

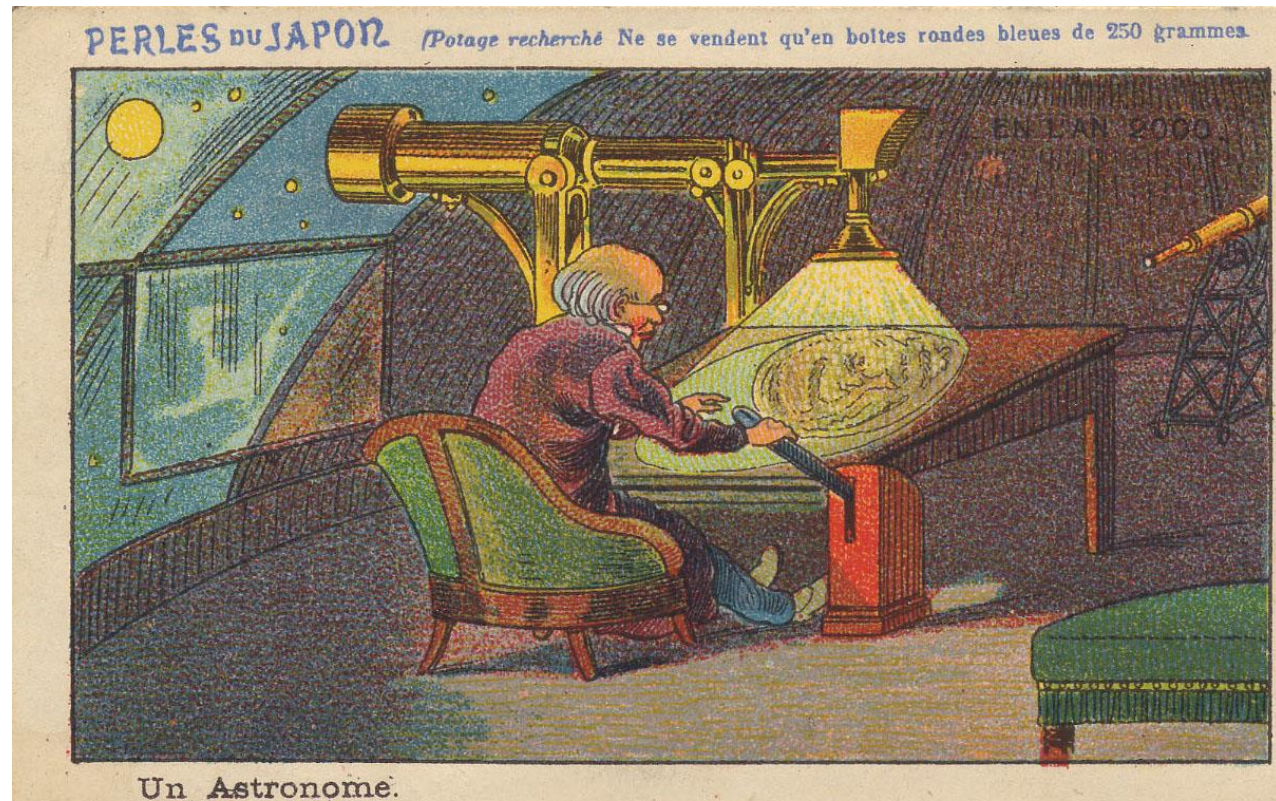


L'instrumentation des astronomes: télescopes et récepteurs

École d'été « l'univers à la portée de tous »
23-26 août 2017

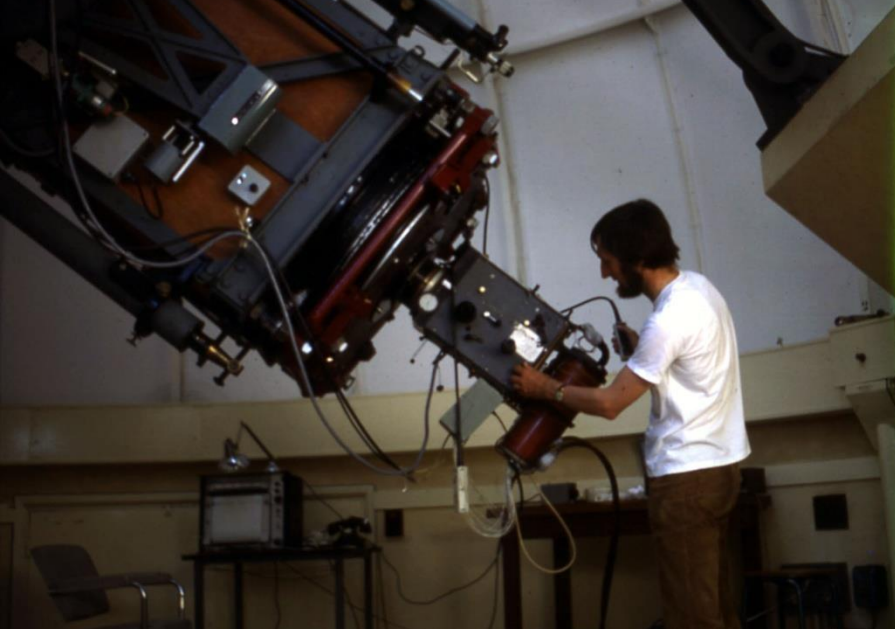


Qu'est-ce qu'un astronome?
Quel est le travail des
astronomes?
Quels sont leurs outils?

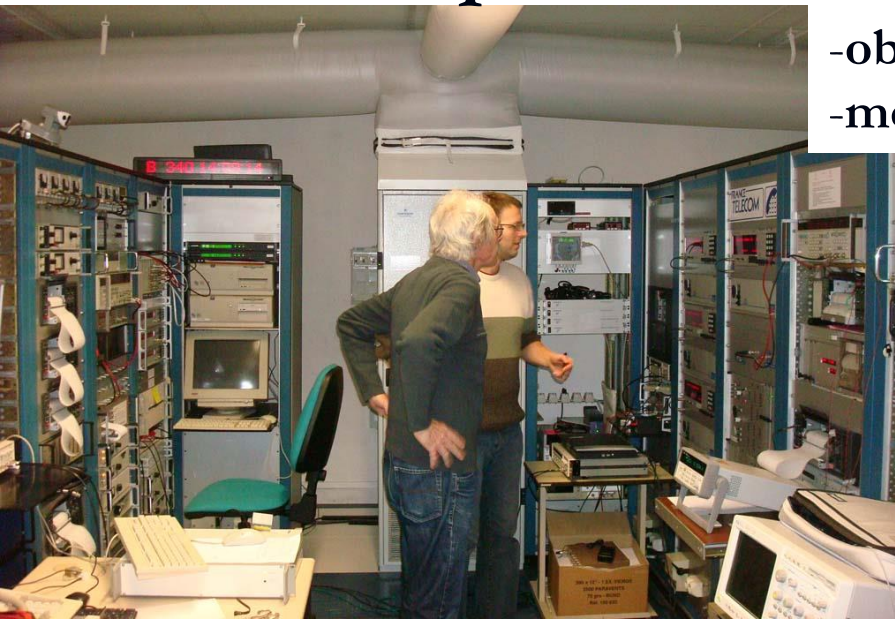


L'astronome amateur : admirer les beautés du ciel





L'astronome chercheur et explorateur : explorer et comprendre l'univers



- observer
- modéliser



La création d'observatoires dès l'antiquité



PTOLÉMÉE OBSERVANT LE CIEL.
BAS-RELIEF DU CAMPANILE DE LA CATHÉDRALE DE FLO-
RENCE, PAR GIOTTO ET A. PISANO. — CL. ALINARI.

La création des
 observatoires
 modernes à partir
 du XVI^{ème} siècle:
 en 1580
 l'observatoire de
 Tycho Brahé

ORTHOGRAPHIA
 PRÆCIPVÆ DOMVS ARCIS VRANIBV RGI
 IN ANSVLA PORTVM DANICI VENVSIA vulgo HVENNA, ASTRONOMIÆ INSTAV.
 RANDÆ GRATIA CIRCA ANNV M 1580 à TYCHONE BRAHE
 EXÆDIFICATÆ.



ICHTNOGRAPHIA ET EIVS EXPLICATIO

A Ianna Orientali. C. Oc-
 gulos rectos concurrentes, qui
 Conaculum hybernium sive hypocau-
 angulo post fornacem parvum quod
 gyricum est, in quo tamen quing.
 ptasi ad manum isthic operi Pyroni-
 jum illud descendendum foret. B
 qui aquas hinc inde cum lubuit, in
 culum illud hybernium. E. F. G.
 pro ascensu in superiorem contigna-
 mentiticium 40. ulnas profundus,
 quos per siphones hinc inde occultas
 Camera tam superiores quam infe-
 descensu in Laboratorium Chymi-
 bni magni Orichalcicum num. exhibitu.
 V. Quatuor Mense pro Stadiois, 4.
 Camini tam è Laboratorio inferiori
 in quatuor angulo conclavium. Y. Lelli
 in ystem conclavibus, hinc inde dispo-
 Intelligenda autem sunt hæc omnia
 in eâ quantitate, veluti fundameto
 majori domus supra depicta quadra-
 re poterunt.



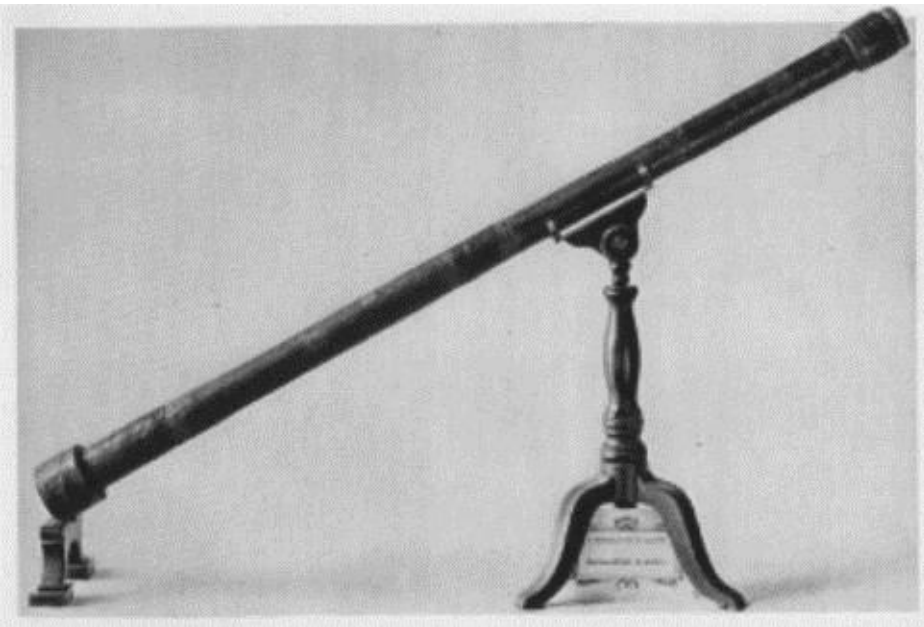
cidentalibus. G. Transitus s. ad an-
 tamen postea in tres redacti sunt, ut
 lum D. ampliaretur, atq. in eju-
 dam & secretion Laboratorum spæ.
 distinctim erant furni, qui promi-
 nico inferyiebant, ne semper in ma-
 Fons aquarum volubilem rotans,
 sublime etiaculabatur. D. Cama.
 Camera pro hospitibus. L. Gradu-
 tionem. H. Coquina. K. Puteu
 artificis hydraulico ferriens & a.
 per murum transeuntes in singulas
 viotes distribuens. P. Gradus pro
 com. T. Bibliotheca. VV. Glo-
 bium inferiori ascendentes, quam

L'observatoire du Vatican, créé en 1578 par le pape Grégoire XIII pour étudier la réforme du calendrier.



The Tower of the Winds towards the end of the 18th century.

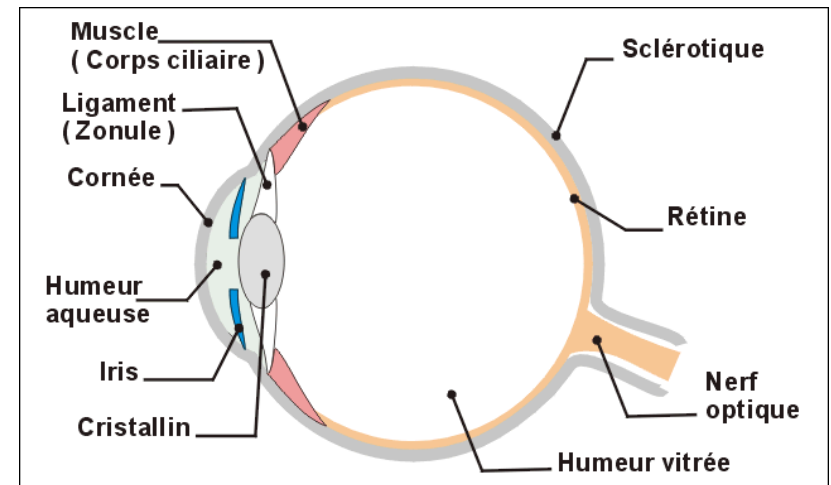
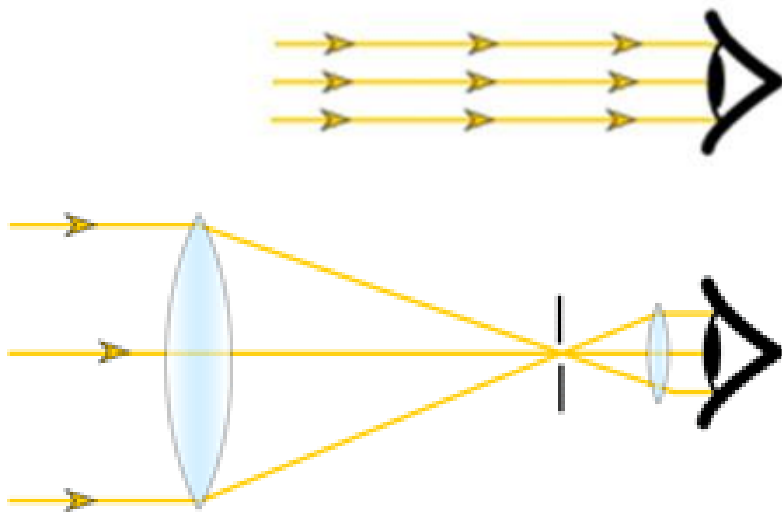
Galilée s'aide d'une lunette en 1609



- Les petits points du ciel ne sont pas des points!

Lunette ou télescope : pourquoi ?

- Capter le maximum de lumière venant des astres
- L'œil est un appareil d'optique très performant mais il n'est pas suffisant





Ori.

