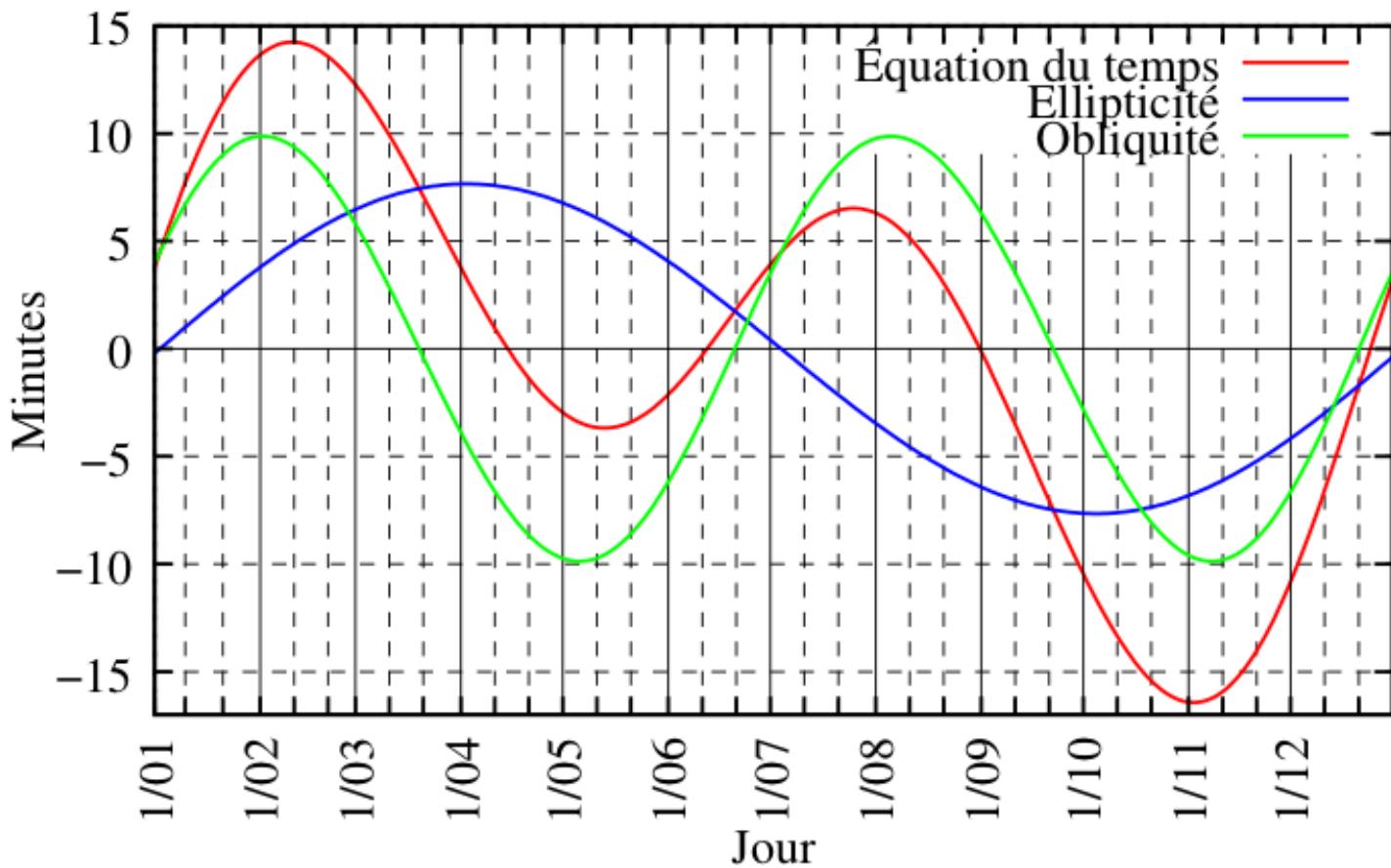


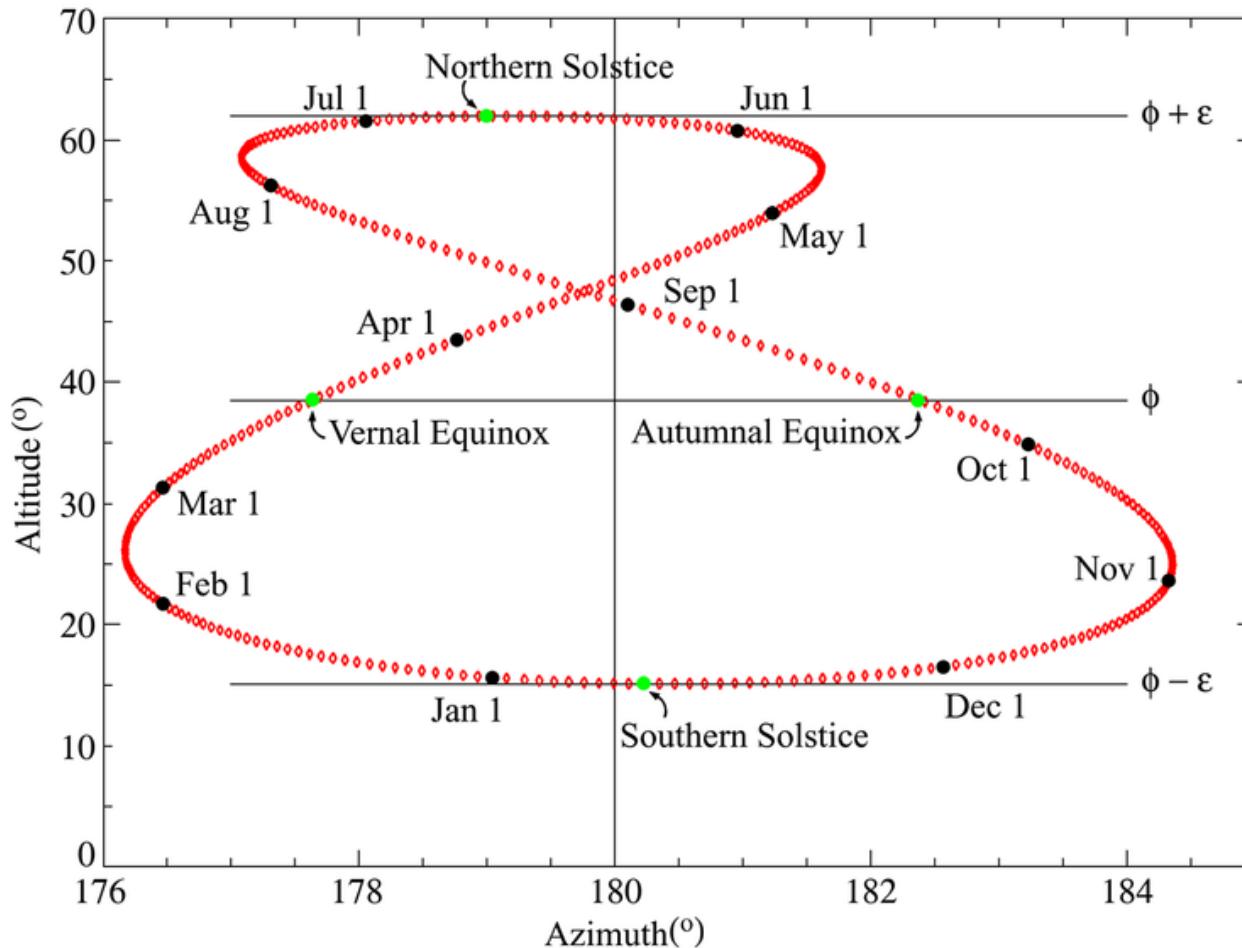
# Equation du temps

Soleil en retard – Soleil en avance



Difference entre le temps solaire moyen et le temps solaire vrai.

# Analemme



Position du Soleil lorsqu' il est 12h pour le Soleil moyen



# **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

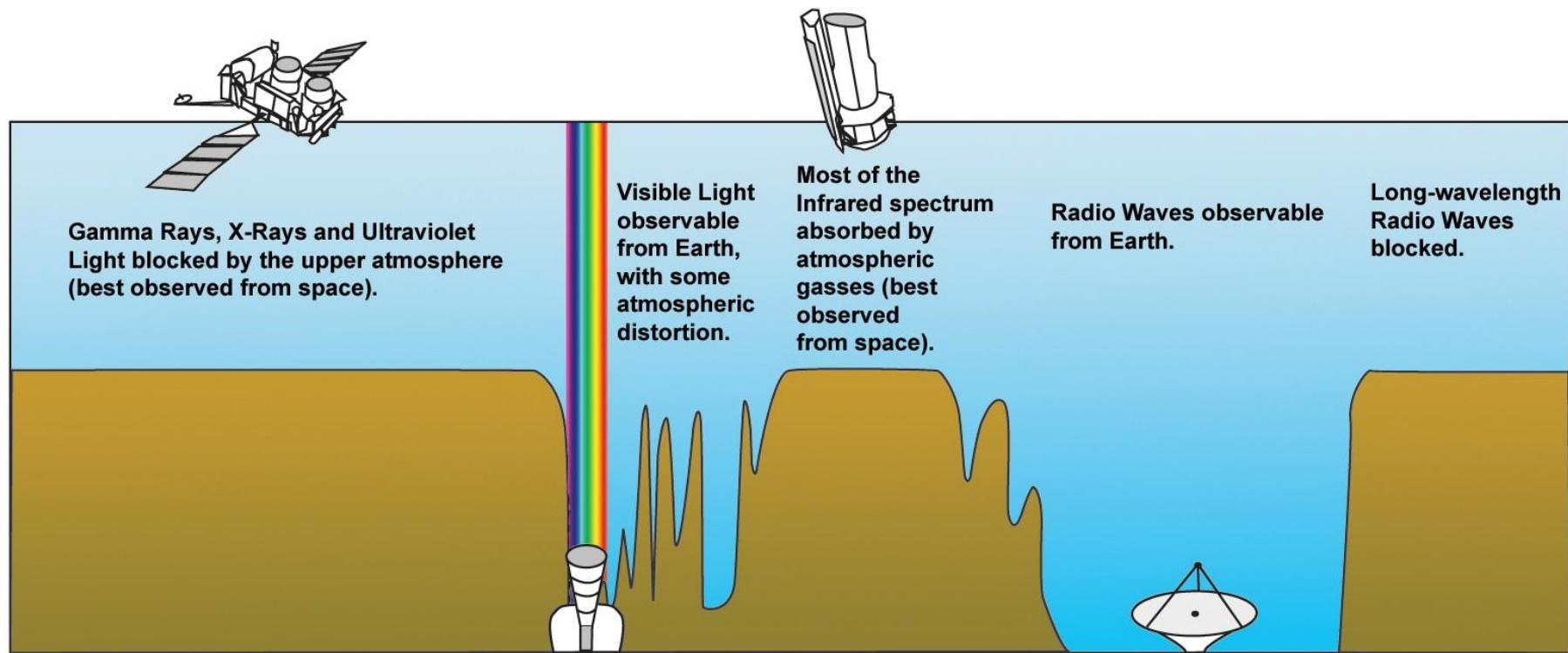
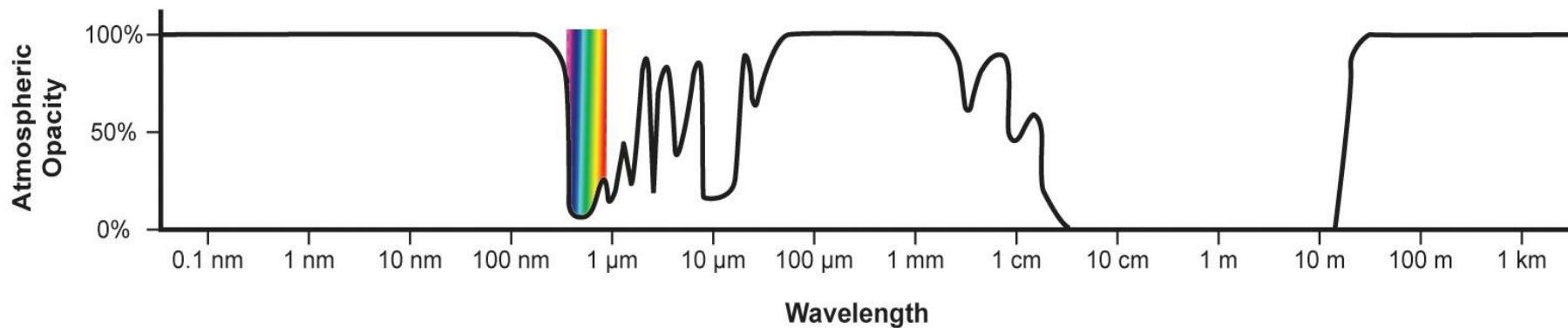
## Effets néfastes de l'atmosphère sur les observations:

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

## Effets additionnels:

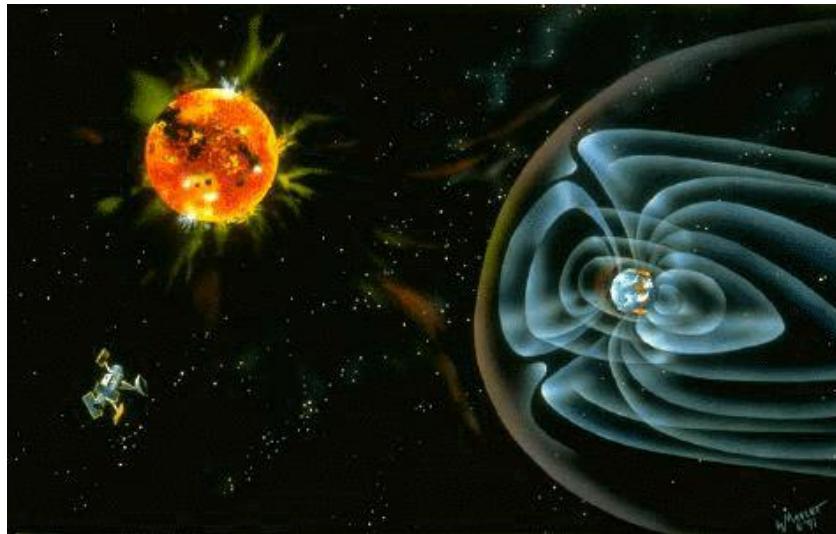
- Pollution lumineuse due à l'Homme
- Pollution lumineuse due à la Lune
- Lumière zodiacale
- Aurores polaires

# 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.

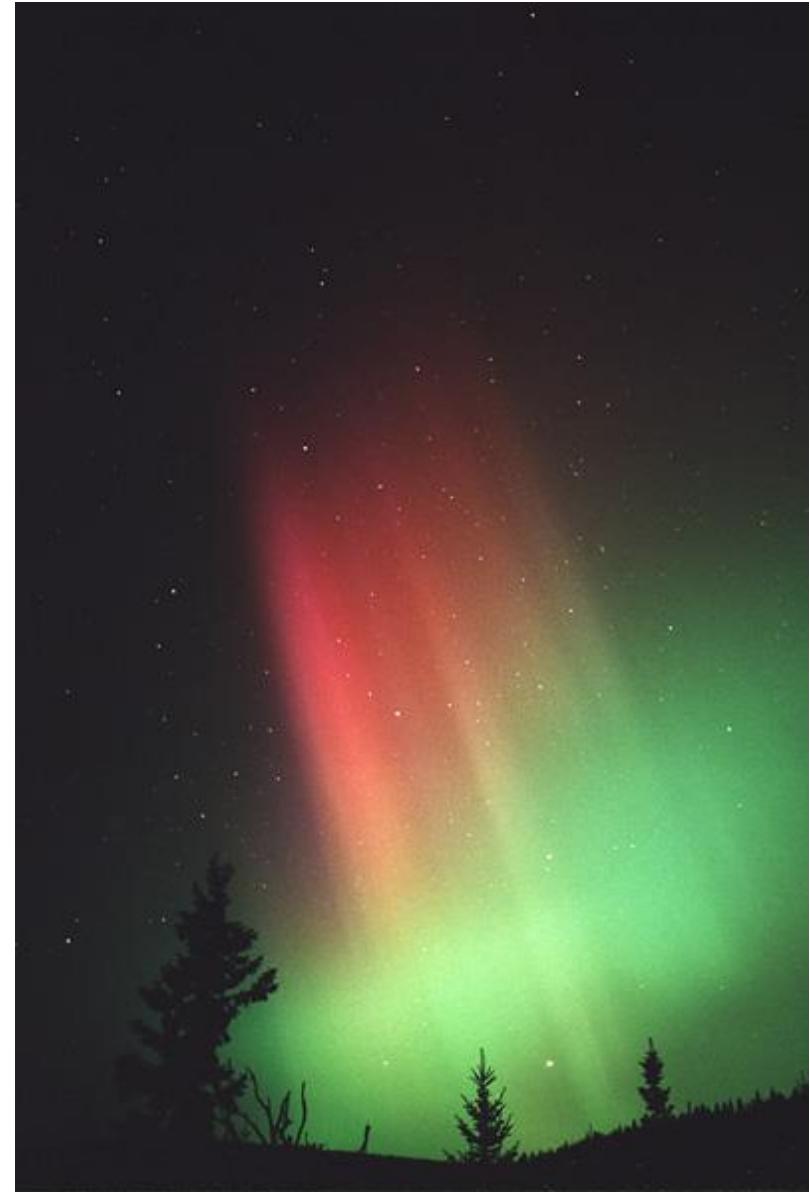


Choc entre les particules solaires et les atomes et molécules atmosphériques -> ionisation, recombinaison et fluorescence

