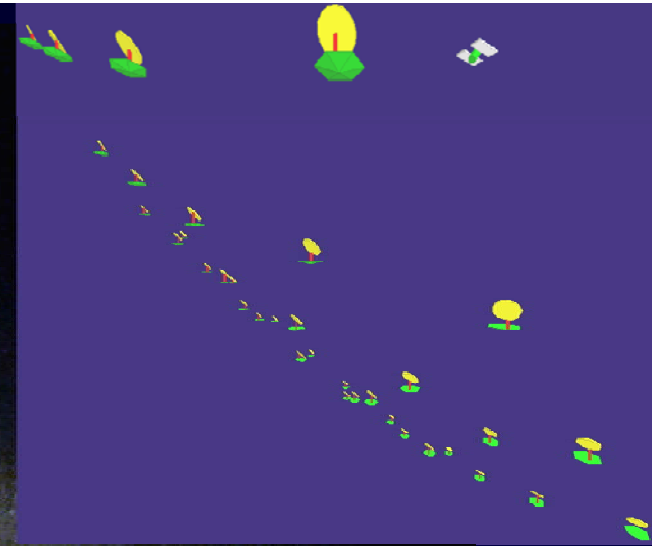


Exo-planètes, étoiles et galaxies : progrès de l'observation

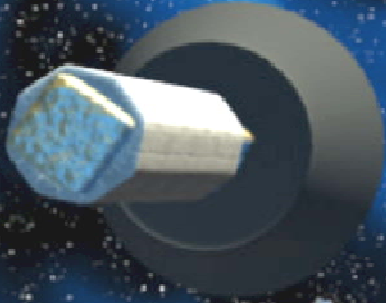


- Fichiers des cours précédents sur: www.college-de-france.fr/default/EN/all/ast_obs/annee_20082009.htm
- Articles sur: www.oamp.fr/lise
- Videos sur: [redacted]

011_Exopl1.jsp

aujourd'hui:

Hypertélescopes dans l'espace: recherche de vie et cosmologie



QuickTime™ et un décompresseur
Photo - JPEG sont requis pour visualiser
cette image.



- A 15h:

Séminaire d' Andrea Chiavassa (Université de Liège)

"La surface tachée de Betelgeuse: un zoom sur sa dynamique
atmosphérique"

dernier cours à Paris cette année (3 cours à Grenoble en Mai)

Mieux voir les étoiles,

leurs planètes: présence de vie ?

les galaxies,

l'univers lointain



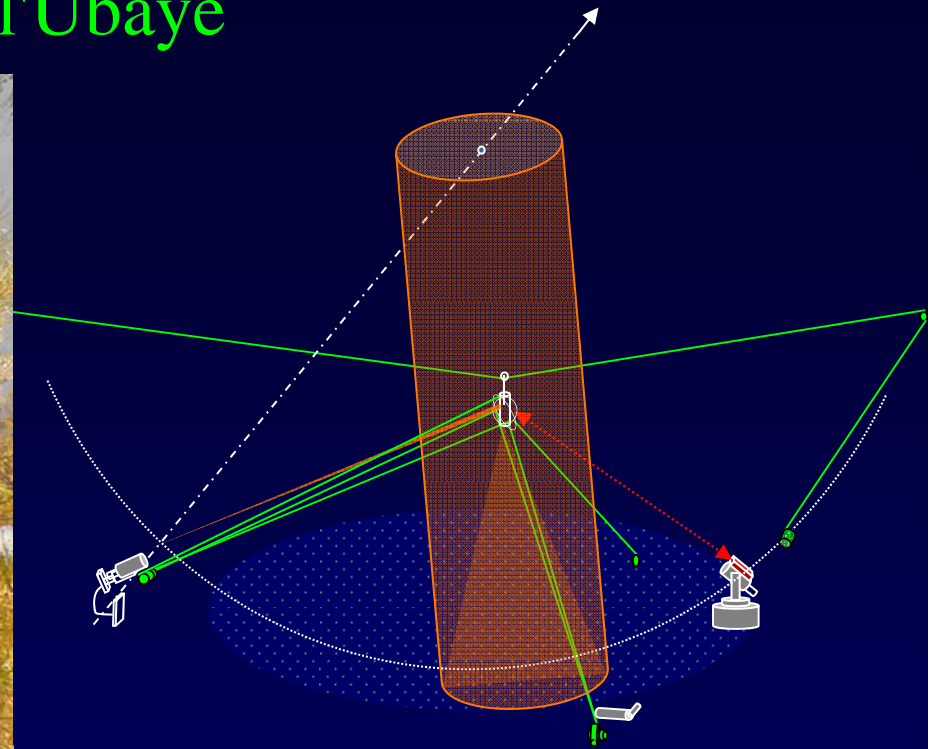


QuickTime™ et un décompresseur
Photo - JPEG sont requis pour visualiser
cette image.



Les essais d'hypertélescope sur Terre préparent
les versions spatiales

Essais d'un hypertélescope dans l'Ubaye



- premiers essais avec deux miroirs: obtenir des interférences
- ensuite:
 - agrandissement à 200m ? installation de 100 miroirs
 - proposition d'un "Kilometric hypertelescope" européen
 - en attendant l'espace...

câble



Voir la vie extra-solaire ?

Laser Trapped Exo-Earth Imager (LTEEI)

Pour une image directe comme celle-ci

Distance 10 années-lumière , pose 10 heures

QuickTime™ et un décompresseur
Photo - JPEG sont requis pour visualiser
cette image.

- Flotille de 100km, avec 10,000 - 1.000.000 miroirs, dimension 10 à 3cm (surface 100m²)
- Espacement 1000 à 100m
- masse totale des miroirs: 250kg : " tiennent dans une valise "

Exemple: 100,000 miroirs de 3cm

Espacement 316 m , Direct Imaging Field 1.6 nanoradian, ou 0,3 milli arc-seconde

Résolution angulaire à 500 nm: 1.03 micro-arc-seconde

Diamètre des miroirs émetteurs laser : 2.6m et 13.3 m **peuvent être dilués**

Masse des miroirs: 2.3 gramme, total pour 100,000: 236 kg

Impacts de micro-météorites > 1 micron (Grun) : 2.4 /miroir/an , vitesse acquise: > 0,014 micron/s

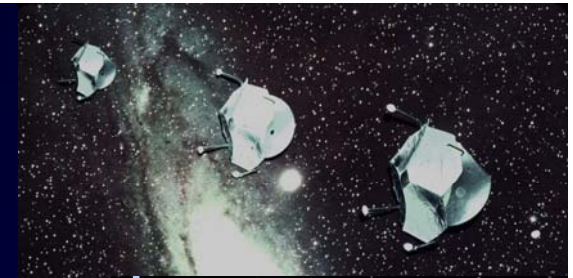
Hypertélescope dans l'espace

- Réseau optique de 100 000 km ?
 - exemple: hypertélescope "Neutron Star Imager" à N miroirs de 8m
 - Voir en détail le pulsar du Crabe ? Diamètre 20km, rotation 33ms
- Au delà: Y aura-t-il une turbulence gravitationnelle ? Quelle limitation ?



Dans l'espace: flotilles interférométriques

- Fascinant : quelle limitation de résolution ?
- Proposées à NASA et ESA depuis 1982
 - TRIO (Labeyrie et al., 1982)
 - version lunaire LOVLI (Arnold et al. 1996)
 - DARWIN (Léger et Mariotti 1993)
 - TPF-I
 - EEI
 - SPECS (Mather et al.)
 - Luciola (Labeyrie et al. 2008)
- Pilotage complexe: les agences spatiales repoussent ...
- Comment simplifier ?



QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.

Proposition d'hypertélescope spatial Luciola

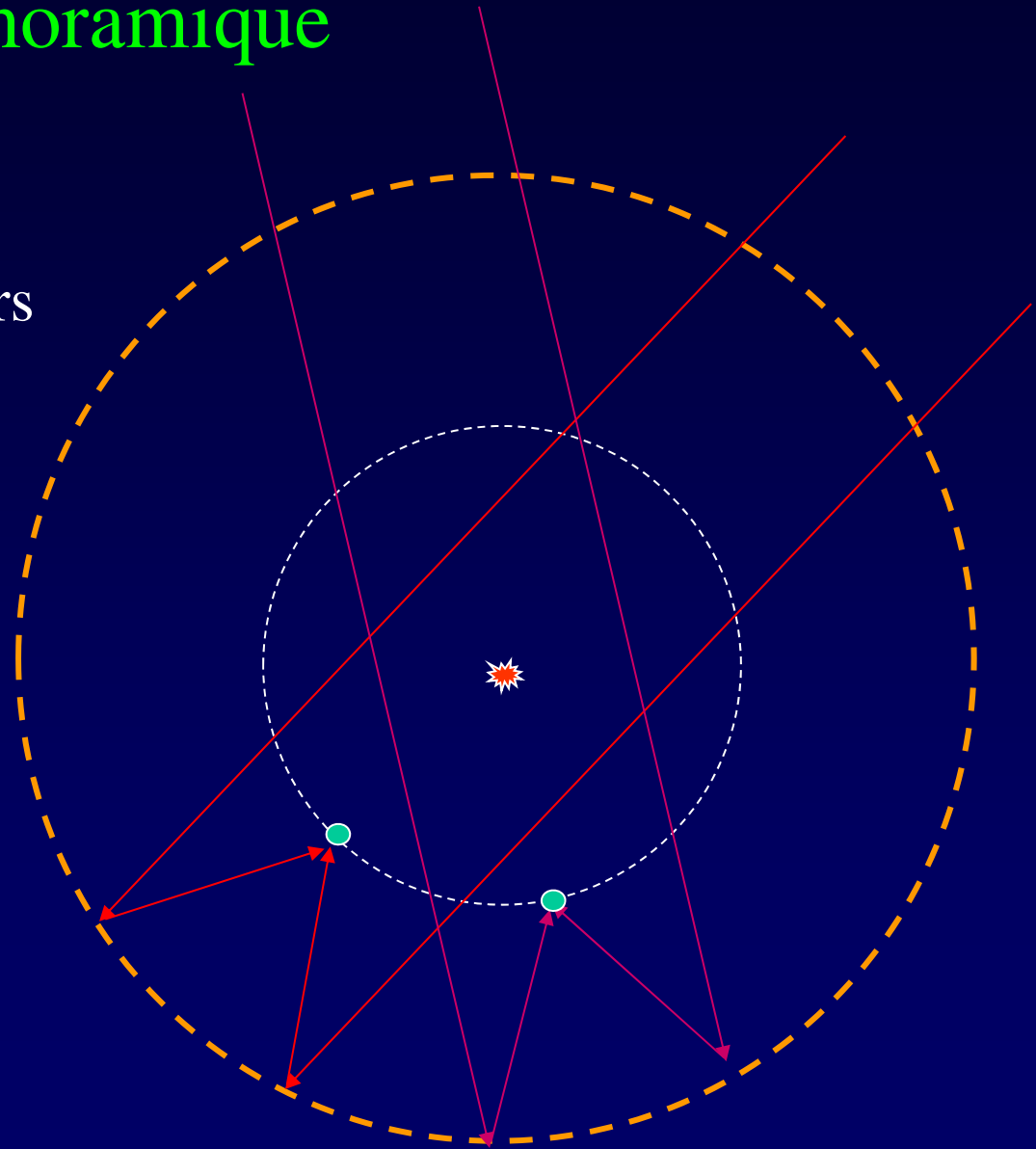
(soumise à l'ESA, 2008, Exp. Ast. 2009)



