

## 4 – ÓPTICA ADAPTATIVA

A óptica adaptativa foi desenvolvida pela Defesa e militares dos EUA nos anos 70/80. No final dos anos 80 os astrónomos aproveitaram a publicação em revistas de material “desclassificado” como secreto.

### 4.1 Princípios

Por oposição à óptica activa, a **óptica adaptativa** tem também por objectivo melhorar a qualidade da imagem obtida por um telescópio mas, desta vez, actua compensando os efeitos nefastos do “seeing” atmosférico e similares (perturbações 7–10 da tabela na pág.41). Os erros a corrigir são **de fase**, e tal é conseguido, como na óptica activa, recorrendo aos modos de vibração do espelho em causa.

Em termos formais, diz-se que é um processo de controlo de **alta frequência** (10–10<sup>3</sup> Hz, tipicamente).

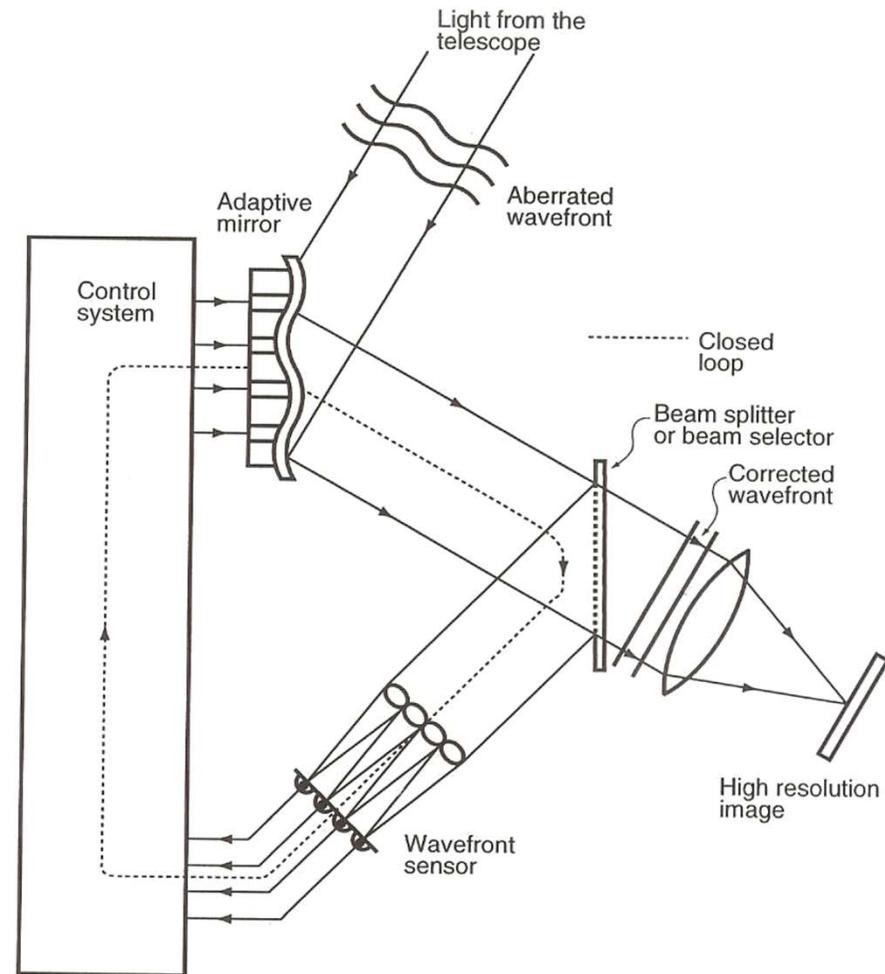
Existem **cinco diferenças** fundamentais entre as ópticas activa e adaptativa:

Propriedade	Óptica	
	Activa	Adaptativa
períodos (gama) <i>[em ordens de grandeza]</i>	2 <i>[limite prático]</i>	≥ 5
campo de coerência de fase (imagem)	ilimitado	muito limitado
gama de correcção para $w \propto D^4/e^2$	muito larga	estreita
área da Física	Teoria da Elasticidade (simples)	Teoria de Gases (complexa)
Local da correcção	espelho primário (sem perda de fotões)	espelho "de transferência" (~70% de perdas)

Assim, a óptica adaptativa apenas “ganha” à óptica activa na primeira propriedade.

A implementação da óptica adaptativa, em termos práticos, recorre a um **pequeno espelho flexível (adaptável)** que compensa, em tempo real, os efeitos do “seeing” e similares, traduzindo a superfície do espelho, em cada instante, uma imagem “invertida” daqueles efeitos. A luz que serve de teste vem de uma estrela brilhante no campo da observação (bem próxima: arcseg; *c.f. rádio – graus*). Pode ser **natural** ou **artificial** (laser). Pode, ainda, ser algo estendido (e.g. satélite de Júpiter ou grânulo solar).

A óptica adaptativa tem um enorme sucesso no IV, onde já se domina a técnica. Para outros comprimentos de onda (e.g. visível) o progresso tem sido mais lento.



Como se ilustra na Tabela seguinte, o problema do visível é, em primeiro lugar, teórico.

Grandeza limite para 100 fotões por sub-abertura, em função do comprimento de onda

(exposições da ordem dos ms).

Área do céu disponível para observações nos pólos e equador galáctico.

Banda	V	K	L	N
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0.5	2.2	3.6	10
$m_{\text{lim}}$	7	13	15.5	17
$C_P$	$\approx 0\%$	0.1%	30%	100%
$C_E$	$\approx 0\%$	0.3%	100%	100%

Na Tabela ao lado ilustra-se, de outra forma, a dificuldade em encontrar estrelas no óptico pois a **distância** máxima “de coerência” ( $\theta_0$ ) é muito curta.

Assim, não é possível trabalhar no óptico com uma estrela natural: é obrigatório o recurso ao **laser**.

Teoricamente, temos:

$$\text{Número de actuadores} \propto D^2 \propto \lambda^{-12/5}$$

Assim, quanto maior o comprimento de onda, menor o número de actuadores necessário (mais uma “acha na fogueira” contra o óptico).

A propósito, há uma forma (teórica) de calcular o número máximo de actuadores que se podem colocar num espelho deformável. São dados pela exigência:

Spectral band	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$\theta_0$ (arcsec)
U	0.365	1.2
B	0.44	1.5
V	0.55	1.9
R	0.70	2.6
I	0.90	3.5
J	1.25	5.1
H	1.62	7.0
K	2.2	10.1
L	3.4	17.0
M	5.0	27.0
N	10	64

$$\nu_N = 1/(2d_A) \ll \nu_{modal}^{min}$$

onde:  $\nu_N$  é a frequência de Nyquist,

$d_A$  o espaço médio dos actuadores,

$\nu_{modal}^{min}$  é a frequência mais baixa dos modos de vibração do primário (c.f. Figura da pág.39).

Recorrendo mais uma vez ao exemplo do VLT, a gama dinâmica de correcção  $w$  é de  $20\mu\text{m}$  ( $\pm 10\mu\text{m}$ , portanto). As flutuações atmosféricas responsáveis pelo “seeing” têm duração  $\tau > 3 \text{ ms}$ . Logo,  $\nu < 1/(3 \times 10^{-3}) \approx 330 \text{ Hz}$ .

O exemplo anterior dá-nos uma ideia da frequência máxima normalmente necessária para compensar o “seeing”. No entanto, de facto, a duração típica das flutuações depende do comprimento de onda:

$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	0.5	2.2	3.6	10
$\tau$ (ms)	6	36	95	218

## 4.2 Elementos

Um sistema de óptica adaptativa contém **três** elementos principais. O:

- i) espelho adaptável;
- ii) analisador de imagem (sensor de frente de onda);
- iii) detector.

Poderá, ainda, ter um **quarto** elemento (opcional): uma fonte laser, geradora da estrela artificial.

## 4.2.1 O espelho adaptável

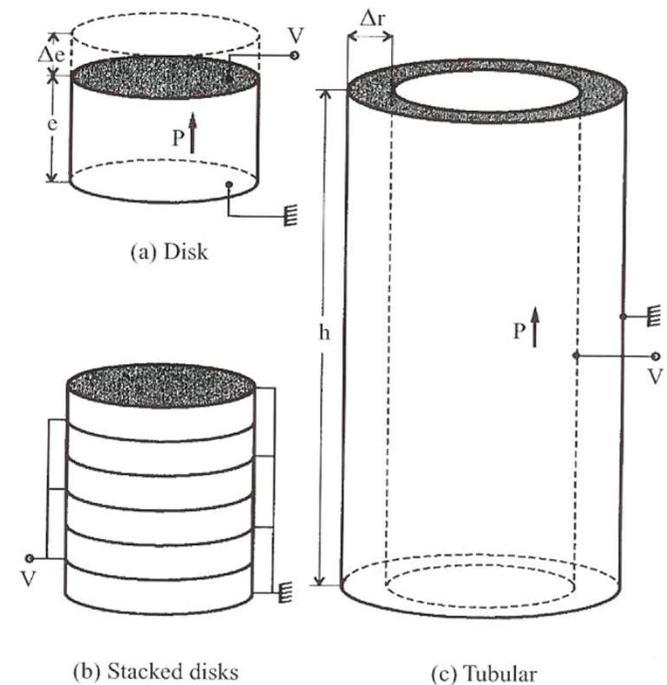
### A) Os actuadores

O tipo de actuador mais comum (**piezoeléctrico**) é, de facto, de um tipo mais geral dito “de efeito ferro-eléctrico”.

Quando se aplica um campo eléctrico  $\vec{E}$  a uma cerâmica piezoeléctrica polarizada ao longo de uma dimensão  $e$ , esta é deformada de  $\Delta e$ , devido a uma tensão  $\propto |\vec{E}|$  (também  $\Delta e/e \propto |\vec{E}|$ ).

