

# Chapitre 6

## Observables et observations

# Observables

Seule information en provenance de l'Univers: la lumière

Lunettes et télescopes sont utilisés pour

1. Collecter la lumière
2. Former des images à haute résolution spatiale

-> Comparaison des observations et de la théorie

Les quantités mesurables sont essentiellement:

- Flux lumineux et leurs variations
- Distributions spectrales
- Positions (angulaires)
- Vitesses radiales (Doppler)
- Vitesses tangentielles (mouvements apparents)

# L'atmosphère terrestre

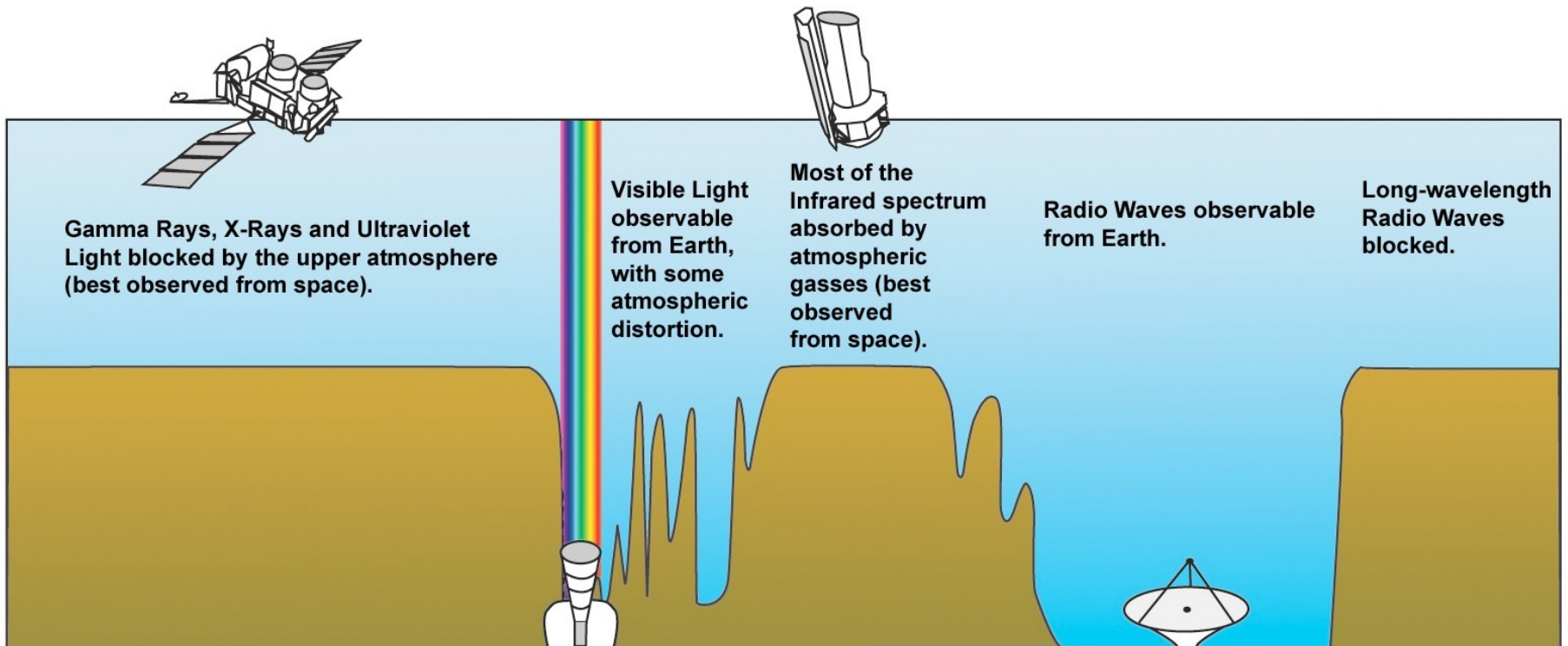
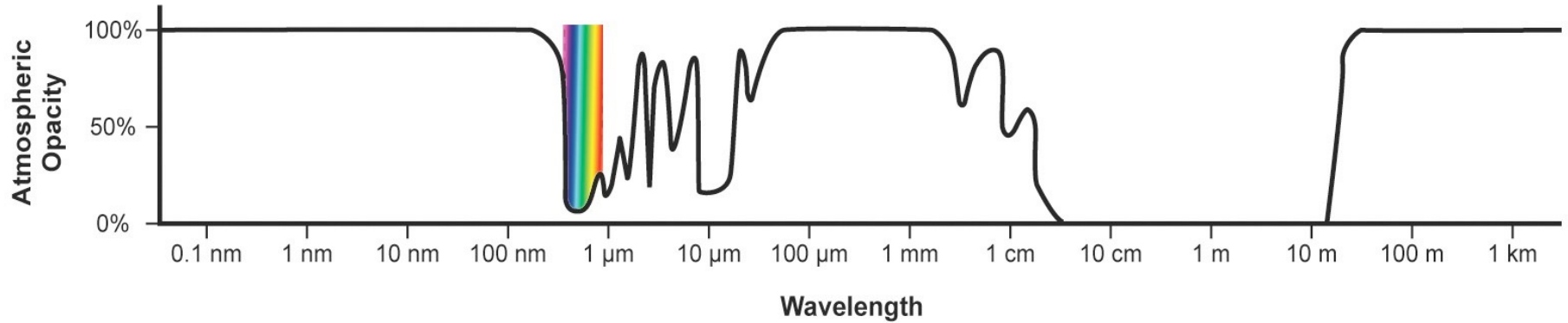
## Effets néfastes de l'atmosphère sur les observations:

- Absorption
- Diffusion
- Emission
- Distorsion des images (turbulence)
- Effets chromatiques (réfraction atmosphérique)

## Effets additionnels:

- Pollution lumineuse due à l'Homme
- Pollution lumineuse due à la Lune
- Lumière zodiacale
- Aurores polaires

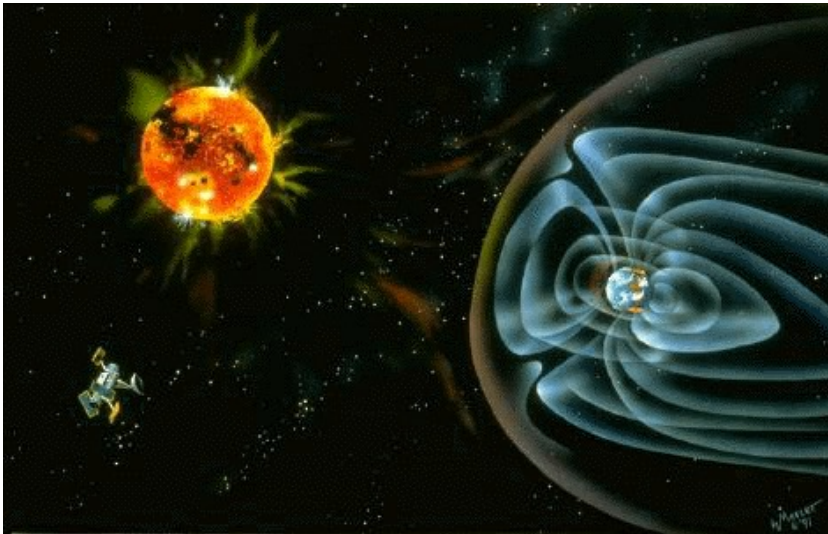
# L'atmosphère terrestre



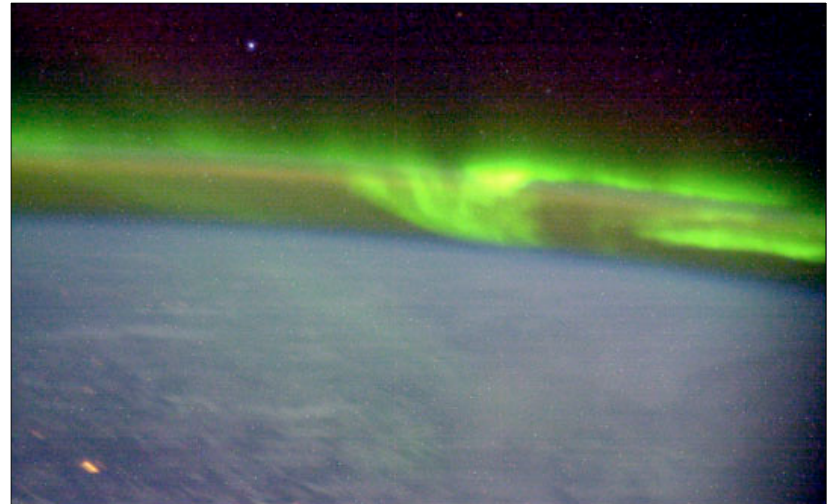


# L'atmosphère terrestre

Emission de lumière par l'atmosphère Terrestre: protons et électrons du « vent Solaire », pris dans le champ magnétique terrestre.



Choc entre les particules solaires et les atomes et molécules atmosphériques -> ionisation, recombinaison et fluorescence

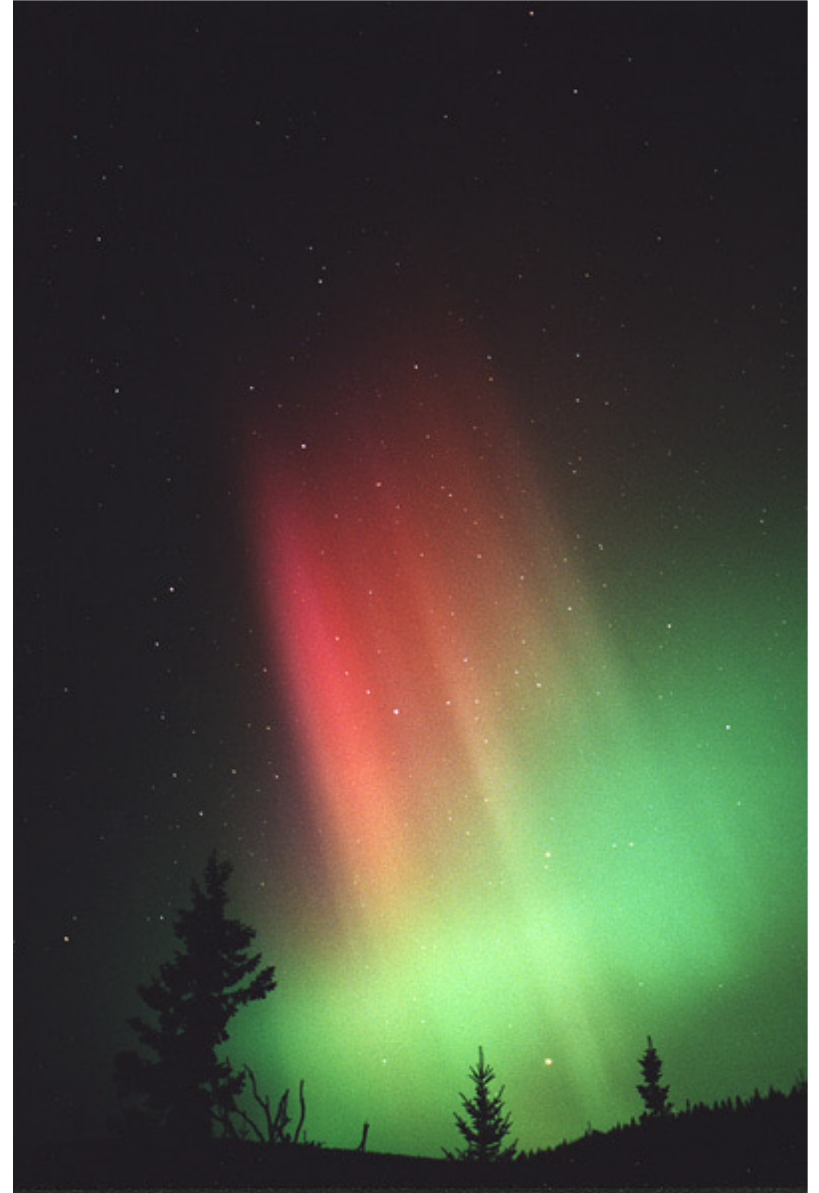


# L'atmosphère terrestre



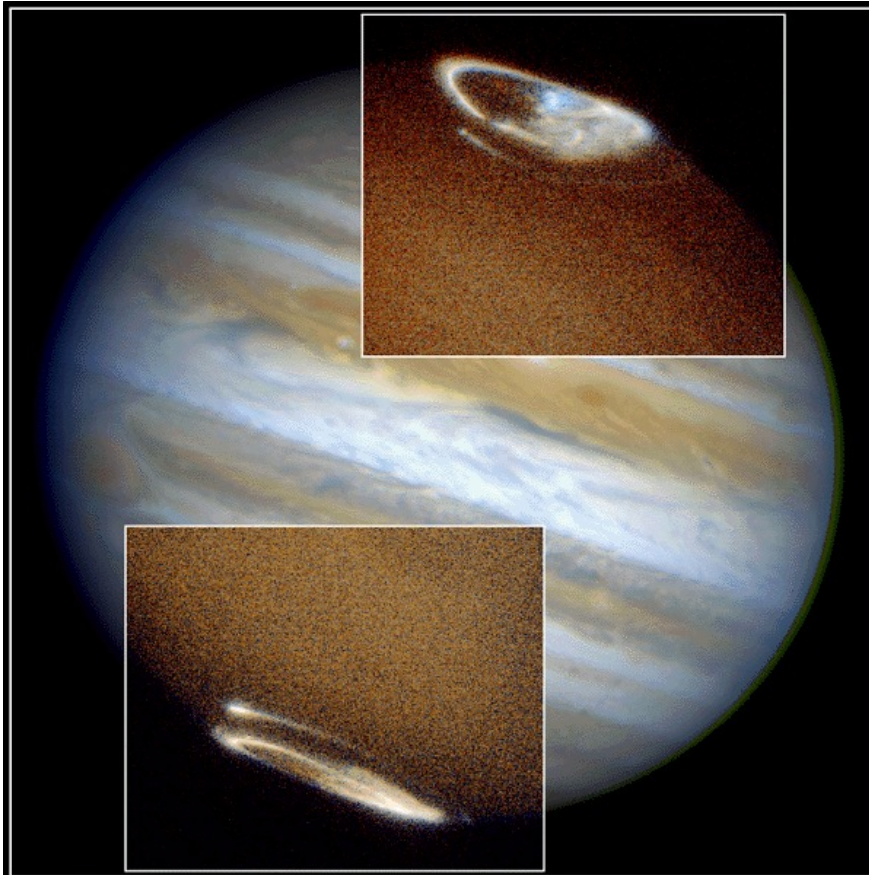


# L'atmosphère terrestre



# L'atmosphère terrestre

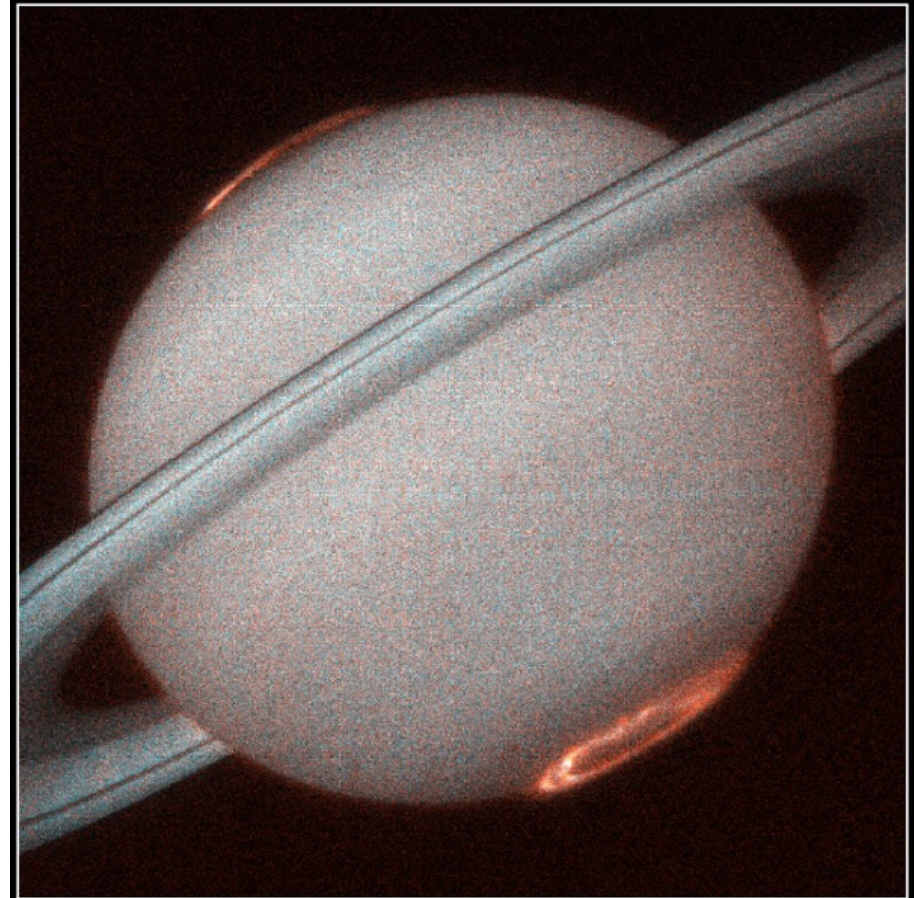
Exemples d'aurores polaires sur Jupiter et Saturne. Les images ci-dessous sont prises en lumière ultraviolette



