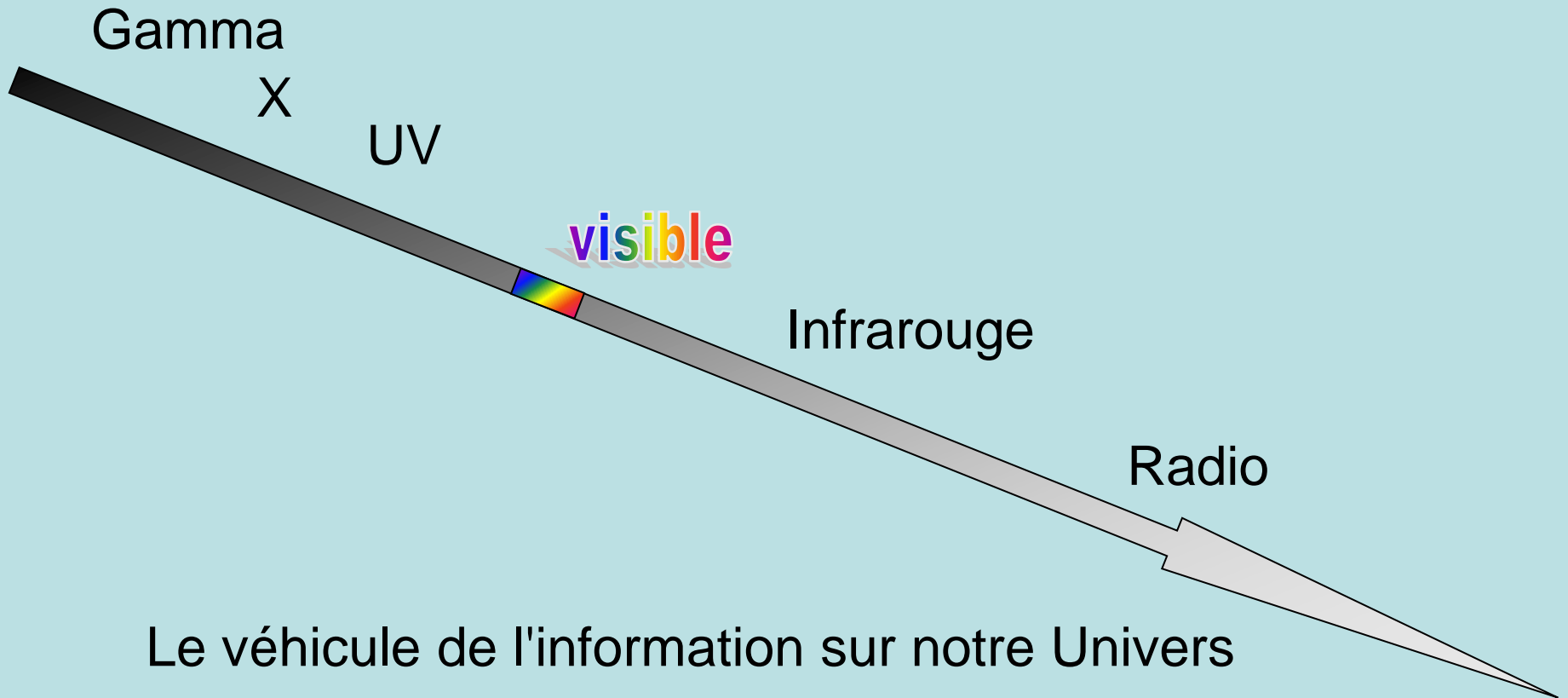


Mercredi 20 janvier 2009

Moyens d'exploration de l'Astrophysique

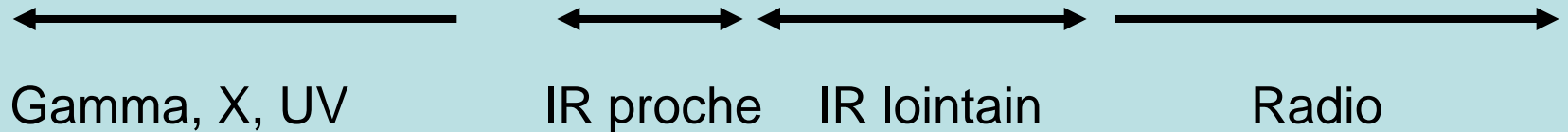
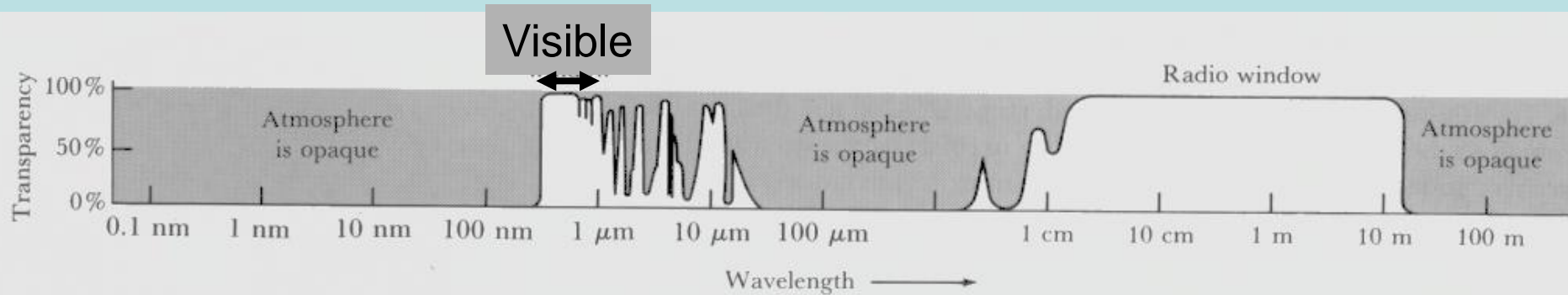
François Sibille, Directeur de Recherche CNRS
CRAL-Observatoire de Lyon

Rayonnement électromagnétique



Le véhicule de l'information sur notre Univers

Transmission de l'atmosphère

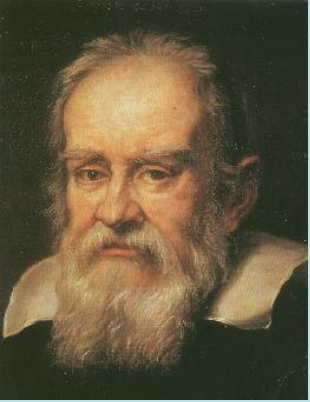


Photons de haute énergie

Photons de basse énergie

L'infrarouge passe mal
Les UV, X et γ sont complètement bloqués

L'accès à l'espace affranchit l'observation de ces limitations



Galilée découvre beaucoup de choses en 1609 ...

... avec une toute petite lunette

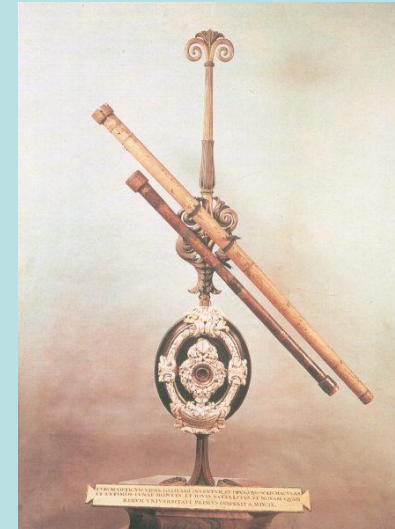
NB ce n'est pas lui qui l'a inventée ! (Giambattista della Porta, 1586)

- Satellites de Jupiter
- Étoiles dans la Voie lactée
- etc.

Lunette : $D \sim 50\text{mm}$

Œil : $D' \sim 5\text{mm}$

$$\Rightarrow \text{Gain} : (D/D')^2 = 100 !$$



Télescope \Rightarrow Image du ciel (concentration des rayons au foyer)

\Rightarrow Collecteur de photons $(D)^2$

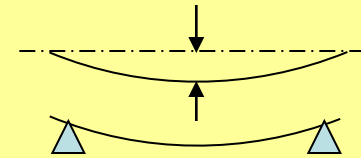
Peut on augmenter indéfiniment le diamètre D ?

Pour collecter plus de photons, bien sur !

- **D'abord un problème de résistance des matériaux :**

Pouvoir collecteur $\propto D^2$ \Rightarrow Masse du miroir $\propto D^3$

flexions $< \lambda/10 \approx 0,05 \mu\text{m}$!



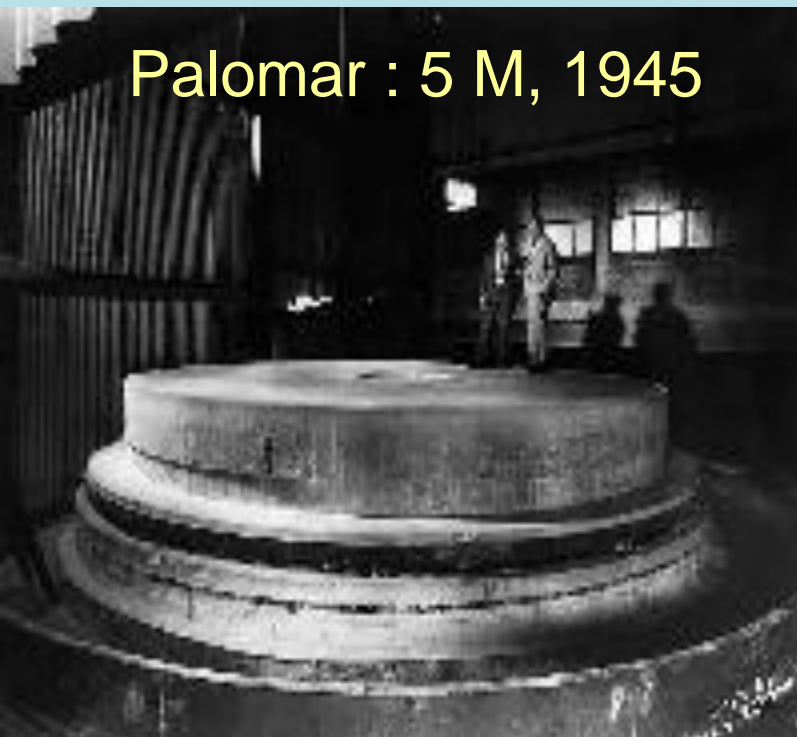
\Rightarrow Monture + importante \Rightarrow + chère !

- **Puis des problèmes de fabrication :**

- Temps de refroidissement de la dalle de verre
- Temps de polissage

Des miroirs de plus en plus minces

Palomar : 5 M, 1945



Mais contrôle actif de la surface

VLT, ESO 1997

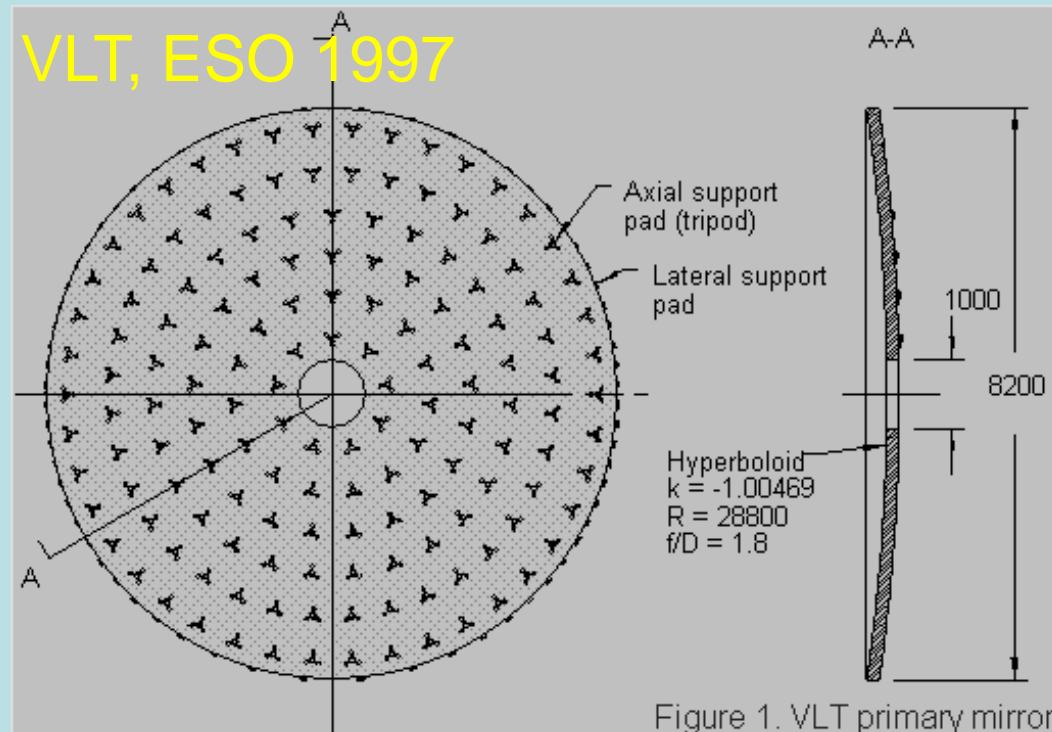
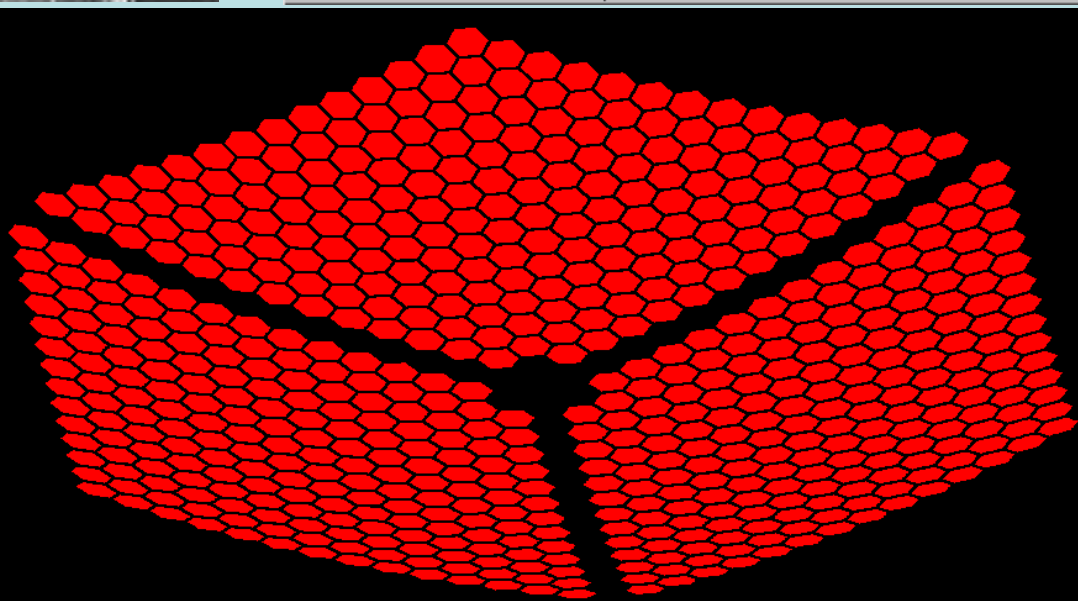


Figure 1. VLT primary mirror

Miroir segmenté
projet pour un
télescope de 30 M
Californie (CELT)
....2010



Augmenter la surface c'est bien (mais cher !)

et si on cessait de gaspiller les photons !

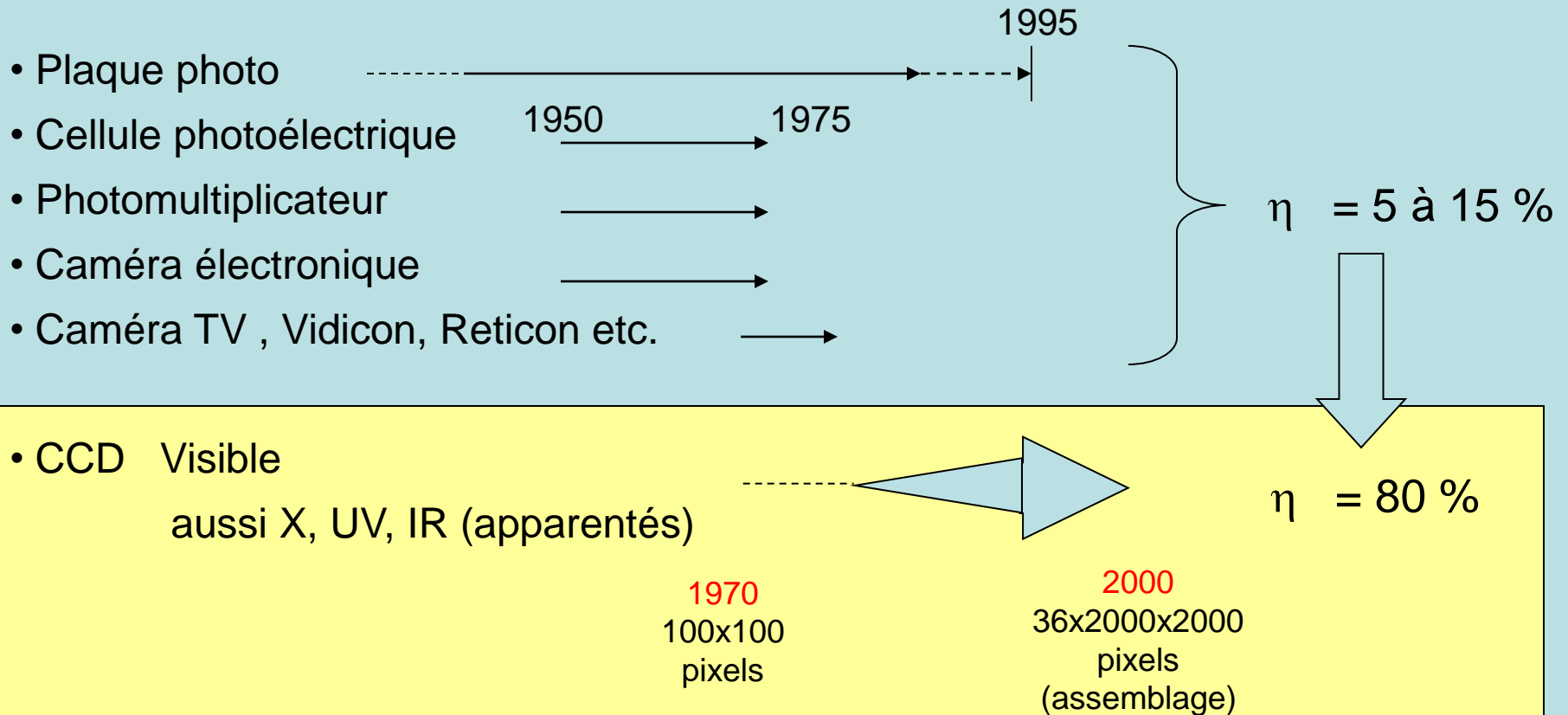
(1975-2005)

Les progrès des détecteurs de lumière

En parallèle : Progrès des détecteurs de lumière

Rendement quantique = $\eta = \frac{\text{nombre de photons détectés}}{\text{nombre de photons incidents}}$ (toujours < 1)

multiplier η par 2 \approx multiplier la surface du miroir par 2



Autre progrès (1995-2005) :

Maîtriser la turbulence

Image d'un objet ponctuel = étoile lointaine

Au foyer, ce n'est pas un "point"

Théoriquement : tache de diffraction :

c'est une tache de diamètre caractéristique :

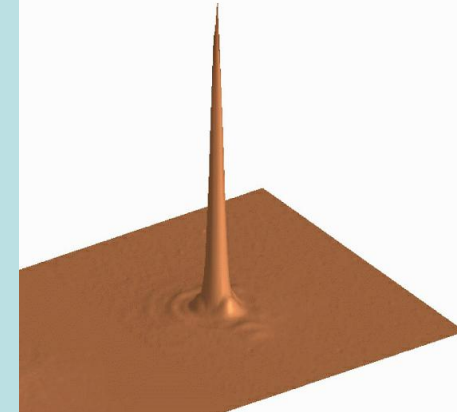
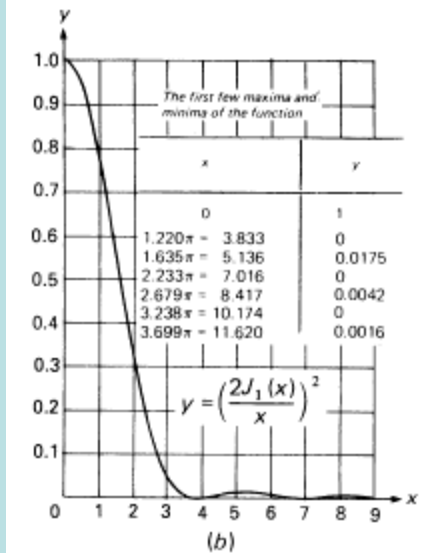
$$\theta \text{ (radian)} \approx \frac{\lambda}{D}$$

↓ Longueur d'onde, m
 ← Diamètre télescope, m

Ex : $D = 5\text{m}, \lambda = 0,5\mu\text{m} \Rightarrow \theta = 0,02''$ (seconde d'arc)

$D = 20\text{ cm}, \lambda = 0,5\mu\text{m} \Rightarrow \theta = 0,5''$ (seconde d'arc)

En pratique : la tache est plus grosse



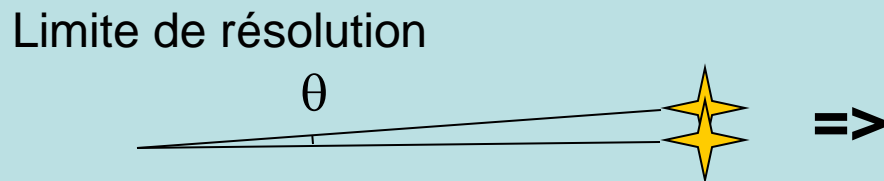
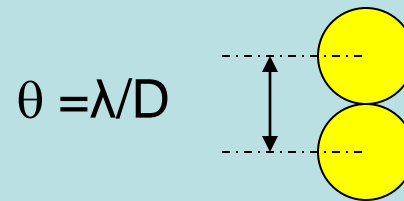
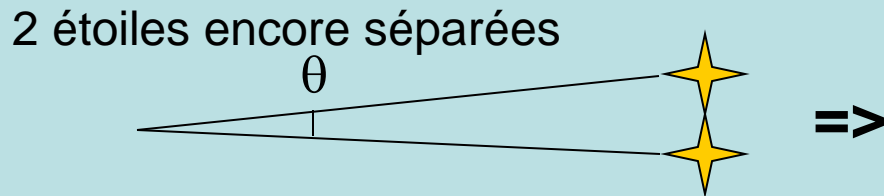
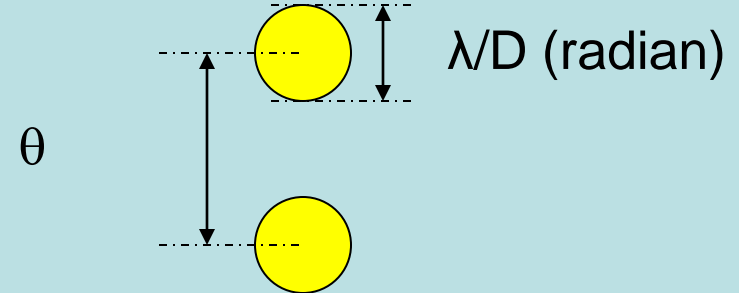
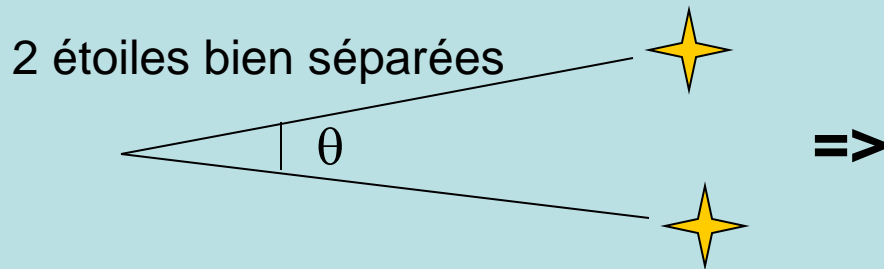
Le problème de la résolution spatiale

Séparation = distance angulaire de 2 objets dans le ciel = θ (radian!)

