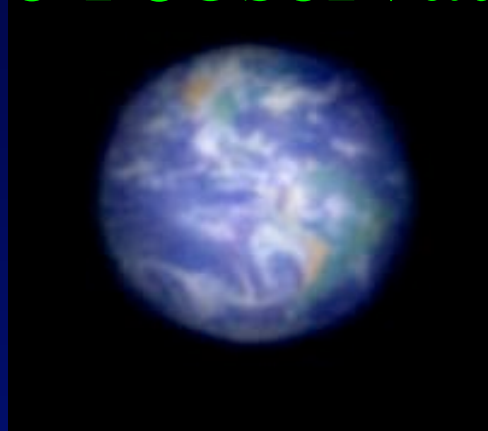


Collège de France

Chaire d' Astrophysique Observationnelle

# Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation



- Cours à Paris les mercredis du 31 Mars au 26 Mai
- Détails sur [www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html](http://www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html)
- les fichiers des projections seront affichés sur [www.oamp.fr/lise](http://www.oamp.fr/lise)

# Calendrier

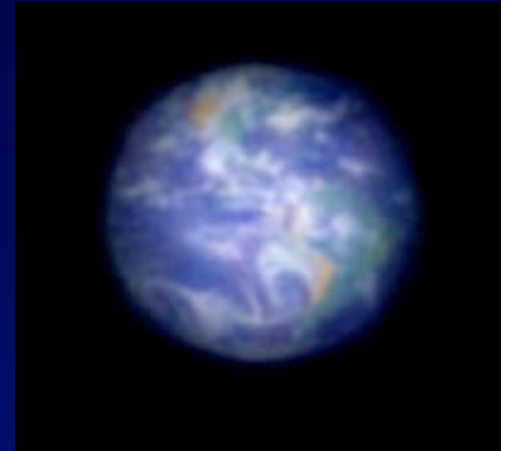
affiché sur: [www.college-de-france.fr/chaires/chaire11/lise.html](http://www.college-de-france.fr/chaires/chaire11/lise.html)

- 31 Mars **Construction d'un hypertélescope au sol ( suite)**
  - Séminaire: **P. Nisenson** "Detecting Extra-Solar Planets with SIM and TPF"
- **11, 18, 25 Février les cours et séminaires n'auront pas lieu**
- 4 Mars

Aujourd'hui à 9h20 et 17h: **Coronographie avec ouverture simple ou multiple : nouvelles possibilités pour l'imagerie d'exo-planètes**

## Séminaires:

11h20: Olivier Guyon « Apodisation par reconfiguration de pupille »



14h30: Kjetil Dohlen « Masques de phase en astronomie: du Mach-Zehnder au coronographe »

15h30: Daniel Rouan « Des fractales aux planètes extrasolaires: l'interférométrie ultra-destructive »

# De l'imagerie à très haute dynamique..... ..... des coronographes..... .... pour voir quoi ?



- Le faible près du brillant
- Exemples:
  - matière circumstellaire: disques, jets, exoplanètes ( luminosité relative  $10^{-6}$  à  $10^{-11}$  )
  - noyaux actifs de galaxies, quasars
  - etc..

# Exo-planètes.... ça existe



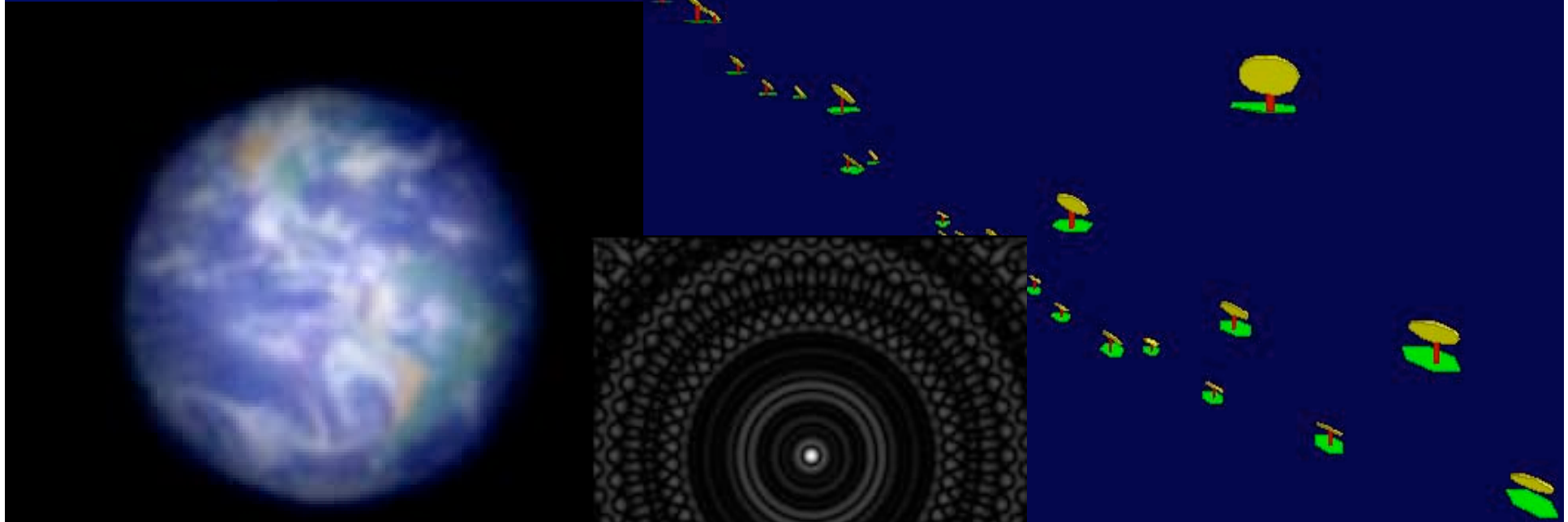
Artist's View of Planet around the Star HD 209458

NASA and G. Bacon (STScI) • STScI-PRC01-38

# Dans 20 ans ? Exo-Earth Imager

150 miroirs  
de 3m  
150 km

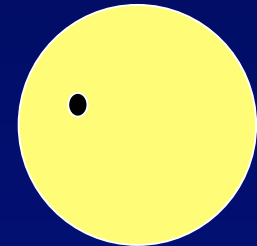
Terre à 3pc  
Pose 30mn



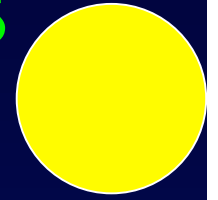
## Rappel:

# Méthodes pour détecter des exo-Terres

- **Visible:** coronagraphie extreme avec telescope  $> 2\text{m}$   
( Bonneau et al. 1975, Moutou et al. 1998 , Nisenson et al.2002 )
- **Infra-rouge :**
  - Nulling interferometer ( DARWIN, TPF)
  - Coronagraphic imaging interferometer ( coronagraphic hypertelescope)
- **Or:**
- **Transits:**
  - photometry with small aperture
  - imaging of resolved star with Exo-Earth Discoverer
- **Doppler spectroscopy and astrometry of star 's reflex orbit** (Mayor & Queloz 1997, Shao et al. 1997)
- **Gravitational lensing:** 2 candidate events, not confirmable



# Detecter la lumière d'exo-Terres



- Essentiel pour la recherche spectroscopique de vie, mais difficile
  - Weak luminosity with respect to parent star
    - $10^{-9}$  to  $10^{-11}$  in the visible
    - $10^{-6}$  in the thermal infra-red ( 10 microns) (Bracewell 1978)
- But enough planet photons with a few square meters of collecting aperture
- Feasible in the visible with « extreme coronagraphy »

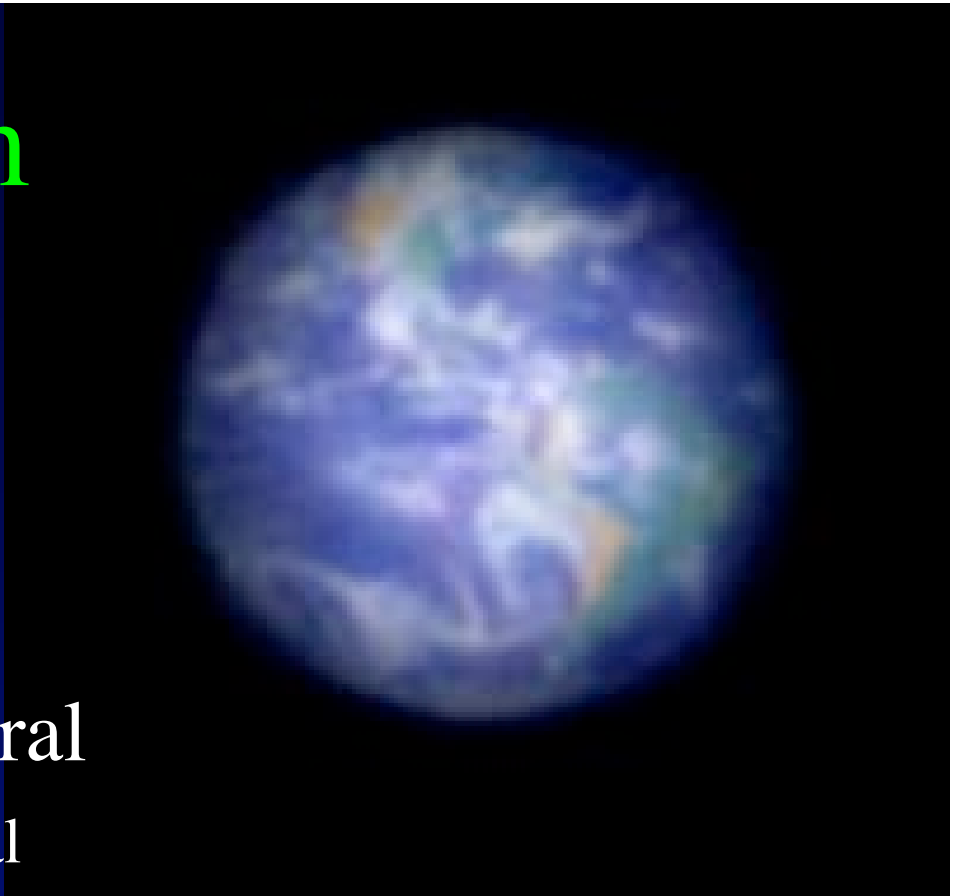


# Atmospheric spectral features indicative of life

- O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O
- How conclusive ? O<sub>2</sub> can be produced from H<sub>2</sub>O by photo-dissociation, under mineral catalysis

# Detecting life from « green spots »

- Can be any color
- seasonal variations  
discriminate against mineral  
colors: phase advance of annual  
photosynthetic cycle with respect to  
temperature cycle
- Correlation with clouds



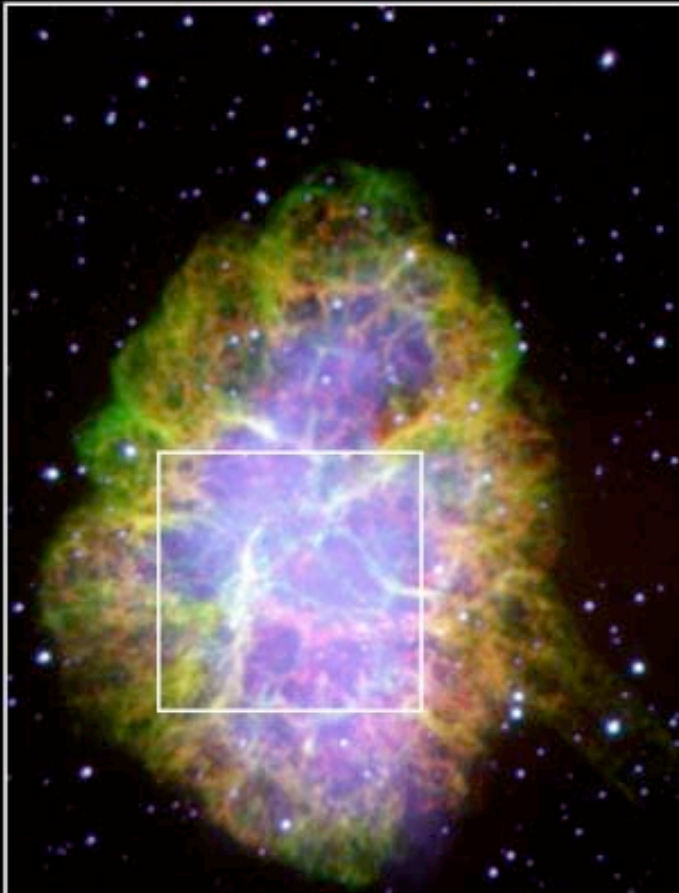
Mieux voir les galaxies....



# Résoudre des étoiles à neutrons ?

- 20 km à 1000 années lumières .....
- Dimension nécessaire: un million de kilomètres

**Crab Nebula**



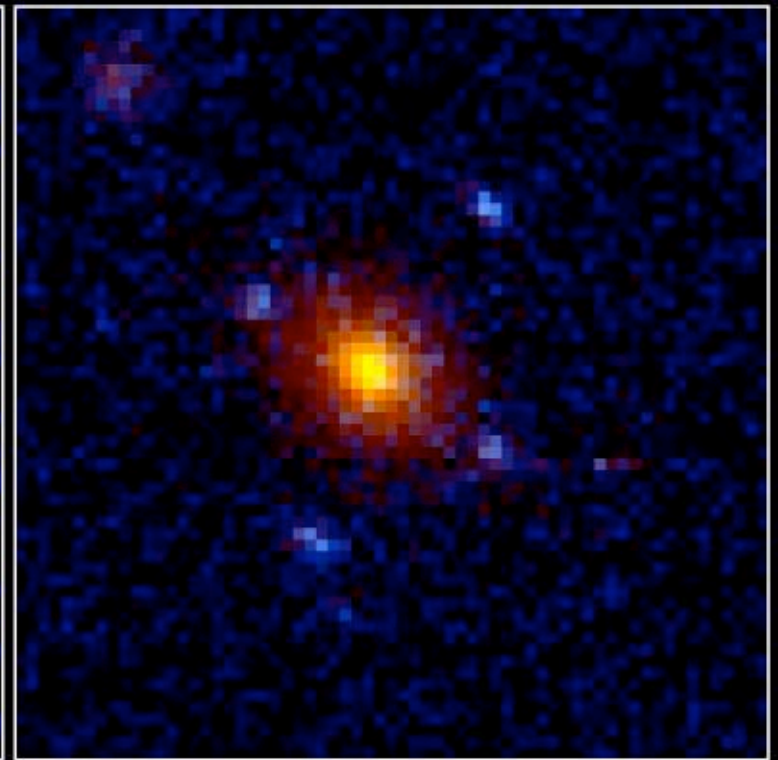
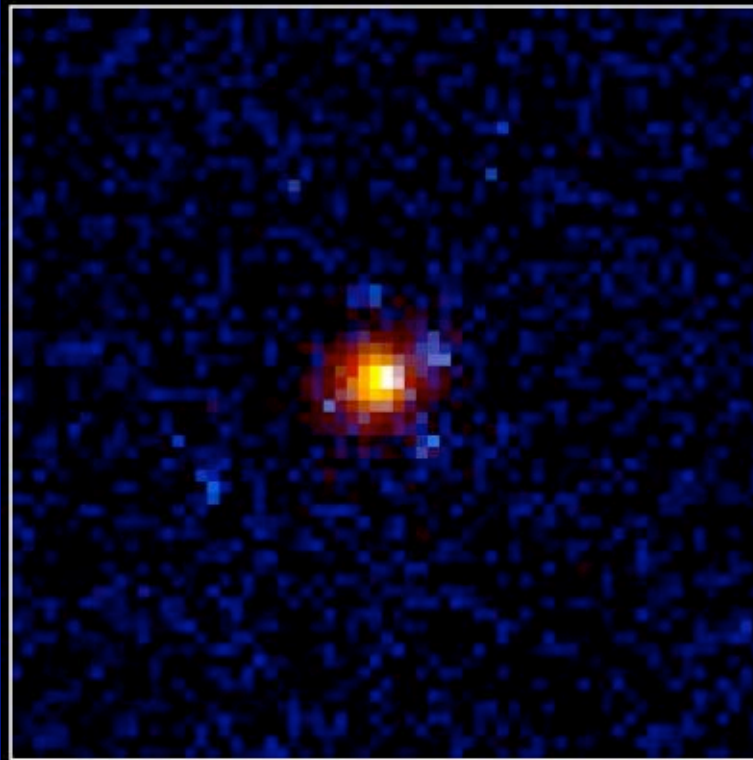
# Faisabilité d'un "Neutron Star Imager"



