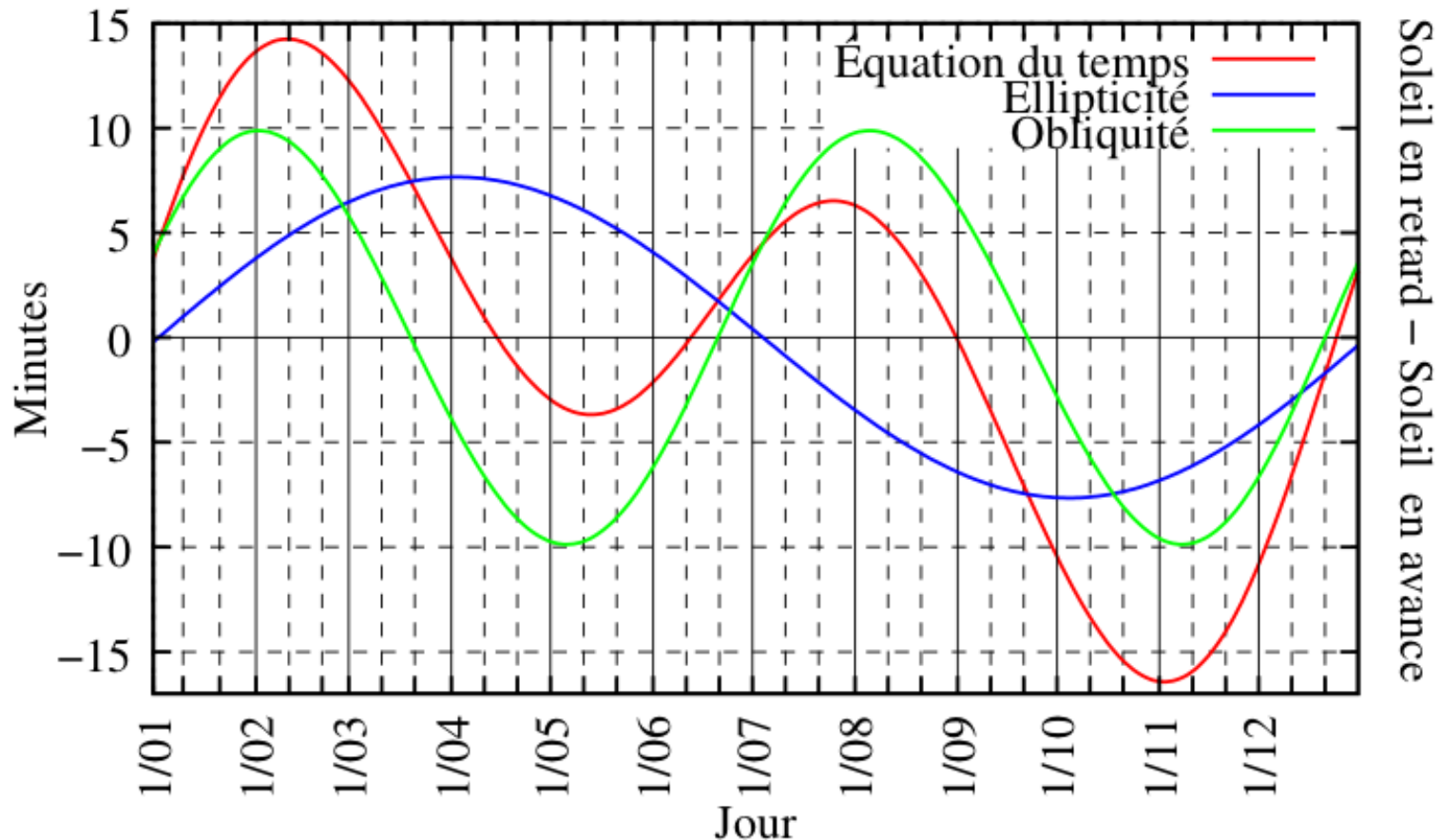
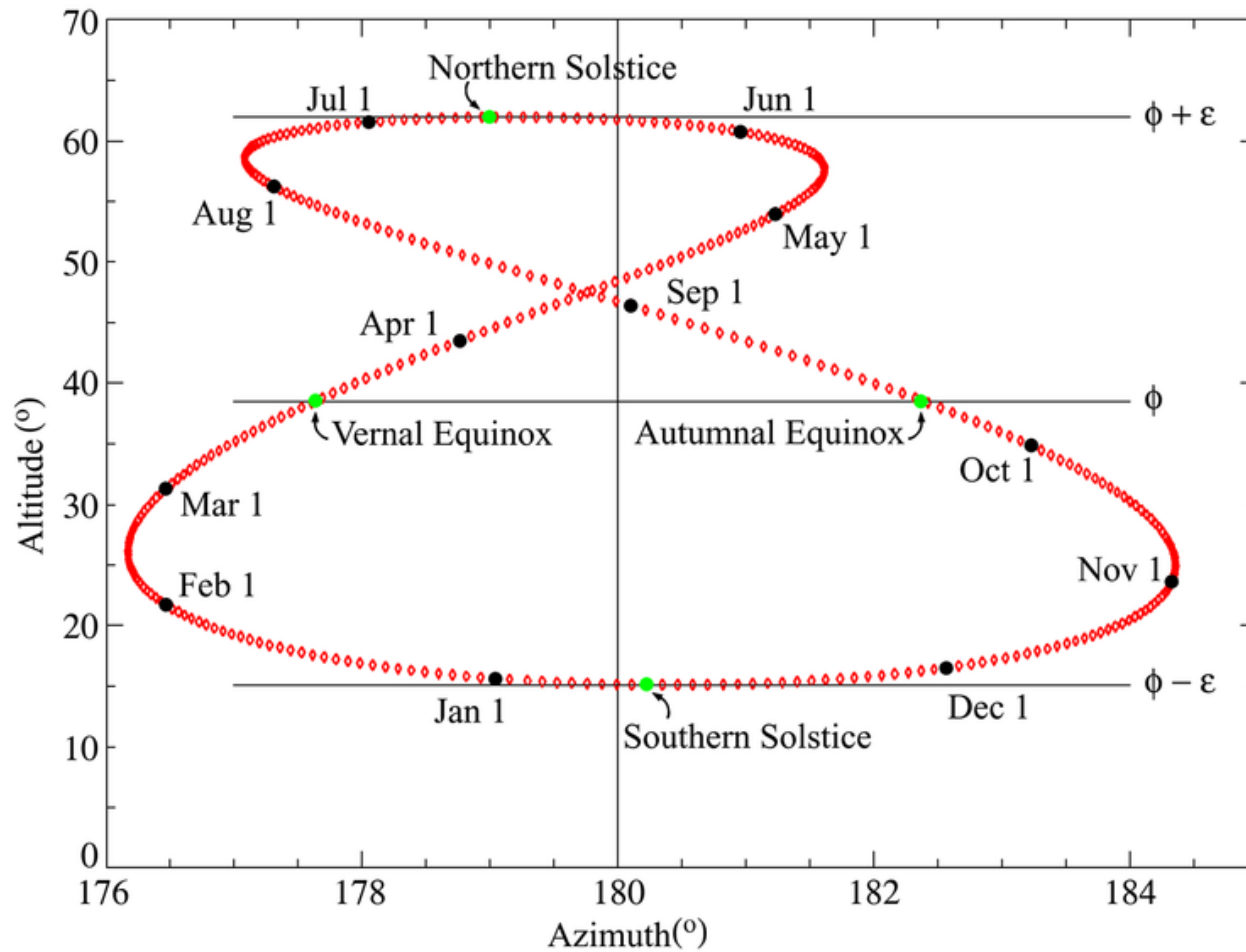


Equation du temps



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

Analemmete



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

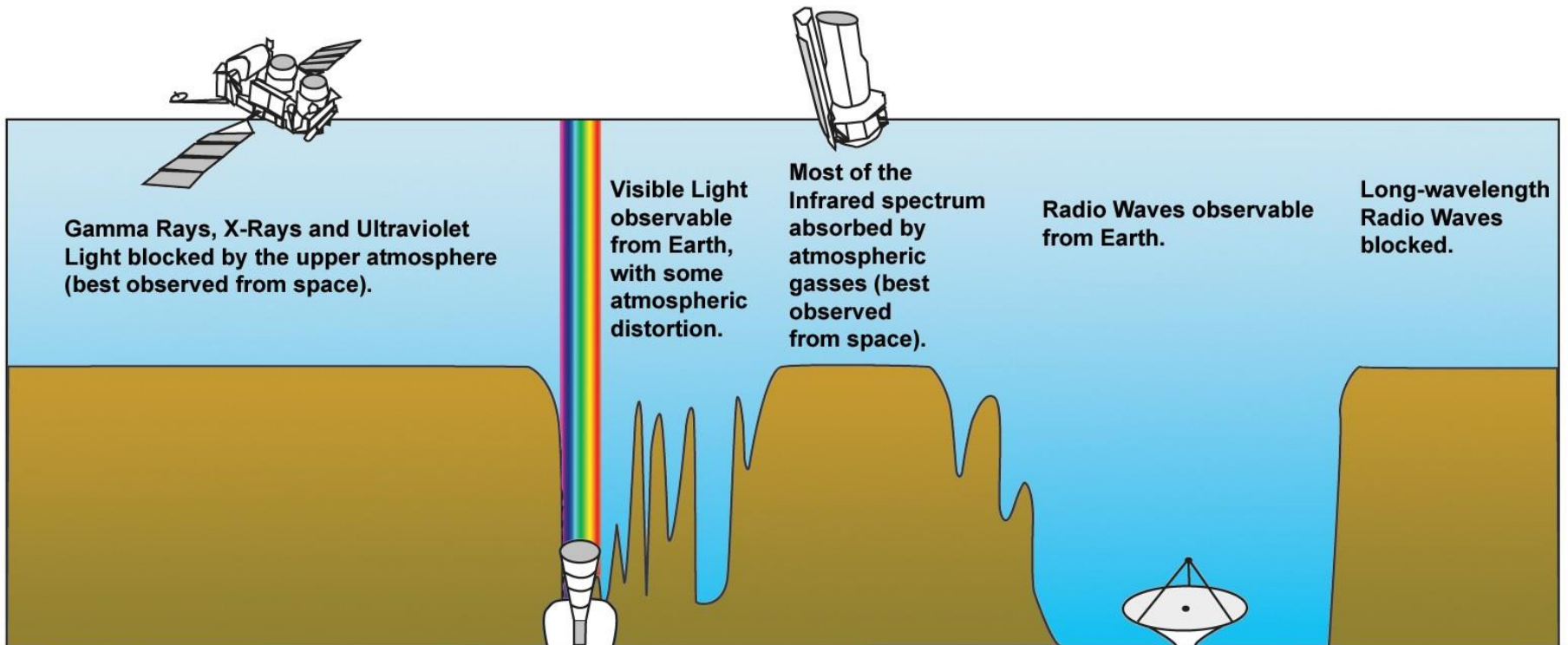
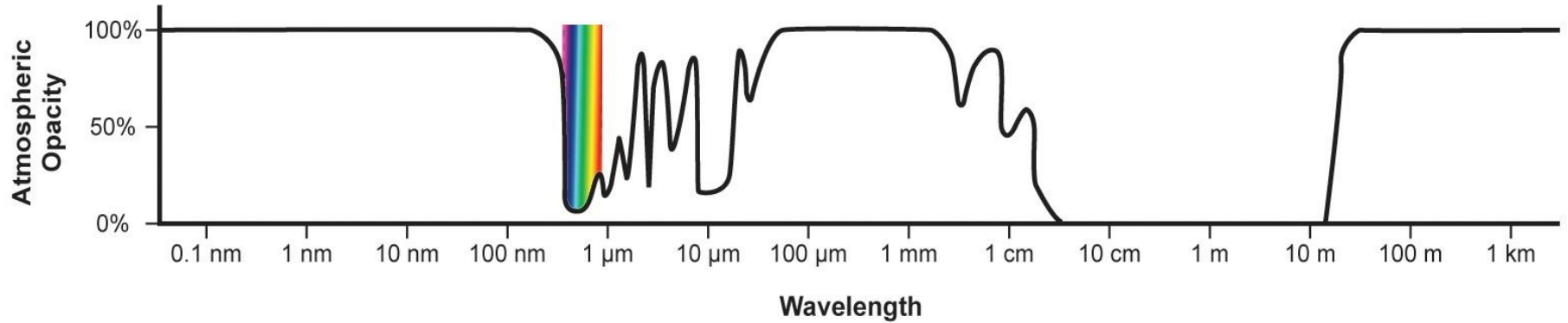
Effets néfastes de l'atmosphère sur les observations:

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

Effets additionnels:

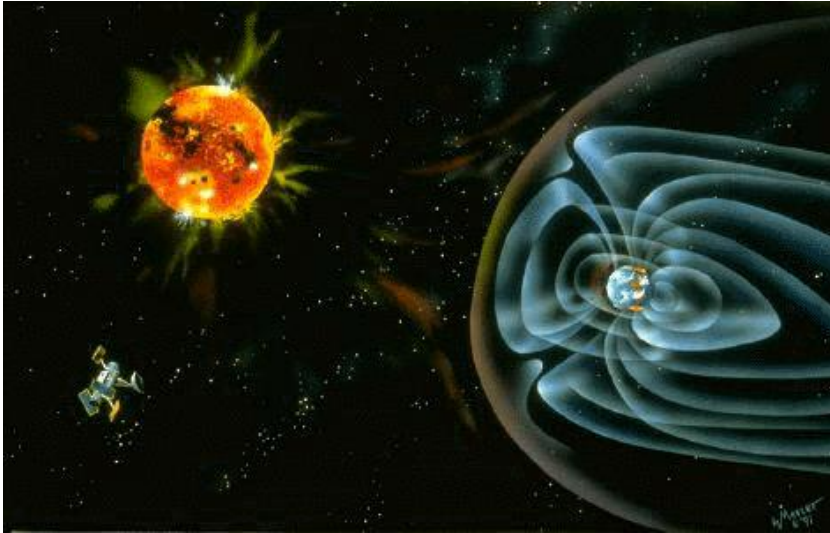
- Pollution lumineuse due à l'Homme
- Pollution lumineuse due à la Lune
- Lumière zodiacale
- Aurores polaires

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.



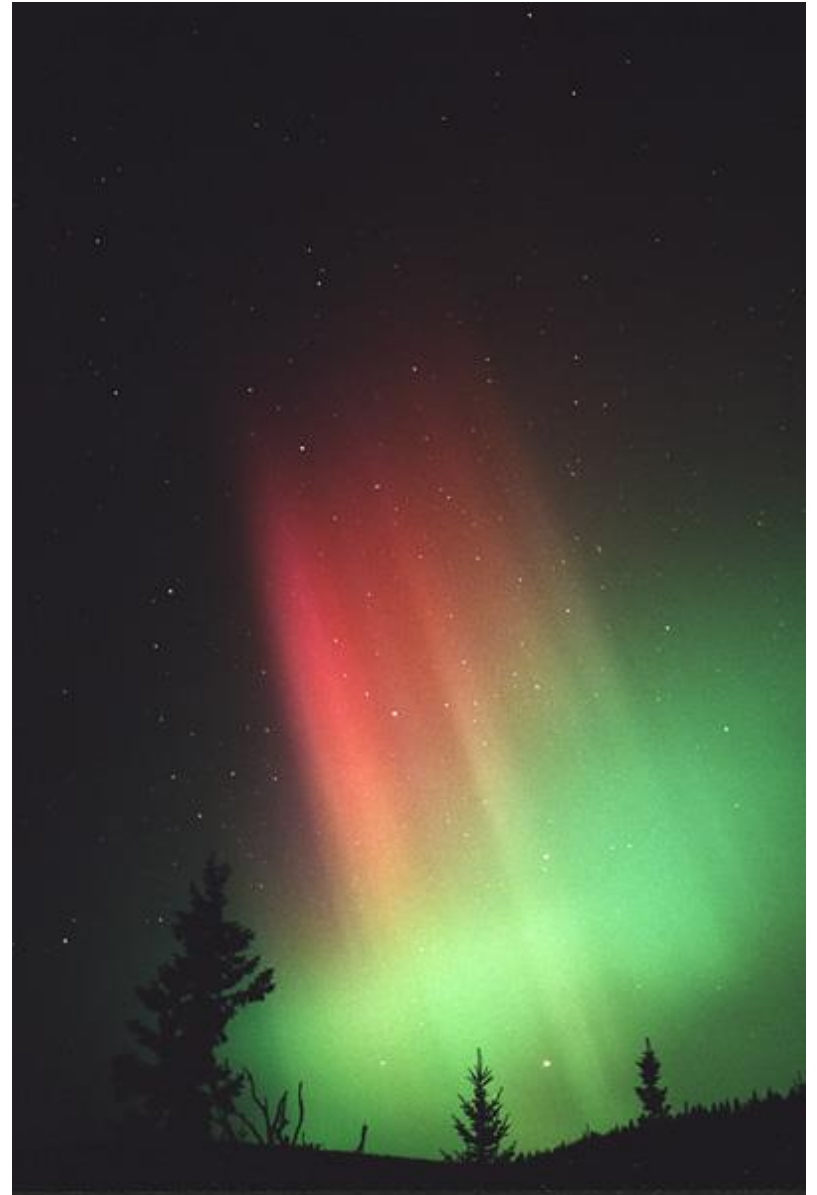
Choc entre les particules solaires et les atomes et molécules atmosphériques -> ionisation, recombinaison et fluorescence