# L'atmosphère terrestre

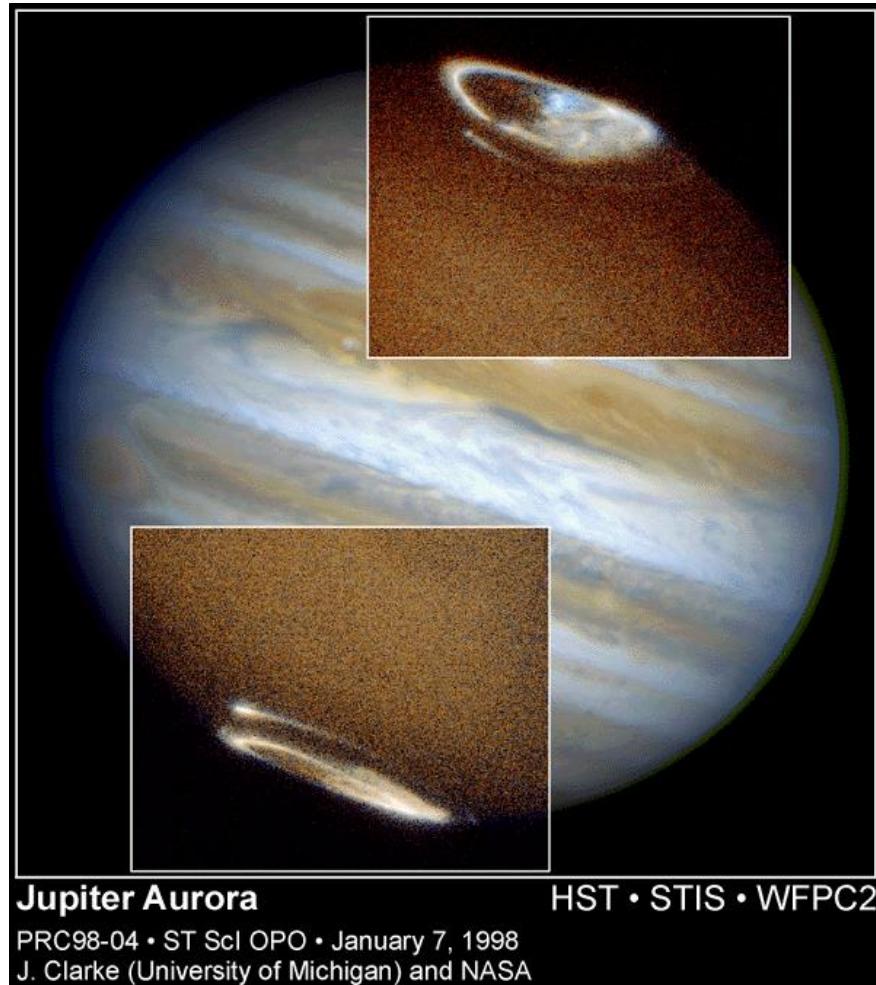


# L'atmosphère terrestre



# L'atmosphère terrestre

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



# L'atmosphère terrestre



# L'atmosphère terrestre

## Observatoire du Mont Wilson en Californie



*Le ciel nocturne vu depuis l'espace*



# Poussières interplanétaires

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

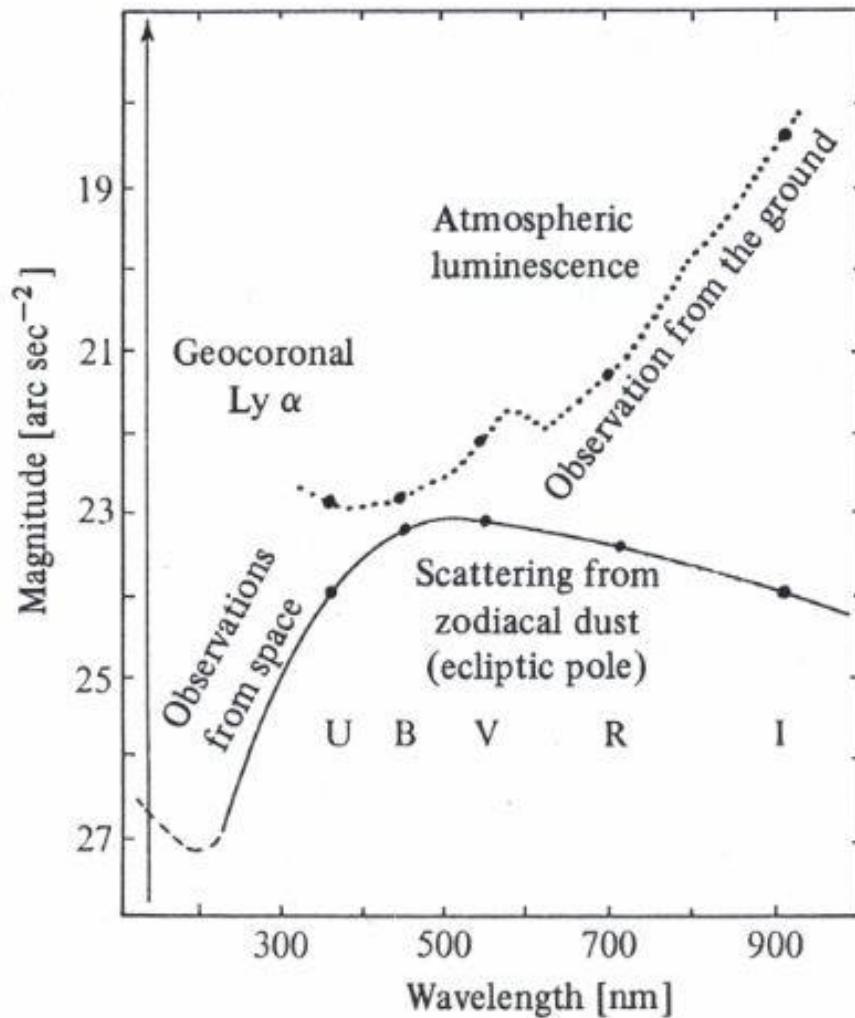


# Poussières interplanétaires



# L'atmosphère terrestre: bilan global

## Brillance de surface du ciel nocturne



# Phosphorescence atmosphérique (airglow)

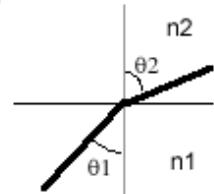


# Réfraction atmosphérique

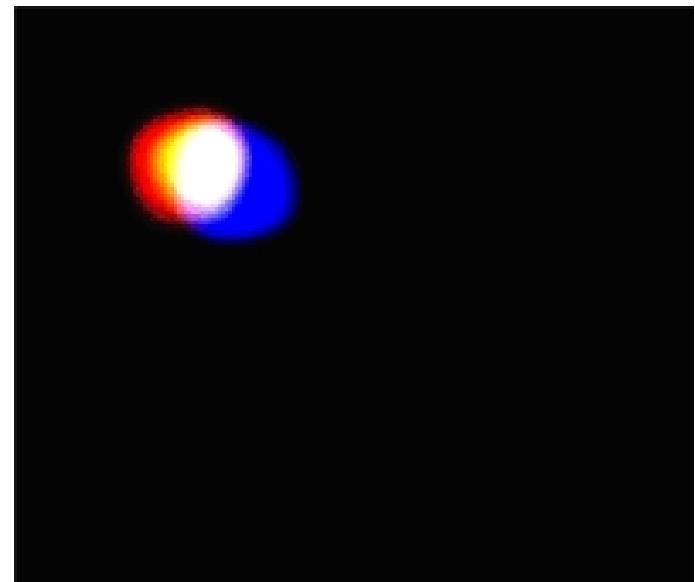
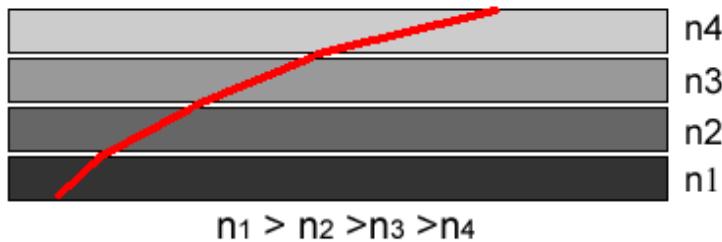
L'atmosphère agit comme un prisme

- 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)

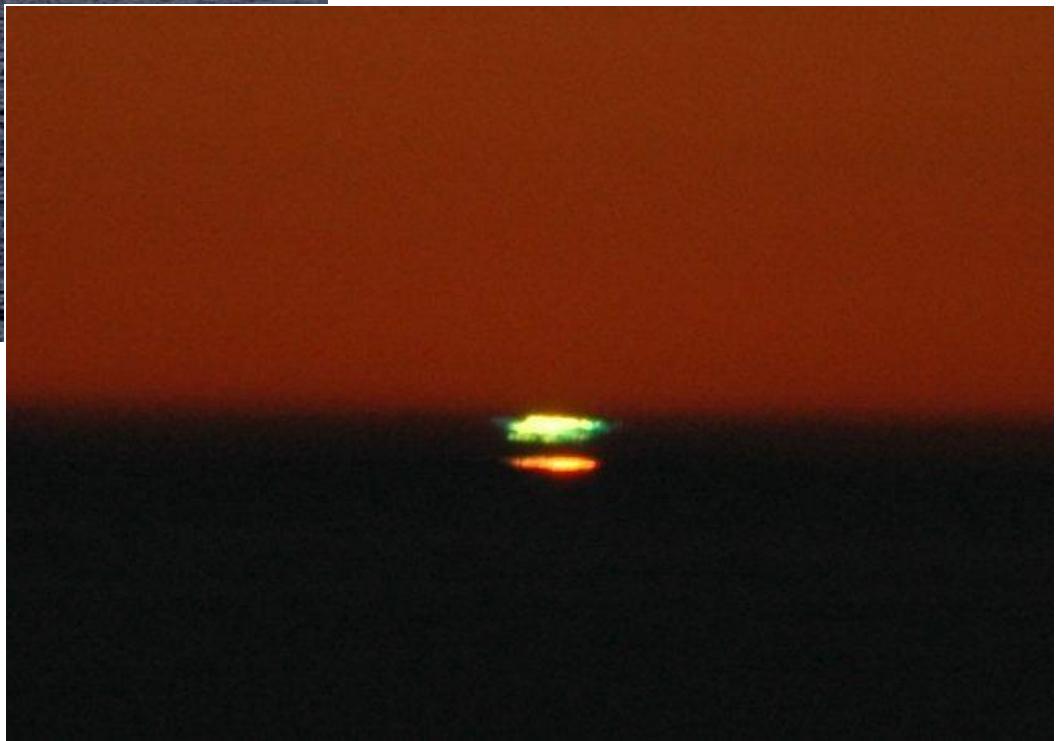
Snell's Law



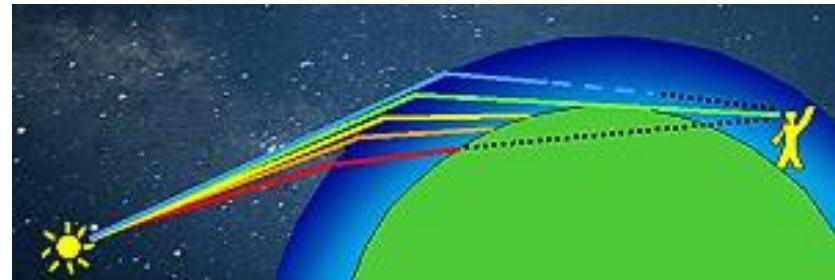
$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



# Exemple de réfraction atmosphérique: le « flash vert »



# Exemple de réfraction atmosphérique: le « flash vert »



# Exemple de réfraction atmosphérique: le « flash vert »

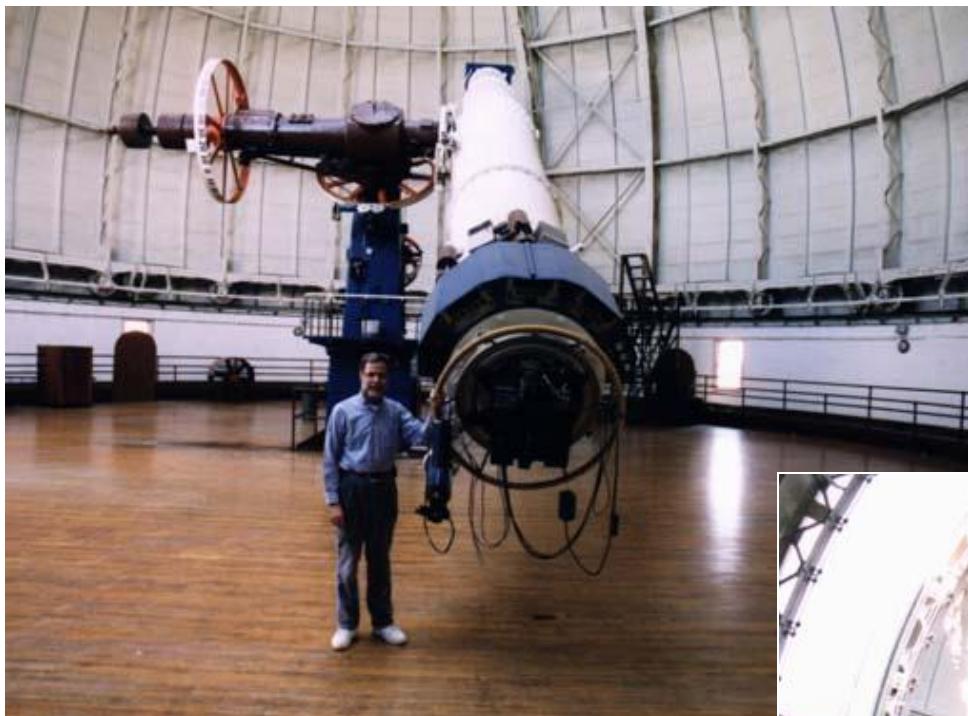


# Lunettes astronomiques

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 grandssements

# 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.

Add lens

Add lens

Only blue and red light are shown, for simplicity.

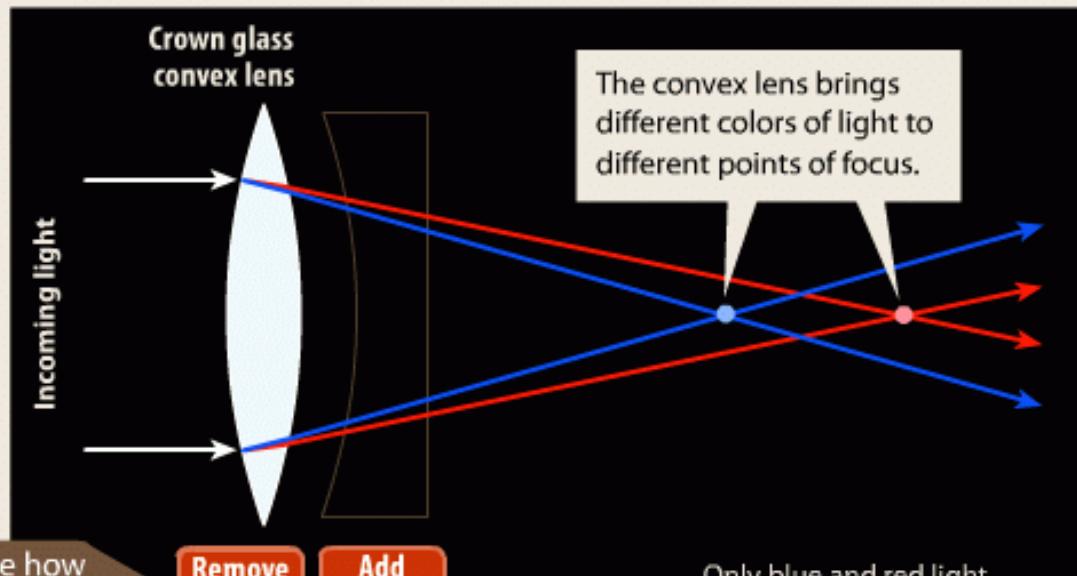
# Lunettes astronomiques

## 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.



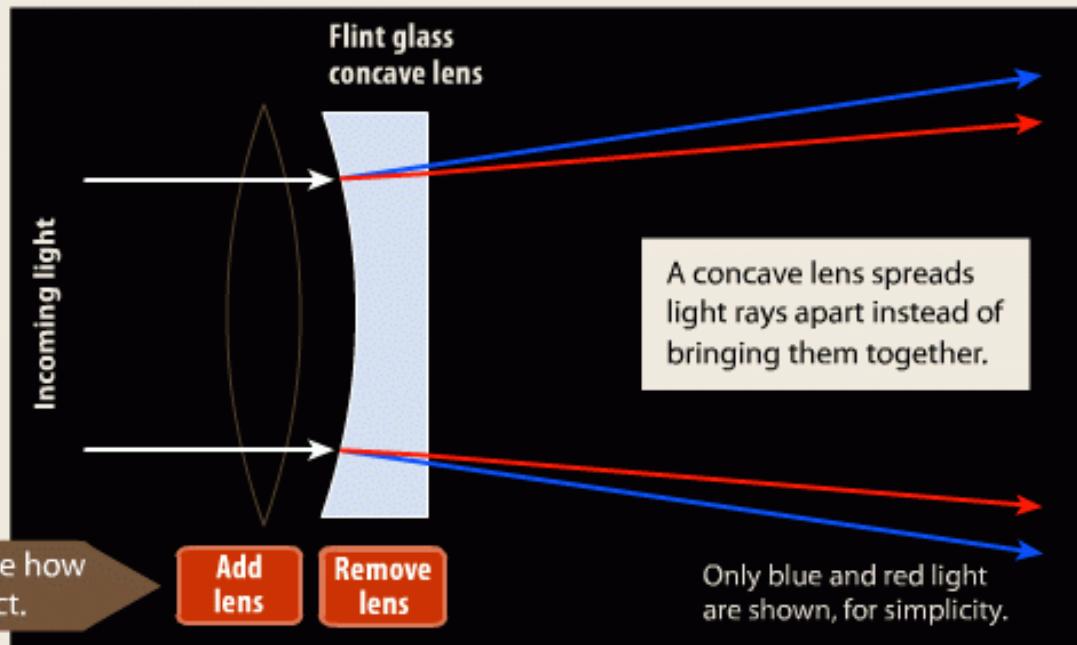
# Lunettes astronomiques

## 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.



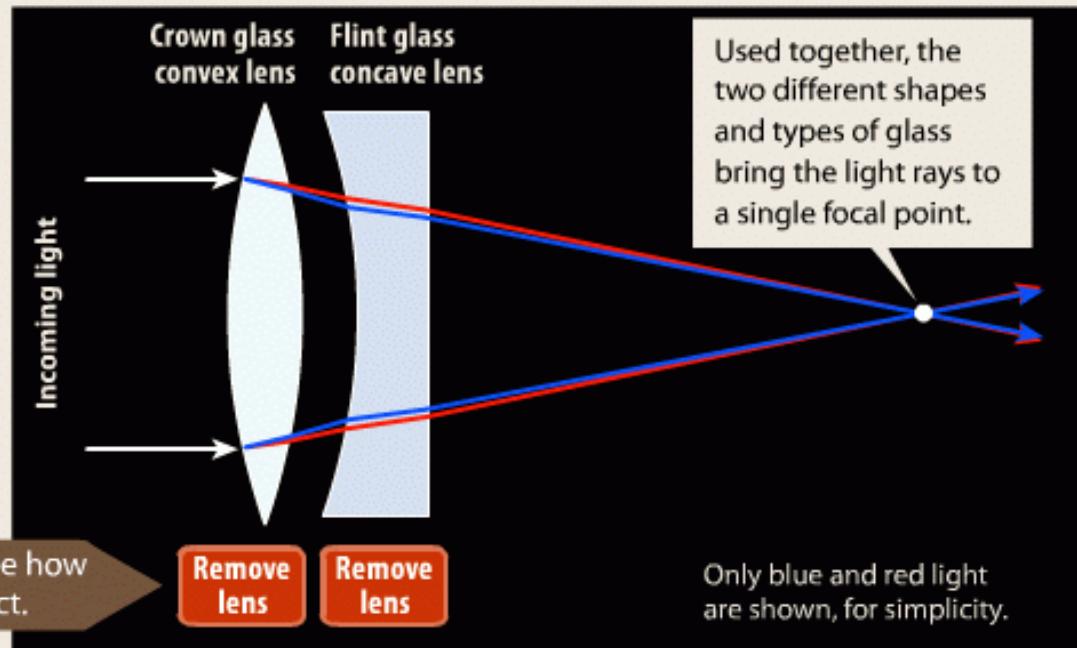
# Lunettes astronomiques

## 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.



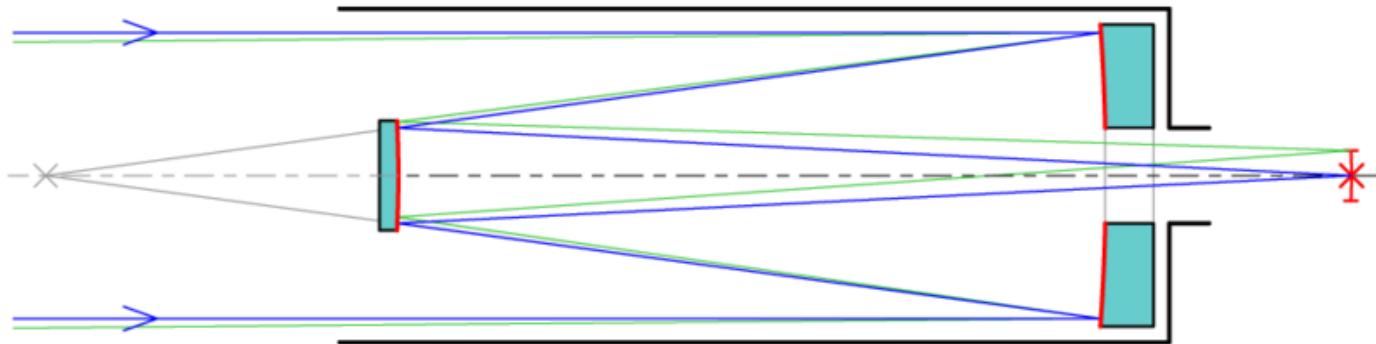
# Télescopes à miroirs

Un miroir forme l'objectif

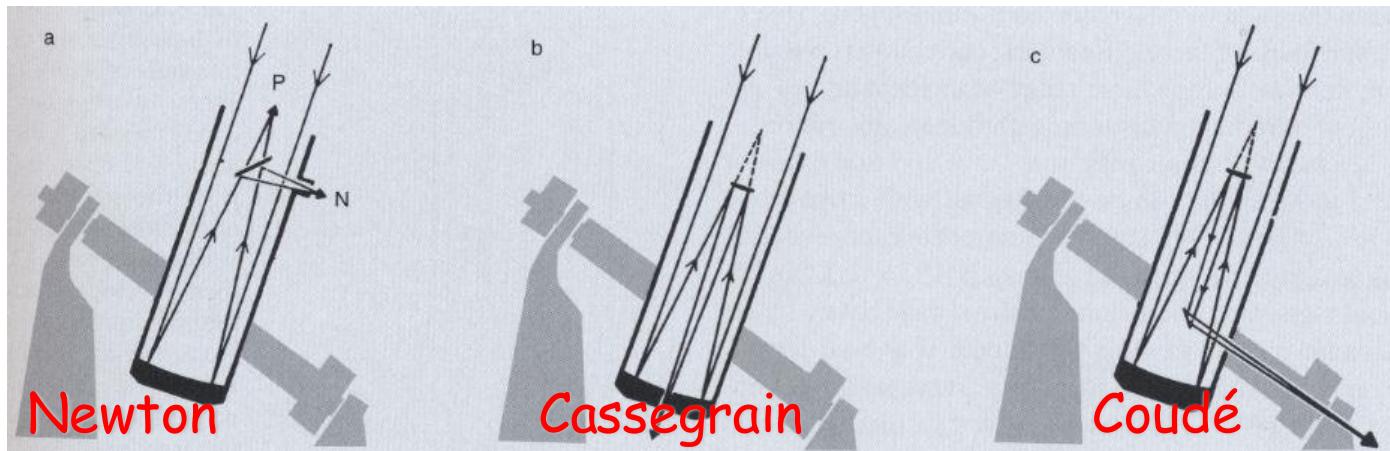
- Le télescope de Newton fonctionne sur ce principe
- Grande taille de miroir
- Plus grande efficacité lumineuse
- Possibilité de miroirs segmentés
- A-chromatique
- Structure plus compacte
- Obstruction centrale due au miroir secondaire