**Jupiter Aurora**

HST • STIS • WFPC2

PRC98-04 • ST ScI OPO • January 7, 1998  
J. Clarke (University of Michigan) and NASA



**Saturn Aurora**

HST • STIS

PRC98-05 • ST ScI OPO • January 7, 1998 • J. Trauger (JPL) and NASA



# L'atmosphère terrestre



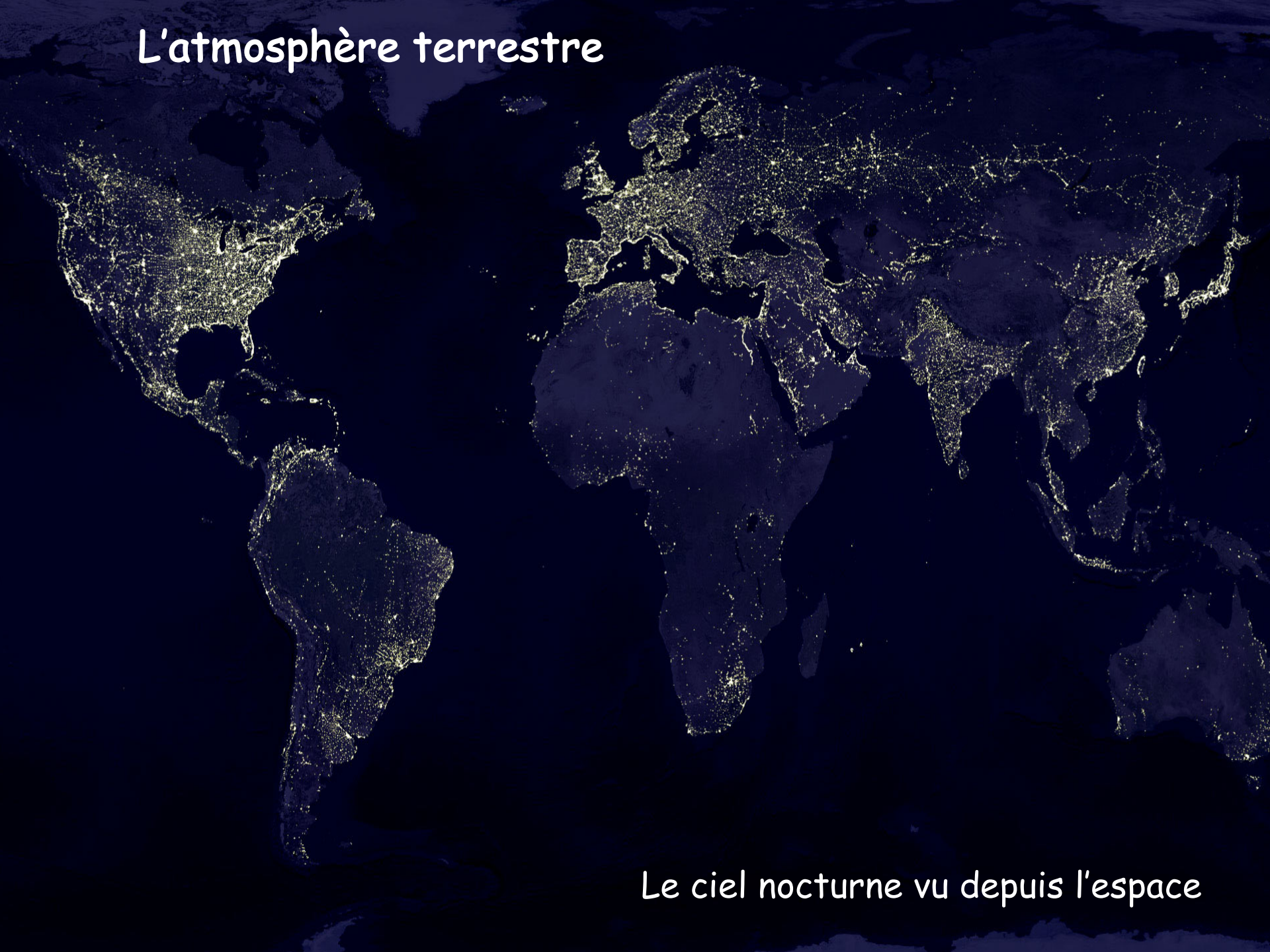


# L'atmosphère terrestre

## Observatoire du Mont Wilson en Californie



L'atmosphère terrestre



Le ciel nocturne vu depuis l'espace



# Poussières interplanétaires

La lumière zodiacale: diffusion dans les particules de l'écliptique



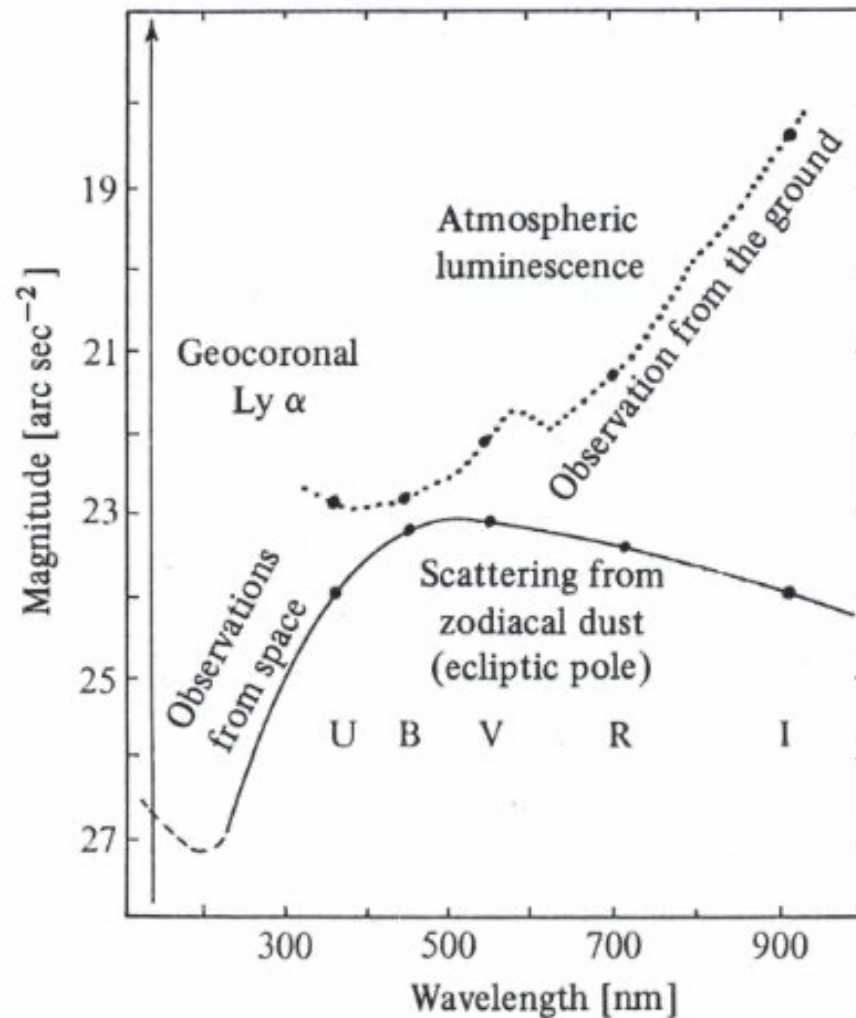


# Poussières interplanétaires



# L'atmosphère terrestre: bilan global

## Brillance de surface du ciel nocturne





# Phosphorescence atmosphérique (airglow)

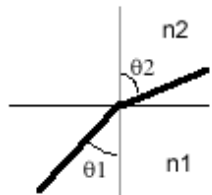


# Réfraction atmosphérique

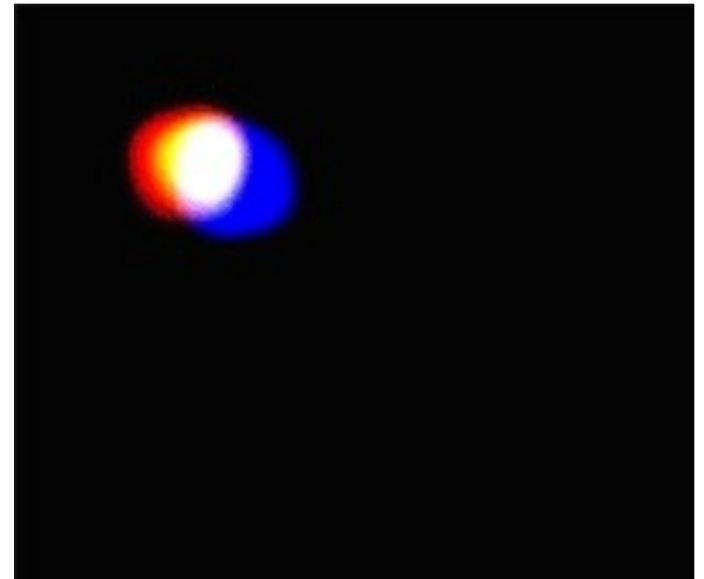
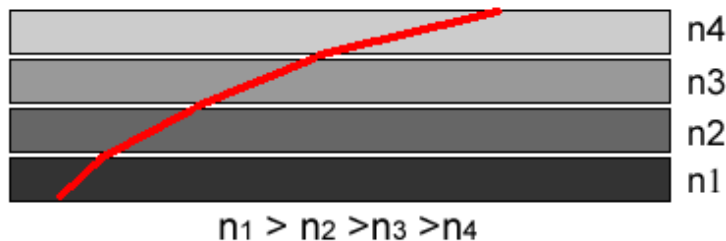
L'atmosphère agit comme un prisme

- L'angle de réfraction dépend de la longueur d'onde  
=> la position apparente d'un objet dépend de sa couleur
- 1 minute d'arc à 45 degrés du zénith
- 30 minutes d'arc à l'horizon (taille de la Lune et du Soleil)

Snell's Law



$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

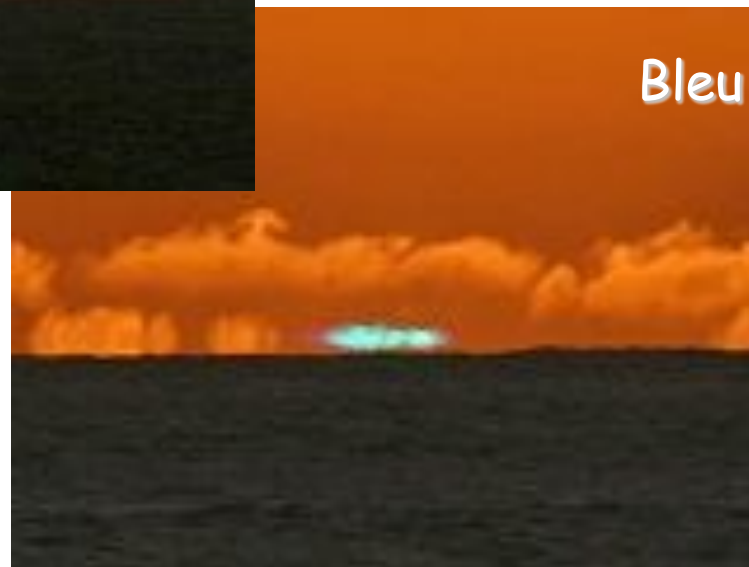
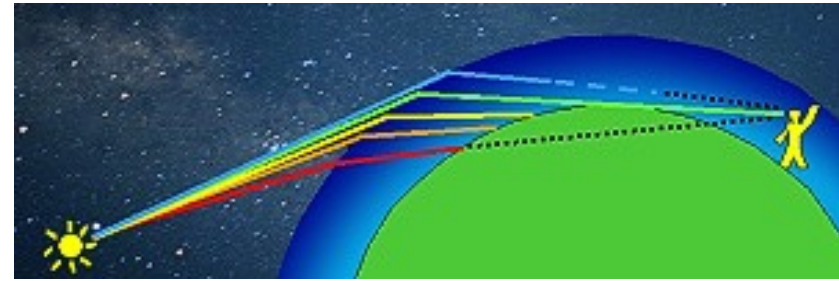




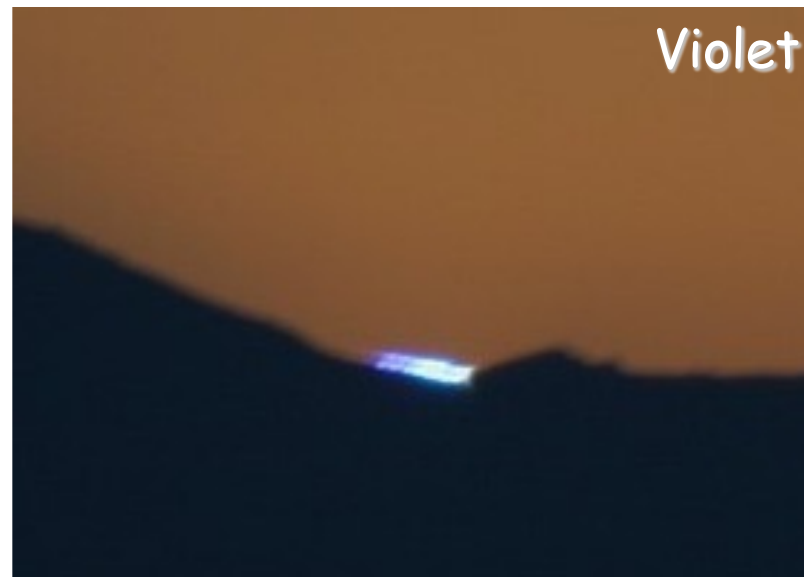
# Exemple de réfraction atmosphérique: le « flash vert »



# Exemple de réfraction atmosphérique: le « flash vert »



# Exemple de réfraction atmosphérique: le « flash vert »



# Lunettes astronomiques

Une lentille convergente forme l'objectif

- La lunette de Galilée fonctionne sur ce principe
- Grande distance focale
- Pas « d'obstruction centrale »
- Limitation du diamètre à environ 1 m
- Chromatisme
- Difficultés de pointage
- Trop forts grossissements



# Lunettes astronomiques



Observatoire de Yerkes,  
Univ. Chicago, USA.  
Objectif de 1 m de diamètre.



# Lunettes astronomiques

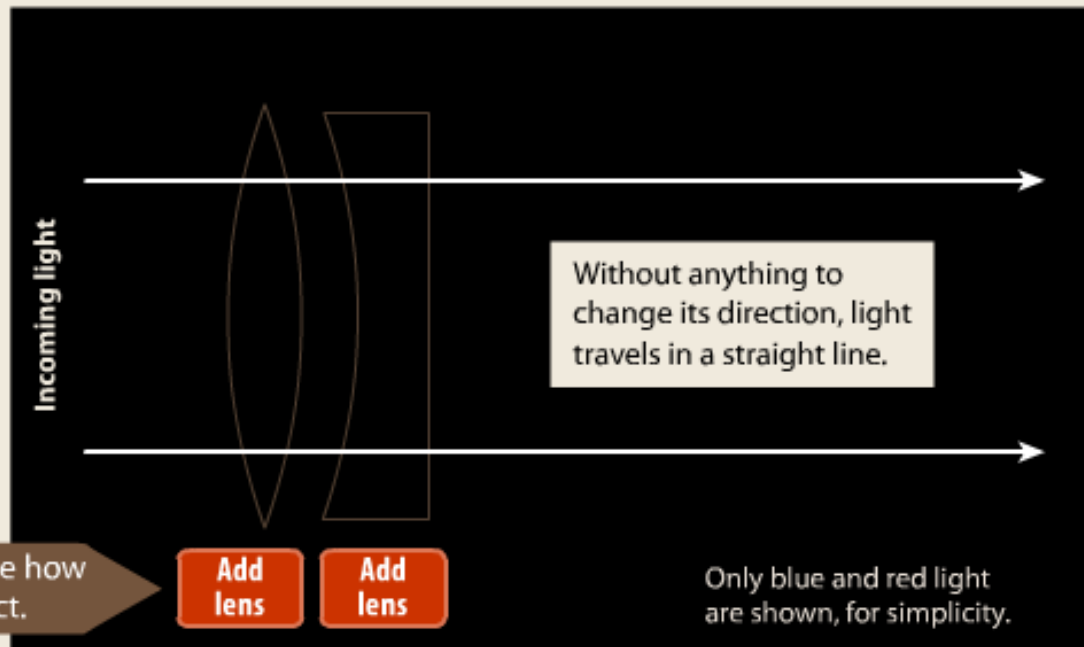
Principe du « doublet achromatique ».

GET TO THE ROOT OF IT 🌱

## The lens doublet corrects chromatic aberration

Pairs of lenses, or doublets, allow different shapes and different kinds of glass – in this case, crown glass and flint glass – to work together to bend light so its colors meet at only one point. Each lens cancels the other's light-bending effects to just the right degree.

Use the buttons to see how the two lenses interact.



