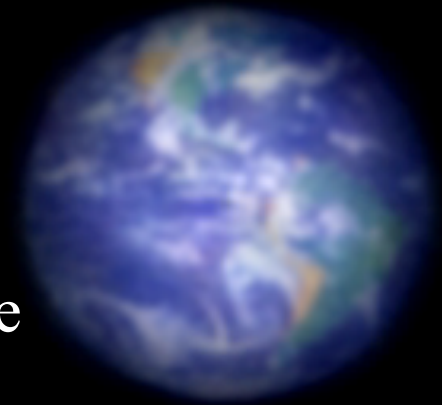


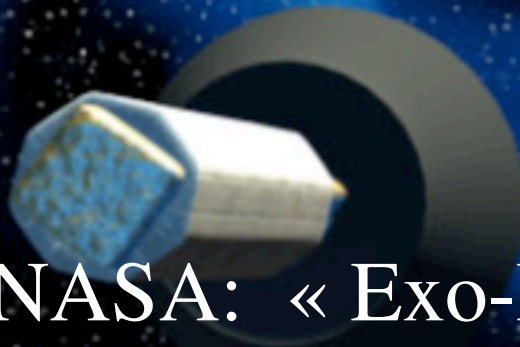
Etapes des hypertélescopes

- essais en cours d'un prototype "Ubaye Hypertelescope"
- avant-projet proposé de "Extremely Large Hypertelescope" (ELHyT) de 1km, sur Terre
- Versions spatiales proposées à NASA et ESA
- <https://lise.oca.eu/IMG/file/WhitepaperProposalHypertelescope.pdf>

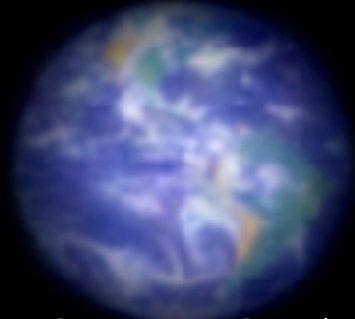
image simulée d'une exo-Terre
à 10 années-lumière
hypertélescope de 100km



Hypertelescope dans l'espace: propositions aux agences spatiales

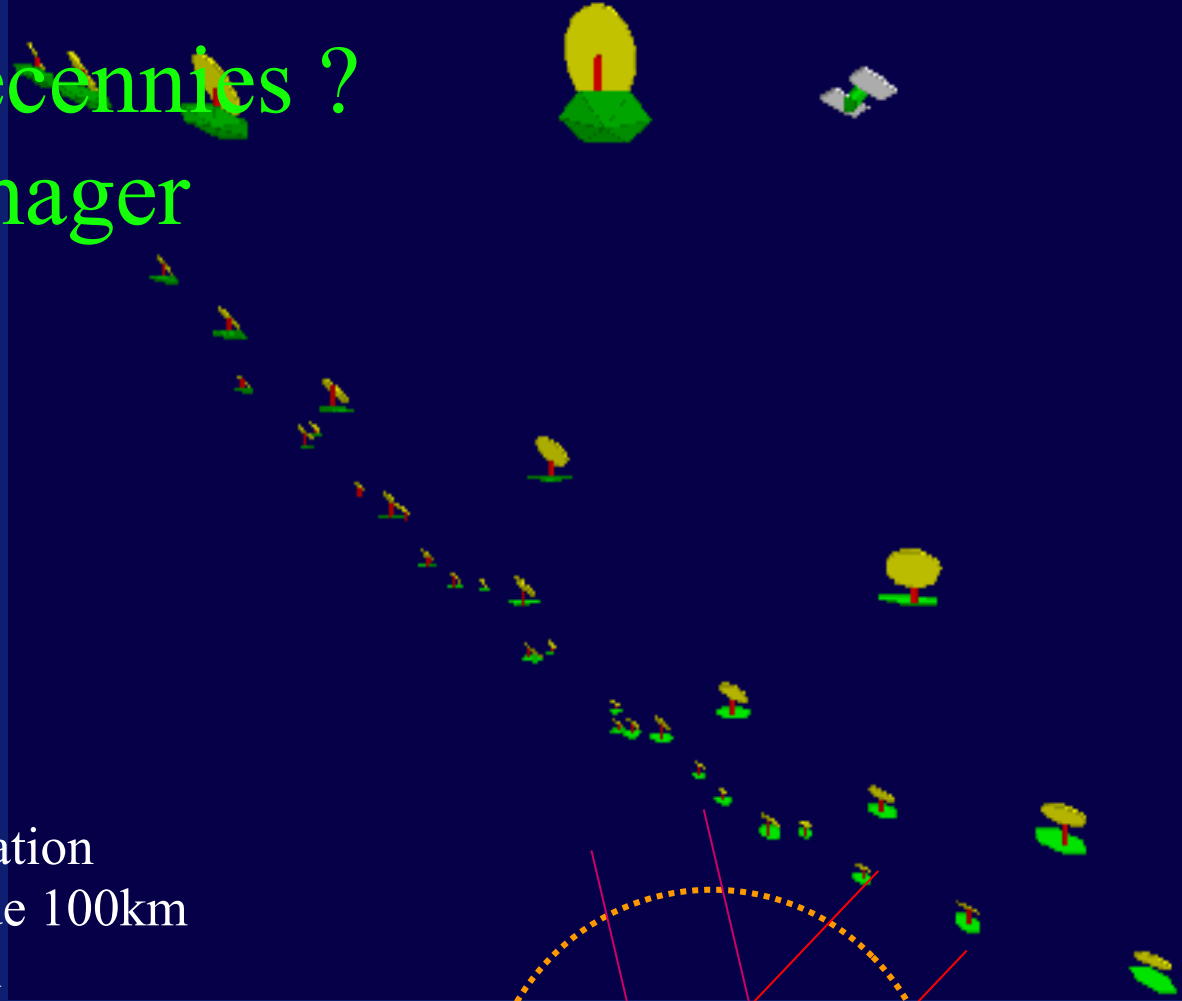
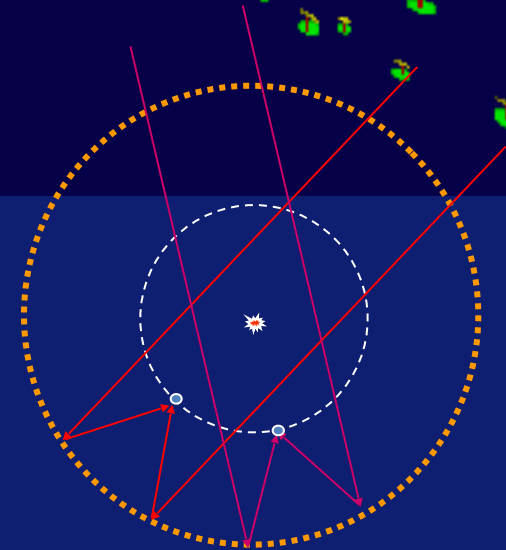
- 
- NASA: « Exo-Earth Discoverer » (2000)
 - ESA: « Luciola »
 - ESA: « Hypertelescope Optical Observatory »...
... avec option « Laser Trapped Hypertelescope Flotilla » (2012)

Dans quelques décennies ? Exo-Earth Imager



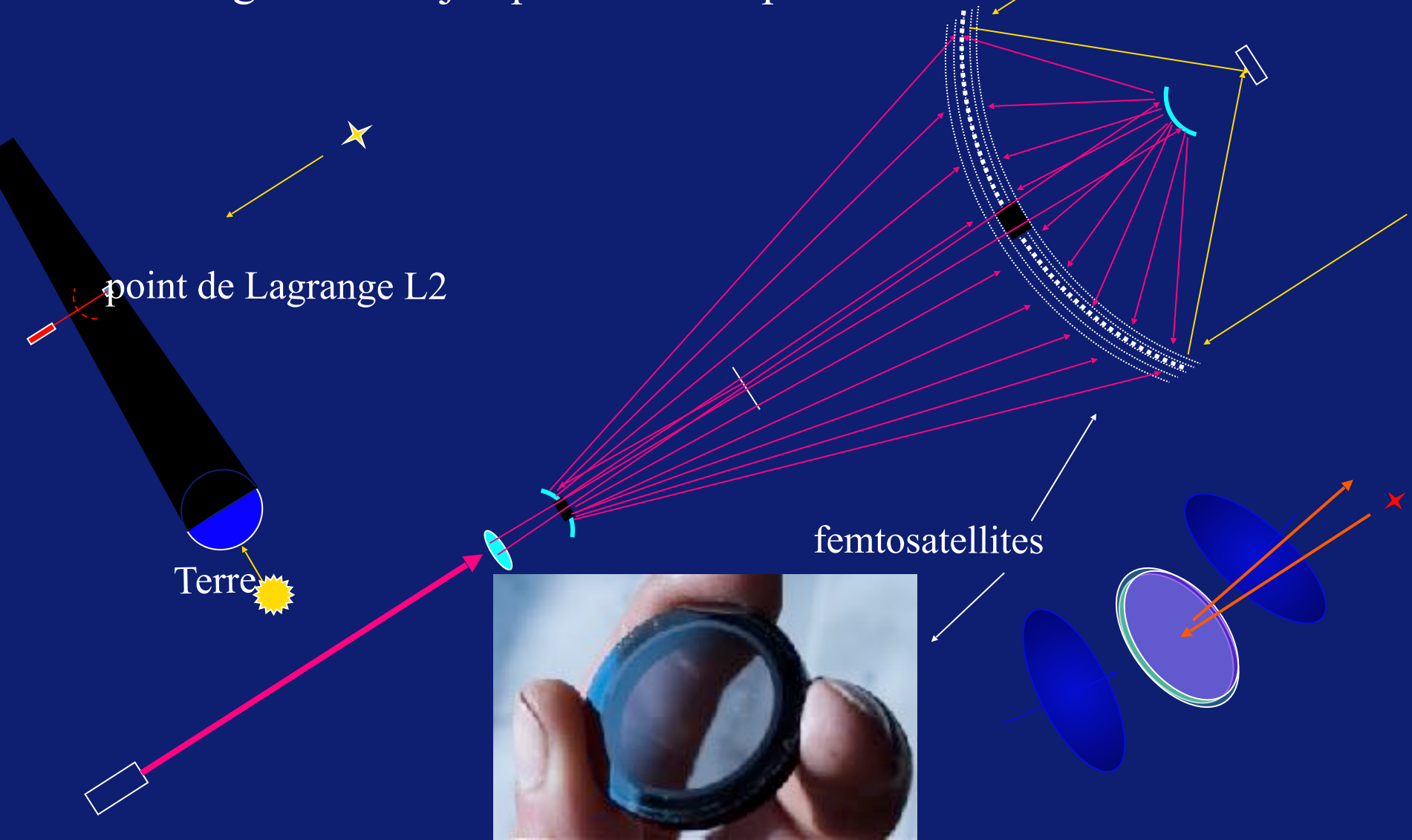
Terre à 10 années-lumière: simulation
d'image directe avec une flotille de 100km
150 miroirs de 3m, pose de 30mn

