテーマに観測時間を集中的に投入することで、共同利用型の望遠鏡では実現が困難であるような大型の観測プロジェクトの遂行を可能とすることが、計画全体の天文学的成果をより多いものとする上で重要であろう。我々は、近赤外線領域における超高感度撮像サーベイでクエーサーや原始銀河のような高赤方偏移天体の発見を目指し、光赤外線領域での分光観測によってそれらの天体の物理的な特徴を調べることを基本的な観測戦略とする。建設予定場所がアタカマであることを考えると、ALMAでの研究展開の見透しについても考慮する必要がある。

本章では、TAO望遠鏡で重点的に推進する具体的な研究テーマとして、現時点で推進グループが追究することを考えているものを示す。今後の学問の進展に伴い、具体的な手法の改善や新たなテーマの追加があることは当然、予想されるが、それについては今後の改訂に伴って更新する予定である。

3.1 宇宙論

第2章に記したように、この10年で観測的宇宙論は大きな進歩を遂げ、WMAP他による宇宙背景放射のゆらぎ測定やハッブル宇宙望遠鏡によるセファイド型変光星を用いたハッブル定数の測定に代表される数パーセントの精密の測定が行われ、標準的な宇宙膨張モデルが確定した。しかしながら宇宙膨張の歴史を理解しようと試みると、膨張しても密度が一定の謎のエネルギーであるダークエネルギーが約70%、重力相互作用を行うが電磁相互作用は行わないダークマターが約25%という、物理学の根幹に関わる大きな謎が残されている。TAOは高い赤外線観測の性能とサーベイ重視の体制によって、観測的宇宙論に関わる謎にいくつかの手法で迫っていくことができる。

3.1.1 クェーサーによる宇宙年代学

宇宙時計としての Fe/Mg 組成比

宇宙時計として期待されている、高赤方偏移クェーサーの Fe/Mg 組成比を測定して、宇宙の幾何構造、一様密度の状態から質量が集積されて最初の大質量天体 (クェーサー) が形成されるまでの時間、最初の星の形成時期など、宇宙論や銀河形成論の核心となる部分の解明を目指す。



図 3.1: 高赤方偏移クェーサー SDSSp J033829.31+002156.3 ($z = 5.0$) の赤外線イメージ (すばる望遠鏡による撮像)

高赤方偏移にあって十分な精度でスペクトルを取得できるのはクェーサーだけである。クェーサーのスペクトルには重元素の輝線が見られる。中でも Mg (マグネシウム) と Fe (鉄) の輝線は特に重要である。宇宙の初期、水素とヘリウムからなる始原ガスの巨大な雲が収縮して銀河が形成された。重い星から軽い星まで、多数の星がほぼ同時生まれたであろう。星の中心部では、重元素が熱核反応で合成される。重い星は数百万年も経つと、その寿命を終え超新星爆発 (II 型超新星) を起し中心部の重元素を放出し、始原ガスを重元素で汚染する。それから 10 億年ほどたってから、ある条件を満たす白色矮星 (2 重星で伴星からのガスが降着) が超新星爆発 (Ia 型超新星) を起こす。Mg は II 型超新星で生成され、Fe のほとんどは Ia 型超新星で生成される。始原ガスは、銀河形成とほぼ同時に Mg で汚染され、それから 10 億年ほどたつと Fe で汚染されるのである。銀河形成直後の Mg に対する Fe の元素組成比は、II 型超新星の元素合成のパターンに一致する。10 億年後に Ia 型超新星が鉄を作り出すようになると、Fe の組成比は大きく増加する。Fe/Mg 元素組成比は、この時間差 (10 億年) を記憶している宇宙時計なの

である。Fe/Mg 元素組成比から求められたクェーサー母銀河の年齢が、宇宙年齢の下限となる (Yoshii et al. 1998)。こうした測定を多数の高赤方偏移クェーサーで行うことにより、宇宙の幾何パラメータを決定できるのである。Fe/Mg 宇宙時計からクェーサーの形成時期も特定することができる。高赤方偏移クェーサーは、超大質量ブラックホール ($10^9 M_{\odot}$) と大質量ハロー ($10^{13} M_{\odot}$) からなる最初の超大質量天体であり、その形成時期を特定することは、一様密度の宇宙空間から質量が集積して銀河が形成され、中性の銀河間ガスが再電離されたとする宇宙進化の理解に重要な基礎を与えるであろう。

現状

Fe/Mg 元素組成比は、紫外線域にある FeII と MgII の輝線を測定して求める。FeII 輝線は、数千数万本の輝線が重なりあった幅の広い盛り上がりとして $2000\text{--}3000 \text{ \AA}$ において観測され、MgII は、 2798 \AA のシャープな輝線として観測される (図 3.2 左図参照)。高赤方偏移クェーサーの場合、紫外線域の FeII と MgII の輝線は赤方偏移のために、赤外線の波長で観測される。図 3.2 の右上図に、キットピーク天文台における赤外線の透過率曲線を示す。この図のように、透過率の低い波長域が存在し、そこで観測することはできない。そのために、図 3.2 右下図のスペクトル ($z = 3.6$ のクェーサー) のように、断片的なスペクトルになってしまう。その結果、(1) 大気の透明な部分に FeII と MgII の輝線が赤方偏移しているクェーサーしか観測できず、観測可能な赤方偏移の範囲が制約される、(2) 観測されたスペクトルは断片的であり、Fe/Mg 元素組成比の測定精度が悪くなる、などの問題が生じる。これらは Fe/Mg 元素組成比の決定精度を大きく劣化させる。

TAO の優位性

宇宙からの赤外線を吸収するは主として大気中の水蒸気である。TAO 望遠鏡の建設予定地である標高 5600m のチャナントール山における水蒸気量は年間を通して $0.4\text{--}1.3\text{mm}$ と極めて少なく、図 3.3 の大気透過曲線に見るように可視光から $2.6\mu\text{m}$ 付近まで連続的に観測可能な波長域がつながっている。また $3\mu\text{m}$ より少し短い波長から $4\mu\text{m}$ を越える波長まで大気透過率の良好な部分が続く。水蒸気は宇宙赤外線を吸収するだけでなく、大気からの熱雑音として観測の感度を劣化させるのであるが、水蒸気の少ない高地に建設される TAO 望遠鏡ではその影響は少なく、世界最高の赤外線感度を実現できる。図 3.4 に、TAO 望遠鏡の感度と高赤方偏移クェーサーのスペクトル (モデル) を比較する。細い実線は、分解能 $R = 5000$ で 10000 秒積分したときの信号雑音比 (S/N) が 5 のレベルを示す。 $z = 5.8$ のクェーサーのスペクトルを S/N 数百のレベルで観測できることが

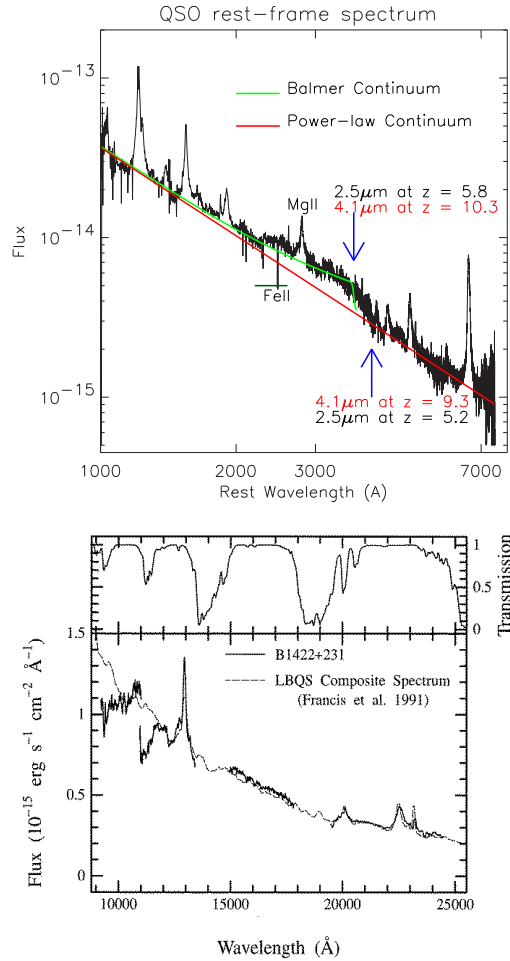


図 3.2: 上図:低赤方偏移クェーサーのスペクトル。鉄輝線を測定するには少なくとも静止波長 3650 \AA までの観測が必要。 $4.1\mu\text{m}$ まで観測できる TAO では、赤方偏移 10 までの測定が可能。下図:KPNO (キットピーク天文台) 4m 望遠鏡で取得した $z = 3.6$ のクェーサーのスペクトル (Kawara et al. 1996)。上図は KPNO における大気の透過率。下図における、細い線は低赤方偏移クェーサーの合成スペクトルを表し、太い線は $z = 3.6$ のクェーサーの観測スペクトルを表す。

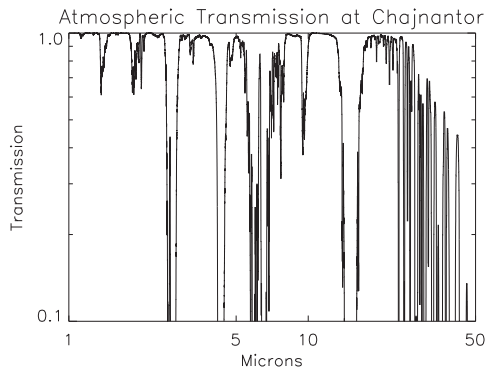


図 3.3: チャナントール山における大気透過率 (モデル)

わかる。観測できないのは 2.56 ~ 2.81 ミクロンの狭い領域だけである。

TAO 望遠鏡は、キューサーの断片的なスペクトルを連続的なスペクトルにするだけでなく、観測可能な最大波長を従来の $2.5\mu\text{m}$ から $4.1\mu\text{m}$ まで拡大する。その結果、図 3.2 に見るように、FeII の高精度観測が可能な最大赤方偏移が $z = 5.8$ から $z = 10.3$ へ大きく拡大される。図 3.5 に、高品質の低赤方偏移キューサーのスペクトルを用いて、 $z > 6$ の観測をシミュレートした結果を示す。TAO における最大波長限界は $4.1\mu\text{m}$ 、VLT では $2.5\mu\text{m}$ と仮定した。横軸は波長制限なしの理想的な観測から得られた FeII/MgII である。TAO での観測値は 1:1 の線に沿って分布しているのに対し、VLT での観測はおおきくばらついており、TAO の優位性を示している。

3.1.2 Ia 型超新星による宇宙膨張測定

観測的宇宙論として宇宙膨張を測定するのに標準的になっているのは、Ia 型超新星を標準光源として用いる方法である。Ia 型超新星は最大光度は -19 等前後とほぼ銀河 1 個分に匹敵するくらい明るく、また減光の速さを使って絶対光度の補正を行うと、10–20%程度の分散で明るさが一定である。近傍と遠方の超新星の明るさを比較することで、ダークエネルギー存在を示唆する観測結果を出している (Perlmutter et al. 1999; Schmidt et al. 1998; 土居 2004)。現在世界では、比較的小型の望遠鏡による近傍の超新星サーベイ (SN Factory, SDSS)、4m 級望遠鏡による中程度の赤方偏移 ($z = 0.2\text{--}0.8$) をカバーするサーベイ (ESSENCE, SNLS)、ハッブル宇宙望遠鏡や 8–10m 級望遠鏡による、最も遠い赤方偏移 ($z = 0.8\text{--}1.6$) を狙ったサーベイ (SCP, High- z) がある。TAO

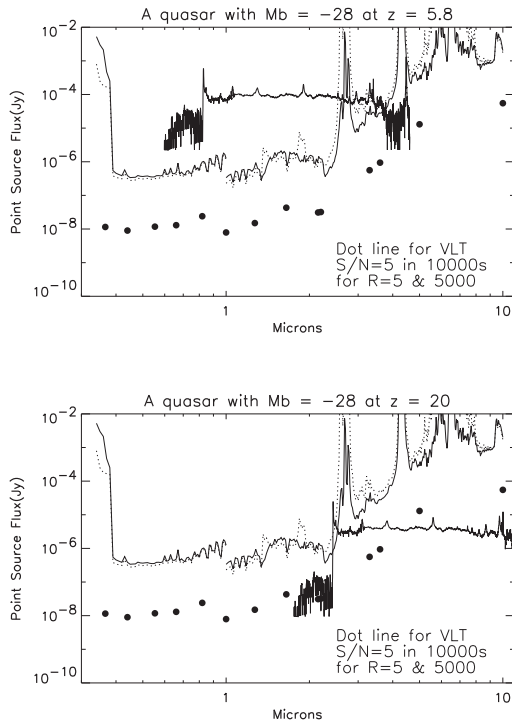


図 3.4: 高赤方偏移のクエーサー (宇宙の起源と進化)。太線はクエーサーのスペクトル、細線は分解能 $R = 5000$ での TAO の感度、細い点線は VLT の同感度、黒丸は広帯域撮像モード $R = 5$ での TAO の感度。積分時間は 10000 秒で $S/N = 5$ を達成。1 μm より短い波長では空間分解能 0.5 秒、1 μm より長い波長は回折限界 (Strehl ratio = 0.5) を仮定。

は、その高い赤外線性能から、さらに遠い超新星観測に寄与するのが望ましいと考えられる。

遠い超新星観測を用いた宇宙膨張測定においては、実は超新星の候補を発見するのはさして困難なことではない。例えばすばる望遠鏡の主焦点カメラ Suprime-Cam を用いると、同時に多数の銀河を観測できるため、一晩に数十個の超新星候補を発見することができる。しかし、この数十個の候補を精密に観測し、精度良い宇宙膨張測定を行うのは容易なことではない。ダークエネルギーの時間変化のような精密測定を行うには、発見のあとの精密な追加観測が重要である。追加観測には 2 種類が必要で、一つは超新星の型と赤方偏移を定める分光観測、他の一つは超新星の明るさの変化を精密に測る追加測光観測である。TAO 望遠鏡は高い赤外線性能のため、これらの追加観測において大い

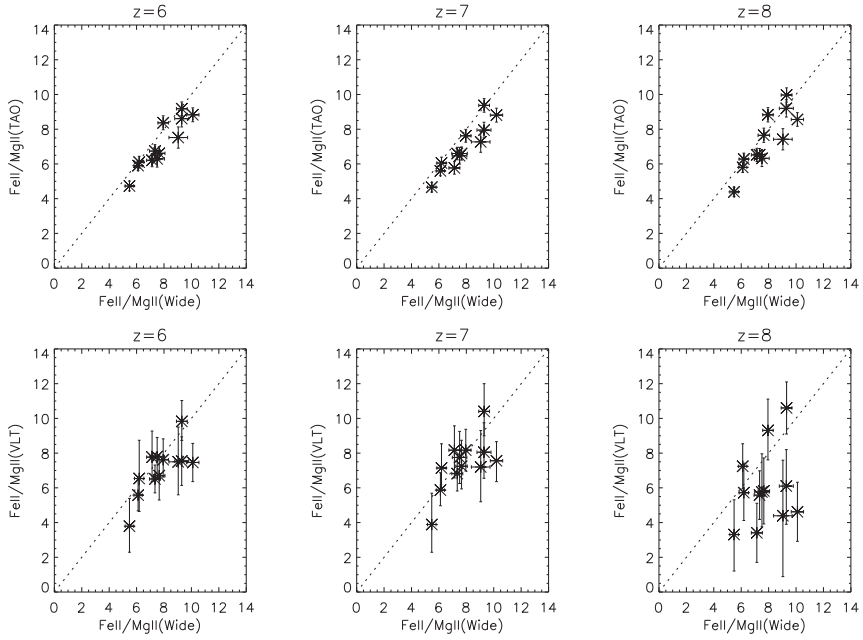


図 3.5: TAO における Fe/Mg 組成比決定精度の優位性 (Matsuoka Y., et al. 2005, private communication)。高品質低赤方偏移クーサーのスペクトル (Tsuzuki 2004) を用いて、TAO における観測 (上列: 最大波長限界 $4.1\mu\text{m}$) と VLT (下列: 同 $2.5\mu\text{m}$) をシミュレートしたもの。横軸は波長の制限なしで測定した FeII/MgII 値。縦軸は、TAO で観測した場合の測定値と VLT で観測した場合の測定値。

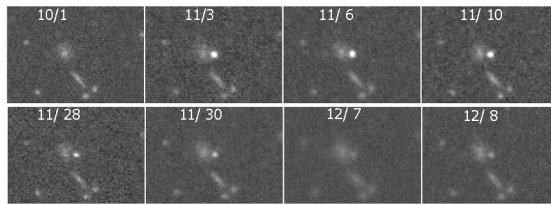


図 3.6: Ia 型超新星 SN2002kp ($z = 0.928$) の明るさが変化する様子。すばる望遠鏡主焦点カメラ Suprime-Cam による可視 i' バンドの撮像例。2002 年 10 月 1 日 (左上) にはほとんど見えなかった超新星が約 1 ヶ月後に明るくなり、また暗くなっていく様子がわかる。

に威力を発揮すると考えられる。

分光観測の役割は、変光天体が Ia 型超新星であることを確認した上で、赤方偏移を測定することである。分光観測で超新星自身のスペクトルが得られる例は、これまでのところ $z = 1.3$ 程度までである (Riess et al. 2004; Lidman et al. 2005)。これは地上望遠鏡の場合、重要な観測波長帯が夜光の強い $1\mu\text{m}$ 弱の波長域に移動してくるため、背景雑音が効いて遠方の暗い超新星の観測が困難となること、また HST では集光力が不足しがちで、かつ、現在の装置では、あまり高い波長分解能の観測は行えないことなどによる。

TAO 望遠鏡においては、シャープな星像により暗い超新星の測定を可能にするアダプティブ・オプティクス (AO) を使うことにより、I バンドから J バンドにかけてのシャープな結像性能を実現し、もっとも遠い超新星の分光を可能とする。概算によると 3 時間の積分で、 $z = 1.5$ の超新星のスペクトルも、必要な質で得ることができる。撮像で発見する候補のすべてを分光観測することはおそらく難しいが、超新星候補の色と光度曲線の情報を、分光観測の行われた超新星を使って較正し、撮像情報から超新星の型を決めることもできると思われる。

分光観測とともに必要となるのは、明るさの時間変化 (光度曲線) を調べる追加測光観測である。Ia 型超新星の場合には、真の明るさの明るい超新星ほどゆっくり暗くなることが知られている。この関係を補正すれば、明るさの分散は 10–15% 程度となり、良い標準光源となる。現在までのところ、地上望遠鏡では $z = 1.2$ 程度までの光度曲線が得られているが (Yasuda et al. 2004)、それを越える赤方偏移では、ハッブル宇宙望遠鏡によってのみ光度曲線が得られている。TAO では AO を使った観測により、 $z = 1.5$ の超新星の静止系で可視のバンドの光度曲線を得ることができる。AO は特に赤外線域で性能も高く、背景光による雑音を大幅に軽減できる。AO の性能にもよるが、概算では 20 分で一個の追加測光が可能となる。一個の超新星に対し、2 色、5 回以上の測光観測を行えば、十分な測定精度が得られる。

全体としてはすばる望遠鏡の広視野観測 (可視の光度曲線を得るための観測を含む) 12 日、TAO による AO 分光観測 12 日、AO 撮像観測 25 日の規模で、 $z = 0.8$ を超える超新星 100 個の測定が可能となる。これは現在までに見つかっている遠方の超新星の数を一桁増やし、赤方偏移ごとに調べる必要のあるダークエネルギーの変化の有無において、もっとも遠方で高精度の値を与えるものと期待できる。

3.1.3 MAGNUM 原理による宇宙膨張測定

宇宙膨張測定の別の方法は活動銀河核の変光現象を利用して赤方偏移 $z \sim 1$ までの活動銀河核・クエーサの距離を測定することで宇宙膨張の測定を行うもので、我々がこれ

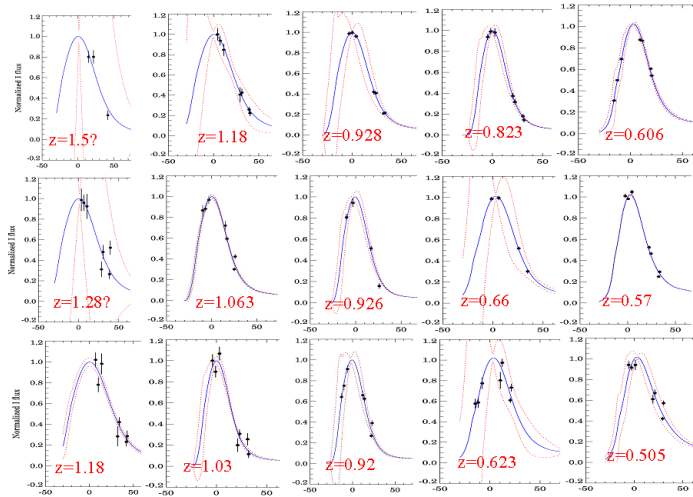


図 3.7: すばる望遠鏡で得られた可視の i' バンドでの遠方の超新星の光度曲線 (明るさの時間変化) の例。

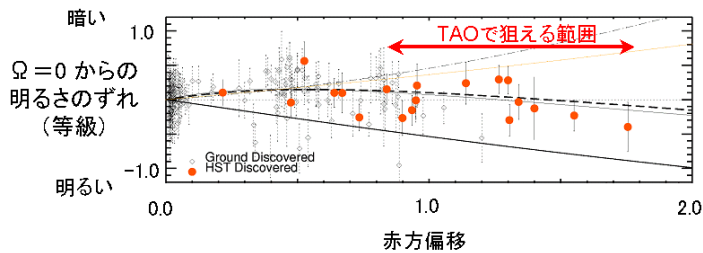


図 3.8: 論文発表された Ia 型超新星の明るさと赤方偏移の図 (Riess et al. 2004)。ただし、明るさについては $\Omega = 0$ の宇宙における距離による減光効果を差し引いて表している。点線は平坦な宇宙でダークエネルギー 70%、物質 30% の場合の予想減光量、橙色はハッブル宇宙望遠鏡で見つかった超新星を示す。高赤方偏移のものはまだ 20 個程度にすぎないが、TAO ではすばる望遠鏡等と協力することにより、赤矢印で示された赤方偏移に 100 個程度の観測点が期待できる。

までに独自に提案、研究を続けてきた手法である。例えば超新星の進化効果の影響など距離測定手法に内包する系統的誤差の影響を見積もるためにも、異なる原理に基づいた手法による独立した測定は重要である。

活動銀河核においては巨大ブラックホール周辺の降着円盤からは紫外線・可視光が放射され、それらの外側を取り巻くダストトラスでは中心部からの放射を吸収し赤外線が再放射されている。このときダストトラスの内側では中心核からの強い放射によりダストは蒸発してしまうためトラス内縁部のダストの温度は蒸発温度で一定になっており、このためダストトラスの内径は中心部の絶対光度の二乗根に比例すると考えられる。ダストトラスの内径は活動銀河核の変光現象を利用して測定することができる。中心部の放射がトラス内縁に到達するためには光速で伝播するぶんの時間がかかるため、中心部からの放射である可視光の変光に遅れて反応してダストトラスからの放射である近赤外線の変光が生じるので、ダストトラスの内径は [可視光変光から近赤外線変光の遅延時間] × [光速] と見積もられる。よって活動銀河核の可視近赤外線モニタ観測から可視・近赤外線変光遅延時間を測定することで活動銀河核の絶対光度を推定し、観測光度と比較して活動銀河核の光度距離を求めることができる (Yoshii 2002)。

この着想のもと東京大学の 2m 望遠鏡 (所在地ハワイ諸島マウイ島、通称 MAGNUM 望遠鏡) および観測装置を立ち上げ、赤方偏移 $z \leq 0.5$ の多数の活動銀河核について可視近赤外線多波長モニタ観測を 2001 年 1 月より開始した。これまでに高精度 (測光精度、観測頻度) で可視・近赤外線変光を測定する方法を確立し、複数の活動銀河核に

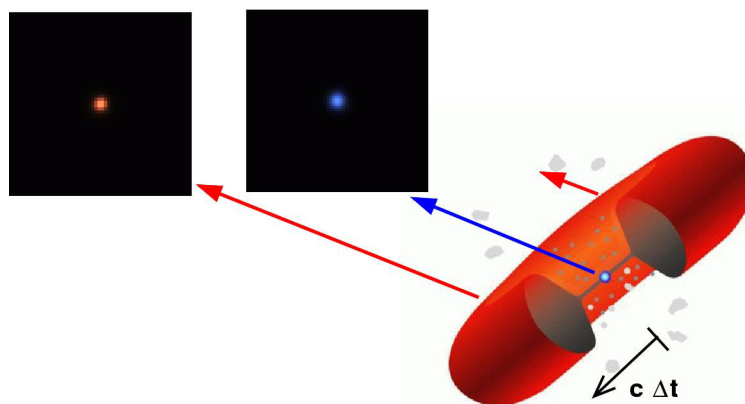


図 3.9: 活動銀河中心部の模式図。中心の降着円盤からは紫外線、可視光が放射され (青い画像)、とりまきダストトラスからは赤外線が放射される (赤い画像)。紫外線、可視光の変光の影響は、降着円盤からダストトラスまでの距離を光速で伝搬したのち赤外線の変光に反映される。

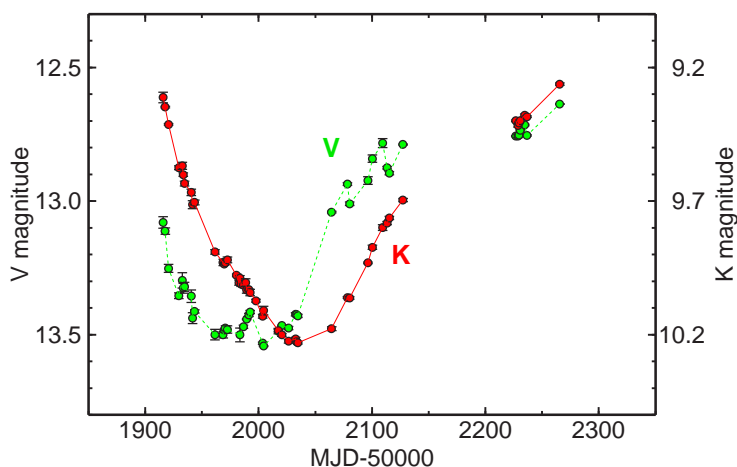


図 3.10: 観測された近傍活動銀河核 NGC4151 の光度曲線 (Minezaki et al. 2004)。可視変光 (緑) に比べて赤外変光 (赤) がおよそ 50 日遅れている。

ついて可視光変光と赤外線変光のあいだの遅延時間をこれまででない精度で測定することに成功した (Minezaki et al. 2004; Suganuma et al. 2004)。また過去の活動銀河核のダストトラス反響探査法の観測データの研究と比較して活動銀河核のダストトラス反響現象を利用した距離測定法の根幹となる可視 近赤外線変光遅延時間が活動銀河核可視絶対光度の二乗根に比例するという関係がおよそ成り立つことを観測的に示した (Minezaki et al. 2004)。

TAO 望遠鏡においては、その大口径と赤外線観測性能を活かして赤方偏移 $z \leq 0.5$ におけるやや低光度の活動銀河核の多波長モニタ観測と赤方偏移 $z \leq 1$ における活動銀河核の多波長モニタ観測を行なう。 $z \leq 0.5$ の観測については現在 MAGNUM 望遠鏡によって観測が行なわれている近傍活動銀河核と同程度の光度の天体をターゲットとしており、近傍から $z \sim 0.5$ までの光度距離測定を高精度で検討するために重要である。宇宙膨張の測定を精度良く行なうためには赤方偏移 $z \sim 1$ まで観測することが当然重要であるが、ダストトラス熱放射が赤方偏移により L バンドに移動してしまい、大気および望遠鏡による熱放射バックグラウンドのため観測は困難になる。しかし TAO 望遠鏡においては水蒸気量が少ない低温の高地に望遠鏡を建設することにより赤外線波長域において高い大気透過率と低いバックグラウンドを実現しており、さらに AO を使うことで可視 \rightarrow 近赤外線遅延時間が ~ 1 年というやや高光度の活動銀河核であれば観測可能となっている。

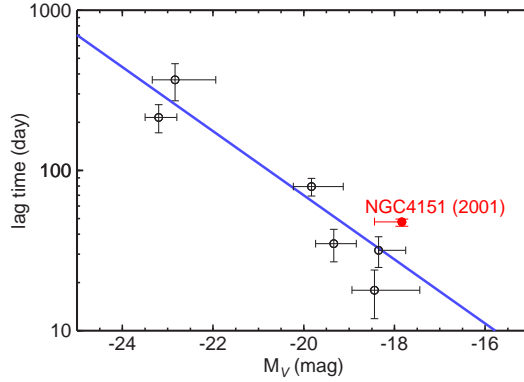


図 3.11: 活動銀河核光度と、可視変光から赤外線変光までの遅延時間との関係。明るい活動銀河核ほど遅延時間が大きく、遅延時間は光度の平方根にほぼ比例している。赤で示したデータ点は MAGUNUM による観測結果でこれまでの研究によるデータ（その他の点）に比べて遅延時間測定精度がはるかに向上している。

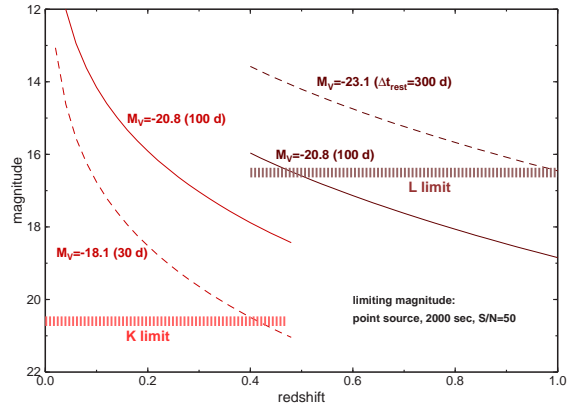


図 3.12: TAO によってモニタ観測可能な活動銀河核の明るさと赤方偏移。赤方偏移 (z) の影響のために活動銀河核のダストオーラスからの放射をとらえるために、 $z \leq 0.5$ については K バンド、 $z \geq 0.4$ については L バンドで観測を行なう。 $z \leq 0.5$ については可視変光から赤外線変光までの遅延時間が数日程度の近傍活動銀河核並の明るさの天体が観測可能となる。 $z \geq 0.4$ についても遅延時間が 1 年程度以下と見積もられる。やや明るい活動銀河核ならば $z = 1$ 程度まで観測可能である。

3.2 銀河の起源と進化

銀河はいつ形成されて、どのような過程を経て現在のよう姿になったのであろうか？

さまざまなグループが光学領域において“真の”原始銀河（原始的なガスから形成中の銀河）の探索を行ったが、未だに明確にそうだと言えるような天体は発見されていない。その理由として、(1) 原始銀河は、分厚いダスト（星間塵）に覆われていて、光学観測では検出できない、(2) 原始銀河は、光学領域では観測できないような、超高赤方偏移 ($z = 10$) にあるかもしれない、ことなどが考えられる。我々は、TAOの赤外線サイトとしての利点と近赤外線の広視野撮像能力を生かし、赤外線における超高感度・広視野の探索を行い、 $z = 15-10$ にある原始銀河の発見、第1世代の星の発見を目指し、「銀河の起源」についての研究を大きく進展させることを目標としている。

また、この探索では、 $z = 5$ より小さい赤方偏移の銀河も多数検出されるが、TAOの専用望遠鏡としての豊富な観測時間を生かし、それらの系統的な赤外線分光を行い、“スペクトルの形”、“元素の存在比”などの情報を基にして、生まれた銀河が、その後どのようにして現在見られるような銀河に進化してきたのかを明確に示すことが、TAOによる銀河研究の第2の目標となる。

現在、すばる望遠鏡を用いて銀河の起源と進化について数多くの研究がすすめられつつある。TAOではそれとは相補的に、主に高赤方偏移に重点をおいた研究がすすめられるが、以下、それを具体的なテーマに分けて紹介していく。それぞれのテーマがどのような赤方偏移を対象としているかを図 3.13 にまとめる。

3.2.1 近赤外背景放射の探求

宇宙背景放射とは、単位立体角あたりの天球から我々に向かってやってくる光、あるいは電磁波の強度をさす。有名な宇宙マイクロ波背景放射は、ビッグバンの名残である真に拡散した黒体輻射場である一方、可視や赤外領域では、銀河や活動銀河中心核などの天体の重ねあわせであると考えられている（図 3.14）。したがって、十分に暗い天体まで観測すれば、宇宙背景放射の大部分を個々の天体に分解することが可能である。実際、ここ 10 年の観測技術の進歩により、可視ではハッブル望遠鏡、赤外ではすばる望遠鏡などによって、大部分の背景放射が分解されていることを示すデータが得られている（図 3.15）。すなわち、銀河計数の傾きを見たとき、最も暗い領域では銀河の明るさが暗くなればなるほど、銀河の単位等級あたりの背景放射への寄与が小さくなっていくのである（図 3.16）。これをそのまま外挿すれば、未だ分解できていない暗い天体からの背景放射への寄与はゼロではないものの、すでに分解されたものに比べて無視できる量であると推論できる。観測データだけでなく、標準的な銀河形成・進化的理論モデルによる解析で

TAOによる銀河の起源と進化

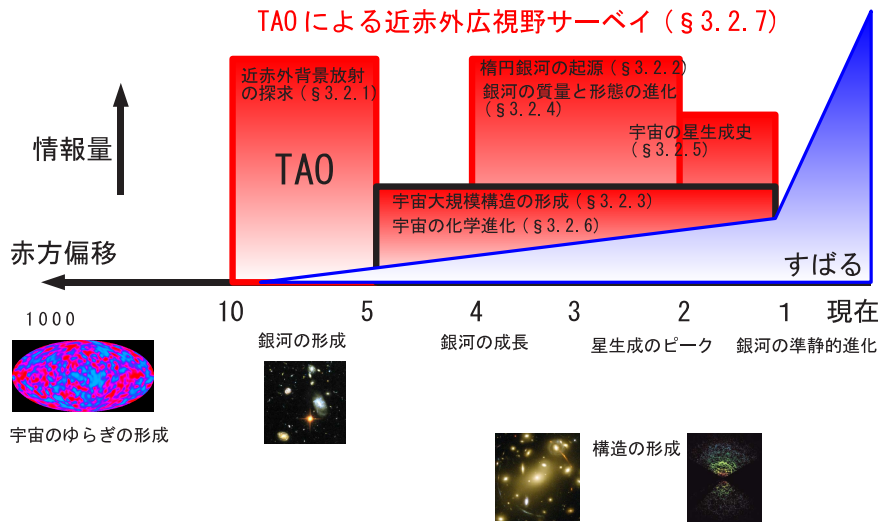


図 3.13: TAO による銀河の起源と進化の研究

も、同様の結論が得られている (Totani et al. 2001a)。

対して、全く独立に、衛星観測によって背景放射強度を天球上に広がった放射として直接測定する試みが行われている。特に、Jバンド、Kバンドなどの近赤外線波長では、衛星による「広がった背景放射強度」と、「分解した銀河による背景放射強度の推定値」が直接比較できるという状況になっている。しかし、本来一致すべき両者の値は驚くべき事に、前者のほうが後者の数倍も大きいという結果が得られているのである。これは、通常の銀河では説明できないほどの量の光が宇宙に満ちあふれていることを示唆しており、これがもし事実であれば、宇宙論、銀河形成論の大幅な変更を迫る衝撃的な結果である (Totani et al. 2001a)。

従って、この背景放射の矛盾を追求することは銀河形成論にとって極めて重要なテーマと言える。衛星観測の精度を上げることがもっとも重要であるが、暗い銀河の銀河計数の傾きに関する研究も重要である。特に、TAO 計画では、大学所有の望遠鏡で集中的に観測時間を投入できるため、この波長域で世界最高感度の広視野ディープサーベイを行うことが可能となる。そのデータは、上に述べた重要な問題に関して貴重なデータとなるはずである。

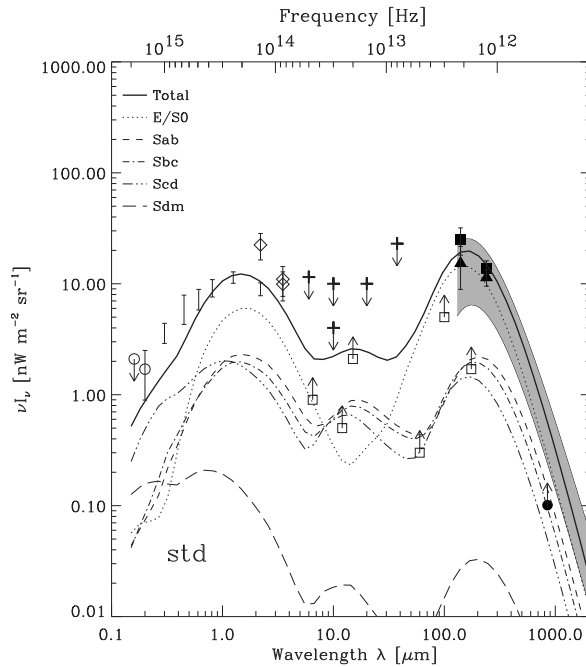


図 3.14: 可視、赤外線領域の宇宙背景放射のスペクトル。データ点は観測、曲線は理論モデル (Totani & Takeuchi 2002)。この波長域では宇宙背景放射は銀河の光の重ね合わせと考えられている。

3.2.2 楕円銀河の起源

楕円銀河の形成メカニズムは、銀河形成論における一大重要トピックである。その星形成のほとんどは、 $z > 3$ 程度の初期に起こったということが最近の研究で分かりつつある。しかし、その初期のスターバーストは銀河の合体で引き起こされたか、はたまたなんらかの別のプロセスかは決着がついていない。その理由は、高赤方偏移である上に、そのようなスターバーストをしている銀河は一般にダストが多く、強い吸収を受けてしまっているため、可視域ではほとんど観測が不可能なためである。

ダストに吸収された光は遠赤外線やサブミリ領域で再放射されるが、その波長域での観測は一般に角分解能が悪く、ALMA など次世代の観測装置を待たねばならない状況にある。一方で、近赤外の領域では、このダストに隠された楕円銀河形成を感度ぎりぎりのところで見つけられる可能性がある。それが、「すばるディープフィールド」中に発

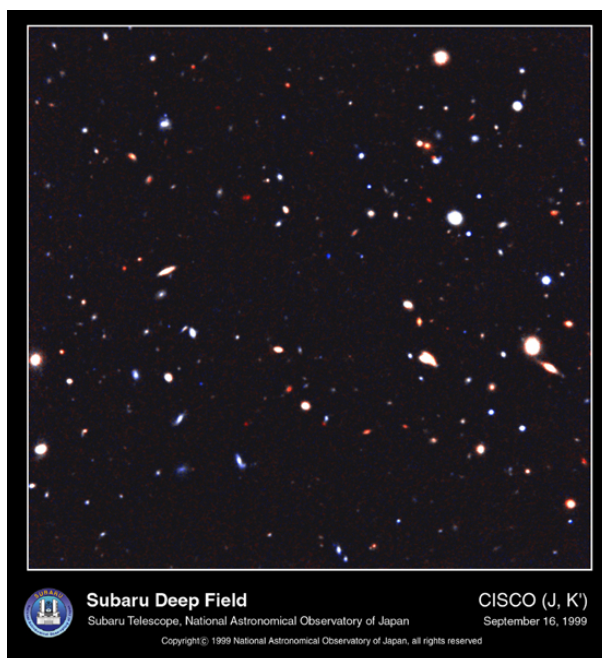


図 3.15: すばるディープフィールド SDF。J バンド ($1.25 \mu\text{m}$)、K' バンド ($2.1 \mu\text{m}$) の合成画像。視野は約 2 分角 (Subaru Telescope Press Release)。

見された、極めて赤い銀河 Hyper Extremely Red Objects (HEROs) である (図 3.17、Maihara et al. 2001)。これは、すでに知られていた Extremely Red Objects (EROs) よりさらに異常なほど赤いために名付けられたもので、EROs はダストがなく受動的に進化する楕円銀河でも説明できる程度の赤さだが、HEROs はもはやスターバースト中のダストの吸収による以外に説明できないほど赤い (Totani et al. 2001b)。実際、ダストの吸収を考慮すると、赤さ、明るさ、数密度などから、HEROs は楕円銀河形成時のスターバーストで説明ができる。これらはサブミリ領域でも、現在の感度でギリギリ受かるか受からないか程度に明るいソースであり、ALMA のよいターゲットである (図 3.18)。

HEROs の個数密度は視野 1 分角に約 1 個程度と考えられているが、TAO の近赤外線カメラは視野 12 分角の広視野と副鏡補償光学を生かした高感度を持っており、一晩の観測で 50 個程度の HEROs が検出されることが期待される。このことから、極めて赤い銀河、引いては、楕円銀河の起源の理解が TAO により大幅に進展されると考えられる。

さらに TAO の重要なことは、すばると違って ALMA と同じ南天にあるため、ALMA との共同観測が効率よく行えるという点である。日本の所有する大望遠鏡として唯一南

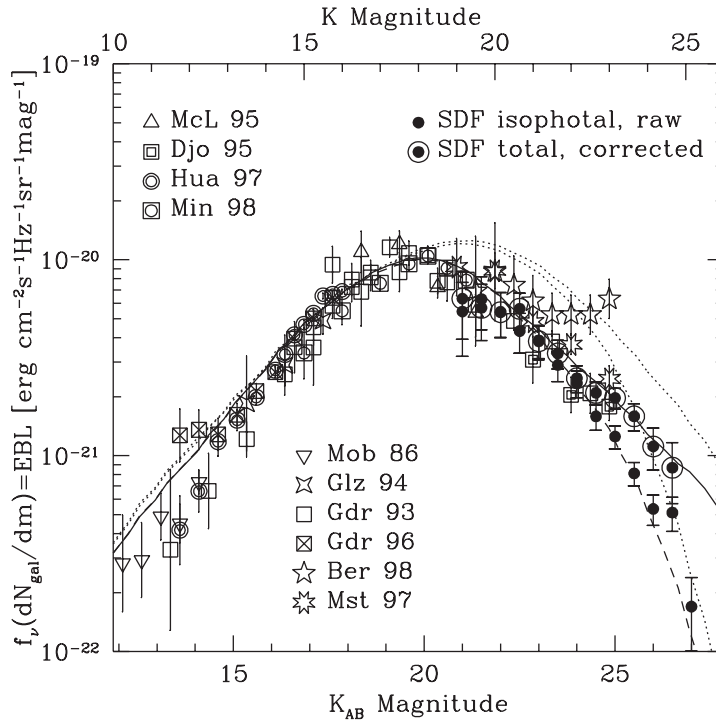


図 3.16: すばるディープフィールドのKバンド銀河計数。宇宙背景放射への寄与としてプロットしている。暗い方では完全に右下がりなので、宇宙背景放射はほとんど分解されていることを示唆している (Totani et al. 2001a)。

天に存在することになる TAO は、ALMA との連携という意味において決定的に重要な地位を占めるであろう。

3.2.3 宇宙大規模構造のマッピング

現在標準とされる Cold Dark Matter (CDM) モデルによれば、宇宙の構造は小さい構造が重力的に寄せ集まって次第に大きな構造が形成されてくる。理論シミュレーションによれば、 $z > 1$ の宇宙では銀河構造はまだ充分な力学的進化を遂げておらず、クランプやフィラメントに代表される複雑な形状をしていると予想される。従って、この時期の宇宙での銀河の分布構造は宇宙論や構造形成論において、極めて貴重な情報を持っているものと考えられる。しかし観測的には、2dF や SDSS といった近傍の赤方偏移サー

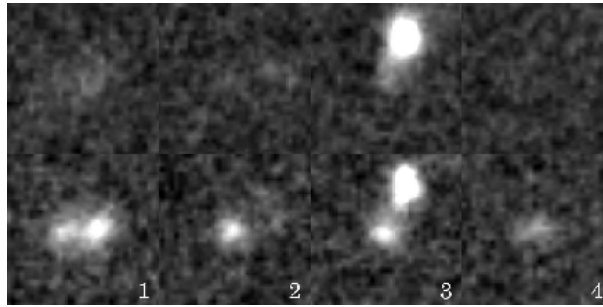


図 3.17: 極めて赤い銀河 Hyper Extremely Red Objects (HEROs)。すばるディープフィールドの中に見つかった4天体。形成中の楕円銀河を見ていると考えられる。上段がJ、下段がKバンドのイメージ (Maihara et al. 2001)。

ベイや $z < 1$ の幾つかの銀河団の周りで、より進化したフィラメント状銀河構造が同定され始めているに過ぎない。

このような背景の中、赤外に最適化した大望遠鏡で、しかもまとまった観測時間の割り当てが可能な TAO の重要な役割は、これまで殆んど未知であった $z > 1$ の宇宙構造を系統的にマッピングすることであろう。これにより宇宙の初期から今日までの宇宙の構造進化の様子を、実証的に描き出すことが可能となる。

銀河の3次元分布を導出するには、銀河までの距離、すなわち、赤方偏移を測る必要があるが、大量な遠方銀河の赤方偏移を一つ一つ分光的に測るのは非現実的なので、一般的には多波長における測光データから赤方偏移を推定する“photometric redshift”という手法を用いる。同じく TAO の可視光装置によって取得される可視光データと組み合わせることにより、これが可能となる。また、“弱い重力レンズ効果”による背景銀河の形状の歪みを利用して、レンズ天体の質量分布を求めることができる。

3.2.4 銀河の質量と形態の進化

CDM モデルに基づいた階層的銀河形成シナリオによると、銀河は最初小さな“building blocks”として生まれ、それらが寄せ集まって今日の銀河が形成されてくると考えられている。楕円銀河などの早期型銀河での大規模な星形成は比較的過去 ($z > 2$) に起ったことがよく知られているが、銀河質量のアセンブリー過程はもっと最近 ($z < 2$) でも顕著に見られることが予想される。従って、このようなモデルでは遠方に行けば行くほど、質量の大きな銀河の個数密度が大幅に減少することが期待され、「 $z < 2$ で銀河の質量変化がなく、受動的に光度進化をするのみ」という古典的な銀河形成モデル (PLE モデ

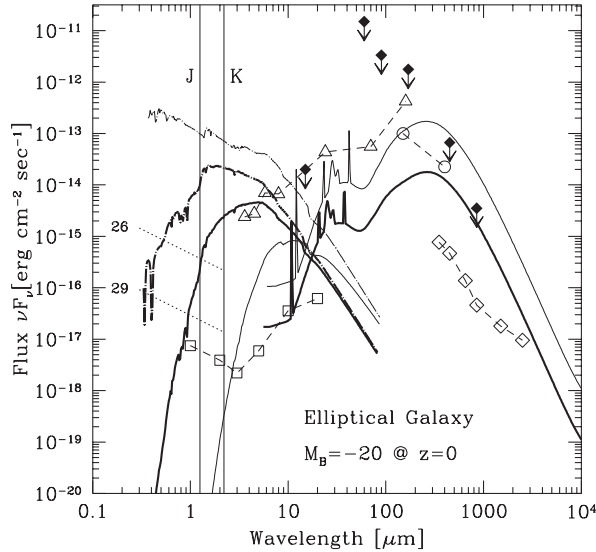


図 3.18: 形成中の楕円銀河の可視 赤外のエネルギースペクトル (Totani et al. 2001b)。現在の宇宙で B バンド絶対等級が -20 となるような典型的楕円銀河の形成モデルによる。 $z = 3$ で形成が始まったと仮定して、太い実線は $z = 2.3$ 、細い実線は $z = 2.7$ の時代に対応している。星からの直接光 (可視-近赤外) と星間ダストからの熱放射 (中間-遠赤外) にわけて書かれている。二つの一点鎖線はそれぞれ、 $z = 2.3$ 、 2.7 の時の星からの直接光がダストによる吸収を受けない場合のスペクトルである。26、29 とラベルされた点線は AB 等級で、縦線は J、K バンドの波長である。黒いダイヤモンドは現在の観測装置による検出限界。白抜き記号で示したのは将来計画の検出限界であり、四角が JWST、三角が Spitzer と Astro-F、丸が FIRST、ダイヤモンドが ALMA の各プロジェクトに対応している。

ル: pure luminosity evolution model) とは、銀河の質量関数に大きな違いを生ずる筈である。従って、 $z \sim 2$ の高赤方偏移における銀河質量関数を求めることは、銀河形成の過程を根本から検証する強力なテストとなる (Kauffmann et al. 1998)。 N 体シミュレーションに基づく準解析的銀河形成モデルとして現在開発されている Numerical Galaxy Catalogue (ν GC, Nagashima et al. 2005) から得られた、階層的銀河形成シナリオに基づく銀河の星質量関数の進化を図 3.19 の下図に示す。このモデルでは、赤方偏移の変化によって、質量関数が大きく変化していることがわかる。

このような質量関数は、観測的には可視光や赤外線光度関数を観測的に調べることにより得ることができる。しかし、アセンブリー (銀河の合体を含む) の過程では、自然と星形成を伴うことが考えられ、星形成の効果と質量成長の効果を区別することが容易

ではない可視の光度関数の進化を調べても、質量進化を明確に示すことはできないと考えられる。対して、近赤外線の光度は星形成の影響をあまり受けないため、銀河の星の質量を比較的忠実に反映している。従って近赤外線バンドの銀河の光度関数の進化を見ることによって、銀河の質量アセンブリー史を明確に描き出せることが期待できる(上記 ν GC による、近赤外線 K バンドの光度関数の進化を図 3.19 の上図に示す)。特に、早期型銀河がいつアセンブリーしたかを説き明かすことができれば、楕円銀河の起源説に決着を与えることができるであろう。

また、TAO サイトのシーイングと副鏡補償光学の組み合わせによるすぐれた星像 ($\text{FWHM} \leq 0''.3$) により、遠方で大きな銀河へと合体しようとしている銀河のサブクランプ (building blocks) を直接分解し、その質量を近赤外光度から見積もることによって、質量変化の微分量を直接導き出すことも可能となる。これら銀河質量進化の解析を銀河の形態や色別に行なうことによって、遠方で顕著に見られる青い不規則銀河が、他の通常銀河に飲み込まれて消えていくという仮説 (Brinchmann & Ellis 2000) も検証することができよう(図 3.20)。さらに、遠方銀河の形態分類も、星形成の影響が少ない近赤外観測によって、バルジとディスクの質量比から正確に行うことが可能となり、準解析的モデルをはじめとする理論的な銀河形成モデルとの直接的な比較を通じて、定量的に銀河の形態進化を議論することができるようになる。

3.2.5 宇宙の星生成史

銀河の星生成率を探るには様々な方法があるが、大規模サーベイなどで主に使われる指標には $\text{H}\alpha$ 輝線強度と紫外光強度の二つがある。 $\text{H}\alpha$ 輝線は OB 型星の紫外光で電離された水素ガス雲から放出され、星生成率の良い指標とされている (Kennicutt 1983)。他方、静止紫外光からは、紫外光を放射する OB 型星の量を直接見積もることができ、それを星生成率に換算することができる。

現在、俗に“Madau Plot”と呼ばれる宇宙の星生成密度 (CSFD: Cosmic Star Formation Density) の進化を示す図を用い、宇宙の星生成史を求める研究が精力的に行われつつある(図 3.21)。星生成率は、 $z < 2$ では $\text{H}\alpha$ の輝線強度で ($z = 0$, Gallego et al. 1995; $z \sim 0.2$, Tresse & Maddox 1998; $z \sim 1.3$; Hopkins et al. 2000)、 $z > 1$ では主に静止紫外光 ($\sim 1500\text{--}2800 \text{ \AA}$) の強度で (Madau et al. 1996; Steidel et al. 1999) 求められた値を用いて概算されている。

紫外光はダストによる吸収を受けやすいことから本質的に誤差が大きく、 $\text{H}\alpha$ による高精度な星生成率の導出の重要性が長年言われ続けてきたが、過去における $\text{H}\alpha$ のサーベイでは、天体数が少なかったために信頼できる星生成率の値が得られているとは言い

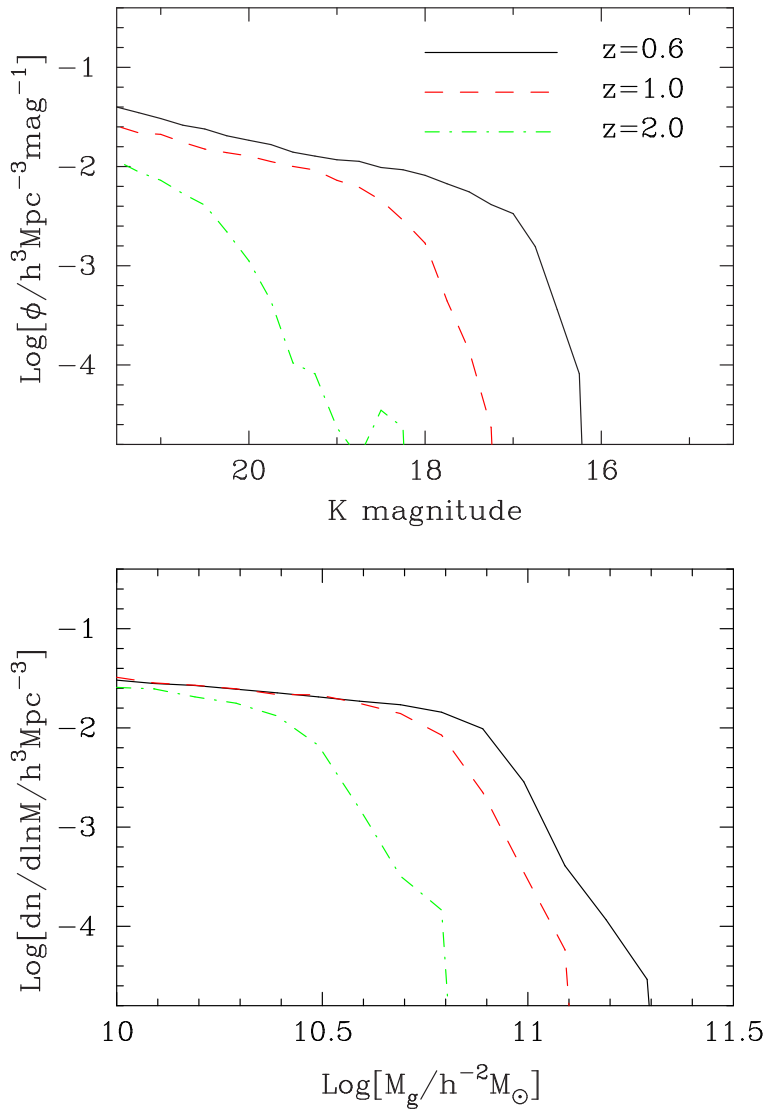


図 3.19: 銀河の星質量関数の進化。上図: K バンド光度関数の進化。 ν GC による予想。下図: 同じく銀河の星質量関数の進化予想。赤方偏移によって、大きく変化することがわかる。

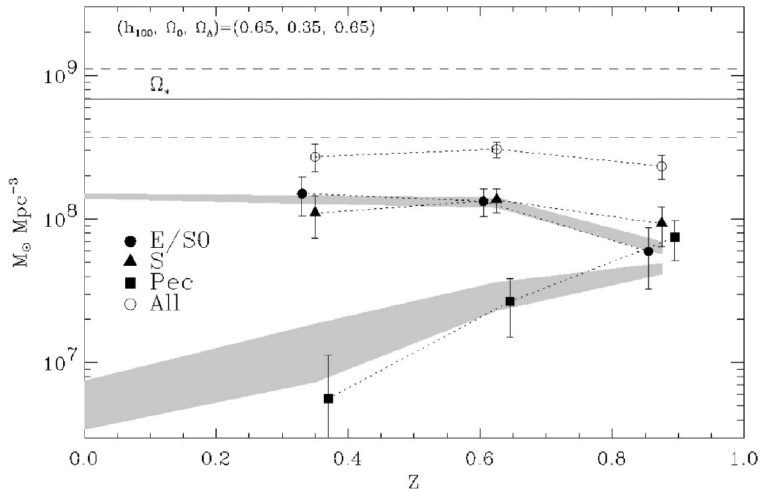


図 3.20: 銀河形態ごとの星質量の進化の違い。宇宙における星質量の共同体積密度の銀河形態別進化 (Brinchmann & Ellis 2000)。

がたかった。 $z > 1$ を越える高赤方偏移の天体では静止波長で可視域が赤外で観測されるようになる。このため、物理状態を決めるのに一般的に用いられる静止波長可視の各種輝線がすべて赤外に入ってくるために赤外分光が欠かせない手法となってくる。TAO では豊富な観測時間を投入して、 $z = 1 - 2.5$ で広く深い赤外線分光サーベイを行い、多数の天体の観測から $z = 1 - 2.5$ での星生成率を高精度に求めることができる。その結果、宇宙の星生成の歴史がもっとも明確なかたちで明らかになるであろう。

