



The  
linked  
image  
canno



The linked  
image  
cannot be  
displayed.

# *Observations interférométriques en astronomie: le fabuleux destin de l'expérience de Young*

Denis Defrère

Lyon, le 19 mars 2011

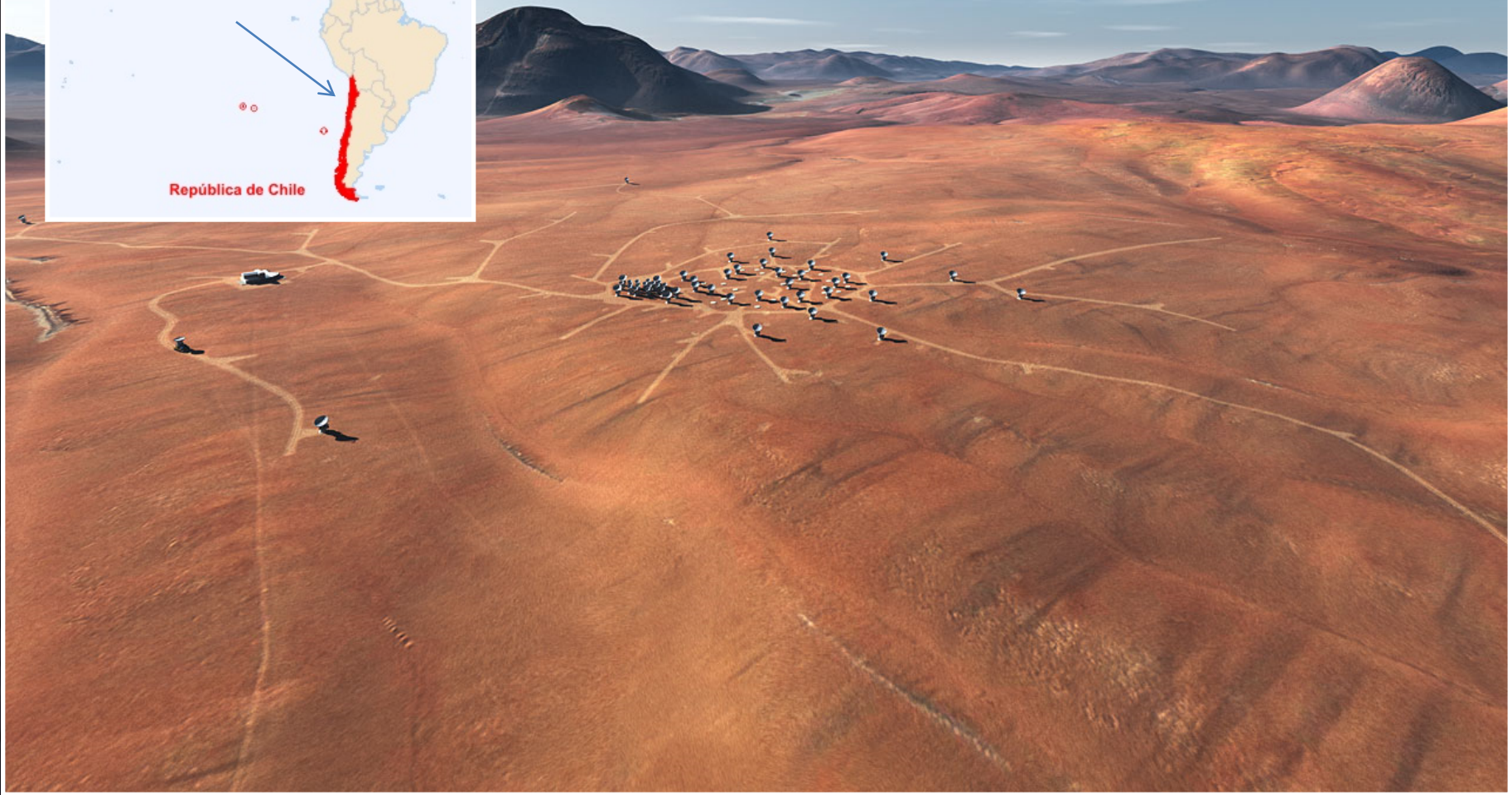














# APERCU



- C'est quoi l'interférométrie?
- L'interférométrie en astronomie
  - Bref historique
  - Les instruments actuels
  - Principaux résultats (non exhaustif)
  - Futurs instruments
  - Perspectives à longs termes

# APERCU

- C'est quoi l'interférométrie?
- L'interférométrie en astronomie
  - Bref historique
  - Les instruments actuels
  - Principaux résultats (non exhaustif)
  - Futurs instruments
  - Perspectives à longs termes

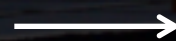
# L'INTERFÉROMÉTRIE, C'EST QUOI?

- Superposition d'ondes électromagnétiques
  - Venant d'une même source
  - À la même longueur d'onde (visible, infrarouge, radio,...).
  - Empruntant des chemins différents

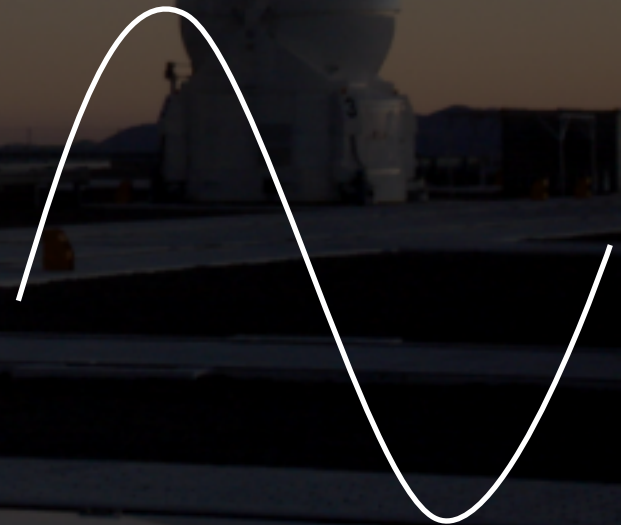
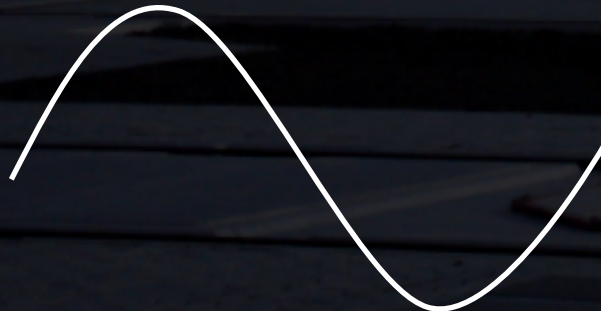
Onde 1



+



Onde 2



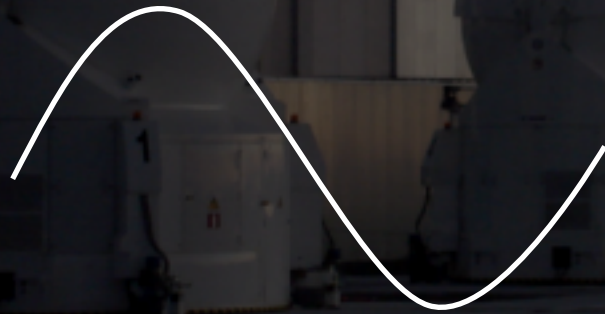
INTERFÉRENCE CONSTRUCTIVE



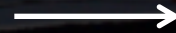
# L'INTERFÉROMÉTRIE, C'EST QUOI?

- Superposition d'ondes électromagnétiques
  - Venant d'une même source
  - À la même longueur d'onde (visible, infrarouge, radio,...).
  - Empruntant des chemins différents

Onde 1



+



Onde 2



INTERFÉRENCE DESTRUCTIVE

# L'INTERFÉROMÉTRIE, C'EST QUOI?

- Superposition d'ondes électromagnétiques
  - Venant d'une même source
  - À la même longueur d'onde (visible, infrarouge, radio,...).
  - Empruntant des chemins différents



# L'EXPÉRIENCE DE YOUNG

C'est en 1800 que Young remet en question l'interprétation corpusculaire de la lumière. En observant les couleurs d'une bulle de savon, il voit s'entremêler deux ondes réfléchies, l'une par la face extérieure et l'autre par la face intérieure. Les vitesses de la lumière sont différentes dans l'air et dans l'eau (comme l'a montré aussi Huygens)

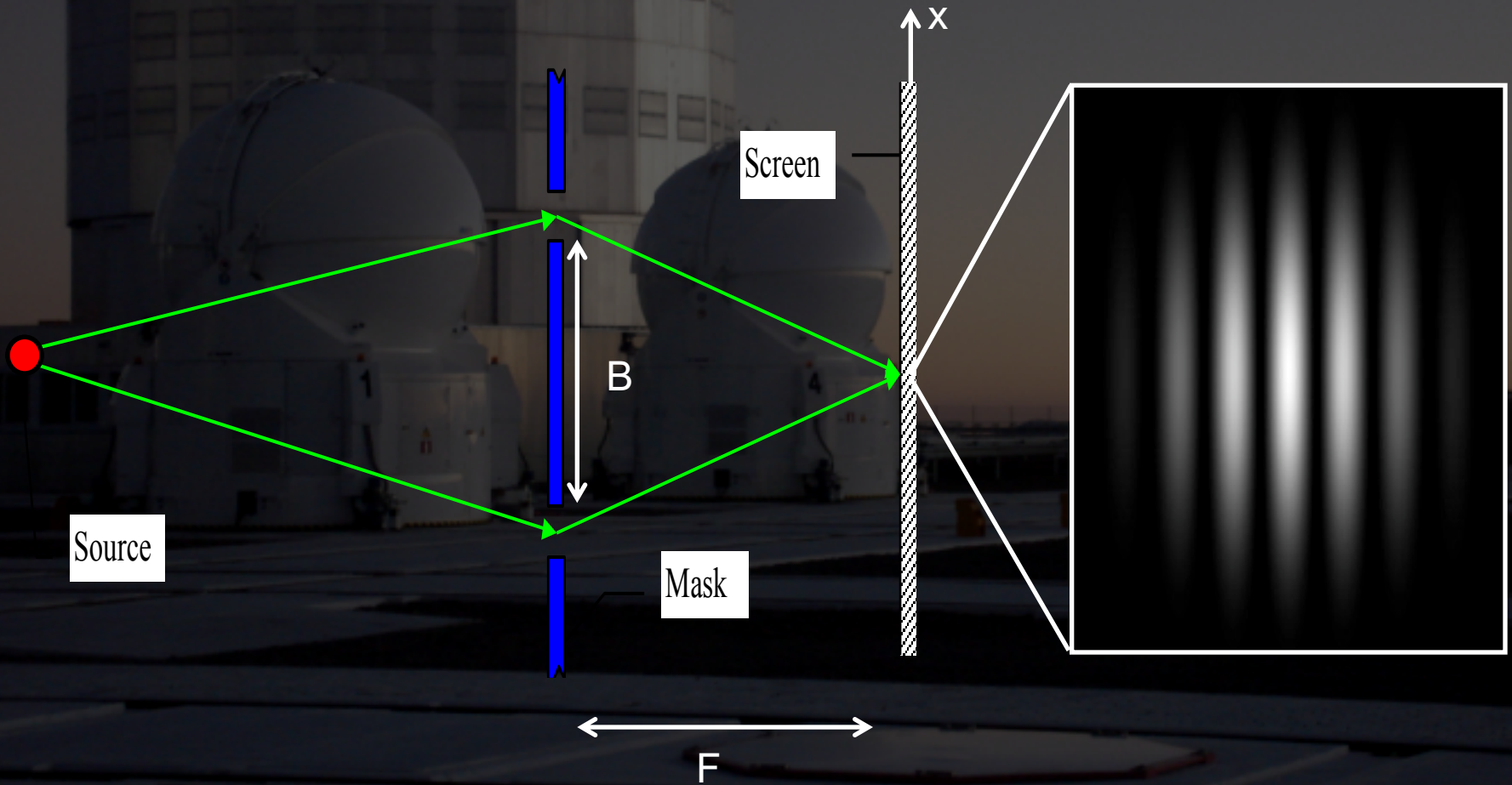
Si la différence de marche entre deux faisceaux émis d'une même source est un multiple impair de la demie longueur d'onde, leur superposition est annihilée. Young appelle ce phénomène « Interférence » Il montre l'aspect ondulatoire de la lumière.



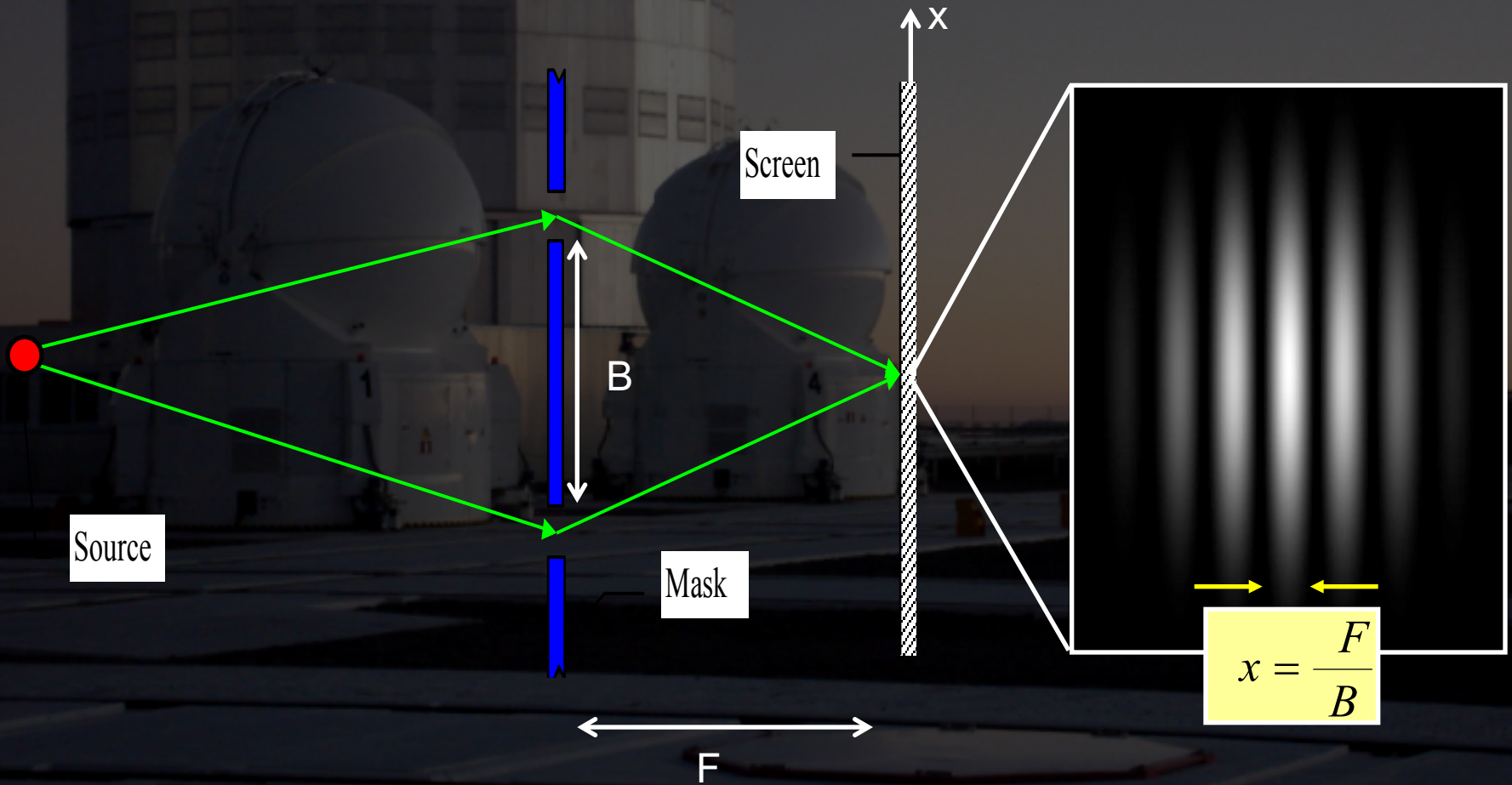
Thomas Young (1773 – 1829)



# L'EXPÉRIENCE DE YOUNG

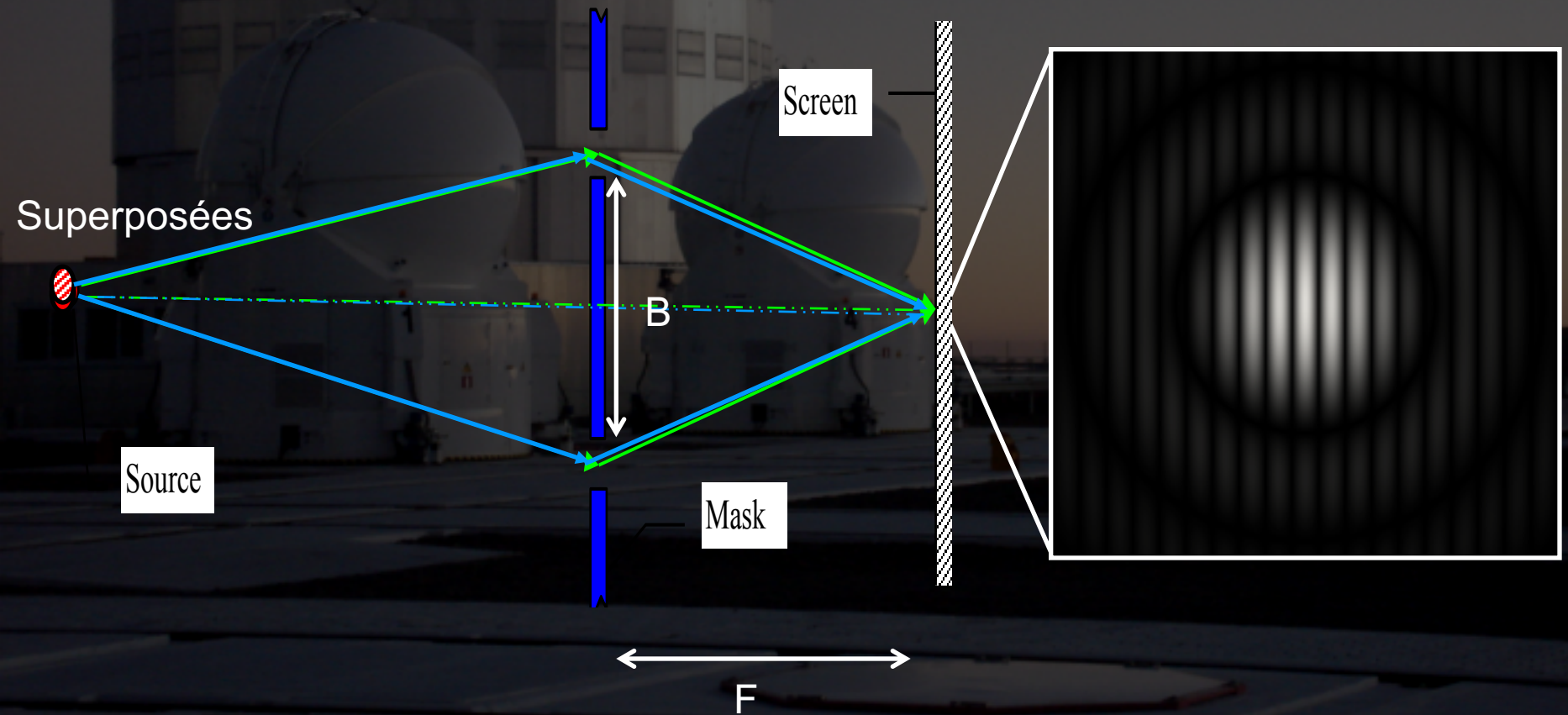


# L'EXPÉRIENCE DE YOUNG



# L'EXPÉRIENCE DE YOUNG

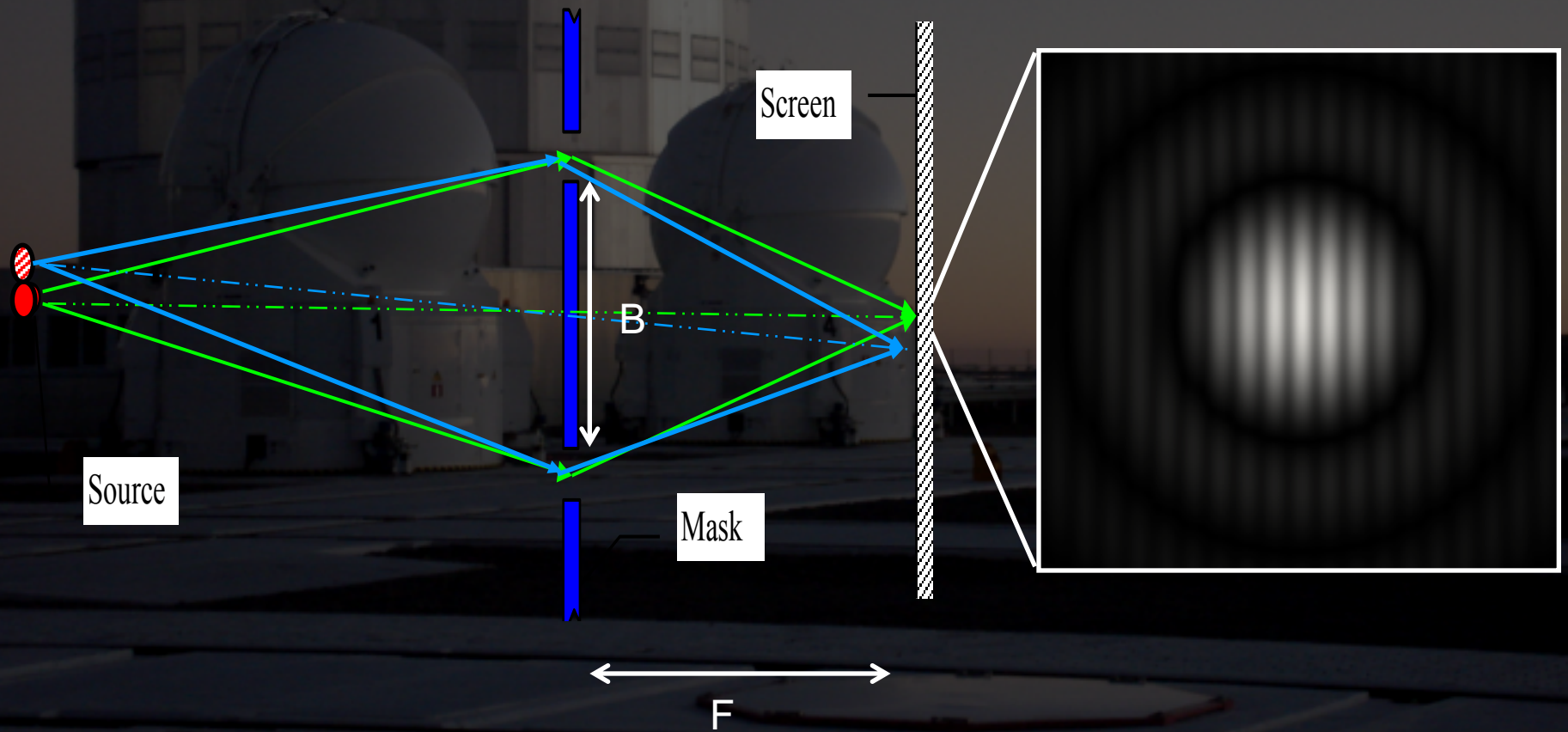
## 2 sources





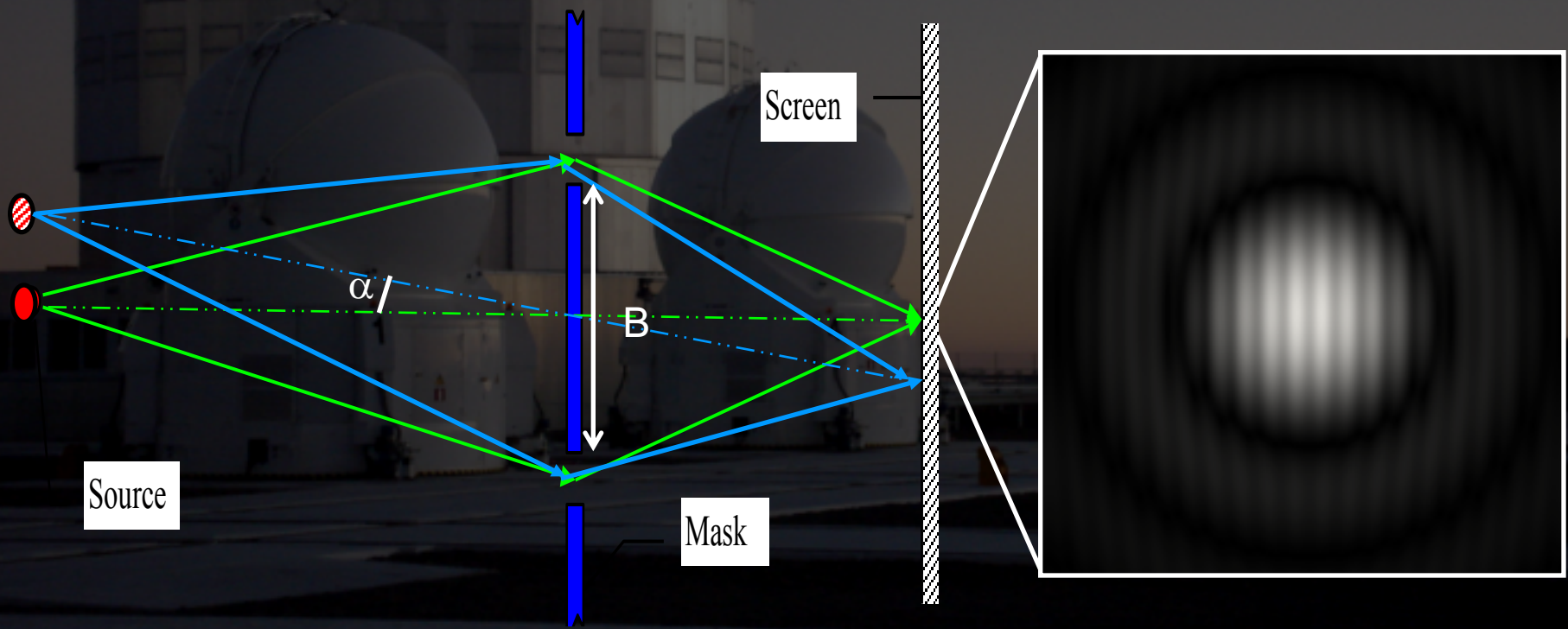
# L'EXPÉRIENCE DE YOUNG

## 2 sources



# L'EXPÉRIENCE DE YOUNG

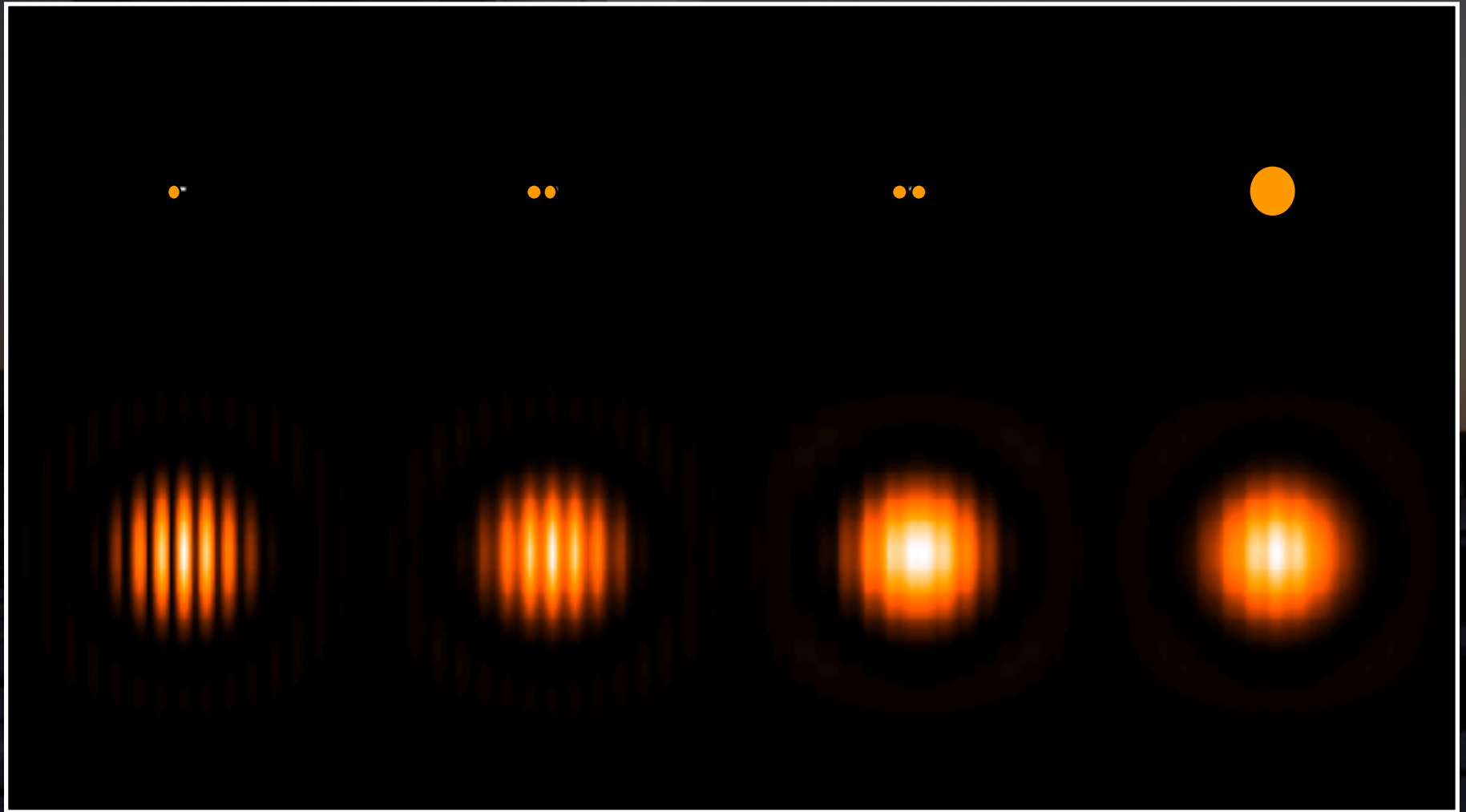
## 2 sources



Le contraste diminue!

