



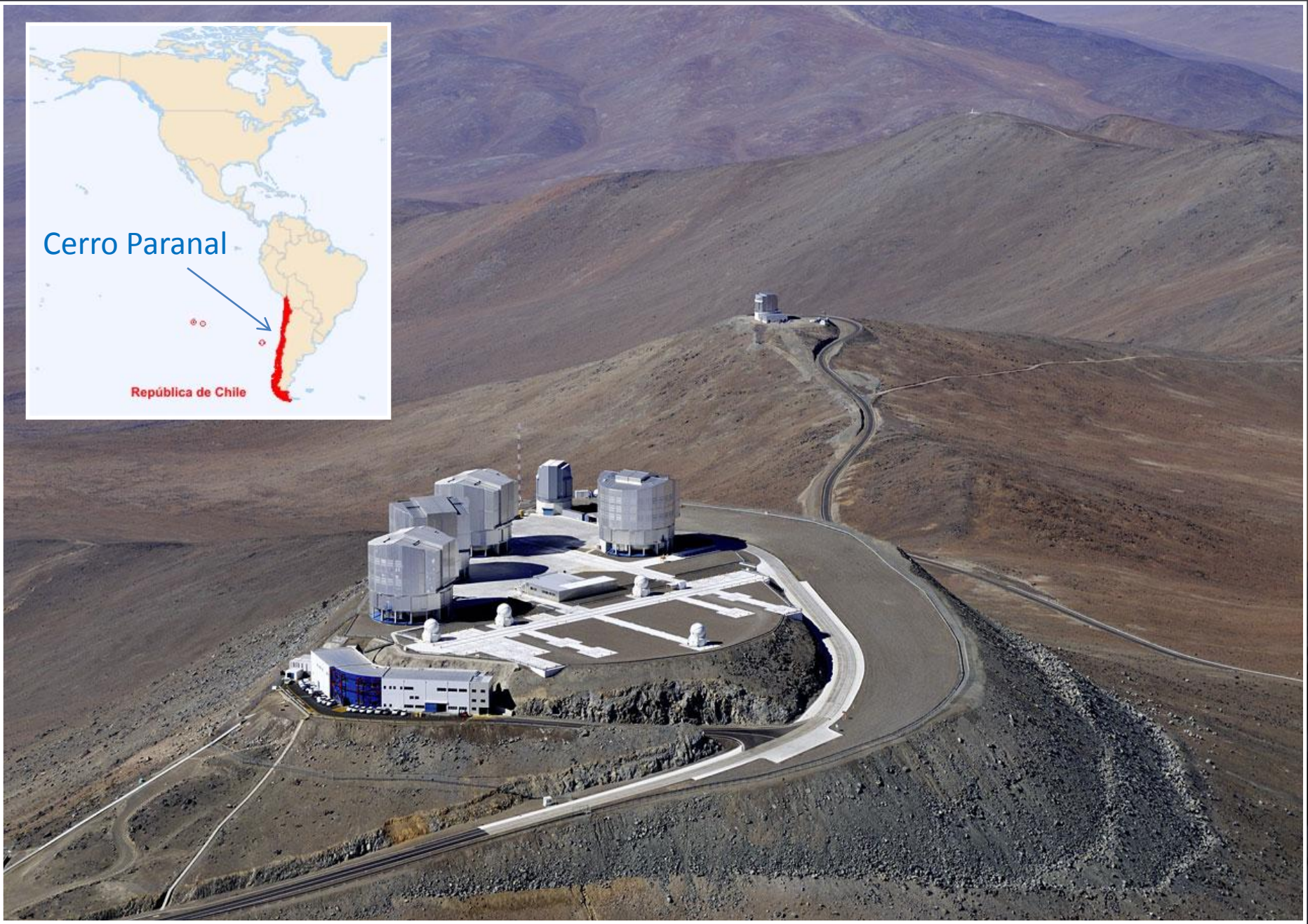
L'interférométrie au service de l'astronomie

Denis Defrère

Paris, le 2 février 2010







APERCU



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

APERCU



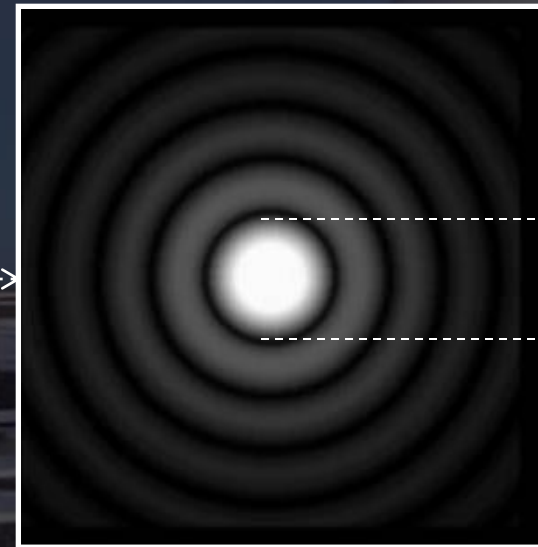
- C'est quoi l'interférométrie?
- Bref historique
- Les instruments actuels
- Principaux résultats (non exhaustif)
- Futurs instruments
- Perspectives à longs termes

LIMITATION DES TELESCOPES

Télescope



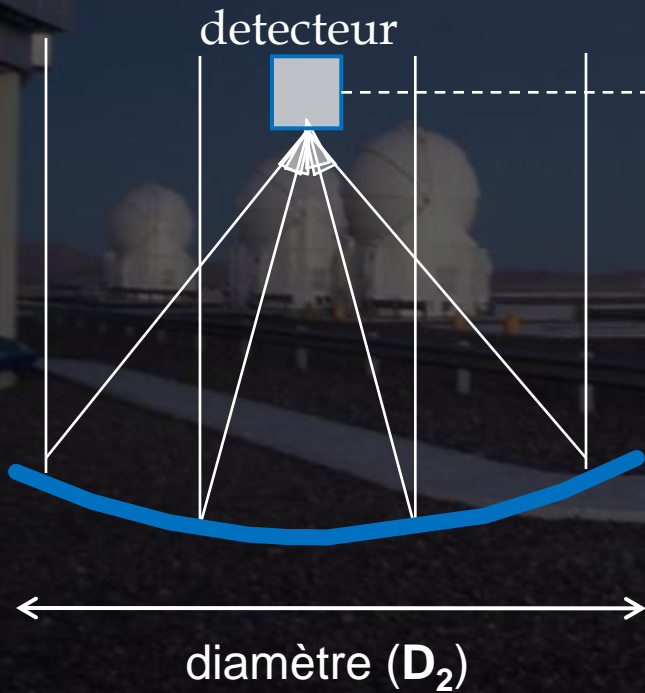
Tache d'Airy



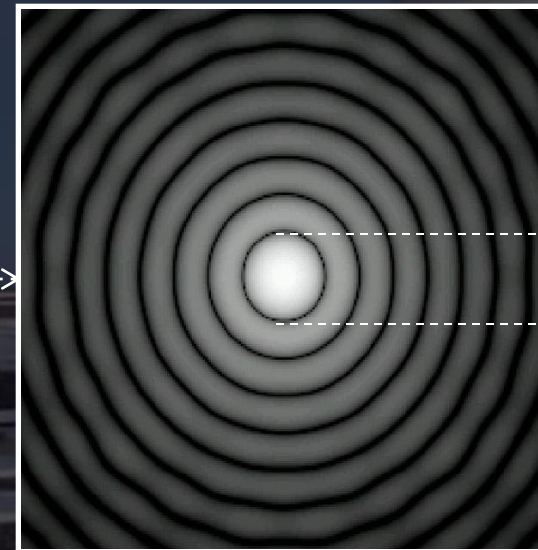
- L'image d'un point n'est pas un point
- Besoin de grands télescopes!

LIMITATION DES TELESCOPES

Télescope

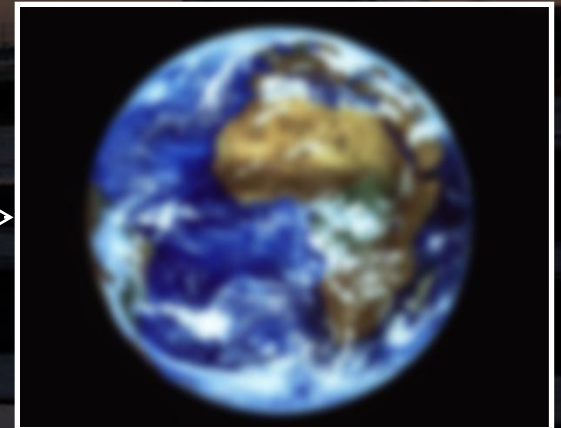
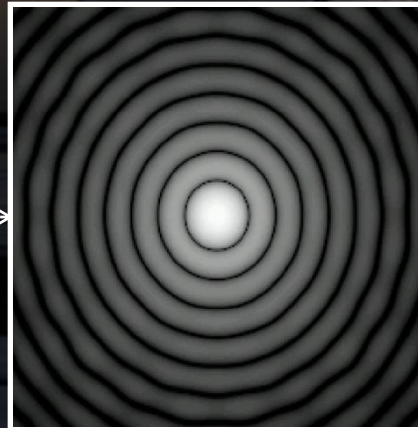
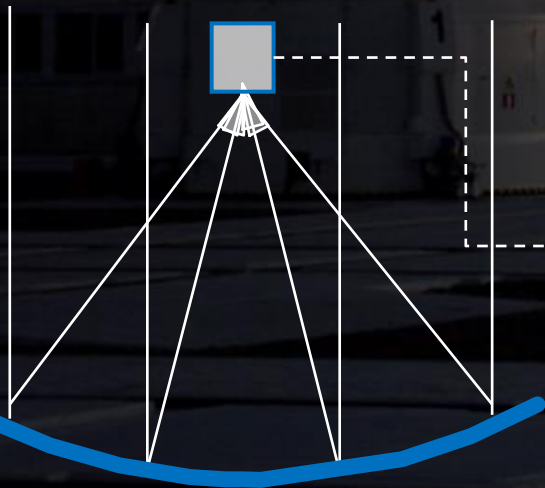
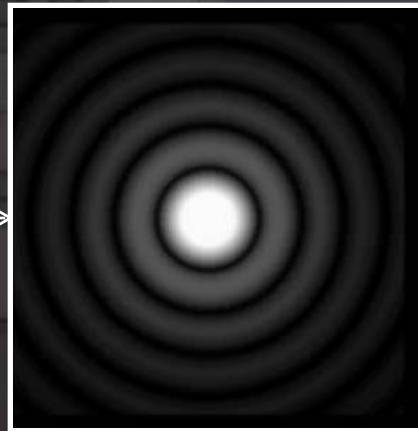
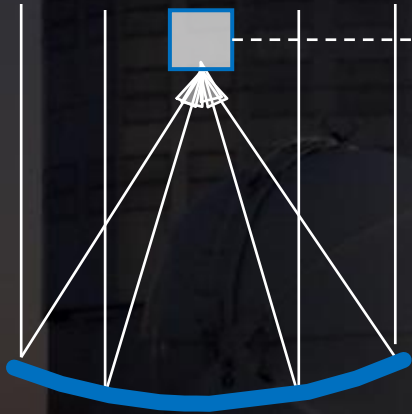


Tache d'Airy



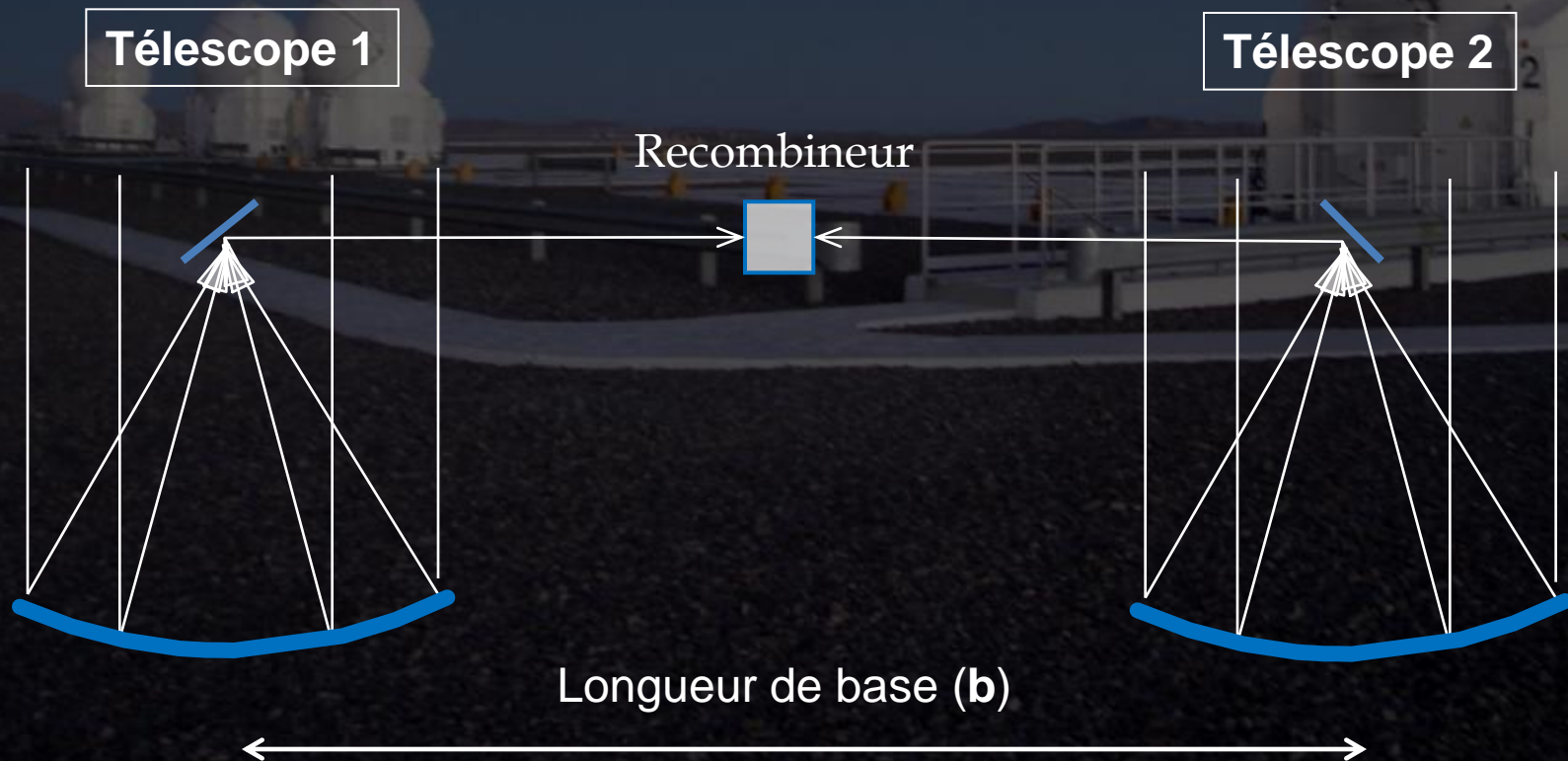
- L'image d'un point n'est pas un point
- Besoin de grands télescopes!