また、同時に得られる $H\alpha/H\beta$ 線の強度比から、ダスト吸収の量を推定することも可能となる。これを用いると吸収を受ける前の個々の銀河の紫外光強度が求まり、静止紫外光による星生成率と $H\alpha$ 星生成率の直接比較が可能となる。一般に、 $H\alpha$ 輝線はより多くの電離紫外線を出す O 型星を中心にサンプルするため 10Myr スケールの星生成活動をトレースするのに対して、静止紫外光はより低質量星までサンプルするので 100Myr スケールの星生成活動を見ることになる (Glazebrook et al. 1999)。この二つの星生成の指標を比較することにより、個々の銀河の星生成活動がどのような段階にあるのかまで、明らかにすることができるであろう。

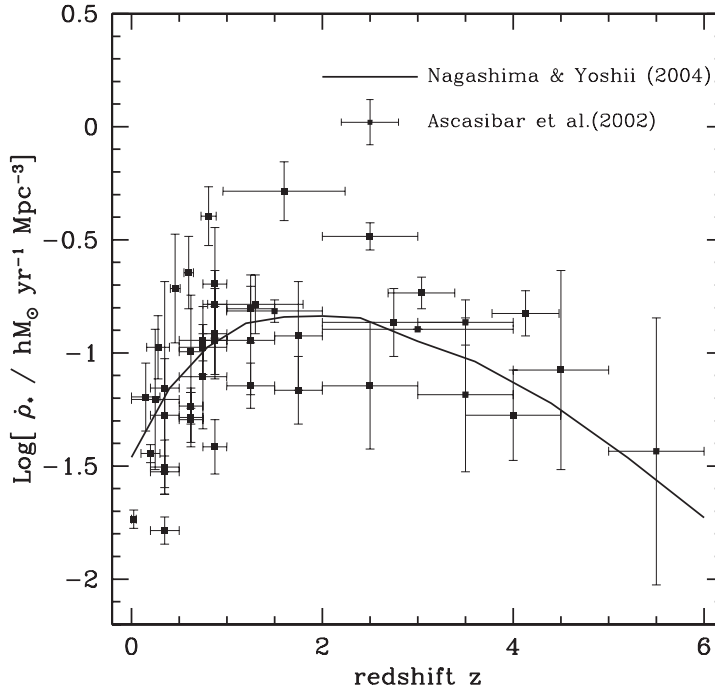


図 3.21: 宇宙の星生成率の進化。誤差棒のついた点は、Ascasibar et al. (2002) により集められた最近の観測結果。実線は Nagashima & Yoshii (2004) による理論モデルの結果。

3.2.6 宇宙の化学進化

TAO で得られる $z > 1$ の高赤方偏移天体の近赤外スペクトルには、星生成の指標となる $H\alpha$ 、 $H\beta$ などの水素輝線だけでなく $[O II] \lambda 3727 \text{ \AA}$ 、 $[O III] \lambda\lambda 4959, 5007 \text{ \AA}$ 、 $[N II] \lambda\lambda 6548, 6583 \text{ \AA}$ などの多数の重元素による輝線を含む。これらを用いて個々の天体の金属量 ($[O/H]$ など) を求めることが可能となる。用いるパラメータは：

- $R_{23} = ([O II] + [O III]) / H\beta$ (Pagel et al. 1979; McGaugh 1991)
- $N_2 = [N II] / H\alpha$ (Denicolo et al. 2002)

などで、これらそれぞれは誤差が大きいものの、この二つを組み合わせることによって十分な精度で金属量を導出できると期待される。

これらのパラメータから、大規模構造内での金属量の空間分布を明らかにし、銀河の空間密度と金属密度の相関を調べることも可能となる。また、統合したデータにより、金属量-赤方偏移関係を導出し、宇宙全体の化学進化の歴史を調べることもできるであろう。

3.2.7 TAO による近赤外広視野サーベイ

以上で概観されたように、TAO プロジェクトにおいては近赤外線による広視野・高感度サーベイがキーとなっている。このような最先端のサイエンスを実現するために、「2色同時観測の広視野カメラ」と「広視野補償光学」を組み合わせ、TAO でしかできないユニークな観測をすすめる。

このセクションで述べてきたように、銀河の形成と進化の研究においては、近赤外波長域の観測によって、本質的な理解がすすむカテゴリーが数多く存在し、TAO による包括的な研究により、この分野を質的にまったく違った次元に引き上げることが可能になる。以下ではそのための具体的な戦略をまとめる。

すばるの次のステップとして

すばる望遠鏡は大型望遠鏡として世界最大の視野 ($30' \times 30'$) の主焦点を誇り、可視波長域での広視野観測を大きく進展させた。その結果、 $z = 6$ における形成期の銀河の発見 (Kodaira et al. 2003)、 $z \sim 4, 5$ における構造形成の発見 (Ouchi et al. 2001, 2003) など、重要な発見が相次いだ。

この次のステップとしては、より長い波長である近赤外線で、より高赤方偏移に重みを置いた観測により、本当の銀河の誕生の現場を見つけることにある。しかし、すばるでは広視野は可視波長域に最適化されているために、近赤外波長域では5分角以上の視野がとれない。近赤外広視野の観測をすすめるには、それに適した設計を施した新しい望遠鏡が必至となる。TAO は、赤外線観測の世界最高の環境を誇るアタカマ、チャナントール山頂に設置されるため、赤外線に最適化した望遠鏡として設計され、まさにこの目的には適している。

また、すばるでは補償光学 (Takami et al. 2004) を用いて、 $0.''1-0.''2$ といった高い空間分解能での銀河の観測がわれわれ東大グループと国立天文台との共同によって行われ (図 3.22)、銀河形態の理解に飛躍的な改善があることが確認された (図 3.23)。TAO では、すばるの補償光学の経験を生かし、未来の A O の一つの形である「広視野補償光学 (地上層 AO: Ground Layer AO)」と呼ばれるサーベイに適した広視野の新しい AO 技術を用い、高い角分解能と感度向上の両方を組み合わせることにより、すばるの次のステップとしての近赤外線サーベイを実行することができる。

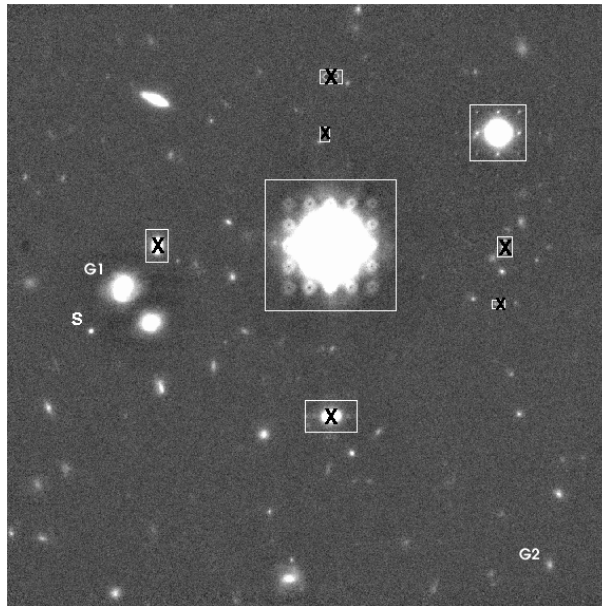


図 3.22: Subaru Super Deep Field. K' バンド ($2.1\ \mu\text{m}$) の画像。補償光学 (AO) を用いて、東大のグループが $K'=24.7\text{mag}$ の世界最高感度を達成した。視野は約 $1''$ (Minowa et al. 2005a)。

近赤外線サーベイの世界の現状

現在、8 mクラスの望遠鏡の登場により余剰時間ができた中口径 (2–4 mクラス) の望遠鏡を専用化して近赤線の広視野サーベイを行うという動きが欧米によってすすめられている。

例えば、アメリカ国立光学天文台による「Deep Wide-Field Survey」が2000年からキットピーク天文台の2mおよび4m望遠鏡とセロトロロ天文台の4m望遠鏡を用いてすすめられている。これは、可視光のB, R, Iバンド (4m望遠鏡) に近赤線のKバンド (2m望遠鏡) を加えた形で行われており、北銀極と南銀極それぞれ9平方度をカバーするサーベイを2005年頃までに終える予定でいる。Kバンドの感度は $K=19.5$ 等級を目指している。

また、イギリスを中心としたグループではハワイマウナケア山頂にあるUKIRT3.8m望遠鏡に視野 $14' \times 14'$ の広視野近赤外線カメラをとりつけ、北天において $K=18.4$ 等級で4000平方度を、 $K=21$ 等級で35平方度を、また、 $K=23$ 等級の高感度で0.77平方度をJHKの3バンドでサーベイする「UKIDSS (UKIRT Infrared Sky Deep Survey)」計画をすすめている。これは、4mクラスの望遠鏡が8mクラスの大型望遠鏡にたちうち

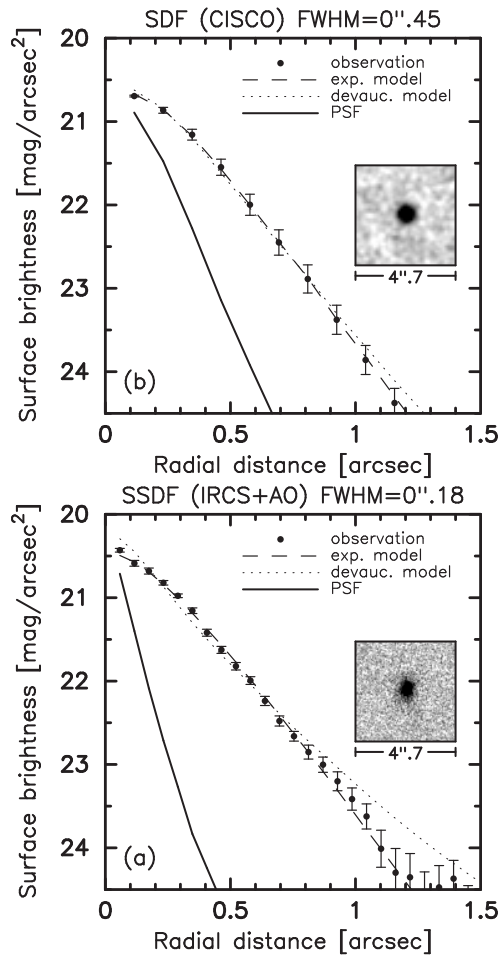


図 3.23: 高分解能による銀河形態の研究。補償光学 (AO) により角分解能が改善すると銀河の形態理解にも大幅な改善がもたらされる。上図は通常のシーイング下で、すばるで取得したある銀河のプロファイルで、円盤銀河的なプロファイル (exponential model) と楕円銀河的なプロファイル (de Vaucouleurs model) の区別が全くできていないことがわかる。対して、下図はすばる望遠鏡の AO を用いて高空間分解した同じ銀河のプロファイルだが、プロファイルが明確になりこの銀河が円盤銀河的なプロファイルを持っていることが明確に示される。TAO では、視野全域 ($\phi 12'$) にわたり、これに近い高空間分解像を得ることができる (Minowa et al. 2005b)。

できないために、競争のために 4m クラスの望遠鏡を専用望遠鏡化するという世界の典型的な流れを示している。この計画では 2004 年から 6 年間でサーベイを終えることを考えている。

同じくイギリスは同様の計画を南天でもすすめるようとしており、そのための専用 4 m 望遠鏡をチリのパラナル山頂に建設している。この「VISTA (Visible & Infrared Survey Telescope for Astronomy)」計画は、 2048×2048 画素の大型検出器を 16 個用い、視野 $45'$ もの超広視野カメラを製作し、 $K=20$ 等級で 5000 平方度、 $K=21.5$ 等級で 250 平方度、 $K=22.5$ 等級の高感度で 25 平方度を、 z JHK の 4 バンドでサーベイするという大規模なプロジェクトとなっている。2006 年度にサーベイを開始し、JWST の時代を通じて 12 年間をかけてサーベイをすすめる予定でいる。

TAO の強み (サイト、装置/AO)

以上のように中型望遠鏡では近赤外線サーベイの時代にすでに移行しつつあるが、世界の 8 m クラスの望遠鏡はすべて多数の装置を用いる共同利用の形態をとっているため、このようなサーベイに移行するにはまだ 10 年以上の時間がかかる。そこで、TAO では専用望遠鏡としての特色を生かし、大型望遠鏡による最高感度の近赤外線サーベイを世界にさきがけて最初を実現することができる。

その高度から赤外線に最適の環境を持っているだけでなく、シーイングもマウナケアに匹敵するかそれ以上の可能性があり、アタカマ・チャナントール山頂は赤外線のサーベイにはうってつけのサイトといえる。装置としては、効率よくサーベイをすすめるために、2 色同時撮像のカメラを用意して、例えば、J バンドと K バンドの撮像を同時にすすめることができる。一波長あたりでも $12'$ の広視野だが、2 色同時観測により、効率では実質 2 倍の広視野を目指す。また、TAO では副鏡を大気の擾乱にあわせてリアルタイムに変形させる広視野補償光学 (地上層 AO : Ground Layer AO) と呼ばれる新技术を用いて、広い視野にわたって $0.''2-0.''3$ 程度の高質の画像を得ることが期待できる。その結果、1 等級程度の感度の向上も得られ、口径 6.5 m であっても、口径 8 m の望遠鏡で通常シーイング下で観測するのに対してまったく遜色ないだけでなく、むしろよりよい高感度での観測が可能となる。

近赤外撮像サーベイの戦略と観測計画

TAO では 4 m クラスの望遠鏡では届かない $K=22-25$ 等級という最も深い感度でのサーベイを目指す (図 3.24)。この深さに到達して初めて、 $z > 1$ の高赤方偏移における銀河の包括的な議論が可能となる。

まず、1 平方度にわたる十分な視野での $K=25$ 等級の「深サーベイ」により、今まで検出できなかった低面輝度 (low surface brightness) の天体までを含めて、究極の銀河計数を行い、銀河起源の宇宙背景放射を確定することができる。また、楕円銀河起源と

考えられる極めて赤い銀河も 1000 個以上検出できるため、楕円銀河の起源について決定的な証拠を得ることもできるであろう。また、100 平方度にわたる K=22 等級での「広視野サーベイ」では、 $z > 1$ の宇宙大規模構造のマッピングが可能となり、100 個以上の $z > 1$ 銀河団の検出から、構造形成のスピードを支配するパラメータについての大きな制約を得ることができる。また、弱い重力レンズ効果による大規模構造の検出だけでなく、重力レンズにより増光された $z > 5$ の高赤方偏移の銀河の検出もできるようになるであろう。このような、TAO による世界で初めての K=22-25 等級の広大な銀河サンプルから、銀河の質量と形態の進化を包括的に明らかにすることができる。

TAO では JWST が本格的に活動を開始する前に、K=25 等級、1 平方度の「深サーベイ」を終了させ、この深さと広さでの最初の知見を得ることになるであろう。その後は、K=22 等級でのサーベイを進め、JWST でも遂行することのできない 100 平方度以上の「広視野サーベイ」を実現することになるだろう。

$z = 1 - 5$ 銀河の近赤外分光サーベイ観測

$z > 1$ を越える高赤方偏移の天体では静止波長で可視域が赤外で観測されるようになる。このため、物理状態を決めるのに一般的に用いられる静止波長可視の各種輝線がすべて赤外に入ってくるために赤外分光が欠かせない手法となってくる。特に宇宙年齢が現在の 20 % 程度の $z = 2-2.5$ の領域は JHK バンドで静止可視域をほぼ覆えるために高赤方偏移の物理状態を調べる上でも、宇宙の歴史の初期を見ているという意味でも非常に魅力的な領域となっている。

しかしながら、現状では赤外多天体分光器がほとんどないことから、このような天体の赤外分光観測はなかなか進まず、行われたとしても静止波長全域を覆っているものはほとんどない (Teplitz et al. 2000)。また現在行われている赤外分光サーベイも $z > 3$ のものを K バンド分光するに留まり (Pettini et al. 1998)、 $z = 1-2$ の天体のサーベイ的観測は行われていない。

TAO の近赤外広視野カメラは、冷却マイクロシャッターアレイを焦点面に備え、効率のよい多天体分光を系統的にすすめることができる。しかも、2 波長同時カメラであるため、 $0.8-2.5\mu\text{m}$ の広波長域を同時に分光することができ、サーベイにはうってつけの設計となっている。TAO 計画では望遠鏡の観測時間の大半を投入し、星生成活動などの重要な指標となる H α 輝線が K バンドで観測できる $z = 2.5$ までの天体の分光サーベイをすすめるが、それにより、宇宙の星生成史や化学進化について明らかにすることが可能となるであろう。

3.3 星間物質

3.3.1 分子雲ダストの観測

ダスト収支の問題

固体微粒子、いわゆるダストは、星間空間の金属の多くを含んでおり、宇宙の重要な構成要素である。また、ダストは星周星間空間での物理・化学過程に深く関わっており、宇宙の物質循環を考える上で欠くことのできない要素である。ダストの研究はこれまでも理論・観測の両面から精力的に行われており、晩期型星や超新星残骸がダストの供給源であること、超新星によるショックで効率的にダストが破壊されること、などが明らかにされている。

しかしながら、ダストの生成進化については、その全体像がいまだに掴めていないの

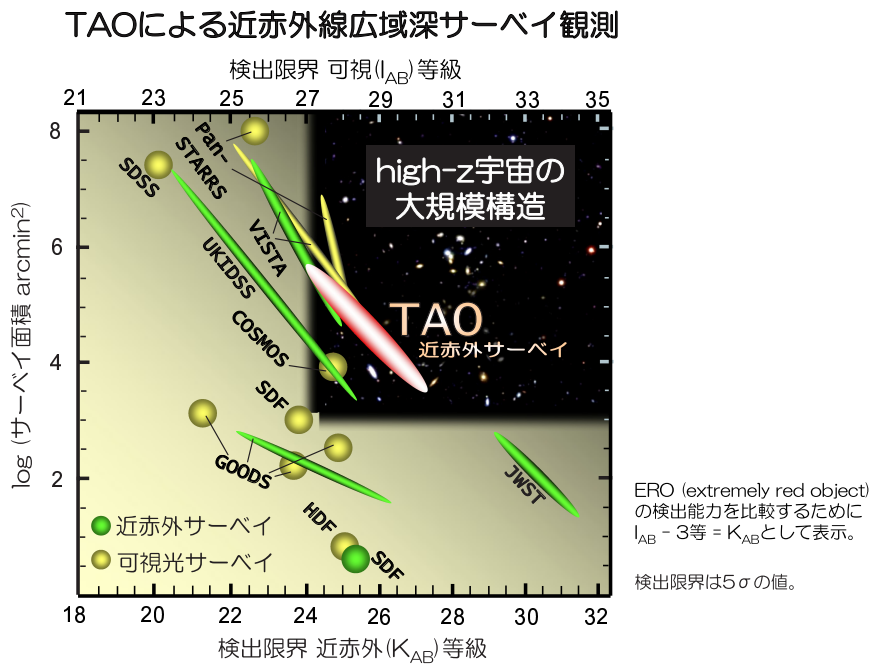


図 3.24: TAO の目指す近赤外広視野サーベイ。縦軸がサーベイ領域の広さ、横軸が感度をあらわす。緑色と黄色はそれぞれ近赤外と可視での代表的なサーベイを示す(計画中のものも含む)。TAO が目指すサーベイは赤色で記述された点であり、非常に深い感度で最も広いサーベイが可能となることわかる。この感度域 (K_{AB} 等級で 25 等級以上)こそが、高赤方偏移での大規模構造や銀河進化の理解にもっとも重要となっている。

が現状である。Dwek (1998) は、星間空間に供給されるダストの量と、星間空間で破壊されるダストの量を、ダストの組成ごとに詳細に比較した (表 3.1) 結果、炭素系ダスト・酸素系 (シリケート) ダストの両方で、ダストの破壊割合が供給割合を 10 倍程度上回ることが示唆された。星間空間には大量のダストが存在しており、金属原子の多くがダストの中に含まれることは、金属線吸収による観測からも明らかであり、この見積もりは大きな矛盾を孕んでいる。AGB 星および SNe からのダスト供給量は星の質量から求められるので比較的正確であり、また、ダストの破壊レートが桁で小さいと言う事も少し考え難い。AGB 星/SNe などの星以外にもダストの供給源があるというのがもっとも有りうるのであるが、その供給源がどこなのか、今だ不明のままである。

その中で、近年注目を浴びているのが、分子雲中で起こるダストの生成プロセスである。ダストは主には金属原子によって構成される物質なので、その形成には金属原子同士が数多く相互作用できる環境が必要である。分子雲は星間空間よりも密度が高く、ダストが形成される可能性は大きいと言える。実際、近年の観測によって、分子雲中のダストは一般星間空間のダストに比べてサイズ成長が見られることが分かっている。これは、ダストの生成プロセスとは直接は関係しないが、金属原子の相互作用が分子雲中で確かに起こっていることを示す例として、重要な結果である。

中間赤外による分子雲ダストの観測

このようなダストの形成や進化を研究する上で、中間赤外域は最も重要な波長域である。中間赤外にはシリケートを始めとした主要なダストのバンドフィーチャが多数存在しており、観測的にダストの組成決定ができる唯一の波長帯である。また、ダストフィー

		供給されるダスト量 ($10^{-9} M_{\odot} \text{pc}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	
		Carbon-rich dust	Silicate dust
AGB	C-rich stars	2.8	0
	O-rich stars	0-3.7	
SNe	Type-Ia	0.1	3.5
	Type II	1.5	7.0
TOTAL		4.4	14.2
		破壊されるダスト量 ($10^{-9} M_{\odot} \text{pc}^{-2} \text{yr}^{-1}$)	
		Carbon-rich dust	Silicate dust
Star Formation		8	29
SNe shock		33	190
TOTAL		41	219

表 3.1: 星間空間でのダストの収支 (Dwek 1998)

チャはその構造やサイズによってフィーチャの形状が変化することが知られており、それを精密に測定することで、構造・サイズについても強い制限をかけられる。従来、ダストサイズは主にエネルギー収支の観点から求められて来たが、これには広い波長範囲を観測することが必要であり、ビームサイズの違いによる観測領域の違いなど、多くの不定性を含んでしまう。ダストフィーチャの観測はこのような不定性無しに直接ダストのサイズを計測できるので、ダストの形成・進化を研究する上で非常に有用な測定である。

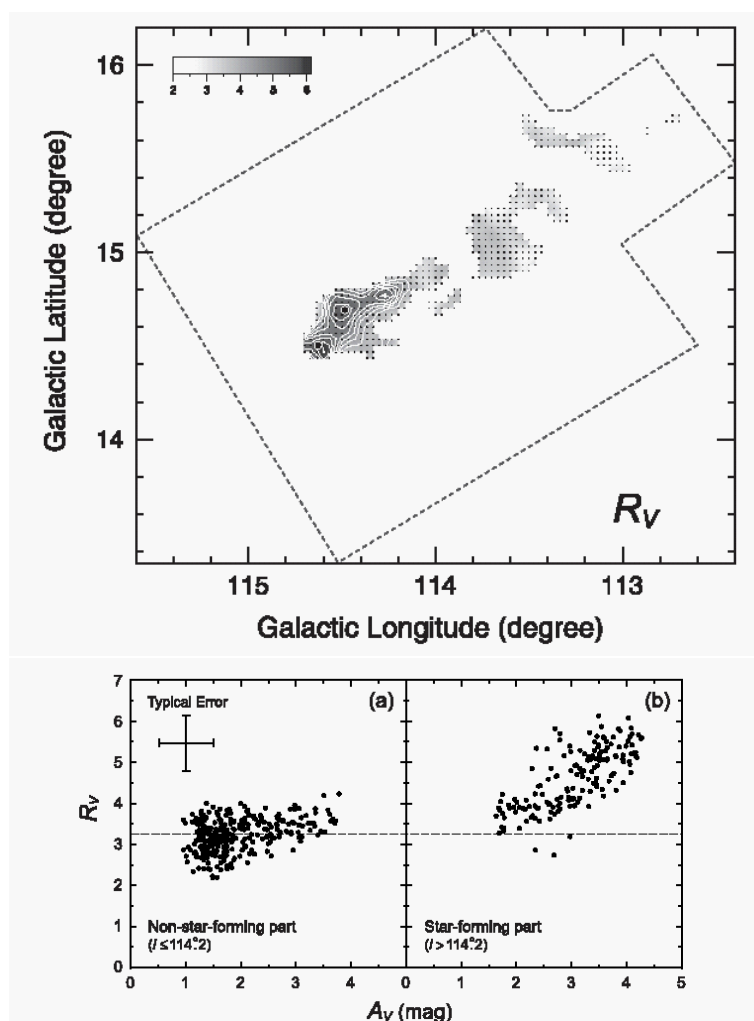


図 3.25: L1251 で観測されたダストの成長の様子 (Kandori et al. 2003)。

ると言える。

分子雲でのダストは (星周空間などを除くと) $\ll 100\text{K}$ なので、中間赤外でのダストフィーチャは吸収として観測される。近年、Bowey らのグループはアモルファスシリケートのフィーチャ ($9.8\mu\text{m}$) を分子雲で観測し (Bowey et al. 1998)、その吸収スペクトルを得ている。しかしながら彼女らの観測は 4m クラスの望遠鏡を用いたものであり、感度が絶対的に不足しているために、サンプル数がごく限られてしまっている。さらに、彼女らの観測は $10\mu\text{m}$ 帯に限られており、ダストフィーチャが豊富で分子雲の最も濃い領域でも saturate しない $20\mu\text{m}$ での観測はまったく行われていない。Spitzer をはじめとしたスペースによる観測では分子雲中をサーベイする計画があるが、すべて撮像が低分散での観測であり、ダストフィーチャを詳しく調べる事はできない。分子雲中でのダスト形成を観測的に明らかにするには、 $R > 200$ での、高感度の観測が必要である。

TAO 望遠鏡による観測

TAO 望遠鏡は熱赤外線観測で高感度を誇る望遠鏡であり、特に Q バンド ($20\mu\text{m}$ 帯) では、従来望遠鏡の倍以上の検出感度を達成できる。この波長帯には、アモルファスシリケートの強いバンド ($18\mu\text{m}$) の他、数多くの結晶化シリケートのバンドが存在しており、ダストの組成や構造を調べる上で重要である。この波長域でのダストフィーチャの吸収スペクトル観測はこれまであまり例が無く、TAO 望遠鏡の果たす役割は大きい。

このような吸収バンドの観測には、参照光源たる背景星の選択も観測精度を決める重要な要素である。このような参照星としては可視・近赤外域では A-F 型の星が用いられ

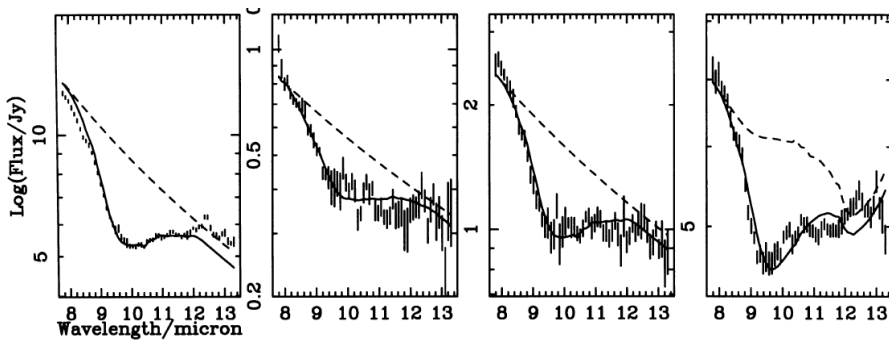


図 3.26: 分子雲および星間空間で観測されたアモルファスシリケート ($9.8\mu\text{m}$) の吸収。左から、Cyg OB2 (星間吸収)、Tau Elias13、同 Elias16、同 Elias18 (分子雲) の観測例。UKIRT3.8m 望遠鏡での観測のため、分子雲天体に関しては S/N はあまり良くない (Bowey et al. 1998)。

る事が多いが、中間赤外では A-F 型は暗く、またベガ現象の影響も危惧されるため、あまり適した参照星ではない。一方、K 型巨星は、中間赤外域で非常に明るく、また、星周ダストの出現率も低いので、参照光源として用いることができると考えられる。K 型星を背景星として使った場合、距離 150pc で (吸収フリーで) 130mJy の明るさとなり、TAO 望遠鏡を使えば 4 時間積分で $S/N > 50$ が達成できる。これは他の地上望遠鏡では到底達成できない感度である。

K 型巨星は見掛けの星密度が比較的高く、同じ分子雲中で複数のサンプルを取ることができる。例えば Taurus 領域では、領域内に背景 K 型巨星は ~20 個存在しており、10–15 快晴夜の観測で全てを分光観測可能である。このような観測を行い領域によってダストがどのように変化するのかが明らかになれば、それを他の諸相 (ダストの可視吸収 A_v や、ガス密度、ガス温度など) と比較することで、ダストがどのように生成成長していくのかを明らかにできる。これはダストの成長率や生成率と密度/温度の関係を観測的に解くことに相当しており、ダスト進化・生成が (起きているとすれば) 何によってコントロールされているのかを知る重要な手がかりとなる。

3.3.2 ガスとの関係

上で述べた観測は分子雲中でのダストの振舞を観測的に明らかにするものである。一方、分子雲中の多くのプロセスはガスが担っており、ダストの状態とガスの諸相との関係はたいへん興味深い。例えばダスト表面は化学反応の場として重要であり、放射性同位体 (例えば ^{13}C) の濃縮などを起こす。したがって同位体分子を使った観測を行う際に、ダストによる影響を考慮する必要がある。また、分子雲中のダストはその表面がガスが凝結してできた氷に覆われていることが予想されるため、ダストの観測の際にもガスの影響は無視できない。したがって、分子雲中で起こっている (ダスト形成を含む) 物理・化学過程を解明するには、ガス/ダスト両面から観測を行うことが必須であり、熱赤外からダストを観測する一方、電波でガスを観測することが重要となる。

このような研究を行う際に、ビームフィリングファクターの問題は解決しておくべき問題である。TAO 望遠鏡での観測は点光源を用いた吸収バンド観測であり、その空間分解能は実効的に無限小である。したがって、電波によるガスの観測でも、できるだけ高い分解能でその物理状況を観測する必要がある。ALMA は世界最高の空間分解能を誇る電波装置であり、これと世界最高感度でダストの吸収バンドを観測できる TAO 望遠鏡を組み合わせることで、分子雲で起きている物理・化学過程を最も詳しく調べることができる。

さらに、ALMA の観測ターゲットの中で最も重要なものの一つが、分子雲中で生まれ

つつある星周円盤の研究である。このような星周円盤ではダストはクーラントとして働くため、その構造を理論計算し観測と合わせるためには、ダストの量やサイズ（表面積）を知ることが必要となる。星周円盤のガス/ダストは当然それを取り囲む分子雲で形成されたものであり、分子雲中のダストの研究は円盤形成の初期値を与えるものと言える。これまでの研究ではこのダストの初期状態としてガス/ダスト比 100 など、希薄な星間空間のものが用いられており、分子雲中のダスト形成・進化はあまり考慮されていない。ここに提案する研究によって分子雲中のダストの状態が明らかになることは、ALMA による星周円盤の観測結果を解釈し理解するのに大きな役割を果たすものだと考えている。

3.4 系外惑星

“我々の太陽系以外にも惑星系が存在するのか?” この問いは人類にとって根源的な疑問であり、これに答えることは現代天文学の重要な使命のひとつである。この問いに答えるべく、これまでたくさんの観測研究がなされて来っており、ここ 10 年の観測によって、他の恒星にも惑星系らしきものがあるという観測的証拠が見つかりつつある。その最たる例は主系列星にみられる惑星系円盤残骸、いわゆるベガ現象の発見と、視線速度法による惑星の検出である。系外惑星系の研究は、このような発見の段階を過ぎ、いよいよ統計・分類に基づいた詳細研究の段階を迎えはじめており、サイエンス集中型の望遠鏡である TAO 望遠鏡が果たす役割は大きい。本セクションでは、TAO 望遠鏡によってもたらされる、系外惑星観測の展開について述べる。具体的には、高解像度中間赤外観測による系外惑星系ディスクの捜査と、食による惑星の観測の 2 つについて議論する。

3.4.1 高解像度観測による系外惑星系探査

ベガ現象は 1983 年に打ち上げられた赤外線観測衛星 IRAS によって発見された現象で、長波長での赤外超過として検出された。その後の精力的なフォローアップ観測により、これが 100–150K の低温ダストからの放射であること、分布は円盤状であることなどが分かって来た。特に近年のサブミリ波 (Greaves et al. 1998) や中間赤外線による観測 (Koerner et al. 1998; Jayawardhana et al. 1998) では、星から数 10AU の付近に大量のダストが集積している様子が空間的に分解して観測されている。また、これらの円盤残骸の中には、ダストがディスク状と言うよりはリング状の構造が複数存在するものも発見されており (Wahhaj et al., 2003)、惑星のような大型天体の存在が示唆されるものもある。

主系列星に見られる残存ダスト円盤は、全て星形成時に存在した原始惑星系円盤から

進化してできたものである。この進化の間に円盤内のダスト粒子は黄道面への沈澱、熱変性、ポインティングロバートソン効果による落ち込みなどを経験し、また集積過程を経て微惑星ひいては惑星を形成すると考えられる。また、形成された(微)惑星は同じ軌道にあるダストを跳ね飛ばして円盤に間隙をつくるなど、円盤の構造に大きな影響を与えることになる。さらには、円盤内では様々な熱的過程が進行し、結晶化などのプロセスによってダスト組成が変化することも期待される。したがって、残存ダスト円盤を詳細に観測すれば、直接には見えない(微)惑星を含めた、惑星系の構造や歴史などを観測的に調べることが可能となる。

従来、このような残存ダスト円盤の観測は、主に中間赤外線域に置ける放射の超過と言う形で検出されて来た。このような測光的な観測は比較的遠方にある星についても超過=ダスト円盤の有無を検出することができるが、微量なダスト放射は検出が難しい。例えば、太陽系の黄道光は $20\mu\text{m}$ 帯でも主星である太陽の数百分の一しか放射しておらず、これを測光的に検出するのは原理的に非常に困難である。また、測光で得られる情報は直接は温度の情報であり、星周ダスト円盤の空間構造に焼きなおすには、ダストの光学特性が分かっている必要がある。一方、ダストの光学特性は円盤進化とカップルして変化することが予想されるので、測光観測から空間構造を推定することは大きな不定性を伴うこととなる。

このような測光的な方法とはまったく違うアプローチとして、高解像度画像による星周ダスト円盤の直接検出という方法がある。これは高解像度のデータによって星周ダスト円盤を主星と空間的に分離し、画像としてダスト円盤を検出するというものである。この方法は円盤が空間的に分離できるような近傍の星に対してしか用いることができない

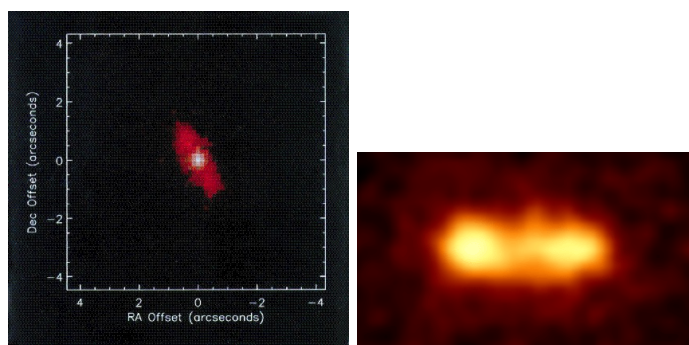


図 3.27: 中間赤外の観測から得られた HR4796 の星周ダストリング。左の図は $10\mu\text{m}$ と $18\mu\text{m}$ の疑似カラー合成であり、広がりは $10\mu\text{m}$ では見られない。右図は同じ HR4796 を $24.5\mu\text{m}$ で観測した画像。この天体の場合、 $24.5\mu\text{m}$ では中心星は完全に見えなくなっており(相対的に明るさが弱い)、ダスト円盤だけが顕著に観測される。

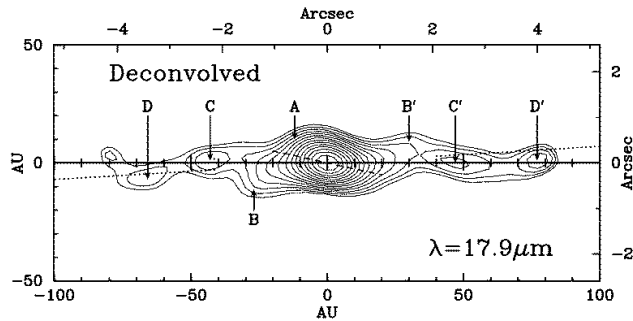


図 3.28: 中間赤外の観測で得られた β Pic の星周ダスト分布。デコンボリューション法により解像度を向上させた結果、4本のリング状 (A,B,C,D) にダストが存在していることがあきらかになった (Wahhaj et al., 2003)。

が、測光法よりも (相対的に) 微弱なダスト放射もとらえることができる。また、直接ダスト円盤の構造をとらえることになるので、分解能が足りている範囲では円盤の空間構造に対する情報を得ることができるといいうメリットを持つ。すなわち、空間分解法による円盤の観測は、測光的な方法と補完的であり、今までの観測では見付けられなかった、

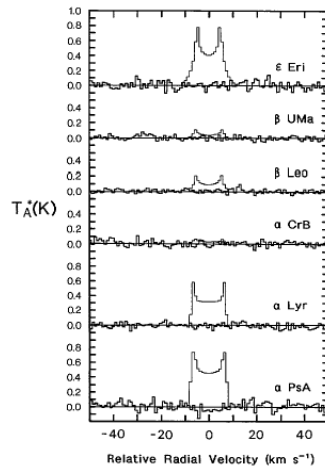


図 3.29: 野辺山 45m 電波望遠鏡による観測から、ベガ型星からの CO 放射はダスト放射から期待されるもの (細線) よりも弱いことがわかった。ここから、(CO のダスト表面への固着などを考慮しても、少なくともいくつかのベガ型星で) ガスの散逸が起きていることがあきらかとなった (Yamashita et al. 1992)。

ダスト量が少ない進化したダスト円盤をさがす事が可能になる。これは、近傍の系外惑星系を探索するという意味で、将来地球型惑星や地球型生命をさがす計画に大きく貢献するものである。

TAO 望遠鏡による観測の優位性

このようなダスト円盤の観測研究を行うのに、TAO 望遠鏡は最も適した望遠鏡である。

星のまわりのダスト円盤は主に中心星からの放射を受けて加熱されており、その温度は星から離れるにつれて下がってゆく。低温のダストは長波長での放射が卓越するので、長い波長で観測するほど、星から離れたダスト円盤が検出できる。一方、観測できる空間構造は回折でその限界が決まっており、波長に比例して構造スケールは大きくなる。したがって、観測波長の違いによる観測の難易は両者の競争となるが、ダストの熱平衡を考えると、回折による分解能劣化の効果よりも温度の下降の影響の方が大きいので、長波長で観測するほどダスト円盤は空間分離が容易になる。実際、これまで空間的に分離し

TAOによる中間赤外線高空間分解観測

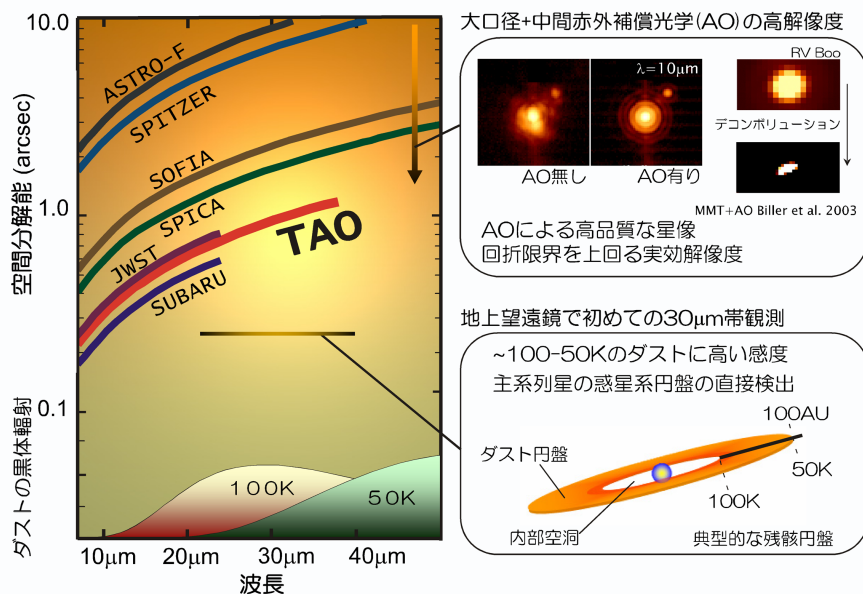


図 3.30: TAO の中間赤外域での優位性

て観測された星周ダスト円盤のほとんどは $10\mu\text{m}$ 帯ではなく $20\mu\text{m}$ 帯で検出されたものであり、中心星の明るさの寄与は、波長が長くなればなるほど小さくなっている (図 3.27 参照)。したがって、ダスト円盤のサーベイ観測を行うには、高解像度観測をより長波長である $20\mu\text{m}$ あるいはそれよりも長波長で行うことが最も望ましく、TAO 望遠鏡の優位性が高い観測分野と言える。

- $20\mu\text{m}$ 帯での高い感度

TAO 望遠鏡は高度 5600m のサイトに設置する計画であり、サイトでの上空水蒸気量 (PWV) は 0.5mm (上位 25 %の平均) まで下がっている。これによって熱赤外で最大のノイズ源である大気からの放射は格段に減少することが予想される。この効果は Q バンド ($16\text{--}26\mu\text{m}$ 帯) で特に顕著であり、例えば $24\mu\text{m}$ 付近では大気放射量が $1/3$ 以下まで減少する (図 3.31)。さらに高高度で気温が低いこと、Q バンドの高解像度観測に最適化された装置を取り付けることなどを考えあわせると、TAO 望遠鏡は Q バンドで最も高い感度が達成できる地上望遠鏡だと言える。特に南半球では 3000m 超のサイトに大型望遠鏡の建設は TAO 以外には予定されていない。高度が 3000m 以下になると Q バンドの観測は難しくなるので、南天天体での熱赤外観測では TAO 望遠鏡の優位性は抜きん出ているといえる。

- $20\mu\text{m}$ 帯での高い空間分解能

TAO 望遠鏡では、副鏡による補償光学システムを用いることで、従来よりも格段に安定した像 (PSF) での観測が可能になる。中間赤外域は可視近赤外に比べると大気擾乱の影響が少なく、半値全幅でみるとほぼ回折限界の像が常に得られることが知られている。しかしながら、その像プロファイルの詳細を調べると、そのストレール比は最大でも 0.5 程度に過ぎず、やはり大気擾乱の影響を受けていることが

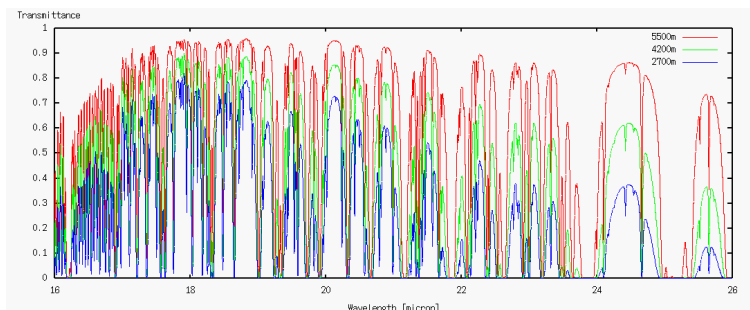


図 3.31: Q バンドでの大気透過率 (モデル計算)

分かる。これを補償光学で補正することで、ほぼ完璧な回折像を常に得ることができるようになることが、MMT6.5m 望遠鏡を用いた試験観測であきらかにされている (Close et al. 2003、図 3.32 も参照)。星周ディスク観測のようなダイナミックレンジが大きく空間分解能ぎりぎりの観測を行うためには、像の安定性が決定的に重要になるので、補償光学をもつ TAO 望遠鏡の優位性は非常に高いと言える。

- 30 μm 帯での観測可能性

30 μm 帯はこれまで地上望遠鏡では観測されたことが無く、1'' スケールの解像度での観測例はまったく存在しない。30 μm 帯では対応する黒体放射温度がおおよそ 80–100K であり、ちょうど太陽系で言うカイパーベルト領域にあたっている。したがって、30 μm 帯は、これまでよりもより低温すなわち外側のダスト円盤の構造を研究するのに最適な波長である。TAO 望遠鏡は世界で初めて 1 秒の空間分解能で 30 μm を観測できる望遠鏡であり、発見的なものも含めて多くの成果が期待できる。

- 豊富な観測時間

無バイアス/ボリュームリミットの観測を行うには、大量の観測時間が必要となる。例えば、後述するような最近傍 G 型星のサーベイ観測の場合、全ての天体を観測するのに約 30 快晴夜が必要である。一方、高解像度を達成できる 8–10m 望遠鏡では中間赤外装置はほぼ全て共同利用で使われており、このようなプロジェクトに多大な時間をかけることは難しい。TAO 望遠鏡だけが、サーベイ的観測に多くの時間を費すことができる望遠鏡である。

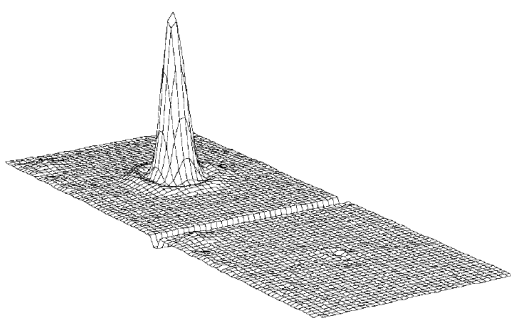


図 3.32: MMT AOS で得られた 11.7 μm の画像 (左)。回折リングがクリアに見えている。右の図は標準星の PSF を差し引きしたもの。回折リングを含めてほぼ完全に点源の差し引きがなされており、残存成分の強度は FLUX の 0.5 % 以下である。(Close et al. 2003)

実際の観測

星周ダスト円盤の構造を空間分解する必要があるため、近傍の星が主な観測ターゲットとなる。ここでは観測の例として2つのカテゴリーを挙げ、その目的および実現性を議論する。

1. 最近傍の星

本研究は微弱なダスト円盤の検出を目指すものであり、進化のある程度進んだ主系列星は重要なターゲットのひとつである。特に主系列星でどの程度の星にダスト円盤が付随するのかといった統計情報は、太陽系との関連を知る上で興味深い。このような統計量を知るためにはボリュームリミットの無バイアスサーベイが必要であり、TAO 望遠鏡での観測研究が待たれるテーマである。

単純な熱平衡モデルを考えた場合、ダストの温度が120 K ($25\mu\text{m}$ で観測可能な温度帯) になる星からの距離は、A 型星で45AU, G 型星で7AU である。TAO 望遠鏡の回折限界は $25\mu\text{m}$ で $0.''97$ であり、AO を用いることでこの直径のダスト円盤まで空間分解可能だと考えると、A 型星で92pc, G 型星で15pc 程度の天体までがターゲットとなる。星密度などから考えると、TAO 望遠鏡でサーベイ可能な天体数はA 型で500 天体、G 型で50 天体となる。これは、円盤進化の統計情報を得るのに十分な数である。

TAO 望遠鏡での Q バンドの検出限界は、on-source 4 時間積分でおおよそ 1.5mJy (3 レベル) である。15pc はなれた G 型星に太陽系と同じダスト円盤が付随していた場合、その明るさはおおよそ 5mJy と推定されるので、TAO を用いればこれを $\text{SN}\sim 10$ で検出することが可能である。

なお、既存の8–10m 望遠鏡では、Q バンドで 5mJy の放射を検出することは非常に難しく (COMICS を用いた場合でも25 時間の積分で $S/N = 3$)、サーベイ的な観測は不可能である。さらに、AO がないシステムでこれだけ長時間に渡ってPSF を安定させることは不可能なので、空間的な分離も困難となる。TAO 望遠鏡だけがこのサーベイを遂行できる望遠鏡となる。

このサーベイによって、15pc 以内の全ての G 型星、および90pc 以内の全ての A 型星について、それが“ダスト円盤を持つ太陽系に似た星”なのか、あるいは“ダスト円盤が存在しない = 太陽系とは違った星”なのかを明らかにすることができ、惑星系の普遍性を知る上でも興味深い結果をもたらすだろう。

2. 近傍運動群

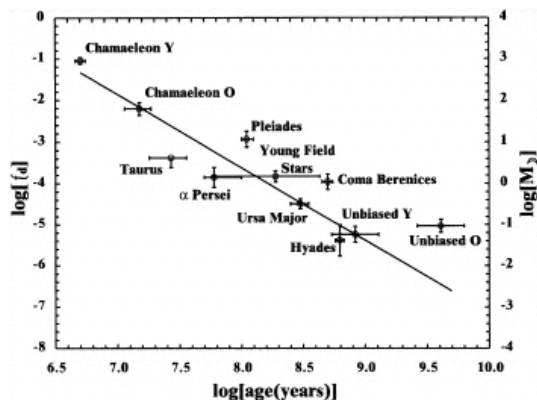


図 3.33: 星周ダストの量と年齢の関係 (Spangler et al. 2001)。

運動群で同定される近傍星団は年齢が同じと考えられる星の集団であり、ダスト円盤の進化を議論するのに好都合である。特にダスト円盤の変化が激しいと考えられる 10–100Myr あたりの進化を議論するには、年齢が精度良く決まっている必要があり、星団の観測は非常に有効である。またこれら星団は同じ進化段階にあって違う質量を持つ星のサンプルでもあることから、星の温度による差異を論じるにも都合が良い。

太陽系近傍 60pc 以内には 4 つの星団があるが、うち 10–100Myr の進化段階にあるのは TW Hya Association と Tucana Association の 2 つである。これらはともに南天にある星団で、年齢はそれぞれ 20Myr、40Myr と推定されている (Zuckerman et al. 2001)。これらの天体までの距離は約 50pc であり、中心星温度が 8000 K までの天体ならば十分に分解可能である。明るさの点でもダスト量が時間の -2 乗に比例している (Spangler et al. 2001) とすれば、数時間の積分で星団の全てのメンバーについてダスト円盤からの放射を検出できるはずである。この観測によって星団メンバー約 50 星を観測すれば進化段階初期でのダスト円盤の構造やその進化、スペクトル型による違いなどを論じることができるようになる。

3.4.2 食による太陽系外惑星の検出

太陽以外の恒星の周囲に惑星が存在することは、近年、観測的に明らかとなり、2004 年 8 月現在で既に 100 個以上が発見されている (図 3.34)。これまでに提案・実行された

検出方法には、直接撮像法、位置天文法、視線速度法、熱放射分離法、分子線分光法、掩蔽法などがあるが、発見されている系外惑星は、ごく僅かな例外を除いて、すべて、視線速度法によるものである。この方法では惑星質量を含む多くの導出パラメータに軌道傾斜角 ($\sin i$) の項が含まれたままであり、これが惑星の物理量に対する不定性となる。また、極めて精密な高分散分光観測 (先ほどの例だと $R = 2 \times 10^7$) が必要であるため、大量のサンプルに対して無バイアスにサーベイを行うのにはあまり適していない。

これを補う特長を持つのが、掩蔽法である。惑星が恒星の手前を横切る際に発生する食 (日面通過) による恒星の変光を観測して検出する方法である。イベント発生率が低いため、これまで、あまり省みられなかったが、既に1つ実例があり、現実的な方法として注目されるべきである。また、以下に挙げるように視線速度法での欠点を補う特徴

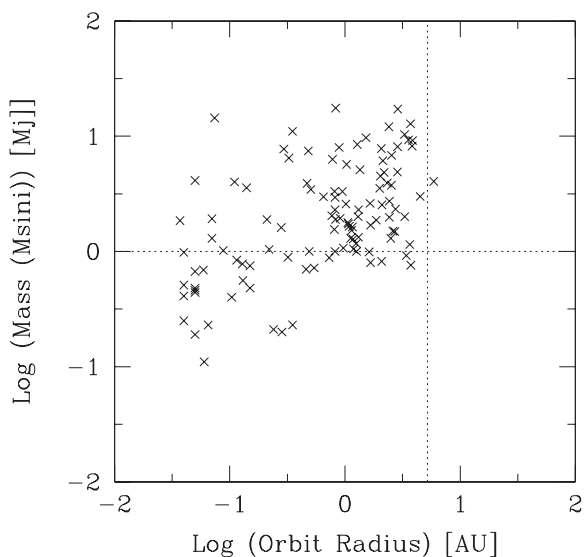


図 3.34: 2004 年までに発見された系外惑星の質量と軌道半径の関係。点線は太陽系の木星を示す。ほとんどの惑星が木星より内側に存在するのは観測効果のせいでもあるが、太陽系と様子が異なる惑星系が多数発見されているのが分かる (元データは California & Carnegie Planet Search ホームページ <http://exoplanets.org/> より)。

を持つ。

- 掩蔽が発生すること自体から惑星の軌道傾斜角に強い制限を加えることができる。変光曲線が十分な精度で求められる場合には、そこから、さらに正確に軌道傾斜角を求めることも可能である。
- 主星に対する惑星の大きさ（直径）を直接観測できる。
- 軌道面の傾きはランダムと考えることができるので統計的な処理がやりやすい。
- 測光観測だけで検出できるので、多数の恒星に対して無バイアスにサーベイすることができる。

ここでは、TAO 望遠鏡での隠蔽による惑星観測として、他の観測では惑星存在の有無が明らかでない星に対して惑星検出を試みる「サーベイ観測」と、視線速度法など他の方法によって存在が明らかとなっている惑星について行う「追求観測」とについて述べる。

サーベイ観測

サーベイ観測は、他の観測で惑星存在の有無が明らかでない星に対して無バイアスで測光モニタサーベイを行い、惑星隠蔽による変光を検出することで、惑星検出を試みるものである。

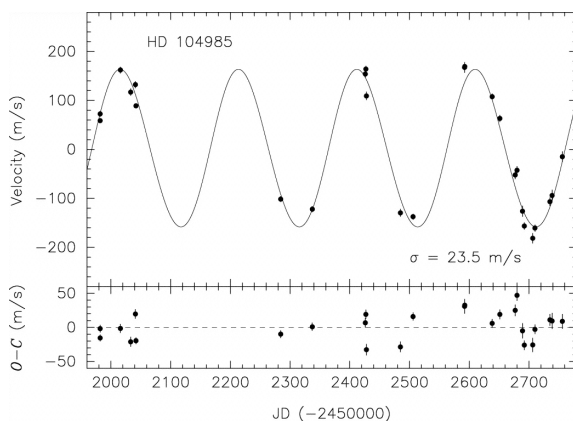


図 3.35: 岡山 188cm 望遠鏡によるドップラーシフト観測の結果。巨星 HD104985 のまわりでも惑星によるドップラーシフトが発見された (Sato et al. 2003)。