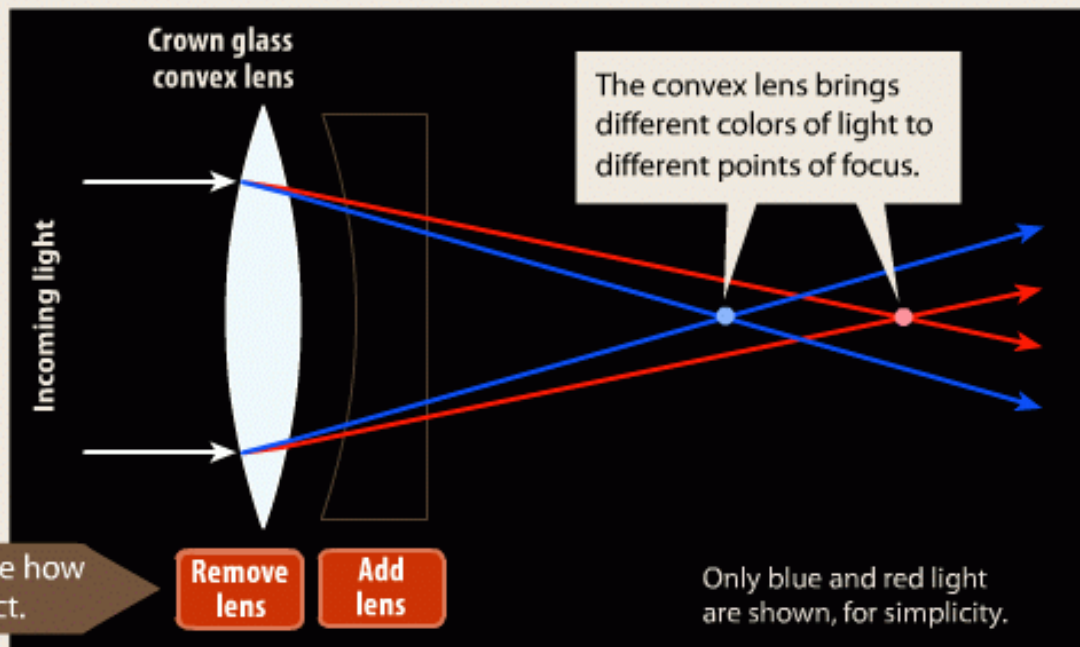
# Lunettes astronomiques

Principe du « doublet achromatique ».

GET TO THE ROOT OF IT 🌱

## The lens doublet corrects chromatic aberration

Pairs of lenses, or doublets, allow different shapes and different kinds of glass – in this case, crown glass and flint glass – to work together to bend light so its colors meet at only one point. Each lens cancels the other's light-bending effects to just the right degree.



# Lunettes astronomiques

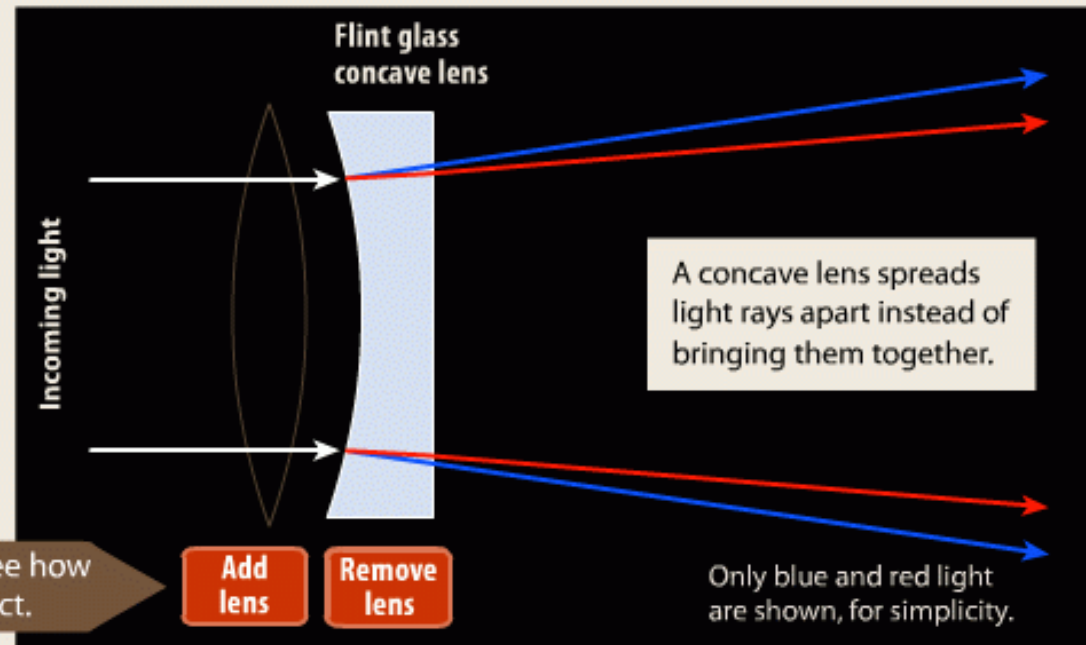
Principe du « doublet achromatique ».

GET TO THE ROOT OF IT

## The lens doublet corrects chromatic aberration

Pairs of lenses, or doublets, allow different shapes and different kinds of glass – in this case, crown glass and flint glass – to work together to bend light so its colors meet at only one point. Each lens cancels the other's light-bending effects to just the right degree.

Use the buttons to see how the two lenses interact.





# Lunettes astronomiques

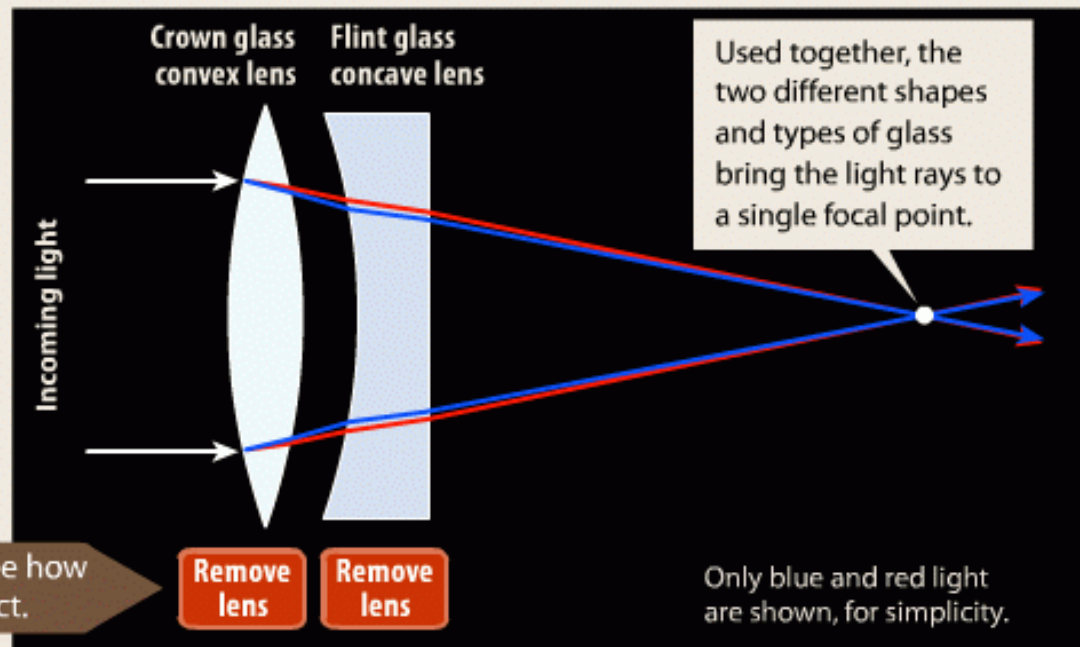
Principe du « doublet achromatique ».

GET TO THE ROOT OF IT

## The lens doublet corrects chromatic aberration

Pairs of lenses, or doublets, allow different shapes and different kinds of glass – in this case, crown glass and flint glass – to work together to bend light so its colors meet at only one point. Each lens cancels the other's light-bending effects to just the right degree.

Use the buttons to see how the two lenses interact.



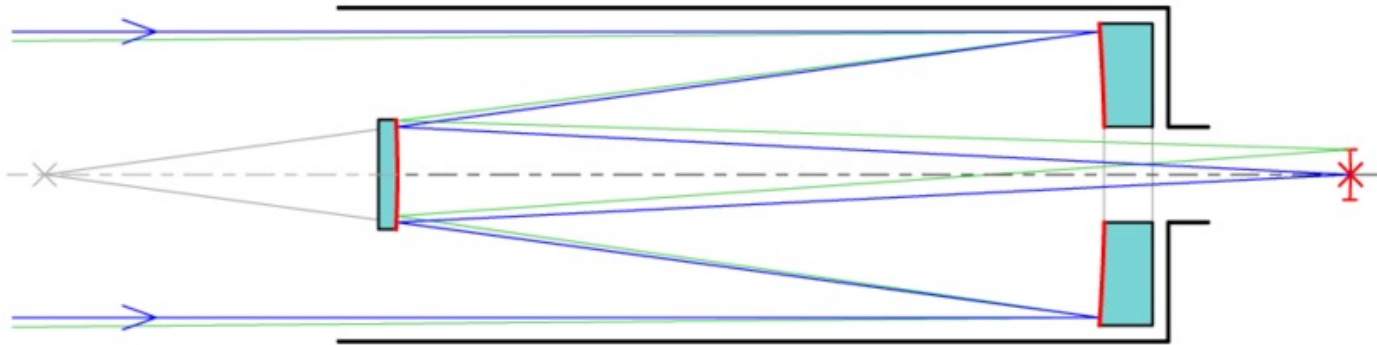
# Télescopes à miroirs

Un miroir forme l'objectif

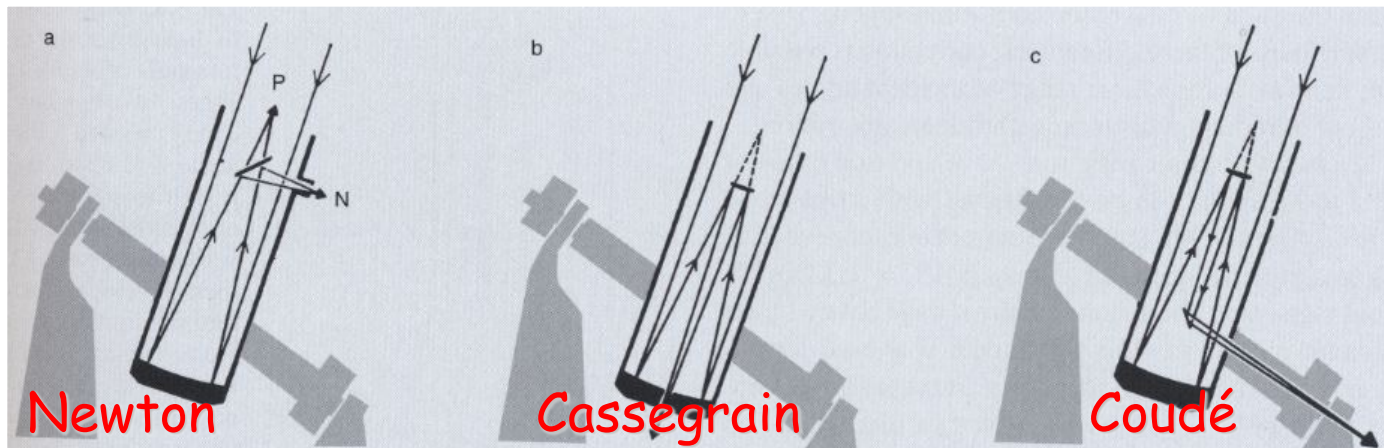
- Le télescope de Newton fonctionne sur ce principe
- Grande taille de miroir
- Plus grande efficacité lumineuse
- Possibilité de miroirs segmentés
- A-chromatique
- Structure plus compacte
- Obstruction centrale due au miroir secondaire

# Télescopes à miroirs

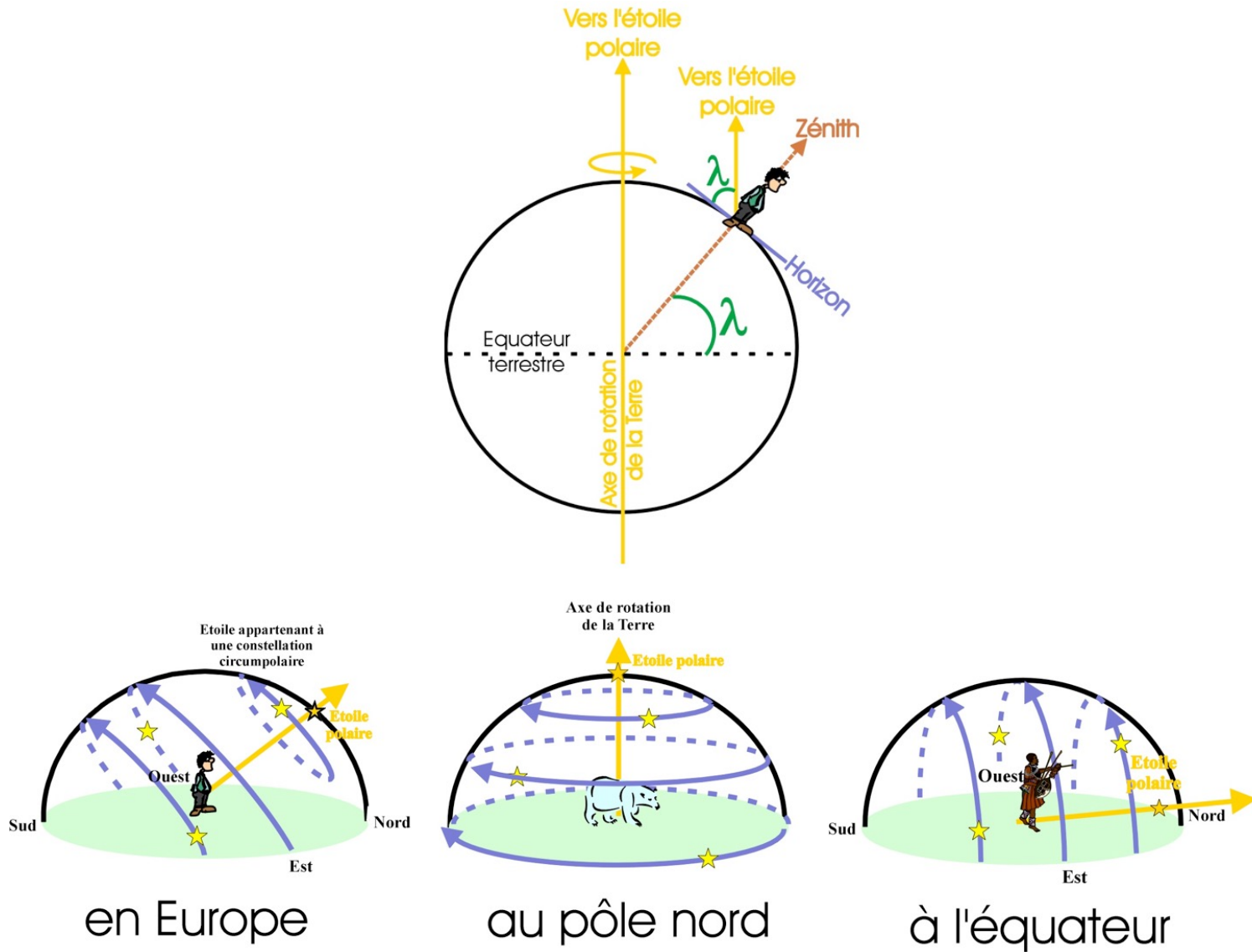
Principes optiques pour des miroirs paraboliques



Différents types de montures dites « équatoriales »



