

## 9 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

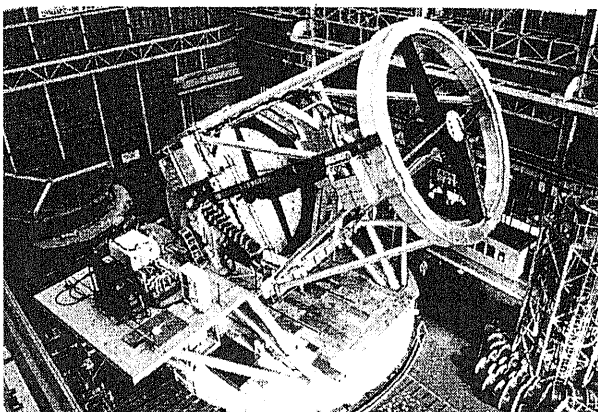
National Astronomical Observatory, Osawa 2-21-1, Mitaka, Tokyo 181, Japan

### 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。波面を測るための参照光源には、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場合は低コストで、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

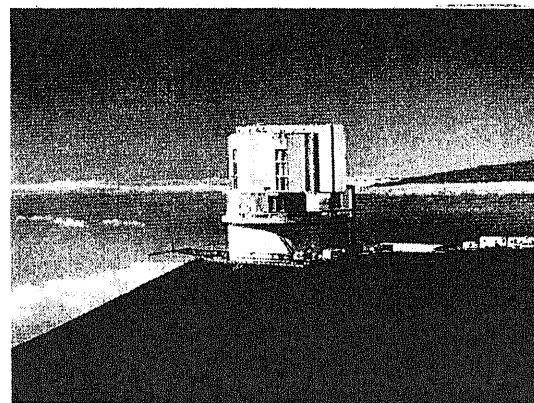


図 1. 建設中のすばる望遠鏡 左：国内での仮組、右：ハワイ島マウナケア山頂のドーム

のノイズの問題で、シャック・ハルトマン方式の方が有利になる。

(i) シャック・ハルトマン方式 (図3)

望遠鏡の瞳をマイクロレンズアレイで分割して、各マイクロレンズで結像されるスポットの位置の動きから、波面の局所的な傾きを求める方式である。波面は連続であると仮定して、波面を再生する。

(ii) 曲率センス方式 (図4)

望遠鏡の瞳の前後での明るさの分布を測定し、波面の局所的な曲率を測定する方式である。波面が平面波なら、瞳の前後で光強度分布に差は無いが、もし曲率を持っていると片方で明るくなり、もう片方では暗くなる。曲率データから波面形状に戻すには、境界の波面の傾きの情報が必要であるが、それは瞳前後像の縁の形から求める。