- Dimension:  $10^5$  -  $10^6$  kilometres pour résoudre une source de 20 km.
- miroirs, de 8-mètres et combineur de même diamètre,
- locus primaire paraboloidé, pour un combineur compact
- métrologie laser interne + pointage global pour acquérir l'image
- Nombreux photons par resel sur le pulsar du Crabe, mais peu sur les étoiles ordinaires
- **Coronographie envisageable: chercher un jet tournant ?**

# Lentilles gravitationnelles classiques (Zwicky ca. 1950)

- Lointaines  $> 100$  Mparsecs



**Gravitational Lenses**

HST · WFPC2

PRC95-43 · ST ScI OPO · October 18, 1995 · K. Ratnatunga (JHU), NASA



**Gravitational Lens**  
**Galaxy Cluster 0024+1654**

HST · WFPC2

PRC96-10 · ST ScI OPO · April 24, 1996

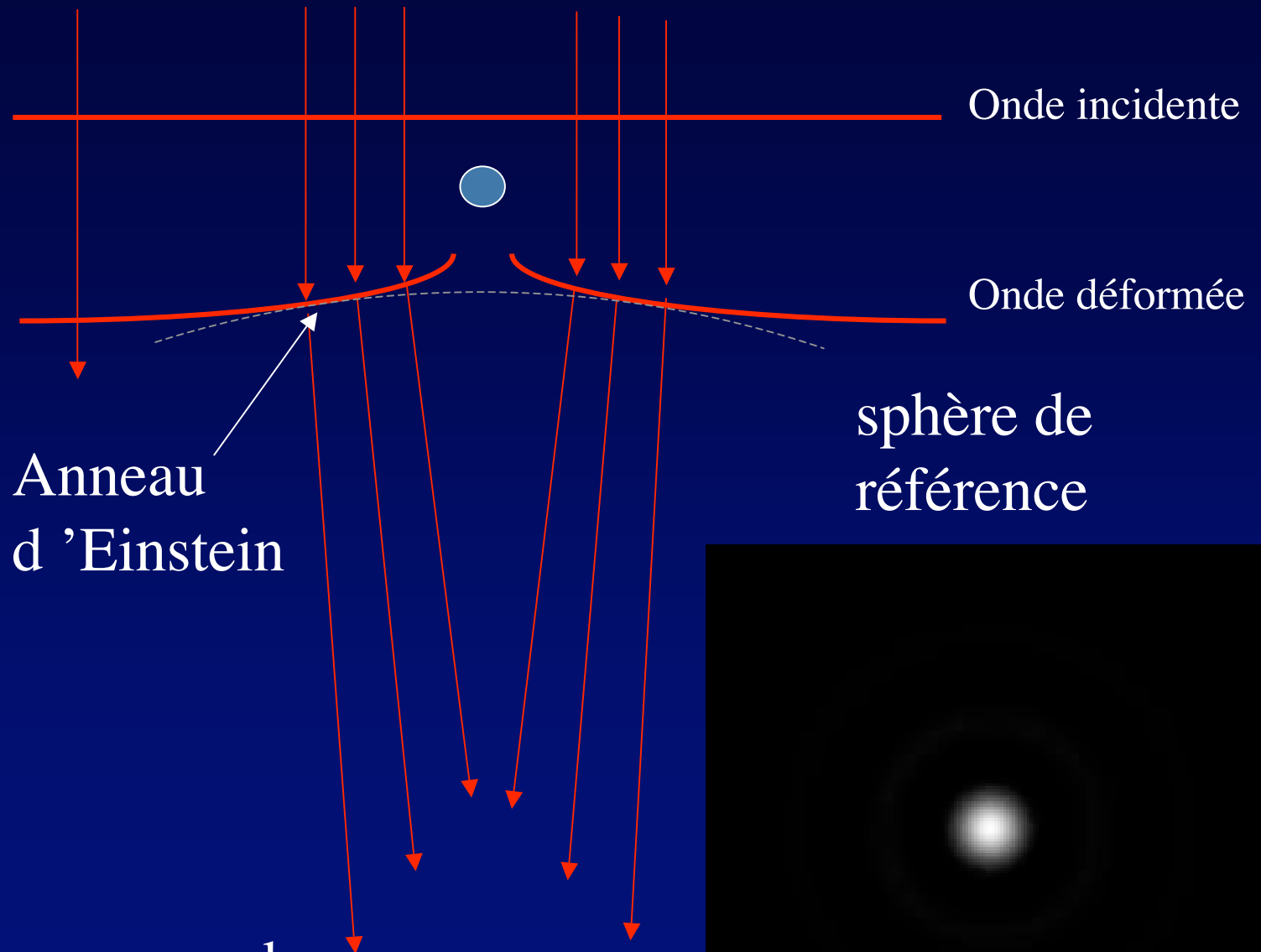
# Lentilles gravitationnelles moins classiques.....

..... à projection diffractive (Labeyrie 1995)

- Masse proche ( 0,01 à 1 pc)
- Stellaire ou planétaire (  $10$  à  $10^{-6}$  masses solaires)
- Lumineuse ou obscure ( naine brune, planète perdue, trou noir )
- **Nécessite coronographe si lumineuse**



- Lentille gravitationnelle: Anneau d'Einstein et diffraction.

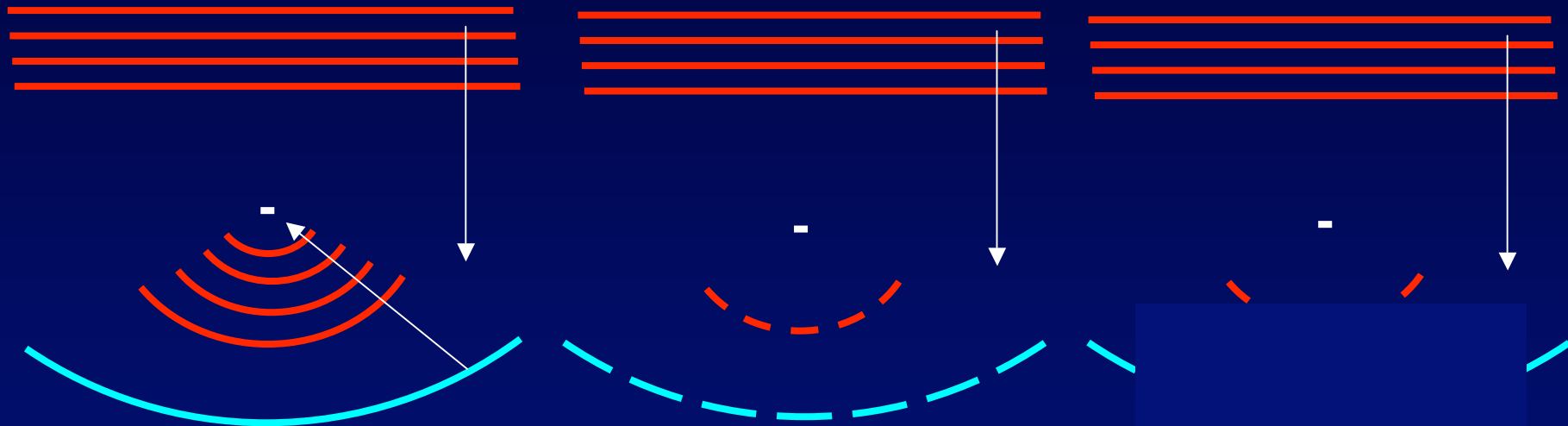


Analogie avec un grand interféromètre à ouverture annulaire



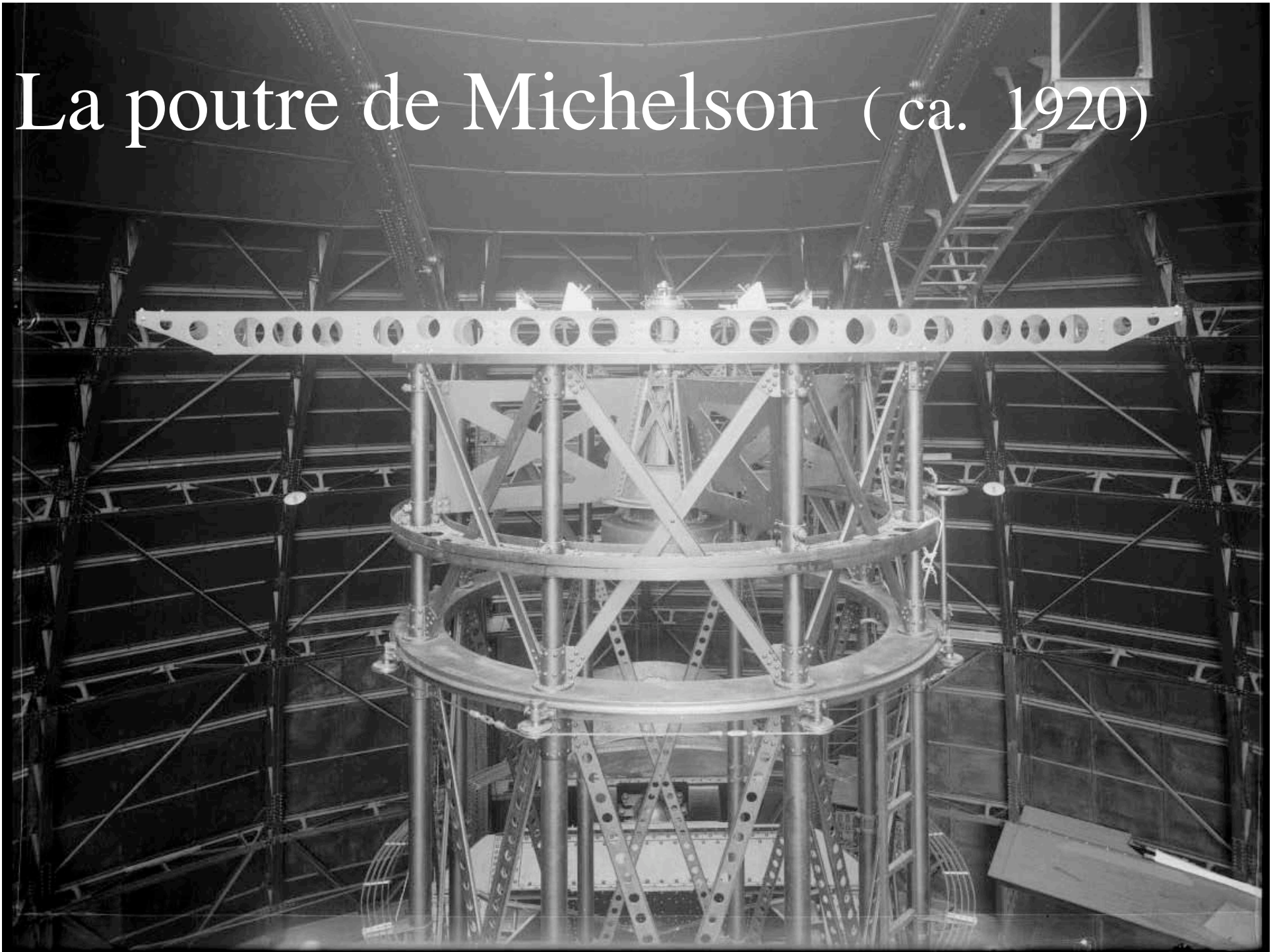
Figure de diffraction

# Interféromètre



- Marche encore avec deux éléments : image dégradée, mais sans perte de résolution