A cerâmica que se conhece onde o efeito é mais forte é o **PZT** ( $\text{Pb}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ), cada disco deformando-se de 0.3–0.8  $\mu\text{m}/\text{kV}$ .

- a) Cada disco de PZT tem, tipicamente, 1mm de espessura.
- b) Juntando dezenas de discos de PZT em paralelo, podem-se obter alguns microns de deformação para umas centenas de Volts.
- c) Em alternativa, pode-se usar o PZT na forma de um cilindro e alterar a sua espessura ( $\Delta r$ ).

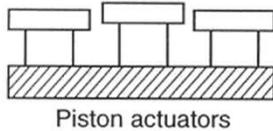


Um outro tipo de actuador, quase exclusivamente utilizado em espelhos adaptáveis de membrana, é o **electrostático**. É, essencialmente, um conjunto de terminais eléctricos que não se deslocam (fixos). Permitem uma sensibilidade de 10–20 $\mu\text{m}/\text{kV}$  (bem melhor que os piezoeléctricos).

## B) O espelho em si

É, de todos, o elemento mais crítico. Há quatro tipos principais, com subtipos (conforme os actuadores):

i) **segmentado**: a) *pistão*; b) *inclinação*; c) *pistão+inclinação* [o mais comum]



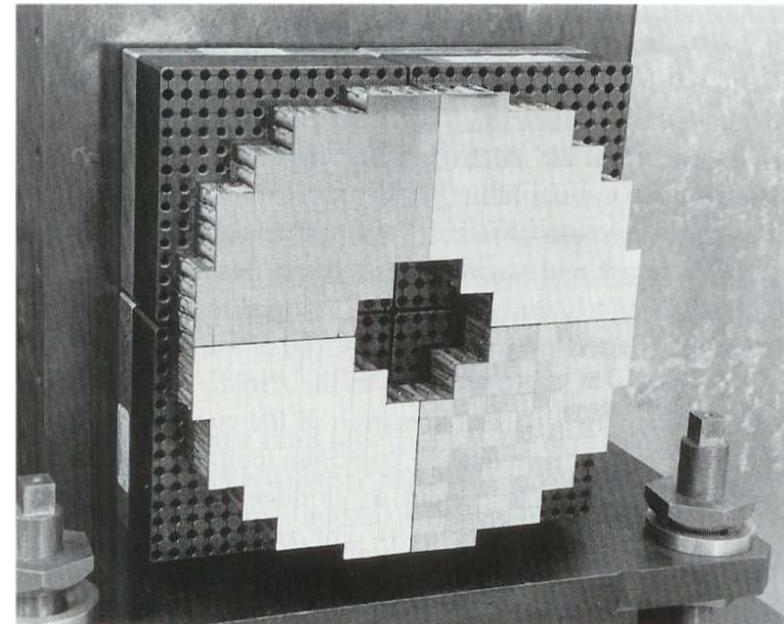
**vantagens**: - fácil controle algorítmico

- independência dos elementos facilita reparações

**desvantagens**: - fogem fótons pelos espaços entre os segmentos

- são precisos oito vezes mais actuadores do que em espelho monolítico equivalente

*Um espelho para óptica adaptativa segmentado. Neste caso usa actuadores do tipo pistão + inclinação. O recorde de segmentos em espelhos deste tipo é de 512. Potencialmente, 10000 são factíveis.*



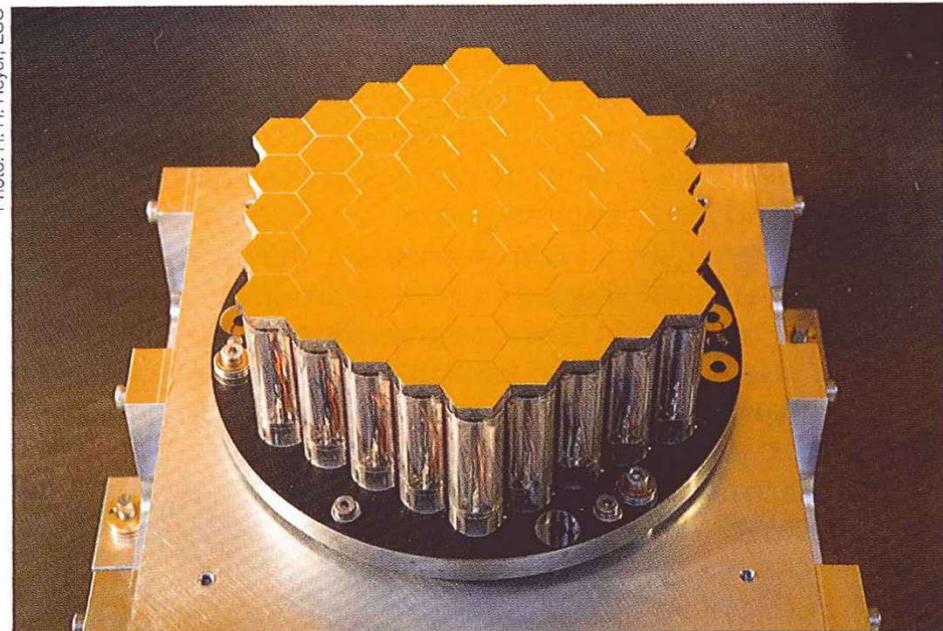
Um exemplo topo de gama da aplicação de uma segmentação de tipo **1-c** é a do Extremely Large Telescope (ELT) que, no design corrente, terá 42m de diâmetro e será composto de 984 segmentos hexagonais com 1.5m de diagonal. O espaço entre segmentos será de apenas 4mm. No entanto, terão de ser alinhados com uma precisão de 15 nm.

Um protótipo foi construído com 61 segmentos, cada um com três actuadores piezo-eléctricos (permitem um deslocamento até  $15\mu\text{m}$ ).



*Um segmento.*

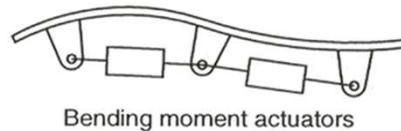
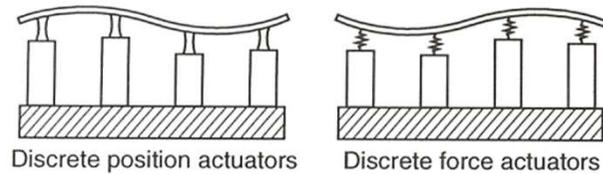
Photo: H. H. Heyer, ESO



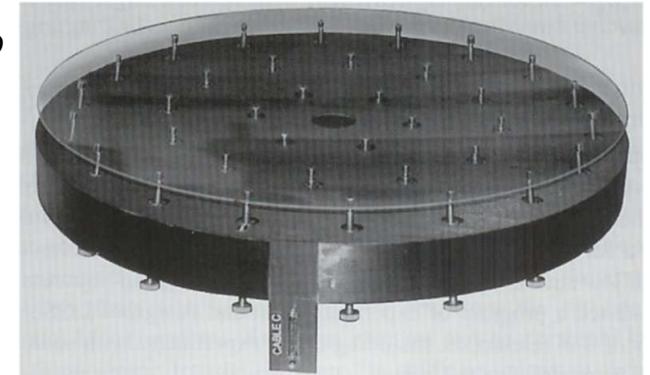
*O protótipo.*

ii) **fino**: a) *posição discreta*; b) *força discreta*; c) *momento de força* [raro – piezoelétricos polarizados]

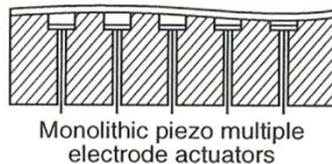
**vantagem**: - não são precisos muitos actuadores (normalmente são piezoelétricos)



Protótipo de secundário para o MMT (64cm), com actuadores piezoelétricos.

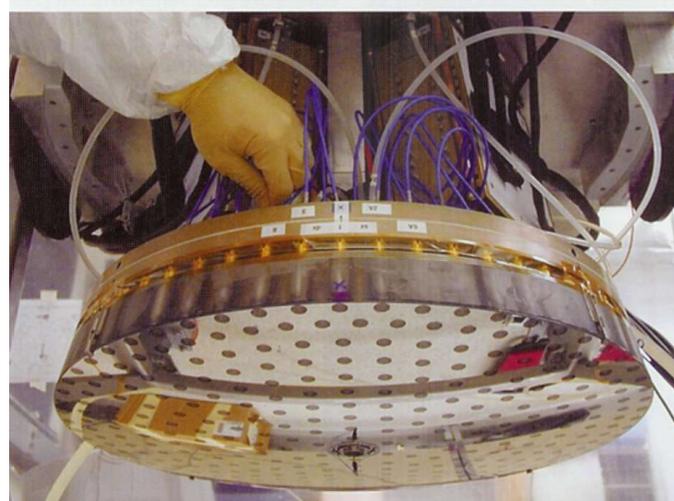


iii) **monolítico**: como os actuadores são piezoelétricos só é aplicável para espelhos <1m – a deformação máxima é  $\pm 2\mu\text{m}$ . Assim, têm uma vasta aplicação em secundários de telescópios.



a) O secundário que acabou por ficar no MMT.

b) Este espelho é constituído por um disco piezoelétrico de 1.5cm de espessura; no seu topo colocou-se uma placa vítrea reflectora (1mm de espessura). Os 345 actuadores são uma rede de eléctrodos.

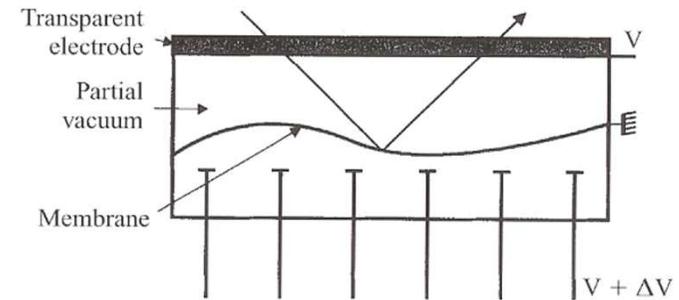


a)



b)

iv) **membrana**: é um tipo de espelho bastante frágil que consiste numa membrana sobre um anel, numa câmara de vácuo. Actuadores electrostáticos deformam-na.