BROUILLAGE DES FRANGES pour  $\alpha = \lambda/2B$ :

# L'EXPÉRIENCE DE YOUNG





# THÉORÈME DE VAN CITTERT – ZERNIKE

Intensité de la source

Réponse à un point source dans la direction  $\alpha$

$$I(\vec{x}) = \text{Re} \left[ I(\vec{\alpha}) \exp 2 j \frac{\vec{B} \cdot \vec{x}}{z} - d \right]$$

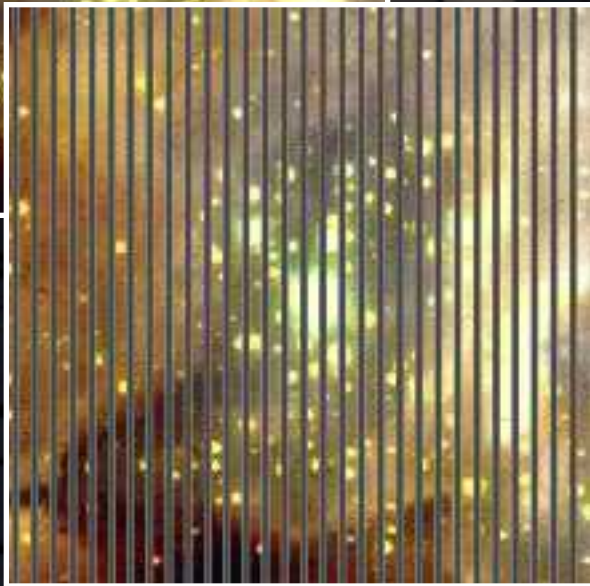
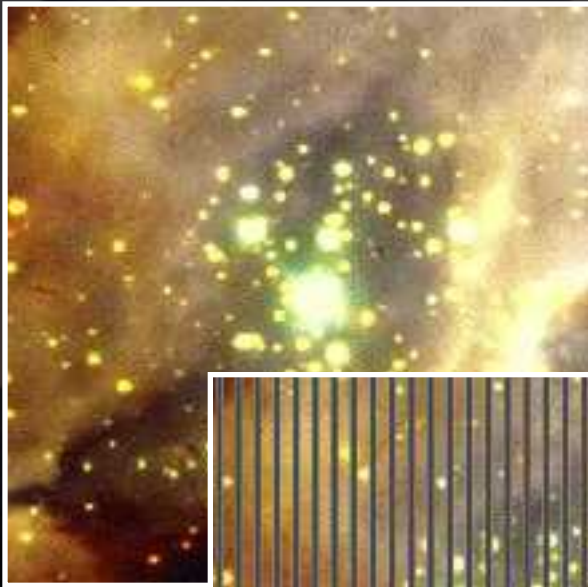
Intensité observée

$$= \text{Re} \left[ \exp 2 j \frac{\vec{B} \cdot \vec{x}}{z} I(\vec{\alpha}) \exp - 2 j \frac{\vec{B} \cdot \vec{x}}{z} - d \right]$$

Terme cosinus instrumental

Transformée de Fourier 2D de la l'intensité de la source intensity à une fréquence angulaire  $B/\lambda$  (**fonction de visibilité**)

# THÉORÈME DE VAN CITTERT – ZERNIKE



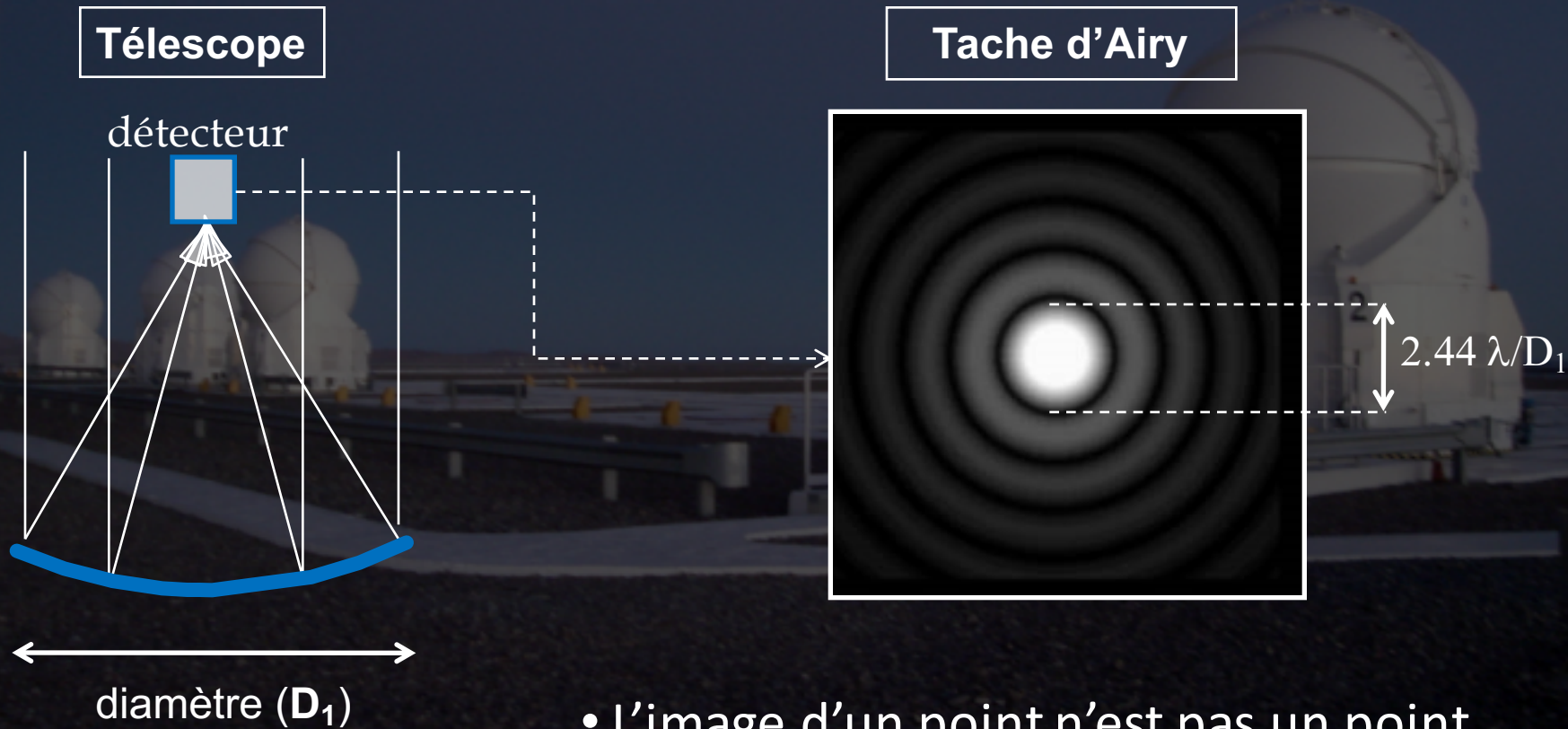
- Un interféromètre projette des franges sur la distribution d'intensité de la source
- L'amplitude des franges donnent des informations sur la structure de la source à une échelle donnée
- La phase des franges est déterminée par la position des franges

# APERCU

- C'est quoi l'interférométrie?
- L'interférométrie en astronomie
  - Bref historique
  - Les instruments actuels
  - Principaux résultats (non exhaustif)
  - Futurs instruments
  - Perspectives à longs termes

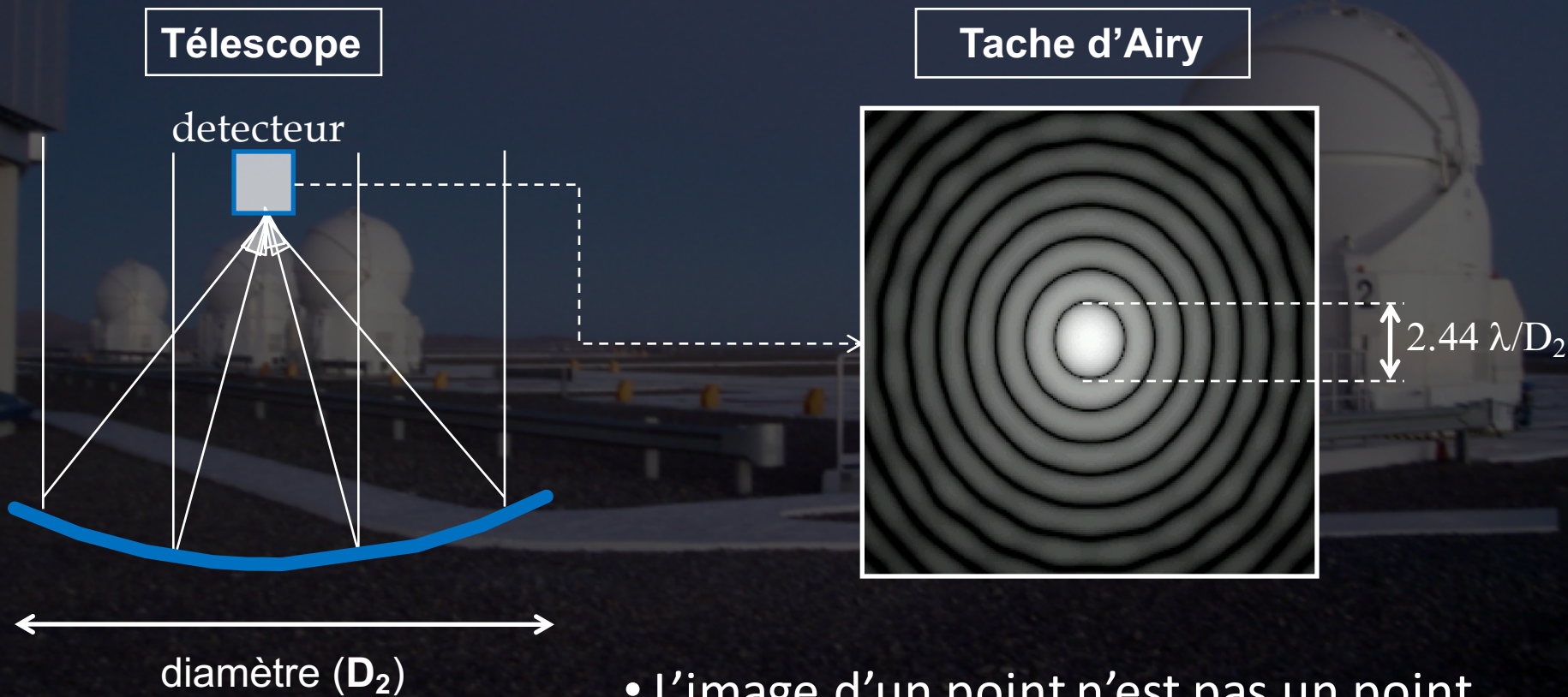


# LIMITATION DES TELESCOPES



- L'image d'un point n'est pas un point
- Besoin de grands télescopes!

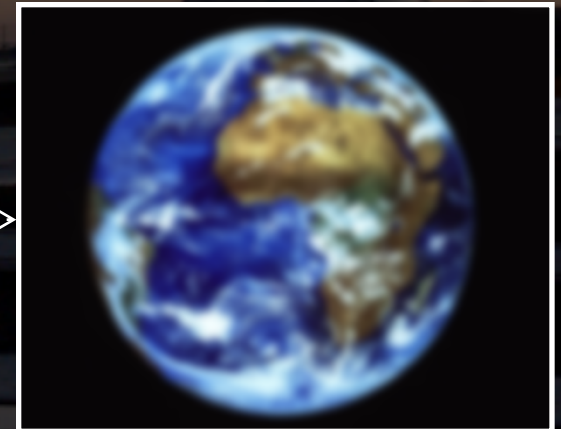
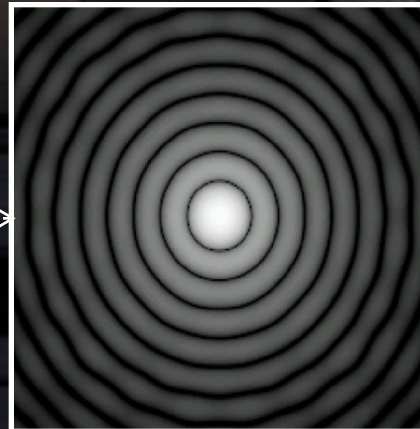
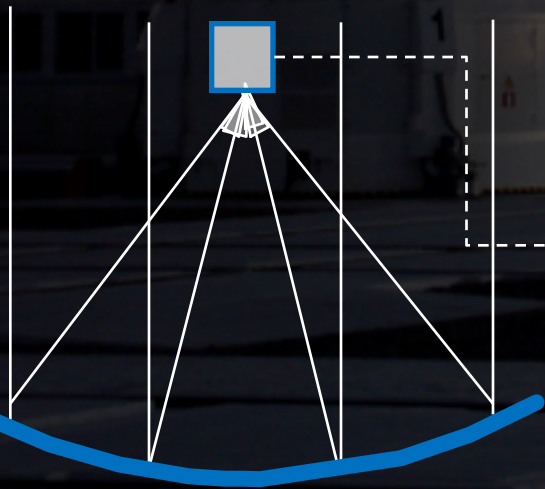
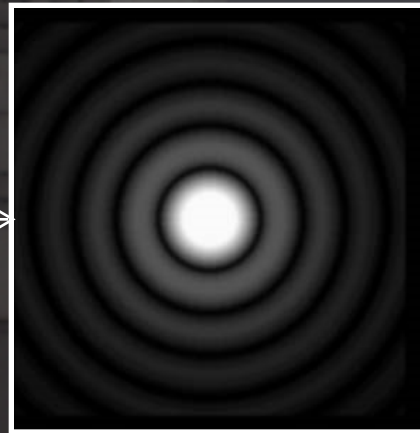
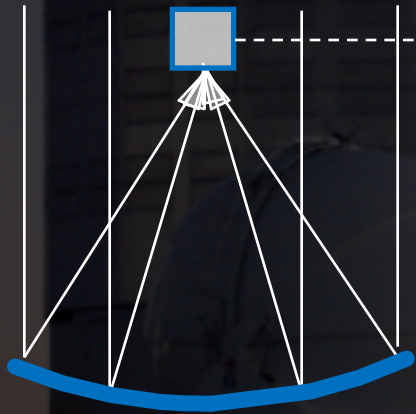
# LIMITATION DES TELESCOPES



- L'image d'un point n'est pas un point
- Besoin de grands télescopes!



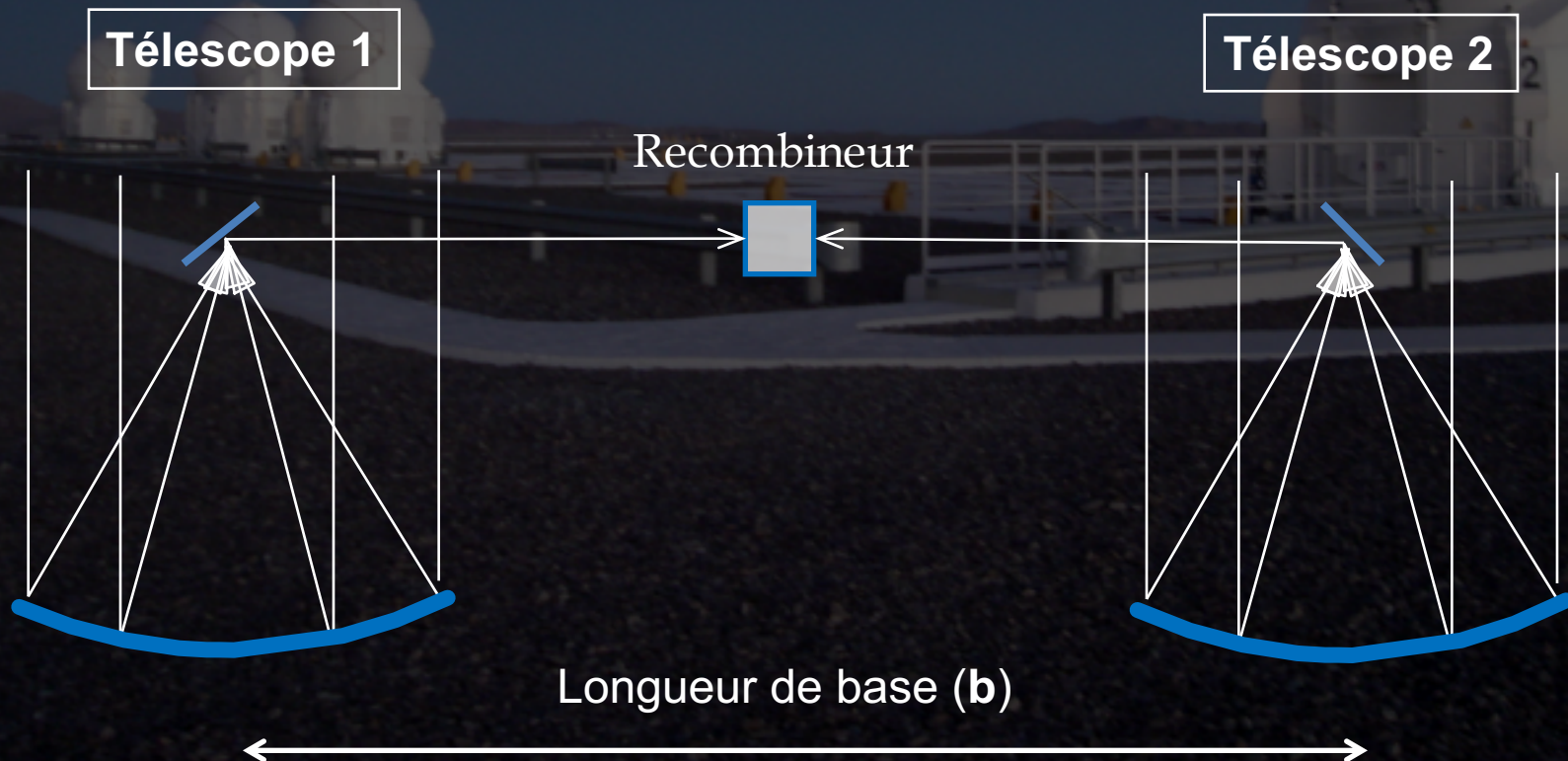
# LIMITATION DES TELESCOPES





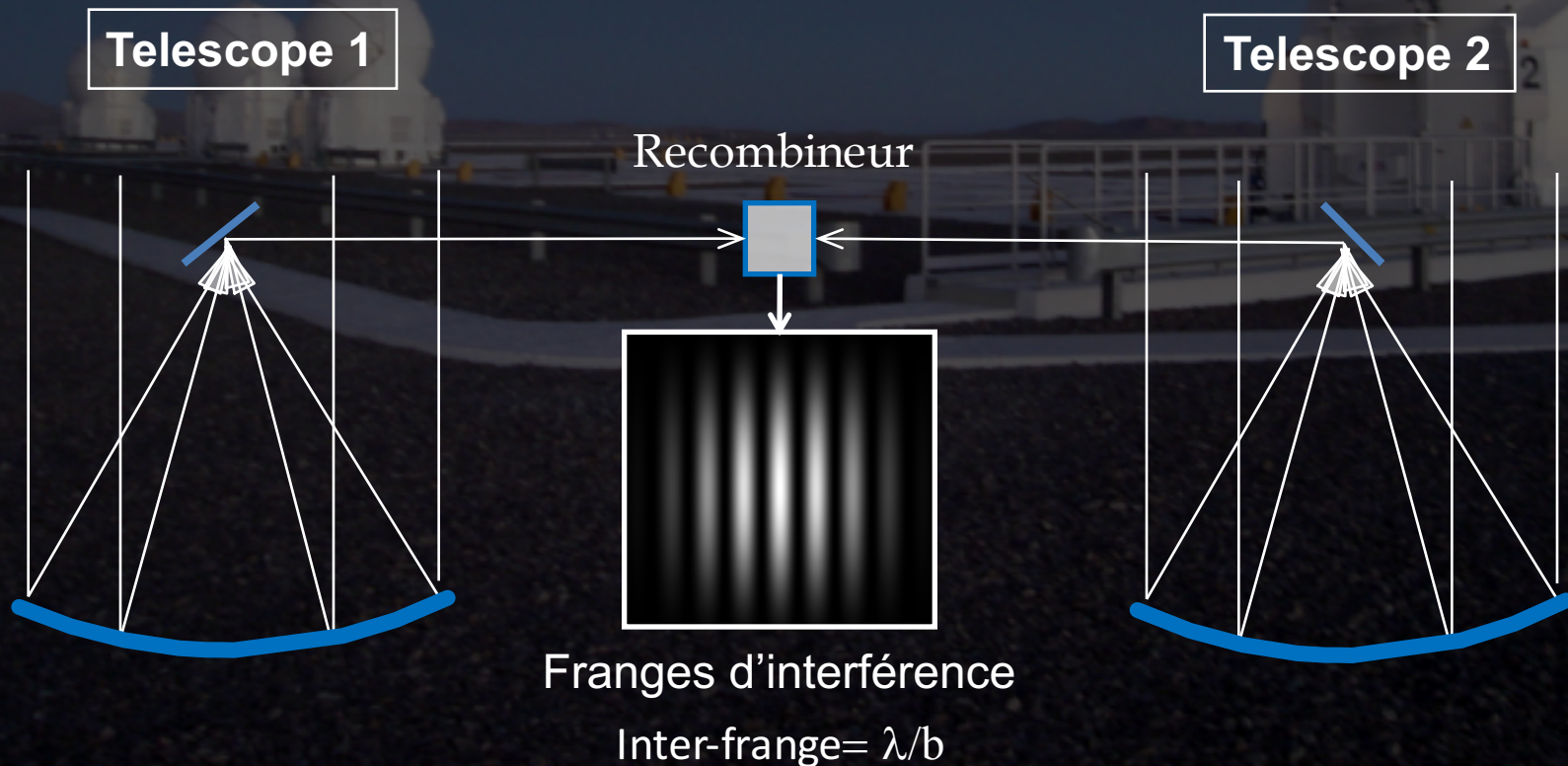
# PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

- H. Fizeau et E. Stephan (1868-1870):  
“In terms of angular resolution, two small apertures distant of  $D$  are equivalent to a single large aperture of diameter  $D$ ”

