

科学研究費補助金  
基盤研究（S）研究成果報告書

研究課題名：  
「レーザーガイド補償光学系による  
銀河形成史の解明」

研究期間： 平成19年度－平成23年度



平成24年6月

研究代表者氏名 家 正則  
自然科学研究機構国立天文台  
光赤外研究部・教授

科学研究費補助金  
基盤研究 (S) 研究成果報告書

研究課題名  
「レーザーガイド補償光学系による  
銀河形成史の解明」

研究期間  
平成19年度－平成23年度

平成24年6月

研究代表者氏名 家 正則  
(自然科学研究機構国立天文台・光赤外研究部・教授)

# 目次

目次		2
第一章 はしがき	家	
1.1 研究組織		4
1.2 研究経費		6
第二章 研究目的と当初構想	家	
2.1 先行特別推進研究(平成14-18年度)の実績		7
2.2 初年度応募時の平成19年度研究計画書		8
第三章 研究経過の概要	家	
3.1 すばる望遠鏡の視力を10倍に改善		19
3.2 宇宙の夜明けの観測的研究で世界をリード		21
3.3 次世代超大型望遠鏡計画の推進		22
3.4 全体計画の進捗経過		23
3.5 サイエンスワークショップ		29
第四章 レーザーガイド星188素子補償光学系		
4.1 主要仕様	早野	31
4.2 装置概要	早野	32
4.3 観測装置	早野・家	37
第五章 主要サブシステム		
5.1 主光学系	早野	41
5.2 可変形鏡	大屋	42
5.3 波面センサー	渡辺	47
5.4 較正用人工光源	渡辺	51
5.5 視野回転、瞳回転補正光学系	大屋	53
5.6 大気分散補正光学系	大屋	57
5.7 ビームプリッター交換機構	美濃和	61
5.8 ガイド星捕捉光学系	美濃和	66
5.9 レーザー光源	早野	70
5.10 レーザー伝送用光ファイバー	伊藤	72
5.11 送信望遠鏡	斉藤	77
5.12 波面補正リアルタイム制御系	服部	80
5.13 補助診断系	早野	97
5.14 機械系・電気系・制御計算機	美濃和	104
5.15 望遠鏡インターフェース	早野	106
第六章 装置性能		
6.1 機能・性能試験観測	早野	109
6.2 基本性能(限界等級、感度、熱背景輻射など)	美濃和	110
6.3 波面補正性能	美濃和・早野	113
第七章 装置運用		
7.1 運用ソフトウェア	美濃和	119
7.2 レーザー安全運用	早野	122
7.3 観測効率(オーバーヘッドなど)	美濃和	129

第八章	研究成果ハイライト		
8.1	宇宙再電離	家	131
8.2	重力レンズクエーサー撮像	家	133
8.3	重力レンズクエーサーの分光	小林	134
8.4	Ia型超新星の後期近赤外線スペクトルサーベイ	本原	135
8.5	系外惑星	家	136
8.6	次世代装置の検討	家	137
第九章	社会への成果還元		
8.1	受賞		139
8.2	新聞記事		140
8.3	公開講演会・TV・ラジオ		141
第十章	論文リスト		143
第十一章	主要論文別刷		
2011	PJAB.87.575-586, <u>Iye</u> , Masanori Subaru studies of the cosmic dawn		158
2011	ApJ.734.119-137, Kashikawa, N., et al. Completing the Census of Ly $\alpha$ Emitters at the Reionization Epoch		168
2011	ApJ.738.30-37, Rusu, C. E., et al. SDSS J133401.39+331535.: A New Subarcsecond Gravitationally Lensed Quasar		186
2010	SPIE.7736E.21-28, <u>Havano</u> , Y., et al. Commissioning status of Subaru laser guide star adaptive optics system		194
2010	SPIE.7736E.122-128, <u>Minowa</u> , Y., et al Performance of Subaru adaptive optics system AO188		206
第十二章	主要新聞記事		209
第十三章	おわりに		246

# 第一章 はしがき

## 1.1 研究組織

(氏名、所属、平成 24 年 2 月時点での職、研究での役割)



[研究代表者]

**家 正則**、国立天文台・研究連携主幹・TMT プロジェクト、教授

研究総括、レーザーガイド補償光学系の全体計画の立案・予算、人的な管理を行なった。また、この補償光学系が研究テーマである遠宇宙研究に最適な性能を持つように基本仕様策定を行い、観測的研究と補償光学のキャンペーンを進めた。



[研究協力者]

**高見英樹**、国立天文台・ハワイ観測所長、教授

レーザーガイド補償光学系の基本設計、開発、試験の全体について、指揮をとり、専任技術者を含むハワイ観測所の国際チームをマネジメントした。188 素子補償光学系の前の 36 素子補償光学系の開発期からの実質上の開発責任者。



**早野裕** 国立天文台・ハワイ観測所、助教

全固体和周波レーザー光源の開発と、高出力レーザー光をレーザー送信望遠鏡に伝送するための、フォトニック結晶光ファイバーの開発の責任者。レーザーガイド星生成システムのチームリーダー。



**大屋真** 国立天文台・ハワイ観測所、シニア AO サイエнтиスト

可変形鏡の開発を担当。有限要素法などの手法をもちいて、動的性能も含めた最適設計を行ない、試験調整の責任者でもある。補償光学系の素光学調整、装置の立ち上げ試験などについても、大きな貢献をした。



**斉藤嘉彦** 東京工業大学・助教

レーザーガイド星チームとして、レーザー送信望遠鏡の内部光学系の設計、製作、試験を担当。レーザーガイド星関係の機器制御のソフトウェアの開発、試験を主に担当。



**服部雅之** 国立天文台・ハワイ観測所、AO サイエнтиスト

補償光学系の自動最適化制御システムの責任者。補正すべき大気揺らぎの時々刻々変化に、制御を最適化するアルゴリズムの開発、実装、加えて、レーザーガイド星を用いた運用に向けては、波面制御アルゴリズムの基礎改良も行った。



**渡辺誠** 北海道大学・助教

補償光学系のほぼすべての光学系の設計し、製作、調整、試験を広い範囲で責任をもって担当した。光学・機械系の組み立て、調整、制御ソフトウェアも、幅広く担当した。



**美濃和陽典** 国立天文台・ハワイ観測所、AO サイエнтиスト

36 素子補償光学系の性能評価担当。試験調整や試験観測などを分担し、深探査観測での限界等級の評価を行った。



**Olivier Guyon** 国立天文台・ハワイ観測所、AOサイエンティスト

補償光学系の基本設計を行なうシミュレーションの責任者。計算機上で現実に近い補償光学系の光伝搬シミュレーションを実現。その結果に基づいて、実際に製作する光学系、可変形鏡、波面センサーの設計を最適化した。



**伊藤周** カナダ ヴィクトリア大学・PD 研究員

フォトニック結晶光ファイバーを用いたレーザー伝送光学系の製作、伝送実験を担当。わずか 14 ミクロンの直径の光ファイバーに高出力のレーザー光を高い効率で入射、伝送させるための極めて高精度の機械光学系の開発をおこなった。



**大藪進喜** (名古屋大学助教)

イメージローテータの駆動ソフトウェア開発。補償光学系のシミュレーションを実施するための計算機環境の立ち上げ、データ解析用の計算機の立ち上げに貢献した。



**白旗麻衣** 国立天文台・ハワイ観測所、AOサイエンティスト

補償光学系の運用の立ち上げを担当。試験開発用の制御ソフトウェアから共同利用制御ソフトウェアの移行計画に参加。APD のダークカウントの経年変化をモニタし、劣化した APD の特定、修理、交換を担当。さらに、補償光学系の熱輻射の影響の推定と抑制方法の検討に貢献。

[専任エンジニア]



**Stephen Colley** 国立天文台・ハワイ観測所、電子エンジニア

補償光学系の電気系全般の設計責任者。単一光子検出器の信号高速検出、制御計算機に転送、制御計算機からのデジタル信号を可変形鏡制御信号に変換などを製作。



**Sebastian Egner** (国立天文台ハワイ観測所を退職後、ミュンヘンの企業のエンジニア)

イメージローテータの組立・調整、機能および性能試験、制御ソフトウェアの開発のマネジメントを担当。また、大気分散補正光学系の組立と調整、機能性能評価を実施。さらに、射出したレーザービームから人工衛星を回避するソフトウェアの開発、像面の歪みの解析など、貢献は多岐にわたる。



**Michael Eldred** 国立天文台・ハワイ観測所、機械エンジニア

補償光学系の機械系全般の設計責任者。光学系保持機構、光学系の駆動システム、装置全体が構成される光学定盤、補償光学系システム全体の電動搬送機構、全体の光軸調整機構などの、広範な機械システムに及ぶ。



**Mathew Dinkins** 国立天文台・ハワイ観測所、ソフトウェアエンジニア

補償光学システムの制御ソフトウェア担当。全体を統括するソフトウェア、リアルタイム制御、及び光学系駆動制御ソフトウェアの開発をおこなった。



**Taras Golota** 国立天文台・ハワイ観測所、ソフトウェアエンジニア

補償光学系システムのソフトウェア担当。リアルタイム制御ソフトウェアのほか、モニター用カメラおよびすばる望遠鏡とのインターフェースソフトウェアの開発を行った。

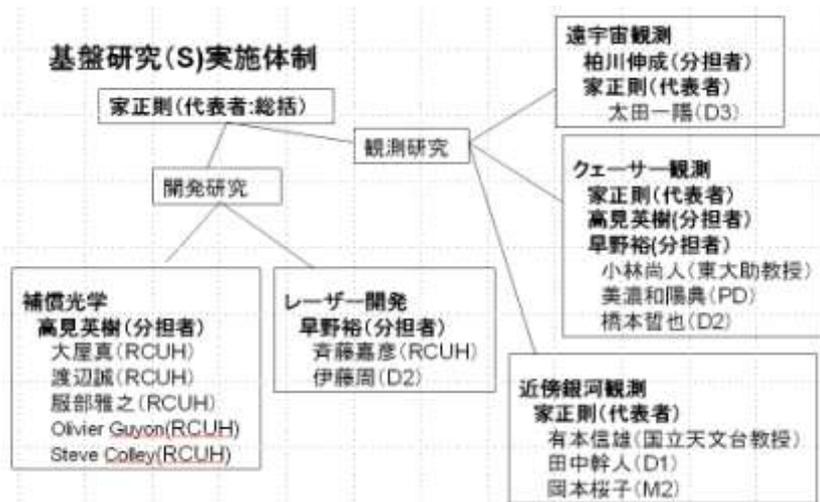


図 1. 研究開始時の研究体制

## 1.2 研究経費

	直接経費
平成 19 年度	2160 万円
平成 20 年度	3940 万円
平成 21 年度	1950 万円
平成 22 年度	1160 万円
平成 23 年度	830 万円
計	10040 万円

## 第二章 研究目的と当初構想

### 2.1 先行特別推進研究(平成 14-18 年度)の実績と経緯

本基盤研究 (S)「レーザーガイド補償光学による銀河形成史の解明」(平成 19-23 年度)は、先行研究である特別推進研究「レーザーガイド補償光学系による遠宇宙の近赤外高解像観測」(平成 14-18 年度)で、開発製作した、188 素子補償光学系とレーザーガイド星生成装置を、ハワイ島マウナケア山頂の国立天文台すばる望遠鏡(口径 8.2m) に実装して共同利用システムとして完成させ、すばる望遠鏡の空間解像力を格段に改善して、遠宇宙の観測に新展開をもたらすことを目的としたものである。

先行研究では当時 8 m 級望遠鏡としては、曲率センサー方式の補償光学系として世界最先端の**188素子システム**の開発を実現した。システムの改良等に対応し易くするため、すばる望遠鏡ナスマス焦点部に製作した。

完成した新補償光学系は、天体からの光波面の乱れを毎秒1000回測定し、波面乱れを修正するための形状可変鏡をリアルタイムで駆動して補償し、大気のゆらぎの効果を打ち消して、望遠鏡の回折限界の解像力を実現するものである。2006年10月に行った試験観測で、このシステムを使わないときに0.6秒角になる星像のサイズがその10分の1の0.06秒角にまで改善され、空間解像力と感度が格段に向上することを実証した。ひとことという**解像力を約10倍に改善**したことになる。

先行研究成果のもう一つの大きな柱は「**レーザーガイド星生成システム**」の開発であった。理化学研究所の協力を得て、Nd:YAGの2波長のレーザーを混合した和周波レーザーとして589nmのナトリウムD線で発振する**全固体和周波レーザー**を開発し、レーザー伝送は伝送損失の少ない**フォトニック結晶ファイバー**の開発・実用化を進めた。送信望遠鏡はすばる望遠鏡の側面装備でなく、副鏡の裏側に装備することとし、設計製作を行った。完成したシステムは、安定に出力4Wの高品質レーザー光を発生できることが確認され、2006年10月に行った試験観測により、このレーザービームにより、高度90kmの高さに存在するナトリウム原子が励起発光し、補償光学系で必要となる波面測定に十分な明るさの人工星を任意の方向に作ることを実証した。

補償光学系は、すばる望遠鏡だけでなく、Gemini 天文台、Keck 天文台、VLT 天文台などの 8-10m 級の望遠鏡においても、必須の装置と位置づけられ、レーザーガイド星システムもそれぞれ異なる方式での開発が進められている。すばるの新補償光学系は、波面曲率センサー方式で 188 素子という多素子のシステムを実現し、他天文台で使われている別方式のセンサーを用いた 150-300 素子のシステムよりも、補償性能の高いシステムとなった。

先行研究のサイエンス目的である遠宇宙の高解像観測研究の準備研究を開発と平行して進めた。その結果、遠方の銀河探査では**赤方偏移 7.0 の人類史上最も遠い銀河の発見**に成功し、2006 年 9 月のネイチャー誌に発表した。この成果は世界記録を達成しただけでなく、宇宙再電離史の終焉期に第一歩を記したものとして、ホットな成果とされている。

設計・製作・検証に時間を要したため、188 素子新補償光学系を用いた観測的研究は当初構想より約 1 年遅れ、平成 19 年度から開始した。レーザーガイド星システムをすばる望遠鏡システムに組み込んだ本格的観測については、新規開発事項が複数あり、平成 19-23 年度にわたる科学研究費補助金**基盤研究 (S)「レーザーガイド補償光学系による高感度高解像観測ー太陽系から遠宇宙までー(研究代表者:家 正則)**」に引き継ぐこととなった。

## 研究目的

本欄には、研究の全体構想及びその中で本研究の具体的な目的について、適宜文献を引用しつつ記述し、特に次の点については、焦点を絞り、具体的かつ明確に記述してください。（記述に当たっては、「科学研究費補助金（基盤研究等）における審査に関する規程」（公募要領59～90頁参照）を参考にしてください。）

- ① 研究の学術的背景（本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置づけ、応募者のこれまでの研究成果を踏まえ着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）
- ② 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか
- ③ 当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義
- ④ 基盤研究（A）に、本研究と関連する研究課題を応募している場合には、到達目標等の相違点、また、関連のない研究課題を応募している場合には、研究内容等との相違点（該当者は必ず記述してください。）

① 研究の学術的背景（本研究に関連する国内・国外の研究動向及び位置づけ、応募者のこれまでの研究成果を踏まえ着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）

地上の望遠鏡は大気ゆらぎのため、その空間解像力が制限される。大気ゆらぎが少ないマウナケア山頂の8.2mすばる望遠鏡でも、近赤外線（波長  $2 \mu\text{m}$ ）での分解能は、回折限界（0.06秒角）に比べ約10倍劣化し、0.6秒角程度となる。大気のゆらぎを測り、光波面擾乱を実時間補償し、本来の空間分解能を達成する技術を「補償光学」と呼ぶ。

本研究グループは平成14-18年度の特別推進研究「レーザーガイド補償光学系による遠宇宙の近赤外線高解像観測（研究代表者：家正則）」により(1)188素子補償光学系（Takamiほか2005）および(2)レーザーガイド星生成システム（Hayanoほか2005）を開発した（図1）。平成18年10月に行った試験観測で、世界トップレベルの補正性能と当初目標を上回るレーザー出力を達成した（図2、3）。前者は望遠鏡の分解能と感度を飛躍的に高めるものであり、後者はこれまで補償光学の適用ができなかった銀河系外天体や遠宇宙の観測をも可能にする新技術である。約400億円のすばる望遠鏡の性能をその約1.5%の予算で10倍に高めた効果は絶大と言っても過言でないであろう。

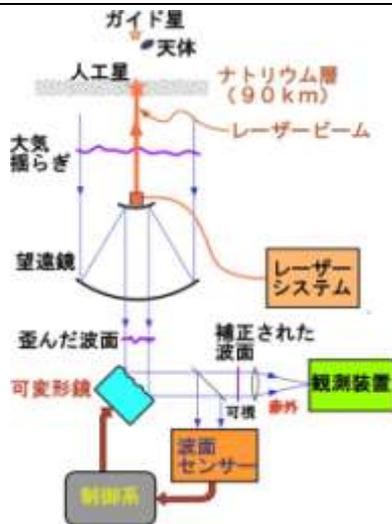


図1. すばる補償光学系の原理とシステム構成



図2. (左)新188素子補償光学系、(右)すばる望遠鏡ファーストライト時の画像。とともにオリオン星雲のトラペジウムの近赤外線画像。空間解像力が約10倍に改善されている。



図3. レーザーガイド星生成用レーザービームの初照射画像(30秒間露出)

② 研究期間内に何をどこまで明らかにしようとするのか

本研究グループが中心となって製作したレーザーガイド補償光学系の性能を最大限に活かす遠宇宙、キューサー、近傍銀河の恒星種族の三テーマについて観測を進め、銀河進化史に新たな知見を得る。これらは補償光学を適用できなかった分野であり、大きな親展が期待できる。

### [1] 「遠宇宙」

#### (1-1) 最遠銀河の高解像観測（柏川、家、太田ほか）

Iye他(2006, Nature)は、主焦点カメラに特製狭帯域フィルターを装着して行った探査観測の結果、41533天体の中から、赤方偏移7.0のライマン $\alpha$ 銀河I0K-1(図4)を発見した。これは、人類が見た最も遠い（つまり宇宙でも最も初期の）銀河である(表1)。レーザーガイド補償光学系を駆使して、この銀河など高赤方偏移銀河の近赤外高解像撮像により、衝突合体期にある銀河の構造について初めての知見を得る。Iye他論文では、赤方偏移7.0の時代の銀河の数が赤方偏移6.6の時代に比べて有意に少ないことを指摘した。それが、(1)赤方偏移7.0の時代にはまだ衝突合体で成長した銀河が少なかったためか、(2)初代の銀河光による宇宙の再電離が未完で、ライマン $\alpha$ 光が吸収散乱されたためかという宇宙史の新たな疑問について、近赤外線高解像観測で手がかりを得る。

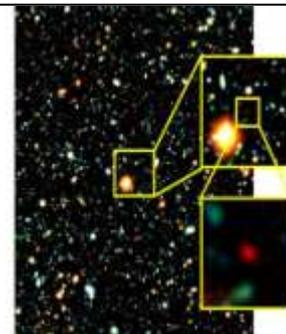


図4. 赤方偏移7.0の最遠銀河(中央の赤い天体)

研究機関名	国立天文台	研究代表者氏名	家正則
-------	-------	---------	-----

研究目的 (つづき)

表1. 最も遠い銀河上位10傑中の9つがすばる望遠鏡による発見。Iye他の発見したI0K-1は群を抜いて遠い。

表1: 最も遠い銀河ベストテン (2006年9月14日)

順位	天体名	座標	赤方偏移	使用望遠鏡	論文
1	I0K-1	J132459.8+272456	6.964	すばる	家ほか
2	SDF ID1004	J132522.3+273520	6.597	すばる	谷口ほか
3	SDF ID1018	J132520.4+273459	6.596	すばる	柏川ほか
4	SDF ID1030	J132357.1+272448	6.589	すばる	柏川ほか
5	SDF ID1007	J132432.5+271647	6.58		
6	SDF ID1008	J132518.8+273043	6.57		
7	SDF 132418	J132418.3+271455	6.57		
8	HCM-6A	J023954.7-013332	6.56		
9	SDF ID1059	J132432.9+273124	6.55		
10	SDF ID1003	J132408.3+271543	6.55		

(1-2) 赤方偏移 1 - 3 の銀河の形態 (家、美濃和、高見、小林) :

Minowa 他 (2005) は既存の 36 素子補償光学系を駆使して、「すばる超深探査領域」について、積分時間 26.8 時間に及ぶ超深撮像観測を行い、波長 2.2 μm で解像度 0.18 秒角、限界等級 24.7 等 (5 シグマ) を達成し、遠方宇宙での銀河数密度やサイズや形態の測定から、銀河進化モデルとの比較がより定量的にできることを世界で初めて示した。新 188 素子補償光学系では更に高解像高感度の観測が可能であり、銀河形成史の様々なモデルを峻別する道を拓く。

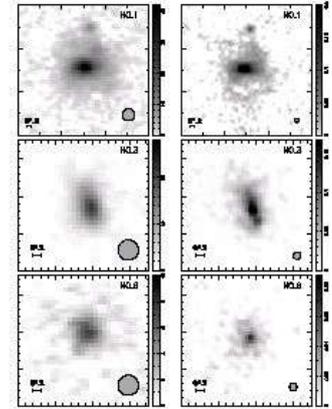


図5. 赤方偏移 1 - 3 の銀河の形態 : (左)補償光学非使用、(右)36 素子補償光学使用。

[2] 「キューサー」

(2-1) キューサーやガンマ線バースターの近赤外分光(家、早野、小林、ほか) :

近年赤方偏移が6を越すキューサーやガンマ線バースター(Kawai 他 2006、Totani 他 2006)が相次いでいる。高赤方偏移のキューサーやガンマ線バースター(GRB)の近赤外高分散分光観測により、宇宙の再電離や元素合成史の研究を進めることができる(Miwasa 他 2005)。特に補償光学装置と高分散分光器の組み合わせはキューサーやGRBなど点光源の観測限界をこれまでより格段に深くすることができ、銀河間空間の希薄なガスの元素組成の観測的研究を大きく進展させることができる。36 素子補償光学系を用いた観測で重力レンズキューサー2 重像 Q1422+231A と B(分離角 0.5 秒角)を分離して得た近赤外線高分散スペクトルから、銀河間吸収雲のわずか 24 光年離れた位置での組成の違いを初めて確認した結果などを得ている。

(2-2) キューサー母銀河の分光

コロナグラフでキューサーを隠した上で、低分散分光を行うことにより、これまで観測が著しく困難であったキューサーの母銀河を直接分光観測することを構想しており(Iye 他 2002)、その実現性の検討を行う。

[3] 「近傍銀河の恒星種族」

(3-1) 近傍銀河の形成史(田中、岡本、家、有本ほか)

アンドロメダ銀河 M31 など近傍の銀河の超高解像撮像で得られる色-等級図から、その恒星種族の分布を調べ、銀河の形成と進化の歴史に迫ることができる。右図はすばる望遠鏡主焦点カメラの多色撮像から得たアンドロメダ II (矮小楕円体銀河) の色-等級図だが、転向点の光度レベル(27.5 等)までは撮像が到達していないため、星の年齢を決定することができず、金属量推定に不定性が残る。188 素子レーザーガイド補償光学系を駆使し、近赤外線での深い撮像による転向点の星の光度と赤色巨星の低分散スペクトルから、年齢、金属量、視線速度など恒星種族の基本量を求め、星形成史を銀河の様々な領域で初めて導く。

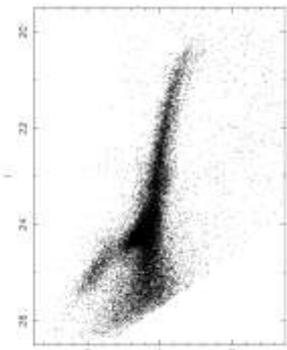


図6. アンドロメダ II の色等級図。

③ 当該分野における本研究の学術的な特色・独創的な点及び予想される結果と意義

本研究グループが開発したすばる望遠鏡レーザーガイド星 188 素子補償光学系は現時点で世界トップレベルの観測性能を実現した。まだ、これまで補償光学観測ができなかった遠宇宙や近傍銀河構成種族の観測へのレーザーガイド星の利用による観測は、ケック望遠鏡などごく一部の大型望遠鏡で着手されつつある段階であり、早期に観測を実施することで、格段の成果を挙げることができる。

④ 本研究と関連する研究課題を応募している場合には、到達目標等の相違点、研究内容等との相違点 (該当者は必ず記述してください。)

本研究内容に加えて、次世代の補償光学系となるトモグラフィ補償光学系の基礎開発を行うため、新たな特別推進研究を併願している。特別推進研究が採択された場合は、本研究は辞退する。

研究計画・方法

本欄には、研究目的を達成するための具体的な研究計画・方法について、平成19年度の計画と平成20年度以降の計画に分けて、適宜文献を引用しつつ記述してください。ここでは、研究が当初計画どおりに進まない時の対応など、多方面からの検討状況について述べるとともに、次の点についても、焦点を絞り、具体的かつ明確に記述してください。

① 研究計画を遂行するための研究体制について、研究代表者、研究分担者及び研究協力者（海外共同研究者、科学研究費への応募資格を有しない企業の研究者、大学院生等（必要に応じ氏名、員数を記入することも可））の具体的な役割（図表を用いる等）、及び研究分担者ともに行う必要がある場合には、学術的観点から研究組織の必要性・妥当性及び研究目的との関連性

② 研究代表者が、本研究とは別に職務として行う研究のために雇用されている者である場合、または職務ではないが別に行う研究がある場合には、その研究内容と本研究との関連性及び相違点

平成19年度

図7に本特別推進研究の開発研究と観測研究の主要課題とその実施チーム体制を示す。常時研究に参加する代表者・分担者に加え、RCUHはハワイ観測所雇員、M2-D3は東大大学院生、有本国立天文台教授と小林東大助教授は前特別推進研究の分担者であり研究協力者として随時研究に参加協力する。

図7. 研究実施体制



I. 観測的研究

平成14-18年度の特別推進研究(研究代表者家正則)により開発製作した188素子ナスミス補償光学系、およびレーザーガイド星生成システムを、ナスミス焦点に移設した近赤外分光撮像装置IRCS(図8)と共に用いることにより、これまで明るいガイド星が無いため観測が全く不可能であった以下のテーマを主に、撮像・分光観測をその空間解像度を回折限界にまで高めて(図9)実施する。観測は望遠鏡時間配分審査委員会の審査決定、および観測所の装置運用スケジューリングにより実施時期が決定されること、また実施時期に天候不良に見舞われることもあるので、必ずしも当該年度中に完了できるとは限らないが、複数のプログラムを並行して走らせることで、最終的には科学成果が得られると期待している。



図8. ナスミス焦点に設置した188素子補償光学系(左)と近赤外分光撮像装置 IRCS(右)

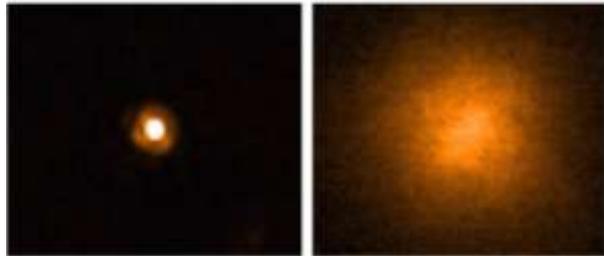


図9. 188素子AOによる波長 $2.2\mu\text{m}$ 星像(左)補正あり 0.063 秒角、(右) 補正なし、0.6 秒角。現 36 素子 AO と比べて 2 倍悪いシーイングでも回折限界性能が達成された。

1) 赤方偏移7までの銀河の高解像撮像 (家、柏川、太田、美濃和、小林)

家・柏川ほかが発見した赤方偏移 7.0 の最遠銀河 IOK-1(Iye 他 2006)は、まだその近赤外面像が得られていない(図 4, 表 1 参照)。補償光学装置で回折限界像が得られれば、ビッグバンから 7.8 億年後の時期での銀河の構造を初めて見ることができる。S/N 比の良い画像を得るには膨大な観測時間が必要だが、現実的な観測時間で得られる画像からも初期宇宙での銀河形成に関する重要な情報を得られよう。IOK-1 についてはスピッツァー宇宙望遠鏡による  $3\sim 5\mu\text{m}$  帯での撮像観測を提案予定であり、これと合わせて、バルマー不連続スペクトルの観測から恒星種族の分析を行う。

赤方偏移 6 以上でのライマン輝線銀河の光度関数の変化(図 10, Kashikawa 他 2006)について宇宙再電離と CDM 銀河形成史の観点から具体的に解明することをめざす。

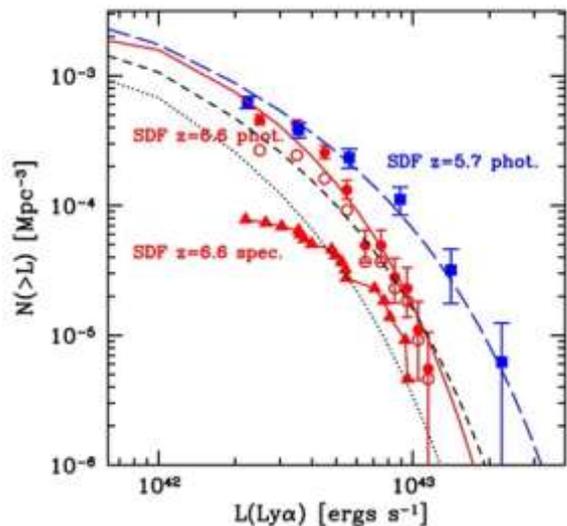


図 10. ライマン輝線銀河の光度関数

研究機関名	国立天文台	研究代表者氏名	家 正則
-------	-------	---------	------

**研究計画・方法 (つづき)**

また、赤方偏移1～3の銀河の撮像観測については、すばる超深探査領域で36素子補償光学系を用いた撮像観測を実施済みであるが(図5参照、Minowa他)、188素子新補償光学系で同じ領域を更に観測し、より深い高感度高解像観測を行い、銀河の光度関数、形態分布やサイズ分布に関する観測限界を深め、新しい知見を得る。

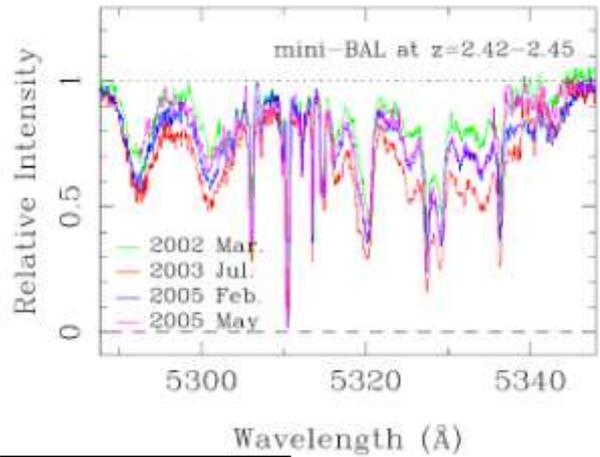
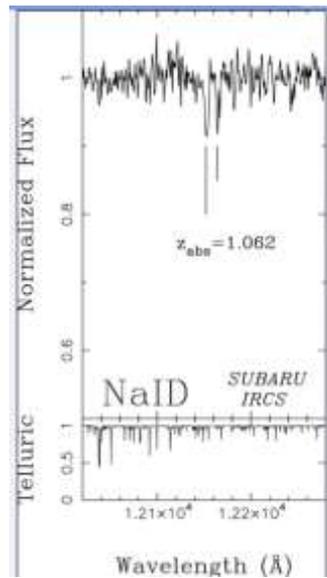


図 11. クェーサーの分光により発見された銀河間ナトリウム吸収線(近藤他 2006)。

図 12. mini-BAL クェーサー吸収線の時間変動(三沢他 2005)

**2)クェーサーと母銀河の分光観測(家、高見、美濃和、小林、橋本)**

これまででは明るいガイド星が近傍にあるごく限られたクェーサーの観測しかできなかったが、レーザーガイド星補償光学系完成によりほぼ全てのクェーサーについて回折限界分光が可能となる。回折限界分光により、波長分解能の向上とS/N比の大幅な改善が可能であり、近藤他(2006)ではクェーサー分光により銀河間空間の希薄ガスによるナトリウム吸収線を初めて同定することに成功している(図11)。またmini-BALクェーサーの時間変動観測(Misawa他2005)などでも新補償光学系を用いた分光観測を行うことにより、画期的データを得ることができよう(図12)。

急速に減光するガンマ線バースターについても(図13)、補償光学系を用いることにより、像サイズを絞り輝度を上げることができるので、これまで不可能であった減光時での分光観測も可能となる。

また、クェーサー本体の散乱光のため観測が困難な母銀河の性質についても、クェーサーの波長幅の広い輝線スペクトルと対照的な波長幅の狭い輝線スペクトルを呈する母銀河を分光学的に分離して、クェーサー本体と母銀河の関係や相互作用について研究する道が拓けるものと期待している。

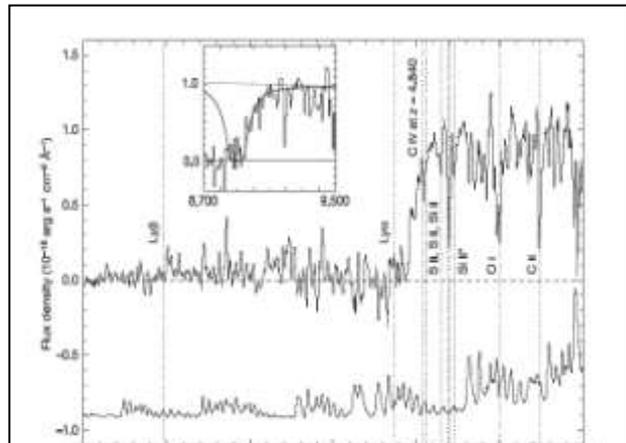


図 13. 赤方偏移 6.3 のガンマ線バースター(河合他 2006)

**3)近傍銀河の測光観測(田中、岡本、家、有本、早野)**

M31など局所銀河群に属する銀河、矮小銀河についてこれまでの主焦点カメラでの撮像データ(図14)に加えて、カバー領域は限定的にならざるを得ないものの、その中心部、球状星団、ハロー部を近赤外線レーザーガイド補償光学を駆使し、高感度高解像度画像を得ることができる。補償光学系を用いることにより図6より遙かに暗い天体の測定が可能となるため、転向点の暗い星まで撮影できると期待される。得られた画像を分析して、新たにより暗い星まで含めた色一等級図を作り、恒星種族の年齢と金属量を分析することで冷たい暗黒物質の描像に基づく銀河形成史に迫る。

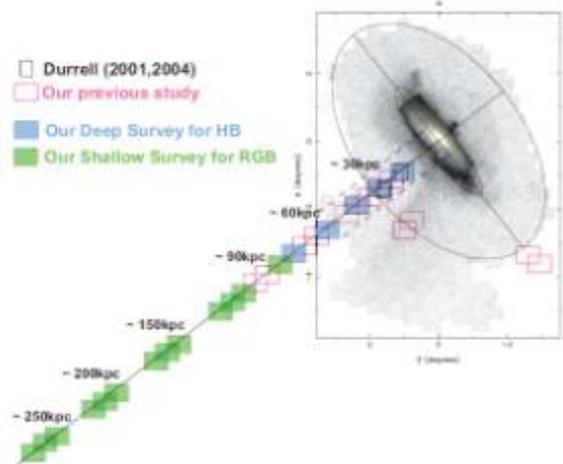


図 14. 主焦点カメラによる撮像観測で恒星種族の研究を進めている M31 外縁部ハローとストリーム領域。

研究計画・方法（つづき）

II. 開発的研究(高見・早野ほか)

レーザーガイド星補償光学系を共同利用装置として使い易いものに完成させるためには、レーザーガイド星生成システム(図15)、188素子補償光学系システムをすばる望遠鏡全体システムとリンクして、安定に効率良く運用できるように改良していく必要がある。ビームスプリッタの開発導入により効率を改善する。

観測前の準備/システム診断から、実際の観測時の全体系のモニタリング、観測プログラムのスケジューリングなどの効率を改善することにより、実際の観測能率を大幅に改善できる余地がある。

このための、システムチューニングを行う。この作業の進行状況に応じて平成19年度から一部共同使用観測を開始し、S08A期(平成20年2月-7月)からの共同利用提供をめざす。これにより、本研究グループの主体的な観測計画以外にも、広く世界中の天文学者に本システムを有効利用して頂き、本研究テーマ以外の太陽系外惑星探査研究などさまざまな観測による最新の学術成果を挙げていただく。

平成20年度

・観測的研究

- 1) 新補償光学系による遠宇宙の深撮像観測を行う(柏川、家、太田、美濃和)
- 2) IRCSによるキューサー吸収線の分光観測を行う(家、高見、美濃和、橋本、小林)
- 3) M31など近傍銀河の恒星種族の観測を行う(家、田中、岡本、有本、早野)

・開発的研究

- 1) ビームスプリッタ自動交換機構を完成し、レーザーガイド補償光学系全体システムの最終調整、完全共同利用開始をめざす。(高見、早野、渡辺、服部、大屋)



図 15. レーザーガイド星生成システムとすばる望遠鏡観測システムの結合による高効率観測システムの完成をめざす。

平成21年度

・観測的研究

- 1) 新補償光学系による遠宇宙の深撮像観測を継続して行う(柏川、家、太田、美濃和)
- 2) IRCSによるキューサー吸収線の分光観測を継続して行う(家、高見、美濃和、橋本、小林)
- 3) M31など近傍銀河の恒星種族の観測を継続して行う(家、田中、岡本、有本、早野)
- 4) 観測的研究の進展状況をレビューする国際研究集会を開催する。

・開発的研究

- 1) 観測システムの制御系の改善を行い、より効率の良い観測を可能にする。(高見、早野他)

平成22年度

- 1) 新補償光学系による遠宇宙の深撮像観測を継続して行う(柏川、家、太田、美濃和)
- 2) IRCSによるキューサー吸収線の分光観測を継続して行う(家、高見、美濃和、橋本、小林)
- 3) M31など近傍銀河の恒星種族の観測を継続して行う(家、田中、岡本、有本、早野)

平成23年度

- 1) 新補償光学系による遠宇宙の深撮像観測を総括する(柏川、家、太田、美濃和)
- 2) IRCSによるキューサー吸収線の分光観測を総括する(家、高見、美濃和、橋本、小林)
- 3) M31など近傍銀河の恒星種族の観測を総括する(家、田中、岡本、有本、早野)
- 4) 研究成果のとりまとめを行い、成果を公表する。

なお、研究成果については随時、記者発表や公開講演会を開催して社会への成果還元、公表に努める。

研究機関名	国立天文台	研究代表者氏名	家 正則
-------	-------	---------	------

**今回の研究計画を実施するに当たっての準備状況等**

- 本欄には、次の点について、焦点を絞り、具体的かつ明確に記述してください。
- ① 本研究を実施するために使用する研究施設・設備・研究資料等、現在の研究環境の状況
  - ② 共同して研究を行う者がいる場合には、その者との連絡調整の状況など、研究着手に向けての状況
  - ③ 本研究の研究成果を社会・国民に発信する方法等

① 本研究を実施するために使用する研究施設・設備・研究資料等、現在の研究環境の状況  
 平成 14-18 年度の5年計画で本研究グループが進めてきた特別推進研究「レーザーガイド補償光学系による遠宇宙の近赤外線高解像観測」により、「188 素子補償光学システム」と、波面を測るのに必要な明るいガイド星の無い天域でも、新補償光学系を利用できるようにする「レーザーガイド星生成システム」を製作し、平成 18 年 10 月に行った初観測で期待通りの性能が達成されていることを確認した。本研究グループの開発した補償光学系はすばる望遠鏡の重要な新機能装置であり、ハワイ観測所の期待も高く、施設設備の準備は整っている。

学術的にも本研究グループは、既存の 36 素子補償光学系を駆使して、これまでに無く高い空間分解能で極めて微弱な銀河の観測が実現できることを実証した。それまでに最も深い近赤外線撮像観測がなされた「すばる深探査領域」について、初めて補償光学系を使用した超深撮像観測を積分時間 26.8 時間にわたって行った結果、波長 2.2 ミクロンで解像度 0.18 秒角、限界等級 24.7 等 (5シグマ) を達成した。これは遠方宇宙での銀河数密度を明らかにした超深撮像観測であり、遠方の暗い銀河のサイズや形態の測定から、銀河進化モデルとの比較がより定量的にできることが世界で初めて示された (Minowa ほか 2005)。

赤方偏移 3.9 の重力レンズクェーサー APM08279+5255 を補償光学系にて分離し、近赤外線分光器 (IRCS) により高分散スペクトル (波長分解能 1 万) を得た結果、スペクトル中に赤方偏移 1.1 の銀河に対応した NaID の吸収線を世界でも初めて確認することに成功した (Kondo ほか 2006)。

ほかにも、原始惑星系円盤の渦巻構造の発見 (Fukagawa ほか, 2004)、木星の衛星のスペクトルに含水鉱物あるいは水酸基に対応する 3 μm の吸収の発見 (Takato ほか 2004)、大質量星の星周円盤の発見 (Sako ほか 2005) など、2006 年 9 月の時点で Nature 誌論文 2 編, Science 誌論文 1 編を含む 32 編の査読論文成果が挙げられた。

② 共同して研究を行う者がいる場合には、その者との連絡調整の状況など、研究着手に向けての状況  
 本研究代表者と研究分担者は過去 5 年以上にわたり密接な共同研究を行ってきている。基盤 S-3 頁に示した研究組織図中のハワイ観測所雇員、研究指導中の東京大学大学院生、および前特別推進研究分担者であった有本教授、小林助教授からなる研究協力者ともすでに前特別推進研究時から実質的に共同研究を行ってきており、本研究が採択されれば、そのままスムーズに研究着手が可能である。

③ 本研究の研究成果を社会・国民に発信する方法等  
 家は放送大学 TV 講義で補償光学の特別講義を行っている他、これまでも折りに触れ記者会見を行い、新聞記事や公共 TV 報道で本研究の成果を発表してきた。本研究成果についても、大学での授業や公開講演会、記者発表、科学雑誌記事などで、家のみならず研究分担者も積極的に研究成果を発信していく所存である。

**研究計画最終年度前年度の応募を行う場合の記入事項 (該当者は必ず記述してください (公募要領 14~15 頁参照))**

本欄には、研究代表者として行っている平成 19 年度が最終年度に当たる継続研究課題の当初研究計画、その研究によって得られた新たな知見等の研究成果及び中間評価結果 (特別推進研究及び基盤研究 (S) が該当) を記述するとともに、当該研究の進展を踏まえ、今回再構築して本研究に応募する理由 (研究の展開状況、経費の必要性等) を記述してください。(なお、本欄に記述する継続研究課題の研究成果等は、7 頁の「これまでに受けた研究費とその成果等」欄には記述しないでください。)

研究種目名	審査区分	課題番号	研究課題名	研究期間
		.....		平成 年度～ 平成19年度

**当初研究計画及び研究成果等**

該当しない。

**応募する理由**

該当しない。

これまでに受けた研究費とその成果等

本欄には、研究代表者及び研究分担者がこれまでに受けた研究費（科学研究費補助金、所属研究機関より措置された研究費、府省・地方公共団体・研究助成法人・民間企業等からの研究費等。なお、現在受けている研究費も含む。）による研究成果等のうち、本研究の立案に生かされているものを選定し、科学研究費補助金とそれ以外の研究費に分けて、次の点に留意し記述してください。

① それぞれの研究費毎に、研究種目名（科学研究費補助金以外の研究費については資金制度名）、期間（年度）、研究課題名、研究代表者又は研究分担者の別、研究経費（直接経費）を記入の上、研究成果及び中間・事後評価（当該研究費の配分機関が行うものに限る。）結果を簡潔に記述してください。

② 科学研究費補助金とそれ以外の研究費は点線を引いて区別して記述してください。

① それぞれの研究費毎に、研究種目名（科学研究費補助金以外の研究費については資金制度名）、期間（年度）、研究課題名、研究代表者又は研究分担者の別、研究経費（直接経費）を記入の上、研究成果及び中間・事後評価（当該研究費の配分機関が行うものに限る。）結果を簡潔に記述してください。

(1) 特別推進研究(2002-2006年度)、「レーザーガイド補償光学系による遠宇宙の近赤外高解像観測」、研究代表者、6億7080万円： すばる望遠鏡用に本研究グループが開発し共同利用に提供中の36素子補償光学系に比して5倍の機能を持つ「188素子補償光学系」と補償光学系を全天で使用できるようにするための「レーザーガイド星生成システム」を開発した。両装置は当初計画を上回る性能のものが完成した。観測的研究により、宇宙でも最も遠い銀河を発見するなどの研究成果を挙げた。

(2) 基盤研究(C)企画調査(1999年度)、「8m級望遠鏡による21世紀の天文学」、研究代表者、230万円： すばる望遠鏡と第一期観測装置の完成を受け、2000-2010年代の天文学と期待される観測装置を展望した。

(3) 試験研究(B)広領域(1995-1997年度)、「究極の可視光検出器(裏面照射大型薄膜CCD)の試作」、研究代表者、1870万円： すばる望遠鏡用の超高感度大型CCDの試作を国内メーカーと共同して行い、長波長感度の高い独自の大型CCD素子の開発に目処をつけた。

(4) 総合研究(A)広領域(1993-1994年度)、「擾乱媒質中の波動伝播と補償光学」、研究代表者、1340万円： すばる望遠鏡の36素子補償光学系の基本設計を行うための、基本技術を関連応用分野の技術を調査して集約した。

(5) 一般研究(A)広領域(1992-1994年度)、「トモグラフィ-(断層写真)補償光学による高解像観測の研究」、研究代表者、2100万円： すばる望遠鏡補償光学装置の開発のため、波面計測原理の検討と計測装置の試作を行った。

(6) 試験研究(B)(1991-1992年度)、「アダプティブオプティクス(補償光学)装置の試作研究」、研究代表者、1350万円： 波面補償の中核となる可変形状鏡やティップティルト鏡の試作を行った。

(7) 一般研究(B)(1987-1988年度)、「高感度低雑音カメラによる銀河の分光学的研究」、研究代表者、740万円： (8)で開発したCCDカメラのCCD素子をより高感度なものに更新し、微弱光の分光観測を実現した。

(8) 一般研究(A)(1985-1986年度)、「CCD(固体撮像素子)による微光天体の測光・分光学的研究」、研究代表者、2960万円： 我が国で初めて液体窒素冷却による本格的なCCDカメラを開発し、岡山観測所188cm望遠鏡に「搭載して、共同利用に公開することに成功し、日本のCCD時代の先鞭を切った。

② 科学研究費補助金とそれ以外の研究費は点線を引いて区別して記述してください。

(1) 国庫債務負担行為(1997-1999年度)、すばる望遠鏡観測装置(その1)の一部、カセグレン補償光学系製作、高見英樹、家正則他、約2億円： すばる望遠鏡第一期観測装置として36素子補償光学系を製作し、共同利用に提供して、近赤外線高解像観測を進めている。

(2) 国庫債務負担行為(1996-1998年度)、すばる望遠鏡観測装置(その2)の一部、微光天体分光撮像装置製作、家正則他、約3億5000万円： すばる望遠鏡第一期観測装置として、微光天体分光撮像装置を製作し、共同利用に提供して、遠方銀河の分光学的研究を進めている。

研究期間名	国立天文台	研究代表者氏名	家 正則
-------	-------	---------	------

### 人権の保護及び法令等の遵守への対応 (該当者は必ず記述してください(公募要領7頁参照))

本欄には、本研究に関連する法令等を遵守しなければ行えない研究(社会的コンセンサスが必要とされている研究及び生命倫理・安全対策に対する取組が必要とされている研究等)を含む場合に、どのような対策と措置を講じるのか記述してください。

該当しない

### 研究分担者に分担金を配分する理由 (該当者は必ず記述してください(公募要領8頁参照))

(本欄には、研究分担者に分担金を配分しないと研究遂行上大きな支障が生じる理由を記述してください。)

該当しない

### 研究経費の妥当性・必要性

本欄には、「研究計画・方法」欄で述べた研究規模、研究体制等を踏まえ、次頁以降に記入する研究経費の妥当性・必要性・積算根拠について記述してください。また、研究計画のいずれかの年度において、各費目(設備備品費、旅費、謝金等)が全体の研究経費の90%を超える場合及びその他の費目で、特に大きな割合を占める経費がある場合には、当該経費の必要性(内訳等)を記述してください。

#### 開発用消耗品

- ー観測目的に応じたビームスプリッター製作(光学系)
- ービームスプリッター自動交換機構(機械系、電気系)
- ー可変形状鏡制御性能向上(機械系、電気系)

これらの開発製作に平成19年度1150万円、平成20,21年度に各1000万円、平成22年度に600万円の予算が必要と見込んでいる。

#### 可変形状鏡

現188素子可変形状鏡の動作性能を解析した結果を反映し、必要であれば電極配置をさらに最適化した可変形状鏡を製作する。可変形状鏡は極めて薄い鏡からなり、万一破損した場合にはレーザーガイド補償光学系の運用が2年以上停止することになるので、予備の可変形状鏡は共同利用上不可欠であり、特別推進研究で製作した可変形状鏡の性能評価を踏まえて、更なる性能向上をめざした2枚目を特注製作する。1枚目の製作費用と製作期間から約2年間の製作期間、2500万円の予算が必要である。

#### 研究員雇用経費(謝金)

基盤研究で観測的研究に従事する科学研究員を当初3年間は2名、後半2年間は1名雇用する。一人年間あたり5500千円。および随時発生する雑事の謝金500千円。

主な現有設備 (記入に当たっては、基盤研究(S)研究計画調書等作成・記入要領を参照してください。)					
研究機関	設備名	仕様(形式・性能)	専用・共同利用の別	設置年度	備考
国立天文台 ハワイ観測所	すばる望遠鏡	可視光赤外線望遠鏡 (直径8.2m、経緯台、能動光学)	共同利用	1999	本研究への使用スケジュールは観測所が決定する。
国立天文台 ハワイ観測所	188素子補償光学系	波面曲率センサー(188素子)、 バイモルフ可変鏡(188駆動素子)	H20年から共同利用化	2005	
国立天文台 ハワイ観測所	レーザーガイド星生成システム	固体和周波レーザー(4W)、 フォトニック結晶光ファイバー、 送信望遠鏡(50cm)	H20年から共同利用化	2006	
国立天文台 ハワイ観測所	近赤外線分光撮像装置	近赤外線撮像カメラ(波長1-5 ミクロン)、分光器(分解能 20000以下)	共同利用	2000	本研究への使用スケジュールは観測所が決定する。

**設備備品費の明細** (記入に当たっては、基盤研究(S)研究計画調書等作成・記入要領を参照してください。)(金額単位：千円)

年度	品名・仕様	数量	単価	金額	主として使用する研究者及び設置機関名	購入予定時期
19	計			0		
20	可変形状鏡(188駆動素子) CILAS(仏)社特注 計	一式	25000	25000 25000	ハワイ観測所	10月末
21	計			0		
22	計			0		
23	計			0		
研究機関名	国立天文台			研究代表者氏名	家 正則	

<b>消耗品費等の明細</b> (記入に当たっては、基盤研究(S)研究計画調書等作成・記入要領を参照してください。) (金額単位：千円)								
年度	消耗品費		旅 費		謝 金 等		そ の 他	
	品 名	金額	事 項	金額	事 項	金額	事 項	金額
平成19年度	光学部品	6000	(国内) 研究打ち合わせ	0	研究員雇用経費	11000		0
	機械部品	2500	(外国)		研究補助謝金	500		
	電気部品	3000	研究交流・ 研究成果発表	1000				
	計	11500	計	1000	計	11500	計	0
20年度	光学部品	6000	(国内) 研究打ち合わせ	0	研究員雇用経費	11000		0
	機械部品	2000	(外国)		研究補助謝金	500		
	電気部品	2000	研究交流・ 研究成果発表	1000				
	計	10000	計	1000	計	11500	計	0
21年度	光学部品	5000	(国内) 研究打ち合わせ	500	研究員雇用経費	11000		0
	機械部品	2000	(外国)		研究補助謝金	500		
	電気部品	3000	研究交流・ 研究成果発表	1500				
	計	10000	計	2000	計	11500	計	0
22年度	光学部品	4000	(国内) 研究打ち合わせ	500	研究員雇用経費	5500		0
	機械部品	0	(外国)		研究補助謝金	500		
	電気部品	2000	研究交流・ 研究成果発表	1500				
	計	6000	計	2000	計	6000	計	0
23年度	光学部品	1000	(国内) 研究打ち合わせ	500	研究員雇用経費	5500		0
	機械部品	0	(外国)		研究補助砂金	500		
	電気部品	1000	研究交流・ 研究成果発表	1500				
	計	2000	計	2000	計	6000	計	0

# 第三章 研究経過と成果の概要

## 3.1 すばる望遠鏡の視力を 10 倍に改善

### 補償光学装置をすばる望遠鏡の共同利用装置に提供

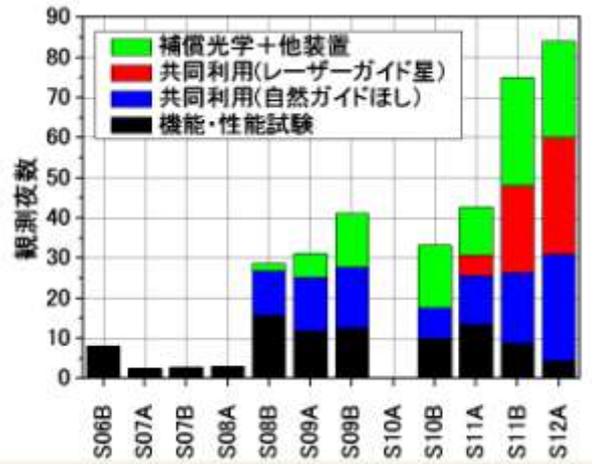
特別推進研究では、すばる望遠鏡ナミス焦点に搭載する 188 素子補償光学系本体とレーザーガイド星生成装置を開発し、近赤外線でのすばる望遠鏡の空間解像力 0.6 秒角を、その 10 倍の 0.06 秒角にまで高めることができることを実証した。また自然ガイド星が無い天域でも補償光学を使えるようにするため人工ガイド星をつくるレーザーガイド星生成装置を開発し照射に成功した。

本基盤研究 (S) では、これらの装置をすばる望遠鏡の共同利用装置として提供するのに必要な周辺光学系やシステム診断系を開発した。その結果、補償光学装置本体は平成 20 年度後期から完成度の高い装置として世界中の天文学者に公開した。観測申し込みが殺到した。

レーザーガイド星生成装置は平成 23 年度前期から共同利用に提供した。補償光学系本体と組み合わせた観測の開始は、可変形鏡の破損事故や、すばる望遠鏡の冷却液漏れ事故の影響があり、当初予定より約 1 年遅れたが、自然ガイド星の無い天域でも、補償光学系が利用可能となり、銀河系外天体や遠宇宙の観測への応用が拡がり、重力レンズ二重クェーサーの観測では、二つの像をつくる原因となった銀河の撮影に成功するなど、成果が続々と上がりつつある。

### 補償光学装置の利用者の著しい増大

右図は補償光学装置をすばる望遠鏡に搭載して行った観測の夜数統計である (S12A については追加公募中のため見込数夜数を含む)。自然ガイド星での共同利用観測は 2008 年度後期 (S08B) から開始しており、半期で 13 夜程度の安定した利用がある。レーザーガイド星を用いての観測は、基盤研究 (S) で開発した周辺光学系やシステム診断系の試験を 2009 年度まで行い、2010 年度から開始予定であったが、可変形鏡が破損する事故があり、S10A は実施できなかった。新しい可変形鏡を製作して、2011 年度前期 (S11A) から開始した。その直後にすばる望遠鏡の冷却液漏れ事故が発生するなど、想定外の事態も発生したが、S11A からは順調に夜数が増えている。



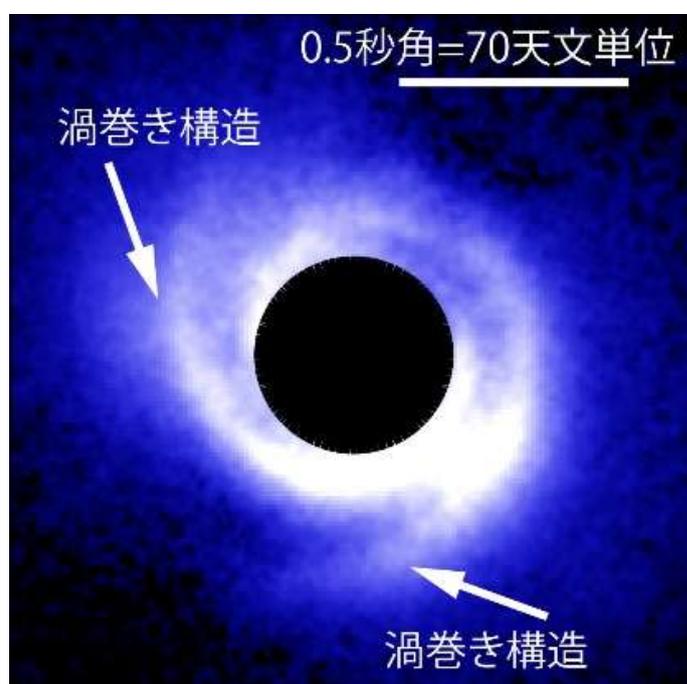
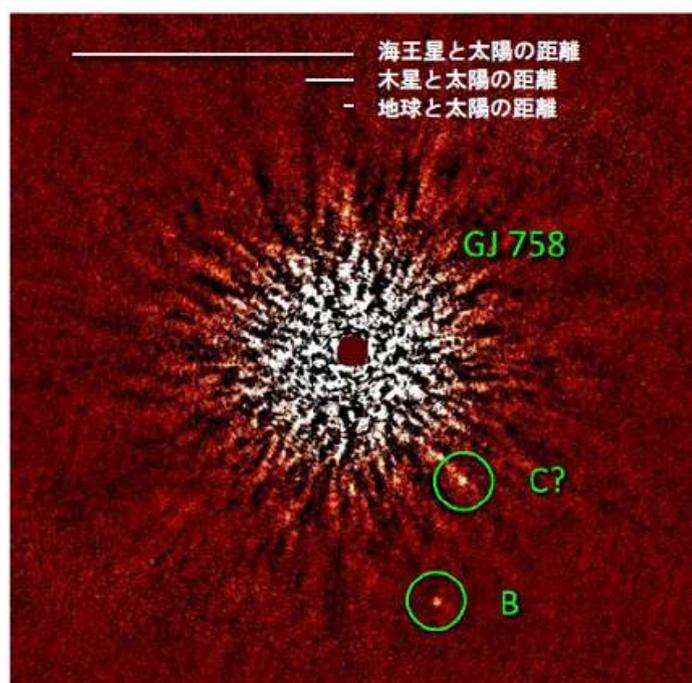
ちなみに、補償光学装置の観測総夜数は 2006 年以降で 352 夜 (試験観測 93 夜、自然ガイド星観測 103 夜、レーザーガイド星観測 56 夜、HICIAO など他チームが開発した装置を装備しての観測 99 夜) に達している。S12A 期に限ると全観測夜数のほぼ半分に達する見込みである。

これに伴い、補償光学装置の威力を実感する観測者も増え、次世代補償光学装置の検討や次世代超大型望遠鏡計画の検討にも弾みがついている。ハワイ観測所の補償光学運用担当者の負担が極めて重くなっており、運用できる技術者と支援天文学者を育成中である。

## 補償光学コミュニティの拡がり

すばる望遠鏡の補償光学系への期待は極めて大きく、2012 年度前期の利用状況を見ると、公募枠 77 夜のうちの 31.5 夜 (40%) が補償光学系を用いた観測となっている。レーザーガイド星を利用できるようになり、遠宇宙の観測が急速に増えている。本代表者のグループでも新たに球状星団の固有運動の良い観測データを得ており、今後成果が続々と発表できると考えている。

すばる望遠鏡の解像力が補償光学装置により 10 倍に改善されることを見越して、太陽系外惑星観測を目的とした第二世代のコロナグラフ HICIAO (田村: 特定領域, 平成 16-20 年度) が製作された。他にも、系外惑星撮像装置 SCEXAO (Olivier Guyon: 基盤 B, 平成 22-23 年度)、面分光器観測を目指した赤外面分光器 CHARIS (J. Kasdin: プリンストン大, 林正彦: 新学術, 平成 24-28 年度) が国際的拡がりを持って開発され始めている。HICIAO は戦略的観測プログラムが割り当てられ、平成 21 年度には太陽型星 GJ758 の周囲を巡る太陽系外惑星の画像を初めて撮影することに成功し (下図左)、平成 24 年には若い星 SAO 206462 の原始惑星系円盤の渦巻き構造を見事に捕らえる (下右図) などのスピノフ成果も得られた。このように補償光学の利用者が格段に増えている。



## 補償光学技術の国際的展開と他分野への応用

レーザー伝送に開発したフォトニック結晶ファイバー (三菱電線と開発) 技術は、欧州南天天文台やケック望遠鏡にも技術移転され採用された。さらに、すばる望遠鏡の次世代補償光学装置として、可変形副鏡の開発により地表層補償光学 (GLAO) を目指す可能性と多天体補償光学 (MOAO) を目指す可能性の検討を始めている。

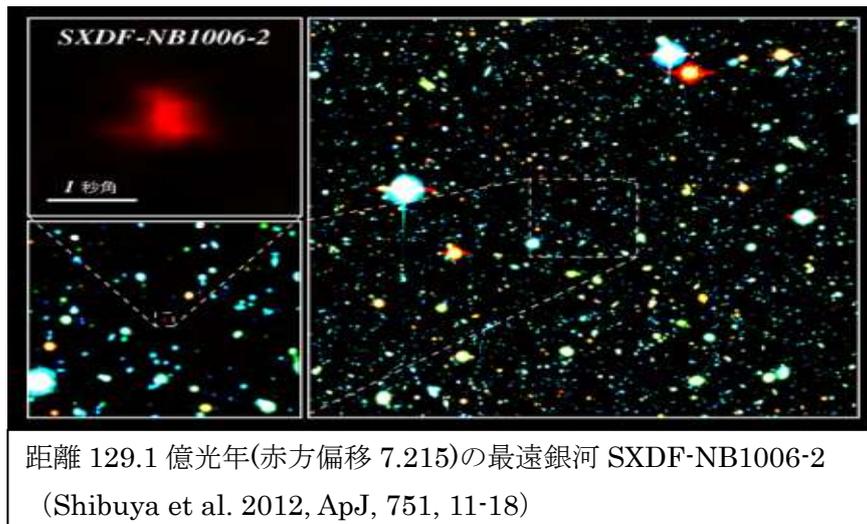
光波面の乱れを測定しその乱れを直すことで光学的な性能を向上させるという補償光学の考え方は、天文学に限らずさまざまな分野での応用が可能な技術である。実際、本研究グループは以下の分野との交流を行っている。眼底撮影 (網膜撮影に補償光学を応用することで診断解像力を向上させる)、レーシック手術 (眼レンズ手術に必要な光学歪みの測定)、補償光学顕微鏡 (細胞組織の内部を鮮明に撮影する技術)、レーザー核融合 (レーザービームの品質を補償光学で向上させてビーム強度を安定に増大させる) などである。

## 3.2 宇宙の夜明けの観測的研究で世界をリード

### 赤方偏移 7.215 の最遠銀河の発見

研究代表者(家正則)と研究協力者(柏川伸 国立天文台准教授、太田一陽 京都大学 GCOE 研究員、澁谷隆俊 総合研究大学院大学博士 3 年)のグループは、すばる望遠鏡を用いたライマン $\alpha$ 銀河の研究で、引き続き大きな学術的成果を挙げた。

本研究期間内では、赤方偏移 7.3 (129.3 億光年)の銀河探査のために新たな特殊フィルターを製作し探査観測を続けた。4 年間におよぶ探査観測の結果、赤方偏移 7.215 の新たな最遠銀河 SXDF-NB1006-2 をついに発見することに成功した(右図)。



遠方銀河探査の分野では、本研究グループが特別推進研究期間内の 2006 年に世界記録となる赤方偏移 6.96(128.8 億光年)の最遠銀河 IOK-1 を発見することに成功した以降、4 年間にわたりそれを越える銀河の発見が無かった。2010 年末から赤方偏移 7 を越えるいくつかの銀河の発見が海外で報ぜられ、2012 年 1 月にはすばるで赤方偏移 7.213 の銀河 GN-108036 (Ono et al. 2012) が世界記録を奪還したが、今回の発見はそれをわずかに上回る記録となった。

Table 1: 最も遠い銀河ベストテン (2012 年 6 月 10 日)

順位	名前	座標	赤方偏移	億光年	論文	発表年月
1	SXDF-NB1006-2	J021856.5-051958.9	7.215	129.1	澁谷他	2012.6
2	GN-108036	in GOODS NORTH field	7.213	129.1	小野他	2012.1
3	BDF-3299	J222812.3-0350959.4	7.109	129.0	Vanzella 他	2010.12
4	A1703_zD6	J131501.0+515004	7.045	128.9	Schenker 他	2012.1
5	BDF-521	J222703.1-350707.7	7.008	128.9	Vanzella 他	2010.12
6	G2-1408	J132357.1+272448	6.972	128.8	Fontana 他	2010.12
7	IOK-1	J132359.8+272456	6.964	128.8	家他	2006.9
8	HUDF09_1596	J033303.8-275120	6.905	128.7	Schenker 他	2012.1
9	SDF46975	in Subaru Deep field	6.844	128.6	小野他	2012.1
10	NTTDF-6345	J120536.9-074522.3	6.701	128.4	Pentericci 他	2011.12

### 宇宙の夜明け時期の特定

だが、学術的に重要なことは世界記録競争よりも、観測できる遠方銀河の数がこの時代を限界に急速に減るといふ事実である。

137 億年前のビッグバンで始まった宇宙は、急激な膨張に伴い 38 万年後には電離状態にあった陽子と電子が結合した中性水素原子が主となる「暗黒時代」に突入する。その後、初期の密度ゆらぎが成長して、約 2 億年後から宇宙のあちこちで初代星を含む原始銀河生まれ始めたと考えられている。原始銀河には若く高温の星があり、その紫外線により周辺空間の中性水素が次々に電離する。現在の宇宙空間は完全に電離しているが、初代の原始銀河からの紫外線で宇宙の大半が電離した時期を「宇宙再電離期」と呼ぶ。電離した空間では水素原子が放つ一番強い光であるライマン $\alpha$ 輝線は妨げられることなく進むが、電離が完了していないとライマン $\alpha$ 輝線はその先へは届かない。

ライマン $\alpha$ 輝線を放つ銀河を手がかりに、いつの時代から見えなくなるかを調べて宇宙再電離期（わかりやすくするため「宇宙の夜明け」と呼んでいる）を探るとい手法をすばる望遠鏡チームは追求した。

赤方偏移 4.8(124.0 億年前)、5.7(126.5 億年前)、6.6(128.2 億年前)の時代まで調べたところで、128 億年前後で見える銀河の数が減ることを発見した。研究代表者らは、すばる望遠鏡の主焦点カメラに搭載する特殊な狭帯域フィルター（透過中心波長 973nm と透過中心波長 1006nm）とを開発し、赤方偏移が 7.0(距離にして約 129 億光年彼方)と赤方偏移 7.3 (129.3 億年前)の銀河に狙いを定めた探索観測を 8 年間にわたり行い、赤方偏移 7.0(128.8 億年前)の銀河 (IOK-1) を 2006 年に、また今回赤方偏移 7.2(129.1 億年前)の銀河 SXDF-SN1006-2 を発見した。また、すばる望遠鏡の観測限界に挑む観測で、それぞれ 1 個しか発見できなかったことから、これこそ宇宙再電離（宇宙の夜明けと名付けた）の現場を観測しているものと考えられることを、本研究グループがすばるの観測データを元に世界に先駆け発見し、発表したことは、国際的にも大きな成果と認められている。

ちなみに、本研究期間内に発表した Ota et al. (2008)は引用件数 85、Kashikawa et al (2011)は引用研究 32 と発表からの月日が浅いにも拘わらず、注目されており、特別推進最終年度に発表した Kashikawa et al. (2006)は引用件数 223、Iye et al. (2006)は引用件数 193 となっている。

## 国際会議招待講演

(1) 2008 年にグルノーブル(仏)で開催された国際光工学会 (SPIE) 総会では、天文学者と装置技術者約 2000 名が参加した総会で、”High redshift galaxy surveys”と題して「宇宙の夜明け」に関する研究現状のレビュー講演を家が行った。この講演録は研究集會集録の巻頭論文として発表された。

(2) また 2010 年にはプラハ(チェコ)で開催された宇宙空間研究委員会 (COSPAR) の総会でも”Lyman alpha emitter surveys at high redshift”と題して家が「宇宙の夜明け」に関する招待講演を行った。

(3) 日本学士院からの依頼を受け、「宇宙の夜明け」の研究に関する日本の研究を軸にまとめたレビュー論文 ”Subaru studies of the cosmic dawn”を、家が 2011 年に日本学士院紀要 (PJAB, 87, 575) に発表した。

(4) 葉山で 2008 年に開催した国際研究集會で、柏川が「宇宙の夜明け」に関する招待講演を行った。

(5) ポルトガルで開催された国際研究集會で、柏川が「宇宙の夜明け」について招待講演を行った。

そのほか一般講演等については 9 章にまとめた。

## 3.3 次世代超大型望遠鏡計画の推進

補償光学系によりハッブル宇宙望遠鏡を凌ぐ解像力を地上望遠鏡で実現できることを実証し、次世代の地上超大型望遠鏡 TMT(右図)をハワイ島マウナケア山頂に国際協力科学事業として建設することを目指した活動を平成 17 年度から展開している。日本の代表者として国立天文台内に TMT 推進室を組織し、推進室長として推進活動に専念している。TMT でも補償光学を最大限に進化させて装備することが肝要であり、すばる望遠鏡の次世代補償光学系の開発計画の検討にも注力している



マウナケア山頂での国際協力科学事業としての建設を目指す次世代超大型望遠鏡 TMT の完成予想図。

# 3.4 全体計画の進捗経過

## 平成19年度実績報告書より

平成14-18年度に本研究グループが実施した特別推進研究「レーザーガイド補償光学による遠宇宙の近赤外高解像観測」により、開発製作し試験観測に成功した188素子補償光学系とレーザーガイド星生成システムを組み合わせ、すばる望遠鏡の共同利用観測装置として完成し公開する準備を進めた。具体的には、レーザービーム送出望遠鏡の性能改善、赤外観測光と波面計測用可視光を分離するより高性能な光学素子であるビームスプリッターコーティングの開発、波面擾乱の計測装置の機能増強と改修などを進め、システム全体の診断・調整系の設計・開発を進めた。新補償光学系については平成20年度後期から一部共同利用に提供する。

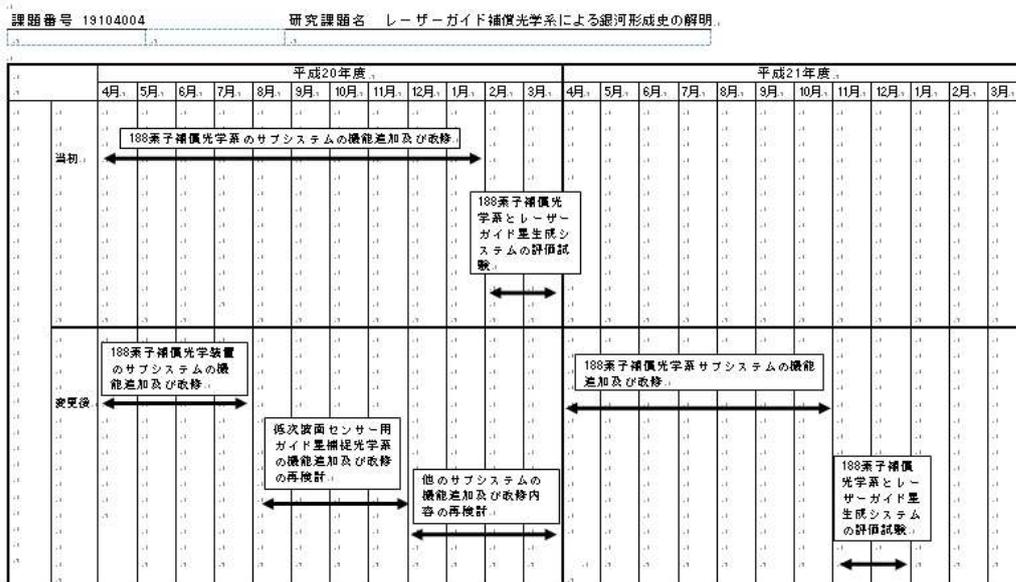
また、すばる深探査領域で本研究グループが発見した最遠のライマン $\alpha$ 輝線銀河(赤方偏移7.0、約129億年前の銀河)などの遠方銀河の系統的探査観測により、宇宙の再電離時期に迫る研究を進めた。平成19年度末時点で、最遠銀河ベストテンのうちの9つまでをすばる望遠鏡による発見が占めている。銀河形成史の解明のための遠宇宙の観測的研究を発展させ、さらに遠方の銀河探査を目指して、赤方偏移7.3の銀河探査のためのフィルターを開発した。また赤方偏移6~7の時代の銀河をより多く観測して、宇宙の再電離の描像を観測的により明確にすることを目指して、新たな観測計画を提案中である。レーザーガイド星システムを用いた本格的な試験実証観測の具体化のため、遠銀河、クエーサー、近傍銀河に関する各種提案の最適化を検討中である。

## 平成20年度実績報告書より

国立天文台ハワイ観測所の口径8mすばる望遠鏡の、近赤外線での空間解像力を10倍向上させる188素子補償光学系とその適用範囲を広げるためのレーザーガイド星生成システムを、2006年度までに特別推進研究で完成させたが、本基盤研究Sでは、これらのシステムをすばる望遠鏡で連携させて安定運用するために必要となる、波面センサー、大気分散補正系、ビームスプリッター、ガイド星補足光学系などのサブシステムを開発し、全体を統合したシステムを完成させることと、これを用いてこれまで補償光学観測ができなかった遠宇宙の観測を行うことを目的としている。

平成20年度に開発を行ったビームスプリッター交換機構、大気分散補正光学系、低次波面センサー用ガイド星捕捉システム、188素子AO用ADCユニット等について、製作完了あるいはすばる望遠鏡への設置を平成21年度に持ち越すことになったため、これらに関する予算の繰り越しを行ったが、平成21年にこれらのサブシステムの開発を完了し、全体統合系の試験観測を開始し、11等星相当のレーザーガイド星を安定に生成することができるようになり、繰り越し事業については完了した。(平成20年度からの繰越額 21,157,000円)

事業計画行程表



## 平成20年度自己評価報告書より

### 1. 研究計画の概要

2002-2006年度の特別推進研究(研究代表者:家正則)で開発した188素子補償光学系とレーザーガイド星生成システムをすばる望遠鏡に搭載して、共同利用に提供できるシステムとして完成させ、高赤方偏移銀河などの高解像近赤外観測を行うことによって、初期宇宙の銀河形成史の解明に迫ることを目的とする。

### 2. 研究の進捗状況

レーザーガイド星補償光学系をすばる望遠鏡と連動して共同利用に提供できるシステムにするために、高次波面センサー、低次波面センサー、ビームスプリッタ交換機構、大気分散補正機構などの製作を進めた。2008年度内に完成予定であったサブシステムの一部は2009年度前半の完成に持ち越したが、全体計画に支障は無く順調に進捗した。

### 3. 現在までの達成度

② 概ね順調に進展している。

当初予定より若干遅れが発生しているが、全体計画の中では支障無く進展している。

### 4. 今後の研究の推進方策

2009年6月にレーザーガイド星生成システムの組み合わせ試験を行い、その後夏から秋にかけて、全体システムの試験調整を進める予定である。2009年度末には本格的な観測を開始する予定で、観測対象や観測手順の事前検討を平行して進めている。

### 5. 代表的な研究成果

〔雑誌論文〕(計 7件)

① Ota, K., Iye, M., Kashikawa, N., et al.: Reionization and Galaxy Evolution Probed by  $z = 7$  Ly $\alpha$  Emitters, ApJ, 677, 12-26, (2008), 査読有

距離129億光年の最も遠い銀河を研究代表者らが2006年に発見したが、その観測の詳細と宇宙の再電離現象に関する制限を詳述した論文を発表した。

② Furusawa, H.; Kosugi, G.; Akiyama, M.; Iye, M.; et al.: The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). II. Optical Imaging and Photometric Catalogs, ApJS, 176, 1-18, (2008) 査読有

③ Ouchi, M.; Kashikawa, N.; Okamura, S.; Iye, M. et al.: The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). IV. Evolution of Ly $\alpha$  Emitters from  $z=3.1$  to  $5.7$  in the 1 deg $^2$  Field: Luminosity Functions and AGN, ApJS, 176, 301-330, (2008) 査読有

④ McGrath, E. J.; Stockton, A.; Canalizo, G.; Iye, M.; Maihara, T.: Morphologies and Color Gradients of Luminous Evolved Galaxies at  $z \sim 1.5$ , ApJ, 682, 303-318, (2008) 査読有

ハッブル宇宙望遠鏡の高解像近赤外観測による赤方偏移2の銀河の内部構造の解析を行った。

⑤ Stockton, A., Iye, M., Maihara, T.: Morphologies of Two Massive Old Galaxies at  $z \sim 2.5$ , ApJ, 672, 146 (2008) 査読有

⑥ Misawa, T.; Tytler, D.; Iye, M. et al.: Spectroscopic Analysis of H I Absorption Line Systems in 40 HIRES Quasars, AJ, 134, 1634, (2007) 査読有

⑦ Yamanoi, H., Iye, M. et al.: The Galaxy Luminosity Functions down to  $M \sim -10$  in the Hydra I Cluster, Astron. J. 1376, (2007) 査読有

〔学会発表〕(計 18件)

① Iye, M.: High redshift galaxy surveys, SPIE.7016, 1-10, (2008) 査読無

2008年6月26日にマルセイユで開催された国際光工学会の全体シンポジウム企画の特別招待講演として参加者1200名の参加者に対して「最遠銀河の探査と宇宙論の現状」について講演した。

② Kondo, S., Iye, M.; Study of  $z=3.5$  Mg II Absorption Systems with Subaru IRCS NearInfrared High Resolution Spectroscopy, ASPC, 399, 209-210, (2008) 査読無

③ Iye, M., Kashikawa, N., Furusawa, H., Ota, K., Ouchi, M., Shimasaku, K.: Suprime-Cam LAE Survey at Redshift 7.3 -- Ultimate Limit with New Red-Sensitive CCDs, ASPC, 399, 61-62, (2008) 査読無

④ Ouchi, M.; Kashikawa, N.; Iye, M.; et al.; Discovery of a Giant Ly $\alpha$  Emitter Near the Reionization Epoch, arXiv0807.4174, (2008) 査読無

⑤ Ota, K.; Kashikawa, N.; Malkan, M. A.; Iye, M.; et al.: Overdensity of  $i'$ -Dropout Galaxies in the Subaru Deep Field: A Candidate Protocluster at  $z \sim 6$ , arXiv0805.4480, (2008) 査読無

発表②から⑤はすばる望遠鏡による遠宇宙の観測的研究の成果発表である。

⑥ Watanabe, M.; Oya, S.; Hayano, Y.; Takami, H.; Iye, M.; Implementation of 188-element curvature-based wavefront sensor and calibration source unit for the Subaru LGSAO system, SPIE.7015E.169W, (2008) 査読無

⑦ Minowa, Y.; Takami, H.; Watanabe, M.; Hayano, Y.; Iye, M.; et al.; Development of a dichroic beam splitter for Subaru A0188, SPIE.7015E.166M, (2008) 査読無

⑧ Oya, S.; Hayano, Y., Takami, H., Iye, M., et al.; Characterization of vibrating shape of a bimorph deformable mirror, SPIE 7015E.1030, (2008) 査読無

⑨ Hayano, Y.; Takami, H.; Ito, M.; Iye, M.; Current status of the laser guide star adaptive optics system for Subaru Telescope, SPIE 7015E.25, (2008) 査読無

⑩ Saito, N.; Hayano, Y.; Iye, M.; Sodium D2 resonance radiation in single-pass sum-frequency generation with

actively mode-locked Nd:YAG lasers, OptL, 32, 1965 (2007)

①他に日本天文学会年会発表等多数

⑥以下はレーザーガイド星補償光学系の開発に不可欠な研究の成果発表である。

〔その他〕

(1) 新聞記事

広い撮影視野 効率よく銀河探索：毎日新聞、2009. 1. 25

宇宙の謎に迫る すばる望遠鏡：北日本新聞、2009. 1. 5

宇宙の起源に日本の目 すばる望遠鏡観測 10 年：岩手新聞、2009. 1. 4

家教授ら 3 人に仁科記念賞：読売新聞、2008. 11. 14

家教授らに仁科記念賞：朝日新聞、2008. 11. 14

国立天文台の家氏らに仁科賞：日経産業新聞、2008. 11. 14

仁科記念賞 家・上田・早野氏が受賞：日刊工業新聞、2008. 11. 14

仁科記念賞に家氏ら 3 氏：日本経済新聞、2008. 11. 14

最遠銀河の観測報告：中日新聞、2007. 9. 30

望遠鏡、近くの星に照準：日本経済新聞、2007. 9. 16

(2) 放送大学 TV 講義

大気のゆらぎを打ち消す高解像天体観測：

年間 4 回放映

(3) ホームページ

<http://optik2.mtk.nao.ac.jp/~iye/kiban-s.htm>

[http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/11/20/j\\_index.html](http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/11/20/j_index.html)

[http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/09/13/j\\_index.html](http://subarutelescope.org/Pressrelease/2006/09/13/j_index.html)

(4) 一般講演等

・「宇宙史の暗黒時代に迫る－最遠銀河の発見、レーザーガイド補償光学、次世代望遠鏡－」東京大学物理セミナー、2008. 12. 19

・「宇宙暗黒時代の夜明け－すばる望遠鏡が探る超遠方銀河－」、第 6 回自然科学研究機構シンポジウム、東京国際フォーラム、2008. 9. 23

・「宇宙史の暗黒時代に迫る」、浜松コンファレンス、浜松市、2007. 11. 3

・「すばる望遠鏡から超巨大望遠鏡へ－宇宙史の暗黒時代に迫る－」、日本天文学会記念公開講演会、岐阜県、2007. 9. 29

・「光で宇宙の果てを見る」日本物理学会科学セミナー、電気通信大学 2007. 8. 25

・スーパーサイエンス高校講義（戸山高校、高崎高校、川越高校）

・朝日カルチャーセンター新宿講演

・江東区民講座

## 平成21年度実績報告書より

国立天文台ハワイ観測所の口径 8 m すばる望遠鏡の、近赤外線での空間解像力を 10 倍向上させる 188 素子補償光学系とその適用範囲を広げるためのレーザーガイド星生成システムを、2006 年度までに特別推進研究で完成させたが、本基盤研究 S では、これらのシステムをすばる望遠鏡で連携させて安定運用するために必要となる、波面センサー、大気分散補正系、ビームスプリッター、ガイド星補償光学系などのサブシステムを開発し、全体を統合したシステムを完成させることと、これを用いてこれまで補償光学観測ができなかった遠宇宙の観測を行うことを目的としている。

平成21年度は、これらのサブシステムの開発が進み、全体統合系の試験観測を開始し、11 等星相当のレーザーガイド星を安定に生成することができるようになった。平成22年 1 月に行った試験観測中に可変形状鏡に損傷が発生したため、この復帰に約 6 ヶ月を要するが平成22年度中には、本研究目的である遠宇宙の観測テーマについてレーザーガイド補償光学系を用いた観測を開始できる見込みである。

遠宇宙の銀河の観測においては、本研究グループが平成18年に発見した 129 億光年かなたの銀河 IOK-1 が、現在でも最遠記録となっている。この記録を更新するため 130 億光年かなたの銀河探査観測を進めており、撮像観測からいくつかの候補銀河を発見した。平成21 年度末にはこのうちの 2 つの銀河の分光観測を行い、そのデータ解析を開始している。遠方の銀河の観測を拡大することにより、宇宙史の中で、この時代に形成された銀河からの紫外線放射により銀河間空間の中性水素ガスが電離した「宇宙の夜明け」が起きたと考えられるが、その時期をより詳細に特定すること、また高解像観測で初期銀河の構造を解明することを目的としている。

## レーザーガイド星補償光学系による銀河形成史の解明

Laser guide star adaptive optics studies of  
the formation history of galaxies



家 正 則 (IYE MASANORI)

自然科学研究機構国立天文台・光赤外研究部・教授

### 研究の概要

本研究代表者のグループが特別推進研究(14-18年度)で開発した188素子補償光学系とレーザーガイド星生成装置を、すばる望遠鏡に実装して共同利用装置として完成させ、129億光年かいたの銀河やクエーサーなどの高解像観測を行い、宇宙の暗黒時代の終焉期における銀河形成史を観測的に解明する。

研 究 分 野： 数値系科学

科 研 費 の 分 科 ・ 種 目： 天文学

キ ー ワ ー ド： 補償光学、回折限界、レーザー人工星、原始銀河、宇宙再電離

#### 1. 研究開始当初の背景

大気の中らぎを測り、光波面擾乱を実時間補償して、本来の空間分解能を達成する技術を「補償光学」と呼ぶ。本研究グループは平成14-18年度の特別推進研究「レーザーガイド補償光学系による遠宇宙の近赤外高解像観測(研究代表者：家正則)」により、(1)188素子補償光学系、および(2)レーザーガイド星生成システムを開発し、平成18年10月に行った試験観測で、世界トップレベルの補正性能と当初目標を上回るレーザー出力を達成した。

#### 2. 研究の目的

本基礎研究(S)では、先の特別推進研究で開発したレーザーガイド補償光学系を、すばる望遠鏡システムに組み込み、効率的な観測を行うのに必要な補助光学系を加えて、共同利用装置として完成させ、本研究の主目的である(1)最遠銀河の高解像観測、(2)赤方偏移1-3の銀河の形態、(3)クエーサーやガンマ線バースターの近赤外分光、(4)クエーサー母銀河の分光、(5)近傍銀河の形成史などの観測的研究を行うことを目指す。

#### 3. 研究の方法

すばる望遠鏡で、実際の観測を円滑に行うために必要となる補助光学系などの開発を行い、レーザーガイド星補償光学系を共同利用装置として完成させ公開する。装置開発者に与えられる観測時間を活用して、これまで

不可能であった遠方宇宙の銀河やクエーサーの補償光学観測を実施し、銀河形成史の解明をめざす。

#### 4. これまでの成果

平成14-18年度に本研究代表者の特別推進研究「レーザーガイド補償光学系による遠宇宙の近赤外高解像観測」により、開発製作し試験観測に成功した188素子補償光学系とレーザーガイド星生成システムに、以下に挙げる補助光学系を追加開発した。

自然ガイド星を用いた観測については、すばる望遠鏡の共同利用観測装置40188として完成し、平成20年9月より世界中の天文学者の利用に共同利用装置として、提供し公開した。

追加開発した補助システムとしては、(1)低次波面センサー、(2)ビームスプリッタ、(3)ビームスプリッタ交換機構、(4)大気色分散補正光学系、(5)低次波面センサー用ガイド星捕捉光学系、(6)高次波面センサー制御光学系、(7)校正用光源がある。いずれも既製品は無く、本グループが新規設計して制作した(Harano et al 2008)。

レーザーガイド星を用いる観測については、レーザー送信望遠鏡等の光学調整を進めた結果、高度90kmの上空で11等星相当の明るさで発光するレーザーガイド星を、所望の観測位置に発生させるシステムを完成

した。全体系が大変複雑なため、すばる望遠鏡のシステムとして完成し、安定運用に至るまでに何段階もの技術試験が必要であったが、最終総合試験と本研究目的の観測は2010年秋から開始できる予定である。

装置開発に平行して観測的研究も努力的に進めた。すばる探査領域で本研究グループが系統的に探査した結果、赤方偏移5.7、6.6、7.0の遠方銀河のさらなる系統的探査観測により、宇宙の再電離時期を特定する研究を進めた (Iye 2008; Ota et al. 2008)。分光観測でその赤方偏移の測定がなされた遠方銀河の上位十三位までは本研究グループの発見で独占している。新たな特殊フィルターを制作し、さらに遠方の赤方偏移7.3の銀河候補天体を新規発見し、2010年春に分光観測を行い解析を進めている。これにより、最遠方銀河の世界記録を自己更新できる可能性がある。

レーザーガイド星システムを用いると、本研究代表者らが発見した赤方偏移7.0の最遠銀河 IOK-1などを約10倍の空間解像度で観測することが可能になり、形成期の銀河の構造の観測から形成過程に近ることができるはずである。具体的な観測法やターゲットを検討し、またキューサーやガンマ線天体の高解像撮像と高分散分光観測の計画策定を進めた。

一連の探査のなかで距離としては四番目となるが、極めて大きく広がったダイヤモンド線銀河を発見した (Ouchi et al. 2009)。129億年前に、すでに大きな原始ガス銀河があったことが示された。

共同利用観測の成果の中では、本研究分担者の早野が参加した研究成果として、太陽類似のG型星 GJ758 を補償光学装置で像を絞り、人工日食を起してその周辺の暗い天体を撮影する手法を用いて、始めて太陽系外惑星 GJ758b とCが撮影された。この発見は *Time* 誌が選んだ2009年の科学上の十大発見の一つに選ばれた成果であり、本研究側としては成し得なかったものである。

## 5. 今後の計画

これまでに製作したコンポーネントの最終調整、組合せ試験などを進め、188素子レーザーガイド星補償光学系の総合試験、および総合試験観測を進め、2010年度末から共同利用観測を開始する。

2010年秋からのレーザーガイド星補償光学装置を駆使した観測開始に向けて、装置開発者グループに与えられる保

証時間20夜相当分の、執行計画を定めるため、本研究分担者、連携研究者などを軸にサイエンス検討会をこれまで二度開催してきたが、2010年5月に第三回検討会を開催し、観測計画について検討を深める予定である。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む) 以下三件の学術受賞があった。

**仁科記念賞受賞** (2008年12月5日) : 荻正剛

「すばる望遠鏡による初期宇宙の探査」

**赤上孝樹賞受賞** (2010年2月4日) : 柏川徳成

「すばる探査宇宙探査計画による銀河形成史の研究」

**大塚科学大賞表彰** (2010年4月13日) : 荻正剛、

高見英樹、早野裕、「望遠鏡の視力を高めるレーザーガイド星補償光学系の研究」

主な学術成果論文としては

Iye, M., "High redshift galaxy surveys", SPIE (総会招待講演), 7016, 1-10 (2008)

Ouchi, M., Kashikawa, N., Iye, M., ifu,

"Discovery of a Giant Ly $\alpha$  Emitter Near the Reionization Epoch", *ApJ*, 696, 1165-1175 (2009)

Ota, K., Iye, M., Kashikawa, N., ifu,

"Reionization & galaxy evolution probed by  $z=7$  Ly $\alpha$  emitters", *ApJ*, 677, 12-25 (2008)

Hayano, Y., Takami, H., Iye, M. :

"Current status of the laser guide star adaptive optics system for Subaru Telescope", SPIE, 7015, 1-8 (2008)

Ito, M., Hayano, Y., Takami, H., Iye, M. :

"High-power laser beam transfer through optical relay fibers for a laser guide adaptive optics system", PASJ, 61, 763-768, (2009)

McGrath, E., Iye, M., "Morphologies and Color Gradients of Luminous Evolved Galaxies at  $z \sim 1.5$ ", *ApJ*, 682, 303-318, (2008)

## 解説記事

荻正剛, 宇宙の夜明けに迫る一最果ての銀河探査一, *パリティ* 23, 11, 4-14, (2008)

## 新聞報道

宇宙は近くなった 最古銀河とらえた  
技術、読売新聞、2009年10月23日  
すばる望遠鏡10年 遠方宇宙研究世界をリード、読売新聞、2009年9月6日

ホームページ

<http://optik2.mtk.nao.ac.jp/~iye/>

課題番号	19104004	研究期間	平成19年度～平成23年度
研究課題名	レーザーガイド補償光学系による銀河形成史の解明	研究代表者 (所属・職)	家 正則 (国立天文台・光赤外研究部・教授)

【平成22年度 研究進捗評価結果】

評価	評価基準
A+	当初目標を超える研究の進展があり、期待以上の成果が見込まれる
A	当初目標に向けて順調に研究が進展しており、期待どおりの成果が見込まれる
○	B 当初目標に対して研究が遅れており、今後一層の努力が必要である
	C 当初目標より研究が遅れ、研究成果が見込まれないため、研究経費の減額又は研究の中止が適当である

(意見等)  
 研究代表者が特別推進研究で開発したレーザーガイド補償光学系を、すばる望遠鏡システムに組み込み、最遠銀河の高解像観測などを行い、銀河形成史を解明することを目指した研究である。計画は詳細設計等の遅れがあった上、総合試験中に発生した可変形鏡の損傷事故により、当初計画に比して約1年半遅れている。残された研究期間内に何を最優先課題として観測するかについて、まだ具体的な方針が示されていない点が懸念される。今後の一層の努力により、科学的成果を挙げることを期待したい。

平成22年度実績報告書

繰越（翌債）を必要とする理由書

機関番号：62616	研究機関名：国立天文台	研究代表者名：家 正則
課題番号：19104004	繰越(翌債)承認要求額：910,000円（内訳：直接経費 700,000円・間接経費 210,000円）	
研究種目：基盤（S）、研究課題名：レーザーガイド補償光学系による銀河形成史の解明		
当初計画及び変更後の計画		当初の研究計画
<当初計画> ・最終試験準備(H22.4-9) ・最終総合試験(H22.10-12) ・科学観測開始(H23.1) ・H22年度成果とりまとめ(H23.3)		(研究概要) ※2~3行程度 レーザーガイド補償光学系の最終総合試験により所期性能達成を確認し、本年度内に銀河形成史の解明に関する科学観測に着手する予定であった。
<変更後の計画> ・最終試験準備(H22.4-9) ・最終総合試験(H22.10-H23.3) ・科学観測開始(H23.4) ・H22年度成果とりまとめ(H23.6)		
繰越事由の発生した時期 平成22年10月～平成23年1月		補助事業の完了時期 平成23年6月30日：3ヶ月延長
事由(注)		
記号等 ㊦ ア 気象の関係(豪雨) (㊦キ及び㊦ウの場合は、具体的な内容を記載) ※2~3行程度 ※㊦アの場合は記入不要		

(注) 以下の事由(記号等)については、具体的な内容の記載をすること		具体的な内容を記載する必要がない事由(事由(記号等)のみを選択)	
㊦キ 計画に関する諸条件(新たな知見の発見) (研究協力者の確保難) (装置の開発遅延) (機器の故障) (その他(内容))	㊦ウ 資材の入手難 (資材及び資料の入手難) (マウス等実験動物の確保難) (その他(内容))	㊦エ 計画に関する諸条件(計画の変更)	㊦ア 研究に際しての事前調査 ㊦イ 研究方式の決定の困難 ㊦ア 気象の関係(豪雨) ㊦イ 気象の関係(豪雪) ㊦ウ 気象の関係(風浪) ㊦エ 気象の関係(その他)

## 3.5 サイエンスワークショップ

(1) 国立女性教育会館(埼玉県比企郡嵐山町) 2010年5月24日-25日 参加者19名

LGSAO チームに与えられる保証時間 (GT : Guaranteed Time) で行うサイエンスについて一日半に渡り合宿して協議した。その結果開発チーム 13 名については基本的に一人一夜の観測を各自のテーマに基づき行うこととし、残りの7夜については、開発チームと周辺のサイエンスメンバーから GT 観測提案を受け、審議の結果メンバーで投票して執行計画を決めることとした。

開発者裁量枠 (13 晩) の内訳は以下の通り: 家(1)、高見 H(1)、早野(1)、大屋(1)、服部(1)、渡辺(1)、斉藤(1)、伊藤(1)、寺田(1)、表(1)、Guyon(1)、美濃和(1)、高見 M (0.5)、大藪 (0.5)

公募枠(7 夜)に提案された観測テーマのリストは以下のとおりであった。

High- $z$ 銀河撮像: total 12 (5)				
家	IoK1, 重力レンズ銀河	J,K, NB imaging	LGS	2 (1), 2 (1)
美濃和	BzKs, DRGsの形態	J,K imaging	LGS/NGS	5 (1)
渋谷	LAEの形態	K imaging	LGS	2 (1)
五十嵐	Ultra bright SMG	K imaging	LGS	1 (1)
QSO撮像 (PSF差し引き): total 8 (1.5)				
大藪	QSO母銀河	K imaging	LGS/NGS	1
Rusu	重力レンズQSO	K imaging	LGS/NGS	2 (0.5)
大越	DLA母銀河	NB imaging	LGS/NGS	5 (1)
吸収線: total 1.5 (0.5)				
濱野	QSO吸収線系	zJ, J echelle	LGS/NGS	1.5 (0.5)
近傍銀河: total 3 (1)				
白旗	AGN分子トラス	M echelle	LGS/NGS	2 (1)
大井	Sy銀河の星形成	GrismL	NGS	1 (1hr)
銀河系内: total 5 (2.2)				
樋口	球状星団の固有運動	K imaging	NGS	2 (1)
成田	惑星系の軌道	GrismJ, EchelleJ	NGS	1 (0.2)
高遠	小惑星の水	KL-prism	LGS/NGS	2(1)

寺田

「Spatially Differential Spectroscopy of Inner Region around YSOs」、I. Class I sources (LGS) [ $<200\text{AU}$ ]、II. Classical T Tauri Stars (NGS) [ $<100\text{AU}$ ]、観測モード: グリズム (K), L; エシエル L, (M)

「Slicing Protoplanetary Disks in Orion Nebula」、ガイド星: LGS&NGS、観測モード: グリズム (K), L; プリズム KL

伊藤

「LGS を用いて M17 星形成領域を撮像観測」(J, H バンド)、1. これまでに Kバンドでしか検出できなかった Class I 天体の J, H バンドでの等級を同定する。2. コンパクトなシルエット天体を観測し、エンベロープ (シルエット) の形状を観測する。3. Class I or Class II のシルエット構造の対比を検討する。ガイド星: LGS, 観測モード: J, H バンド撮像

「NGC7538 (ウルトラコンパクト HII 領域) の撮像観測」 シルエット天体の発見を目的とする。ガイド星: LGS, モード: Bry, K-cont 撮像

高見英樹

「ミラの視直径測定」、大気吸収線毎のサイズを測定、ガイド星: NGS, モード: K バンドグリズム

Pyo

「Outflows from Sub-Stellar to High Mass Star Formation」

(低質量星) 星円盤系内部の kinematics, 惑星誕生が予想される transition disk 天体に置けるマイクロジェット の検出、ガイド星: NGS, モード: [FeII], HeI, H<sub>2</sub> のエシエル分光

(大質量星) アウトフローが発見されている天体の、アウトフローソースの確定と、その近傍の速度空間情報を得る。 ガイド星 : LGS(?), モード : L', M' 撮像、エシエル分光

## 高遠

「Where is the water? -searching for an evidence of Water on D-type asteroid」

D 型小惑星の水の痕跡を探る、ガイド星 : LGS, NGS、モード : プリズム KL

## 家

重力レンズ銀河の構造、IOK-1 の高分解能撮像、球状星団の固有運動 w/樋口、重力レンズ QSO w/Rusu

ガイド星 : LGS、モード : 撮像 (J, K, NB)

## 美濃和

「DLA 母銀河探査 w/大越」、ガイド星 : NGS or LGS、モード : NB 撮像

## 渡辺

「AGN ダストトーラス」 形状モデルへの制限、ガイド星 : NGS or LGS モード : 偏光分光

## 大屋

「重力レンズ QSO」 輝線領域の構造を探る、ガイド星 : NGS or LGS モード : グリズム K, L

## 大藪

「AGN 母銀河」、ガイド星 : NGS or LGS、モード : K バンド撮像

## (2) 大阪大学中之島センター(大阪市) 2011 年 9 月 8 日 参加者 36 名

すばる望遠鏡のレーザーガイド補償光学による観測が軌道に乗り始めたことを受け、次世代の補償光学装置と高解像観測の将来計画を検討した。

早野、美濃和ほかによるすばる望遠鏡の補償光学装置の現状報告、世界的な補償光学観測の最新成果について小林ほかがレビューした。また次世代補償光学検討の動向について、多天体補償光学 (MOAO)、多層共役補償光学 (MCAO)、広視野補償光学 (GLAO) などの開発に関する高見英樹のレビューがあり、日本が目指すべき補償光学の方向を議論した。すばる望遠鏡に GLAO を開発する可能性について支持する意見などがあつた。

# 第四章 レーザーガイド星 188 素子補償光学系

本章では、先行研究である特別推進研究「レーザーガイド補償光学系による遠宇宙の近赤外高解像観測」(平成14-18年度)、および本基盤研究 (S)「レーザーガイド補償光学による銀河形成史の解明」(平成19-23年度)によって最終的に完成され、共同利用装置として運用が始まったレーザーガイド星188素子補償光学系について述べる。

## 4.1 主要仕様

遠宇宙の観測に新展開をもたらすという主目的を達成するためのレーザーガイド星188素子補償光学系の主要仕様は以下の通りである。

設置場所	すばる望遠鏡、赤外ナスミス焦点
波長	0.9-5.3 $\mu\text{m}$ (観測装置)、0.45-0.9 $\mu\text{m}$ (波面センサー)
主光学系	視野直径 2.7', F/13.9 (赤外ナスミス焦点)
主光学系の透過率	0.7 (0.9-5.3 $\mu\text{m}$ )
制御素子数	188
可変形鏡	バイモルフ鏡
Tip/tilt マウントのストローク	+/- 5'
高次波面センサー	曲率波面センサー方式 (188 個の光子計数型アバランシェフォトダイオード)
低次波面センサー	2x2 シャックハルトマン式波面センサー (16 個の光子計数型アバランシェフォトダイオード)
制御帯域	> 100 Hz, 1000 corrections/sec
自然ガイド星の等級範囲	-1 < R < 16.5
Tip/tilt, focus ガイド星の等級範囲	R < 18
自然ガイド星の選択範囲	視野直径 2'
Tip/tilt ガイド星の選択範囲	視野直径 2.7'
レーザーシステム	和周波発生方式、波長 589nm、3.0W on-sky、R=12 相当
レーザービーム伝送	シングルモードフォトニック結晶光ファイバー
レーザー送信望遠鏡	副鏡の背後に口径 50cm のベントカセグレン式望遠鏡 (12.5 倍のビーム拡大率)

表 4.1.1 すばる望遠鏡レーザーガイド星補償光学系の主要仕様

我々は初代36素子補償光学系の経験を生かした補償光学系の性能向上、および、特に遠宇宙の観測対象が限定されてしまうという問題点の克服のため、レーザーガイド星の生成システムの実用化を目指してきた。上記主要仕様はそのような背景の中、もっとも現実的であると結論づけられたものである。特徴としては、性能対素子数の効率がよいとされる曲率波面センサー方式を適用している点、曲率波面センサー方式としては世界最大の素子数を目標とした点、低次波面センサーでTip/tiltだけでなくfocusも測定できるようにしてレーザーガイド星の焦点の不定性を補正できるようにしたこと、Tip/tiltガイド星の選択範囲を直径2.7分角と設計最大限まで広くし観測可能天体の確率を高めたこと、レーザーガイド星の光度安定化を重視し、レーザー自身の安定化の確保と安定したビーム伝送のため光ファイバー伝送を用いている点、光子計数アバランシェフォトダイオードを利用した高感度の波面センサーという利点を生かし、レーザー出力上限値を出来るだけ緩くしレーザー開発のリスクを低減し、またTip/tiltおよびfocusガイド星の限界等級を18等級まで保証した点などがある。尚、各仕様の詳細な説明などは4.2節の装置概要で行う。

## 4.2 装置概要

レーザーガイド星188素子補償光学系は188素子補償光学系およびレーザーガイド星生成システムからなる。また補償光学系の後段には望遠鏡回折限界像を生かした観測装置が設置される。レーザーガイド星188素子補償光学系全体のレイアウトを図4.2.1に示す。188素子補償光学系はすばる望遠鏡の赤外側ナスミス焦点に設置されている。また、レーザー光源はレーザー室と呼ばれる恒温クリーンルームの中に安置され、レーザー室も安定した赤外ナスミス台に置かれる。高出力レーザー伝送に特化して製作されたフォトニック結晶光ファイバーを用いて望遠鏡副鏡の背後にマウントしたレーザー送信望遠鏡までレーザービームを導き、空に射出する構成になっている。

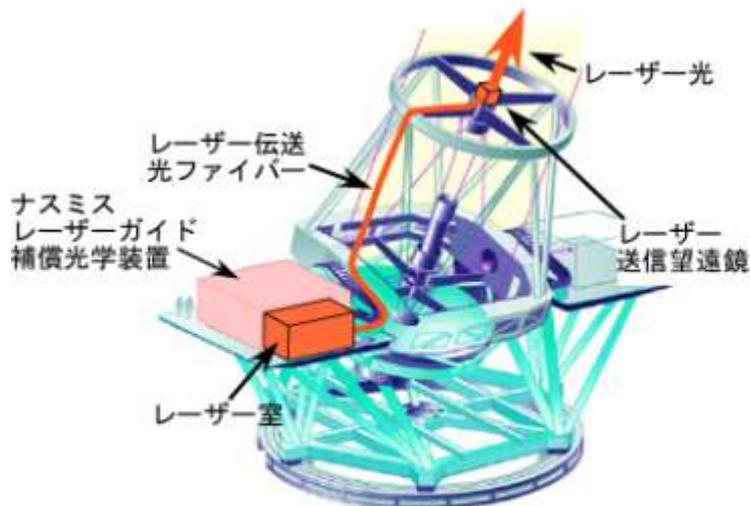


図 4.2.1. レーザーガイド星 188 素子補償光学系のレイアウト



図 4.2.1. すばる望遠鏡赤外ナスミス台に設置された補償光学系。

### 4.2.1 補償光学系

188素子補償光学系は主光学系、可変形鏡、波面センサー、制御系（計算機、エレクトロニクスなど）で構成される。制御用計算機を除くほとんどの部分がすばる望遠鏡ナスミス台に設置される。これは初代36素子補償光学系がカセグレン焦点に設置されていたのとは異なる。素子数が36素子から188素子に向上すると星像の性能向上が期待で

きる一方、補償光学系そのもの安定度を確保するのが必要であったため、カセグレン焦点よりもさらに重力的に、温度的に安定したナスミス台を選択する必要があった。

補償光学系の制御系以外のレイアウトを図4.2.1に示す。望遠鏡から来る光を赤く色づけした。DM (Deformable Mirror)が可変形鏡、HOWFS(Higher-Order WaveFront Sensor、高次波面センサー)とLOWFS(Lower-Order WaveFront Sensor、低次波面センサー)が波面センサーを示す。エレクトロニクスはこれらのコンポーネントが置かれた光学ベンチの下と、10mほど離れた場所に設置された19インチラックに格納されている。制御計算機は望遠鏡ドームとは別の制御棟計算機室に設置されている。

望遠鏡から来る赤く色付けされた光は、図の中央のやや下にあるビームスプリッターで0.9ミクロンより長い波長の(赤色)と短い波長(濃い青)とに分離される。赤が観測装置に導かれ、濃い青は波面センサーに導かれる。自然ガイド星のみを利用する場合、高次波面センサー(HOWFS)のみに天体の光が導入され波面の計測が行われる。レーザーガイド星を利用する場合は、レーザーガイド星を高次波面センサーに(濃い青)、Tip/tiltおよびfocusガイド星を低次波面センサーに(空色)それぞれ分けられる。高次波面センサーに導かれたレーザーガイド星を使ってfocusよりも高次の波面計測が行われ、低次波面センサーに導かれたTip/tiltおよびfocusガイド星を使って位置誤差と焦点誤差の計測が行われる。

図の中央上部にあるコンポーネントは較正用人工光源とよばれ、自然ガイド星、レーザーガイド星を模擬する光源、大気ゆらぎを模擬する光学素子が格納され、補償光学系の調整、システム較正、性能評価などに利用する。コンポーネント全体が大きな2軸のステージに搭載されており、補償光学系の光路への挿入および退避を遠隔で制御できる。

各主要サブシステムの詳細は5節で行う。

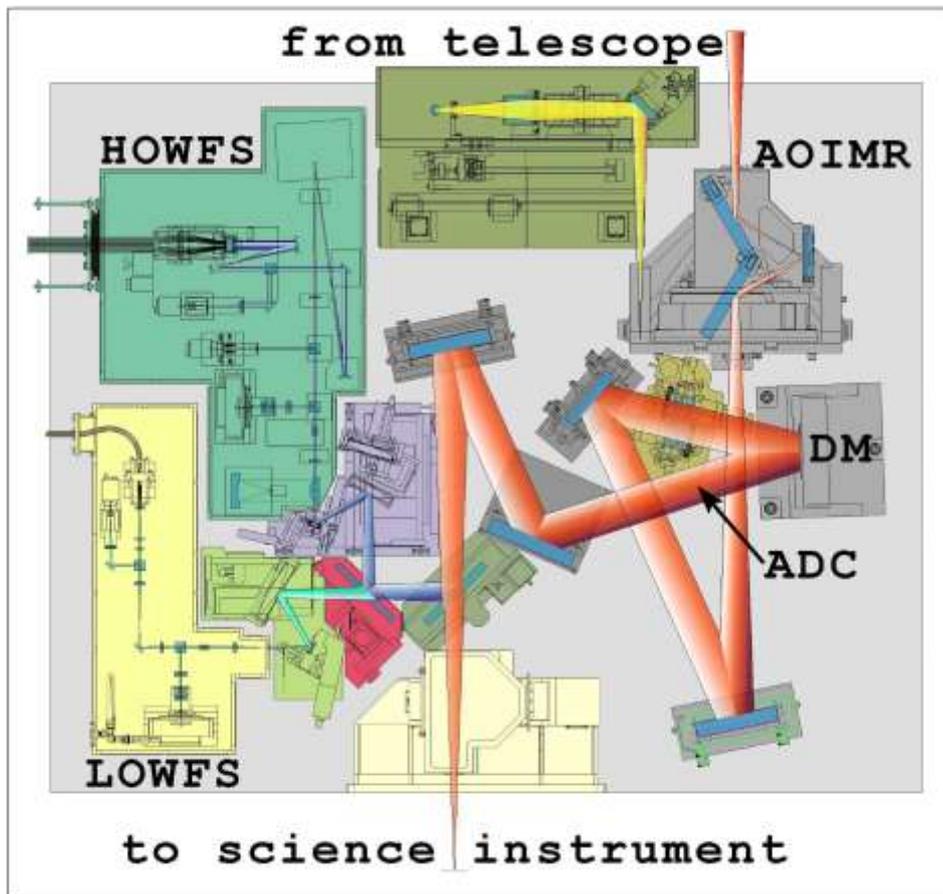


図 4.2.1.1. 188 素子補償光学系の光路図



図 4.2.1.2. 188 素子補償光学系の内部。図 4.2.1.1 を左上側から見ている。手前は高次波面センサー (HOWFS)。

## 4.2.2 レーザーガイド星生成系

レーザーガイド星生成システムは、レーザー光源、レーザービーム伝送用光ファイバー、送信望遠鏡、光ファイバーへの入射光学系、各種診断系、制御系などから構成される。そのブロック図を図4.2.2.1に示す。赤外ナスマイス台にあるレーザー室は2つの部屋からなる。一つは21.5°Cに制御されたクリーンルームでレーザー本体と光ファイバーへの入射光学系および各種レーザー診断系が安置されている。もう一つはレーザー制御用計算機やエレクトロニクスなどがある制御室である。レーザービームは高出力レーザー伝送に特化したシングルモードフォトニック結晶光ファイバーに入射される。高出力レーザーを光ファイバーで伝送する場合、非線形な散乱効果である誘導ラマン散乱、誘導ブリュアン散乱、自己位相変更効果などが影響してくる。その影響を出来る限り低減させるためにモードフィールド径が14.3マイクロメートルまで大きくできるフォトニック結晶光ファイバーを応用した。主要サブシステムのレーザー伝送用光ファイバーの節で詳細を述べるが、非線形散乱効果を低減する工夫をした結果、伝送効率が約50%程度まで達している。光ファイバーで伝送されたレーザービームは望遠鏡副鏡の背後にマウントしたレーザー送信望遠鏡ユニットまで導かれる。光ファイバーから射出してきたレーザービームを直径300mmの平行光束に整形し、口径50cmの送信望遠鏡から空に射出される。送信望遠鏡の前段には、レーザービームの広がり角度を調節するレンズ駆動機構とレーザービームの射出方向を遠隔制御できるステージ駆動システムが用意されている。レーザービームは副鏡によってできる“影”の中心に向かって射出し、手前のレイリー散乱光を効率よくカットする必要がある。送信望遠鏡ユニットは各観測ごとに望遠鏡副鏡の背後に取り付けられるため、その度にレーザービーム照射方向と副鏡の影との関係を観測直前に校正する。また、レーザー射出方向は望遠鏡の姿勢による重力変形などで変化するため、レーザービームの射出する仰角、方位角などに応じた射出方向モデルを経験的に作成し、それによって射出方向を微調整している。またレーザービームの広がり角度も温度によって変化するため、レーザーガイド星の画像捕捉を確認しながら調整を行っている。

我々は高度90km、幅10km程度に存在するナトリウム金属原子を励起するナトリウムレーザーガイド星を利用している。そのため、レーザー光源の波長はナトリウムD線の589.158nmに正確に合わせている。望遠鏡の仰角によってナトリウム層までの距離と実効的な厚さが変わり、レーザーガイド星の明るさが変わる。またナトリウム層にある中性原子数によってもレーザーガイド星の明るさが変わる。これまでの試験観測などの実績を見ると、望遠鏡仰角60度、空への射出強度3Wで約12等級相当のレーザーガイド星を生成することができている。

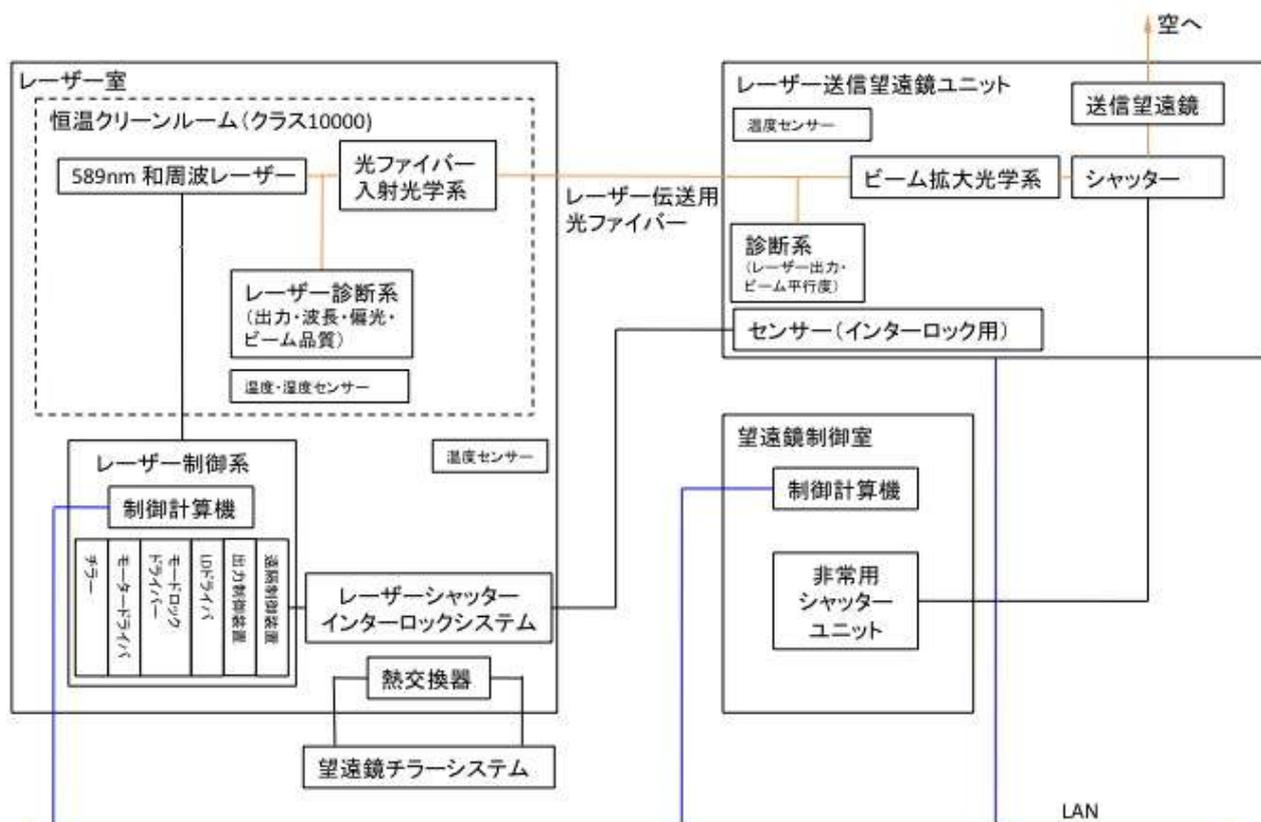


図4.2.2.1 レーザーガイド星生成システムのブロック図



図4.2.2.2 調整中の光ファイバー入射光学系

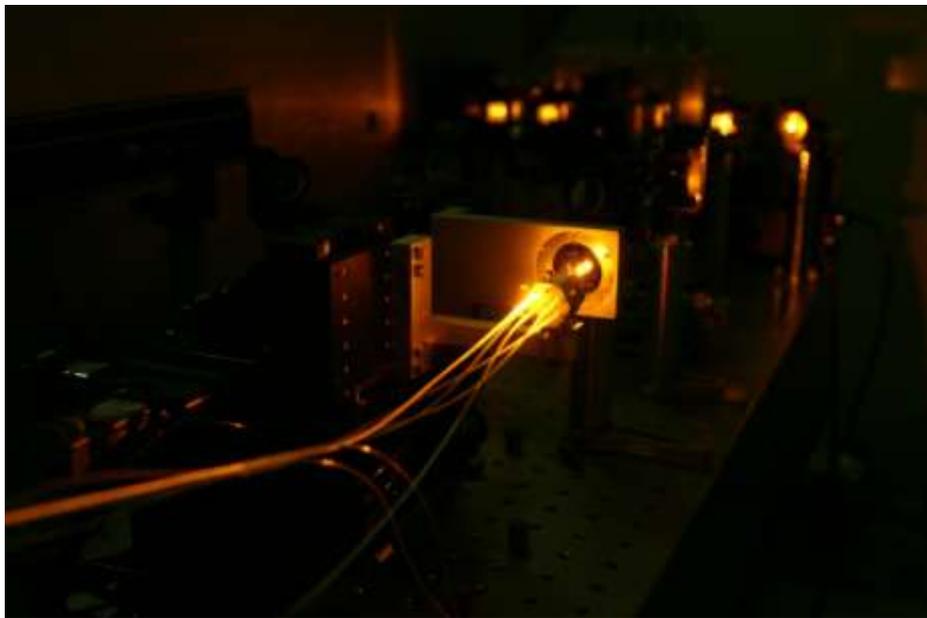


図4.2.2.2 伝送用光ファイバー。一つのマウントに6本の伝送用光ファイバーをマウントしている。そのうちの1本を常時使用し、その他はスペアである。

## 4.3 観測装置

188素子補償光学系は主としてIRCS (InfraRed Camera and Spectrography) という近赤外線撮像および分光装置と組み合わせて使用される (図4.2.1参照)。それ以外にも、188素子補償光学系が望遠鏡の回折限界像をもたらすという最大のメリットを生かした各種装置がある。HiCIAOという系外惑星観測に目的を絞った高コントラスト装置、京都3次元分光器第二号機、SCEXA0という特殊なコロナグラフを用いた系外惑星探査装置などである。

IRCSはすばる望遠鏡の共同利用観測装置として最も多く188素子補償光学系と組み合わせて利用されている。また、HiCIAOは戦略枠プログラムが認められ、2010年から5年間、合計120晩をかけて、系外惑星系探査および星周ディスク探査を系統的に行っている。また世界初となる補償光学系を用いた可視光面分光装置となる京都3次元分光器第二号機は2012年4月から試験観測が開始される。SCEXA0はすでに何度か試験観測が実施され、最終的な特殊なコロナグラフを用いた観測が控えている。

それ以外にも、188素子補償光学系を用いた装置がいくつか提案されている。まず、国立天文台を中心に系外惑星による主星の視線速度方向の移動を精密なドップラー効果測定で検出するプロジェクトがある。これはM型星の周りにある地球型惑星の発見を目的としている。また、東京大学、国立天文台、プリンストン大学が共同で進める赤外線面分光装置がある。これは188素子補償光学系だけでなくSCEXA0も併用し、系外惑星特有のスペクトル線を主星と分離して検出することを目的としている。このように多くの特徴のある装置が188素子補償光学系の後段に設置される計画が進められている。

### (1) IRCS

A0188の主力観測装置。もともとはカセグレンA036システムの観測装置としてカセグレン焦点にあったが、補償光学装置をカセグレンA036からナスミスA0188に更新することになったのに伴い、寺田氏ほかにより、ナスミス焦点装置として改良が加えられた。

A0188を用いて観測する場合には、視野20秒角を0.02秒角画素で撮影する高解像モードと、視野53秒角を0.052秒角画素で撮影する低解像モードとがある。

撮像モードの他にグリズムやエシエルグリズムを用いた分光モードがある。

		Camera			Spectrograph
Detector		ALADDIN III 1024 <sup>2</sup> InSb array			ALADDIN III 1024 <sup>2</sup> InSb array
Pixel size		27 um			
	Resolution	Fine (12 mas)	High (20 mas)	Low (52 mas)	(slit-length direction) x (slit-width direction)
Pixel scale	w/o AO	N/A	20.42±0.07 mas	52.42±0.07 mas	54.57 mas x 67.75 mas
	w/ AO	11.94±0.01 mas	20.57±0.04 mas	52.77±0.04 mas	54.93 mas x 68.20 mas
Field of view	w/o AO	N/A	20.91"²	53.68"²	3.5-9.4" in slit-length
	w/ AO	12.22"²	21.06"²	54.04"²	
Gain		5.6 e <sup>-</sup> /ADU			3.8 e <sup>-</sup> /ADU
Dark current		0.1 e <sup>-</sup> /s			0.05 e <sup>-</sup> /s
Read noise per NDR		43 e <sup>-</sup> rms			68 e <sup>-</sup> rms
Saturation level		123 000 e <sup>-</sup>			129 000 e <sup>-</sup>
Readout rate <sup>(1)</sup>		0.41 s (standard)			
		0.12 s (fast)			

表 8.3.1 IRCS の観測機能

## (2) HICIAO

188 素子補償光学系による高解像画像にコロナグラフ撮像機能を追加するための装置。従来の 36 素子補償光学系用 CIAO に比べ約 1 桁高いコントラスト性能を実現し、太陽系外惑星の初の直接撮像や原始惑星系円盤の直接撮像観測に 2009 年から成果を挙げている。HiCIAO では通常のコロナグラフ撮像に加えて、偏光観測や分光微分撮像を行うこともできる。

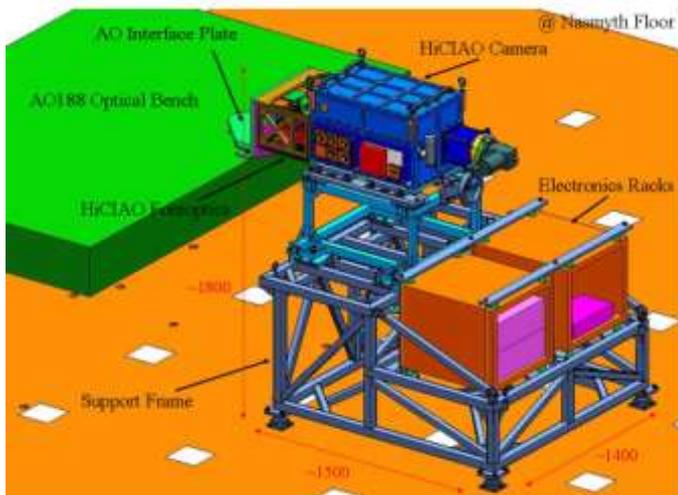


図 8.3.1 ナスミス焦点の HICIAO の配置図

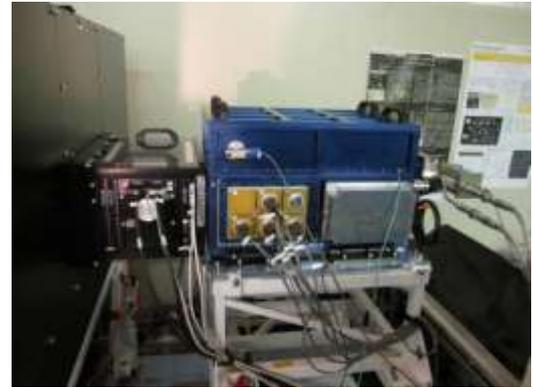


図 8.3.2 HICIAO

## (3) K3DII

京都大学宇宙物理学教室の菅井肇氏（現東京大学数物連携宇宙研究）が中心となって開発してきた、空間二次元、波長一次元の情報を一度に測定するための「三次元分光器」で Kyoto3DII と呼ばれている装置を、すばる望遠鏡の AO188 焦点で用いようという構想がある。AO188 は近赤外線観測に最適化して製作された装置なので、より要求仕様が厳しい可視光域では完全な性能が出ないが、赤色域でも空間解像度の一定の改善が期待できる。