# La poutre de Michelson (ca. 1920)



# « Interféromètre à deux Télescopes » Nice 1974



# Grand interféromètre à deux télescopes



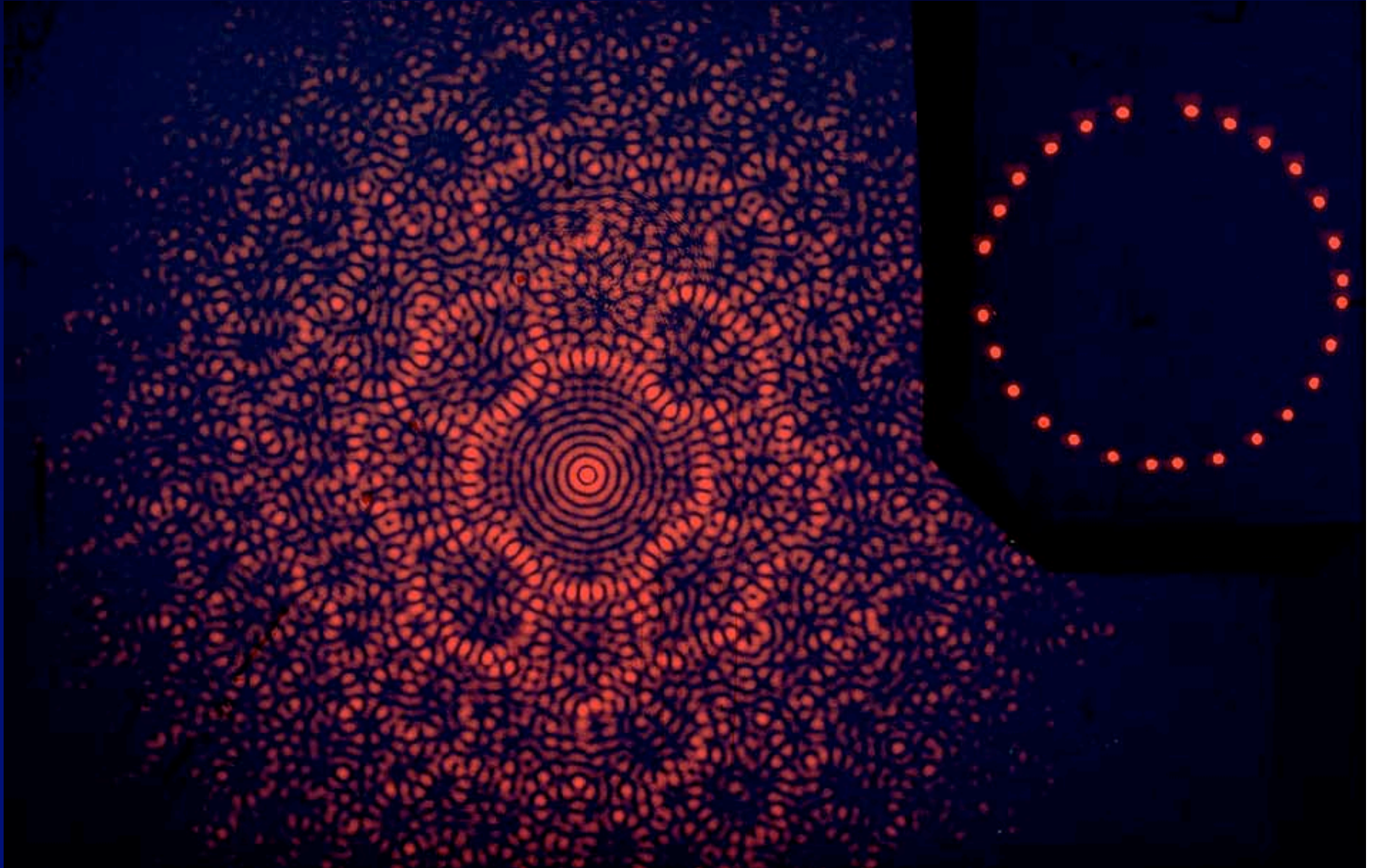
- 2x 1,5m , base 10 à 67m
- Calern ( Alpes Maritimes)

spectre de  $\gamma$  Cassiopée, avec franges d'interférence

H $\alpha$

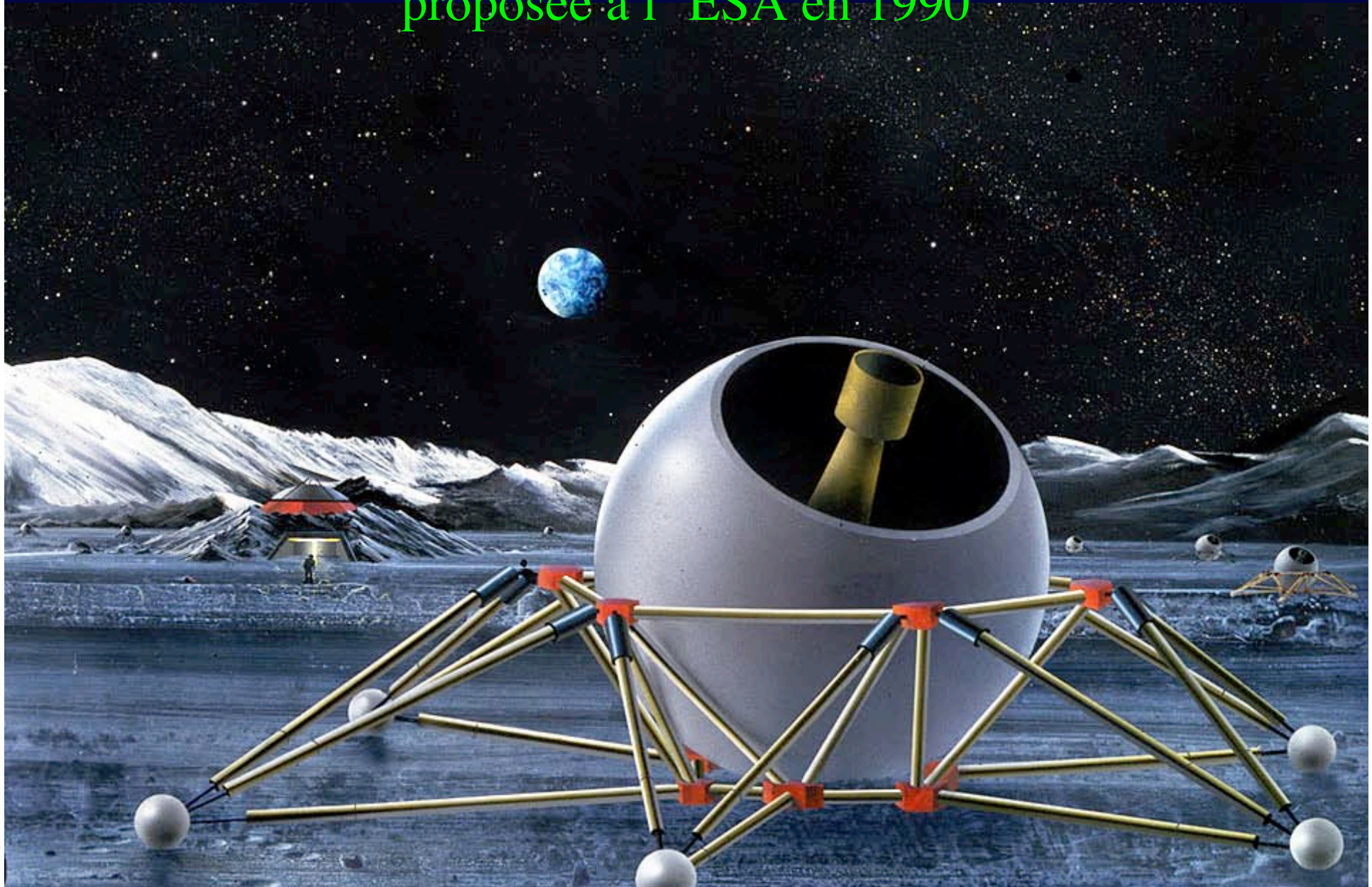


# Image



# Version lunaire du OVLA

proposée à l'ESA en 1990



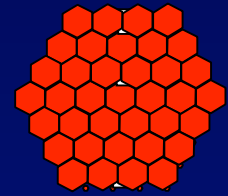


ouverture

# Hypertélescope: définition

(Labeyrie, A&A, 1996)

Pupille  
de sortie

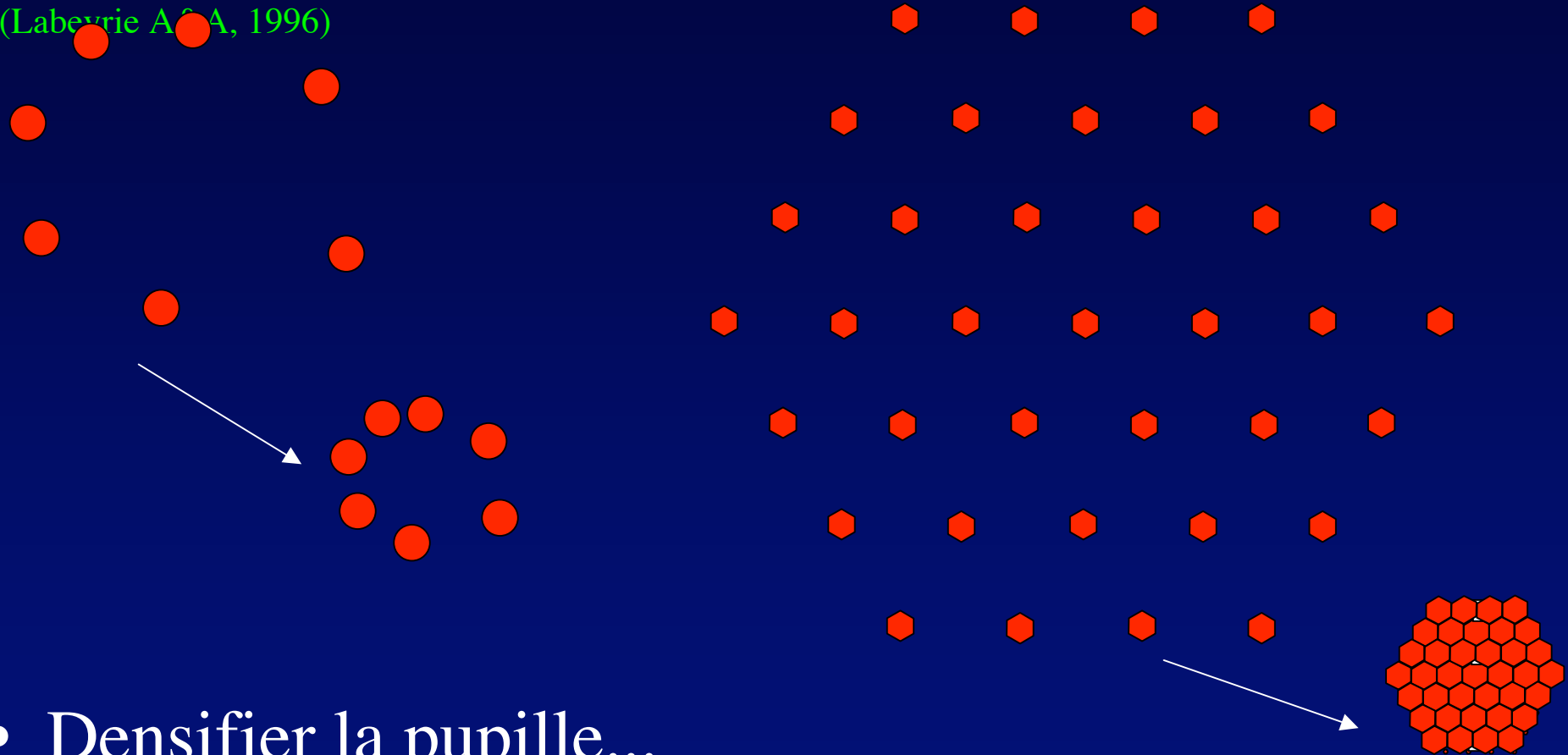


- Interféromètre imageur, multi-ouvertures, à pupille densifiée
- Forme directement des images....
- ....dans un champ réduit

Rappel:

# Principe des hypertélescopes

(Labeyrie A. & A., 1996)

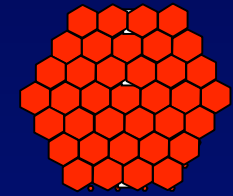


- Densifier la pupille...
- ...en préservant la disposition des centres

Pour la coronographie:

# hypertélescopes périodiques complètement densifiés

ouverture à 37 éléments  
de Exo-Earth Discoverer

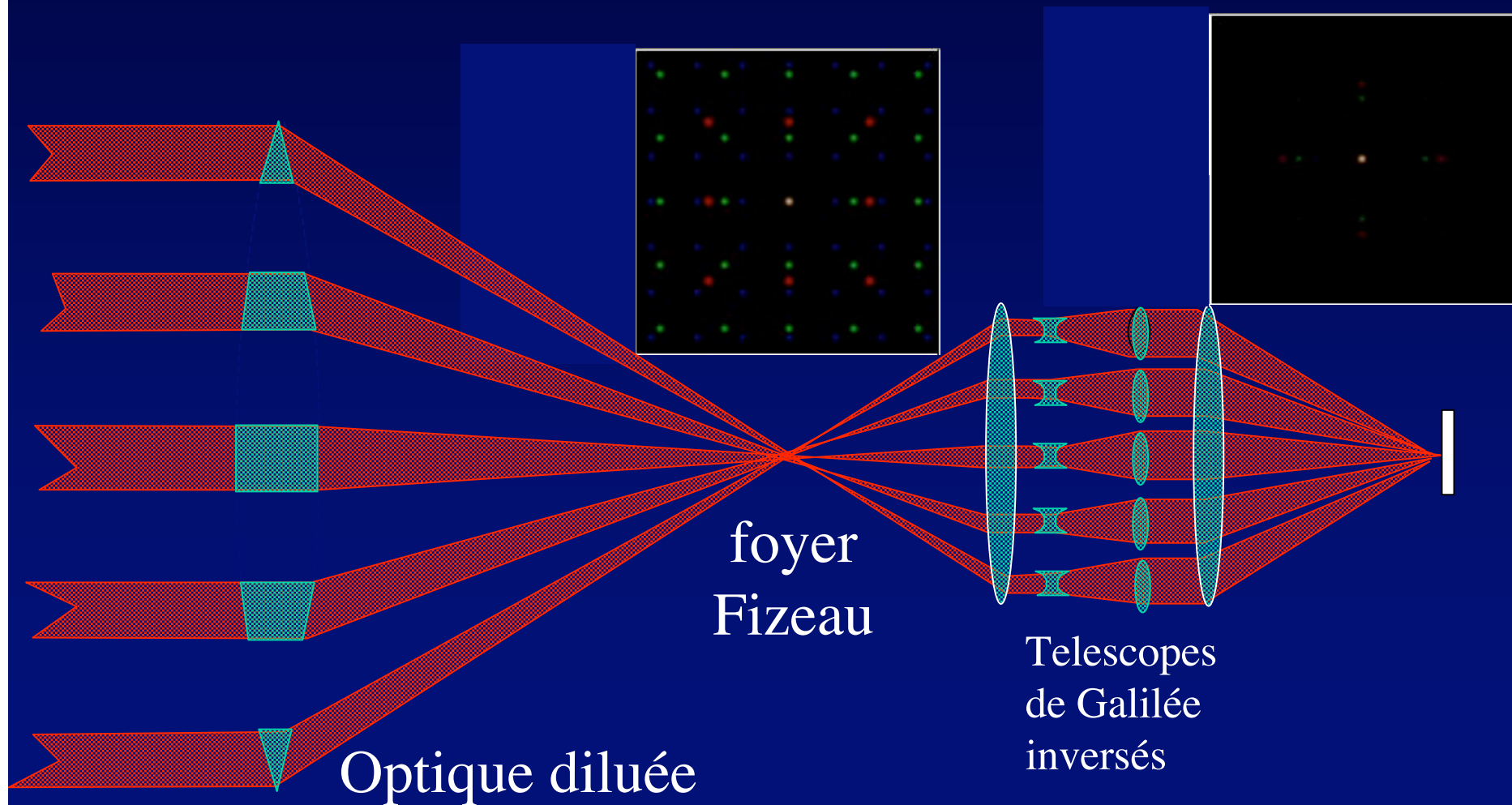


- Pupille de sortie pleine , se comporte comme une ouverture ordinaire
- forte redondance, améliore la dynamique de 1' image et la coronographie