Hypertélescope:

Version panoramique

- Piloter une flotille de miroirs
- " formation flight"



Un début prometteur...

essai récent de vol en formation: expérience PRISMA

2011, Franco-Suédois (CNES & SNSB) www.prismasatellites.se

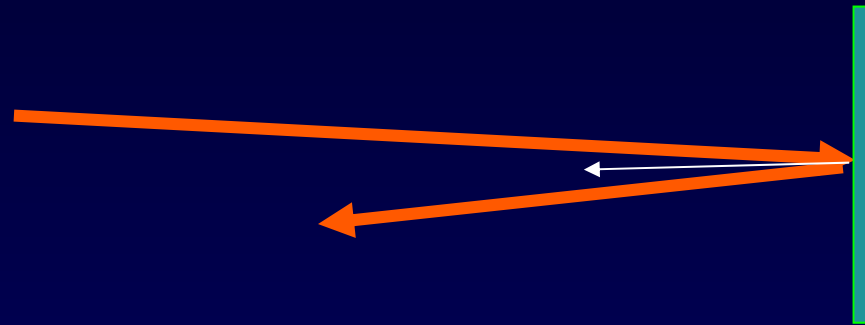
- Pilotage relatif de deux mini-satellites...Mango & Tango
- ... Autonome sans le sol
- Micro fusées
- Positionnement par GPS
- Faible coût, résultats encourageants



Photo de Tango prise par Mango

Dans l'espace:

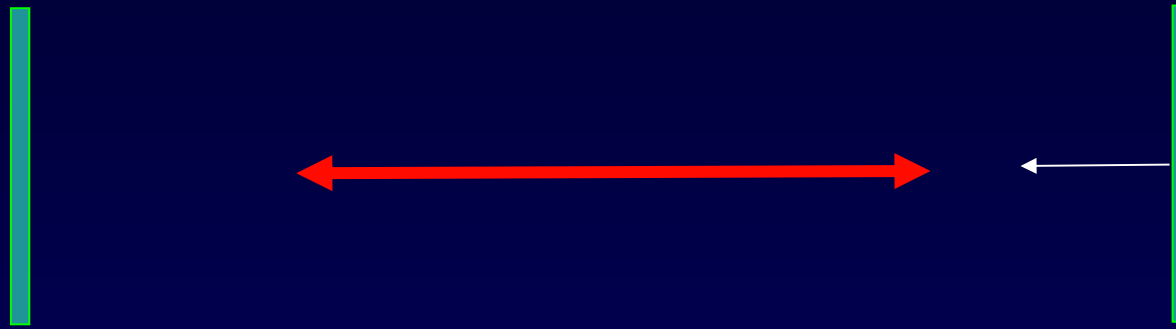
propulsion par laser



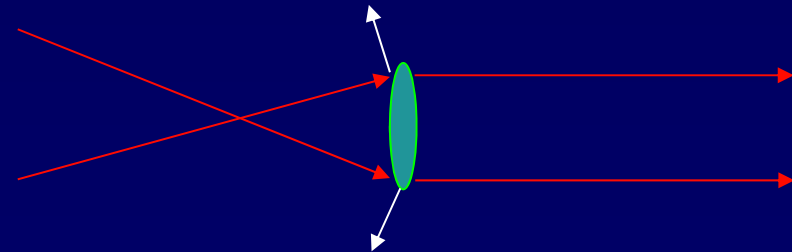
- Force répulsive
- Pression de radiation sur un miroir : $F = 2 P/c$
- exemple: $P = 1W \Rightarrow F = 6 \text{ nN}$ très faible !

Dans l'espace:

propulsion par laser cas d'une cavité résonnante



- Passages multiples, force accrue, mais répulsive
- Propositions de flotilles de miroirs captifs à laser & cable
- Peut-on se passer de cable ?

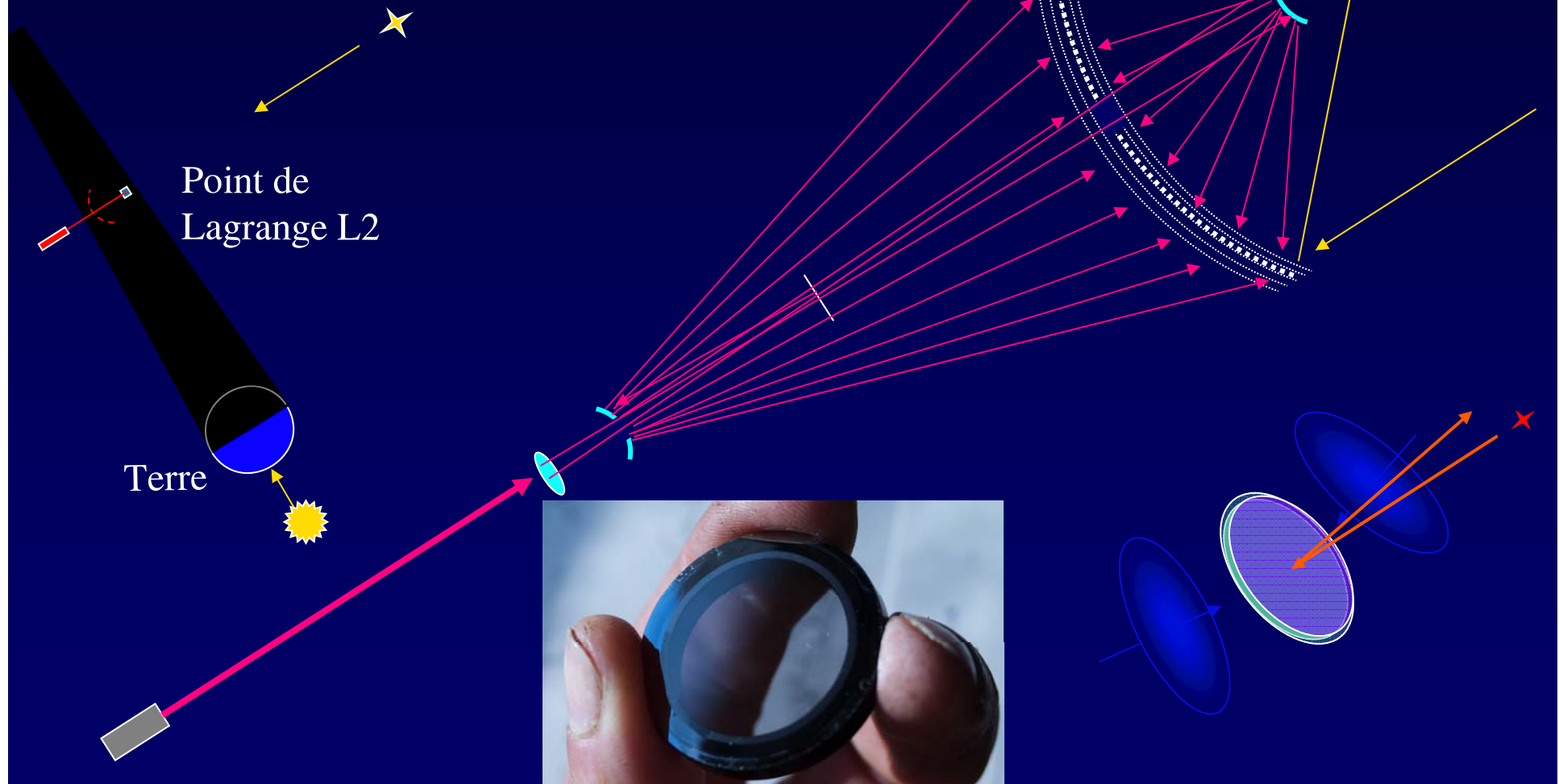


"Laser-Trapped Hypertelescope Flotilla" LTHF

(Labeyrie et al., Experimental Astronomy, 2009)

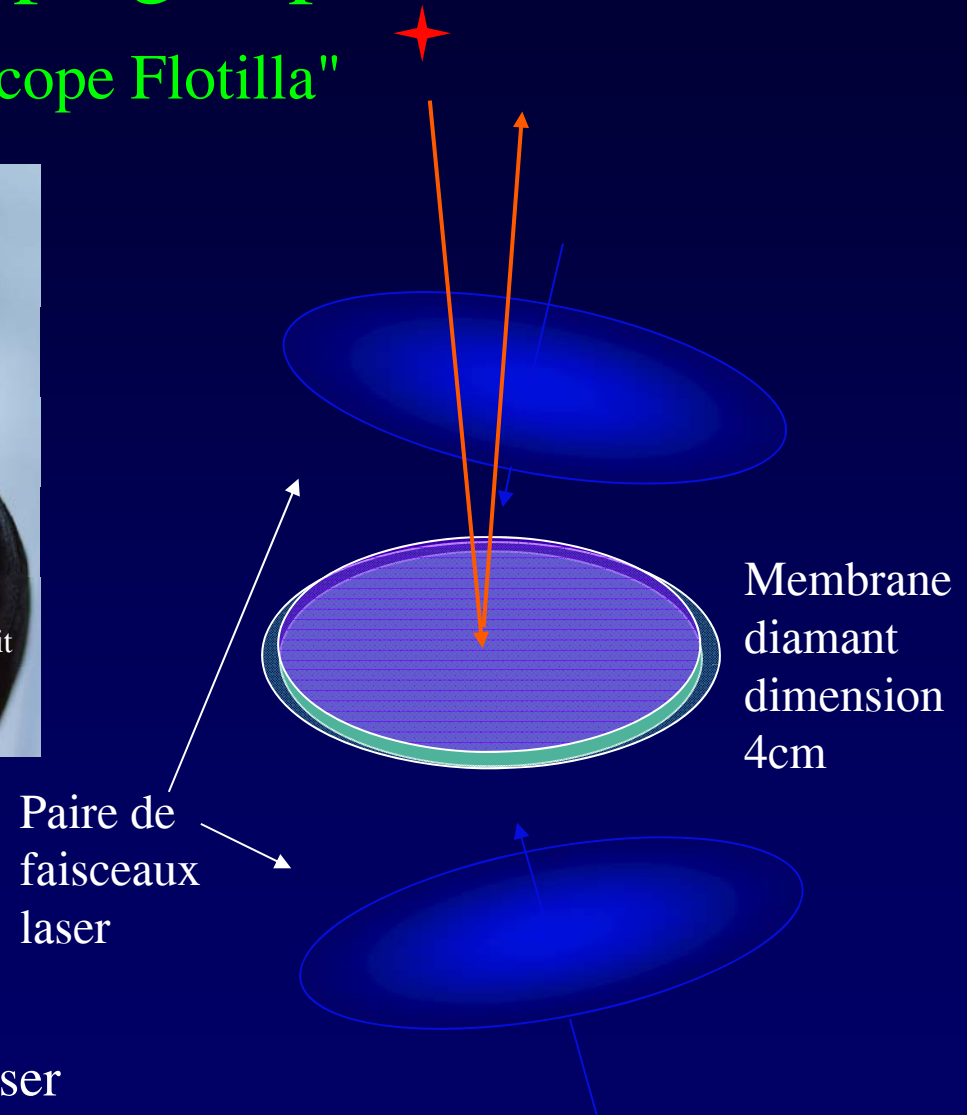
Extensible vers une flotille de 100km ?

