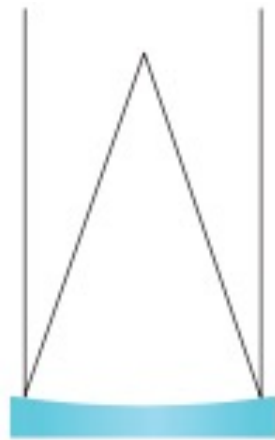


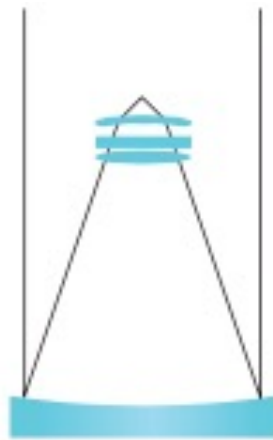
Systemes d'observation pour le domaine visible

- le rôle de l'observation en astrophysique
- telescopes
 - systèmes optiques (réfracteurs, réflecteurs)
 - - montures
 - optique active
 - optique adaptative
- instrumentation focale
 - les détecteurs pour le domaine visible
 - photométrie
 - imagerie
 - spectroscopie
- caractéristiques d'un système d'observation
- Les météorites
pour l'exploration des corps du système solaire (J. Lasue)

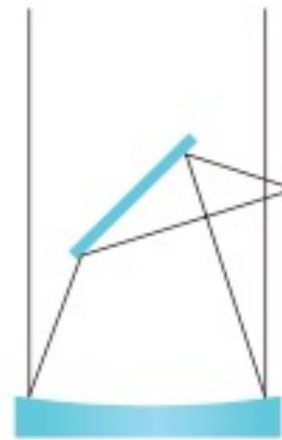
Les configurations de foyers



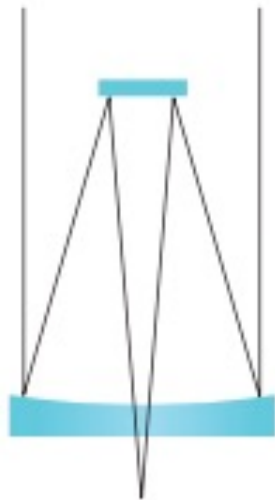
Primaire



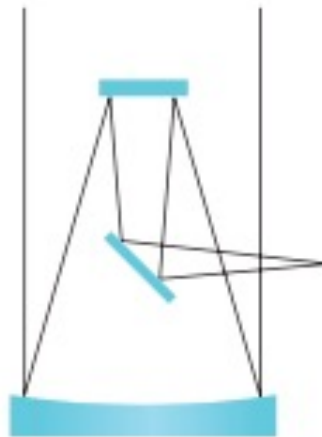
Primaire avec correcteur



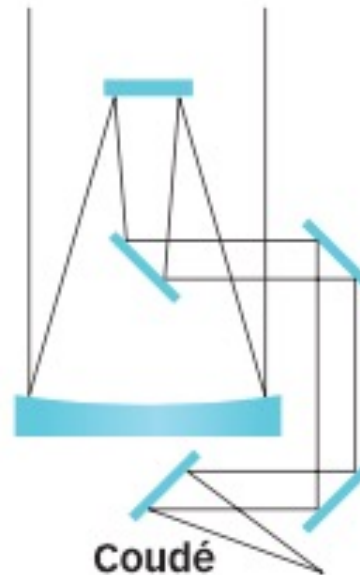
Newton



Cassegrain



Nasmyth

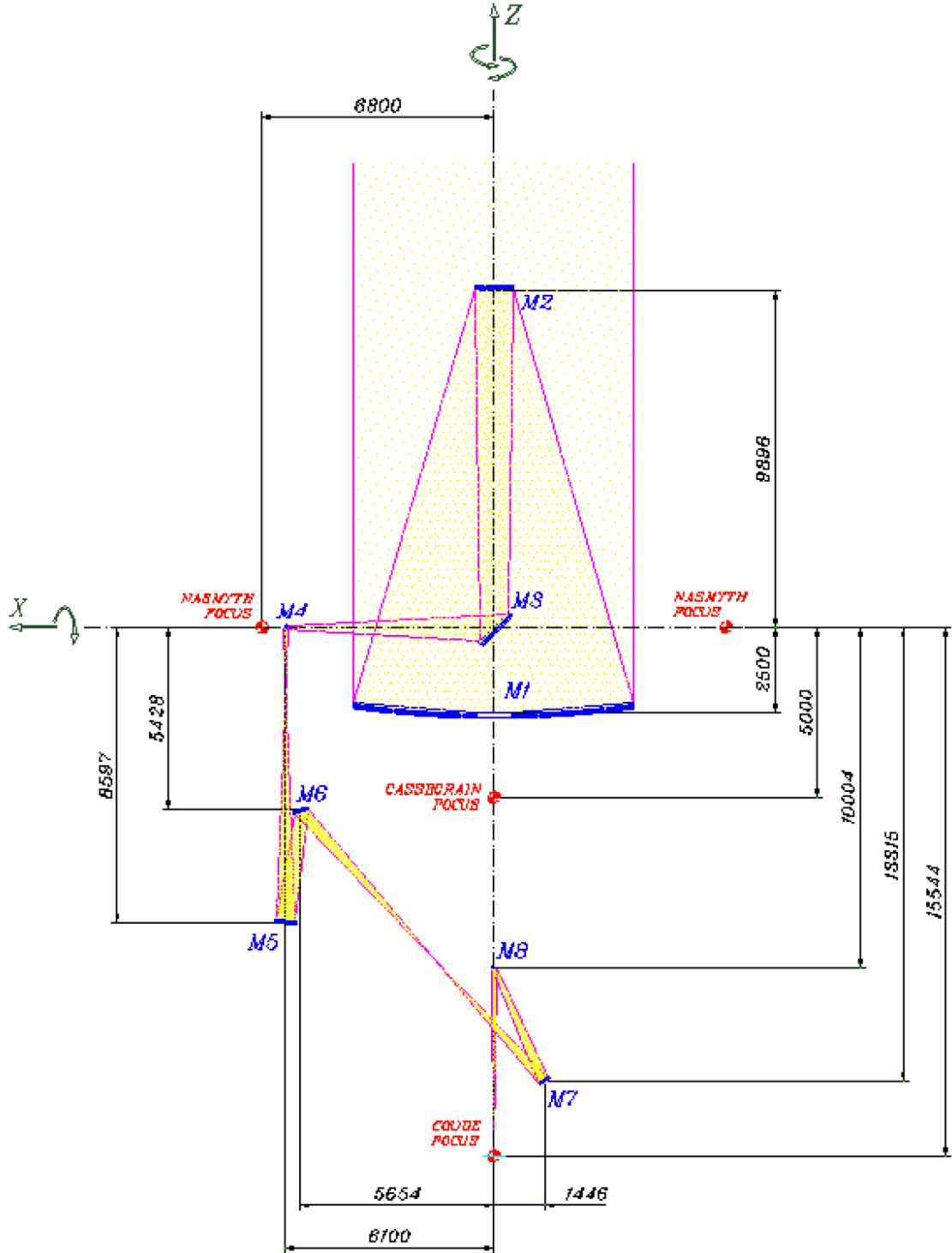


Coudé

foyer	ouverture $\frac{D}{2F}$	utilisation
primaire	$> 1/10$	imagerie à grand champ avec un correcteur
Cassegrain	$1/30$ à $1/10$	imagerie et spectroscopie à champ moyen et à très bonne résolution spatiale
ou Nasmyth	$< 1/30$	spectroscopie à haute résolution spectrale des objets individuels, Interférométrie
Coudé		

UT @ VLT

Cassegrain-,
Nasmyth-,
ou Coudé-focus



Montures



EQ6 (monture allemande)

montures equatoriales



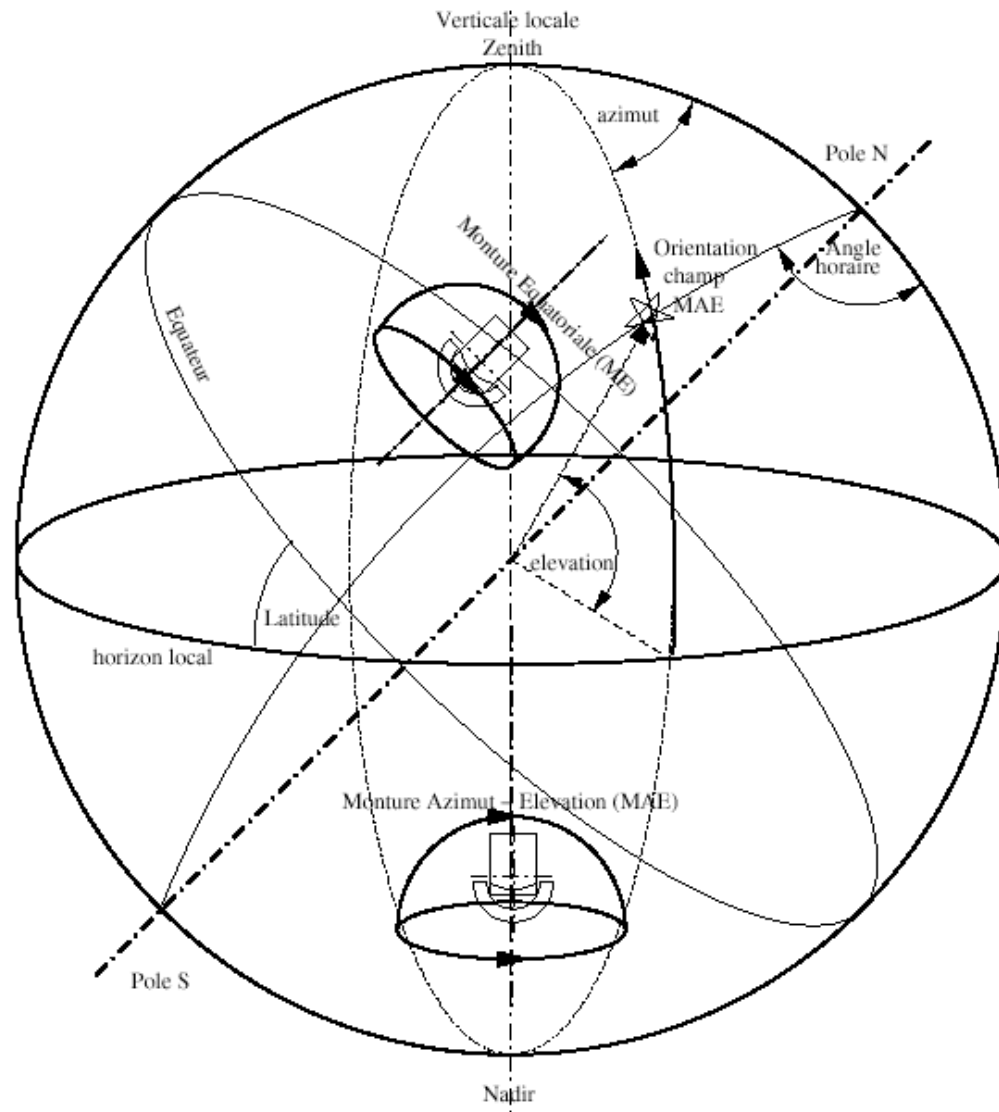
monture à fourche



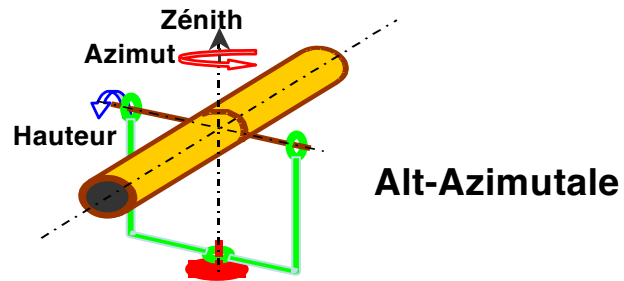
monture Dobson

monture altazimutale

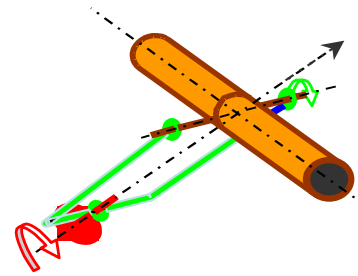
Montures



Montures des lunettes et télescopes

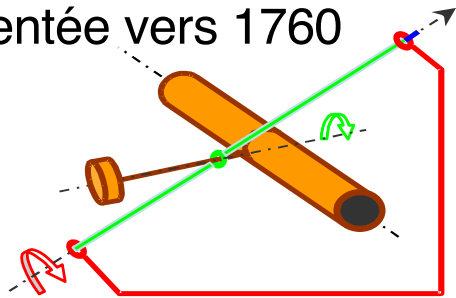


Alt-Azimutale

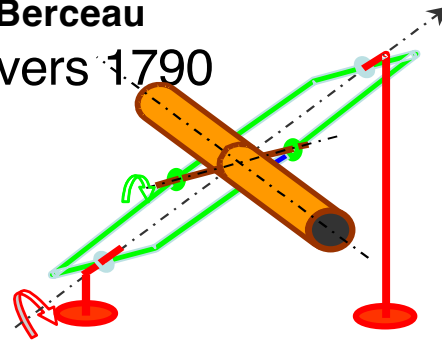


à Fourche
Inventée vers 1616

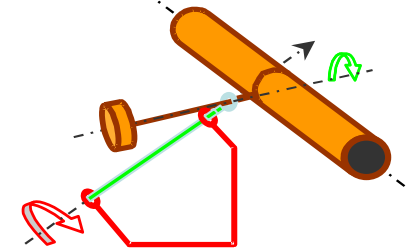
Anglaise Simple
Inventée vers 1760



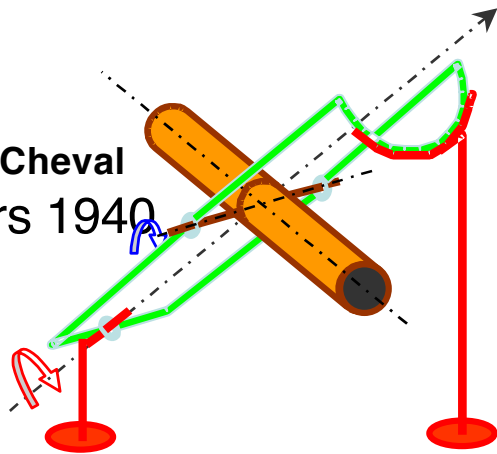
Anglaise à Berceau
Inventée vers 1790



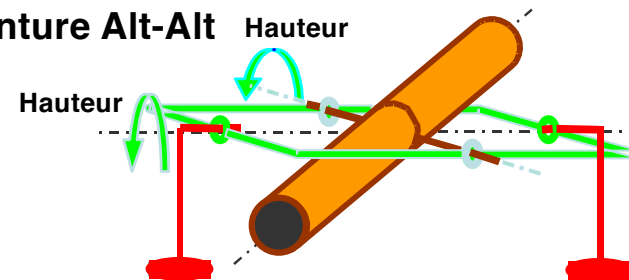
Allemande
Inventée vers 1815



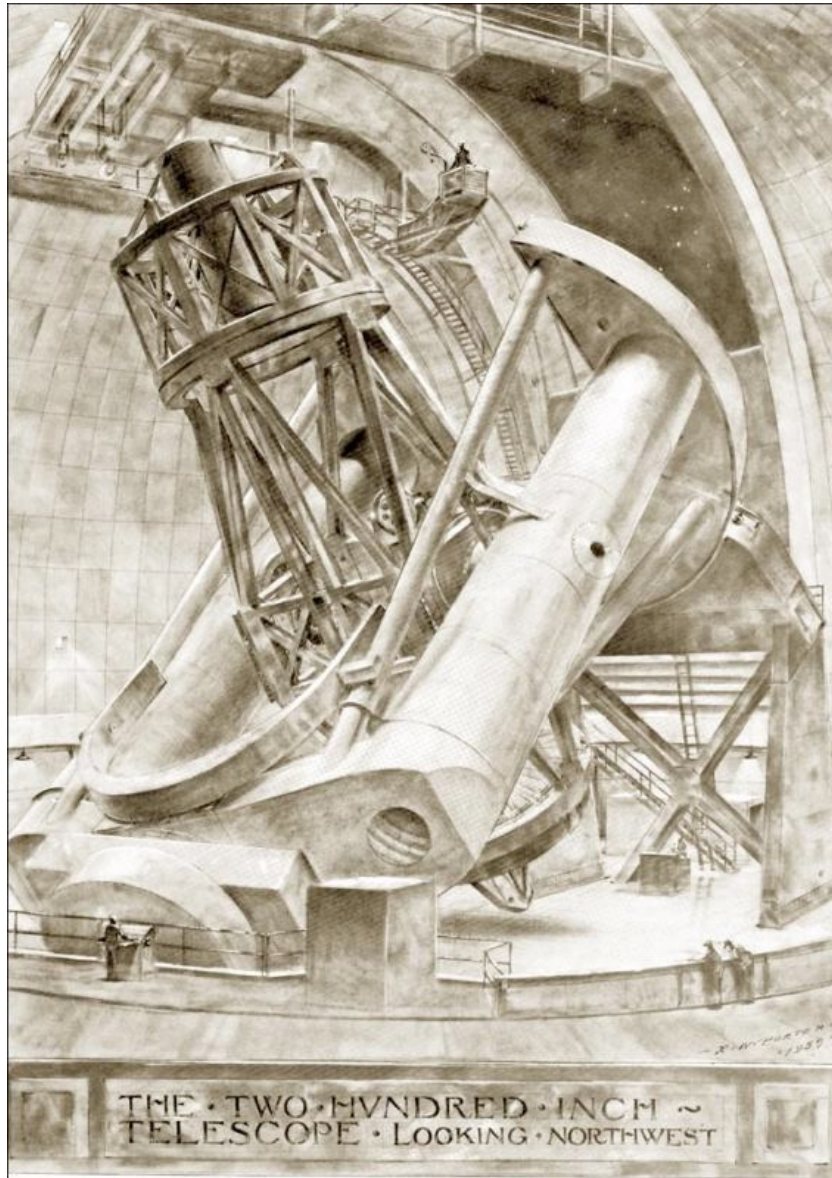
Berceau Fer à Cheval
Inventée vers 1940



Monture Alt-Alt

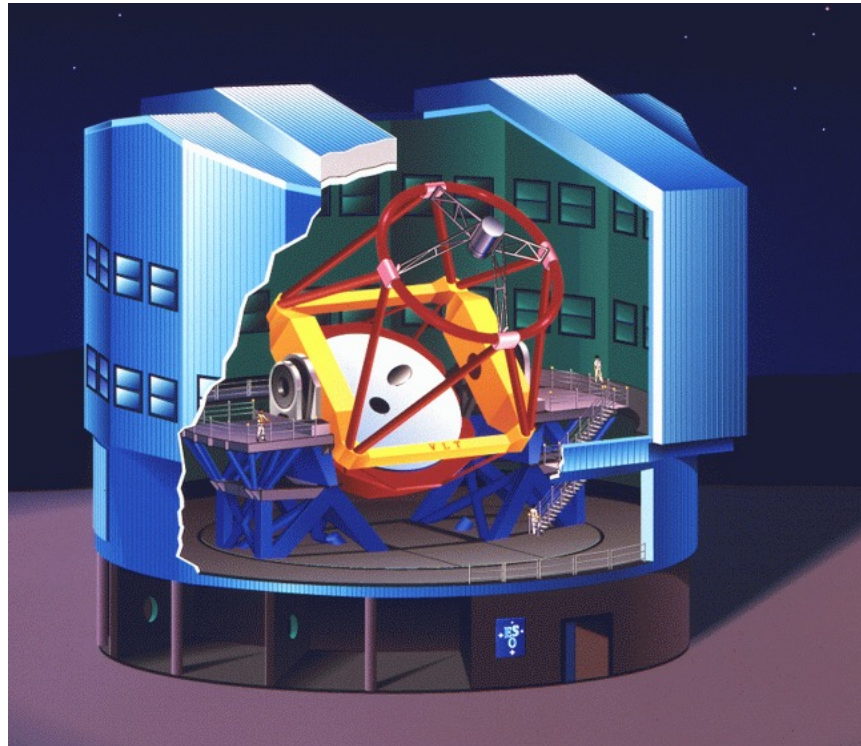


Monture équatoriale - Mt Palomar



Dans la monture équatoriale, l'axe principal du télescope - l'axe ou l'axe horaire - est aligné sur l'axe Nord-Sud. La compensation du mouvement apparent ne requière alors qu'un mouvement uniforme, facile à réaliser et réguler. Le deuxième axe - axe δ - est perpendiculaire à l'axe et mécaniquement porté par celui-ci.

monture azimuth-elevation : VLT



D'un point de vue mécanique, il est beaucoup plus rationnel d'aligner l'axe principal selon la verticale locale (minimum de contrainte).

On fait alors coïncider les axes avec ceux du référentiel local et on obtient la compensation du mouvement apparent en appliquant les équations de passage du référentiel équatorial au référentiel local.

=> Rotation du champ de vue !

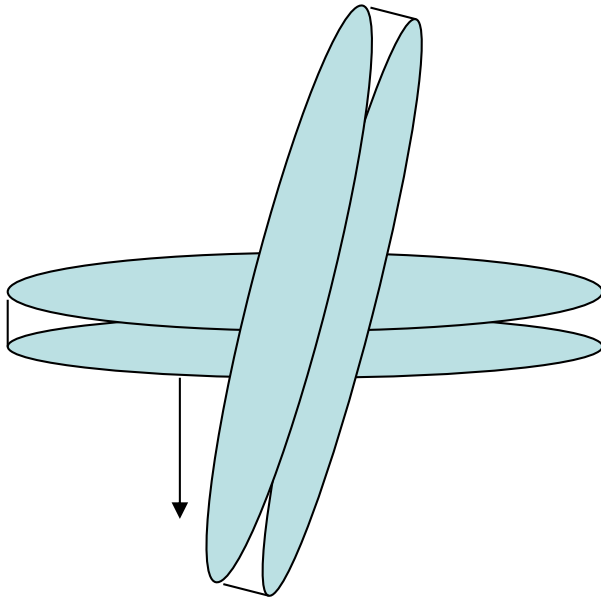


Systemes d'observation pour le domaine visible

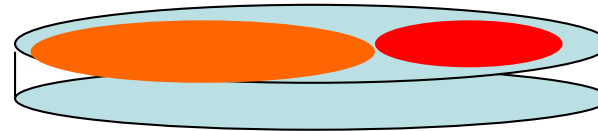
- le rôle de l'observation en astrophysique
- telescopes
 - systèmes optiques (réfracteurs, réflecteurs)
 - montures
 - - optique active
 - optique adaptative
- instrumentation focale
 - les détecteurs pour le domaine visible
 - photométrie
 - imagerie
 - spectroscopie
- caractéristiques d'un système d'observation
- Les météorites
pour l'exploration des corps du système solaire (J. Lasue)

Vers une Optique Active

Problème : déformations lentes du miroir au cours d'une observation



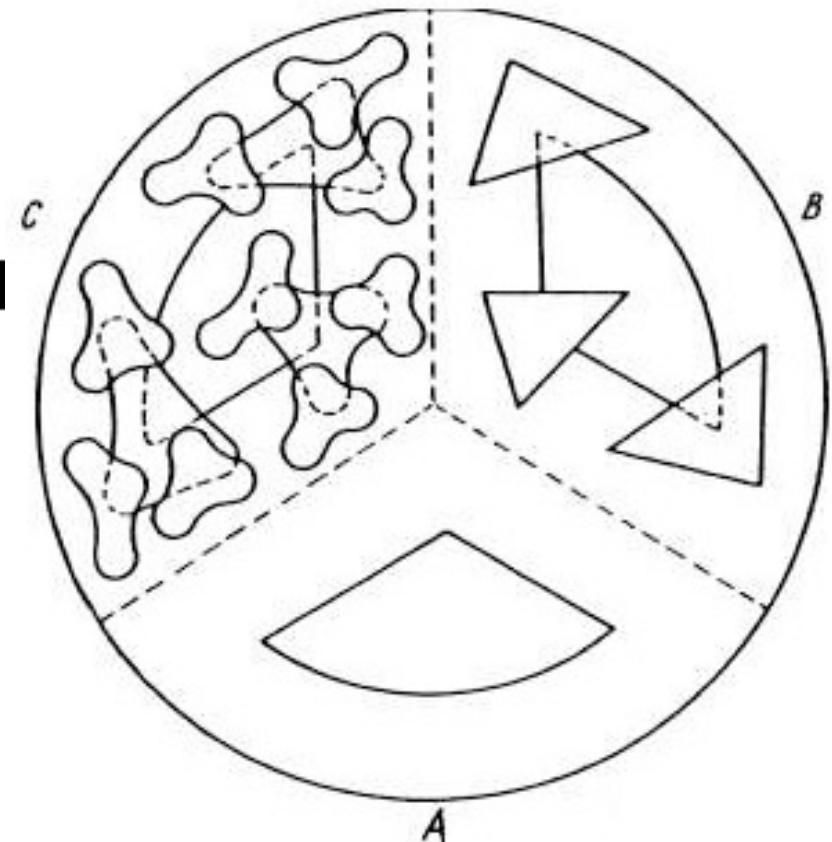
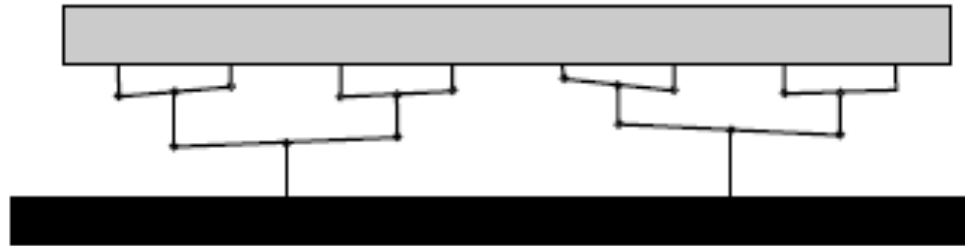
Contraintes mécaniques



Contraintes thermiques

L'image subit des aberrations.

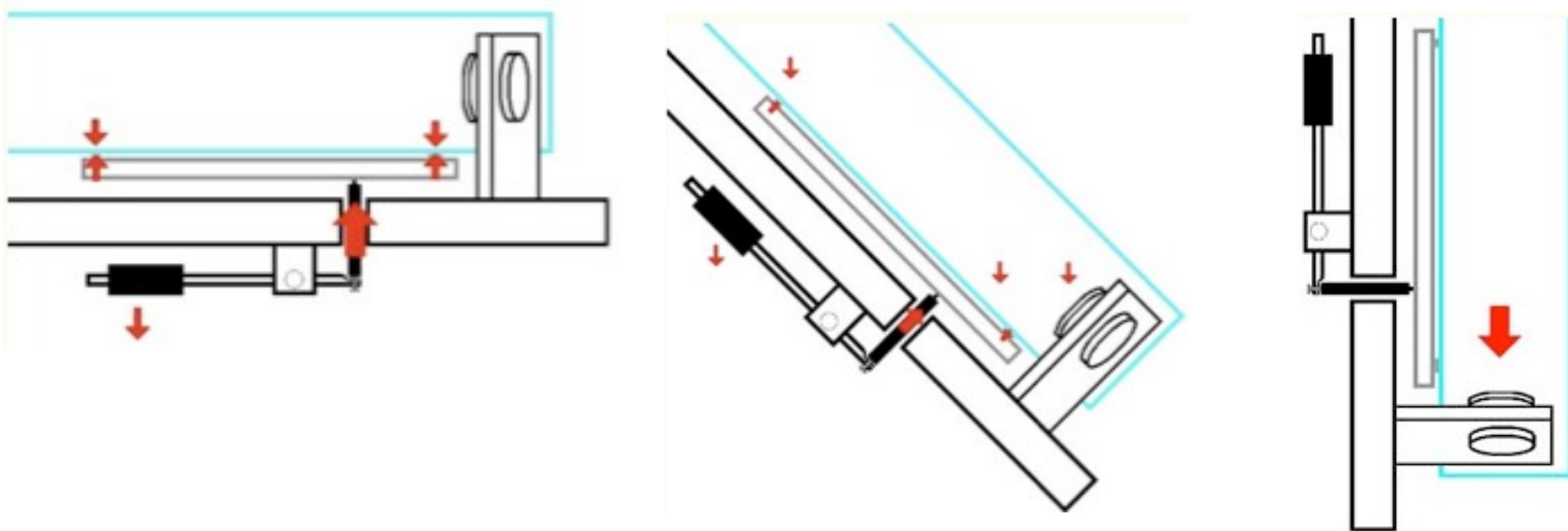
Vers une optique active – "Wiffle-trees"



La géométrie du "whiffle tree" définit la fraction du poids total du miroir qui est portée par chaque point d'appui.