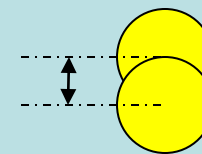
Théoriquement (Diffraction)

DANS LE CIEL

IMAGE AU Foyer



$\theta = \frac{1}{2} \lambda/D$

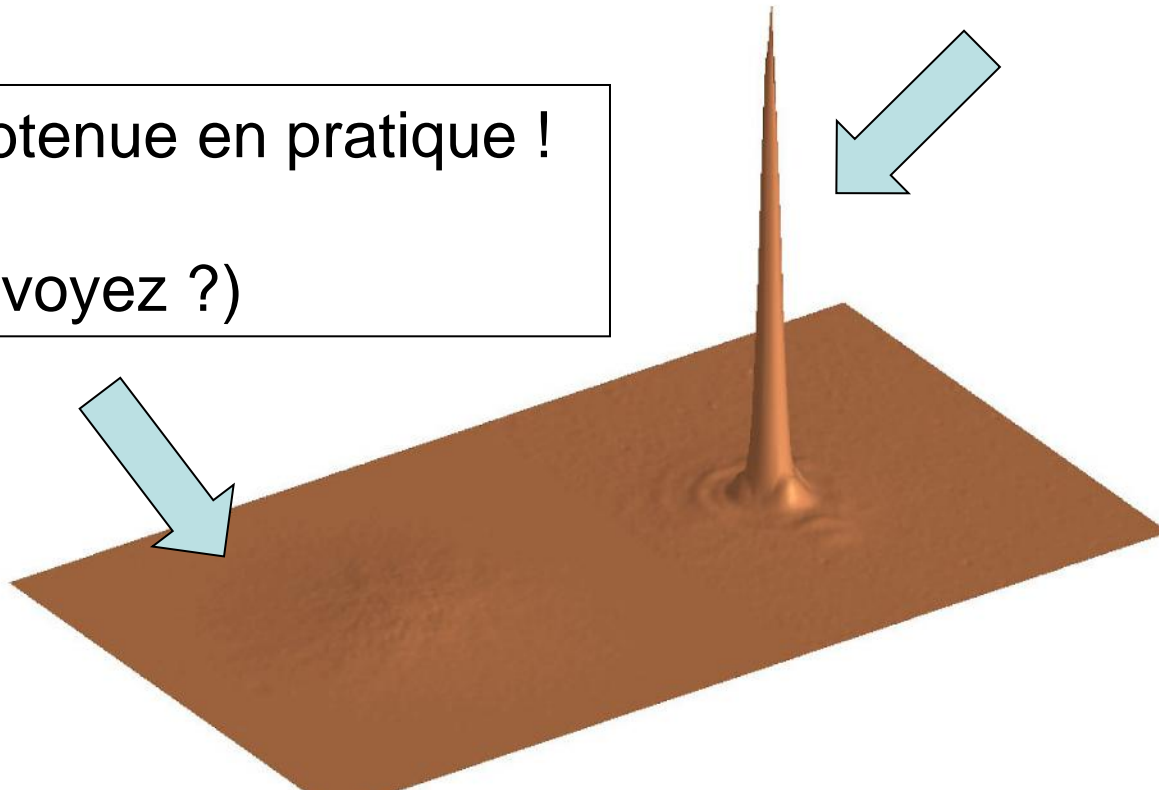


On ne peut plus distinguer les 2 images

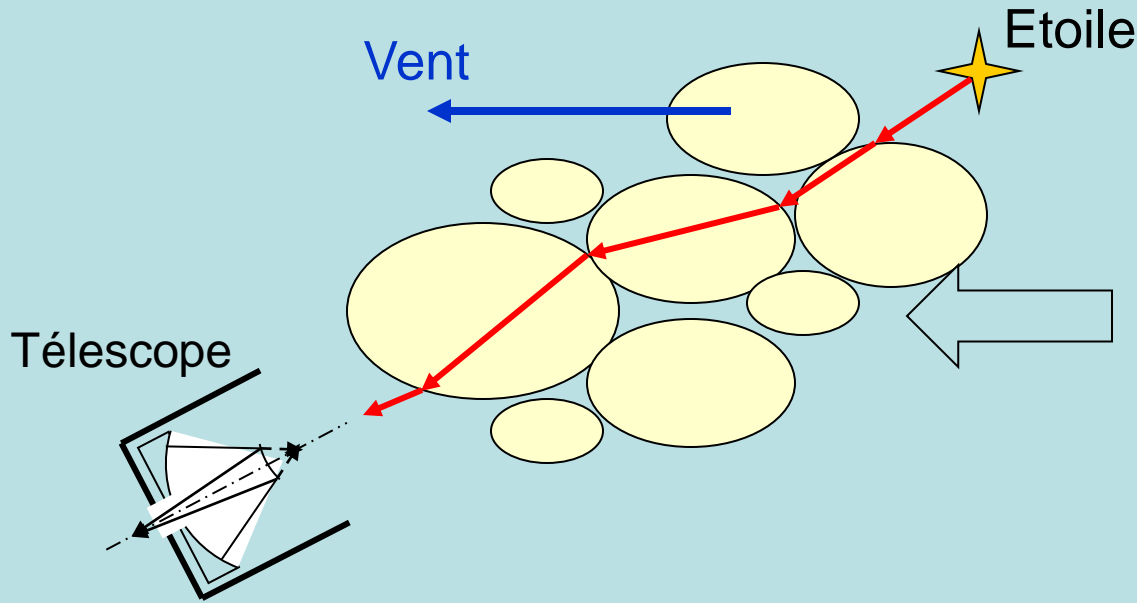
Au foyer, l'image d'une étoile n'est pas un "Point" !

Image théorique :
"Tache d'Airy"
(Prévue par l'Optique)

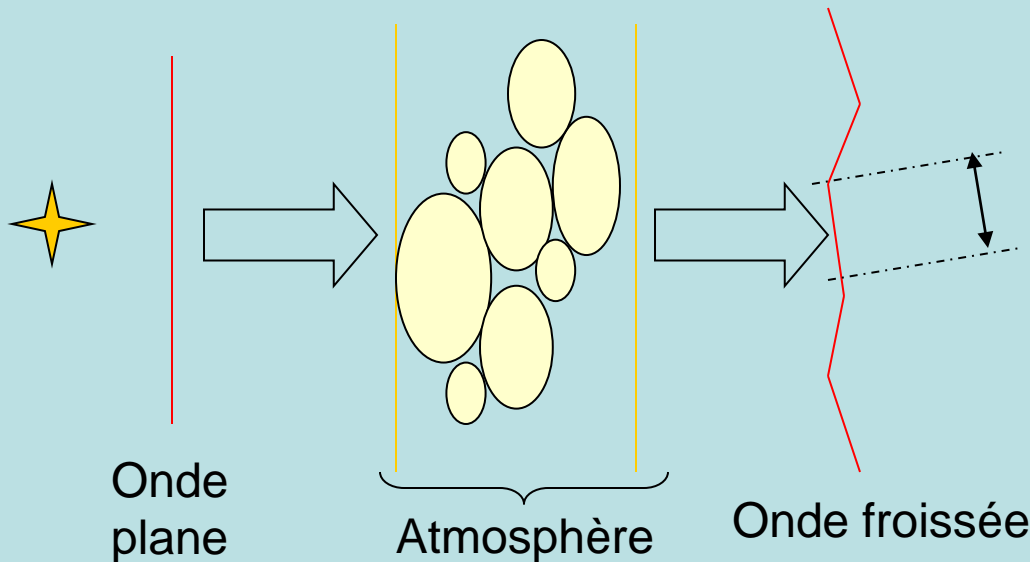
Image obtenue en pratique !
(Vous la voyez ?)



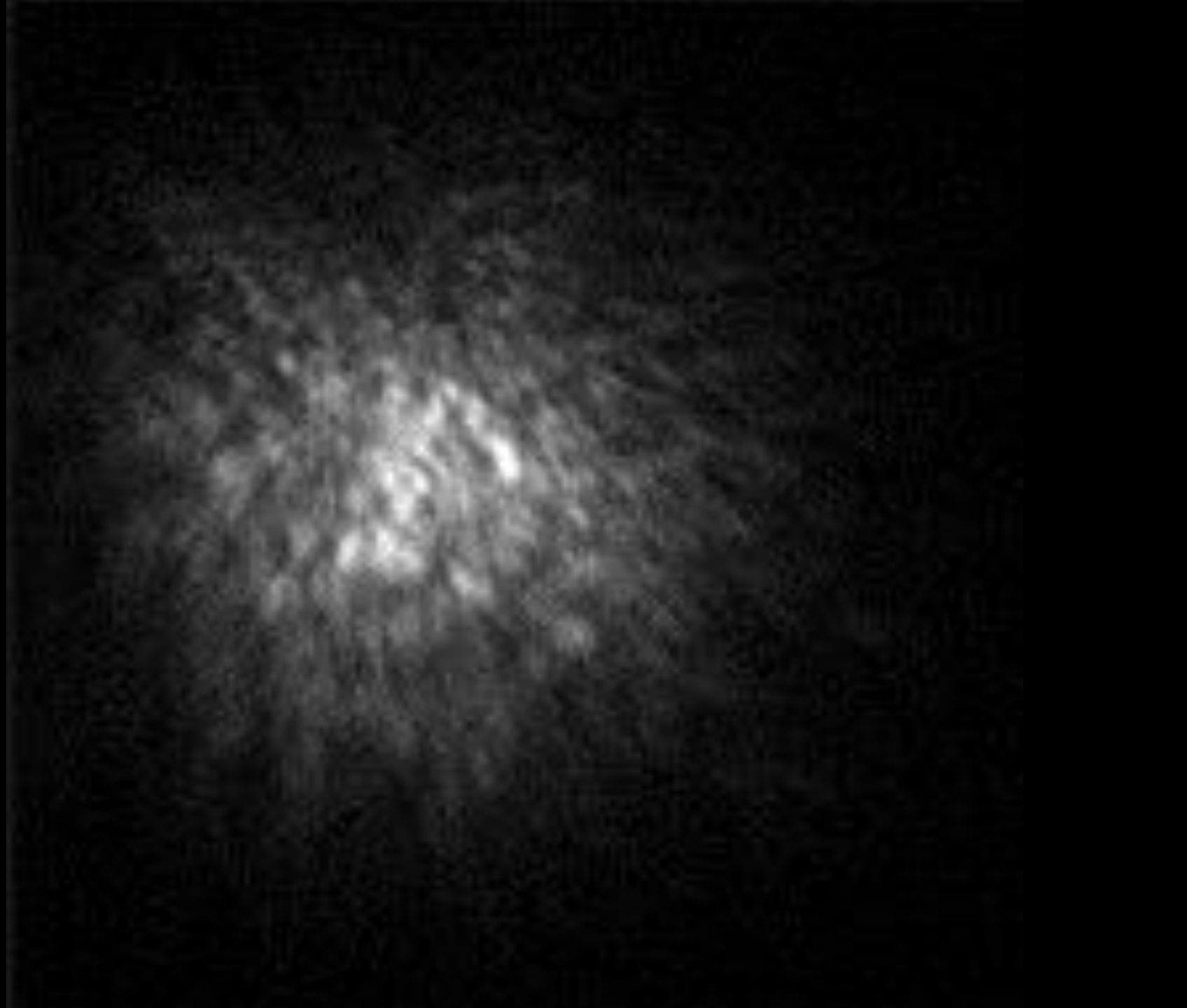
Turbulence atmosphérique => dégradation



Bulles d'air poussées par le vent
température et humidité variables
indice de réfraction variable
=> effet de prisme
=> trajet optique perturbé



r_0 = diamètre d'une portion d'onde
à peu près plane (à $\lambda/10$)
Visible : $r_0 \approx 10$ cm
(Paramètre de Fried)
 r_0 caractérise l'état de la turbulence

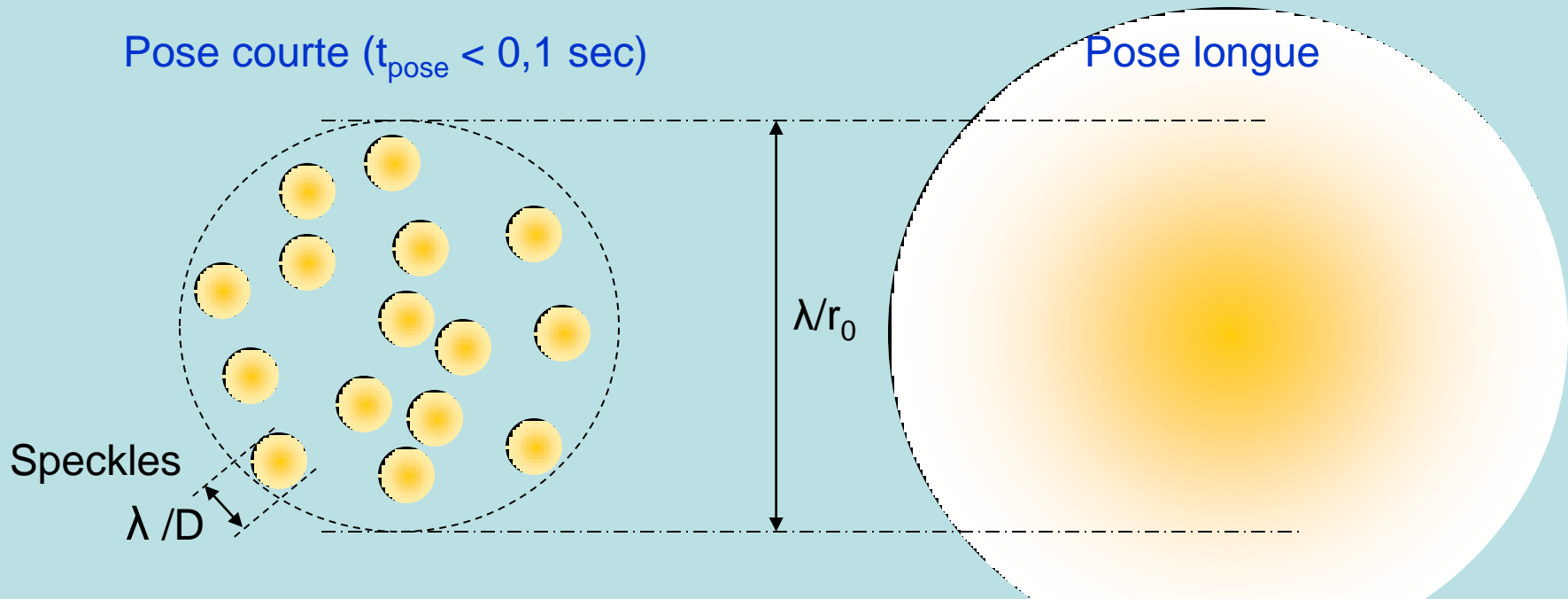


Poses courtes et poses longues

$D_{\text{tel}} < r_0$ Onde plane sur la surface du miroir => tache de diffraction théorique

$D_{\text{tel}} > r_0$ Onde froissée sur la surface du miroir => **Speckles** (Tavelures)

Image d'une étoile au foyer d'un grand télescope



En pose longue :

Télescope

• $D = 10 \text{ cm}$

• $D = 10 \text{ m}$

Résolution théorique

$\theta \approx 1''$

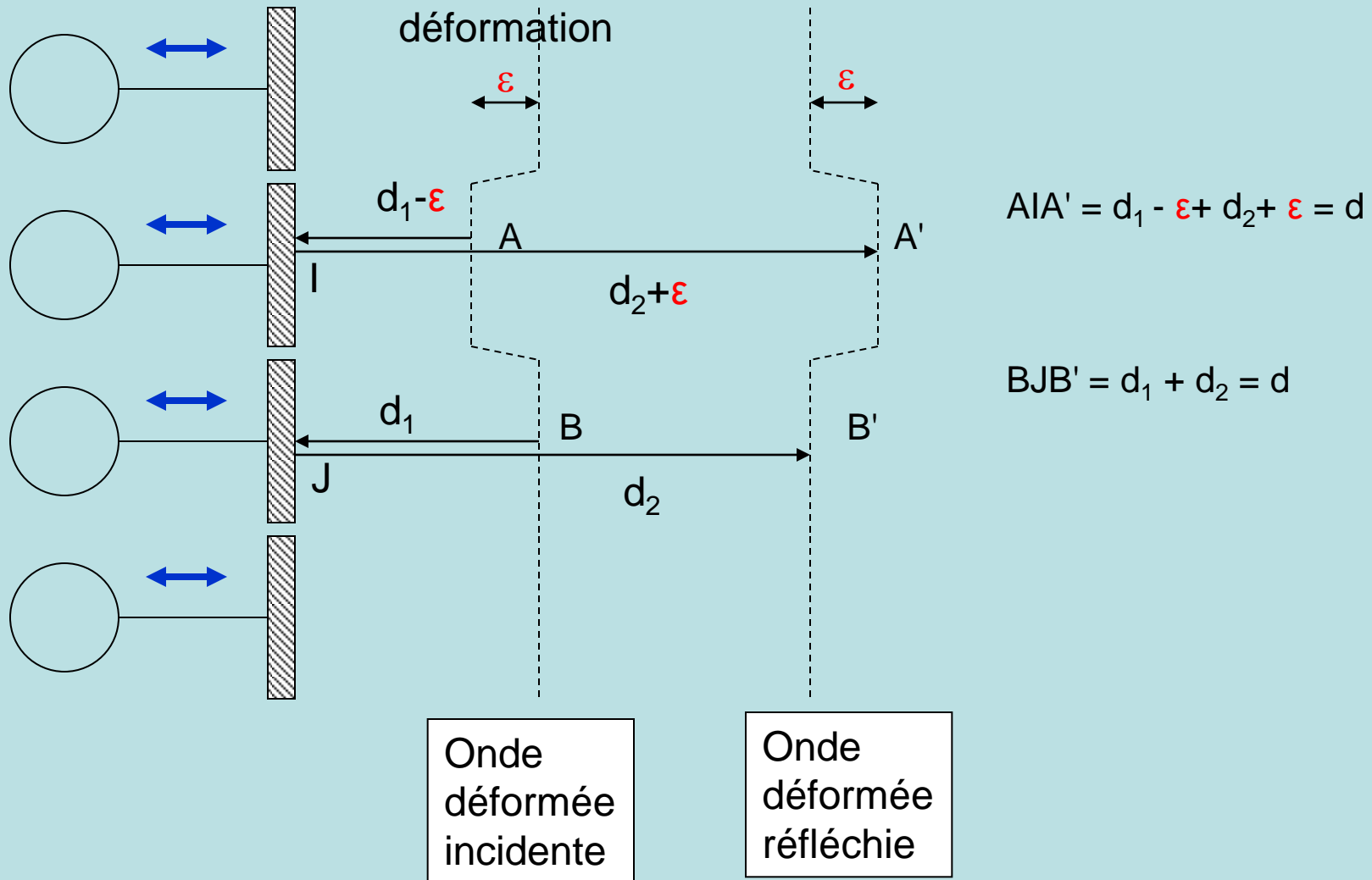
$\theta \approx 0,01''$

Résolution limitée par la turbulence

$\theta \approx \lambda / r_0 \approx 1''$ **Même performance !**

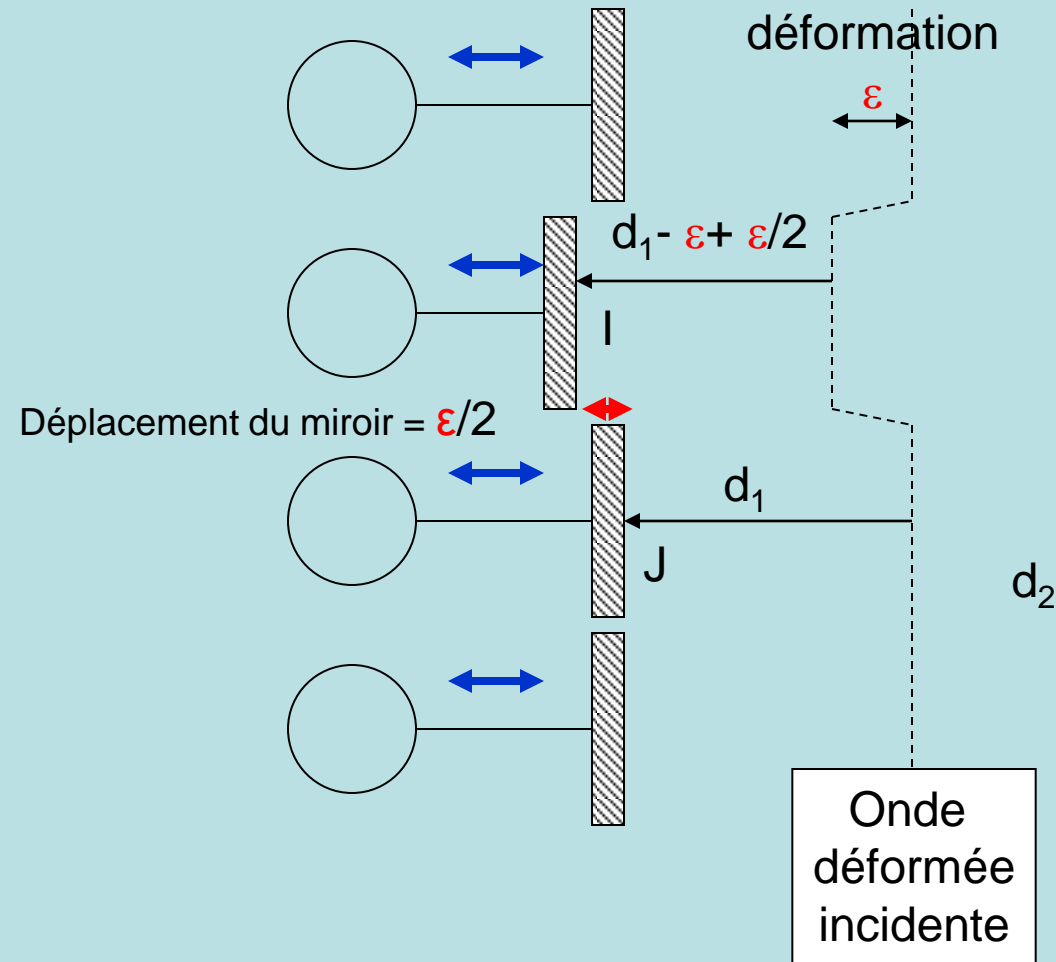
Peut on "repasser" l'onde froissée par la turbulence ?

Principe de l'optique adaptative



Peut on "repasser" l'onde froissée par la turbulence ?

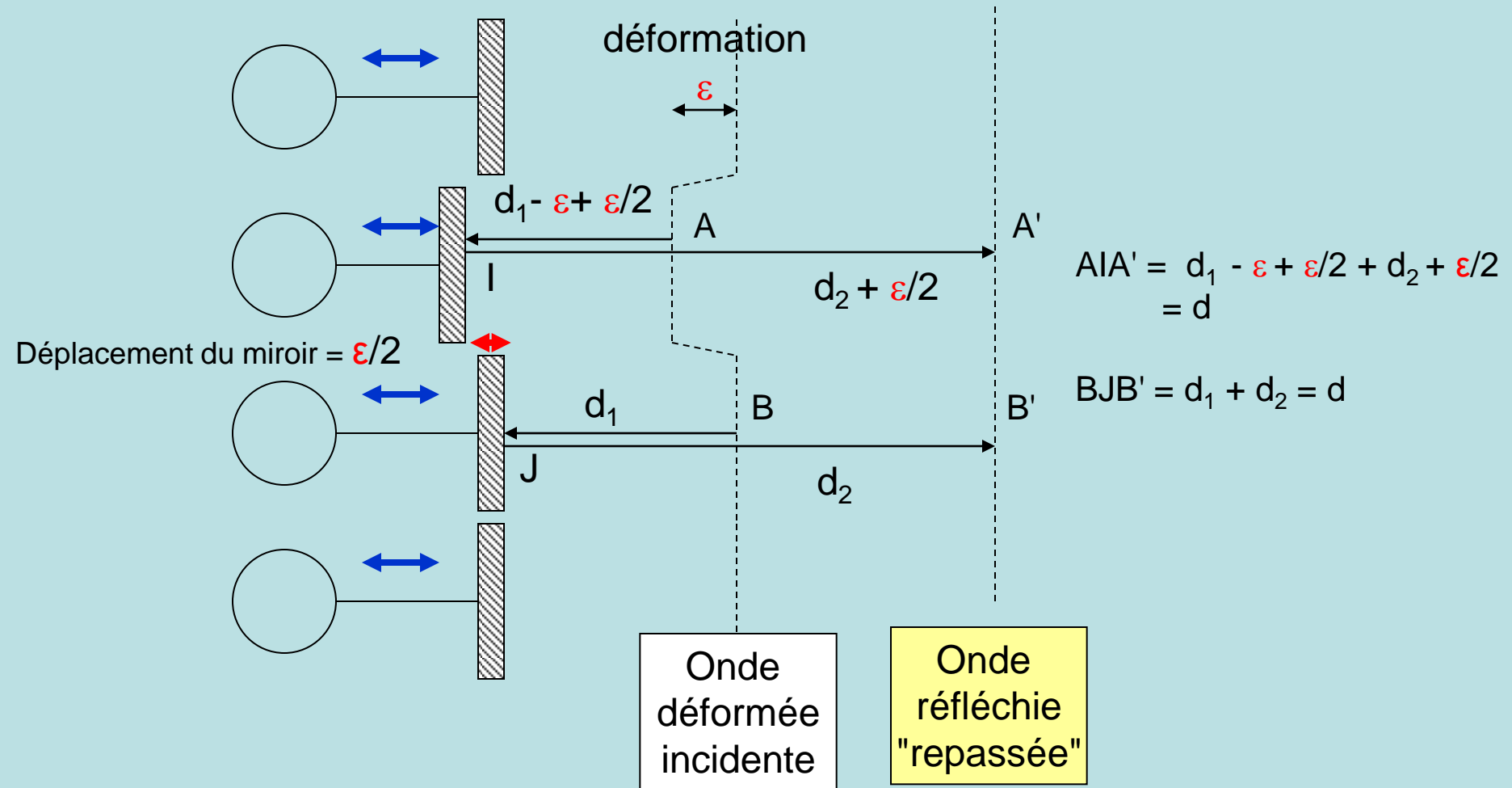
Principe de l'optique adaptative



L'onde plane donnera la résolution limite théorique de la diffraction (λ/D)

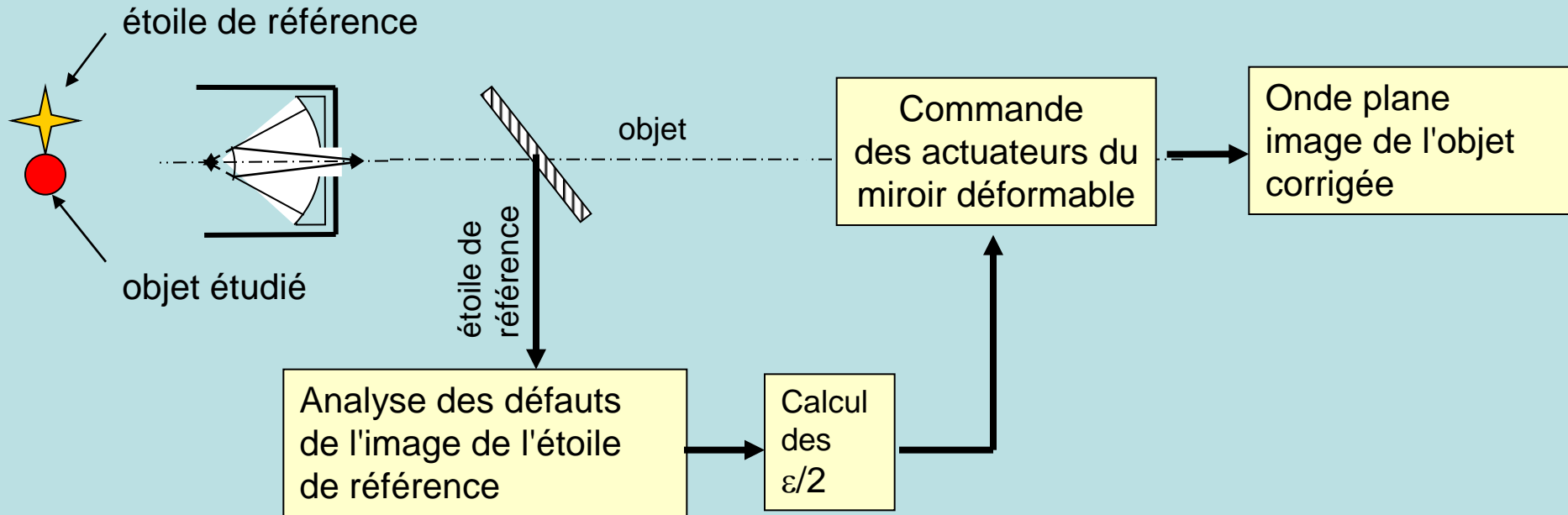
Peut on "repasser" l'onde froissée par la turbulence ?