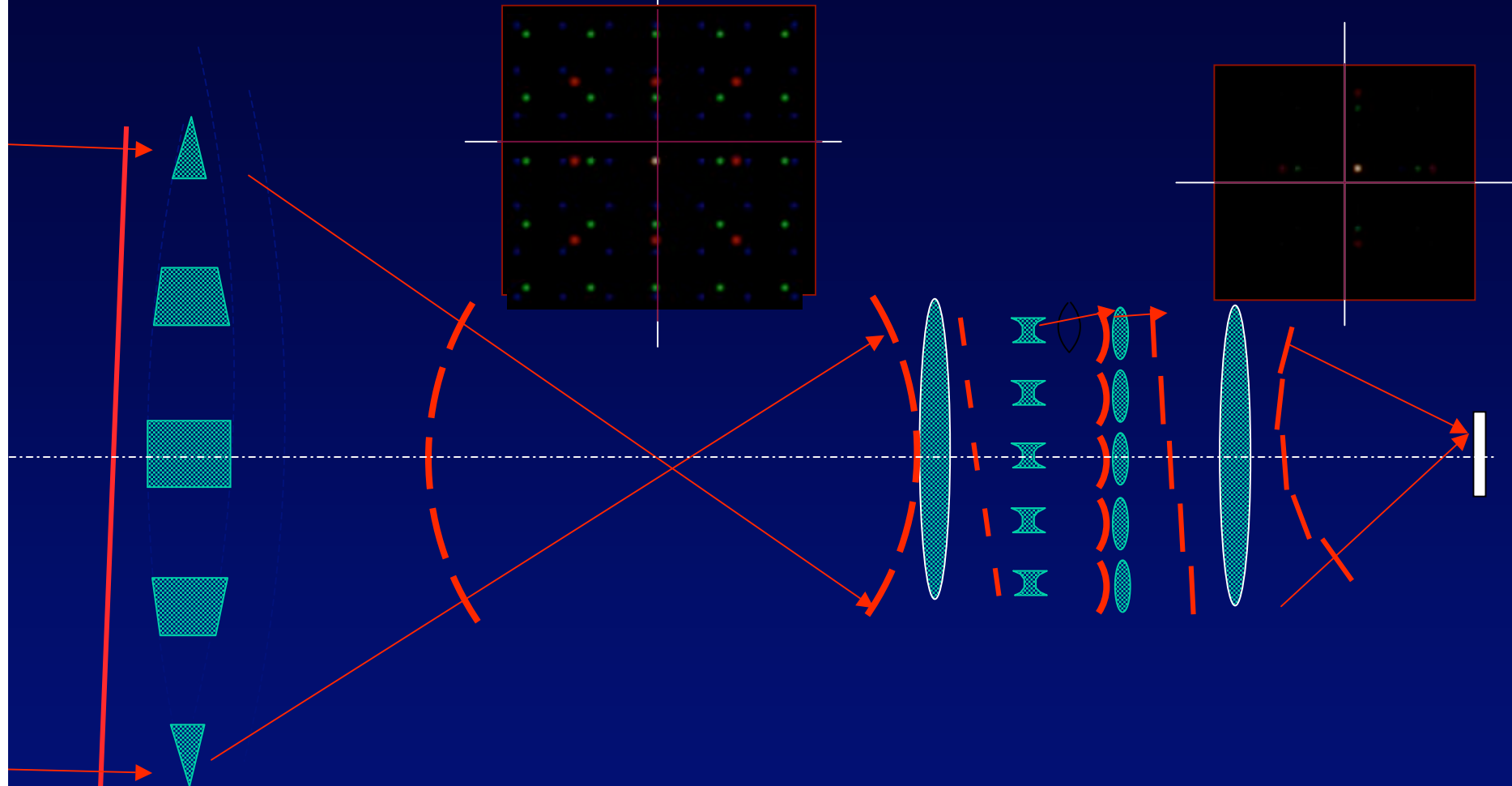
# Principe des hypertélescopes

« interféromètre imageur multi-ouverture à pupille densifiée »

(Labeyrie A&A, 1996)



# Source hors d'axe

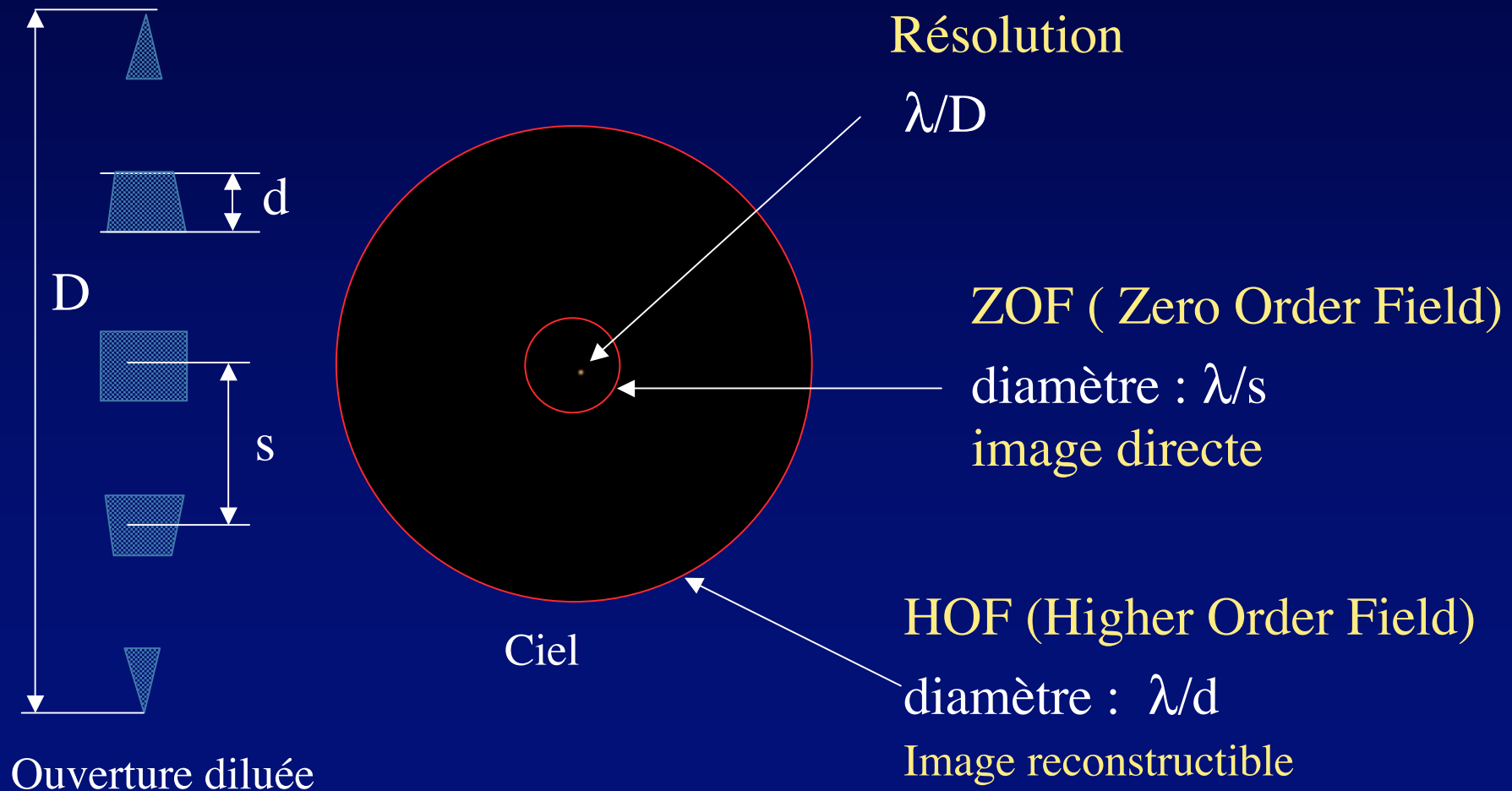


- l'onde plane devient "en escalier"
- l'image est décalée dans l'enveloppe
- pseudo-convolution, champ limité

# Propriétés des hypertélescopes

- Image intensifiée, par rapport à l'imagerie Fizeau
- Imagerie directe de  $N$  à  $N^2$  resels actifs avec  $N$  ouvertures, selon la redondance
- Champ limité et limitation d'encombrement: « resels actifs »
- Plusieurs champs avec autant de densifieurs exploitant des HOFs adjacents
- Les limitations disparaissent quand le nombre d'ouvertures tend vers l'infini
- **Coronographiables, avec multi-étages**
  - Sous-ouvertures (visible en pratique)
  - Ou dans l'image combinée

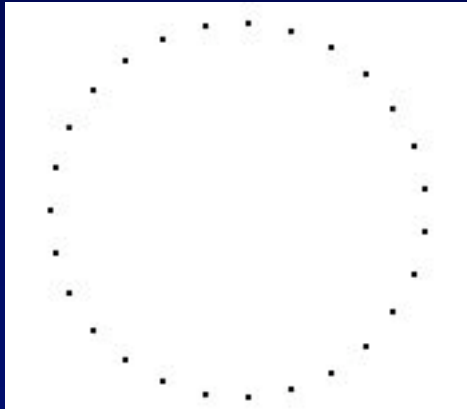
# Champ d'un hypertélescope périodique & complètement densifié



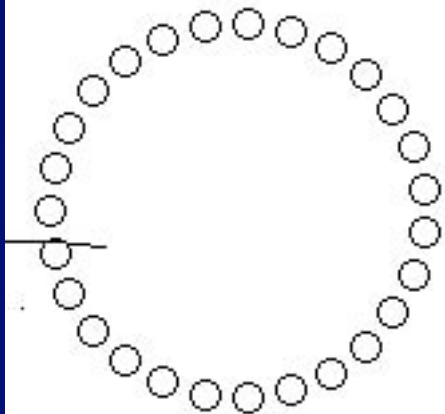
# Encombrement des images

- Exemple: 27 ouvertures

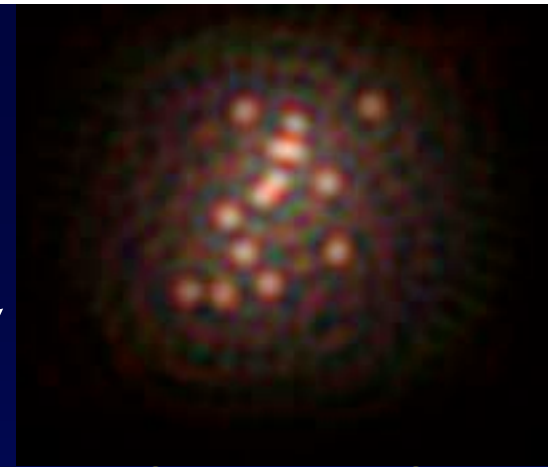
entrée



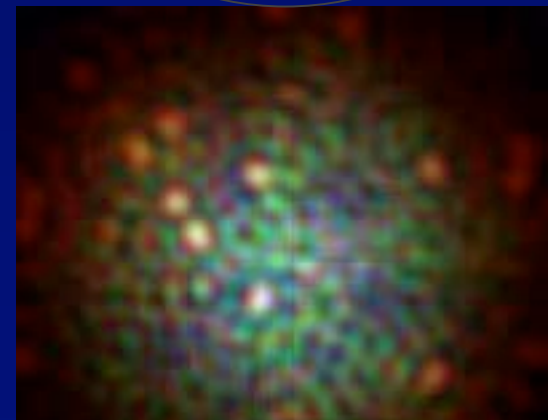
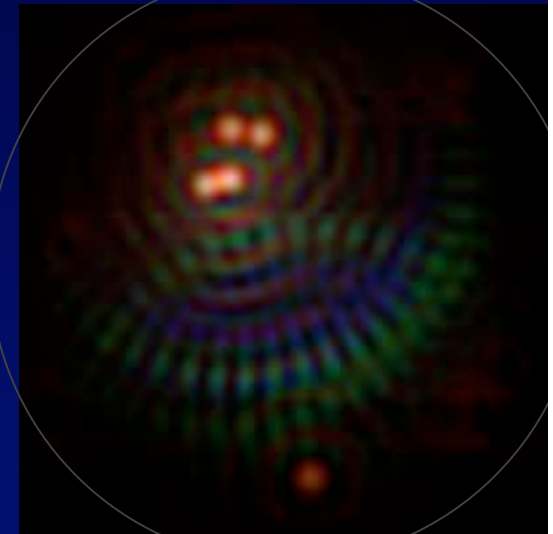
sortie