- rechercher des variations
saisonnnières, indice de vie



hypertélescope dans l'espace: flotille de nombreux petits miroirs piégés par laser

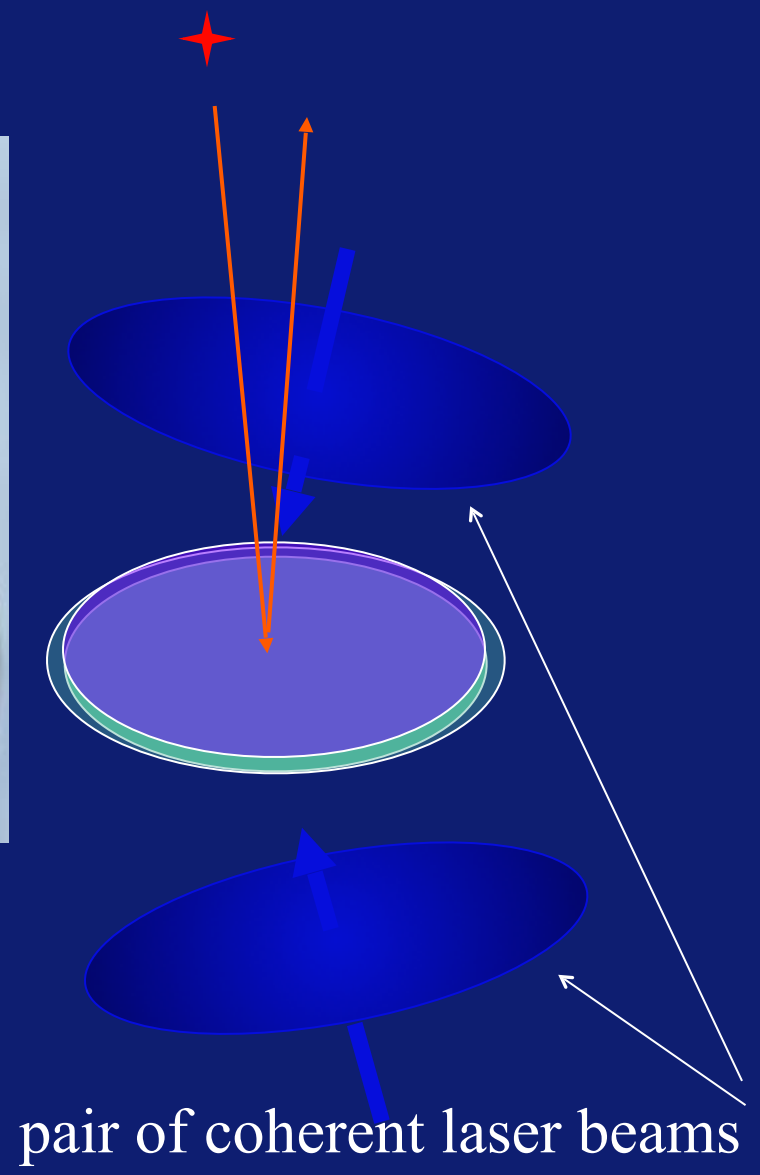
diamètre augmentable jusqu'à 10 km... puis 100 000km ?



In space: "Laser Trapped Hypertelescope Flotilla": laser-trapped mirrors



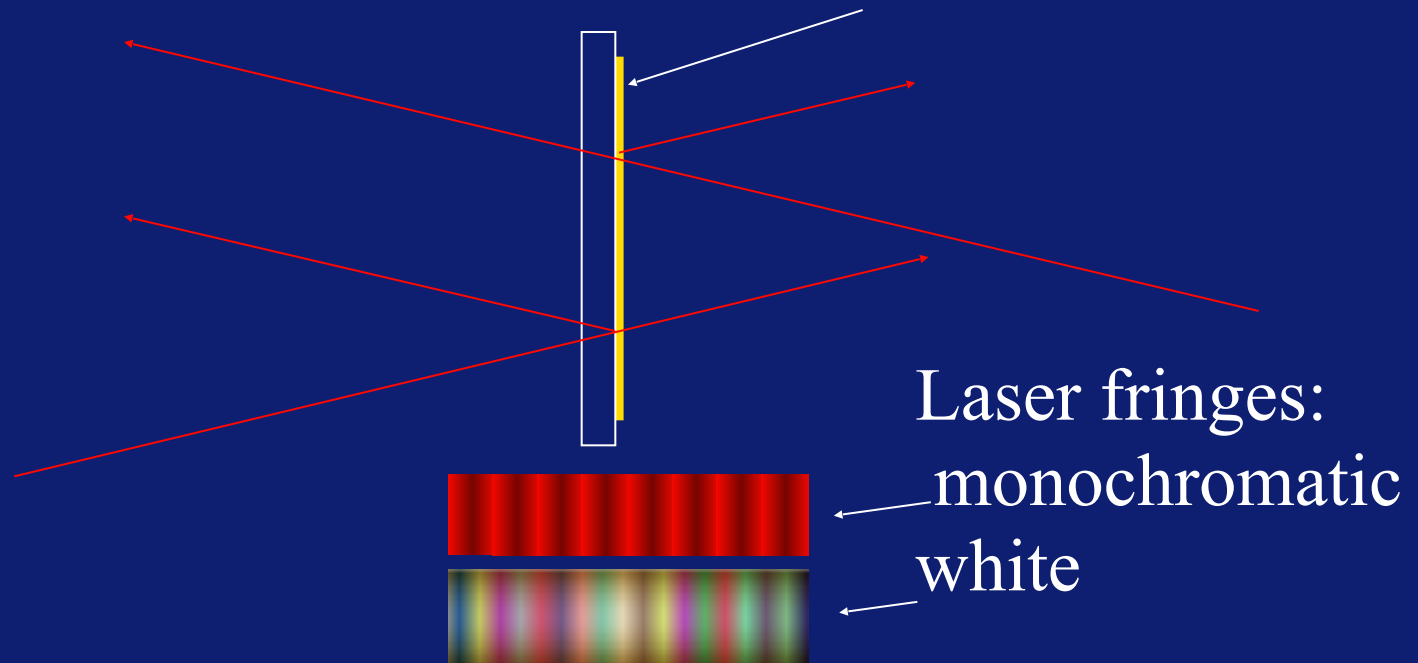
Pellicle beam splitter
commercially available



pair of coherent laser beams

Laser-trapped mirror

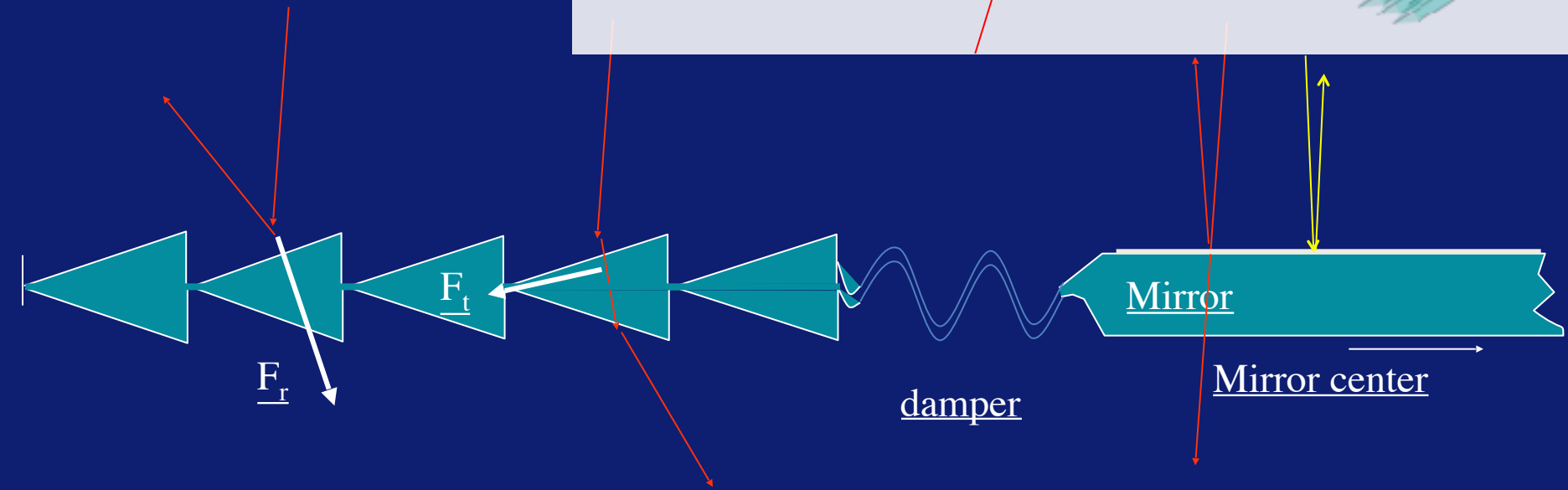
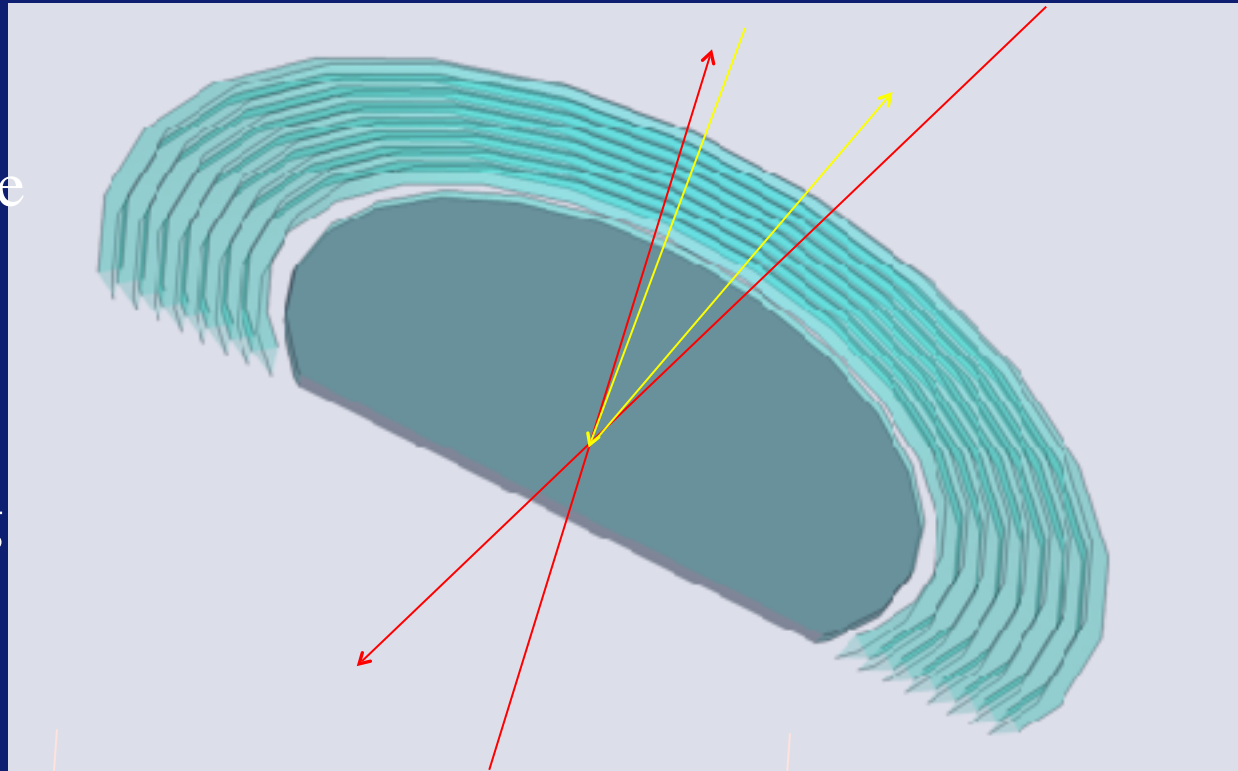
Dichroic coating
Semi-reflective at laser wavelengths
Reflective at star wavelength