# Télescopes à miroirs

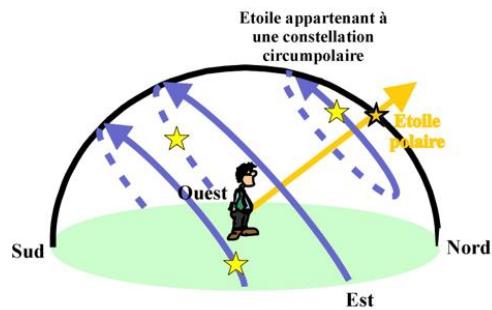
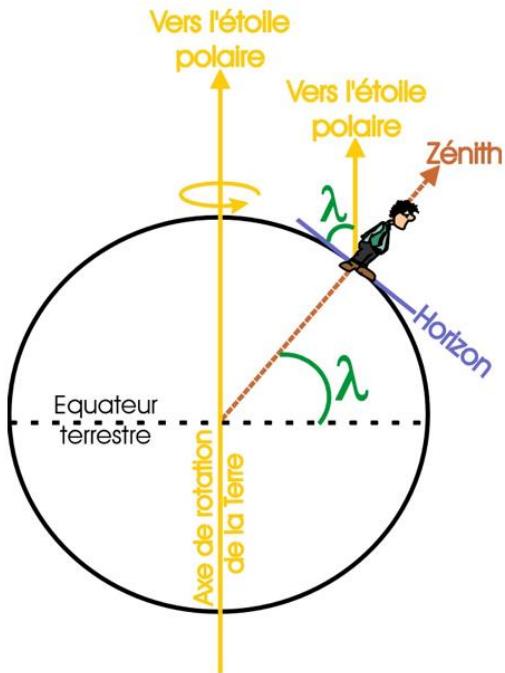
Principes optiques pour des miroirs paraboliques



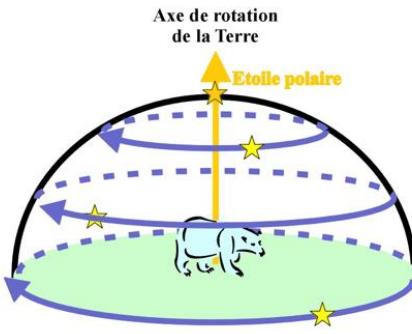
Différents types de montures dites « équatoriales »



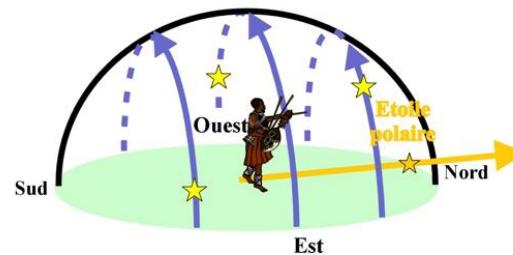
# Perception du ciel selon le lieu d'observation



en Europe

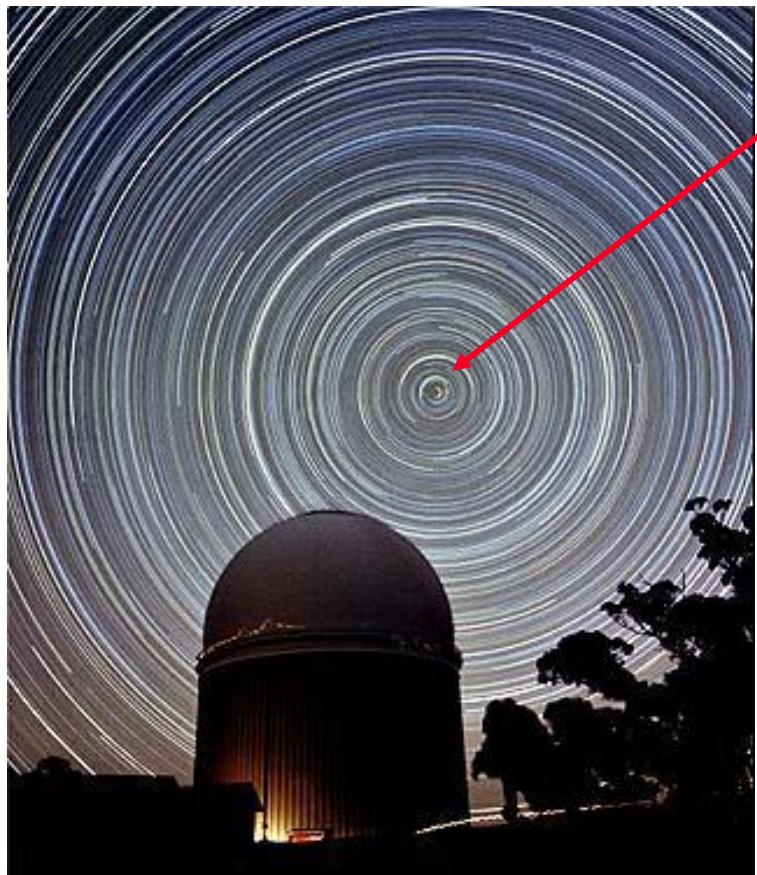


au pôle nord



à l'équateur

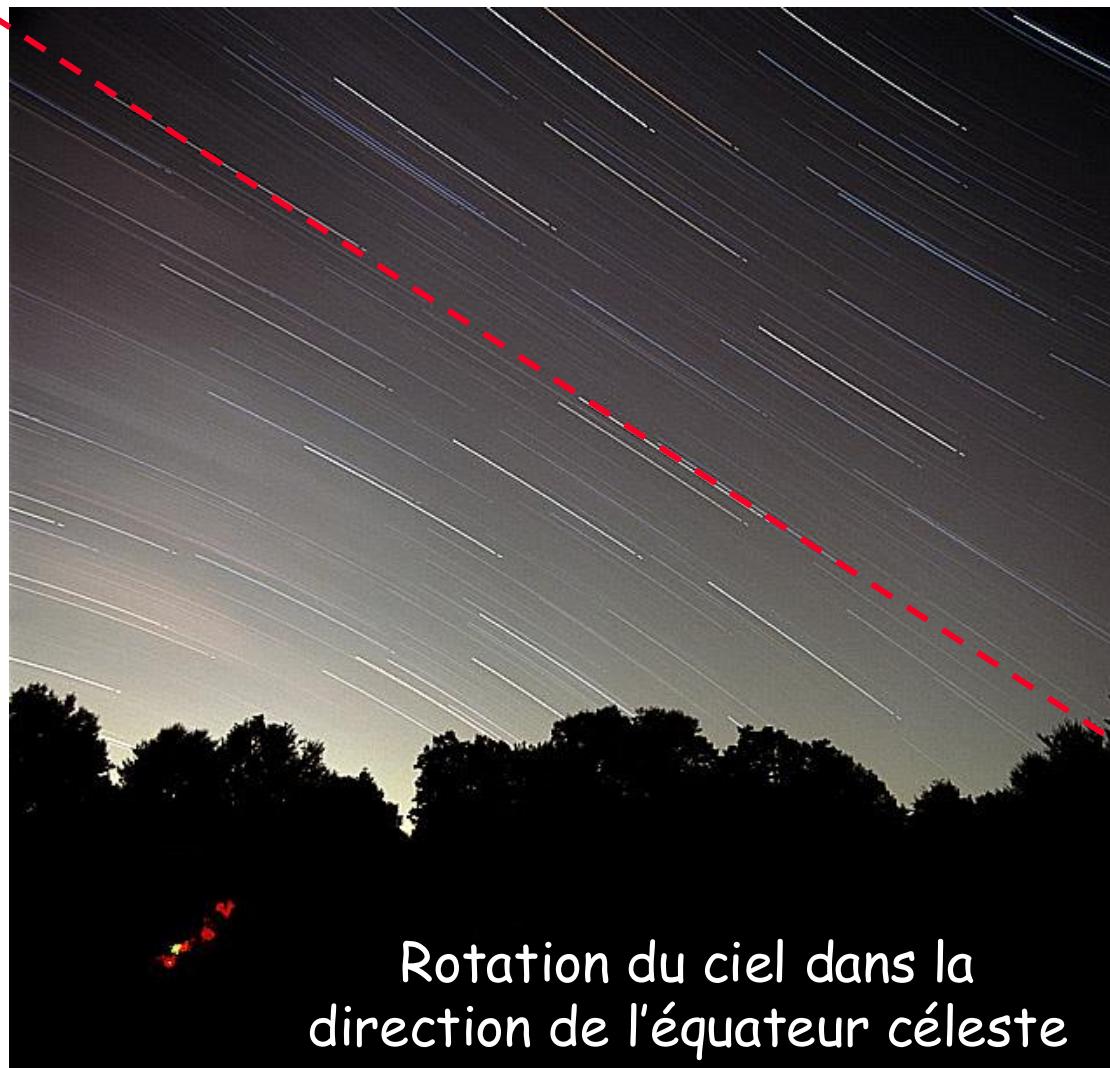
# Nécessité de « suivre » le mouvement apparent du ciel



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



# Télescopes à miroirs

Télescope de 5 m de diamètre du Mont Palomar



# Qualité des observations

## Observations profondes:

- Grand miroir
- Longues poses

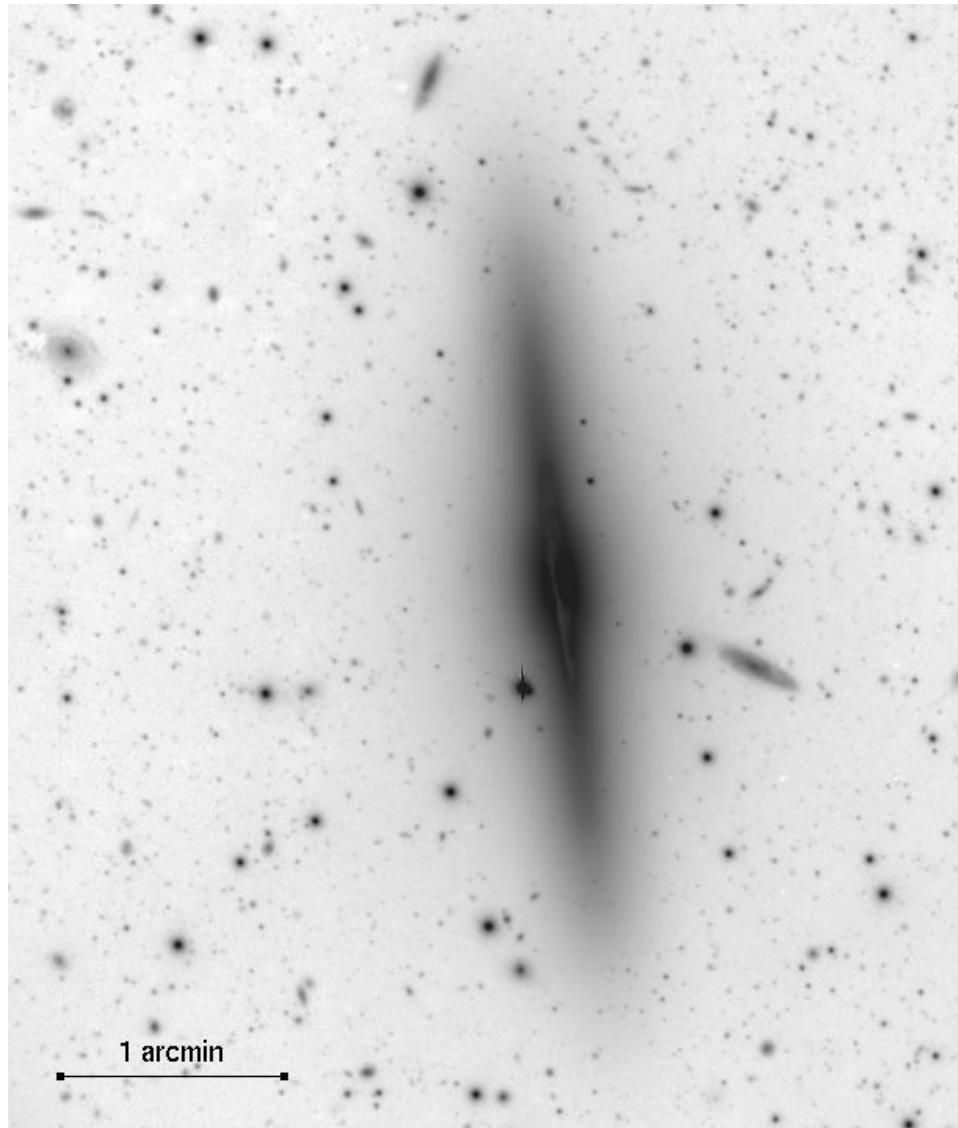
## Images nettes:

- 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.

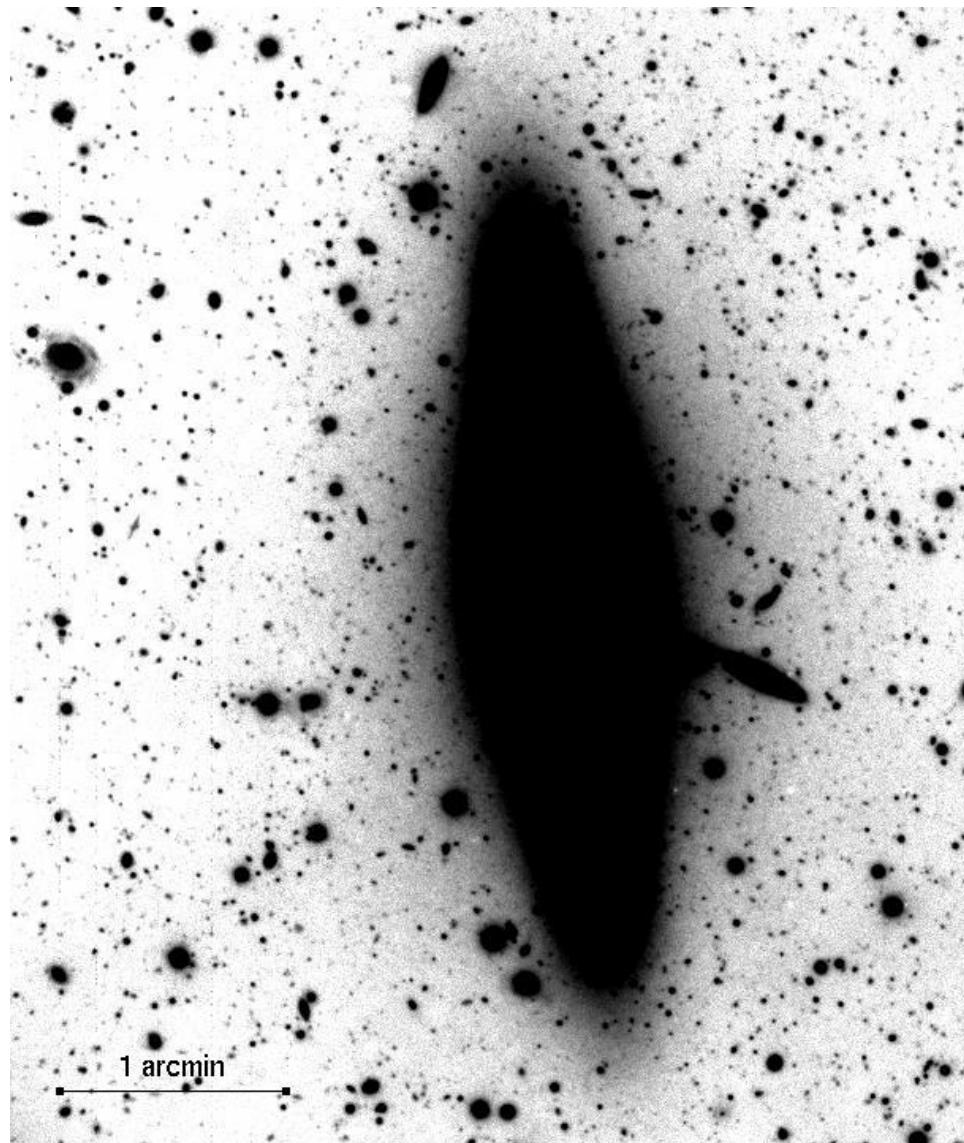
Pose courte (1 min)



## Images « profondes »

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

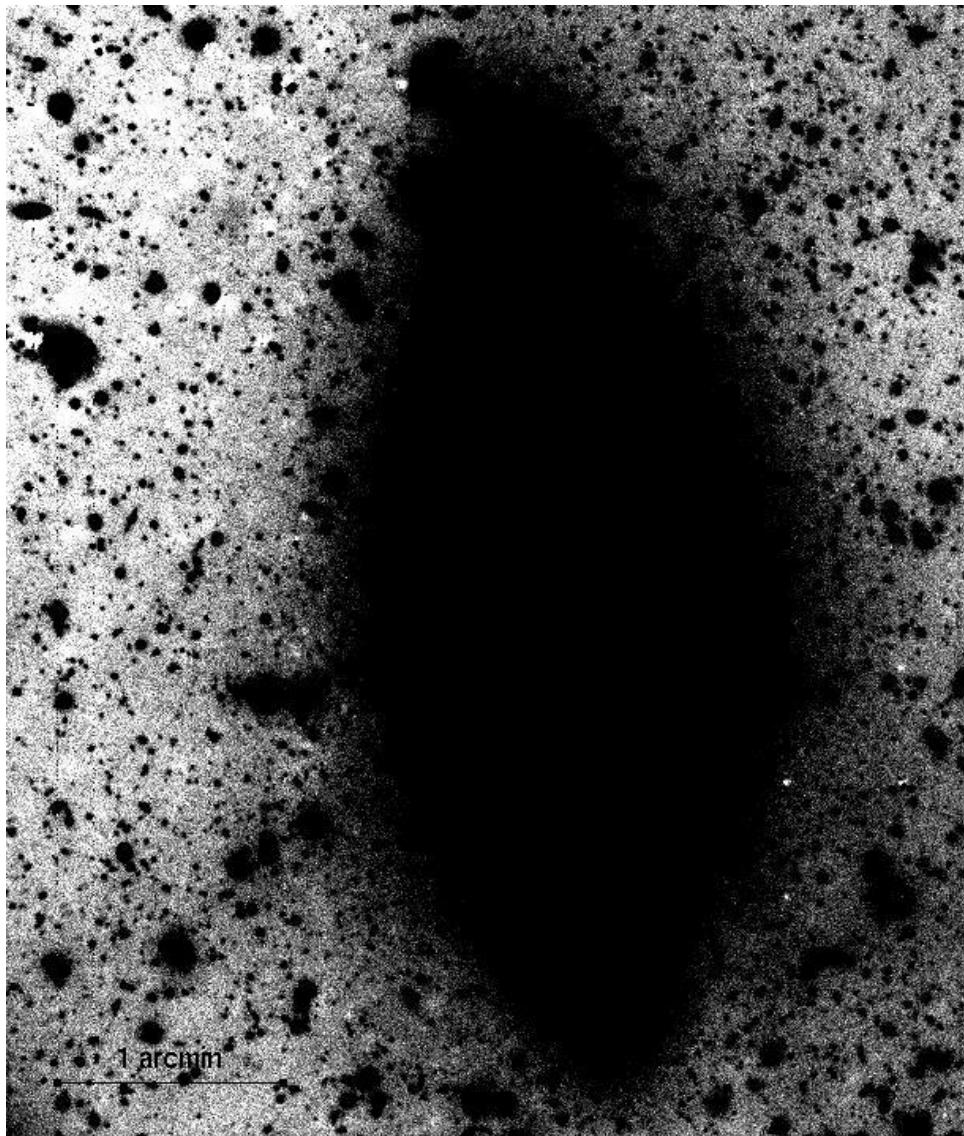
Pose moyenne (30 min)



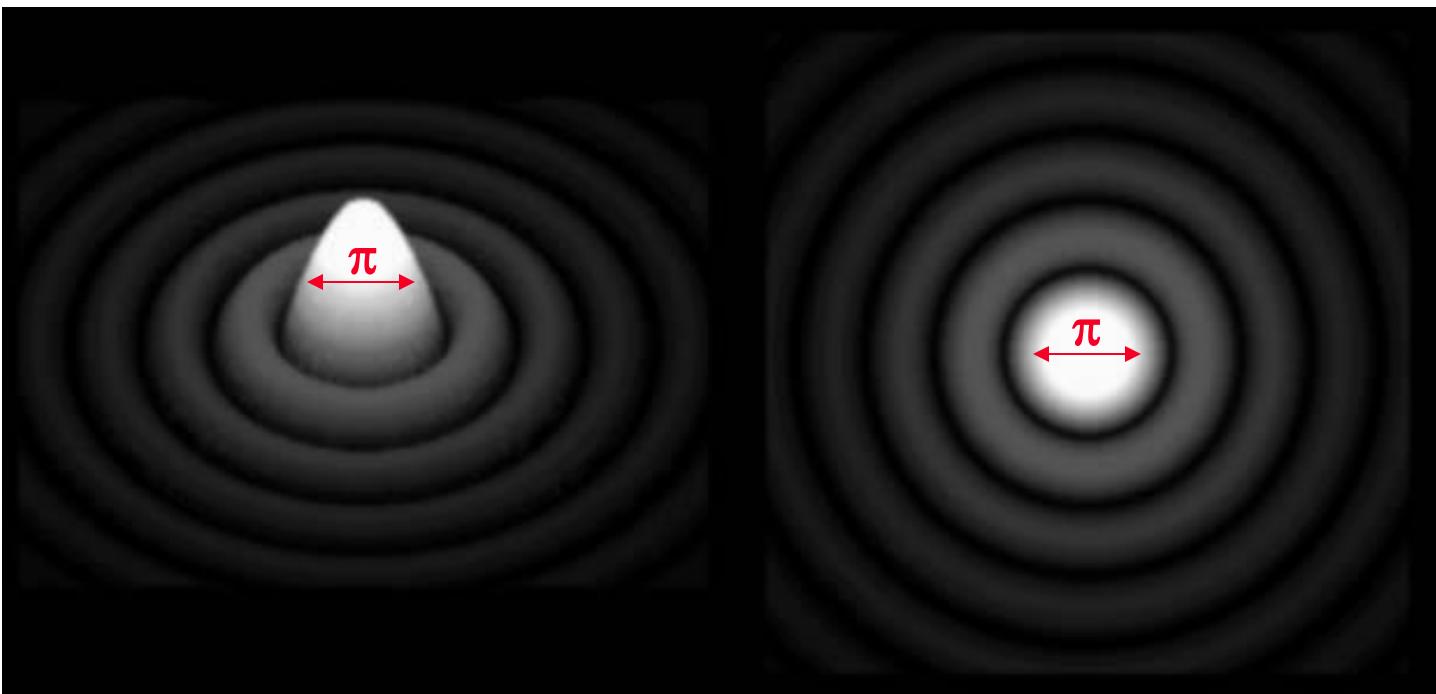
## Images « profondes »