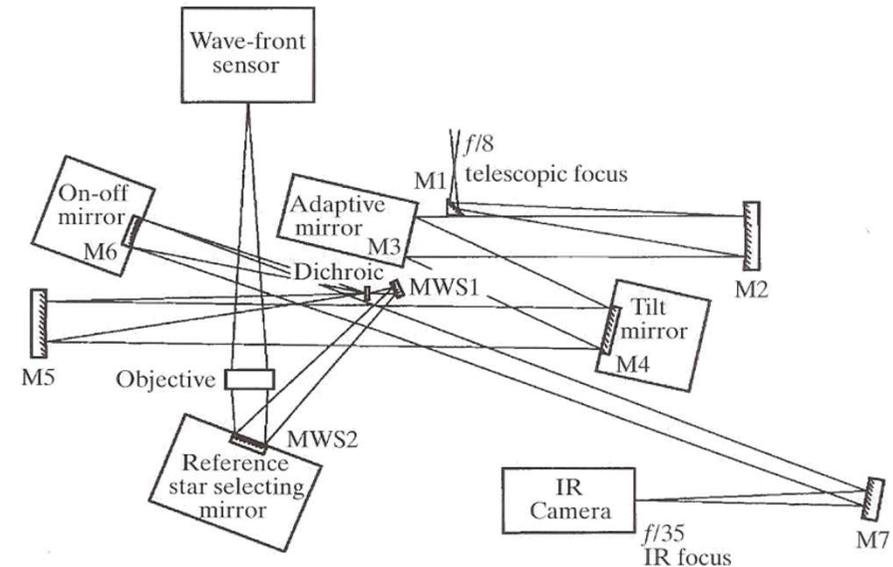
A preferência entre os quatro tipos vai, para já, para os espelhos finos. Como exemplo famoso o **COME-ON** (CGE/OPMeudon/ESO/ONERA) que foi o primeiro espelho adaptativo desenvolvido. Foi instalado no OHP 1.52m em 1989 e depois no ESO 3.6m em 1990.

A capacidade de “actividade” do espelho era de 30 Hz, usando para referência estrelas com  $m_V < 9$  (o sensor de frente-de-onda era do tipo Shack-Hartmann com 20 lenticulas – Secção 4.2.2). Assim,  $\tau > 1/30 > 33$  ms. Da Tabela da pág.50, vem que só funciona a óptica adaptativa neste caso para  $\lambda \geq 2.2\mu m$ .

*O espelho adaptativo do sistema COME-ON de sílica banhada a prata. Tem 6.5cm de diâmetro,  $D/e=65$  (**superflexível**), 19 actuadores piezoeléctricos separados de 1.7cm, uma gama de “actividade” de  $\pm 7.5\mu m$  e o 1º modo de vibração está nos 3.5 kHz.*



O esquema de funcionamento do sistema COME-ON como exemplo de um sistema de óptica adaptativa. A luz vem do espelho principal do telescópio ao centro (de cima), encontrando logo o **espelho adaptativo** (M3) da Fig. da página anterior. O dicróico (logo abaixo deste) envia radiação visível para o sensor de frente-de-onda (por **transmissão**) – as distorções atmosféricas são **acromáticas** – e radiação IV para o detector (por **reflexão**).



Um sistema-protótipo intermédio foi desenvolvido mais tarde (COME-ON-PLUS) – esteve instalado no ESO 3.6m, incluindo melhoramentos em todas as especificações: a “actividade” do espelho subiu para 65 Hz, usando para referência estrelas com  $m_V < 10$  e um sensor Shack-Hartmann com 32 lenticulas; 52 actuadores com uma gama de “actividade” de  $\pm 5\mu\text{m}$ ; 1º modo de vibração a 13.5 kHz.

O sistema ADONIS (ADaptive Optics Near Infrared System), instalado no ESO 3.6m em 1996, pouco alterou em relação ao COME-ON-PLUS: apenas a nível de computadores de apoio e software, que passou a integrar inteligência artificial.

O ADONIS, no entanto, foi fundamental para a bem sucedida instalação (em 2001) do sistema de óptica adaptativa no VLT (NACO): NAos(Nasmyth Adaptive optics system)–CONica(NI Camera – and spectrograph). A “actividade” do espelho subiu para 100-200 Hz, usando para referência estrelas **no visível** com  $m_V < 14$ ; tem 185 actuadores com uma gama de “actividade” de  $\pm 4\mu\text{m}$ .

## 4.2.2 O sensor de frente-de-onda

Os **sensores de frente-de-onda** foram originalmente concebidos para testar a qualidade da óptica de um telescópio (identificar defeitos geométricos, principalmente). Uma vez que, no fundo, se pretende algo semelhante na óptica adaptativa, foram adoptados estes sistemas. Assim, em tempo real, testa-se a **qualidade da imagem** que entra no telescópio.

O sensor mais utilizado em óptica adaptativa é o de **Shack-Hartmann** (S-H). Este é o que preserva mais fótons para análise posterior (perdas diminutas) e faz o serviço todo de uma vez (apenas uma medição necessária). As **lentículas de Shack** acabam por implicar um ganho extra de fótons que chega às 5 mag (~ 100 vezes). Assim, podem-se utilizar estrelas de referência fracas (ex. até 14 mag no NTT, quando sem lentículas se fica pelas 9 mag).

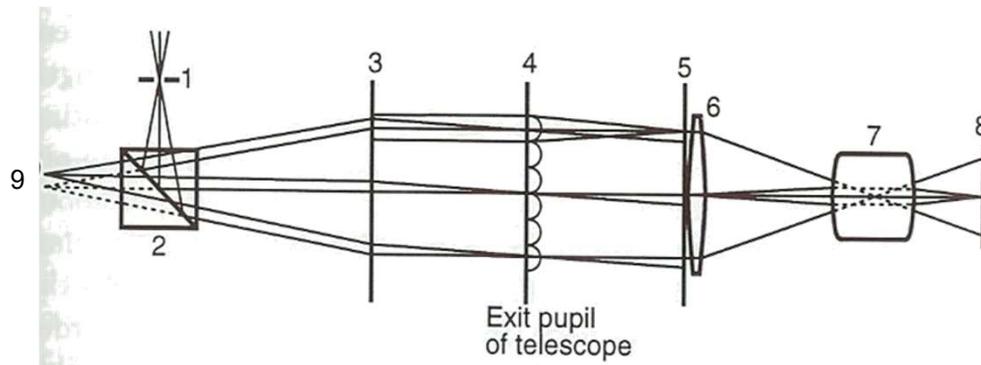
A limitação inicial do sensor (no caso do NTT a 9 mag) depende apenas da sua qualidade/ruído na estimação da frente-de-onda. Os “topo de gama” ficam-se por estrelas  $m_V < 12 \text{ mag}$ . Desce-se depois em magnitude das estrelas de referência graças às lentículas.

Existe uma fórmula que relaciona a magnitude limite com o comprimento de onda da observação:

$$m_{lim} = 14.6 + 8 \log \lambda(\mu m)$$

Na Tabela seguinte, além desta relação, apresenta-se a **distância máxima** entre a estrela de referência e o objecto observado de forma a garantir que a óptica adaptativa funciona (isto é, garante-se que as perturbações atmosféricas que afectam o objecto e a estrela são as mesmas), em função de  $\lambda$ .

Banda	R	I	J	H	K
$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ ) - observação	0.65	0.85	1.22	1.65	2.2
$m_{\text{lim}}$	13.1	14.0	15.2	16.3	17.3
$d_{\text{max}}$ (arcseg)	13.4	18.6	28.6	41.1	58.1

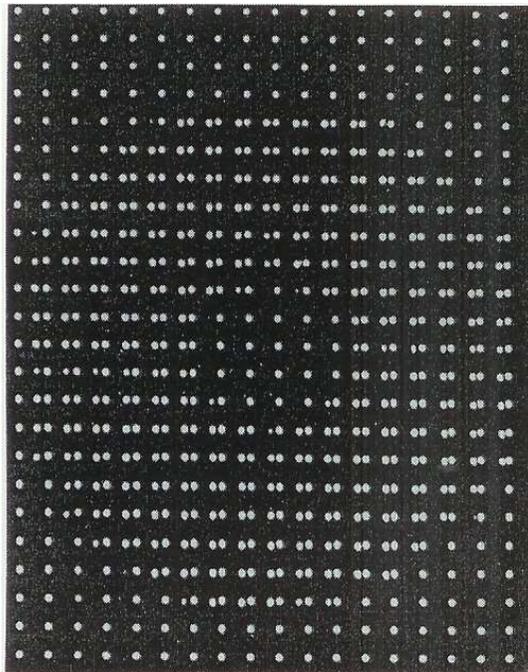
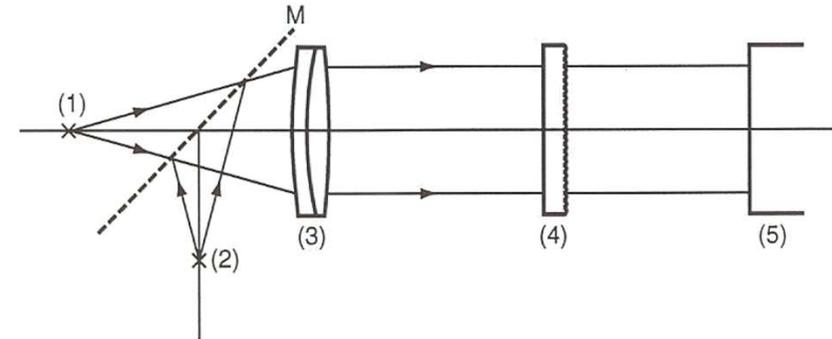