L'atmosphère terrestre

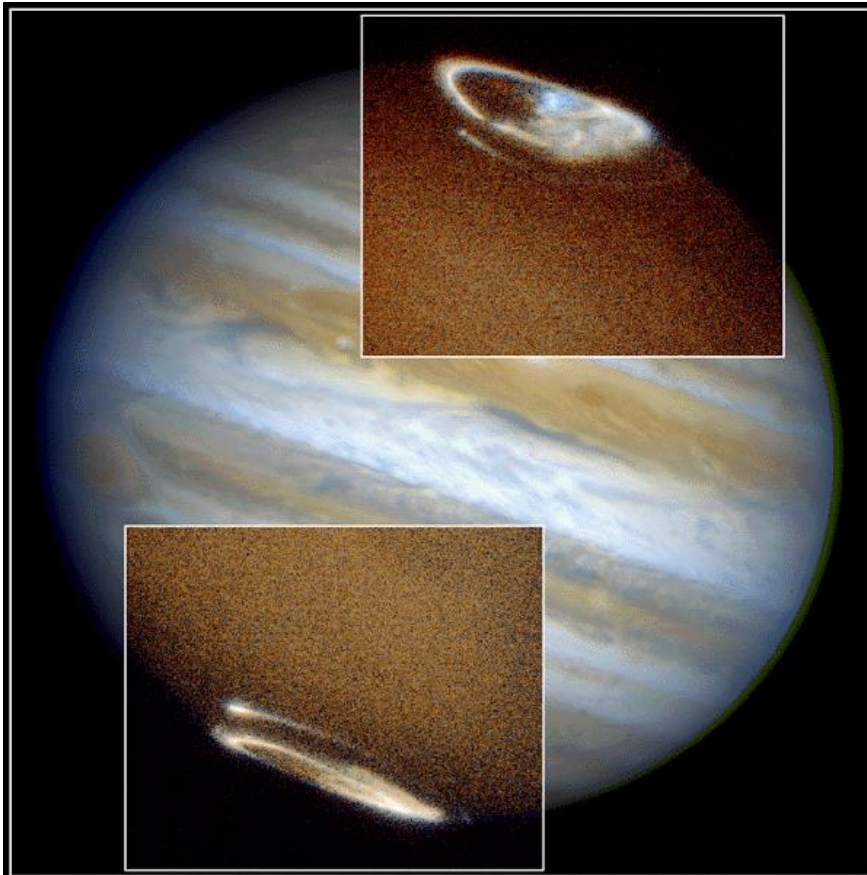


L'atmosphère terrestre



L'atmosphère terrestre

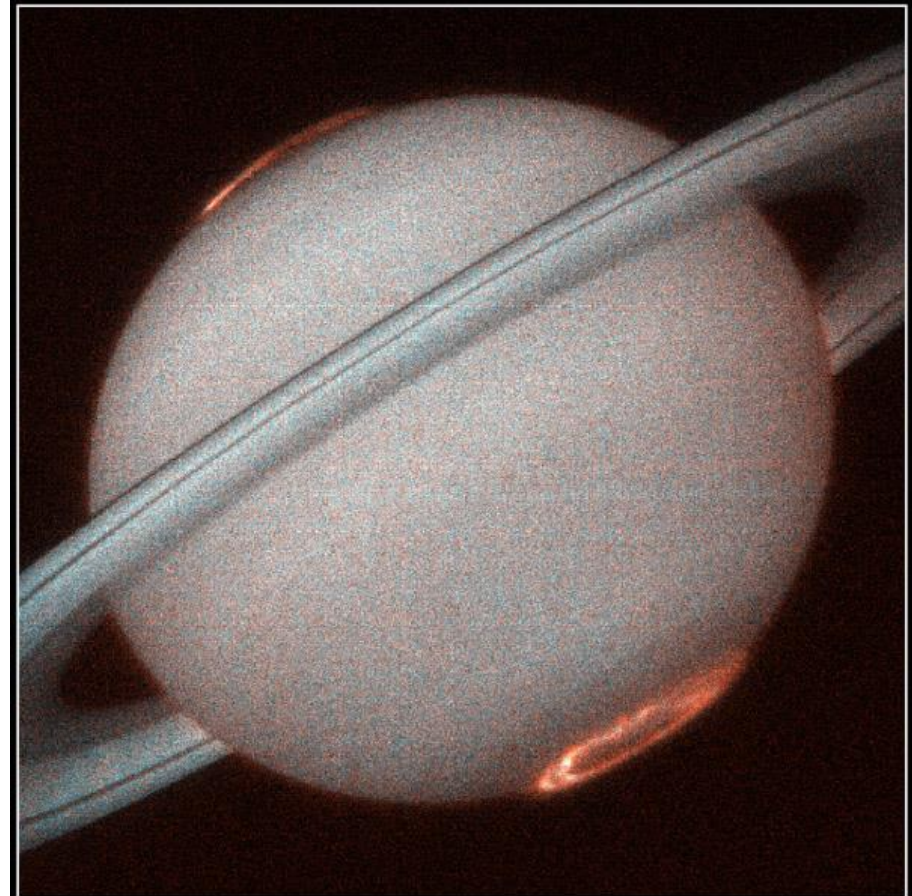
Exemples d'aurores polaires sur Jupiter et Saturne. Les images ci-dessous sont prises en lumière ultraviolette



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



Le ciel nocturne vu depuis l'espace



Poussières interplanétaires

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

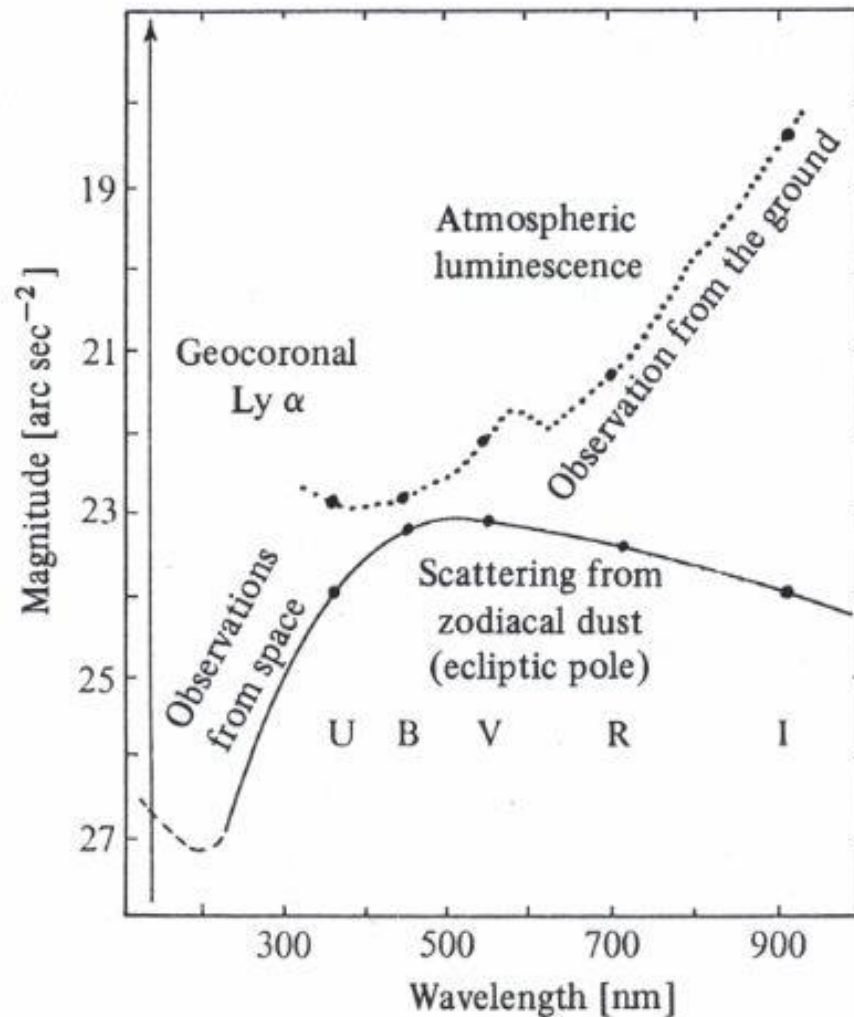


Poussières interplanétaires



L'atmosphère terrestre: bilan global

Brillance de surface du ciel nocturne



Phosphorescence atmosphérique (airglow)

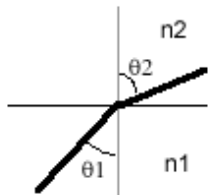


Réfraction atmosphérique

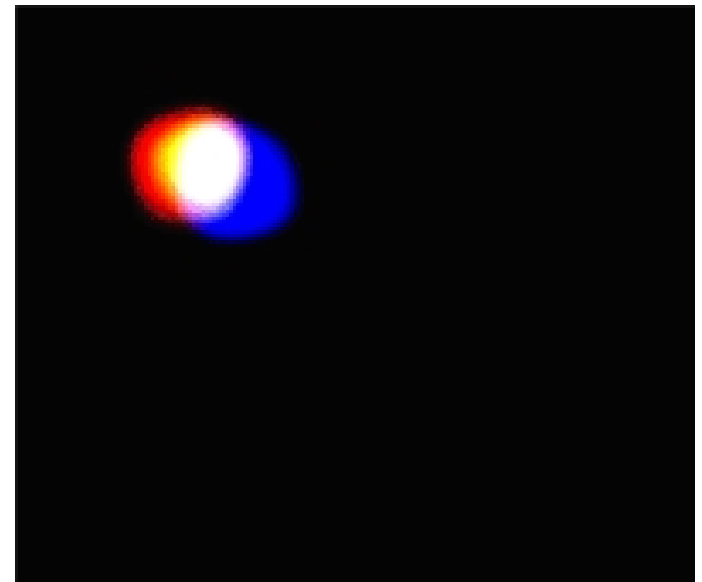
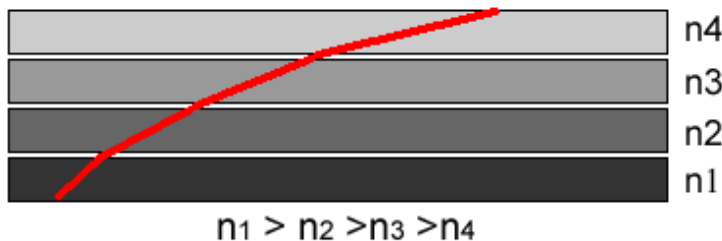
L'atmosphère agit comme un prisme

- 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



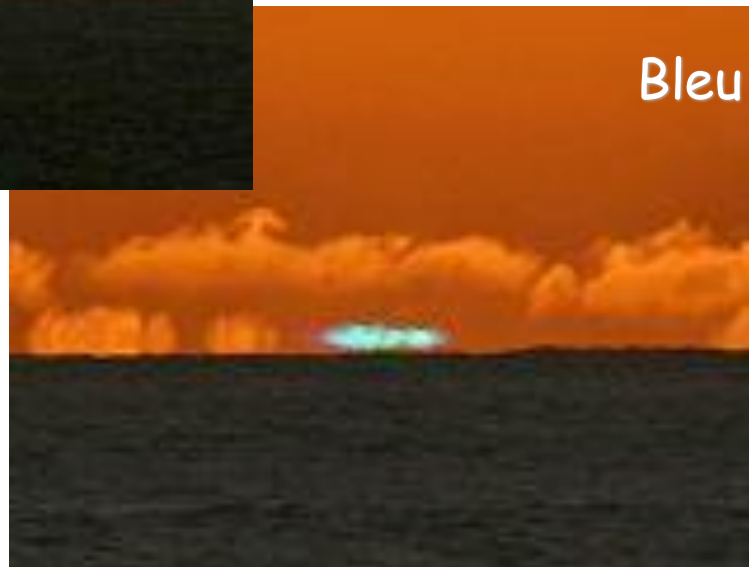
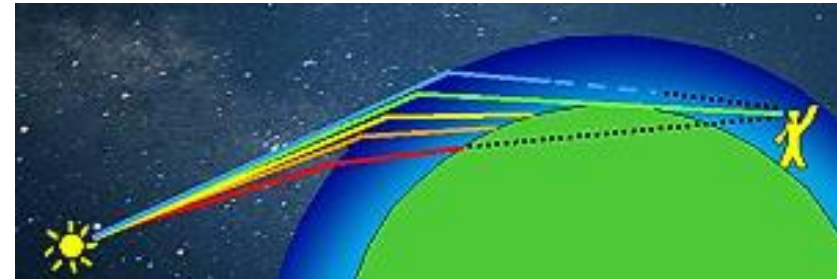
$$\frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$



Exemple de réfraction atmosphérique: le « flash vert »



Exemple de réfraction atmosphérique: le « flash vert »



Exemple de réfraction atmosphérique: le « flash vert »

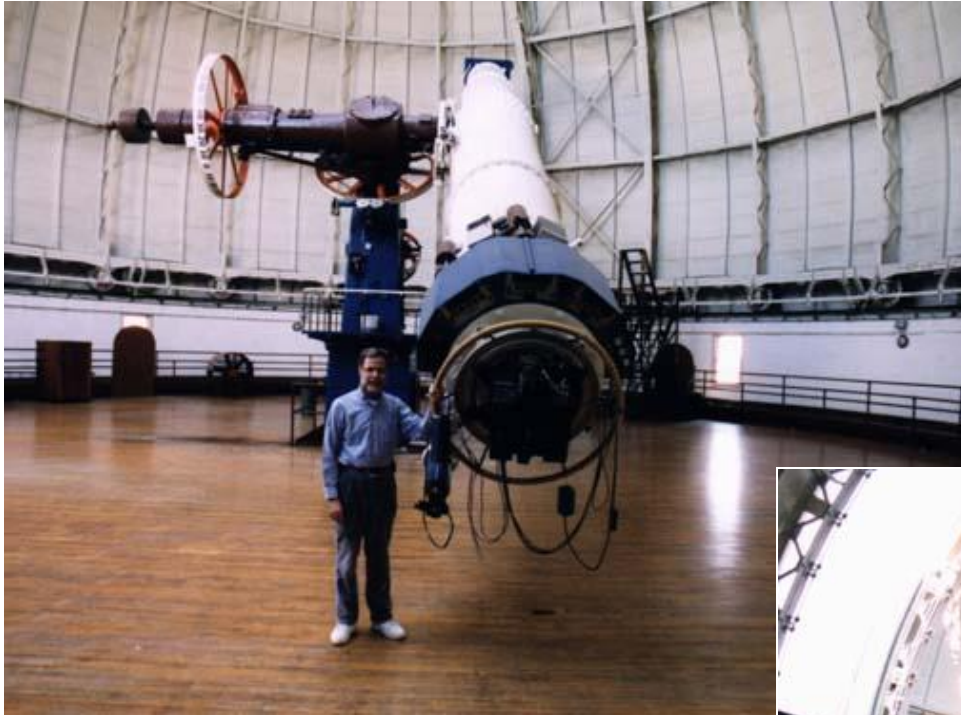


Lunettes astronomiques

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

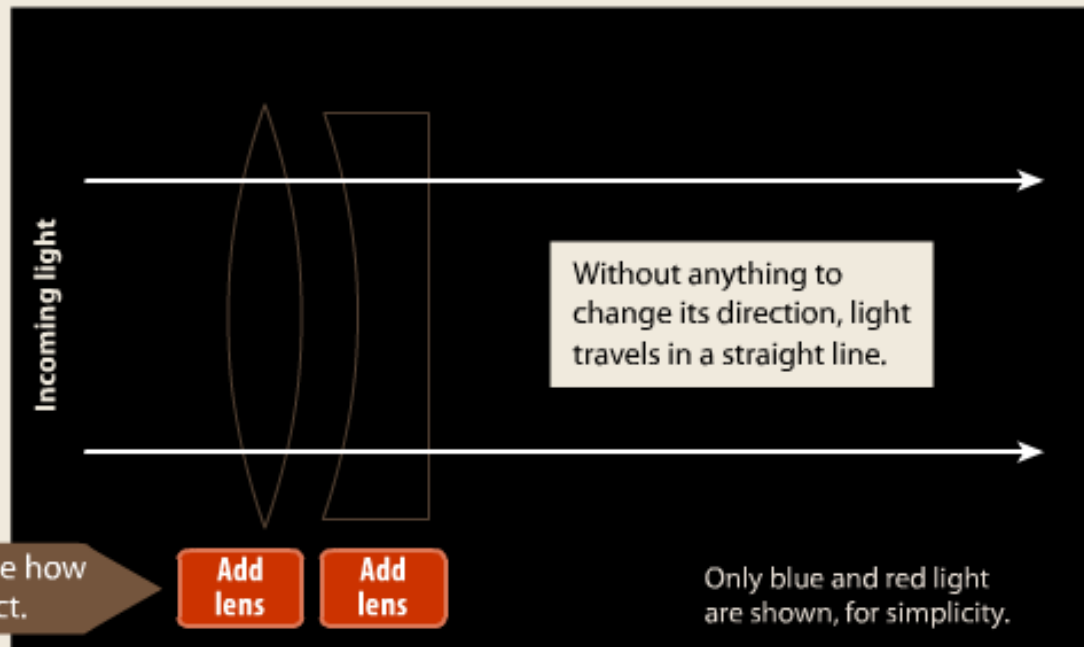
Principe du « doublet achromatique ».

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.



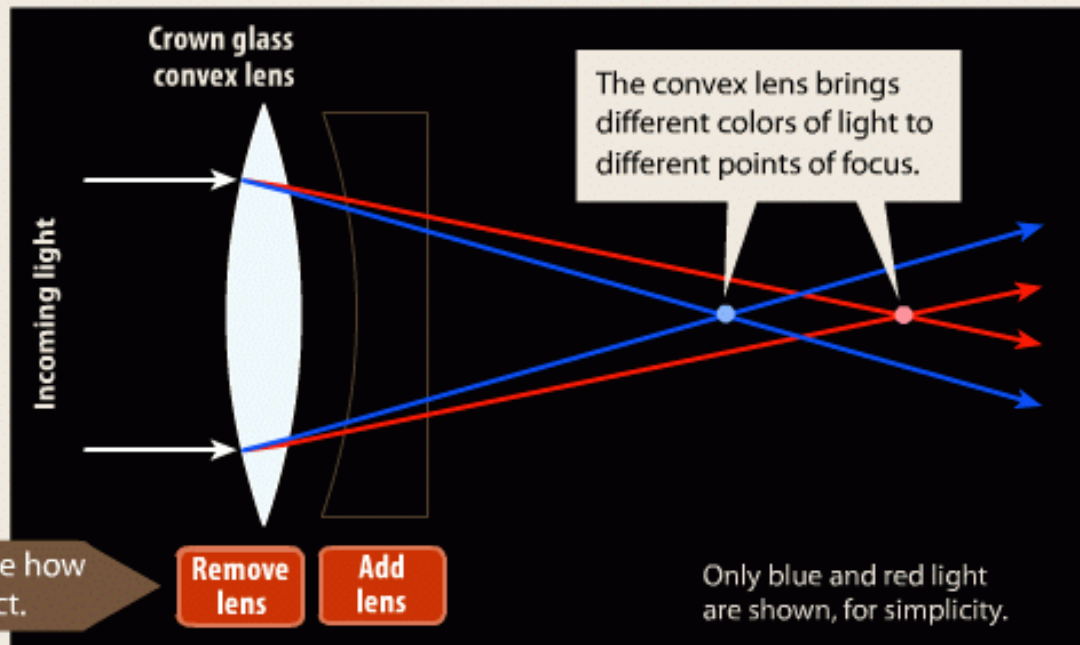
Lunettes astronomiques

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

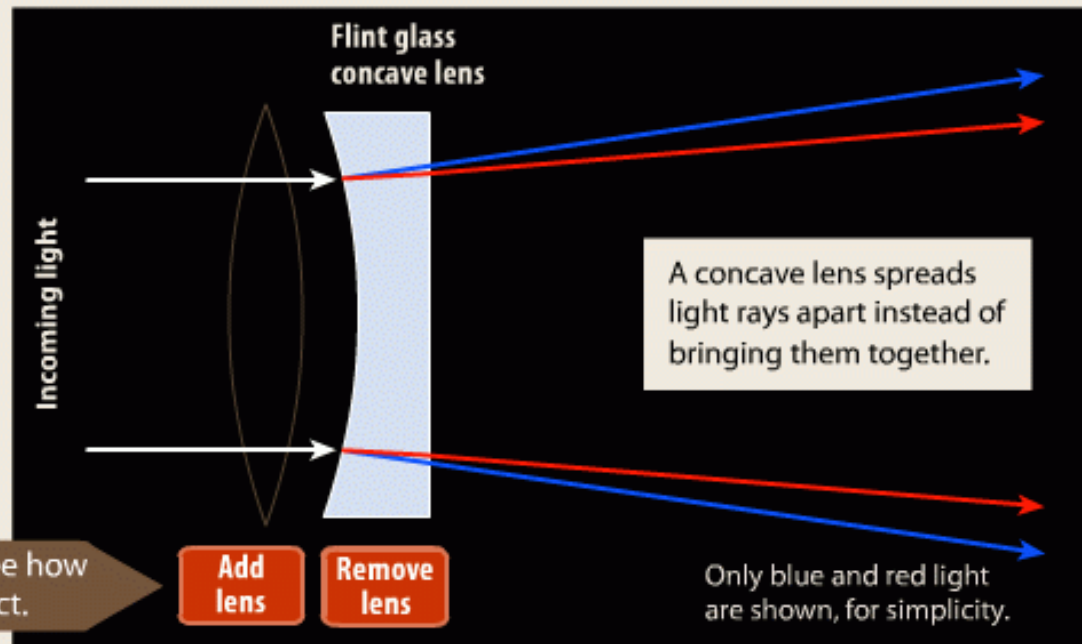
Principe du « doublet achromatique ».