*

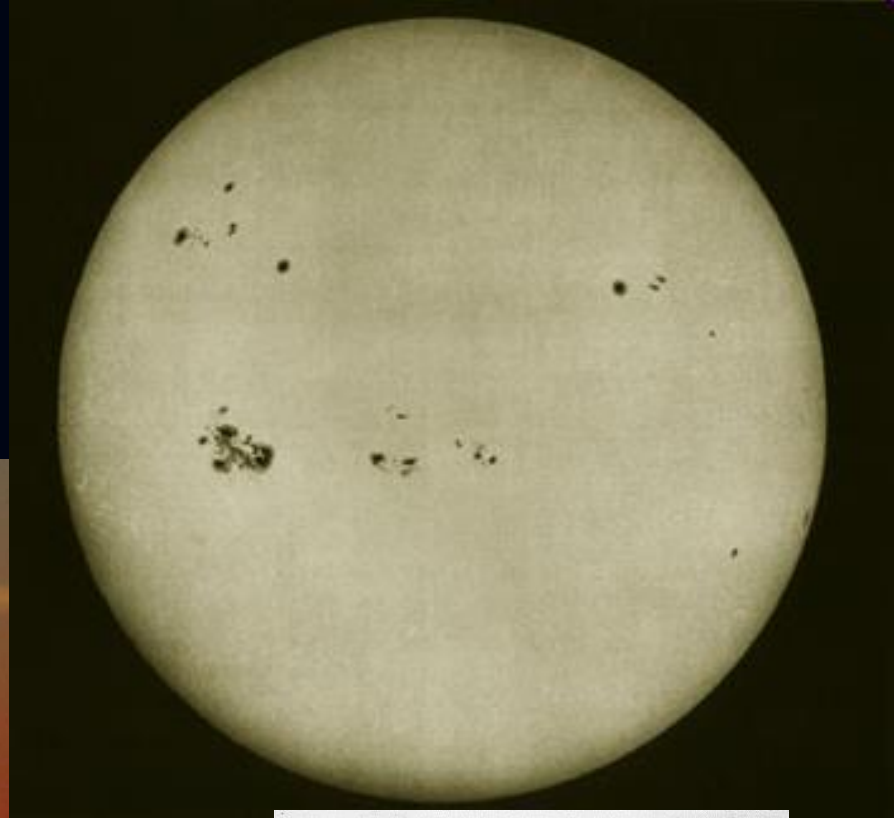
*

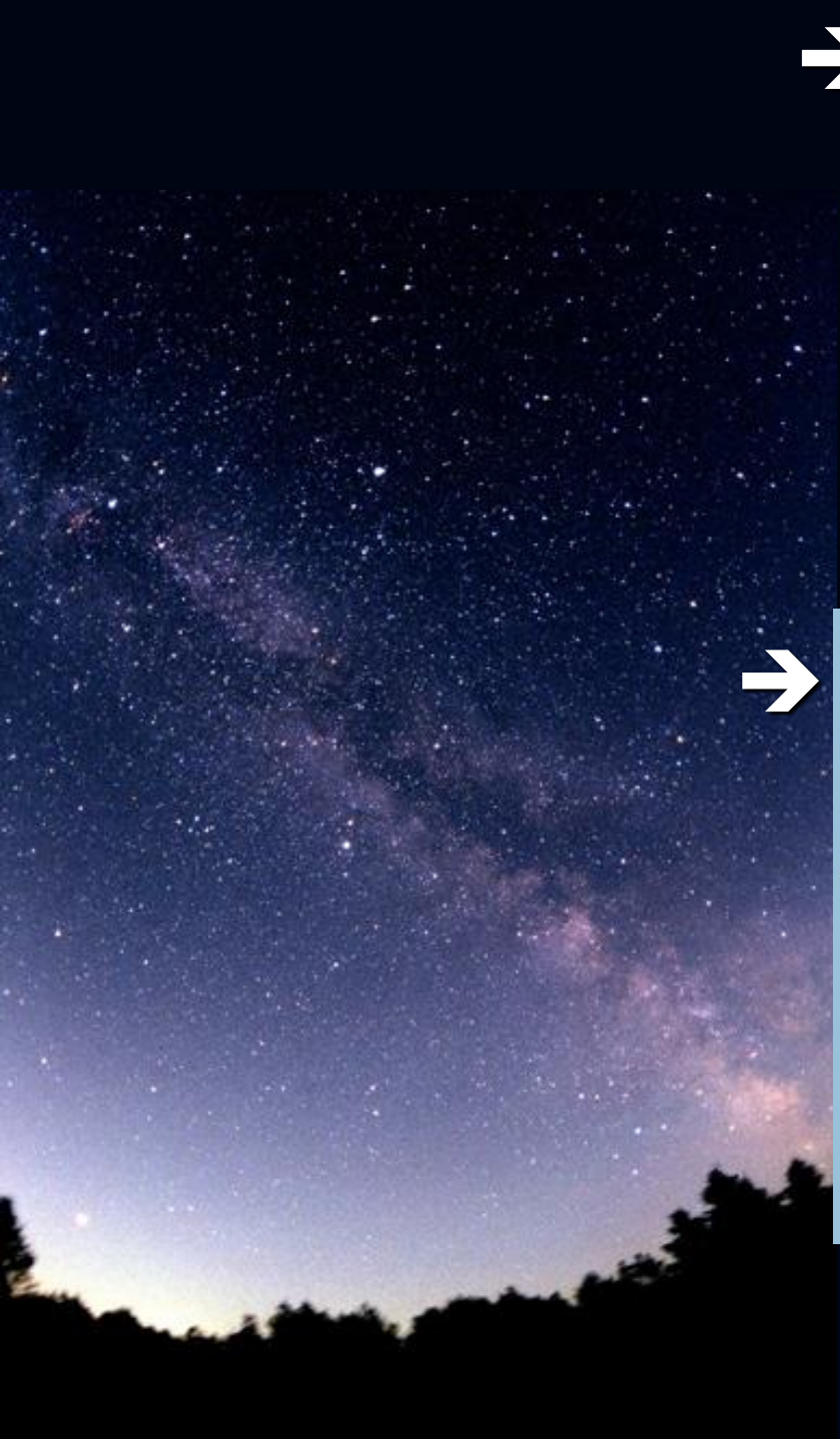


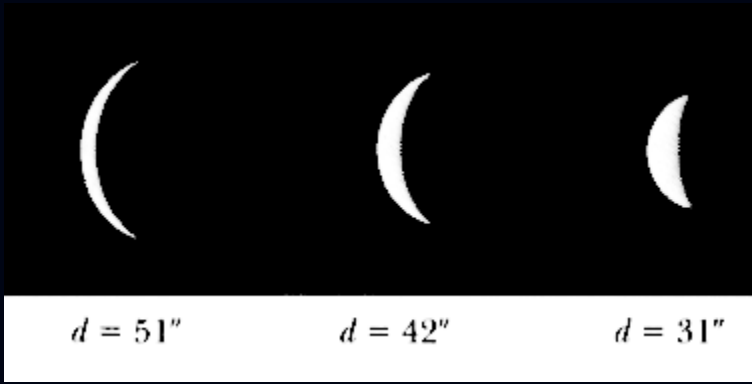
*

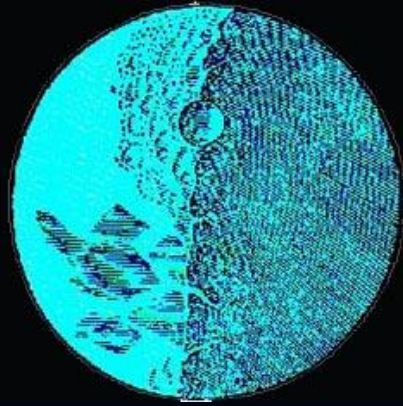
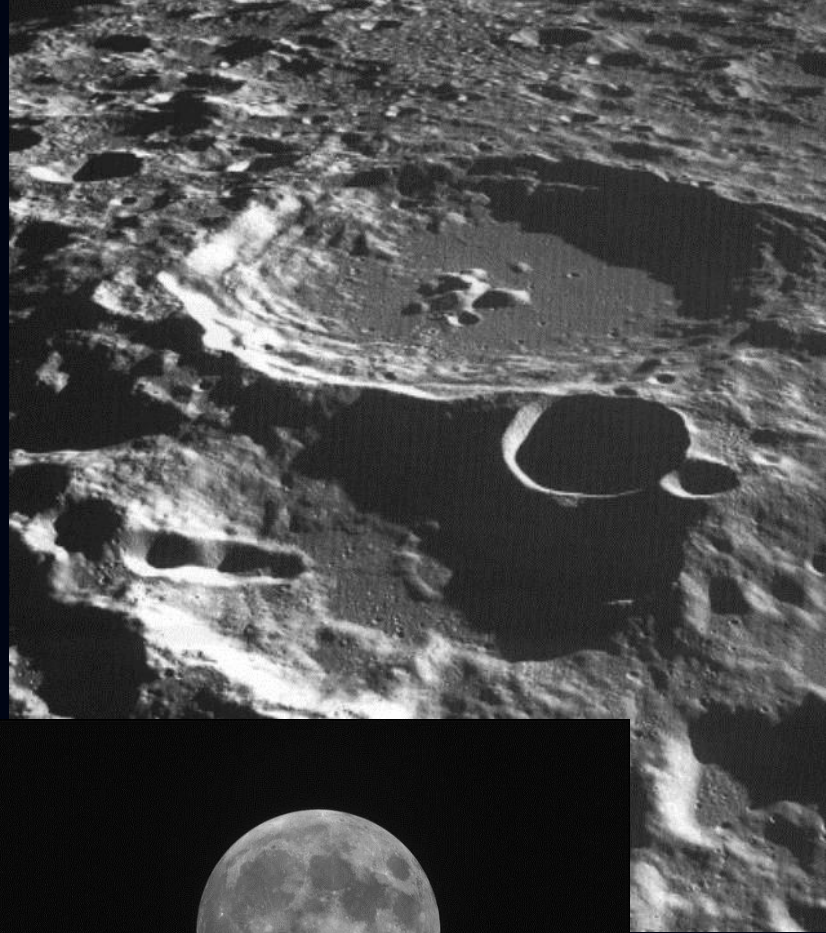
Occ.



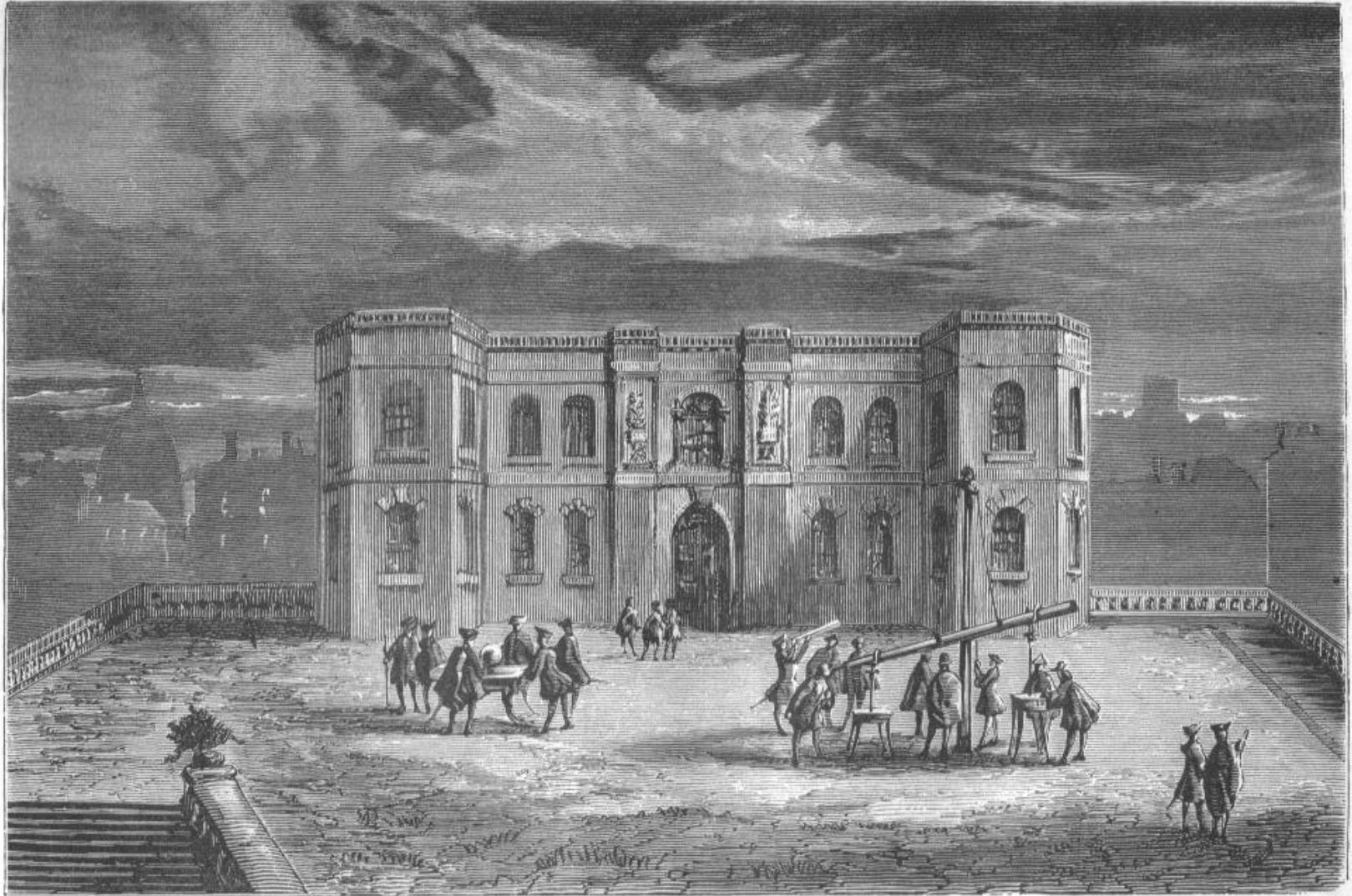








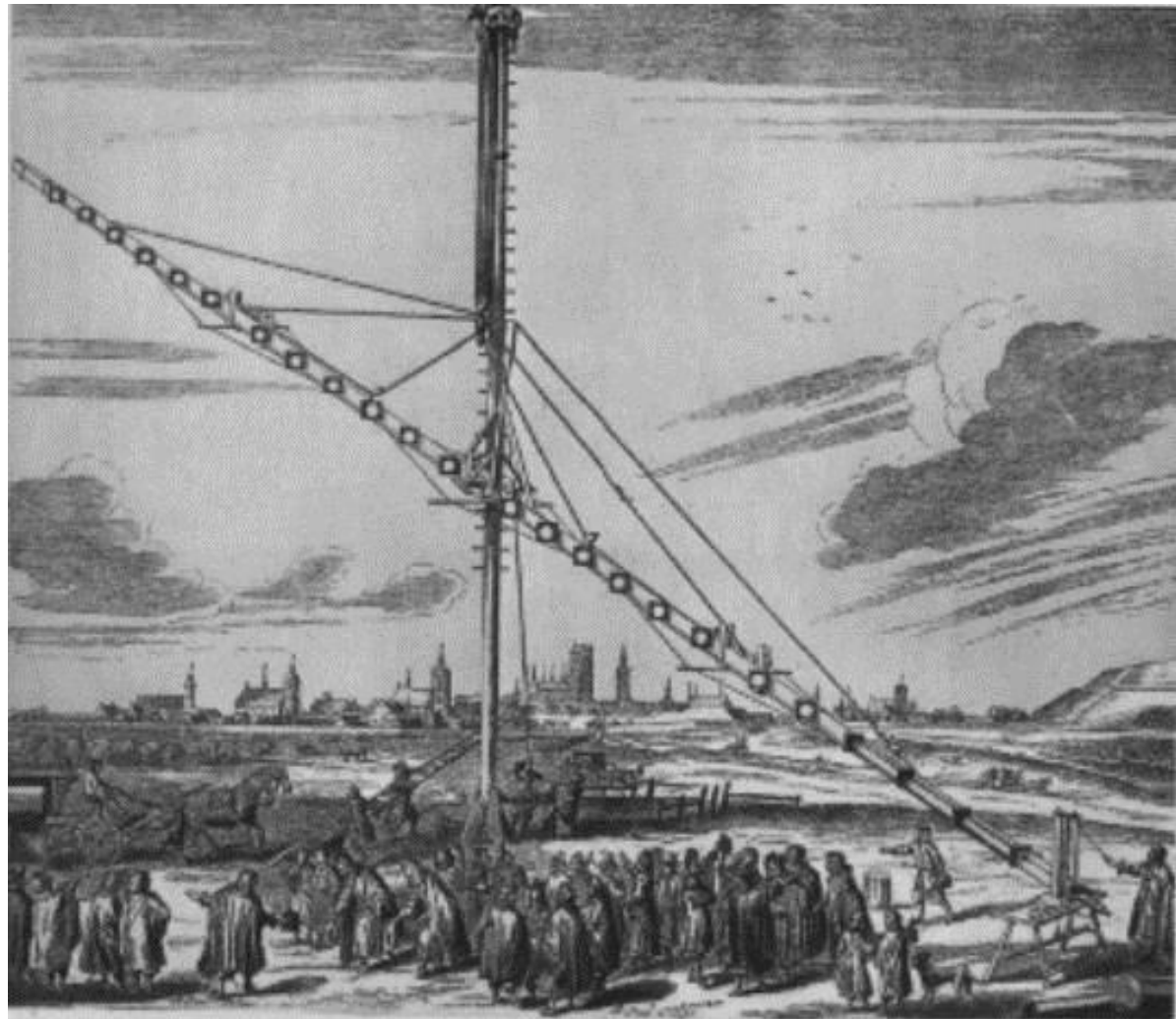
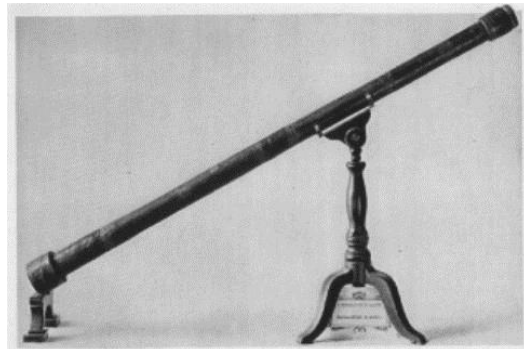
1667: création de l'observatoire de Paris



L'OBSERVATOIRE DE PARIS SOUS LOUIS XIV.

L'évolution des instruments

Allonger l'instrument
= grossir les images



LA GRANDE LUNETTE D'HÉVELIUS. GRAVURE EXTRAITE DE LA « MACHINA COELESTIS » DE JEAN HÉVELIUS. DANTZIG, 1670.

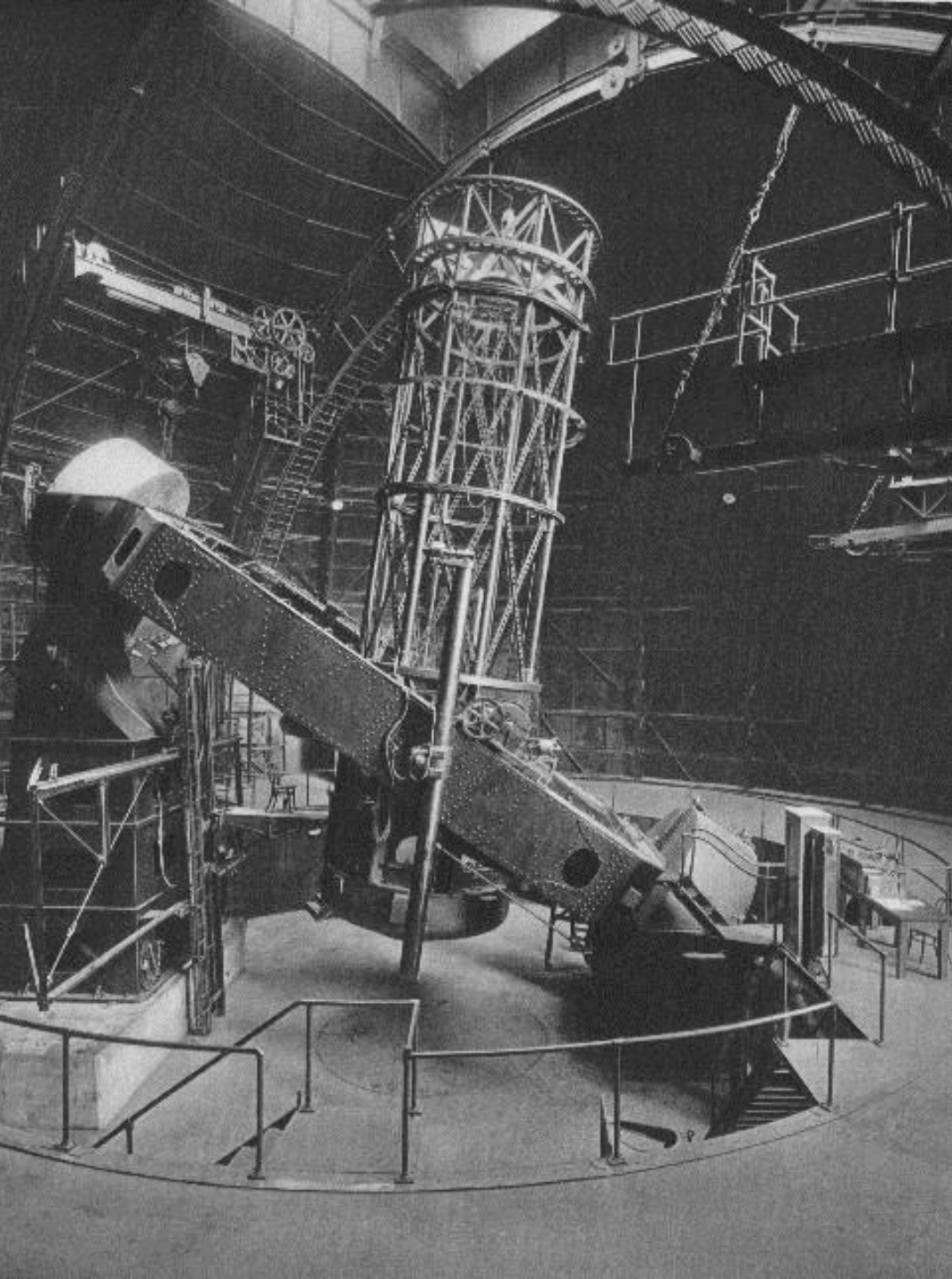
**Les grandes
lunettes: augmenter
la focale et la
résolution pour
séparer les étoiles
doubles**

Monture équatoriale allemande



LE GRAND EQUATORIAL COUDÉ DE L'OBSERVATOIRE DE PARIS.

Des instruments
compliqués
mais qui restent
tributaires de la
taille du miroir
ou de la lentille
collectrice de
lumière.