Um esquema de funcionamento do sensor S-H. Este é aplicável a espelhos na gama  $f/3$  a  $f/50$ . Legenda:

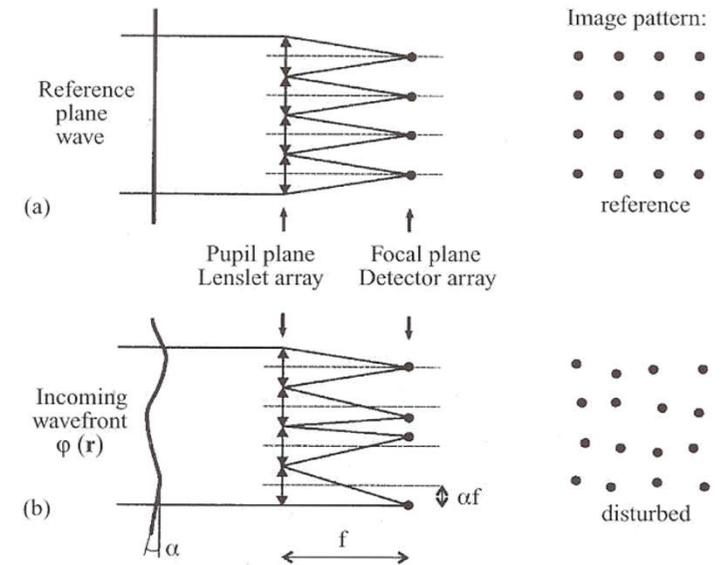
- 1 – fonte de referência (estrela);
- 2 – separador de feixe (beam splitter);
- 3 – colimador;
- 4 – ecrã de Hartmann;
- 5 – placa fotográfica; **ou** 6-7 – lente e objectiva para convergência de raios para
- 8 – CCD
- 9 – imagem a testar.

O VLT usa uma versão simplificada do sensor S-H. Legenda:

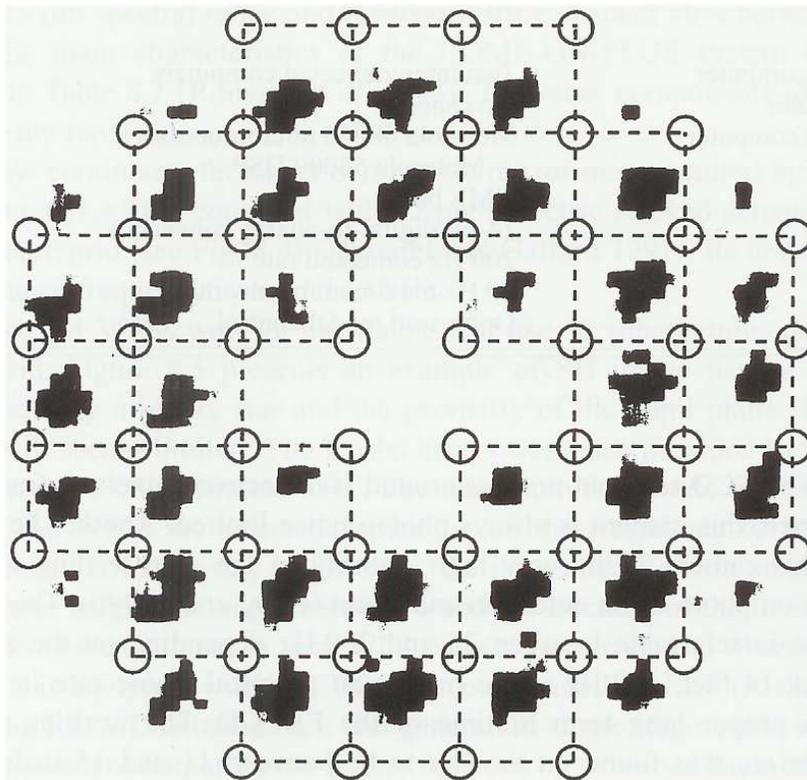
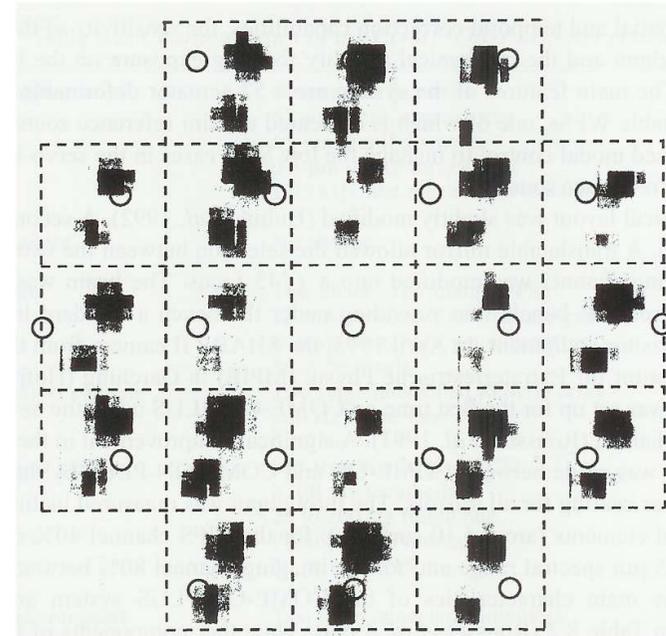
- 1 – imagem a testar;
- 2 – fonte de referência (estrela) – pode não ser utilizada sempre, servindo o espelho M de “beam splitter”;
- 3 – colimador;
- 4 – ecrã de Hartmann e lenticulas de Shack 20x20 (0.5x0.5mm<sup>2</sup>);
- 5 – CCD – entrada directa de luz.



Um ecrã de Hartmann obtido após passagem da luz por uma placa de Shack com 40x40 lenticulas de 1x1mm<sup>2</sup>. Os pontos duplos delimitam a forma do telescópio (pupila). Quanto maior a distância entre cada par, pior é a qualidade da frente-de-onda. As correcções da óptica adaptativa vão ser feitas, assim, para cada par.



O sensor de Shack-Hartmann do sistema COME-ON (ver Fig. da pág.57). Este é constituído por 20 lenticulas (pixeis nesta imagem). Note-se a localização dos 19 actuadores do sistema (círculos).

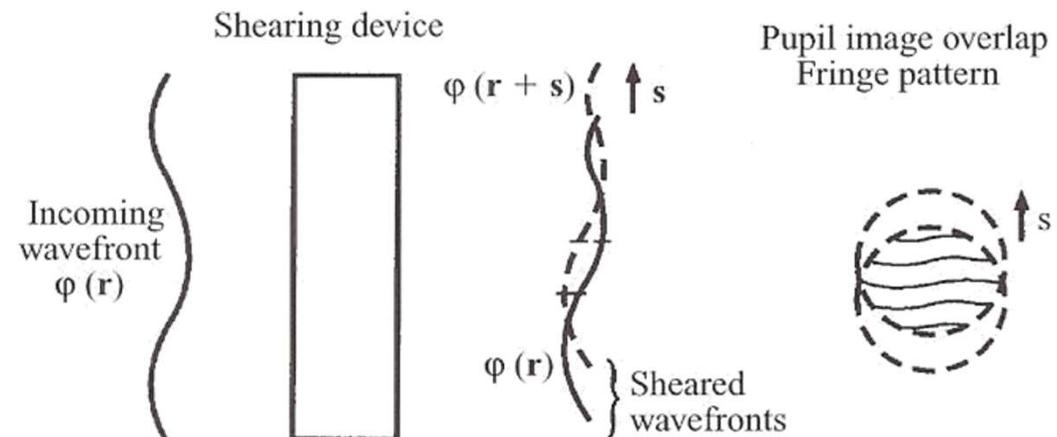


O sensor de Shack-Hartmann do sistema COME-ON-PLUS. Este é constituído por 32 lenticulas. Note-se a localização dos 52 actuadores do sistema (círculos).

Existem outros dois tipos de sensores de frente-de-onda com alguma utilização, embora bem menos que o S-H. Isto é devido a que tanto um como o outro perdem muitos fótons nas divisões do feixe:

- i) **Sensor de Foucault**: é também baseado num teste comum à óptica de telescópios (o da lâmina); usa duas lâminas colocadas ortogonalmente de forma a que incida uma imagem da estrela de referência em cada uma (beam splitter). Mede-se a distorção da imagem espacio-temporalmente.
- ii) **Sensor de interferência (eficiência <70%)**: a distorção da imagem é dada pela interferência da frente-de-onda consigo própria (após uma rede de difracção deslocar lateralmente a onda); são necessárias duas medições ortogonais como no caso do Sensor de Foucault.

O “shearing device” não é mais que uma rede de difracção especial que também funciona como “beam splitter”: a onda interfere consigo mesma.



## 4.2.3 O detector

Como na óptica activa e como em quase todas as áreas da Astronomia Óptica (incluindo imagem e espectroscopia) o detector preferido, pela sua sensibilidade e versatilidade, é a CCD. Conforme a configuração do esquema de utilização do sensor, podem-se usar até **quatro detectores**.

A CCD ideal a utilizar deve ter uma largura espectral grande, boa eficiência quântica, baixo ruído (“dark current”, “readout”, amplificação), um curto intervalo de tempo para leitura e armazenamento de dados, uma boa área de pixeis e uma excelente resolução (espacial).