Vers une optique active - leviers astatiques

maintenir le miroir principal :
les contraintes mecaniques sont proportionnelles au poids supporté



Des poids placés sur des leviers logés sous le fond du barillet, contrebalancent l'effet de la gravité en appliquant une "poussée" à l'arrière du miroir proportionnelle à sa masse.

Lorsque le tube optique est abaissé vers l'horizon, les poids appliquent une moins grande poussée et la masse est progressivement prise en charge par les supports latéraux.

le BAT *Bolshoi Azimutal Telescope*



1976
le BAT
Bolshoi Azimutal Telescope

Special Astrophysical Observatory
Zelentchuk (Russie)

D = 6 m,

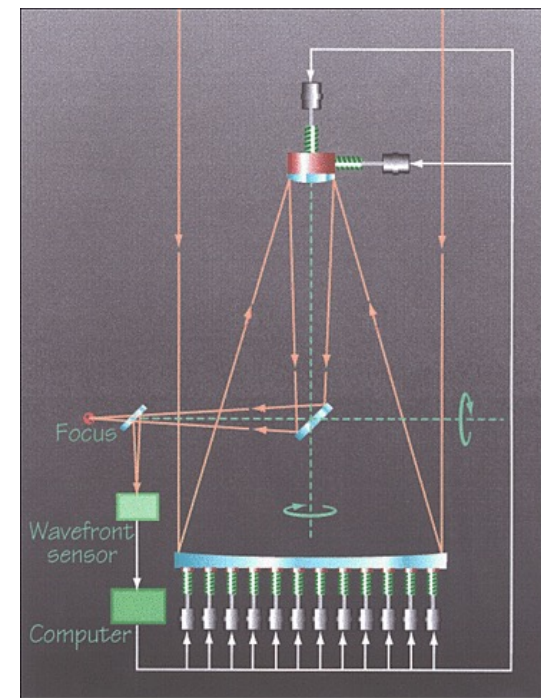
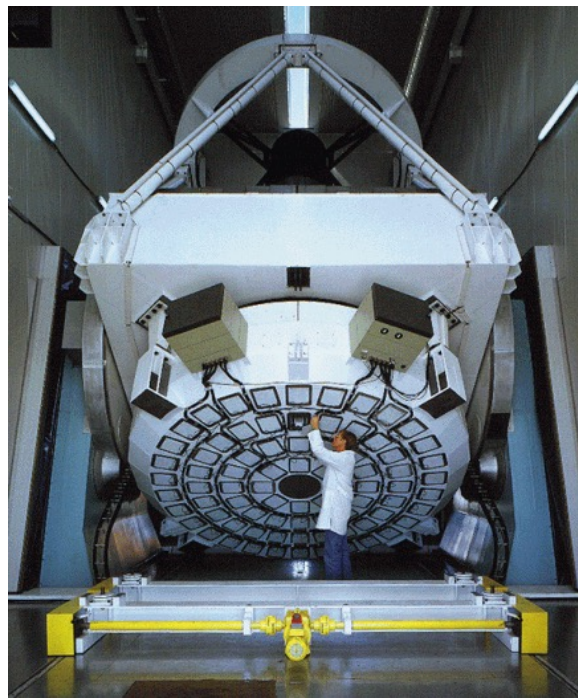
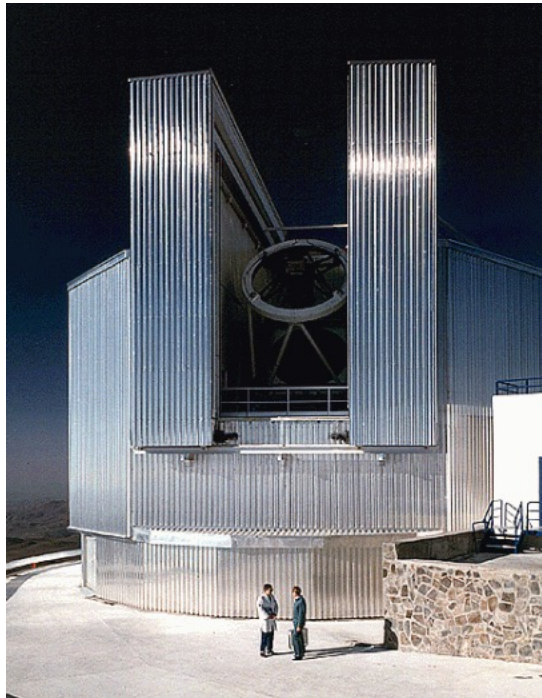
F = 24 m (foyer primaire)

F = 180 m (foyer Nasmith)

Miroir "classique"

Monture "Alt-Azimutale"

Optique Active : exemple New Technology Telescope (NTT)



ESO, Observatoire de La Silla (Chili), 1989

Miroir primaire mince $D = 3,6$ m, $e = 27$ cm poids 6 t

compensation des déformations par **optique active**

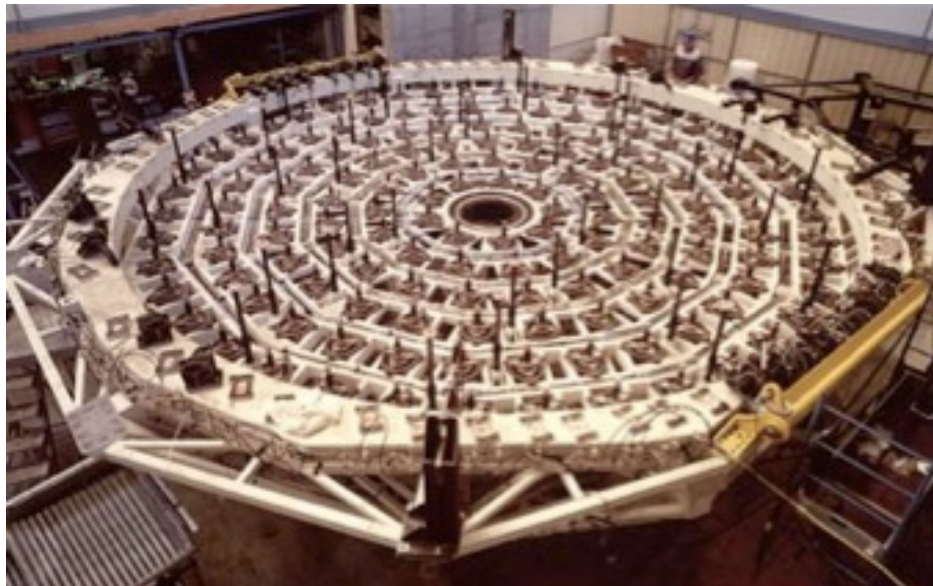
Type Ritchey-Chrétien

Foyer Nasmyth $F = 38,5$ m

Monture Alt-Azimutale

Optique Active : exemple New Technology Telescope (NTT)

Optique active = système restituant la forme idéale du miroir de manière dynamique avec des miroirs *minces* positionnés par des actuateurs. L'optique active corrige les déformations lentes d'origine thermique et mécanique.

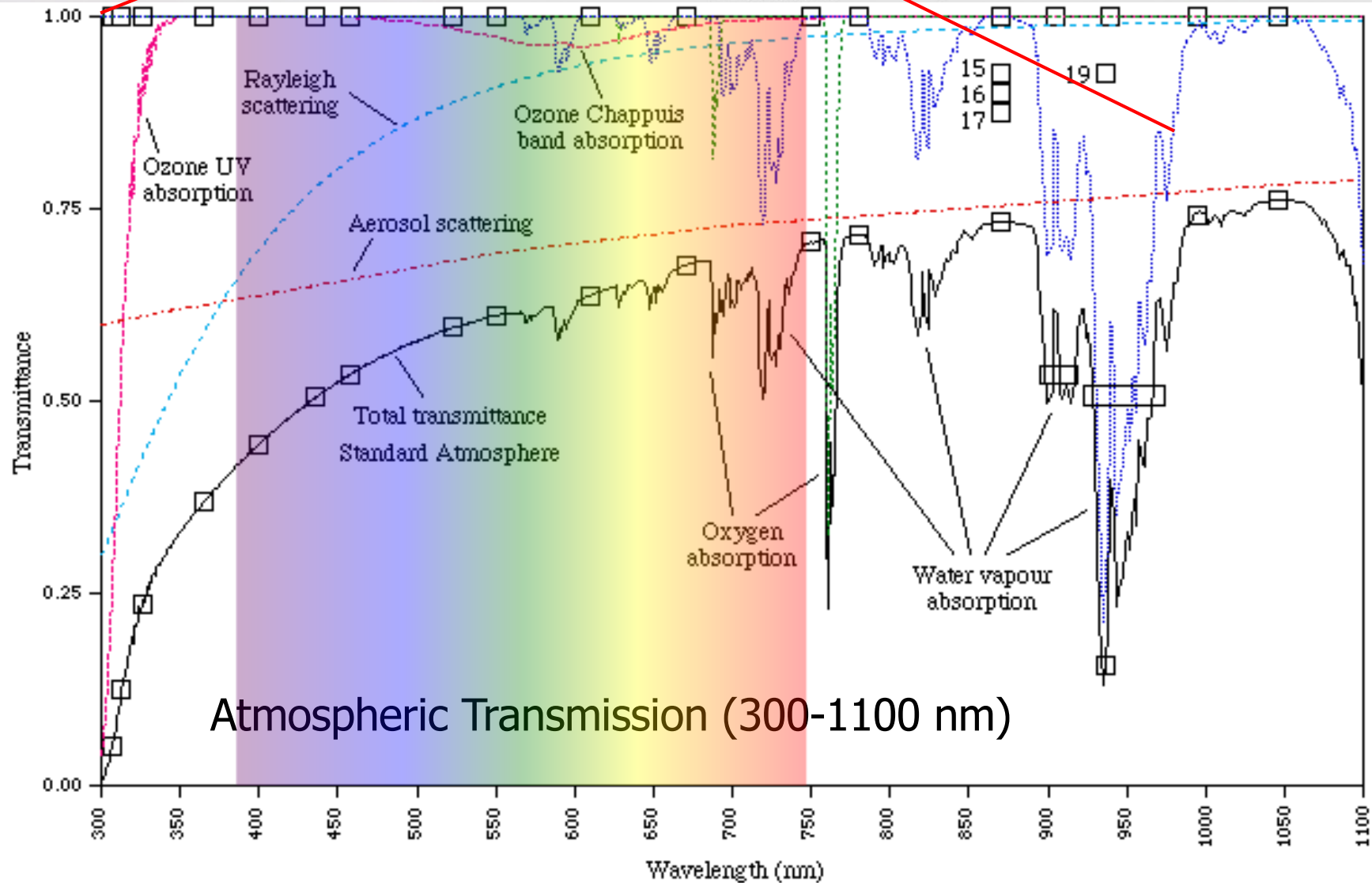
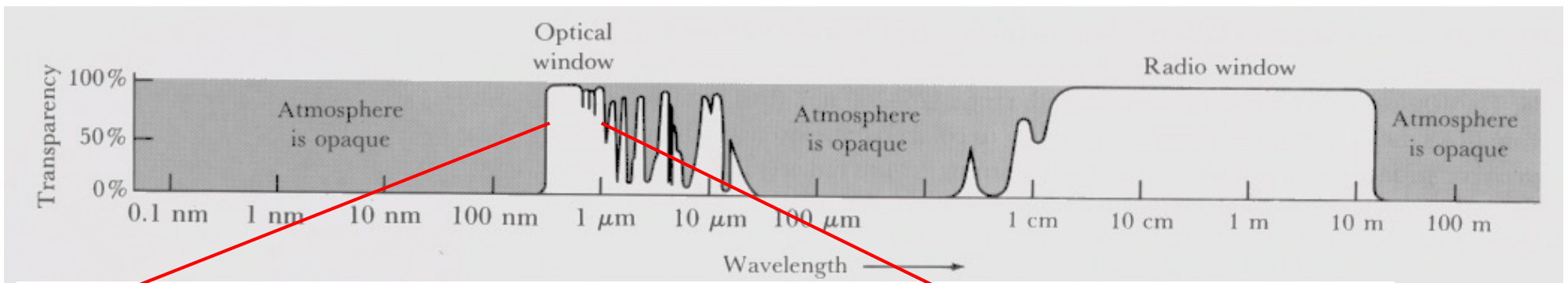


Crédit ESO

En mode actif, les actuateurs assurent un profil idéal du miroir. Les écarts à la parabole, mesurés par le senseur du front d'onde, ont un écart-type de 43 nm, soit environ 10 fois moins qu'une longueur d'onde dans le visible !

Systemes d'observation pour le domaine visible

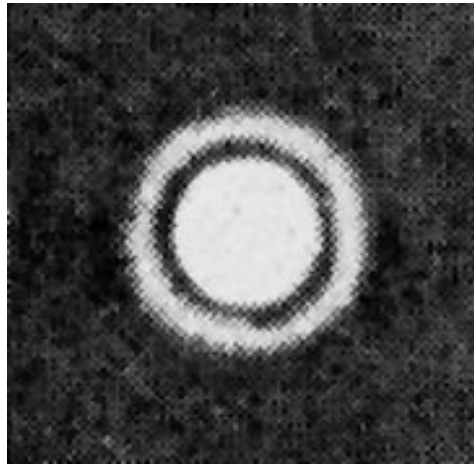
- le rôle de l'observation en astrophysique
- telescopes
 - systèmes optiques (réfracteurs, réflecteurs)
 - montures
 - optique active
 - - **optique adaptative**
- instrumentation focale
 - les détecteurs pour le domaine visible
 - photométrie
 - imagerie
 - spectroscopie
- caractéristiques d'un système d'observation
- Les météorites
pour l'exploration des corps du système solaire (J. Lasue)



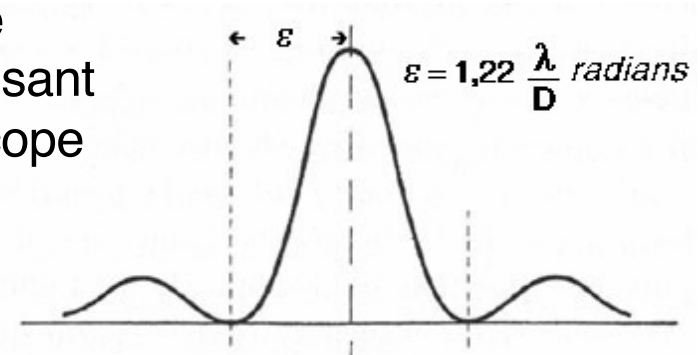
Atmospheric Transmission (300-1100 nm)

optique adaptative : pourquoi ?

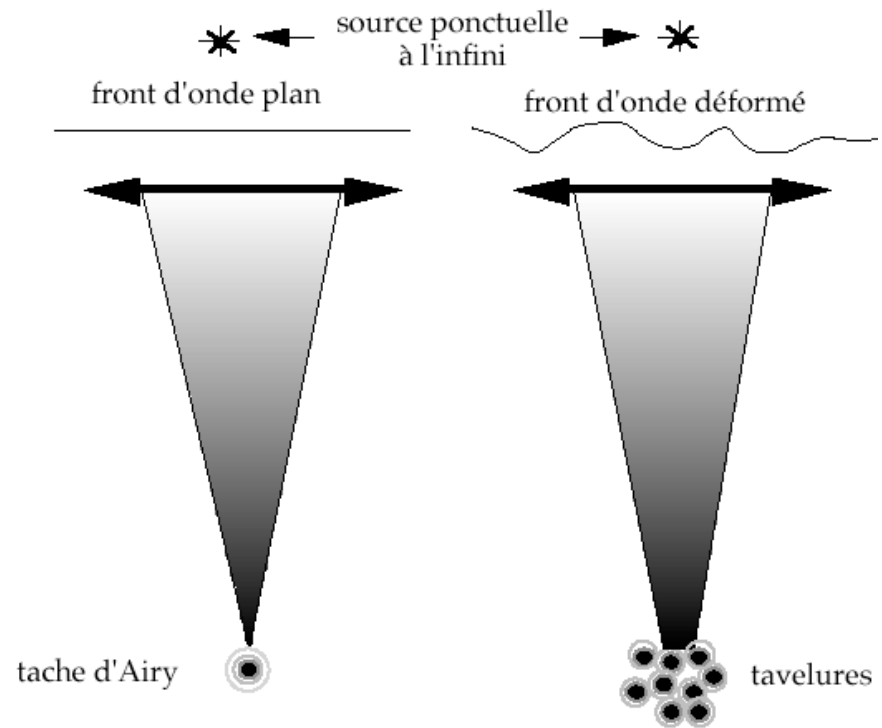
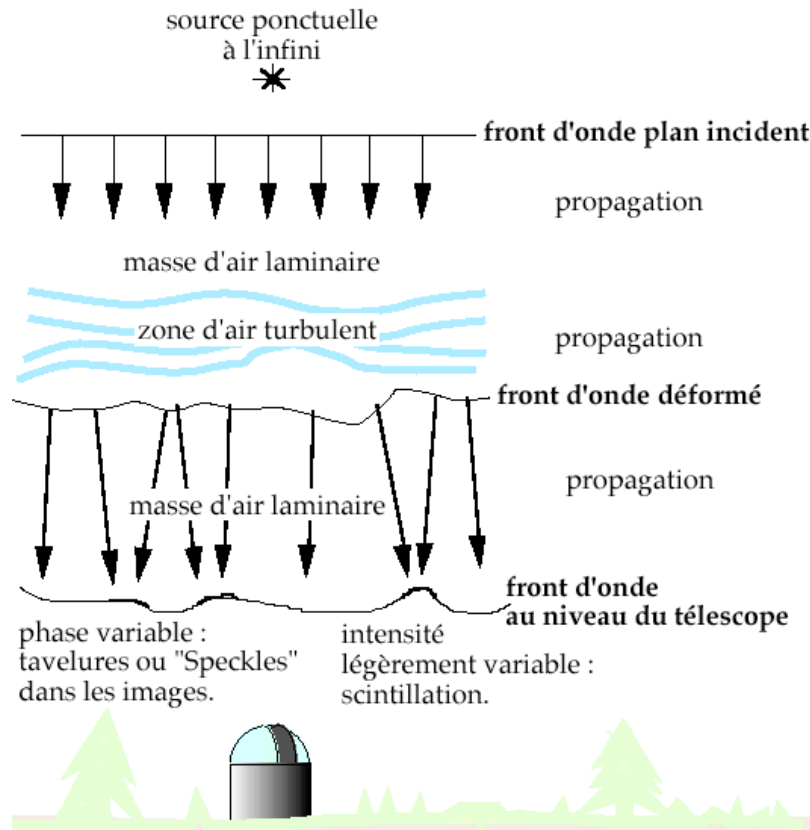
Seeing



Tache d'Airy
image d'une source
ponctuelle, apparaissant
au foyer d'un télescope
de diamètre D

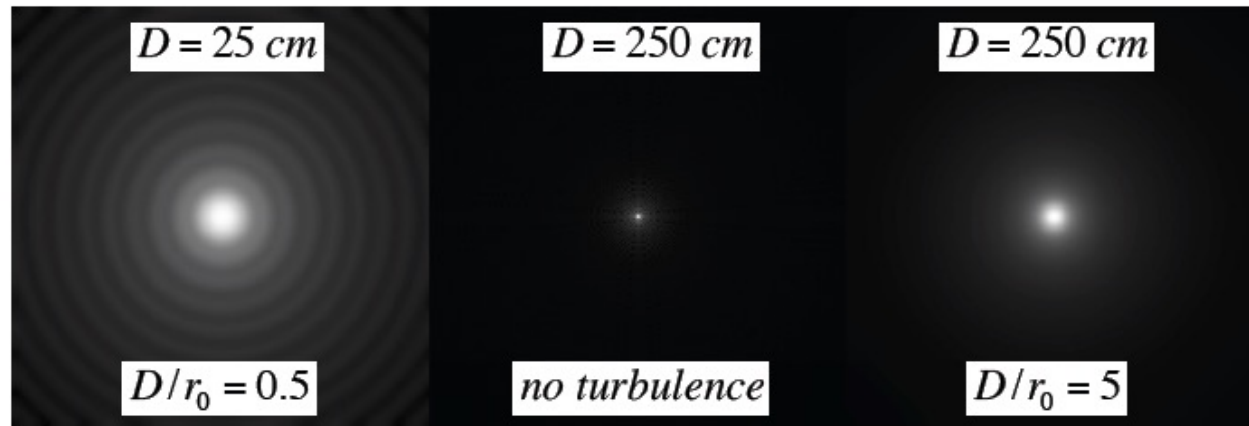


optique adaptative : pourquoi ?

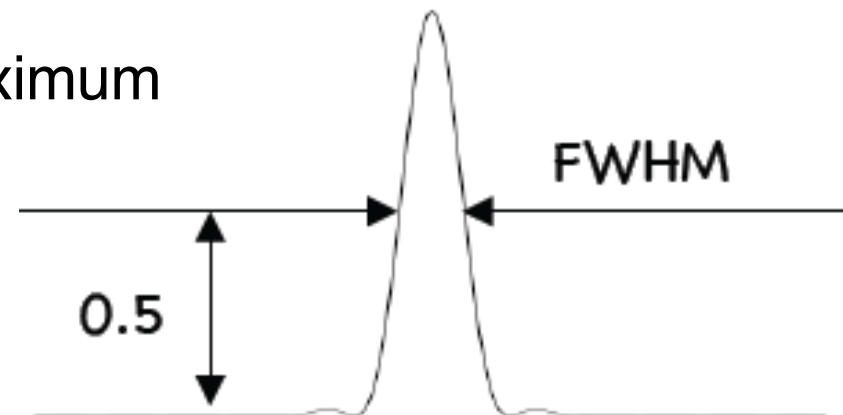


PSF & FWHM

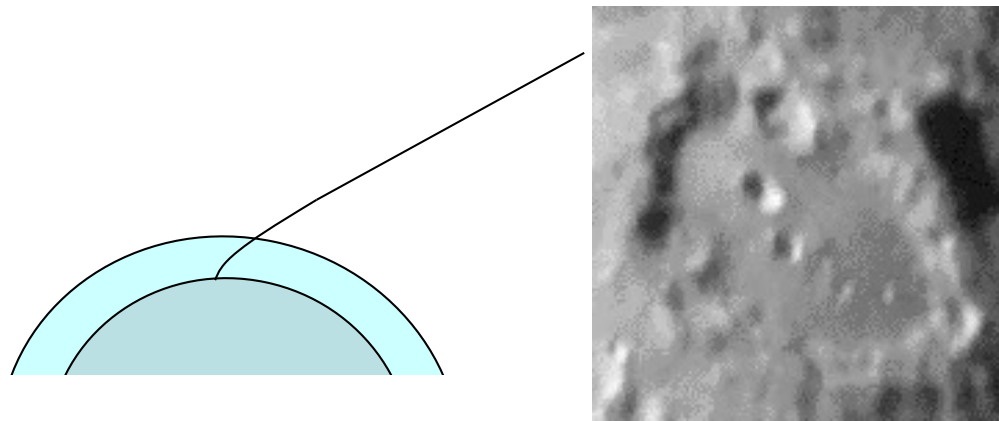
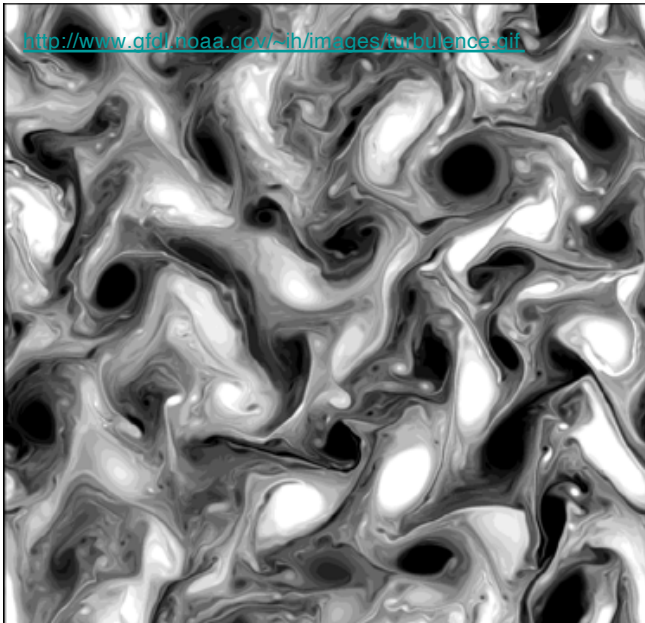
“Point Spread Function” (*réponse impulsionnelle*) = image d’une source ponctuelle donné par le system optique du telescope



largeur de la PSF à 50% du maximum
(Full Width at Half Maximum)
 \approx resolution angulaire



Réfraction atmosphérique, Turbulence



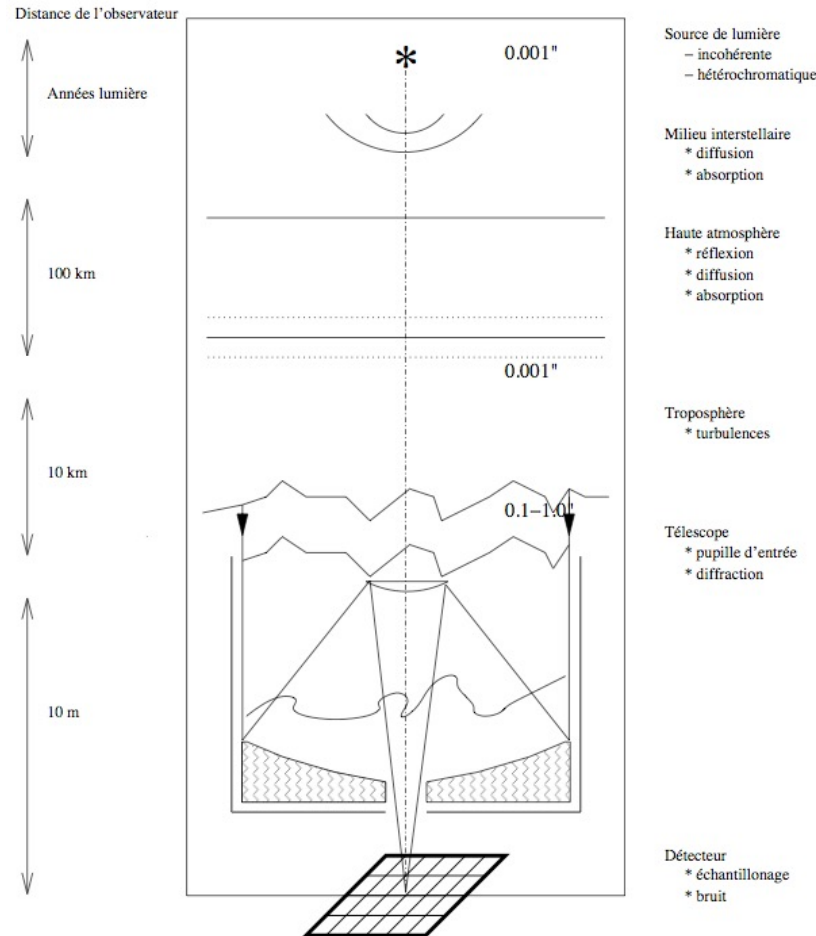
L'atmosphère s'agit comme des lentilles convergent et divergent sur une échelle de l'ordre de 10 cm, qui change en 0.1-1 s