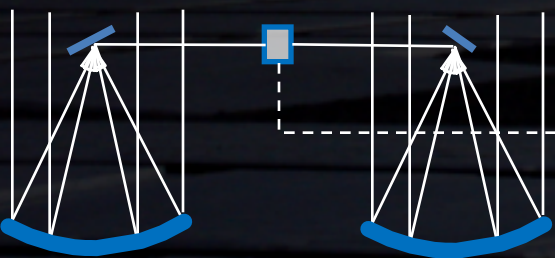
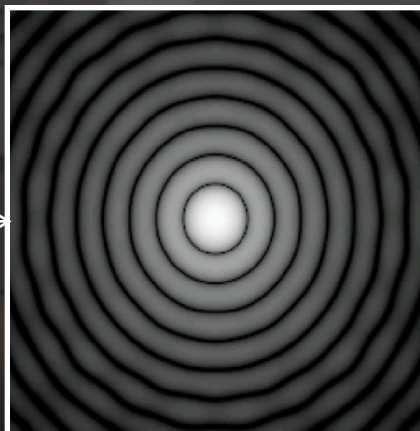
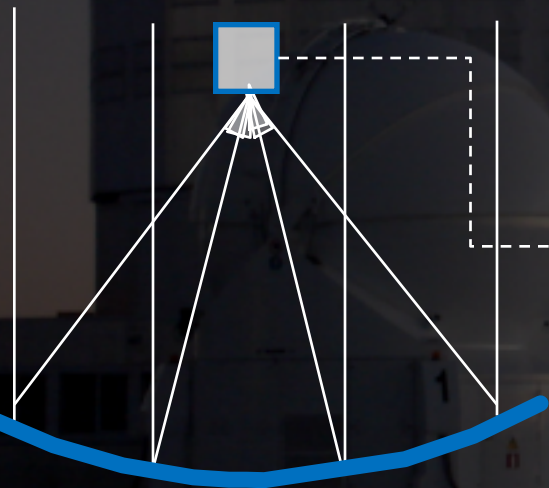
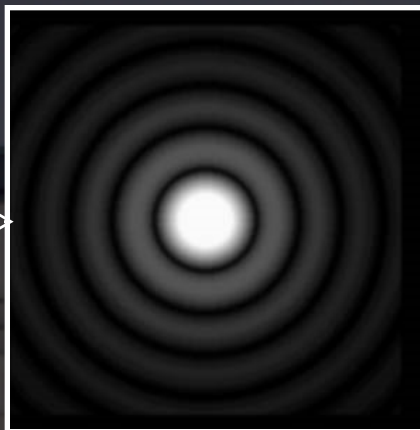
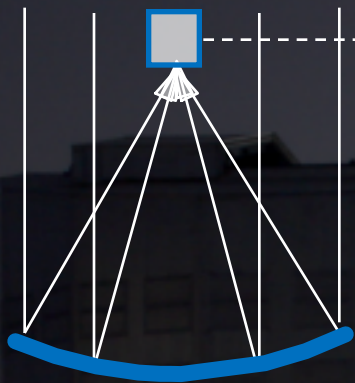


# PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

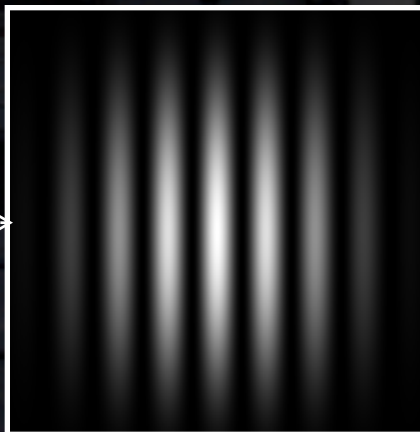
- H. Fizeau et E. Stephan (1868-1870):  
“In terms of angular resolution, two small apertures distant of  $D$  are equivalent to a single large aperture of diameter  $D$ ”





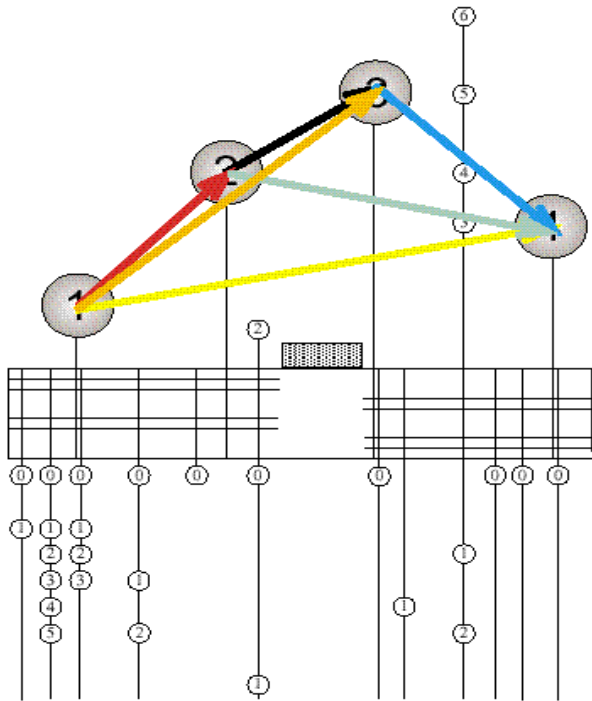


$b > D$

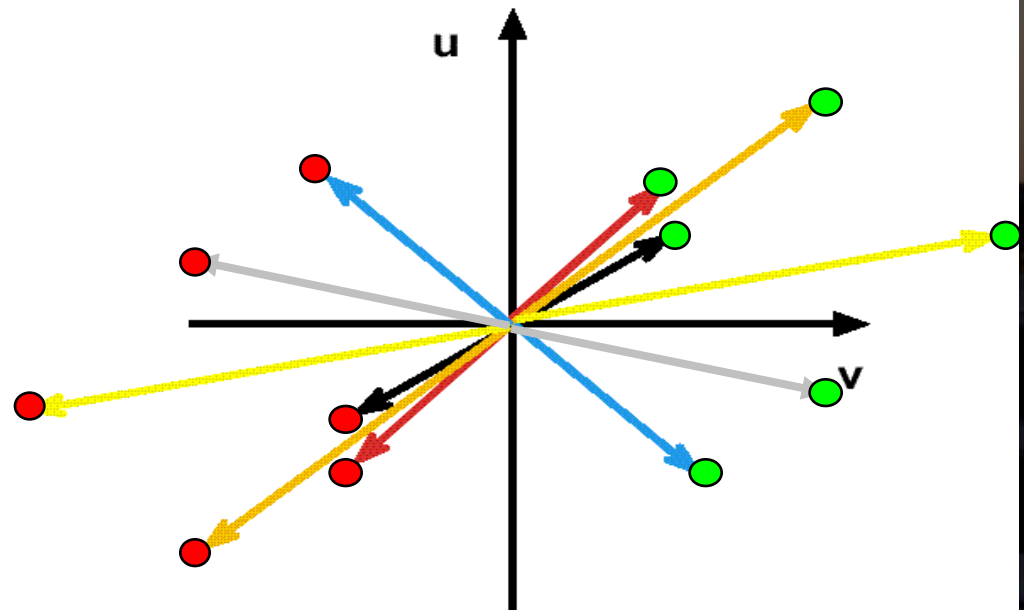


# PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

- Cependant, un interféromètre ne donne pas accès à toutes les fréquences spatiales. La couverture du “plan  $u,v$ ” est limitée.
- But: reconstruction d'images



This is the  $uv$ -plane:

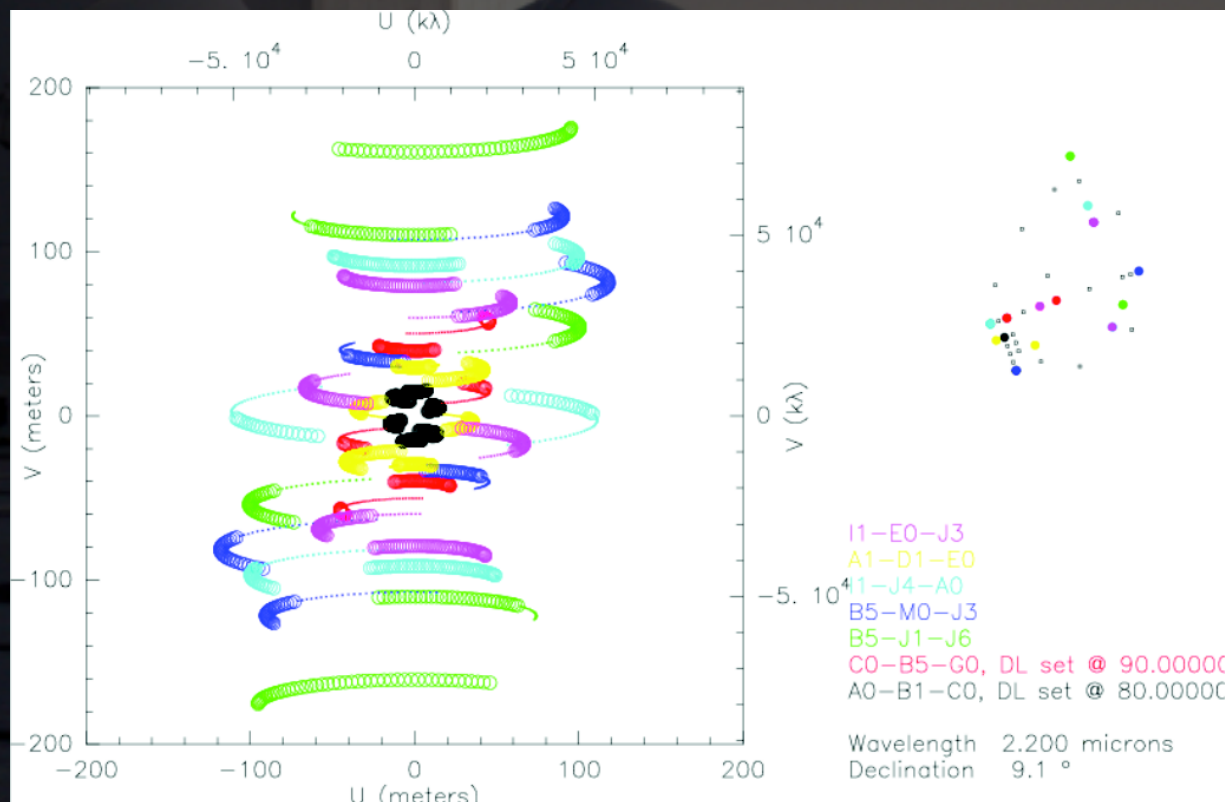


Note: This is the  $uv$ -plane for an object at zenith. In general, the projected baselines have to be used.



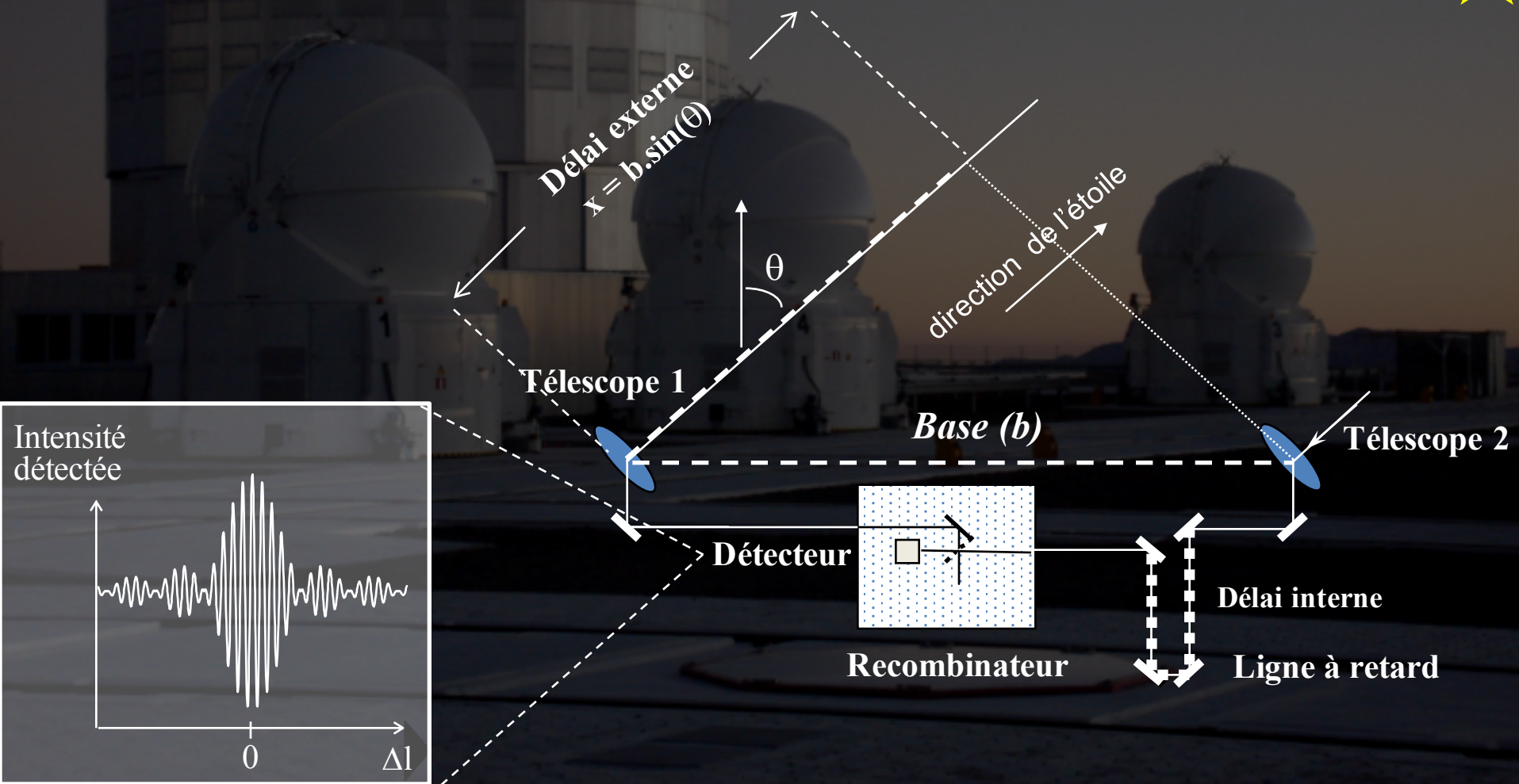
# PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

- Cependant, un interféromètre ne donne pas accès à toutes les fréquences spatiales. La couverture du “plan  $u,v$ ” est limitée.
- But: reconstruction d'images



# PRINCIPE D'UN INTERFÉROMÈTRE

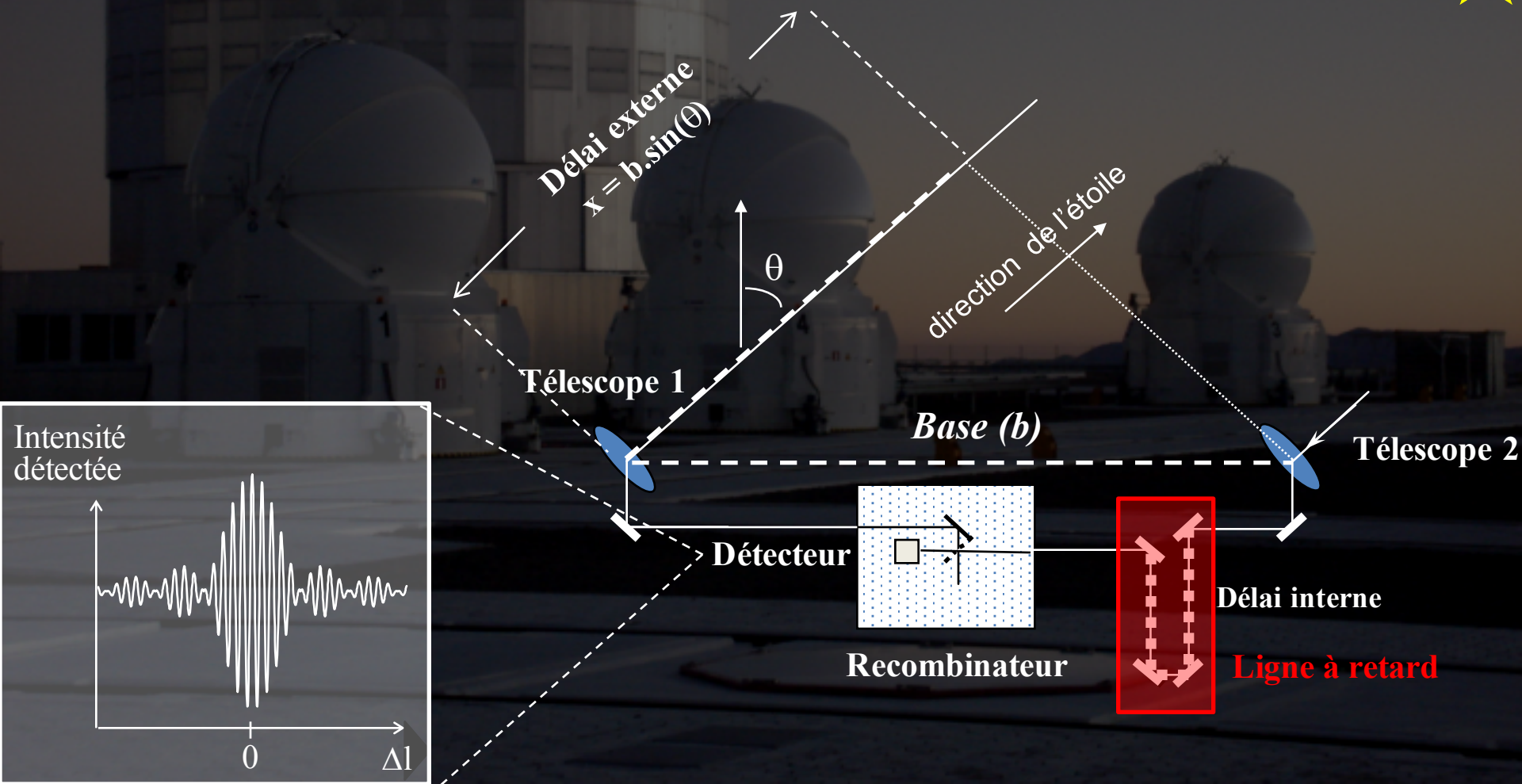
- Besoin d'une ligne à retard pour compenser le délai externe





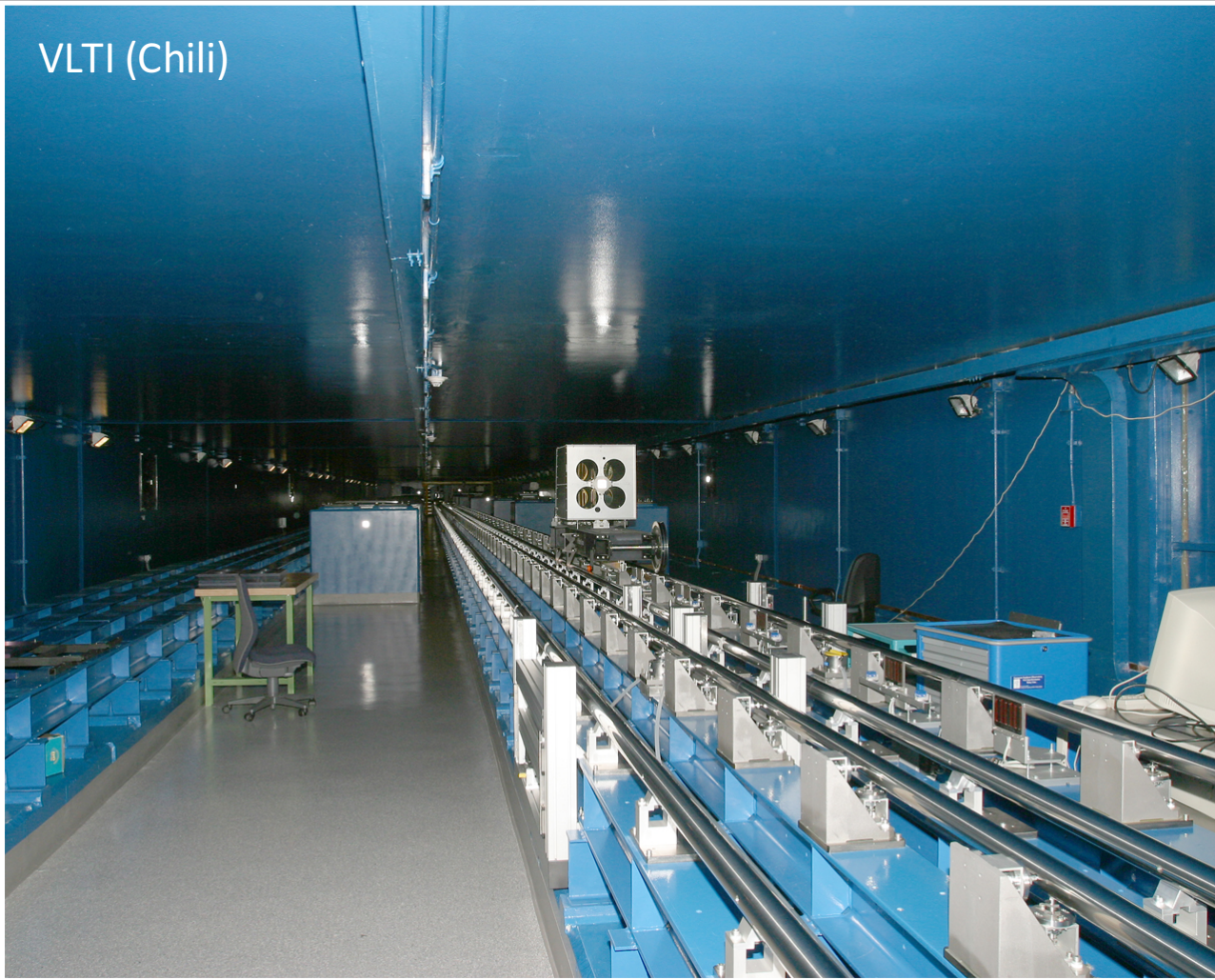
# PRINCIPE D'UN INTERFÉROMÈTRE

- Besoin d'une ligne à retard pour compenser le délai externe



# LIGNE À RETARD

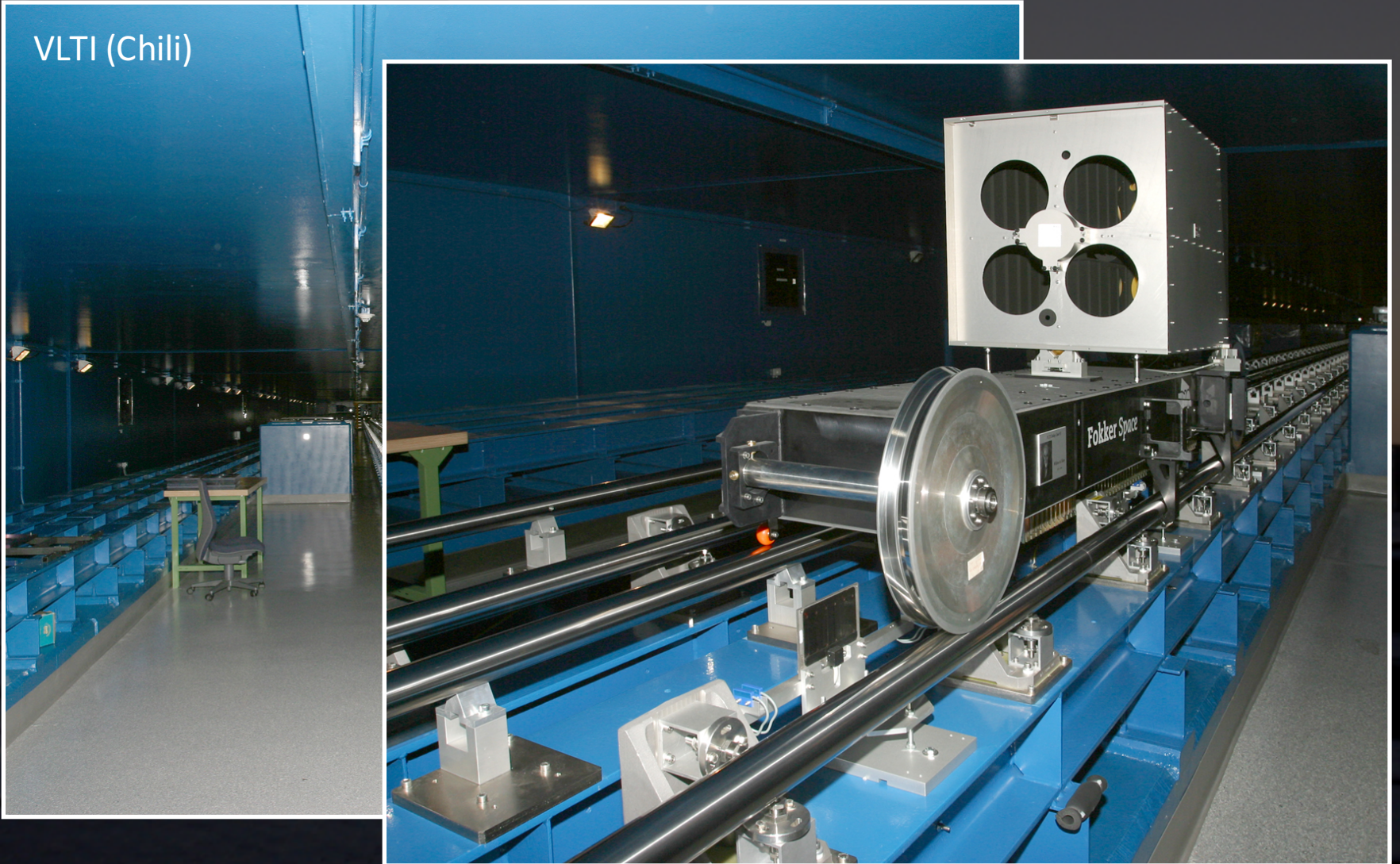
VLT (Chili)





# LIGNE À RETARD

VLT (Chili)





# LIGNE À RETARD

CHARA (USA)