"Laser Trapped Exo-Earth Imager (LT-EEI)



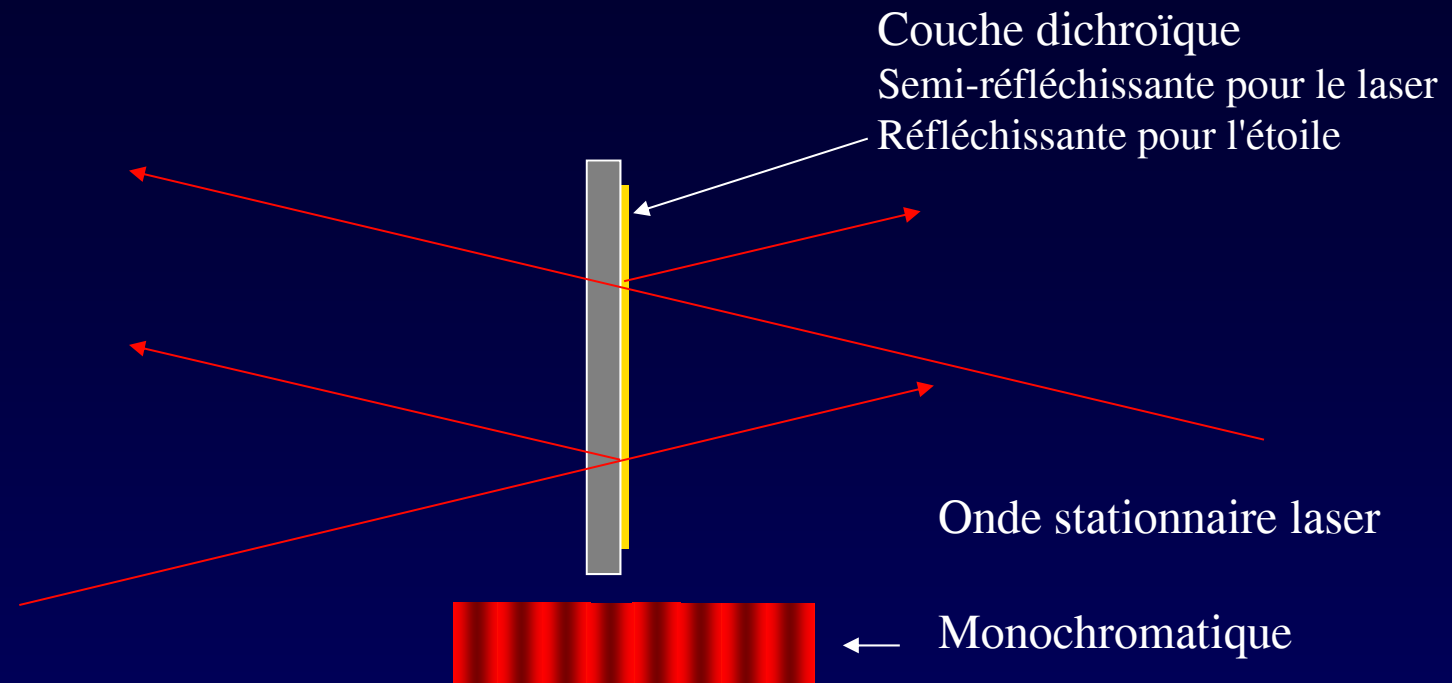
Dernière idée pour l'espace: Flotille hypertélescope piégée par laser

"Laser Trapped Hypertelescope Flotilla"



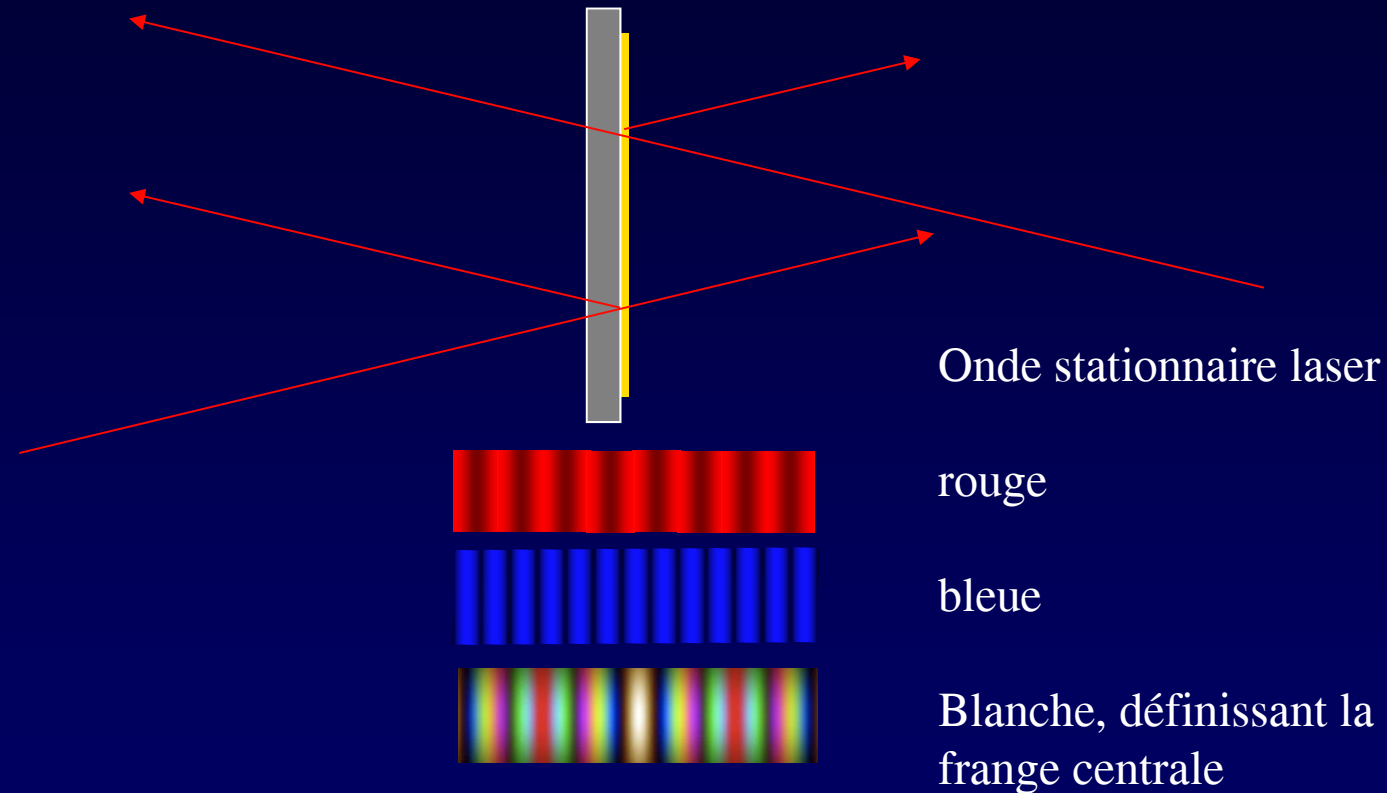
- des satellites passifs ...
- ... sous forme de miroirs piégés par laser

Principe du miroir piégé par laser (Labeyrie 1979, Guillon et al. 2006)



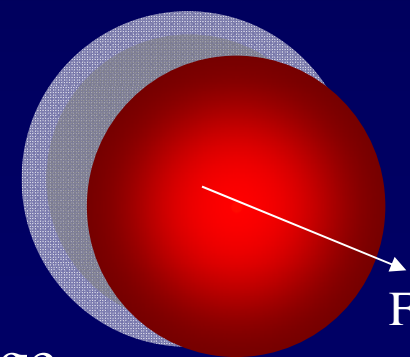
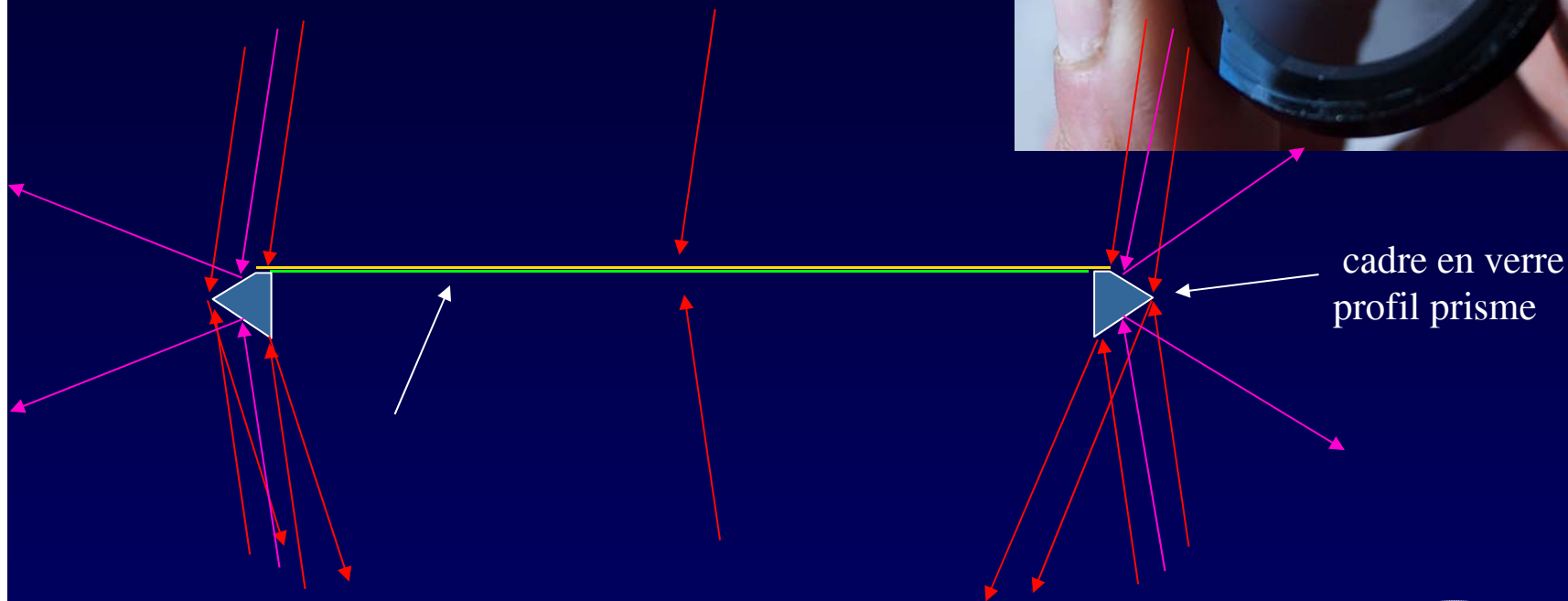
- l'interférence des faisceaux module les intensités émergentes...
- la lumière peut sortir d'un côté ou de l'autre, en déplaçant la lame de $\lambda/4$
- la pression de radiation P/c s'inverse selon la position... à intervalles de $\lambda/4$
- la lame se piège sur la frange la plus proche