Principe de l'optique adaptative



L'onde plane donnera la résolution limite théorique de la diffraction (λ/D)

Il faut disposer d'une étoile proche de l'objet et pas trop faible (étoile de référence)



Etoile de référence **proche** = distance < 10" => **Contrainte forte**

- Idée d'une source artificielle (Laser sur couche atmosphérique à 90 km)
- La qualité du site reste essentielle

MACAO : Multi Application Curvature Adaptive Optics

MACAO

Installé sur chaque UT
avant recombinaison
interférométrique



View of the First MACAO-VLTI Facility at Paranal

Optique adaptative au VLT

1 UT, **Sans AO**



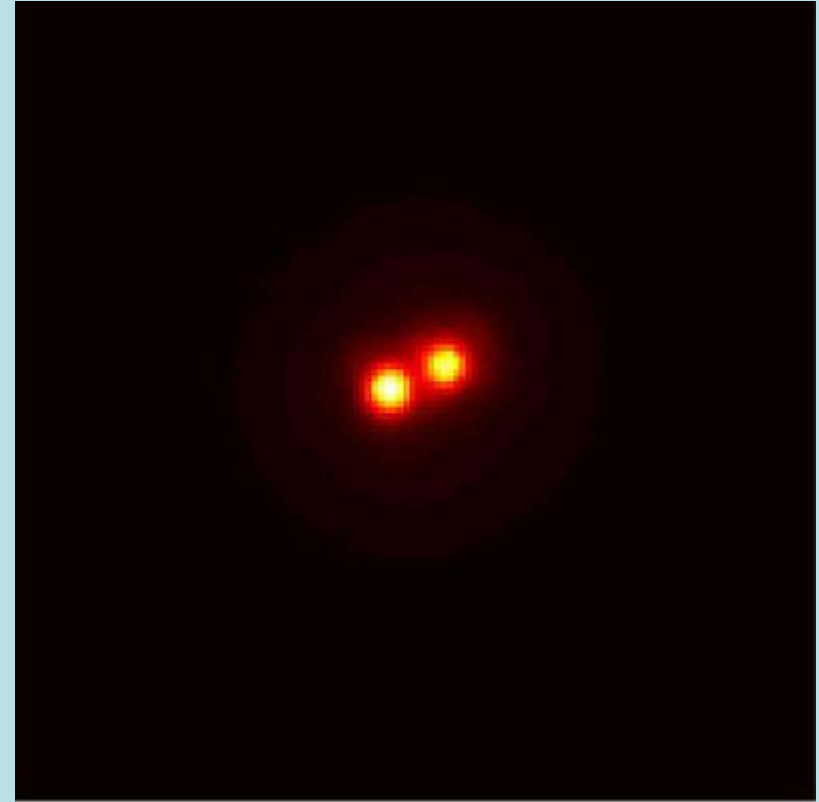
The Star HIC 59206 (uncorrected image)
(VLT KUEYEN + MACAO-VLTI)

ESO PR Photo 12b/03 (13 May 2003)

© European Southern Observatory



1 UT, **Avec AO**



The Star HIC 59206 (AO corrected image)
(VLT KUEYEN + MACAO-VLTI)

ESO PR Photo 12c/03 (13 May 2003)

© European Southern Observatory



AO => Gain considérable en résolution angulaire

Pour aller plus loin en résolution :

Télescope → Interféromètre

Pour augmenter encore la résolution :

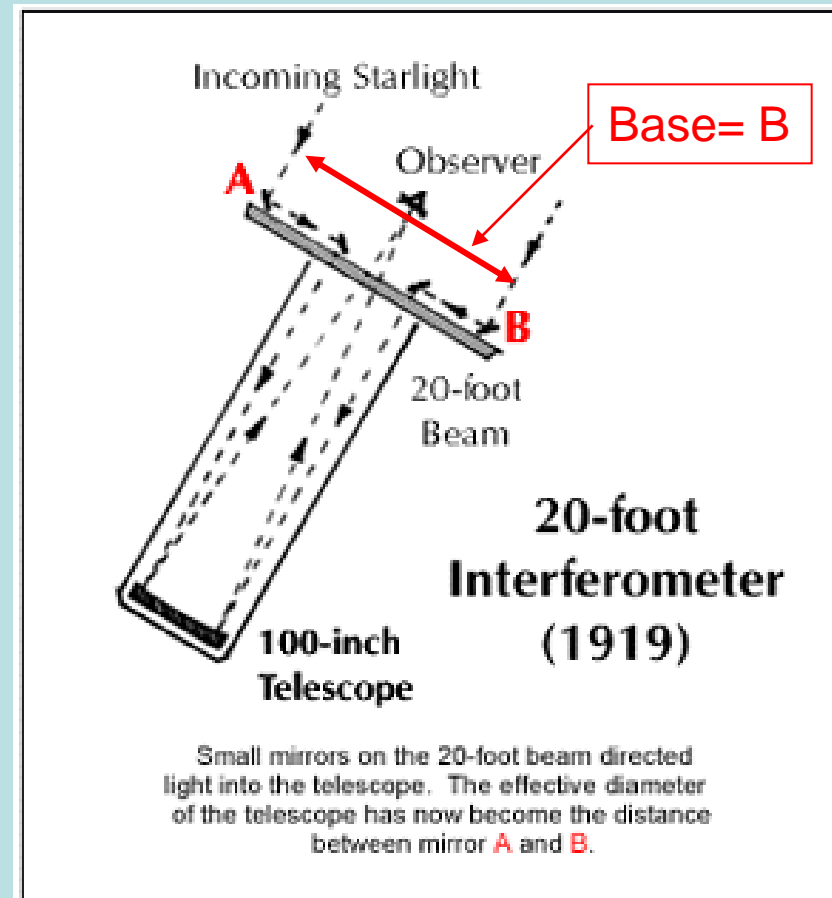
INTERFEROMETRIE

Combiner plusieurs petits télescopes qui travaillent ensemble
On s'approche d'un très grand télescope

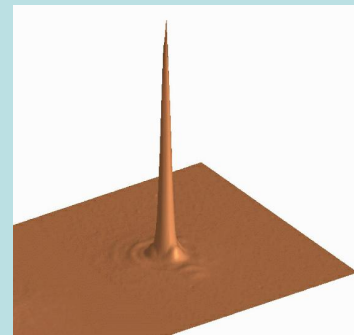
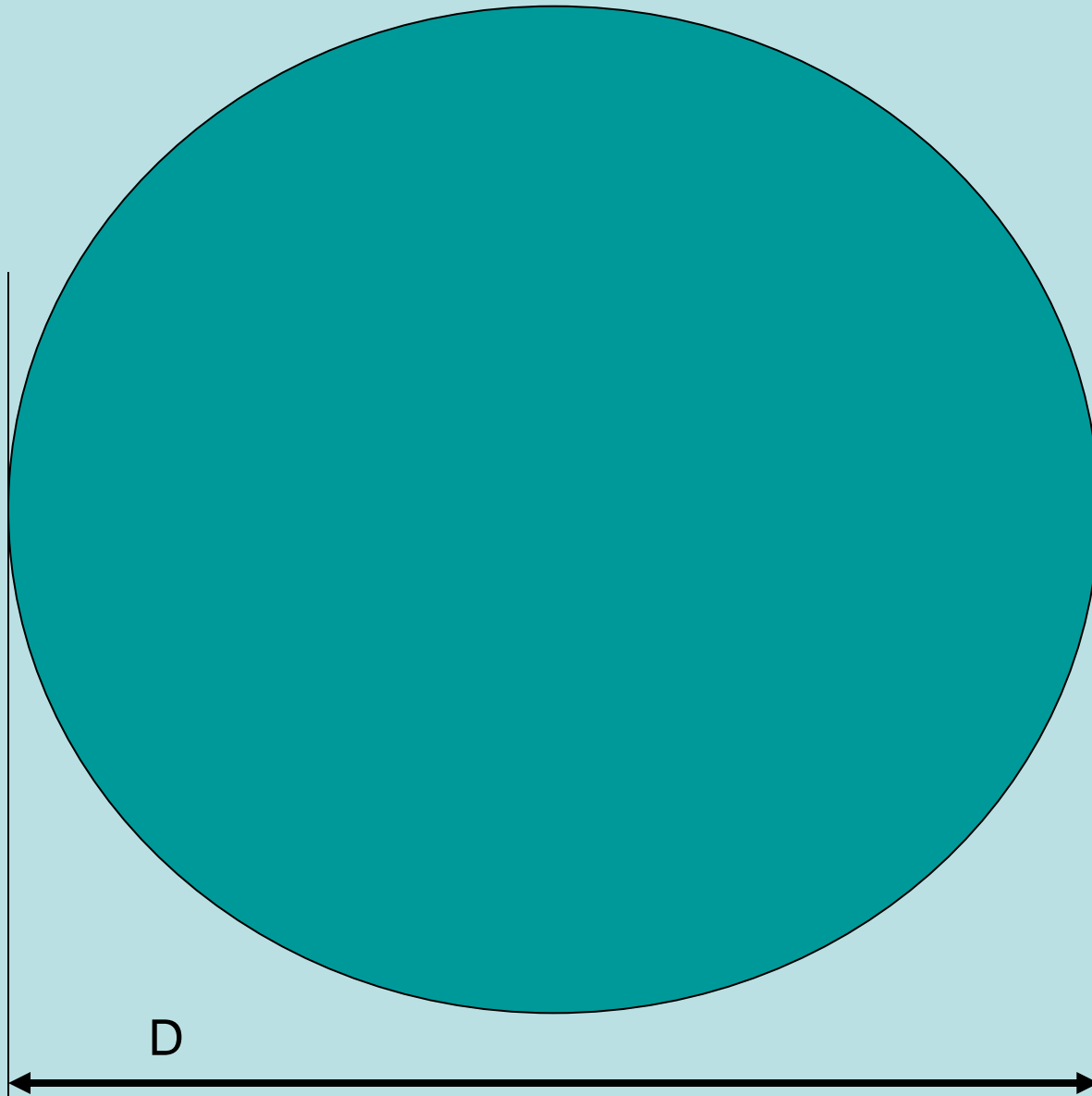
λ/D devient λ/B $B = \text{Base}$

Michelson et Pease 1919

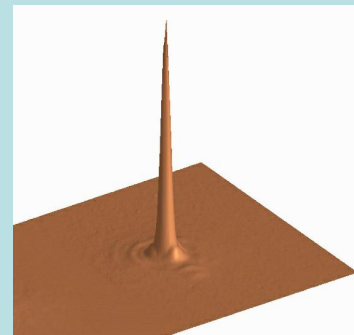
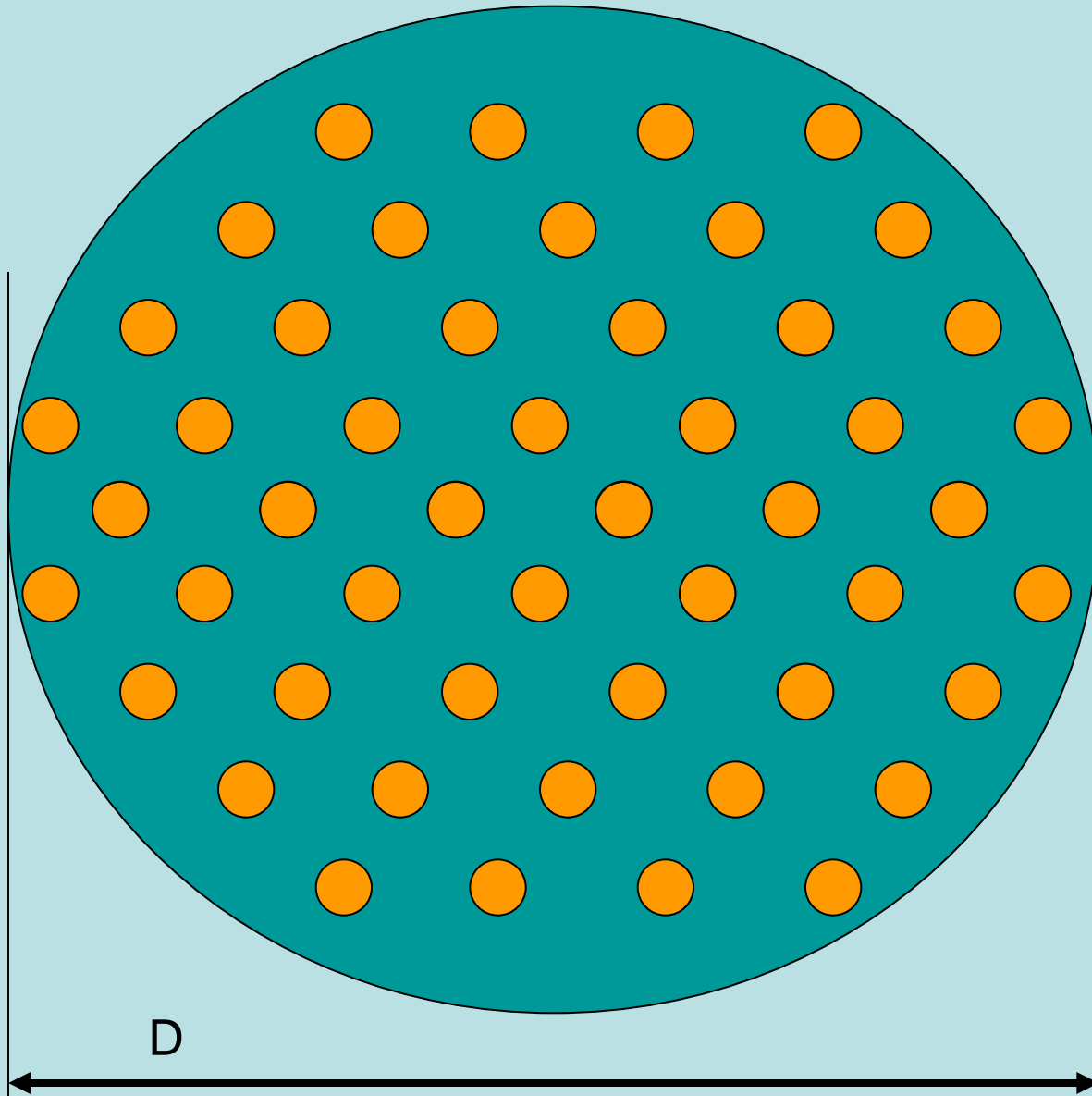
Radioastronomie



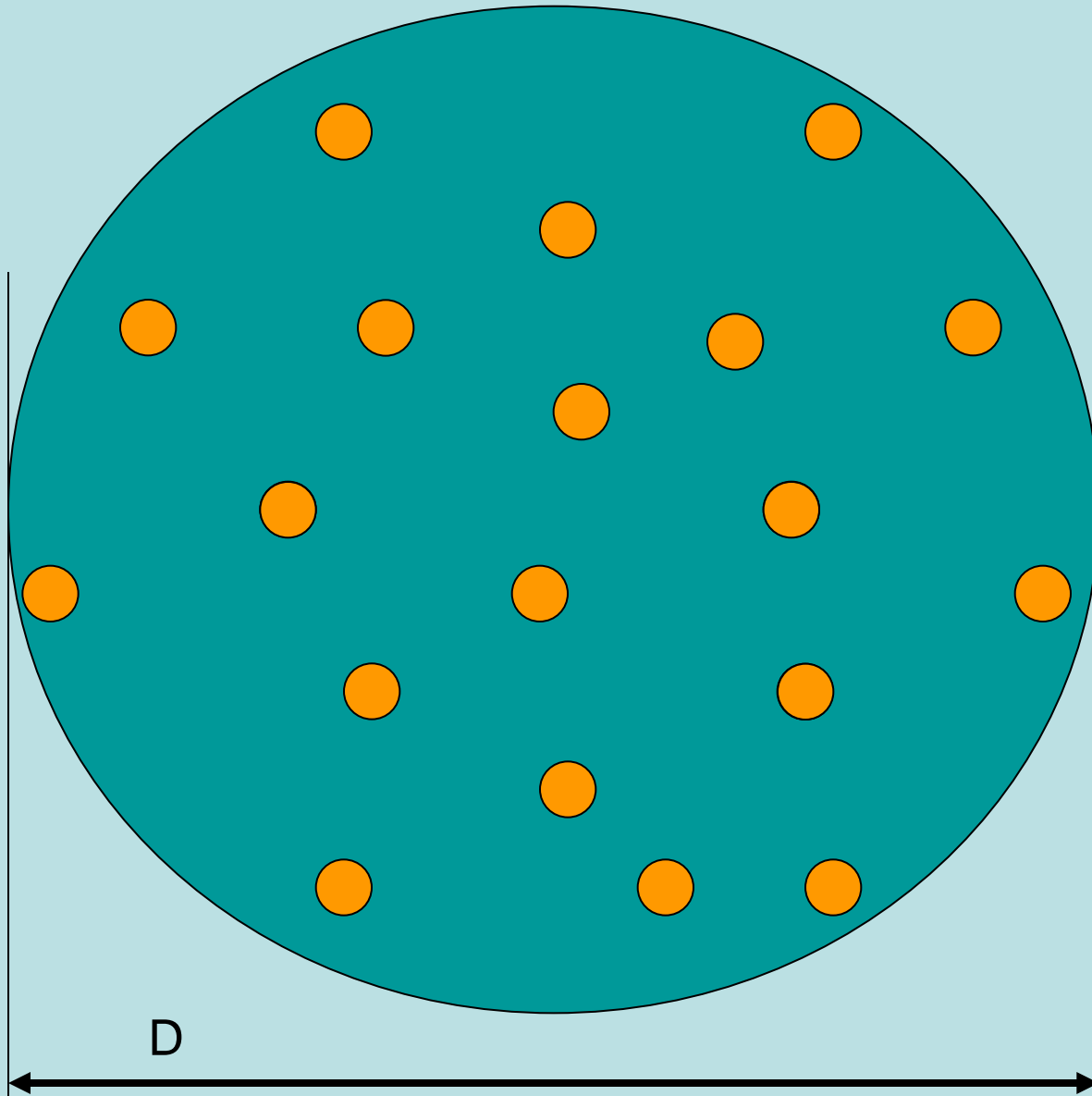
1 télescope de diamètre $D \rightarrow \lambda/D$



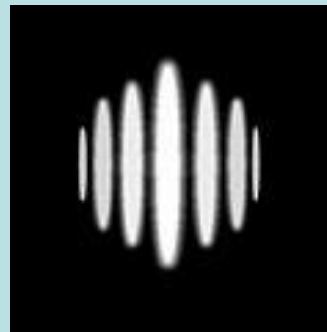
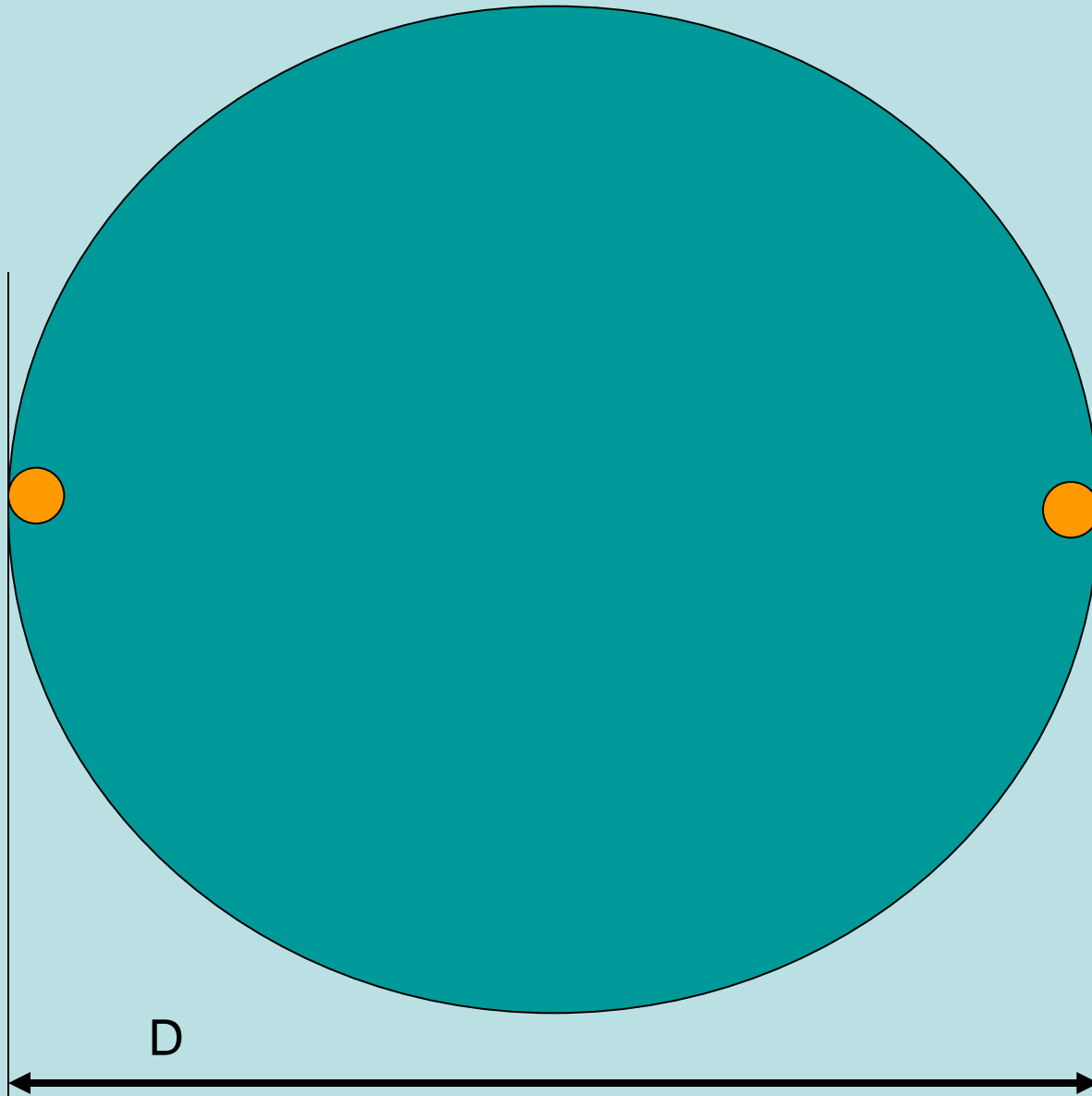
beaucoup de petits morceaux d'un télescope de diamètre $D \rightarrow \sim \lambda/D$



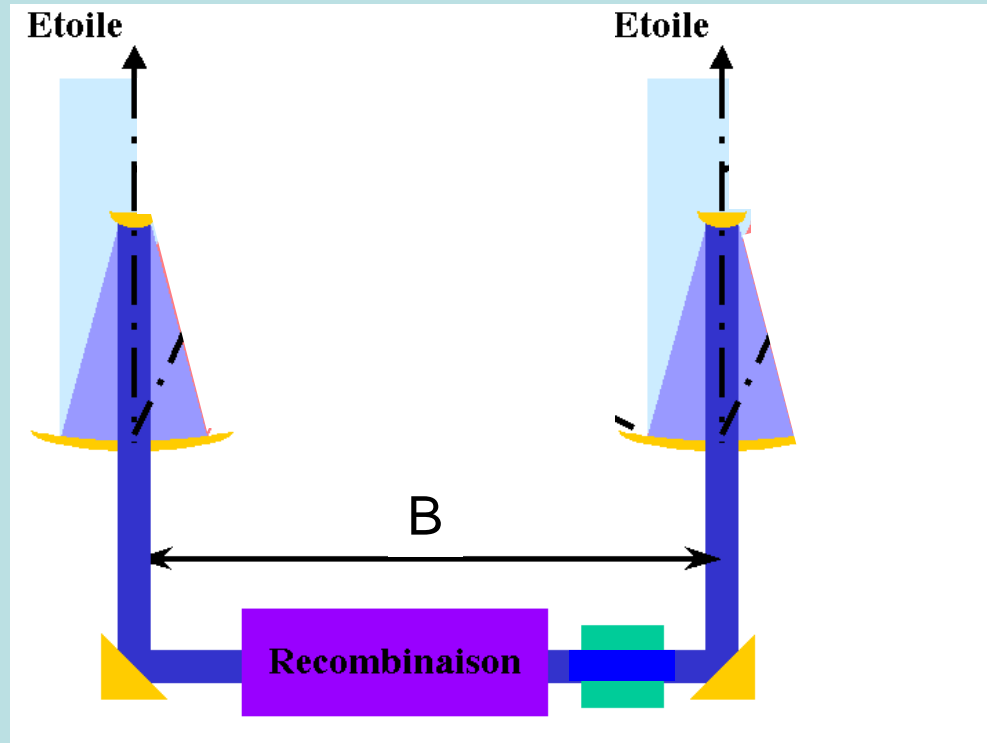
Interférométrie : n'utiliser qu'une partie du miroir



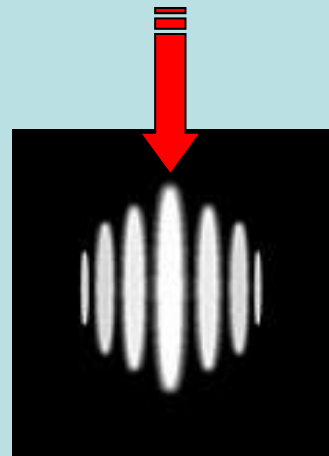
Interférométrie : n'utiliser qu'une partie du miroir = 2 télescopes séparés

