

家正

796 9/9

「大気を捉えるための技術」
応用物理学会(第47回) 9月 9日
大気を捉えるための技術
9月 9日

#103

補償光学系とレーザーガイド星

Adaptive Optics and Laser Guid Star

高遠徳尚*、高見英樹、大坪政司、神澤富雄、鎌田有紀子、中島浩二、家 正則

国立天文台 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1

* email: takato@optik.mtk.nao.ac.jp

Naruhisa Takato, Hidaki Takami, Masashi Otsubo, Tomio Kanzawa, Yukiko Kamata, Koji Nakashima, and Masanori Iye

National Astronomical Observatory, Osawa 2-21-1, Mitaka, Tokyo 181, Japan

1. 補償光学系とは

1. 1 望遠鏡の分解能

小口径の望遠鏡で天体を観測する場合、口径が大きくなればなるほど角分解能が向上するが、ある程度以上口径が大きくなると、次第に地球大気のゆらぎの影響が効いてきて、ある程度以上はいくら口径を大きくしても分解能は向上しなくなる。その時の気象条件にも依るが、可視光で観測する場合 10~20 cm 以上では大気ゆらぎが支配的になる（肉眼で観測する場合には、瞬間の像を見ているのでもう少し大きな口径まで、分解能の向上を感じられる）。補償光学とは、このように大気ゆらぎで乱された像を、リアルタイムで補正する装置である。

国立天文台では、口径 8.2 m の望遠鏡（愛称：すばる望遠鏡）を、天体観測にとっては大気の条件の良いハワイ島マウナケア山頂（標高 4200 m）に建設中であるが（図 1）、この望遠鏡の角分解能は完全に大気ゆらぎによって制限されている。我々はこの望遠鏡に 8.2 m の回折限界分解能を与えるべく、補償光学系を開発している。

1. 2 補償光学系の原理

補償光学系の原理を、図 2 に示す。大気ゆらぎを通った光の波面は歪んでいるが、その歪みに合わせて変形する鏡（可変形鏡）を通してやれば、歪みは取り除かれる。可変形鏡を制御するために、波面をリアルタイム（~ kHz）で計測することが重要である。波面を測るために参照光源には、観測する天体自身が十分明るければそれを使うが、そうでない場合は近傍の明るい天体を使う。後で述べるレーザーガイド星は、この参照星を任意の位置に作る技術である。

(1) 波面センサ

波面センサには主に、シャック・ハルトマン方式、曲率センス方式、シアリング干渉計式がある。このうち、天文用波面センサとしては、前者が使われている。シアリング干渉計式は初期に良く使われたが、干渉方式のため波長幅が取れず、天体用としては感度不足のため、あまり使われていない。曲率センス方式は、補正の素子数が少ないと低コストで、高性能のものを作ることができるが、補正素子数が 50~100 を超えると波面再生時

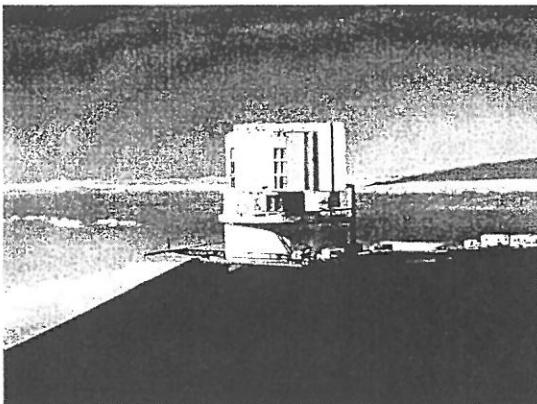
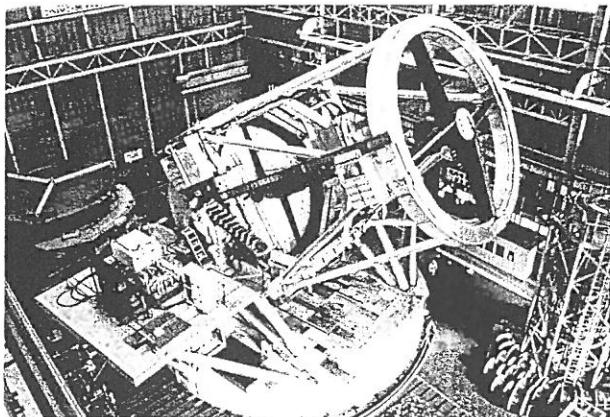