Scintillement des étoiles vues à l'œil nu

Limite de résolution angulaire d'un télescope terrestre de $\sim 1''$ dans la bande visible.



optique active vs optique adaptative



optique active :

low frequency feedback loops
(usually $f \leq 1$ Hz)

optique adaptative :

higher frequencies

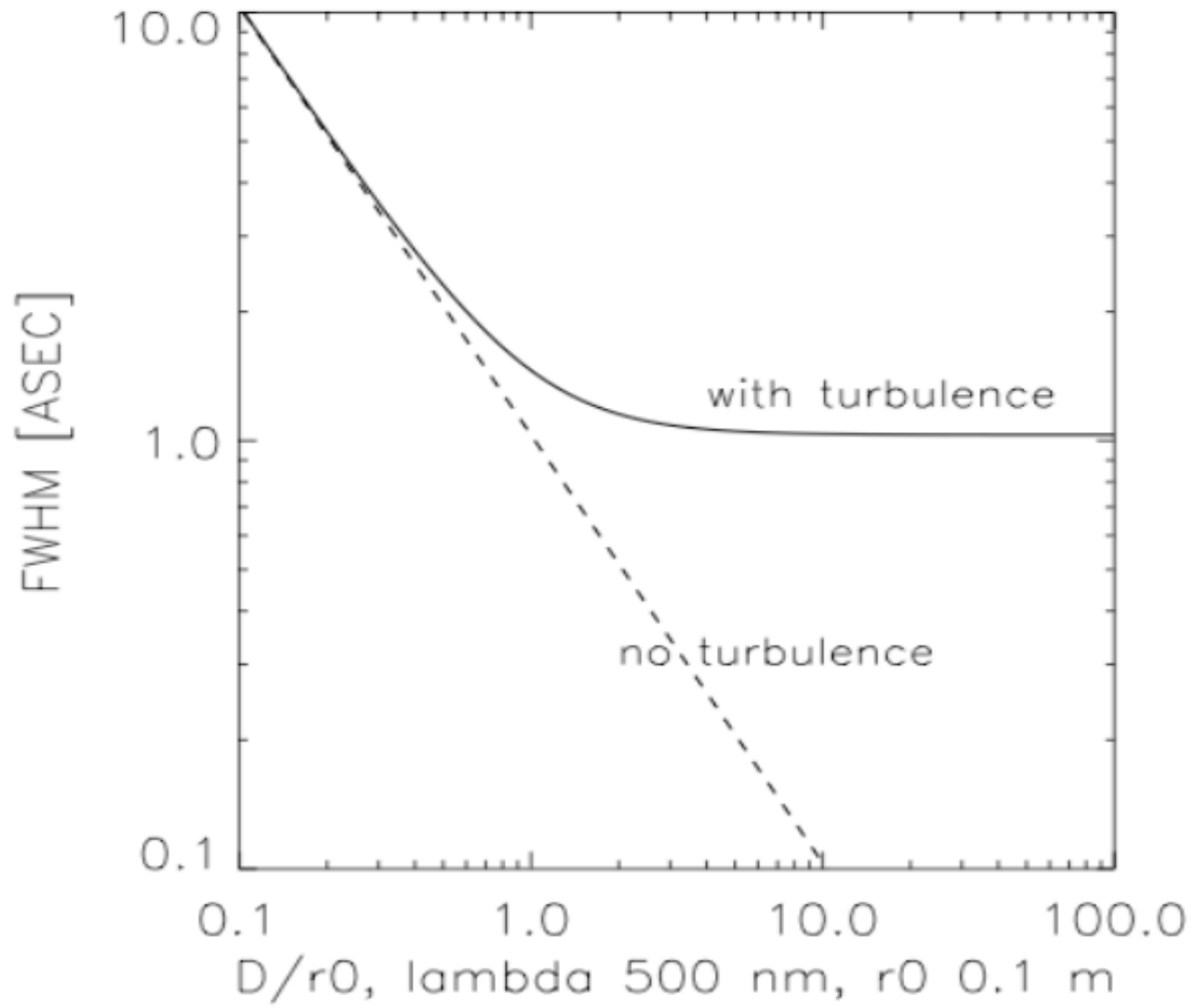
characteristic of atmospheric seeing
($f \leq$ several kHz).

Formation d'une image

quatre paramètres décrivant les images perturbées par le seeing :

- **le paramètre de Fried $r_o(\lambda)$** , induisant à une PSF de largeur λ / r_o au lieu de la valeur de diffraction λ/D (diamètre du télescope D);
- **le temps de cohérence atmosphérique $\tau_c(\lambda)$** , pendant lequel l'image reste approximativement inchangée;
- **l'angle isoplanatique $\alpha_o(\lambda)$** , qui définit le champ angulaire sur lequel la perturbation de l'image reste approximativement constante : la variance de l'excursion de phase sur une période de temps donnée;
- **la variance de l'excursion de phase** sur une ouverture de diamètre D , donnée par $\sigma_\phi^2 = 1.03(D/r_o)^{5/3}$.

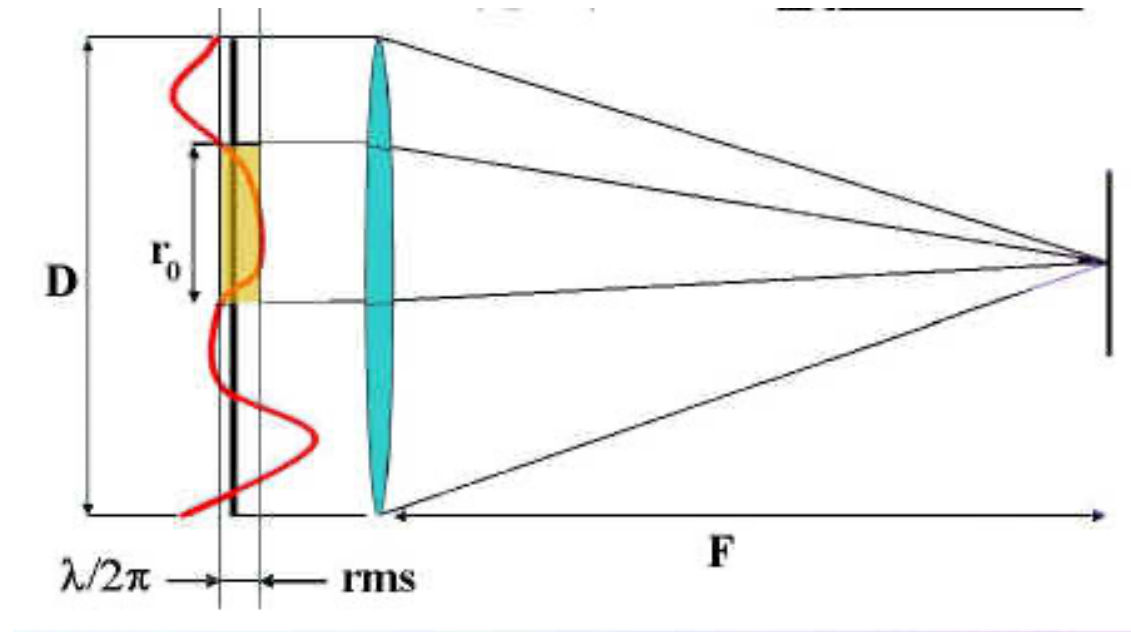
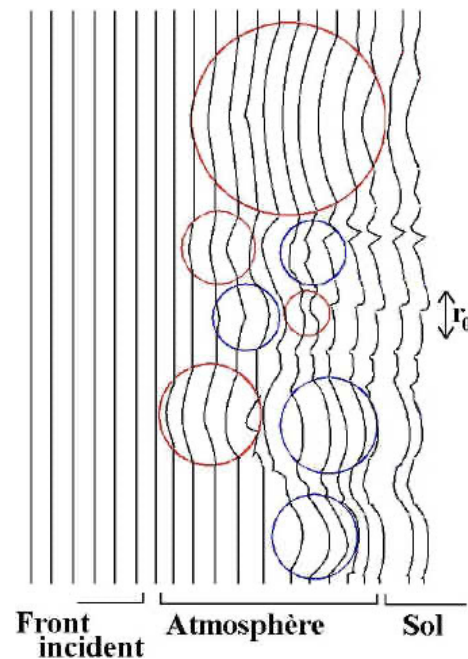
turbulence optique : PSF & Paramètre de Fried $r_0(\lambda)$



Paramètre de Fried $r_o(\lambda)$

$r_o(\lambda)$ correspond au diamètre maximal de la surface de la pupille pour laquelle la surface d'onde peut être considérée comme plane.

turbulence => resolution λ / r_o au lieu de la limite de diffraction $\sim \lambda/D$ du telescope (D diameter telescope),



Paramètre de Fried $r_o(\lambda)$

Dans un bon site, à $\lambda = 1 \mu\text{m}$, des valeurs typiques sont

$$r_o \approx 20 \text{ cm},$$

$$\tau_c \approx 20 \text{ ms},$$

$$\alpha_o \approx 10 \text{ arcsec et}$$

$$\sigma = 4 \text{ rd (pour } D = 10 \text{ m)}$$

ces valeurs varient très fort avec les conditions locales

moyenne pour le domaine visible ($\lambda = 0.5 \mu\text{m}$) :

$r_o = 0,1 \text{ m}$, mais il dépend beaucoup des conditions météo.

Un bon mistral donnera un ciel cristallin avec un $r_o = 0,01 \text{ m}$,
donc de très mauvaises images.

Une situation de vent faible au Pic du Midi peut occasionner des $r_o \approx 0,5 \text{ m}$.

Temps de cohérence de l'atmosphère $\tau_c(\lambda)$

Durée durant laquelle une image reste (quasiment) inchangée :

On peut définir

τ_c , le temps de cohérence comme étant le temps maximum pour lequel la différence de phase $\Delta\phi$ entre deux points écartés du fronts d'onde ne change pas de plus de $\pi/2$

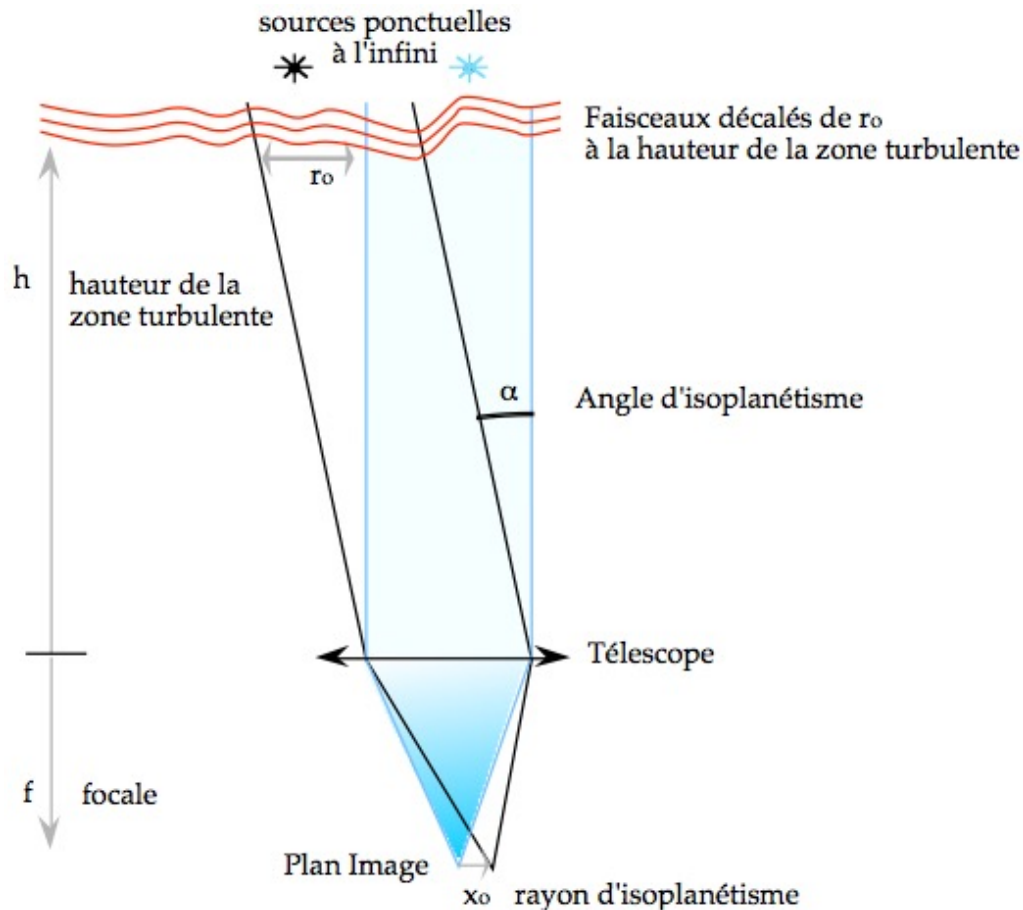
$$\tau_c = \tau \text{ tel que } \langle |\Delta\phi(t) - \Delta\phi(t+\tau)|^2 \rangle < (\pi/2)^2$$

Si l'on fait l'hypothèse que la cause des aberrations est localisée à une altitude donnée et se déplace de manière homogène à la vitesse du vent à cette altitude :

$$\tau_c \approx r_o / v \quad \text{où } v \text{ est la vitesse du vent}$$

(si $v \approx 20 \text{ m/s}$, avec $r_o = 0.1 \text{ m} \Rightarrow 5 \text{ ms}$)

Isoplanétisme



le domaine d'isoplanétisme $\alpha_0(\lambda)$, définissant l'angle à l'intérieur duquel les perturbations restent approximativement constantes

On peut déterminer un champ maximal de rayon x_0 pour lequel la stabilité de la fonction de transfert est satisfaisante. C'est le champ d'isoplanétisme. Si l'on fait l'hypothèse que les perturbations sur l'image sont causées par une seule zone turbulente localisée à une altitude h , on a une relation suivante entre x_0 , champ d'isoplanétisme et r_0 , paramètre de Fried :

$$x_0/f = r_0/h = \alpha .$$

de L.Koechlin, LATT OMP

exercice - turbulence de l'air et dégradation des images

Calculer la différence de chemin optique* ΔL associée à la traversée d'une veine d'air "froid" de 0.25 m d'épaisseur ayant un écart en température de 1°C avec l'air environnant : température de l'air environnant : 300K.

L'indice de l'air est $n = 1,0002817$ à $\lambda = 400 \text{ nm}$, et $(n-1)$ varie proportionnellement à la densité de l'air. On est à pression constante et on considère l'air comme un gaz parfait.

Cette veine d'air froide empiète sur une partie du passage de la lumière arrivant dans un télescope. Le **critère de Rayleigh** impose que les défauts de surface d'onde soient **inférieurs à $\lambda/4$** pour maintenir une PSF (réponse impulsionnelle) limitée par la diffraction. Quels sont les effets de cette lame d'air sur les images pour $\lambda = 400 \text{ nm}$?

*le **chemin optique** entre deux points A et B est défini comme la distance AB parcourue par un rayon lumineux multipliée par l'indice de réfraction que le rayon a rencontré lors de son trajet

exercice - turbulence de l'air et dégradation des images

donné $e = 0.25$ m épaisseur de la veine d'air froide

$\Delta T = 1^\circ$ C avec l'air environnant

$T = 300$ K

$n = 1,0002817$ à $\lambda = 400$ nm, et $(n-1) \sim \rho$ - gaz parfait

calcul de ΔL , différence de chemin optique L :

$$L = c \cdot t = c \cdot e / v = ne \quad \text{avec } c/v = n$$

$$pV = n_m RT; \quad n_m / V = p / RT \quad n_m \text{ mols. } M \text{ masse molaire}$$

$$\rho = M \cdot n_m / V = M \cdot p / RT$$

$$\rho \sim 1/T$$

$$\Delta(n-1) / (n-1) = \Delta\rho / \rho = - \Delta T / T \Rightarrow \Delta n \approx - (n-1) \Delta T / T$$

$$\Delta \text{ chemin optique} \quad \Delta L = e \Delta n = - e (n-1) \Delta T / T$$

$$\Delta L = -0.25(1.0002817-1)(1/300) = 0.23 \cdot 10^{-6} \text{ m} \quad \mathbf{230 \text{ nm} > \lambda/4}$$

le critère de Rayleigh ne sera pas satisfait

AO basics (P. Lena)

The seeing parameters translate into the AO specifying quantities, in the following approximative way :

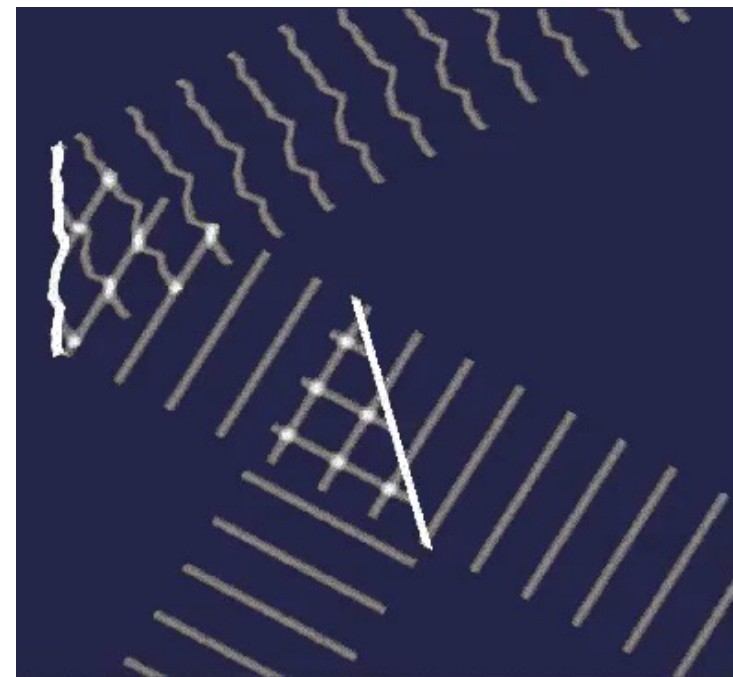
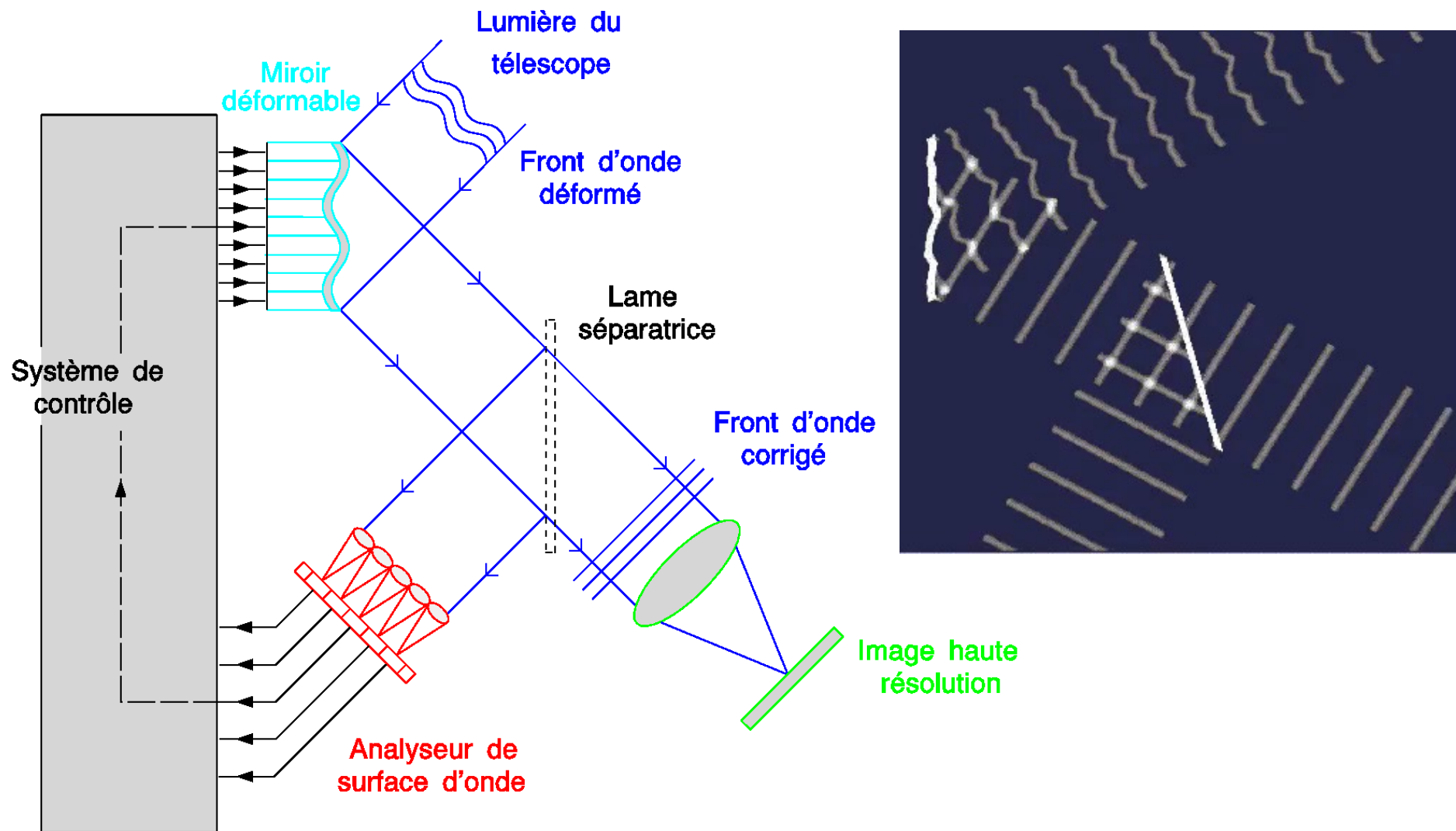
$$N \approx [D/r_o(\lambda)]^2$$

N, the number of degrees of freedom the deformable mirror must have to correct at the wavelength, and in consequence the number of sub-pupils to be analyzed by the wavefront sensor;

$$f_{\text{loop}} \approx 10 \times (\tau_c)^{-1}$$

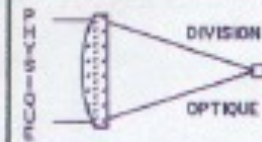
is the required closed loop operation frequency ; the rms amplitude of the correcting mirror is the achromatic quantity $\lambda\sigma_\Phi/2\pi$

principe d'une Optique Adaptative



ONERA

SYSTEME D'OPTIQUE ADAPTATIVE "COME-ON"
(**C**ge, **O**bservatoire de **M**eudon, **E**so, **ON**ERA)



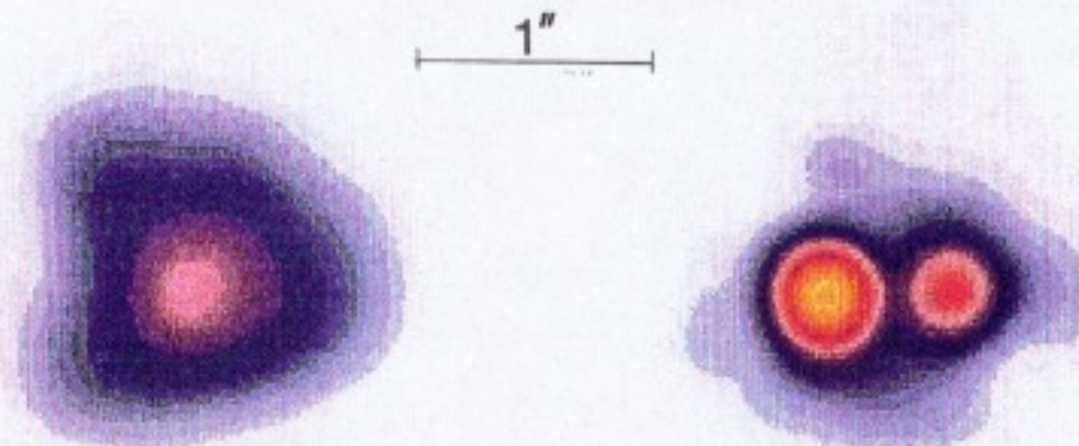
Première démonstration en astronomie de la correction
en temps réel de la turbulence atmosphérique

J. Fontanelle
D. Bouget
V. Michard

Ph. Courvoisier
M. Lévesque
M. J. R. Cantó

J. L. L. L. L.
J. L. L. L. L.

M. J. R. Cantó
J. L. L. L. L.



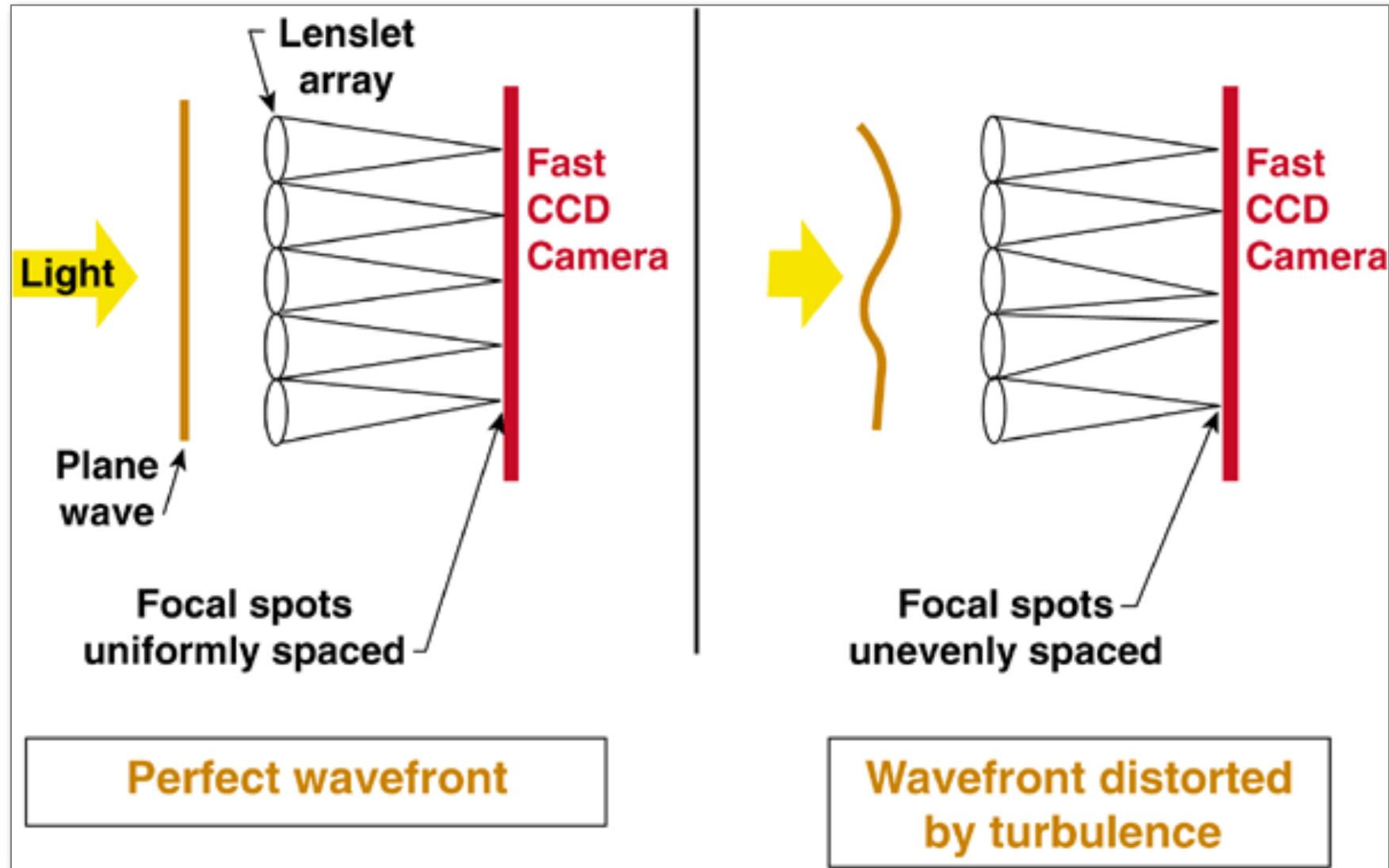
St. Clément
Bouget
J. L. L. L. L.