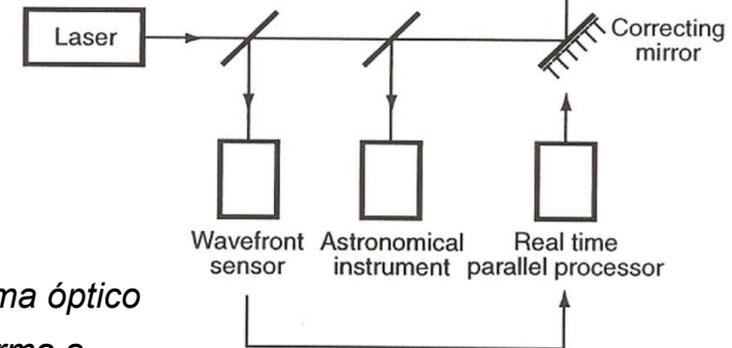
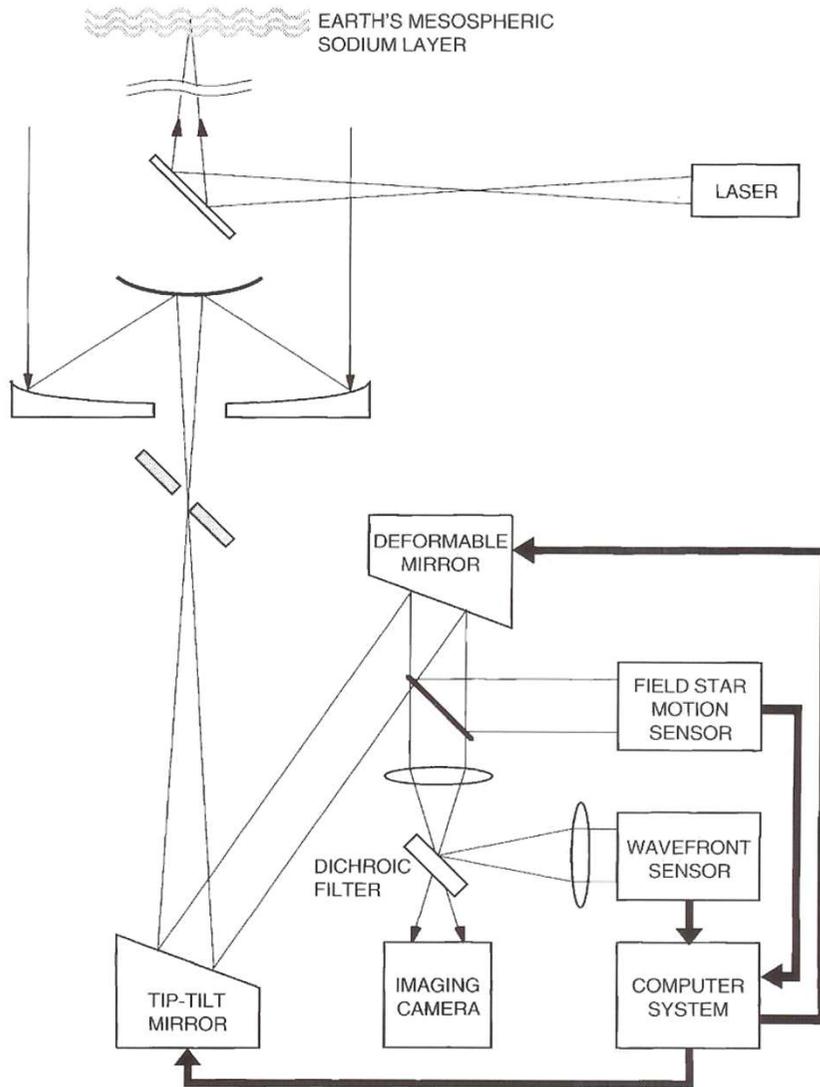
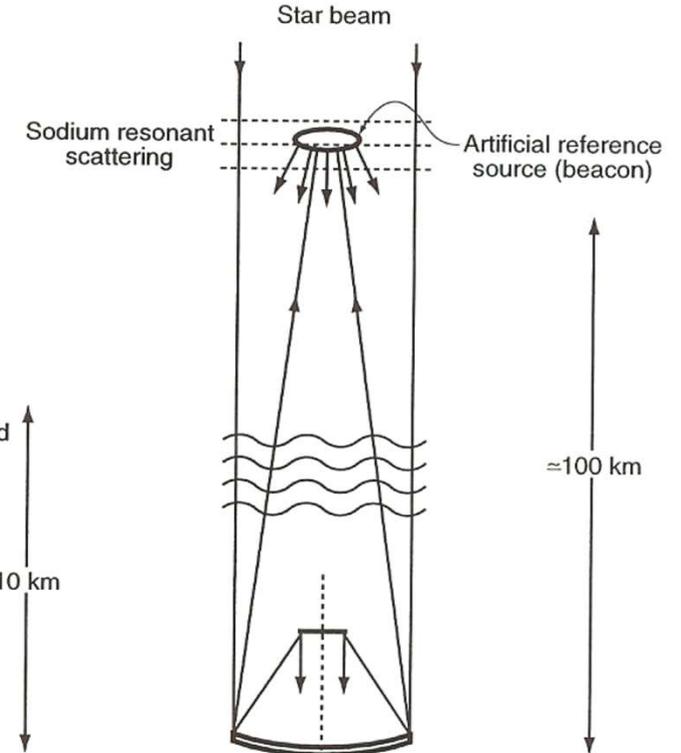
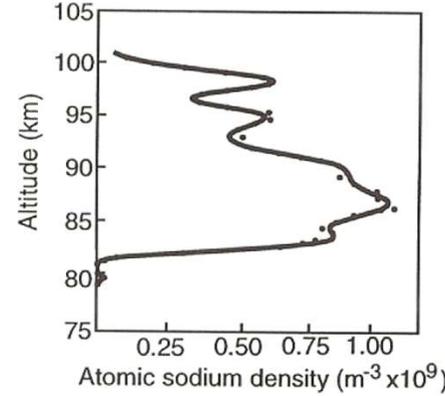
## 4.2.4 A fonte laser

A única esperança para utilizar óptica adaptativa no óptico é a geração de uma boa **estrela de referência artificial**. Mesmo para o IV tais “estrelas” de referência são importantes devido à escassez de estrelas de referência próximas do objecto a observar que sejam suficientemente brilhantes (4% de probabilidade para  $\lambda \geq 2.2\mu\text{m}$ ; no visível a probabilidade é de  $7 \times 10^{-5}\%$ ).

Ao sistema de produção da estrela artificial por emissão de um feixe laser chama-se **LIDAR** (Laser Imaging Detection And Ranging) ou LGS (Laser-Guide Star). A ideia é projectar um laser ajustado à linha  $D_2$  do sódio ( $\lambda = 589\text{nm}$ ) desde o observatório até uma altitude de 80-100km (mesosfera; os efeitos do *seeing* cessam aos 25km): quanto mais alto melhor, de forma a garantir que o feixe laser (que é cónico) seja uma “estrela” pontual (e.g. 0.5m de “diâmetro” a 100km de altitude => 1”, a dimensão aproximada do disco de *seeing*). Aí, átomos de **sódio** são excitados.

A potência típica do laser é 50-200 W para  $\lambda \leq 1\mu\text{m}$ .

Os átomos de sódio ( $\sim 10^9 \text{ m}^{-3}$ ;  $T=200\text{K}$ ) existem em maior quantidade entre os 80 e os 100km de altitude: são normalmente descritos como numa camada de 24km de espessura centrada nos 90km. Pensa-se que têm origem em poeiras de meteoros.

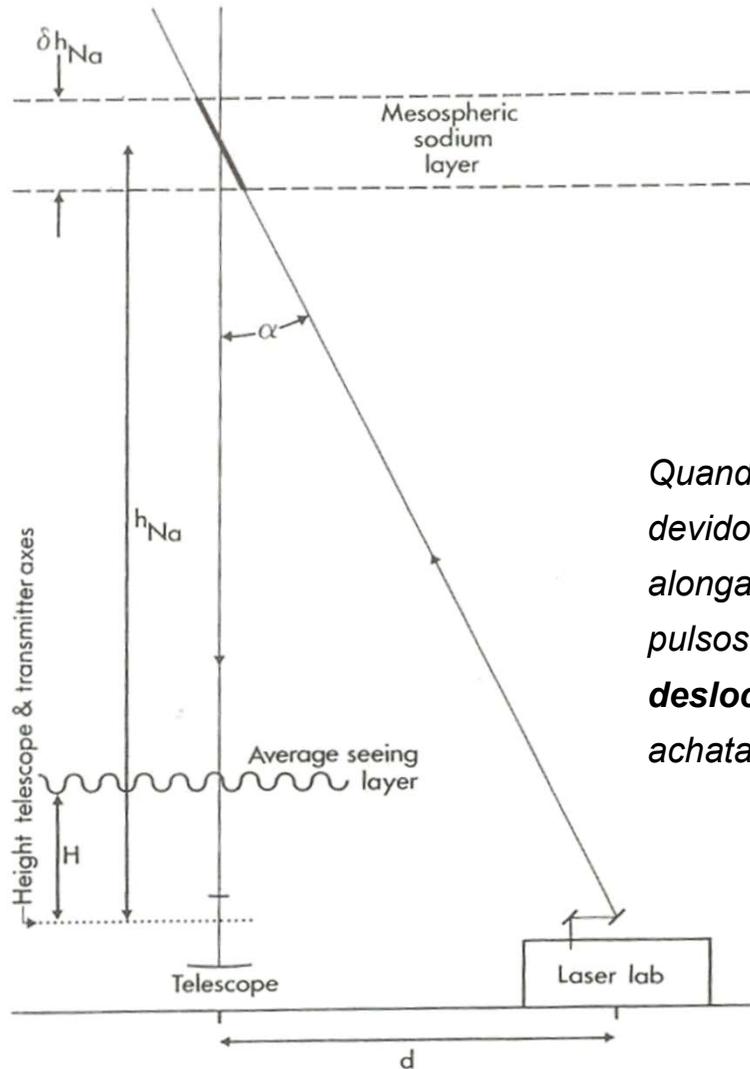


O laser usa o sistema óptico "ao contrário" de forma a produzir um cone com dezenas de km de altura.