LIMITATION DES TELESCOPES



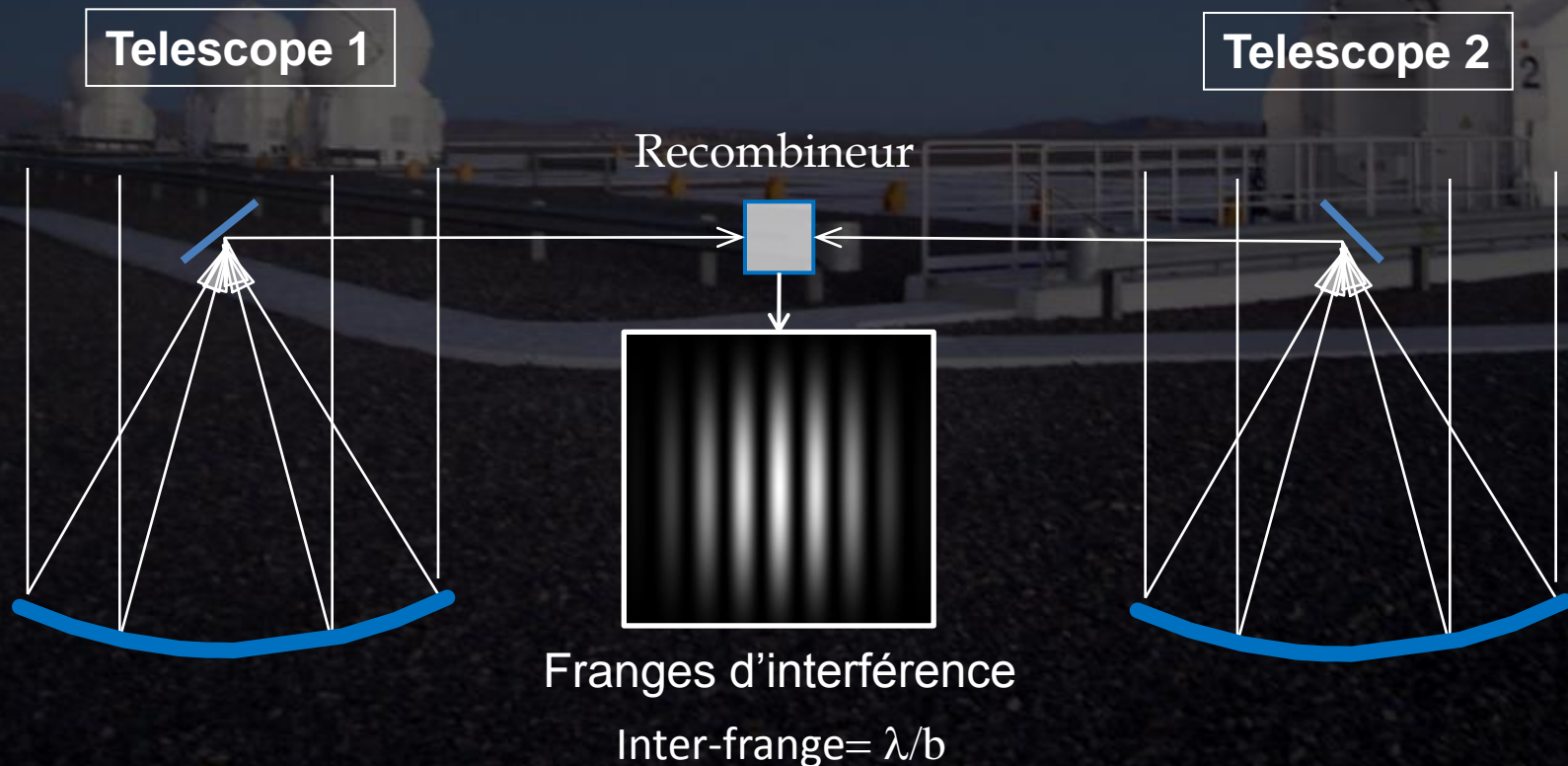
PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

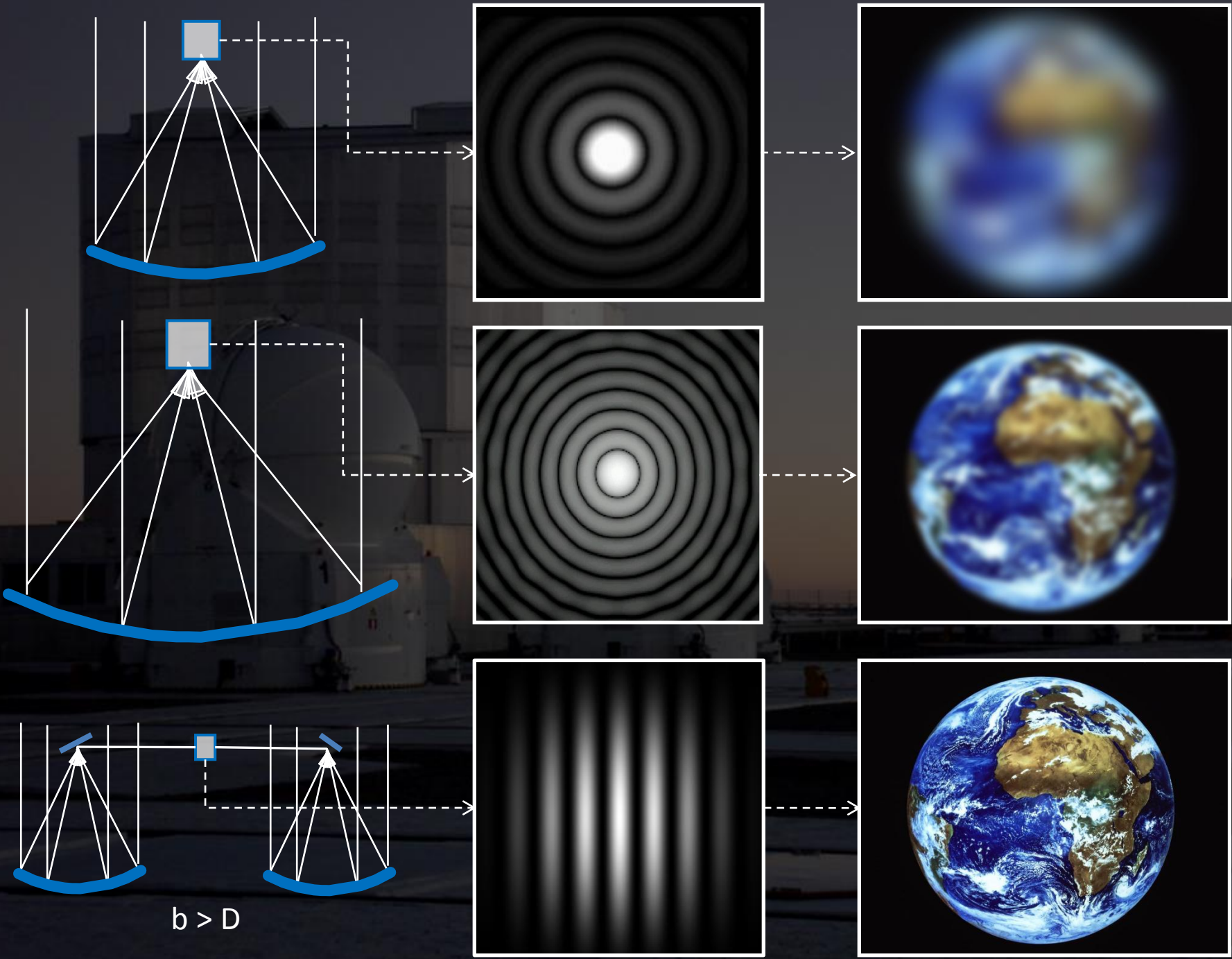
- H. Fizeau and E. Stephan (1868-1870):
“In terms of angular resolution, two small apertures distant of D are equivalent to a single large aperture of diameter D ”



PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

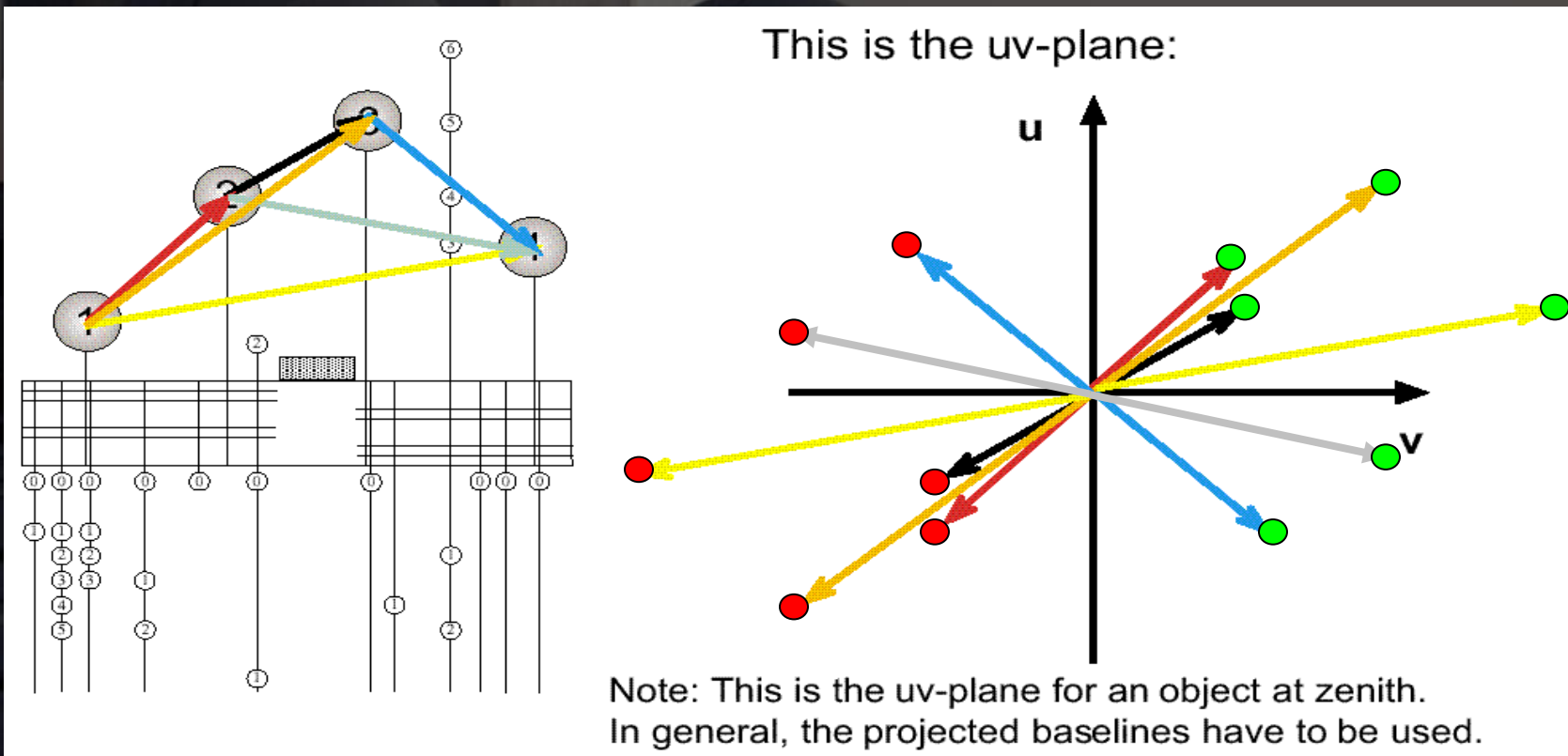
- H. Fizeau et E. Stephan (1868-1870):
“In terms of angular resolution, two small apertures distant of D are equivalent to a single large aperture of diameter D ”





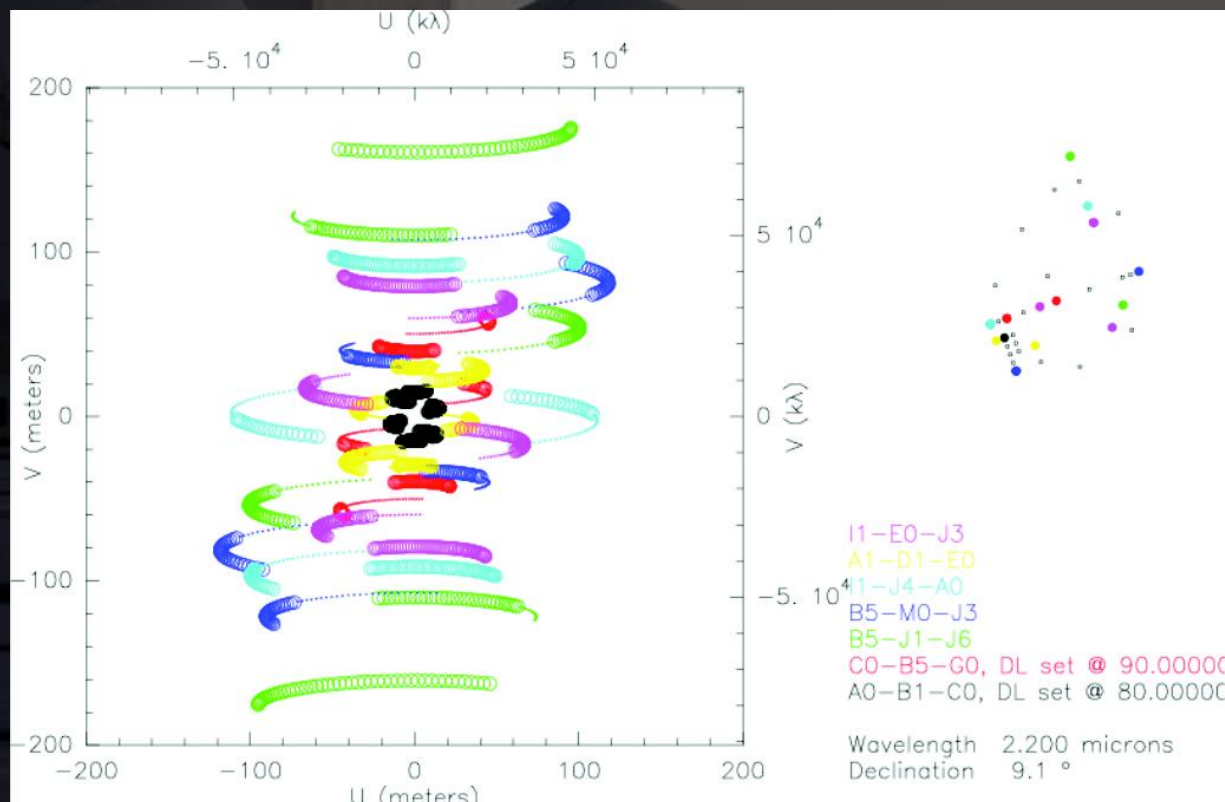
PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

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



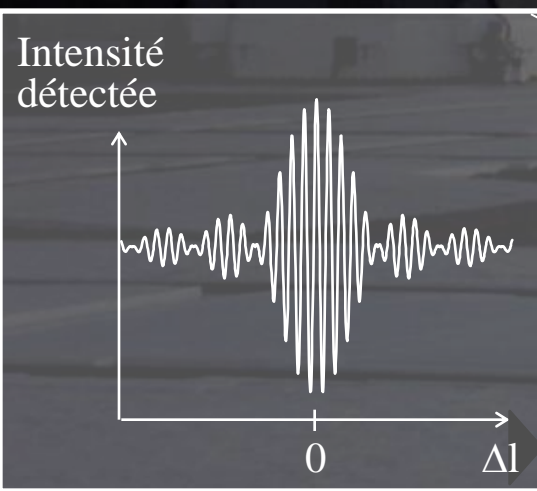
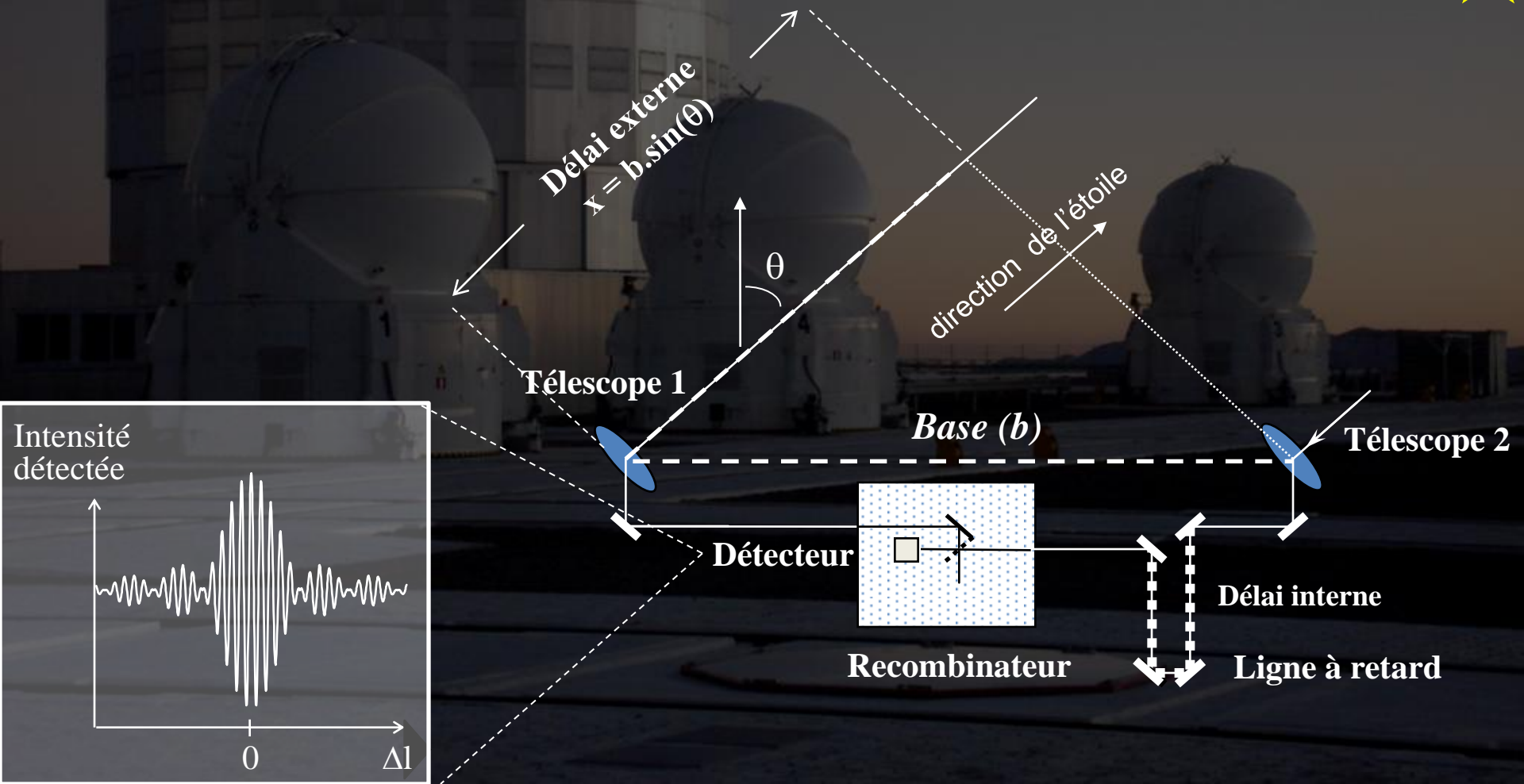
PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