Image non corrigée

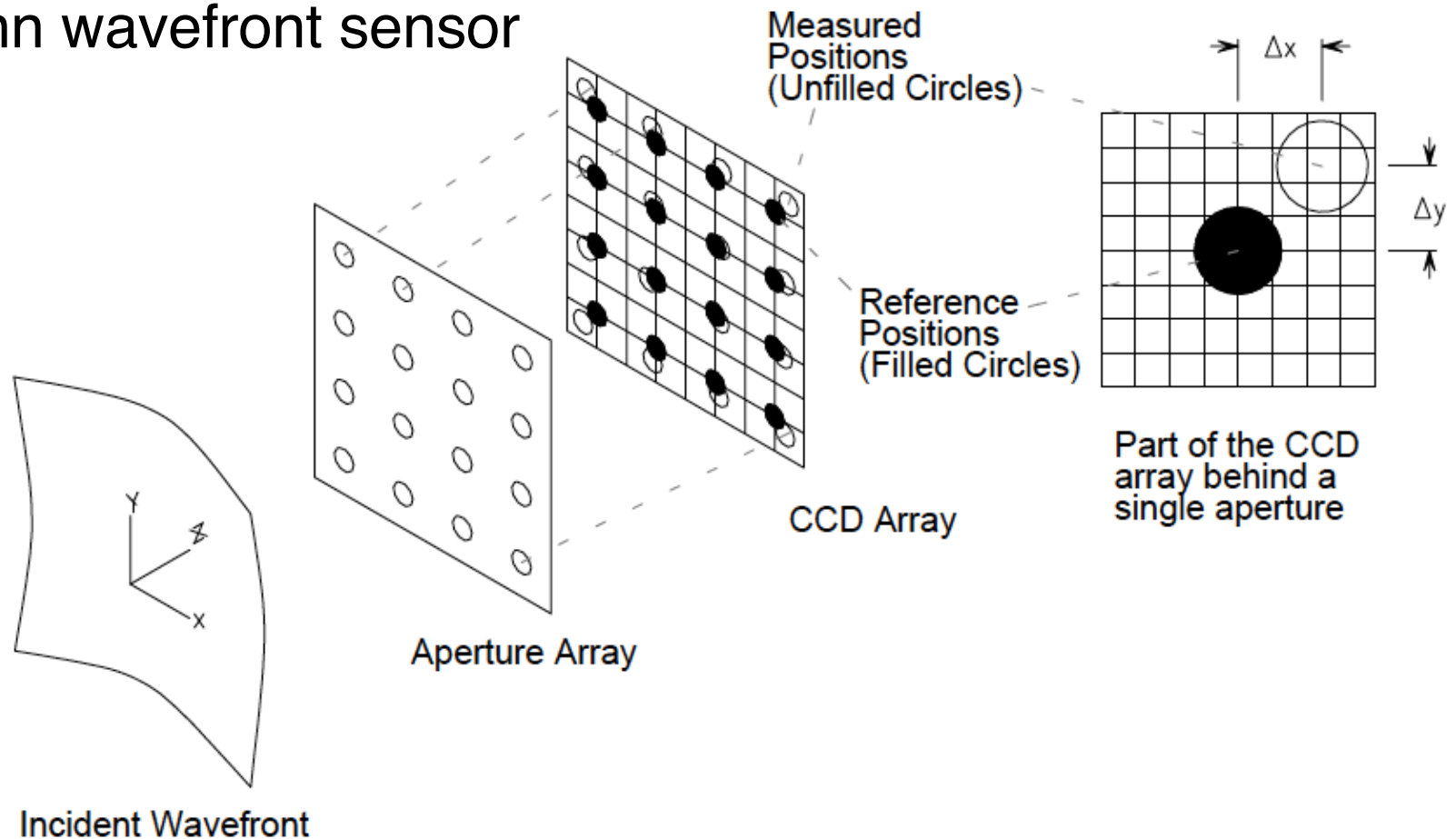
Image corrigée

Observatoire de Haute Provence, Octobre 1989,
Télescope de 1,5m ν_2 Andromède, $\lambda = 2,2\mu\text{m}$

Hartmann wavefront sensor



Hartmann wavefront sensor

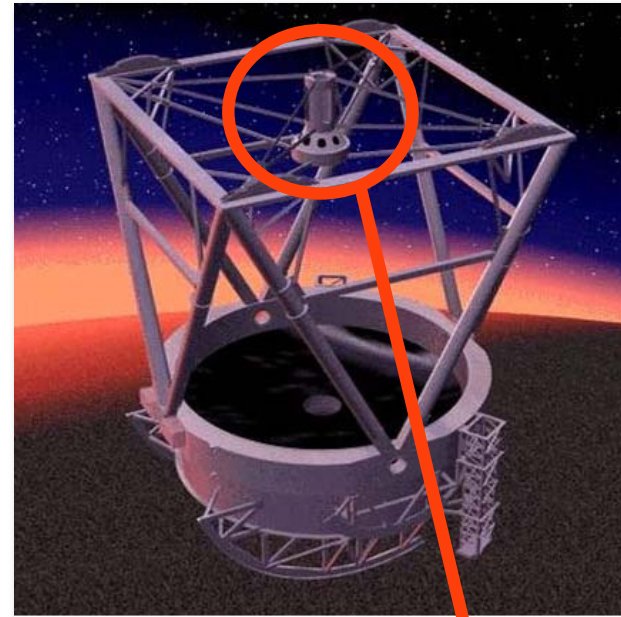
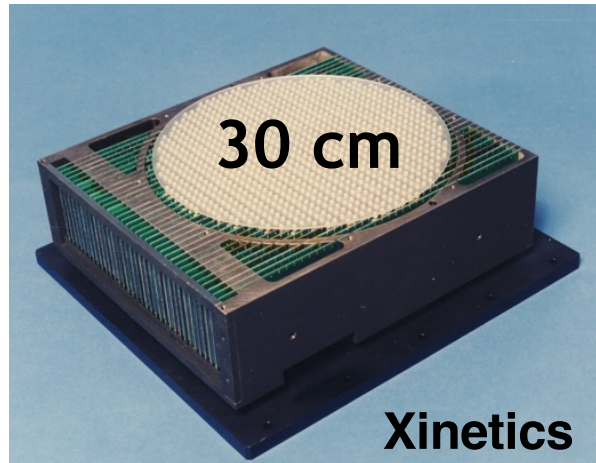


Array of apertures mounted a distance from a CCD

- the apertures displace the diffracted spot proportional to the average phase tilt over the aperture.
- the wavefront sensor measures the tilt over each aperture by comparing the measured positions of the diffracted spots to the positions of the diffracted spots for a reference input beam.
- the tilt measurements are then converted into a replica of the wavefront by performing a form of integration called wavefront reconstruction

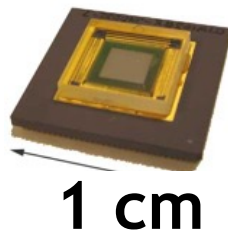
Deformable mirrors come in many sizes

Glass facesheet
1000 actuators



Adaptive
Secondary
Mirrors

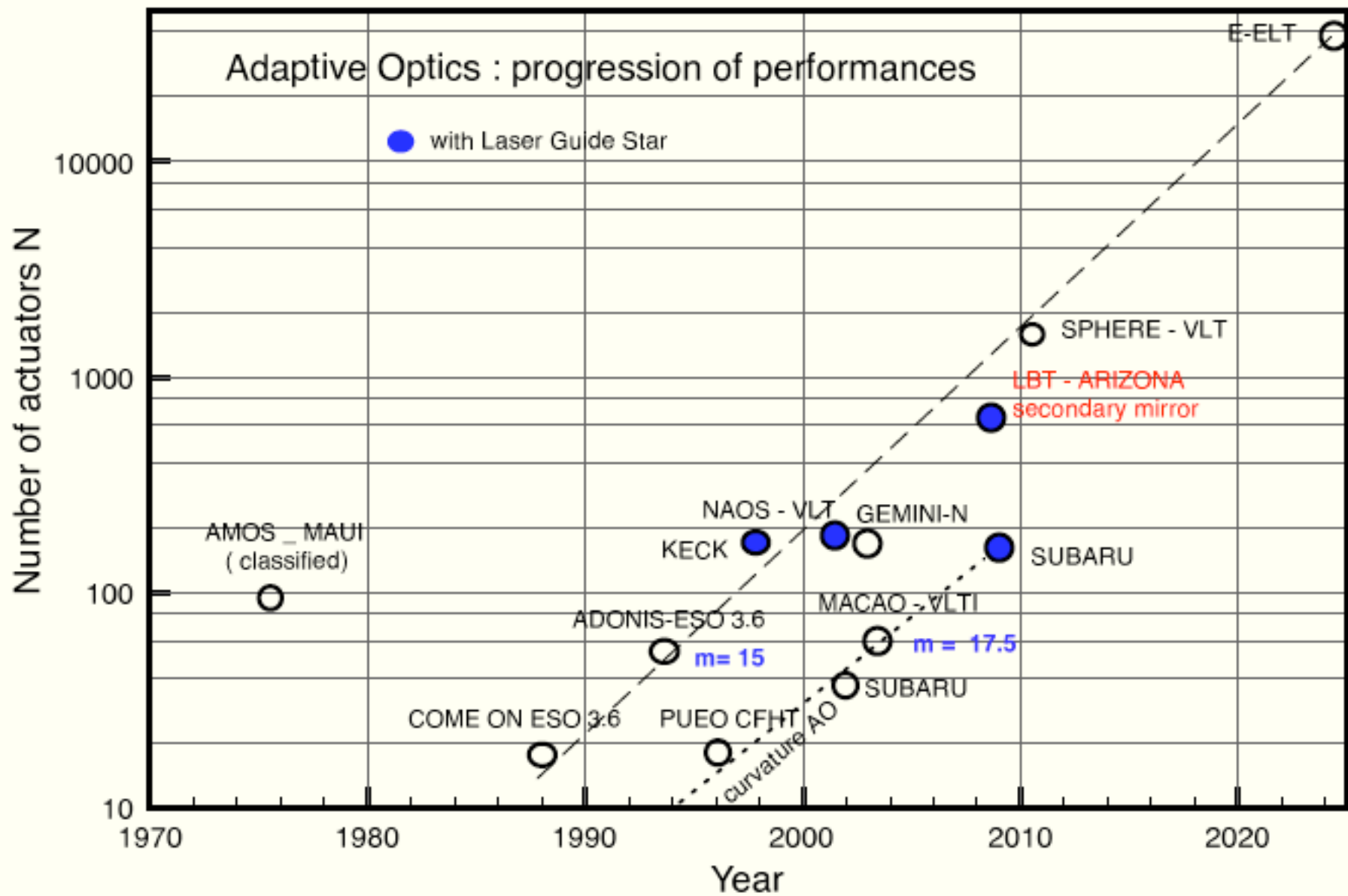
MEMS
1000 actuators



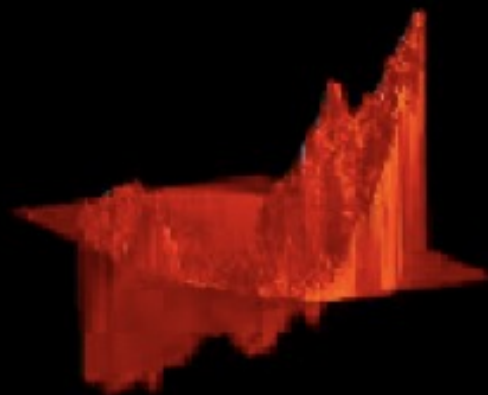
Boston
Micro-
Machines



Optique Adaptative – progres des performances



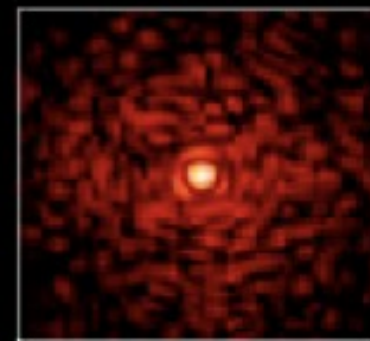
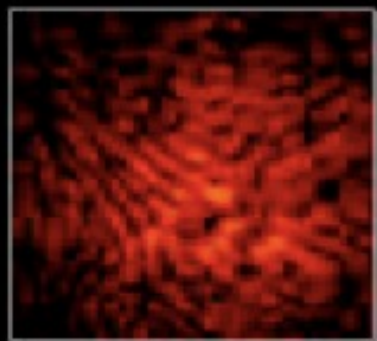
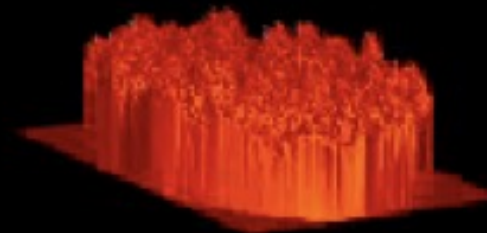
Incident wavefront



**Shape of
Deformable Mirror**



Corrected wavefront



Credit: J. Lloyd

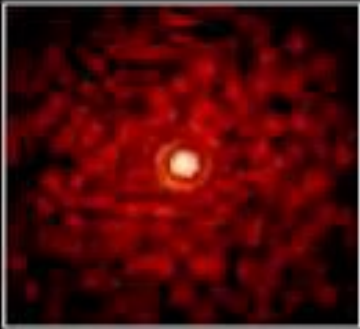
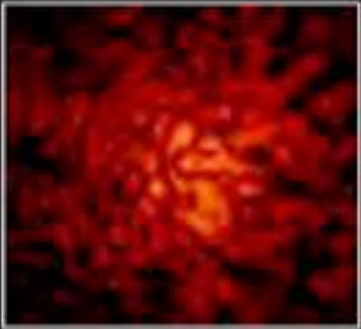
Incident wavefront



Shape of Deformable Mirror



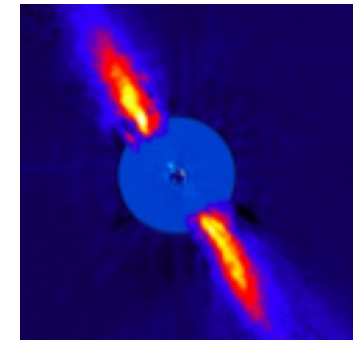
Corrected wavefront



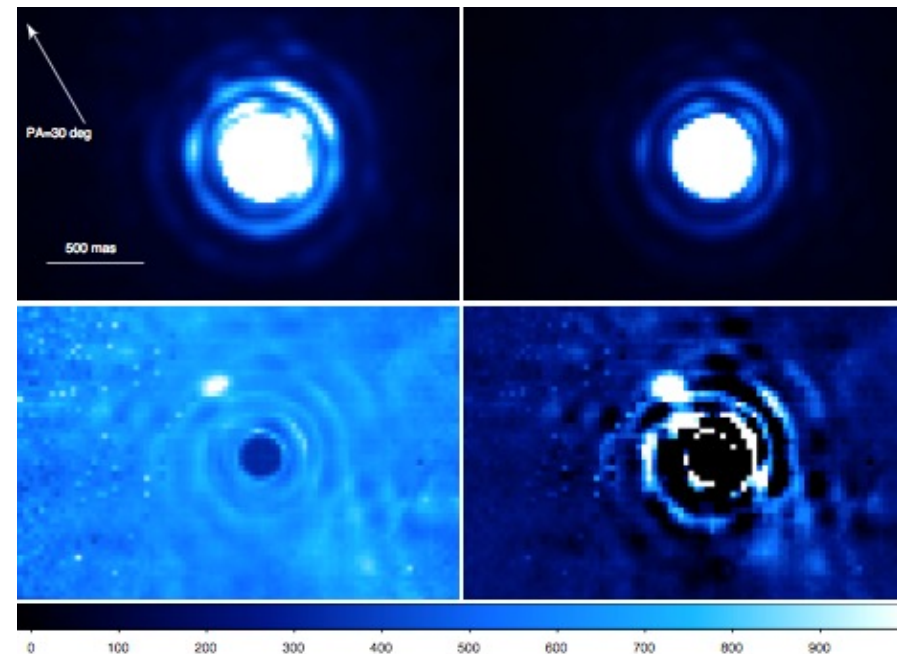
A probable giant planet imaged in the β Pictoris disk



Nasmyth Adaptive Optics System (NAOS) Near-Infrared Imager and Spectrograph (CONICA)



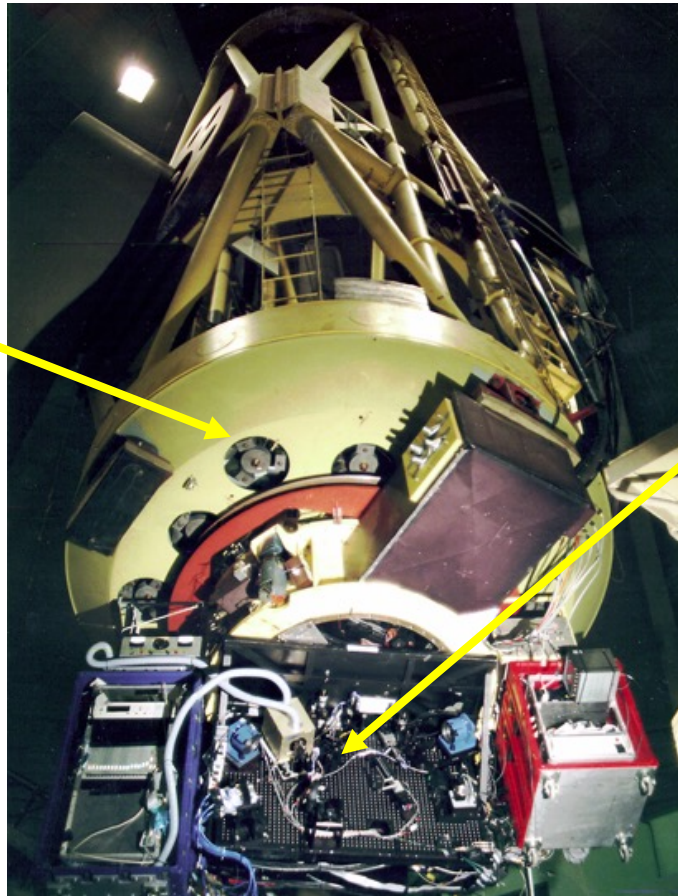
β Pic and HR 2435 recentered and saturated L' images (top left and top right, respectively) in data set A. Below are the divided (bottom left) and subtracted (bottom right) images. North is up and East is to the left.



Lick adaptive optics system at 3m Shane Telescope

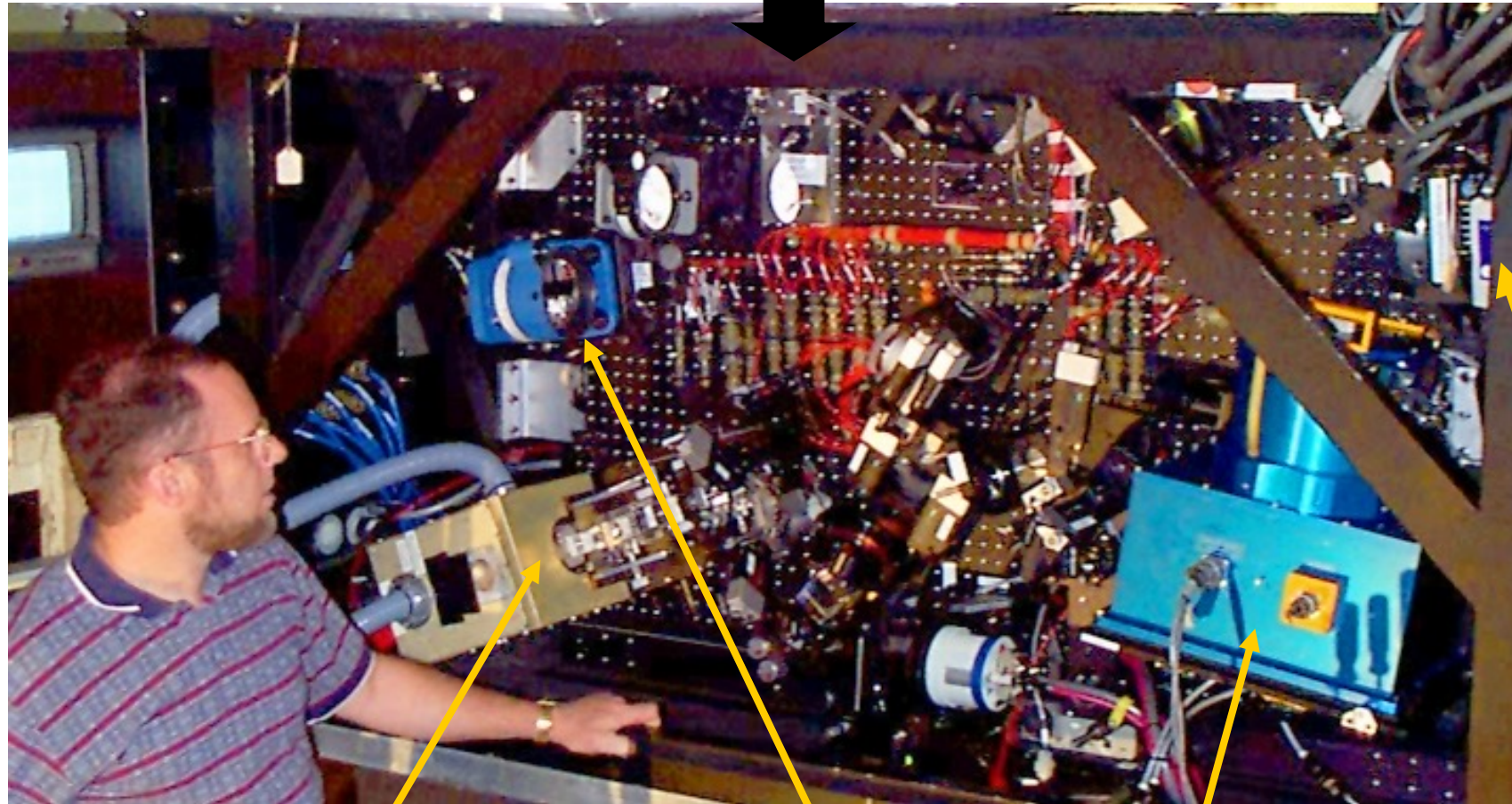
Adaptive optics system is usually behind the main telescope mirror