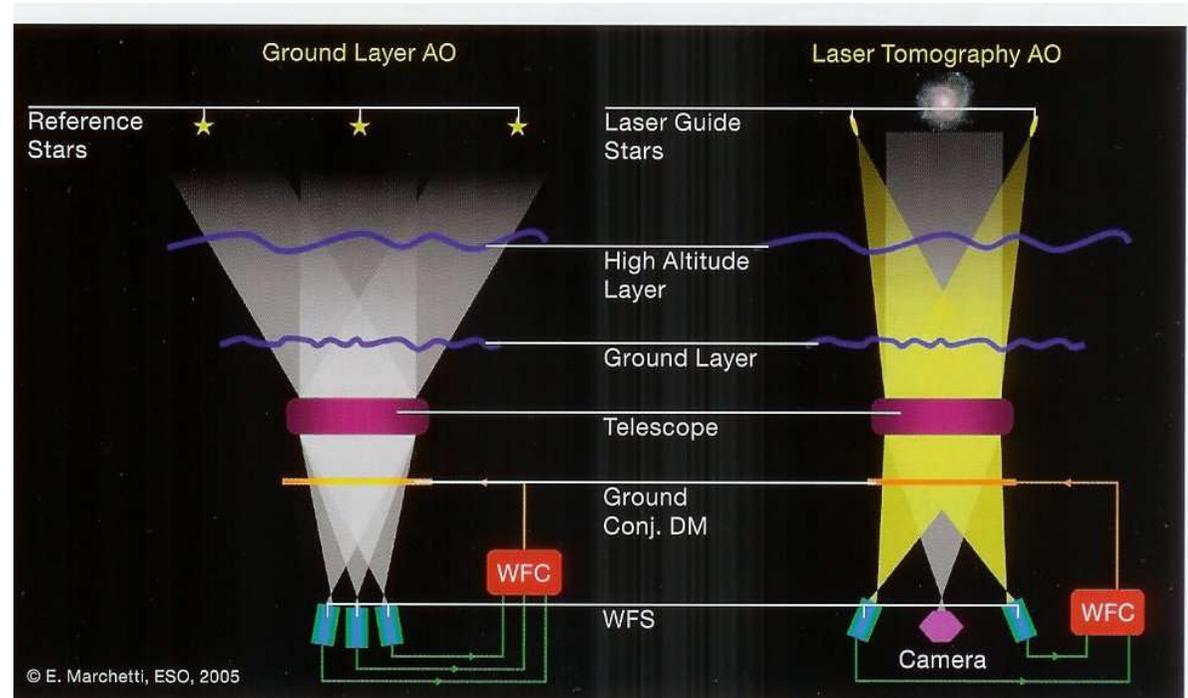
A utilização prática de estrelas artificiais não é muito diferente da utilização de estrelas “naturais”.

WFS – wave front sensor (sensor de frente-de-onda);

WFC – wave front camera (detector associado).



Quando é laser é projectado de um dos lados, devido à perspectiva a “estrela” parecerá alongada. Isto resolve-se com a utilização de pulsos:  $1\mu s$  vai implicar que a estrela se **desloca** rapidamente (em vez de aparecer achatada). Isto é de mais fácil correcção.



O feixe laser do Yepun (VLT).

Um exemplo de um sistema moderno é o do Keck. O laser tem uma potência de 20W e a sua fonte está instalada no rés-do-chão da cúpula do Keck. A sua luz segue por fibra óptica até um telescópio de 50cm de diâmetro ao lado do Keck, que produz o cone que dá origem à estrela artificial.

Na Tabela seguinte dão-se mais alguns exemplos de sistemas laser em utilização actualmente.

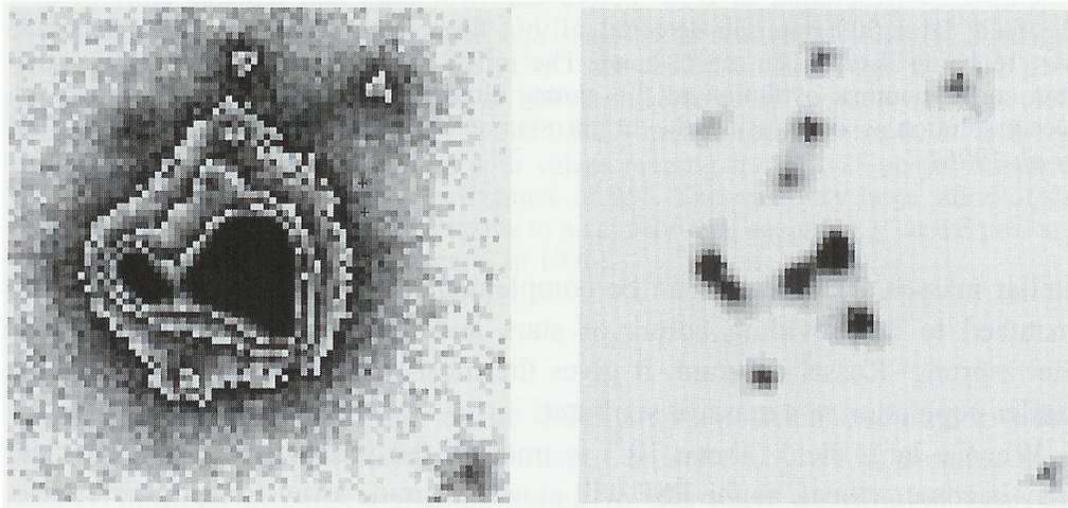
Authors	Pulse length ( $\mu\text{sec}$ )	Rate (Hz)	Duty cycle (%)	Energy per pulse (J)	Average power (W)	Power in pulse (W)	Predicted stellar magnitude <sup>1</sup> (V)
Thompson et al. (1987, 1988, 1989)	2.0	7.5	.0015	.020	0.15	10 000	14
Jeys et al. (1989)	0.1	1000	.01	.0003	0.3	3 000	12
Humphreys et al. (1991)	4.0	20	.008	.12	2.4	30 000	12
Max et al.(1992a,b), Gavel et al.(1992) <sup>2</sup>	0.8	26000	2	.07	$\geq 100$	$\geq 5000$	$\approx 6$
Ultimate Limit :			100		5 000 +	5 000 +	2

Um dos caminhos para o futuro na produção de estrelas de referência laser será o da produção de **feixes laser múltiplos**. Assim se acompanhará a evolução no campo dos detectores, onde já começam a existir os “de grande campo” que observam grandes porções do céu de uma só vez (e.g.  $1^\circ \times 1^\circ$ ).

## 4.3 Sumário

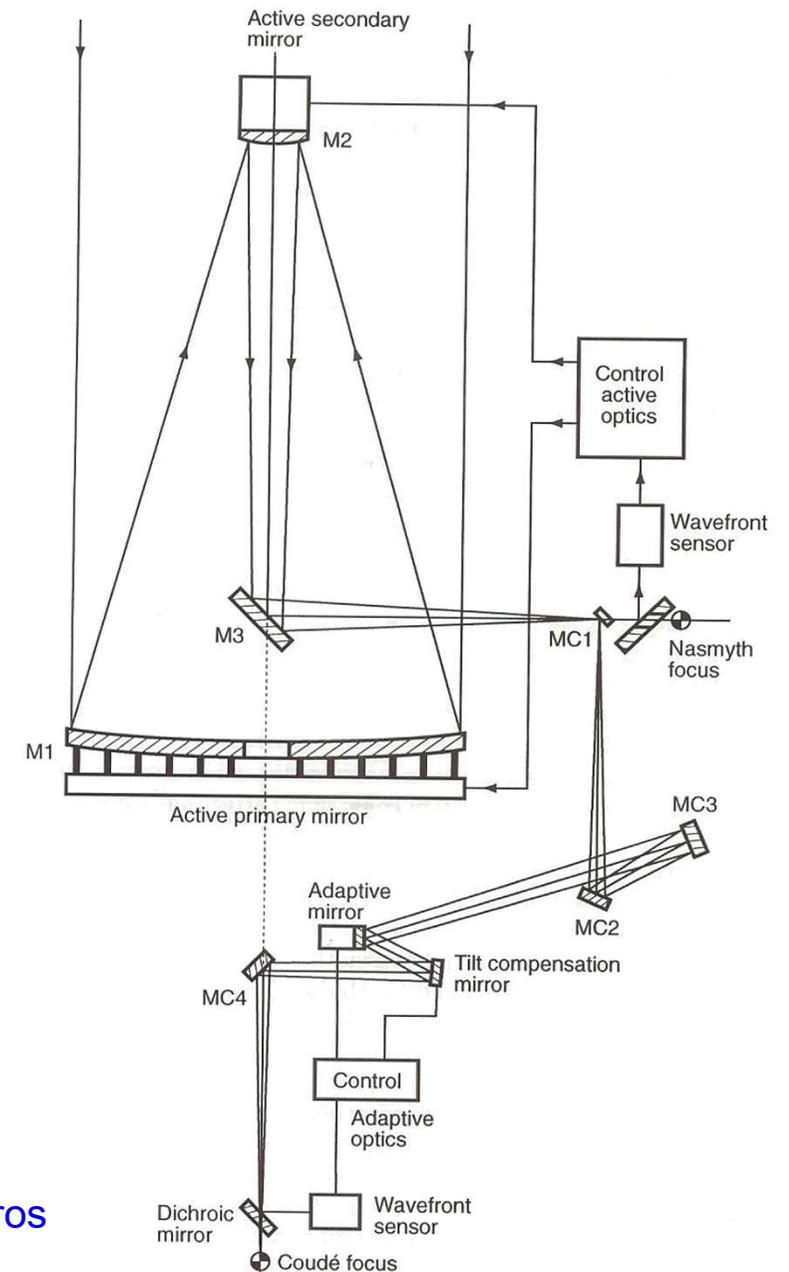
Como exemplo do sistema completo **óptica activa + adaptativa** ilustra-se o caso do VLT.