- interference of beams modulates the output intensities
- radiation pressure P/c reverses ... at $1/4$ intervals
- cyclic blueward color shift for "pumping" toward central fringe

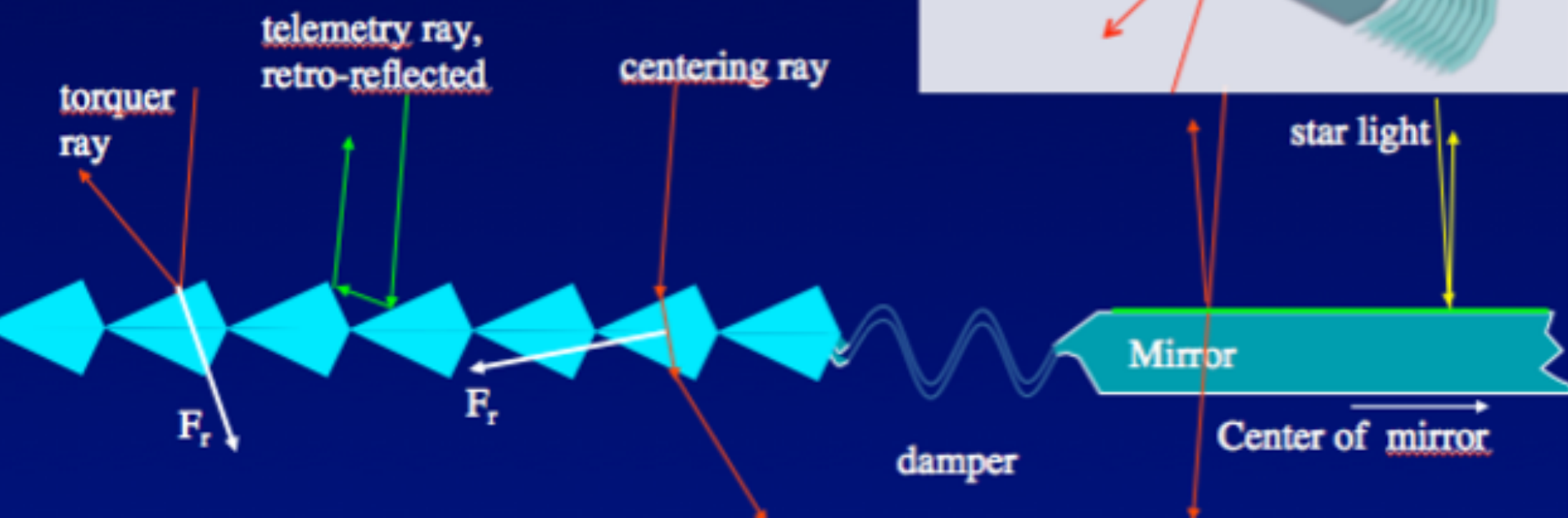
Laser-trapped mirror element

- coarse alignment by laser radiation pressure on peripheral Fresnel lens
- fine alignment and cophasing by standing waves

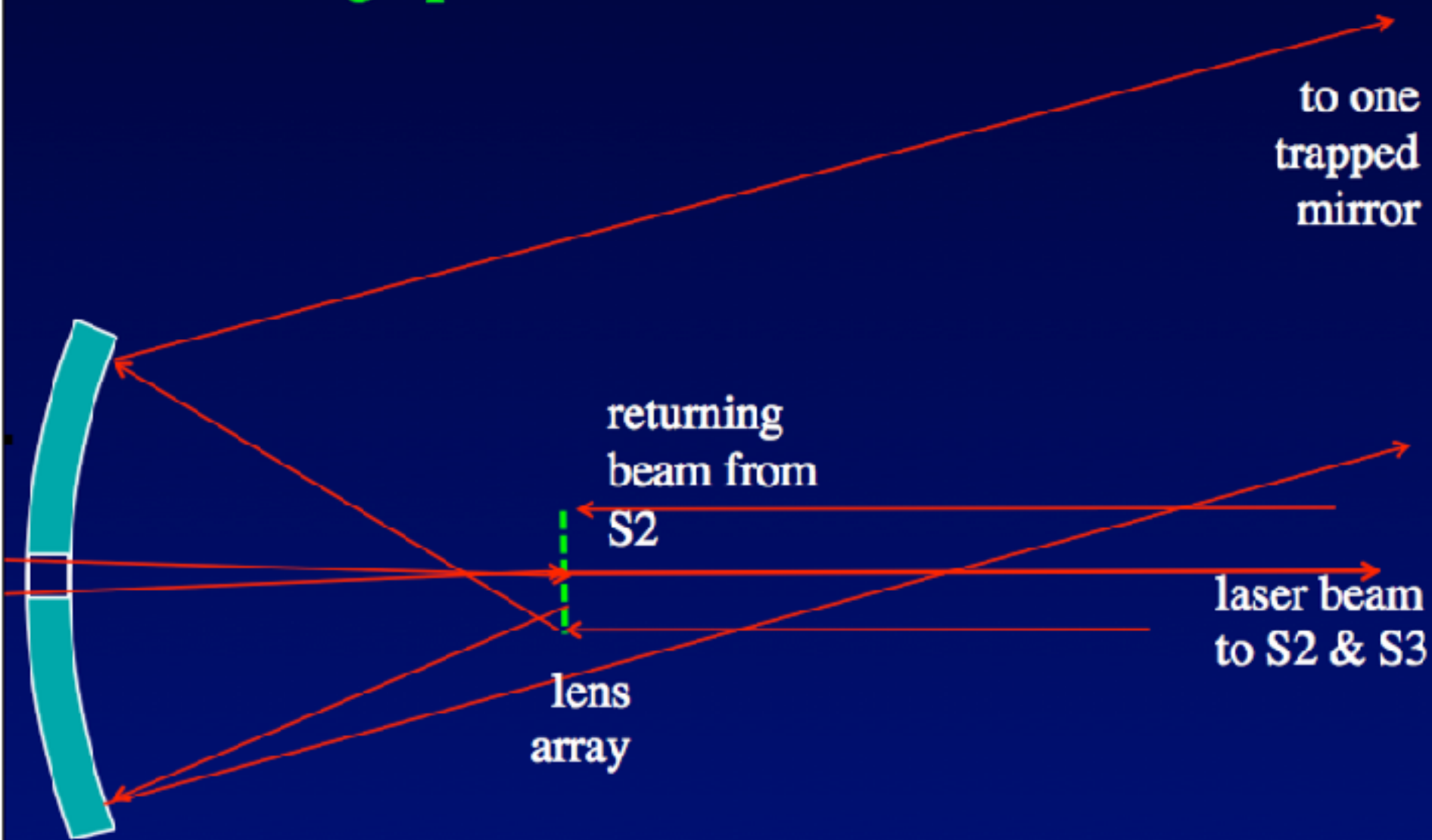


Fresnel-prism ring for: coarse telemetry + transverse trapping + attitude trapping

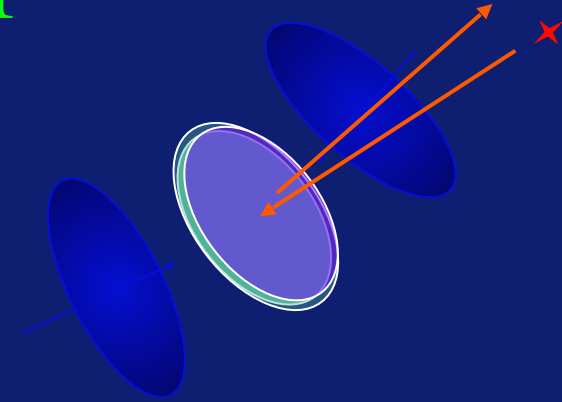
- laser light retro-reflected from grooves serves for coarse telemetry
- deflection of transmitted laser light generates radiation pressure which tends to recenter the mirror
- reflection from faces creates a torque which coarsely maintains the attitude



Beam fanning optics



« Laser Trapped Hypertelescope Flotilla » première génération



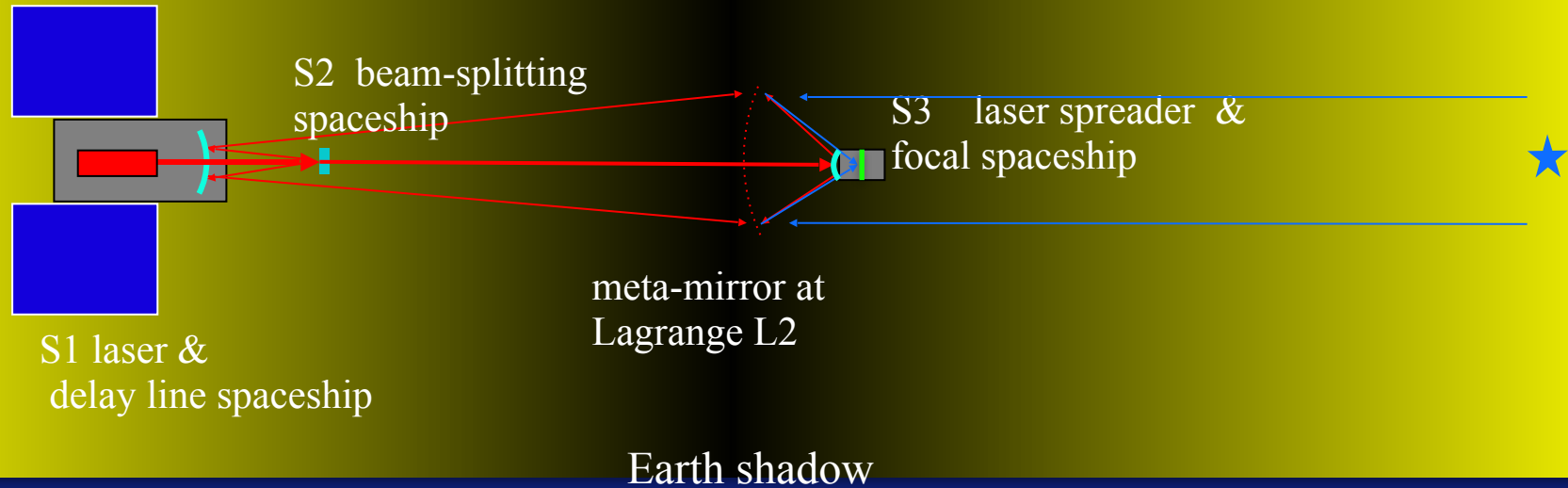
- Diamètre de la flotille : 1-100 km
des miroirs élémentaires: 30mm,
masse: $m = 0.5$ gramme
- Puissance laser **par miroir** : $P = 3\text{mW}$
- poussée: $F = P/c = 10^{-11}\text{ N}$
- accélération max. : $\gamma = F/m = P/(c m) = 0.02 \text{ micron.s}^{-2}$
 $\Delta x = (\frac{1}{2}) \gamma t^2 = 10 \text{ mm en } 1000\text{s}$ soit **1m en 1 heure , 10km en 100 heures**
- vitesse d'évasion des miroirs (axiale) : 30nm/s
- Surface équivalente au JWST obtenue avec 40,000 miroirs
... nécessitant un laser de 120 Watt
- Empaquetage des miroirs pour livraison en orbite: volume $< 0.2 \text{ m}^3$
- Déploiement: par éloignement axial des éléments
- Maintenance:
 - récupération de miroirs évadés par une paire de faisceaux laser orientables
 - ou miroirs supplémentaires en réserve