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



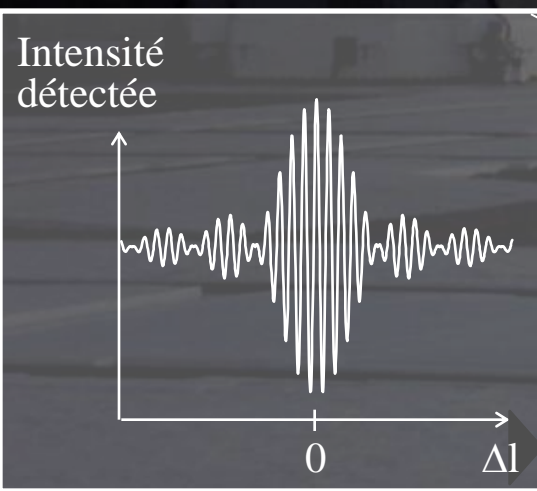
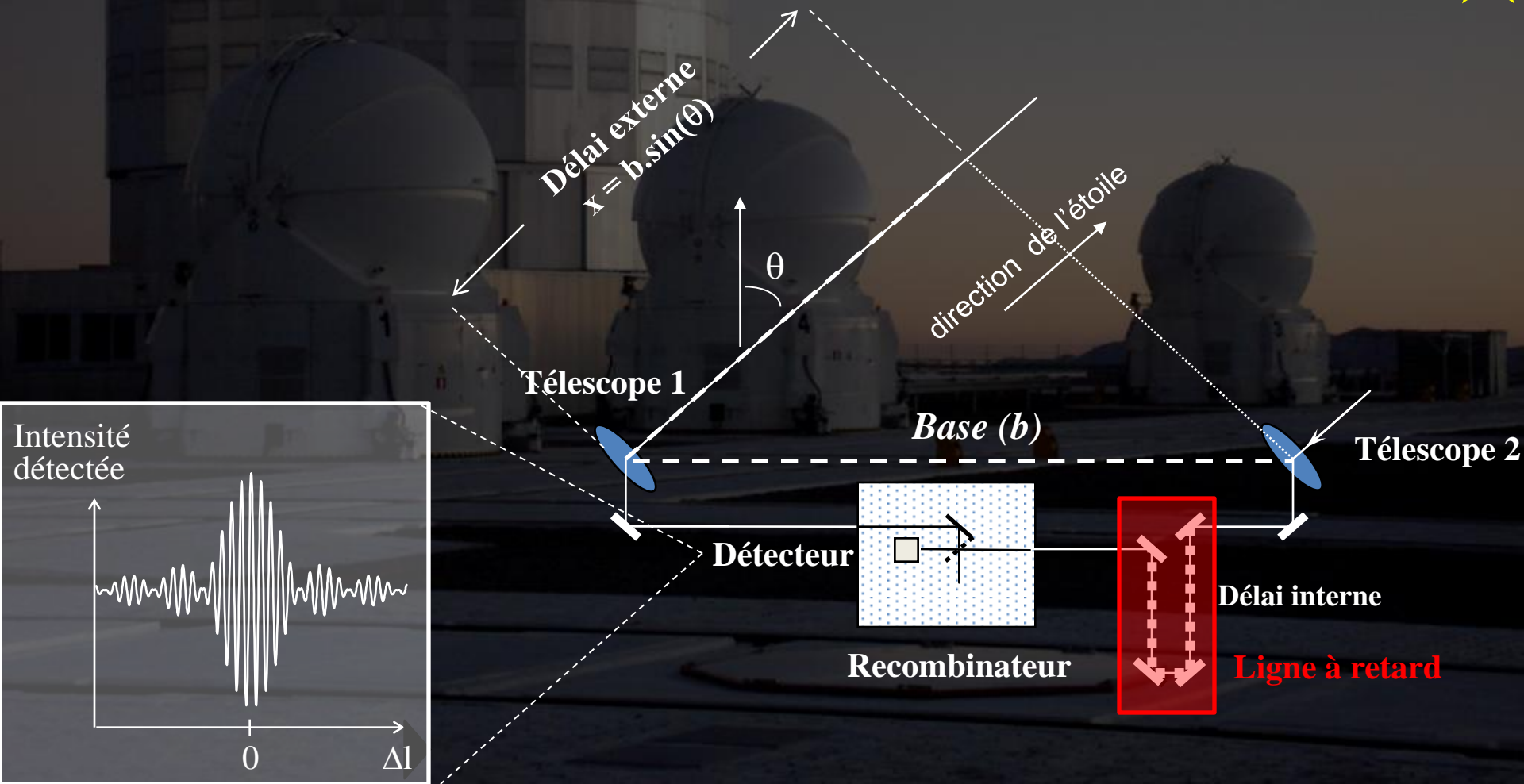
PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

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



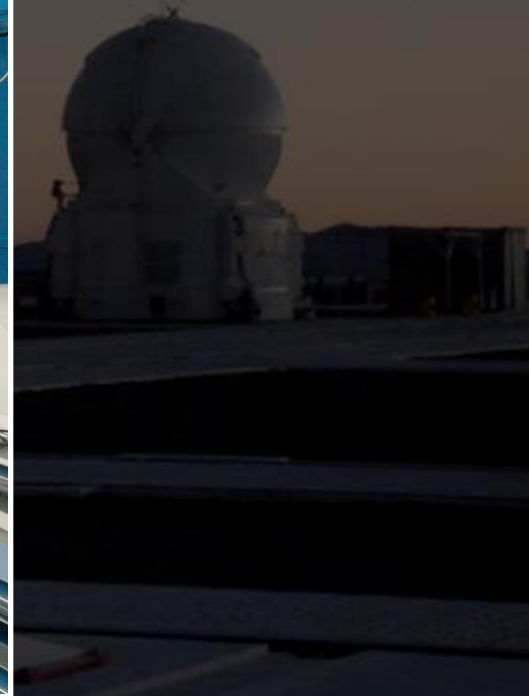
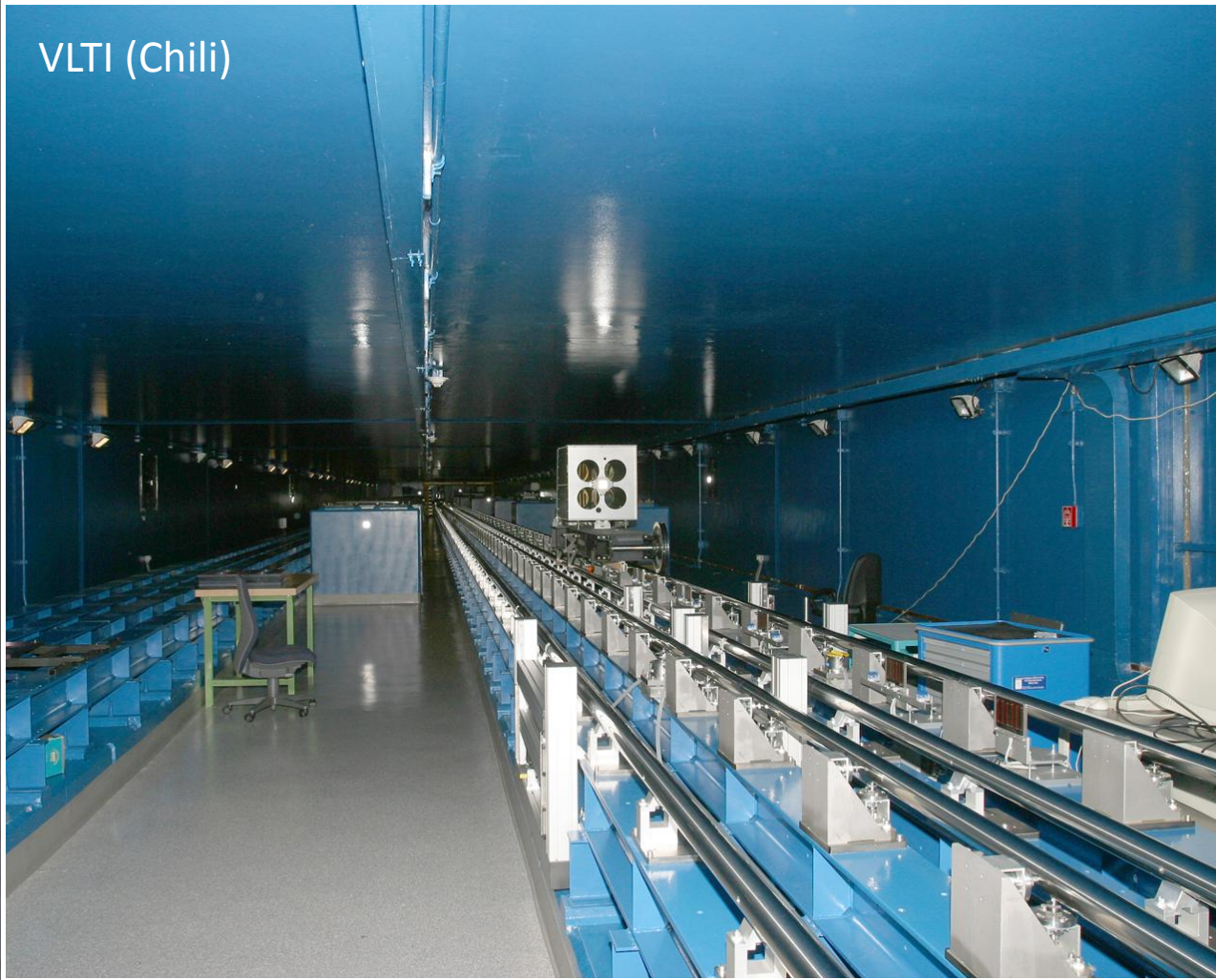
PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

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



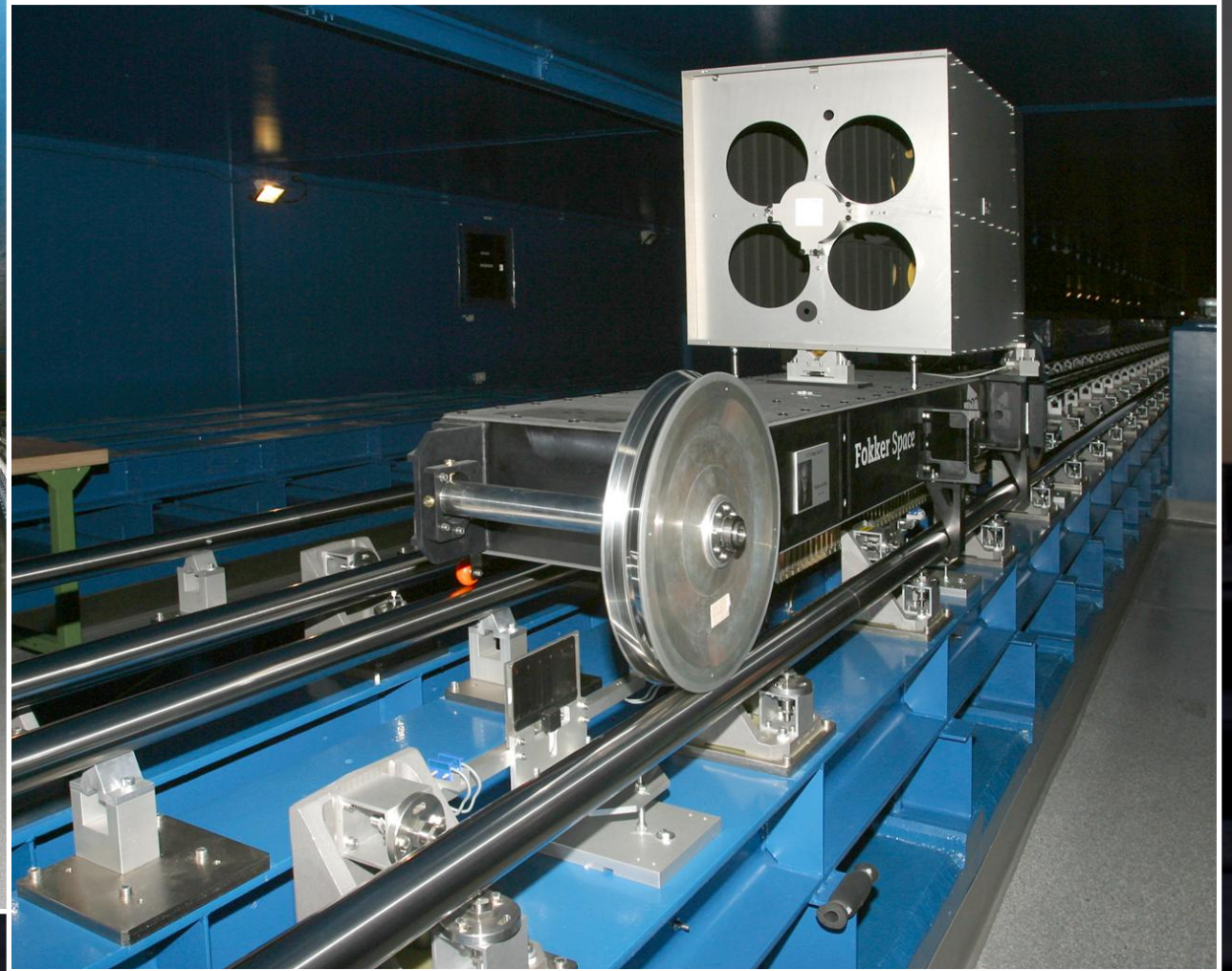
LIGNE À RETARD

VLTI (Chili)



LIGNE À RETARD

VLT (Chili)



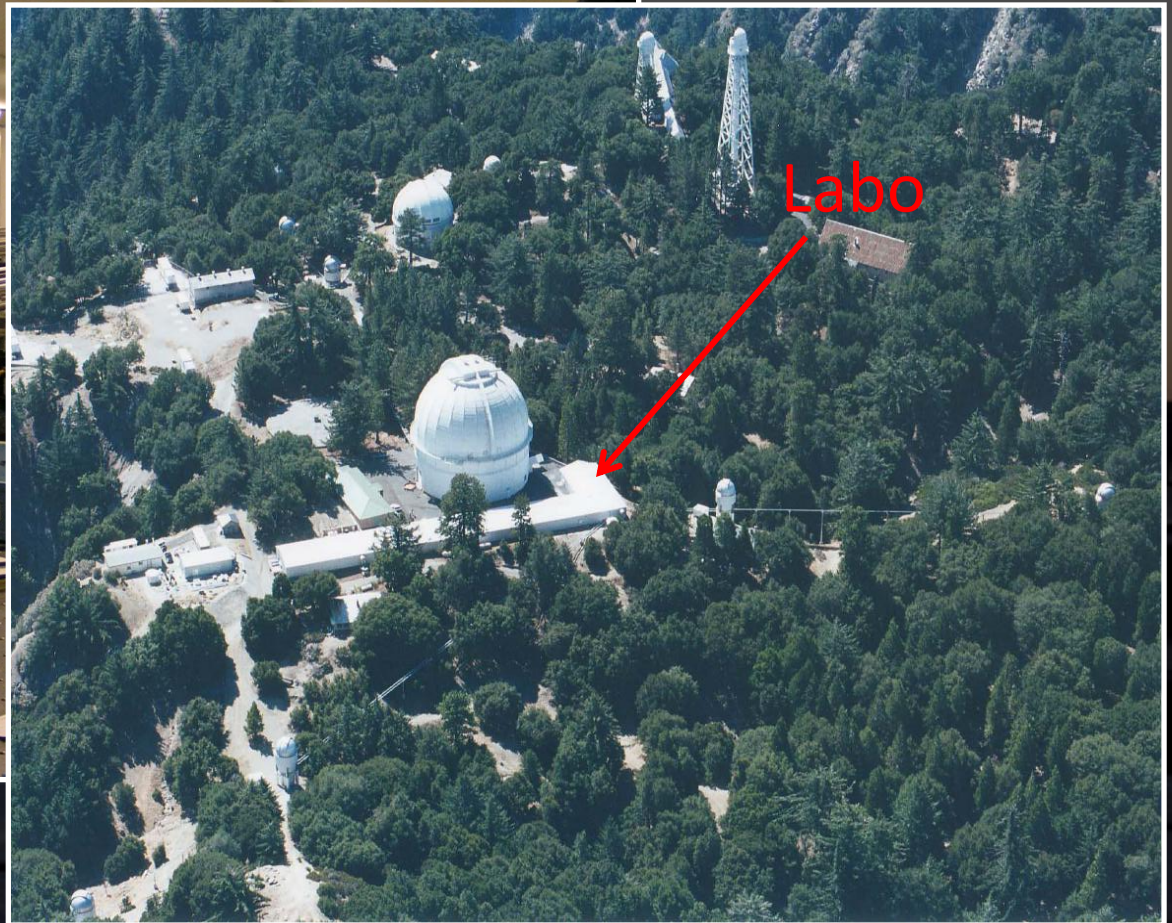
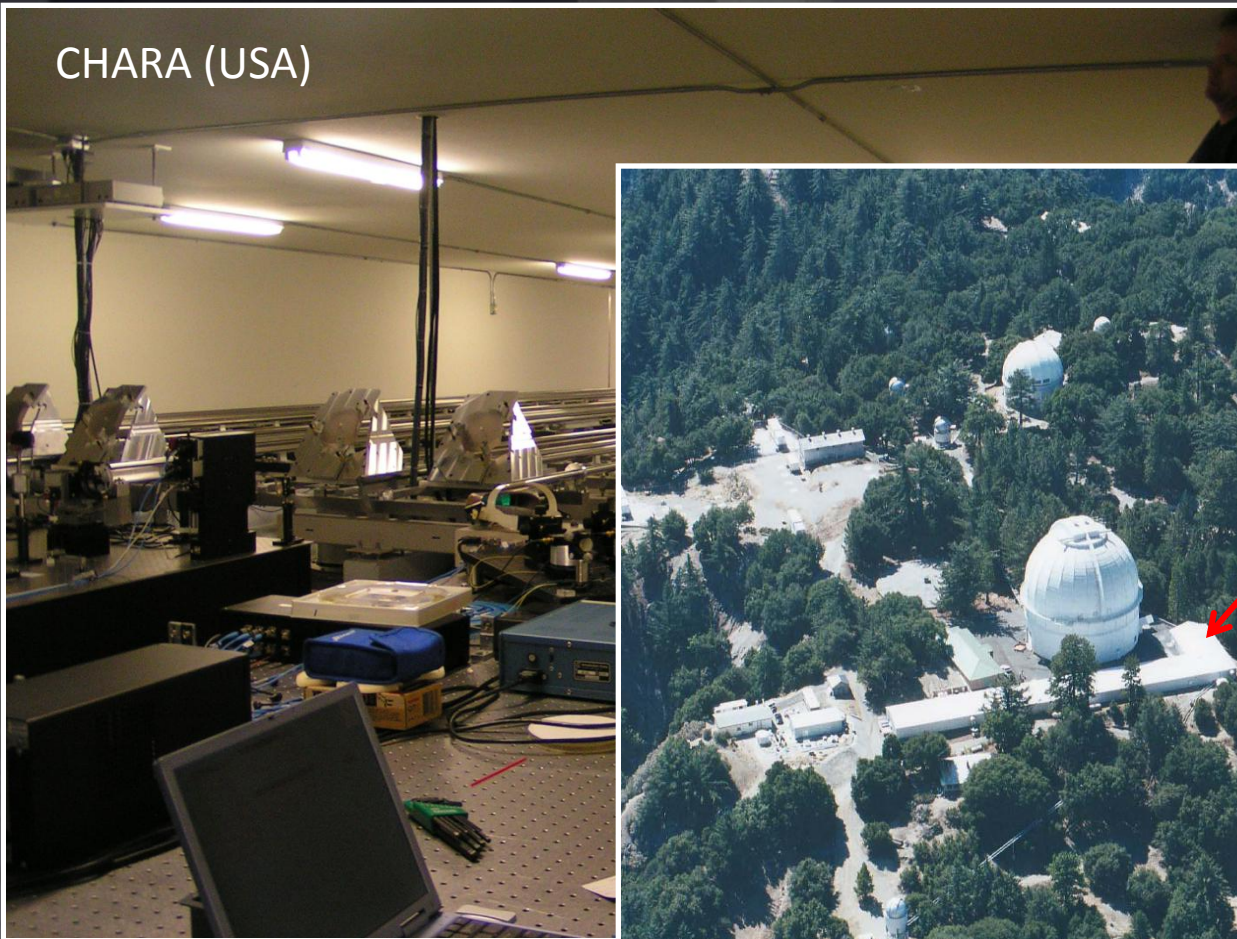
LIGNE À RETARD