惑星隠蔽による星の減光する割合は、中心星と惑星の見掛けの大きさの比で決まっており、惑星が小さいほど減光量は小さい。例えば地球サイズの惑星の場合、減光の割合は 8×10^{-5} であり、これを検出することは事実上不可能となる。一方、木星サイズの惑星の場合は、減光の割合が 0.01 程度となり、 $S/N = 1000$ 程度の観測を行えば検出が可能となる。TAO 望遠鏡の場合、積分時間 1000 秒で $V=20.9\text{mag}$ 、 $K=19.4\text{mag}$ の星が $S/N = 1000$ であるので、これより明るい星に対してモニタを行うことで、木星型惑星を検出できる可能性がある。¹

では隠蔽の検出はどの程度の星で期待できるだろうか。隠蔽を検出するには、まず我々がその惑星の軌道と（ほぼ）同一平面の位置にいる必要がある。このような幾何学になる確率は恒星サイズ・軌道・軌道面傾斜角によって決まっている。惑星の軌道面がランダム、星が太陽と同じであると仮定すると、木星軌道にある惑星で $1/1300$ 、Hot Jupiter (0.32AU) の場合では、 $1/79$ となる。サーベイする星の中でこれだけの割合の星が、我々から見て食を起こす幾何学にあると言える。さらに、観測期間中に食を起こす確率を考える。観測期間が 1 日 8 時間で 60 日だとすると、食が期間内に起こる確率は、木星軌道にある惑星の場合で 5×10^{-3} 、Hot Jupiter の場合だと 0.33 となる。

これらの議論をあわせると、惑星系を持つ星をひとつモニタした際に隠蔽を検出できる確率は、木星軌道の木星型惑星で 4×10^{-6} 、Hot Jupiter で 4×10^{-3} となる。一方、 $V < 20.9\text{mag}$ の星は銀河面付近で 1 平方度あたり 10^5 個ほど存在している。したがって、1 度の視野をモニタした場合に、観測される期待値は、木星型惑星で 0.04 個、Hot Jupiter で 40 個に達する。すなわち、このようなモニタ観測を行うことで木星型惑星、特に Hot Jupiter のような惑星については、その隠蔽を検出できる可能性は大きいと言える。

サーベイでの検出は、視線速度法よりも多くの星について一度に調査することができる他に、視線速度法では観測にかかりにくい、公転速度が遅い惑星についても確率的に検出される可能性がある。したがって、掩蔽法で惑星存在が示唆された星について視線速度法による追求観測を行うなど相補的に観測を行うことができる。また、ここでの見積もりでは、太陽類似恒星周囲にしか惑星が存在しないとして見積もりを行っているが、サーベイ観測の場合、それ以外の恒星も同時に監視することとなり、これらの恒星周囲に惑星が存在するかどうか、同時にチェックすることが可能である。実際に、G 型巨星周囲の系外惑星が発見されている (Sato et al. 2003)。ただし、巨星周囲の方が、掩蔽法での検出はより困難である。もし、太陽に類似していない恒星周囲の系外惑星についての統計が得られれば、それだけで大きな発見である上に、検出率も増加することになる。

¹近赤外アレイ検出器で $S/N = 1000$ を達成するのは実際は簡単ではないが、ディザリングを頻繁に行ったりオフセットを直前直後に差し引くなど観測手法を工夫すれば不可能ではない。具体的な方法は現在検討中である。

また、食が発生するのは、惑星摂動による主星の天球上での固有運動が最大となる時期ではあるが、その変化は最小の時期である。このため、直線的な固有運動と分離して惑星を探すことを考えると、掩蔽発生時は、固有運動によって惑星を確認するには適していない。しかし、この時点で恒星と惑星と太陽系とが一直線に並んでいるという強い拘束条件を課することができるため、固有運動法単独よりも高い精度で短期間のうちに惑星の軌道を決定できる。

追求観測

視線速度法や位置天文法など他の方法によって検出された恒星については、食が発生する可能性がある時点を指定することができれば、その時期に集中して特定の恒星に対して掩蔽観測を行うことができる。

隠蔽法の場合、食が発生するのは視線速度変化が最大の際に限られるので、その時点をねらって観測すればよい。この場合、食が観測されるか否かで軌道がほぼ edge-on であるか否かを定めることができ、観測された場合は、惑星の質量をほぼ正確に決定することができる。

掩蔽が観測されたのは、2005年3月現在ではHD209458およびTrES-1の2例だけである。前者は視線速度法によって存在が知られていた惑星を検出したもの、後者は多色観測による掩蔽で検出した後に視線速度法で確認したものである。変光曲線の解析から軌道傾斜角、惑星半径などが求められ、視線速度法による結果と合わせることで惑星質量などが決定されている。これが軌道傾斜角の不定性なしに惑星質量などが決定されている唯一の系外惑星である (Henry et al. 2000; Charbonneau et al. 2000; Castellano et al. 2000; Jha et al. 2000; Alonso et al. 2004)。HD209458は、口径わずか80cmおよび10cmの望遠鏡によって発見・測定されている。これは、HD209458の公転周期が、たまたま3.5日と短かったために繰り返し観測が可能だったためであるが、この類の観測を大口径望遠鏡で実施すれば大きな成果が得られる可能性を示唆している。実際、ハッブル宇宙望遠鏡による高精度観測によってHD209458の変光曲線はきわめて高い精度で既に観測されており、恒星の周縁減光などの影響を考慮した上での惑星サイズが求められている (Mandel & Agol 2002)。

精密な固有運動測定によって惑星の存在が示唆された場合は、固有運動の変化が最小になる際に食が発生する可能性があるため、この時点をねらって観測すればよい。この場合、惑星質量などは固有運動測定だけからでも求めることは可能であるが、掩蔽発生時は、その時点で恒星と惑星と太陽系とが一直線に並んでいるという強い拘束条件となるため、固有運動法単独よりも高い精度で惑星の軌道を決定できる。また、惑星直径は掩蔽法でしか得ることができない情報である。

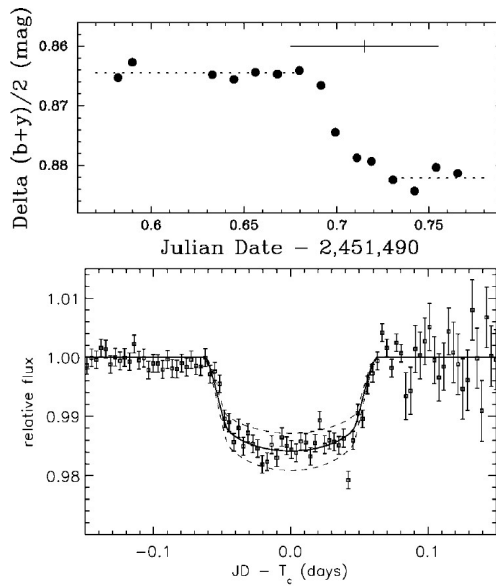


図 3.36: HD209458 の食変光曲線。Henry et al. (2000) と Charbonneau et al. (2000) の結果。

3.5 その他のテーマ

他に、TAO の能力を活かした観測テーマとして以下のものが挙げられよう。

3.5.1 銀河中心

天の川銀河の中心は最も近い銀河中心であり、そこには高密度ガスや強い磁場が大量にあり、星形成やブラックホールの活動が相互に作用する複雑な系となっている。これらの構成要素が空間的に分解できる唯一の銀河中心核であることを考えると、そこでの現象を天体物理学的に解明することは特定の 1 天体を観測するという意味を越えて、銀河中心一般への雛型としての意味も持つということができる。

TAO 望遠鏡の建設予定地であるアタカマから見ると、銀河中心は、ほぼ天頂を通るという理想的な観測条件にあり、長時間連続して観測することができる。緯度的にほぼ同等の設置条件である VLT で、近赤外線観測によって、いて座 A* 周囲を巡る恒星が観測され、いて座 A* が太陽の 300 万倍の質量を持つブラックホールであることを確定したことは多くの研究者の記憶にあたらしい。

銀河中心は強い星間吸収のために可視光の観測は不可能であり、そこにある恒星については、その分布や運動は赤外線ではしか捕えることができない。この点で、VLT よりも赤外観測性能に優れた TAO 望遠鏡では、この領域のより詳細な情報が得られることが期待される。

また、豊富な星間ガスの運動や物理状態を調べることも重要である。赤外線では多数の電離ガス輝線や分子輝線（例えば、[Ne II] $12.8\mu\text{m}$, $\text{H}\alpha$ $12.4\mu\text{m}$, H_2 $12.3\mu\text{m}$ など）が観測可能であり、電波観測による分子ガス・磁場の観測や、X 線観測による超高温プラズマと相補的なデータを衛星よりもずっと高い分解能で、かつ、高い強度ダイナミックレンジで観測することができる。これは、銀河中心には多様な天体が多数集中していることを考えると、本質的に重要である。

3.5.2 星形成

星形成域の中心部分も星間吸収が激しいため、その様子を捕えるためには赤外線の観測が必要である。銀河系内で最大の恒星が形成されているといわれるエータカーリーナ領域を始め、多くの星形成領域が TAO により観測可能となる。これによって、数値流体シミュレーションによって示されている星形成初期段階に発生する諸現象を観測的に検証することが可能となろう。

また、TAO の広い視野と高い赤外線性能を活かし、深く広い観測を実施することでサンプル数を飛躍的に増大させることで、従来にない精度での初期質量関数を導出できる。これによって、例えば星形成領域ごとの初期質量関数の違いを見いだすことができる可能性があり、集団的な星形成のメカニズムにせまることができよう。

3.5.3 低温度星の切れ目のないスペクトルの取得

TAO 望遠鏡では、観測不可能な赤外線域が従来の観測サイトよりも狭いため、連続した波長域に渡って優れた感度が達成できる。これを活用することで、低温度星のスペクトルを大気窓にまたがるような広い波長域に渡って連続観測することで、全体のスペクトルを従来にない高い精度で決定することができる。

3.5.4 太陽系外縁天体の搜索

エッジワース・カイパー帯には、すでに多数の小天体が発見されており、これらの分布や性質を調べることは、太陽系の起源を明らかにする上で重要であることはいうまで

もない。その分布は、平均太陽距離 50AU 付近に境界があるとされているが、明るい天体だけが減少しているのか、質量分布が大きく減少しているのかは、観測限界の影響もあり、明確にはなっていない。TAO の優れた赤外線撮像性能を活用することで、このことについて明確な回答が出せることが期待できる。また、エッジワース・カイパー帯天体の鉱物学的性質を知るためには、その反射光の赤外分光観測が必要である。ここでも、TAO の優れた赤外線分光能力が発揮できる。

3.6 ALMA との連携

TAO の設置場所や期待される研究テーマを考える上で、国立天文台が欧米と協力して推進している ALMA との連携は特別に検討する必要があるだろう。そこで、ここでは、ALMA 計画の簡単な紹介とともに、それとの連携を考慮した上で重要となる研究テーマについて、一部、既出のものとの重複はあるが、改めてまとめてみることにした。

Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA) は、日本を含む世界的規模の国際協力によって、アタカマ高地にベースラインアレイ 64 台、ACA 16 台の合計 80 台という規模の超高精度アンテナ群を展開し、ミリ波からサブミリ波に至る波長域で、かつてない高い感度と解像度、および撮像能力を実現する装置計画である。2012 年からの本運用を目指して、北米およびヨーロッパに続き、我が国も平成 16 年度より建設を開始した。

TAO は、この ALMA サイトと同じエリアに設置される、我が国唯一の大型光学赤外線



図 3.37: ALMA の完成予想図。アタカマ砂漠 (標高 5000m) に、高精度なサブミリ波アンテナを合計 80 台展開する。

望遠鏡である。米欧は、それぞれ既に GEMINI/VLT をはじめとする複数の大型光学赤外線望遠鏡を南半球に有しており、それらの観測に基づき ALMA での観測提案を検討・策定するものと予想される。こうした現状を考えると、TAO が、光赤外域における研究ばかりでなく、ALMA によるミリ波サブミリ波帯での観測研究を進める上でも、日本の天文学コミュニティに測り知れない恩恵をもたらすことは疑う余地がないと言える。

TAO が ALMA と連携することの重要性は、3.2.7 節などでも既に触れられているが、以下に、ALMA という装置の特徴と、そこから期待されるであろう TAO との連携の可能性について概観する。

3.6.1 ALMA の特徴

ALMA という観測装置の特徴としては、以下の 3 点があげられる。

1. 大集光力：直径 12m の超高精度アンテナがベースラインアレイだけで 64 台ある上に、量子雑音限界に迫る超高感度 SIS 受信機システム、および、最大 8GHz にも及ぶ広い周波数帯域は、ミリ波サブミリ波帯において、かつてない高い感度での観測を可能にする。さらに、日本が建設する ALMA Compact Array (ACA) システムが加わることで、ベースラインアレイだけでは感度が不足する空間周波数成分に対しても十分な感度を達成できる。これによって、総合的な感度は、既存の装置と比較して 2 桁から 3 桁も向上していることになる。
2. 高解像度：アンテナ群を最大 10km という広い領域に渡って展開し、さらに大気による波面の揺らぎを補正するシステム（電波位相補償法）を用いることにより、連続波では最大 $0.''01$ という、ハッブル宇宙望遠鏡をも凌駕する高い角分解能を実現する。輝線観測では、感度による制約があるが、それでも $0.''1$ 程度の解像度による観測が多くの天体で可能になると予想される。角分解能のジャンプは、口径 10m クラスのサブミリ波望遠鏡が主役となっている $850\mu\text{m}$ 帯では 3 桁以上。既に干渉計が稼動しているミリ波帯においても、1 桁から 2 桁の跳躍となる。
3. 高撮像能力：ベースラインアレイだけで 64 台という素子数の多さにより、短時間の観測で十分な Fourier 成分を取得し、極めて高い品位の画像を得ることができる。さらに、ACA システムをあわせることにより、干渉計のアキレス腱である「空間的に広がった構造への感度がない」という弱点を補いつつ、天体の輝度分布を、かつてない精度で忠実に写し撮ることができると期待される。

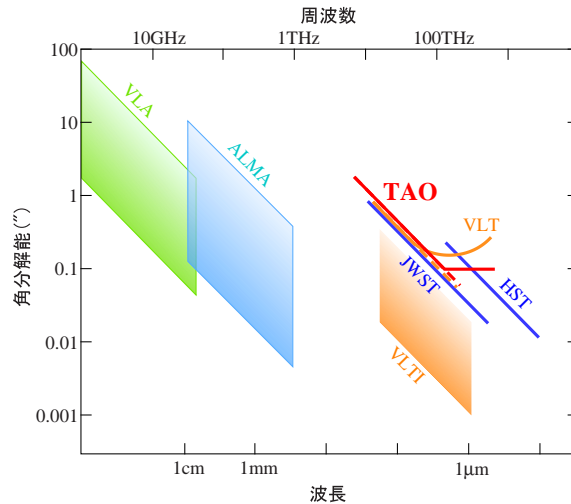


図 3.38: ALMA がカバーする波長域と角分解能の位置づけ。TAO をはじめとする光学赤外線望遠鏡と同等以上の角分解能を、ミリ波サブミリ波領域ではじめて実現できる。

3.6.2 TAO と ALMA の連携

submm galaxies の可視赤外 follow up 観測

JCTM/SCUBA による、サブミリ波帯における blank field survey によって発見された多数の「サブミリ波銀河」の存在は、宇宙初期において、ダストに深く埋もれた若い星形成銀河が多数存在していることを直接的に示し、銀河の形成と進化を観測的に研究する上で大きなインパクトを与えた (Hughes et al. 1998)。しかしながら、既存のサブミリ波カメラは角分解能に難があり (典型的に $10''$ かそれ以上で、光学赤外線観測と比較し 1 桁から 2 桁悪い)、その結果、他の波長における観測と比較してその銀河の性質を詳しく調べていくことはなかなか容易ではない (Dunlop et al. 2004)。また、角分解能が悪いことの影響として、観測ビーム内に複数の暗い放射が重畳することで観測の深さが制限される (confusion) ため、遠赤外線光度にして、典型的に $10^{12} L_{\odot}$ というごく明るい種族しか検出されてこないため、銀河の一般的な性質を明らかにするという視点からは極めて不十分な観測しかできていないのが現状である。

しかし、上記のような特徴を持つ ALMA が本格的に稼働すれば、様相は一変する。角分解能は、 $0.''1$ から $0.''01$ が達成され、その恩恵として、confusion limit のない、極めて深い撮像が可能となる。この時、極めて多数のサブミリ波銀河が続々と発見されることは間違いない。たとえば、 $\lambda = 850 \mu\text{m}$ において ALMA 5 時間積分で達成される感度

(5σ で $40\ \mu\text{Jy}$) では、1 平方度あたり 10^5 個以上のサブミリ波銀河が検出できることが期待できる。広い領域をカバーするために、積分時間を 3 分程度にした浅いサーベイであっても、1 平方度を掃くことで数 1000 個規模のサブミリ波銀河サンプルが生み出されるであろう。

これらのサブミリ波銀河の素性を探る上で、可視から赤外に至る多色撮像や分光観測により、対応天体を見出して SED の全貌をおさえることができるほか、その redshift を調べることは必要不可欠なステップであるが、我々自身の手でこれを遂行できるのは、TAO をおいて他にない。

optical/infrared selected galaxies の ISM と star formation の定量

TAO により実行される、近赤外域での、深くて広いサーベイは、活発に星形成をしている遠方の若い銀河を、新たに多数見出すと期待されている。これらの新しく見つかる若い赤外線天体は、ALMA による格好の観測対象となる。若い星からの UV/optical 放射は、その周囲にあるダストに吸収・再放射されるため、より波長の長い領域をカバーする ALMA での follow up 観測を行うことにより、これら若い星形成銀河の SED の全貌をはじめてつかむことができる。

長波長側での観測は、そこに埋もれた星形成を定量するという観点からも重要である。ダストに深く埋もれた銀河においては、可視赤外域で見積もった星形成率が、(減光量を見積もり、それを補正してもなお) 遠赤外線/サブミリ波域の観測から評価した星形成率よりも有意に(極端なケースでは桁で) 食い違うことがある (e.g., Frail et al. 2002)。TAO により遂行される、 $z = 1\text{--}2.5$ での銀河の分光サーベイにより、cosmic star formation density のデータが得られると期待される。このサンプルに基づき、ALMA において星形成率を独立に調べていくことにより、個々の銀河で、星形成におけるダストの影響を多角的に検討できる。これは、真の cosmic star formation history を得る上での重要なステップである。

quasar/遠方銀河の化学汚染史

Fe/Mg 比を用いてクェーサーにおける星形成史を遡ることは、TAO における最も重要な研究課題の一つである。ALMA による高赤方偏移のクェーサーのダスト観測および分子輝線観測は、その銀河でどの程度重元素汚染が進んでおり、したがっていつ major formation が開始されたかを探る上で独立な手がかりを与えることで、相補的な役割を果たす。既に、既存のミリ波望遠鏡により、 $z = 6.42$ のクェーサーにおけるダスト放射および CO 分子輝線が検出されており (Fan et al. 2003)、 $z > 8$ という時期での重元素汚

Molecular & atomic lines from mm to infrared wavelengths

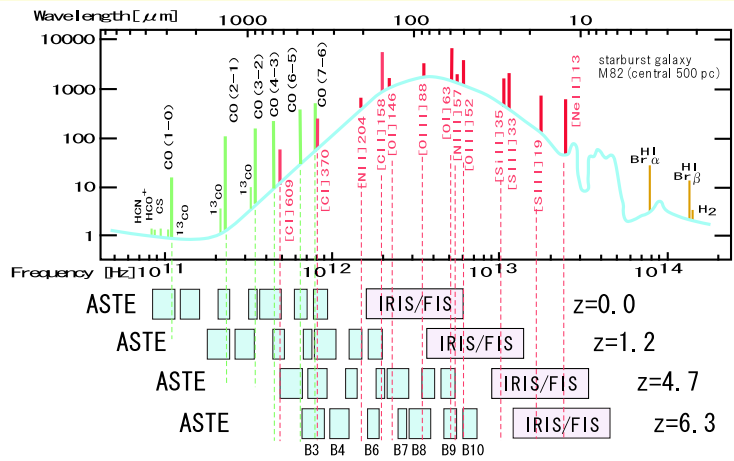


図 3.39: ALMA がカバーする波長域と銀河の SED。TAO では、若い星からの放射や高温ダストからの放射を捕らえる一方、ALMA は、より低温のダストや星間物質 (原子・分子からの放射) を観測する。両者の連携により、遠方にある若い星生成銀河の SED を総合的に描き出すことができる。

染開始時期が示唆されている。しかしながら、現在の観測で検出されるダストや分子輝線は、クェーサーの中でも極端に明るい部類のみであり、一般的な性質を示すものと結論づけることはできない。ALMA が稼動すれば、数桁暗いクェーサーまでダストや分子ガスを検出することが可能であり、ようやく、可視赤外域と同等の数のサンプルをミリ波サブミリ波でもそろえ、銀河の重元素汚染の様子を複数の波長から多角的に考察できるであろう。

銀河の形態進化史

TAO の補償光学 (AO) による深い近赤外域撮像能力は、個々の銀河の形状や内部構造を識別する上でも大きな威力を発揮する。ALMA では、 $0.''1$ から $0.''01$ という解像度での ISM の撮像が可能となるため、たとえば $z \sim 1$ という距離の銀河であっても、近傍銀河で現在観測されているスケール (数 100 pc スケール) まで解像することが可能である。TAO と ALMA による撮像をいろいろな redshift の銀河で進めていくことにより、銀河の内部構造、すなわち、potential と ISM や星形成領域の分布が、どのような赤方偏移まで遡るとどう変化していくのか、絨毯爆撃的に追うことが可能になる。

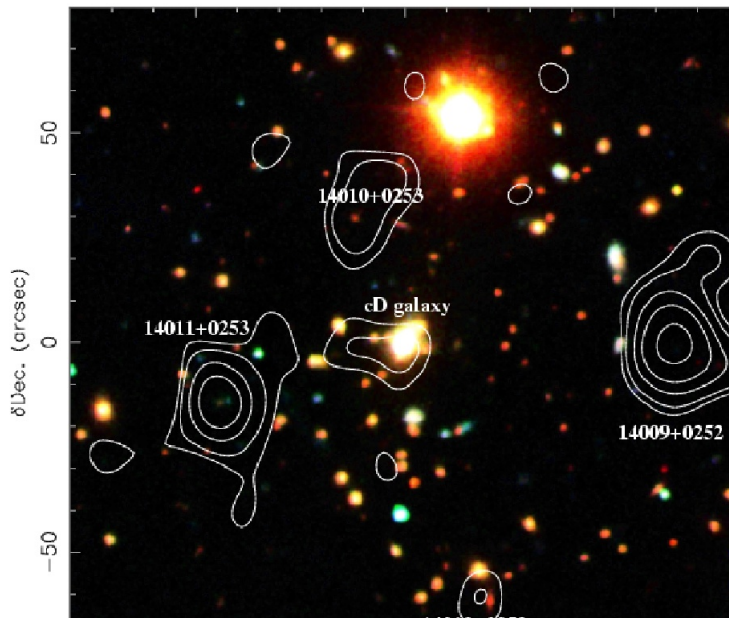


図 3.40: サブミリ波で明るい銀河 (サブミリ銀河) の観測例。可視赤外域でみて赤い銀河が対応していることが多いが、現在の観測装置では角分解能が悪いため、対応天体が同定できないことも多い。ALMA では、この画像より 2 桁から 4 桁程度高い解像度でサブミリ銀河を見つけ出し、それらを TAO によって観測することで、その SED を総合的に描き出し、遠方にある形成途上の銀河の進化を探ることができると期待される。

星周円盤の構造解明

TAO 望遠鏡による熱赤外域での星周円盤の観測は、暖かい ($< 200\text{K}$) ダスト円盤からの熱放射を精密に、高解像度で描き出すものであり、星周円盤の探査やその構造の理解に大きな約割を果たす。一方、サブミリ波での観測は、それよりも低温にあるダストをトレースするものであり、その意味で熱赤外観測と相互補完的な関係にある。これまでの観測では熱赤外線、サブミリ波とも空間分解能が不足しており、円盤の詳細な構造を観測から直接探することは難しかった。ALMA はサブミリ波で $0.''1-0.''01$ という非常に高い空間分解能を有しており、TAO 望遠鏡も熱赤外域で 1 秒角を切る解像度が達成できる。さらに TAO 望遠鏡は地上望遠鏡としてはじめて $30\ \mu\text{m}$ 帯での観測が可能な望遠鏡であり、従来にない高解像度 ($\sim 2''$) の $30\ \mu\text{m}$ 画像も取得可能となる。したがって、TAO と ALMA を組み合わせた観測は、円盤の構造を詳細に調べる上で高い相乗効果を生むものと言える。

また、TAO 望遠鏡は ALMA の観測ターゲット選定にも多いに役立つものである。TAO で計画している星周円盤のサーベイは、これまでとは違う高解像度を切口に星周円盤を捜査するものであり、このサーベイで見つかった星周円盤は ALMA の高解像度を活かした観測のターゲットとしてふさわしい。ALMA のような多岐に渡る研究を行う望遠鏡に置いては、興味深い観測ターゲットをどれだけたくさん用意できるかが、観測成果を高める鍵となる。その意味でも、TAO 望遠鏡の果たすべき約割は大きい。

星間ダストの進化の解明

星間空間および分子雲中でのダストの研究は、ダスト自身の進化を知る上でも、また複雑な分子の生成過程を考える上でも興味深い課題であり、ALMA での主たる研究主題のひとつである。ミリ波サブミリ波でのダストの観測では、その総量やサイズ分布などを知ることができるが、その組成や構造に制限を与えることは難しく、物質的な観点からダストを同定することはできない。これに対して、熱赤外域はダストの放射/吸収スペクトル構造が数多く存在する波長帯であり、物質を同定するのに欠かせない波長である。さらに熱赤外観測はミリ波サブミリ波に比べるとより温度が高いダストを選択的に捕らえるので、両者を比較することでダスト温度についての情報も得られることになる。したがって、熱赤外観測とミリ波サブミリ波観測の組み合わせは、星間ダストの総合的な理解には不可欠なものであり、TAO と ALMA が協力すれば大きな相乗効果を挙げることができる。

関連図書

- Allonso R., et al., 2004, ApJ, 613, L153
- Ascasibar Y., Yepes G., Gottlöber S., Müller V., 2002, A&A, 387, 396
- Bowey J. E., Adamson A. J., Whittet D. C. B., 1998, MNRAS, 298, 131
- Brinchmann J., Ellis R. S., 2000, ApJ, 536, L77
- Castellano T., Jenkins J., Trilling D. E., Doyle L., Koch D., 2000, ApJ 532, L51
- Charbonneau D., Brown T. M., Latham D. W., Mayor M., 2000, ApJ 529, L45
- Close L. M., Biller B., Hoffmann W. F., Hinz P. M., Biegler J. H., Wildi F., Lloyd-Hart M., Brusa G., Fisher D., Miller D., Angel R., 2003, ApJ, 598, L35
- Denicolo G., Terlevich R., Terlevich E., 2002, MNRAS, 330, 69
- Dunlop J. S., et al., 2004, MNRAS, 350, 769
- Dwek E., 1998, ApJ, 501, 643
- Fan X., Strauss M., Richards G., Gunn J., Lupton R., Schneider D., Pentericci L., Rix H., Rix H., 2003, in “AGN Physics with the Sloan Digital Sky Survey” ASP Conference Series, 311, 431
- Frail D. A., 2002, ApJ, 565, 829
- Gallego J., Zamorano J., Aragón-Salamanca A., Rego M., 1995 ApJ, 455, L1
- Glazebrook K., Blake C., Economou F., Lilly S., Colless M., 1999, MNRAS, 306, 843
- Greaves J. S., et al. 1998, ApJ, 506, L133
- Henry G. W., Marcy G. W., Butler R. P., Vogt S. S., 2000, ApJ 529, L41

Hopkins A. M., Connolly A. J., Szalay A. S., 2000, *AJ*, 120, 2843

Hughes D. H., et al., 1998, *Nat*, 394, 241

Jayawardhana R., et al. 1998, *ApJ*, 503, L79

Jha S., Charbonneau D., Garnavich P. M., Sullivan D. J., Sullivan T., Brown T. M., Tonry J. L., 2000, *ApJ*, 540, L45

Kodaira K., et al., 2003, *ApJ*, 558, L83

Kandori R., Dobashi K., Uehara H., Sato F., Yanagisawa K., 2003, *AJ*, 126, 1888

Kauffmann G., Charlot S., 1998, *MNRAS*, 297, L23

Kawara K., Murayama T., Taniguchi Y., Arimoto N., 1996, *ApJ*, 470, L85.

Kennicutt R., 1983, *ApJ*, 272, 54

Kodaira K., et al., 2003, *PASJ*, 55, L17

Koerner D. W., et al. 1998, *ApJ*, 503, L83

Lidman C., et al., 2005, *A&A*, 430, 843

Madau P., et al., 1996, *MNRAS*, 283, 1388

Maihara T., et al. 2001, *PASJ*, 53, 25

Mandel K., Agol E., 2002, *ApJ*, 580, L171

McGaugh S. S., 1991, *ApJ*, 380, 140

Minezaki T., et al., 2004, *ApJ*, 600, L35

Minowa Y., et al., 2005, *ApJ*, in press

Minowa Y., et al., 2005, in preparation

Nagashima M., Yoshii Y., 2004, *ApJ* 610, 23

Nagashima M., Yahagi H., Enoki M., Yoshii Y., Gouda N., 2005, *ApJ*, in press

Ouchi M., et al., 2001, *ApJ*, 558, L83

Ouchi M., et al., 2003, ApJ, 582, 60

Pagel B. E. J., et al., 1979, MNRAS, 189,95

Perlmutter S., et al., 1999, ApJ, 517, 565

Pettini M., et al., 1998, ApJ, 508, 539

Riess A. G., et al., 2004, ApJ, 607, 665

Sato B., et al., 2003, ApJ, 597, L157

Schmidt B. P., et al., 1998, ApJ, 507, 46

Spangler C., et al. 2001, ApJ, 555, 932

Steidel C. C., Adelberber K. L., Giavalisco M., Dickinson M., Pettini M., 1999, ApJ, 519, 1

Suganuma M., et al. 2004, ApJ, 612, L113

Takami H., Takato N., Hayano Y., Iye M., Oya S., Kamata Y., Kanzawa T., Minowa Y., Otsubo M., Nakashima K., Gaessler W., Saint-Jacques D., 2004, PASJ, 56, 225

Teplitz H., Mclean I., Becklin E., Figer D., Gilbert A., Graham J., Larkin J., Levenson N., Wilcox M., 2000, ApJ, 533, L65

Totani T., Yoshii Y., Iwamuro F., Maihara T., Motohara K., 2001a, ApJ, 550, L137

Totani T., Yoshii Y., Iwamuro F., Maihara T., Motohara K., 2001b, ApJ, 558, L87

Totani T., Takeuchi, T. T., 2002, ApJ, 570, 470

Tresse L., Maddox S., 1998, ApJ, 495, 691

Tsuzuki Y., 2004, PhD Thesis, University of Tokyo

Wahhaj Z., Koerner D. W., Ressler M. E., Werner M. W., Backman D. E., Sargent A. I., 2003, ApJ, 584, L27

Yasuda N., et al., 2004, AAS

Yamashita T., Handa T., Omodata T., Kitamura Y., Kawazoe E., Hayashi S., S.,
Kaifu N., 1992, ApJ, 402, L65

Yoshii Y., 2002, in “New Trends in Theoretical and Observational Cosmology”,
eds. K. Sato & T. Shiromizu (Universal Academy, Tokyo) p.235

Yoshii Y., Tsujimoto T., Kawara K., 1998, ApJ, 507, L113

Zuckerman B., Song I., Webb R. A., 2001, ApJ, 559, 388

土居守, 2004, 「宇宙を見る新しい目」日本物理学会編, 日本評論社



図 3.41: チャナントール山麓から見上げた山頂。手前に白く見えるのは硫黄。

第4章 サイト - チリ北部アタカマ地域

4.1 チリの天文台と天文学研究機関

チリ共和国は南米大陸の太平洋岸に、南緯約 17 度から南に延びた国土を持ち、西はほぼアンデス山脈の分水嶺を境にボリビア、アルゼンチンと国境を接している。大陸東端であるため太平洋の沖合には、強い寒流であるフンボルト海流が流れ、海上からの水蒸気量が少ない。このため、全般的に降雨量が少なく、特に、中緯度高圧帯に当たる地帯は乾燥しており、南緯 30 度以北では、水蒸気量が少なく晴天率も高いという天体観測に適した地域となっている。さらに、チリ共和国は南米の中では比較的治安もよく、技術水準も高いこともあり、比較的古くから有望な観測地として注目され、欧米各国が観測所を設置している。南米の地図を図 4.1 に示す。

大型観測施設が設置されている場所は、大きく 2 地域に分けられる。南のラセレナ地域と北のアントファガスタ地域である。ラセレナ地域は、南緯 30 度付近に当たり、第 IV 地方 (region IV) の州都であるラセレナ市 (人口 11 万人) と隣接する港湾都市コキンボ市 (人口 11 万人) を中心とした地域である。首都サンチャゴからは直線距離で 500km ほど。サンチャゴとの間に 2 ~ 3 社がそれぞれ 1 日 2 ~ 3 便の航空便を飛ばしている。国土を縦貫する汎アメリカ高速道路が通っており、10 社以上が高速バスを運行していて、陸上交通の便もチリ国内としては極めて良い。コキンボ港が利用できるため、海外からの重量物の輸送にも適している。

ヨーロッパ南天天文台 (ESO) ラシヤ観測所 (La Silla) は、南緯 29 度 15 分、西経 70 度 44 分に位置する。ラセレナ市の北 150km ほど、海拔 2500m の山頂に口径 3.6m の望遠鏡を筆頭とする大小 20 近くの望遠鏡が設置された大天文台である。後述の VLT の技術試験を目的とした新技術望遠鏡 NTT (口径 3.58m) やシュミット望遠鏡が設置され、視線速度による太陽系外惑星探査観測や赤外線掃天観測 DENIS など、ここにある他の望遠鏡を利用して実行されている。数年前までは、光学赤外線望遠鏡の他に、スウェーデンと共同運用している口径 15m の電波望遠鏡 SEST や東京大学天文学教育研究センターが運用している口径 60cm の電波望遠鏡も設置され、ミリ波・サブミリ波観測も行われていた。運用本部はドイツ・ミュンヘンにあり、ベルギー、デンマーク、フランス、ドイツ、イタリア、オランダ、ポルトガル、スウェーデン、スイス、英国の 10 ヶ国が共

同で組織している。山頂には観測装置改修や構内移動用自動車の検修ための工場、研究のための図書館、観測者宿泊施設、食堂、診療所、従業員の保養施設などをもち、さながら小さな町の様相を呈している。見学者用の施設は設置されていないが、ラセレナ市内からの見学ツアーが組まれており、連日多数の見学者が訪れている。山頂以外には、現地運用本部としてサンチャゴに施設を持つ（後述）ほか、ラセレナ市内にも連絡事務所を持っている。

ラスカンパナス天文台 (Las Compañas) は、南緯 29 度 01 分、西経 70 度 42 分に位置する。ラセレナ市より北方 156km の海拔 2500m の山頂にあり、ESO ラシヤ観測所の隣り山に当たる。口径 6.5m のマゼラン望遠鏡 2 台を筆頭に、デュポン望遠鏡 (口径 2.5m) など 10 台程度の天体望遠鏡が設置されている。マゼラン望遠鏡は、同型の望遠鏡 2 台が隣接して設置されており、管路によって結合することにより、光干渉計として用いることも可能な設計となっている。名古屋大学の 4m 電波望遠鏡なんてんも、ここに設置され、観測を行っていた。米国ワシントンに本部を置くカーネギー財団が運営している。

インターアメリカン天文台セロトロロ観測所 (Cerro Tololo) は、南緯 30 度 10 分、西経 70 度 49 分に位置する。ラセレナ市より東に 88km、ピスコやワイン生産で有名なエルキ谷をさかのぼった海拔 2200m の山頂にある。1962 年に開設された。口径 4m のブ

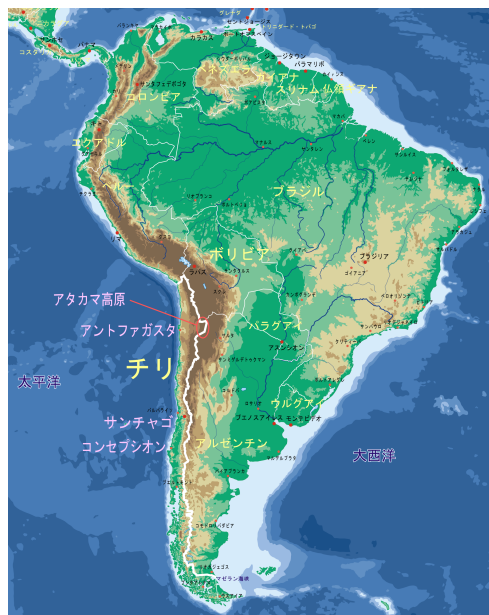


図 4.1: 南米におけるチリの位置

ランコ望遠鏡を筆頭に4基の望遠鏡が狭い山頂にひしめいている。コロンビア大学からハーバードスミソニアン天体物理学研究所のグループが設置した口径1.2m電波望遠鏡もここにある。米国立光学天文台NOAOとして、米国の大学連合が作っているAURA (Associated Universities for Research in Astronomy) が運営に当たっている。広報普及活動にも力を入れており、天文博物館が設置され、ラセレナ市内からのツアーが組まれていて、連日多数の見学者が訪れている。山頂以外にラセレナ市内に事務や技術部門を含む支援施設を持ち、研究スタッフは観測所と交代勤務の体制を取っている。

セロパチョン観測所は、セロトロコ天文台の数km南のパチョン山頂にあり、口径8mのジェミナイ南望遠鏡を持つ。米国、英国、カナダ、オーストラリア、チリ、アルゼンチン、ブラジルの7ヶ国共同で建設・運用されている。また、ジェミナイ南望遠鏡の隣にブラジル、ミシガン州立大学、北カリフォルニア大学、米国立光学天文台NOAOの共同で口径4mのSOAR望遠鏡を建設している。セロトロコ天文台とは国道からのアクセス道路は兼用しているものの、相互には多少離れているため、パチョン山頂には望遠鏡支援設備のほか研究施設も設けられている。

アントファガスタ地域は南緯24度付近、南回帰線直下に当たり、第II地方(region II)の州都である港湾都市アントファガスタ市(人口22万人)を中心とした地域である。首都サンチャゴから直線距離で1000kmほど。数社が1日数便の航空便を飛ばしている。国土を縦貫する汎アメリカ高速道路が通っており、陸上交通の便も良い。チリ北部最大の港湾であるアントファガスタ港が利用できるため、海外からの重量物の授受にも適している。

ヨーロッパ南天天文台(ESO)パラナル山観測所は、南緯24度40分、西経70度25分に位置する。アントファガスタ市の南120kmほど、太平洋岸から12kmながら海拔2635mのパラナル山頂に口径8.2mの望遠鏡4基が設置されている。VLTと呼ばれる、この望遠鏡群は、それぞれ単独でも使用可能なほか、地下トンネルに光路が設置されており、全体を結合して干渉計として使用することもできる。さらに敷地内に敷設された線路上を移動可能な、3台の予備望遠鏡(Auxiliary Telescopes)と呼ばれる1.8m鏡も加えて最長基線202mの干渉計として運用することが可能である。観測所の運用は、ラシヤと共にヨーロッパ南天天文台が行っており、サンチャゴの施設は共通である。

アントファガスタ市から北西200kmほどのアタカマ高原は海拔5000m近くに及び、ここでALMAが建設されている。科学保護地域(Science Preserve)となっており、商業目的の活動などに対して一定の保護がチリ政府から与えられている。ここには小規模ながら、既に天文観測設備が設置され始めている。日本の国立天文台が設置した口径10mの電波望遠鏡ASTEや名古屋大学が移設・改修した4m電波望遠鏡なんてん2がそれぞれある。米国コーネル大学が宇宙背景放射観測装置を設置していたこともある。

このほか、チリ国内には、首都サンチャゴ市内に天文学関係の大きな機関が設置され

ている。ヨーロッパ南天天文台 (ESO) はサンチャゴ市内にオフィスを持ち、ロシアおよびパラナル両観測所の運営統括を行っている。観測所で必要な物資の調達、ヨーロッパなど国外からの観測機器授受に関する税関措置、対現地政府交渉などを行う部局があるほか、研究部門も持ち、観測所現地と交代勤務する体制がとられている。このほか、訪問観測者のための専用宿泊施設を持ち、観測者に不便を感じさせない対応となっている。

チリ国内の研究拠点に目を転ずると、国内で天文研究者が在籍する大学は、2002年時点での調査によれば、チリ大学、カトリカ大学、コンセプション大学、北カトリカ大学、ラセレナ大学の5つがある。

チリ大学天文学教室は市内西部、カラン山にあり、14名のスタッフを擁し、博士課程が設置されており、多数のポスドクおよび大学院生が在籍している。カラン山には教室や研究室のほか、いくつかの観測機器もあるが、現在は、上述のチリ国内にある国際研究機関の大型観測装置の観測時間を利用した研究が中心である。

カトリカ大学天文天体物理学教室は、8名のスタッフを擁し、博士課程が設置されており、多数のポスドクおよび大学院生が在籍している。小型の光学望遠鏡を持っているが、現在の研究活動は、上述のチリ国内にある国際研究機関の大型観測装置の観測時間を利用したものが中心である。

コンセプション大学は南部のコンセプション市にある。物理学教室に、4名の天文学研究スタッフが在籍しており、博士課程を持つ。恒星に関する研究が中心である。

ラセレナ大学はスタッフ2名で学部のみであるが、ラセレナ市にあり、周辺にある3つの国際天文台に地理的に近いという特徴を持つ。これを活かして、ESOから客員1名を迎えている。

北カトリカ大学はスタッフ1名であるが、アントファガスタ市にあり、ESOやALMAに最も近い大学であり、地の利を活かした研究拠点となる可能性を秘めている。

これら5大学は共同でFONDAP (Fondo Nacional de Desarrollo de Areas Prioritarias) を構成している。これはCenter of Excellenceとして産業科学省 (CONICYT) から認定を受けた研究組織で、チリ大学ALMAを利用した研究拠点となることを目指している。

チリの大学所在都市および外国設置天文台の位置を図4.2に示す。

特にチリ大学とはTAO計画推進をきっかけとして東京大学との学術協力の協定を結んでおり、サイト調査について協力して実施する体制を確立している。

チリの学術研究は産業科学省によって統括されている。ここは、正式にはComisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológicaというが、略称であるCONICYTと呼称されることが多い。CONICYTは学術研究のみならず国内産業についても管轄としており、チリ政府内では重要な役所である。チリ国内における学術研究活動は基本的にCONICYTの掌握の元で行われており、チリ国外の研究機関による活動も含まれる。

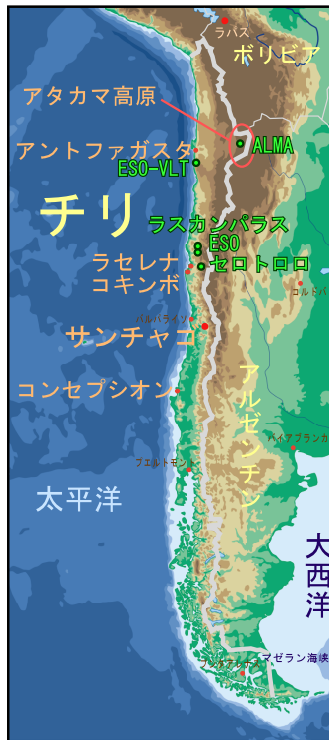


図 4.2: チリの主要都市と主要天文台所在地

後述するようにチリの主要産業は主に北部で採掘される鉱産物と中部で栽培される農作物であるため、これらの産業に悪影響を与える活動は基本的に認められない。したがって、無人の荒野といえども鉱産資源の採掘権が設定されると他の目的に利用することは困難となる。しかしながら、アタカマ地区は、学術研究上の価値が鉱産資源開発の潜在価値に優先するとの判断を CONICYT が既に行っており、ALMA 建設に関連して科学保護地域 (Science Preserve) を設定しており、鉱物資源採掘活動との支障が生じない配慮がなされている。逆に、アタカマ地区で長期にわたり学術調査活動を行うに際しては CONICYT の許可が必要となる。

TAO 計画では、次章で述べるサイト調査を行うに際して、CONICYT に申請を行っており、歴史的遺物、自然環境、対地雷に十分な注意を払い、他の学術研究活動に支障を生じないように配慮の上、科学保護地域内における調査活動の許可を得ている (Appendix C 参照)。

CONICYT との交渉進展に際しても、チリ大学は協定に基づいて大きな役割を果たし

ており、今後も重要なパートナーであることは間違いない。

4.2 アタカマの地理

地上に大型観測を建設する場合、その能力を最大限に引き出すためには天文観測に適した地域を選定する必要がある。光害に代表される人工的な悪影響を避けるのは当然であるが、自然環境の結果、地球大気による擾乱が最小限となっている場所を選定することも極めて重要である。具体的には、大気が乾燥しており、海拔が高く、晴天率が高く、上空の大気が安定していることが必要である。

このような条件を満たす場所を地球規模で探すと、南北回帰線付近で大洋の東寄りの高山が当てはまる。南北回帰線付近は中緯度高圧帯と呼ばれ、恒常的に高気圧が居座る場所となっている。これは、赤道付近で加熱された大気が上空で放射冷却したものが、南北回帰線付近で下降気流となるため生じていると考えられている。このため晴天率が高く、乾燥した地域となりやすい。実際、世界の大規模な砂漠地帯は南北回帰線付近に分布する。

地球の自転の影響で、大洋には大規模な海流が生じている。これは、コリオリカの関係で、赤道付近で東から西へ、高緯度で東から西へと向かう流れとなっており、大洋の東寄りでは、高緯度から低緯度へと向かう寒流となる。同じ理由で、中緯度高圧帯付近では、大気は西から東への偏西風が卓越する。このため、大洋に面する大陸西岸では水蒸気量が少ない寒流の上を通過した大気が陸地に達することとなり、晴天率が高い気候となる。

大洋上は大気循環を遮るものがない。このため、大陸西岸の高山や孤立峰を持つ島嶼は望遠鏡建設地としては高い海拔でありながら、周囲の地形による大気擾乱が少なく、優れた観測条件を得やすい。以上の条件を総合的に考慮すると、南米アンデス山脈、特にチリ共和国北部が世界で最も優れた観測条件を満たすことが期待できる。現代天文学では、観測のために高度な技術を必要とする。したがって、高度な技術的支援を比較的容易に得ることができることは、建設地選定において比較的重要な要因となる。建設時や運用時のことを考えると、通信および輸送の便がある程度以上は確保できることも考慮すべきである。また、安心して観測を実行でき、数年にわたる建設を安全に遂行できることを考えると、政治的に安定した地域であることも望まれる。チリ共和国は、これらの条件も満たしている。

チリ共和国は、東西幅 200km 程度、南北には南米大陸本土だけで南北 4000km に及ぶ細長い国土を持ち（チリ政府は南極大陸の一部に対し領有権を主張している）、西は太平洋に面し、東はアンデス山脈を境にボリビア、アルゼンチンと国境を接している。ペルーと国境を接する北部は砂漠地帯、首都サンチャゴ付近は地中海性気候の温帯、南部

は寒冷森林地帯から氷食地形による複雑な海岸線を持つ冷帯となっている。

太平洋沿岸をフンボルト海流が強い寒流として南から北へ流れており、これがチリの気候に強い影響を与えている。特に北部では緯度に比べて年平均気温が低く、乾燥しており、太平洋岸南回帰線直下の都市アントファガスタは、年平均気温 16.5 、年間降水量 2mm であり、周囲は国境となるアンデス山脈の麓まで、アタカマ砂漠と呼ばれる砂漠地帯となっている。

チリ共和国自体は、農産物と鉱石を中心とする一次産品が主要輸出品である。日本では銅やワインの輸出元として知名度が高い。日本とは 1897 年に外交関係を確立しており、日露戦争当時、軍艦の提供を受けたこともある。1818 年のスペインからの独立時に、南米では唯一、先住民との合意により政府を樹立した経緯を持つ。世界史上唯一、革命に依らない社会主義政権を持ったり、その後の軍事独裁政権での非人道的政治体制を敷いたりしたこともあったが、現在では完全に民主主義国家となっており、南米では最も治安が安定した国として定評がある。経済的にも比較的安定している。

チリ国内のうち、アントファガスタ地域は、1883 年に終結した「太平洋戦争」Guerra de Pacifico によってボリビアから割譲した地域であるが、現在、領有権は国際的に確定している。銅やチリ硝石など地下資源に恵まれており、世界最大と言われる露天掘り銅山であるチュキカマタ銅山も、この地域にある。

地域最大の都市アントファガスタは、人口 22 万人。これら鉱産資源の積出港としてチリ北部最大の規模を誇る。周辺に良好な港湾がないことと歴史的経緯から、チリのみならず、隣国ボリビアやアルゼンチンからの輸送需要も多く、アントファガスタからアンデス山脈を越えて両国へと通じる高速道路や鉄道が整備されている。

大陸規模でみると、5000m 以上の高山が連なるアンデス山脈が太平洋岸に迫っているが、100km 規模でみると、太平洋岸から国境までは、複数の山脈が南北に走っている。アタカマ地区では、この山脈はほぼ 3 列となっており、西から、ヨーロッパ南天天文台パラナル山観測所のある海岸山脈、海拔 3000-4000m 級のドメイコ山脈、そして、海拔 5000-6000m 級の山々が連なるアンデス主山脈となっている。

図 4.3 にアタカマ地区を通る東西線に沿ったチリの地形の断面図を示す。

ドメイコ山脈とアンデス主山脈との間は、僅かな水分も卓越する西風に対して手前ある 2 つの山脈に遮られてしまうため、特に乾燥した地区となっており、世界 2 番目の面積を持つアタカマ塩湖が広がっている。アタカマ塩湖の北岸には、内陸部の中心となる町サンペドロ・デ・アタカマがある。伝統的な遊牧や鉱山採掘のほか、砂漠の特異な風景見物を目的とした観光が地域の主要産業である。TAO 計画で望遠鏡建設を計画している場所は、ALMA 建設地に隣接しており、アタカマ塩湖の東側にあたるアタカマ高原である。アンデス主山脈中となるが、海拔 5000m 近い高原が数 km 以上も続く乾燥した高地であり、海拔 6000m に迫る孤立峰が散在する。気候は西風が卓越しており、晴天率が高

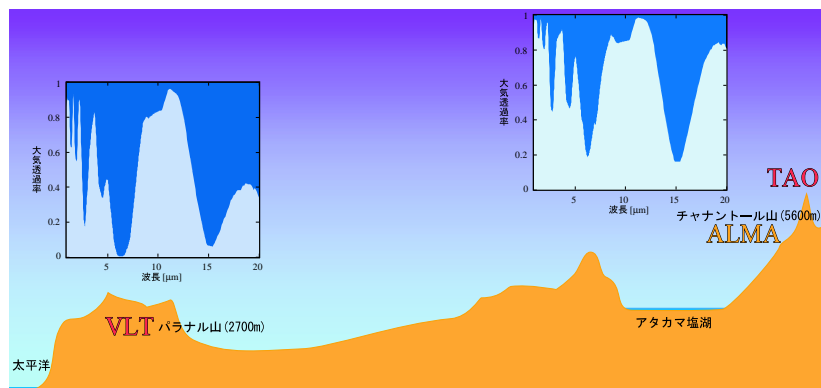


図 4.3: アタカマでの東西地形断面図

く絶対水蒸気量が少ないが、高山であるため一時的ではあるが降雪がある。2月頃には一時的に東風が吹くことがあり、「ボリビアの冬」と呼ばれる荒天が続くことがあるが、それ以外の季節はおおむね天候は安定している。天候条件の詳細については次章サイト調査を参照されたい。

アタカマ高原の中にはいくつかの孤立峰が点在している。その多くは火山起源であるが、多くは休火山であり容易には噴火する恐れはない。この点では富士山やマウナケア山と同様である。特に高原の西端に近い孤立峰は、西からの気流が乱されることなく山頂付近を吹き抜けるため、天体観測には最適な場所であることが期待できる。一方、麓から山頂へ到達する道路が建設できる程度の地形であることも現実的な条件となる。これらの点で我々が注目したのが標高 5600m のチャナントール山である。チャナントール山の航空写真を図 4.4 に示す。

4.3 南天 5600m のサイト

図 4.5 に、TAO から見た主要な天域の連続観測可能時間 (visibility) をすばる望遠鏡と比較する。縦軸は airmass < 1.5 で連続観測が可能な時間、横軸は赤経である。南天に TAO を設置することにより、北天のすばる望遠鏡と共同して全天を良い条件で観測することが可能になる。ALMA、ASTRO-F、ASTRO-E2 など新たに発見される天体は暗く、追求観測には長時間の積分が必要とされるはずである。南天の TAO は、銀河南極 (SGP)、大小マゼラン星雲 (LMC, SMC)、銀河中心 (GC) などの観測に威力を発揮することが図から見て取れる。

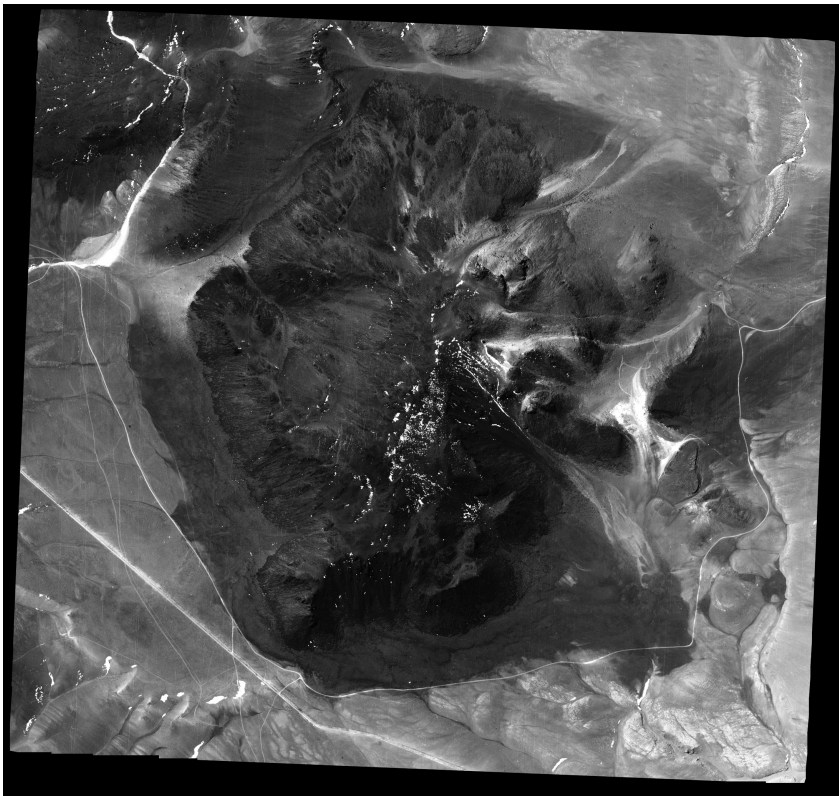


図 4.4: チャナントール山の航空写真

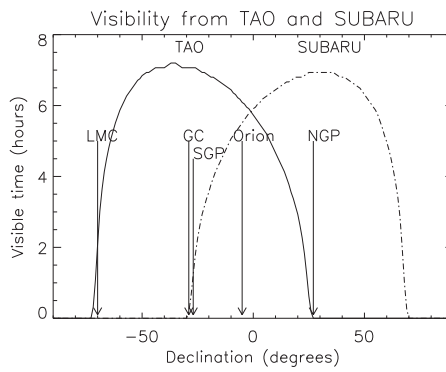


図 4.5: 主要天域の連続観測可能時間 (airmass < 1.5)

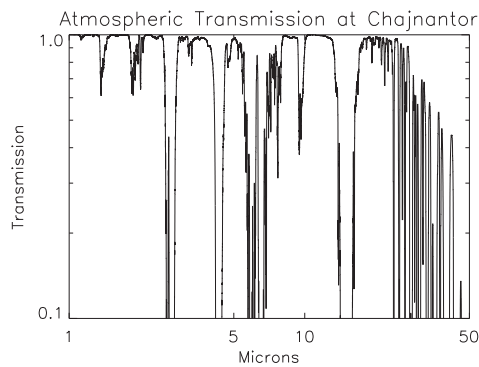


図 4.6: 大気透過率 (10 percentile at Chajnantor)