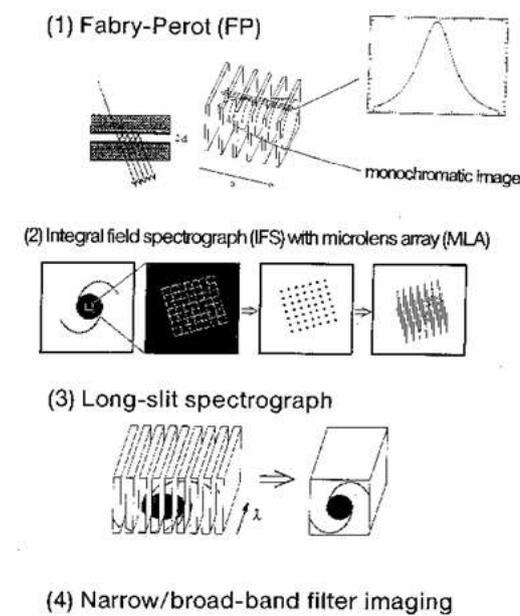


図1 3DIIの4つの観測モード。

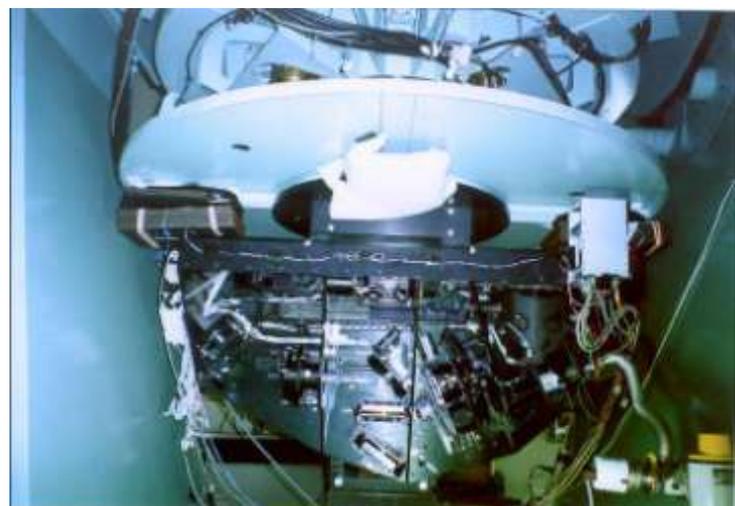


図 4.3.3 三次元分光の多様な観測モード(左：菅井氏 HP より)

図 4.3.4 光学シミュレータにより試験中の K3DII (右：菅井氏 HP より)

#### (4) SCExAO (Subaru Coronagraphic Extreme Adaptive Optics)

太陽系外惑星や原始惑星系円盤の直接撮像を目指してすばる望遠鏡グループのオリビエ・ギヨン氏を中心として開発中のコロナグラフ撮像装置。母星のごく近くにある惑星を検出できるように、すばる補償光学装置と HICIAO カメラに新しい原理の PIAA コロナグラフモードを実現するように設計製作中である。

位相誘導振幅アポダイゼーション(Phase Induced Amplitude Apodization : PIAA) では平行光束中に二つの光学系を置いて、すばる望遠鏡の副鏡や副鏡スパイダーによる中央部のビーム遮蔽の回折などによるコロナグラフ撮像への雑音発生を光分布を再配置することにより、極力低減するように工夫した光学系であり、光の損失が大きい古典的なアポダイゼーション法に比べて、効率が良いなどの利点がある。

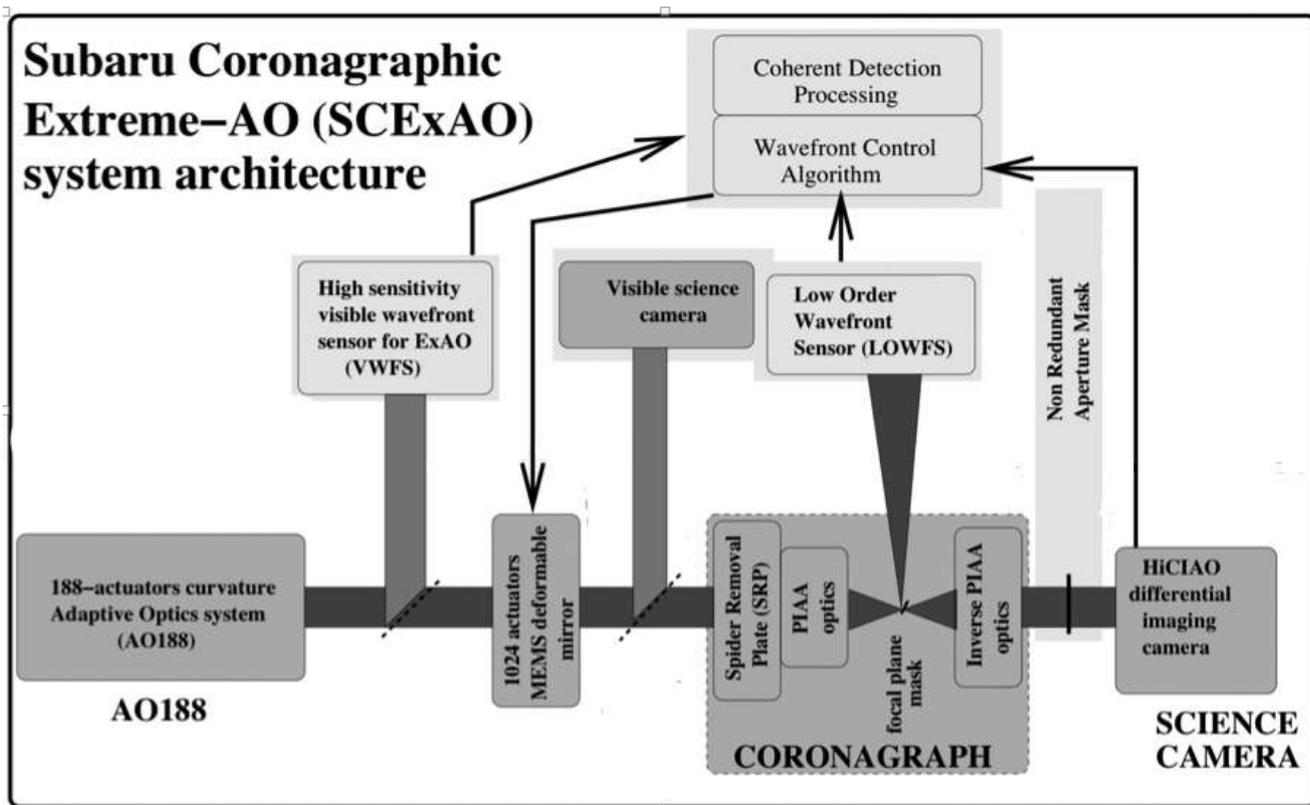


図 8. 3. 9 PIAA の原理

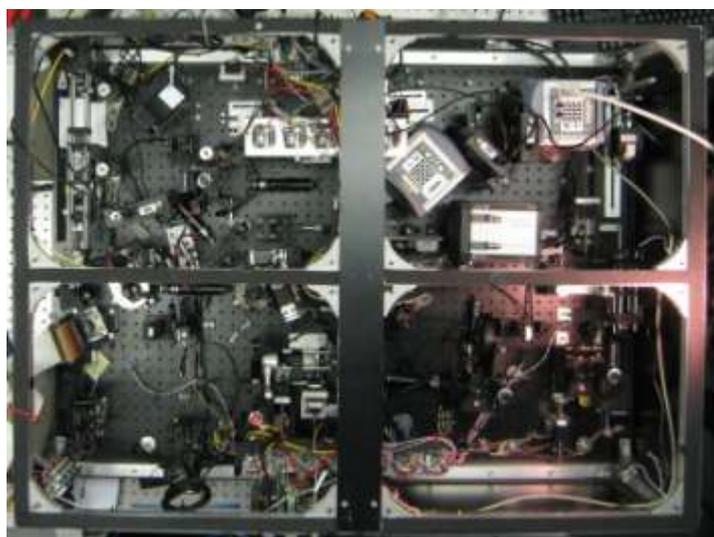


図 8. 3. 10 SCExAO 装置の内部

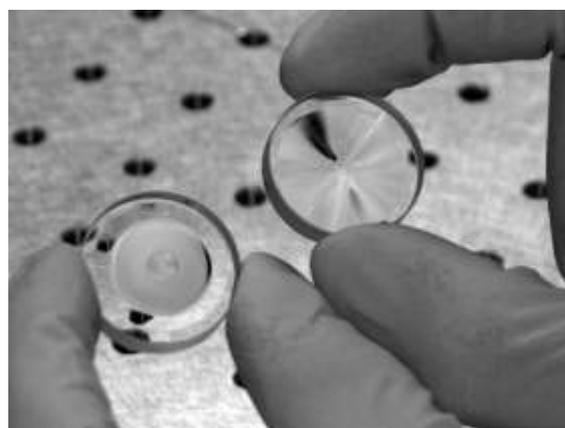


図 8. 3. 11 PIAA で用いるレンズ



# 第五章 主要サブシステム

## 5.1 主光学系(早野)

188素子補償光学系の主要光学系はすばる望遠鏡の赤外ナスマス焦点と同じF値をそのまま観測装置に導くように設計された。補償光学系を使用するときとしないときの切り替えは補償光学系全体を移動させなければならない。しかし、後段にくる観測装置は望遠鏡赤外ナスマス焦点に直接取り付けることも、補償光学系を通して、両方も光学的に組み合わせることができるようにした。

すばる望遠鏡のナスマス焦点には、F/13.9の集光光が導かれてくる。図5.1.1の右上からF/13.9が入射し、AO IMR(Adaptive Optics Image Rotator、視野・瞳像回転補正光学系)を通過する。このサブシステムは3枚の鏡の組み合わせ全体を回転させることで望遠鏡瞳像や観測装置の検出器に映る天体像を回転させることができる。その後、F/13.9の集光光は軸外し放物面鏡 (AO M1(OAP1))で平行光になる。AO M2という平面鏡で反射された後、ADC(Atmospheric Dispersion Corrector、大気分散補正光学系)によって波長の違いによる像位置のずれを補正される。ADCは挿入、退避が可能な直動移動ステージにマウントされている。さらに、軸外し放物面鏡によって作られる望遠鏡瞳像の位置に設置されたティップティルトマウントに搭載された可変形鏡 (AO M3(DM/TT))によって反射される。可変形鏡は波面センサーによって測定された情報をもとに、大気ゆらぎで乱された波面誤差をキャンセルするように変形駆動されている。駆動部分は188箇所分割されている。可変形鏡にかかったtip/tiltのオフセット量は可変形鏡をマウントしたティップティルトマウントにoffloadされ、さらに、ティップティルトマウントのオフセット量は望遠鏡のポインティングにoffloadされる。可変形鏡を反射した光はAO M4という平面鏡で反射した後、軸外し放物面鏡 (AO M5(OAP2))で再びF13.9の集光光に戻される。観測装置の前でビームスプリッターによって光を波面センサーに分割する。ビームスプリッターは遠隔操作のできる交換機構に装備されている。この交換機構は3つのビームスプリッターをマウントできる。

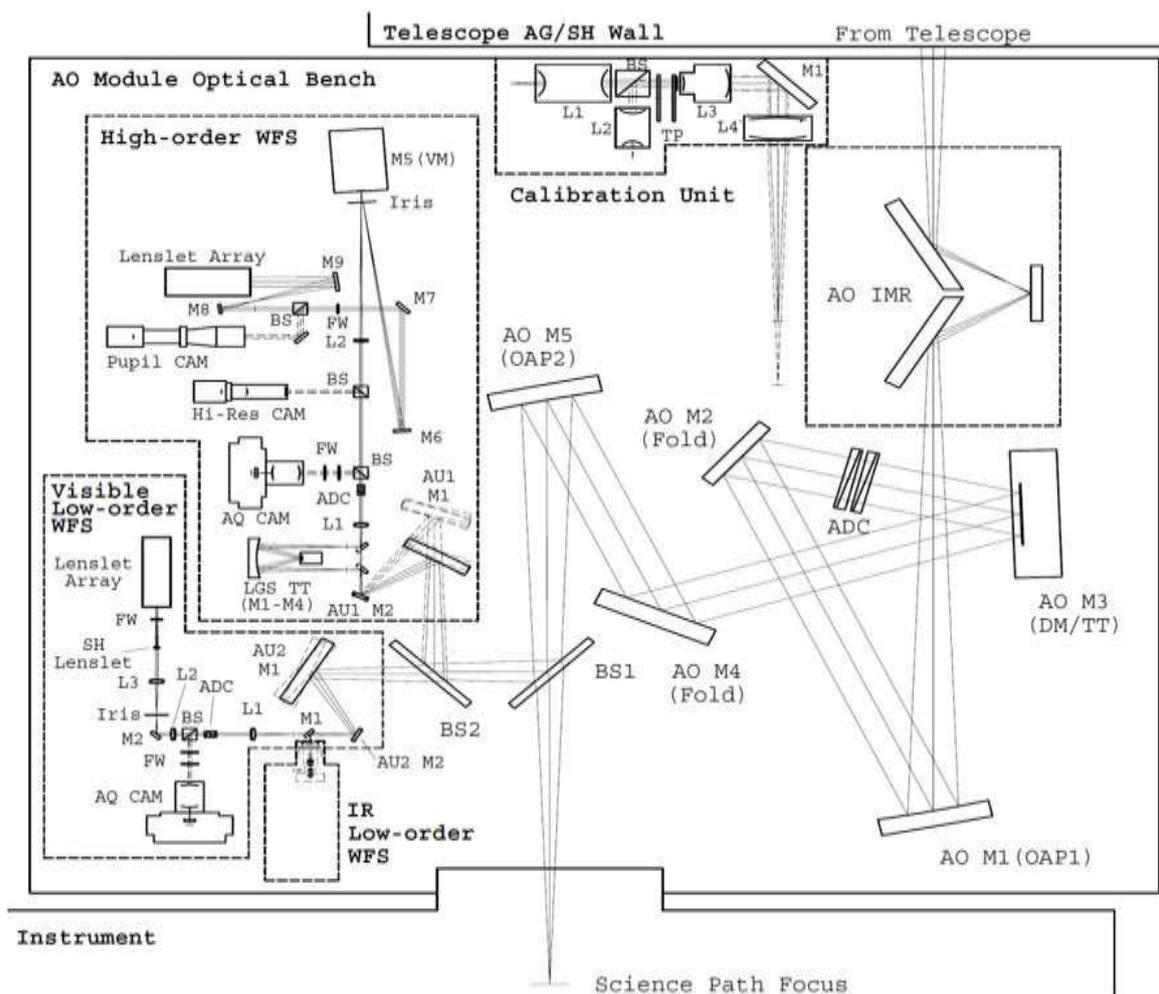


図 5.1.1. 188 素子補償光学系の主光学系

## 5.2 可変形鏡(大屋)

可変形鏡は、位相の乱れを補正する鏡であり制御信号に応じて表面形状を変形させることができる。地上からの天体観測においては大気ゆらぎを補正し、回折限界の解像度を実現している重要部品である。可変形鏡の形式は複数あるが、レーザーガイド補償光学系ではバイモルフ形式を採用した。この形式は2枚の薄い圧電材料基板を貼り合わせたもので、制御電極を間に挟んであり外側両面は全体がグラウンド電極になっている(図 5.2.1 参照)。制御電極に電圧を掛けると基板の一方が伸び、他方が縮むことで電極部分の鏡面の曲率を変化させることができる。

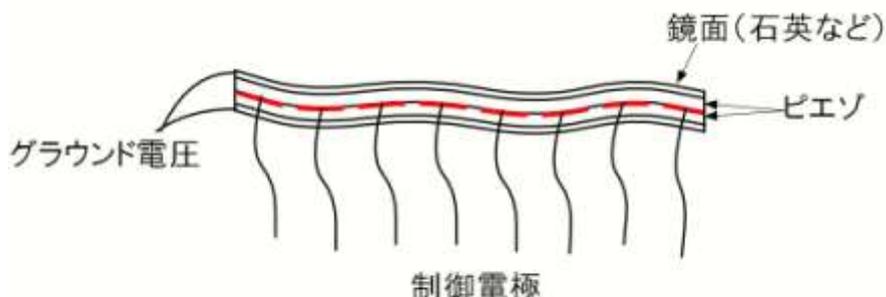


図 5.2.1 : バイモルフ式可変形鏡構造の模式図

他の可変形鏡の形式としては多数の圧電アクチュエータで鏡面を裏から押し引きする積層ピエゾタイプがよく用いられる。積層タイプはアクチュエータの接点で鏡面を制御するのに対して、バイモルフ形式の場合は電極が面として制御するのでより平滑な変形が得られるという特徴がある。一つの電極が故障で制御できなくなった場合でも周囲の電極の変形により機械的に平滑に内挿されるという利点もある。また、圧電材料が鏡材も兼ねるので軽量である。その反面薄い基板を外周の支持点で支えるという構造なので振動しやすく共振周波数は数百 Hz と低くなり補償光学装置の制御帯域に近くなるので注意を要す。

すばる望遠鏡に最初に搭載された補償光学系においてもバイモルフ形式の 36 素子可変形鏡を使用していたが、188 という素子数はその 5 倍以上と飛躍的に多いものであり、製作当時バイモルフ鏡としては世界で最多であった。同時期に開発中であったヨーロッパ南天文台の VLT(8.2m)用の 60 素子、ハワイ大学製作の Gemini 天文台用(8.1m)用 85 素子など、他望遠鏡用の可変形鏡と比較しても倍以上と格段に大きいものであった。

素子数を増やすと、より細かい光波面の位相の乱れを補正することができるので性能が向上するが、このような飛躍的な多素子化を実現するためには新たな技術課題に挑戦して解決しなければならなかった。その技術的課題とは、共振周波数を十分に高く保ったまま必要な曲率ストローク(変形量)を確保することである。細かい波面のゆらぎを補正するためには、より大きな曲率が必要になる。ストロークを増やすには鏡材を薄くすればよいが、そうすると共振周波数が下がり、速い大気ゆらぎに応答できない。一方で共振周波数を上げるためには鏡材の直径を小さくするのが有効であるが、そうすると今度は個々の電極が小さくなり変形量が減少し、ストローク不足になる。この相反する条件を満たす鏡材の直径・厚みの最適値を決定するため、国立天文台は有限要素法を用いたストローク及び共振周波数解析を繰り返し行った。またその過程において、さらに制御電極の形状・配置を最適化する、従来のものに比べて圧電定数が大きい材料を採用する等の工夫を重ねて仕様(表 5.2.1)を満足する結果に到達することができた。

表 5.2.1 : 可変形鏡仕様

素子数	188
ビーム径	90 mm
入射角	16°
鏡材直径	130 mm
厚さ	2.0 mm
材料及び厚さ	
ピエゾ(P188)+ガラス(BK7)	2×0.9 mm + 2×0.1 mm
ストローク(鏡面曲率)	
全電極	1/(±10 m)
単一電極	1/(±16 m)
印加電圧	< ±400 V
共振周波数	
主共振	700 Hz
副共振	250 Hz
鏡面精度	< $\lambda/20$ rms @ 0.6 $\mu$ m
表面粗さ	< 1 nm rms @ 0.6 $\mu$ m
ヒステリシス	< 20 %

このようにして得られた電極配置の設計を図 5.2.2 に示す。各電極の形状は六角形に近い、いわゆるボロノイ・ダイアグラムである。このような電極形状を導入したのは世界で初めてで独創性の高いものである。赤い点線の円は、外側が有効径の 90mm を、内側が副鏡の影(直径 25mm)を示す。鏡材の直径は 130mm である。外周上に 3 箇所ある赤丸は鏡材の支持点を示している。各周の電極の最初と最後には電極番号が書いてある。

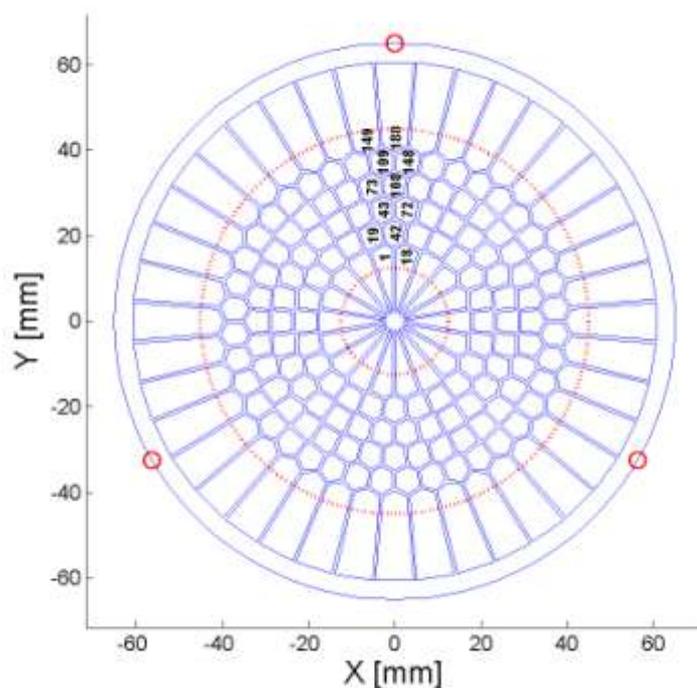


図 5.2.2 : 可変形鏡の電極配置

実際に製作された可変形鏡の制御電極の写真が図 5.2.3 である。この写真から解るように実際の電極は入射ビームの傾きに合わせて全体の形状が楕円状に引き伸ばされている。この制御電極構造は 2 枚の圧電材料基板に挟まれており完成時の現在は外部からは見えない。

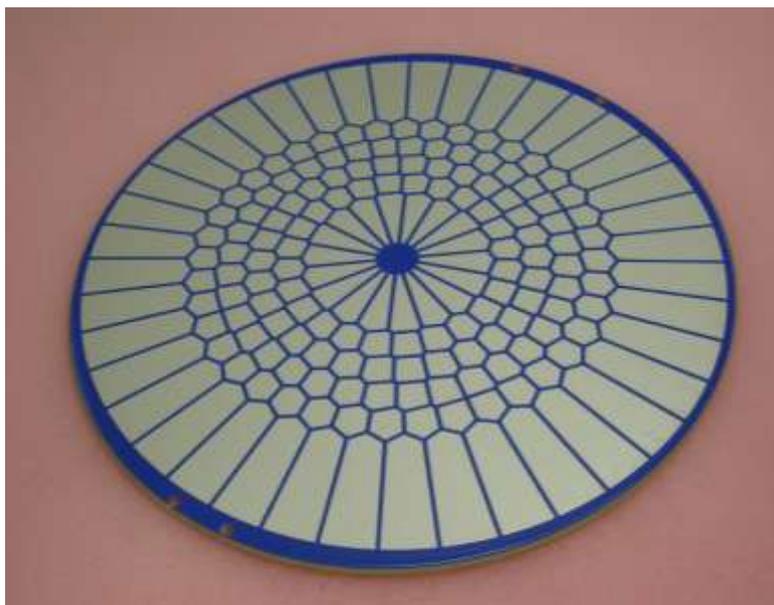


図 5.2.3 : 可変形鏡の制御電極の写真

可変形鏡の基板は図 5.2.4、図 5.2.5 にあるようにホルダーに固定して使用する。



図 5.2.4 : ホルダーに組み込まれた可変形鏡。鏡材の外周の上と左下、右下の 3 箇所にある白い突起が支持点である。

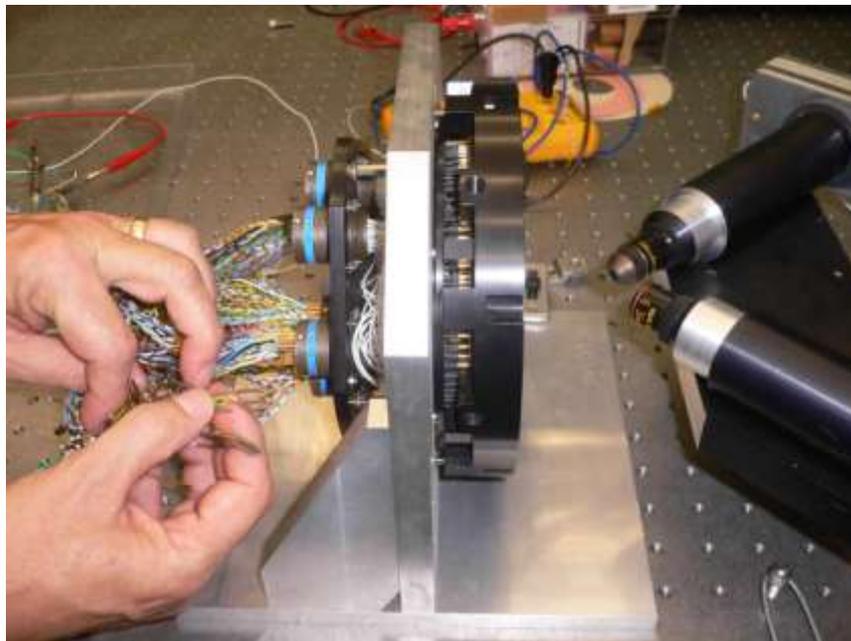


図 5.2.5 : 検査中の可変形鏡を側面から見た写真。鏡材裏のピンからコネクタへの配線が見えている。

電圧を加えて鏡面を変形させて干渉計で測定した例を図 5.2.6、図 5.2.7 に示す。

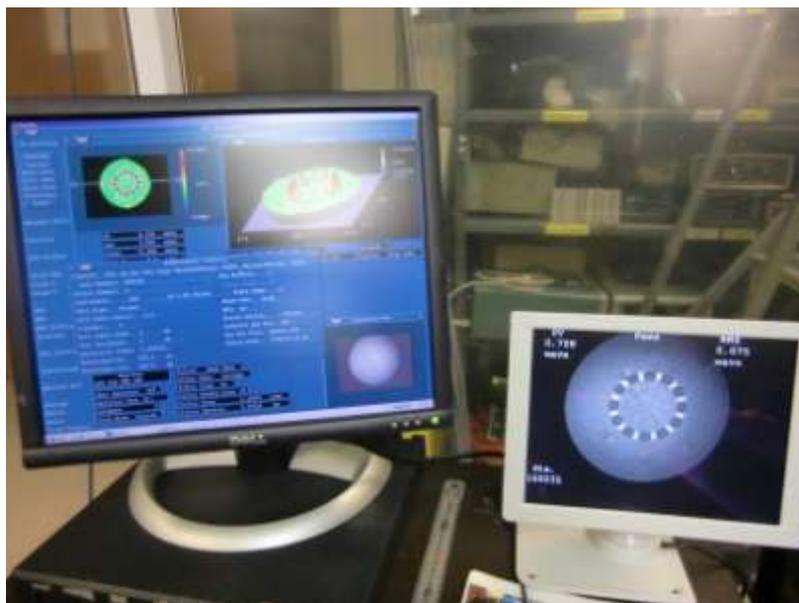


図 5.2.6 : 可変形鏡の変形を Zygo 干渉計で測定しているところ。第 2 周の電極に  $\pm 200V$  を隣同士交互に掛けてある。

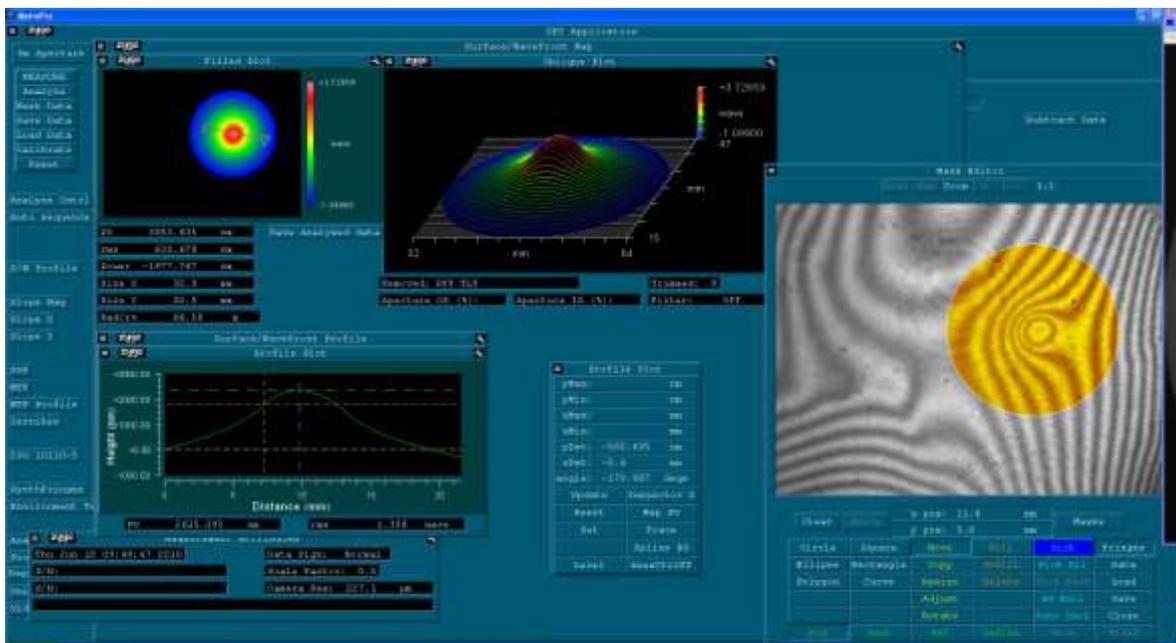


図 5.2.7 : 可変形鏡の一つの電極による変形の測定結果例。80 番の電極に+400V の電圧を印加した時の表面形状から-400V の表面形状を差し引いて解析している。

補正すべき波面誤差のうち波面全体の傾きは、大気ゆらぎに起因する成分の中で最大であることに加えて望遠鏡の追尾誤差が含まれるので、可変形鏡だけではストローク不足になる。そのため、可変形鏡は独立したティップティルトマウントに搭載されている(図 5.2.8)。ティップティルトマウントはジンバル式でボイスコイルにより駆動され、キャパシタセンサで変位をセンスしてフィードバックしている。ジンバルのバランスを取るため、ホルダーと鏡材を合わせた重心が鏡面の中心に一致し、且つ縦と横のジンバル軸の交点(不動点)に一致するように設計されている。そのためにコネクタおよびコネクタ取り付けパネルはジンバル固定の可変形鏡ホルダーからは切り離され、ティップティルトマウントのフレーム側に固定される。マウントの機械的なストロークは $\pm 3.7$ 分角で天空上では $\pm 5$ 秒角に相当し、分解能は0.5%以下である。バンド幅は127Hzであり変化が遅い波面全体の傾きの補正には十分である。

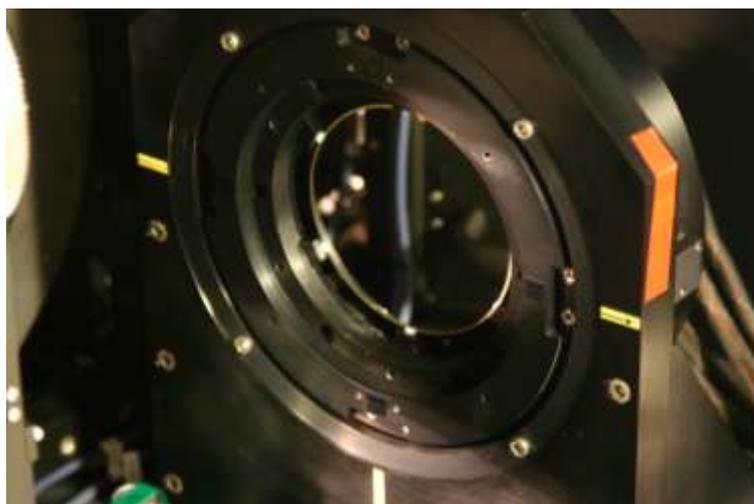


図 5.2.8 : ティップティルトマウントに組み込んだ可変形鏡

現在、この可変形鏡はティップティルトマウントも含めて天文学的科学的成果を生み出すのに十分な性能をもって動作している。



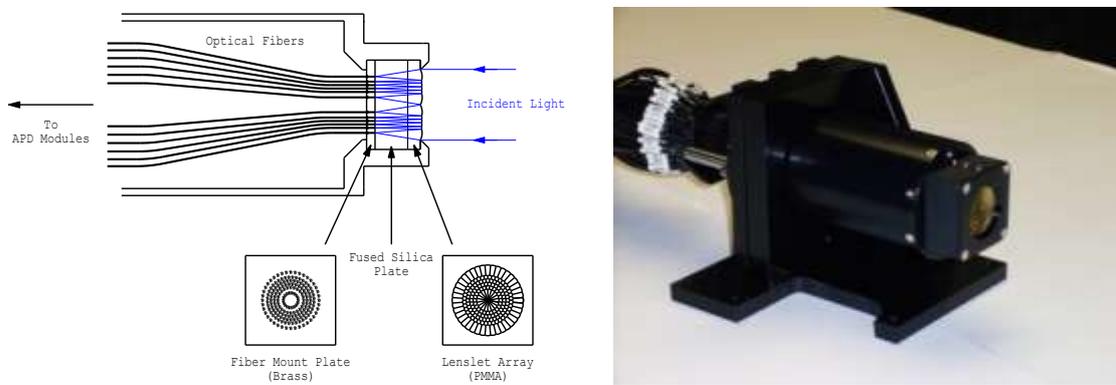


図 5.3.2: 188 素子レンズレットアレイユニット

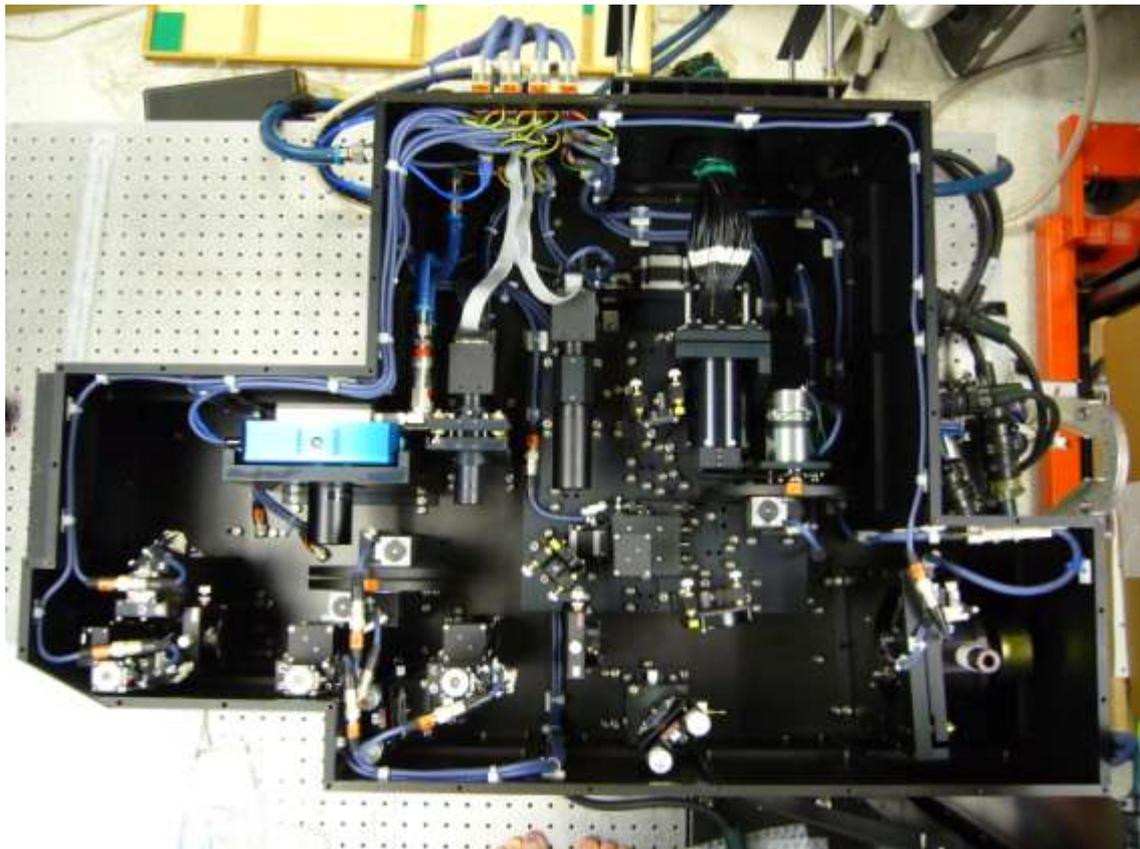


図 5.3.3: 高次波面センサー機械系

188 素子曲率波面センサーの光学系の構成は、基本的にすばる 36 素子補償光学システムの曲率波面センサーの構成を踏襲しているが、対応波長域については 36 素子システムが  $0.6\text{--}0.8\mu\text{m}$  であったのに対し、188 素子システムではレンズ設計や反射・AR コーティングの最適化を行って  $0.45\text{--}1.0\mu\text{m}$  に拡大させ、広帯域化による感度の向上を図った。

188 素子のレンズレットアレイは、一体型のプラスチックモールドレンズとし、ダイヤモンドツールにより精密機械加工した銅製金型により製作した。この方式も 36 素子システムのそれを踏襲したものであるが、188 素子システムではレンズレットのレンズ形状に非球面を採用し、レンズレットの焦点に置かれる光ファイバーとの結合効率の向上を図った。

高次波面センサーの光学機械系については、2006 年のファーストライト後、2008 年から開始する共同利用に向けてのシステムの安定性向上のため、コンポーネントへのアクセス性、光学調整機構の信頼性、遮光性についての改良を行い、多くの部分の再設計・再製作を行った（図 5.3.3）。

## (2) 低次波面センサー (2×2 素子 Shack-Hartmann センサー)

低次波面センサーには、波面のティルト情報と同時にデフォーカス情報を得るため、Shack-Hartmann 型センサーを採用した。また、検出器には一般的な Shack-Hartmann センサーで用いられる CCD ではなく、光計数 APD 検出器を採用した。光計数 APD 検出器を用いた場合は CCD に比べて光ファイバーの結合ロスなどで若干センサー全体のスループットが減少するが、光計数 APD 検出器では原理的に読み出しノイズが発生しないことから CCD の場合より暗い天体の観測においては有利になるという利点がある。また、高次波面センサーと検出器の電気系を共有できるという利点もあった。

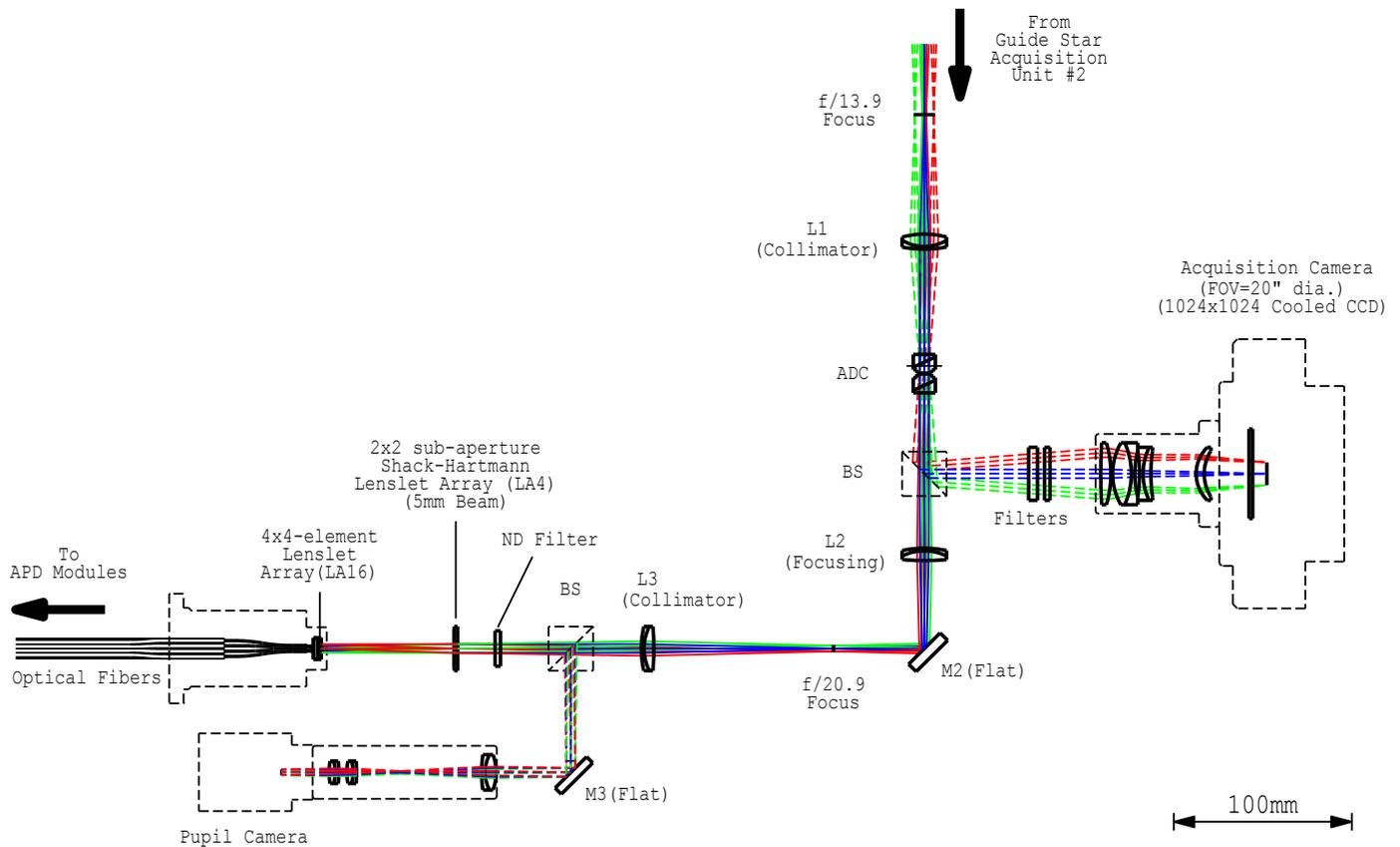


図 5.3.4: 低次波面センサー光学系

図 5.3.4 に低次波面センサーの光学系を示す。低次波面センサーに入射したビームは、L1 と L2 レンズにより再結像された後、L3 レンズによってコリメートされ、2×2 素子の Shack-Hartmann レンズレットアレイ (LA4、図 5.3.5) 上に直径 5mm の瞳像を結ぶ。瞳像は 2×2 素子レンズレットアレイにより 4 分割され、4×4 素子のレンズレットアレイ (LA16、図 5.3.5) 上にスポット像を形成する。4×4 素子レンズレットアレイの各レンズレットの焦点面には、188 素子レンズレットアレイユニットと同様に光ファイバーの端面が配置され、レンズレットに入射した光の強度を光ファイバーの先に繋がれた光計数 APD モジュールで測定する構成となっている。

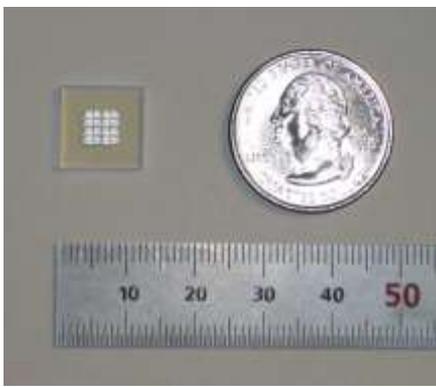


図 5.3.5: 4×4 素子レンズレットアレイと 2×2 素子 Shack-Hartmann レンズレットアレイ

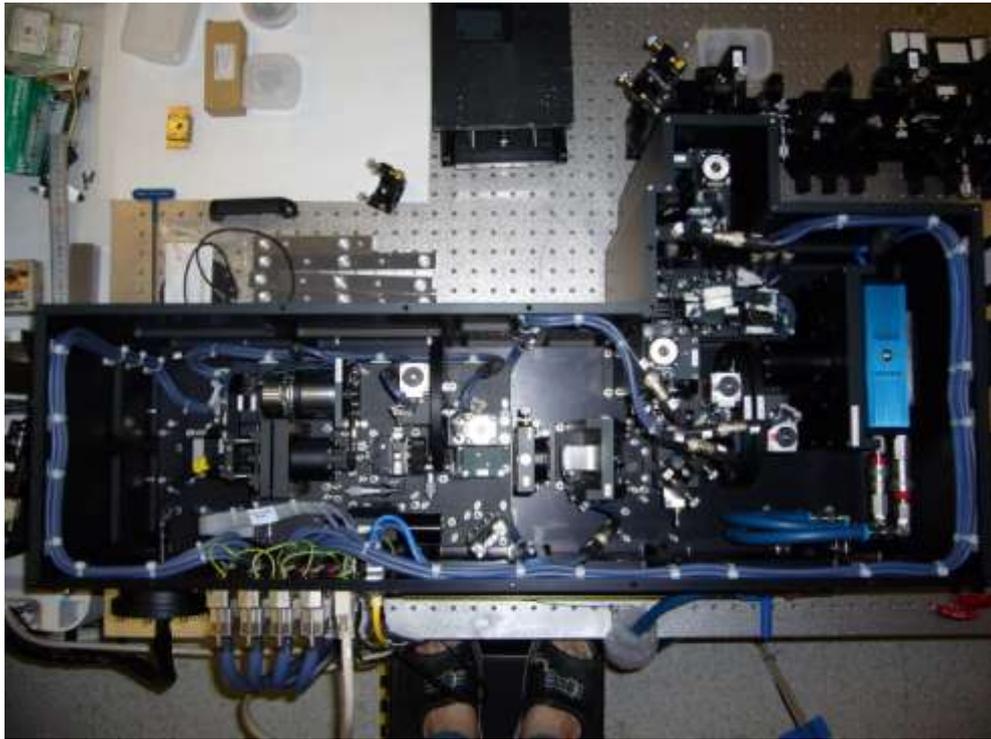


図 5.3.6: 低次波面センサー機械系

## 5.4 較正用人工光源(渡辺)

188 素子システムには、光学調整や較正、制御マトリックスの生成、システムの診断などのために望遠鏡からのビームをシミュレートする較正用人工光源ユニットを装備した。このユニットは、望遠鏡と同じF値を持った、自然ガイド星とレーザーガイド星に対応する2つのビームを再現し、大気ゆらぎ生成板を挿入することにより大気ゆらぎの効果もシミュレート可能とした。レーザーガイド星が有限距離にあることによるレーザーガイド星の焦点位置のずれ、レーザーガイド星の像位置のふらつき(ティップティルト)、レーザーガイド星の像サイズも再現するよう設計した。

図5.4.1に較正用人工光源の光学系を示す。疑似自然ガイド星の光源には、 $0.655\mu\text{m}$ と $1.55\mu\text{m}$ のレーザーダイオードの光を結合させて用いた。疑似レーザーガイド星の光源には黄色LEDを採用し、拡散板と $100\mu\text{m}$ ピンホールとを用いることで星像サイズ0.5秒角のレーザーガイド星を再現した。また、レーザーガイド星の像位置のふらつき(ティップティルト)はピエゾ駆動のティップティルトミラーを用いて再現し、レーザーガイド星の焦点位置のずれ(自然ガイド星の焦点位置との違い)は2つのビームスプリッタープリズムを用いて自然ガイド星とレーザーガイド星とで光路長を変えることにより再現した。

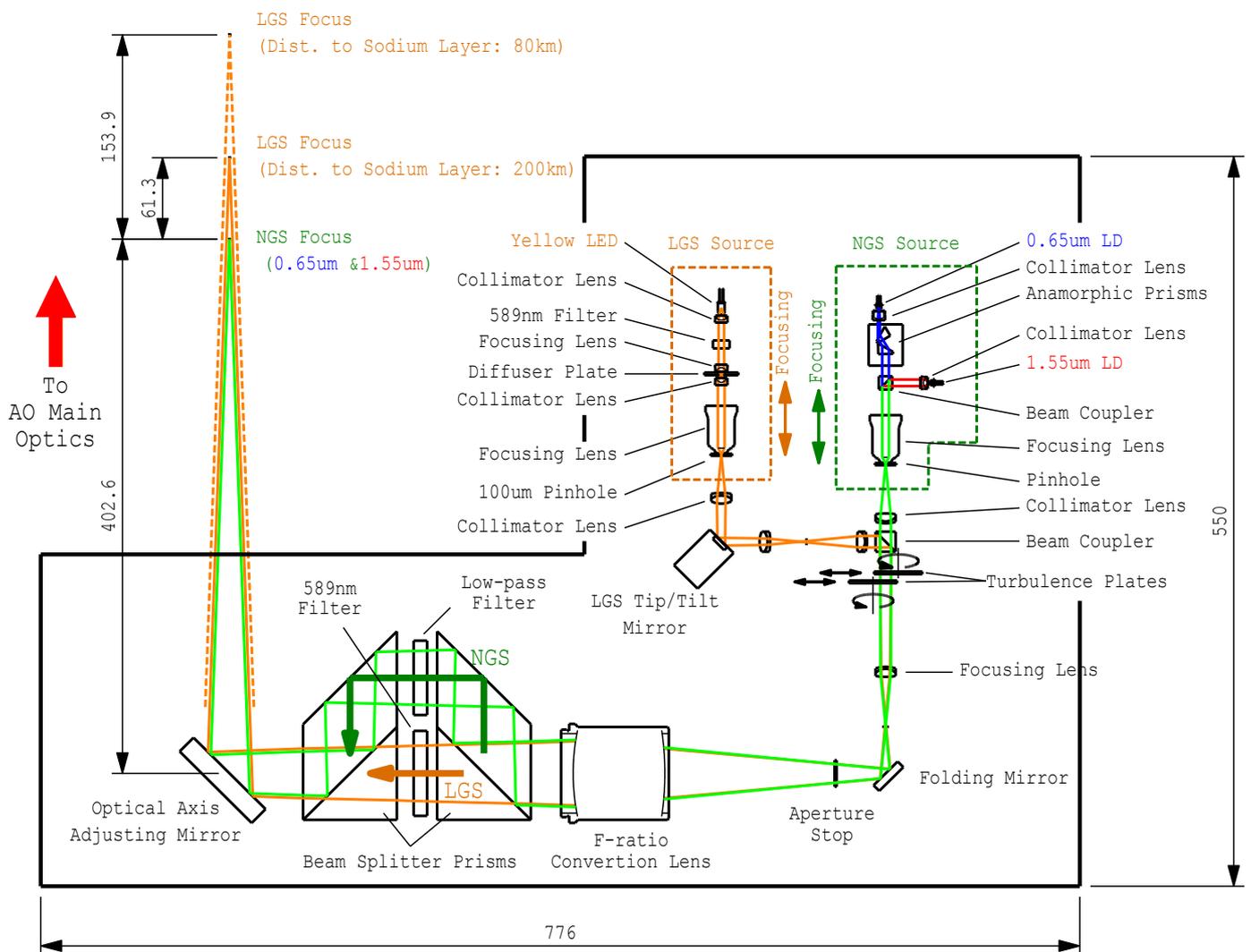


図 5.4.1: 較正用人工光源の光学系

較正用人工光源の光学系は、全体をXZ自動ステージ上に載せ(図5.4.2左)、システムの主光学系の2.7分角の視野内の任意の位置に疑似光源のビームが入射可能である。

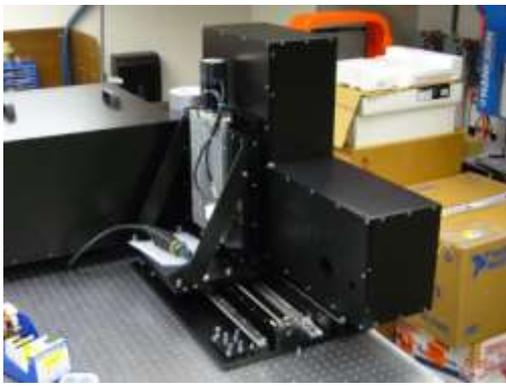


図 5.4.2: 較正用人工光源 XZ ステージ (左), 較正用人工光源ユニット内部 (右)

## 5.5 視野・瞳像回転補正光学系(大屋)

補償光学装置で得られる質の高い天体像を実際の観測で有効に活用するためには、視野・瞳像回転補正光学系(以下簡単のため像回転補正光学系と記す)は欠くことのできない重要な部品である。

すばる望遠鏡のような大型の望遠鏡の架台は、小型望遠鏡で一般的に用いられる赤道儀式架台ではなく、水平方向・高度方向の回転で天体を追尾する経緯台式架台が採用される。この場合回転軸が天空の回転軸(地球の自転軸)と一致していないため望遠鏡を向ける方向によって、焦点面上での視野の向きが回転してしまう。そのためこの回転を補正して、焦点面上での天体の向きが常に同じになるように補正する機構が必要になる。すばる望遠鏡の場合鏡筒のお尻にあるカセグレン焦点の装置は装置自体を回転する機構があるが、高度軸の横にあるナスミス焦点では大型装置の搭載にも対応するために天体からのビームの方を回転する像回転機構を用いている。

像回転補正光学系を用いると視野のみならず瞳像も回転することができる。すばるの様な反射望遠鏡光学系の瞳には副鏡の影に加えて副鏡を支持するスパイダーの影が入っているが、特にスパイダーは像面に強い回折パターンを生じる。高いコントラストを必要とする天体では、焦点面上で天体を固定するよりも、このスパイダーパターンを固定した方が解析上有利である。ナスミス焦点の場合、瞳像は望遠鏡の高度軸の回転に伴って回転するが、この回転を元に戻すように像回転機構を制御することで実現できる。

表 5.5.1 : 像回転補正光学系仕様

補正精度(回転ステージ)	
追尾時	< 72 秒角
定常値	< 36 秒角
光学特性	
配置	K 配置(3 鏡面)
有効開口径	
入射側	104mm
焦点面	87mm
出射側	114mm
鏡面コーティング	保護膜付き銀
鏡面精度	平坦性 $1/4 \lambda$ PV、粗さ 1nm RMS
出射光軸ずれ	
位置	< 50 $\mu$ m
傾き	< 0.7 分角
駆動速度	
追尾時	< 0.04° /秒
二点間移動時	5° /秒
追尾方式	
指示角度計算方式	追尾開始時に天体座標を基にファイル生成
同期方式	NTP による時刻同期
角度制御方式	位置制御
追尾モード	恒星、非恒星、瞳固定

補償光学装置を用いると像が 10 倍シャープになるので像回転の精度に対する要求も 10 倍高くなる。また可変形鏡、波面センサのレンズレットアレイなど主要部品が瞳面上にあるので、単に焦点面上での天体像の位置だけでなく入射光線の傾きも含めたアラインメントが重要になる。さらに、暗いガイド星でも観測可能にするためには鏡面をなるべく反射率が高い状態に保ち、必要があれば簡単に交換できることが望まれる。このような理由から、補償光学装置はナスミス焦点に設置されているが、望遠鏡のものとは独立した像回転補正光学系を開発した。表 5.5.1 に補償光学装置用の像回転補正光学系の仕様を示す。

像回転補正光学系の光学配置は 3 枚の鏡を組み合わせたいわゆる K 配置である。各面と光軸との交点を結ぶと正三角形になっている。

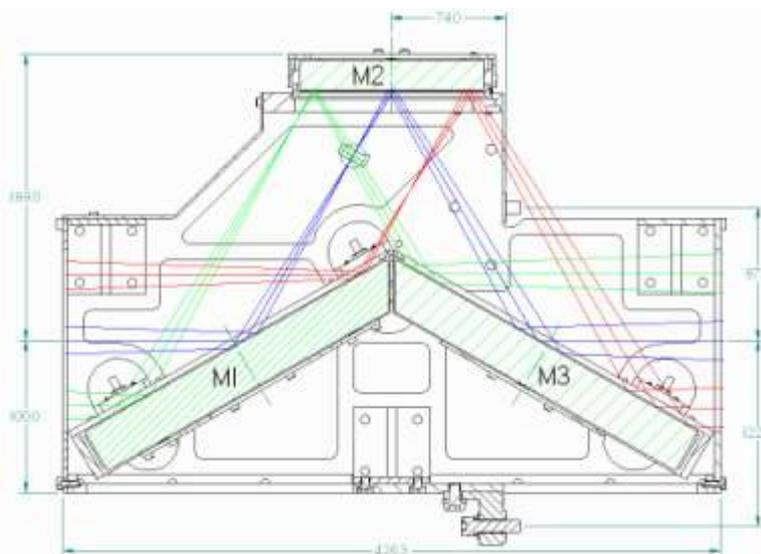


図 5.5.1 : 像回転補正光学系の光学配置

この 3 枚の鏡を一つのユニット(K ユニット)として光軸の周りに回転させることで出射側の像を回転することができる。出射側の像は K ユニットの回転角の倍回転する。図 5.5.1 に K ユニット内の像回転補正光学系の光学配置を示す。望遠鏡からの光が図の左から入射し右側の補償光学系に出射する。鏡は入射側から順番に名前が付いており M1、M2、M3 となっており、この図では断面が示されている(注：名前の番号は像回転光学系内部のものであり、全体あるいは他の光学部品の番号とは区別される)。

高い精度を保つために機械設計も慎重に検討を重ねた。機械的干渉を避けるため K ユニットの両端を別の回転機構で支持する構造ではなく、中心付近に配置する一つの回転機構で支持する設計を採用した。K ユニットは鏡部分だけでも全長 398mm、光軸から最も離れた 2 枚目の鏡の端は 194mm と大きいので、高精度の回転ステージでこれを内蔵することができる大きさの適当な製品が見当たらなかった。その結果、2 枚目の鏡を回転ステージ外に出した片持ち構造にせざるを得なかった。K ユニットは回転するので重力が掛かる方向が大きく変化する。撓みによる変形が光学性能に与える影響を最小限に抑えるために有限要素法による評価を繰り返し行った。有限要素法による解析計算結果の例を図.5.5.2 に示す。温度によるアラインメントの変化を避けるため、材料は光学定盤と同じく鉄を採用している。また、K ユニットは保守のために回転ステージから着脱可能なように設計されている。K ユニットの写真を図.5.5.3 に示す。完成して試験中の像回転補正光学系の写真を図.5.5.4 に示す。

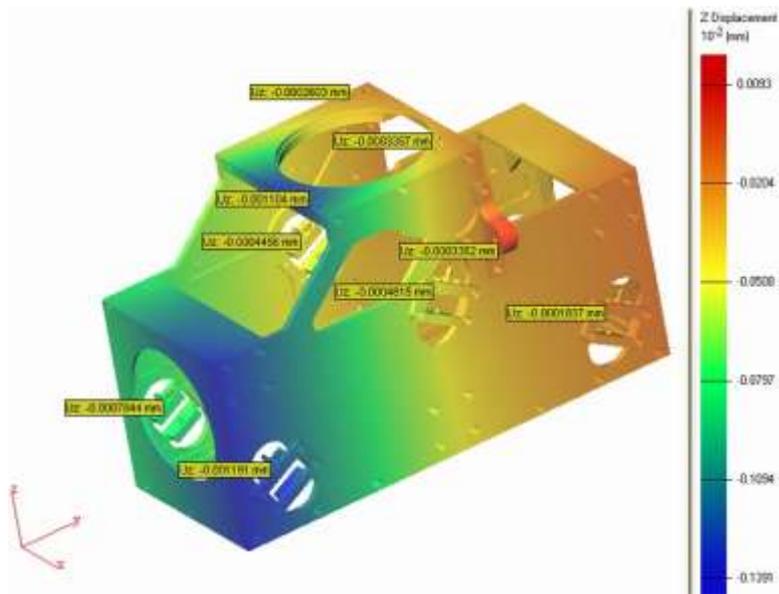


図.5.5.2 : K ユニットの有限要素用解析の例



図.5.5.3 : K ユニットの写真

十分な光学性能を発揮するためには組み立て調整が非常に重要である。各鏡をホルダーに固定する際に鏡材に力を加えすぎると鏡面に変形が及ぶので干渉計で確認しながら慎重に固定する。またホルダーに入った各鏡を K ユニットに入れた後も全体を通した光学性能を干渉計で確認する。K ユニット内の光路長もこの時に測定する。像回転光学系全体の光軸調整は大きく次の 2 つに分かれる。K ユニット内の鏡の取り付け調整(K ユニットの回転ステージの取り付けはここに含まれる)、回転ステージを光学ベンチ上に固定する際の補償光学系の光軸に対する調整である。各光軸調整の段階で光線の位置と傾きの両方を合わせる必要がある。光軸に沿って離れた 2 点間での光線の位置を測定すれば、位置と傾きの両方のずれを検出することができる。光軸調整では出射光線のずれ量の測定と鏡の位置・傾きの調整を反復して繰り返すので、カメラを移動せずに測定ができるように光路長延長器を導入して調整を行った。回転ステージ自体の位置・傾きがずれていた場合、入射側の基準光線が出射側に作るスポット位置は回転ステージが 1 回転した時に 2 回転する。一方で、回転ステージ上に取り付けた K ユニット内の位置・傾きがずれていた(K ユニット自体の取り付けのずれも特殊な場合としてここに含まれる)場合は、回転ステージが 1 回転した時に 1 回転しかしない。実際にはスポットの軌跡は両方の成分が混ざったものになるが、この点に気を付けて調整を行うと収束させやすい。



図.5.5.4 : 試験中の像回転補正光学系(左)



図.5.5.5 : 補償光学装置の光学ベンチ上に組み込まれた像回転補正光学系(右)。中央に K ユニット、左側に銀色の回転ステージが写っている。望遠鏡からの天体の光が写真右側より入射し、左側にある波面補償光学系に抜けていく。

補償光学装置の像回転補正光学系の特徴は、望遠鏡の制御とは独立して動作している点である。観測する天体の座標を指定すると、その夜の観測終了時刻までの角度変化を計算し、結果を追尾ファイルとして生成する。追尾はこのファイルを参照して、NTP同期した時刻を元に回転ステージの角度を変化させていく。通常の恒星追尾の他に、太陽系天体などの非恒星追尾、瞳像が回転しないように制御するモードが実装されている。図 5.5.6 に制御系統の概念図を示す。

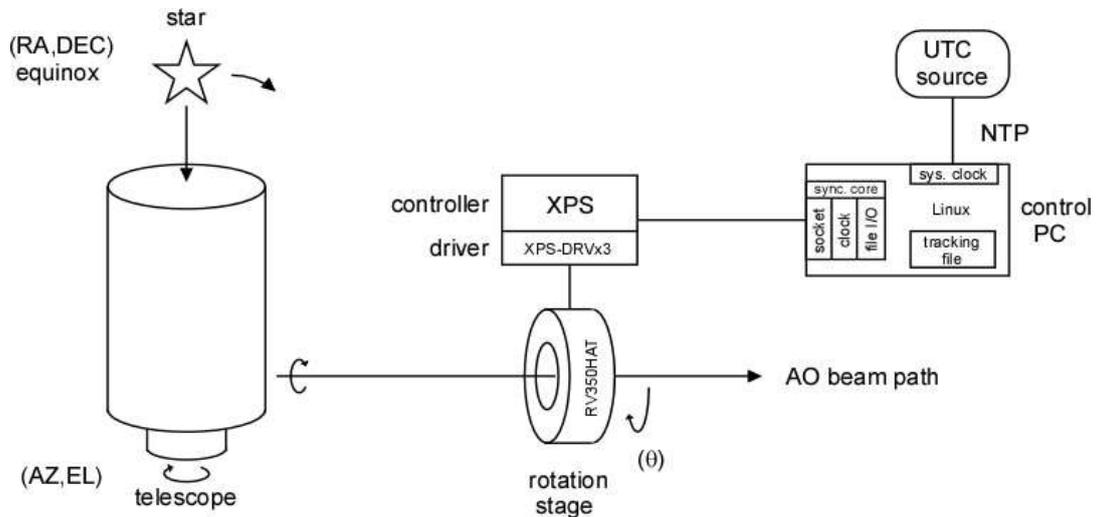


図 5.5.6 : 像回転補正光学系の制御系統の概念図。

## 5.6 大気分散補正光学系(大屋)

大気の屈折率は波長ごとに僅かに変化するため星の光が斜めに入射してくると波長ごとに屈折角が異なり、鉛直方向に色分散が生じてしまう(図 5.6.1、図 5.6.2 参照)。色分散の大きさは天頂角に依存する。その結果、一つの観測バンド内でも長波長側と短波長側で焦点を結ぶ位置がずれて像が伸びてしまう。補償光学装置を用いると像が 10 倍シャープになるので許容される大気分散による像の伸びも 10 分の 1 になる。また補償光学装置の場合、波面センサは可視光で波面を測定しており、可視光の像が波面センサに対して固定するように制御している。そうすると、異なる波長で観測していると像の位置が天頂角によって微動してしまう。これら大気による色分散の影響を補正するため、補償光学装置は大気分散補正光学系を内蔵している。

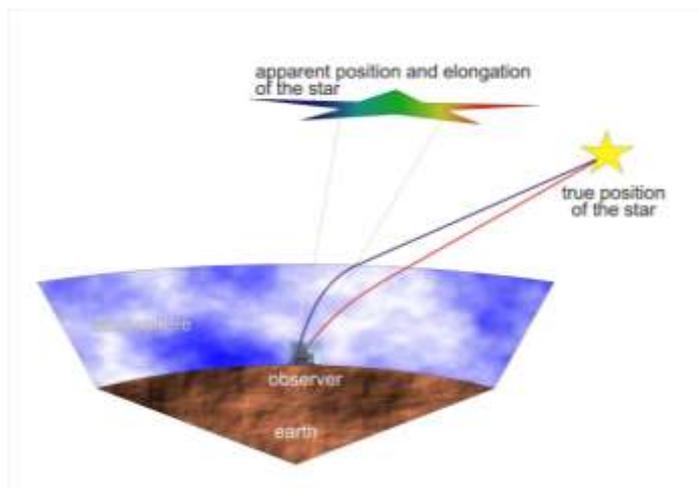


図 5.6.1 : 大気分散の概念図.

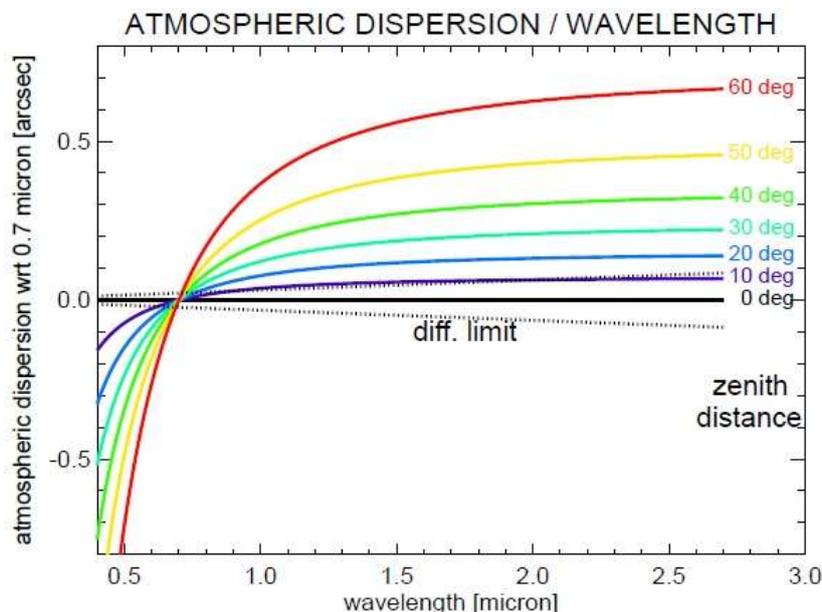


図 5.6.2 : 大気分散の波長、天頂角依存性

光学配置(図 5.6.3 参照)は、瞳面に近い平行光束中に 2 種類の光学ガラスを貼り合わせたプリズムを 2 個近接して配置してある。前後のプリズムの光学特性は同一であり、それぞれ独立に回転できるようになっている。相対的な角度が  $0^\circ$  の場合は前のプリズムの色分散が後ろのプリズムで打ち消されるが、相対的な角度が大きくなるにつれて部分的にしか打ち消されなくなる。大気分散補正光学系が生じる色分散が、地球大気による色分散を打ち消すよ

うにプリズムの角度を調整することで、補償光学装置を出射する光束の色分散を抑えることができる(図 5.6.4 参照)。大気分散補正光学系は波面センサに用いられる可視光も補正するので  $0.45 \mu\text{m}$  から補正する必要がある。一方で波長  $2\mu\text{m}$  より長波長側の観測では大気分散の影響は小さく補正する必要がないので、設計波長は  $0.45 \mu\text{m}$  から  $2 \mu\text{m}$  となっている。

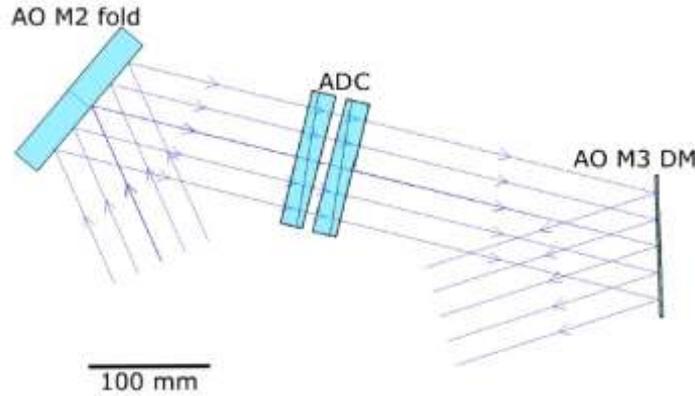


図 5.6.3 : 大気分散補正光学系の光学配置(上面図)

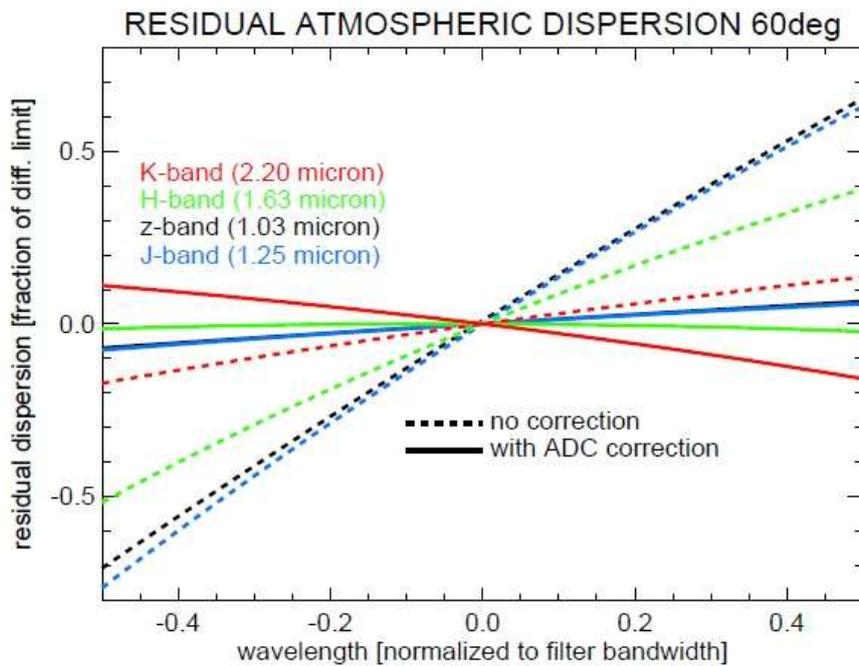


図 5.6.4 : 大気分散の観測バンド内補正残差(波長はバンド幅で規格化されている)

機械設計としては、二つのプリズムの相対角度を精度よく決定することが必要であるが、他にも要件がある。天頂方向は観測時の天体の方角や位置角で変化するので、二つのプリズムは全周可動できるようになっている必要がある。大気分散補正光学系は  $2\mu\text{m}$  より長波長側では使用できないので、観測波長によって挿抜可能なようにしなくてはならない。大気分散補正光学系の設置場所の周囲は補償光学系内で折り返されている光路や光学部品で囲まれており使用できる空間が非常に限られている。精度を保ったまま小型化できるように薄型の大口徑ベアリングやボール減速機を用いるなどの配慮を行った。その結果、図 5.6.5 に示す設計に至った。

大気分散補正光学系の仕様を表 5.6.1 にまとめる。

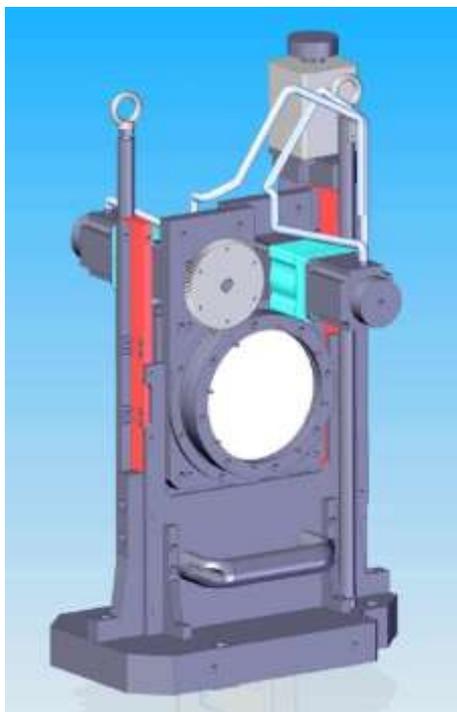


図.5.6.5 : 大気分散補正光学系の設計モデル

表 5.6.1 : 像回転補正光学系仕様

光学特性	
有効開口径	120 mm
面精度	平坦性 $1/8 \lambda$ PV、粗さ 1nm RMS
コーティング	誘電体多層膜 0.45 – 2.0 $\mu\text{m}$
機械性能	
挿抜動作	精度 0.1 mm、所要時間 30 秒以内
回転動作	
角度精度	0.1°
偏心	< 0.5 mm
面振れ精度	< 1.5°
最大速度	> 5° /秒
追尾方式	
指示角度計算方式	角度指示命令ごとに計算
同期方式	NTP による時刻同期
角度制御方式	位置制御
追尾モード	恒星、非恒星、瞳固定

完成した大気分散補正光学系の写真を図.5.6.6 に示す。図.5.6.3 の光路とも比較すると大気分散光学系の周囲が光学部品と光路で囲まれており、色分散を補正するためのプリズムに対して非常に狭い空間であることが解る。

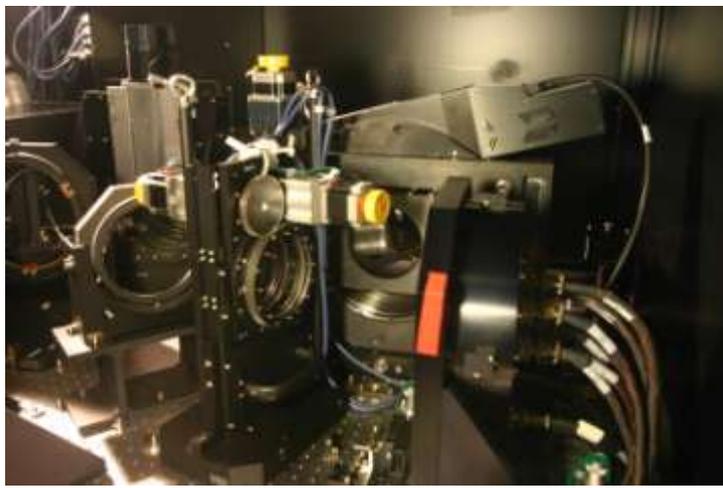


図.5.6.6 : 完成して補償光学装置に組み込まれた大気分散補正光学系。画面中央左の黄色いノブ付モータが取り付けられている装置が、光路に挿入された状態の大気分散補正光学系。その左後ろ側に見える鏡が補償光学系 M2、右手前の橙色のテープが貼ってあるマウントには可変形鏡(補償光学系 M3)が収まっている。

一般的な観測では、観測装置上で天体が回転しないように視野・瞳像回転補正光学系の角度を調整している。また目的によっては、位置角を回転して観測を行うので大気分散補正光学系の二つのプリズムの角度は、これらを考慮して決定する必要がある。基本的には、視野・瞳像回転補正光学系と同じ方式で天頂の方向を計算している。すなわち、望遠鏡の制御とは独立しており、観測する天体の座標を指定すると NTP 同期した時刻を元に回転ステージの角度を計算して変化させていく。通常の恒星追尾の他に、太陽系天体などの非恒星追尾、瞳像が回転しないように制御するモードが実装されている。基本的には全波長帯で最適になる角度を計算しているが、特定の観測バンドごとの最適化にも対応可能なようになっている。

## 5.7 ビームスプリッター交換機構(美濃和)

### 5.7.1 概要

すばる補償光学(AO188)では、光波面の測定に、すばる補償光学システム(AO188)では、シャープな星像を得るために、天空上の自然ガイド星、及びレーザーにより高度 80~100kmに人工的に作ったレーザーガイド星からの光波面を、波面センサーで測定し、可変形鏡により乱れた波面を元に戻している。AO188では、光波面を測定の測定には、可視光を用い、波面を補正した星像の観測には近赤外光を用いている。そのため、天体から来る光を可視光と近赤外光に分けるビームスプリッター(BS1)が必要である。また、レーザーガイド星からの光を使って波面を測定する場合、高次波面センサーと低次波面センサーの2種類のセンサーを用いるが、高次波面センサーではレーザーガイド星からの光(589nm)を用いて高次の波面揺らぎを測定し、低次波面センサーでは、自然のガイド星からの可視光を使ってレーザーガイド星では測れない低次の波面揺らぎ(tip/tilt)を測定する。そのため、光路上に自然ガイド星からの可視光とレーザーガイド星からの589nmの光を分けるビームスプリッター(BS2)が必要となる。ビームスプリッターは、共に使用される観測装置、またはガイド星の種類に応じて複数の種類を用意している。例えば、また、BS2としては、ガイド星として自然ガイド星のみを使う場合、BS1で反射された可視光をすべて高次波面センサーに送るための高反射ミラーを用いるが、レーザーガイド星を使う場合、高次波面センサーに589nmの光を反射し、残りの可視光を低次波面センサーに透過するビームスプリッター(BS589)を用いる。このような、複数のビームスプリッターを自動的に交換する交換機構を光路中に設置している。

### 5.7.2 光学系

#### (1) BS1

BS1は天体からの光のうち、長い波長の光を透過させ観測装置へ送り、短い波長の光を反射させ波面センサーへと送るビームスプリッター(BS)である。このビームスプリッターとしては、観測用途に応じて以下の3種類を考えている。

1)可視光(0.45-0.90  $\mu\text{m}$ )を反射し、近赤外光(0.90-5.20  $\mu\text{m}$ )を透過する BS: NIR1

--- IRCS, HiCIAO など赤外線観測装置で使用

2)近赤外線の短い側(<2.0  $\mu\text{m}$ )を反射し、長い側(>2.0  $\mu\text{m}$ )を透過する BS:NIR2

--- 赤外波面センサーを用いた観測に使用

3)可視光短い側(0.45-0.60  $\mu\text{m}$ )を反射し、長い側(0.65-0.90  $\mu\text{m}$ )を透過する BS: OPT

--- Kyoto-3D、SCEXAO など可視光を観測する装置で使用

これらのBSのうち、NIR1は日本真空光学に依頼して製作した。また、OPTについては、京都大学がKyoto-3DII用に製作した。これらの2つのBSは、すでにAO188光学系に組み込まれている。NIR2については、現在赤外波面センサーの開発が停止しており、製作を行っていないが、将来的に組み込む可能性を考えて、ビームスプリッター交換機構に専用のポートを用意している。NIR1では、赤外線を透過するためにフッ化カルシウムを用い、OPTでは可視光で透過率の高い合成石英を用いている。BS1基板は集光光束中におかれるため、通常の平行平面基板では、ガラスに対する角度が光線によって異なる事により、非点収差を発生する。この収差を打ち消すために、BS1基板にはウェッジを付けている。この基板に対し、NIR1では赤外線での透過率の高いフッ化物のソフト膜、OPTでは誘電体多層膜のコーティングを施している。図5.7.1に基板の図面、図5.7.2にNIR1、OPTの分光特性をまとめる。

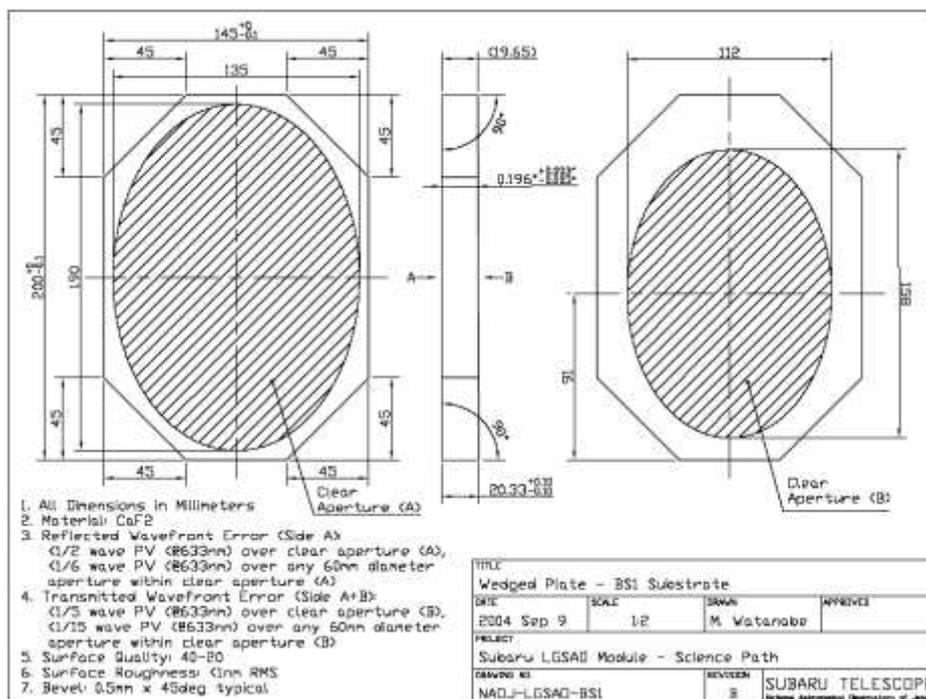


図 5.7.1 : BS 1 (NIR1) 基板の図面。OPT 基板も材質は異なるが、ほぼ同形状である。

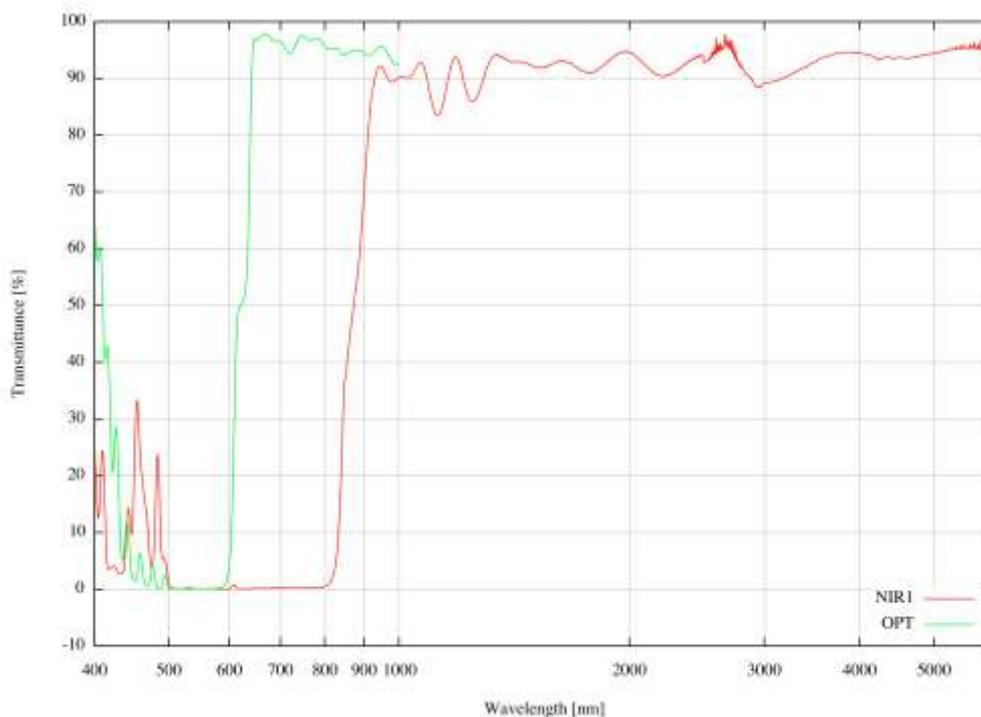


図 5.7.2 : NIR1, OPT の分光特性 (波長に対する透過率)

## (2) BS2

BS2は BS1で反射した光の全てを反射して高次波面センサーに送る鏡(MIRROR)と、レーザーガイド星の波長である589nm の光を反射し、残りを透過するビームスプリッタ (BS589)の2種類がある。自然ガイド星モードの観測では、MIRRORを使用し、レーザーガイド星モードの観測ではBS589を使用する。MIRRORはシグマ光機、BS589は日本真空光学に依頼して製作を行った。図5.7.3にBS2のMIRROR、BS589の仕様をまとめた図面を示す。BS589基板では、BS1の基板と同様に、非点収差を打ち消すためのウェッジを付けている。BS589 のコーティングは、589nm 周辺の狭帯域で高反射率(図 5.7.4)を実現するために、100 層以上の誘電体多層膜のコーティングを施している。そのため、コーティン

グ膜の応力により基板の反りが発生し、基板面精度を落としてしまう。この膜応力による反りを打ち消すために、基板裏面に AR コートを兼ねた表面と同程度の膜数の誘電体多層膜をカウンター膜として施した。これにより、基板全体に渡り  $1/10\lambda$  を下回る高い面精度を実現している。

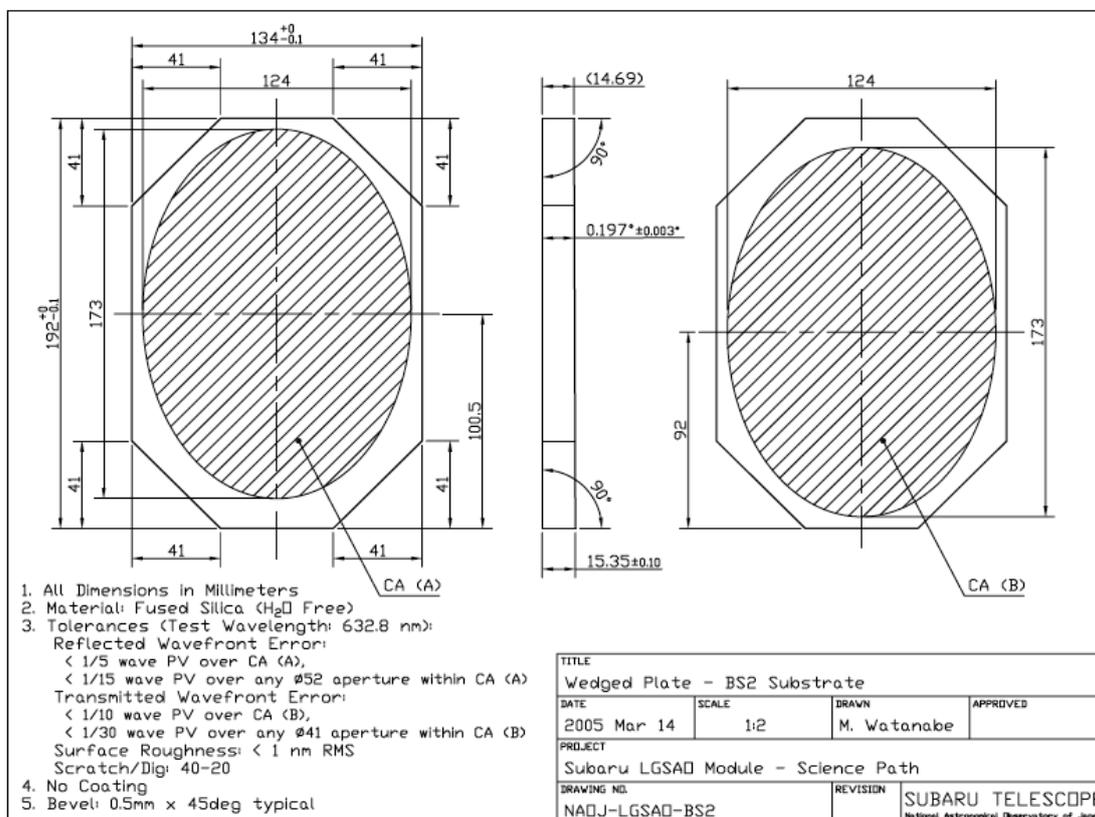
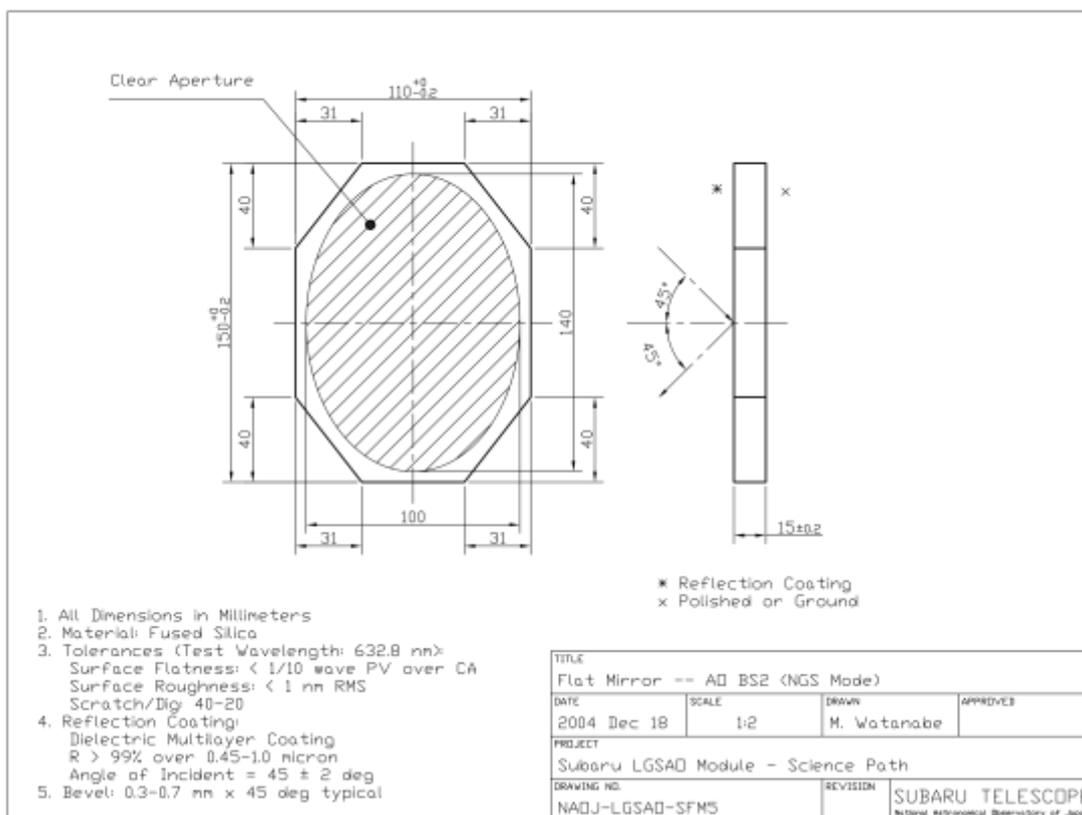


図 5.7.3 : BS2 として用いている MIRROR(上図)と BS589 (下図) の仕様をまとめた図面。

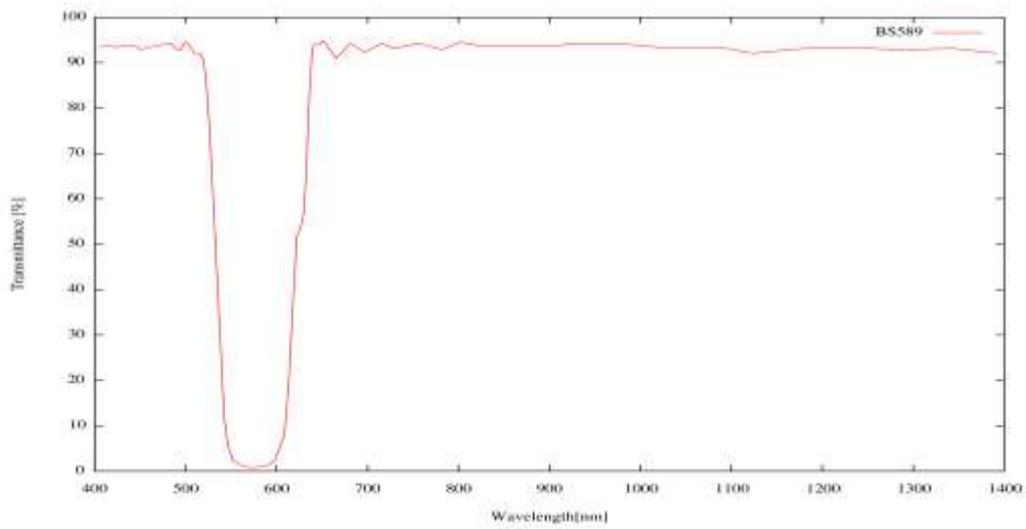


図 5.7.4 BS589 の分光特性(波長に対する透過率)

### 5.7.3 機械系

ビームスプリッタ交換機構は、BS1 では現在使用している NIR1, OPT と、将来的に追加する可能性のある NIR2 の 3 種類、BS2 ではミラーと BS589 の 2 種類のビームスプリッタ基板を光路上に配置し、遠隔操作により交換可能にする機構である。BS 交換機構は、スライドガイド、ボールネジ、ステッピングモーターを用いたステージで構成されている。静停時には、ステッピングモーターの軸をブレーキでおさえる事で、ステージ位置が動かない様な構造になっている。ビームスプリッタは、専用のホルダーにインストールされ、ホルダーごとステージにインストールすることができるようになっている。ステージは、光学定盤に対し垂直方向に移動し、遠隔操作により1分以内に目的のビームスプリッタを光路中に配置する事が出来る。図 5.7.5 に、ビームスプリッタ交換機構の構成例、及び実際に AO188 光学系に組み込まれた BS1,BS2 交換機構を示す。

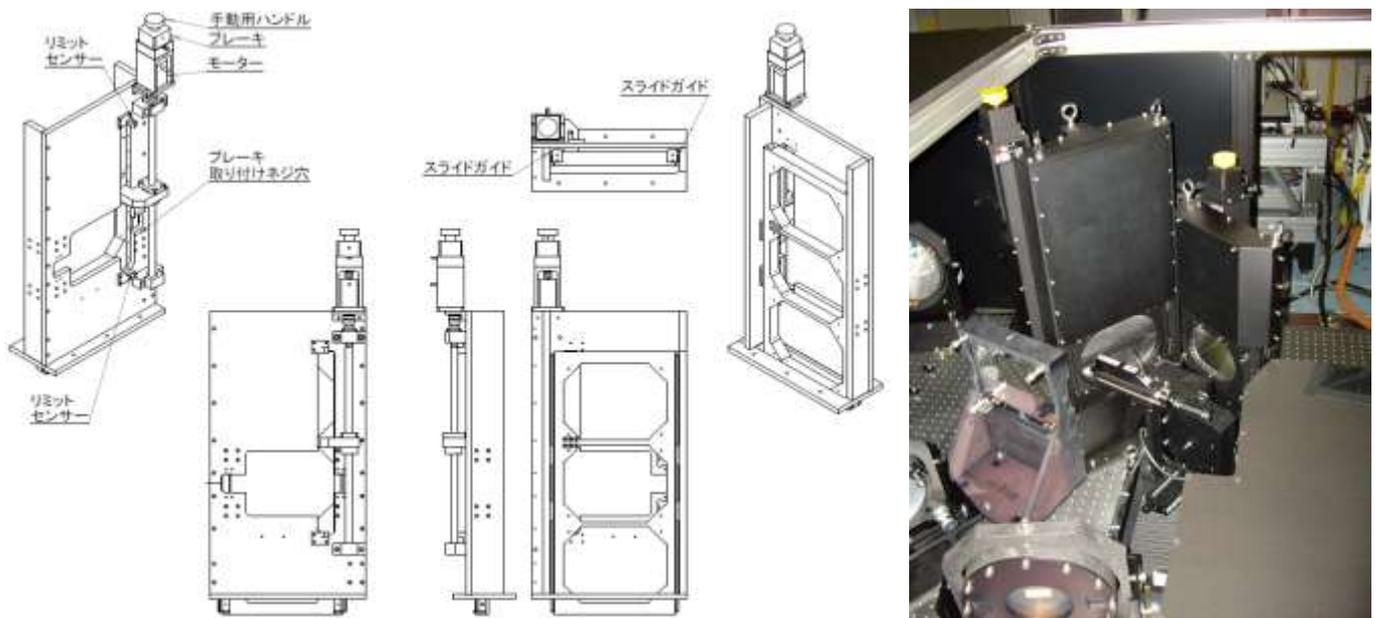


図 5.7.5:ビームスプリッタ交換機構の構成(左図)と、実際に光学ベンチにインストールされた交換機構の写真(右図)。写真で、左側の高いタワーが BS1 交換機構、右側の低いタワーが BS2交換機構である。

ビームスプリッタ交換機構では、光学系のアラインメントの再現性を確保するために、上下方向の繰り返し位置決め精度としては  $10\ \mu\text{m}$  以内、ビームスプリッタ基板の角度の再現性としては 1 秒角以内を満たす必要がある。BS1,BS2 交換機構は、AO188 光学系にインストールの直前に、山頂施設の光学ベンチにおいて個別に繰り返し精度の測定を行っており(図 5.7.6)、実際にこの繰り返し精度を満たしている事が確認された。

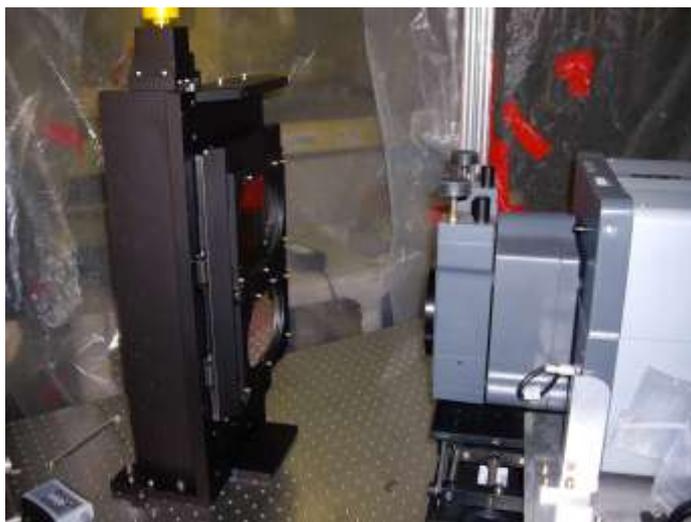


図 5.7.6 山頂施設における ZYGO 干渉計を用いたビームスプリッタ交換による基板取り付け角度の再現性の測定の様子

## 5.8 ガイド星捕捉光学系(美濃和)

### 5.8.1 概要

AO188 では、大気揺らぎによる波面誤差を測定するのに、直径 2 分角の視野内にある自然ガイド星 (NGS) または、高度 $\sim$ 90km のレーザー ガイド星 (LGS) のどちらかを用いる。また、LGS モードの場合、LGS では測定できない低次の波面誤差を測定するために、直径 2.7 分角の視野内にある Tip/Tilt ガイド星 (TTGS) を用いる。これらのガイド星を、高次、または低次波面センサー内の同じ位置に結像するように導入するのがガイド星捕捉ユニット (高次用:AU1, 低次用:AU2) である(図.5.8.1 参照)。表 5.8.1 に AU1/2 で要求される仕様をまとめる。ポインティング精度は J バンドでの回折限界 PSF のサイズ(40mas)を目標値に設定した。AO では、制御ループ中に、波面センサー内のガイド星の結像位置が変わると、それを補正するように光路上の可変形鏡が変形するため、観測装置上の天体の位置が動く。そのため、繰り返し再現性による観測装置上の星像の劣化が 3%以下になるように、AU の再現性の目標値を天空上で 6mas(PV) と設定した。

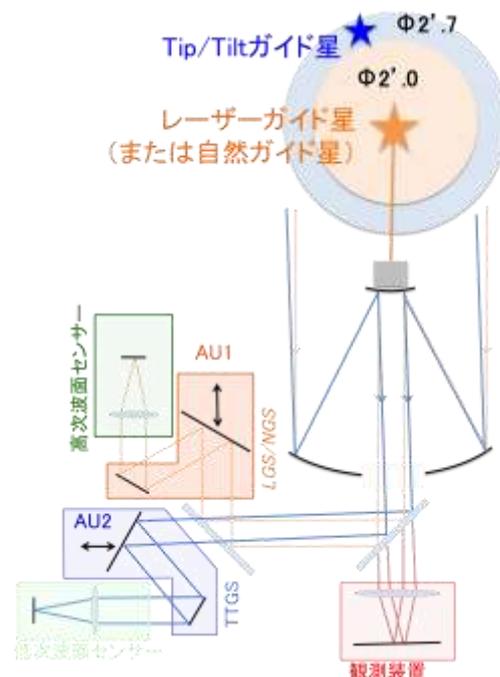


図 5.8.1:ガイド星捕捉ユニットの概念図

表 1	AU1	AU2
ガイド星	自然(可視)、レーザー(589nm)	Tip/Tilt(可視、赤外)
波長範囲	0.45 $\mu$ m $\sim$ 1.0 $\mu$ m	0.45 $\mu$ m $\sim$ 2.5 $\mu$ m
ガイド星搜索範囲	直径2分角	直径2.7分角
フォーカス調整範囲	-5mm $\sim$ +160mm	-5mm $\sim$ +5mm
ポインティング精度	天空上0.04秒角	
ポインティング再現性	天空上0.006秒角	
トラッキング速度	0' .2/分(位置)、0.55mm/分(フォーカス)	

表 5.8.1:ガイド星捕捉ユニットの仕様

### 5.8.2 光学系

AU1/2 は、それぞれ2枚の平面鏡の傾きと間隔を変える事で、入射光の焦点位置、焦点面での結像位置、光軸の傾きを変えられる様な光学系となっている(図.5.8.2 参照)。ガイド星からの光はビームスプリッター(BS2)により、NGS/LGSはAU1へ、TTGSはAU2へ導入される。M1は、ガイド星搜索範囲である2.0/2.7分角をカバーするために、AU1/2でそれぞれ $\phi$  115/150mmの平面鏡が用いている。M2はガイド星導入用カメラの視野( $\phi$  20")を確保するべく、AU1/2で共通の $\phi$  30mmの平面鏡が用いている。表1のスペックを満たすのに必要な鏡の角度とM1位置の可動範囲を表 5.8.2 に表す。高次波面センサーでは可視光で波面を測定するため、AU1の鏡面は可視光で反射率99%以上を達成できる誘電体多層膜とした。低次波面センサーは、現状では可視光で測定しているが、将来的には赤外波面センサーの導入も検討しているため、AU2の鏡面は可視～赤外線での反射率98%以上を達成できる保護膜付き銀コートとした。AU1/2では観測装置へ行く光路とは独立した波面センサーへの光路上にあるため、ここでの波面誤差は観測装置上でのPSFの劣化につながる

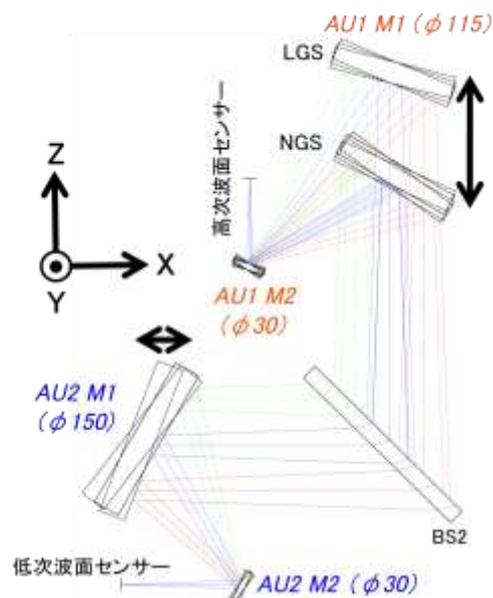


図 5.8.2:AUの光学系。2枚の鏡の傾きと間隔を調整する事で、結像位置、光軸の傾きを任意に変えることができる。

(Non-common path error)。Jバンド( $1.2\mu\text{m}$ )波長域でストレール比の低下が1%以下とするため、AU1/AU2の鏡は $1/10\lambda$ (PV)以下の高い面精度のものを使用している。

表2		AU1				AU2			
		最小値	最大値	絶対精度	再現性	最小値	最大値	絶対精度	再現性
M1	X軸回り	-7°.14	7°.14	7".5	1".1	-9°.61	9°.61	8".5	1".2
	Y軸回り	-6°.23	15°.92			-8°.37	9°.34		
M2	X軸回り	-7°.08	7°.08	28"	4".2	-9°.53	9°.53	20"	3".0
	Y軸回り	-6°.17	15°.87			-8°.30	9°.27		
M1シフト量		-3.37mm	98.46mm	20 $\mu\text{m}$	3.0 $\mu\text{m}$	-4.68mm	9.72mm	21 $\mu\text{m}$	3.2 $\mu\text{m}$

表 5.8.2: 鏡の回転角度と M1 シフトの可動範囲、絶対精度、再現性。可動範囲は、M1,M2 の角度が  $30^\circ$ 、間隔が150mmの時を基準とし、その位置からのずれとして表している。

### 5.8.3 機械系

AUの機械系は、M1/M2を上下左右に傾けるジンバルマウントと、M1の位置を光軸方向に前後させるリニアステージからなっている。ジンバルマウントの角度調整機構には Newport LTA-HL アクチュエーターを採用した。このアクチュエーターは、25mmのストロークを持ち、単方向位置再現性が  $0.5\mu\text{m}$  以下という高い位置決め性能を実現している。我々はジンバルマウントの軸受けとアクチュエーター先端までの距離(アーム長)を調整し、表 5.8.2 に示した鏡角度の広いストロークと高い位置決め精度の両立を実現した。リニアステージとしては、Newport XMS100(AU1)/XMS50(AU2)ステージを採用した。XMSステージは表 2 に示した M1 シフト量をカバーするストロークを持ち、光エンコーダーにより  $1\mu\text{m}$  の位置再現性を実現しているため、表2の仕様を十分満たしている。我々はエンコーダーからの光漏れを防ぐために、XMSステージ全体を箱で囲い、M1マウントとの接続部は蛇腹で覆った。ジンバルマウントの高い角度再現性や、トラッキング時の動的安定性を実現するため、軸受けにはバネを用いたベアリング(C-flex)、アクチュエーターの動力伝達には厚さ  $0.2\text{mm}/0.3\text{mm}$  の板バネを採用し、バネによりガタやバックラッシュが発生しない構造とした(図.5.8.3 参照)。M1/M2のマウントは、1枚のベースプレート上に乗っている。ベースプレート上では位置決めピンにより、各マウントの位置が再現するようになっている。また、ベースプレートも、AOベンチ上で位置決めピンにより搭載位置を決めており、アラインメントが再現するようになっている。ベースプレート(アルミ)とAOベンチ(ステンレス)の熱膨張率の違いによるプレートのひずみを逃がすために、ベースプレートとベンチに接する場所を端の3点とし、そこから伸びる細いアームで全体を支える構造を採用した。

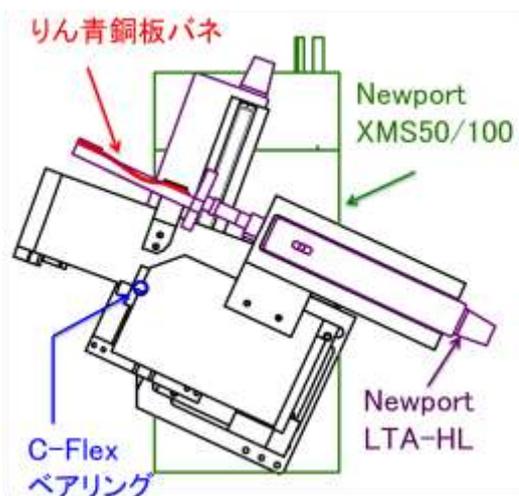


図 5.8.3: AU1 M1 のジンバルマウントと、リニアステージ。軸受けと動力伝達にバネを用いる事で、ガタやバックラッシュが発生しない構造を採用した。

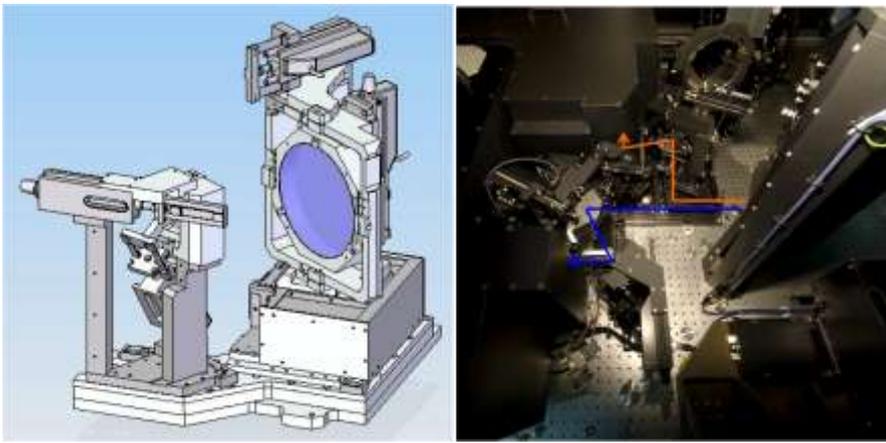


図 5.8.4 : AU2 の 3D モデル (左) と、AO188 に搭載された AU1/AU2 (右)。左上、左下にある黒い箱の中がそれぞれ高次、低次波面センサーで、その入り口にあるのが AU1, AU2 である。写真では BS2 は取り外してある。

## 5.8.4 性能評価

### 鏡角度較正

AU ではジンバルマウントの軸受け、アクチュエーターからの動力伝達にバネを用いているため、アクチュエーターを動かしたときの鏡の角度はバネの張力と鏡(+ホルダー)の荷重の釣り合いで決まる。そのため、アクチュエーターの位置と鏡の角度の関係は解析的には求める事ができず、予め較正しておく必要がある。そこで、我々は2枚の平行平面基板を、角度を付けて配置する事ができるウェッジプレートを用いた較正方法を考案した(図.5.8.5 参照)。ウェッジ基板は頂角が 0.9999 度になっている。このウェッジ基板の間で往復反射する光線は、透過する光線(0 次)に対し、1.9998 度×往復回数の角度を持って出射する。我々は5往復(5次)までの反射光を用いて、AU1/2 の M1 にて、表 2 に示したストローク内の 10 点の角度を離散的に較正し、その 10 点を4次関数でフィットする事で、アクチュエーターと鏡の角度の関係を求めた(図.5.8.6 参照)。M2 については、図.7 の様な光学系を用い、M1 をウェッジ基板で較正した角度に傾け、CCD での像の位置を見ながら、M1 により傾いた光線を戻すように M2 アクチュエーターを動かし角度較正を行った。AU1/2 の M2 の角度較正の結果を図.5.8.6 に示す。M1/M2 ともに、表2で規定したストローク、絶対角度精度をともに満たしている事を確認した。

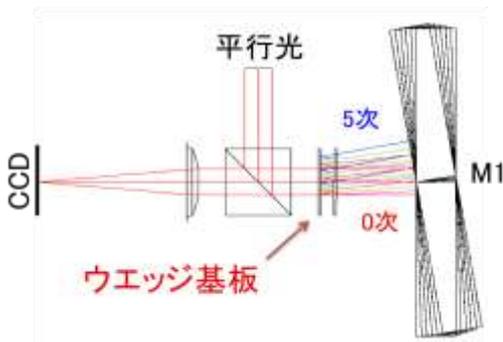


図 5.8.5: M1 角度較正用光学系。頂角が正確に分かっているウェッジ基板の多重反射光(0 次～5 次)を利用して鏡角度とアクチュエーター位置の関係を求める。

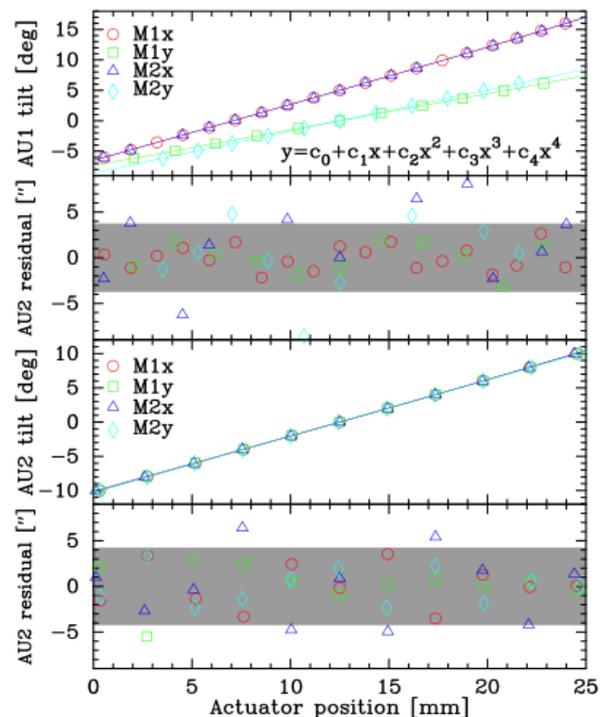


図 5.8.6: 角度較正により求めたアクチュエーター位置と鏡角度の関係。AU1/2 の全軸において、フィッティング残差は表 5.8.2 で示した絶対精度(M1 のみグレイの領域で表示)を下回っている。

## 角度再現性

AUでは表2の通り非常に高い鏡の角度再現性が要求される。我々は、図.5.8.7の光学系を用いてAU1/2の全軸について角度の単方向再現性を確認した。単方向再現性はアクチュエーターのストロークの端と中心の3点において、位置を+1mm→-1mm、または-1mm→+1mmに動かし、CCD上での像位置のずれをもとに見積もった。その結果、全軸において表2の仕様を満たす1秒角程度の鏡角度再現性を実現している事を確認した(図.5.8.8参照)。また、アクチュエーターを+1mm→-1mm→-1mm→+1mm動かした時の再現性(双方向再現性)については、アクチュエーターのバックラッシュにより、鏡の角度に換算して10~20秒角のずれがある事を確認した。このバックラッシュによる再現性の劣化をさけるために、観測時にAUを動かす際には、アクチュエーターの目的値へ常に同じ方向から寄せるようにした。しかし、トラッキングなど双方向から目的値へ動かす必要がある場合は、バックラッシュの影響を避けられないため、バックラッシュによる位置ずれをキャンセルする制御方法を考えている。

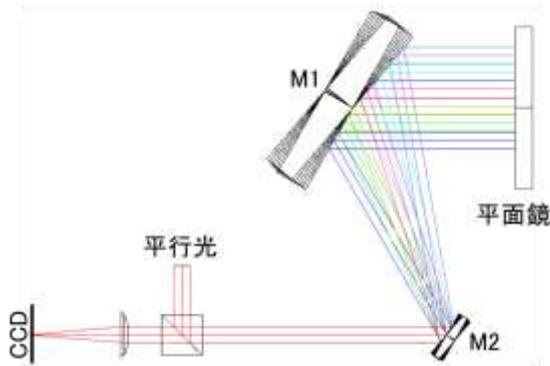


図 5.8.7: M2 角度較正、再現性測定用光学系。

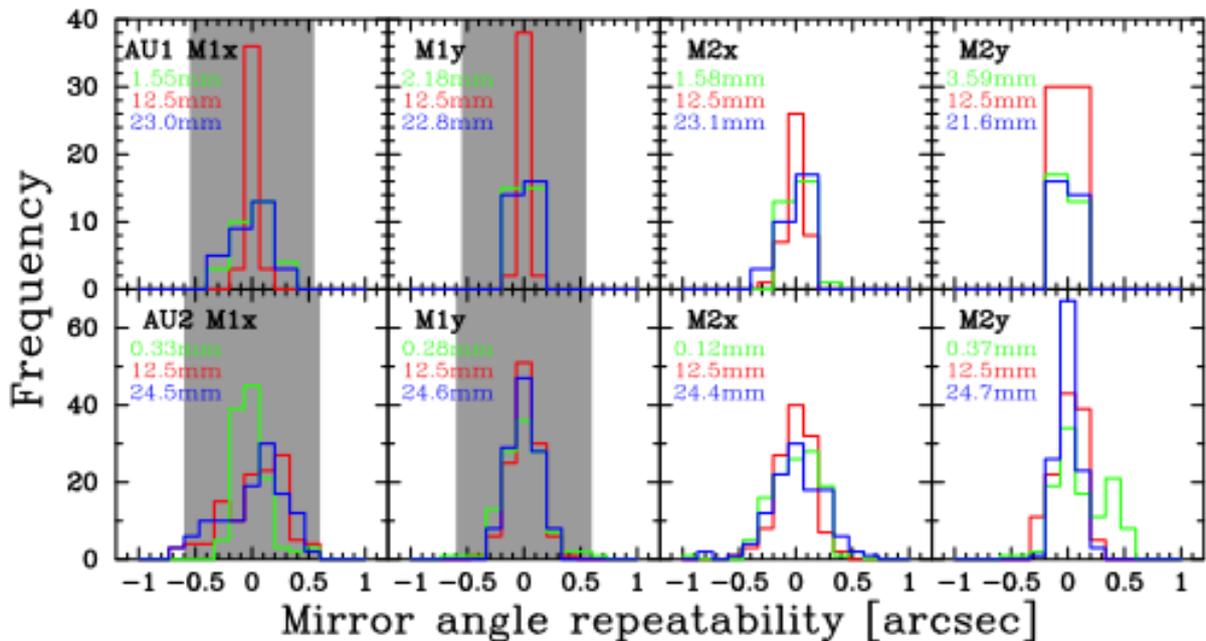


図 5.8.8: 再現性測定の結果。全ての軸において1秒角程度の再現性を達成。グレイの領域は表2で規定したM1の角度再現性の仕様範囲を表している。

## 5.9 レーザー光源(早野)

高度90km、幅10km程度に存在するナトリウム金属原子を励起し、補償光学系のガイド星として利用できるレーザーガイド星を生成するためのレーザー光源の基本仕様を表5.9.1にまとめた。

ナトリウム原子を励起するための波長は最も発光効率がよいとされるナトリウムD2線に合致させる必要がある。またナトリウムD2線は1.7GHzはなれた2群の発光スペクトルをもつことが知られている。このスペクトルの幅は高度90kmの温度(200K程度)の熱運動によるドップラー幅で決定されている。

一方、補償光学系のガイド星として利用するため、レーザーガイド星は12等級相当よりも明るくかつ安定しており、サイズは可能な限り小さいほうが望ましい。レーザーの発振形態によってレーザーガイド星の明るさは変わり、連続波がもっとも効率がよい。しかし連続波は光ファイバー伝送の際に、非線形ブリュアン散乱の影響があるので我々のシステムには不向きである。そのため、発振形態は疑似連続波とも言われる高い繰り返し周波数(143MHz)のモードロックパルス波を選択し、発光効率と光ファイバー伝送効率の両立をはかった。シングルモード光ファイバーで伝送されたレーザービームはビーム品質が高く小さなレーザーガイド星を作ることが容易であるが、入射するレーザービームの品質が光ファイバーの伝送効率に直接影響する。そのため、レーザーの横モードの品質は $TEM_{00}$ 、 $M^2 < 1.1$ を達成し高い伝送効率を維持する必要がある。

波長	ナトリウムD2線、589.159nm
出力	>4W
発振周波数幅	<2GHz
横モード品質	$TEM_{00}$ 、 $M^2 < 1.1$
偏光	直線
出力安定性	±5%以下
発振形態	モードロックパルス(繰り返し周波数15. MHz)

表4.2.9.1 レーザーの基本仕様

我々は、理化学研究所と協力し、1064nmと1319nmで発振する2つのNd:YAGレーザーを非線形結晶に同時に入射し和周波発生させナトリウムD2線の波長で発振するレーザーを開発した。レーザー光源の構成および光学系は図4.2.9.1に示す。

1064nmおよび1319nmの波長で発振するNd:YAGレーザーにはそれぞれ2つの励起モジュール(pumping chambers)があり、3方向から半導体レーザーによって円柱型のNd:YAG結晶を励起する。励起モジュールのNd:YAG結晶による円柱型形状および熱レンズ効果によって、横モードを $TEM_{00}$ に限定できるという仕組みを利用している。音響型光学素子(AO mode locker)に信号発生器からの交流信号を与えることで、モードロック動作させ、143MHzのパルスを発生させる。音響型光学素子の端面をブリュスター角にすることで偏光方向を限定している。励起モジュールの間に偏光方向を90°回転させる光学素子(rotator)を配置し非点収差を取り除いている。高反射鏡(HR、high reflective mirror)の直前にエタロンを置き、角度と温度を調整して波長の粗調整と微調整を行っている。1064nmと1319nmのNd:YAGレーザーにそれぞれエタロンがあるため、波長のチューニングに自由度がある。実際には1319nmのNd:YAGレーザーの出力が最大になるような波長を決定し、1064nmのNd:YAGレーザーの波長を微調整して、正確にナトリウムD2線にチューニングしている。それぞれのNd:YAGレーザーの共振器の出力窓(OC、output coupler)から射出されるレーザービームを平行光にし、周期反転非線形結晶素子(PP Mg:SLT)にレンズを介して集光する。2つのNd:YAGレーザーの焦点が合致するときに最大の和周波発生効率が得られる。

現在、1064nmのNd:YAGレーザーの出力は13.5W、1319nmのNd:YAGレーザーの出力6Wが達成され、589nmの波長で5.5Wが常に得られている。

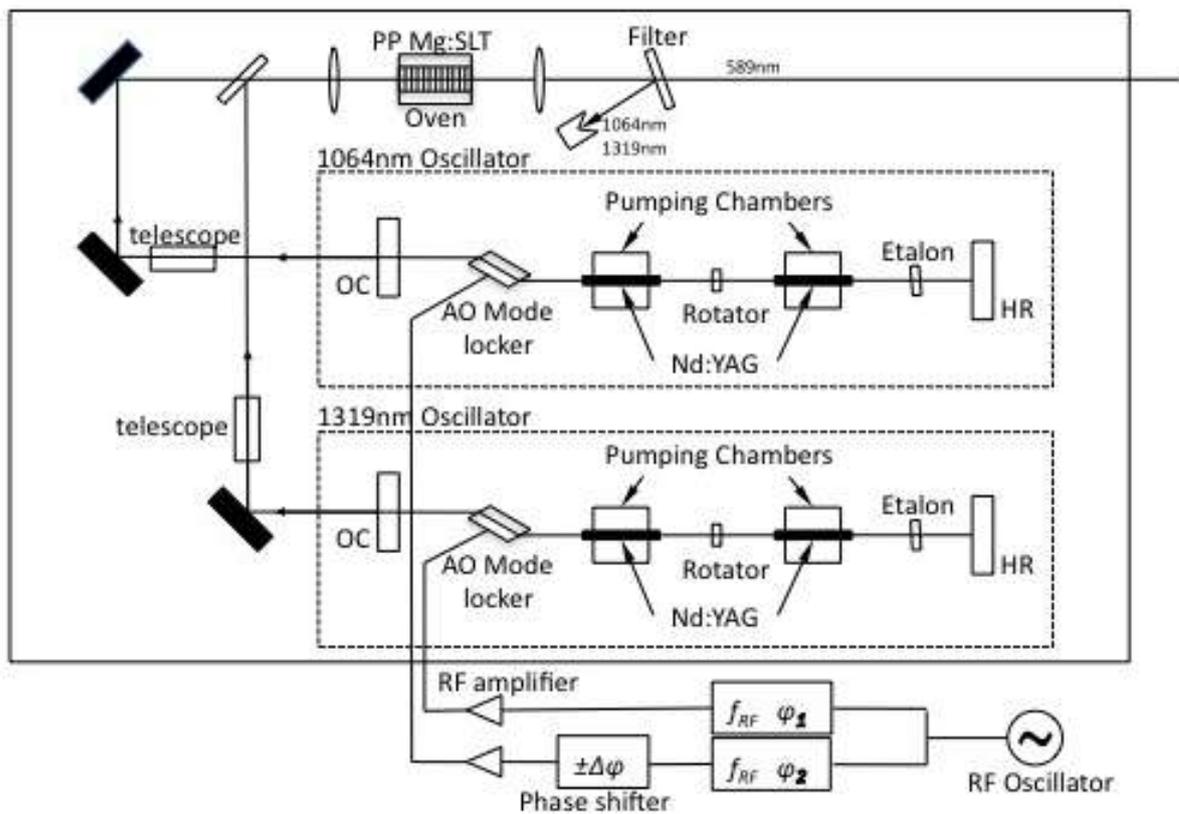


図5.9.1 和周波レーザーの光学系

レーザーのパワーをONにしてから出力および波長が安定するまで3時間ほど要する。しかし、レーザーガイド星を波面測定用ガイド星として十分使用できる安定度は、出力 $\pm 5\%$ 以下、周波数では $\pm 100\text{MHz}$ 、波長では $\pm 0.1\text{pm}$ である。このレベルの安定動作に落ち着くまでにはレーザー点灯後約1時間もあれば十分であることが実験的に確かめられている。また出力、波長の安定性は日ごとにまったく変化しないため、通常運用ではレーザーパワーをONにするだけでよく、まさにturnkeyのシステムである。

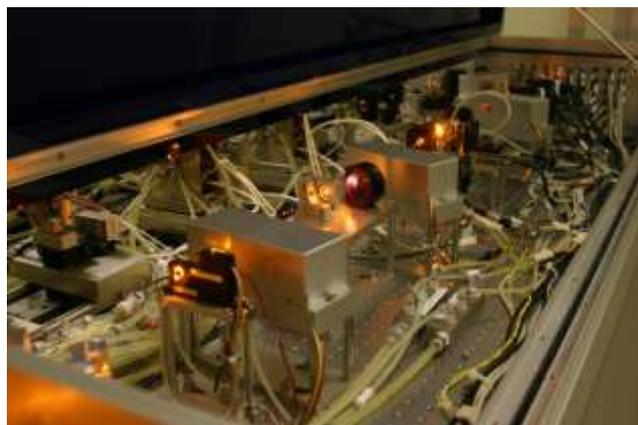


図5.9.2 589nm和周波レーザーの内部。Nd:YAGレーザー（左）と和周波発生側（右）。

## 5.10 レーザー伝送用光ファイバー(伊藤)

レーザービームを赤外ナスミス台のレーザー設置位置から望遠鏡副鏡裏に取り付けられたレーザー送信望遠鏡(LLT)に伝送するため、約 35m の光ファイバーを採用した。光ファイバーによる伝送がミラーによる伝送より優れているのは、

(1)ファイバー伝送はシングルモードファイバーを使用するため、よいビームのクオリティを保ったまま伝送することができる。

(2)光ファイバーはフレキシブルに敷設できる。

という点である。一方、光ファイバー伝送の不利な点としては、

(1)光ファイバーにレーザービームを入射する際に、最高の伝送効率を得るためには高い位置、および角度の精度が必要である。

(2)光ファイバーの材質(純粋石英)による損失は約 10dB/km であり、35m では透過率が 92.2% である。高反射ミラーコーティング(反射率 99.5%)の 16 枚分に相当し、無視できない。

(3)光ファイバーで高出力レーザーを伝送すると、コアの光エネルギー密度が非常に高くなり、誘導ブリュアン散乱(SBS)や誘導ラマン散乱(SRS)などの非線形散乱によって伝送効率が著しく低下する。(SBS、SRS については次節にて詳細を説明)