Operation at L2 in Earth penumbra



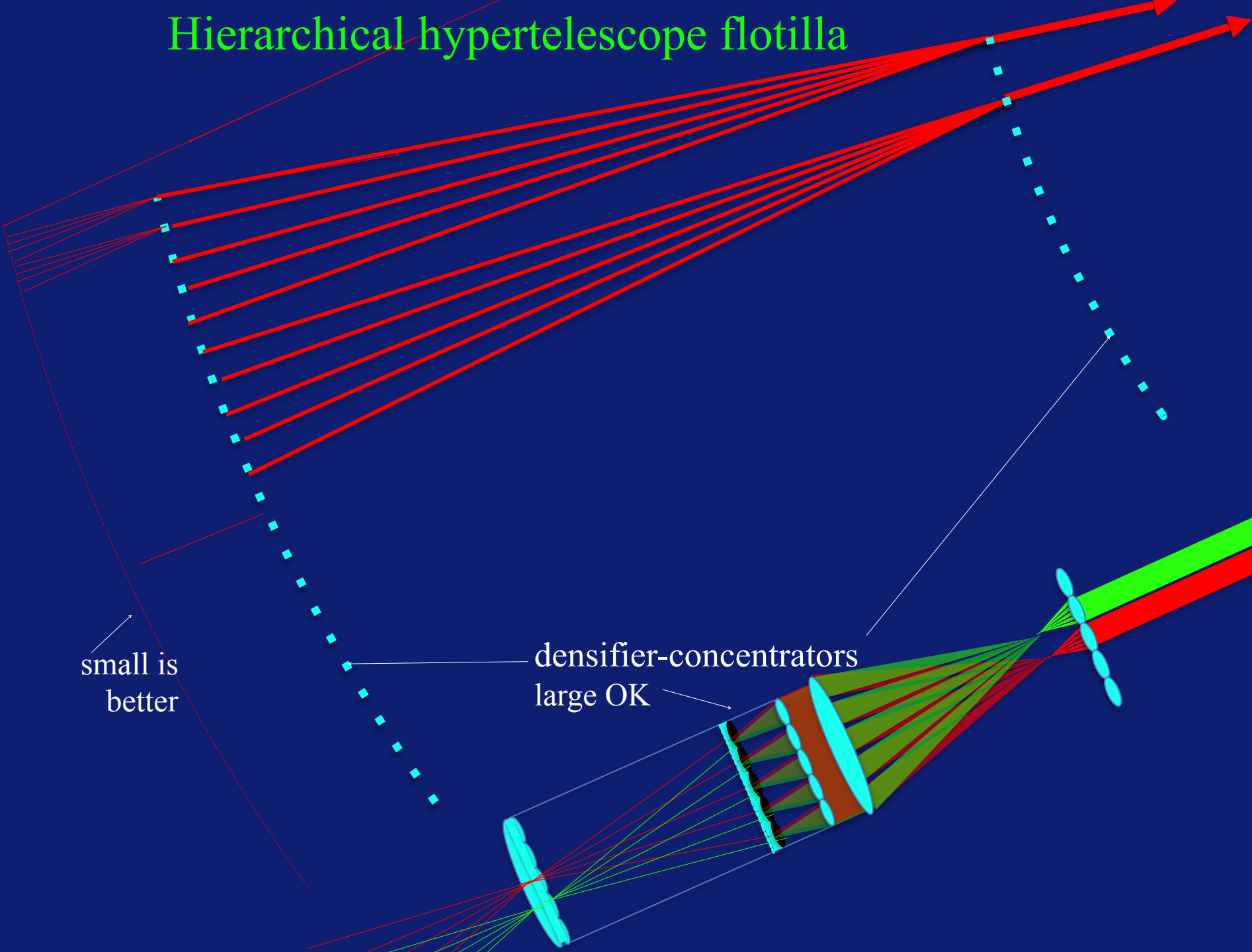
- Laser located outside of shadow
- Sky coverage in 6 months with continuous scan, transverse to Sun direction

Positionnement au point de Lagrange L2



- mise en orbite de S1, S2 & S3 attachés
- déploiement: écartement coordonné de S1, S2 & S3....
- élargit l'intersection des faisceaux...
- en entraînant transversalement les miroirs piégés

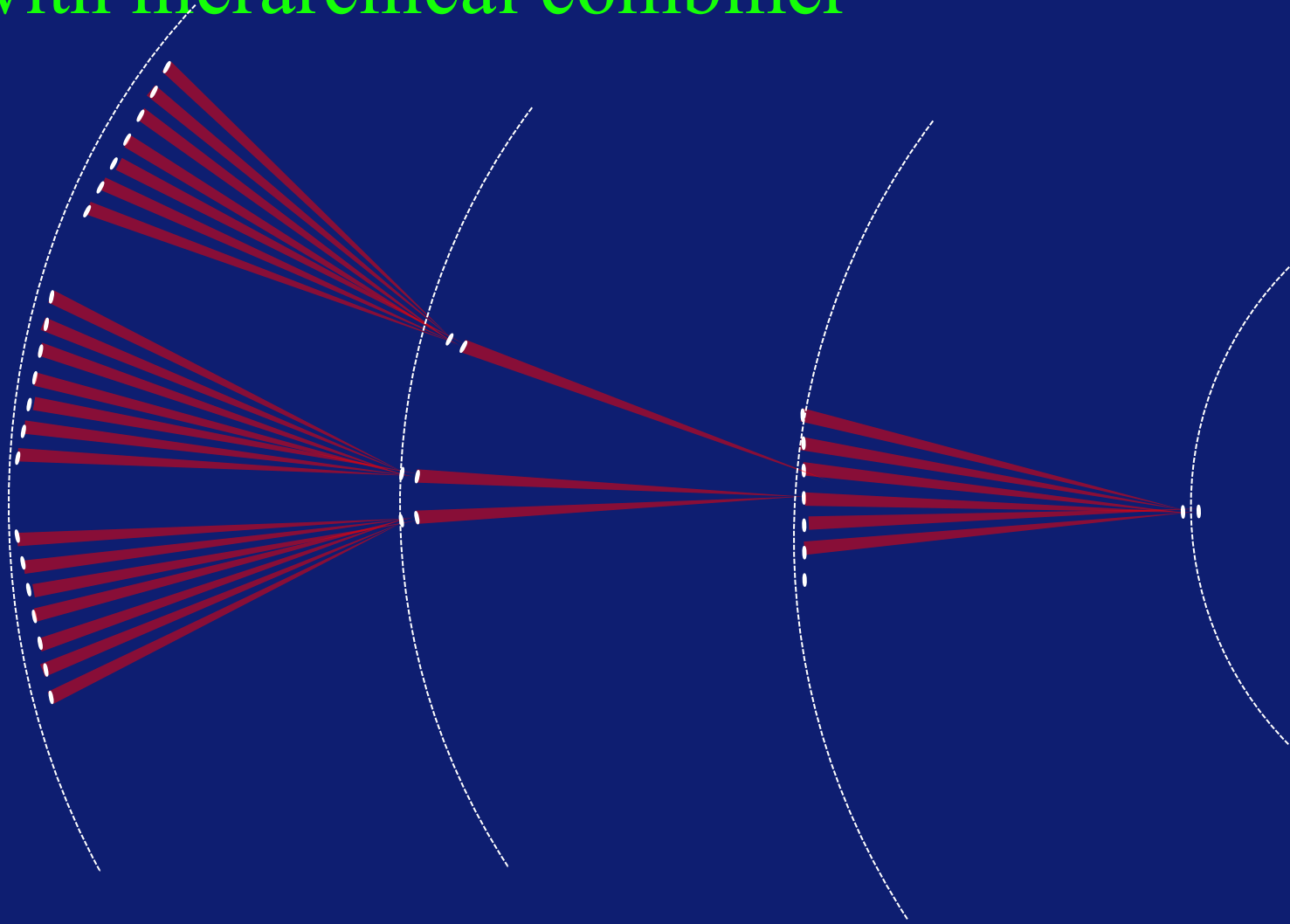
Hierarchical hypertelescope flotilla



small is better

densifier-concentrators
large OK

100,000km flotilla as « Neutron Star Imager » with hierarchical combiner



- less mirror area needed

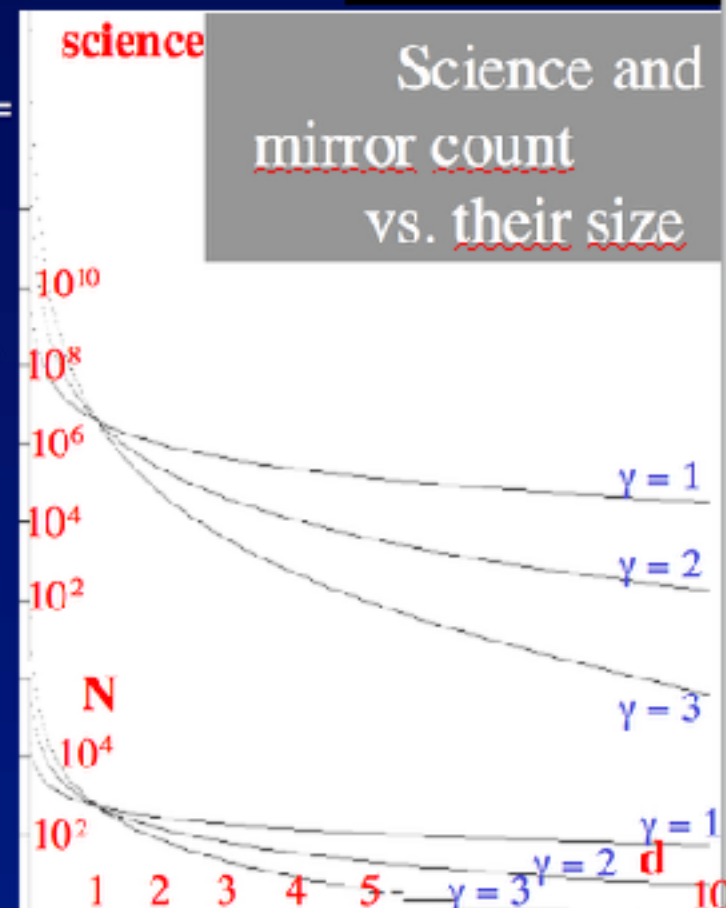
Interferometer and hypertelescope:

The science gain with smaller sub-apertures at given collecting area

(Labeyrie et al., Exp. Astronomy, 2009, Labeyrie et al., 2010)



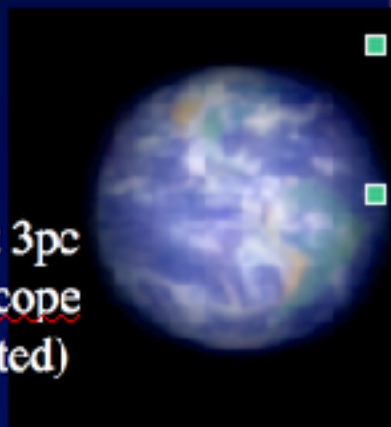
- crowded fields : the tolerable number of stars grows as N^2
- The size of the "Direct Imaging Field » (or « Clean Field ») is λ/S (s is the sub-aperture spacing)
- Science vs. mirror size d , at given cost $C_{pa} = N d^\gamma$, where $\gamma = 2$ to 3
- $Sc = C_{pa}^2 d^{-2\gamma} \{ (7/4) \log_2 C_{pa} + (1-7\gamma/4) \log_2 d \}$
- Huge gain in science with smaller d :
1000x more science with d=10cm than 1m
- ... but minimal mirror size : a few centimeters for tolerable diffractive spreading in the Fizeau focal plane
- Example of " Laser Trapped Hypertelescope Flotilla" : 40,000 mirrors of 3cm matching the collecting area of JWST



Science with a Moon-based **hypertelescope**

“Lunar Optical Hypertelescope Array” (LOHA)

Simulated direct image of an Earth at 3pc
observed with a 150km **hypertelescope**
(uniform level subtracted)

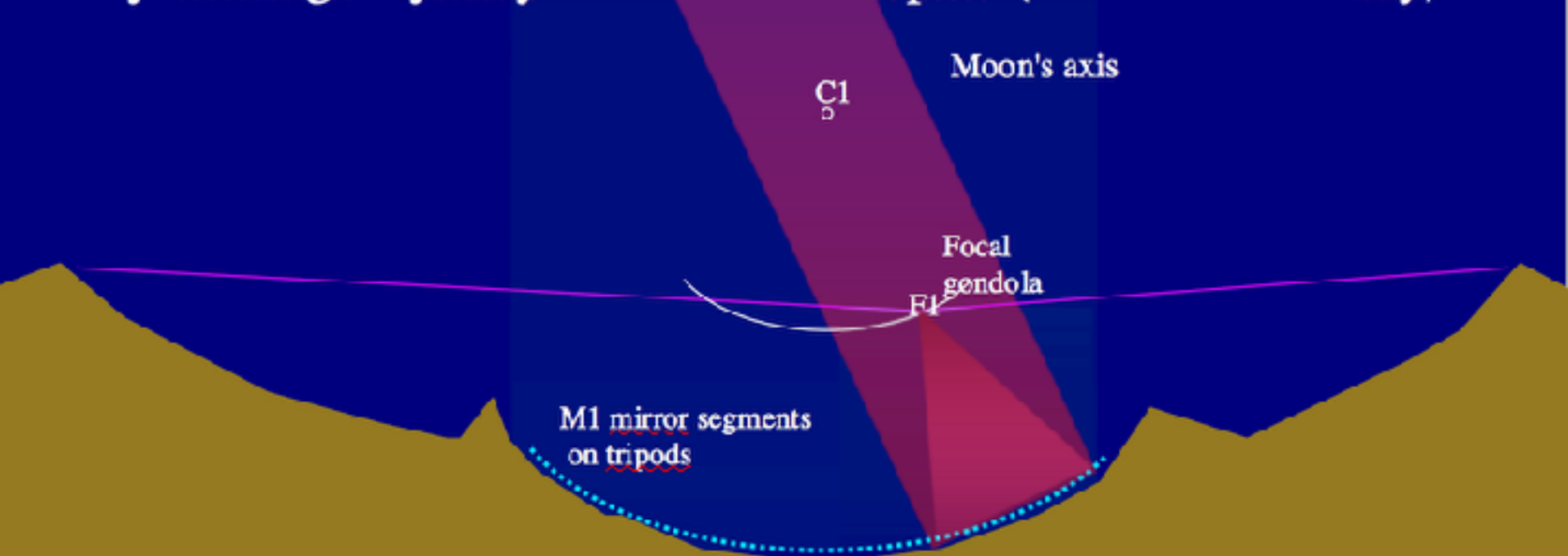


- Science with **direct imaging** and a **high magnitude limit** , **UV to IR spectro-imaging** :
 - **stellar physics**, **exoplanets resolved**, **AGNs**, **faint remote galaxies**
- **Arecibo-like optics** in a lunar crater, for 5km **meta-aperture** :
 - **fixed dilute primary mirror** , **having many small segments**
 - **cable-suspended focal camera**, **movable for near-meridian observing**
- **Lagrangian focal camera** for a **much larger meta-aperture** (200km?)
... but **modest sky coverage**

Lunar concept A (being tested on Earth):

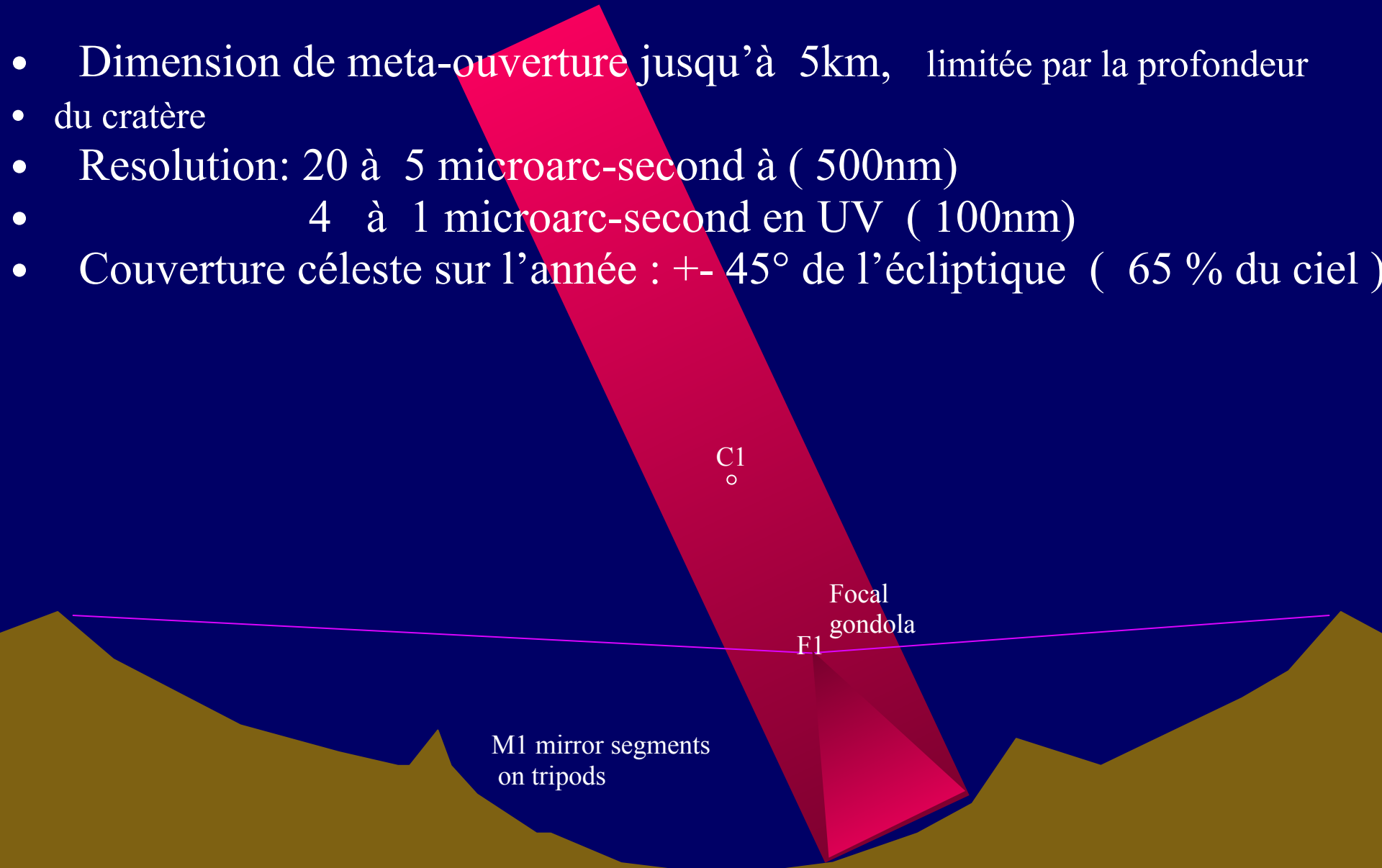
Optical Hypertelescope Array (LOHA) in deep crater

- Arecibo-like design, as tested for terrestrial hypertelescopes
- Fixed segmented primary mirror, 5-10km size
- Meta-aperture size: 5 km, limited by crater depth
- Focal camera suspended from cable, actively pendulated
- Resolution: 20 to 5 microarc-seconds in visible (500nm)
4 to 1 microarc-seconds in UV (100nm)
- Sky coverage : yearly: $\pm 45^\circ$ from ecliptic (about 65 % of sky)