チャナントール山頂における大気透過率 (計算値) を図 4.6 に示す。高度 5640m で乾燥しているために、既存のサイトでは不可能な観測が TAO では可能となる。たとえば、(1) z, J, H, K と分かれている観測バンドが、TAO では光学領域から $2.55\mu\text{m}$ まで連続的につながり、また (2) 大気の窓は $43\mu\text{m}$ 付近まで開いている。宇宙論的な天体の赤方偏移を決定するには、光学領域から $2.55\mu\text{m}$ まで連続的に分光できることのメリットは大きい。 $4\mu\text{m}$ 付近まで大気の窓が開いていることは、地上からは観測不能であった観測的研究分野 (水素の純回転遷移線、スターバーストの遠赤外線など) に新たな可能性を与えるものである。

第5章 サイト調査の経緯

5.1 現地調査

1999年初めの本プロジェクト開始以来、チリでのいろいろな調査を進めてきた。以下に、その内容について簡単にまとめる。

第1回「地形調査、天文台訪問」

期間(チリ滞在日) : 1999/10/10-23

参加者 : 川良、田中、(半田)

協力者 : 中井 直正 (国立天文台)、Angel Otarola (ESO)

- VLT 訪問 (C.Cesarsky, ESO 台長、D.Hofstadt, ALMA chief engineer と会見)
- Atacama 調査 (Pampa la Bola 平原探索、CBI 訪問)
- Co.Quimal 調査 (3700m 地点まで車で、4000m 付近まで登山)
- 在チリ日本大使館訪問 (成田右文 大使、梶本泰代 書記官と会見)
- チリ大学訪問 (M.T.Ruiz と会見)
- Las Campanas Office 訪問 (M.Phillips 副所長と会見)
- Las Campanas 天文台訪問 (F.Perez, Magellan Project chief engineer と会見、Magellan 望遠鏡見学)
- Gemini South 訪問
- AOC (CTIO) Office 訪問 (N.Suntzeff と会見)

第2回「地形調査、天文台訪問」

期間(チリ滞在日) : 2000/06/28-07/07

参加者 : 川良、田中

協力者 : 阪本 成一 (国立天文台)

- Atacama 調査 (Pampa la Bola 平原探索)

- チリ大学訪問 (M.T.Ruiz, J.May, J.Masa, L.Bronfman と会見)
- 在チリ日本大使館訪問 (梶本泰代 書記官と会見)
- CTIO Office 訪問 (A.Walker 副所長, N.Suntzeff, B.Gregory と会見)
- Las Campanas 天文台訪問 (S.Shectman, Magellan の光学系設計者と会見、Magellan 望遠鏡見学)
- ESO Office 訪問 (A.Otarola と会見)

第3回「地形調査、衛星気象データ WS 出席、チリ大学と MoU 締結、天文台訪問」

期間 (チリ滞在日) : 2001/05/07-16
 参加者 : 吉井、田中、土居
 協力者 : Angel Otarola (ESO)

- Atacama 調査 (Pampa la Bola 平原探索、気象モニター設置場所確認、Co.Honar 登頂)
- チリ大学訪問 (M.T.Ruiz, L.Bronfman と会見 サイト調査に関する MoU 締結)
- AOC Office にて衛星気象データの WS 出席 (A.Erasmus, L.Nyman, 他が出席)
- CTIO, Gemini South 訪問
- Las Campanas 天文台訪問 (F.Perez, Magellan Project chief engineer と会見、Magellan 望遠鏡見学)
- ESO 訪問 (NTT 他を見学)
- ESO Office 訪問 (D.Hohstadt と会見)
- 在チリ日本大使館訪問 (成田右文 大使、梶本泰代 書記官と会見)
- Puga 訪問 (建設会社)

第4回「気象モニター設置」

期間 (チリ滞在日) : 2001/09/11-17
 参加者 : 田中、河野、宮田

- 気象モニター設置 (Co.Chajnantor と Co.Chascon とのサドル地点)
- 周辺の地形調査

第5回「気象データ回収」

期間(チリ滞在日) : 2002/02/18-24

参加者 : 河野、宮田

- 気象データ回収(2001/9-2002/2のデータ)
- 周辺の地形調査

第6回「Chajnantor 登頂、気象データ取得、シーイング測定」

期間(チリ滞在日) : 2002/11/19-12/14

参加者 : 田中、河野、宮田、土居、本原、征矢野

- Chajnantor 登頂(Ocegtel社のV.Saldana氏、F.Mellado氏が同行)
- 気象データ回収
- シーイングモニタ試験観測
- Magellan 望遠鏡見学
- チリ大学訪問(M.T. Ruiz, L. Bronfman と会合)

第7回「シーイング測定」

期間(チリ滞在日) : 2003/9/30-10/10

参加者 : 土居、本原、征矢野

協力者 : 高遠 徳尚、浦口 史寛(国立天文台)

- シーイングモニタ2点同時観測
- チリ大学訪問(M.T. Ruiz, L. Bronfman と会合)

第8回「雲モニター設置、気象データ取得」

期間(チリ滞在日) : 2004/3/2-3/13

参加者 : 吉井(サンチアゴ)、田中、河野、宮田、征矢野

協力者 : 江澤 元、岩下 浩幸(国立天文台)

- チリ大学訪問(L.Bronfman、J.Maza、M.T.Ruiz と会合)
- 日本大使館訪問(小川元 大使、中村和人 書記官、遠藤知庸 書記官と会合)
- 雲モニター設置(ASTE コンテナ屋根に設置)
- 気象データ回収

第9回「チャナントール山山頂アクセス道路敷設準備」

期間 (チリ滞在日) : 2005/2/27-3/4

参加者 : 田中

協力者 : 岩野 久香 (国際航業)、土井 英 (フジタ)
中村 浩樹 (タカラ建設)

- ALMA-OSF (Operation Support Facility) 訪問、waiver forms にサイン
- 道路建設体制及び準備状況の確認
- 現地地形を道路予定ルートに沿っての登山にて調査

5.2 衛星によるチリ北部の気象調査

チリ北部、特にアタカマ高原は地球上で最も乾燥した地域である。水蒸気の吸収に強く影響されるサブミリ波観測に重点をおく ALMA が、アタカマの Chajnantor 高原に建設されることになったのは当然であろう。

赤外線性能を重視する TAO 望遠鏡では、水蒸気はもとより、サブミリ波観測では問題とならない氷粒子 (絹雲) の存在が問題になる。つまり、ALMA とは異なる気象調査が要求される。我々は、1993 年 7 月から 1999 年 9 月の期間における気象衛星 Meteosat-3 及び GOES-8 のデータを解析することにした。この期間には、強いエルニーニョとラニーニャが 1 回づつ、通常のラニーニャが 1 回と弱いエルニーニョが 2 回含まれており、長期の気象変動を調べるのに最適である。データは、東大、米国セロトロロ天文台、ESO の 3 者がそれぞれ購入したものをつなぎ、データ解析は東大とセロトロロ天文台が共同で気象学者の Erasmus に委託した。

解析は、 $6.7\mu\text{m}$ (水蒸気チャンネル) と $10.7\mu\text{m}$ (赤外チャンネル) のイメージデータについて行った。既存の天文施設である米国セロトロロ天文台を含むチリ北部地域全域を解析の対象とし、夜間の晴天率や水蒸気量のマップを作成した。更に、我々が光赤外線観測の最適地として選定した 2 地点を含む 14 地点について詳細な解析を行った。その結果の一部を下に示す。

	測光夜 (%)	水蒸気量 (mm)	注
トロロ山	65%	2.2 - 6.5	米国セロトロロ天文台
パラナル山	85%	1.8 - 6.0	ESO パラナル天文台
チャナントール山	70%	0.3 - 1.2	TAO 第 1 候補地
キマル山	82%	0.9 - 2.8	TAO 第 2 候補地

測光夜と水蒸気量を組み合わせて考えた場合、TAO 設置候補地はいずれも既存の天文台の観測条件をしのぐことがわかった。我々が心配していた絹雲の出現も、測光夜の割合にみられるように十分に少ない。TAO 第 1 候補地であるチャナントール山（標高 5600m）の水蒸気量（mm）の少なさは特筆に値する。水蒸気量が少ないことは、赤外線の大気透過に優れ、大気熱雑音が少ないことを意味する。まさに、地上における赤外線観測の最適地である。

5.3 気象モニタによる地表気象条件のモニタ観測

5.3.1 概要

アタカマサイトの気象条件を調べる事は、望遠鏡建設地を決定する上でも、観測の環境や建設の条件を知る上でも重要である。これまでも ALMA サイトなどでは活発に気象データが取られているが、TAO 望遠鏡が目指している 5600m でのデータはまだ無い。そこで TAO グループでは独自の気象モニタを開発し、それによる気象データのモニタリングを行っている。気象モニタステーションは 2000 年度に完成、三鷹の天文センター構内に設置し試験運用を行った後、2001 年 9 月からアタカマサイトに輸送、モニタリングを開始している。現在の設置場所は高度 ~5000m のサドルポイントである。2004 年 3 月までに 2 年以上のデータを取得し解析を行っている。本節ではこの気象モニタ装置の詳細と、得られたデータについて述べる。

5.3.2 気象モニタ装置

TAO 用気象モニター装置は温度/湿度/風向風速/赤外放射量などを記録できる装置である。データは 10sec を単位として測定され、60 測定毎に平均演算などなされたあとロガー装置 (CR10X1) に自動的に保存されてゆく。なお、ロガーや各測定器は太陽電池と蓄電池によって駆動するようになっている。

図 5.1 にモニタ装置の写真のをせる。

データの読みだしはシリアルケーブル経由でノートパソコンを用いて行う。

気象装置は三鷹で仮運用を行った後、2001 年 9 月にアタカマサイトに輸送しモニタを開始している。現在はパンパラボラのサドルポイントに設置している (表 5.2 参照)。

この設置場所は Cerro Chajnantor と Cerro Chascon のちょうど間にあたる領域である。この場所には国立天文台 ALMA グループが気象モニタを設置している。この ALMA グループのデータと我々のデータはほぼ同じ量を測定することになるので、データを比

較検討することで両者の相対較正が可能となる。このように相対較正をおこなっておけば、後に我々のモニタ装置を別の場所に移設した後でも、両者のデータを精度良く比較することができる。2点のデータを同時に取得できれば、大気の逆転層の振舞を調べる事ができ、天候の状況を知る上で非常に重要な情報となりうる。

5.3.3 データ解析と結果

データの回収はこれまで4回に渡って行っており、28ヶ月間のデータについて解析が完了している。ここではこのうち、温度・湿度・風速(平均/最大)および絶対水蒸気量の変動についてまとめる。

データ解析は以下の手順で行った。まずデータを1月毎に分割する。この1月の範囲で毎日同じ時刻に得られたデータ値の median (中央値) を求め、これがその月の典型的な日変化だと考える。ここで時間としてはチリ標準時を用い、サマータイムは考えない。なお、絶対水蒸気量は直接の測定値ではないが、温度・湿度の測定から計算して求めている。

表 5.3 は月ごとの測定値の時間変動をまとめたものである。なお、同じ月に対して2回以上測定がある場合は、その平均を記載した。

図 5.2, 5.3, 5.4, 5.5 は各季節での気象条件の日変化および風速のヒストグラムである。



図 5.1: 気象モニタ装置全景

各月のデータは 2004 年 3 月のデータ回収の時点で最も新しいデータを示してある。

西暦年		年
1/1 からの換算日		日
時刻		時分
赤外放射量	平均値	kW/m ²
赤外放射計ドーム温度	平均値	°C
赤外放射計本体温度	平均値	°C
赤外放射量	補正後の平均値	kW/m ²
風速	平均	m/s
風向	ベクトル平均	°
風速	最大	m/s
最大風速の時間	時分	
気温	平均値	°C
湿度	平均値	%
気圧	平均値	hPa
蓄電池電圧	平均値	V
口ガー温度	平均値	°C

表 5.1: 測定値一覧

西経	67.7196°	GPS による
南緯	23.001°	GPS による
高度	~5000m	地図からの推定

表 5.2: 設置場所

気温 [C]					湿度 [%]				
月	12:00	18:00	24:00	30:00	月	12:00	18:00	24:00	30:00
1	7.60	4.29	-2.11	-3.61	1	19.57	29.46	60.92	55.60
2	7.45	3.86	-1.32	-2.33	2	19.98	43.70	76.50	54.12
3	8.09	3.44	-0.69	-1.57	3	26.66	48.30	66.25	54.38
4	5.05	0.49	-2.90	-3.17	4	11.13	23.27	31.00	18.79
5	0.96	-2.69	-4.50	-4.70	5	19.62	40.35	32.94	33.27
6	0.62	-3.60	-4.97	-5.23	6	11.30	21.33	15.15	13.63
7	-2.67	-5.70	-7.38	-7.86	7	23.15	31.70	32.21	22.79
8	0.22	-3.92	-6.46	-6.90	8	9.58	16.87	17.36	14.60
9	1.19	-2.26	-5.43	-6.03	9	8.77	15.47	14.97	11.80
10	4.75	1.70	-4.13	-4.37	10	8.50	15.35	23.74	14.82
11	6.68	3.34	-2.89	-3.85	11	8.48	14.05	21.12	12.99
12	6.65	4.20	-2.06	-3.87	12	10.61	16.75	32.12	21.09

気圧 [hPa]					水蒸気量 [g/cc]				
月	12:00	18:00	24:00	30:00	月	12:00	18:00	24:00	30:00
1	565.1	564.5	565.5	564.6	1	1.68	2.11	2.56	1.94
2	565.5	564.6	565.7	564.8	2	1.72	2.68	3.17	2.08
3	565.8	565.0	566.0	565.0	3	2.37	3.10	3.03	2.31
4	565.2	564.6	565.3	564.4	4	0.74	1.17	1.10	0.69
5	565.3	564.5	565.0	564.2	5	1.13	1.42	1.17	1.16
6	565.3	564.6	565.1	564.0	6	0.53	0.79	0.49	0.46
7	563.6	563.2	563.7	562.5	7	0.75	1.03	0.82	0.62
8	564.5	563.7	564.4	563.4	8	0.50	0.66	0.52	0.43
9	564.1	563.7	564.0	562.9	9	0.47	0.65	0.49	0.36
10	564.8	564.3	564.8	564.0	10	0.61	0.86	0.86	0.48
11	564.7	564.1	565.1	564.1	11	0.59	0.86	0.80	0.50
12	564.6	564.2	565.0	564.0	12	0.75	1.09	1.23	0.72

風速 [5min の平均 m/s]					風速 [瞬間最大 m/s]				
月	12:00	18:00	24:00	30:00	月	12:00	18:00	24:00	30:00
1	6.74	10.82	2.41	2.56	1	10.44	13.31	3.63	3.09
2	5.94	10.63	1.99	2.30	2	8.97	13.18	2.90	3.01
3	5.33	9.48	2.18	1.92	3	8.88	12.00	3.13	2.71
4	6.14	8.71	3.12	3.35	4	11.03	11.09	5.07	5.06
5	6.25	7.61	4.69	4.66	5	11.95	11.10	8.82	8.70
6	6.16	6.15	4.68	4.83	6	10.00	8.59	8.36	7.91
7	6.52	7.46	4.36	5.73	7	12.04	11.15	9.50	10.23
8	6.54	8.27	4.35	4.53	8	11.48	11.09	6.63	8.61
9	7.29	9.32	4.76	5.28	9	12.87	12.29	7.40	8.98
10	7.68	10.30	3.30	3.31	10	11.76	12.85	4.70	4.36
11	7.91	11.18	3.04	2.93	11	11.51	13.83	4.06	3.66
12	7.27	10.89	2.27	2.27	12	11.43	13.79	3.42	3.10

表 5.3: 測定値一覧

夏期

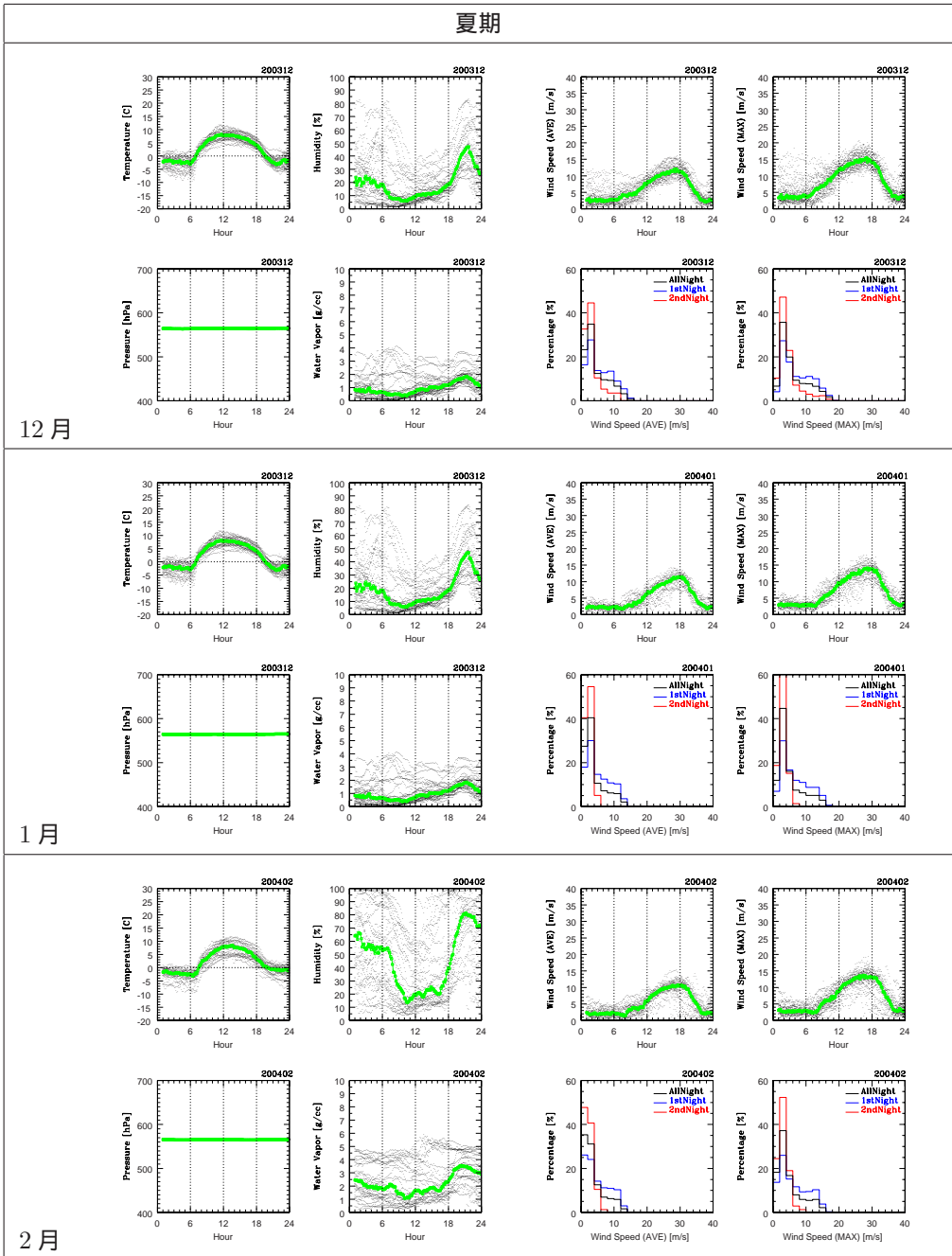
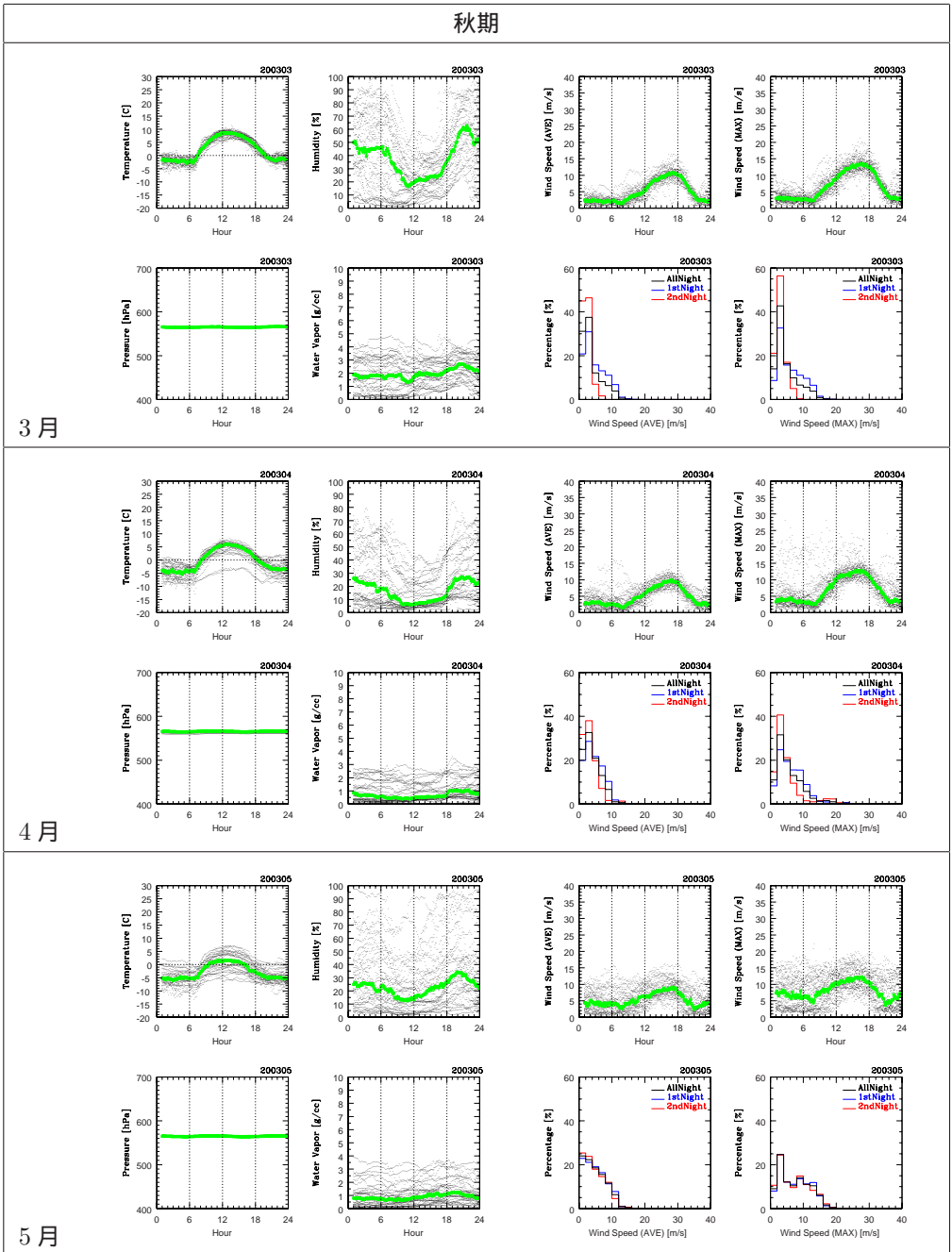


図 5.2: 気象データの日変化の例 (夏期:12、1、2月)

秋期



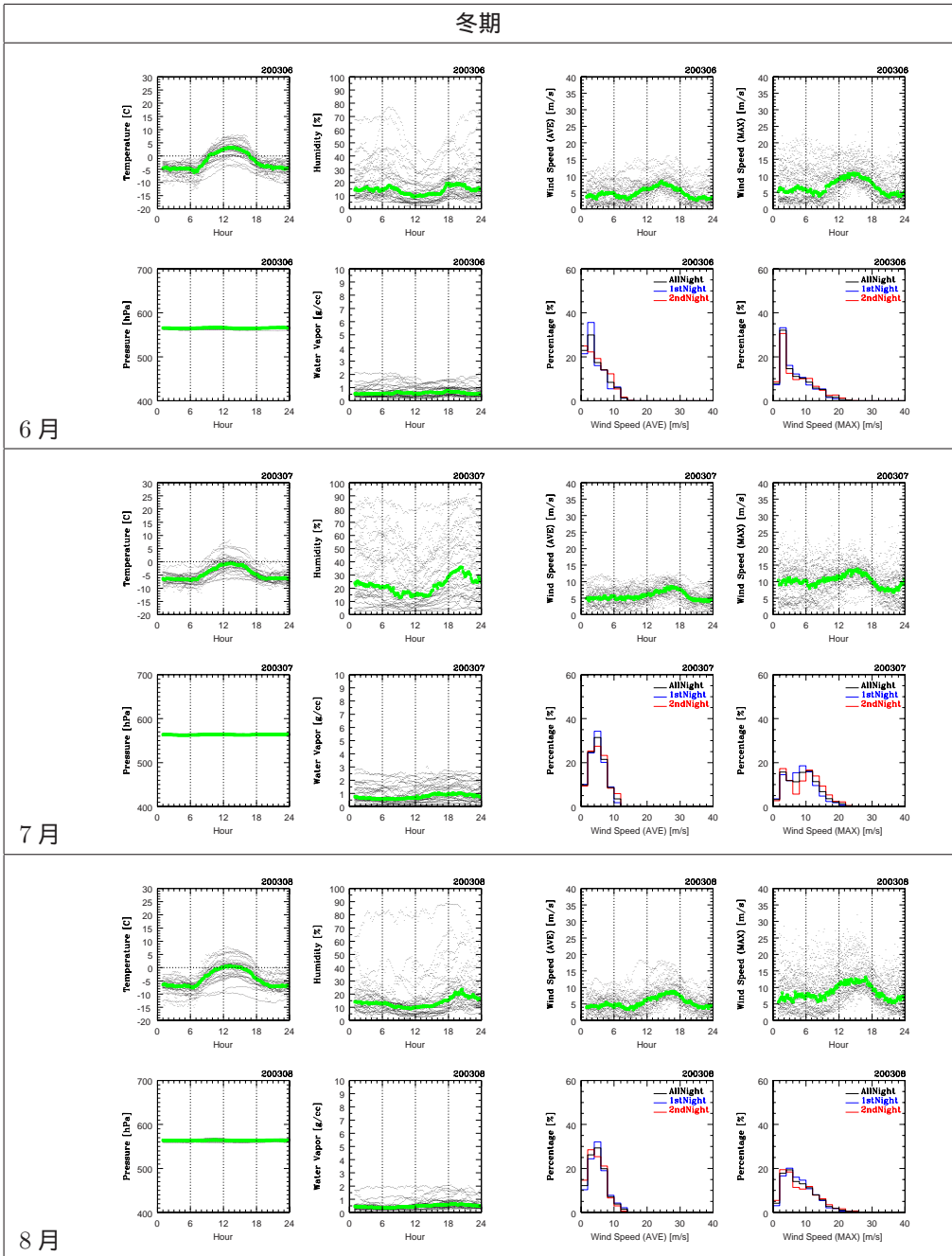
3月

4月

5月

図 5.3: 気象データの日変化の例 (秋期:3、4、5月)

冬期



6月

7月

8月

図 5.4: 気象データの日変化の例 (冬期:6、7、8月)

春期

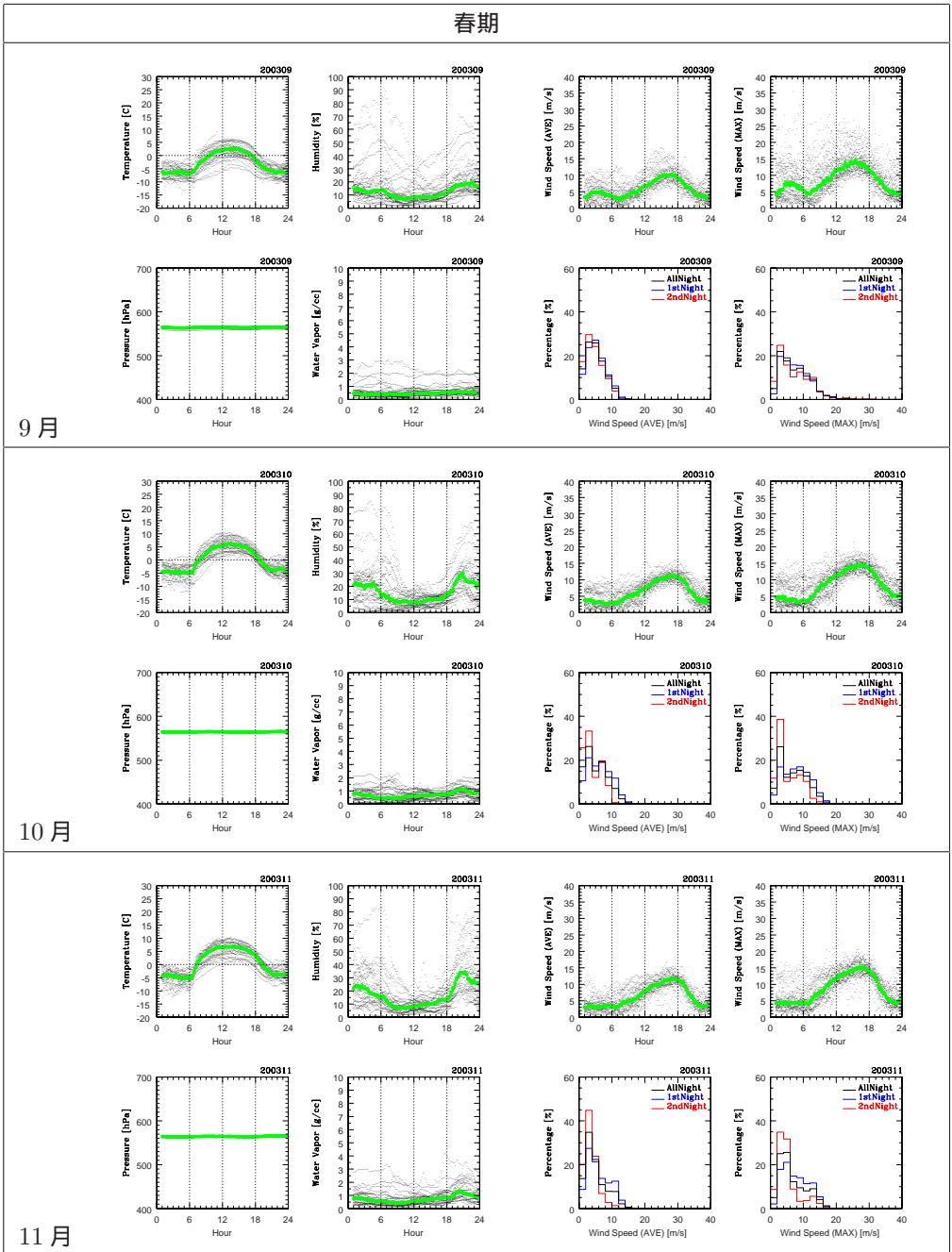


図 5.5: 気象データの日変化の例 (春期:9、10、11月)

データの解釈

- 気温

気温は日中山形に上がり、夜間はほぼ一定値という変動を示す。この形はどの月もほぼおなじように見える。夜間の温度は冬期で -5°C から -8°C 、夏期で -1°C から -4°C 程度である。

- 湿度/水蒸気量

湿度は年間を通じて日中は低く夜間に上昇するという傾向が見られる。しかしながら水蒸気量の変化ではこのような傾向は見られないので、これは温度の変化によるものだと思われる。

水蒸気量は冬から春にかけてが最も値が小さく、8-9月ではメディアン値で 0.4g/cc を切る状態が続く。逆に夏期の2,3月頃は水蒸気量が高く、湿度も70%を超えることが多い。これはいわゆるボリビアンウインターの影響であると思われる。

- 風速

平均風速は午後から前半夜最初にかけて大きくなり ($\sim 10\text{m/s}$)、あとは小さい ($\sim 5\text{m/s}$) という傾向をもつ。この傾向はどの月でもあまり大きくは変わらないが、8-10月は夜間の風速が少しだけ高いようである。逆にボリビアンウインターの影響を受けている1-2月は風速は小さくなっている。

最大風速の変化は平均風速の変化とほぼ同様である。8-10月が最も風の強い時期であり、 25m/s を越えるような風が吹く日が何度かある。それ以外の時期では最大風速は概ね $15-20\text{m/s}$ である。

5.4 赤外雲モニタによる雲量のモニタ観測

5.4.1 概要

2003年までに行った衛星画像の解析や気象モニタ装置によるモニタ測定によって、アタカマサイトの気象条件についてはかなり明らかになって来ている。気象衛星の画像からはグローバルな雲の挙動が明らかになっており、チャナントール山周辺では測光夜が70%を越すことがあきらかになって来た。また、気象モニタのデータからは、特に9-11月の春期にかけて気象条件に非常に恵まれ、地表水蒸気量の median で 0.5g/cc を切る状態が続くことが分かっている。これらは、アタカマ/チャナントール山が赤外観測に非常に適したサイトであることを示している。

しかしながら、これまでの気象調査は衛星や地表データを元にしたものであり、山にローカルに湧き出すような低層の雲については状況がつかめていなかった。そこで我々TAOグループは2004年から、中間赤外線での全天雲モニタ装置を製作し、それによる雲量のモニタ観測をスタートさせた。このモニタ装置はMAGNUM望遠鏡用の雲モニタをベースに開発したものであり、日中を含む常時、雲の量をモニタできるものである。カメラは市販の中間赤外カメラを用いており、観測波長は $8-12\mu\text{m}$ である。モニタはASTEサイトに設置され、ASTEの観測時の気象状況監視にも利用されている。

モニタ装置は2003年に開発され、東大木曾観測所などで試験を行った後、2004年3月にアタカマに設置、運用を行っている。これまでに、約2カ月分のデータの取得/解析を終えており、 τ で0.05レベルの雲まで充分に検出できることが明らかになっている。本節では、この雲モニタ装置の性能や得られた画像について述べる。



図 5.6: 雲モニタ写真。後ろはチャナントール山。

5.4.2 雲モニタ装置

TAO 赤外雲モニタ装置は、熱赤外線による全天モニタ観測を行う装置である。この装置は、MAGNUM 望遠鏡用の赤外雲モニタ装置をベースに開発を行ったものであり、日中を含む常時、雲の量をモニタできるようになっている。システムの諸元を表 5.4 にまとめておく。装置は大きく分けて、全天カメラ部分と制御用計算機からなっている。装置のブロックダイアグラムを図 5.7 に示す。

雲モニタ装置は 2004 年 3 月に、アタカマ/パンパラボラ高地の ASTE サイトに設置され運用されている。全天カメラ部は ASTE 望遠鏡脇の荷物用コンテナの上に、制御計算機はコンテナ内の防塵箱内にそれぞれ設置されている。電源やネットワーク環境は ASTE の物を利用している。

画像は 5 分に一度取得され、自動簡易解析を行った後、解析後データとしてシステムコントローラ PC のハードディスク上に保存される。これに加えて、オフラインでの詳細解析に使うため、生データを 30 分に一度ハードディスク上に残している。データの発生レートは 1.5Mbyte/hour である。コントローラ PC は ASTE ネットワークに接続されており、オンライン解析されたデータは WEB を通じて ASTE ネットワークに配信されている。

設置場所	アタカマ/ASTE サイト	標高 ~5000m
視野	天頂角 10-70°	ただし天頂に対して約 10° 傾斜 チャナントール山山頂を含む
分解能	1pix~0.8 度	
観測波長	8-12 μ m	カメラ感度による
モニタ期間	2004/03/09 -	
データ取得レート	1 枚/5 分	うち 6 枚に一度は RAW データ も保存
データ発生レート	1.5Mbyte/hour	
全天鏡	カセグレンタイプ全天鏡 (国立天文台)	入射窓 ϕ 40 タイプ
入射窓	Ge ϕ 40mm t3mm	表面 DLC コート 裏面 反射防止 コート
カメラ	AVION 製 IR-30	感度波長域 8-12 μ m アナログ ビデオ出力 RS232C 経由で制御
温度計	OMRON 製 E5GN	RS485 経由で制御
温度センサー	プラチナ抵抗 x2	測定範囲 -200-850°C
参照光源	銅ブロック (黒色塗装)	
制御 PC	Linux 計算機	Vine Linux
画像取込ボード	GV-BCTV5/PCI (I/O データ)	Video4Linux で制御

表 5.4: 雲モニタ諸元

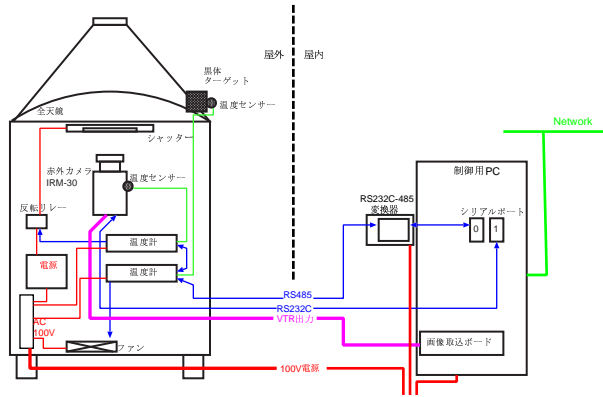


図 5.7: 雲モニタブロックダイアグラム

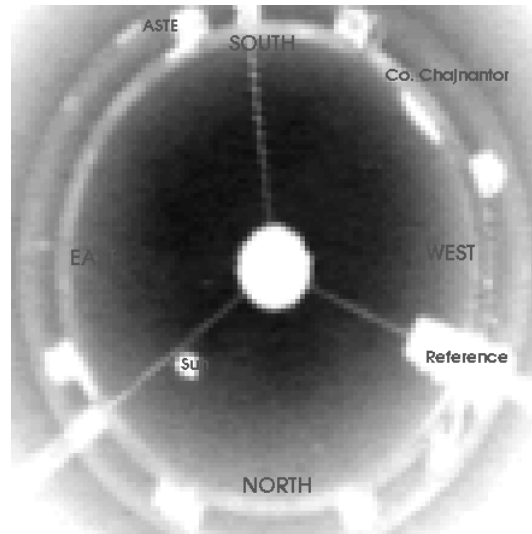


図 5.8: 得られた雲画像の例 (生画像)

5.4.3 データ解析

この雲モニタシステムで得られた画像データは雲からの赤外線放射の他、鏡、窓、レンズといった光学系からの放射を含んでいる。また、カメラは内部較正システムを持たないので、周囲環境によって出力レベルが変動してしまう。雲からの放射量を正確に測定するためには、このような要素を解析によって取り除く必要がある。

本雲モニタは視野内に黒体の参照光源を持ち、空の画像と同時にその明るさを測定するようになっている。参照光源の明るさはその温度（非制御）を測定することで計算できるので、参照光源の測定値を用いればカメラの出力変動はキャンセルすることが可能になる。また、代表的な快晴画像を集めて快晴時の代表画像を作成し、光学系温度を補正した上でこれを得られた画像から差し引けば、光学系からの赤外放射も除去することが可能である。さらに雲の温度をカメラ温度と同じであると仮定することで、得られた赤外線画像から雲量 τ のマップを作成することができる。

具体的な解析手順は以下の通りである。

1. ゲインを変えて取った 7 枚の画像を重ね合わせて 1 枚の画像にする。これは参照光源と空の明るさの比が大きく (> 1000)、普通の画像取得だけではダイナミックレンジが不足し十分な精度の測定が行えないため。
2. 参照光源の明るさと温度を測定。温度から理想的には明るさが幾らになるかを計算し、測定された明るさととの差を求める。これがカメラのバイアス変動と考え画像から引き算する。
3. カメラシステム温度を元に画像を規格化する。これによって画像は“カメラ温度での放射率”を表す量になる。
4. 同様に解析した快晴画像を差し引く。差し引きによって光学系からの放射がキャンセルされる。
5. 画像の不要な部分にマスクをかける。

解析の例として、快晴の場合とうす曇りの場合の τ マップ画像を図 5.9 に示す。

5.4.4 解析結果

雲のモニタ観測は 2004 年 3 月にスタートしているが、3-4 月にかけては現地の電源トラブル他でモニタが行われておらず、十分なデータが得られているのは 2004 年 5 月以降である。ここでは、2004 年 5 月と 6 月のデータを解析した結果を示す。

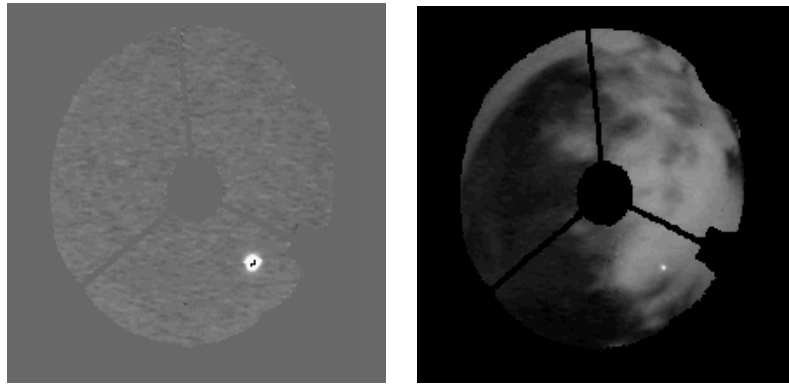


図 5.9: 雲画像の解析結果の例 (左=快晴、右=うす曇り)

τ の時間変動の様子を各方向で調べるため、得られた τ マップを天頂と高さ $3 \times$ 方向 4 の計 13 領域 (表 5.5 参照) に分けてその値を調べた。13 領域のうち、天頂および NE 低、NW 低、SE 低、SW 低の 4 領域、計 5 領域の変動の様子を図 5.10 に示す。なお領域のうち、SW 低領域はチャナントール山を含む方向である。

τ の変動は大きく分けて、一日周期の弱い変動と、ときどき起きる大きな変化からなっ

名前	方向	天頂角
天頂	全方向	$< 25^\circ$
NE 高	北東方向 (画面左下)	$25 - 40^\circ$
NE 中	北東方向 (画面左下)	$40 - 55^\circ$
NE 低	北東方向 (画面左下)	$55 - 70^\circ$
NW 高	北西方向 (画面右下)	$25 - 40^\circ$
NW 中	北西方向 (画面右下)	$40 - 55^\circ$
NW 低	北西方向 (画面右下)	$55 - 70^\circ$
SE 高	南東方向 (画面左上)	$25 - 40^\circ$
SE 中	南東方向 (画面左上)	$40 - 55^\circ$
SE 低	南東方向 (画面左上)	$55 - 70^\circ$
SW 高	南西方向 (画面右上)	$25 - 40^\circ$
SW 中	南西方向 (画面右上)	$40 - 55^\circ$
SW 低	南西方向 (画面右上)	$55 - 70^\circ$

表 5.5: 雲モニタ解析の領域

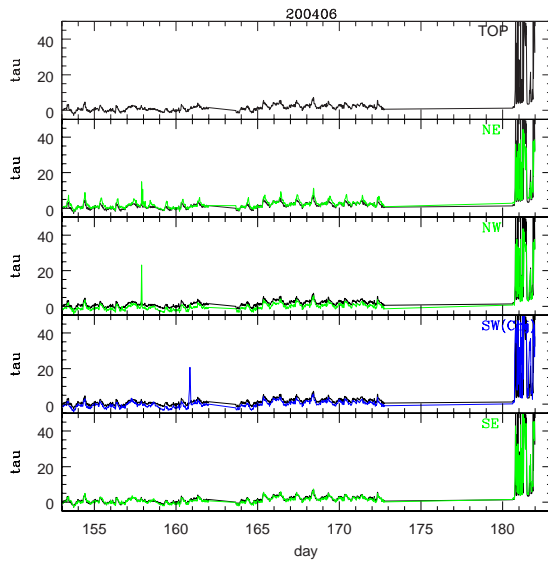
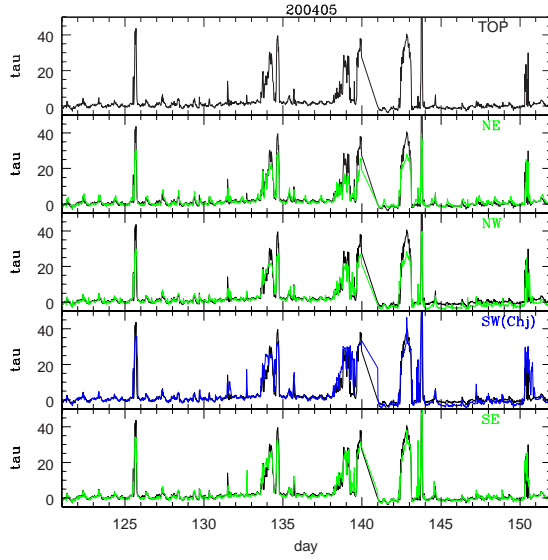


図 5.10: τ の時間変動 (天頂、NE 低、NW 低、SE 低、SW 低)

領域	2004/05		2004/06	
	快晴 ($\tau < 5\%$)	晴れ ($\tau < 10\%$)	快晴 ($\tau < 5\%$)	晴れ ($\tau < 10\%$)
天頂	87%	90%	94%	97%
NE 低	86%	91%	87%	97%
NW 低	85%	89%	95%	96%
SW 低	82%	85%	94%	95%
SE 低	85%	89%	93%	96%

表 5.6: 雲モニタの測定による晴れの割合

ている。このうち前者の日変化は、光学系の温度変化など解析で落とし切れなかった成分であり、後者が実際の雲からの放射による成分だと考えている。このデータから、本モニタ観測によって、 $\tau \sim 5\%$ の雲ならば十分に検出できていることが分かる。

グラフから、 τ の時間変動の様子は方向で大きくは違っておらず、一次近似的には方向に強く依存しない事が分かる。しかしながら、より詳細に見ると、北側のデータ（パネル上から 2、3 枚目）は天頂のデータ（黒線）よりも曇の場合にやや小さめであることが多い。逆に南側では（パネル上から 4、5 枚目）、曇の場合に天頂よりも τ が少し大きい傾向が見られる。

これを詳しく見るために、天頂での τ と他の領域での τ の相関を取ってみる（図 5.11）。図より、南側、特に SW 側で τ が大きいデータが多いことが分かる。SW 領域はチャナントール山方向にあたっており、これらの結果は、チャナントール山上空で起きている、ローカルな雲の湧き出しを捕らえたものと思われる。

このようなローカルな雲の湧き出しがどの位の頻度で起きているかを調べるために、各領域での雲量の統計量を計測した。表 5.6 は、各場所での τ の出現割合をまとめたものである。

SW 側では相対的に晴れの割合が低下しており、天頂に比べて約 5%ほど晴れの割合が低い。すなわち、天頂で晴れであってもチャナントール山上空にだけローカルに雲がある割合は、この期間ではせいぜい 5%程度であると言える。

5%という値自身は問題になるような量ではなく、この結果からはチャナントール山で雲が湧き出す現象が観測に大きな影響を与えとは考えられない。ただし、この雲の湧き出し現象は季節によって大きく異なることも予想される。今後も引き続きモニタを進め、年間を通じた雲の湧き出し割合を調査する必要がある。

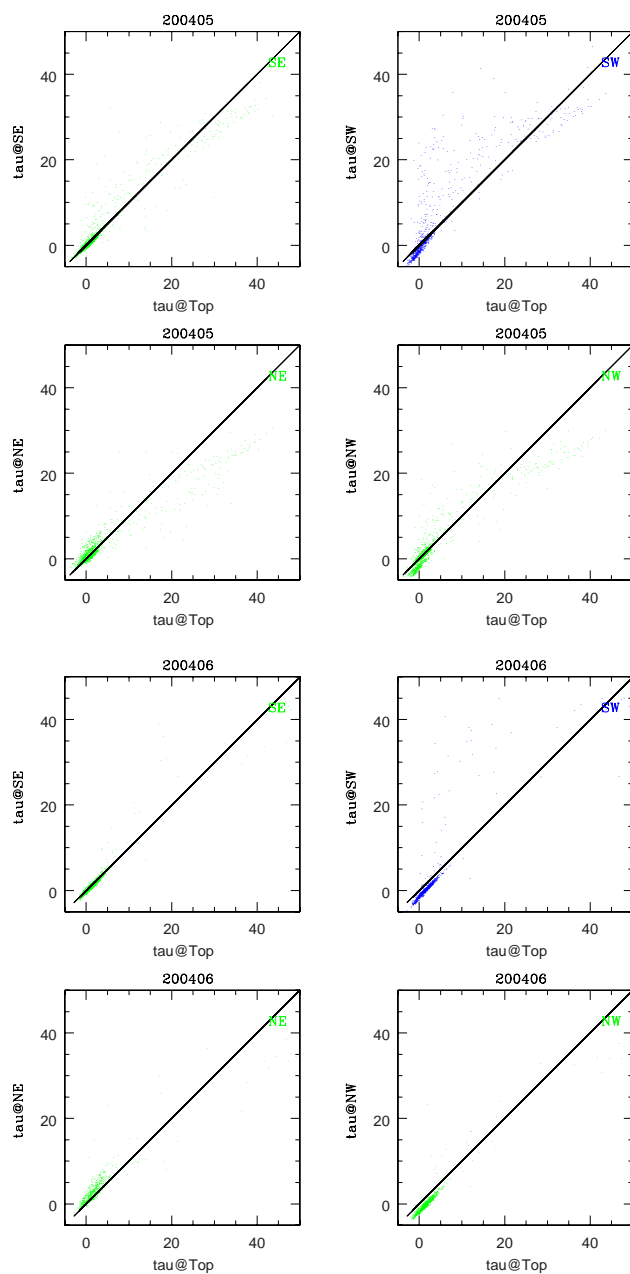


図 5.11: 天頂での τ と、NE 低/NW 低/SE 低/SW 低の各領域での τ との相関

5.5 シーイングモニタ

5.5.1 概要

サイトの決定にあたり重要なことの一つに、星のイメージサイズ、いわゆるシーイングサイズがあげられる。天体（点源）からの光は、地球の大気外ではほぼ理想的な平面波として入射するが、大気を通して来る間に波面が歪められ、望遠鏡を通して検出器の上に結像した際には、望遠鏡の収差を別にしても、理想的な点源像よりも広がって測定される。この波面の歪みはある狭い視野範囲であれば高速に変形する反射鏡などを使って補正可能である（Adaptive Optics: AO）が、もともとの歪みの量が少ないほど、より広い視野範囲あるいはより短周期の（短波長の光の）変動に対応できるので、AOを用いる場合でも、望遠鏡の位置決定の際にはシーイングサイズの良い場所を選ぶ必要がある。

このような測定は本来は像の回折限界がシーイングサイズよりも小さい望遠鏡、つまりある程度大きい口径の望遠鏡を良い性能でトラッキングしなければならない。しかし例えば $0.''1$ の回折限界を得るために必要な望遠鏡の口径は 1m 程度となり、性能良いトラッキングのできる設置も含めると大規模な装置となってしまう。そこで、シーイング測定に特化した必要最小限の規模の装置として近年良く用いられているのが DIMM (Differential Image Motion Monitor) である。もともとは ESO のグループによって提案され (Sarazin, M. Roddier, F., “The ESO differential image motion monitor”, 1990, *Astron. Astrophy.*, 227, 294–300)、現在ではいくつもの天文台で各夜のシーイングの評価に用いられている。

DIMM は、望遠鏡の先端に口径 $d = 5 \sim 10\text{cm}$ の開口を $s = 10 \sim 20\text{cm}$ の間隔で 2 個開け、それぞれの開口を通して入る光を、CCD 検出器の上に横に並べて結像するようにしたもので、それぞれの像の重心を高速 ($\sim 1/1000\text{sec}$ 露出) で測定する。二つの像の重心の相対位置を測ることで、間隔 s だけ離れたところでの波面のずれが測定できる。つまり、重心位置の平均的な移動量の差を調べることにより、間隔 s での波面の乱れ具合が統計的にわかる。一方、大気の波面を乱すもとなっている大気のゆらぎはコルモゴロフ乱流のモデルでよく近似され、大きなスケールと小さなスケールの間に良い相関があるとされている。そこで、このモデルを用いることで、20cm 程度の間隔で測定されたデータから口径 6.5m といった大型の開口を使った場合のシーイングも計算によって推測可能となるのである。

5.5.2 東大シーイングモニタ

我々は国立天文台の高遠グループと共同で TAO サイト調査用 DIMM を開発した (Motohara, K., et al., “University of Tokyo DIMM: a portable DIMM for site testing at Atacama”, 2004, Proc. SPIE, 5382, 648)。この DIMM は、東京大学と国立天文台ハワイ観測所にそれぞれ各 1 台ずつ配置されている。

望遠鏡には Meade 社の 30cm シュミットカセグレンを用いる。この望遠鏡は最低 1 人でも組み立てが可能で、携帯性に優れているとともに、RS-232C 接続によって PC からの制御が可能であるという特長をもつ。開口については、 $\phi 80\text{mm}$ の開口 2 個を、約 200mm 離して直交して 2 組設ける。これによって、将来的には上空の風向/風速の情報も得られることを目標としている。開口には 8mm 厚の BK7 の基板を置き、基板の両面が 40 秒角だけ傾くようにウエッジをかける。これにより、一つの星の像が、ほぼ一辺が 30 秒角の正方形の位置に、4 つの像として取得される。

検出器としては電子シャッターのある、1msec 以下の露出の可能な CCD カメラを用いる。東大で 4 機種の評価を行い、最も性能の良かったワテック社の Neptune100 という CCD カメラを用いることとした。CCD からのアナログビデオ出力はデータ取得用 PC のビデオキャプチャボード経由で取り込まれ、重心検出を行い、シーイングを算出する。また、バックアップのためビデオ出力は別にデジタルビデオカメラで録画する。

データ取得 PC は省電力マザーボード (EPIA-E533 / VIA Technologies 社) を搭載した DC12V で駆動可能なものを用いる。これにより、自動車用バッテリーで丸 1 晩以上の観測が可能となる。アタカマのような孤立した場所では商用の電源は期待できないため、この特性が観測効率を左右する非常に大きな要素となる。データ取得 PC は Vine Linux を搭載し、Video4Linux ライブラリを用いてビデオキャプチャボードから画像を取得する。シーイング測定ソフトウェアは全く新規に開発した。

図 5.12 にシステム構成を、図 5.13 にシステム全景を、表 5.7 に諸パラメータをしめす。

5.5.3 試験観測

アタカマでの本観測を開始する前に、以下の試験観測を実施した。

- 三鷹試験観測 (2002/10/28–29)
基本動作を確認するための観測を行う。ソフトウェアに問題がいくつか見付かったものの、重大な問題は無いと判断。
- チリ/アタカマ試験観測 (2002/11/30–12/4)
アタカマの標高 5000m 付近、TAO 気象モニタ脇での試験観測。本観測と同じ条

件での観測を行い、問題を洗い出すのを目的とする。この観測から以下の問題が浮き上がってきた。

- 風による振動：アタカマでは常に西風が吹き付けており、これによる振動が大きすぎて安定して正確なシーイングの測定ができない。また、これに関連してメモリ管理のバグのためにソフトウェアが不安定になってすぐに異常終了してしまう問題も明らかになった。

● マウナケア試験観測 (2003/3/17-19)

我々の DIMM システムが示すシーイング値の絶対キャリブレーションを行うため、

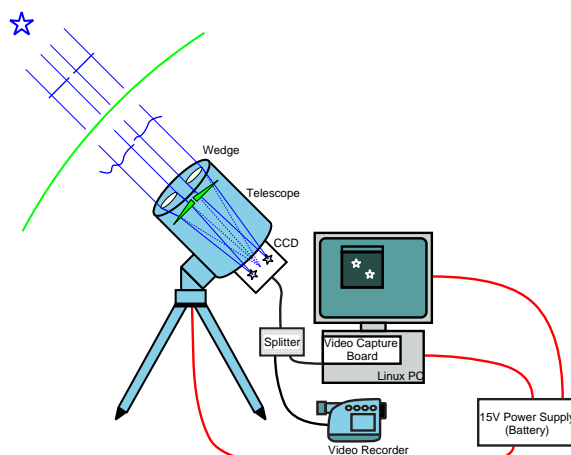


図 5.12: シーイングモニタのシステム概略

アパーチャー口径	74mm
アパーチャー数	4
アパーチャー間隔	205mm
ピクセルスケール	0."67 × 0."63
観測波長	5500Å
限界等級	~1.5 等 (1msec 露出時)
データ取得 PC	Storm Squid mini
OS	Vine Linux 2.6
画像取込ボード	VA1000Lite (AOpen) + Video4Linux