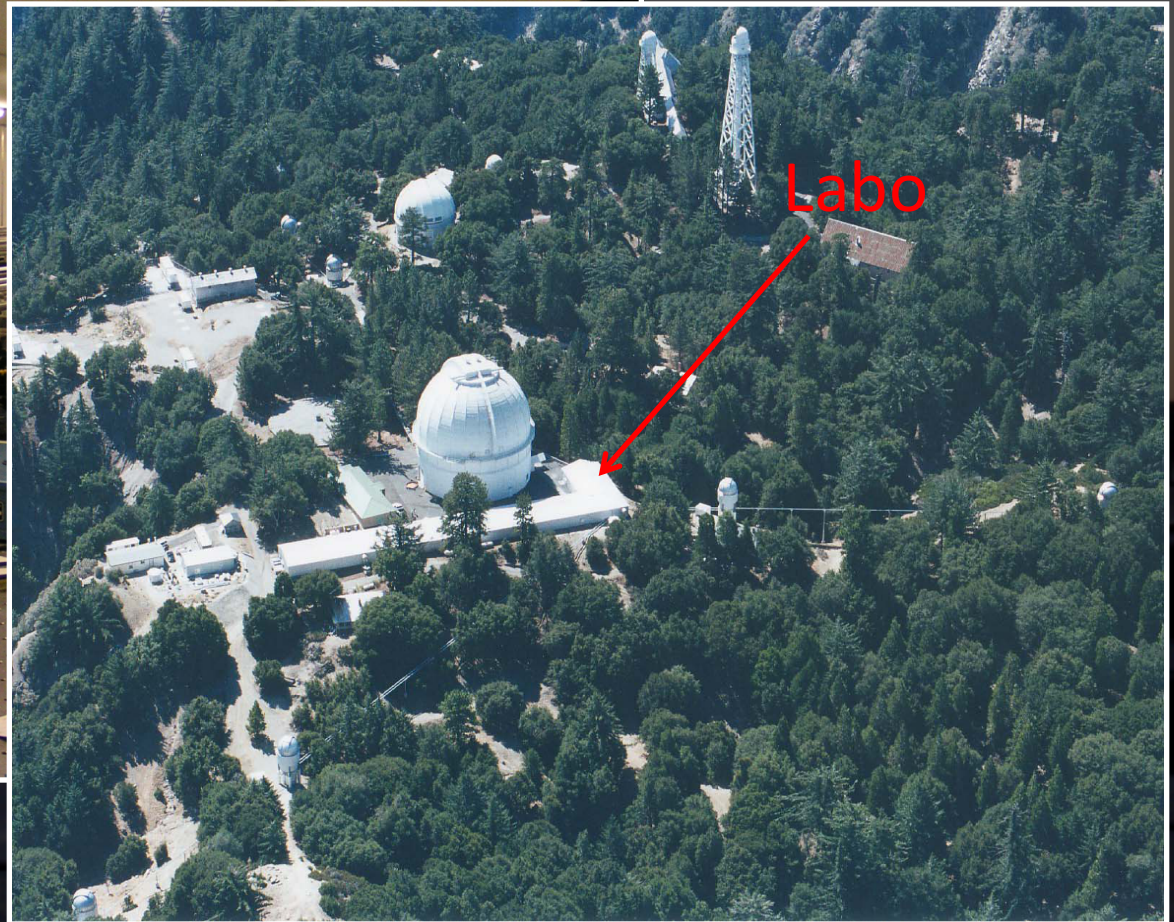
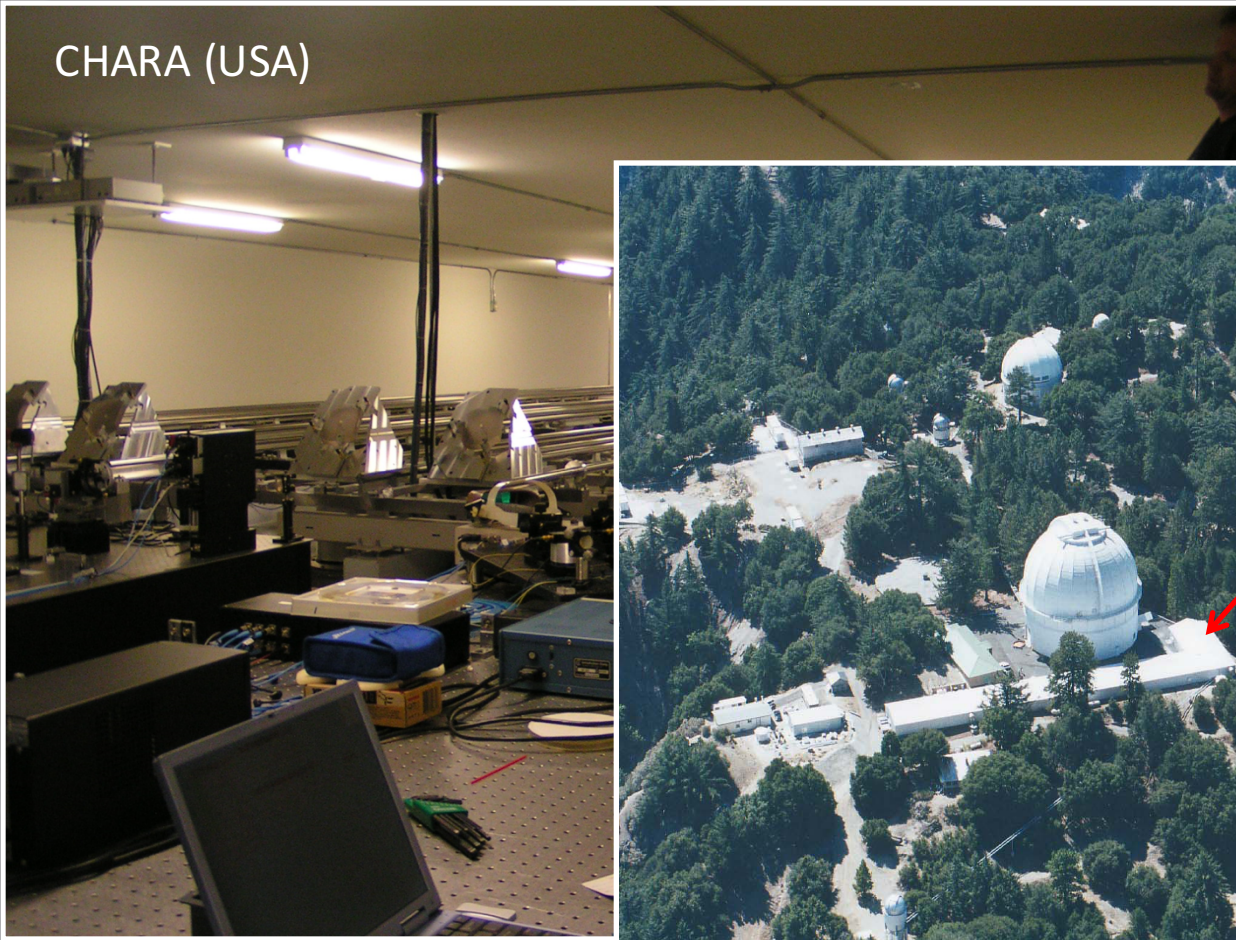


2009.04.01



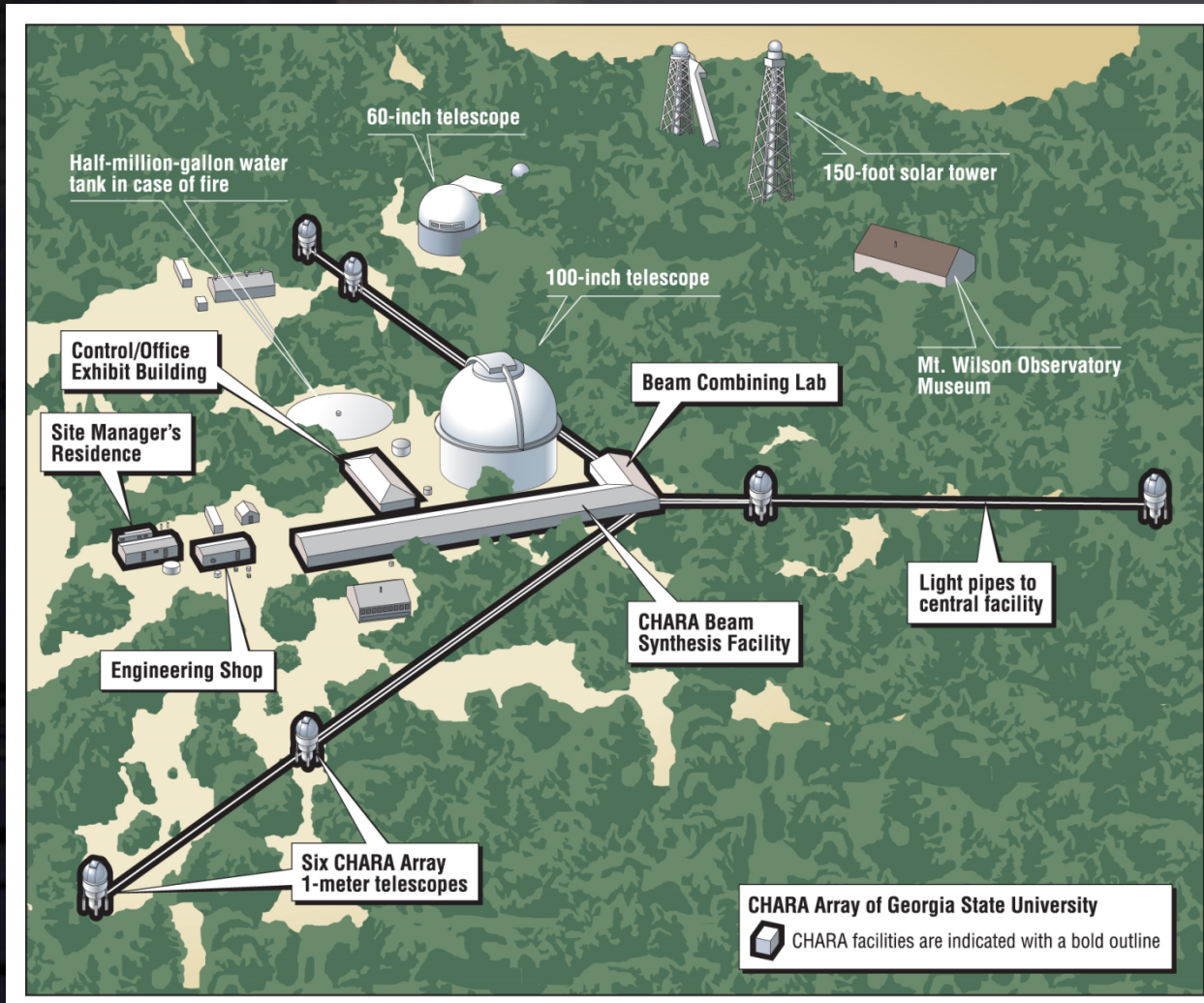
# LIGNE À RETARD

CHARA (USA)



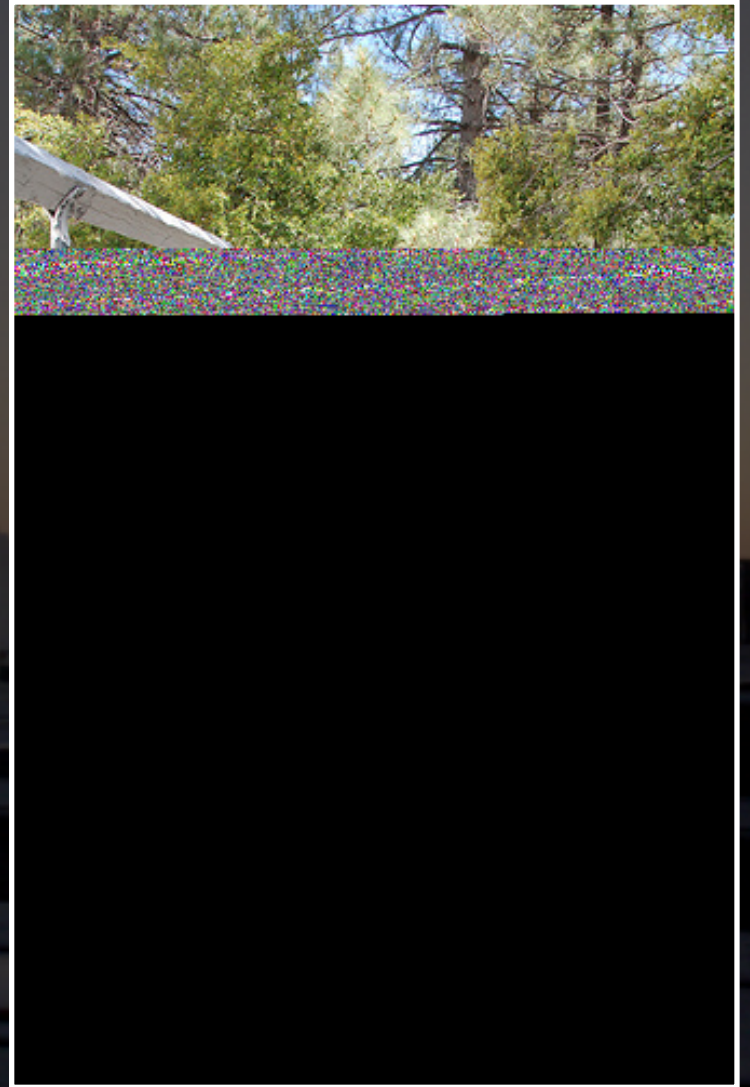


# COMBINAISON DES TELESCOPES





# COMBINAISON DES TELESCOPES

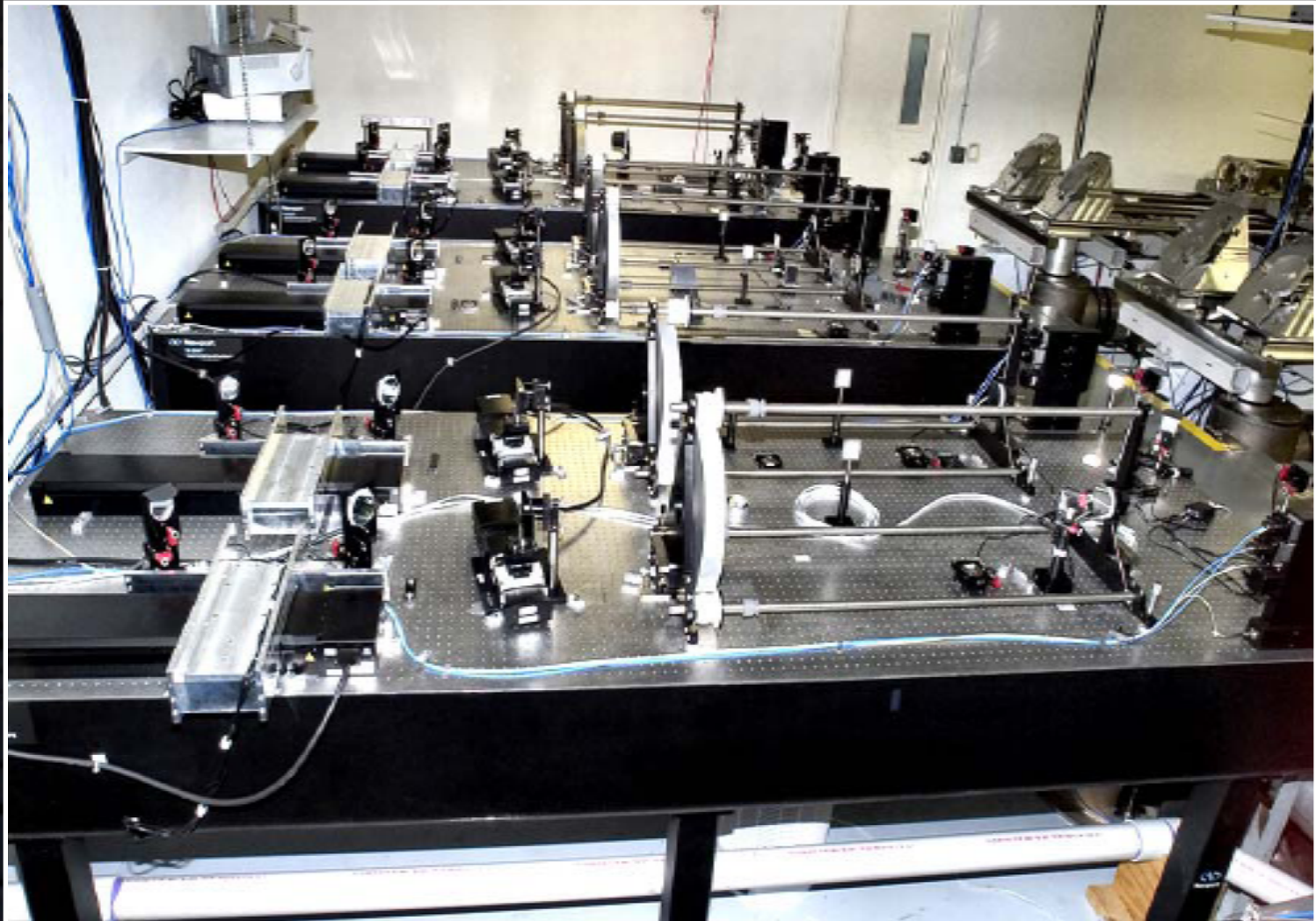


# COMBINAISON DES TELESCOPES



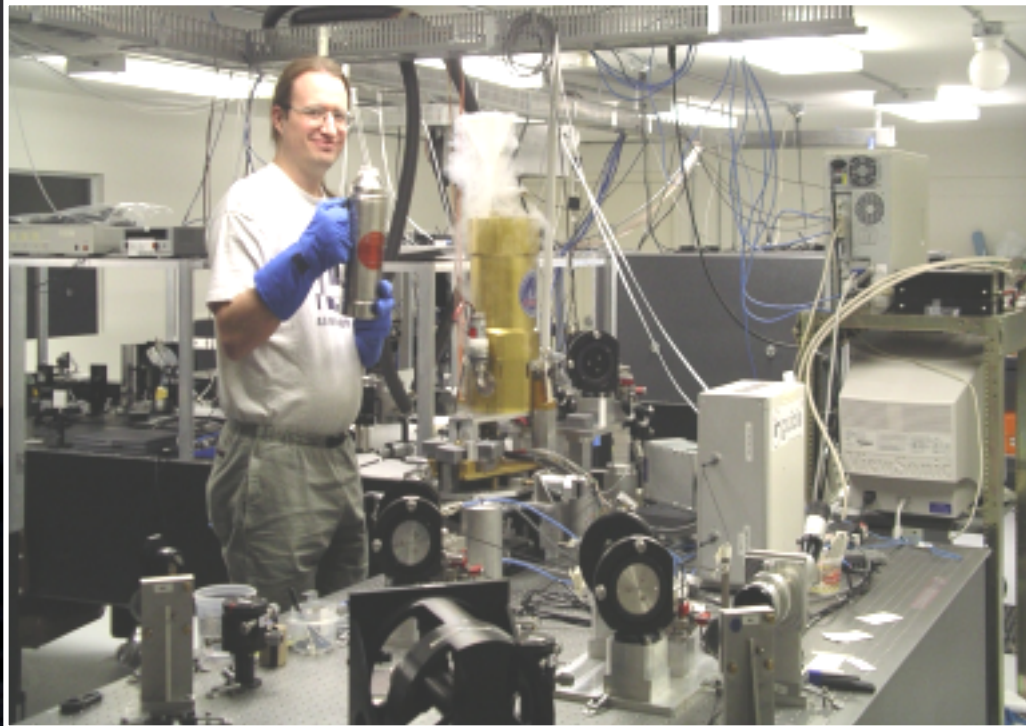


# COMBINAISON DES TELESCOPES



# BANC DE RECOMBINAISON

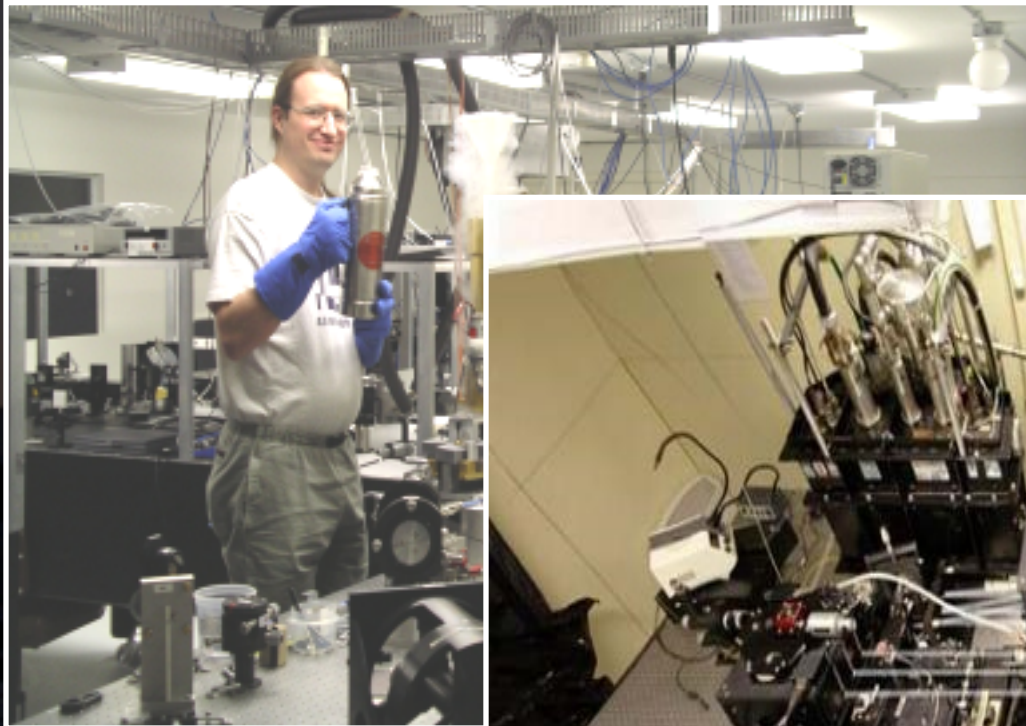
FLUOR@CHARA





# BANC DE RECOMBINAISON

FLUOR@CHARA

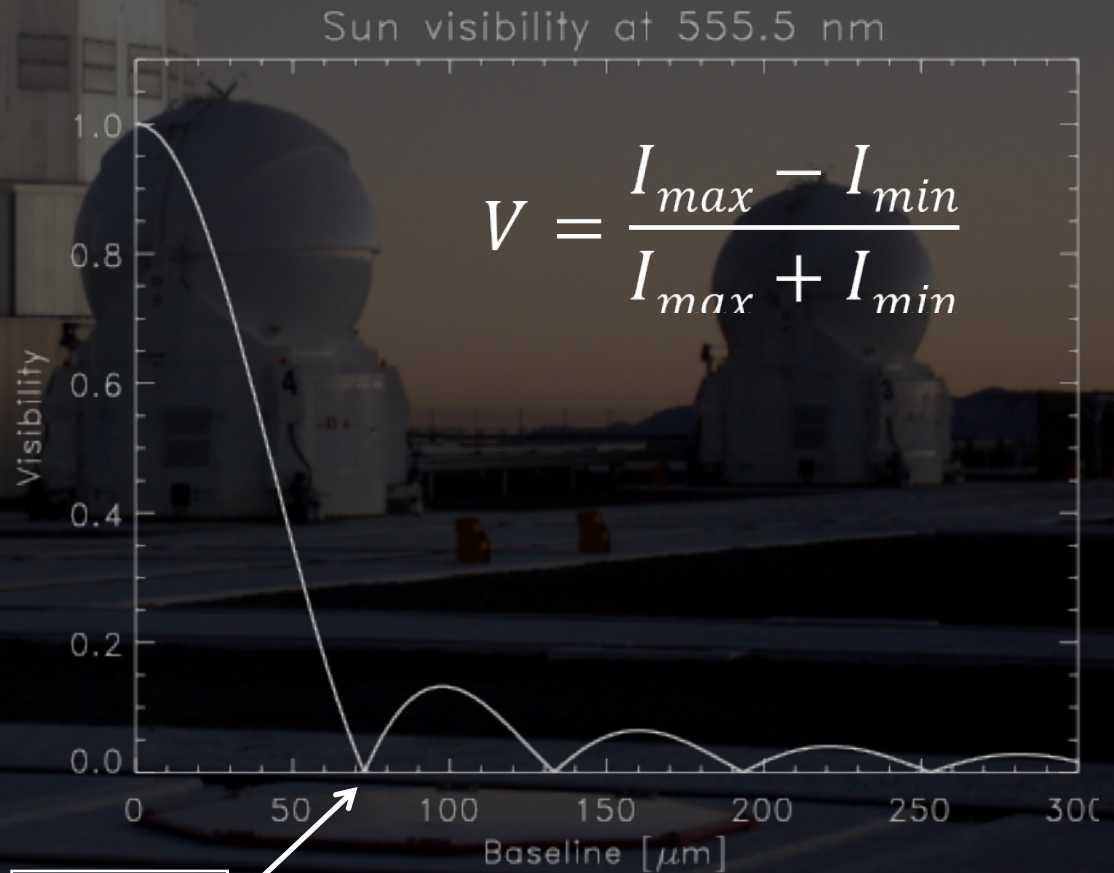
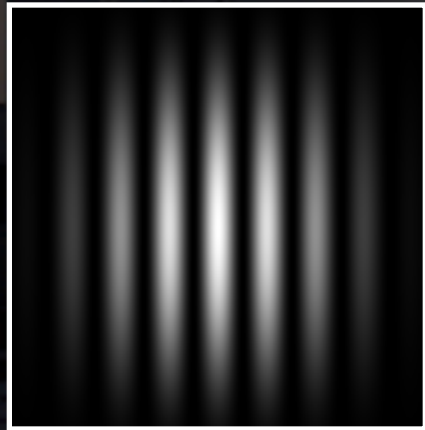