(iii) シアリング干渉計式

波面を分割して、横方向にずらして干渉させて、波面の局所的な傾きを測定する方式である。

(2) 可変形鏡

ピエゾ・スタックを並べた上に薄い (1~5 mm) の鏡をのせたもの、ピエゾでバイモルフを作って表面に鏡を

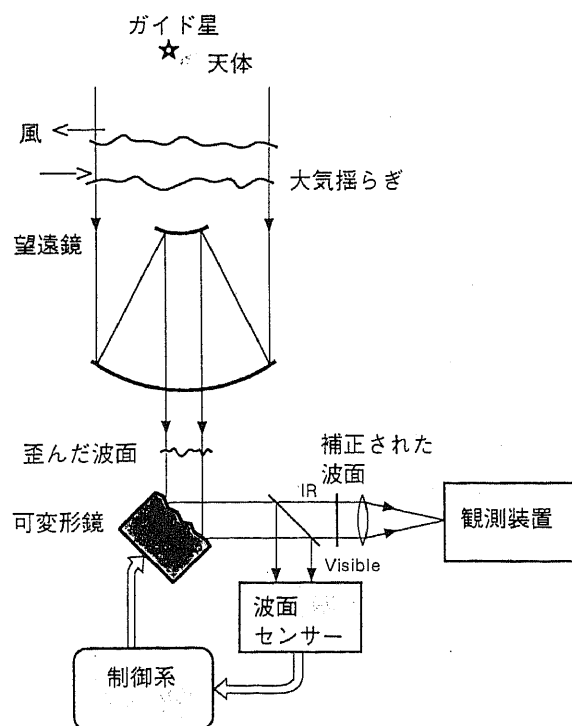


図2 補償光学系の概念図

レプリカものや、鏡を分割して、一枚ごとにアクチュエータを取り付けたものなどがあり、いくつかの会社から市販もされている。ハードタイプのピエゾをアクチュエータとして使ったものは、ヒステリシスが5%程度あり、またじわじわと変形するクリープもあるため、制御には注意が必要である。閉ループ制御をしている場合はあまり問題ないが、スタティックに変位を与える場合は、その影響が大きい。

(3) 高速計算機

波面センサデータから可変形鏡駆動データをリアルタイムで計算するために、高速な計算機が必要である。制御の周波数は、対象とする波面ゆらぎのスケールや、気象条件に大きく依存するが、1 m程度のスケールのゆらぎまで補正するなら、サンプリング周波数は数kHzである。計算自体は単純な行列計算であるが、補正項数が多くなってくると計算時間が間に合わなくなるので、DSPを使ったり、複数のCPUで並列に計算したりして対応している。

1. 3 国立天文台の試作機

我々のグループでは、前述のすばる望遠鏡用の補償光学系を開発中である。波面センサは曲率センス式で、36個のアバランシェ・フォトダイオードを検出器として

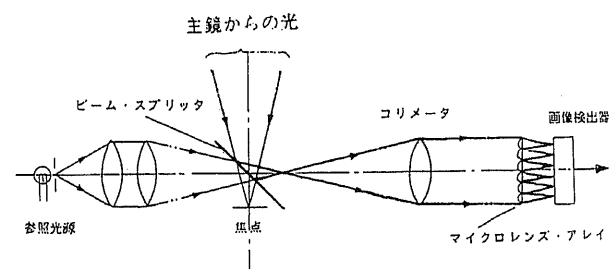


図3 シャック・ハルトマン波面センサ

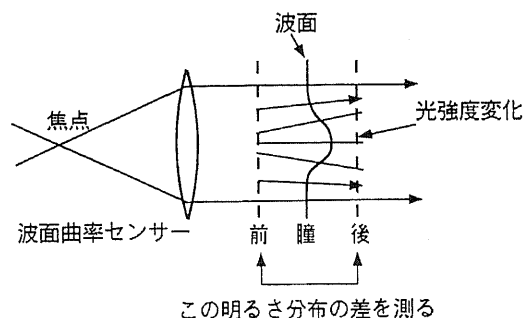


図4 波面曲率センサの原理

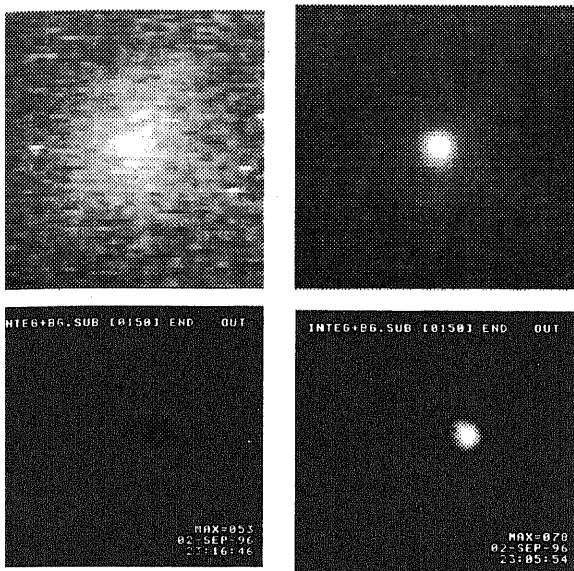


図5 国立天文台試作機によるテスト観測  
 上：実効波長 $2.5\ \mu\text{m}$ 、下：実効波長 $0.7\ \mu\text{m}$   
 左：補正なし、右：補正あり