表 5.7: シーイングモニタ諸元



図 5.13: シーイングモニタをセットアップしたところ (アタカマにて)



図 5.14: マウナケア山頂での試験観測の様子

国立天文台ハワイ観測所の旧型 DIMM との同時観測をマウナケア山頂のすばる望遠鏡脇にて行った。この結果、以下の問題が判明した。

- インターレース問題：用いている CCD がインターレース方式であるために、時間が $1/60\text{sec}$ 離れた 2 つのフレームが同一フレームの奇偶列にそれぞれ格納されている。これを単一のフレームとして扱っていたために、実効的な星像の位置がなまされて相対位置の揺らぎが小さくなり、実際のシーイングよりも良い値を返していることが判明。

5.5.4 アタカマ本観測

以上の試験観測で明らかになった問題を解決した上で、2003年10月上旬にTAOのアタカマでの本観測を行った (Uraguchi, F. et al., “Simultaneous seeing measurements at Atacama”, 2004, Proc. SPIE, 5489, 218)。この観測は、アタカマの多地点のシーイング測定を行うだけでなく、国立天文台ハワイ観測所の高遠グループの協力のもとに東京大学とハワイ観測所の同型のDIMMによる同時観測を行い、各地点の相対シーイングを測定することを目的としていた。

測定地点

測定点は図 5.15 に示した 3 地点で、いずれかの 2 地点の同時測定を行った。

- TAO 気象モニタ設置場所 (以下「気象モニタ」と呼ぶ : 4950m)
アタカマの平原部のサンプルとして測定を行う。
- チコ山山頂 (「チコ山頂」: 5150m)
コーネル大のグループが以前測定を行っており、非常に良いシーイングの値を出し

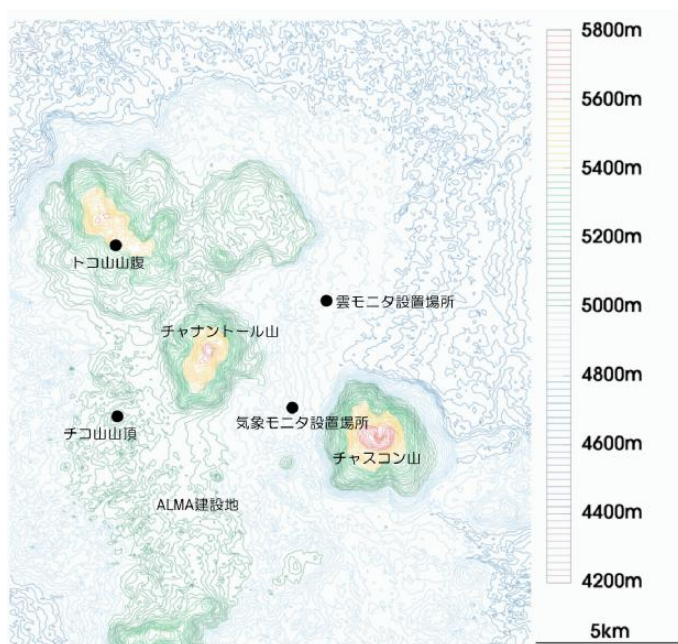


図 5.15: アタカマでのシーイング測定地点

ている。彼らの結果との比較という意味でも測定を行うべき地点

- トコ山中腹（「トコ山腹」：5430m）

標高が5430mと、非常に高い。山頂ではないので接地境界層の影響が心配されるが、Chajnantor山頂にもっとも近い条件の地点。これまでここまで高い地点でのシーイング測定の報告はないので、ここで測定すれば世界でもっとも高い地点でのシーイング測定となる。

測定結果と議論

測定は2003/10/4-10/7の3夜に渡って行った。図5.16、5.17、5.18に結果を示す。この結果から、以下のことが読みとれる。

- 気象モニタ脇について

気象モニタ横の地点は周辺のピークに比べて（気象条件にもよるが）シーイングがかなり悪いと見られる。Chicoで0."4を記録していたときに4"近くにまで悪化していたのは驚きだった。これはチャスコン山とチャナントール山の地表が放射冷却で冷え、それによって生じた重い空気が山肌を流れ落ちて（下降流）気象モニタ周囲に流れ込んで乱流を起こしているのではないかと推測される。

- チコ山頂とトコ山腹

高度が上がると上空の強い西風によって生じる接地境界層の乱流でシーイングが悪くなるのではないかと心配していたが、その逆に高度が上がるほどシーイングが良くなるという測定結果が出た。測定は前半夜1回のみ限定されており今後もデータを蓄積していく必要があるものの、これは、標高が上がるにつれてシーイングも良くなる可能性を示唆している。

- 測定値について DIMM による測定値は大気乱流が Kolomogrov 乱流であると仮定している。しかし、大口径の望遠鏡ではこの仮定が成り立たなくなり、一般的には DIMM によるシーイングよりも小さい値となることから、実際の望遠鏡で測定されるシーイングは今回の値よりもさらに良いと予想される。

すなわち、チャナントール山頂は

- － ベストシーイングが可視で0."4を十分に切る
- － 通常でも可視で0."6程度が期待できる可能性がある

など、マウナケア山頂に勝とも劣らないシーイングを持っている可能性が示された。

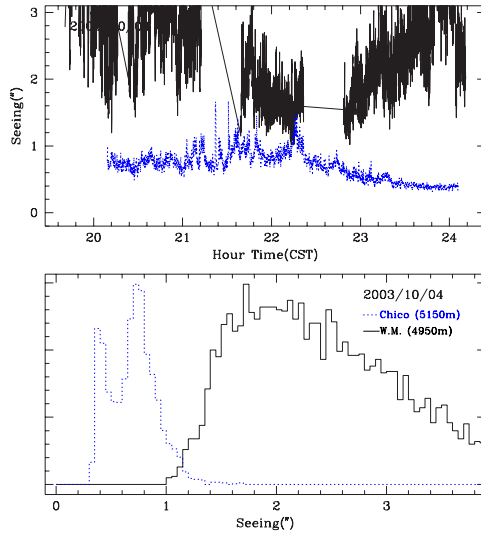


図 5.16: 2003/10/4 の測定結果。左が時間変動、右がヒストグラム。黒実線が気象モニタ脇、青点線がチコ山頂の値である。

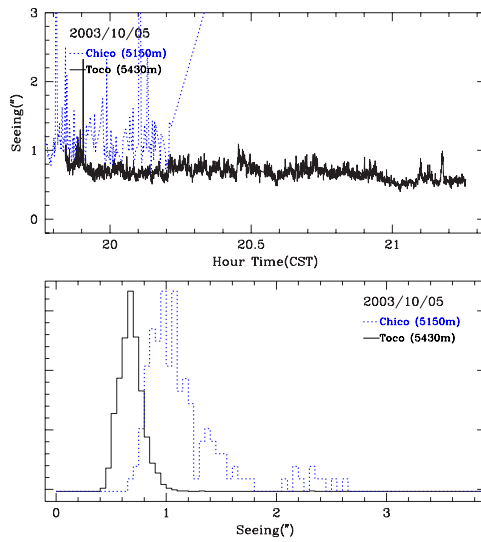


図 5.17: 2003/10/5 の測定結果。黒実線がトコ山腹、青点線がチコ山頂の値である。

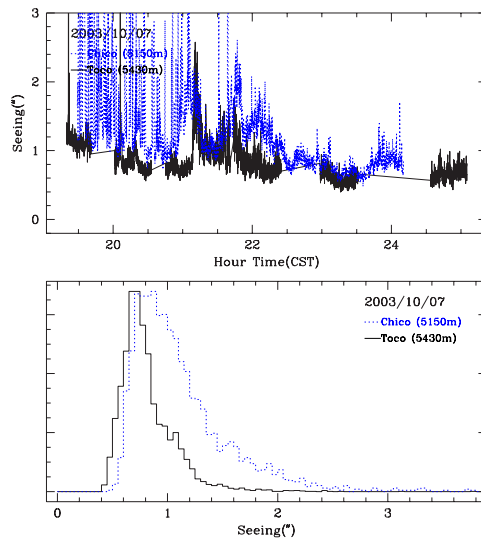


図 5.18: 2003/10/7 の測定結果。黒実線がトコ山腹、青点線がチコ山頂の値である。

5.6 今後の予定

現在、チャナントール山頂へのアクセス道路の建設を進めており、2005 年中に完成する予定である。その完成後、気象モニタ、雲モニタ、シーイングモニタを山頂に移設して本格的なサイト調査を開始する予定としている。



図 5.19: シーイングモニター装置を候補地へ搬入する途中で。アタカマ高原は草木 1 本見られぬほどの乾燥地帯だ。

第6章 望遠鏡

6.1 望遠鏡の基本仕様

6.1.1 背景

現在、建設中まで含めて 6m 超級の光赤外望遠鏡は 17 台もあり¹、これらのすべてが 2005 年までに科学運用を開始することになっている。米国では、2015 年頃を目指して 30m 級の光赤外望遠鏡計画が進行中であり、2020 年頃には 50–100m 級の光赤外望遠鏡の建設が予想されている。すばる級の口径を持つ光赤外線望遠鏡をスペース天文台として運用する次世代宇宙望遠鏡 JWST も 2011 年頃の稼働を目指している。20 世紀は 8–10m 光赤外線望遠鏡の出現で幕を閉じたが、望遠鏡革命はまだ端緒についたばかりで、21 世紀初頭は望遠鏡の大型化高性能化が加速されるであろう。こうした時代に口径 4m 級以下の小さな望遠鏡を建設しても、それが MACHO や MAGNUM のような専用望遠鏡でない限り世界最先端の教育と研究を行うことは難しいであろう。我々は、最先端の教育と研究を維持できる最小口径の望遠鏡は MMT や Magellan の口径 6.5m であろうと判断した。Magellan 2 望遠鏡は、望遠鏡とドームを合わせた値段が約 30M 米ドルであり、Gemini など 8m 望遠鏡の価格 100M 米ドルに比べて、かなり割安であり、かつ構造も単純であり比較的小さなグループでも製作可能な大望遠鏡である。我々は、Magellan 望遠鏡に修正を加えて、赤外線の感度では世界最高性能の望遠鏡を建設することにした。

6.1.2 望遠鏡の概要

TAO 望遠鏡と Magellan 望遠鏡の違いは、前者が 5000m 級の高地で運用されることと赤外線観測に最適化されていることである。表 6.1 に両者の主たる違いを示す。

望遠鏡や地球大気 (特に水蒸気) からの放射を最小にするために、主鏡を銀コーティングし、高度 5600m のチャナントール山頂に望遠鏡を設置する。構造の簡素化、および酸素が希薄な高度での科学運用の負担を軽減するために、単一の副鏡とし、副鏡の交換は

¹すばる、Keck (×2)、Gemini (×2)、VLT (×4)、Magellan (×2)、MMT、GTC、LBT、HET、SALT、BTA

考えない。

MMT 用にアリゾナ大で開発中の $f/15$ 可変型副鏡を採用し、補償光学技術による回折限界での観測を行う。従来の補償光学系では、5-6 枚のミラーが必要であるが冷却が難しく、増大した熱雑音のために感度が思うように向上しない。一方、可変副鏡による補償光学系では、ミラーを追加する必要がないため、分解能が向上した分だけ感度が向上し、観測能率が従来型の数倍に達する。本可変鏡は、アクチュエータで駆動するために移動距離が長く、振動副鏡としての使用も可能である。また、レーザーガイド星を使い、

	TAO	Magellan
最適化波長	赤外線	光学
主鏡 6.5m $f/1.25$	Ag coating	Al coating
副鏡	$f/15$ deformable	$f/5, 11, 15$
光学最大視野	$30' \phi$	$60' \phi$
高度	5600m	2700m
Photometric nights/yr	260	220
Precipitable water	0.4mm 10%tile	~2mm 冬

表 6.1: TAO と Magellan の比較

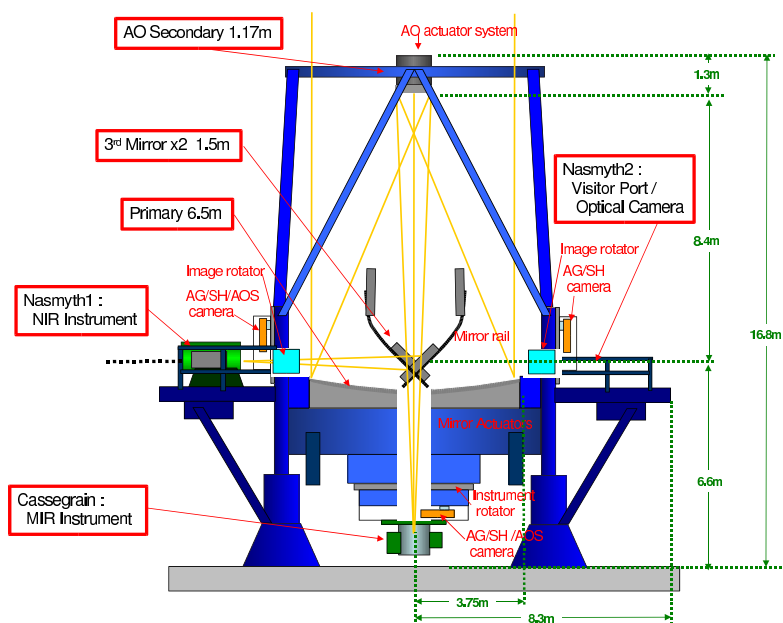


図 6.1: TAO 望遠鏡 (予想図)

補償光学の有効天域をほぼ全天に拡大する。広視野補償光学系に関しても、可変型副鏡の共役点は地表付近にあるので、上空の攪乱層の高度を共役点とする可変鏡を追加するだけでよいという利点がある。

6.2 マジェラン望遠鏡

TAO 望遠鏡と同一口径の望遠鏡として、チリ共和国内に設置されているマジェラン望遠鏡がある。そのデザインは TAO を設計する上で大いに参考になるものであり、かつ、参考にすべきものでもある。そこで、ここではマジェラン望遠鏡について多少詳しく紹介する。

カーネギー天文台とアリゾナ大学が始めたマジェラン計画では、口径 6.5m の光赤外望遠鏡をチリのラスカンパナス天文台のなかに一台建設する予定であった。その後、3 大学の参加により計画が拡大し、6.5m 光赤外望遠鏡を 2 台建設することになった。マジェランコンソーシアムでの出資比率は、カーネギー天文台 50%、ハーバード大学 20%、アリゾナ大学 10%、ミシガン大学 10%、MIT 10%となっており、ホスト国 (チリ) への分配 10%を除く 90%の観測時間は、出資比率に応じて分配される。マジェラン望遠鏡は、2 台で約 0.7 億米ドル (約 88 億円) と安価であること、比較的小規模のグループで建設運用が可能であること、望遠鏡そのものの構造が簡単で高地における建設が可能であること、などの観点から TAO 望遠鏡のモデルとして採用されることになった。

図 6.2 にマジェラン望遠鏡の組み立て図を示す。主鏡は、アリゾナ大ミラーラボで開発製作された F/1.25 ハネカム鏡 (オハラ社 E6 BSC ガラス) で、自重を支えるのに十分な厚み (外周厚み 71cm、内周厚み 39cm) を持ちながら、重量は 7.7 トンと超軽量である。光学形状は Classical Cassegrain であるが、副鏡と組み合わせて Gregorian 焦点 (合成 F/11) を作り、視野 40 分にわたり平坦な焦点面を実現している。赤外線副鏡としては振動型の SiC 鏡が計画されていたが、開発のメドが立たず中止された。焦点としては、Gregorian Nasmyth 焦点 2 つ、“folded port” 焦点 3 つ、Cassegrain 焦点 1 つ (赤外線用) の合計 6 つが使用可能である。

架台は、カーネギー天文台と L&F 社が中心になって開発したもので、Tripod Disk という構造を採用した。これは、伝統的な Fork 型 (固有振動が低く不安定) と ALT-AZ Disk 型 (安定だが Elevation Disk が大きく製作が困難) の中間型と言うべきものである。床面から Tripod Disk を出すことで、Elevation Disk の直径を小さくして製作を容

易にすると同時に安定な構造 (固有振動 10Hz) を実現した。望遠鏡の回転部分の総重量は 127 トン (Azimuth システム回転 52 トン、OSS²システム回転 75 トン) である。駆動角速度は、Azimuth slew rate = 2°/sec (0.1°/sec²)、Elevation slew rate = 1°/sec (0.1°/sec²) である。指向精度は、1°offset に対し 0.1" (rms)、10°offset に対し 1" (rms)、任意からの offset (全天) に対し 2" (rms) である。

図 6.3 に示すように、温度制御は望遠鏡とドームで行う。望遠鏡の構造中や主鏡/セル中を空気が流れる。ドームの表面積の 25% は換気用のルーバーに覆われている。無風の場合は、ファンを用いて強制換気を行う。1°C/hour の外気温度の変化に追従することを目標としている。表 6.2 に operation condition と survival condition をまとめる。

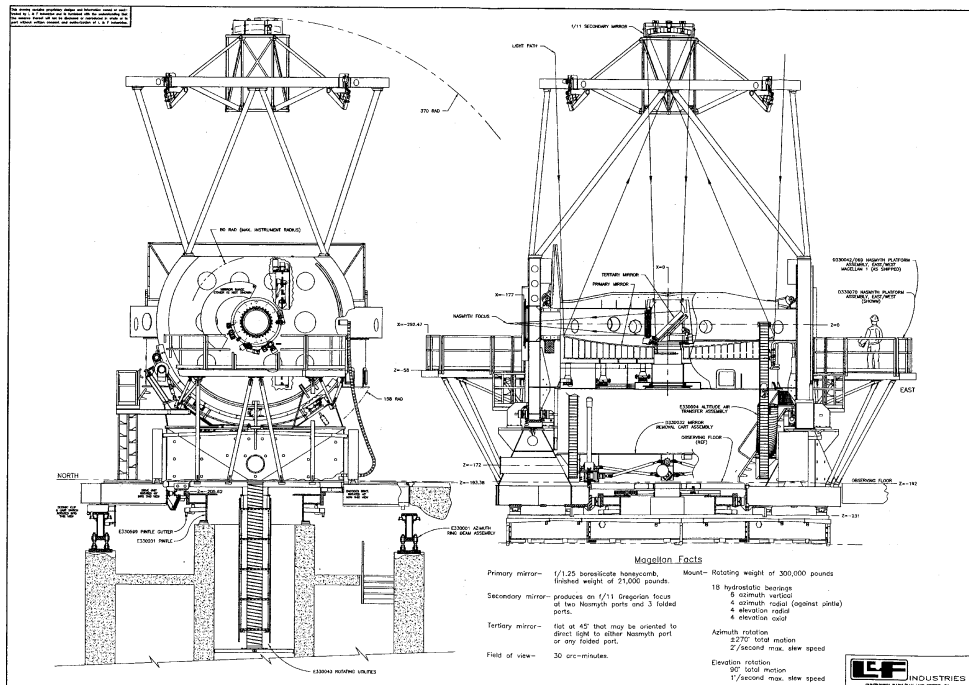


図 6.2: マジェラン望遠鏡

²optical support system (Elevation Disk と一緒に回転する光学支持部)

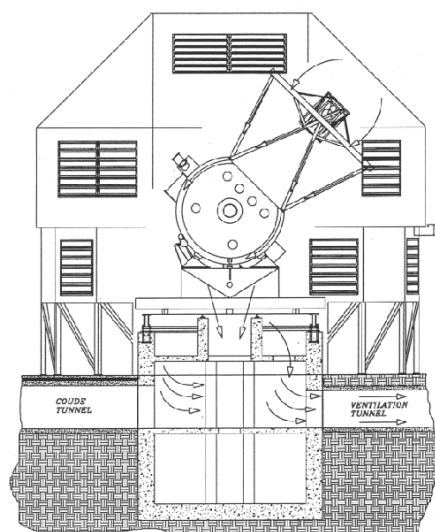


図 6.3: マジェラン望遠鏡とドーム

	Operating	Surviving
風速	最大瞬間風速 22m/sec、望遠鏡表面 6.6m/sec	望遠鏡表面 22m/sec
外気温	-9 ~ 27°C	-18 ~ 38°C
湿度	95%	100%
地震	0.4G 水平	0.4G 水平

表 6.2: Operating and Survival Conditions

6.3 望遠鏡光学系

TAO 望遠鏡は Magellan 望遠鏡を元にした望遠鏡であり、ベースとなる主鏡や構造などは Magellan で確立された技術を利用する。その一方で、TAO 望遠鏡はこれまでで最高高度の地点に設置されるなど、独自性の高い望遠鏡であり、そのメリットを最大限に活かす設計が必要である。

この章では TAO 望遠鏡の光学系仕様について、パラメータ選択の理由から設計案までについて解説する。

6.3.1 TAO 望遠鏡光学系の概念設計

目指すべき方向

TAO 望遠鏡の光学系を検討する場合に、重要視すべき要素は以下の 3 点である。

- 赤外線での観測に最適化された望遠鏡

TAO 望遠鏡は 5600m の高山の山頂に設置される。この高度では赤外域における大気の吸収が影響が小さくなるので、普通の地上望遠鏡からでは観測できないような波長域も観測できる。また、熱赤外域でも大気放射が少なくなることから、高感度の観測が可能になる。これらの特徴は、TAO 望遠鏡が赤外観測について大きな優位性を持っている事を示しており、これを活かすように望遠鏡光学系は設計されるべきである。

また、近年赤外域では、補償光学の利用が進んでおり、中間赤外を含めた広い波長でその有効性が指摘されている。赤外線望遠鏡である TAO 望遠鏡でもこの補償光学の導入を前提にして望遠鏡を検討すべきである。

- 広視野の望遠鏡

観測効率をあげて望遠鏡を有効に利用するには、視野をできるだけ広く取ることが望ましい。Magellan 望遠鏡はこの事を念頭に置いた設計をしており、TAO の光学系もその利点をできるかぎり活かした設計にするべきである。

- シンプルでメンテナンスが少ない望遠鏡

望遠鏡の効率を高め、最大限の成果を上げるためには、安定的に望遠鏡が運用できる状態にあることが不可欠である。これには望遠鏡の構造や運用をシンプルにする必要がある。特に TAO 望遠鏡は作業性の極端に悪い高地に設置する上に、運用に

割ける人員も限られているために、運用に手間がかからないように設計段階から気をつけておく必要がある。

そのため、望遠鏡光学系としては1つの副鏡だけを用いるように設計を行う。また、補正系などの切替えもシンプルな動作（例えば平面ミラーの抜き差しだけ）でできるようなレイアウトとする。

望遠鏡パラメータの選択

望遠鏡のタイプ I. (Cassegrain/Gregorian)

最初に望遠鏡のタイプを Cassegrain 系にするか Gregorian 系にするかを考える。

Cassegrain 系と Gregorian 系の利点を収差、実サイズ、補償光学の導入の点から比較したのが表 6.3 である

非点収差・像面湾曲は Cassegrain の方が少しだけ量が少ないが、補正は Gregorian の方が楽である。これは普通に補正系を組むと Cassegrain 系になるので、望遠鏡を Gregorian にした方が収差成分の打ち消しが容易になるからである。非点・像面湾曲は視野を確保する上で大きな問題になる収差なので、広視野化を考えた場合、Gregorian にするメリットは大きいと思われる。

望遠鏡サイズ/副鏡サイズの観点から見ると、Cassegrain の方が全体のサイズを小さくできる分メリットは大きい。このメリットは望遠鏡最終 F 値が明るいほど顕著である。逆に F10 がそれ以上暗い望遠鏡光学系を考えると、サイズのメリットはあまり効かなくなる。

	Cassegrain	Gregorian
コマ収差	同じ	
非点収差	少し良い	少し悪い
像面湾曲	少し良い	少し悪い
湾曲の補正	難しい	やさしい
軸ずれコマ	同じ	
主鏡副鏡間距離	小 ~7m (F10 の場合)	大 ~10m (F10 の場合)
副鏡サイズ	小	大 (Cas の ~1.2 倍)
補償光学	効果小	効果大

表 6.3: Cassegrain 系と Gregorian 系の比較

補償光学の効果の点から考えると、Cassegrain よりも Gregorian の方がメリットが大きい。これは、Gregorian 望遠鏡では、副鏡の主鏡による像が実像として望遠鏡上空に結び、これがちょうど大気の大擾乱層付近にあたるので、擾乱の影響を副鏡による AO で補償しやすいからである。一方、Cassegrain ではこれが虚像になり、地表面よりも上に共役面はできない。

以上まとめると、広視野化、赤外線性能 (AO 性能) の両面から Gregorian の方がメリットは大きいと言える。唯一問題になるのは望遠鏡サイズの問題であるが、これは実際の製作性との兼ね合いもあるので、現時点での判断は難しい。したがって、今検討では望遠鏡タイプは Gregorian と考えることとする。

望遠鏡のタイプ II. (Classical/Ritchey-Chretien)

望遠鏡のタイプとしては Classical な望遠鏡にするのか、Ritchey-Chretien (以下 RC) にするのかを考える。

RC は主鏡副鏡でコマを取り除いてある系であり、同じ F 値で設計を行う限り Classical よりも結像性能は良い。しかしながら、RC 系は主鏡の形状も F によって変わってしまうので、コマを補正できるのは 1 つの F に対してだけであり、他の F 値を使うとコマが発生してしまう。このコマの強さは F の 3 乗に比例する量であり、RC で設定された F よりも F が暗い場合に特に影響が顕著である。

さらに、高視野用の補正系を考えると、コマ収差を取るには像面から離れた位置にもパワーを持つ光学エレメントを置く必要が出て来る。具体的には望遠鏡第三鏡付近に補正レンズ系をいれることになるが、これは交換等の手間を考えると非常に大きなデメリット

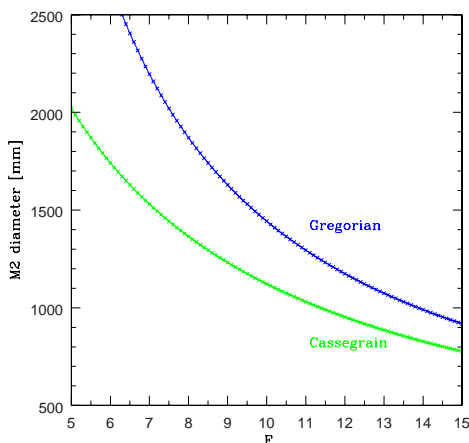


図 6.4: F 値と M2 サイズの関係

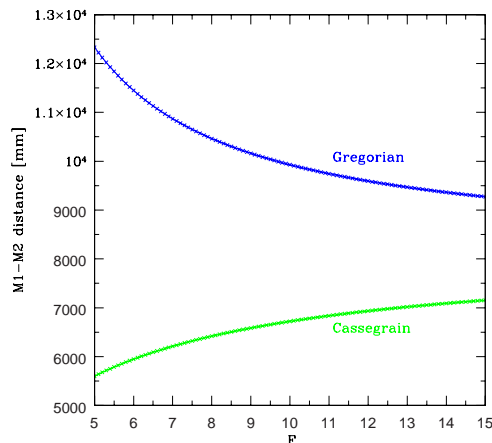


図 6.5: F 値と M1M2 距離の関係

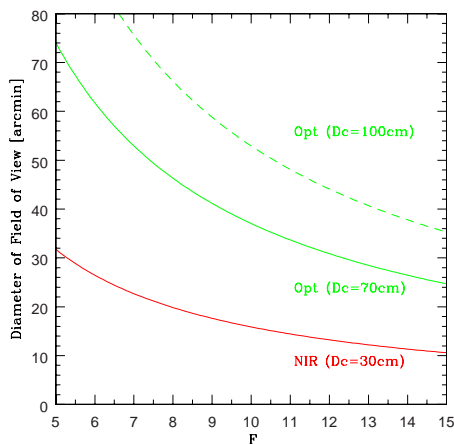


図 6.6: F 値と視野の関係

トとなる。

TAO 望遠鏡は運用をできるだけシンプルにしたいので、望遠鏡の F を切替えて観測を行うことは想定しない。したがって Classical な光学系を取るメリットは無く、RC 解を採用すべきである。

最終 F 値

最終 F 値を決めるのに考慮すべき要素としては、視野と副鏡サイズの 2 点が挙げられる。

- 視野広い視野を取るには焦点面付近に補正系が必要となって来る。この補正系の物理的なサイズは製作などの面から限られており、これが焦点面の物理的なサイズを規定する。例えば可視用補正系の場合、レンズのサイズは $\phi 70\text{cm}$ が限度であり、これが事実上の焦点面サイズになる (もし像面湾曲の補正をあきらめ、収差だけ取り除くならレンズを Silica だけで作れるので $\phi 100\text{cm}$ 超も可能である)。赤外の場合はレンズ材質がより限られるので、 $\phi 30\text{cm}$ 程度が上限であろう。

このように焦点面のサイズが一意に決まってしまうので、望遠鏡の視野と F 値は 1:1 の対応を示すようになる。これを図にしたのが図 6.6 である。当然 F 値が明るい程視野は大きくなる。

- 副鏡サイズ

主鏡のサイズ/F が固定なので、最終 F を決めれば副鏡のサイズも一意に決まる (図 6.4 参照)。副鏡サイズが大きくなると、補償光学副鏡の製作が難しくなる。現在、MMT で運用されている補償光学副鏡は直径 640mm、LBT 用および Magellan 用

に開発が進んでいるもので直径が各々 911mm、1300mm である (詳細は後の項を参照)。数年以内にどの程度大きい物まで実用化されるかは不明であるが、Magellan の 1300mm を大きく越えるものは難しい。

また、副鏡サイズが大きくなると、中心遮蔽の影響で望遠鏡回折像のリング成分が強くなる。図 6.7 は中心遮蔽の割合を変化させた場合の回折像を計算したものである。遮蔽物の直径が有効径の 20% を越える辺りから、影響は無視できないほど大きくなるのが分かる。TAO 望遠鏡の主鏡サイズは 6500mm なので、遮蔽による像劣化を防ぐ意味でも副鏡サイズは <1300mm とすべきである。

上で見た通り、視野を確保するには最終 F は明るくしなければならず、副鏡の製作性や遮蔽の影響を鑑みると副鏡は小さく (すなわち、F は暗く) する必要がある。ここでは案として、最終 F=12、副鏡サイズ ~1200mm を取ることにする。この場合の望遠鏡の基本仕様は表 6.4 の通り。

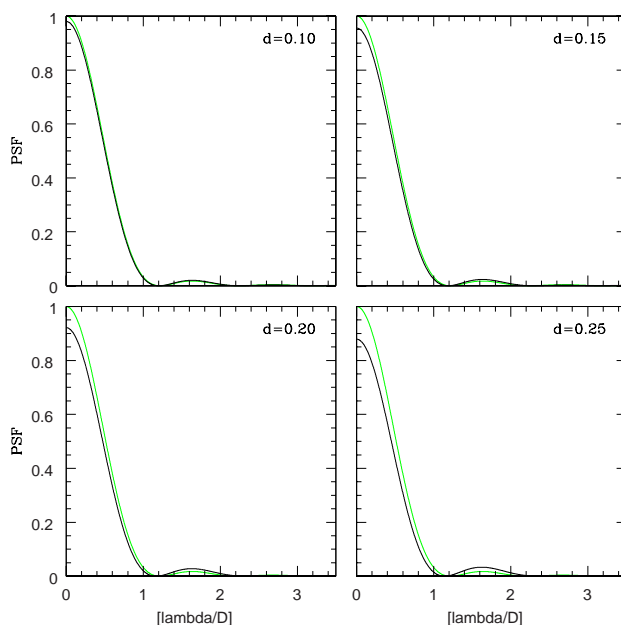


図 6.7: 遮蔽直径割合が 0.10、0.15、0.20、0.25 の場合の回折像。横軸は λ/D で縦軸が遮蔽無し
の回折像の中心強度で規格化した明るさ。緑線は比較のための遮蔽が無い場合の回折パターンを示
す。遮蔽率が 20% を越えると急激に回折像が悪化する事が分かる。

望遠鏡タイプ	Gregorian Ritchey-Chretien
主鏡系	6500mm
主鏡 F 値	1.25
副鏡	副鏡 (補償光学機能付)
副鏡サイズ	~1174mm
副鏡による遮蔽率	18% (直径換算)
主鏡副鏡間距離	~9593mm
バックフォーカス	4500mm
最終 F 値	12.0
プレートスケール	$2.65''/\text{mm} = 380 \mu\text{m}/''$
可視装置視野 *	最大 $\phi 30'$
近赤外装置視野 *	最大 $\phi 13'$
中間赤外装置視野	最大 $\phi 2'$

(*) 理想的な補正系が組めた場合。なお補正系の設計は装置の光学系に深く関係するため、詳細は別項に述べる。

表 6.4: 望遠鏡光学系の基本仕様

6.3.2 望遠鏡設計案

上の概念設計に基づいて、設計した望遠鏡の案を表 6.5 に示す。また、これに基づくレイアウトを図 6.8 に、主焦点スポットダイアグラムを図 6.9 と図 6.10 に示す。

パーツ	パラメータ	コメント
主鏡	有効径 6500 mm	穴による遮蔽 = 直径で 7.2%
	曲率半径 -16250.00 mm	
	コニック係数 -0.99667	距離=8126.25mm に主鏡による像面
	カセグレン穴径 470 mm	
	距離 9560.91 mm	
副鏡	有効径 1145.19 mm	副鏡による遮蔽 = 直径で 18%
	曲率半径 2598.50mm	
	コニック係数 -0.66952	
	距離 8,560.91 mm	
第三鏡	サイズ 1250mm × 880mm	45 度の降り曲げ鏡 抜き差し可能
	形状 平面	
	距離 5,500 mm	
焦点面	像スケール $2.65''/\text{mm}$ 像面の弯曲半径 ~1355mm	

表 6.5: 望遠鏡光学系のパラメータ

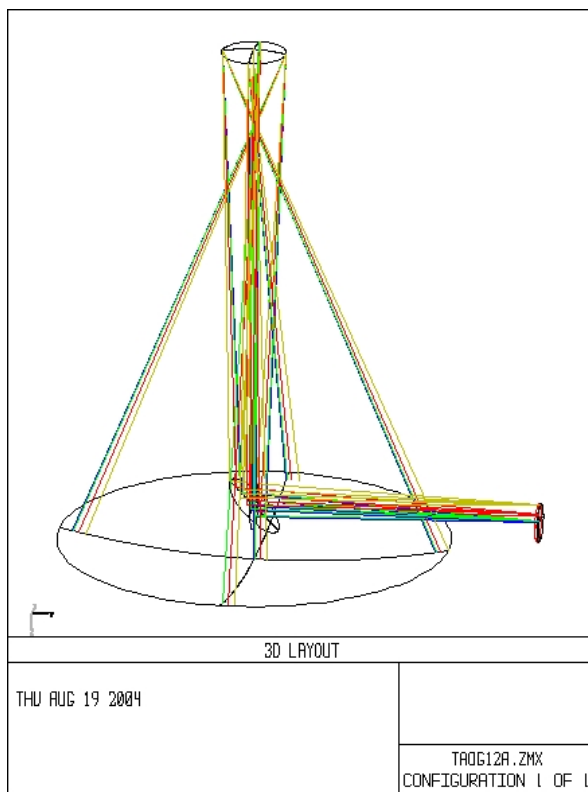


図 6.8: 望遠鏡レイアウト図。書かれてある光線は視野中心からの半径で 0' (視野中心)、1'、6.5'、15' となっている。

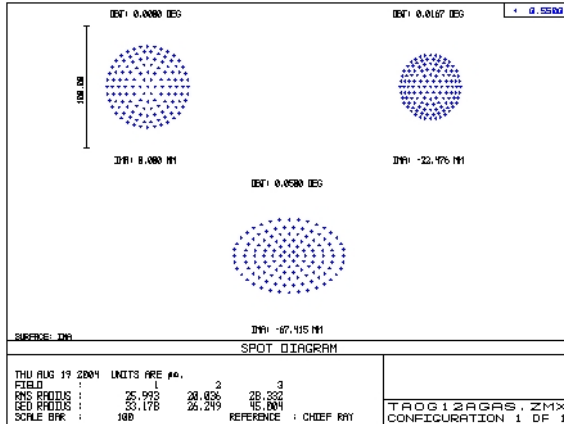


図 6.9: 直焦点 (補正系無し) のスポットダイアグラム。0' (視野中心)、1'、3' でのスポットを示してある。像面湾曲は補正せず、焦点は平面だとしている。スケールバーは 100 μ m であり、0.265'' に相当している。RMS 径は全ての視野で 60 μ m (0.16'') を切っている。

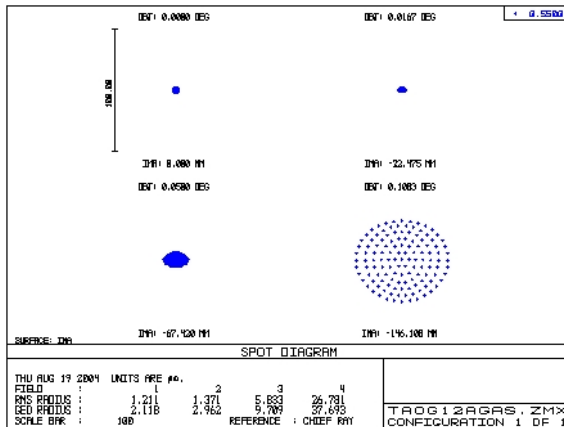


図 6.10: 直焦点 (補正系無し) のスポットダイアグラム。像面は曲率半径 1350mm の曲面とした。先の 0' (視野中心)、1'、3' に加えて、6.5' でのスポットを示した。

6.4 望遠鏡構造体

6.4.1 望遠鏡仕様

望遠鏡構造は原則として Magellan 望遠鏡のものを踏襲し、必要に応じて変更を加えてゆくこととする。表 6.6 に、望遠鏡に対する要求仕様をしめす。

6.4.2 マゼラン望遠鏡との違い

焦点部

TAO 望遠鏡では中間赤外線観測が大きな柱となる。しかしながら、中間赤外線波長においては望遠鏡からの熱放射が背景放射の大きな要因となるために反射面の数を可能な限り減らす必要がある。このため、中間赤外装置は第 3 鏡を使わないカセグレン焦点におくこととする。

マゼラン望遠鏡ではカセグレン焦点は装備されてないため、以下の変更が必要となる。

- 主鏡セルにカセグレン穴を開ける
- 主鏡の再蒸着は主鏡セルごと行うため、蒸着時にカセグレン穴を塞ぐ構造が必要となる

最低固有振動数	10Hz
軸受	油静水軸受け
駆動機構	フリクションドライブ
指向精度	1."5 rms
エンコーダ	
解像度	0."01
精度	0."1
トラッキングエラー	< 0."03 (風速 11m/s 以下) < 0."2 (風速 15m/s 以下)
焦点部	可視ナスミス、赤外ナスミス、カセグレン

表 6.6: TAO 望遠鏡本体の要求仕様

風耐性

これまでの調査で、建設地の風速がかなり大きいことが判明してきた。とくに、前半夜の瞬間最大風速は 14m/s にも達し、平均速度も 11m/s を超える。このため、マゼラン望遠鏡の風耐性（トラッキングエラーが風速 7m/s 以下で $< 0.''03$ 、風速 11m/s 以下で $< 0.''2$ ）に比べてより厳しい条件となっている。

副鏡

マゼラン望遠鏡では複数の副鏡を交換する事を想定した副鏡ユニットであったが、TAO 望遠鏡では可変形副鏡のみを用いるために副鏡交換機構が不要である。

第 3 鏡

カセグレン焦点を持たないマゼラン望遠鏡では第 3 鏡ユニットは常に光路上におかれ、使用する焦点によって光軸上を回転させて切替えを行っていた。

これに対し、カセグレン焦点を持つ TAO 望遠鏡では第 3 鏡は 2 ユニット必要で、これらが必要に応じてレール上を移動することによって焦点を切替える設計となる（図 6.1）。

6.5 観測制御系

ここでは望遠鏡本体、および、望遠鏡・周辺機器・観測装置との関連を中心に観測のための制御系について検討する。まずは大きく 2 つの階層に分けて検討を進めることにする。すなわち望遠鏡の複数のモータや鏡のアクチュエータ、ドームスリットや方位軸回転モータなどのハードウェアを直接的に制御する階層と、望遠鏡、周辺機器および観測装置を統合して制御し適切な観測を実現する階層である。この章では前者を「望遠鏡制御層」、後者を「観測制御層」と呼ぶことにする。望遠鏡の指向機能を例にとると天体の赤経赤緯をパラメータとして時々刻々の方位高度に変換したうえで望遠鏡の方位軸モータ、高度軸モータを制御する部分が「望遠鏡制御層」に属し、指向追尾コマンドによって天体の赤経赤緯のパラメータを受け取る部分などのユーザ、装置間のインターフェース部分が「観測制御層」に属することになる。

その上でさらに望遠鏡および観測装置の遠隔制御による観測運用の実現について検討を行なう。望遠鏡サイトの標高 5600 m では気圧はおよそ半分しかなく人間が継続的に作業するには極めて困難な環境であり、このため観測者が山頂に登ることなく標高の低い基地から遠隔観測を行なうことが重要となるからである。我々、天文学教育研究セン

ターのグループではこれまでに地上光赤外線望遠鏡については木曾観測所 1.05 m シュミット望遠鏡および東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター 2m MAGNUM 望遠鏡を、電波望遠鏡としては野辺山およびチリに設置されている 60 cm サブミリ波望遠鏡の開発および観測運用を通じて、遠隔観測についての経験を蓄積してきている。とくに MAGNUM 望遠鏡については当初より無人遠隔観測を目標として開発をすすめ、現在ではアメリカハワイ州マウイ島にある望遠鏡を天文学教育研究センター三鷹キャンパスから観測監視を行ないながら現地無人の状態での安定した自動観測を実現している。そこでこれらの経験を踏まえつつ他の 8 m 級大望遠鏡の状況も調査し遠隔観測についての検討を行なった。

6.5.1 望遠鏡制御層

望遠鏡制御層においてはモータ、アクチュエータ等の直接的な制御および望遠鏡の指向追尾や主鏡副鏡の補正など比較的短いタイムスケールでの複数の装置の統合的な制御を行なう部分である。制御計算機は装置ごとに設置しそれらをネットワーク(シリアル通信あるいはイーサネット)で結んで分散制御を行なう。比較的短いタイムスケールでの制御のために必要であれば制御計算機にはリアルタイム OS (DOS あるいは RTLinux など)を採用する。

また遠隔観測の実現のためには望遠鏡ハードウェアおよび制御層ソフトウェアの信頼性がことさらに重要になってくる。また機械に不調が生じたときにリセットをしたり電源を入れ直したりすることがあるが、それらは全て計算機から制御できなければならない。さらに不調が予想される場合には容易に交換できるようにハードウェアのモジュール化と立ち上げ試験ルーチンの自動化を進める必要がある。

いずれにしてもこの部分は望遠鏡や他の装置のハードウェアと密接に結びついているため望遠鏡製作会社と十分に協議をしたうえで細かい仕様を策定していく予定である。

6.5.2 観測制御層

観測制御層においては観測者にインターフェースを提供し、目的とした観測を遂行するために望遠鏡、ドーム、観測装置などを統合した制御を行なう部分である。

まず観測遂行時における制御の統括は観測装置の制御プログラムが行なうことにする。すなわち観測装置が観測者へのインターフェースを提供し、また観測装置制御プログラムからの指示のもと望遠鏡やドーム他の装置の制御を行なうことにする。これは観測者が求める観測データは観測装置が取得するものであること、観測装置によって観測に必

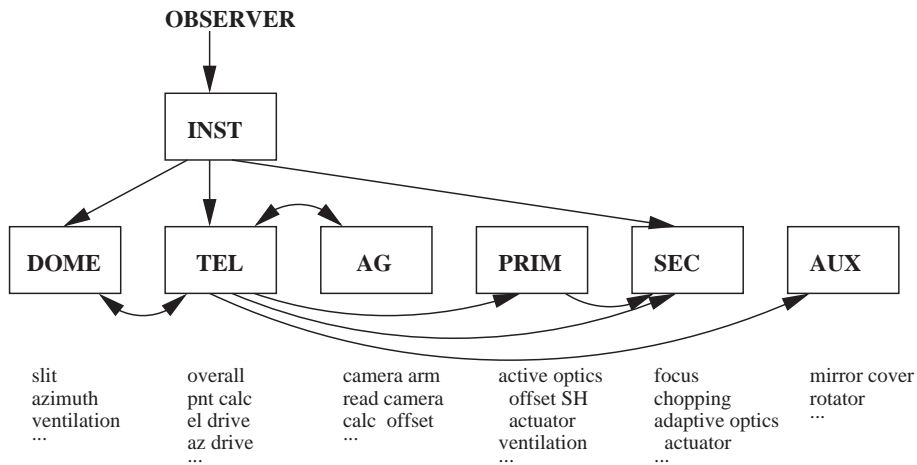


図 6.11: 観測制御系のイメージ。

要な機能の内容が様々に異なることなどの理由から、望遠鏡、ドーム等は観測遂行中に観測装置から求められる機能を提供すれば良いという考えかたに基づいている。望遠鏡制御のための独自のユーザインターフェースを用意する必要はあるが、主に一連の観測の前のオートガイダの設定や望遠鏡のメンテナンス、実験などの用途に限定されることになるであろう。このため望遠鏡制御プログラムとしては観測装置および観測者へのインターフェースの基礎として各機能の制御コマンドセット/ライブラリを提供する(もちろん複数の矛盾するコマンドや望遠鏡の機能を損なうようなコマンドについてはソフトウェア的な安全装置を組みこんでおく必要がある)。また現地での調整作業を極力省力化するため望遠鏡制御プログラムの開発と同時にソフトウェア的な望遠鏡シミュレータを作成して観測装置開発時の試験に提供する。

望遠鏡制御層と同様に観測制御層においても各装置ごとに制御計算機を設置しネットワークで結んだ分散制御を行なう。観測装置制御プログラムは主に望遠鏡制御プログラムに通信すればよく、主鏡、副鏡、オートガイダなどの各制御プログラムに直接通信する必要はないと思われるがそれらへのアクセスを制限しないという意味で、階層構造をことさらに深くすることはしない。例えば副鏡チョッピング制御の場合においては検出器の読みだしのタイミングに合わせて観測装置計算機から副鏡制御計算機に直接制御信号を送る必要がある。計算機の OS には Linux、プログラム言語には C を中心に使い、制御プログラム間の通信には IP プロトコル/イーサネット上での socket 通信を使う予定である。

6.5.3 遠隔観測

前述のとおり望遠鏡サイト標高 5600 m での作業はたいへんな困難をとまなうため遠隔観測が重要となるが、望遠鏡立ち上げ当初からの完全無人遠隔観測を開始しようとすることは現実的ではない。そこで安全のために観測支援と現場監視にあたる望遠鏡オペレータを山頂に 2 名配置するが、サンペドロ (標高 2500 m) の基地に滞在する観測者が全ての操作を行ない遠隔観測を遂行する状況を最初の目標とする。

このため山頂には酸素分圧を高めた待機室を設置して望遠鏡オペレータや山頂作業者の健康と安全に配慮する。また山頂の望遠鏡オペレータは緊急時の対応も行なうが夜間の作業は危険も伴うのであくまで応急処置にとどめ、本格的な対応は翌昼に行なうことにする。山頂とサンペドロの観測基地は高指向性アンテナを利用したマイクロ波無線通信によって数 Mbps の速度で直接 TCP/IP LAN を接続する。山頂の望遠鏡オペレータと基地の観測者とのコミュニケーションのためにはテレビ会議システムを準備する。さらになんらかの LAN 接続の故障に備えバックアップ回線として衛星電話 (FAX も使用可能) を 2 回線は確保する。観測は基本的には無線 LAN 経由で観測装置制御計算機にログインし、コマンドなどテキストベースでの観測制御プログラムを実行する。この場合、回線速度は全く支障が無いであろう。取得画像の表示などグラフィカルなユーザインタフェースが必要な場合においても無線 LAN 接続の数 Mbps の速度では制御プログラムの X ウィンドウ画面を観測者の手元に飛ばして来てもおそらく支障はないと考えられる。しかし将来的により遅い回線速度や不安定な回線からの遠隔観測、すなわち公衆インターネット経由での日本からの遠隔観測の実現を見据え、観測者の手元の計算機で表示制御プログラムを立ち上げ socket 通信によって必要なデータをやりとりすることにして通信量を減らすことも考慮する。

また、遠隔観測を支援するものとして監視システムを構築する。これは主に環境監視、装置監視、緊急警告対応の各システムによって構成される。環境監視システムは気象情報および雲量情報を収集する。地上観測では天候が変化するためこれらの情報は望遠鏡や観測装置の保護には欠かせず、さらには観測条件について定量的な情報が得られるため観測モードの変更や得られた観測データの質の評価にも有用となる。我々は既にサイト調査において気象モニター、雲量モニターの遠隔自動運用を行っており、それらをさらに改良・追加する予定である。

装置監視システムは観測制御層の各制御プログラムからリアルタイムでステータスを収集し一ヶ所にまとめログとして保存するとともに観測者にわかりやすい形でまとめて表示するものである。ステータス収集のタイムスケールは必要に応じて可変にする。人間からみたときの認識性や汎用性を考慮しログは ASCII テキストとして保存する。ここまでにおいてログを表示するだけでも原理的には観測監視が可能であるが、それらの

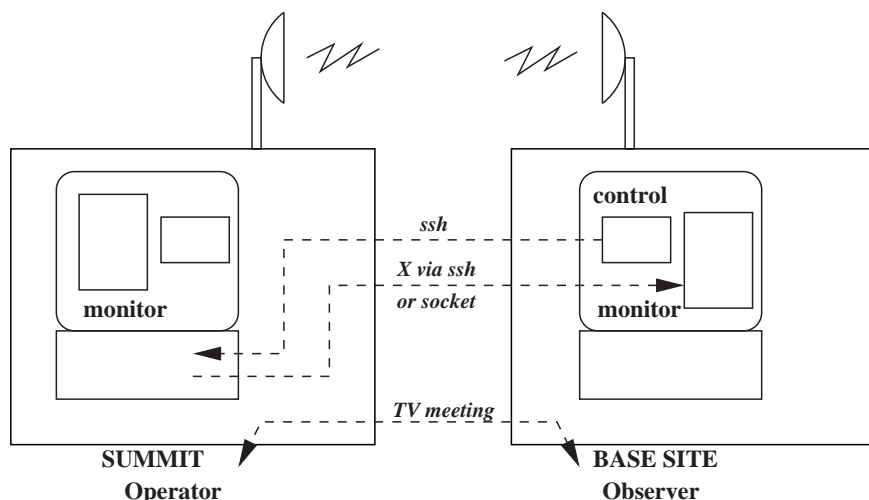


図 6.12: サンペドロからの遠隔観測のイメージ

情報を集約、取捨選択して表示することはたいへん有用である。そこで収集したログに基づいて情報を提供するサーバを置き状況表示クライアントが socket 通信により随時必要なステータスを取りだして表示するシステムを構築する。表示システムは複数立ち上げられるので望遠鏡オペレータと観測者との情報の共有にも役立つ。

緊急警告対応システムは観測中に一ヶ所に収集したステータスを解析し、問題となる状況が生じている場合には観測者に警告を発するとともに定められた手順に基づいて事態収拾、復帰を自動で行なう、あるいは手動で行なうことを要請するものである。同様のシステムは MAGNUM 望遠鏡における遠隔自動観測システム上で運用を続けている。単純な障害についてはごく簡単な対応で自動対応には問題ないと思われるが、深刻あるいは複雑な障害が生じたときには対応は難しくなり人間による介入が必要になることが考えられる。このとき必要な手順が複雑になると時間もかかり切迫した状況のなかでヒューマンエラーを起こしやすくなるため、ごく簡単なコマンドで望遠鏡および観測システム全体が「安全」な状態にもっていけるようにハードウェア・ソフトウェアとも作りこんでおく必要がある。これにより緊急時において焦るなかでも簡単に安全を確保できると同時に、より複雑な対応をじっくり行なうための時間を作りだすのにも重要である。また速やかな観測復帰のために立ち上げ試験手順においても自動化を進めることが有用である。

6.6 リモート制御の検討

本計画では良好な観測条件を求めて望遠鏡を高山に建設する。建設地の標高は 5000 m を超え大気圧は地上のおよそ半分しかなく、人間が継続的に作業するには極めて困難な環境である。このため通常は高山に登ることなく標高の低い基地からのリモート制御により観測を行なうことが必須となる。

地上光赤外線望遠鏡のリモート制御に関して天文学教育研究センターのグループは東京大学ビッグバン宇宙国際研究センター MAGNUM 望遠鏡の開発と運用を通じてその経験を蓄積している。同望遠鏡 (口径 2 m) はアメリカ合衆国ハワイ州マウイ島の標高約 3000 m のハレアカラ山頂にあり、TAO 建設予定地ほどは厳しい環境ではないが観測のための恒常的な滞在は望ましくない。そこで開発当初から無人リモート制御を目標に整備を進めており、さらに観測スケジューリングソフトウェアを整備することで無人自動観測を目標としている。すでに天文学教育研究センター三鷹キャンパスからのリモート監視・制御のもとで複数回の無人自動観測を行なっている。

もともと現代的な光赤外線望遠鏡はほぼ全てがコンピュータの制御下でありネットワークを通じてリモート観測を遂行するにあたっての障害はさほど大きいものではないが、リモート観測の実現にあたってはいくつか特別に考慮すべきことがあることは確かである。そこで MAGNUM 望遠鏡の経験をもとに以下にそれらを簡単にまとめる。なおここでは具体的な技術・方法には踏み込まず方針とすべき内容を列挙する。これはコンピュータ・ネットワーク技術の進歩が非常に速いため採用すべき適切な技術も当然変化していくためである。

まず気象条件の監視が極めて重要である。風雨から望遠鏡および観測装置を保護するために悪天候時には確実にエンクロージャを閉じなければならないが、地上観測では天候が変化し予測も難しいため常に気象条件を監視して対応する必要がある。このとき温湿度、風向風速や気圧、雨量など基本的な諸量のほかに雲量の測定が重要である。雲量監視装置はすでに MAGNUM 望遠鏡の運用にあたって実用化しており、これにより気象条件の悪化にも事前に余裕をもって対応できるようになっている。

ハードウェアの信頼性の確保は当然重要である。なかでもすべての機械のリモートでの制御のためには停電時の電力と通信回線の確保が重要となる。低温下における機械系や冷凍機冷却水の凍結防止や低大気圧下におけるハードディスクの耐久性、機器の冷却特性の低下など高山での運用において特別の注意が必要となるものもある。また安全対策のためにあらゆる望遠鏡や観測装置の状況把握と施設内の監視が必要である。

つぎに現代的な望遠鏡はもともとほとんどコンピュータ制御下にあるが、それをさらに押し進め望遠鏡や観測装置の「全て」の制御がコンピュータを通じて実行できるようにする必要がある。これには通常の観測制御のみならず観測準備や緊急時の対応、復旧

手順も含まれなければならない。

システムの信頼性の確保のためには機能を制限してでも信頼性の確保を優先し必要以上にシステムを複雑にしないことが重要である。ただ単体の信頼性の向上には限界もあるためネットワーク回線も含む重要部分はシステムを多重化し誤動作に備え、さらにシステムの異常監視システムを独立に機能させる必要がある。