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

$$P = \frac{1,22}{D}$$

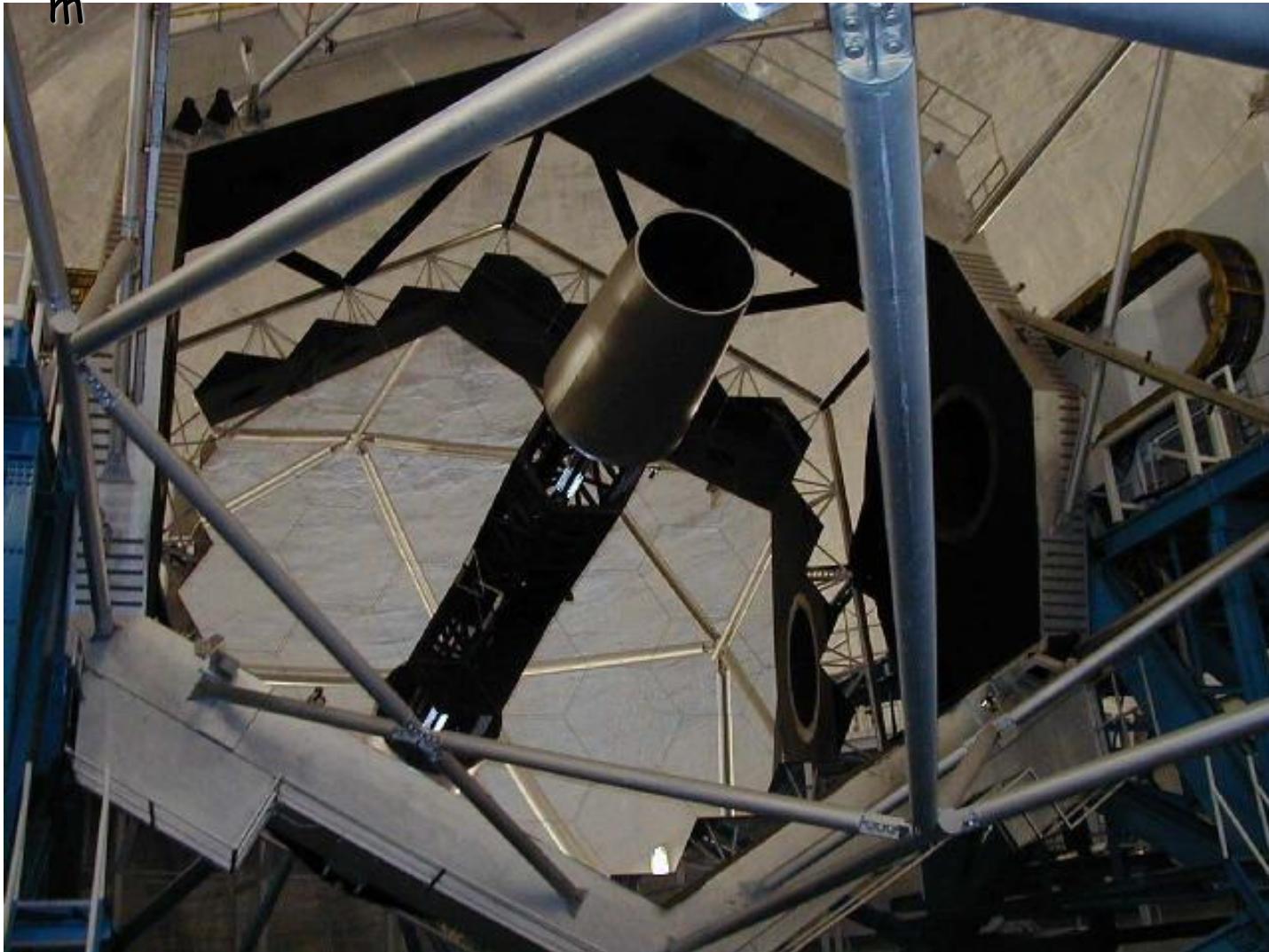
# Télescopes optiques géants

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

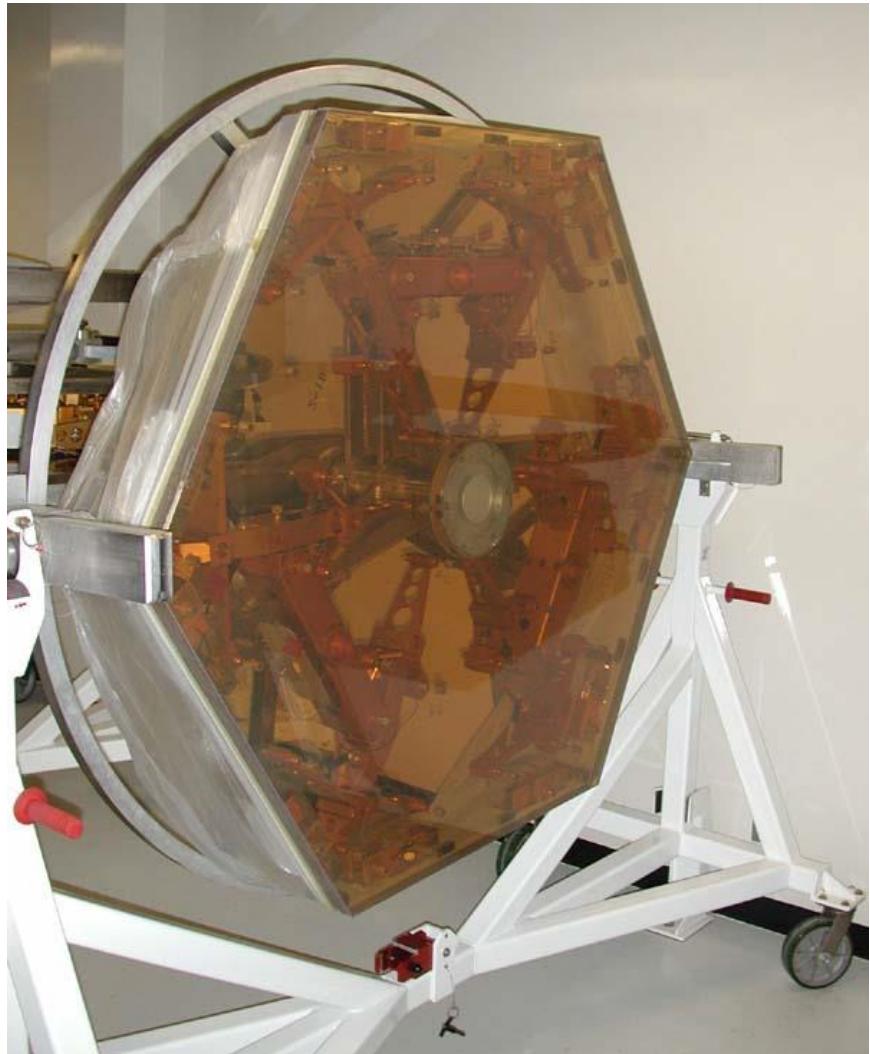
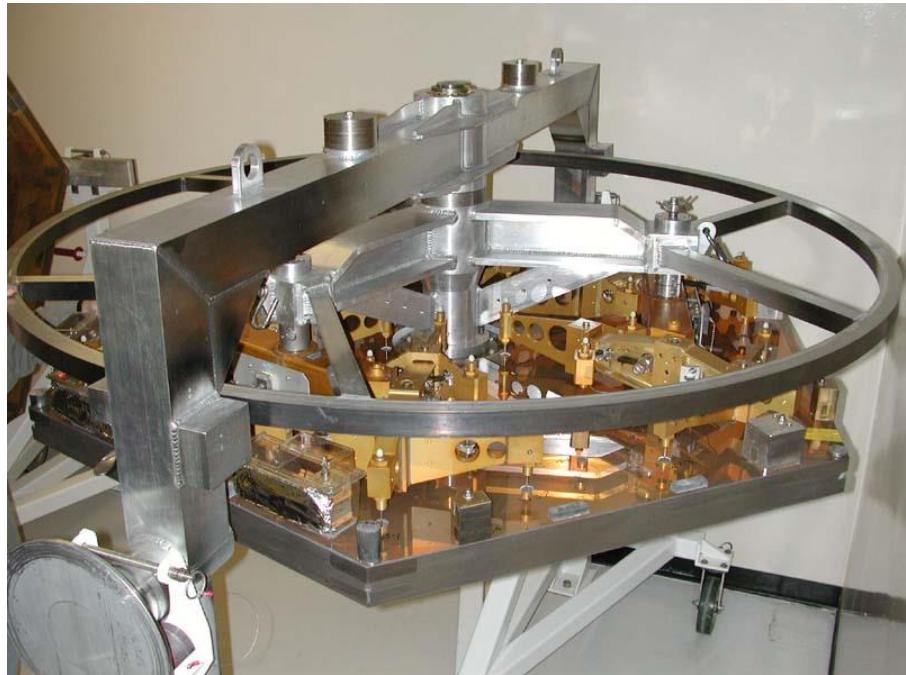


# Télescopes optiques géants

Observatoire Keck: 36 segments hexagonaux de 1.8 m

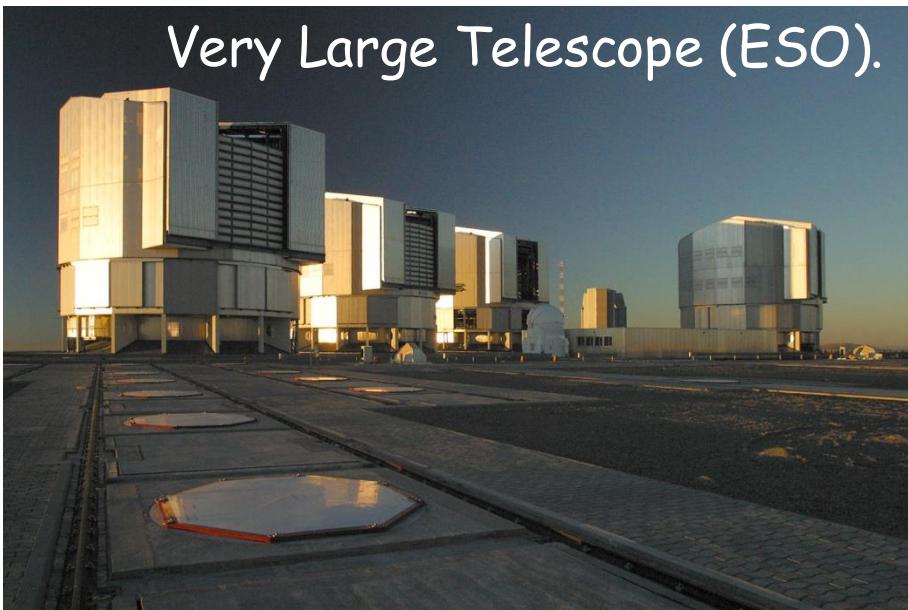


# Télescopes optiques géants



# Télescopes optiques géants

Very Large Telescope (ESO).



Cerro Paranal, Chili:  $4 \times 8\text{ m}$   
(European Southern  
Observatory: ESO).