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

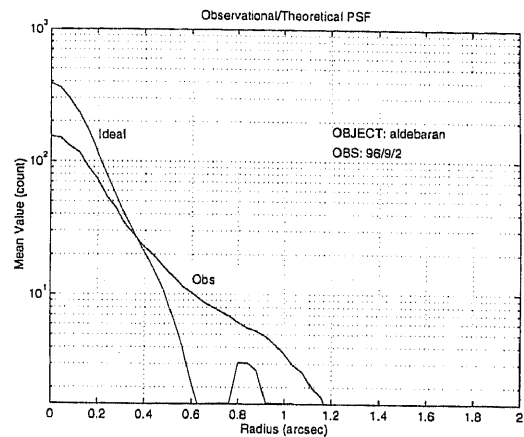


図6 補正後の赤外像のPSF

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)

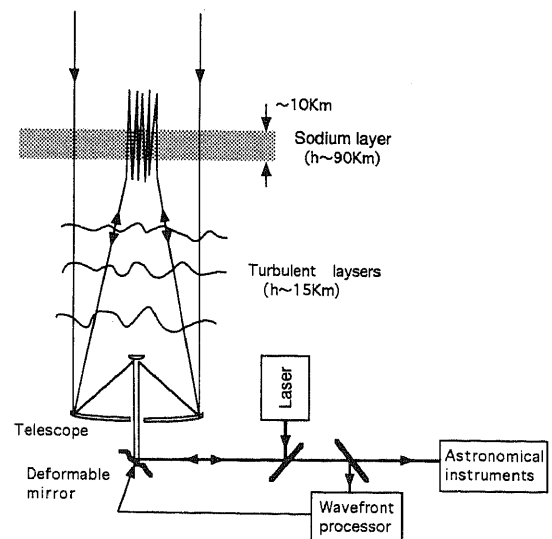


図7 レーザーガイド星の原理

Table 1. Known Airglow Emissions for the Earth\*

$\lambda$ (Å)	Emitter State	Day Intensity	Height (km)	Process	Twilight Intensity	Height (km)	Night Intensity	Height (km)	Process	$g$ ( $s^{-1}$ )	$d$ (source)	$h_q$ (km)	Remarks
304	He <sup>+</sup>	Present		R			(4.8)			$1.1 \times 10^{-4}$			Nightglow radiation could be either or both
584	He	Present		R			(12)			$1.7 \times 10^{-5}$			
834	O <sup>+</sup>	Present		R									
1025	H <sub>1</sub> Ly- $\beta$	Present	200 to 10 <sup>4</sup>	R		200	10 R	200	R	$2.6 \times 10^{-6}$			
1200	N( <sup>4</sup> P)	400 R	180	R?									
1216	H <sub>1</sub> Ly- $\alpha$	6 kR	100 to 10 <sup>5</sup>	R		100 to 10 <sup>5</sup>	2 kR	100 to 10 <sup>5</sup>	R	$2.1 \times 10^{-3}$	$(4.5 \times 10^{-8} [H_2])$		
1302, 1304, 1306	O( <sup>3</sup> S)	7.5 kR	190	eFR						$1.0 \times 10^{-4}$			
1356	O( <sup>5</sup> S)	350 R	140	e									
1300-1500	N <sub>2</sub> ( $\alpha'$ $\Pi_u'$ )	Present		e									Lyman-Birge-Hopfield
1493, 1744	N	Present		e									
2000-4000	N <sub>2</sub> (A <sup>3</sup> $\Sigma_u^+$ )	Present		e									
2160, etc.	NO(A <sup>2</sup> $\Sigma_u^+$ )	1 kR	70-150	R						$4.0 \times 10^{-6}$			Vegard-Kaplan $\gamma$ bands; $g$ for 1-0 band
3371, etc.	N <sub>2</sub> (C <sup>3</sup> $\Pi_u$ )	900 R	$\geq 130$	e									2nd Positive Herzberg
2600-3800	O <sub>2</sub> (A <sup>3</sup> $\Sigma_u^+$ )	Present		e									
3466	N( <sup>2</sup> P)	Present		e			600 R	90	C				
3889	He( <sup>3</sup> P)			R	1 R	>400?				0.1			Scatterer is He( <sup>3</sup> S)
3914, etc.	N <sub>2</sub> <sup>+</sup> (B <sup>2</sup> $\Sigma_u^+$ )	2.0 kR	150	RF	200-500 R	300	<1 R			0.050	$10^{-8} [N_2]$	46	1st Negative