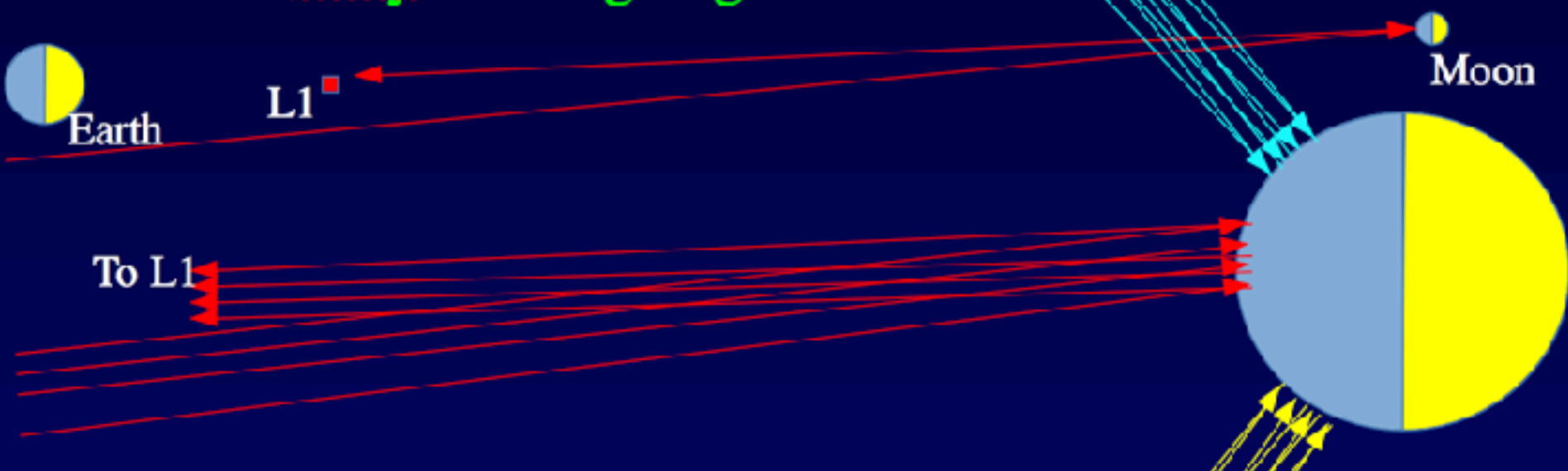
Version lunaire de “Hypertelescope Ubaye”

- Dimension de meta-ouverture jusqu’à 5km, limitée par la profondeur du cratère
- Resolution: 20 à 5 microarc-second à (500nm)
- 4 à 1 microarc-second en UV (100nm)
- Couverture céleste sur l’année : $\pm 45^\circ$ de l’écliptique (65 % du ciel)



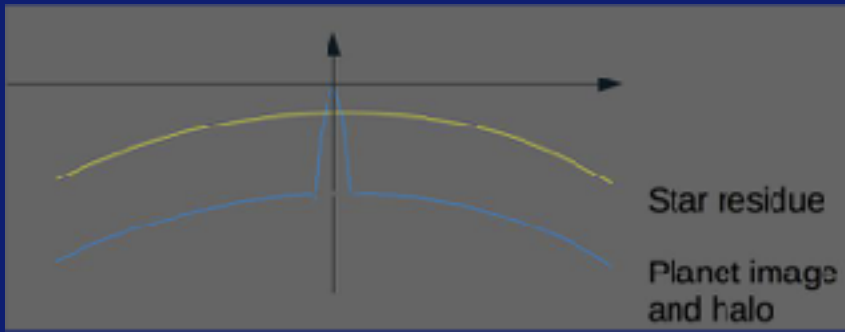
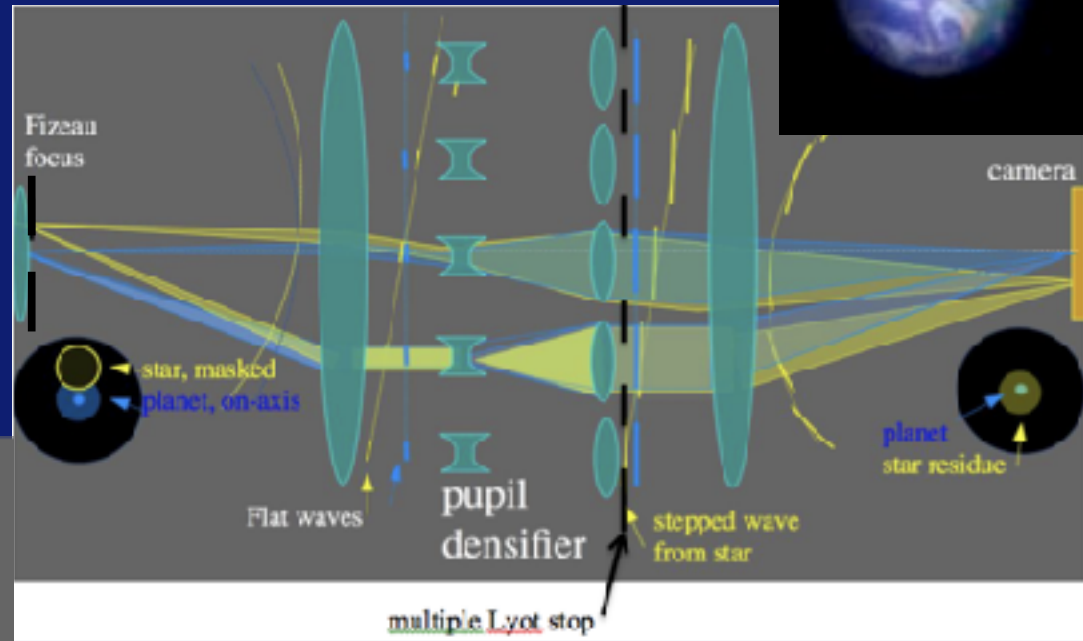
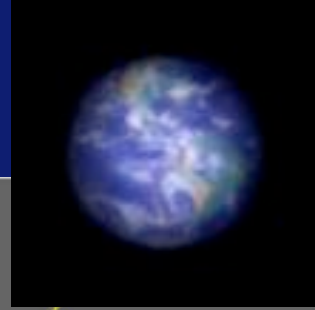
Lunar concept B:

300km array and Lagrangian focal camera



- Choice of lunar longitudes suitable for focus at L1, L4 or L5
- A shallow (28m) 300km crater can match the required mirror curvature, using small tripods as mirror supports
- Minimal mirror sizes for efficient light throughput, assuming uniformly sized primary segments and focal field collector:
 - 10m for each at 500nm
 - 1.7m for each at 12nm EUV

Hypertélescope coronographique: exoplanètes et recherche de vie



Condition d'imagerie multipixel d'une exoplanète:

$$N > F_{\text{star/planet}} R_{\text{planet}} C$$

nombre d'ouvertures resels gain coronographique

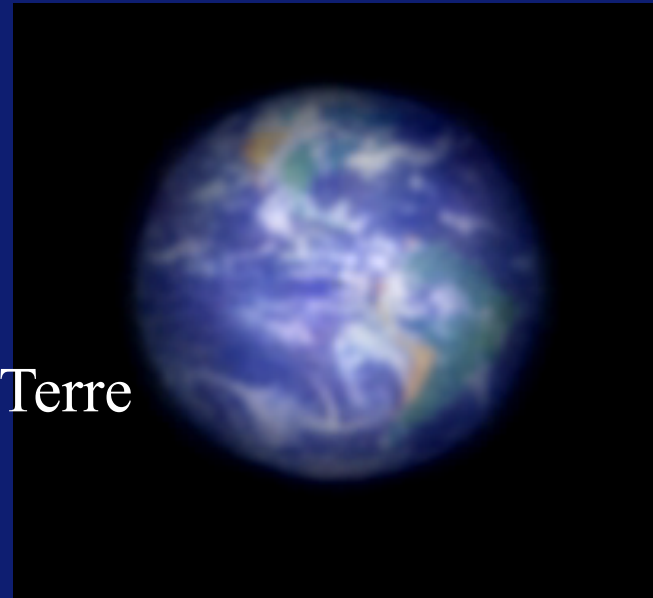
Exemple: 1000 miroirs pour 30x30 resels sur exo-Terre 10^{-10} à 3pc, si gain coro = 10^{10}

Hypertélescopes dans l'espace:

Recherche de vie sur les exoplanètes

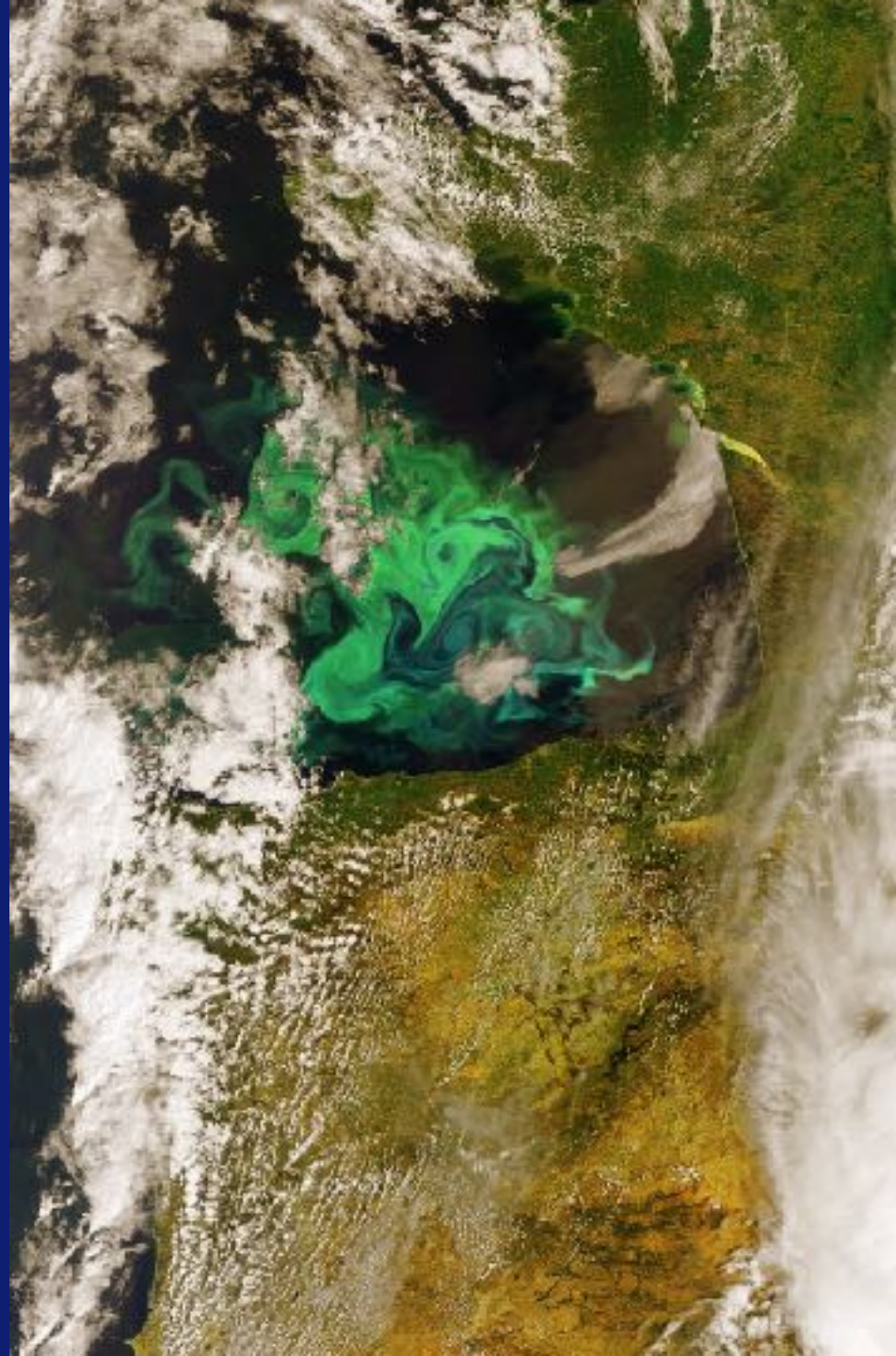
- critères plus robustes que la composition de l'atmosphère:
- rechercher des changements de couleur saisonniers

image simulée d'une exo-Terre
à 10 années-lumière
hypertélescope de 100km



Signatures of exo-life

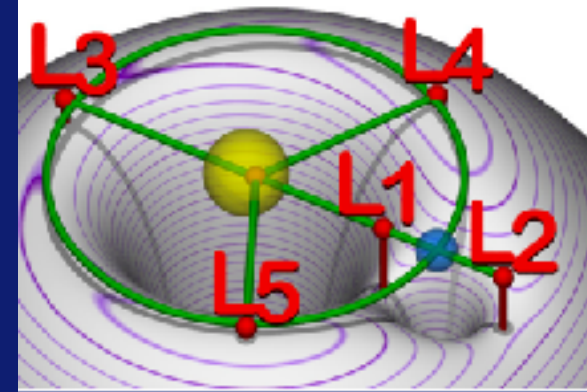
- Examples:
 - marine algal bloom
 - indian summer
- fast varying