(4)光ファイバー中で起こる自己位相変調(SPM)により、伝送されるレーザー光のバンド幅がレーザー光の強度に応じて広がってしまう。これによりレーザーガイド星(LGS)を生成する効率が低下する。また、光ファイバー中を透過したレーザー光のスペクトルのピークの周波数にも影響を及ぼす。(SPM については次節にて詳細を説明)という点があげられる。

我々は、以下の理由から光ファイバーによるレーザービーム伝送を選択した。

フォトニック結晶光ファイバー(PCF)というコア径の大きくできるシングルモード光ファイバーの開発に成功し、入射光学系の難易度を低くし、光ファイバーのコア内の光エネルギー密度を下げることできた。

モードロック議事連続波というレーザーでは、パルス幅(時間)が誘導ブリュアン散乱(SBS)の応答速度よりも十分短く、非線形散乱が発生しないことが確認できた。

レーザーのパルス強度を低減させる光学系を光ファイバー入射前に設置する事で自己位相変調(SPM)の影響を低減させることができた。

PCF とはクラッド部分に周期的な空気穴のパターンを作成し、実効的に屈折率を小さく調節した光ファイバーであり(図 5.10.1)、コア径を従来のステップインデックスやグレーテッドインデックスタイプの光ファイバー(通常  $5\mu\text{m}$  程度)よりも大きな十数  $\mu\text{m}$  にすることができる。PCF の端面は空気穴へのダメージを避ける為に先端の穴を融かしてつぶし、空気穴が外気と接しない様にしている。

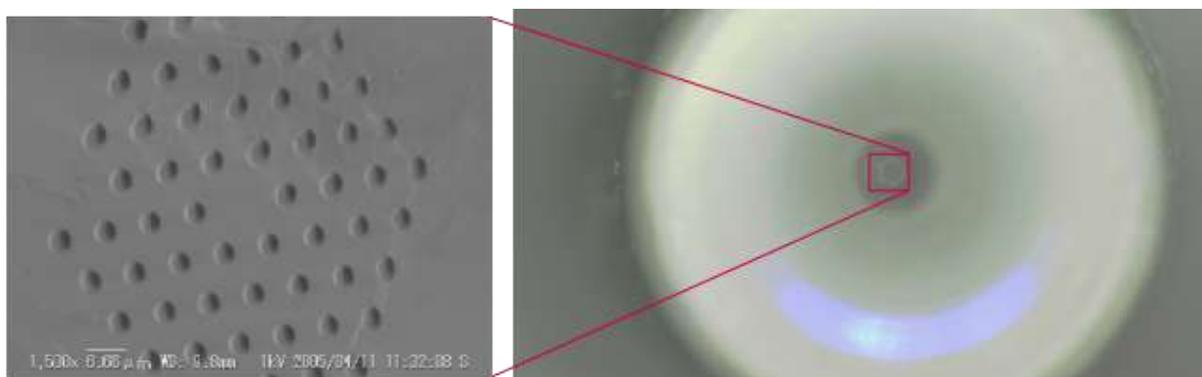


図 5.10.1 : フォトニック結晶ファイバーの端面

## (1) 誘導ブリュアン散乱 (SBS) と誘導ラマン散乱 (SRS) の評価

我々の 6.5W レーザーをモードフィールド径  $4\ \mu\text{m}$  のステップインデックスシングルモード光ファイバーに入射したとすると、 $35\text{MW}/\text{cm}^2$  という莫大なエネルギー密度となる。このような光の強度の集中があると、光と光ファイバーの媒質との非線形効果が無視できなくなる。特にレーザー光の光ファイバー伝送では誘導ブリュアン散乱と誘導ラマン散乱が最も考慮すべき非線形散乱である。

ラマン散乱とは媒質中に入射した光のごく一部が、入射した光の周波数より小さい周波数となって散乱される現象である。これは量子力学的に言うと、入射光子が分子によって周波数の小さな光子へ散乱され、それと同時にその分子が振動状態の間の遷移をする家庭として表される。入射する光の強度がある閾値を超えると、この散乱された光が指数関数的に増加し、誘導ラマン散乱 (SRS) が起きる。

誘導ブリュアン散乱 (SBS) は SRS よりも低い入射強度で起きる非線形現象である。SRS と同様にある閾値を超える光強度を光ファイバーに入射すると、その入射光のほとんどが逆向きに進行する散乱光となって発生する。SBS が SRS と異なる点は、光ファイバー中で SBS が起きると散乱光は逆向きに伝播するのに対し、SRS では両方向の伝播しうる。また、SBS の散乱光の周波数は SRS と同様に入射光の周波数より小さくなるが、その周波数シフト量は約  $10\ \text{GHz}$  であり、SRS による周波数シフト量に比べて3桁小さい、といった点でも異なっている。SBS の過程は入射する光の電氣的なひずみによって格子振動の振動モードを発生させ、それが屈折率の周期的な変調を作り出す。この光によって作られた回折格子によって入射光が回折を受けるのだが、回折格子自体が音速で動いている為、ドップラーシフトを受け、低周波側にシフトした散乱光が生成されるとして理解できる。

2005年5月にステップインデックス光ファイバー (SIF) とフォトニック結晶光ファイバー (PCF) についてハイパワーのレーザービームを入射する実験を行った。この目的は SIF と PCF についてハイパワーを入射したとき、SBS あるいは SRS の発生閾値、もしくは閾値の加減を実験的に見積もることである。

実験に使用したファイバーは SIF : NUFERN 製 200m、モードフィールド径 (MFD)  $4\ \mu\text{m}$ 、伝送効率  $7\text{dB}/\text{km}$ 、PCF : 三菱電線製、200m、MFD  $11\ \mu\text{m}$ 、伝送効率  $10\text{dB}/\text{km}$  をそれぞれ使用した。入射したレーザーのパラメータを表 1 に示す。

● 波長 <sup>◦</sup>	● $589.159\text{nm}$ (ナトリウム $D_2$ 線) <sup>◦</sup>
● カパワ <sup>◦</sup>	● $\sim 7\ \text{W}$ <sup>◦</sup>
● スペクトル幅 <sup>◦</sup>	● $\sim 2\ \text{GHz}$ <sup>◦</sup>
● ビーム品質 <sup>◦</sup>	● $\text{TEM}_{00}\ M^2 \sim 1.1$ <sup>◦</sup>
● 発振形態 <sup>◦</sup>	● 疑似CW (モードロック) <sup>◦</sup>
● 繰り返し周波数 <sup>◦</sup>	● $15\ \text{MHz}$ <sup>◦</sup>
● パルス幅 <sup>◦</sup>	● $0.7\ \text{ns}$ <sup>◦</sup>

表 1 : 使用したレーザーのパラメータ

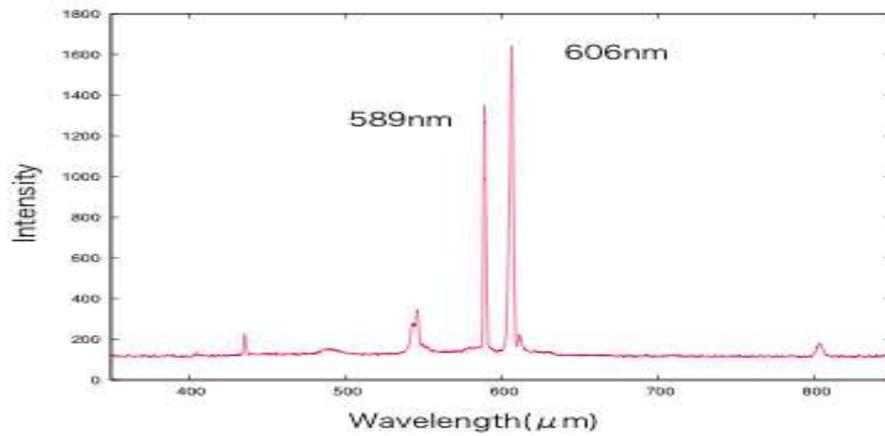


図 5.10.2 : シングルモード光ファイバーで確認された SRS

SIF に 2W を超えるパワーを入射した時、SRS による散乱光が現れた(図 5.10.2)。光ファイバーを伝播してきたレーザー光の波長スペクトルを測定すると二つのピークを持ち、それぞれ 589nm と 606nm であった。589nm は元々のレーザーの波長である。一方 606nm の光は SRS によって発生したものであり、見積もられるラマン散乱による波長シフト量 (16nm) に一致している。しかし、SBS の特徴は全く見られなかった。したがって、入射したレーザーにおける SIF に対する SRS の閾値は~1.3W であることが見積もられた。また、入射パワーが 1.3W を超えたあたりから、ファイバーを通過してくる 606nm の光の強度が徐々に高くなった(図 5.10.3)。対照的に PCF では SBS と SRS は 4W 以下の入射パワーでは起きなかった。また、端面のダメージなどによるレーザー透過光の現象も全く見られなかった。

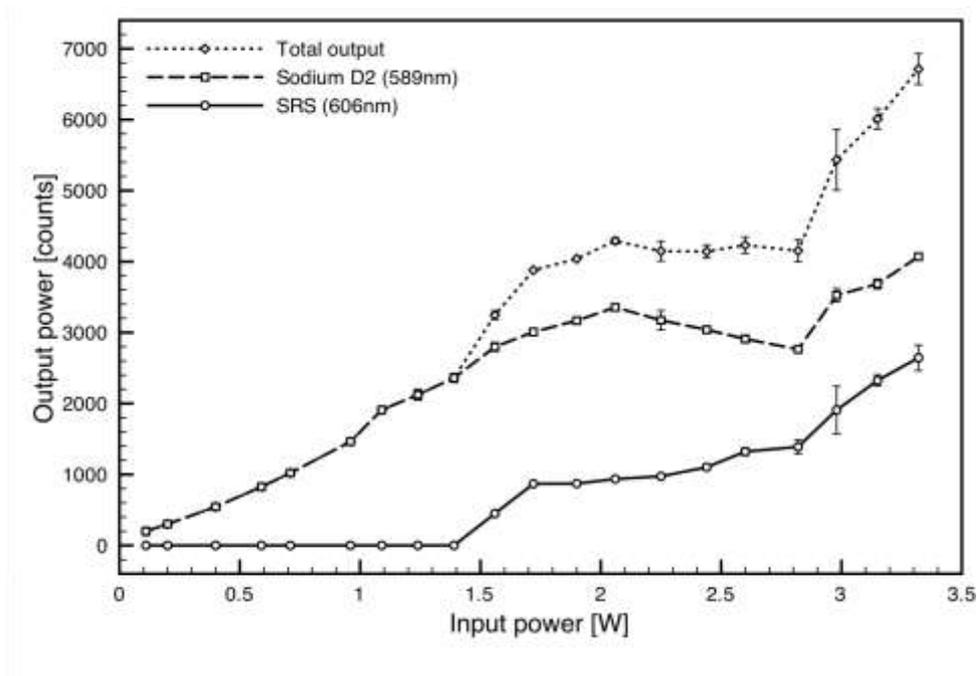


図 5.10.3 : SRS 散乱光の増加

入射レーザーが連続波の場合、SRS の閾値は SBS のものよりも 2桁程高いことが知られている。ただし、我々の用いたレーザーは 143MHz の繰り返し周波数で、パルス幅が 0.7ns というモードロック疑似連続波である。このようなレーザーを光ファイバーに入射しても、その短パルスのため、SBS を発生させる音響光学的なフォノンがレーザー光と相互作用しにくいということが実験的に確認された。

実験結果から実際にすばる望遠鏡に敷設するレーザー伝送用 PCF である MFD が  $14\mu\text{m}$ 、長さ 35m、伝送効率 10dB/km の SRS の閾値の下限值を見積もることができる。SBS の発生閾値はの場合 SRS よりも大きいのでここでは考慮しなくて良い。SRS の発生閾値は光ファイバーコアの面積に比例し、光ファイバーの実効長に反比例する。したがって、長さ 200m、MFD  $11\mu\text{m}$  の PCF に 7W を入射しても SRS が発生しなかったことから、実際に使用する PCF の SRS 閾値は 80W 以上であると計算される。

## (2) 自己位相変調 (SPM) の評価

光ファイバー内の媒質が光の強度によって屈折率を変化させる効果のおかげで、パワーの高いレーザーパルスを中心とパワーの低い裾の部分で屈折率が異なることになり、位相が変化する。その結果、レーザーパルスのスペクトルの広がりとして観測される。この現象を自己位相変調 (SPM) と呼ぶ。SPM によるパルス幅の広がりにはレーザーパルスのピークパワーに比例している。したがって、ピークパワーを下げることであれば、自己位相変調の影響を低減することができる。レーザーのスペクトルが広がれば、ナトリウム原子を励起する光子の数も減少するため、LGS 生成の効率が悪くなる。

2010 年に我々のレーザー伝送系における SPM の影響を測定する実験を行った。また、SPM を低減する為の新しい入射光学系を構築し、その効果の測定を行った。使用したレーザーは SBS、SRS の評価の際に使用したのと同じであるが、出力は  $\sim 6.7\text{W}$  であった。また、実際のレーザー伝送用 PCF を使用している。

レーザービームのスペクトルは PCF に入射するパワーを増加させる事で広がっていった。図 5.10.4 は入射パワーとそれによって広がったスペクトルを示している。また、比較のために PCF に通す前のレーザーのスペクトルも示している。これらのスペクトルはその面積が一定になるように規格化されている。この図 5.10.4 では測定された半値前幅 (FWHM) は透過したパワーが 3.7W のとき 8.4GHz であった。これに対し、PCF を通す前のレーザー自体のスペクトルの FWHM は 1.4GHz と求められた。

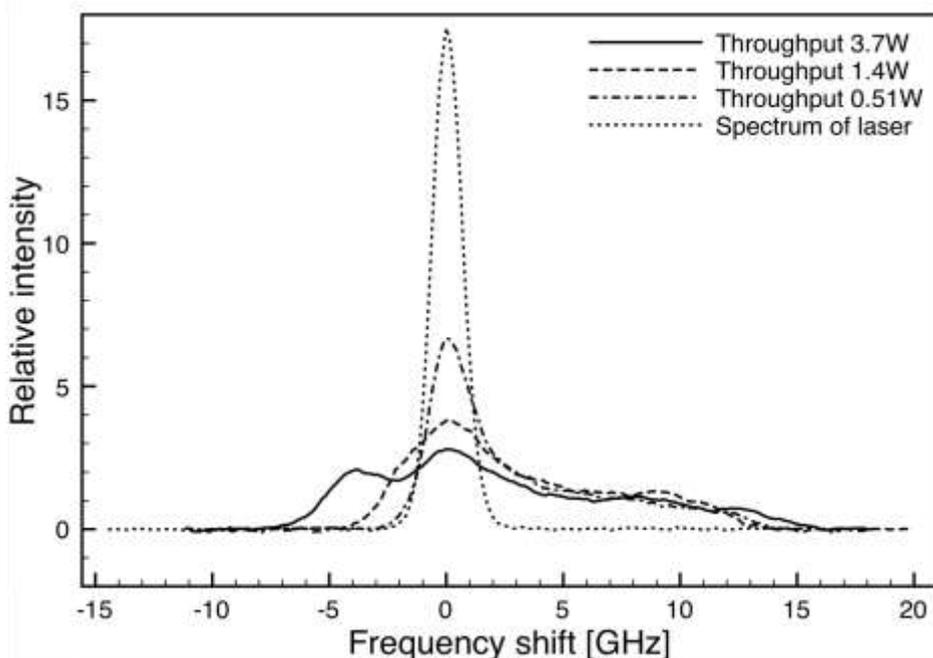


図 5.10.4 : PCF 透過後のレーザービームの広がったスペクトル

我々は SPM を低減させるため、パルスを分割する事で 1 パルス辺りのピークパワーを下げる光学系を構築した (図 5.10.5)。この光学系ではパルスを 4 分割する事でピークパワーを約 4 分の 1 に低減させている。パルスを 4 分割した場合、PCF 後のスペクトルは入射パワーに応じて緩やかに上昇した。2.6W を入射した時のスペクトルの

広がりや分割しないパルスでの 3 W 入射の時の比較を図 5.10.6 に示す。この図 5.10.6 においても面積が一定になるように規格化している。図 5.10.6 から明らかにパルスを分割した方が、レーザービームのスペクトルの広がり方が小さくなっている、すなわち SPM の影響が低減されたことがわかった。

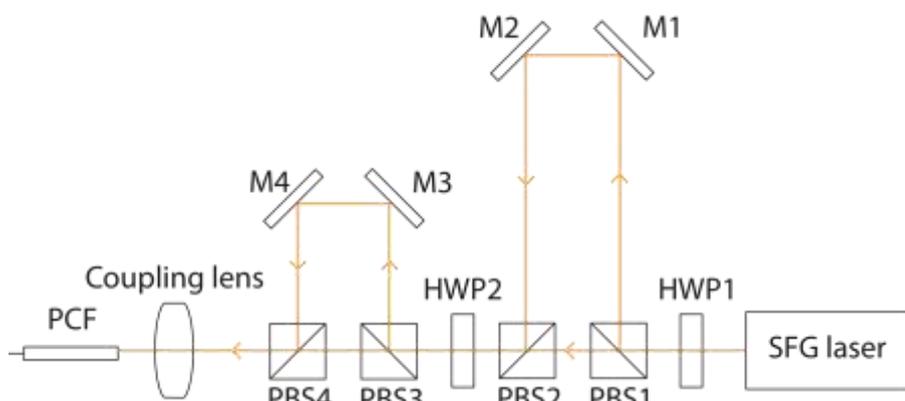


図 5.10.5 : レーザーパルスを 4 分割する光学系

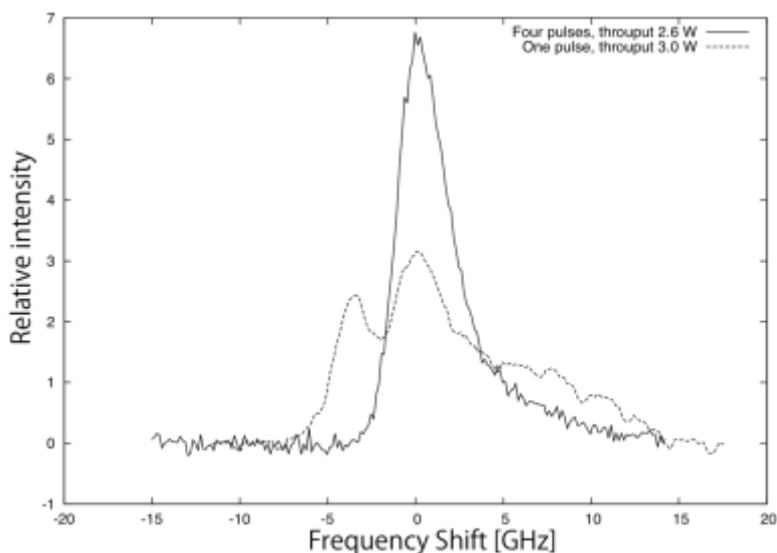


図 5.10.6 : パルス分割前後の SPM によるレーザービームのスペクトルの広がり方の比較

また、パルスを分割したレーザーを上空に照射し生成した LGS の明るさを分割する前と比較すると、パルス分割の場合、LGS は 46% 明るくなっていることがわかった。したがって、SPM を低減させる事で、LGS をより明るくすることが可能であるとわかった。このレーザーパルスを分割する光学系を加える事でより明るい LGS を生成することができ、それによって AO の性能の向上につなげることができる。

## 5.11 送信望遠鏡（斉藤）

### 5.11.1 レーザー送信望遠鏡

レーザー送信望遠鏡は、伝送用光ファイバーから射出したレーザービームを最終的に最大 50cm のビーム径に拡大して、上空 90km にある金属ナトリウム層にむけてレーザービームを打ち上げる役割をもつ。基本仕様は表 5.11-1 に示した。

表 5.11-1 レーザー送信望遠鏡の基本仕様

口径	50 cm
ビーム拡大率	12.5 倍
波面収差	約 90nm rms
視野	直径 2 分角
設置場所	トップユニット
サイズ	直径< 1.2 m、高さ<1.5 m
全重量（本体）	70 kg

欧州南天天文台が所有するチリの 8m クラス望遠鏡（VLT）のためのレーザーガイド補償光学系に使用されるレーザー送信望遠鏡の設計、製作がイタリアのメカで進められていた。欧州南天天文台の要求仕様と我々の要求仕様とはほぼ同様であり、調査した限りでは、このレーザー送信望遠鏡がもっとも適したものであること判明した。また、開発コスト、開発時間を節約する目的で、望遠鏡とのインターフェースを除き、まったく同様のレーザー送信望遠鏡を購入する決断をした。図.5.11-1 がレーザー送信望遠鏡である。設置場所である望遠鏡のトップユニットにおいてもほぼ回折限界の性能を維持できる軽量構造になっているため、レーザーガイド星作成性能は非常に優れている。

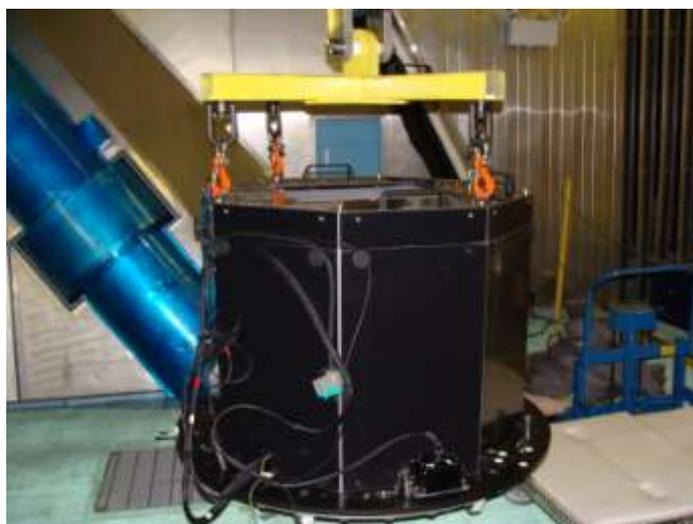


図.5.11-1 レーザー送信望遠鏡

### 5.11.2 レーザー送信望遠鏡診断系

レーザー伝送用ファイバーを出射したビームは一定の広がり角を持ち空間を伝播する。そのビームを平行光に直し（コリメーションという）、最適なビーム径を持ったビームを指定した角度でレーザー送信望遠鏡に入射させるための機構が必要となる。また、レーザー本体側で伝送用ファイバーに最適な状態で入射するために必要なビーム強度の計測機構も必要とな

る。上の目的のためにファイバーから出射したビームがレーザー送信望遠鏡に入射される間に設けられた機構が「レーザー送信望遠鏡診断系」である。ここで言うことは

- (1)ビームのコリメーション
- (2)ビームの方向制御
- (3)光ファイバー入射光学系のためのマルチモードファイバー入射光学系である。概要は図.5.11-2 の通り

### レーザー送信望遠鏡入射光学系

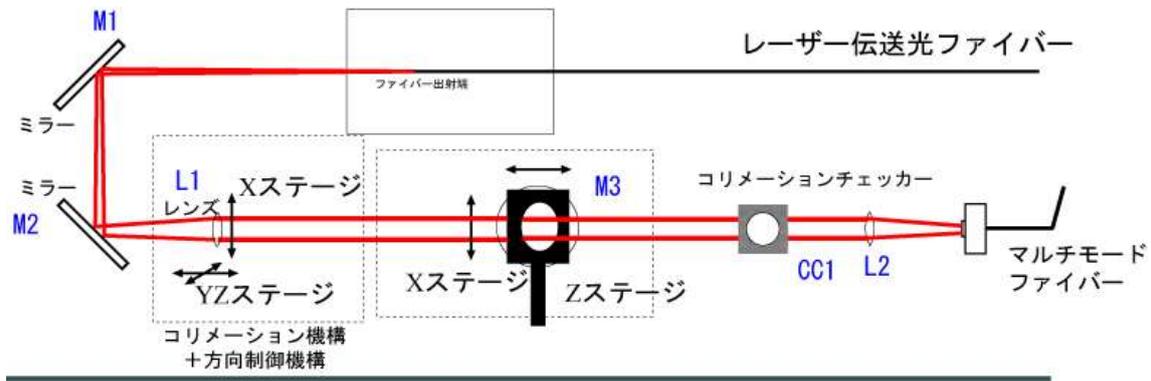


図.5.11-2 レーザー送信望遠鏡診断系概念図.

#### 5.11.1.1) ビームのコリメーション

レーザーガイド星を形成するためには送信望遠鏡に入射するビームはコリメーションビームである必要がある。ビームのコリメーション機構において、まずコリメーション用のレンズ（図.5.11-2 の L1）の焦点距離すなわちコリメーションビームの径を決定する必要がある。

送信望遠鏡に入射するビーム径は最大 50mm が入射可能であるが、診断系で確保可能な空間が制限されているため、実際のビーム径は 50mm 以下となる。

ビーム径を決定するのはファイバーの開口数 (NA) とファイバー出射端からコリメーションレンズまでの距離  $d$  であり、この送信望遠鏡の光学系ではそれぞれ  $NA=0.04$ 、 $d=400\text{mm}$  とした。これは最終的に送信望遠鏡から打ち上げられるビームの径が 24mm となることに対応している。

#### 5.11.1.2) ビームの方向制御

ビーム方向制御はレーザーガイド星を視野内のどの位置に形成するかを決定するために必要な機能である。ビームの方向制御はコリメーション用のレンズをビームに垂直な面内を移動させることで実現する。上記のコリメーションと合わせて、これらの制御のためにレンズは XYZ の 3 方向に動くステージに取り付けられており、このステージは  $\pm 3$  ミクロンの精度で動作する。これは天球上に打ち上げられたビームを 0.24 秒角の誤差で制御することに相当し、補償光学系で補正可能な位置的誤差の範囲に収まっている。

この機構によって遠隔操作による精密なコリメーションと方向制御のどちらも実現している。

#### 5.11.1.3) 光ファイバー入射光学系のためのマルチモードファイバー入射光学系

レーザー伝送用ファイバーに入射したビームが最適な結合効率を達成しているかどうかを知るためには、出射側からどれだけの強度を持つビームが出射されているかを知る必要がある。そこでコリメーションビームを送信望遠

鏡に入射させるためのミラー(図.5.11-2 のM3)の透過光(0.5%の透過率)をマルチモードファイバーに結合させ、それをレーザー本体側まで伝送し、光ファイバー入射光学系にて送信望遠鏡側のビーム強度の情報として利用する。このビーム強度は常にモニターされており、制御室からリモートでビームのファイバーへの結合を調整することが可能である。

現在運用中のレーザー送信望遠鏡診断系の様子は図.5.11-3の通り

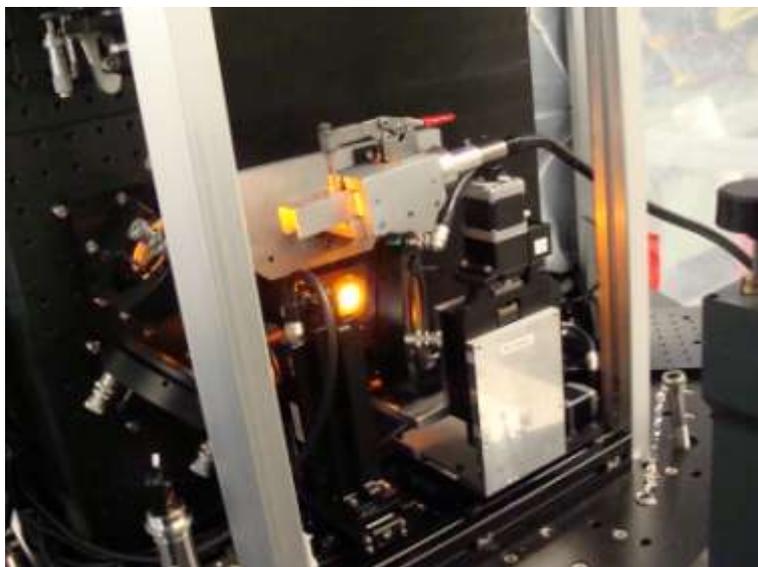


図.5.11-3 レーザー送信望遠鏡診断系

## 5.12. 波面補正リアルタイム制御系(服部)

補償光学の制御系は、波面センサーで測定した入射光波面の歪みを、可変形鏡の変形量に反転加算し、出射光線の波面収差をゼロに収束させるようなフィードバック系である。本章では、そのためのデジタル数値制御処理を行う波面制御系を説明する。すばる AO では、曲率方式と言われる、入射波の位相面の局所的な曲率を検出して制御する方式が取られている。光学系を含んだ波面制御系の概念的な構成は、図 5.12.1 に示す通りである。

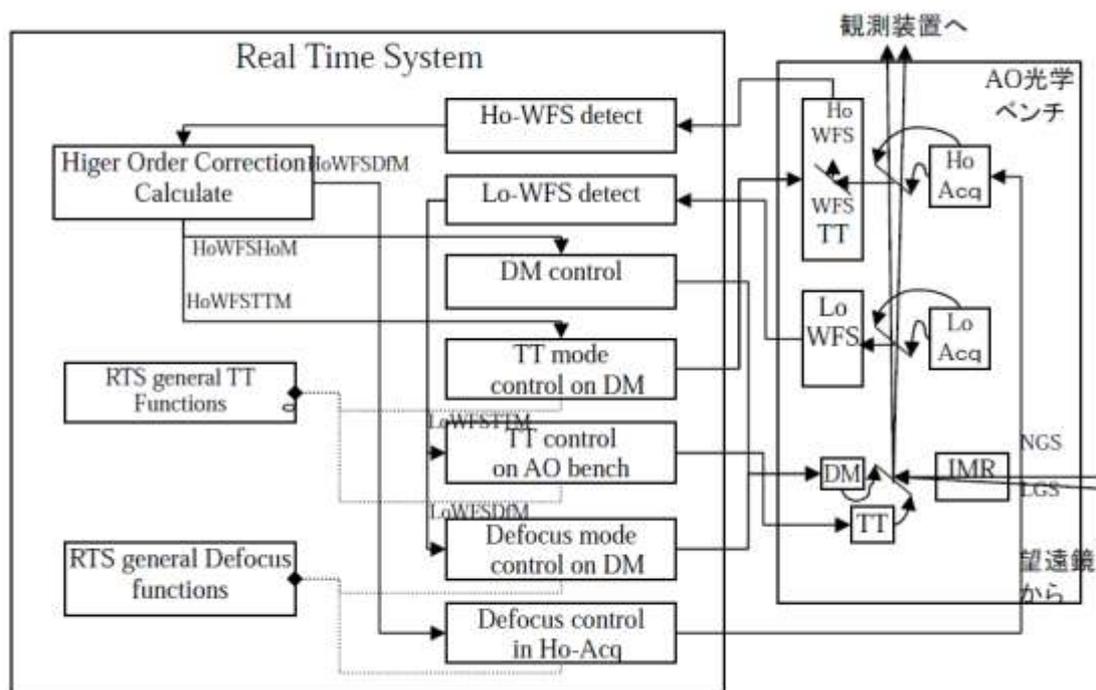


図. 5.12.1 波面制御系構成図.

なお、本研究が開始した時点で、上記制御系はすでに通りの動作をする状態にあった。その後、今回の研究では、波面補正の性能と運用上の利便性の向上のため、計算アルゴリズムなど波面制御ソフトウェアに多くの改良を行ってきており、この節で述べるのは、主に、計算処理を行うコンピューター上でのソフトウェアの改良となる。

### 5.12.1 ハードウェアの概略

波面制御部のハードウェアの概略を述べる。まず、数値計算等を行う計算機のハードウェアには、リアルタイム計算機と呼ばれるものを用いている。これは、通常の計算機能の他に、特に、外部から入力された計測信号に対して、遅滞無く、計算処理と外部制御出力を行う機能を付加したものである。今回は、特に、補償光学系に合わせて、多素子の入出力を高速で制御できるよう、大容量のものを用いた。

リアルタイム計算機にはいくつかの方式があるが、AO 188 に用いたものは、セミリアルタイム方式あるいはソフトウェアリアルタイム方式と呼ばれている。これは、ハードリアルタイムと呼ばれる計算機のクロック自体を計算のタイミングに用いる方式ではなく、割り込みと言うソフトウェア上でハードウェア入力を検知する機能を用いることで、制御を行うハードウェアに同期して柔軟に計算処理や制御出力を行う方式によっている。すなわち、図 5.12.2 において、波面センサーの振動鏡に入った駆動信号に連動した同期信号が、APD のカウンターボードに送られ、カウンターボードでは、このハードウェア的な駆動信号を受けるたびに、ソフトウェア上では、波面補正を

行う計算が始動され結果が可変形鏡に出力される。ここで、振動鏡の駆動速度を変化させても、それに追従して計算と制御が行われるため、系の動作速度は揺らぎや機器の特性に合わせて設定可能となる。

制御系の実際のハードウェアの詳細は、LGS AO の開発時の資料に譲るが、特徴としては、リアルタイム計算機から、可変形鏡を駆動するデジタルアナログ変換器までと、APD での光電子パルスを計測するカウンターボードまでの接続に、光ファイバーを用いた FPDP インターフェースを用いていること等がある。

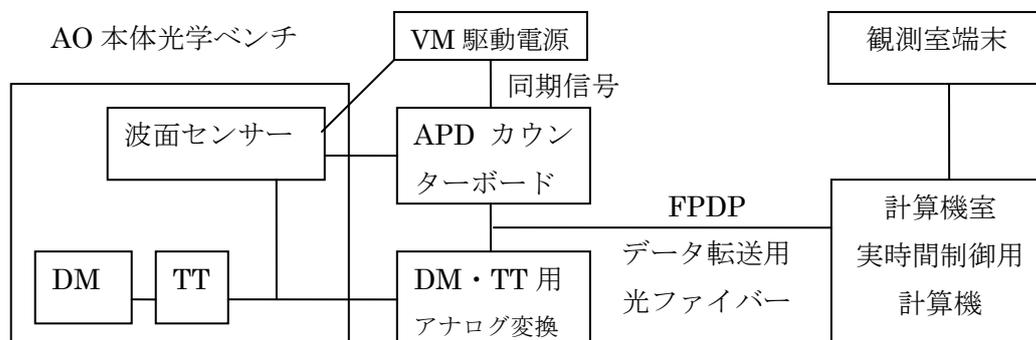


図.5.12.2 すばる AO 波面制御系ハードウェア構成図.

今回の研究期間中、ハードウェアの中ではリアルタイム計算機を更新している。これは、LGS モードで増大する計算量への対応と、それまでの機材の老朽化が進んでハードウェアの不調による停止が見られるようになったためである。この更新により、CPU とメモリーの容量は大幅に増大し、後述されるソフトウェアの拡張にも十分な計算量を確保することができている。計算機のシステムは、従来との互換性を考慮してコンカレント社のレッドホークシステムを搭載したものであるが、CPU は当時最新の AMD 社の製品を四基搭載したもので、メモリーも大幅に増強しており、それ以前のものとは比べて CPU、メモリーともに容量は倍増している。

### 5.12.2 波面制御ソフトウェア

本研究において、波面制御系で主な作業となったのは、レーザーガイド星を用いた制御を完成させ、実際の運用に合うように調整するための、ソフトウェアの改修であった。ここで、「改修」とは言うものの、波面センサーの情報をほぼそのまま可変形鏡にフィードバックするのみで良い自然ガイド星の場合と比べ、制御系の複雑性は構成要素の組み合わせ論的度数で大幅に増すことになった。特に、レーザーガイド星からの情報は、運用や試験の条件に合わせて、随時自在に導入と切り離し出来るように構成する必要がある。また、今回開発している補償光学系が、すばるに搭載されるものであることもまた、設計を大幅に複雑にしている。一つには、望遠鏡での実動試験の時間は非常に限られるため、単体での試験機能など、各種付加機能も充実させる必要がある。

本研究の開始した時点では、最低限の機能の実装された制御ソフトウェアが、単純に行数を数えて三千行程度であった。しかしながら、上記のような事情に合わせて改修を行い、報告書を作成している現段階では、同様に数えて数万行にまで増えている。このことから、どのような機能を開発するかと同時に、いかにこのような大規模なプログラムを扱うかが、開発の過半を占めるようになってしまった事情が存在する。また、それらの改修は、研究開発の進捗にあわせて柔軟に行う必要があり、この点を克服するため、ソフトウェアの開発方法には様々な工夫が加えられ、本節で引用される書式もそのような背景に基づいて作られたものが多い。このため、ソフトウェア開発手法の確立から説明を始める。

## (1) 大規模なソフトウェアにおける自由度の高い開発方法の確立

まず、今回の研究開始当初、原型となった自然ガイド星用を中心にした基本制御ソフトウェアでさえ、かなりの紆余曲折を経て開発された事情があった的を指摘しておく。これは、波面センサーや可変形鏡等の特殊な機器類を用いた上で波面制御という特殊な動作を行い、さらにそれを用いて大気揺らぎという自然の不確定要素が扱われるため、システム設計の詳細の確定には開発過程での実験に頼る部分が多くなったためである。つまり、制御用ソフトウェアは、組み立てては試験という、試行錯誤の集成物となり、実験のための機能付加とその実験結果の反映の繰り返しで、頻繁な書き換えが要求されることとなった。一方で、当時のソフトウェア開発担当者は、開発開始当初の仕様書を確定したものとして受け止めていた様子で、実験結果に基づく度重なる変更は、一見些細であっても、時に、事前に想定したソフトウェアの基本構造に想定外の変更を要求する様子であった。開発途中でそのような試行錯誤が増えれば、事前に考えていたソフトウェアの構造設計の範疇では対応が難しくなり、その結果、整合性の維持が難しくなってくる。そのような、構造設計の整合性の取りにくい状況下で、さらになるソフトウェアの規模の増大は、作成期間の急激な増大を招く様相を呈した。

上記の一方で、本研究の課題となったレーザーガイド星 AO の安定運用においては、レーザーガイド星の特性の詳細自体が試験観測を十分に行った後でなければ決めることが出来ず、その一方で、実際の運用へ適合させるためのシステムの拡張により、ソフトウェアの規模も大幅に増大することが予想された。つまりは、手元にある不完全な情報から作りうる部分を作ってしまう、それを用いて実験を重ね、そこで得られた情報にもとづいて、制御アルゴリズムなど基本的な機能までも随時追加、事後修正するような開発方針を採らざるを得ない。このためには、設計が一部未確定なままでも可能な箇所から開発を進め、その間にプログラムサイズが増大したとしても、整合性に限界が来て手詰まりとなるようなことが無いような、柔軟なソフトウェア開発の手法を確立する必要があった。

出発点の一つとして、まず、プログラムの規模が増大してくると、プログラムの書き換えにおける整合性の確保、あるいは「文脈的」なバグの低減が本質的に重要になってくる事を、簡単な考察と共に以下に示しておく。これは、プログラムの規模が大きくなってくると、小さなプログラムの場合と比べ、所謂、バグといわれる欠陥の本質が異なってくる点に留意する必要があるということである。つまり、小さなプログラムでは文法的な単純ミスが殆どであるが、プログラムのサイズが大きくなると、細部でのバグが、その箇所のみの個別のトラブルにとどまらずに、他の箇所と結合して不整合を生ずるような、「文脈的」なバグが多く見られるようになる。ソフトウェア開発の経験があれば、プログラムを書いているうちに、書いたその場所で良く目を凝らすと見えてくるようなバグよりも、直接書いているのと少し離れた見えにくい場所で、思いがけなくバグが浮上するようなことが増えるのは、誰しも思い当たる事であろう。前者の、小規模なプログラムで問題となる単純な「文法」に由来するバグは、単純な確率の問題で出現するとして良い為、プログラムのサイズに比例する事になる。しかしながら、大規模なプログラムで問題になる後者の「文脈的」なバグはやや複雑になる。その対応策を取らなかった場合の文脈バグの爆発的な増加に関して、以下、数理的な側面も考慮して、簡単なモデルを考えてみる。

上記の文脈的なバグは、実装された機能間で組み合わせた際の不整合から起こるものであるとすると、プログラムサイズの増大に対して比例するわけではなく、むしろ組み合わせ数学的により高次の増加を見せることになる。まず、この点が第一義的な問題と理解できる。さらにこの、文脈的なバグを修正する際の問題として、障害の出た場所から原因となったバグが離れている場合が多く、原因の特定が難しい場合の多いことが、問題に拍車をかける。問題に対する発生原因は単一であるとして、その原因の追跡を、単純に総当り的に行うとした場合、その追跡の対象域は（なんらかの定数を介するとしても）、プログラムサイズに比例する程度となる。そうであれば、原因の特定にかかる時間も、おおよそ原因の検索範囲に比例するとして、プログラムサイズに比例することになる。また、そのような修正も含めて、書き加えた部分と他の部分との再度の不整合の発生率というのを考えれば、これは、プログラムの他の箇所で問題が誘発されずに済む率の累乗を 1 から引いたものであるから、プログラムサイズと共に増大する。何も対策を採らぬままプログラムが大きくなったときに、これが運悪く極端に出れば、一つの問題を直しても、ほぼ確実に別の問題が発生するような状況となり、問題を回避するのに費やされる時間が急激に長く、ある

いは、時間をかけて直しても直しても思わぬ所に別のバグが発生して改善しないというような事態に陥りかねないことになる。

上記によると、「文脈的」なバグ発生率がプログラムサイズの高次の乗数で、また、その発生したバグの修正の難しさもプログラムサイズの高次の関数となるため、規模の大きなプログラムの開発は行数対して爆発的に時間を消費し、急激に難しくなる傾向を持ちうることを、示すものと考えられる。直感的には、つまり、何も対策を講じなければ、ある行数以上のプログラムは、組み合わせ論的な不整合の増大に阻まれ、現実によりうる有限の時間内には決して完成し得ないと言う事になる。ソフトウェア開発の遅延はしばしばその実例も耳にするが、多くで上述の要因があるものと思慮される。たとえば、倍のサイズのソフトでも3倍の時間の時間がかかったのを実績として、やり方を変えぬまま、頑張りさえすれば10倍のサイズでも10倍の時間で仕上げられると計画を立てても、達成の保証は殆どありえないと言う事になる。

この文脈バグの問題を始めに挙げたのは、大きなソフトウェアの作成が特に困難となることの、恐らくは主原因と考えうるからである。その低減こそが、各種のプログラム技法の目的であり、また、本節に示した多くのソフト開発法の根底にも存在しているとすると、しばしばそれらの理解が容易になる。また、計算機を用いる研究プロジェクトであれば、研究期間中に成果を挙げて成功裏に終わる為には、上記の文脈的バグによる限界点の理解は本質的となろう。その一方で、一部のソフトウェア専門家以外には、あまり注意の届かない事柄でもあるため、教訓を残す意味からも、明示を試みた。

そういったソフトウェアの改修であるが、より現実的な問題としては、有限時間どころか迅速に行われなければ意味の無くなってしまふことが多い。これはつまり、ソフトウェアに期待される特質の一つが、ハードウェアには無い柔軟性ということに由来する。極端に言えば、もし、ソフトウェアによる処理が過剰に複雑となる結果、そもそもハードウェアから作りなおしてしまったほうが早いのであれば、そうすべき、と言う事になる。(もともと、今回のような研究用の装置では、作り直しの難しい高価で特殊なハードウェアも多いため、この場合には、ソフトウェアによる事後的な機能付加が本質的と解釈される場合ありうるが、その場合でも研究期間の制約は存在する。)

またさらに、ソフトウェアに特段の柔軟性の期待される理由として、科学研究が未知の探求であってその為の装置である以上、どのように厳密に設計しても、実際に稼動して研究を始めてみると、もともとの想定とは違う事態が多々生じることがある。そして、科学研究は完成した機材の運用する間にも進歩を重ねるものであるから、元々は設計外であった拡張も期待されるであろう。これには、単なるソフトウェアの技術の範疇を超えて、先を見通した柔軟な基本構成が望まれることになるが、その為には、制御理論や光物理に、さらには、そもそもの天文学と、基礎科学にまで立脚した検討が必要となった。それらを、先に述べた現代的なソフトウェア開発の技法を組み合わせることで、単なる改修にとどまらない、より効果的な拡張が可能となる。

上記をまとめると、本研究で行った数万行のソフトウェアの改修を実現する為には、バグの発生率を抑えながら、柔軟に開発を継続する手法を確立することは、必須であったと言える。一方で、そのためには甚大な工夫や努力を求められることとなった。今回の研究において導入を行った手法や技法は、ごく大まかには以下の二種類に大別出来る。

- 1、現代的なソフトウェア技術の導入 (UML、ユースケース駆動開発、オブジェクト指向、リファクター、ソフトウェア開発管理、開発サイクル、シミュレーター開発) による、迅速性の向上とバグの低減。
- 2、基礎設計 (制御理論、光学理論、観測天文学に基づく) からの再拡張。

このうち特に、1、であるが、これは、担当した筆者自身の専門がソフトウェアそれそのもと言うわけでは無い事をまず先に断っておく。この点から、専門的な知識体系よりは、今回の研究の範囲での実用性に重点が置かれている。以下に各要素の概略を述べる。

## (2) UML の導入

はじめに、UML (Unified Model Language) に関してであるが、従来から存在した記法 (主に図法) を統一することで、設計を厳密にする効用を狙ったものであるとのことである[5.12 章文献 5.12.1]。文脈的、つまり、一つには論理的不整合によるバグの発生を減らそうとすれば、本研究のように、当初、基本設計関わる一部要素が未知で決まらないにしても、確定した部分の設計だけでもその記述の厳密性が高くできるのは良いことと言える。専門的に完璧を期そうとすると、色々あるようであるが、著者のような初学者からすると、以下の二つの各図法が、現代的なソフトウェア設計の特徴と要点を端的に表すものと思われる。

### 1) ユースケース図

主に、利用者側からの所謂「要求仕様」をまとめるのに使う。要求される機能をおもに利用者の立場 (これに外部機械との接続も含めれば、システムの外側から見た記述として) 簡明に表す図である。次節で説明するユースケース駆動開発では、この図が出発点になる。

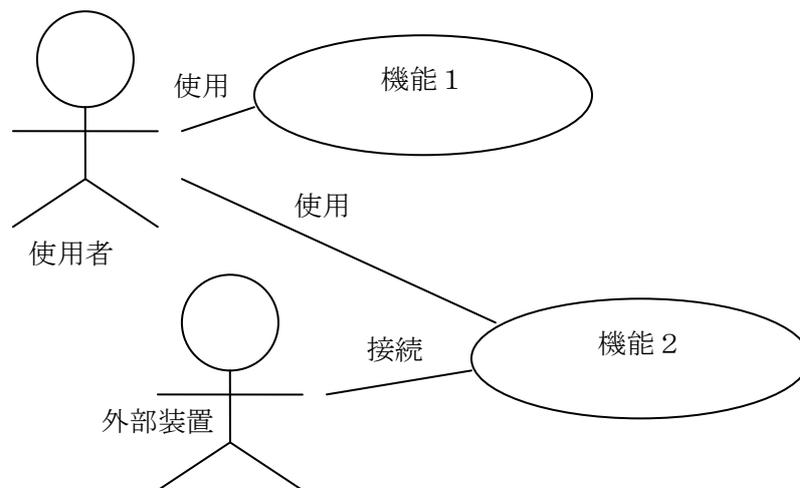


図.5.12.3 ユースケース図

### 2) クラス図

実際に実装を行う際の状況を表すための図である。ブロックダイアグラムとして良く知られた通常の図において、各ブロックの中に、オブジェクトの (厳密には、クラスというある種の集合に対する) 名称、変数名、関数名を記述したものであると考えれば、おそらく、ほぼ等しくなる。この場合、各ブロック間での接続は、通常のブロックダイアグラムで見られる信号や手続きの流れだけでなく、ブロック間での従属関係 (オブジェクト指向の術語で言う所の継承、委譲等) を書き込む場合がある。

なお、本研究で実際に使用された図の様式は、浅学の故もあり元々の UML の仕様から規格外となってしまう場合がある。ただこれには恐らく、実用上、一単一長の部分もあり、UML 本来の趣旨には反する一方で、厳密性を諦めた引き換えに、専門外のスタッフも含めた情報の共有性が向上するメリットともなったようである。いずれにせよ、結果から言えば、細部はともかく俯瞰的記述での厳密性は向上するため、十二分な効用が期待出来たようである。将来的に、計算機を用いた自動管理を行う場合などには、UML の本来の趣旨通り厳密に扱う必要があるものと考えられる。

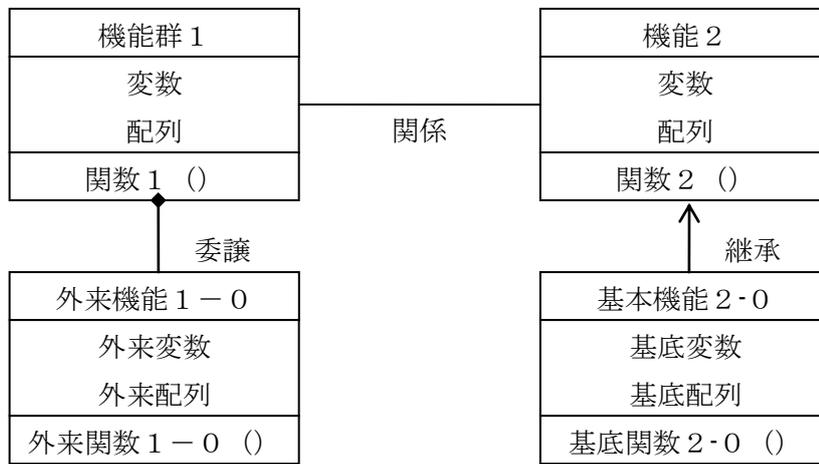


図. 5.12.4 クラス図

### (3) ユースケース駆動開発の導入

すばる AO が従来に無い機能を多く搭載した半ば試作品でありながら、天文観測に供用されるべき実用装置でも無くてはならないことを考えると、その持つ機能は、開発者以外も納得しながら使用が可能ないようによく整理されている必要がある。ユースケース駆動開発は、この点の改善を図るために導入を行っている。手法の概略は、上記の UML で最初に挙げたユースケース図を用いて使用者側や既存機材からの要求仕様をまとめ、その図を出発点として、要素の分析と置換を繰り返すことで設計を進めることとなる。通常、最終的には計算プログラムの実装の概略としてクラス図を導出し、それが設計図となる。このような過程の効用の一つは、例えば、人間が漠然と全体的に考える「機能」と、計算機で具体的に実現できるステップ毎の「コード」の間で、設計時に調整を加えて不整合を減らすことで、構造的なバグの発生を未然に防ぐことが出来るということであろう。この、人間の直感と計算機の動作の間のズレの意外な厄介さは、計算機を使った経験のある人であれば、容易に理解出来るものであろう。この視点からすれば、ユースケース駆動開発は、使用者側の要求を基本に、実装可能な計算機の機能を取捨選択しつつ両者の調整を行うことで、ズレを緩和しながら機能を合わせこんでゆく手法とも言える。

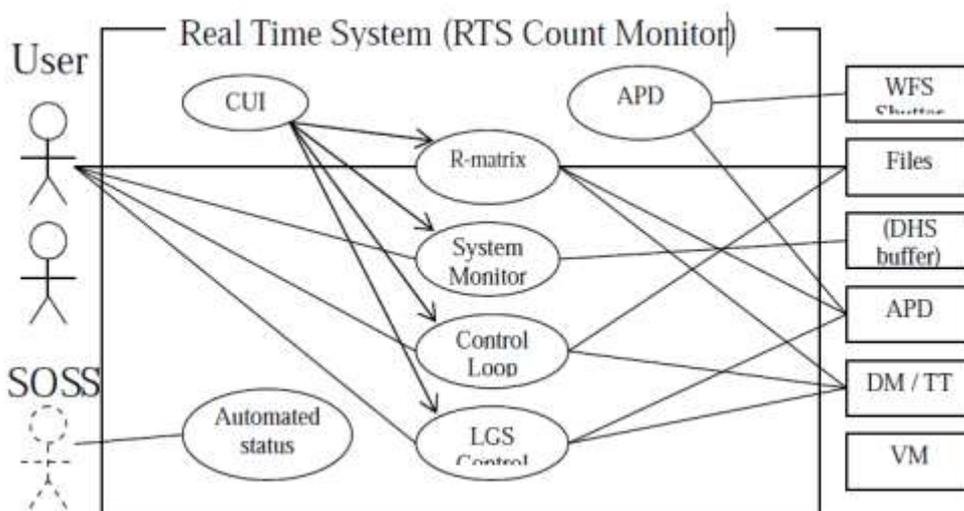


図. 5.12.5 すばる AO 188、全体ユースケース図（分析前）

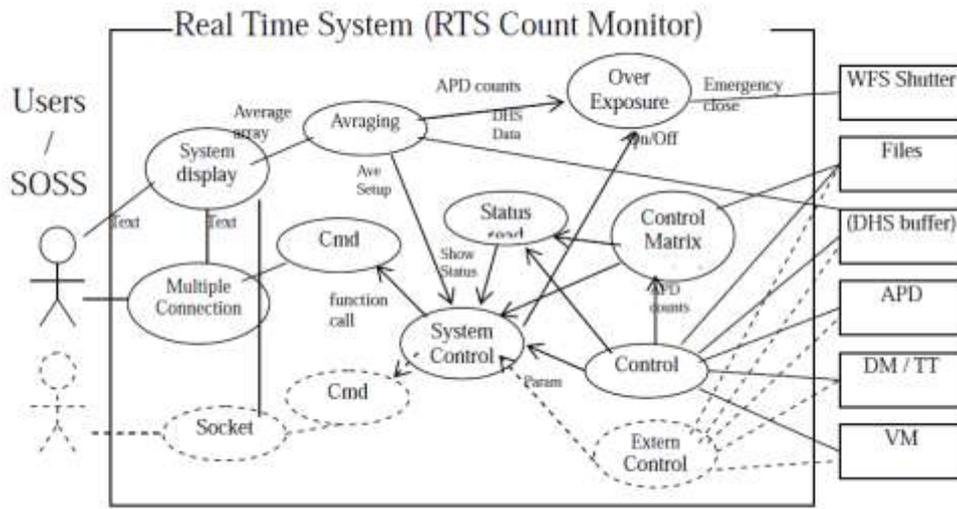


図. 5.12.6 すばる AO 全体ユースケース図 (分析後)

ユースケース駆動開発の良く知られた具体的な方法としては、文献[5.12 章文献 5.12.2] [5.12 章文献 5.12.3]のものが挙げられるが、単に、ユースケースからオブジェクトを導出するための方法ということであれば、似た方法が多種ありえることとなる。われわれの場合は、上記の文献を参考にしつつ、考えられる限り簡略化した方法として、ユースケース図自体を整理しながら計算機上での構成を概述するところまで変形を加えてしまう方法を取った。図 5.12.5 および図 5.12.6 に本研究で行われた設計例の一部を示す。

さらに詳細へと分析を進め、最終的には図 5.12.7 に示した通り、それら機能を実装する際に必要となる変数および関数を考えながら、他の要素とも矛盾が無いようにしつつ要素ごとにクラス図等にまとめる。そして、計算機へのプログラミングはクラス図に基づいて進め、実際にプログラムが動いた後にはその実装に合わせてクラス図自体を最終的なものに加筆修正するようにした。このような開発過程で、元々のユーザーからの要求項目に対して計算機で実現できる範囲で最善に近いものの実装が可能となる。また、最終的に出来上がったクラス図は、実装された

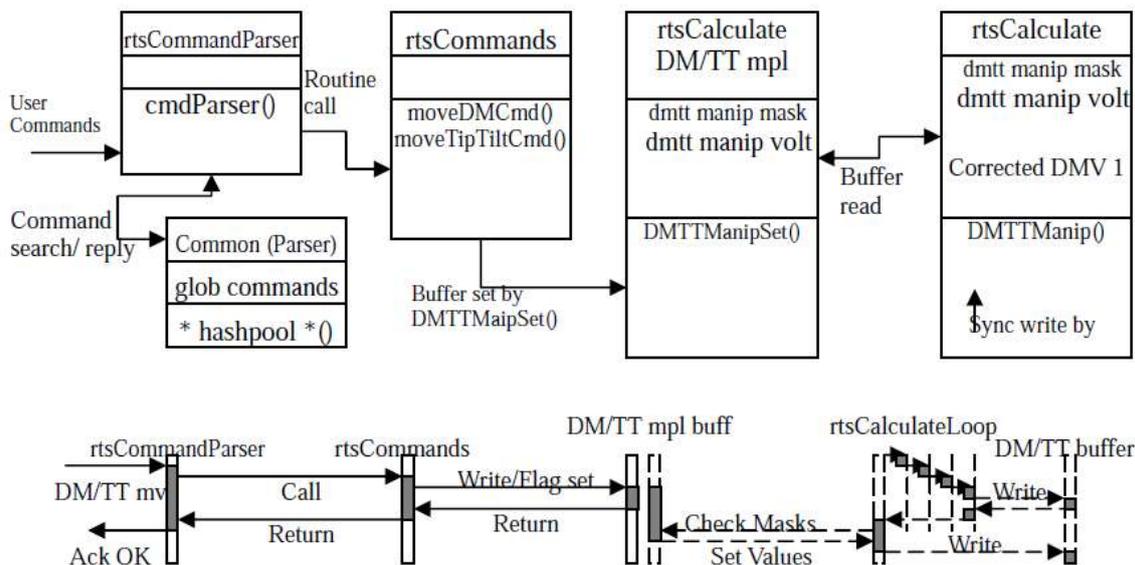


図. 5.12.7 詳細設計の例 (DM・TT の手動操作系) UML の他の記法 (図の下はタイミングチャート) による分析も活用しながら、それと照らして矛盾の出ないように最終的な実装形態 (図の上) を決定する。

実装されたプログラムに対して厳密性の高い俯瞰を与え（ごく具体的に言えば、関数と変数が揃って書いてあるので、ソースプログラムに照らした時に各機能の具体的な実装箇所を確実に特定できる）、プログラムを事後修正する際にはその構造明快に示す資料となり、後で述べる開発サイクルの円滑性の向上に役立つことになる。このように、計算機プログラムを設計の各段階で簡潔かつ厳密に記述しうるものとして、前述した UML は非常に良好な記法と言える。

#### (4) オブジェクト指向の導入

さらに、オブジェクト指向[5.12 章文献 5.12.4] [5.12 章文献 5.12.5]に関してであるが、様々な見解もあり細かな解説は書籍に譲ることにするが、それらに共通することを要約すると、変数とそれに対する一連の計算操作を、一体の「オブジェクト」として扱うことの出来る計算機言語体系を基盤にしたプログラミング、あるいは、ソフトウェア開発の手法と言って良いのだろう。プログラミングのレベルで、従来との比較で言えば、「オブジェクト」と呼ばれる実在あるいは仮想のプログラム対象物を導入し、従来からの変数や関数はその属性物として、オブジェクト毎に整理された状態で実装する。この実装法を、先に述べた文脈的なバグとの関係で考えると、変数や関数の実装を整理して局在されることで、一箇所で生じたバグの影響が、本来関係の無い筈の他箇所に波及して文脈的なバグになってしまうことを防ぐ効果があると考えられる。

また、上記のオブジェクト指向という記述法が、今回のような制御系の開発で、単なるバグを防ぐ技巧以上に理にかなったものにも見えるのが、まず第一に、変数を物理変数、計算法則を物理法則（運動方程式）に設定すれば、この、森羅万象のうち数理物理的に記述出来る大抵のものがオブジェクトの記法にうまく収まる点である。その多数の物体を含む系への拡張も、上記オブジェクト間での相互作用として記述することで導入することが可能で、また、それらオブジェクトそれぞれに対して実行時に初期値を設定できるのも、同じく理に適ったものに見える。その他、所謂オブジェクト指向に含まれている技巧のうち、オブジェクトの属性として含まれる変数や計算操作を、他のベースとなる基本（術語としては基底）オブジェクトにおいて、変更部分のみを書き換える事で、多数のオブジェクトを効率的に記述できると言う事になる。これが、オブジェクト指向プログラミングの手法としてよく知られた、「継承」と言う手法にあたる。最終的に、それら部分変更を加えたオブジェクトに少しずつ異なる初期値を与えて複数実行すれば、相互に似た性質を持ちながら少しずつ異なった物が多数存在するような系について、従来の手法と比べて遥かに容易に実装できることになる。この点は今回の研究では、たとえば、系に複数の機材が存在しているティップティルト系の処理等に適用している。

なお、本研究において、記述法に関してはオブジェクト指向の技巧を参考にしながらも、実際のプログラム言語としては、オブジェクト指向向けの記述文法を特段に含まない通常の C 言語（gcc）を用いた。これは、担当者以外でもソースコードを読みながら、ある程度の改変や、波面制御系を含む系操作形等の開発に役立てることができるよう、という配慮によっている。

#### (5) ソフトウェアの構造の変更とリファクター

リファクター[5.12 章文献 5.12.6]に関しては、その大元とされる文献には、その具体的な体系がデザインパターンと言われる一種の定石の間での相互変換法の一覧として網羅されている。これらは、ごく大まかなには、機能は同じままに残して、ソースコードの構成を、主に、他の箇所との互換性が高まるように修正し再実装を行う行為、と理解してよいであろう。従来はこのような目的で、一旦書きあがったソフトウェアを書き直すことは、別のバグが誘発される傾向があるため回避すべき、とさえされていた。しかしながら、近年においてはむしろ、一定の原則の範囲内であればプログラムの構造の書き換えも容易となり、通常のデバッグの延長程度に容易なものとして、一般的になってきたものと言えよう。恐らく一つの要因として、まず、近年、計算機言語の定義の詳細に曖昧性が減り、また、それに合わせてコンパイラーが文法的なエラーを正確にはじき出すように発展してきたことがある。著者のように、計算機のプログラミングを科学研究用途で行う範囲でも、コードの書き換えに伴いバグの発生に悩ま

されることは格段に少なくなった印象がある。これをさらに一歩進めて、特に、所謂オブジェクト指向で（あるいは、従来の計算機言語であってもオブジェクト指向的に）プログラムされていれば、プログラムの比較的高次の構成までが明確に記述され、コンパイラによる機械的なチェックも可能であるため、文脈バグの発生まで一部は回避できることになる。さらに、先の文献にもあるような「リファクター」の典型パターンを知っておけば、プログラムの構成に関わる部分の書き換えも、比較的頻繁に行ってしまうても、問題が無いばかりでなくむしろ後々の不整合を避けるには有効性が高いということである。今回の研究では、リファクターの登場を、一つの技術的背景として踏まえ（ただし今回の開発では、所謂リファクターの定石には拘らず、ソースコードの基本構成からの書き換えと捉えた上で）ソフトウェア開発上の選択肢の一つとして積極的に採用している。このように、ソースコードの構成の変更が比較的容易となったことで、プログラムの構成を大胆に変えながらも、先に述べた文脈的のものも一部含めてバグの発生は回避し、ソフトウェアの拡張性を継続的に確保することが可能となる。ここでは、所謂リファクターのデザインパターンの定石に含まれるものではないが、実際にすばるの補償光学系のソフトウェアで構造変更を行った際に作成したクラス図を参考に挙げておく。

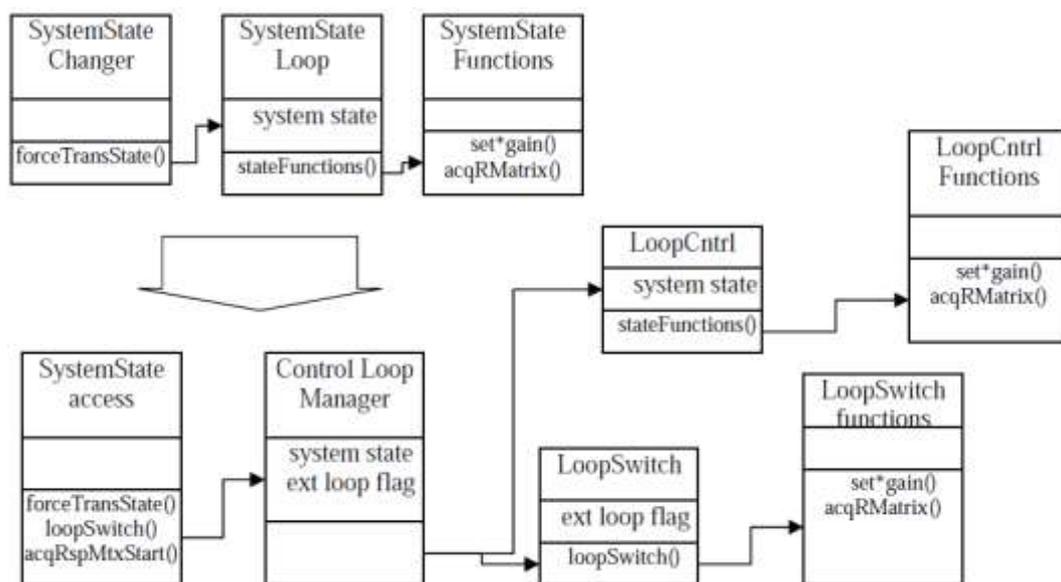


図. 5.12.8 すばる補償光学系における波面制御ソフトウェアの構造変更の例、矢印が変更の前後を表している。

## (6) ソフトウェア開発管理法の導入

上述のソフトウェア的な技法を駆使すれば、規模の大きなソフトウェアの改修の自由度が大きく向上すると言う時点で、研究そのものの発展や展開に大きなメリットとなる。しかしながら、行数の多いプログラムを一行ずつであっても書き換えることが原理的に負担の大きい作業であることは変わらない。先の節で述べた通り、既に存在する他の数万行との間で整合性を取り続ける以上、ソースの書き換えの負荷は本質的である。そうであれば、依然、無駄な変更は避けるべきであるし、またさらには、これも先に述べたように、そのような負担それ自体がプログラムのサイズに対する高次の関数であるとする、どのみちプログラムのサイズには限界点があって飽和してしまうことは念頭に置かれるべきである。それらが数理的に見ても、避けられない事実であれば、手持ちの技術や人手を有効に利用し、どの部分から開発を進めて目標を達成してゆくかを、正確に見極めるのが肝要となる。それらのために、後述する、工程管理、及び、開発サイクルと言った近年の生産管理に基づいた考え方に基づいたソフトウェア開発管理法を導入することで、開発作業の能率と効果の向上を図ってきている。

## (7) 工程管理に基本を置いたソフトウェア開発管理法

工程管理は、工業の生産管理において発展してきた考え方である。良く知られた品質管理との比較で言うと、従来知られた品質管理は、主に、実際に作製されて出来上がった最終製品に対して（主に統計的な）検定を行い、異常の発生率から生産工程の見直しを行うものと言えよう。これは、特に、量産品の生産ラインの管理の方法として有効性が広く知られている。日本の高校程度の数学教育でも、確率・統計の具体的な応用として品質管理の原理が例題に引かれていたりするものである。それに対し、工程管理は、むしろ、生産の現場での異常の発見に重きを置き、不良品を実際に作ってしまう以前に、組み立て現場での情報を元に生産工程に迅速な「改善」を加えるような生産管理法であるとされているようである。近年一つには特に、日本での工業生産方式における工程管理[5.12 章文献 5.12.7]の発達が近年世界的に知られつつあるとのことである。

品質管理に加えて工程管理を行うことの有用性であるが、所謂品質管理のみでは、不良品を避けるのに、実際に不良品を作ってそれが統計的検定で検出されるまで修正が行えないと言う矛盾が生じるが、工程管理を用いて、生産現場での問題点の早期発見を行えば、わざわざ不良品を作り上げてそれを検定せずとも、完成品への不良品の混入をそもそも回避しうることになる。工業的な量産であれば、ラインから出荷された時点での不良率の低減の以前に、そもそもの不良品を作ってしまう「無駄」の低減という、至極具体的なメリットとなる。

この、工程管理が近年、単純な無駄の低減以上に重要になってきている理由に、(多品種)少量生産の増加が挙げられるようである。この点は、少量生産の極限として、製品をただ一個のみ作成する特注品や試作品を考えてみれば明らかで、そもそもの製品数が標本としては少な過ぎるため、統計的な管理は不可能となり、完成品への（統計的な）評価に基づく品質管理のみでは信頼性が確保し難くなる一方で、生産現場における工程管理に頼るべき比重は著しく大きくならざる得なくなる。この、統計の有効にならないような少数生産品と言う点では、本節で述べているソフトウェアのみならず、そもそも、本研究のような研究用の装置と言うもの自体が試作品に近いものも多く、工程管理の手法が多く参考になるものと考えられる。

そして、ここで興味深いのは、このような工程管理の手法が、現代的な計算機ソフトウェアの開発手法の一つのモデル[5.12 章文献 5.12.7]とされて来ていることである。この場合、ユーザーからのフィードバックに頼る従来の方法は、品質管理に近く、複雑化した工業製品同様、ソフトウェアが大部で複雑になるにつれ、わざわざ欠陥入りで一通り全体を作り上げてから検査して修正するのは無駄ばかりが多くなる、と言うことが要点の一つとなるようである。ここでもし、製造工程の途中で何らかの効率的な検査と修正の過程、たとえば、全体を組みつけて完成させる前に、まずは生産現場で一部を仮組みして早期検査を行い整合性を確かめ、その時点で、不良があれば場所を特定して即時に修正を加えられるのであれば、生産性の向上が見込めることになる。上記を別の直感的な表現で言えば、歪んだ部品を気づかず放置すればそれに組み付けた部品も歪むがごとく、ソフトウェアの場合でもバグを放置すればそれに合わせて別のバグが誘発されてより修正が難しくなる場合が多いと言うことである。この観点から言えば、トラブルが他に波及する前に、局在した状態で発見して波及してしまう前に修正するのが肝要と言うことになる。検査過程とは別に、この不整合を局在させて波及を食い止めると言う点では、オブジェクト指向を利用して、必要に応じ、変数や関数を局在させた実装や設計を行う技巧が根本的に有効であると言う事にもなる。

またここで本研究での教訓も踏まえ、恐らくはソフトウェアに限らず、実験装置開発上のより根源的な事柄として、担当者の専門に合わせて仕事を分担するという、従来からある「工程」を効率化する筈の切り分けの方法自体が、研究機器の開発のような専門性の高い作業の分担において、意外にも障害になってしまふことを指摘しておく。これは、分担の境界で問題が生じた場合に、別の分担との接続箇所にも波及するため問題の局在化が難しい一方で、分担それぞれにおける専門性が高度化するにつれて、そのような境界での問題がどの専門の分担者にも埒外の問題と映ってしまう場合が多く、初期的な見落としから問題の拡大を招いてしまいがちなことによる。たとえば、ハードウェアの作成（もしくは、システム設計）と、その制御ソフトウェアの作成をそれぞれの専門家が担当する方式を採れば、それぞれの担当するハードウェアとソフトウェアの間で不整合が生じた場合に、どちらの専門家から見ても自分には埒外と見えて放置される傾向が強く見られる。また、ハードウェアの特殊性からくるソフトウェア上の障害に関しては、ハードウェア側からはソフトが未熟と映る一方、でソフトウェア側からするとハード

ウェアの欠陥とされ、互いに修正を放棄してしまうような傾向も多く見られた。結果的に、専門性の高さが裏目に出て問題の把握と修正が難しくなる傾向があり、さらに、そのような境界箇所は機材の接続部でもあり、全体を組み上げる上でのキーパーツとして働くことも多いため、しばしばプロジェクトレベルでの進捗遅延の原因となった。それを回避する為の有効策として、たとえば、あるハードウェアとそれを制御するソフトウェアであれば、専門性にこだわり過ぎず、可能であればあえて同じ者が一貫して担当してしまうように方針を変更している。しかしながら、本章で触れている波面制御ソフトなど全体が関わる部分に関しては、その部分での作業量やソフトウェア内部での整合性に重点を置いて、接続する多数の他の要素から切り分けて分担せざる得なくなる。この点、各部との境界での整合性は特に留意し、それぞれの担当者との連絡を良くして、積極的に問題を発見し修正していくことに常に留意する必要があった。

これらソフトウェア開発管理のより具体的な手法は多岐に渡る為、詳しくは本章引用のものも含めて[5.12 章文献 5.12.4][5.12 章文献 5.12.7]、文献を参照されたい。ごく平易に言えば、主に、問題の早期発見と修正[5.12 章文献 5.12.7]を常に工夫ということになるが、上記の仕事の分担の境界に関する注意点の他にも、われわれの導入してきた方法を挙げておく。まず特に、制御ソフトの改修で早期から導入を行って効果の見られているのが、ソフトウェアシミュレーターの導入であった。これは、ハードウェアが無くてもソフトウェア単体で動かせるシミュレーターで、ごく簡単なものであるため、波面補正の計算としては数学的に正確なものでは無いが、ほぼリアルタイムの速度を確保してあってソフトウェア単体でも様々な試験や検査が可能となるため、たとえば、ユーザーの操作系の確認の為に、ソフトウェアの試験の為に装置や望遠鏡を動かすなどと言ったことの必要性を、大幅に減らすことが可能になっている。なお、このようなシミュレーターの導入の成果は、われわれのプロジェクトに限らず、より一般的なもののようでもある[5.12 章文献 5.12.7]。また、元々の設計から、ソフトウェアの実装時の都合や各種のテストの結果、設計自体に変更を行った場合には、設計図も合わせて修正することが整合性の確保に有効な対処となるが、この作業を簡潔かつ厳密に行うのに、UMLの利用は有効であった。このように最終的な実装時の時点でUMLにより図を残す方法は、しばらくして作業員自身も何をしたか忘れてしまった頃に、ソフトウェアの改良のために膨大な行数から特定の機能の実装状況を把握するのに、有用性が見られている。

### (8) 開発サイクルを導入した柔軟な開発計画法の導入

開発サイクルもまた、一般の工業設計や生産から導入された考え方である。これは従来、設計、作製、検査と言う一連の製造工程が、全要素に対する確定した設計を元に一元的になされるべきとされて来たものが、近年においてはむしろ、要点となる箇所から設計を開始し設計が出来次第その部分から作製して評価を行い、さらに、それによる試験による知見を設計に取り込みつつ、その他の箇所へ設計を敷衍して作製や評価を進める、等と、発展的に設計と作製を相互に織り込みながら繰り返す方式の有用性が指摘されている。

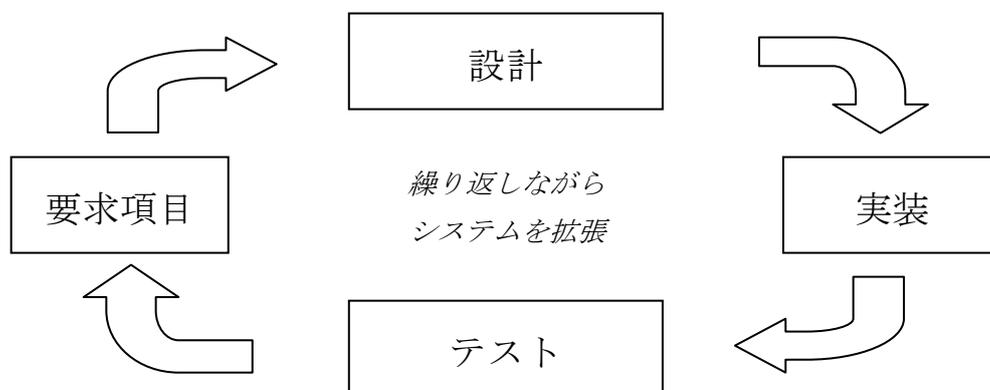


図.5.12.9 開発サイクルの概念図

特に端的には、設計図さえも、開発過程で発見された不都合やユーザーからの要求に従って、柔軟に修正されるべきと言うことになる。今回の研究で、波面制御ソフトの設計とその変更に関しては、ソフトウェアの特質である設計の柔軟性を最大とするべく、この考え方を取り込んでいる。その場合に問題となる、度重なる書き直しからくる不整合を避けるのには、UMLを参考にした記法を導入し、変更部分に関しては最終的な変更を記した図を追加することで、簡潔ながらも現実の実装状態の記録をより厳密に残すことが可能なようにしている。

また、初期の開発サイクルにおいて必要以上には設計の厳密性を求めず後の開発サイクルで決定する、と言う考え方もできることになるが、これがうまく活用できれば、開発計画上の大きな無駄の削減につながる場合がある。それが顕著となるのは、一つの機能が他の機能に依存する場合であろう。一方を完成した後に試験を行い、その結果に応じて他方に関する設計を決めるという方法が取れば、何も分からないうちから両方の機能を見込みですべて設計して作ってしまい、後から一方の機能が殆ど使えないことが判明するような事態に陥らずに済む。われわれの研究では、LGSモードとNGSモードがそのような関係にあると言える。さらに、この考え方を進めると、一回の開発サイクルで、全目標のうちどこまでを実現し、その結果をフィードバックすることで、その次の開発サイクルではさらにどこまで実現する、と言った、段階的な開発計画を無理なく立てることができるようになる。今回の研究でも、たとえば、次回の試験観測ではNGSを二つ用いてLGSモードの動作を試した後、レーザーガイド星の実験データも受けて、運用に合わせたより実用的なLGSでの実装を決定するなどと言った段階拡張的な開発方法（スパイラルモデルと言われる方法[5.12 章文献 5.12.4]）に、そのような考え方を適用している。

そして、そのような開発サイクルを数万行にわたる波面ソフトウェアの上で持続的に機能させるためには、試験結果から得られた修正箇所について、当初の想定外のものも含めて（それ以前に、そもそも想定外が出ないように、技術と言うよりは科学的な知見に基づいた基本設計も重要となるが、これらに関しては次節に述べる）より自在に改修箇所を設定できる柔軟な方法が必要となる。そこで、現代的設計と手法（オブジェクト指向、リファクター等）に基づいた柔軟な設計と実装、また、その改修によりバグが発生しない各種の技法や試験法、管理法（主に工程管理を参考にした各種技法）が肝要となる訳である。

## （9） 基本設計の再検討

これまで、ソフトウェアの柔軟性を最大化して、事後的に何度も修正するための方法を述べてきたが、一方で、発生した問題個別の修正を徒に繰り返すよりは、より基本的な設計を洗練し大枠の拡張性を増すことで対応できれば、そのほうが好ましいと考えられる。この考え方を突き詰めると、観測天文学によるシステムへの要求に立ち返った上で、制御工学的、あるいは、光学的に、改善を図れるかを再検討したのち、前節で述べたソフトウェア的技巧を生かせば、事後修正でありながらも抜本的な改善を図りうることになる

### （a） 観測天文学からの主な要請

天文学的な要請からすると、波面補正の必要性は像分解能の向上であるといえる。またそれは、分光観察時にも、入射スリット上での強度の向上、あるいは、強度の向上を生かしてより細かいスリットを使えば、波長分解能の向上につながることになる。自然の星を波面補正の参照に用いることで波面補正自体の効果は確認されてきているが、波面補正を行う際の参照に用いるのに十分な明るさのある星の存在する領域が、全天で限られているという問題がある。この問題を解決するために、レーザーガイド星補償光学では、明るい星の無い天域では、高層大気に存在しているナトリウム層にレーザーを照射して励起することで、その発光を波面補償の参照光源として併用する。

そこで用いられるレーザーガイド星に関しては不確定な要素が多いことになる。たとえば、ナトリウム層の高さは、高層大気のこれまでの研究においては100km程度とされているものの、具体的に、すばる望遠鏡のあるマウナケアという特定の場所における高度とその変動については、未確定の要因となる。また、戻り光の強度やスポットサイズにも変化を見込む必要がある。また、レーザーガイド星を参照に用いる場合も、ティップティルトの制御に関しては自然のガイド星（TTガイド星）を用いるが、観測可能な天域を広くし、また、同じガイド星を用いる場合であれば性能の向上を図るために、感度の良い検出法が望まれる。このため、LGSモード時には、TTガイド星に

対しては、ティップティルトに関する感度のよいシャックハルトマン型のセンサーを用いた構成としている。

レーザーガイド星以前のよりの基本的な事項として、望遠鏡の立地による開発作業の制約がある。観測精度を良好とするためには、望遠鏡の口径はより大きなものが望ましく、また、その開口を生かすには、補償光学のような補整機の有無によらず、元々の結像性能が良いように気流の安定した立地が好ましい。さらに、赤外線での放射や空気による吸収が少なくなるよう、立地は空気の薄く冷涼な場所が好ましく、マウナケア山頂域は、晴天率も高く、それら条件から好適地の一つとして知られる。すばるのような大型の望遠用は、世界でも数が限られ、夜間に限られた観測時間は非常に貴重である。しかしながらこのような立地その他の条件は、観測や装置開発作業上は著しい制約ともなりうる、開発すべき補償光学装置まで赴いての作業は、マウナケア山頂まで遠距離のアクセスが必要となり、また、ネットワークを介したりリモート接続を利用しても、観測とその準備の為の現地での作業の間に確保出来る試験時間は、制限の厳しいものとなるため、ソフトウェアも含めて、観測機材はそのような状況に対応した作りとなっている必要がある。ソフトウェアに関しては、実機での試験時間が限られること、また、空気の薄い山頂でのプログラミング作業は著しい制約を受けることを念頭に置く必要がある。

### (b) 制御工学における考慮、「線形制御」の導入

レーザーガイド星は、シーイングにより出射ビームの受ける擾乱により、その元々の大きさやティップティルト成分が変化してしまうなど、自然の星と比べて変動が大きく、利用可能な情報の抽出が重要になる。この点で、レーザーガイド星から得られた情報を、補償光学系のどの場所にどの程度のフィードバックゲインで導入するのが最良となるかを確定すると言う、試行錯誤を含めた研究的側面の大きい作業となる。これら、開発開始時点での不確定の事項の存在により、通常の技術開発でごく普通に用いられる、設計前に条件を調べ上げて確定し、設計をそれら条件に合わせて特化させてしまうような開発方式を取ることが難しい。

今回の研究開始の時点での元々の制御方式は、自然のガイド星に関する機知の知見に基づいて設計された比例制御(PID 制御)に拠っていたが、レーザーガイド星の制御にこれを直接適用するには、基本的に自由度が不足で柔軟性が欠如している。これを、制御理論を参考に、より一般的な形態とされる線形制御に近い方式に書き換え、レーザーガイド星をシステムに取り込む際の対応性を広くする。線形制御は、解析力学などで見られる時間発展の数学形式と似た形式[5.12 章文献 5.12.8][ 5.12 章文献 5.12.9]で、左辺に置かれた系の物理変数の時間微分が、右辺にある系の物理状態から、制御システムの効果を含めながら、導出生成される形式を元としている。この観点から、TT やデフォーカスなどの成分を系の状態変数や制御変数の一部として扱い、それらに対して状態フィードバックを適用することを考えれば、以下の行列形式で書けることになる。この形式では従来のフィードバックゲインが行列状となるため、われわれの系では便宜的にゲインマトリックスと呼んでいる。これは、系を時間領域で微分的な線形系として、以下の式 (1) ように記述される。

$$\frac{\Delta}{\Delta t} \begin{bmatrix} DM & HigherOrderMode \\ DM & TipTiltMode \\ DM & DefocusMode \\ & TT \\ & WFS TT \\ & AcqUnitDefocus \\ & \\ & SecondaryTT \end{bmatrix} = GainMatrix(Output, Input) \begin{bmatrix} HoWFS & HigherOrderModes \\ HoWFS & TipTiltMode \\ HoWFS & DefocusMode \\ LoWFS & TipTiltMode \\ LoWFS & DefocusMode \\ & \\ & TT \end{bmatrix} \quad (1)$$

これに対して、制御ソフトウェア側に実装された構成は、以下の図 5.12.10 の通りとなる。またさらに実際の実装では、フィードバックゲインを 0 と置いた際に、他要素から回りこんだ誤差の累積で該当要素の制御値が変動するのとの無いように、フィードバックゲインが 0 と設定された要素には、制御値を 0 に抑圧するような制御が別途

かかるように作られている。

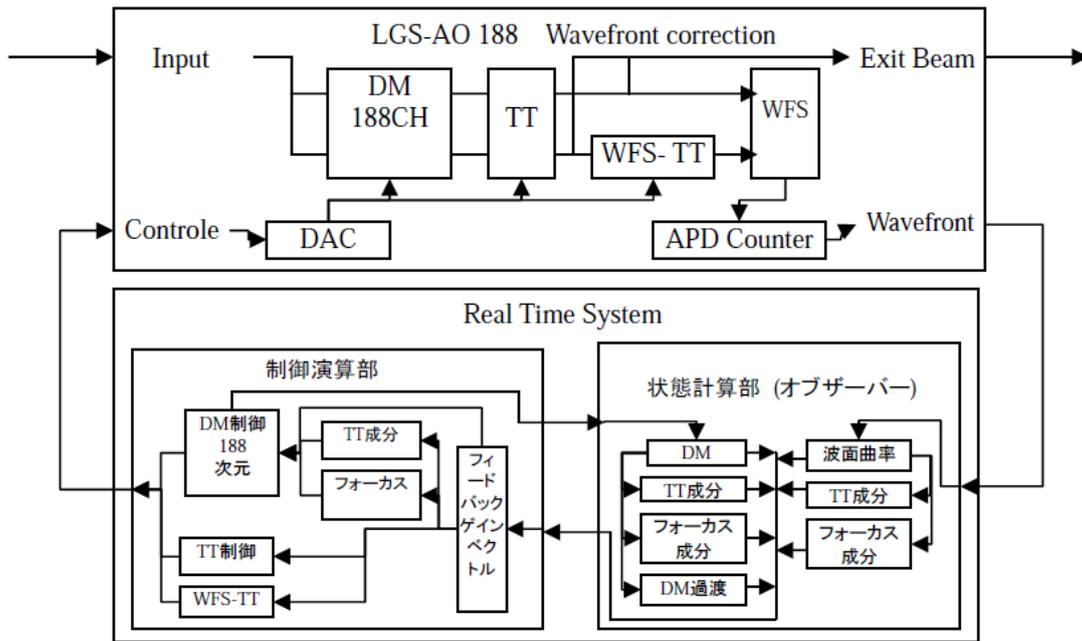


図. 5.12.10 線形制御の実装

この変更により、後述の通り、レーザーガイド星モードを含めて数的に想定しうる殆ど全て制御モードに関して、フィードバックゲインを式(1)のゲイン行列上のどの要素に与えるかの選択で、ほぼすべてのフィードバック経路を自在に設定できるようになった[服部ら、春季天文学会(2010)][M.Hattori et.al, SPIE (2010)]。つまり、一定の範囲ながらも、想定外の制御方法の追加のリスクを心配する必要が、原理的に無くなった訳である。これが、以前の研究で懸案として残った NGS と比べて大幅に複雑性の増す LGS モードでの制御をどのように調整して性能を發揮させて行くかと言う問題に対しては抜本策となった。たとえば、フィードバックゲインを与える要素を選択することにより、波面制御ソフトウェアの変更は無しで、デフォーカスは規定値で固定した上での LGS モードなど、他の制御方法との比較試験も原理的に可能となった。また、低次波面センサーとティップティルトマウントを直結した高速制御など、将来の観測装置からの要求に対応可能な特殊な制御も可能になっている。

このような制御方式の原理的な柔軟性の活用に関して、特に期待される箇所の一つが、フォーカス成分の扱いで、焦点の位置をティップティルトガイド星から取得して制御に生かすことが出来れば、不確定要因の一つであるナトリウム層の高度の変動からの、像に対する影響を大幅に減らすことが出来る。これは実際に機能し、性能の向上に貢献している。

### (c) 光学との関連

光学的には、従来の波面曲率型の波面センサーとは別形式のシャックハルトマンセンサーを、波面制御システムに追加する必要がある。このシャックハルトマンセンサーの信号と制御方法に関して、物理的な解釈を良く検討する必要がある。また、動作中の波面センサーと可変形鏡の信号は、光学的な収差の情報を含む為、それら収差が最小となる最良の動作状況が把握できるような分析の機構を追加し、運用に供する。この、モニター機構は、APD の故障の早期発見など、リモートからも含めて運用性の向上に寄与する。システムの運用性詳細は、次章で述べる。

波面曲率の計算法に関して数理的な考察を加えたところ、フォトンカウンティングの領域では、従来の計算方法では曲率が低く出る傾向のあることが理論的に判明し、改修を加えている。これは、数理的検討によれば、曲率計算の分母には強度の平均値を用いるべきというものである。また、今後の拡張に関しても、いくつか提案や試験を

行っている[M.Hattori et.al, SPIE (2010) ]。

### (10) レーザーガイド星モードの追加と調整

前節で説明したとおり LGS AO188 では、ゲインの設定により、任意のティップティルト成分やデフォーカス成分の間でフィードバック制御をかけることが出来るようになってきている。これは、内部的には式(1)の形式で、ゲインを表す行列の要素への数値の代入となる。ここへ代入する数値を工夫することで、同一の制御ソフトウェアで自然ガイド星モードとの両立が原理的には可能となった。しかしながら、本研究で最終目的となるのは、このレーザーガイド星モードを実際の天文観測に供しうる状態まで完成させることである。

#### (a) LGS 制御モード

上記、一般の制御モードを用いて、校正光源による試験、および、試験観測において、幾通りかの方法で上記のゲインを表す行列に値を代入して動作実験を行うことで、制御方法のより具体的な枠組みを決定した。まず、試験結果に基づき、一般の制御モードに存在しているフィードバックゲインのうち、LGS/NGS の試験に実際に用いるものだけを抜き出し、運用時に分かりやすいように略称をつけ、CUI から操作が可能ないようにした。以下は、操作 CUI に表示される制御系統略図と要素の略称である。

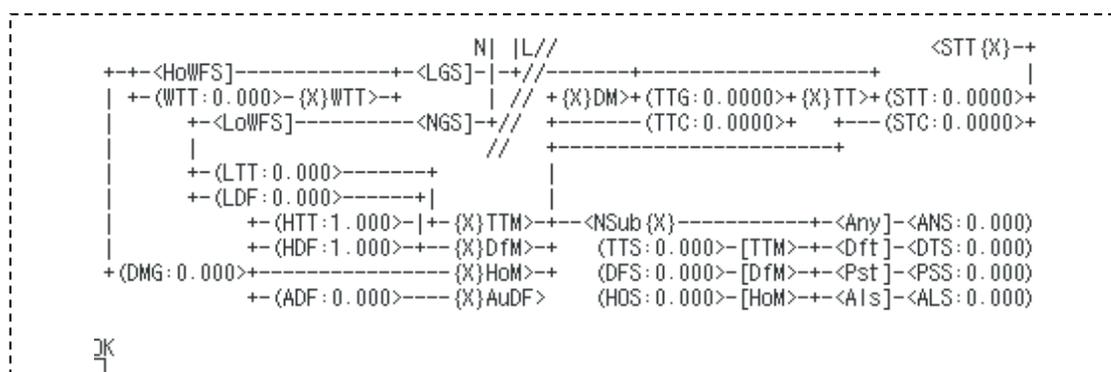


図. 5.12.11 LGS 波面制御系ゲイン設定 CUI

ここで、[DMG]:高次波面センサーから可変形鏡への制御ゲイン、[TTG]: DM の TT 成分から TT マウントへの制御ゲイン、[WTT]:波面センサーTT の制御ゲイン、[HTT]:高次波面センサーからの TT 成分の制御ゲイン、[LTT]:低次波面センサーからの TT 成分の制御ゲイン、[HDF]:高次波面センサーからのデフォーカス成分の制御ゲイン、[LDF]:低次波面センサーからのデフォーカス成分の制御ゲイン となっている。これに対し、たとえば gain DMG 0.1 と入力すれば、高次波面センサーから可変形に 0.1 のフィードバックゲインがかかる。系の基本動作として、自然ガイド星モードでは、HTT=1,HDF=1 とした上で、従来からある基本フィードバックゲインとして DMG を調整する。レーザーガイド星モードでは、HTT および HDF は 0 にしてレーザーガイド星からの低次成分は遮断し、LTT および LDF を設定することで TT ガイド星を補足した低次波面センサーからそれらを導入する。この状態で、高次信号については、DMG によりレーザーガイド星からのフィードバックがかかることになる。この方式により、自然ガイド星での操作に慣れた使用者にも、その延長でレーザーガイド星モードまで、直感的な操作が可能なのである。

さらに、試験観測での実動試験が繰り返され、レーザーガイド星モードの標準的な始動手順は、順序の変更な部分もあるが、ごく基本的には以下の通りとなった。

- 1、低次波面センサーにガイド星(NGS)を導入する。
- 2、低次波面センサーから DM の TT 成分に(LTT)、フィードバックをかける。
- 3、低次波面センサーから DM のフォーカス成分に(LDF)、フィードバックをかける。
- 4、LGS を高次波面センサーに導入する。
- 5、高次波面センサーから波面センサーTT に(WTT)フィードバックゲインをかけて、LGS の振動成分を吸収する。

6、高次波面センサーから DM へ(DMG)、高次成分のフィードバックゲインをかけて、波面補正を行う。

また、この操作の間に、各フィードバックゲインの最適な設定が可能ないように、ゲインを最適にする機構を実装している。この、ゲインの最適化に関しては、次節で詳述する。

### (1.1) その他の改善箇所と実装された機能群。

#### (a) 時間領域でのオーバーサンプリング

従来、VM 振動の 1 周期に 1 回の割合で DM の制御が行われていたものを、VM の振動の半周期に 1 回 DM が制御されるようにソフトウェアの改良を行っている。さらに、VM の振動の 1/4 周期、1/6 周期等についても提案 [M.Hattori et.al, SPIE(2010)]を行っているが、半周期以下でのオーバーサンプリングにはハードウェアの対応が必要となるため、導入した場合の実際の効果の程度の見極めも含め、それについては今後の課題となっている。

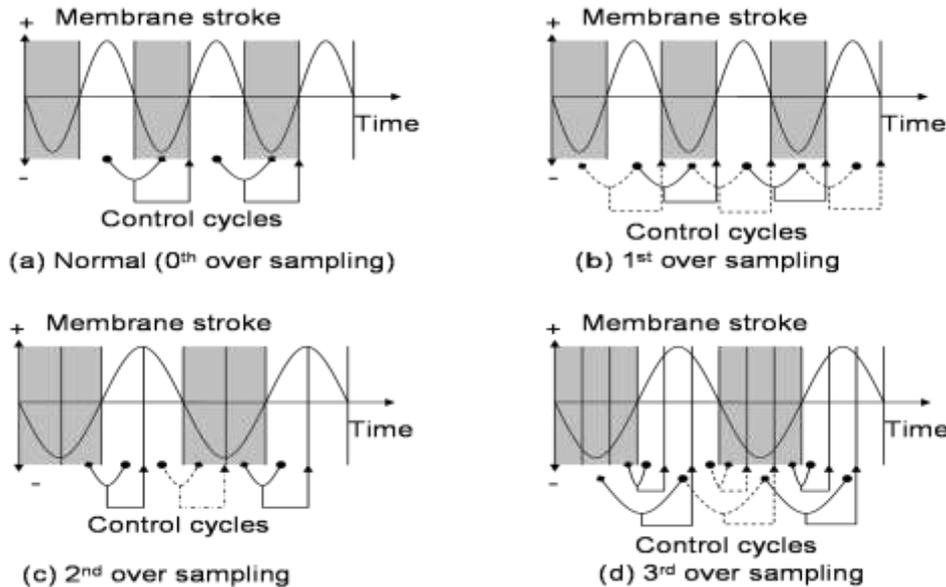


図. 5.12.1.2 時間領域でのオーバーサンプリング

#### (b) レスポンス関数取得ルーチンの一般化

システムのレスポンス関数の取得に関して、従来のルーチンでは DM に加えたインパルスの高次波面センサー上での定常反応のみしか測定が行えなかったのを、任意の素子にインパルスを加えた場合の系の反応を任意の素子で読み取れるように拡張を行った。また、設計上は、過渡応答の測定も可能になっている [服部ら、秋季天文学会(2011)]。

### (1.2) 付記

制御理論とソフトウェアに関して筆者の本来の専門から特に離れてしまうため、本章で用いた用語や概念に不適切な箇所のありえることは、ご了承くださいませと幸いです。特に、開発現場が日本国外のハワイ観測所にある現状から、開発業務の合間に気軽に邦文の初学者向けの書籍に目を通すと言ったことがかなわず、文献を十分に確保し切れていない状況もご理解いただけますと幸いです。

#### 5.12.章、ソフトウェア開発と制御理論に関する文献

[5.12.1] 「UML が分かる本」 檜山友一 著、オーム社 (2004年)

[5.12.2] 「ユースケースの適用：実践ガイド(Applying Use Cases: A Practical Guide)」、ゲリ・シュナイダー、ジェイソン・ウィンダース著、羽生田 栄一監訳、オーグス総研訳 ピアソンエデュケーション (2000年)

[5.12.3] 「ユースケース入門 ユーザーマニュアルからプログラムを作る(Use Case Driven Object Modeling

with UML: A Practical Approach)」、ダグ・ローゼンバーグ、ケンドール・スコット著、株式会社テクノロジーアート訳、長瀬嘉秀+今野睦監訳、ピアソンエデュケーション（2001年）

[5.12.4] 「わかるオブジェクト指向 ソフトウェア開発必須技術のマスター」 豆蔵セミナーライブオンテキスト1、山田隆太・株式会社豆蔵 著 技術評論社（平成17年）

[5.12.5] 「オブジェクト脳のつくり方」 翔泳社 牛尾剛 著、長瀬嘉秀 監修

[5.12.6] 「リファクタリング プログラムの体質改善テクニック(Refactoring: Improving The Design of Existing Code)」、マーチン・ファウラー著、児玉公信、友野晶夫、平澤章、梅澤真史、ピアソンエデュケーション（2000年）

[5.12.7] 「エクストリームプログラミング入門 変化を受け入れる 第2版」、ケント・ベック著、シンシア・アンドレス協力、長瀬嘉秀 監訳・株式会社テクノロジーアート訳、ピアソンエデュケーション（2005年）

[5.12.8] 「線形制御工学」竹内義之著、 大学教育出版（2002年）

[5.12.9] 「制御システム論の基礎」久村富持著、 共立出版株式会社（1988年）

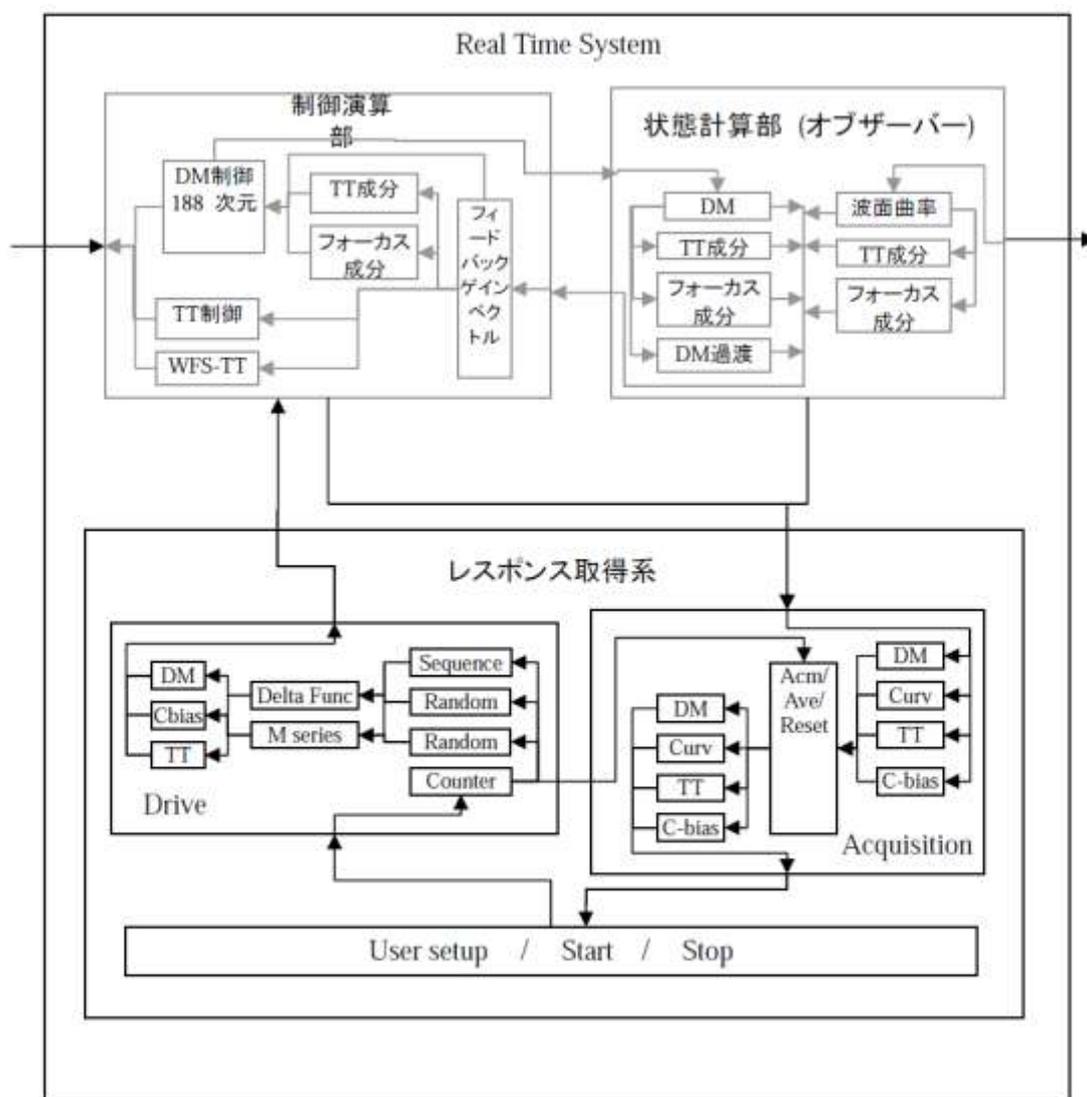


図. 5.12.13 レスポンス取得システムのブロック図

## 5.13 補助・診断系

すばるレーザーガイド188素子 AO の高性能を生かすためには、高精度な機器類を作成して組み立てと調整を行い、またさらに、それにふさわしい制御系を組んだ上で、動作時の条件に合わせて最適な状態で動作させる必要がある。そのためには、使用者が各機器類の動作を随時調整しつつ、波面制御系が自在に設定可能なこと、またさらに、環境の変動に対応するためには、動作中の状態をリアルタイムで監視できる必要がある。本章では、すばる AO の波面制御の補助診断系に対して、まず、操作系からの俯瞰を行い、さらに、モニター機能を中心とした診断系と、その他、運用支援用の各種補助機能を紹介する。

### 5.13.1 操作系

操作系に関して、AO 自体の基礎的な研究及び開発用には CUI (文字表示) を採用している。これは、運用に入った後も観測の実情や、初期開発後に登場した最新技術をも取り込みながら、発展の継続され続けるべき天体観測システムにおいて、付加調整的な開発作業が迅速となるメリットが大きいためである。もし、システムの開発段階から GUI を標準装備にして固定化してしまうと、表示部分の作り直しの手間に制約されて基本機能からの改変が難しくってしまう場合がある。図.5.13.1 は、実際に用いられている CUI であるが。波面制御部などで原理的な改変を行った後には、使用者からそれら新機能へのアクセス手段をすばやく提供し、早期に試験や観測を行えるようになっている。

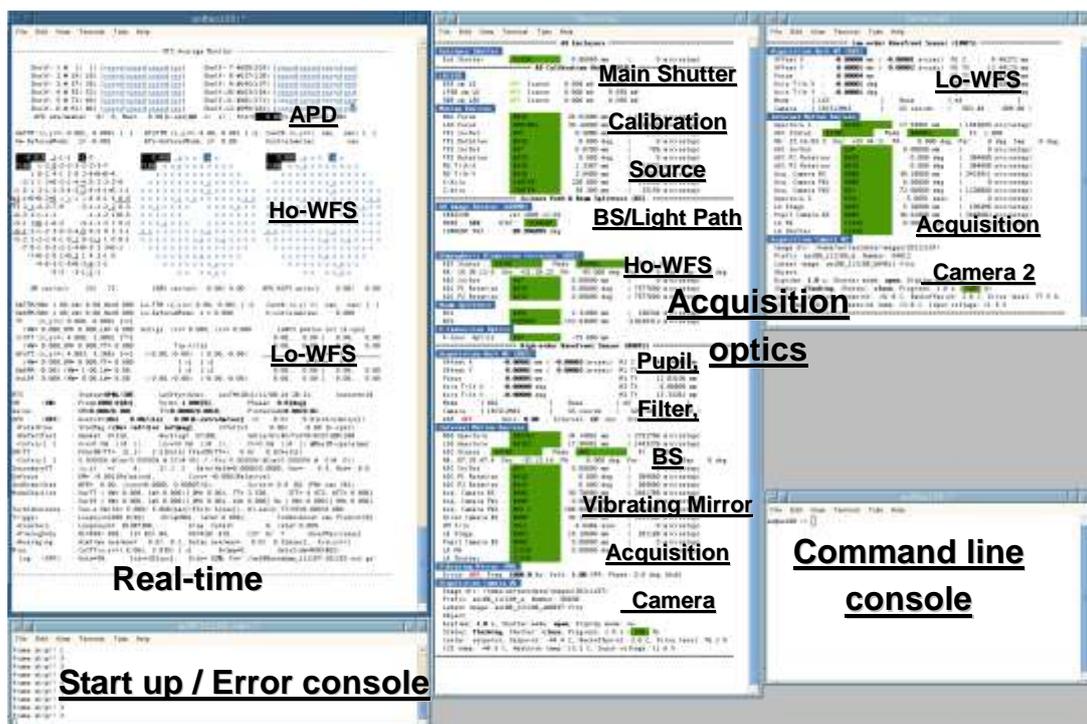


図.5.13.1 すばる AO の開発用 CUI 操作系、実時間制御系は左上の表示窓

今後、開発された補償光学系を長期間の運用に供するにあたっては、連日にわたる観測での操作上の利便性の確保に GUI の装備が必須となる。それら GUI の実装は、実際の運用で必要となる機能を選んだ上で、利用者の現場での使い勝手が良く反映された状態になっている必要がある。このため、波面制御部についてはその開発担当者が兼務するよりは、主に観測運用側で試験観測を通して実地に必要な機能を見極めながら、GUI への実装を行う方針を採用し、現在も、鋭意開発作業が進められている。特に、波面制御部については、波面制御用に提供された多岐の機能を良く整理して、運用時の使い勝手の向上を図りつつ、貴重な観測時間での確実な動作を確保するために試験を繰り返す必要がある。この為には、波面制御部をソフトウェアシミュレーターで擬似動作させた上、試験用に

開発済みの CUI を表示データのプロトタイプとして利用しながら、作成した GUI を運用側自ら納得の行くまで試験を繰り返すことで、より効果的に開発を進めることが可能になっている。上記の開発方針は、前章で述べた、実装された基本機能がなるべく迅速に試験できること、さらに、分担として切り分けられる仕事の内容を一貫したものにするという考え方にも基づいている。

### 5.13.2 診断系、モニター機能

#### (1) 内蔵式および外装式の診断系の併設

すばるのレーザーガイド星補償光学系では、本研究が開始される以前から計画されていた、動作状態の詳細な分析を行うための外装式のデータ分析系（データハンドリングシステム・DHS）に加え、波面制御系用実時間コンピュータに内蔵する形で、数値モニター（Count Monitor と呼んでいる）と言う診断系を実装している。これは、外装式の DHS が、波面制御用の実時間計算機とは別の計算機に配置され、両者の間での連係動作を要するのに対し、数値モニターは実時間計算機側に実装されて独立で動作するため、システムの調整時や各種試験中などに、実時間計算機が稼動している限りは常に使用できる状態にある。また、当該動作モニターへの新機能の実装は、波面制御部を実際の機器類から独立にソフトウェアで擬似駆動するシミュレーターを利用すれば、波面制御ソフトウェア単体で行うことが出来る。

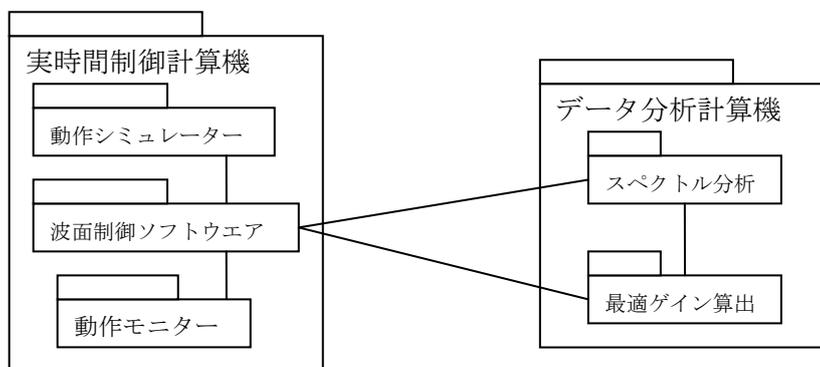


図 5.13.2 内蔵および外装式の診断系パッケージ

#### (2) 波面制御系内蔵式の動作モニター(RTS Count Monitor)

前節でふれた、数値モニターであるが、ただ単に単純なだけの簡易モニターというわけではなく、計算アルゴリズムについては以下の通り数理的な検討を行い、最小限の構成でありながらも、開発の基礎段階から天文観測での運用にわたり、多種多様な情報の算出が実現しうるように特に工夫されている。その根幹部は多段接続された時間積分ルーチンで構成され、0.1 秒、1 秒、10 秒、100 秒といった異なるタイムスケールで、波面センサーにおける入射光強度、波面曲率、DM への制御電圧について、時間平均及び時間二乗平均が連続的に計算されるように構成されている。この基本構成部分で得られた数値を基底に用いて、それらを結合することにより、各種の動作パラメーターを効率的に算出することが出来る。それらの数値は数値モニターに付属の CUI で使用者に表示され、さらに、一瞬間ごと（変更も可能）の間引きデータをログとしてファイルに出力したり、また、TCP/IP ネットワークを介して GUI プロセスなどに受け渡すことも出来る。つまりは、この多段につなげた積分バッファから、必要なタイムスケールで数値を取り出し、それらを組み合わせれば、ほぼ任意の数値パラメーターを、必要な時間分解能において連続的に監視することが容易に出来るようになる。このことを利用して、新たな機能を実装したときに、その動作を確実にするための監視ルーチンも同時にこの数値モニターに実装してしまうことで、早期に試験を行い実用に供することに役立ってきている。

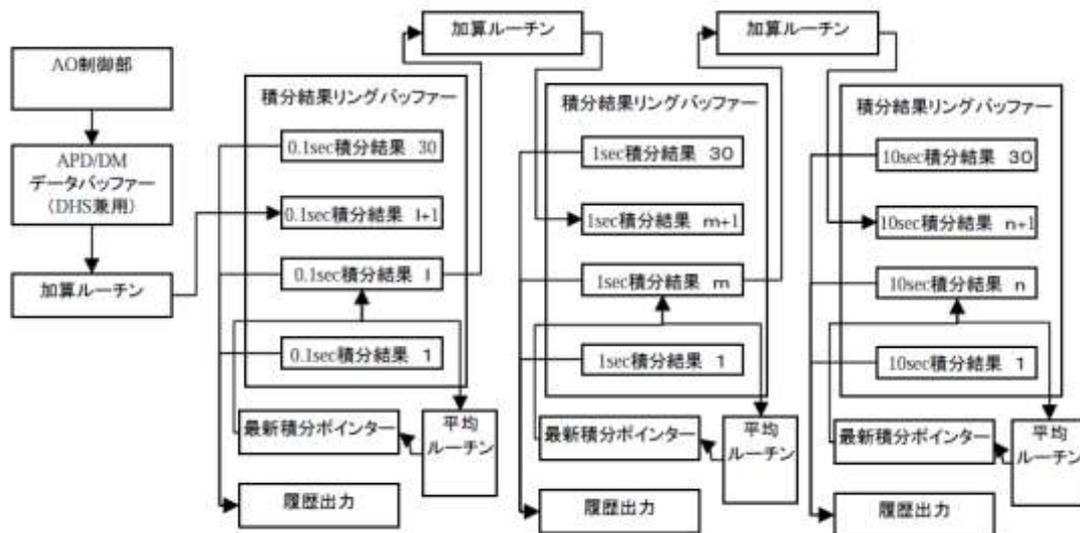


図. 5.13.3 数値モニターの多段式時間領域積算アルゴリズムのブロック図

### (3) 外装式のデータ分析系 (Data Handling System)

これは、波面制御用のリアルタイム計算機とは別にデータ処理専用の計算機 (DHS) を配置して、リアルタイム計算機からネットワークでデータの転送を行い、後述する揺らぎのスペクトル分析を用いた制御ゲインの最適化などを行う。また、計算過程で得られる揺らぎのフーリエスペクトルも、データとして取り出して表示などが行えるように構成されている。この、揺らぎスペクトルのデータは、望遠鏡上空の大気の状態に対して新たに知見を与え、次世代のシステムへの発展を考える上での布石ともなる。この DHS については、計算アルゴリズムの主要部分に関しては早期に実装を終えている [M.Hattori et.al., SPIE, 2006] が、補償光学システム全体を天体観測に供用するための作業との兼ね合いがあって、データ転送部分が現時点で実装作業の途中となっている。図の 5.13.4 に、DHS のデータ処理部分の構成図を示す。

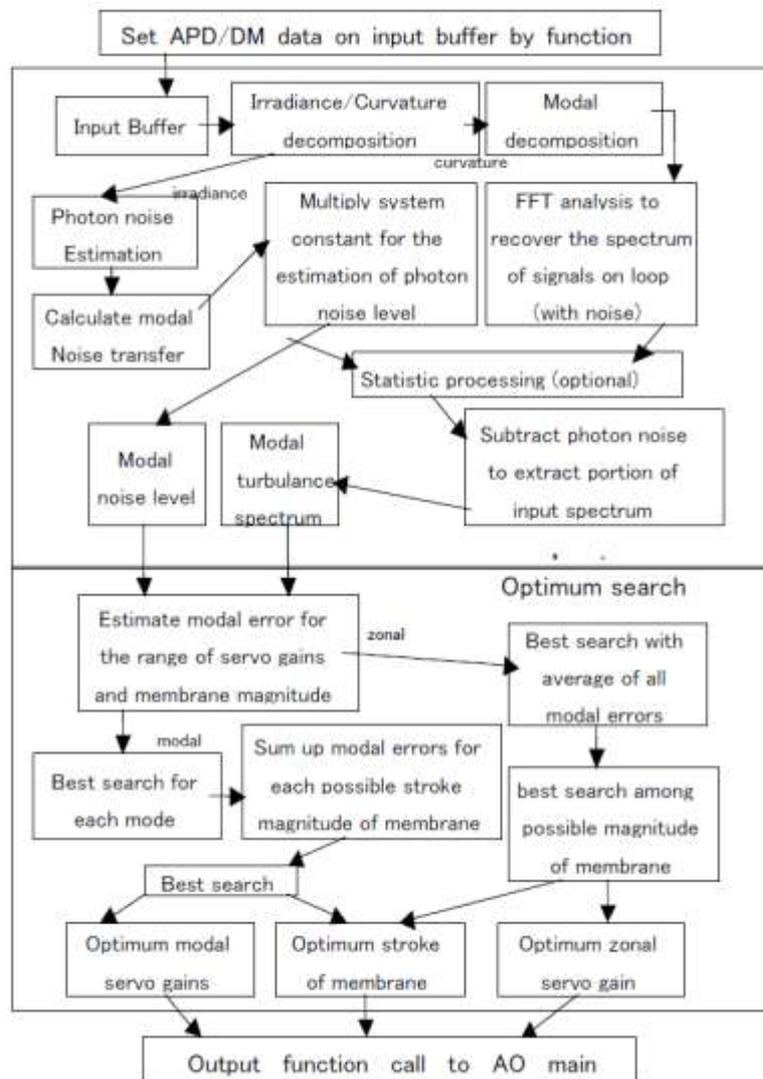


図. 5.13.4 揺らぎスペクトル分析によるフィードバックゲイン最適化構成図

### 5.13.3 各種補助機能

動作状態の監視は、一見補助的な機能であるが、運用上は重要性の高い項目となる。望遠鏡を用いた観測時間は貴重であるため、それを最大限に生かすには、観測中にも動作状態が常時容易に確認できて、随時調整を行えることが望まれる。特に、大気揺らぎの状態は変動するものであるため、波面制御部のパフォーマンスは常に容易に確認できて、大気揺らぎの急変で制御が外れてしまった場合など、異常時発生時には警告が表示される、といった構成が望ましい。また、補償光学に用いられている部品類は、高価な上に調整にも手間がかかるものが多い為、それら部品に故障の要因となりうる無用の負荷をかけずに操作が行える必要がある。これら、運用能率を向上するための各種補助機能に関しては、実際の観測を通して装置運用の実情を取り込みながら、随時開発が進められてきているが、本節では、それらから一部主要なものを紹介する。なお、これらの補助機能の多くは、試験や運用の必要に応じて調整が積み重ねられるものであるため、持続的な開発作業を継続するためには、前章で説明した現代的なソフトウェア開発法が前提となっていることは指摘しておく。これらのソフトウェア的な高次技術の援用もあって、現在まで改良を継続してきている波面制御部を含めながらも、詳細な運用支援機能まで、一貫して整合性の取れた実装が可能となっている。

#### (1) DM・TTの振動・停止検出機能

DM および TT に関して、異常振動や動作の停止を、使用者が即時に気がつくように警告表示する機能が実装されている。実装箇所は、内蔵式の数値モニターになっている。このような異常動作の原因には、視野内に雲が入った場合など、天候の要因が挙げられる。

## (2) APD の管理機能

LGSAO188 の特徴の一つに、波面センサーでの光検出に高感度かつ高速のアバランシュダイオードをもちいていることがある。アバランシュダイオードは、実時間でのフォトンカウンティングという高感度の光波面検出に好ましい性能を持つものの、CCD など他の方式と比べて、素子間での特性のばらつきの管理が必要となる。とりわけ運用上の問題になったのが、素子の寿命のばらつきの管理であった。これは、素子作成時の元々のばらつきが考えられる上に、素子の使用状況にも依存する事情がある（ごく具体的には過露光で故障する）。素子に寿命が来た時は感度が急低下してしまう事が多く、運用時に欠陥素子による性能の低下を防ぎ、安定した性能を提供するには、APD 劣化の早期発見と交換作業の円滑化が望まれる。そこで、波面センサーに入射する光が、瞳面上ではほぼ一定と考えられるため、時間当たりの係数値に関して素子間での統計的な検定を行い、明らかにカウント数の多い素子が特定されて表示上で明示されるようになっている。また、素子ごとのフォトンカウント数について、経時的な劣化を調べることが出来るよう、数値が常時外部へ出力されるようになっている。この機能は、内蔵式の数値モニターに実装され、常時稼動を続けている。

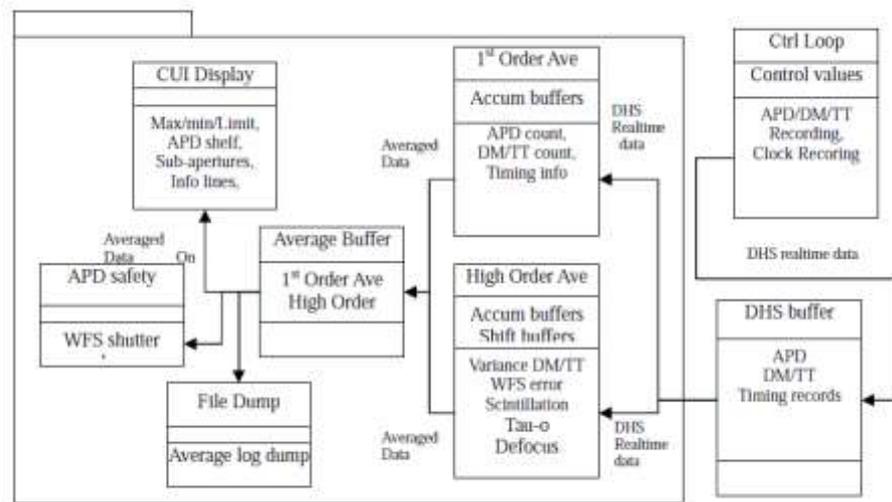


図.5.13.5 APD 管理機能

## (3) フィードバックゲイン最適化

制御時のフィードバックゲインは波面補償の性能に大きく影響を与えるが、その最適値は揺らぎの状況やガイド星の明るさで変化する。つまり、フィードバックをかける量を、観測の現場でどのように調整するかは、補償光学系性能を発揮させる上で重要である。すばるのレーザーガイド星補償光学系では、以下の二通りの方法が考えられており、現在、そのうちの一方で実装の完了しているゲインスキャンと言う方法を用いて運用が行われている。

## (4) ゲインスキャン

制御ループをかけた状態で、自動的にフィードバックゲインを増大あるいは減少させ、波面センサーの出力の絶対値が最小となる値を検索する機能である。観測時に露光を開始する前に行い、露光開始前の大気揺らぎに対して、最良のフィードバックゲインを探し出すことを可能にする。長所として、仕組みが簡単で制御プログラム本体に内蔵された数値モニターに実装されているため、随時使用可能なことがある。原理上も波面エラーから収差の最小点を直接検出する明快なものであるため、仕組みが簡単で信頼性が高い。

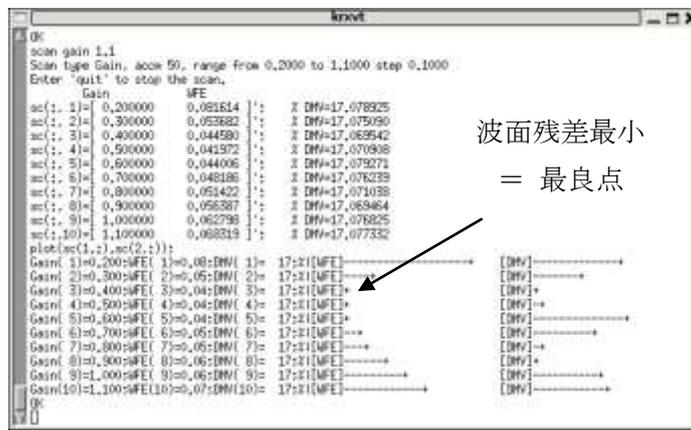


図.5.13.6 ゲインスキャンによる最良ゲイン検索の表示 (シミュレーター使用)

しかしながら、天文観測においては、観測対象によって長時間の露光の行われる事も多く、ゲインスキャンでは露光中の揺らぎの状態の変化には対応できないことが問題になってくる。この場合には、後述の、揺らぎの時間スペクトル分析に基づく最適化アルゴリズムの適用がより望ましいものとなり、報告書執筆の時点では鋭意開発が進められている。

### (5) 時間スペクトル分析による最適化アルゴリズム

これは、前述の外装式の診断系 (DHS) 上で、波面の曲率と可変形鏡の制御信号に対して時間領域でのフーリエ変換を行い、周波数領域で残差成分が最小となるように、最良の制御ゲインを算出する方法である。主要アルゴリズム部分については開発が完了しており [M.Hattori et.al., SPIE, 2006] 最適な制御ゲインの算出と共に、計算過程で得られる時間領域でのフーリエスペクトルが表示可能なように設計されている。ただし、これを可動させるには、波面制御系で毎秒千回を超える制御サイクル毎に発生する大量のデータをネットワーク経由で DHS に転送する必要があるが、この部分は現在開発中となっている。この時間スペクトルを用いた最適化アルゴリズムが稼動するようになると、前述のゲインスキャンと比べた場合に、性能的に暗い天体に対する時間積分時の性能がさらに向上する可能性がある。また、現在ゲイン調整に用いられているゲインスキャンが、操作に若干のコツを要することから運用性の向上も期待できる。

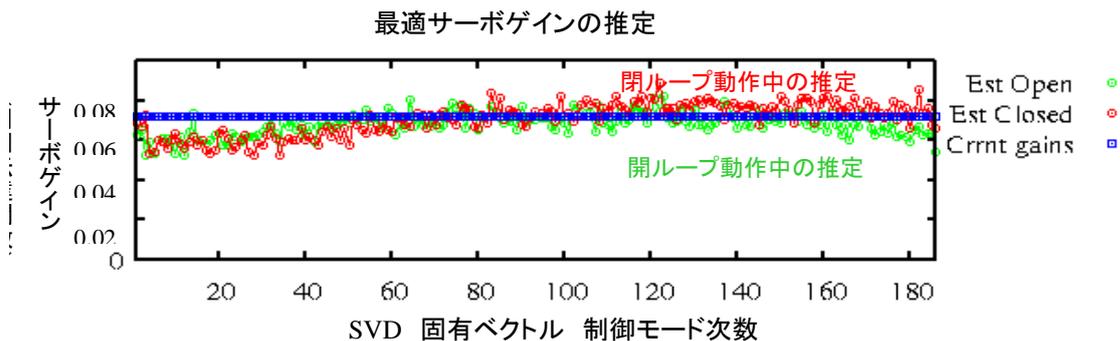


図.5.13.7 最適フィードバックゲイン推定の試験動作

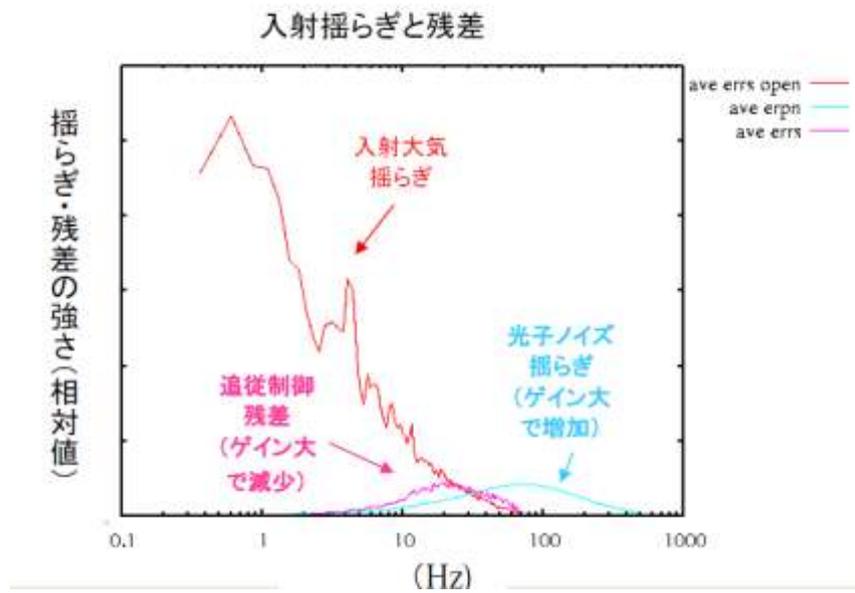


図. 5.13.8 スペクトル分析の試験動作

#### (6) APD/DM の補間機能

制御回路などハードウェアに故障が生じた場合にも、APD および DM に関して、隣接素子間での補間、あるいは、故障素子における曲率を 0 に固定してしまうことで、故障部分の動作を隣接する他の要素で補って波面補償の動作を確保する機能である。一部素子が動作出来ない時にも性能の低下を食い止め、動作可能な素子の数に応じて、実用上十分な性能で波面補正を提供することが可能であることが確認できている。