**Le télescope
du Mont Wilson:
augmenter le
diamètre du
miroir pour
détecter des
objets faibles et
augmenter la
résolution**

Monture équatoriale à berceau

Les méthodes de l'astronome

- Astrométrie → mesures (positions précises)
- Photométrie → sensibilité (quantité de lumière)
- Spectrométrie → analyse de la lumière (couleurs)
- Imagerie → résolution (détails)

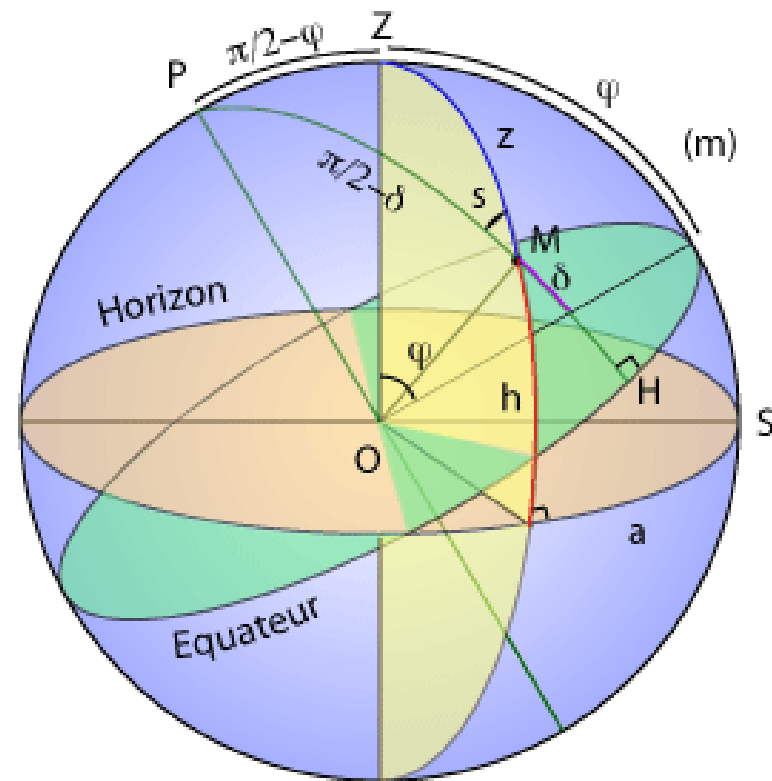
La sensibilité et la résolution dépendent de la taille du télescope: voir loin (astres peu lumineux) et voir de près (détails de surface).

Qu'est-ce que l'astrométrie?

- C'est la mesure de positions et distances dans l'univers
- La géométrie et la géodésie mesurent la Terre; l'astrométrie mesure le ciel

Elle permet:

- de se repérer sur Terre, de se repérer dans le ciel
- de comprendre le mouvement des astres dans le système solaire et dans l'univers
- de tester nos modèles et nos représentations de l'univers en surveillant les mouvements des astres



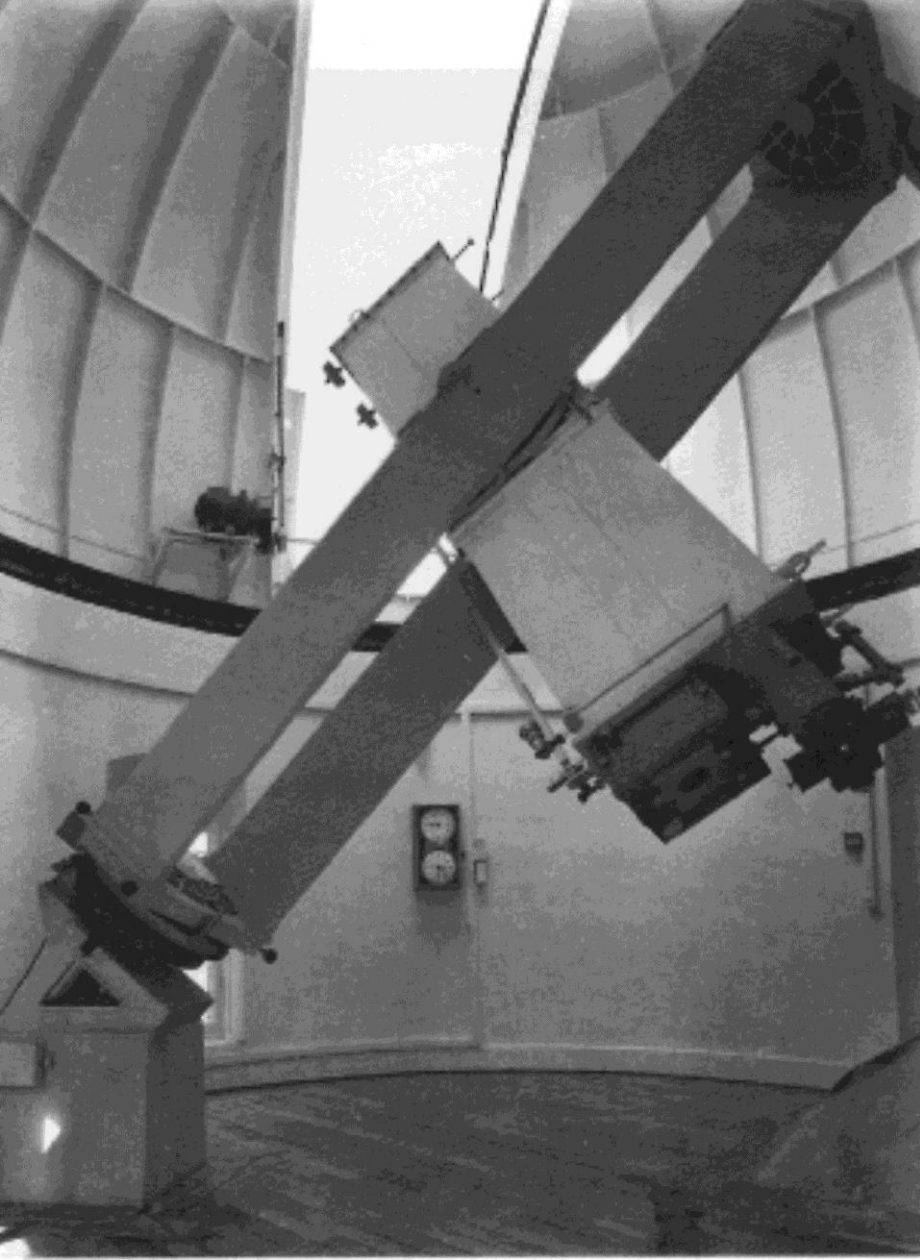


**Instrument « méridien »
très utilisé aux XIX^{ème} et
XX^{ème} siècles.**

- Mesurer les positions:
- la précision dépend de l'instrumentation
 - on mesure la hauteur sur l'horizon et l'instant du « passage »

Construire des cartes du ciel!





ÉQUATORIAL DE LA CARTE DU CIEL

Instrument composé de deux lunettes, l'une photographique, l'autre visuelle. L'objectif photographique a été taillé par les frères Henry.

Le projet « de la Carte du ciel »:

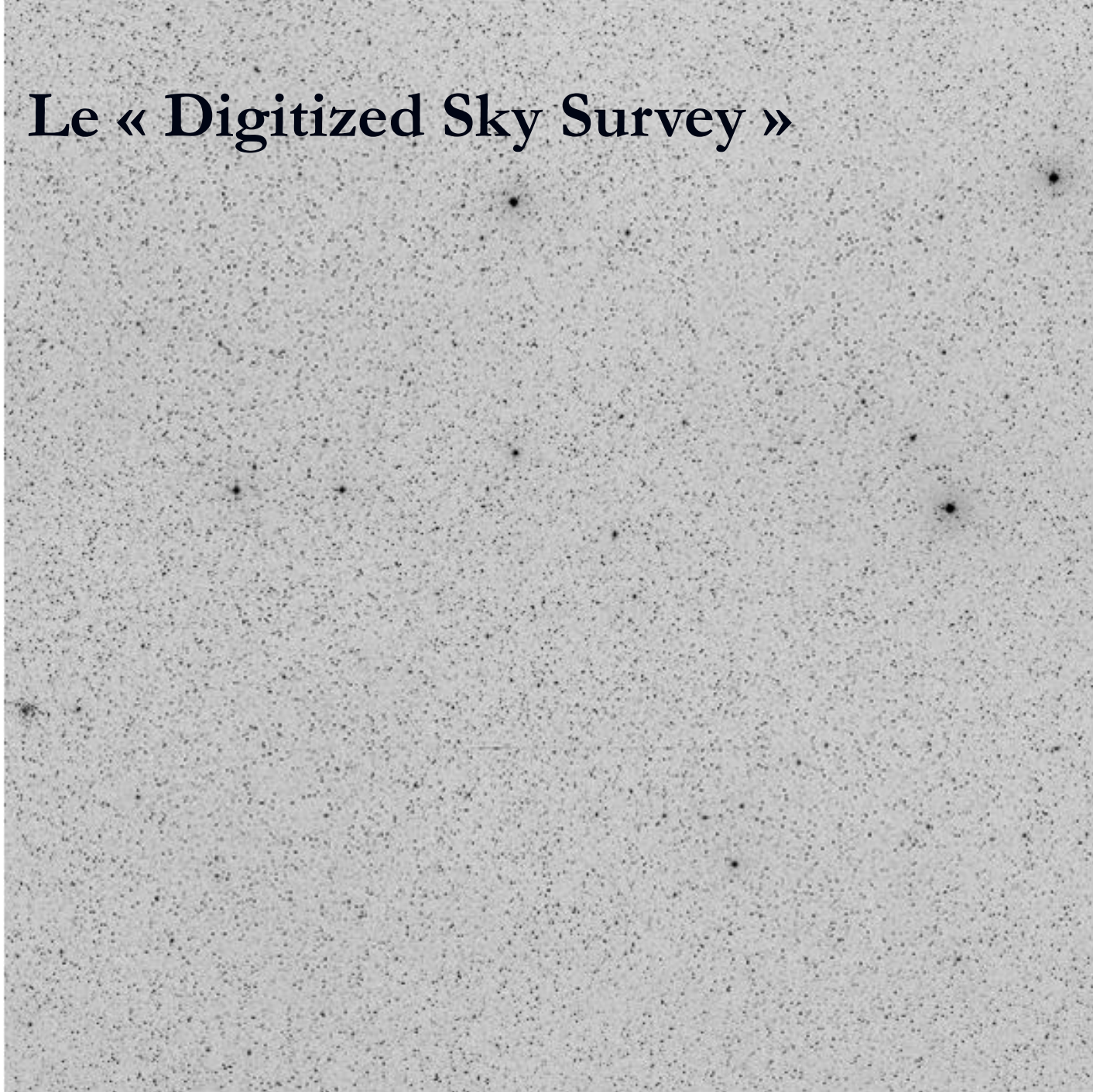
photographier l'ensemble du
ciel

- un défi impossible au
XIX^{ème} siècle
- mais réussi au XX^{ème}
siècle (projet du Digitized
Sky Survey)

Le télescope de Schmidt: un grand champ



Le « Digitized Sky Survey »

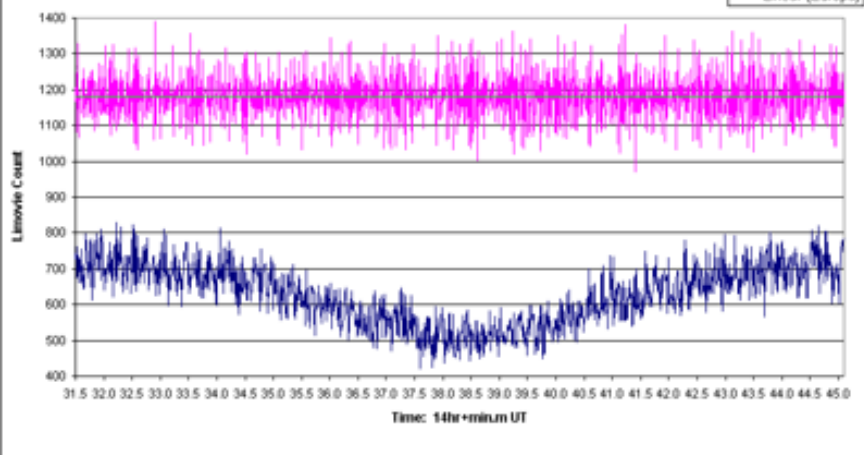


Qu'est-ce que la photométrie?

- C'est la mesure de la lumière reçue des astres
- Elle permet:
 - de détecter les variations de luminosité des astres
 - de comprendre ce qui fait briller les astres
 - de tester nos modèles et nos représentations de l'univers

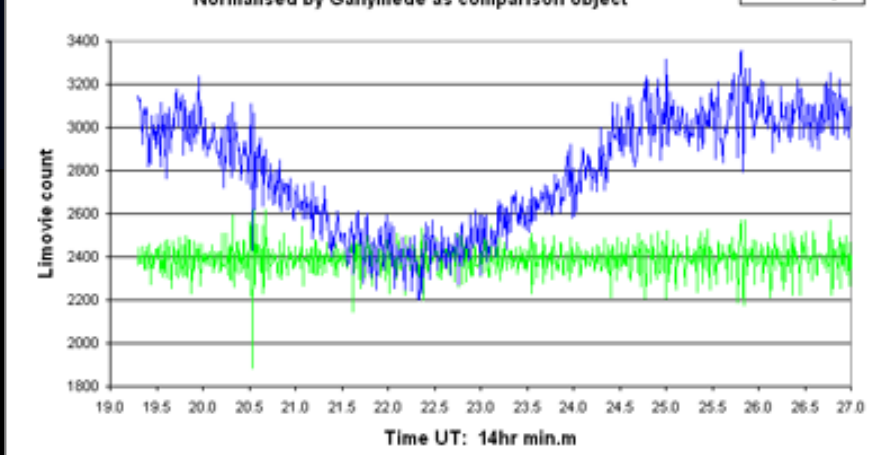
Europa ecl. Callisto, 2009 June 10. 25fps, 16-binned data
normalised by Europa as comparison object

— Callisto
— Europa
— Linear (Europa)

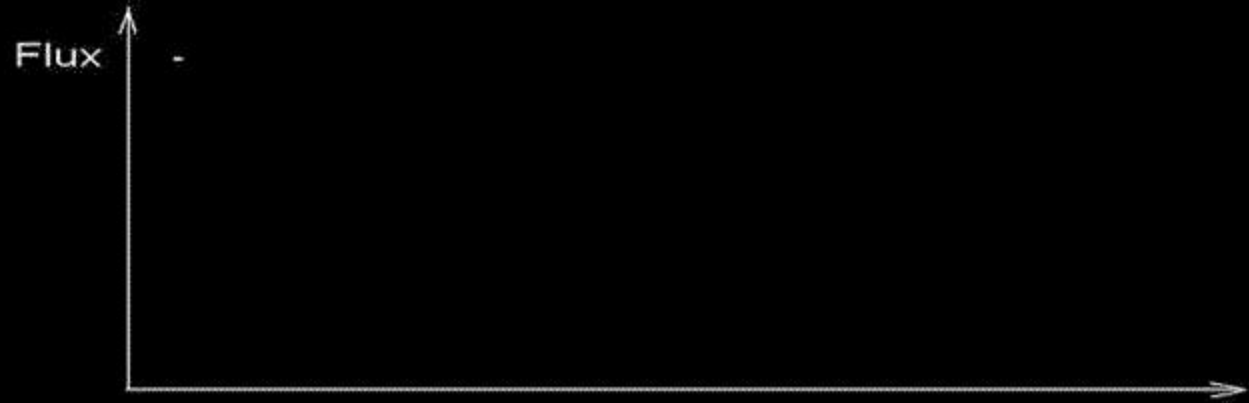


Io Occults Europa, 2009 June 18. 25 fps, 16 binned data
Normalised by Ganymede as comparison object

— Ganymede
— Io/Europa



Ganymede Occulting Europa
May 18, 2009. 1136 UT - 1152 UT
Paul Maxson Mewlon 250
F/30. 100 frames stacked for each image.

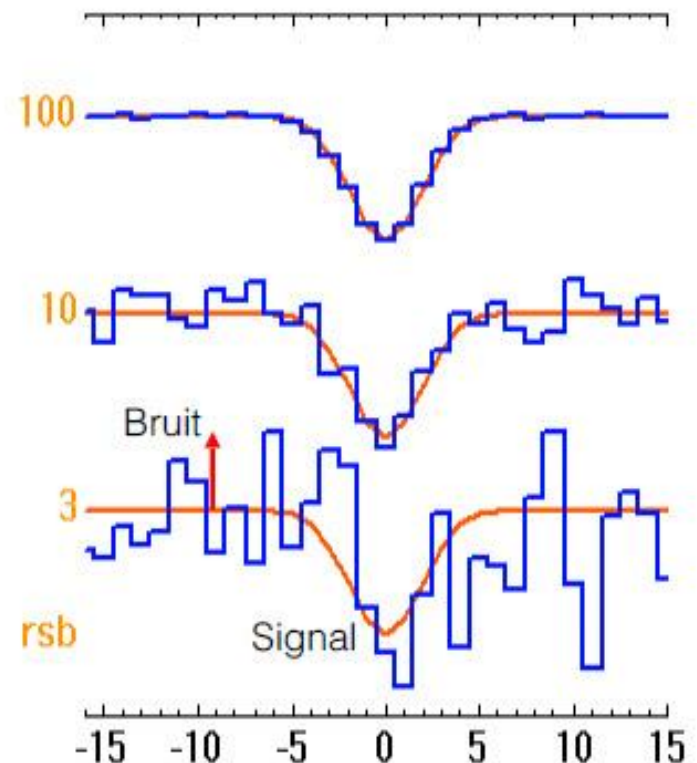
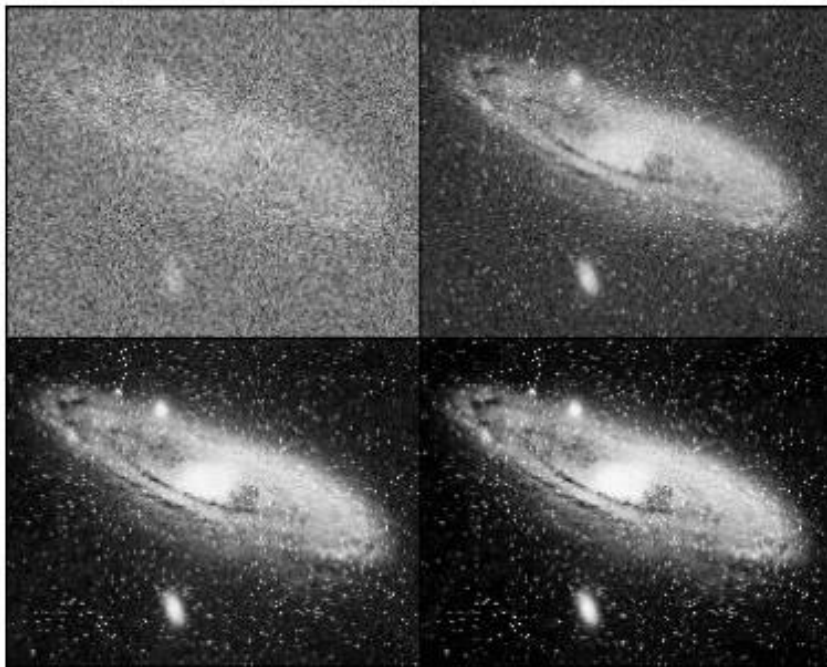


Le rapport signal/bruit

- Le signal reçu est bruité par des signaux parasites

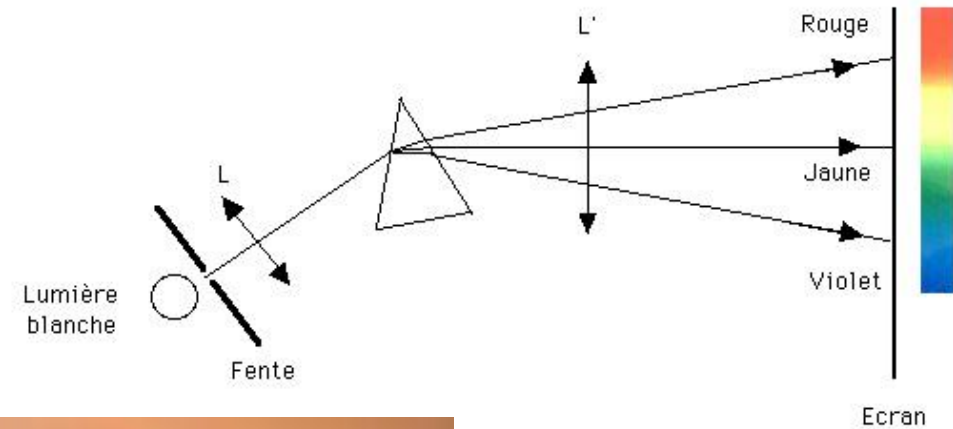
Rapport Signal sur Bruit (Signal/Noise) :

- $S/N > 3-5$ pour une détection fiable
- $S/N > 10$ pour une mesure quantitative fiable
- $S/N > 100$ excellent (mais rare !)