*O sistema de óptica activa+adaptativa do UT4 (NAOS-CONICA). Funciona para 1-5 $\mu$ m.*



*A imagem de um campo estelar sem e com óptica adaptativa (esquerda e direita, respectivamente). Usou-se o ADONIS no ESO 3.6m e uma fonte de referência com  $m_V = 11.7$ .*

Na Tabela seguinte apresentam-se as características dos **primeiros** sistemas de óptica adaptativa em vários telescópios.



Location (name)	Application	Lambda <sup>1</sup>	Mirror type	Number of elements	Wave-front sensor <sup>2</sup>	References <sup>3</sup>
Lockheed/SPO	Solar	visible	segmented tip-tilt/pistoned	19	H-S	Acton, 1989, Acton & Smithson, 1991,1992, Smithson et al.,1984, Title et al., 1987
NOAO <sup>4</sup>	Stellar	NIR	continuous pistoned	37/55	H-S	Beckers, 1987c,1988b, Beckers et al., 1986, Goad & Beckers, 1989
ESO/France (COME-ON)	Stellar	NIR	continuous pistoned	19	H-S	Fontanella et al., 1988, Kern et al.,1988,1989a,b ,1990a,b, Merkle et al., 1991a, Rigaut et al., 1991,1992d, Rousset et al., 1990a,b
Johns Hopkins U <sup>5</sup>	Stellar <sup>7</sup>	visible	membrane mirror	61/91	CS	Clampin et al., 1991, Durrance & Clampin, 1989
Durham (MARTINI) <sup>5</sup>	Stellar	visible	segmented tip-tilt	6	H-S	Doel et al., 1991a,b, 1992, Sharples et al., 1992
ESO/France (COME-ON PLUS) <sup>5</sup>	Stellar	NIR	continuous pistoned	52	H-S	Gendron et al., 1991, Rousset et al., 1992b
U. of Hawaii	Stellar	NIR	continuous curvable	7/13	CS	Graves & McKenna, 1991, Graves et al.,1992, Roddier et al., 1987, 1991a,b
NOAO/SPO <sup>5</sup>	Solar	visible	continuous pistoned	61	SUN	Dunn, 1987a, 1989, 1990, Dunn et al., 1991
U. Chicago (ChAOS) <sup>5</sup>	Stellar	NIR	various planned	156	SI	Kibblewhite & Wild, 1992, Kibblewhite, 1992a,b
Mt Wilson (60"/ACE) <sup>5</sup>	Stellar	Visible & NIR	continous pistoned	69	H-S	Greenwood (priv. comm.), Shelton (priv. comm.)
CFHT (BONNETTE) <sup>5</sup>	Stellar	visible & NIR	continuous pistoned	44	CS	Arsenault & Salmon, 1992
ESO/VLT <sup>6</sup>	Stellar	NIR	continuous pistoned	256	H-S	Merkle, 1986, 1987b,c, 1988, Merkle, 1992b, Merkle & Hubin, 1991, Merkle et al., 1991b
LEST <sup>6</sup>	Solar	visible	continuous pistoned	200	SUN	Dunn, 1987b,c, von der Lühe, 1983

<sup>1</sup> Visible = 400 to 900 nm; NIR is 1 to 5  $\mu$ m.

<sup>2</sup> H-S = Hartmann Shack Sensor, CS = curvature sensor, SI = shearing interferometer, SUN = sensing on solar granulation or sunspots.

<sup>3</sup> Includes only limited number of descriptive references.

<sup>4</sup> Discontinued due to a lack of support.

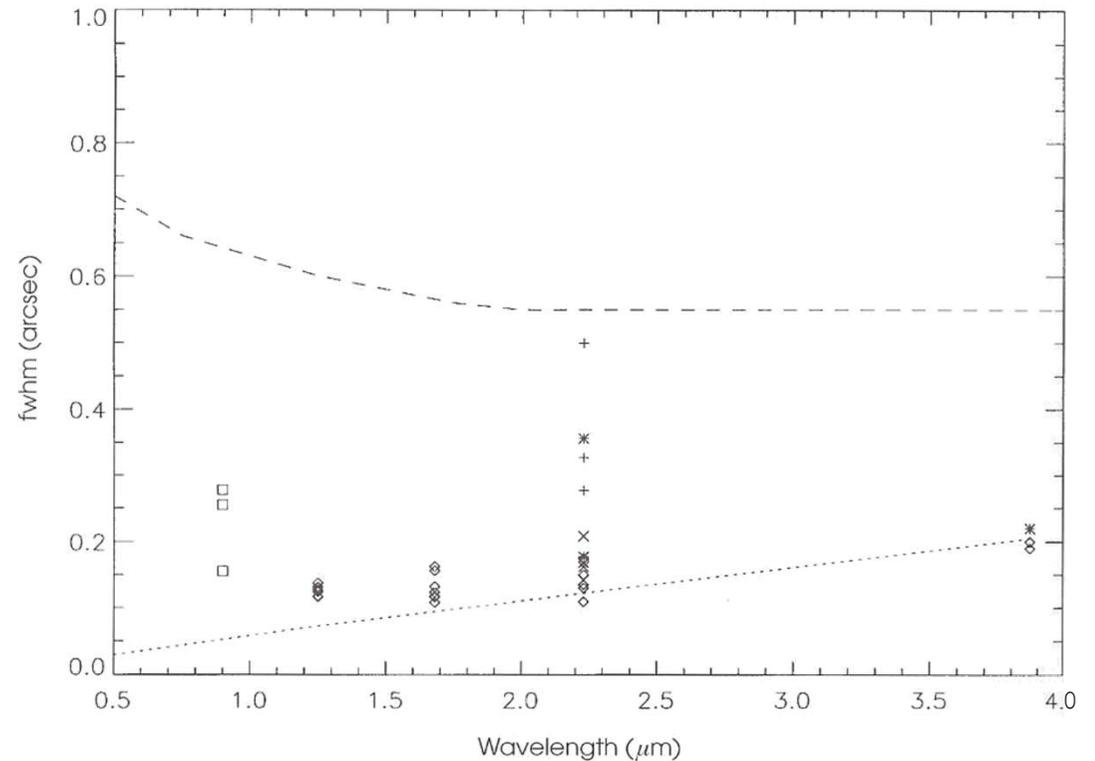
<sup>5</sup> Effort being implemented.

<sup>6</sup> Efforts in planning phase.

<sup>7</sup> Coronagraphy.

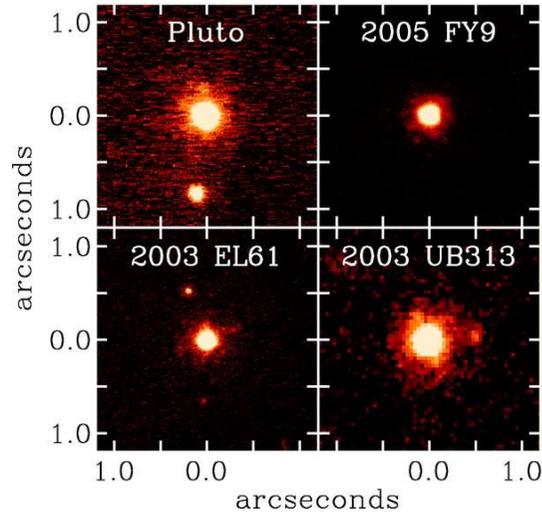
Na Figura seguinte ilustram-se as importantes vitórias resultantes do recurso à óptica adaptativa.

*A qualidade da imagem com o sistema COME-ON-PLUS. A curva pontilhada é o limite de difracção enquanto a outra curva dá o seeing típico. Os símbolos relacionam-se com o brilho das estrelas observadas como segue:  $\square, \diamond$  ,  $6 < m_V < 10$ ;  $\times$  ,  $11 < m_V < 12$ ;  $+$  ,  $12 < m_V < 14$ ;  $*$  ,  $m_V > 14$ .*

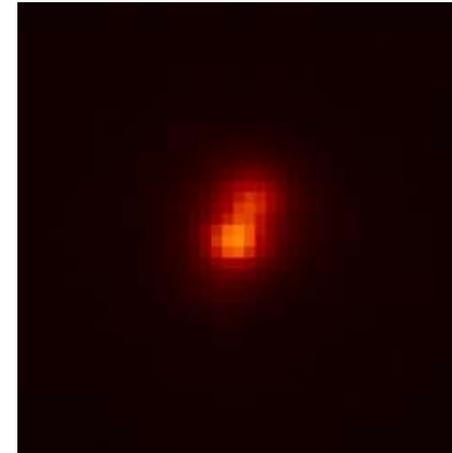


Para concluir este capítulo, no que segue apresenta-se um sumário de vários resultados científicos relevantes obtidos com o VLT, Keck e Subaru graças à óptica adaptativa.

## Planetas



*Keck*: imagem de quatro objectos grandes do Cinturão de Kuiper. Três têm satélites. Da esquerda para a direita e de cima para baixo: Plutão-Charon (faltam Nix e Hydra); 2005FY9; “Pai Natal” e satélite (falta outro); Eris e Dysnomia.



## Estrelas

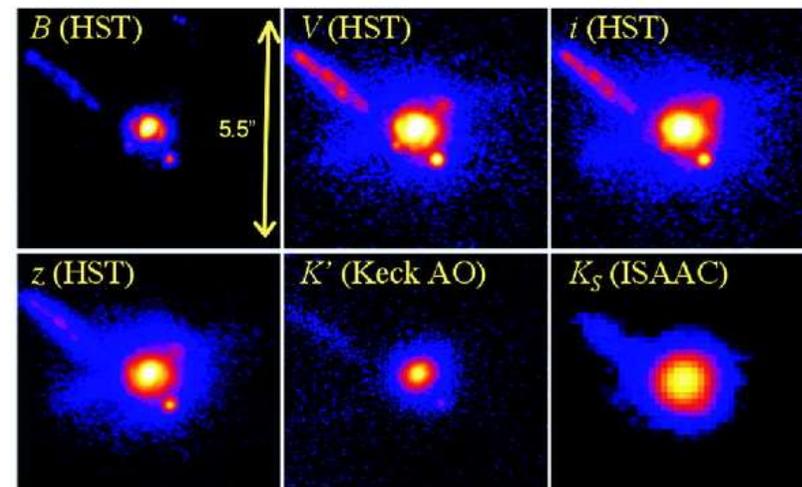
*VLT*: imagem de uma estrela binária com separação de 30 mili-segundos de arco (mas).