Support for
main
telescope
mirror



Adaptive optics
package below
main mirror

Lick adaptive optics system at 3m Shane Telescope



Wavefront
sensor

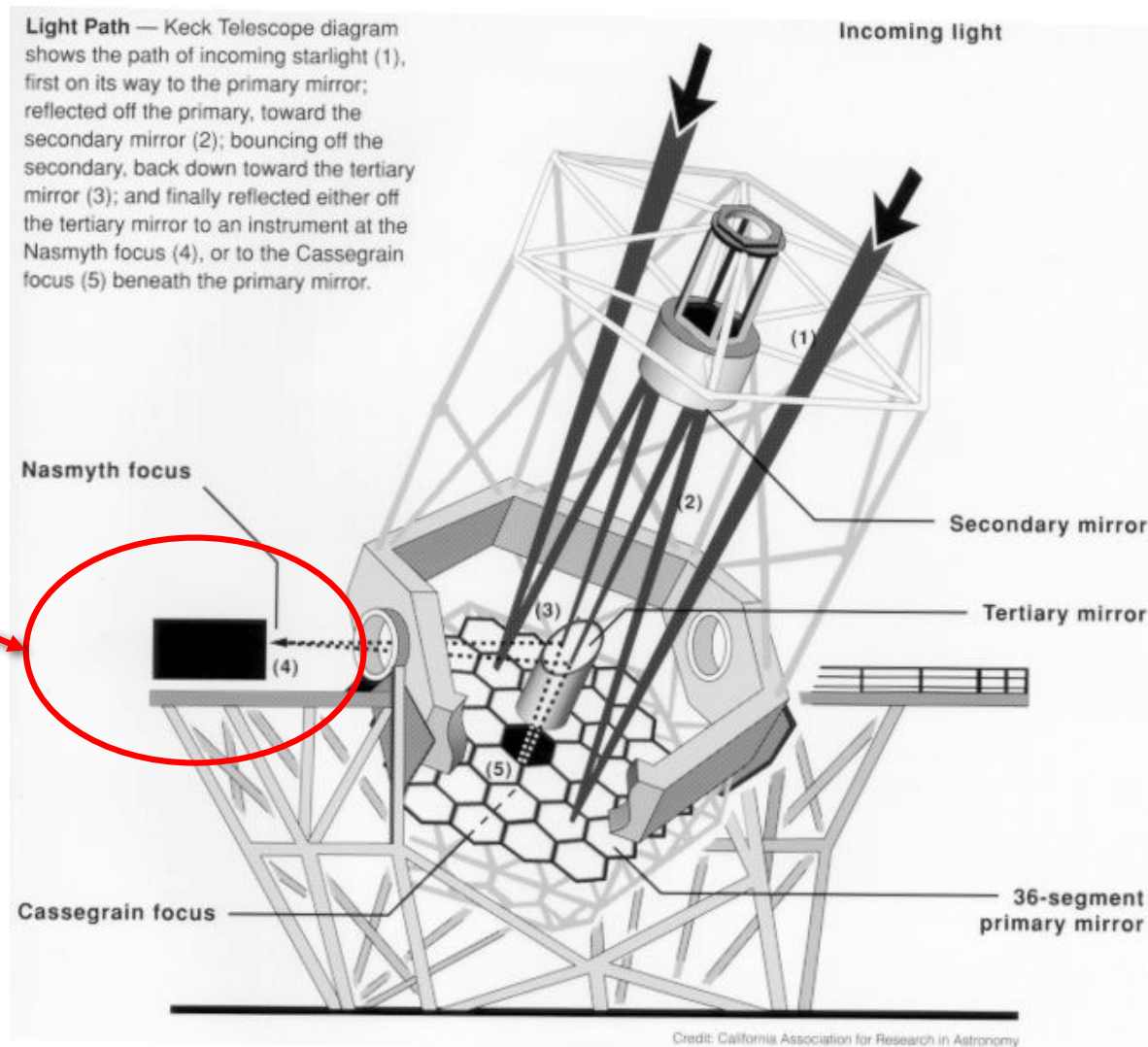
Off-axis
parabola
mirror

IRCAL infra-red
camera

DM

The Keck Telescopes

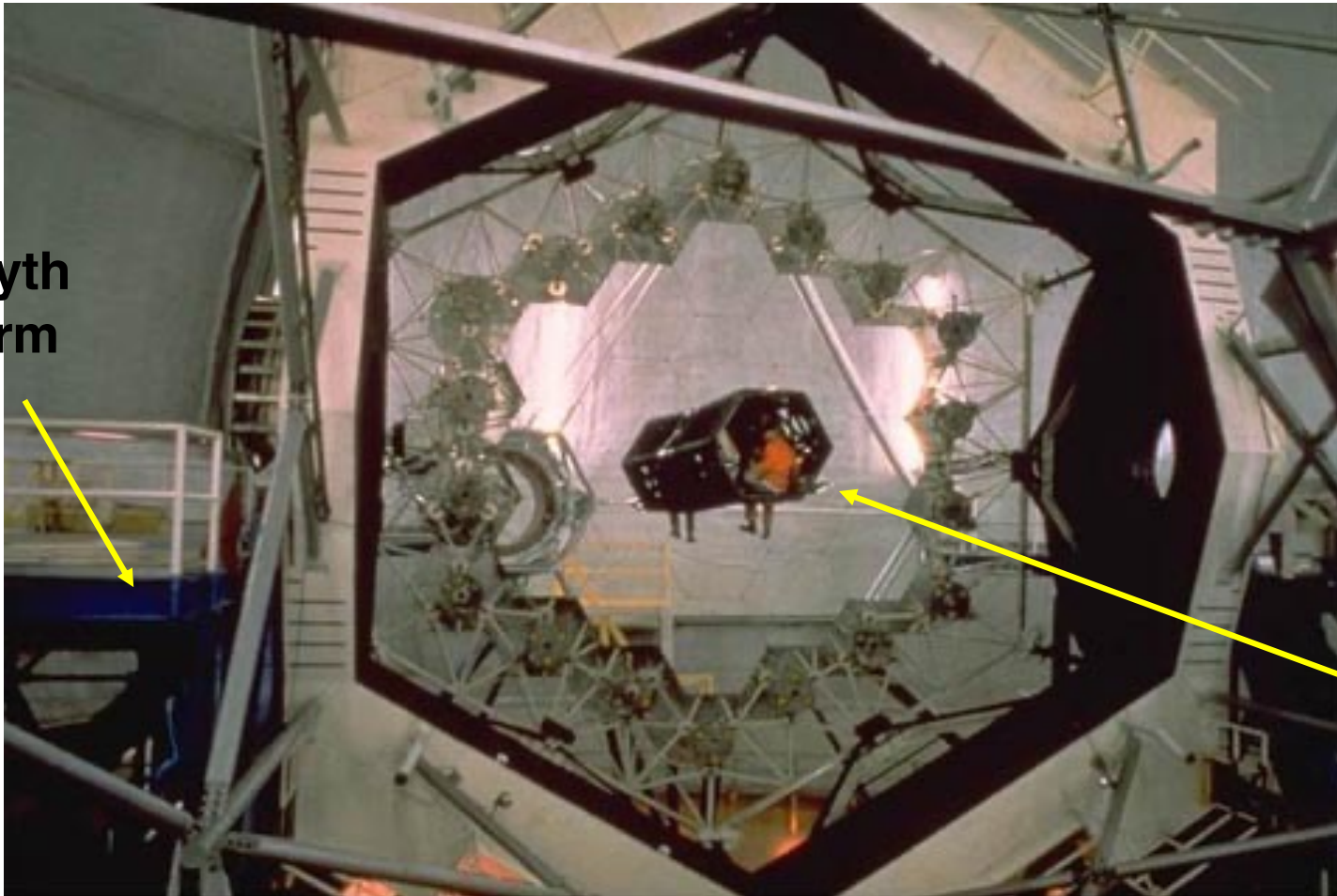
**Adaptive
optics
lives here**



The Keck Telescopes

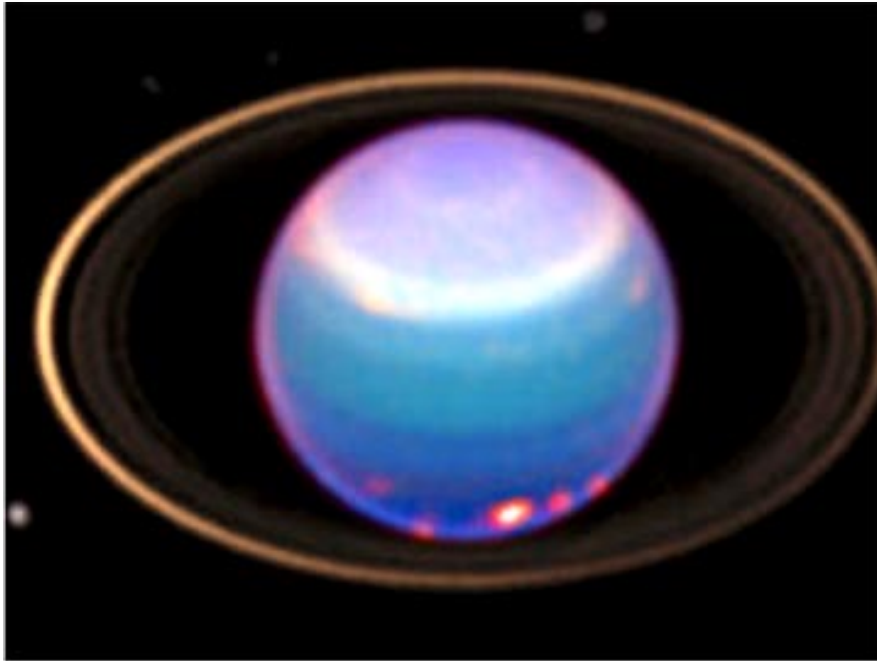
Keck Telescope's primary mirror consists of 36 hexagonal segments

**Nasmyth
platform**

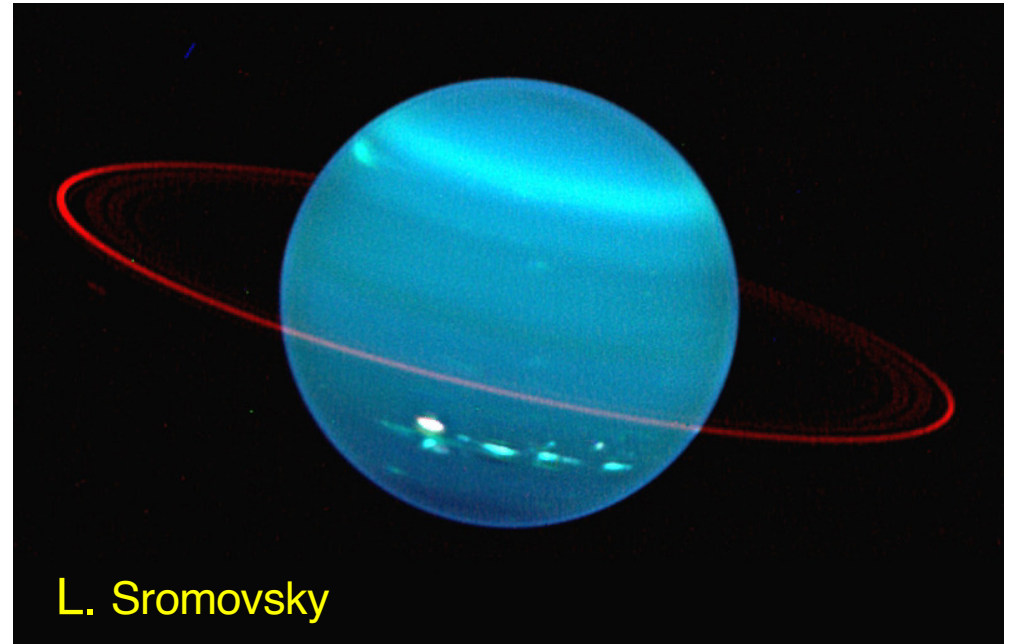


Person!

Uranus with Hubble Space Telescope and Keck AO



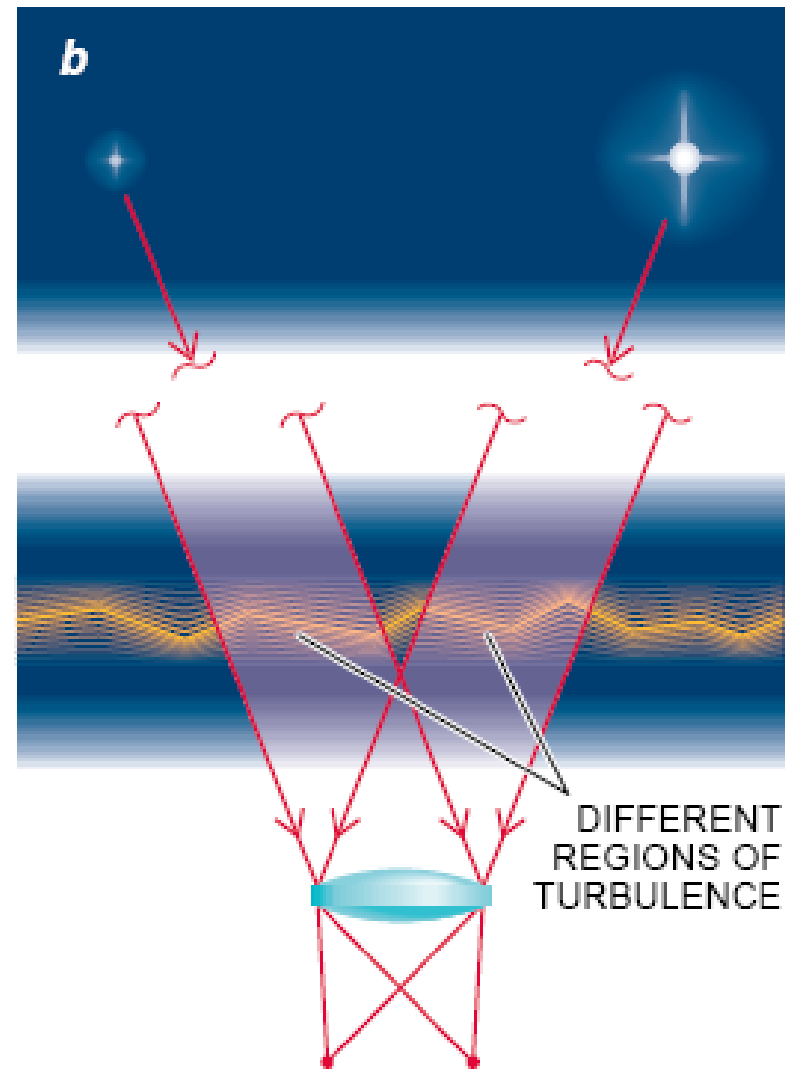
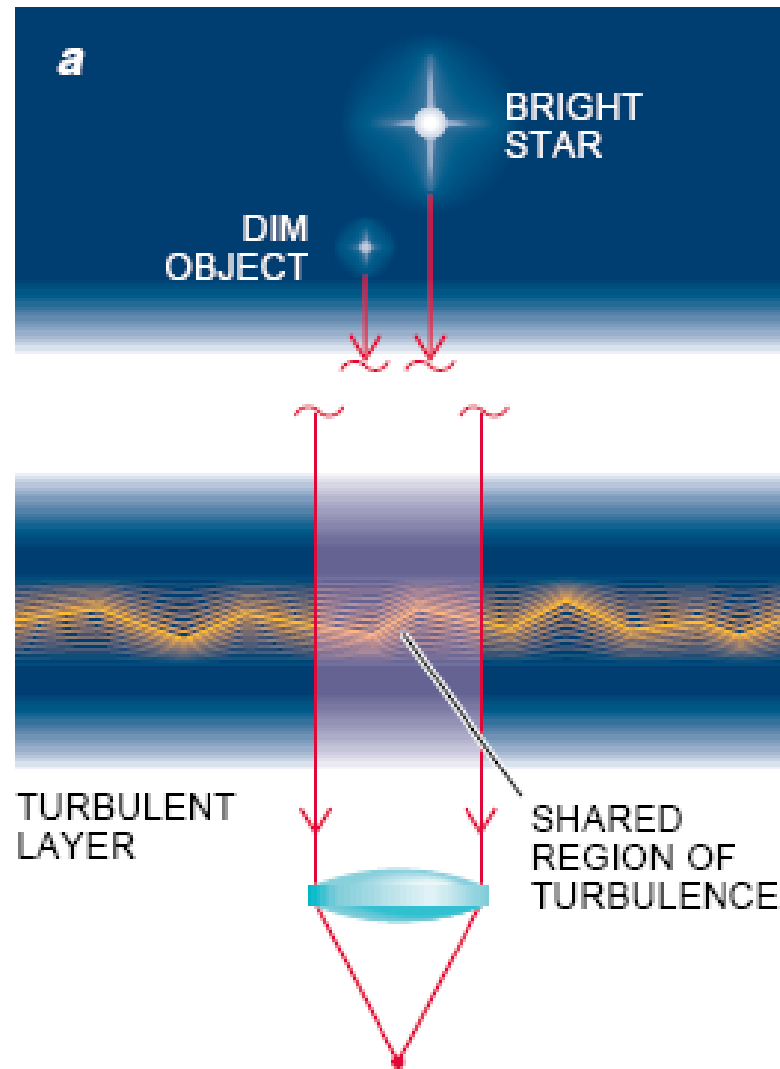
HST, Visible



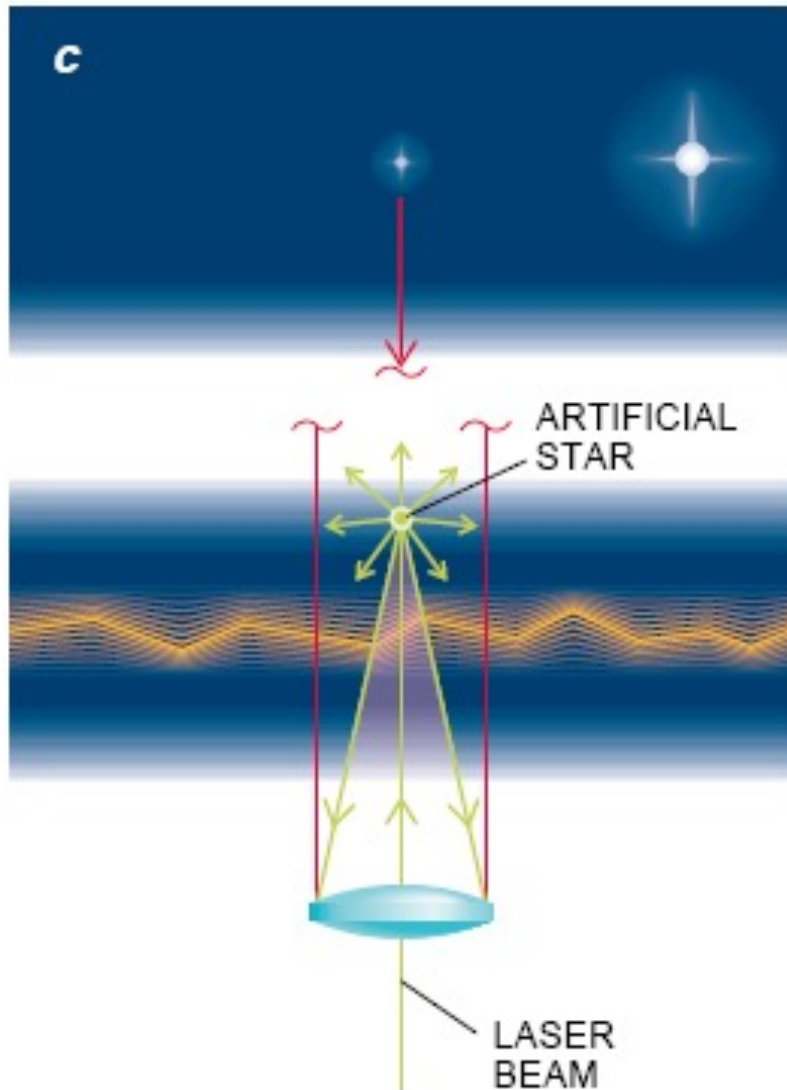
Keck AO, IR

Lesson: Keck in near IR has ~ same resolution as Hubble in visible

Guide Stars



Artificial Guide Stars



- The area of sky coverage can be expanded using artificial guide stars.
- Created using a LASER aligned with the telescope optics.
- Rayleigh beacons take advantage of Rayleigh scattering in the atmosphere.
 - Useful for telescopes with apertures $< 2\text{m}$.
 - Creates a 1 to 2 arc second guide star 5 to 10km in altitude.
 - 100W LASER
 - LASER is pulsed so that backscatter can be eliminated by range gating.

Optique Adaptative – sans étoile de référence

Que faire en cas d'absence d'une étoile de référence dans la zone observée (typiquement quelques dizaines ") ?



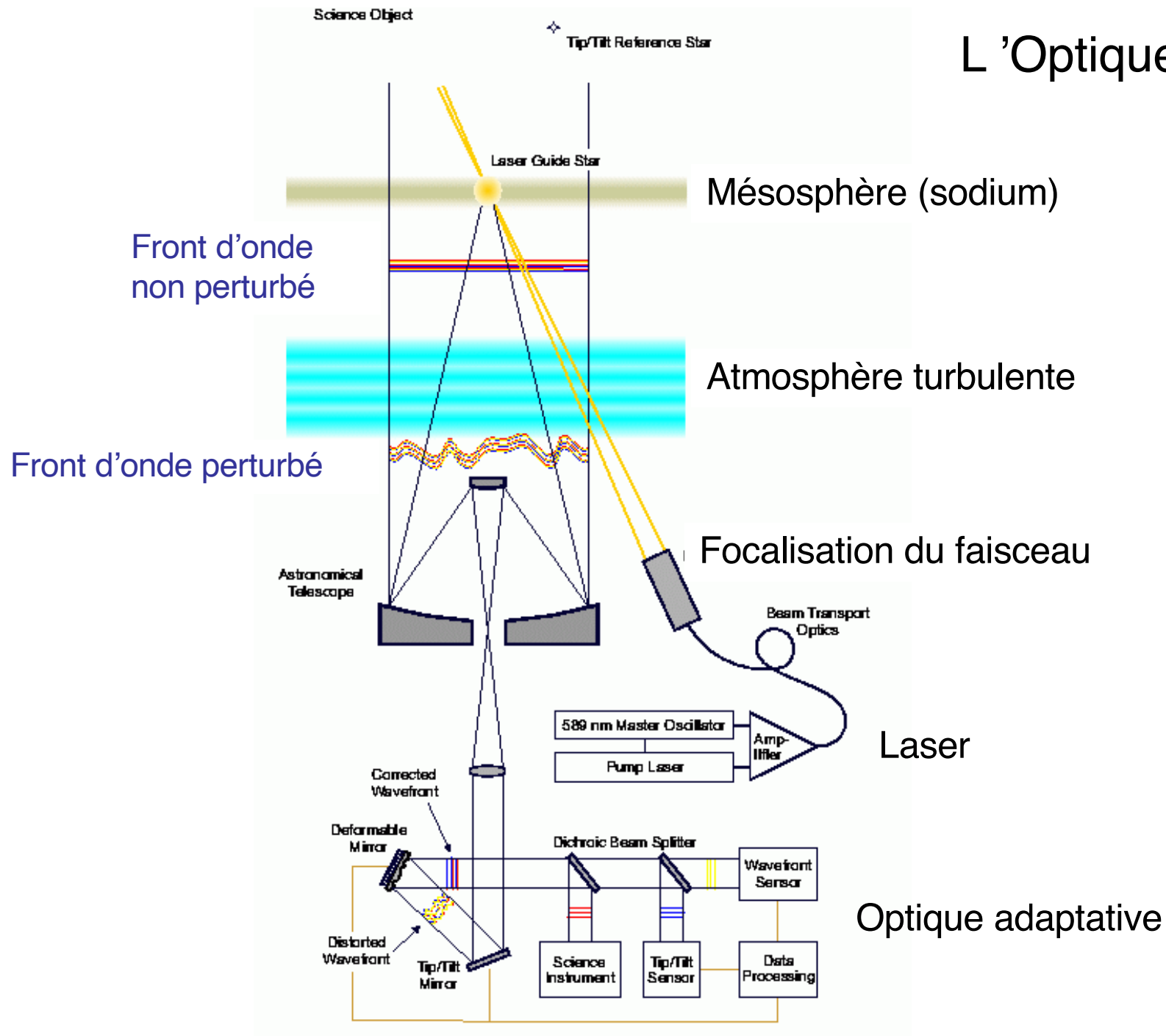
Solution :

Etoile artificielle
créée par un faisceau
laser au sodium

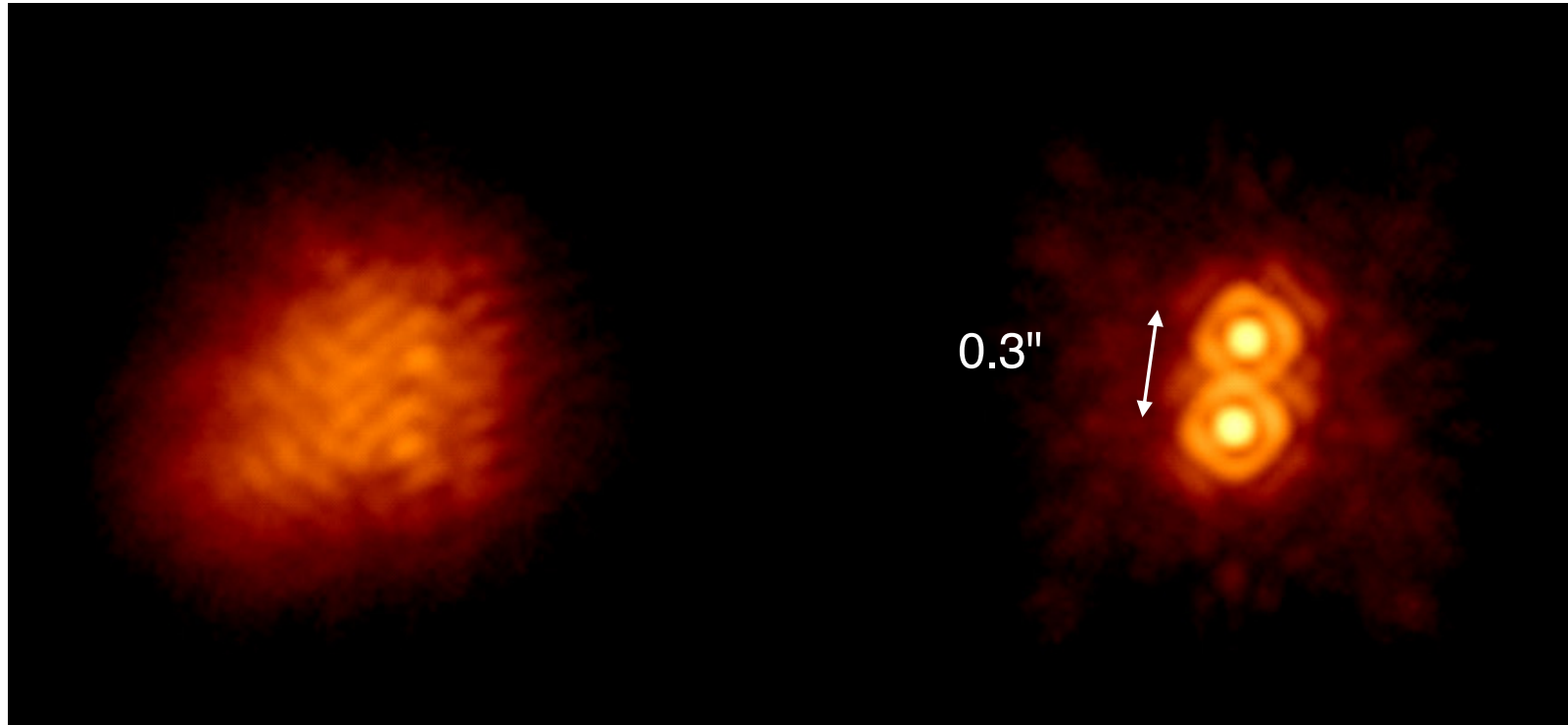
5 m Mt Palomar

Le faisceau du laser excite des atomes de sodium dans l'atmosphère haute (mésosphère) et crée un point lumineux.

L'Optique Adaptative



L'étoile double IW Tau par l'optique adaptative

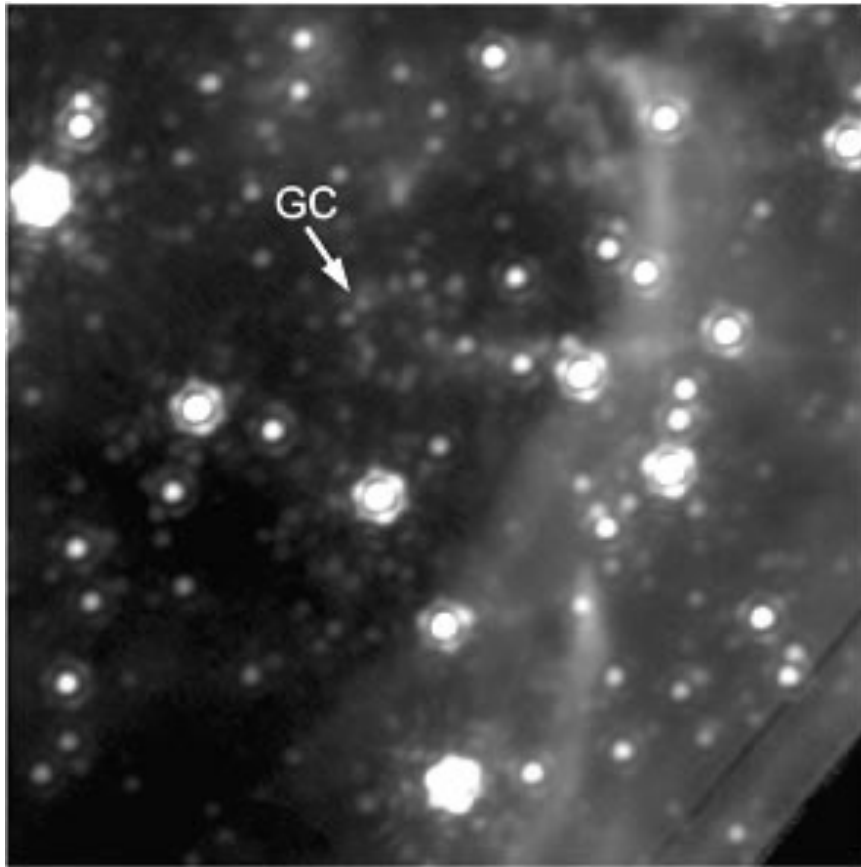


Images prises au 5 m telescope du Mt Plaomar par Chas Beichman and Angelle Tanner du JPL

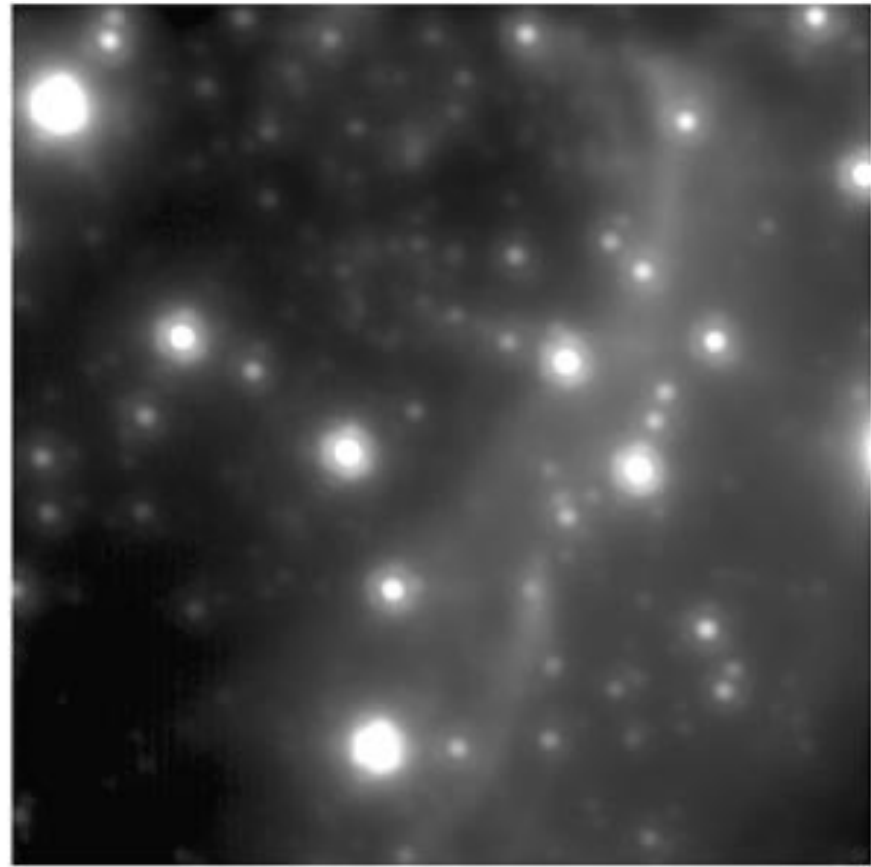
Galactic Center with Keck laser guide star

(GC is location of supermassive black hole)

Keck laser guide star AO



Best natural guide star AO



Optique adaptative : Conclusions

L'optique adaptative permet d'obtenir des pouvoirs séparateur proche de la limite théorique donnée par la diffraction.