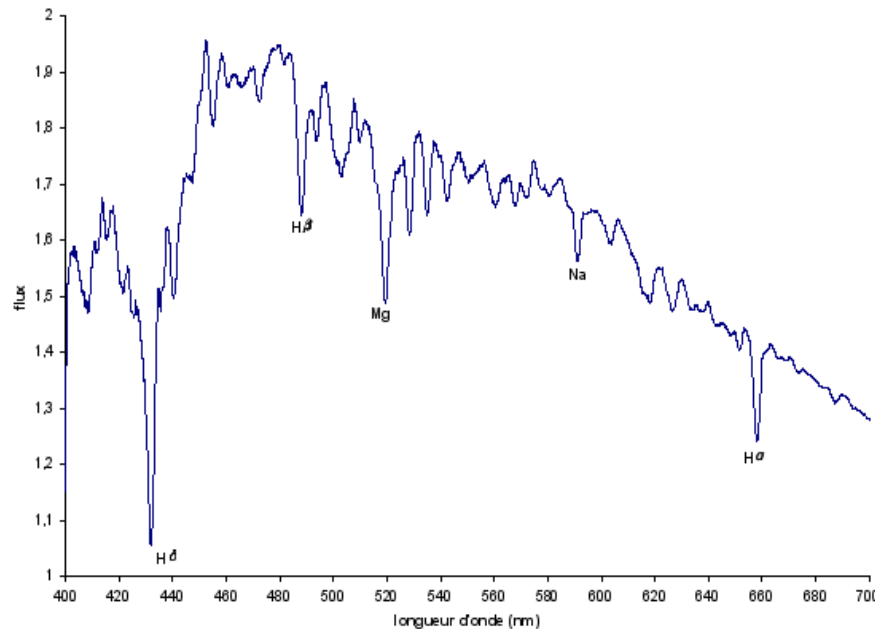
Qu'est-ce que la spectrométrie?

- C'est l'analyse de la lumière reçue des astres
- La spectrométrie décompose dans les différentes couleurs
 - de connaître la nature des corps qui émettent de la lumière
 - de comprendre le principe de fonctionnement des étoiles



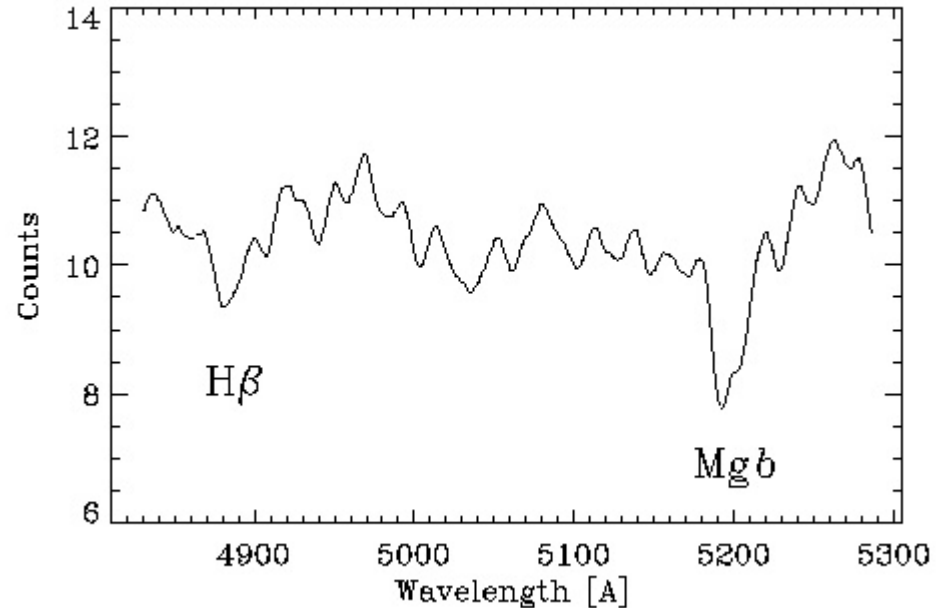
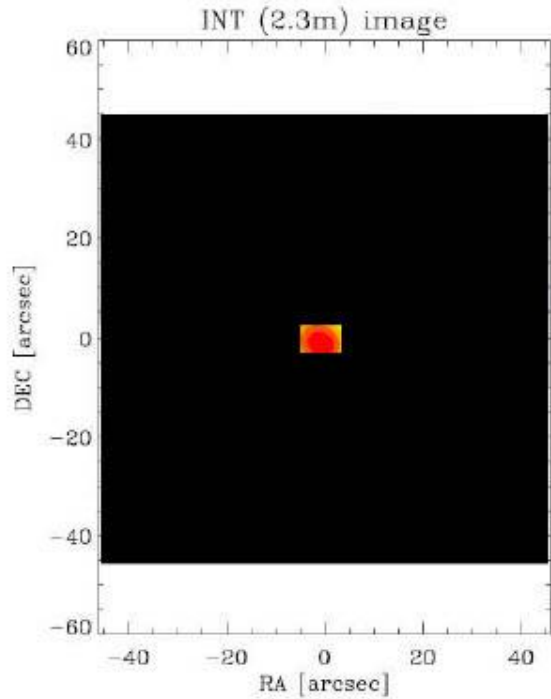
Le spectre électromagnétique

- Mesurer le spectre d'une étoile ou d'un autre objet, c'est mesurer la quantité de lumière selon la longueur d'onde (la couleur) considérée.
- Chaque étoile a un spectre particulier qui la caractérise bien.



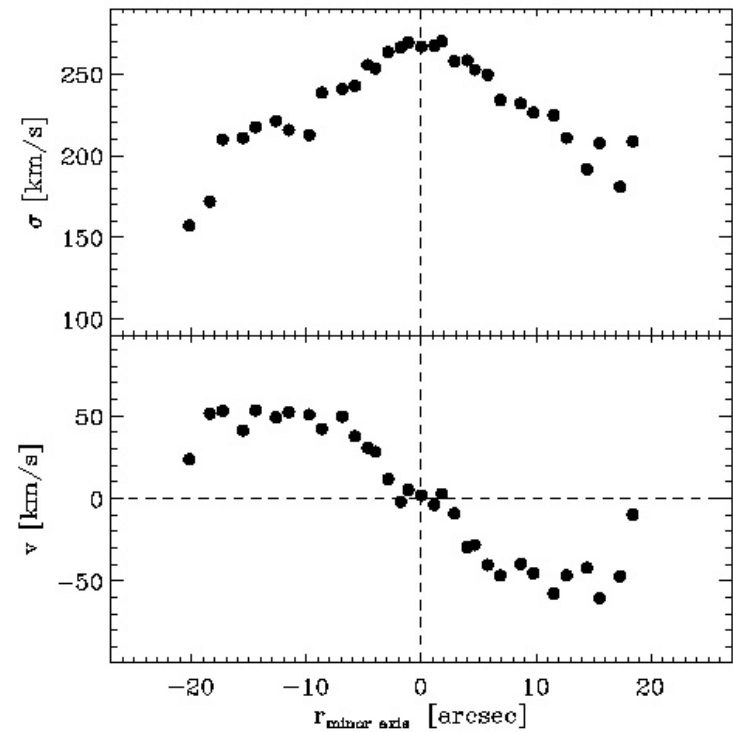
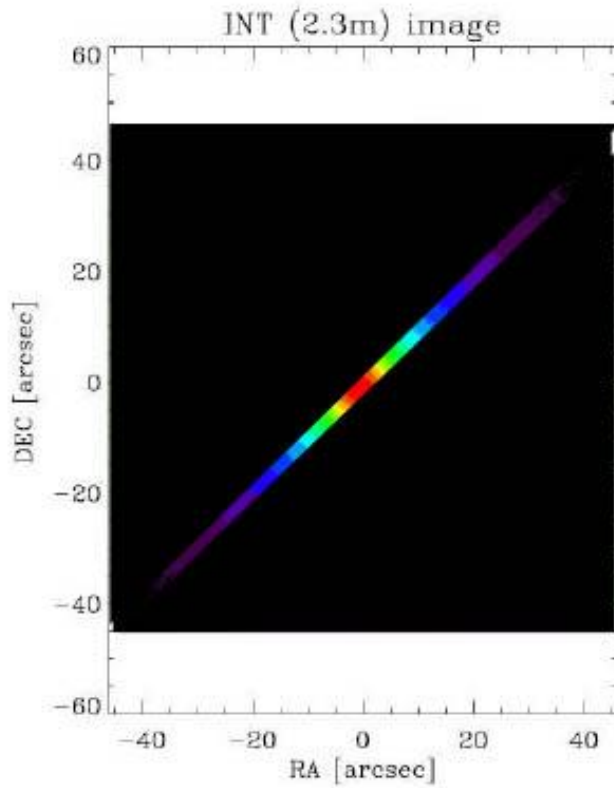
Spectroscopie d'ouverture

Analyse de champ → vitesse



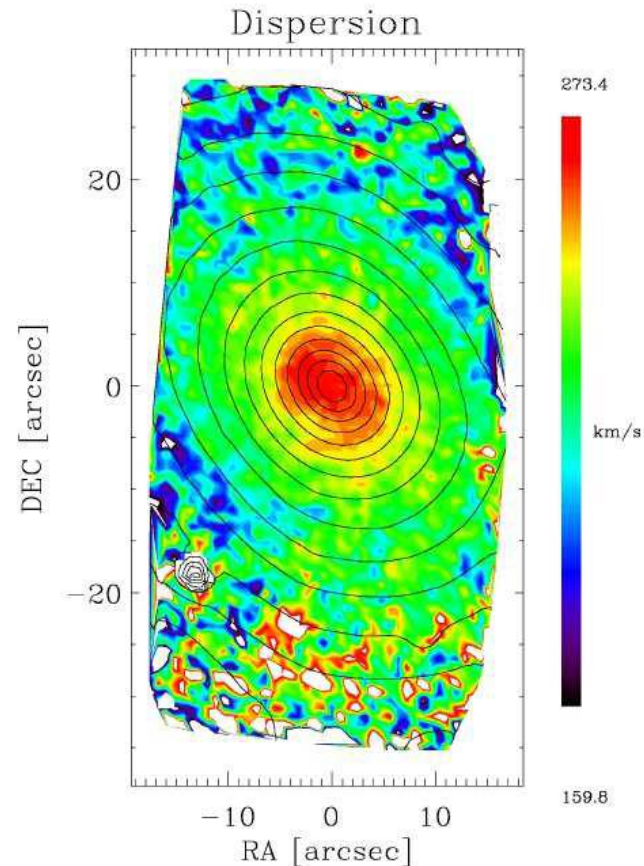
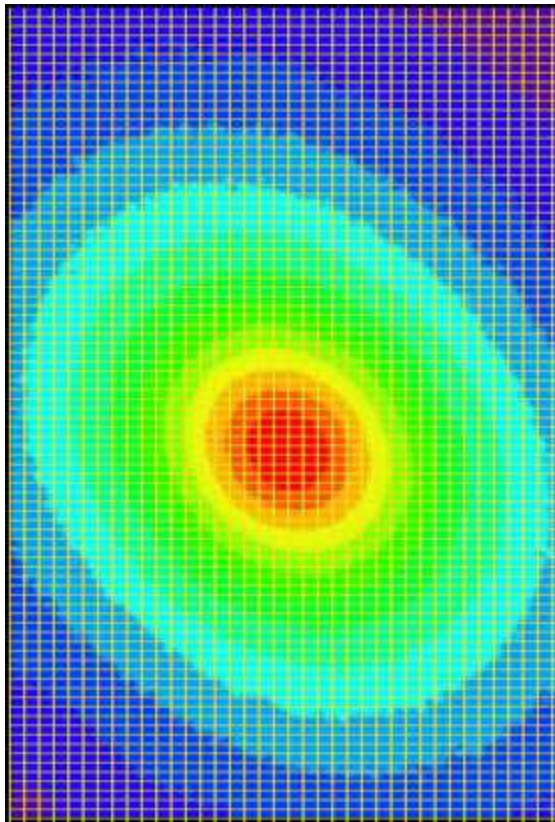
Spectroscopie à longue fente

■ Profils cinématiques



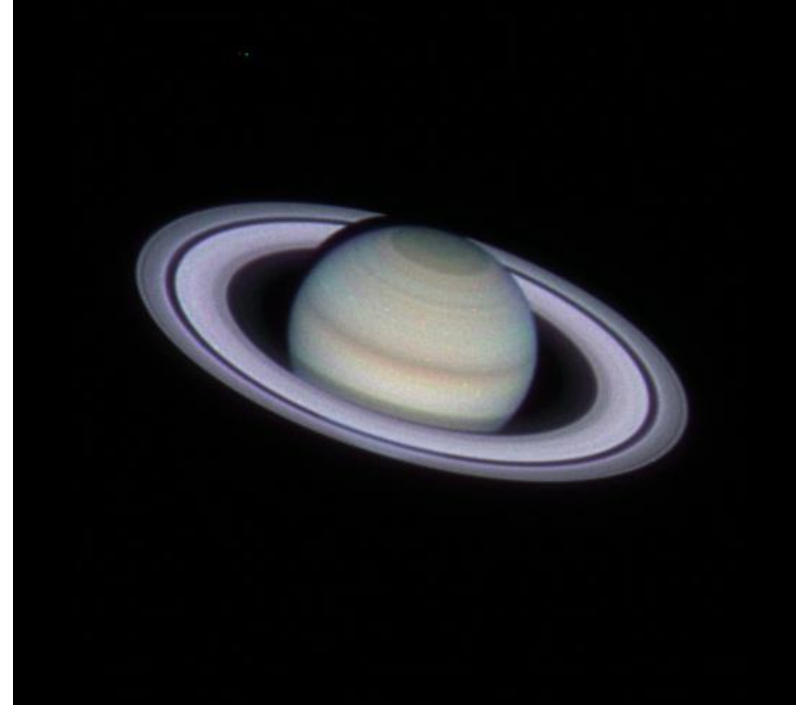
Spectroscopie intégrale de champ

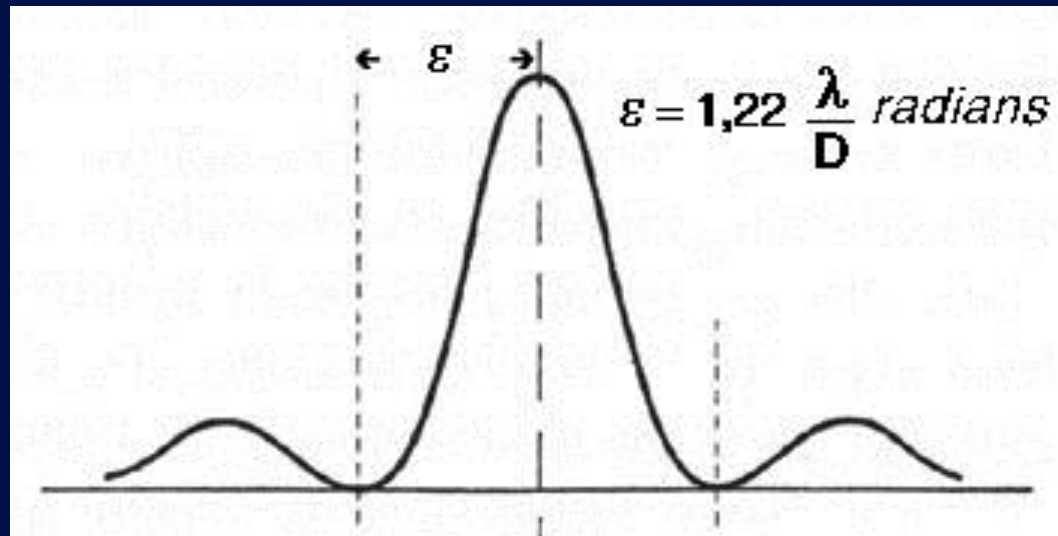
- On obtient un spectre à chaque position



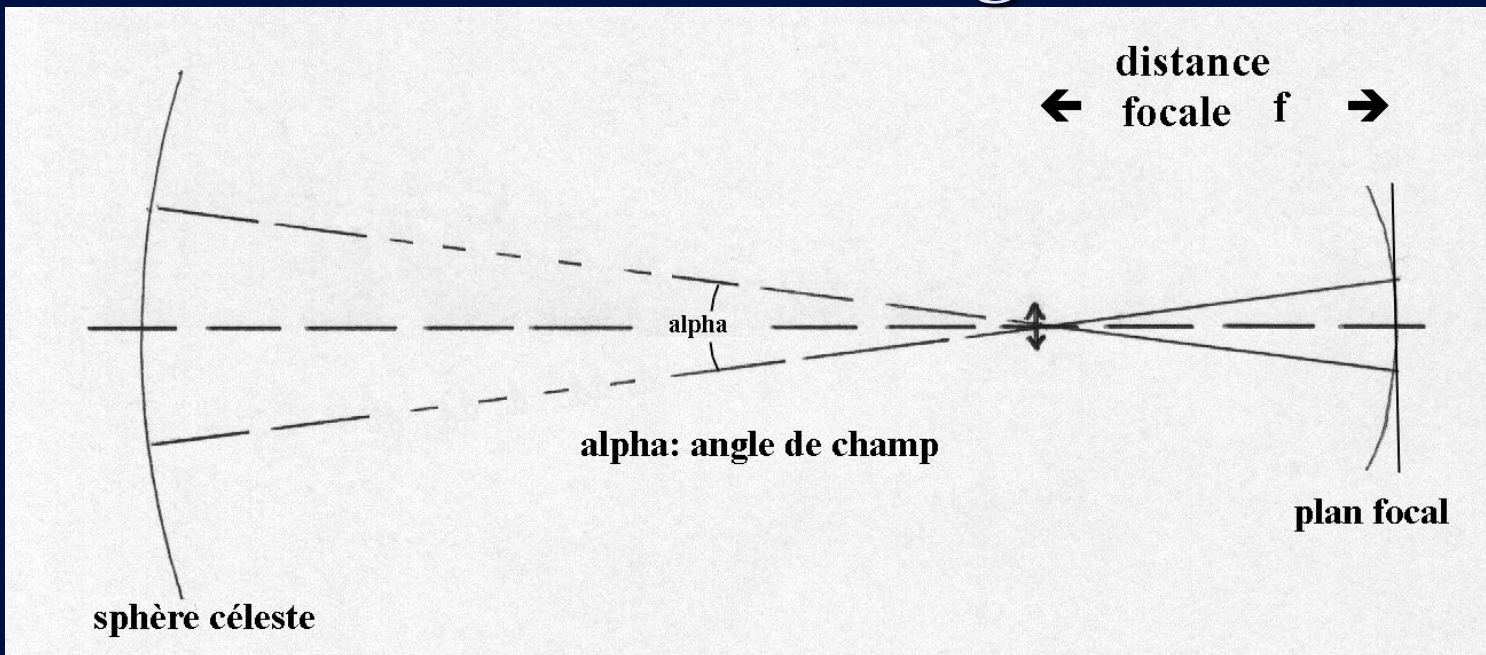
Qu'est-ce que l'imagerie?