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

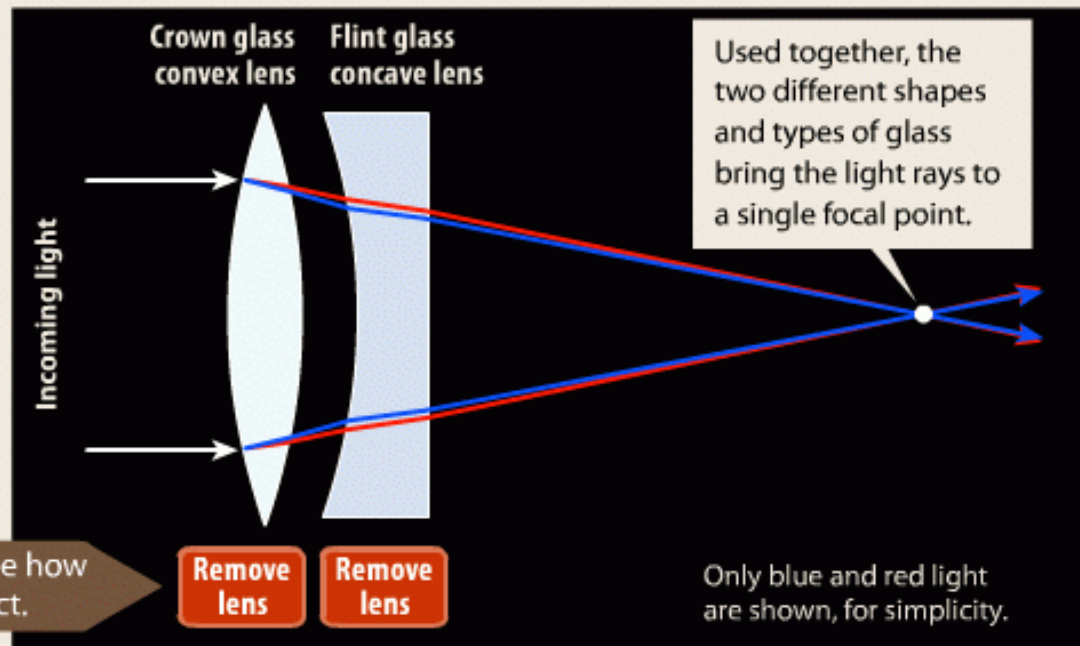
Principe du « doublet achromatique ».

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.



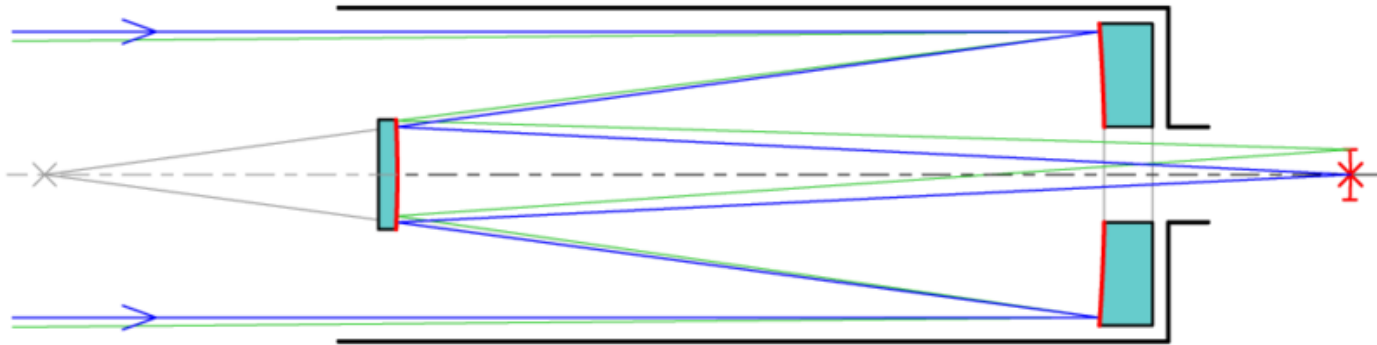
Télescopes à miroirs

Un miroir forme l'objectif

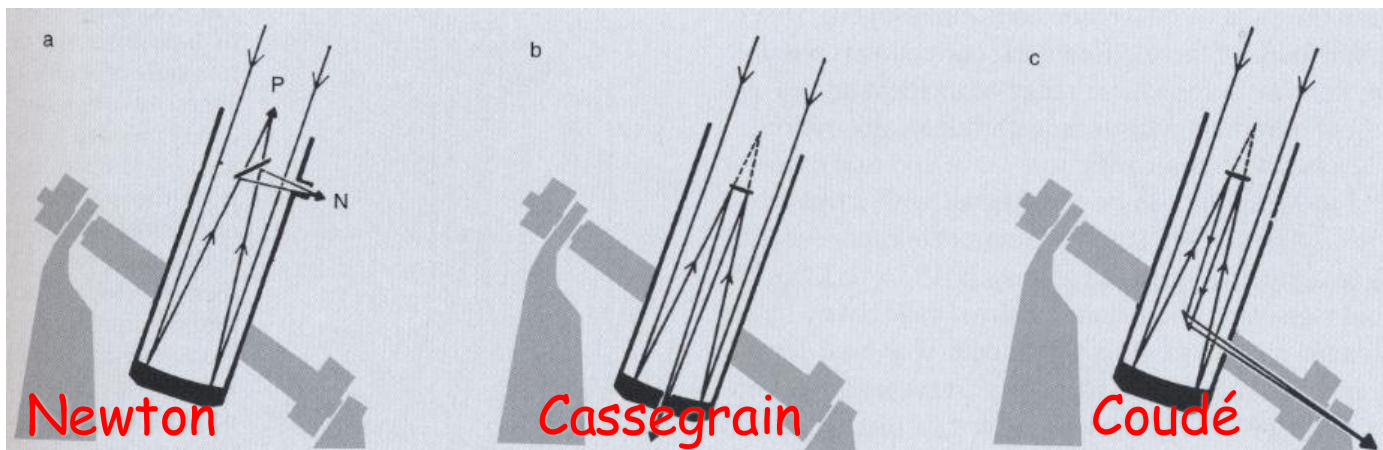
- Le télescope de Newton fonctionne sur ce principe
- Grande taille de miroir
- Plus grande efficacité lumineuse
- Possibilité de miroirs segmentés
- A-chromatique
- Structure plus compacte
- Obstruction centrale due au miroir secondaire

Télescopes à miroirs

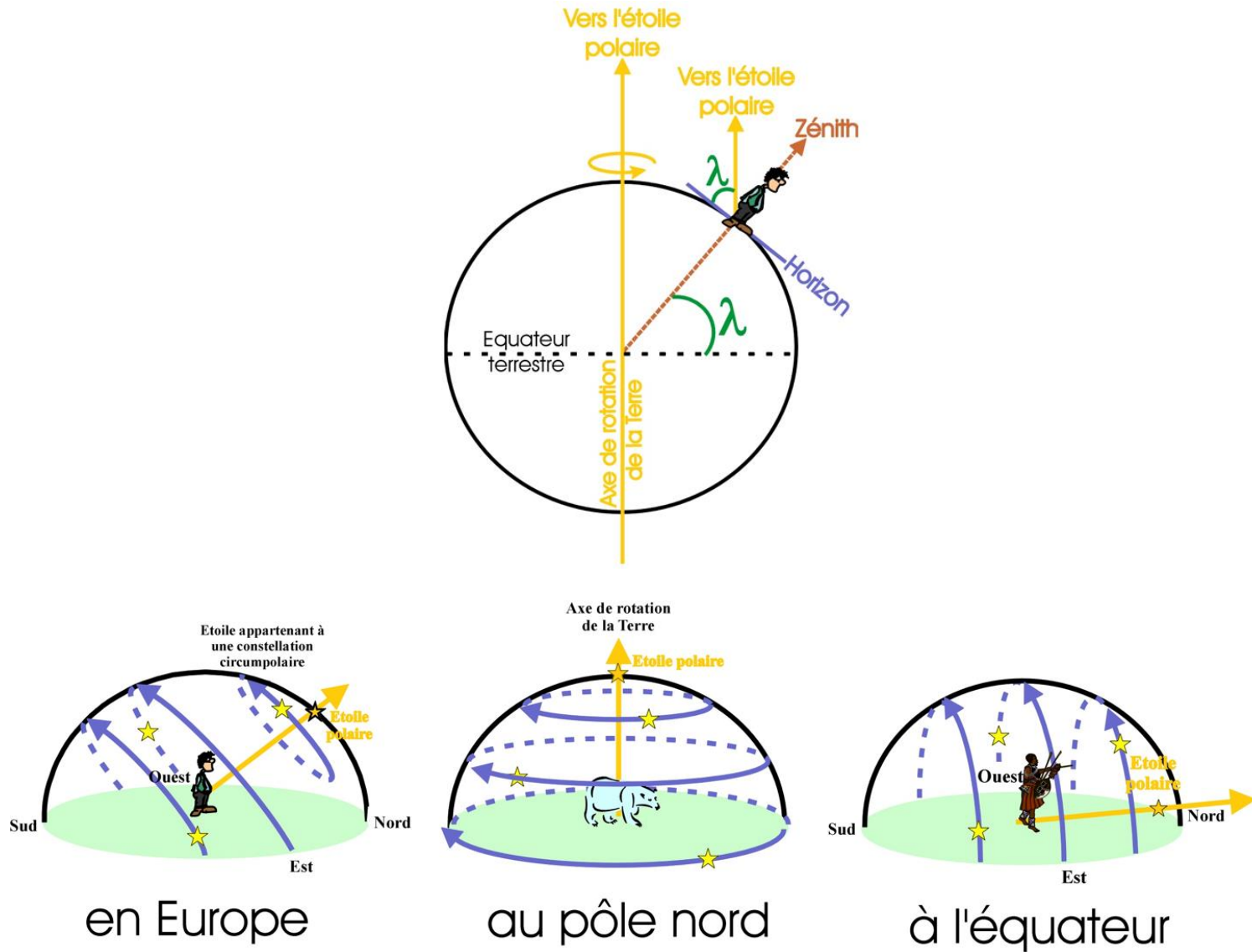
Principes optiques pour des miroirs paraboliques



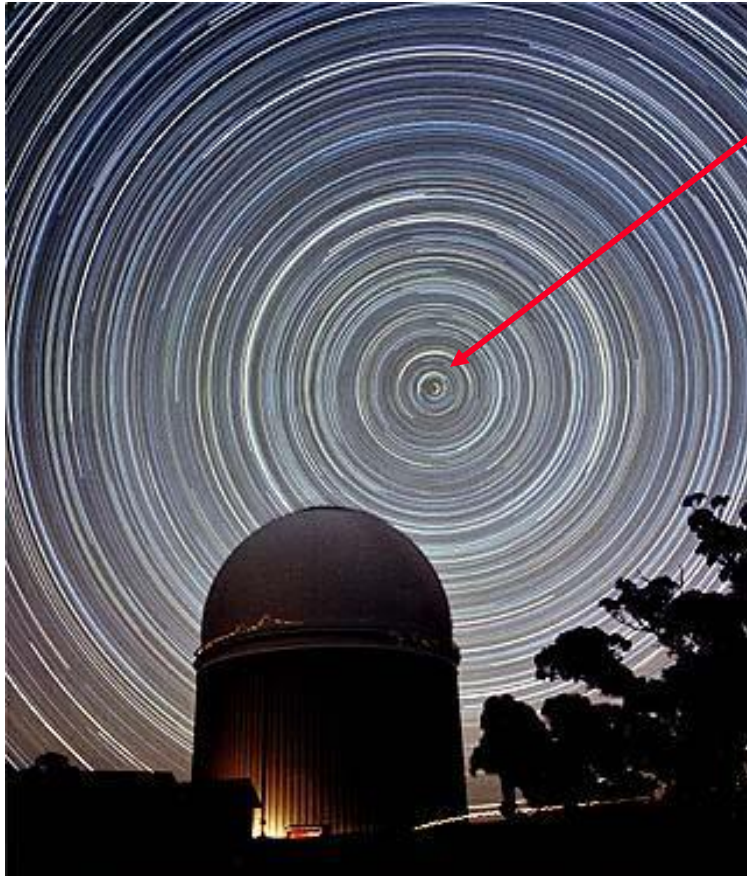
Différents types de montures dites « équatoriales »



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



Télescopes à miroirs

Télescope de 5 m de diamètre du Mont Palomar



Qualité des observations

Observations profondes:

- Grand miroir
- Longues poses

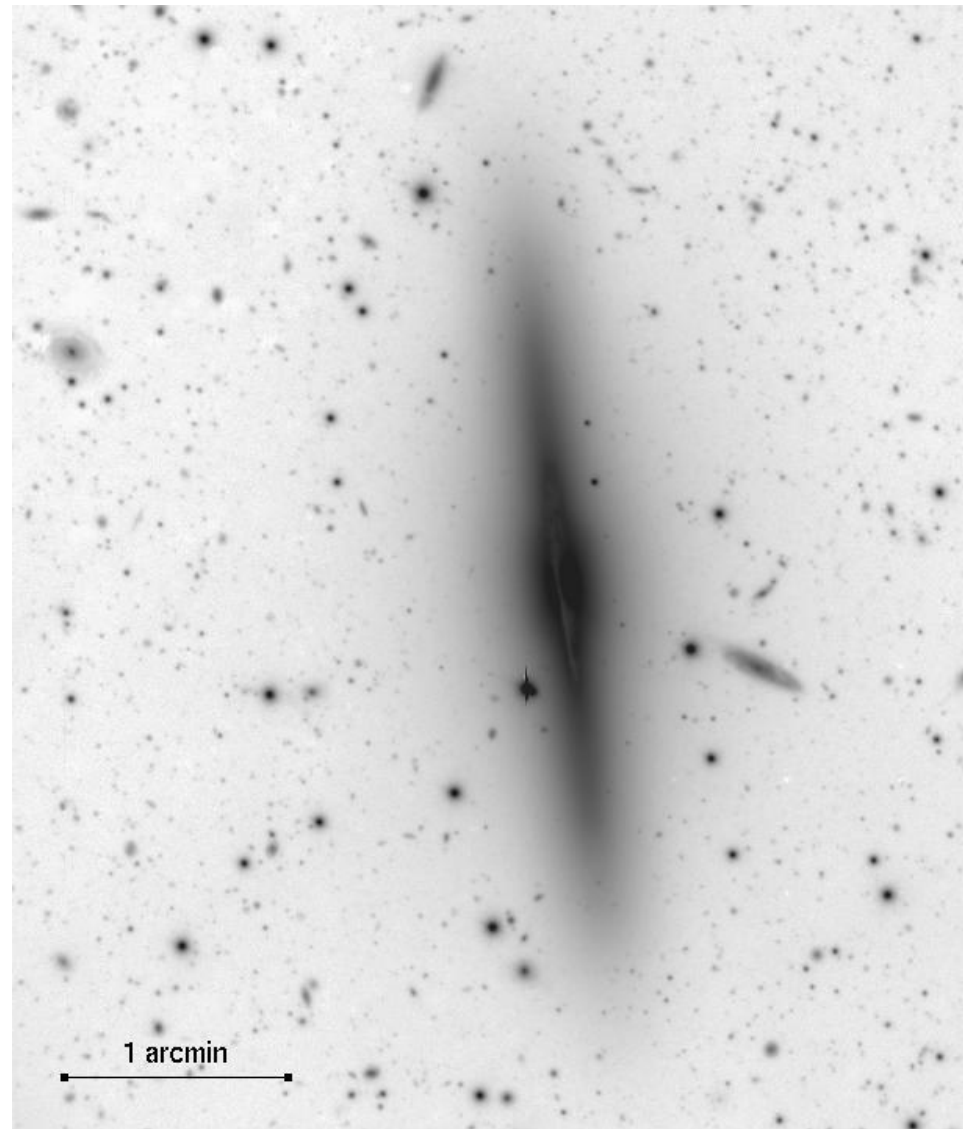
Images nettes:

- 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.

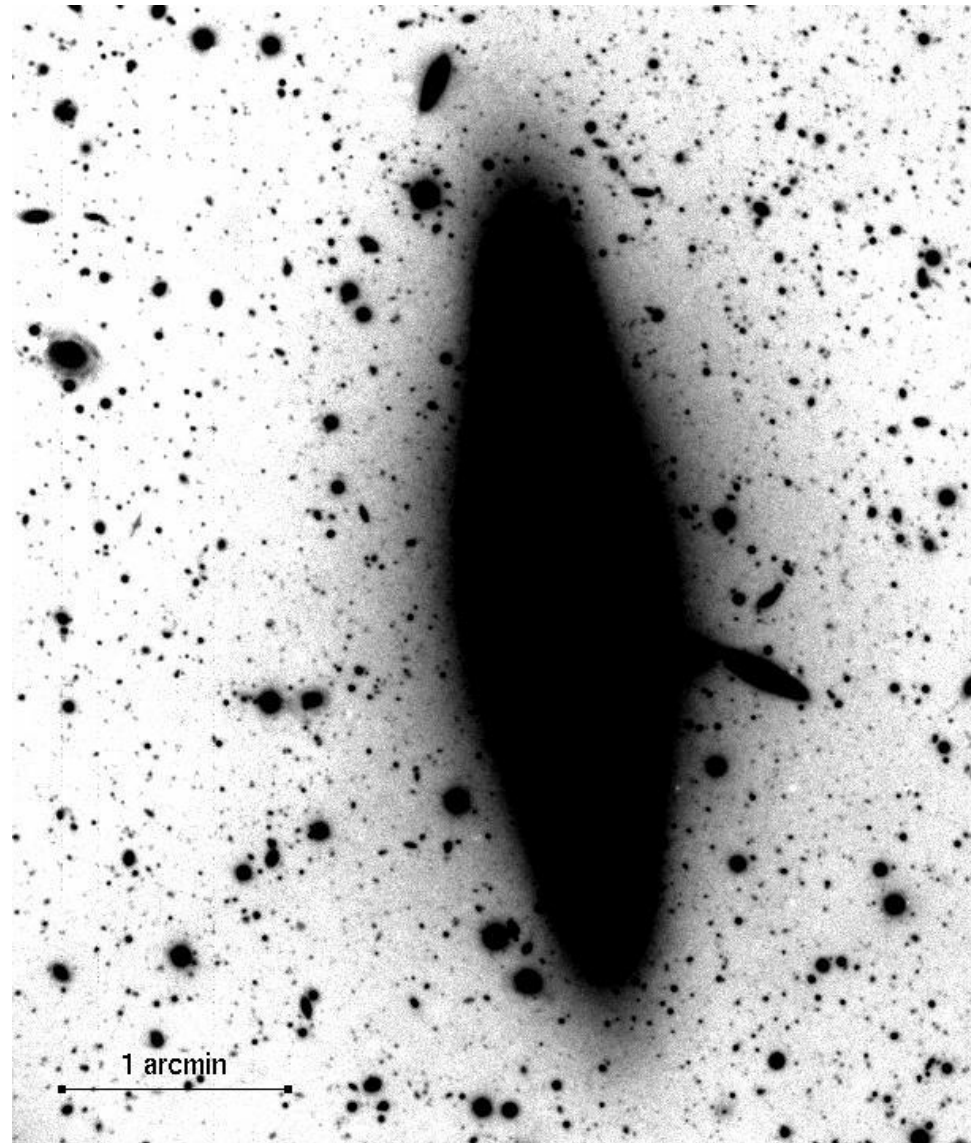
Pose courte (1 min)



Images « profondes »