# Perception du ciel selon le lieu d'observation





# Nécessité de « suivre » le mouvement apparent du ciel



Rotation du ciel et hauteur de l'axe des pôles au dessus de l'horizon



# Nécessité de « suivre » le mouvement apparent du ciel



Rotation du ciel dans la direction de l'équateur céleste

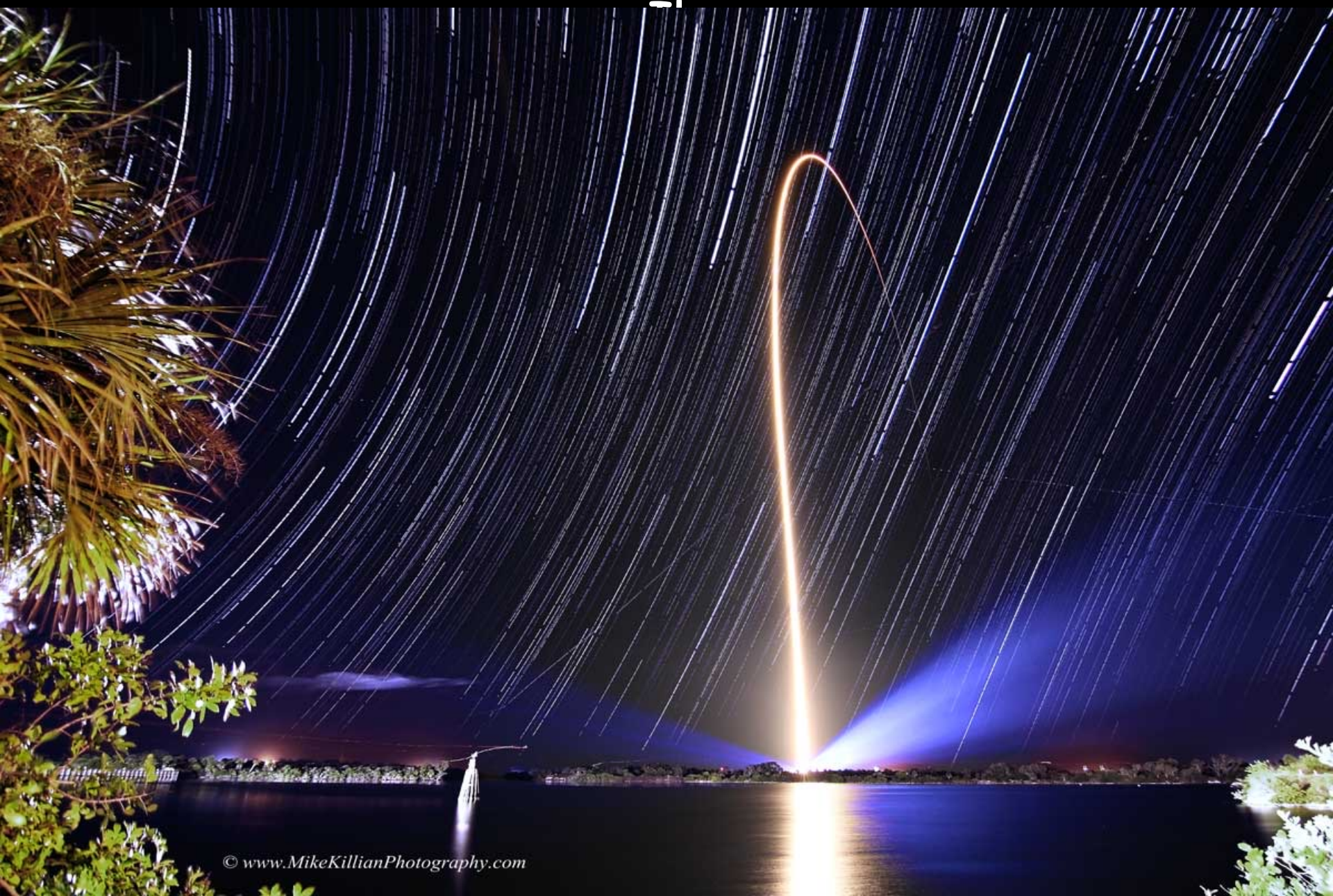


Nécessité de « suivre » le  
mouvement apparent du ciel





# Illustration de la rotation terrestre





# Télescopes à miroirs

Télescope de 5 m de diamètre du Mont Palomar



# Qualité des observations

## Observations profondes:

- Grand miroir
- Longues poses

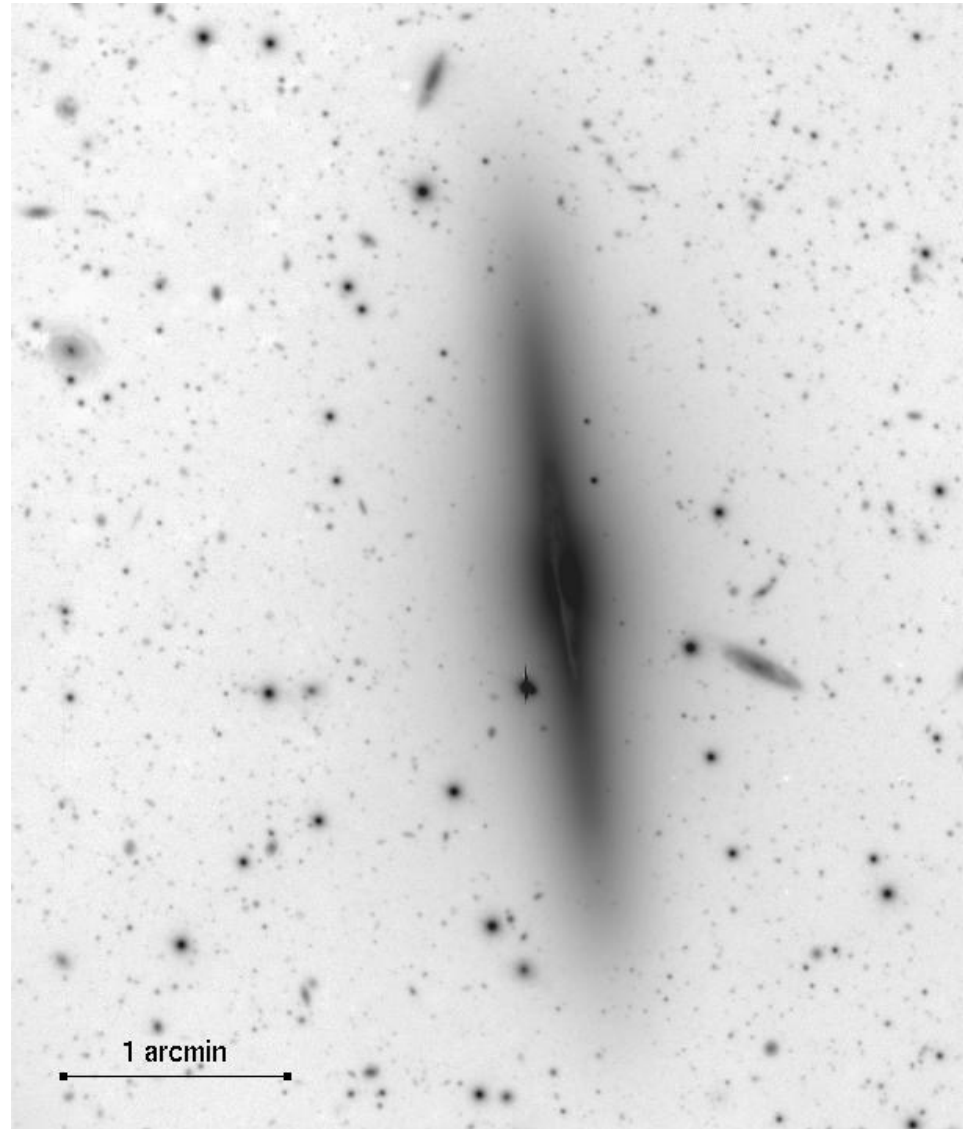
## Images nettes:

- Limite de diffraction
- Limite due à la turbulence atmosphérique
- Correction partielle de la turbulence
- Techniques interférométriques

## Images « profondes »

Image d'une galaxie prise avec le VLT (Very Large Telescope) au Chili.

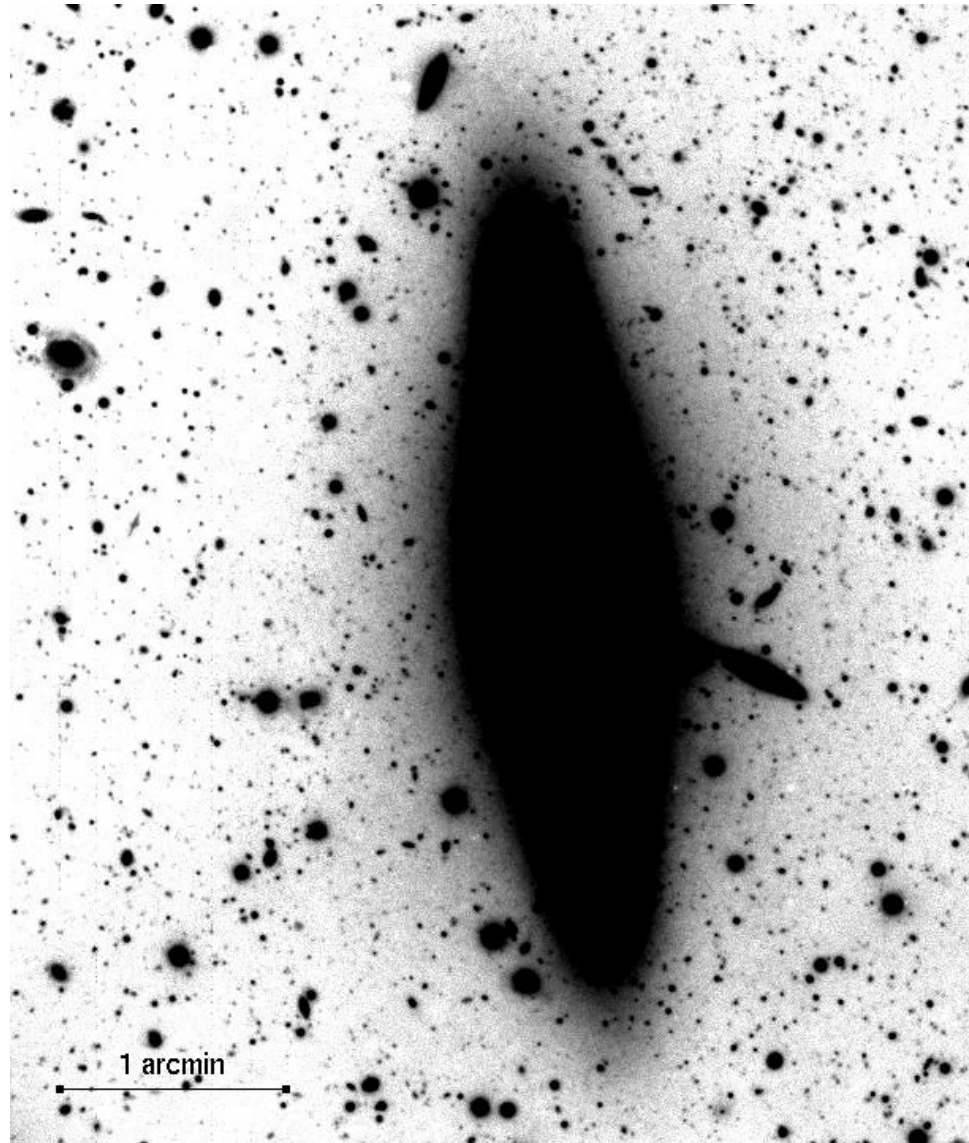
Pose courte (1 min)



## Images « profondes »

Image d'une galaxie  
prise avec  
le VLT (Very Large  
Telescope)  
au Chili.

Pose moyenne (30 min)

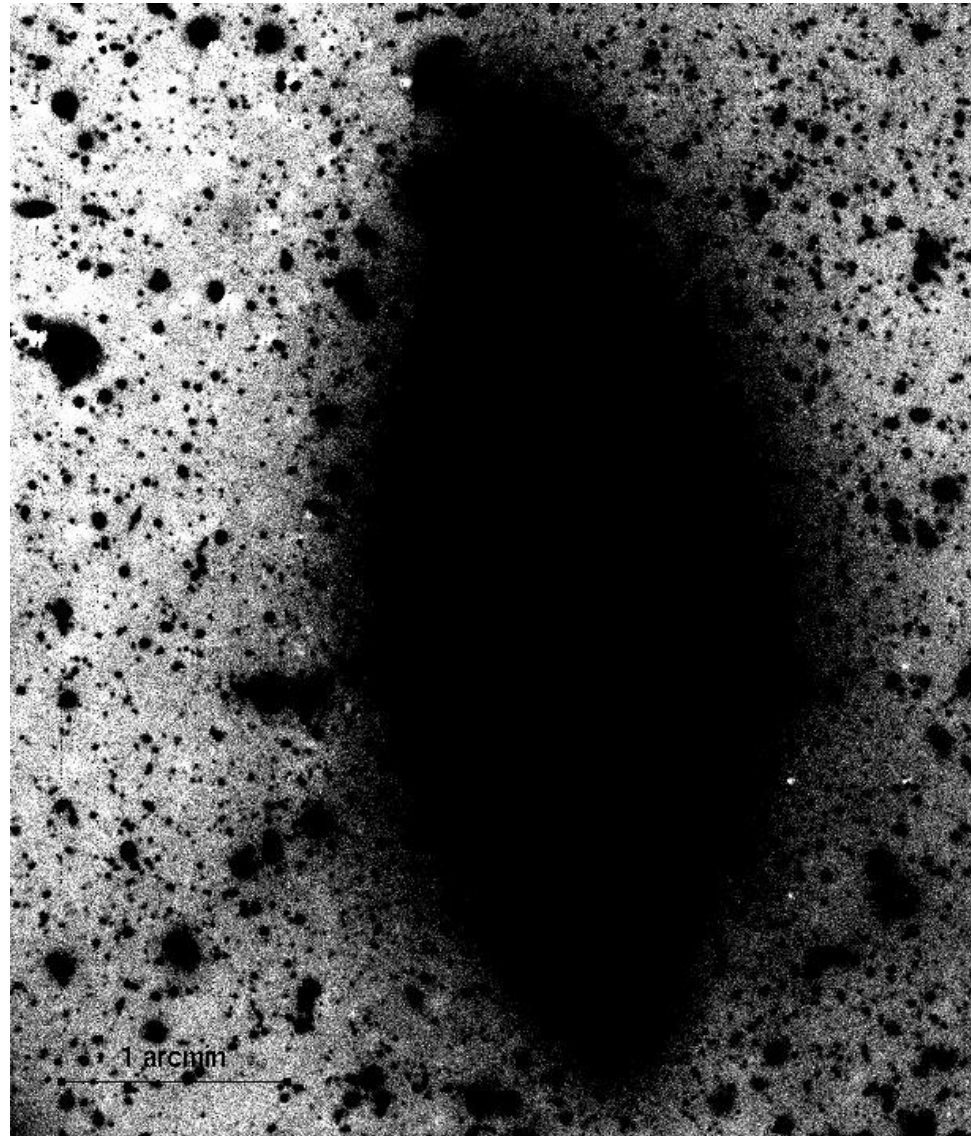




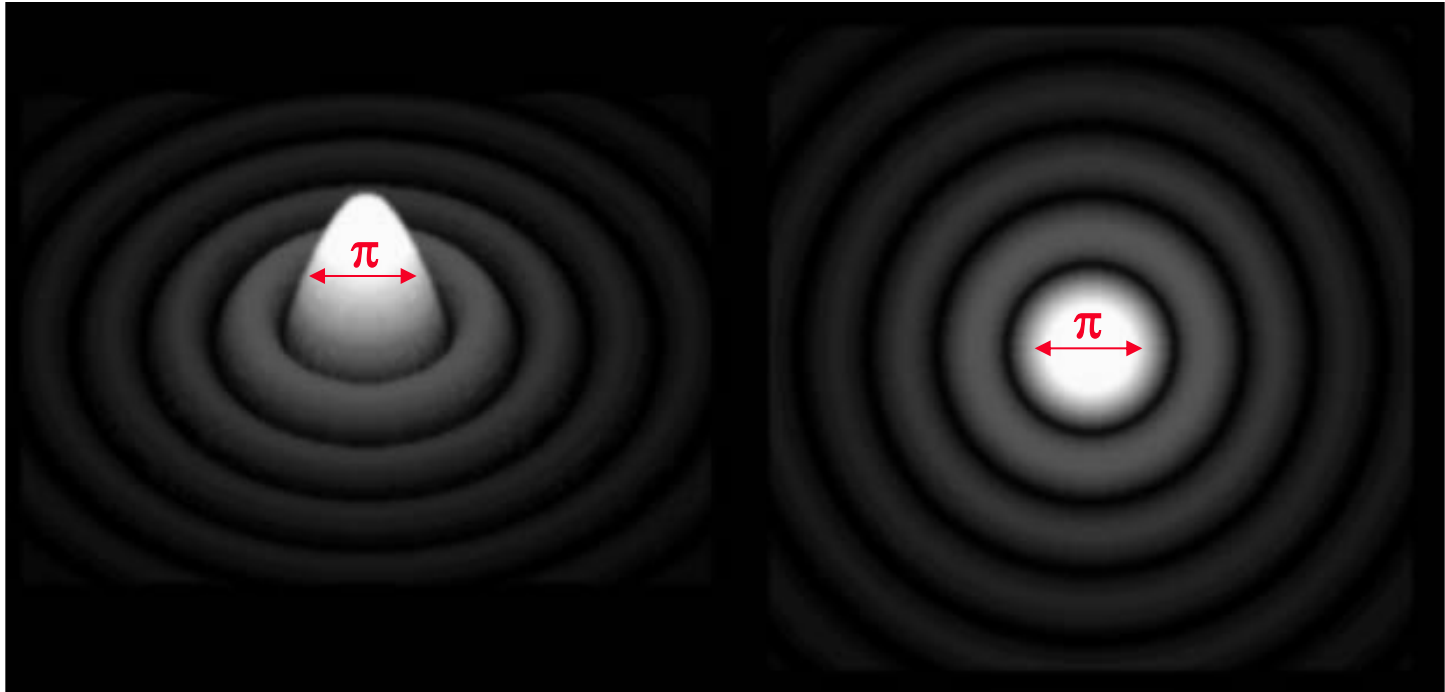
# Images « profondes »

Image d'une galaxie prise avec le VLT (Very Large Telescope) au Chili.