AMBER@VLT1



# UNE EXPÉRIENCE SIMPLE

- Observer le Soleil avec des micro-interféromètres



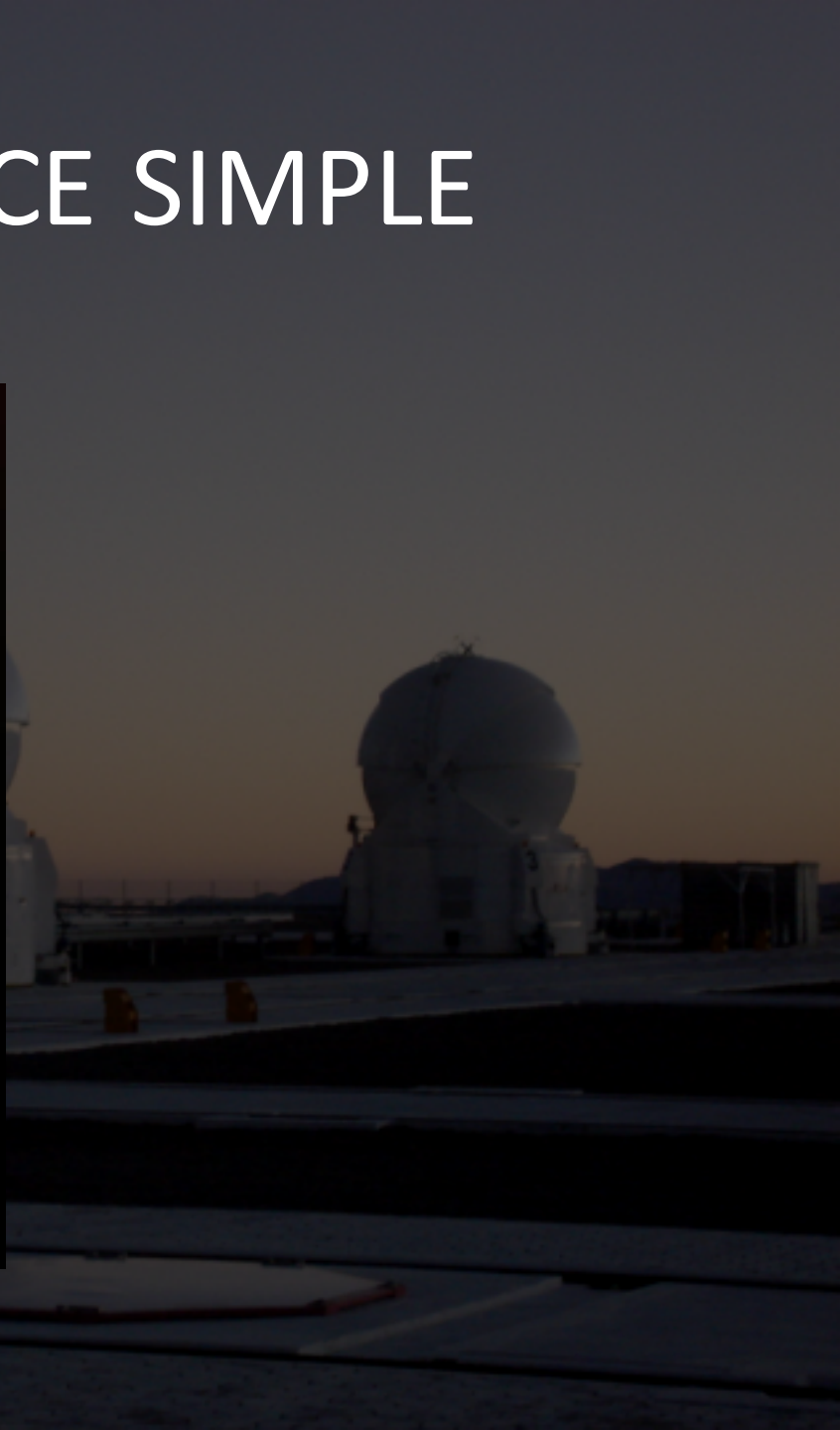
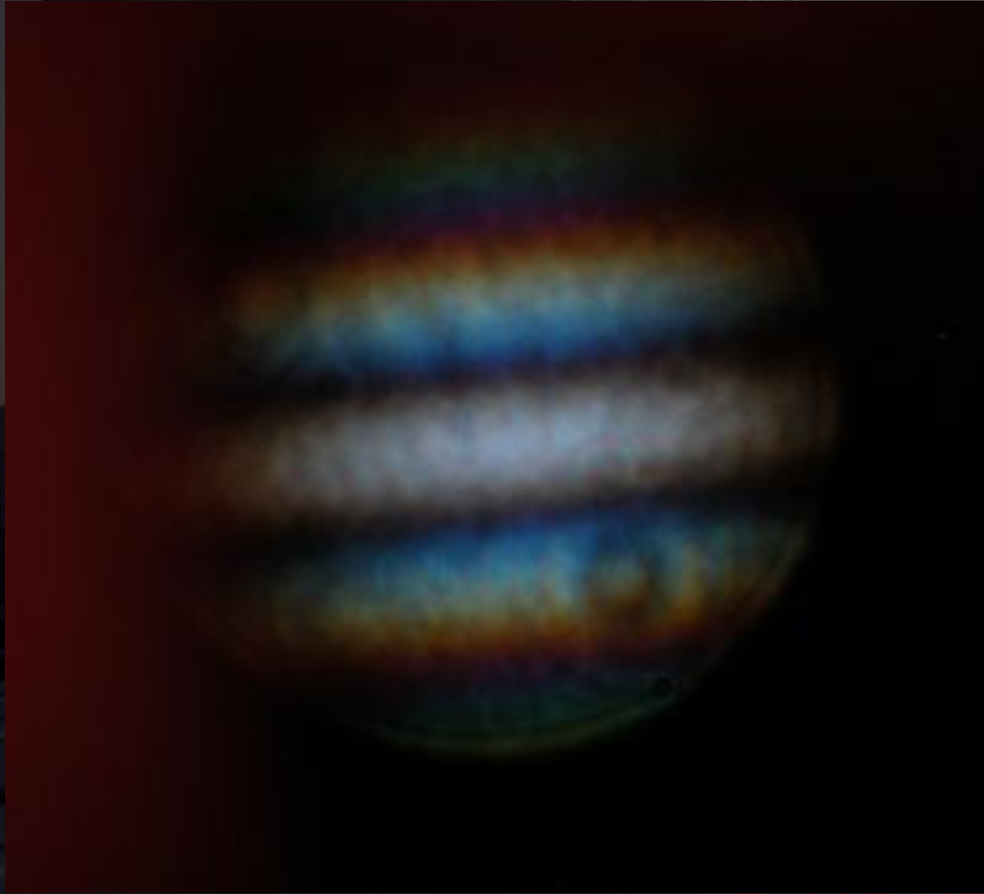
$$\alpha = \lambda/2B$$



# UNE EXPÉRIENCE SIMPLE

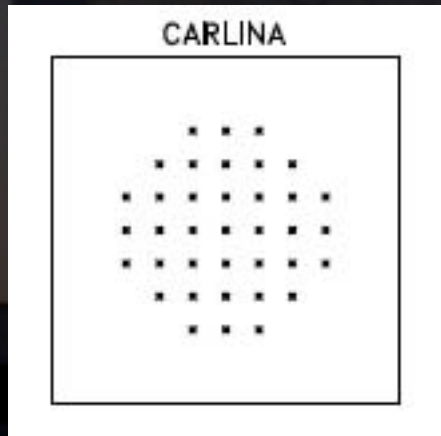


# UNE EXPÉRIENCE SIMPLE



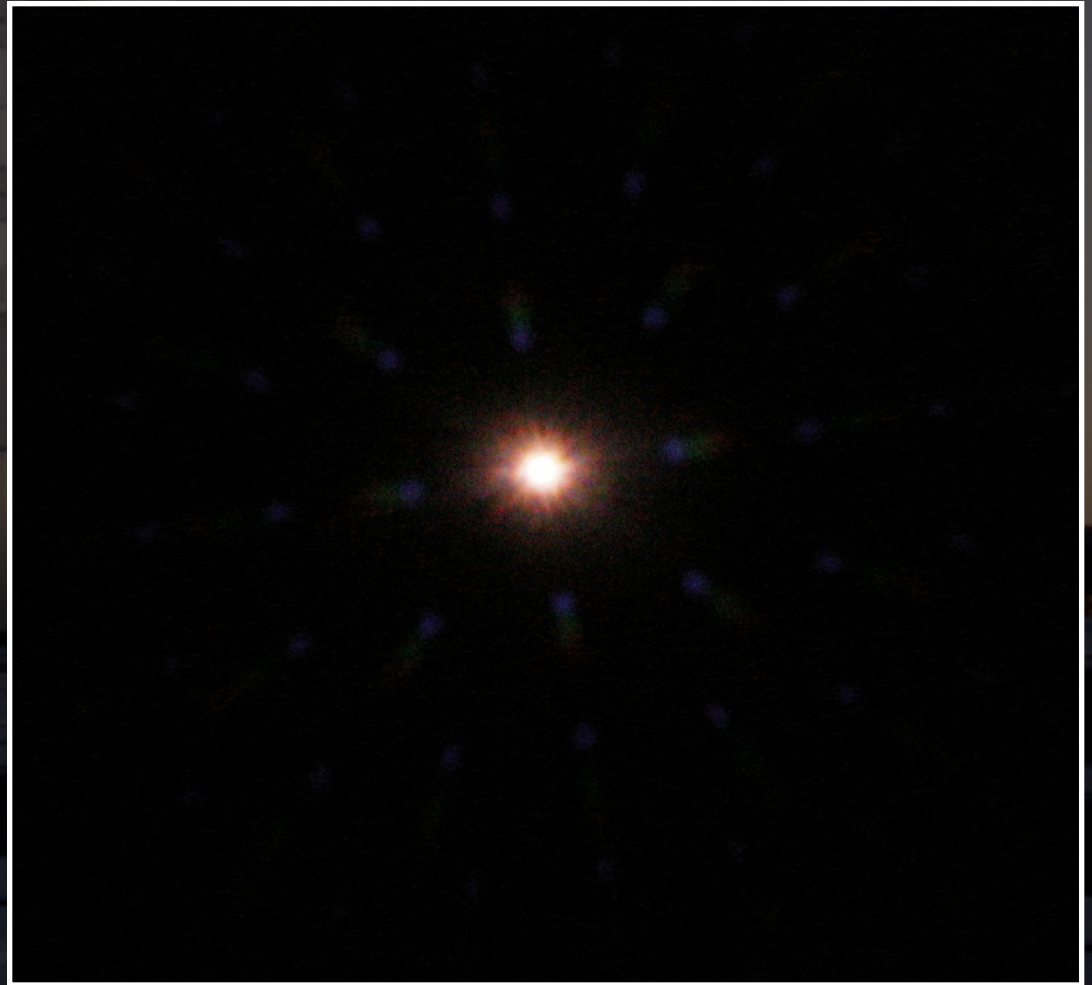


# UNE EXPÉRIENCE SIMPLE

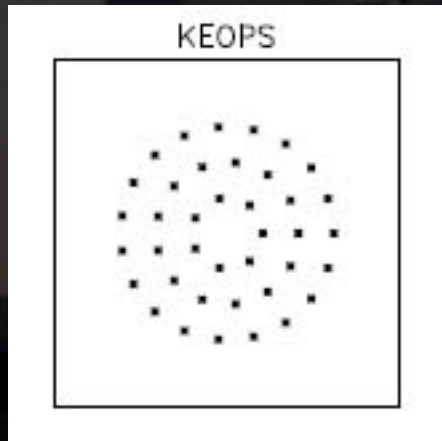


↔  $50\mu$

.  $14\mu$



# UNE EXPÉRIENCE SIMPLE



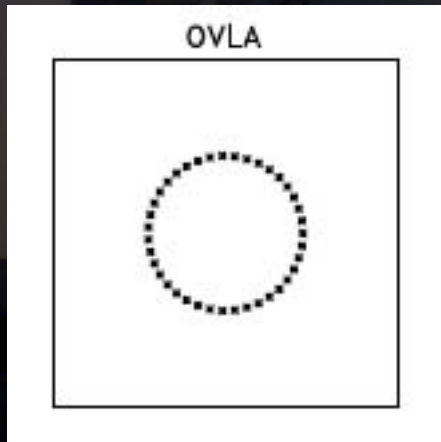
↔  $50\mu$

•  $14\mu$



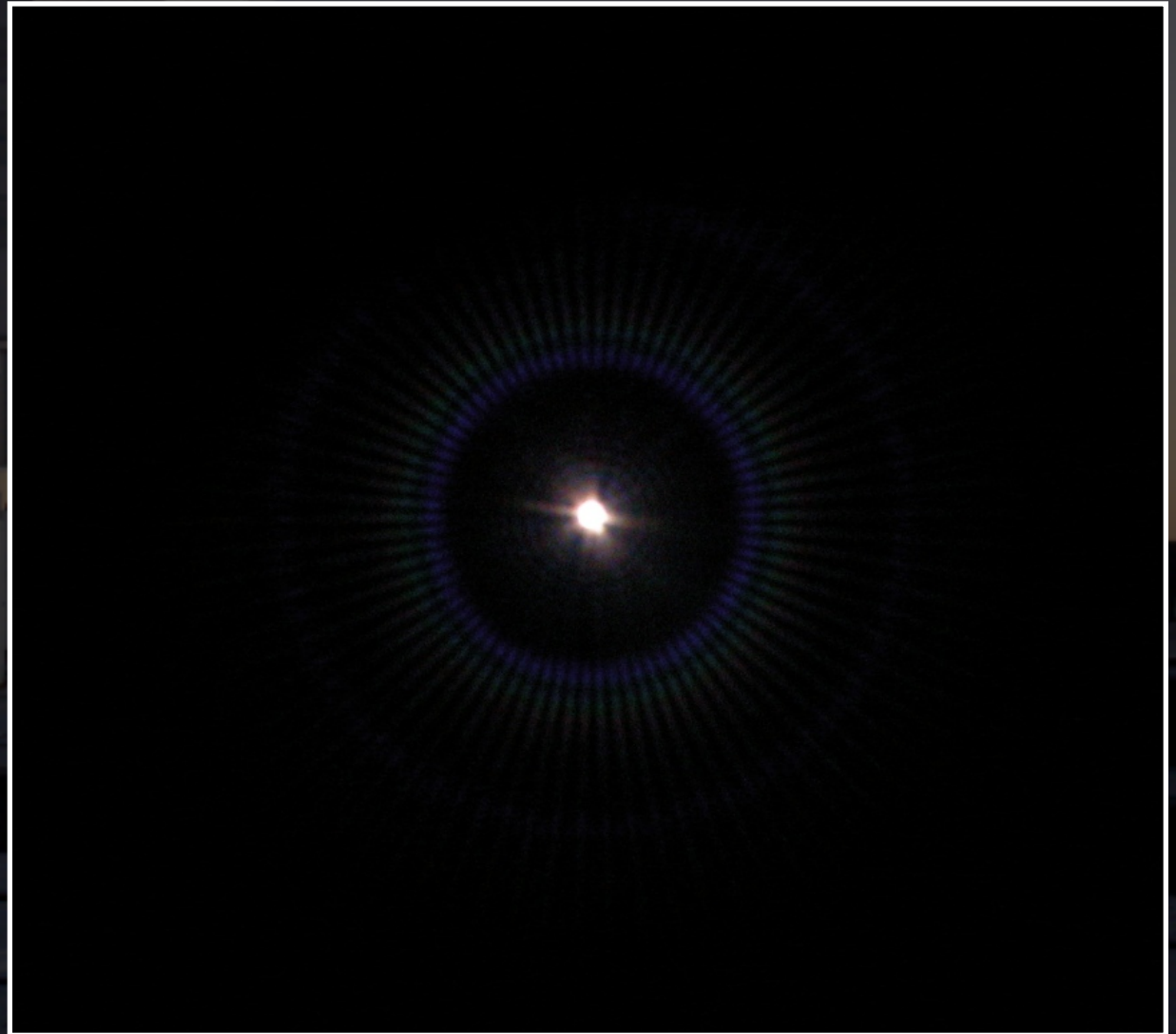


# UNE EXPÉRIENCE SIMPLE

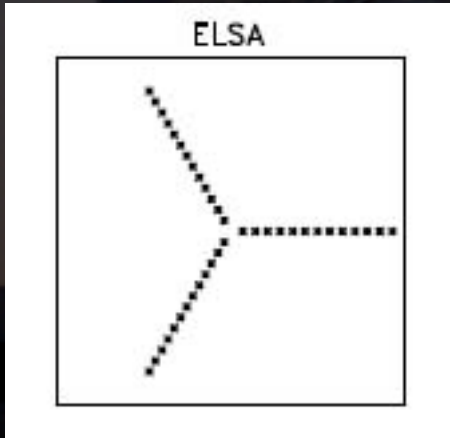


↔  $50\mu$

•  $14\mu$



# UNE EXPÉRIENCE SIMPLE



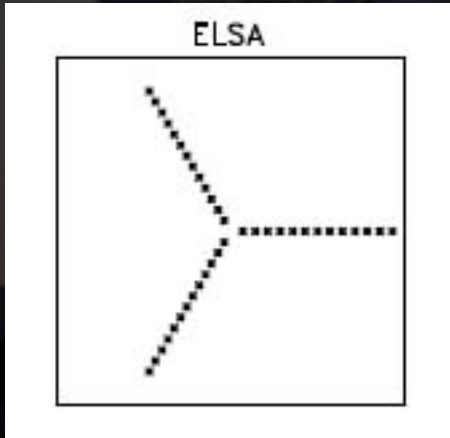
↔  $50\mu$

•  $14\mu$





# UNE EXPÉRIENCE SIMPLE



↔  $50\mu$

•  $14\mu$



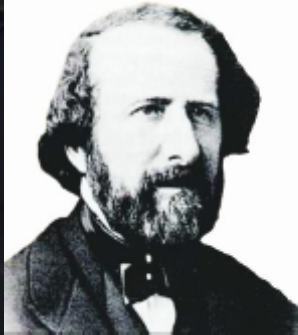
# APERCU

- C'est quoi l'interférométrie?
- L'interférométrie en astronomie
  - **Bref historique**
  - Les instruments actuels
  - Principaux résultats (non exhaustif)
  - Futurs instruments
  - Perspectives à longs termes



# BREF HISTORIQUE

- 1868 – Fizeau suggéra la possibilité de l'interférométrie stellaire



## PRIX BORDIN.

QUESTION PROPOSÉE EN 1865 POUR 1867.

(Commissaires : MM. Duhamel, Pouillet, Regnault, Bertrand, Edmond Becquerel, Fizeau rapporteur.)

Rapport sur le Concours de l'année 1867.

« Le prix sera décerné au savant qui aura exécuté ou proposé une expérience  
» décisive permettant de trancher définitivement la question déjà plusieurs fois  
» étudiée de la direction des vibrations de l'éther dans les rayons polarisés. »

Il existe en effet pour la plupart des phénomènes d'interférence, tels que les franges d'Yung, celles des miroirs de Fresnel et celles qui donnent lieu à la scintillation des étoiles d'après Arago, une relation remarquable et nécessaire entre la dimension des franges et celle de la source lumineuse, en sorte que des franges d'une ténuité extrême ne peuvent prendre naissance que lorsque la source de lumière n'a plus que des dimensions angulaires presque insensibles; d'où, pour le dire en passant, il est peut-être permis d'espérer qu'en s'appuyant sur ce principe et en formant par exemple, au moyen de deux larges fentes très-écartées, des franges d'interférence au foyer des grands instruments destinés à observer les étoiles, il deviendra possible d'obtenir quelques données nouvelles sur les diamètres angulaires de ces astres.

# BREF HISTORIQUE

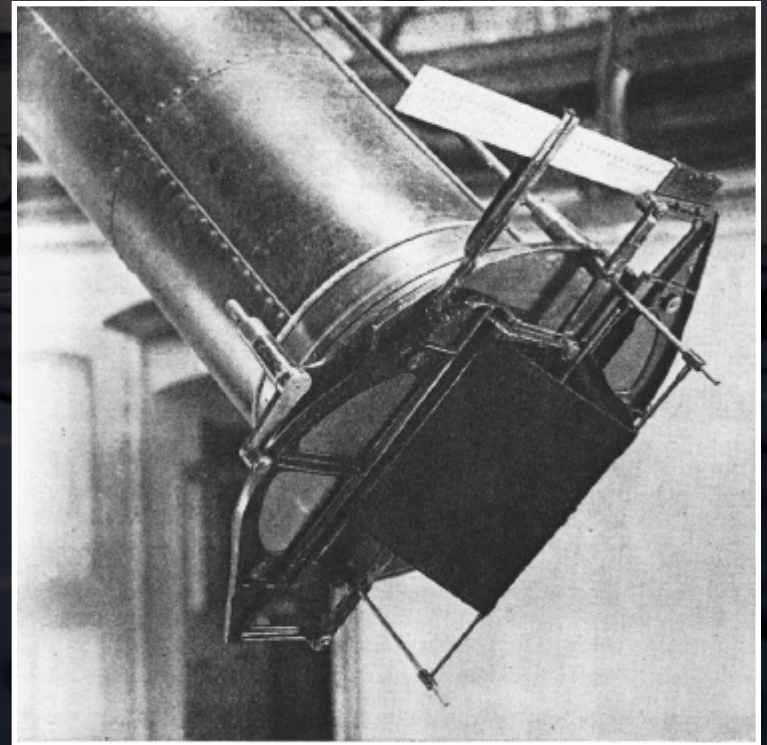
- 1874 - Stephan utilisa le réfracteur de Foucault à l'observatoire de Marseille pour observer des étoiles.
- La plupart des étoiles ont un diamètre angulaire plus petit que 0.158''





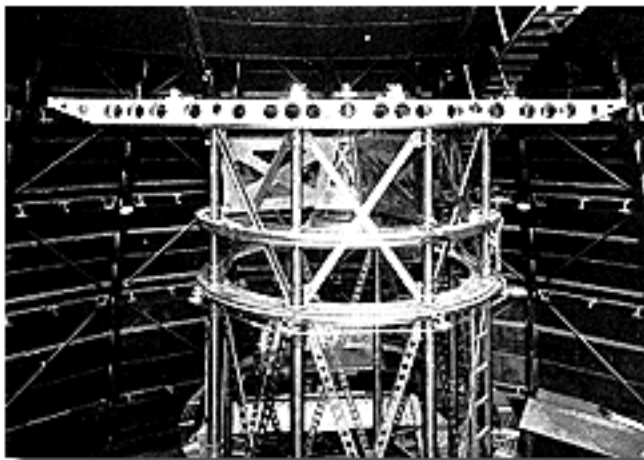
# BREF HISTORIQUE

- 1890 – Michelson décrit les bases mathématiques de l'interférométrie stellaire et proposa une approche à l'interférométrie à longue base.
- 1891 – Michelson mesura le diamètre angulaire des satellites de Jupiter.
- 30 ans passèrent...

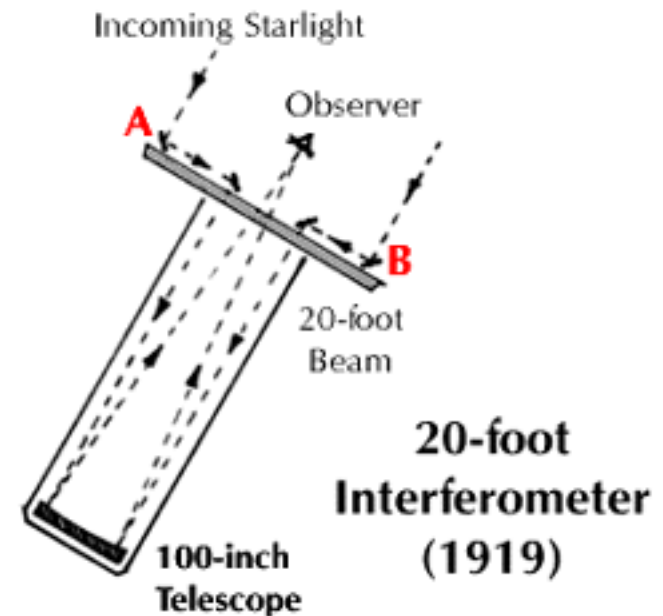


# BREF HISTORIQUE

- 1921 – Michelson mesura le diamètre angulaire de plusieurs étoiles



The 20-foot beam on top of the 100-inch Hooker Telescope on Mt. Wilson in Southern California.



Small mirrors on the 20-foot beam directed light into the telescope. The effective diameter of the telescope has now become the distance between mirror **A** and **B**.

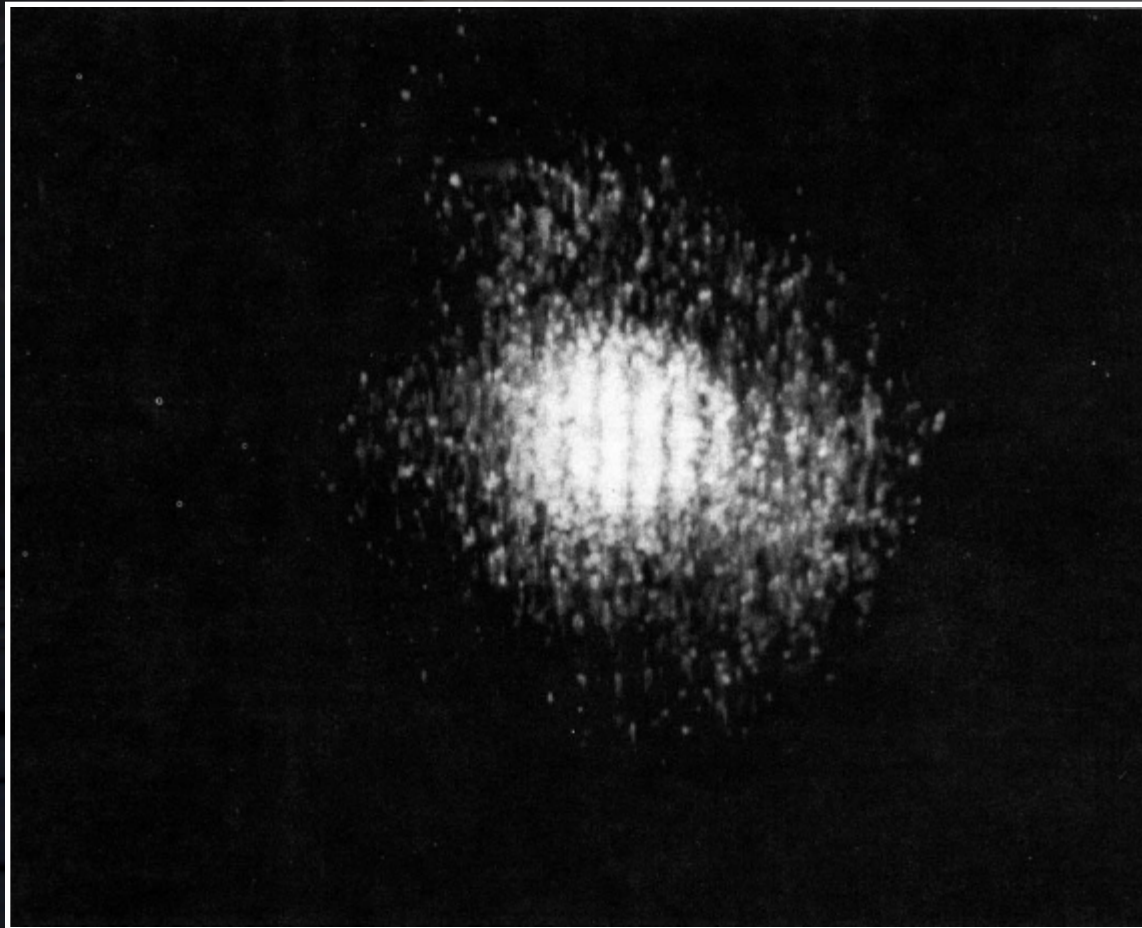


# BREF HISTORIQUE

- 1932 – Naissance de la radio astronomie
  - Génération d'ingénieurs « radar » suite à la 2<sup>e</sup> guerre mondiale
  - Développement de la radio astronomie dans les années 50
- 1956 – Nouveau type d'interféromètre (en intensité, Hanbury Brown)
  - Mesure du diamètre angulaire de Sirius (1956)
  - Construction d'un interféromètre en intensité en Australie (1961)
- 1960 - Utilisation de la Terre pour faire de la synthèse d'ouverture
- 1974 – Première franges détectées à partir de télescopes séparés (Labeyrie, I2T)
- Construction d'une série d'interféromètres dans les années 80 et 90