15 étoiles

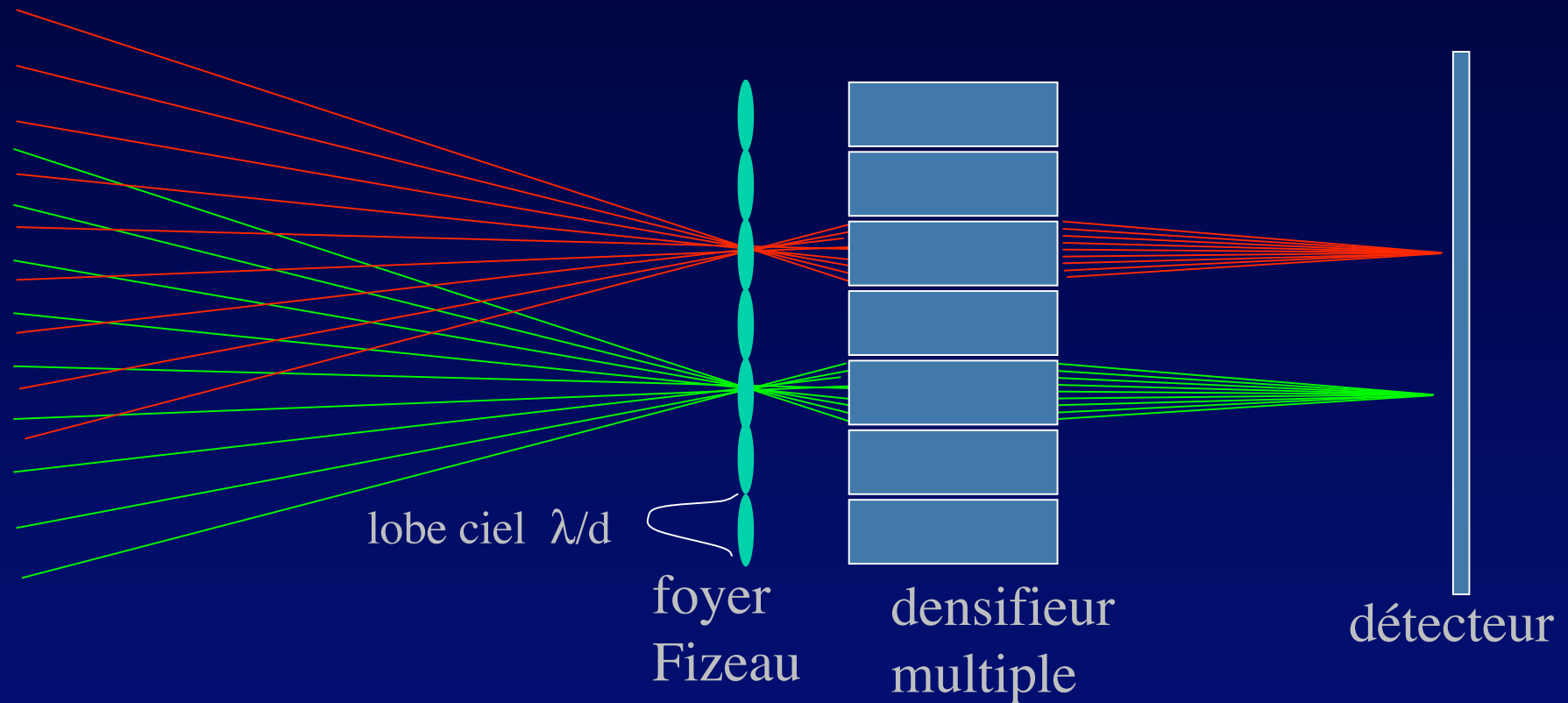


60 étoiles



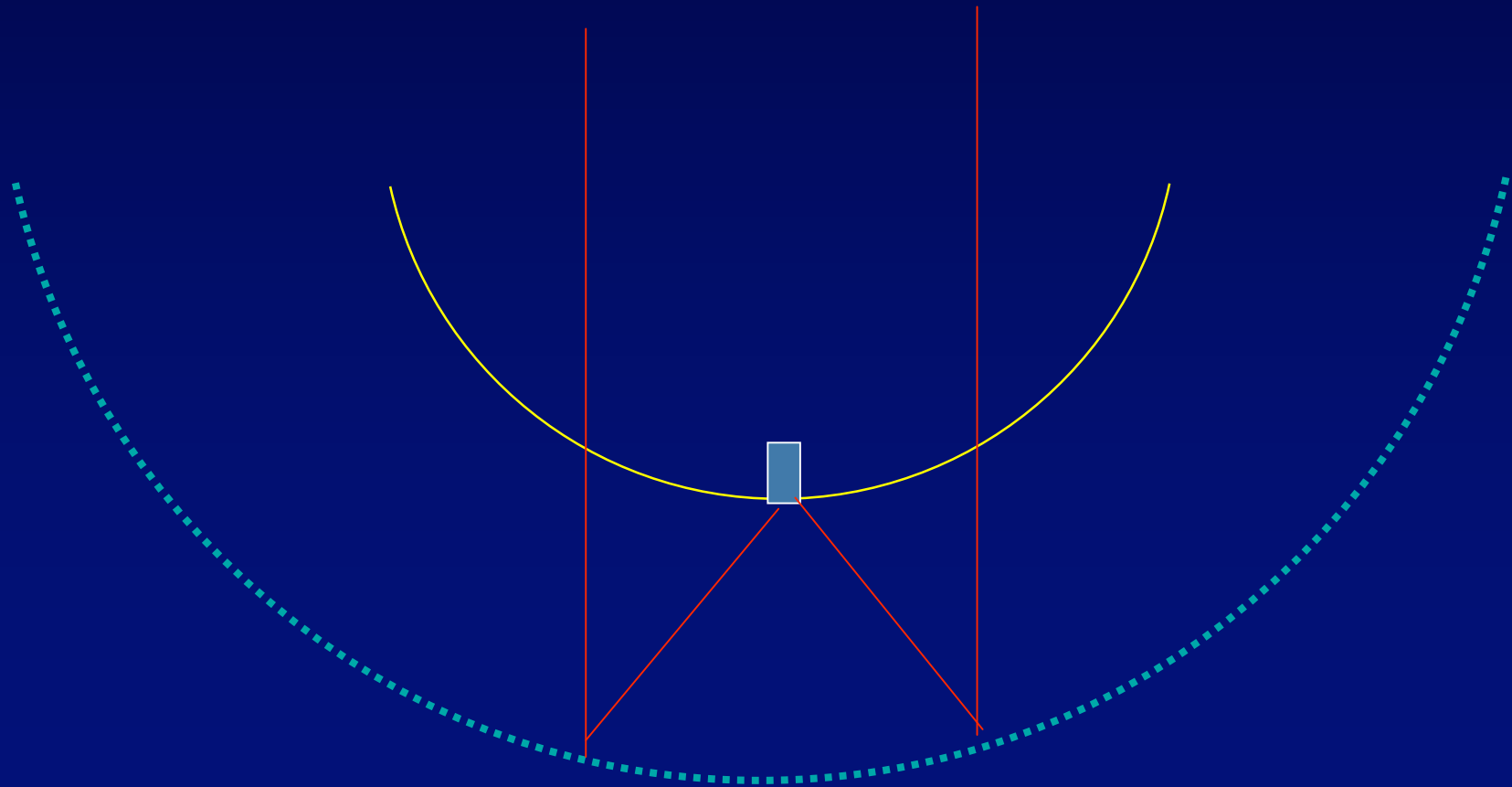


# Densifieur multiple pour étendre le champ



- Optique intégrée pour 1 000 x 1 000 densifieurs
- Poses décalées pour reconstruction mosaïque

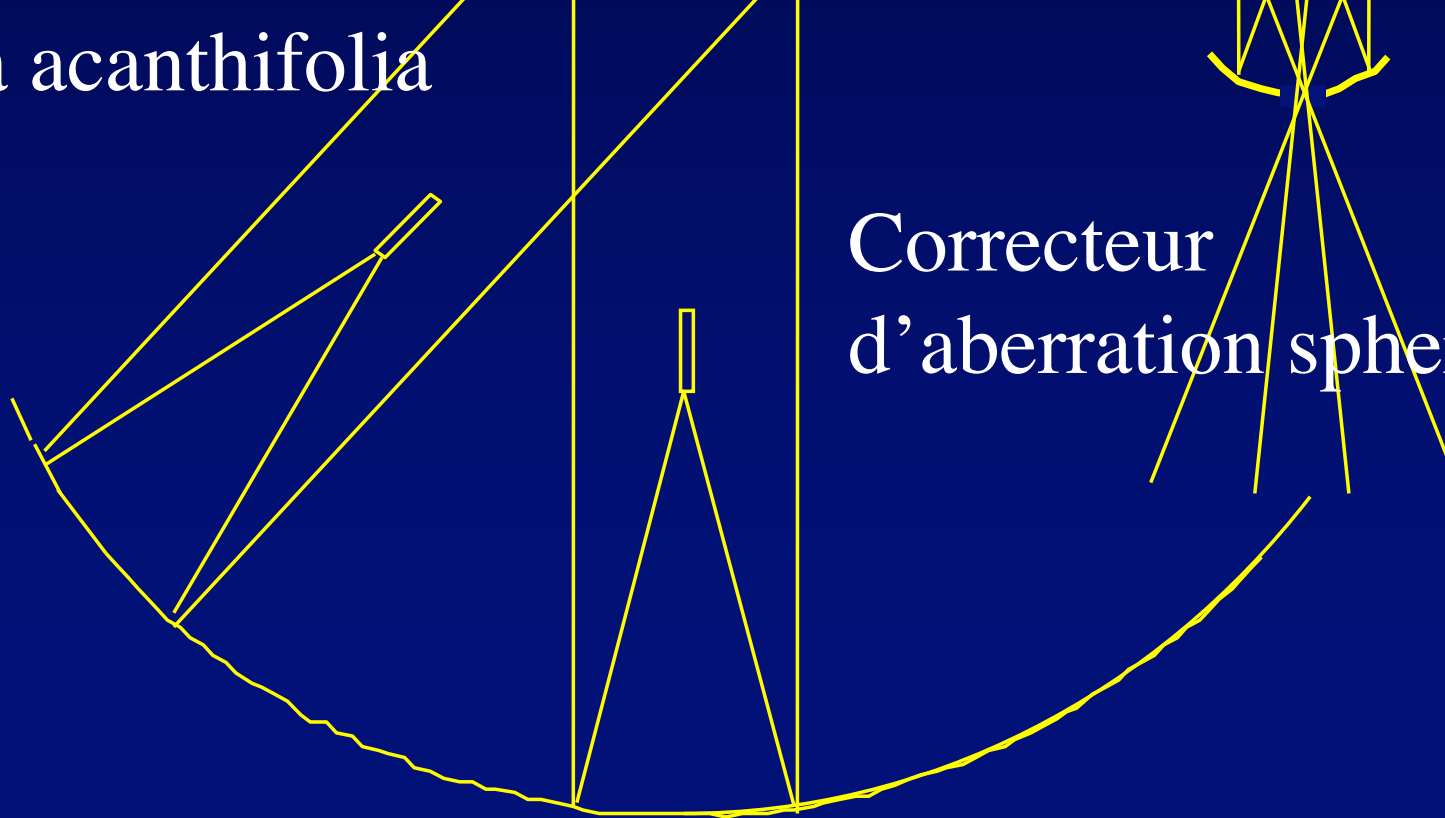
# Principe optique d'un CARLINA





CARLINA  
hypertélescope  
au sol

Carlina acanthifolia



Correcteur  
d'aberration sphérique

# Exo-Earth Discoverer:

a hypertelescope version proposed for DARWIN/TPF

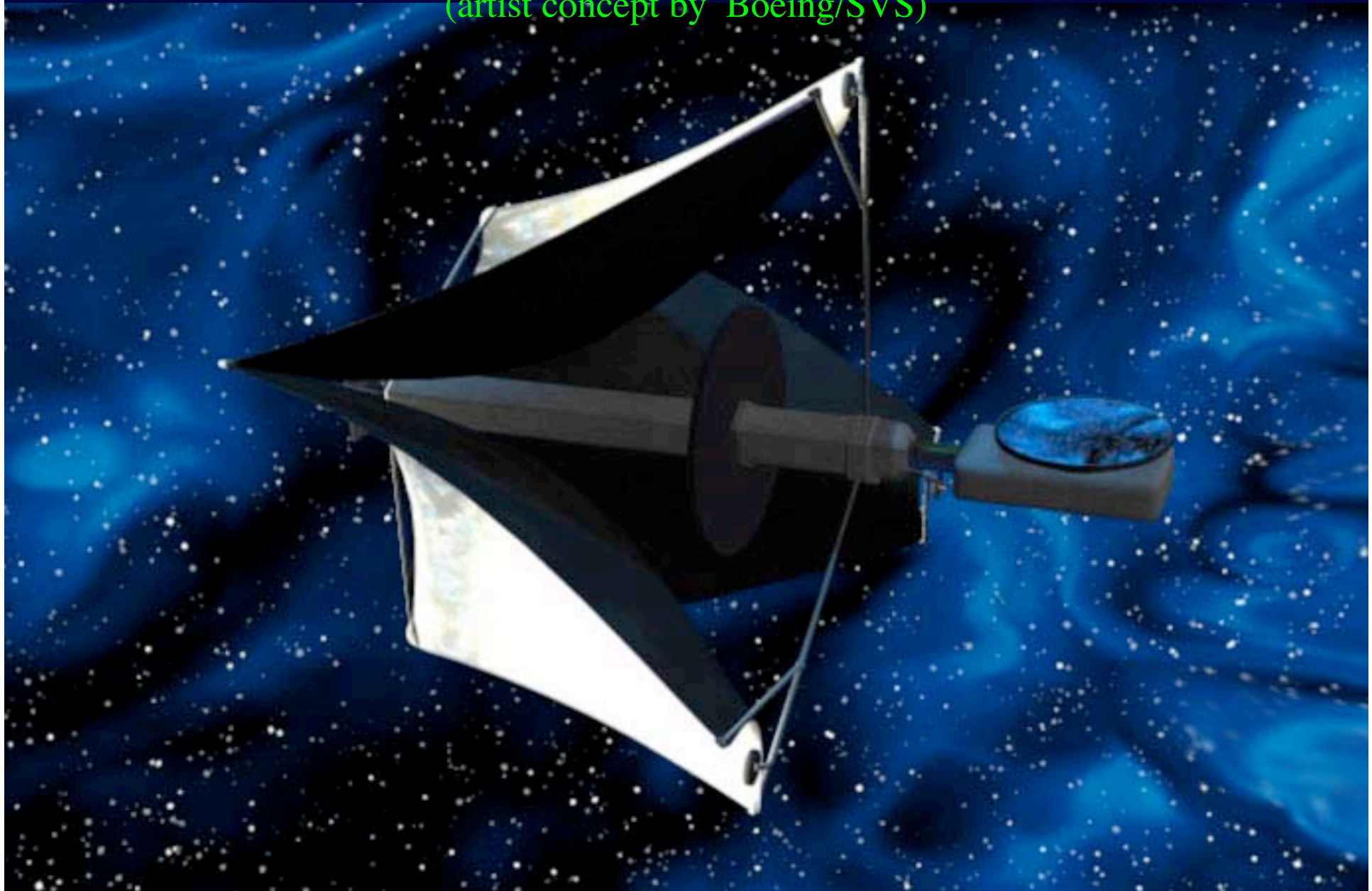
100 -1000m flotilla of 37 mirrors, 0.8m size