Pose longue (10 h)



# Images nettes



Un télescope agit comme une ouverture circulaire qui diffracte la lumière. Les fonctions de Bessel, décrivent la tâche d'Airy, ou la « tâche de diffraction » dont le diamètre angulaire (en radians) est

$$\pi = \frac{1,22\lambda}{D}$$



# Télescopes optiques géants

Observatoire Keck: 2 x 10 m (Caltech & UC), Hawaii, Mauna Kea



Copyright: W.M. Keck Observatory

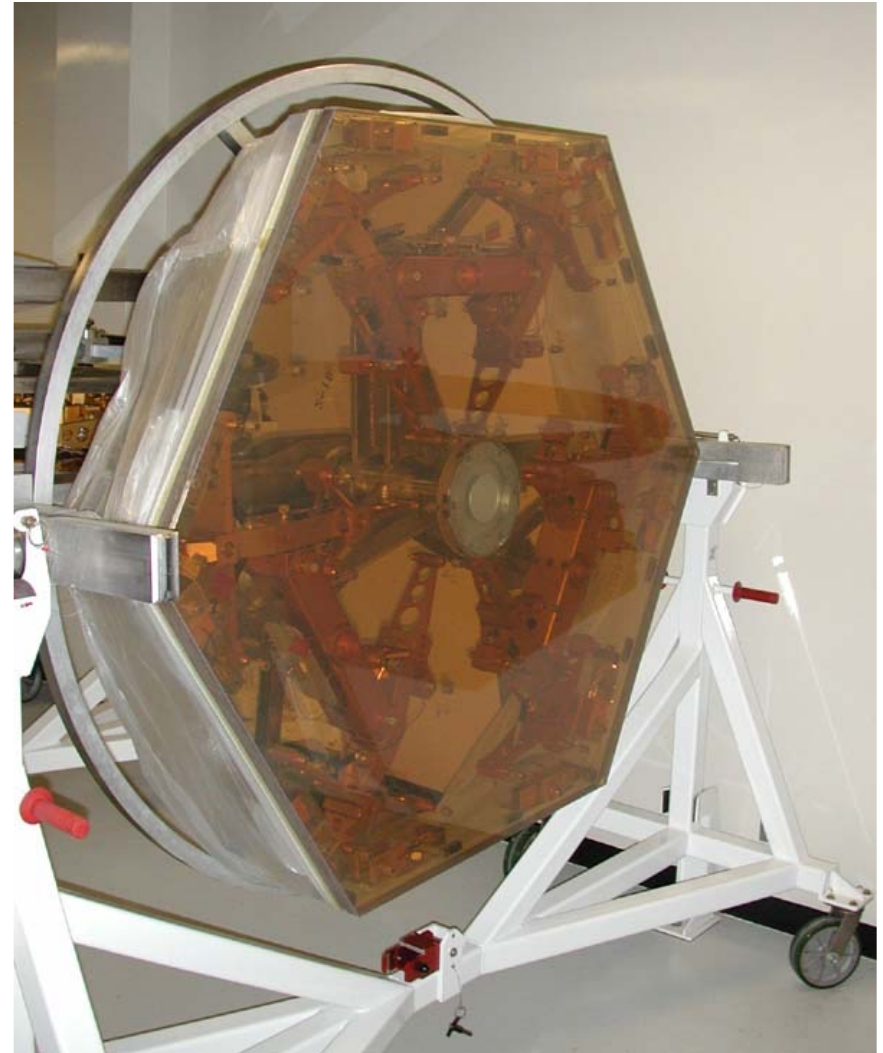
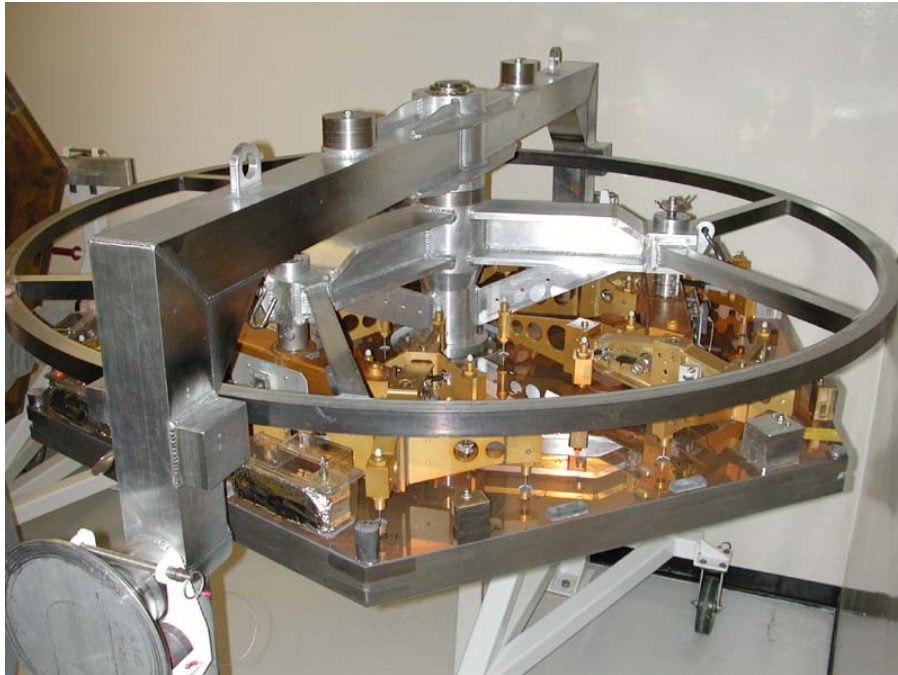


# Télescopes optiques géants

Observatoire Keck: 36 segments hexagonaux de 1.8  
m



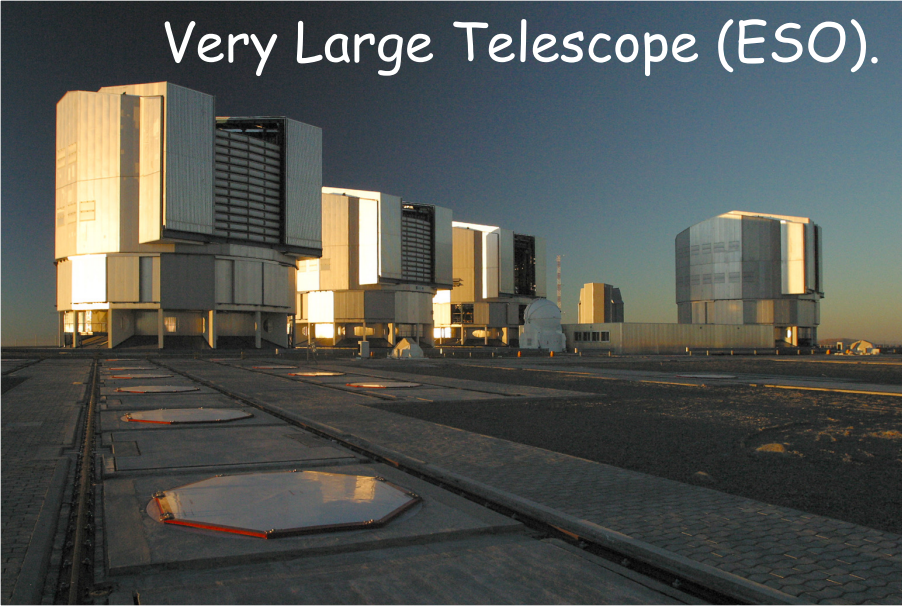
# Télescopes optiques géants





# Télescopes optiques géants

Very Large Telescope (ESO).



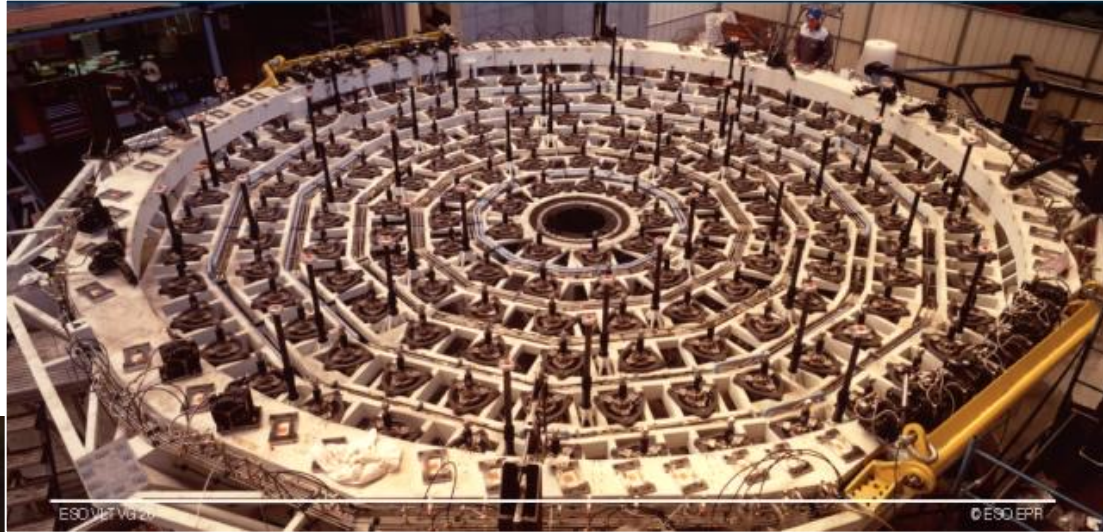
Cerro Paranal, Chili: 4 x 8 m  
(European Southern  
Observatory: ESO).





# Télescopes optiques géants

Miroir du VLT: 8 m de diamètre, 17 cm d'épaisseur, 25 tonnes de céramique.



Support du miroir et ses 196 actuateurs actifs qui garantissent une forme stable



Miroir de 8 m après la



# Télescopes optiques géants

Transport des morceaux de télescopes dans les Andes Chiliennes





Galaxie NGC 1672 observée par le télescope spatial Hubble  
Résolution  $\sim 0,1$  seconde d'arc

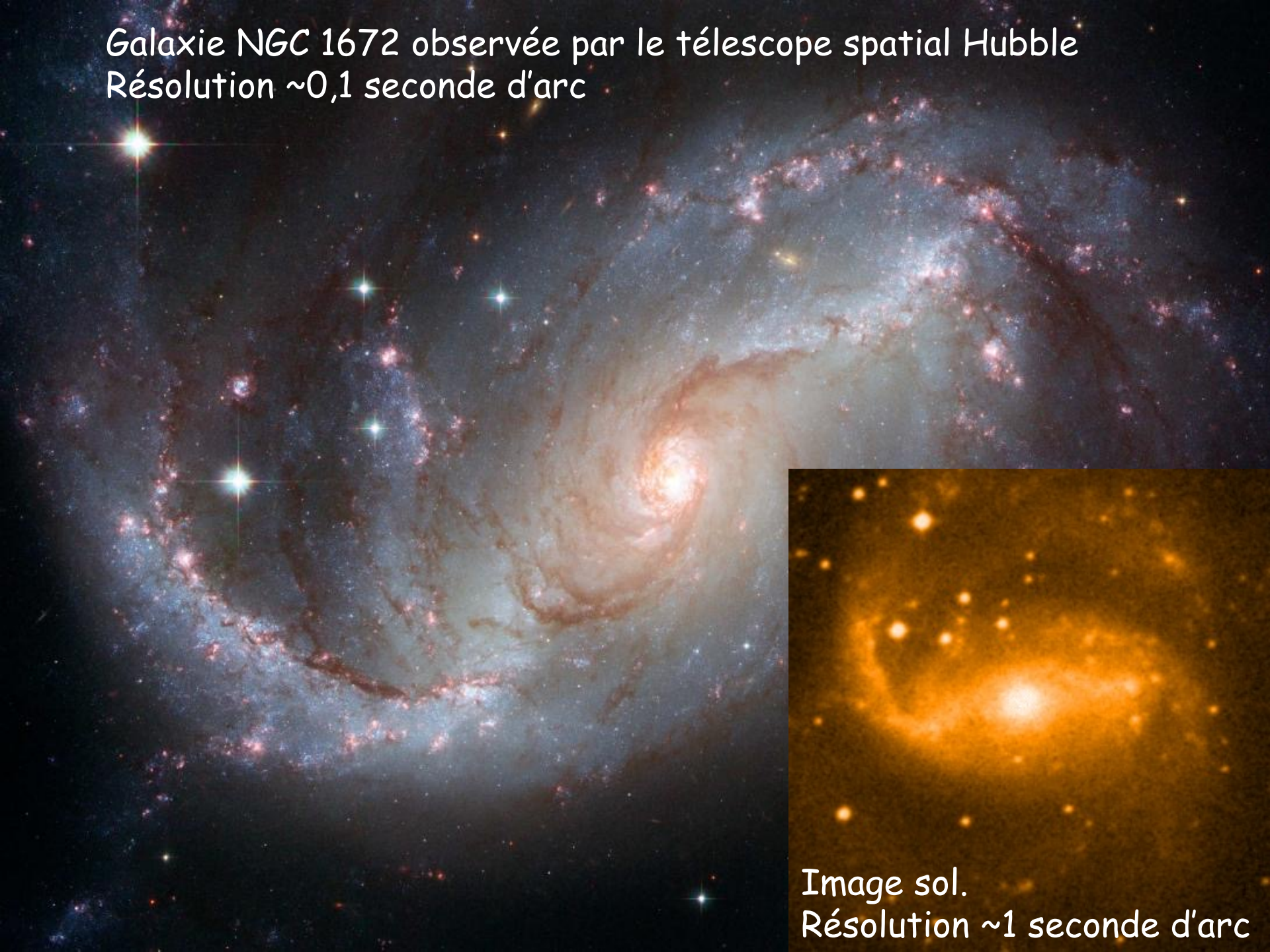
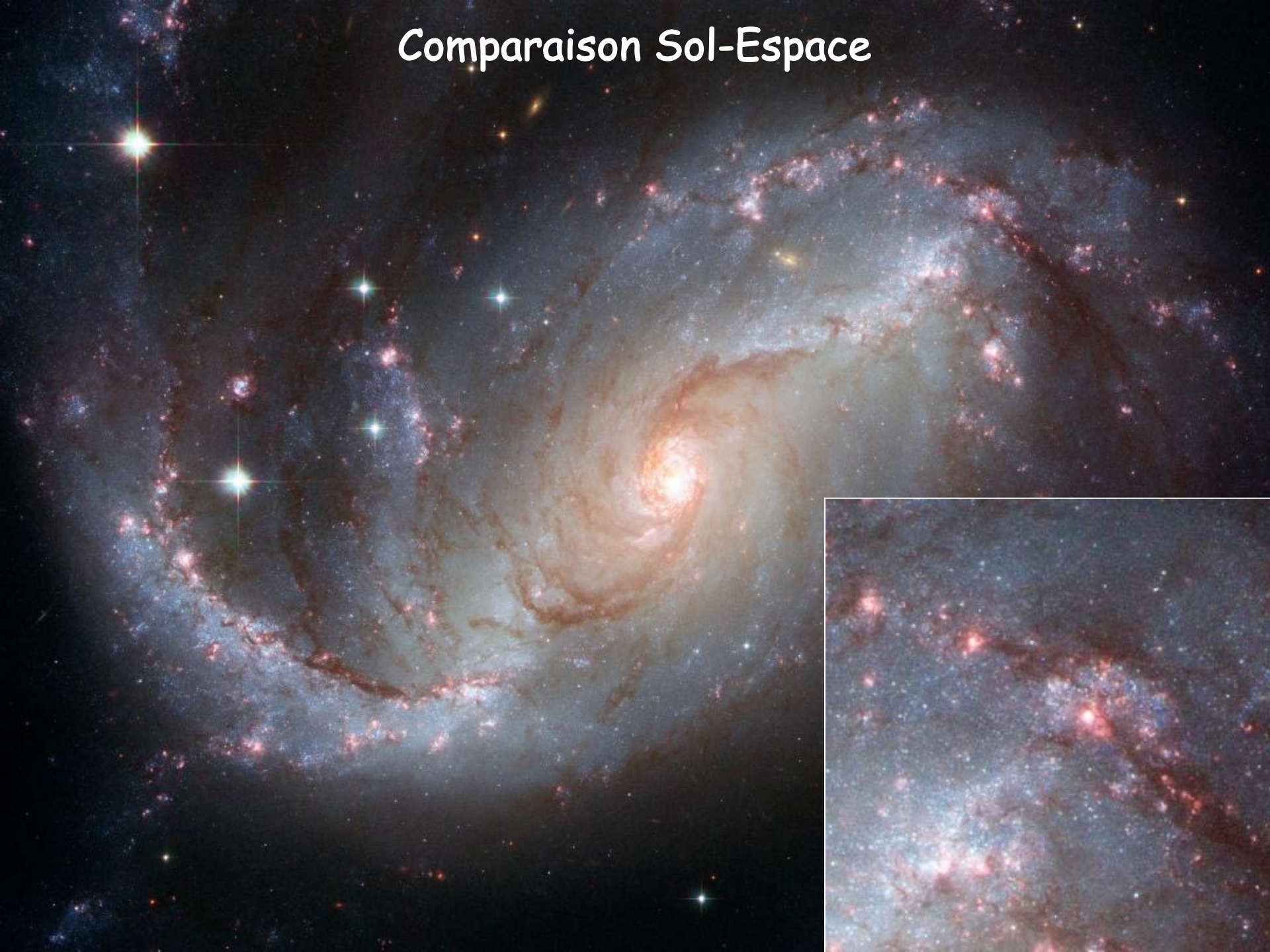


Image sol.  
Résolution  $\sim 1$  seconde d'arc



# Comparaison Sol-Espace



# Optique active et optique adaptative



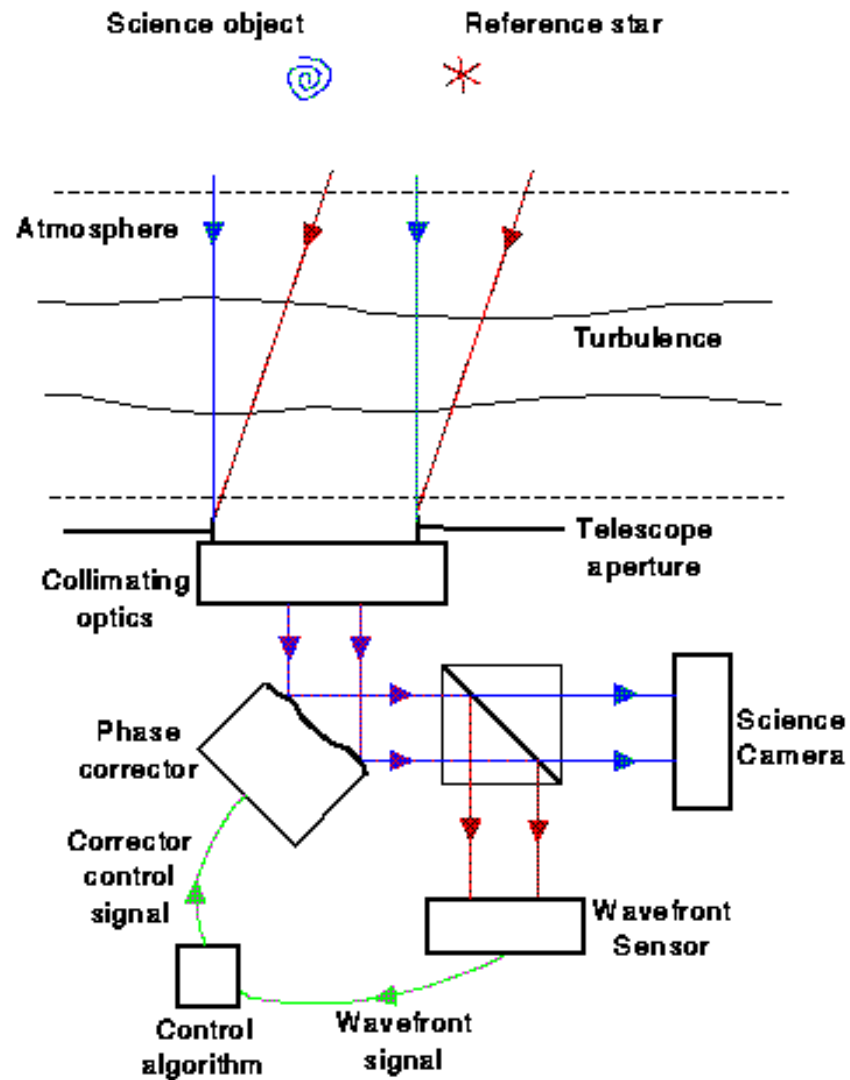
Optique active:  
correction de la déformation du miroir principal

A dark blue rectangular box with a black border. Inside the box, the text "VLT ACTIVE OPTICS" is written in a large, bold, white serif font. Below it, the text "IMAGE CORRECTIONS" is written in a smaller, bold, white serif font.