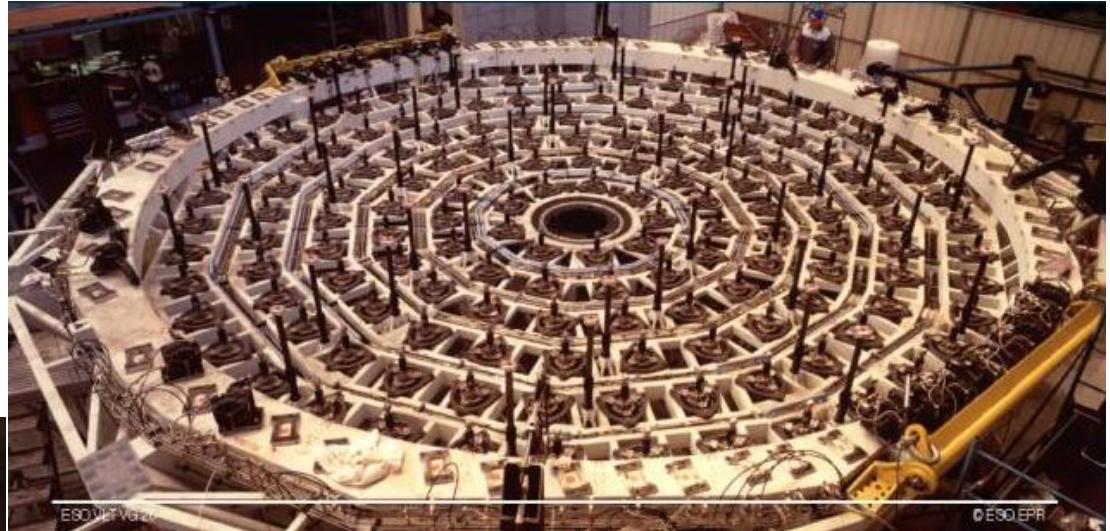


# Télescopes optiques géants

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



Miroir de 8 m après la



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

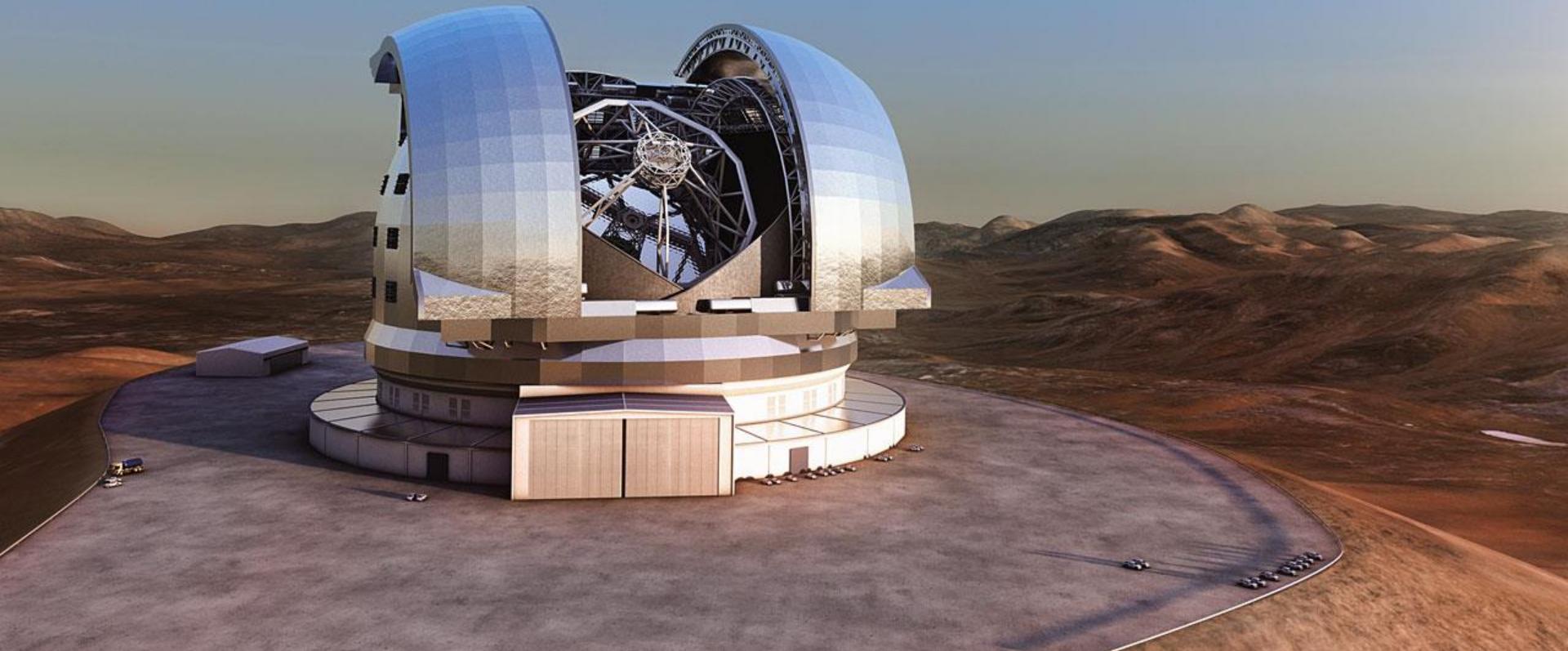
# Télescopes optiques géants

Transport des morceaux de télescopes dans les Andes Chiliennes



# European Extremely Large Telescope (E-ELT)

## Miroirs segmentés de 39.5 m de diamètre + optique adaptative



# Site de l'E-ELT en construction

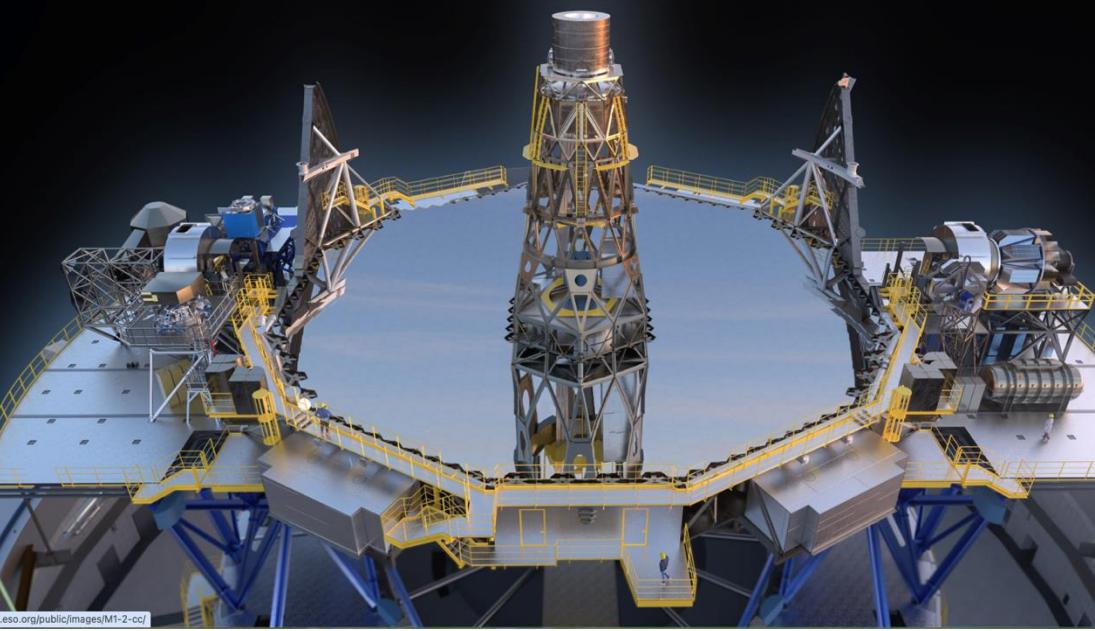


21 Mar 2025 21:00 CET / 17:00 CLST

# THE EXTREMELY LARGE TELESCOPE

The World's Biggest Eye on the Sky  
39.5 m diameter

Latest Available Image



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

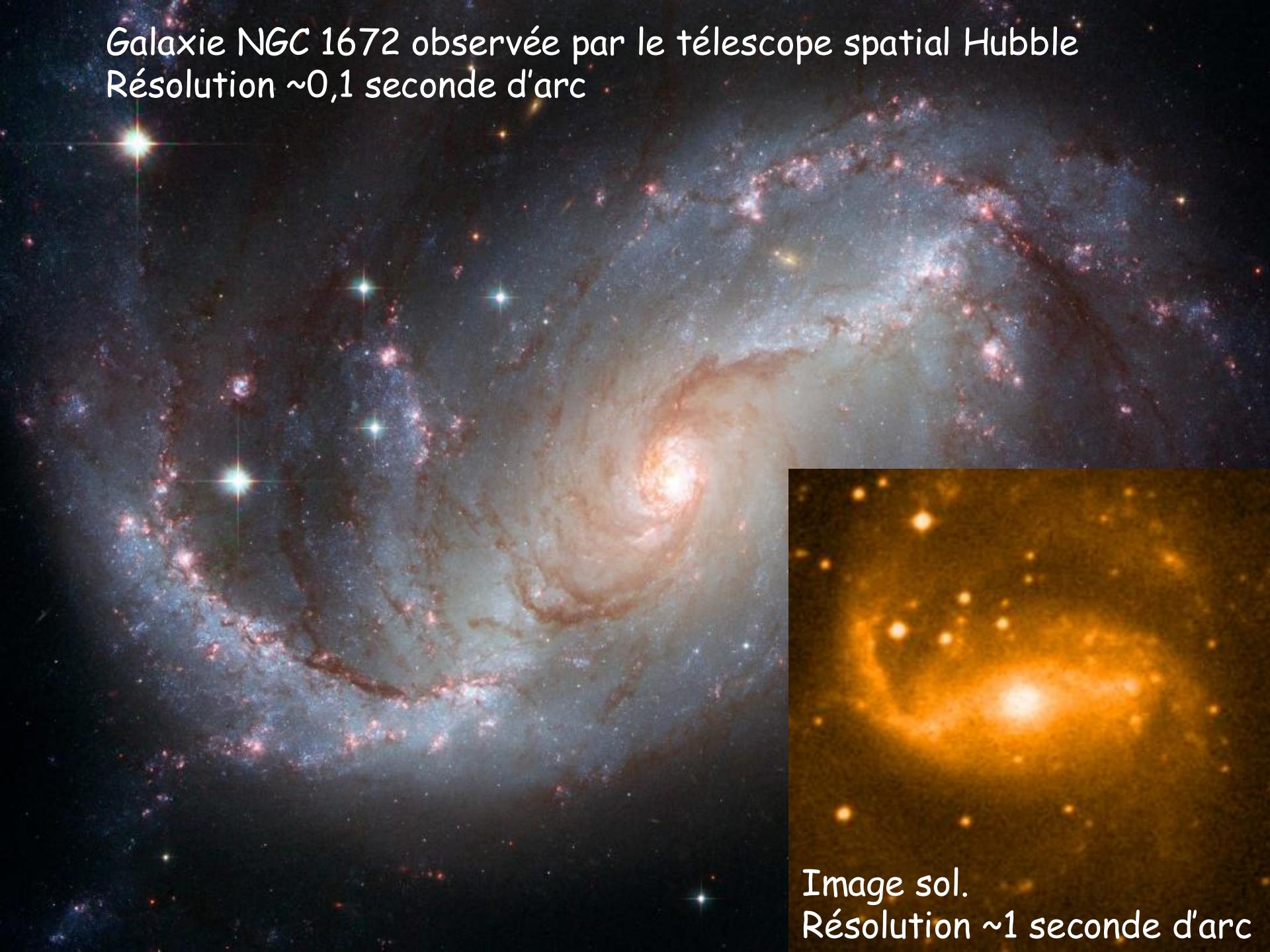
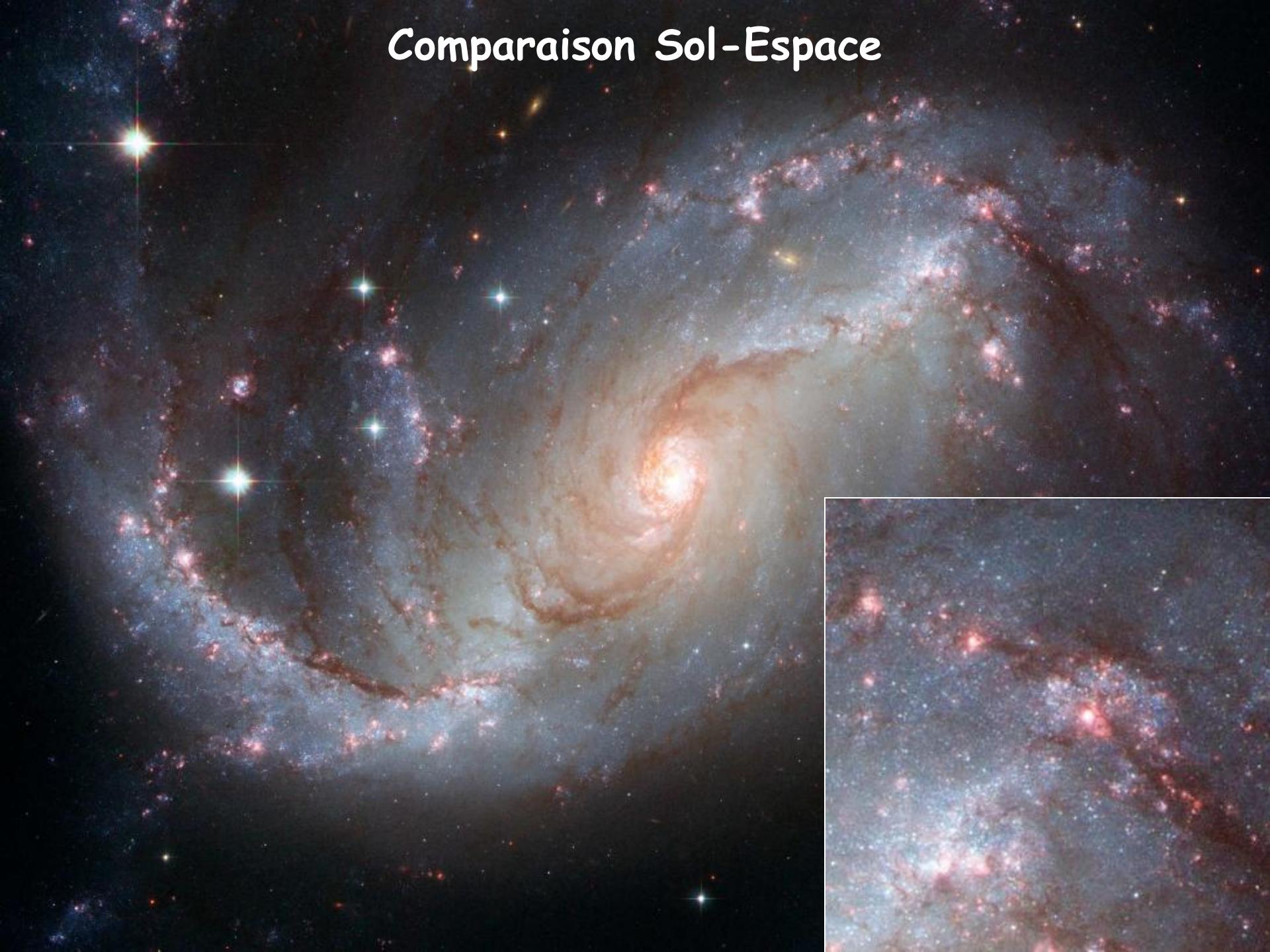


Image sol.  
Résolution ~1 seconde d'arc

# Comparaison Sol-Espace



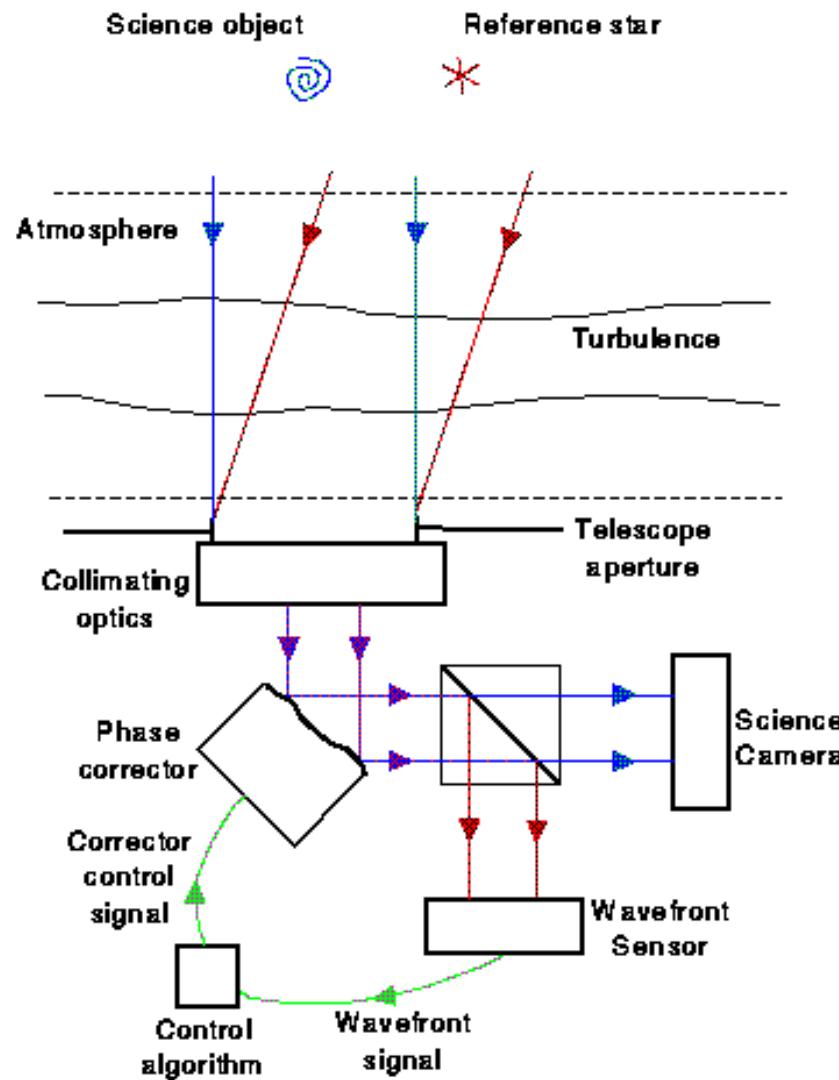
# **Optique active et optique adaptative**

# Optique active: correction de la déformation du miroir principal



VLT ACTIVE OPTICS  
IMAGE CORRECTIONS

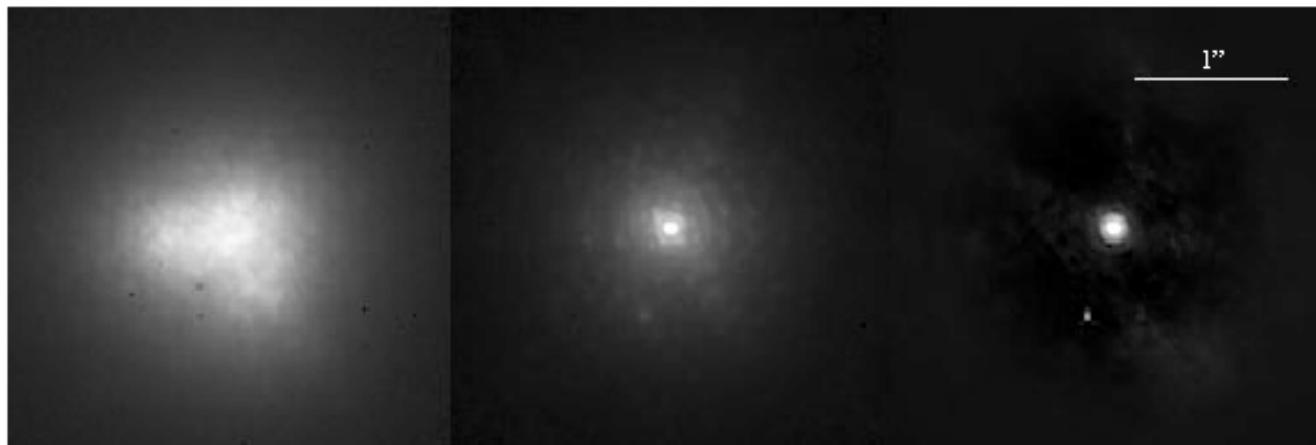
# Optique adaptative: correction de la turbulence



# Optique adaptative: correction de la turbulence

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

Gemini/Hokupa'a (June 1999)



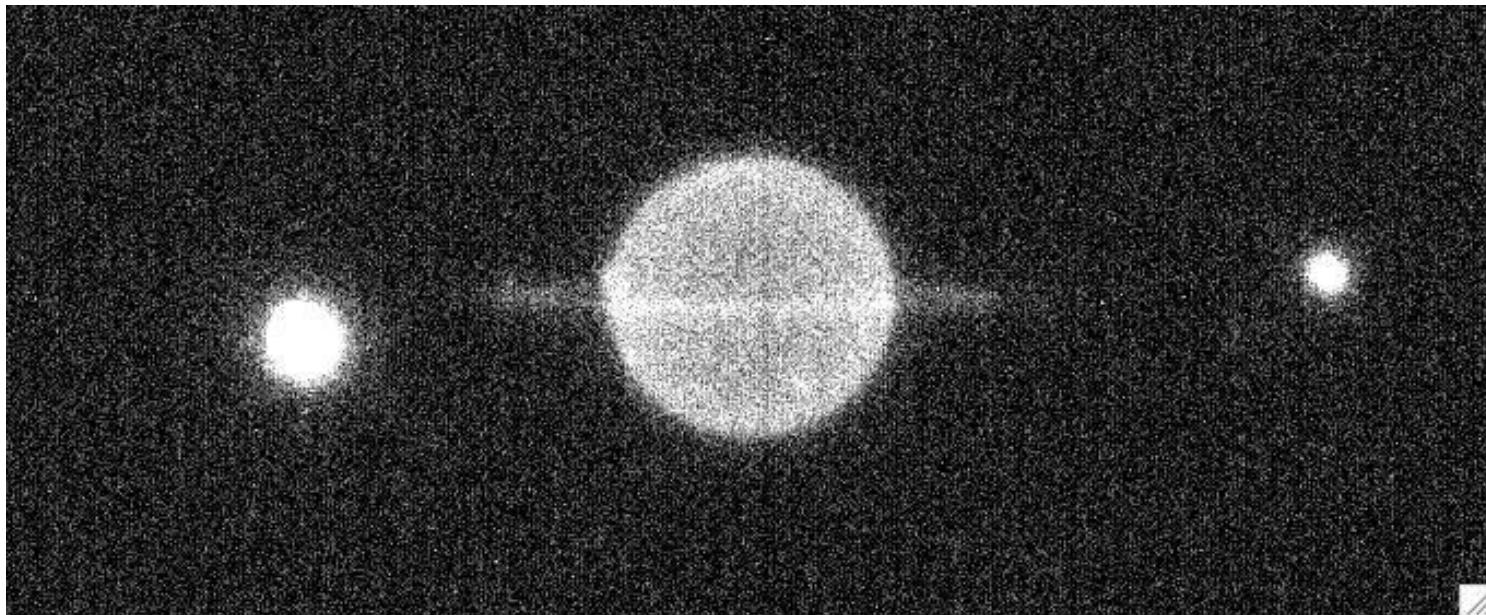
Uncompensated  
(Hokupa'a off)

Compensated  
(Hokupa'a on)

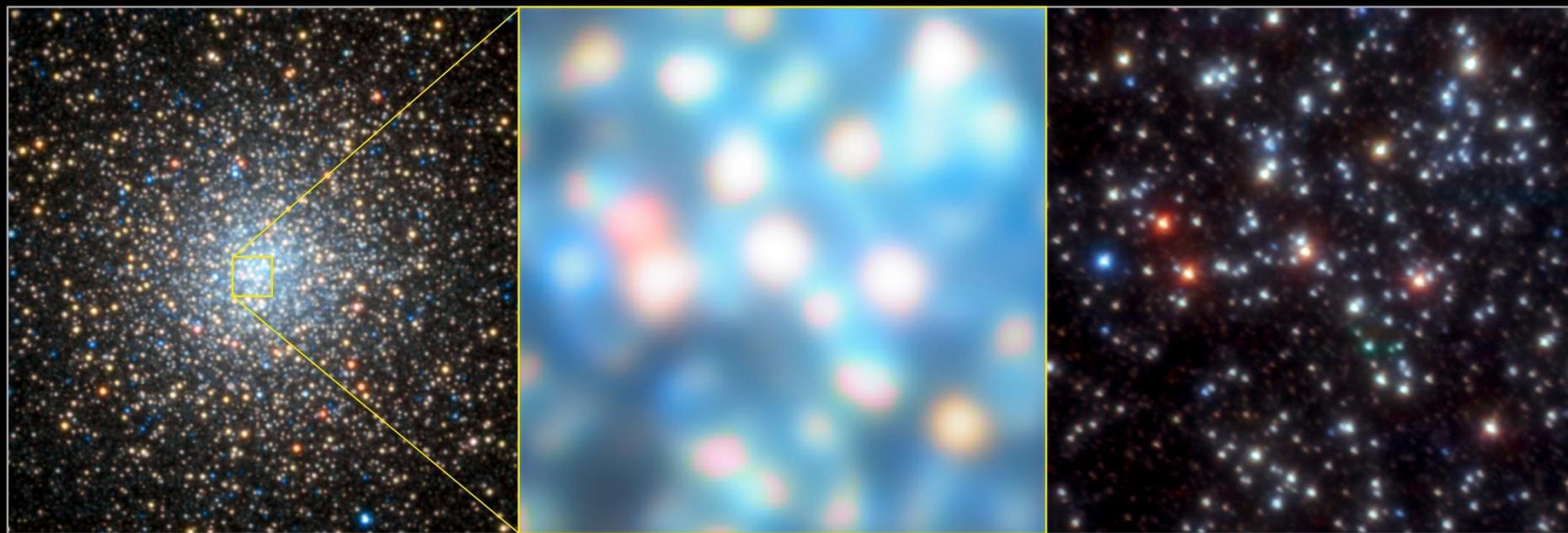
Compensated and  
post-processed

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

# Optique adaptative: images VLT d'Uranus



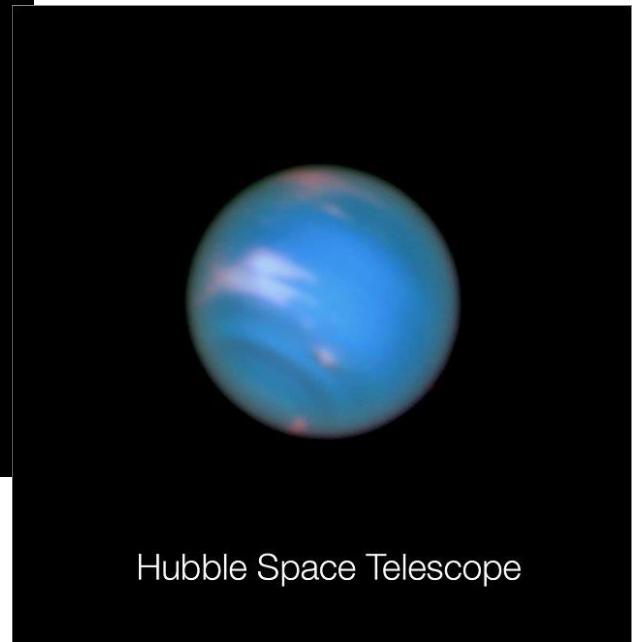
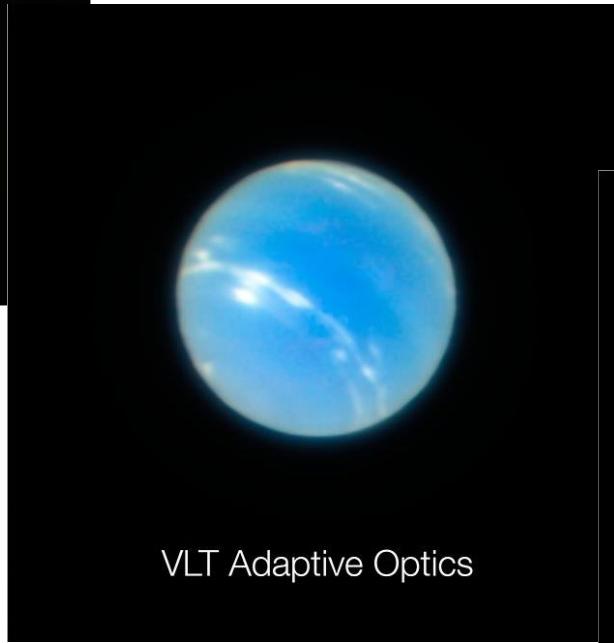
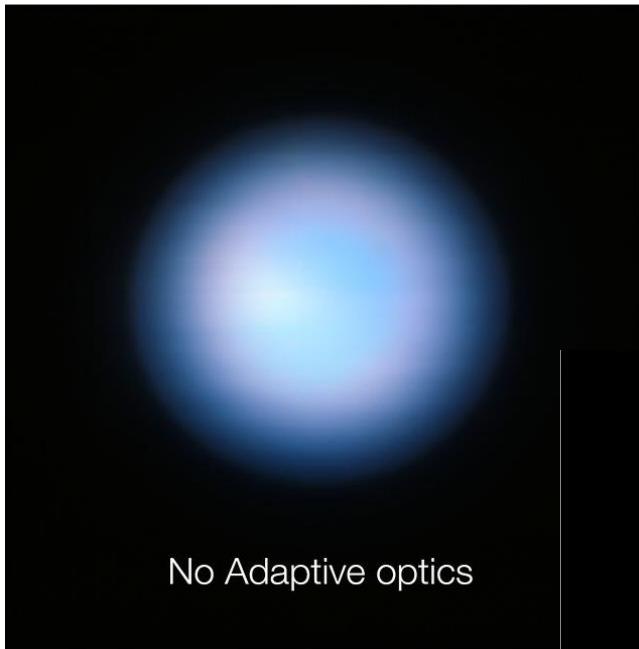
# Optique adaptative: correction de la turbulence