Privilégier la frange centrale en variant la longueur d'onde



- la lame piégée est attirée vers la frange centrale en balayant du rouge au bleu la longueur d'onde laser , à répétition

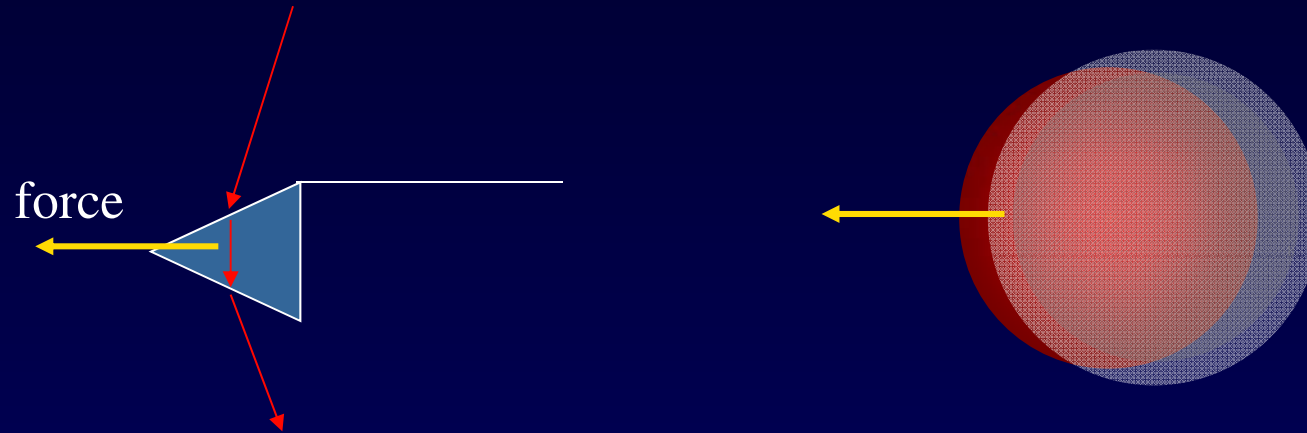
Miroir membrane pour "Laser Trapped Hypertelescope Flotilla"



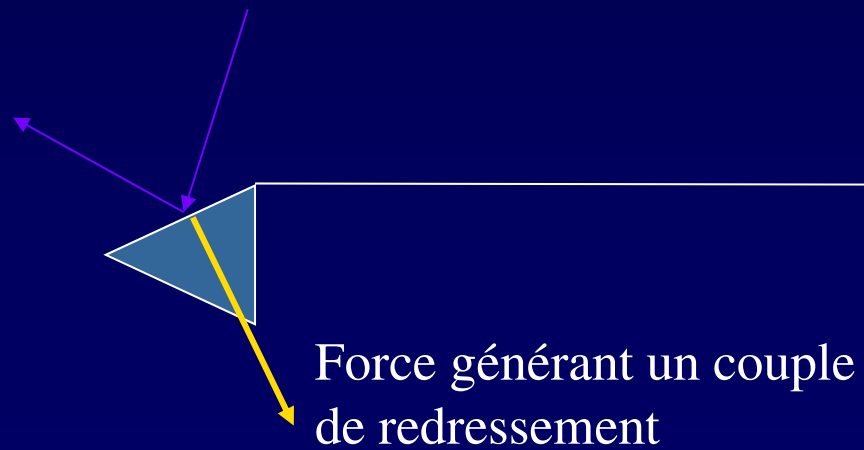
Auto-centrage

Piégeage transverse :

Auto-centrage par effet de "pincette laser"



L' attitude s'auto-ajuste aussi

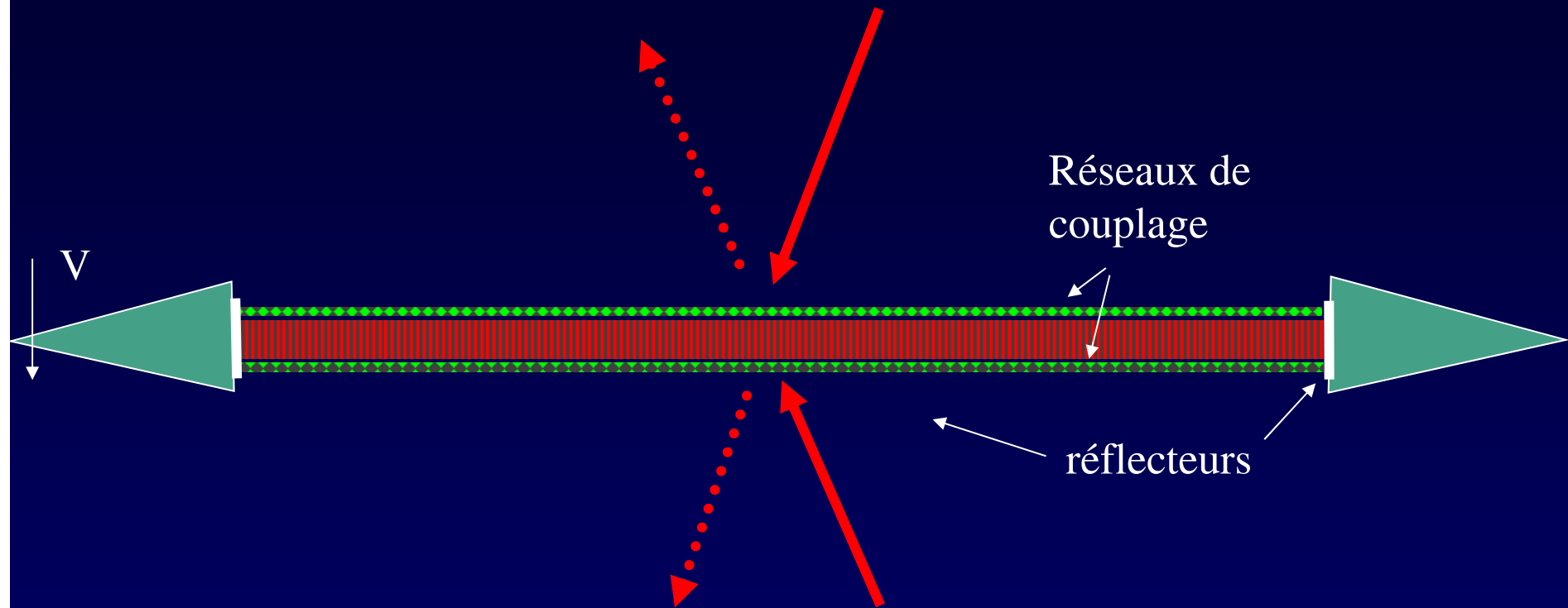


Amortir l'oscillation



- L'excitation par les photons infra-rouges s'accumule
- Amortisseur:
 - Des micro-cerises ? Queue flexible, inélastique, absorbe l'énergie
 - membrane flexible ?
 - Amortisseur optique ?
- Préciser les limitations

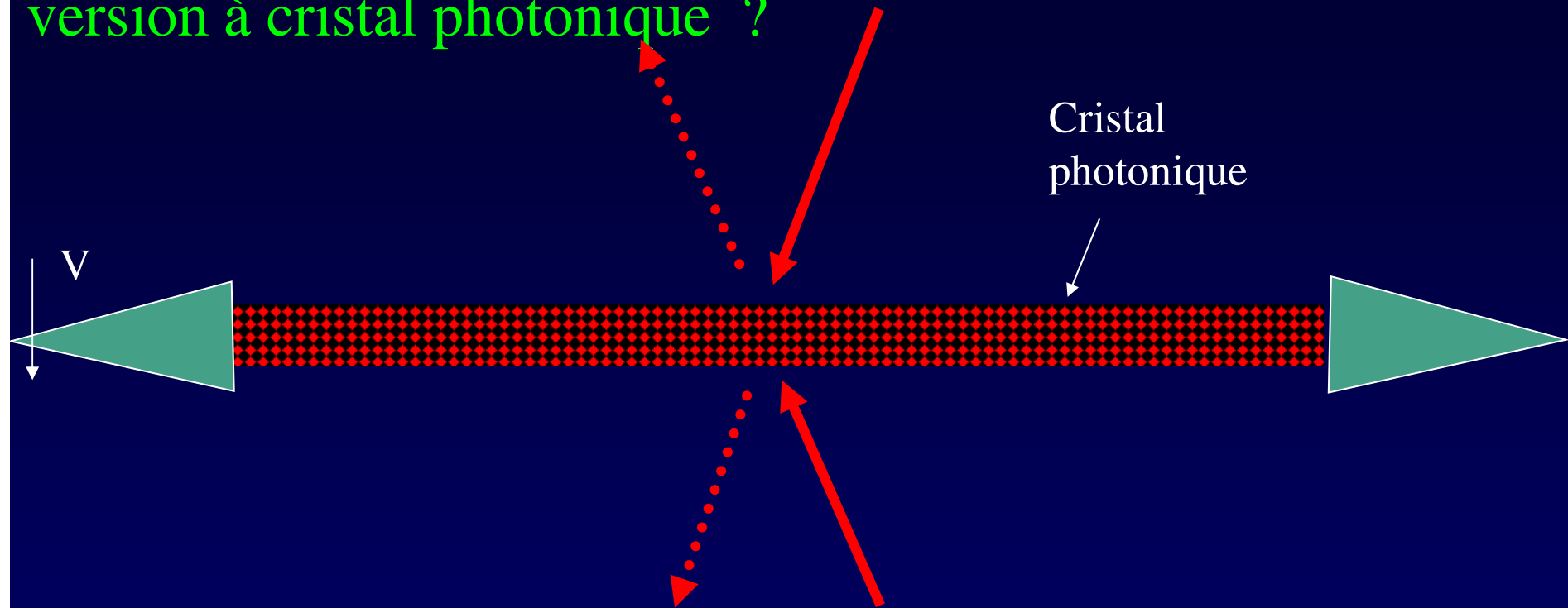
Amortisseur optique par résonateur transverse ?



- pour créer un terme d'amortissement ...
- ... rendre R & T sensibles à la longueur d'onde, donc à V ...
- ... par une cavité résonante transverse, à haut gain
- difficultés: modes complexes dans le disque

Amortisseur optique par résonateur transverse:

version à cristal photonique ?