- C'est l'obtention d'une image du ciel ou d'un corps lointain à l'aide d'un instrument d'optique
- C'est le seul moyen pour l'astronome d'explorer l'univers
- Elle permet:
 - d'explorer l'univers
 - de connaître les différents astres qui se trouvent dans le ciel
 - de tester nos modèles et nos représentations de l'univers





Le problème de l'imagerie: la tache de diffraction sur l'image focale



Résolution:

La résolution concerne la faculté de distinguer des détails sur une image astronomique.

Un point → une tache dont le diamètre dépend de la taille du télescope

Il est impossible de distinguer deux points dont la distance est inférieure à la taille de la tache: c'est la résolution du télescope utilisé .

Exemples:

Œil humain (pupille de 6mm): 1 minute de degré

Télescope de 30 cm de diamètre: 0,4 seconde de degré

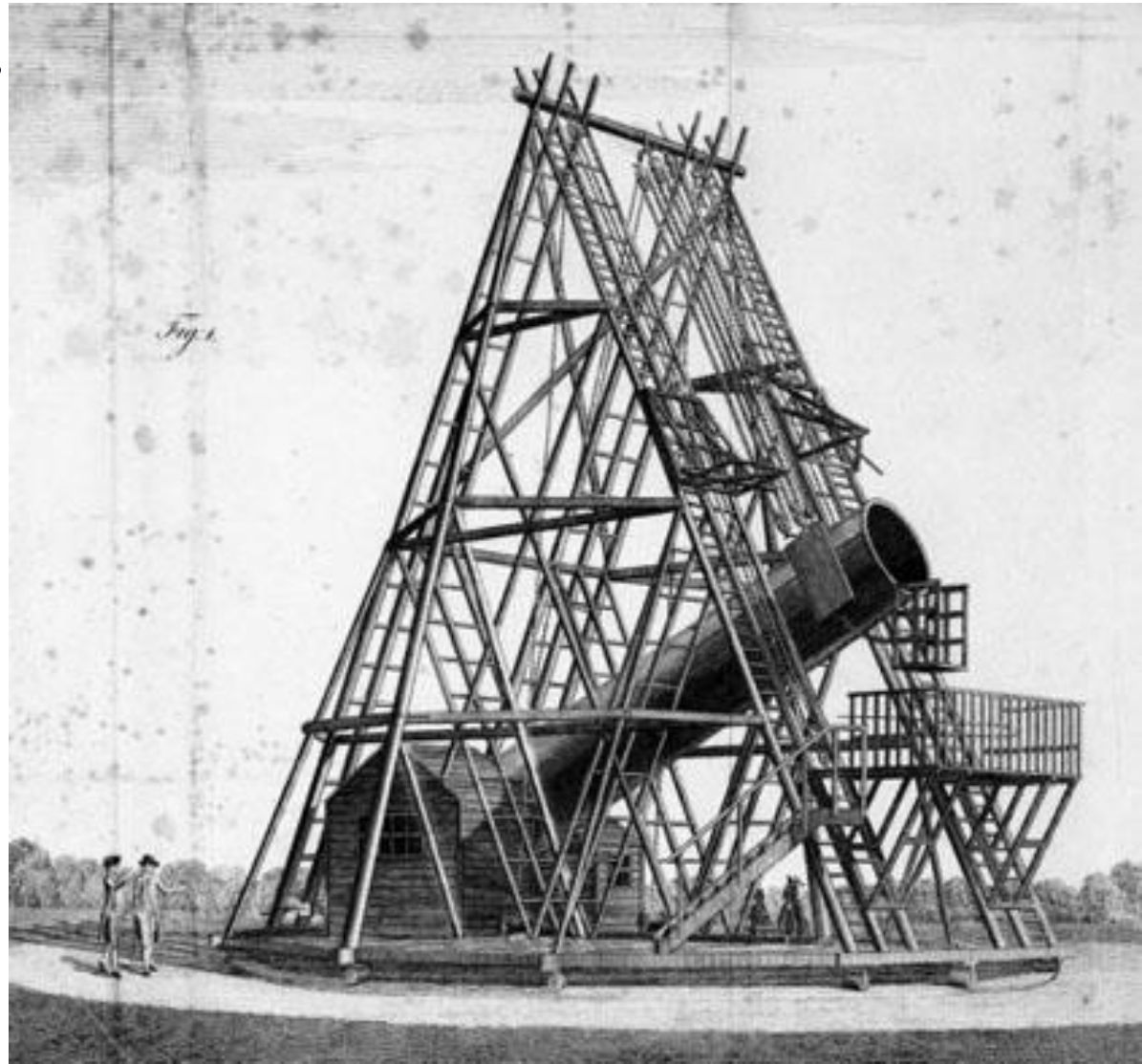
Télescope de 1m de diamètre: 0,12 seconde de degré

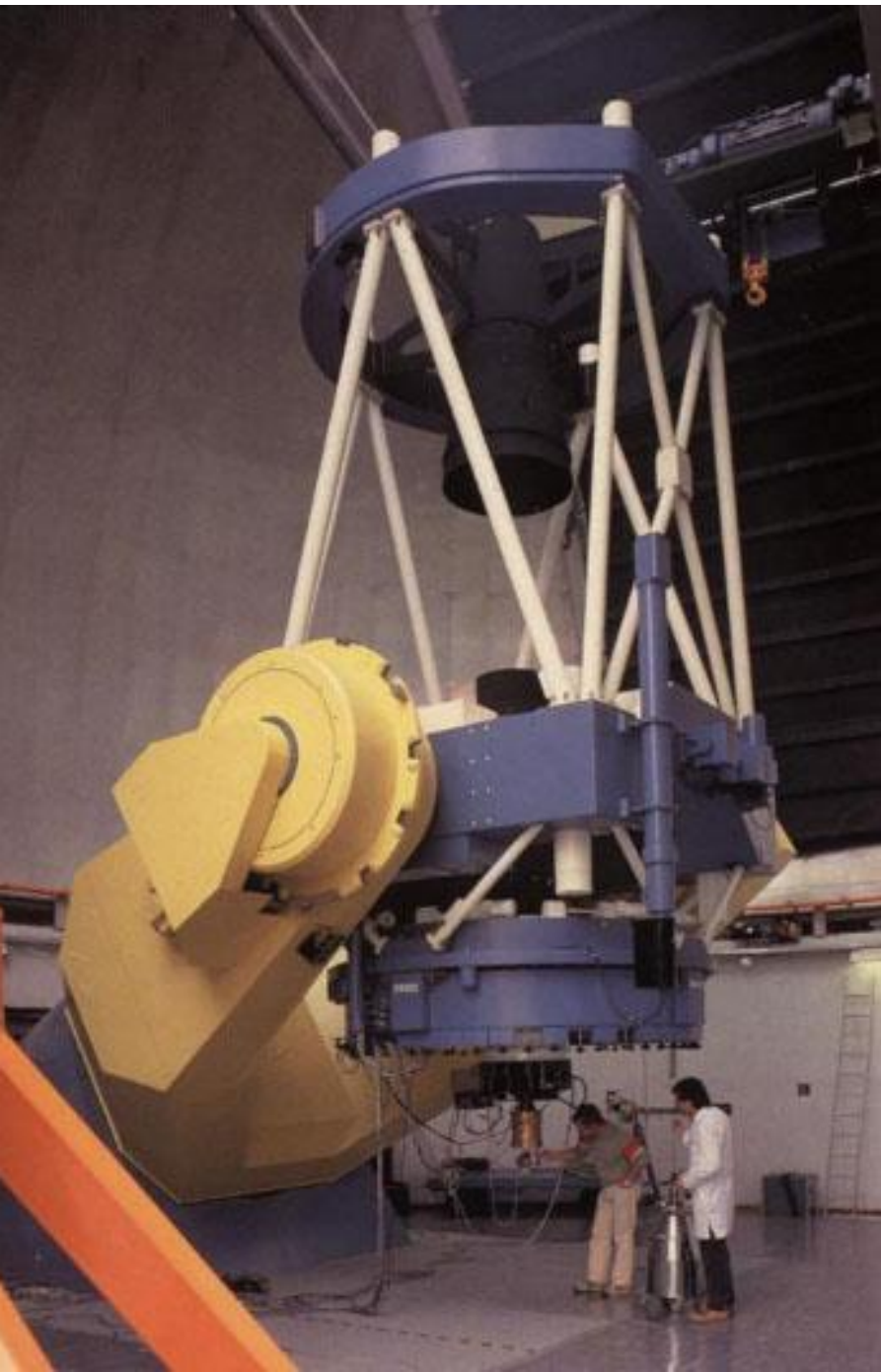
Télescope de 10 mètres de diamètre: 0,01 sec. de degré

L'atmosphère, ennemie de la résolution

- L'atmosphère altère les images :
 - Scintillation: variation d'intensité
 - Agitation : déplacement aléatoire de l'image
- La dégradation se traduit par le « seeing »:
 - 0,2 seconde de degré au Pic du Midi
 - 1 seconde à l'observatoire de Haute Provence

Dès le XVIIIème siècle, la course aux grands télescopes qui permettent de voir plus loin et de voir plus de détails et de découvrir de nouveaux objets: comètes, Uranus,...

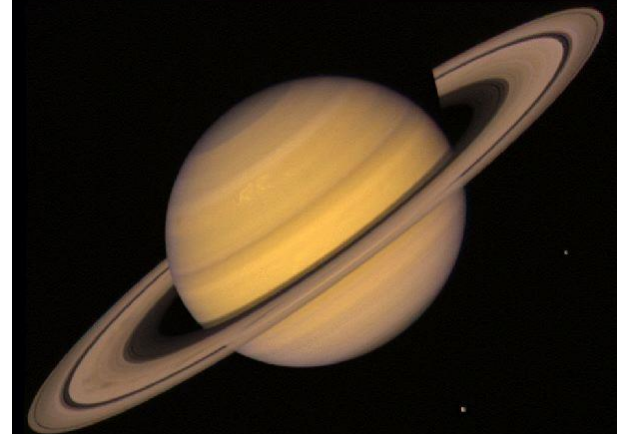
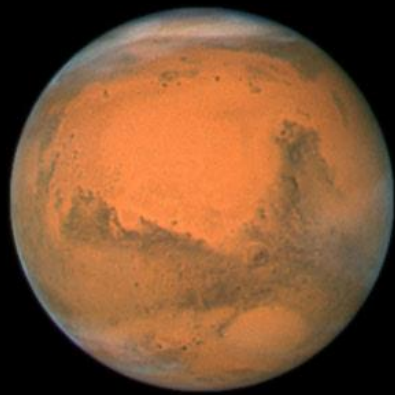




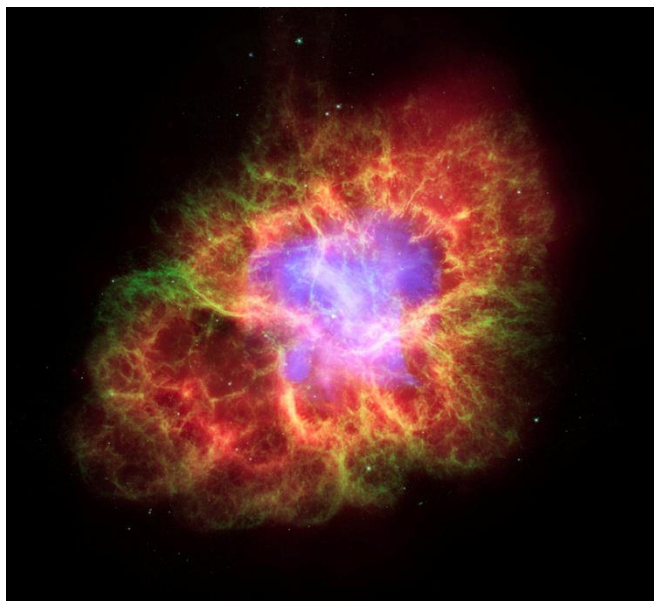
**Pour voir des détails
de plus en plus fins:
des télescopes de
plus en plus grands:**

**- la finesse des détails
dépend directement du
diamètre du miroir du
télescope**

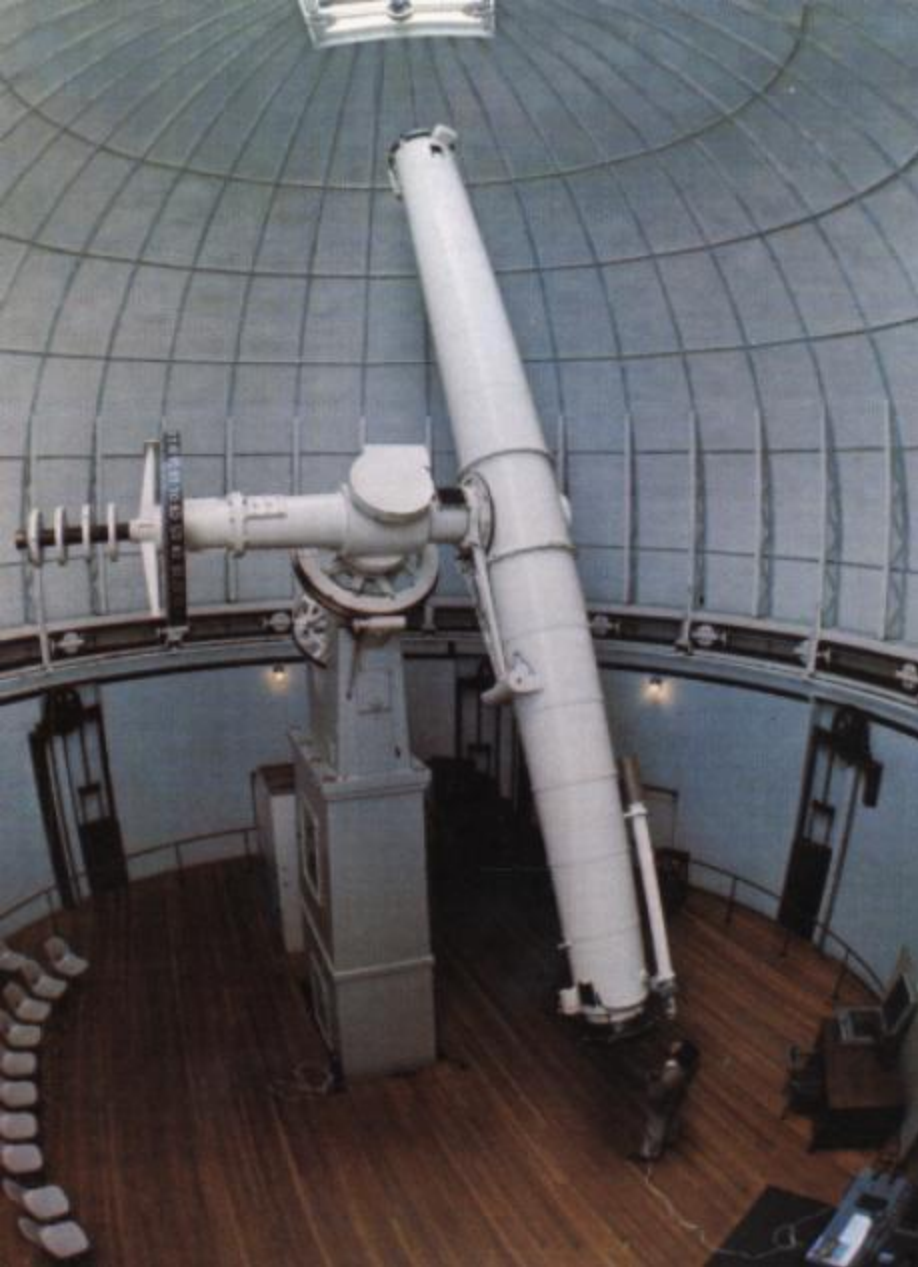




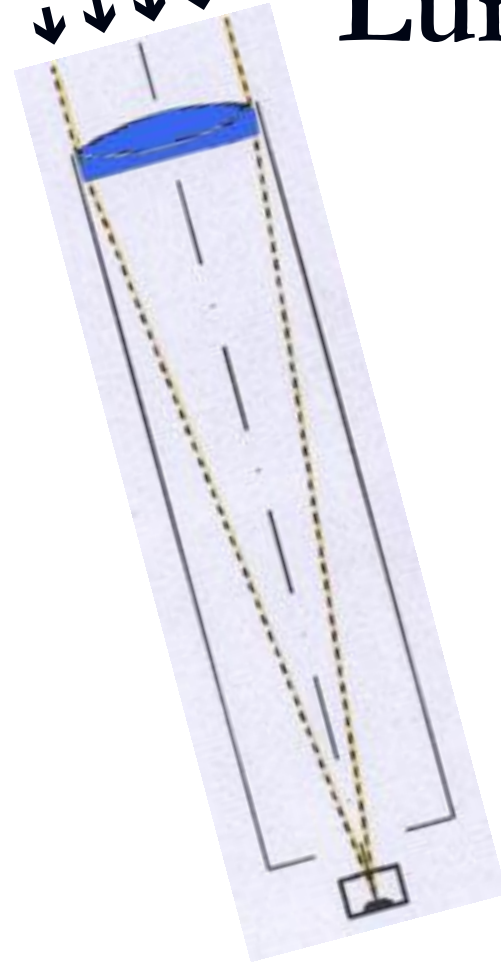
Voir des détails de plus en plus fins



Lunette ou télescope ?