artist concept by Boeing /SVS

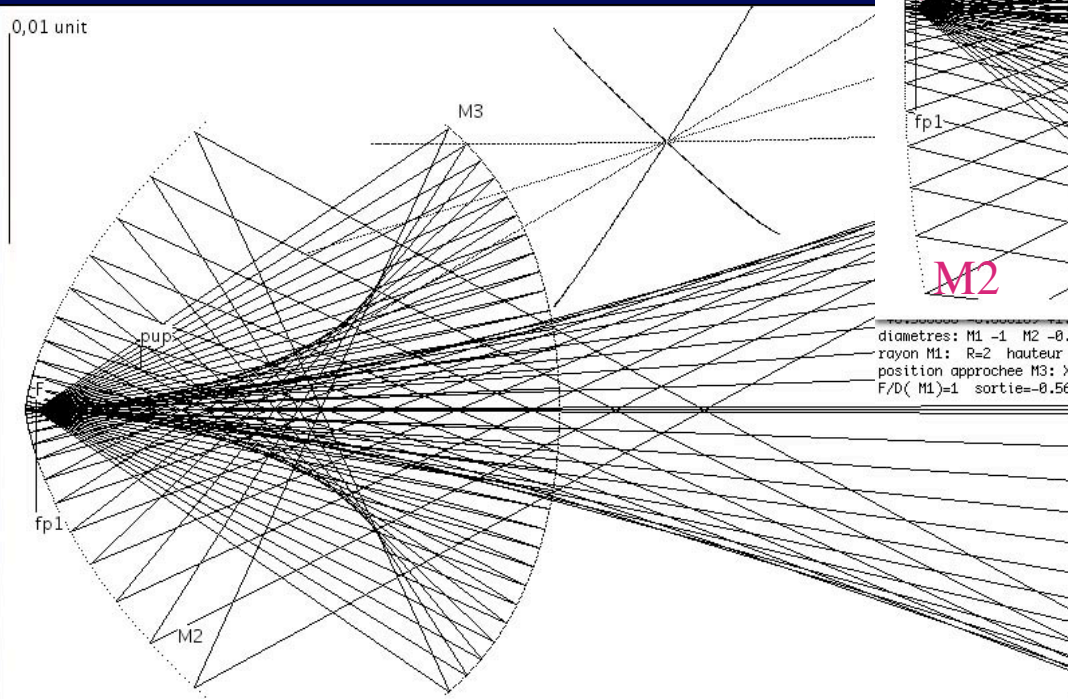
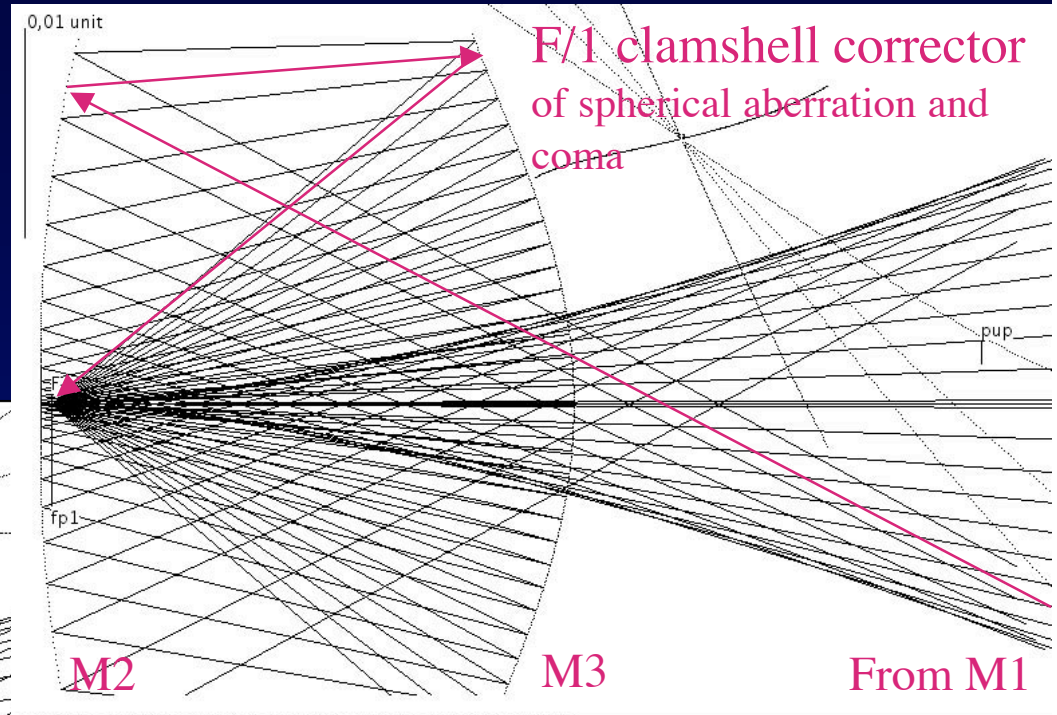
# Free-flyer element

(artist concept by Boeing/SVS)



# Correcting the aberration of a spherical mirror in the beam combiner

Two types of clamshell correctors



diametres: M1 -1 M2 -0.034905 M3 -0.03536 soit M1 = 3.536030  
 rayon M1: R=2 hauteur incidence HM=-0.5 sinus sortie SM=-0.66  
 position approchee M3: XD=1.025 chemin optique PL=3.051 focale resultante=0.82449  
 F/D( M1)=1 sortie=-0.569141 deltafocus =-2.500000E-03 mic = 6 champ ref =-1.010000E-04

diametres: M1 -1 M2 -0.02738 M3 0.027  
 rayon M1: R=2 hauteur incidence HM=-0  
 position approchee M3: XD=1.025 chemir  
 F/D( M1)=1 sortie=0.720741 deltafocus

Diameter 2.7% of M1 at F/1

Suitable for the Exo-Earth Discoverer

**VIDA** (Lardière et al. 2002):

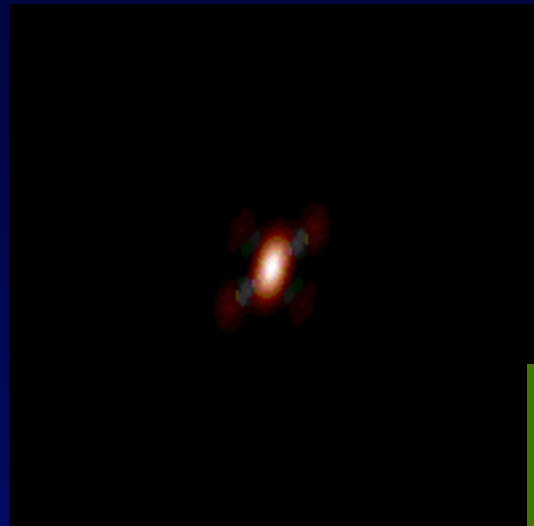
**imageur hypertélescope et  
coronographe au VLTI**

- Accroissement prévisible de sensibilité

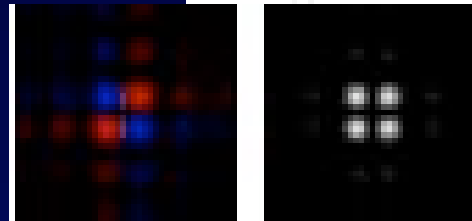
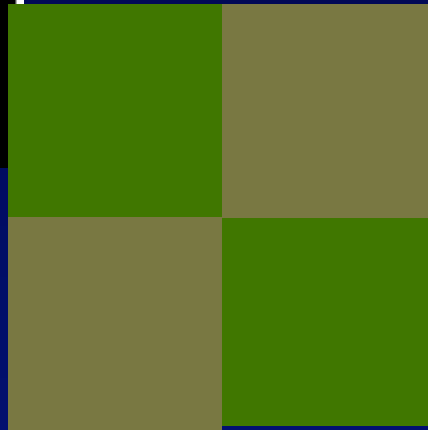


# Coronographe au VLTI ?

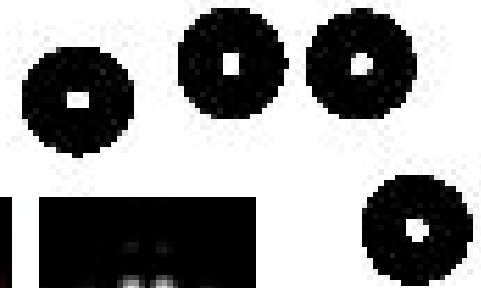
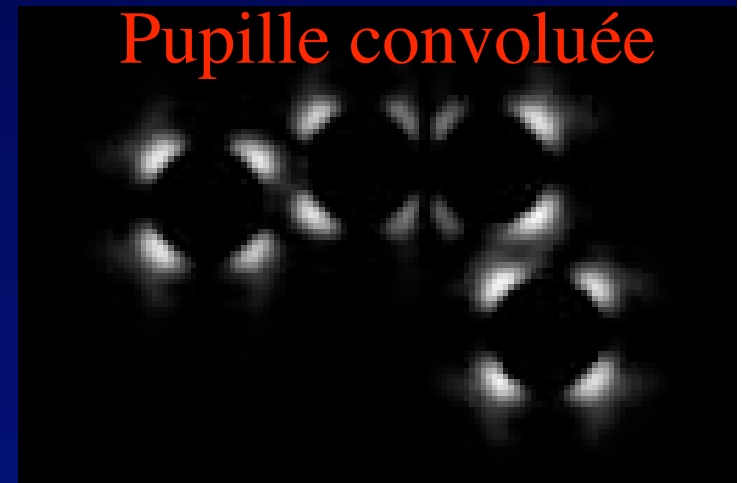
Pupille densifiée 4 UT



diffraction des 4 quadrants  
amplitude et phase



Pupille convoluée





# Hypertélescopes et cosmologie: encombrenement du champ ?



**Hubble Deep Field**

**HST · WFPC2**

PRC96-01a · ST Scl OPO · January 15, 1996 · R. Williams (ST Scl), NASA

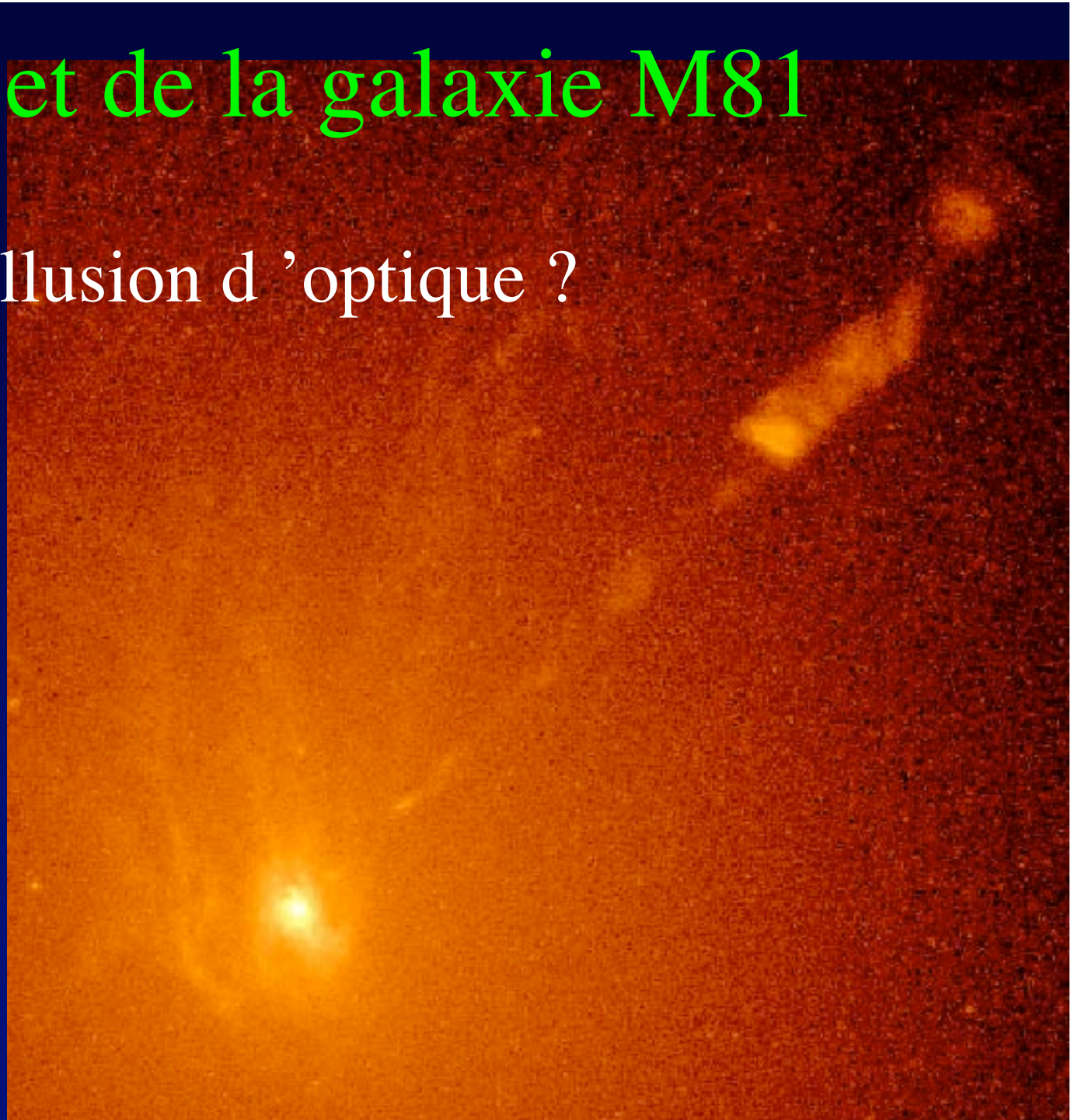
# Mettre en phase....

- c'est crucial !
- c'est difficile ! .... Mais c'est payant !
- Plus facile dans l'espace .... lorsque l'on saura piloter les miroirs

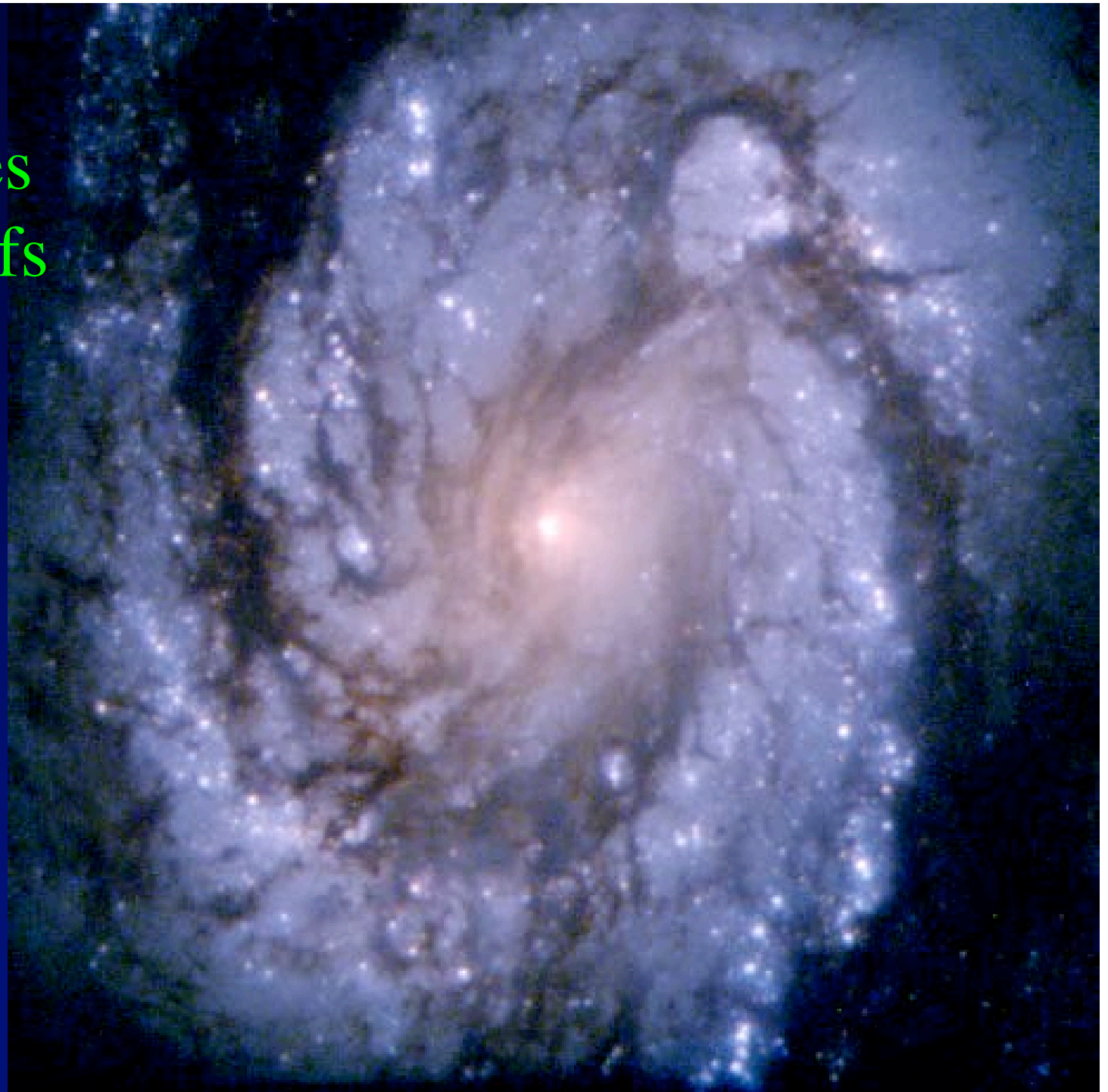
“speckles” enregistrés au Mont Palomar

# Noyau et jet de la galaxie M81

- Est-ce une illusion d'optique ?