## 5.14 機械系・電気系・制御計算機

### 5.14.1 補償光学系光学ベンチ

188素子補償光学系の主要な光学素子はハニカム構造を内部に持つ光学テーブルに配置される。光学テーブルのサイズは2100mm x 1720mm x 200 mmで、2つの光学テーブルを接合した特注品である。(図5.14.1.1)。テーブル上面には25mmの格子状にM6ネジ穴が開いており、位置決めピンを使う穴の位置を光学テーブルの隅を基準として精密に測定した。位置決めピンとサイズが精密に加工されたディスクを使って、各光学コンポーネントユニットの位置を3点で決定し、かつ高い精度で再現よく設置できるようにした。またステンレス製の光学テーブル上面にアルミ製の台座を持つ光学コンポーネントを取り付けるので、サイズの大きい較正用人工光源ユニット、高次波面センサー、低次波面センサーは熱膨張の違いを吸収するメカニズムを用いている。ほとんどの光学コンポーネントは3点で支持され、ネジ止めの際の歪みを最小限にしている。光学テーブル全体は遮光用カバーとそれを支えるフレームで覆われている。光学テーブル内部にアクセスするときはネジ止めされた側面のカバーの一部を取り外すだけでよい。また、光学テーブル内部へのケーブル等はすべてカバーとは独立したコネクタパネルを介して配線される(図5.14.1.2)。補償光学系と観測装置IRCSとの間は、蛇腹タイプの遮光ユニットが取り付けられる。

光学テーブルはマウントユニットに極力歪みがないように調整された4点で支えられる。マウントユニットのそれぞれ4つの足には球状の金属があり、ナスミス台に設置した4カ所のカップ状の台座の上に置かれる。球状の金属が台座の3カ所で接して、設置位置の再現性を確保している。マウントユニットにはAPDモジュールの格納ユニットと補償光学系内部の駆動機構用モータコントローラなどの制御エレクトロニクスが納められている(図5.14.1.3)。

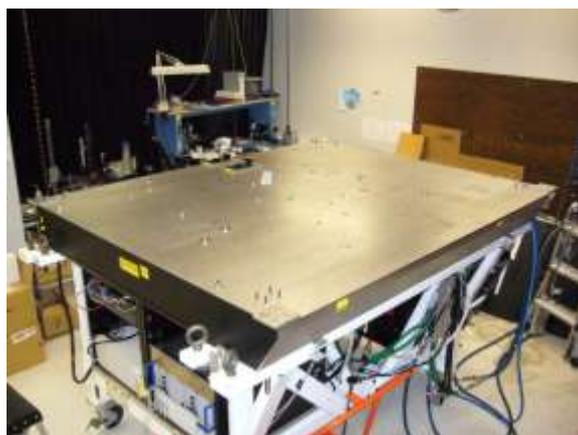


図5.14.1.1 188素子補償光学系用光学テーブル



図5.14.1.2 光学ベンチカバーのコネクタパネル



図 5.14.1.3 光学ベンチ下制御ラック

## 5.14.2 制御エレクトロニクス・制御計算機

補償光学系のための制御エレクトロニクスは、波面センサー用検出器である光子計数APDモジュール、その駆動回路、光子計数用カウンターボード、可変形鏡とそれを組み込んだTip/tiltマウントのドライバー、可変形鏡のデジタル制御信号をアナログに変換するユニット、曲率波面センサーで用いられる振動鏡用信号発生器およびそのドライバーなどがある。これらは、可変形鏡高圧電源、APD主要電源、ネットワーク機器、シリアル通信機器、温度などをモニタするデータロガーなどとともに188素子補償光学光学ベンチおよびマウントから少し離れた場所にある2つの高さ1.8mの19インチエレクトロニクスラックに納められている。重量制限および排熱処理の理由から光学ベンチから隔離されている。(図5.14.2.1)

較正用人工光源ユニット、高次波面センサー、低次波面センサー、ガイド星捕捉機構、ビームスプリター交換機構など補償光学系光学系のモーター駆動などの制御エレクトロニクスは補償光学系光学ベンチ下のエレクトロニクスラックに置かれている。

補償光学用制御計算機、波面計測用リアルタイム計算機、波面データ解析用計算機などは望遠鏡ドームから離れた制御棟計算機室に置かれている。ナスミス台のエレクトロニクスラックから観測制御棟の計算機室の補償光学系制御計算機まで、光ファイバーを用いて波面測定・補正のためのデータを高速通信している。



図 5.14.2.1 188 素子補償光学系制御ラック

## 5.14.3 レーザー室

レーザー室は望遠鏡赤外ナスミス台に設置されている。サイズが5m x 3m x 2.5mの恒温室である。2つの部屋に分割されていて、レーザー本体を設置している側はクラス10000程度のクリーンルームとなっている。クリーンルームの上部には空気清浄用フィルターと組み合わせた循環型ヒーターがあり、室温を0.1℃の精度で制御できる。現在の設定温度は22.5℃である。恒温かつクリーンルームを維持することで、長期間にわたるレーザーの出力安定性、波長安定性を保証している。もう一つの部屋にはレーザーの駆動系と制御系、内部循環型熱交換装置などが配置されている。レーザーのクリーンルームから流れ込む22.5℃の暖気と装置の熱を排熱するため、望遠鏡システムから供給される冷却水を用いて制御装置室内の熱交換を行っている。

## 5.15 望遠鏡インターフェース

### 5.15.1 望遠鏡赤外ナスミス台

望遠鏡赤外ナスミス台の188素子補償光学系、観測装置、レーザー室の配置を図5.15.1.1に示した。またそれぞれの装置を設置するナスミス台の台座の位置も示した。188素子補償光学系の台座の位置は、すばる望遠鏡の高度軸に合わせたレーザービームの位置を3次元測距システムで正確に測定したのち、188素子補償光学系の光学テーブルとレーザービームが設計通りの位置関係になるようにナスミス台の台座を決定する。188素子補償光学系は内部に較正用人工光源がある。この光源を光軸基準として、188素子補償光学系の後ろに設置する観測装置の位置を決定する。最終的には星を使って、補償光学系の高次波面センサーあるいは観測装置の撮像素子を用いて、精密な望遠鏡ポインティングモデルを構築する。

### 5.15.2 電力供給

望遠鏡設備からレーザーガイド星補償光学系に供給される電力系統は、

1. 188素子補償光学系光学ベンチ
2. 188素子補償光学系から隔離されたエレクトロニクスラック
3. 制御計算機
4. レーザー (UPS、common)

の4系統に大別される。

188素子補償光学系光学ベンチには赤外ナスミス下の電力供給パネルPDB71のサーキットブレーカー番号306から3相208V、2.0kVAの容量が割り当てられ、単相120V、容量15Aのサーキットブレーカー3つと 単相120V、容量20Aのブレーカー2つに分配されている (図5.15.2.1)。



図 5.15.2.1 補償光学系光学ベンチ用配電盤。

制御計算機を格納しているラックには計算機室の

188素子補償光学系から離れて設置されているエレクトロニクスラックには、APD用主要電源のために、赤外ナスミス下の電力供給パネルPDB71のサーキットブレーカー番号101から3相480V、2.0kVAの容量が割り当てられ、トランスで208Vに減圧され供給される。それ以外のエレクトロニクスについては、同じPDB71のサーキットブレーカー番号506から3相108V、2.0kVAの容量が割り当てられ、3相それぞれが単相120V、容量15Aのサーキットブレーカーの分配されている (図5.15.2.2)。



図 5.15.2.2 エレクトロニクスラック用配電盤。左の半分のユニットはAPD主要電源専用。

制御計算機を格納しているラックには計算機室の配電盤の単相120V、20Aのブレーカーから供給している。レーザーシステムは望遠鏡のUPS DOME側から13kVA、通常の商用電源から6kVAが供給されている（図5.15.2.3）。



図 5.15.2.3 レーザー用配電盤。左が通常電源、右がUPS。

### 5.15.3 冷却水供給

補償光学系のAPD格納ユニットと波面センサー内の2つのCCDカメラに供給する冷却溶媒はエチレングリコール50%と水50%の混合溶液を使用し、内部循環型のチラーで6°Cに設定されている。これはAPDモジュールが電源投入時に5°C以下となっていると正常に立ち上がらないため、5°C以下の望遠鏡から供給される冷却溶媒を直接利用できないからである。

レーザー室の熱交換のための冷却溶媒は望遠鏡のチラーシステムAから供給される。最大流量は毎分10リットル、冷却溶媒の温度は赤外ナスマス階の温度よりも2〜3°Cほど下、停止した状態では0.9MPa、循環中では0.6MPaの液圧をもつ。

# 第六章 装置性能

## 6.1 機能・性能試験観測

2006年10月より開始された機能・性能試験観測は、その後一部のコンポーネントの故障、不具合、改修などを経ながら、順調に進められてきた。この節ではその試験観測の執行状況について報告する。

2006年度（先行研究である特別推進研究「レーザーガイド補償光学系による遠宇宙の近赤外高解像観測」の最終年度）は、最初の試験観測（5夜分割当）で補償光学系の動作確認とレーザー射出を実証したが、直後の10月15日の大地震による補償光学系のいくつかのコンポーネントが破損した。しかし望遠鏡復旧後、4夜分を使いレーザーガイド星生成システムの実験を進めた。

2007年度（本基盤研究（S）「レーザーガイド補償光学による銀河形成史の解明」の初年度）は、レーザーガイド星補償光学系の共同利用観測を開始すること目標に、補償光学系とレーザーガイド星生成システムの統合を第一優先とした。そのため、補償光学系の試験観測は実施されなかった。一方レーザーガイド星生成システムの試験を5夜ほど実施した。

2008年度は、18夜を使い、自然ガイド星を用いた補償光学系の性能を確認し2009年から共同利用を開始する目処を立て、またレーザーガイド星の性能評価をし補償光学系のガイド星として十分実用に耐えうることを確認した。

2009年度は21夜の割当てがあり、2010年1月末にレーザーガイド星を用いた補償光学系の動作確認をした。しかし、その直後に可変形鏡が故障したため、その回復に半年以上かかり、次の性能評価観測は2010年度の10月まで待たなければならなかった。

2010年度は合計13夜を使いレーザーガイド星を用いた補償光学系を完成させ、共同利用観測を開始した。

2011年度（本基盤研究（S）「レーザーガイド補償光学による銀河形成史の解明」の最終年度）には、共同利用観測および装置開発者に与えられる観測時間を用いた本格的な科学運用が開始する一方、19夜の試験観測を実施し、性能の向上、観測効率の向上、共同利用観測提案に応じたきめ細かいチェックなどを行った。今後レーザーガイド星補償光学系が安定運用に落ち着くまで、このような試験観測項目が続いていくと予想している。

## 6.2 基本性能（限界等級、感度、熱背景輻射他）（美濃和）

### 6.2.1 光学系透過率、放射率

AO188 を使った観測では、天体からの光は AO188 のサイエンスパス光学系（8枚の銀コート鏡+ビームスプリッタ(BS1)）を通過して観測装置へと導かれる。図 6.2.1 にサイエンスパス光学系の透過率の波長依存性を示す。近赤外線での観測波長域（1～5  $\mu\text{m}$ ）において、透過率は70～80%であった。また、AO188 光学系は常温におかれているため、鏡の枚数が増える事で、特に 2  $\mu\text{m}$  以上の熱赤外線域において、鏡自身の熱放射により背景光が増加する。L' (3.77  $\mu\text{m}$ )、M' (4.68  $\mu\text{m}$ )バンドにおいて、AO188 光学系を通す事で背景光が約2倍になる事が確認されている。この主な原因の一つとして、常温の AO188 光学ベンチ内壁からの熱放射が、ビームスプリッタ(BS1)の裏面で反射して観測装置に入っている事が考えられる。BS1 の裏面は、技術的な困難により裏面に反射防止膜を付ける事ができないため、裏面反射で見る内壁の付近に冷たい液体窒素等を入れたデューワーを置くなどの対策が検討されている。

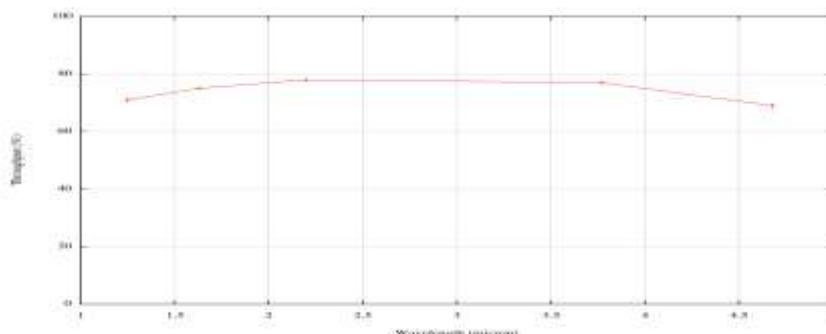


図 6.2.1 AO188 光学系透過率の波長依存性

### 6.2.2 検出感度、限界等級

AO188 を用いる事で、R<10 等の明るいガイド星を使った場合、望遠鏡の回折限界に迫るシャープな星像を得る事ができる。これにより、PSF の中心集中度が向上し、暗い天体の検出感度が上がる事にある。この中心集中度の向上による天体検出感度のゲインは、6.2.1 で示した AO188 光学系による透過率の低下、放射率の向上による感度の劣化に比べて大きく、AO188 を用いる事で、1等以上の感度ゲインを得られる事になる。表 6.2.1 に、AO188+IRCS 観測の各波長域での限界等級と、AO188 を用いた事による感度ゲインをまとめる。

表 6.2.1 AO188+IRCS の限界等級（R<10 等の明るいガイド星を使った場合）

フィルター	波長 ( $\mu\text{m}$ )	(AO なし)*1		(AO あり)*2		感度ゲイン *4
		限界等級 (1時間積分、5 $\sigma$ )	アパーチャ*3 (= 2 x FWHM)	限界等級 (1時間積分、5 $\sigma$ )	アパーチャ*3 (= 2 x FWHM)	
z	1.03	23.9	1.0 秒角	24.5	0.4 秒角	0.62
J	1.15	23.6	1.0 秒角	25.0	0.2 秒角	1.38
H	1.63	22.8	1.0 秒角	24.2	0.2 秒角	1.44
K'	2.12	22.6	1.0 秒角	24.1	0.2 秒角	1.47
L'	3.77	17.1	1.0 秒角	18.1	0.2 秒角	0.97
M'	4.68	14.6	1.0 秒角	15.6	0.2 秒角	0.97

\*1 AO 光学系を通さない IRCS 単体で測った感度

\*2 AO 光学系を通して測った感度。AO 光学系の透過率、放射率が考慮されている。

\*3 限界等級を見積もる際の測光アパーチャーのサイズ。総フラックスの 50%が含まれる 2xFWHM のサイズを仮定。

\*4 AO を使う事による検出感度のゲイン (AO あり、なしでの限界等級の差)

### 6.2.3 光学系ディストーション

AO188 を用いた観測では、星像を望遠鏡の回折限界まで小さくする事が出来るため、天体の固有運動の測定で威力を発揮する。しかし、このような固有運動の測定では、光学系のディストーションによる位置ずれ予め補正する事が重要である。AO188 の光学系では、可変形鏡を用いて光波面を補正するために、軸外し放物面鏡を用いて平行光を作っているが、この放物面鏡の面精度、及びアラインメントの精度によって、像面でのディストーションが発生すると考えられる。この光学系のディストーションの補正のために、IRCS を用いて球状星団の画像を取得し、1mas 以下の精度での位置測定が行われている HST/ACS の画像データと比較して、20mas (20"x20"), 52mas (53"x53") の2つの視野内でのディストーションのマップを作成した。このマップを元に、ディストーション形状を多項式でフィットし、歪んだ画像を補正する方法を考案した。その結果、5mas の精度でディストーションの補正ができる事が分かった。現在、この精度をさらに上げて 1mas の精度でのアストロメリを実現するべく、ディストーションの測定方法、解析方法の改良を行っている。

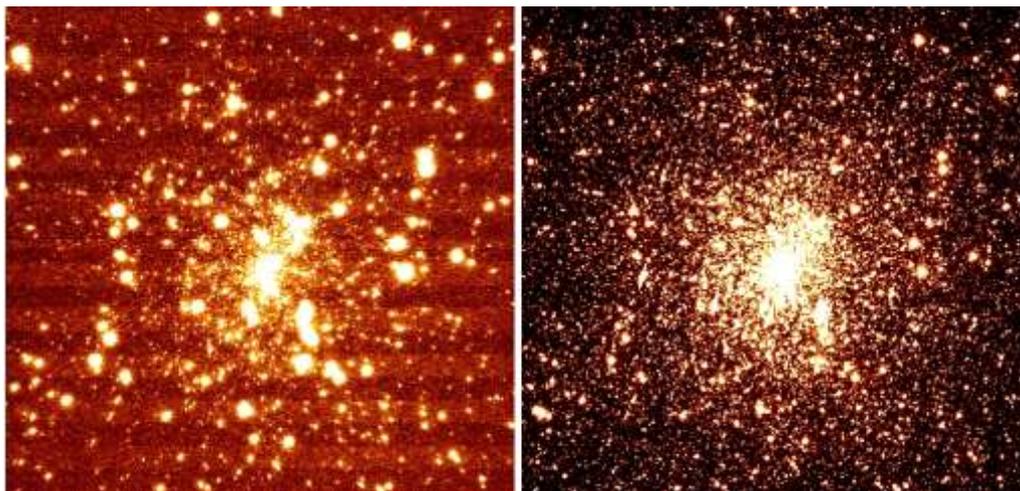


図 6.2.2 ディストーション測定のための球状星団画像(M15)の比較。左が IRCS+AO188 で撮られたもの、右が HST/ACS で撮られたものである。HST/ACS の画像は 1mas 以下の精度でディストーションが補正されているため、この画像を基準に IRCS+AO188 のディストーションマップを作成した。

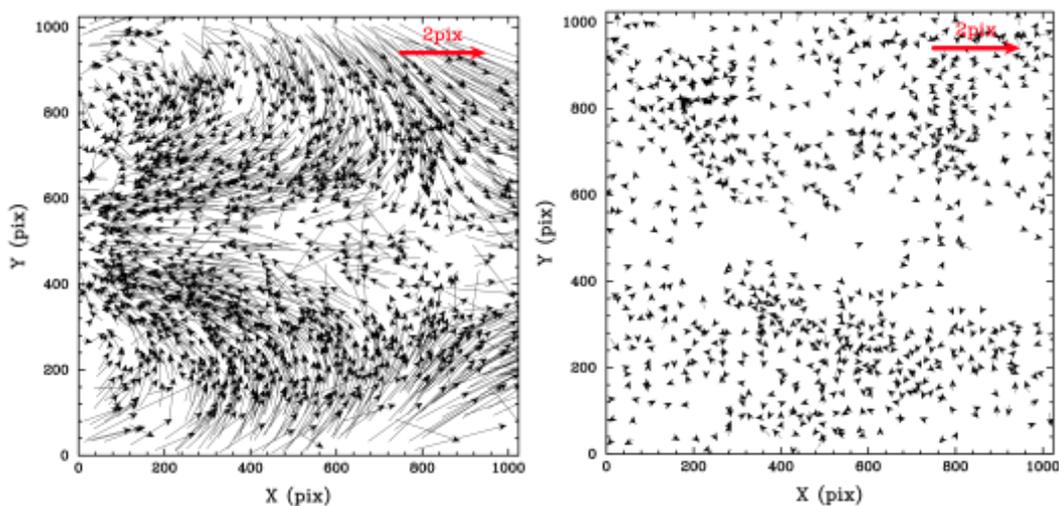


図 6.2.3 IRCS 52mas モード(53"x53")のディストーションマップ。IRCS+AO188 画像と HST/ACS 画像での球状星団内の個々の星の位置のずれを矢印で示している。左図はディストーション補正前、右図はディストーション補正後のマップ。

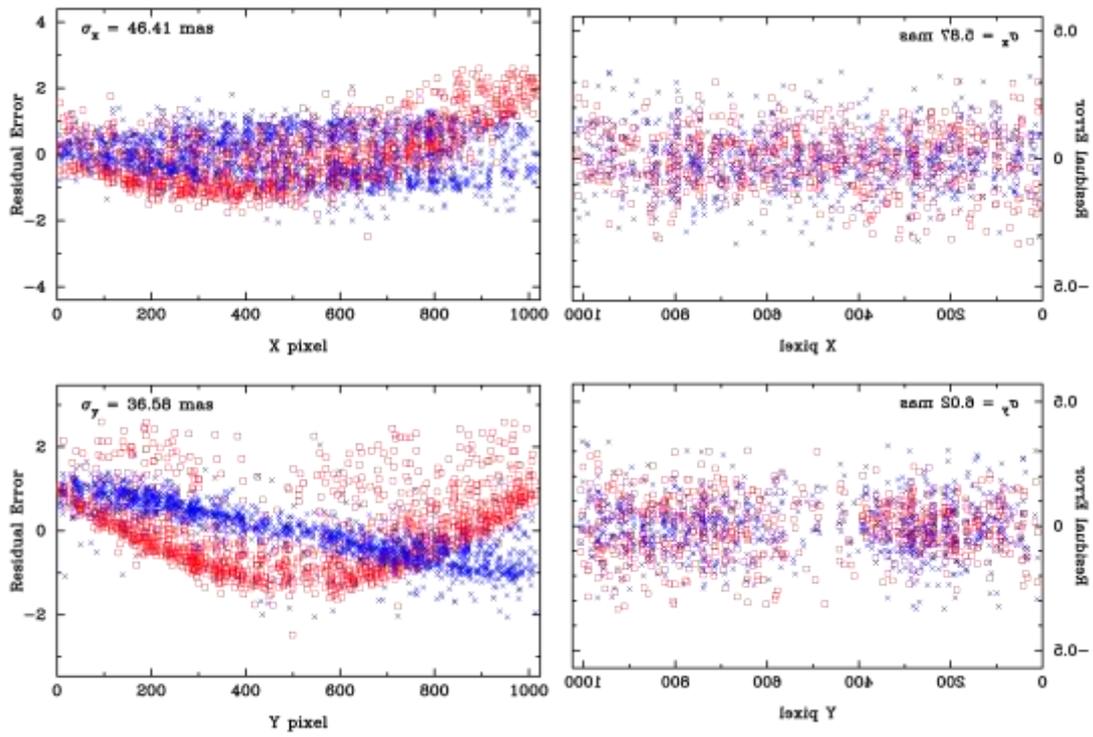


図 6.2.4 IRCS 52mas モードのディストーション。横軸は画像の X,Y 座標、縦軸は IRCS+AO188 と HST/ACS での星の位置の X 方向(赤)、Y 方向(青)のずれを表している。左図はディストーション補正前、右図はディストーション補正後。ディストーション補正後は、ずれは 5mas 程度におさえられている。

## 6.3 波面補正性能(美濃和、早野)

### 6.3.1 自然ガイド星モードの性能評価

#### (1) ストレール比と星像の半値全幅

補償光学系の性能はストレール比という指標を用いる。これは理想的な回折限界像のピークの値に対する、補償光学系で補正した星像のピーク値の比である。ストレール比が1ということは回折限界像が得られたことになり、ストレール比が0.5の場合はピーク値が回折限界像の半分である。自然ガイド星のRバンド等級を横軸にし、縦軸にKバンド(2.2 $\mu\text{m}$ )でのストレール比をプロットしたのが図6.3.1(左)で縦軸に星像の半値全幅をプロットしたのが図6.3.1(右)である。

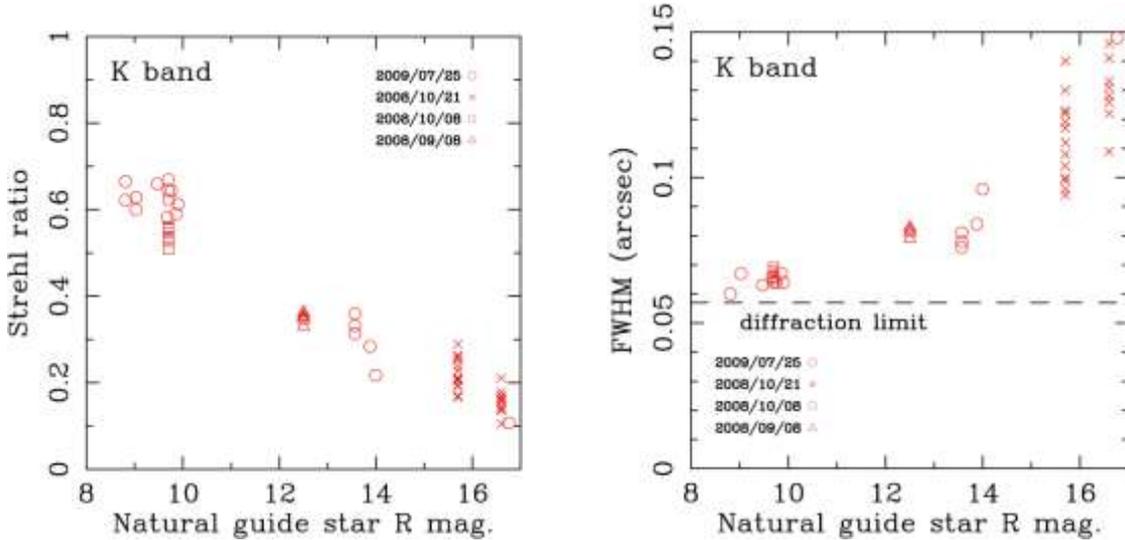


図6.3.1 自然ガイド星の等級ごとの補償光学系の性能(ストレール比、半値全幅FWHM)。4度の異なる夜の試験観測のデータを用いており、その時のシーイング条件はおおむね同じでKバンド(2.2 $\mu\text{m}$ )で0.4秒角であった。

次に横軸に観測波長、縦軸にKバンド(2.2 $\mu\text{m}$ )でのストレール比(図6.3.2(左))と、星像の半値全幅(図6.3.2(右))を示す。観測波長が長いほど性能がよく、明るいガイド星ほど性能がよいことがよくわかる。

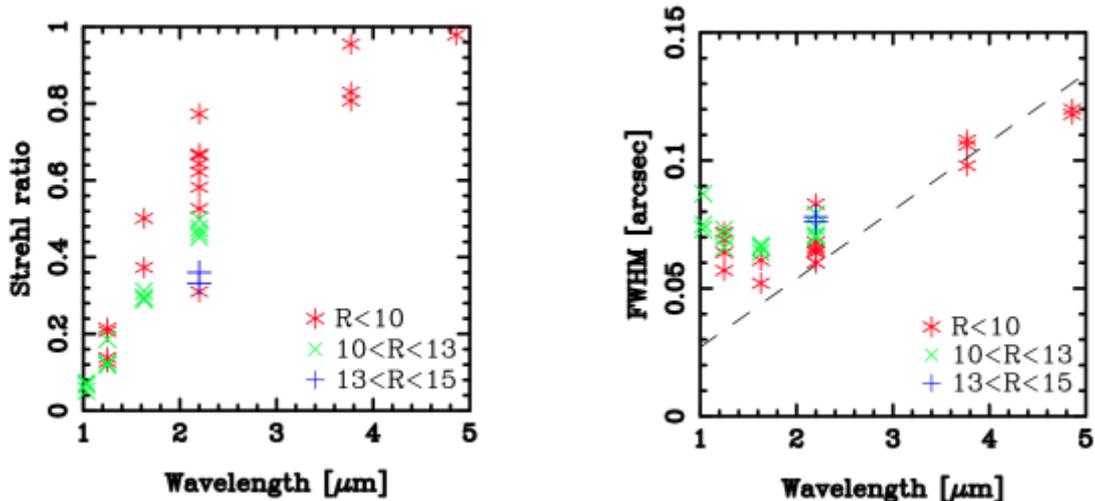


図6.3.2 観測波長とごとの補償光学系の性能(ストレール比、半値全幅FWHM)

次に横軸にフリード長、縦軸にストレール比をプロットする(図6.3.3)。Rバンドで10等級より明るい自然ガイド星では波面の残差が0.01( $D/r_0$ )<sup>5/3</sup>から0.02( $D/r_0$ )<sup>5/3</sup>程度になることがわかる。より暗いガイド星ではその値が大きくなる。この波面の残差はZernike多項式の低い次数から20から50項まで補正した残差に相当する。188素子補償光学系としては、補正できている項数が少ない。我々はその差を調査しているところで、波面センサーと観測装置の共通光学系以外の部分で発生する波面誤差を疑っている。

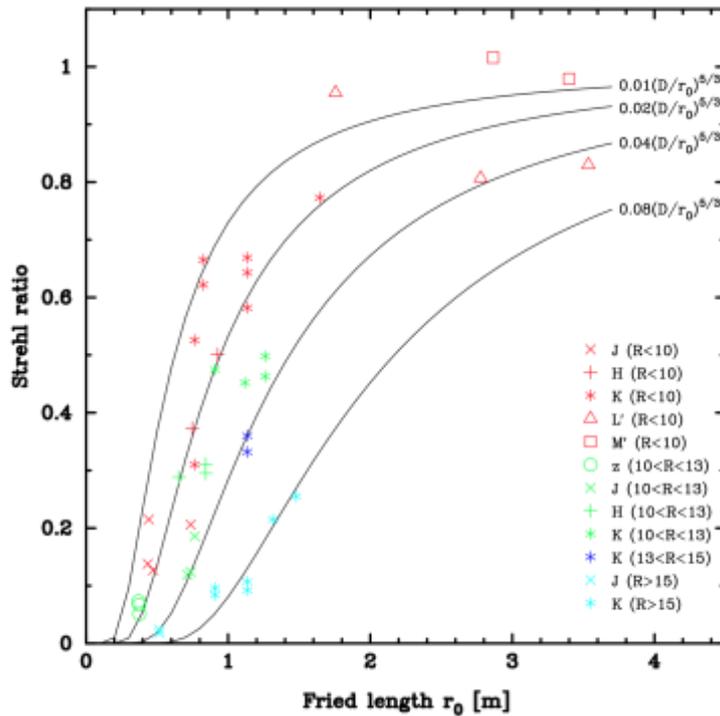


図6.3.3 フリード長とストレール比

## (2) Encircled Energy (天体の光量の中心集中度)

実際の観測において、観測天体の光の中心集中度が大切な物理量である。特にスリット分光の場合がそうである。スリットに入射できる天体の光量が観測効率およびデータの信号雑音比を決定づける。

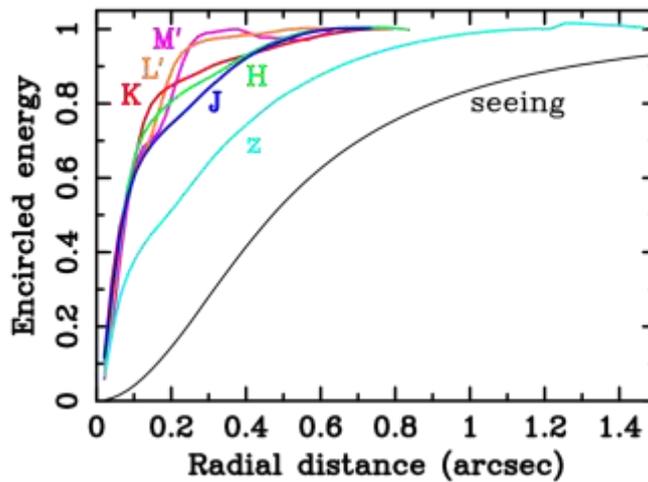


図6.3.4 天体の光量の中心集中度

図6.3.4は横軸に天体の中心（ピーク）からの半径、縦軸にその半径で決まる円内の光量比を示した者である。黒い線は半値全幅が0.4秒角というシーイング条件、色付けした線は各波長帯で補償光学系を持たたときの光量比である。Jバンドより長い波長では半径0.1秒角に点源天体の全光量の半分が集中していることがわかる。Kバンドにおける点源の感度は約2等級ほどとなる。

## (3) Isoplanatic angle. (離れた自然ガイド星の場合の性能)

観測天体と自然ガイド星が異なる場合、それらの位置が離れるにつれて観測天体の性能が劣化する。これは自然ガイド星で測定する大気ゆらぎと観測天体が通ってくる大気ゆらぎが、それらの距離の増大とともに異なってくるからである。この効果をanisoplanaticsといい、2つの天体からの波面の差のroot mean square値が1ラジアンとなる角距離をisoplanatic angleと定義する。通常30秒角程度であるが、夜ごとあるいは時間ごとに変動する。また高い場所にあるゆらぎ成分が大きく寄与してくる場合は極端にisoplanatic angleが小さくなる。図6.3.5は自然ガイド星からの距離に対するストレール比をプロットしたものだ。天体はM5とM15という球状星団である。ストレール比のばらつきが大きい、この測定から推定したisoplanatic angleはそれぞれ26秒角 (M5)、35秒角 (M15)であった。

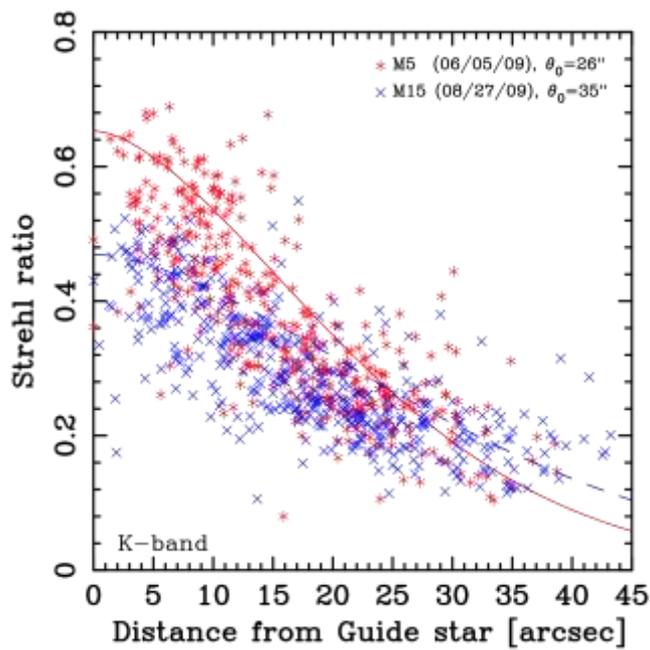


図6.3.5 球状星団によるanisoplanatismの測定

## 6.3.2 レーザーガイド星モードの性能評価

### (1) レーザーガイド星の明るさ

エレベーション 80 度程度では、レーザーガイド星 (LGS) の明るさは R バンドで約 11.7 等相当の明るさとして検出される。しかし、望遠鏡から出射されたレーザー光は、地球大気を通してナトリウム層に届くまでに減光されるため、望遠鏡のエレベーションが変わる事で、レーザー光が地球大気を通過する距離が変わり、検出される LGS の明るさも変化する。また、LGS の明るさは観測日での高層大気におけるナトリウム原子の総量によっても変化する。図 6.3.6 に、LGS の明るさの、エレベーションによる変化と、観測日による変化の一例を示す。

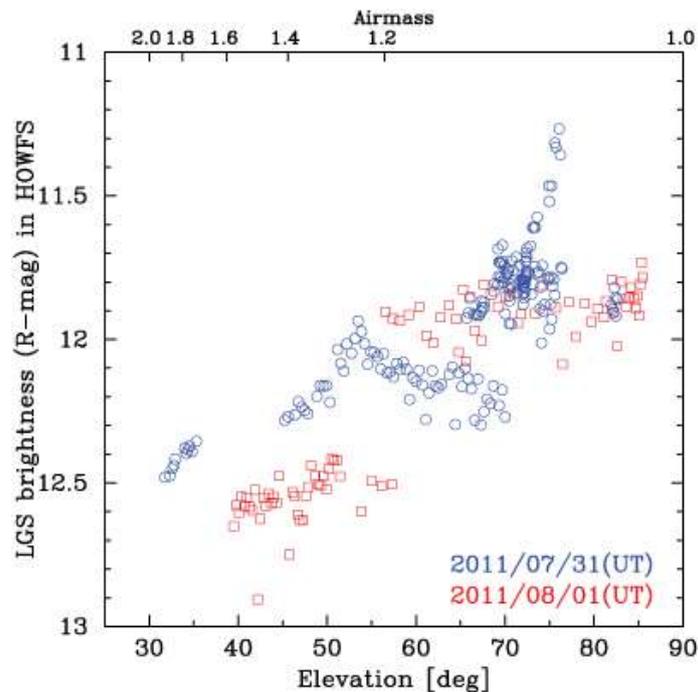


図 6.3.6 LGS の明るさ (R バンド等級)

## (2) ストレール比と星像の半値全幅

図 6.3.7, 6.3.8 にレーザーガイド星モードで到達できる星像(点源)の半値幅とストレール比と、tip/tilt ガイド星の R バンド等級、または観測波長の関係を示す。一般的に、レーザーガイド星モードの性能は、tip/tilt ガイド星の明るさが明るいほど、また観測波長が長いほど良くなる。AO による補正の効果が得られる最も暗いガイド星の限界は R バンド等級で 18 等ほどである。レーザーガイド星モードの性能は、エレベーションが低くなればなるほど悪くなる。これは、エレベーションが低くなる事で、レーザーガイド星の明るさが暗くなり、かつサイズが大きくなる事が影響している。

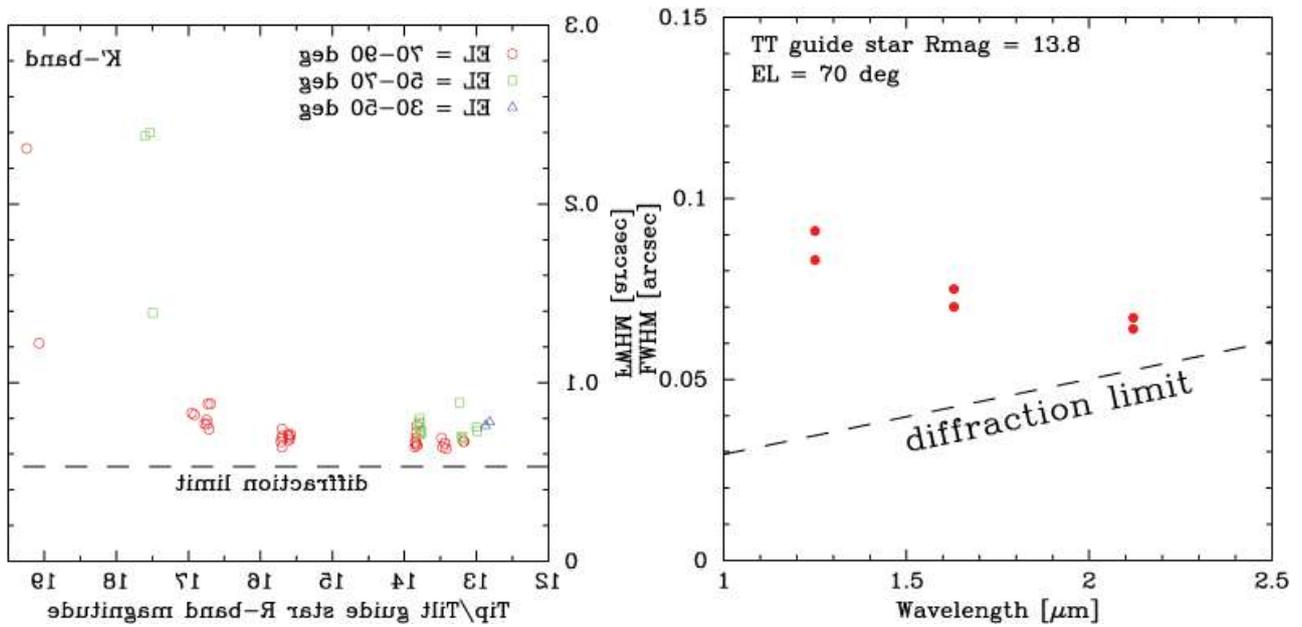


図 6.3.7 LGS モードで得られる星像の半値幅の、Tip/Tilt ガイド星の明るさ(R バンド等級)による違い(左図)と、観測波長による違い(右図)。

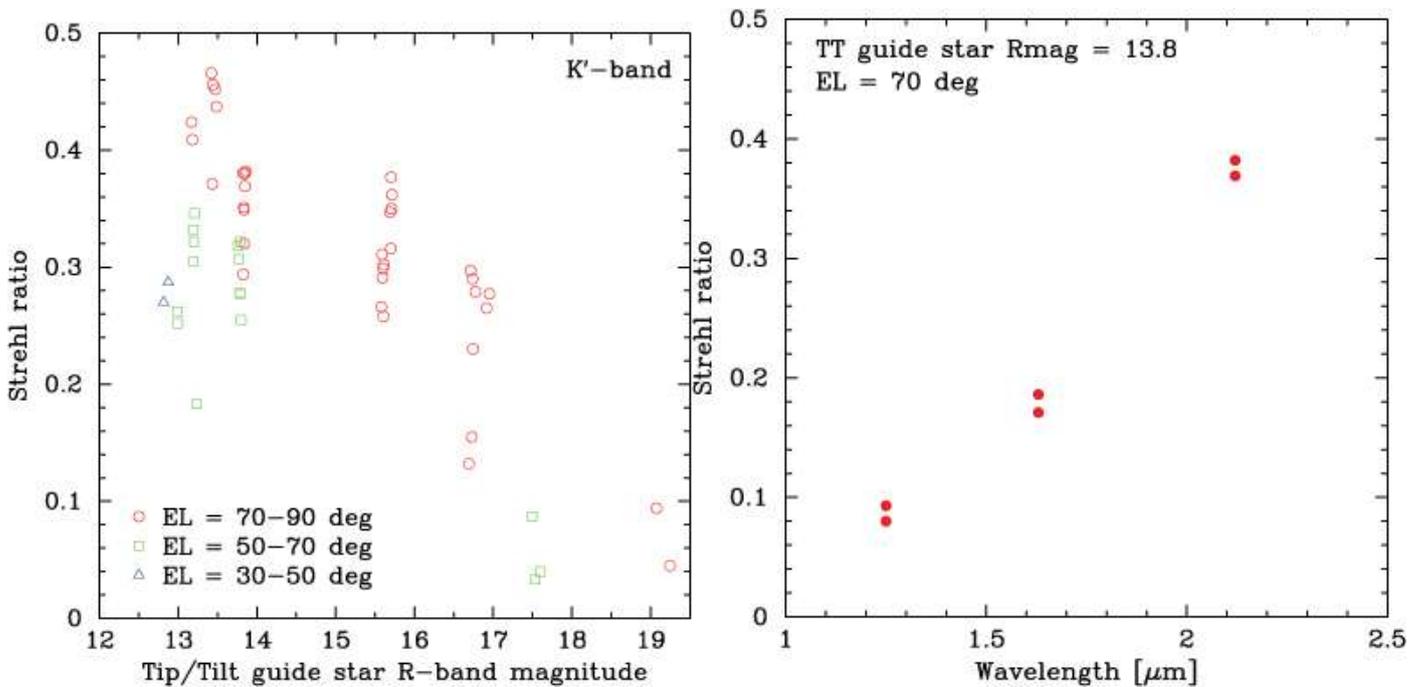


図 6.3.8 LGS モードで得られる星像のストレール比の、Tip/Tilt ガイド星の明るさ(R バンド等級)による違い(左図)と、観測波長による違い(右図)。

### (3) Tip/Tilt isoplanatic angle (離れた tip/tilt ガイド星の場合の性能)

自然ガイド星を用いた低次波面誤差 (tip/tilt モード、デフォーカスモード) の補正は、6.3.1.3 節で示した NGS モードでの高次波面誤差の場合と同様に、ガイド星の離角が離れるほど悪くなって行く。しかし、この悪くなり方は、NGS モードに比べて緩やかである。図 6.3.9 に、tip/tilt ガイド星との離角と、星像の半値幅、ストレーラ比の関係を示す。LGS モードの場合、約 90 秒角離れたガイド星でも補正性能の大きな劣化を伴わず使用する事が出来る。

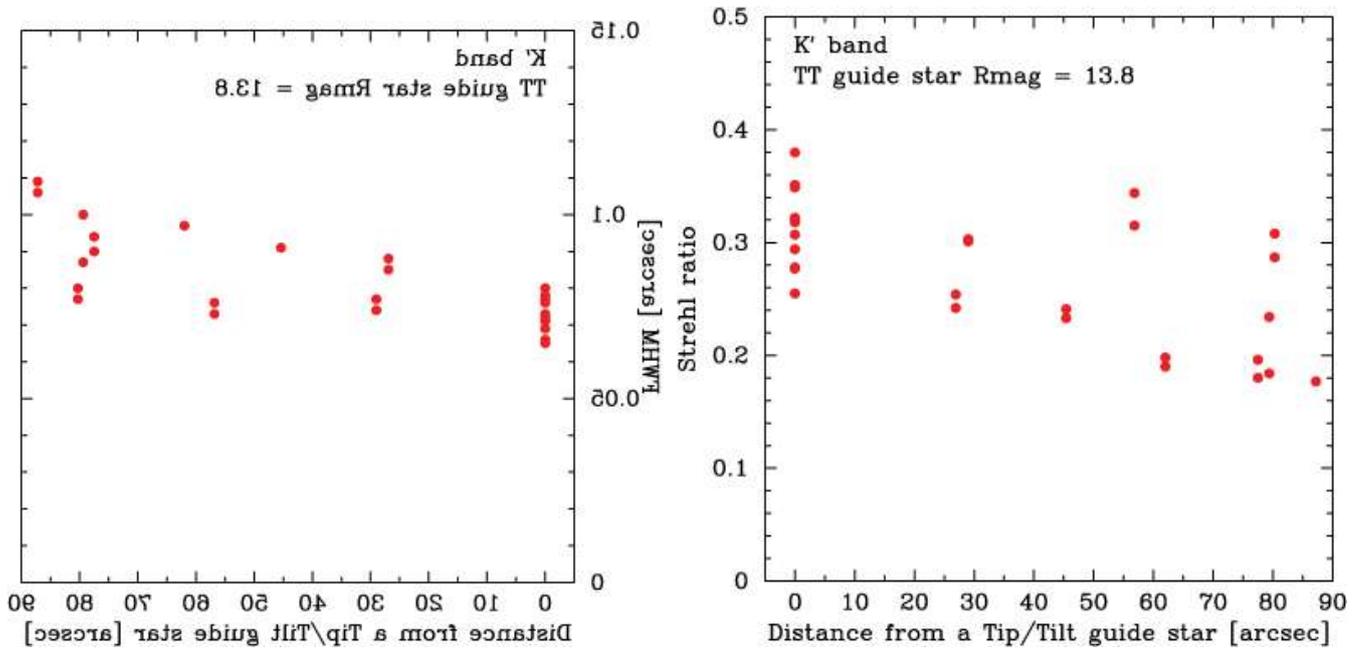


図 6.3.9 tip/tilt ガイド星までの離角による星像の半値幅(左図)、ストレーラ比(右図)の変化

# 第七章 装置運用

## 7.1 運用ソフトウェア(美濃和)

AO188 の観測運用ソフトウェアは、TCP/IP サーバーとクライアントによって構成されている。ユーザーは、クライアントソフトウェアを使って、サーバーに指令を出し、サーバーはクライアントからの要求を処理し、必要なデバイスへ適宜指令を出す。各サーバーは OBCP と呼ばれるワークステーション(ao188)上で常時立ち上がっており、クライアントからの指令を待つ一方で、各デバイスからのステータス情報を 1~10 秒間隔で更新している。以下に、観測運用で用いられているサーバー群を記す。

- リアルタイムシステム(5.12 章参照)との通信ソフトウェア: RTSCOM
- AO 光学系に組み込まれたオプトメカ系を制御するソフトウェア:  
CALSCI 人工光源、大気分散補正機構、ビームスプリッタ交換機構、  
IMR:視野回転補正機構、AU:ガイド星捕捉機構、HOWFS:高次波面センサー、LOWFS: 低次波面センサー
- CCD カメラで画像を取得し、記録するソフトウェア:  
AQCAM: ガイド星導入用カメラ、HPCAM: アライメント用瞳カメラ、ハイレゾカメラ
- 光学ベンチ内外の温度、湿度などの環境情報を記録するソフトウェア: ENVMON
- レーザーガイド星を打ち上げるための送信望遠鏡内のオプトメカを制御するソフトウェア: LLT
- レーザーと他の望遠鏡の視野、または人工衛星とのコリジョンを監視するソフトウェア (7.2 章参照): LTCS

これ以外に、APD サポートサーキット(ASC)や、カウンターボードなどの電気系の制御をするスクリプトが用意されている。AO188 の観測運用では、装置単体の制御だけではなく、IRCS, HiCIAO, Kyoto-3DII といった観測装置と、望遠鏡との連携が不可欠である。この装置、望遠鏡間の連携は、すばる望遠鏡での統合的な望遠鏡、装置制御システムである Gen2 を通して行っている。観測の際には、AO188 のワークステーション内に Gen2 との通信用の RPC サーバー(SIMCAM)を立ち上げ、Gen2 が各デバイスを担当する各サーバーからステータスを問い合わせ、装置、望遠鏡間でステータスを共有している。また、Gen2 から送られた指令は、SIMCAM を通して各デバイスへと伝達される。図 7.1.1 に AO188 の運用ソフトウェア群と、各デバイス、望遠鏡、観測装置の関係を表した図を示す。

ユーザーインターフェースとしては、Gen2 で用意されている IntegGUI と呼ばれる統合 GUI 環境を利用している(図 7.1.2 参照)。観測者は、IntegGUI の中で、オペファイルと呼ばれる観測スクリプトを開き、必要な観測シーケンスを選択し実行している。また、IntegGUI の中にはコマンドランチャーも用意されており、レンズアレイシャッターの開閉や、ループの ON/OFF などの AO188 の各デバイスへの個別の指令は、このランチャーを通して行われる。



IntegGUI からのコマンドの実行とは別に、リアルタイムシステム、各オプトメカのステータスを表示するソフトウェアも用いられている。現在は、図 7.1.3 の様な CUI ベースのステータス表示を利用しているが、現在 GUI によるステータス表示が進められている。図 7.1.4 に現在開発中のリアルタイムシステムモニターの GUI を示す。ここでは、DM 形状、波面曲率測定値、APD シグナルの他、ループゲイン、APD のシグナル平均値、波面推定誤差、DM 印可電圧の分散値などの時間変化をプロットしている。観測時には、このモニターを見ながらガイド星の導入や、ループゲインの最適化を行っている。

その他、レーザーガイド星モードの観測時には、レーザーの安全運用のために、レーザーを打ち上げている方向と、他の望遠鏡の視野、または人工衛星の位置が重ならないように、観測中は Laser traffic control system (LTCS)を通じて常にモニターをしている。LTCS についての詳細は 7.2 章に記す。

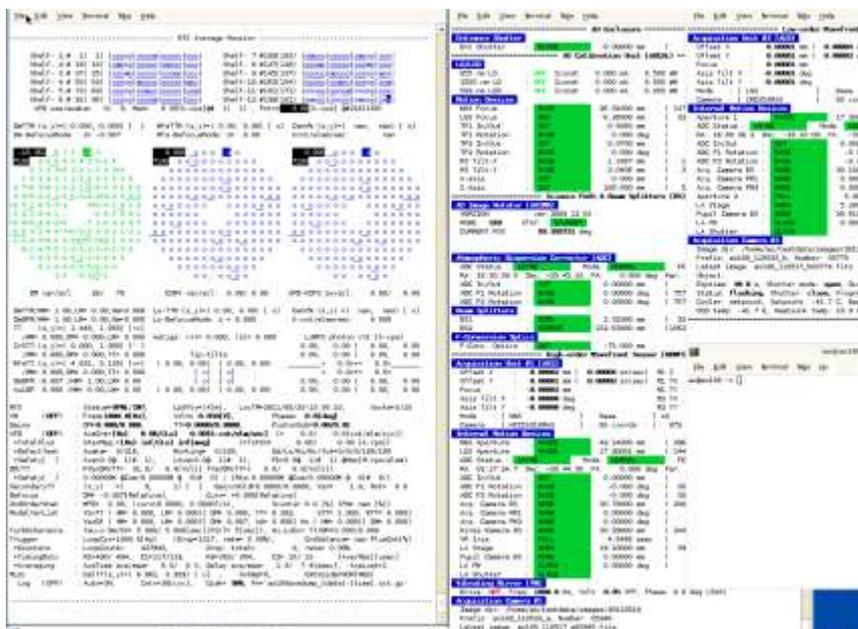


図 7.1.3 現在用いられているキャラクターベースのステータス表示。左側にリアルタイムシステムのステータス、右側に光学系内のオプトメカのステータス、CCD カメラのステータスが表示されている。

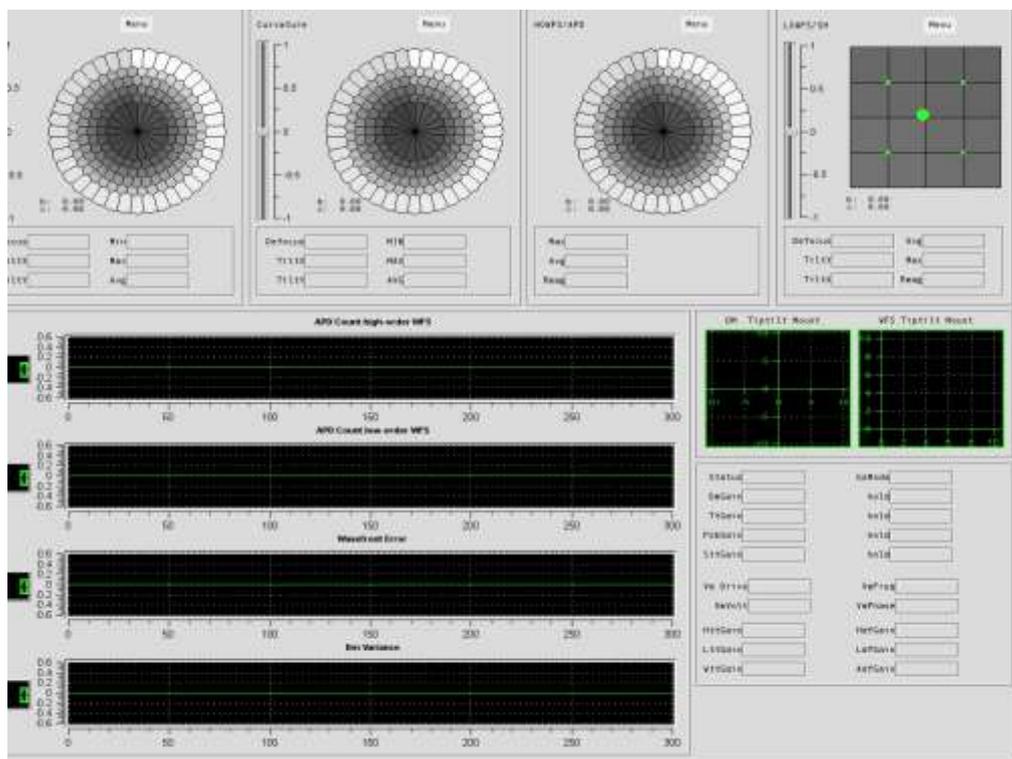


図 7.1.4 現在開発中のリアルタイムシステムモニター。

## 7.2 レーザー安全運用(早野)

### 7.2.1 ハワイ観測所山頂施設におけるレーザー安全対策

レーザーガイド星を作成するためのレーザー本体はクラス 4 に分類される。従って、そのための安全対策を十分にとる必要がある。レーザー本体はレーザー室の恒温クリーンルームに安置されているので、レーザー室のクリーンルームは通常施錠し、入室するのはレーザー安全訓練を受けた一部の開発者と管理者に限定する。またレーザー室の制御室も通常施錠し、関係者以外の立ち入りを禁じている。

送信望遠鏡ユニットが望遠鏡に取り付けられていない場合は、レーザービームがドーム内に漏れることはないの  
で安全である。送信望遠鏡ユニットが望遠鏡に取り付けられ、レーザービームが空に向けて射出可能な状態にある  
ときは注意が必要である。

夜間観測中はレーザービームが伝送用光ファイバーで送信望遠鏡ユニットまで導かれ空に射出される。しかし、  
送信望遠鏡ユニットにアクセスすることは特別なエアリフターを操作して近づかない限り不可能であり、そのエ  
アリフターを操作することのできる作業者は限定されている。さらに、その作業者が危険な領域に侵入する場合  
は、望遠鏡や装置に異常のあるときであり、夜間の望遠鏡オペレータの管理下に置かれる。そのため、十分な安全  
性を確保した後に作業を進めることになる。従って、観測中は十分な安全性が保たれる。

夜間の観測以外は、送信望遠鏡ユニット付近へのアクセスの制限がゆるくなり自由度がます。安全を確保するた  
め、インターロックシステムを構築した。送信望遠鏡のパネルを開けると、レーザーシステムのシャッターが自動  
的に閉じ、送信望遠鏡にレーザービームは伝送されることはない。

送信望遠鏡の着脱時は、その作業者が積極的にこのレーザーシャッターのインターロックシステムをロックアウ  
トし、作業中の表示を掲げる。作業終了後、表示を元に戻し、ロックアウトを解除する。

山頂作業者は全員レーザー安全講習を受講する義務を課しており、不測の事態に対しても十分な対処をとれるよ  
うな教育を施している。

### 7.2.2 Mauna Kea Laser Operation Group

マウナケア山頂には多くの光学赤外線望遠鏡、電波望遠鏡がある。レーザーガイド星は従来の観測方法と異なり、  
自ら光りを発して観測する。光害を厳しく取り締まってきた観測所としては矛盾した行為ともいえる。しかし、一  
方で、レーザーガイド星補償光学系の科学的な成果の期待は大変大きく、マウナケアの光学赤外線望遠鏡、特に 8m  
クラスの望遠鏡は、すべてレーザーガイド星補償光学系を開発し運用してきている。このような背景があり、マウ  
ナケアでのレーザーガイド星の運用ガイドラインを議論するワーキンググループ、Mauna Kea Laser Guide Star  
Technical Working Group が今から約 15 年前に発足し、レーザーガイド星の運用ルールを以下のように策定した。

## Current Laser Guide Star Policy

“The use of sodium D wavelength (589 nm) laser guide stars for astronomy is permitted on Mauna Kea subject to the following conditions:

1. No Observatory shall project a sodium laser beacon exceeding a power of 50 W. Multiple beacons can be projected from a single Observatory as long as their total power does not exceed 200 W. Laser beacons may not be projected at a zenith angle greater than 70 degrees.
2. Laser beacons must not interfere with observations being performed by other Mauna Kea telescopes. Any Observatory pointing a laser beacon must, therefore, adhere to the observing coordination guidelines approved by the Mauna Kea Directors.
3. Any Observatory projecting a laser beacon must receive prior approval for their aircraft system from the FAA. Only passive aircraft detection systems are permissible.

Written confirmation that conditions 1 to 3 have been met by an Observatory must be provided to the IfA Director at least 30 days prior to the first projection of a laser beacon from that Observatory.

Use of guide stars at alternate wavelengths will be permitted only after an evaluation of their utility and impact, similar to that performed for sodium D wavelength lasers, is carried out and is submitted to and approved by the Mauna Kea Directors.”

それから10年以上がたち、現在では4つの望遠鏡でレーザーガイド星が稼働している。当初策定したルールの改訂要求が各望遠鏡から提案され、ルール・ポリシーの見直しをするため、Mauna Kea Laser Technical Working GroupはMauna Kea Laser Operation Group (MLOG)と名前を変えて、2010年3月から新しいルールとその運用システムについて議論を開始し、2011年10月にMauna Kea Laser Policyというガイドラインをマウナケアにある観測所の所長の了解を得た後に改訂した(次ページ)。主な改訂はレーザービームが他の望遠鏡と干渉したとき、最初に望遠鏡を向けていた側に優先権があるという新しいルールの導入である。これは、レーザーガイド星を使う望遠鏡が増えたことに伴って考案されたものである。Keck、Geminiなどはこのルールの参加を決定しているが、すばる望遠鏡とCFHTはレーザービームの影響が無視できない主要観測装置があるため、ルールへの参加を保留している。MLOGの今後の課題は、すべての望遠鏡が納得する解決策を模索し、また新ルールおよびそれを支えるアップグレードされたレーザービームトラフィック制御システムを作り出していくことである。

## **Mauna Kea Laser Policy June 20, 2011**

The use of sodium D wavelength (589 nm) lasers for laser guide star systems or other astronomy purposes is permitted on Mauna Kea subject to the following conditions:

1. No observatory shall project a sodium laser beacon exceeding a power of 50 Watts. Multiple laser beacons can be projected from a single observatory as long as their total power does not exceed 200 W.
2. All observatories projecting laser beacons and all observatories not wishing to be impacted by lasers or by laser guide stars must participate in the Mauna Kea Laser Traffic Control System (LTCS). The LTCS is designed to maximize the science of participating observatories by:
  - a. Preventing light from laser beacons and laser guide stars from contaminating scientific detectors and/or other sensors such as guiders that may be impacted by the 589nm laser radiation
  - b. Ensuring that observations, whether they make use of lasers or not, can be conducted without unanticipated interruptions or collisions
3. All observatories projecting laser beacons must comply with applicable FAA laser aviation safety requirements, including:
  - a. Any observatory projecting a laser beacon must receive prior approval for their aircraft safety system from the FAA in the form of a Letter of No Objection. The observatory must comply with the conditions in the Letter of No Objection.
  - b. Laser beacons may not be projected at a zenith angle greater than 65°.
4. Observatories projecting a laser beacon should be aware that their operations could potentially impact satellites and should adopt suitable mitigations.
5. Written confirmation that the above conditions have been met by an Observatory must be provided to the IfA Director at least 30 days prior to the first projection of a laser from that Observatory.
6. A notification shall be sent no later than 7 days prior to any laser operation to all participating observatories and other contacts of concerned organizations so that LTCS systems can be started, military exercise coordination can occur, and any other laser impact issues can be coordinated.

Use of lasers at wavelengths other than 589nm will be permitted only after an evaluation of their utility and impact, similar to that performed for sodium D wavelength lasers, is carried out and is submitted to and approved by the Mauna Kea Directors.

The above policy must be approved by consensus of the Mauna Kea Directors before taking effect. Once this update is approved, it will supersede all previous versions of the policy.

### **7.2.3 レーザービームトラフィック制御システム**

マウナケア山頂で最初にレーザービームを照射したケック望遠鏡のグループによって、レーザービームが他の望遠鏡の視野を妨げないためのレーザービームトラフィック制御システムが開発された。このシステムは各望遠鏡の指向方向と状況（観測中の是非、望遠鏡移動中など）を収集し、各望遠鏡の3次元的な位置関係の情報をもとに、それぞれの望遠鏡の視野の重なりを計算するサブシステムと、レーザービームがある望遠鏡の視野と干渉する事前予測およびその干渉継続期間の通知を行うサブシステムと、レーザービームがある望遠鏡の視野と干渉した時の自動シャッター動作を管理するサブシステムから構成されている。

各望遠鏡は図 7.2.3.1 のような情報をウェブページとして作成し、レーザービームトラフィック制御システムのみが閲覧可能な設定をする。レーザービームを照射する望遠鏡では、レーザービームトラフィック制御システムを図 7.2.3.2 に示したウェブページから立ち上げ、図 7.2.3.3 のようなユーザーインターフェースを用いて、レーザービームの干渉をチェックする。

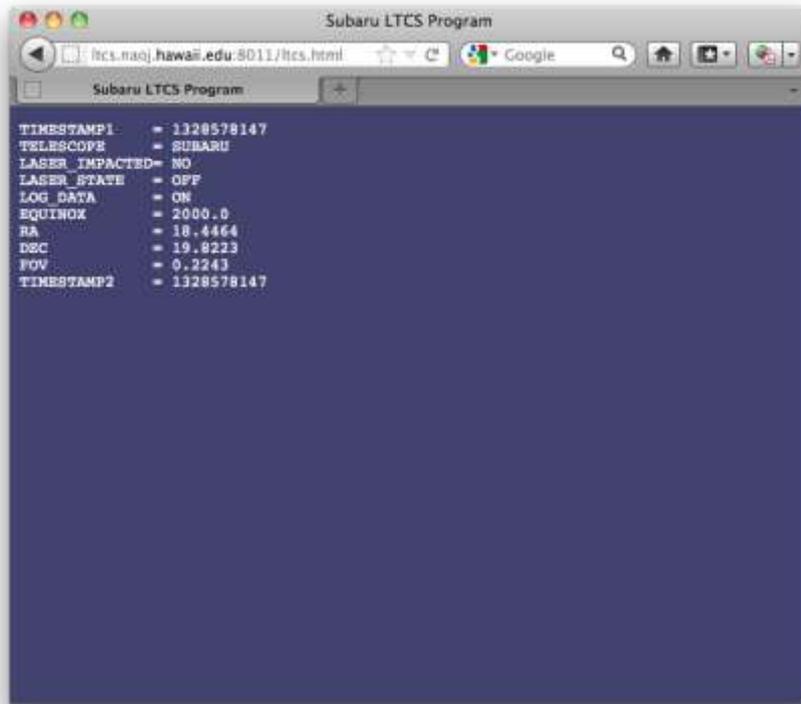


図 7.2.3.1 レーザートラフィック制御システムが参照するすばる望遠鏡のポインティング情報を掲載するウェブページ



図 7.2.3.2 レーザートラフィック制御システムの開始と停止を制御するウェブインターフェース。観測開始と終了時に観測オペレータが操作する。

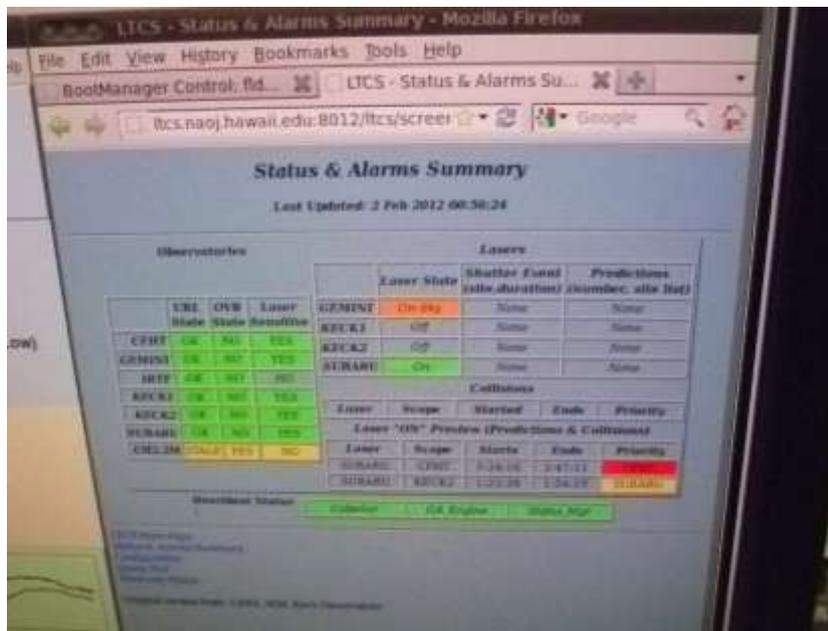


図 7.2.3.3 レーザートラフィック制御システムのステータス。レーザービームが照射されているときは Laser State の欄が On-Sky となる (Gemini はレーザーを照射している)。またレーザーのシャッターが閉じられているは Laser State の欄が On となる (すばる望遠鏡はレーザースタンバイ状態)。もしレーザービームと他の望遠鏡が干渉する場合、その開始時刻および終了時刻などの情報も表示される。この画面ではすばる望遠鏡が CFHT と Keck2 と干渉する予測が表示されている。

## 7.2.4 アメリカ航空局との連携

レーザービームをすばる望遠鏡から射出するとき、アメリカ連邦航空局 (FAA) にレーザービームの屋外使用に関する申請書 (FAA Form 7140-1、図 7.2.4.1) をレーザー照射設備の概念図、レーザー照射場所の地図、レーザー最大被曝許容量の計算シート、レーザー屋外使用および航空機監視の実績レポートなどとともに提出し、異議がないという手紙 (Letter of no objection、図 7.2.4.2) を事前に受け取る必要がある。この手続きは 2 年ごとに実施することを FAA から求められている。



図 7.2.4.1 レーザー屋外使用の申請書

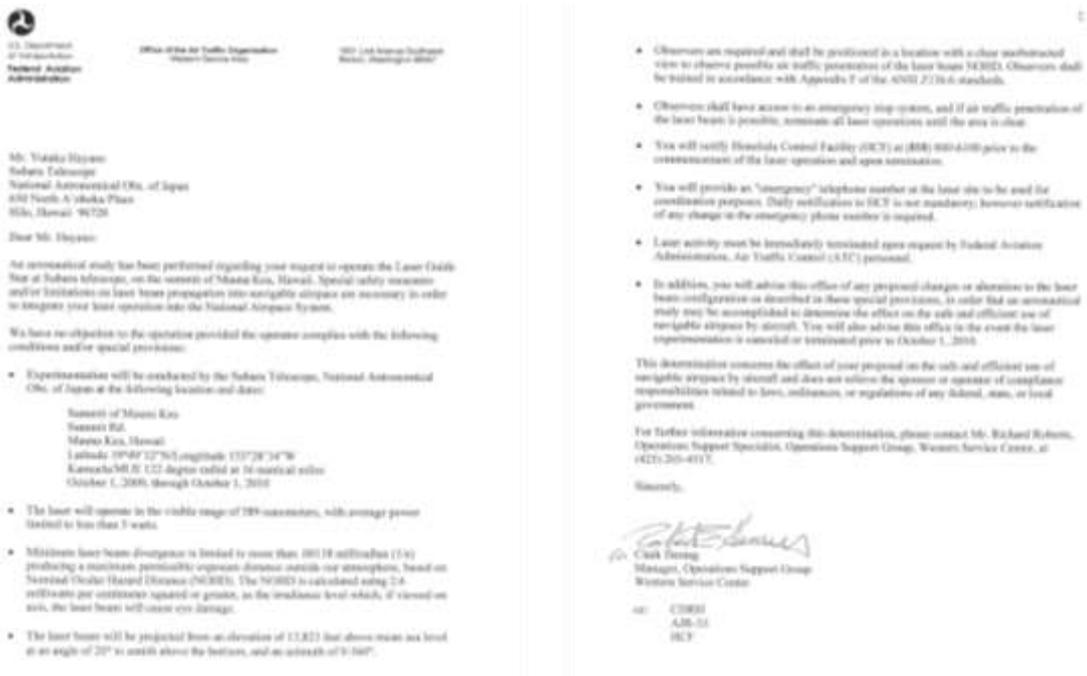


図 7.2.4.2 異議なし (Letter of no objection) という FAA からの返事

また、レーザーガイド星補償光学系の観測予定を四半期ごとにアメリカ連邦航空局ホノルル支所に電子メールで通知し、観測当日のレーザー射出 30 分前にアメリカ連邦航空局ホノルル支所に電話連絡をしている。

## 7.2.5 Laser Clearing House との連携

Laser Clearing House(LCH)はアメリカ軍の機関である。人工衛星のデータベースをもとに、レーザー照射可能な時間帯を計算するサービスを行っている。レーザーガイド星補償光学系を用いた観測を実施する 4 日前までに、レーザーを照射する天体 (赤経、赤緯) と固定した方向 (方位角と仰角) のリストをテキストファイルで提出する。LCH は観測日までにそれぞれの天体や固定方向に対して、レーザー照射可能時間帯のリストのテキストファイルを電子メールで送ってくる。天体や方向によってばらつきがあり、レーザーが照射できない時間は、10 秒程度が何度もあったり、20 分以上となることもある。このレーザー照射可能時間帯の制限が、観測効率や観測手順に大きく影響を与えている。さらに、観測開始直前に LCH から電話や電子メールですべての方向にレーザーを照射できない時間帯が追加で通知されることがある。短いときは数分が数回程度であるが、長いときは一晩すべてブロックされることがある。

この問題は MLOG 会議でも議論が開始され、LCH およびその関連機関に対し、レーザー照射のできない時間を削減できないかどうか問い合わせを開始している。

## 7.2.6 航空機の監視

アメリカ連邦航空局は、レーザーを屋外で使用するときには、レーダーシステムか人間による航空機監視を求めている。異議がないという手紙を受け取るためには、航空機の監視体制が整っていることを示さなければならない。これまで、航空機の監視体制はスポッターと呼ばれる臨時雇用者を利用してきた。一晩のレーザーガイド星補償光学系の観測につき、基本的に 5 名のスポッターを手配している。一人は運転手兼現場責任者、四人が二人ずつ組となり、1 時間交代ですばる望遠鏡のドームの東西で航空機を監視する。航空機とその位置はすべて記録用紙に書とめる。万が一レーザービームの近傍を航空機が通過する場合は、レーザーオペレータに報告し、緊急の場合はレーザ

ーシャッターを遮蔽する非常用ボタンを押すことになっている。

一方、スポッターの件費が膨大になることの懸念と、マウナケアでは航空機がレーザービーム付近を通過することは非常にまれであることから、人間による航空機監視の負荷を低減するよう理解もとめる動きが出てきた。Keck 望遠鏡が主導となり、アメリカ連邦航空局へのガイドラインを提示する G10T という委員会 (SAE、Society of Automotive Engineers の Laser Safety Hazards Committee) に積極的に働きかけ、ほとんどの委員をマウナケア山頂に招待し、レーザー運用の実際と航空機の飛来状況を視察してもらった。その努力が実り、2011 年 3 月に G10T が Performance Criteria for Laser Control Measures Used for Aviation Safety という文書をまとめた。Keck 望遠鏡と Gemini 望遠鏡はレーザーの射出方向によってはスポッター 1 人にする申請を行い、アメリカ連邦航空局はこの新しい文書に従って判断し、それを認めた。すばる望遠鏡もスポッター 1 人体制を模索しているが、十分な視界が確保できるような監視体制を実現するにはまだ時間がかかるであろう。

一方、航空機の監視システムとして、TBAD (Transponder Based Aircraft Detection) というシステムを Keck 望遠鏡を中心となり、Gemini 望遠鏡とすばる望遠鏡が協力して試験を進めている (図 7.2.6.1)。7 つのフラットアンテナのうち中央の 1 つを広視野の transponder 検出器として、そして 7 つすべてのアンテナを組み合わせて狭視野の transponder 検出器として用いる。この広い視野と狭い視野の信号強度比によって transponder を発している航空機の位置を決定する。現在 Keck 望遠鏡のワイメアオフィスの実験室で試験中である。またこの他、Gemini 望遠鏡が中心となって可視光による全天カメラの試験も進めている。これらの人に頼らないシステムを検証し実用化する努力も着々と進めている。



図 7.2.6.1 TBAD に使用されるアンテナ。

## 7.3 観測効率（オーバーヘッドなど）（美濃和）

補償光学を用いた観測では、通常の天体観測における望遠鏡の移動、天体導入、視野調整、積分時間調整などのオーバーヘッドに加え、波面補正のためのガイド星の導入、及び制御ループパラメーターの最適化などの補償光学特有のオーバーヘッドが必要になる。また、レーザーガイド星をガイド星に用いる場合には、これに加え、レーザーガイド星の出射方向の調整、ビームコリメーションの調整、Tip/Tilt ガイド星の導入、低次ループパラメーターの調整などの時間が余分に必要になる。以下に、自然ガイド星(NGS)モード、レーザーガイド星(LGS)モードに分けて、AO188の観測におけるオーバーヘッドについてまとめる。

### (1) NGSモード

NGSモードの観測では、通常10-15分のオーバーヘッドが必要になる。この中には、ガイド星の導入、ループパラメーターの最適化、AO補正後の天体の導入(視野調整)が含まれる。ループパラメーターとしては、可変形鏡に対するゲイン、振動鏡の振幅の2種類の値を変えて、波面センサー信号上の波面残差、可変鏡印加電圧の分散、観測装置上での星像サイズを見ながら最適な組み合わせを探す。明るい星をガイド星とする場合、波面センサー上で検出される光子数が十分であるため、波面残差を正しく測る事ができる。そのため、パラメーターのスキャンを自動で行う事が出来る。しかし、暗い星をガイド星として使う場合、光子数が十分ではなくノイズ(ダーク、背景光のショットノイズ)に埋もれてしまうため、波面残差は正しく測る事ができない。そのため、最適化を行うには観測装置上で星像サイズを確かめながら行う必要がある。そのため、明るい星に比べて、暗い星の方でオーバーヘッドが大きくなる。また、銀河の中心核などの広がった天体をガイド星として用いる場合も、パラメーターの調整(特に振動鏡の振幅)の自動化が行えず、点源に比べてオーバーヘッドが大きくなる。その他、観測天体から30"以上離れた星に対しては、観測装置の視野内にガイド星と観測天体を同時に入れる事ができないため、視野を振る必要があるため、余分なオーバーヘッドが必要になる。最適化のプロセスは、大気の状態が安定しており、明るさ、離角などのガイド星の性質が変わらなければ、一度最適パラメーターを決めた後は省略する事が出来る。以下に、ガイド星の種別毎に、導入と最適化に必要なオーバーヘッドをまとめる。

表 7.3.1: NGSモードで必要なオーバーヘッド

ガイド星	導入	最適化
明るい星 ( $R < 14$ )	3.0 分	5-10 分
暗い星 ( $R > 14$ )	3.0 分	10-15 分
広がった星 (銀河など)	3.0 分	10-15 分
30 秒角以上離れた星	6.0 分	5-10 分

### OLGSモード

LGSモードの観測では、観測夜の最初にレーザー光源の射出方向、及びコリメーションの調整をしなければならない。この調整は通常日没直後のトワイライトの時間帯にレーザーを打ち上げ、波面センサー内のカメラを用いて、射出方向の調整にはレーザーのレイリー散乱光を、コリメーションの調整にはレーザーガイド星のサイズを指標にして行う。この調整は、1晩の中で1-2回行う必要があり、1回あたり15分程度のオーバーヘッドが必要になる。この他、観測天体毎に、レーザーガイド星、及びTip/Tiltガイド星の導入、及びループパラメーターの最適化が必要になる。ガイド星の導入にはそれぞれのガイド星に対し3分程度(計6分)必要になる。ループパラメーターとしては、レーザーガイド星を用いる高次波面センサーに対しては、可変形鏡のゲイン、振動鏡の振幅、波面センサーTip/Tilt オフロードゲインの3種類、Tip/Tilt ガイド星を用いる低次波面センサーに対しては、Tip/Tilt モードとデフォーカス

モードをDMに戻すゲインの2種類の調整を行う。この調整に必要なオーバーヘッドは、気象条件によって大きく変わるが、通常5~15分程度必要になる。以下に、LGSモードで必要なオーバーヘッドをまとめる。

表 7.3.2:LGSモードで必要なオーバーヘッド

LGS 初期調整	15 分 (1晩で1、2回)
TTGS 導入	3 分
LGS 導入	3 分
最適化	5-15 分

LGSモードの観測の場合は、これらのオーバーヘッド以外に、レーザーの安全運用(7.2 参照)に必要な出射停止期間によるオーバーヘッドがある。

# 第八章 研究成果ハイライト

## 8.1 宇宙再電離

銀河形成史の観測的研究におけるすばる望遠鏡による高赤方偏移の銀河探査は、主焦点カメラの広視野機能とすばる研究チームの戦略的観測の実施により、大きな成果を挙げてきた。本研究代表者、家のグループが2006年9月にNature誌に発表した赤方偏移6.96、距離128.8億光年かなたのライマン $\alpha$ 輝線銀河 IOK-1の発見は、人類がその距離を正確に測定したものとしては2011年まで、世界記録となった。今回、本研究で新たな世界記録となる赤方偏移**7.215**の銀河(距離**129.1**億光年に相当)**SXDF-NB1006-2**を発見した。

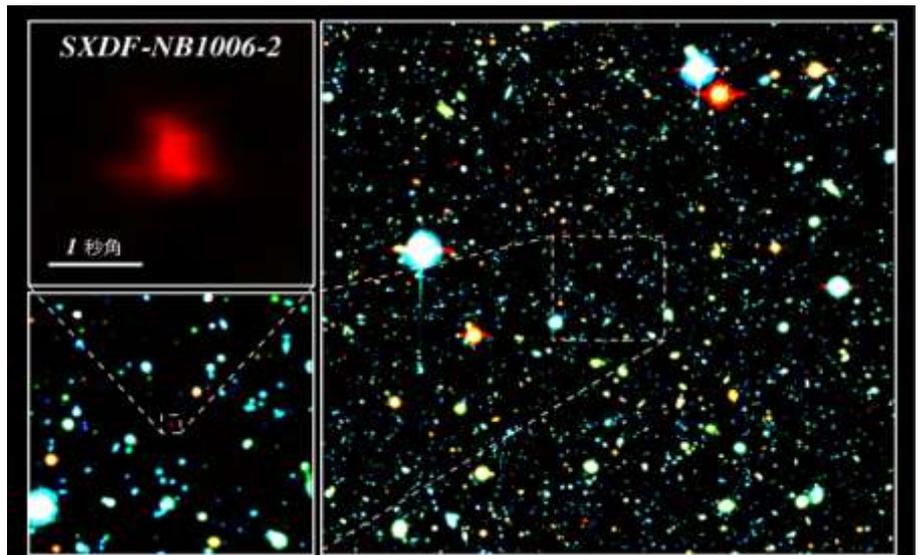


図 8.1.1 赤方偏移 7.215 (129.1 億年前) の銀河 SXDF-NB1006-2 (Shibuya et al 2012)

すばる望遠鏡チームは柏川を中心に「すばるディープフィールド探査計画」を遂行し、赤方偏移 4.8 (124.1 億年)、5.7 (125.9 億年)、6.6 (128.2 億年)の各時代について多数のライマン $\alpha$ 輝線銀河とライマンブレイク銀河を同定し、その統計データから、どのくらいの明るさの銀河がどれだけあるかを表す「光度関数」を求めることに成功し、赤方偏移 5.7 までの時代に比べて、赤方偏移 6.6 の時代には明るいライマン $\alpha$ 輝線銀河の数が少なかったという有意な兆候を発見した。

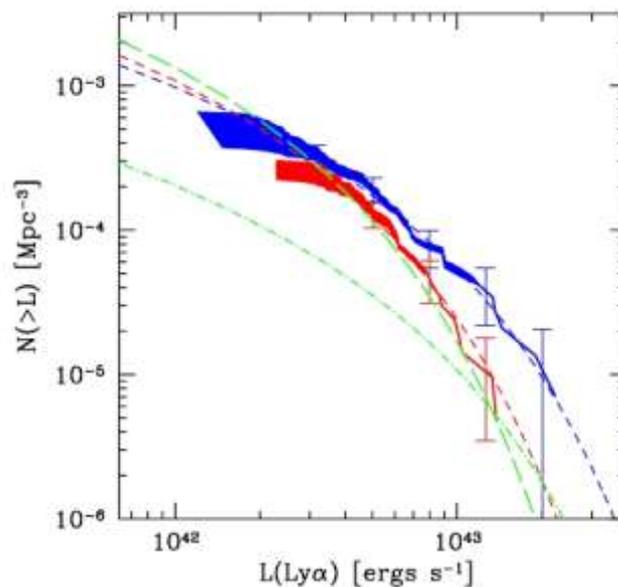


図 8.1.2 ライマン $\alpha$ 輝線銀河の光度関数。赤方偏移 5.7(青)に比べ赤方偏移(6.6)では明るい銀河が少ない。(Kashikawa et al. 2011)

この研究は基盤研究 (S) の研究期間中も継続発展させ、ライマン $\alpha$ 輝線銀河の光度関数に赤方偏移 5.7 から 7.0 の時代にかけて顕著な変化があったことが、一層明らかとなった(図 8.1.2)。この変化はライマン連続光成分では認められないため、観測される銀河数とその光度の変化は、銀河の成長によるのではなく、この時期に銀河間空間の

水素原子の電離状態に変化があり、赤方偏移 6.6 以上の時代には中性水素原子が残っていたため、ライマン  $\alpha$  光の透過がブロックされ、ライマン  $\alpha$  銀河が見えにくくなっていると解釈される。このことは、赤方偏移 1000 の時代に中性化した銀河間空間の中性水素の初代星からの紫外線による電離現象(宇宙再電離)が赤方偏移 7 の時代を挟んで進行していたことを物語っている(図 8.1.3)と考えられる。

すばる望遠鏡によるこの一連の研究は、世界的にも高く評価され、国内でも研究代表者の家正則が仁科記念賞(2008 年度)、東レ科学技術賞(2010 年度)、紫綬褒章(2011 年度)を得、研究協力者の柏川伸成も井上學術賞(2009 年度)を受賞した。その後、欧州のグループなどにより赤方偏移 7.0 を越す銀河も小数見つかりはじめているが、2012 年 6 月の時点でのトップはすばる望遠鏡による小野他の論文による 129.1 億光年の銀河となっている(図 8.1.4)。

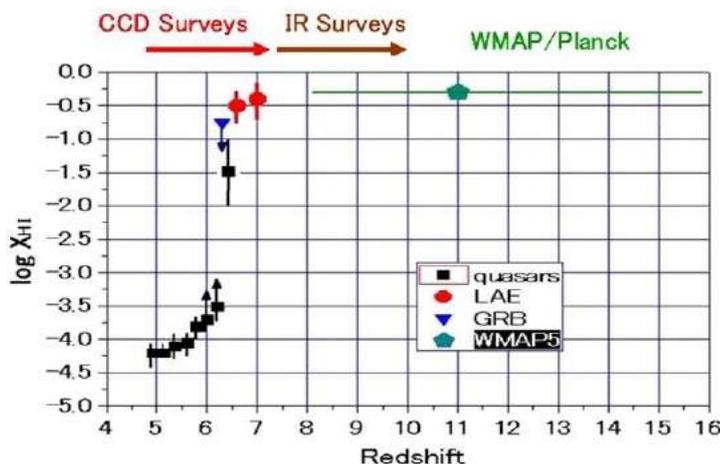


図 8.1.3 銀河間空間の水素原子の非電離率の変遷

Table 1: 最も遠い銀河ベストテン (2012 年 6 月 10 日)

順位	名前	座標	赤方偏移	億光年	論文	発表年月
1	SXDF-NB1006-2	J021856.5-051958.9	7.215	129.1	澁谷他	2012.6
2	GN-108036	in GOODS NORTH field	7.213	129.1	小野他	2012.1
3	BDF-3299	J222812.3-0350959.4	7.109	129.0	Vanzella 他	2010.12
4	A1703 <sub>z</sub> D6	J131501.0+515004	7.045	128.9	Schenker 他	2012.1
5	BDF-521	J222703.1-350707.7	7.008	128.9	Vanzella 他	2010.12
6	G2-1408	J132357.1+272448	6.972	128.8	Fontana 他	2010.12
7	IOK-1	J132359.8+272456	6.964	128.8	家他	2006.9
8	HUDF09_1596	J033303.8-275120	6.905	128.7	Schenker 他	2012.1
9	SDF46975	in Subaru Deep field	6.844	128.6	小野他	2012.1
10	NTTDF-6345	J120536.9-074522.3	6.701	128.4	Pentericci 他	2011.12

表 8.1.1 2012 年 6 月 10 日時点での遠方銀河のベストテン

## 8.2 重力レンズクエーサーの撮像

補償光学装置は従来の10倍の空間解像度での撮像観測を可能にするので、これまでハッブル宇宙望遠鏡の独断場であった重力レンズ現象の詳細な観測を、ハッブル宇宙望遠鏡の $8.2/2.4=3.4$ 倍の解像力で行うことを可能にした。重力現象の中でも、遠方の極めて明るい天体であるクエーサーの手前に偶然銀河や銀河団がある場合に、銀河や銀河団の重力場により、クエーサーからの光が曲げられて、複数の像が見える重力クエーサー現象の存在が知られている。図8.2.1はSDSSサーベイで発見されたそのような重力レンズ候補天体の一つSDSSJ1134+3115である。

補償光学による観測により、重力レンズ効果を受けて0.8秒角に分離して見える二つのクエーサー像が、明瞭に撮影できたばかりか、重力レンズ効果を起こした手前の銀河の姿が二つの像の間にはっきりと確認できた。これらの観測結果を、重力レンズ効果による光線変位のモデル計算と比較することにより、レンズ銀河の質量などを求めることができた。この手法は見えない暗黒物質の分布を暴き出す手法として、今後の拡張応用が期待される。

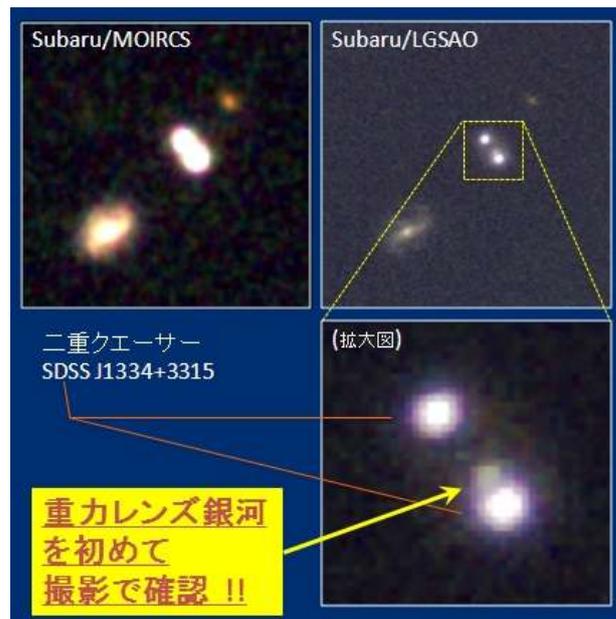


図 8.2.1 重力レンズクエーサーSDSS J1134+3115

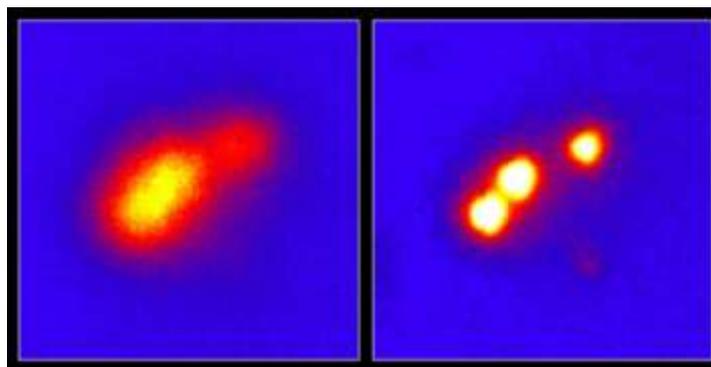


図 8.2.2 重力レンズクエーサーB1422+231

## 8.3 重力レンズクエーサーの分光

図 8.3.1 は重力レンズクエーサー B1422+231 の拡大画像である。重力レンズ効果で分離した二つのクエーサー像 A と B の光を補償光学系の高い空間分解能を活かして分光観測した。得られたスペクトルに見られる吸収線はクエーサーの手前にある超新星残骸によるものと考えられるが、異なる光路を通過した光(図 8.3.2)が被る吸収スペクトルに差異が認められる(図 8.3.3)。このことから、ガス雲の分布や運動に関する情報を引き出すことができる。

重要な結果は、このような手法によって、

- $z=3.54$  においてたったの 8pc のガス雲の空間構造を吸収線の違いから調べられたこと
- 吸収線からガス雲の運動速度や組成からこの吸収線系は Ia 型超新星残骸のシェルであると考えられること
- FeII のドップラー幅が大きいことから、図 8.3.2 のように FeII は MgII とは異なり、激しく擾乱を受けた超新星残骸から放出されたガスをトレースしていること

などが判明したことである(小林、濱野)。

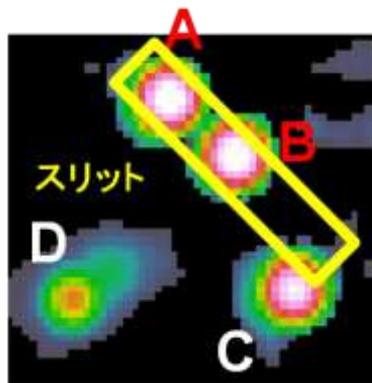


図 8.3.1 重力レンズクエーサー B1422+231

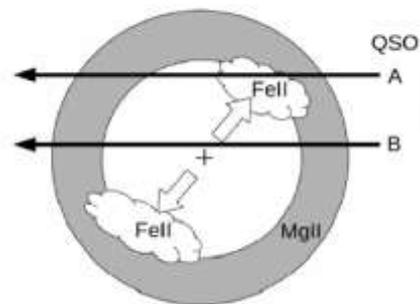


図 8.3.2 クエーサーからの光路 A と B が  $z=3.54$  の超新星残骸の異なる経路を通過していて、吸収線の輪郭の違いを生じている。

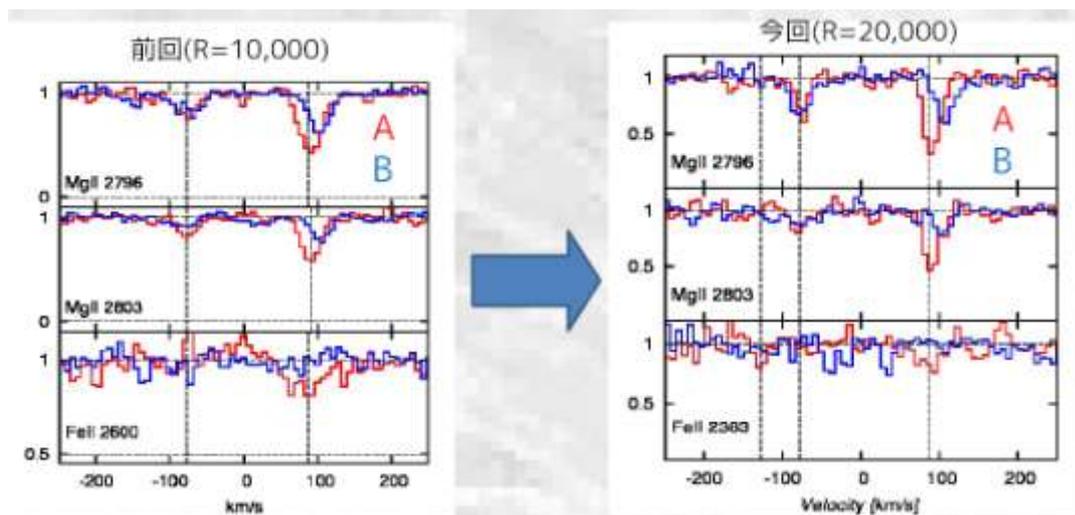


図 8.3.3 波長分解能 2 倍のスペクトルを得ることができ、吸収成分 A と B の速度差がより明確になった。

## 8.4 Ia 型超新星の後期近赤外線スペクトルサーベイ

Ia 型超新星は白色矮星に伴星からガスが流入し、チャンドラセカール質量に到達した際に起こす爆発であると考えられている。その絶対等級は経験的に一定であることが知られていて、遠方の Ia 型超新星の明るさを測定することによって宇宙の加速膨張が発見されたことは記憶に新しい。しかしながら、その爆発の詳細な物理過程はまだ明らかになっておらず、その解明が星物理だけでなく宇宙論にとっても重要な課題となっている。

そのためには、爆発により吹き飛んだ物質の中心部の物理状態を探る必要があるが、爆発直後は外層物質が濃密で見通すことができない。しかしながら爆発から 100 日以上経過すると、爆発に伴う膨張運動にしたがい密度が低下し、中心まで見通すことができるようになる。特に近赤外線での分光観測は鉄やコバルトなどの輝線を分離して、その輝線の形状や相対速度から爆発時の内部構造を探ることができるため有効である。実際にこれまでの観測から、その輝線の形状や視線速度に様々なバラエティがあり、Ia 型超新星といえども多様な爆発構造を持つことが明らかになってきた。

しかしながら、これら後期での明るさは H バンドで 20 等前後と非常に暗く、通常の分光観測は非常に時間が掛かる。そこで、補償光学を用いることによって星像を小さく絞り、実効的な観測時間を一桁近く減らすことが可能となる。実際に 2011 年度より観測を行ない 2012 年 4 月の時点で 3 天体のスペクトルを得ることに成功した。

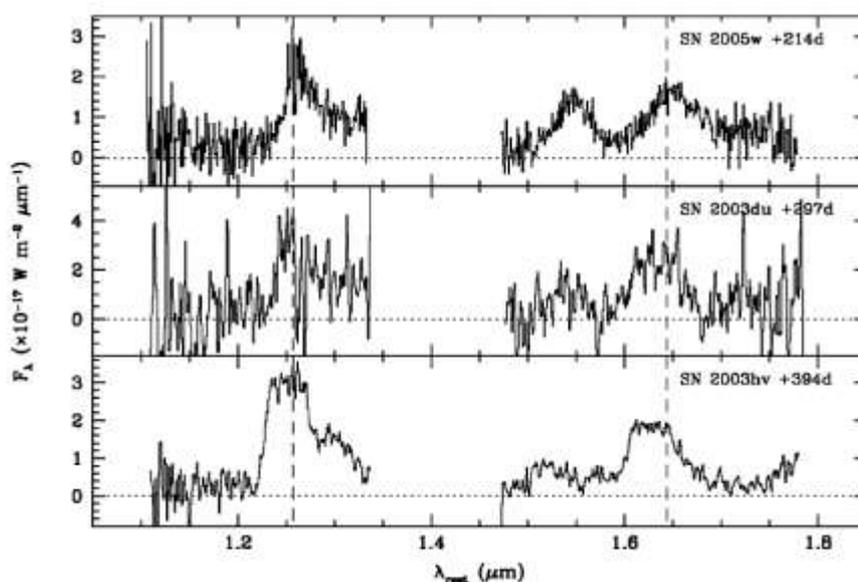


図 8.4.1 Ia 型超新星の後期スペクトルの例。尖った輝線（上）から上部が平らになったもの（下）まで様々な形状をしていることが分かる。(Motohara et al. 2006 から)

## 8.5 系外惑星

本基盤研究 (S) の研究テーマではないが、遠宇宙の観測と並んで現在最もその発展性と科学的意義から注目が集まっている太陽系外惑星の観測的研究にも、本基盤研究 (S) で開発完成した、すばる望遠鏡 188 素子補償光学系が大きな役割を果たしていることは、強調しておきたい。

188 素子補償光学系により得られる回折限界の天体像は、太陽系外惑星の探査観測や撮影には不可欠なものとなっているが、これに母星のまぶしい光を消して、惑星を見易くするコロナグラフ撮像機能を備えたカメラ (HICIAO) が、別途科研費(研究代表者:田村元秀氏)により開発され、補償光学系の観測装置群の重要な一員となっている。

図 8.5.1 は太陽とほぼ同じ質量と温度を持つ G 型星 GJ758 を補償光学系と HICIAO で撮影して発見された惑星 B の画像である。また、図 8.5.2 は HR4796A の残骸円盤の塵のリングがくっきりと映し出されている。

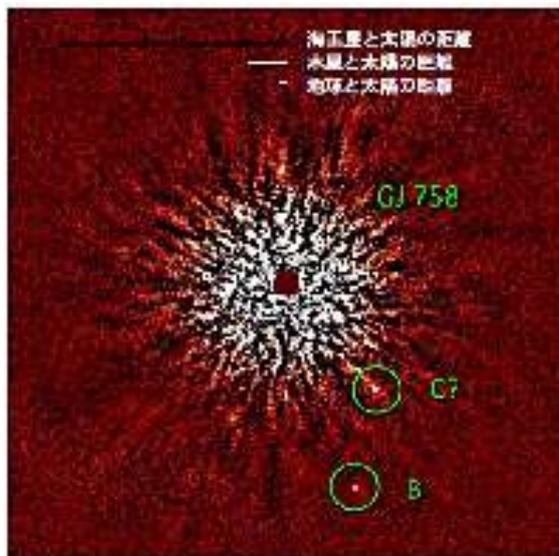


図 8.5.1 太陽類似星 GJ758 の惑星 B の撮影に成功

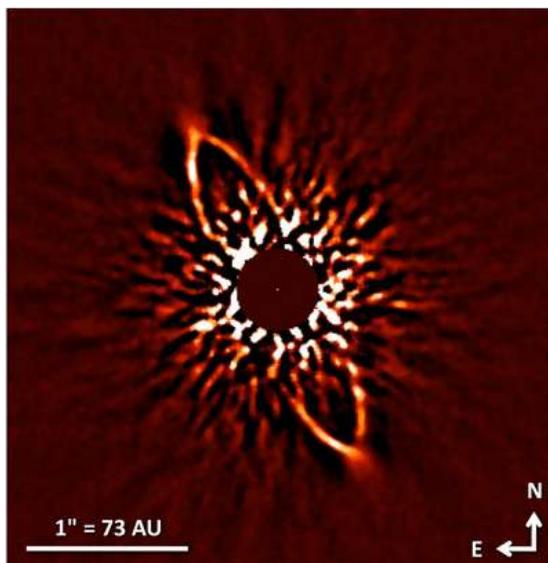


図 8.5.2 HR4796A の周囲のダストリング

# 8.6 次世代装置の検討

## 8.6.1 すばる望遠鏡の次世代補償光学構想

すばる望遠鏡の今後の戦略としては、そのユニークな広視野観測機能を活かした Hyper SuprimeCam や Prime Focus Spectrograph によるサーベイ的観測を暗夜に重点配備し、明夜については次世代補償光学系と赤外観測装置を組み合わせた観測で特徴を出すことが構想されている。このような中、補償光学チームが次に何をめざすべきかについて、本研究チームを軸に 2011 年 9 月には大阪にてワークショップを開催した。次世代の補償光学システムとしては、世界的にもいろいろなアプローチが構想されている。具体例としては

- 1) Ground Layer Adaptive Optics(GLAO)：大型可変副鏡により比較的広い視野に渡り、シーイングを一定程度改善する (図 8.6.1)
- 2) Multi Object Adaptive Optics(MOAO)：小型波面補正モジュールで多天体について補償光学を実現する
- 3) Extreme Adaptive Optics(ExAO)：一天体ながら究極の解像力を目指す
- 4) Multi-Conjugate Adaptive Optics(MCAO)：複数の大気擾乱層に対応する (図 8.6.2)
- 5) Laser Tomography Adaptive Optics(LTAO)：有限距離のレーザーガイド星で把握できる領域が限られていることに対処する

などの可能性が議論された(図 8.6.3)。今後の議論によるが、方向性としては汎用性の高い 1) への期待が多かった。

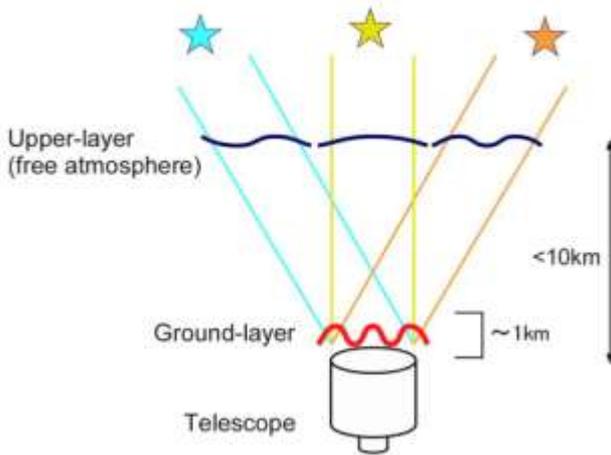


図 8.6.1 地表層補償光学と断層写真法による視野拡大

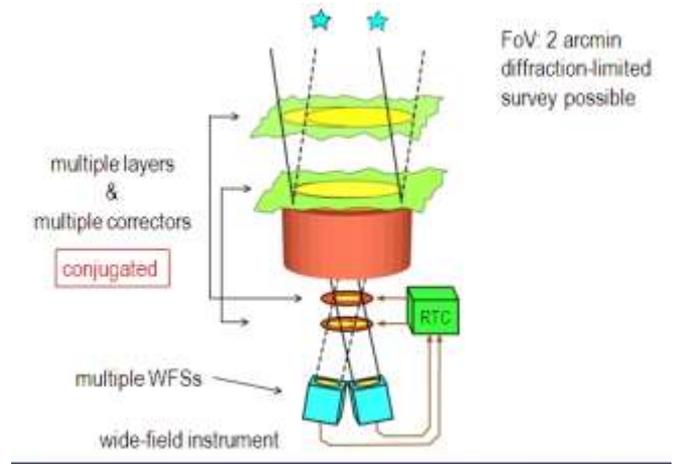


図 8.6.2 多層共役補償光学の概念

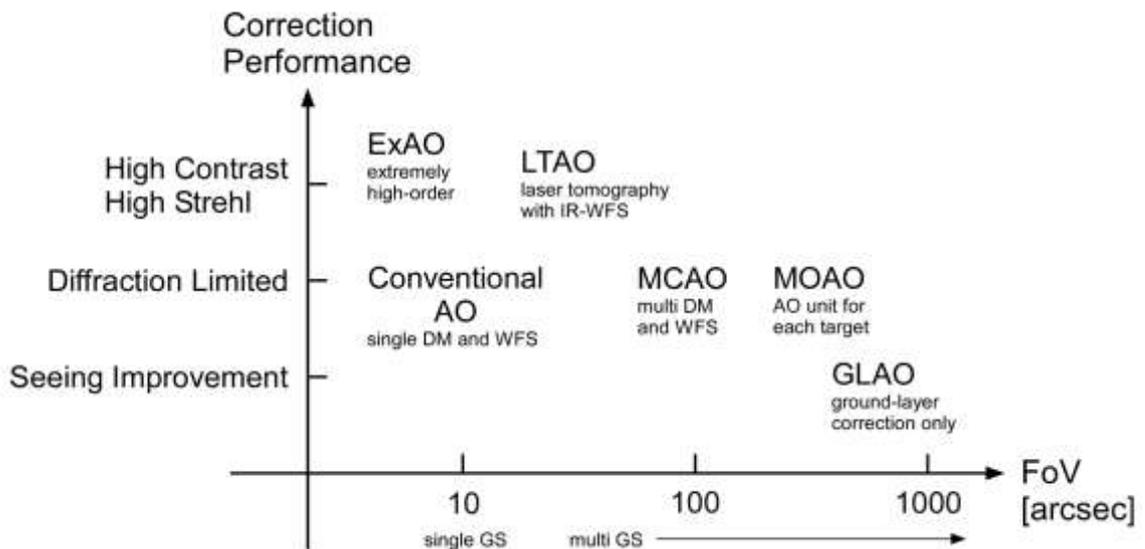


図 8.6.3 さまざまな補償光学 13

## 8.6.2 30m 望遠鏡構想

近赤外線での8 mすばる望遠鏡の回折限界撮像が本基盤研究 (S) で実現し、口径 10mのケック望遠鏡の補償光学装置による観測も軌道に乗り始めたことにより、現在日本、カナダ、アメリカ、中国、インドの五カ国国際科学協力事業として 2020 年代初めの完成を期して検討が進められている 30m 望遠鏡 (TMT 計画: 図 8.6.4) においても、補償光学技術の高度化とその機能をフルに活かした観測装置 (IRIS など) の具体的検討が始まっている。



図 8.6.4 30m望遠鏡 (TMT) 完成予想図

30m 望遠鏡 TMT では、補償光学を備えると空間解像力は K バンドで 15 ミリ秒角となり、アストロメトリの制度としては 0.5 ミリ秒角を実現することができると見込まれる(図 8.6.5)。これは既に 8 m級望遠鏡の補償光学観測で銀河系中心領域の恒星の軌道運動を捕捉する観測などで一部始まっている、アストロメトリ天文学に大きな可能性を拓くものであると期待されており、国立天文台では TMT に搭載する回折限界撮像装置 IRIS の撮像光学系の検討を進めている (図 8.6.6)。

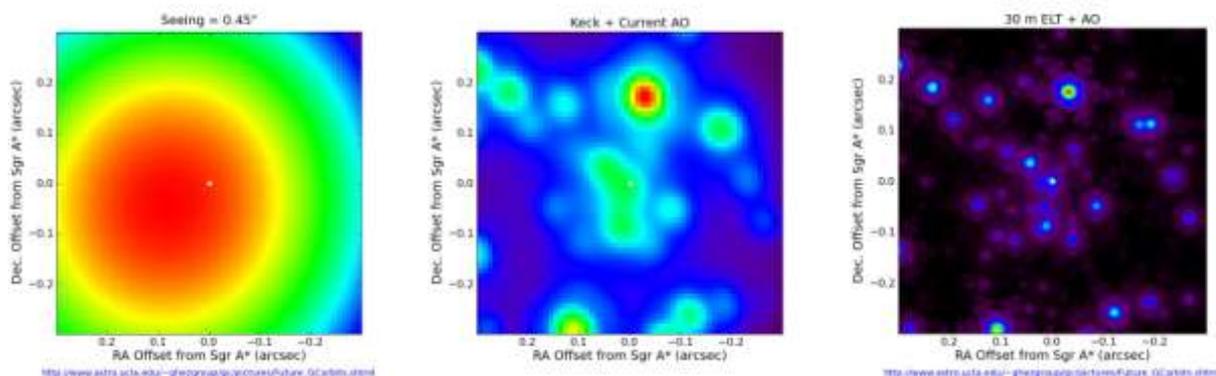


図 8.6.5 (左)シーイング 0.45 秒角、(中)ケック望遠鏡補償光学による分解能、(右)30m望遠鏡 TMT 補償光学による画像(予測図)



図 8.6.6 TMT 回折限界観測装置 IRIS

# 第九章 社会への成果還元

## 9.1 受賞等

紫綬褒章 2011 年度 家正則 (2011. 11. 15)

東レ科学技術賞 2011 年度 家 正則、「初期宇宙史の観測的研究とレーザーガイド星補償光学装置の開発」 (2011. 5. 18)

日本天文学会 2010 年度欧文研究報告論文賞 嶋作一大ほか、「Lyman-alpha Emitters at  $z=5.7$  in the Subaru Deep Field」 (2011. 3. 17)

文部科学大臣表彰 2010 年研究部門： 家 正則、高見英樹、早野裕「望遠鏡の視力を高めるレーザーガイド星補償光学系の研究」 (2010. 4. 13)

井上學術賞 柏川伸成 「すばる深宇宙探査による銀河形成史の研究 (Formation history of galaxies by Subaru Deep Field Survey)」 (2010. 2. 4)

仁科記念財団 2008 年仁科記念賞： 家 正則、「すばる望遠鏡による初期宇宙の観測」 (2008. 12. 5)

Outstanding Employee of the year 2011: 美濃和陽典、大屋真、服部雅之、ハワイ大学研究公社 RCUH (2012. 2. 24)

自然科学研究機構長若手表彰 早野裕 (2012. 6. 10 予定)

## 9.2 新聞記事

- 34) 紫綬褒章、日経新聞、2011年11月2日。紫綬褒章受章者、産経新聞、2011年11月2日
- 33) 秋の褒章 698人23団体、紫綬褒章の受章者、毎日新聞、2011年11月2日
- 32) 紫綬褒章受賞者 読売新聞、2011年11月2日、東京新聞、2011年11月2日
- 31) 秋の褒章 698人23団体、紫綬褒章の受章者、朝日新聞、2011年11月2日
- 30) 「紫綬褒章」自然科学系11氏の業績、科学新聞、2011年11月4日
- 29) 秋の褒章 都内77人3団体、最遠の銀河発見、読売新聞、2011年11月2日
- 28) 「132億歳」最古の銀河、読売新聞、2011年1月27日
- 27) 銀河の年齢 どう調べるの?、産経新聞、2010年11月14日
- 26) 最も遠い銀河 131億光年先 欧州の研究チーム発見、読売新聞、2010年10月22日
- 25) 最新の宇宙探査学ぶ 赤羽ホール、北国新聞、2010年9月26日
- 24) 宇宙誕生の秘密を探る:巨大化する望遠鏡、読売新聞、2010年7月18日
- 23) TOKYO ホームページふるさと 国立天文台教授家正則さん 大阪府吹田市、読売新聞、2010年6月15日
- 22) 平成22年度科学技術分野の文部科学大臣表彰 望遠鏡の視力を高めるレーザーガイド星補償光学系の研究 家正則・高見英樹・早野裕、科学新聞、2010年4月16日
- 21) 平成22年度科学技術分野の文部科学大臣表彰科学技術賞・研究部門 家正則 読売新聞、2010年4月6日
- 20) ひと 次世代巨大望遠鏡で宇宙最初の星と第二の地球を探す 家正則さん、しんぶん赤旗、2010年1月15日
- 19) 30メートル次世代望遠鏡計画 宇宙の夜明け、見える?!、しんぶん赤旗、2010年1月13日
- 18) 宇宙は近くなった 最古銀河とらえた技術、読売新聞、2009年10月23日
- 17) 宇宙の果ても見える? 口径30メートルモンスター望遠鏡、朝日新聞、2009年9月7日
- 16) すばる望遠鏡10年 遠方宇宙 研究世界をリード、読売新聞、2009年9月6日
- 15) すばる望遠鏡による初期宇宙探査の研究、科研費NEWS、2009 Vol.1. p.25
- 14) 次世代映す望遠鏡建設、産経新聞、2009年7月23日
- 13) 広い撮影視野 効率よく銀河探索、毎日新聞、2009年1月25日
- 12) 宇宙の謎に迫る すばる望遠鏡、北日本新聞、2009年1月5日
- 11) 宇宙の起源に日本の目 すばる望遠鏡観測10年、岩手新聞、2009年1月4日
- 10) 宇宙の起源探る目 すばる望遠鏡観測10年、下野新聞、2009年1月4日
- 9) 人の世界観変えた、毎日新聞、2009年1月1日
- 8) ハッブル後継「暗黒」に迫る、日本経済新聞、2008年12月21日
- 7) 国立天文台の家氏らに仁科賞、日経産業新聞、2008年11月14日
- 6) 仁科記念賞 家・上田・早野氏が受賞、日刊工業新聞、2008年11月14日  
仁科記念賞に家氏ら3氏 日本経済新聞、2008年11月14日
- 5) 家教授ら3人に仁科記念賞、読売新聞、2008年11月14日  
家教授らに仁科記念賞 朝日新聞、2008年11月14日
- 4) わかるかな? 山頂で困ること、読売新聞、2007年11月26日
- 3) わかるかな? すばるの世界一、読売新聞、2007年11月19日
- 2) 最遠銀河の観測報告、中日新聞、2007年9月30日
- 1) 望遠鏡、近くの星に照準、日本経済新聞、2007年9月16日

## 9.3 一般講演・学術講演・TV・ラジオ

- 「すばる望遠鏡・補償光学・次世代超大型望遠鏡」、東京六稜会、2011年10月19日
- 「すばる望遠鏡・宇宙の夜明け・補償光学・次世代超大型望遠鏡」、NHK ラジオ深夜便 2011年8月15-18日、各23時35分より
- 「次世代超大型望遠鏡」、NHK 教育放送 サイエンスゼロ 2011年7月28日18時25分(再放送)
- 「次世代超大型望遠鏡」、NHK 教育放送 サイエンスゼロ 2011年7月22日24時(23日0時)
- 「すばる望遠鏡・補償光学・次世代超大型望遠鏡」、宇宙線研究所談話会、2011年6月8日
- 「すばる望遠鏡で見る宇宙」 もっと知りたい! 第2日曜日は天文・宇宙のトピラ、タイムドーム明石、中央区、2011年4月10日
- 「宇宙のギネス記録競争」 ふれあい天文講座、石川県小松市中海小、2011年3月1日
- 「レーザーガイド補償光学と次世代超大型望遠鏡」 電気通信大学、調布市 2011年1月9日
- 「すばる望遠鏡の成果と次世代望遠鏡」 東京大学エグゼクティブ・マネジメント・プログラム、国立天文台、2010年12月23日
- 「宇宙のギネス記録競争」 ふれあい天文講座、茨城県つくば市立竹園東中学校 2010年12月2日
- 「宇宙のギネス記録競争」 ふれあい天文講座、静岡県磐田市神明中学校、2010年11月25日
- 「30m 望遠鏡TMTができたら・・・」すばる望遠鏡公開講演会、慶応大学藤原洋記念ホール 2010年11月21日
- 「すばるで見る宇宙の一番星」 金沢市民講演会、北国新聞赤羽ホール、2010年9月25日
- 「すばる望遠鏡の成果から次世代TMTへー天文学と高エネルギー物理の接点ー」 高エネルギー研究機構、金茶会 2010年9月15日
- 「望遠鏡の視力を改善する補償光学」 眼光学学会年会、横浜パシフィコ 2010年9月4日
- 「超大型望遠鏡TMT」 日本光学会、東大生産研、2010年7月9日
- 「超大型望遠鏡で見る宇宙」 三鷹アストロパブ、2010年5月15日
- 「巨大望遠鏡で宇宙の一番星を見る」 名古屋サイエンスカフェ・ガリレオ・ガリレイ、2010年3月28日
- 「巨大望遠鏡で宇宙の一番星を見る」 宗像ユリックス、2010年3月27日
- 「巨大望遠鏡で宇宙の一番星を見る」 電力館科学ゼミナール、渋谷電力館 2010年3月13日
- 「すばる望遠鏡の成果と次世代望遠鏡」 東京大学エグゼクティブ・マネジメント・プログラム、国立天文台、2009年12月23日
- 「最遠銀河、補償光学、次世代望遠鏡」 平成基礎科学財団、静岡文化芸術大学、2009年12月20日
- 「巨大望遠鏡で見る一番星」、宙博 2009、東京国際フォーラム、2009年12月5日
- 「最遠銀河、補償光学、次世代望遠鏡」、合同フォーラム「未来ある人類社会の構築」、学術総合センター、2009年11月16日
- 「すばる望遠鏡から30m望遠鏡TMTへーボケを直して最初の銀河を見る」、国立天文台特別公開日記念講演、2009年10月24日
- 「最遠銀河、補償光学、次世代望遠鏡」 物理学教室講演会、大阪大学、2009年10月20日
- 「第一世代銀河の探査」最新天文学普及WS、岡山県遙照山ホテル、2009年10月10日
- 「最遠銀河、補償光学、次世代望遠鏡」すばる10周年記念シンポ、学術総合センター、2009年10月5日
- 「すばる望遠鏡で見る宇宙の果て」特別企画公開、岡山天体物理観測所、2009年8月29日
- 「暗黒宇宙の夜明け」日本宇宙フォーラム、広島国際会議場、2009年7月4日
- 「可視・赤外天文の現状と将来：スペースへの期待」スペース天文学の将来シンポジウム、京都大学、2009年6

月 20 日

- 「すばる望遠鏡で見る宇宙の果て」月光天文台講演会、月光天文台、2009年5月16日
- 「すばる望遠鏡で見る宇宙史」スーパーサイエンスハイスクール講義、埼玉県立川越高校、2009年5月11日
- 「すばる望遠鏡で見る宇宙の果て」湘南レクチャー、総合研究大学院大学、2009年5月4日
- 「宇宙史の暗黒時代に迫るー最遠銀河の発見、レーザーガイド補償光学、次世代望遠鏡ー」東大物理セミナー、東大、2008年12月19日
- 「宇宙暗黒時代の夜明けーすばる望遠鏡が探る超遠方銀河ー」、第6回自然科学研究機構シンポジウム、「宇宙究極の謎ー暗黒時代、暗黒物質、暗黒エネルギーー」、東京国際フォーラム、2008年9月23日

# 第十章 論文リスト

2012年 (2012年5月6日付判明分)

1. ApJ, 750, 161- 176 (2012).  
Dong, R., Rafikov, R., Zhu, Z.; Hartmann, L.; Whitney, B.; Brandt, T.; Muto, T.; Hashimoto, J.; Grady, C.; Follette, K.; Kuzuhara, M.; Tanii, R.; Itoh, Y.; Thalmann, C.; Wisniewski, J.; Mayama, S.; Janson, M.; Abe, L.; Brandner, W.; Carson, J.; Egner, S.; Feldt, M.; Goto, M.; Guyon, O.; **Hayano, Y.**; Hayashi, M.; Hayashi, S.; Henning, T.; Hodapp, K. W.; Honda, M.; Inutsuka, S.; Ishii, M.; **Iye, M.**; Kandori, R.; Knapp, G. R.; Kudo, T.; Kusakabe, N.; Matsuo, T.; McElwain, M. W.; Miyama, S.; Morino, J.-I.; Moro-Martin, A.; Nishimura, T.; Pyo, T.-S.; Suto, H.; Suzuki, R.; Takami, M.; Takato, N.; Terada, H.; Tomono, D.; Turner, E. L.; Watanabe, M.; Yamada, T.; **Takami, H.**; Usuda, T.; Tamura, M.  
*The Missing Cavities in the SEEDS Polarized Scattered Light Images of Transitional Protoplanetary Disks: A Generic Disk Model*
2. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Online Early, 7p (2012)  
Ota, K. **Iye, M.**  
*Subaru FOCAS survey of  $z=7-7.1$  Ly $\alpha$  emitters: a test for  $z \geq 7$  Ly $\alpha$  photometric luminosity functions*
3. 2012arXiv1204.3234O  
Ota, K., Richard, J., **Iye, M.**, Shibuya, T., Egami, E., **Kashikawa, N.**  
*A Search for  $z=7.3$  Ly $\alpha$  Emitters behind Gravitationally Lensing Clusters*
4. ApJ 751, 11- 19 (2012)  
Shibuya, T., **Kashikawa, N.**, Ota, K., **Iye, M.**, Ouchi, M., Furusawa, H., Shimasaku, K., Hattori, T.  
*The First Systematic Survey for Lyman Alpha Emitters at  $z=7.3$  with Red-sensitive Subaru/Suprime-Cam*
5. 2012arXiv1204.1165T  
Tadaki, K., Kodama, T., Ota, K., Hayashi, M., Koyama, Y., Papovich, C., Brodwin, M., Tanaka, M., **Iye, M.**  
*A large scale structure traced by [OII] emitters hosting a distant cluster at  $z=1.62$*
6. ApJ, 748, L22 (2012)  
Muto, T.; Grady, C. A.; Hashimoto, J.; Fukagawa, M.; Hornbeck, J. B.; Sitko, M.; Russell, R.; Werren, C.; Curé, M.; Currie, T.; Ohashi, N.; Okamoto, Y.; Momose, M.; Honda, M.; Inutsuka, S.; Takeuchi, T.; Dong, R.; Abe, L.; Brandner, W.; Brandt, T.; Carson, J.; Egner, S.; Feldt, M.; Fukue, T.; Goto, M.; Guyon, O.; **Hayano, Y.**; Hayashi, M.; Hayashi, S.; Henning, T.; Hodapp, K. W.; Ishii, M.; **Iye, M.**; Janson, M.; Kandori, R.; Knapp, G. R.; Kudo, T.; Kusakabe, N.; Kuzuhara, M.; Matsuo, T.; Mayama, S.; McElwain, M. W.; Miyama, S.; Morino, J.-I.; Moro-Martin, A.; Nishimura, T.; Pyo, T.-S.; Serabyn, E.; Suto, H.; Suzuki, R.; Takami, M.; Takato, N.; Terada, H.; Thalmann, C.; Tomono, D.; Turner, E. L.; Watanabe, M.; Wisniewski, J. P.; Yamada, T.; **Takami, H.**; Usuda, T.; Tamura, M.  
*Discovery of Small-scale Spiral Structures in the Disk of SAO 206462 (HD 135344B): Implications for the Physical State of the Disk from Spiral Density Wave Theory*

7. ApJ, 747, L16 (2012).  
Ly, C., Malkan, M.A., **Kashikawa, N.**, Ota, K., Shimasaku, K., **Iye, M.**, Currie, T.  
*Dust Attenuation and H $\alpha$  Star Formation Rates of  $z \sim 0.5$  Galaxies*
8. 2012arXiv1202.6082I  
Ito, M., **Hayano, Y.**, Saito, Y., **Takami, H.**, Saito, N., Akagawa, K., **Iye, M.**  
*Suppression of Self-Phase Modulation in a Laser Transfer System using Optical Fiber on the Subaru Telescope*
9. 2012ApJ.744.89H  
Hibon, P.; **Kashikawa, N.**; Willott, C.; **Iye, M.**; Shibuya, T.  
*Search for  $z \sim 7$  Ly $\alpha$  Emitters with the Suprime-Cam at the Subaru Telescope*

## 2011 年

1. 2011ApJ.75.L.6T  
Thalmann, C.; Janson, M.; Buenzli, E.; Brandt, T. D.; Wisniewski, J. P.; Moro-Martin, A.; Usuda, T.; Schneider, G.; Carson, J.; McElwain, M. W.; and 41 coauthors  
*Images of the Extended Outer Regions of the Debris Ring around HR 4796 A*
2. 2011PJAB.87.575I  
**Iye, Masanori**  
*Subaru studies of the cosmic dawn*
3. 2011ApJ.738.30R  
Rusu, Cristian E.; Oguri, Masamune; Inada, Naohisa; Kayo, Issha; **Iye, Masanori**; **Hayano, Yutaka**; **Oya, Shin**; **Hattori, Masayuki**; **Saito, Yoshihiko**; **Ito, Meguru**; and 5 coauthors  
*SDSS J133401.39+331535.: A New Subarcsecond Gravitationally Lensed Quasar*
4. 2011ApJ.734.119K  
**Kashikawa, Nobunari**; Shimasaku, Kazuhiro; Matsuda, Yuichi; Egami, Eiichi; Jiang, Linhua; Nagao, Tohru; Ouchi, Masami; Malkan, Matthew A.; **Hattori, Takashi**; Ota, Kazuaki; and 9 coauthors  
*Completing the Census of Ly $\alpha$  Emitters at the Reionization Epoch*
5. 2011PASJ.6.3S.613E  
Ebizuka, Noboru; Kawabata, Koji S.; Oka, Keiko; Yamada, Akiko; Kashiwagi, Masako; Kodate, Kashiko; Hattori, Takashi; Kashikawa, Nobunari; **Iye, Masanori**  
*Grisms Developed for FOCAS*
6. 2011PASJ.6.3S.605E  
Ebizuka, Noboru; Ichiyama, Kotaro; Yamada, Toru; Tokoku, Chihiro; Onodera, Masato; Hanesaka, Mai; Kodate, Kashiko; Katsuno Uchimoto, Yuka; Maruyama, Miyoko; Shimasaku, Kazuhiro; and 5 coauthors  
*Cryogenic Volume-Phase Holographic Grisms for MOIRCS*
7. 2011ApJ.728.85J  
Janson, M.; Carson, J.; Thalmann, C.; McElwain, M. W.; Goto, M.; Crepp, J.; Wisniewski, J.; Abe, L.; Brandner, W.; Burrows, A.; and 39 coauthors  
*Near-infrared Multi-band Photometry of the Substellar Companion GJ 758 B*