Lunette:



La lunette réfracte la lumière avec sa lentille

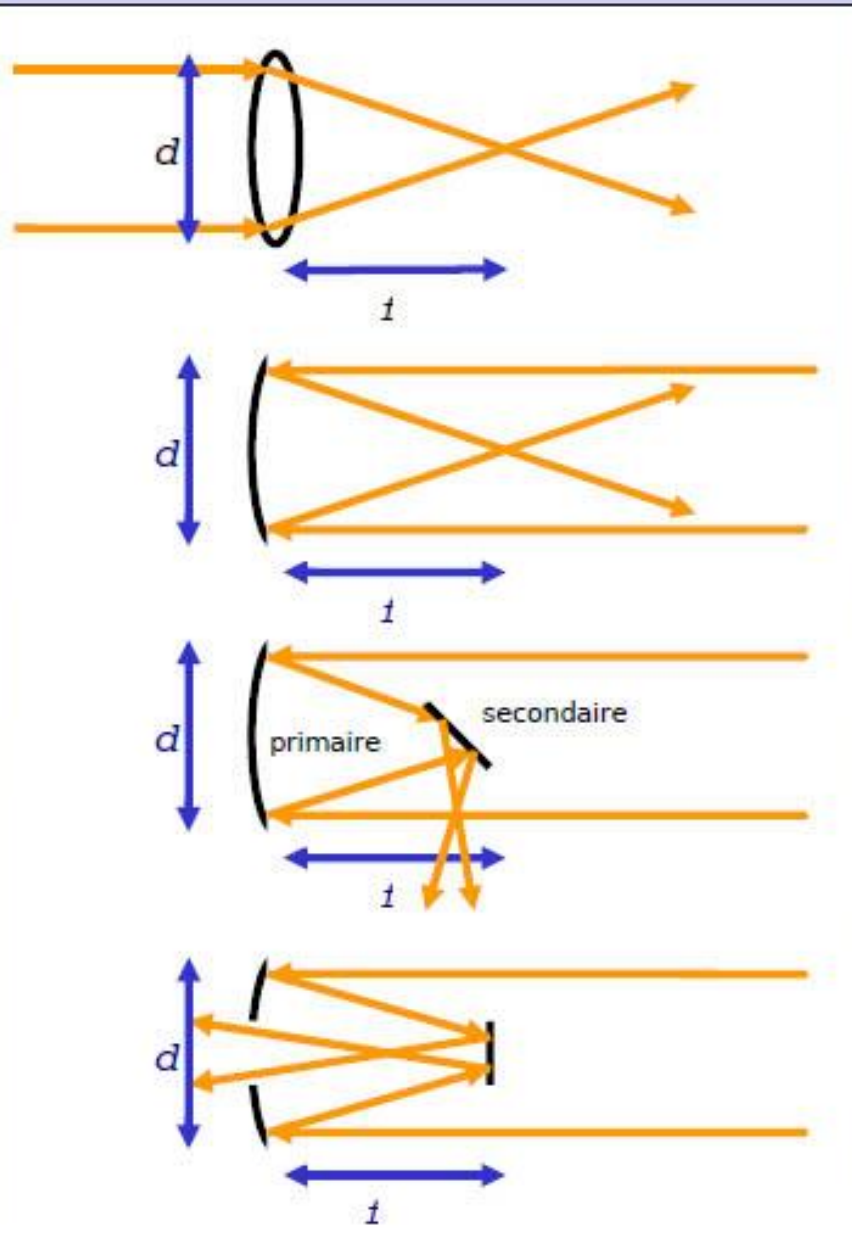


Télescope:



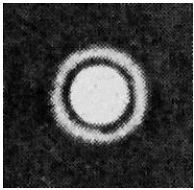
Le télescope réfléchit la lumière sur son miroir

Définitions



- f = longueur focale, distance nécessaire pour focaliser la lumière après réfraction (à travers une lentille) ou réflexion (sur la surface d'un miroir)
- d = diamètre de l'objectif principale (lunette) ou du miroir (téléscope)
- Grossissement :
$$g = f_{\text{instru}} / f_{\text{oculaire}}$$
- Rapport f/d (ouverture)

Augmenter la taille des télescopes: sensibilité, résolution et précision



Un point → une tache dont la taille dépend du diamètre du télescope ↑
Plus le diamètre du télescope est grand, plus l'image d'un point est petite

C'est la limite des plus petits détails perceptibles: deux points trop proches donneront une seule tache!

Augmenter la taille des télescopes: résolution

Exemples: détail perceptible à 4000 km:

Lunette de Galilée → 40 m → un château

Télescope d'amateur → 10 m → une maison

Petit télescope professionnel → 2 m → une personne

Très Grand Télescope (VLT) → 20 cm → une assiette

Augmenter la taille des télescopes: **précision**

Précision de positionnement à 4000 km:
(dépend des modèles d'analyse des images)

Hipparque (-150) → 20 km → une montagne

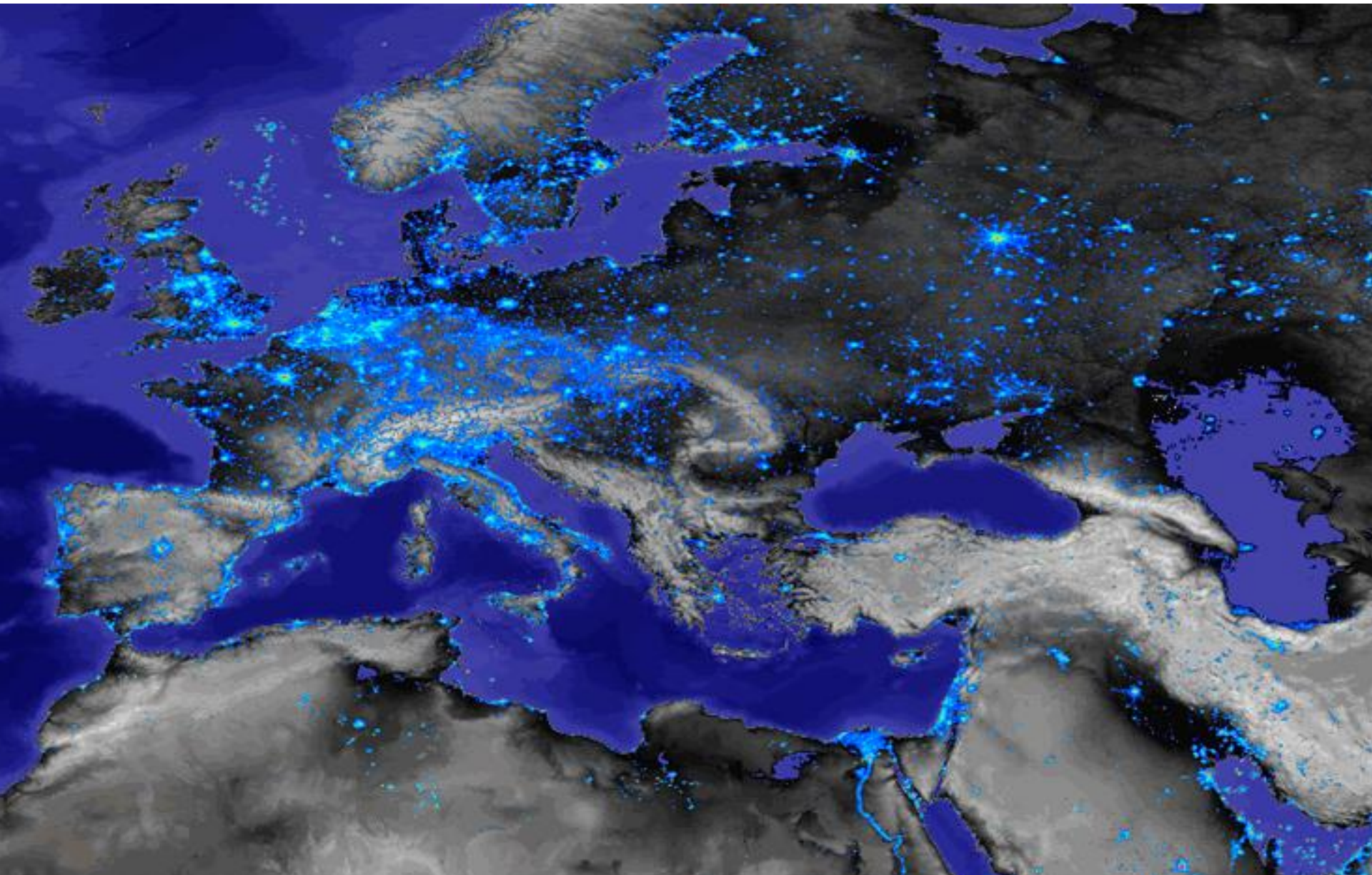
Tycho Brahé (1630) → 400 m → une colline

XIX^{ème} siècle → 20 m → une maison

XX^{ème} siècle → 20 cm → une assiette

XXI^{ème} siècle (GAIA) → 0,02 mm → un cheveu

Éviter les lumières parasites



Monter les télescopes en altitude



L'observatoire du Pic du Midi de Bigorre

Le HST, télescope spatial, pour s'affranchir de l'atmosphère



Voit-on très loin?

Les galaxies: des « univers » comme le nôtre très lointains



**Des télescopes de plus en plus
grands, de plus en plus loin et de plus
en plus hauts!**





**Le VLT: une
ouverture de 8
mètres dans le
désert
d'Atacama au
Chili**

Le VLT: une ouverture de 8 mètres









Des astronomes informaticiens





Salle de contrôle

Les récepteurs: CCD et Cmos

La plaque photographique a été remplacée par le CCD dans les années 1980.

Plaque photographique:

photon → réduction d'un ion d'iodure

d'argent → obscurcissement des zones de lumière par dépôt d'argent métallique

Inconvénients:

il n'y a pas de proportionnalité entre les photons et l'obscurcissement

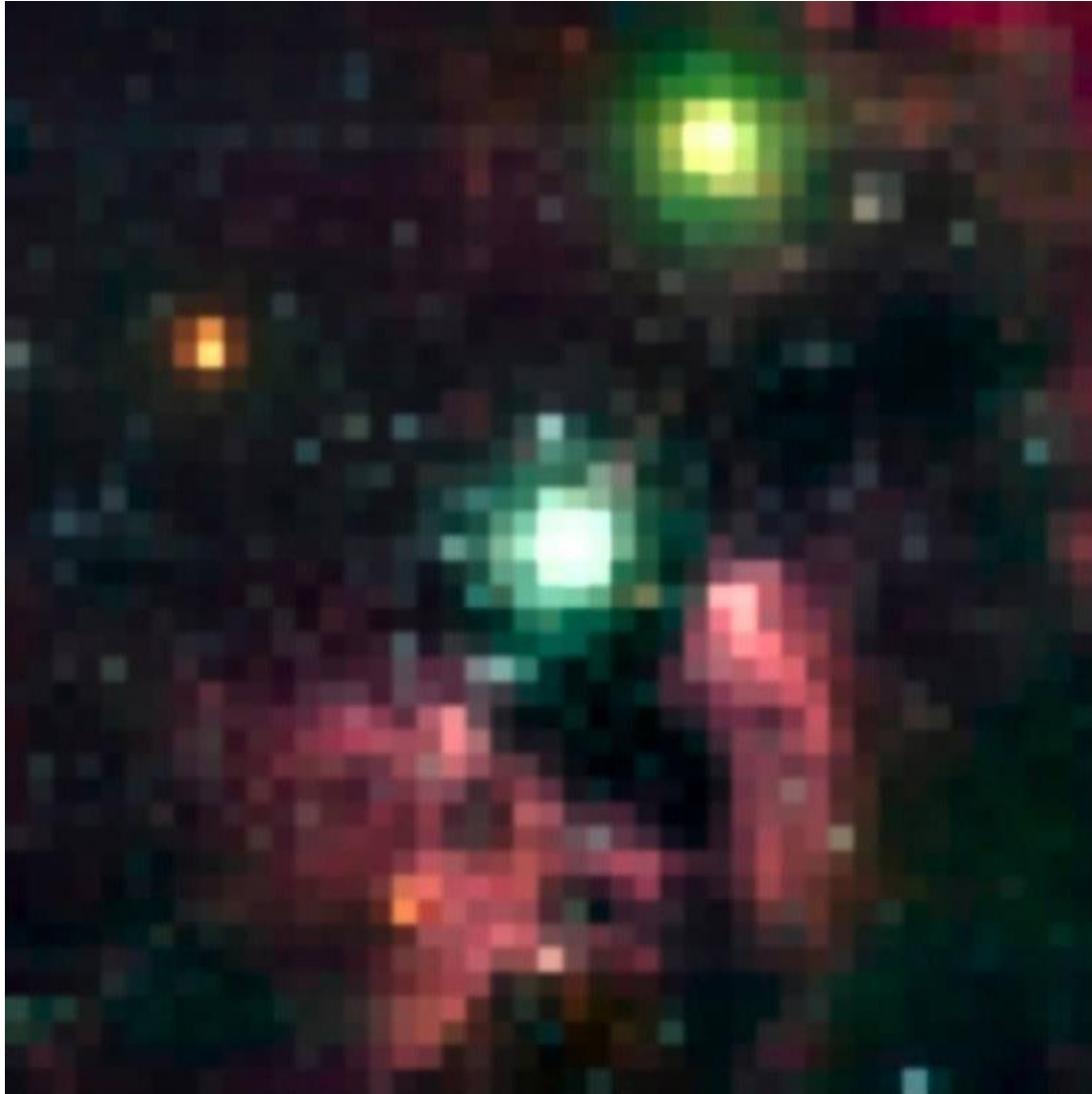
Il faut beaucoup de photons pour réduire l'iodure d'argent

Les récepteurs: CCD et Cmos

Le CCD utilise l'effet photoélectrique pour reconstituer une image

photon → électron → courant électrique → numérisation

L'échantillonnage en pixels

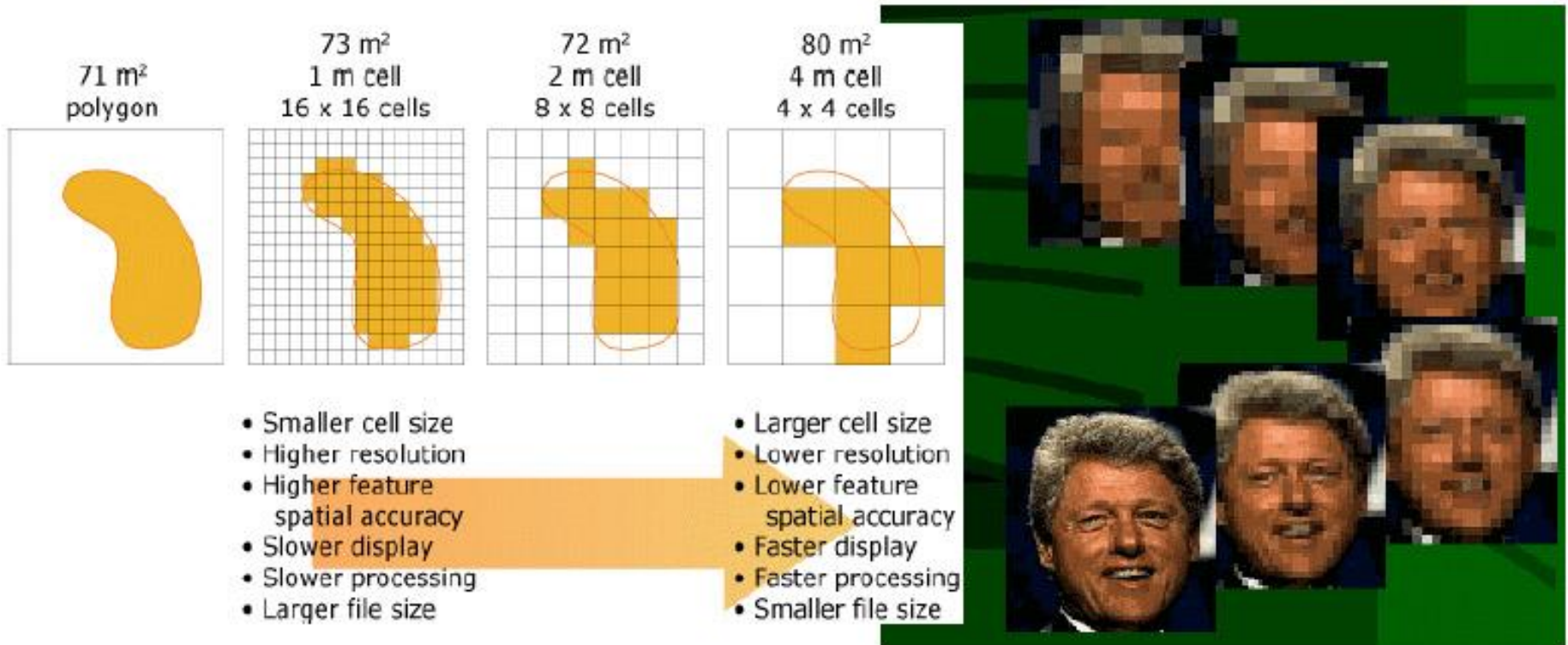


L'image est découpé en pixels successifs chacun exposé à la lumière.

L'échantillonnage en pixels: le choix dépend de la qualité de l'image

Pixel = Echantillonnage spatial

Contient une mesure individuelle du signal considéré

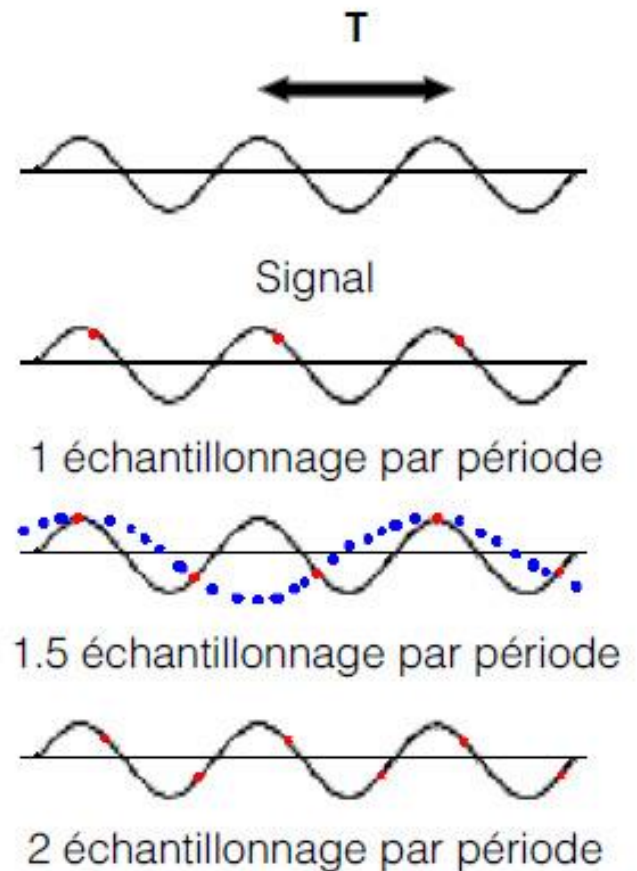


L'échantillonnage en pixels

Théorème de Nyquist-Shannon

Pour représenter fidèlement un signal périodique de manière numérique :

Il faut strictement plus de **deux éléments** d'échantillonnage ("pixels") par période T



L'échantillonnage en pixels

Théorème de Nyquist-Shannon

Aliasing
(repli de spectre)



Vérifie la condition de Nyquist-Shannon



Ne vérifie pas Nyquist-Shannon

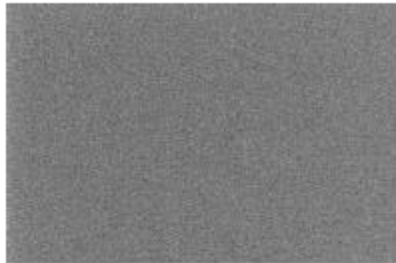
Le traitement d'une image CCD

Pour obtenir une image CCD:

- L'accumulation des charge construit l'image sous forme matricielle
- Il faut compléter avec:
 - Une image du CCD non exposé
 - Une image d'une plage de lumière uniforme

Calibration d'une image CCD

Correction des défauts : images de calibrations



Images de 'Bias'

- Pose très courte (~ 0 s), obturateur fermé
- Doit être soustrait de toutes les images brutes pour enlever le niveau de biais



Images de 'Dark'

- Mesuré avec obturateur fermé et même T_{exp} que les poses scientifiques
- Soustrait aux images brutes pour enlever le courant d'obscurité