6.7 限界等級

6.7.1 主なパラメータ

この計算で用いた望遠鏡の使用は表 6.7 の通りである。

以下、望遠鏡鏡面の反射率、大気の透過率、大気背景放射の条件に関して詳細に説明する。

6.7.2 望遠鏡鏡面の反射率

望遠鏡鏡面は銀蒸着を施すと仮定し、反射率は理科年表の値を用いた。反射率のプロットを図 6.13 中段に示す。

パラメータ		可視 ($< 1\mu m$)	近赤外 ($1 \sim 10\mu m$)	中間赤外 ($10\mu m <$)	単位
主鏡口径	D	6.5 (TAO)	8.2 (Subaru)	8.1 (VLT)	(m)
鏡面反射率	ϵ_{tel}		6.7.2 節参照		
鏡面数	n_{mirror}		2		
大気透過率	ϵ_{atm}		6.7.4 節参照		
大気温度	T_{atm}		255		(K)
大気放射率	e_{atm}		$= 1 - \epsilon_{atm}$		
望遠鏡温度	T_{tel}		270		(K)
望遠鏡放射率	e_{tel}		$= 1 - \epsilon_{tel}^{n_{mirror}}$		
観測装置効率	ϵ_{opt}		6.7.3 節参照		
大気背景放射	f_{BG}		6.7.5 節参照		
読出ノイズ	n_{read}	3	10	2000	($e^- s^{-1} pix^{-1}$ r.m.s.)
暗電流	i_{dark}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	($e^- s^{-1} pix^{-1}$)
ピクセルスケール	s_{pixel}		0.1		(" pix^{-1})
電荷容量	W_{pix}	1.5×10^5	2×10^5	2×10^7	($e^- pix^{-1}$)
最短積分時間	t_{min}	10	0.1	0.025	(s)

表 6.7: 限界等級計算に用いたパラメータ

6.7.3 観測装置の効率

観測装置の効率は、大きく (1) 検出器の量子効率、(2) 光学系の透過率、(3) 分光観測を行う場合は分光素子の透過率、に分けて考える。

検出器の量子効率

- 可視 ($\lambda < 0.9\mu\text{m}$) での CCD の効率は、EEV のカタログ値³を用いる。
- 近赤外線 ($0.9 < \lambda < 5\mu\text{m}$) のアレイ検出器は全波長帯域で 80%を超えるものが出て来ているので、80%とした。
- 中間赤外線 ($5\mu\text{m} < \lambda$) では、 $25\mu\text{m}$ 以下では Si:As を、 $25\mu\text{m}$ 以上では Si:Sb を使うと仮定し、値は SOFIA 計画の中間赤外カメラ FORCAST のページにある Si:As⁴と Si:Sb⁵の値を用いた。

光学系と分光素子の透過率

光学系、分光素子の透過率は表 6.8 のように仮定した。

これらすべて合わせた観測装置の透過率を図 6.13 の下段に示す。

6.7.4 大気の透過率

可視域

可視域での大気減光は主に大気中の分子とダストの散乱によるものと考えられる。そこで GEMINI の資料 (もとのデータは CFHT マニュアルなど) にあるマウナケア (4200

	可視	近赤外	中間赤外
光学系透過率	0.7	0.7	0.5
分光素子透過率	0.6	0.6	0.6

表 6.8: 観測装置の透過率

³<http://anela.mtk.nao.ac.jp/eev/eev.pdf>

⁴http://tnt.tn.cornell.edu/techmemos/Support_Docs/TM00_19/SiAs\%20DQE.prn

⁵http://tnt.tn.cornell.edu/techmemos/Support_Docs/TM00_19/SiSb\%20DQE.prn

m)における大気減光量のデータをもとに、各高度の大気圧によってスケーリングして各高度での大気透過率を推定する。

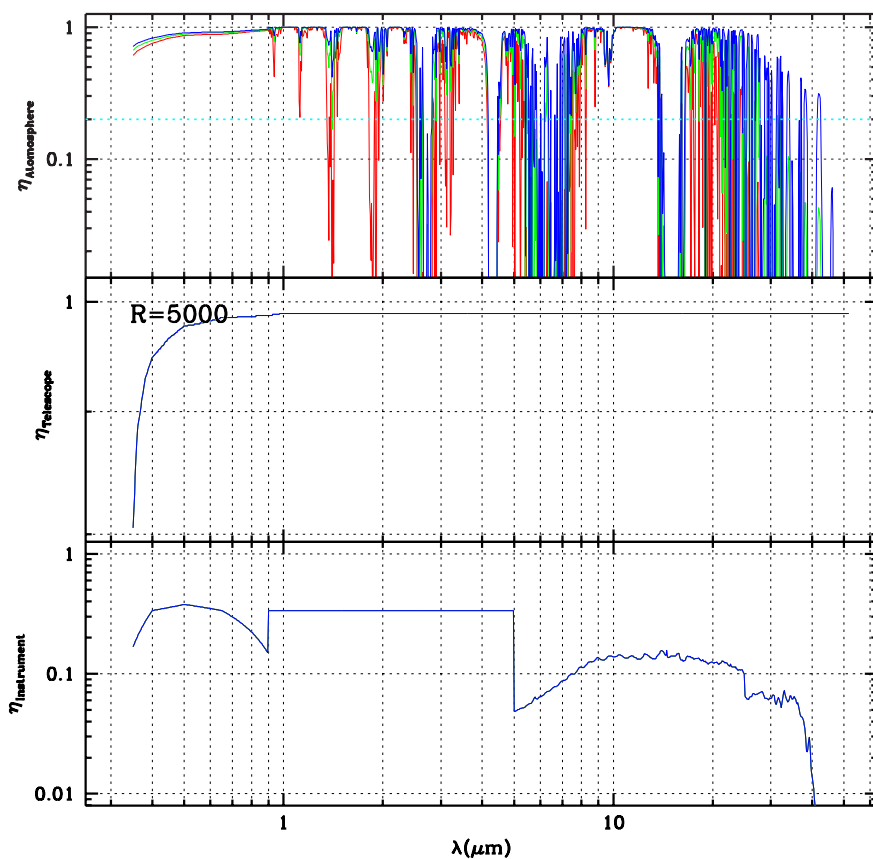


図 6.13: 限界等級計算に用いたさまざまな透過率曲線。(上) 大気の透過率。ただし、大気の透過率のデータは波長分解能 5000 に落して表示している。青線が 5600m (TAO)、緑線が 4200m (すばる)、赤線が 2600m (VLT) の標高に対応している。また、水色線は透過率が 20% のレベルを示している。(中) 望遠鏡鏡面の反射率 (2 回反射)。(下) 観測装置の透過率 (光学系、分散素子、検出器の効率を全て合わせたもの)。

赤外域

赤外域での大気透過率は大気モデルによる透過率を計算するソフトである ATRAN (Lord, S. D. 1992, NASA Technical Memor, 103957) によりを計算した。標高は 5600m、4200m (マウナケア相当)、2600m (VLT サイトのパラナル相当) の 3 通りを仮定している。注意事項として

- 天頂 ($Z = 0$)
- 計算波長域は $0.8\mu\text{m} \sim 1000 \mu\text{m}$
- ATRAN の仕様が波長分解能 $R \sim 10000$ (30 km/s) までとなっているので、計算は $R = 10000$ (波長によって R に ± 200 くらいの差がある) で行なった。
- ATRAN の標準大気モデルによれば 5600m=18373 フィートにおける水蒸気量は 1.1mm となったが、Chajnantor における水蒸気量の観測結果より水蒸気量上位 25% より 0.5mm を仮定した。
- ATRAN の標準大気モデルによれば 4200 m=13780 フィートにおける水蒸気量は 3.4 mm となったが、GEMINI 望遠鏡の資料で 4200m マウナケアでの水蒸気量上位 20% が 1.0mm であることから、1.0mm を仮定した。
- 2600m=8530 フィートの計算については ATRAN の標準大気モデルによる水蒸気量 6.0mm を採用。

計算結果を図 6.13 上段に示す。

6.7.5 背景放射

大気背景放射は夜光と熱放射の 2 種類があるとし、以下のように仮定した。

- 夜光はマウナケアでの測定結果⁶を用いる。ただし、 $2.25\mu\text{m}$ より長波長は大気熱放射だけで良いとして、0 とする。
- 大気からの熱放射は、温度 T_{atm} の黒体放射 $\times (1 - e_{\text{atm}})$ とした。
- 望遠鏡からの熱放射は、温度 T_{tel} の黒体放射 $\times (1 - e_{\text{atm}}^{\text{mirror}})$ とした。

⁶<http://www.gemini.edu/sciops/ObsProcess/obsConstraints/obsConstraints.html>

6.7.6 限界等級

以上の条件を元に、 $0.35 \sim 52\mu\text{m}$ に渡っての限界等級を積分時間は $10,000$ 秒、 $S/N = 10$ として TAO、すばる、VLT の各望遠鏡で、撮像 ($R = 5$)、狭帯域撮像 ($R = 100$)、中分散分光 ($R = 5000$) の観測モードについて算出した。

この際に以下の条件を課した。

- 星像サイズは可視 ($\lambda < 1\mu\text{m}$) で $0.''5$ 、赤外 ($\lambda > 1\mu\text{m}$) で $0.''4$ 。ただし、回折限界のサイズがこれよりも大きい場合は回折限界サイズを用いる。
- 検出アパーチャーのサイズは星像サイズの 2 倍とする。
- 単一フレームの積分時間 t_{single} は背景放射によるカウントを S_{BG} ($\text{e}^- \text{s}^{-1} \text{pix}^{-1}$) としたときに

$$t_{\text{single}} = W_{\text{pixel}}/S_{\text{BG}} \quad (6.1)$$

とする。ただし、

- $t_{\text{single}} > 3600\text{s}$ なら $t_{\text{single}} = 3600\text{s}$
- バックグラウンド・リミットに達する積分時間 t_{BGLP} を

$$t_{\text{BGLP}} = (4n_{\text{read}})^2/S_{\text{BG}} \quad (6.2)$$

とし、 $t_{\text{single}} > t_{\text{BGLP}}$ なら $t_{\text{single}} = t_{\text{BGLP}}$ とする。

さらに、以下の観測不能条件を課している。

- 最小積分時間 (t_{min}) の積分で背景放射によってピクセル容量 W_{pix} が溢れる場合は観測不能とする。
- 大気の透過率が $\epsilon < 0.2$ の波長帯は背景放射の変動が大きすぎるために観測不能とする。

最終的に算出された限界等級が図 6.14 ~ 6.16 である。

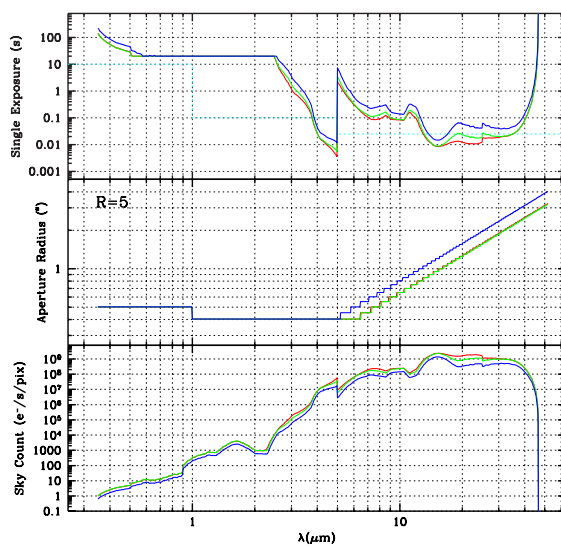
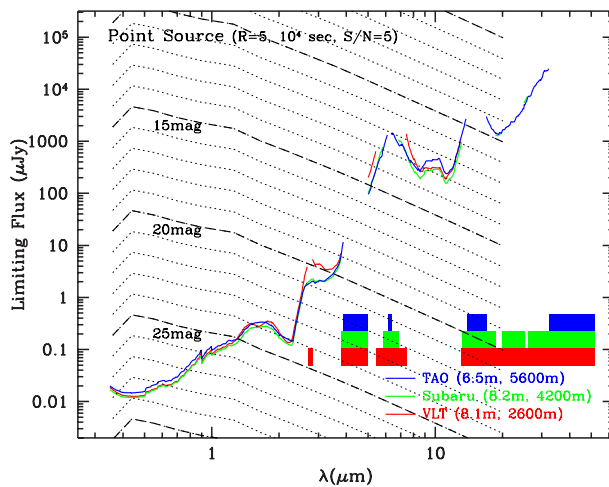


図 6.14: (上) 撮像時 ($R = 5$) の TAO (青線)、すばる (緑線)、VLT の限界等級 (赤線)。下四角は TAO (青)、すばる (緑)、VLT (赤) で観測不能な波長帯を示している。(下) 撮像時の単一積分時間、アパーチャーの半径 (星像サイズの直径)、ピクセルあたりの背景放射のカウント。水色の点線は各波長帯での最小積分時間を表している。

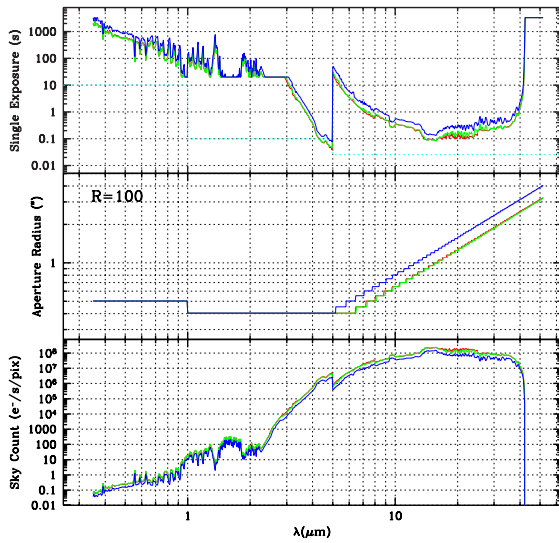
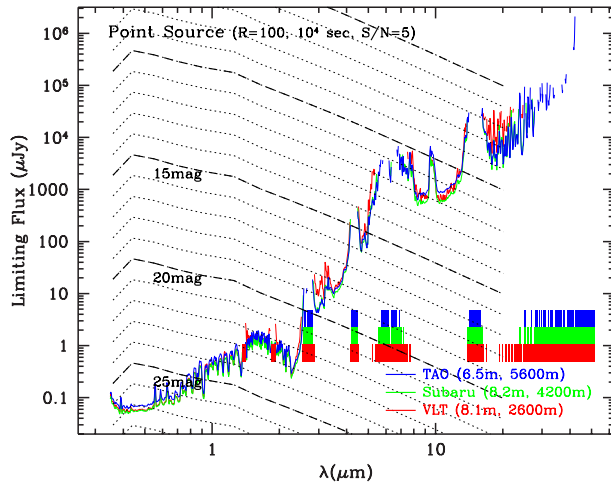


図 6.15: 狭帯域撮像時 ($R = 100$)。

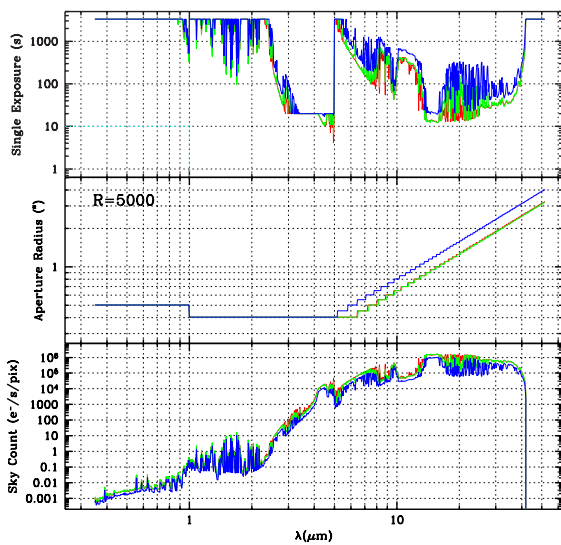
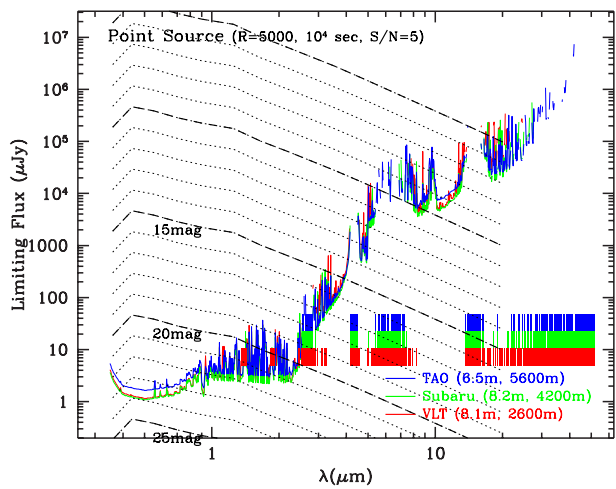


図 6.16: 分光時 ($R = 5000$) の TAO(青線)。

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 2048×2048 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 $1.37\mu\text{m}$ カットのダイクロイ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、ダイクロイックミラーにより 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

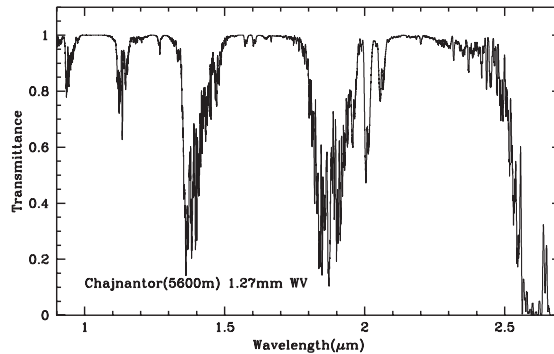


図 7.1: Chajnantor 山頂での近赤外域の大気の透過率。水蒸気量 1.27mm 、標高 5600m として ATRAN で計算したもの。

検出器	HAWAII2-RG × 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	ダイクロイックミラーにより $1.37\mu\text{m}$ 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 μm 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¹。

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。

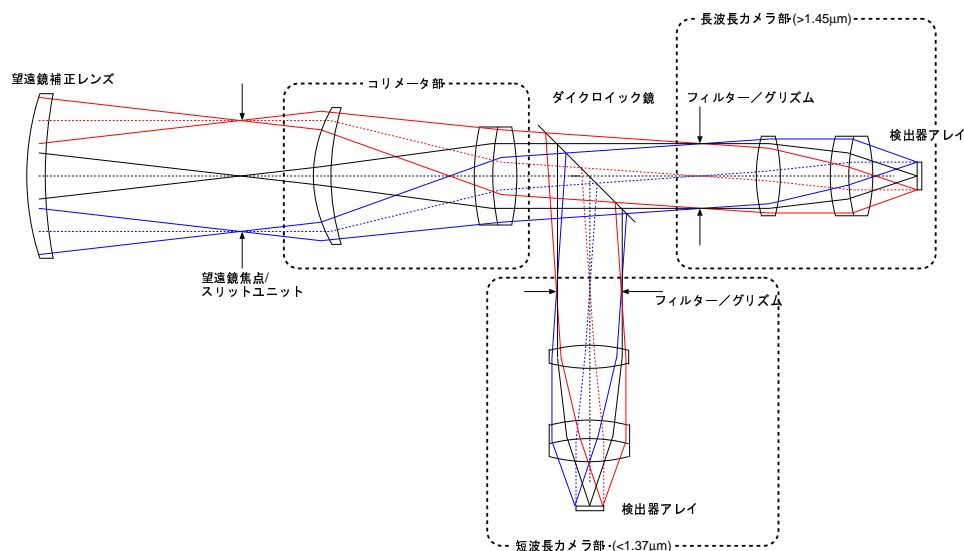


図 7.2: 近赤外 2 バンド同時撮像分光装置の光学レイアウトの概念図

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

表 7.2: 光学パラメータ諸元

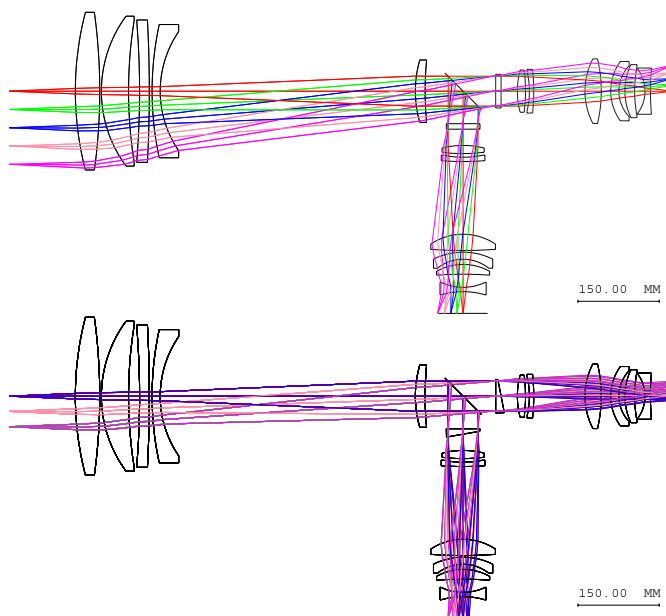


図 7.3: 撮像時 (上) と分光時 (下) の光学レイアウト

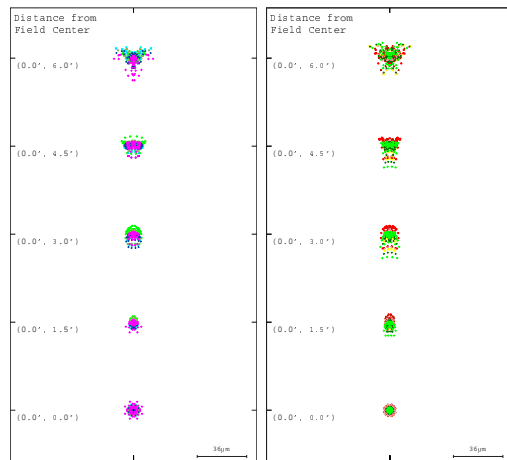


図 7.4: 撮像時のスポットダイアグラム。右が青、左が赤カメラ。

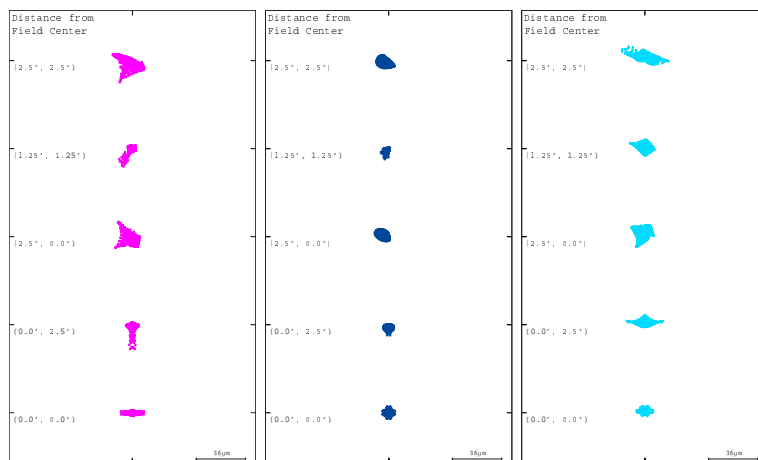


図 7.5: 青カメラで分光時のスポットダイアグラム。左から $0.7\mu\text{m}$ 、 $0.8\mu\text{m}$ 、 $0.95\mu\text{m}$ のとき。

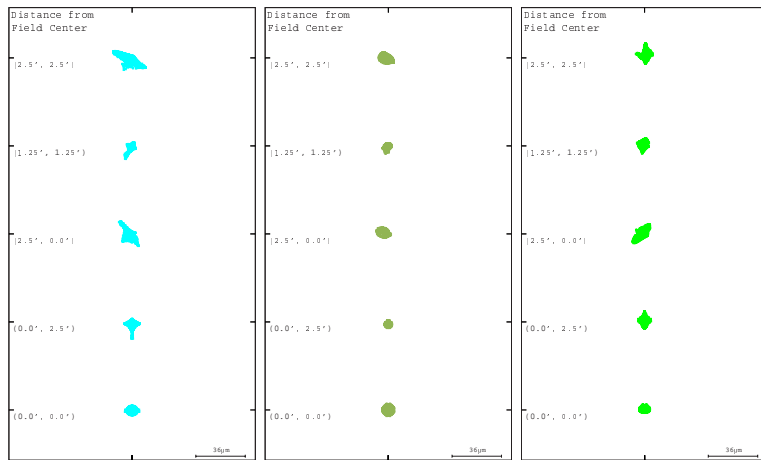


図 7.6: 青カメラで分光時のスポットダイアグラム。左から $1.1\mu\text{m}$ 、 $1.25\mu\text{m}$ 、 $1.4\mu\text{m}$ のとき。

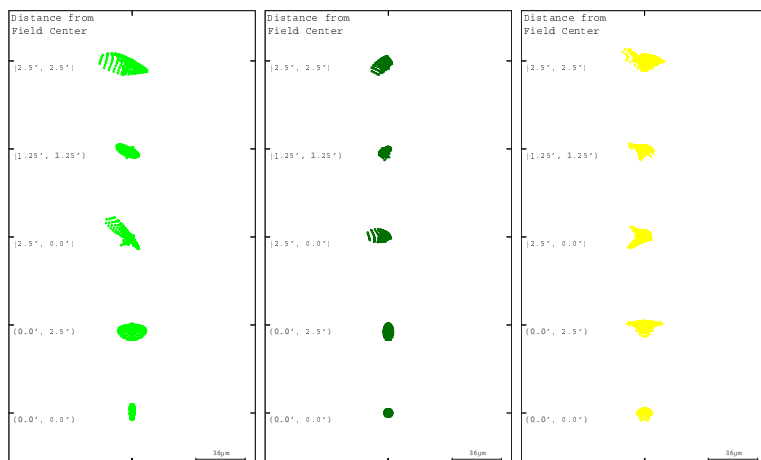


図 7.7: 赤カメラで分光時のスポットダイアグラム。左から $1.4\mu\text{m}$ 、 $1.6\mu\text{m}$ 、 $1.8\mu\text{m}$ のとき。

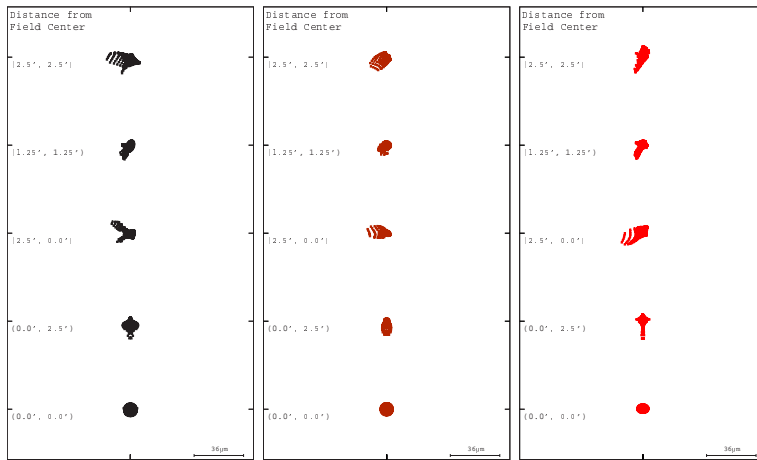


図 7.8: 赤カメラで分光時のスポットダイアグラム。左から $2.0\mu\text{m}$ 、 $2.2\mu\text{m}$ 、 $2.4\mu\text{m}$ のとき。

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、 30K 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、

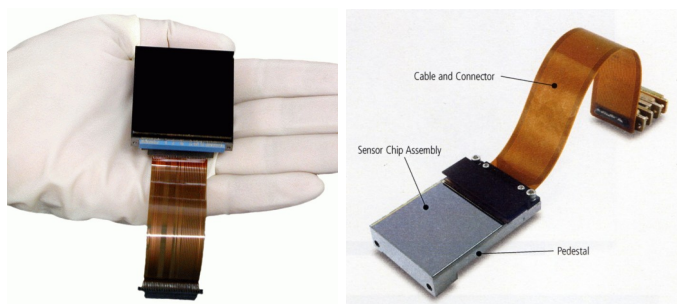


図 7.9: Rockwell Scientific 社の HAWAII2-RG (左) と Raytheon 社の VIRGO (右)

パラメータ	HAWAII2-RG	VIRGO
ピクセルサイズ	18 μm	20.0 μm
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 μm	0.85 – 2.5 μm
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²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。

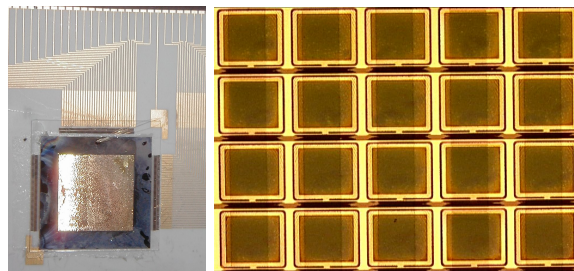


図 7.10: GSFC で開発中のマイクロシャッターアレイ (左) とその電子顕微鏡写真 (右)

²http://bram.gsfc.nasa.gov/ms_webpage/

パラメータ	仕様値
シャッター板サイズ	100 μm ×500 μm
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
シャッター駆動方式	静電駆動
使用波長帯	0.3 ~ 2.5 μm

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³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、シャッター素子が 500 μm ×100 μm でそれを 20 個並べたものを 1 ユニット (500 μm ×2000 μm) とする。

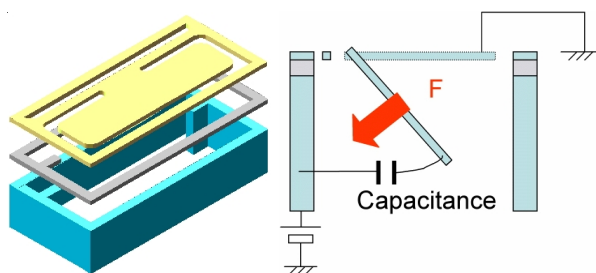


図 7.11: 東大天文センターと生産研が共同で開発しているマイクロシャッターアレイの 1 素子分の概念図 (左) と静電駆動のモデル図 (右)

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

最終的にこのユニットを 10×40 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 5×5 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、 4×8 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。

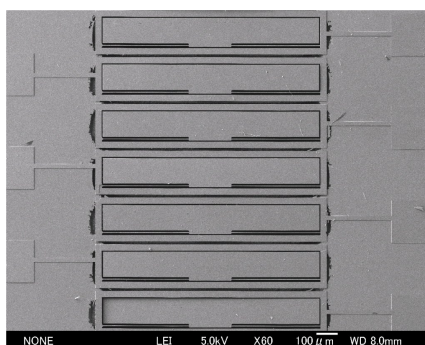


図 7.12: 生産研で製造されたマイクロシャッターアレイの試作品一号

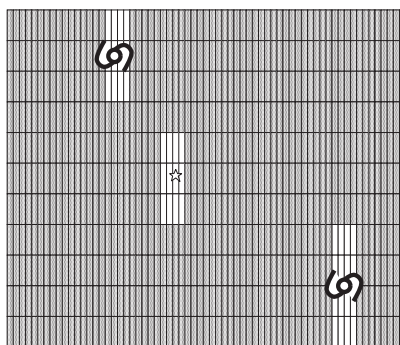


図 7.13: マイクロシャッターを用いたときの焦点面のイメージ。背景の個々の四角が $100\mu\text{m} \times 500\mu\text{m}$ のシャッター板に相当する。複数のシャッター板を同時に開くことによって (白抜き四角)、任意の位置にある天体の分光を可能とする。

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観測は、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観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 μm ）での透過率もさることながら、Q バンド（波長 16–26 μm ）での透過率が非常によい事が分かる。また、波長 28 μm 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観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 μm 帯の大気の窓と、30 μm 帯の大気の窓での観測に最適化した装置であり、地上赤外観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 μm 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。

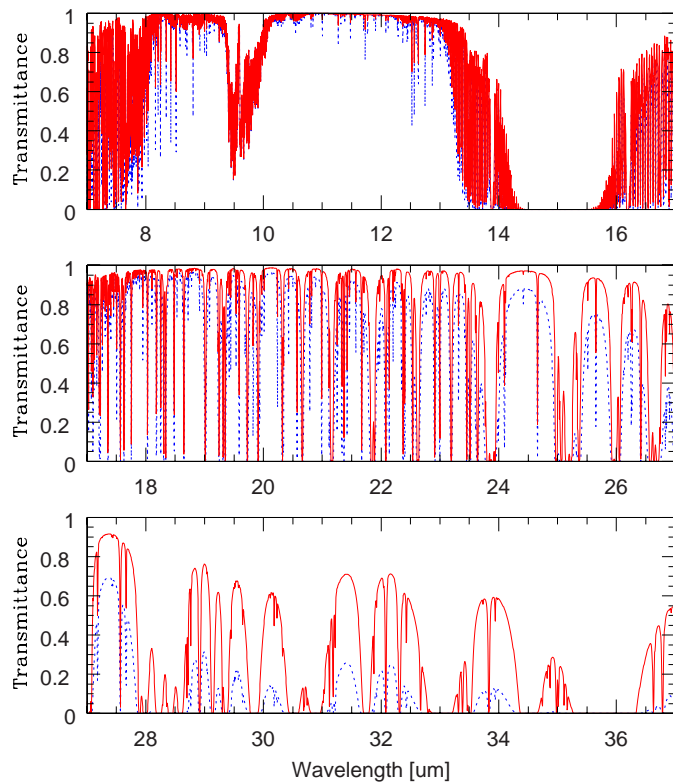


図 7.14: 大気透過率のモデル計算結果。赤が PWV=0.38mm、青が PWV=0.91mm であり、各々高度 5600m、4200m での水蒸気条件上位 10%に対応している。

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 μm 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 μm で最高感度の高解像度観測装置

20 μm 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⁴存在せず、南天の興味深い天体につい

⁴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 10mJy (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 H_2O (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⁵、 $30\mu\text{m}$ 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。

⁵2011 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 256×256 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 256×256 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)

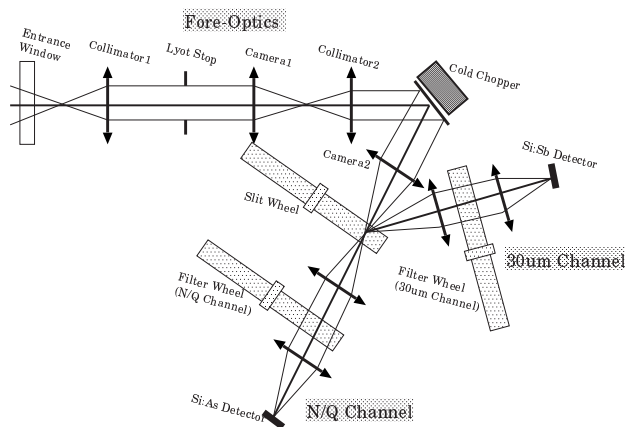


図 7.15: 中間赤外装置の光学系レイアウト

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

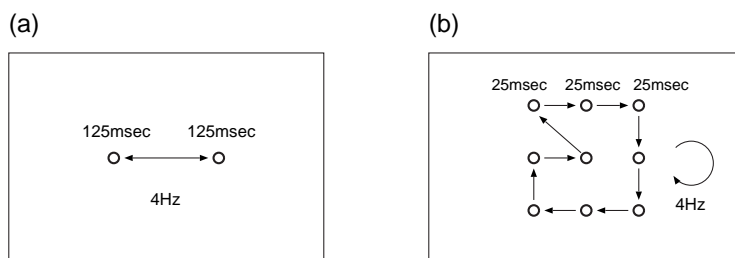


図 7.16: チョッピングによる星像の移動シーケンス。(a) 従来のチョッピング観測。星像は往復運動をする。(b) 多点チョッピング観測。星像は 9 点を順に移動する。

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するために、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 ~ 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（ノッディング）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

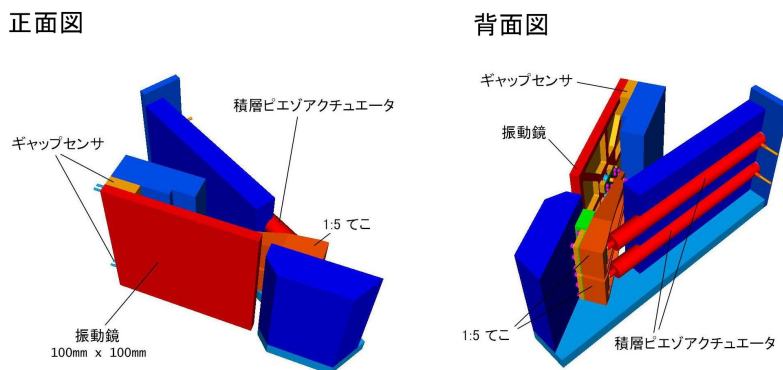


図 7.17: 冷却振動鏡の概観

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 ⁶
	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 μm 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 μm 以上に感度を持たないため、30 μm 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)⁶の波長依存性を示す。Si:Sb BIB 検出器は 25 μm 以下で Si:As BIB 検出器の半分以下の DQE しか持たないが、38 μm 付近の長波長まで感度が持続する。35 μm 以上で感度の低下が見られるため、37、38 μm 帯の観測に影響が出る可能性があるが、20 – 35 μm 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 μm 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 μm 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 μm	5 – 38 μm
ピクセル数	256 \times 256	256 \times 256
ピクセルサイズ	50 μm	50 μm
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)

⁶BIB 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 η の 1/2 乗に比例せず、ゆらぎ項 β で補正した Detective quantum efficiency (DQE) = η/β の 1/2 乗に比例する。従って、BIB の場合、感度計算には η のかわりに DQE を使う必要がある。

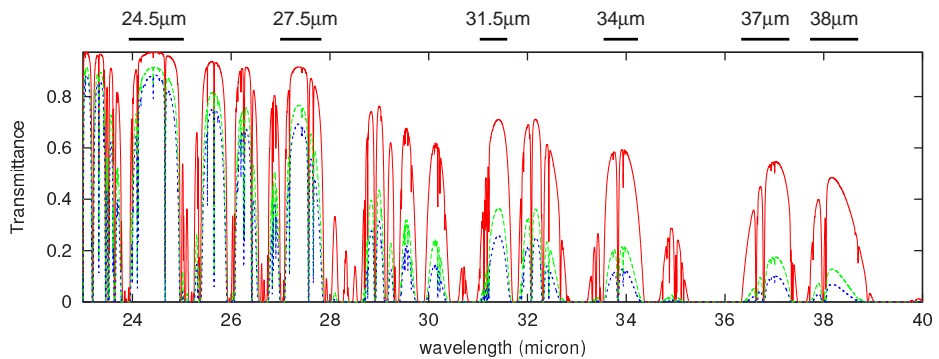


図 7.18: 23 – 40 μm 帯の大気透過率曲線。(赤) チャナントール (TAO サイト) の水蒸気量の少ない日、上位 10% のデータ; PWV = 0.38mm。(緑) チャナントール、上位 50% のデータ; PWV = 0.85mm。(青) ハワイ マウナケア、上位 10% のデータ; PWV = 0.91 %。上部の黒線は、チャナントールにおいて 30 μm 帯で比較的大気透過率の良い波長帯 (大気の窓) を示している。

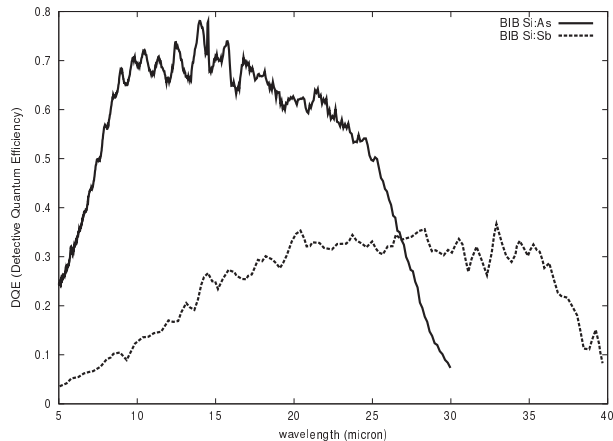


図 7.19: Boeing 256 \times 256 Si:As BIB および 256 \times 256 Si:Sb BIB の Detective Quantum Efficiency (DQE)。Boeing 社測定。SOFIA FORCAST チーム Web サイトより。両検出器は anti-reflection (A/R) コート処理を行なえば、この図よりも量子効率が向上しフリンジ強度が減少することが報告されている (Heter et al. 1998, SPIE 3354, 109)。

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 μm 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 μm 帯では 20 μm 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 μm 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。

256×256 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 $5\text{--}10\text{ Mbyte/sec}$ ($18\text{--}36\text{ Gbyte/hour}$) 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 2cm の KBr を使用した場合、その透過率は $\sim 60\%$ まで落ち込む^{7, 8}。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

⁷COMICS による実測値

⁸透過率 T は、反射率 R 、吸収係数 α 、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 μm 帯のフィルタの実績はあるが、30 μm 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 μm フィルタの開発を進めていく。

10–20 μm 帯と30 μm 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 μm と30 μm 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 μm を透過し、25–40 μm を反射する。17–24 μm と30–40 μm 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 μm 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。

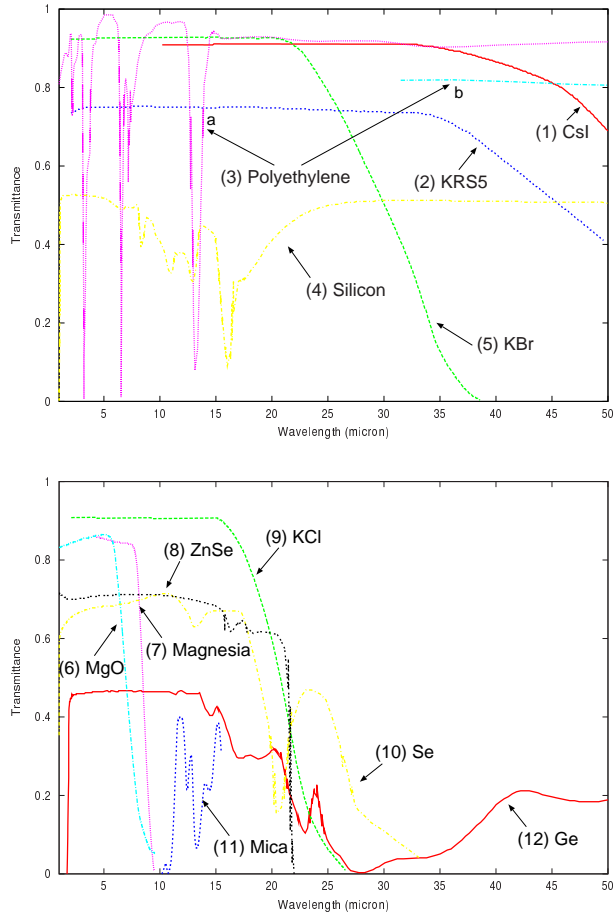


図 7.20: (上) 30 μm 帯を透過する物質の透過率。(下) 10–20 μm 帯を透過する物質の透過率。(1) CsI 5mm 厚。(2) KRS-5 2mm 厚。(3) ポリエチレン。a:0.1mm 厚。b:1.02mm 厚。(4) シリコン 2mm 厚。(5) KBr 5mm 厚。(6) MgO 5.5mm 厚。(7) マグネシア 10mm 厚。(8) ZnSe 6mm 厚。(9) KCl 10mm 厚。(10) Se 1.69mm 厚。(11) マイカ 8 μm 厚。(12) Ge 2mm 厚。(3) は基礎物性図表、それ以外は Handbook Of Infrared Optical 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 μ 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′ ϕ) 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 μm 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 μm 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 μm 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 μm 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 [μm]				備考	
	1	1.25	1.65	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 μm 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

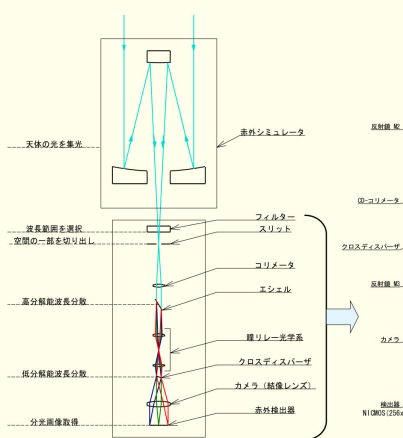


NICE 内部構造



NICE で得られた画像

NICEの光学系構成



NICEの内部構造

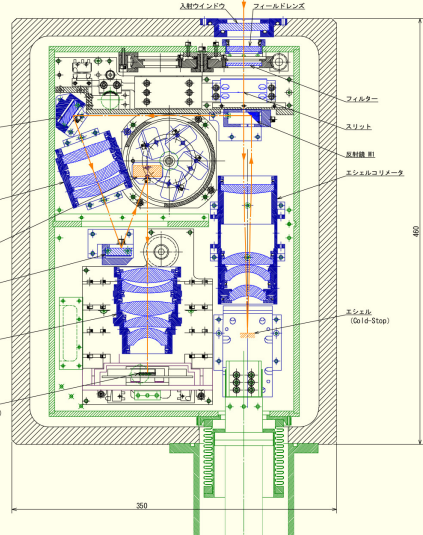


図 7.21: 赤外エシエル分光器の仕様など

第8章 施設およびサイト整備

チャナントール山は ALMA 建設地の平原（標高 4800–5000m）から 600m ほどそびえ立っている孤立峰である。その山頂を整備し、そこに TAO 望遠鏡を建設する。以下で、現在検討している山頂施設及びサイト整備の概要を示す。

8.1 道路拡張

現在、調査用の道路の建設を進めている。そのための地質調査を 2003 年 9 月に行った。標高 5100–5200m の地点（5ヶ所）で試掘を行い、地質のサンプルを採取した。試掘は 5ヶ所とも 50–60cm の深さで固い岩盤にぶつかった。したがって、道路を敷設するためには、ブルドーザーで土砂を削るという方法のみでは困難であることが判明した。図 8.1 に予定ルートの平面図を、表 8.1 に道路の仕様を示す。

この調査用道路は、四輪駆動のピックアップトラックでの調査用機材の搬入などのためのものであり、望遠鏡、ドーム、施設等の本建設には使えない。したがって、本計画の初期段階においてこの調査用道路を拡張（別ルートでの一部新設を含む）する必要がある。本道路の仕様については、まだ確定していないが、上記調査用道路に比べて、勾配をより緩やかに、道路幅を 8m 以上にするなどが必要であり、道路長も長くなると考えられる。なお、現地は午後から夜半にかけて強い西風が予想される（気象調査等を参照）。したがって、調査用道路についてもそうであるが、特に冬季の雪の影響を避けるために、道路はできるだけ北及び東面に敷設する。

最大勾配	12%
平均勾配	10%以下
道路幅員	4m
法面角度（岩盤部）	80 度
法面角度（その他の部分）	60 度
最小曲率半径	40m
道路長	6.4km
整地	土砂を敷きグレーダーで微調整後ローラー転圧仕上げ

表 8.1: 調査要道路仕様

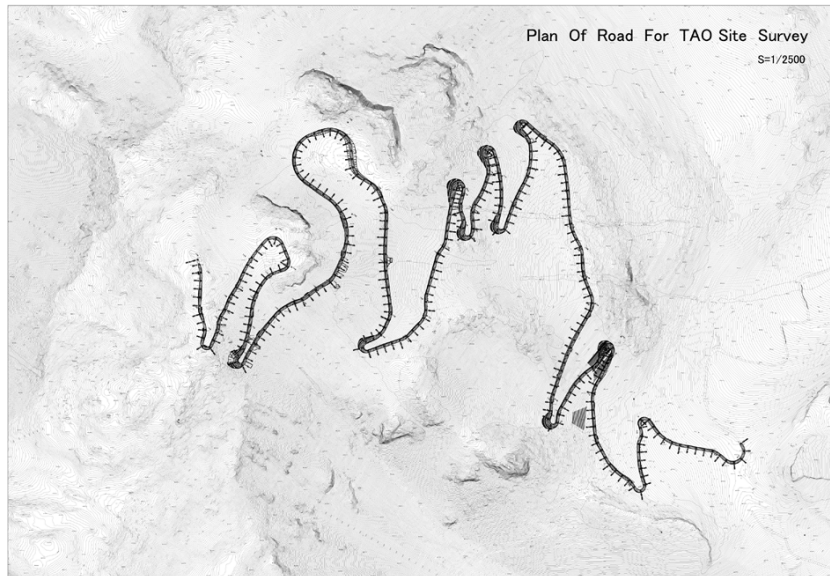


図 8.1: 調査用道路の予定ルート

8.2 サイト基礎

山頂のどの程度の面積を望遠鏡ドーム及び諸施設建設のために整地するかについては、施工の現実性も含めて、まだ十分な調査を行っていない。一つの案を図 8.2 に示す。

8.3 ドーム下部及び制御棟 (蒸着室等を含む)

8.4 ドーム上部

ドームについては望遠鏡の光学系・機械構造が決定していないので不定要素はあるが、口径 25m ドームを考えている。強風に対して強い構造であることを考慮する必要がある。一つの案を図 8.3 に示す。

8.5 発電水道施設

上記以外に、電気、水道、ネットワークなど観測所を維持するために必要不可欠な諸施設がある。眼下に ALMA があるとはいえ、できるだけ独立した運用のためには、自前

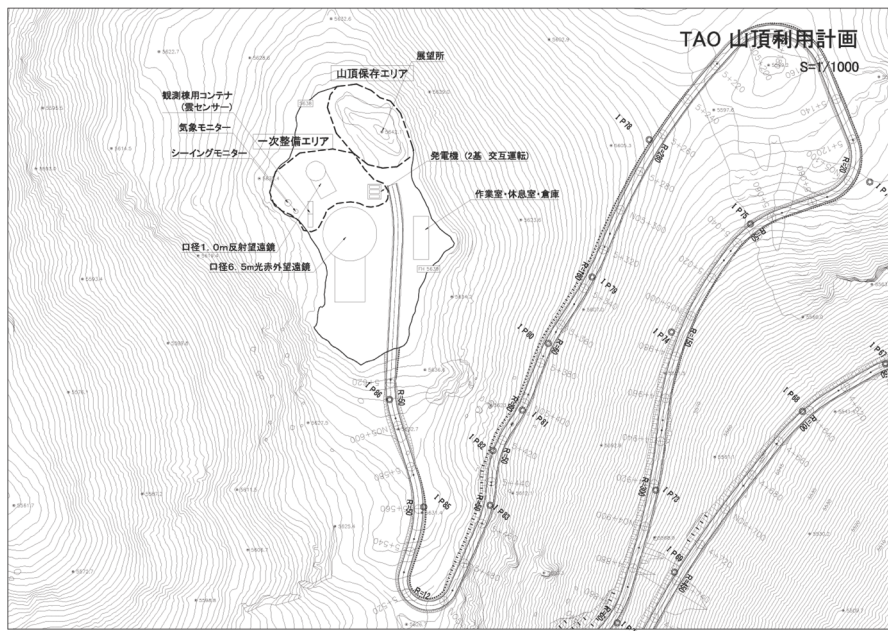


図 8.2: サイト配置案

での諸施設の保持が望ましい。

8.6 研究宿泊施設 (サンペドロ・デ・アタカマ付近)

上記の山頂施設の他に、サンペドロ・デ・アタカマ付近に研究宿泊施設が必要である。リモート観測が軌道に乗れば、夜間山頂に上がることはないが、ここから観測を監視する。さらに、天文台の維持等のためのスタッフの滞在スペース、望遠鏡・観測装置の保守のための実験室・倉庫、来訪者滞在のためのスペース等に使われる。

以上の諸施設の建設予算及び年次計画については、概算要求の項にまとめて示す。

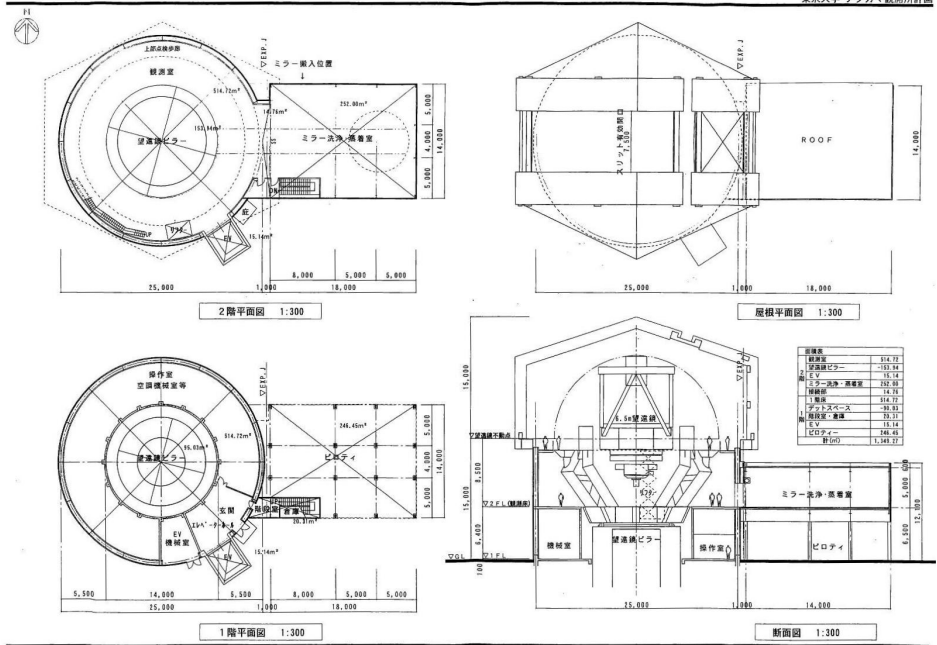


図 8.3: ドーム案

第9章 概算要求 [予算額、年次計画]

9.1 予算額

総費用 (総額約 77 億円) の内訳と年次計画を表 9.2 に示す。これは、マジェラン望遠鏡での実績を参考に、高地での作業を考慮して導出している。

9.2 年次計画

TAO の建設には 6 年間で予定している (表 9.1 に概要をまとめる)。現在、この 6 年計画に含まれる、サイト調査、光学系の検討、観測装置の検討をできる限り行っている。

作業	期間(年)	初年度	2年度	3年度	4年度	5年度	6年度
サイト調査	1.0	←→					
設計・解析	1.0	←→					
主鏡	4.5	←→	←→	←→	←→	←→	
Casting	2.5	←→	←→	←→			
Grinding	2.0		←→	←→	←→	←→	
架台	3.0		←→	←→	←→	←→	
構造物製作	1.5		←→	←→			
組み上げ(工場)	0.5				←→		
組み上げ(現地)	1.0				←→	←→	
ドーム	1.5		←→	←→	←→		
構造物製作	1.0		←→	←→			
組み上げ(現地)	0.5				←→		
サイト整備	0.5		←→				
光学系取り付け・テスト	0.5					←→	
総合テスト・試験観測	1.0						←→
試験観測用観測装置製作	2.0				←→	←→	
現地補助施設建設	1.5				←→	←→	
観測運用							←→
可視撮像分光装置製作	4.0		←→	←→	←→	←→	
近赤外撮像分光装置製作	4.0		←→	←→	←→	←→	
中間赤外撮像分光装置製作	3.0				←→	←→	←→

表 9.1: 年次計画表

区分	総額 千円	H17年度 千円	H18年度 千円	H19年度 千円	H20年度 千円	H21年度 千円	H22年度 千円
A. プロジェクトオフィス	300,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000	50,000
B. 設備							
B-1. 望遠鏡機械系	1,640,000	40,000	160,000	300,000	510,000	570,000	60,000
架台	900,000	40,000	160,000	200,000	300,000	200,000	
主鏡セル	400,000			100,000	150,000	150,000	
ガイダー	40,000				20,000	20,000	
機械系装置等(含 総合調整)	300,000				40,000	200,000	60,000
B-2. 望遠鏡光学系	1,900,000	200,000	300,000	500,000	500,000	350,000	50,000
主鏡	1,000,000	200,000	200,000	200,000	200,000	200,000	
副鏡	550,000		100,000	150,000	200,000	100,000	
第3鏡(含 補正光学系)	350,000			150,000	100,000	50,000	50,000
B-3. 望遠鏡制御系	60,000				30,000	30,000	
B-4. 蒸着プラント	300,000			50,000	150,000	100,000	
B-5. 観測装置	1,000,000		150,000	300,000	300,000	200,000	50,000
可視光撮像分光装置	300,000		50,000	100,000	100,000	50,000	
近赤外撮像分光装置	400,000		100,000	150,000	100,000	50,000	
中間赤外分光撮像装置	300,000			50,000	100,000	100,000	50,000
計	5,200,000	290,000	660,000	1,200,000	1,540,000	1,300,000	210,000
C. 施設およびサイト整備							
C-1. 道路拡張	300,000	300,000					
C-2. サイト基礎	200,000	200,000					
C-3. ドーム下部及び制御棟	1,100,000		600,000	500,000			
C-4. ドーム上部	400,000			400,000			
C-5. 発電水道施設	200,000		200,000				
C-6. 研究宿泊施設	300,000				300,000		
計	2,500,000	500,000	800,000	900,000	300,000	0	0