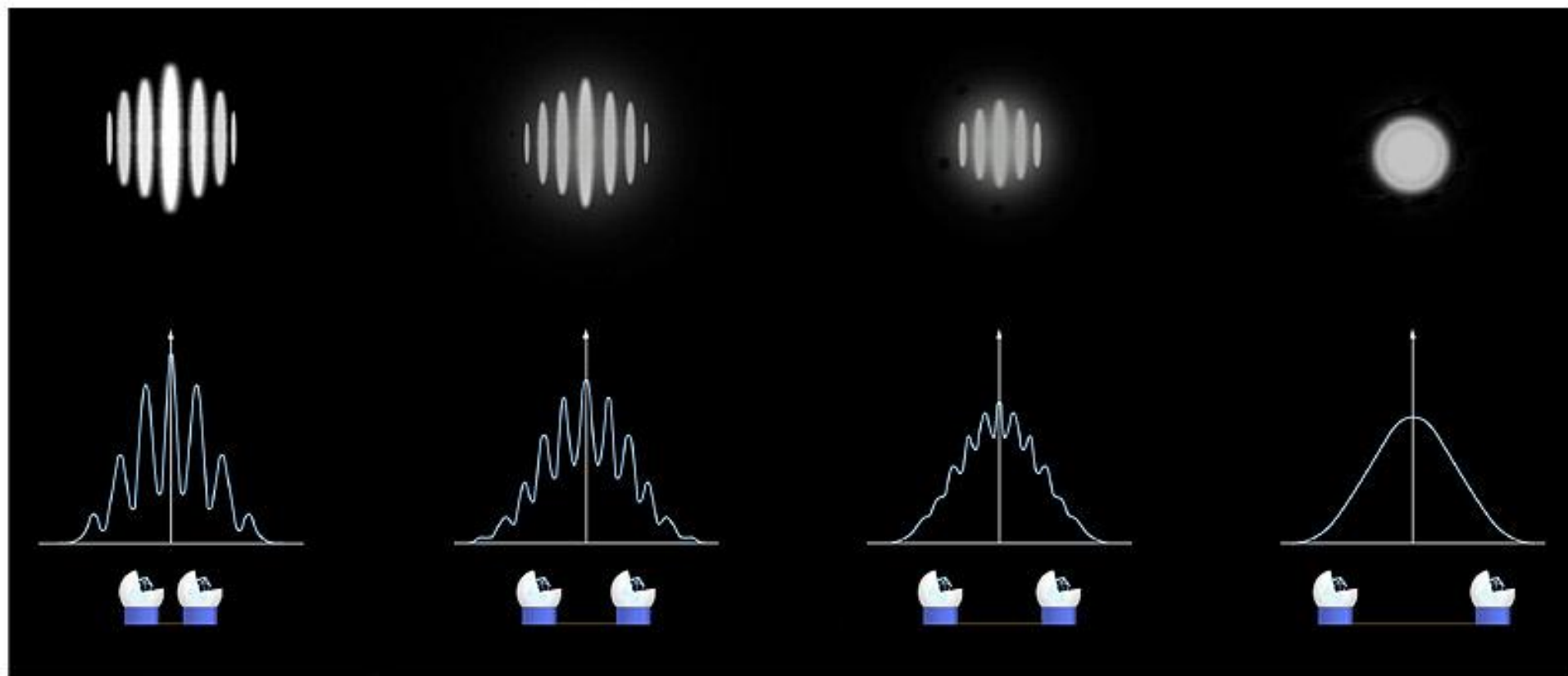


Interféromètre à 2 télescopes :



Frange





Interferometric Fringes at Different Telescope Baselines (Simulation)

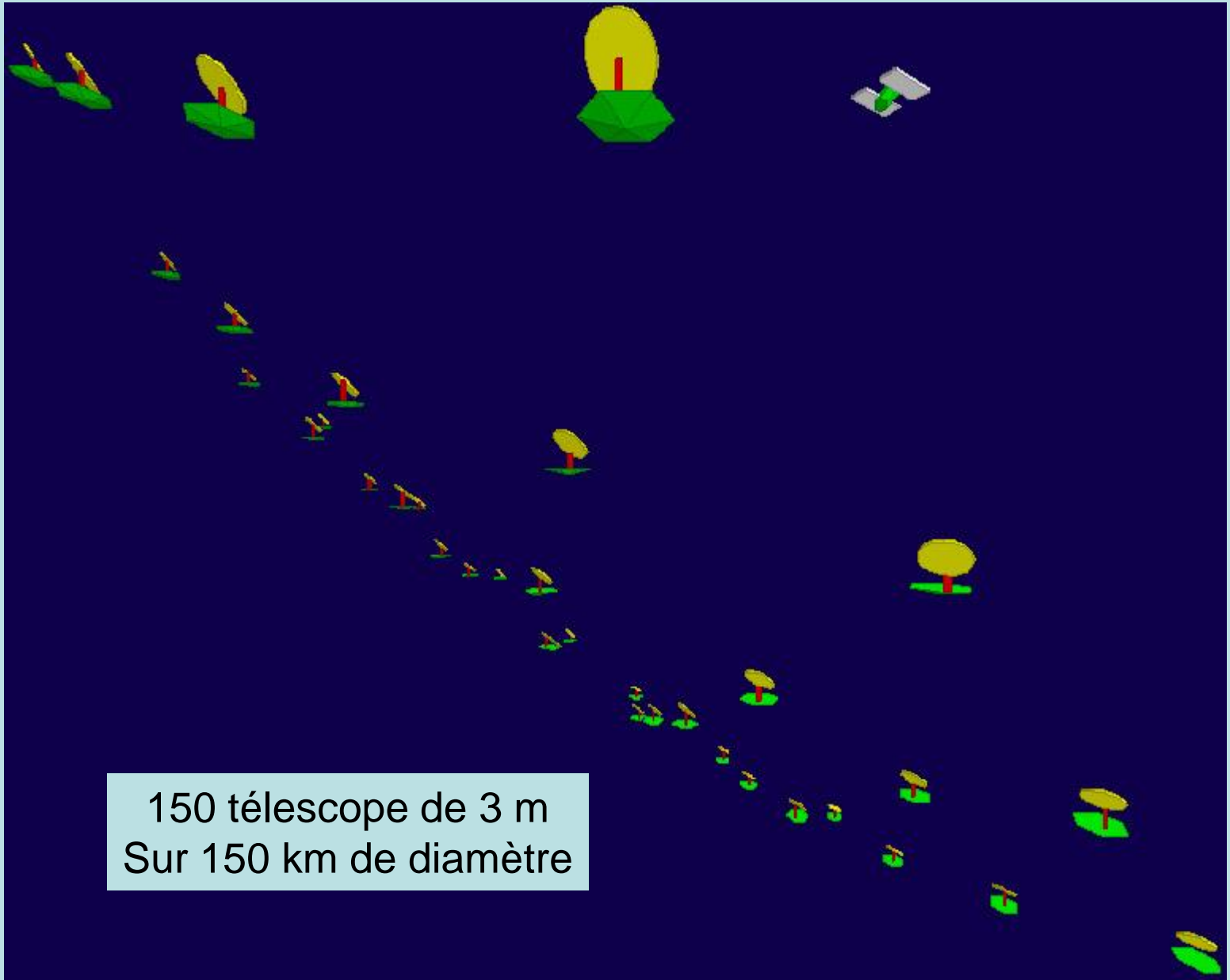
ESO PR Photo 10e/01 (18 March 2001)

© European Southern Observatory



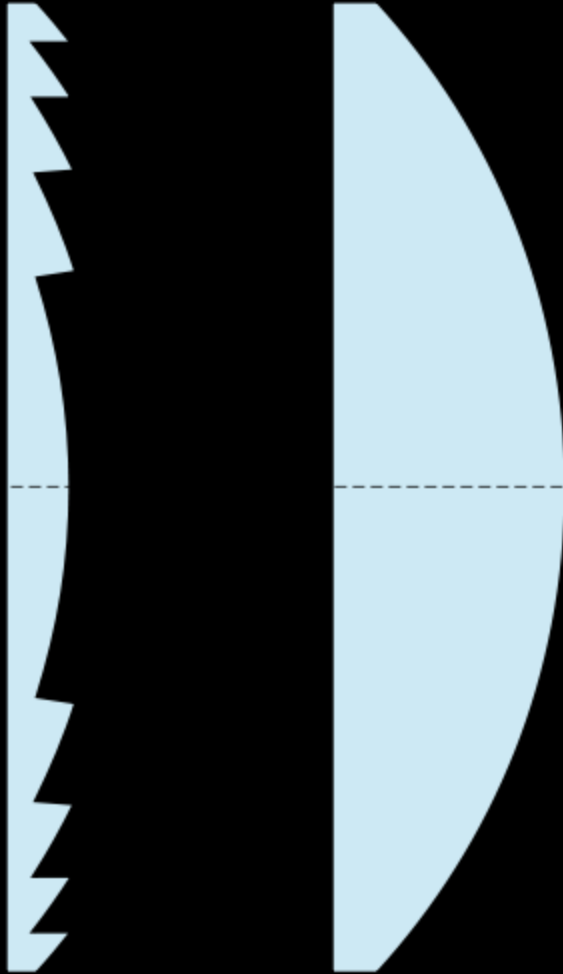
Et pour aller encore plus loin : l'hyper-télescope

Délire



150 télescope de 3 m
Sur 150 km de diamètre

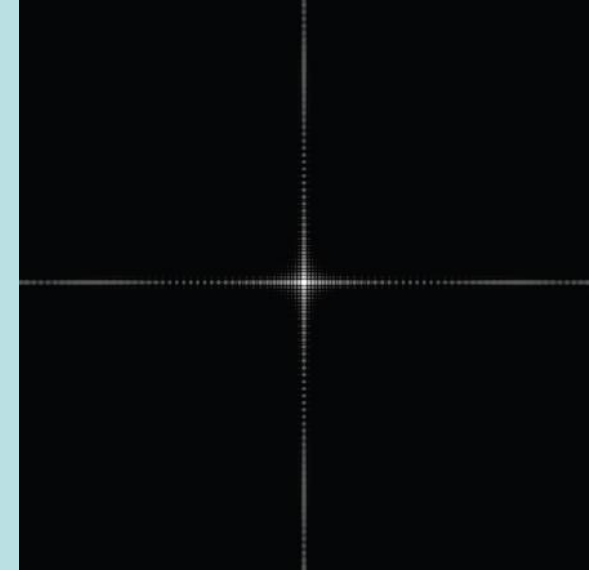
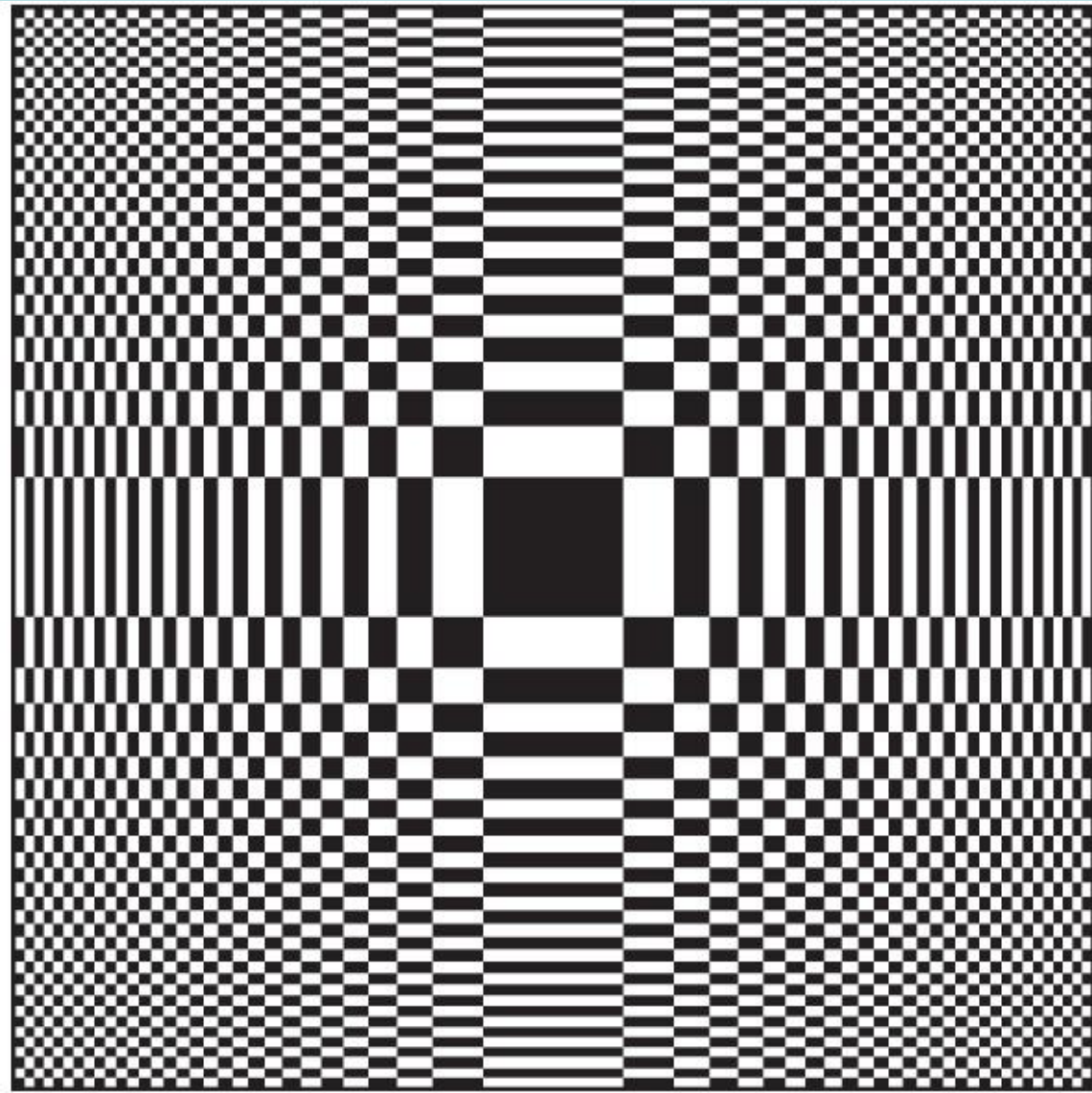
Télescope spatial à masque de Fresnel



Lentille de Fresnel

Economiser du verre

Télescope spatial à masque de Fresnel



Masque de Fresnel

$$f = c^2 / 8N\lambda$$

$$c = 3\text{m}$$

$$n = 300 \text{ zones}$$

$$l = 0,6 \text{ mm}$$

$$f = 6,25 \text{ km}$$

- On a des détecteurs presque parfaits
- On sait corriger la turbulence
(NB : donc on a moins besoin du Hubble Space Telescope)

Comment progresser ?

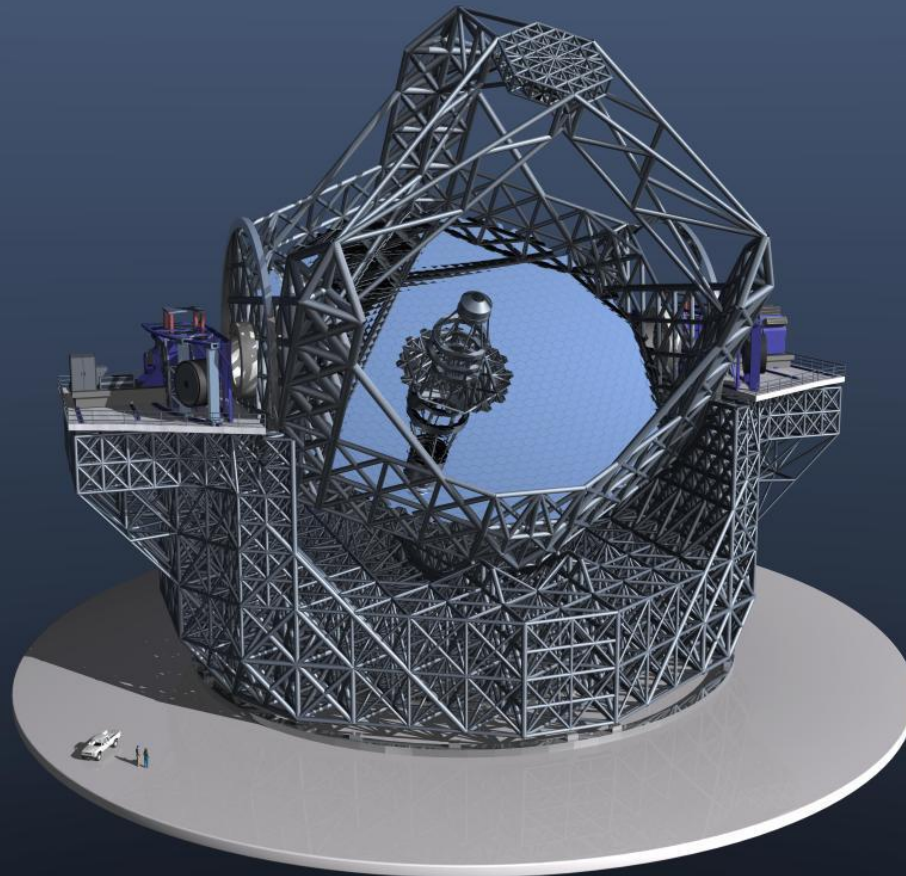
Au sol : Télescopes géants du futur

Dans l'espace : Télescopes γ , X , UV, Infrarouge
(Transparence de l'atmosphère)

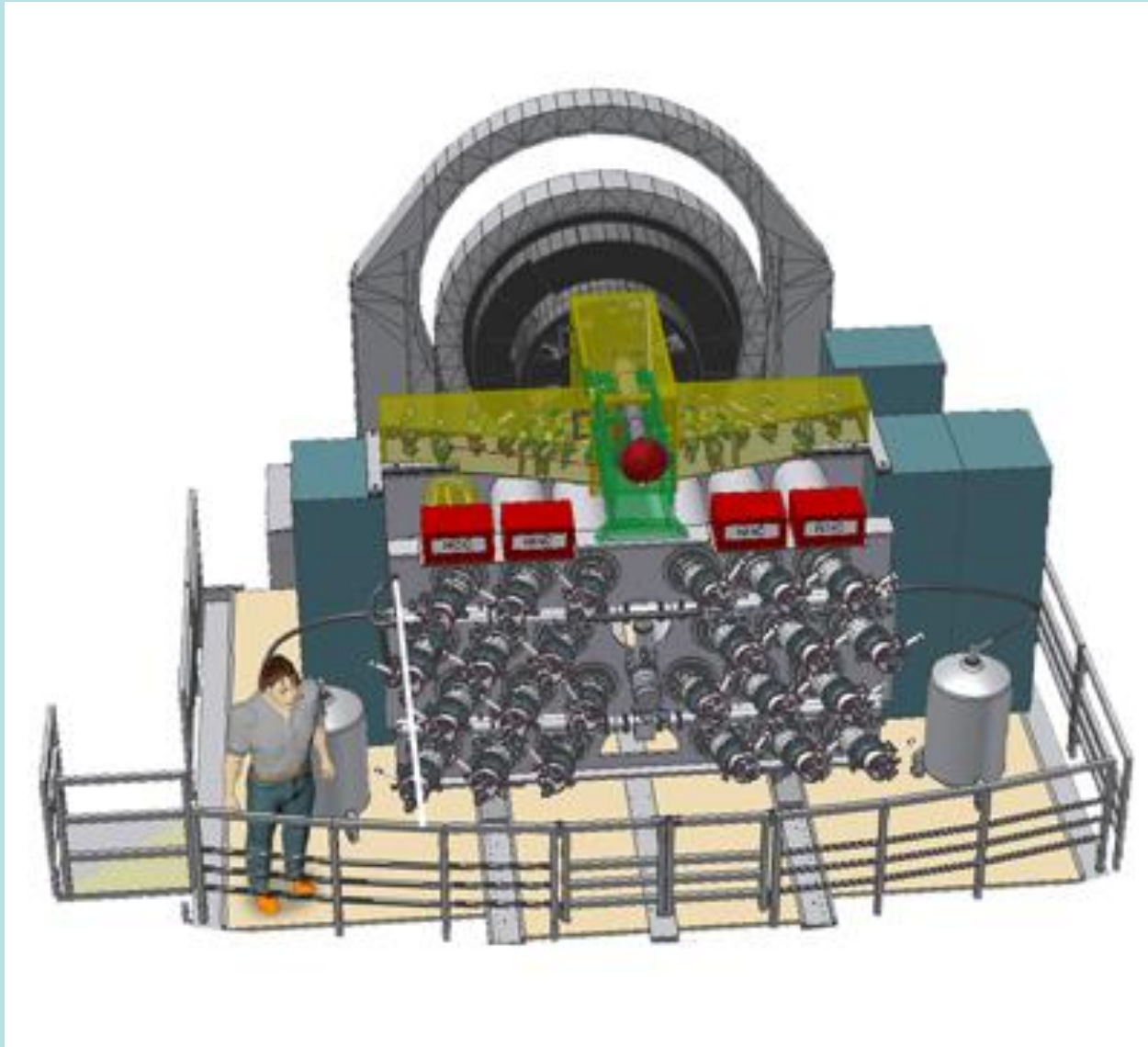
Au sol : télescopes géants du futur

E-ELT * 42 mètres !

* (European-Extremely Large Telescope)

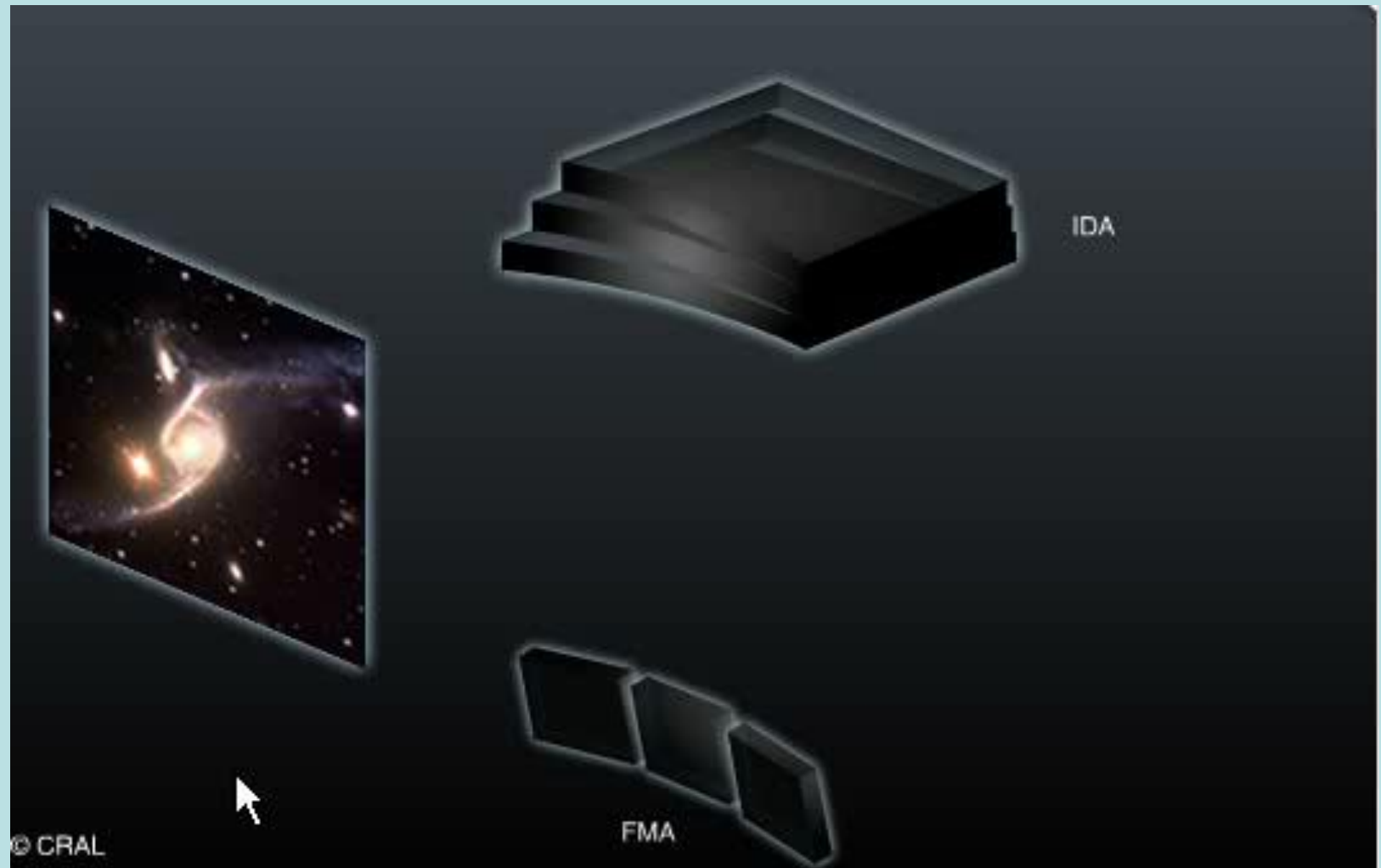


MUSE : une nouvelle génération d'instruments pour télescopes géants

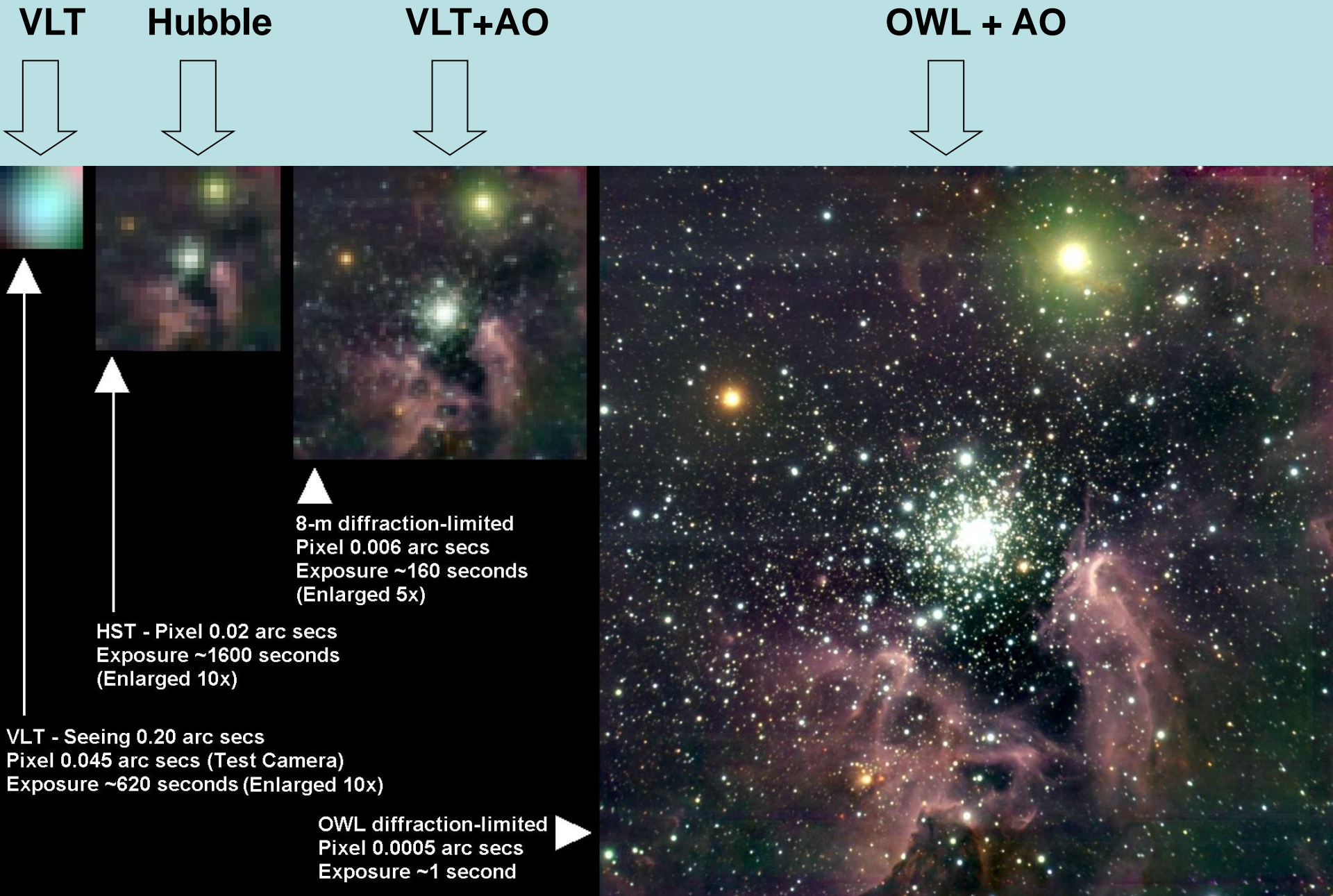


Découper l'image en 24 bandes
Découper chaque bande en 48 morceaux

1 image → 1152 spectres

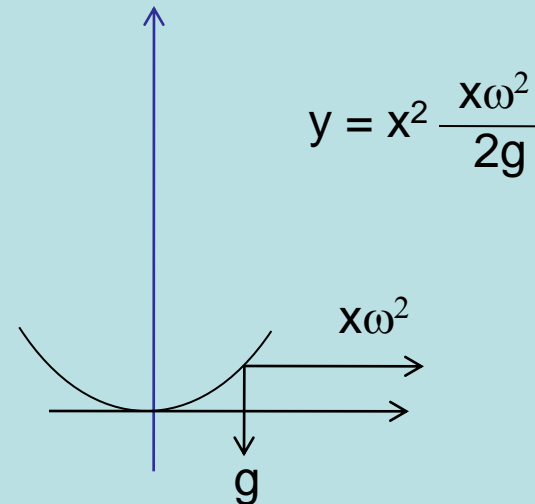


Et on a bien le droit de faire des simulations (pour convaincre les bailleurs de fonds !)