**VLT ACTIVE OPTICS**

**IMAGE CORRECTIONS**

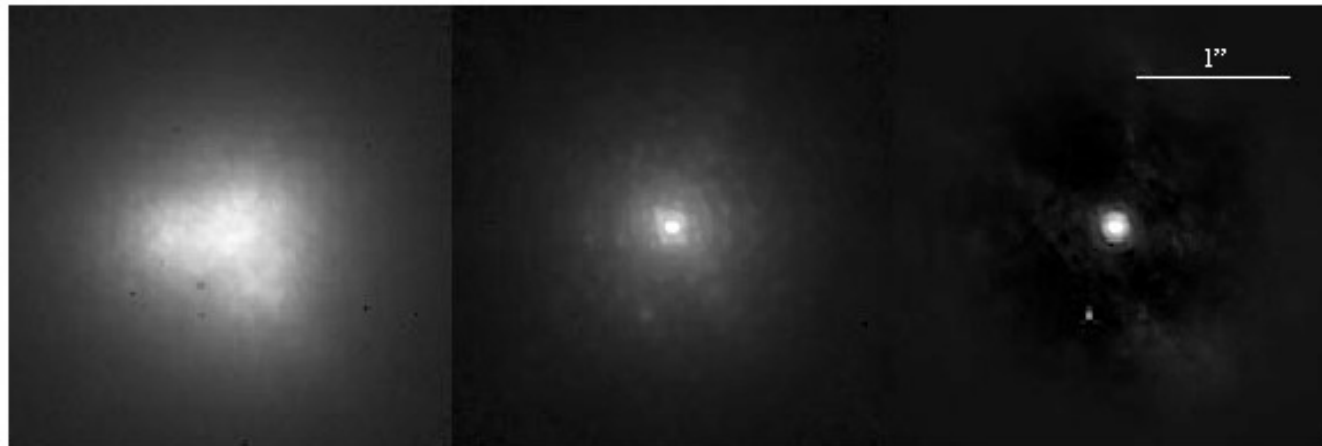
# Optique adaptative: correction de la turbulence



# Optique adaptative: correction de la turbulence

Instrument infrarouge Hokupa'a sur le télescope de 8 m Gemini (Hawaii)

Gemini/Hokupa'a (June 1999)



Uncompensated  
(Hokupa'a off)

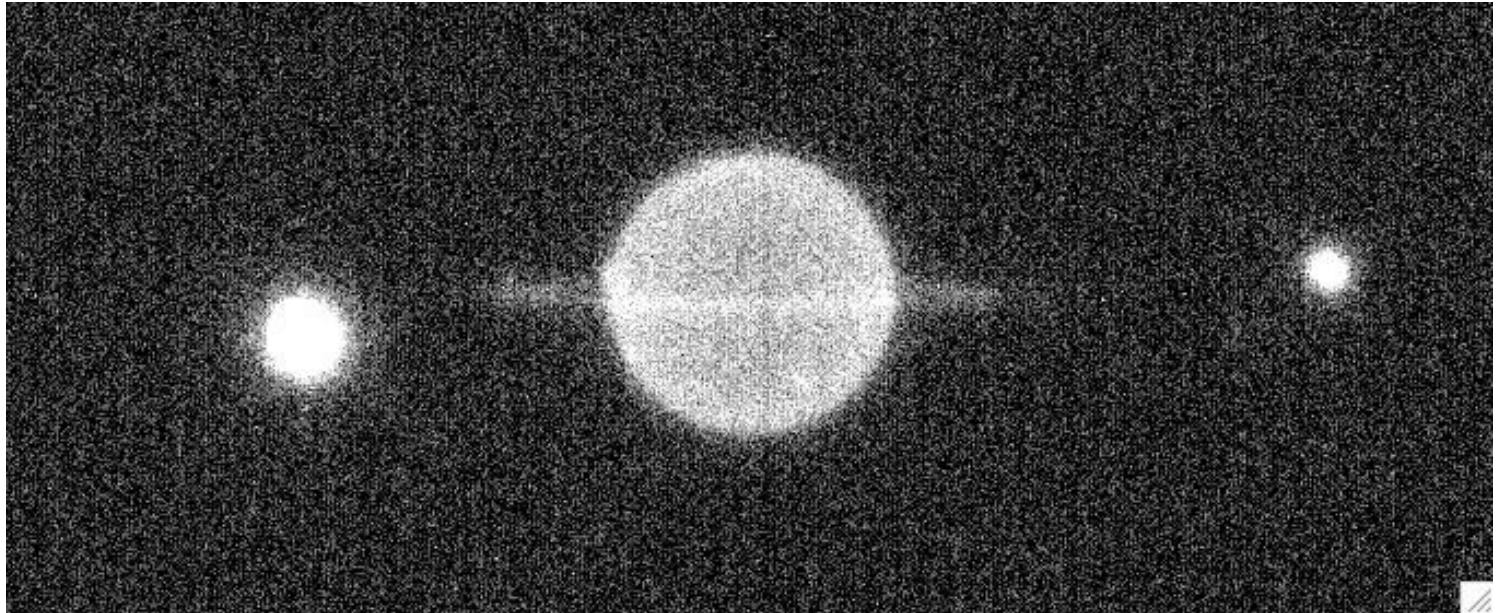
Compensated  
(Hokupa'a on)

Compensated and  
post-processed

Young massive star V1318 Cyg (K band)  
(faint companion was previously unknown)



# Optique adaptative: images VLT d'Uranus



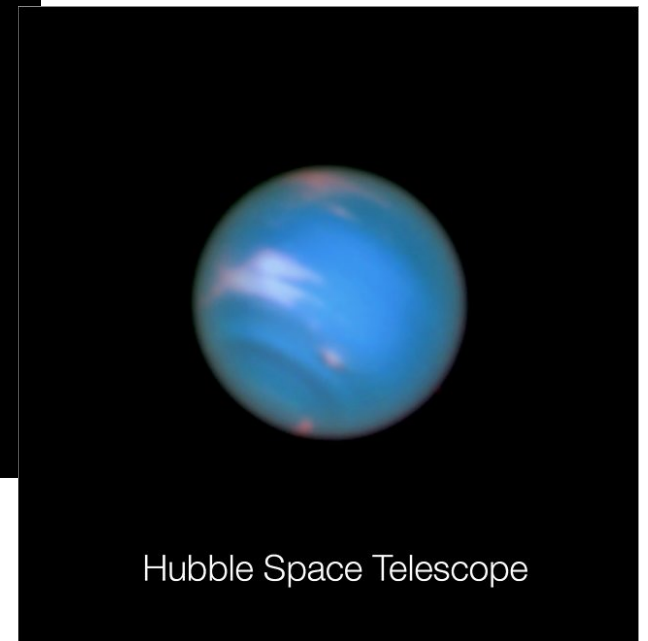
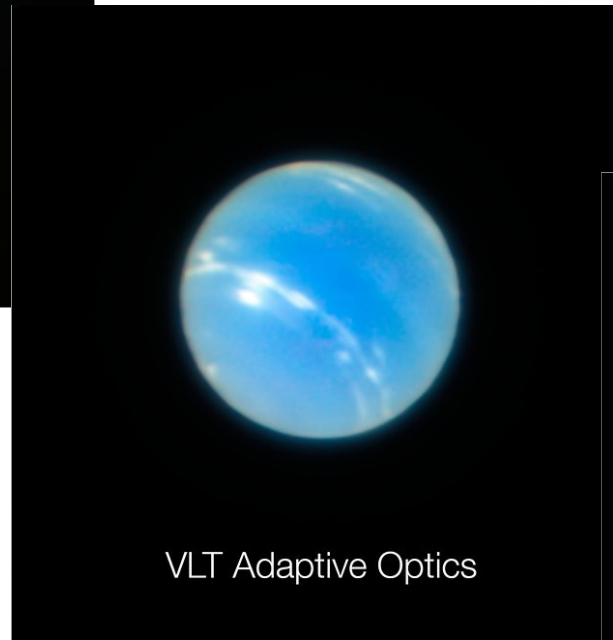
# Optique adaptative: correction de la turbulence



VLT+MUSE Wide Field Mode  
without Adaptive Optics

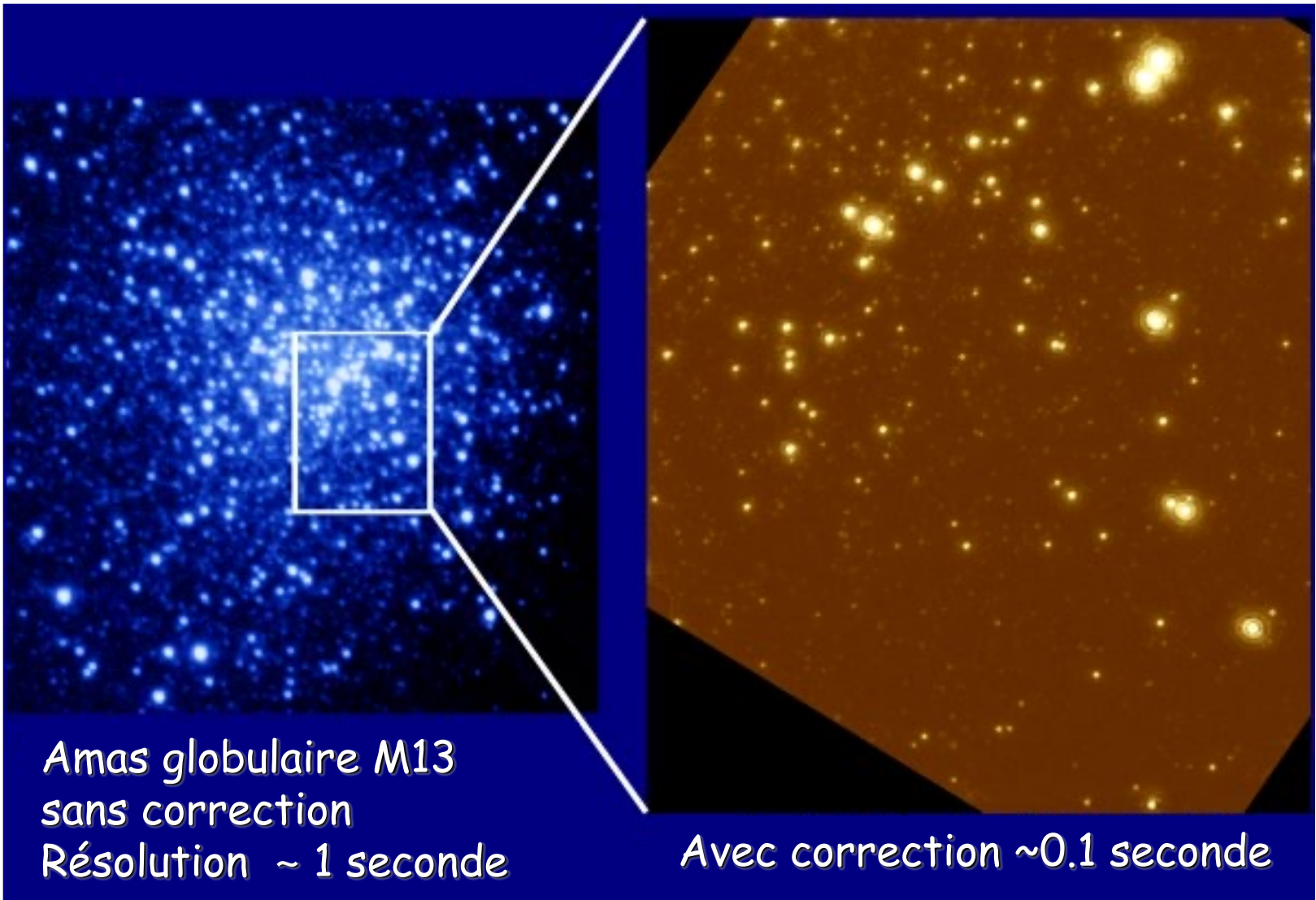
VLT+MUSE Narrow Field Mode  
with Adaptive Optics

# Optique adaptative: correction de la turbulence





# Optique adaptative: correction de la turbulence





Utilisation d'étoiles guides laser sur la haute atmosphère  
(~10 km), ici à l'ESO (Paranal, Chili).





Utilisation d'étoiles guides laser sur la haute atmosphère  
(~10 km), ici à l'ESO (Paranal, Chili).

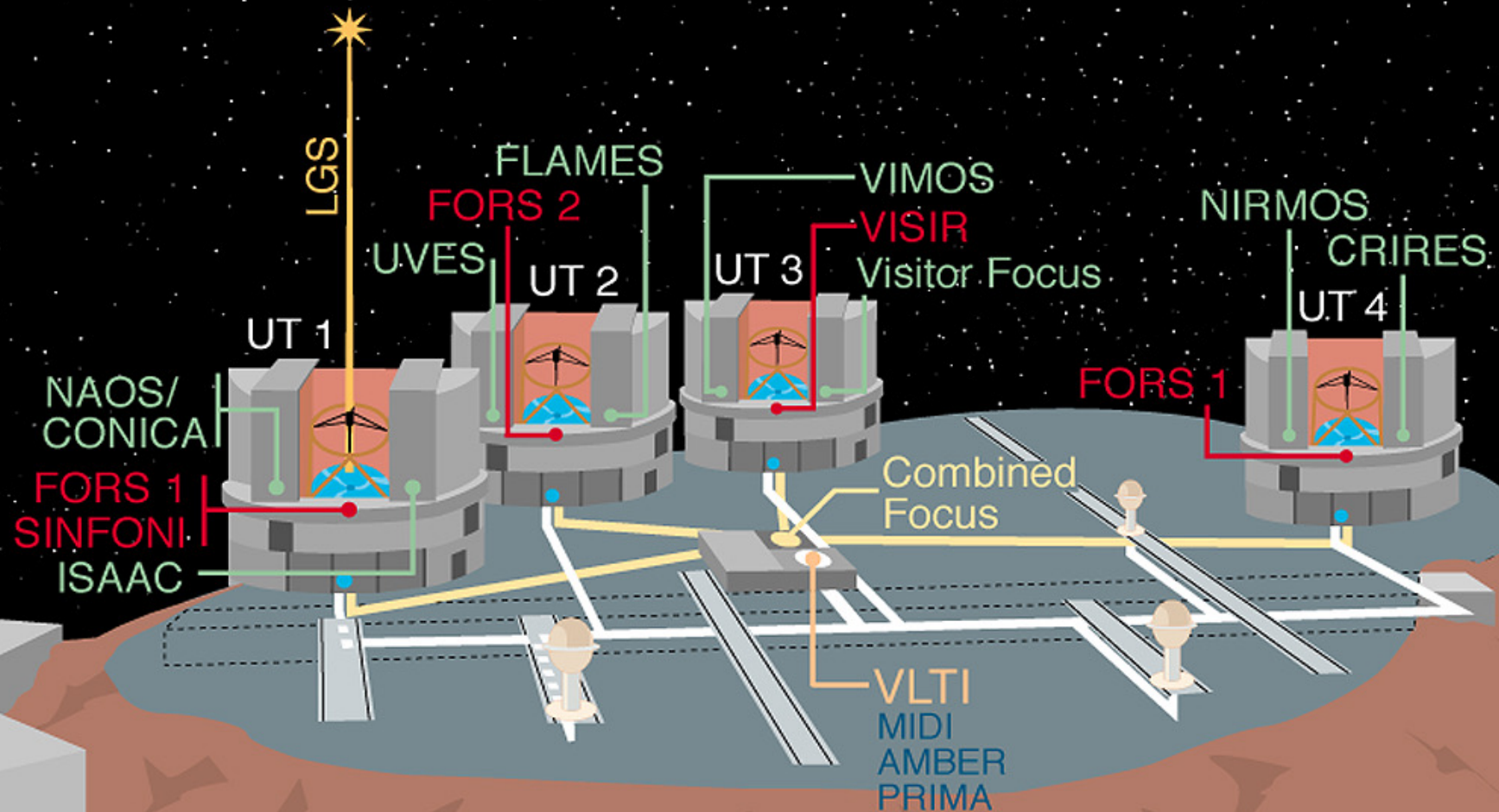




# Etoiles laser artificielles



# Interférométrie



La résolution équivalente est celle d'un télescope dont le diamètre serait la longueur de la plus grande base de l'interféromètre