Autres possibilités de nacelle focale pour La Lune:

1- orbite “ halo Lagrange L1”

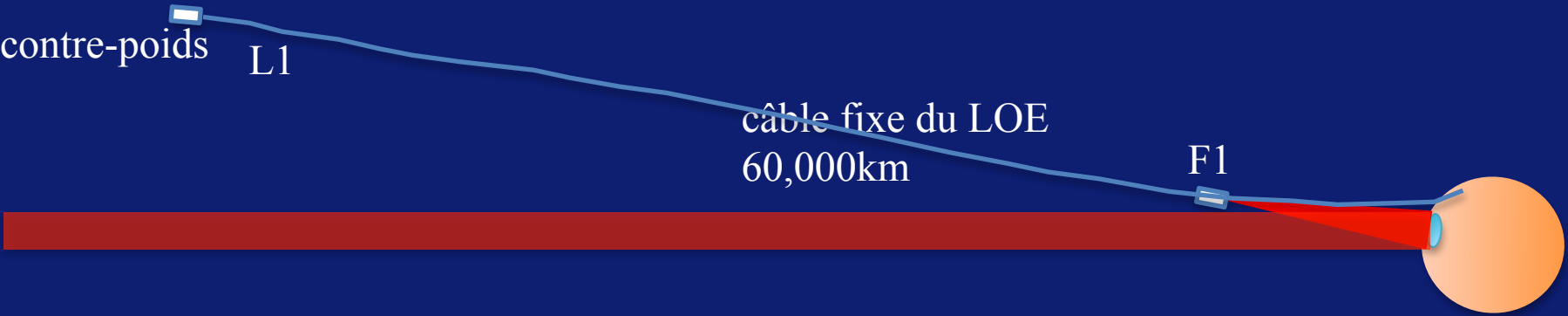
2- suspendue au câble d’un “ascenseur lunaire “



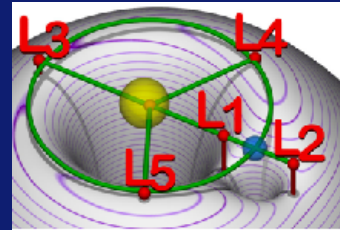
- Miroirs dans un grand cratère (200km ?)...
- ... peu profond pour longue distance focale (60 000km à L1)
- Nacelle peu mobile: couverture céleste restreinte

Hypertelescope lunaire: option C

Caméra sur « Lunar Orbital Elevator »

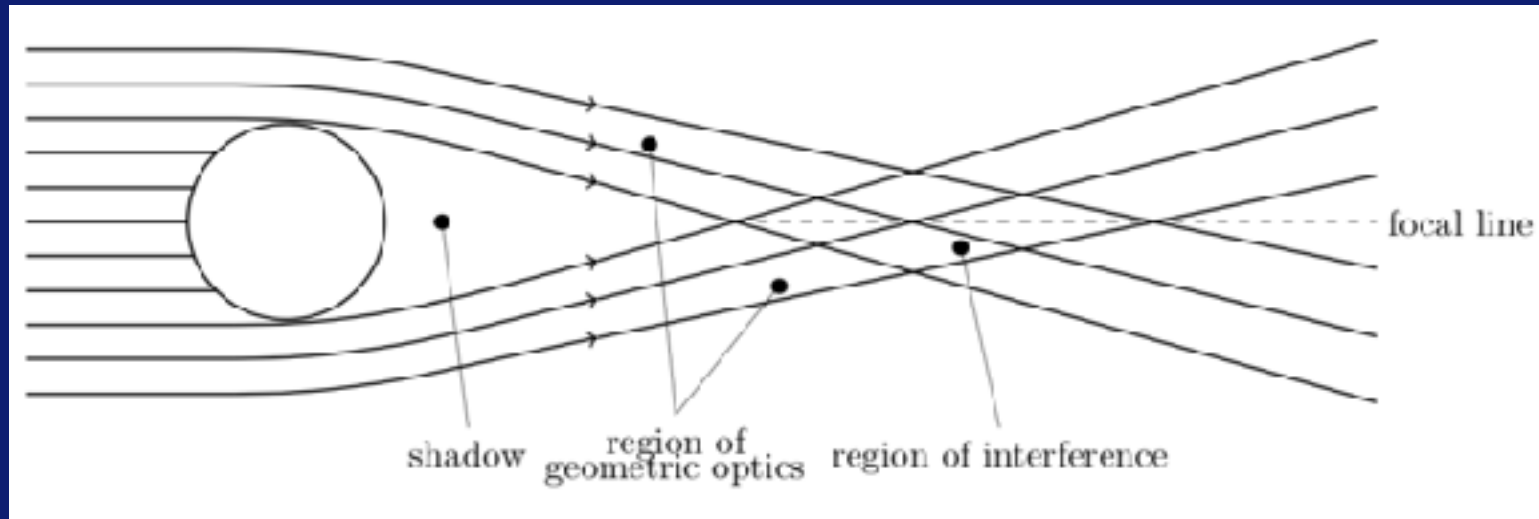


- couverture céleste: grand cercle en 1 mois
- augmentable avec câble « fronde » ?
- ... à étudier



points de Lagrange
Terre-Lune

Proposition de Turyshev & Toth (2017): coronographie au foyer gravitationnel du Soleil



- télescope à 650 U.A. ($5 \cdot 10^{15}$ km) du Soleil
- Soleil masqué par coronographe, sauf l'anneau d'Einstein
- Résolution à $\lambda = 1\mu$: 10^{-10} seconde d'arc ou 10m à 1pc
- Intensification de l'image: 10^{11}

Lentille gravitationnelle solaire: Soucis de contraste dans l'image

- contamination par la lumière solaire: télescope avec coronographe ? devrait suffire
- contamination par l'étoile mère de la planète: négligeable ?
- contamination par l'enveloppe convoluée de la planète: importante, **À PRÉCISER**

Proposition de Turyshev & Toth (2017): coronographie au foyer gravitationnel du Soleil

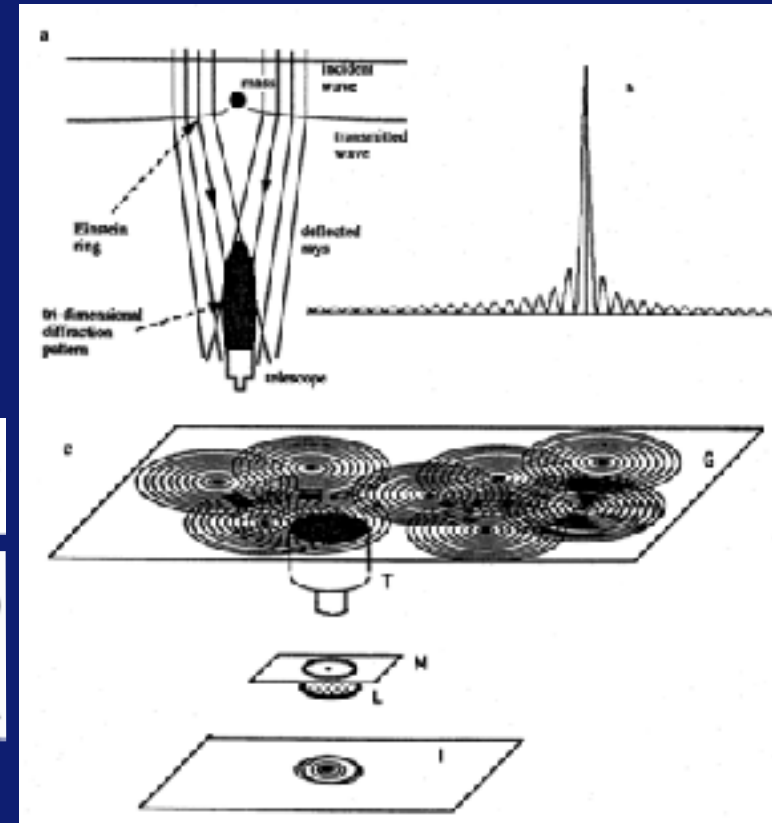
- Précise le calcul de Labeyrie (1994)