## Galáxias

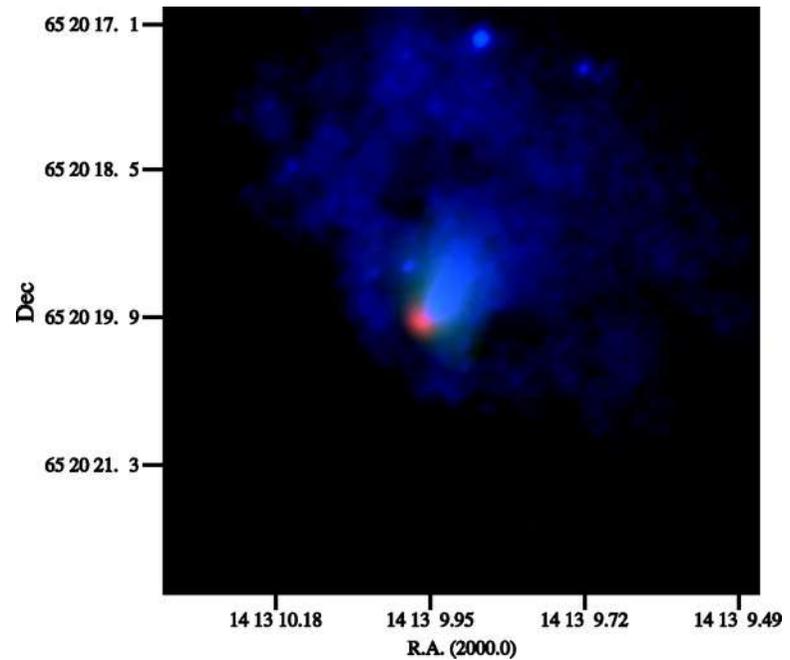
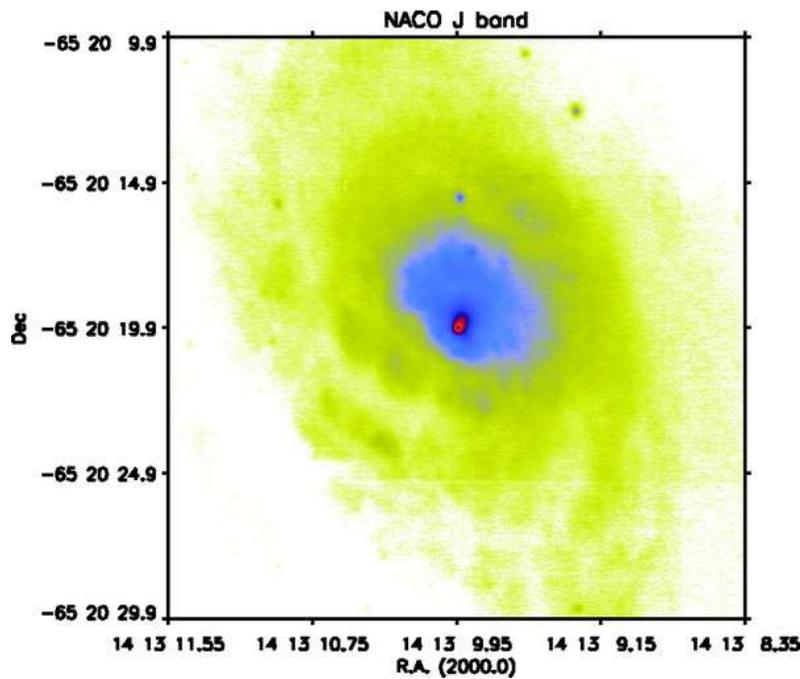
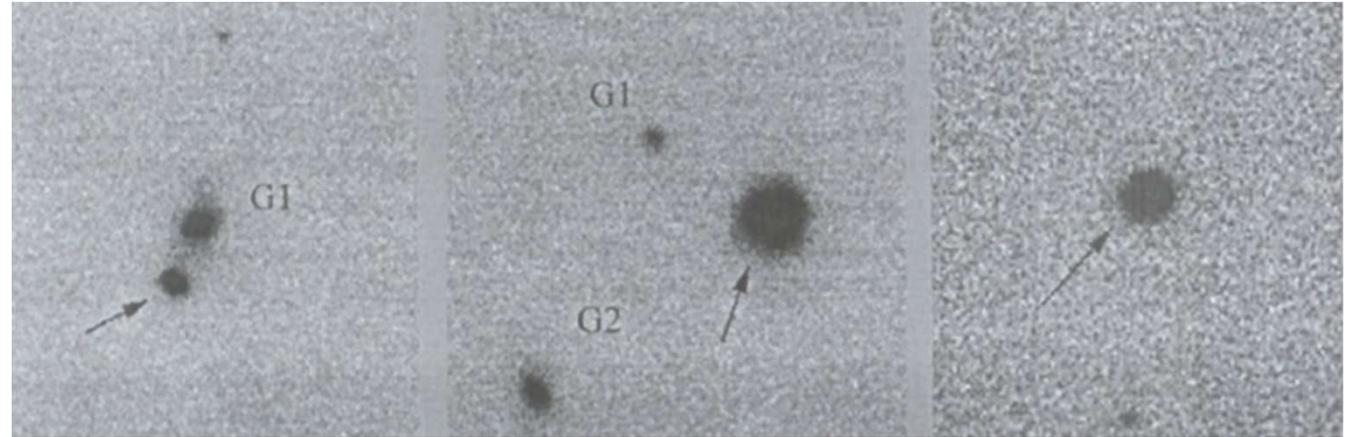
*VLT*: Espectroscopia IV do núcleo de Cen A revela buraco negro supermassivo ( $6 \times 10^7 M_{\odot}$ ).

A resolução foi de 60 mas.

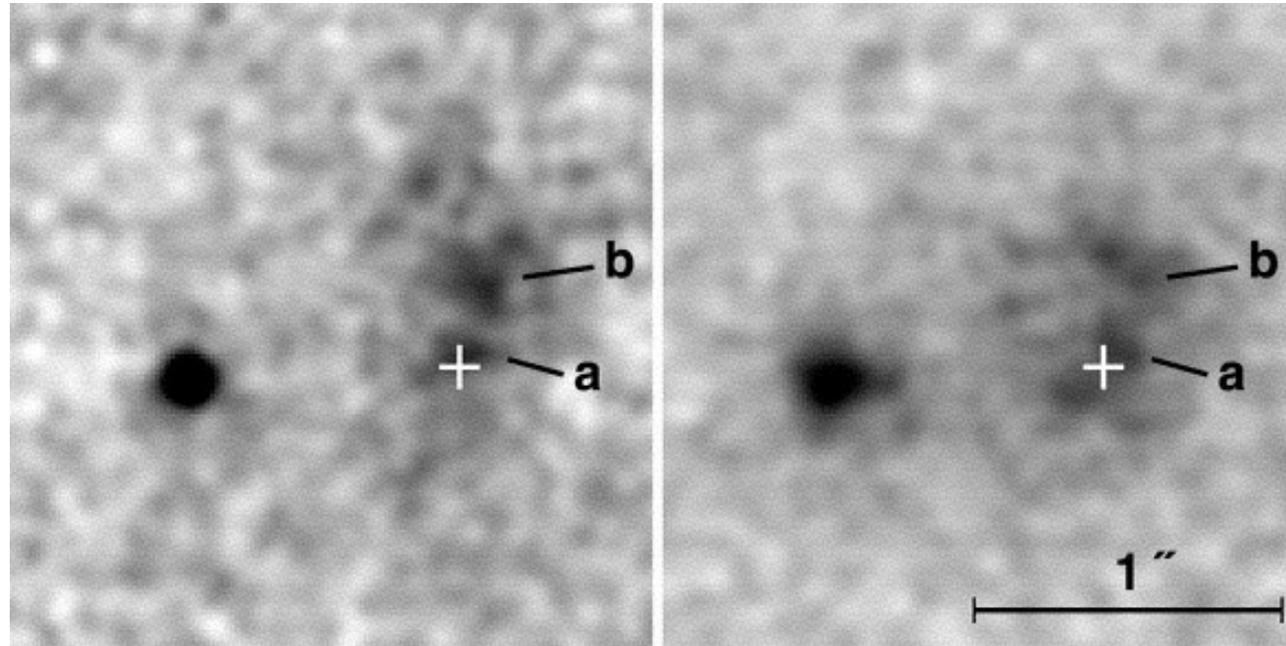
*VLT+Keck*: uma galáxia peculiar (em interação) a  $z=0.42$ .



*VLT: As galáxias hospedeiras de três quasares ( $z \sim 2.5$ ) – assinalados. Outras galáxias existem nos campos (G1, G2).*



*VLT: A região central do AGN na galáxia Circinus. À esquerda a imagem é do NACO (20"×20"). À direita é do HST+NACO (um zoom que revela um tamanho de 10 pc para o jacto).*



*Keck (esq) e Subaru (dir): Os dois núcleos activos em 3C294 ( $z=1.786$ ): note-se a escala. A cruz branca marca o núcleo rádio. O núcleo óptico está à esquerda (a  $0.9''$  do núcleo rádio). O objecto assinalado com b é uma estrela da Nossa Galáxia.*