Ligne à retard sur le VLT, nécessaire pour mélanger les faisceaux « en phase »



**Observations dans les ondes radios**



# Observations dans le domaine radio

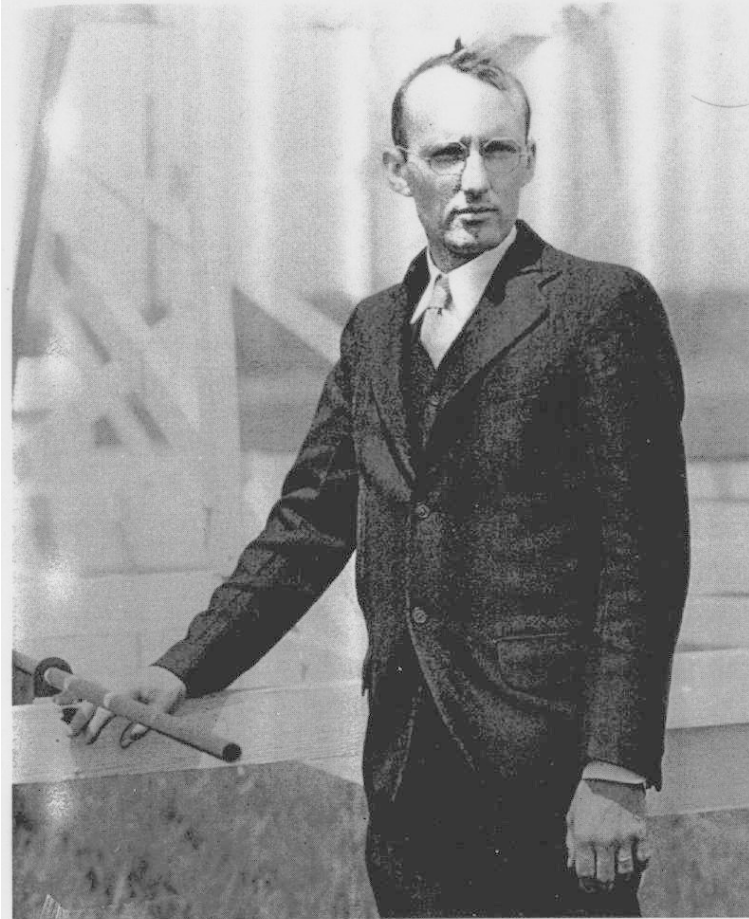
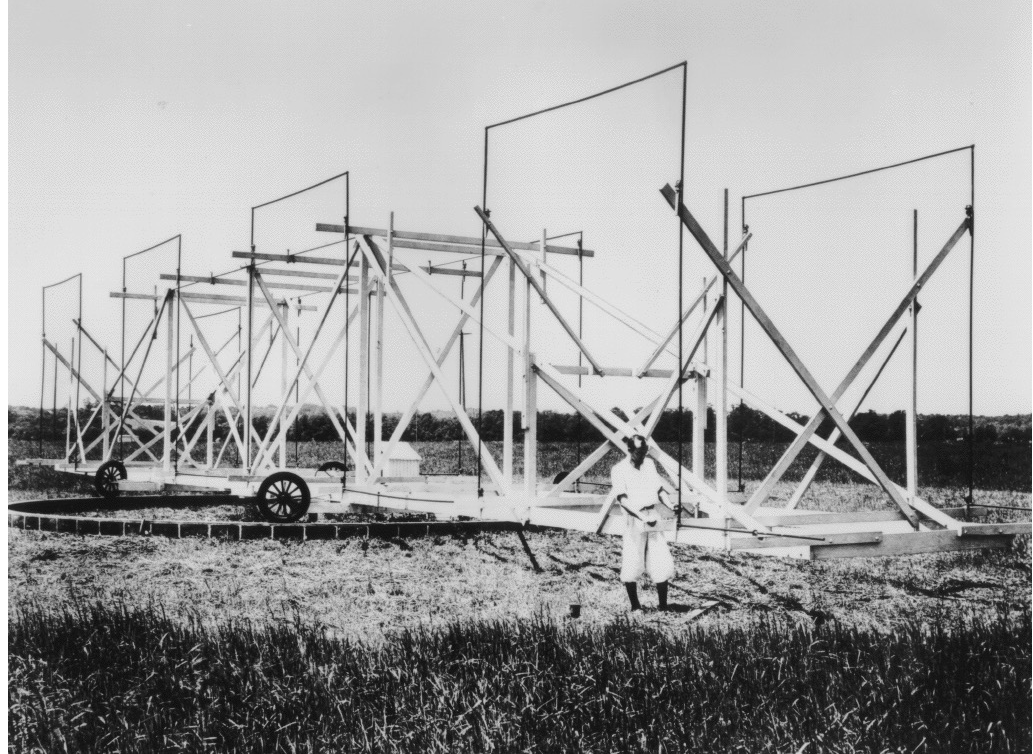


FIG. 1—Karl Guthe Jansky, about 1933.



Karl Jansky (1933) et son antenne radio: découverte de l'émission radio de la Voie Lactée.



# Observations dans le domaine radio

## Mécanismes d'émission:

- Corps noir
- Synchrotron
- Vibrations/rotations des molécules  
(longueurs d'ondes millimétriques)
- Raie à 21 cm de l'hydrogène neutre HI

# Observations dans le domaine radio

Antenne de 300 m de diamètre de Arecibo (Puerto Rico)  
fonctionnant dans le domaine centimétrique



Antenne secondaire  
orientable



# FAST: Five-hundred-meter Aperture Spherical Radio Telescope (China)

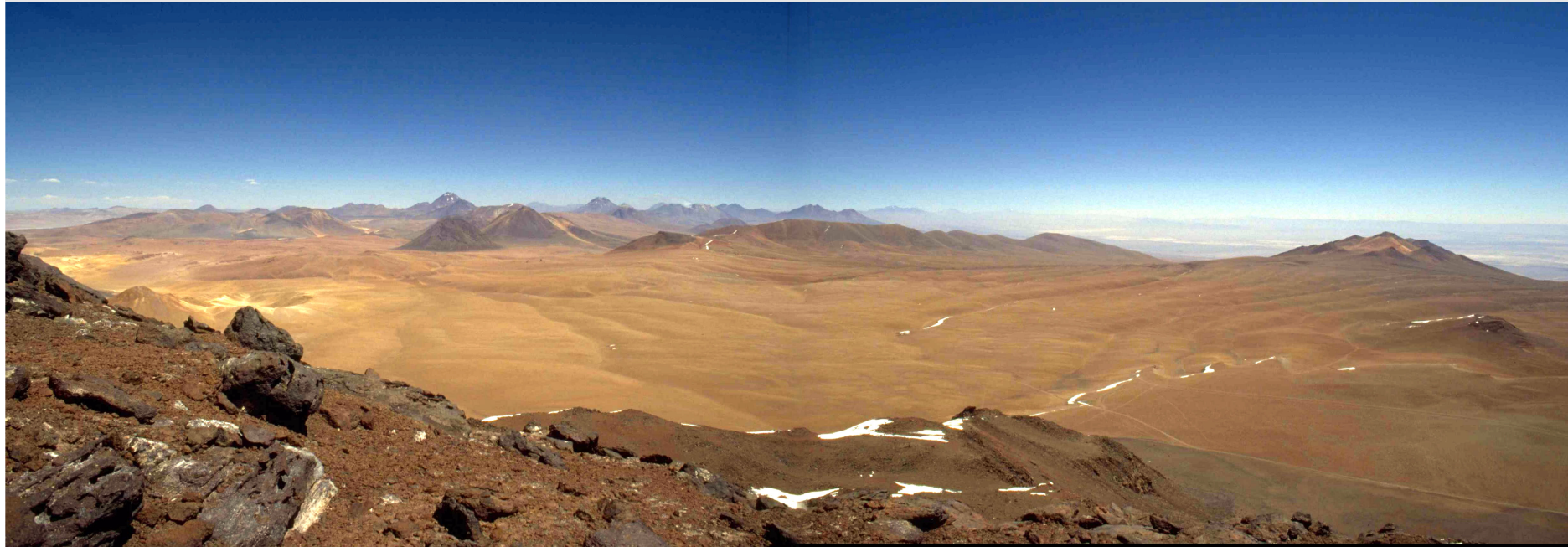
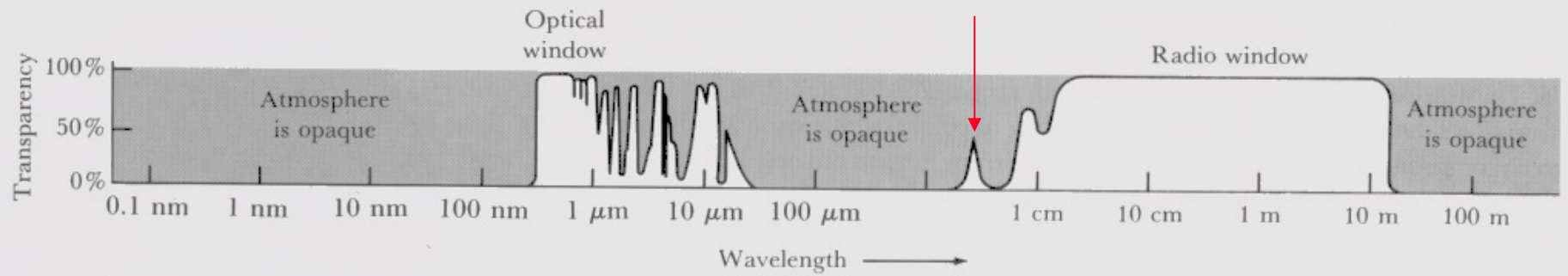




# Observations dans le domaine radio



Very Large Array, Nouveau Mexique



## Atacama Large Millimeter Array:

- site d'altitude: 5400 m
- air sec 0-5% d'humidité
- plateau de 20 km pour disposer un réseau d'antennes



# Observations dans le domaine radio

Atacama Large Millimeter Array =  $(52 \times 12 \text{ m}) + (14 \times 7 \text{ m})$  sur 10 km  
Etat du site en 2011



# Observations dans le domaine radio



Atacama Large Millimeter Array =  $(52 \times 12 \text{ m}) + (14 \times 7 \text{ m})$  sur 10 km  
Etat du site en 2011



# Observations dans le domaine radio



Atacama Large Millimeter Array =  $(52 \times 12 \text{ m}) + (14 \times 7 \text{ m})$  sur 10 km  
Etat du site en 2017



# Observations dans le domaine radio



Transporteur d'antenne (2017)



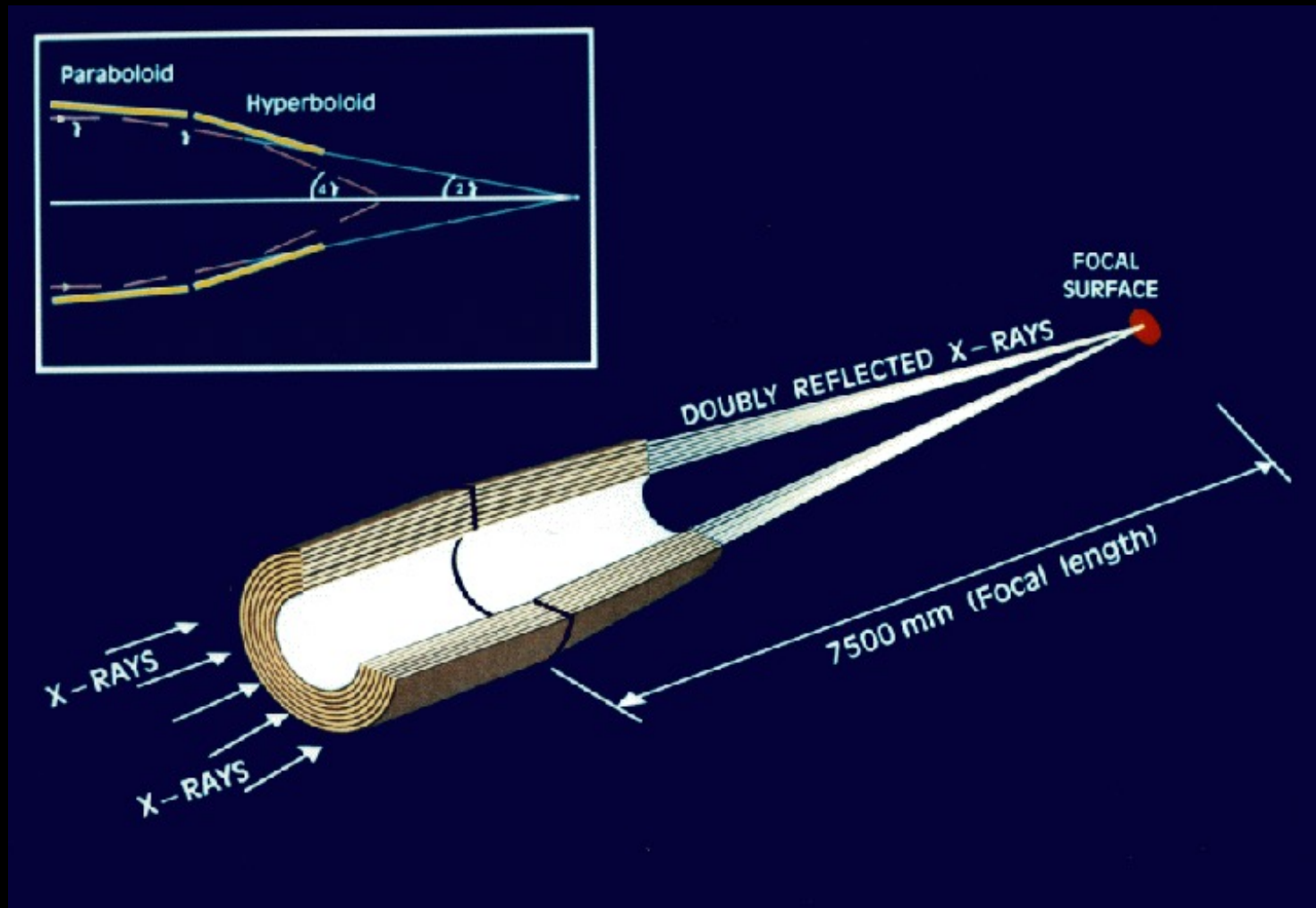
# Observations dans le domaine radio

Dans le domaine radio, on peut mélanger les signaux analogiques, permettant ainsi l'interférométrie à très longue base (VLBI: Very Long Baseline Interferometry)



# Observations dans le domaine X

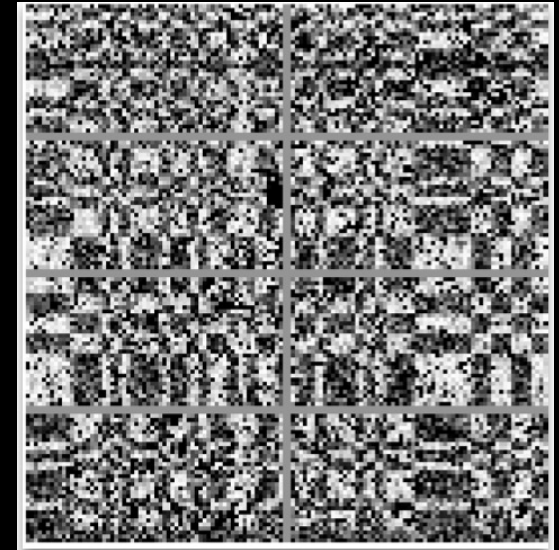
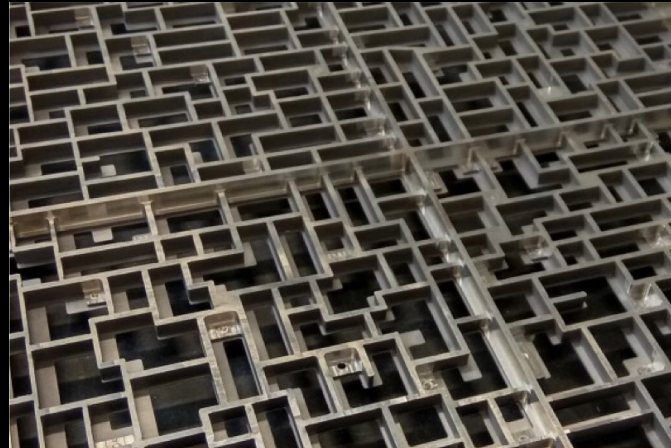
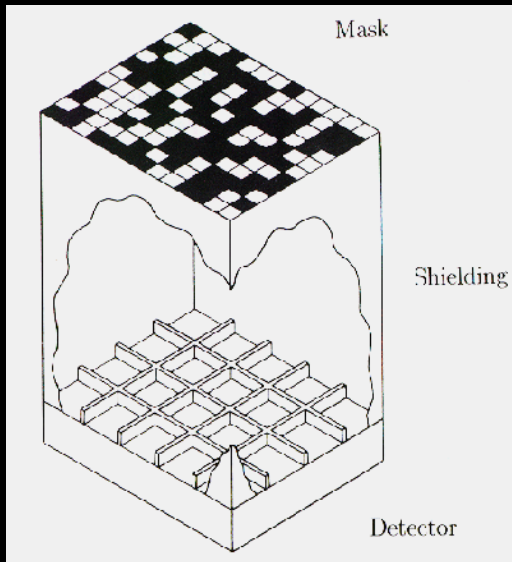
Phénomènes très énergétiques (SN, trous noirs, accrétion)  
Miroir en couches à incidence rasante





# Observations dans le domaine Gamma

Images reconstruites à partir des ombres portées sur un réseau de détecteurs Cherenkov.