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

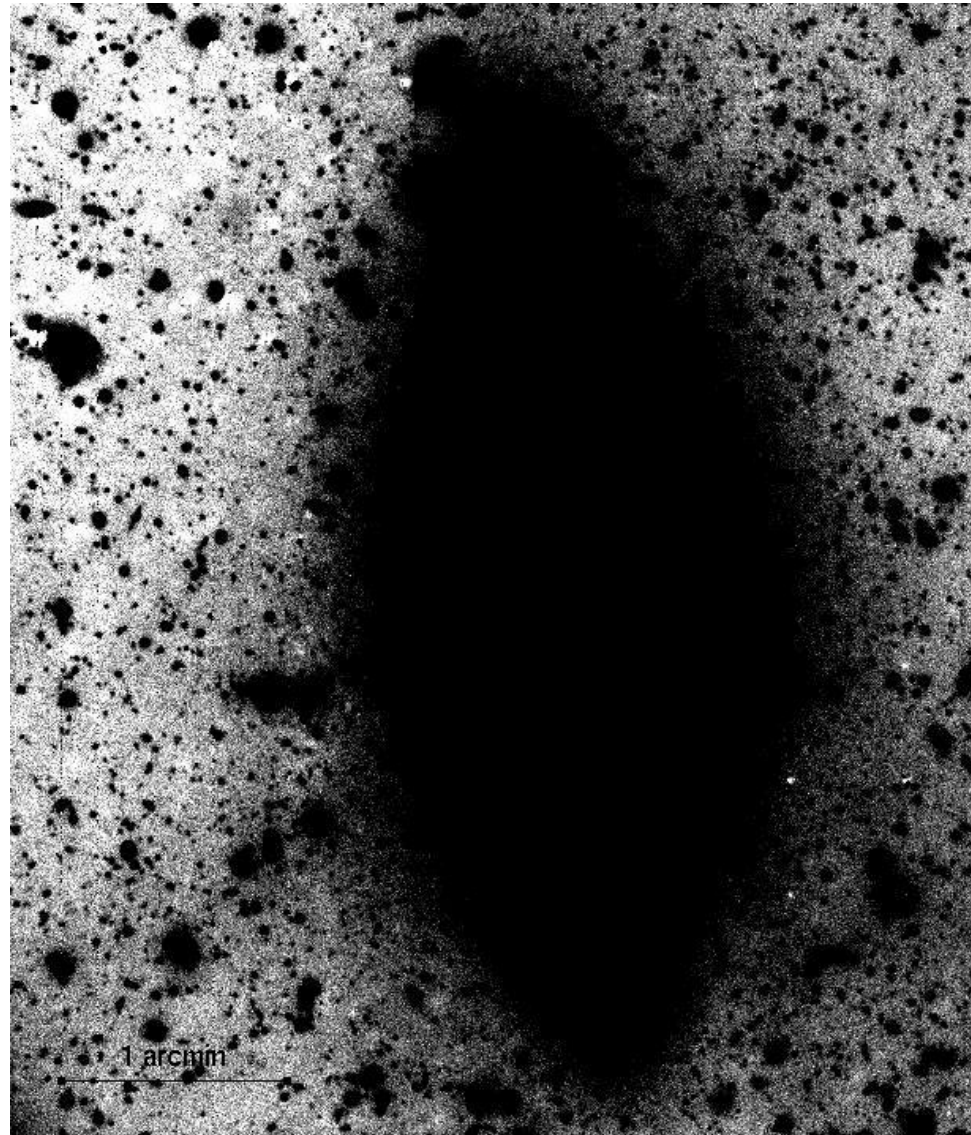
Pose moyenne (30 min)



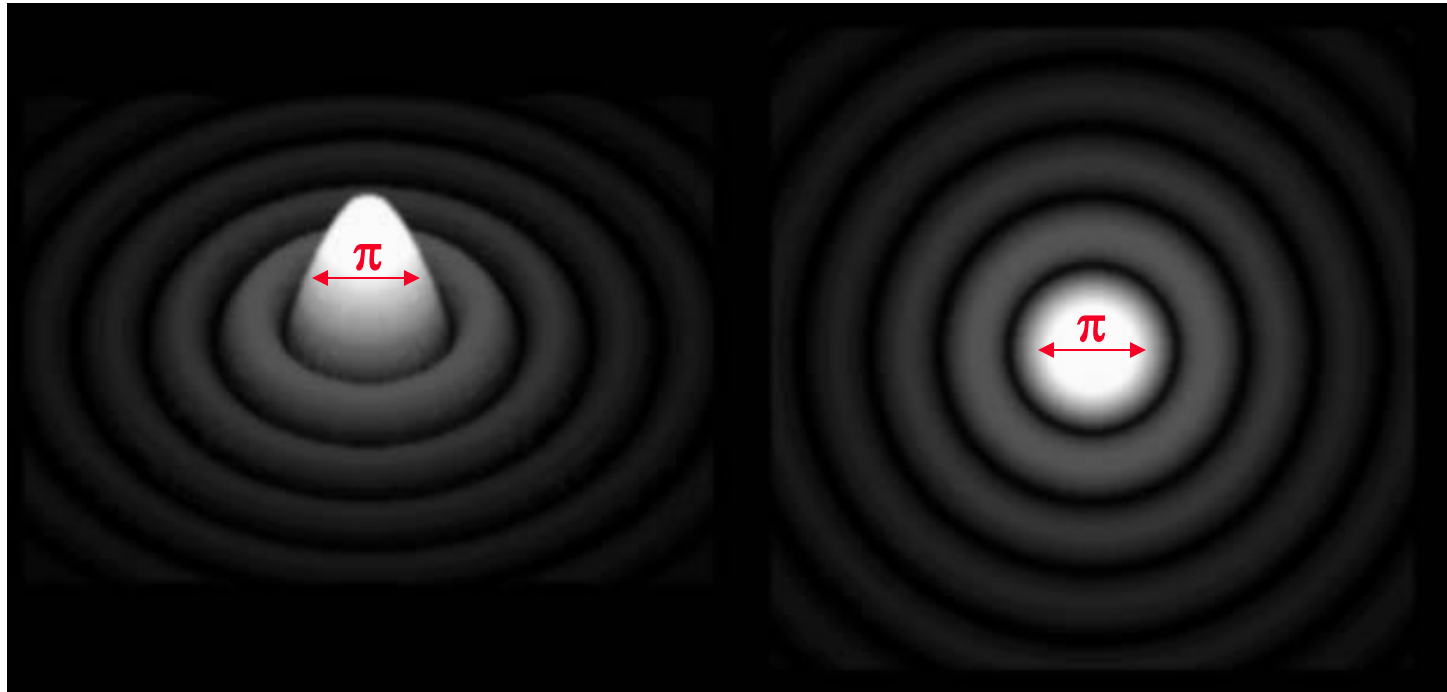
Images « profondes »

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

$$\rho = \frac{1,22 /}{D}$$

Télescopes optiques géants

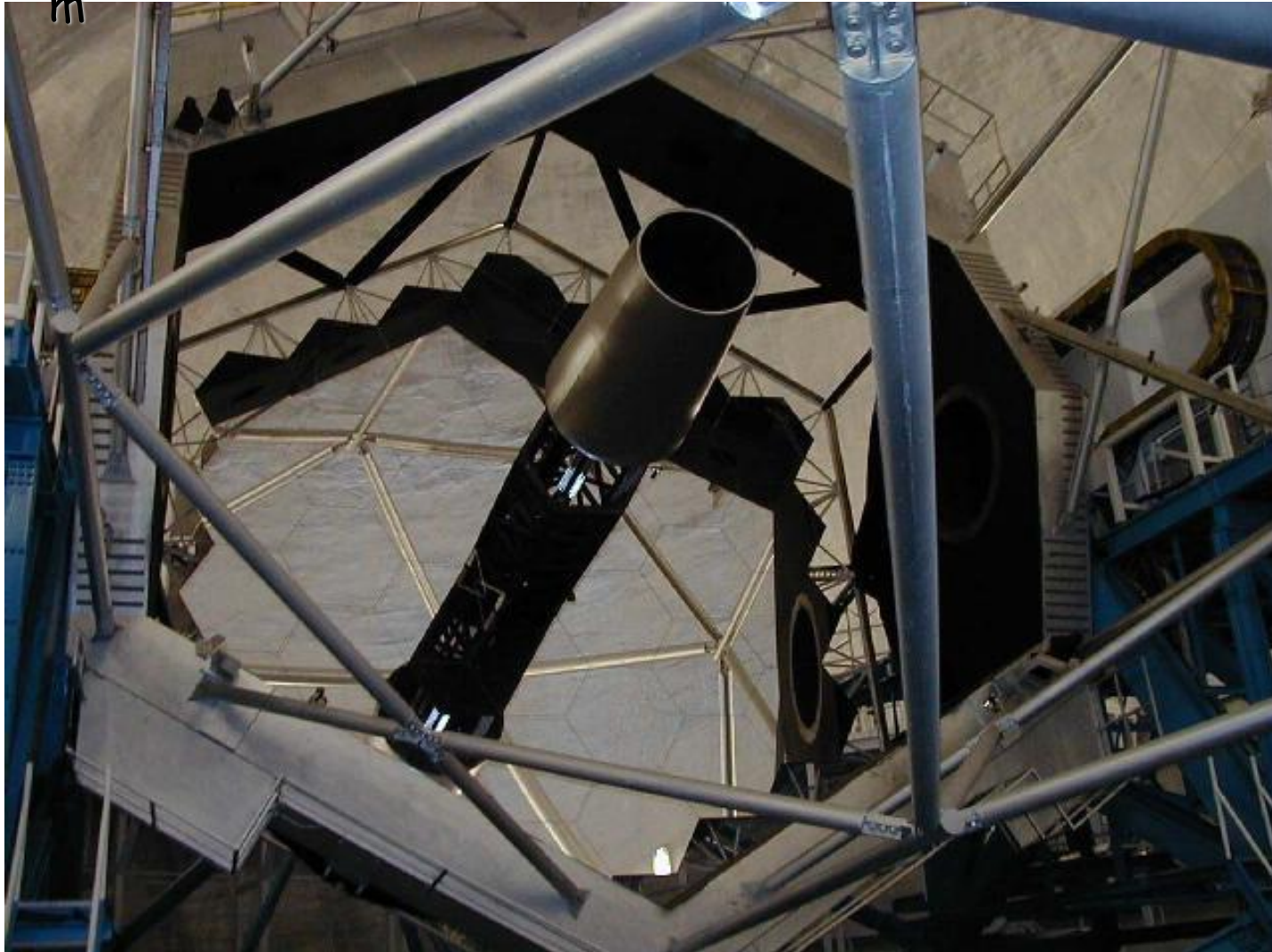
Observatoire Keck: 2 x 10 m (Caltech & UC), Hawaii, Mauna Kea



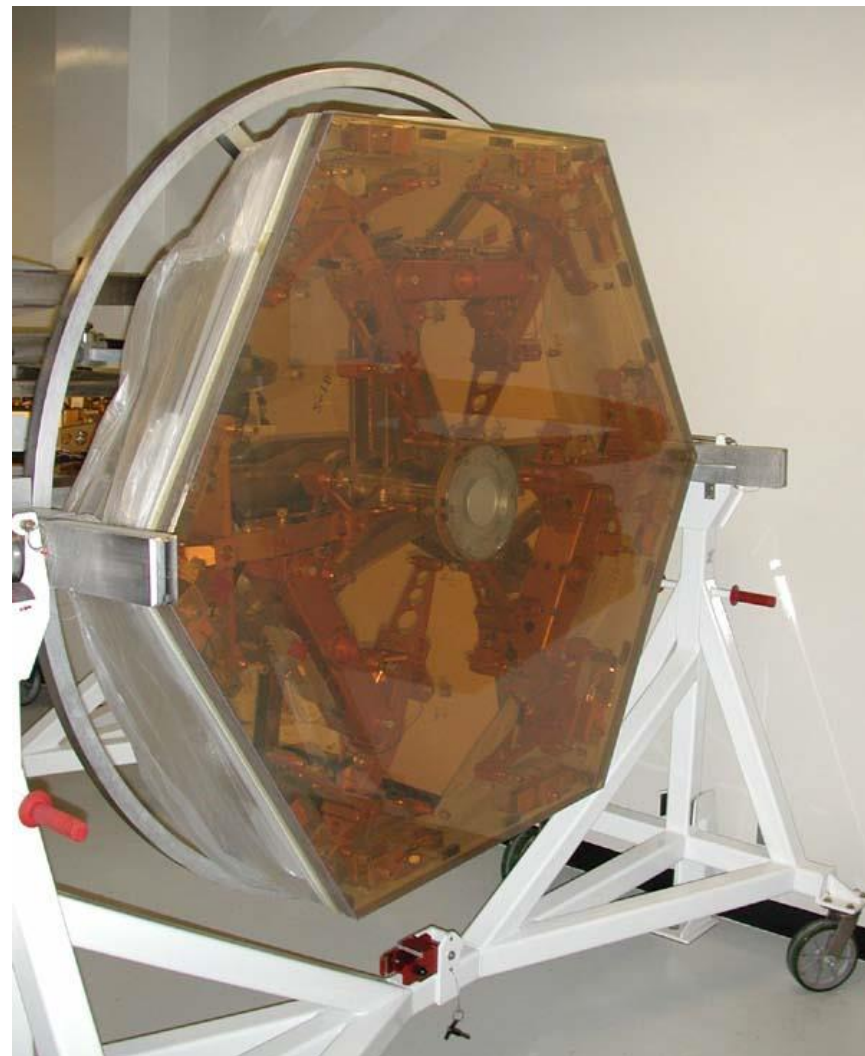
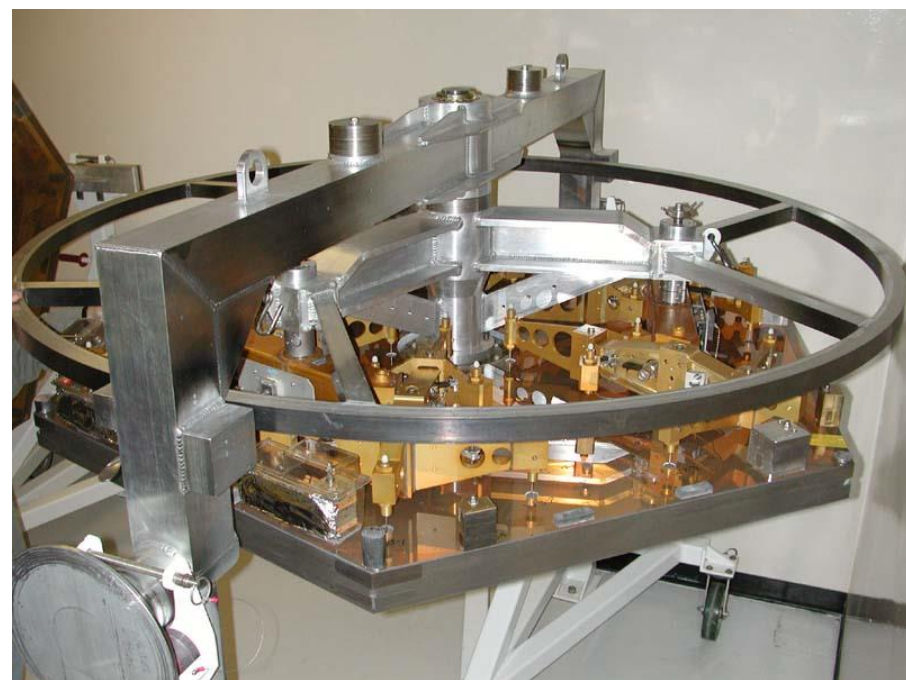
Copyright: W.M. Keck Observatory

Télescopes optiques géants

Observatoire Keck: 36 segments hexagonaux de 1.8 m

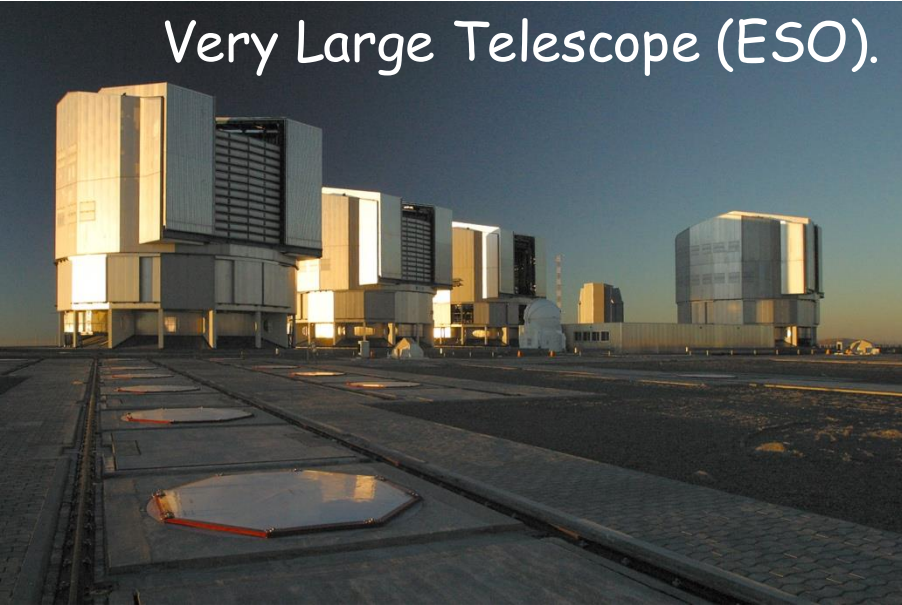


Télescopes optiques géants



Télescopes optiques géants

Very Large Telescope (ESO).

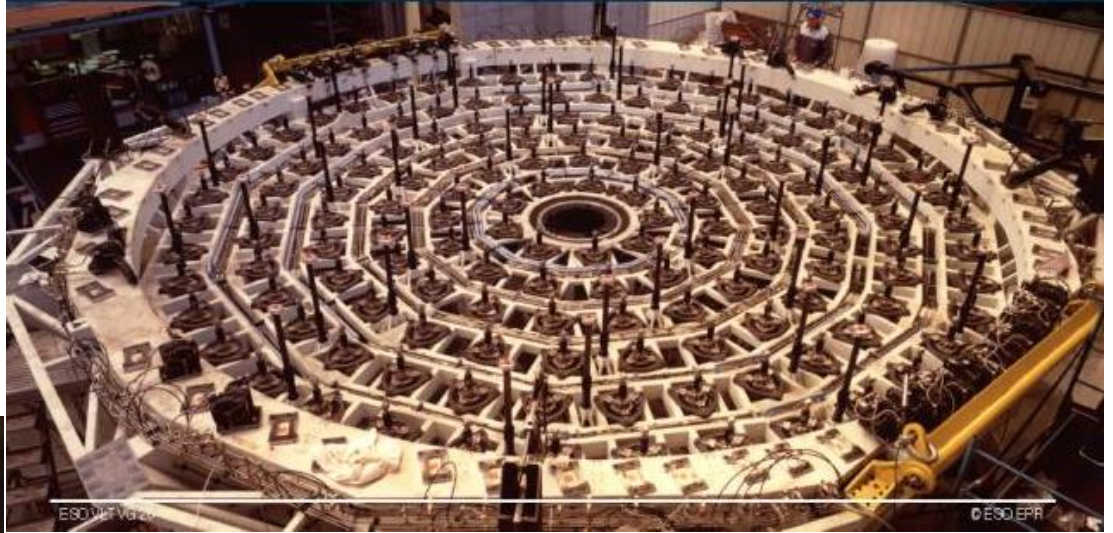


Cerro Paranal, Chili: 4 x 8 m
(European Southern
Observatory: ESO).