Elle augmente aussi la sensibilité des télescopes car l'énergie provenant des objets observés arrive de manière plus concentrée sur les pixels des détecteurs.

Elle ne dispense cependant pas

- de la recherche d'un site de qualité (plus de cinq ans de recherche pour le VLT...).
- de la prise de précautions pour assurer un environnement stable autour du télescope (échange thermique "coupole-air")

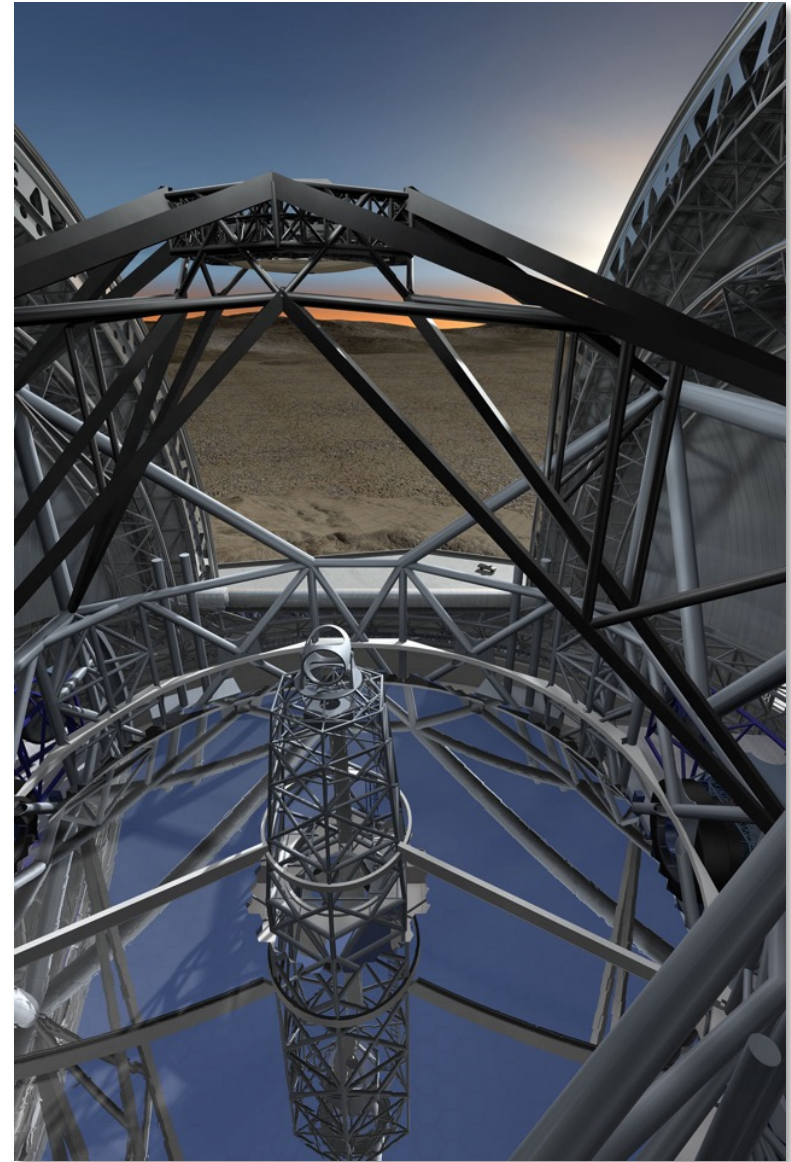
ELT : European Extremely Large Telescope



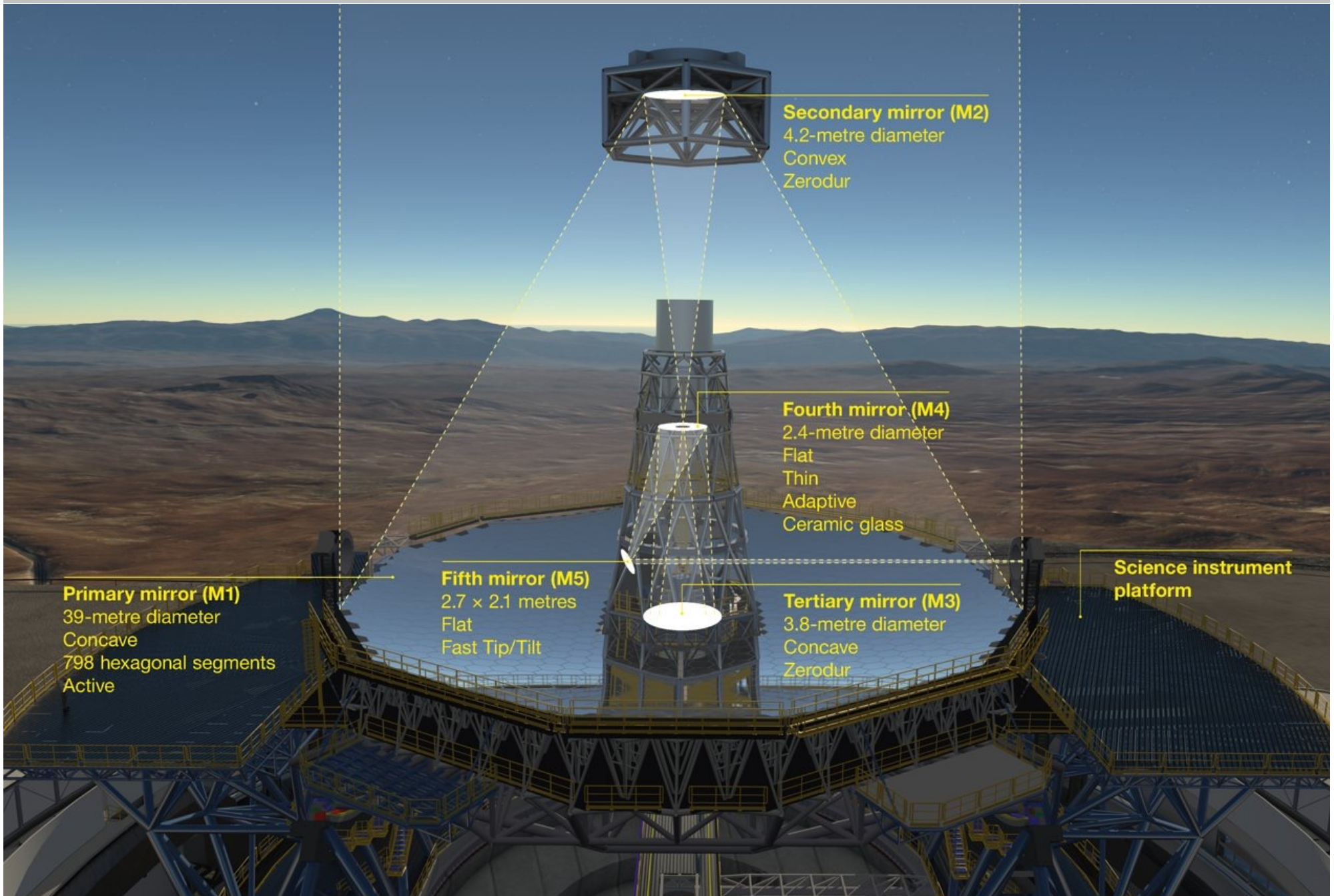
technical first light in 2025 (planned)

ELT : European Extremely Large Telescope

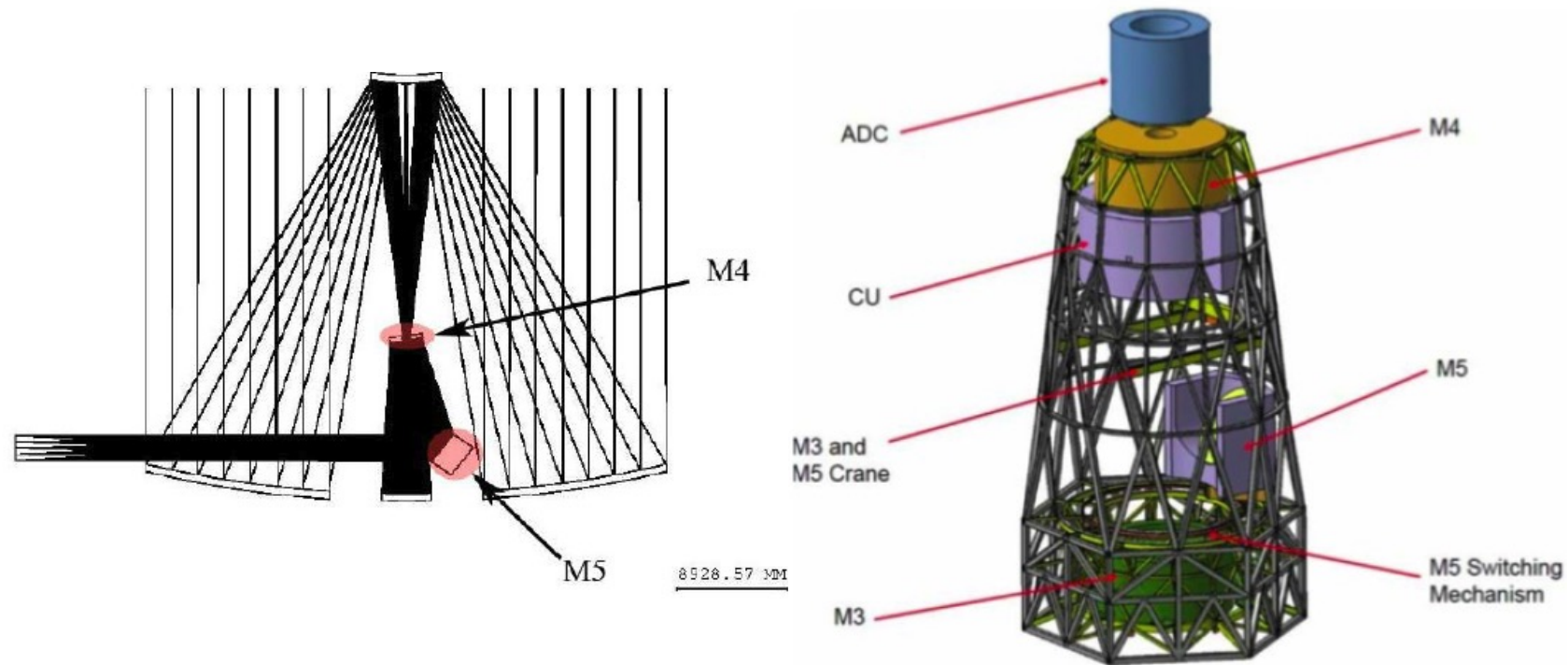
- 40-m class telescope: largest optical-infrared telescope in the world.
- Segmented primary mirror.
- Active optics to maintain collimation and mirror figure.
- Adaptive optics assisted telescope.
- Diffraction limited performance.
- Wide field of view: 10 arcmin.
- Mid-latitude site (Armazones in Chile).
- Fast instrument changes.
- VLT level of efficiency in operations.



ELT : European Extremely Large Telescope



ELT : European Extremely Large Telescope

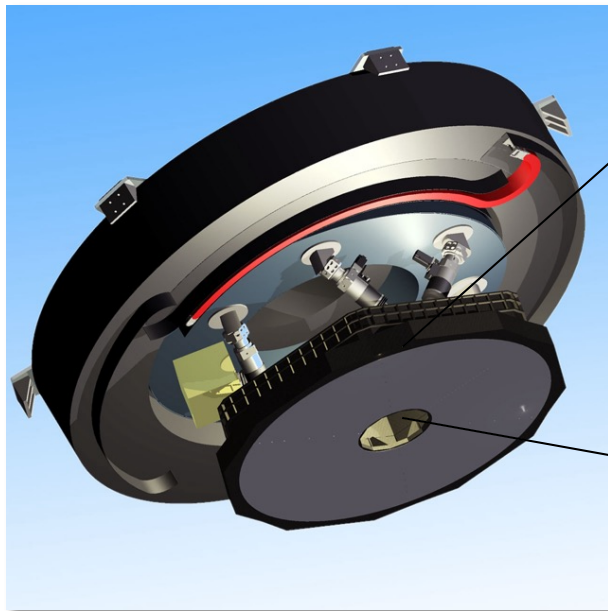
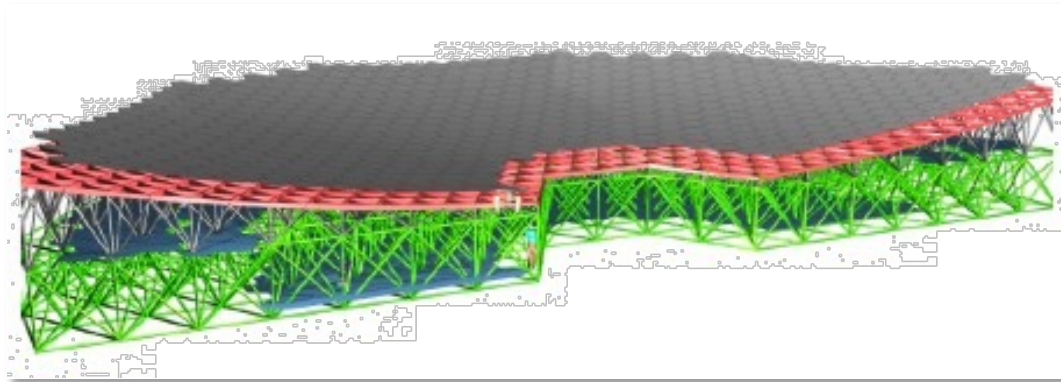


three mirror anastigmat with two flat folding mirrors (M4, M5) providing the adaptive optics. This novel five-mirror design results in an exceptional image quality, with no significant aberrations in the 10-arcmin field of view.

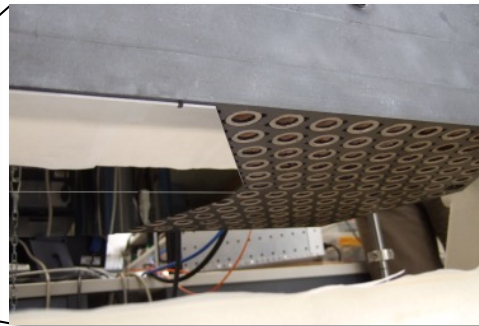
ELT : European Extremely Large Telescope

f/0.93 !

M1: 39.3 m, 798 hexagonal segments of 1.45 m tip-to-tip: 978 m² collecting area



M4: 2.4 m, flat, adaptive
6000 to 8000 actuators



M5: 2.6 x 2.1 m, flat,
provides tip-tilt correction



Great Paris Exhibition Telescope
(lens at the same scale)
Paris, France (1900)

Yerkes Observatory
(40" refractor lens at the same scale)
Williams Bay, Wisconsin (1893)

Hooker (100")
Mt Wilson, California (1917)

Hale (200")
Mt Palomar, California (1948)

Multi Mirror Telescope
(1979-1998) (1999-)
Mount Hopkins, Arizona

BTA-6 (Large Altazimuth Telescope)
Zelenchuksky, Russia (1975)

Large Zenith Telescope
British Columbia, Canada (2003)

Gaia
Earth-Sun L2 point (2014)

Kepler
Earth-trailing solar orbit (2009)

James Webb Space Telescope
Earth-Sun L2 point (planned 2018)

Hubble Space Telescope
Low Earth Orbit (1990)

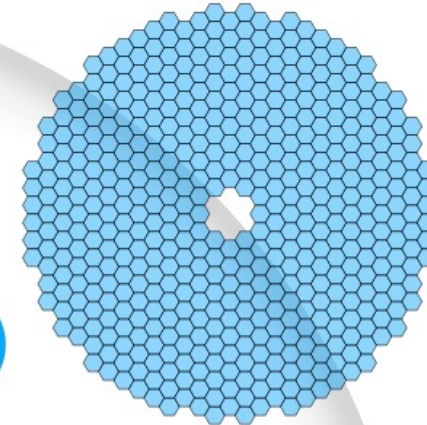


Tennis court at the same scale

Large Sky Area Multi-Object Fiber Spectroscopic Telescope
Hebei, China (2009)

Gran Telescopio Canarias
La Palma, Canary Islands, Spain (2007)

Keck Telescope
Mauna Kea, Hawaii (1993/1996)



Thirty Meter Telescope
Mauna Kea, Hawaii (planned 2022)

Hobby-Eberly Telescope
Davis Mountains, Texas (1996)

Southern African Large Telescope
Sutherland, South Africa (2005)

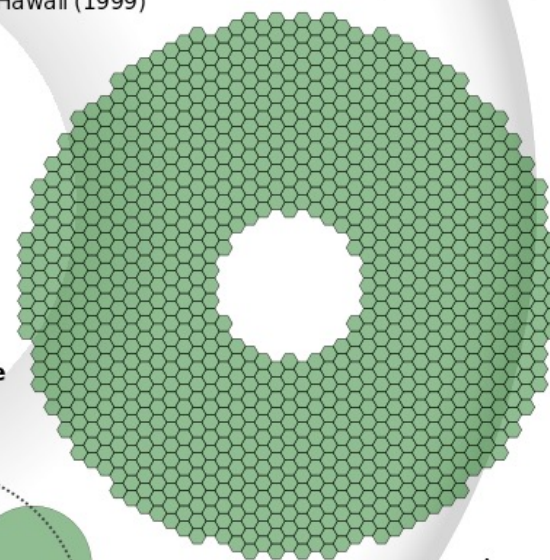
Gemini North
Mauna Kea, Hawaii (1999)

Subaru Telescope
Mauna Kea, Hawaii (1999)

Gemini South
Cerro Pachón, Chile (2000)

Large Binocular Telescope
Mount Graham, Arizona (2005)

Large Synoptic Survey Telescope
El Peñón, Chile (planned 2020)

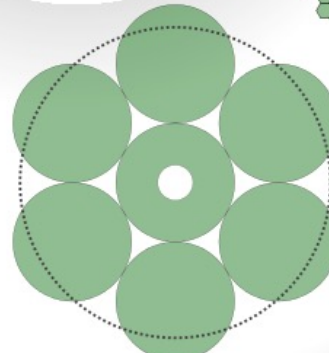


European Extremely Large Telescope
Cerro Amalones, Chile (planned 2022)

Human at the same scale

0 5 10 m
0 10 20 30 ft

Very Large Telescope
Cerro Paranal, Chile (1998-2000)



Giant Magellan Telescope
Las Campanas Observatory, Chile (planned 2020)

Magellan Telescopes
Las Campanas, Chile (2000/2002)

Overwhelmingly Large Telescope
(cancelled)

Arecibo radio telescope at the same scale



Basketball court at the same scale


Des télescopes de plus en plus grands - pourquoi faire ?



- quantité de lumière
 - résolution angulaire
- => Interférométrie

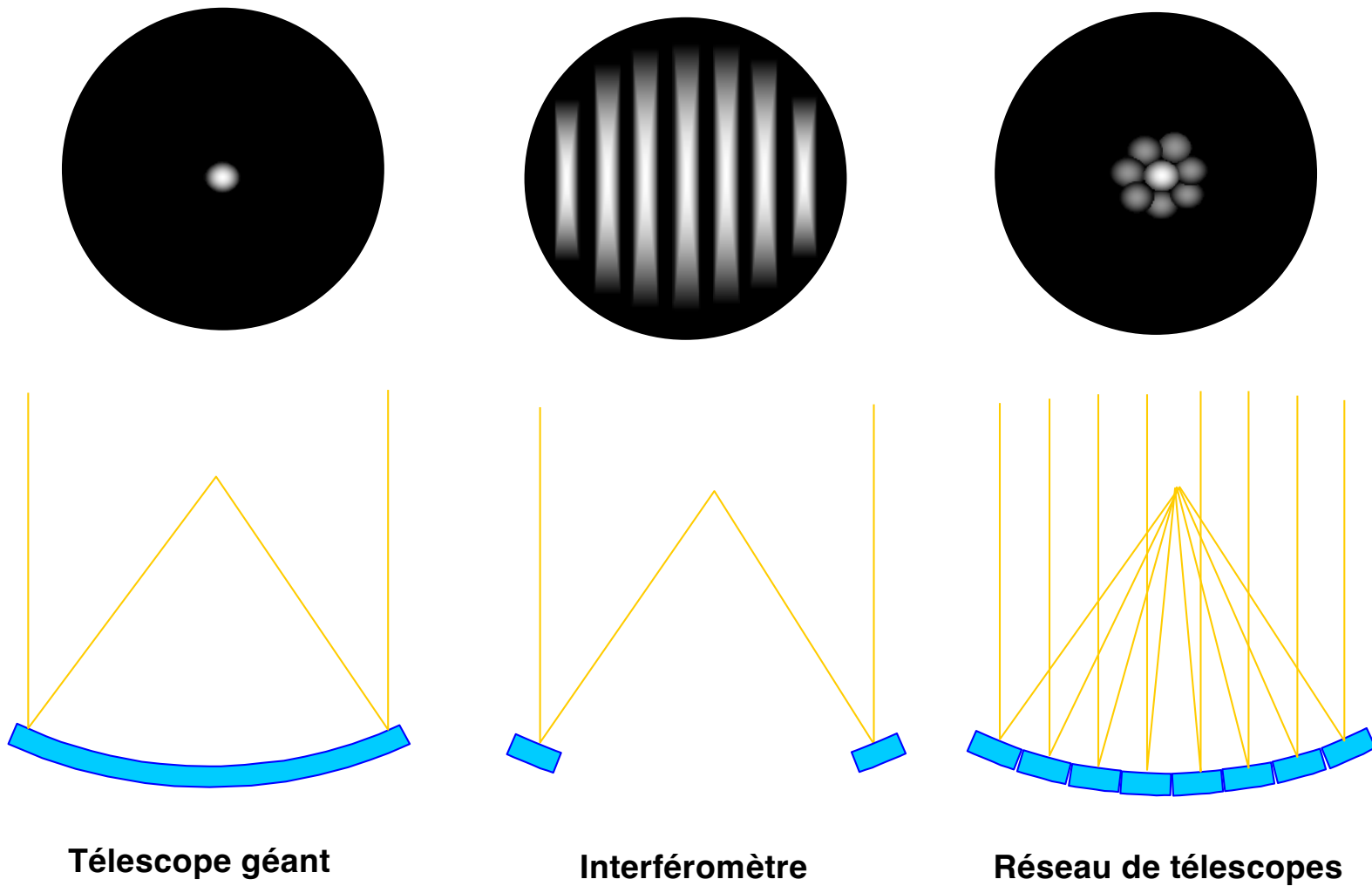


Systemes d'observation pour le domaine visible

- le rôle de l'observation en astrophysique
- telescopes
 - systèmes optiques (réfracteurs, réflecteurs)
 - montures
 - optique active
 - optique adaptative  Interférométrie
- instrumentation focale
 - les détecteurs pour le domaine visible
 - photométrie
 - imagerie
 - spectroscopie
- caractéristiques du système d'observation

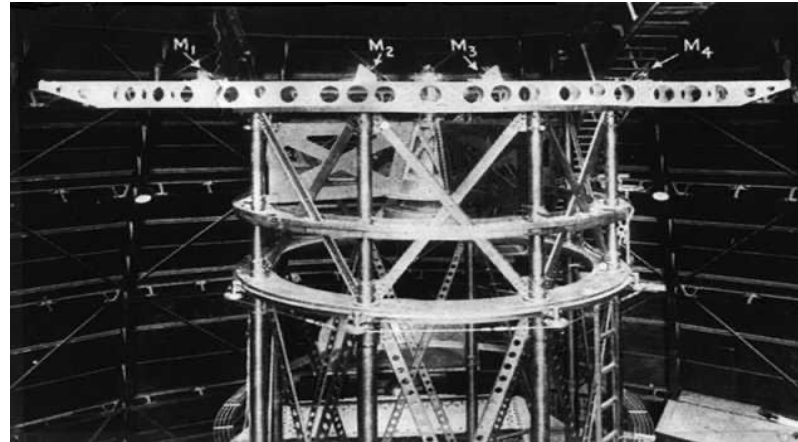
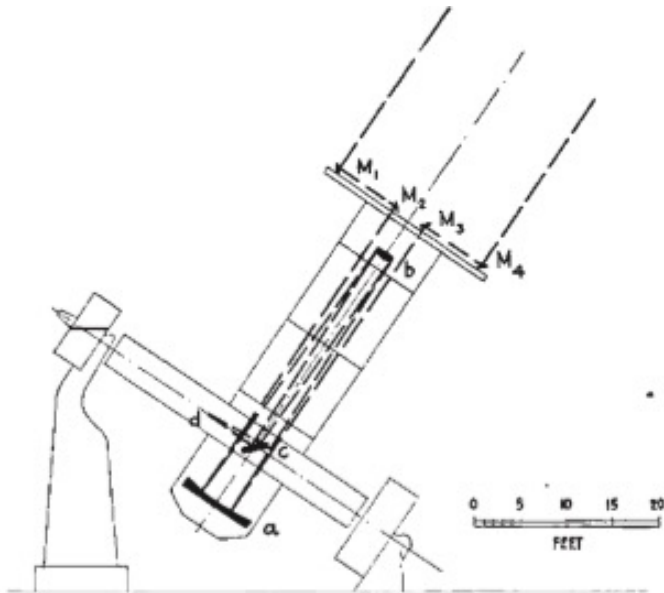
Comment accroître la résolution angulaire ?