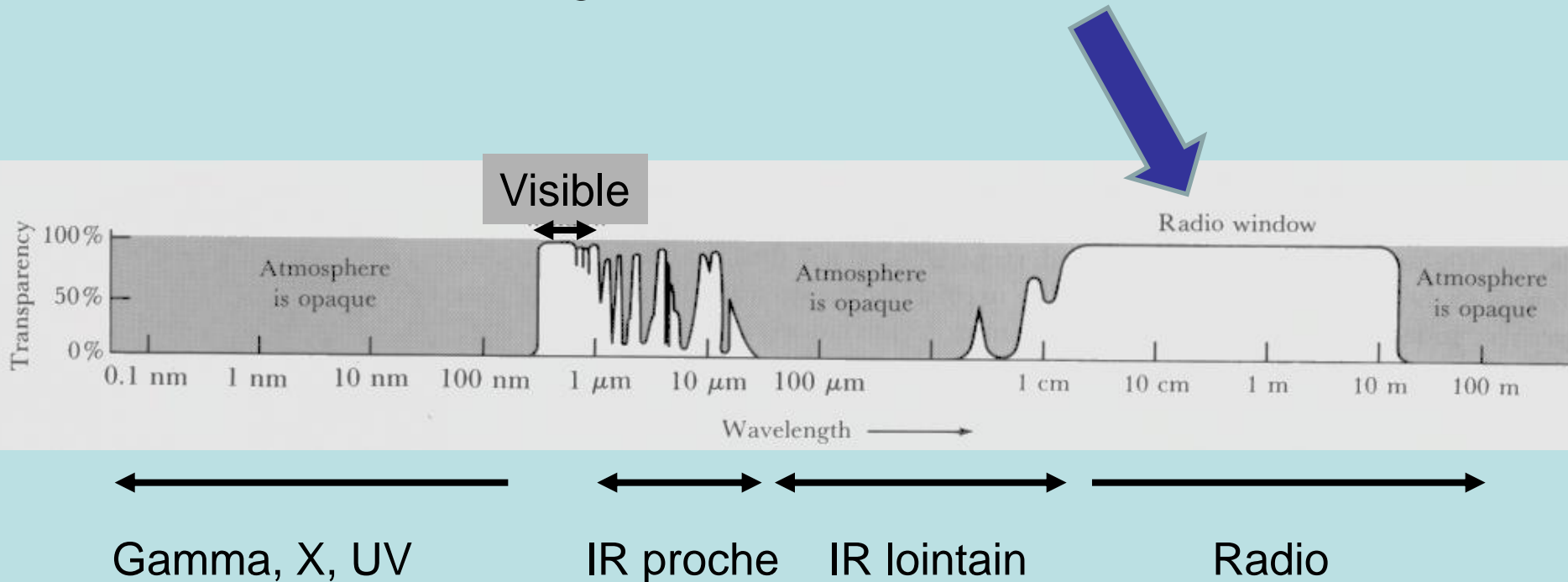
Au sol : Grand télescope ... pas cher !

Miroir liquide



Au sol : Radioastronomie :

Astronomie du gaz, des atomes et des molécules



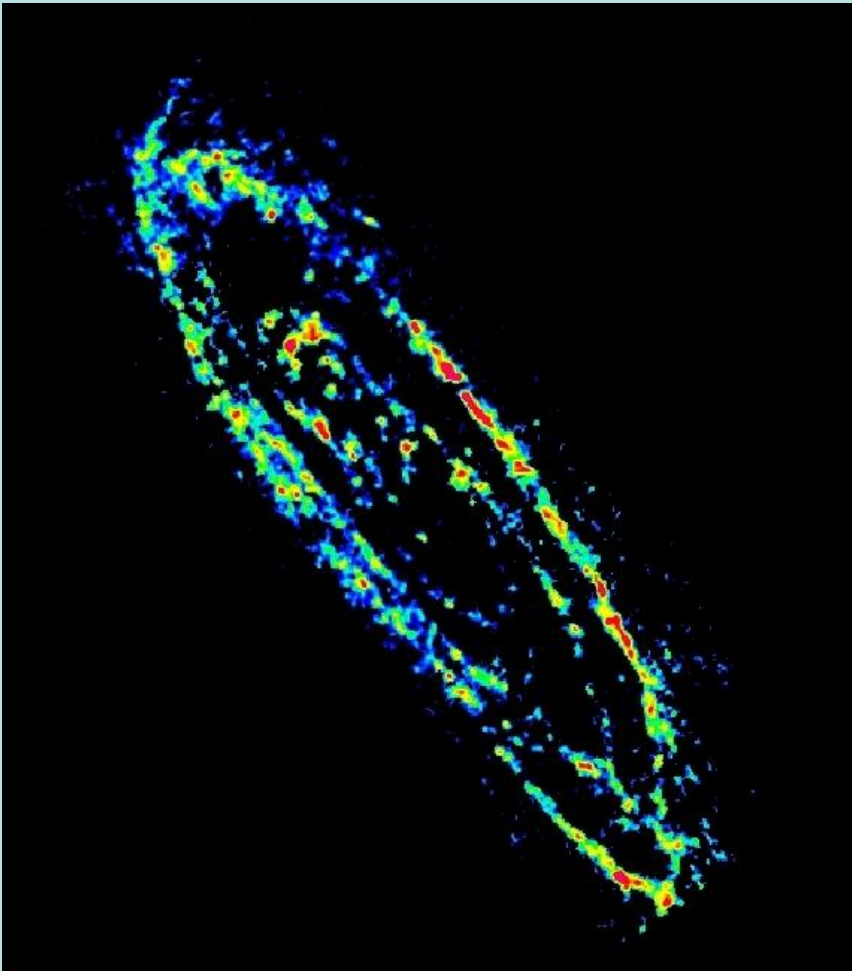
Interféromètre de l'IRAM sur le plateau de Bure



Antenne unique (Parkes, Australie) 64 m de diamètre



Le monoxyde de carbone dans la galaxie d'Andromède



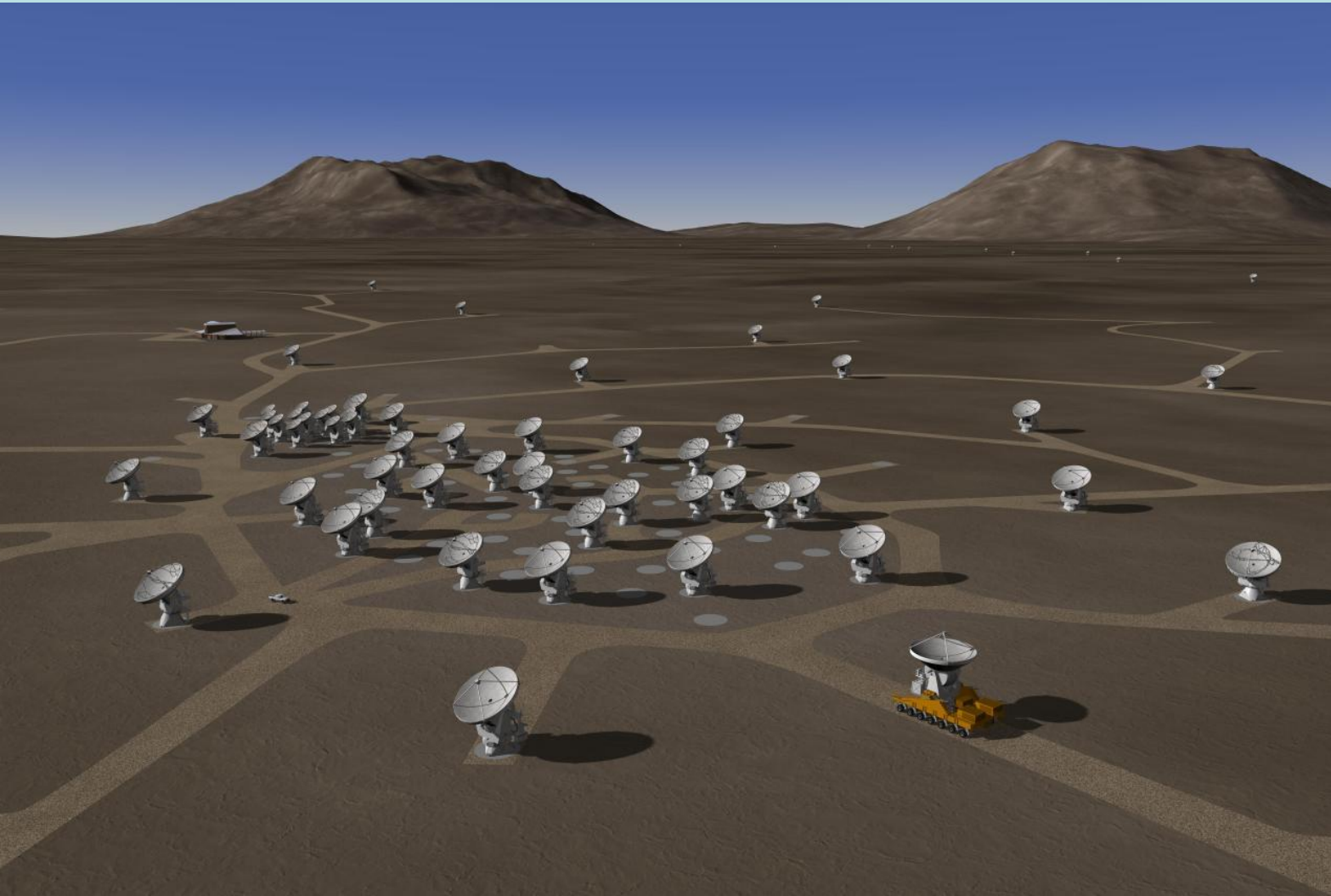
ALMA (Atacama Large Millimeter Array)

66 antennes de 12m de diamètre

Réparties sur des bases de 150 m à 15 km

Altitude 5100m

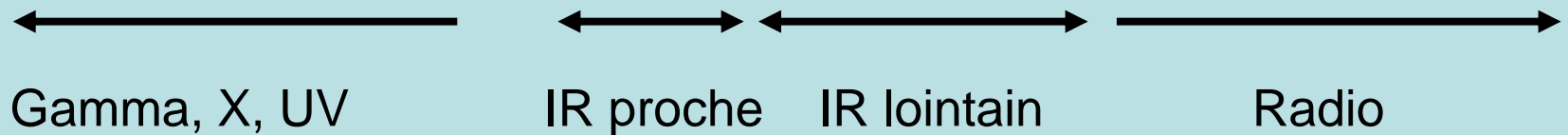
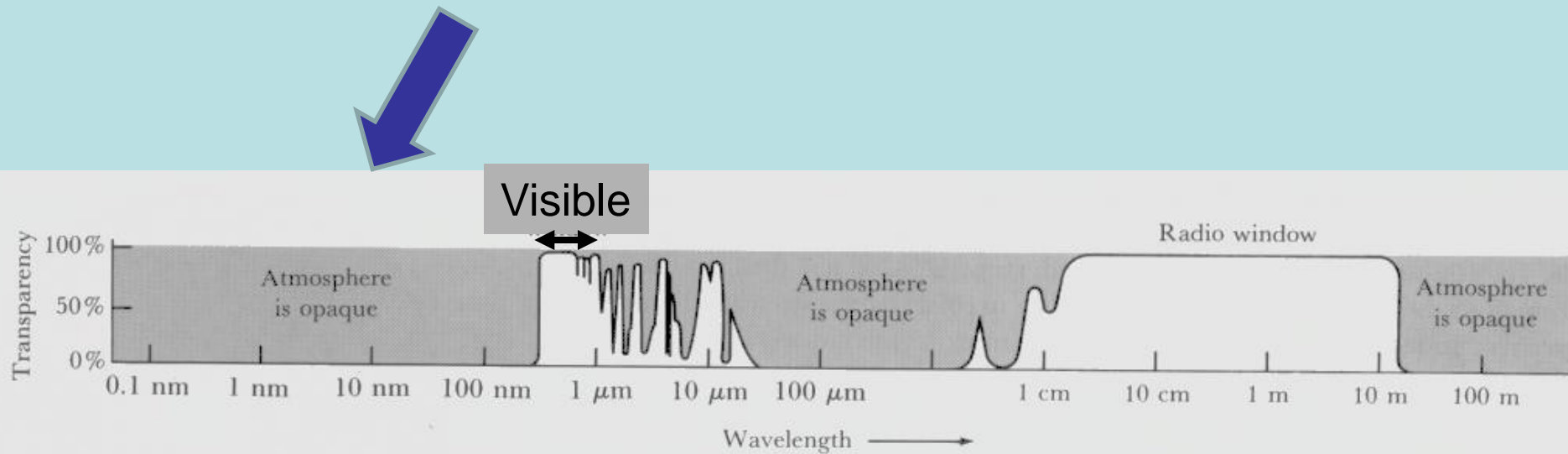
Démarrage 2012



ALMA : Le camion pour déplacer les antennes et reconfigurer le réseau

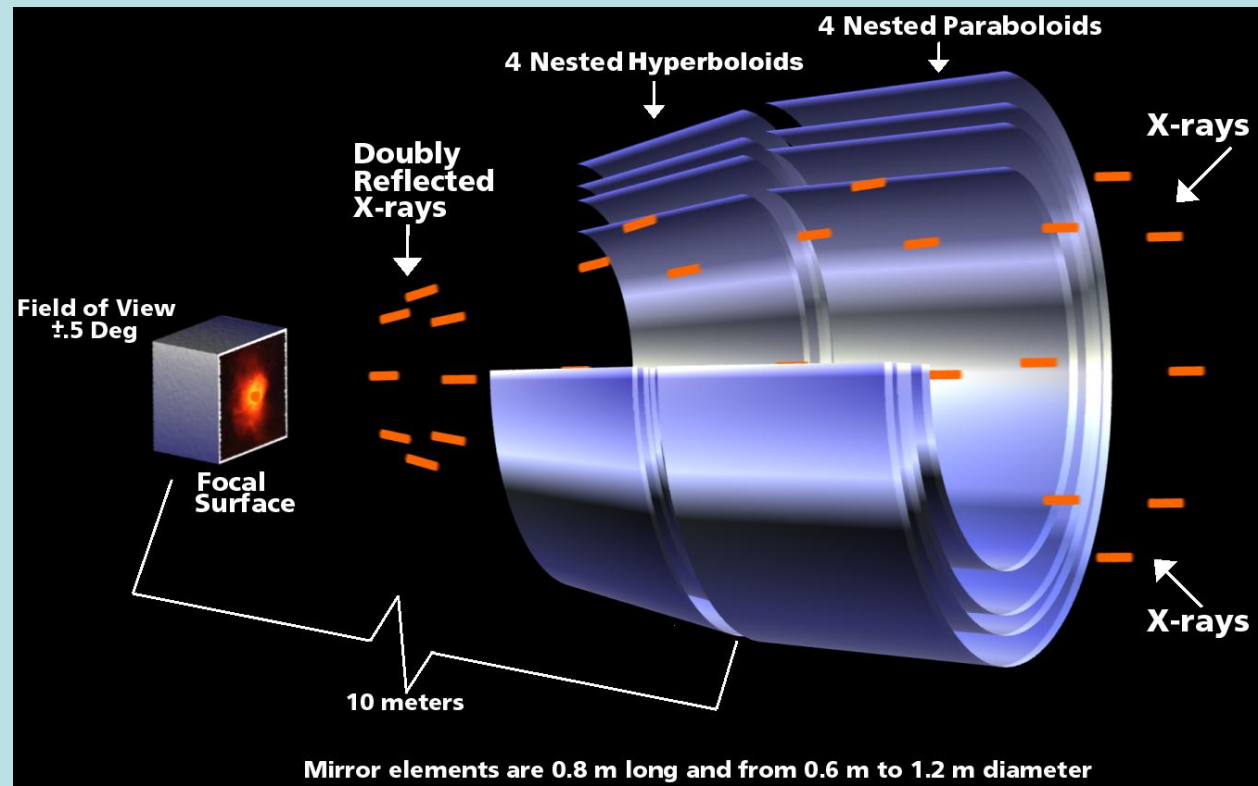
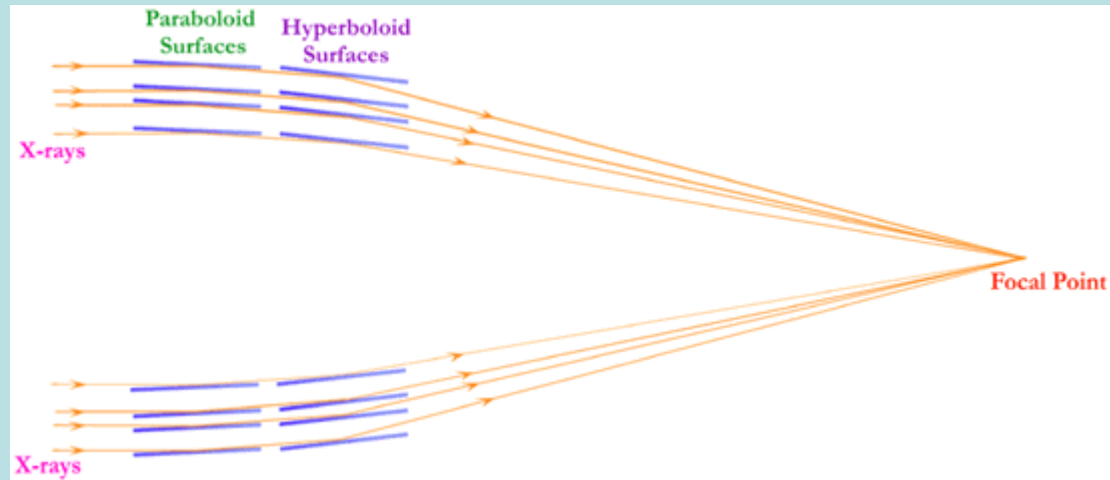


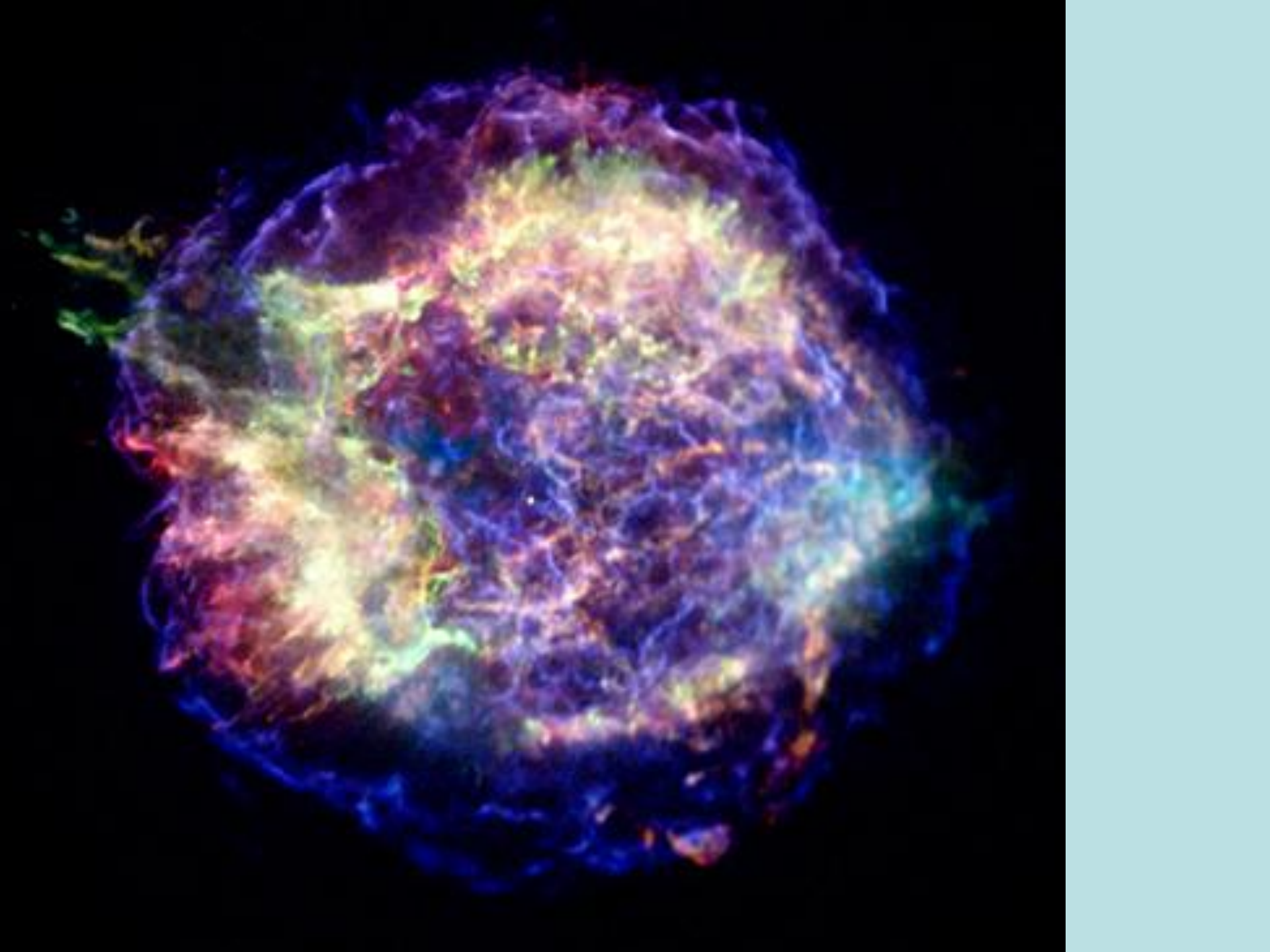
Rayons X : Astronomie des gaz très chauds



Astronomie des rayons X : étude du gaz très chaud

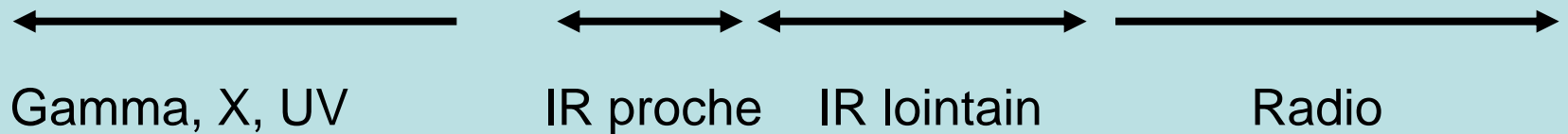
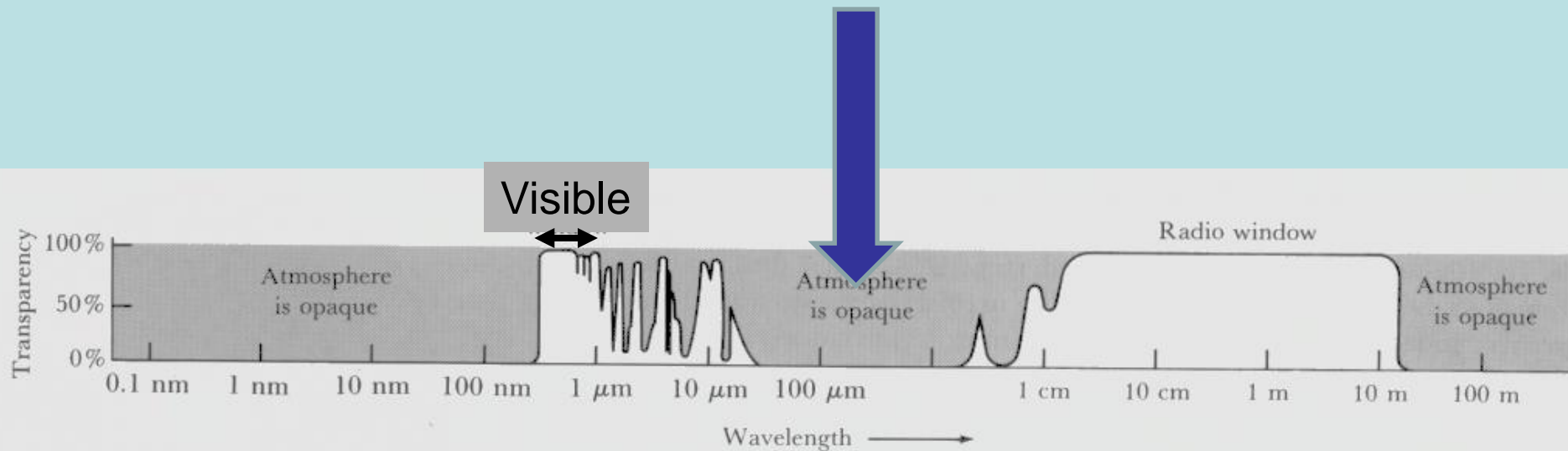
Exemple :
satellite CHANDRA(sekar)