図 1. 建設中のすばる望遠鏡 左：国内での仮組、右：ハワイ島マウナケア山頂のドーム

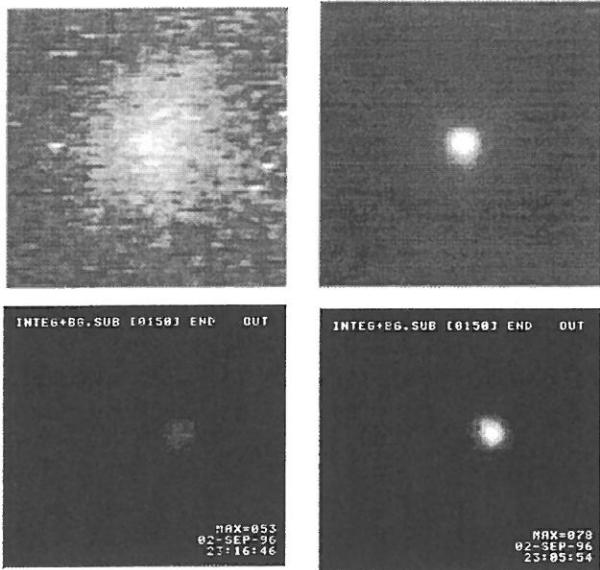


図5 国立天文台試作機によるテスト観測

上：実効波長 $2.5 \mu\text{m}$ 、下：実効波長 $0.7 \mu\text{m}$
左：補正なし、右：補正あり

使用している。可変形鏡はピエゾを使ったバイモルフ式で、36素子である。制御のサンプリング周期は約 0.6 msec である。

図5に補償光学系の効果を、実効波長 $2.5 \mu\text{m}$ と $0.7 \mu\text{m}$ で観測した場合について示す。波長が長い方が大気ゆらぎの影響が少ないため、補正の効きも良く、半値幅で $1/3$ 、ピーク強度で 7倍に改善されている。Point Spread Function を回折限界と比べると（図6）、ピークの強度は理想値の 0.4 倍であるが、ほぼ回折限界に近くまで改善されているのがわかる。

2. レーザーガイド星

2. 1 天然星を使った補償光学系の問題点

補償光学系では、波面を測定するための参照光源が必要であり、観測する天体自身が十分明るければそれを使い、そうでない場合は近傍の明るい天体を使っている。しかし、都合良く観測したい天体のそばに適当な参照星が見つかるとは限らない。星の分布等を考慮して、明るい参照星が見つかる確率を計算してみると、天然の星を参照星として使った場合には、全天の約 10%程度しか観測できないことがわかる。目的天体と参照星との距離

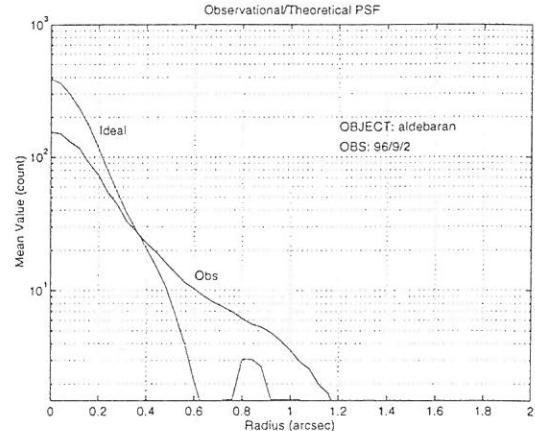


図6 補正後の赤外像のPSF

が離れても良ければ、もう少し改善されるが、その場合は補正の効きが悪く、また像が参照星の方にのびてしまう。

参照星が見つからない問題は、実用上きわめて重要なため、任意の方向に参照光源を作る技術が提案された。それがレーザーガイド星である。

2. 2 レーザーガイド星の原理（図7）

地球の高層約 90 Km には、ナトリウム原子の密度が濃い層が存在している。この層めがけて、ナトリウム D 線 (589 nm) のレーザーを当ててやると、共鳴散乱を起こして発光するので、これを参照光源として利用する。

大気には様々な原子が含まれているが、レーザーガイド星として利用できるためには、(1) 高層にあること、(2) 十分に明るく発光すること、(3) 発光波長が波面センサの有感波長内にあること、が必要である。(1)