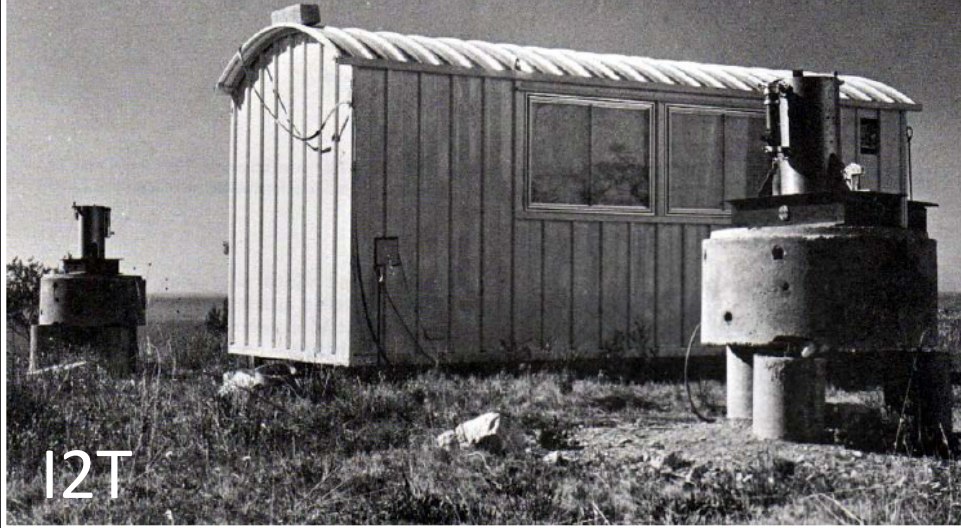
# BREF HISTORIQUE

- Premières franges avec l'I2T





Antoine Labeyrie, "Interference fringes obtained on Vega with two optical telescopes," *Astrophys. J.* L71-L75 (1975)





# APERCU

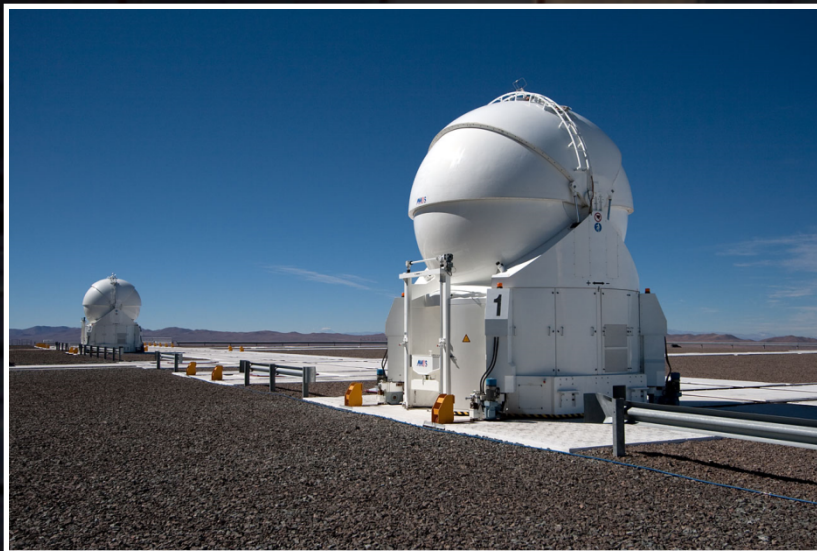
- C'est quoi l'interférométrie?
- L'interférométrie en astronomie
  - Bref historique
  - **Les instruments actuels**
  - Principaux résultats (non exhaustif)
  - Futurs instruments
  - Perspectives à longs termes



# UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'INSTRUMENTS

## 1. VLT (Cerro Paranal, Chili)

- 4 télescopes de 8m + 4 télescopes de 1.8m
- Premières franges 2001
- Plusieurs instruments (AMBER, MIDI, FINITO, PRIMA)



The VLT Array on the Paranal Mountain

# UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'INSTRUMENTS

## 2. Keck (Hawaii, USA)

- 2 télescopes de 10m
- Premières franges en 2001

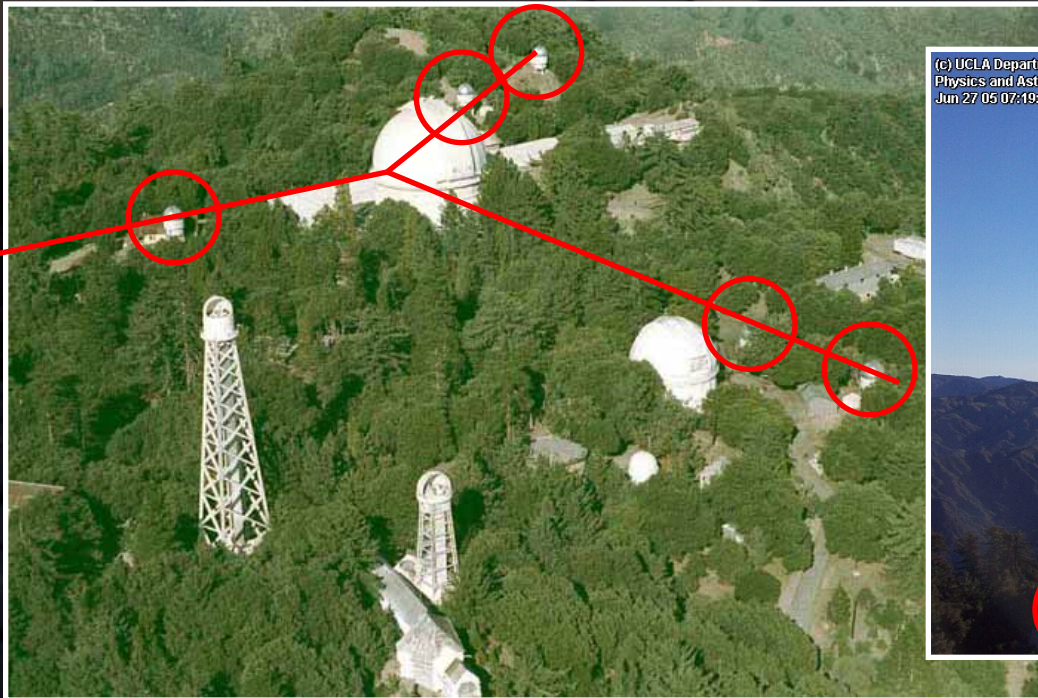




# UNE NOUVELLE GÉNÉRATION D'INSTRUMENTS

## 3. CHARA (Mount Wilson, California):

- 1999 – Premières franges
- 6 télescopes de 1-m
- Longueur de base max: 330m



(c) UCLA Department of  
Physics and Astronomy  
Jun 27 05 07:19:51



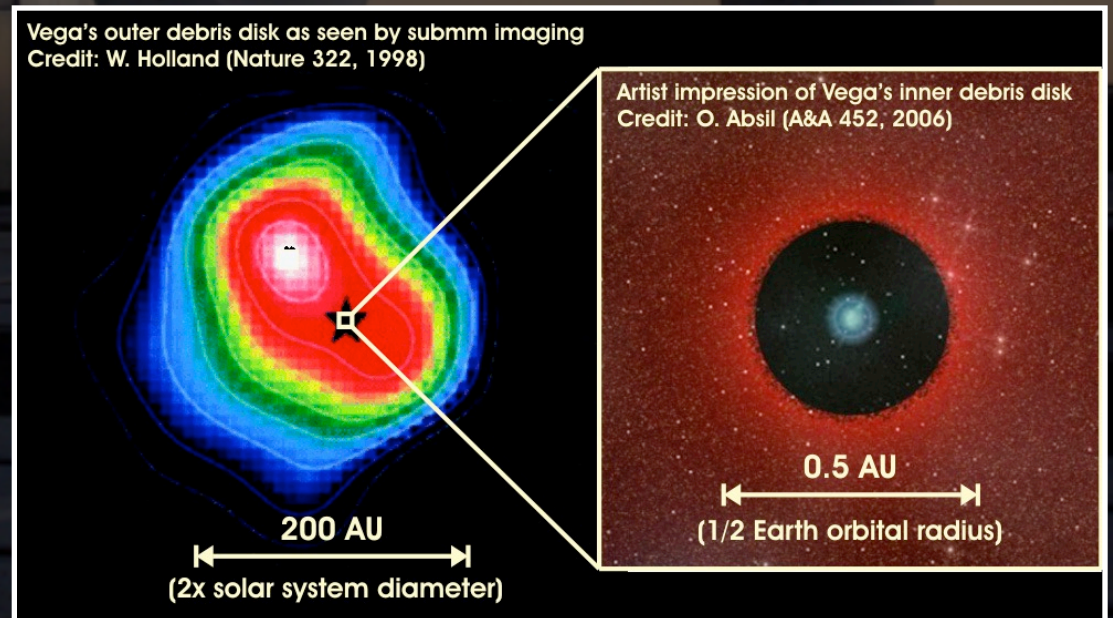
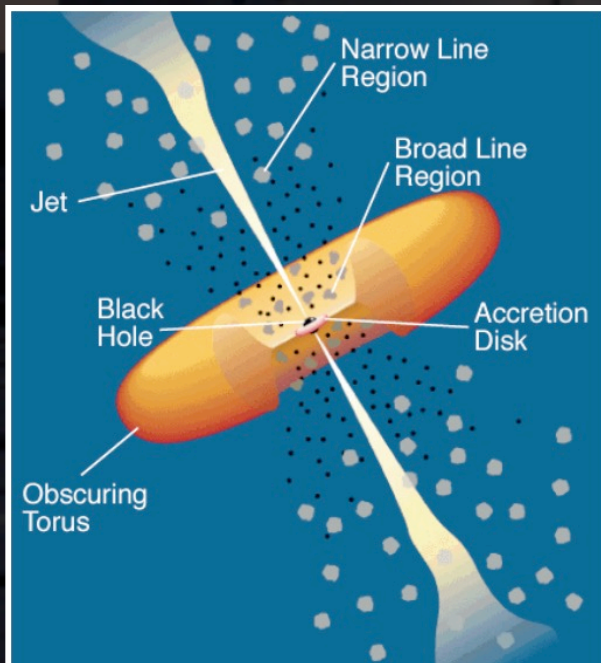
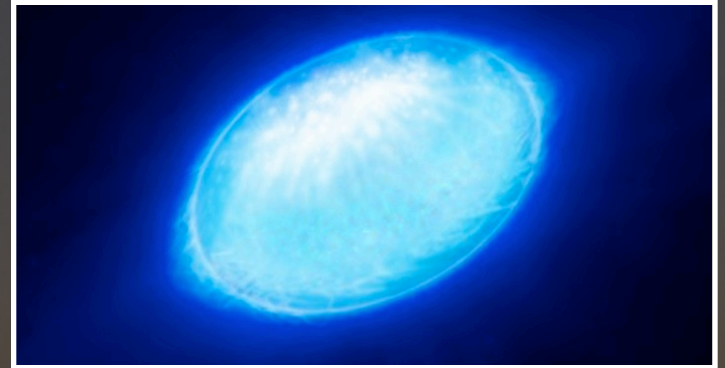
# APERCU

- C'est quoi l'interférométrie?
- L'interférométrie en astronomie
  - Bref historique
  - Les instruments actuels
  - Principaux résultats (non exhaustif)
  - Futurs instruments
  - Perspectives à longs termes



# PRINCIPAUX RÉSULTATS

- Contributions principales:
  - Étude des étoiles
  - Étude de l'environnement stellaire
  - Étude des AGNs



# ÉTUDE DES ÉTOILES

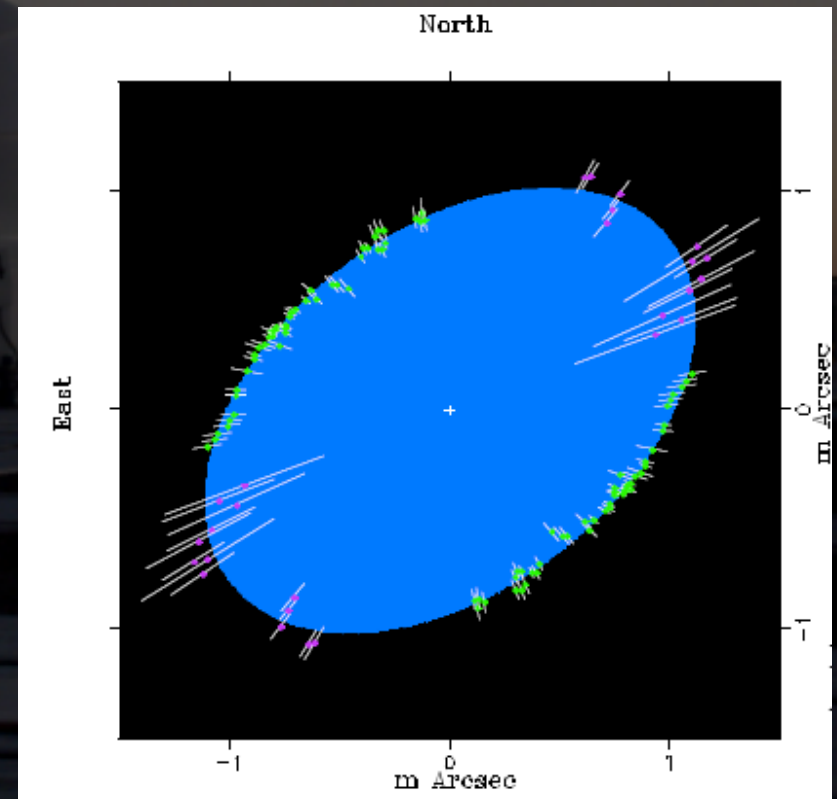
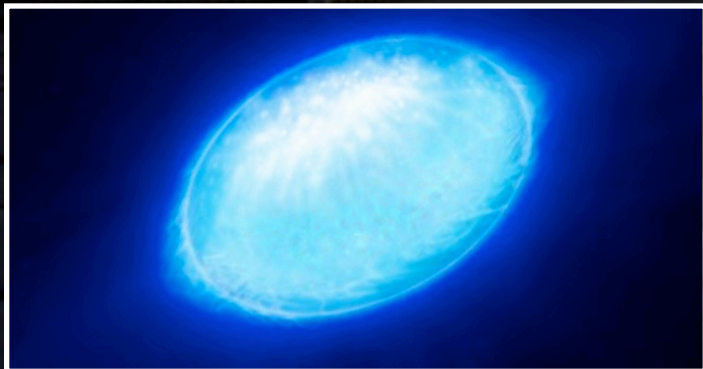
- Mesure du diamètre et de la température des étoiles
- Étude des binaires:
  - Masses, luminosités, paramètres orbitaux,...
  - Présence d'un compagnon
- Étude des étoiles Mira (Perrin et al. 2004)
  - Couche moléculaire mince
  - En accord avec la spectroscopie
- Étude des Céphéides (Kervella et al. 2004)
  - Mesure de leur distance
  - Calibration des relations de période-luminosité et de période-rayon, à la base de la mesure des distances extragalactiques



# ACHERNAR: “a rotating potato”

- Achernar :

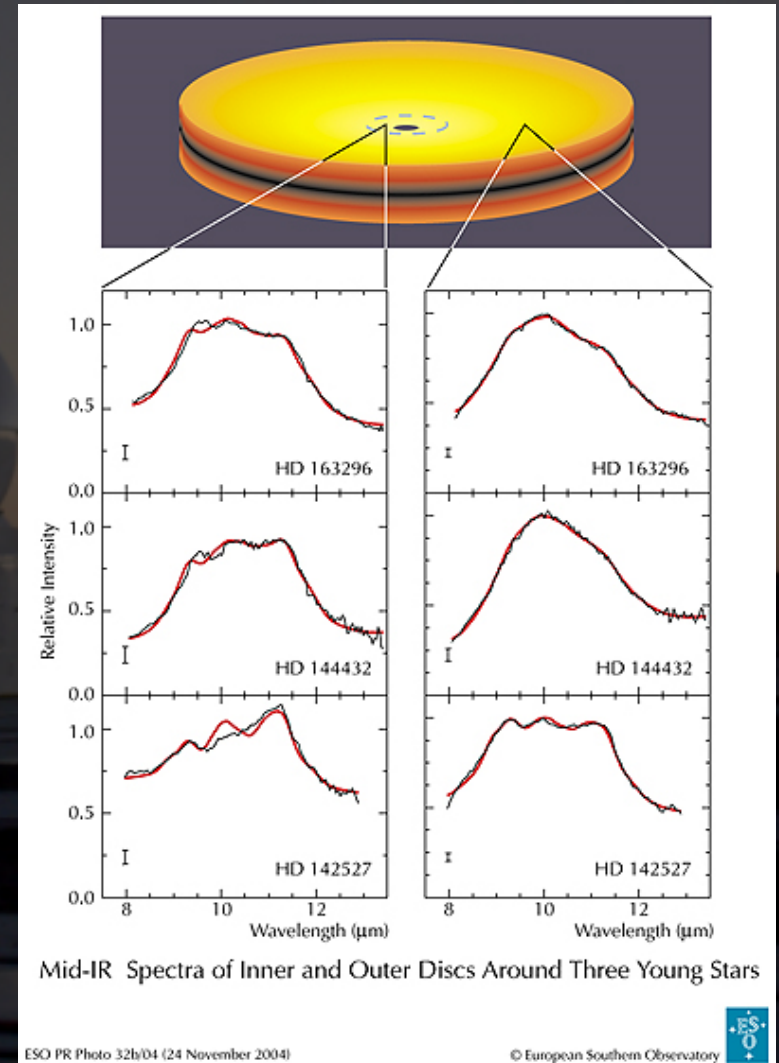
- Observée avec VLTI/VINCI - Domiciano de Souza et al. (2003)
- Rotateur rapide
- Plus plate qu’attendue:  
 $2a/2b = 1.56 \pm 0.05$
- Défis théoriques...



# ÉTUDE DES DISQUES

## 1. Autour des YSO

- PTI/IOTA/AMBER/Keck:
  - Disques plus larges que prévu
  - Cavité interne
- VLT/MIDI:
  - 11.3  $\mu\text{m}$  indique la présence de cristaux de silicates dans la région interne.
  - Les briques nécessaire pour les planètes telluriques présentes très tôt

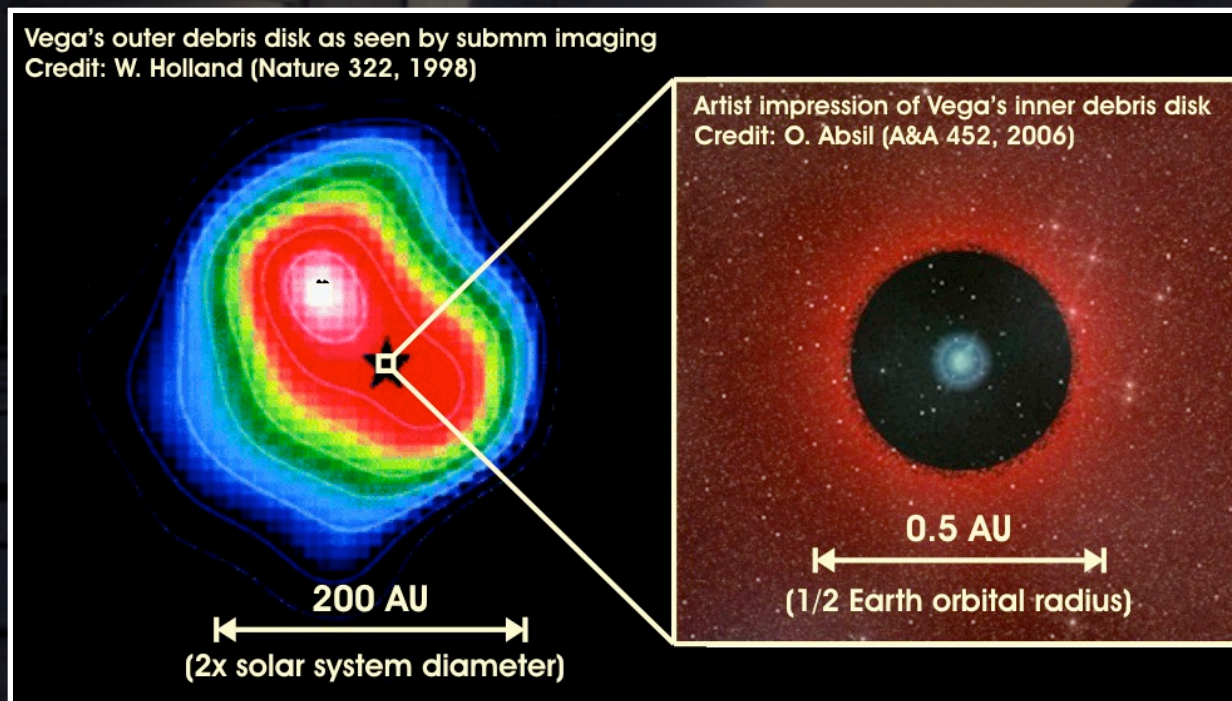




# ÉTUDE DES DISQUES

## 2. Disque de débris

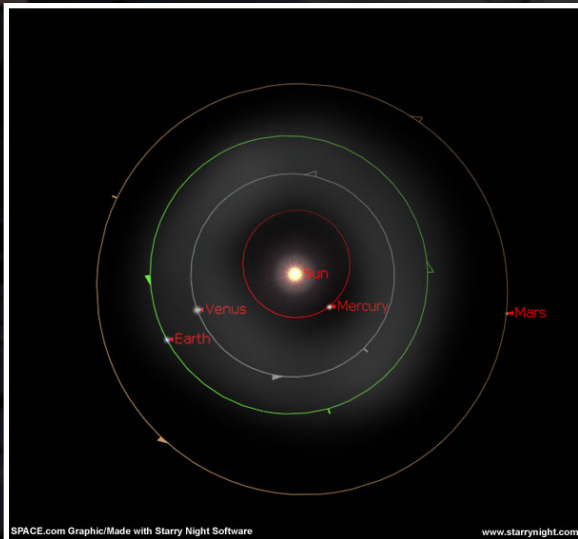
- Première détection grâce à l'interférométrie: Vega (Absil et al. 2006)
- Environ 1% du flux stellaire dans l'infrarouge



# ÉTUDE DES DISQUES

## 2. Disque de débris

- Première détection grâce à l'interférométrie: Vega (Absil et al. 2006)
- Environ 1% du flux stellaire dans l'infrarouge



SPACE.com Graphic/Made with Starry Night Software

www.starrynight.com

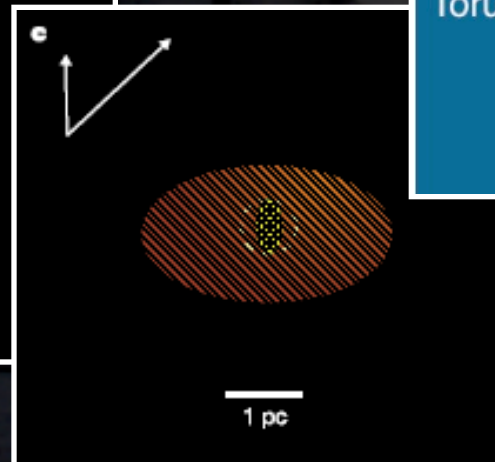
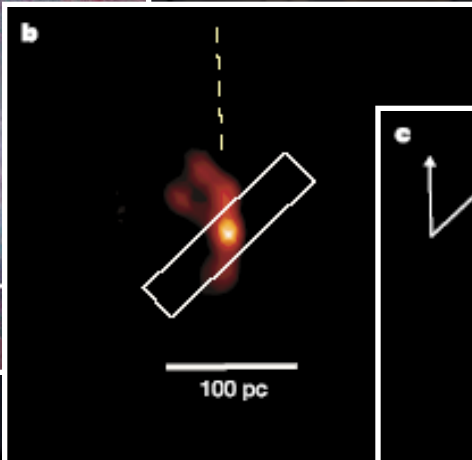
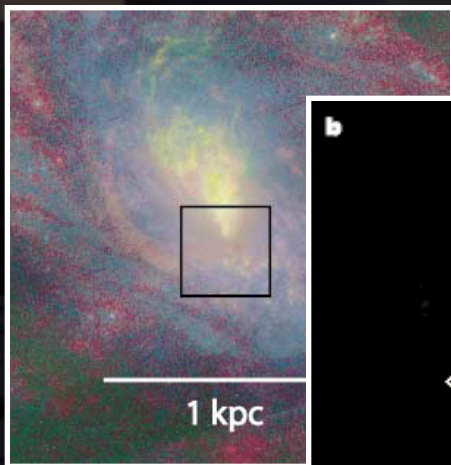
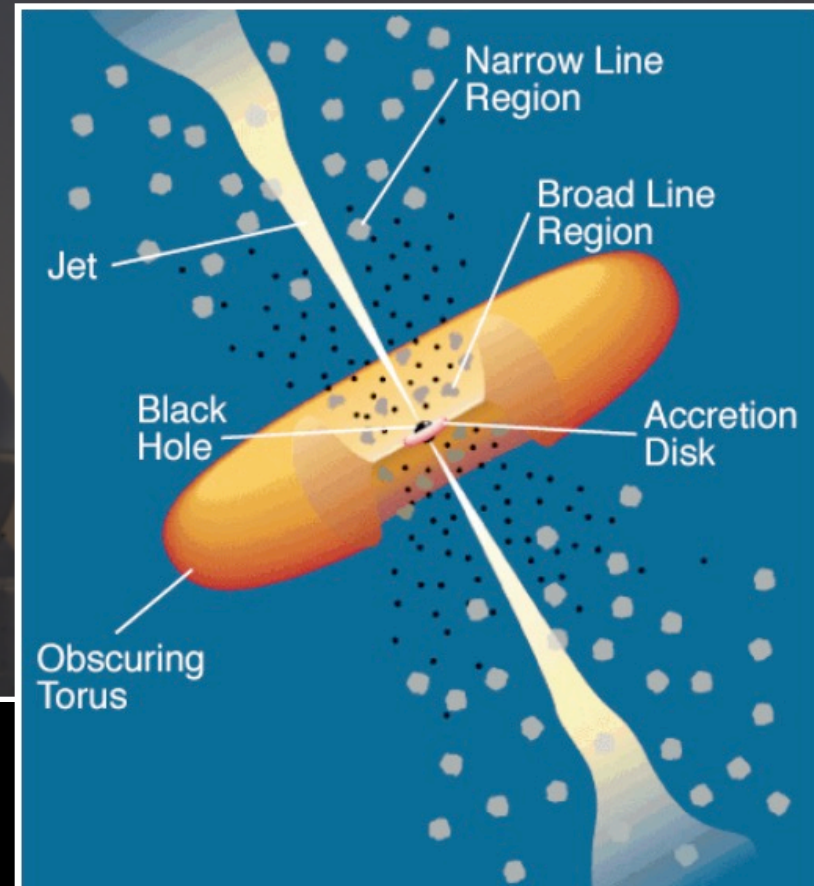