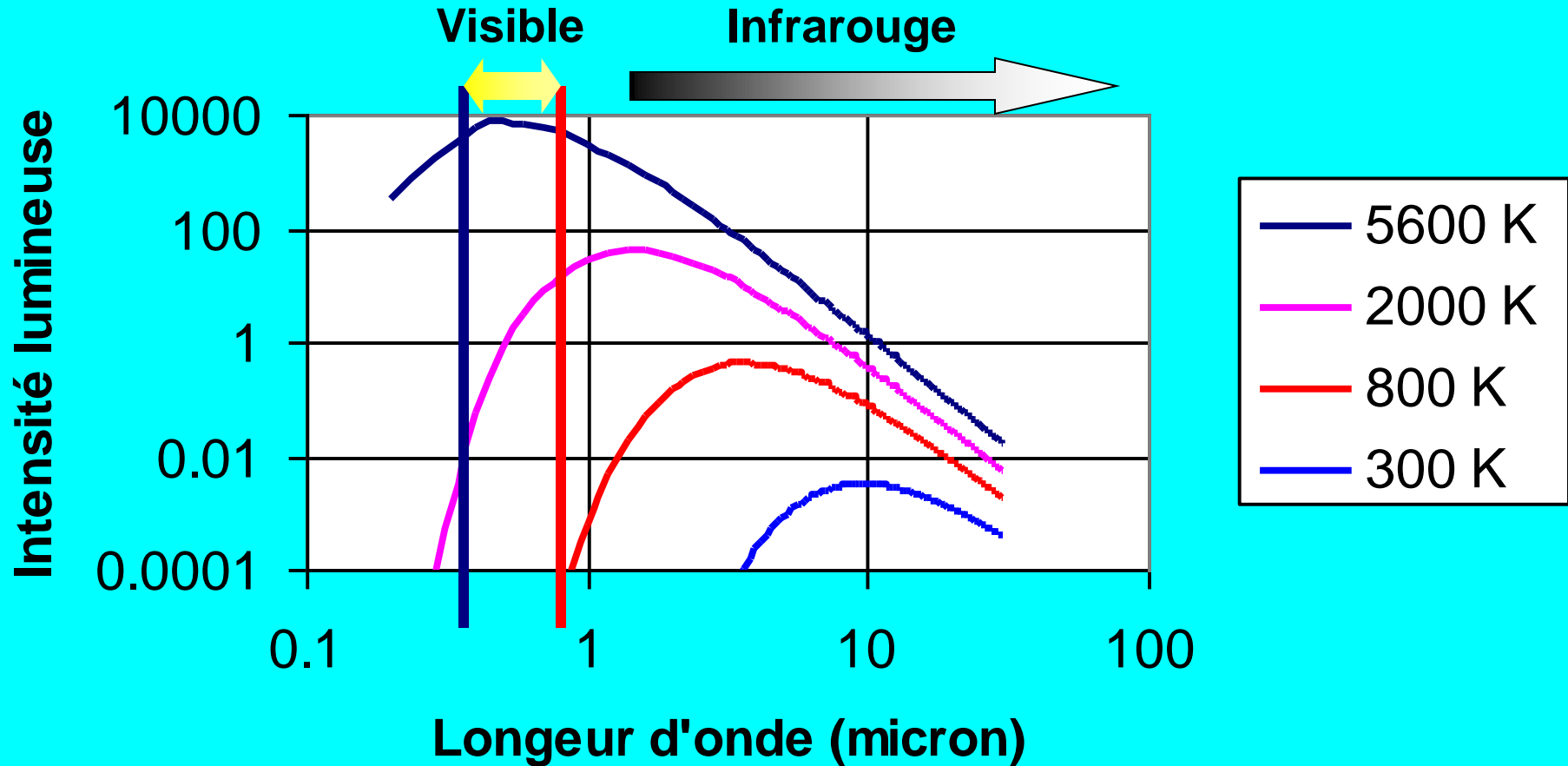
Domaine de l'infrarouge

Astronomie de la matière froide

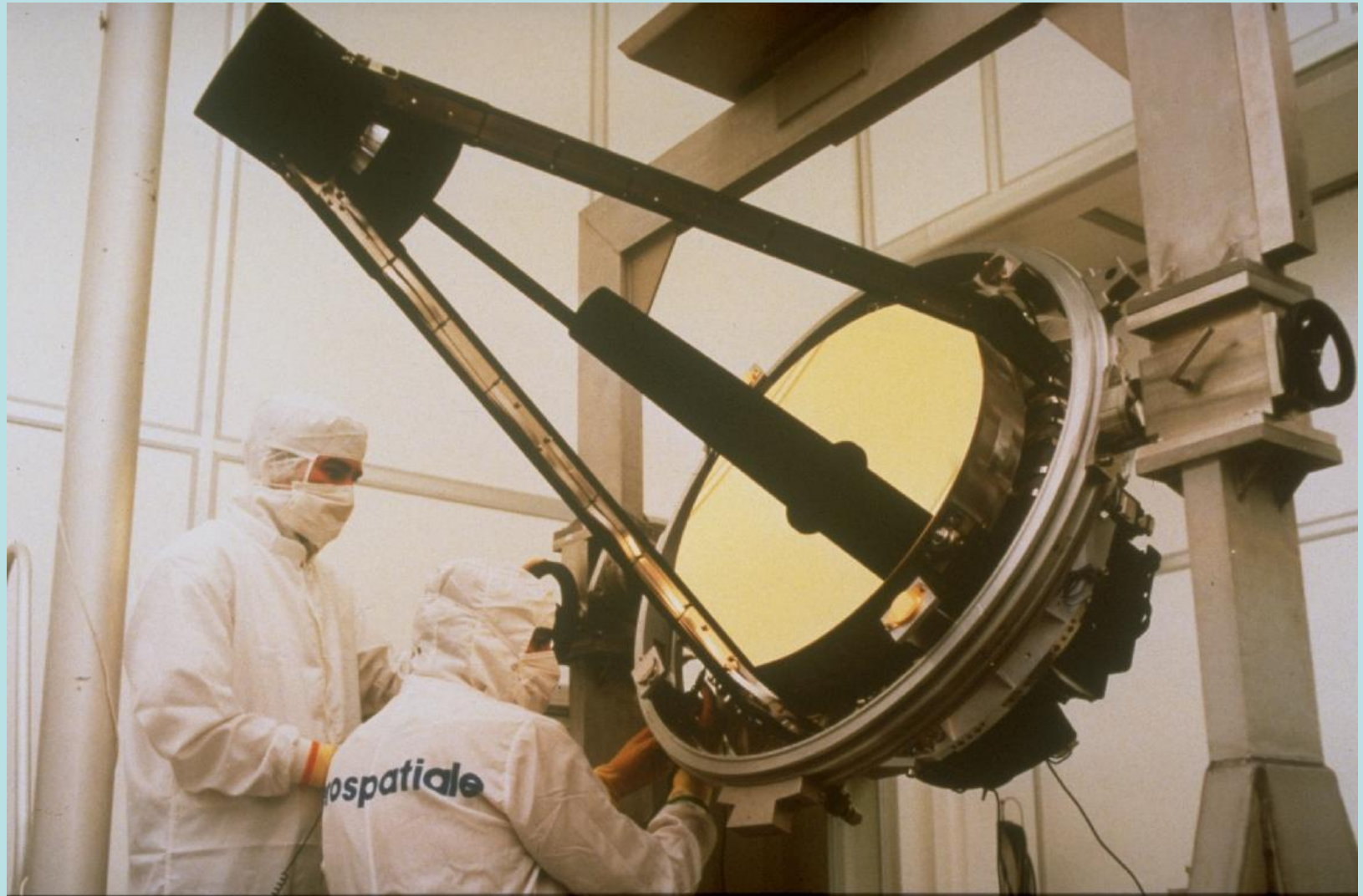


Astronomie des objets froids

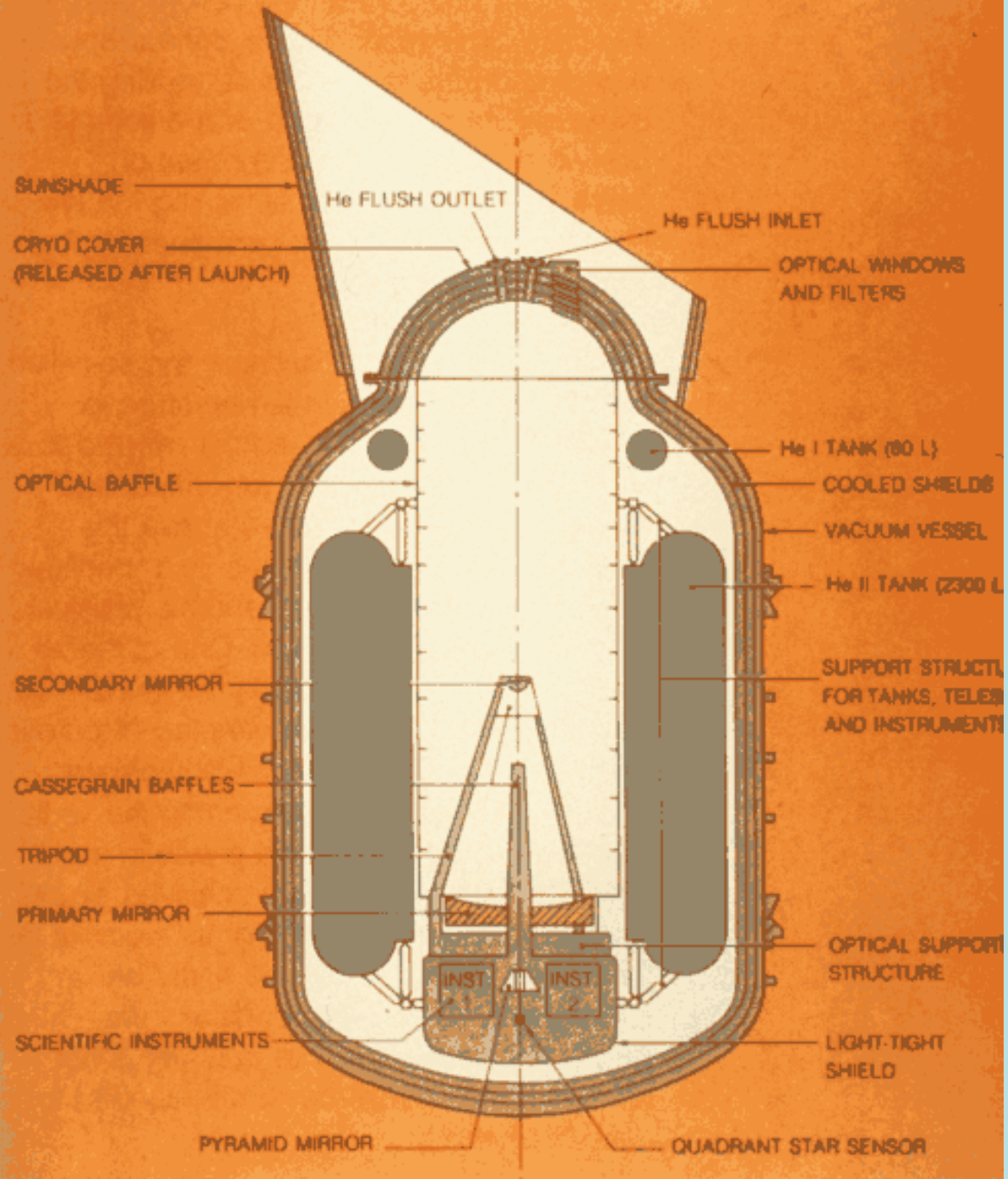
CORPS NOIR - LOI DE PLANCK



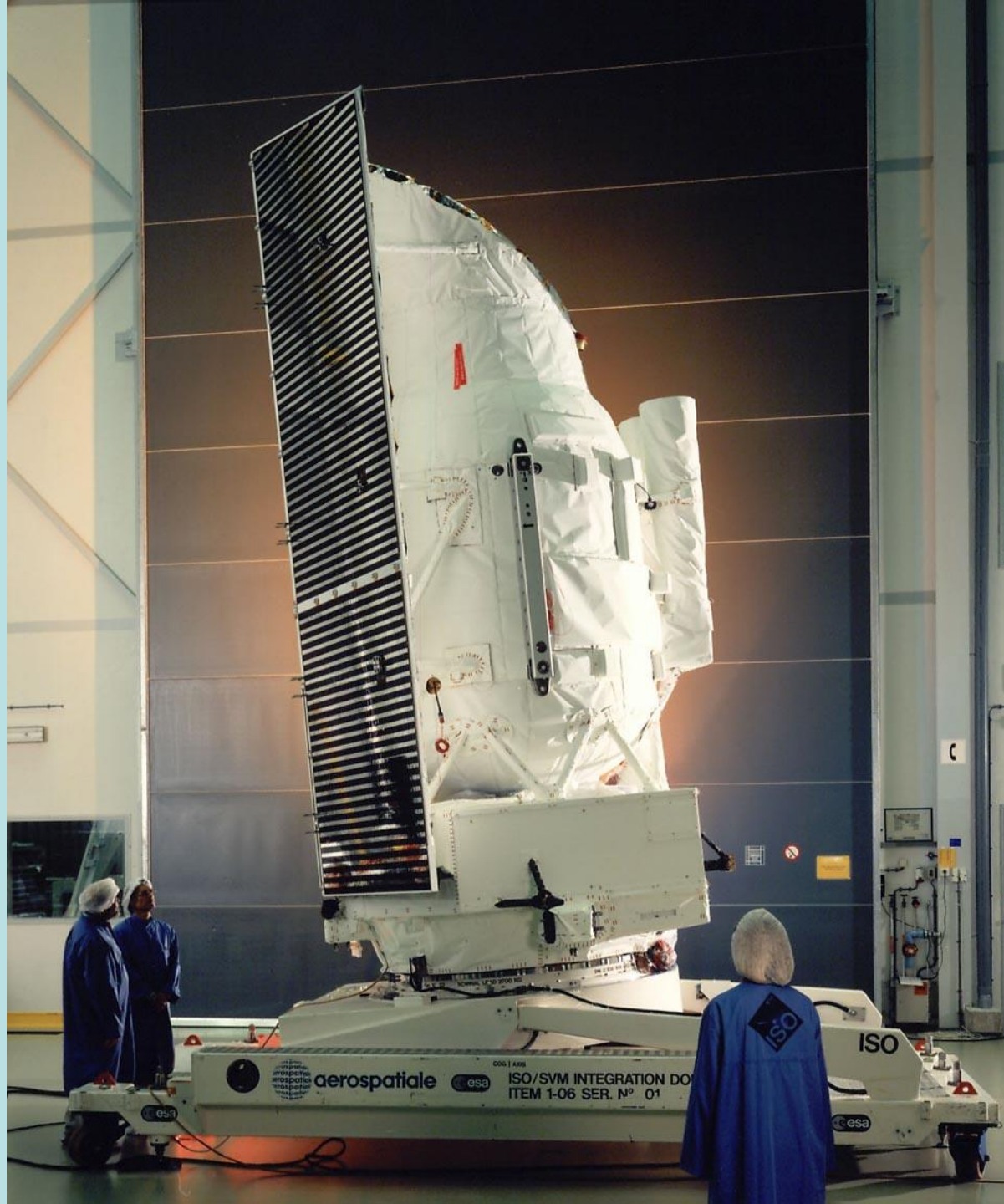
Un 'petit' télescope (60 cm de diamètre !)



Enfermé
dans
un gros
vase
dewar



En salle blanche
à l'ESTEC



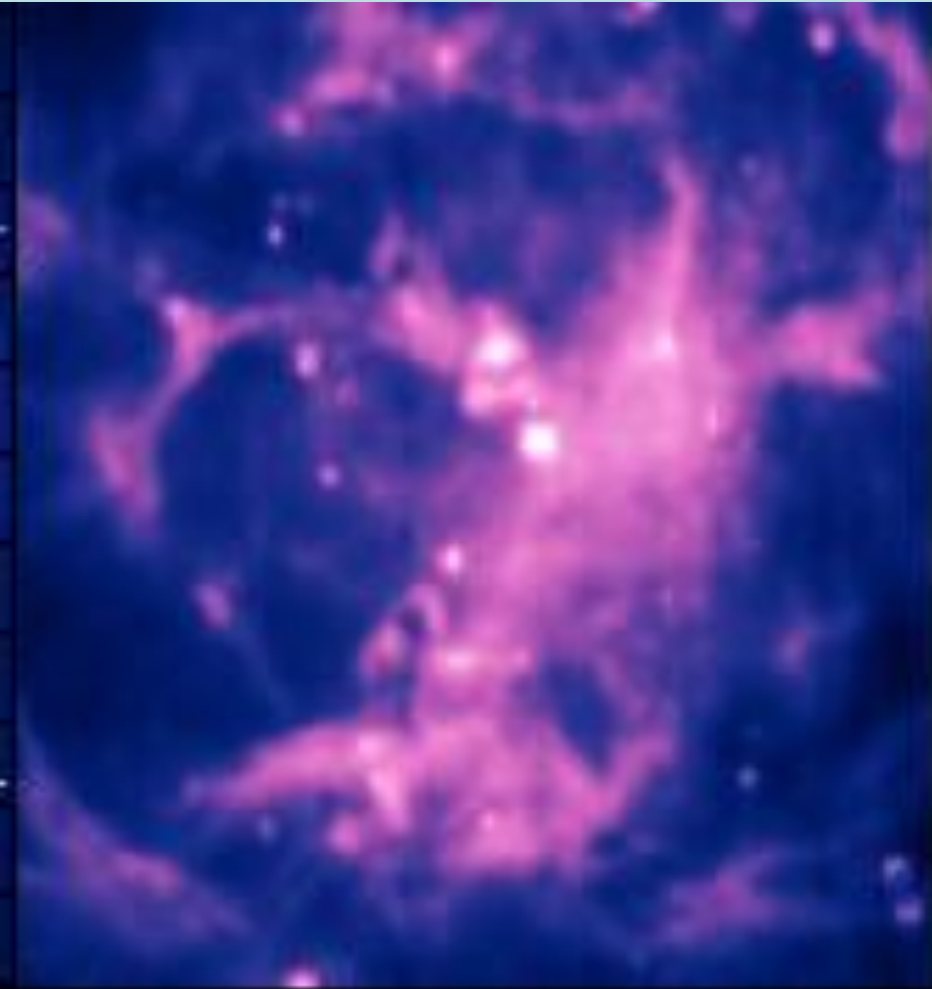
Nébuleuse « Trifide »

Positif

Négatif

Infrarouge

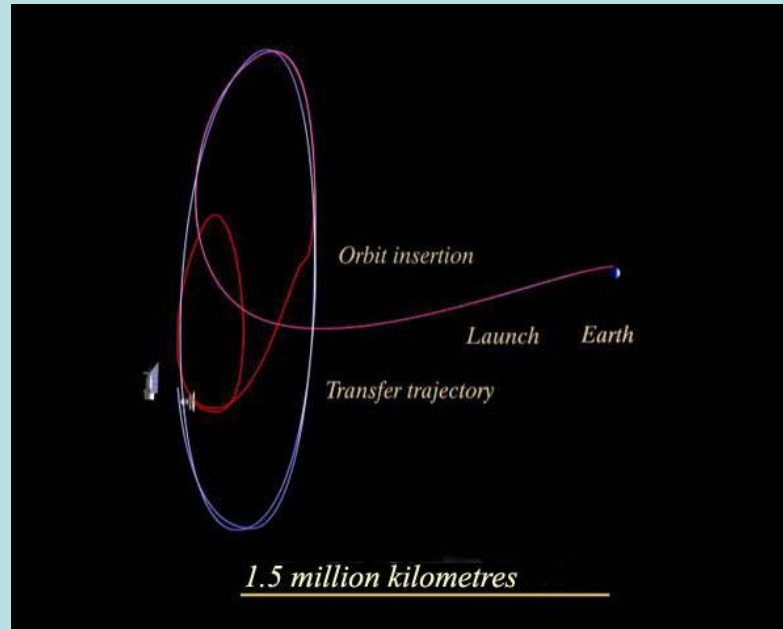
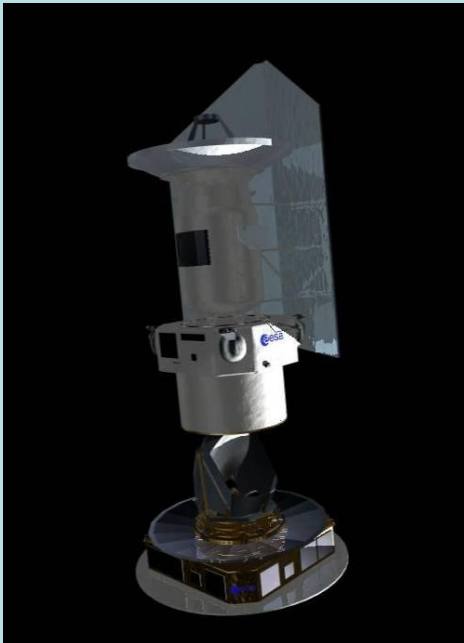
Visible ($H\alpha$)



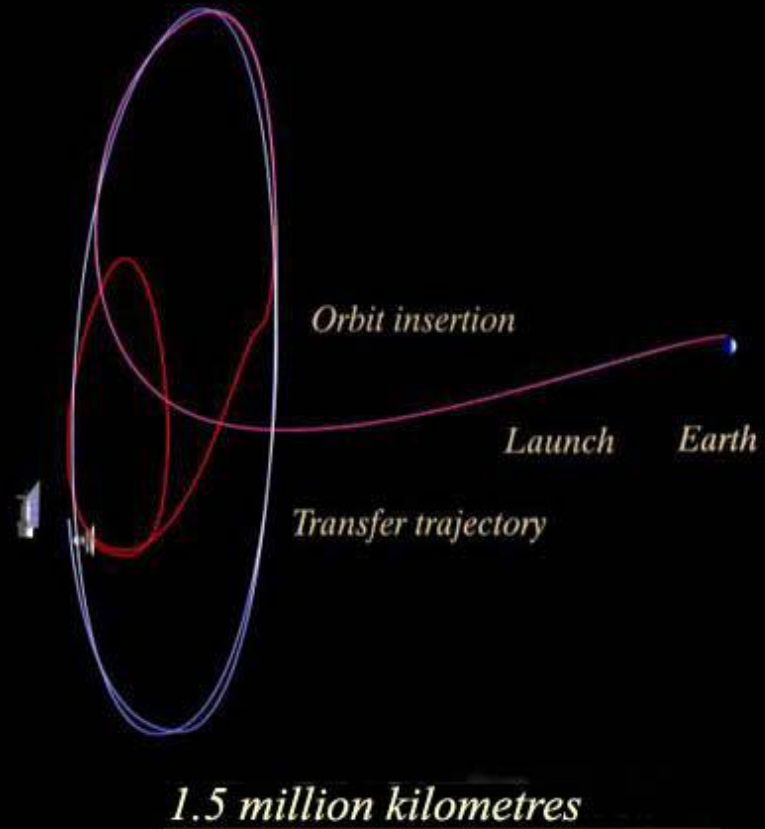
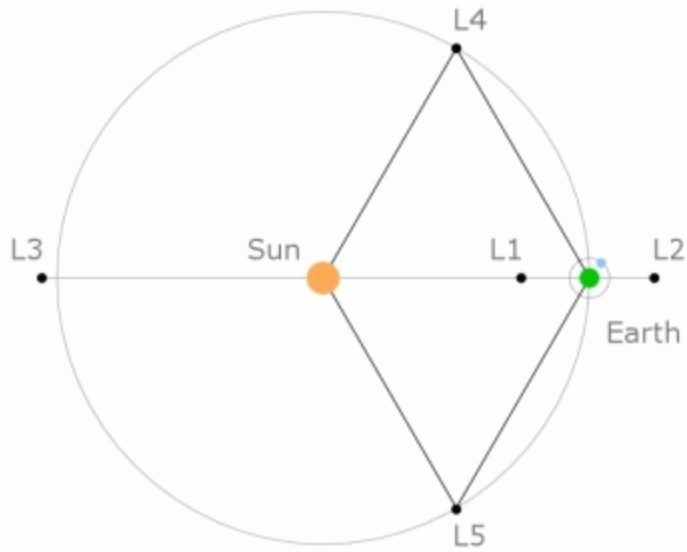
Double lancement :

Télescope HERSCHEL pour l'IR lointain 57- 670 μm (ex : FIRST)