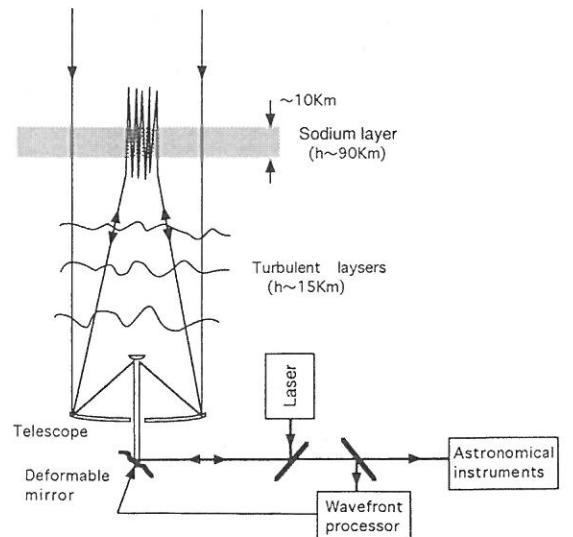


図7 レーザーガイド星の原理

Concept	Temporal format	Duty cycle	Energy/pulse avg pw/r	Spectral width	Beam quality	Status	Comments	Reference
Flashlamp pumped R6G dye	4ns pw, 20pps	0.012%	120 mJ/p	3 GHz	4 x DL	Used at WSMR in SWAT 11984	Built by AVCO for MITLL	LL Journal, 5(1), 45, 1992
Flash lamp pumped dye	2ns pw, 7.5ps	.0015%	20 mJ/p 0.15watt	10.1 pm 0.15watt	0.4mrad div.	Used in 1987 Mauna Kea experiments	UIUC Lidar system	Nature, 328, 229-231, 1987
Flash lamp pumped 1.06 +1.32 Nd:YAG summed in LiIO ₃	100μs macro@ 10pps, each a 100MHz train of 0.7ns pulses	0.007%	0.5J 5 watts	3 GHz	2 x DL	Used in atmospheric measurements of optical pumping	Built by Tom Jey's MITLL	Optics Letters, 17, 1143-1145, 1992
Flash lamp pumped 1.06 + 1.32 Nd:YAG summed in LBO	60 ns macro@ 840pps each a 100MHz train of 0.4ns pulses	0.2%	24 mJ 20 watts	3 GHz	1.5 x DL	Signal return measurements at SOR, 1991	Built by Tom Jey's MITLL	JOSA A, 11, 806-812, 1994
Copper vapor laser pumped dye laser	32ns pw @ 26Kpps	0.083%	42.mJ 1100 W	3GHz	<1.5 x DL	Signal return measurements 1992	Built by LLNL	JOSA A, 11, 813-824, 1994
Light Age Alcatelndic Raman shifted free dbld	80ns pw @ 20pps %	.00016	10 mJ 0.2 watt	100-150 MHz	un-known	Nalidar fielded in German	Potassium excited by fundamental at 769	Geophys Res Lett, 23, 141, 1996
Argon pumped Spectra-Physics 380C ring dye	CW	100%	1.2W	10 MHz	-DL	completed May 1993	Not optimized for ESO Proc No. 48, UofA, UofC, MMT	ESO Proc No. 48, 95, 1993
Argon pumped Coherent model 859-21 ring dye	CW	100%	2.7 watts	10 MHz	-DL	completed Dec 1993, MMT	filed experiments by UofC and UofA	SPIE, 2201, 342-351, 1994
Argon pumped standing wave dye	CW	100%	1.7 watts	10 MHz	-DL	completed Feb 1994, MMT	Built by LLNL	SPIE, 2201, 342-351, 1994
Argon pumped ring dye laser	CW	100%	0.8 watt	10 MHz	-DL	Wind and temp meas at SOR, 1995	Guide star expts SOR/U of Illinois	Chet Gardner, U of Illinois
Freq doubled Nd:YAG pumped dye laser	100ns pw @ 11Kpps	0.11%	1.55 mJ 17 watts	3 GHz	1.5 x DL	Installed on Jim Lick telescope	Built by LLNL	Herb Friedman, UNL
Laser diode pumped 1.50μs macro@ 400pps each a 100MHz train of 0.7ns pulses	150μs macro@ 400pps each a 100MHz train of 0.7ns pulses	0.42%	50 mJ 8 watts	3 GHz	DL	Installed at ARC TEM00 telescopic Apache Pt, NM, 1995	Built by Tom Jey's MITLL	Ed Kibblewhite, U of Chicago