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

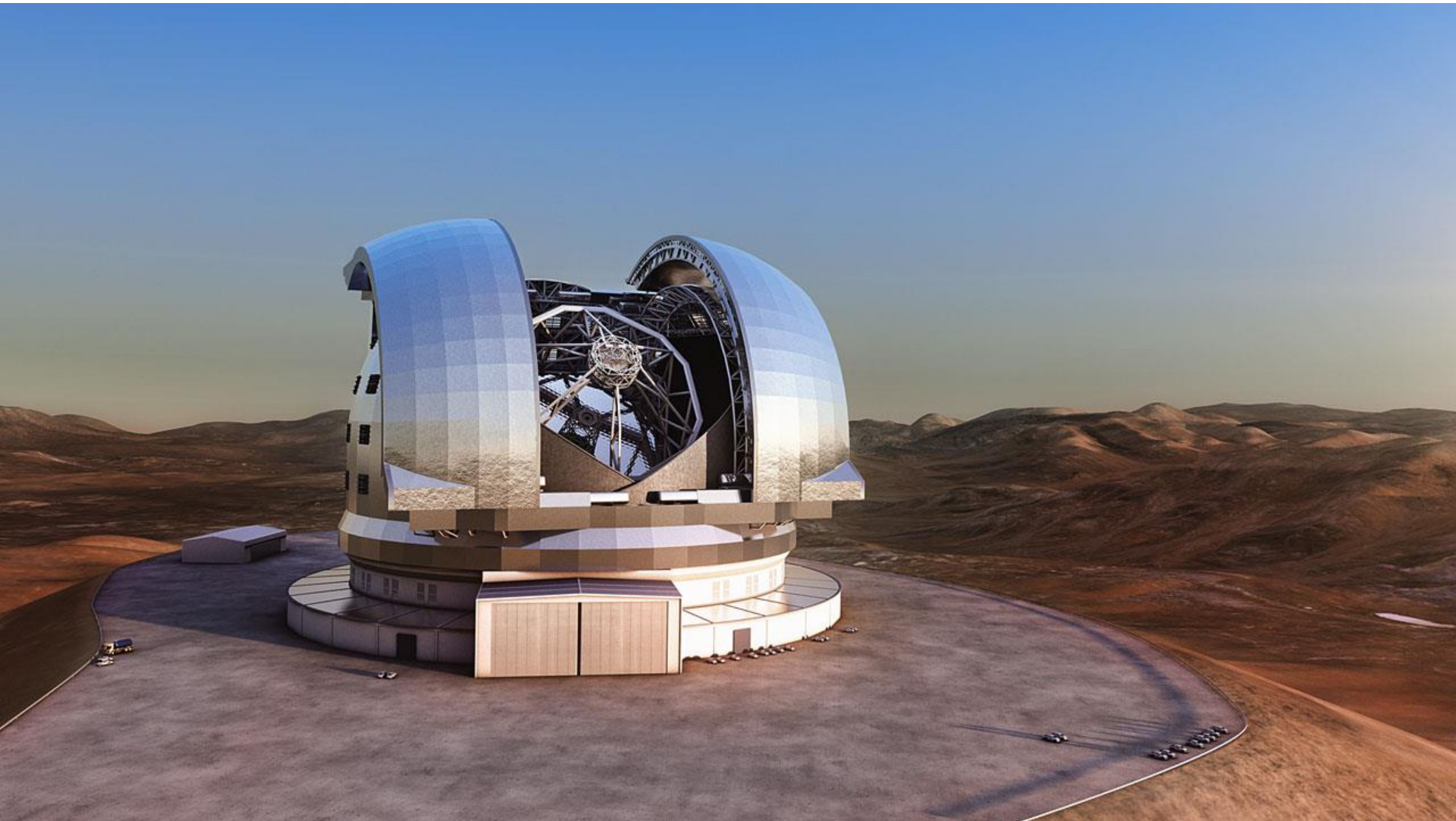
Télescopes optiques géants

Transport des morceaux de télescopes dans les Andes Chiliennes



European Extremely Large Telescope (E-ELT)

Miroirs segmentés de 39.5 m de diamètre + optique adaptative



Site de l'E-ELT en construction

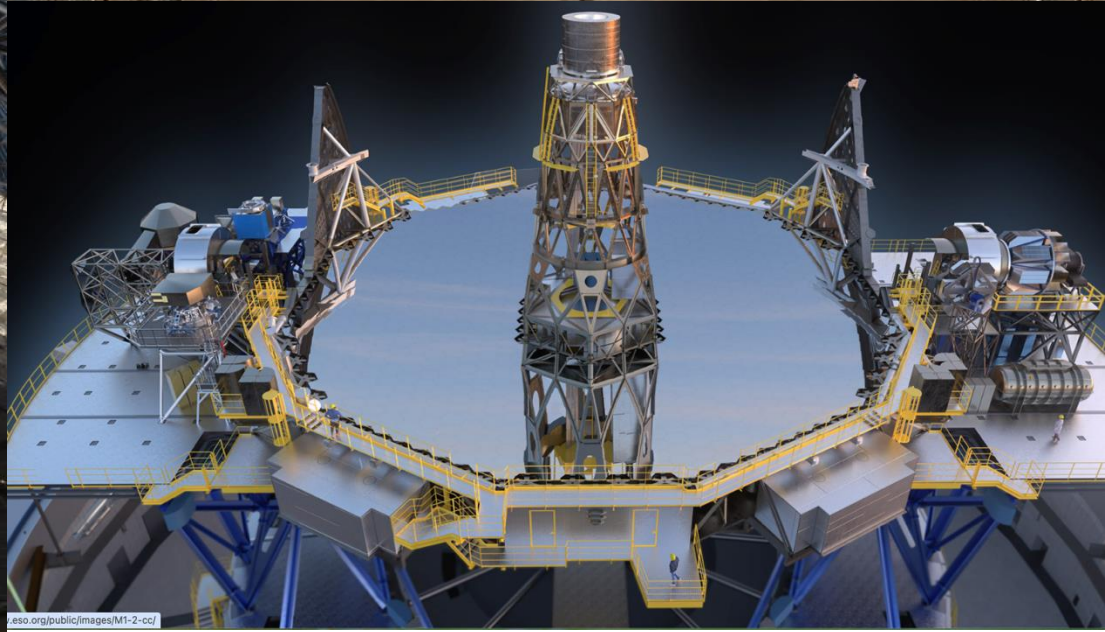


THE EXTREMELY LARGE TELESCOPE

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

Latest Available Image

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



www.eso.org/public/images/M1-2-cc/

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

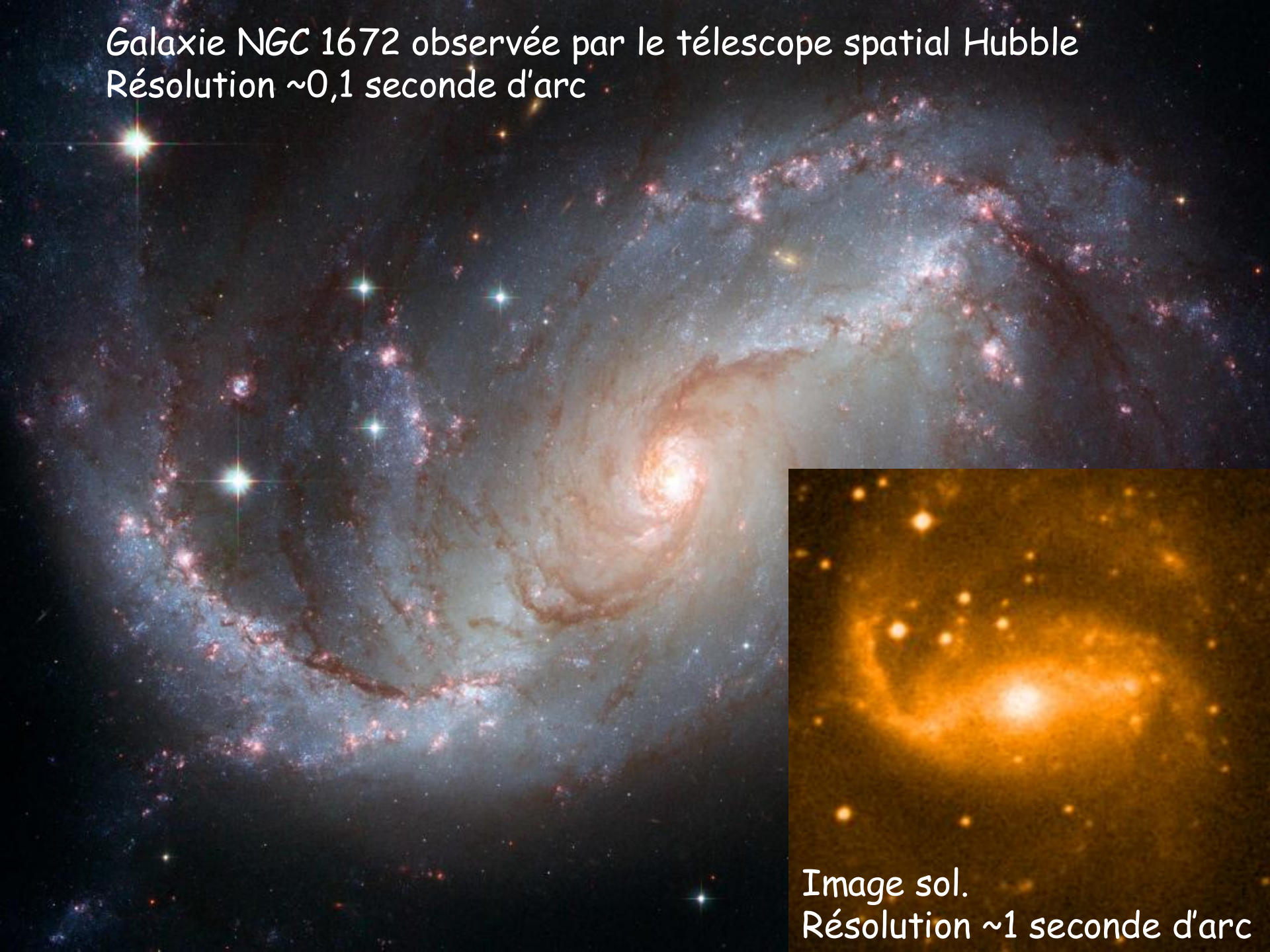
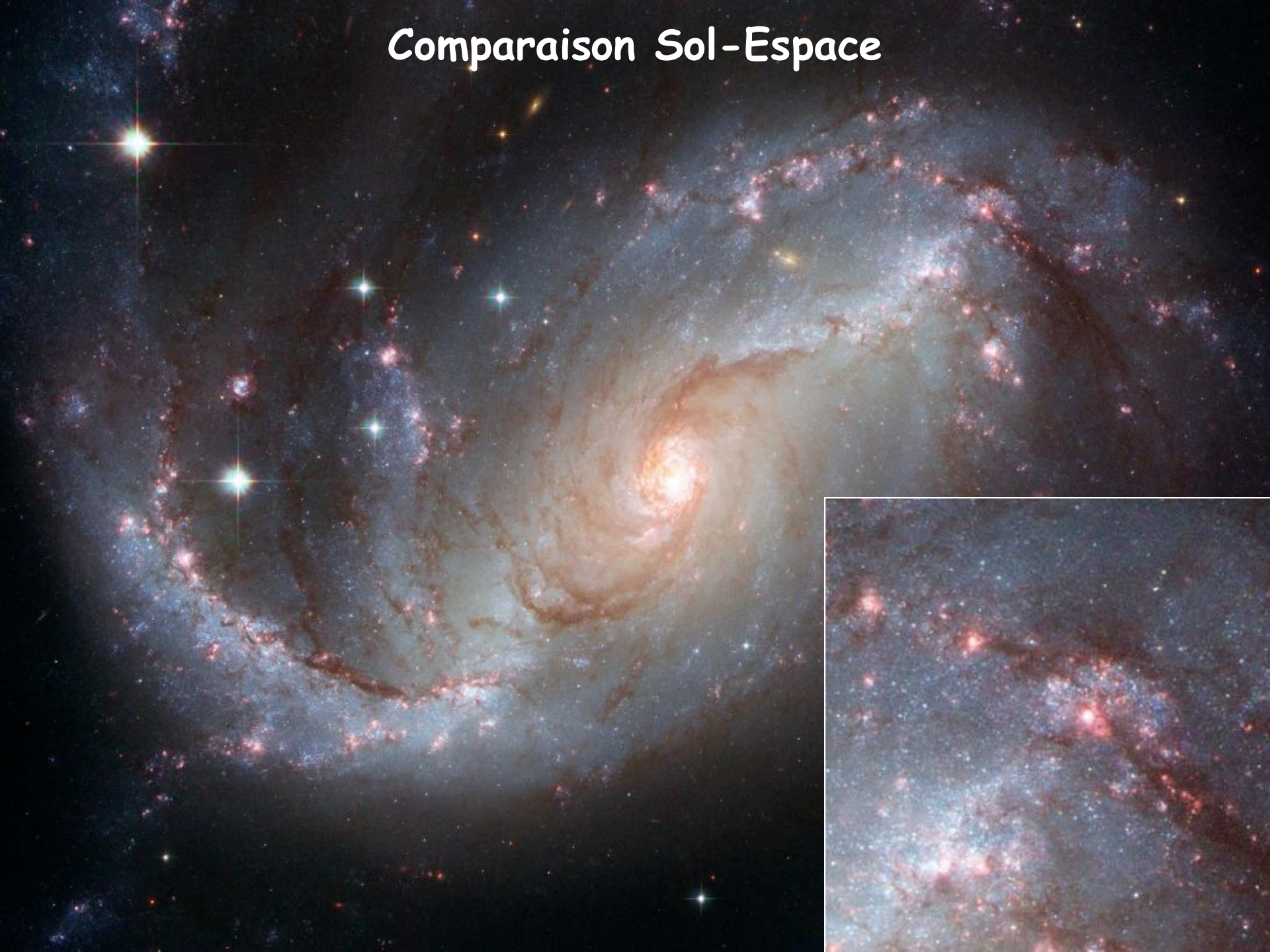


Image sol.
Résolution ~ 1 seconde d'arc

Comparaison Sol-Espace



Optique active et optique adaptative

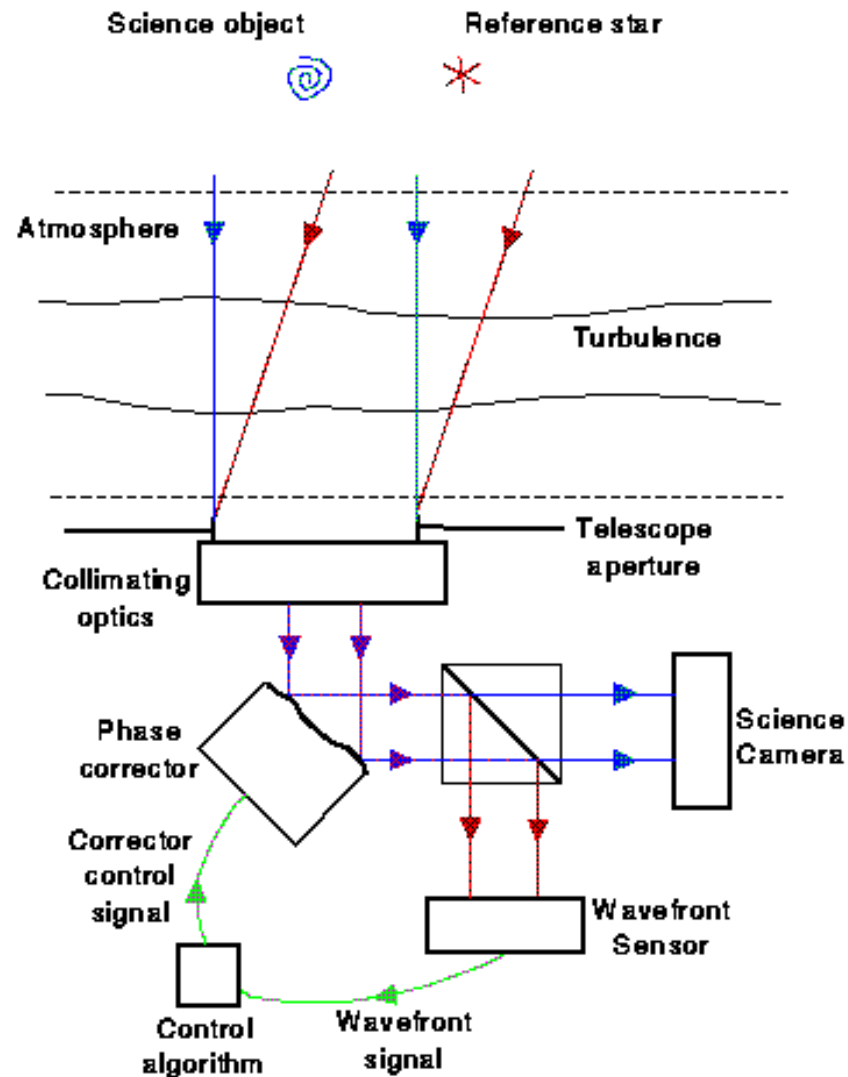
**Optique active:
correction de la déformation du miroir principal**



VLT ACTIVE OPTICS

IMAGE CORRECTIONS

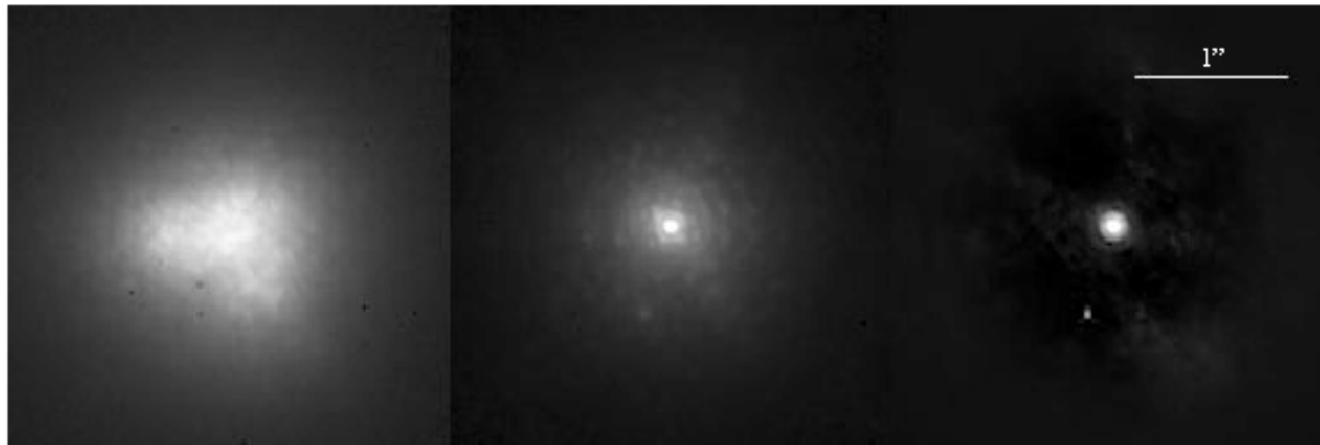
Optique adaptative: correction de la turbulence



Optique adaptative: correction de la turbulence

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

Gemini/Hokupa'a (June 1999)



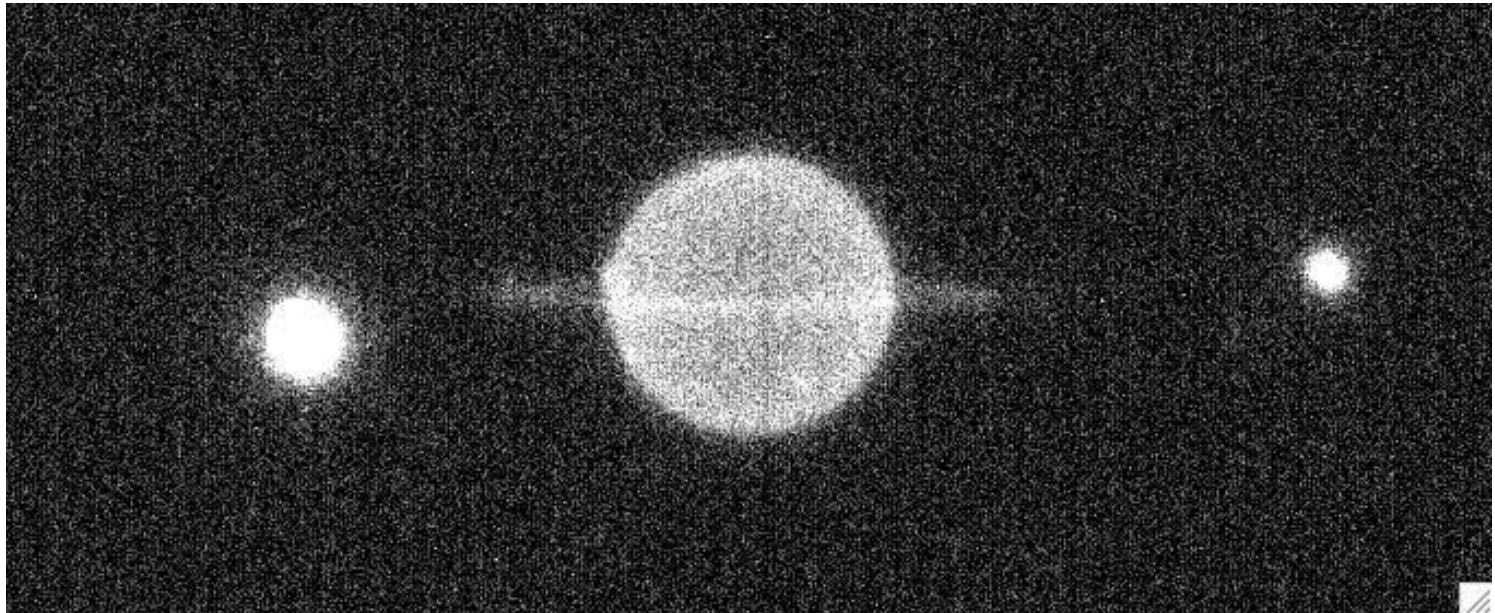
Uncompensated
(Hokupa'a off)