CHARA (USA)

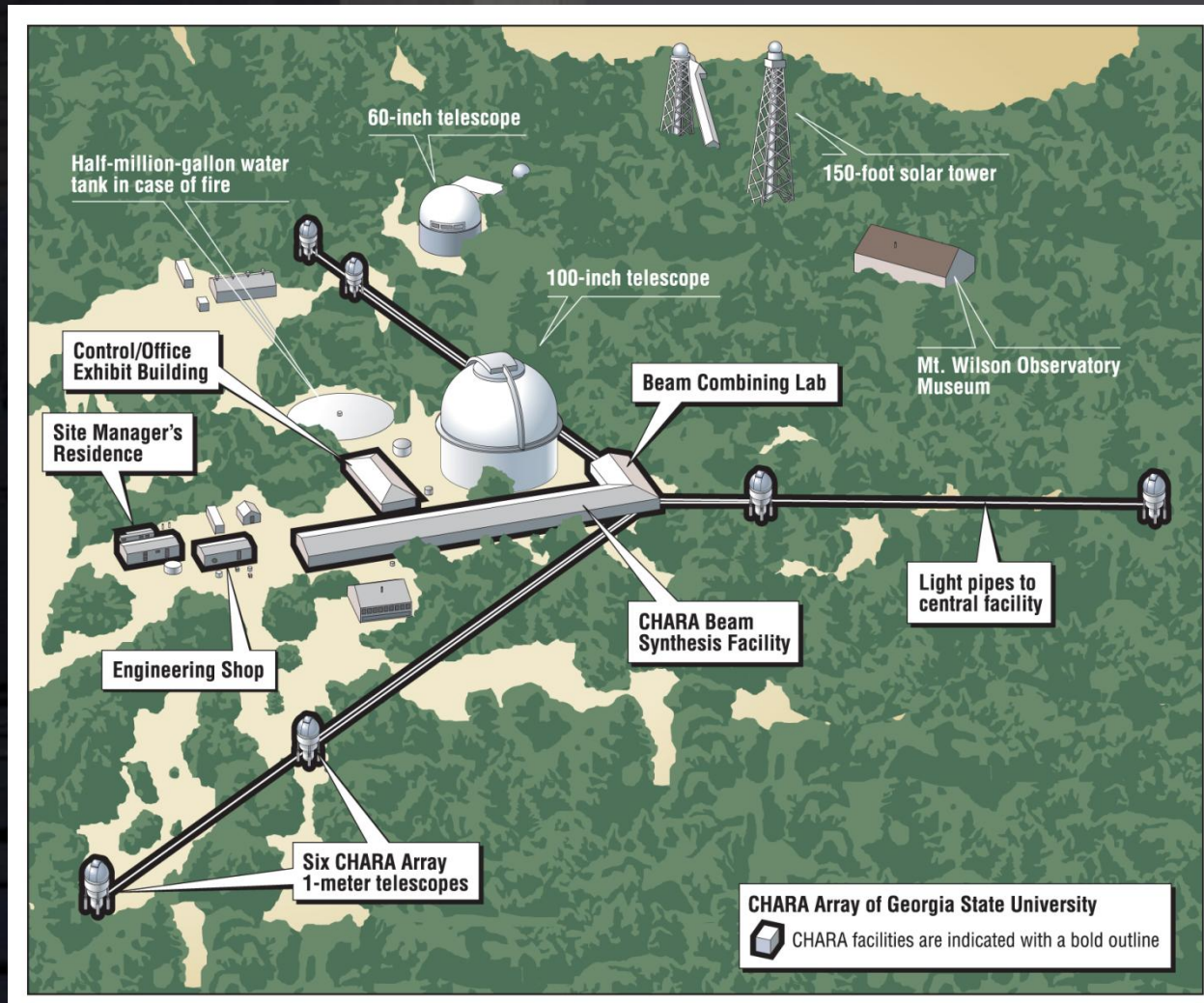


LIGNE À RETARD

CHARA (USA)



COMBINAISON DES TELESCOPES



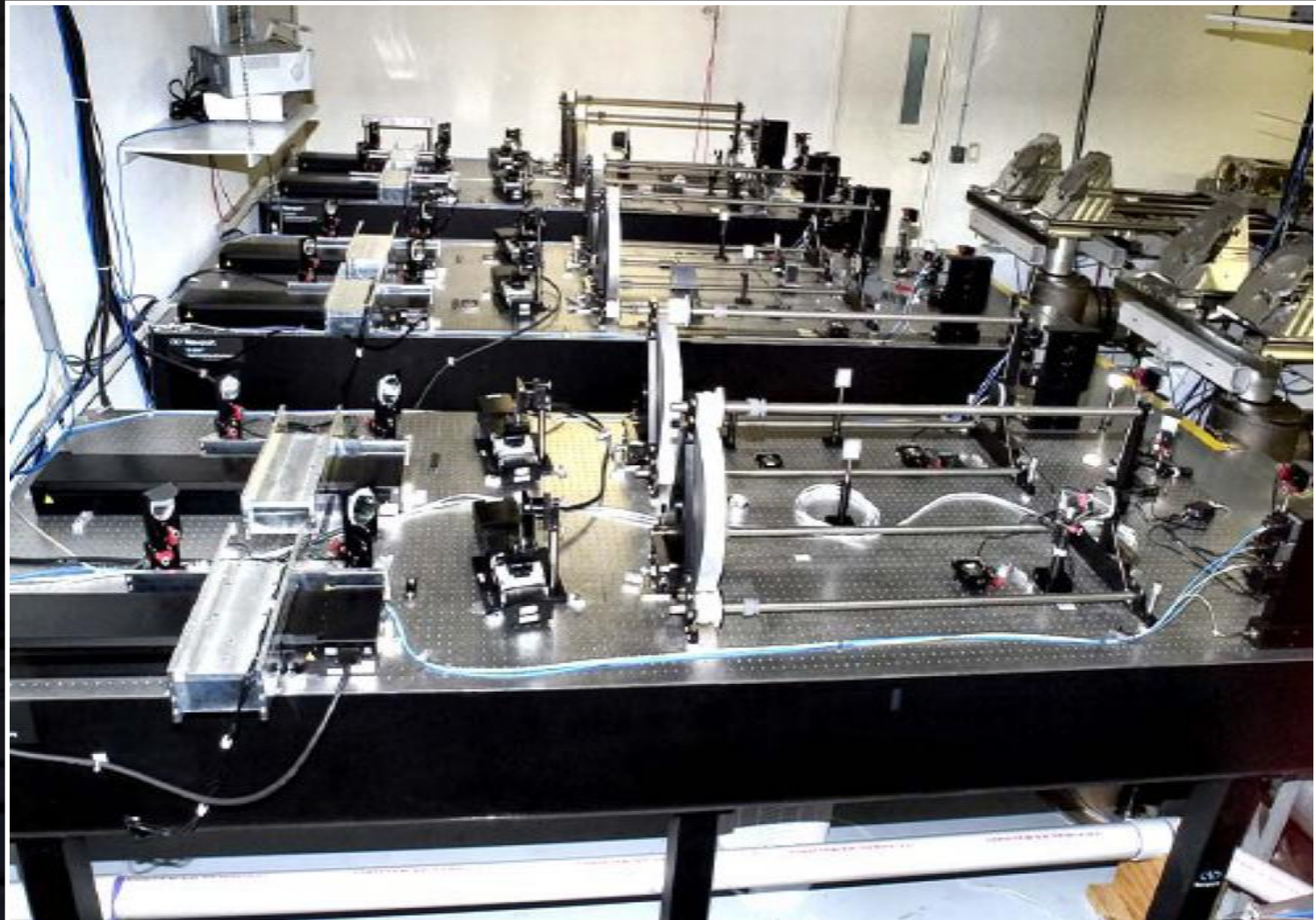
COMBINAISON DES TELESCOPES



COMBINAISON DES TELESCOPES

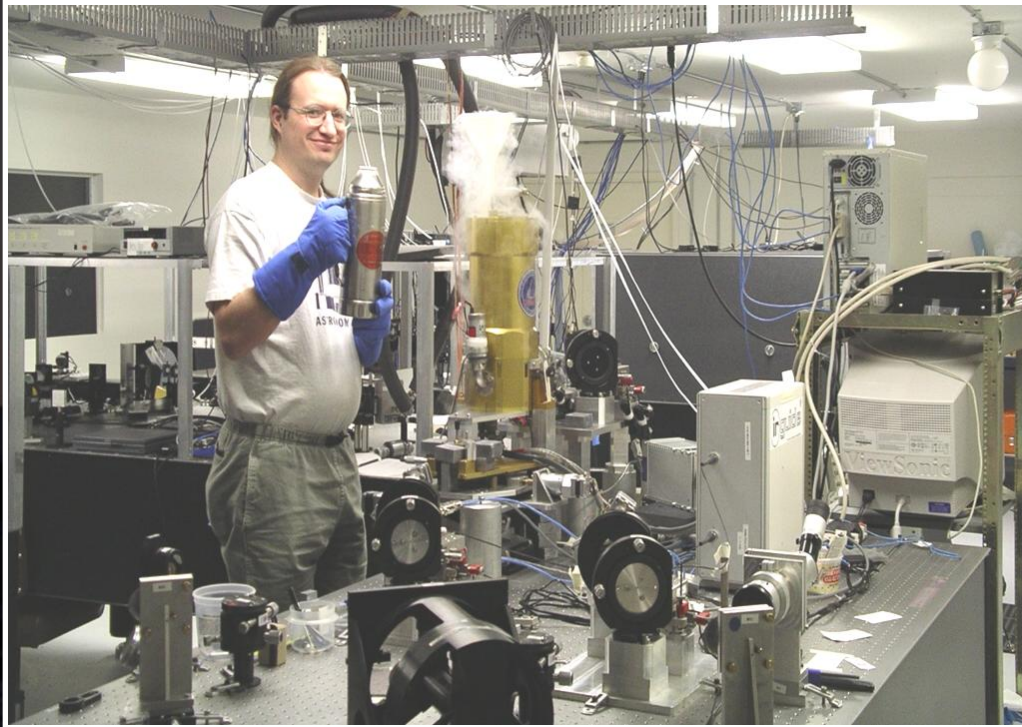


COMBINAISON DES TELESCOPES



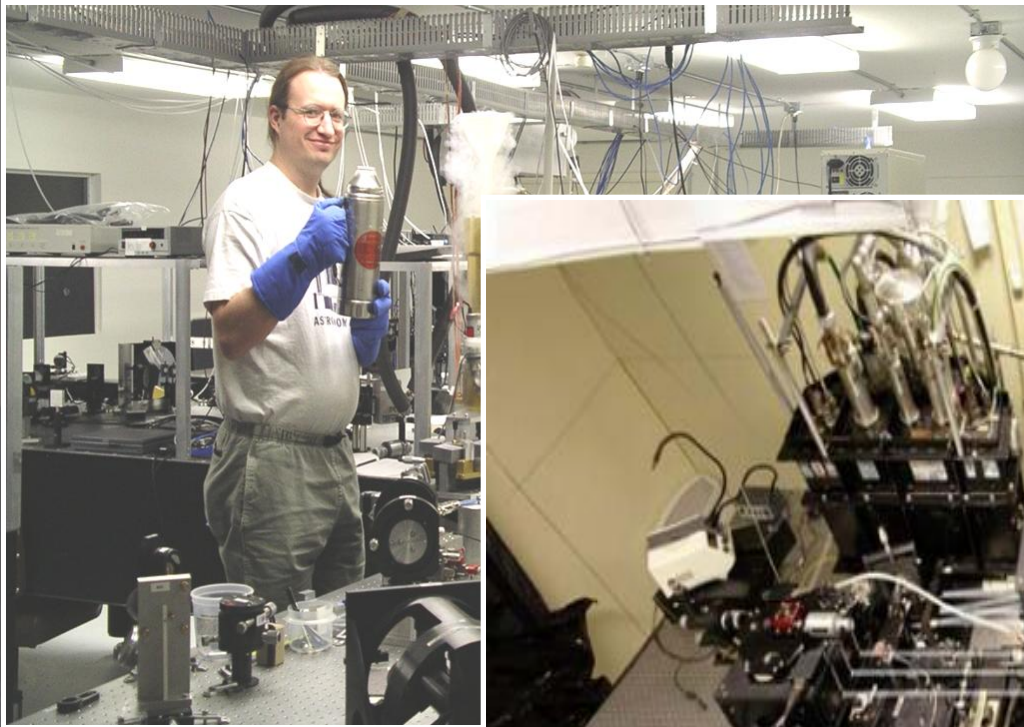
BANC DE RECOMBINAISON

FLUOR@CHARA



BANC DE RECOMBINAISON

FLUOR@CHARA



AMBER@VLT1



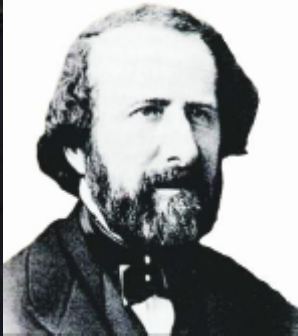
APERCU



- C'est quoi l'interférométrie?
- **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.