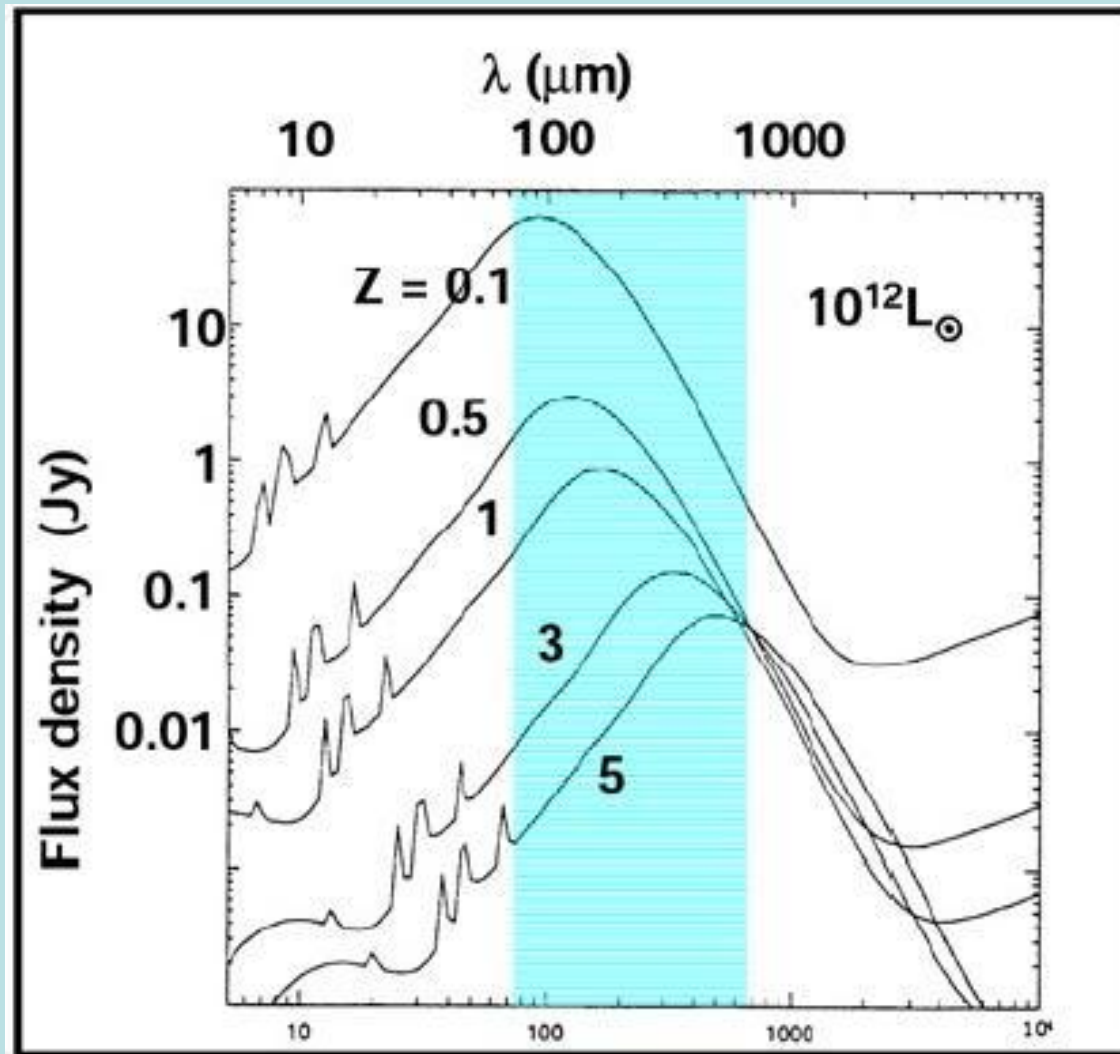
PLANCK fluctuations du fond cosmologique (ex : COBRA/SAMBA)



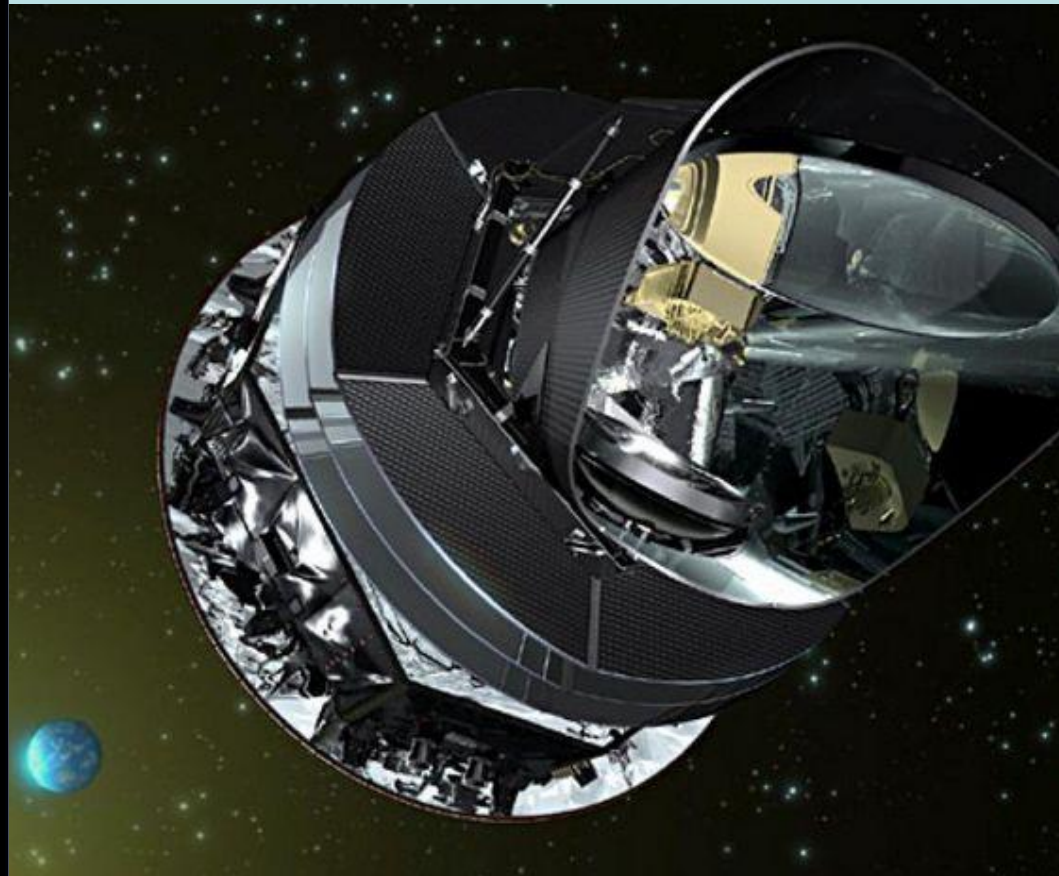
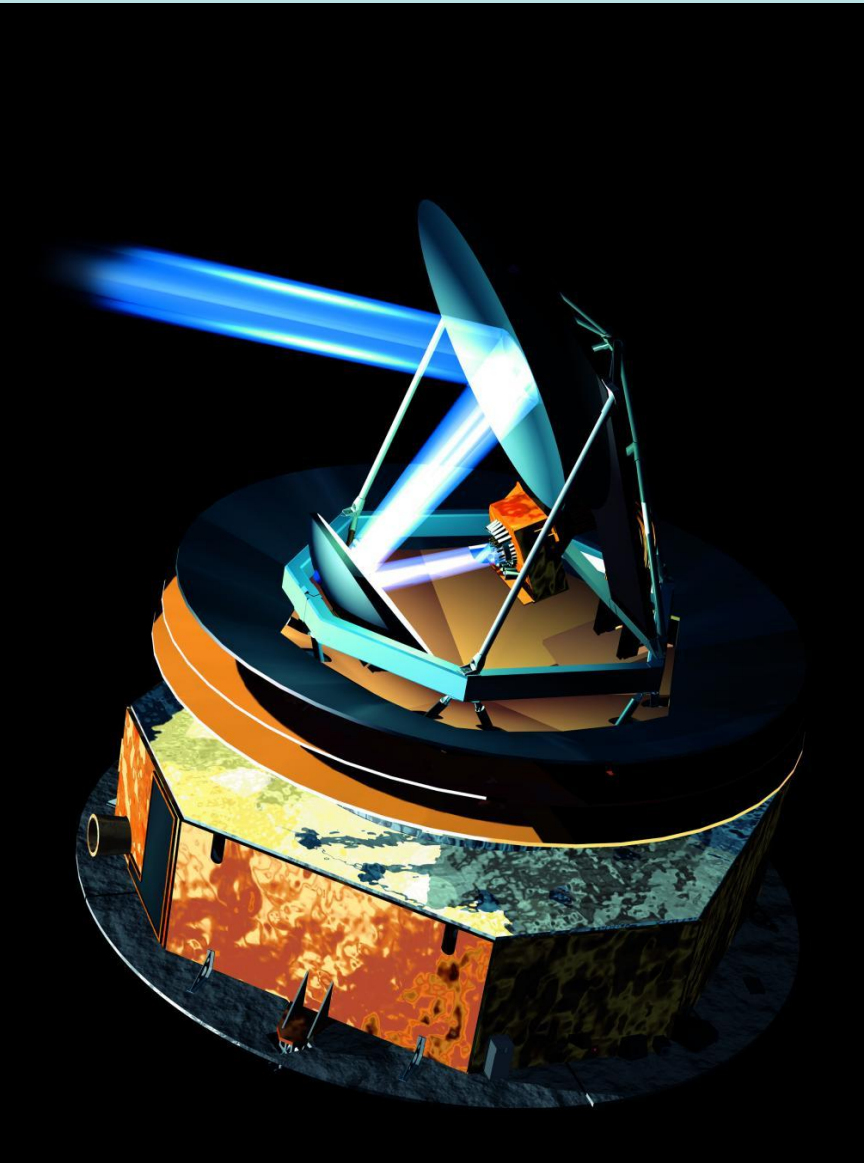
Points de Lagrange



Herschel : spectre des proto-étoiles dans les premiers temps de l'Univers



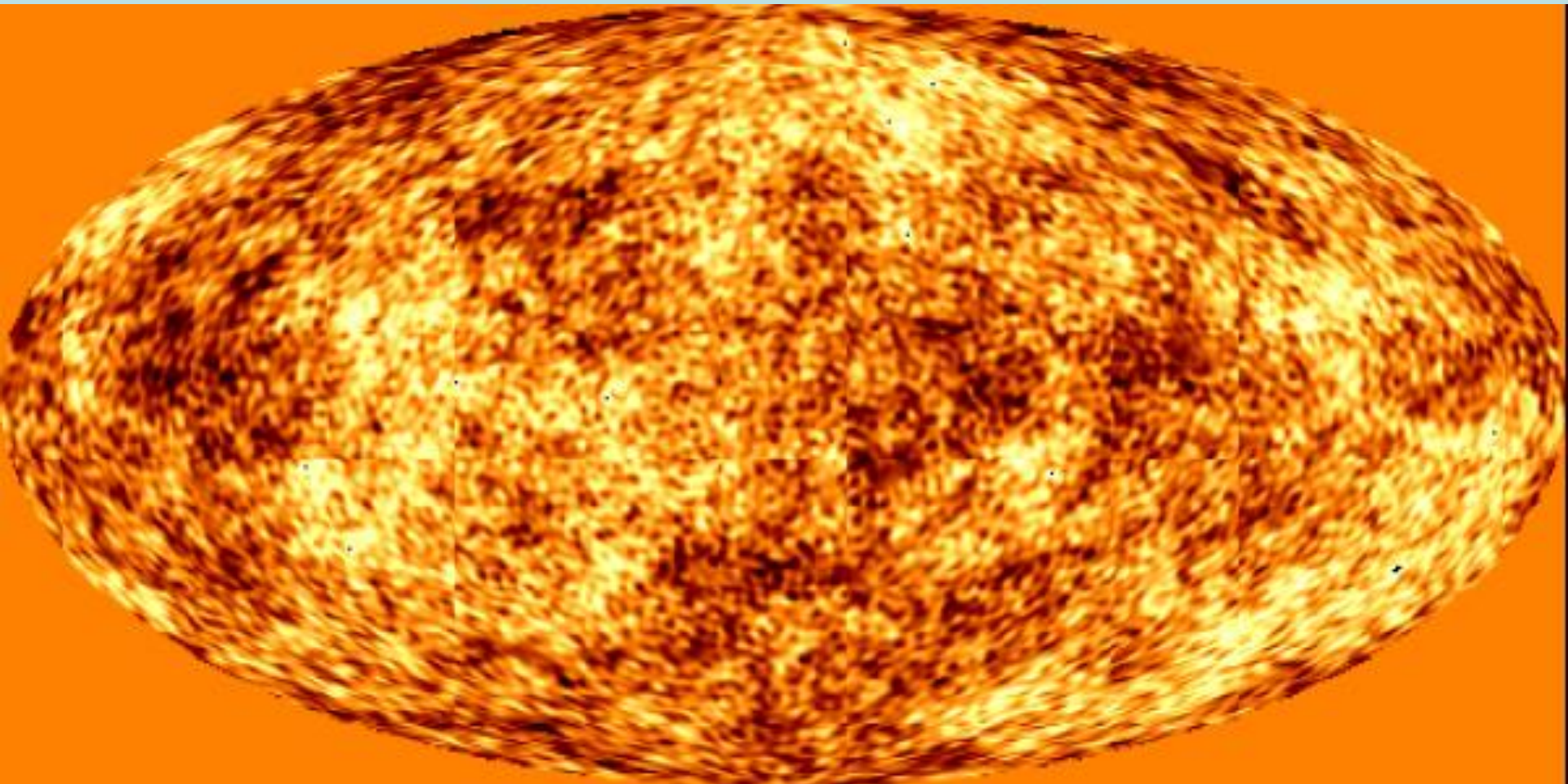
Planck : les premières fluctuations



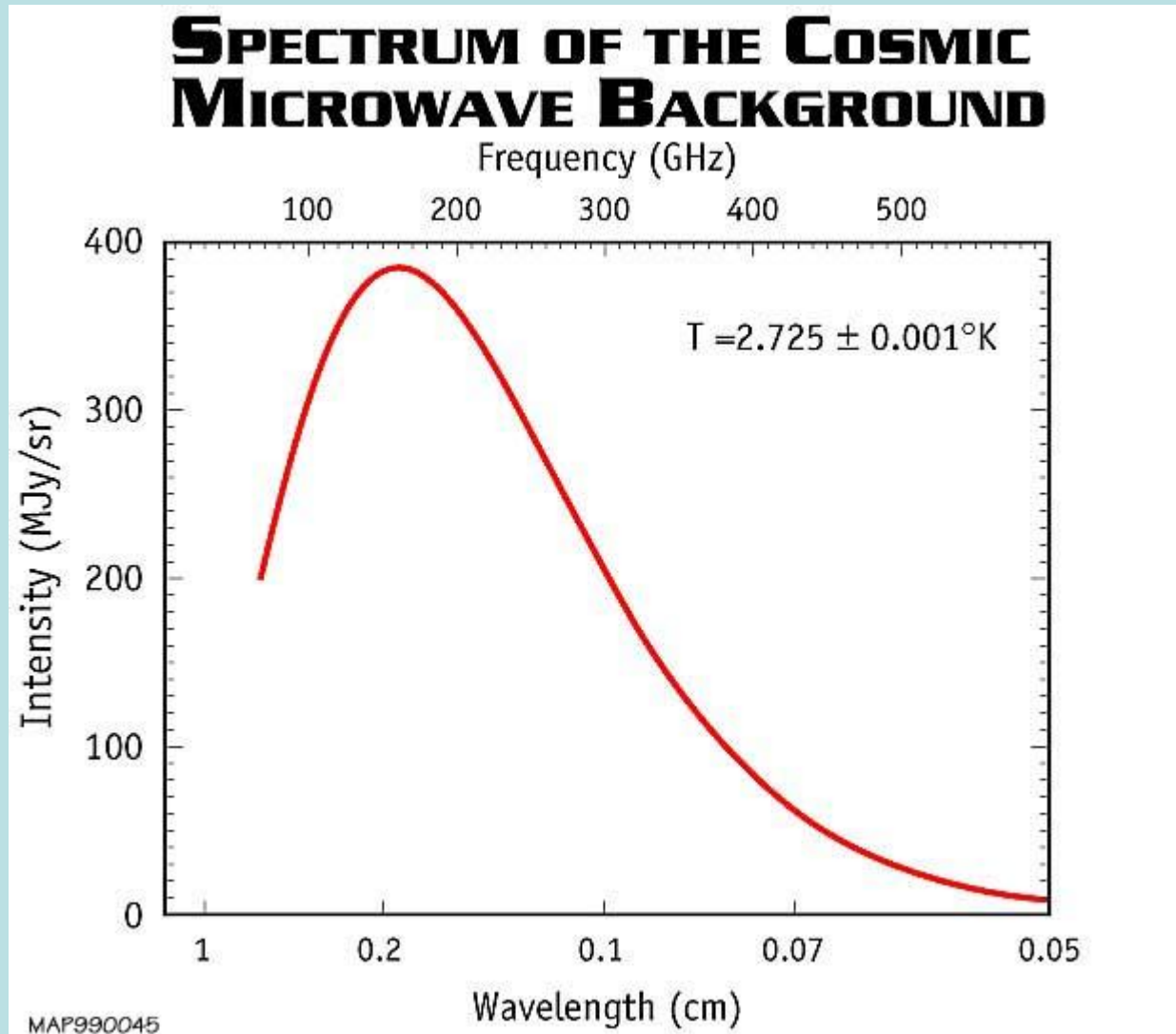
$$\Delta T/T = 5 \cdot 10^{-6}$$

Fluctuation de température / brillance / densité de matière

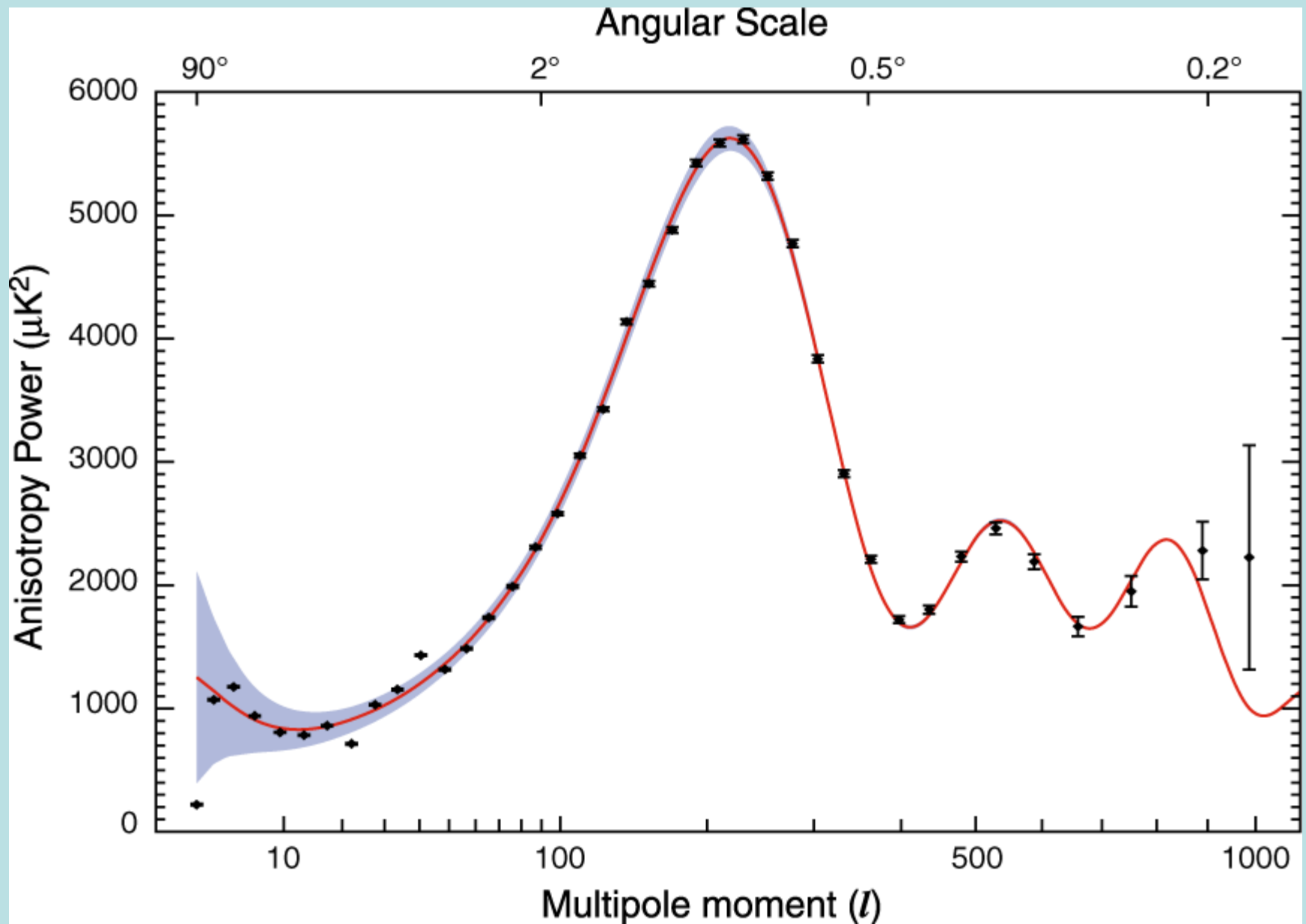
premières évidences de la structuration de la matière

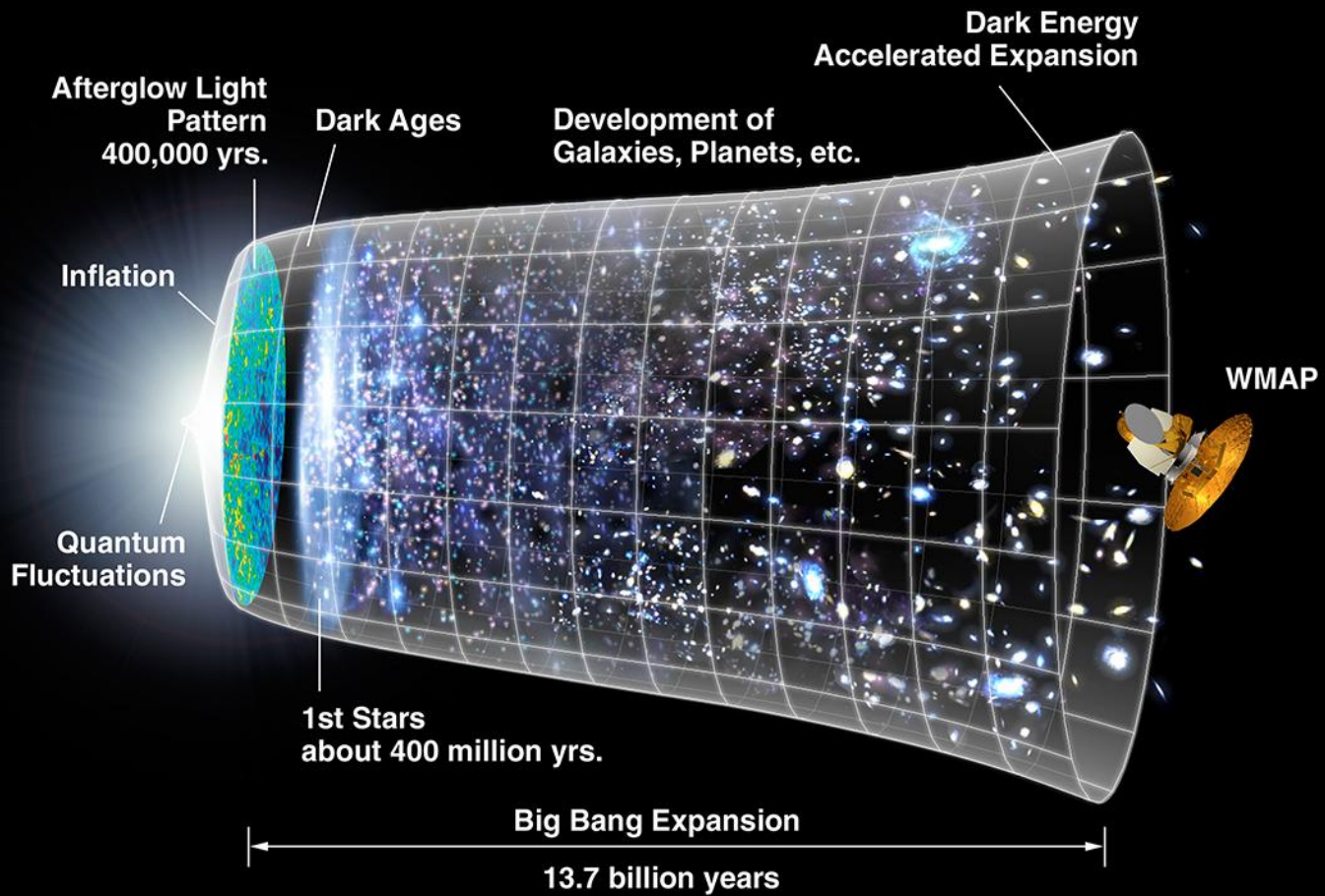


Le spectre de « corps noir » du fond cosmologique (WMAP)



Le spectre « angulaire » du fond cosmique (WMAP)





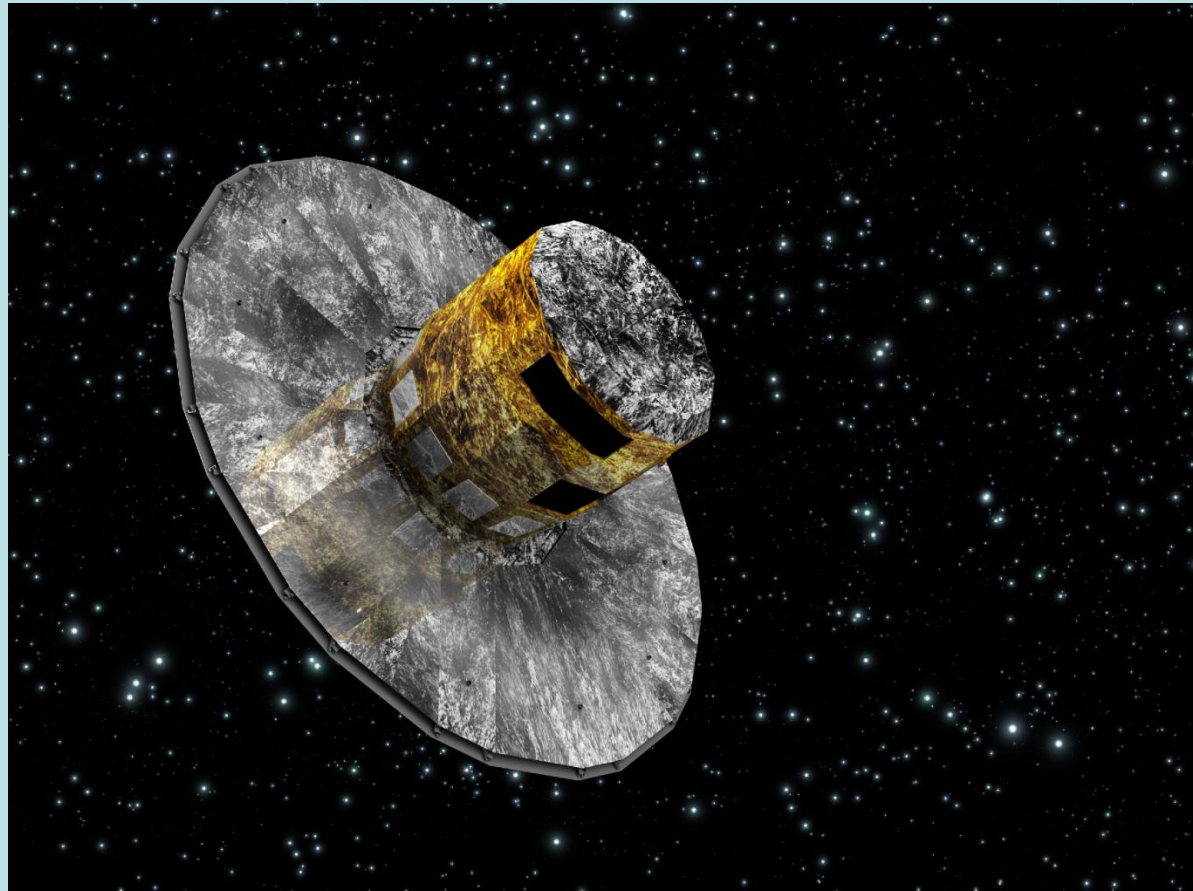
GAIA : héritier d'hipparcos

Observation de 1 million d'étoiles (1% de la Galaxie)