- 8 2011AAS.21733513L  
Ly, Chun; Malkan, M. A.; Ross, N.; Ota, K.; Kashikawa, N.; **Iye**, M.  
*The Stellar Population Completeness of Narrow-band Emission-line Surveys*
- 9 2011Icar.214.21H  
Hong, Peng K.; Sugita, Seiji; Okamura, Natsuko; Sekine, Yasuhito; Terada, Hiroshi; Takatoh, Naruhisa; **Hayano**, Yutaka; Fuse, Tetsuharu; Pyo, Tae-Soo; Kawakita, Hideyo; and 15 coauthors  
*A ground-based observation of the LCROSS impact events using the Subaru Telescope*
- 10 2011AdSpR.48.323E  
Enya, K.; Kotani, T.; Haze, K.; Aono, K.; Nakagawa, T.; Matsuhara, H.; Kataza, H.; Wada, T.; Kawada, M.; Fujiwara, K.; and 32 coauthors  
*The SPICA coronagraphic instrument (SCI) for the study of exoplanets*
- 11 2011SSRv.tmp.114H  
Heldmann, Jennifer L.; Colaprete, Anthony; Wooden, Diane H.; Ackermann, Robert F.; Acton, David D.; Backus, Peter R.; Bailey, Vanessa; Ball, Jesse G.; Barott, William C.; Blair, Samantha K.; and 77 coauthors  
*LCROSS (Lunar Crater Observation and Sensing Satellite) Observation Campaign: Strategies, Implementation, and Lessons Learned*
- 12 2011ApJ.729L.17H  
Hashimoto, J.; Tamura, M.; Muto, T.; Kudo, T.; Fukagawa, M.; Fukue, T.; Goto, M.; Grady, C. A.; Henning, T.; Hodapp, K.; and 42 coauthors  
*Direct Imaging of Fine Structures in Giant Planet-forming Regions of the Protoplanetary Disk Around AB Aurigae*

## 2010 年

- 1 2010ApJ.723.869O  
Ouchi, Masami; Shimasaku, Kazuhiro; Furusawa, Hisanori; Saito, Tomoki; Yoshida, Makiko; Akiyama, Masayuki; Ono, Yoshiaki; Yamada, Toru; Ota, Kazuaki; Kashikawa, Nobunari; and 5 coauthors  
*Statistics of 207 Ly $\alpha$  Emitters at a Redshift Near 7: Constraints on Reionization and Galaxy Formation Models*
- 2 2010PASJ.62.1167O  
Ota, Kazuaki; Ly, Chun; Malkan, Matthew A.; Motohara, Kentaro; Hayashi, Masao; Shimasaku, Kazuhiro; Morokuma, Tomoki; **Iye**, Masanori; Kashikawa, Nobunari; Hattori, Takashi;  
*Spitzer Space Telescope Constraint on the Stellar Mass of a  $z = 6.96$  Ly $\alpha$  Emitter*
- 3 2010ApJ.722.803O  
Ota, Kazuaki; **Iye**, Masanori; Kashikawa, Nobunari; Shimasaku, Kazuhiro; Ouchi, Masami; Totani, Tomonori; Kobayashi, Masakazu A. R.; Nagashima, Masahiro; Harayama, Atsushi; Kodaka, Natsuki; and 4 coauthors  
*Ly $\alpha$  Emitters at  $z = 7$  in the Subaru/XMM-Newton Deep Survey Field: Photometric Candidates and Luminosity Functions*

- 4 2010AIPC.1279.5.3T  
Tanaka, Masaomi; Kawabata, Koji S.; Hattori, Takashi; Aoki, Kentaro; **Iye**, Masanori; Maeda, Keiichi; Mazzali, Paolo A.; Nomoto, Ken'ichi; Pian, Elena; Sasaki, Toshiyuki; Yamanaka, Masayuki  
*Multi-Dimensional Explosion Geometry of Supernovae: Spectropolarimetric Study with Subaru*
- 5 2010ApJ.719.378H  
Hashimoto, T.; Ohta, K.; Aoki, K.; Tanaka, I.; Yabe, K.; Kawai, N.; Aoki, W.; Furusawa, H.; Hattori, T.; **Iye**, M.; and 23 coauthors  
*"Dark" GRB 080325 in a Dusty Massive Galaxy at  $z \sim 2$*
- 6 2010SPIE.7739E.77A  
Akitaya, Hiroshi; Yamashita, Takuya; Ohshima, Norio; **Iye**, Masanori; Maihara, Toshinori; Tokoro, Hitoshi; Takahashi, Keisuke  
*Studies on evaluating and removing subsurface damage on the ground surface of CLEARCERAM-Z HS*
- 7 2010SPIE.7736E.183W  
**Watanabe**, Makoto; Ito, Meguro; **Oya**, Shin; **Hayano**, Yutaka; Minowa, Yosuke; **Hattori**, Masayuki; **Saito**, Yoshihiko; Egner, Sebastian; **Takami**, Hideki; **Iye**, Masanori; and 4 coauthors  
*Visible low-order wavefront sensor for the Subaru LGS/AO system*
- 8 2010SPIE.7736E.171S  
**Saito**, Yoshihiko; **Hayano**, Yutaka; Ito, Meguro; Minowa, Yosuke; Egner, Sebastian; **Oya**, Shin; **Watanabe**, Makoto; **Hattori**, Masayuki; Garrel, Vincent; Akagawa, Kazuyuki; and 9 coauthors  
*The performance of the laser guide star system for the Subaru Telescope*
- 9 2010SPIE.7736E.169I  
Ito, M.; **Hayano**, Y.; **Saito**, Y.; **Takami**, H.; **Iye**, M.; **Hattori**, M.; **Oya**, S.; **Watanabe**, M.; Akagawa, K.; Colley, S. A.; and 2 coauthors  
*The characteristics of laser-transmission and guide star's brightness for Subaru LGS/AO188 system*
- 10 2010SPIE.7736E.164E  
Egner, Sebastian; Ikeda, Yuji; **Watanabe**, Makoto; **Hayano**, Y.; Golota, T.; **Hattori**, M.; Ito, M.; Minowa, Y.; **Oya**, S.; **Saito**, Y.; and 2 coauthors  
*Atmospheric dispersion correction for the Subaru AO system*
- 11 2010SPIE.7736E.156H  
**Hattori**, Masayuki; Colley, Stephen; Garrel, Vincent; Egner, Sebastian; Golota, Taras; Guyon, Olivier; Ito, Meguro; Minowa, Yosuke; **Oya**, Shin; **Saito**, Yoshihiko; and 4 coauthors  
*Recent development in real-time control system of Subaru adaptive optics including laser guide star mode*
- 12 2010SPIE.7736E.128O  
**Oya**, Shin; **Hattori**, Masayuki; Minowa, Yosuke; Negishi, Satoru; Tomono, Daigo; Terada, Hiroshi; Pyo, Tae-Soo; **Watanabe**, Makoto; Ito, Meguro; **Saito**, Yoshihiko; and 8 coauthors  
*Tip/tilt offload of Subaru AO188 by telescope secondary mirror*
- 13 2010SPIE.7736E.122M  
Minowa, Yosuke; **Hayano**, Yutaka; **Oya**, Shin; **Watanabe**, Makoto; **Hattori**, Masayuki; Guyon, Olivier; Egner, Sebastian; **Saito**, Yoshihiko; Ito, Meguro; **Takami**, Hideki; and 4 coauthors  
*Performance of Subaru adaptive optics system AO188*

- 14 2010SPIE.7736E.21H  
Hayano, Yutaka; Takami, Hideki; Oya, Shin; Hattori, Masayuki; Saito, Yoshihiko; Watanabe, Makoto; Guyon, Olivier; Minowa, Yosuke; Egner, Sebastian E.; Ito, Meguru; and 4 coauthors  
*Commissioning status of Subaru laser guide star adaptive optics system*
- 15 2010SPIE.7735E.101S  
 Suzuki, Ryuji; Kudo, Tomoyuki; Hashimoto, Jun; Carson, Joseph; Egner, Sebastian; Goto, Miwa; Hattori, Masayuki; Hayano, Yutaka; Hodapp, Klaus; Ito, Meguro; and 18 coauthors  
*Performance characterization of the HiCIAO instrument for the Subaru Telescope*
- 16 2010ApJ.714.1209T  
 Tanaka, Masaomi; Kawabata, Koji S.; Yamanaka, Masayuki; Maeda, Keiichi; Hattori, Takashi; Aoki, Kentaro; Nomoto, Ken'ichi; Iye, Masanori; Sasaki, Toshiyuki; Mazzali, Paolo A.; Pian, Elena  
*Spectropolarimetry of Extremely Luminous Type Ia Supernova 2009dc: Nearly Spherical Explosion of Super-Chandrasekhar Mass White Dwarf*
- 17 2010suba.prop.61I  
Iye, Masanori  
*Follow-up Spectroscopy of LAE candidates at  $z \sim 7.3$  in SDF*
- 18 2010ApJ.708.1168T  
 Tanaka, Mikito; Chiba, Masashi; Komiyama, Yutaka; Guhathakurta, Puragra; Kalirai, Jason S.; Iye, Masanori  
*Structure and Population of the Andromeda Stellar Halo from a Subaru/Suprime-Cam Survey*
- 19 2010AAS.21535401G  
 Guhathakurta, Puragra; Beaton, R.; Bullock, J.; Chiba, M.; Fardal, M.; Geha, M.; Gilbert, K.; Howley, K.; Iye, M.; Johnston, K.; and 8 coauthors  
*The SPLASH Survey: Spectroscopy of Newly Discovered Tidal Streams in the Outer Halo of the Andromeda Galaxy*
- 20 2010cosp.38.2371I  
Iye, Masanori  
*Lyman alpha emitter surveys at high redshift*
- 21 2010lyot.confE.76E  
 Enya, K.; Kotani, T.; Nakagawa, T.; Matsuhara, H.; Kataza, H.; Wada, T.; Kawada, M.; Mita, M.; Komatsu, K.; Uchida, H.; and 31 coauthors  
*Coronagraph with SPICA*
- 22 2010ApJ.718L.87T  
 Thalmann, C.; Grady, C. A.; Goto, M.; Wisniewski, J. P.; Janson, M.; Henning, T.; Fukagawa, M.; Honda, M.; Mulders, G. D.; Min, M.; and 40 coauthors  
*Imaging of a Transitional Disk Gap in Reflected Light: Indications of Planet Formation Around the Young Solar Analog LkCa 15*
- 23 2010SPIE.7736E.183W  
Watanabe, Makoto; Ito, Meguro; Oya, Shin; Hayano, Yutaka, Minowa, Yosuke; Hattori, Masayuki; Saito, Yoshihiko; Egner, Sebastian; Takami, Hideki; Iye, Masanori; and 4 coauthors  
*Visible low-order wavefront sensor for the Subaru LGSAO system*

- 24 2010SPIE.7736E.169I  
 Ito, M.; **Havano**, Y.; **Saito**, Y.; Takami, H.; **Iye**, M.; **Hattori**, M.; **Oya**, S.; **Watanabe**, M.; Akagawa, K.; Colley, S. A.; and 2 coauthors  
*The characteristics of laser-transmission and guide star's brightness for Subaru LGS/AO188 system*
- 25 2010SPIE.7736E.164E  
 Egner, Sebastian; Ikeda, Yuji; **Watanabe**, Makoto; **Havano**, Y.; Golota, T.; **Hattori**, M.; Ito, M.; **Minowa**, Y.; **Oya**, S.; **Saito**, Y.; and 2 coauthors  
*Atmospheric dispersion correction for the Subaru AO system*
- 26 2010SPIE.7736E.156H  
**Hattori**, Masayuki; Colley, Stephen; Garrel, Vincent; Egner, Sebastian; Golota, Taras; Guyon, Olivier; Ito, Meguro; **Minowa**, Yosuke; **Oya**, Shin; **Saito**, Yoshihiko; and 4 coauthors  
*Recent development in real-time control system of Subaru adaptive optics including laser guide star mode*
- 27 2010SPIE.7736E.128O  
**Oya**, Shin; **Hattori**, Masayuki; **Minowa**, Yosuke; Negishi, Satoru; Tomono, Daigo; Terada, Hiroshi; Pyo, Tae-Soo; **Watanabe**, Makoto; Ito, Meguro; **Saito**, Yoshihiko; and 8 coauthors  
*Tip/tilt offload of Subaru AO188 by telescope secondary mirror*
28. 2010SPIE.7736E.122M  
**Minowa**, Yosuke; **Havano**, Yutaka; **Oya**, Shin; **Watanabe**, Makoto; **Hattori**, Masayuki; Guyon, Olivier; Egner, Sebastian; **Saito**, Yoshihiko; **Ito**, Meguro; Takami, Hideki; and 4 coauthors  
*Performance of Subaru adaptive optics system AO188*
- 29 2010SPIE.7736E.26C  
 Conan, Rodolphe; Bradley, Colin; Lardiere, Olivier; Blain, Celia; Venn, Kim; Andersen, David; Simard, Luc; Veran, Jean-Pierre; Herriot, Glen; Loop, David; and 5 coauthors  
*Raven: a harbinger of multi-object adaptive optics-based instruments at the Subaru Telescope*
- 30 2010SPIE.7736E.21H  
**Havano**, Yutaka; Takami, Hideki; **Oya**, Shin; **Hattori**, Masayuki; **Saito**, Yoshihiko; **Watanabe**, Makoto; Guyon, Olivier; **Minowa**, Yosuke; Egner, Sebastian E.; **Ito**, Meguro; and 4 coauthors  
*Commissioning status of Subaru laser guide star adaptive optics system*
- 31 2010SPIE.7735E.129G  
 Golota, Taras; **Oya**, Shin; Egner, Sebastian; **Watanabe**, Makoto; Eldred, Michael; **Minowa**, Yosuke; Takami, Hideki; Cook, David; **Havano**, Yutaka; **Saito**, Yoshihiko; and 3 coauthors  
*Software control and characterization aspects for image derotator of the AO188 system at Subaru*
- 32 2010SPIE.7735E.101S  
 Suzuki, Ryuji; Kudo, Tomoyuki; Hashimoto, Jun; Carson, Joseph; Egner, Sebastian; Goto, Miwa; **Hattori**, Masayuki; **Havano**, Yutaka; Hodapp, Klaus; **Ito**, Meguro; and 18 coauthors  
*Performance characterization of the HiCIAO instrument for the Subaru Telescope*
- 33 2010PASJ.62.779N  
 Narita, Norio; Kudo, Tomoyuki; Bergfors, Carolina; Nagasawa, Makiko; Thalmann, Christian; Sato, Bun'ei; Suzuki, Ryuji; Kandori, Ryo; Janson, Markus; Goto, Miwa; and 39 coauthors  
*Search for Outer Massive Bodies around Transiting Planetary Systems: Candidates of Faint Stellar Companions around HAT-P-7*

- 34 2010LPI.41.1939H  
 Hong, P. K.; Sugita, S.; Okamura, N.; Sekine, Y.; Terada, H.; Takatoh, N.; **Havano**, Y.; Fuse, T.; Kawakita, H.; Wooden, D. H.; and 9 coauthors  
*Hot Bands Observation of Water in Ejecta Plume of LCROSS Impact Using the Subaru Telescope*
- 35 2010LPI.41.1821O  
 Okamura, N.; Sugita, S.; Hong, P. K.; Kawakita, H.; Sekine, Y.; Terada, H.; Takatoh, N.; **Havano**, Y.; Fuse, T.; Wooden, D. H.; and 9 coauthors  
*The Estimate of the Amount of Ejecta in LCROSS Mission*
- 36 2010AAS.21560104C  
 Carson, Joseph; Thalmann, C.; Janson, M.; Goto, M.; McElwain, M.; Egner, S.; Feldt, M.; Hashimoto, J.; **Havano**, Y.; Henning, T.; and 10 coauthors  
*Discovery Of The Coldest Imaged Companion Of A Sun-like Star*

## 2009 年

- 1 2009PASJ.61.1179W  
 Wang, Yiping; Yamada, Toru; Tanaka, Ichi; **Iye**, Masanori  
*A Massive Disk Galaxy at  $z > 3$  along the Line of Sight of QSO 1508+5714*
- 2 2009yCat.21760001F  
 Furusawa, H.; Kosugi, G.; Akiyama, M.; Takata, T.; Sekiguchi, K.; Tanaka, I.; Iwata, I.; Kajisawa, M.; Yasuda, N.; Doi, M.; and 26 coauthors  
*Short Title (Furusawa+, 2008)*
- 3 2009PASJ.61.76.3I  
**Ito**, Meguru; **Havano**, Yutaka; **Saito**, Yoshihiko; Takami, Hideki; Saito, Norihito; Akagawa, Kazuyuki; Takazawa, Akira; Ito, Mayumi; Wada, Satoshi; **Iye**, Masanori  
*High-Power Laser Beam Transfer through Optical Relay Fibers for a Laser Guide Adaptive Optics System*
- 4 2009PASJ.61.623T  
 Takami, Hideki; Goto, Miwa; Gaessler, Wolfgang; **Havano**, Yutaka; **Iye**, Masanori; Kamata, Yukiko; Kanzawa, Tomio; Kobayashi, Naoto; **Minowa**, Yosuke; **Oya**, Shin; and 6 coauthors  
*Direct Observation of the Extended Molecular Atmosphere of o Ceti by Differential Spectral Imaging with an Adaptive Optics System*
- 5 2009arXiv0908.0369I  
**Iye**, Masanori  
*National Astronomical Observatory of Japan*
- 6 2009yCat.21760301O  
 Ouchi, M.; Shimasaku, K.; Akiyama, M.; Simpson, C.; Saito, T.; Ueda, Y.; Furusawa, H.; Sekiguchi, K.; Yamada, T.; Kodama, T.; and 6 coauthors  
*Subaru/XMM-Newton deep survey IV. (SXDS) (Ouchi+, 2008)*

- 7 2009suba.prop.55I  
Iye, Masanori  
*SXDF survey for Lyman alpha Emitters at  $z=7.3$  with red-sensitive SuprimeCam*
- 8 2009ApJ.699.1119T  
Tanaka, Masaomi; Kawabata, Koji S.; Maeda, Keiichi; Iye, Masanori; Hattori, Takashi; Pian, Elena; Nomoto, Ken'ichi; Mazzali, Paolo A.; Tominaga, Nozomu  
*Spectropolarimetry of the Unique Type Ib Supernova 2005bf: Larger Asymmetry Revealed by Later-Phase Data*
- 9 2009ApJ.696.1164O  
Ouchi, Masami; Ono, Yoshiaki; Egami, Eiichi; Saito, Tomoki; Oguri, Masamune; McCarthy, Patrick J.; Farrah, Duncan; Kashikawa, Nobunari; Momcheva, Ivelina; Shimasaku, Kazuhiro; and 17 coauthors  
*Discovery of a Giant Ly $\alpha$  Emitter Near the Reionization Epoch*
- 10 2009AIPC.1133.5.13.7A  
Aoki, K.; Totani, T.; Hattori, T.; Ohta, K.; Kawabata, K. S.; Kobayashi, N.; Iye, M.; Nomoto, K.; Kawai, N.  
*No Evidence for Variability of Intervening Absorption Lines toward GRB 060206: Implications for the Mg II Incidence Problem*
- 11 2009PASJ.61.387A  
Aoki, Kentaro; Totani, Tomonori; Hattori, Takashi; Ohta, Kouji; Kawabata, Koji S.; Kobayashi, Naoto; Iye, Masanori; Nomoto, Ken'ichi; Kawai, Nobuyuki  
*No Evidence for Variability of Intervening Absorption Lines toward GRB 060206: Implications for the MgII Incidence Problem*
- 12 2009suba.prop.65I  
Iye, Masanori  
*Deep SDF survey for Lyman alpha Emitters at  $z=7.3$  with new SuprimeCam*
- 13 2009ApJ.707L.123T  
Thalmann, C.; Carson, J.; Janson, M.; Goto, M.; McElwain, M.; Egner, S.; Feldt, M.; Hashimoto, J.; Havano, Y.; Henning, T.; and 10 coauthors  
*Discovery of the Coldest Imaged Companion of a Sun-like Star*
- 14 2009AIPC.1158.385H  
Havano, Yutaka  
*Progress of the Laser Guide Star Adaptive Optics at Subaru Telescope*
- 15 2009ApJ.693.610G  
Goto, M.; Henning, Th.; Kouchi, A.; Takami, H.; Havano, Y.; Usuda, T.; Takato, N.; Terada, H.; Oya, S.; Jager, C.; Andersen, A. C.  
*Spatially Resolved 3  $\mu$ m Spectroscopy of Elias 1: Origin of Diamonds in Protoplanetary Disks*
- 16 2009AAS.21333603M  
Martinache, Frantz; Guyon, O.; Lozi, J.; Tamura, M.; Hodapp, K.; Suzuki, R.; Havano, Y.; McElwain, M. W.  
*The Subaru Coronagraphic Extreme AO Project*

## 2008 年

- 1 2008ASPC.399.479T  
Tanaka, M.; Chiba, M.; Komiyama, Y.; Guhathakurta, P.; **Iye**, M.  
*A Panoramic View of the Stellar Halo in My Neighbor Andromeda: A Metal Poor Halo Emerges in the North-West Fields*
- 2 2008ASPC.399.209K  
Kondo, S.; Kobayashi, N.; Minami, A.; Okoshi, K.; **Minowa**, Y.; Tsujimoto, T.; Churchill, C. W.; Terada, H.; Pyo, T.; **Iye**, M.  
*Study of  $z=3.5$  Mg II Absorption Systems with Subaru IRCS Near-Infrared High-Resolution Spectroscopy*
- 3 2008ASPC.399.61I  
**Iye**, M.; Kashikawa, N.; Furusawa, H.; Ota, K.; Ouchi, M.; Shimasaku, K.  
*Suprime-Cam LAE Survey at Redshift 7.3 -- Ultimate Limit with New Red-Sensitive CCDs*
- 4 2008ApJ.685L.121B  
Brown, Thomas M.; Beaton, Rachael; Chiba, Masashi; Ferguson, Henry C.; Gilbert, Karoline M.; Guhathakurta, Puragra; **Iye**, Masanori; Kalirai, Jason; Koch, Andreas; Komiyama, Yutaka; and 7 coauthors  
*The Extended Star Formation History of the Andromeda Spheroid at 35 kpc on the Minor Axis*
- 5 2008SPIE.7014E.60I  
Ichikawa, Takashi; Ichiyama, Kotaro; Ebizuka, Noboru; Murata, Chihiro; Taniguchi, Yuichiro; Okura, Tsutomu; Harashima, Masakazu; Uchimoto, Yuka; Katsuno, Maruyama, Miyoko; **Iye**, Masanori; Shimasaku, Kazuhiro  
*Cryogenic VPH grisms for MOIRCS*
- 6 2008SPIE.7014E.58N  
Nakajima, Kaoru; Ebizuka, Noboru; **Iye**, Masanori; Kodate, Kashiko  
*Optimal fabrication of volume phase holographic grism with high efficiency and high dispersion, and its applications for astronomical observation*
- 7 2008suba.prop.19I  
**Iye**, Masanori  
*SXDF survey for Lyman alpha Emitters at  $z=7.3$  with red-sensitive SuprimeCam*
- 8 2008SPIE.7018E.153E  
Ebizuka, Noboru; Yokota, Hideo; Kajino, Fumiyoshi; Kawabata, Koji S.; **Iye**, Masanori; Sato, Shuji  
*Novel direct vision prism and Wollaston prism assembly for diffraction limit applications*
- 9 2008SPIE.7018E.111A  
Akitaya, Hiroshi; **Iye**, Masanori; Okita, Kiichi; Sato, Motoyasu; Matsuo, Hiroyuki; Itazu, Takeshi; Uno, Takeshi; Yamaguchi, Masao; Tanaka, Zen-ei; Yamashita, Takuya; and 3 coauthors  
*Application of zero-expansion pore-free ceramics to a mirror of an astronomical telescope*
- 10 2008SPIE.7016E.1I  
**Iye**, Masanori  
*High redshift galaxy surveys*

- 11 2008SPIE.7015E.169W  
Watanabe, Makoto; Oya, Shin; Hayano, Yutaka; Takami, Hideki; Hattori, Masayuki; Minowa, Yosuke; Saito, Yoshihiko; Ito, Meguru; Murakami, Naoshi; Iye, Masanori; and 5 coauthors  
*Implementation of 188-element curvature-based wavefront sensor and calibration source unit for the Subaru LGSAO system*
- 12 2008SPIE.7015E.166M  
Minowa, Yosuke; Takami, Hideki; Watanabe, Makoto; Hayano, YuTakamiyake, Masaaki; Iye, Masanori; Oya, Shin; Hattori, Masayuki; Murakami, Naoshi; Guyon, Olivier; and 6 coauthors  
*Development of a dichroic beam splitter for Subaru AO188*
- 13 2008SPIE.7015E.103O  
Oya, Shin; Minowa, Yosuke; Hattori, Masayuki; Watanabe, Makoto; Hayano, Yutaka; Itoh, Megru; Saito, Yoshihiko; Takami, Hideki; Iye, Masanori; Guyon, Olivier; and 4 coauthors  
*Characterization of vibrating shape of a bimorph deformable mirror*
- 14 2008SPIE.7015E.25H  
Hayano, Yutaka; Takami, Hideki; Guyon, Olivier; Oya, Shin; Hattori, Masayuki; Saito, Yoshihiko; Watanabe, Makoto; Murakami, Naoshi; Minowa, Yosuke; Ito, Meguru; and 6 coauthors  
*Current status of the laser guide star adaptive optics system for Subaru Telescope*
- 15 2008ApJ.682.303M  
 McGrath, Elizabeth J.; Stockton, Alan; Canalizo, Gabriela; Iye, Masanori; Maihara, Toshinori  
*Morphologies and Color Gradients of Luminous Evolved Galaxies at  $z \sim 1.5$*
- 16 2008ApJS.176.301O  
 Ouchi, Masami; Shimasaku, Kazuhiro; Akiyama, Masayuki; Simpson, Chris; Saito, Tomoki; Ueda, Yoshihiro; Furusawa, Hisanori; Sekiguchi, Kazuhiro; Yamada, Toru; Kodama, Tadayuki; and 6 coauthors  
*The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). IV. Evolution of Ly $\alpha$  Emitters from  $z=3.1$  to  $5.7$  in the 1 deg $^2$  Field: Luminosity Functions and AGN*
- 17 2008ApJS.176.1F  
 Furusawa, Hisanori; Kosugi, George; Akiyama, Masayuki; Takata, Tadafumi; Sekiguchi, Kazuhiro; Tanaka, Ichi; Iwata, Ikuru; Kajisawa, Masaru; Yasuda, Naoki; Doi, Mamoru; and 26 coauthors  
*The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). II. Optical Imaging and Photometric Catalogs*
- 18 2008yCat.83831485V  
 Valenti, S.; Benetti, S.; Cappellaro, E.; Patat, F.; Mazzali, P.; Turatto, M.; Hurley, K.; Maeda, K.; Gal-Yam, A.; Foley, R. J.; and 21 coauthors  
*BVRI light curves of SN 2003jd (Valenti+, 2008)*
- 19 2008arXiv0805.4480  
 Ota, Kazuaki; Kashikawa, Nobunari; Malkan, Matthew A.; Iye, Masanori; Nakajima, Tadashi; Nagao, Tohru; Shimasaku, Kazuhiro; Gandhi, Poshak  
*Overdensity of  $i'$ -Dropout Galaxies in the Subaru Deep Field: A Candidate Protocluster at  $z \sim 6$*
- 20 2008ApJ.677.120  
 Ota, Kazuaki; Iye, Masanori; Kashikawa, Nobunari; Shimasaku, Kazuhiro; Kobayashi, Masakazu; Totani, Tomonori; Nagashima, Masahiro; Morokuma, Tomoki; Furusawa, Hisanori; Hattori, Takashi; and 3 coauthors

- 21 2008Sci.319.1220M  
Maeda, Keiichi; Kawabata, Koji; Mazzali, Paolo A.; Tanaka, Masaomi; Valenti, Stefano; Nomoto, Ken'ichi; Hattori, Takashi; Deng, Jinsong; Pian, Elena; Taubenberger, Stefan; and 8 coauthors  
*Asphericity in Supernova Explosions from Late-Time Spectroscopy*
- 22 2008MNRAS.383.1485V  
Valenti, S.; Benetti, S.; Cappellaro, E.; Patat, F.; Mazzali, P.; Turatto, M.; Hurley, K.; Maeda, K.; Gal-Yam, A.; Foley, R. J.; and 21 coauthors  
*The broad-lined Type Ic supernova 2003jd*
- 23 2008ApJ.672.15.13.S  
Stockton, Alan; McGrath, Elizabeth; Canalizo, Gabriela; **Iye**, Masanori; Maihara, Toshinori  
*Morphologies of Two Massive Old Galaxies at  $z \sim 2.5$*
- 24 2008mgng.conf.381T  
Tanaka, Mikito; Chiba, Masashi; Komiyama, Yutaka; **Iye**, Masanori; Guhathakurta, Puragra  
*A Subaru/Suprime-Cam Survey of the Andromeda Giant Stream: Constraints of the Dwarf Galaxy as the Stream's Progenitor*
- 25 2008glv.book.335T  
Tanaka, Mikito; Chiba, M.; Komiyama, Y.; **Iye**, M.; Guhathakurta, P.  
*The Origin of the Giant Stellar Stream of M 31*
- 26 2008SPIE.7018E.4N  
Novi, A.; Canestrari, R.; Ghigo, M.; **Hayano**, Y.  
*Wavefront corrective lens for the Subaru Laser Launching Telescope*
- 27 2008PASP.120.655G  
Guyon, Olivier; Blain, Celia; Takami, Hideki; **Hayano**, Yutaka; **Hattori**, Masayuki; **Watanabe**, Makoto  
*Improving the Sensitivity of Astronomical Curvature Wavefront Sensor Using Dual-Stroke Curvature*
- 28 2008ApJ.672.398I  
**Ito**, M.; Yamashita, T.; Sako, S.; Takami, H.; **Hayano**, Y.; Terada, H.  
*Near-Infrared Silhouette Object Survey in M17*
- 29 2008 Proc.IEEJ International Workshop on Quantum and Optical Devices, OQD08 48,  
**Ito** M., **Hayano** Y., **Saito** Y., Takami H., **Iye** M., Saito N., Akagawa K., Takazawa A., **Ito** M.,  
*Photonic crystal fiber for the high power sodium D2 line laser*

## 2007 年

1. 2007ApJ.670.592M  
Mazzali, P. A.; Kawabata, K. S.; Maeda, K.; Foley, R. J.; Nomoto, K.; Deng, J.; Suzuki, T.; **Iye**, M.; Kashikawa, N.; Ohyama, Y.; and 3 coauthors  
*The Aspherical Properties of the Energetic Type Ic SN 2002ap as Inferred from Its Nebular Spectra*

- 2 2007AJ.134.1634M  
 Misawa, Toru; Tytler, David; **Iye**, Masanori; Kirkman, David; Suzuki, Nao; Lubin, Dan; Kashikawa, Nobunari  
*Spectroscopic Analysis of H I Absorption-Line Systems in 40 HIRES Quasars*
- 3 2007SPIE.6693E.18G  
 Guyon, Olivier; Angel, James R. P.; Bowers, Charles; Burge, James; Burrows, Adam; Codona, Johanan; Greene, Thomas; **Iye**, Masanori; Kasting, James; Martin, Hubert; and 11 coauthors  
*TOPS: a small space telescope using phase induced-amplitude apodization (PIAA) to image rocky and giant exo-planets*
- 4 2007NCimB.122.1015O  
 Ota, K.; **Iye**, M.; Kashikawa, N.; Shimasaku, K.; Kobayashi, M.; Totani, T.; Nagashima, M.; Morokuma, T.; Furusawa, H.; Hattori, T.; and 3 coauthors  
*The reionization and galaxy evolution probed by  $z=7$  Ly $\alpha$  emitters*
- 5 2007PASJ.59.841I  
**Iye**, M.; Tanaka, M.; Yanagisawa, M.; Ebizuka, N.; Ohnishi, K.; Hirose, C.; Asami, N.; Komiyama, Y.; Furusawa, H.  
*SuprimeCam Observation of Sporadic Meteors during Perseids 2004*
- 6 2007HiA.1732I  
**Iye**, Masanori  
*Japan's optical/infrared astronomy plan*
- 7 2007HiA.14.265T  
 Totani, T., Kawai, N., Kosugi, G., Aoki, K., Yamada, T., **Iye**, M., Ohta, K., Hattori, T.  
*Implications for the cosmic re-ionization from the optical afterglow spectrum of GRB050904 at  $z = 6.3$*
- 8 2007AJ.1376Y  
 Yamanoi, Hitomi; Tanaka, Masayuki; Hamabe, Masaru; Yagi, Masafumi; Okamura, Sadanori; **Iye**, Masanori; Shimasaku, Kazuhiro; Doi, Mamoru; Komiyama, Yutaka; Furusawa, Hisanori  
*The Galaxy Luminosity Functions down to  $M \sim -10$  in the Hydra I Cluster*
9. 2007lyot.confE.37G  
 Guyon, O.; Angel, J. R. P.; Bowers, C.; Burge, J.; Burrows, A.; Codona, J. L.; Greene, T.; **Iye**, M.; Kasting, J.; Martin, H.; and 12 coauthors  
*Direct Imaging of Nearby Exoplanets with a Small Size Space Telescope: Telescope to Observe Planetary System (TOPS)*
- 10 2007ApJ.662.389G  
 Goto, Miwa; Kwok, Sun; Takami, Hideki; Hayashi, Masa; Gaessler, W.; **Hayano**, Yutaka; **Iye**, Masanori; Kamata, Yukiko; Kanzawa, Tomio; Kobayashi, Naoto; and 8 coauthors  
*Diffraction-Limited 3  $\mu$ m Spectroscopy of IRAS 04296+3429 and IRAS 05341+0852: Spatial Extent of Hydrocarbon Dust Emission and Dust Evolutionary Sequence*
- 11 2007AAS.210.3308G  
 Guyon, Olivier; Angel, R.; Bowers, C.; Burge, J.; Burrows, A.; Codona, J.; Greene, T.; **Iye**, M.; Kasting, J.; Martin, H.; and 12 coauthors  
*Direct Imaging Of Nearby Exoplanets With A Small Size Space Telescope: Telescope To Observe Planetary System (TOPS)*

- 12 2007arXiv0705.328T  
Tanaka, Mikito; Chiba, Masashi; Komiyama, Yutaka; **Iye**, Masanori; Guhathakurta, Puragra  
*A Subaru/Suprime-Cam Survey of M31's spheroid along the South-East minor axis*
- 13 2007ApJ.659.862Y  
Yamada, Toru; Kodama, Tadayuki; Akiyama, Masayuki; Furusawa, Hisanori; Iwata, Ikuru; Kajisawa, Masaru; **Iye**, Masanori; Ouchi, Masami; Sekiguchi, Kazuhiro; Shimasaku, Kazuhiro; and 3 coauthors  
*Erratum: "The Number Density of Old Passively-Evolving Galaxies at  $z = 1$  in the Subaru/XMM-Newton Deep Survey Field" (ApJ, 6.34, 861 [2005])*
- 14 2007ApJ.657.738L  
Ly, Chun; Malkan, Matt A.; Kashikawa, Nobunari; Shimasaku, Kazuhiro; Doi, Mamoru; Nagao, Tohru; **Iye**, Masanori; Kodama, Tadayuki; Morokuma, Tomoki; Motohara, Kentaro  
*The Luminosity Function and Star Formation Rate between Redshifts of 0.07 and 1.47 for Narrowband Emitters in the Subaru Deep Field*
- 15 2007PASJ.59.277T  
Taniguchi, Yoshiaki; Ajiki, Masaru; Nagao, Tohru; Shioya, Yasuhiro; Murayama, Takashi; Kashikawa, Nobunari; Kodaira, Keiichi; Kaifu, Norio; Ando, Hiroyasu; Karoji, Hiroshi; and 30 coauthors  
*Errata : The SUBARU Deep Field Project: Lyman  $\alpha$  Emitters at a Redshift of 6.6*
- 16 2007suba.prop.102I  
**Iye**, Masanori  
*FOCAS spectroscopy of a possible  $z=7.02$  LAE candidate IOK-2*
- 17 2007amos.confE.77H  
**Hayano**, Y.; **Saito**, Y.; **Ito**, M.; Saito, N.; Akagawa, K.; Takazawa, A.; **Ito**, M.; Wada, S.; Takami, H.; **Iye**, M.  
*The Laser Guide Star System for Adaptive Optics at Subaru Telescope*
- 18 2007ApJ.667.303T  
Terada, Hiroshi; Tokunaga, Alan T.; Kobayashi, Naoto; Takato, Naruhisa; **Hayano**, Yutaka; Takami, Hideki  
*Detection of Water Ice in Edge-on Protoplanetary Disks: HK Tauri B and HV Tauri C*
- 19 2007amos.confE.68T  
Takami, H.; **Hayano**, Y.; **Oya**, S.; **Hattori**, M.; **Watanabe**, M.; Guyon, O.; Eldred, M.; Colley, S.; **Saito**, Y.; **Itoh**, M.; Dinkins, M.  
*The First Light of the Subaru Laser Guide Star Adaptive Optics System*

## 第十一章 主要論文別刷

2011 PJAB.87.575-586

Iye, Masanori

Subaru studies of the cosmic dawn

11

2011 ApJ.734.119-137

Kashikawa, N., Shimasaku, K., Matsuda, Y., Egami, E., Jiang, L., Nagao, T., Ouchi, M., Malkan, M.A., Hattori, T., Ota, K., Taniguchi, Y., Okamura, S., Ly, C., Iye, M., Furusawa, H., Shioya, Y., Shibuya, T., Ishizaki, Y., and Toshikawa, J.

Completing the Census of Ly $\alpha$  Emitters at the Reionization Epoch

19

2011 ApJ.738.30-37

Rusu, C. E., Oguri, M., Inada, N., Kayo, I., Iye, M., Hayano, Y., Oya, S., Hattori, M., Saito, Y., Ito, M., Minowa, Y., Pyo, T.S., Terada, H., Takami, H., and Watanabe, M.

SDSS J133401.39+331535.: A New Subarcsecond Gravitationally Lensed Quasar

8

2010 SPIE.7736E.21-28

Hayano, Y., Takami, H., Oya, S., Hattori, M., Saito, Y., Watanabe, M., Guyon, O., Minowa, Y., Egner, S.E., Ito, M., Garrel, V., Colley, S., Golota, T., and Iye, M.

Commissioning status of Subaru laser guide star adaptive optics system

8

2010 SPIE.7736E.122-128

Minowa, Y., Hayano, Y., Oya, S., Watanabe, M., Hattori, M., Guyon, O., Egner, S., Saito, Y., Ito, M., Takami, H., Garrel, V., Colley, S., Golota, T., and Iye, M.

Performance of Subaru adaptive optics system AO188

7

## Subaru Studies of the Cosmic Dawn

By Masanori Iye

### Abstract:

An overview on the current status of the census of the early universe population is given. Observational surveys of high redshift objects provide direct opportunities to study the early epoch of the Universe. The target population included are Lyman Alpha Emitters (LAE), Lyman Break Galaxies (LBG), gravitationally lensed galaxies, quasars and gamma-ray bursts (GRB). The basic properties of these objects and the methods used to study them are reviewed. The present paper highlights the fact that the Subaru Telescope group made significant contributions in this field of science to elucidate the epoch of the cosmic dawn and to improve the understanding of how and when infant galaxies evolve into mature ones.

**Key words:** Early Universe; High redshift galaxies; Ly $\alpha$  emitters; Subaru Telescope.

**1. INTRODUCTION** Since the discovery of the expansion of the Universe by Edwin Hubble in 1929, astronomers attempted to look at distant galaxies with increased power of new generation telescopes. By studying distant galaxies, one can look back the early history of the Universe. Partridge and Peebles (1967)[1], in their classical paper, predicted the properties of primordial galaxies and pointed out that these galaxies with redshifted Ly $\alpha$  emission would be the targets observational astronomers should look for. As was reviewed in Pritchett(1994)[2], many attempts followed using 4m class telescopes for the next three decades without leading to a great success.

National Astronomical Observatory of Japan built the 8.2m Subaru Telescope atop Mauna Kea during 90's, which became in full operation by 2002[3]. Astronomers in the world started to find out extremely distant objects using 10m Keck telescope, 8.2m Subaru Telescope, 8.1m VLT, and 8.0m Gemini Telescopes. The observational techniques used are 1) narrow band imaging surveys for Ly $\alpha$  emitting galaxies[4]-[29], 2) multi-band photometric surveys for Lyman break galaxies[30]-[38], 3) searches for amplified images of gravitationally lensed galaxies[39]-[44], 4) photometric surveys for high redshift quasars[45]-[47], and 5) studies of sporadic gamma ray bursts[48]-[51] in high redshift galaxies. As of today, the highest spectroscopically confirmed redshift records are  $z = 7.213$  for

LAEs[29],  $z = 7.085$  for quasars[47], and  $z \sim 8.2$  for GRBs[51]. There are additional candidates of Lyman break galaxies whose photometric redshift estimate indicate  $z > 8$ [35]-[38].

The current picture of the big bang Universe indicates that the expanding universe cooled rapidly to form neutral hydrogen from protons and electrons at 380,000 years after the big bang. This is the epoch when the photons are decoupled from the matter and constitutes the last scattering surface. Hence, this is also the epoch of the Universe beyond which observation by electromagnetic radiation cannot penetrate. Figure 1 shows the power spectrum of the temperature fluctuation at this epoch derived from 7 years of WMAP observation of the cosmic microwave background[52, 53]. Measured data showing the baryon acoustic oscillation features and the onset of Silk damping tail are very well reproduced by a  $\Lambda$ CDM model, constraining the cosmological parameters, cosmic age  $t_0 = 13.75 \pm 0.13$  Gyr, the Hubble constant  $H_0 = 71.0 \pm 2.5$  km/s/Mpc, baryon density  $\Omega_b = 0.0449 \pm 0.0028$ , cold dark matter density  $\Omega_c = 0.220 \pm 0.026$ , and vacuum energy density  $\Omega_\Lambda = 0.734 \pm 0.029$ . The density fluctuation of the dark matter and the matter grew by gravitational instability and it is conceived that the first generation of stars were born at around 200 million years after the big bang.

The initial set of formed stars contained wide range of mass spectrum. As all the elements heav-

ier than boron were produced through the nuclear burning of hydrogen inside stars and were not existent in the early universe where only hydrogen and helium were formed during the first 5 minutes of the big bang, astronomers use a brutal term, "metal" for all the elements heavier than carbon. The absence of "metal" elements in the primordial gas helped to form massive stars. Due to the strong UV radiation from those newly formed massive hot stars, the surrounding intergalactic matter was gradually re-ionized. It is like a "Global Warming" of the Universe. When and how these re-ionization process took place was not observationally clarified yet but polarization measurement of WMAP7 [53] suggests that it took place at  $z \sim 10.5 \pm 1.2$ , if the re-ionization was an instantaneous event. It is more likely that the cosmic re-ionization could have taken place in an extended period sometime during  $6 < z < 17$ .

Detailed observations deep into the era beyond  $z = 7$  is, therefore, crucial. Some of the recent number counts of galaxies at  $5.7 < z < 7$  indicate significant decrease in the number density of Ly $\alpha$  emitting galaxies, especially at its bright end of the luminosity function[13]-[19], which could either be due to the premature formation of those bright galaxies through merging processes or due to the increasing fraction of neutral hydrogen that blocks the visibility of Ly $\alpha$  emitting galaxies at high redshift.

In the subsequent sections 2-6, I will review the target population of galaxies in the early Universe and the technique astronomers are employing to find those objects together with some recent results. The summary will be given in the last section.

**2. NARROW BAND SURVEY FOR LYMAN ALPHA EMITTERS** Ly $\alpha$  emitters, often abbreviated as LAEs, are thought to be young galaxies in star-forming phase lasting about 10 million years with star formation rate from 1 to 10 solar mass per year. Hot massive stars produce strong UV radiation field and ionize the interstellar gas. The ionized hydrogen recombines and cools by emitting finally a Lyman  $\alpha$  photon to settle down to the lowest ground level. The amount of stars produced in LAEs is yet of the order of  $10^8$  solar mass and the continuum radiation from stars is not necessarily conspicuous. The spectra of LAEs are therefore characterized by strong Lyman-alpha emission line as shown in Figure 2. At high redshift universe be-

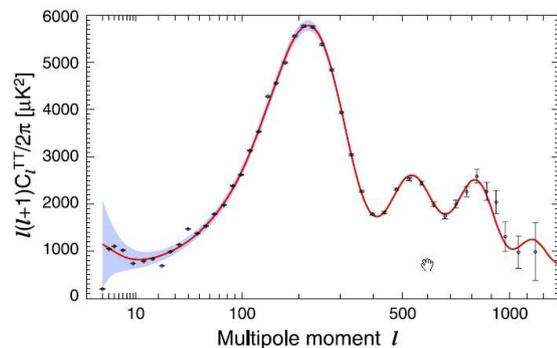


Fig. 1. Temperature fluctuation power spectrum from 7 years observation by WMAP (Larson et al.(2011)[53]). The ordinate shows the auto correlation of the expansion coefficients of the cosmic microwave background temperature distribution in spherical harmonics  $Y_l^m$ . Measured data points are very well reproduced by a  $\Lambda$ CDM model denoted by a solid curve, that constrains many of the cosmological parameters. The gray band represents the uncertainty due to the cosmic variance.

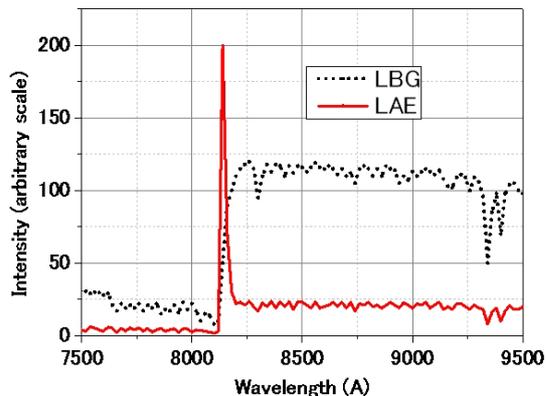


Fig. 2. Typical spectra of a Lyman-Alpha Emitter (solid line) and a Lyman Break Galaxy (broken line) at an assumed redshift 5.7, showing the Ly $\alpha$  emission line at 815nm and stellar continuum long ward of the Lyman  $\alpha$  emission line.

yond  $z \sim 5$ , due to the absorption of Ly- $\alpha$  photons by the residual neutral hydrogen in the line of sight to us, the blue part of the emission line profile is truncated and LAEs show a characteristic asymmetric profile. The identification of the observed emission line to Ly- $\alpha$  121.5nm line at high redshift, rather than other typical emission lines, e.g., CIV 154.9nm, MgII 279.8nm, [OII] 372.7nm, and [OIII] 500.7nm, at lower redshifts, can be properly made by covering a wide enough spectral range to check the presence of other possible lines. However, even for a single line, the presence of this asymmetric emission line profile provides fair confidence to the line identification.

Although LAEs are characterized by their redshifted Ly $\alpha$  emission line, they are so faint and the Earth's foreground night sky emission, that consists of emission line bands of OH radicals in the upper atmosphere and the thermal blackbody emission, hinder their detection in the near infrared spectral region,  $\lambda > 680\text{nm}$ , where the Ly $\alpha$  emission is shifted for galaxies with redshift  $z > 4.6$ . Figure 3 shows the strong bands of telluric OH emission lines in the wavelength region below 1.05 micron, where Si-CCDs are sensitive. Astronomers use the dark gaps between these OH bands to probe deep space.

Subaru observational astronomers formed a consortium to develop a series of narrow band filters for the wide field camera, Suprime-Cam [54], whose transmittance bands are matched to one of these OH band gaps to detect LAEs whose redshifted Ly $\alpha$  emission enters in such dark sky windows. LAEs

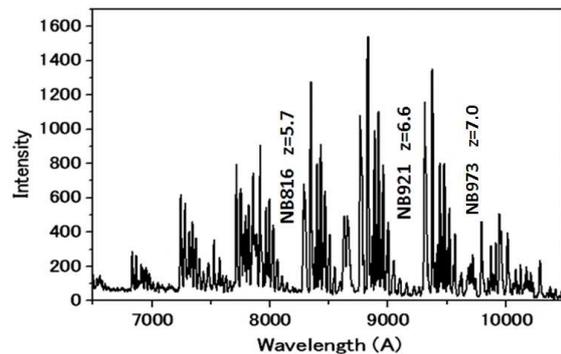


Fig. 3. OH night sky emission bands showing a few gaps, which astronomers use as dark windows to look deeply into the Universe. Narrow band filters whose transmission are matched to these dark windows are used to sample LAEs at  $z=5.7$  (NB816),  $z=6.6$  (NB921) and  $z=7.0$  (NB973).

at appropriate redshift range are expected to show up brighter in the narrow band image than in other broad band images. The narrow band (NB) survey is therefore trying to slice the universe in a narrow range of redshift. For instance, the narrow band filter NB816 that has the central wavelength at 816nm is suitable for isolating LAEs at  $z = 5.7$ , NB921 for  $z = 6.6$ , etc. The most distant LAE at  $z = 6.964$  was also discovered using another filter NB973[15]. The replacement of Suprime-Cam CCDs to new red sensitive ones with thicker depletion layer in 2009 provided enhanced sensitivity at around 1 micron and the reddest filter NB1006 for redshift 7.3[18] was also added to the Suprime-Cam filter suite.

The Subaru Deep Field survey[55] and the Subaru XMM-Newton Deep Field survey[56] were designed to enable systematic studies of galaxy population in the early universe by using the Suprime-Cam imaging data obtained in broad bands,  $B, V, R, i'$  and  $z'$  to allow photometric redshift estimate of each object from their observed spectral energy distribution fitted to stellar population synthesis models for galaxies. This unique data set sampling the large space volume in the early universe provided a reference frame to study the luminosity function, morphological and clustering properties, time evolution of galaxies in the early universe. Narrow band imaging data using NB711, NB816, and NB921 added precious samples for studying LAEs at  $z \sim 4.8, 5.7$  and 6.6, respectively. These data are also used to study star forming galaxies and active galactic nuclei at lower redshifts.

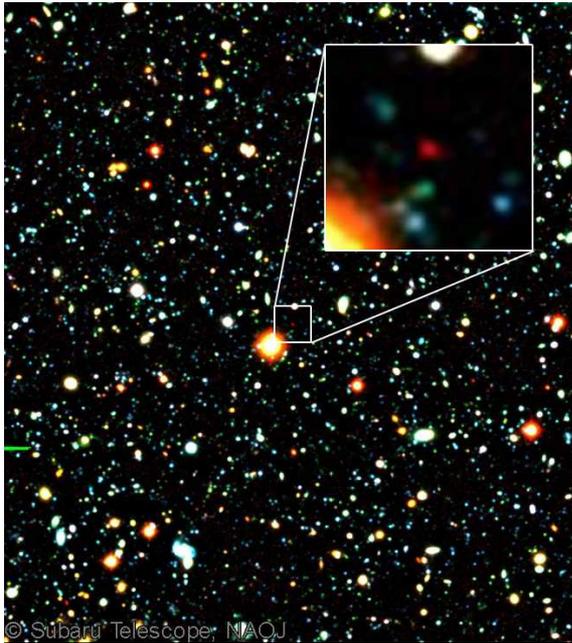


Fig. 4. The most distant galaxy IOK-1 is shown as a red blob in the inlet panel covering  $8 \times 8$  arcsec in the sky. The entire field of view covers  $254 \times 284$  arcsec. North is up and East to the left.

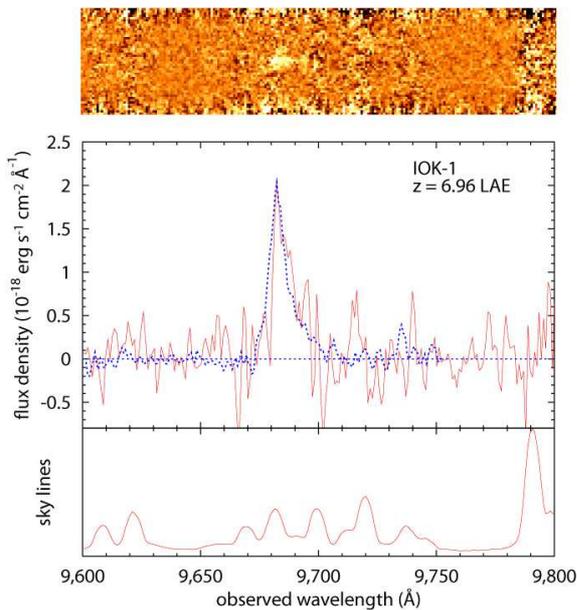


Fig. 5. The red line in the center panel shows the observed spectrum of IOK-1, showing the characteristic Ly $\alpha$  emission line with an asymmetric profile at 968nm indicating its redshift 6.96 (Iye et al.(2006)[15]). The blue line superposed shows the averaged template profile of Ly $\alpha$  emission lines for LAEs at lower redshift shifted to  $z = 6.96$ . The red line in the lower panel shows the foreground OH night sky emission lines in the same spectrum.

The red blob in the inlet panel of Figure 4 shows the most distant LAE, IOK-1, at the time of its discovery by Iye et al(2006)[15] and remained at the top of the list until the end of 2010 when two LAEs were found beyond  $z = 7$ [25]. IOK-1 was discovered among the 41,533 objects above  $5\sigma$  threshold detected in the Subaru Deep Field through the narrow band filter NB973 for a total exposure time of 15 hours with Suprime-Cam. All the objects were cross identified in images taken in other filters and five objects, IOK-1 to IOK-5, which are visible only in this narrow band filter, were identified as photometric candidates for  $z \sim 7$  LAEs.

Color excess in NB973 is a necessary, but not sufficient, condition for  $z \sim 7$  LAEs. There are several types of possible contaminants in these  $5\sigma$  photometric candidates. First, since the narrow band imaging observation was made 1-2 year after other broad band observations, some of the candidates may well be variable objects like AGNs or galaxies where supernovae added extra light when narrow band observation was made. Possibility for emission line objects at a lower redshift is a common concern. To our surprise, simple Gaussian statistics cautions us that there might be one or two  $5\sigma$  "noises" as well, since there are millions of independent 2 arcsec apertures one can sample in the Suprime-Cam field. Therefore spectroscopic follow up observation is essential to establish a firm confirmation. Eventually, it was revealed that only one object, the brightest IOK-1, is a real LAE at redshift 6.96, with the characteristic asymmetric line profile as shown in Figure 5.

Table 1 shows the top 21 list of high redshift galaxies with spectroscopic redshift confirmation to the best of the authors knowledge at the time of writing this review. Although, a discovery of redshift 8.6 LAE was reported in 2010[25], the published data do not appear as a robust one and I haven't included this object in this list. Readers may notice that 14 out of 21 were discovered by Subaru/Suprime-Cam surveys. This is because Subaru/Suprime-Cam enables observation of large survey volume with significant depth.

Subaru Deep Field surveys yielded several dozens of LAE candidates both at redshift 5.7 and 6.6, of which more than half of them are already confirmed spectroscopically to be LAEs. With this fair sample, one can derive the luminosity function of LAEs. It was confirmed that the UV continuum luminosity functions of LAEs at redshift 5.7 and 6.6

Table I. Top 21 distant galaxies (Aug. 8, 2011)

#	ID	$z$	Paper	Date
1	GN-108036	7.213	Ono+	2011.7
2	BDF-3299	7.109	Vanzella+	2011.4
3	A1703zD6	7.045	Schenker+	2011.7
4	BDF-521	7.008	Vanzella+	2011.4
5	G2-1408	6.972	Pentricci+	2011.7
6	IOK-1	6.964	Iye+	2006.9
7	HUDF09-1596	6.905	Schenker+	2011.7
8	SDF46975	6.844	Ouchi+	2011.7
9	NTTDF6345	6.701	Pentricci+	2011.7
10	NTTDF474	6.623	Pentricci+	2011.7
11	SXDN71598	6.621	Ouchi+	2010.11
12	SXDW30717	6.617	Ouchi+	2010.11
13	SDF1004	6.597	Taniguchi+	2005.2
14	SDF1018	6.596	Kashikawa+	2006.4
15	SXD Himiko	6.595	Ouchi+	2008.7
16	SXDW31790	6.590	Ouchi+	2010.11
17	SXDC106098	6.589	Ouchi+	2010.11
17	SDF1030	6.589	Kashikawa+	2006.4
19	SDF91163	6.587	Kashikawa+	2009.2
19	SDF91988	6.587	Kashikawa+	2009.2
19	SDF71101	6.587	Kashikawa+	2009.2

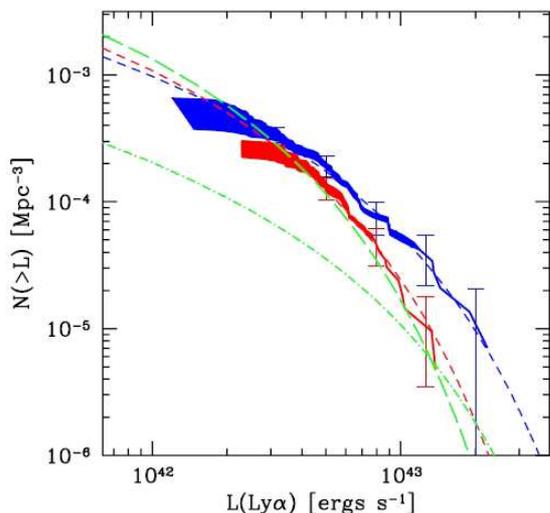


Fig. 6.  $\text{Ly}\alpha$  luminosity functions of LAEs at  $z=5.7$  (blue) and  $z=6.6$  (red). Note that the significant decrease in Lyman-alpha luminosity function at its bright end (Kashikawa et al., 2011[23]).

are practically identical. On the other hand, figure 6 shows that the  $\text{Ly}\alpha$  luminosity function derived at redshift 6.6 has a significant deficiency with respect to that at redshift 5.7 especially at their brighter population[23].

This can be explained if the neutral hydrogen fraction of the intergalactic matter is increasing from redshift 5.7 to 6.6, as the neutral hydrogen selectively absorbs and scatters the  $\text{Ly}\alpha$  photons but not affects UV continuum photons. Such a change in the fraction of neutral hydrogen is possible by the ionizing photons produced by the first generation of massive hot stars. Actually, the observed  $\text{Ly}\alpha$  luminosity functions, the UV luminosity functions, and the distribution of equivalent width of the  $\text{Ly}\alpha$  emission are compatible with a star formation history where an initial Pop III massive star formation was followed later by a Pop II star formation[57].

Recent follow up HST imaging of IOK-1 in the F130N, F125W, and F160W filters to probe the redshifted  $\text{HeII } \lambda 1640$  emission placed an upper limit for the amount of metal free Pop III stars[25]. The scarcity of massive galaxies at higher redshift could be ascribed, in principle, to premature evolutionary process of galaxies built from tiny proto galaxies. However, in this case, both the LAE luminosity function and the UV continuum luminosity function should show a coherent difference. Cosmic variance, though not negligible, could not be the main cause of this striking difference.

The significant change in the fraction of neutral hydrogen during  $6 < z < 7.2$  is also supported by recent additional works[28, 29, 47]. We, therefore, conclude that observations of the galaxy population in the early universe started to reveal the epoch when the cosmic re-ionization was not completed. This last phase of cosmic re-ionization is often referred as "cosmic dawn".

The upper panel of Figure 7 shows the angular correlation function for LAEs at  $z = 6.6$  as a function of angular separation derived for the first time in the Subaru -XMM deep Field[20]. Filled squares are observed values, which is fitted by a solid line. The existence of positive correlation at shorter scale implies the presence of clustering. Dotted line is that for underlying cold dark matter predicted by a theoretical model.

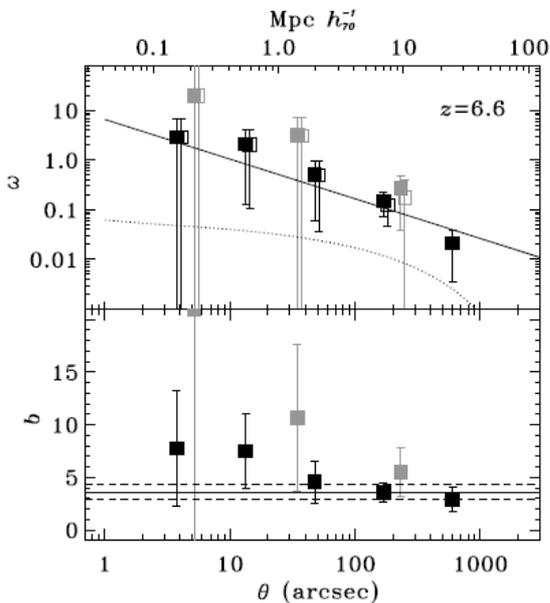


Fig. 7. Angular correlation function  $\omega$  and bias  $b$  as a function of angular distance  $\theta$  derived for 207 LAEs discovered in the Subaru-XMM Deep Field. Black and gray squares represent measured values for all and bright subsamples, respectively. Solid line in the top panel shows best fit power-law, while the dotted line denotes the angular correlation function of the underlying dark matter predicted by a CDM model. The evidence of clustering is shown for the first time at  $z = 6.6$  (Ouchi et al. 2011[24].)

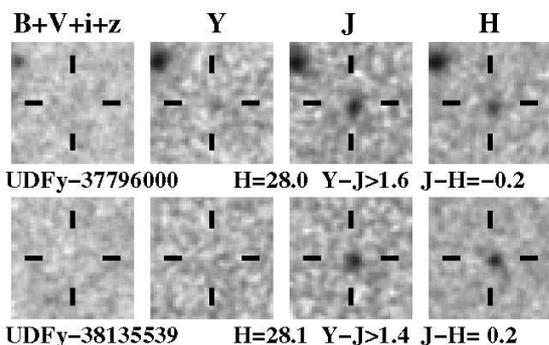


Fig. 8. Lyman break galaxy candidates at  $z \sim 8.6$  discovered as Y-dropouts from the Hubble Ultra Deep Field (Bouwens et al. 2011[38].)

### 3. TWO COLOR DIAGNOSIS FOR LYMAN BREAK GALAXIES

Another population of galaxies searched for in the early Universe is called Lyman Break Galaxies, abbreviated as LBGs. LBGs are thought to be fairly massive galaxies with evolved stellar population. Stellar continuum is much stronger than LAEs.  $\text{Ly}\alpha$  emission is less conspicuous as compared with LAEs. The spectra of these galaxies show characteristic discontinuity at the blue side of  $\text{Ly}\alpha$  line caused by the intrinsic stellar atmospheric absorption and by the intergalactic neutral hydrogen absorption (cf. Figure 2). These galaxies, therefore, are visible at bands red ward of  $\text{Ly}\alpha$  line but are not visible at bands blue ward of the  $\text{Ly}\alpha$  line. One can select out LBG candidates at  $z=6$  by looking for objects that is not visible in the i-band and other bands at shorter wavelengths but is visible in bands at longer wavelengths, which is called "i-band dropouts". Similarly, one can look for  $z=7$  LBGs as  $z'$ -band dropout, and  $z=9$  LBGs as J-band dropouts.

Here again, one have to be careful for possible contaminants. Galactic T-dwarfs, a class of low-mass, low-temperature, low-luminosity stars[58], dwell in the similar region in the two color diagram. One may be able to reject T-dwarfs by their point source images if the image quality is superb. Variable objects and  $5\sigma$  noises are the common problems for this survey as well.

Hubble ACS and NICMOS imaging at Hubble Ultra Deep Field and GOODS field was used to identify faint  $z$ -dropouts at around  $z=7.3$  and about 8 candidates were identified, but similar attempt for J dropout didn't yield a candidate[33]. Another group reported finding of 10  $z$ -dropouts and 2 J-dropouts[33]. Unfortunately, many of these objects do not show strong  $\text{Ly}\alpha$  emission and spectroscopic confirmation of their genuine redshift remains difficult with currently available 8-10m class telescopes.

Figure 8 shows two examples of LBG candidates at  $z \sim 8.6$  discovered as Y-dropouts from the Hubble Ultra Deep Field survey[36]. They are not visible in filter bands at  $B$ ,  $V$ ,  $R$ ,  $i$ ,  $z$ , and  $Y$ , but detected in infrared  $J$  and  $H$  bands. Photometric redshift estimates based on comparison of the derived spectral energy distribution with those models of galaxies place them possibly at  $z \sim 8.6$ .

Hubble Ultra Deep Field imaging survey with ACS probed much deeper than ground based observations, but has a much smaller survey volume. The

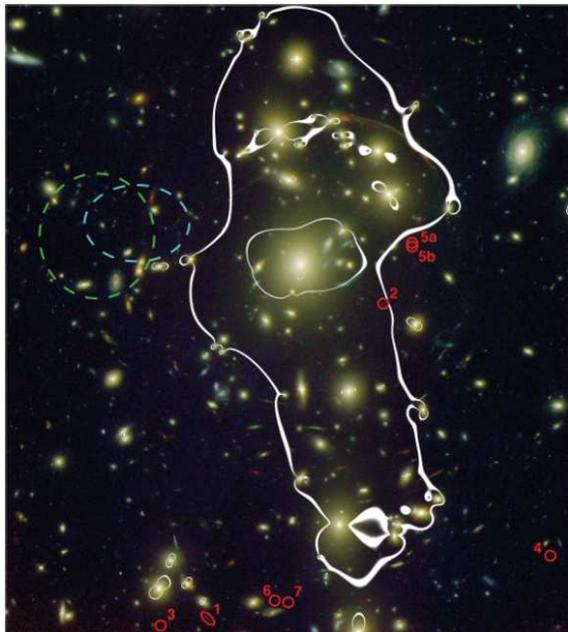


Fig. 9. Lyman break galaxy candidates at  $z \sim 7$  marked in red circles and ellipses as discovered behind the gravitational lensing cluster A1703 at  $z = 0.28$  (Edited from Bradley et al. 2010[44].)

wide field surveys to pick up scarce bright population and narrow field deep surveys to study fainter populations, are complementary to each other.

**4. SURVEY FOR STRONGLY LENSED GALAXIES** Another unique survey project is to take advantage of the gravitational lensing effect of a massive cluster of galaxies, which will magnify and brighten the background faint galaxies. In this sense, clusters of galaxies are the largest cosmic telescopes in the Universe with a diameter about 1Mpc. They are in situ and free of charge to use. However, you cannot point them to your favorite targets. Wavefront aberrations are bizarre. Although the images produced by cluster lensing are peculiarly deformed and enlarged, the largest advantage is the fact some of the lensed images are brightened considerably and when multiple lensed images are available they can be used to check for the consistency of their reconstructed source image.

Appropriate modeling of the gravitational field of the cluster enables the prediction of the location of critical lines for assumed source redshift slice where the magnification becomes infinity. Observers can

look for lensed object along these critical lines and there are in fact several candidate galaxies found in this way[39]-[44]. For instance, a survey for strongly lensed LAEs in 9 clusters yielded six candidates[40]. If any of these candidates are real, the number density of faint population of galaxies is much larger than previously considered and may well explain the necessary amount of re-ionizing source.

Figure 9 shows several  $z$ -dropout objects that could be Lyman Break Galaxies at redshift  $z \sim 7$  behind the cluster Abel 1703 at  $z = 0.28$ [44]. Photometric results indicate better match to galaxies at  $z \sim 7$ , however, here again the possibility of galaxies at  $z \sim 1.7$  is hard to rule out just from imaging.

**5. QUASARS** The next category of objects of interest in the distant, early universe are point sources, first, quasars. The photometric survey technique used to isolate high redshift quasar candidates is similar to that used for LBGs. Objects that match the expected spectral energy distribution of high redshift quasars are surveyed in the two color diagram or even a multi-dimension color manifold. Sloan Digital Sky Survey with its enormous data base is a nice test bed to apply this approach. Many quasars beyond redshift 6 were found in this way[45]-[47]. Gunn-Peterson tests[59, 60] of quasars up to redshift 6 indicate strongly that the cosmic re-ionization ended by redshift 6. The most distant quasar found to date is ULAS J1120+0641 at 7.08[42], which also supports the increase of neutral hydrogen fraction from  $z = 6$  to  $z = 7$ .

**6. GAMMA RAY BURSTS** The advent of the real time alert system of gamma ray burst increased the chance for optical and infrared astronomers to make prompt observations of these rapidly declining bursts[48]-[51]. The most distant GRB observed to date is GRB090423 at  $z \sim 8.2$ [51]. GRBs at high redshift can be useful tools to probe the cosmic re-ionization through its Lyman-alpha damping wing[51].

Timely spectroscopy of GRB050904[48, 49] using FOCAS[61] was very successful in deriving an estimate on the intergalactic neutral hydrogen from its damped Ly $\alpha$  wing absorption profile as well as giving a concrete evaluation of the chemical abundance in its host galaxy at  $z \sim 6.3$ .

GRB has a much simpler featureless contin-

uum than the quasar spectra which has broad emission lines superposed on the non-thermal continuum. GRBs are, in a way, better probes to study the re-ionization history. Both quasars and GRBs are point sources, the advent of laser guide star adaptive optics makes the observation of fainter objects feasible and we expect many such observations will be conducted soon, if the observatories pay efforts for timely follow-up spectroscopy of long burst GRBs. GRBs may provide a new way to study even higher-redshift galaxies and first generation of stars.

**7. CONCLUSION** The 8.2m Subaru Telescope[3], operated by the National Astronomical Observatory of Japan, at the summit of Mauna Kea has made a systematic census of early galaxy populations, especially the Ly $\alpha$  emitters for which a precise redshift measurement is feasible, in the Subaru Deep Field[55] and Subaru-XMM Deep Field[56], using a series of narrow band filters mounted on the wide field camera, Suprime-Cam[54], a unique instrument among those for 8-10m class telescopes. Owing to its wide field coverage of Suprime-Cam and a dedicated consortium to make a systematic observation feasible, the Subaru Suprime-Cam data base was extremely successful in finding many of distant populations of galaxies beyond redshift 6. The detectability of Ly $\alpha$  emission has been used as an important criterion to diagnose the epoch of the cosmic re-ionization[57].

Fig.10 shows the increase of the fraction of neutral hydrogen as measured from Gunn-Peterson tests[59] of quasars up to redshift 6.42 on the left hand. Our results from redshift 6.6 and 7.0 LAE is shown in red and an upper limit from redshift 6.3 GRB is shown in blue triangle. Planck satellite may give more clue in 5 years time. Surveys for galaxies beyond redshift 7 up to 11 is, therefore, extremely important to elucidate what happened actually in this period and for that we need NIR deep surveys.

Fig. 11 shows the annual growth of the records of the highest redshift objects. The Subaru discovery of  $z=6.964$  galaxy, IOK-1, was announced on Sep.14, 2006, and remained at the top until October 2010. As shown in Table 1, several galaxies at  $7.0 < z < 7.2$  were discovered during the last 10 months. The highest redshifts of quasars and GRBs are also exceeding  $z = 7$ . Some LBGs are also found whose photometric redshift estimate indicate  $z \sim 8-10$ . To

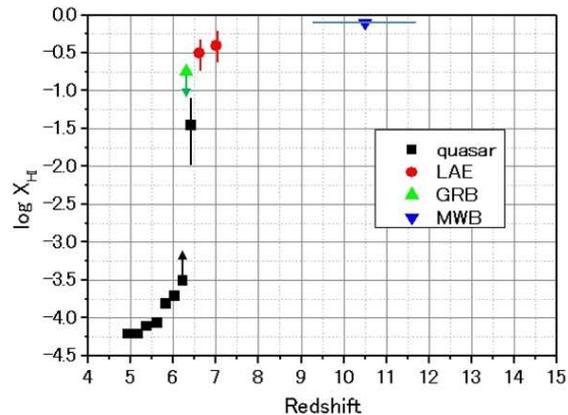


Fig. 10. Neutral hydrogen fraction of intergalactic matter as derived from Gunn-Peterson tests of  $z > 5$  quasars (black squares), damped Lyman-alpha wing profile (blue triangle), and Ly $\alpha$  luminosity function (red circles). Also plotted is the WMAP 7 year result, which predicts  $z \sim 10.5 \pm 1.2$  for instantaneous re-ionization[53]. Note, however, that WMAP cannot constrain when re-ionization started and how long it took to complete.

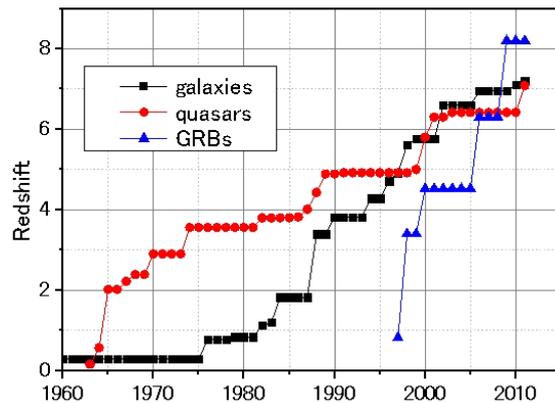


Fig. 11. Growth history of largest redshift objects. Note that GRBs are catching up quickly.

extend the survey volume at high redshift Universe, Hyper Suprime-Cam[62] having 7 times wider field of view than Suprime-Cam and the Large Synoptic Survey Telescope (LSST)[63] will play important roles. We are about to start seeing the cosmic dawn but to make a great leap in this science, we do need next generation of space telescope, James Web Space Telescope (JWST)[64], to probe population  $z > 10$ . The next generation ground based extremely large telescopes, Thirty Meter Telescope (TMT)[65], European Extremely Large Telescope (E-ELT)[66], and Giant Magellan Telescope (GMT)[67] will elucidate the concrete characteristics of the infant Universe.

**8. ACKNOWLEDGMENT** The author expresses his sincere respect and acknowledgment to all the individuals who contributed to the planning, construction, and operation of Subaru Telescope and those who made great use of this facility to advance the studies of the universe as reviewed in this article. He is also grateful to anonymous referees who reviewed the draft with great care and made useful suggestions.

### References

- [1] Partridge, R.B. & Peebles, P. J. E. (1967) Are young galaxies visible?, *Astrophys. J.*, **147**, 868-886
- [2] Pritchet, C.J. (1994) The search for primeval galaxies, *Publ. Astron. Soc. Pacific*, **106**, 1052-1067
- [3] Iye, M., Karoji, H., Ando, H., Kaifu, N., Kodaira, K., et al. (2004) Current Performance and On-Going Improvements of the 8.2 m Subaru Telescope, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, **56**, 381-397
- [4] Hu, E. M. & McMahon, R. G. (1996) Detection of Lyman-alpha-emitting galaxies at redshift 4.55, *Nature* **382**, 231-233
- [5] Hu, E. M., Cowie, L. L., McMahon, R. G., Capak, P., Iwamuro, F., Kneib, J.-P., Maihara, T., Motohara, K. (2002) A redshift  $z = 6.56$  galaxy behind the cluster Abell 370, *Astrophys. J.* **568**, L75-L79
- [6] Ajiki, M., Taniguchi, Y., Murayama, T., Nagao, T., Veilleux, S., Shioya, Y., Fujita, S.S., Kakazu, Y., Komiyama, Y., Okamura, S., Sanders, D. B., Oyabu, S., Kawara, K., Ohya, Y., Iye, M., Kashikawa, N., Yoshida, M., Sasaki, T., Kosugi, G., Aoki, K., Takata, T., Saito, Y., Kawabata, K., Sekiguchi, K., Okita, K., Shimizu, Y., Inata, M., Ebizuka, N., Ozawa, T., Yadoumaru, Y., Taguchi, H., Ando, H., Nishimura, T., Hayashi, M., Ogasawara, R., Ichikawa, S. (2002) A New High-Redshift Ly $\alpha$  Emitter: Possible Superwind Galaxy at  $z=5.69$ , *Astrophys. J.*, **576**, L25-L28.
- [7] Ajiki, M., Taniguchi, Y., Fujita, S., Shioya, Y., Nagao, T., Murayama, T., Yamada, S., Umeda, K., Komiyama, Y. (2003) A Subaru Search for Ly $\alpha$  Emitters at Redshift 5.7, *Astron. J.*, **126**, 2091-2107
- [8] Taniguchi, Y., Ajiki, M., Murayama, T., Nagao, T., Veilleux, S., Sanders, D. B., Komiyama, Y., Shioya, Y., Fujita, S.S., Kakazu, Y., Okamura, S., Ando, H., Nishimura, T., Hayashi, M., Ogasawara, R., Ichikawa, S. (2003), The Discovery of a Very Narrow Line Star-forming Object at a Redshift of 5.66, *Astrophys. J.*, **585**, L97-L100.
- [9] Kodaira, K., Taniguchi, Y., Kashikawa, N., Kaifu, N., Ando, H., Karoji, H., Ajiki, M., Akiyama, M., Aoki, K., Doi, M., Fujita, S. S., Furusawa, H., Hayashino, T., Imanishi, M., Iwamuro, F., Iye, M., Kawabata, K. S., Kobayashi, N., Kodama, T., Komiyama, Y., Kosugi, G., Matsuda, Y., Miyazaki, S., Mizumoto, Y., Motohara, K., Murayama, T., Nagao, T., Nariai, K., Ohta, K., Ohya, Y., Okamura, S., Ouchi, M., Sasaki, T., Sekiguchi, K., Shimasaku, K., Shioya, Y., Takata, T., Tamura, H., Terada, H., Umemura, M., Usuda, T., Yagi, M., Yamada, T., Yasuda, N., Yoshida, M. (2003) The discovery of two Lyman alpha emitters beyond redshift 6 in the Subaru Deep Field, *Publ. Astron. Soc. Jpn* **55**, L17-L21
- [10] Rhoads, J.E., Xu, C., Dawson, S., Dey, A., Malhotra, S., Wang, J., Jannuzi, B.T., Spinrad, H., Stern, D. (2004) A luminous Ly-alpha-emitting galaxy at redshift  $z = 6.535$ : Discovery and spectroscopic confirmation, *Astrophys. J.* **611**, 59-67

- [11] Nagao, T., Taniguchi, Y., Kashikawa, N., Kodaira, K., Kaifu, N., Ando, H., Karoji, H., Ajiki, M., Akiyama, M., Aoki, K., Doi, M., Fujita, S. S., Furusawa, H., Hayashino, T., Iwamuro, F., Iye, M., Kobayashi, N., Kodama, T., Komiyama, Y., Matsuda, Y., Miyazaki, S., Mizumoto, Y., Morokuma, T., Motohara, K., Murayama, T., Nariai, K., Ohta, K., Okamura, S., Ouchi, M., Sasaki, T., Sato, Y., Sekiguchi, K., Shimasaku, K., Shioya, Y., Tamura, H., Tanaka, I., Umemura, M., Yamada, T., Yasuda, N., Yoshida, M. (2004) A strong Ly-alpha emitter at  $z = 6.33$  in the Subaru Deep Field selected as an  $i'$ -dropout, *Astrophys. J.* **613**, L9-L12
- [12] Taniguchi, Y., Ajiki, M., Nagao, T., Shioya, Y., Murayama, T., Kashikawa, N., Kodaira, K., Kaifu, N., Ando, H., Karoji, H., Akiyama, M., Aoki, K., Doi, M., Fujita, S. S., Furusawa, H., Hayashino, T., Iwamuro, F., Iye, M., Kobayashi, N., Kodama, T., Komiyama, Y., Matsuda, Y., Miyazaki, S., Mizumoto, Y., Morokuma, T., Motohara, K., Nariai, K., Ohta, K., Ohya, Y., Okamura, S., Ouchi, M., Sasaki, T., Sato, Y., Sekiguchi, K., Shimasaku, K., Tamura, H., Umemura, M., Yamada, T., Yasuda, N., Yoshida, M. (2005) The SUBARU Deep Field Project: Lyman alpha emitters at a redshift of 6.6, *Publ. Astron. Soc. Jpn* **57**, 165-182
- [13] Shimasaku, K., Kashikawa, N., Doi, M., Ly, Chun, Malkan, Matthew A., Matsuda, Y., Ouchi, M., Hayashino, T., Iye, M., Motohara, K., Murayama, T., Nagao, T., Ohta, K., Okamura, S., Sasaki, T., Shioya, Y., Taniguchi, Y. (2006) Ly alpha Emitters at  $z=5.7$  in the Subaru Deep Field, *Publ Astron Soc Jpn*, **58**, 313-334
- [14] Kashikawa, N., Shimasaku, K., Malkan, M.A., Doi, M., Matsuda, Y., Ouchi, M., Taniguchi, Y., Ly, C., Nagao, T., Iye, M., Motohara, K., Murayama, T., Murozono, K., Nariai, K., Ohta, K., Okamura, S., Sasaki, T., Shioya, Y., Umemura, M. (2006) The End of the Re-ionization Epoch Probed by Ly-alpha Emitters at  $z=6.5$  in the Subaru Deep Field, *Astrophys.J*, **648**, 7-22
- [15] Iye, M., Ota, K., Kashikawa, N., Furusawa, H., Hashimoto, T., Hattori, T., Matsuda, Y., Morokuma, T., Ouchi, M., Shimasaku, K. (2006) A Galaxy at a redshift 6.96, *Nature*, **443**, 186-188
- [16] Murayama, T.; Taniguchi, Y.; Scoville, N. Z.; Ajiki, M.; Sanders, D. B.; Mobasher, B.; Ausel, H.; Capak, P.; Koekemoer, A.; Shioya, Y.; Nagao, T.; Carilli, C.; Ellis, R. S.; Garilli, B.; Giavalisco, M.; Kitzbichler, M. G.; Le Fevre, O.; Maccagni, D.; Schinnerer, E.; Smolcic, V.; Tribiano, S.; Cimatti, A.; Komiyama, Y.; Miyazaki, S.; Sasaki, S. S.; Koda, J.; Karoji, H. (2007) Ly $\alpha$  Emitters at Redshift 5.7 in the COSMOS Field, *Astrophys. J. Suppl.*, **172**, 523-544.
- [17] Ota, K., Iye, M., Kashikawa, N., Shimasaku, K., Kobayashi, M., Totani, T., Nagashima, M., Morokuma, T., Furusawa, H., Hattori, T., Matsuda, Y., Hashimoto, T., Ouchi, M. (2008) Reionization and galaxy evolution probed by  $z=7$  Ly-alpha emitters, *Astrophys.J.*, **677**, 12-26
- [18] Iye, M. (2008) High redshift galaxy surveys, *Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems II*. Edited by Brissenden, Roger J., Silva, David R. *Proceedings of the SPIE*, **7016**, 2-10
- [19] Ouchi, M., Ono, Y., Egami, E., Saito, T., Oguri, M., McCarthy, Patrick J., Farrah, D., Kashikawa, N., Momcheva, Ivelina, Shimasaku, K., Nakanishi, K., Furusawa, H., Akiyama, M., Dunlop, J. S., Mortier, An. M. J., Okamura, S., Hayashi, M., Cirasuolo, M., Dressler, A., Iye, M., Jarvis, M. J., Kodama, T., Martin, C. L., McLure, R. J., Ohta, K., Yamada, T., Yoshida, M. (2009) Discovery of a Giant Ly Emitter Near the re-ionization Epoch, *Astrophys. J.*, **696**, 1164-1175
- [20] Ota, K., Ly, C., Malkan, M.A., Motohara, K., Hayashi, M., Shimasaku, K., Morokuma, T., Iye, M., Kashikawa, N., Hattori, T. (2010) Spitzer Space Telescope Constraint on the Stellar Mass of a  $z = 6.96$  Ly Emitter, *Publ.Astron. Soc. Jpn*, **62**, 1167-1175
- [21] Ota, K., Iye, M., Kashikawa, N., Shimasaku, K., Ouchi, M., Totani, T., Kobayashi, M. A. R., Nagashima, M., Harayama, A., Kodaka, N., Morokuma, T., Furusawa, H., Tajitsu, A., Hattori, T. (2010) Ly Emitters at  $z = 7$  in the Subaru/XMM-Newton Deep Survey Field: Photometric Candidates and Luminosity Functions, *Astrophys. J.*, **722**, 803-811
- [22] Lehnert, M. D., Nesvadba, N. P. H., Cuby, J.-G., Swinbank, A. M., Morris, S., Clement, B., Evans, C. J., Bremer, M. N., Basa, S. (2010) Spectroscopic confirmation of a galaxy at redshift  $z = 8.6$ , *Nature*, **467**, 940-942
- [23] Kashikawa, N., Shimasaku, K., Matsuda, Y., Egami, E., Jiang, L., Nagao, T., Ouchi, M., Malkan, M.A., Hattori, T., Ota, K., Taniguchi, Y., Okamura, S., Ly, C., Iye, M., Furusawa, H., Shioya, Y., Shibuya, T., Ishizaki, Y., Toshikawa, J., (2011) Completing the Census of Ly-alpha Emitters at the re-ionization Epoch, *Astrophys. J.*, **734**, 119-
- [24] Ouchi, M., Shimasaku, K., Furusawa, H., Saito, T., Yoshida, M., Akiyama, M., Ono, Y., Yamada, T., Ota, K., Kashikawa, N., Iye, M., Kodama, T., Okamura, S., Simpson, C., Yoshida, M. (2011) Statistics of 207 Ly Emitters at a Redshift Near 7: Constraints on re-ionization and Galaxy Formation Models, *Astrophys. J.*, **723**, 869-894

- [25] Vanzella, E., Pentericci, L., Fontana, A., Grazian, A., Castellano, M., Boutsia, K., Cristiani, S., Dickinson, M., Gallozzi, S., Giallongo, E., Giavalisco, M., Maiolino, R., Moorwood, A., Paris, D., Santini, P. (2011) Spectroscopic Confirmation of Two Lyman Break Galaxies at Redshift Beyond 7, *Astrophys.J.* **730**, L35-L39
- [26] Cai, Z., Fan, X., Jiang, L., Bian, F., McGreer, I., Dave, R., Egami, E., and Zabludoff, A., (2011), Probing Population III Stars in Galaxy IOK-1 at  $z=6.96$  through He II Emission, *Astrophys. J.*, **736**, L28-L31
- [27] Schenker, M. A., Stark, D. P., Ellis, R. S., Robertson, B. E., Dunlop, J. S., McLure, R. J., Kneib, J. -P., Richard, J., (2011), Keck Spectroscopy of Faint  $3 < z < 8$  Lyman Break Galaxies:- Evidence for a Declining Fraction of Emission Line Sources In the Redshift Range  $6 < z < 8$ , submitted to *Astrophys.J.*, arXiv1107.12618
- [28] Pentericci, L.; Fontana, A.; Vanzella, E.; Castellano, M.; Grazian, A.; Dijkstra, M.; Boutsia, K.; Cristiani, S.; Dickinson, M.; Giallongo, E.; Giavalisco, M.; Maiolino, R.; Moorwood, A.; Santini, P. (2011), Spectroscopic confirmation of  $z \sim 7$  LBGs: probing the earliest galaxies and the epoch of reionization, submitted to *ApJ*, eprint arXiv:1107.1376
- [29] Ono, Y., Ouchi, M., Mobasher, B., Dickinson, M., Penner, K., Shimasaku, K., Weiner, B., J., Kartaltepe, J.S., Nakajima, K., Nayyeri, H., Stern, D., Kashikawa, N., Spinrad, H., (2011), Spectroscopic Confirmation of Three  $z$ -Dropout Galaxies at  $z = 6.844 - 7.213$ : Lyman Alpha Demography of  $z \sim 7$  Galaxies, submitted to *Astrophys. J.*, arXiv1107.3159
- [30] Iwata, I., Ohta, K., Tamura, N., Ando, M., Wada, S., Watanabe, C., Akiyama, M., Aoki, K. (2003) Lyman Break Galaxies at  $z \sim 5$ : Luminosity Function, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **55**, 415-432.
- [31] Ando, M., Ohta, K., Iwata, I., Akiyama, M., Aoki, K., Tamura, N. (2006) Deficiency of Large Equivalent Width Ly $\alpha$  Emission in Luminous Lyman Break Galaxies at  $z \sim 5 - 6?$ , *Astrophys.J.*, **45**, L9-L12
- [32] Bouwens, R. & Illingworth, G., (2006) Rapid Evolution in the most luminous galaxies during the first 900 million years, *Nature* **443**, 189-192
- [33] Bouwens, R. et al.,  $z \sim 7-10$  galaxies in the HUDF and GOODS fields, and their UV luminosity functions, arXiv-0803.0548v2 (2008)
- [34] Stark, D.P., Ellis, R.S., Ouchi, M. (2010) Keck Spectroscopy of Faint  $3 < z < 7$  Lyman Break Galaxies: A High Fraction of Line Emitters at Redshift Six, *Astrophys. J. Let.*, **728**, L2-L7
- [35] Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Labbe, I., Oesch, P. A., Trenti, M., Carollo, C. M., van Dokkum, P. G., Franx, M., Stiavelli, M., Gonzalez, V., Magee, D., Bradley, L. (2011) A candidate redshift  $z \sim 10$  galaxy and rapid changes in that population at an age of 500 Myr, *Nature*, **469**, 504-507
- [36] Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Oesch, P. A., Labbe, I., Trenti, M., van Dokkum, P., Franx, M., Stiavelli, M., Carollo, C. M., Magee, D., Gonzalez, V. (2011) UV Luminosity Functions from 132  $z \sim 7$  and  $z \sim 8$  Lyman-Break Galaxies in the ultra-deep HUDF09 and wide-area ERS WFC3/IR Observations, submitted to *Astrophys.J.* arXiv:1006.4360
- [37] Bunker, A.J., Wilkins, S., Ellis, R.S., Stark, D.P., Lorenzoni, S., Chiu, K., Lacy, M., Jarvis, M.J., Hickey, S. (2011) The contribution of high-redshift galaxies to cosmic re-ionization: new results from deep WFC3 imaging of the Hubble Ultra Deep Field, *Mon. Not.Royal Astron. Soc.*, **409**, 855-866
- [38] Bouwens, R. J., Illingworth, G. D., Oesch, P. A., Stiavelli, M., van Dokkum, P., Trenti, M., Magee, D., Labbe, I., Franx, M., Carollo, C. M., Gonzalez, V. (2010) Discovery of  $z \sim 8$  Galaxies in the Hubble Ultra Deep Field from Ultra-Deep WFC3/IR Observations, *Astrophys. J. Let*, **709**, L133-L137
- [39] Kneib, J.-P., Ellis, R. S., Santos, M. R. & Richard, J., (2004) A probable  $z \sim 7$  galaxy strongly lensed by the rich cluster A2218: Exploring the Dark Ages, *Astrophys. J.* **607**, 697-703
- [40] Stark, D. P., Ellis, R. S., Richard, J., Kneib, J.-P., Smith, G. P., Santos, M. R. (2007) A Keck survey for gravitationally-lensed Lyman-alpha emitters in the redshift range  $8.5 < z < 10.4$ : New constraints on the contribution of low luminosity sources to cosmic re-ionization, *Astrophys.J.* **663**10-28
- [41] Bradley, L. D., Bouwens, R. J., Ford, H. C., Illingworth, G. D., Jee, M. J., Benitez, N., Broadhurst, T. J., Franx, M., Frye, B. L., Infante, L., Motta, V., Rosati, P., White, R. L., Zheng, W. (2008) Discovery of a very bright strongly lensed galaxy candidate at  $z \sim 7.6$ , *Astrophys. J.* **678**, 647-654
- [42] Richard, J. et al., (2008) A Hubble & Spitzer Space Telescope Survey of Gravitationally-lensed galaxies: Further evidence for a significant population of low luminosity galaxies beyond redshift seven, *Astrophys.J.*, **685**, 705-724
- [43] Richard, J., Kneib, J.-P., Ebeling, H., Stark, D. P., Egami, E., Fiedler, A. K. (2011) Discovery of a possibly old galaxy at  $z = 6.027$ , multiply imaged by the massive cluster Abell 383, *Mon. Not. Royal Astron. Soc. Let.* **414**, L31-L35

- [44] Bradley, L. D., Bouwens, R. J., Zitrin, A., Smit, R., Coe, D., Ford, H. C., Zheng, W., Illingworth, G. D., Benitez, N., Broadhurst, T. J. (2011) Through the Looking Glass: Bright, Highly Magnified Galaxies at  $z \sim 7$  Behind Abell 1703, submitted to *Astrophys.J.*, arXiv1104.2035B
- [45] Fan, X., Carilli, C. L., Keating, B. (2006) Observational Constraints on Cosmic re-ionization, *Ann. Rev. Astron. & Astrophys.*, **44**, 415-462
- [46] Mortlock, D.J., Patel, M., Warren, S.J., Hewett, Paul C., Venemans, B.P., McMahon, R.G., Simpson, C.J. (2011), Probabilistic selection of high-redshift quasars, submitted to *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.*, arXiv1101.4965
- [47] Mortlock, D.J., Warren, S.J., Venemans, B.P., Patel, M., Hewett, P.C., McMahon, R.G., Simpson, C., Theuns, T., Gonzales-Solares, E.A., Adamson, A., Dye, S., Hably, N.C., Hirst, P., Irwin, M., Kuiper, E., Lawrence, A., and Roettgering, H.J.A., A luminous quasar at a redshift of  $z = 7.085$ , (2011), *Nature*, **474**, 616-619
- [48] Kawai, N., Kosugi, G., Aoki, K., Yamada, T., Totani, T., Ohta, K., Iye, M., Hattori, T., Aoki, W., Furusawa, H., Hurley, K., Kawabata, K. S., Kobayashi, N., Komiyama, Y., Mizumoto, Y., Nomoto, K., Noumaru, J., Ogasawara, R., Sato, R., Sekiguchi, K., Shirasaki, Y., Suzuki, M., Takata, T., Tamagawa, T., Terada, H., Watanabe, J., Yatsu, Y., Yoshida, A. (2006) Afterglow spectrum of a gamma-ray burst with the highest known redshift  $z = 6.295$ , *Nature*, **440**, 184-186
- [49] Totani, T., Kawai, N., Kosugi, G., Aoki, K., Yamada, T., Iye, M., Ohta, K., Hattori, T. (2006) Implications for cosmic re-ionization from optical afterglow spectrum of the Gamma-Ray Burst 050904 at  $z = 6.3$ , *Publ Astron Soc Jpn*, **58**, 485-498
- [50] Tanvir, N. R. & Jakobsson, P. (2007) Observations of GRBs at high redshift, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, **365**, 1377-1384
- [51] Tanvir, N. R. et al. (2009). "A gamma-ray burst at a redshift of  $z = 8.2$ ". *Nature* **461**, 1254-1257
- [52] Dunkley, J., Spergel, D. N., Komatsu, E., Hinshaw, G., Larson, D., Nolta, M. R., Odegard, N., Page, L., Bennett, C. L., Gold, B., Hill, R. S., Jarosik, N., Weiland, J. L., Halpern, M., Kogut, A., Limon, M., Meyer, S. S., Tucker, G. S., Wollack, E., Wright, E. L. (2009) Five-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Likelihoods and Parameters from the WMAP data, *Astrophysical J.* **701**, 1804-1813
- [53] Larson, D., Dunkley, J., Hinshaw, G., Komatsu, E., Nolta, M. R., Bennett, C. L., Gold, B., Halpern, M., Hill, R. S., Jarosik, N., Kogut, A., Limon, M., Meyer, S. S., Odegard, N., Page, L., Smith, K. M., Spergel, D. N., Tucker, G. S., Weiland, J. L., Wollack, E., Wright, E. L. (2011) Seven-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Power Spectra and WMAP-derived Parameters, *Astrophys.J.Suppl.*, **192**, 16-34.
- [54] Miyazaki, S., Komiyama, Y., Sekiguchi, M., Okamura, S., Doi, M., Furusawa, H., Hamabe, M., Imi, K., Kimura, M., Nakata, F., Okada, N., Ouchi, M., Shimasaku, K., Yagi, M., Yasuda, N. (2002) Subaru prime focus camera: Suprime-Cam, *Publ. Astron. Soc. Jpn* **54**, 833-853
- [55] Kashikawa, N., Shimasaku, K., Yasuda, N., Ajiki, M., Akiyama, M., Ando, H., Aoki, K., Doi, M., Fujita, S., Furusawa, H., Hayashino, T., Iwamura, F., Iye, M., Karoji, H., Kobayashi, N., Kodaira, K., Kodama, T., Komiyama, Y., Matsuda, Y., Miyazaki, S., Mizumoto, Y., Morokuma, T., Motohara, K., Murayama, T., Nagao, T., Nariai, K., Ohta, K., Okamura, S., Ouchi, M., Sasaki, T., Sato, Y., Sekiguchi, K., Shioya, Y., Tamura, H., Taniguchi, Y., Umemura, M., Yamada, T., Yoshida, M. (2004), The Subaru Deep Field: The Optical Imaging Data, *Publ Astron Soc Jpn*. **56**.1011-1023
- [56] Furusawa, H., Kosugi, G., Akiyama, M., Takata, T., Sekiguchi, K., Tanaka, I., Iwata, I., Kajisawa, M., Yasuda, N., Doi, M., Ouchi, M., Simpson, C., Shimasaku, K., Yamada, T., Furusawa, J., Morokuma, T., Ishida, C.M., Aoki, K., Fuse, T., Imanishi, M., Iye, M., Karoji, H., Kobayashi, N., Kodama, T., Komiyama, Y., Maeda, Y., Miyazaki, S., Mizumoto, Y., Nakata, F., Noumaru, J., Ogasawara, R., Okamura, S., Saito, T., Sasaki, T., Ueda, Y., Yoshida, M., (2008) The Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS). II. Optical Imaging and Photometric Catalogs, *Astrophys. J. Suppl.*, **176**, 1-18
- [57] Dijkstra, M., Mesinger, A., Wyithe, J. S.B. (2011) The detectability of Ly $\alpha$  emission from galaxies during the epoch of re-ionization, The detectability of Ly emission from galaxies during the epoch of re-ionization,
- [58] Kakazu, Y., Hu, E. M., Liu, M. C., Wang, W.-H., Wainscoat, R.J., Capak, P. L.. (2010) Hawaii Quasar and T Dwarf Survey. I. Method and Discovery of Faint Field Ultracool Dwarfs, *Astrophys. J.*, **723**, 184-196
- [59] Gunn, J. E. & Peterson, B. A. (1965) On the density of neutral hydrogen in intergalactic space, *Astrophys. J.* **142**, 1633-1641

- [60] Becker, R. H., Fan, X., White, R. L., Strauss, M. A., Narayanan, V. K., Lupton, R. H., Gunn, J. E., Annis, J., Bahcall, N. A., Brinkmann, J., Connolly, A. J., Csabai, I., Czarapata, P. C., Doi, M., Heckman, T. M., Hennessy, G. S., Ivezi, , Knapp, G. R., Lamb, D. Q., McKay, T. A., Munn, J. A., Nash, T., Nichol, R., Pier, J. R., Richards, G. T., Schneider, D. P., Stoughton, C., Szalay, A. S., Thakar, A. R., York, D. G. (2001) Evidence for re-ionization at  $z \sim 6$ : Detection of a Gunn-Peterson trough in a  $z = 6.28$  quasar, *Astron. J.* **122**, 2850-2857
- [61] Kashikawa, N., Aoki, K., Asai, R., Ebizuka, N., Inata, M., Iye, M., Kawabata, K. S., Kosugi, G., Ohyama, Y., Okita, K., Ozawa, T., Saito, Y., Sasaki, T., Sekiguchi, K., Shimizu, Y., Taguchi, Hi. Takata, T., Yadoumaru, Y., Yoshida, M. (2003) FOCAS: Faint Object Camera and Spectrograph for the Subaru Telescope, *Publ. Astron. Soc. Japan*, **54**, 819-832
- [62] Komiyama, Y., Aihara, H., Fujimori, H., Furusawa, H., Kamata, Y., Karoji, H., Kawanomoto, S., Mineo, S., Miyatake, H., Miyazaki, S., Morokuma, T., Nakaya, Hi., Nariai, K., Obuchi, Y., Okura, Y., Tanaka, Y., Uchida, T., Uruguchi, F., Utsumi, Y., Endo, M., Ezaki, Y., Matsuda, T., Miwa, Y., Yokota, H. Wang, S.-Y., Liaw, E.J., Chen, H.-Y., Chiu, C.-F., Jeng, D.-Z., (2010), Hyper Suprime-Cam: camera design, *SPIE*.**7735**,.116
- [63] <http://www.lsst.org/lsst/>
- [64] <http://www.jwst.nasa.gov/>
- [65] <http://www.tmt.org/>
- [66] <http://www.eso.org/sci/facilities/eelt/>
- [67] <http://www.gmto.org/>



## COMPLETING THE CENSUS OF Ly $\alpha$ EMITTERS AT THE REIONIZATION EPOCH<sup>\*,†</sup>

NOBUNARI KASHIKAWA<sup>1,2</sup>, KAZUHIRO SHIMASAKU<sup>3,4</sup>, YUICHI MATSUDA<sup>5</sup>, EIICHI EGAMI<sup>6</sup>, LINHUA JIANG<sup>6</sup>, TOHRU NAGAO<sup>7</sup>,  
MASAMI OUCHI<sup>8</sup>, MATTHEW A. MALKAN<sup>9</sup>, TAKASHI HATTORI<sup>10</sup>, KAZUAKI OTA<sup>8</sup>, YOSHIAKI TANIGUCHI<sup>7</sup>, SADANORI OKAMURA<sup>3,4</sup>,  
CHUN LY<sup>11</sup>, MASANORI IYE<sup>1,2</sup>, HISANORI FURUSAWA<sup>12</sup>, YASUHIRO SHIOYA<sup>7</sup>, TAKATOSHI SHIBUYA<sup>2</sup>, YOSHIFUMI ISHIZAKI<sup>2</sup>,  
AND JUN TOSHIKAWA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Optical and Infrared Astronomy Division, National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan; [n.kashikawa@nao.ac.jp](mailto:n.kashikawa@nao.ac.jp)

<sup>2</sup> Department of Astronomy, School of Science, Graduate University for Advanced Studies, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

<sup>3</sup> Department of Astronomy, University of Tokyo, Hongo, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>4</sup> Research Center for the Early Universe, University of Tokyo, Hongo, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>5</sup> Department of Physics, Durham University, South Road, Durham DH1 3LE, UK

<sup>6</sup> Steward Observatory, University of Arizona, 933 North Cherry Avenue, Tucson, AZ 85721, USA

<sup>7</sup> Research Center for Space and Cosmic Evolution, Ehime University, Bunkyo-cho, Matsuyama 790-8577, Japan

<sup>8</sup> Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwa-no-Ha, Kashiwa City, Chiba 77-8582, Japan

<sup>9</sup> Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles, CA 90095-1547, USA

<sup>10</sup> Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA

<sup>11</sup> Space Telescope Science Institute, 3700 San Martin Drive, Baltimore, MD 21218, USA

<sup>12</sup> Astronomy Data Center, National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Received 2010 November 3; accepted 2011 April 11; published 2011 June 6

### ABSTRACT

We carried out extended spectroscopic confirmations of Ly $\alpha$  emitters (LAEs) at  $z = 6.5$  and  $5.7$  in the Subaru Deep Field. Now, the total number of spectroscopically confirmed LAEs is 45 and 54 at  $z = 6.5$  and  $5.7$ , respectively, and at least 81% (70%) of our photometric candidates at  $z = 6.5$  ( $5.7$ ) have been spectroscopically identified as real LAEs. We made careful measurements of the Ly $\alpha$  luminosity, both photometrically and spectroscopically, to accurately determine the Ly $\alpha$  and rest-UV luminosity functions (LFs). The substantially improved evaluation of the Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$  shows an apparent deficit from  $z = 5.7$  at least at the bright end, and a possible decline even at the faint end, though small uncertainties remain. The rest-UV LFs at  $z = 6.5$  and  $5.7$  are in good agreement, at least at the bright end, in clear contrast to the differences seen in the Ly $\alpha$  LF. These results imply an increase in the neutral fraction of the intergalactic medium from  $z = 5.7$  to  $6.5$ . The rest-frame equivalent width ( $EW_0$ ) distribution at  $z = 6.5$  seems to be systematically smaller than  $z = 5.7$ , and it shows an extended tail toward larger  $EW_0$ . The bright end of the rest-UV LF can be reproduced from the observed Ly $\alpha$  LF and a reasonable  $EW_0$ –UV luminosity relation. Integrating this rest-UV LF provides the first measurement of the contribution of LAEs to the photon budget required for reionization. The derived UV LF suggests that the fractional contribution of LAEs to the photon budget among Lyman break galaxies significantly increases toward faint magnitudes. Low-luminosity LAEs could dominate the ionizing photon budget, though this inference depends strongly on the uncertain faint-end slope of the Ly $\alpha$  LF.

**Key words:** cosmology: observations – early universe – galaxies: formation – galaxies: high-redshift

**Online-only material:** color figures

### 1. INTRODUCTION

Cosmic reionization was a major event in the early history of the universe. It is a drastic phase transition of the intergalactic medium (IGM) and is closely related to the birth of the first galaxies; however, it is still unclear when and how reionization occurred. The polarization measurement of the cosmic microwave background (CMB) by *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe* implies reionization at  $z = 10.9 \pm 1.4$  (Komatsu et al. 2009), and the complete Gunn–Peterson (GP) trough of the Sloan Digital Sky Survey (SDSS) QSOs suggests that cosmic reionization ended at  $z \sim 6$  (e.g., Fan et al. 2006). In addition to these unknowns, it is unclear which objects were responsible for the cosmic reionization. Although QSOs are

expected to be the main contributor at the bright end of the luminosity function (LF) of ionizing sources, the QSO population alone cannot account for all the required ionizing photons (Jiang et al. 2008; Willott et al. 2005). Star-forming galaxies such as Lyman break galaxies (LBGs) and Ly $\alpha$  emitters (LAEs) at the reionization epoch are the only alternatives that could dominate the LF at the faint end.

The LAEs are one class of high- $z$  star-forming galaxies. Detecting their strong Ly $\alpha$  emissions is feasible even beyond  $z = 6$  using deep narrowband (NB) imaging. Along with LBGs, they tell us about early star formation history and initial structure formation. In addition, they may serve as valuable observational tools for probing the cosmic reionization process. Ly $\alpha$  photons are sensitive to the physical state of the IGM. It is expected that the damping wing from the surrounding neutral IGM attenuates Ly $\alpha$  photons so significantly that the Ly $\alpha$  emission flux will be reduced; therefore, it is naturally expected that the Ly $\alpha$  LF of LAEs should decline as it traces earlier times in the reionization epoch (Haiman & Spaans 1999; Malhotra & Rhoads 2004). The LAE population appears to have a similar number density over

\* The data presented herein were partly obtained at the W. M. Keck Observatory, which is operated as a scientific partnership among the California Institute of Technology, the University of California, and the National Aeronautics and Space Administration. The Observatory was made possible by the generous financial support of the W. M. Keck Foundation.

† Based in part on data collected at the Subaru Telescope, which is operated by the National Astronomical Observatory of Japan.

a long-time period from  $z = 3$  to  $6$  (e.g., Ouchi et al. 2008). Thus, if a sharp decline appears in the Ly $\alpha$  LF of LAEs, it could result from attenuation by the neutral IGM. Consequently, the observed census of LAEs during the reionization period could trace the neutral fraction of IGM hydrogen,  $x_{\text{HI}}$ . The census of observable LAEs beyond  $z = 6$  is sensitive to  $x_{\text{HI}}$  of the universe.

This ‘‘Ly $\alpha$  test’’ has an advantage in that it is sensitive even at  $x_{\text{HI}} > 10^{-3}$ , which is the upper limit for the application of the GP test. In addition, this method uses galaxies that are more abundant than QSOs or gamma-ray bursts (GRBs), so it will yield a volume-averaged estimate for the neutral fraction. Significant variation in IGM transmissions among different QSO lines of sight (Djorgovski et al. 2006) suggests that the reionization process is spatially patchy. In the future, it will be possible to investigate field-to-field variation in the neutral fraction, providing qualitative estimates of this spatially patchy reionization process. Alternatively, the change in the Ly $\alpha$  LF could be caused by galaxy evolution. Distinguishing IGM attenuation from galaxy evolution is crucial for this test. However, recent systematic surveys for LAEs at lower- $z$  revealed that the Ly $\alpha$  LF exhibits almost no evolution from  $z = 3$  to  $z = 6$ , though the physical reason for this is unclear. In any case, this result strongly supports the viability of the Ly $\alpha$  test, in which any decline of such static LAE LF at  $z > 5.7$  would be caused by an IGM attenuation. Nevertheless, part of the LF decline should be caused by the intrinsic galaxy evolution of LAEs; therefore, it is important to compare the rest-UV LFs based on the LAE sample at the same time as the Ly $\alpha$  test is made, because the rest-UV continuum flux is not sensitive to the neutral IGM.

Several model predictions of the Ly $\alpha$  LF at the reionization epoch agree that the amplitude of the LF decreases as  $x_{\text{HI}}$  increases (McQuinn et al. 2007; Haiman & Cen 2005; Le Delliou et al. 2005; Dijkstra et al. 2007b; Mesinger & Furlanetto 2007; Kobayashi et al. 2007; Iliiev et al. 2008; Dayal et al. 2009). The H II bubbles of bright LAEs clustered in the overdense regions would effectively overlap, creating a larger H II bubble with a high-ionization fraction, which would significantly reduce the Ly $\alpha$  flux attenuation. As a result, the bright LAEs that are expected to reside in a high-density environment should be readily observed, whereas faint LAEs are more severely attenuated. This results in a smooth decrease in the amplitude of the LF toward higher  $x_{\text{HI}}$ . To compare with these model predictions, we have to observe a large sample of high- $z$  LAEs.

In our previous papers (Kashikawa et al. 2006, hereafter K06; Shimasaku et al. 2006, hereafter S06), we have presented spectroscopic confirmations of 17 and 34 LAEs at  $z = 6.5$  and  $5.7$ , respectively, in the Subaru Deep Field (SDF); see also Kodaira et al. (2003) and Taniguchi et al. (2005) for LAEs at  $z = 6.5$ . The sample consisted of objects with excess flux in narrowband NB921 ( $\lambda_c = 9196 \text{ \AA}$ , FWHM =  $132 \text{ \AA}$ ) and NB816 ( $\lambda_c = 8150 \text{ \AA}$ , FWHM =  $120 \text{ \AA}$ ) images. We found that the Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$  reveals an apparent deficit at least at the bright end, corresponding to  $\sim 0.75$  mag fainter, compared with that observed at  $z = 5.7$ . The decline in the Ly $\alpha$  LF from  $z = 5.7$  to  $6.5$  could imply a substantial transition in the IGM ionizing state between these epochs, suggesting that reionization was not complete at  $z = 6.5$ . The trend was also confirmed in the LAE sample at  $z \approx 7$  (Iye et al. 2006). The Ly $\alpha$  luminosity density of LAEs did not change from  $z = 3$  to  $z = 5.7$ , and it gradually decreased from  $z = 5.7$  to  $7$  (Ota et al. 2008). The abrupt drop in luminosity density from  $z = 5.7$  to  $7.0$  did

not seem to be caused by continuous galaxy evolution. This gradual decline recalls the IGM attenuation, though we have few spectroscopically identified galaxies at  $z = 7$ .

Turning to the faint end of the LF below  $L(\text{Ly}\alpha) = 5 \times 10^{42}$ , the amplitude difference between our photometrically and spectroscopically determined estimates was too large to constrain the faint end. Our faint spectroscopic sample at both  $z = 6.5$  and  $5.7$  was still so small that we could not reliably identify a significant difference in the LF between these two epochs at the faint end. We neither determined the faint-end slope of the LF nor constrained the true contribution of LAEs to the entire photon budget required for full reionization.

In this paper, we describe our extended spectroscopic confirmations of LAEs at  $z = 6.5$  and  $5.7$  after K06 and S06 to determine more accurately the faint end of the LAE LFs close to the reionization epoch. Spectroscopic confirmations enhance the reliability of the LAE sample, eliminating possible contaminations from emission-line galaxies at lower- $z$ , and improving the derivation of the Ly $\alpha$  luminosity with precise redshifts. A large number of spectroscopically identified LAEs enable us to construct more accurate LFs in both the Ly $\alpha$  luminosity, which is sensitive to the neutral IGM, and the rest-UV luminosity, which is insensitive to it. The larger spectroscopic sample also provides better statistical estimates of the contamination rate, increasing the reliability of our photometric LAE sample. Purely photometric detection of LAE candidates might have non-negligible ambiguities in estimating both Ly $\alpha$  luminosities, which is sensitive to the neutral IGM, and the rest-UV luminosity, which is insensitive to it, especially at high- $z$  beyond  $z = 6.5$ , where it is difficult to detect them even with broadband imaging (Hibon et al. 2010; Tilvi et al. 2010; Ota et al. 2010). An increase in the spectroscopic sample size could also improve the stacked spectrum, which may provide insights into either the internal dynamics of the LAE or the IGM properties (K06).

The Subaru Suprime-Cam has a very large field of view (FOV;  $27 \times 34 \text{ arcmin}^2$ ). Wide-field imaging increases the chance of discovering rare objects, such as the most distant galaxies (Iye et al. 2006). Furthermore, it is generally predicted in almost all models of the reionization process that an overlapping H II bubble at the end of the reionization could be as large as 10 physical Mpc (Barkana & Loeb 2004; Wyithe & Loeb 2004; Furlanetto et al. 2004), which corresponds to the FOV size of the Subaru Suprime-Cam. Thus, wide FOV observations are essentially required to achieve an unbiased picture of the universe at the reionization period. Our LAE samples were obtained from a general blank field without resorting to amplification of gravitational lensing by foreground clusters, providing reliable statistics about their LFs. High- $z$  surveys rendered by gravitational lensing, which are accessible to low-luminosity sources (Richard et al. 2008; Stark et al. 2007; Hu et al. 2002), are complementary to our survey.

This paper is organized as follows. In Section 2, we review our photometric LAE sample and initial spectroscopic identifications, presented in our previous studies. In Section 3, we describe our new spectroscopically identified LAE sample at  $z = 6.5$  and  $5.7$ . In Section 4, we accurately derive the Ly $\alpha$  and rest-UV luminosities of our LAE sample, comparing the Ly $\alpha$  and UV LFs between  $z = 6.5$  and  $5.7$ . Comparisons of the rest-frame equivalent width ( $\text{EW}_0$ ) and stacked Ly $\alpha$  emission profile are presented in Sections 5 and 6. In Section 7, we present a new method for deriving the rest-UV LF of LAEs, using the Ly $\alpha$  LF and  $\text{EW}_0$  distribution, to constrain the photon budget required for reionization. A summary of the paper is provided in

**Table 1**  
Summary of Spectroscopic Observations

Observational Run	Instrument	Date(UT)	$T_{\text{integ}}$ (ks)	Seeing(arcsec)	$N_{\text{mask}}^a$	$N_{65}^b$	$N_{57}^c$
2006 <sup>d</sup>	FOCAS	Apr 26	7.2–9.0	0.5–1.0	2	2	0
2007	FOCAS	May 19–22, 24	10.8–16.2	0.5–1.2	5	15	4
2008	DEIMOS	Apr 30, May 1	5.4–10.8	0.7–1.1	4	1	2
2009	DEIMOS	Apr 26–27	10.8–16.2	0.7–0.8	3	8	10
2009 <sup>e</sup>	DEIMOS	Apr 24–25	10.8–12.6	0.7–0.8	2	2	1
2010 <sup>f</sup>	FOCAS	Mar 18–21	18.0		2	0	3
Total						28	20

**Notes.**

<sup>a</sup> The total number of masks.

<sup>b</sup> The total number of identified LAEs at  $z = 6.5$ .

<sup>c</sup> The total number of identified LAEs at  $z = 5.7$ .

<sup>d</sup> These were identified in the course of other observational program in Nagao et al. (2007).

<sup>e</sup> These were identified in the course of other observational program in L. Jiang et al. (2011, in preparation).

<sup>f</sup> These were identified in the course of other observational program in M. Iye et al. (2011, in preparation).

Section 8, with some discussion of the implications for reionization based on our results.

Throughout the paper, we assume cosmology parameters:  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$ , and  $H_0 = 70 h_{70} \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . These parameters are consistent with recent CMB constraints (Komatsu et al. 2009). Magnitudes are given in the AB system.

## 2. SUMMARY OF THE PREVIOUS LAE SAMPLE AT $z = 6.5$ AND $z = 5.7$ AS OF 2006

The sample selection of photometric LAE candidates at  $z = 6.5$  and  $z = 5.7$  was presented in Taniguchi et al. (2005) and S06, respectively. The details of observation, photometry, and color selection were presented in those papers; here, we briefly discuss our photometric selection of the LAE sample. The sample was based on flux-excess objects in narrowband NB921 and NB816 images, compared with very deep broadband images of the SDF (Kashikawa et al. 2004). We selected LAE candidates at  $z = 6.5$  with definite NB excesses down to the  $5\sigma$  limiting magnitude of NB921 = 26.0, i.e.,  $z' - \text{NB921} > 1.0$  and  $z' - \text{NB921} > (z' - \text{NB921})_{3\sigma}$ , where  $(z' - \text{NB921})_{3\sigma}$  is the  $3\sigma$  error in the color of  $z' - \text{NB921}$ , and the very red color in broad bands, i.e.,  $(i' - z' \geq 1.3$  and  $z < i'_{2\sigma} - 1.3)$  or  $(z \geq i'_{2\sigma} - 1.3)$ , where  $i'_{2\sigma}$  are defined as  $2\sigma$  limiting magnitudes of  $i'$ , to reduce contamination from foreground emission-line galaxies. We also applied the no detection (ND;  $\leq 3\sigma$ ) criteria in all bands blueward of the dropout band, i.e.,  $B$ ,  $V$ , and  $R$ . In Taniguchi et al. (2005), we found 58 photometric candidates at  $z = 6.5$  down to NB921 = 26.0 in the effective survey region of  $876 \text{ arcmin}^2$ ; spectroscopic confirmations of 17 candidates were presented in K06. In S06, we selected LAE candidates at  $z = 5.7$  with NB excesses with  $i' - \text{NB816} \geq 1.5$  down to NB816 = 26.0 and very red color in broad bands, i.e.,  $(R - z' \geq 1.5$  and  $R < R_{2\sigma})$  or  $(R \geq R_{2\sigma})$ , where  $R_{2\sigma}$  are defined as  $2\sigma$  limiting magnitudes of  $R$ . We also applied the ND ( $\leq 2\sigma$ ) criterion in the  $B$  and  $V$  bands. The 89 photometric candidates were found at  $z = 5.7$  down to NB816 = 26.0 in the same survey region; 34 of them were confirmed by spectroscopy. We estimated the detection completeness, defined as the ratio of detected LAE candidates to all the LAEs actually present in the universe. This should be corrected when evaluating the LF as a function of NB magnitudes by counting artificial objects distributed on the real NB images. The detection completeness was evaluated as  $>0.8$  at NB816  $< 25.0$  and  $\sim 0.75$  at NB816 = 26.0, and as  $>0.75$  at NB921  $< 25.0$  and  $\sim 0.45$  at NB921 = 26.0, for the  $z = 5.7$  and

$6.5$  sample, respectively. We quantitatively distinguished LAEs from nearby emitters based on their asymmetric emission-line profile, using the “weighted skewness” indicator (K06). The comoving survey volume was as large as  $2.17 \times 10^5 \text{ Mpc}^3$  and  $1.80 \times 10^5$  for  $z = 6.5$  and  $z = 5.7$ , respectively. It should be noted that the LAE samples at these two epochs were extracted from the same field using the same photometric procedure, similar survey volume, and similar selection criteria. We carefully determined the NB-excess criteria to provide almost the same EW thresholds ( $\text{EW}_0 > 10 \text{ \AA}$ ) for both LAE samples.

## 3. NEW SPECTROSCOPIC IDENTIFICATIONS FROM LAE SAMPLE

### 3.1. Spectroscopic Observations

We carried out further spectroscopic observations with the Subaru FOCAS (Kashikawa et al. 2002) and the Keck II DEIMOS (Faber et al. 2003) over the last four years (2006–2010). This spectroscopic campaign is summarized in Table 1.

The FOCAS observations were made with a  $300 \text{ line mm}^{-1}$  grating and an O58 order-cut filter. The spectra covered  $5400\text{--}10000 \text{ \AA}$ , with a pixel resolution of  $1.34 \text{ \AA}$ . The  $0'.6$  wide slit gave a spectroscopic resolution of  $7.1 \text{ \AA}$  ( $R \sim 1300$ ). The spatial resolution was  $0'.3 \text{ pixel}^{-1}$  with 3 pixel on-chip binning. We also allocated slits for NB921-strong ( $z' - \text{NB921} > 1$ ) emitters, irrespective of their  $(i' - z')$  color, as an LAE criterion to test our selection criteria. Some extra slits were allocated for our candidates in another observation by Nagao et al. (2007), in which they used a  $175 \text{ line mm}^{-1}$  Echelle grating, an SDSS  $z'$  filter as an order-cut filter, and  $0'.83$  slit, giving  $R \sim 1500$ . Extra slits were also allocated for observations by M. Iye et al. (2011, in preparation), in which they used the VPH900 grism, O58 order-cut filter, and  $0'.8$  slit, giving  $R \sim 1500$ . We obtained spectra of standard stars Hz 44, Feige 34, and BD+28 for flux calibration. The data were reduced in a standard manner.

For the DEIMOS observations, we used an  $830 \text{ line mm}^{-1}$  grating and a GG495 order-cut filter. The central wavelength was set to  $\lambda_c = 8100 \text{ \AA}$ . The slit width was  $1''.0$  with  $0.47 \text{ \AA pixel}^{-1}$ , giving a resolving power of  $\sim 3600$ . The wavelength coverage was  $\sim 5000\text{--}10000 \text{ \AA}$ , depending on the position in the mask. We also allocated slits for strong NB921 emitters. Some extra slits were allocated for our candidates in

another observation led by L. Jiang et al. (2011, in preparation), in which they used almost the same instrumental setup, except that  $\lambda_c = 9239 \text{ \AA}$ . We obtained spectra of standard stars BD +28 4211 and Hz 44 for flux calibration. The data were reduced with the spec2d pipeline<sup>13</sup> for DEEP2 DEIMOS data reduction. During the 2010 run, the flexure compensation system (FCS) of DEIMOS was broken. Unexpected flexure at this time was adequately corrected by shifting the spectral images based on the instrumental rotation angle, which is sensitive to the flexure change, of each exposure.

All spectroscopic observations were taken at high enough resolving power to distinguish single Ly $\alpha$  emission from [O II] doublets (rest-frame separation of 2.78  $\text{\AA}$ ); however, in practice, it is hard to discriminate between the features, given very faint emissions. To quantitatively distinguish LAEs from nearby emitters, we used a line asymmetry estimator, called weighted skewness,  $S_w$ , as in K06. Skewness is a popular statistic defined as the third moment of the distribution function. In K06, we found that this estimator is sensitive to asymmetry and carefully determined the critical value to distinguish LAEs from nearby emitters based on our NB921- and NB816-excess sample. The  $S_w$  values of foreground emitters never exceeded  $S_w = 3$ , which we set as the critical  $S_w$  value to distinguish LAEs from foreground emitters. We should note that the threshold  $S_w = 3$  applied in this study is only valid for LAEs at  $z = 5.7$  and 6.5. We have no guarantee that the same critical value can be used for LAEs at different  $z$ , where, in principle, different intergalactic attenuation could change the degree of asymmetry in the Ly $\alpha$  emission. We serendipitously identified some LAEs (three for  $z = 6.5$  and eight for  $z = 5.7$ ) from strong NB921 and NB816 emitters that did not meet our color selection criteria. We found that most of them had very close neighbors in the images, which prevented accurate aperture photometry. In summary, we identified 28 and 20 additional LAEs at  $z = 6.5$  and 5.7, respectively.<sup>14</sup> The spectra of these additional LAEs are shown in Figures 1 and 2, and their spectroscopic properties are summarized in Tables 2 and 3 for  $z = 6.5$  and 5.7, respectively.

We did not detect  $N_V \lambda 1240$ , which is the only accessible strong high-ionization metal line indicative of active galactic nucleus (AGN) activity, from any of these newly identified LAEs. We have some candidates (two for  $z = 6.5$  and six for  $z = 5.7$ ) that exhibited only a faint, poorly fit “single-” line emission signal, so we could not verify its asymmetry, which is the only key diagnostic for distinguishing Ly $\alpha$  emission from other emissions. We did not include these single-line emitters in the LAE samples. We had some additional candidates (7 for  $z = 6.5$  and 10 for  $z = 5.7$ ) for which no emission signal was detected, even using 8–10 m class telescopes. These might be intrinsically too faint, or some could be transient objects. Table 4 summarizes our current spectroscopic identifications of LAEs at  $z = 6.5$  and 5.7 in the SDF and Figure 3 shows the NB-magnitude histogram of spectroscopic identifications. At this time, 90% and 74% of the photometric candidates at  $z = 6.5$  and 5.7, respectively, have been followed by spectroscopy. Uncertain “single” and “no-detection” candidates are of course only dominant at the very faint end of the sample, so we consider this to be our current observational feasibility limit.

<sup>13</sup> The data reduction pipeline was developed at University of California, Berkeley, with support from National Science Foundation grant AST 00-71048.

<sup>14</sup> SDF J132417.9+271746 and SDF J132521.1+272712, classified as single-line emitters in Taniguchi et al. (2005), and SDF J132417.8+272833 (ID 91179), classified as a single-line emitter in S06, were found to be LAEs in the deep spectroscopic observations performed in this study.

Despite this uncertainty, most of the photometric candidates have been spectroscopically identified, and only six candidates remain without follow-up spectroscopy in the  $z = 6.5$  sample.