3933,68	Ca <sup>+</sup> ( <sup>2</sup> P)				<100 R	80-200				0.3, 0.15			
4368	O( <sup>3</sup> P)				1 R								
5200	N( <sup>2</sup> D)	90 R	~200	I	10 R		1 R	~250	I	$(6 \times 10^{-11})$		~200	Also quenched by electrons
5000-6500	NO <sub>2</sub> ?						1 R/Å	~90	C				Continuum
5577	O( <sup>1</sup> S)	3.0 kR	90, 175	Ce	400 R	200?	250 R	90, 300	C, I	$(1 \times 10^{-11})$	$3 \times 10^{-8} [O_2]$	94	2972 Å (5%)
5893	Na( <sup>2</sup> P)	30 kR	92		1-4 kR	92	20-150 R	~92	C	0.80		40	
6300, 64	O( <sup>1</sup> D)	2-20 kR	250	Fle	1 kR	300	10-500 R	300	I	$(4.5 \times 10^{-10})$	$5.8 \times 10^{-6} [O_2]$	340	
6563	H( <sup>3</sup> P)						3 R	200	F	$2.6 \times 10^{-6}$			
6708	Li( <sup>2</sup> P)				10-1000 R	~90				16			May be of artificial origin
7619, etc.	O <sub>2</sub> ( <sup>1</sup> $\Sigma$ )	300 kR	40-120	RF	40 R	~90	6 kR	~80	C	$6.3 \times 10^{-9}$	$<5 \times 10^{-3} [O_2]$	90	Atmospheric
7699	K( <sup>2</sup> P)									1.67			
7774, 8446	O	1.6, 1.1 kR	~150	e								37	1st Positive
10510, etc.	N <sub>2</sub> (B <sup>3</sup> $\Pi_g'$ )	900 R	150	e	3 kR	500				16.8		~400	Scatterer is He( <sup>3</sup> S); $h_q$ for its destruction
10830	He( <sup>3</sup> P)												Meinel; $g, d$ for 1-0 band (9200 Å)
11036, etc.	N <sub>2</sub> <sup>+</sup> (A <sup>2</sup> $\Pi_u$ )	4 kR	150	RF						0.042	$2.8 \times 10^{-8}$		
12700, etc.	O <sub>2</sub> ( <sup>1</sup> $\Delta$ )	20 MR	50	F	5 MR	80	80 kR	90?	C?	$(9.4 \times 10^{-11})$	$9.5 \times 10^{-3} [O_2]$	75	IR atm; 0-1 band 1.58 $\mu m$ ; Noxon bands 1.9 $\mu m$ ;
2800, etc.	OH( $\nu < 9$ )	4.5 MR		C			4.5 MR	90	C				Meinel; 4.5 $\mu m$ to 3816 Å

\*From Ref. 20. Production processes are R, resonance scattering; F, fluorescence; I, ionic reactions; e, photoelectrons; C, chemical association; T, excitation transitions. Production rate factors are  $g$  and  $d$ ,  $h_q$  is the quenching height.