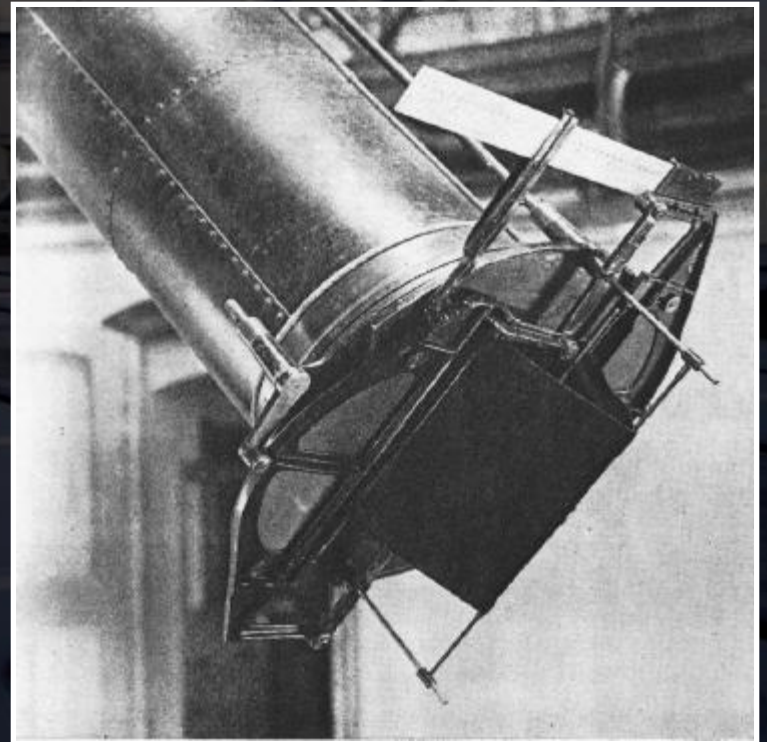
BREF HISTORIQUE

- 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 $0.158''$



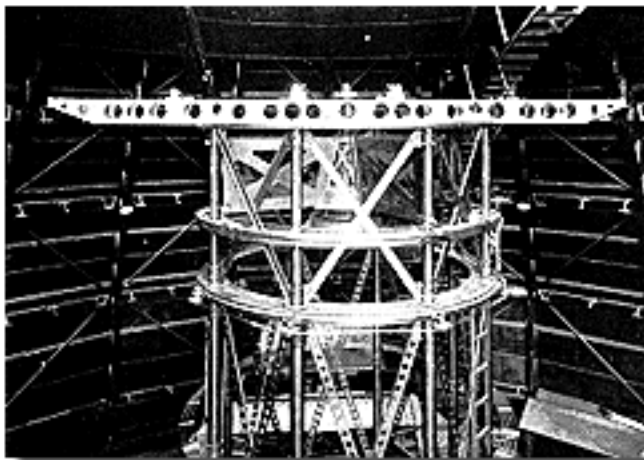
BREF HISTORIQUE

- 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...

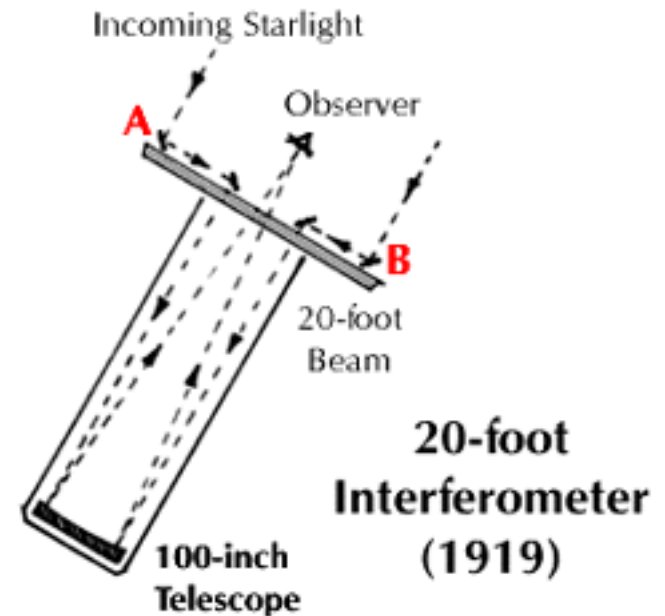


BREF HISTORIQUE

- 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.



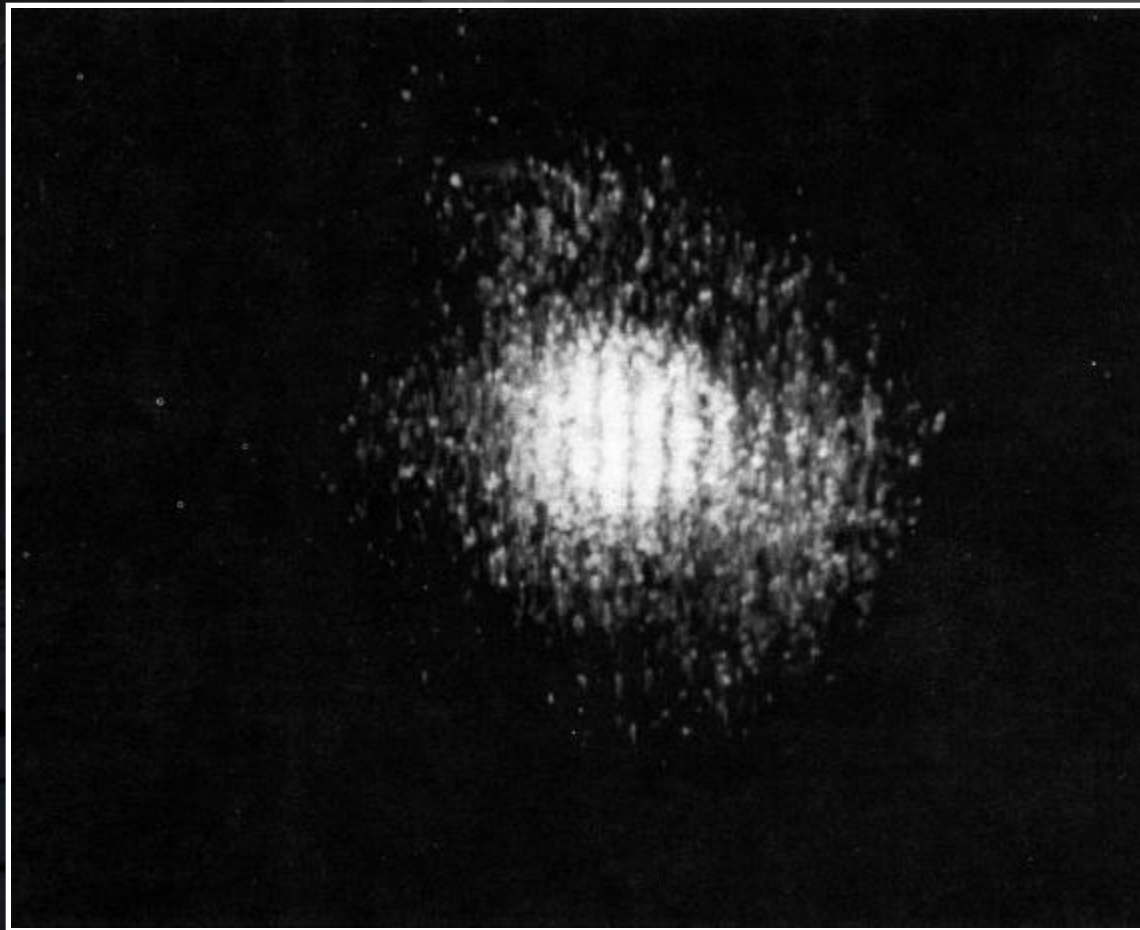
Small mirrors on the 20-foot beam directed light into the telescope. The effective diameter of the telescope has now become the distance between mirror **A** and **B**.

BREF HISTORIQUE

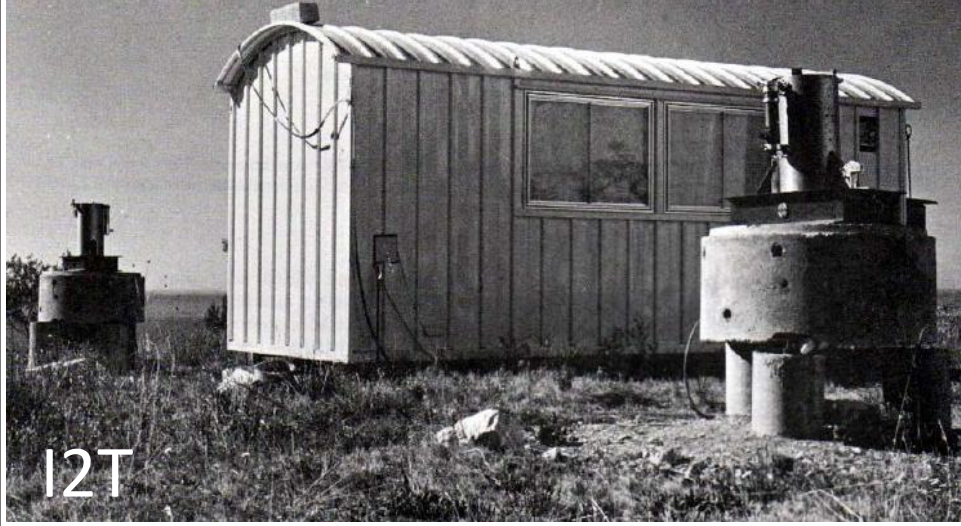
- 1932 – naissance de la radio astronomie
 - Génération d'ingénieurs « radar » suite à la 2^e guerre mondiale
 - Développement de la radio astronomie dans les années 50
- 1956 – Nouveau type d'interféromètre (en intensité, Hanbury Brown)
 - Mesure du diamètre angulaire de Sirius (1956)
 - Construction 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)



I2T

GI2T



IOTA



SUSI

APERCU



- C'est quoi l'interférométrie?
- 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)

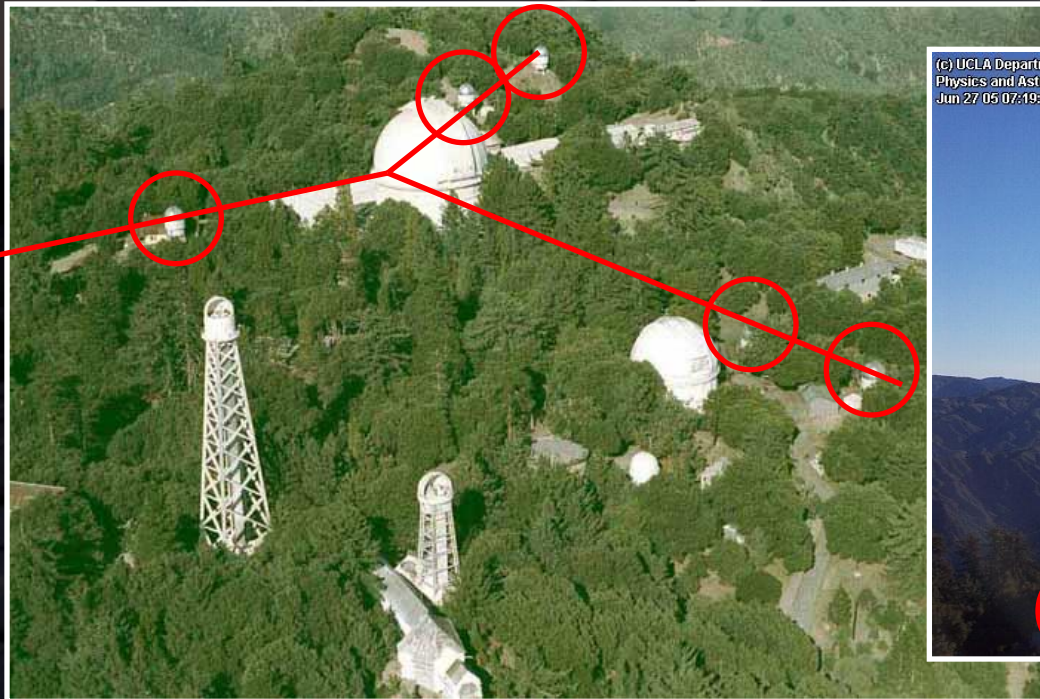
- 2 télescopes de 10m
- Premières franges en 2001



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



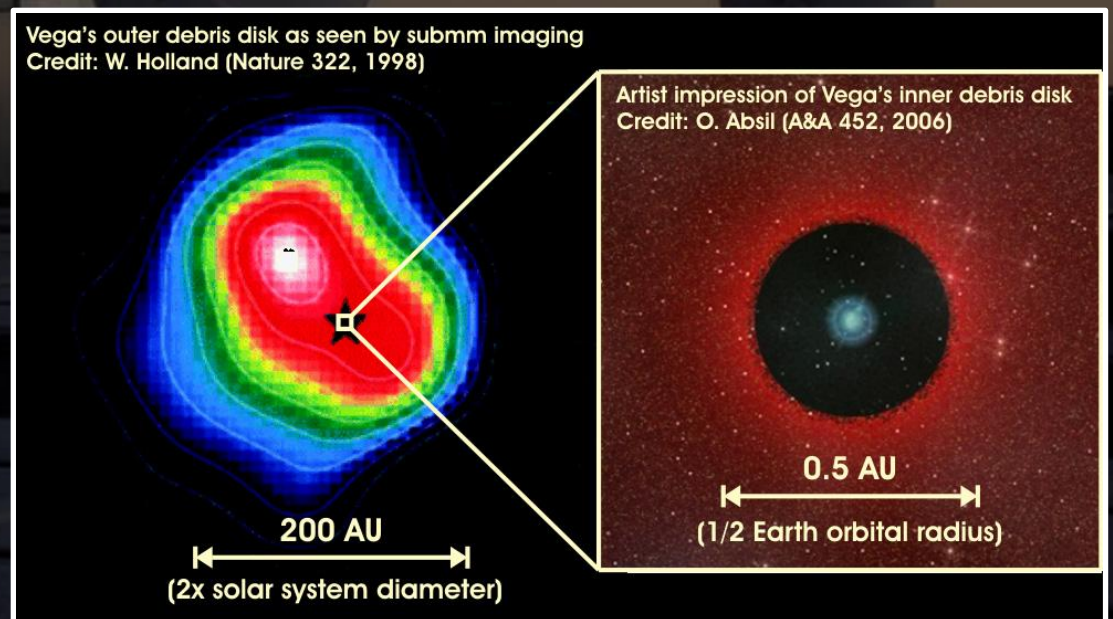
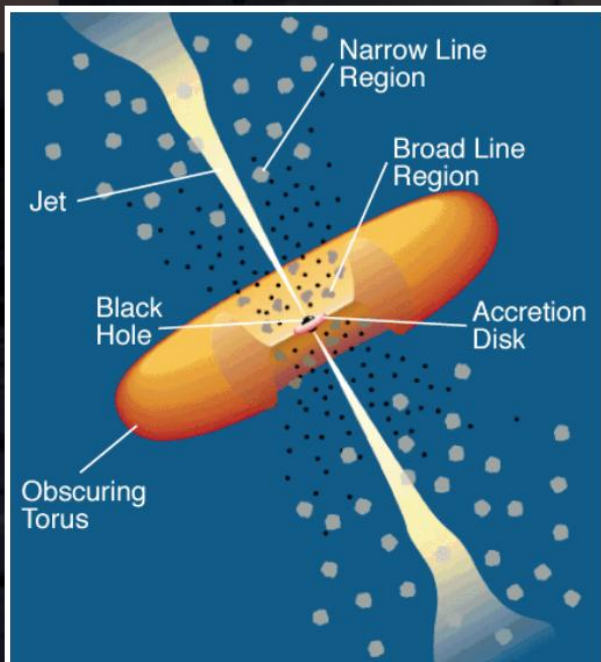
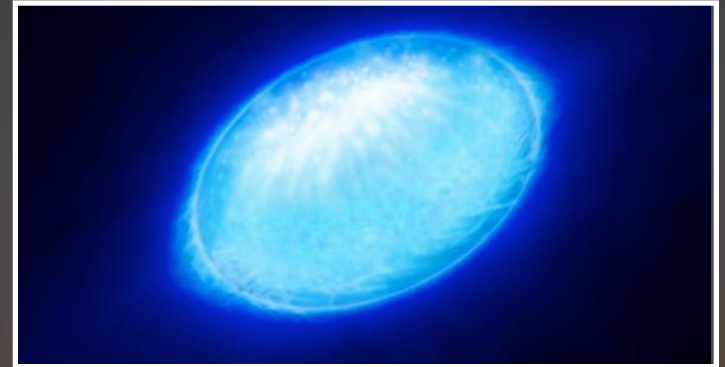
APERCU



- C'est quoi l'interférométrie?
- 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



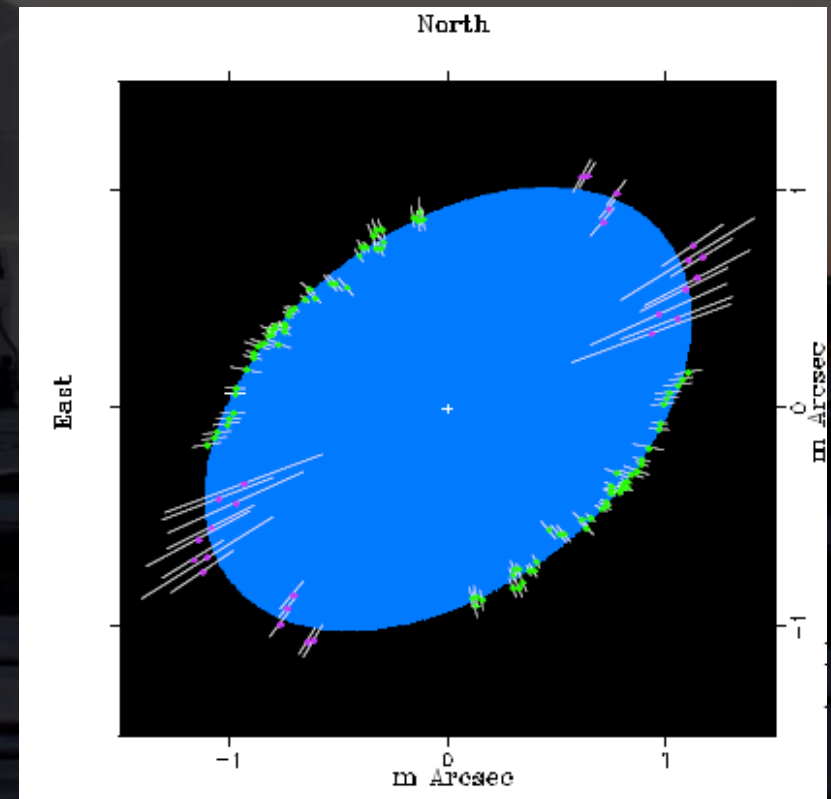
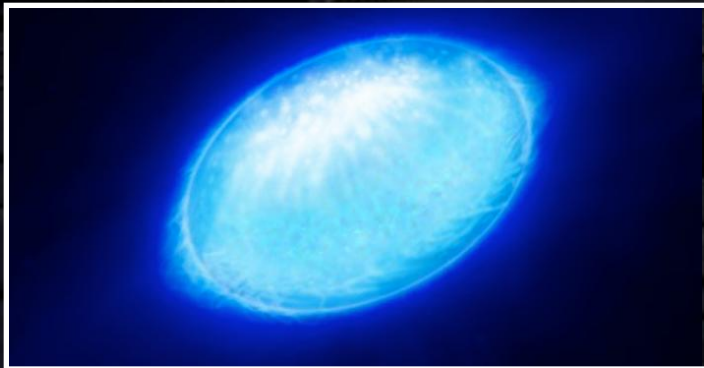
ÉTUDE DES ÉTOILES