表 9.2: 望遠鏡と観測装置の総費用

第10章 運用体制

10.1 研究・運用に必要な人員

TAOを運用するためには、表10.1の人員が必要であると考えている。表10.1のTAO運用のために必要な人員は望遠鏡のリモート制御立ち上げ期を想定している。リモート制御が計画通りに機能すれば、現地の人員は見直せるかもしれない。

名称	人員	勤務地	雇用形態*	機能
台長・副台長	3**	チリ/三鷹	三鷹雇用	現地の統括と三鷹との調整
観測運用担当	3**	チリ/三鷹	三鷹雇用	観測の実施と観測計画の作成
望遠鏡担当	1	三鷹	三鷹雇用	望遠鏡の改良
電気系担当	1	三鷹	三鷹雇用	電気系の改良と観測装置の開発
機械系担当	1	三鷹	三鷹雇用	機械系の改良と観測装置の開発
ソフトウェア担当	1	三鷹	三鷹雇用	ソフトの改良と観測装置の開発
サイト主任	1	チリ	三鷹/チリ雇用	現場での統括
電気系管理者	1	チリ	三鷹/チリ雇用	現場での電気系の保守と改良
機械系管理者	1	チリ	三鷹/チリ雇用	現場での機械系の保守と改良
ソフト系管理者	1	チリ	三鷹/チリ雇用	現場でのソフト系の保守と改良
観測装置管理者	2	チリ	三鷹/チリ雇用	現場での観測装置の保守と改良
望遠鏡オペレータ	4	チリ	チリ雇用	望遠鏡の運転と観測補助
事務員	2	三鷹	三鷹雇用	事務、台長秘書など
	2	チリ	チリ雇用	
運転手	1	チリ	チリ雇用	車の運転、物品購入
警備員	3	チリ	チリ雇用	門番、夜間警備
清掃員	2	チリ	チリ雇用	観測所とサイトの清掃

* チリ雇用については、チリ大学（または CONICYT）などに現地法人（人材派遣会社のようなもの）を作ってもらい、そこを通す必要がある。これは、校費の支出方法と、直接の雇用関係 избежатьという2つの問題解決のためである。例えば、すばるでも、現地（日本人も含む）での雇用の際には、RCUH (Research Corporation of the University of Hawaii) を通している。

** 計6名のうち、2-3名がチリ常駐

表 10.1: 必要と予想される人員

10.2 TAO 天文台の運用・維持・管理

1. 組織

(a) 所長委員会 (週 1 回; 現地)

- メンバー: 所長 (または副所長) + Astronomer (1-2 名) + Engineer (1-2 名; 現地雇用)
場合によっては日本側スタッフを含めた TV 会議
- 討議項目: 大方針の決定、対外交渉、日本との連絡、観測計画の方針

(b) 運用委員会 (週 1 回; 現地)

- メンバー: 所長 (または副所長) + Astronomer (1-2 名) + Engineer (1-2 名; 現地雇用) + Technician (3-5 名; 現地雇用) + Officer (1-2 名; 現地雇用) + ポスドク、大学院生
- 討議項目: スケジュールの確認 (年間、月間、次週)、技術的問題点の議論とその対処

(c) 観測会議 (年数回; 三鷹)

- メンバー: 天文センター長 + 天文センタースタッフ + 全国の共同研究者 + 技術者 + ポスドク、大学院生
- 討議項目: 観測経過報告、観測提案の検討、研究結果の報告・検討

2. 年間スケジュール

(a) 観測時間

(b) 定期的技術時間

- 蒸着 (年 1 回程度)
- 光学性能確認 (年数回)
- 機械メンテ (年数回)

(c) 不定期技術時間

- 観測モード切替 (装置交換-主に PI 装置)
- 故障に対する対処
- 望遠鏡改修・改良
- 装置メンテ・開発

3. Operation の体制

- (a) 観測者 (原則として日本からのリモート観測)
- (b) 望遠鏡オペレーター (原則として山麓研究施設から監視; 1-2 名)
- (c) 技術者 (必要に応じてダイクルーとして数名が山頂に上がる)

観測時間の割り当て

ここに示したような従来の共同利用観測とは異なる哲学に基づく運用体制を考えているため、TAO 望遠鏡を利用する人々の所属研究機関別の具体的な時間配分比率を明示するのは困難が伴う。しかしながら、イメージを得るために強いて予想してみると、結果として、運用の主体となる東大と京大とで全体の半分を、地元であるチリには 10%を、残りを他の大学などで分けあうということになるのではと予想している。

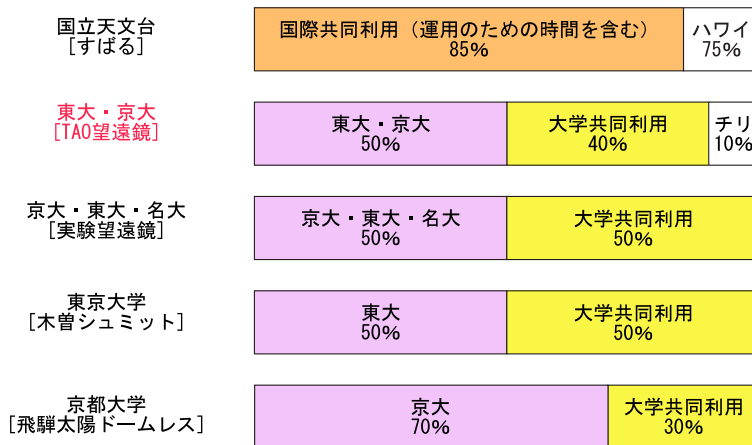


図 10.1: TAO 望遠鏡運用時の研究機関別時間配分のイメージと他の主な光赤外共同利用望遠鏡の時間配分



図 10.2: 暮れなずむアタカマ高原



図 10.3: 茜に染まるチャナントール山

第11章 他大学との協力関係

11.1 大学望遠鏡の必要性

< 大学での研究とは？ >

人類の認識の前進、環境の変化に対して着実な進展を目指すためには多様な研究スタイルが必要である。現在、日本の自然科学研究は、主に、大学、国立研究機関、さらには企業の研究所などで行われている。特に、国立大学と国立共同利用研究機関との関係は、その時々様々な要因に影響されてきた。しかしながら、普遍的に大学(のみ)が担うべき役割は存在する。その役割とは、長期的な展望、戦略を基に、研究の土台を作ることである。さらに、あえて言えば、予想のできない扉を開くことである。例えば、次の種類の研究を模索することは極めて重要であり、大学でのみ可能である。

- 研究の方法論を模索・確立すること。
- 長期の系統的な観測が必要な研究テーマを実行すること。
- 先端的な技術開発を、失敗をおそれず試みること。

これらを汎用型共同利用望遠鏡で行うことは難しく、効率も悪い。多くの失敗(それが予想だにできなかったような新しい扉を開く)、科学的・技術的な豊富な経験の蓄積が、自然に対する思索を真に深く広くする。その一方で、世界と対等に、火花を散らして競争できる次世代の超大型装置の建設へとつながる。

< 次世代を育てる大学院教育の場としての大学望遠鏡 >

研究者としての将来を決定づけるのは、本人の資質を別にすれば、20代の大学院時代の経験・環境である。現代天文学の最先端までの高度な理解・経験を、丁寧に身につけるには、失敗をおそれずに、自分の手を動かし、考えたことを何でも試してみることが必要である。十分な時間を確保して、観測天文学でこれを実行する場が、「大学天文台」である。さらに、レベルの高い研究者を育てるためには、単なる演習ではなく、実際に一流の成果をあげ、これを学位論文にまとめ上げ、達成感を実感できることが重要である。このような場で20代を過ごした若手が、明日の日本の科学技術を世界を舞台に発展させ

てくれる。このために我々の東京大学アタカマ天文台が担う役割は極めて大きい。そして、その役割を十二分に果たすためには、望遠鏡の検出能力が十分高く、アイデア次第では第一級のデータが取得できることが必要である。

<なぜ、今、東大か？>

以上で、日本の天文学において研究・教育の両面で大学が重要な位置を占めていることを述べたが、それでは、なぜ、東京大学なのか。まず、日本の国公立大学の中で宇宙科学関連の専攻を有する大学は5校あまりあるが、東京大学(天文学専攻と天文センターを合わせて)が最も規模が大きい。特に以下の3点の理由により、東京大学で本計画を進めることが最も適切である。

1. 望遠鏡建設・運営及び機器開発の実績：東京大学の天文グループは旧東京天文台時代を別にしても、中小規模の望遠鏡を国内外に建設・運用し、多くの実績を上げている。例をあげると、旧東京天文台から引き継いだ形ではあるが、木曾シュミット望遠鏡がある。近年、大型 CCD カメラ、赤外カメラなどを開発し、全国共同利用と共に、東大独自のプロジェクトを進めている。さらに、広視野電波望遠鏡を野辺山、チリに設置して、共同利用型大望遠鏡では決してできない、銀河系の広領域データを集積している。また、ハワイマウイ島にマグナム 2 m 望遠鏡を建設して、クウェーサーの大規模な観測を開始している。望遠鏡の建設・運用以外に、装置開発においても、すばる望遠鏡用を始めとし、地上・スペース両面において多くの開発実績を持つ。
2. 天文学教育研究センターの設立趣旨：旧東京天文台が国立天文台へと改組された際に設置された天文センターは、三鷹に設置され、観測・装置開発に重点を置いている。あえて言えば、将来「東京大学理学部天文台」として、上の項で述べたように、大学固有の観測施設を有し、基礎的研究と教育との両面において十二分の役割を果たすべく設置されたと考えている。設立から 10 有余年を経た現在、木曾シュミット望遠鏡を遙かに上回る規模の観測施設が必要不可欠である。我々は、今までの期間を本計画実行のための準備期間と位置づけ、多くの経験を蓄積してきた。
3. 多くの大学院生：東京大学大学院には毎年 20 名程度の大学院生が入学している。これは他大学に比べて圧倒的に多い。将来、全国の宇宙科学系大学が教育の面で協力することを視野に入れると、まずは質量共に圧倒している大学院生を有する東京大学で本計画を進めることは、極めて理にかなっている。我々の大きな前進が、日本全体の大学院教育の充実に貢献できると信じている。

本計画は、本来、天文センター及び天文学専攻が一体となって推進すべきものである。東京大学の天文グループは、天文センターと本郷の基盤講座である天文学専攻より成る。天文学専攻は理論的研究に重点を置き、基盤講座として大学院・学部教育にあたっている。この両者が役割分担をしつつも、東京大学天文グループとして緊密な協力を基に計画を推進するよう議論を重ねている。

11.2 国内の他大学などの研究機関との協力に関する基本方針

TAO プロジェクトと大学など国内の他研究機関との協力に関する基本方針は次の通りである。

- 1 TAO の建設維持管理は、原則として東大が行う。
- 2 TAO の運用は、原則として東大が行う。
- a 観測時間の割り当ては、機械的に何%かを他機関に割り当てることはしない。大型プロジェクトや野心的な萌芽的プロジェクトに重点をおく。
- 3 研究(天文学、装置開発、データ解析など)は、全国の研究者と共同研究を行う。
 - a 近い将来、TAO の主要研究テーマや観測装置開発計画を公表し、これらを中心とした共同研究を呼びかける。
 - b 観測データは、観測終了後できるだけ早い時期に Archive として公開する。Archive の運用を天文台などの他機関にまかせる可能性も考える。
- 4 教育に関しては、他大学の大学院生も積極的に受け入れる。東大と他大学を合わせて博士論文を年間 10 篇生産するのが目標。

11.3 本計画を支持していただいている大学

2002年7月現在、以下のリストにある70の大学の研究者の方々からの賛同をいただいている。また、今後計画の進展に伴い様々な形での共同研究を行うことを希望する大学の方もおられ、いくつかの大学からは計画の推進にも協力を表明していただいている。

北海道大学理学部	法政大学工学部	大阪大学理学部
北海道教育大学函館校	立教大学理学部	大阪教育大学教育学部
北海学園大学工学部	専修大学法学部	大阪府立大学総合科学部
弘前大学理工学部	駒澤大学文学部	近畿大学理工学部
岩手大学人文社会科学部	東京商船大学商船学部	関西学院大学理工学部
東北大学理学部	青山学院大学理工学部	神戸大学大学院自然科学研究科
東北学院大学教養学部	日本大学理工学部	岡山理科大学総合情報学部
山形大学理学部	日本女子大学理学部	広島大学理学部
福島大学教育学部	國學院大学文学部	山口大学理学部
新潟大学理学部	杏林大学保健学部	下関市立大学経済学部
筑波大学物理学系	明治学院大学法学部	香川大学教育学部
千葉大学理学部	神奈川大学工学部	愛媛大学理学部
宇都宮大学	名古屋市立大学自然科学研究教育センター	九州大学理学部
群馬大学教育学部	愛知教育大学教育学部	福岡教育大学教育学部
埼玉大学理学部	岐阜大学工学部	大分大学教育福祉科学部
獨協大学外国語学部	和歌山大学教育学部	長崎大学教育学部
東京工業大学理学部	福井大学工学部	熊本大学理学部
東京学芸大学教育学部	京都大学理学部	熊本学園大学商学部
お茶の水女子大学理学部	京都大学工学部	九州東海大学工学部
一橋大学社会学部	京都大学基礎物理学研究所	宮崎大学工学部
電気通信大学電気通信学部	京都産業大学理学部	鹿児島大学理学部
東京都立大学理学部	京都薬科大学物理学教室	
東海大学総合教育センター	同志社大学理工学研究所	
上智大学理工学部	同志社女子大学生活科学部	
早稲田大学教育学部		

11.4 天文学研究連絡委員会

天文学研究連絡委員会から以下の支持を得ている。

11.4.1 天文研連特別議事録

2003年4月23日

日本学術会議 天文学研究連絡委員会 特別議事録

2003年4月23日

天文学研究連絡委員会委員長 池内 了

「大学における光赤外線観測天文学の研究基盤の強化について」

(はじめに)

第18期日本学術会議天文学研究連絡委員会は、いくつかの大学が相互の連携および国立天文台との協力のもとで立案・推進中の光赤外線望遠鏡計画全般に関し、数度にわたって審議した。その結果、わが国の天文学研究と科学教育におけるこれらの計画の重要性に鑑み、わが国の全天文学を代表する本委員会の総意として、以下の特別議事録を残すことを決定した。

記

(すばる望遠鏡と大学望遠鏡)

国立天文台がハワイに設置したすばる望遠鏡の優れた性能と観測成果は、現在世界的に高く評価されており、わが国のみならず国際的な天文学の推進に大きな役割を果たしつつある。しかしその一方、大学における天文学の観測施設や研究設備は、わが国では依然として遅れたまま強化されてこなかった。欧米では、それぞれの国で複数の大学が優れた望遠鏡を有し、国立施設の大望遠鏡と競いあるいは連携を図りつつ優れた教育や先進的開発研究を進めている状況と引き比べれば、それとの落差は大きいと言わざるを得ない。

(大学望遠鏡の重要性)

わが国における光学赤外線天文学の総合的な発展のためには、大学共同利用機関である国立天文台による中枢的大型望遠鏡の建設に加え、大学における特色ある望遠鏡・観測施設の充実による研究基盤の強化という、2本の柱が必要である。

大学における適切な望遠鏡・観測施設が存在は、新たな可能性を開く萌芽的研究、特色ある観測装置の開発、大学院学生の教育、すばる望遠鏡による優れた成果の創出にも、不可欠だからである。すばる望遠鏡はただ一つであるため観測時間をめぐり競争は極めて厳しく、これらの目的（大学院生の教育、萌芽的研究、観測装置の開発）に使用することは容易ではない。自然を探求する科学の推進には、最先端を開拓する高いピークと、それを支えつつ新たな方向や若い人材を育てる広い裾野の両方がなければならないことは、先に延べた欧米の例を見るまでもないであろう。裾野を形成する大学が、大学院教育や特色ある研究を進めるため独自の望遠鏡を持つことの重要性については、すでに1994年の日本学会会議天文学研究連絡委員会報告『21世紀の天文学長期計画』において深く検討され、強調されてきたところである。また2000年文部省学術審議会特定研究領域推進分科会宇宙科学部会報告『我が国における天文学研究の推進について』においても、同趣旨の勧告がなされている。

(状況改善の試み)

近年、各大学においては、天文学および関連分野の研究者が科学研究費補助金などの競争的資金や国際協力により、小型の特色ある望遠鏡による研究を進めるなど、状況を少しでも改善する具体的努力が積み重ねられてきた。その例としては、東大のハレアカラ2m望遠鏡による活動銀河核の可視赤外線長期モニター観測、名古屋大学の南アフリカ1.4m望遠鏡による大小マゼラン星雲、銀河中心部および星生成領域の赤外線探査がある。また広島大学は国立天文台から1.5m赤外シミュレータを移管してガンマ線バースト現象の観測を行う計画を推進し、名古屋大学と国立天文台は、中国と協力して2m級赤外線望遠鏡を中国適地に設置し、東アジア地域における天文学共同体制構築のステップとする計画を検討している。しかし、これらはあくまで競争的資金や自助努力の範囲にとどまるものであり、規模としても目的としても、大学の基盤を本格的に強化するものではなかった。

(基幹3大学による望遠鏡計画)

このような状況のなかで、現在、東北大学、東京大学、京都大学は、それぞれに特色ある本格的望遠鏡計画を立案し、概算要求によってその早期実現を図る体制を整えている。わが国の基幹大学が本格的かつ最新の望遠鏡施設を持つことは、すでに述べてきたように当該大学のみならずわが国の天文学にとっての宿願である。本委員会では、連携して光赤外線観測天文学の研究基盤の強化を進めようとしているこの三つの計画について、その意義と緊急性を審議した。

(東京大学の望遠鏡計画) 東京大学の6.5m望遠鏡計画は、国立天文台が推進中のアル

マ計画のサイトに近いチリの標高 5600 m 高地に、赤外線観測に最適化した望遠鏡を設置するものである。望遠鏡サイトとして世界最高の標高という好条件を利用して、高赤方偏移の天体を観測し、すばる望遠鏡や ALMA と連携して、宇宙初期の歴史の解明を目指す。

(京都大学の望遠鏡計画)

京都大学の 3.5 m 望遠鏡計画は、新技術による軽量望遠鏡を西日本で最高の観測サイトである国立天文台岡山天体物理観測所内に設置し、すばる望遠鏡や我が国の赤外線衛星 Astro-F との連携により、宇宙の突発現象の分光学的追求と星形成史の解明を目指す計画である。また、西日本の多くの大学と密に連携し、西日本における天文学の教育研究の拠点を形成する。

(東北大学の望遠鏡計画)

東北大学は、2 m 望遠鏡を福島県の好条件のサイトに設置し、近傍宇宙の暗黒物質の分布を明らかにする計画である。そのため国立天文台との共同開発による赤外線カメラを取り付け、広視野赤外線サーベイに力点を置いたプロジェクト指向の強い計画である。また東日本では最初の本格的望遠鏡施設として、地域の大学と連携し、東日本の天文学教育研究の拠点とする。

(基幹 3 大学の望遠鏡計画の評価)

これらの望遠鏡計画は、各大学独自の斬新な研究計画を目指すと同時に、望遠鏡のサイズ・機能からも、相補的なものとなっている。またすばる望遠鏡と密接に連携してそれぞれ特色ある探査的プロジェクトを強力に進めることを基本とし、すばる望遠鏡との相補性や、探査結果をもとにすばる望遠鏡を用いてより高度な観測成果を目指しているところも、優れた点である。さらに、地域性と大学間の連携を重視し、強力な教育拠点とすることで、次世代を担う人材の育成、および新たな可能性を開く機器の開発研究や萌芽的研究、技術力の育成等、大学の教育研究基盤の強化の要請に応えるものとして位置付けられている。

(国立天文台・大学間の協力)

これら 3 計画は、それぞれにサイト調査、望遠鏡設計と技術開発、観測装置の共同製作など、国立天文台との密接な協力のもとで進められている。また 3 大学相互の役割分担や相互協力についての協議・協力関係の構築も具体化しつつある。さらに、それぞれに地域・関連大学との協力体制を光学天文連絡会 (光天連) など広い研究者コミュニティを中心に組織しつつあり、法人化後の大学のあり方に新たな方向性を打ち出すものとしても評価される。

(結論)

東京、京都、東北3大学の望遠鏡計画は、すばる望遠鏡も含めて相互に不可欠な機能を補い合いつつ、わが国に切望されてきた大学の観測的基盤と天文学教育の強化を実現するものとなっている。同時に、すばる望遠鏡のより有効な利用と高い成果、大学間の新たな協力などを実現するものであると考えられる。すばる望遠鏡などの活躍で広がりつつある宇宙と自然への興味を受け止め、それぞれの大学の教育と研究上の特色を最大限に活かしてゆく道であろう。

以上の視点から、日本学術会議天文学研究連絡委員会は我国の天文学コミュニティの総意を代表して、これらの計画が順次、早期に実現することを強く望むものである。

2005年5月18日

日本学術会議 天文学研究連絡委員会 特別議事録

2005年5月18日

天文学研究連絡委員会委員長 池内 了

「大学における光赤外線観測天文学の推進について」

(はじめに)

第19期日本学術会議天文学研究連絡委員会は、東京大学と京都大学が相互の協力および国立天文台との連携のもとで立案・推進中の Tokyo Atacama Observatory 計画 (以下、TAO 計画)、及び次世代大型望遠鏡を展望した新技術実験望遠鏡計画を核とする光赤外線望遠鏡建設計画に関し、その意義と緊急性を審議した。その結果、わが国の天文学研究と科学教育におけるこの計画の重要性に鑑み、わが国の全天文学を代表する本委員会の総意として、下記の特別議事録を残すことを決定した。

記

(すばる望遠鏡と大学望遠鏡)

国立天文台がハワイに設置したすばる望遠鏡の優れた性能と観測成果は、現在世界的に高く評価されており、わが国のみならず国際的な天文学の推進に大きな役割を果たしつつある。大学共同利用機関である国立天文台は、わが国の大学研究者等に世界的に最先端の観測性能を有するすばる望遠鏡を共同利用装置として提供することで、わが国の天文学の推進に大きな寄与を果たしている。しかしその一方で、わが国の大学における天文学の観測施設や研究設備の強化は十分ではなく、特に人材育成の観点からもそれぞれの大学の特徴を生かした基盤的設備の充実が望まれる。欧米では、それぞれの国で複数の大学が優れた望遠鏡を有し、国立施設の大望遠鏡と競い、あるいは連携を図りつつ優れた教育や先進的開発研究を進めており、それらとの落差は大きい。

(大学望遠鏡の重要性)

わが国における光学赤外線天文学の総合的な発展のためには、大学共同利用機関である国立天文台による中枢的大型望遠鏡の建設に加え、大学における特色ある望遠鏡・観測施設の充実による研究基盤の強化という、2本の柱が必要である。大学における適切な望遠鏡・観測施設の有存在は、新たな可能性を開く萌芽的研究、特色

ある観測装置の開発、大学院学生の教育、すばる望遠鏡による優れた観測計画の創出にも、不可欠だからである。

自然を探求する科学の推進には、最先端を開拓する高いピークと、それを支えつつ新たな方向や若い人材を育てる広い裾野の両方が不可欠であることは、先に述べた欧米の例を見るまでもないであろう。大学が大学院教育や特色ある独自研究を進めるために固有の望遠鏡を持つことの重要性については、すでに1994年の日本学術会議天文学研究連絡委員会報告『21世紀の天文学長期計画』において深く検討され、強調されてきた。また2000年文部省学術審議会特定研究領域推進分科会宇宙科学部会報告『我が国における天文学研究の推進について』においても、同趣旨の勧告がなされている。

(大学望遠鏡の近年の状況)

近年、各大学においては、天文学および関連分野の研究者が科学研究費補助金などの競争的資金や国際協力により、小型の特色ある望遠鏡による研究を進めるなど、状況を少しずつ改善する具体的努力が積み重ねられてきた。その例としては、東京大学のハレアカラ2m望遠鏡による活動銀河核の可視赤外線長期モニター観測、名古屋大学の南アフリカ1.4m望遠鏡による大小マゼラン星雲・銀河中心部および星生成領域の赤外線探査がある。これらは競争的資金や自助努力の範囲で実現し、大学の基盤の強化に貢献してきた。しかし、さらに、国際的な天文学分野の最前線で活躍するすばる望遠鏡や、近い将来に完成するALMAとの連携のもとで、天文学の新しいフロンティアを拓き、かつその先頭に立つことを可能にする大学発信の本格的な望遠鏡計画の実現が是非とも必要である。

このような方向を目指す具体的な大学独自の計画として、地上の観測条件としては究極的な条件を有する南米チリのアタカマ高地に望遠鏡を設置するTAO計画が東京大学を中心として進められている。また、将来を見据えた新たな技術の展望を開くために、国内(岡山)設置の新しい概念の実験望遠鏡による研究開発の計画が京都大学を中心に進められている。これらの計画は当初はそれぞれの独自計画の推進が行われてきたが、全国の大学間の連携による共同研究的な枠組みをベースにした全体計画としてまとまりを持つようになってきた。

(東京大学と京都大学の望遠鏡計画の概要とその評価)

TAO計画は、国立天文台が推進中のALMA計画のサイトに近いチリの標高5600mの山頂に、赤外線観測に最適化した6.5m望遠鏡を設置するものである。望遠鏡サイトとして世界最高の標高という好条件を利して、高赤方偏移の天体を観測し、すばる望遠鏡やALMAと連携して、宇宙初期の歴史の解明を目指す。

この望遠鏡計画は、大学独自の斬新な研究計画を目指すと同時に、すばる望遠鏡と密接に連携してそれぞれ特色ある探査的プロジェクトを強力に進めることを基本とし、すばる望遠鏡との相補性や、探査結果をもとにすばる望遠鏡を用いてより高度な観測成果を目指しているところも、優れた点である。さらに、大学間の連携を重視し、強力な教育拠点とすることで、次世代を担う人材の育成、および新たな可能性を開く機器の開発研究や萌芽的研究、技術力の育成等、大学の教育研究基盤の強化の要請に応えるものとして位置付けられている。

さらに、京都大学を中心として、技術的な側面の研究開発に重点をおいた 3 m 望遠鏡を国立天文台岡山天体物理観測所のサイトに設置する。ここでは、次世代超大型望遠鏡への技術開発研究や機動性を生かした観測課題を追求する。とりわけ、研削による鏡面製作や分割鏡の新方式制御を目指し、国内産業とも密接なかかわりを持つ実験望遠鏡として、大学での教育や人材育成に貢献する。

(東京大学と京都大学の協力及び国立天文台と他大学との連携)

TAO 計画は、サイト調査、望遠鏡設計と技術開発、観測装置の共同製作など、東京大学と京都大学との協力に基づいて進められている。一方、京都大学が中心となって国立天文台岡山天体物理観測所・名古屋大学の関連研究室との連携で進めている 3 m 望遠鏡は、すばる望遠鏡・TAO 望遠鏡から次世代超大型望遠鏡構想へと繋いでいくものとして大変重要な役割を担う。

地上の大型観測装置計画としては、先にふれた文部省学術審議会の報告にあり、大学共同利用機関における共同利用装置として、アルマ計画の推進及び達成が最重要課題とされている所でありその認識はかわるものではないが、これらの拠点大学の観測装置の充実、人材養成の立場からも日本の天文学の発展を支える基盤となるものである。従って、これらの望遠鏡計画は、国立天文台との密接な協力のもとで進められるべきものであるとともに、大学独自の計画を実現する新しい枠組みのもとでの道筋をつくることも必要である。例えば、大学が中心となって企画立案する大型・中型計画の評価とその実施、また大学間の新しいタイプの共同研究・連携研究の実施などが進められるようなシステムが望まれる。

全国の関連大学との協力体制も光学赤外線天文学連絡会など広い研究者コミュニティを中心に組織しつつあり、法人化後の大学のあり方に新たな方向性を打ち出すものとしても評価される。

(結論)

東京大学と京都大学の密接な協力の基に進められている望遠鏡計画は、わが国に

切望されてきた大学の観測的基盤と天文学教育の強化を実現するものであると同時に、大学間の新たな協力などを実現するものであると考えられる。これらの実現はすばる望遠鏡などの活躍で広がりつつある宇宙と自然への興味をさらに拡大し、日本全体の大学の教育と研究上の特色を最大限に活かしてゆく道であろう。

以上の視点から、日本学術会議天文学研究連絡委員会はわが国の天文学コミュニティの総意を代表して、光赤外線天文学の領域において大学が最優先で推進すべきTAO計画及び新技術実験望遠鏡計画を核とした東京大学と京都大学の計画が早期に実現することを強く望むものである。

11.4.2 天文研連委員長談話

天文研連委員長談話

2003年9月20日

TAO計画について

日本学術会議天文学研究連絡委員会（以下、研連と略す）は、日本における天文学研究者のコミュニティーを代表する唯一の公的機関である。今期の研連においては、各大学における天文学研究の将来計画を重要議題として集中的な審議が続いている。中でも、東京大学理学研究科天文学研究教育センターと同天文学専攻が計画している TAO（東京大学アタカマ天文台）構想については、これまで研連において計画の紹介とともに複数回議論され、その計画の中身について委員の理解が得られており、東京大学における天文学研究施設を充実していくための重要な計画と認識されている。このような計画を積極的に推進していくことは、東京大学のみならず、日本の多くの大学の天文学研究推進にとっても重要と考え、今後、研連（及び委員長）として計画の推進にいっそうの努力を重ねる所存である。

日本学術会議天文学研究委員会

委員長 池内 了



図 11.1: 天文研連委員長談話

11.5 光学赤外線天文連絡会

光学赤外線天文連絡会から以下の支持を得ている。

11.5.1 運営委員会声明

2005年1月21日

光学赤外線天文連絡会 運営委員会声明

光学赤外線天文連絡会 運営委員会

< 声明主文 >

わが国の光赤外線天文学研究分野が、国内外の天文学研究の進歩・発展に対して将来にわたって一層の貢献をするために、東京大学及び京都大学双方の新望遠鏡建設を核とする計画の推進が必要である。すばる望遠鏡の成果を継承・発展させるためには本計画のすみやかな実現が強く望まれるものであり、当該大学はもとより、文部科学省、並びに関連研究者の一層の努力を要請する。

< 日本の光赤外地上観測天文学の現状 >

すばる望遠鏡から生み出される最新の研究成果は、わが国の光赤外線天文学が世界の一線に並び、あるいは世界をリードしていることを証明している。この望遠鏡は、日本の光学赤外線天文学研究者らの長年にわたる強い要請に応えて建設されたものであり、2000年度から始まった本格的観測によって先端的な研究成果が次々と生み出されている。われわれ光学赤外線天文学研究者にとって、8.2mの口径を持つすばる望遠鏡を用いて世界に誇れる科学的成果を達成することが、大きな喜びであると同時に重要な責務でもある。

一方、口径6mを越える大型望遠鏡がすでに全世界で13台稼動し、3台が建設中である。この事実は少数の大型望遠鏡だけでは学問的要請に十分応えられないことを如実に表している。わが国がすばる望遠鏡以外に口径2mを越える望遠鏡を持たないことは、すばる望遠鏡の成功に喜んでばかりはいられない基盤の弱さを示すものである。

他方で、すばる望遠鏡計画において、建設開始の数年以上前から、その成功の鍵となる新技術開発が進められていたことを忘れてはならない。次世代の大望遠鏡の成功の鍵は、建設開始以前の周到な技術開発と、次世代の研究を担う若手研究者の養成である。

< 基幹大学望遠鏡の必要性 >

国家的大計画を遂行する国立天文台などの大学共同利用機関と、これを支える各大学とは相補的な役割を担う。

国立天文台のすばる望遠鏡が大活躍する時代にあっては、一方において大学における観測天文学の教育研究の基盤の強化がきわめて重要である。大学は先端的なサイエンスの研究および独創的な新技術開発の核となること、また、それらを担う人材の育成を行うことが求められている。このことは既に1994年の天文学研究連絡委員会の報告書『21世紀に向けた天文学長期計画について』および、2000年12月の(旧)文部省学術審議会総会報告『我が国における天文学研究の推進について(報告)』の中で強調されている。

つまり、次代を担える若手研究者の養成、変化の激しい最先端研究への臨機応変の対応、将来の大望遠鏡のための基礎技術開発などは、各大学が担うべき使命である。これらが揃うことで当該分野の学術研究が総合的に発展できるのであって、大望遠鏡一つあれば済むというものではない。

< 提案されている大学望遠鏡計画 >

東京大学、京都大学がそれぞれ提案中の二つの望遠鏡計画は、上記のような理念の下で一体の計画としてとらえるべきものである。両望遠鏡はすばる望遠鏡やALMAとの比較では小規模の計画であり、国立天文台よりはむしろ、実力と体制を備えた基幹大学が担うべきものである。

東京大学の6.5m望遠鏡はその中核であり、天文学の最前線を切り拓こうとする野心的な計画である。未開拓であった波長帯や対象を開拓していく萌芽的研究や、大規模なサーベイ観測を行って人類の知的財産の一角を担う重要な成果を出すことをめざしている。超新星やクェーサーの大規模な近赤外分光サーベイによるダークエネルギーの詳細研究や、原始惑星系円盤の中間赤外線詳細撮像などはきわめて重要な成果をもたらすと期待される。建設予定サイトはチリ・アタカマの高度5600mの場所であり、赤外線観測にとって地上最高のサイトの一つであるとともに、ALMAとの連携観測が容易である。また高い空間分解能と赤外線観測性能を両立させるため、能動光学副鏡を装備するなどの工夫を行う。東京大学が望遠鏡本体の建設を行い、京都大学は観測装置の開発とサイト調査を分担する。さらに日本全国の研究者との共同研究を行うことで、様々な新しいアイデアを生かしながら活発な観測研究を行う計画である。

京都大学が提案する国内3m級望遠鏡はさらにその次の時代の発展を図るものである。このためには観測研究とともに技術開発研究が欠かせないが、上記6.5m望

遠鏡やすばるなどの大型望遠鏡は新技術開発に最適とはいえない。従って京都大学は世界最先端のユニークな技術開発を進めるために 3m 級望遠鏡を国内に設置する計画を提案する。目標は、研削による鏡面製作と分割鏡制御という革新的技術開発研究であり、国内産業との連携を強化しながら、将来の超大型望遠鏡や宇宙望遠鏡のための基礎開発となるであろう。また 6.5m 望遠鏡等に装着する観測装置の開発という役割も重要である。また国内に設置される大学望遠鏡という利点を生かした、機動性のある研究課題の展開、たとえばコンパクト天体の物理の解明、星間物質研究の新局面の開拓等でユニークな研究成果が期待される。京都大学を中心に、国立天文台岡山天体物理観測所、名古屋大学の関連研究グループが共同で望遠鏡建設を推進する。

< 国立天文台、将来の大型計画との関係 >

この基本計画の推進は、次世代のより高度な超大型国際望遠鏡の建設とそれによって展開されるサイエンスの基礎となり、日本の光学赤外線天文学の基盤を強化し、国立天文台を中心とした大きな計画に発展していくことが期待され、わが国の天文学研究の発展のためにきわめて重要なステップである。

付録A 外部評価委員会報告書

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻及び 同天文学教育研究センターに対する 外部評価委員会報告書

2002年(平成14年)3月

1. はじめに

本書は、東京大学大学院理学系研究科長、佐藤勝彦教授の要請を受けた下記のメンバーから成る外部評価委員会による、同理学部/理学系研究科の天文学専攻及び同天文学教育研究センターに関する評価報告書である。本委員会の委員は、いずれも佐藤勝彦研究科長より委嘱されたものであり、メンバーは以下の通りである：

奥田治之(委員長):	群馬県立ぐんま天文台副台長
Jeremy Mould(副委員長):	米国立光学天文台長
池内 了:	名古屋大学教授
海部宣男:	国立天文台長
Robert S. Stobie:	南アフリカ天文台長
Peter A. Strittmatter:	アリゾナ大学スチュアート天文台長。

本委員会の任務は、東京大学大学院理学系研究科天文学専攻及び天文学教育研究センターの教育、研究、組織に関する諸活動を評価し、将来における両研究機関の活動性の向上及び発展に向けて助言と勧告を与える事である。評価は、天文学専攻と天文学教育研究センターによって予め準備された「外部評価資料」と、口頭発表の聴取、並びに、施設の視察及び学生との面談に基づいて行った。

外部評価委員会の日程は以下の通りであった。

2001年(平成13年)12月12日(水) 於東京大学天文学専攻(東京本郷)

午前 外部評価委員会準備会議

発表聴取：一般的背景の概要

天文学専攻の組織と運用

天文学教育研究センターの組織と運用
教育プログラム

午後 発表聴取：天文学専攻に於ける研究
天文学専攻施設の視察

12月13日(木) 於東京大学天文学専攻(東京本郷)

午前 発表聴取：天文学教育研究センターに於ける研究

午後 学生との面談

発表聴取：天文学専攻と天文学教育研究センターの将来計画
外部評価委員会会議

12月14日(金) 於東京大学天文学教育研究センター(東京三鷹)

午前 まとめのための議論

午後 天文学教育研究センターと国立天文台の視察

報告書作成への外部評価委員会会議

外部評価委員会中間報告(口頭発表)

2. 評価概要とコメント

本委員会は、「外部評価資料」と委員会での口頭発表や補足説明の聴取並びに議論を通じて、日本の天文学の長く輝かしい歴史にふさわしい東京大学天文学グループによる数々の素晴らしい業績に強い感銘を受けた。以下に、本委員会の両組織に対する評価の纏めを記す。

2.1. 教育

天文学科・天文学専攻及び天文学教育研究センターは、優秀な学生を集め、国際的に一流のスタッフを擁して、学部学生、大学院生に対して優れた天文学教育を施すと共に、日本の若い天文学研究者を数多く輩出してきた。

E1. 学部教育

学部教育カリキュラムは、天文学と物理学を幅広く覆うように良く配慮されている。特に、天文学科学生にしっかりした基礎物理学の素養を培うという方針は、委員会として強く支持するものである。昨今、天文学が急速に進歩し、一般社会の天文学への関心も急速に膨らんでいるにも拘らず、天文学科学生定員が、過去50年もの間変更なく、一年当り僅か5人から7人に定められているという事実は驚きである。実際の入学者は、近年、定員のほぼ倍に増えてはいるが、公式の学生定員を増やすことが適切である。

E2. 大学院教育

大学院における教育課程は、物理学専攻、国立天文台、宇宙科学研究所の協力も受け、幅広い分野、新分野を覆うように良く配慮されている。これは、近代天文学が新しい物理学や技術革新と相まって進展して来た事を考えると、非常に重要な事である。学生との面談において、学部天文学科で既習した内容の講義の幾つかが大学院課程でも基礎的の科目として開講されているという指摘がなされたが、これは、学生による講義評価システムを導入することで避けられるであろう。

本委員会は、大学院学生が早い時点から研究プロジェクトに参加し、多くの学生が期限内に修士課程、博士課程を修了していることに感心した。しかしながら、学生の研究テーマは、学生の強い意欲や独立心からというより、過去の教育で学生自身が良く知っている分野に囚われる傾向が見られ、この点が多少気掛かりである。また、海外の研究者や研究所を訪れたり、他国でポスドクの地位や職を得ようとする等の国際的な機会を活用しようという意識が、学生には乏しいように見受けられる。

講義カリキュラムが充実したものであるのに比べて、実験的訓練の密度は、やや低い。学生実験室の視察からは、学生実験の内容は比較的単純で受動的なものが多くという印象を受けた。装置の設計やハードウェアの開発など、もっと主体的な実験が取り入れられることが望ましい。

2.2. 研究

天文学専攻と天文学教育研究センターで行なわれている主要な研究活動は、以下の分野に大別される：

- R1. 銀河天文学と宇宙論
- R2. 恒星物理学
- R3. 太陽物理学
- R4. 電波天文学
- R5. スペース天文学

本委員会は、どの研究グループも非常に活発に研究活動を行っており、しかも各分野の最先端の問題に取り組んでいることに深い感銘を受けた。その多くは国際的基準から見ても質の高いものであり、幾つかは世界の天文学の最先端に位置している。生産性は一般に非常に高く、幾つかの個別分野では特に高い。以下に記すのは、上記各分野の研究グループ毎の、国際的に最も良く知られていると思われる研

究である。

R1. 銀河天文学と宇宙論

化学進化を取り入れた銀河進化の理論的研究は、銀河進化の基本モデルを提供してきた。これを背景にして、数々の観測的な研究がなされてきた。すばる望遠鏡の有力な観測装置である Suprime-Cam を開発し、非常に深く、統計的にも優れた銀河計数観測を成功裡に行ない、宇宙の幾何と銀河進化についての貴重な情報をもたらした。SDSS (Sloan Digital Sky Survey) やヨーロッパの ISO (Infrared Space Observatory) プロジェクトにも積極的に参加し、銀河進化の初期状態を探る新たな方法を切り開きつつある。

銀河活動核の可視と赤外での光度変化の時間差を測定するという手法は、活動銀河までの距離を測定するための独立で新しい方法になる可能性がある。ハワイ・マウイ島のハレアカラには既に口径 2m の望遠鏡が建設され運用が始まっている。宇宙論的パラメータに新たな制限をもたらす事が期待される。

鉄とマグネシウムの比 (Fe/Mg) を新しい銀河年齢の指標とするというアイデアが提案された。この手法の確立は、現在高い優先度で計画を進めている東京大学アタカマ天文台プロジェクトの主要目的である。

R2. 恒星物理学

超新星爆発と元素合成に関する膨大な一連の研究は国際的にこの分野をリードし続けている。中でも大きな成功を収めたのは、I型/II型超新星、特に SN1987A の理解を深めた事、種族 III の大質量星の元素合成、ガンマ線バーストに関連する極超新星への最近の応用等である。多波長観測と緊密に連携した研究が超新星理論の確立へと繋がった。

GRAPE は革命的な発明であり、多体問題を解明するための最も有力な計算機となった。GRAPE は世界最速の演算速度 (100Tflops) を達成しており、天文学のみならず他の科学分野での多体問題の研究に革命をもたらした。

低温度星の大気や褐色矮星についての理論的研究は、委員会では発表されなかったものの、広く知られているものである。

R3. 太陽物理学

日震学の研究グループは、日震学や星震学の手法を開発し、それらを用いて太陽や星の内部構造を解析する事に成功した。これにより、長年に亘る太陽ニュートリノ問題に対して、またニュートリノの物理に対して、貴重な知見が得られた。

宇宙磁場の起源や太陽活動の長期変動を解釈するユニークな理論が展開されている。しかしながら、その評価は難しく、その努力に見合う十分な国際的評価を受けていない。

R4. 電波天文学

銀河系及び他の銀河の大局構造を明らかにすることを目的として、野辺山ミリ波望遠鏡による CO 分子観測によって得た高精度の豊富な回転曲線データを用いて、様々な試みが行われた。これにより、銀河中心での質量集中度や銀河系内の暗黒物質に関する重要で明確な情報が得られている。小型サブミリ波望遠鏡による銀河系の北天及び南天での CO 分子のマッピング観測は、小さな装置といえども、適切に設計されそれが完璧に遂行されたあかつきには、いかに優れた成果を上げる事が出来るかを示す良いお手本である。小型サブミリ波望遠鏡の観測と機器開発における成功によって、次の国家的プロジェクトである ALMA 計画の強力な基盤が築かれたと言っても良い。

R5. スペース天文学

スペース天文学グループは、宇宙科学研究所が進めている宇宙空間での赤外ミッションの様々な計画に携わってきた。東京大学グループは、軽量で極低温に冷却された鏡や赤外分光器といった、中枢部分の開発に多大な貢献をしてきたが、これらはミッションの成功には欠かせない重要なものであった。これらを用いた星間物質の研究により、PAH (Poly Aromatic Hydrocarbon) などの新しいダスト成分についての貴重な情報が得られた。このグループは、将来の先進的な赤外ミッションのための革新的なハードウェアの開発も活発に行っている。

2.3 組織

東京大学天文学専攻は日本の天文学の教育及び研究において最も長い歴史を持ち、その発足は東京大学が創設された時である 1877 年 (明治 10 年) にまで遡る。天文学専攻は、1888 年 (明治 21 年) に東京大学の附置機関として創設された東京天文台と共に、日本における天文学の教育及び研究の中心としての機能を果たして来た。第二次世界大戦後、同専攻は 3 講座で新たなスタートを切り、東京天文台と緊密に協力して活動を続けてきた。1988 年 (昭和 63 年) に東京天文台が東京大学から離れて独立した研究機関となってからは、東京天文台から移管された木曾観測所を併い、3 つの研究グループから成る、天文学教育研究センターが東京大学理学部の付属機関として設置された。

東京大学は日本の国立大学の中で最高の名声を持ち、天文学科・天文学専攻では

優秀な学生を集め、傑出したスタッフの下に優れた教育が行われている。天文学科・天文学専攻は傑出した教育組織であり、優れた学生をより高度な教育課程へ送り、日本の天文学界へ優れた天文学者を輩出している。物理学科・物理学専攻との緊密な協力の下で行われている教育では、しっかりした基礎物理の素地が確保されている。天文学教育研究センターも天文学科・天文学専攻での教育に協力しており、とりわけ観測実習の機会を提供している。国立天文台及び宇宙科学研究所のスタッフの支援や協力も、天文学のより広い分野の最前線に学生を触れさせることに役立っている。

研究に関して言えば、天文学専攻及び天文学教育研究センターの活動は重要なものであり、国際的に見て非常に高く位置付けられる。天文学専攻及び天文学教育研究センターのスタッフは、国立天文台や宇宙科学研究所との共同研究を始め、国際共同プロジェクトにも積極的に関わってきている。本委員会は、多様な分野に及ぶ彼らの多大な業績に感銘を受け、日本そしてまた世界の天文学を牽引している彼らの実績を高く称賛するものである。実際、天文学専攻及び天文学教育研究センターは、正しく我国最高の教育研究条件に恵まれていると言える。

教育研究活動の水準を高く保つために、スタッフ人事は公募によって日本全国から慎重に選考されている。また、スタッフの人事異動は頻繁に行われているようには見えない。しかしながら、天文学教育研究センターの最近の事例を例外として、多くは近隣の機関との間の異動である。

ところで、教育需要が増え、研究活動が急速に拡大したにもかかわらず、また理学系研究科・理学部の他の専攻・学科が大きく拡大する中で、東京大学の天文学グループの大きさが50年以上も変わりが無いのは意外であり、現在のこの組織の小ささは、世界の天文学の急速な進歩とは不釣り合いである。

1974年(昭和49年)に設立された木曾観測所は、日本における恒星及び銀河天文学の進展に寄与してはいるものの、晴夜率の点では、木曾は世界の他の天文最適地に太刀打ち出来ない事を認識しなければならない。

天文学専攻と天文学教育研究センターとの間では、恐らく地理的に分かれていることが一因であろうが、意思疎通や協力は、これまでのところ十分に活発であったとは言い難い。

国際共同研究としては、様々な計画やプログラムを通して観測データのみならず人員や検出器の交換という形で、活発に行われてきた。しかしながら、国際共同研究が今なお小規模で狭い範囲に限られている事は少々残念である。多くのスタッフが海外の研究機関を訪れているが、その多くは短期的なものであり、常任スタッフ

として海外に定住した者はほとんどいない。他方、外国の研究者で日本の計画やプログラムに関与している者もほとんどいない。学生の交換もほとんどなく極めて限られている。このような状況は米国や欧州諸国ではまず考えられないことである。言語や地理的な障壁が高い事は理解出来るが、それでもなお、東京大学という日本のトップクラスの大学においてさえこのような状況である事は遺憾である。

2.4 将来計画

天文学専攻及び天文学教育研究センターは、両組織の教育研究環境に関する困難な状況を非常に深刻に考えている。この状況を改善するために、天文学専攻と天文学教育研究センターは共同で、以下の様な改革及び新計画を挙げている。

1. 学部の天文学教育の需要に応え、大学院へ優秀な学生を供給するために、学部学生の定員を5人から最低でも15人に増やすよう努力する。
2. 天文学専攻における実験・観測機能を強化する事を目的に、将来の天文学のための技術開発を行う実験天文学グループと、すばる、ASTRO-Fそして教育研究センターにおいて計画中の東京大学アカタマ天文台(TAO)など多くの大計画で発生する大量のデータを完全に活用するためのデータ処理グループの、二つの新しいグループの創設を図る。
3. 銀河進化や宇宙論といった観測的研究を更に盛んにする事を目的に、赤外線観測に最適化した大口径(6.5m)の望遠鏡(東京大学アカタマ天文台)を、赤外線観測に世界で最も適した、チリ・アカタマ高原の標高5000m以上の地に建設する。詳細な設計と運用計画については、天文学教育研究センターで広範に検討中である。
4. 電波天文学を更に広範に推進するために、国立天文台で進展中のALMA(Atacama Large Millimeter Array)計画への参加を図る。ASTE(Atacama Submillimeter Telescope Experiment)計画への協力やALMAで用いるサブミリ波検出器システムの開発への参加は、現在進行中である。
5. 木曾観測所を活発にするために、二つの新しい計画を提唱している。一つはドイツの位置天文衛星DIVA(Double Interferometer for Visual Astrometry)との共同プログラムであり、このプログラムの下でDIVAで観測された星の視線速度を南半球のUKシュミット望遠鏡と共同で測定するために、KOSMOS(Kiso Observatory Schmidt Multi Object Spectrograph)という名の多天体ファイバー分光器の製作を図る。もう一つは、銀河系及びM31のミラ型変光星の広範なサーベイ計画である。

本委員会は、これら全ての提案が妥当なものであり、また両組織の現状を改善して、急速に発展する天文学において両組織がこれからも指導的な立場を維持していくために、これらの提案は早急に実現されるべきものであると了解する。

3. 勧告事項

本委員会は、3日間の委員会における発表の聴取と議論を通して、天文学専攻及び天文学教育研究センターの過去の活動と現在の状況、更なる教育研究活動の向上を目指して取り組んでいる将来計画を理解した。また本委員会は、天文学専攻及び天文学教育研究センターのこれまでの多大な業績と、両組織が将来の更なる発展のために熱心な努力を払われていることに敬意を表する。

本委員会は、委員会における議論に基づき、天文学専攻及び天文学教育研究センターの現状の改善と将来計画の実現のために、以下の事項を勧告する。

3.1 教育体制

天文学科・天文学専攻には、学部学生及び大学院学生のための、広範囲にわたる優れた教育課程が用意されている。また、本委員会は、東京大学天文学専攻には、日本の天文学の発展のために優れた天文学者を輩出するという重要な責務がある事も理解する。しかしながら、次のような明らかに改善が必要である部分も見受けられる。

1. 若い学生諸君の天文学に対する強い学究意欲に応え、また大学院生の供給源として確保するために、学部学生の定員を大幅に、そして緊急に増やす必要がある。学部課程については、5人から15人へ増やすという案は適当である。
2. しかしながら、学生は学部、修士課程、博士課程へと移行する際に研究遂行の場所や研究分野を変えるよう奨励されるべきである。学部学生を他大学の大学院課程に進学させたり、他大学からの大学院学生の入学を推奨したりすることも重要である。
3. 物理学の素養を培うカリキュラムを、特に実験物理学に力点を置いて、強化すべきである。
4. 学生は、国際的な天文学の研究環境に適応するべく、英語で意思疎通を行う能力を身に付ける必要がある。
5. カリキュラムの改善に関しては、学部と大学院間の講義科目の重複を避け、特に大学院課程ではより内容の進んだ講義やセミナーを開講するなど、学部と大学院間の調整が必要である。このためには、学生からの講義に対する評価が役立つであろう。

6. 学生には、進路相談に応じて貰いたいと切実に思っているようであり、この要求に応えるべきである。

3.2 研究体制

本委員会は、天文学専攻及び天文学教育研究センターで行われている研究の質とその生産性の高さに強い印象を受けた。これらの研究の大部分は世界における天文学の最前線にある。しかしながら、将来の目標とすべきは、新しい分野の先導や開拓に挑むことである。そのために下記の方策を採ることを薦める。

1. 現代天文学の多くの分野は、物理学との相互作用の結果生まれたものである。物理学専攻で活発に行われている研究は、天文学専攻にとっても高い価値を持つ。両専攻が、より緊密に研究を行うことを薦める。
2. 天文学専攻に新しい血を入れ、且つ天文学研究を全国規模で高めるために、物理学専攻に見られるように、東京圏を超えて教官の流動性を高めるべきである。
3. 加えて、研究活動の国際的な交流（人的交流を含む）をより活発にする事が強く望まれる。
4. 大部分の研究は個人ベースで行なわれて来ており、その成果はそれぞれの努力に負うところとなっている。研究の活動性を高めると共に、研究のスケールを大きくするために、共同研究をより活発に行う事が望まれる。天文学専攻と天文学教育研究センターの間に協調関係を築き、共同研究を行うことで、両者の間から組織としての境界を無くすことが出来るであろう。
5. これまでの研究活動は、その一部は国立天文台と共同で行われて来たとは言え、伝統的に、理論、観測の研究ともに、専攻の枠組みの中に閉じていた。しかし、この事は天文学専攻が天文学の新しい動きをリードし難くして来た側面も持っているように思える。天文学教室は新しい実験グループを作することを提案しているが、これは研究活動の革新性を高める事に繋がるものであり、この提案を強く支持したい。こうした実験の分野の指導者となるべき人材は、物理学の分野に多い。人事の公募と選考を行う際には、単に分野を特定して選考するよりも、人物に基づいて行う方がしばしば良い結果が得られるという事に留意すべきであろう。

3.3 組織及び運営体制

組織の変革を行うことによって、天文学専攻及び天文学教育研究センターは、教育と研究において常に高い質と生産性を保ってきた。しかし、今日の天文学の急速な進展を考えると、両組織は組織運営の更なる強化が必要である。

1. 研究面でのみならず、学部と大学院教育の基礎を固めるためにも、物理学専攻との繋がりを維持し、更に強化すべきである。同様の事が、国立天文台及び宇宙科学研究所との繋がりについてとも言える。
2. これは国立大学に共通する問題ではあるが、支援スタッフ即ち事務職員と技術職員の不足は、研究設備の運営や、新しい研究活動を始める上での大きな制約となっている。本委員会は、この現状を大幅に改善する必要を強く訴えたい。
3. 研究と教育の国際化を進めるためには、スタッフに外国人研究者を加えること（長期やパーマネントを含め）が効果的である。
4. 東京大学アタカマ天文台計画を成功させるためには、天文学教室と天文学教育研究センターの間の協力関係を活発にすることが不可欠である。この計画を実現するため、如何なる組織形態が最良かを注意深く検討し評価すべきである。

3.4 将来計画

多数の新しい計画が天文学専攻と天文学教育研究センターから提案されている。その中で、東京大学アタカマ天文台の建設は最優先の課題である。他にも、規模は小さいが重要な提案が多くある。以下はそれらの提案に対するコメントであるが、東京大学アタカマ天文台計画については、より重点的に触れてある。

1. 東京大学アタカマ天文台は、非常に高所に設置するために近赤外の観測性能が高い点、及び、南天に設置するために「すばる望遠鏡」と相補的であり、且つ ALMA と強い協力関係を築ける点において、類例の無い観測施設である。従って、本委員会は、最前線の大学研究設備としての、そして日本の天文学の新しい財産としての東京大学アタカマ天文台の建設を強く支持する。東京大学アタカマ天文台からは、活動銀河やクエーサー年代学に留まらず、非常に多くの成果が生み出されるであろう。なお、東京大学アタカマ天文台については、以下の点に注意を払うべきである。
2. 東京大学アタカマ天文台の科学上の意義、効果については、さらに広い観点からの包括的な検討が必要であり、特に、すばる、ALMA、ASTRO-F などとの共同研究の有効性を高める様な努力をすべきであろう。
3. 他大学のグループとの協力は 東京大学アタカマ天文台計画を成功させるために不可欠であり、共同研究を企画すべきである。
4. 東京大学アタカマ天文台の計画実行と運営については、十分注意深く、より深い議論がなされるべきである。特に人的支援が計画の成功には不可欠であ

り、天文学教室と天文学教育研究センターの緊密な協力は欠かせない。両組織の再編成や融合が必要ではないかと考えられる。

5. 木曾観測所の活性化：様々な研究提案の中で、KOSMOS 計画は木曾シュミット望遠鏡の興味深い利用方法であると言える。しかしながら、木曾観測所の観測条件は一級ではないため、他の観測サイトとの競争力で劣る面がある。天文教育への貢献も含めて、将来計画の実行には慎重な検討が必要である。観測装置の開発に比重を移すことは、将来、東京大学アタカマ天文台等での将来の活動のために有効であろう。
6. ASTE 計画と ALMA 計画において国立天文台と共同研究を行う事を強く支持する。しかし、限られた人的資源の中での、現実的な企画・立案がなされるべきである。
7. 新しい実験グループを作ることは将来の装置開発を可能にする。物理学や工学の才能のある適切な人材を獲得する事が重要である。

以上、個々の研究グループが挙げた将来計画は、いずれも妥当なものであり賛同出来るものである。しかし、これらの研究計画は単に個人的な視点のみからではなく、天文学の将来に対する長期的な見通しに基づいて、より慎重に戦略を練り、検討されなければならない。

3.5 その他

本委員会は、学生が学習・研究活動を有効に進める上での問題点について、以下の二点を含む幾つかの指摘を行った。

1. 財政的支援の問題：米国やヨーロッパ諸国の大学院の場合と異なり、日本では国家による奨学金は給与ではなく貸与である。
2. 教官と学生との間の交流や他の研究機関との交流は、教育面での改善にとっても研究活動の活性化にとっても有益である。

4. 結論

我々外部評価委員は、本委員会が東京大学スタッフと学生の協力の下で評価を成功裡に終わらせることが出来た事を喜びたい。時間的に制約の多い日程であったにもかかわらず、発表や議論の交換は率直、効果的、且つ生産的に行なわれた。教官や学生との対話や議論は有意義であった。また、天文学専攻及び、比較的新しい組織である天文学教育研究センターが、かつての東京天文台である国立天文台、物理学専攻、宇宙科学研究所と協力して、日本の天文学の基礎を作り、且つそれを世界

的な研究を行なう拠点に発展させる上で中心的な貢献をしている事を、深く認識出来た。

天文学は最も古い科学であり、最も新しい科学でもある。天文学は急速に発展し、拡大している。その探求は宇宙の果て或いは宇宙最初の天体形成の時代にまで到達しつつある。一方で、地球や生命の起源にまで迫ろうともしている。こうした問題の探求は世界や人類に対する我々人類の思想形成に確実に影響を与えるであろう。この点において、天文学はあらゆる科学の中で最も重要であり価値のある科学の一つであると言える。

本委員会は、東京大学の天文学グループが、新しい天文学を開拓し、将来において世界の天文学をリードすることを確信し、グループの成功を心から期待している。同時に、この報告書が研究環境の改善や教育研究活動の着実な発展に役立つことを願い、本書で指摘・勧告した推進項目、改善項目が早急に実現される事を強く望む次第である。

最後に、本外部評価委員会は天文学専攻及び天文学教育研究センターのスタッフの方々に感謝の意を表したい。スタッフの方々が長時間を費やされて行われた外部評価の準備のお蔭で、評価を突りあるものにすることが出来た。また、大学院生諸君と天文学教育の様々な面について話をする機会が持てたのは有意義であった。ブルース A. ピーターソン博士が取って下さった会議メモは、この報告書を作成する上で大変有用であった。ここ博士に感謝の意を表する。

付録B 協定

我々は現在までに、本計画を進めるために他の研究機関と以下の協定を結んでいる。それらの概要と協定書の写しを掲載する。

図 B.1 学術交流に関する協定

チリ大学と。

図 B.2 天文学研究における科学協力に関する協定

チリ大学と。

図 B.3 学術交流に関する協定

アリゾナ大学と。協定を継続延長する合意書も交わされている。

東京大学とチリ大学
との間における
学術交流に関する協定書

東京大学総長とチリ大学学長は、両大学の協力がそれぞれの大学における研究その他の学術活動の発展を促進するものであるという認識に立ち、ここに学術交流協定を締結する。

第1条 東京大学とチリ大学は、学術研究上共通の関心を持つ分野において、以下の項目につき、適切な方法で交流を行うものとする。

- (1) 教官及び研究者の人物交流
- (2) 共同研究プロジェクトの実施
- (3) 講義やシンポジウムの開催
- (4) 情報及び学術出版物の交換

第2条 両大学は、上記の事項に関し、具体的な実施案をその都度作成する。その際、両大学は互惠平等の原則を守るものとする。

第3条 それぞれの大学は、交流計画を実現するための費用調達に最善の努力を尽くすものとする。

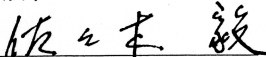
第4条 この協定は、当事者による下記の署名日の遅い方の日より5年間有効とする。有効期間は両当事者の合意で延長することができる。有効期間内といえども、各当事者は6カ月前の通知により本協定を解除することができる。

第5条 この協定は両大学の合意によって変更することができる。

第6条 この協定は日本語、スペイン語及び英語で二部ずつ作成され、そのいずれも正本とする。

本協定成立の証として両当事者は下記のそれぞれの日付で本協定に署名した。

東京大学


総長 佐々木 毅
2003年 1月 16日

チリ大学


学長 Luis Riveros
2003年 1月 16日

図 B.1: 東京大学とチリ大学間の学術交流に関する協定書

AGREEMENT ON ACADEMIC EXCHANGE FOR COOPERATION
BETWEEN
THE UNIVERSITY OF TOKYO AND THE UNIVERSITY OF CHILE

The President of the University of Tokyo and the Rector of the University of Chile, being convinced that cooperation between the two universities will promote the development of research and other academic activities in each university, hereby conclude this Agreement.