# Résoudre les noyaux actifs

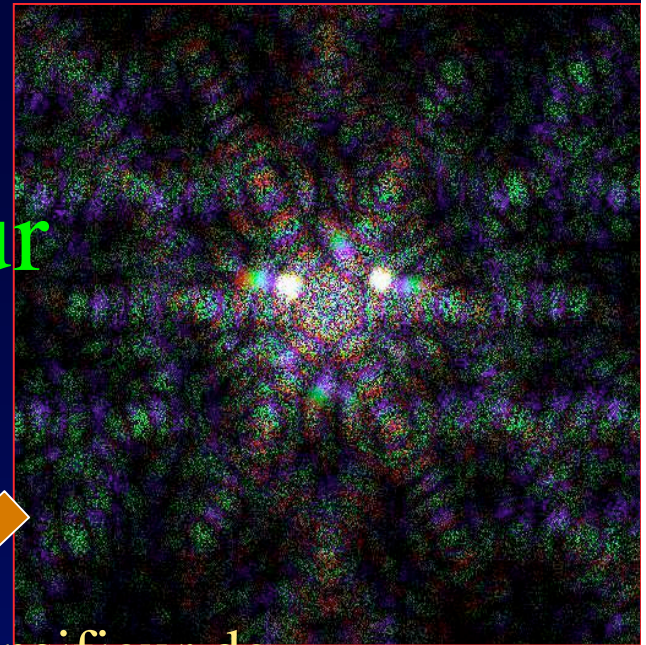
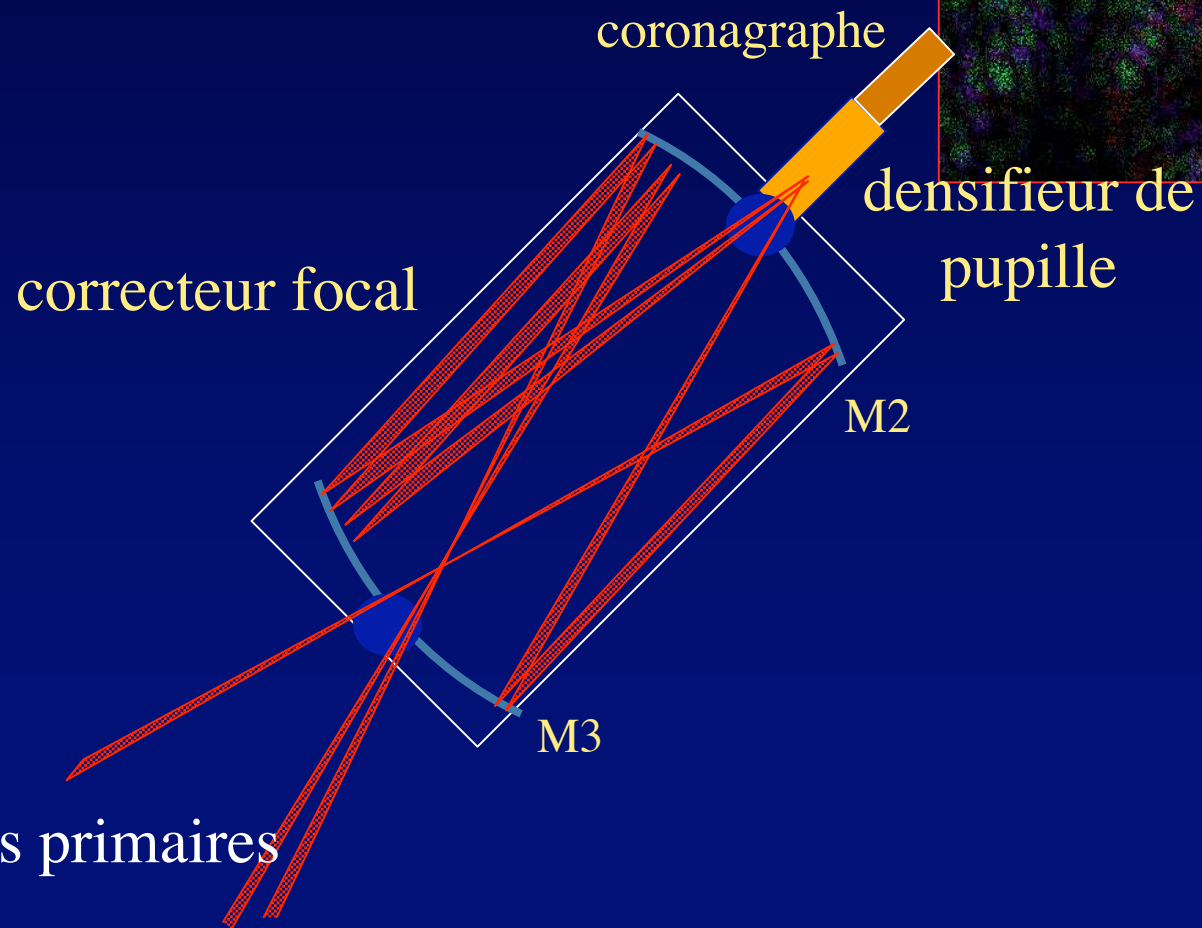


# Faisabilité d'un "Neutron Star Imager"



- Dimension:  $10^5$  -  $10^6$  kilometres pour résoudre une source de 20 km.
- miroirs, de 8-mètres et combineur de même diamètre,
- locus primaire parabololoïde, pour un combineur compact
- métrologie laser interne + pointage global pour acquérir l'image
- Nombreux photons/resel sur le pulsar du Crabe, mais peu sur les étoiles ordinaires

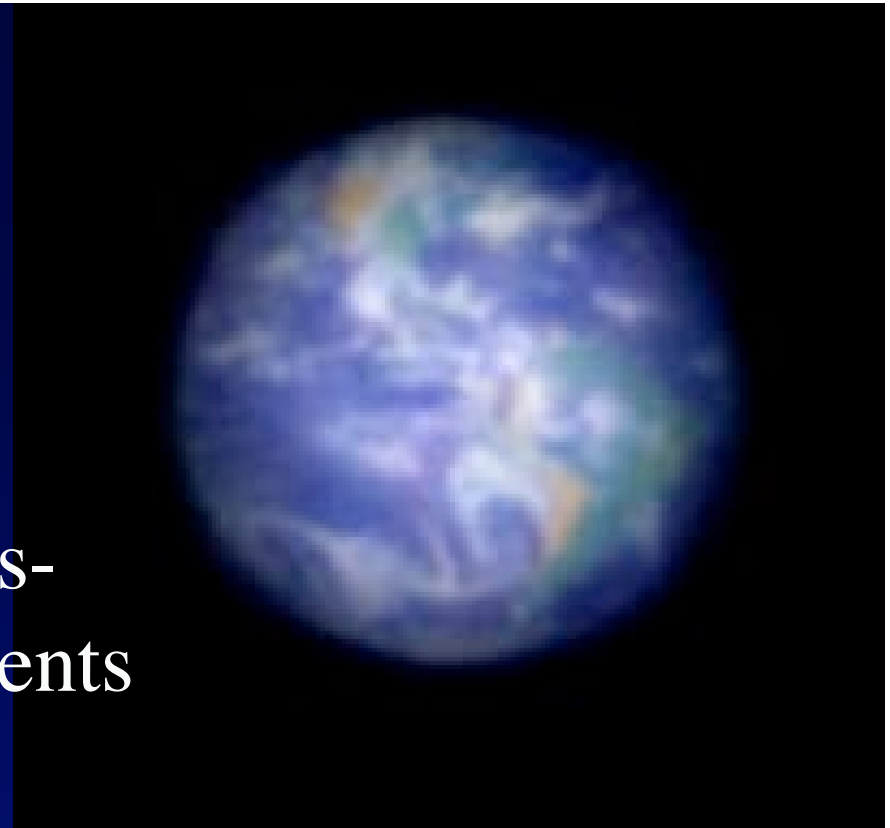
Hypertelescope proposé pour DARWIN et TPF:  
**combineur focal et densifieur**



Des miroirs primaires

# Voir la vie sur des images résolues

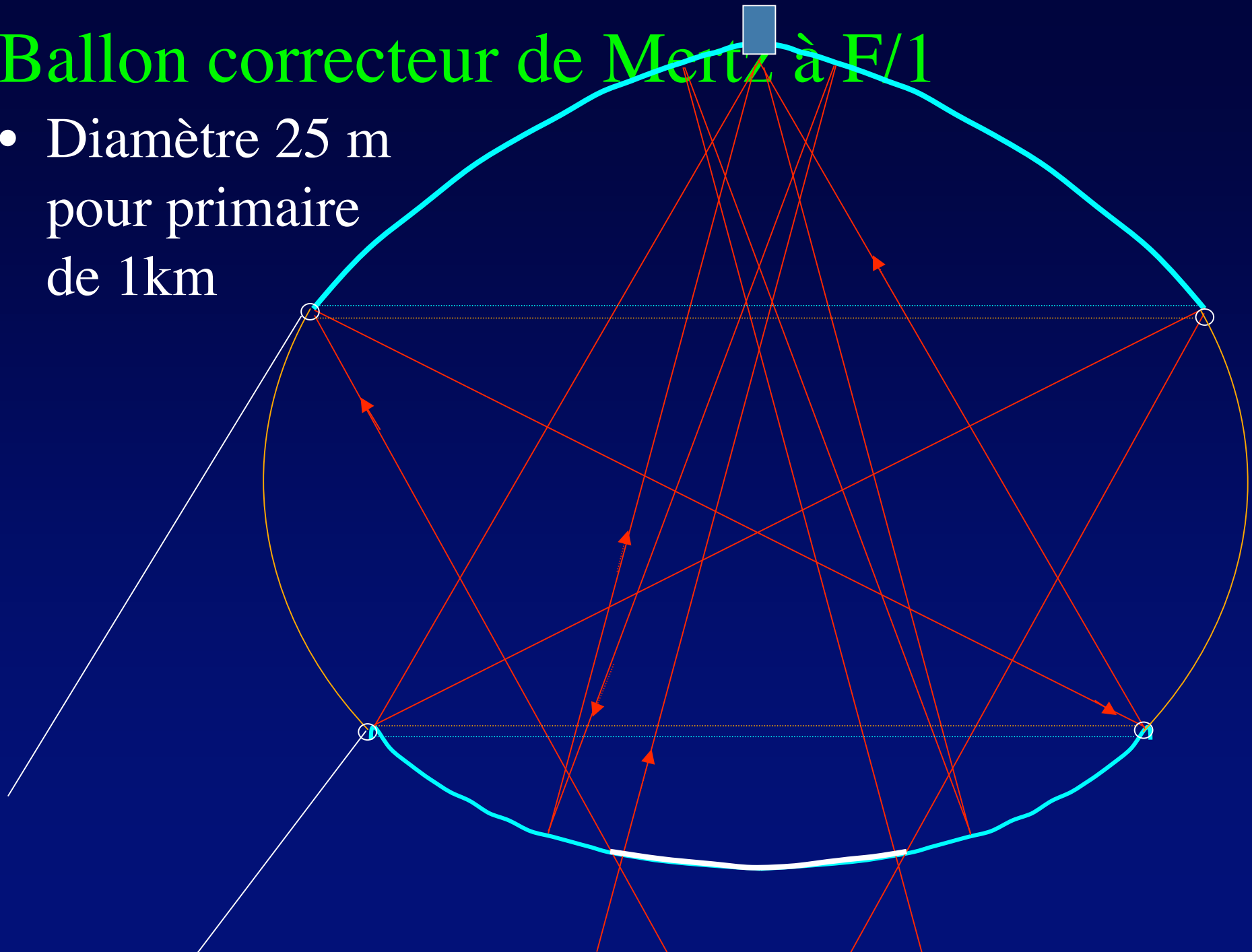
- Exemple : Terre à 10 années-lumière, vue avec 150 éléments de 4m, diamètre 150 km
- Poses 30 mn
- La verdure réfléchit l'infrarouge proche
- Coronographe pour chaque ouverture



```
from e_oppo on a e_res por am a es  
st double zoom=5, contraction=10,  
st unsigned int Nt=50, rolMax=3;
```

# Ballon correcteur de Mertz à F/1

- Diamètre 25 m pour primaire de 1km

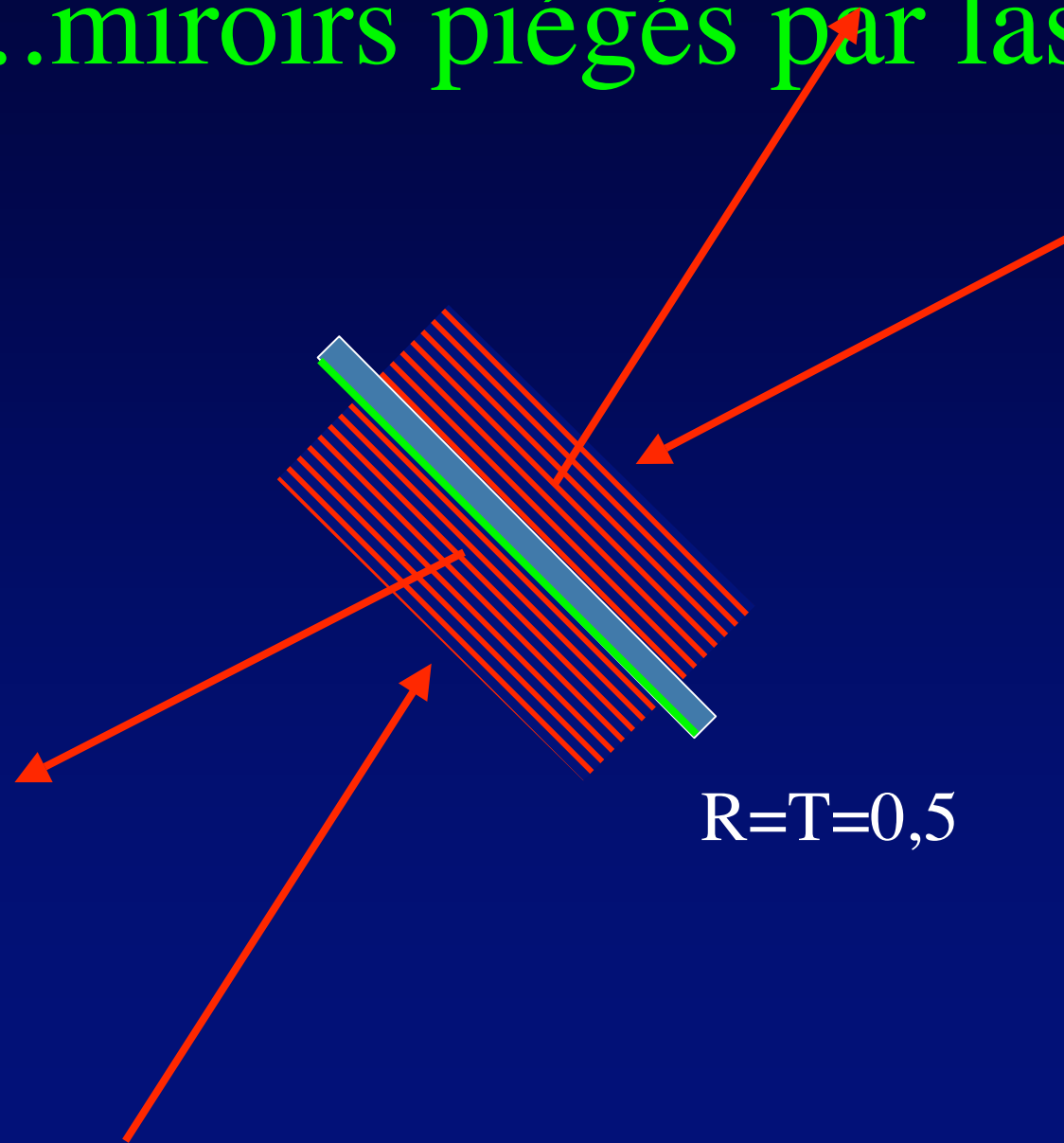




dans l'espace...