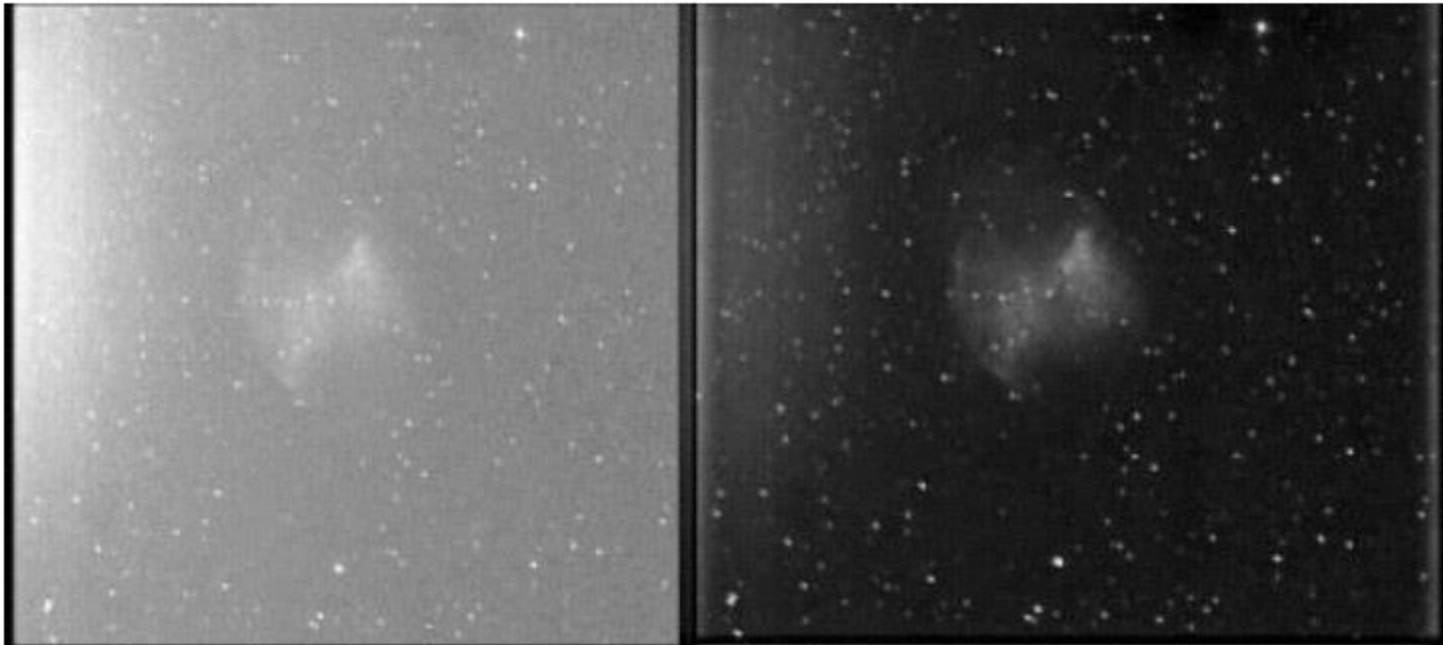
Images de 'Flat-field'

- Mesuré dans les mêmes conditions que les poses scientifiques avec une lumière uniforme
- Sky flats ou lamp flats

Plusieurs poses moyennées pour diminuer le bruit → « master »

Calibration d'une image CCD

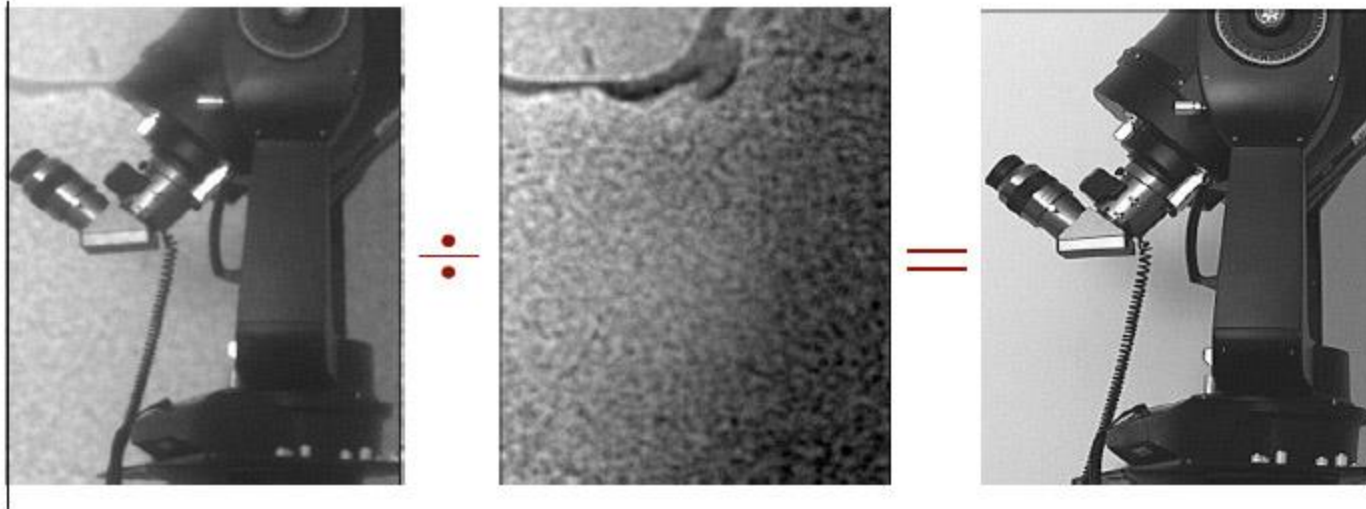
Soustraction du dark / biais



Calibration d'une image CCD

Correction du défaut d'uniformité

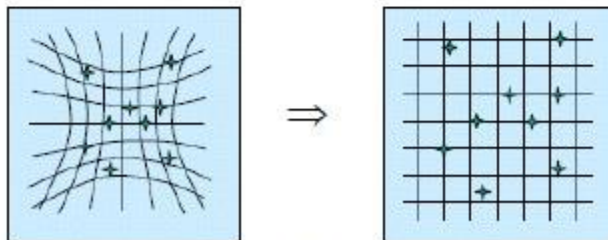
Diviser TOUTES les images par le master flat



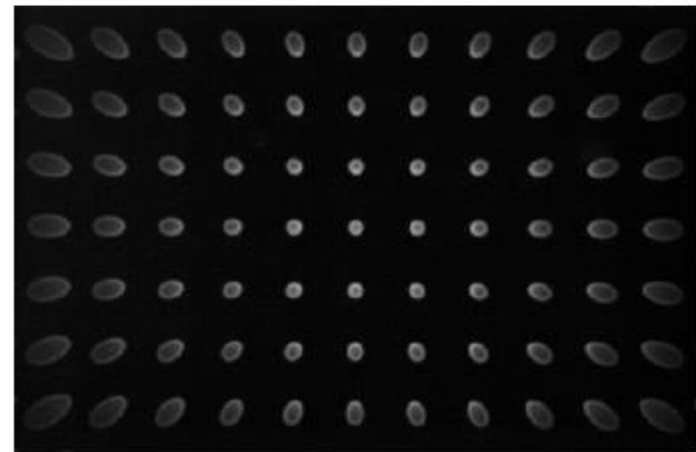
Calibration d'une image CCD

Correction des défauts optiques

- Apparition de corrélations entre les axes spatiaux (et/ou spectraux)
- Peuvent être corrigés via un modèle optique et/ou des lampes de calibration et/ou des étoiles de calibration
- Les données sont interpolées en fonction de ce modèle optique



Mapping of sky coordinate grid in reference field



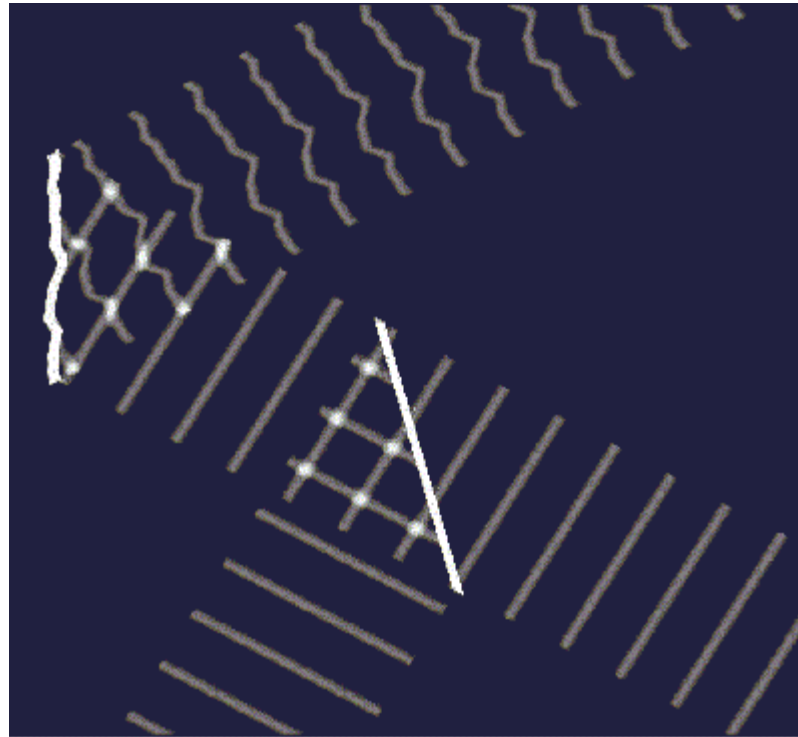
Le mode TDI:

cercle méridien et « scanning » télescope ou télescope à balayage

- On reconstruit une image par tranche en laissant défiler le ciel (méridien) ou en balayant un grand cercle de la sphère céleste
- Cercles méridiens automatiques:
 - Observer le défilement des astres et non plus leur passage au méridien
- « Scanning telescope »:
 - Observer le long de grands cercles de la sphère céleste
- GAIA
 - Balayer le ciel depuis l'espace

L'optique adaptative

- « redresser » les rayons lumineux troublés par l'atmosphère terrestre

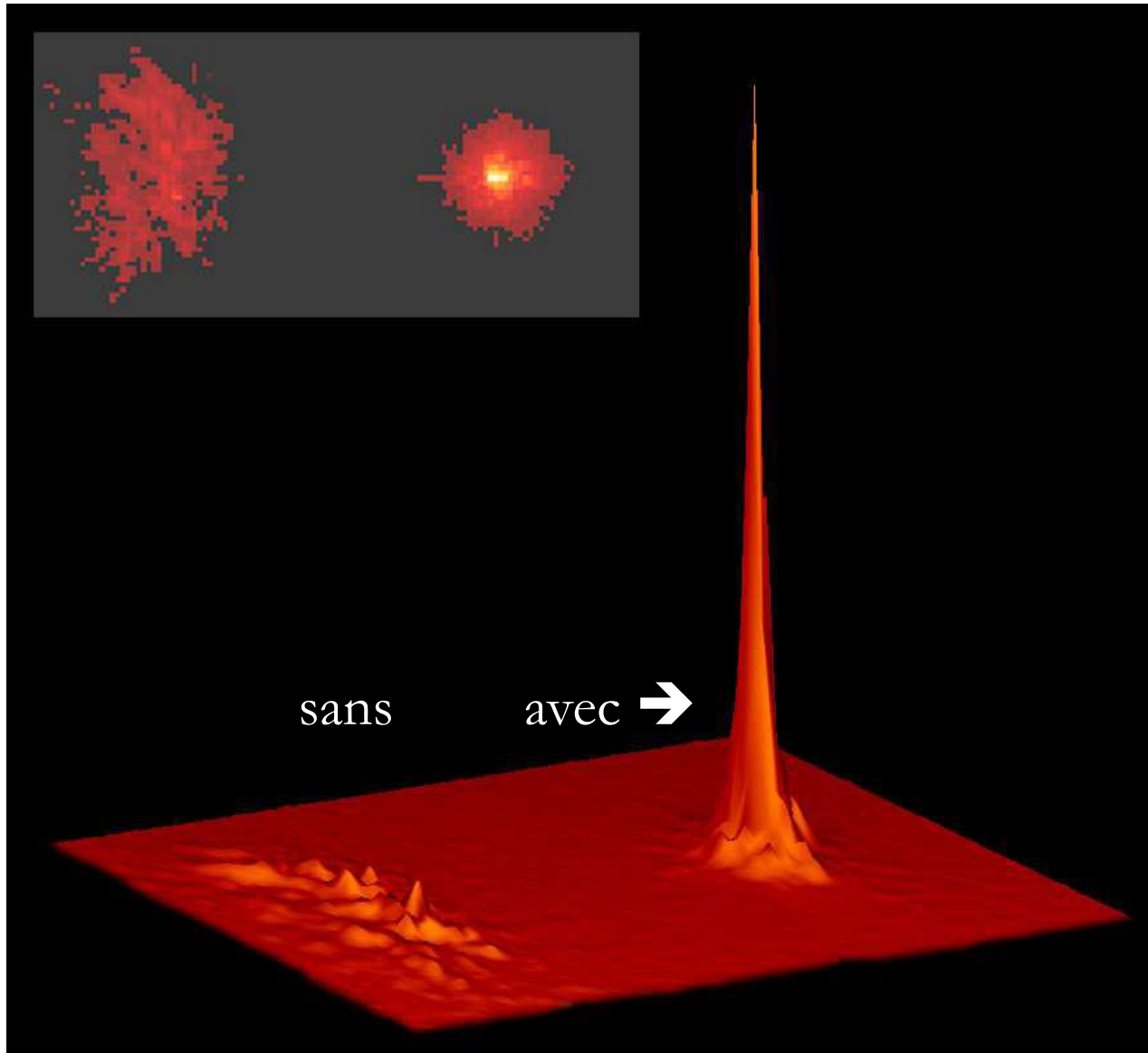


L'optique adaptative/l'optique active

■ Principe :

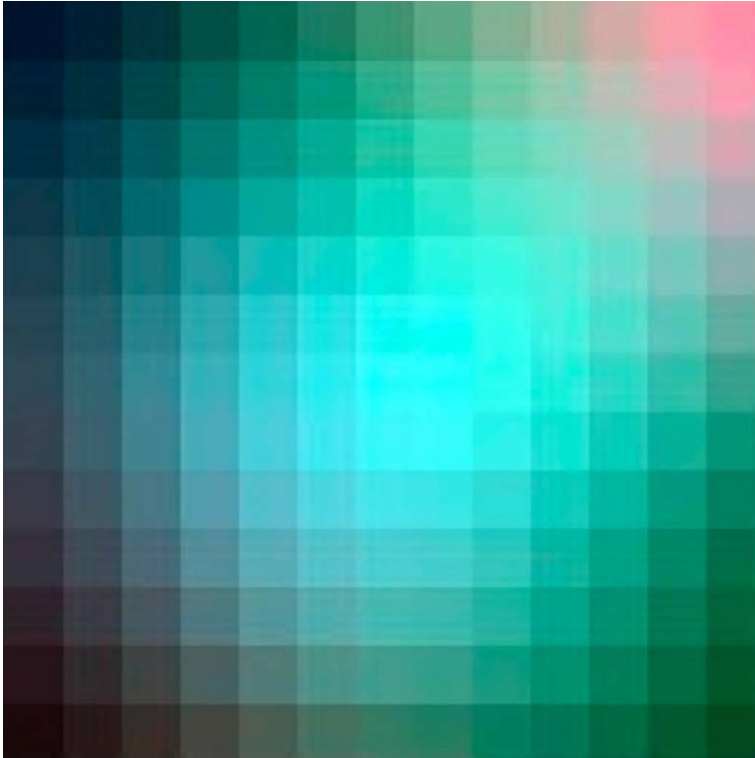
- la turbulence atmosphérique « brouille » les images
- on analyse le front d'onde avec un dispositif optique (interférométrique ou non) pour estimer la perturbation due à l'atmosphère
- cela nécessite d'avoir une source ponctuelle (étoile ou quasar) de magnitude « convenable » (ni trop brillante, ni trop faible) dans le champ, sinon « étoiles guides lasers » (par exemple au Very Large Telescope sur Yepun)
- on déforme le miroir primaire en temps réel à l'aide de petits vérins (optique active)

L'optique active

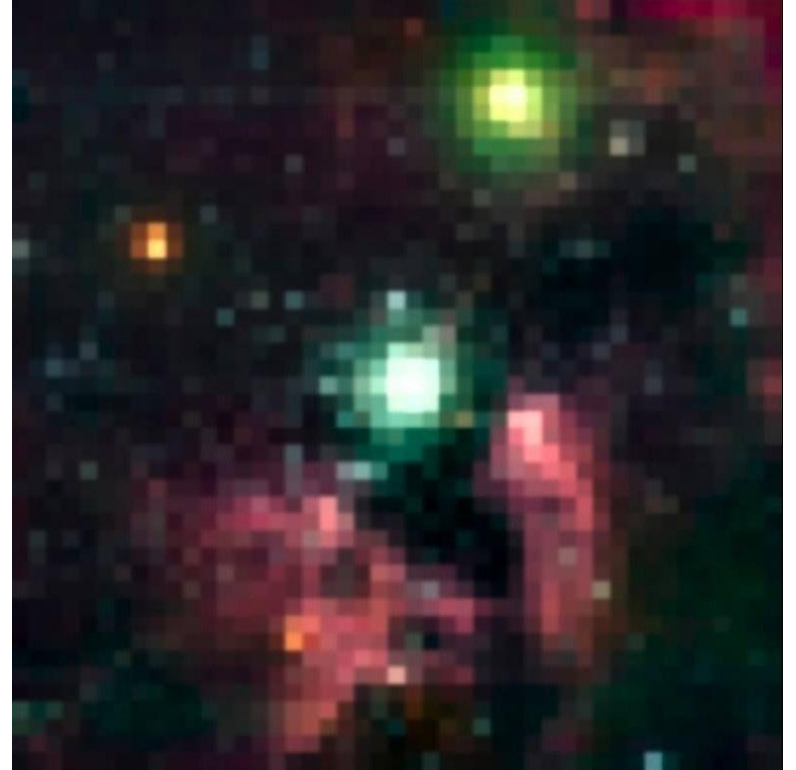


Etoile laser au télescope Keck (Hawaii)

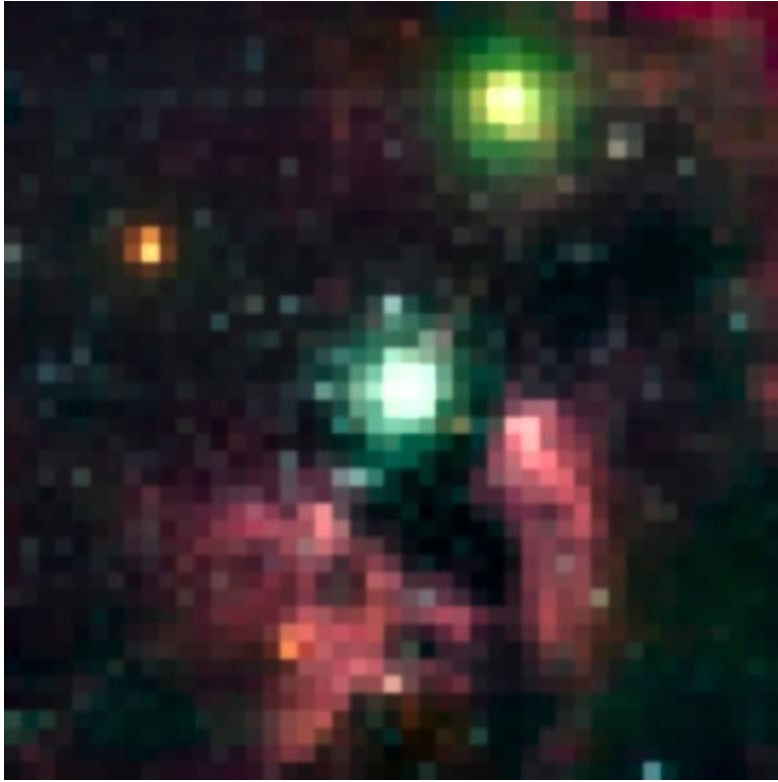




petit télescope



grand télescope



grand télescope



très grand télescope

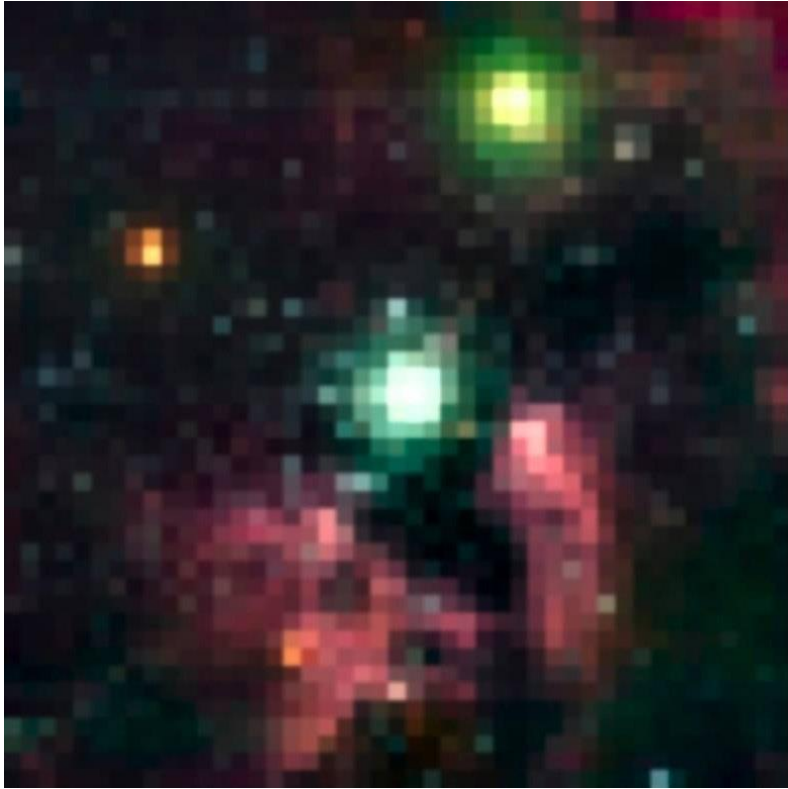


sans optique adaptative



avec optique adaptative

- C'est la même image!