- Position
- Vitesse radiale
- Parallaxe
- Mouvement propre

Carte à 3D

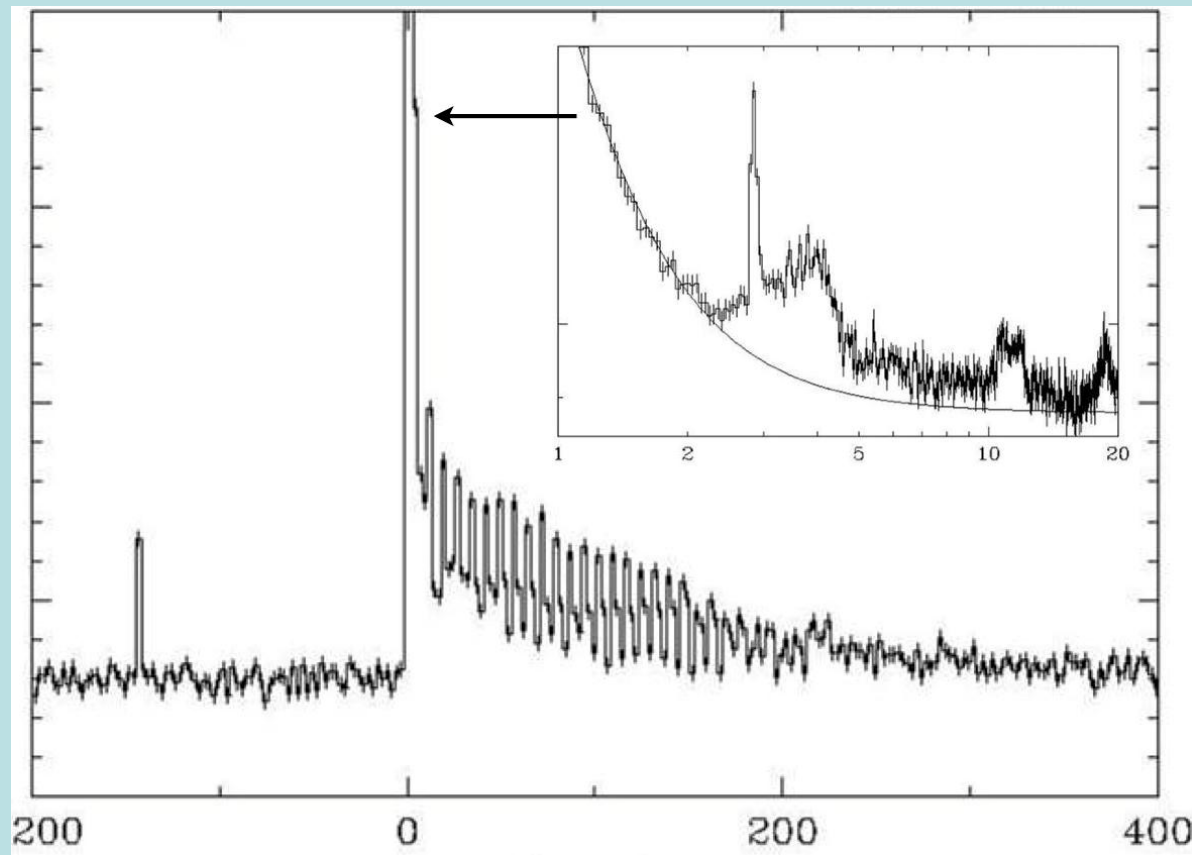
~ 200 CCD
150 Go par 24 h



Rayons gamma : Astronomie d'événements violents

Trous noirs, pulsars, étoiles à neutron etc

Un pulsar réorganise
son champs magnétique



Physique fondamentale dans l'espace : MICROSCOPE

Qui «pèse » le plus lourd : 1Kilo de plume ou un kilo de plomb ?

m_i = masse inertielle = résistance au changement de vitesse

$f = m_i \gamma$ Principe fondamental de la mécanique

m_g = masse grave = réponse à un champs de gravitation

$f = G \frac{M_{\text{Terre}} m_g}{r^2}$ Gravité (loi de Newton)

Actuellement : $m_i = m_g$ à 10^{-12} près

On veut atteindre 10^{-15} (sans cryogénie), et même 10^{-18} (avec cryogénie)

Objet en orbite : Equilibre entre **force centrifuge** et gravité = chute libre infinie

Force centrifuge

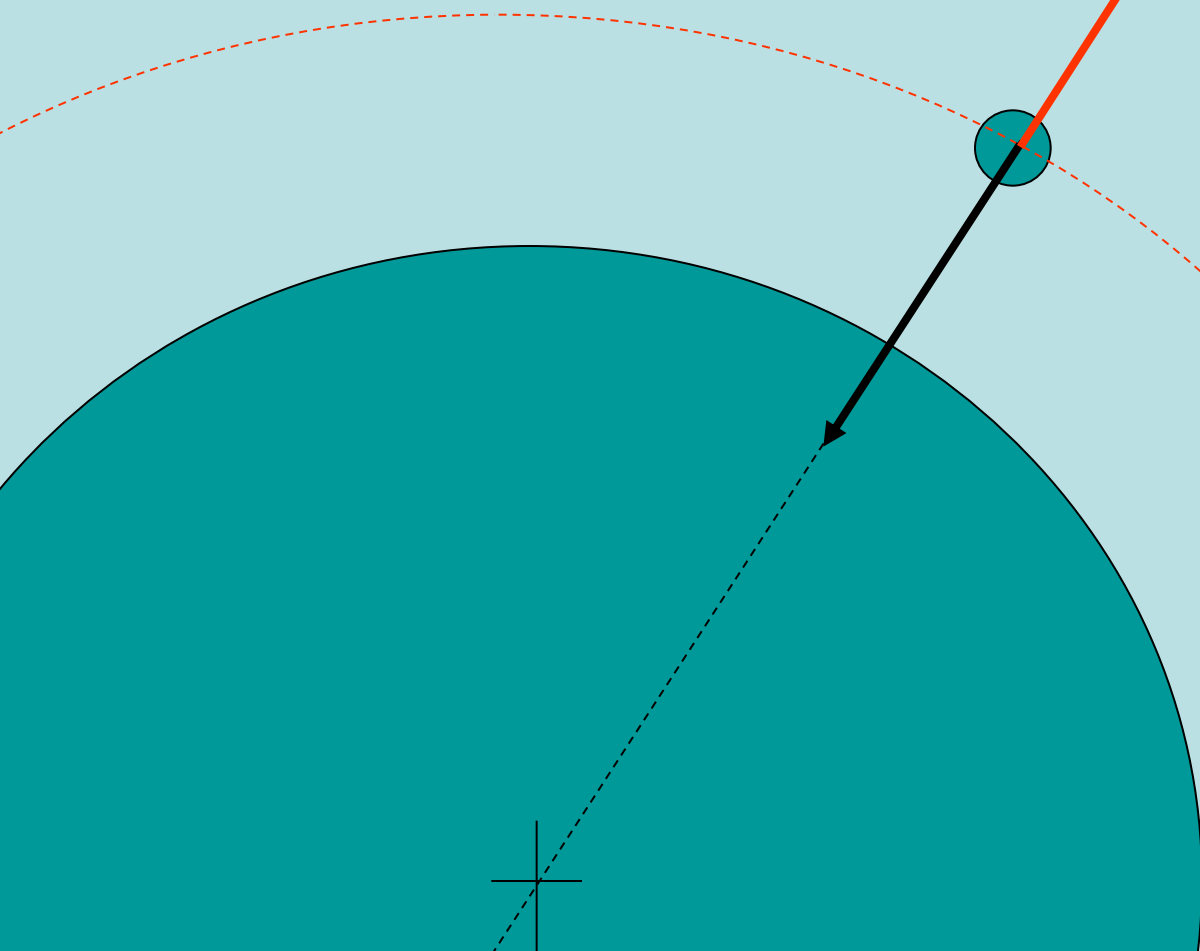
$$f = \frac{m_i v^2}{r_{\text{cercle}}}$$

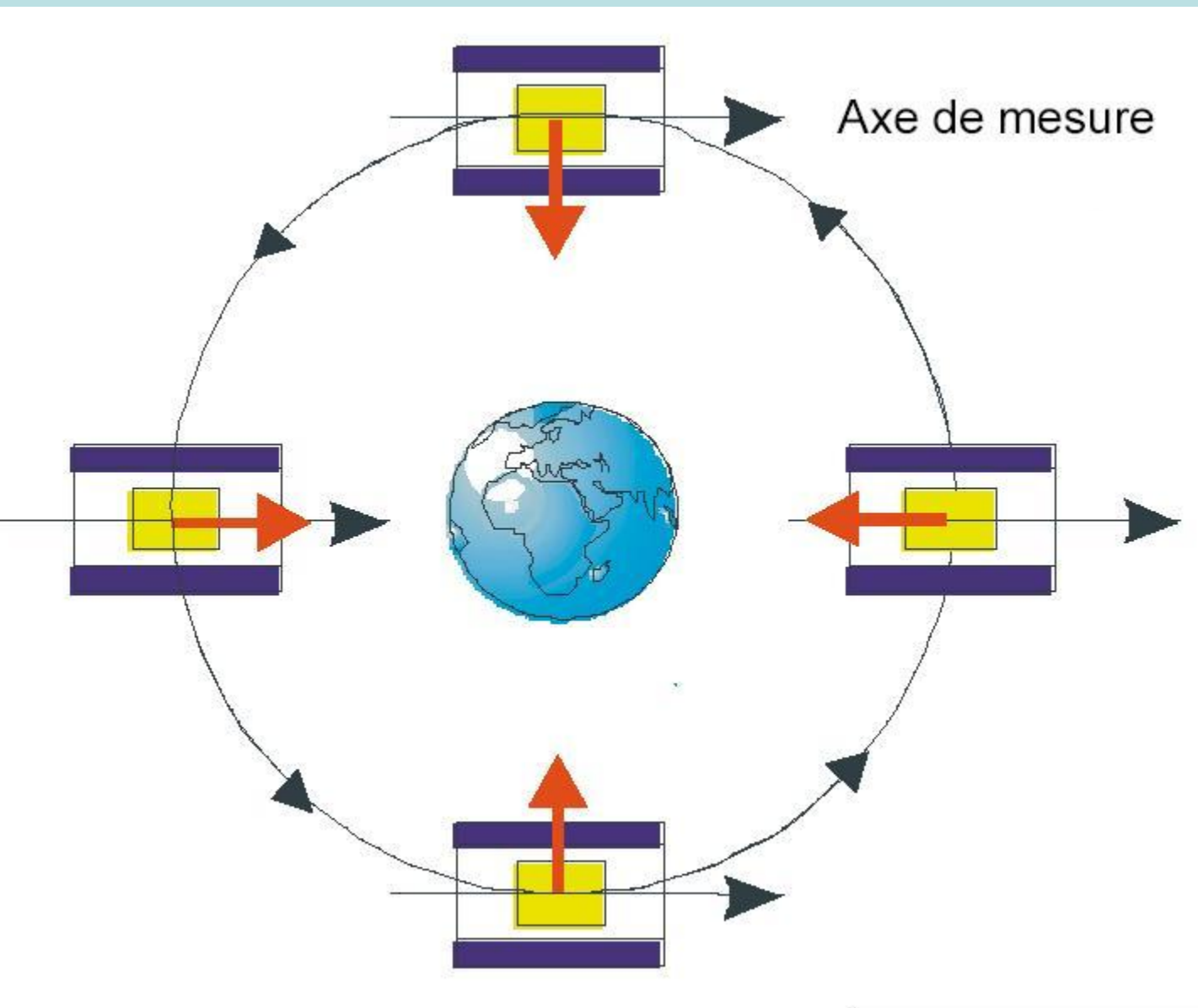
m_i = masse inertielle

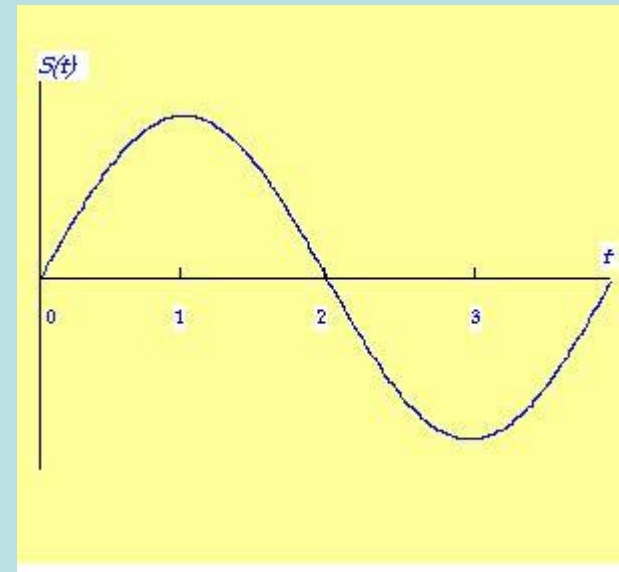
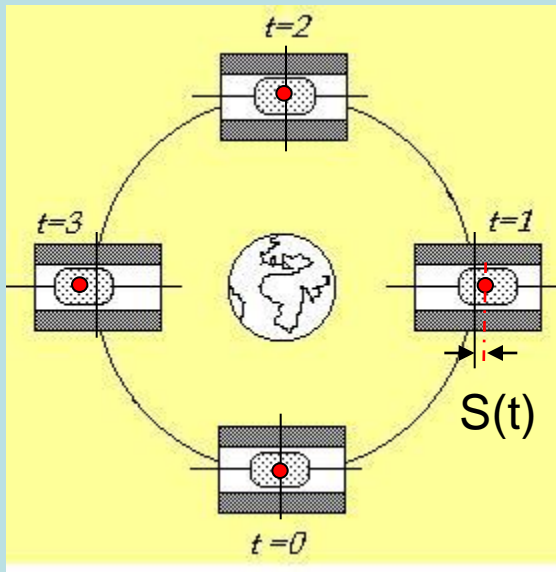
Gravité (loi de Newton) :

$$p = G \frac{M_{\text{Terre}} m_g}{r^2}$$

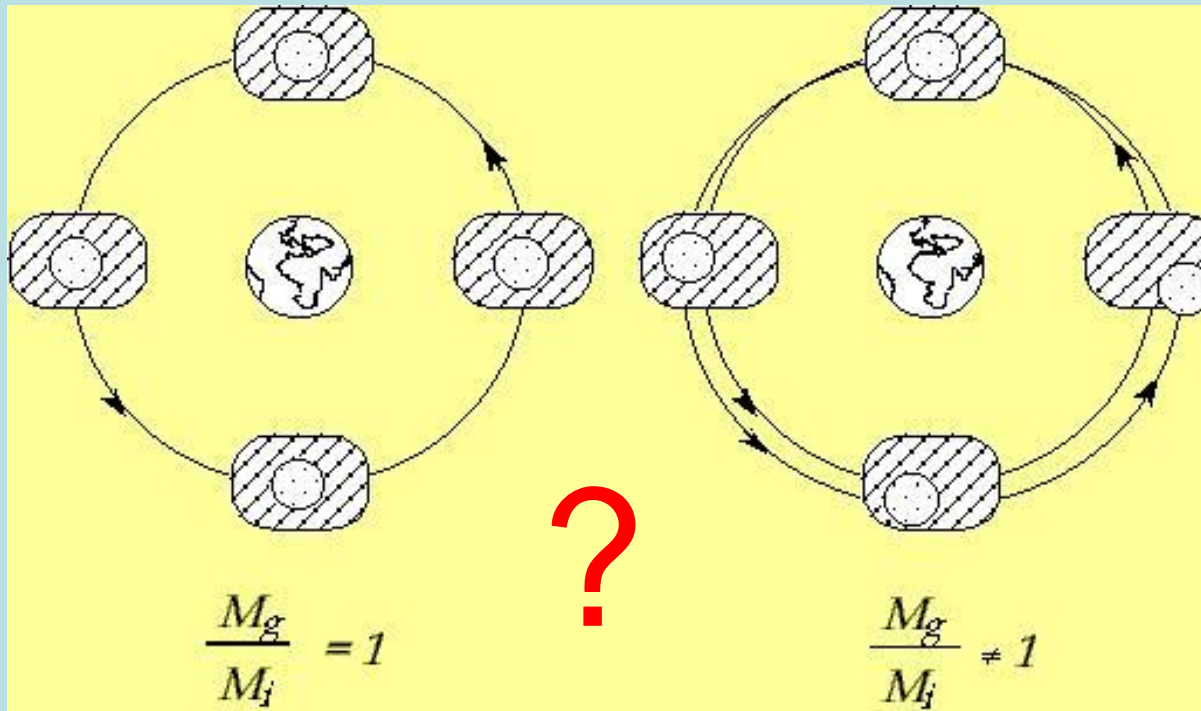
m_g = masse grave





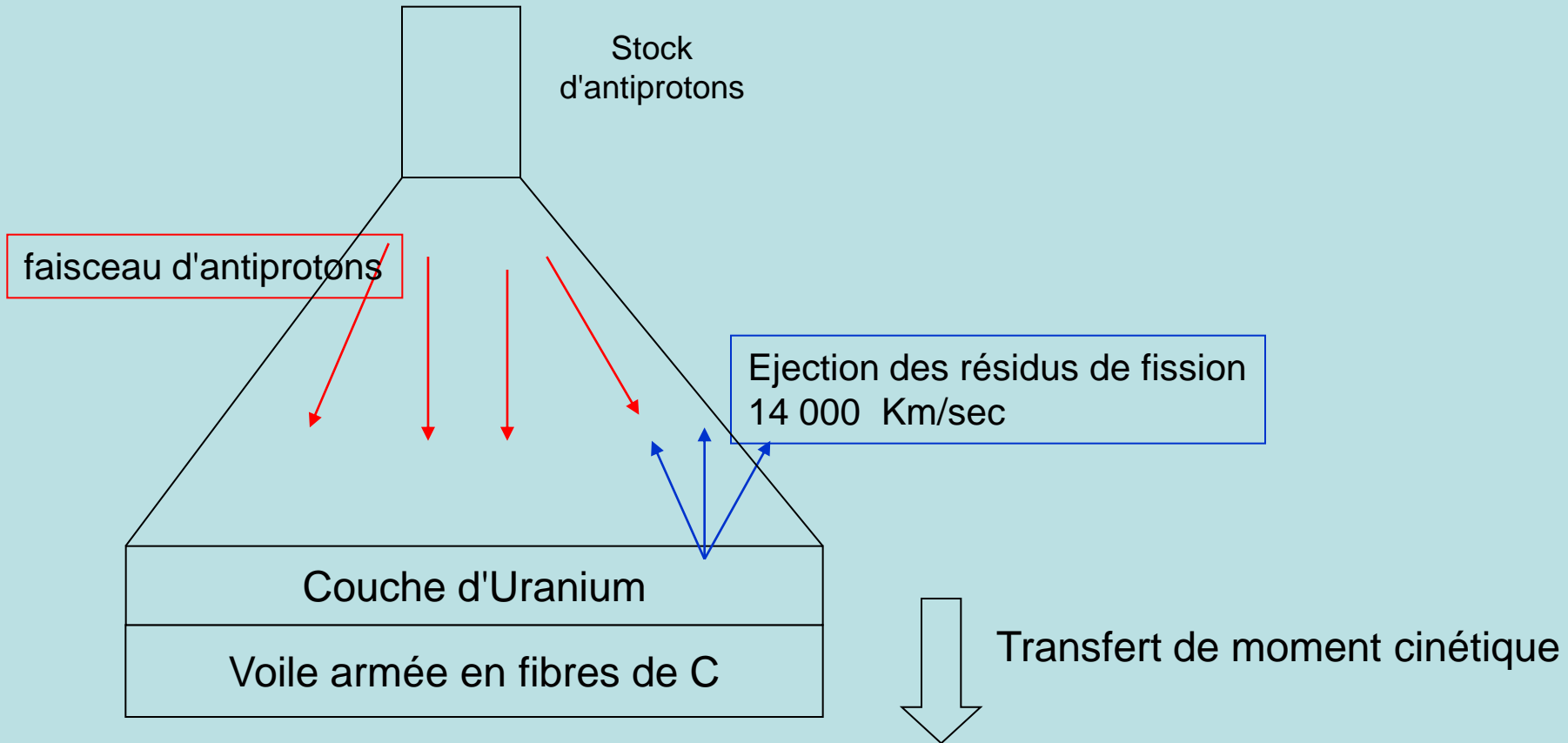


Chute libre \Leftrightarrow force centrifuge pendant 10^5 sec



Délire

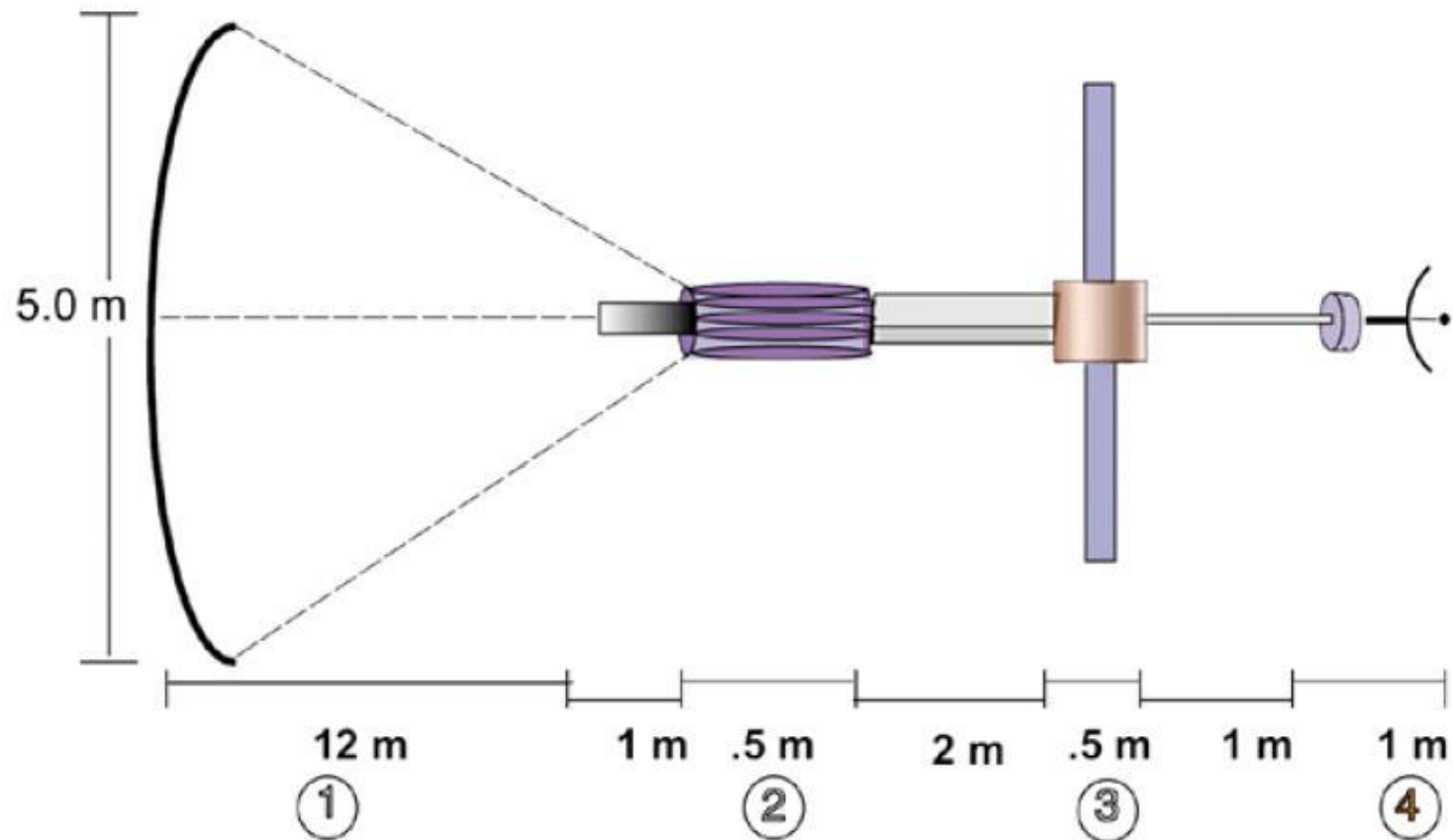
Concept résolument futuriste : la voile à antimatière !



1 Kg de combustible fournit une poussée de 1 N pendant 10^6 sec

Concept : 135Kg + 30mg d'antiprotons => 250 UA en 10 ans

Kuiper Belt Spacecraft

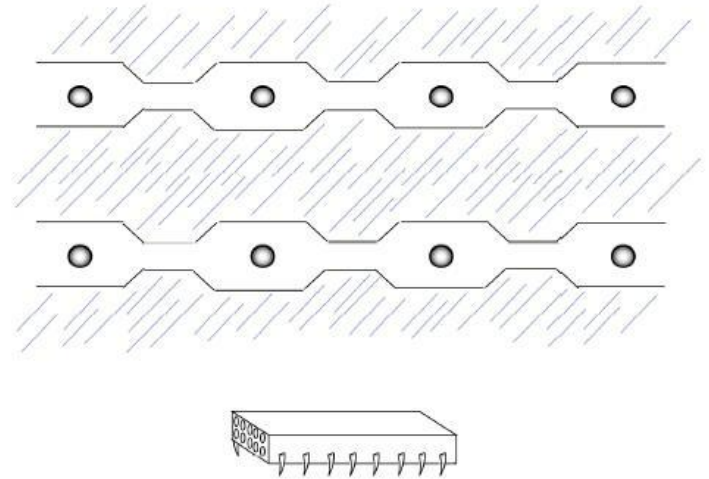


1. uranium coated carbon sail
2. solid H₂ bar flake storage units
3. electrical power supply, anti proton driven
4. 10 kg payload

Problème : stockage des antiprotons

Confinement dans un champ
électrostatique

Solid Antihydrogen Pellet Storage



Problème : production des antiprotons

30 mg d'antiprotons = $1,8 \cdot 10^{22}$ particules

production actuelle au Fermilab : $5 \cdot 10^{14}$ particules/an

Futur ? : 17g => α Centaure en 50 ans