- reroidissement obtenu par Karrai et al. (2008)

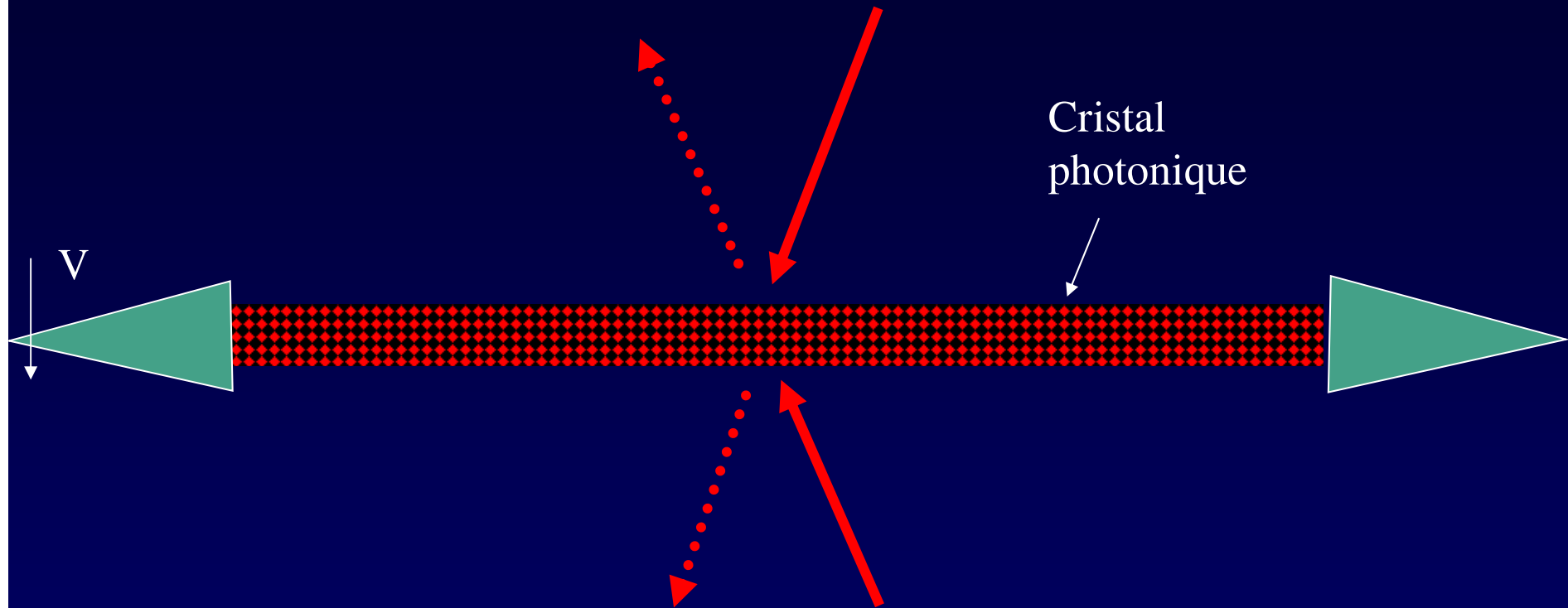
pour observer l'infra-rouge lointain:

Peut-on faire d'une pierre deux coups ?

- piéger les miroirs
- et les refroidir...
- des télescopes cryogéniques furent lancés...
- bientôt: "James Webb Space Telescope" 40 à 7 Kelvin, détecteur refroidi

QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.

Refroidissement par laser: est-ce possible ?



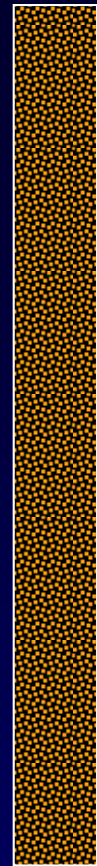
Deux articles récents le suggèrent :

Seletskiy et al., 2010 "Laser cooling of solids to cryogenic temperatures"

Karrai et al., 2008, "Doppler Optomechanics of a Photonic Crystal"

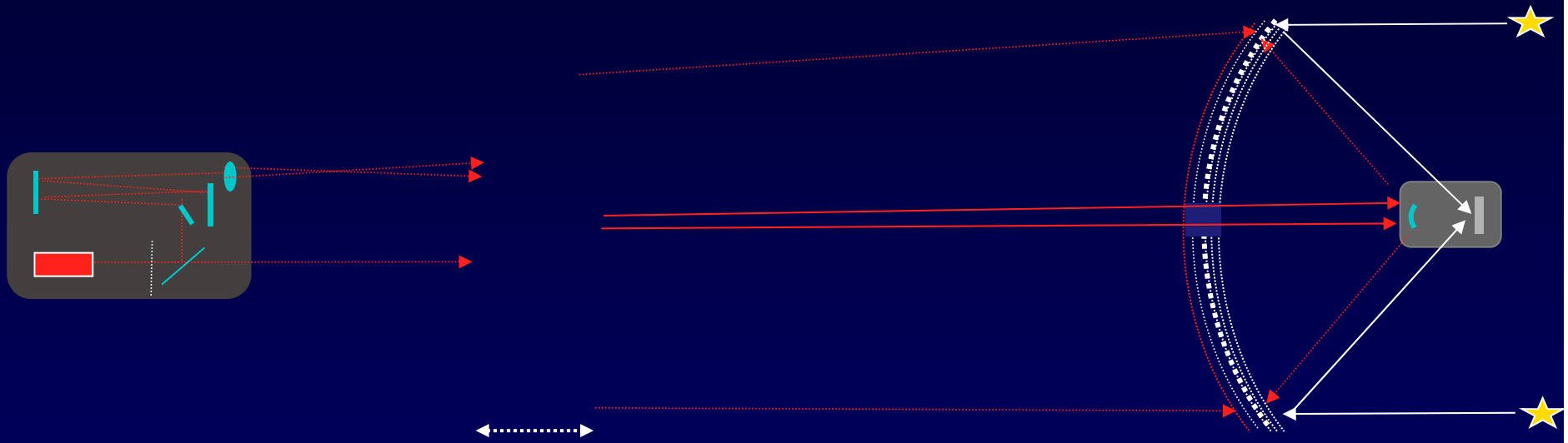
Oscillation et température de la lame

Le laser peut-il la refroidir ?



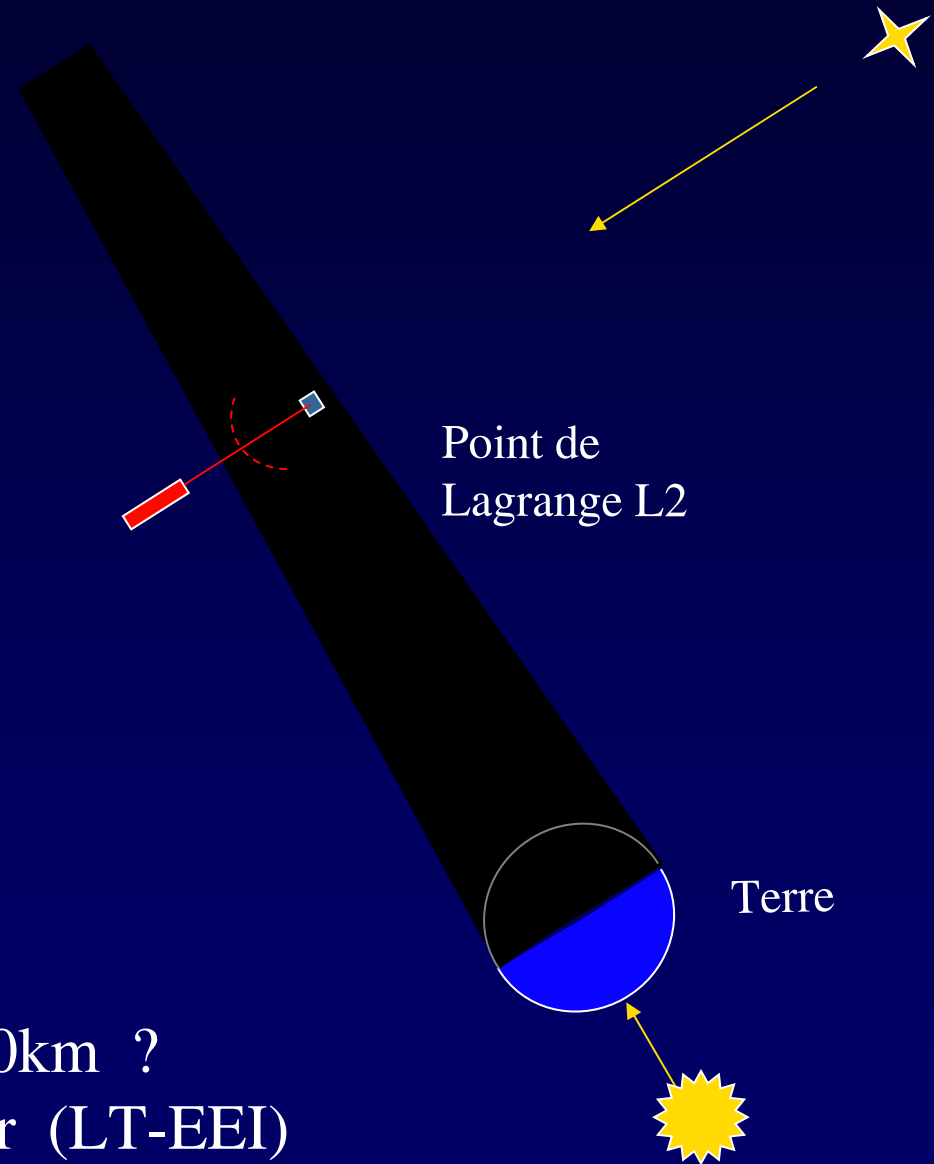
- Température : oscillation aléatoire des atomes dans la lame
- Fait osciller ses faces optiques
- Les amortir extrait l'énergie thermique , refroidit

Laser trapped hypertelescope flotilla: 2 satellites nécessaires au moins , avec ligne à retard virtuelle



"Laser-Trapped Hypertelescope Flotilla"