- Mesure du diamètre et de la température des étoiles
- Étude des binaires:
 - Masses, luminosités,...
 - 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 :

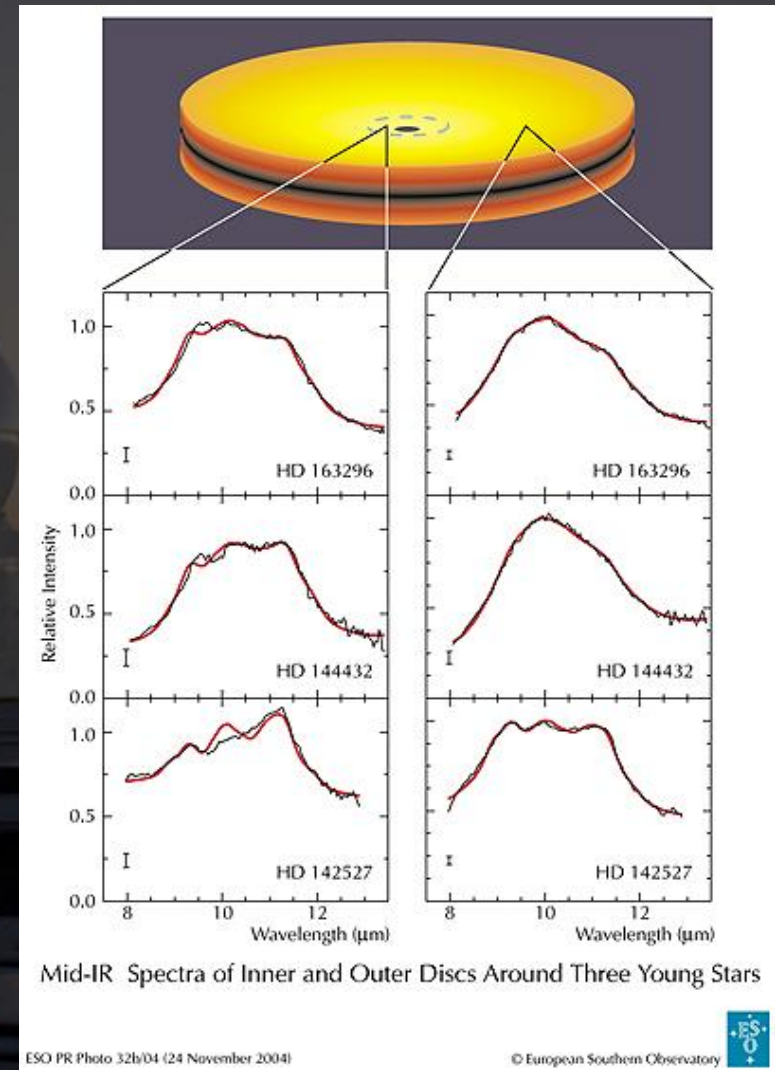
- Observée avec VLT/VINCI - Domiciano de Souza et al. (2003)
- Rotateur rapide
- Plus plate qu’attendue:
 $2a/2b = 1.56 \pm 0.05$
- Défis théoriques...



ÉTUDE DES DISQUES

1. Autour des YSO

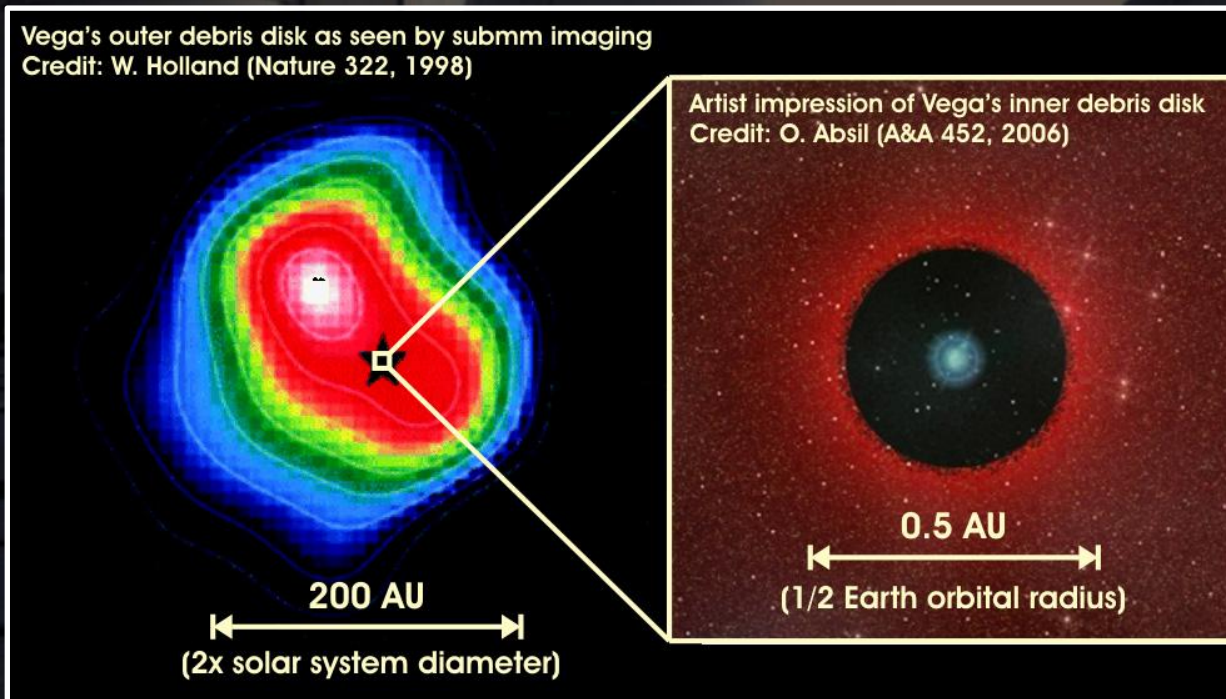
- PTI/IOTA/Keck:
 - Disques plus larges que prévu
 - Cavité interne
- VLT/MIDI:
 - Spectroscopie
 - 11.3 μm indique la présence de cristaux de silicates dans la région internes
 - Les briques nécessaire pour les planètes telluriques présents très tôt



ÉTUDE DES DISQUES

2. Disque de débris

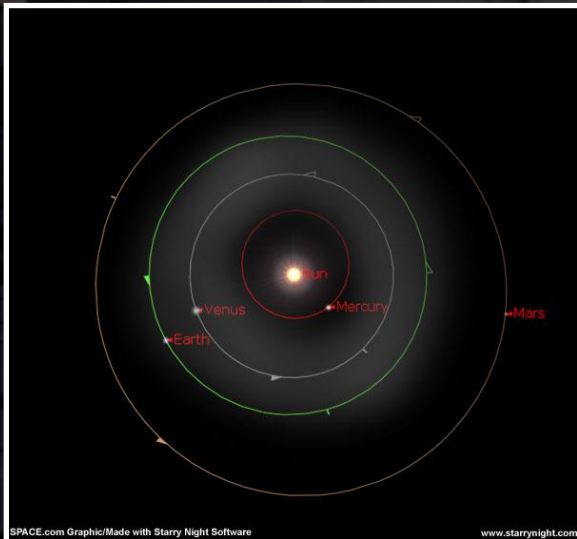
- Première détection grâce à l'interférométrie: Vega (Absil et al. 2006)
- Environ 1% du flux stellaire dans l'infrarouge



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

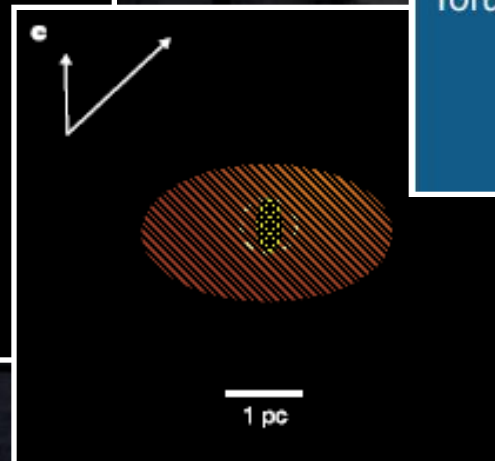
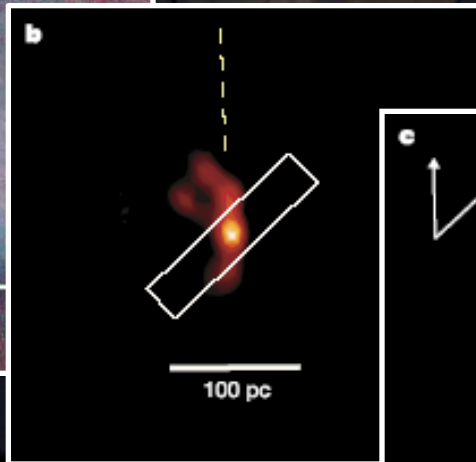
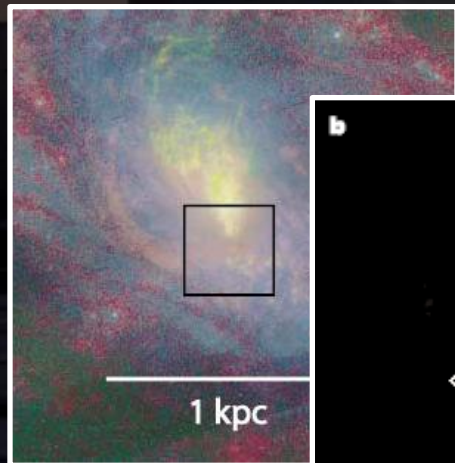
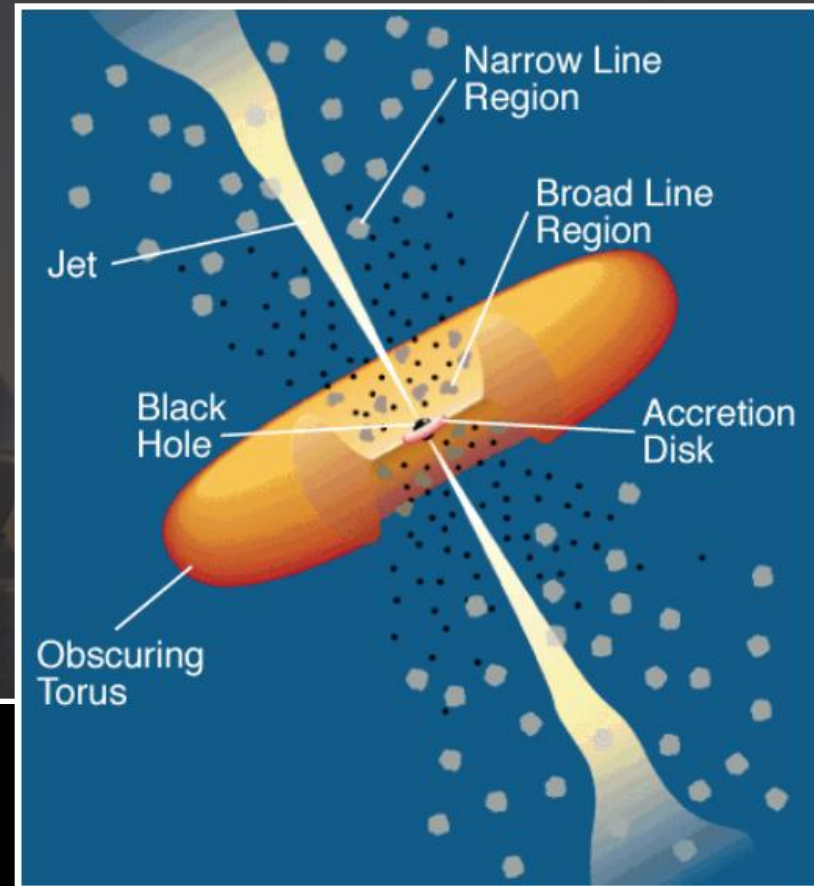
www.starrynight.com



© 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 pc et 3 pc de diamètre
- En accord avec les prédictions théoriques



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, μ 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...)
- ...

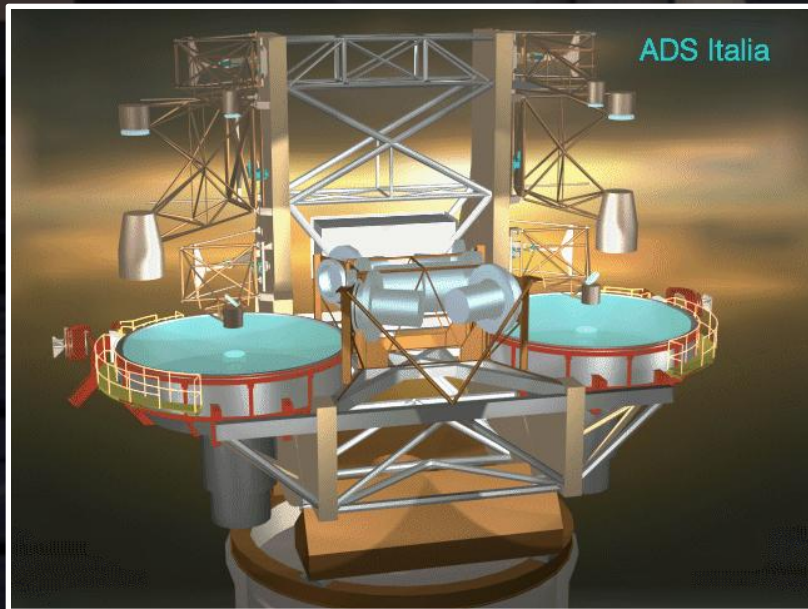
APERCU



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

FUTURS INSTRUMENTS

- Large Binocular Telescope (~2011)
 - 2 télescopes de 8m
- Madgalena Ridge Observatory (~2011)
 - 10 télescopes de 1.4m



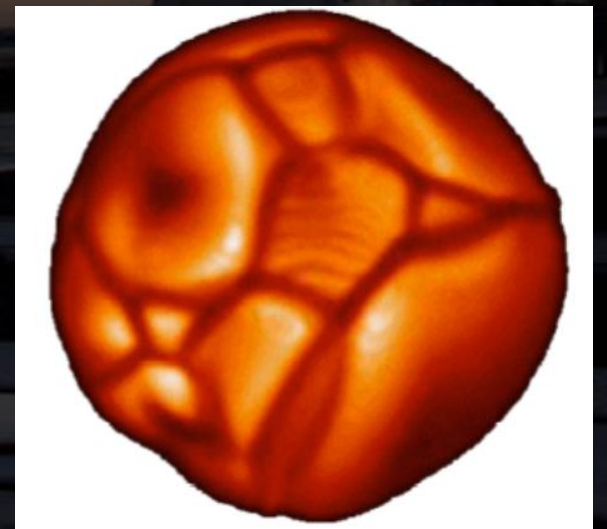
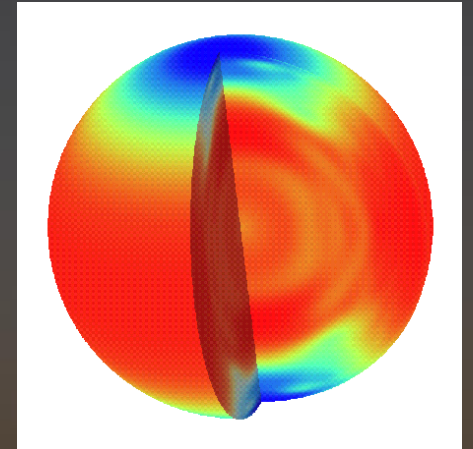
APERCU



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

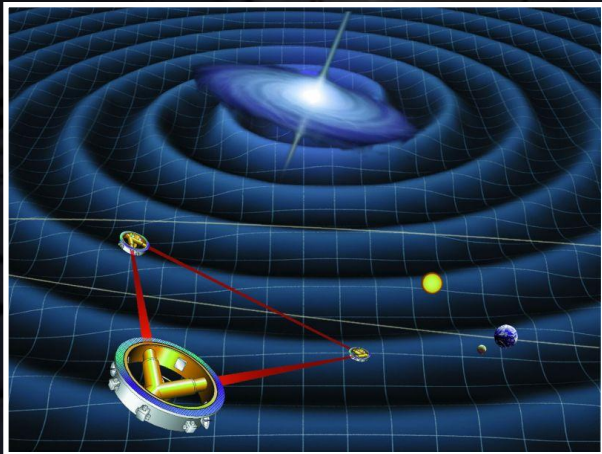
PERSPECTIVES À LONGS TERMES

- Paramètres fondamentaux des étoiles
 - M, L, R, age... pour tous les types spectraux
 - Profile 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