Compensated
(Hokupa'a on)

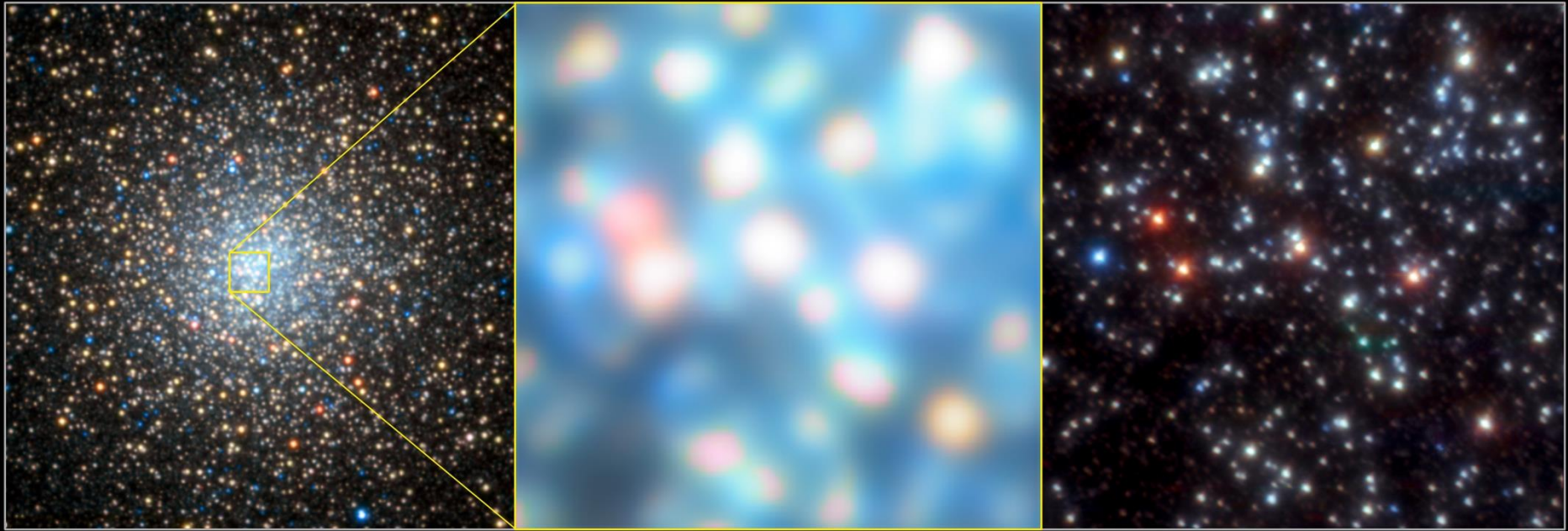
Compensated and
post-processed

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

Optique adaptative: images VLT d'Uranus



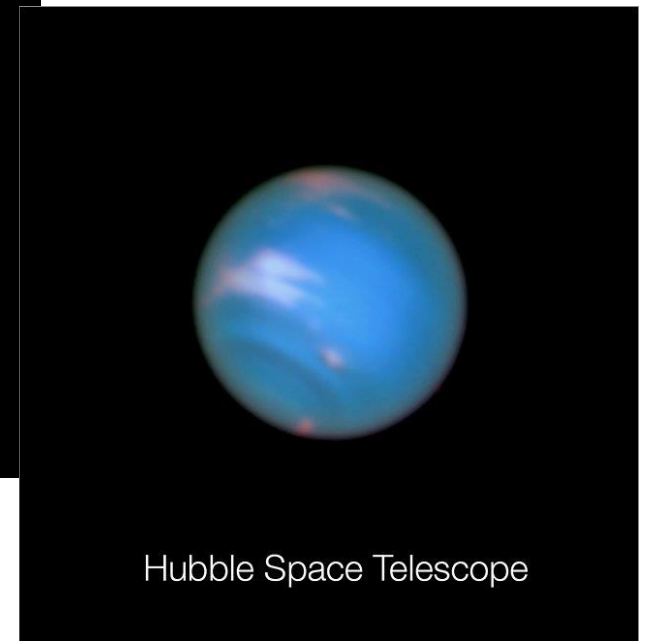
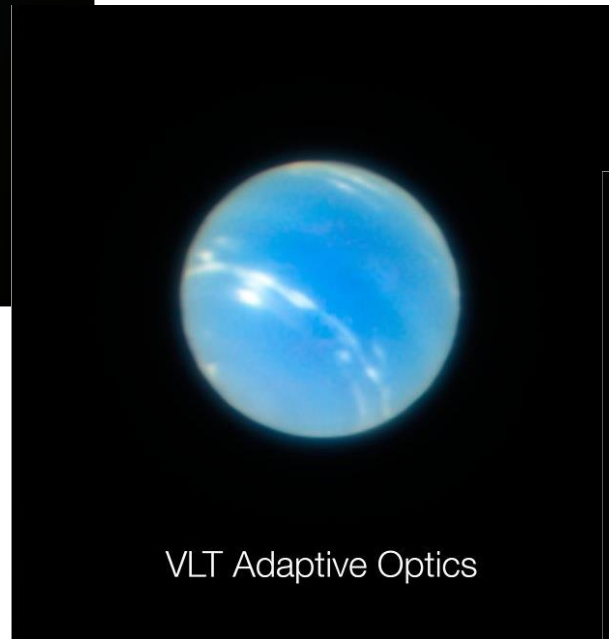
Optique adaptative: correction de la turbulence



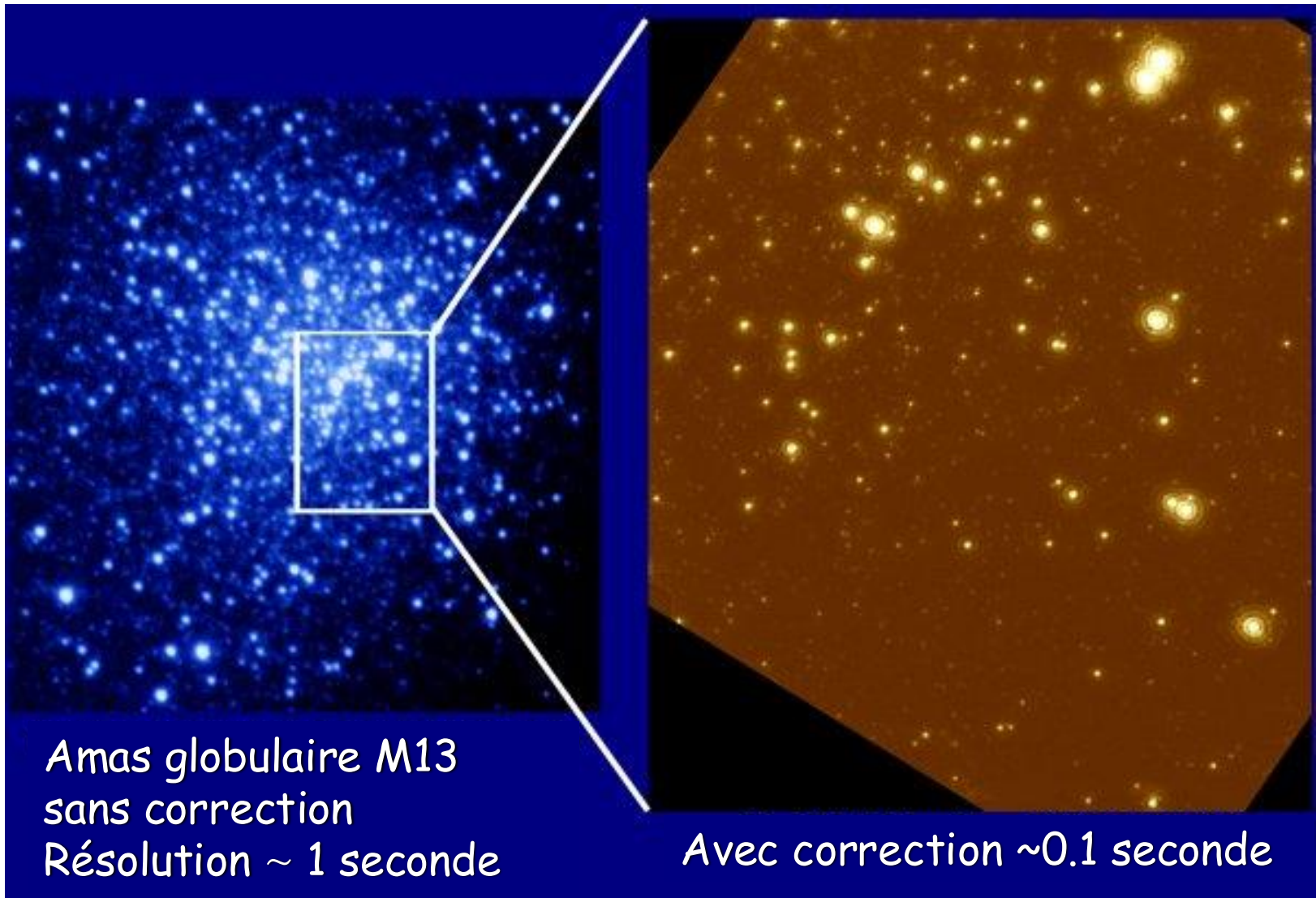
VLT+MUSE Wide Field Mode
without Adaptive Optics

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).



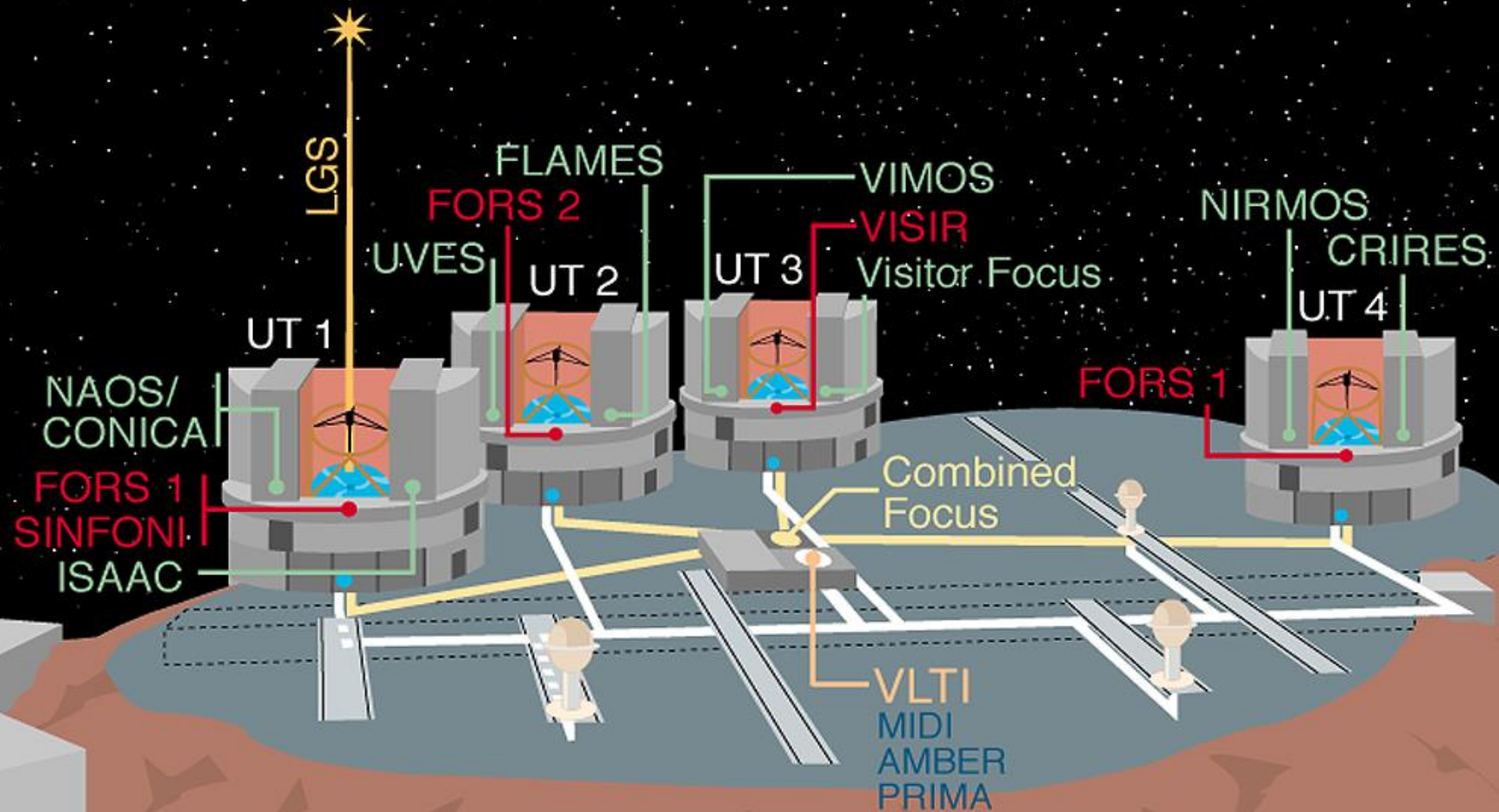
Utilisation d'étoiles guides laser sur la haute atmosphère
(~10 km), ici à l'ESO (Paranal, Chili).



Etoiles laser artificielles



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

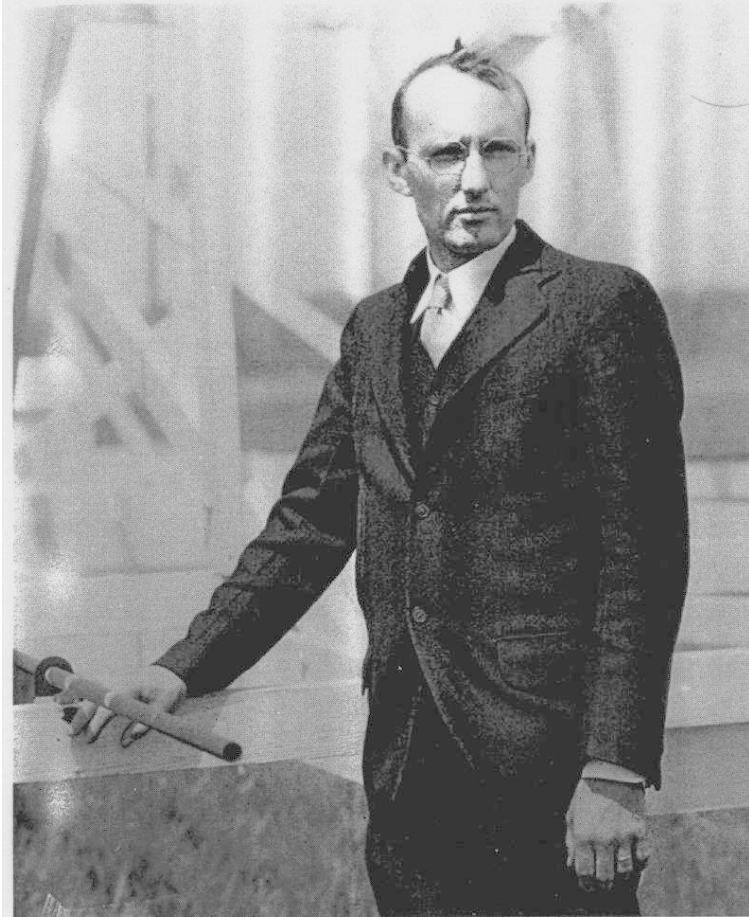
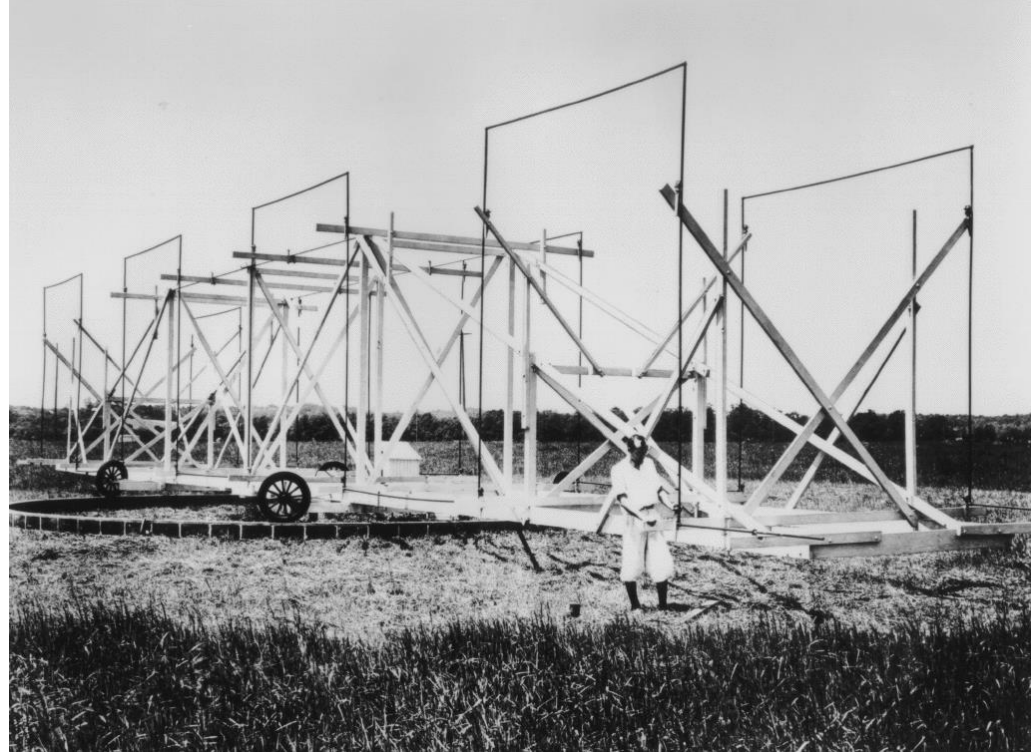


FIG. 1—Karl Guthe Jansky, about 1933.