© Yuri Beletsky

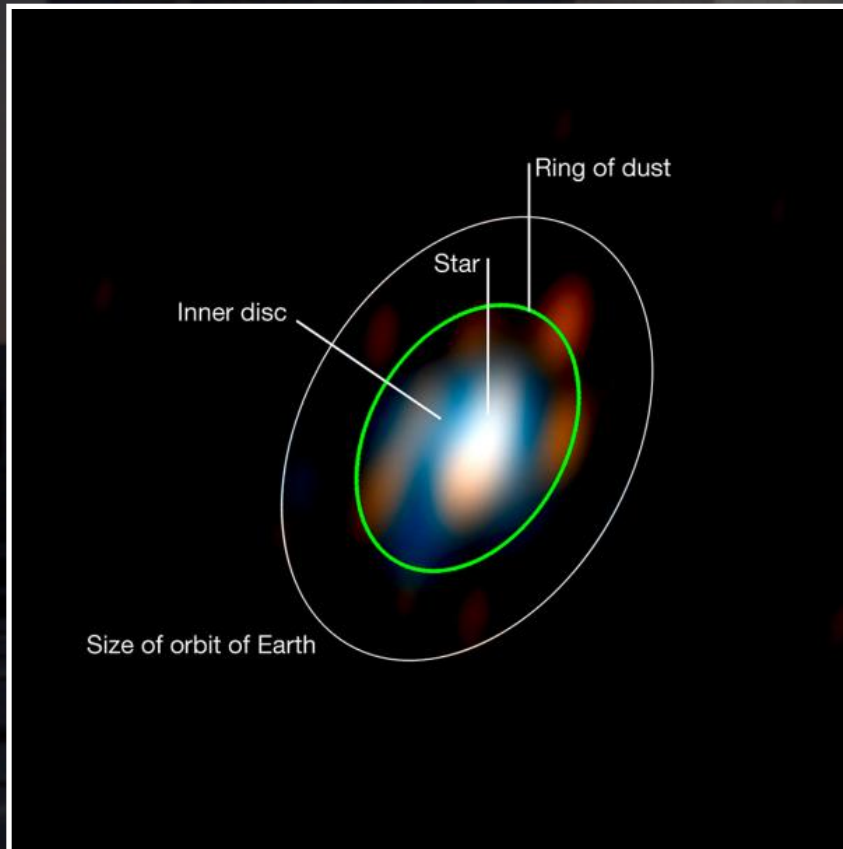


# ÉTUDE DES AGNs

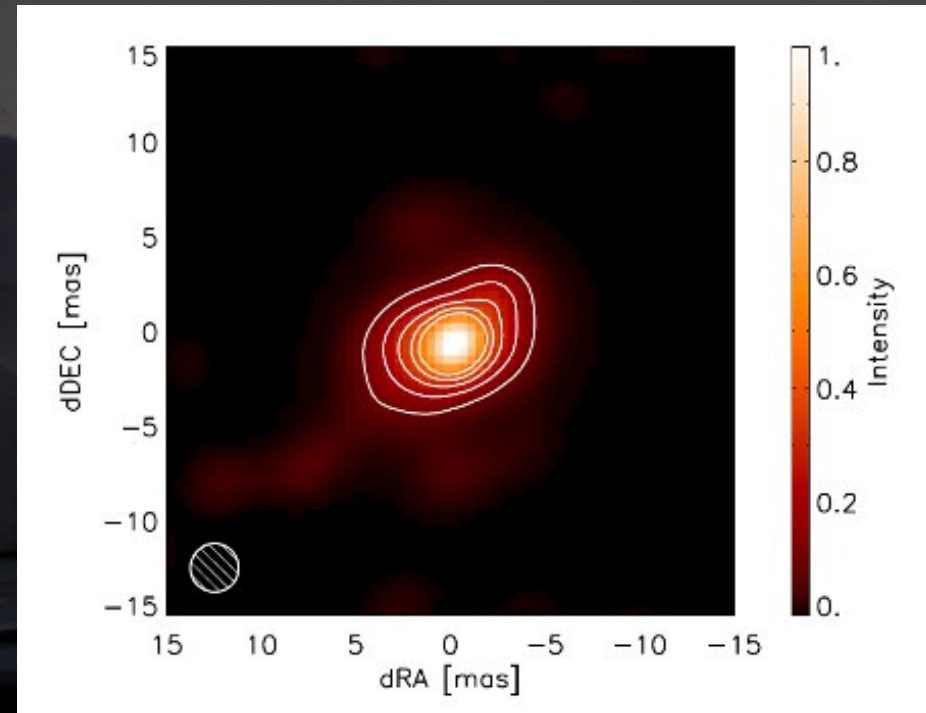
- Tore de NGC1068 résolu avec VLT/MIDI
- Modèle avec 2 composantes: à  $\sim 800\text{K}$  et à  $\sim 300\text{K}$  à environ  $0.7\text{ pc}$  et  $3\text{ pc}$  de diamètre
- En accord avec les prédictions théoriques



# PREMIÈRE RECONSTRUCTION D'IMAGES



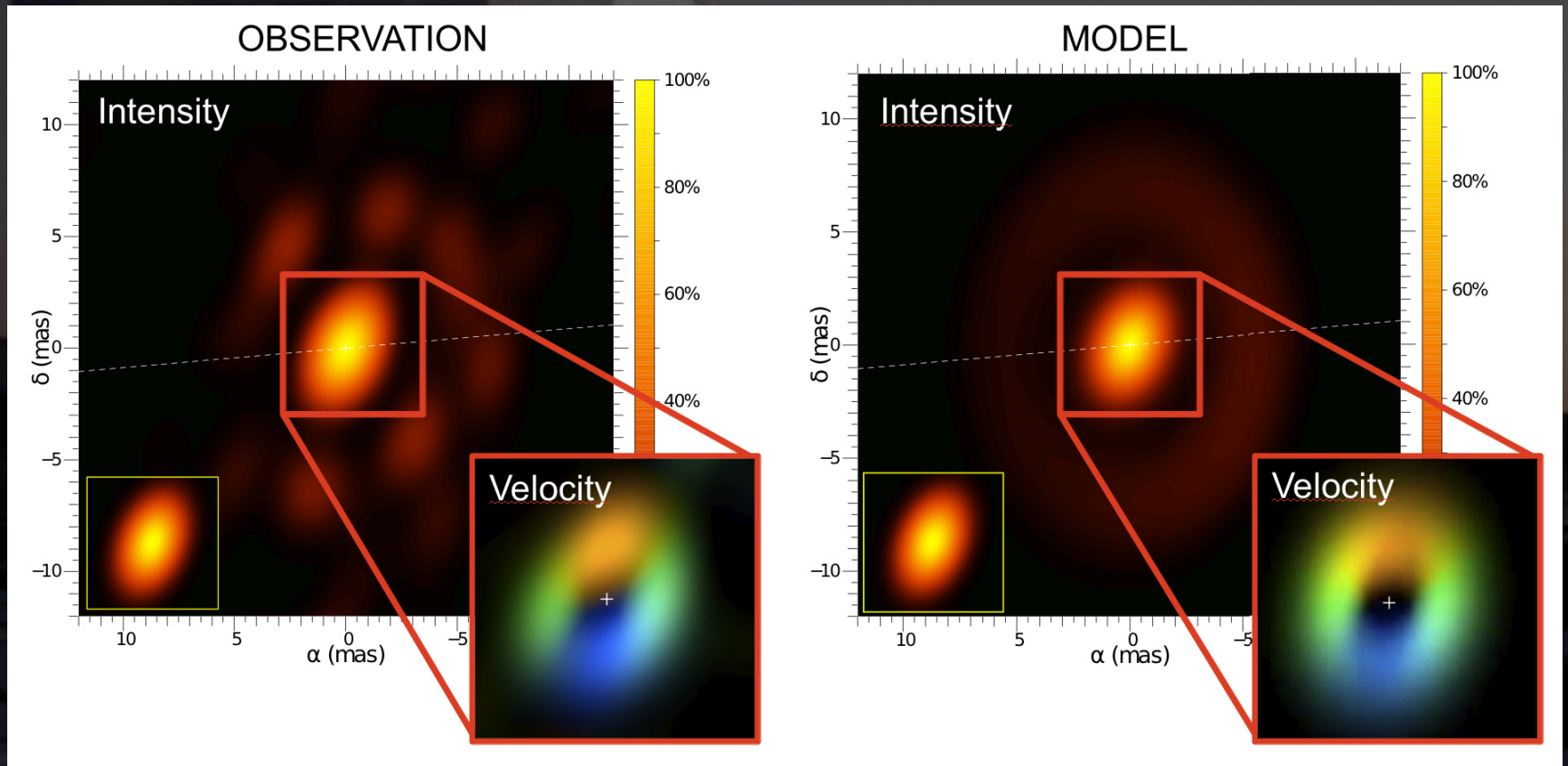
YSO - Renard et al. 2010



YSO - Kraus et al. 2010



# PREMIÈRE RECONSTRUCTION D'IMAGES



Étoile super-géante - Millour et al. 2010

# ET BEAUCOUP D'AUTRES...

- **Intérieurs stellaires:** Cen, Sirius,... (Thévenin, Kervella, di Folco, Ségransan,...)
- **Etoiles de faible masse:** Proxima du Centaure (Ségransan, Forveille, Perrier, ...)
- **Surface des supergéantes:** Ori,  $\mu$  Cep (Perrin, Foresto,...)
- **Intérieurs des disques autour d'étoiles HAeBe de Herbig (Berger, Malbet, Tatulli, Benisty,...)**
- **Silicates dans les disques de HAeBe (Dutrey, di Folco,...)**
- **Magnétisme stellaire (Perraut, Le Bouquin, Mourard,...)**
- **Atmosphère des géantes K:** Arcturus (Bordé, Perrin,..)
- **Etoiles éruptives FU Orionis (Malbet, Lachaume, Berger,...)**
- **Disque de poussière autour des étoiles B[e]: CPD 57-2874 (Domiciano de Souza, Stee,...)**
- **Etudes des étoiles Wolf-Rayet (Chesneau, Dessart,...)**
- **Explosion de nova: RS Oph (Chesneau,...)**
- **Vents de disque des étoiles Ae/Be de Herbig: MWC 297 (Malbet, Benisty, Tatulli, Berger...)**
- ...

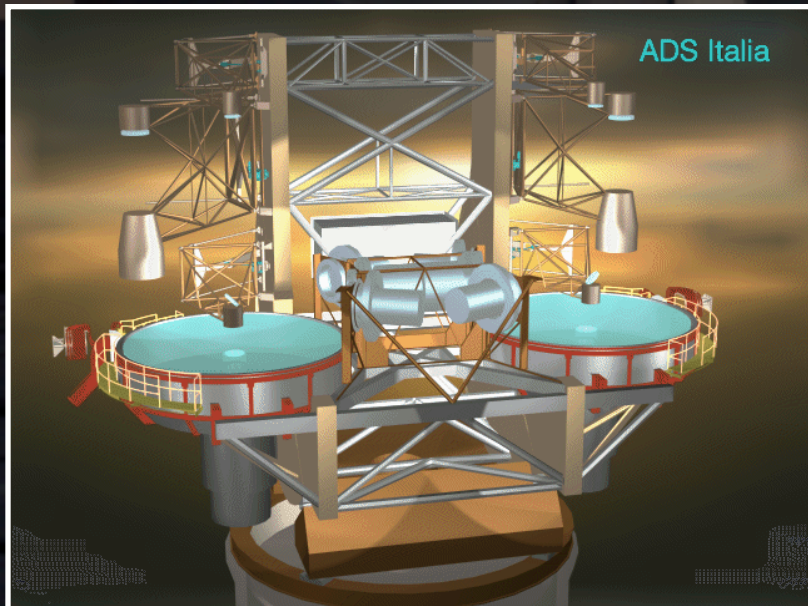


# APERCU

- C'est quoi l'interférométrie?
- L'interférométrie en astronomie
  - Bref historique
  - Les instruments actuels
  - Principaux résultats (non exhaustif)
  - **Futurs instruments**
  - Perspectives à longs termes

# FUTURS INSTRUMENTS

- Large Binocular Telescope Interferometer
  - 2 télescopes de 8m
- Madgalena Ridge Observatory
  - 10 télescopes de 1.4m





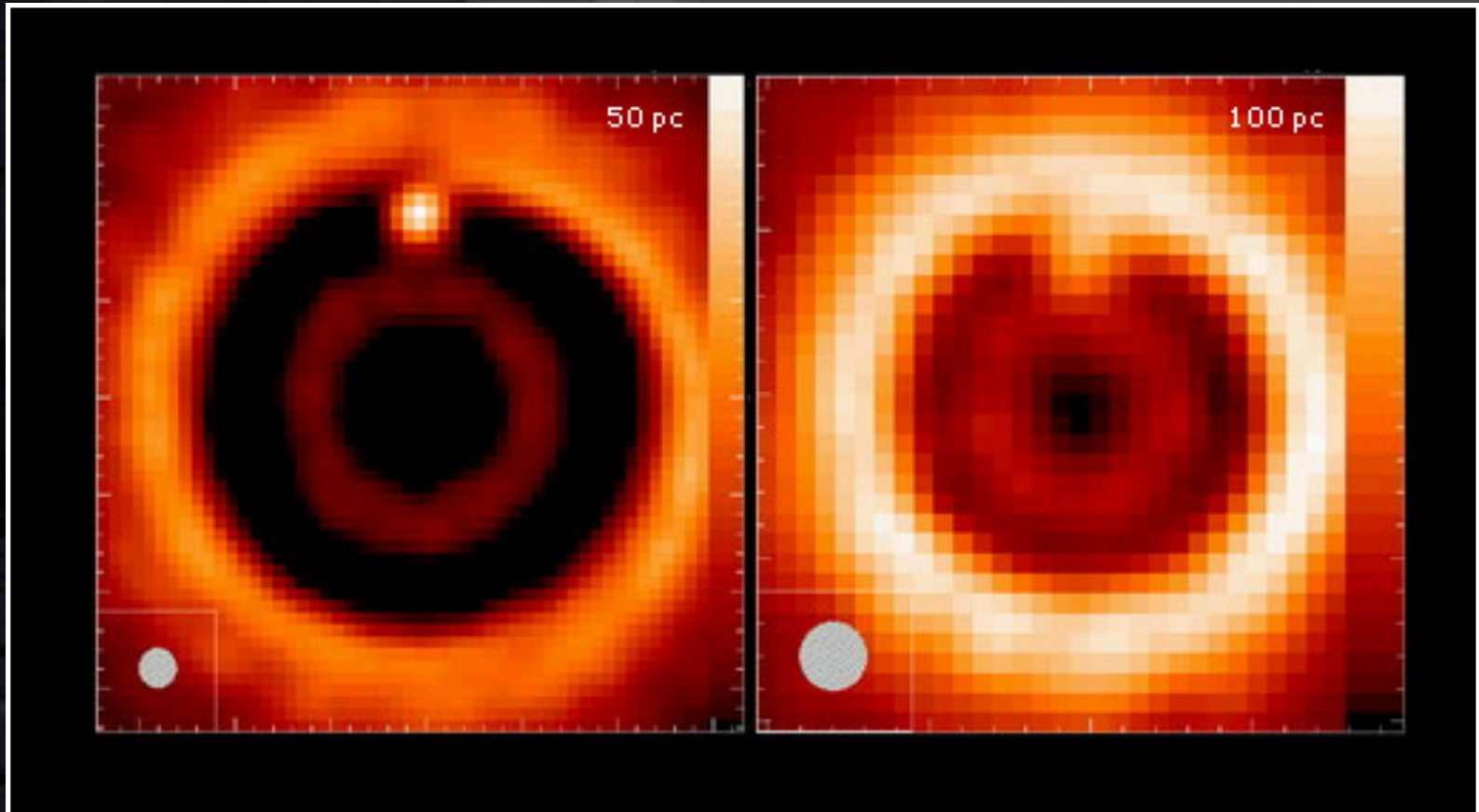
# FUTURS INSTRUMENTS

- The “Atacama Large Millimeter Array”



# FUTURS INSTRUMENTS

- The “Atacama Large Millimeter Array”



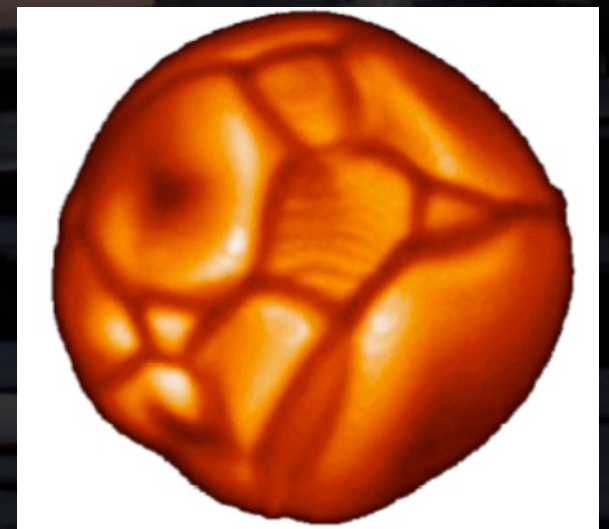
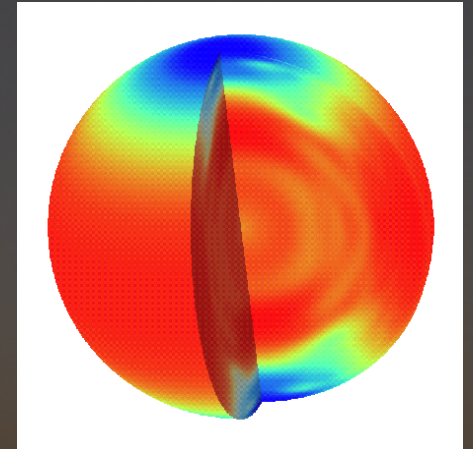


# APERCU

- C'est quoi l'interférométrie?
- L'interférométrie en astronomie
  - Bref historique
  - Les instruments actuels
  - Principaux résultats (non exhaustif)
  - Futurs instruments
  - Perspectives à longs termes

# PERSPECTIVES À COURTS TERMES

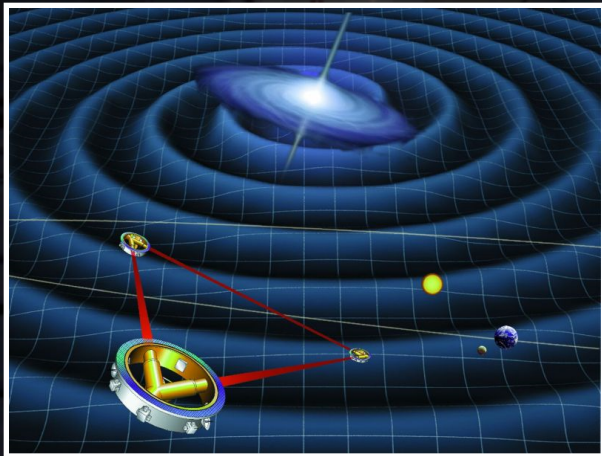
- Paramètres fondamentaux des étoiles
  - M, L, R, age... pour tous les types spectraux
  - Profil de rotation
- Imager la surface des étoiles
- Étoiles multiples:
  - Études des propriétés des binaires
  - Formation et évolution des binaires
- Enveloppes circumstellaires:
  - Distribution et évolution du gaz et de la poussière
  - Formation des planètes





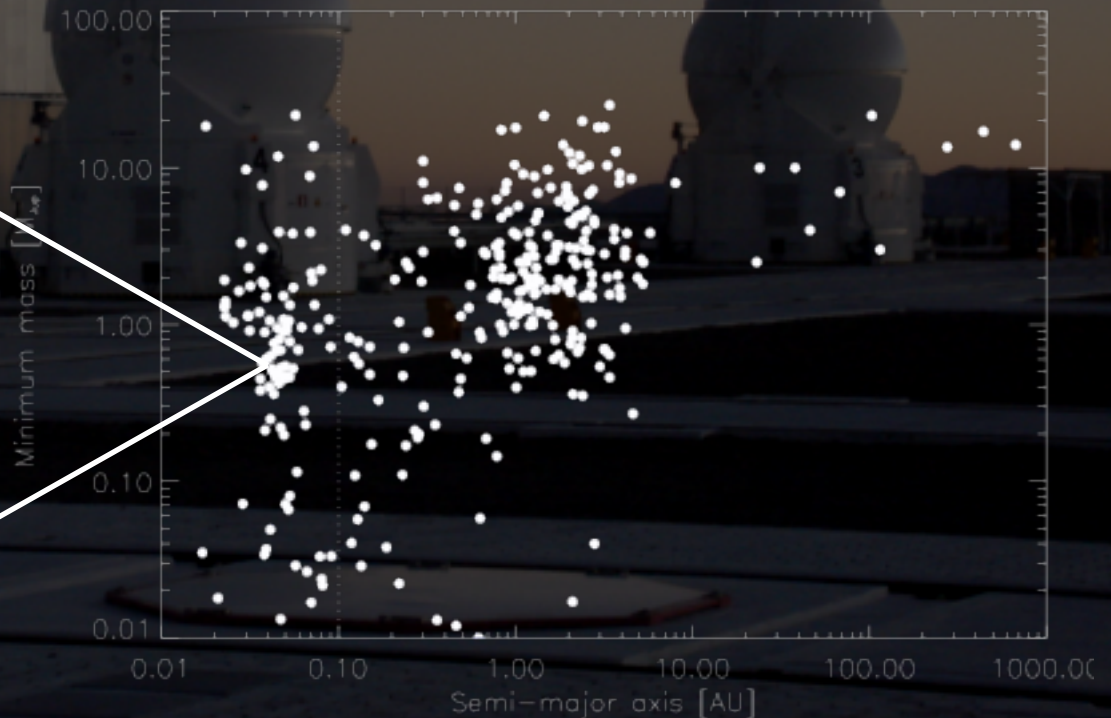
# PERSPECTIVES À LONGS TERMES

- Études extragalactiques
  - Clusters d'étoiles jeunes
  - Céphéides dans les galaxies proches
  - Trou noir central
- Détecter des ondes gravitationnelles
- Caractériser des planètes similaires à la Terre



# CARACTERISER DES EXO-TERRES

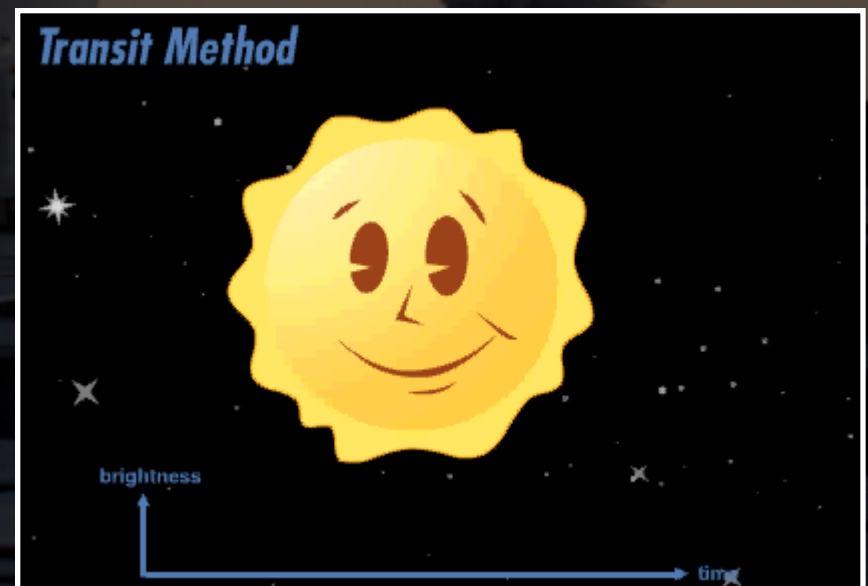
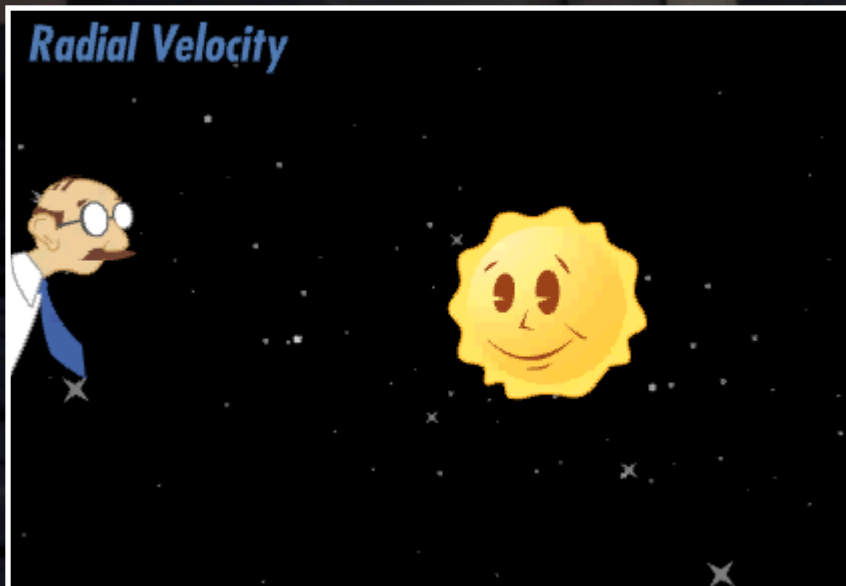
- Statut sur les exoplanètes
  - Première planète extrasolaire détectée en 1995
  - Environ 540 planètes détectées à ce jour
  - Techniques actuelles limitées





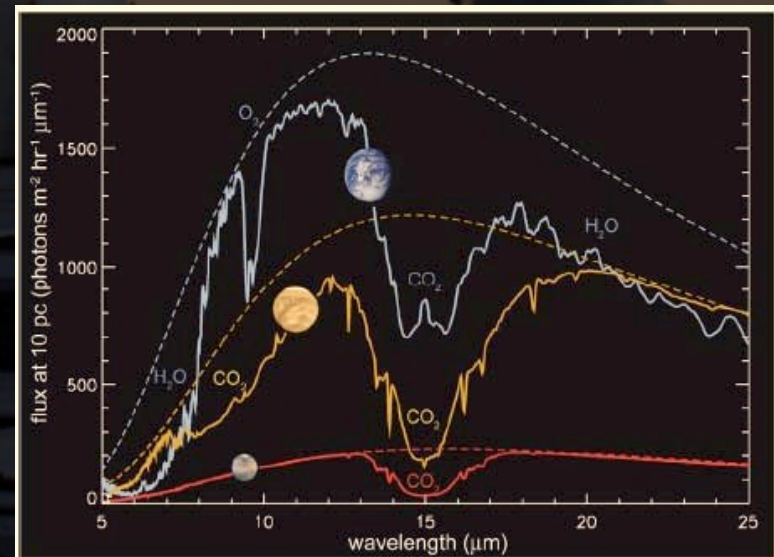
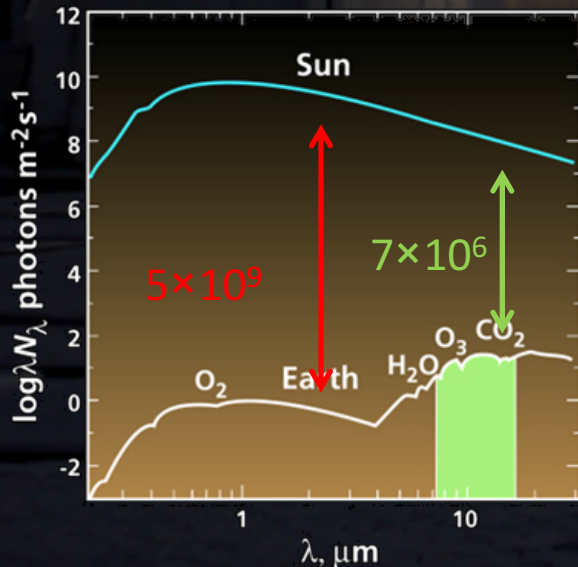
# CARACTERISER DES EXO-TERRES

- Statut sur les exoplanètes
  - Première planète extrasolaire détectée en 1995
  - Environ 540 planètes détectées à ce jour
  - Techniques actuelles limitées



# CARACTERISER DES EXO-TERRRES

- Détection directe pour chercher des bio-signatures
- Détection directe difficile
  - Contraste étoile/planète élevé ( $10^7$ -IR et  $10^{10}$ -visible)
  - Faible séparation angulaire ( $0.1''$  pour un système Terre-Soleil à 10 pc).