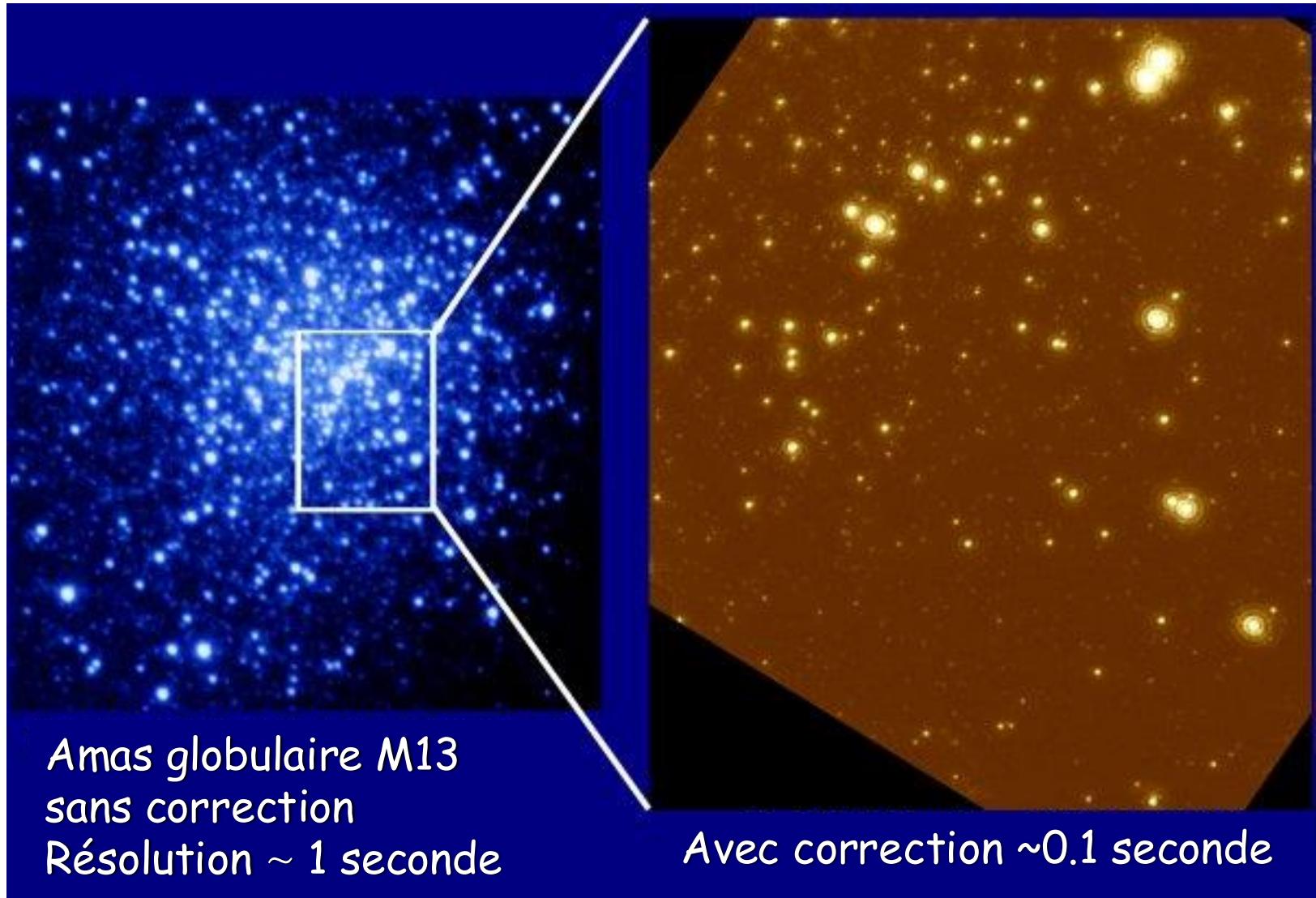
VLT+MUSE Wide Field Mode  
without Adaptive Optics

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

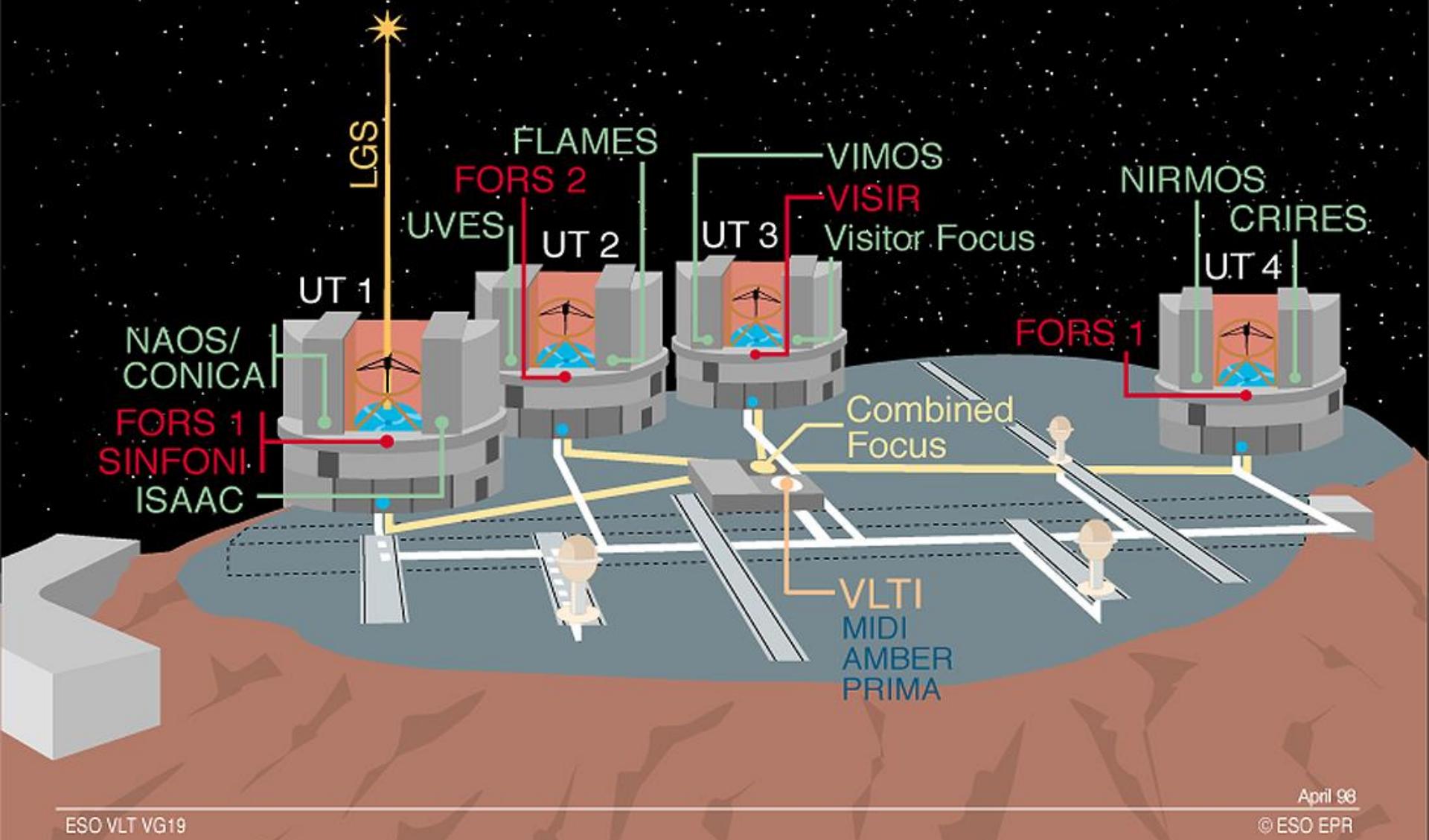


© Stéphane Guisard

# Interférométrie

# THE VLT FOCI & INSTRUMENTS

# Interférométrie optique



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

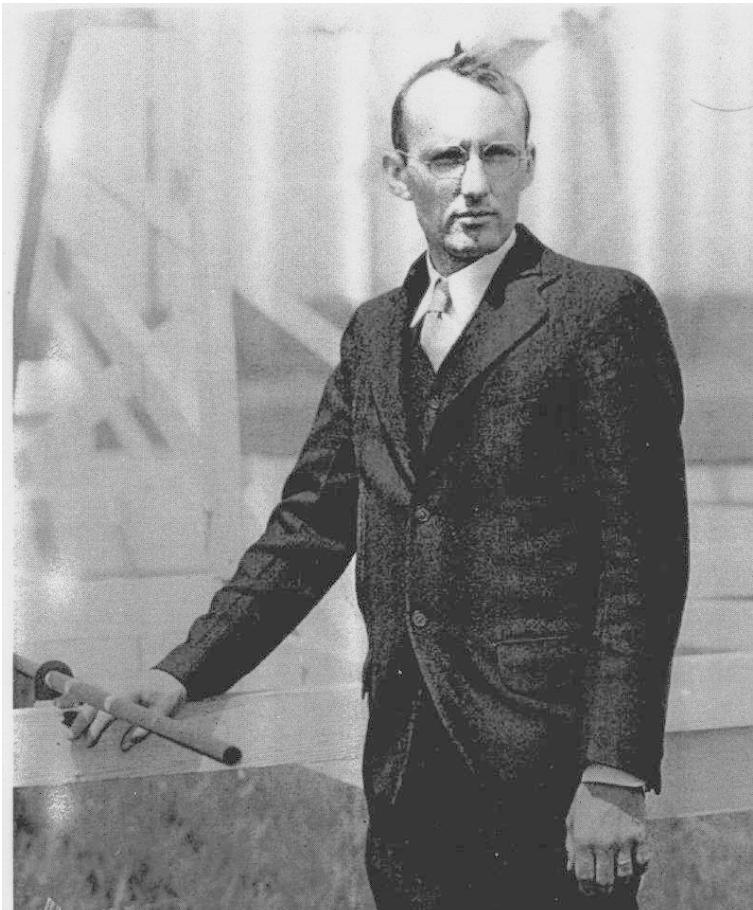
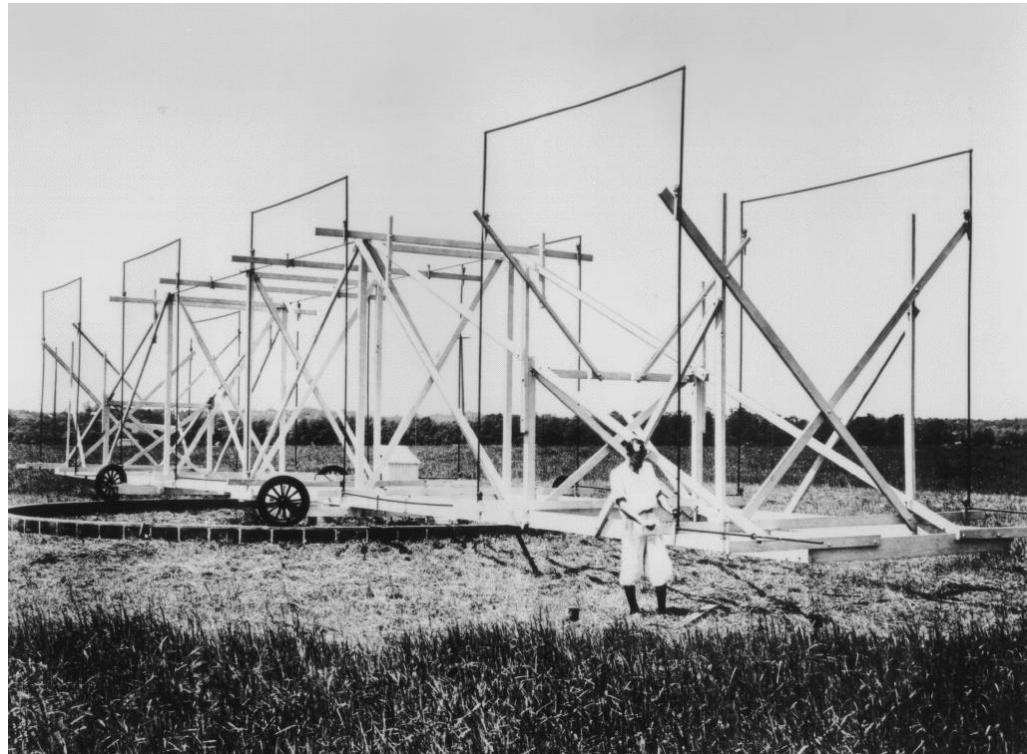


FIG. 1—Karl Guthe Jansky, about 1933.



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 (Chine)



# Observations dans le domaine radio

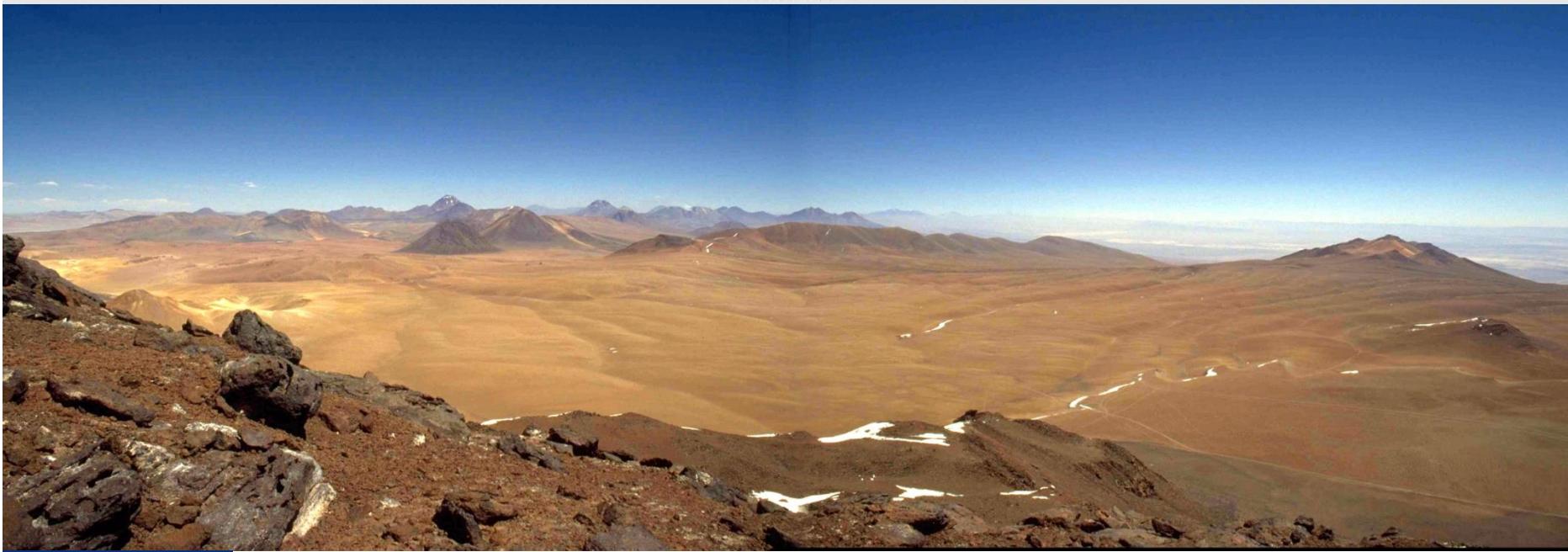
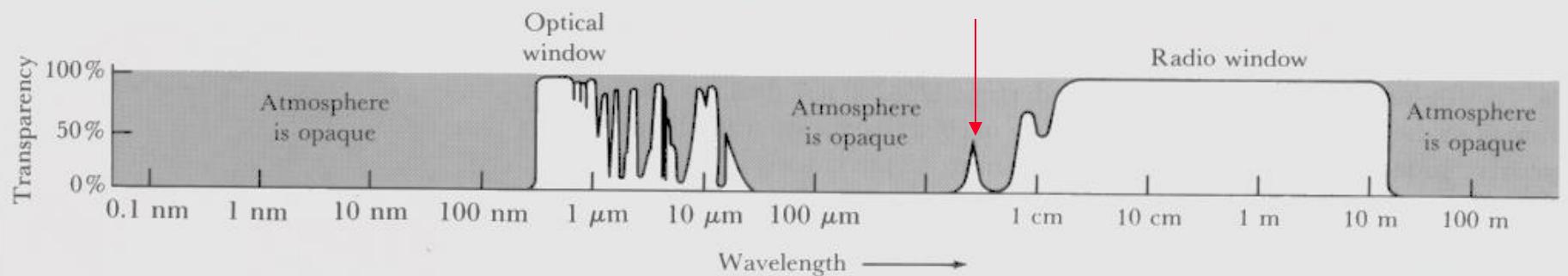


Very Large Array, Nouveau Mexique

# SKAO

## Square Kilometre Array Observatory





## 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 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)



# Event Horizon Telescope (EHT)

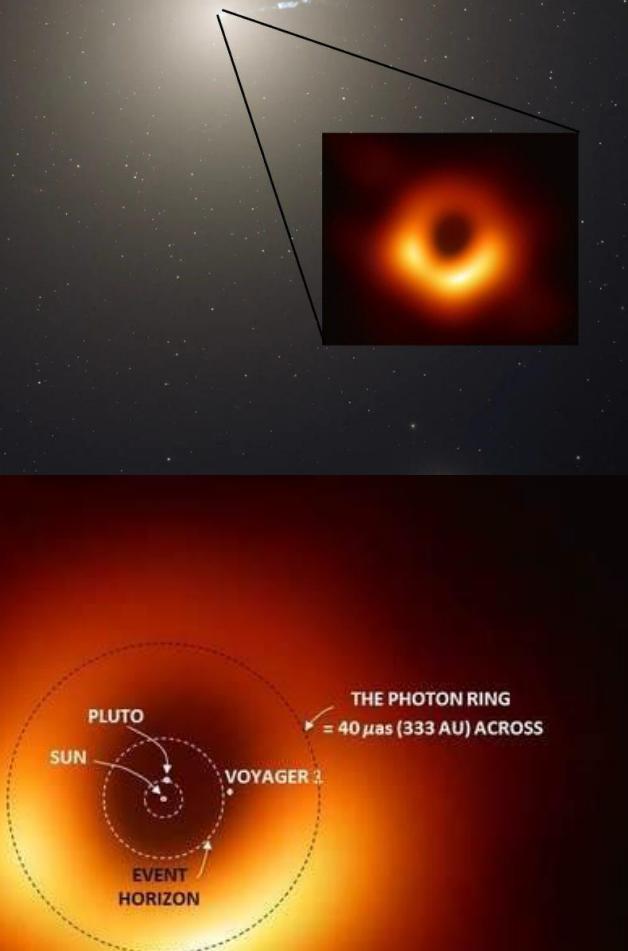
A Global Network of Radio Telescopes



## 2017 OBSERVATIONS

- ALMA**  Atacama Large Millimeter/  
submillimeter Array  
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- APEX**  Atacama Pathfinder EXperiment  
CHAJNANTOR PLATEAU, CHILE
- 30-M**  IRAM 30-M Telescope  
PICO VELETA, SPAIN
- JCMT**  James Clerk Maxwell Telescope  
MAUNAKEA, HAWAII
- LMT**  Large Millimeter Telescope  
SIERRA NEGRA, MEXICO
- SMA**  Submillimeter Array  
MAUNAKEA, HAWAII
- SMT**  Submillimeter Telescope  
MOUNT GRAHAM, ARIZONA
- SPT**  South Pole Telescope  
SOUTH POLE STATION

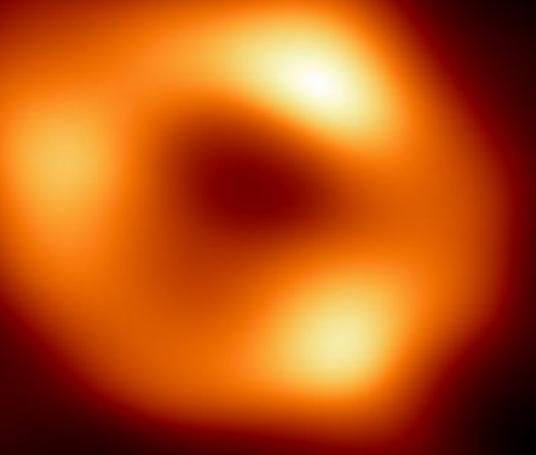
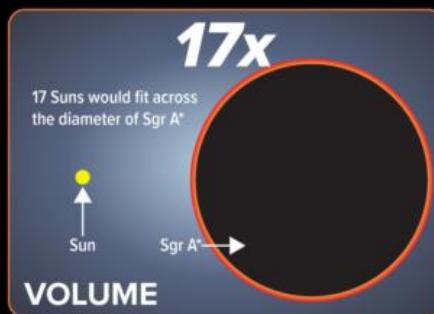
# M87



# Sagittarius A\*

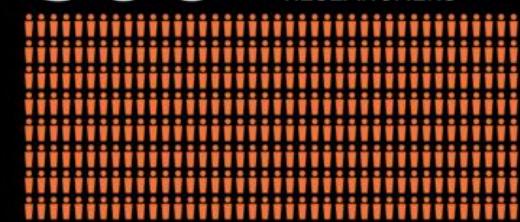
Sgr A\* /sadge-ay-star/

This is the first image of our neighborhood black hole in the center of the Milky Way galaxy. The ring around the black hole is captured light bent by the powerful gravity of the black hole.