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

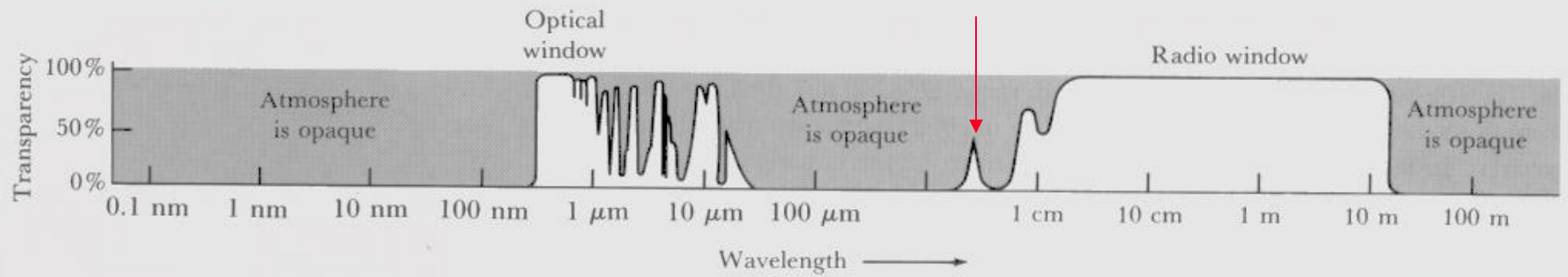


Very Large Array, Nouveau Mexique



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

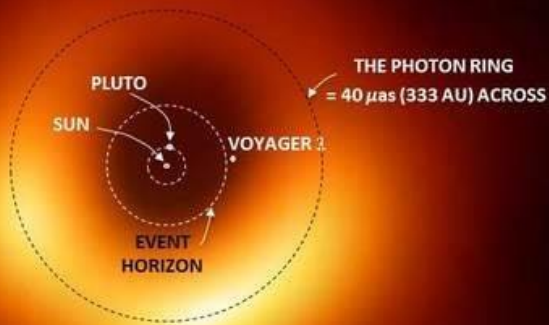
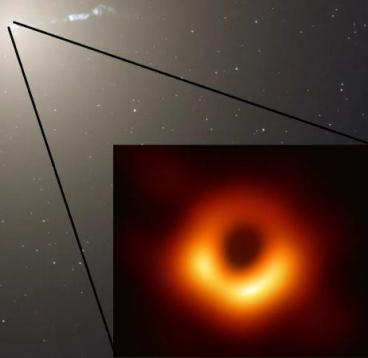
SPT



South Pole Telescope
SOUTH POLE STATION



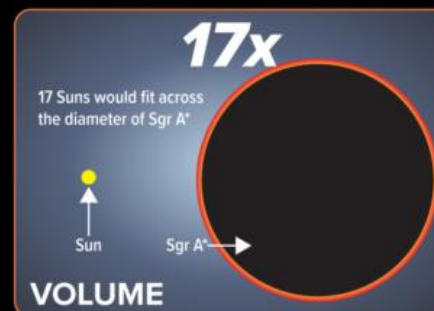
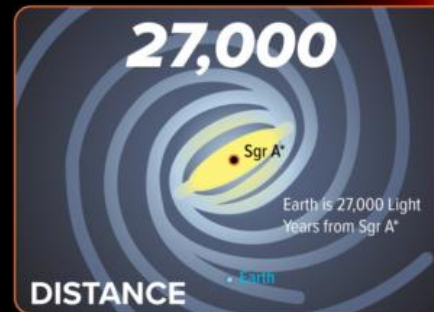
M87



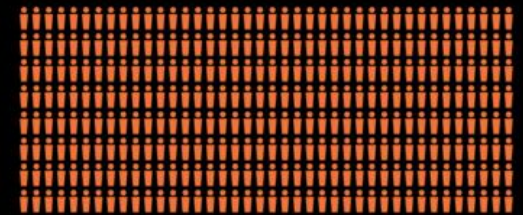
Sagittarius A*

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.



300+ RESEARCHERS



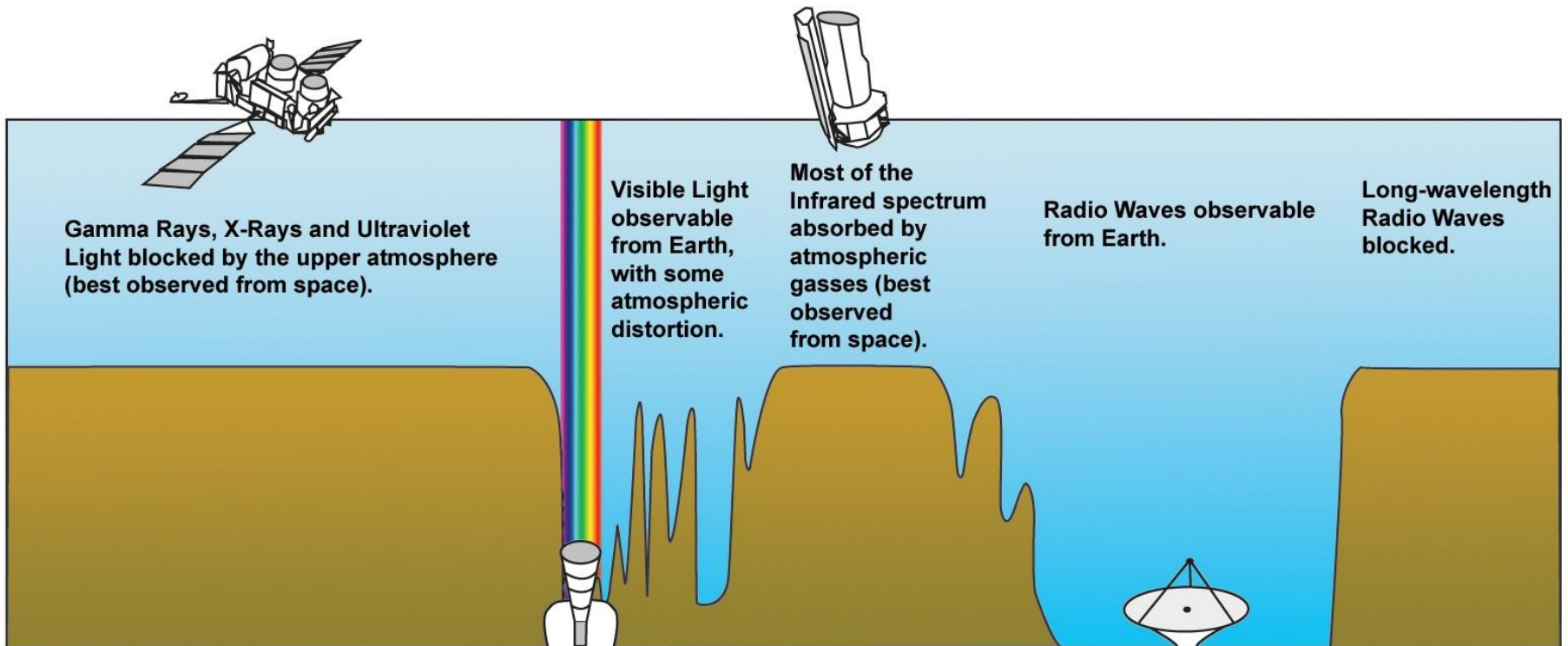
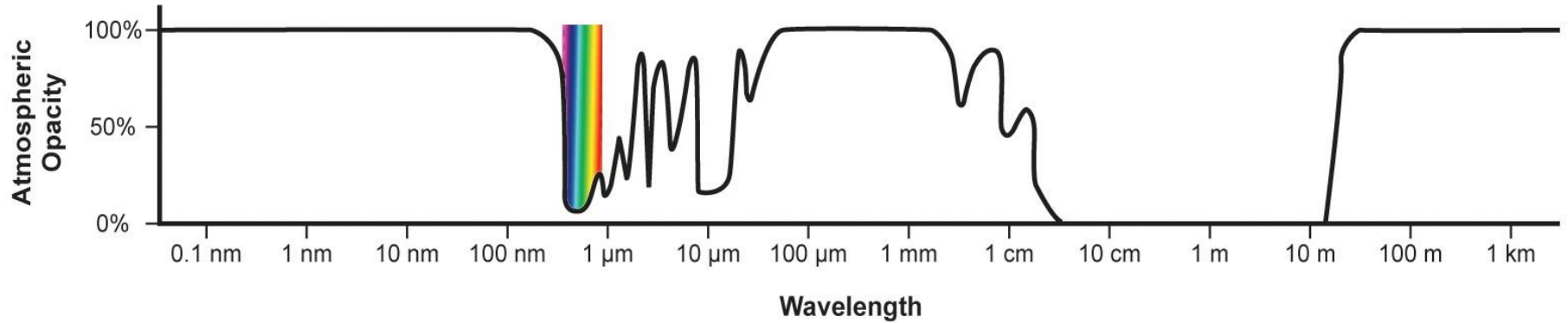
80 INSTITUTES



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

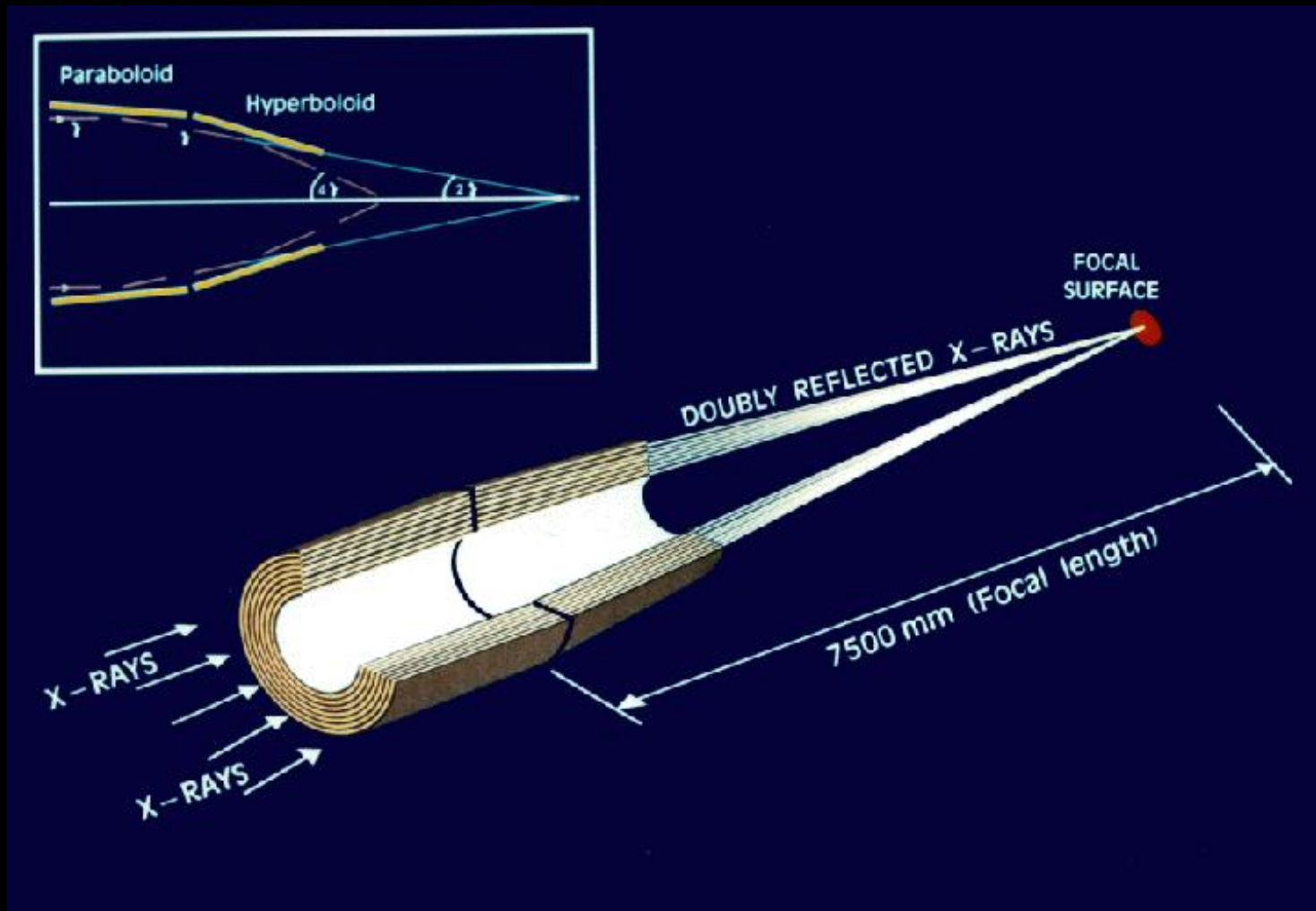
Observations depuis l'Espace

L'atmosphère terrestre



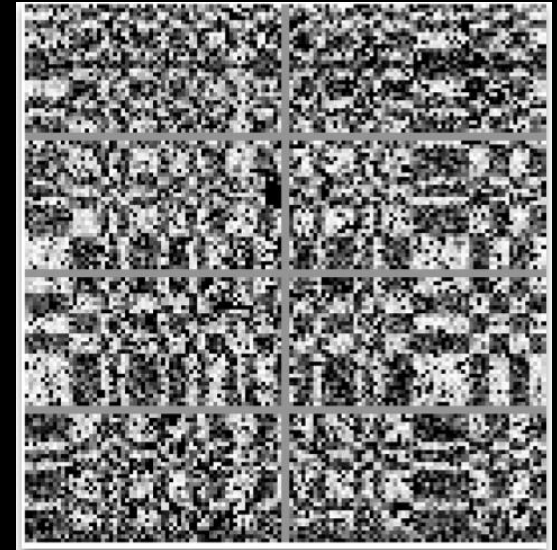
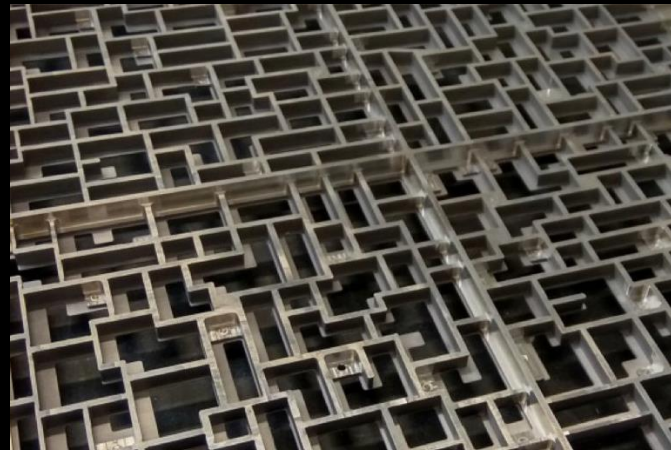
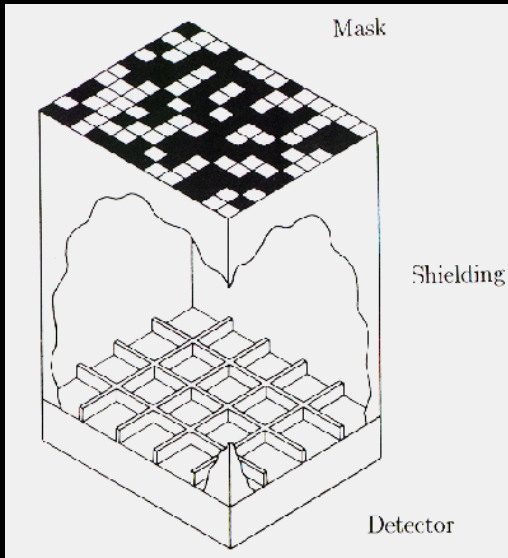
Observations dans le domaine X

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

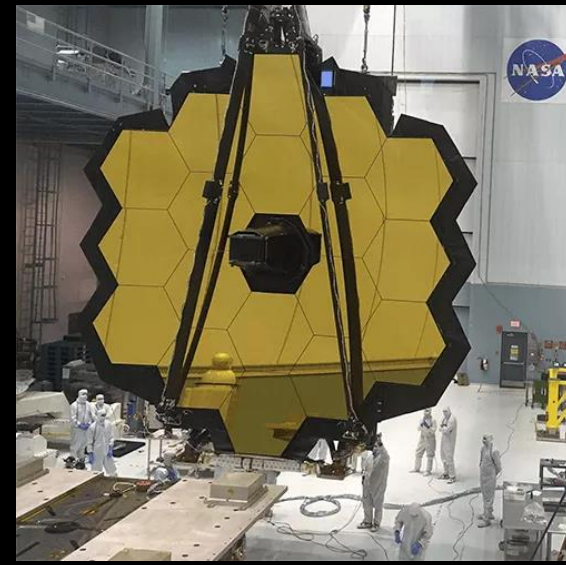
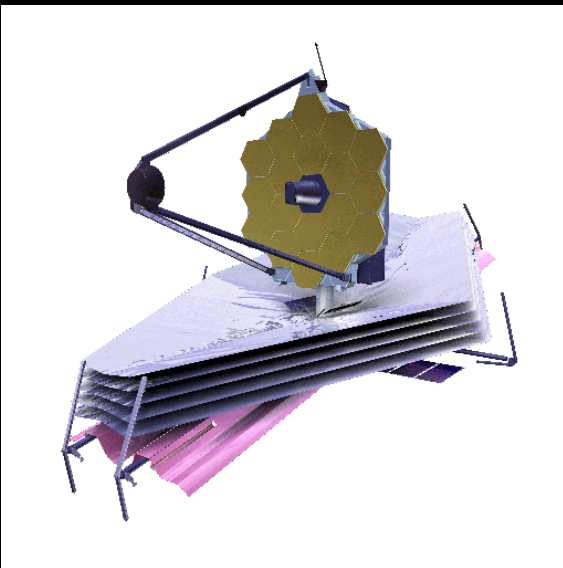
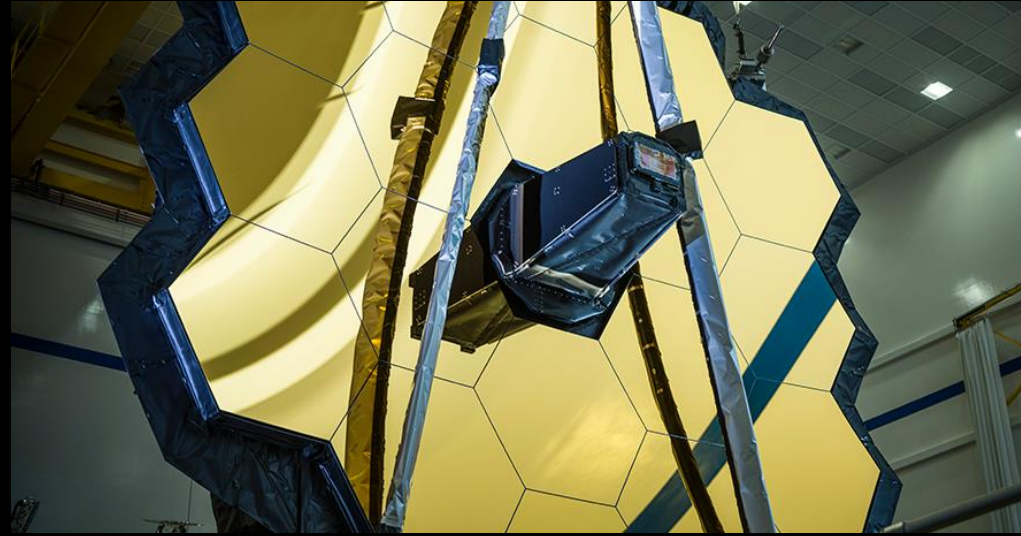
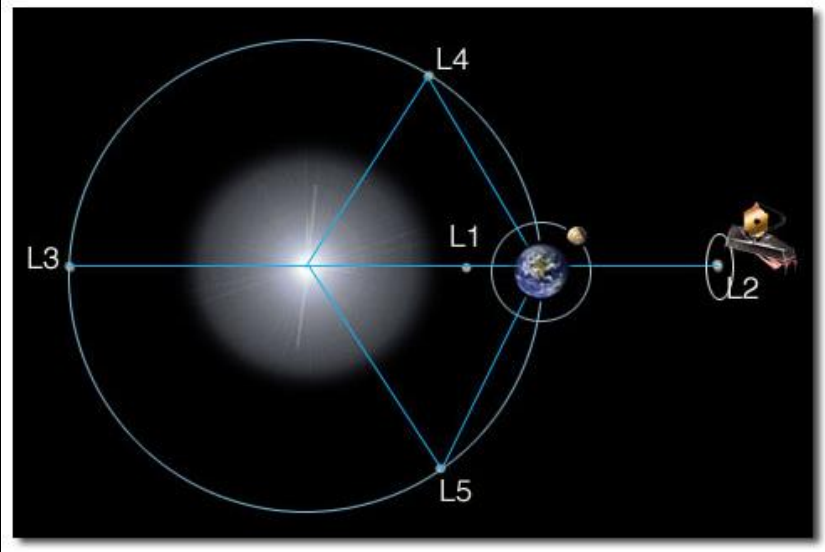
Télescope spatial Hubble de 2,4 m de diamètre UV, optique, IR