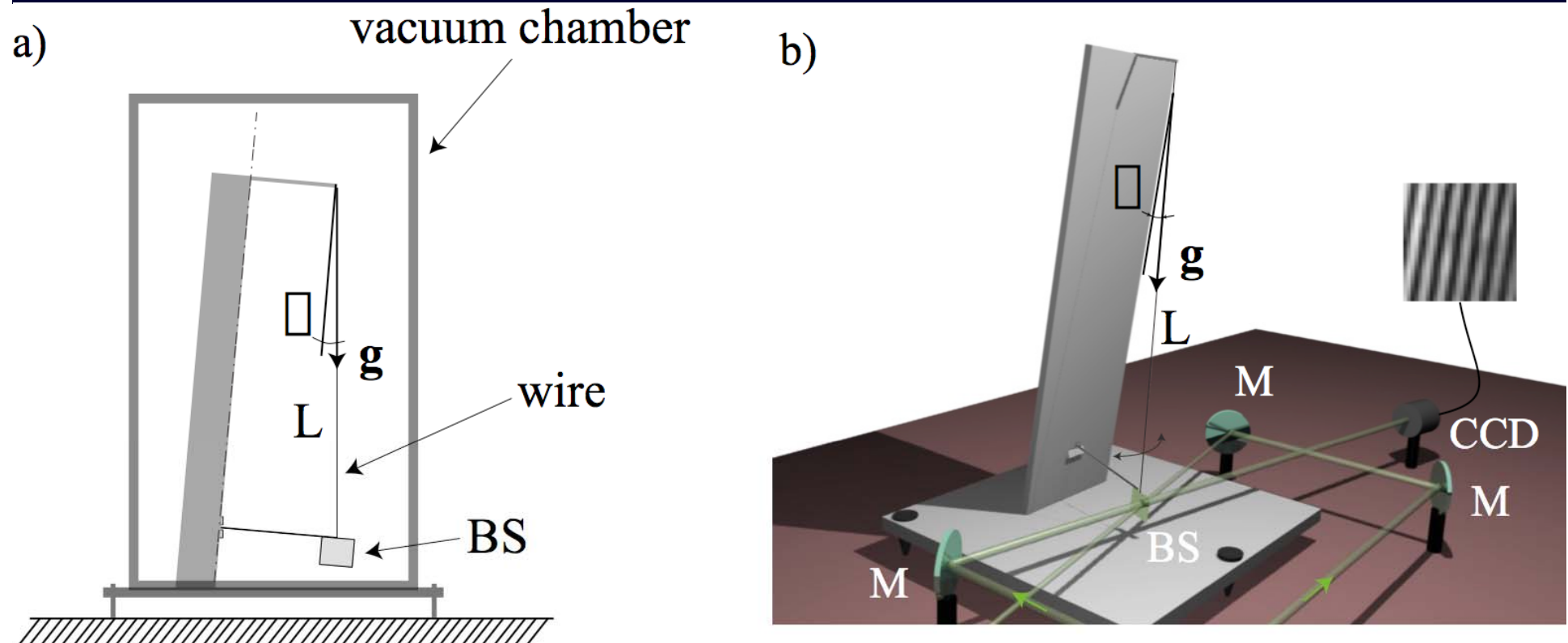
(Labeyrie et al., Experimental Astronomy, 2009)



Extensible vers une flotille de 100km ?

"Laser Trapped Exo-Earth Imager (LT-EEI)"

Montage d'essai en laboratoire par U.Bortolozzo & S.Residori



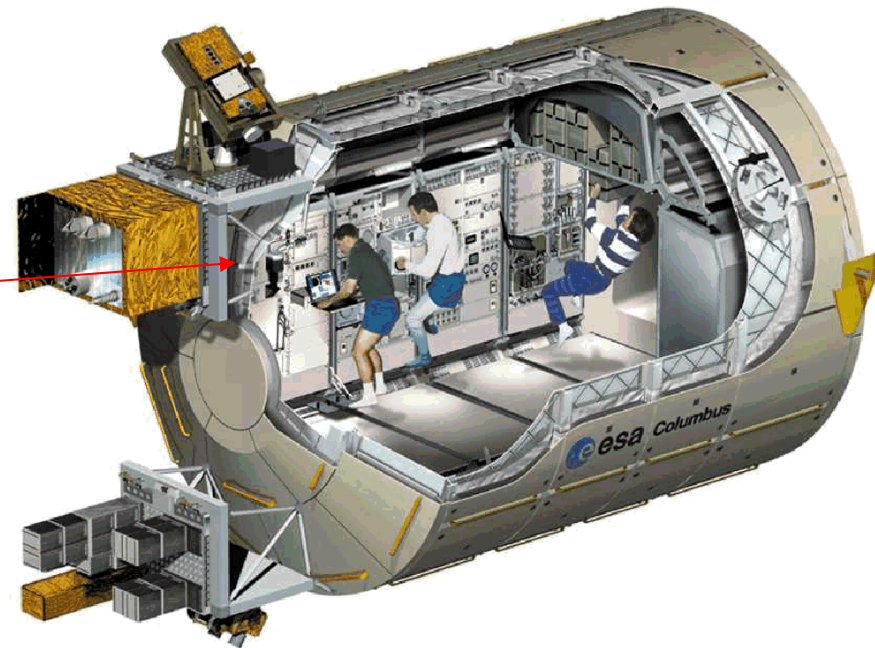
- lame à suspension "sismographe porte de jardin"
- très sensible
- sous vide poussé, éliminant l'effet du mouvement Brownien
- laser à argon 100W,
- détection de mouvement par lumière lente (Bortolozzo et al.)

Essais envisagés dans la "International Space Station"

- gravité résiduelle :
0,2 micro-g or 2 micron.s-2
- Acceptable avec quelques Watts de puissance laser
- satellite géostationnaire aussi envisageable



Laboratoire Columbus (ESA)
racks reliés au vide extérieur



Rechercher la vie...

Laser Trapped Exo-Earth Imager (LTEEI)

QuickTime™ et un décodeur
Photo - JPEG sont requis pour visualiser
cette image.

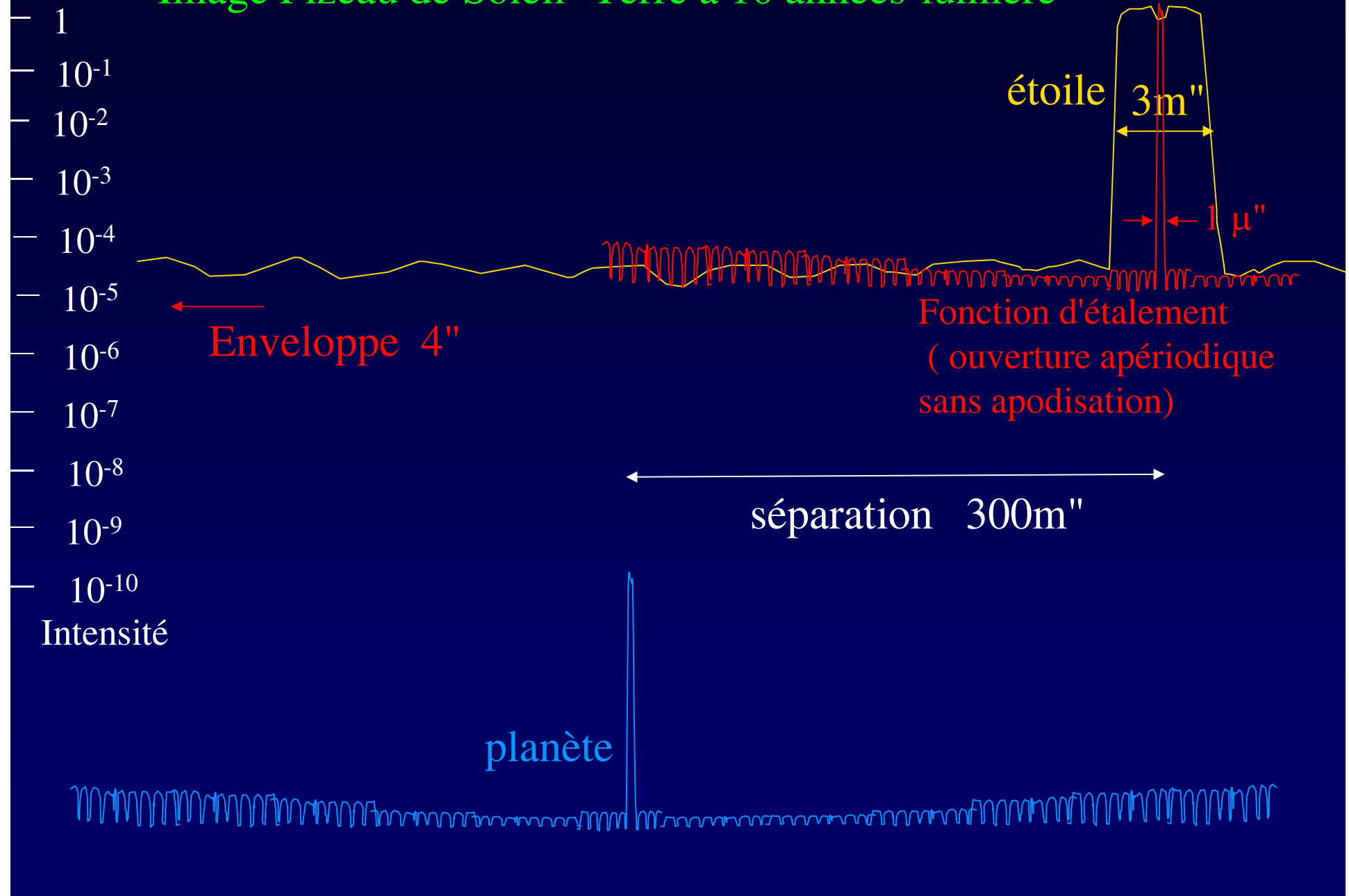
Image simulée
d'une exo-Terre à
10 années-lumière

- flotille de 100km, résolution 1 micro-seconde d'arc à 500nm...
- ... soit 500 km à 10 années-lumière
- 1000 x 1000 miroirs de 30mm, espacés de $s = 100m$
- périodique ou spirale apodisante, etc... ? Comparer par simulations
- même surface collectrice qu'un télescope de 30m monolithique
- champ d'imagerie propre $\lambda / s = 1m''$ à 500nm



Laser Trapped Exo-Earth Imager:

Image Fizeau de Soleil - Terre à 10 années-lumière

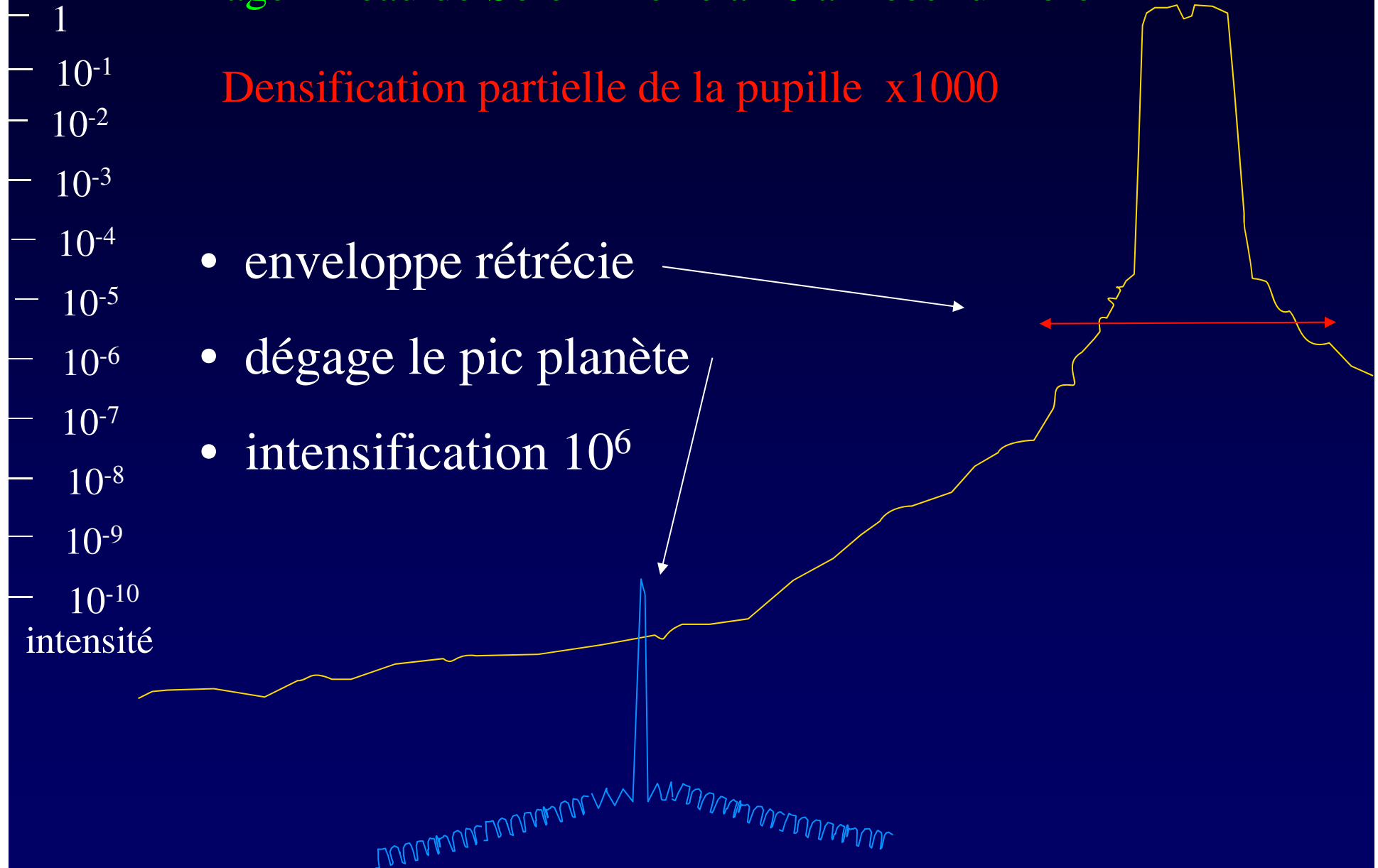


version Luciola LT d'Exo Earth Imager:

Image Fizeau de Soleil - Terre à 10 années-lumière

Densification partielle de la pupille x1000

- enveloppe rétrécie
- dégage le pic planète
- intensification 10^6

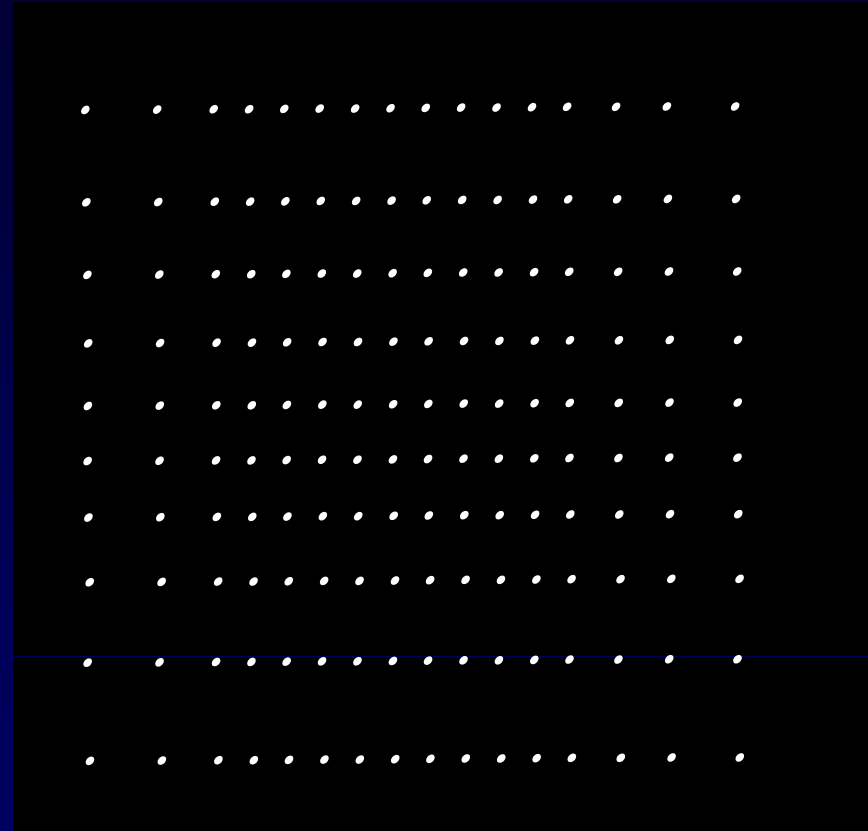


Laser Trapped Exo Earth Imager (LTEEI)

Flotille apodisante

1000 ouvertures

QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.



• miroirs plus espacés au bord

- atténue les pieds de la fonction d'étalement
- peut remplacer ou compléter un coronographe
- à préciser pour " Laser Trapped Exo Earth Imager"

Coronographe adaptatif

QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.

Gemini Planet Imager (McIntosh et al.)

Coronographe du télescope Hubble

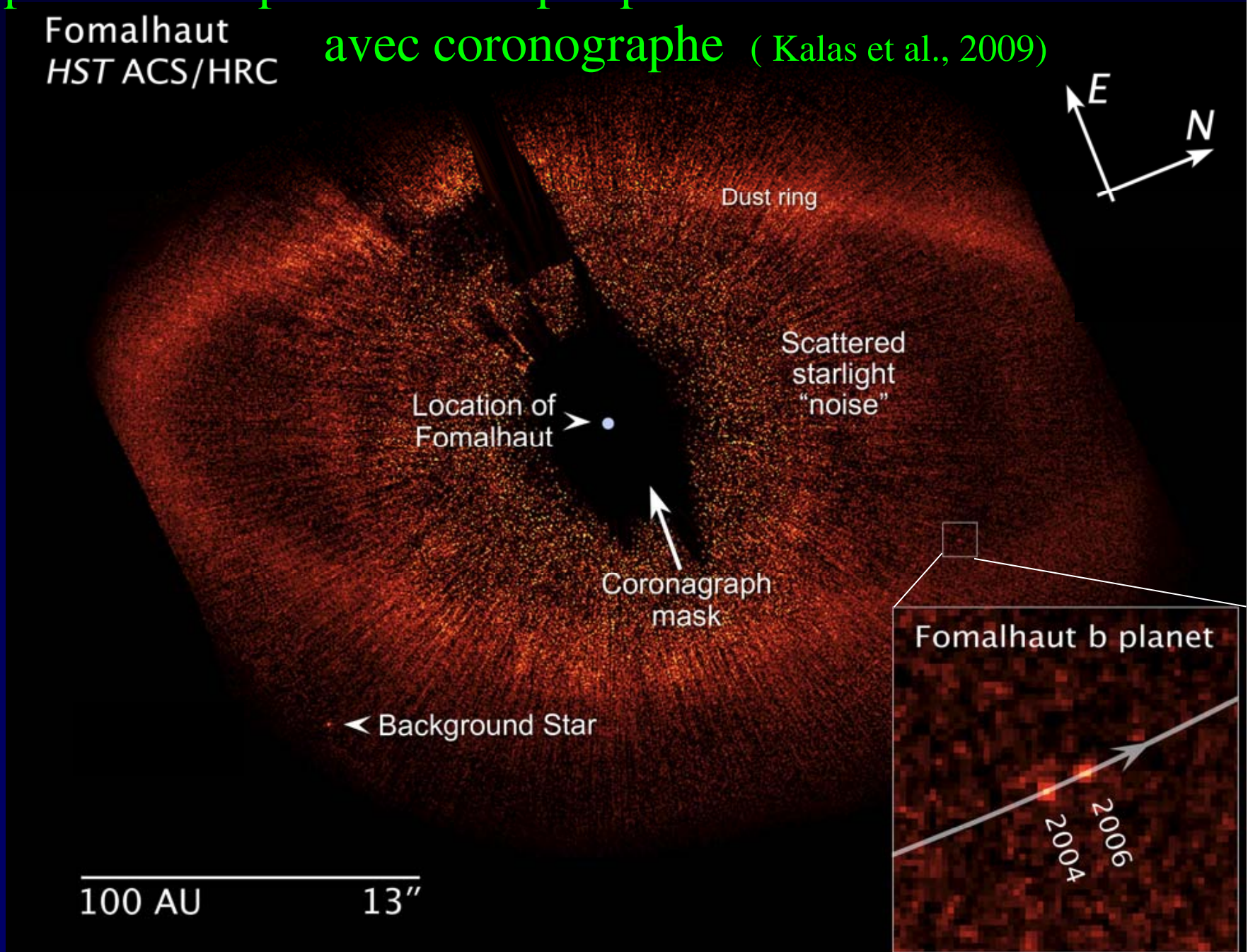
QuickTime™ et un
décompresseur
sont requis pour visionner cette image.