Observation de la  
nébuleuse du crabe avec  
« Integral »



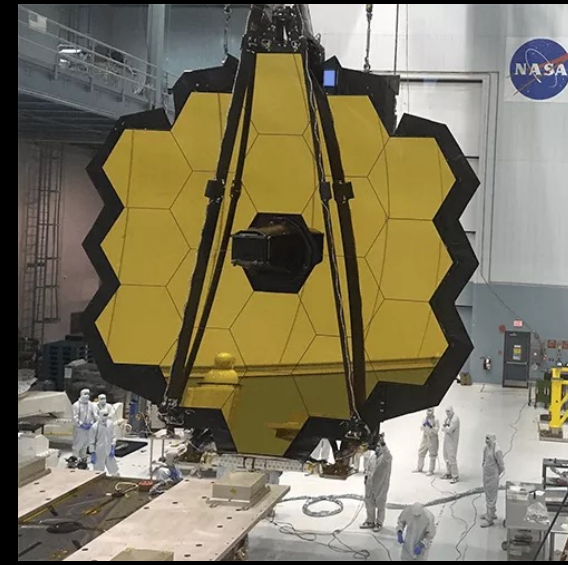
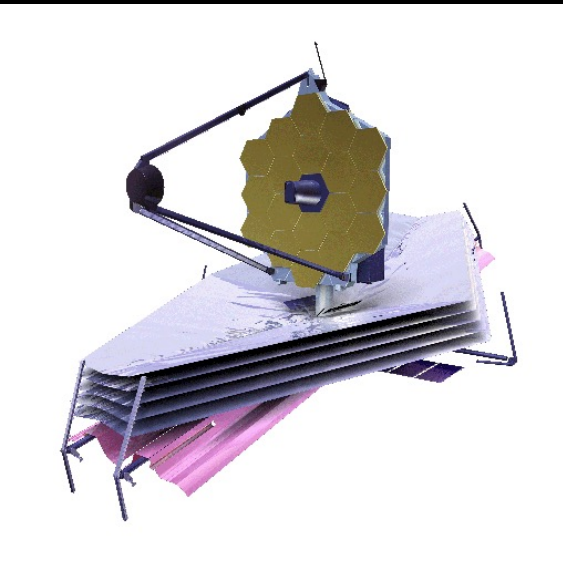
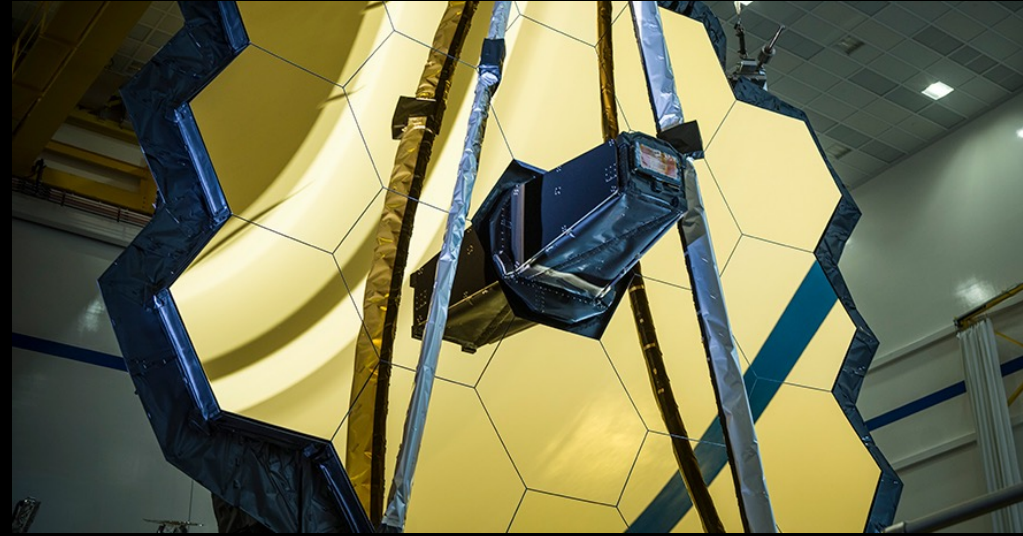
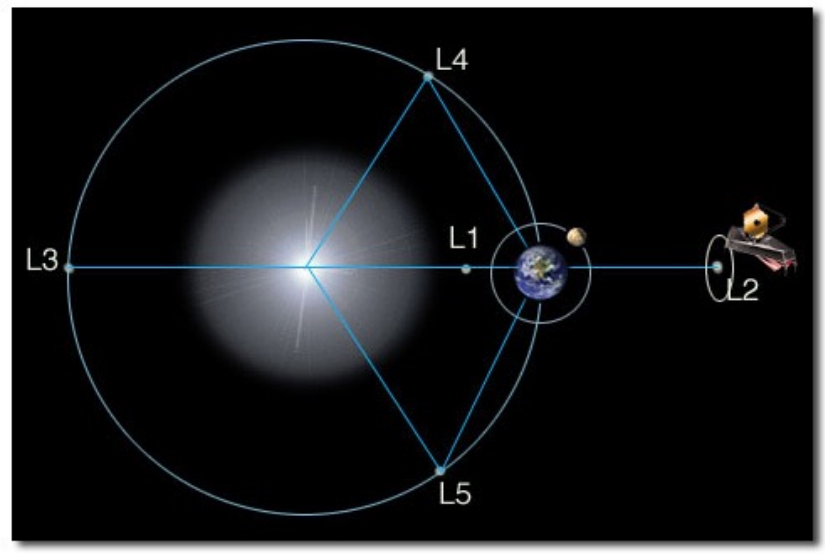
# Observatoires Spatiaux

Télescope spatial Hubble de 2,4 m de diamètre UV, optique, IR





# James Webb Space Telescope (NASA-ESA) de 6,5 m de diamètre en orbite au point de Lagrange L2. Camera IR uniquement.





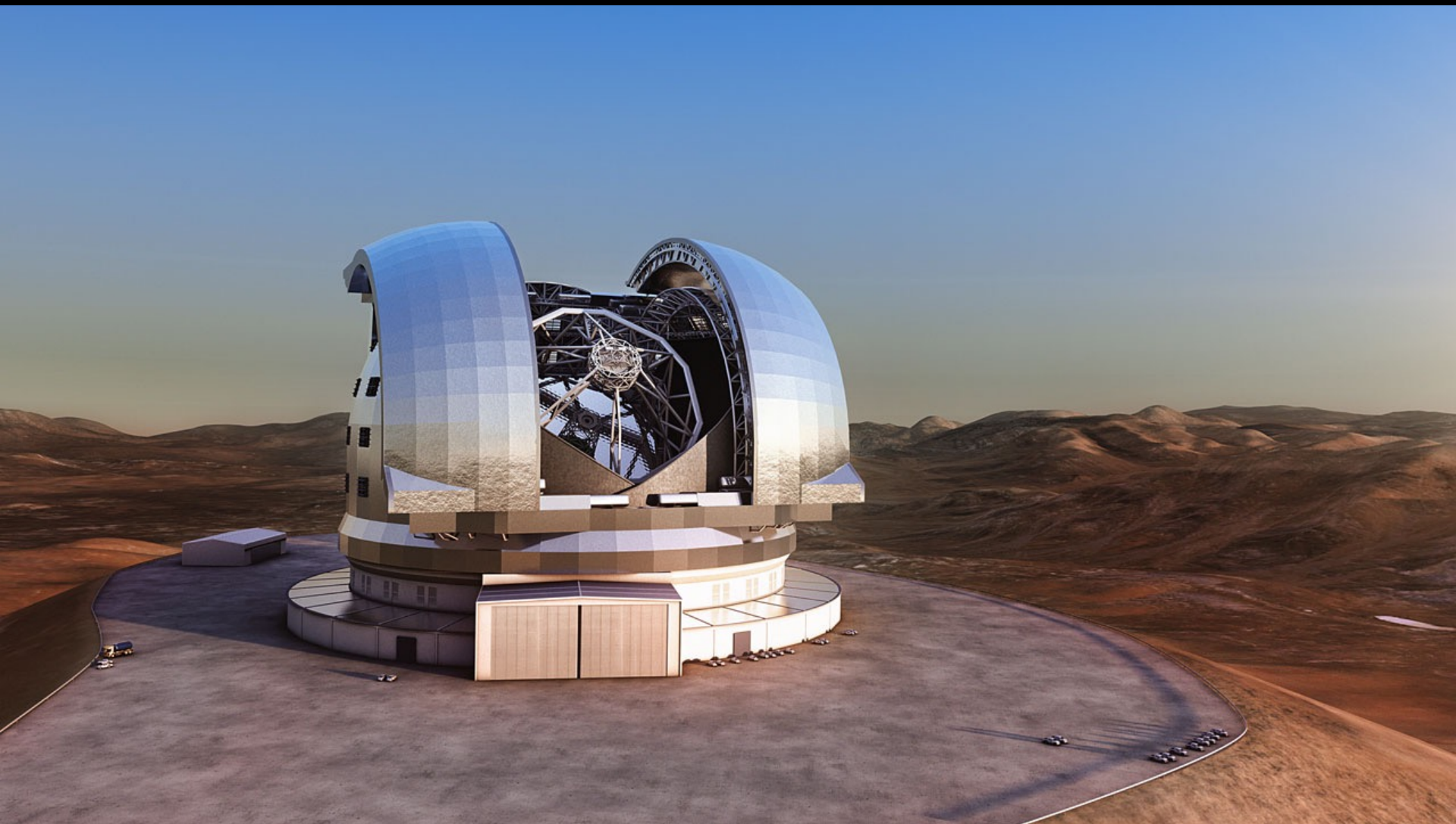
# Observatoires Spatiaux





# European Extremely Large Telescope (E-ELT)

Miroirs segmentés de 39.5 m de diamètre + optique adaptative



# European Extremely Large Telescope (E-ELT) Miroirs segmentés de 39.5 m de diamètre + optique adaptative

120 m

100 m

80 m

60 m

40 m

20 m





# European Extremely Large Telescope (E-ELT) Miroirs segmentés de 39.5 m de diamètre + optique adaptative





# Site de l'E-ELT en 2017

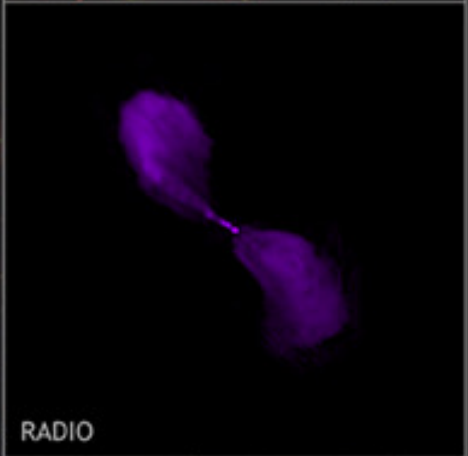




# Importance d'observations multi longueur d'ondes



X-RAY



RADIO



OPTICAL

## Galaxie Centaurus A

# Importance d'observations multi longueur d'ondes

Nébuleuse « du Crabe »  
Explosion de supernova  
(image optique VLT)



Image infrarouge:  
Poussières chauffées  
(satellite Spitzer)



# Importance d'observations multi longueur d'ondes



Crab Nebula Supernova Remnant Spitzer Space Telescope • IRAC • MIPS  
NASA / JPL-Caltech / R. Gehrz (University of Minnesota) sig05-004

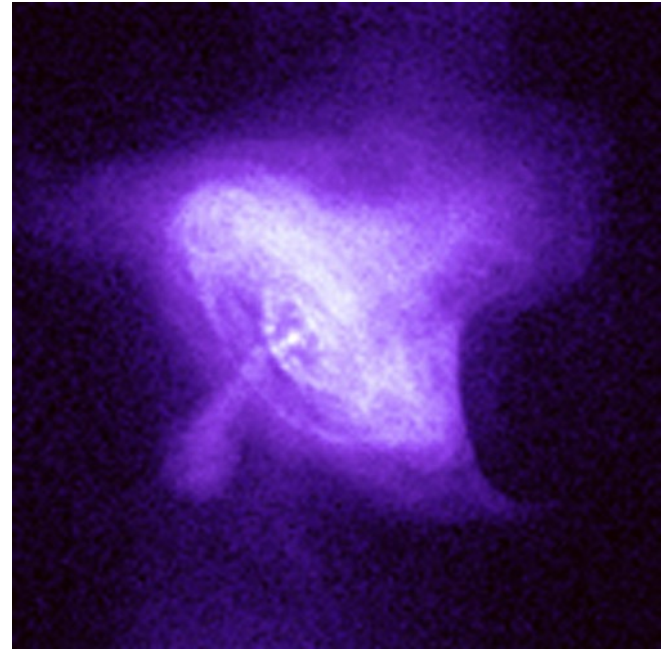


Image en rayons X  
Gaz chauffé

# Importance d'observations multi longueur d'ondes

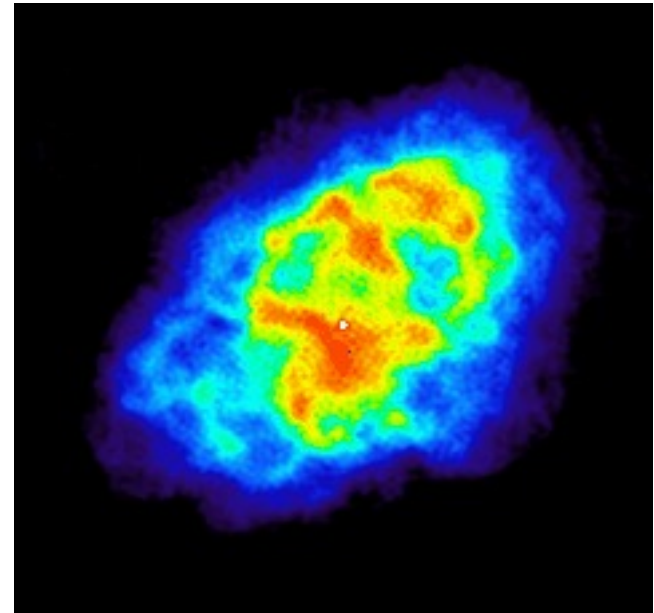
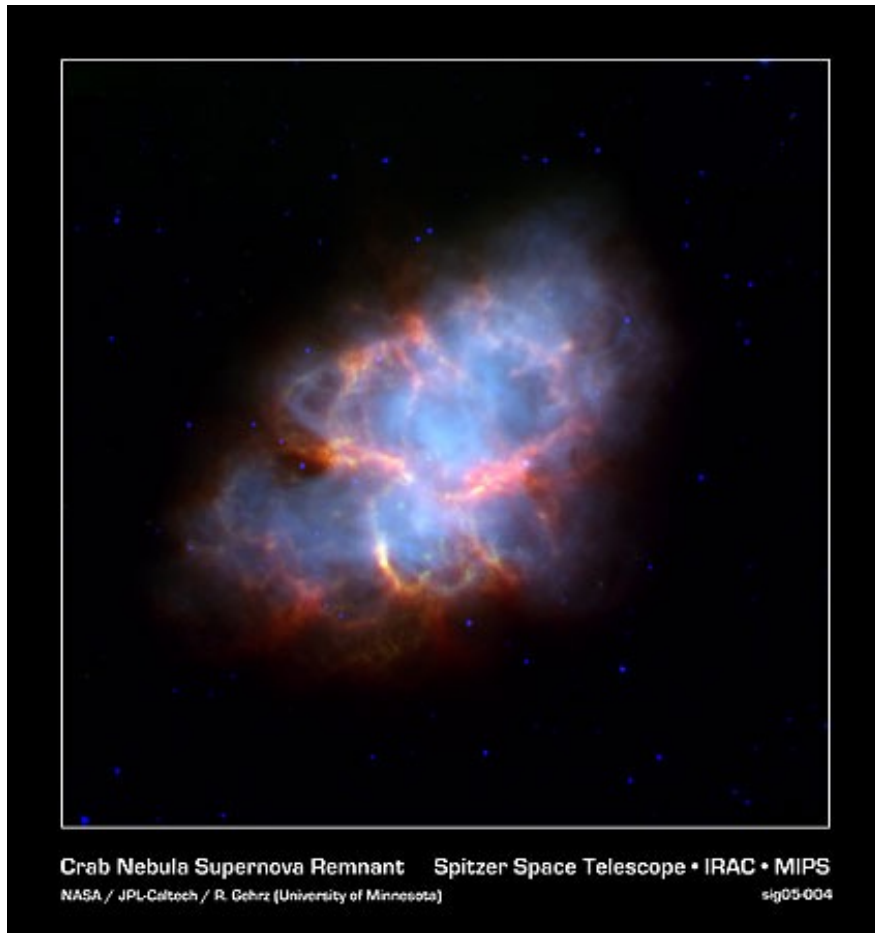


Image « radio » :  
rayonnement synchrotron