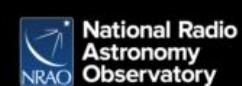
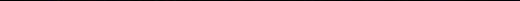


This result is made possible by a global human effort of more than 300 researchers from 80 institutions.

**300+** RESEARCHERS

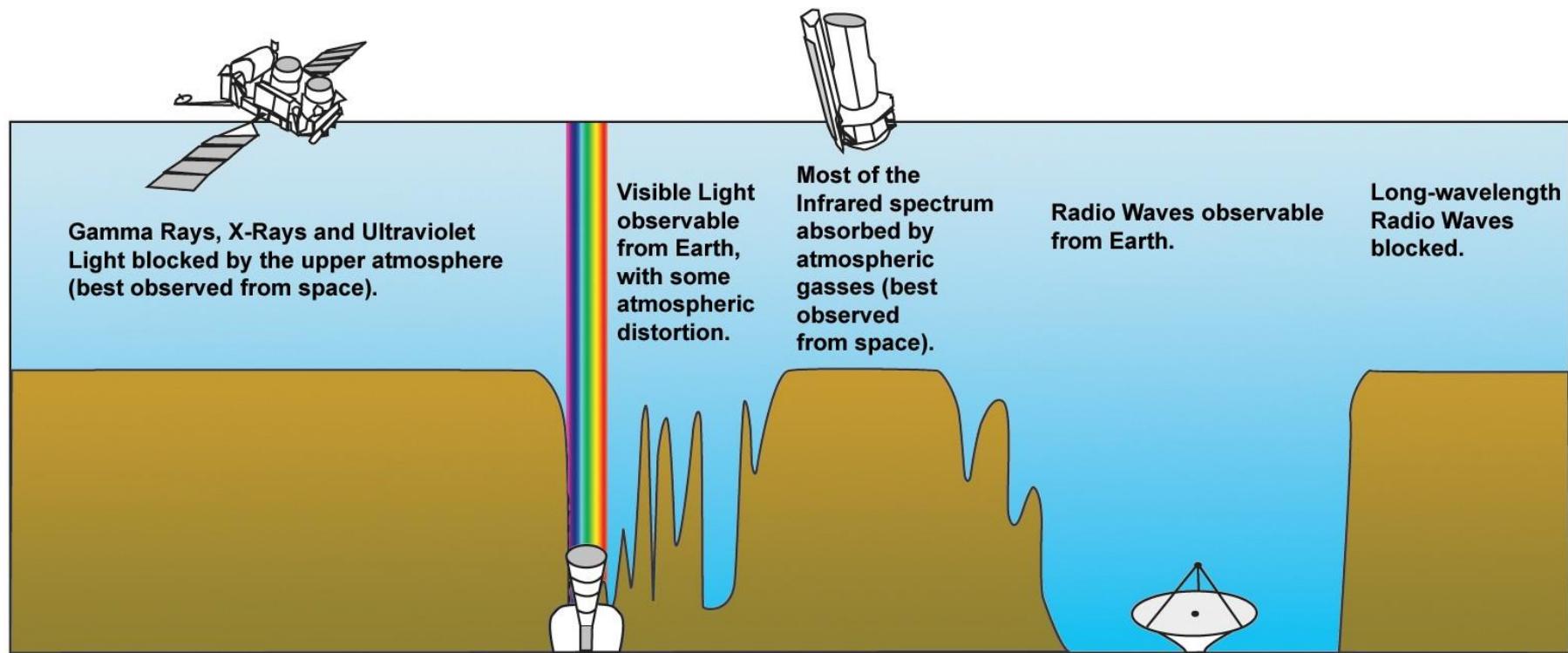
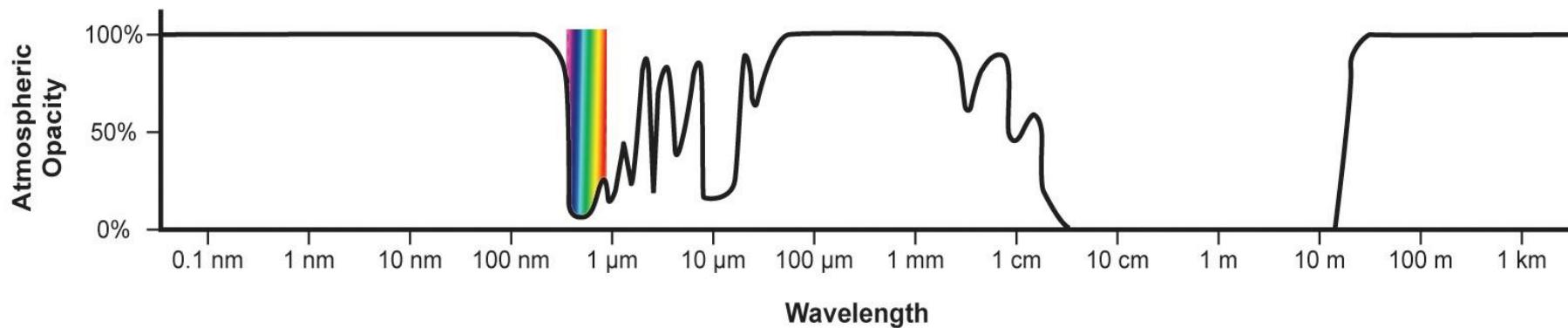


**80** INSTITUTES



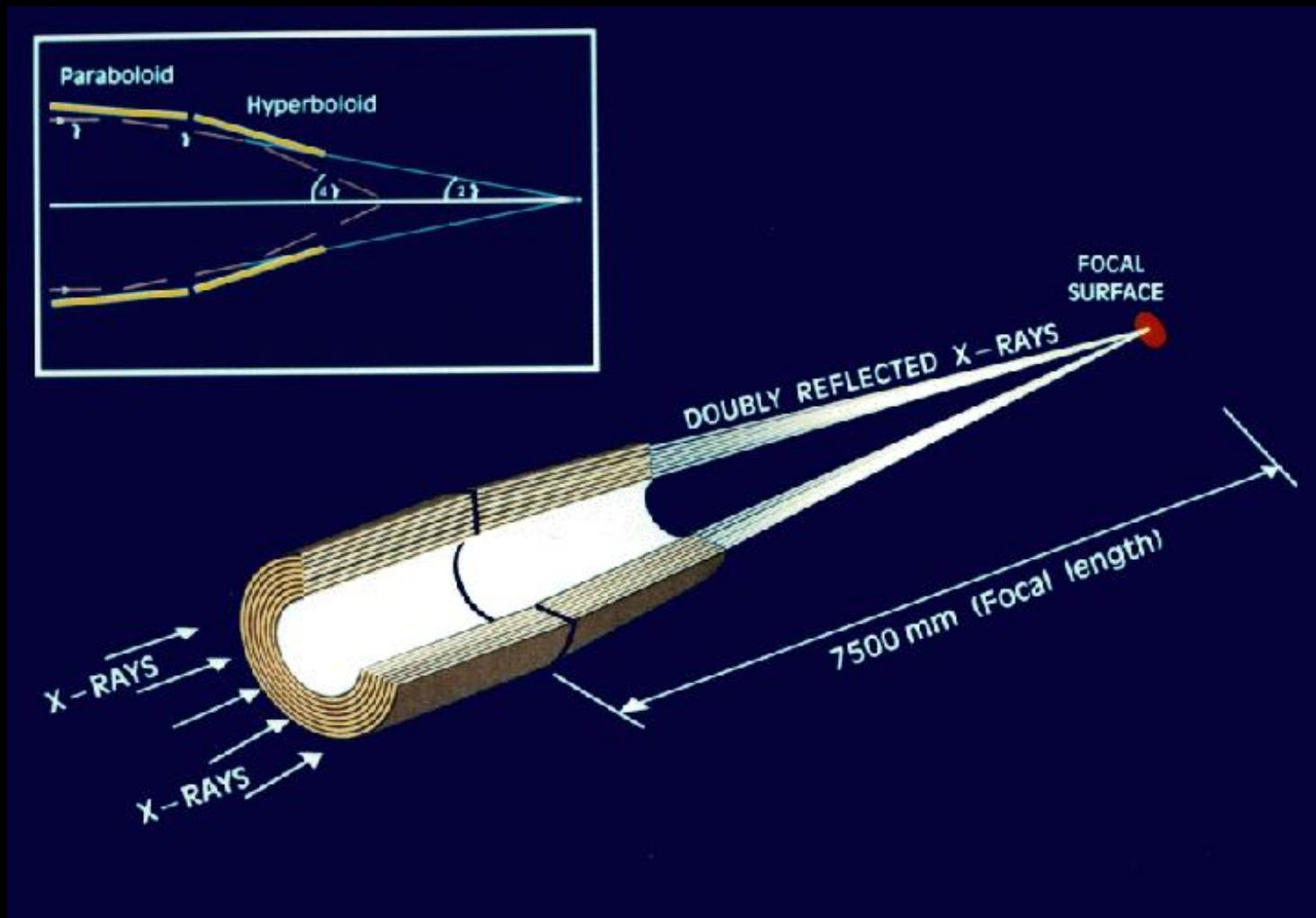
# **Observations depuis l'Espace**

# L'atmosphère terrestre



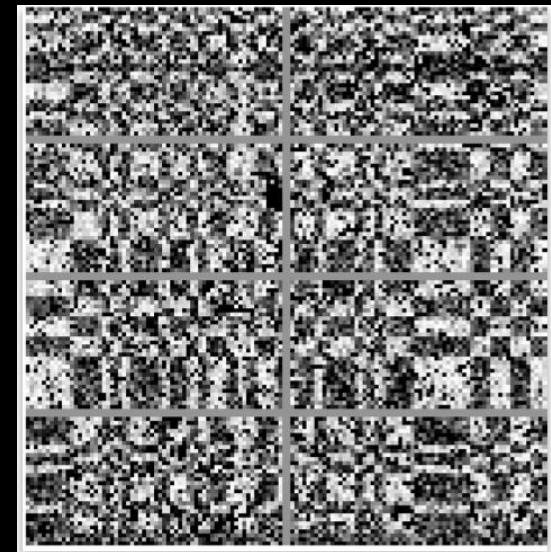
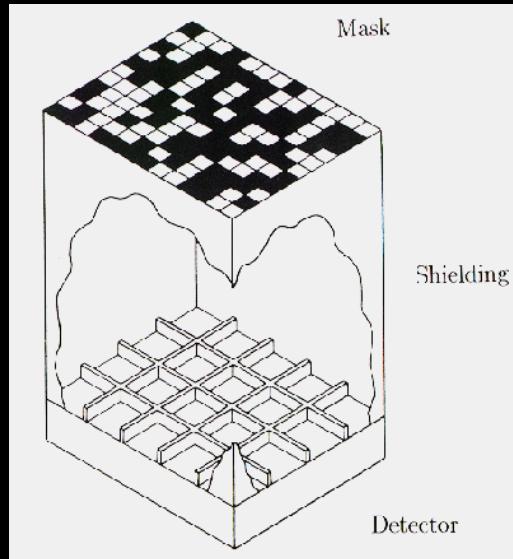
# Observations dans le domaine X

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



# Observations dans le domaine Gamma

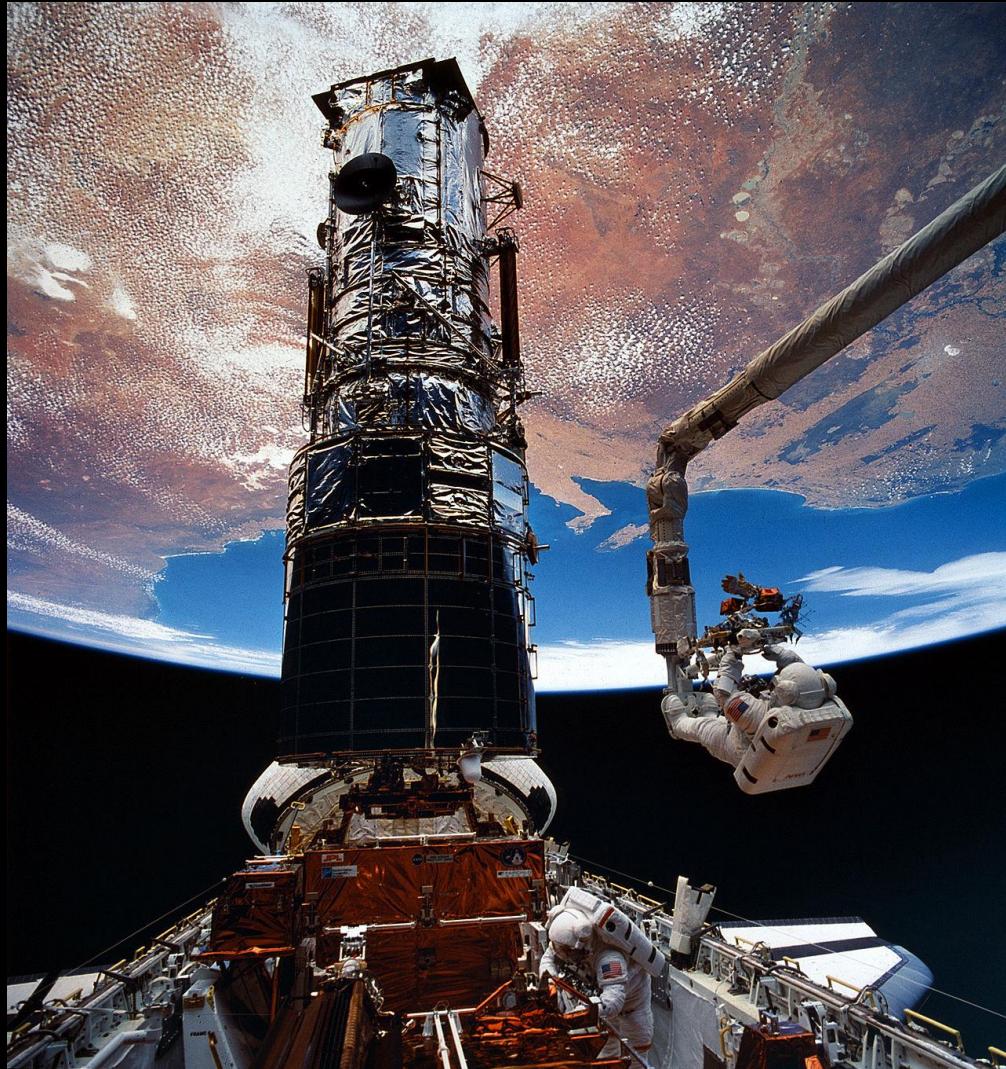
Images reconstruites à partir des ombres portées sur un réseau de détecteurs Cherenkov.



Observation de la nébuleuse du crabe avec « Integral »

# Observatoires Spatiaux

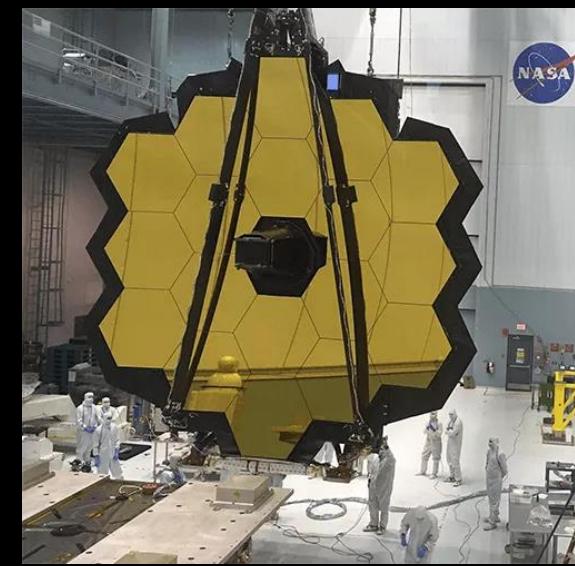
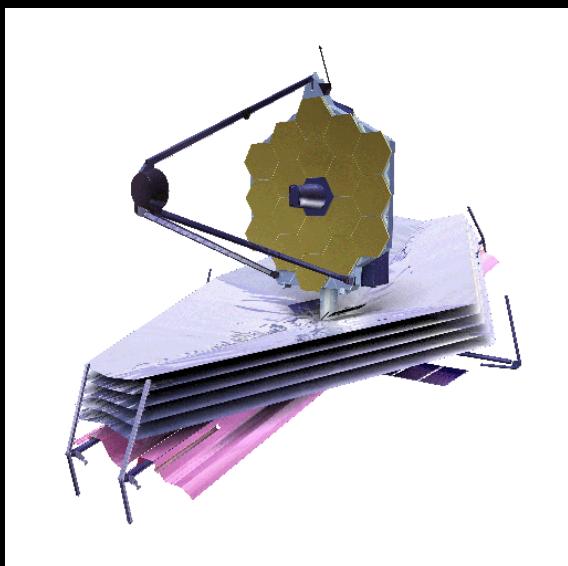
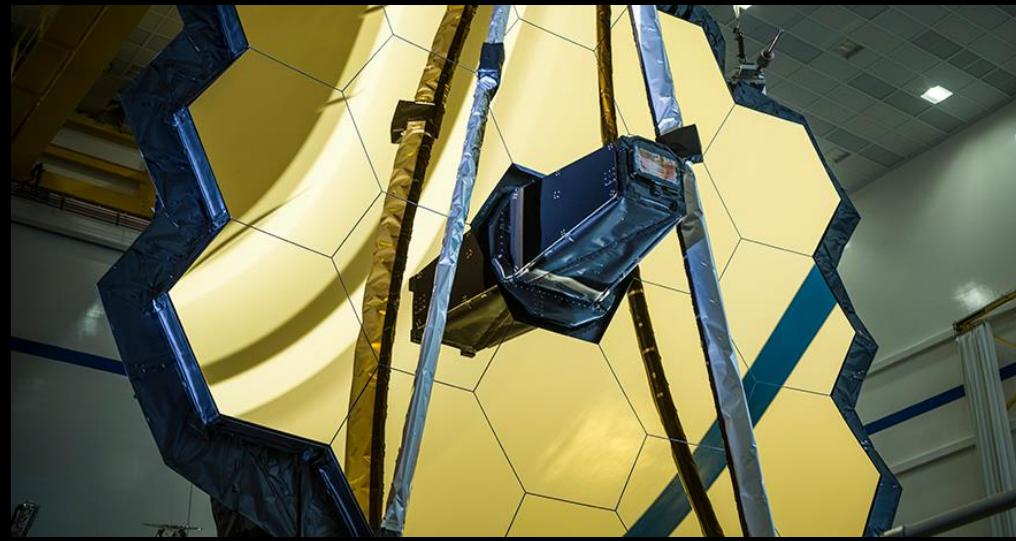
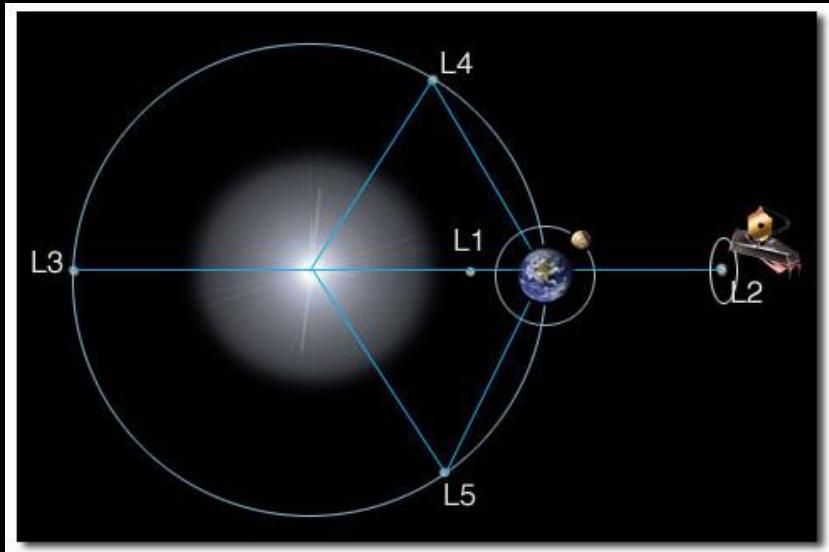
Télescope spatial Hubble de 2,4 m de diamètre UV, optique, IR