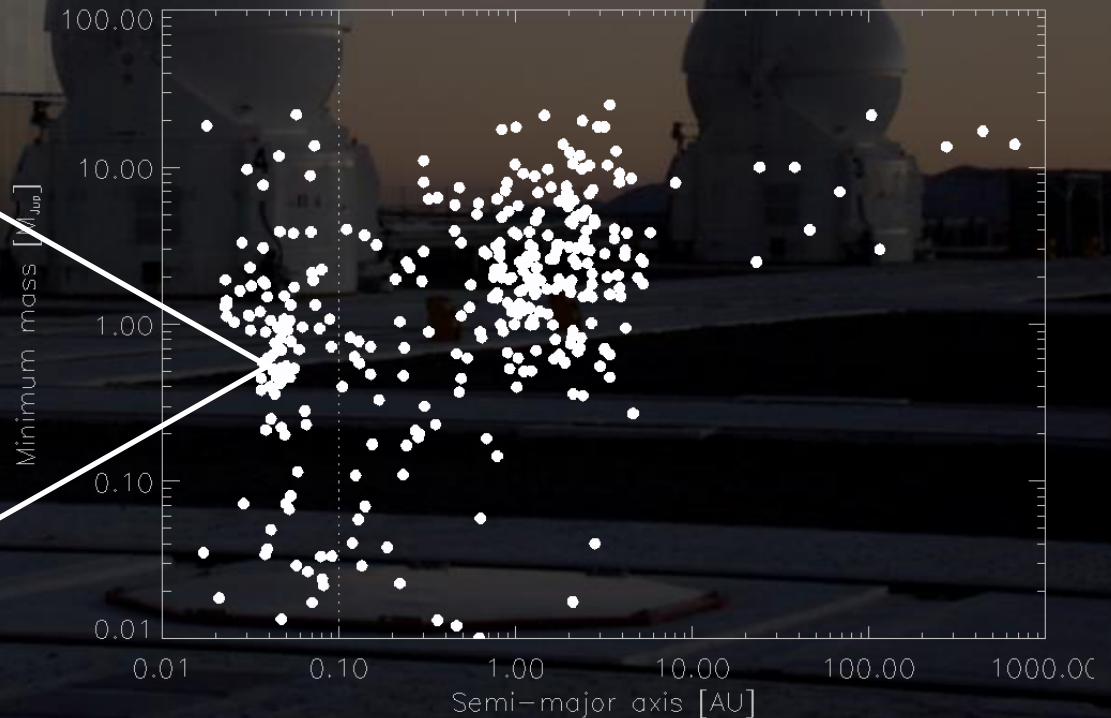
PERSPECTIVES À LONGS TERMES

- 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



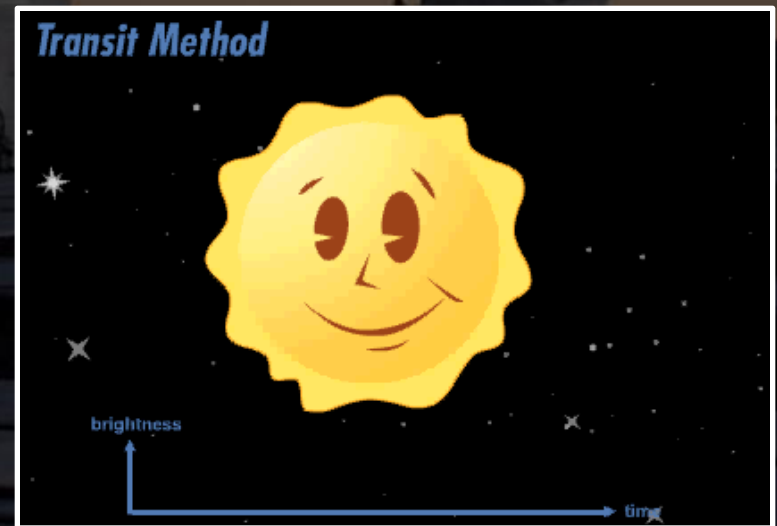
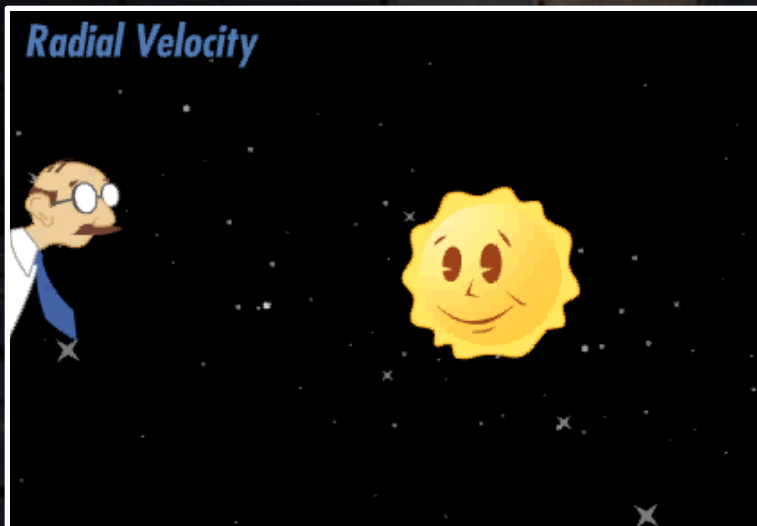
CARACTERISER DES EXO-TERRES

- Statut sur les exoplanètes
 - Première planète extrasolaire détectée en 1995
 - Environ 430 planètes détectées à ce jour
 - Techniques actuelles limitées



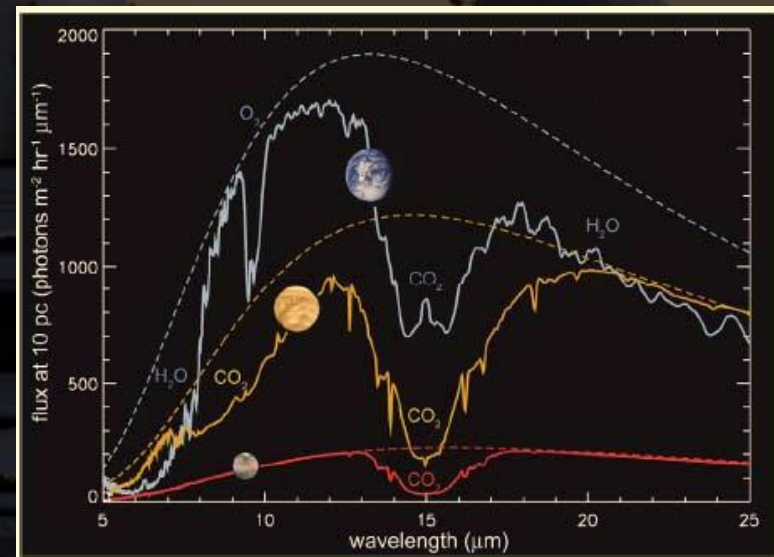
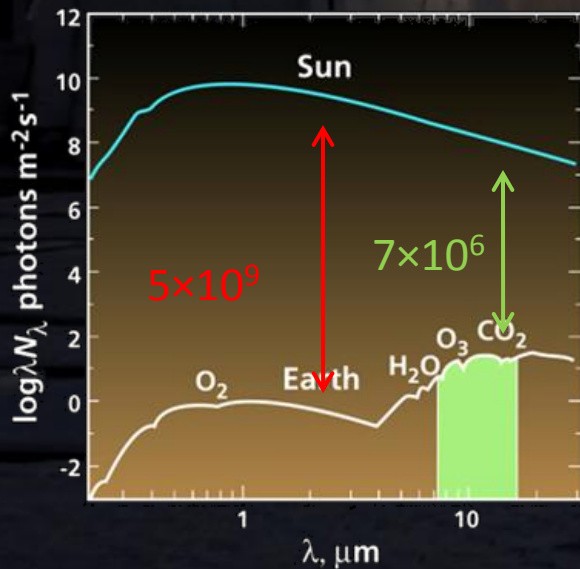
CARACTERISER DES EXO-TERRES

- Statut sur les exoplanètes
 - Première planète extrasolaire détectée en 1995
 - Environ 430 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

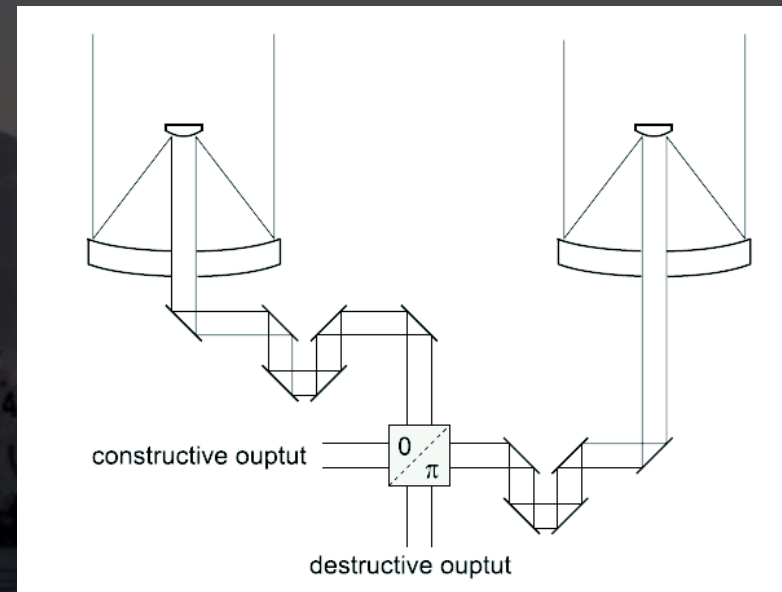
*...cachée par
le phare.*



A lighthouse on a rocky coastline with a large red thought bubble overlaying the scene. The text is written in white, bold, sans-serif font within the bubble.

Caché dans le
brouillard exozodiacal

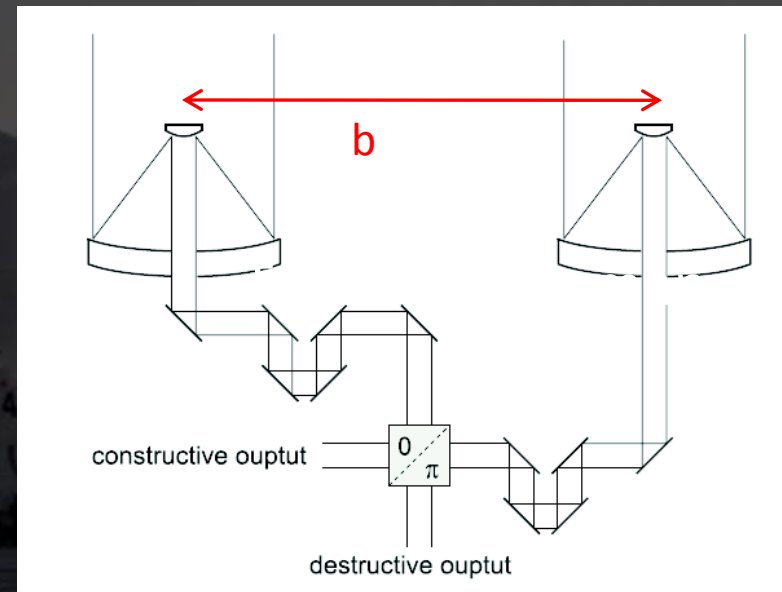
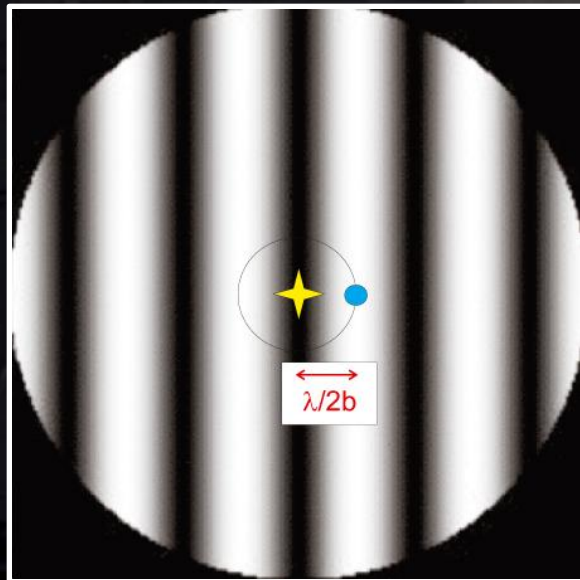
INTERFÉROMÉTRIE DESTRUCTIVE



Supprimer la lumière stellaire par interférence destructive

INTERFÉROMÉTRIE DESTRUCTIVE

Carte de transmission



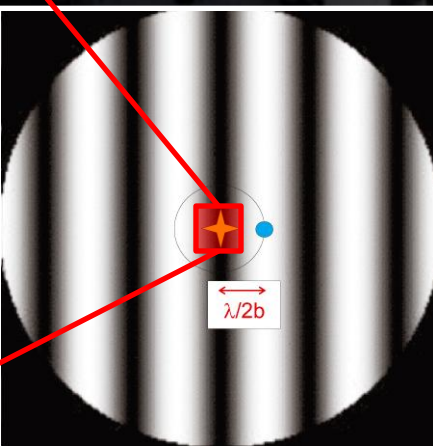
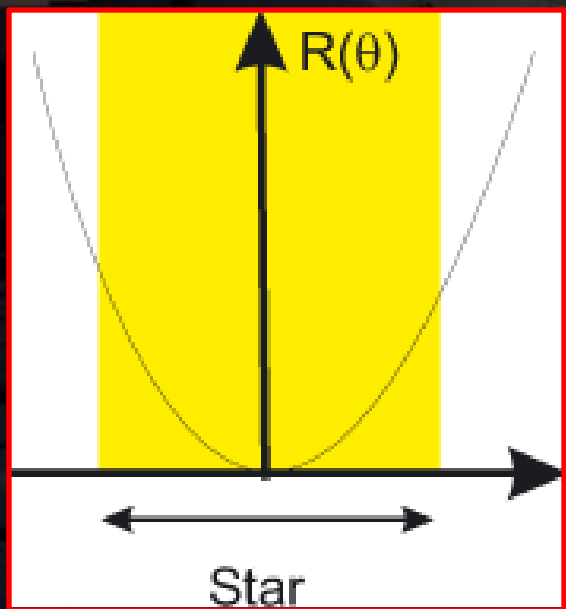
Supprimer la lumière stellaire par interférence destructive

SOURCES DE BRUITS



Système planétaire

Fuite stellaire



Interféromètre de nulling

Carte de transmission

SOURCES DE BRUITS

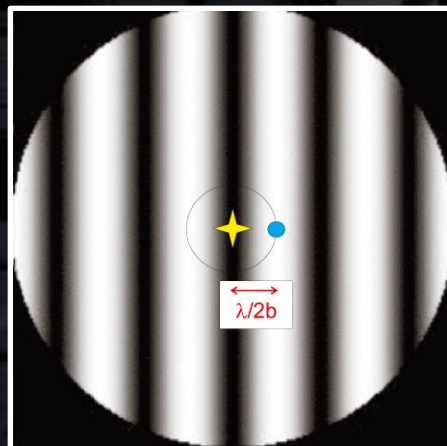


Système planétaire

Nuage zodiacal



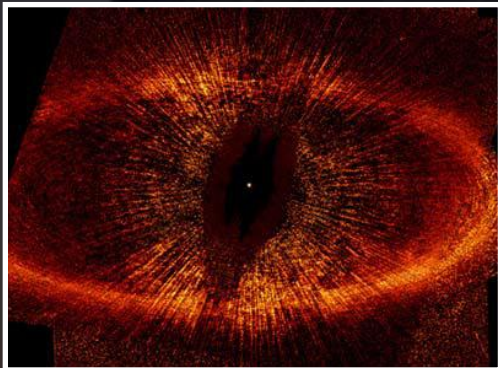
Interféromètre de nulling



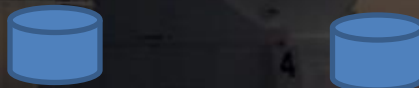
Carte de transmission

SOURCES DE BRUITS

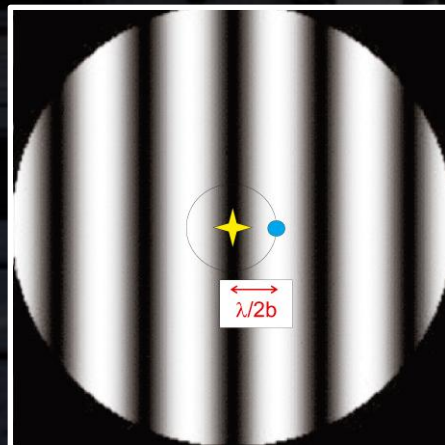
Nuage exozodiacal



Système planétaire

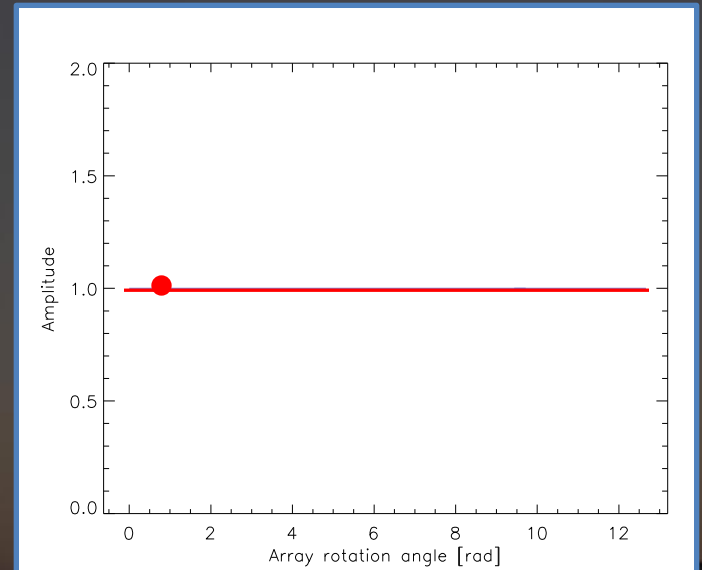
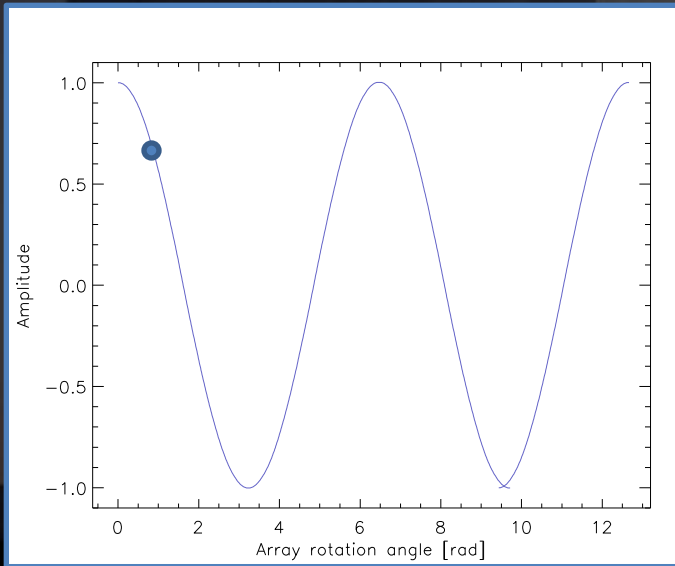