Article 1. The University of Tokyo and the University of Chile agree to promote cooperation between both universities in academic fields of mutual interest through appropriate means as follows:

1. Exchange of faculty members and research staff members
2. Conducting joint research projects
3. Holding lectures and symposia
4. Exchange of information and academic publications

Article 2. Both universities shall prepare a detailed program concerning specific steps and measures for implementing each of the items in Article 1. Both universities shall honor the principle of reciprocity in working out such a program.

Article 3. Each university shall make every effort to raise funds from various sources to make programs for cooperation feasible.

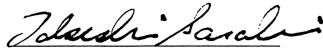
Article 4. This Agreement remains effective for a period of five years starting from the date of the latter of the two signatures by the parties hereto. Its period of validity may be extended by mutual agreement. Either party may, by giving six months written notice to the other party, terminate this Agreement during its period of validity.

Article 5. This Agreement may be amended by mutual agreement of both universities.

Article 6. This Agreement will be executed in duplicate, in Japanese, Spanish and English versions respectively, all of which shall be deemed as originals.

The parties hereto establish this Agreement by duly signing as of the respective dates written below.

The University of Tokyo

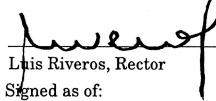


Takeshi Sasaki, President

Signed as of:

January 16, 2003

The University of Chile



Luis Riveros, Rector

Signed as of:

January 16, 2003

CONVENIO
de Intercambio Académico y de Cooperación
entre
la Universidad de Tokio y la Universidad de Chile.

El Presidente de la Universidad de Tokio y el Rector de la Universidad de Chile, convencidos que la cooperación entre ambas universidades promoverá el desarrollo de la investigación y otras actividades académicas en sus respectivas instituciones, suscriben en este acto el Convenio que sigue.

Artículo 1. La Universidad de Tokio y la Universidad de Chile convienen promover la cooperación entre ambas universidades en áreas académicas de mutuo interés a través de medios apropiados, como sigue:

1. Intercambio de profesores e investigadores;
2. Conducción conjunta en proyectos de investigación;
3. Celebración de conferencias y simposios, y
4. Intercambio de información y de publicaciones académicas.

Artículo 2. En cada caso específico, ambas universidades prepararán un programa detallado donde se describan los pasos y mecanismos necesarios para la implementación del Artículo 1. Ambas universidades honrarán el principio de reciprocidad en la elaboración de dicho programa.

Artículo 3. Cada universidad hará todos sus esfuerzos para obtener los recursos económicos de diversas fuentes de financiamiento para hacer factibles los programas.

Artículo 4. Este Convenio permanecerá en vigor por un período de cinco años a contar desde la última fecha de firma indicada más abajo por las partes. Su período de validez podrá ser extendido por acuerdo mutuo de las partes. Cualquiera de las partes podrá poner término a este Convenio durante el plazo de su vigencia dando aviso por escrito a la otra parte con seis meses de anticipación.

Artículo 5. Este Convenio podrá ser modificado por acuerdo mutuo de ambas universidades.

Artículo 6. Este Convenio será ejecutado en duplicado en versiones en Japonés, Español, e Inglés respectivamente, todos los cuales serán considerados como originales.

Las partes establecen este Convenio firmando en forma legal en las respectivas fechas escritas abajo.

Universidad de Tokio



Takeshi Sasaki, Presidente

Firmado el:
16 de Enero de 2003

Universidad de Chile



Luis Riveros, Rector

Firmado el:
16 de Enero de 2003

東京大学とチリ大学
との間で交わす天文学研究における
科学協力に関する合意書

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センターに運営責任を持つ、日本国の東京にある国立大学である東京大学の総長と、チリ国のサンチアゴにある公団であるチリ大学の学長は、ここに合意書を締結する。

東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センターが計画している、チリ共和国の領土に6.5m赤外線望遠鏡を設置する東京大学アタカマ天文台（以下T A O）の学術上の価値を認識し、協力して計画の実現にあたりたいチリ大学の意思を考慮し、以下の事項について合意した。

1. 東京大学とチリ大学は、光赤外天文学の科学的技術的進展と観測サイト調査において協力する。
2. T A Oの建設、設置、運用に必要となるすべての資材及び機材の輸入、及びT A O計画に参画するためにチリを訪れる研究者、エンジニア、技術者、従業員の所持品の輸入は、チリ財務省第15,172法律に基づいた優遇措置を受ける。
3. T A Oが設置された後、T A Oの観測時間の10%が毎年チリ为天文学に与えられる。チリ大学は、チリ天文学コミュニティの代理として、委員会を設け時間配分を決定する。東京大学大学院理学系研究科附属天文学教育研究センターが新しくチリ国内に設置する装置や望遠鏡についても同様な条件が課せられる。
4. 上の条項に基づき、T A Oの施設を使用する天文学研究者には、T A Oの施設の一般の使用者全てと同等な権利と制約が適応される。
5. この合意書は、双方の署名者の合意に基づいて修正することができる。各当事者は6カ月前に書面により相手側に通知することにより本合意書を解除することができる。

本合意書は三つの同等な原本（日本語、スペイン語、英語）に基づき両大学の正当な代表者によって実施される。双方の大学は、それぞれの言語で書かれた原本を一部ずつ保持することとする。

東京大学

佐々木 毅

総長 佐々木 毅

2003年 1月 16日

チリ大学

Luis Riveros

学長 Luis Riveros

2003年 1月 16日

図 B.2: 東京大学とチリ大学間で交わす天文学研究における科学協力に関する協定書

SCIENTIFIC COOPERATION AGREEMENT
in Astronomical Investigations
between
the University of Tokyo and the University of Chile

The President of the University of Tokyo, a national university based in Tokyo, Japan, which operates the Institute of Astronomy of the Graduate School of Science and the Rector of the University of Chile, a public corporation based in Santiago, Chile, hereby conclude this Agreement.

Considering the scientific importance of the plans of the Institute of Astronomy of the University of Tokyo to install the University of Tokyo Atacama Observatory (hereinafter, TAO), which will include a 6.5m infrared-optimized telescope, in the territory of the Republic of Chile, and the wish of the University of Chile to cooperate with the realization of said plans, the following has been agreed to.

FIRST - The University of Tokyo and the University of Chile will collaborate in scientific and technical development of optical and infrared astronomy and in testing of observing sites.

SECOND - The importation of all materials or implements which may be necessary for the construction, installation, and operation of the TAO, as well as the importation of the personal effects of scientists, engineers, technicians, and employees who may travel to Chile for this program, will be subject to the benefits granted by Chilean Ministry of Finance Law No. 15,172.

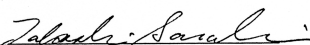
THIRD - After the TAO has been installed, ten percent of the observing time at the TAO will be set aside each year for Chilean astronomy. The University of Chile will be responsible for setting up a special Time Allocation Committee on behalf of the Chilean national community to administer this time. The same condition will apply to any other new instrument or telescope installed in Chile by the Institute of Astronomy of the University of Tokyo.

FOURTH - Astronomers using the facilities of the TAO for observations in accordance with the terms of the preceding paragraph, will have the same privileges and be subject to the same regulations applicable to all users of the facilities of the TAO in general.

FIFTH - This agreement can be amended by mutual agreement of the signatories. Either party may, by giving six months written notice to the other party, terminate this Agreement.

In witness of the above, this Agreement is to be executed in three identical copies (one in Japanese, one in Spanish, and one in English) by authorized representatives of each university and both parties will retain one copy of each of the Agreement.

The University of Tokyo



Takeshi Sasaki, President

Signed as of:

January 16, 2003

The University of Chile



Luis Riveros, Rector

Signed as of:

January 16, 2003

CONVENIO DE COLABORACION CIENTIFICA
en Investigaciones Astronómicas
entre
la Universidad de Tokio y la Universidad de Chile

Este Convenio se suscribe entre el Presidente de la Universidad de Tokio, universidad nacional con base en la ciudad de Tokio, Japón, la que opera el Instituto de Astronomía de la Escuela de Graduados en Ciencias, y el Rector de la Universidad de Chile, una corporación de derecho público con residencia en Santiago, Chile.

Considerando la importancia científica que tiene la proyectada instalación en el territorio de la República de Chile por el Instituto de Astronomía de la Universidad de Tokio del University of Tokyo Atacama Observatory (en adelante, TAO), dotado con un telescopio infra-rojo de 6.5 mts., y el interés de la Universidad de Chile de colaborar con el desarrollo de dicho proyecto, las partes acuerdan como sigue.

PRIMERO: La Universidad de Tokio y la Universidad de Chile colaborarán en el desarrollo científico y técnico de la astronomía óptica e infra-roja y en las pruebas que habrán de realizarse en los sitios de observación.

SEGUNDO: La importación de todos los materiales e implementos que fueren necesarios para la construcción, instalación y operación del TAO, así como la importación de los efectos personales de los científicos, ingenieros, técnicos y empleados que puedan viajar a Chile por este programa, quedarán sujetos a los beneficios que otorga la Ley N° 15.172 del Ministerio de Hacienda de Chile.

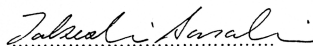
TERCERO: Luego de instalado el TAO, un diez por ciento del tiempo de observación en el TAO será reservado cada año para la astronomía chilena. A la Universidad de Chile le corresponderá crear un Comité especial de Distribución de Tiempo a nombre de la comunidad nacional de Chile a fin de administrar este tiempo reservado. El mismo criterio se aplicará a cualquier otro nuevo instrumento o telescopio que fuere instalado en Chile por el Instituto de Astronomía de la Universidad de Tokio.

CUARTO: Los astrónomos que utilicen las instalaciones del TAO para observaciones conforme a los términos del párrafo precedente, tendrán los mismos privilegios y estarán sujetos a las mismas regulaciones aplicables a todos los usuarios de las instalaciones del TAO.

QUINTO: Este Convenio podrá ser modificado por acuerdo mutuo de los firmantes. Cada una de las partes podrá terminar este Convenio dando aviso escrito a la otra parte con seis meses de anticipación.

En testimonio de lo anterior, este Convenio se suscribe en tres ejemplares idénticos (uno en japonés, otro en español y otro en inglés), firmados por los representantes autorizados de cada universidad, quedando una copia en cada idioma en poder de cada una de las partes.

Universidad de Tokio

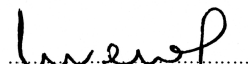


Takeshi Sasaki, Presidente

Firmado el:

16 de Enero de 2003

Universidad de Chile



Luis Riveros, Rector

Firmado el:

16 de Enero de 2003

☒ B.2: スペイン語版



東京大学とアリゾナ大学との間における 学術交流に関する協定書

東京大学総長とアリゾナ大学総長とは、両大学の協力がそれぞれの大学における研究その他の学術的活動の発展を促進するものであるとの認識に立ち、ここに学術交流協定を締結する。

第1条 東京大学とアリゾナ大学は、学術研究上共通の関心を持つ分野において、以下の項目につき、適切な方法で交流を行うものとする。

1. 教官、研究者及び大学院学生の交流
2. 共同研究等の実施
3. 講義及びシンポジウムの開催
4. 情報及び学術刊行物の交換

第2条 両大学は、上記の事項に関し、具体的な実施案をその都度作成する。その際、両大学は互恵平等の原則を守るものとする。

第3条 両大学は、交流計画を実現するための費用調達に最善の努力を尽くすものとする。本協定第2条に基づき作成された実施計画は、必要な資金が準備された後に効力を有するものとする。

第4条 この協定は、締結の日から5年間有効とするが、両大学の合意により更新することができる。

第5条 この協定は、両大学の合意により改定することができる。

この協定に関する折衝は、両大学の理学部が担当する。

この協定書は、和文及び英文により作成し、双方で各1通を保管する。

日付: 1987. 8. 4

東京大学総長

森 亘

森 亘

日付: 1987. 8. 11

アリゾナ大学総長

ヘンリー・コフラー

Henry C. Kofler

図 B.3: 東京大学とアリゾナ大学との間における学術交流に関する協定書

AGREEMENT ON ACADEMIC EXCHANGE FOR COOPERATION
BETWEEN
THE UNIVERSITY OF TOKYO AND THE UNIVERSITY OF ARIZONA

The President of the University of Tokyo and the President of the University of Arizona, being convinced that cooperation between the two Universities will promote the development of research and other academic activities in each University, hereby conclude this Agreement.

Article 1. The University of Tokyo and the University of Arizona agree to promote cooperation between both Universities in academic fields of mutual interest through appropriate means as follows:

1. Exchange of faculty members, research staff members, and graduate students
2. Conducting joint research projects and activities
3. Holding lectures and symposia
4. Exchange of information and academic publications

Article 2. In each specific case both Universities shall prepare a detailed program concerning specific steps and measures for implementing Article 1. Both Universities shall honor the principle of reciprocity in working out such a program.

Article 3. Each University shall make every effort to raise funds from various sources to make programs for cooperation feasible. Any program prepared under Article 2 will take effect only after funds have been appropriated for it.

Article 4. This Agreement will be effective from the date of signing for a period of five years. The period of its validity may be extended by agreement of both Universities.

Article 5. This Agreement may be amended by agreement of both Universities.

In preparing the programs of cooperation and putting them into effect, the Faculty of Science of the two Universities will act on behalf of each University.

In witness of the above, this Agreement is to be executed in two identical copies, one in Japanese and one in English, by authorized representatives of each University and both parties will retain one copy of each of the Agreement.

Date: Aug. 4, 1987

Date: Aug. 11, 1987

Wataru Mori

Wataru Mori
President
The University of Tokyo

Henry Koffler

Henry Koffler
President
The University of Arizona

K&K

図 B.3: 英語版



アリゾナ大学と東京大学との間の学术交流協定の更新に関する覚書

アリゾナ大学理事会と東京大学は、先に締結した協定第4条にもとづき、両大学間の協定に関する学术交流協定を1992年8月から1997年7月までの5年間にわたって延長することに合意した。

アリゾナ大学は、本覚書に付属する3項目の条項（利害の対立が生じた場合、人種や性別による差別の撤廃、予算配当がなされない場合における同大学の行為に関する規定）により、本協定が制約を受けることを表明した。これに対し、東京大学はアリゾナ大学の立場を了承した。

但し、両大学のいずれかの申し出により、本協定の有効期間中においても終結することができる。

日付: 7/29/93

日付: 1993年7月14日

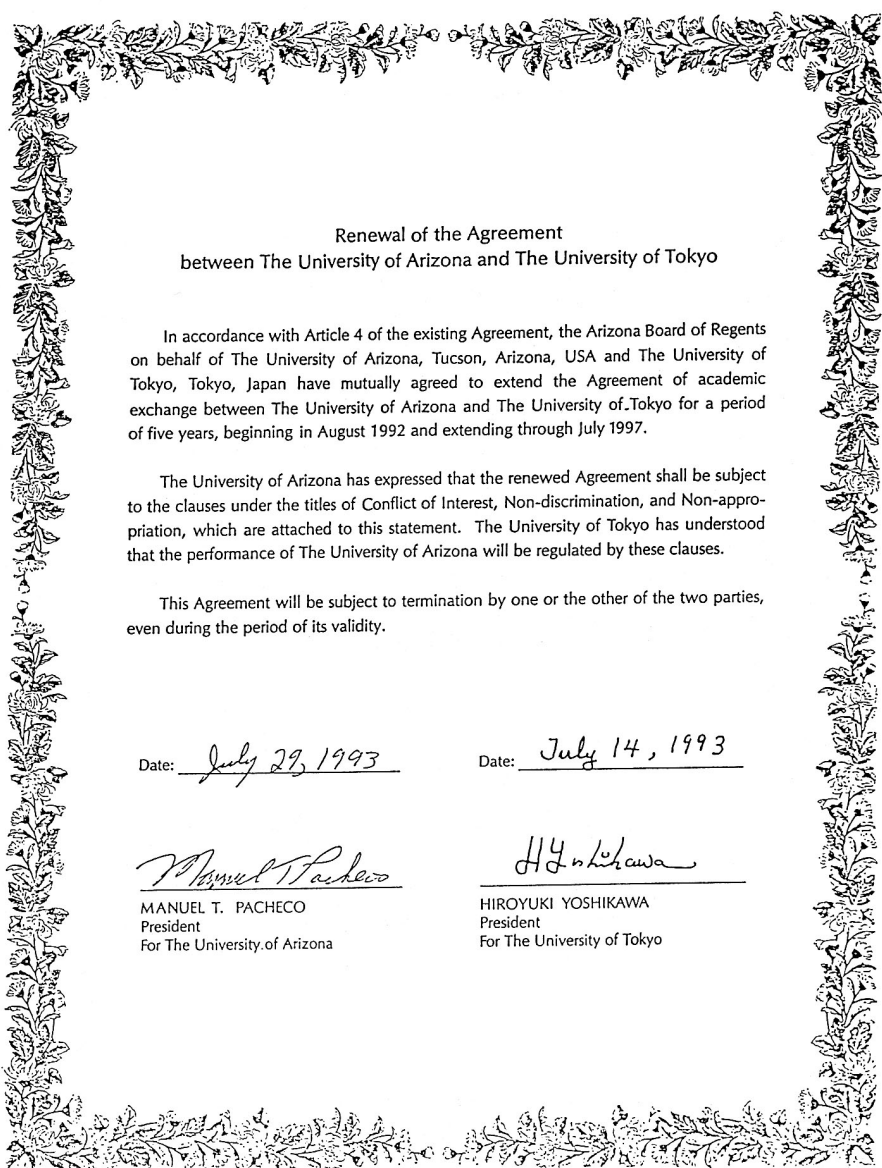
Manuel T. Pacheco

アリゾナ大学総長
MANUEL T. PACHECO

吉川弘之

東京大学総長
吉川弘之

図 B.3: 東京大学とアリゾナ大学との間における学术交流協定の更新に関する覚書 (1992 年)



Renewal of the Agreement
between The University of Arizona and The University of Tokyo

In accordance with Article 4 of the existing Agreement, the Arizona Board of Regents on behalf of The University of Arizona, Tucson, Arizona, USA and The University of Tokyo, Tokyo, Japan have mutually agreed to extend the Agreement of academic exchange between The University of Arizona and The University of Tokyo for a period of five years, beginning in August 1992 and extending through July 1997.

The University of Arizona has expressed that the renewed Agreement shall be subject to the clauses under the titles of Conflict of Interest, Non-discrimination, and Non-appropriation, which are attached to this statement. The University of Tokyo has understood that the performance of The University of Arizona will be regulated by these clauses.

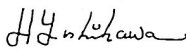
This Agreement will be subject to termination by one or the other of the two parties, even during the period of its validity.

Date: July 29, 1993

Date: July 14, 1993



MANUEL T. PACHECO
President
For The University of Arizona

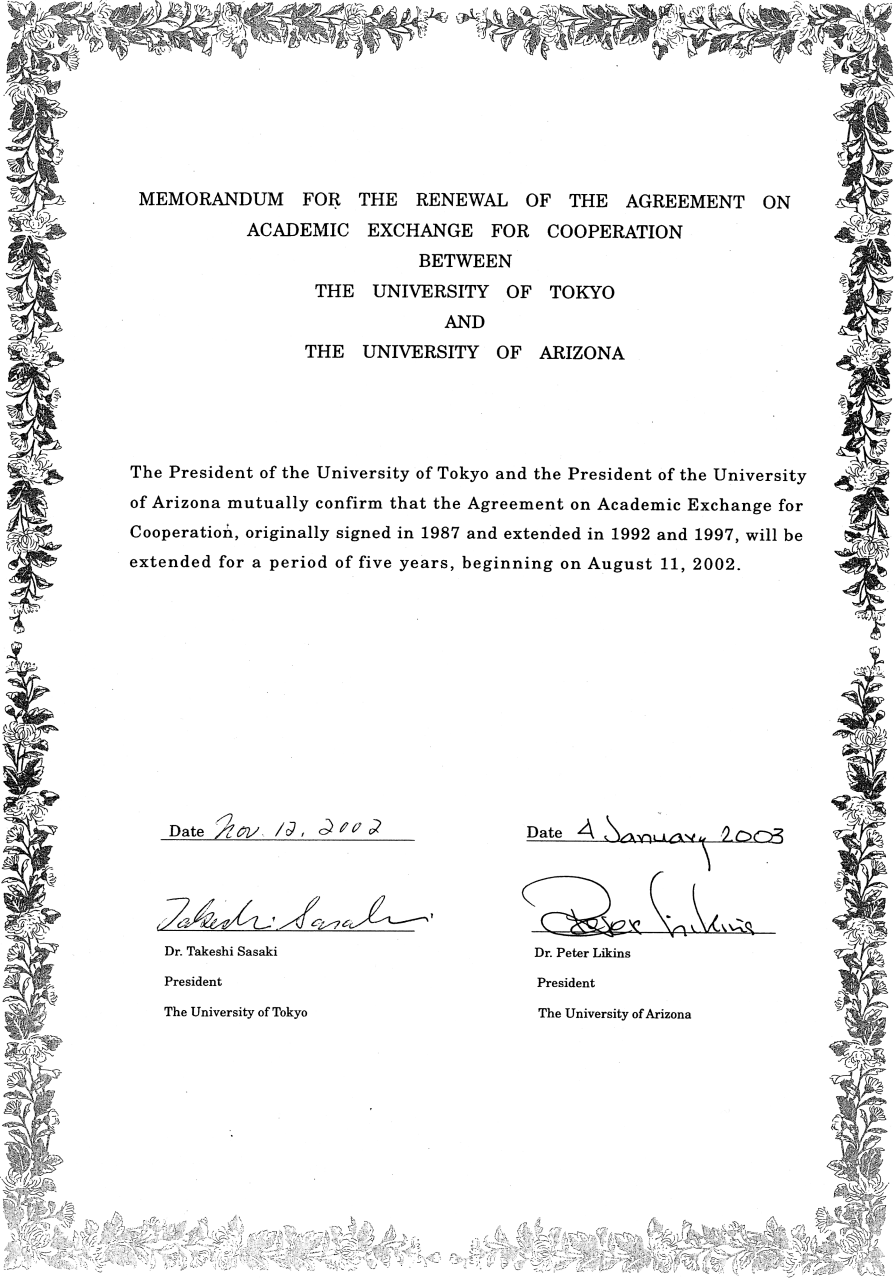


HIROYUKI YOSHIKAWA
President
For The University of Tokyo

図 B.3: 英語版



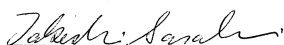
図 B.3: 東京大学とアリゾナ大学との間における学術交流協定の更新に関する覚書 (2002 年)



MEMORANDUM FOR THE RENEWAL OF THE AGREEMENT ON
ACADEMIC EXCHANGE FOR COOPERATION
BETWEEN
THE UNIVERSITY OF TOKYO
AND
THE UNIVERSITY OF ARIZONA

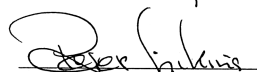
The President of the University of Tokyo and the President of the University of Arizona mutually confirm that the Agreement on Academic Exchange for Cooperation, originally signed in 1987 and extended in 1992 and 1997, will be extended for a period of five years, beginning on August 11, 2002.

Date Nov. 12, 2002



Dr. Takeshi Sasaki
President
The University of Tokyo

Date 4 January 2003



Dr. Peter Likins
President
The University of Arizona

図 B.3: 英語版



図 B.4: チャナントール山頂まで、あと一息



図 B.5: チャナントール山頂への初の調査登頂 (2002 年 11 月)

付 録 C 合意書

本計画の進行に当たって現在までに以下の合意書を交わしている。また、これらに基づいた活動について産業科学省 (CONICYT) からの許可も得ている。それらの概要を述べると共に、写しを掲載する。


- 図 C.1 衛星によるチリ北部の気象データの解析についての MoU
AOC (AURA Observatory in Chile) と。(その後、ESO も含めての 3 者の MoU とした)
- 図 C.2 TAO 望遠鏡の建設及び運用の際の協力関係についての MoU
チリ大学と。
- 図 C.3, C.4 気象データ取得をチャナントール山付近に設置運用するための許可申請書
産業科学省 (CONICYT) へ提出。
- 図 C.5 気象データ取得をチャナントール山付近に設置運用するための許可書
図 C.3 の申請書を受けて、産業科学省 (CONICYT) より発行。

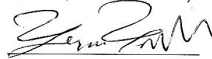
MEMORANDUM OF UNDERSTANDING
BETWEEN
THE AURA OBSERVATORY IN CHILE,
THE INSTITUTE OF ASTRONOMY OF THE UNIVERSITY OF TOKYO,
AND
THE EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY

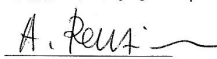
In order to pursue their mutual interests in the characterization and monitoring of astronomical sites in Northern Chile, The AURA Observatory in Chile (hereafter AOC), The European Southern Observatory (hereafter ESO), and The Institute of Astronomy of The University of Tokyo (hereafter IoA-UT) agree to the exchange of satellite cloud cover digital data, as follows:

- 1 AOC will provide Meteosat-3 and GOES-8 data covering 1.7.93 - 29.2.96, covering channels 1 (visible), 3 (water-vapor) and 4 (IR) from the National Climatic Data Center (NCDC). The ownership of this dataset will reside with AOC. Distribution to other parties will require the express permission of AOC.
- 2 IoA-UT will provide GOES-8 data covering 1.6.97 - 30.9.99, covering channels 1 (visible), 3 (water-vapor) and 4 (IR) from the NCDC. The ownership of this dataset will reside with IoA-UT, distribution to other parties will require the express permission of IoA-UT.
- 3 ESO will provide GOES-8 data consisting of 6.7 micron data covering 1.1.98 - 30.4.00 and at least one year of 10 micron data. The ownership of this dataset will reside with ESO, distribution to other parties will require the express permission of ESO.
- 4 AOC, ESO, and IoA-UT undertake to share the above datasets. Each will receive a copy of the raw data, plus a pre-processed data set so as to facilitate possible future analyses.
- 5 This memorandum of understanding replaces the memorandum of understanding between Cerro Tololo Inter-American Observatory, National Optical Astronomy Observatories and the European Southern Observatory that was signed by Malcolm Smith on September 17, 1999 and Alvio Renzini on September 28, 1999.

Signed:

Date: 17 Sept. 2001

Malcolm Smith (AOC)

Date: 9 Oct. 2001

Yuzuru Yoshii (IoA-UT)

Date: 21.08.01

Alvio Renzini (ESO)

☒ C.1: 衛星によるチリ北部の気象データの解析についての MoU

MEMORANDUM OF UNDERSTANDING
for Scientific Cooperation in the
University of Tokyo Atacama Observatory
between
The Astronomy Department of the University of Chile
and
Institute of Astronomy of the University of Tokyo

In consideration of the mutual interest of the Astronomy Department of the University of Chile and Institute of Astronomy of the University of Tokyo (hereafter IoA-UT) in the "University of Tokyo Atacama Observatory" (TAO) project, that is currently planned at IoA-UT, to install a 6.5m infrared-optimized telescope in the territory of the Republic of Chile, both parties agree to the following terms:

The Astronomy Department of the University of Chile and IoA-UT will collaborate in scientific projects of mutual interest.

In particular, joint measurements of the atmospheric transparency and stability in the optical and infrared wavelength regions will be conducted in north Chile as part of the site testing necessary for the installation of the TAO 6.5m telescope.

The Astronomy Department of the University of Chile will obtain the necessary permits to place equipments in the aforementioned place.

When the funding for the TAO project is granted, the Astronomy Department of the University of Chile and IoA-UT will make their best efforts toward the signature of an agreement between the University of Chile and the University of Tokyo, to allow the importation, installation, and operation of the TAO and related instrumentation in Chile.

Date: *May 10, 2001*

M. Teresa Ruiz

Professor María Teresa Ruiz
Director
Departamento de Astronomía
Universidad de Chile

Date: *10/5/01*

Yuzuru Yoshii

Professor Yuzuru Yoshii
Director
Institute of Astronomy
University of Tokyo

図 C.2: TAO 望遠鏡の建設及び運用の際の協力関係についての MoU



School of Science
University of Tokyo

Prof. Y. Yoshii

Institute of Astronomy
University of Tokyo
Mitaka, Tokyo 181-0015, Japan

Telephone +81-422-34-5027
Facsimile +81-422-34-5041

E-mail yoshii@mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

21 March 2001

Dr. Eric Goles Chacc,
Presidente de CONICYT,
Canada 308, Providencia,
Casilla 297-V, Santiago 21,
Chile

Dear Dr. Goles,

The Institute of Astronomy of the University of Tokyo, hereafter IoA-UT, represented by its director, Yuzuru Yoshii, in collaboration with Departamento de Astronomia, Universidad de Chile, wishes to execute studies and work in the area near Cerro Chajnantor, inside the Scientific Preserve administered by CONICYT, to the South-East of San Pedro de Atacama in the second administrative region of the Chilean territory.

The studies and work in question consist of the installation and operation of a meteorological station. We wish to install the station at an altitude of 4900 meters at the coordinates of $23^{\circ}00'01''\text{S}$ and $67^{\circ}43'09''\text{W}$. The meteorological station consists of a 3m high pole on top of a tripod stand with 1m long legs, and the data recording equipment contained within a 0.5m cube at the ground level. Instruments for measuring wind, temperature, humidity, infrared radiation, etc. will be attached to this pole. The equipment will be used to investigate and characterize the atmospheric conditions affecting astronomical research in the optical and infrared wavelength regions of the electromagnetic spectrum.

We hereby request permission so that we can carry out the studies and work as above.

In connection with the above studies and work to investigate and characterize the atmospheric conditions affecting astronomical research in the optical and infrared wavelength regions of the electromagnetic spectrum at the Scientific Preserve of Chajnantor in the second administrative region of Chile, we are pleased to make a commitment to the following conditions:

図 C.3: CONICYT への許可申請書

a) Places of historical interest, archeological, anthropological or paleontological interest:

If we encounter remains, ruins, utensils, places of worship, etc. we will suspend work and advise the authorities.

b) Environment:

We will adopt all the safeguards necessary to avoid a negative environmental impact. We will carry out our work according to the norms and procedures that are administered by the respective national environmental commission of the second administrative region of Chile.

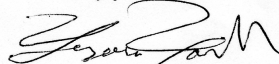
c) Antipersonnel mines:

We note that there is a possibility of existence of antipersonnel mines in the region, although the Ministry of Defense claims that the site area is free of them. We will be alert to the possibility, and we understand that our work in this area is our exclusive responsibility.

d) Non-interference with other projects:

We note that CalTech operates the “Cosmic Background Imager” in Chajnantor, and that atmospheric studies are being carried on there for the ALMA project as well. We undertake that we will inform of our exploration and coordinate the effort with the other groups working in the area so as not to perturb their operation.

Sincerely yours,



Yuzuru Yoshii
Director of IoA-UT
Professor of Astronomy

Institute of Astronomy,
The University of Tokyo,
Osawa 2-21-1, Mitaka
Tokyo 181-0015
Japan

☒ C.4: CONICYT への許可申請書 (つづき)



GOBIERNO DE CHILE
CONICYT

SANTIAGO, July 19, 2001.

Professor
Yuzuru Yoshii
Director Institute of Astronomy
University of Tokyo
Osawa 2-21-1, Mitaka
Tokyo 181-0015
Japan

Dear professor Yoshii:

With regards to the installation and operation of a meteorological station near Cerro Chajnantor, with the goals of characterizing the atmospheric conditions for astronomical research, we are pleased to acknowledge your commitment to the conditions established in your letter of 21 March 2001, regarding (a) Places of historical interest, (b) Environmental Impact, (c) Antipersonal Mines, and (d) Non interference with other projects.

Under such conditions we grant permission for the described activities to be carried out within the Scientific Reserve under the administration of CONICYT.

Sincerely Yours,

ERIC GOLES CHACC
President
National Commission for
Scientific and Technological Research

● COMISION NACIONAL DE INVESTIGACION CIENTIFICA Y TECNOLOGICA

TELEFONO (56 - 2) 365 4400
FAX: (56 - 2) 655 1396
E-MAIL: info@conicyt.cl
CANADA 308
SANTIAGO DE CHILE

www.conicyt.cl

図 C.5: CONICYT から出された許可書

付録D 世界の大型観測装置(地上・スペース)の現状

D.1 運用中・建設中の地上望遠鏡

D.1.1 ケック望遠鏡 I、II

運用主体: カリフォルニア工大、NASA
主鏡: 口径 10m、分割鏡
設置場所: ハワイ・マウナケア山頂
Web ページ: <http://www2.keck.hawaii.edu/>

D.1.2 すばる望遠鏡

運用主体: 国立天文台(日本)
主鏡: 口径 8.2m、薄メニスカス鏡
設置場所: ハワイ・マウナケア山頂
Web ページ: <http://subarutelescope.org/>



図 D.1: ケック望遠鏡



図 D.2: すばる望遠鏡

D.1.3 ジェミニ望遠鏡

- 運用主体: 英国、カナダ、米国、チリ、オーストラリア、アルゼンチン、ブラジル
主鏡: 口径 8.1m (2つの地区に1基ずつ)
設置場所: ハワイ・マウナケア山頂およびチリ・パチョン山頂に各1基
Web ページ: <http://www.gemini.edu/>



図 D.3: ジェミニ北望遠鏡 (左) と南望遠鏡 (右)

D.1.4 Very Large Telescope (VLT)

- 運用主体: ヨーロッパ南天天文台
主鏡: 口径 8.1m × 4基 (Antu, Kueyen, Melipal, Yepun)
設置場所: チリ・パラナル山頂
Web ページ: <http://www.eso.org/paranal/>

D.1.5 マゼラン望遠鏡 I・II

- 運用主体: カーネギー財団、アリゾナ大、ハーバード大、ミシガン大、マサチューセッツ工大
主鏡: 口径 6.5m × 2基、ハニカム鏡
設置場所: チリ・ラスカンパラス天文台
Web ページ: <http://www.ociw.edu/magellan/>



図 D.4: Very Large Telescope

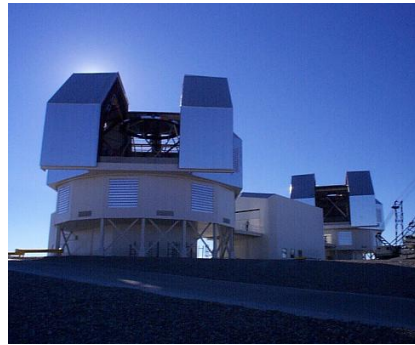


図 D.5: マゼラン望遠鏡



図 D.6: Hobby-Eberly 望遠鏡

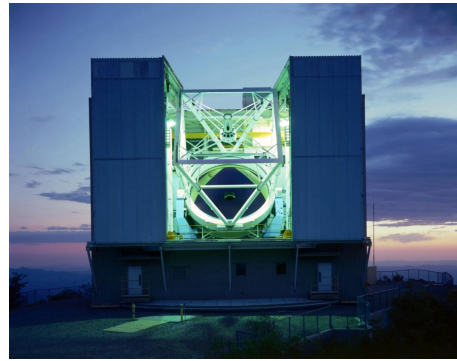


図 D.7: Multi-Mirror Telescope

D.1.6 Hobby-Eberly 望遠鏡 (HET)

- 運用主体: テキサス大学マクドナルド天文台、ペンシルバニア州立大、スタンフォード大ほか
- 主鏡: 口径 11m (有効開口 9.2m)、高度固定球面鏡
- 設置場所: 米国・フォウルクス山
- Web ページ: <http://www.as.utexas.edu/mcdonald/het/het.html>

D.1.7 Multi-Mirror Telescope (MMT)

運用主体: アリゾナ大学、スミソニアン研究所
主鏡: 6.5m
設置場所: 米国・ホプキンス山
Web ページ: <http://www.mmt.org/>

D.1.8 South Africa Large Telescope (SALT)

運用主体: 南アフリカ・サザーランド天文台、ドイツ、ポーランド、米国、
ニュージーランド
主鏡: 口径 11m (有効開口 9.2m)、高度固定球面鏡
設置場所: 南アフリカ・サザーランド天文台
Web ページ: <http://www.salt.ac.za/>
その他: 建設中。2004 年末観測開始予定。



図 D.8: South Africa Large Telescope



図 D.9: Large Binocular Telescope



図 D.10: カナリア大望遠鏡



図 D.11: Stratospheric Observatory for Far Infrared Astronomy

D.1.9 Large Binocular Telescope (LBT)

- 運用主体: イタリア、アリゾナ大学、マックスプランク研究所ほか
主鏡: 口径 8.4m×2 基 同架、2 鏡干渉計/非干渉合成鏡
設置場所: 米国・グラハム山
Web ページ: <http://medusa.as.arizona.edu/lbto/index.htm>
その他: 建設中。2005 年完成予定。

D.1.10 カナリア大望遠鏡 (GTC)

- 運用主体: スペイン、メキシコ
主鏡: 口径 10.4m、分割鏡
設置場所: カナリア諸島
Web ページ: <http://www.gtc.iac.es/home.html>
その他: 建設中。2005 年観測開始予定。

D.1.11 Stratospheric Observatory for Far Infrared Astronomy (SOFIA)

- 運用主体: NASA、DLR(ドイツ航空宇宙センター)
主鏡: 口径 2.7m
設置場所: 航空機 (ボーイング B747SP) 搭載
Web ページ: <http://sofia.arc.nasa.gov/>
その他: 中間赤外線観測。2005 年就航予定。

D.2 計画中の地上望遠鏡

D.2.1 Thirty Meter Telescope (TMT)

- 運用主体: AURA (全米天文学研究大学連合)、ACURA (カナダ天文学研究大学連合)、カリフォルニア大学、カリフォルニア工科大学、他
- 主鏡: 口径 30m、分割鏡 (1080 枚)
- 進捗: 2015 年ファーストライトをめざす
- Web ページ: <http://tmt.ucolick.org/>

D.2.2 Overwhelmingly Large telescope (OWL)

- 運用主体: 欧州南天天文台
- 主鏡: 口径 100m、分割鏡 (3048 枚)、球面鏡 + 平面鏡 + 補正鏡
- Web ページ: <http://www.eso.org/projects/owl/>

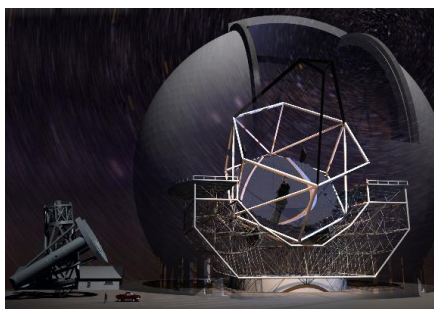


図 D.12: TMT

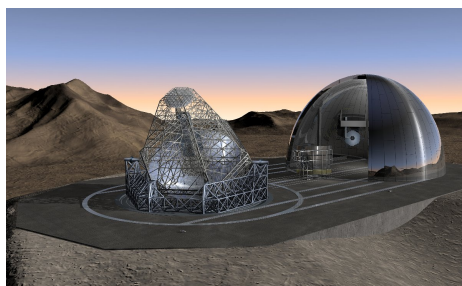


図 D.13: OWL

D.2.3 Euro50

- 運用主体: フィンランド、アイルランド、スペイン、スウェーデン、英国
- 主鏡: 口径 50m、分割鏡 (618 枚)
- Web ページ: <http://www.astro.lu.se/~torben/euro50/>
- その他: 可視および近赤外線観測を目指している。カナリア諸島が建設候補地。

D.2.4 Giant Magellan Telescope (GMT)

- 運用主体: カーネギー財団、アリゾナ大、ハーバード大、ミシガン大、マサチューセッツ工大、スミソニアン研究所
- 主鏡: 口径 21m、分割鏡 (7 枚)
- Web ページ: <http://helios.astro.lsa.umich.edu/magellan/>
- その他: 8.4m の大型セグメントで高 S/N、高解像度の撮像を目指している。チリ・ラスカンパナス観測所が建設候補値。



図 D.14: Euro50

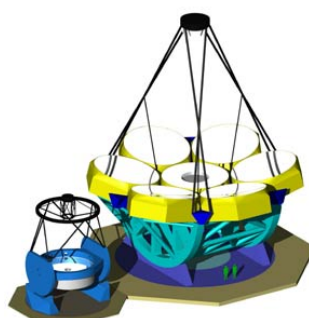


図 D.15: GMT

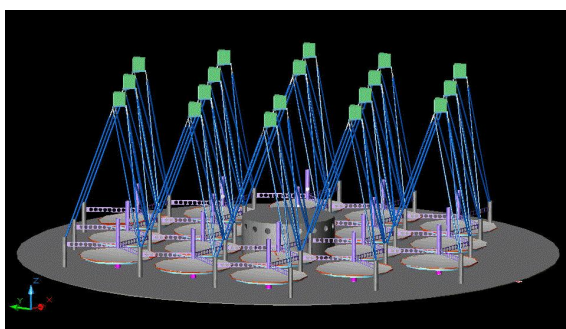


図 D.16: LAMA

D.2.5 LAMA

運用主体: コロンビア大、ロチェスタ工大、ニューヨーク州立大、ニューサウスウェルズ大、プリテッシュコロンビア大、米自然史博物館
主鏡: 口径 10m 固定液体鏡 × 18 基、密集配置。放物面鏡 + 補正鏡
Web ページ: <http://www.astro.ubc.ca/LMT/lama/index.html>
その他: 可視および近赤外線観測。チリかニューメキシコに設置を検討中。

D.2.6 アタカマ望遠鏡

運用主体: コーネル大、カリフォルニア工科大
主鏡: 口径 25m
Web ページ: <http://www.astro.cornell.edu/research/projects/atacama/>
その他: 波長 200 μ m 以上の遠赤外/サブミリ望遠鏡。チリ・アタカマに設置。

D.3 宇宙望遠鏡 (HST, SST 以外は計画)

D.3.1 ハッブル宇宙望遠鏡 (HST)

主鏡口径:	2.4m
計画主体:	NASA、ESA ほか。
観測波長域:	可視光、近赤外線、近紫外線
主な観測テーマ:	汎用
設置場所:	地球周回 (高度 900km)
進捗:	稼働中
Web ページ:	http://hubble.nasa.gov/

D.3.2 Spitzer 宇宙望遠鏡 (SST)

主鏡口径:	0.85m 冷却
計画主体:	NASA、カリフォルニア工大
観測波長域:	中間-遠赤外線 (3-180 μ m)
主な観測テーマ:	汎用
設置場所:	地球追跡軌道
進捗:	稼働中
Web ページ:	http://www.spitzer.caltech.edu/



図 D.17: ハッブル宇宙望遠鏡

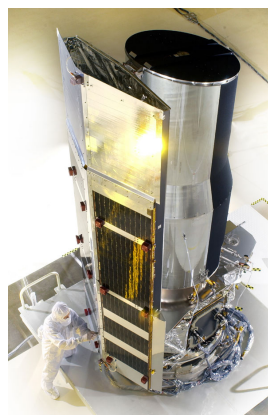


図 D.18: Spitzer 宇宙望遠鏡

D.3.3 James Webb 宇宙望遠鏡 (JWST)

主鏡口径: 6m
計画主体: NASA ほか。
観測波長域: 可視光、近赤外線、中間赤外線
主な観測テーマ: 汎用
設置場所: 地球-太陽 L2 点
進捗: 2011 年打ち上げを目指す
Web ページ: <http://www.jwst.nasa.gov/>

D.3.4 Herschel Space Observatory

主鏡口径: 3.5m Ritchey-Chretien
計画主体: ESA
観測波長域: 中間赤外線
主な観測テーマ: 汎用
設置場所: 地球-太陽 L2 点
進捗: 2007 年打ち上げ予定
Web ページ: <http://first.esa.int/>

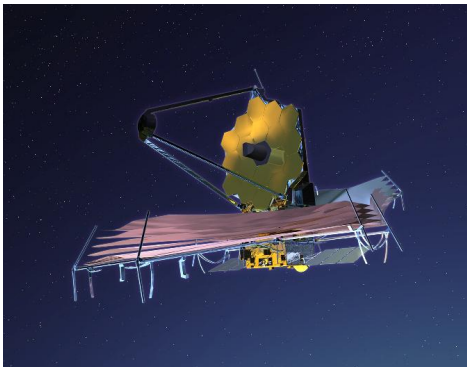


図 D.19: James Webb 宇宙望遠鏡



図 D.20: Herschel Space Observatory

D.3.5 TPF

主鏡口径:	可視単一開口:4 × 6m、中間赤外線干渉計:3 ~ 4m
計画主体:	NASA-JPL、ESA
観測波長域:	可視、中間赤外線
主な観測テーマ:	太陽系外地球型惑星の検出と分光観測
設置場所:	検討中
進捗:	2014年に可視単一開口望遠鏡を、2020年までに中間赤外線干渉計を打ち上げ
Web ページ:	http://planetquest.jpl.nasa.gov/TPF/tpf_index.html

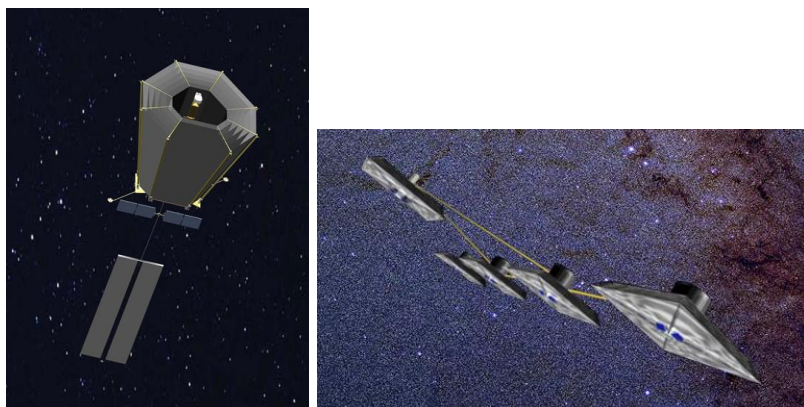


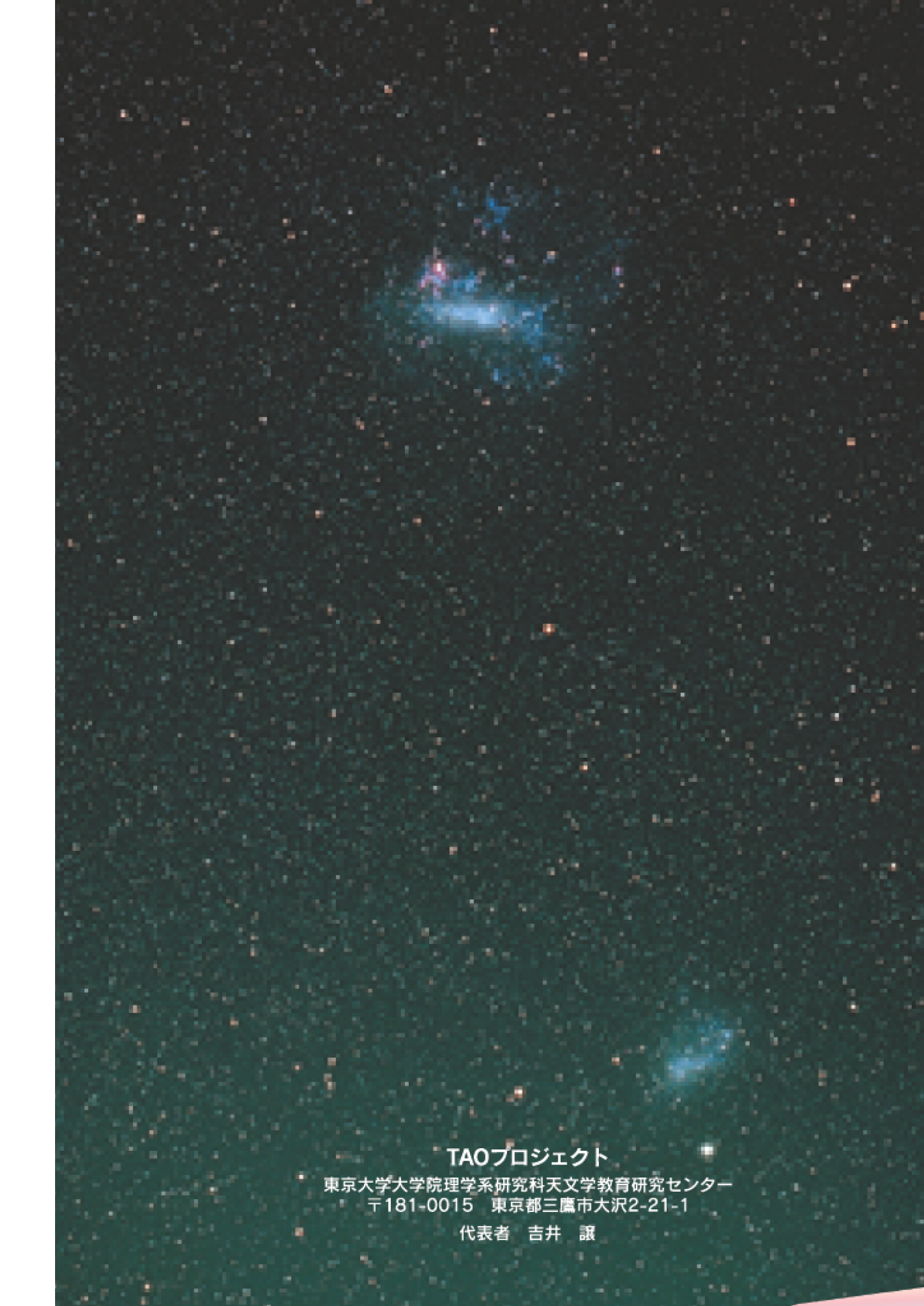
図 D.21: TPF:(左) 可視望遠鏡。(右) 中間赤外線干渉計

D.3.6 Darwin

主鏡口径:	1.5m 以上 ×6 基
計画主体:	ESA
観測波長域:	中間赤外線
設置場所:	地球-太陽 L2 点
進捗:	2015年以降の打ち上げを検討
Web ページ:	http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/



图 D.22: Darwin



TAOプロジェクト

東京大学大学院理学系研究科天文学教育研究センター
〒181-0015 東京都三鷹市大沢2-21-1

代表者 吉井 譲