AMCI-2

$$\left(\langle R_{\perp} F_{\text{tsat}} \rangle \right)$$

Table 2 Mesospheric sodium lasers used in field experiments

End user or interested party	Developer	Laser concept	Temporal format	Duty cycle	Avg power	Status	Comments	Reference
SOR	Karl Koch, Phillips Lab	Combined intracavity OPO & sum frequency pumped by Nd:YAG	CW MI, n=76MHz cleomed, 40Hz, 1ms	0.15%	100 mW	Basic concept demonstrated	1.06μm NL materials, 1.0μm better	Opt. Lett., 19, 1967-1969, 1994
MPIA, Calif Alto, 3.5m	MPG-Garching	Nr pumped dye	CW	1.00%	2.3W		Commercial components	Andreas Quirrenbach
UK AO Program, WHT	Oxford Lasers	CVL pumped dye	Sous at several kpps	0.05%	-10W	Lab evaluation		Goeff Hogan
Kek II, Mauna Kea	LLNL	Freq doubled Nd:YAG pumped dye	100ns pw @ 30Kpps	0.1%	20 mW	PR + design		Herb Friedman, LLNL
SOR	LLNL	Freq doubled Nd:YAG pumped dye	100ns pw @ 10Kpps	0.1%	-200W	On-hold	Scaling up of existing technology	Herb Friedman, LLNL
SOR	Rocketdyne	Nd:YAG pumped OPO/OUTASH	1Kpps, 100 μs, NL	0.13%	10W	Basic concept demonstrated		Chris Clayton, PLIDN
SOR	TRW	Intracavity Raman shifted Nd:YAG by CaWO4 and freq double to 589nm.	10ns macro pulses	0.11%	50-200W	Lasing on D2 line	Concept by R. Byer at Stanford	Jackie Derr, TRW Paper, this conference
Univ of Ariz, SOR	Univ of Arizona	Configurational tuned Nd:YAG	300ns pw, 100Kpps, 1-10 GHz	1%	10W	Basic concept demonstrated with Nd:YAG line width		Dick Powell, Univ of Arizona, OSC

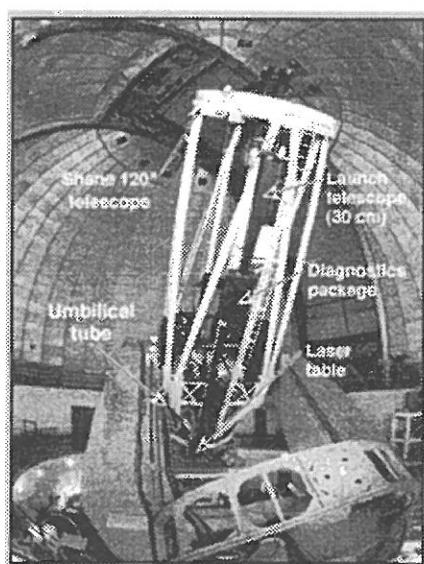
Table 3 Conceptual and developmental mesospheric sodium lasers ($\langle R_{\perp} F_{\text{tsat}} \rangle$)

測所に提案し、基本的に実験を認める方向で動いている。

天文のサイエンティフィックな観測にレーザーガイド星
が使われるようになる日も近い。

4. 参考文献

表2～4のreference を参照されたい。



* 色素レーザ

* tuned to 589nm(Na D)

* Nd-Yag laser pump
(freq. doubled)

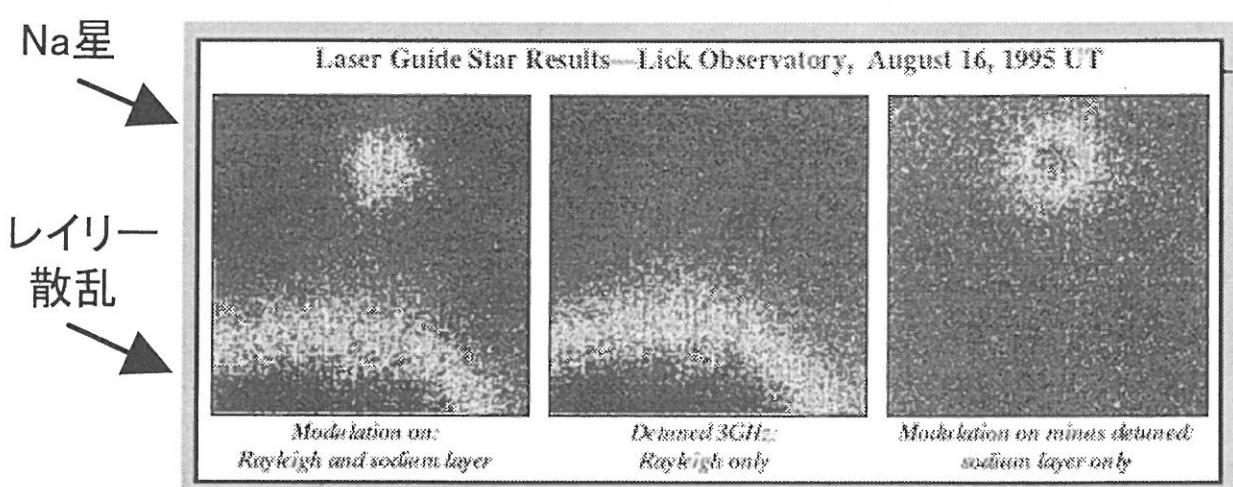
* 15W output

* 100ns pulse

* 繰返し周波数: 11 kHz

Lawrence Livermore National Laboratory

図10 ローレンス・リバモアのレーザーガイド星システム



- ・ガイド星サイズ: 1.8 arcsec
- ・9等星(0.26photon/cm²/ms) @ 15W Laser

図11 ローレンス・リバモアのレーザーガイド星