(W. Happer, et al)

Concept	Temporal format	Duty cycle	Ener/pulse avg pwr	Spectral width	Beam quality	Status	Comments	Reference
Flashlamp pumped R6G dye	4μs pw, 20pps	0.012%	120 mJ/p 2.4 watts	3 GHz	4 x DL	Used at WSMR in SWAT I 1984	Built by AVCO for MIT/LL	LL Journal, 5(1), 45, 1992
Flash lamp pumped dye	2μs pw, 7.5pps	.0015%	20 mJ/p 0.15 watt	10.1 pm	0.4 mrad 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 LiIO3	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 Jeys MIT/LL	Optics Letters, 17, 1143-1145, 1992
Flash lamp pumped 1.06 + 1.32 Nd:YAG summed in LBO	60 μs 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 Jeys, MIT/LL	JOSA A, 11, 806-812, 1994
Copper vapor laser pumped dye laser	32ns pw @ 26Kpps	0.083%	42mJ 1100 W	3GHz	<1.5 x DL	Signal return measurements 1992	Built by LLNL	JOSA A, 11, 813-824, 1994
Light Age Alexandrite Raman shifted/ freq dbld	80ns pw @ 20pps	.00016 %	10 mJ 0.2 watt	100-150 MHz	un-known	Na lidar fielded in German	Potassium excited by fundamental at 769	Geophys Res Ltr, 23, 141, 1996
Argon pumped Spectra-Physics 380C ring dye	CW	100%	1.2W	10 MHz	-DL	completed May 1993 UofA, UofC, MMT	Not optimized for stable freq operation	ESO Proc No. 48, 95, 1993
Argon pumped Coherent model 899-21 ring dye	CW	100%	2.7 watts	10 MHz	-DL	completed Dec 1993, MMT	field 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 3m Lick telescope	Built by LLNL	Herb Friedman, LLNL
Laser diode pumped 1.06+1.32 Nd:YAG lasers summed in LBO	150μs macro @ 400pps each a 100MHz train of 0.7ns pulses	0.42%	50 mJ 8 watts	3 GHz adjustable	DL TEM00	Installed at ARC telescope Apache Pt, NM, 1995	Built by Tom Jeys, MIT/LL	Ed Kibblewhite, U of Chicago

Table 2 Mesospheric sodium lasers used in field experiments (R Fugate)

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 ML at 76MHz chopped, 40Hz, 1ms	0.015%	100 mW	Basic concept demonstrated	1.06μm limits NL materials, 1.03μm better	Opt. Lett., 19, 1967-1969, 1994
MPIA, Calar Alto, 3.5m	MPI-Garching	Ar pumped dye	CW	100%	2-3W		Commercial components	Andreas Quirrenbach
UK AO program, WHT	Oxford Lasers	CVL pumped dye	50ns at several Kpps	0.05%	~10W	Lab evaluation		Geoff Hogan
Keck II, Mauna Kea	LLNL	Freq doubled Nd:YAG pumped dye	100ns pw @ 30Kpps	0.3%	20 watts design	PDR +		Herb Friedman, LLNL
SOR	LLNL	Freq doubled Nd:YAG pumped dye	100ns pw @ 30Kpps	0.3%	~200W design	On-hold	Scale-up of existing technology	Herb Friedman, LLNL
SOR	Rocketdyne	Nd:YAG pumped OPO/OPA/SHG	1Kpps, 100 μs, ML	0.33%	10W design	Basic concept demonstrated		Chris Clayton, PL/LIDN
SOR	TRW	Intracavity Raman shifted Nd:YAG by CaWO4 and freq double to 589nm.	30μs macro pulses ML at 100MHz	0.11%	50-200W goal	Lasing on D2 line demonstrated	Concept by R. Dyer at Stanford	Jackie Berg, TRW Paper this conference
Univ of Ariz, SOR	Univ of Arizona	Configurational tuned Nd:YAG intracavity Raman shifted by CaWO4, freq doubled to 589nm.	300ns pw, 100Kpps, 1-10 GHz line width	3%	10W goal	Basic concept demonstrated with Nd:YAG		Dick Powell, Univ of Arizona, OSC