### 3.2. Spectroscopic Sample

Now the total numbers of spectroscopically confirmed LAEs in the SDF are 45 and 54 at  $z = 6.5$  and 5.7, respectively. Figure 4 shows the line-peak wavelength distribution of spectroscopically confirmed LAEs. The distributions of line peaks show an apparent blueward deviation against the NB transmission curve, which was already confirmed in our previous studies. This is due to the fact that the asymmetric LAE profile, with a broad red wing and sharp blue cutoff and a discontinuous Lyman continuum break, contributes more to the NB flux when a line peak lies at the blue side of the transmission curve. The evaluations of sample completeness and contamination rates are listed in Table 4. At least 81% (70%) of our photometric candidates at  $z = 6.5$  (5.7) have been spectroscopically identified as real LAEs. Because “single” and “ND” candidates depend on uncertain assumptions, we evaluated two extreme values, i.e., we assumed that all of these uncertain candidates were really LAEs and then assumed that none of the candidates was really an LAE. By taking the average of these two cases, our photometric sample completeness factor, determined as the ratio of the number of true LAEs to the number of objects that meet our selection criteria ( $= (1 - \langle \text{CT} \rangle) / \langle \text{CP} \rangle$ , see Table 4), was evaluated to be  $(1 - 0.105) / 0.935 = 0.957$  and  $(1 - 0.180) / 0.860 = 0.953$  for  $z = 6.5$  and  $z = 5.7$ , respectively. These spectroscopic results indicate that our photometric sample has high reliability, indicating our color selection process works well. [O III] and [O II] emitters identified by spectroscopy based on their doublet signatures were removed from the photometric sample, whereas LAEs that were serendipitously found by spectroscopy but not listed in the original photometric sample were included in the following analysis.

## 4. Ly $\alpha$ AND REST-UV LUMINOSITY FUNCTIONS

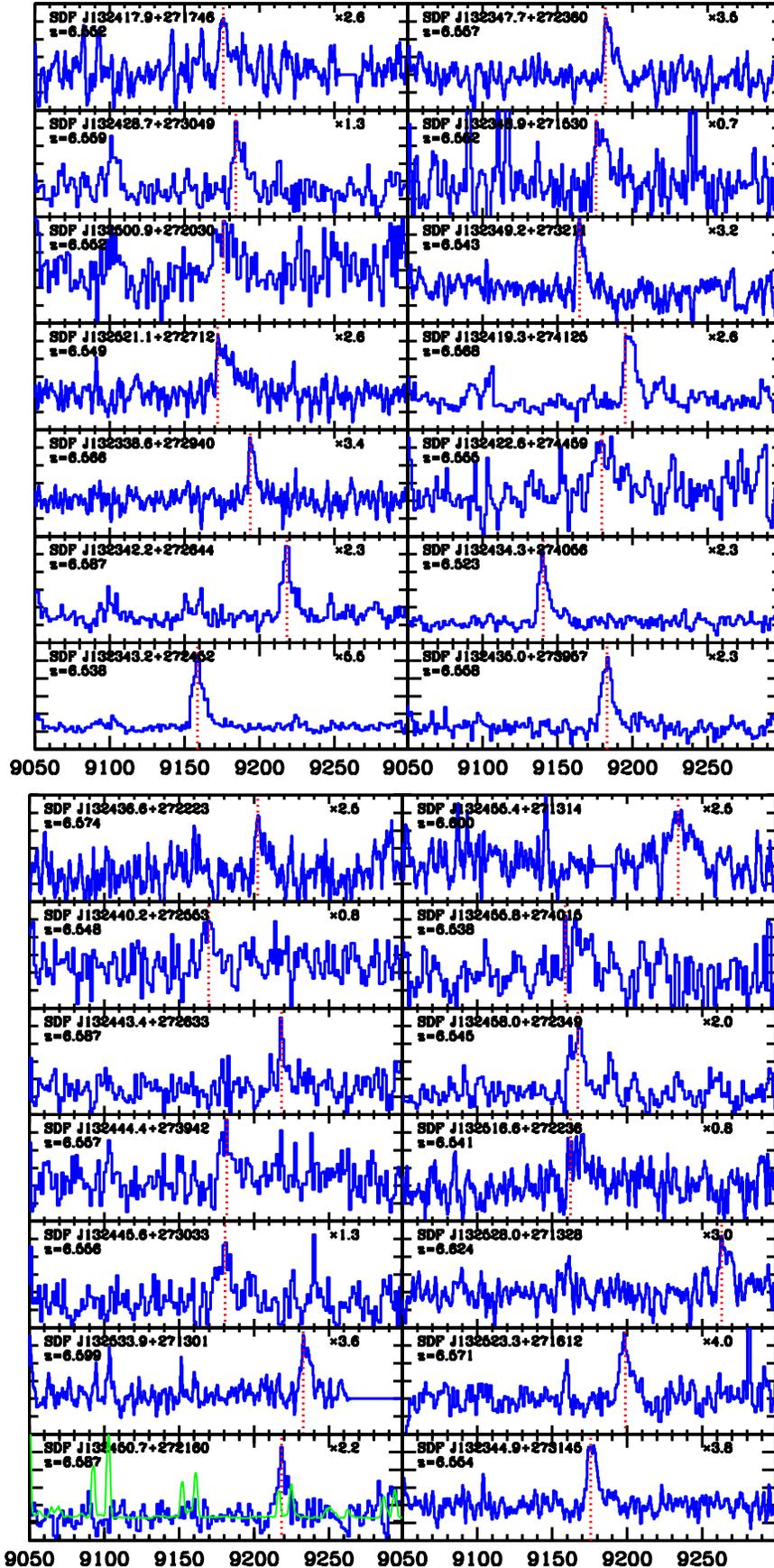
### 4.1. Deriving Ly $\alpha$ Luminosity

We derived Ly $\alpha$  luminosity both photometrically and spectroscopically. The latter would be more accurate than the former, but hardly gives an accurate measurement of faint continuum flux in most cases, though these are eventually found to be fairly consistent with one another. We measured luminosities more carefully in this than the previous study (K06) to accurately determine Ly $\alpha$  and rest-UV LFs. We applied the following procedure, not only to the newly identified LAE sample but also to the previously identified objects by recalculating the Ly $\alpha$  and rest-UV luminosities.

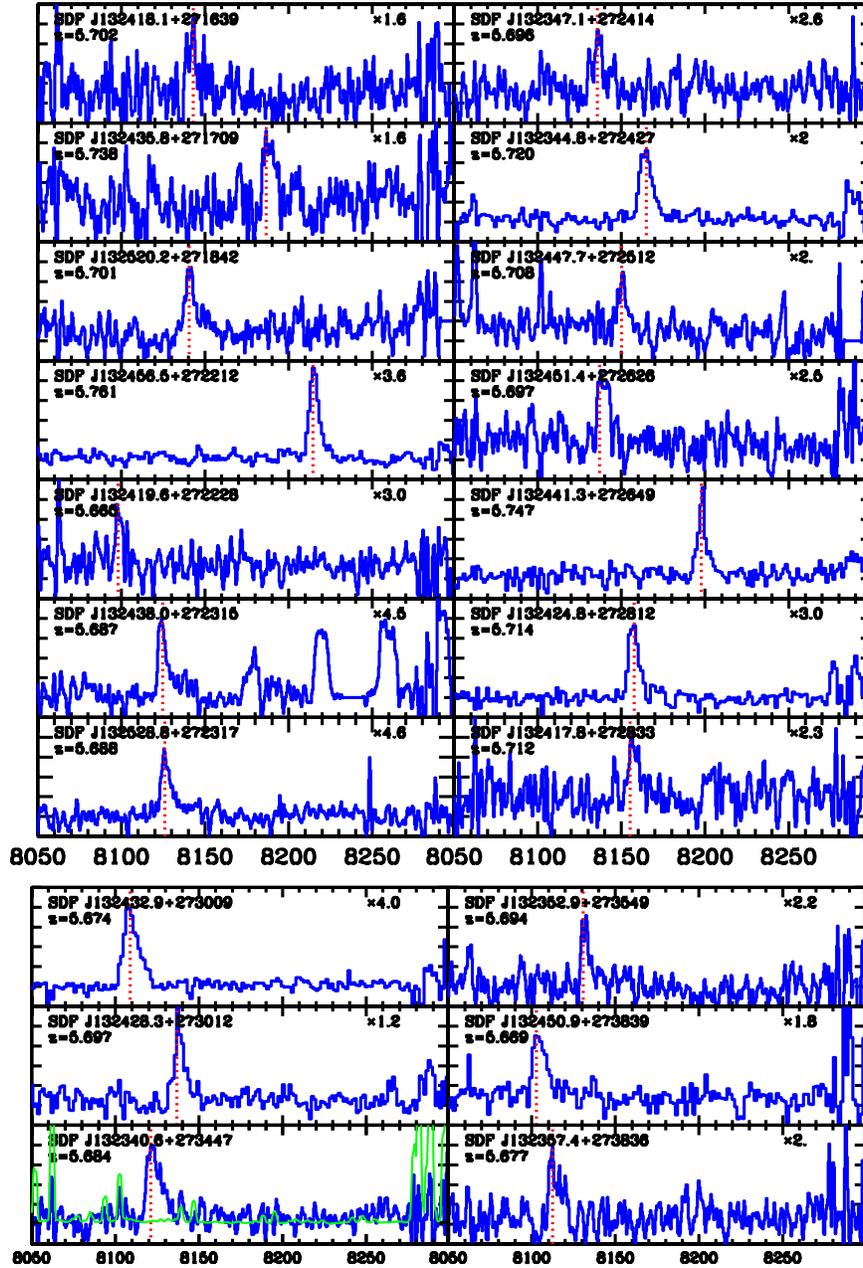
First, for the photometric estimate of Ly $\alpha$  line flux, the Ly $\alpha$  line ( $f_{\text{line}}$ ;  $\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ ) and rest-UV continuum ( $f_c$ ;  $\text{erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$ ) fluxes were evaluated from NB and BB magnitudes ( $m_{\text{NB}}$  and  $m_{\text{BB}}$ ) as follows:

$$m_{\text{NB}, \text{BB}} + 48.6 = -2.5 \log \frac{\int_0^{\nu_{\text{Ly}\alpha}} (f_c + f_{\text{line}}) T_{\text{NB}, \text{BB}} d\nu / \nu}{\int T_{\text{NB}, \text{BB}} d\nu / \nu}, \quad (1)$$

where  $\nu_{\text{Ly}\alpha}$  is the observed frequency of Ly $\alpha$ , and  $T_{\text{NB}}$  and  $T_{\text{BB}}$  are the transmission bandpasses of the NB and BB filters, respectively. The (NB, BB) filter combinations in the above formula are (NB921,  $z'$ ) and (NB816,  $z'$ ) for  $z = 6.5$  and 5.7, respectively. We assumed that the spectral energy distribution (SED) of LAEs had a constant  $f_c$  and  $\delta$ -function Ly $\alpha$  emission



**Figure 1.** Spectra of 28 spectroscopically confirmed LAEs at  $z = 6.5$ . ID number and redshift are shown in the upper left corner of each panel. Spectra taken by DEIMOS were smoothed with a 3 pixel boxcar. The vertical dotted line indicates the center of the Ly $\alpha$  emission line. The vertical scale is marked in  $0.1 \times 10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$ , and a scaling factor to obtain the correct scale appears in the right corner in each panel. The sky spectrum is overplotted on the left bottom panel with an arbitrary flux scale.

Figure 2. Same as Figure 1, but for 20 LAEs at  $z = 5.7$ .

profile, whose line width was much smaller than  $\nu_{Ly\alpha}$ . The estimate of the Ly $\alpha$  line flux was not largely affected, even when taking account of a finite line width as of the observed  $\lesssim 30 \text{ \AA}$ , which made the Ly $\alpha$  flux change at most by  $\sim 16\%$  at the reddest wavelength of the NB band. The observed value was adopted for  $\nu_{Ly\alpha}$  when spectroscopically identified; otherwise, the central frequency,  $\nu_c$ , of the NB filters was used. We used the actual filter transmission curves convolved by telescope, instrument, and atmospheric transmissions for  $T_{NB, BB}$ . The importance of such a careful analysis of filters' non-square transmission curve has been pointed out in Gronwall et al. (2007). If an object was not detected in the BB filter,  $m_{BB}$  was replaced by the  $1\sigma$  limiting magnitude of BB, and  $f_c$  was forcibly set to 0 when  $f_c < 0$ .

In spectroscopic measurements of Ly $\alpha$  line flux, we corrected for slit loss. The target was regarded as almost perfectly centered in the slit because the typical positioning error of the slit on the target object was as small as  $0''.1$  rms for both FOCAS and

DEIMOS spectrographs. Thus, we assumed that the slit flux loss depended only on the seeing size, target size, and slit width. We calculated a possible slit flux loss based on the seeing size and slit width for each spectroscopic observation. The intrinsic Ly $\alpha$  radial light profile of each object was simply assumed to be a Gaussian profile with FWHM measured on the NB image deconvolved by the seeing size ( $0''.98$ ) of the image. The slit lengths were always so much longer ( $> 8''.0$ ) than the object size that slit loss along the spatial direction was negligible. The resultant slit loss was corrected for the spectroscopically measured Ly $\alpha$  flux for each object. The average slit loss was evaluated to be  $24.1\% \pm 10.1\%$  and  $30.3\% \pm 12.5\%$  for  $z = 6.5$  and  $5.7$ , respectively. The difference in slit flux loss between these two samples was minor.

Comparisons of the Ly $\alpha$  fluxes measured photometrically and spectroscopically for the spectroscopically identified LAE sample are shown in Figures 5 and 6. The correspondence is

**Table 2**  
Spectroscopic Properties of  $z = 6.5$  LAEs

ID <sup>a</sup>	NAME	$z^b$	$f^{\text{spec}}(\text{Ly}\alpha)^c$ ( $10^{-18}$ erg s $^{-1}$ cm $^{-2}$ )	$L^{\text{spec}}(\text{Ly}\alpha)^d$ ( $10^{42}h_{70}^{-2}$ erg s $^{-1}$ )	FWHM <sup>e</sup> (Å)	$S_w$ (Å)	OBS. <sup>f</sup>
12	SDF J132417.9+271745	6.552	10.5	5.14	9.05	9.33 ± 2.38	D
13	SDF J132428.7+273049	6.559	5.35	2.62	10.1	7.49 ± 1.72	F
14	SDF J132500.9+272030	6.552	8.78	4.29	19.2	8.45 ± 3.12	F
19	SDF J132521.1+272712	6.549	9.56	4.67	12.4	12.91 ± 3.17	D
22	SDF J132338.6+272940	6.566	9.59	4.71	5.04	12.0 ± 3.14	D
23	SDF J132342.2+272644	6.587	12.5	6.19	6.50	6.17 ± 0.96	F
24	SDF J132343.2+272452	6.538	21.5	10.4	9.10	8.74 ± 0.56	F
25	SDF J132347.7+272360	6.557	10.2	4.99	9.53	7.41 ± 1.84	D
26	SDF J132348.9+271530	6.552	4.66	2.28	16.0	16.66 ± 4.56	F
27	SDF J132349.2+273211	6.543	9.62	4.69	7.99	8.16 ± 4.83	D
34	SDF J132419.3+274125	6.568	11.9	5.85	9.41	3.54 ± 0.59	F
35	SDF J132422.6+274459	6.555	7.96	3.90	18.5	11.30 ± 4.73	F
40	SDF J132434.3+274056	6.523	9.27	4.49	7.45	8.89 ± 1.10	F
41	SDF J132435.0+273957	6.558	12.5	6.10	8.83	5.25 ± 1.40	F
42	SDF J132436.5+272223	6.574	6.37	3.14	9.39	9.07 ± 2.88	D
43	SDF J132440.2+272553	6.548	6.10	2.98	16.5	4.03 ± 3.61	F
44	SDF J132443.4+272633	6.587	6.85	3.39	16.0	6.89 ± 2.14	F
45	SDF J132444.4+273942	6.557	6.97	3.42	14.0	14.60 ± 22.02	F
46	SDF J132445.6+273033	6.556	10.0	4.91	23.2	16.62 ± 4.95	F
47 <sup>g</sup>	SDF J132533.9+271301	6.599	6.53	5.94	8.84	6.62 ± 0.51	D
49	SDF J132450.7+272160	6.587	10.8	5.35	9.14	3.98 ± 1.22	F
50	SDF J132455.4+271314	6.660	13.5	6.70	18.1	6.04 ± 7.09	D
51	SDF J132455.8+274015	6.538	7.06	3.44	25.2	10.55 ± 6.75	F
53	SDF J132458.0+272349	6.545	17.7	8.65	17.3	3.99 ± 2.72	F
56	SDF J132516.6+272236	6.541	6.59	3.21	14.5	6.60 ± 13.6	D
57	SDF J132528.0+271328	6.624	17.5	8.79	10.1	6.41 ± 4.03	D
60	SDF J132523.3+271612	6.571	15.9	7.82	10.9	8.87 ± 0.59	F
61	SDF J132344.9+273145	6.554	14.5	7.08	8.04	7.89 ± 3.75	D

**Notes.**

<sup>a</sup> The object IDs are those of T05, except ID = 60 and 61, which are not listed in the photometric catalog of T05.

<sup>b</sup> The redshift was derived from the wavelength of the flux peak in an observed spectrum assuming the rest wavelength of Ly $\alpha$  to be 1215 Å. These measurements could be overestimated in the case of significant damping wings by IGM. Also, the observed peak position was slightly shifted redward due to instrumental resolution. See Figure 13.

<sup>c</sup> The observed line flux corresponds to the total amount of the flux within the line profile. The slit loss was corrected.

<sup>d</sup> No dust absorption correction was applied.

<sup>e</sup> Corrected for instrumental broadening.

<sup>f</sup> Observed with FOCAS (F) or DEIMOS (D).

<sup>g</sup> The coordinates of T05 ID-47 appeared incorrectly in T05.

good except in a few cases. Note that the photometric Ly $\alpha$  flux may have non-negligible uncertainty when  $m_{BB}$  is only given by an upper limit, as appears often in the  $z = 6.5$  sample. We hereafter use spectroscopically measured Ly $\alpha$  fluxes for the spectroscopically identified LAEs and photometrically inferred Ly $\alpha$  fluxes for the remaining uncertain (referred to as “single,” “ND,” and “wo/spec” in Table 4) objects.

#### 4.2. Ly $\alpha$ Luminosity Function

We estimated the acceptable Ly $\alpha$  LF range specified by the upper and lower limits. The upper limit was estimated assuming that all the uncertain (“single,” “ND,” and “wo/spec” in Table 4) photometric candidates, for which photometrically evaluated Ly $\alpha$  luminosities were adopted, were really LAEs. The lower limit was estimated assuming that all the uncertain candidates were not LAEs, i.e., using only the pure spectroscopically identified LAE sample. To derive the Ly $\alpha$  LF, the detection completeness, which decreases at fainter NB magnitudes, was corrected in the same way as outlined in K06. In both the upper and lower limit estimates, we corrected for this detection completeness by number weighting according to the NB magnitude.

Figure 7 provides a comparison of the cumulative Ly $\alpha$  LFs between  $z = 6.5$  and 5.7. The red-shaded and blue-shaded regions indicate acceptable LF ranges for  $z = 6.5$  and 5.7, respectively. Compared with our previous estimate in K06, the acceptable LF ranges are now more sharply determined. The given uncertainties are by the Poisson errors, shown for some average data points between upper limit and lower limit data points, indicating that Poisson errors are dominant at the bright end, whereas the spectroscopic uncertainties are dominant at the faint end. Taking into account the corrections for the completeness factor (95.7% for  $z = 6.5$  and 95.3% for  $z = 5.7$ ) evaluated in the previous section, both LFs could increase by a factor of  $\sim 1.05$ , although this is smaller than the Poisson errors. Note that we derived the apparent Ly $\alpha$  luminosity uncorrected for either dust extinction or self-absorption, which is evident on the blue-side cutoff of the emission line.

We fitted a Schechter function,  $\phi(L)dL = \phi^*(L/L^*)^\alpha \exp(-L/L^*)dL/L^*$ , to the average data points between the upper limit and lower limit data points. The  $\chi^2$  was minimized with a single grid search in the two parameters,  $L^*$  and  $\phi^*$ , for fixed slopes of  $\alpha = -1.7, -1.5, \text{ and } -1.3$ . The larger value of the Poisson errors or the difference between the upper limit and

**Table 3**  
Spectroscopic Properties of  $z = 5.7$  LAEs

ID <sup>a</sup>	NAME	$z^b$	$f^{\text{spec}}(\text{Ly}\alpha)^c$ ( $10^{-18} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ )	$L^{\text{spec}}(\text{Ly}\alpha)^d$ ( $10^{42} h_{70}^{-2} \text{ erg s}^{-1}$ )	FWHM <sup>e</sup> ( $\text{\AA}$ )	$S_w$ ( $\text{\AA}$ )	OBS. <sup>f</sup>
34549	SDF J132418.1+271639	5.702	9.56	3.38	16.9	$9.97 \pm 1.99$	D
36849	SDF J132435.8+271709	5.738	6.92	2.49	12.0	$32.8 \pm 11.7$	D
45159	SDF J132520.2+271842	5.701	10.5	3.72	11.1	$6.09 \pm 3.28$	D
61394	SDF J132456.5+272212	5.761	39.6	14.4	7.09	$3.45 \pm 0.47$	F
62511	SDF J132419.6+272228	5.665	15.0	5.23	4.81	$6.52 \pm 2.07$	D
65899	SDF J132438.0+272315	5.687	15.0	5.29	5.34	$13.8 \pm 2.13$	D
66162	SDF J132528.8+272317	5.688	16.4	5.78	8.01	$12.0 \pm 2.56$	D
70773	SDF J132347.1+272414	5.696	6.77	2.39	11.0	$3.35 \pm 2.86$	D
71751	SDF J132344.8+272427	5.720	10.4	3.70	9.96	$5.30 \pm 1.27$	F
75550	SDF J132447.7+272512	5.708	14.9	5.28	6.63	$4.74 \pm 3.44$	D
81382	SDF J132451.4+272626	5.697	9.05	3.20	8.55	$6.20 \pm 2.00$	D
83092	SDF J132441.3+272649	5.747	15.6	5.62	5.50	$5.70 \pm 5.22$	F
89624	SDF J132424.8+272812	5.714	13.1	4.67	8.36	$4.08 \pm 5.53$	F
91179	SDF J132417.8+272833	5.712	13.3	4.74	14.0	$8.31 \pm 1.35$	D
98040	SDF J132432.9+273009	5.674	25.9	9.06	11.0	$7.62 \pm 1.80$	F
98461	SDF J132428.3+273012	5.697	11.3	3.99	3.99	$3.65 \pm 1.81$	F
120018	SDF J132340.6+273447	5.684	38.8	13.6	11.3	$10.0 \pm 2.00$	D
124905	SDF J132352.9+273549	5.694	6.88	2.43	5.07	$6.93 \pm 4.93$	D
138608	SDF J132450.9+273839	5.669	19.7	6.88	11.4	$4.56 \pm 10.3$	F
138624	SDF J132357.4+273836	5.677	8.30	2.60	11.0	$5.04 \pm 2.75$	D

**Notes.**

<sup>a</sup> ID in the NB816-detected catalog of S06.

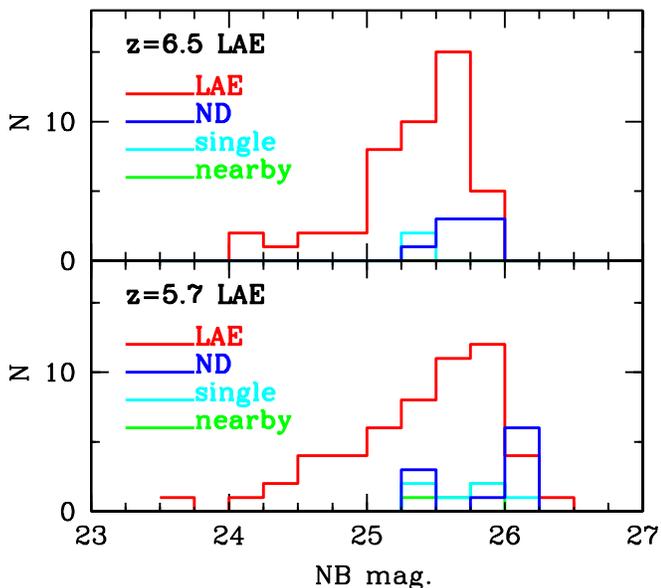
<sup>b</sup> The redshift was derived from the wavelength of the flux peak in an observed spectrum assuming the rest wavelength of Ly $\alpha$  to be 1215 $\text{\AA}$ . These measurements could be overestimated in the case of significant damping wings by IGM. Also, the observed peak position was slightly shifted redward due to instrumental resolution. See Figure 13.

<sup>c</sup> The observed line flux corresponds to the total amount of the flux within the line profile. The slit loss was corrected.

<sup>d</sup> No dust absorption correction was applied.

<sup>e</sup> Corrected for instrumental broadening.

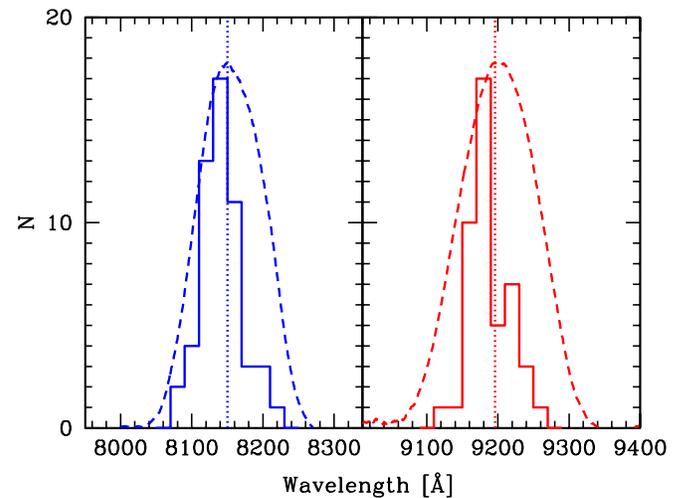
<sup>f</sup> Observed with FOCAS (F) or DEIMOS (D).



**Figure 3.** Magnitude histogram of spectroscopically identified LAEs.

the lower limit was used for the error of each data point when fitting a Schechter function. The derived best-fit parameters are listed in Table 5.

After spectroscopic confirmations of a large amount of our LAE samples at both  $z = 6.5$  and  $5.7$ , we found that the evaluation of the Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$  was apparently deficient compared with that of  $z = 5.7$ , at least at the bright end, where



**Figure 4.** Observed wavelength distribution of the Ly $\alpha$  line peak for our spectroscopic sample at  $z = 5.7$  (left) and  $6.5$  (right). The transmission curves of NB816 (left) NB921 (right) are overplotted as dashed lines.

the entire samples at both epochs have been spectroscopically identified. A possible decline in the  $z = 6.5$  LF appeared even at the faint end. The  $L^*$  difference between  $z = 6.5$  and  $z = 5.7$  decreased slightly to  $\sim 0.65$  mag from the previous estimate of  $\sim 0.75$  mag, given  $\alpha = -1.5$ . A major cause of this change could be the significant increase in the number of spectroscopically confirmed LAEs and the more careful measurements of luminosity performed in the present study.

**Table 4**  
Summary of Spectroscopic Identifications

$z$	$N_{\text{phot}}^{\text{a}}$	$\text{Ly}\alpha$	$\text{H}\alpha$	$[\text{O III}]$	$[\text{O II}]$	Single <sup>b</sup>	ND <sup>c</sup>	wo/spec <sup>d</sup>	$\text{Ly}\alpha_{\text{serend}}^{\text{e}}$	$\text{Ly}\alpha_{\text{total}}^{\text{f}}$	$\text{CP}_{\text{min}}^{\text{g}}$	$\text{CP}_{\text{max}}^{\text{h}}$	$\text{CT}_{\text{max}}^{\text{i}}$	$\text{CT}_{\text{min}}^{\text{j}}$
6.5	58	42	0	1	0	2	7	6	3	45	93%	94%	19%	2%
5.7	89	46	0	0	4	6	10	23	8	54	85%	87%	30%	6%

**Notes.**

<sup>a</sup> Photometric candidates.

<sup>b</sup> These possess only a single poor-quality symmetric emission feature with small  $S_w < 3$ , in which we cannot determine whether they are  $\text{Ly}\alpha$  emission or  $[\text{O II}]$  emission (K06).

<sup>c</sup> No detection of any emission features.

<sup>d</sup> Candidates without spectroscopic follow-up observations.

<sup>e</sup> LAEs serendipitously discovered in spectroscopic observation. They are not included in the photometric candidates.

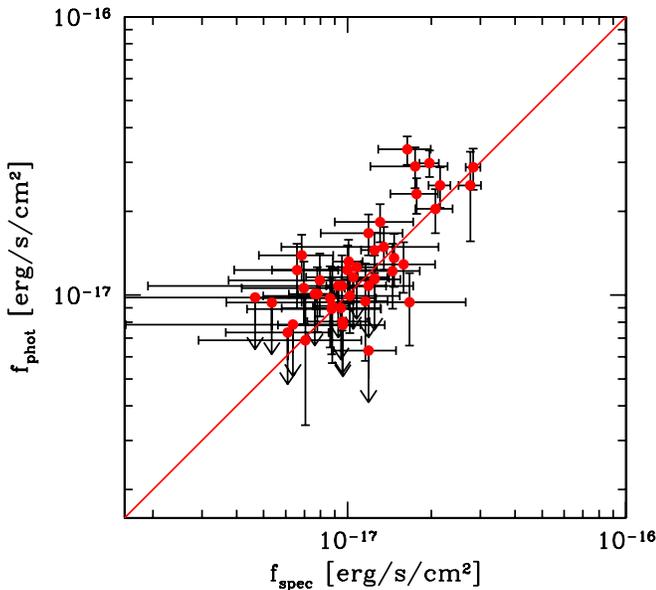
<sup>f</sup> Total number of LAEs spectroscopically identified =  $\text{Ly}\alpha + \text{Ly}\alpha_{\text{serend}}$ .

<sup>g</sup> Sample completeness rate provided that all singles are foreground objects =  $\text{Ly}\alpha / \text{Ly}\alpha_{\text{total}}$ .

<sup>h</sup> Sample completeness rate provided that all singles are LAEs =  $(\text{Ly}\alpha + \text{single}) / (\text{Ly}\alpha_{\text{total}} + \text{single})$ .

<sup>i</sup> Sample contamination rate provided that all singles and NDs are foreground objects =  $([\text{O III}], [\text{O II}] + \text{single} + \text{ND}) / (N_{\text{phot}} - \text{wo/spec})$ .

<sup>j</sup> Sample contamination rate provided that all singles and NDs are LAEs =  $([\text{O III}], [\text{O II}]) / (N_{\text{phot}} - \text{wo/spec})$ .

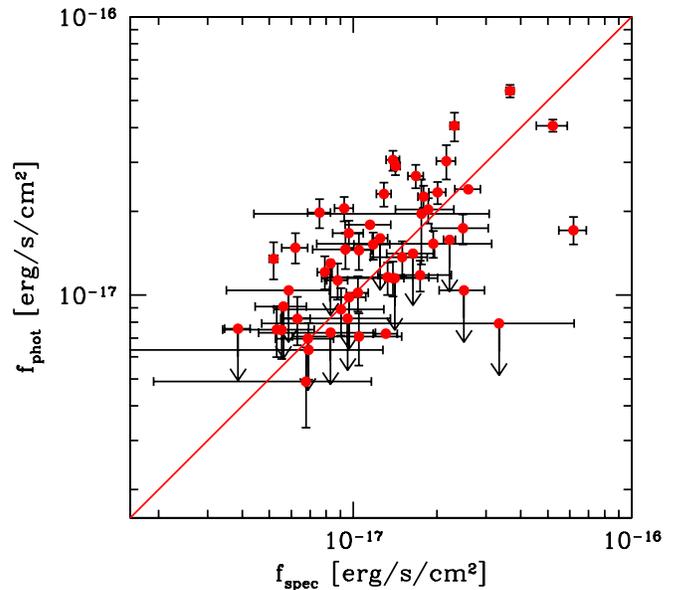


**Figure 5.** Comparison of the  $\text{Ly}\alpha$  fluxes measured by spectra,  $f_{\text{spec}}$ , with those inferred from photometry,  $f_{\text{phot}}$ , for our spectroscopic LAE sample at  $z = 6.5$ . The solid line represents a one-to-one correspondence between  $f_{\text{spec}}$  and  $f_{\text{phot}}$ . The errors were estimated based on the sky rms fluctuation of each spectrum for  $f_{\text{spec}}$  and errors in magnitudes for  $f_{\text{phot}}$ .

(A color version of this figure is available in the online journal.)

#### 4.2.1. Uncertainties in the LF Estimates

Two uncertainties appeared in the photometric estimate of the  $\text{Ly}\alpha$  luminosity: the photometric error and the redshift ambiguity. In the previous section, we assumed that the peak of the  $\text{Ly}\alpha$  emission line was the central wavelength,  $\lambda_c$ , of the NB filters for the photometric sample. We carried out a Monte Carlo simulation to see how the associated uncertainties would affect the resultant LF. In the simulations, Gaussian random photometric errors both in BB and NB were assigned to the measured magnitudes of the photometric sample, and redshifts were assigned so that their redshift distributions matched the observations, as shown in Figure 4. The  $1\sigma$  photometric error was estimated from the background fluctuation and the flux Poisson noise. The process of recalculating the LF and deriving the best-fit Schechter parameters was repeated many times. We found rms fluctuations of  $\sigma(\log(L^*)) = 0.041$  and  $\sigma(\log(\phi^*)) = 0.066$  for  $z = 6.5$  and

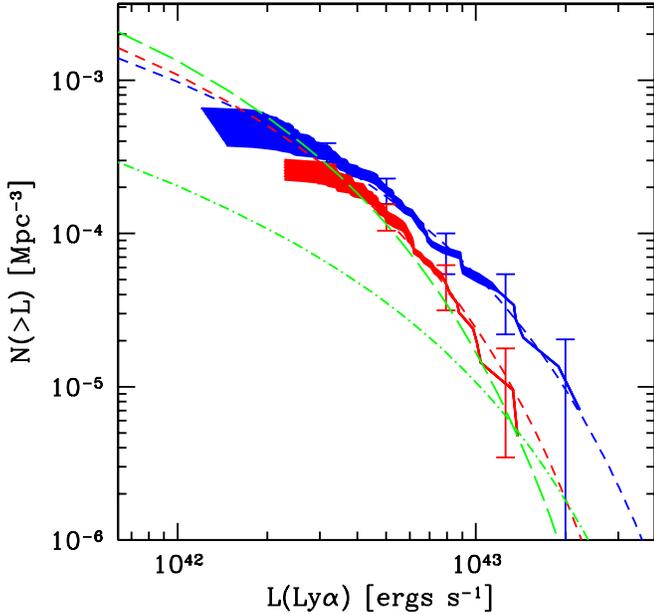


**Figure 6.** Same as Figure 5, but for LAEs at  $z = 5.7$ .

(A color version of this figure is available in the online journal.)

$\sigma(\log(L^*)) = 0.023$  and  $\sigma(\log(\phi^*)) = 0.027$  for  $z = 5.7$  for  $\alpha = -1.5$ , suggesting that these uncertainties have only a small impact on the result. The photometric sample selection prior to the luminosity measurements might be affected by errors in the photometric catalog. We also carried out a Monte Carlo simulation to see how the photometric error in the catalog would affect the color selection and resultant LF, by assigning random errors to the measured magnitudes of detected object catalogs in all bands. We did not use spectroscopic estimate of the  $\text{Ly}\alpha$  flux in the simulation and estimated the  $\text{Ly}\alpha$  LFs photometrically. The rms fluctuations were found to be  $\sigma(\log(L^*)) = 0.104$  and  $\sigma(\log(\phi^*)) = 0.119$  for  $z = 6.5$  and  $\sigma(\log(L^*)) = 0.098$  and  $\sigma(\log(\phi^*)) = 0.094$  for  $z = 5.7$  for  $\alpha = -1.5$ . We note that more than 70% of our LAE samples have been spectroscopically identified, whereas we have to add the redshift ambiguity in all the sample in this simulation; therefore, the uncertainties of the LF estimates are apparently overestimated.

Given an observed NB flux, the photometric  $\text{Ly}\alpha$  flux tended to be overestimated, and the continuum flux tended to be underestimated when the actual line-peak wavelength was



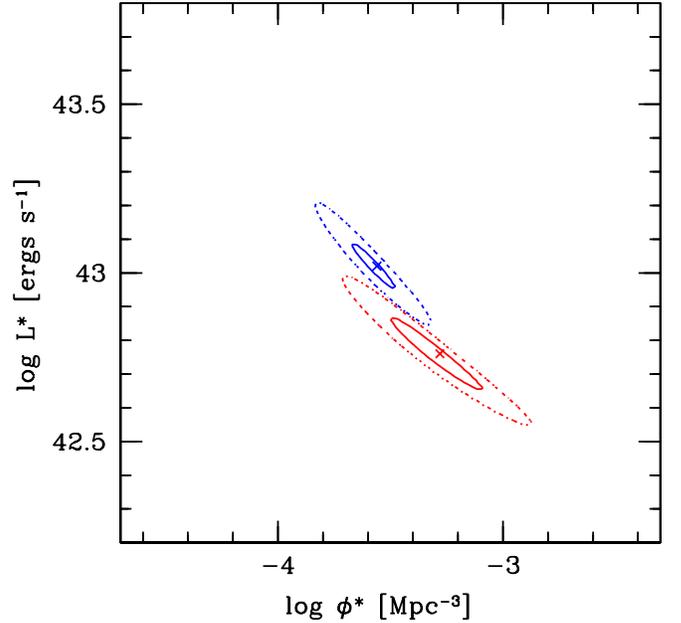
**Figure 7.** Comparison of the cumulative  $\text{Ly}\alpha$  LFs of LAEs at  $z = 6.5$  (red-shaded region) and  $z = 5.7$  (blue-shaded region). We estimated the acceptable  $\text{Ly}\alpha$  LF ranges as specified by the upper and lower limits. The upper limit was estimated assuming that all the uncertain (referred to as “single,” “ND,” and “wo/spec” in Table 4) photometric candidates are really LAEs, and the lower limit was estimated assuming that all the uncertain candidates are not LAEs, i.e., using only the pure spectroscopically identified LAE sample. In both the upper and lower limit estimates, we corrected for the detection completeness by number weighting according to the NB magnitude. Error bars evaluated by the Poisson errors are shown in some average data points between the upper limits and lower limits. The short-dashed lines (red for  $z = 6.5$  and blue for  $z = 5.7$ ) show the fitted Schechter LFs in the case of  $\alpha = -1.5$ . As a comparison, the green long-dashed line shows the  $\text{Ly}\alpha$  LF at  $z = 6.5$  from Ouchi et al. (2010), and the green dot-dashed line shows that of Hu et al. (2010).

**Table 5**

Best-fit Schechter Parameters for LAE LF at  $z = 6.5$  and  $5.7$  of the SDF

Sample	$\alpha$ (Fix)	$L^*$ $\log(h_{70}^{-2} \text{ erg s}^{-1})$	$\phi^*$ $\log(h_{70}^3 \text{ Mpc}^{-3})$
$z = 6.5$	-1.7	$42.82^{+0.10}_{-0.10}$	$-3.40^{+0.22}_{-0.18}$
	-1.5	$42.76^{+0.10}_{-0.10}$	$-3.28^{+0.20}_{-0.20}$
	-1.3	$42.70^{+0.10}_{-0.10}$	$-3.20^{+0.20}_{-0.18}$
$z = 5.7$	-1.7	$43.12^{+0.06}_{-0.04}$	$-3.74^{+0.06}_{-0.08}$
	-1.5	$43.02^{+0.06}_{-0.06}$	$-3.56^{+0.08}_{-0.10}$
	-1.3	$42.94^{+0.06}_{-0.06}$	$-3.34^{+0.10}_{-0.08}$

smaller than the  $\lambda_c$  due to a strong Lyman break in the continuum as well as to the asymmetric  $\text{Ly}\alpha$  line profile. This trend would be expected if the transmission curve of the NB filter was nearly a top-hat shape; however, we used NB filters with almost Gaussian-shaped transmission curves, as shown in Figure 4. For these filters, photometrically estimated line flux would maintain the observed NB excess by decreasing when the line peak shifted farther away, whether it was redder or bluer, from the  $\lambda_c$ . As a result, the photometric line flux was largely underestimated when an emission line was really located in the redder part of the NB transmission, whereas in the blue portion, an underestimate due to the low transmission was balanced by an overestimate due to the continuum Lyman break. We confirmed these trends by numerical experiment. As the observed line-peak distribution deviated to blue, the systematic error in the photometric estimate of  $\text{Ly}\alpha$  line would be small. In our Monte Carlo simulation, we



**Figure 8.** Error ellipses of the best-fit Schechter parameters  $\phi^*$  and  $L^*$  of  $\text{Ly}\alpha$  LF given a fixed  $\alpha = -1.5$ . The lower ellipse (red) is for LAEs at  $z = 6.5$ , and the upper ellipse (blue) is for  $z = 5.7$ . The inner and outer solid ellipses are the  $1\sigma$  and  $3\sigma$  confidence levels, respectively.

found that the systematic error caused by this trend was as small as  $\sigma(\log(L^*)) = 0.04$  and  $0.06$  for  $z = 5.7$  and  $6.5$ , respectively. We also performed a Monte Carlo simulation to investigate any possible distortion that the discrepancy, as seen in Figures 5 and 6, between spectroscopically measured and photometrically inferred  $\text{Ly}\alpha$  luminosities could have on the result. When Gaussian random error with the same scatter as in Figures 5 and 6 was assigned to each  $\text{Ly}\alpha$  luminosity, the best-fit Schechter parameters, given  $\alpha = -1.5$ , only changed by  $\sigma(\log(L^*)) = 0.023$  and  $\sigma(\log(\phi^*)) = 0.042$  for  $z = 6.5$  and  $\sigma(\log(L^*)) = 0.042$  and  $\sigma(\log(\phi^*)) = 0.070$  for  $z = 5.7$ , which were negligible.

#### 4.2.2. Comparisons with Other Studies

The Schechter parameters derived in this study are almost identical to previous estimates by S06 for  $z = 5.7$ , whereas at  $z = 6.5$ , the values in this study fell between the previous estimates of the upper and lower limits. These parameters are also consistent, within the errors, with independent studies by Ouchi et al. (2008, 2010) for  $z = 6.5$  and  $5.7$ . The estimates at  $z = 6.5$  given by Hu et al. (2010) differed by the largest amount from our estimate, especially at faint luminosities. Their estimated  $\text{Ly}\alpha$  LF was almost a factor of three (five) lower than estimates of K06, Ouchi et al. (2008, 2010) at their faintest bin at  $\log L(\text{Ly}\alpha) \sim 42.8$  at  $z = 6.5$  ( $5.7$ ). Hu et al. (2010) claimed that the difference might be mainly caused by a large contamination in the photometric sample, if present; however, the present study, based on a large number of spectroscopic confirmations, completely disallows this interpretation. As shown in Section 3, the contamination of our sample was as low as  $\leq 20\%$ , evaluated by the spectroscopic results, and the sample completeness was as high as  $\geq 85\%$  for both the  $z = 6.5$  and  $5.7$  samples. The photometric LAE selection of Ouchi et al. (2008, 2010) nearly matches this study, so their sample is probably also less affected by contamination. The reason for the difference in the two evaluations at the faint end is unclear because the data reduction,

photometry, and the LAE selection differ slightly. However, we can suggest one plausible explanation. The Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$  by Hu et al. (2010), which is basically based on their spectroscopic sample, is very close to that of our spectroscopic estimate (K06). Spectroscopic confirmation at the faint end is generally so difficult that our previous spectroscopic sample apparently lacked completeness at the faint end. The present study, based on spectroscopic observations with deeper typical integration times (10 ks; see Table 1) than Hu et al. (2010), overcame the problem and revealed that most of these faint unidentified objects were real LAEs. As almost half of the faint photometric sample of Hu et al. (2010) were not spectroscopically identified at  $z = 5.7$ , the completeness difference at the faint end could explain the significant difference in resultant Ly $\alpha$  LFs. Nonetheless, it is interesting to note that both studies, more or less, detected a difference in the Ly $\alpha$  LFs between  $z = 6.5$  and 5.7.

#### 4.2.3. Significance of the LF Difference and the Cosmic Variance

To illustrate the significance of the LF difference between  $z = 6.5$  and 5.7, we plotted the error contours for our Schechter-parameter fits in Figure 8. The confidence levels of the fitting were computed based on the larger of the Poissonian error or the difference between the upper limit and the lower limit. Figure 8 reveals that the  $(L^*, \phi^*)$  error ellipses at fixed  $\alpha = -1.5$  for  $z = 5.7$  and 6.5 do not overlap each other; that is, the difference in LF between  $z = 5.7$  and 6.5 is significant at almost the  $3\sigma$  level. This is also the case for any  $\alpha$ . The difference in  $L^*$  is more significant than that in  $\phi^*$ . Based on Somerville et al. (2004), we evaluated the cosmic variance of our LAE samples. We assumed a one-to-one correspondence between LAEs and dark halos and used their predictions at  $z = 6$ . With our comoving survey volume of  $2.17 \times 10^5 h_{70}^{-3} \text{Mpc}^3$  and a number density of  $2.76 \times 10^{-4} (1.94 \times 10^{-4}) h_{70}^3 \text{Mpc}^{-3}$  for the upper (lower) limit estimate, we obtained a cosmic variance of  $\sim 32\%$ . We also estimated a variance of  $\sim 20\%$  for the  $z = 5.7$  LAE sample. As shown by the error bars in Figure 8, the  $3\sigma$  error circles for the two epochs overlap each other when cosmic variance is included; however, our upper limit estimate still differed from the  $z = 5.7$  result at the  $2\sigma$  level. Although the difference in LF was large at the bright end and small at the faint end, we forcibly attempted to fit the LF at  $z = 6.5$  for the Schechter function at  $z = 5.7$  with either fixed  $\phi^*$  or  $L^*$ , given  $\alpha = -1.5$ . We obtained  $\log L^* = 42.90^{+0.02}_{-0.14}$  given a fixed  $\phi^*$ , corresponding to a 24% decrease in the Ly $\alpha$  luminosity,  $L^*(z = 6.5) = 0.76 L^*(z = 5.7)$ , and we obtained  $\log(\phi^*) = -3.74^{+0.06}_{-0.24}$  given a fixed  $L^*$ , corresponding to a 34% decrease in LF amplitude,  $\phi^*(z = 6.5) = 0.66\phi^*(z = 5.7)$ . These values are comparable to the cosmic variance, indicating that the observed LF difference might be caused by the cosmic variance. We cannot rule out this possibility, but we discuss it further in Section 8.

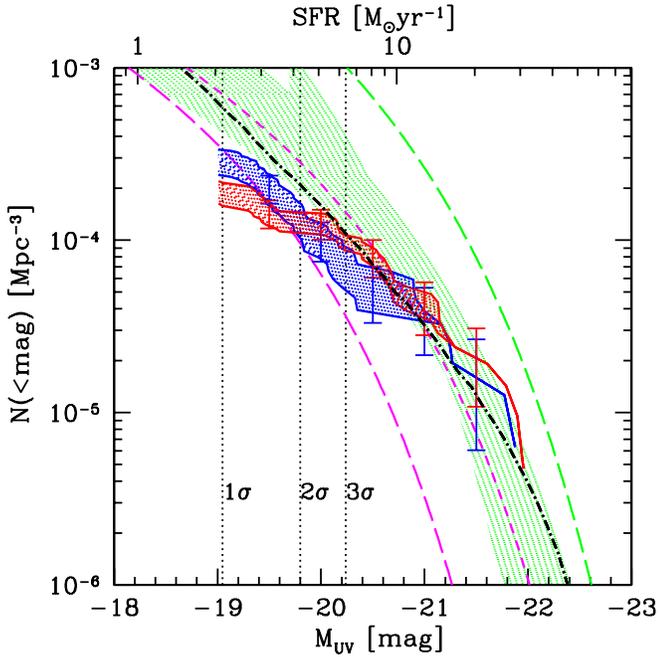
#### 4.3. Rest-UV Continuum Luminosity Function

We derived the rest-UV continuum LFs of our LAE sample at  $z = 6.5$  and 5.7. In Section 4.1, the flux of the rest-UV continuum ( $f_c$ ) was simultaneously derived once the Ly $\alpha$  line flux ( $f_{\text{line}}$ ) was determined by either spectroscopy or photometry. The effective wavelength of the derived UV luminosity was 1250–1270 Å for both  $z = 5.7$  and 6.5. The detection completeness in the  $z'$  band, which corresponds to the rest-UV flux, should be corrected when calculating the UV LF; however, our LAE samples were basically selected in NB magnitude. It is

impossible to evaluate the detection completeness in the  $z'$  band for the NB-selected sample; therefore, we should note that it is inevitable that the derived rest-UV continuum LF may be affected, especially at the faint end of the LF, by the difference in completeness of the NB and  $z'$  bands. As in our previous study, the correction was made based on the detection completeness in the NB filter evaluated in the previous section. To overcome the problem, we take an alternative approach to derive the rest-UV LF of LAEs in Section 7. No correction has been applied for dust. LAEs are generally recognized to be young, less massive galaxies with little dust ( $E(B - V) < 0.05$  at  $z \sim 6$ ; Ono et al. 2010; and even at  $z \sim 3$ ; Gronwall et al. 2007), though old and massive stellar populations are found in some LAEs (Finkelstein et al. 2009).

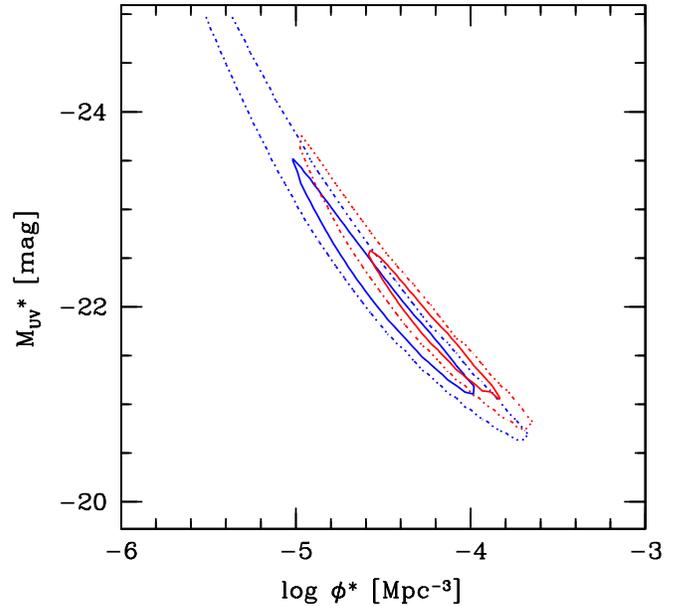
Figure 9 shows the rest-UV continuum LF of our LAE sample. As in the Ly $\alpha$  LF, the red- and blue-shaded regions mark the acceptable UV LF ranges for  $z = 6.5$  and 5.7, respectively, and Poisson errors are shown for some data points. The vertical dotted lines indicate the corresponding limiting magnitudes in the  $z'$  band. Our LF measurements at magnitudes fainter than  $M_{\text{UV}} = -20.24$  ( $3\sigma$ ) may be uncertain because the corresponding  $z'$ -band magnitudes are no longer reliable. The derived rest-UV LFs presented in this study are nearly consistent with our previous studies discussed in K06 and S06, though the amplitudes are slightly lower than before. We confirmed the result of our previous study that the rest-UV LF does not change between  $z = 6.5$  and 5.7, at least at the bright end of  $M_{\text{UV}} < -20.5$ . We fit the Schechter function to these data points down to  $M_{\text{UV}} = -20.24$ , beyond which our measurements were largely affected by incompleteness of source detection. Because data points were limited to the bright end, we used a fixed slope of  $\alpha = -1.5$ . The best-fit parameters were  $M_{\text{UV}}^* = -21.720^{+0.625}_{-0.875}$  and  $\log(\phi^*) = -4.15^{+0.35}_{-0.40}$  for  $z = 6.5$ , and  $M_{\text{UV}}^* = -21.845^{+0.625}_{-1.750}$  and  $\log(\phi^*) = -4.30^{+0.35}_{-0.70}$  for  $z = 5.7$ . Figure 10 shows the error contours, which overlap at the  $1\sigma$  errors. This is in clear contrast to the difference seen in the Ly $\alpha$  LF. It should be noted that the rest-UV continuum flux is not sensitive to the neutral IGM. This result strongly supports the interpretation that the difference in Ly $\alpha$  LF between  $z = 6.5$  and 5.7 is caused by the IGM attenuation. However, the best-fit parameters of rest-UV LFs include large uncertainties, and the large error contours in Figure 10 suggest that our LAE sample is still insufficient to strongly constrain the parameters. Possible distortions in the rest-UV LF caused by photometric error were also evaluated by the Monte Carlo simulation as in Section 4.2. Assuming  $\alpha = -1.5$ , the  $1\sigma$  fluctuations were found to be  $\sigma(M_{\text{UV}}^*) = 0.253$  and  $\sigma(\log(\phi^*)) = 0.136$  for  $z = 6.5$  and  $\sigma(M_{\text{UV}}^*) = 0.154$  and  $\sigma(\log(\phi^*)) = 0.087$  for  $z = 5.7$ . These fluctuations are smaller than the fitting errors of the best-fit Schechter parameters, though larger than those of Ly $\alpha$  LFs.

In Figure 9, we overplotted another rest-UV continuum LF estimate (with a simple extrapolation at the faint end) of the LAE sample at  $z = 5.7$  by Ouchi et al. (2008), which was almost consistent with our measurement at  $z = 5.7$  at  $M_{\text{UV}} < -20.5$ . The green-shaded region is the range of the UV LF of LBGs sampled at  $z \sim 6$  determined by various studies, based on Bouwens et al. (2007), Figure 11. The coincidence of UV LFs of LBG and LAE at  $z \sim 6$  was confirmed by S06 and Ouchi et al. (2008). This indicates that most LBGs at  $z \sim 6$  display Ly $\alpha$  emissions, though the UV LF measurements remain uncertain for both in LAE and LBG. It is quite interesting to note that the UV LFs of these two populations are consistent at  $z \sim 6$  because they generally seem to show different evolutionary trends at



**Figure 9.** Comparison of the rest-UV continuum cumulative LFs of LAEs at  $z = 6.5$  (red-shaded region) and  $z = 5.7$  (blue-shaded region). The upper and lower limits of the shaded regions are determined in the same way as in the Ly $\alpha$  LF estimate. The vertical lines indicate the limiting magnitudes in the  $z'$  band at  $M_{UV} = -19.05$ ,  $-19.80$ , and  $-20.24$  for  $1\sigma$ ,  $2\sigma$ , and  $3\sigma$  given  $EW_0 = 0$  at  $z = 6.5$ , respectively. The rest-UV LF measurements at magnitudes fainter than the  $3\sigma$  limiting magnitude may be uncertain due to incompleteness in the  $z'$  band; we show the rest-UV continuum LFs down to the  $1\sigma$  limiting magnitude just for reference. We did not use data points at  $>M_{UV} = -20.24$  when fitting the Schechter function. Error bars are calculated from Poisson errors. As a comparison, the rest-UV LF of the LAE sample at  $z = 5.7$  (magenta short-dashed line) and  $z = 3.1$  (magenta long-dashed line) evaluated by Ouchi et al. (2008), the range of the rest-UV LF of the LBG sample at  $z \sim 6$  (green shaded region) determined by various studies (see Figure 11 of Bouwens et al. 2007), and the rest-UV LF of  $z \sim 3$  LBG (Reddy et al. 2008; green long-dashed line) are shown. The black dot-dashed line shows the estimate of the UV LF at  $z = 5.7$  using the Ly $\alpha$  LF with  $\alpha = -1.5$ , assuming a universal  $EW_0$ -UV luminosity relation (see Section 7).

$z < 6$ . In Figure 9, we also present the UV LF of LAEs at  $z = 3.1$  (Ouchi et al. 2008; magenta long-dashed line) and that of LBGs at  $z \sim 3$  (Reddy et al. 2008; green long-dashed line). The UV LF of the LAEs seems to show an increase in  $L^*$  at higher- $z$ , whereas that of the LBGs seems to have the reverse trend, showing a decrease in  $L^*$ . A high fraction of LAEs among LBGs in the early universe is naturally expected if an LBG appears as an LAE during its initial starburst phase, when it is still dust free (Shapley et al. 2001). The scenario is supported by measurements of the LAE dark halo mass of  $\sim 10^{11\pm 1} M_\odot$ , which is systematically smaller than that of LBGs (Ouchi et al. 2010) at all epochs. Shimasaku et al. (2006) and Ouchi et al. (2008) reached almost the same conclusion concerning a high fraction of LAEs among LBGs at  $z \sim 6$ , whereas Dow-Hygelund et al. (2007) claimed that the fraction of LAEs among LBGs at  $z \sim 6$  was  $\sim 30\%$ , which was almost the same as at  $z \sim 3$ . Stark et al. (2011) estimated that the LAE fraction of luminous LBGs with  $-21.75 < M_{UV} < -20.25$  at  $z \sim 6$  was as small as 20%, though their sample was restricted to strong Ly $\alpha$  emissions with  $EW_0 > 25 \text{ \AA}$ . A much higher fraction of LAEs should be expected at smaller  $EW_0$  from their EW distribution. Henry et al. (2010) suggested another possibility based on their blind multislit spectroscopic search for LAEs that the  $i$ -dropout color selection might miss



**Figure 10.** Error ellipses of the best-fit Schechter parameters  $\phi^*$  and  $L^*$  of the rest-UV continuum LFs of LAEs at  $z = 6.5$  (red upper ellipse) and  $z = 5.7$  (blue lower ellipse), assuming a fixed  $\alpha = -1.5$ . The inner and outer solid ellipses are the  $1\sigma$  and  $3\sigma$  confidence levels, respectively. The confidence levels of the fit were computed based on the larger of the Poisson error or the difference between the upper limit and the lower limit.

a certain fraction of LAEs that have blue ( $i - z$ ) colors due to strong Ly $\alpha$  emission. Otherwise, the UV LF of LBGs might be underestimated due to dust extinction, which is generally small for LAEs. We cannot make any conclusive argument about the LAE fraction of LBGs and its evolution solely from our observed rest-UV LF; however, one should be careful when comparing among different observations because the fraction depends on the threshold EW applied when selecting the LAEs as well as on the rest-UV luminosity.

## 5. EW DISTRIBUTION

A more straightforward observable probe of reionization is the equivalent-width distribution of LAEs, which can be derived from the Ly $\alpha$  and UV-continuum fluxes. These are sensitive and insensitive to the neutral IGM, respectively. It was very hard to measure the rest-frame equivalent width ( $EW_0$ ) in spectroscopic data because most LAEs were too faint to accurately measure their continuum flux directly from spectra. Instead, the  $EW_0$  was calculated using NB and broadband photometry.  $EW_0$  was photometrically estimated in some previous work, though most of the  $EW_0$  values were only lower limits because the continuum emission was not detected in broadband images. In contrast, most LAEs in the present study were actually detected in the  $z'$ -band image by virtue of the extreme depth of the SDF images. The  $EW_0$  were reliably determined in those cases.

Figure 11 compares the  $EW_0$  distribution of the LAE samples for  $z = 6.5$  and  $5.7$ . The detection completeness was corrected by number weighting according to the NB magnitude, as outlined in Section 4.2. Here, we did not correct for the absorption of the blue side of the Ly $\alpha$  emission due primarily to the interstellar medium (ISM) absorption inside the galaxy. K06 showed that the blue-side line profile of Ly $\alpha$  emission of the composite spectrum of LAEs at  $z = 6.5$  was simply explained by spectral broadening, which meant that the blue side of the observed Ly $\alpha$  emission was almost completely absorbed.

Therefore, if the ISM absorption is corrected, the evaluated  $EW_0$  would almost double. For several LAEs that remained undetected in the  $z'$  band ( $<1\sigma$ ), we used the lower limit of  $EW_0$  by replacing the  $z'$ -band magnitude with the  $1\sigma$  limiting magnitude of  $z' = 27.79$ . The systematic errors caused by the process will be discussed later.

In Figure 11, we also plotted the  $EW_0$  distribution of lower- $z$  LAEs at  $z = 3.1, 3.7,$  and  $5.7$  extracted from Ouchi et al. (2008). The  $EW_0$  distribution of our  $z = 5.7$  LAE sample was almost consistent with other low- $z$  samples, whereas the  $EW_0$  at  $z = 6.5$  seemed to be systematically smaller than that at  $z = 5.7$ . This appeared more clearly in the cumulative distribution of  $EW_0$  shown in the bottom panel of Figure 11. We evaluated a possible distortion in the  $EW_0$  distribution caused by photometric error and the redshift ambiguity by the Monte Carlo simulation, as discussed in Section 4.2. The  $1\sigma$  fluctuations of the  $EW_0$  distribution of the simulation, shown as the shaded regions in the bottom panel of Figure 11, ensured that our results were not seriously affected by these uncertainties. S06 suggested that an estimate of the  $EW_0$  distribution at  $z = 5.7$  based on  $i'$  and NB816 magnitudes was largely different from one based on  $z'$  and NB816 magnitudes. In the former estimate, the Ly $\alpha$  line enters both the  $i'$  and NB816 bands, as it does at  $z = 6.5$ , which is based on  $z'$  and NB921 magnitudes. The blue dashed line in the bottom panel of Figure 11 indicates the  $EW_0$  distribution at  $z = 5.7$  when  $EW_0$  is calculated from  $i'$  and NB816 magnitudes. It approaches the  $EW_0$  distribution at  $z = 6.5$ , with an extended tail at large  $EW_0$ . This might be caused by the fact that the deeper limiting magnitude of the  $i'$  band imposed a stronger constraint on the continuum flux than did the  $z'$  band, which only provided a lower limit on  $EW_0$  when undetected; therefore, deeper BB magnitudes generally tended to yield higher  $EW_0$ . Excluding objects that were not detected in the  $z'$  band actually reduced the number of objects with high  $EW_0$ , but did not make a substantial change in the overall  $EW_0$  distributions shown in Figure 11, i.e.,  $EW_0$  at  $z = 6.5$  seems to be systematically smaller than at  $z = 5.7$ . However, there is no way to estimate the  $EW_0$  distribution at  $z = 6.5$  in the case of using a BB band, in which the Ly $\alpha$  line does not enter, because we do not have any sufficiently deep BB bands at longer wavelength than the  $z'$  band. We cannot completely rule out the possibility that the difference seen in the  $EW_0$  distribution between  $z = 5.7$  and  $6.5$  is attributed to the difference whether the Ly $\alpha$  line enters into the BB band or not. A very deep  $J$ -band photometry to estimate  $EW_0$  at  $z = 6.5$  is required to make a more fair comparison of the  $EW_0$  distribution.

The median  $EW_0$  at  $z = 6.5$  is  $74 \text{ \AA}$ , which is smaller by  $15 \text{ \AA}$  than that at  $z = 5.7$ . This trend may be easily understood from the resultant LFs of these two epochs. The UV-continuum LFs are almost identical, whereas Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$  is deficient compared with that at  $z = 5.7$ . The trend was also indirectly suggested from a possible FWHM difference in lines seen by Hu et al. (2010), for which it was difficult to derive  $EW_0$  due to the shallow photometric data. Fontana et al. (2010) suggested that the absence of prominent L $\alpha$  lines in their LBG sample at  $z \sim 7$  compared with a conservative EW distribution at lower- $z$ .

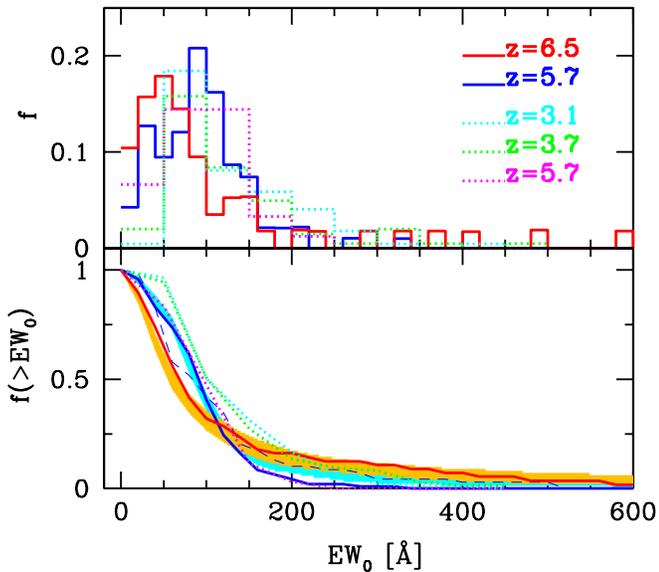
Another interesting feature of this plot is that the  $EW_0$  distribution at  $z = 6.5$  has a remarkable extended tail toward larger  $EW_0$  compared with  $z = 5.7$ . Such an effect was also found in the LBG sample (Stark et al. 2007). One explanation for this might be contamination by Population III-dominated galaxies. It is generally thought that the universe was first metal

enriched by this first generation of stars. As these Population III stars were born in extreme metal-free conditions, they presumably had a top-heavy initial mass function. Given their exceptionally high effective temperatures, they are expected to produce a very hard spectrum, enough to ionize the primordial He gas. The main characteristics of the predicted SED are the presence of a large-EW Ly $\alpha$  emission line, due to the strong ionizing flux, and strong He I and He II recombination lines, due to spectral hardness (Schaerer 2002). Therefore, Population III-dominated galaxies are expected to appear among high- $z$  LAE samples with large EWs. Several LAEs at  $z = 6.5$  have  $EW_0$  larger than  $\sim 300 \text{ \AA}$ , which cannot be attained by the usual Population II synthesis. These objects are plausible Population III candidates because of their extraordinarily large EW at high- $z$ , though they are expected to dominate at higher- $z$  ( $7 < z < 15$ ), according to most model predictions (Johnson et al. 2008; Yoshida et al. 2007). One alternative possible origin for the large Ly $\alpha$  EW is a contribution from AGNs. Otherwise, the large Ly $\alpha$  EW might be the result of scattering in a clumpy, dusty ISM (Neufeld 1991; Hansen & Oh 2006; Finkelstein et al. 2009). Follow-up NIR spectroscopy to detect the He II emission signal is the only promising way to confirm Population III-dominated galaxies. However, it should be noted that such an extended tail toward larger  $EW_0$  can, more or less, be produced artificially by the uncertainty in BB flux.

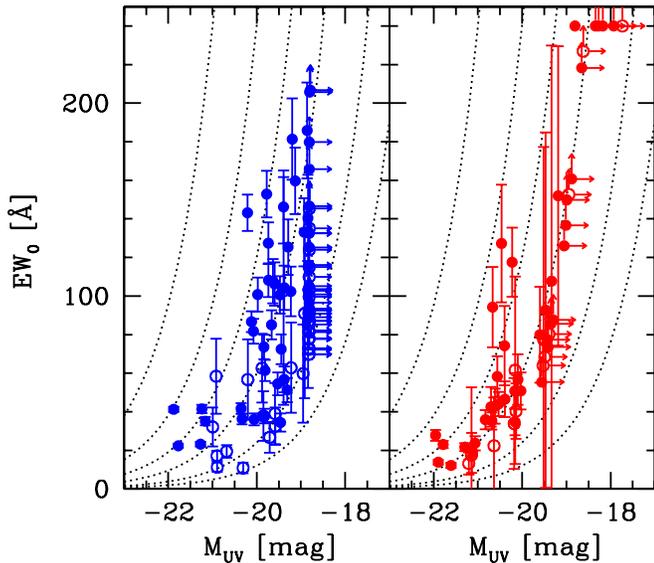
Figure 12 shows the  $EW_0$ -UV luminosity relation. For faint  $z'$ -band magnitudes ( $<27.79; 1\sigma$ ), both  $EW_0$  and  $M_{UV}$  are only provided as lower limits, indicated as arrows in the figure. Note that the  $z'$  bandpass directly corresponds to the UV-continuum luminosity at  $z = 5.7$ , whereas the Ly $\alpha$  flux also contributes to the  $z'$ -band flux at  $z = 6.5$ . A clear vertical lower limit sequence of  $M_{UV}$  can be seen at  $z = 5.7$  in Figure 12 and not at  $z = 6.5$ . As reported in previous lower- $z$  studies (S06; Stark et al. 2010; Vanzella et al. 2009; Ouchi et al. 2008; Ando et al. 2006), we saw an apparent deficit of LAEs with large  $EW_0$  at bright UV magnitudes, and the maximum  $EW_0$  increased with lower UV luminosity, which is expected if low-luminosity galaxies are less obscured by dust. This study confirmed the trend at  $z = 5.7$ , and almost the same tendency was found at  $z = 6.5$  as well.

## 6. Ly $\alpha$ PROFILE OF THE COMPOSITE SPECTRUM

The Ly $\alpha$  emission-line profile is also a useful reionization signature, in principle, because the neutral IGM imposes a damping absorption feature on it (Dayal et al. 2008; Dijkstra et al. 2007a). A difference in Ly $\alpha$  line profiles between two epochs around the reionization period might suggest changing IGM opacity. Though there are many model predictions of Ly $\alpha$  profiles during the reionization epoch, numerous factors such as star formation rate (SFR), internal kinematics, inflow/outflow, and source clustering easily affect the profiles. On the observational side, individual spectra are usually too noisy to verify the line profile, so several spectra must be stacked to obtain good average line-profile features. As in our previous study (K06), the composite spectrum was made using the procedure outlined below. We now have 45 and 54 LAE spectra at  $z = 6.5$  and  $5.7$ , respectively, though at different spectroscopic resolutions. First, we removed the spectra with the poorest instrument resolution. Then, each spectrum was smoothed with a Gaussian kernel chosen to produce a common instrument resolution of FWHM  $\sim 6.4 \text{ \AA}$ , which was practically measured from the FWHM of sky lines near the Ly $\alpha$  emission for  $z = 5.7$  and  $6.5$ . Each spectrum was shifted so that the



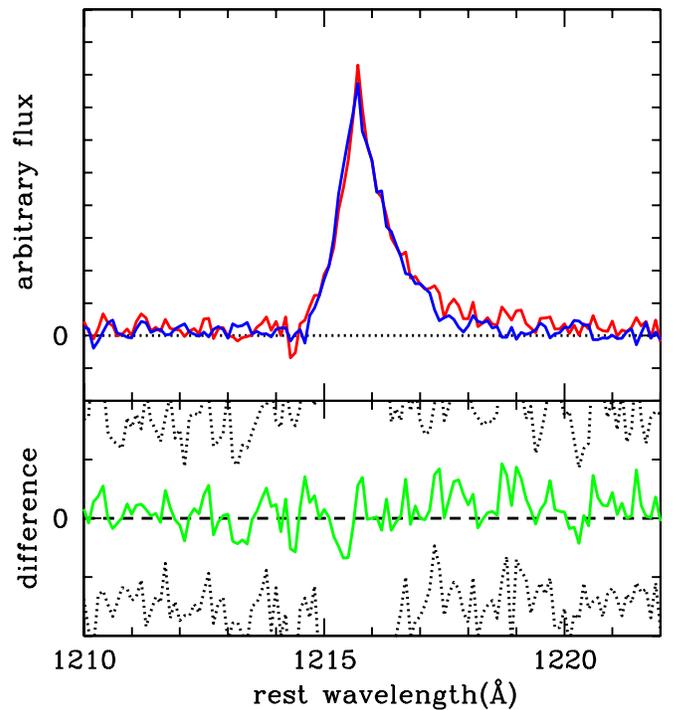
**Figure 11.** Top: the differential  $EW_0$  fraction distribution of the LAE sample at  $z = 6.5$  (red line) and  $z = 5.7$  (blue line). Comparisons with low- $z$  LAEs at  $z = 3.1$ , 3.7, and 5.7 from Ouchi et al. (2008) are also shown. Bottom: the cumulative  $EW_0$  fraction distribution of the LAE sample at  $z = 6.5$  (red line) and  $z = 5.7$  (blue line). The orange and cyan shaded regions are shown as  $1\sigma$  fluctuations in the  $EW_0$  distribution caused by photometric errors and redshift uncertainties. The blue dashed line indicates the cumulative  $EW_0$  fraction distribution of the LAE sample at  $z = 5.7$  given that  $EW_0$  was calculated from  $i'$  and NB816 magnitudes.



**Figure 12.** UV luminosity– $EW_0$  relation at  $z = 5.7$  (left) and  $6.5$  (right). Filled circles show the spectroscopic sample, and open circles show the photometric sample. The objects with  $EW_0 > 240 \text{ \AA}$  are plotted at the  $EW_0 = 240 \text{ \AA}$ . Error bars denote uncertainties caused by photometric errors and redshift ambiguity, except for data points that have large uncertainties due to no detection in the BB band (only the upper limit of  $M_{UV}$  and the lower limit of  $EW_0$  are shown as arrows). The dotted curves represent the  $EW_0$  at fixed  $Ly\alpha$  luminosity from top to bottom: 5, 2, 1, 0.5, 0.2,  $0.1 \times 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ .

line-peak wavelength, which is the only feature used to estimate the redshift, was at the rest wavelength of  $1215.67 \text{ \AA}$ . The spectra were rebinned to a common pixel scale and then co-added by taking the average with scaling and weighting based on their line flux, using a  $3\sigma$  clipping to eliminate sky-subtraction residuals.

Figure 13 compares the final composite spectrum between  $z = 6.5$  and  $5.7$ . Both composite spectra revealed an apparently



**Figure 13.** Comparison of the composite spectrum between  $z = 6.5$  (red) and  $5.7$  (blue). The lower panel shows the residual of the subtraction of  $z = 5.7$  from  $6.5$ . The dotted line shows the  $1\sigma$  error of the difference of the composite spectra.

asymmetric profile with an extended red wing. We found no significant differences between these two composite spectra, even when comparing the composite spectra made only from  $Ly\alpha$ -bright or  $Ly\alpha$ -faint objects. This conclusion is consistent with Ouchi et al. (2010) and Hu et al. (2010). The composite spectrum at  $z = 6.5$  seems to have a slight excess over  $z = 5.7$  at the red wing tail from  $1217 \text{ \AA}$  to  $1220 \text{ \AA}$ , though it is much smaller than the  $1\sigma$  error of the difference in the composite spectra. This could be caused by a slight broadening in the  $Ly\alpha$  emission-line profile itself from  $z = 5.7$  to  $6.5$ , as suggested by Ouchi et al. (2010). Otherwise, this could be caused by scaling to systematically smaller  $Ly\alpha$  flux at  $z = 6.5$ , compared to that of  $z = 5.7$  (as seen on the  $EW_0$  distribution), which increases the UV-continuum level at  $z = 6.5$ .

The similarity in  $Ly\alpha$  emission profiles might indicate a lack of significant IGM opacity evolution from  $z = 5.7$  to  $6.5$ . However, using the composite spectrum of  $Ly\alpha$  emission to constrain the reionization has a critical problem of its own. As mentioned above, the wavelength of the  $Ly\alpha$  line peak has to be used to measure the redshift and is often systematically offset from the rest frame. Shapley et al. (2003) found the kinematic offset implied by the relative redshifts of  $Ly\alpha$  emission and low-ionization interstellar absorption lines in an LBG sample at  $z \sim 3$ . The offsets vary significantly as a function of  $Ly\alpha$  emission strength from  $800 \text{ km s}^{-1}$  to  $480 \text{ km s}^{-1}$ , though these shifts could be smaller at high- $z$ , where the emitting halos are substantially less massive, and might not power such strong winds as at  $z \sim 3$ . This can be explained in terms of the properties of large-scale outflows (Adelberger et al. 2003; Mas-Hesse et al. 2003; Westra et al. 2005). Recently, McLinden et al. (2011) were the first to detect the  $[O III]$  emission line from two LAEs at  $z \sim 3$ , and they also found apparent velocity offsets. Such systematic offsets in  $Ly\alpha$  emission lines from the

systemic redshift would increase the uncertainty in measuring redshifts using only the Ly $\alpha$  peak. Consequently, when making a composite spectrum using several LAE spectra, these systematic offsets would dilute the line profile, critically preventing us from revealing an accurate line profile. Also, if the field-to-field variances of the neutral fraction and the size of the H II bubble were large even at the same redshift, the composite line profile would be diluted. It seems hard to derive a conclusive constraint on reionization from line profiles alone. The most promising method for overcoming the problem is to measure the systemic redshift of LAEs by detecting nebular emissions (Adelberger et al. 2005; McLinden et al. 2011), which is still technically difficult at  $z > 5$ . This wind effect could allow the Ly $\alpha$  emission line to emerge at wavelengths where the GP optical depth is reduced, transmitting the Ly $\alpha$  flux directory to the observer even at the reionization epoch (Dijkstra & Wyithe 2010). McQuinn et al. (2007) found that a 400 km s $^{-1}$  redshift in the Ly $\alpha$  line did not have a large effect on their conclusions regarding the effect of reionization on the Ly $\alpha$  LF and clustering at  $x_{\text{H I}} < 0.4$ , and they concluded that this wind effect would not seriously affect the “Ly $\alpha$  test” in the late phase of reionization.

We would also like to note that the Ly $\alpha$  radiative transfer is complicated by the geometry and kinematics of the ISM and the IGM. The relative geometries of interstellar H I and H II regions significantly affect resonant scattering, which can either suppress or enhance the Ly $\alpha$  line (Charlot & Fall 1993; Neufeld 1991). The resonant scattering in the IGM induces a change in the frequency of Ly $\alpha$  photons, which can also cause a mass-dependent redward shift of the Ly $\alpha$  line peak, even in the absence of a galactic wind (Zheng et al. 2010). Dust attenuation, if any, also significantly reduces the Ly $\alpha$  emission. A stacking analysis would, more or less, overlook these variations among galaxies.

In K06, we showed that our composite Ly $\alpha$  line profile at  $z = 6.5$  could be realized by both the reionization model, in which we included the attenuation of a GP damping wing from outside the H II bubble, and the galactic wind model, which has another broadly extended Gaussian component in the line profile. Although additional spectroscopic data have improved the quality of the composite spectrum, the spectral resolution of our composite spectrum is still too low to distinguish between these two models. Higher resolving power provided by larger telescopes will be required to constrain the model more strongly.

## 7. CONTRIBUTION OF LAEs TO THE REIONIZATION PHOTON BUDGET

The integration of the observed UV LF at the faint end provides an estimate of the luminosity density and, thus, of the photon budget of reionization. Therefore, an accurate UV LF estimate based on the LAE sample will constrain the LAE contribution to the photon budget. Unfortunately, the UV LF measurements at magnitudes fainter than  $M_{\text{UV}} = -20.24$  ( $3\sigma$ ) may be critically uncertain because of incompleteness, which cannot be corrected due to the difference in the completeness of the NB and  $z'$ -band data. Here, we take another approach to derive the UV LF of LAEs using both the Ly $\alpha$  LF and the EW $_0$ –UV luminosity relation, as shown in Figure 12.

The EW distribution function is well approximated by an exponential function (Gronwall et al. 2007; Stark et al. 2011), though its  $e$ -folding width,  $w$ , might depend on UV luminosity. Several previous works provide derivations of the EW $_0$ –UV luminosity relation of LAE at lower- $z$  (e.g., Stark et al. 2010;

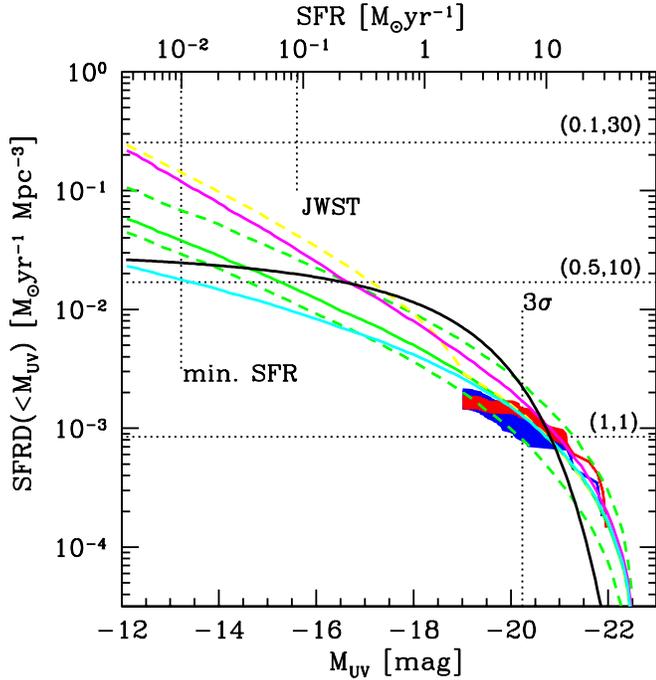
Vanzella et al. 2009; Ouchi et al. 2008; Ando et al. 2006). Their conclusions are roughly consistent with an apparent deficit of large EW $_0$  at bright UV magnitudes and a maximum EW $_0$  that increases with lower UV luminosity. The relation does not show a clear evolution across the  $3 < z < 6$  redshift range (Ouchi et al. 2008; Cassata et al. 2011), and our result at  $z = 6.5$  also roughly follows this trend (Figure 12), though we derived our result from a relatively small sample. Among these previous studies, Stark et al. (2010) derived a reliable EW $_0$ –UV luminosity relation based on a large spectroscopic LAE sample at  $3 < z < 7$ . Based on this relation, the characteristic  $e$ -folding width,  $w$ , was empirically determined to increase with fainter UV magnitudes:  $w = 60M_{\text{UV}} + 1440$ , which gives  $w = 60 \text{ \AA}$  at  $M_{\text{UV}} = -23$  and  $w = 300 \text{ \AA}$  at  $M_{\text{UV}} = -19$ , respectively. This equation almost traces the maximum EW $_0$  values as a function of  $M_{\text{UV}}$ . Figure 12 of Stark et al. (2010) shows an apparent deficiency in LAEs with low EW $_0$  and low UV luminosity, though it could be caused by their spectroscopic detection limit. Hence, we assumed that the peak of the exponential distribution was always at EW $_0 = 0$ , independent of  $M_{\text{UV}}$ . A cutoff EW, below which LAEs were not included in the sample, was set to 10  $\text{\AA}$ , based on the LAE selection criterion  $m_z - m_{\text{NB}} > 1$ , and Equation (1). With this EW $_0$  probability distribution, we conducted Monte Carlo simulations to derive  $M_{\text{UV}}$ , given an Ly $\alpha$  luminosity and EW $_0$ . The Ly $\alpha$  LF measurements included an accurate correction for completeness; therefore, the UV LF was estimated free of incompleteness even at the faint end when assuming the EW $_0$  distribution, as described above.

The dot-dashed line in Figure 9 shows the estimate of the UV LF at  $z = 5.7$  with this method. Here, we assumed that the faint end of the Ly $\alpha$  LF at  $z = 5.7$  was  $\alpha = -1.5$ . Note that we did not use the UV LF at  $z = 6.5$  to constrain the photon budget because the Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$  might be affected by neutral IGM attenuation. The UV LF estimated with the method is fairly consistent with the bright end of the observed UV LF at  $z = 5.7$ , where the incompleteness is not severe. The bright end of the rest-UV LF down to  $3\sigma$  limiting magnitudes in the  $z'$  band can reasonably be reproduced from the observed Ly $\alpha$  LF and the EW $_0$ –UV luminosity relation. However, the shape of the derived UV LF is closer to a power law than to a Schechter function. When we fit the UV LF to a Schechter function, the faint-end slope was found to be  $\alpha = -2.4$ , which is much steeper than those derived from LBGs (Bouwens et al. 2007).

The critical number density of ionizing photons necessary to keep the intergalactic hydrogen ionized was given in Maddau et al. (1999). The corresponding critical star formation rate density (SFRD),  $\dot{\rho}_*(z)$ , can be written as

$$\dot{\rho}_*(z) = 0.013 f_{\text{esc}}^{-1} \left( \frac{C}{30} \right) \left( \frac{1+z}{6} \right)^3 \times \left( \frac{\Omega_b h_{70}^2}{0.04} \right)^2 M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}, \quad (2)$$

where  $f_{\text{esc}}$  is the escape fraction of ionizing photons and  $C$  is the ionized hydrogen clumping factor of the IGM. Here, the authors assumed a Salpeter initial mass function, solar metallicity, and SED at  $< 912 \text{ \AA}$  based on the Bruzual & Charlot population synthesis model. Both  $f_{\text{esc}}$  and  $C_{30}$  are highly uncertain. The  $f_{\text{esc}}$  was generally estimated to be  $< 0.1$  (Leitherer et al. 1995; Deharveng et al. 2001; Fernandez-Soto et al. 2003; Malkan et al. 2003; Shapley et al. 2006) for various galaxies at various



**Figure 14.** Comparison between  $\dot{\rho}_*$  for different parameter sets of  $(f_{\text{esc}}, C)$  in Equation (2) and the SFRD (green solid line) derived by integrating the UV LF of LAEs at  $z = 5.7$  estimated in Section 7. The SFRD estimates based on the observed UV LF appear as the blue (red) shaded region for  $z = 5.7$  (6.5), though these are incomplete at the faint end below the  $3\sigma$  limiting magnitude. The dashed line above the solid line shows the SFRD estimates when  $w$  is reduced to half. The dashed line below the solid line shows the SFRD estimates when the cutoff  $\text{EW}_0 = 15 \text{ \AA}$  instead of  $10 \text{ \AA}$  is applied. The magenta and cyan solid lines show the SFRD estimate when  $\alpha$  is changed from  $-1.5$  to  $-1.7$  and  $-1.3$ , respectively. The black solid line shows the SFRD estimate based on the UV LF of LBGs at  $z \sim 6$  (Bouwens et al. 2007). The minimum SFR inferred by the simulation by Nagamine et al. (2010) and approximate detection limit of JWST are shown by dotted lines.

redshifts. Iwata et al. (2009) and Inoue et al. (2011) obtained much higher  $f_{\text{esc}}$  of  $\sim 0.5$  for some LAEs at  $z = 3.1$ , and Vanzella et al. (2010) found one LBG at  $z = 3.795$  with a direct detection of the Lyman continuum flux, which gave  $f_{\text{esc}} > 0.15$ . Bouwens et al. (2010a) recently argued for the possibility of high  $f_{\text{esc}}$  at  $z \sim 7$  to account for the observed steep UV-continuum slope without a nebular emission contribution (see also Taniguchi et al. 2010). We assumed that the escape fraction did not depend either on luminosity or on redshift, though some models predict that it could increase up to  $\sim 0.8$  in lower-mass galaxies at higher- $z$  (Ricotti & Shull 2000; Wise & Cen 2009; Razoumov & Sommer-Larsen 2010). Siana et al. (2010), based on deep *Hubble Space Telescope* (*HST*) far-UV images, suggest that the escape fraction significantly increases from  $z = 1.3$  to 3. The IGM clumping factor was estimated to be  $C \sim 30$  at  $z = 5$  based on a numerical simulation, though it could be lower if higher density regions are less ionized (Gnedin & Ostriker 1997). A more recent simulation by Pawlik et al. (2009) suggests a much lower clumping factor,  $C = 6$ . Bolton & Haehnelt (2007) suggest  $C \lesssim 3$  at  $z = 6$ , based on measurements of the metagalactic photoionization rate, combined with a model for the ionizing photon mean free path. Figure 14 presents a comparison between  $\dot{\rho}_*$  for different parameter sets of  $(f_{\text{esc}}, C)$  in Equation (2) and the SFRD derived by integrating the UV LF estimated in this section. Assuming the complete escape of ionizing photons ( $f_{\text{esc}} = 1$ ) and a homogeneous IGM ( $C = 1$ ), the universe can be easily ionized only by bright LAEs at

$z = 6.5$ ; however, in the more realistic case with  $f_{\text{esc}} < 1$  and  $C \gg 1$ , the contribution of low-luminosity LAEs is important to the reionization process.

Our method assumed the  $\text{EW}_0$ –UV luminosity relation, which is found to be quite sensitive to the SFRD estimate. The dashed line above the solid line in Figure 14 shows the SFRD estimates when  $w$  was reduced to half. The dashed line below the solid line in Figure 14 shows the SFRD estimates when the  $\text{EW}_0 = 15 \text{ \AA}$  cutoff was applied instead of  $10 \text{ \AA}$ . Both of these estimates are apparently inconsistent with the reliably observed bright end of the SFRD; therefore, only narrow ranges of parameters in the  $\text{EW}_0$ –UV luminosity relation are acceptable. As mentioned in Section 5, an  $\text{EW}_0$  larger than  $\sim 300 \text{ \AA}$  is hard to explain using the usual Population II synthesis. When making a trial cutoff at the high- $\text{EW}_0$  end of the  $\text{EW}_0$ –UV luminosity, the SFRD steepens sharply at the faint end. We also fit a one-sided Gaussian instead of an exponential to the  $\text{EW}_0$  distribution function, but the estimate did not change significantly. The most uncertain parameter in the estimate was the faint-end slope of the  $\text{Ly}\alpha$  LF,  $\alpha$ , which, thus far, was poorly constrained by observation. The magenta and cyan solid lines in Figure 14 show the SFRD estimates when changing  $\alpha$  from  $-1.5$  to  $-1.7$  and  $-1.3$ , respectively. Although these two estimates hardly affect the bright end, maintaining consistency with the observations, they diverge strongly at the faint end. The steeper faint-end slope makes a larger contribution to the photon budget, as expected.

The black solid line in Figure 14 shows the SFRD estimate based on the UV LF of LBGs at  $z \sim 6$  (Bouwens et al. 2007). Although the SFRD of LAEs seems to be larger than that of LBGs at the bright end, they are within the uncertainties (see the shaded region of Figure 9 indicating the range of the UV LF of the LBG sample at  $z \sim 6$  determined by various studies). At the faint end, the SFRD of LAEs increases more significantly than the SFRD of LBGs toward faint magnitudes, as expected from the fact that the LAEs have steeper UV LF. It should be noted that this result strongly depends on the faint-end slope,  $\alpha$ , of the  $\text{Ly}\alpha$  LF at  $z = 5.7$ , which is poorly constrained by this study. Here, we provide only estimates for values of  $\alpha = -1.3, -1.5$ , and  $-1.7$ . At low- $z$ , Gronwall et al. (2007) derived a faint-end slope of the  $\text{Ly}\alpha$  LF of  $\alpha = -1.49^{+0.45}_{-0.34}$ , and Cassata et al. (2011) found  $\alpha = -1.60^{+0.12}_{-0.12}$  at  $z \sim 2.5$  and  $\alpha = -1.78^{+0.10}_{-0.12}$  at  $z \sim 4$ . It is interesting that a steeper faint-end slope of the UV LF than of the LBG is predicted in Figure 14 even when  $\alpha = -1.3$ , which is shallower than those at low- $z$ . Stark et al. (2011) also suggested a higher fraction of LAEs in their LBG sample toward fainter UV magnitudes. Consequently, the relative contribution to the photon budget of the LAEs compared with the LBGs increases toward fainter magnitudes. It finally exceeds the contribution of the LBGs at the faintest magnitude, which seems unlikely. Nagamine et al. (2010) employed a cosmological smoothed particle hydrodynamic simulation to reproduce some observational properties of LAEs and found a critical threshold in stellar mass around  $M_* \sim 10^7 M_\odot$ , below which star formation rapidly drops, as might be expected from the Kennicutt law. Therefore, we assumed that the minimum SFR that galaxies should have is  $10^{-2} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ , which corresponds to the critical stellar mass in the simulation by Nagamine et al. (2010). When assuming  $\alpha = -1.5$ , the LAE contribution exceeds the LBG around  $M_{\text{UV}} \sim -15$ . This might suggest that some of our assumptions are not reasonable; otherwise, the faint-end slope of the  $\text{Ly}\alpha$  LF of LAEs should be shallower than  $-1.5$ . For example, given  $\alpha = -1.3$ , the LAE

contribution does not overwhelm the LBG contribution down to  $\text{SFR} = 10^{-2} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ . However, we note here again that the derived UV LF of LAEs is based on many assumptions. For example, the faint-end slope of the SFRD becomes flatter even with  $\alpha = -1.5$  if much larger  $\text{EW}_0$  are allowed at faint UV luminosities. On the other hand, we note that the LBG estimate is also based on an extrapolation of the observed UV LF to very faint levels.

Despite many uncertainties, this might be the first estimate of the contribution of the LAE population to the reionizing photons. The SFR estimate based on Ly $\alpha$  luminosity is much more strongly affected by extinctions of dust, ISM, and IGM than the SFR estimate based on rest-UV luminosity. Our result indicates that low-luminosity LAEs could contribute significantly to the photon budget necessary for reionization, though these faint LAEs are below the current detection limits. Insofar as a universal  $\text{EW}_0$ -UV luminosity relation is assumed, a steep faint-end slope in the UV LF is predicted even when the faint-end slope of the Ly $\alpha$  LF is shallower than those at low- $z$ . The faint end of the LF of these ionizing sources is critical to the conclusion, and an accurate determination of the faint-end slope of the Ly $\alpha$  LF will enable a precise estimate of the total ionizing photon density emitted by LAEs at this epoch. Bouwens et al. (2007) concluded that the number of  $i$  dropouts at  $z \sim 6$  appears to be approximately consistent with the numbers necessary to reionize the universe. Recent studies using *HST*/WFC3 identified more and fainter galaxies at even higher- $z$ , suggesting a faint-end slope that is sufficiently steep (Oesch et al. 2010; Bouwens et al. 2010b) to fully reionize the universe. The LAE sample based on NB searches exploring only a small redshift coverage is complementary to the estimate because LAEs should constitute a very young population at a single epoch among heterogeneous high- $z$  star-forming galaxies sampled by the  $i$ -dropout method. Moreover, our LAE sample has the advantage of many spectroscopic confirmations, providing an accurate estimate of sample completeness and contamination, which also increases the reliability of our photometric LAE sample.

## 8. SUMMARY AND DISCUSSION

We obtained extended spectroscopic confirmations of LAEs at  $z = 6.5$  and  $5.7$  in the SDF, and our conclusions can be summarized as follows.

1. We provided new identifications of 28 and 20 LAEs at  $z = 6.5$  and  $5.7$ , respectively. The discrimination of an LAE from other nearby emitters was based on a quantitative line asymmetric estimator, the weighted skewness,  $S_w$ . The total number of spectroscopically confirmed LAEs in the SDF is now 45 (54) at  $z = 6.5$  ( $5.7$ ), which means that 90% (74%) of the photometric candidates have been followed by spectroscopy. Our long campaign of follow-up spectroscopy shows that our photometric LAE sample is highly reliable, with low incompleteness and little contamination.
2. We made more careful measurements of Ly $\alpha$  luminosity, both photometrically and spectroscopically, than in our previous study to determine Ly $\alpha$  and rest-UV LFs more accurately. The non-square transmission curve of filters was taken into account in the photometric measurements, and we corrected for slit loss in the spectroscopic measurements. The Ly $\alpha$  fluxes measured photometrically and

spectroscopically agree very well, showing that our measurement of Ly $\alpha$  luminosity is accurate.

3. We derived Ly $\alpha$  LFs of LAEs at  $z = 6.5$  and  $5.7$ . With a large number of spectroscopic confirmations of our LAE sample and more careful measurements of luminosities, the Ly $\alpha$  LFs at both redshifts are more sharply determined than those in our previous studies. The substantially improved evaluation of the Ly $\alpha$  LF of  $z = 6.5$  shows an apparent deficit from  $z = 5.7$ , at least at the bright end and a possible decline even at the faint end, though small uncertainties remain.
4. We derived rest-UV LFs of LAEs at  $z = 6.5$  and  $5.7$ . We confirmed the result of our previous study, namely that the rest-UV LFs at  $z = 6.5$  and  $5.7$  agree with each other, which is in clear contrast to the difference seen in the Ly $\alpha$  LF, though the measurements of UV LFs of LAEs still have large uncertainties. The rest-UV LF of LAEs is almost consistent with that of LBGs within the errors, at least at the bright end, suggesting that the fraction of LAEs among LBGs at  $z \sim 6$  is higher than that at  $z = 3$ .
5. The  $\text{EW}_0$  distribution of our  $z = 5.7$  LAE sample is almost consistent with other low- $z$  samples, whereas the  $\text{EW}_0$  at  $z = 6.5$  seems to be systematically smaller than  $z = 5.7$ . This may be understood from the resultant LFs of these two epochs: UV-continuum LFs are almost identical, whereas the Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$  is deficient compared to that at  $z = 5.7$ . There remains, however, the possibility that the trend is attributed to the artifacts of using the BB band including the Ly $\alpha$  line at  $z = 6.5$ . The  $\text{EW}_0$  distribution at  $z = 6.5$  shows an extended tail toward larger  $\text{EW}_0$  compared with  $z = 5.7$ , though  $\text{EW}_0$  measurements are not reliable when not detected in the BB band. The  $\text{EW}_0$  and rest-UV luminosity relation shows an apparent deficit of LAEs with large  $\text{EW}_0$  at bright UV magnitudes, and the upper-limit of the  $\text{EW}_0$  increases with lower UV luminosity.
6. We found no significant difference in the composite Ly $\alpha$  line profile between  $z = 6.5$  and  $5.7$ , though the possible velocity offset of Ly $\alpha$  line from the systemic redshift might dilute the composite profiles.
7. We tried to recover the rest-UV LF of LAEs at the faint end, where incompleteness is severe, by assuming a universal  $\text{EW}_0$ -UV luminosity relation. When choosing reasonable parameters to fit to the observed  $\text{EW}_0$ -UV luminosity relation, the bright end of the rest-UV LF at  $z = 5.7$  was well reproduced from the observed Ly $\alpha$  LF. Integrating this rest-UV LF permitted the first experimental estimate of the photon budget of LAEs for reionization. The derived UV LF suggested that the fractional LAE contribution to the photon budget among LBGs significantly increases toward fainter magnitudes. Low-luminosity LAEs could contribute significantly to the photon budget, though this depends on the poorly constrained faint-end slope of the Ly $\alpha$  LF.

### 8.1. Implications for Reionization

We confirmed our previous result that the Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$  declines from those at  $z < 5.7$  based on our deep LAE samples with a high spectroscopic identification rate. This result is, more or less, consistent with Ouchi et al. (2010) and Hu et al. (2010). The decline in the Ly $\alpha$  LF of LAEs from  $z = 5.7$  to  $6.5$  could be caused by the evolution of some intrinsic property of LAEs or by evolution in the ionization state of the IGM. It will be almost impossible to distinguish between these two

possibilities from the Ly $\alpha$  LF alone; however, the rest-UV LF, which is not sensitive to the neutral IGM, may provide an additional diagnostic of the cause of the observed trend. Interestingly, our measurements of the rest-UV LFs agree well within uncertainties between these two epochs at least at the bright end, where an apparent difference is observed in the Ly $\alpha$  LF. This result might support the interpretation of neutral IGM attenuation. Assuming a fully ionized IGM at  $z = 5.7$ , the observed difference in the Ly $\alpha$  LF suggests  $x_{\text{H I}} \sim 0.38$  at  $z = 6.5$  based on the model of McQuinn et al. (2007). Another important aspect of ascribing the difference in Ly $\alpha$  LF to the galaxy evolution of LAEs is that it should simultaneously explain the difference between  $z = 5.7$  and 6.5 and the lack of evolution in the Ly $\alpha$  LF from  $z = 3$  to 6. The model of Kobayashi et al. (2010), which takes into account a possible evolution of  $f_{\text{esc}}$  and reasonably reproduces the Ly $\alpha$  LF, UV LF, and EW distribution of LAEs from  $z = 3.1$  to 6.5, favors  $x_{\text{H I}} \sim 0.4$  at  $z = 6.5$ . In the model of Kobayashi et al. (2010), the observed large decline in the Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$  could be partly caused by galaxy evolution; however, IGM attenuation is still required to account for the entire decline. The predicted value of the neutral fraction at the moment is strongly model-dependent. Dayal et al. (2008) concluded that the Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$  could be reproduced by their model even with small  $x_{\text{H I}} = 3 \times 10^{-4}$ , though a strong increase in dust content was required to match the model to the Ly $\alpha$  LF at  $z < 5$ . The amplitude difference in the Ly $\alpha$  LF is still relatively small between these two epochs, suggesting that the universe was still largely ( $\gtrsim 60\%$ ) ionized at  $z = 6.5$ . Such an amplitude difference is smaller than the uncertainties of the rest-UV LFs, though we concluded that the rest-UV LFs between the two epochs agree well at the bright end. More accurate measurement of the rest-UV LFs based on the larger LAE sample in the future will provide a stronger constraint on the Ly $\alpha$  test.

### 8.2. Cosmic Variance Uncertainties

The decline in Ly $\alpha$  LF from  $z = 5.7$  to 6.5 might be caused by cosmic variance. The sample size is not yet large enough to statistically refute this interpretation; however, we found no difference in the rest-UV continuum LFs, which should be affected by cosmic variance from  $z = 5.7$  to 6.5, if it exists. Ouchi et al. (2010) recently carried out an LAE survey at  $z = 6.5$  with an FOV five times wider than this study. Though their number of spectroscopic confirmations is small, the result is statistically robust and less affected by cosmic variance than ours. They concluded that the Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$  shows a decline of 30% in Ly $\alpha$  luminosity from  $z = 5.7$ , whereas the present study finds a 24% decline. Interestingly, they detected an apparent difference in the LF even at the faint end. Their LF difference alone constrains the neutral fraction to  $x_{\text{H I}} < 0.2_{-0.2}^{+0.2}$ , though they did not detect the significant enhancement of clustering amplitude expected during reionization. Hu et al. (2010) also completed their LAE surveys at  $z = 6.5$  and 5.7, using an FOV five times wider than this study. Though the shape of their LF differs from this study and Ouchi et al. (2010), they also found that the Ly $\alpha$  LFs differed based on their own estimates at these two epochs, indicating a 44% decline in  $\phi^*$ , whereas this study found a 34% decline. It is interesting that both of these wide-field studies confirmed a difference in the Ly $\alpha$  LF between  $z = 6.5$  and 5.7. Nakamura et al. (2011) also derived the Ly $\alpha$  LF at  $z = 6.5$ , with a low number density only  $\times 0.3$  of our previous study. The degree of difference in the LF found in the present study, Ouchi et al. (2010), and Hu et al.

(2010) is slightly inconsistent, possibly suggesting field-to-field cosmic variance. Otherwise, such a variance could be caused by a patchy reionization process, which has been suggested in the GP trough measurements showing a substantial variation in IGM transmissions among different QSO lines of sight around  $z \sim 6$  (Djorgovski et al. 2006). Such a process is expected to be caused by primordial clustering or an initial large-scale structure of ionizing sources. Much wider surveys of high- $z$  LAEs are required to obtain statistically significant constraints on any variance.

### 8.3. Photon Budget of Reionization

In Section 7, we attempted to estimate the rest-UV LF of LAEs using the Ly $\alpha$  LF, assuming a universal EW $_0$ –UV luminosity relation. Interestingly, this estimate reproduces the bright end of the observed UV LF reasonably well, enabling an estimate of the LAE contribution to the photon budget required for reionization. We note, however, that this method has large uncertainties, including the universality of the EW $_0$  distribution function and the EW $_0$ –UV luminosity relation. Pentericci et al. (2010) indicated that a correlation between Ly $\alpha$  strength and age or SFR might change with cosmic time, potentially changing the EW $_0$  distribution function. Nilsson et al. (2009) suggested no correlation between EW and UV luminosity; however, this assumption, coupled with the observed Ly $\alpha$  LF, produces a much steeper faint-end slope in the UV LF of LAEs, exacerbating the inconsistency with the UV LF of LBG. The universality of the EW $_0$  distribution and EW $_0$ –UV luminosity relation should be verified at lower- $z$  based on a larger LAE sample. The observed large scatter in Ly $\alpha$  EW $_0$  at faint UV luminosity could be due to small amounts of dust extinction (Verhamme et al. 2008) and possibly to a stochasticity of their complicated duty cycle (Nagamine et al. 2010), which has not yet been clearly revealed. Furthermore, more accurate determinations of the faint-end slope of the Ly $\alpha$  LF,  $f_{\text{esc}}$ , and  $C$  are required to provide a stronger constraint on the photon budget. The *James Webb Space Telescope* (*JWST*) will extend the current observational limit down to  $m_{\text{AB}} \sim 31$ , which corresponds to  $M_{\text{UV}} = -15.6$  at  $z = 5.7$  (see Figure 14). Significant detections of LAEs down to this faint end will allow a more precise estimate of the photon budget. The *JWST*/NIRCam and tunable filter imager will catch LAEs at higher- $z$  far beyond the current frontier of the distant universe. The derived Ly $\alpha$  LF during the early reionization phase will be more sensitive to the neutral fraction, giving a stronger constraint on the history of reionization.

We are grateful to the Subaru and Keck Observatory staffs for their help with the observations. The observing time for part of this project was committed to all the Subaru Telescope builders. We thank an anonymous referee for helpful comments that improved the manuscript. This research was supported by the Japan Society for the Promotion of Science through Grant-in-Aid for Scientific Research 19540246.

*Facilities:* Subaru (FOCAS, Suprime-Cam), Keck:II (DEIMOS)

### REFERENCES

- Adelberger, K. L., et al. 2003, *ApJ*, 584, 45  
 Adelberger, K. L., et al. 2005, *ApJ*, 629, 639  
 Ando, M., et al. 2006, *ApJ*, 645, L9  
 Barkana, R., & Loeb, A. 2004, *ApJ*, 609, 474  
 Bolton, J. S., & Haehnelt, M. G. 2007, *MNRAS*, 382, 325  
 Bouwens, R. J., et al. 2007, *ApJ*, 670, 928

- Bouwens, R. J., et al. 2010a, *ApJ*, 708, 69
- Bouwens, R. J., et al. 2010b, arXiv:1006.4360
- Cassata, P., et al. 2011, *A&A*, 525, 143
- Charlot, S., & Fall, S. M. 1993, *ApJ*, 415, 580
- Dayal, P., et al. 2008, *MNRAS*, 389, 1683
- Dayal, P., et al. 2009, *MNRAS*, 400, 2000
- Deharveng, J.-M., et al. 2001, *A&A*, 375, 805
- Dijkstra, M., Litz, A., & Wyithe, J. S. B. 2007a, *MNRAS*, 377, 1175
- Dijkstra, M., & Wyithe, J. S. B. 2010, *MNRAS*, 408, 352
- Dijkstra, M., Wyithe, J. S. B., & Haiman, Z. 2007b, *MNRAS*, 379, 253
- Djorgovski, S. G., Bogosavljevic, M., & Mahabal, A. 2006, *New Astron.*, 50, 140
- Dow-Hygelund, C. C., et al. 2007, *ApJ*, 660, 47
- Faber, S., et al. 2003, *Proc. SPIE*, 4841, 1657
- Fan, X., et al. 2006, *AJ*, 132, 117
- Fernandez-Soto, A., Lanzetta, K. M., & Chen, H.-W. 2003, *MNRAS*, 342, 1215
- Finkelstein, S. L., et al. 2009, *ApJ*, 691, 465
- Fontana, A., et al. 2010, *ApJ*, 725, 205
- Furlanetto, S. R., Hernquist, L., & Zaldarriaga, M. 2004, *MNRAS*, 354, 695
- Gnedin, N. Y., & Ostriker, J. P. 1997, *ApJ*, 486, 581
- Gronwall, C., et al. 2007, *ApJ*, 667, 79
- Haiman, Z., & Cen, R. 2005, *ApJ*, 623, 627
- Haiman, Z., & Spaans, M. 1999, *ApJ*, 518, 138
- Hansen, M., & Oh, S. P. 2006, *MNRAS*, 367, 979
- Henry, A. L., et al. 2010, *ApJ*, 719, 685
- Hibon, P., et al. 2010, *A&A*, 515, 97
- Hu, E. M., Cowie, L. L., Barger, A. J., Capak, P., Kakazu, Y., & Trouille, L. 2010, *ApJ*, 725, 394
- Hu, E. M., Cowie, L. L., McMahon, R. G., Capak, P., Iwamuro, F., Kneib, J.-P., Maihara, T., & Motohara, K. 2002, *ApJ*, 568, L75 (erratum 576, L99)
- Iliev, I. T., et al. 2008, *MNRAS*, 391, 63
- Inoue, A. K., et al. 2011, *MNRAS*, 411, 2336
- Iwata, I., et al. 2009, *ApJ*, 692, 1287
- Iye, M., et al. 2006, *Nature*, 443, 186
- Jiang, L., et al. 2008, *AJ*, 135, 1057
- Johnson, J. L., et al. 2008, *MNRAS*, 388, 26
- Kashikawa, N., et al. 2002, *PASJ*, 54, 819
- Kashikawa, N., et al. 2004, *PASJ*, 56, 1011
- Kashikawa, N., et al. 2006, *ApJ*, 648, 7 (K06)
- Kobayashi, M. A. R., Totani, T., & Nagashima, M. 2007, *ApJ*, 670, 919
- Kobayashi, M. A. R., Totani, T., & Nagashima, M. 2010, *ApJ*, 708, 1119
- Kodaira, K., et al. 2003, *PASJ*, 55, L17
- Komatsu, E., et al. 2009, *ApJS*, 180, 330
- Le Delliou, M., Lacey, C., Baugh, C. M., Guiderdoni, B., Bacon, R., Courtois, H., Sousbie, T., & Morris, S. L. 2005, *MNRAS*, 357, L11
- Leitherer, C., Robert, C., & Heckman, T. M. 1995, *ApJS*, 99, 173
- Maddau, P., Haardt, F., & Rees, M. J. 1999, *ApJ*, 514, 648
- Malhotra, S., & Rhoads, J. E. 2004, *ApJ*, 617, L5
- Malkan, M., Webb, W., & Konopacky, Q. 2003, *ApJ*, 598, 878
- Mas-Hesse, J. M., Kunth, D., Tenorio-Tagle, G., Leitherer, C., Terlevich, R. J., & Terlevich, E. 2003, *ApJ*, 598, 858
- McLinden, E. M., et al. 2011, *ApJ*, 730, 136
- McQuinn, M., et al. 2007, *MNRAS*, 381, 75
- Mesinger, A., & Furlanetto, S. 2007, *ApJ*, 669, 663
- Nagamine, K., et al. 2010, *PASJ*, 62, 1455
- Nagao, T., et al. 2007, *A&A*, 468, 877
- Nakamura, E., et al. 2011, *MNRAS*, 412, 2579
- Neufeld, D. A. 1991, *ApJ*, 370, 85
- Nilsson, K. K., et al. 2009, *MNRAS*, 400, 232
- Oesch, P. A., et al. 2010, *ApJ*, 709, L16
- Ono, Y., et al. 2010, *ApJ*, 724, 1524
- Ota, K., et al. 2008, *ApJ*, 677, 12
- Ota, K., et al. 2010, *ApJ*, 722, 803
- Ouchi, M., et al. 2008, *ApJS*, 176, 301
- Ouchi, M., et al. 2010, *ApJ*, 723, 869
- Pawlik, A., et al. 2009, *MNRAS*, 394, 1812
- Pentericci, L., et al. 2010, *A&A*, 514, 64
- Razoumov, A. O., & Sommer-Larsen, J. 2010, *ApJ*, 710, 1239
- Reddy, N. A., et al. 2008, *ApJS*, 175, 48
- Richard, J., et al. 2008, *ApJ*, 685, 705
- Ricotti, M., & Shull, J. M. 2000, *ApJ*, 542, 548
- Schaerer, D. 2002, *A&A*, 382, 28
- Shapley, A. E., Steidel, C. C., Pettini, M., & Adelberger, K. L. 2003, *ApJ*, 588, 65
- Shapley, A. E., et al. 2001, *ApJ*, 562, 95
- Shapley, A. E., et al. 2006, *ApJ*, 651, 688
- Shimasaku, K., et al. 2006, *PASJ*, 58, 313 (S06)
- Siana, B., et al. 2010, *ApJ*, 723, 241
- Somerville, R. S., Lee, K., Ferguson, H. C., Gardner, J. P., Moustakas, L. A., & Giavalisco, M. 2004, *ApJ*, 600, L171
- Stanway, E. R., et al. 2007, *MNRAS*, 376, 727
- Stark, D. P., et al. 2007, *ApJ*, 663, 10
- Stark, D. P., et al. 2010, *MNRAS*, 408, 1628
- Stark, D. P., et al. 2011, *ApJ*, 728, L2
- Taniguchi, Y., et al. 2005, *PASJ*, 57, 165
- Taniguchi, Y., et al. 2010, *ApJ*, 724, 1480
- Tilvi, V., et al. 2010, *ApJ*, 721, 1853
- Vanzella, E., et al. 2009, *ApJ*, 695, 1163
- Vanzella, E., et al. 2010, *ApJ*, 725, 1011
- Verhamme, A., et al. 2008, *A&A*, 491, 89
- Westra, E., et al. 2005, *A&A*, 430, L21
- Willott, C. J., et al. 2005, *ApJ*, 633, 630
- Wise, J. H., & Cen, R. 2009, *ApJ*, 693, 984
- Wyithe, J. S. B., & Loeb, A. 2004, *Nature*, 432, 194
- Yoshida, N., et al. 2007, *ApJ*, 663, 687
- Zheng, Z., et al. 2010, *ApJ*, 716, 574

## SDSS J133401.39+331534.3: A NEW SUBARCSECOND GRAVITATIONALLY LENSED QUASAR\*

CRISTIAN E. RUSU<sup>1,2</sup>, MASAMUNE OGURI<sup>3,4</sup>, NAOHISA INADA<sup>5</sup>, ISSHA KAYO<sup>6</sup>, MASANORI IYE<sup>1,2,7</sup>, YUTAKA HAYANO<sup>8</sup>, SHIN OYA<sup>8</sup>, MASAYUKI HATTORI<sup>8</sup>, YOSHIHIKO SAITO<sup>8</sup>, MEGURU ITO<sup>8</sup>, YOSUKE MINOWA<sup>8</sup>, TAE-SOO PYO<sup>8</sup>, HIROSHI TERADA<sup>8</sup>, HIDEKI TAKAMI<sup>8</sup>, AND MAKOTO WATANABE<sup>9</sup>

<sup>1</sup> Optical and Infrared Astronomy Division, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

<sup>2</sup> Department of Astronomy, Graduate School of Science, University of Tokyo 7-3-1, Hongo Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

<sup>3</sup> Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwa-no-ha, Kashiwa, Chiba 277-8568, Japan

<sup>4</sup> Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

<sup>5</sup> Department of Physics, Nara National College of Technology, Yamatokohriyama, Nara 639-1080, Japan

<sup>6</sup> Department of Physics, Toho University, Funabashi, Chiba 274-8510, Japan

<sup>7</sup> Department of Astronomical Science, The Graduate University for Advanced Studies (SOKENDAI), National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

<sup>8</sup> Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA

<sup>9</sup> Department of CosmoSciences, Hokkaido University, Kita 10, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan

Received 2011 April 10; accepted 2011 June 7; published 2011 August 10

### ABSTRACT

The quasar SDSS J133401.39+331534.3 at  $z = 2.426$  is found to be a two-image gravitationally lensed quasar with an image separation of  $0''.833$ . The object is first identified as a lensed quasar candidate in the Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search, and then confirmed as a lensed system from follow-up observations at the Subaru and University of Hawaii 2.2 m telescopes. We estimate the redshift of the lensing galaxy to be 0.557 based on absorption lines in the quasar spectra as well as the color of the galaxy. In particular, we observe the system with the Subaru Telescope AO188 adaptive optics with a laser guide star, in order to derive accurate astrometry, which well demonstrates the usefulness of the laser guide star adaptive optics imaging for studying strong lens systems. Our mass modeling with improved astrometry implies that a nearby bright galaxy  $\sim 4''$  apart from the lensing galaxy is likely to affect the lens potential.

*Key words:* gravitational lensing: strong – instrumentation: adaptive optics – quasars: individual (SDSS J133401.39+331534.3)

### 1. INTRODUCTION

Since the discovery of the first gravitationally lensed quasar (Walsh et al. 1979), it has convincingly been demonstrated that lensed quasars provide insights into various research fields in astrophysics and cosmology, as well as being a unique tool for studying the dark universe. For instance, one can directly measure the structure and substructure of lensing objects, including the distribution of dark matter, through detailed observations and analysis of lensed systems (e.g., Treu & Koopmans 2004; Rusin & Kochanek 2005; Chiba et al. 2005). Magnification by gravitational lensing greatly enhances our ability to study quasar host galaxies at high redshifts (e.g., Peng et al. 2006). Moreover, the statistics of lensed quasars, as well as measurements of time delays between lensed images, provide independent constraints on cosmological parameters (e.g., Chae et al. 2002; Oguri 2007; Oguri et al. 2008; Suyu et al. 2010).

High-resolution imaging such as that provided by adaptive optics (AO) is crucial for accurately characterizing lensed quasar systems. This is not only the case for the small-separation systems ( $\sim 1''$ ), where accurate astrometry (prone to the effect of atmospheric seeing) is necessary for constraining mass models of the lensing galaxies (e.g., Sluse et al. 2008), but also for the larger separation systems, where AO imaging can identify lens substructures and faint extended lensed features such as arcs (e.g., McKean et al. 2007).

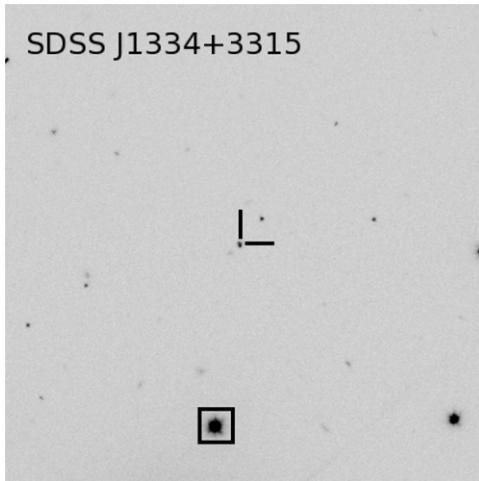
The Sloan Digital Sky Survey Quasar Lens Search (SQLS; Oguri et al. 2006, 2008; Inada et al. 2008, 2010) has been one of

the most successful strong lens surveys conducted to date. SQLS relies on the large homogeneous sample of spectroscopically confirmed quasars from the Sloan Digital Sky Survey (SDSS; York et al. 2000). By identifying lensed quasar candidates using the color and morphological information from the SDSS imaging data, SQLS has discovered more than 40 new lensed quasars so far. Together with previously known lenses which were re-observed by the SDSS, the SQLS sample consists of  $\sim 60$  lensed quasars, constituting roughly half of all lensed quasars discovered to date.

However, a disadvantage of SQLS, like other ground-based optical strong lens surveys, is its poor capability of identifying subarcsecond (image separation  $\theta < 1''$ ) lensed systems. This is because typical seeing sizes of ground-based optical imaging observations are  $\sim 1''$ , which makes it difficult to resolve multiple components of subarcsecond systems. Indeed, discoveries and confirmations of subarcsecond lensed quasars have been made mostly by radio surveys (e.g., Browne et al. 2003) or by using the *Hubble Space Telescope* (e.g., Reimers et al. 2002), with a few exceptions from ground-based surveys (e.g., Castander et al. 2006; Blackburne et al. 2008).

In this paper, we report the discovery of the first new subarcsecond (two-image) lensed quasar discovered in the course of SQLS, SDSS J133401.39+331534.3 (hereafter SDSS J1334+3315). After briefly describing the lens candidate selection from the SDSS data (Section 2), we present our imaging and spectroscopic follow-up observations (Section 3). We further observe this system with the Subaru Telescope laser guide star AO (LGS+AO188) for robust detection as well as characterization of the lensing galaxy (Sections 4 and 5). The accurate astrometry obtained with the LGS+AO188 is then used for

\* Based on data collected at the Subaru Telescope, which is operated by the National Astronomical Observatory of Japan. Use of the UH2.2 m telescope for the observations is supported by NAOJ.



**Figure 1.** Finding chart of SDSS J1334+3315 from the SDSS *i*-band image. The size is  $2.5 \times 2.5$ . North is up and east is left. The bright star indicated by an open square was used as the tip-tilt star for the laser guide star adaptive optics imaging (see Section 4 for details).

gravitational lens mass modeling (Section 6). We summarize our results in Section 7. We assume the concordance cosmology with  $H_0 = 70 \text{ km}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ ,  $\Omega_m = 0.27$ , and  $\Omega_\Lambda = 0.73$  throughout this paper.

## 2. CANDIDATE SELECTION FROM THE SLOAN DIGITAL SKY SURVEY

The SDSS (SDSS-I and SDSS-II Legacy Survey; York et al. 2000) is a combination of imaging and spectroscopic surveys to map  $10,000 \text{ deg}^2$  of the sky, centered at the North Galactic Cap. The survey uses a dedicated wide-field 2.5 m telescope (Gunn et al. 2006) at the Apache Point Observatory in New Mexico, USA. Images taken in five broadband filters (*ugriz*; Fukugita et al. 1996; Gunn et al. 1998; Doi et al. 2010) are reduced with an automated pipeline, achieving astrometric accuracy better than about  $0.1''$  (Pier et al. 2003), and photometric zero-point accuracy better than about 0.01 mag over the entire survey area, in the *g*, *r*, and *i* bands (Hogg et al. 2001; Smith et al. 2002; Ivezić et al. 2004; Tucker et al. 2006; Padmanabhan et al. 2008). The SDSS also conducts spectroscopic observations with a multi-fiber spectrograph covering  $3800\text{--}9200 \text{ \AA}$ , with a resolution of  $R \sim 1800$  (Blanton et al. 2003). The data are publicly available (Stoughton et al. 2002; Abazajian et al. 2003, 2004, 2005, 2009; Adelman-McCarthy et al. 2006, 2007, 2008).

The SQLS (Oguri et al. 2006, 2008; Inada et al. 2008, 2010) identifies lensed quasar candidates among spectroscopic quasars in the SDSS (Richards et al. 2002), using two selection algorithms. One is the morphological selection, which selects quasars with possible extended morphology as small-separation lensed candidates. The other is the color selection, which searches for nearby stellar objects whose colors are similar to the spectroscopically identified quasars. SDSS J1334+3315 is a lensed quasar candidate at  $z = 2.426$  selected by the morphological selection (see Figure 1 for a finding chart). Although the morphological selection is designed to be nearly complete at  $\theta > 1''$ , it can identify some subarcsecond lensed systems as well, as explicitly shown in simulations of lensed quasar images (Oguri et al. 2006). The point-spread function (PSF) magnitudes of the unresolved SDSS J1334+3315 system, measured by the SDSS, are  $u = 19.32 \pm 0.03$ ,  $g = 18.76 \pm 0.01$ ,

$r = 18.66 \pm 0.02$ ,  $i = 18.80 \pm 0.02$ , and  $z = 18.71 \pm 0.03$ , where the Galactic extinction is not corrected.

## 3. FOLLOW-UP SPECTROSCOPY AND IMAGING

### 3.1. Spectroscopy

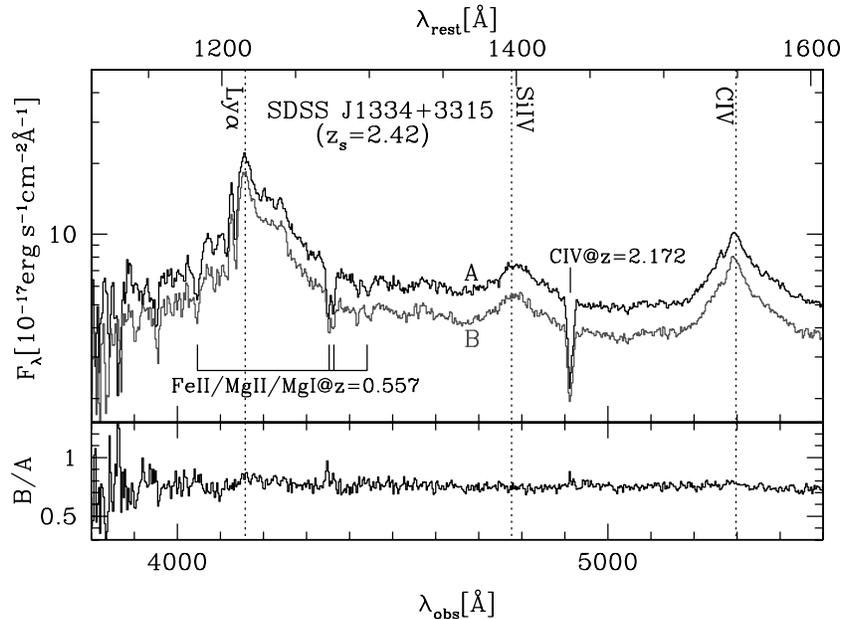
We conducted spectroscopic follow-up observations of SDSS J1334+3315 with the Faint Object Camera and Spectrograph (FOCAS; Kashikawa et al. 2002) at the Subaru 8.2 m telescope on 2009 January 31. We adopted the 300B grism and the L600 filter to cover the wavelength from  $3700 \text{ \AA}$  to  $6000 \text{ \AA}$ . We obtained data with an exposure of 600 s using a  $1''$  slit, with  $2 \times 2$  on-chip binning. The resulting spatial resolution is  $0.208 \text{ pixel}^{-1}$  and the spectral resolution is  $R \sim 400$ . The observations were necessary in order to extract individual spectra of the two stellar components (the two quasar images), which are unresolved in the original SDSS spectroscopy. The one-dimensional spectra of the stellar components were extracted using standard IRAF tasks. We were unable to extract the spectrum of a lensing galaxy (see Section 3.2), due to its faint nature and the sub-arcsecond separation of the quasar components. Although the two stellar components are resolved reasonably well in the two-dimensional spectrum, we adopted a deblending procedure developed by Pindor et al. (2006) in extracting one-dimensional spectra, in order to minimize the cross-contamination between the two components.

The spectra shown in Figure 2 indicate that both stellar components have quasar broad emission lines ( $\text{Ly}\alpha$ ,  $\text{Si IV}$ ,  $\text{C IV}$ ) at the same wavelengths, corresponding to a redshift of 2.426 (measured also by the initial SDSS spectroscopy). The emission lines have the same overall shape, supporting the gravitational lensing hypothesis. Several absorption lines are also observed in both spectra, at the same wavelengths. We identify some of these as the  $2599 \text{ \AA}$   $\text{Fe II}$  and the  $2796 \text{ \AA}$ ,  $2803 \text{ \AA}$   $\text{Mg II}$  doublet, from which we derive the redshift of the absorber to be  $z = 0.557$ . The absorption is seen in both components, with the absorption in component A being slightly stronger than that in component B. We postulate this absorber to be the lensing galaxy, as the redshift is consistent with the photometric redshift estimate of the lensing galaxy, as we will discuss later (Section 5). In addition, we identify a strong  $\text{C IV}$  absorber at  $z = 2.172$  in both stellar components.