Disque de poussière autour de l'étoile jeune HD14156

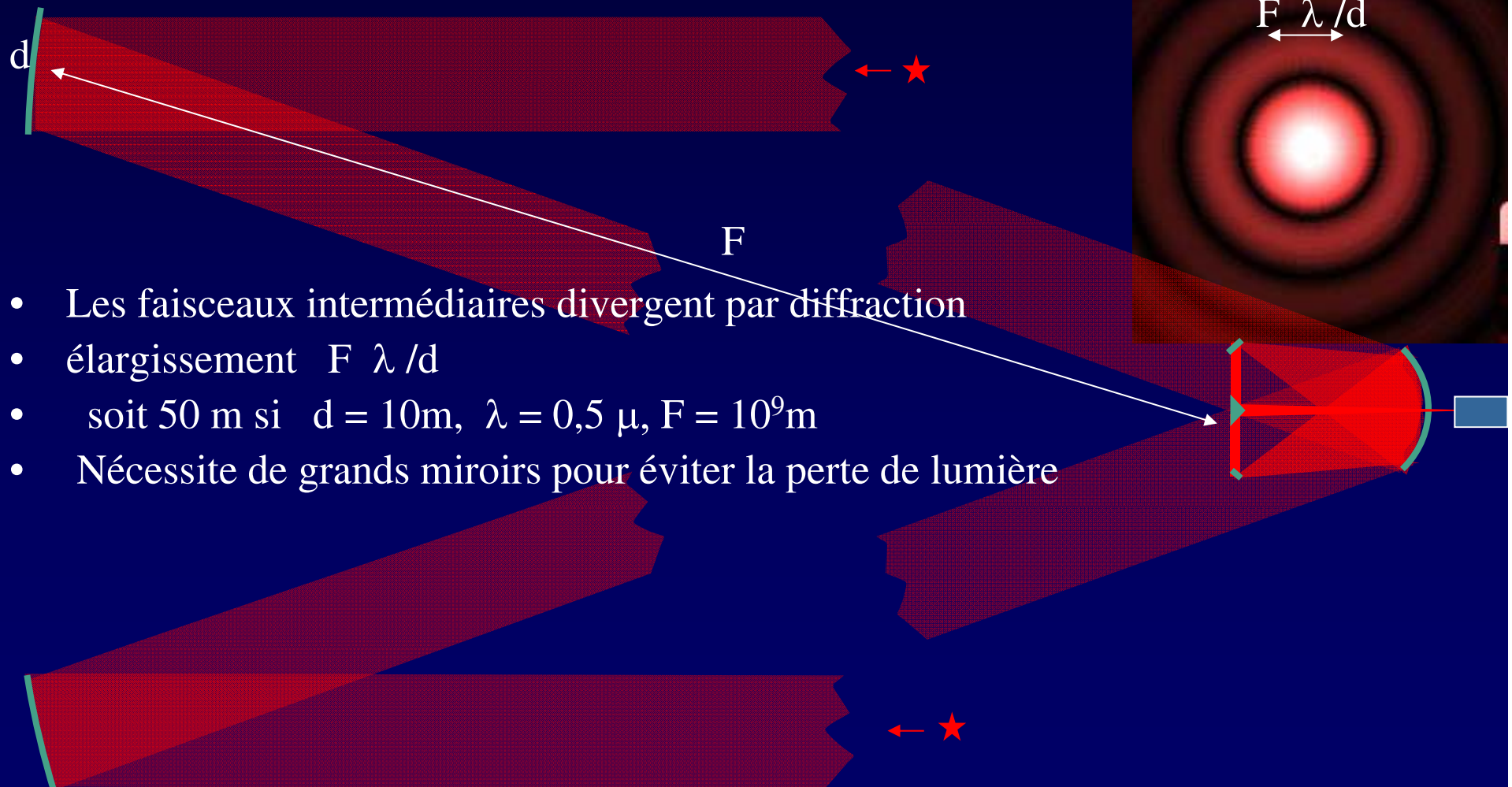
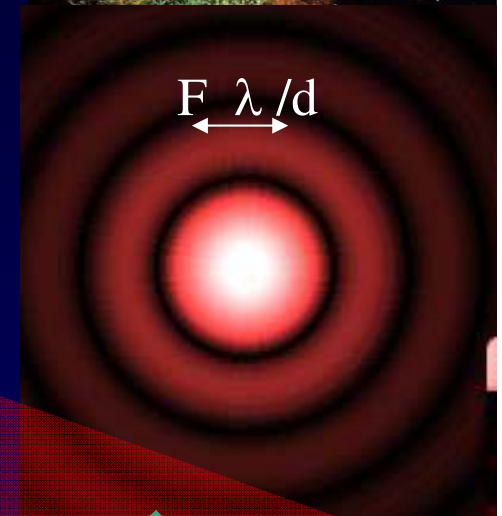
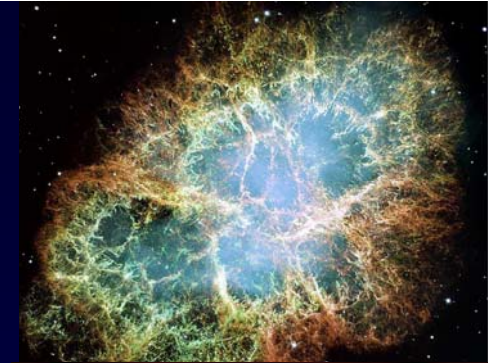
Exo-planète vue par le télescope spatial Hubble

Fomalhaut
HST ACS/HRC

avec coronographe (Kalas et al., 2009)



Dans l'espace: flotilles interférométriques géantes
Quelle limite de dimension ? un million de
kilomètres ? " Neutron Star Imager "



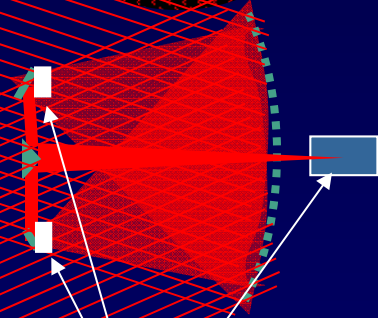
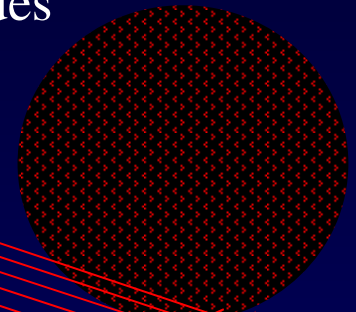
- Les faisceaux intermédiaires divergent par diffraction
- élargissement $F \lambda / d$
- soit 50 m si $d = 10\text{m}$, $\lambda = 0,5 \mu$, $F = 10^9\text{m}$
- Nécessite de grands miroirs pour éviter la perte de lumière

Pour Neutron Star Imager :

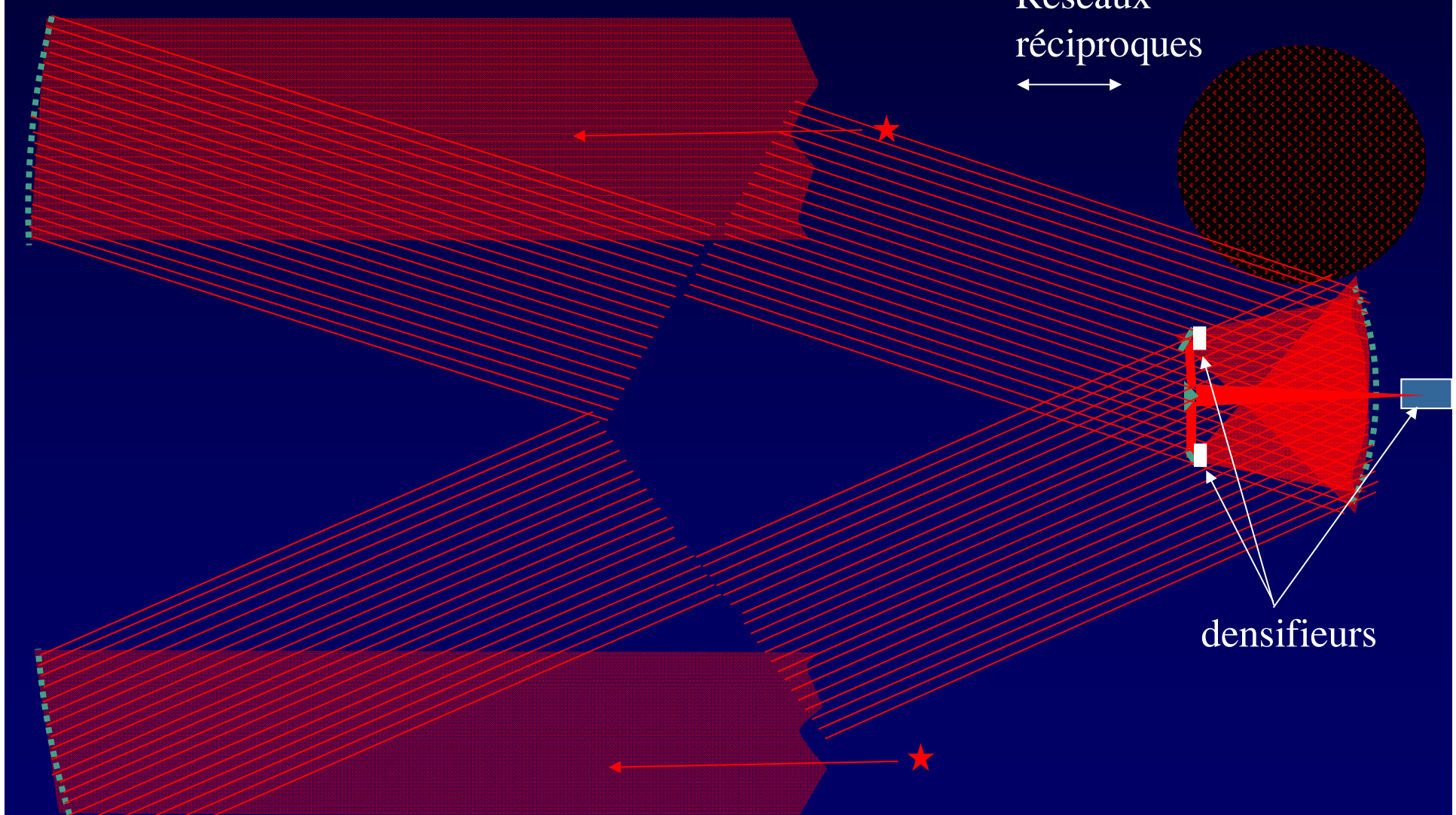
Peut-on remplacer les grands miroirs par des sous-flotilles ?

Flotille de flotilles, piégées par laser

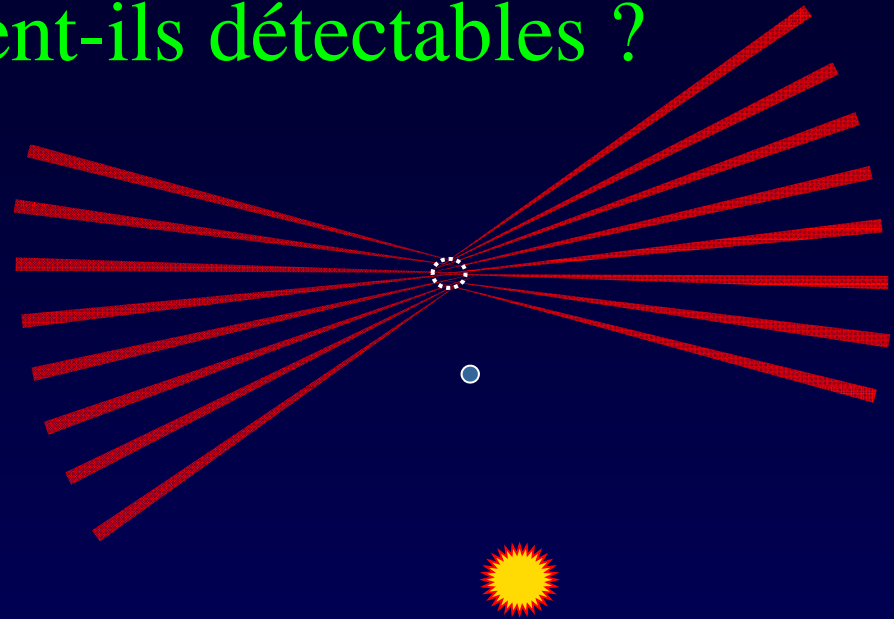
Réseaux
réciproques



densifieurs



Pour amateurs de SETI (Search for Extra-Terrestrial Intelligence) : Des exo- LTHF seraient-ils détectables ?



- Méthodes classiques :
 - Écoute radio (on peut contribuer au traitement des données par "seti at home")
 - détection d'émissions laser: il faudrait qu'elles nous visent, donc que leur auteurs connaissent notre niveau d'évolution et capacité à les détecter
 - Recherche de sphères de Dyson
- chercher des exo-LTHF ? Par leur émission laser scintillante ?

Hypertélescopes pour la cosmologie

- La mise en phase est possible sur des sources ultra-faibles
- même magnitude limite qu'un télescope monolithique de surface équivalente
- galaxies lointaines, etc...
- Les petits miroirs ne sont pas pénalisants pour l'infra-rouge...
- ... mais avantageux si le piégeage laser les refroidit

Hubble Ultra Deep Field

Laser Trapped Exo-Earth Imager (LTEEI) : atténuer l'étoile mère

- Possible avec :
- interférence destructive entre paires proches (Bracewell)
- coronagraphie avec des sous-groupes, avec densification de pupille hiérarchique