Table 3 Conceptual and developmental mesospheric sodium lasers (R Fugate)

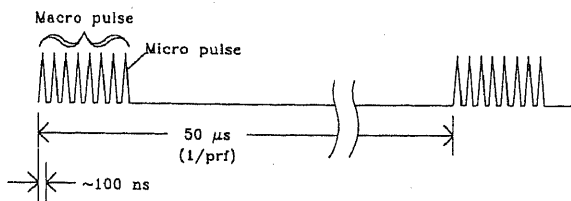


図8 レーザーパルス・フォーマットの一例 (Hogan et. al)

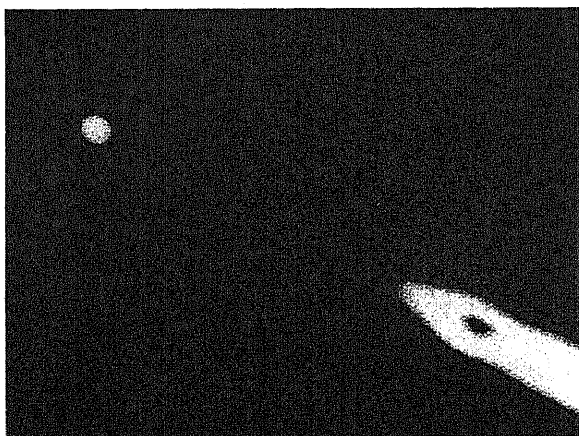


図9 レーザーガイド星 (シカゴ大)

はもし参照光源が低い所にあると、実際の天体と違った大気を通ってくる割合が大きくなって、補正が悪くなるからである。波面センサは、現在のところ高感度化のために可視光を利用している。表1に利用できそうな大気内原子の一覧を示す。この中で上記の条件を最も良く満たすのが、ナトリウムである。波面センサを赤外線にすれば、また別の原子も利用できるかもしれない。

ナトリウム原子を励起する場合、あまり強い光を当てると励起が飽和してしまい、照射光が無駄になるので、CWで励起するか、図8のようにパルスに分けて一度に強い光が当たらないように工夫している。また、ナトリウム原子の熱運動等を考慮して、照射光のバンド幅は約3 GHzていどの広さを持たせてあることが多い

## 2. 3 レーザーガイド星の実際

図9は実際にレーザーガイド星を作った時の写真である(シカゴ大)。右下からのびているのが、低層大気によるレーリー散乱で、左上に丸く写っているのが、ナトリウム層による共鳴散乱である。レーリー散乱中で一部明るいところがあるが、これはピナツポ火山の噴煙によ

る散乱である。

現在いくつかの天文台で、実際にレーザーガイド星を作る実験を行っている。ナトリウム励起のレーザーの方式も様々である。表2にレーザーの種類と励起方式を、表3に主な天文台を示す。詳しくは各表のレファレンスを参照されたい。ここでは Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) の例を簡単に紹介する。なおこれらの情報は、World Wide Web で簡単に参照できるようになっている。興味のある方は

<http://www.cfht.hawaii.edu/manuals/aob/>

[other-aosystems.html](http://www.cfht.hawaii.edu/manuals/aob/other-aosystems.html)

にアクセスすると、補償光学系についてのサイトが多数リンクされている。

LLNL のシステムは、リック天文台の3 m望遠鏡に設置されている(図10)。使用レーザーはNd-YAG レーザーでポンピングされた、色素レーザーで、589 nm に合わせてある。出力は15 Wで、100 ns 幅のパルスを11 KHzの繰り返し周波数で、ナトリウム層を励起している。レーザーは3 m望遠鏡に同架された30 cmの望遠鏡から打ち上げれる。安定してレーザー星を作るには、レーザーによる熱等で光学系が変化するのを補償する事がキーポイントになっているという。