The ratio of the fluxes of the two stellar components is quite constant along the plotted range ( $B/A = 0.7\text{--}0.8$ ). There is therefore no sign of differential dust reddening which, should it occur on the line of sight to one of the quasars, would affect the flux ratio toward shorter wavelengths. Because the flux ratio is quite constant both across the continuum and the broad line regions, there is also no evidence of microlensing effects. Microlensing due to stars in the lensing galaxy would effect the continuum emission more strongly than the broad line emission, since the physical size of the region associated with the former is much smaller than the one associated with the latter (e.g., Sluse et al. 2008). The change in flux ratio below  $\sim 4000 \text{ \AA}$  in the observer's frame is thought to be due to errors arising from the low detector response in that region.

### 3.2. Optical and Near-infrared Imaging

Optical (*I* and *z*) follow-up images were taken with the Tektronix  $2048 \times 2048$  CCD camera (Tek2k) at the University of Hawaii 2.2 m (UH88) telescope on 2009 April 15. The pixel scale is  $0.219 \text{ pixel}^{-1}$ . The total exposure time was 800 s for each filter. The seeing was  $\sim 1''\text{--}1.2''$ . The images were



**Figure 2.** Follow-up spectra of SDSS J1334+3315 A and B taken with FOCAS at the Subaru Telescope. Quasar emission lines redshifted to  $z_s = 2.42$  are indicated by vertical dotted lines. Strong absorption systems at  $z = 0.557$  and  $2.172$  seen in both components A and B are marked by vertical solid bars. The lower panel plots the ratio of the two spectra.

reduced using standard IRAF<sup>10</sup> tasks. The photometric zero points were derived by comparing magnitudes of nearby stars located in the same frame to their SDSS magnitudes, with the resulting zero-point accuracy of  $\sim 0.05$  mag. For the  $I$  band, the magnitude conversion has been performed using equations given by Lupton.<sup>11</sup>

In addition, we obtained near-infrared ( $JHK_s$ ) images with the Multi-Object Infrared Camera and Spectrograph (MOIRCS; Ichikawa et al. 2006; Suzuki et al. 2008) at the Subaru 8.2 m telescope (Iye et al. 2004) on 2010 April 2, under an excellent seeing size of  $\sim 0''.4$ . The pixel scale is  $0''.117$  pixel<sup>-1</sup>. The total exposure time was 600 s for  $J$  and  $K_s$  bands, and 480 s for  $H$  band. We used the MCSRED software package (I. Tanaka et al. 2010, in preparation) for the data reduction. We derived the magnitude zero points using the standard star FS33 (Leggett et al. 2006), leading to a zero-point accuracy estimated at  $\sim 0.05$  mag.

Results of the follow-up imaging are summarized in Figure 3. In addition to the candidate lensed quasar system, there are two red galaxies (G1 and G2) within  $5''$ . In order to check the presence of the lensing galaxy in between the stellar components, as well as to extract relative astrometry and photometry from the data, we analyze the images using the public software GALFIT (Peng et al. 2002). We fit all components simultaneously with nearby stars as PSF templates and galaxies modeled by the Sérsic profile. For the bright galaxy G1, the preliminary GALFIT fitting produces the best-fit Sérsic index of  $n = 0.87$ , very close to the canonical value  $n = 1$  for disk-like galaxies. The faint galaxy G2 appears to be quite red and is also not detected in the optical images. Due to its faintness, we cannot extract an accurate Sérsic index.

Table 1 provides a summary of the GALFIT modeling results. The separation between the stellar components (the two quasar

images), derived from the  $K_s$ -band image, is  $0''.83 \pm 0''.01$ . We detect an extended object (galaxy G) in between the two stellar components, which can be interpreted as a lensing galaxy. We find that the lensing galaxy is hardly detected in the UH88 optical images, while it is significantly detected in the Subaru/MOIRCS near-infrared images (see also Figure 3). The difference can be attributed to the much better angular resolution and the deeper depth of the MOIRCS images. The position of the lensing galaxy G is difficult to determine accurately, as the best fit varies between different bands. However, by adopting the position estimated in the  $K_s$  band, where G appears brightest, we determine that the center of the lensing galaxy is closer to the brighter stellar component, a fact often seen among two-image lensed quasars (e.g., Kayo et al. 2010). We are unable to determine a robust estimate of the Sérsic index for G, due to the galaxy being blended with the quasar components. In order to extract magnitudes for G, we adopt the canonical value for elliptical galaxies,  $n = 4$ . This is justified by the fact that most galaxies acting as lenses are ellipticals, as spirals only contribute to about 10% of the probability for multiple imaging (e.g., Fukugita & Turner 1991).

#### 4. LASER GUIDE STAR ADAPTIVE OPTICS IMAGING

While the spectroscopic and imaging follow-up observations presented in the previous section indicate that SDSS J1334+3315 is a true lensed quasar system, its small angular separation makes it difficult to study the system in detail solely from these observations. One way to overcome this problem in the near-infrared is to obtain high-resolution AO images, as already done for several other lensed quasar systems (e.g., McKean et al. 2007; Auger et al. 2008; Sluse et al. 2008; Lagattuta et al. 2010).

We obtained high-resolution near-infrared images for this quasar system using the Infrared Camera and Spectrograph (IRCS; Kobayashi et al. 2000) at the Subaru telescope, along with the laser guide star AO system (LGS+AO188; Hayano et al. 2008, 2010; Minowa et al. 2010). AO188 uses a curvature

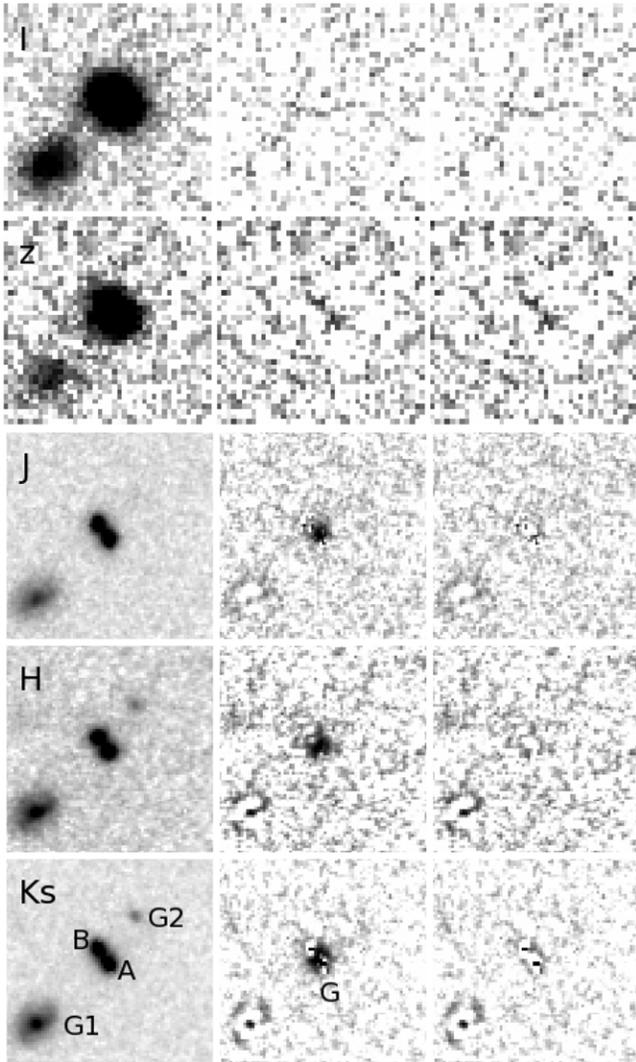
<sup>10</sup> IRAF is distributed by the National Optical Astronomy Observatory, which is operated by the Association of Universities for Research in Astronomy, Inc., under cooperative agreement with the National Science Foundation.

<sup>11</sup> These equations are attributed to Lupton (2005) but appear to be unpublished. They can be found at <http://www.sdss.org/dr5/algorithms/sdssUBVRITransform.html>

**Table 1**  
Result of Imaging Observations with UH88/Tek2k and Subaru/MOIRCS

Name	$\Delta X$ (arcsec)	$\Delta Y$ (arcsec)	$I$	$z$	$J$	$H$	$K_s$
A	$0.000 \pm 0.003$	$0.000 \pm 0.003$	$19.16 \pm 0.03$	$19.18 \pm 0.03$	$18.57 \pm 0.02$	$18.10 \pm 0.02$	$17.41 \pm 0.01$
B	$-0.502 \pm 0.003$	$0.673 \pm 0.003$	$19.50 \pm 0.02$	$19.75 \pm 0.03$	$18.99 \pm 0.02$	$18.40 \pm 0.01$	$17.72 \pm 0.01$
G	$-0.159 \pm 0.015$	$0.235 \pm 0.020$	$21.50 \pm 0.37$	$21.92 \pm 1.69$	$20.29 \pm 0.11$	$19.30 \pm 0.07$	$18.53 \pm 0.06$
G1	$-3.160 \pm 0.004$	$-2.587 \pm 0.004$	$19.95 \pm 0.04$	$20.33 \pm 0.07$	$18.68 \pm 0.03$	$17.70 \pm 0.02$	$17.06 \pm 0.02$
G2	$1.160 \pm 0.011$	$2.073 \pm 0.013$	...	...	$22.18 \pm 0.18$	$20.42 \pm 0.08$	$19.69 \pm 0.07$

**Notes.** The positive directions of  $\Delta X$  and  $\Delta Y$  are defined by west and north, respectively. The astrometry is measured in the  $K_s$ -band image. The quoted errors include statistical errors only. The magnitude measurements for galaxies G1 and G2 are photometric aperture magnitudes, whereas those of components A, B, and G are model estimates fitted with GALFIT. The quoted errors include statistical errors only, and exclude uncertainties inherent in the PSF estimates or the zero points. Magnitudes are given in the Vega system, without the Galactic extinction correction, except for  $z$ -band magnitudes which are in the AB system.



**Figure 3.** Follow-up images taken with Tek2k at the UH88 Telescope and MOIRCS at the Subaru Telescope. The size of each panel is  $9'' \times 9''$ . North is up and east is left. From top to bottom panels, we show  $I$ - and  $z$ -band images from Tek2k and  $J$ -,  $H$ -, and  $K_s$ -band images from MOIRCS. Left, middle, and right panels display original images, images after subtracting all but the lensing galaxy (component G), and images after subtracting all components, respectively.

sensor with 188 control elements and a 188 element bimorph deformable mirror (BIM188), and operates at the Nasmyth focus of the Subaru Telescope. IRCS was used in the low-resolution mode with a pixel scale  $0''.0527$ , producing a  $54''$  field of view.

The observations were performed in an engineering run on 2011 February 18, with excellent seeing  $\sim 0''.3$ – $0''.5$ . We used an  $R \sim 13.4$  mag star located  $57''$  from the target as a tip-tilt guide star (see Figure 1). We obtained a set of 60 s individual exposures with a total exposure time of 10 minutes for  $J$  band, 4 minutes for  $H$  band, and 12 minutes in  $K'$  band. The measured Strehl ratios were  $\sim 8\%$  in the  $J$  band,  $\sim 12\%$  in the  $H$  band, and  $\sim 12\%$  in the  $K'$  band. The full width at half-maximum (FWHM) of the PSF was  $\sim 0''.10$ – $0''.15$  in all three bands. Therefore, although the PSF is not diffraction limited (the diffraction limit is  $\sim 0''.06$  for the Subaru Telescope in the  $K'$  band), it is better than what would be obtained with the *Hubble Space Telescope* at the diffraction limit, in the equivalent band ( $\sim 0''.22$ ).

The standard star P272-D (Leggett et al. 2006) was observed on the same night and at the same airmass with the target, without AO. Both the target and standard star frames were reduced with the IRCS IMGRED package (Minowa et al. 2005). The zero points which we estimate from aperture photometry are  $J = 24.39 \pm 0.01$  mag  $s^{-1}$ ,  $H = 24.53 \pm 0.02$  mag  $s^{-1}$ , and  $K' = 23.78 \pm 0.02$  mag  $s^{-1}$ , respectively, where the quoted errors refer only to the differences between aperture photometry of the standard star in different frames.

We initially tried to build the PSF on an isolated star  $\sim 10''$  from the target, in the direction opposite to the tip-tilt star. However, this left significant residuals when subtracting the quasar components, most likely due to anisoplanatism introduced by the AO. We therefore built the PSF by fitting a two-component model, consisting of the Moffat and Gaussian analytical profiles, to the relatively isolated fainter quasar component. Our GALFIT modeling suggests a best-fit Moffat profile FWHM of  $\sim 6$ – $8$  pixels ( $\sim 0''.3$ – $0''.4$ ), which is indicative of the seeing disk, and a Gaussian profile FWHM of  $\sim 2$ – $3$  pixels ( $\sim 0''.10$ – $0''.15$ ), corresponding to the PSF core. This method significantly improves fitting and reduces the residuals after subtracting best-fit models.

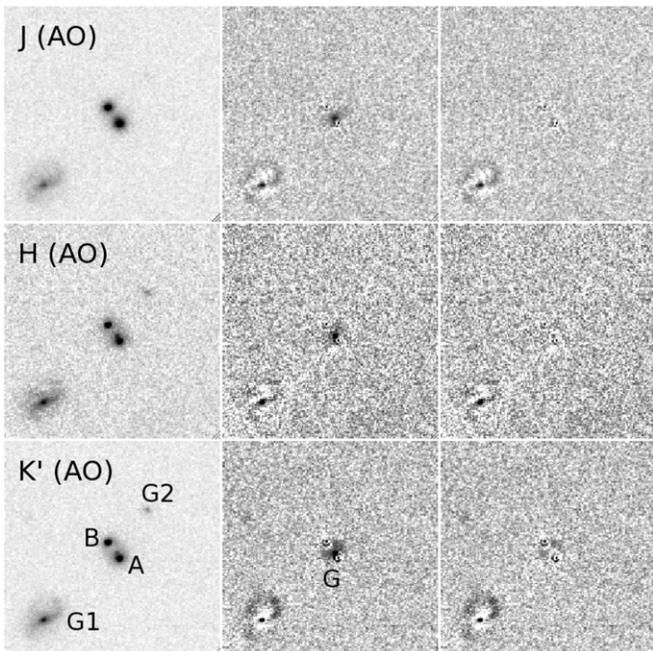
We show the AO images in Figure 4 and summarize the results we obtained in Table 2. Thanks to the much improved angular resolution, the lensing galaxy is clearly visible even before subtracting the stellar components. The spiral arm of the nearby galaxy G1 is also clearly seen. The relative astrometry derived from the LGS+AO188 image is broadly consistent with the MOIRCS result shown in Table 1, but the attached errors are now much smaller. There are small discrepancies in the relative positions of the quasar images, larger than the error bars attached to the MOIRCS measurements, which must be due to an inaccurate original measurement of the position of image A (made difficult by the close proximity of the lens galaxy). The LGS+AO188 measurement corrects the

**Table 2**  
Result of Subaru LGS+AO188 Imaging

Name	$\Delta X$ (arcsec)	$\Delta Y$ (arcsec)	$n$	$R_e$ (arcsec)	$e$	$\theta_e$ (deg)	$J$	$H$	$K'$
A	$0.000 \pm 0.001$	$0.000 \pm 0.001$	...	...	...	...	$18.71 \pm 0.01$	$18.27 \pm 0.01$	$17.53 \pm 0.01$
B	$-0.484 \pm 0.001$	$0.677 \pm 0.001$	...	...	...	...	$19.03 \pm 0.01$	$18.54 \pm 0.02$	$17.83 \pm 0.01$
G	$-0.134 \pm 0.006$	$0.235 \pm 0.007$	$\equiv 4$	$0.20 \pm 0.03$	$0.62 \pm 0.08$	$-42.7 \pm 5.9$	$21.01 \pm 0.06^a$	$20.06 \pm 0.05^a$	$19.36 \pm 0.05$
G1	$-3.178 \pm 0.004$	$-2.578 \pm 0.002$	$1.68 \pm 0.06$	$0.50 \pm 0.01$	$0.53 \pm 0.01$	$-58.2 \pm 0.7$	$18.68 \pm 0.04$	$17.90 \pm 0.03$	$17.28 \pm 0.03$
G2	$1.159 \pm 0.005$	$2.033 \pm 0.004$	$2.46 \pm 1.09$	$0.08 \pm 0.01$	$0.61 \pm 0.11$	$38.3 \pm 7.0$	$22.69 \pm 0.31$	$20.52 \pm 0.13$	$19.94 \pm 0.10$

**Notes.** The positive directions of  $\Delta X$  and  $\Delta Y$  are defined by west and north, respectively, and the astrometry is estimated from the  $K'$ -band image. Shapes of the galaxies (the Sérsic index  $n$ , the half-light radius  $R_e$ , the ellipticity  $e$ , and the position angle  $\theta_e$  measured east of north) are all measured in the  $K'$ -band image. The Sérsic index of galaxy G is considered to be the fiducial value of 4, as explained in the text. The magnitude measurements for galaxies G1 and G2 are photometric aperture magnitudes, whereas those of components A, B, and G are model estimates fitted with GALFIT. The quoted errors include statistical errors only and exclude uncertainties inherent in the PSF estimates or the zero points. Magnitudes are given in the Vega system, without the Galactic extinction correction.

<sup>a</sup> The quoted values of the lens galaxy magnitudes in the  $J$  and  $H$  bands correspond to the best-fit models (Sérsic index 1 rather than 4). When constraining an index of 4, the values become  $\sim 0.1$  mag lower.



**Figure 4.** Subaru LGS+AO188 images of SDSS J1334+3315 in the  $J$ ,  $H$ , and  $K'$  bands. The size of each panel is  $9'' \times 9''$ . North is up and east is left. As in Figure 3, from left to right panels we show original images, images after subtracting all but the lensing galaxy (component G), and images after subtracting all components, respectively.

MOIRCS-determined values, because the image A and the lens are more clearly separated. In addition, small (sub-pixel) discrepancies between the MOIRCS- and LGS+AO188-determined positions of galaxies G1 and G2 should be due to better detected morphological features in the LGS+AO188 imaging. The quasar image separation is found to be  $\theta = 0''.833 \pm 0''.002$ . We also confirm that the center of the lensing galaxy is closer to the brighter quasar component. In addition, the high-resolution images enable us to make a more reliable measurement of the shape of each galaxy, such as the half-light radius and the ellipticity. Although the goodness-of-fit estimate  $\chi^2$  is almost insensitive to the choice of fiducial Sérsic index 1 (exponential profile) or 4 (de Vaucouleurs profile), less residuals appear in the  $K'$  band after subtracting the lens galaxy modeled by the Sérsic index 4. This suggests an elliptical galaxy, in accordance with our original assumption.

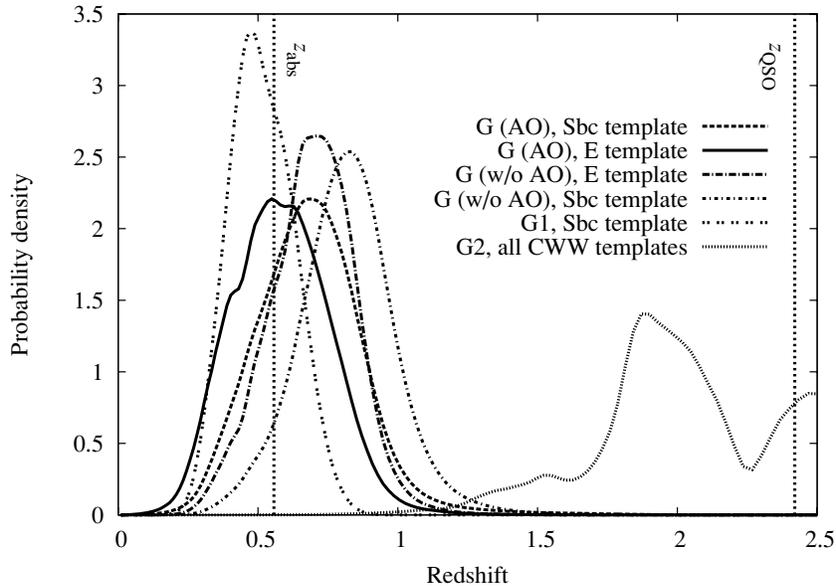
We must note that the photometry (especially that of the lensing galaxy) differs significantly from the MOIRCS result. This is presumably because of the PSF and magnitude zero-point uncertainties, which are hard to characterize for AO images. On the other hand, relative photometry of the lens/quasar images should be more accurate in the case of the AO observations, due to the higher resolution. Also, objects (especially the galaxies) appear systematically fainter in the AO images, which may be due to uncorrected light scattered at large distances. While we leave for future work more comprehensive and sophisticated analysis of the PSF and photometric calibration, we confirm that our astrometric results are rather robust against these uncertainties.

## 5. PHOTOMETRIC REDSHIFTS

In order to check the validity of our assumption that the strong absorption at  $z = 0.557$  seen in the quasar spectra is caused by the lensing galaxy G, we estimate a photometric redshift for this galaxy based on the magnitudes in the five observed bands ( $I$ ,  $z$ ,  $J$ ,  $H$ ,  $K_s/K'$ ). We also estimate photometric redshifts for the two nearby galaxy companions. We employ the publicly available HyperZ (Bolzonella et al. 2000) and EAZY (Brammer et al. 2008) algorithms, both of which produce redshift estimates based on template-fitting methods. For both algorithms, we use as templates the observed mean spectral energy distributions (SEDs) of local galaxies from Coleman et al. (1980, hereafter CWW), extrapolated into ultraviolet and near-infrared with the evolutionary models of Bruzual & Charlot (1993). In the case of EAZY, we use a Bayesian prior on the apparent magnitudes, which is implemented in the code. The prior is added to help prevent the redshift probability distributions from having multiple peaks, as template colors can be degenerate with redshift.

Since the best magnitude estimates for the lensing galaxy are significantly different between the MOIRCS  $JHK_s$  and the LGS+AO188 IRCS  $JHK'$  bands, we use both of these estimates separately. On the other hand, for the two nearby galaxies, where the aperture magnitudes are fairly similar, we use the values obtained with LGS+AO188. As photometric redshift estimates require absolute magnitudes, we attach error bars larger than the ones quoted in Tables 1 and 2, to allow for uncertainties in the magnitude zero points.

We conducted initial photometric redshift fits with HyperZ and checked the results of the best-fitted spectral templates with EAZY. The resulting photometric redshift probability distributions computed with EAZY are shown in Figure 5 and



**Figure 5.** Photometric redshift probability distributions, normalized to unit area, for the three galaxies G, G1, and G2, calculated using the magnitudes in Tables 1 and 2. In the case of G, we consider separately the IRCS  $JHK'$  (with AO) and MOIRCS  $JHK_s$  (w/o AO) magnitudes. The probability distributions are calculated with EAzY, for the most consistent template estimates (see Section 5 for details). The redshift of the quasar components, as well as that of the absorption line system measured in both quasars at  $z = 0.557$ , is also marked with vertical lines.

**Table 3**  
Best-fit Photometric Redshifts

Object and Template	Best-fit $z$	$1\sigma$ Limits	$2\sigma$ Limits
G (AO), Sbc template	0.694	0.494–0.876	0.329–1.174
G (AO), E template	0.586	0.397–0.768	0.255–0.959
G (w/o AO), E template	0.694	0.530–0.850	0.368–1.004
G (w/o AO), Sbc template	0.818	0.644–0.986	0.456–1.202
G1, Sbc template	0.513	0.390–0.642	0.298–0.757
G2, all CWW templates	2.124	1.774–2.579	1.311–2.884

**Table 4**  
Best-fit Mass Models

Model	$\sigma$ (km s $^{-1}$ )	$e$ or $\gamma$	$\theta_e$ or $\theta_\gamma$ (deg)	$R_{\text{Ein}}$ (arcsec)	$\mu_{\text{tot}}$	$\Delta t$ (days)
SIE	147	0.235	–47.1	0.40	6.0	11.1
SIS+ $\gamma$	143	0.096	–47.2	0.38	6.1	10.0

summarized in Table 3. For the lensing galaxy, the best-fitted templates obtained with HyperZ are E (elliptical) and Sbc (spiral). The results are consistent with the probability curves calculated by EAzY. Although we cannot conclusively discriminate between the two templates based on the morphological information obtained even with LGS+AO188, both templates yield redshift probability distributions consistent with the redshift estimated from the absorption lines, within  $1\sigma$  confidence interval when using the LGS+AO188-estimated magnitudes, and at  $1\sigma$ – $2\sigma$  confidence interval when using MOIRCS-estimated magnitudes. We therefore conclude that the lensing galaxy is likely to be at  $z = 0.557$  and is certainly at a redshift lower than that of the quasar components, consistent with the gravitational lensing hypothesis.

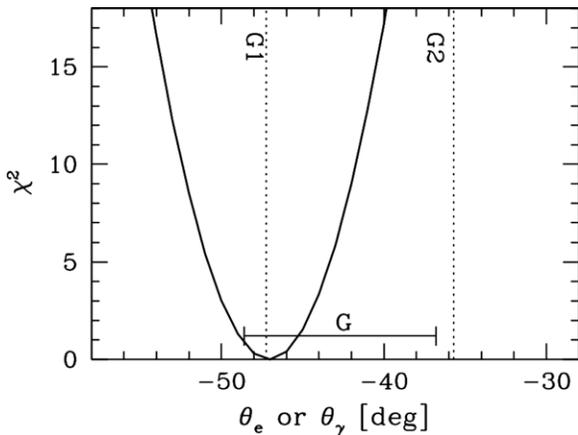
For the bright nearby galaxy G1, the probability curve for the Sbc template (matching the disk-like morphology) is in good agreement with  $z = 0.557$ , making it very likely that this galaxy is located at the same redshift as the lensing galaxy. It is also in good agreement with the previous redshift estimate of  $0.50 \pm 0.07$ , from the SDSS database. The G2 galaxy has a very poorly estimated redshift, due to its faintness, and also appears to be located at a redshift much larger than G and G1.

## 6. MASS MODELING

We conduct gravitational lensing mass modeling to check whether the observed image configuration can be reproduced

with reasonable mass models, as a final check of the gravitational lensing hypothesis for this system. We use the public software *glafic* (Oguri 2010) to solve the lens equation and to find best-fit mass models. We use seven observational constraints for mass modeling: the (two-dimensional) positions of the lensed quasar images and the lensing galaxy, as well as the flux ratio between the quasar images. The positional constraints are taken from the accurate astrometric results derived from Subaru LGS+AO188 imaging (Table 2). We use a flux ratio constraint of  $B/A = 0.75 \pm 0.05$ , consistent with most follow-up photometric results as well as the spectroscopic flux ratio over a wide wavelength range. The lens redshift is assumed to be  $z = 0.557$ . Given the small number of observational constraints available, we are forced to consider the simplest mass models: the Singular Isothermal Ellipsoid (SIE) and the Singular Isothermal Sphere with an external shear (SIS+ $\gamma$ ). Both mass models have seven parameters (the position of the lens and its velocity dispersion  $\sigma$  or Einstein radius  $R_{\text{Ein}}$ , the ellipticity  $e$  or shear  $\gamma$  and their associated position angles  $\theta_e$  or  $\theta_\gamma$ , and the position of the source), which indicates that there are no degree of freedom, as is common in the mass modeling of two-image lensed quasars.

We find that both models can fit the lensed system perfectly, signifying that the choice of the models is reasonable. Table 4 summarizes the best-fit values for both models. We find that the best-fit ellipticity for the SIE model,  $e = 0.235$ , is significantly smaller than the observed ellipticity of the lensing galaxy,  $e \sim 0.62$ , but the position angles agree quite well with each other. Such large difference of the ellipticity and the agreement of the position angle has often been seen in previous analyses



**Figure 6.** Best-fit  $\chi^2$  as a function of the position angle measured east of north. Since the results are very similar for SIE and SIS+ $\gamma$  models, the position angle can be interpreted as either  $\theta_e$  of SIE or  $\theta_\gamma$  of SIS+ $\gamma$ . Note that the other model parameters are marginalized over. The horizontal line indicates the  $1\sigma$  range of the measured position angle of the lensing galaxy G. The vertical dotted lines show directions of the external shear corresponding to the location of nearby galaxies G1 and G2.

of strong lens systems (e.g., Keeton et al. 1998). The position angle of the best-fit SIS+ $\gamma$  model is almost the same as that of the SIE model. In fact the angle corresponds to the position of the nearby galaxy G1, suggesting that the quadrupole of the lens potential may be dominated by perturbation due to G1. For both models, the total magnification and time delay are predicted to be  $\mu_{\text{tot}} \sim 6.0$  and  $\Delta t \sim 10\text{--}11$  days, respectively.

Here, we discuss whether galaxy G1 can have a significant impact on the mass modeling. Based on the analysis in Section 5, we assume that the redshift of galaxy G1 is the same as that of the lensing galaxy. The follow-up photometry indicates that G1 is at least  $\sim 1.5$  mag brighter than the lensing galaxy. Adopting the Faber–Jackson relation, we infer that the Einstein radius of G1 is at least twice as large as that of the lensing galaxy, i.e.,  $R_{\text{Ein}} \sim 0''.8$ . Given the distance between G and G1 of  $d \sim 4''.1$ , we estimate the external shear produced by G1 as  $\gamma \sim R_{\text{Ein}}/2d \sim 0.1$ , which is very close to the best-fit external shear of  $\gamma \sim 0.096$  for the SIS+ $\gamma$  model, suggesting that G1 can have a significant impact on this lensed quasar system. A caveat is that G1 appears to be a disk-dominated spiral galaxy (see Figure 4 and Table 2), and hence the use of the Faber–Jackson relation may not be appropriate.

To further explore the origin of the quadrupole, we compute the goodness-of-fit estimate  $\chi^2$  as a function of the position angle. Specifically, we compute  $\chi^2$  for each fixed value of the position angle, with the other model parameters varied to achieve a minimum  $\chi^2$ . We find that the results are very similar between the position angle of the ellipticity  $\theta_e$ , for the SIE model, and the position angle of the external shear  $\theta_\gamma$ , for the SIS+ $\gamma$  model, as a consequence of the well-known shear-ellipticity degeneracy. The result shown in Figure 6 indicates that the position angle inferred from mass modeling is perfectly consistent with an external shear from galaxy G1, as well as consistent with the position angle of the elliptical lensing galaxy G at  $1\sigma$  level. On the other hand, the location of the nearby galaxy G2 corresponds to an external shear with a large  $\chi^2$ , which implies that G2 is not affecting the lens potential. While we cannot decompose contributions from G and G1 at this point, detailed observations of a lensed quasar host galaxy in deeper AO imaging observations may help clarify the origin of the quadrupole.

## 7. SUMMARY

We have reported the discovery of the subarcsecond ( $\theta = 0''.833$ ) gravitationally lensed quasar SDSS J1334+3315. The system has been identified as a lensed candidate from the SDSS data, using the standard SQLS candidate selection algorithm, despite the image separation being smaller than the criterion for which the morphological selection is complete. Our follow-up observations at the Subaru and UH88 telescopes have confirmed the system to be a real strong lensing event. It consists of two images of a quasar at  $z = 2.426$ , lensed by a foreground galaxy. From the colors as well as absorption lines in the quasar spectra, we infer the redshift of the lensing galaxy to be  $z = 0.557$ . In particular, we have obtained high-resolution near-infrared images of this lensed quasar system using the Subaru LGS+AO188 system, with a better resolution in the  $K'$  band than would be provided by the *Hubble Space Telescope* in the equivalent band. The images clearly reveal the presence of the lensing galaxy in between the quasar images and enable us to derive very accurate relative astrometry, as well as shapes of galaxies. In particular, the higher resolution made possible to identify errors in the non-AO astrometry, caused by the lens galaxy and one of the quasar images being blended, and thus made possible a more accurate mass modeling. We have found that the image configuration can be well reproduced with the standard mass models. We have pointed out that the nearby galaxy G1, which is located  $<5''$  from the lensing galaxy and is likely associated physically with the lensing galaxy, may affect the lens potential. This lensed system has the smallest image separation among the newly discovered SQLS lenses.

This work represents the first observation and analysis of any gravitationally lensed quasar system with the Subaru LGS+AO188. Our results demonstrate the usefulness of laser guide star AO imaging observations, in particular that of the Subaru Telescope LGS+AO188 imaging, which has a much improved sky coverage, for the study of strong lens systems. As explicitly shown, the high-resolution imaging enabled by the AO system is crucial for accurate and robust measurements of the position and shape of the lensing galaxy, particularly for small-separation lensed quasars as presented in the paper. Indeed we are conducting an imaging survey of SQLS lenses with Subaru LGS+AO188, aiming to derive accurate astrometry and to detect lensed quasar host galaxies, which will further increase the value of the SQLS lensed quasar sample.

C.E.R. is sponsored by the Japanese Monbukagakusho scholarship. I.K. acknowledges the support of the JSPS Research Fellowship. This work was supported in part by the FIRST program “Subaru Measurements of Images and Redshifts (SuMIRe)” and World Premier International Research Center Initiative (WPI Initiative), MEXT, Japan. The Subaru LGS+AO188 project has been supported by the Grant-in-Aid for Specially Promoted Research 14002009 from the Japan Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology and by the Grant-in-Aid for Scientific research (S)19104004 from Japan Society for the Promotion of Science. The authors recognize and acknowledge the very significant cultural role and reverence that the summit of Mauna Kea has always had within the indigenous Hawaiian community. We are most fortunate to have the opportunity to conduct observations from this superb mountain.

Funding for the SDSS and SDSS-II has been provided by the Alfred P. Sloan Foundation, the Participating Institutions, the National Science Foundation, the U.S. Department of

Energy, the National Aeronautics and Space Administration, the Japanese Monbukagakusho, the Max Planck Society, and the Higher Education Funding Council for England. The SDSS Web site is <http://www.sdss.org/>.

The SDSS is managed by the Astrophysical Research Consortium for the Participating Institutions. The Participating Institutions are the American Museum of Natural History, Astrophysical Institute Potsdam, University of Basel, Cambridge University, Case Western Reserve University, University of Chicago, Drexel University, Fermilab, the Institute for Advanced Study, the Japan Participation Group, Johns Hopkins University, the Joint Institute for Nuclear Astrophysics, the Kavli Institute for Particle Astrophysics and Cosmology, the Korean Scientist Group, the Chinese Academy of Sciences (LAMOST), Los Alamos National Laboratory, the Max-Planck-Institute for Astronomy (MPIA), the Max-Planck-Institute for Astrophysics (MPA), New Mexico State University, Ohio State University, University of Pittsburgh, University of Portsmouth, Princeton University, the United States Naval Observatory, and the University of Washington.

## REFERENCES

- Abazajian, K., et al. 2003, *AJ*, **126**, 2081  
 Abazajian, K., et al. 2004, *AJ*, **128**, 502  
 Abazajian, K., et al. 2005, *AJ*, **129**, 1755  
 Abazajian, K. N., et al. 2009, *ApJS*, **182**, 543  
 Adelman-McCarthy, J. K., et al. 2006, *ApJS*, **162**, 38  
 Adelman-McCarthy, J. K., et al. 2007, *ApJS*, **172**, 634  
 Adelman-McCarthy, J. K., et al. 2008, *ApJS*, **175**, 297  
 Auger, M. W., Fasnacht, C. D., Wong, K. C., Thompson, D., Matthews, K., & Soifer, B. T. 2008, *ApJ*, **673**, 778  
 Blackburne, J. A., Wisotzki, L., & Schechter, P. L. 2008, *AJ*, **135**, 374  
 Blanton, M. R., Lin, H., Lupton, R. H., Maley, F. M., Young, N., Zehavi, I., & Loveday, J. 2003, *AJ*, **125**, 2276  
 Bolzonella, M., Miralles, J.-M., & Pelló, R. 2000, *A&A*, **363**, 476  
 Brammer, G. B., van Dokkum, P. G., & Coppi, P. 2008, *ApJ*, **686**, 1503  
 Browne, I. W. A., et al. 2003, *MNRAS*, **341**, 13  
 Bruzual, A. G., & Charlot, S. 1993, *ApJ*, **405**, 538  
 Castander, F. J., Treister, E., Maza, J., & Gawiser, E. 2006, *ApJ*, **652**, 955  
 Chae, K.-H., et al. 2002, *Phys. Rev. Lett.*, **89**, 151301  
 Chiba, M., Minezaki, T., Kashikawa, N., Kataza, H., & Inoue, K. T. 2005, *ApJ*, **627**, 53  
 Coleman, G. D., Wu, C.-C., & Weedman, D. W. 1980, *ApJS*, **43**, 393  
 Doi, M., et al. 2010, *AJ*, **139**, 1628  
 Fukugita, M., Ichikawa, T., Gunn, J. E., Doi, M., Shimasaku, K., & Schneider, D. P. 1996, *AJ*, **111**, 1748  
 Fukugita, M., & Turner, E. L. 1991, *MNRAS*, **253**, 99  
 Gunn, J. E., et al. 1998, *AJ*, **116**, 3040  
 Gunn, J. E., et al. 2006, *AJ*, **131**, 2332  
 Hayano, Y., et al. 2008, *Proc. SPIE*, **7015**, 25  
 Hayano, Y., et al. 2010, *Proc. SPIE*, **7736**, 21  
 Hogg, D. W., Finkbeiner, D. P., Schlegel, D. J., & Gunn, J. E. 2001, *AJ*, **122**, 2129  
 Ichikawa, T., et al. 2006, *Proc. SPIE*, **6269**, 38  
 Inada, N., et al. 2008, *AJ*, **135**, 496  
 Inada, N., et al. 2010, *AJ*, **140**, 403  
 Ivezić, Ž., et al. 2004, *Astron. Nachr.*, **325**, 583  
 Iye, M., et al. 2004, *PASJ*, **56**, 381  
 Kashikawa, N., et al. 2002, *PASJ*, **54**, 819  
 Kayo, I., Inada, N., Oguri, M., Morokuma, T., Hall, P. B., Kochanek, C. S., & Schneider, D. P. 2010, *AJ*, **139**, 1614  
 Keeton, C. R., Kochanek, C. S., & Falco, E. E. 1998, *ApJ*, **509**, 561  
 Kobayashi, N., et al. 2000, *Proc. SPIE*, **4008**, 1056  
 Lagatuta, D. J., Auger, M. W., & Fasnacht, C. D. 2010, *ApJ*, **716**, L185  
 Leggett, S. K., et al. 2006, *MNRAS*, **373**, 781  
 McKean, J. P., et al. 2007, *MNRAS*, **378**, 109  
 Minowa, Y., et al. 2005, *ApJ*, **629**, 29  
 Minowa, Y., et al. 2010, *Proc. SPIE*, **7736**, 122  
 Oguri, M. 2007, *ApJ*, **660**, 1  
 Oguri, M. 2010, *PASJ*, **62**, 1017  
 Oguri, M., et al. 2006, *AJ*, **132**, 999  
 Oguri, M., et al. 2008, *AJ*, **135**, 512  
 Padmanabhan, N., et al. 2008, *ApJ*, **674**, 1217  
 Peng, C. Y., Ho, L. C., Impey, C. D., & Rix, H.-W. 2002, *AJ*, **124**, 266  
 Peng, C. Y., Impey, C. D., Ho, L. C., Barton, E. J., & Rix, H.-W. 2006, *ApJ*, **640**, 114  
 Pier, J. R., Munn, J. A., Hindsley, R. B., Hennessy, G. S., Kent, S. M., Lupton, R. H., & Ivezić, Ž. 2003, *AJ*, **125**, 1559  
 Pindor, B., et al. 2006, *AJ*, **131**, 41  
 Richards, G. T., et al. 2002, *AJ*, **123**, 2945  
 Reimers, D., Hagen, H.-J., Baade, R., Lopez, S., & Tytler, D. 2002, *A&A*, **382**, L26  
 Rusin, D., & Kochanek, C. S. 2005, *ApJ*, **623**, 666  
 Sluse, D., Courbin, F., Eigenbrod, A., & Meylan, G. 2008, *A&A*, **492**, L39  
 Smith, J. A., et al. 2002, *AJ*, **123**, 2121  
 Stoughton, C., et al. 2002, *AJ*, **123**, 485  
 Suyu, S. H., Marshall, P. J., Auger, M. W., Hilbert, S., Blandford, R. D., Koopmans, L. V. E., Fasnacht, C. D., & Treu, T. 2010, *ApJ*, **711**, 201  
 Suzuki, R., et al. 2008, *PASJ*, **60**, 1347  
 Treu, T., & Koopmans, L. V. E. 2004, *ApJ*, **611**, 739  
 Tucker, D. L., et al. 2006, *Astron. Nachr.*, **327**, 821  
 Walsh, D., Carswell, R. F., & Weymann, R. J. 1979, *Nature*, **279**, 381  
 York, D. G., et al. 2000, *AJ*, **120**, 1579

# Commissioning status of Subaru laser guide star adaptive optics system

Yutaka Hayano<sup>a</sup>, Hideki Takami<sup>a</sup>, Shin Oya<sup>a</sup>, Masayuki Hattori<sup>a</sup>, Yoshihiko Saito<sup>a</sup>, Makoto Watanabe<sup>b</sup>, Olivier Guyon<sup>a,c</sup>, Yosuke Minowa<sup>a</sup>, Sebastian E. Egner<sup>a</sup>, Meguru Ito<sup>a</sup>, Vincent Garrel<sup>a</sup>, Stephen Colley<sup>a</sup>, Taras Golota<sup>a</sup>, Masanori Iye<sup>d</sup>

<sup>a</sup>Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 North A'ohoku Place, Hilo, HI, USA 96720;

<sup>b</sup>Department of CosmoSciences, Graduate School of Science, Hokkaido University, Kita-10, Nishi-8, Kita-ku, Sapporo, Japan 060-0810;

<sup>c</sup>Department of Astronomy/Steward Observatory, University of Arizona, 933 North Cherry Avenue, Tucson, AZ 85721-0065;

<sup>d</sup>National Astronomical Observatory of Japan, 2-21 Osawa, Mitaka, Tokyo, Japan 181-8588

## ABSTRACT

The current status of commissioning and recent results in performance of Subaru laser guide star adaptive optics system is presented. After the first light using natural guide stars with limited configuration of the system in October 2006, we concentrated to complete a final configuration for a natural guide star to serve AO188 to an open use observation. On sky test with full configurations using natural guide star started in August 2008, and opened to a public one month later. We continuously achieved around 0.6 to 0.7 of Strehl ratio at K band using a bright guide star around 9th to 10th magnitude in R band. We found an unexpectedly large wavefront error in our laser launching telescope. The modification to fix this large wavefront error was made and we resumed the characterization of a laser guide star in February 2009. Finally we obtained a round-shaped laser guide star, whose image size is about 1.2 to 1.6 arcsec under the typical seeing condition. We are in the final phase of commissioning. A diffraction limited image by our AO system using a laser guide star will be obtained in the end of 2010. An open use observation with laser guide star system will start in the middle of 2011.

**Keywords:** adaptive optics, laser guide star, curvature sensor, bimorph mirror, Subaru Telescope

## 1. INTRODUCTION

A curvature sensing technique is one of the most efficient AO system<sup>1</sup> The first generation AO system attached on Cassegrain focus of the Subaru Telescope, AO36,<sup>2</sup> has 36 elements curvature wavefront sensor and 36-elements bimorph deformable mirror. We decided to push forward the merit of this efficiency up to 188 elements of curvature sensing technique for a second generation AO system at Subaru Telescope.<sup>3,4</sup> Also a single sodium laser guide star system is incorporated to our second generation AO system to maximize the sky coverage.<sup>5</sup> The project of AO188 was funded in 2002. We got 5 years' budget for fabrication and construction of the system and consecutive 5 years' budget for commissioning and science program.

## 2. SYSTEM OVERVIEW

### 2.1 System layout

A new curvature AO system with 188 elements, AO188, is mounted at Nasmyth focus of the Subaru Telescope, instead of at Cassegrain focus. A facility instrument, the infrared camera and spectrograph, IRCS, which was formerly at Cassegrain focus with AO36, is modified to use at Nasmyth focus with AO188. A laser system needs clean and thermally stabilized environment to guarantee a stable operation in output power, beam quality, and

---

Further author information: (Send correspondence to Yutaka Hayano)  
Yutaka Hayano.: E-mail: hayano@subaru.naoj.org, Telephone: 1 808 934 5941

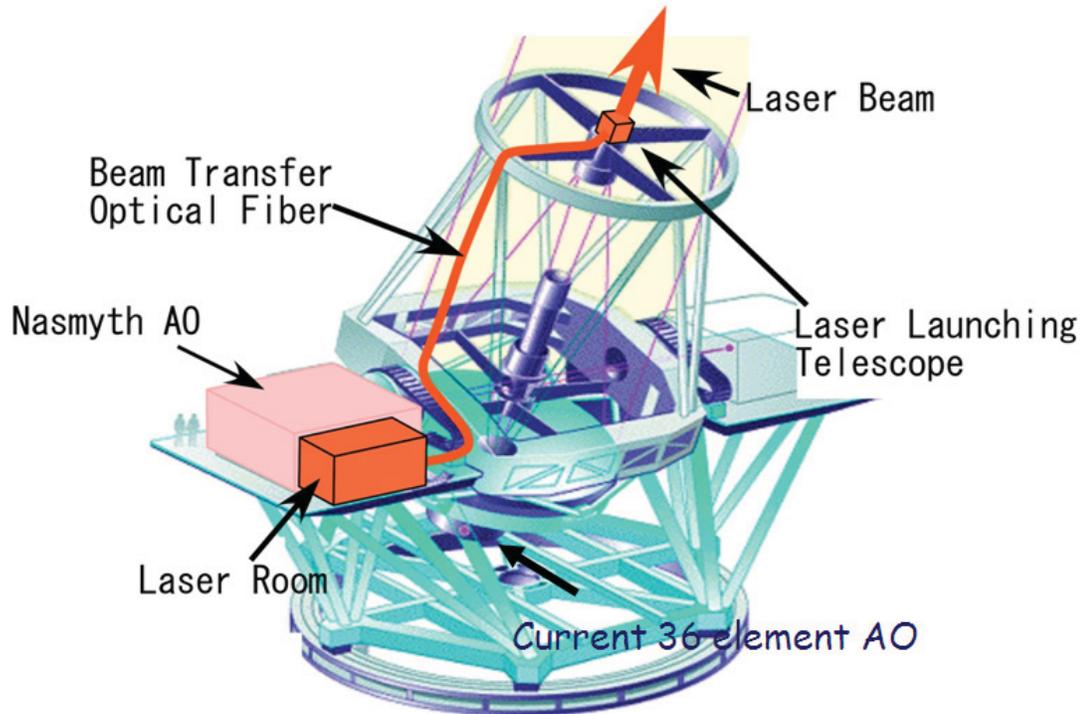


Figure 1. The layout of laser guide star AO system at Subaru Telescope. AO system and the laser are mounted on the Nasmyth platform. We mount the laser launching telescope behind the secondary mirror. The laser beam is transferred from the laser room to the laser launching telescope by the optical fiber.

oscillating wavelength. Thus, a thermally stabilized laser clean room is built at a stable Nasmyth platform. An optical fiber transfers a laser beam from the laser clean room to a laser launching telescope behind the secondary mirror of Subaru Telescope. While the optical fiber is installed permanently to Subaru Telescope, the laser launching telescope need to attach and detach for every demand of laser projection to the sky. Figure 1 shows a system layout to the Subaru Telescope.

## 2.2 AO system description

AO188 is mounted between Subaru Telescope and science instruments. There is no pick-off mirror, so that we need to moved away AO188 if science instruments do not want to use AO188.

Figure 2 shows a optical layout of AO188. AO188 receives  $f/13.9$  beam from the telescope. Field of view to science instruments is designed as 2 arcmin. The first optical component is a derotator (AO IMR in Figure 2), which can rotate the field on sky. We use three-mirrors system to change the orientation of the field on sky as well as the telescope pupil pattern. The off-axis parabola (OAP1 in Figure 2) collimates the beam and images the telescope pupil on the deformable mirror. The pupil size on the deformable mirror is 90 mm. Between the first off-axis parabola and deformable mirror, we insert an atmospheric dispersion collector (ADC in Figure 2). The ADC is designed to compensate an chromatic dispersion by atmosphere from visible to near infrared.<sup>6</sup> Deformable mirror with 188 elements<sup>7</sup> is mounted on a tip-tilt mount (DM/TT in Figure 2). Since the temporal bandwidth limit of the tip-tilt mount is quite limited, only averaged offset of tip-tilt on the deformable mirror

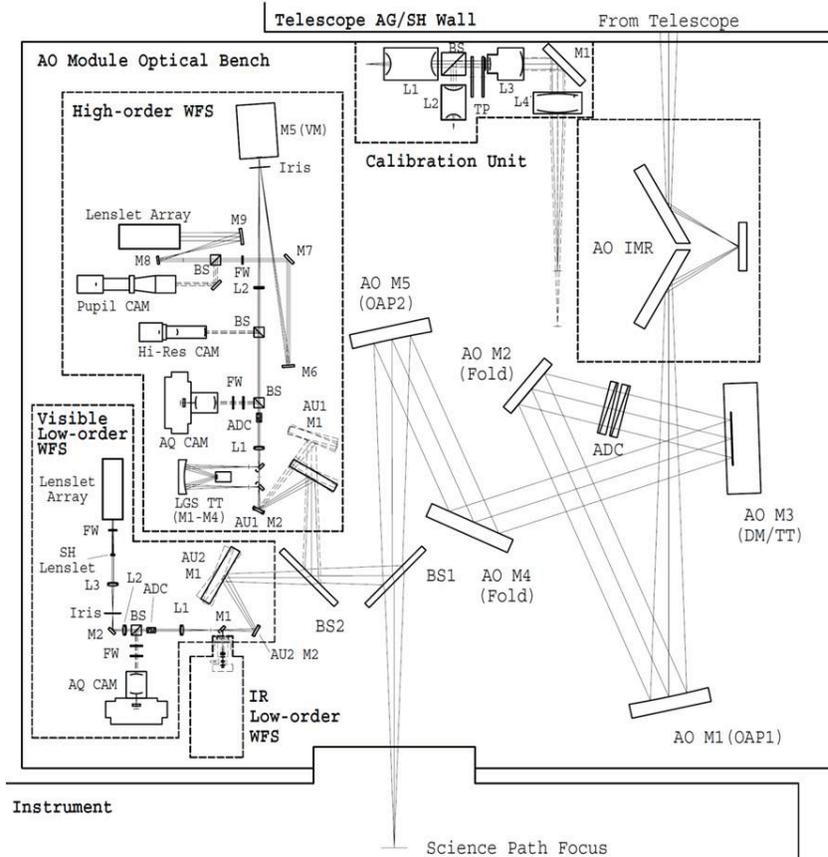


Figure 2. The optical layout of AO188.

is fed back to the tip-tilt mount. The stroke of each axis of tip-tilt mount is  $\pm 5$  arcsec. Offset on the tip-tilt mount is off-loaded to the telescope pointing. For the observation aimed in the thermal near infrared wavelength longer than  $2.5 \mu\text{m}$ , the offset on the tip-tilt mount shift a thermal background on the science detector. Thus we offload a tip-tilt offset on the deformable mirror directly to the telescope secondary mirror.<sup>8</sup> The second off-axis parabola (OAP2 in Figure 2) converges the beam again into focal ratio of 13.9.

Prior to science instruments, beamsplitters (BS1 in Figure 2) reflect a part of light for wavefront sensing. Three beamsplitters in total can be mounted to the automated exchange system. One beamsplitter reflects a visible light shorter than  $900 \text{ nm}$ .<sup>9</sup> Second one reflects shorter than about  $635 \text{ nm}$ , which is used for an optical science instruments. Third one is for an infrared wavefront sensor.

We have two wavefront sensors. One is a 188 sub-aperture curvature wavefront sensor as a high-order wavefront sensing and another is a  $2 \times 2$  sub-aperture Shack-Hartmann wavefront sensor as a low-order wavefront sensing, especially for tip-tilt and focus.

Another beamsplitter (BS2 in Figure 2), which is optimized to reflect a light from a sodium laser guide star, divides optical paths to two wavefront sensors. When we use only a natural guide star, a high-reflective mirror sends all light to the high-order wavefront sensor. We can switch between these two modes using automated exchange system.

A guide star is selected by a two-mirror system to wavefront sensors. We can select a guide star different from the science object within the 2 arcmin diameter field for the high-order wavefront sensor. (AU1 M1 and

AU1 M2 in Figure 2) The low-order wavefront sensor has a wider selectable field of view of searching a guide star at 2.7 arcmin. (AU2 M1 and AU2 M2 in Figure 2) Two-mirror system, worked as a guide star acquisition system, controls the position as well as the focus of science object on a science camera.

The field of view of the high-order wavefront sensor is 4 arcsec. We also use a field stop (Iris inside the high-order WFS in Figure 2) down to 1 arcsec to reduce a sky background and aliasing effect in curvature sensing. A vibrating mirror (VM inside the high-order WFS in Figure 2), placed at focal position, can move back and forth of the position of telescope pupil on the 188-elements fixed lenslet array. The distance from the pupil plane to measure the curvature can be changed by the vibrating amplitude of the mirror. Light corrected by each lenslet array is injected to a large-core multi mode optical fibers and feeds to a photon counting APDs.<sup>10</sup> The geometry of electrodes on the deformable mirror and that of lenslets in the high-order wavefront sensor are well matched. Sampling rate of high-order wavefront is selectable. We use 1 kHz sampling typically.

The low-order wavefront sensor has 4 arcsec field of view, same as high-order wavefront sensor. We placed 2×2-element lenslet array at the position where the telescope pupil is conjugated, and 4×4-element lenslet array is located at the focal position of 2×2-element lenslet array, instead of putting a CCD array. Multi mode optical fibers are mounted exactly where the focal position of 4×4-element lenslet array. A photon counting APDs are also used to detect the light corrected by the 4×4-element lenslet array with optical fiber.<sup>11</sup>

### 2.3 Laser guide star system

A coherent light source at sodium resonance spectral line at 589 nm is generated by a sum-frequency mixing of two Nd:YAG laser at the wavelength of 1064 nm and 1319 nm.<sup>12,13</sup> Periodically poled MgO-doped stoichiometric lithium tantalate (PPMgO:SLT) crystal is used for sum-frequency generation. The average output power was started from 4.5 W in 2006 and finally it reached at 6.8 W after a fine tuning of laser system.<sup>14</sup> The laser is located in the thermally stabilized laser clean room. The room temperature is controlled at 22 degree Celsius. Stability of the room temperature is within 0.1 degree during the laser operation.

The laser beam is focused by a off-the-shelf doublet lens onto a solid-core photonic crystal fiber (PCF), whose mode field diameter is about 14.3  $\mu\text{m}$ . Both the doublet lens and the connector jacket of PCF are mounted on the 3-axis linear stages. The adjustment the position and the distance between the tip of the PCF and lens allows us to maximize the coupling efficiency. The maximum overall throughput of the optical fiber we achieved is about 75 %.<sup>15,16</sup> The laser launching telescope is mounted behind the secondary mirror of the telescope. The aperture size of the laser launching telescope is 500 mm, while the input aperture size is 40 mm. Thus this is a beam expander, whose magnification is 12.5. The telescope has three mirrors, primary, secondary and tertiary, similar to a bent Cassegrain telescope. We found that the wavefront error at the center area degrades the image quality at the sodium layer, which is caused by the stress at the connection between the primary center area and the tertiary support structure. Finally, the wavefront error within a full aperture is reduced by less than 100 nm after the modification of the mechanical structure.

The laser beam coming out from the PCF at the laser launching telescope is collimated by the lens. We chose the beam size about 25 mm. The steering of the laser beam is done by moving the lens laterally to the optical axis. The steering step is designed as 0.1 arcsec on sky. It is not necessary to steer a pointing direction of the launched beam in real time, since the position error of the laser guide star is compensated by the dedicated tip-tilt mirror inside the high-order wavefront sensor (LGS TT inside the high-order WFS in Figure 2). Tip-tilt offset on the dedicated tip-tilt mirror is offloaded by the position correction at the guide star acquisition system in front of the high-order wavefront sensor. The averaged focus error measured by the laser guide star indicates the estimation error of the mean altitude of the laser guide star. The offset of focus error is also compensated by the acquisition guide star unit. The rest of higher-order wavefront error is fed back to the deformable mirror.

## 3. OVERVIEW OF CURRENT STATUS

### 3.1 Performance using natural guide stars

We are monitoring the performance of AO188 using natural guide star since 2008. The Strehl ratio at K band for various brightness of guide stars are plotted in Figure 3. We achieved the Strehl ratio around 0.6 to 0.7 for the bright guide stars. The Strehl ratio is still larger than 0.2 even though the guide star magnitude is around

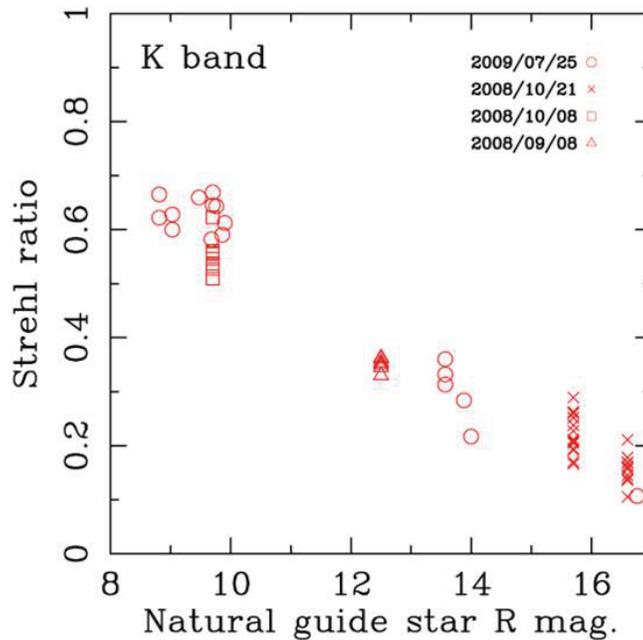


Figure 3. The estimated Strehl ratio as a function of the brightness of guide stars at K band, 2.2  $\mu\text{m}$ .

15 in R band. Sampling rate was 1 kHz for all cases from bright to faint guide stars. Since the photon-counting APDs have no readout noise, the performance using the fainter guide star was not apparently degraded.

The detail performance, including the isoplanatic angle and the Strehl ratio at other wavelength, is described in the other paper.<sup>17</sup>

### 3.2 On sky evaluation of laser guide star

Several engineering observations to create a laser guide star reveals that a typical image size in full width half maximum is around 1.2 to 1.6 arcsec at zenith under an averaged seeing condition. Figure 4 shows an example of a laser guide star image, taken by the CCD camera in the high-order wavefront sensor. The exposure time is 20 seconds. The brightness of a laser guide star at zenith was about equivalent magnitude of 10.7 in R band. We estimated that the laser power just after the launching telescope is around 4 W.

The brightness of a laser guide star as a function of elevation is also evaluated.<sup>14</sup> A simple geometrical model predicts that the brightness of a laser guide star decreases by air mass, because the brightness decreases as a square of a distance to a laser guide star, which is proportional to a square of air mass, and the brightness increases linearly with column length of sodium layer, which is proportional to air mass. Our measurement matched this model prediction approximately.

Also the brightness change due to a wavelength offset was measured as well.<sup>18</sup> We found an unexpectedly wide tunable range, with which a laser guide star has enough brightness. Measuring a bandwidth of a laser beam relayed by the PCF, the spectral broadening was found due to a self phase modulation effect inside the PCF. This is caused by a high peak power in the PCF. While the initial spectral bandwidth of the laser is 1.7 GHz, the output laser after PCF has about 8 GHz. We roughly estimated that the efficiency of return signal of sodium fluorescence light is degraded by a factor of 4 or 5.

### 3.3 Estimation of limiting magnitude of low-order wavefront sensor

We estimated the limiting magnitude of a low-order wavefront sensor. The averaged photo-counts of each APD at the low-order wavefront sensor for faint guide stars are plotted in Figure 5. Based on our experience of

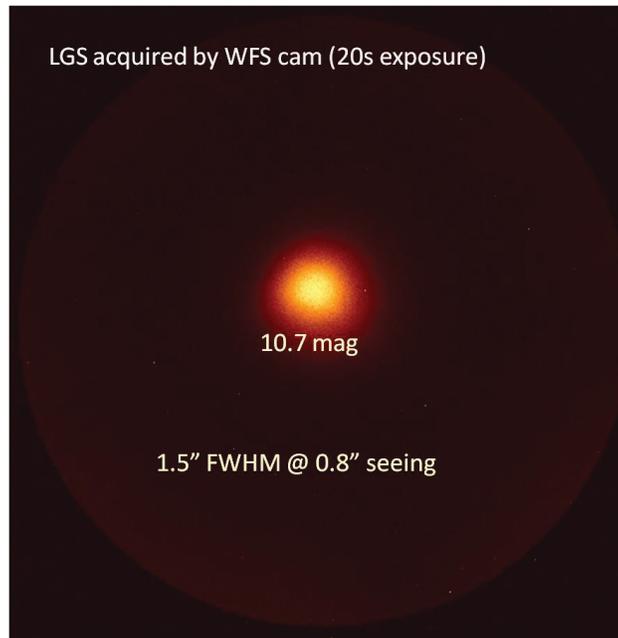


Figure 4. An image of laser guide star at zenith taken by the CCD camera in the high-order wavefront sensor. The brightness of the laser guide star is about equivalent magnitude of 10.7 in R band. The image size at the full width half maximum is 1.5 arcsec.

estimating a limiting magnitude of high-order wavefront sensor, We assume that a wavefront error in tip-tilt and focus can be measured at the photo-counts of APDs of 10 for each sampling rate at 100 Hz. Figure 5 indicates that the guide star at the magnitude around 18 in R band can be used as a tip-tilt and focus natural guide star. Unfortunately, we had a serious trouble in deformable mirror at this experiment, so that we could not evaluate the closed loop performance itself using the faint guide star.

#### 4. SCHEDULE OF COMMISSIONING

We are in the final phase of commissioning. Most components will be modified, integrated and tested by the end of October in 2010. The engineering observation and open use observation using natural guide star will resume in November, 2010. Seven nights in total for engineering observation have been assigned until the end of January, 2011. Performance evaluation of AO188 using a laser guide will be continued until the end of 2011. The risk-shared open use observation using a laser guide star will start during the final commissioning phase around in the middle of 2011. Finally, AO188 with a laser guide star will be served fully to open use observation in 2012.

#### 5. SUMMARY

The commissioning of the next generation AO for Subaru Telescope, AO188, is in the final phase. The AO188 system using a natural guide star has been served to open use observation since 2008. We achieved around 0.6 to 0.7 of Strehl ratio at K band using a bright guide star around 9th to 10th magnitude in R band. We succeeded to create a laser guide star in good quality. The image size is about 1.2 to 1.6 arcsec under the typical seeing condition. Final integration and testing is going on until October, 2010. Then we resume on sky evaluation through an engineering observation especially for using a laser guide star. After performance evaluation about one year in 2011, AO188 with a laser guide star will be served to risk-shared open use observation in the middle of 2011. Most of the risks will be reduced by 2012.

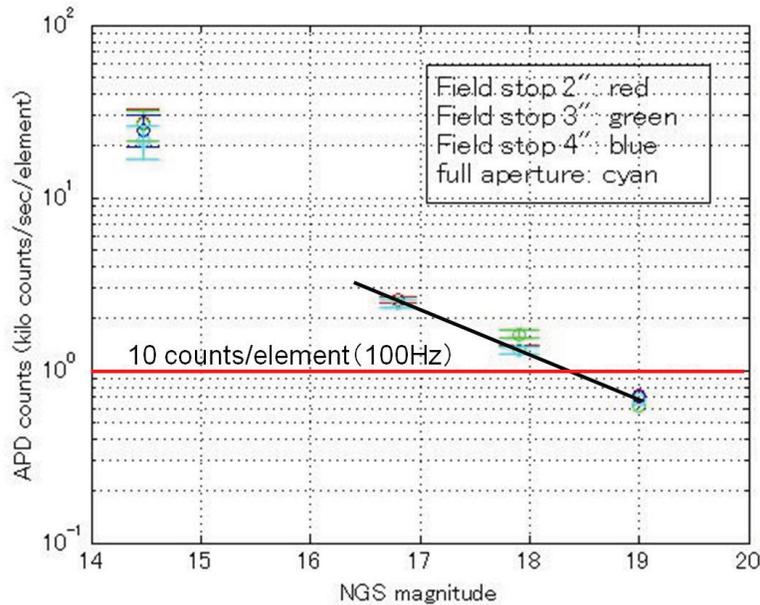


Figure 5. The average photo-counts of APDs as a function of natural guide star magnitude. We assume that a limiting magnitude, which can compensate a tip-tilt and focus wavefront error, corresponds to an averaged photo counts of 10 for each sampling rate at 100 Hz.

## ACKNOWLEDGMENTS

We thank our colleagues at the Subaru Telescope, especially the staffs, who supported us during an integration, daytime testing, and engineering observation of AO188 system at the summit of Mauna Kea. This work has been supported by Grant in aid of MEXT (Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology) and Subaru Telescope, NAOJ.

## REFERENCES

- [1] Racine, R., "The Strehl efficiency of adaptive optics systems," *PASP* **118**, 1066–1076 (2007).
- [2] Takami, H., Takato, N., Hayano, Y., Iye, M., Oya, S., Kamata, Y., Kanzawa, T., Minowa, Y., Otsubo, M., Nakashima, K., Gaessler, W., and Saint-Jacques, D., "Performance of Subaru Cassegrain adaptive optics system," *PASJ* **56**, 225–234 (2004).
- [3] Takami, H., Colley, S., Dinkins, M., Eldred, M., Guyon, O., Golota, T., Hattori, M., Hayano, Y., Ito, M., Iye, M., Oya, S., Saito, Y., and Watanabe, M., "Status of Subaru laser guide star AO system," *Proc. SPIE* **6272**, 62720C–1 – 62720C–10 (2006).
- [4] Hayano, Y., Takami, H., Guyon, O., Oya, S., Hattori, M., Saito, Y., Watanabe, M., Murakami, N., Minowa, Y., Ito, M., Colley, S., Eldred, M., Golota, T., Dinkins, M., Kashikawa, N., and Iye, M., "Current status of the laser guide star adaptive optics system for Subaru Telescope," *Proc. SPIE* **7015**, 701510–1 – 701510–8 (2008).
- [5] Hayano, Y., Saito, Y., Ito, M., Saito, N., Kato, M., Akagawa, K., Takazawa, A., Colley, S., Dinkins, M., Eldred, M., Golota, T., Guyon, O., Hattori, M., Oya, S., Watanabe, M., Takami, H., Wada, S., and Iye, M., "The laser guide star facility for Subaru Telescope," *Proc. SPIE* **6272**, 627247–1 – 627247–7 (2006).
- [6] Egner, S. E., Ikeda, Y., Watanabe, M., Hayano, Y., Golota, T. I., Hattori, M., Ito, M., Minowa, Y., Oya, S., Saito, Y., Takami, H., and Iye, M., "Atmospheric dispersion correction for the Subaru AO system," *Proc. SPIE* **7736**, in press (2010).

- [7] Oya, S., Bouvier, A., Guyon, O., Watanabe, M., Hayano, Y., Takami, H., Iye, M., Hattori, M., Saito, Y., Ito, M., Colley, S., Dinkins, M., Eldred, M., and Golota, T. I., “Performance of the deformable mirror for Subaru LGS AO,” *Proc. SPIE* **6272**, 62724S–1 – 62724S–8 (2006).
- [8] Oya, S., Hattori, M., Minowa, Y., Hayano, Y., Negishi, S., Tomono, D., Terada, H., Pyo, T. S., Watanabe, M., Ito, M., Saito, Y., Egner, S. E., Takami, H., Iye, M., Guyon, O., Garrel, V., Colley, S., and Golota, T. I., “Tip/tilt offload of Subaru AO188 by telescope secondary mirror,” *Proc. SPIE* **7736**, in press (2010).
- [9] Minowa, Y., Takami, H., Watanabe, M., Hayano, Y., Miyake, M., Iye, M., Oya, S., Hattori, M., Murakami, N., Guyon, O., Saito, Y., Ito, M., Colley, S., Dinkins, M., Eldred, M., and Golota, T., “Development of a dichroic beam splitter for Subaru AO188,” *Proc. SPIE* **7015**, 701561–1 – 701561–8 (2008).
- [10] Watanabe, M., Oya, S., Hayano, Y., Takami, H., Hattori, M., Minowa, Y., Saito, Y., Ito, M., Murakami, N., Iye, M., Guyon, O., Colley, S., Eldred, M., Golota, T., and Dinkins, M., “Implementation of 188-element curvature-based wavefront sensor and calibration source unit for the Subaru LGS AO system,” *Proc. SPIE* **7015**, 701564–1 – 701564–8 (2008).
- [11] Watanabe, M., Ito, M., Oya, S., Hayano, Y., Minowa, Y., Hattori, M., Saito, Y., Egner, S. E., Takami, H., Iye, M., Guyon, O., Garrel, V., Colley, S., and Golota, T. I., “Visible low-order wavefront sensor for the Subaru LGS AO system,” *Proc. SPIE* **7736**, in press (2010).
- [12] Saito, Y., Hayano, Y., Saito, Y., Ito, M., Saito, N., Kato, M., Akagawa, K., Takazawa, A., Colley, S., Dinkins, M., Eldred, M., Golota, T., Guyon, O., Hattori, M., Oya, S., Watanabe, M., Takami, H., Iye, M., and Wada, S., “589 nm sum-frequency generation laser for the LGS/AO of Subaru Telescope,” *Proc. SPIE* **6272**, 627246–1 – 627246–7 (2006).
- [13] Saito, N., Akagawa, K., Ito, M., Takazawa, A., Hayano, Y., Saito, Y., Ito, M., Takami, H., Iye, M., and Wada, S., “Sodium  $D_2$  resonance radiation in single-pass sum-frequency generation with actively mode-locked Nd:YAG lasers,” *Optics Letters* **32**, 1965–1967 (2007).
- [14] Saito, Y., Hayano, Y., Ito, M., Minowa, Y., Egner, S. E., Oya, S., Hattori, M. W. M., Garrel, V., Akagawa, K., Guyon, O., Colley, S., Golota, T. I., Saito, N., Takazawa, A., Ito, M., Takami, H., Wada, S., and Iye, M., “The performance of the laser guide star system for the Subaru Telescope,” *Proc. SPIE* **7736**, in press (2010).
- [15] Ito, M., Hayano, Y., Saito, Y., Akagawa, K., Kato, M., Saito, Y., Takazawa, A., Takami, H., Iye, M., Wada, S., Colley, S., Dinkins, M., Eldred, M., Golota, T., Guyon, O., Hattori, M., Oya, S., and Watanabe, M., “Transmission characteristics of high-power 589-nm laser beam in photonic crystal fiber,” *Proc. SPIE* **6272**, 627245–1 – 627245–8 (2006).
- [16] Ito, M., Hayano, Y., Saito, Y., Takami, H., Saito, N., Akagawa, K., Takazawa, A., Ito, M., Wada, S., and Iye, M., “High-power laser beam transfer through optical relay fibers for a laser guide adaptive optics system,” *Publications of the Astronomical Society of Japan* **61**, 763 – 768 (2009).
- [17] Minowa, Y., Hayano, Y., Oya, S., Watanabe, M., Hattori, M., Guyon, O., Egner, S. E., Saito, Y., Ito, M., Iye, M., Takami, H., Garrel, V., Colley, S., and Golota, T. I., “Performance of Subaru adaptive optics system AO188,” *Proc. SPIE* **7736**, in press (2010).
- [18] Ito, M. et al., “The characteristics of laser-transmission and guide star’s brightness for Subaru LGS/AO188 system,” *Proc. SPIE* **7736**, in press (2010).

# Performance of Subaru adaptive optics system AO188

Yosuke Minowa<sup>a</sup>, Yutaka Hayano<sup>a</sup>, Shin Oya<sup>a</sup>, Makoto Watanabe<sup>b</sup>, Masayuki Hattori<sup>a</sup>, Olivier Guyon<sup>a</sup>, Sebastian Egner<sup>a</sup>, Yoshihiko Saito<sup>a</sup>, Meguru Ito<sup>a</sup>, Hideki Takami<sup>a</sup>, Vincent Garrel<sup>a</sup>, Stephen Colley<sup>a</sup>, Taras Golota<sup>a</sup> and Masanori Iye<sup>c</sup>

<sup>a</sup>Subaru Telescope, NAOJ, 650 North Aohoku Place, Hilo, Hawaii 96720, USA;

<sup>b</sup>Hokkaido University, Faculty of Science, Kita 10 Nishi 8, Kitaku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan;

<sup>c</sup>National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

## ABSTRACT

Subaru adaptive optics system (AO188) is an 188-elements curvature sensor adaptive optics system that is operated in both natural and laser guide star modes. AO188 was installed at Nasmyth platform of the Subaru telescope and it has been successfully operating in the natural guide star mode since October 2008. The performance of AO188 in the natural guide star mode has been well verified from on-sky data obtained with the infrared camera and spectrograph (IRCS). Under normal seeing condition, AO188 achieves K-band Strehl ratio between 60% and 70% using  $R = 9.0$  magnitude natural guide stars and it works well with faint guide stars down to  $R = 16.5$  magnitude. We measured the FWHM and Strehl ratio of stellar images in globular clusters and found that the isoplanatic angle is approximately 30 arcsec. In this paper, we describe an overview of the operation procedure for AO188, as well as its performance such as angular resolution, Strehl ration, and sensitivity gain for detecting faint objects.

**Keywords:** adaptive optics, telescope operation, image quality, strehl ratio

## 1. INTRODUCTION

Subaru AO188<sup>1</sup> is a curvature adaptive optics system which consists of a 188 element wavefront curvature sensor with photon counting Avalanche Photo Diode modules and a 188 elements bimorph deformable mirror. It is installed at the IR Nasmyth platform of Subaru telescope and operated in both natural guide star (NGS) and sodium laser guide star (LGS) modes. The detail specification of the AO188 is summarized in Table 1. The science camera mainly used with AO188 is IRCS (Infrared Camera and Spectrograph),<sup>2</sup> which provides imaging and spectroscopy capabilities in near-infrared (0.9-5.3  $\mu\text{m}$ ) wavelength. HiCIAO (High Contrast Instrument for the Subaru Next Generation Adaptive Optics)<sup>3</sup> is also available with AO188 as a PI type instrument. HiCIAO is equipped with a coronagraph and offers the capability of high contrast imaging at 0.9-2.5  $\mu\text{m}$  wavelength. We are also planning to use Kyoto-3DII<sup>4</sup> with AO188 as a PI-type instrument, which provides the capability of integral field spectroscopy at optical wavelength range (0.65-0.95  $\mu\text{m}$ ). AO188 has successfully completed the first light observations with IRCS in late 2006. AO188 NGS mode has been offered for open use observations since 2008B. Currently, LGS mode is in commissioning phase.

## 2. AO188 OPERATION

The operation of AO188 in NGS mode requires a guide star for the wavefront measurement. The guide star should be a bright star located within 30 arcsec from your target. The target object for the science camera can also be used as the guide star. To obtain reasonable performance improvement, the guide star should be brighter than  $R$  magnitude of 16.5. Since we are using high-sensitive APDs for the wavefront sensor, the brightest limit of the guide star is around  $R \sim 8$ , although the brighter star up to  $R \sim -1$  can be used as the guide star by

---

Further author information: (Send correspondence to Y.M.)

Y.M.: E-mail: minoways@subaru.naoj.org, Telephone: +1-808-934-5905

Table 1. Summary of AO188 NGS mode specifications

Location of the system	Nasmyth focus (IR)
Defomable mirror	Bimorph mirror with 188 electrodes
Wavefront sensor	Curvature sensor with 188 photon counting APDs
Real time computer	4 Xeon CPUs (2.0GHz) with real time Linux OS
Control band width	> 100 Hz, 1000 correction/sec
Field of view	2'.7
Main optics throughput	~ 70%
Guide star magnitude	-1 < $R$ < 16.5 (NGS)
Science instrument	IRCS, HiCIAO, Kyoto-3DII

using attenuation filters installed inside of the wavefront sensor. To feed the guide star to the wavefront sensor, we used a guide star acquisition unit that consists of two gimbal mirrors and a linear stage. The gimbal mirrors adjust the position and ray tilt of the guide star. The linear stage is mounted under the one of the gimbal mirrors and adjusts the focus position of the guide star by changing the separation of two gimbal mirrors.<sup>5</sup>

Once we acquire the guide star to the wavefront sensor, we try to find the optimum control parameters, namely amplitude of the focus modulation for wavefront curvature measurement and servo loop gain. The modulation amplitude is corresponding to the voltage applied to a vibrating mirror (VM) mounted in the wavefront sensor. Higher voltage enables the measurement of higher order wavefront aberrations, but decreases the S/N of the wavefront measurement because of the loss of photon counts detected on the APDs. To find the optimum value, we scan the VM voltage by checking the photon counts. We empirically found that the optimum value is the voltage where the photon counts decreased by 10-20 % of the maximum counts. Since AO188 is currently using the classical zonal control algorithm, we scan a single servo gain by checking wavefront error estimated at the wavefront sensor and the variance of the DM voltages. Figure 1 shows an example of the gain scan. Too low gain gives worse wavefront correction (i.e. large wavefront error), while too high servo gain gives control loop. We found that the DM variance and the wavefront error are good tracers for finding optimum gain that gives the highest Strehl ratio.

Typical overheads for acquiring the guide star and tuning the loop performance are 10 minutes for bright star ( $R < 14$ ) and 15 minutes for faint stars ( $R > 14$ ). If the guide star is an extended source (e.g., nucleus of AGN), additional ~5 minutes is required for the parameter tuning.

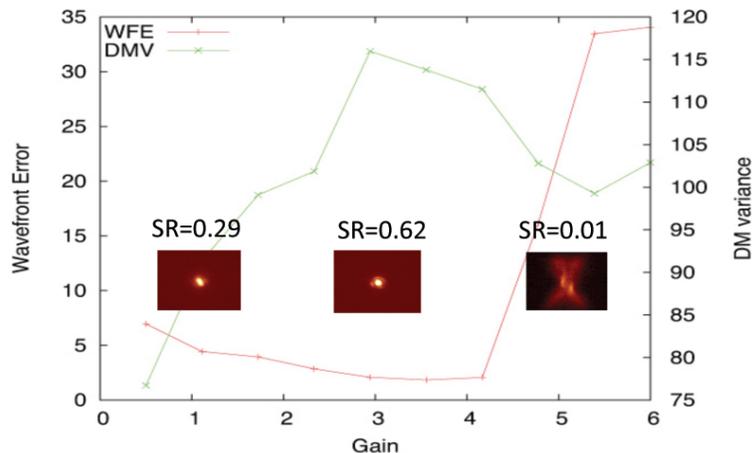


Figure 1. Example of the servo gain scanning. The images of PSF obtained with IRCS during the scanning are also shown. The optimization is performed by finding the gain at which the wavefront error is close to the smallest value before the DM control becomes unstable due to the oscillation. In this case, the gain of 3 gives the best performance.

### 3. PERFORMANCE EVALUATION

AO188 was extensively tested during the engineering run held from 2008 to 2009. The performance was evaluated in the near-infrared bands (zJHKL/M') using IRCS image mode with a pixel scale of 20 mas/pix. We took point sources (stars) with various  $R$ -band magnitude from 8 to 17. All exposures were longer than 10 seconds to get statistically meaningful data. To characterize AO188, we used the Strehl ratio and FWHM extracted from the IRCS images.

#### 3.1 Strehl ratio calculator

The Strehl ratio is often used to characterize the error of AO system. It is defined as the ratio between the peak intensity of a PSF divided by the peak intensity of a diffraction-limited PSF with the same total flux. To calculate the Strehl ratio, we need to find the peak value of the observed and ideal PSFs normalized by their total flux. However, it is difficult to find the peak value of the high Strehl ratio ( $> 0.5$ ) PSFs, because the pixel scale (20 mas/pix) of the IRCS is not small enough to well-sample the diffraction-limited PSFs whose FWHM is smaller than 60 mas. Moreover, it is difficult to find the total flux from the observed images from short ( $\sim 10$  seconds) exposure images. The flux from the outer part of the PSF halo cannot be measured due to the noise and thereby underestimating the total flux (or overestimating the Strehl ratio). To overcome these difficulties, we have developed a code for measuring the Strehl ratio. At first we fits the observed PSF to find its peak value and center coordinates and measure the flux using a circular or elliptical aperture. The size and shape of the aperture are determined depending on the S/N of the observed image using SExtractor software.<sup>6</sup> Then a new image which only contains the ideal diffraction-limited PSF at the same coordinates with the same pixel scale (20 mas/pix) as the observed one are created. The ideal PSF is created by the fourier transform of the telescope pupil. A linear phase is applied on the fourier transform to shift the PSF. Figure 2 shows the example of the PSF pupil, the linear phase, and the calculated PSF. We measure the peak value from this “under-sampled” ideal PSF using the same fitting procedure for the observed PSFs. In order to take into account the effect of the total flux underestimation, we use the same aperture as the observed PSF for measuring the flux of the ideal PSF. Finally, we can get the Strehl ratio by dividing the peak to flux ratio of the observed PSF by that of the ideal PSF with less affected by the PSF under sampling and the flux underestimation.

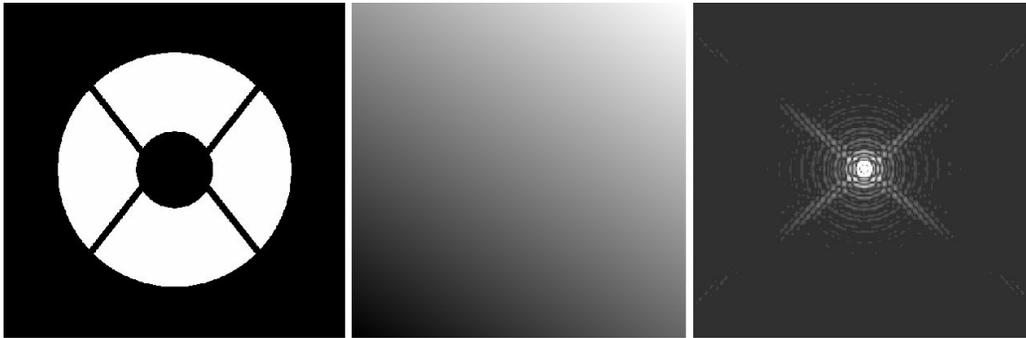


Figure 2. Examples of the telescope pupil (left) and linear phase (middle). The ideal PSF (left) was created by the fourier transform of the pupil and phase images.

#### 3.2 NGS on-source Strehl ratio and FWHM

Figure 3 shows the achieved Strehl ratio and FWHM as a function of the  $R$ -band magnitude of the natural guide star and the observed wavelength. The Strehl ratio that we obtained for a bright guide star ( $R < 10$  mag) was 1.0, 0.85, 0.65, 0.40, 0.20 and 0.08 at  $M'$  ( $4.86\mu\text{m}$ ),  $L'$  ( $3.77\mu\text{m}$ ),  $K$  ( $2.20\mu\text{m}$ ),  $H$  ( $1.63\mu\text{m}$ ),  $J$  ( $1.25\mu\text{m}$ ), and  $z$  ( $1.03\mu\text{m}$ ) -bands, respectively, under seeing conditions of 0.4–0.7 arcsec. We achieved the Strehl ratio of  $\sim 0.1$  at  $K$ -band even for  $R \sim 16.5$  faint guide star. The FWHM for all near-infrared bands were less than 0.1 arcsec except for the faintest guide star with  $R \sim 16.5$ , which is very close to the diffraction limit. Note that the FWHM of the shorter wavelength images might be overestimated because of the insufficient pixel sampling (20 mas/pix) with respect to the size of diffraction-limited images.

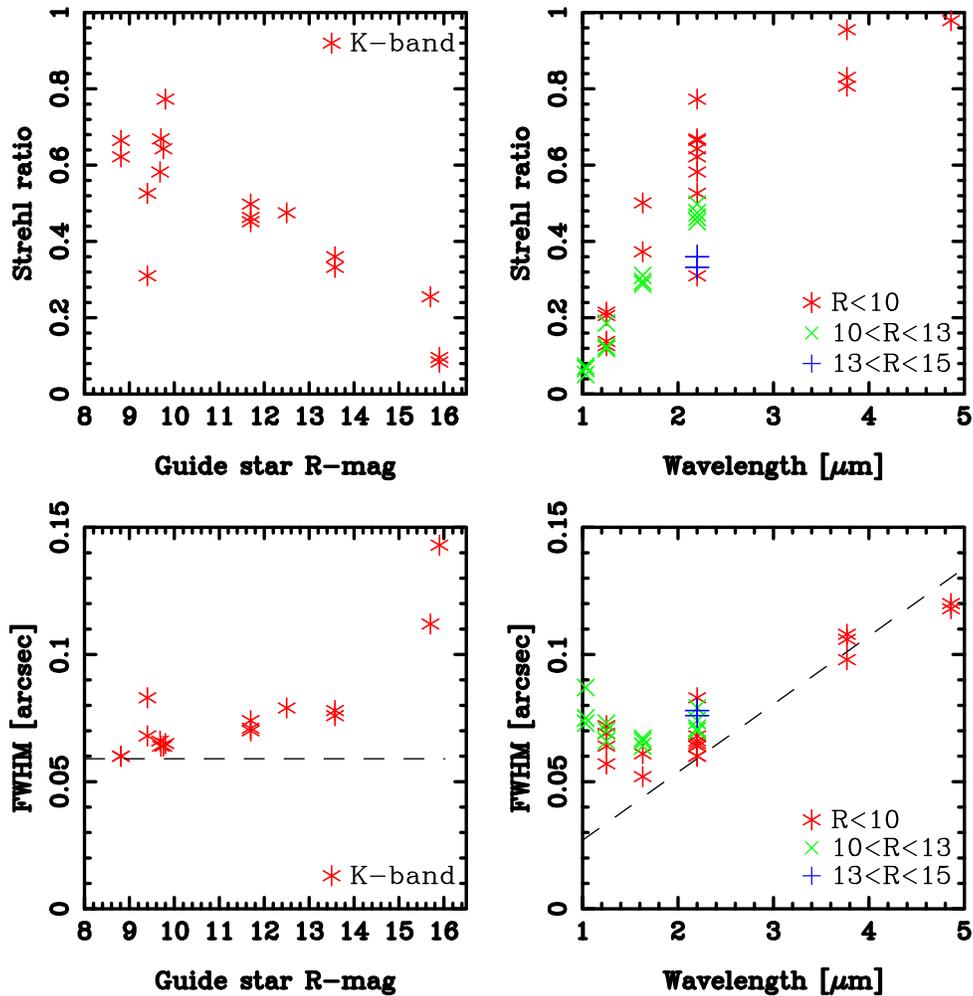


Figure 3. Strehl ratio as a function of  $R$ -band magnitude of the NGS and the observed wavelength under normal seeing condition of 0.4 – 0.7 arcsec. Dashed lines show the FWHM of the ideal diffraction-limited (SR=1.0) PSF.

### 3.3 Fried length versus Strehl ratio

Figure 4 shows a plot of the Strehl ratio versus Fried length ( $r_0$ ) at the image wavelength. Solid lines show the model plot of the residual wavefront variance ( $\Delta$ ). The residual wavefront variance after removal of the  $N$ th lower degrees of Zernike modes from Kormogorov phase screen is given by  $\Delta(N) = 0.2944N - \sqrt{3}/2(D/r_0)^{5/3}$  [rad<sup>2</sup>].<sup>7</sup> We found that the best fit models are  $\Delta/(D/r_0)^{5/3} = 0.01$  to 0.02 for bright stars ( $R < 10$ ) and 0.08 for faint stars ( $R > 15$ ). These are corresponding to the correction up to the Zernike order of 20 – 50 for bright stars and 5 – 6 for faint targets. Although we achieve the Strehl ratio of more than 0.7 in best case at  $K$ -band, our best performance is still low for the curvature sensor with 188 elements. According to the Racine 2006,<sup>8</sup> the curvature sensor with more than 100 sub-apertures is expected to achieve  $\Delta/(D/r_0)^{5/3} < 0.01$ . This discrepancy could be cause by the non-common path error due to the difference in optical path between science and WFS paths and/or the limitation of the control bandwidth due to unexpected turbulence.

### 3.4 Encircled energy and sensitivity gain

Figure 5 shows the plot of the encircled flux as a function of the aperture radius in  $z'JHK$ -bands with a typical  $R = 12$ th magnitude guide star. We found that the aperture radii that contains 50% of total flux are 4, 3, and 2 times smaller than typical seeing PSF (FWHM~0.4) at  $KH$ ,  $J$ , and  $z'$ -bands, respectively. These mean that the

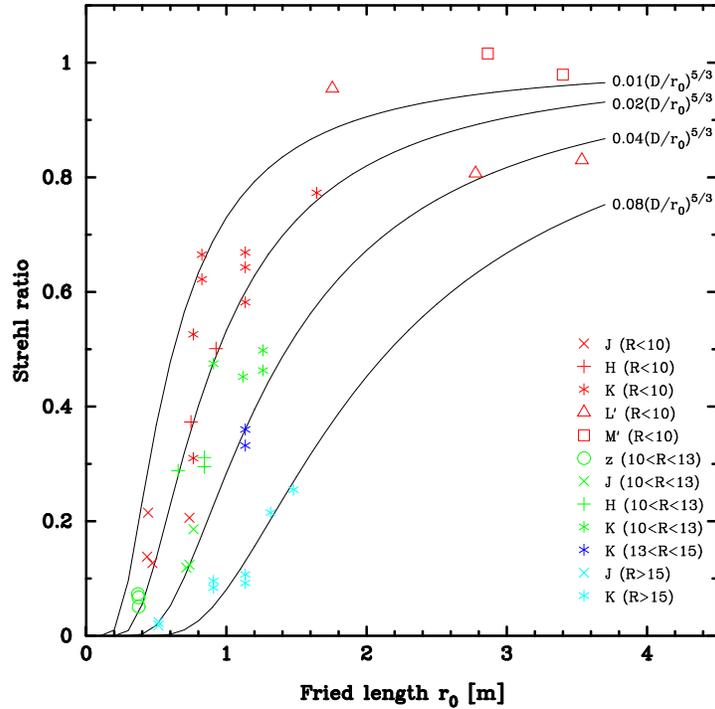


Figure 4. Strehl ratio versus Fried length ( $r_0$ ) at the near-infrared wavebands. Solid lines show the model predictions with the residual wavefront variances of 0.01, 0.02, 0.04 and 0.08.

sensitivity gain for detecting faint objects are increase by 0.75 mag, 0.60 mag, and 0.37 mag at  $KH$ ,  $J$ ,  $z'$ -bands, respectively.

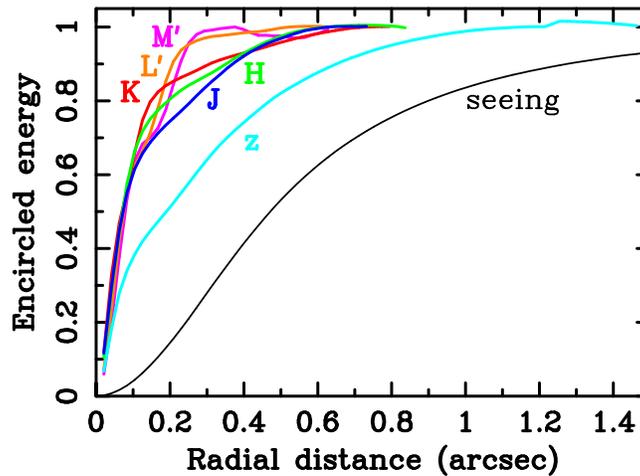


Figure 5. Encircled energy of the PSF as a function of the distance from the center of the AO corrected PSF at each near-infrared band. The encircled flux of a seeing PSF (FWHM $\sim$ 0'.4 arcsec) is also plotted for comparison. Total flux was normalized to unity.

### 3.5 Isoplanatic Field

Performance of AO correction degrades gradually with increasing distance from a guide star because the angular correlation of atmospheric turbulence becomes lower as increasing distance from a guide star (anisoplanatism).

Figure 6 shows the Strehl ratio as a function of the distance from the guide star estimated from the image of globular cluster M5 and M15 obtained with IRCS 52 mas/pix mode. The Strehl ratio decreases with increasing the distance from the guide star ( $\Delta\theta$ ) by  $SR \propto \exp[-(\Delta\theta/\theta_0)^{5/3}]$  where  $\theta_0$  is an isoplanatic angle defined as the separation angle at which the Strehl ratio has degraded by a factor of e with respect to the on-axis value. We found that the isoplanatic angle of AO188 was around 30 arcsec in radius.

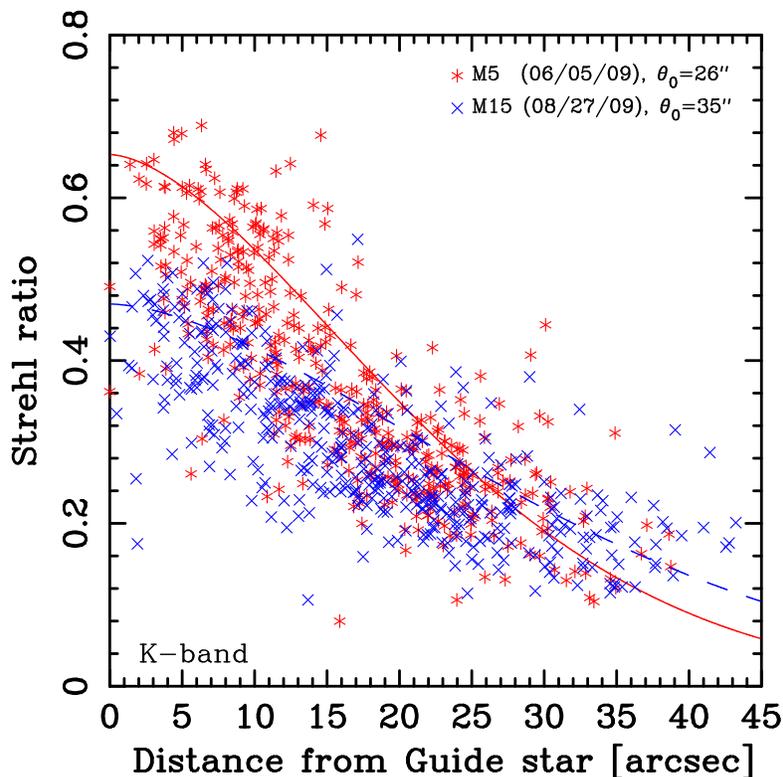


Figure 6. Variation of the Strehl ratio within IRCS 52mas/pix mode field of view as a function of distance from a guide star. The results are based on snapshots of globular clusters M15 (crosses) and M5 (asterisks) taken under normal seeing condition. The solid and dashed lines show the Strel ratio derived from the model of the residual wavefront variances as a function of the distance from guide stars with the isoplanatic angle of 26 arcsec and 35 arcsec, respectively.

#### 4. SUMMARY

In this paper, we presented the procedure for AO188 operation such as the guide star acquisition and loop performance tuning. We also described a method for calculating the Strehl ratio which takes into account the effect of uncertainties in finding the peak and flux values from under-sampled short exposure images. Finally, AO188 NGS mode has been characterized from the on-sky performance such as FWHM and Strehl ratio of the PSF extracted from the IRCS near-infrared images.

#### ACKNOWLEDGMENTS

We would like to thank all staff of Subaru telescope, National Astronomical Observatory of Japan (NAOJ), who kindly support our research and development.

#### REFERENCES

- [1] Hayano, Y., “Progress of the laser guide star adaptive optics at subaru telescope,” in [*Exoplanets and disks: their formation and diversity*], T. Usuda, M. Tamura, . M. I., ed., *American Institute of Physics Conference Series* **1158**, 385–386 (2009).

- [2] Kobayashi, N., Tokunaga, A. T., Terada, H., Goto, M., Weber, M., Potter, R., Onaka, P. M., Ching, G. K., Young, T. T., Fletcher, K., Neil, D., Robertson, L., Cook, D., Imanishi, M., and Warren, D. W., “Ircs: infrared camera and spectrograph for the subaru telescope,” in [*Optical and IR Telescope Instrumentation and Detectors*], Iye, M. and Moorwood, A. F., eds., *Proc. SPIE* **4008**, 1056–1066 (2000).
- [3] Hodapp, K. W., Suzuki, R., Tamura, M., Abe, L., Suto, H., Kandori, R., Morino, J., Nishimura, T., Takami, H., Guyon, O., Jacobson, S., Stahlberger, V., Yamada, H., Shelton, R., Hashimoto, J., Tavrov, A., Nishikawa, J., Ukita, N., Izumiura, H., Hayashi, M., Nakajima, T., Yamada, T., and Usuda, T., “Hiciao: the subaru telescope’s new high-contrast coronagraphic imager for adaptive optics,” in [*Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy II*], McLean, I. S. and Casali, M. M., eds., *Proc. SPIE* **7014**, 42 (2008).
- [4] Sugai, H., Hattori, T., Kawai, A., Ozaki, S., Hayashi, T., Ishigaki, T., Ishii, M., Ohtani, H., Shimono, A., Okita, Y., Matsubayashi, K., Kosugi, G., Sasaki, M., and Takeyama, N., “The kyoto tridimensional spectrograph ii on subaru and the university of hawaii 88 in telescopes,” *PASP* **122**, 103–118 (2010).
- [5] Watanabe, M., Takami, H., Takato, N., Colley, S., Eldred, M., Kane, T., Guyon, O., Hattori, M., Goto, M., Iye, M., Hayano, Y., Kamata, Y., Arimoto, N., Kobayashi, N., and Minowa, Y., “Design of the subaru laser guide star adaptive optics module,” in [*Advancements in Adaptive Optics.*], Domenico B. Calia, B. L. E. and Ragazzoni, R., eds., *Proc. SPIE* **5490**, 1096–1104 (2004).
- [6] Bertin, E. and Arnouts, S., “SExtractor: Software for source extraction.,” *A&AS* **117**, 393–404 (1996).
- [7] Noll, R. J., “Zernike polynomials and atmospheric turbulence,” *Journal of the Optical Society of America* **66**, 207–211 (1976).
- [8] Racine, R., “The strehl efficiency of adaptive optics systems,” *PASP* **118**, 1066–1075 (2006).

# 最も遠い 銀河発見

128億8千万光年

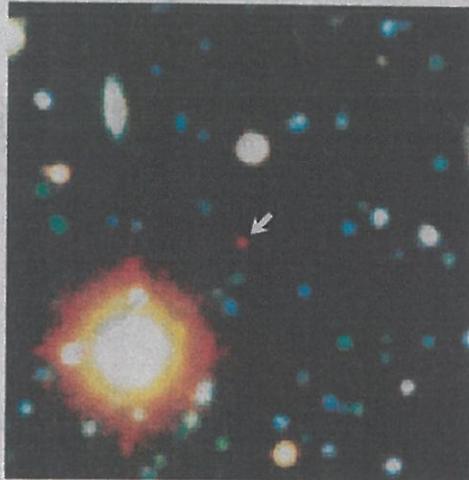
すばる望遠鏡

地球からの距離が約128億8千万光年と、これまでで最も遠く離れた銀河を、国立天文台や東京大などの研究チームが発見した。ハワイにあるすばる望遠鏡で観測した。約137億年前のビッグバンで誕生して間もない宇宙の様子をとらえ

たことになり、宇宙の進化の研究に役立つという。14日発行の英科学誌「ネイチャー」に発表する。従来、最も遠いとされていたのは、すばる望遠

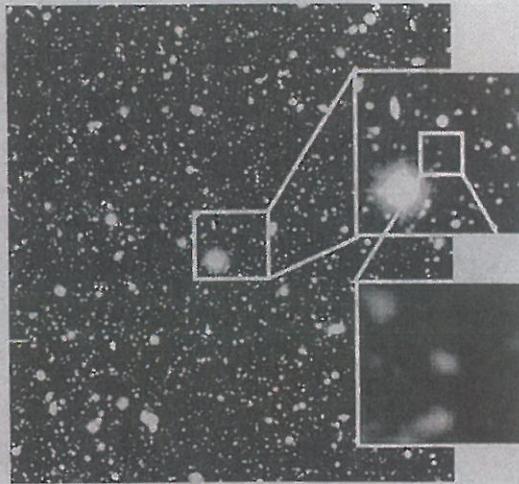
鏡が05年にとらえた銀河で、距離は約128億2500万光年だった。今回、その記録を6千万光年ほど更新した。研究チームは誕生した

ばかりの恒星の周囲にあるガスが燃せられて出す光をたよりに観測。かみのけ座の一角で新しい銀河を発見したという。研究チームの家主・国立天文台教授(銀河物理学)によると、これまでの研究結果からの予想では、周辺に銀河が6個ほどあると見込まれていたが、1個しか観測できなかった。6千万年ほどの間に、宇宙空間の様子が変わった可能性もあり、家教授は「この時代の宇宙がどんな状態だったのか、さらに観測を続けたい」として



発見された最も遠い銀河(矢印) 研究チーム提供

# 128億8000万光年の彼方



すばる望遠鏡がとらえた観測史上地球から最も遠い銀河。右下の枠の中央(国立天文台提供)

## 最遠の銀河

地球から128億8000万光年(1光年は約10兆キロメートル)も離れた観測史上では最も遠い銀河を、国立天文台や東京大、京都大などの研究チームが「すばる望遠鏡」(ハワイ・マウナケア山頂)を使って発見した。14日発行の英科学誌「ネイチャー」に発表した。

これまでの最遠の銀河より約6000万光年遠くにあり、137億年前の宇宙誕生(ビッグバン)から7億8000万年後の初期宇宙に、確実に銀河ができていたことが確認された。

研究チームは、宇宙の奥深くで遠ざかっていく銀河を観測するのに適した特殊なフィルターを開発。すばる望遠鏡に取り付け「春のかみのけ座」の方向で銀河を探索した。その結果、最遠銀河の候補が2つ見つかり、そのうちの明るい方の光は128・8億光年かなたの銀河であることを確認した。もう一方の暗い天体についても、解析による確認を行っている。研究チームの**家正則**・国立天文台教授によると、同じ方向では地球から128・2億光年前後の極めて遠い銀河が10個ほど見つかった。今回の銀河が見つかったあたりでは銀河の候補が少ないことから、128億8000万年前からの約6000万年の間に宇宙の姿が大きく変わったことが示唆されるという。

(1)

B版

1952年5月30日第3種郵便物認可

# しんぶん 赤旗

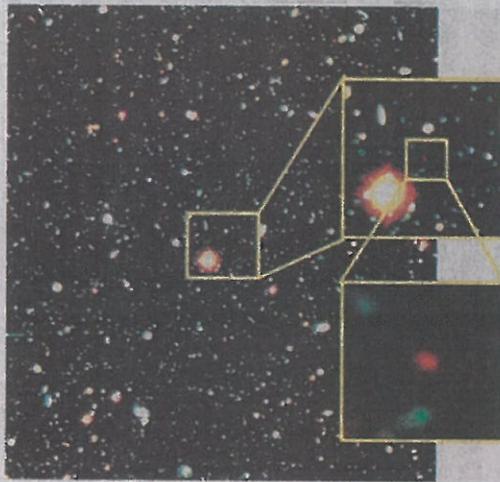
2006年 9月14日 木曜日

日刊第20051号

発行所 日本共産党中央委員会  
東京都渋谷区千駄ヶ谷4の26の7  
〒151-8586 電話 03(3403)6111

©日本共産党中央委員会2006年

## 129億光年 最遠の銀河



すばる望遠鏡が観測した、かみのけ座の方向の深探査領域の一部。今回見つかった最遠の銀河は右下の四角の中心にある赤い天体です（国立天文台提供）

### すばる望遠鏡で発見

国立天文台などの観測チームは十三日、すばる望遠鏡による観測で、これまでで最も遠方の銀河を見つけたと発表しました。地球から約百二十八億八千万光年の距離にあり、これまでに観測されている最遠の銀河より、さらに約六千万光年遠方にあります。

観測チームは、かみのけ座の

一角を「すばる深探査領域」と定め、遠方にある銀河に狙いを絞った観測を続けてきました。

今回、遠方の銀河が放つ光だけを選択的にとらえることのできる特殊なフィルターを開発して観測することで、この銀河を発見することに成功しました。

宇宙の始まり（約百三十六億六千万年前）から七億八千万年ほどたった初期宇宙の銀河から届いた光です。国立天文台の家正則（いえ・まさのり）教授は「これまで観測の届かなかった宇宙史の暗黒時代の解明に一歩踏み出せた」といいます。

今回の発見によって、すばる望遠鏡は、遠方銀河リストの上位七位までを独占しました。観測成果は、十四日付の科学誌『ネイチャー』に掲載されます。

2006年(平成18年) 11月22日 水曜日

29

13版

すばる望遠鏡「視力」10倍に

国立天文台は21日、米ハワイ島のすばる望遠鏡の「視力」を最大10倍に高める新システムを開発したと発表した。星々の光は、地上に届くまでに大気のゆらぎの影響を受けてゆがんで見える。同天文台は、レーザー光線で夜空に約10等級の人工星を光らせ、観測データを基にゆがみを補正し、鮮明な画像＝1面NEWSLINEに写真＝が得られるようになった。

人工星は、レーザー装置で上空

国立天文台が新システム

90m付近に発生させ、この星の光が大気で揺らぐ様子をセンサーで計測。望遠鏡本体の鏡が集めた光は観測装置に導かれるが、新システムでは、途中で反射鏡を組み入れた。この鏡は188個に分割され、計測データを基に表面を瞬時に微妙に変形させ、ゆがみを相殺する。

研究チームの家正則教授は「赤外線なら米ハッブル宇宙望遠鏡の3.4倍という高い解像度になる」と説明している。 【山田大輔】



MAINICHI



新 毎 日 新 聞

発行所：東京都千代田区一ツ橋1-1-1 〒100-8051 電話(03)3212-0321  
 郵便振替口座 00180-3-2800  
 毎日新聞東京本社 ©毎日新聞社 2006

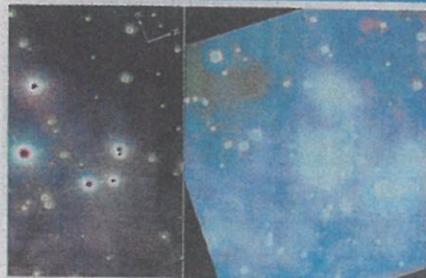
トータルヘルスケアへ。



白十字

http://www.hakujuji.co.jp

NEWSLINE



補正で鮮明

29

すばる望遠鏡の「視力」が最大10倍に。オリオン大星雲の中心部の画像(左)＝国立天文台提供)も、99年(右＝同)より鮮明に。大気のゆらぎを補正する装置の成果だ。

産 経 新 聞

平成18年(2006年)11月22日 水曜日

29 社会 15版

## ▶すばる望遠鏡 新技術で最高画質実現

国立天文台は21日、ハワイのすばる望遠鏡の解像度を平成11年の観測当初の10倍に向上させたと発表した。大気の揺らぎに伴う光の乱れを高精度に補正し、世界最高水準の鮮明な画質を実現した。遠くの銀河や太陽系外惑星の観測で新発見が期待できそうだ。

口径8.2メートルのすばるは、100キロ先のピンポン球を識別する解像度を持つ。しかし、星の光が地球の大気を通る際に、かげろうのような屈折現象で光の波形が乱れ、理論上の10分の1の能力しか発揮できないのが課題だった。同天文台と理化学研究所は、高度90キロを浮遊するナトリウム原子にレーザーを照射し、星のように発光させる装置を望遠

鏡に設置。この光を指標に大気の揺らぎを連続的に検出し、乱れた光を特殊な鏡で補正する技術を開発した。

従来の補正方法では、観測可能な場所は全天の約1%だったが、新たな方法はほぼ全天で可能で、明るさも2倍以上。同天文台の家正則教授は「宇宙の最初のころに生まれた銀河の中心で何が起きているのか分かるだろう」と話している。

「視力」  
10倍に

27☆

2006年(平成18年)11月22日 水曜日

すばる望遠鏡  
「視力」10倍に

新装置が稼働

国立天文台ハワイ観測所が「188素子補償光学系」と「レーザーガイド星生成システム」をすばる望遠鏡に搭載し、試験観測とレーザービームの初照射を行ったと家正則国立天文台教授らのグループが21日発表した。従来に比べて約10倍の解像度で、より広い天域を観測でき、新たな研究成果が期待できるという。

天体から放射される光は望遠鏡に到達する前に、地球の大気のゆらぎにより星像が乱され、ぼやけてしまう。しかし188素子補償光学系を使い、星像の乱れをリアルタイム補正することで、解像度を約10倍に高めることに成功した。

また、これまで補償光学系を使った観測ができるのは、すぐそばに明るい星があるごく限られた天域だけだった。レーザーガイド星生成システムにより全天の半分以上の天域で補償光学を用いた観測が可能になる。

# より遠い銀河を探せ

## 128億8千万光年の先を競う研究者

誕生後まもない宇宙の姿を知るため、遠く離れた銀河の観測を研究者が競っている。現在の最も速い「記録」は地球からの距離約128億8千万光年に、日本の国立天文台が見つけた銀河だ。米チームも、より遠い可能性のある銀河をとりえ、後を追う。さらに遠くを狙う計画も準備が進んでいる。

(福島慎吾)

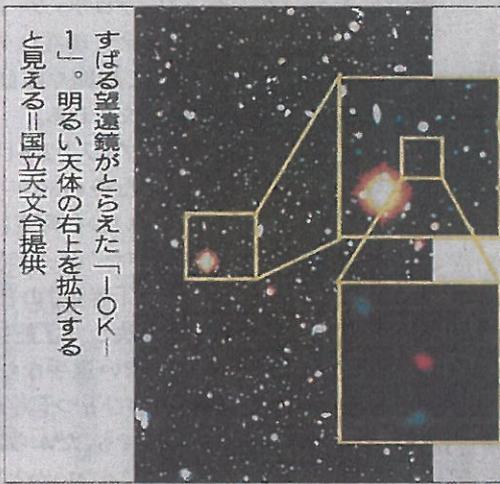
## 日本のすばる望遠鏡リード

地球から100億光年離れた天体が発した光は、100億年かけて地球に届く。「遠い宇宙からの光を見ることは、遠い過去を直接見ることに」なる。国立天文台の家庭教師は話す。

宇宙の誕生は約137億年前。その数億年後に最初の銀河が生まれたとされ、そこまで観測でき

かのはるべしが可能だ。世界中の研究者が観測を競うなか、家さんらの観測チームがハワイのすばる望遠鏡で見つけ、9月に「地球から約128億8千万光年のかなたにある」と発表した銀河が「IOK-1」だ。

かみのけ座の一角にある「すばるディープフィールド」と呼ばれる領域



すばる望遠鏡がとらえた「IOK-1」。明るい天体の右上を拡大すると見える国立天文台提供

に位置する。地球から眺めると満月ほどの大きさで、すばる望遠鏡が重点的に観測する領域だ。遠い銀河からのかすかな光を見るには、ほかの星の光がじゃまになる。星が密集する天の川の方向を避け、明るい星が特に少ない空が選ばれた。

観測チームは、この領域で30分かけて1枚の写真を撮影。それを30枚重ね合わせて、かすかな光

## 米は宇宙望遠鏡打ち上げ計画も

今のところ、遠い銀河の記録の上位20位のほとんどを、すばる望遠鏡が占める。「すばる望遠鏡は一度に見る範囲が広く、銀河探しには有利」と家さんは言う。

だが、欧米勢も負けじと、ハワイのケック望遠

鏡、南米チリにある欧州南天天文台の大型望遠鏡VLTなどで、遠い銀河を探している。

米国のカーネギー研究所やカリフォルニア大学サンタクルーズ校などのチームは、地球を回るハッブル宇宙望遠鏡やスピッ



すばるディープフィールドの位置 (12月1日午前3時、東京の空)

を放つ約4万個の銀河を見つけた。その光をさらに分析して、「IOK-1」を探し出した。

これについて、英ケンブリッジ大のリチャード・マクマホン教授は、英科学誌ネイチャーの解説で「宇宙で最初に輝きだした銀河探しの今後に、さらなる期待を持たせるとコメントした。

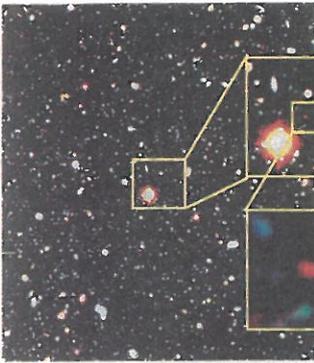
この発見は、過去の宇宙の姿に新たな謎を提示した。6個程度の銀河が見つかると思われていたのに、1個しかなかったのだ。当時の宇宙にあったガスが光を隠しているのか、それとも観測できるほど銀河が十分に成長していなかったのか。宇宙進化の理論が修正される可能性もあるという。

公表した。約129億光年かたにあるとされるが、光の詳しい観測ができていないので正確な距離を割り出せず、記録は「非公認」扱いだ。

チームの発表で、リチャード・パウエンス博士は「この時代にはもっと多くの銀河があると思われるが、今の望遠鏡で見るとは光が弱すぎる」とコメントしている。

家さんたちは「我々の記録もいずれは破られる」と、さらに遠い銀河からの光だけを通すフィルター1の開発を進める。129億3千万光年離れた銀河の発見が目標だ。

米航空宇宙局はハッブル宇宙望遠鏡より高性能のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡を18年にも打ち上げる計画だ。遠い銀河ばかりか、宇宙の最も初期に生まれた星の観測も目指している。



すばる望遠鏡が観測した、かみのけ座の方向にあるすばる後援領域の一部。今回発見された最も遠方の銀河「IOK-1」は、右下の拡大画像の中心の赤い天体(国立天文台提供)

# 科学

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの家正則(えい、まさのり)国立天文台教授に聞きました。



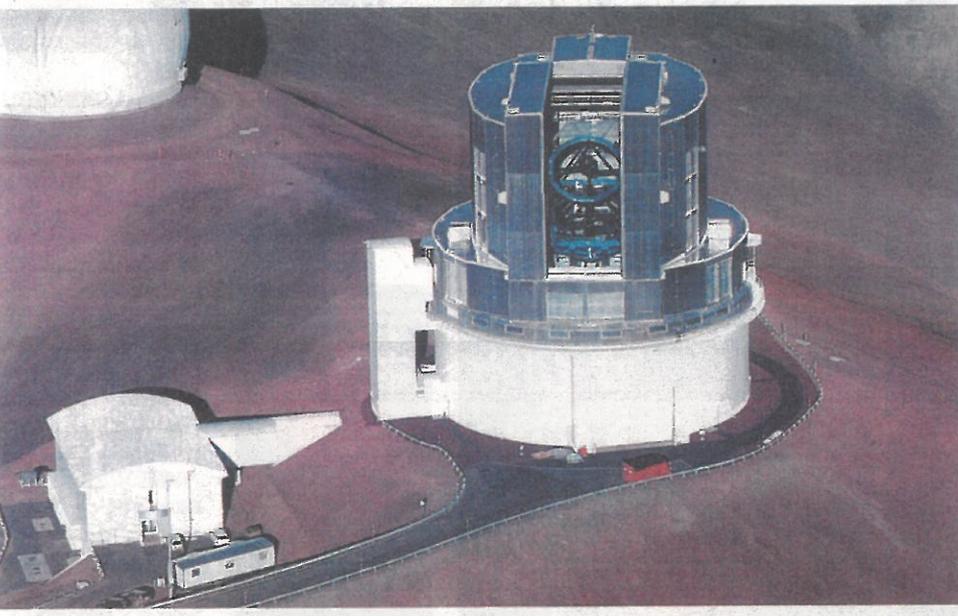
## 国立天文台 家正則さんにきく

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの家正則(えい、まさのり)国立天文台教授に聞きました。

### 最遠の銀河見つけた

# すばるの眼力

## 世界をリード



すばる望遠鏡 ハワイ島マウナケア山頂にある、日本の光学赤外線望遠鏡。口径は8.2メートル、一枚鏡で170センチメートル。1996年に観測開始された。

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの家正則(えい、まさのり)国立天文台教授に聞きました。

宇宙は膨張しているため、遠い天体ほど高速で遠ざかっています。天体からの光は、高速で遠ざかるほど、ドップラー効果で波長が長くなる性質(赤方偏移)があります。今回、この性質を利用して、特定の波長域の光だけを通すフィルターで特定の距離からくる銀河を狙いを絞った観測をしました。

現在の、遠方銀河の観測は、すばる望遠鏡の狙撃場といえます。すばる望遠鏡は視野が広く、一度に満月ほどの天域を観測することができ、また、1秒間に約10億個の星を撮影することができます。また、口径が8.2メートルと大きく、集光力が高いため、非常に暗い天体も観測することができます。

観測望遠鏡	距離	発表時期
1 すばる	128.83	06年9月
2 すばる	128.25	05年2月
3 すばる	128.25	06年4月
4 すばる	128.24	06年4月
5 すばる	128.22	05年2月
6 すばる	128.22	05年2月
7 すばる	128.22	03年4月
8 ケック	128.19	02年4月
9 すばる	128.18	06年4月
10 すばる	128.18	05年2月

※距離の単位=億光年(国立天文台の資料から)

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの家正則(えい、まさのり)国立天文台教授に聞きました。

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの家正則(えい、まさのり)国立天文台教授に聞きました。

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの家正則(えい、まさのり)国立天文台教授に聞きました。

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの家正則(えい、まさのり)国立天文台教授に聞きました。

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの家正則(えい、まさのり)国立天文台教授に聞きました。

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの家正則(えい、まさのり)国立天文台教授に聞きました。



(11)

3版

2007年(平成19年)9月3日(月曜日)

わかるかな?

グリーンフラッシュ=写真真=は水平線に沈んでゆく太陽が一瞬緑色の光を放つ現象です。まれにしか見えないので、これを見た人には幸運が訪れると言われています。太陽の光は紫から赤まで虹の七色が混

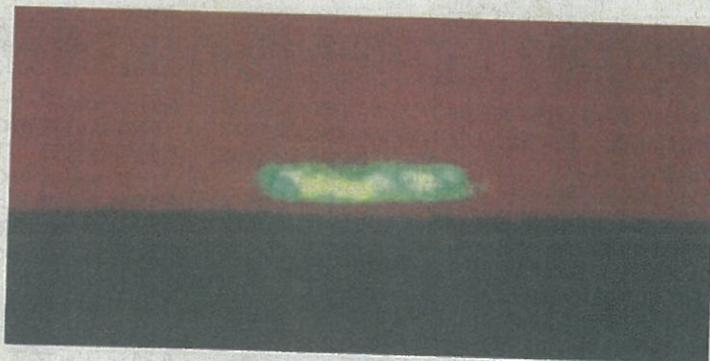
ざっているはずですが、なぜ緑色に見えるのでしょうか。

①赤い夕陽の残像として補色の緑が見える

②青い光は吸収され、赤い光は届かず、緑色が残る

③太陽コロナの放つ緑色の特別な光が見える

出題者は、家正則・国立天文台教授



札幌市の勇内山昭次郎さん撮影

解答は左ページに

わかるかな? 解答

問題は右ページ



答えは②です。地球の大気はプリズムのように光を屈折させる効果があり、直線的には見えない位置に太陽が沈んでも、光が曲がって届きます。このため、実際の日没は、幾何学で決まる時刻より1分以上遅れて起こります。屈折作用は波長が短い青い光ほど大きいので、赤い光が届かなくなったあとでも青い光がまだ届く時間が、ごくわずかですがあります。でも、青い光ほど空気中の塵で吸収散乱され弱められてしまいます。これらの効果のため、中間色の緑色の光だけが一瞬残るのです。晴れた日に高い山や見晴らしの良い海辺に行く機会があったらぜひ、グリーンフラッシュが見えないか、日没の瞬間を見てみましょう。

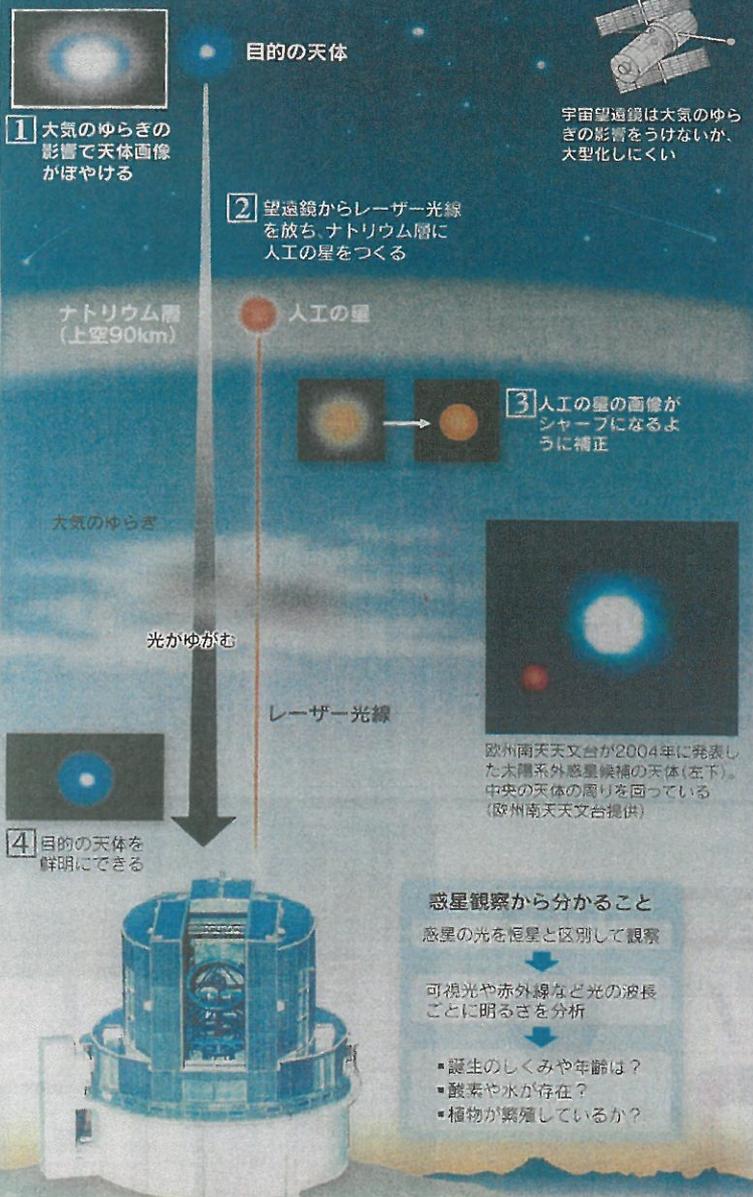
ご意見、ご要望 こちらまで

ご意見、ご要望は、科学部へ

ファクス(03・3217・8169)か、電子メール(t-kagakubu@yo.miuri.com)でお寄せ下さい。

# サイエンス

## 人工の星でゆがみを補正



ハワイ・マウナケア山頂にあるすばる望遠鏡(国立天文台提供) グラフィックス デザイン 藤田健一郎

世界最先端の望遠鏡は百三十億光年(一光年は光が一年間に進む距離)という遠いかなたの銀河をこらえて「こ」まで来た。そんな今、世界の天文学者が「近く」の天体の観測に火花を散らしている。特に地球から数百光年以内、狙うのは太陽系の外にある別の惑星だ。太陽のような恒星に比べはるかに観測しにくい惑星を鮮明に撮り、生命が存在するかという謎に迫ろうとしている。

ハワイにある日本のすばる望遠鏡では、来年から新装置「レーザーガイド星補償光学系」の本格運用を始める。開発を主導する国立天文台の室司則教授は「ハッブル宇宙望遠鏡を二倍近く上回るシャープさであらゆる天体を観測できる。世界最高レベルの装置だ」と期待を寄せる。

地上の望遠鏡で見ると、宇宙の星からの光はゆがんでおり、画像がぼやけてしまう。地球の大気がゆがむ影響のためだ。ハッブルのようにロケットで打ち

# 望遠鏡「近く」の星に照準

上げ宇宙空間の望遠鏡ならその心配はないが、小型に限られる。大型化が容易な地上の強みを生かすため、光のゆがみを消す技術の開発が進んでいる。すばるの新装置もその一つ。ゆがみを補正し、鮮明な天体画像にする。望遠鏡の視力に相当する性能「分解能」は、例えば観測でよく使われる波長二ミクロン(約は百万分の一)の赤外線をとらえる場合、ほぼ上限の角度六万分の一だ。これは二百ミクロンに置いたテニスボールの輪郭を見分けられる性能だ。光のゆがみは、望遠鏡内部の

特殊な鏡を微細な素子で細かく変形させることで打ち消す。この仕組みは以前からあるが、新装置は二つの点で機能が向上する。一つは鏡を変形させる素子の数を従来の五倍以上に増やすこと。非常に細かいゆがみまで補正できるようになる。もう一つはレーザーガイド星と呼ぶ技術だ。

従来、鏡をどのように変形させるかは、観測したい暗い天体の近くの明るくて見やすい星を参考にする。せむしも似た大気

## 太陽系外の惑星 直接観測を狙う

のゆがみの影響を受けているはずなので、明るい星が鮮明になるように変形させれば、暗い天体も正しく補正できるといわれる。しかし、その都合の良い星があるのは空全体の1%程度にすぎない。

そこで新装置は代わりに空に人工の星を投影する。望遠鏡からレーザー光線を放ち、上空約九十キロメートルにあるナトリウム層を光らせる。地上からはオレンジ色の新しい星ができたように見える。空全体どこでも高分解能で観測できるようにする。

高性能な目はもちろん遠い天体を見るのにも役立つが、近年観測競争が激しいのは、近くの太陽系外の惑星を詳しく鮮明にとらえることだ。

太陽系外惑星は、一九九五年にベガ星の周りに発見されたのが最初だが、現在までに二百五十個近くが見つかっている。といっても直接その姿を画像にとらえるのは候補天体も含めてまだ数例。恒星に比べて惑星は小さく、自分ではほとんど光らないので、恒星の光に埋もれてしまつたら、従来は惑星の引力の影響でふらつく恒星の動きを観察するなどして、間接的に見つけてきた。

高い分解能なら直接観測できる可能性がある。木星のように巨大で、しかもできてから一億

年以内といった若い惑星は比較的明るいため、検出の期待は高い。大気の成分を詳しく調べること、惑星がどのように進化しているかという謎を解明できる。すばるでは恒星の明るくない光だけを巧みに遮る装置を組み合わせて、生まれたばかりの巨大惑星の検出を狙っている。

将来さらに直接観測の手法が向上すれば、どんな惑星なのか、さまざま多くの情報が得られるようになる。例えば、地球のように生命を育む水や酸素があるのかどうか、可視光と赤外線を観測するから植物の存在を割り出すアイデアも提案されている。植物の葉は可視光を吸収する一方、赤外線を反射しやすいため、赤外線を利用する。シャープな画像を撮る新技術で、夢が広がっている。

太陽系外惑星を狙う動きは欧米の巨大望遠鏡でも活発だ。欧州南天天文台(本部ドイツ)は二〇〇四年に「太陽系外惑星の候補天体」の画像を発表した。当初は本天体中心の星の周りを回っているのかどうか疑われたが、その後の研究から初の惑星検出例とする見方が強まっている。間接観測から直接観測へ、惑星研究の新時代が本格的に始まる。

(田中深一郎)

### キーワード

**星の光のゆがみ補正**  
地上から星を見ると、上空の気温の変動などが原因で起きる大気の影響で、星からの光は刻々とゆがんで見えている。星が瞬いて見えるのもこのためだ。影響をなるべく減らすことで、巨大望遠鏡は通常、大気が薄い高地に設置されるが、

**宇宙望遠鏡に技術応用も**  
それでも天体画像はゆがんでしまう。星の光のゆがみは実は宇宙空間の望遠鏡にもある。鏡の表面にはどうしても必要な微細な凹凸があり、ゆがみの原因になるからだ。そこで地上の望遠鏡の技術に応用し、極限まで補正できる宇宙望遠鏡を打ち上げる構想もある。

2007年(平成19年)11月12日(月曜日)

夕刊 言 賞 賞 券 屋 門

わかるかな?