L'interférométrie à longue base: les principes

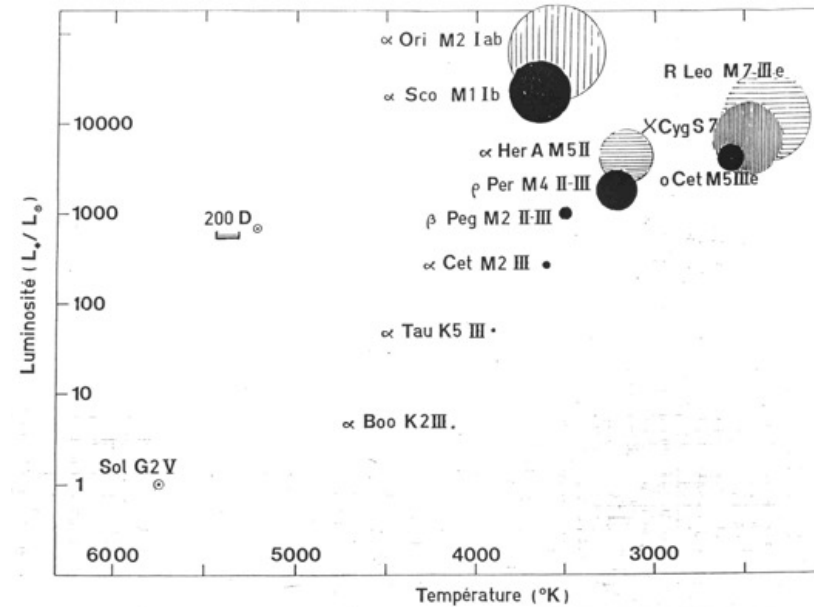


L'Interféromètre de Michelson

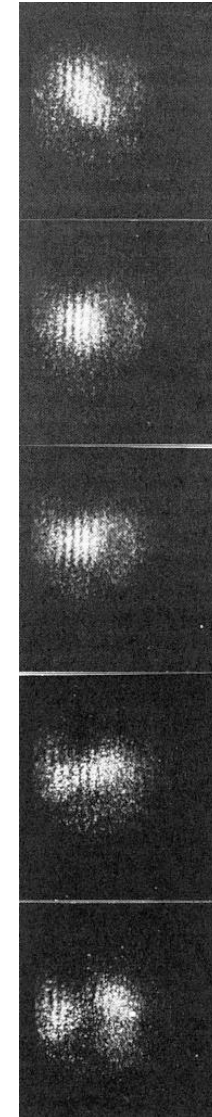
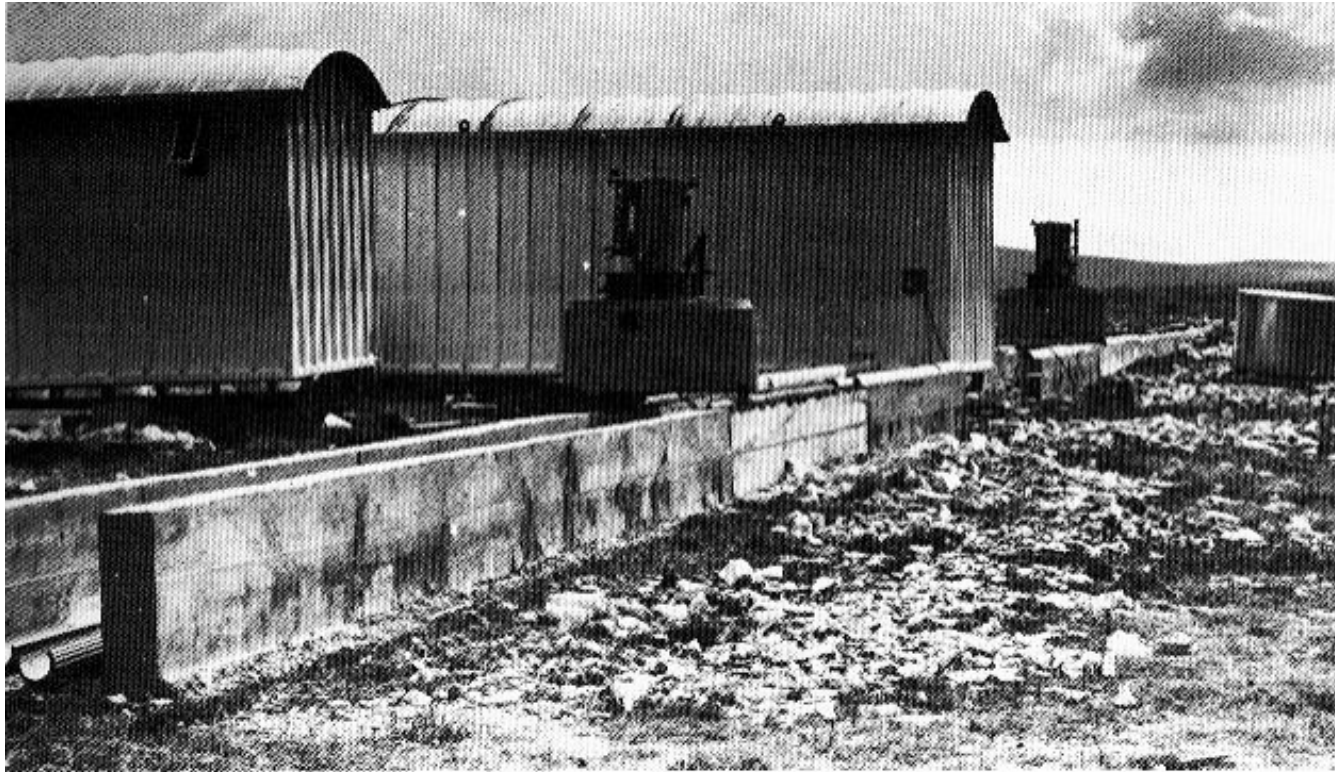
1920 -1930



mesures du diamètres des étoiles



Le premier interferometre de Labeyrie - 1975-1980



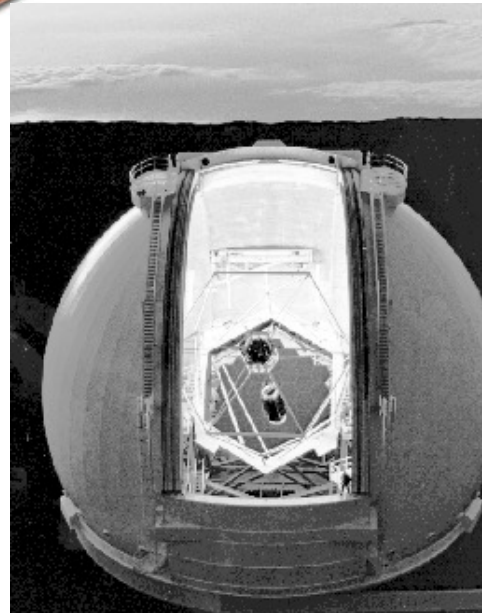
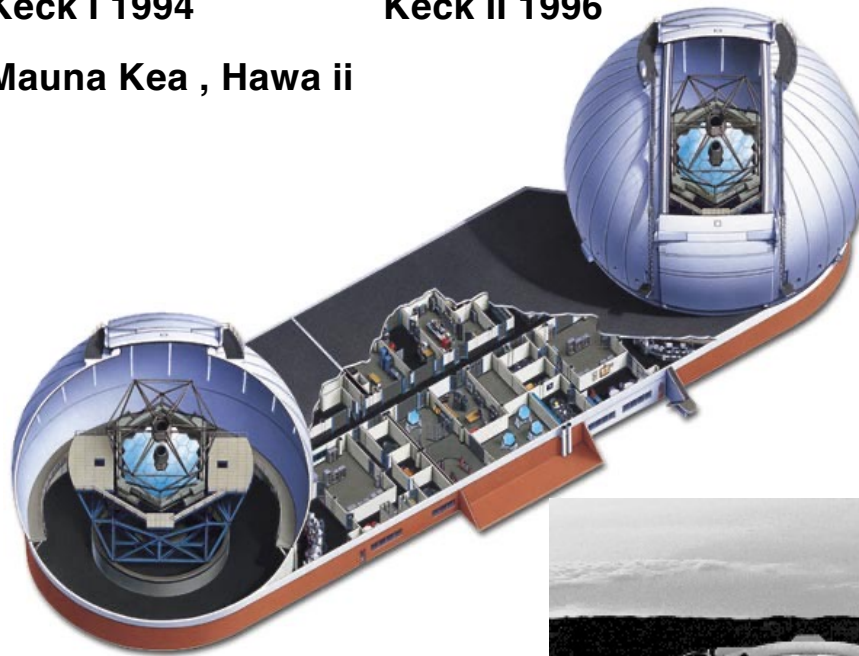
Franges de Vega à
 $\lambda = 550 \text{ nm}$

Télescopes KECK

Keck I 1994

Keck II 1996

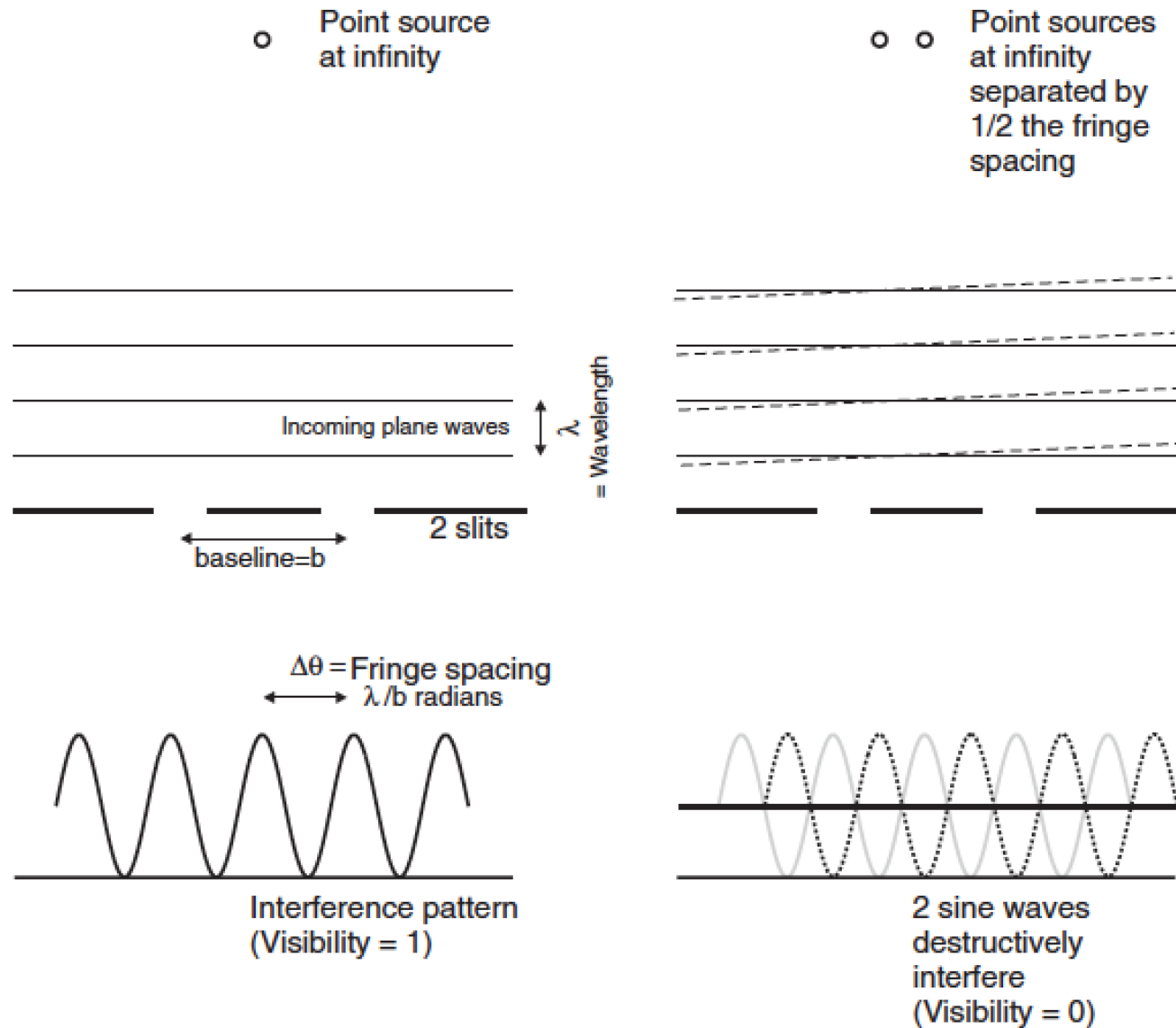
Mauna Kea , Hawa ii



Miroir primaire mince $D = 10$ m
composite : 36 éléments de 90 cm
Optique Active
Foyer Ritchey Chrétien $F = 17,5$ m
Foyer Nasmyth $F = 120$ m
Foyer Coudé $F = 408$ m
monture alt-Azimutale
Visible proche IR
Optique Active
Imagerie, Spectroscopie
Interférométrie $B = 85$ m

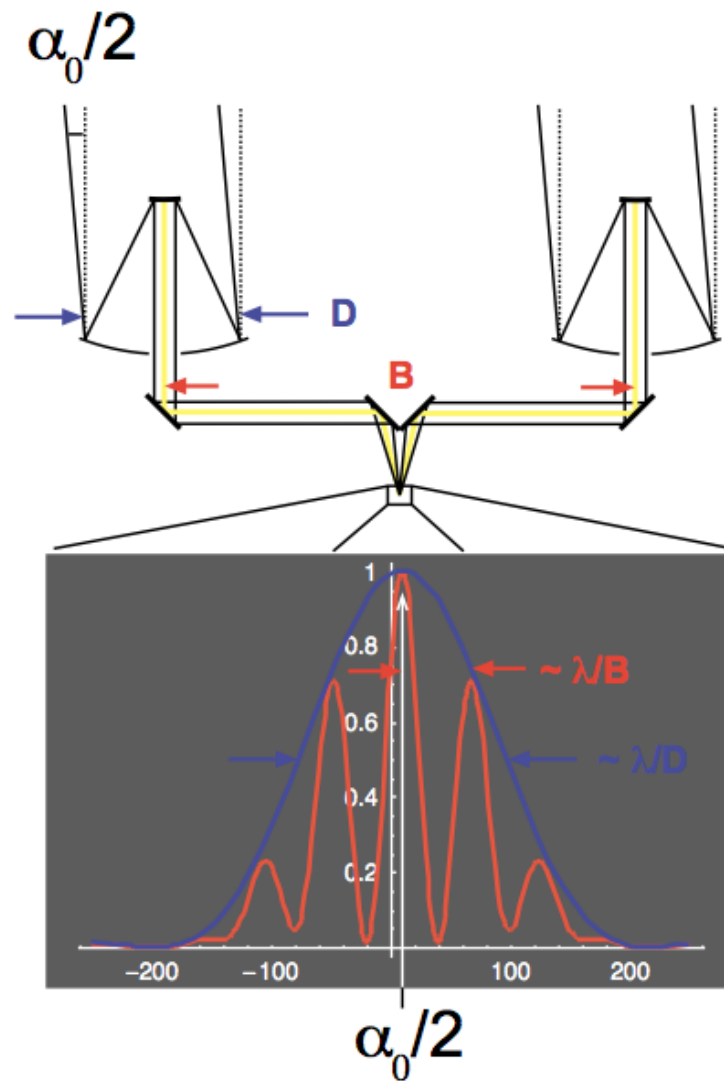
<http://www2.keck.hawaii.edu/>

Les fentes de Young

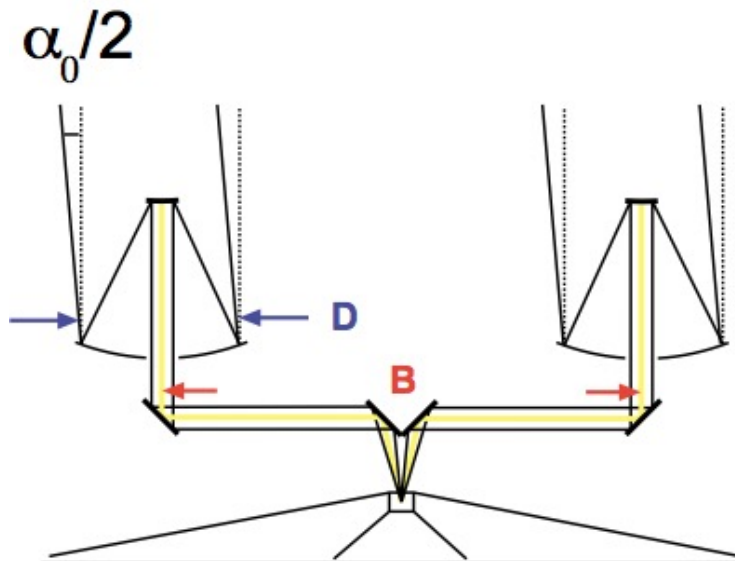


L'Interféromètre de Michelson

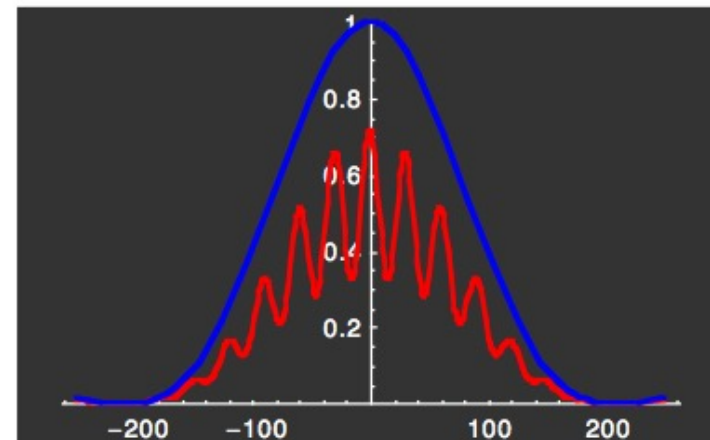
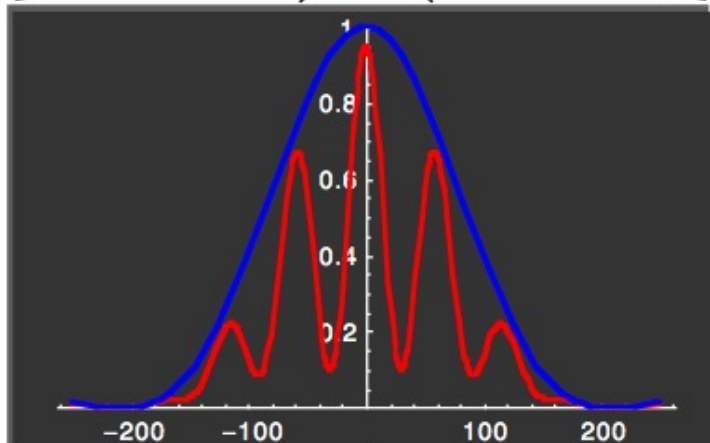
Source décalée de $\alpha_0/2$



L'Interféromètre de Michelson



- Stellar source with angular size α_0
- Add fringe patterns (i.e. intensities) between $\pm\alpha_0/2$
- Resulting fringe pattern shows reduced contrast
- Reduced contrast depends on B – and on α_0



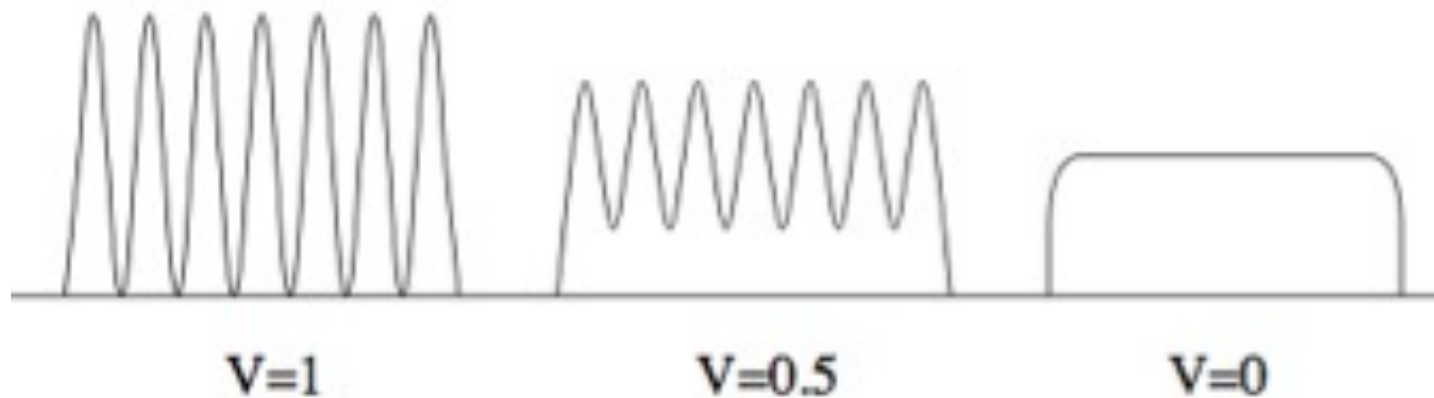
B_1 and α_0 (Movies used for illustration) $B_2 > B_1$ and α_0

Visibilité des franges

Michelson defined the quantity “Visibility” as:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} .$$

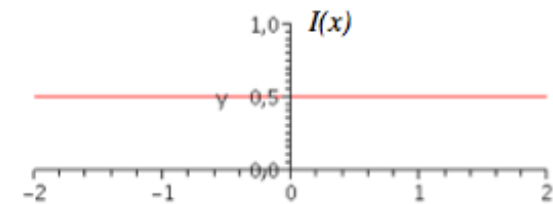
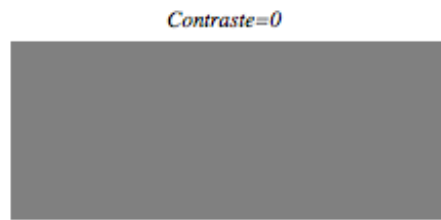
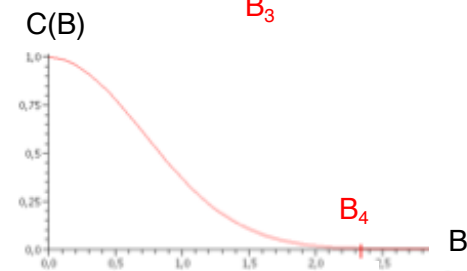
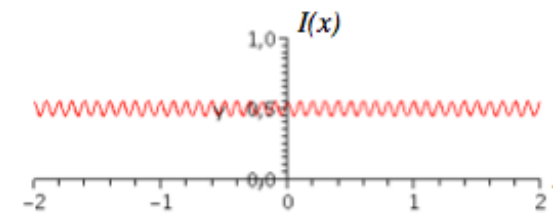
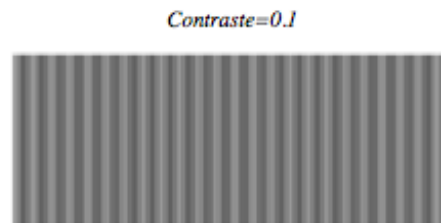
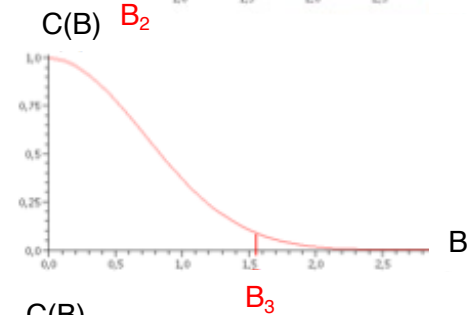
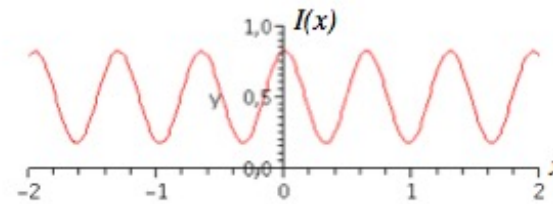
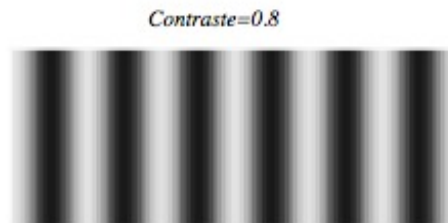
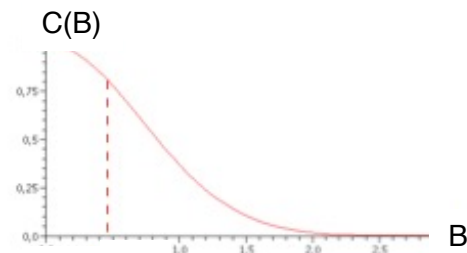
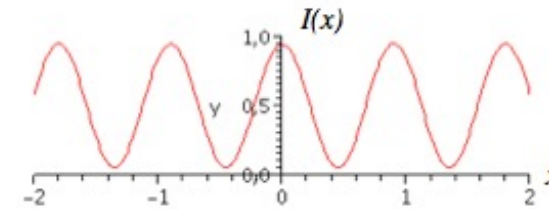
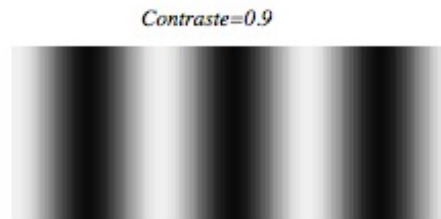
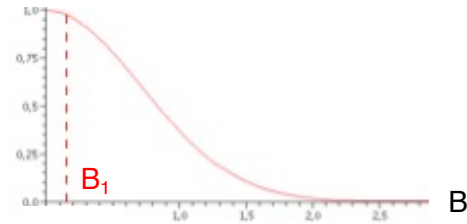
This is the basic observable for an interferometer.