図11がLLNLで得られたレーザー星の像である。レーザー星のサイズは1.8 arcsecで、15 Wのレーザーを用いて9等星に相当する明るさ(0.26 photon/cm<sup>2</sup>/ms)を得ている。

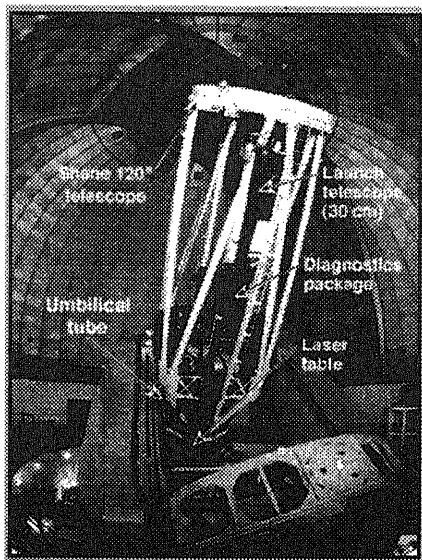
## 3. まとめ

補償光学系は既に実用の段階に入り、次世代望遠鏡には必須の技術となった。天然星を使ったシステムでは、観測できる方向が限られてしまうため、レーザーガイド星が考案された。天文の業界では、夜空を光害から守ることの一貫として、たとえばハワイ島マウナケア山頂では、レーザーガイド星の実験を禁止してきたが、その有用性がにわかには認められるようになってきている。先日、マウナケア山頂にあるケック望遠鏡のグループが、マウナケア山頂でのレーザーガイド星実験を山頂にある各観

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

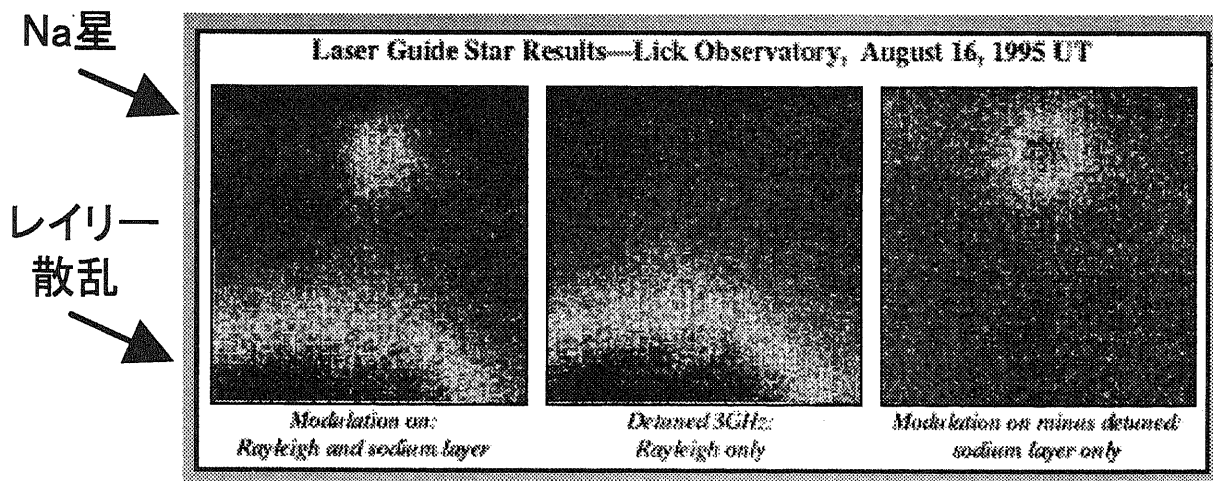
表2～4のreferenceを参照されたい。



- \* 色素レーザー
- \* 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/cm<sup>2</sup>/ms) @15W Laser

図11 ローレンス・リバモアのレーザーガイド星