Gravitational lenses as giant diffractive telescopes

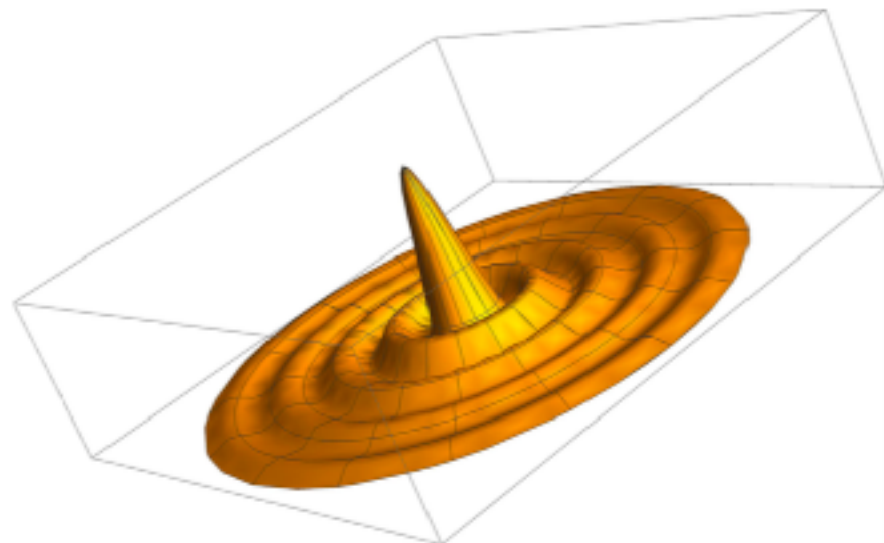
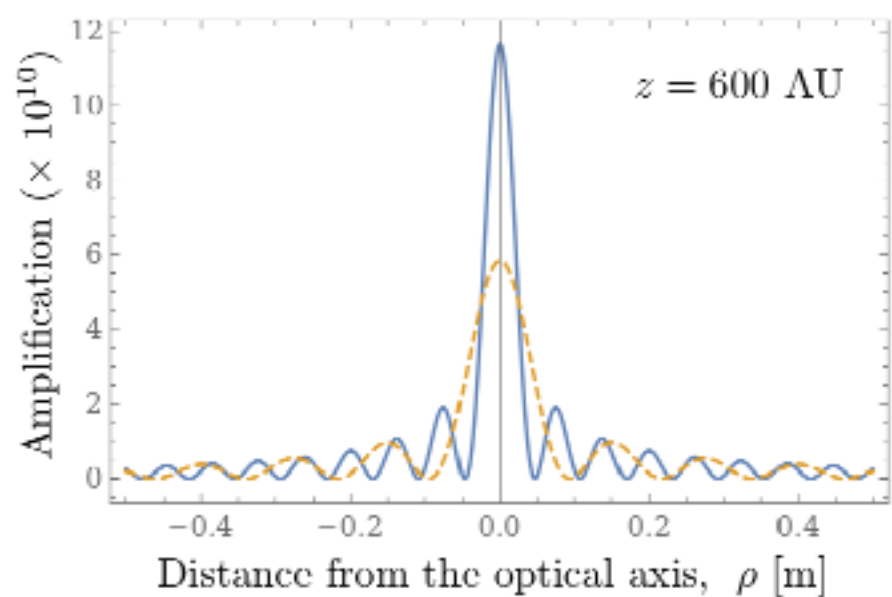
A. Labeyrie *Astron. Astrophys.* 284, 689–692 (1994)

$$A = 4\pi\epsilon R_E \int_0^\infty e^{4\frac{\pi}{\lambda}\left(\frac{R}{\epsilon}\right)^2} d\left(\frac{R}{\epsilon}\right) \quad (8)$$

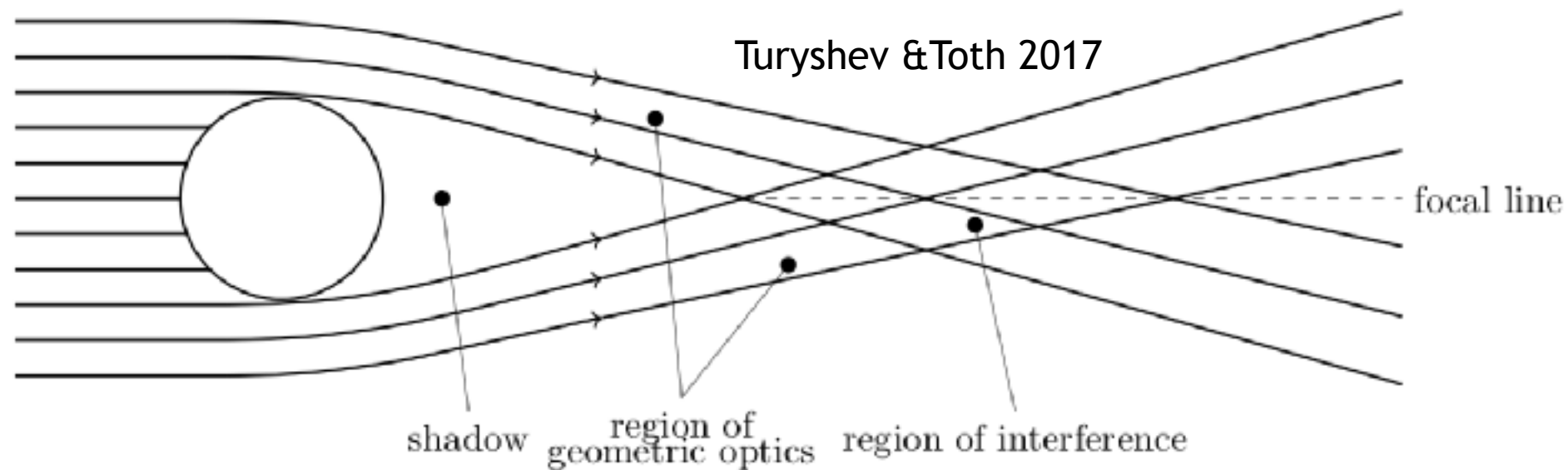
if $\epsilon = \frac{1}{2}\sqrt{\lambda D_{OL}}$ is half the annulus width such that $\Delta' < \frac{\lambda}{4}$.



- Étend au cas du soleil imageant une exoplanète
- Riche en théorie optique & équations <https://youtu.be/Hjaj-Ig9jBs>
- Télescope à 650 U.A. ($7 \cdot 10^{15}$ km) du Soleil, aligné avec la planète
- Soleil masqué par coronographe, sauf l'anneau d'Einstein
- Résolution 10m à 1pc



Turyshev & Toth 2017



Proposition de Turyshev & Toth (2017): fonction d'étalement “ Point Spread Function (PSF)”

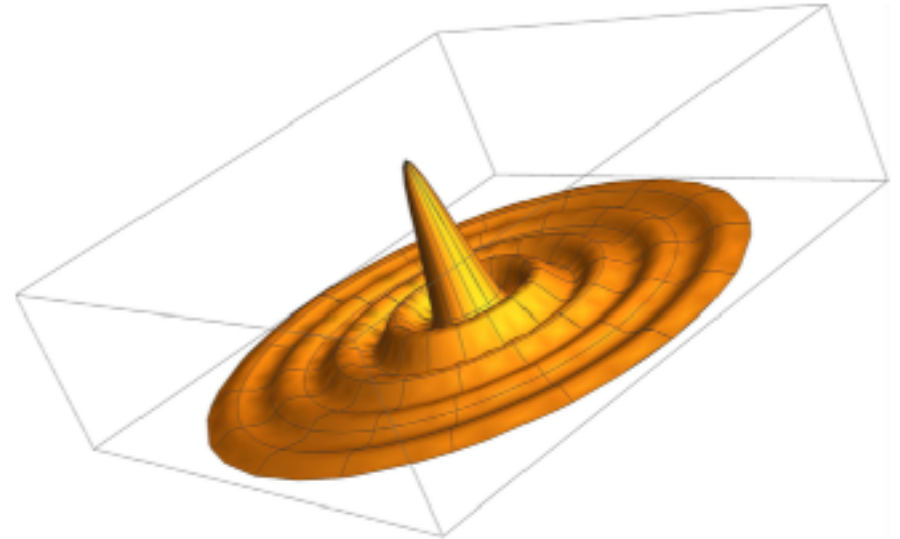
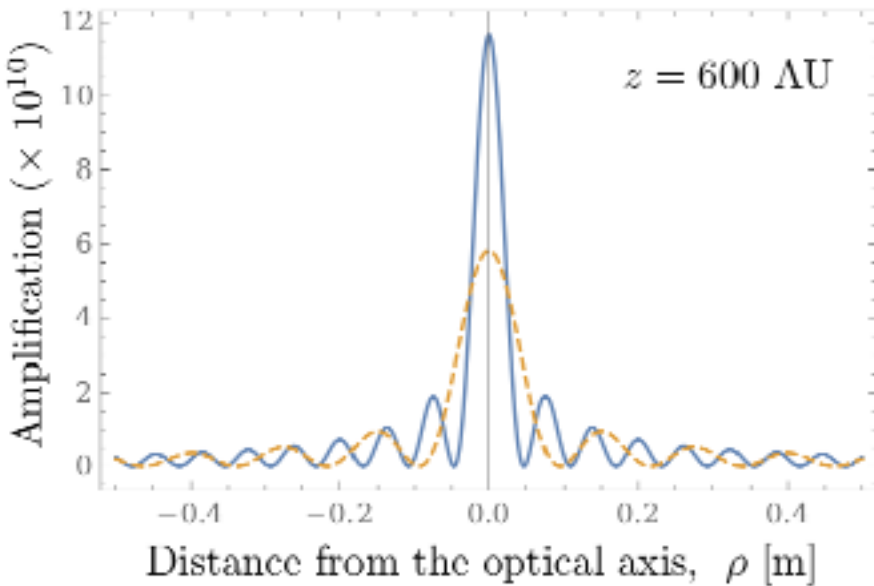


Image: Turyshev et Toth (2017)

- La PSF contient 350 000 anneaux, approx. en $1/R$
- dégradant fortement le contraste de l'image exoplanétaire
Par le Soleil : évitable avec un bon coronographe ?
- Par l'étoile mère: semble négligeable
- Par les pieds de la fonction d'étalement: à préciser d'après Turyshev et Toth

Calcul (probaAiryPic&SunCoro4.bas)



longueur d'onde $5.0E-07$ m delta lambda $4.000000E-07$ m efficacit# 0.3 0
distance source-lentille =? (pc). 1
distance observateur-lentille=? 700 UA
masse=? (masses solaires) 1
densite? 1-solaire;2-terrestre;3-etoile neutrons;4-naine blanche 1
m=1 Mo; densite=1126 kg/m³ diametre lensing body 750024553 m
dist. critique (M,mu) = $3.0E-03$ pc diametre etoile moy. projete 1666134 m
ol= $3.3E-03$ pc; ls= $1.0E-06$ Mpc grandissement $3.3E-03$
diametre telescope (m) 1
rayon anneau d'Einstein: angulaire= 1549.9 mas; reel **784 052 km**
epaisseur: angulaire $6.9E-11$ rad, **reelle 7,2 km** egale au diam. envelope
sol ! **Airy sol= resel 0.020m REPETE diam envelope PSF sol 7,2 km**
nbre d'anneaux dans PSF sol 354216 Einstein « collier »: N 682177.3
resol ang. $4.03E-11$ arcsec
resels emissifs planete 3.8E+12 **CONTRASTE DE L'IMAGE** planete $1.7E-07$,
photons/s par resel de: planete 14574546 , envelope $8.2E+13$, SNR en
1s 1.6 in 1 heure 96 **A PRÉCISER**
grandissement 3.3E-03 **diamètre de l'image planete 40km**
resels dans l'image de : étoile $6.6E+15$ planete $3.8E+12$
resels dans l'ouverture du telescope 2405.9 balayage planete: pas 15 98
977 km contraste planete / (envelope etoile) (incorrect, IGNORE
l'attenuation radiale des anneaux de l'ENVELOPPE) 4228
masse de la fusée 1000 kg poussée pour équilibre statique $1.2E-05$ N

Conclusions

- Poursuivre la comparaison des approches différentes:
 - en labo et station orbitale pour flotille piégée par laser
 - étude des versions lunaires
 - foyer gravitationnel du Soleil
- **science:** objets compacts et exoplanètes, recherche de vie, SETI ...