....miroirs piégés par laser ?

- Piéger



$$R=T=0,5$$

dans l'espace...

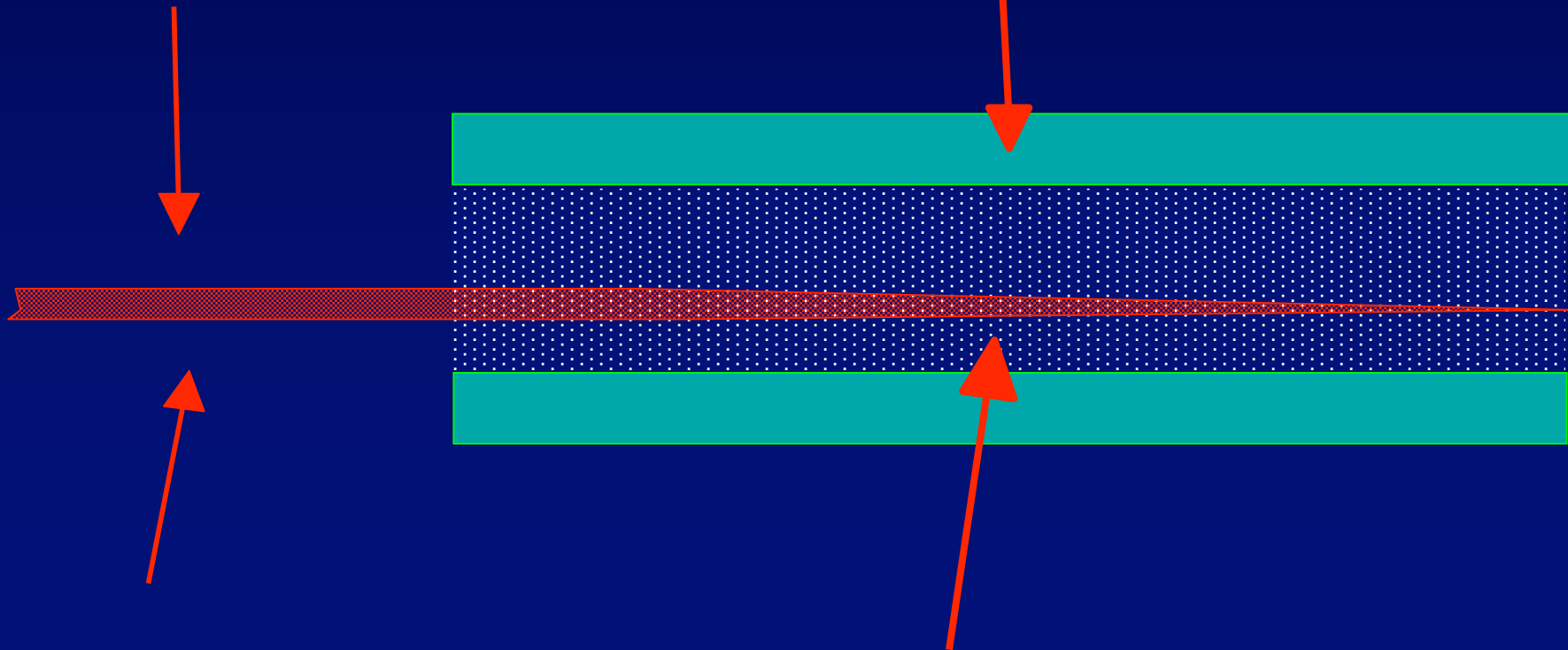
....miroirs piégés par laser ?

- Piéger des nanosphères, puits quantiques ....
- ... sur une surface
- ....est-ce possible ?

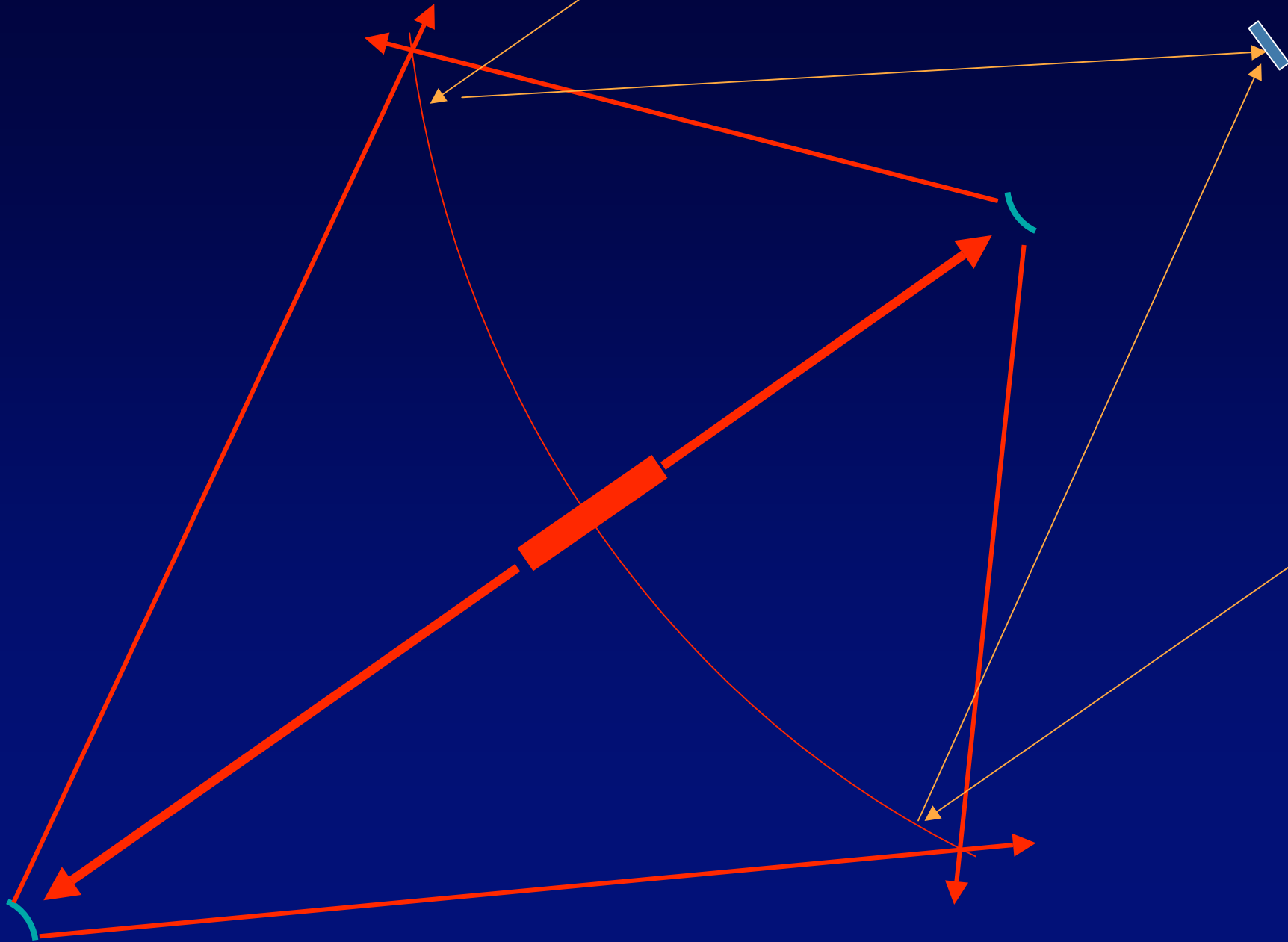
dans l'espace...

...fabriquer une membrane piégée?

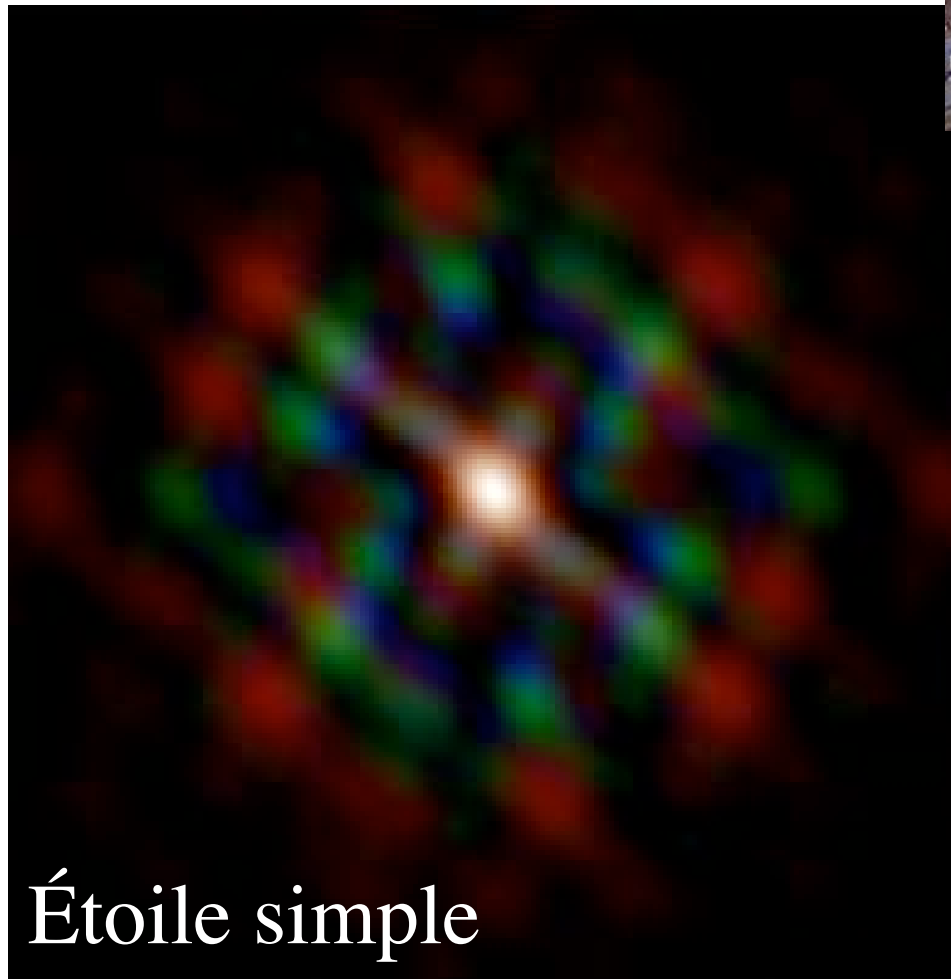
- Par photo-CVD ? (Chemical Vapor Deposition)



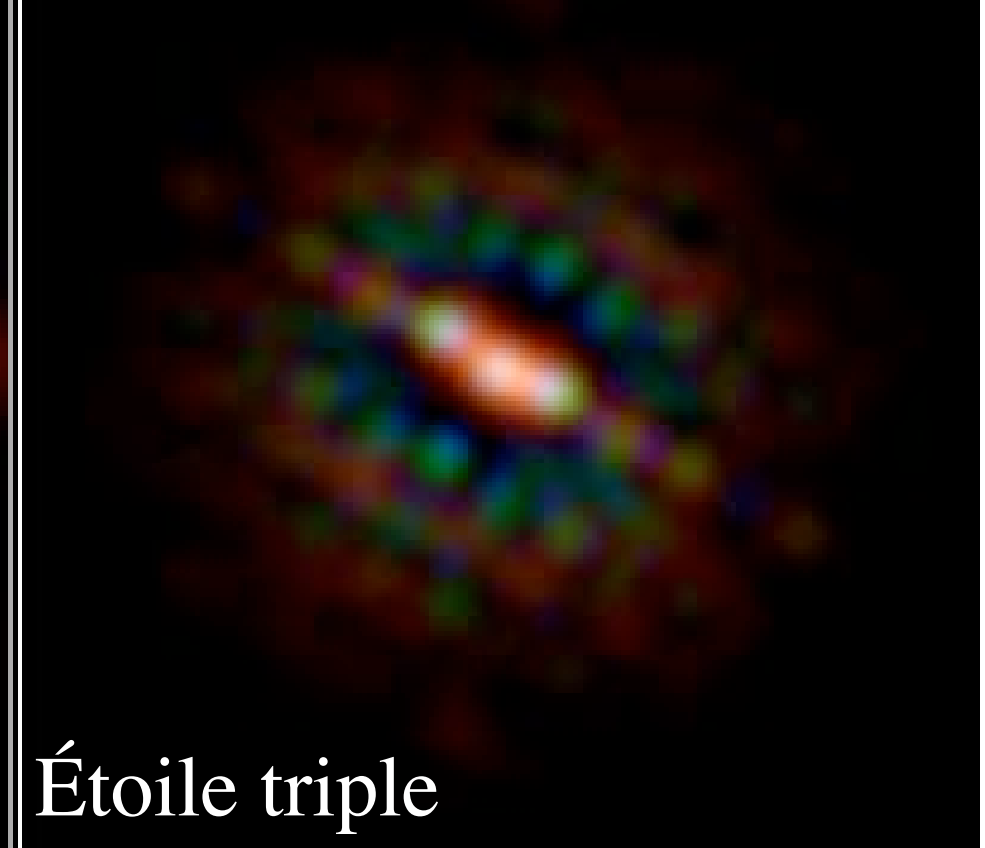
dans l'espace...miroirs piégés par laser ?



# Synthèse d'ouverture par NPOI (Arizona)



Étoile simple



Étoile triple

# ESO: Over Whelmingly Large telescope (OWL)

- Diamètre 100 m, surface 7 000 m<sup>2</sup>
- Magnitude 35 à 38, avec optique adaptative
- Étude en cours