Observatoires Spatiaux



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



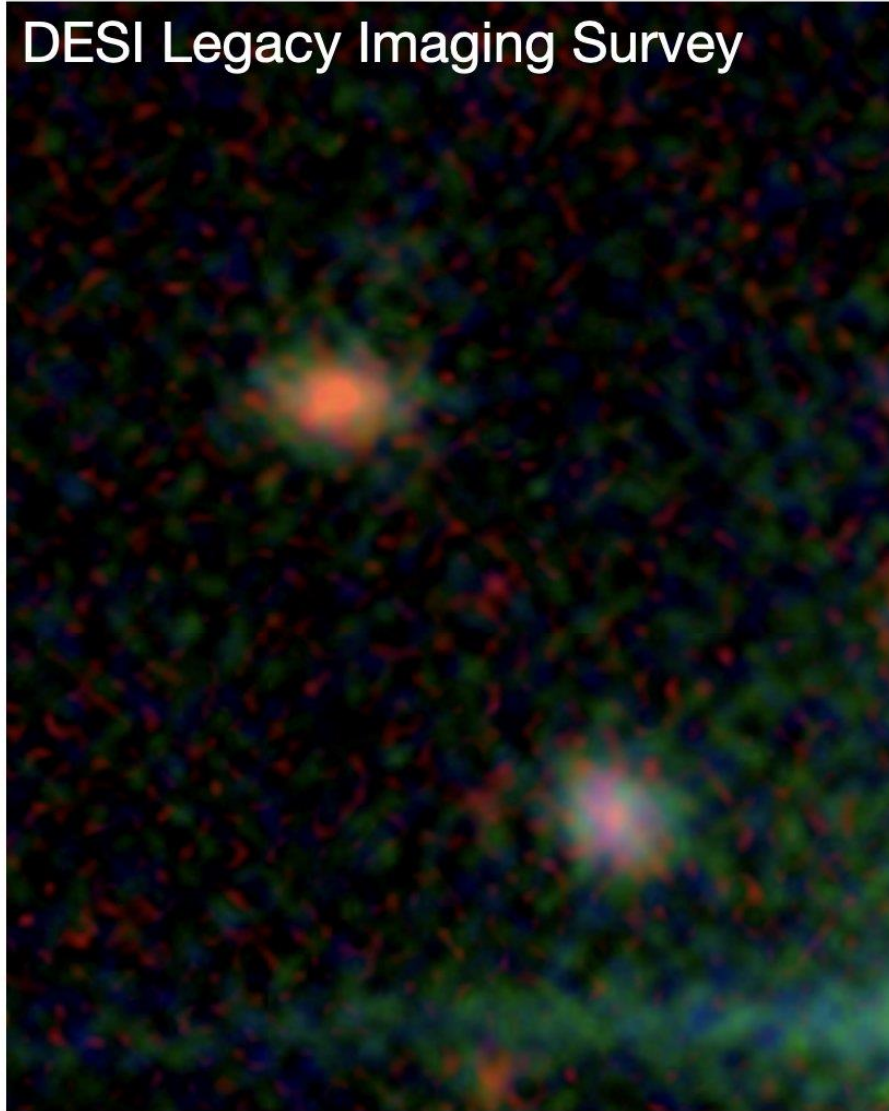
JWST vu depuis la Terre à 1.5 millions de kilomètres



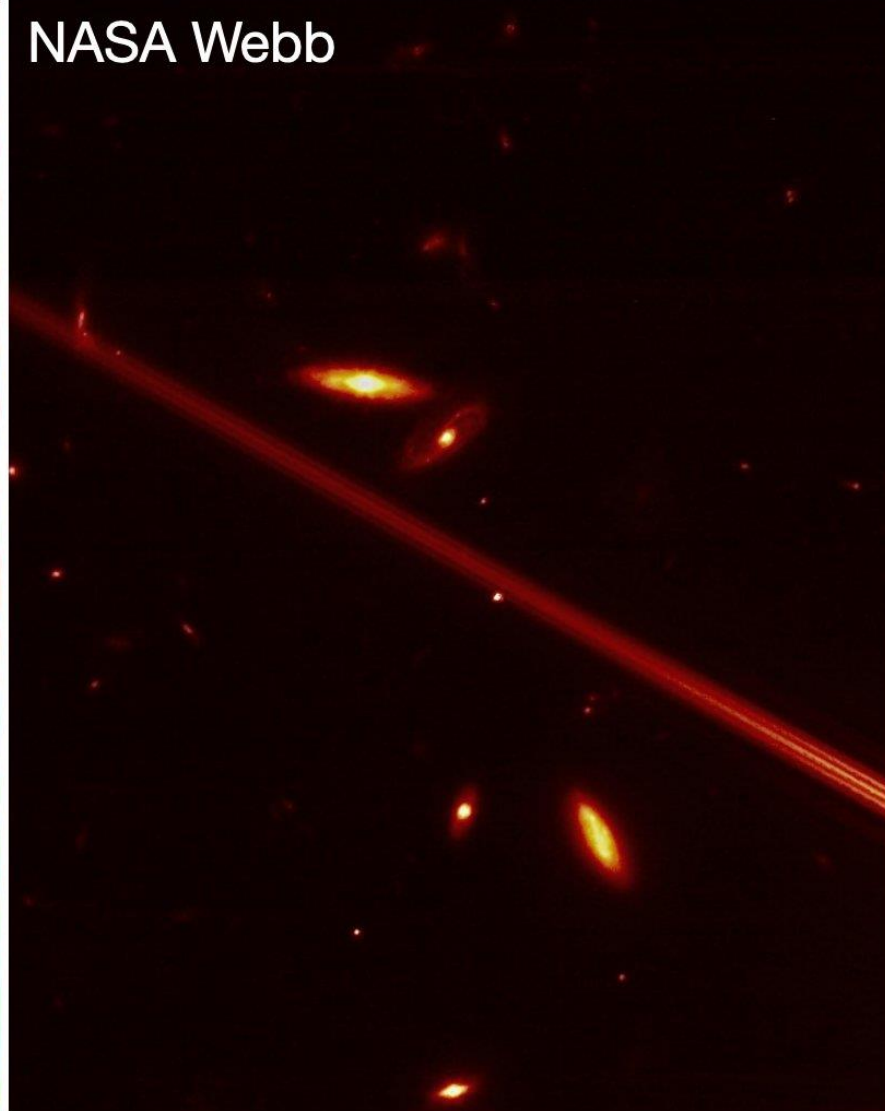
Première image avec le miroir aligné



DESI Legacy Imaging Survey



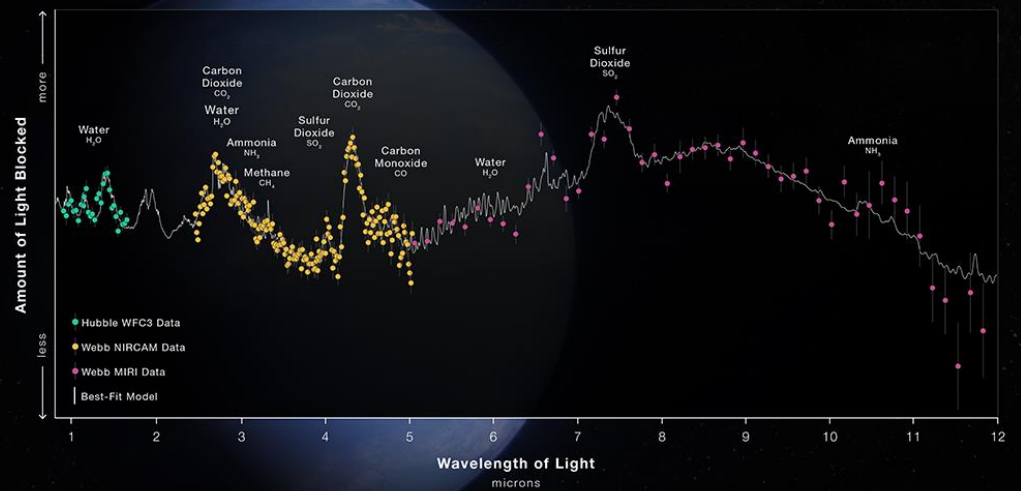
NASA Webb





GAS-GIANT EXOPLANET WASP-107 b TRANSMISSION SPECTRUM

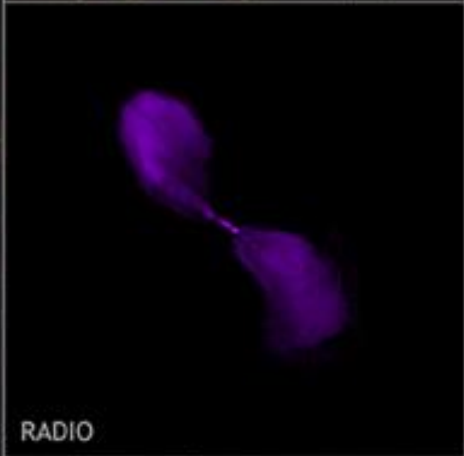
Hubble WFC3 | Grism Spectroscopy
Webb NIRCAM | Grism Spectroscopy
Webb MIRI | Low-Resolution Spectroscopy



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)

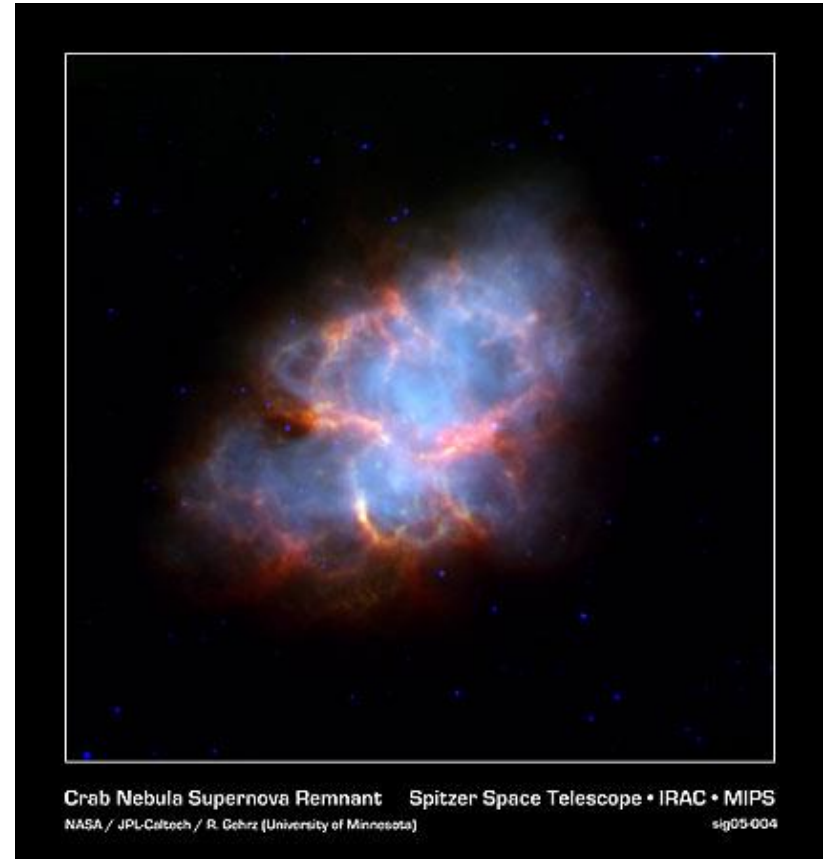


Image infrarouge:
Poussières chauffées
(satellite Spitzer)

Importance d'observations multi longueur d'ondes

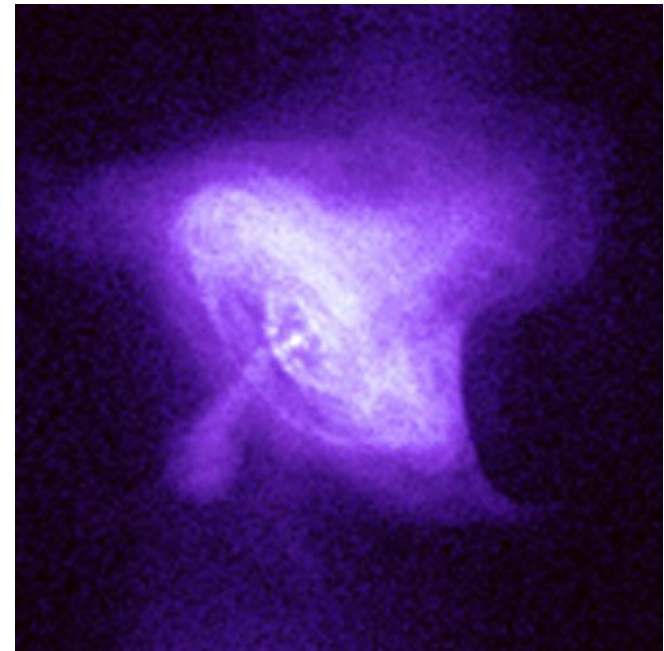
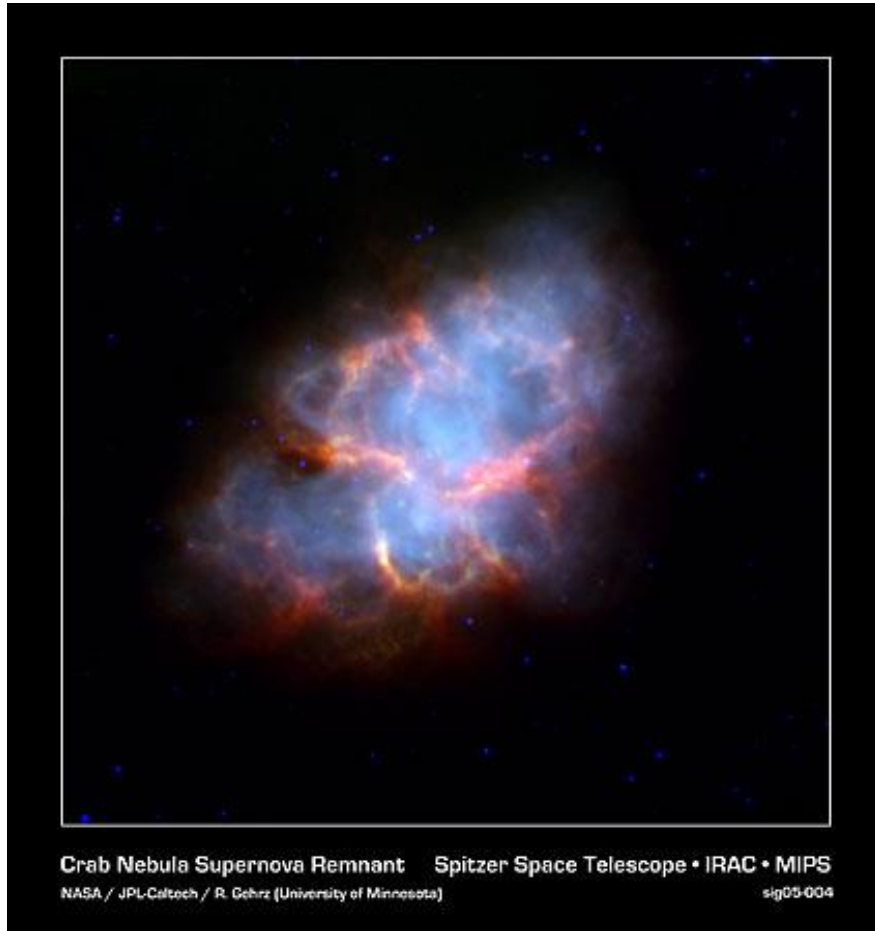


Image en rayons X
Gaz chauffé

Importance d'observations multi longueur d'ondes

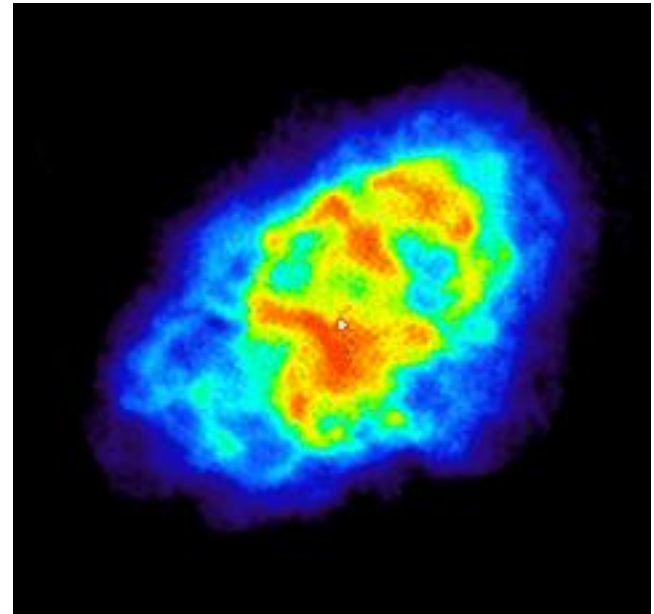
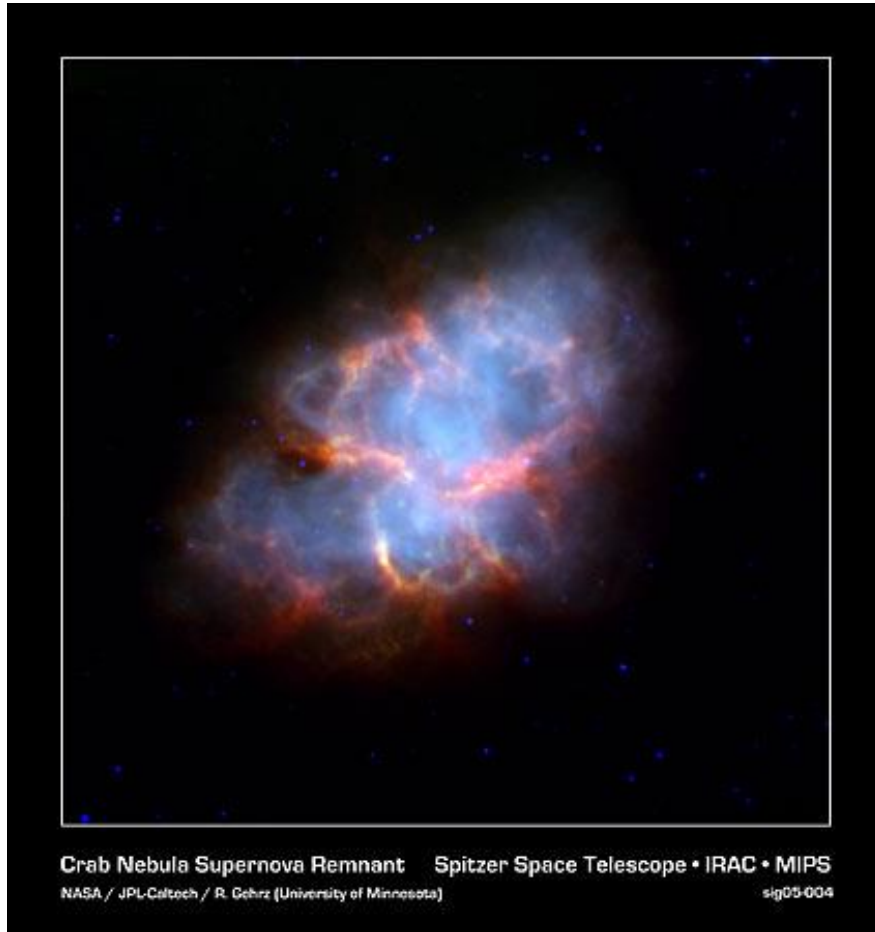


Image « radio » :
rayonnement synchrotron