*L'étoiles est un milliard de fois + brillante...*



*...que la planète*

*...cachée par  
le phare.*





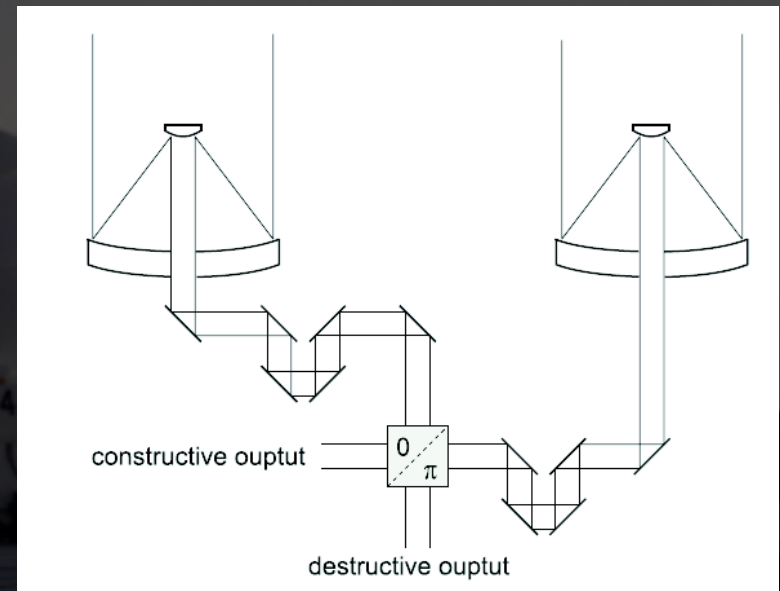
A lighthouse with a red lantern room stands on a rocky coastline. The scene is dimly lit, suggesting dawn or dusk. A large, red, cloud-like thought bubble is superimposed over the lighthouse, containing the text. The background shows the ocean with waves crashing against the rocks.

**Caché dans le  
brouillard exozodiacal**





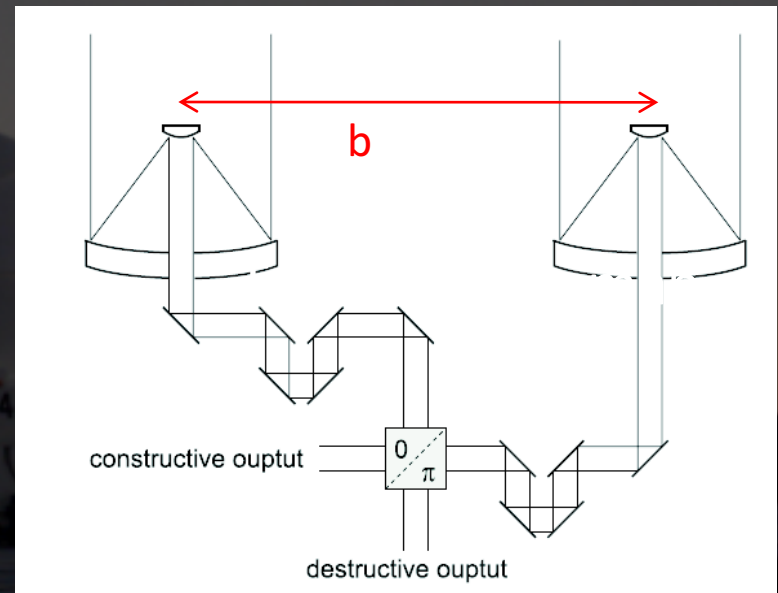
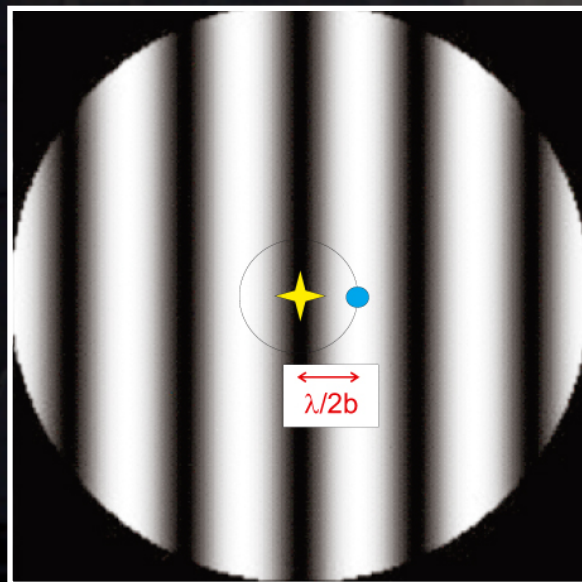
# INTERFÉROMÉTRIE DESTRUCTIVE



Supprimer la lumière stellaire par interférence destructive

# INTERFÉROMÉTRIE DESTRUCTIVE

Carte de transmission



Supprimer la lumière stellaire par interférence destructive

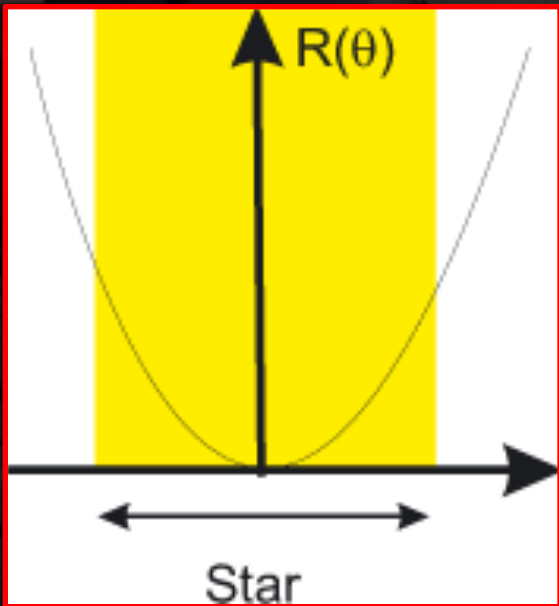


# SOURCES DE BRUITS

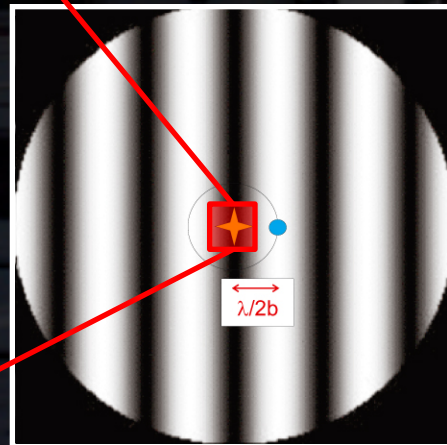


Système planétaire

Fuite stellaire



Interféromètre de nulling



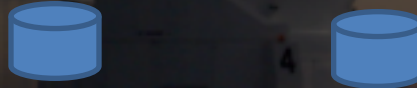
Carte de transmission

# SOURCES DE BRUITS

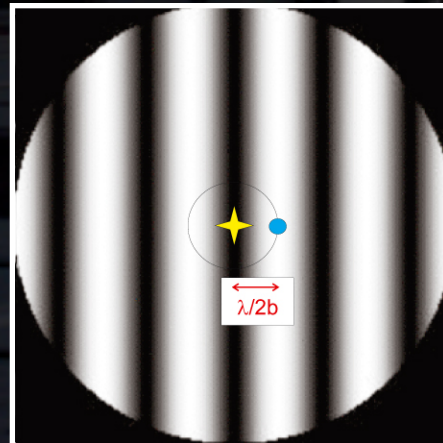


Système planétaire

Nuage zodiacal



Interféromètre de nulling

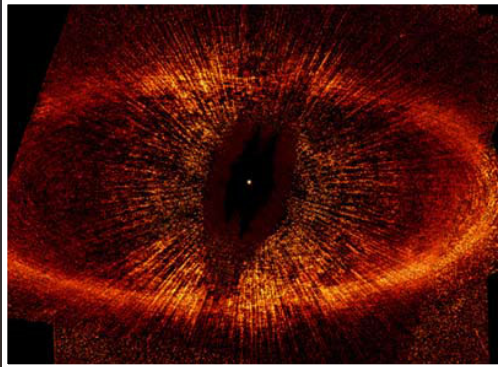


Carte de transmission

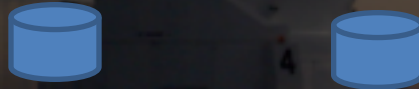


# SOURCES DE BRUITS

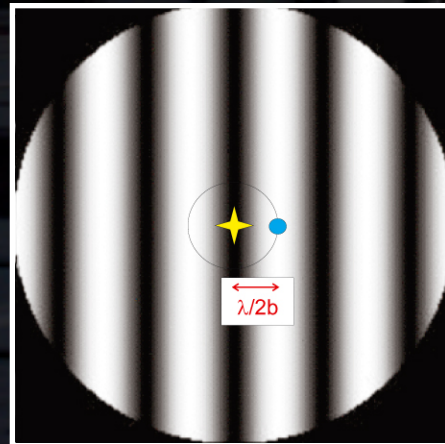
Nuage exozodiacal



Système planétaire

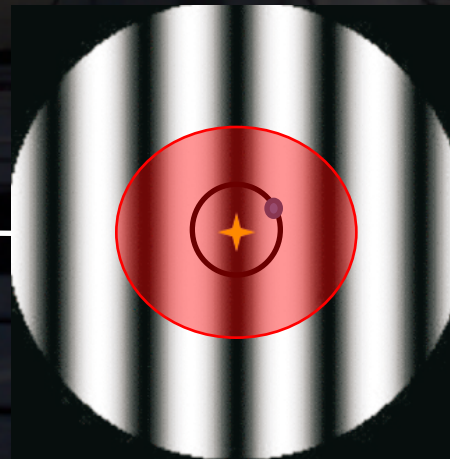
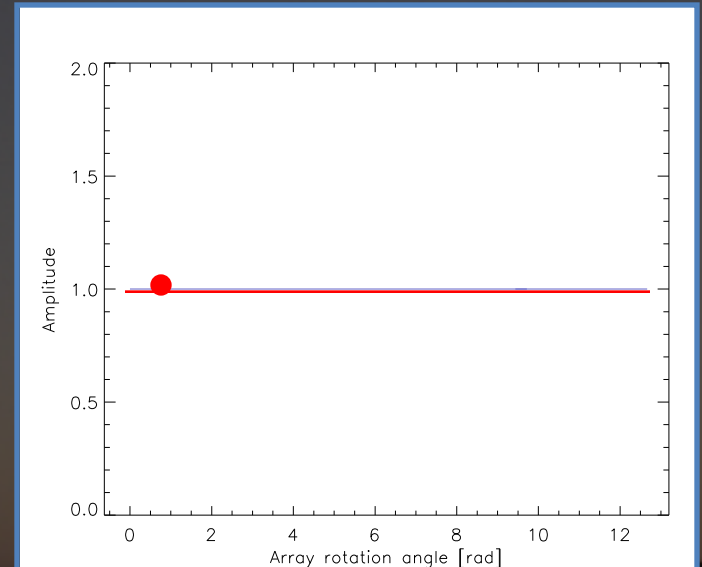
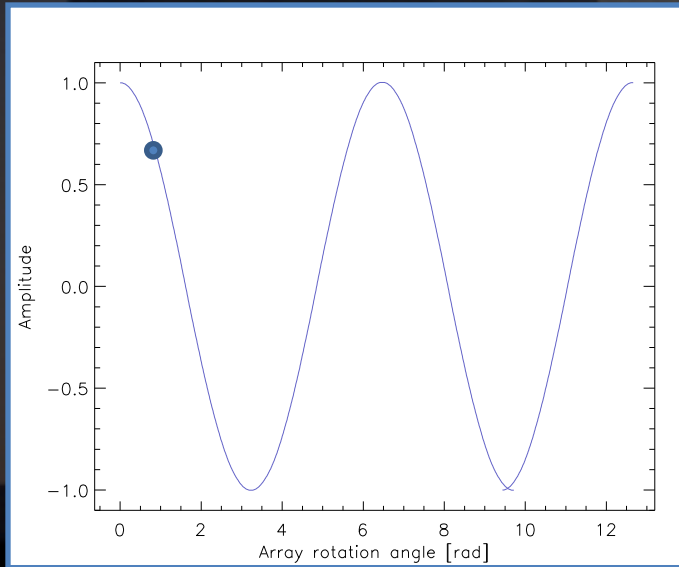


Interféromètre de nulling



Carte de transmission

# INTERFÉROMÉTRIE DESTRUCTIVE

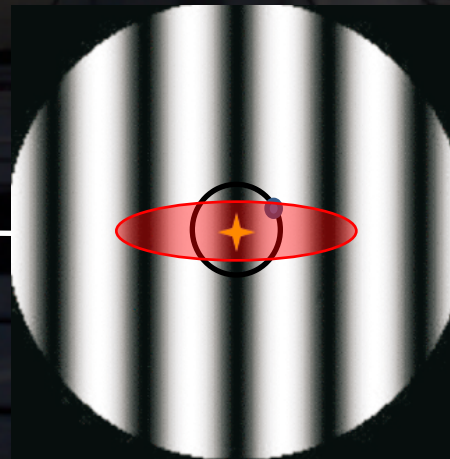
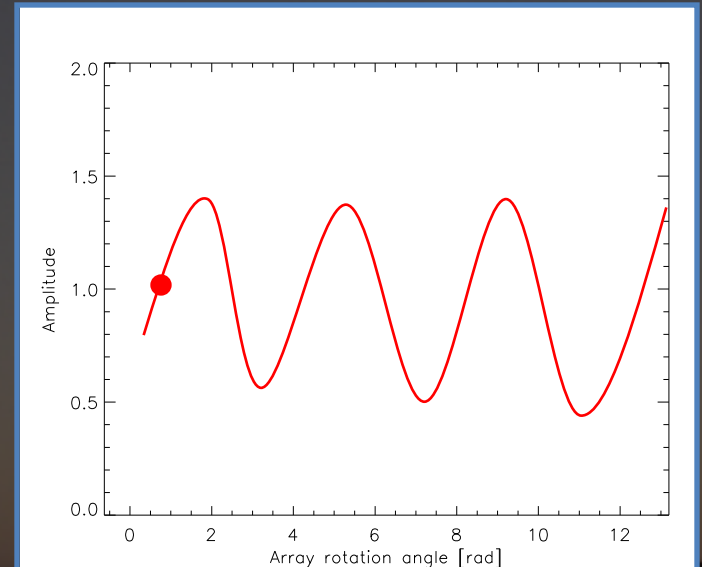
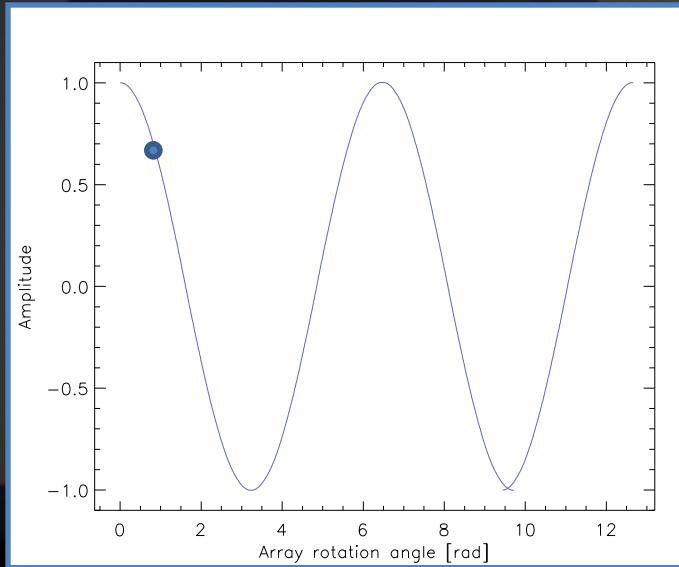


Planète

Sources symétriques



# INTERFÉROMÉTRIE DESTRUCTIVE

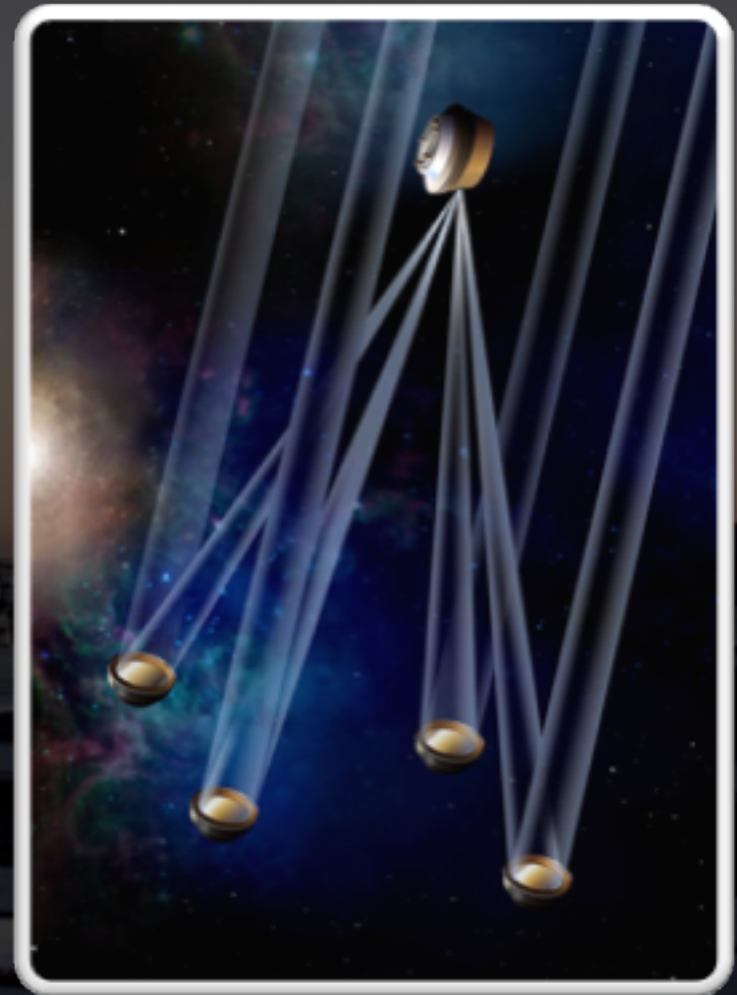
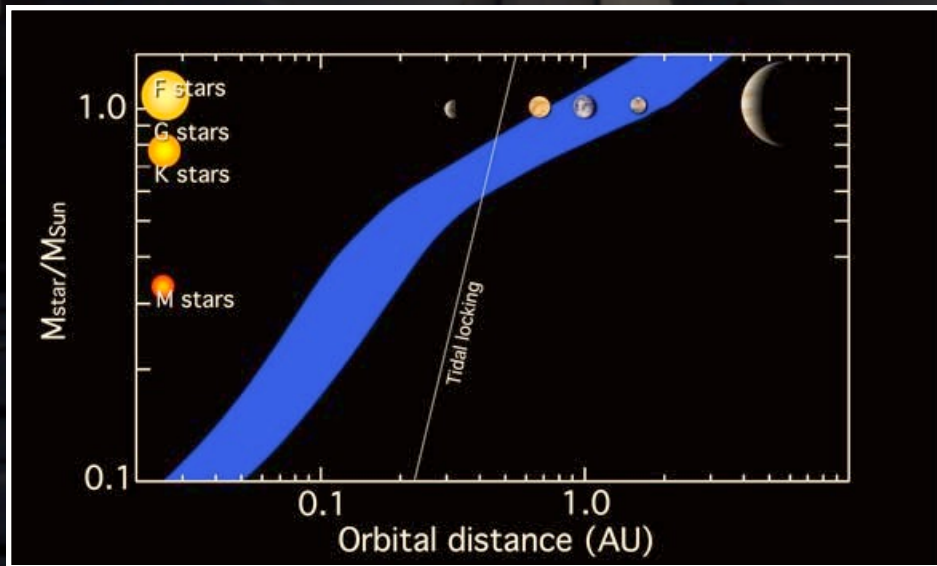


Planète

Sources symétriques

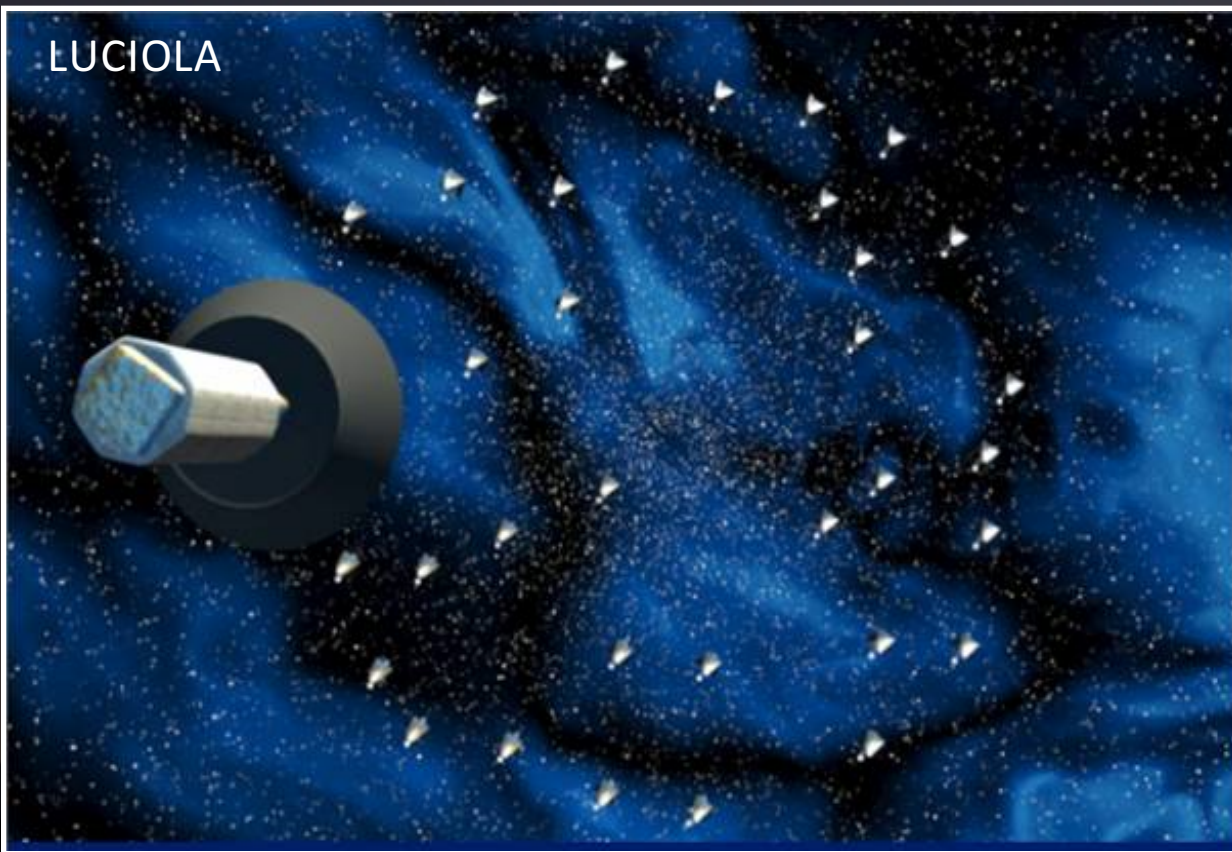
# DETECTER DE LA VIE EXTRASOLAIRE

- Projet Darwin/TPF
  - 4 télescopes en vol en formation
  - Étude spectro d'exo-Terres





LUCIOLA



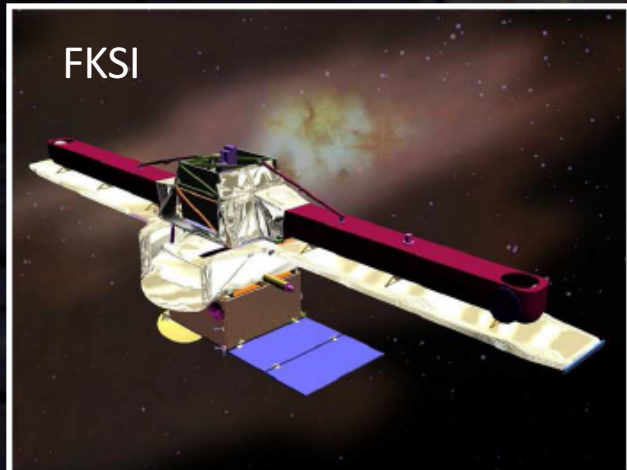
GENIE/VLTI



PEGASE



FKSI



ALADDIN





“There are infinite worlds both like and unlike this world of ours... We must believe that in all worlds there are living creatures and planets and other things we see in this world.”

*Epicurus -300 B.C*



# Perspectives

## Our Planet Hunting Neighborhood



Most of the planets  
found to date lie  
within about 300  
light-years from  
our Sun.

# CONCLUSIONS

- L'interférométrie est entrée pleinement dans l'astronomie "courante"
- Ce changement s'est fait notamment dans un cadre européen, le VLT
- Il existe de nombreux projets
- Les perspectives à longs termes sont prometteuses
  - Imager des exo-Terres lointaines
  - Tester la relativité générale



## Liens utiles:

- Optical Long Baseline Interferometry News (OLBIN):

[olbin.jpl.nasa.gov](http://olbin.jpl.nasa.gov)

- Site du groupe AEOS de l'Institut d'Astrophysique et de Géophysique de Liège:

[www.aeos.ulg.ac.be](http://www.aeos.ulg.ac.be)