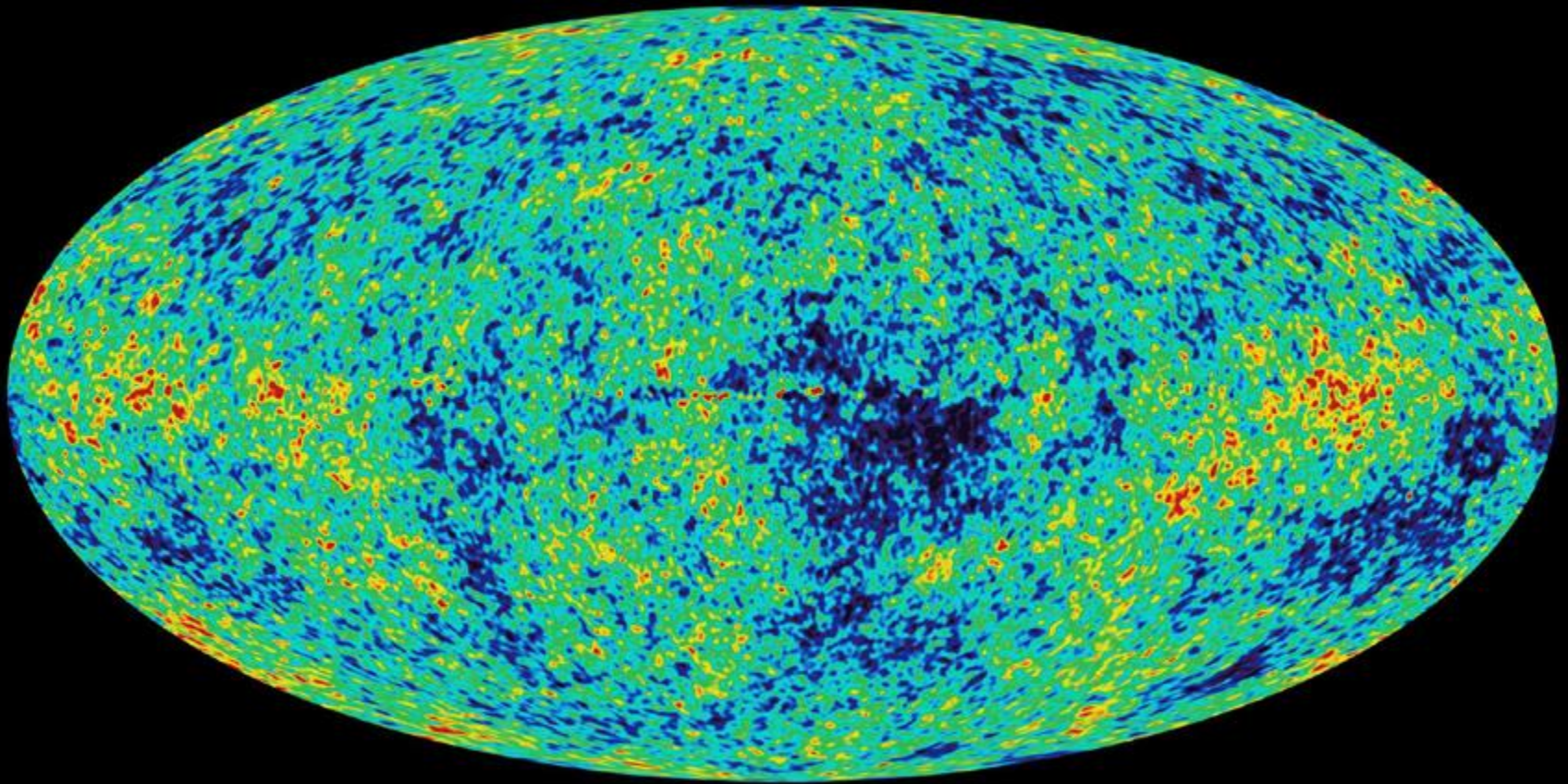
Toujours plus loin avec des télescopes toujours plus grands!

- Galaxies lointaines: qu'y a-t-il derrière elles?





Le fond cosmologique ou le bout du monde... observable en ondes radio



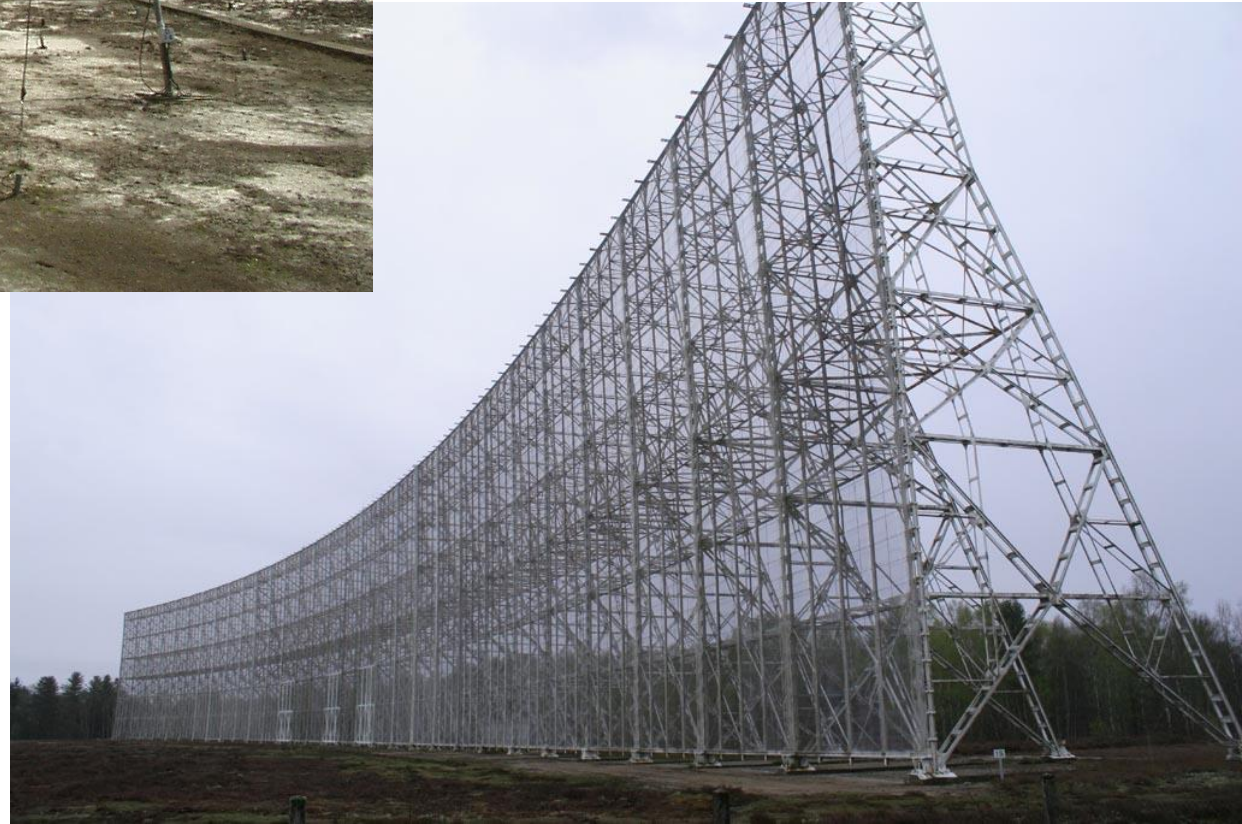
Aucun télescope ne peut voir au-delà...

Les télescopes qui observent en radio



De très grands collecteurs d'ondes radio: écouter les étoiles

Écouter les étoiles à Nançay en Sologne



Les antennes du VLA (Very Large Array) au Nouveau Mexique



Sonder les cieux avec de puissants radars

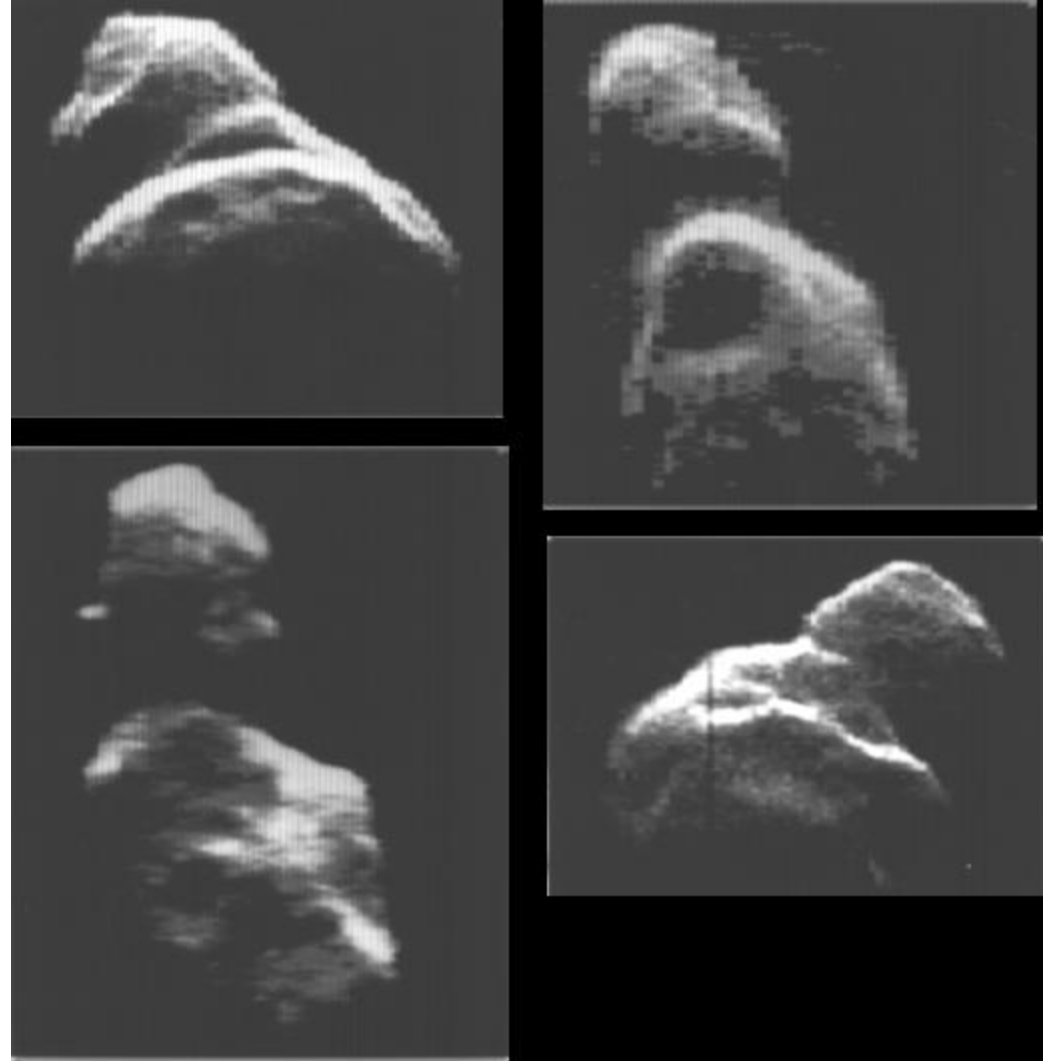


Observer grâce au radar



Géographos

Toutatis →



Un télescope: jusqu'à quelle taille?

- Lunette (à lentille): → 1 mètre
- Télescope (à miroir):
 - Miroir seul: → 5 mètres
 - Miroir mince (optique active): → 10 mètres (VLT, ...)
 - Miroir segmenté: → 100 mètres (ELT, ...)
 - Interférométrie: → ??? (dans l'espace)

L'ELT (Extrêmement Large Telescope)

Un miroir de 50 mètres
de diamètre

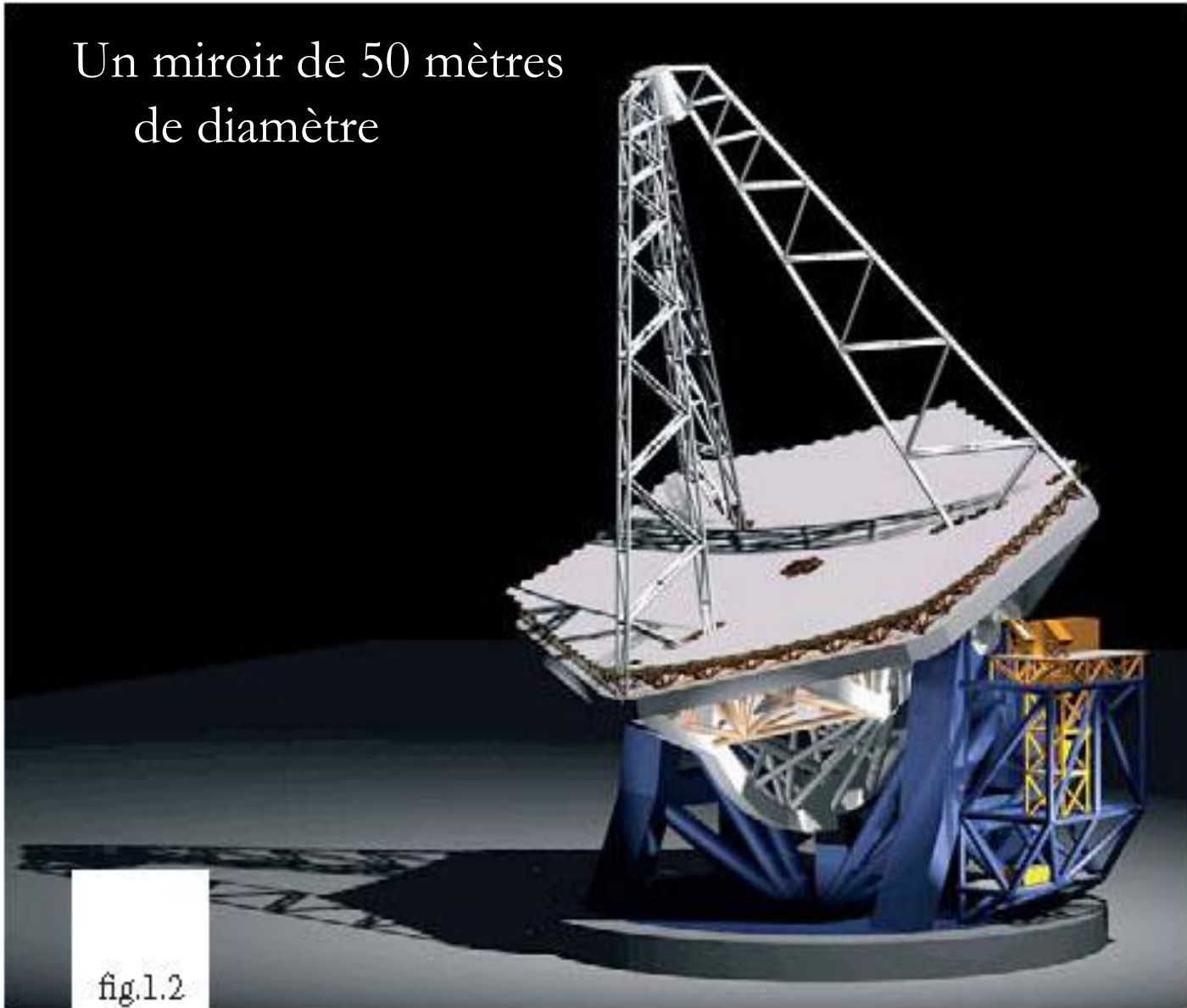


fig.1.2

Encore plus grand : dans l'espace!



Voir des planètes autour des étoiles

De nouveaux types de télescopes pour de nouveaux types de signal

- Jusqu'à présent, on ne détecte et on observe que les ondes électromagnétiques.
- Existe-t-il d'autres types d'ondes?
- Oui: les ondes gravitationnelles.
- Ce sont des fluctuations de l'espace lui-même, c'est-à-dire qu'une distance entre deux points va varier mais les systèmes de mesure aussi, ce qui complique leur détection!

Détecter les ondes gravitationnelles

- Les « télescopes » VIRGO et LIGO tentent de détecter ces fluctuations de l'espace.
- Qui ou quoi les émet? Des variations de masse importante en provenance des trous noirs.
- Une première détection a eu lieu en 2016.
- La variation de distance détectée a la taille d'un atome!
- Ces ondes nous permettent de voir au-delà de l'horizon cosmologique où l'univers est opaque.



← LIGO

VIRGO →



Conclusion

- L'astronome regarde, observe mais n'intervient pas sur son objet d'étude.
- L'astronome observe, propose une représentation de l'univers qu'il remet en cause après chaque nouvelle observation.
- L'astronome explore et cherche à comprendre l'univers, sa formation, son évolution.
- L'astronome répond à la question « comment? » mais pas à la question « pourquoi? »