trous de Young – éclairés par un source large

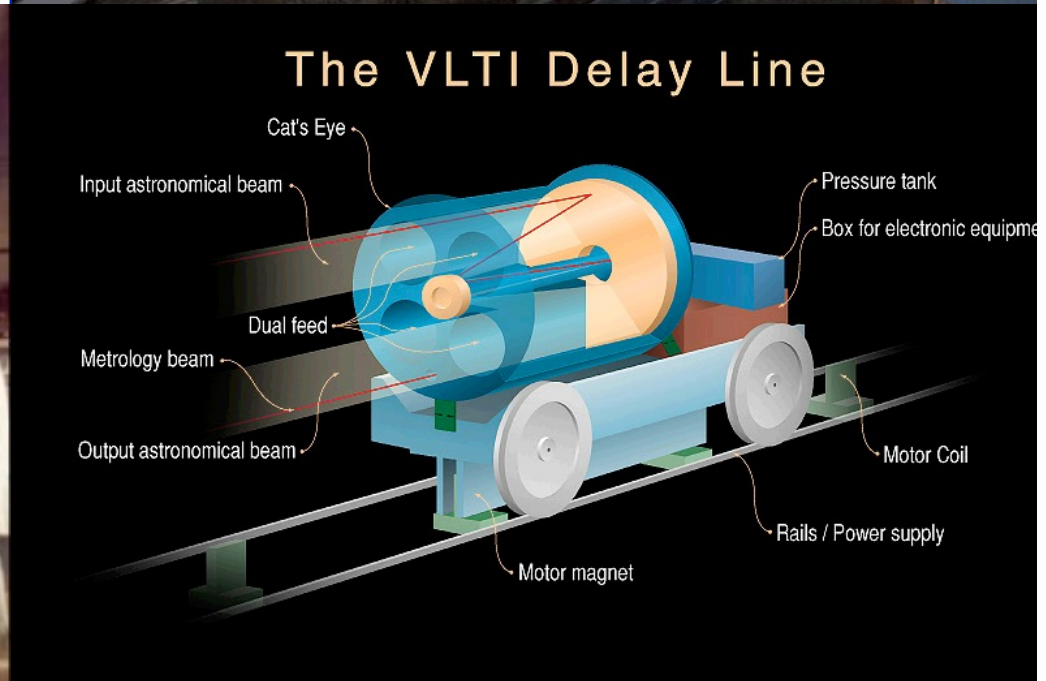
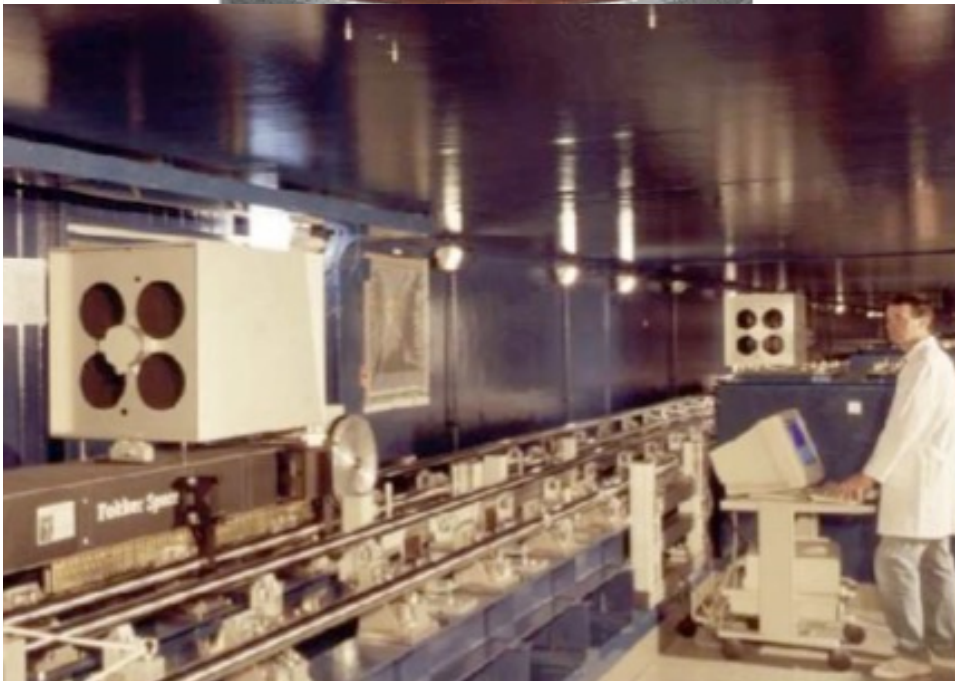
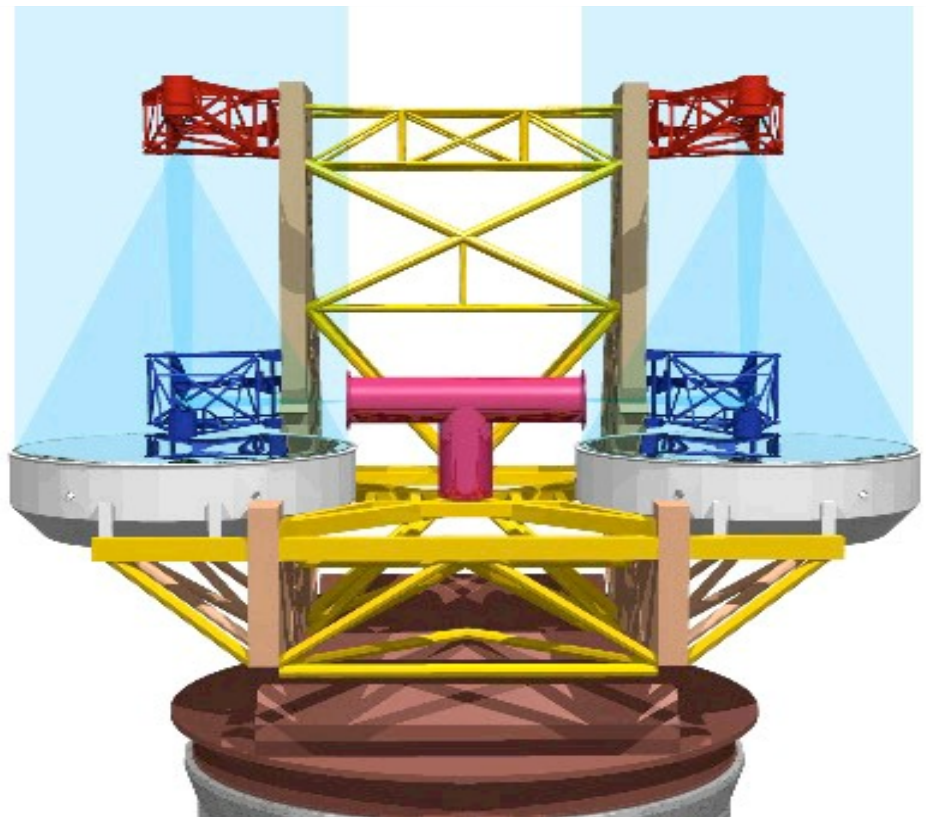
fonction contraste $C(B)$
 distance B a entre les trous

visibilité

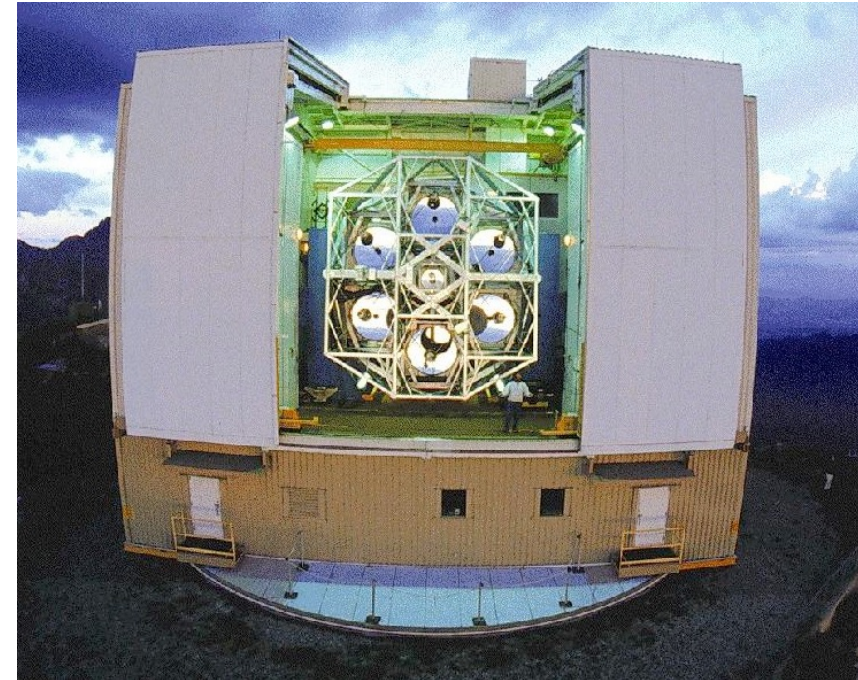
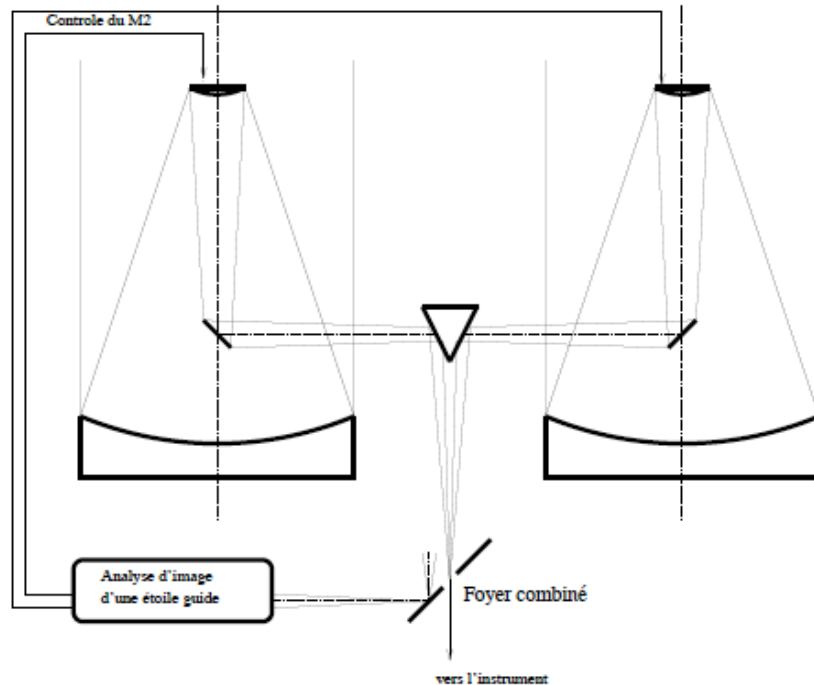


Les règles d'or de l'interferometrie

- La modulation d'amplitude V ("Visibilité" de 1 to 0) des franges dépend de la taille angulaire de la source (α).
- Pour une taille angulaire de la source donnée, la modulation d'amplitude V diminue quand la séparation des trous (B) augmente.
- Pour une longueur d'onde λ , la modulation commence à être affectée par la taille $\alpha \gtrsim \lambda / B$



Optique Active : Multi Mirror Telescope



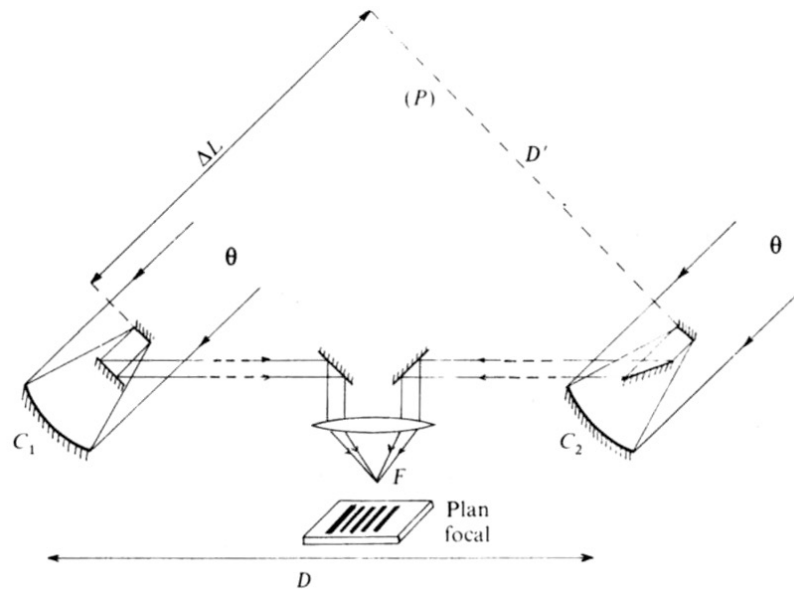
Système Co-focal

L'ensemble des telescope est co-alinéé de façon active au foyer commun

Système Co-phasee

Le chemin optique de chaque sous-système est ajusté pour obtenir un ensemble coherent

Interferometrie directe (Michelson)

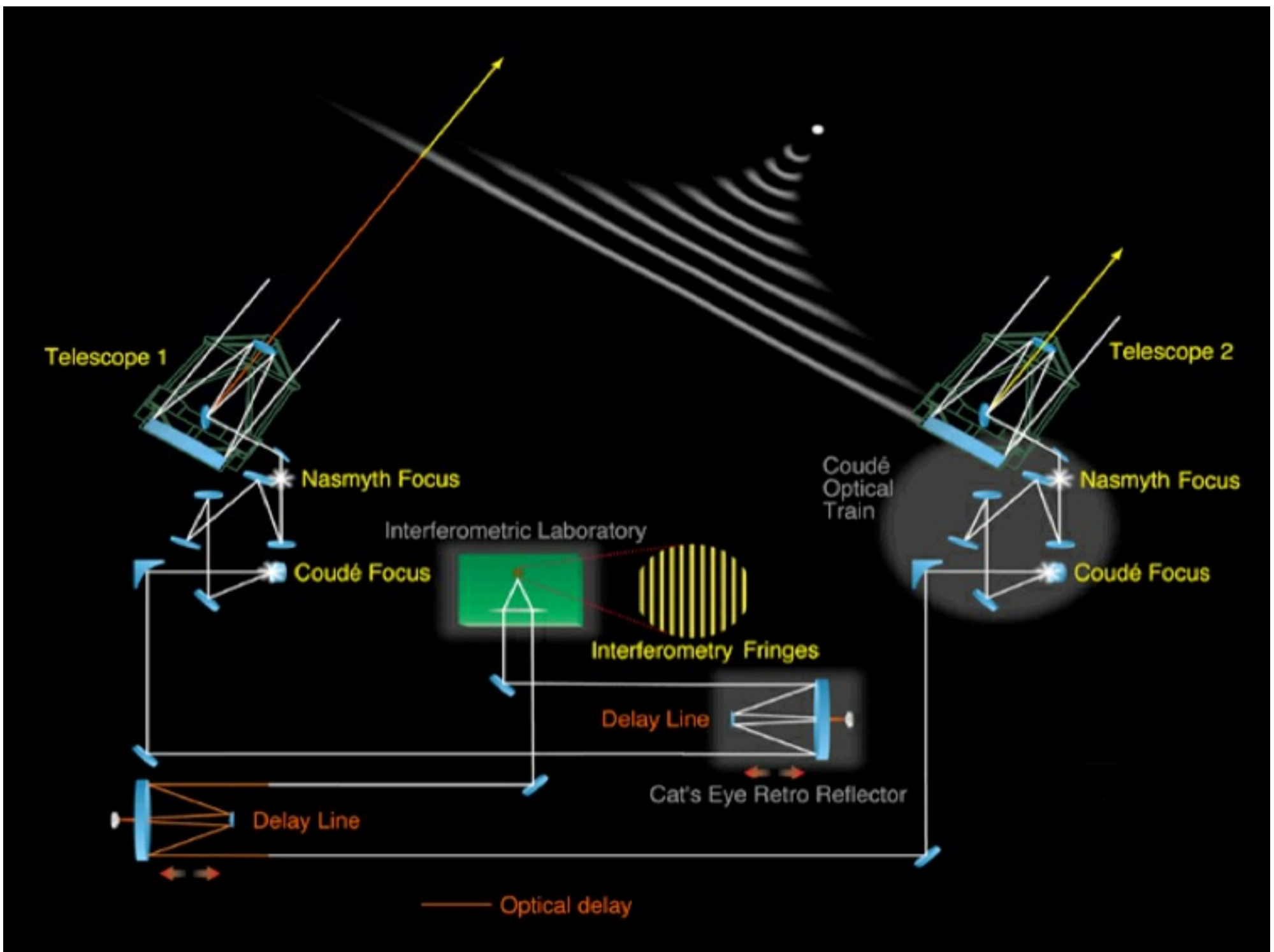


Deux telescopes de diamètre C , séparés de D , poursuivent chacun la direction Θ

Combinaison des deux faisceaux afocaux dans un plan focal commun (miroirs secondaires sont très peu ouverts $f/500$)

Interférence : mesure de la cohérence $\gamma(\tau)$, donc du spectre spatial de l'objet à la fréquence spatiale $|\omega| = D/\lambda$

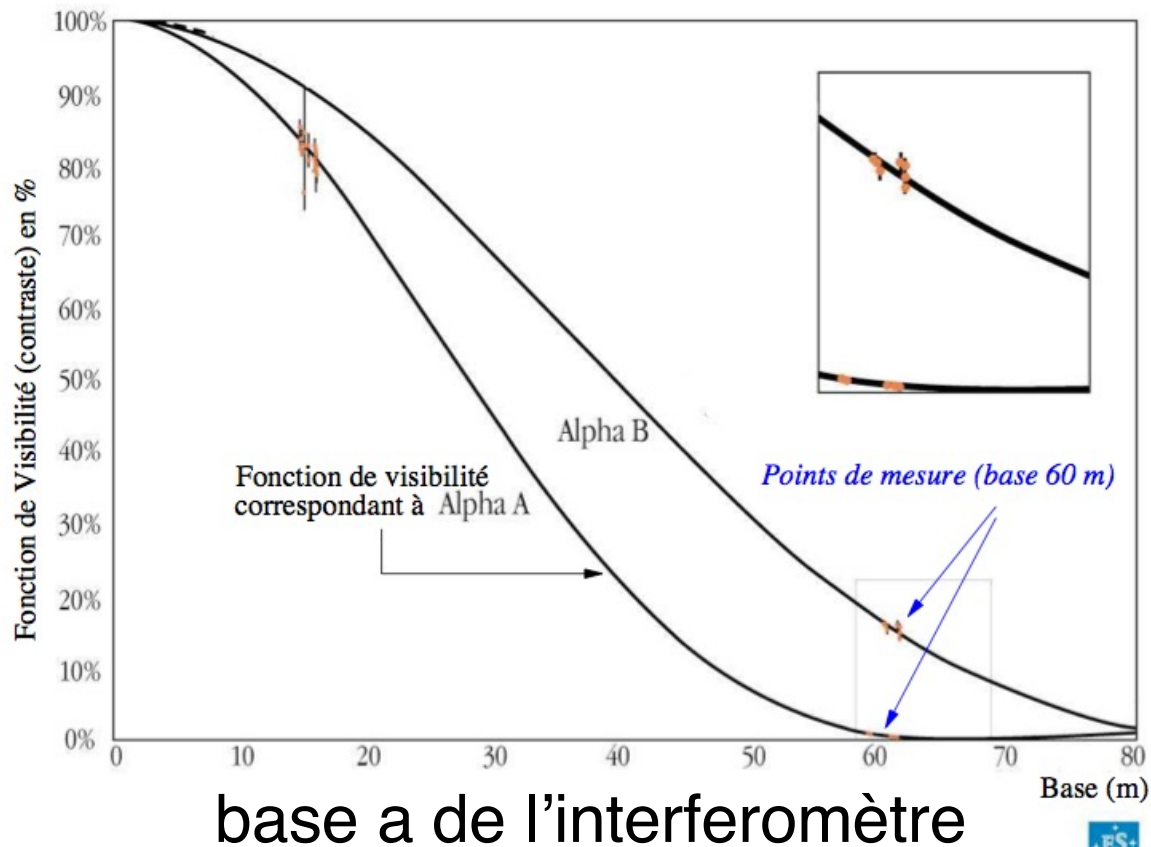
On place le dispositif de recombinaison sur une table mobile de telle façon que $FC_2 - FC_1 = \Delta L(t)$ compense la rotation diurne



fonctions de visibilité de l'étoile double α Cen

fit de fonctions de Bessel (premier zéro \Rightarrow diamètre de l'étoile)

contraste des franges



ESO PR Photo 07d/03 (15 March 2003)

© European Southern Observatory

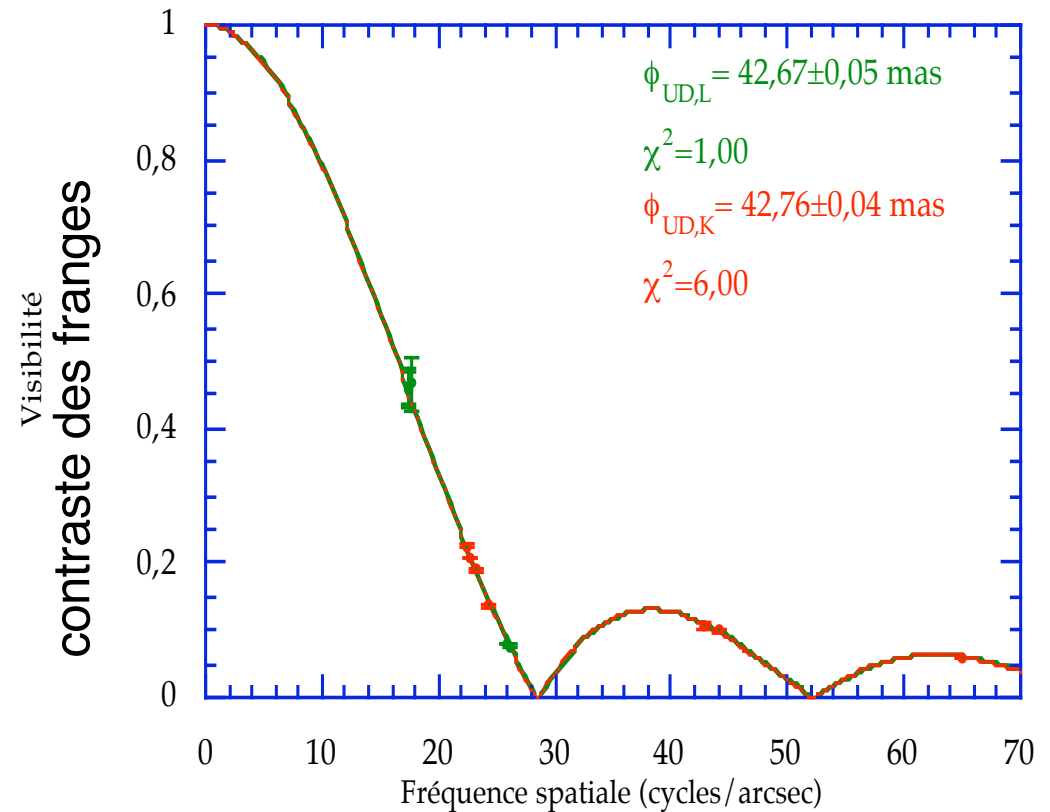
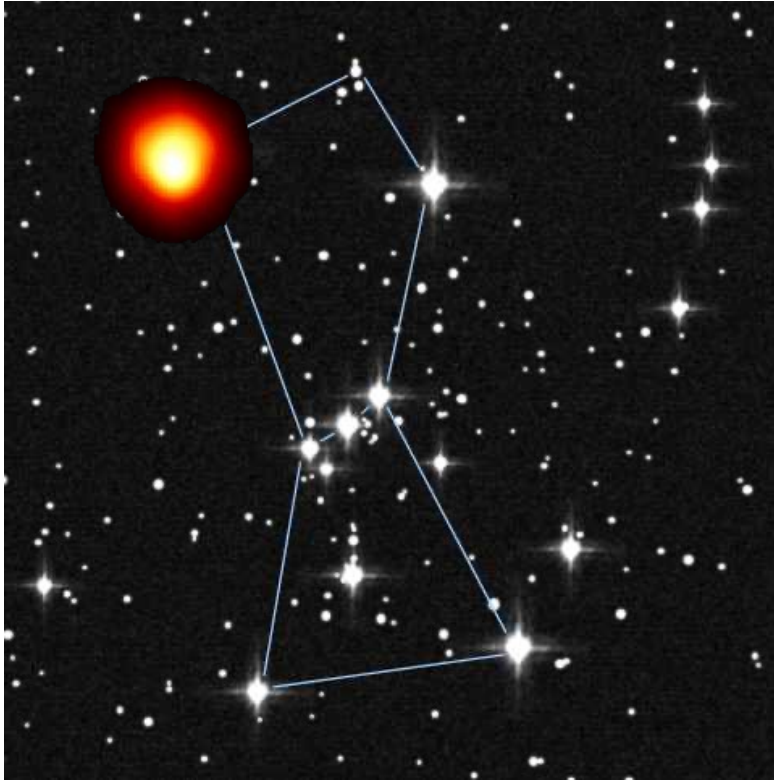


A : 8.51 ± 0.02 milliseconde d'arc

B : 5.86 ± 0.03 milliseconde d'arc

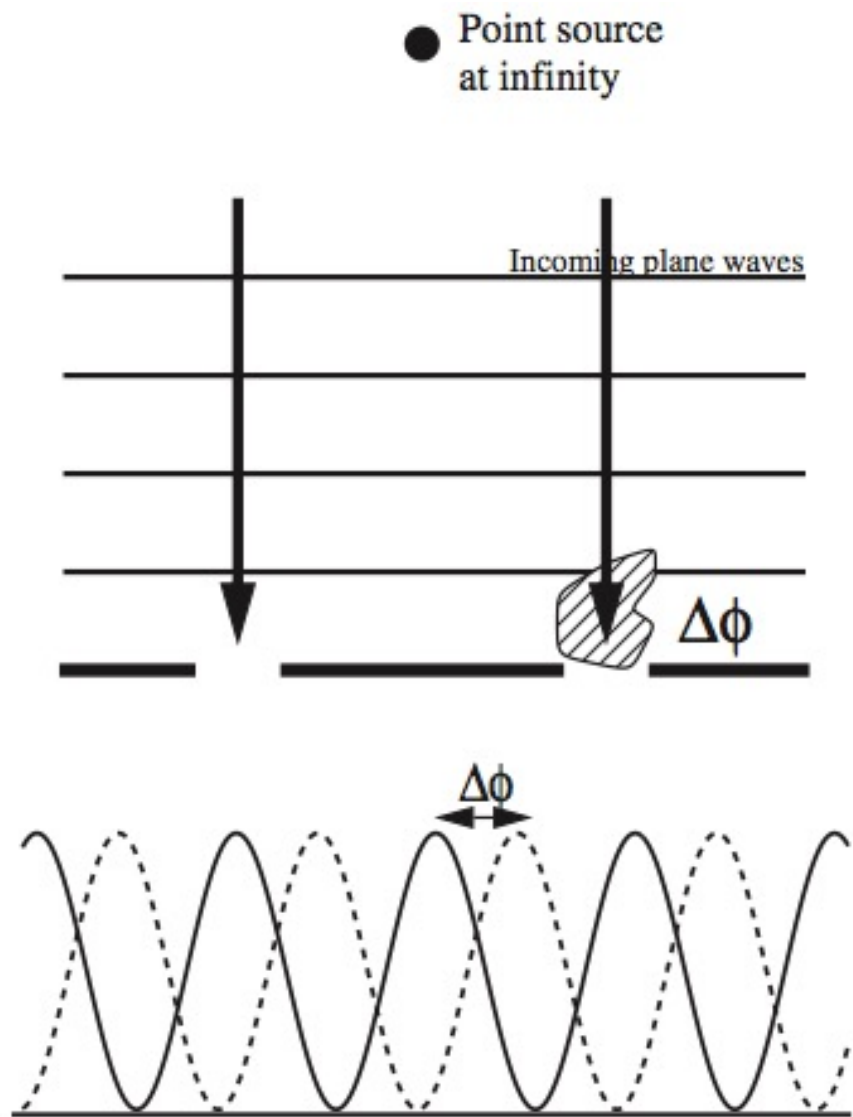
rayon stellaire de Bételgeuse

Bételgeuse



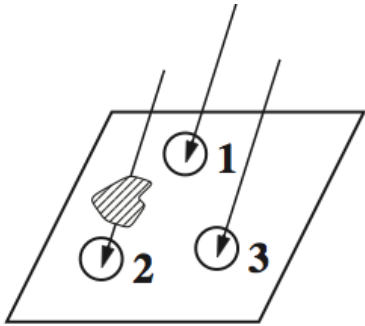
with the new (2007) Hipparcos parallax of $\pi = 6.55 \pm 0.83 \text{ mas}$ ($152 \pm 20 \text{ pc}$)
 $\phi \approx 43 \text{ mas}$ (Perrin's estimate) gives a stellar radius of about $\sim 3.3 \text{ AU}$ ($730 R_{\odot}$)

perturbations atmosphériques et délais de phase



Les retards atmosphériques ou erreurs de phase au niveau des télescopes provoquent des décalages de franges, comme on peut le voir par analogie avec l'expérience des doubles fentes de Young.

Clôtures de phase



Observed	Intrinsic	Atmosphere
$\Phi(1-2)$	$= \Phi_o(1-2)$	$+ [\phi(2)-\phi(1)]$
$\Phi(2-3)$	$= \Phi_o(2-3)$	$+ [\phi(3)-\phi(2)]$
$\Phi(3-1)$	$= \Phi_o(3-1)$	$+ [\phi(1)-\phi(3)]$

Closure Phase (1-2-3)	$= \Phi_o(1-2) + \Phi_o(2-3) + \Phi_o(3-1)$
-----------------------------	---

Il est néanmoins possible d'extraire d'interférogrammes affectés par la turbulence des informations sur la phase, si l'on dispose d'au moins 3 télescopes.

=> on combine ces 3 équations de façon à annuler les phases turbulentes

Table 1. Phase information contained in the closure phases alone.

Number of telescopes	Number of Fourier phases	Number of closing triangles	Number of independent closure phases	Percentage (%) of phase information
3	3	1	1	33
7	21	35	15	71
21	210	1 330	190	90
27	351	2 925	325	93
50	1225	19 600	1176	96