Interféromètre de nulling

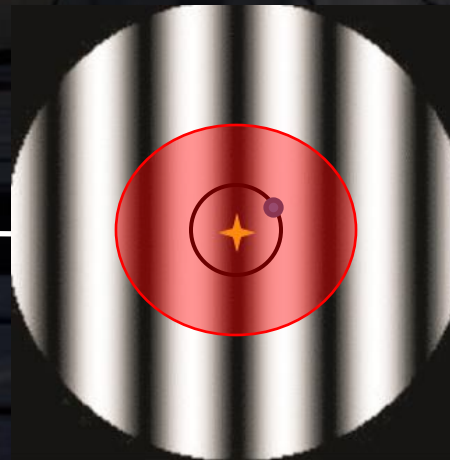


Carte de transmission

INTERFÉROMÉTRIE DESTRUCTIVE

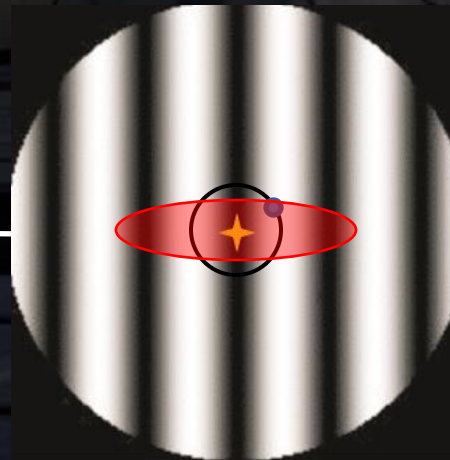
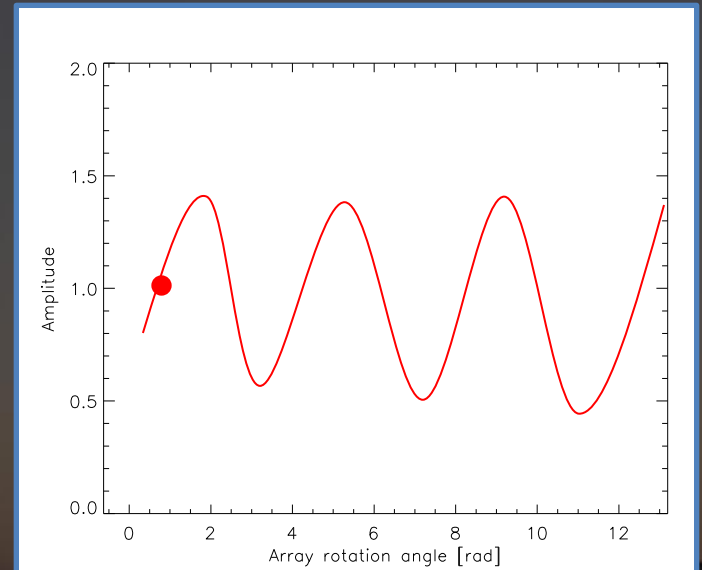
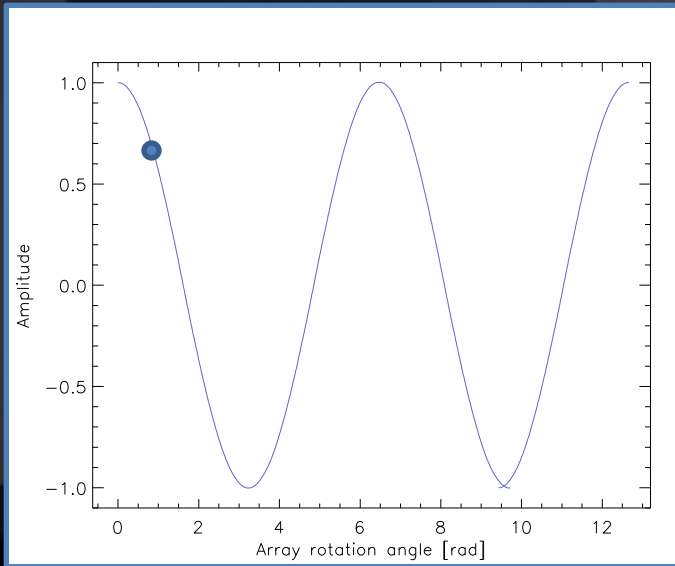


Planète



Sources symétriques

INTERFÉROMÉTRIE DESTRUCTIVE

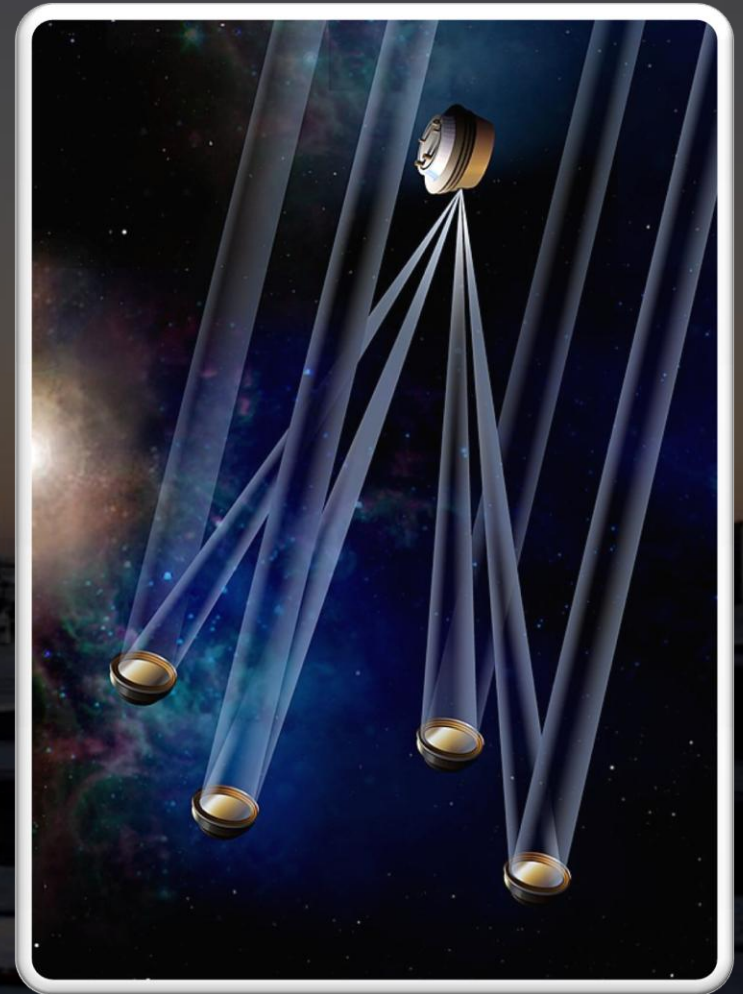
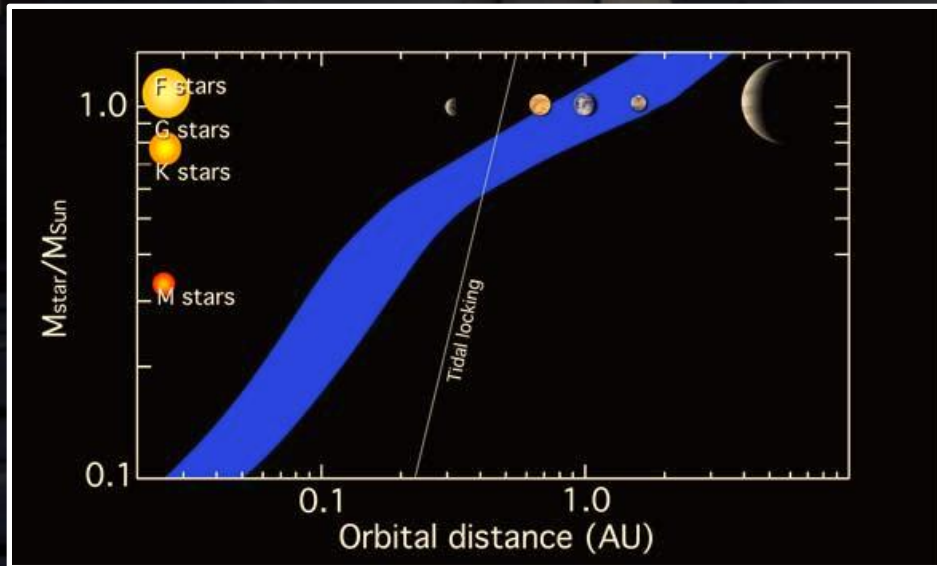


Planète

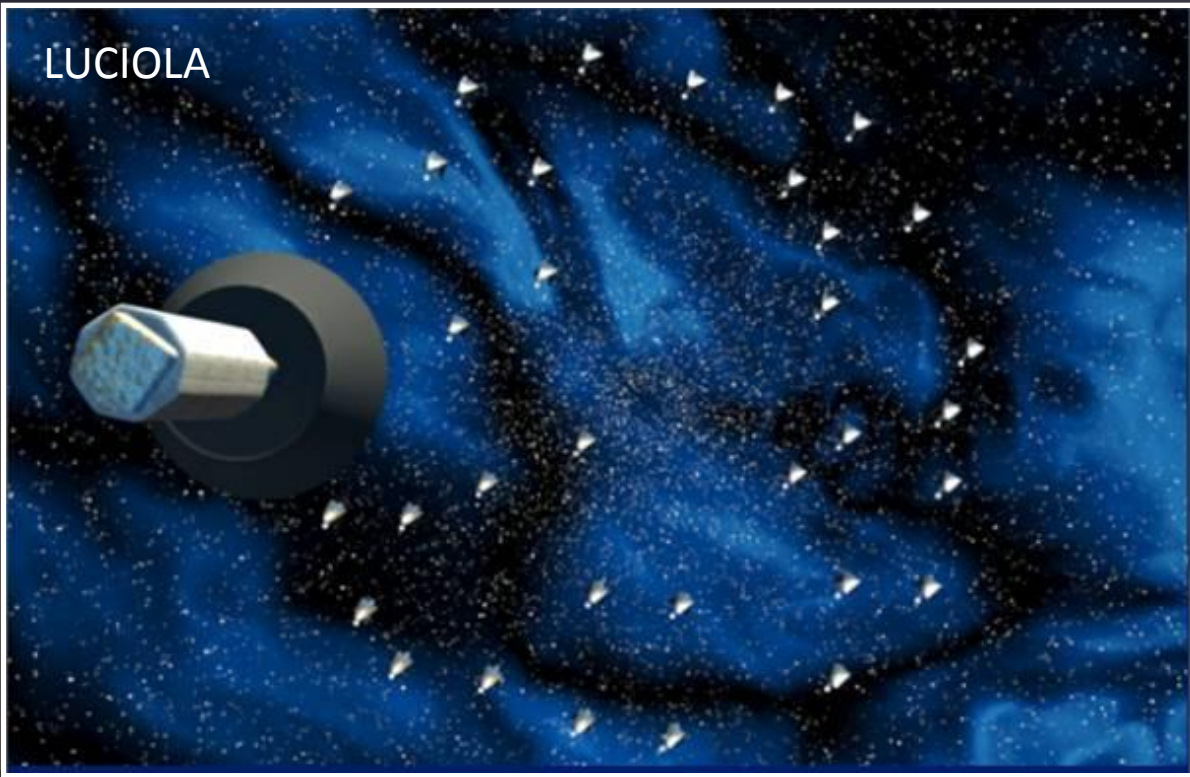
Sources symétriques

DETECTER DE LA VIE EXTRASOLAIRE

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



LUCIOLA



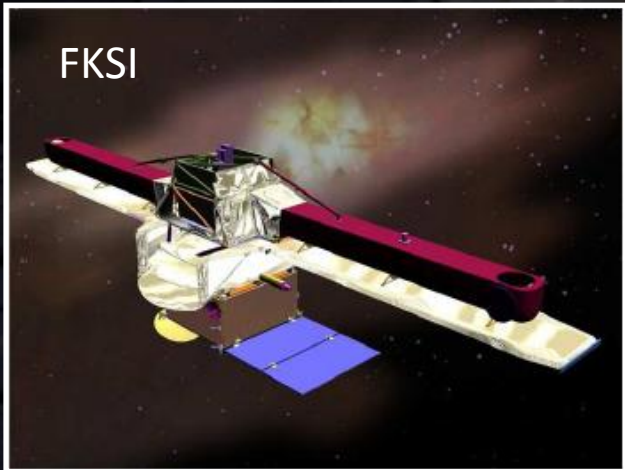
GENIE/VLTI



PEGASE



FKSI



ALADDIN



CONCLUSIONS



- L'interférométrie est entrée pleinement dans l'astronomie "courante"
- Ce changement s'est fait notamment dans un cadre européen, le VLTI
- Il existe de nombreux projets
- Les perspectives à longs termes sont prometteuses

Liens utiles:

- Optical Long Baseline Interferometry News (OLBIN):

olbin.jpl.nasa.gov

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

www.aeos.ulg.ac.be



A blue-tinted image of Earth from space, showing the curvature of the planet and the atmosphere. The text "BACKUPS SLIDES" is overlaid in the center. The image has a dark background with some lens flare effects.

BACKUPS SLIDES

PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

- Cas simple : 2 ondes monochromatiques et polarisées linéairement

$$\mathbf{E}_1 = \Psi_1 e^{-i\omega_1 t} \mathbf{e}_1$$
$$\mathbf{E}_2 = \Psi_2 e^{-i\omega_2 t} \mathbf{e}_2$$

avec

$$\Psi_1 = A_1 e^{i\phi_1}$$

$$\Psi_2 = A_2 e^{i\phi_2}$$

- Superposition (équations de Maxwell linéaires) :

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2$$

- Intensité (moyenne du carré du module du champ électrique)

$$|\mathbf{E}|^2 = \mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* = |\mathbf{E}_1|^2 + |\mathbf{E}_2|^2 + 2 \operatorname{Re}\{\mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2\}$$

TERME D'INTERFERENCE

- Terme d'interférence :

$$2 \operatorname{Re}\{\mathbf{E}_1^* \cdot \mathbf{E}_2\} = 2(\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2) \operatorname{Re}\{\Psi_1^* \Psi_2 e^{-i(\omega_2 - \omega_1)t}\}$$

PRINCIPES DE L'INTERFÉROMÉTRIE

$$2 \operatorname{Re}\{E_1^* \cdot E_2\} = 2(\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2) \operatorname{Re}\{\Psi_1^* \Psi_2 e^{-i(\omega_2 - \omega_1)t}\}$$

- Pas d'interférence si
 - ✓ Moyenne du terme d'interférence nulle, i.e. quand ω_1 différent de ω_2 .
 - ✓ Ondes polarisées orthogonalement : \mathbf{e}_1 et \mathbf{e}_2 orthogonaux.
- En prenant la moyenne, on obtient les intensités :

$$I = I_1 + I_2 + 2(\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2) \{I_1 I_2\}^{1/2} \cos \phi$$

$$\phi = \phi_2 - \phi_1$$

- Cas simple :