# Observatoires Spatiaux



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



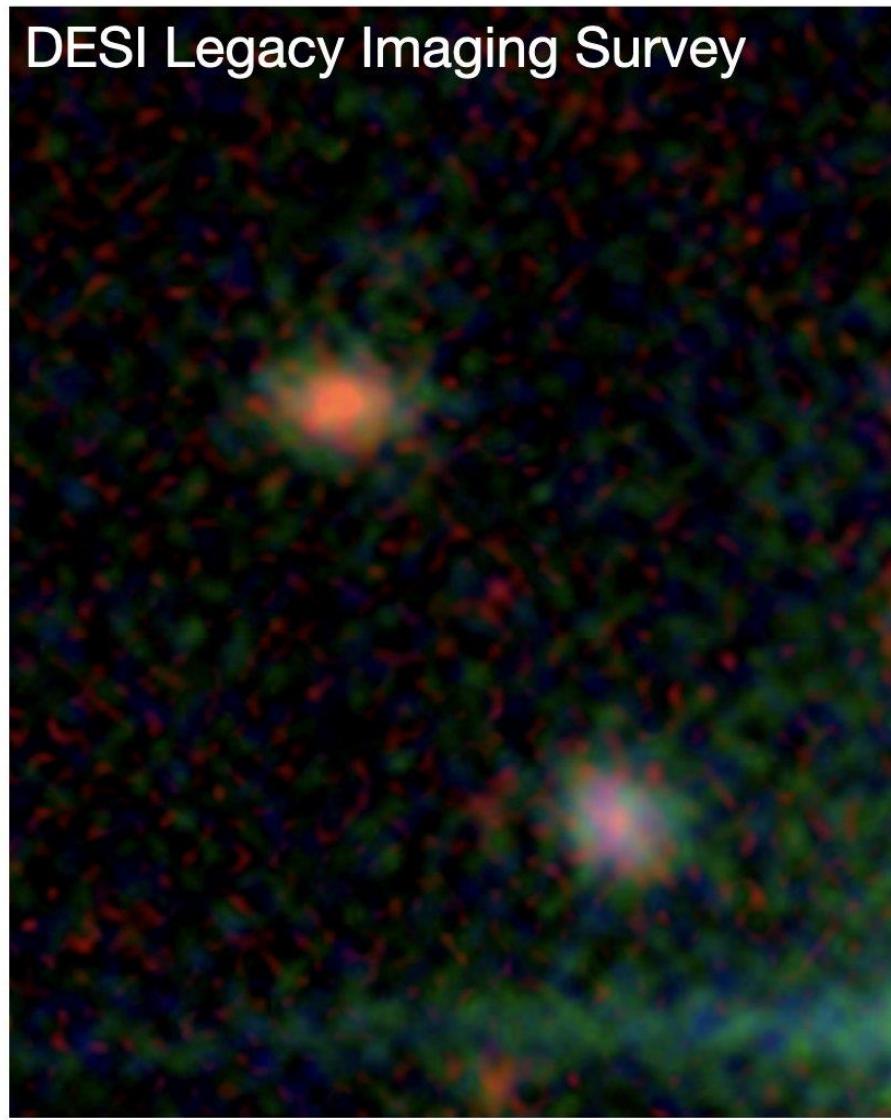
JWST vu depuis la Terre à 1.5 millions de kilomètres



Première image avec le miroir aligné

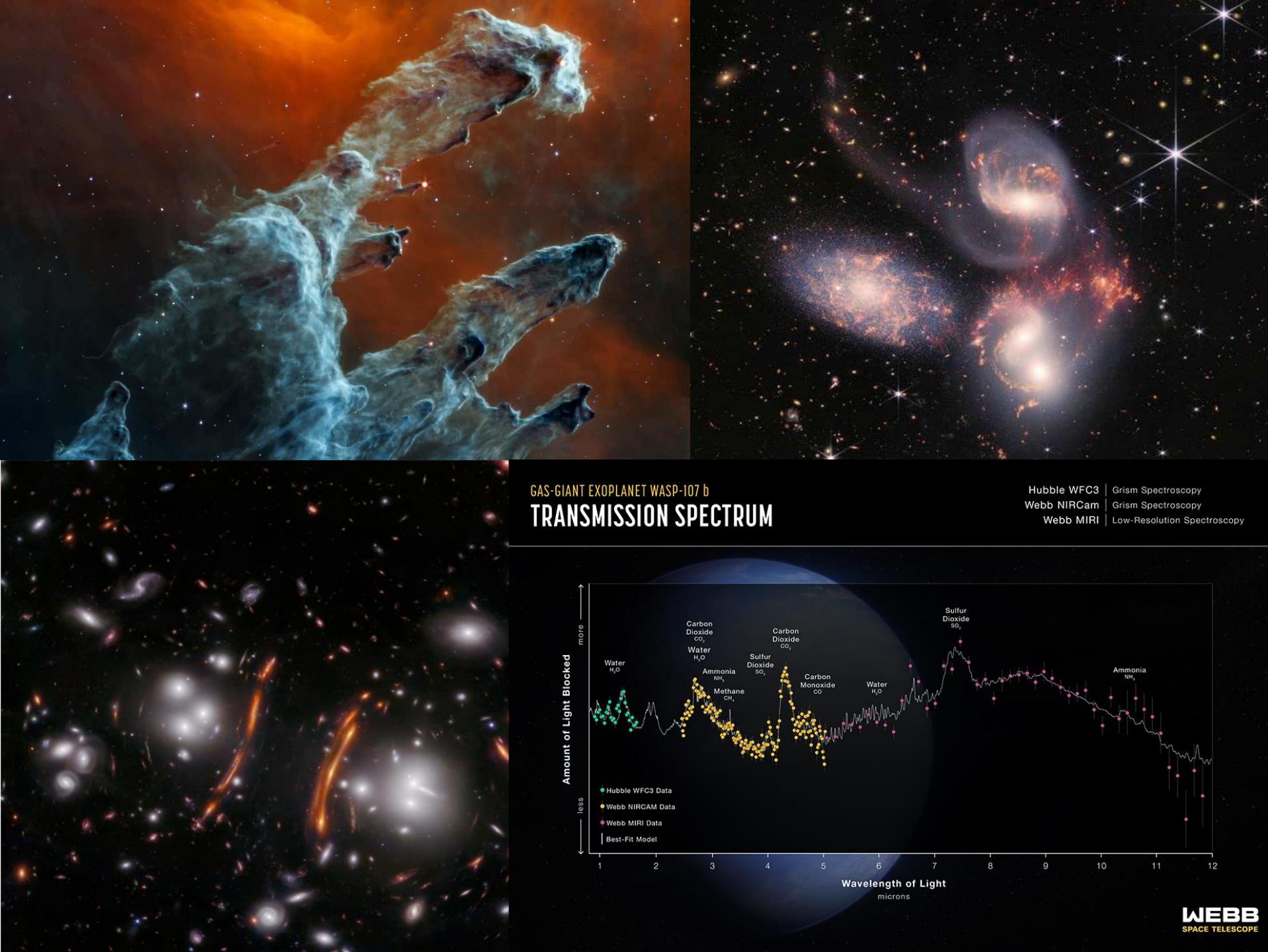


DESI Legacy Imaging Survey

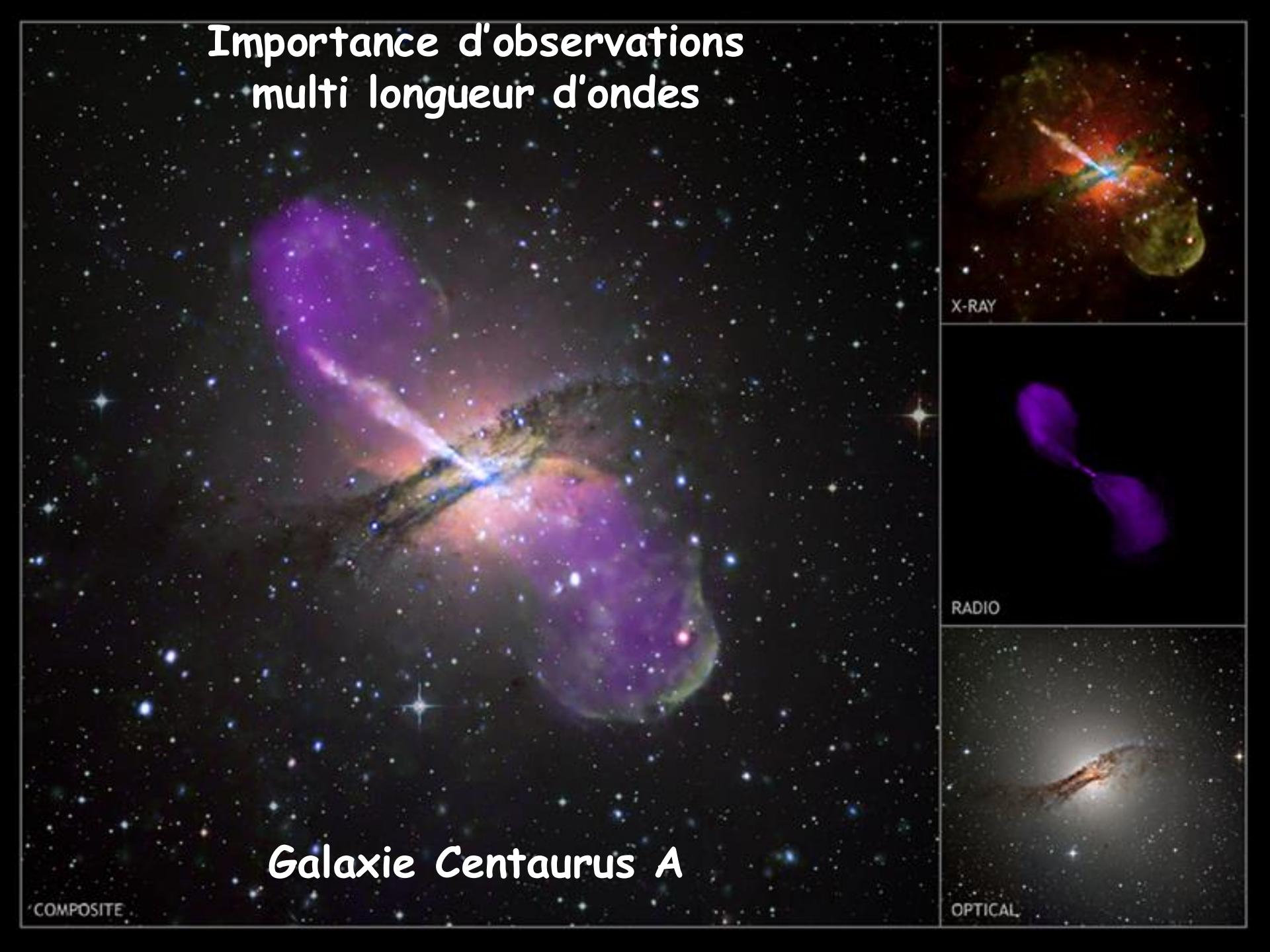


NASA Webb





# Importance d'observations multi longueur d'ondes



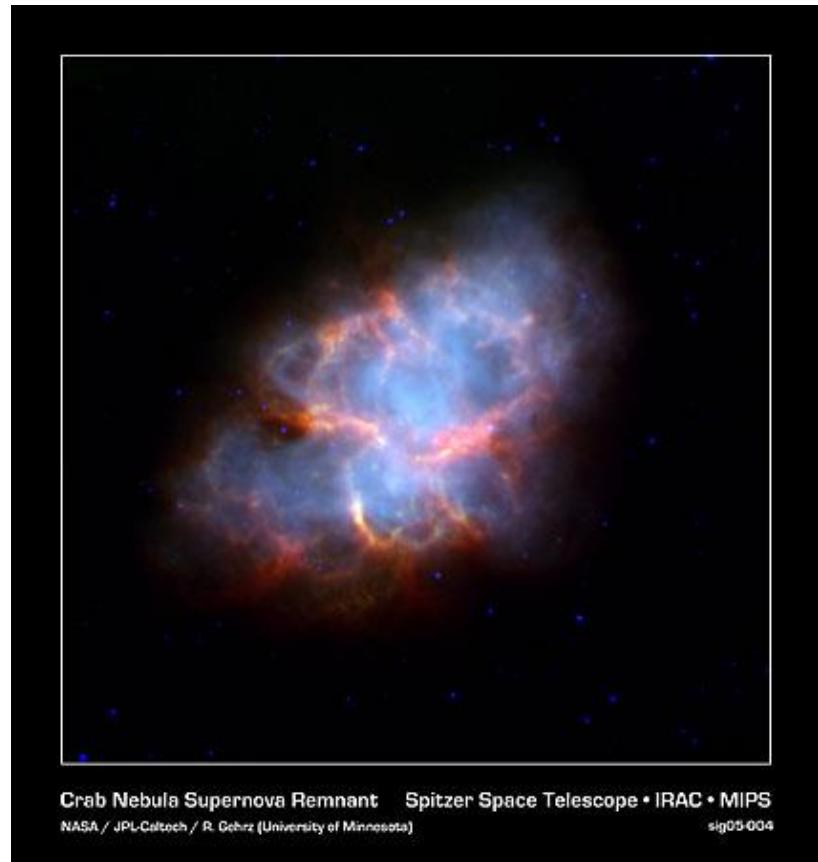
Galaxie Centaurus A

COMPOSITE

OPTICAL

# Importance d'observations multi longueur d'ondes

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



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

Image infrarouge:  
Poussières chauffées  
(satellite Spitzer)

# Importance d'observations multi longueur d'ondes

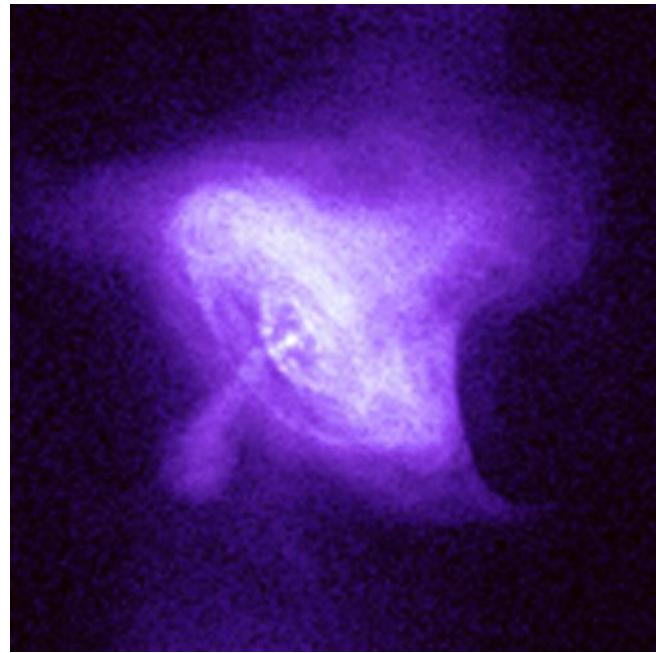
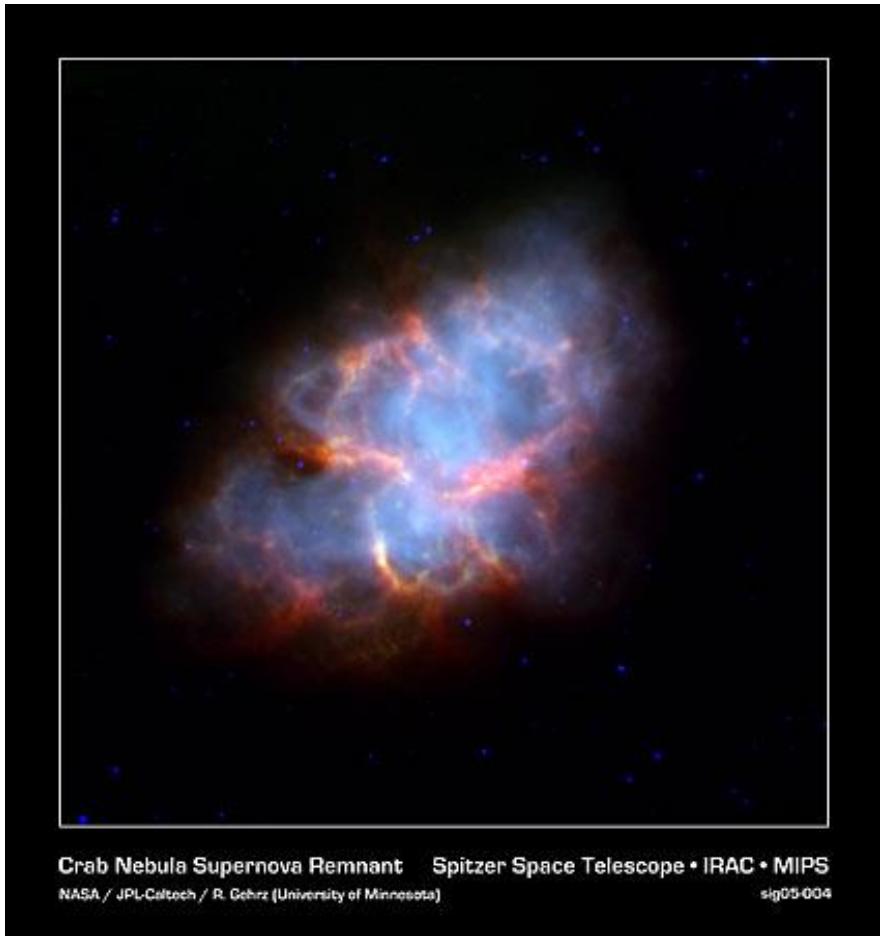


Image en rayons X  
Gaz chauffé

# Importance d'observations multi longueur d'ondes

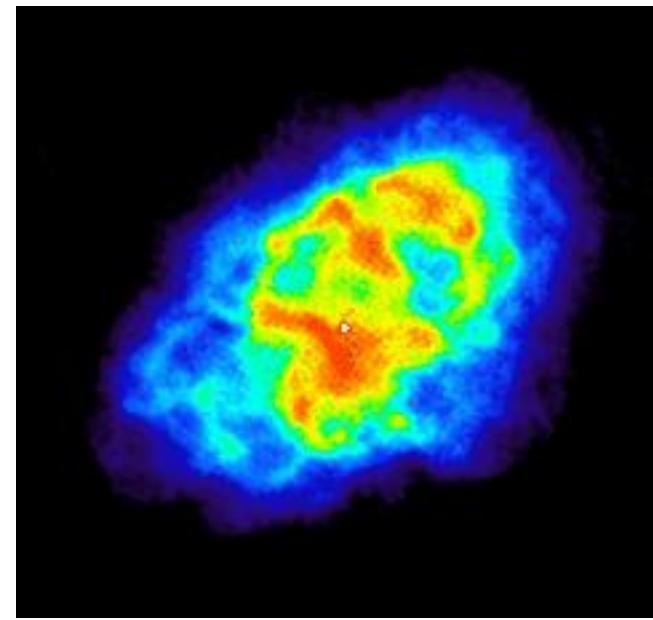
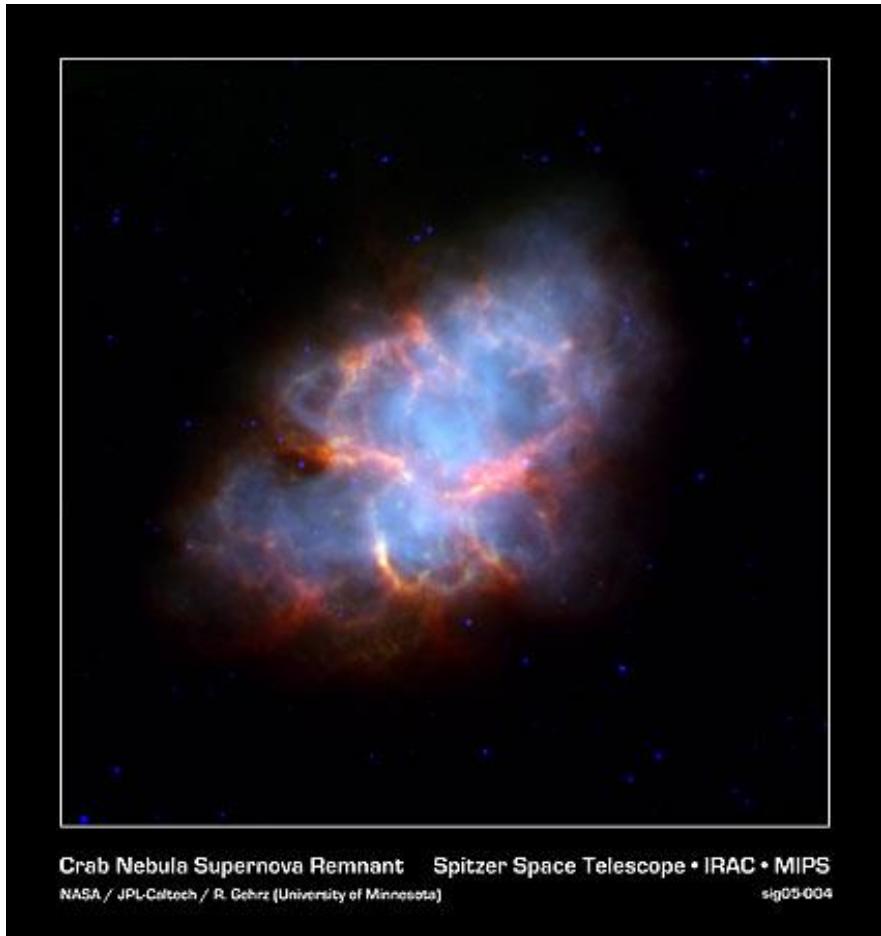


Image « radio » :  
rayonnement synchrotron