ハワイのすばる望遠鏡は、狙った天体を正確にとらえ、追尾することができます。望遠鏡は水平に敷いた円形レールの上で東西南北の方角を変え、空

を見上げる角度も真上からほぼ水平まで応じられます。でも、実は天頂から角度1度以内の真上は観測できません。なぜでしょう。

- ①雨よけの屋根があるため
- ②真上の星は追尾できないため
- ③真上だと望遠鏡が揺れるため

出題者は、家正則・国立天文台 教授



解答は左ページに

わかるかな?

解答

問題は右ページ

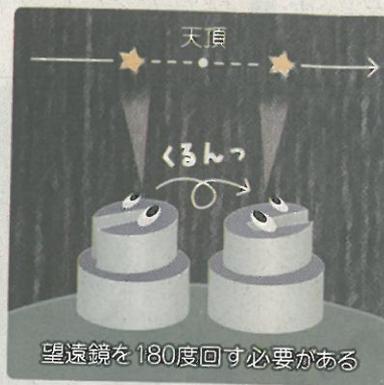
答えは②です。

東から西へ回る天体の日周運動を望遠鏡は追尾します。「赤道儀方式」と違って、「経緯台方式」のすばる望遠鏡では、天頂は特別な点になります。天頂付近を通る星を追いかけるには、仰ぎ見る角度を変えるだけではなく、望遠鏡の方角をぐるりと回す必要が生じます。

重さ550トンのすばる望遠鏡は、円形レールの上で厚さ0.1ミリの膜の上に浮いた状態で、リニアモーターにより音もなく滑るように動きますが、その最大速度は秒速0.5度に設

定してあります。

このため天頂から1度以内で天体を追いかけるには間に合わないのです。



ご意見、ご要望 こちらまで

ご意見、ご要望は、科学部へ

ファクス(03・3217・8169)か、電子メール(t-kagakubu@yo.miuri.com)でお寄せ下さい。

2007年(平成19年)11月19日(月曜日)

夕刊 読書 賞 新 聞

わかるかな?

日本がハワイに建設したすばる望遠鏡には、世界最大の薄型1枚鏡を使っていたり、観測装置の数も世界最多だったりという世界一があります。観測の

成果でも、実はいまだ破られていない「世界一」を2006年に達成しました。それは次のうちのどれでしょうか。

- ①宇宙で一番遠い銀河の発見
- ②銀河系で一番遠い星の発見
- ③太陽系で一番遠い天体の発見

出題者は、家正則・国立天文台教授



解答は左ページに

わかるかな? 解答

問題は 右ページ

答えは①です。

はるか遠くにある銀河は、宇宙膨張に伴って遠ざかっていく際の「赤方偏移」を頼りにその距離を見積もります。赤方偏移は、もともとの光の波長が長くなる(赤っぽくなる)割合として定義されます。

現在、測定に成功した最も遠い天体は、2006年にすばる望遠鏡で確認された赤方偏移6.96の銀河です。遠い天体ほどその光が届くまでに時間がかかるので、この銀河の場合、129億年昔の姿を見ていることとなります。これはビッグバンで宇宙が始まってからわず

か8億年後に相当します。

遠い銀河探しの世界競争では、ベストテンのうち九つがすばる望遠鏡による発見となっています。



ご意見、ご要望 こちらまで

ご意見、ご要望は、科学部へ

ファクス(03・3217・8169)か、電子メール(t-kagakubu@yomiuri.com)でお寄せ下さい。

2007年(平成19年)11月26日(月曜日)

夕刊 読書 賞 楽 楽

わかるかな?

すばる望遠鏡は、宇宙を観測するのに最も適した場所として、ハワイ島の高度4200mのマウナケア山頂に建設されました。高山にあるすばる望遠鏡で観測する天文学者や技術者の山頂の生活では、普段と違

うことが起こりますが、次の中で正しくないのはどれでしょう。

- ①長時間山頂にいると頭痛や眠気に襲われることがある
- ②湿度が極端に低いので肌が荒れる
- ③食事がおいしくて、つい食べすぎる

出題者は、天文台教授 家正則・国立



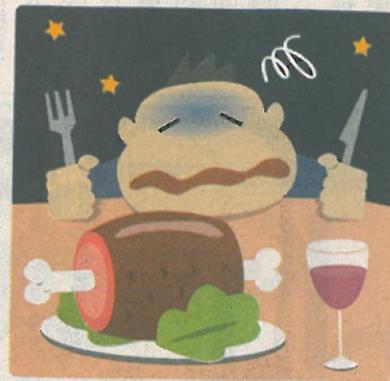
解答は左ページに

わかるかな?

解答 問題は右ページ

個人差がありますが、正しくないのは③でしょう。山頂は0.6気圧、夜間の平均気温は0度、湿度は頻繁に20%以下となります。このため観測者は高度2800mの中間宿泊所で体ならしに1泊してから山頂に向かう規則になっています。それでも、平地に比べると血中酸素濃度が低下するので、眠気や頭痛などの軽い高山病の症状におそわれることがあります。症状が出た場合は無理せずに中間宿泊所に下山します。乾燥しているため、喉、唇、目、鼻、肌の問題が生じることもあります。体には厳しい環境なものと、和食メニュー

がないので、食欲が落ちるのが普通です。でも、だからこそと、しっかり食べまくる猛者もいるんですよ。



ご意見、ご要望 こちらまで

ご意見、ご要望は、科学部へ

ファクス(03・3217・8169)か、電子メール(t-kagakubu@yomiuri.com)でお寄せ下さい。

家教授ら3人に仁科記念賞

仁科記念財団は13日、物理学で優れた業績を上げた研究者に贈る第54回仁科記念賞を、国立天文台の家正則教授(59)、東京大学の上田正仁教授(45)(冷却原子気体)と早野龍五教授(56)(原子物理)の3人に授与すると発表した。授賞式は12月5日に行われる。

家教授らに仁科記念賞

仁科記念財団(山崎敏光理事長)は13日、物理学で優れた業績をあげた研究者を対象にした今年度の「仁科記念賞」を、国立天文台の家正則教授(59)ら3人に贈ると発表した。家氏の授賞理由は「す

ばる望遠鏡による初期宇宙の探査」。ほかに上田正仁・東京大教授(45)が「引力相互作用する原子気体のボース・アインシュタイン凝縮の理論的研究」、早野龍五・東京大教授(56)が「反陽子ヘリウム原子の研究」の業績で選ばれた。授賞式は12月5日。

しんぶん 赤 旗

3氏に仁科記念賞

仁科記念財団は13日、今年度の仁科記念賞を家正則国立天文台教授(59)、上田正仁東京大大学院教授(45)、早野龍五東京大大学院教授(56)の三人に授与すると発表しました。授賞式は12月5日、都内で行われます。

家教授は、すばる望遠鏡(米ハワイ島)の観測装置を設計。約百二十九億光年という観測史上最も遠い銀河を

発見しました。

上田教授は、極低温の世界で物質が固まり、まるで一つの粒子のように振る舞う「ボース・アインシュタイン凝縮」を理論的に考察。この状態が引力により崩壊する過程を明らかにしました。

早野教授は、通常のヘリウム原子核の周りを回る原子を反陽子に置き換えた「反陽子ヘリウム原子」を研究。構造などの解明に成功しました。

2008年(平成20年)11月14日 金曜日

☆20



上田氏



家氏



早野氏

仁科記念財団(東京都文京区、山崎敏光理事長)は13日、原子物理学やその応用に関し、優れた研究業績を挙げた研究

# 仁科記念賞 家・上田・早野氏が受賞

者に贈る「仁科記念賞」の08年度受賞者を、家正

則国立天文台光赤外研究部教授(59)、上田正仁(東京大学大学院理学系研究科教授(45)、早野龍五(東京大学大学院理学系研究科教授(56))に授与すると発表した。授賞式は12月5日18時から東京・丸の内東京会館で行い、3氏に副賞50万円がそれぞれ贈られる。

家教授の受賞業績は「すばる望遠鏡による初期宇宙の探査」。家教授率いるすばる望遠鏡の研究グループは、現在知られる最も速い銀河10個のうち9個を発見(これで約129億光年前の銀河の姿が明らかになった。「引力相互作用する原子気体のボース・アインシュタイン凝縮の理論的研究」の業績に贈られる上田教授は、量子力学特有の現象ボース・アインシュタイン凝縮を理論的に考察。その理論が今年実験的に検証された。

早野教授主導の研究グループは反陽子と電子の質量比を9ケタの高精度で決める手法を確立。基礎物理定数表を書き換えたりウム原子の研究」。

## 日本経済新聞

2008年(平成20年)11月14日(金曜日)

★13版

社会 38

仁科記念賞に家氏のe氏  
仁科記念財団は13日、物理学で優れた業績を上げた研究者に贈る「08年度の仁科記念賞を、国立天文台の家正則教授(59)、東京大学の上田正仁教授(45)、東京大学の早野龍五教授(56)の3氏に授与すると発表した。授賞式は12月5日に東京・千代山の東京会館で開く。家教授は米ハワイ州のすばる望遠鏡を使い、地球から約百二十九億光年離れた宇宙で銀河を発見した功績が評価された。



第3種郵便物認可

米ハワイ島のマウナケア山頂に建設された国立天文台のすばる望遠鏡が、初観測フライトから十年を迎える。地球から最も遠い銀河や、太陽系以外にある惑星などを探査し、世界の研究をリードする成果を挙げている。宇宙の起源を究める目的秘蔵を覗いた。

# すばる望遠鏡

## 観測10年



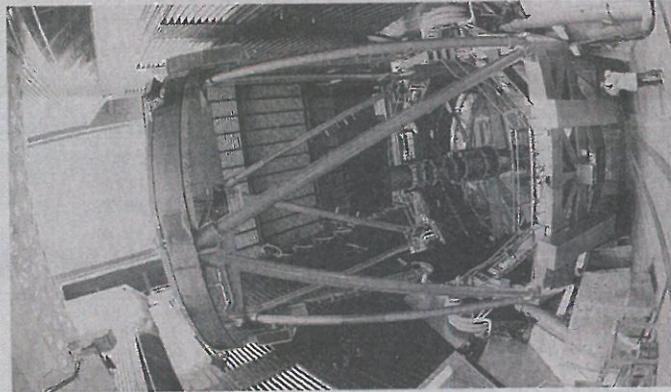
★すばる望遠鏡の歩み  
1999年4月 国会が建設予算を承認  
92.6 ハワイ島のマウナケア山頂で工事開始  
95.4 大坂市の工場で仮組み立てし、望遠鏡を公開  
96.10 マウナケア山で望遠鏡の組み立て開始  
97.4 ハワイ島のヒロ市に国立天文台ハワイ観測所を設置  
98.11 米国の工場で作った望遠鏡がマウナケア山頂に到着。表面をアルミヒールで磨き上げ  
99.1 初観測(フアーストライト)に成功と発表  
2000.12 研究者による共同利用を開始  
04.10 一般の観望者受け入れを開始  
05.7 非常に巨大な鏡を持つ、太陽系以外の惑星を発見と発表  
06.9 地球から最も遠い銀河を発見と発表  
09.1 初観測成功から10年

人類が見た最も遠い銀河は、すばるが10年かかたの約128億光年かたの銀河の光が、約10億年後の宇宙の輝きだ。この輝きは、約10億年後の宇宙の輝きだ。この輝きは、約10億年後の宇宙の輝きだ。

# 宇宙の起源を探る目

でも、数個が見えるほどは説明する。このカメラは、直径8.2メートルの主鏡と、それを取り囲む副鏡で構成される。主鏡は、直径8.2メートルの円盤状の鏡で、その中心には直径1.8メートルの副鏡がある。このように、主鏡と副鏡の組み合わせで、口径を8.2メートルに拡大している。この望遠鏡は、地球から最も遠い銀河や、太陽系以外にある惑星などを探査し、世界の研究をリードする成果を挙げている。

# 最遠銀河 128億光年先



観測用のシヤッターが開き、観測が開始された。すばる望遠鏡の本拠地は、ハワイ州マウナケア山頂にある。

約128億光年かたの銀河の光が、約10億年後の宇宙の輝きだ。この輝きは、約10億年後の宇宙の輝きだ。この輝きは、約10億年後の宇宙の輝きだ。



山道を四輪駆動車で延々と登る。ワイパオを最上まで登ると、眼前には、雪に覆われた山頂が広がる。そこには、国立天文台のすばる望遠鏡が並ぶ。天文台のすばる望遠鏡は、地球から最も遠い銀河や、太陽系以外にある惑星などを探査し、世界の研究をリードする成果を挙げている。

その一角にあった。四十歳を超える観望者は、人懐っこい。観望作業は、ほとんどが、雪に覆われた山頂で行われる。観望作業は、人懐っこい。観望作業は、人懐っこい。

# 雲海望む山頂の天文台

スリッパを履きながら、雪を踏みしめる。観望作業は、人懐っこい。観望作業は、人懐っこい。

ヘルメットと防護着を身に付け、建物に入る。内部は、観望作業が行われる。観望作業は、人懐っこい。観望作業は、人懐っこい。

観望用のシヤッターを開けてもらう。雪が降り、観望作業は、人懐っこい。観望作業は、人懐っこい。

雪に覆われた山頂。観望作業は、人懐っこい。観望作業は、人懐っこい。

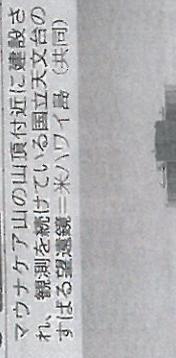
# 酸素マスクを着け研究

肉體はロケットに耐える。観望作業は、人懐っこい。観望作業は、人懐っこい。

観望用のシヤッターを開けてもらう。雪が降り、観望作業は、人懐っこい。観望作業は、人懐っこい。

観望作業は、人懐っこい。観望作業は、人懐っこい。

観望作業は、人懐っこい。観望作業は、人懐っこい。



マウナケア山の山頂付近に建設された、観測を続けている国立天文台のすばる望遠鏡。米ハワイ島(共同)

すばる望遠鏡 日本の国立天文台が1991年から約400億円をかけて米ハワイ島マウナケア山頂付近に建設した望遠鏡。世界最大級の直径8.2メートルの主鏡を持つ。鏡面の中心には、直径1.8メートルの副鏡がある。このように、主鏡と副鏡の組み合わせで、口径を8.2メートルに拡大している。この望遠鏡は、地球から最も遠い銀河や、太陽系以外にある惑星などを探査し、世界の研究をリードする成果を挙げている。

すばる望遠鏡は、地球から最も遠い銀河や、太陽系以外にある惑星などを探査し、世界の研究をリードする成果を挙げている。観望作業は、人懐っこい。観望作業は、人懐っこい。

すばる望遠鏡は、地球から最も遠い銀河や、太陽系以外にある惑星などを探査し、世界の研究をリードする成果を挙げている。観望作業は、人懐っこい。観望作業は、人懐っこい。

47NEWSの新年ページ

全国の地方新聞社と共同通信でつくるサイト「47NEWS」では、すばる望遠鏡の動画をhttp://www.47news.jp/culture/special2009/sub

47NEWSの新年ページ







レーザー光を照射する「すばる望遠鏡」  
左側＝(2009年6月、市川町)初、国立天文台ハワイ観測所研究員撮影



観山 正見 (うへだ まさひと)  
国立天文台台長

すばる望遠鏡のおかげで、日本の研究者は、遠く古い宇宙、宇宙を加速膨張させるダークエネルギー、太陽系外惑星といった現代天文学の主流となるテーマに取り掛かるようになった。

# すばる望遠鏡10年

ハワイマウナケア山頂(標高4205m)に建設された国立天文台の「すばる望遠鏡」が、星の光を初めてとらえた。1999年の「アースライズ」から10年がすぎた。宇宙の謎に迫るいくつかの発見を成し遂げ、観測装置の高度化を進めるスーパー・テレスコープは、次の10年で、何を探そうとしているのか。  
(滝田恭子)

すばる望遠鏡は口径8.2mの一枚鏡を持つ反射式光学望遠鏡だ。恒星や銀河など可視光領域の天体と、より波長が長く、肉眼で見えない赤外線を放つ天体を観測する。宇宙から飛来する中性子線やガンマ線(ガンマ線バースト)の正体が、あまのこ超新星爆発など明らかになり、惑星の正体なるガクとちのり田舎の構造を明らかにしたりと、多くの成果を収めてきた。最も広く知られた業績は、3年前に発表した真冬の銀河「IOX-1」の発見。128億8000万年続いたこの銀河は、宇宙誕生約137億年前の約8億年後という太古の姿を見せている。すばる望遠鏡は、ほかにも128億年以上続いた銀河を数多く発見、観測された遠方銀河の上位10傑を捉えて

# 遠方宇宙研究 世界をリード

いる。12億年前の宇宙は、水素分子の雲などに覆われた「暗黒時代」が終る直前だったと考えられており、暗黒時代の秘密を解く手がかりを得られた」と話す。遠方銀河探索でトップを走るのはなぜか。最大の買値をとしているが、満月1個分の広さを二重に撮影できる主要点カマフラ。反射鏡の上約10分に据えた巨大デジタルカメラで、ハッブル宇宙望遠鏡より100倍かかる範囲を一夜で撮ることができる。ほかの8つの望遠鏡には、これほど高い位置に大きな装置を取り付ける構造がない。IOX-1の発見は、4方1533個の天体を写した1枚の画像から始まった。候補を絞り、特殊な装置を使って距離を調べた結果、この画像にあった128億年以上の銀河はIOX-1のほかは一つだけ。視野の狭い望遠鏡だと発見は困難だった。観測機器も更新中。2006年に予定で天体の光がぼやけるのを補正する装置のセンサーを倍やし、解像度を10倍にした。レーザー光を大気中に照射し、光のゆらぎの補正を助ける装置も来夏稼働する。反射鏡の性能を最大限に引き出し、視野をさらに10倍に広げる新たな主要点カマフラも、12年に設置される予定。系正前・国立天文台教授は「遠方宇宙の研究で世界をリードしたい」と意気込み、129億



すばる望遠鏡の新装置  
視野10倍の主集点カメラ(2012年設置予定)  
解像度を10倍にする補正装置や、太陽系外惑星の検出装置を認る  
レーザー光を照射  
一枚鏡  
(タケコロー・ポロ・ロシオン・キャバ・提供の画像をもとに作成)

光年の銀河の発見に挑む。本誌系外惑星の研究に向けて導入された新装置は、恒星の光を遮り、周囲の惑星を映し出す機能を持つ。太陽系外惑星は約350個が確認されたが、惑星の重力による中心星のふらつきで確認された例がほとんど。直接撮影した例は少ない。今後5年間に惑星のありさまを5000の恒星を調べようとする。田村元秀・国立天文台教授は「5個も数十個の惑星を撮影できるのでは」と期待する。

来月、記念シンポジウム  
「すばる望遠鏡10周年記念シンポジウム」が、10月5日、東京都千代田区の一橋記念講堂で開催される。渡部潤一・国立天文台准教授らの基調講演に続き、パネリスト討論を行う。パネリストは立花隆氏ら。無料。往復はがきにて住所、参加者名、年齢、電話番号を明記し、〒104-8325 読売新聞東京本社事業開発部「すばる」係(03-5159-5886)へ。9月11日必着。

# 広視野観測に重点

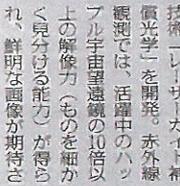
対象とする波長域が異なる電波望遠鏡やX線望遠鏡の研究にも刺激を与えた。いろいろな波長の予たちがそろって観測する天体を選定のに役立つからだ。望遠鏡は建設したら終わりではなく、研究目的に合わせて設置の観測装置を開発する。開発には大学生や院生も参加してお

り人材育成にも貢献している。8、10枚望遠鏡は、世界に10台以上ある。国際分野の流れの中、すばる望遠鏡は広視野が求められる観測に重点を置くこととなるだろう。マウナケア山頂に30枚望遠鏡を国際協力で建設する構想がある。参加の可能性を検討しつつ、すばる望遠鏡と連携させてい

# サイエンス 学び



# 科学



れ、鮮明な画像が期待さ  
界を開きます。

**●日本も参加**  
口径30分の望遠鏡(TMT)は、直径14.4メートルの六角鏡49枚をハチの単状に敷きつめて実現します。望遠鏡を収容するドームは半球状で高さ56分、円形の開口部をもつ屋根が回転して、狙った向きを観測します。

## 30メートル次世代望遠鏡計画

(中村 秀生)

次世代の超大型望遠鏡をハワイに建設する計画が、国際協力で進んでいます。口径は30分。すばる望遠鏡(8.2分)など、現在の大型望遠鏡をはるかにしのぐ性能です。米国・カナダの大学が中心になり、日本の国立天文台は協力機関として参加しています。



家さんたちの観測チームが、すばる望遠鏡を使って発見した、最遠方の銀河「10K-1」。2006年9月の発表以来3年以上、最遠方の世界記録を保持しています。(国立天文台提供)

# 宇宙の夜明け

## 見える?!



TMTの完成予想図 (© TMT Observatory Corporation)

地球以外にも生命は存在するの。大きなテーマにも挑戦します。1995年以来、太陽系外惑星は400個以上見つかりました。しかし、その多くは木星より大きいガス惑星です。

### ●第2の地球

約137億年前に起きたビッグバン(宇宙誕生)のときの膨張の時代から、宇宙は急速に膨張して冷えてゆき、自ら光を放つ天体がない暗黒時代になりました。3億歳ごろの宇宙で最初の星が輝き始め、星々の光で宇宙はやがて、夜明けを迎えます。最近、遠方の天体の観測が進み、この時代の宇宙の姿が明らかになりつつあります。家さんは、すばるを使って、観測史上最も遠い

銀河を発見しました。地球から約129億光年の距離にあります。いまから129億年前、宇宙がまだ膨張以前の時代に銀河が放った光です。ほかにも、宇宙初期に起きた超新星爆発(重い星が一生を終える爆発)による「ガンマ線バースト」と呼ばれる現象などが観測されています。TMTは、こうした天体の正体を調べます。家さんは「銀河が生まれて育っていく時代を直接観測し、宇宙の歴史をひも解きたい」といいます。

### ●連携進めて

TMTの建設予定地はすばると同じハワイ島のマウナケア山頂。すばるで新しい天体を探して、TMTで詳しく調べる戦略です。

一方、「ハッブル」の次世代の宇宙望遠鏡計画も進行中です。米航空宇宙局(NASA)が2013年打ち上げをめざす「ジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡(JWST)」は、ハッブルの3倍近い口径6.5分。地上では観測困難な中間赤外線などの観測が得意です。TMTと互いに助けあって観測を進めます。

TMTの建設開始は11年の予定。早ければ18年に観測を開始します。米国・カナダのほか、中国も参加を検討中です。日本は独自の超大型望遠鏡構想をもっていますが、国際協力での実現に方針転換。予算を獲得して、TMT計画に正式参加することをめざしています。

探査の小惑星に人工クレーターは、はやぶさ後継機計画「探査機「はやぶさ2」の後継機(はやぶさ2)は、小惑星に人工クレーターをつくって内部の物質を調べています。宇宙航空研究開発機構のプロジェクト準備チームが7日、シンポジウムで構想を発表しました。2014年の打ち上げをめざして、計画の検討を進めています。

はやぶさ2のターゲットは、1号機が探査したイトカワとは違うタイプの小惑星(1999 JU3)。直径約1キロで、有機物や水を含んだ鉱物が多く、生命の謎を調べるうえで重要な手がかりが期待されています。18年に到着し、1年以上かけて探査する計画です。

基本構造は1号機とほぼ同じ。小惑星表面を調べるだけでなく、衝突体を秒速2〜3キロでぶつけます。直径数分のクレーターができてきたら、内部の物質も採取できます。

1号機は、2005年に小惑星イトカワへの降着に成功し、今年6月の地球帰還をめざしています。現在、地球から約6000万キロの位置を飛行中で、そのままだ飛行すれば数日以内に地球の引力圏に到達できる軌道に入る見込みです。

# 平成22年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰

文部科学省は15日、科学技術週間に伴う行事の一環として東京都新宿区の京王プラザホテルで平成22年度科学技術分野の文部科学大臣表彰の授賞式を行った。科学技術分野で顕著な功績をあげた人に授与する科学技術賞には、開発部門32件、研究部

門43件、科学技術振興部門3件、技術部門18件、理解増進部門17件。高度な研究開発能力を有する若手研究者(40歳未満)を顕彰する若手科学者賞には85人が選ばれた。ここでは、科学技術賞の研究部門、若手科学者賞を紹介する。

## 科学技術賞「研究部門」43件

- ◇弾塑性力学に基づく地盤の静的・動的応答解明の体系的研究(同研究員)
- ◇蛋白質の糖脂質修飾に働く遺子群の解明とその医学応用研究(木下タロウ・阪大免疫学フロンティア研究センター副拠点長・教授、前田裕輔・阪大微生物病研究所准教授)
- ◇超臨界水反応による新材料創製の研究(阿尻雅文・東北大原子分子材料科学高等研究機構教授)
- ◇フェライト系耐熱鋼の高温長時間強化および高性能化の研究(阿部軍士雄・物材機構特命研究員、田淵正明・同機構材料信賴性センター高温材料グループリーダー、種池正樹・三菱重工高砂研究所主任、岡田浩一・住友金属工業総合技術研究所主任研究員、塚本進・同機構NIMS特別研究員)
- ◇望遠鏡の視力を高めるレーザーガイド星補償光学系の研究(家正剛・国立天文台赤外線研究部教授、高見英樹・同ハワイ観測所教授、早野裕・同助教)
- ◇体温域の赤外放射温度標準の

- 星野聰・同主任研究員、植村豊(同研究員)
- ◇蛋白質の糖脂質修飾に働く遺子群の解明とその医学応用研究(木下タロウ・阪大免疫学フロンティア研究センター副拠点長・教授、前田裕輔・阪大微生物病研究所准教授)
- ◇ラジカル制御プラズマプロセスの先駆的研究(後藤俊夫・名大名誉教授、堀勝・名大大学院工学研究科教授)
- ◇極限性能超短パルスレーザーと超高速分光法の研究(小林孝嘉・電通大情報理工学部先進理工学科特任教授)
- ◇フタロシアニン系色素の吸収波長調節に関する研究(小林長夫・東北大大学院理学研究科教授)
- ◇メタボロミクスを基盤とした植物ゲノム機能科学の研究(齊藤和季・千葉大大学院薬学研究院教授)
- ◇高密度ヘリコン波プラズマの

- ◇インジウムを含む窒化物半導体薄膜の光物性の研究(秩父重英・東北大多元物質科学研究所教授)
- ◇酵素反応の動的分子機構の構造的研究(富田耕造・産総研バイオメディカル研究部門研究グループ長)
- ◇排熱回収型高昇温吸収ヒートポンプの研究(中尾一成・三菱電機先端技術総合研究所首席研究員、池内正毅・元三菱電機冷熱プラント取締役、弓倉恒雄・三菱電機冷熱プラント大阪支社技術部長)
- ◇人工光合成システムの研究(福住俊一・阪大大学院工学研究科教授)
- ◇オレフィン重合新触媒及び有機触媒プラント大阪支社技術部長)
- ◇人光合成システムの研究(福住俊一・阪大大学院工学研究科教授)
- ◇オレフィン重合新触媒及び有機触媒プラント大阪支社技術部長)
- ◇GPCRロドプシンの結晶構造解析を基盤とした機能研究(宮野雅司・理研放射光科学総合研究センター宮野構造成生物物理研究室主任研究員、岡田哲二・学術院大理学部生命科学研究科教授)
- ◇大規模集積化対応IV族半導体CVD原子制御プロセスの研究(室田淳一・東北大電気通信研究所教授)
- ◇異物排出タンパク構造・機能制御と生理的役割に関する研究(山口明人・阪大産業科学研究所所長・教授)
- ◇ナチュラルヒジヨンの研究(山口雅浩・東工大情報工学研究所准教授、羽石秀昭・千葉大フロンティアメカニクス工学研究開発センター教授、村上百合・東工大情報工学研究所特別研究員、大山永昭・同助教)
- ◇化学遺伝学による遺伝子発現制御機構の研究(吉田裕・理研基幹研究所吉田化学遺伝学研究室主任研究員)
- ◇動物クローン技術の実用化に向けた研究(若山照彦・理研発生・再生科学総合研究センターゲノム・リプログラミング研究チームリーダー)
- ◇先端技術を駆使した統合的疲労科学・疲労克服研究(渡邊恭良・理研分子イメージング科学研究センターセンター長)
- ◇先導技術を使用した統合的疲労科学・疲労克服研究(渡邊恭良・理研分子イメージング科学研究センターセンター長)
- ◇暗号通信の研究(田嶋尚也)
- ◇所加藤分子物性「分子性ゼロギャ」の発見と電気伝導
- ◇唯美津木(2)
- ◇田中秀明(2)
- ◇田中秀明(2)
- ◇田中秀明(2)
- ◇谷元洋(38)

## 若手科学者賞85氏

- ◇相原聡(37) NHK放送技術研究所土木技術グループ地盤チーム主任「震動を受ける不飽和砂質土の動力挙動に関する研究」
- ◇大杉美穂(39) 東大医科学研
- ◇川崎晋臣(33) 東京理科大学研究機構講師「炭素同位体による不斉誘起現象の発見と高感度不斉認識の研究」
- ◇佐藤達彦(36) 原子力機構原子力基礎工学研究部門研究副主幹「高エネルギー放射線被ばく影響評価に関する統合的研究」
- ◇澤井拓紀(36) 産総研活断層・地震研究センター主任研究員「沿岸域の堆積物を用いた巨大地震の履歴解明に関する研究」
- ◇山東信介(36) 九大縮感フ
- ◇竹内純(39) 物学研究所附属センター心臓器再生・准教授「心臓再生研究」
- ◇竹内(36) 東京薬科大生命科学研究科助教「神経基盤の学基礎研究所主任波長帯における音暗号通信の研究」
- ◇田嶋尚也(36) 所加藤分子物性「分子性ゼロギャ」の発見と電気伝導
- ◇唯美津木(2)
- ◇田中秀明(2)
- ◇田中秀明(2)
- ◇谷元洋(38)

# TOKYOホームページ



国立天文台教授

家 正則さん 60

大阪府吹田市

生まれは札幌市ですが、父の転勤や海外留学で引越しを繰り返して、住んでいる家は22軒目。そんな私には、中学・高校時代の思春期を過ごした大阪府吹田市が、「研究」に目を向けさせてくれたふるさとです。

## 「未知に迫る」土台培う



いまではそんな暮らしを懐かしく思い出します。中学時代の恩師が教えてくれたのは、理論を積み重ね、研究すれば未知の世界に迫ることができる数学の

おもしろさ。大学では、理論だけでなく観測という実際の行動も必要な天文学にひかれて、その道を歩むことになりましたが、天文学に携わる上

での土台は、大阪で培ったと思っています。

天文学では、最先端の研究に必要な膨大な投資を一つの国だけで負担する事は、もはや不可能。そんな現実を前に、また見ぬ宇宙人に思いをはせていると、地球人同士で傷つけ合った現状が残念でなりません。

吹田市にはたまにしか帰れません。今でも心のよりどころとなってくれる同級生や恩師と酌み交わす一杯は、私にとってやっぱり格別なものです。  
(聞き手・松田晋一郎)

年齢とともにメール (tomino@yo.miurl.com) とお寄せ下さい。掲載分には薄謝をお送りします。

# 巨大化する望遠鏡

## 宇宙の始まりに迫る

望遠鏡が発明された世紀初め、イタリヤの科学者ガリレイは、口径数センチの自作望遠鏡で木星の衛星を発見した。それから400年、望遠鏡は巨大化の道をまっしぐらに進んでいる。はるかかなたの宇宙の始まりの証拠を探すために、

**A** 光学赤外線望遠鏡は、ガリレイの望遠鏡と同様可視光を中心とする波長域を観測する。その一つ、国立天文台のすばる望遠鏡(主鏡の直径8.2メートルは130億光年離れた銀河の発見を様々な成果をもたらした。

が、完成から11年過ぎた。日本とフランスがハワイに建設する「J-PLUS」は、主鏡直径が30メートルもある。欧州は、直径45メートルの次世代望遠鏡(E-ELT)を計画している。最大の狙いは、宇宙の始まりの銀河の観測だ。130億光年以上離れた銀河の光は、130億年以上前の光であり、約137億年前と推定される宇宙誕生の時期に近い。宇宙創成の秘密に迫る手がかりを得られるかもしれない。

**B** ハッブル宇宙望遠鏡は、大気の影響を受けない宇宙に打ち上げて観測

地球から、光の速で130億年かかる距離(130億光年)にある星を観測したら、目に見えるのは130億年前の星の姿! (宇宙誕生の約7億年後)

**ハッブル望遠鏡 (主鏡径2.4m)**  
1990年打ち上げ

- 大気の影響を受けず、高解像度
- 地上から600km上空の軌道に設置
- 何度も修理しながら運用

**成果**  
暗黒物質の観測(暗い星の部分)など



(NASA/ESA)

**ジェームズ・ウェッブ (主鏡径6.5m)**  
欧州、米国が運用(2014年打ち上げ目標)

- 地上から150万km遠方に設置



(NASA/ESA)

**すばる望遠鏡(ハワイ) 8m級**  
ハッブルの200倍の視野・高解像度

- 成果
- 約129億年前の銀河の発見など



(HSC/SMASH)

**A 光学赤外線望遠鏡**... 星から出る光を観測

**TMT(ハワイ) 30m級**  
米国、カナダ、日本も参加を目標(2018年稼働目標)

**巨大マゼラン望遠鏡(チリ) 24m級**  
米国、欧州(18年稼働目標)

**E-ELT(チリ) 42m級**  
欧州(18年稼働目標)

**フラックホルンなどの詳細観測**



(TMT/Frontier/Center for High Resolution)

**C 電波望遠鏡**... 光を出さない天体もキャッチ



(ALMA/ESO)

**アルマ望遠鏡(チリ)**  
早ければ今年にも最初の画像を公表

- 66基のアンテナを使い直径18.5kmの望遠鏡相当の「視力」を実現
- 1塊力100トンの重さを吊る約10倍

**期待される成果**  
生命の起源を解明

**SKA(建設地未定)**  
欧州、米国、中国、インドなどが参加

- アンテナ台数は2000~3000台
- 総長はアルマの100倍

**期待される成果**  
星が誕生する前の宇宙暗黒時代をとらえる



楽しみになる

# 宇宙誕生の秘密を探る

で、晴れた天体画像を撮り続けてきた。その後継として、エームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡は、主鏡直径がハッブルの2.7倍、地球から150万キロメートル離れた公転軌道を回り、大隅の地球の光に邪魔されずに、極めて深宇宙を精密に観測する。

**C** 電波望遠鏡は、光を出さないガス雲のまわりの天体も観測できる。今年10月、南米チリ北部の標高3000メートルの高原に日本などが建設した大型電波望遠鏡「アルマ」が観測を開始した。2年後にはさらに並ぶ66

台、直径18.5メートルの超巨大アンテナに相当する性能を得られる。立松謙二国立天文台アルマ推進室長は「生命のルーツが分かるかも知れない」と言う。惑星の材料となる極温のガスを分析し、惑星がどうやって、生命の材料になる物質があるかを調べる。

巨大電波望遠鏡SKAの構想も動き出している。米欧や中国、インドなどが協力。2600~3000台のアンテナを使って130億光年以前離れた宇宙を探り、星が誕生する前の「宇宙暗黒時代」の謎をとら

えるのが目的だ。巨大望遠鏡の実現には、科学技術の進歩と国際協力が欠かせない。建設費が1000億円を超えるJ-PLUSも、大型望遠鏡の観測で培った技術を持つ国が集まり、計画を練ることで初めて可能になる。

国立天文台の室正則教授は期待を寄せる。「次世代望遠鏡がそろって観測し始める10年後には、生まれつけない宇宙に謎がますますある『宇宙の夜明け』を観測できるかもしれない」

(本間雅江)

## 最も遠い銀河

地球から約131億光年離れた銀河を発見したと、欧州の研究チームが発表した。日本の「すばる望遠鏡」(米ハワイ島)が見つけた約129億光年離れた銀河より遠く、観測史上、最も遠い銀河になる。遠いほど時期

も古く、宇宙誕生から6億年以内にはできた銀河だという。21日付の英科学誌「ネイチャー」に掲載された。ハッブル宇宙望遠鏡の観測で昨年見つかった銀河を、南米チリの超大型望遠鏡(VLT)で詳しく観測した結果、距

### 131億光年先

離が分かった。

愛媛大の谷口義明教授は「宇宙で最初の銀河誕生の瞬間に手が届きつつある。画期的な成果だ」と話している。一方、国立天文台の家正剛教授は「今回の銀河は、光の特徴が従来の銀河とかなり異なる。再確認も必要だ」と指摘している。

### 欧州の研究チーム発見

「『観測史上最も古い銀河発見 誕生はビッグバンの6億年後』というニュースがありました。いったいどうやって、遠くにある銀河の年齢が分かるのでしょうか？」  
—神奈川県伊勢原市、会社員、男性(55)

## 銀河の年齢 どう調べるの？

### ■遠方銀河のギネス記録

現在、宇宙は約137億年前に「ビッグバン」という大爆発から始まったと考えられている。このビッグバンから約6億年後に誕生した銀河を発見したと、欧州の天文学者らが10月21日付の英科学誌「ネイチャー」で発表した。約131億年前に銀河が発した光を望遠鏡でとらえたことになる。なぜ、この光が131億年前のものだと分かるのだろうか。

「遠くの天体から出た光は、宇宙が膨張しているため波長が間延びします。光がどのくらい伸びたかという『赤方偏

ASA(米航空宇宙局)が2003年に解析した結果、約137億年という宇宙の年齢を導き出した。ちなみに、ビッグバン直後の光の赤方偏移は無限大だ。

では、観測した光をどうやって遠くの銀河から来た光だと判断するのか。

生まれて間もない銀河では、大量の星が一斉に誕生する。質量の大きい高温の星は、周囲のガスを暖める。そして、暖められた水素のガスが冷えていくと必ず「ライマン・アルファ線」と呼ばれる特徴的な光を出す。観測した光の「指紋」を調べることで、ライマン・アルファ線

この光の赤方偏移が8.6であり、131億年前の光であることを突き止めたのだ。

### ■TMTで「一番星」を

遠方の銀河を見ることは、誕生初期の宇宙を見ることになる。今回の発見は、銀河がどのように生まれるかという宇宙の歴史解明につながる成果だ。

このように宇宙の神秘を探る天文学の研究だが、どのような日常なのか。

家教授らが米ハワイの「すばる望遠鏡」を使って129億年前の銀河を見つけた際、最初に候補にあがった天体は4万1533個。候補を絞り込むだけで2年間かかり、確認までにさらに2年間かかった。

望遠鏡の使用も容易ではない。すばる望遠鏡の場合、研究者らは事前に目的などを審査され、競争率は3~7倍。やっと使うことができても観測ができるのは夜だけ。準備などを除くと一晩で可能な観測は約6時間。ある天体を15時間観測

## 社会部 オンデマンド

# わずかな光の波長とらえ計測

移」を調べることで、天体の年齢が分かるのです」

こう説明するのは国立天文台の家正則教授(61)だ。家教授らは2006年に約129億年前の銀河を発見し、遠方銀河のギネス記録を4年にわたって保持している。

赤方偏移とは、遠ざかっていく救急車のサイレンの音が低くなる「ドップラー効果」のように、遠ざかる天体から出た光の色の波長が長くなって赤っぽくなる現象だ。

光の波長が2倍になると赤方偏移の値は1で、約77億年前の光になるという。赤方偏移の値が大きくなるほど、遠くの天体から出た光となる。赤方偏移が5だと約125億年前に、10だと約132億年前に出た光になるそうだ。

宇宙最古の光であり、はるか昔に宇宙が熱かったというビッグバンの証拠とされる「宇宙マイクロ波背景放射」の赤方偏移は1000。ビッグバンから約38万年後の光で、N

かどうか判断できるという。天文学者たちは銀河の放つライマン・アルファ線を探しているのだ。

今回、研究成果を発表したパリ天文台のマット・レーネルト氏らは「ハッブル宇宙望遠鏡」がとらえた「UDFy-38135539」という銀河を詳細に調べた。

レーネルト氏はヨーロッパ南天天文台が南米チリに設置した大型望遠鏡「VLT」を使って、約15時間にわたって銀河を観測。かすかなライマン・アルファ線をとらえることに成功した。さらに、

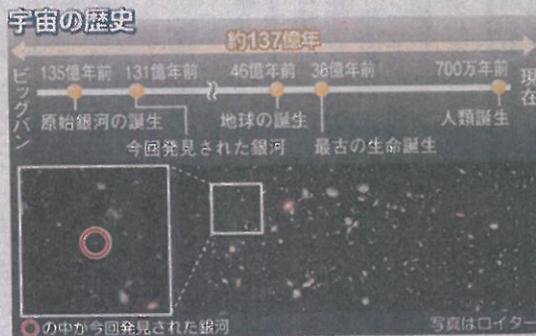
するには最低3晩はかかるが、雨天や風の強い日は観測できない。

「ギネス記録になるか、論文にもならないか、リスクな研究です」と家教授は苦笑する。

これ以上、遠方の天体の観測はできるのか。現在の観測技術では「もうギリギリで難しい」と家教授。

そこで期待されるのが、日本とカナダと米国などがハワイに建設を計画している口径30mの超巨大望遠鏡「TMT」だ。すばる望遠鏡の14~200倍の感度で33等星まで観測可能といい、月面にいるホテルの光も見える性能だという。

「宇宙で最初に誕生した「一番星」や、太陽系外の地球型惑星を見つけることができるかもしれません。また、宇宙の膨張を加速させる未知のダークエネルギーの解明も期待できます」と家教授は話している。(大矢博之)



### 「社会部オンデマンド」の窓口

MSN相談箱 (<http://questionbox.jp.msn.com/>)内の「産経新聞[社会部オンデマンド]」

社会部Eメール [news@sankei.co.jp](mailto:news@sankei.co.jp)

社会部FAX 03-3275-8750

## 第十二章 主要新聞記事別刷

# 最も遠い 銀河発見

## 128億8千万光年

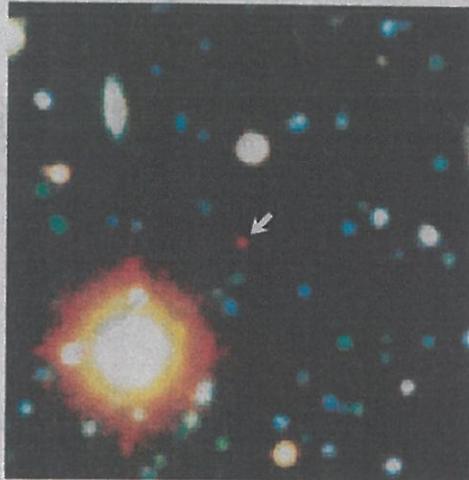
すばる望遠鏡

地球からの距離が約128億8千万光年と、これまでで最も遠く離れた銀河を、国立天文台や東京大などの研究チームが発見した。ハワイにあるすばる望遠鏡で観測した。約137億年前のビッグバンで誕生して間もない宇宙の様子をとらえ

たことになり、宇宙の進化の研究に役立つという。14日発行の英科学誌「ネイチャー」に発表する。従来、最も遠いとされていたのは、すばる望遠

鏡が05年にとらえた銀河で、距離は約128億2500万光年だった。今回、その記録を6千万光年ほど更新した。研究チームは誕生した

ばかりの恒星の周囲にあるガスが燃せられて出す光をたよりに観測。かみのけ座の一角で新しい銀河を発見したという。研究チームの**家正則**（国立天文台教授）は「銀河物理学」によると、これまでの研究結果からの予想では、周辺に銀河が6個ほどあると見込まれていたが、1個しか観測できなかった。6千万年ほどの間に、宇宙空間の様子が変わった可能性もあり、家教授は「この時代の宇宙がどんな状態だったのか、さらに観測を続けたい」として



発見された最も遠い銀河(矢印) 研究チーム提供

(第3種郵便物認可)

毎日新聞

2006年(平成18年)9月14日(木曜日)

14版

2

# 最も遠い銀河観測

すばる望遠鏡

国立天文台の家正則教授らは、米ハワイ島のす

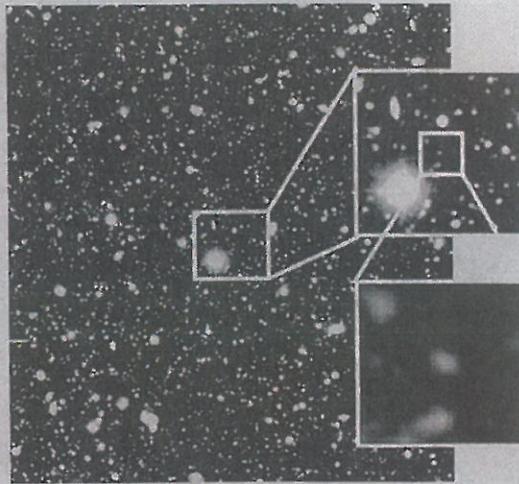
ばる望遠鏡で、観測史上最も遠い銀河を発見した。1面NEWSLINE

ら掲げてでも実行できない」と選挙対策の重要さを強調。幹事長ポストへの意欲をにじませていた。「中川幹事長」で調整が進むことから、外相再任との見方も党内には出ている。

院選の自民党公認候補見直しに言及したことについて一地元のみならずと新しい執行部が協議して決めるべきことだ。新総裁になってからですからねと述べた。安倍氏に対し、地元や参院執行部の意向に配慮するよう促し、たとえられる。【渡辺創】

【山田大輔】

# 128億8000万光年の彼方



すばる望遠鏡がとらえた観測史上地球から最も遠い銀河。右下の枠の中央(国立天文台提供)

## 最遠の銀河

地球から128億8000万光年(1光年は約10兆キロメートル)も離れた観測史上では最も遠い銀河を、国立天文台や東京大、京都大などの研究チームが「すばる望遠鏡」(ハワイ・マウナケア山頂)を使って発見した。14日発行の英科学誌「ネイチャー」に発表した。

これまでの最遠の銀河より約6000万光年遠く(137億年前)の宇宙誕生(ビッグバン)から7億8000万年後の初期宇宙に、確実に銀河ができていたことが確認された。

研究チームは、宇宙の奥深くで遠ざかっていく銀河を観測するのに適した特殊なフィルターを開発。すばる望遠鏡に取り付け「春のかみのけ座」の方向で銀河を探索した。その結果、最遠銀河の候補が2つ見つかり、そのうちの明るい方の光は128・8億光年かなたの銀河であることを確認した。もう一方の暗い天体についても、解析による確認を行っている。

研究チームの**家正則**・国立天文台教授によると、同じ方向では地球から128・2億光年前後の極めて遠い銀河が10個ほど見つかった。今回の銀河が見つかったあたりでは銀河の候補が少ないことから、128億8000万年前からの約6000万年前に宇宙の姿が大きく変わったことが示唆されるという。

(1)

B版

1952年5月30日第3種郵便物認可

# しんぶん 赤旗

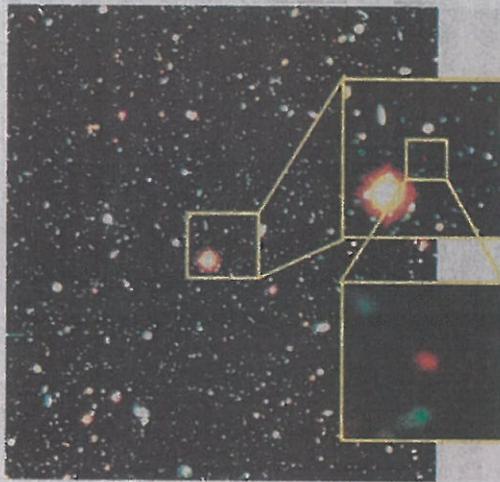
2006年 9月14日 木曜日

日刊第20051号

発行所 日本共産党中央委員会  
東京都渋谷区千駄ヶ谷4の26の7  
〒151-8586 電話 03(3403)6111

©日本共産党中央委員会2006年

## 129億光年 最遠の銀河



すばる望遠鏡が観測した、かみのけ座の方向の深探査領域の一部。今回見つかった最遠の銀河は右下の四角の中心にある赤い天体です（国立天文台提供）

### すばる望遠鏡で発見

国立天文台などの観測チームは十三日、すばる望遠鏡による観測で、これまでで最も遠方の銀河を見つけたと発表しました。地球から約百二十八億八千万光年の距離にあり、これまでに観測されている最遠の銀河より、さらに約六千万光年遠方にあります。

観測チームは、かみのけ座の

一角を「すばる深探査領域」と定め、遠方にある銀河に狙いを絞った観測を続けてきました。

今回、遠方の銀河が放つ光だけを選択的にとらえることのできる特殊なフィルターを開発して観測することで、この銀河を発見することに成功しました。

宇宙の始まり（約百三十六億六千万年前）から七億八千万年ほどたった初期宇宙の銀河から届いた光です。国立天文台の家正則（いへ・まさのり）教授は「これまで観測の届かなかった宇宙史の暗黒時代の解明に一歩踏み出せた」といいます。

今回の発見によって、すばる望遠鏡は、遠方銀河リストの上位七位までを独占しました。観測成果は、十四日付の科学誌『ネイチャー』に掲載されます。

2006年(平成18年) 11月22日 水曜日

29

13版

すばる望遠鏡「視力」10倍に

国立天文台は21日、米ハワイ島のすばる望遠鏡の「視力」を最大10倍に高める新システムを開発したと発表した。星々の光は、地上に届くまでに大気のゆらぎの影響を受けてゆがんで見える。同天文台は、レーザー光線で夜空に約10等級の人工星を光らせ、観測データを基にゆがみを補正し、鮮明な画像＝1面NEWSLINEに写真＝が得られるようになった。

人工星は、レーザー装置で上空

国立天文台が新システム

90m付近に発生させ、この星の光が大気で揺らぐ様子をセンサーで計測。望遠鏡本体の鏡が集めた光は観測装置に導かれるが、新システムでは、途中で反射鏡を組み入れた。この鏡は188個に分割され、計測データを基に表面を瞬時に微妙に変形させ、ゆがみを相殺する。

研究チームの家正則教授は「赤外線なら米ハッブル宇宙望遠鏡の3.4倍という高い解像度になる」と説明している。 【山田大輔】



MAINICHI



新 毎 日 新 聞

発行所：東京都千代田区一ツ橋1-1-1 〒100-8051 電話(03)3212-0321  
 郵便振替口座 00180-3-2800  
 毎日新聞東京本社 ©毎日新聞社 2006

トータルヘルスケアへ。



白十字

http://www.hakujuji.co.jp

NEWSLINE



補正で鮮明

すばる望遠鏡の「視力」が最大10倍に。オリオン大星雲の中心部の画像(左)＝国立天文台提供)も、99年(右＝同)より鮮明に。大気のゆらぎを補正する装置の成果だ。

29

産 経 新 聞

平成18年(2006年)11月22日 水曜日

29 社会 15版

## ▶すばる望遠鏡 新技術で最高画質実現

国立天文台は21日、ハワイのすばる望遠鏡の解像度を平成11年の観測当初の10倍に向上させたと発表した。大気の揺らぎに伴う光の乱れを高精度に補正し、世界最高水準の鮮明な画質を実現した。遠くの銀河や太陽系外惑星の観測で新発見が期待できそうだ。

口径8.2メートルのすばるは、100キロ先のピンポン球を識別する解像度を持つ。しかし、星の光が地球の大気を通る際に、かげろうのような屈折現象で光の波形が乱れ、理論上の10分の1の能力しか発揮できないのが課題だった。同天文台と理化学研究所は、高度90キロを浮遊するナトリウム原子にレーザーを照射し、星のように発光させる装置を望遠

鏡に設置。この光を指標に大気の揺らぎを連続的に検出し、乱れた光を特殊な鏡で補正する技術を開発した。

従来の補正方法では、観測可能な場所は全天の約1%だったが、新たな方法はほぼ全天で可能で、明るさも2倍以上。同天文台の家正則教授は「宇宙の最初のころに生まれた銀河の中心で何が起きているのか分かるだろう」と話している。

「視力」  
10倍に

27☆

2006年(平成18年)11月22日 水曜日

すばる望遠鏡  
「視力」10倍に

新装置が稼働

国立天文台ハワイ観測所が「188素子補償光学系」と「レーザーガイド星生成システム」をすばる望遠鏡に搭載し、試験観測とレーザービームの初照射を行ったと家正則国立天文台教授らのグループが21日発表した。従来に比べて約10倍の解像度で、より広い天域を観測でき、新たな研究成果が期待できるという。

天体から放射される光は望遠鏡に到達する前に、地球の大気のゆらぎにより星像が乱され、ぼやけてしまう。しかし188素子補償光学系を使い、星像の乱れをリアルタイム補正することで、解像度を約10倍に高めることに成功した。

また、これまで補償光学系を使った観測ができるのは、すぐそばに明るい星があるごく限られた天域だけだった。レーザーガイド星生成システムにより全天の半分以上の天域で補償光学を用いた観測が可能になる。

# より遠い銀河を探せ

## 128億8千万光年の先を競う研究者

誕生後まもない宇宙の姿を知るため、遠く離れた銀河の観測を研究者が競っている。現在の最も速い「記録」は地球からの距離約128億8千万光年に、日本の国立天文台が見つけた銀河だ。米チームも、より遠い可能性のある銀河をとりえ、後を追う。さらに遠くを狙う計画も準備が進んでいる。

(福島慎吾)

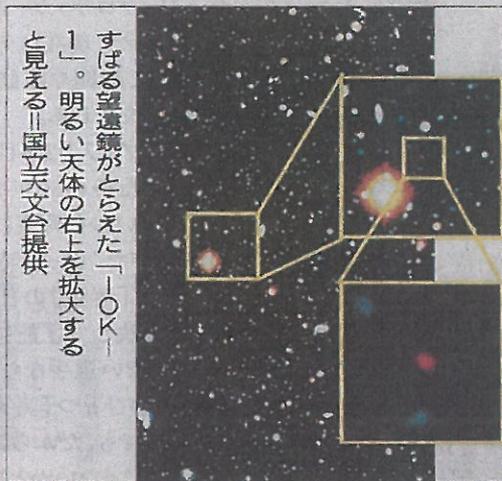
## 日本のすばる望遠鏡リード

地球から100億光年離れた天体が発した光は、100億年かけて地球に届く。「遠い宇宙からの光を見ることは、遠い過去を直接見ることに」なる。国立天文台の家庭教師は話す。

宇宙の誕生は約137億年前。その数億年後に最初の銀河が生まれたとされ、そこまで観測でき

か、ほることが可能だ。世界中の研究者が観測を競うなか、家さんらの観測チームがハワイのすばる望遠鏡で見つけ、9月に「地球から約128億8千万光年のかたにある」と発表した銀河が「IOK-1」だ。

かみのけ座の一角にある「すばるディープフィールド」と呼ばれる領域



すばる望遠鏡がとらえた「IOK-1」。明るい天体の右上を拡大すると見える国立天文台提供

に位置する。地球から眺めると満月ほどの大きさで、すばる望遠鏡が重点的に観測する領域だ。遠い銀河からのかすかな光を見るには、ほかの星の光がじゃまになる。星が密集する天の川の方向を避け、明るい星が特に少ない空が選ばれた。

観測チームは、この領域で30分かけて1枚の写真を撮影。それを30枚重ね合わせて、かすかな光

## 米は宇宙望遠鏡打ち上げ計画も

今のところ、遠い銀河の記録の上位20位のほとんどを、すばる望遠鏡が占める。「すばる望遠鏡は一度に見る範囲が広く、銀河探しには有利」と家さんは言う。

だが、欧米勢も負けじと、ハワイのケック望遠

鏡、南米チリにある欧州南天天文台の大型望遠鏡VLTなどで、遠い銀河を探している。

米国のカーネギー研究所やカリフォルニア大学サンタクルーズ校などのチームは、地球を回るハッブル宇宙望遠鏡やスピッ



この発見は、過去の宇宙の姿に新たな謎を提示した。6個程度の銀河が見つかると思われていたのに、1個しかなかったのだ。当時の宇宙にあったガスが光を隠しているのか、それとも観測できるほど銀河が十分に成長していなかったのか。宇宙進化の理論が修正される可能性もあるという。

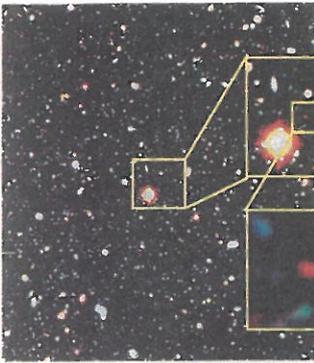
米航空宇宙局はハッブル宇宙望遠鏡より高性能のジェームズ・ウェッブ宇宙望遠鏡を18年にも打ち上げる計画だ。遠い銀河ばかりか、宇宙の最も初期に生まれた星の観測も目指している。

公表した。約129億光年かたにあるとされるが、光の詳しい観測ができていないので正確な距離を割り出せず、記録は「非公認」扱いだ。

チームの発表で、リチャード・パウエンス博士は「この時代にはもっと多くの銀河があると思われるが、今の望遠鏡で見るとは光が弱すぎる」とコメントしている。

家さんたちは「我々の記録もいずれは破られる」と、さらに遠い銀河からの光だけを通すフィルターとの開発を進める。

129億3千万光年離れた銀河の発見が目標だ。



すばる望遠鏡が観測した、かみのけ座の方向にあるすばる後援領域の一部。今回発見された最も遠方の銀河「IOK-1」は、右下の拡大画像の中心の赤い天体（国立天文台提供）

# 科学

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの「家正則さん」の国立天文台教授に聞きました。



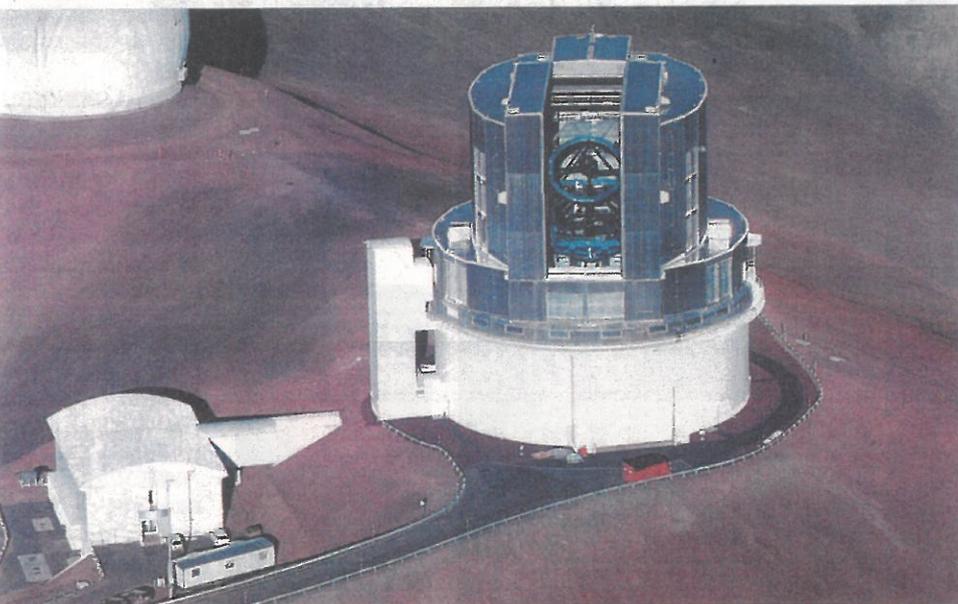
## 国立天文台 家正則さんにきく

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの「家正則さん」の国立天文台教授に聞きました。

### 最遠の銀河見つけた

# すばるの眼力

## 世界をリード



すばる望遠鏡 ハワイ島マウナケア山頂にある。日本の光学赤外線望遠鏡。口径は8.1メートル、一枚鏡で170センチメートル最大の。1996年に観測開始した。

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの「家正則さん」の国立天文台教授に聞きました。

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの「家正則さん」の国立天文台教授に聞きました。

宇宙は膨張しているため、遠い天体ほど高速で遠ざかっています。天体からの光は、高速で遠ざかるほど、ドップラー効果で波長が長くなる性質（赤方偏移）があります。今回、この性質を利用して、特定の波長域の光だけを通すフィルターで特定の距離からくる銀河を狙いを絞った観測をしました。

### 遠方銀河の観測ベスト10

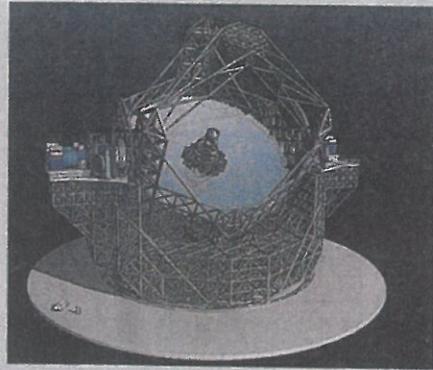
観測望遠鏡	距離	発表時期
1 すばる	128.83	06年9月
2 すばる	128.25	05年2月
3 すばる	128.25	06年4月
4 すばる	128.24	06年4月
5 すばる	128.22	05年2月
6 すばる	128.22	05年2月
7 すばる	128.22	03年4月
8 ケック	128.19	02年4月
9 すばる	128.18	06年4月
10 すばる	128.18	05年2月

※距離の単位=億光年 (国立天文台の資料から)

すばる望遠鏡が、地球から最も遠い銀河の観測記録を次々と打ちかかっています。現在、遠方超新星の上位7位までを独占しています。すばる望遠鏡の快走の秘密は、初期宇宙の謎について、観測チームの「家正則さん」の国立天文台教授に聞きました。

### 口径42m望遠鏡 建設へ

欧州南天天文台、1200億円計画



ELTの想像図。ESO提供

口径42mもの巨大な鏡で宇宙を観測する超大型望遠鏡(ELT)の建設計画を、欧州11カ国が加盟する欧州南天文台(ESO)が発表した。建設費は8億時(約1200億円)にのぼる。今後3年かけて詳細な設計や建設場所の選定

などを進め、17年の完成を目指すという。

巨大な主鏡は、一辺が1.45mの六角形の小さな鏡を906枚並べて造られる。完成後は、太陽系外の惑星やブラックホール、タークマターなどを観測していく。ESOは当初、口径100mの望遠鏡を構想したが、高額の建設費や技術的な難しさから断念。昨年からの天文学者が参加して見直し案を練っていた。

米ハワイ島にある日本のすばる望遠鏡や、チリにあるESOの大型望遠

鏡VLTなどには、1枚でできた口径約8mの主鏡が使われている。ただし、国立天文台の**家正則教授**(次世代大型望遠鏡プロジェクト室長)によると、現在の技術では、これ以上大きくできないと考えられている。

このため次世代大型望遠鏡の主鏡は、ELTのように2m以下の鏡を並べて巨大化させる方向へ動いている。米の口径30mの望遠鏡計画には、日本の国立天文台が参加するかどうかを検討中だ。

(福島慎吾)

# 主鏡直径、一気に30メートル前後に

## 欧米で次世代巨大望遠鏡計画

より遠くを、より鮮明に……。星々の光を地上で集める次世代の巨大望遠鏡計画が、欧米で進んでいる。主鏡の直径を現在の8〜10倍から30倍前後に大型化するものだ。日本も米計画への合流を検討している。

望遠鏡は直径約8メートルの一枚鏡を持つ。しかし、これ以上大きい鏡を製作したり、それを支える構造を作ったりするのは大変だ。望遠鏡は直径約8メートルの一枚鏡を持つ。しかし、これ以上大きい鏡を製作したり、それを支える構造を作ったりするのは大変だ。

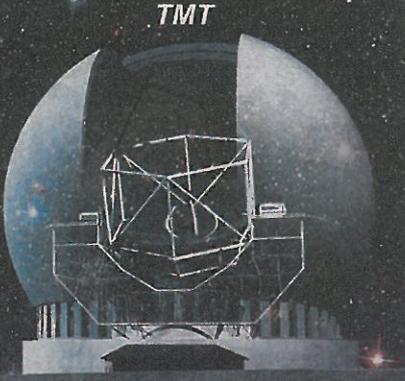
主鏡は大きいほかに、かすかな光をとらえられ、遠い宇宙や暗い天体をより鮮明に観測できる。日本が望遠鏡「L」など、稼働中の巨大

小さな鏡並べ動かして集光の検討が進んでいる。米国の30倍望遠鏡（TMT）構想は、米カリフォルニア工科大や

### 次世代巨大望遠鏡



European Extremely Large Telescope (欧州超大型望遠鏡)



Thirty Meter Telescope (30米望遠鏡)



ハワイのマウナケア山頂の「すばる」



Giant Magellan Telescope (ジャイアント・マゼラン望遠鏡)

	TMT(米国)	GMT(米国)	E-ELT(欧州)
主鏡の大きさ(数字はメートル)	30	24	42
作り方	492枚の小型鏡	約8枚の鏡を7枚	906枚の小型鏡
建設費用	約900億円	約700億円	約1400億円
建設候補地	ハワイ、チリ	チリ	アルゼンチン、チリ、モロッコなど
完成予定	2015年	2017年	2017年

(望遠鏡の想像図と写真は各グループの提供)



かすかな光もとらえる  
↓  
暗い星や遠くの宇宙が、より鮮明に見える

グラフィック提供 有希 / The Asahi Shimbun

国立天文台のすばるは400億円を投じて建設され、99年から観測を続けている。世界で30倍級の次世代巨大望遠鏡が稼働しても、運用を続ける方向だ。

そのために、すばるの能力向上研究が進められてきた。すばるも続けて運用「視野拡大で能力アップ」

唐生宏・国立天文台教授が取り組むのは、主鏡の真上に据え付けられた、すばるの独特の主焦点カメラの改造だ。主焦点カメラには最も広い視野が確保できる利点があるが、設置が難しく高価にもなるので、ほかの巨大望遠鏡は持っていない。

現在の主焦点カメラの視野は満月1個分だが、開発中の新型では満月8個分の広さを一度に撮影できるようにできる。視野が広がれば広いほど観測効率が高まり、研究上の競争力につながる。11年の完成を目指している。

唐生さんは「完成すれば、すばるの価値は大きく上がり、TMTをハワイに建設させることにもつながるだろう」といっている。

鏡を巨大化すると、検出が進んでいる。米国の30倍望遠鏡（TMT）構想は、米カリフォルニア工科大やセザルス・キ台長は「太陽系外惑星の探索や、宇宙の進化、暗黒物質（ダークマター）の解明などが目標」

日本でも、国立天文台が06年に次世代望遠鏡プロジェクトを立ち上げ、すばるの後継を検討してきた。その結果、国立天文台や大学の研究者らは今年2月、独自には作らず、TMTに参加する方針を決めた。日本単独では予算確保が難しいと判断した。

すばるを選んだのは、これだけがある。すばるのあるハワイに建設される可能性を持ったためだ。家正則・国立天文台教授は「すばるは現

代々の巨大望遠鏡で最も広い視野を持つ。すばるで見つけた天体をTMTで詳しく観測する、という連携が期待できる。完成予定が早いのも魅力だ」といっている。

TMTを進めるカリフォルニア工科大のリチャード・エリス教授は「観測の適地かどうかや、コスト、パートナーの要望もふまえて建設地を決めた」としている。

ただ、次世代計画に日本が本格的に参加するのはもう少し先になるだろう。国立天文台は現在、チリに欧米と共同して、電波望遠鏡のアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計（ALMA）を建設中だ。建設費は約1200億円を見込み、日本は256億円を負担する。次世代望遠鏡の予算が確保できるのは、ALMAが本格稼働する12年以降になるとみられている。

観山正見・国立天文台長は「将来構想を検討しないと、世界から取り残される。TMTは興味深い計画だが、日本が参加するのはハワイへの建設が決定されるのが前提」と慎重だ。

(11)

3版

2007年(平成19年)9月3日(月曜日)

わかるかな?

グリーンフラッシュ=写真真=は水平線に沈んでゆく太陽が一瞬緑色の光を放つ現象です。まれにしか見えないので、これを見た人には幸運が訪れると言われています。太陽の光は紫から赤まで虹の七色が混

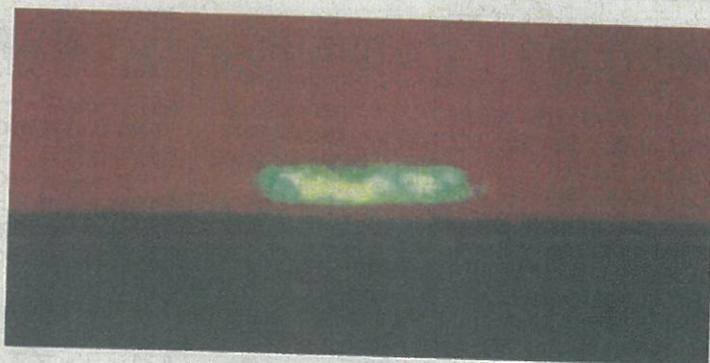
ざっているはずですが、なぜ緑色に見えるのでしょうか。

①赤い夕陽の残像として補色の緑が見える

②青い光は吸収され、赤い光は届かず、緑色が残る

③太陽コロナの放つ緑色の特別な光が見える

出題者は、家正則・国立天文台教授



札幌市の勇内山昭次郎さん撮影

解答は左ページに

わかるかな? 解答

問題は右ページ



答えは②です。地球の大気はプリズムのように光を屈折させる効果があり、直線的には見えない位置に太陽が沈んでも、光が曲がって届きます。このため、実際の日没は、幾何学で決まる時刻より1分以上遅れて起こります。屈折作用は波長が短い青い光ほど大きいので、赤い光が届かなくなったあとでも青い光がまだ届く時間が、ごくわずかですがあります。でも、青い光ほど空気中の塵で吸収散乱され弱められてしまいます。これらの効果のため、中間色の緑色の光だけが一瞬残るのです。晴れた日に高い山や見晴らしの良い海辺に行く機会があったらぜひ、グリーンフラッシュが見えないか、日没の瞬間を見てみましょう。

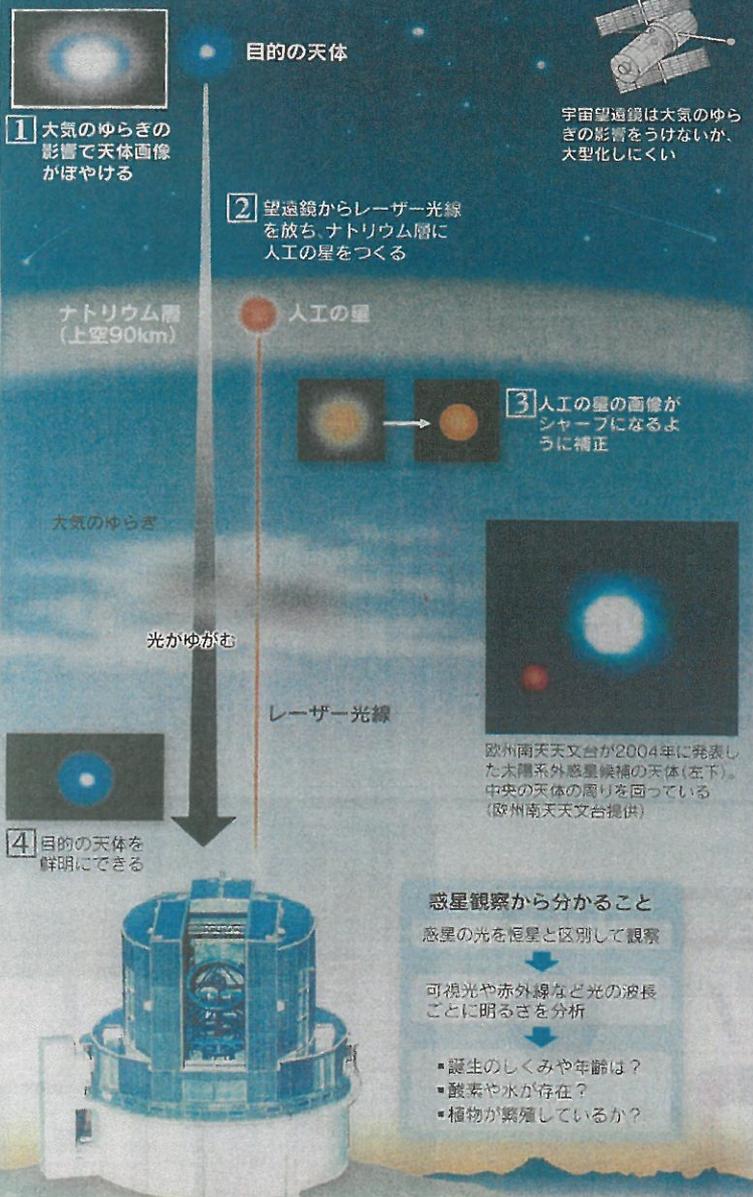
ご意見、ご要望 こちらまで

ご意見、ご要望は、科学部へ

ファクス(03・3217・8169)か、電子メール(t-kagakubu@yo.miuri.com)でお寄せ下さい。

# サイエンス

## 人工の星でゆがみを補正



ハワイ・マウナケア山頂にあるすばる望遠鏡(国立天文台提供) グラフィックス デザイン 藤田健一郎

世界最先端の望遠鏡は百三十億光年(一光年は光が一年間に進む距離)という遠いかなたの銀河をこらえて「こころ」まで来た。そんな今、世界の天文学者が「近く」の天体の観測に火花を散らしている。特に地球から数百光年以内、狙うのは太陽系の外にある別の惑星だ。太陽のような恒星に比べはるかに観測しにくい惑星を鮮明に撮り、生命が存在するかという謎に迫ろうとしている。

# 望遠鏡「近く」の星に照準

ハワイにある日本のすばる望遠鏡では、来年から新装置「レーザーガイド星補償光学系」の本格運用を始める。開発を主導する国立天文台の室正則教授は「ハッブル宇宙望遠鏡を二倍近く上回るシャープさであらゆる天体を観測できる。世界最高レベルの装置だ」と期待を寄せる。

地上の望遠鏡で見ると、宇宙の星からの光はゆがんでおり、画像がぼやけてしまう。地球の大気がゆがむ影響のためだ。ハッブルのようにロケットで打ち上げ、宇宙空間の望遠鏡ならその心配はないが、小型に限られる。大型化が容易な地上の強みを生かすため、光のゆがみを消す技術の開発が進んでいる。

すばるの新装置もその一つ。ゆがみを補正し、鮮明な天体画像にする。望遠鏡の視力に相当する性能「分解能」は、例えば観測でよく使われる波長二 micron(約は百万分の一)の赤外線をとらえる場合、ほぼ上限の角度六万分の一だ。これは二百 micron先に置いたテニスボールの輪郭を見分けられる性能だ。光のゆがみは、望遠鏡内部の特殊な鏡を微細な素子で細かく変形させることで打ち消す。この仕組みは以前からあるが、新装置は二つの点で機能が向上する。一つは鏡を変形させる素子の数を従来の五倍以上に増やすこと。非常に細かいゆがみまで補正できるようになる。

もう一つは「レーザーガイド星」と呼ぶ技術だ。従来、鏡をどのように変形させるかは、観測したい暗い天体の近くの明るくて見やすい星を参考にする。でも似た大気のゆがみの影響を受けているはずなので、明るい星が鮮明にならなければならない。暗い天体も正しく補正できるといわれる。しかし、その割合が不明な星があるのは空全体の10%程度にすぎない。

## 太陽系外の惑星 直接観測を狙う

どのように変形させれば、暗い天体も正しく補正できるといわれる。しかし、その割合が不明な星があるのは空全体の10%程度にすぎない。そこで新装置は代わりに空に人工の星を投影する。望遠鏡からレーザー光線を放ち、上空約九十km高にあるナトリウム層を光らせる。地上からはオレンジ色の新しい星ができたように見える。空全体どこでも高分解能で観測できるようにする。

高性能な目はもちろん遠い天体を見るのにも役立つが、近年観測競争が激しいのは、近くの太陽系外の惑星を詳しく鮮明にとらえることだ。太陽系外惑星は、一九九五年にベガス座の太陽とよく似た恒星の周りに発見されたのが最初だが、現在までに二百五十個近くが見つかっている。といっても直接その姿を画像にとらえるのは候補天体も含めてまだ数例。恒星に比べて惑星は小さく、自分ではほとんど光らないので、恒星の光に埋もれてしまつたらだ。従来は惑星の引力の影響でふらつく恒星の動きを観察するなどして、間接的に見つけてきた。

## キーワード

**星の光のゆがみ補正**  
地上から星を見ると、上空の気温の変動などが原因で起きる大気のゆがみの影響で、星からの光は刻々とゆがんで見える。星が瞬いて見えるのもこのためだ。影響をなるべく減らすと、巨大望遠鏡は通常、大気が薄い高地に設置されるが、

## 宇宙望遠鏡に技術応用も

それでも天体画像はゆがんでしまつた。星の光のゆがみは実は宇宙空間の望遠鏡にもある。鏡の表面にはどうしても必要な微細な凹凸があり、ゆがみの原因になるからだ。そこで地上の望遠鏡の技術に応用し、極限まで補正できる宇宙望遠鏡を打ち上げる構想もある。

(田中深一郎)

2007年(平成19年)11月12日(月曜日)

夕刊 言 賞 賞 券 屋 門

わかるかな?

ハワイのすばる望遠鏡は、狙った天体を正確にとらえ、追尾することができます。望遠鏡は水平に敷いた円形レールの上で東西南北の方角を変え、空

を見上げる角度も真上からほぼ水平まで応じられます。でも、実は天頂から角度1度以内の真上は観測できません。なぜでしょう。  
①雨よけの屋根があるため  
②真上の星は追尾できないため  
③真上だと望遠鏡が揺れるため

出題者は、家正則・国立天文台教授



解答は左ページに

わかるかな?

解答

問題は右ページ

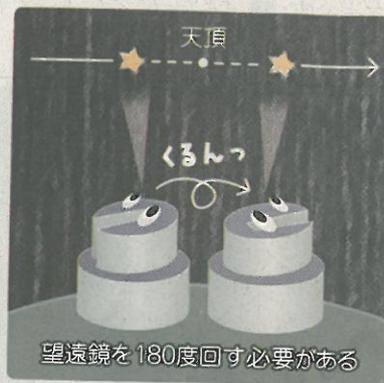
答えは②です。

東から西へ回る天体の日周運動を望遠鏡は追尾します。「赤道儀方式」と違って、「経緯台方式」のすばる望遠鏡では、天頂は特別な点になります。天頂付近を通る星を追いかけるには、仰ぎ見る角度を変えるだけではなく、望遠鏡の方角をぐるりと回す必要が生じます。

重さ550トンのすばる望遠鏡は、円形レールの上で厚さ0.1ミリの膜の上に浮いた状態で、リニアモーターにより音もなく滑るように動きますが、その最大速度は秒速0.5度に設

定してあります。

このため天頂から1度以内で天体を追いかけるには間に合わないのです。



ご意見、ご要望 こちらまで

ご意見、ご要望は、科学部へ

ファクス(03・3217・8169)か、電子メール(t-kagakubu@yomiuri.com)でお寄せ下さい。

2007年(平成19年)11月19日(月曜日)

夕刊 読書 賞 新 聞

わかるかな?

日本がハワイに建設したすばる望遠鏡には、世界最大の薄型1枚鏡を使っていたり、観測装置の数も世界最多だったりという世界一があります。観測の

成果でも、実はいまだ破られていない「世界一」を2006年に達成しました。それは次のうちのどれでしょうか。

- ①宇宙で一番遠い銀河の発見
- ②銀河系で一番遠い星の発見
- ③太陽系で一番遠い天体の発見

出題者は、**家正則・国立天文台教授**



解答は左ページに

わかるかな? **解答**

問題は 右ページ

答えは①です。

はるか遠くにある銀河は、宇宙膨張に伴って遠ざかっていく際の「赤方偏移」を頼りにその距離を見積もります。赤方偏移は、もともとの光の波長が長くなる(赤っぽくなる)割合として定義されます。

現在、測定に成功した最も遠い天体は、2006年にすばる望遠鏡で確認された赤方偏移6.96の銀河です。遠い天体ほどその光が届くまでに時間がかかるので、この銀河の場合、129億年昔の姿を見ていることとなります。これはビッグバンで宇宙が始まってからわず

か8億年後に相当します。

遠い銀河探しの世界競争では、ベストテンのうち九つがすばる望遠鏡による発見となっています。



ご意見、ご要望 こちらまで

ご意見、ご要望は、科学部へ

ファクス(03・3217・8169)か、電子メール(t-kagakubu@yomiuri.com)でお寄せ下さい。

2007年(平成19年)11月26日(月曜日)

夕刊 読書 賞 楽 楽

わかるかな?

すばる望遠鏡は、宇宙を観測するのに最も適した場所として、ハワイ島の高度4200mのマウナケア山頂に建設されました。高山にあるすばる望遠鏡で観測する天文学者や技術者の山頂の生活では、普段と違

うことが起こりますが、次の中で正しくないのはどれでしょう。

- ①長時間山頂にいると頭痛や眠気に襲われることがある
- ②湿度が極端に低いので肌が荒れる
- ③食事がおいしくて、つい食べすぎる

出題者は、天文台教授 家正則・国立



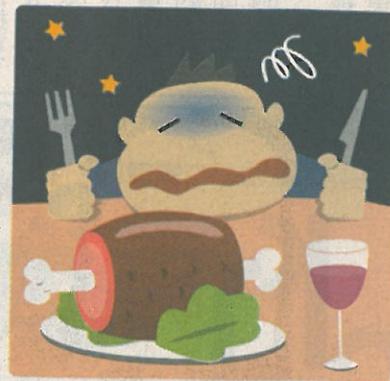
解答は左ページに

わかるかな?

解答 問題は右ページ

個人差がありますが、正しくないのは③でしょう。山頂は0.6気圧、夜間の平均気温は0度、湿度は頻繁に20%以下となります。このため観測者は高度2800mの中間宿泊所で体ならしに1泊してから山頂に向かう規則になっています。それでも、平地に比べると血中酸素濃度が低下するので、眠気や頭痛などの軽い高山病の症状におそわれることがあります。症状が出た場合は無理せずに中間宿泊所に下山します。乾燥しているので、喉、唇、目、鼻、肌に問題が生じることもあります。体には厳しい環境なのと、和食メニュー

がないので、食欲が落ちるのが普通です。でも、だからこそと、しっかり食べまくる猛者もいるんですよ。



ご意見、ご要望 こちらまで

ご意見、ご要望は、科学部へ

ファクス(03・3217・8169)か、電子メール(t-kagakubu@yomiuri.com)でお寄せ下さい。

家教授ら3人に仁科記念賞

仁科記念財団は13日、物理学で優れた業績を上げた研究者に贈る第54回仁科記念賞を、国立天文台の家正則教授(59)、東京大学の上田正仁教授(45)(冷却原子気体)と早野龍五教授(56)(原子物理)の3人に授与すると発表した。授賞式は12月5日に行われる。

家教授らに仁科記念賞

仁科記念財団(山崎敏光理事長)は13日、物理学で優れた業績をあげた研究者を対象にした今年度の「仁科記念賞」を、国立天文台の家正則教授(59)ら3人に贈ると発表した。家氏の授賞理由は「す

ばる望遠鏡による初期宇宙の探査」。ほかに上田正仁・東京大教授(45)が「引力相互作用する原子気体のボース・アインシュタイン凝縮の理論的研究」、早野龍五・東京大教授(56)が「反陽子ヘリウム原子の研究」の業績で選ばれた。授賞式は12月5日。

しんぶん 赤 旗

3氏に仁科記念賞

仁科記念財団は13日、今年度の仁科記念賞を家正則国立天文台教授(59)、上田正仁東京大大学院教授(45)、早野龍五東京大大学院教授(56)の三人に授与すると発表しました。授賞式は12月5日、都内で行われます。

家教授は、すばる望遠鏡(米ハワイ島)の観測装置を設計。約百二十九億光年という観測史上最も遠い銀河を

発見しました。

上田教授は、極低温の世界で物質が固まり、まるで一つの粒子のように振る舞う「ボース・アインシュタイン凝縮」を理論的に考察。この状態が引力により崩壊する過程を明らかにしました。

早野教授は、通常のヘリウム原子核の周りを回る原子を反陽子に置き換えた「反陽子ヘリウム原子」を研究。構造などの解明に成功しました。

2008年(平成20年)11月14日 金曜日

☆20



上田氏



家氏



早野氏

仁科記念財団(東京都文京区、山崎敏光理事長)は13日、原子物理学やその応用に関し、優れた研究業績を挙げた研究者に贈る「仁科記念賞」の08年度受賞者を、家正

# 仁科記念賞 家・上田・早野氏が受賞

者らに贈る「仁科記念賞」の08年度受賞者を、家正

則国立天文台光赤外研究部教授(59)、上田正仁(東京大学大学院理学系研究科教授(45)、早野龍五(東京大学大学院理学系研究科教授(56))に授与すると発表した。授賞式は12月5日18時から東京・丸の内東京会館で行い、3氏に副賞50万円がそれぞれ贈られる。

家教授の受賞業績は「すばる望遠鏡による初期宇宙の探査」。家教授率いるすばる望遠鏡の研究グループは、現在知られる最も速い銀河10個のうち9個を発見(これで約129億光年前の銀河の姿が明らかになった。「引力相互作用する原子気体のボース・アインシュタイン凝縮の理論的研究」の業績に贈られる上田教授は、量子力学特有の現象ボース・アインシュタイン凝縮を理論的に考察。その理論が今年実験的に検証された。

早野教授主導の研究グループは反陽子と電子の質量比を9ケタの高精度で決める手法を確立。基礎物理定数表を書き換えたりウム原子の研究」。

## 日本経済新聞

2008年(平成20年)11月14日(金曜日)

★13版

社会 38

仁科記念賞に家氏の父氏  
仁科記念財団は13日、物理学で優れた業績を上げた研究者に贈る「仁科記念賞」の08年度受賞者を、国立天文台の家正則教授(59)、東京大学の上田正仁教授(45)、東京大学の早野龍五教授(56)の3氏に授与すると発表した。授賞式は12月5日に東京・千代山の東京会館で開く。家教授は米ハワイ州のすばる望遠鏡を使い、地球から約百二十九億光年離れた宇宙で銀河を発見した功績が評価された。

【配信番号 7137☆ 2/1 P】No. 1  
 仁科記念財団 国立天文台の家正則氏らに仁科賞  
 ◎日経産業新聞 [日経テレコン21] 2008年11月14日 朝刊◇ 9面  
 ※無断複製転載禁止

[新 8282-11114日]

■ELMOR3  
 2008年11月14日 9:08  
 「縣様」

### 国立天文台の 家氏らに仁科賞

仁科記念財団は十三日、二〇〇八年度の仁科記念賞を、国立天文台の家正則教授(59)、東京大学の上田正仁教授(45)と早野龍五教授(56)に贈ることを決めた。同賞は物理学の分野で優れた業績を上げた研究者が対象。授賞式は十二日五日に

東京・千代田の東京会館で開く。家教授は、望遠鏡の感度を調節するレンズフィルターを開発、米ハワイ州のすばる望遠鏡を使い、約百二十九億年前の宇宙に存在していた銀河を発見した功績が評価された。上田教授は、物質を構成する粒子間の相互作用によって起こる現象を裏付ける理論を考案した。早野教授は、通常の物質と電気的な性質が反対の「反物質」の質量を超高精度に測定。成果は物理学の教科書に記載される「基礎物理定数」に取り入れられた。

### 早野教授ら3氏に仁科賞

仁科記念財団(東京都)は13日、優れた物理学の業績をたたえる今年の仁科記念賞を、早野龍五・東京大教授(56)、家正則・国立天文台教授(59)、上田正仁・東京大教授(45)の3氏に贈ると発表した。授賞式は12月5日に都内で開かれ、賞金各50万円が贈られる。



カリレオからたどり着いた天体観測衛星を  
早稲田生体工学部で展示する。丸山雅典撮影

# 「世界天文年」 400年前、ガリレオが手作り望遠鏡で未知の扉を開いた。

2009年は国連が定めた「世界天文年」。今から400年前、イタリアの科学者ガリレオ・ガリレイが口径4mmの手作り望遠鏡で天体を観測し、宇宙への扉を開いたのを記念した。各国で、夜空を見上げてもらうイベントが企画されている。7月には日本でも46年ぶりに当院日食が観測できる。宇宙を通して地球や生命への思いを触れるきっかけにしよう。 【下瀬美雅子】



各国の望遠鏡を並べた米ハワイの「アウツクマクマ」山頂域。右側は日本の「望遠鏡山」由美雅典撮影

## 最遠銀河記録した「すばる」

カリレオが作ったと同じ小型望遠鏡を使った天体観測会が昨年11月、東京都調布市で開かれた。地平線近くに見える星が木霊を縦に並べて夜空に輝いていた。アラスカの幌の地にレンズをはめた手作りの望遠鏡で、4人の親子が覗きつけてレンズを覗いた「ダイヤモンドナイト」は歓喜が止まる。国立天文台の観望者さん

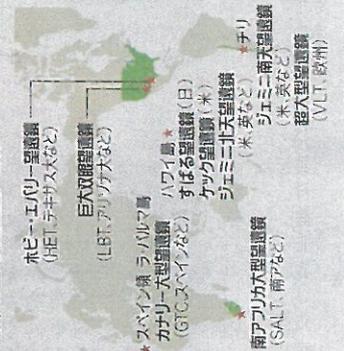
は「カリレオのように驚き体験しよう」と語った。カリレオが1610年に記した「星界の扉」からは驚きと興奮が伝わる。肉眼ではたしかに見える星面はすべてこのシートがあらわな。木霊には四つの衛星が回り「望遠鏡」と記録した。カリレオの望遠鏡をきっかけに望遠鏡作りの熱い became カリレオの望遠鏡をきっかけに望遠鏡作りの熱い became

組み合わせたが、ニュートン鏡を使って天体からの光を集める反射望遠鏡を發明した。鏡は大きいほど光をたくさん集め、暗い天体も観測できる。望遠鏡の大型化が進み、今では口径8〜10メートルの望遠鏡が世界にできた。ハワイに13基設置。米ハワイ島「アウツクマクマ」山頂(4195m)域には各国の望遠鏡が並び、その一つの日本のすばる望遠鏡

ALMAの完成予想図(九州国立天文台など提供)すばる望遠鏡が99年に撮影した初期の星はオリオン大星雲だった(国立天文台提供)

# 人の世界観変えた

## 世界の主な望遠鏡(理科年表などを参考に作成)



世界天文年日本委員会委員長の海部眞男・放送大教授が東京で記者会見し、宇宙観測の意義や天文年での取り組みを語った。



世界天文年日本委員会委員長  
海部眞男、放送大教授

## 起源と生命探るため

河まふまふとよきとよき宇宙が膨張していること分かった。宇宙からクワン(クワン)から誕生したことを示した。とつもない発見だった。太陽地球も同じその中生まれた。宇宙観測は人間の世界観を大きく変えた。その目的は多岐にわたる。一つは物質の起源。つまり宇宙の誕生を突き止めること。もう一つは宇宙生命の探査。望遠鏡から探査すれば地球のよきな星をみつかるかもしれない。星が誕生するところにある子供たちの理科離れが心配されているが世界天文年をきっかけに宇宙科学に興味を持ってほしい。学校や地域での天文教育の推進も必要だと考えていきたい。

(口径8.0m)は単口径として世界最大で70年前に観測された。注目される発見が数多い。銀河の発見だ。その記録は破られていない。速く銀河を観測するほど、銀河の重要性が増えることになる。この発見は1610年の望遠鏡から8年後の記録にすぎない。

「最遠銀河発見した素正則・国立天文台教授は「宇宙の起源」を探るには、より大きな望遠鏡が必要で国際協力が重要」と語る。世界は口径8.0m級の大型望遠鏡の建設が三つある。

望遠鏡は、宇宙へ発する電波を受信する。地球に生命探査に使われる。国立天文台野辺山宇宙望遠鏡(長野県)の電波望遠鏡(口径45m)は、巨大ラジオホールの存在の証拠を得た。東京府には、日本最大口径の電波望遠鏡(口径100m)の「Arecibo」計画が進行中。









レーザー光を照射する「すばる望遠鏡」  
左側は(2009年6月、市川町)の、国立天文台のハワイ観測所研究員撮影



観山 正見 国立天文台長

すばる望遠鏡のおかげで、日本の研究者は、遠く古い宇宙、宇宙を加速膨張させるダークエネルギー、太陽系外惑星といった現代天文学の主流となるテーマに取り掛かるようになった。

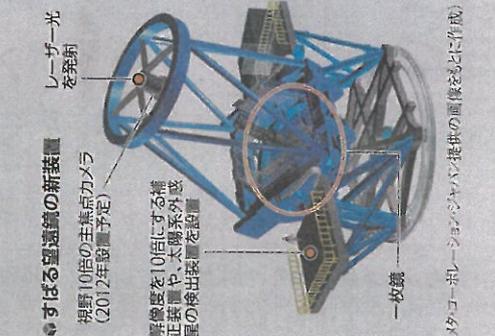
# すばる望遠鏡10年

ハワイ・マウナケア山頂(標高4205m)に建設された国立天文台の「すばる望遠鏡」が、星の光を初めてとらえた。1999年の「アースライズ」から10年がすぎた。宇宙の謎に迫るいくつかの発見を成し遂げ、観測装置の高度化を進めるスーパー・テレスコープは、次の10年で、何を探そうとしているのか。  
(滝田恭子)

すばる望遠鏡は口径8.2mの一枚鏡を持つ反射式光学望遠鏡だ。恒星や銀河など可視光領域の天体と、より波長が長く、肉眼で見えない赤外線を放つ天体を観測する。宇宙から飛来する中性子線やガンマ線(ガンマ線バースト)の正体が、あまのこ超新星爆発など明らかになり、惑星の正体なるガクとカクの田舎の構造を明らかにしたりと、多くの成果を収めてきた。最も広く知られた業績は、3年前に発表した真珠の銀河「IOX-1」の発見。128億8000万年経ったこの銀河は、宇宙誕生約137億年前の約8億年後という太古の姿を見せている。すばる望遠鏡は、ほかにも128億年以上離れた銀河を数多く発見、観測された遠方銀河の上位10傑を数えて

# 遠方宇宙研究 世界をリード

いる。12億年前の宇宙は、水素分子の雲などに覆われた「暗黒時代」が終る直前だったと考えられており、暗黒時代の秘密を解く手がかりを得られた」と話す。遠方銀河探索でトップを走るのはなぜか。最大の買値をとしているが、満月1個分の広さを二度に撮影できる主要点カマフラ。反射鏡の上約10分に据えた巨大デジタルカメラで、ハッブル宇宙望遠鏡より100倍かかる範囲を一夜で撮ることができる。ほかの8.1m級望遠鏡には、これほど高い位置に大きな装置を取り付ける構造がない。IOX-1の発見は、4方1533個の天体を写した一枚の画像から始まった。候補を絞り、特殊な装置を使って距離を調べた結果、この画像にあった128億年以上の銀河はIOX-1のほかは一つだけ。視野の狭い望遠鏡だと発見は困難だった。観測機器も更新中。2006年に予定で天体の光がぼやけるのを補正する装置のセンサーを備え、解像度を10倍にした。レーザー光を大気中に照射し、光のゆらぎの補正を助ける装置も来夏稼働する。反射鏡の性能を最大限に引き出し、視野をさらに10倍に広げる新たな主要点カマフラも、12年に設置される予定。



すばる望遠鏡の新装置  
視野10倍にする構正装置や、太陽系外惑星の検出装置を認

レーザー光を照射  
視野10倍にする構正装置や、太陽系外惑星の検出装置を認

「すばる望遠鏡10周年記念シンポジウム」が、10月5日、東京都千代田区の一橋記念講堂で開かれる。渡部潤一・国立天文台准教授らの基調講演に続き、パネル討論を行う。パネリストは立花隆氏ら。無料。往復はがきにて住所、参加者名、年齢、電話番号を明記し、〒104-8325 東京都新聞東京本社事業開発部「すばる」係(03-5159-5886)へ。9月11日必着。

光年先の銀河の発見に挑む。本誌系外惑星の研究に向けて導入された新装置は、恒星の光を遮り、周囲の惑星を映し出す機能を持つ。大質量系外惑星は約350個が確認されたが、惑星の重力による中心星のふらつきで確認された例がほとんど。直接撮影した例は少ない。今後5年間に惑星のありさまは5000の恒星を調べようとする。田村元秀・回天文台准教授は「5個も数十個の惑星を撮影できるのでは」と期待する。

来月、記念シンポジウム  
「すばる望遠鏡10周年記念シンポジウム」が、10月5日、東京都千代田区の一橋記念講堂で開かれる。渡部潤一・国立天文台准教授らの基調講演に続き、パネル討論を行う。パネリストは立花隆氏ら。無料。往復はがきにて住所、参加者名、年齢、電話番号を明記し、〒104-8325 東京都新聞東京本社事業開発部「すばる」係(03-5159-5886)へ。9月11日必着。

# サイエンス 学び

## 広視野観測に重点

対象とする波長域が異なる電波望遠鏡やエックス線望遠鏡の研究にも刺激を与えた。いろいろな波長の予丁がそろそろ観測する天体を遠くのに役立つからだ。望遠鏡は建設したら終わりではなく、研究目的に合わせて設置の観測装置を開発する。開発には大学生や院生も参加してお

り人材育成にも貢献している。8.1m級望遠鏡は、世界に10台以上ある。国際分野の流れの中、すばる望遠鏡は広視野が求められる観測に重点を置くこととなるだろう。マウナケア山頂に30枚級望遠鏡を国際協力で建設する構想がある。参加の可能性を検討しつつ、すばる望遠鏡と連携させてい





上の解像力(ものを細かく見分ける能力)が得られ、鮮明な画像が期待さ

30メートル 次世代望遠鏡計画
日本も参加
口径30メートルの望遠鏡(TMT)は、直径14.4メートルの六角鏡49枚をハチの単状に敷きつめて集力を発揮します。

30メートル 次世代望遠鏡計画

(中村 秀生)

次世代の超大型望遠鏡をハワイに建設する計画が、国際協力で進んでいます。口径は30メートル、すばる望遠鏡(8.2メートル)など、現在の大型望遠鏡をはるかにしのぐ性能です。



家さんたちの観測チームが、すばる望遠鏡を使って発見した、最遠方の銀河「10K-1」。2006年9月の発表以来3年以上、最遠方の世界記録を保持しています。(国立天文台提供)

宇宙の夜明け

見える?!



TMTの完成予想図 (© TMT Observatory Corporation)

TMTは、地球型の岩石惑星を探査します。太陽に似た星の周りで、液体の水が存在できるような程よい距離の軌道を回る惑星がターゲットです。

初期の宇宙
約137億年前に起きたビッグバン(宇宙誕生)のときの膨張の時代に宇宙は急速に膨張して冷えてゆき、自ら光を放つ天体がない暗黒時代になりました。

第2の地球
地球以外にも生命は存在するのかもしれない。巨大なデームにも挑戦します。

連携進めて
TMTの建設予定地はすばると同じハワイ島のマウナケア山頂、すばるで新しい天体を探して、TMTで詳しく調べる戦略です。

探査の小惑星に人工クレーター
はやぶさ後継機計画
探査機「はやぶさ2」の後継機「はやぶさ3」は、小惑星に人工クレーターをつくって内部の物質を調べてみる。宇宙航空研究開発機構のプロシエクト準備チームが7日、シンポジウムで構想を発表しました。

基本構造は1号機とほぼ同じ。小惑星表面を調べるだけでなく、衝突体を秒速2〜3キロメートルでぶつけます。直径数センチのクレーターができると思われ、内部の物質も採取できます。

1号機は、2005年に小惑星イトカワへの探査に成功し、今年6月の地球帰還をめざしています。現在、地球から約6000万キロメートルを飛行中で、そのままだけに地球の引力圏に到達できる軌道に入る見込みです。

1号機は、2005年に小惑星イトカワへの探査に成功し、今年6月の地球帰還をめざしています。現在、地球から約6000万キロメートルを飛行中で、そのままだけに地球の引力圏に到達できる軌道に入る見込みです。

# 平成22年度 科学技術分野の文部科学大臣表彰

文部科学省は15日、科学技術週間に伴う行事の一環として東京都新宿区の京王プラザホテルで平成22年度科学技術分野の文部科学大臣表彰の授賞式を行った。科学技術分野で顕著な功績をあげた人に授与する科学技術賞には、開発部門32件、研究部

門43件、科学技術振興部門3件、技術部門18件、理解増進部門17件。高度な研究開発能力を有する若手研究者(40歳未満)を顕彰する若手科学者賞には85人が選ばれた。ここでは、科学技術賞の研究部門、若手科学者賞を紹介する。

## 科学技術賞「研究部門」43件

- ◇弾塑性力学に基づく地盤の静的・動的応答解明の体系的研究(同研究員)
- ◇蛋白質の糖脂質修飾に働く遺子群の解明とその医学応用研究(木下タロウ・阪大免疫学フロンティア研究センター副拠点長・教授、前田裕輔・阪大微生物病研究所准教授)
- ◇超臨界水反応による新材料創製の研究(阿尻雅文・東北大原子分子材料科学高等研究機構教授)
- ◇フェライト系耐熱鋼の高温長時間強化および高性能化の研究(阿部軍士雄・物材機構特命研究員、田淵正明・同機構材料信賴性センター高温材料グループリーダー、種池正樹・三菱重工高砂研究所主任、岡田浩一・住友金属工業総合技術研究所主任研究員、塚本進・同機構NIMS特別研究員)
- ◇望遠鏡の視力を高めるレーザーガイド星補償光学系の研究(家正剛・国立天文台赤外線研究部教授、高見英樹・同ハワイ観測所教授、早野裕・同助教)
- ◇体温域の赤外放射温度標準の
- ◇高密度ヘリコン波プラズマの

- 星野聰・同主任研究員、植村豊(同研究員)
- ◇蛋白質の糖脂質修飾に働く遺子群の解明とその医学応用研究(木下タロウ・阪大免疫学フロンティア研究センター副拠点長・教授、前田裕輔・阪大微生物病研究所准教授)
- ◇ラジカル制御プラズマプロセスの先駆的研究(後藤俊夫・名大名誉教授、堀勝・名大大学院工学研究科教授)
- ◇極限性能超短パルスレーザーと超高速分光法の研究(小林孝嘉・電通大情報理工学部先進理工学科特任教授)
- ◇フタロシアニン系色素の吸収波長調節に関する研究(小林長夫・東北大大学院理学研究科教授)
- ◇メタボロミクスを基盤とした植物ゲノム機能科学の研究(齊藤和季・千葉大大学院薬学研究院教授)
- ◇高密度ヘリコン波プラズマの

- ◇インジウムを含む窒化物半導体結晶の光物性の研究(秩父重英・東北大多元物質科学研究所教授)
- ◇酵素反応の動的分子機構の構造的研究(富田耕造・産総研バイオメディカル研究部門研究グループ長)
- ◇排熱回収型高昇温吸収ヒートポンプの研究(中尾一成・三菱電機先端技術総合研究所首席研究員、池内正毅・元三菱電機冷熱プラント取締役、弓倉恒雄・三菱電機冷熱プラント大阪支社技術部長)
- ◇人工光合成システムの研究(福住俊一・阪大大学院工学研究科教授)
- ◇オレフィン重合新触媒及び有機触媒プラント大阪支社技術部長)
- ◇GPCRロドプシンの結晶構造解析を基盤とした機能研究(宮野雅司・理研放射光科学総合研究センター宮野構造生物物理研究室主任研究員、岡田哲二・学術院大理学部生命科学研究科教授)
- ◇大規模集積化対応IV族半導体CVD原子制御プロセスの研究(室田淳一・東北大電気通信研究所教授)
- ◇異物排出タンパク構造・機能制御と生理的役割に関する研究(山口明人・阪大産業科学研究所所長・教授)
- ◇ナチュラルヒジヨンの研究(山口雅浩・東工大情報工学研究所准教授、羽石秀昭・千葉大フロンティアメデイカル工学研究開発センター教授、村上百合・東工大情報工学研究所特別研究員、大山永昭・同助教)
- ◇化学遺伝学による遺伝子発現制御機構の研究(吉田稔・理研基幹研究所吉田化学遺伝学研究室主任研究員)
- ◇動物クローン技術の実用化に向けた研究(若山照彦・理研発生・再生科学総合研究センターゲノム・リプログラミング研究チームリーダー)
- ◇先端技術を駆使した統合的疲労科学・疲労克服研究(渡邊恭良・理研分子イメージング科学研究センターセンター長)
- ◇先導分子の物性(分子性ゼロギャップ)の発見と電気伝導の発見と電気伝導(唯美津木)
- ◇田嶋尚也(36) 所加藤分子物性(分子性ゼロギャップ)の発見と電気伝導(唯美津木)
- ◇田中秀明(37) 研究所助教「巨大な構造決定の研究」
- ◇谷元洋(38)

## 若手科学者賞85氏

- ◇相原聡(37) NHK放送技術研究所土木技術グループ地盤チーム主任「震動を受ける不飽和砂質土の動力挙動に関する研究」
- ◇大杉美穂(39) 東大医科学研
- ◇川崎晋臣(33) 東京理科大学研究機構講師「炭素同位体による不斉誘起現象の発見と高感度不斉認識の研究」
- ◇佐藤達彦(36) 原子力機構原子力基礎工学研究部門研究副主幹「高エネルギー放射線被ばく影響評価に関する統合的研究」
- ◇澤井拓紀(36) 産総研活断層・地震研究センター主任研究員「沿岸域の堆積物を用いた巨大地震の履歴解明に関する研究」
- ◇山東信介(36) 九大縮感フ

- 長、尾崎永一・三菱電機本社環境ファシリティーS営業推進部専任、平田雅志・阪大名譽教授)
- ◇非直線形状円偏波アンテナの理論と実現化についての研究(中野久松・法政大工学部教授)
- ◇フォトニック結晶による新しい光伝播・光閉じ込めの研究(納富雅也・日本電信電話物性科学基礎研究所主幹研究員)
- ◇太平洋の深海における海の温暖化の研究(深澤理郎・海洋研究開発機構地球環境変動領域領域長)
- ◇アリアルポロン酸を用いる触媒の炭素・炭素結合形成法の研究(宮浦憲夫・北大大学院工学研究科特任教授)
- ◇GPCRロドプシンの結晶構造解析を基盤とした機能研究(宮野雅司・理研放射光科学総合研究センター宮野構造生物物理研究室主任研究員、岡田哲二・学術院大理学部生命科学研究科教授)
- ◇大規模集積化対応IV族半導体CVD原子制御プロセスの研究(室田淳一・東北大電気通信研究所教授)
- ◇異物排出タンパク構造・機能制御と生理的役割に関する研究(山口明人・阪大産業科学研究所所長・教授)
- ◇ナチュラルヒジヨンの研究(山口雅浩・東工大情報工学研究所准教授、羽石秀昭・千葉大フロンティアメデイカル工学研究開発センター教授、村上百合・東工大情報工学研究所特別研究員、大山永昭・同助教)
- ◇化学遺伝学による遺伝子発現制御機構の研究(吉田稔・理研基幹研究所吉田化学遺伝学研究室主任研究員)
- ◇動物クローン技術の実用化に向けた研究(若山照彦・理研発生・再生科学総合研究センターゲノム・リプログラミング研究チームリーダー)
- ◇先端技術を駆使した統合的疲労科学・疲労克服研究(渡邊恭良・理研分子イメージング科学研究センターセンター長)
- ◇先導分子の物性(分子性ゼロギャップ)の発見と電気伝導の発見と電気伝導(唯美津木)
- ◇田嶋尚也(36) 所加藤分子物性(分子性ゼロギャップ)の発見と電気伝導(唯美津木)
- ◇田中秀明(37) 研究所助教「巨大な構造決定の研究」
- ◇谷元洋(38)

# TOKYOホームページ



国立天文台教授

家 正則さん 60

大阪府吹田市

生まれは札幌市ですが、父の転勤や海外留学で引越しを繰り返して、住んでいる家は22軒目。そんな私には、中学・高校時代の思春期を過ごした大阪府吹田市が、「研究」に目を向けさせてくれたふるさとです。

## 「未知に迫る」土台培う



いまではそんな暮らしを懐かしく思い出します。中学時代の恩師が教えてくれたのは、理論を積み重ね、研究すれば未知の世界に迫ることができる数学の

おもしろさ。大学では、理論だけでなく観測という実際の行動も必要な天文学にひかれて、その道を歩むことになりましたが、天文学に携わる上

での土台は、大阪で培ったと思っています。

天文学者として米ハワイ島の大型望遠鏡「すばる」(口径約8.1m)に構想時から参加し、観測史上最も遠くまで古い銀河を発見できました。今は、世界の研究者と口径30m級の望遠鏡を作ろうと、約1000億円を見込む資金集めに奔走する毎日、夢は、生命がある第2の地球の発見です。惑星から来る光の分析を続けられ、あと20年くらいで生命を育む海や酸素のある惑

星を見つけられるはず。

天文学では、最先端の研究に必要な膨大な投資を一つの国だけで負担する事は、もはや不可能。そんな現実を前に、また見ぬ宇宙人に思いをはせている。地球人同士で傷つけ合えない状況が残念でなりません。

吹田市にはたまにしか帰れません、今でも心のよりどころとなってくれる同級生や恩師と酌み交わす一杯は、私にとってやっぱり格別なものです。

(聞き手・松田晋一郎)

年齢とともにメール(tomin@yo.niurl.com)にお寄せ下さい。掲載分には薄謝をお送りします。

# 巨大化する望遠鏡

## 宇宙の始まりに迫る

望遠鏡が発明された世紀初め、イタリヤの科学者ガリレイは、口径数センチの自作望遠鏡で木星の衛星を発見した。それから400年、望遠鏡は巨大化の道をまっしぐらに進んでいる。はるかかなたの宇宙の始まりの証拠を探すために、

**A** 光学赤外線望遠鏡は、ガリレイの望遠鏡と同様可視光を中心とする波長域を観測する。その一つ、国立天文台のすばる望遠鏡(主鏡の直径8.2メートルは130億光年離れた銀河の発見を様々な成果をもたらした。

が、完成から11年過ぎた。日本とフランスがハワイに建設する「J-PLUS」は、主鏡直径が30メートルもある。欧州は、直径45メートルの次世代望遠鏡(E-ELT)を計画している。最大の狙いは、宇宙の誕生の瞬間だ。130億光年以上離れた銀河の光は、130億年以上前の光であり、約137億年前と推定される宇宙誕生の時期に近い。宇宙創成の秘密に迫る手がかりを得られるかもしれない。

**B** ハッブル宇宙望遠鏡は、大気の影響を受けない宇宙

地球から、光の速で130億年かかる距離(130億光年)にある星を観測したら、目に見えるのは130億年前の星の姿! (宇宙誕生の約7億年後)

### B 大型宇宙望遠鏡

宇宙に打ち上げて観測

### ハッブル望遠鏡 (主鏡径2.4m)

- 1990年打ち上げ
- 大気の影響を受けず、高解像度
- 地上から600km上空の軌道に設置
- 何度も修理しながら運用

### 成果

暗黒物質の観測(暗い星の部分)など



(NASA/ESA)

### ジェームズ・ウェッブ

6.5m

- 欧州、米国が運用(2014年打ち上げ目標)
- 地上から150万km遠方に設置

### 期待される成果

宇宙最古の星を観測など



(NASA/ESA)

### A 光学赤外線望遠鏡

星から出る光を観測

### すばる望遠鏡(ハワイ) 8m級

- ハッブルの200倍の視野・感度



(Hawaii/IRTF)

### TMT(ハワイ) 30m級

- 米国、カナダ、日本も参加を目標(2018年稼働目標)

### 巨大マゼラン望遠鏡(チリ) 24m級

- 米国、欧州、18年稼働目標

### E-ELT(チリ) 42m級

- 欧州(18年稼働目標)

フラックホルの発見・フラックホルなどの詳細観測

### C 電波望遠鏡

光を出さない天体もキャッチ

### アルマ望遠鏡(チリ)

- 早ければ今年にも最初の画像を公表
- 66本のアンテナを使い直径18.5kmの望遠鏡相当の「視力」を実現
- 「増力」はパワフルな視力を発揮

### 期待される成果

生命の起源を解明

惑星誕生のメカニズムの解明など

### SKA(建設地未定)

- 欧州、米国、中国、インドなどが参加
- アンテナ台数は2000~3000台
- 総長はアルマの100倍

### 期待される成果

星が誕生する前の宇宙暗黒時代をとらえる

# 宇宙誕生の秘密を探る

で、晴れた天候を観望し続けてきた。その後観望は、主鏡直径がハッブルの2.7倍、地球から150万キロメートル離れた空を回り、太陽や地球の光に邪魔されずに、深宇宙を精密に観測する。

**C** 電波望遠鏡は、光を出さないガス雲のまわりの天体も観測できる。今年10月、南米チリ北部の標高3000メートルの高原に日本などが建設した大型電波望遠鏡「アルマ」が観測を開始した。2年後にはさらに並ぶ66

台、直径18.5メートルの超巨大アンテナに相当する性能を得られる。立松隆一国立天文台アルマ推進室長は「生命のルーツが分かるかも知れない」と言う。惑星の材料となる極温のガスを分析し、惑星がどうやって、生命の材料になる物質があるかを調べる。

巨大電波望遠鏡SKAの構想も動き出している。米欧や中国、インドなどが協力。2600~3000台のアンテナを使って130億光年以前に離れた宇宙を探り、星が誕生する前の「宇宙暗黒時代」の謎をとら

えるのが目的だ。巨大望遠鏡の実現には、科学技術の進歩と国際協力が欠かせない。建設費が1000億円を超えるJ-PLUSも、大型望遠鏡の観測で培った技術を持つ国が集まり、計画を断つことで初めて可能になる。

国立天文台の室正則教授は期待を寄せる。「次世代望遠鏡がそろって観測し始める10年後には、生まれつけない宇宙に謎がますます解明されていく」と。

(本間雅江)

## 最も遠い銀河

地球から約131億光年離れた銀河を発見したと、欧州の研究チームが発表した。日本の「すばる望遠鏡」(米ハワイ島)が見つけた約129億光年離れた銀河より遠く、観測史上、最も遠い銀河になる。遠いほど時期

も古く、宇宙誕生から6億年以内にはできた銀河だという。21日付の英科学誌「ネイチャー」に掲載された。ハッブル宇宙望遠鏡の観測で昨年見つかった銀河を、南米チリの超大型望遠鏡(VLT)で詳しく観測した結果、距

### 131億光年先

離が分かった。

愛媛大の谷口義明教授は「宇宙で最初の銀河誕生の瞬間に手が届きつつある。画期的な成果だ」と話している。一方、国立天文台の家正剛教授は「今回の銀河は、光の特徴が従来の銀河とかなり異なる。再確認も必要だ」と指摘している。

### 欧州の研究チーム発見

「『観測史上最も古い銀河発見 誕生はビッグバンの6億年後』というニュースがありました。いったいどうやって、遠くにある銀河の年齢が分かるのでしょうか？」  
—神奈川県伊勢原市、会社員、男性(55)

## 銀河の年齢 どう調べるの？

### ■遠方銀河のギネス記録

現在、宇宙は約137億年前に「ビッグバン」という大爆発から始まったと考えられている。このビッグバンから約6億年後に誕生した銀河を発見したと、欧州の天文学者らが10月21日付の英科学誌「ネイチャー」で発表した。約131億年前に銀河が発した光を望遠鏡でとらえたことになる。なぜ、この光が131億年前のものだと分かるのだろうか。

「遠くの天体から出た光は、宇宙が膨張しているため波長が間延びします。光がどのくらい伸びたかという『赤方偏

ASA(米航空宇宙局)が2003年に解析した結果、約137億年という宇宙の年齢を導き出した。ちなみに、ビッグバン直後の光の赤方偏移は無限大だ。

では、観測した光をどうやって遠くの銀河から来た光だと判断するのか。

生まれて間もない銀河では、大量の星が一斉に誕生する。質量の大きい高温の星は、周囲のガスを暖める。そして、暖められた水素のガスが冷えていくと必ず「ライマン・アルファ線」と呼ばれる特徴的な光を出す。観測した光の「指紋」を調べることで、ライマン・アルファ線

この光の赤方偏移が8.6であり、131億年前の光であることを突き止めたのだ。

### ■TMTで「一番星」を

遠方の銀河を見ることは、誕生初期の宇宙を見ることになる。今回の発見は、銀河がどのように生まれるかという宇宙の歴史解明につながる成果だ。

このように宇宙の神秘を探る天文学の研究だが、どのような日常なのか。

家教授らが米ハワイの「すばる望遠鏡」を使って129億年前の銀河を見つけた際、最初に候補にあがった天体は4万1533個。候補を絞り込むだけで2年間かかり、確認までにさらに2年間かかった。

望遠鏡の使用も容易ではない。すばる望遠鏡の場合、研究者らは事前に目的などを審査され、競争率は3~7倍。やっと使うことができても観測ができるのは夜だけ。準備などを除くと一晩で可能な観測は約6時間。ある天体を15時間観測

## 社会部 オンデマンド

# わずかな光の波長とらえ計測

移」を調べることで、天体の年齢が分かるのです」

こう説明するのは**国立天文台の家正則教授(61)**だ。家教授らは2006年に約129億年前の銀河を発見し、遠方銀河のギネス記録を4年にわたって保持している。

赤方偏移とは、遠ざかっていく救急車のサイレンの音が低くなる「ドップラー効果」のように、遠ざかる天体から出た光の色の波長が長くなって赤っぽくなる現象だ。

光の波長が2倍になると赤方偏移の値は1で、約77億年前の光になるという。赤方偏移の値が大きくなるほど、遠くの天体から出た光となる。赤方偏移が5だと約125億年前に、10だと約132億年前に出た光になるそうだ。

宇宙最古の光であり、はるか昔に宇宙が熱かったというビッグバンの証拠とされる「宇宙マイクロ波背景放射」の赤方偏移は1000。ビッグバンから約38万年後の光で、N

かどうか判断できるという。天文学者たちは銀河の放つライマン・アルファ線を探しているのだ。

今回、研究成果を発表したパリ天文台のマット・レーネルト氏らは「ハッブル宇宙望遠鏡」がとらえた「UDFy-38135539」という銀河を詳細に調べた。

レーネルト氏はヨーロッパ南天天文台が南米チリに設置した大型望遠鏡「VLT」を使って、約15時間にわたって銀河を観測。かすかなライマン・アルファ線をとらえることに成功した。さらに、

するには最低3晩はかかるが、雨天や風の強い日は観測できない。

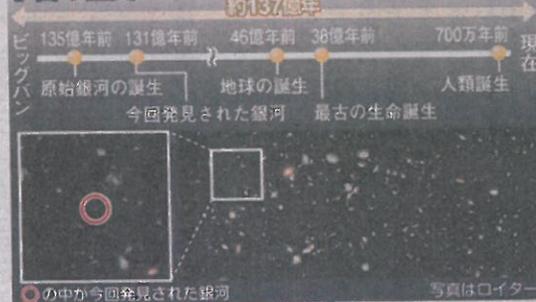
「ギネス記録になるか、論文にもならないか、リスクな研究です」と家教授は苦笑する。

これ以上、遠方の天体の観測はできるのか。現在の観測技術では「もうギリギリで難しい」と家教授。

そこで期待されるのが、日本とカナダと米国などがハワイに建設を計画している口径30mの超巨大望遠鏡「TMT」だ。すばる望遠鏡の14~200倍の感度で33等星まで観測可能といい、月面にいるホテルの光も見える性能だという。

「宇宙で最初に誕生した「一番星」や、太陽系外の地球型惑星を見つけることができるかもしれません。また、宇宙の膨張を加速させる未知のダークエネルギーの解明も期待できます」と家教授は話している。(大矢博之)

### 宇宙の歴史



### 「社会部オンデマンド」の窓口

MSN相談箱 (<http://questionbox.jp.msn.com/>)内の「産経新聞[社会部オンデマンド]」

社会部Eメール [news@sankei.co.jp](mailto:news@sankei.co.jp)

社会部FAX 03-3275-8750

# 第十三章 おわりに

## 補償光学の将来：

補償光学のアイデアは 1953 年に H.Babcock の歴史的論文から始まった。本研究チームは 1990 年代に開発を経て、2002 年度までにすばる望遠鏡カセグレン焦点用 36 素子補償光学系を完成させた。この実績を基にして 2002-2006 年度の特別推進研究にてナスミス焦点 188 素子補償光学系とレーザーガイド星生成装置を開発した。

本基盤研究 (S) は、これらをすばる望遠鏡システムに組み込んで、共同利用装置として完成させることと、完成したシステムを用いて銀河形成史に迫る観測的研究を行うことを目的とした。成熟した共同利用装置としての完成には、当初計画よりやや年月を要したが、完成したシステムの性能は世界に誇るものとなった。また、観測的研究でも、宇宙再電離の解明の研究や、重力レンズクェーサーの研究を初めとしていくつかの研究で成果を上げることができた。

本研究を通じて、すばる望遠鏡の将来計画における次世代補償光学装置開発についても、検討が始まり、また国際共同科学事業としての実現を目指す、30m 望遠鏡計画における補償光学装置と観測目標についても検討が具体化しつつある。

## 謝辞：

最後になりましたが、2002-2006 年度の特別推進研究から 2007-2011 年度の基盤研究 (S) までの十年間にわたり、188 素子補償光学系とレーザーガイド星生成システムの開発、すばる望遠鏡システムへの統合、運用に全力投球で献身してこられた高見英樹、早野裕、美濃和陽典、大屋真、渡辺誠、服部雅之、斉藤嘉彦、伊藤周、大藪進喜、白旗麻衣、Olivier Guyon、Stephen Colley、Sebastian Egner、Mathew Dinkins、Michael Eldred、Taras Golota の各氏に研究代表者として心からの敬意と感謝を表します。

前例が無く、かつ壮大で精緻な装置システム構想の実際の開発・製作には、当初想定していなかったさまざまな事態による計画の遅延が発生し、その都度当初目標を見据えて計画を最適化して遂行することができたのも、一重に開発メンバーの責任感と高い目的意識の持続にあると考えています。

チームの開発を支援してくださった、国立天文台管理部、ハワイ観測所事務室、すばる室の皆さん、契約企業の皆様にも深く感謝致します。

また、サイエンス観測計画の検討・遂行については、銀河・宇宙論の分野では柏川伸成、太田一陽、渋谷隆俊、有本信雄、樋口祐一、Eduard Rusu、大栗真宗の各氏の貢献が大きく、AO188 に装備する系外惑星探査 HICIAO の開発とそれを用いた SEEDS 計画を推進する田村元秀氏のリーダーシップとそのグループの献身的努力も大きな成果の原動力となっていることを付記させていただきます(2012 年 6 月 家正則)。

## すばる望遠鏡による初期宇宙探査の研究

自然科学研究機構国立天文台教授 家 正則

### 科学研究費補助金(科研費)

CCD(固体撮像素子)による微光天体の測光分光学的研究(一般研究(A) 1985~1986)

レーザーガイド補償光学系による遠宇宙の近赤外高解像観測(特別推進研究2002~2006)

世界最高峰の補償光学系を作り上げ、赤外線天文学に多大な貢献。

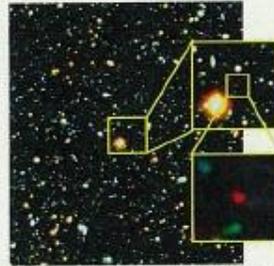
- すばる望遠鏡の空間解像度を従来の10倍高める、制御素子数188の波面センサーと可変形鏡の開発により、高精度の補償光学系を実現。
- 全固体和波レーザー・フォトニック結晶光ファイバーを備えた世界最先端のレーザーガイド星生成装置を開発し、観測可能領域を拡大。

すばる望遠鏡による初期宇宙の探査(自ら設計・製作した狭帯域フィルターを用いて、約129億光年かなたの最遠銀河を発見し、宇宙の再電離完了時期の特定に道を開いた)

2008年度仁科記念賞受賞(受賞業績)



188素子補償光学系はすばる望遠鏡の従来の空間解像力(右)を10倍に改善(左)



距離129億光年にある人類が見た最も遠い銀河を発見し、宇宙の夜明けの時期を特定。



新補償光学系を支援する人工星(左上のレーザービーム先端の赤い星)生成装置を開発



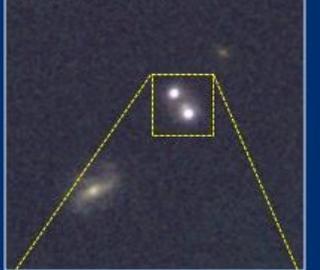
平成22年度文部科学大臣表彰(科学技術部門)「望遠鏡の視力を高めるレーザーガイド星補償光学系の研究」

Subaru/MOIRCS

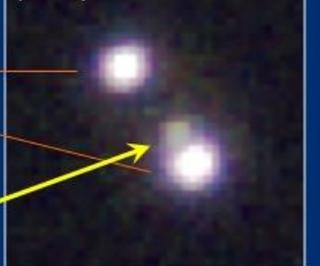


二重クェーサー  
SDSS J1334+3315

Subaru/LGSAO



(拡大図)



重力レンズ銀河  
を初めて  
撮影で確認 !!

重力レンズクェーサー二重像の間にレンズ銀河を確認