

Collège de France

Chaire d'Astrophysique Observationnelle

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



- Six cours à Paris les mercredis du 6 Avril au 1er Juin
- Détails sur [www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html](http://www.college-de-france.fr/chaieres/chaire11/lise.html)
- les fichiers .pdf des projections seront affichés

# Programme

voir : [www.college-de-france.fr/](http://www.college-de-france.fr/)

- 18 Mai: Précurseur spatial pour hypertélescope
  - Séminaire: B. Lopez Interférométrie dans l'Antarctique ( à confirmer)
- 25 Mai:
  - Cours:
  - Séminaire:
- 1er Juin:
  - Cours::
  - Séminaire:

Aujourd'hui :

Coronographie extrême pour la détection des  
exo-Terres: les dernières idées

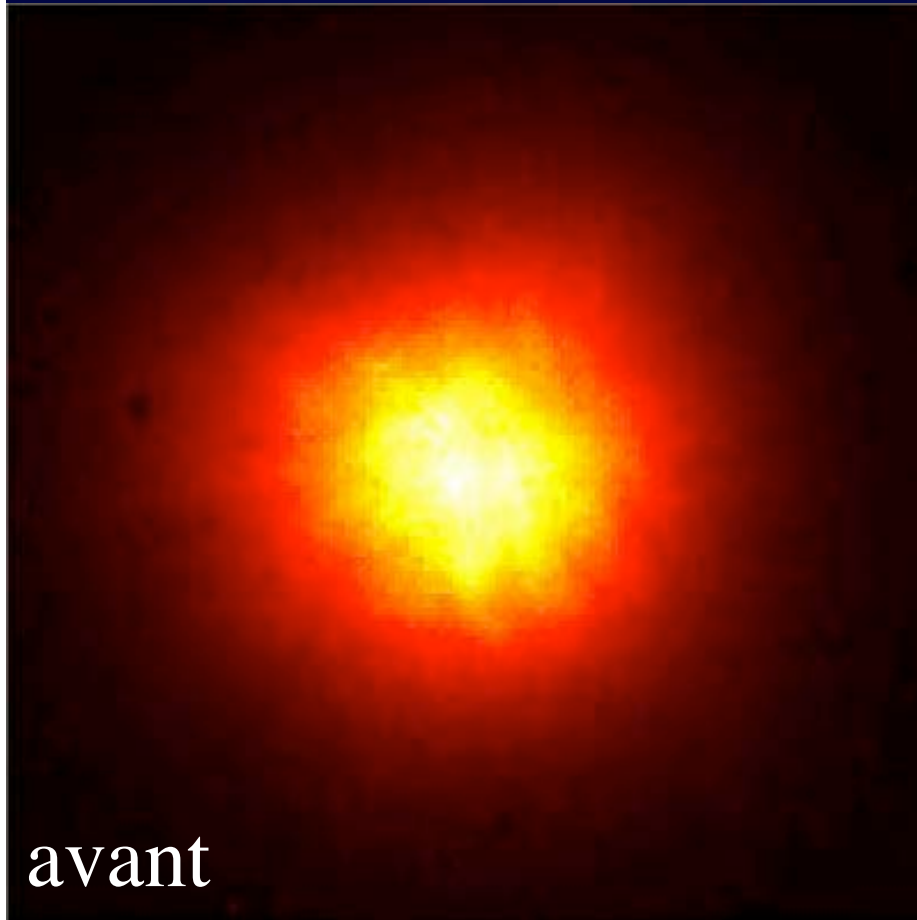
Séminaires:

Jean-Pierre Huignard, Thalès TRT

Bruno Berge, Varioptic

Alan Greenaway

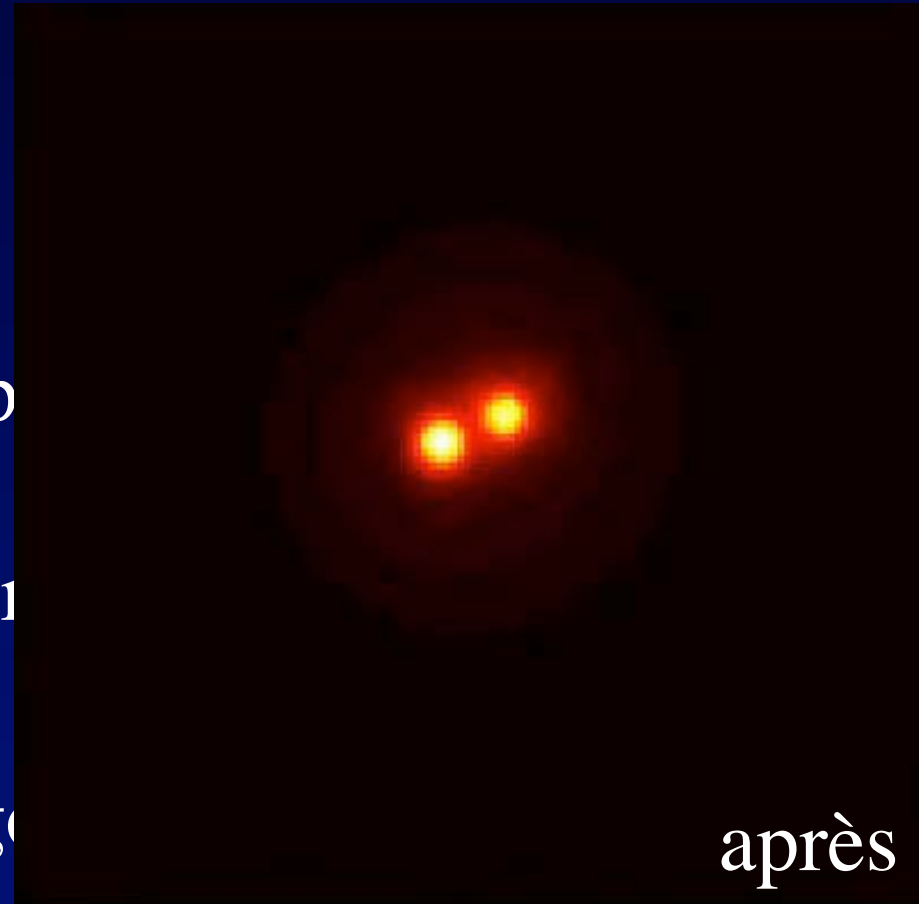
# Binaire et optique adaptative



The Star HIC 59206 (uncorrected image)  
(VLT KUEYEN + MACAO-VLTI)

ESO PR Photo 12b/03 (13 May 2003)

© European Southern Observatory



The Star HIC 59206 (AO corrected image)  
(VLT KUEYEN + MACAO-VLTI)

ESO PR Photo 12c/03 (13 May 2003)

© European Southern Observatory



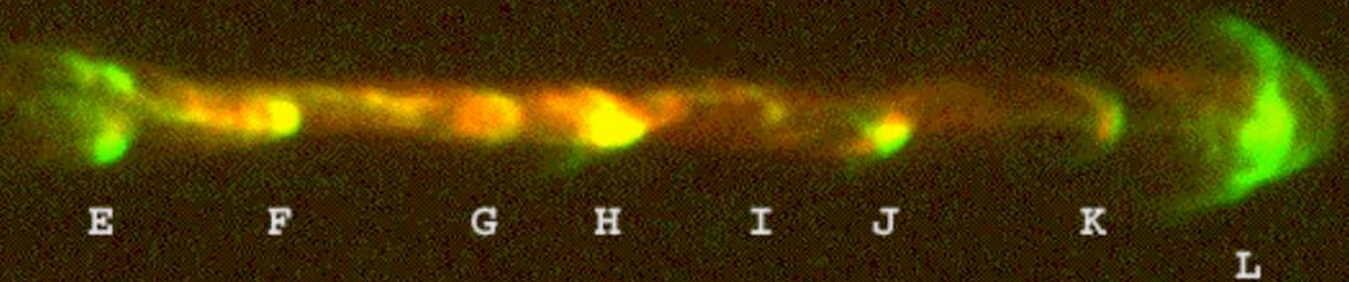
# Jet d'étoile Herbig Haro

HH 111

1994.9 UT

Green:  $H\alpha$

Red: [S II]



1000 AU

# Compagnon: étoile ou planète?

Evidence for a co-moving sub-stellar companion of GQ Lup \*

VLT-NaCo K-band

GQ Lup A

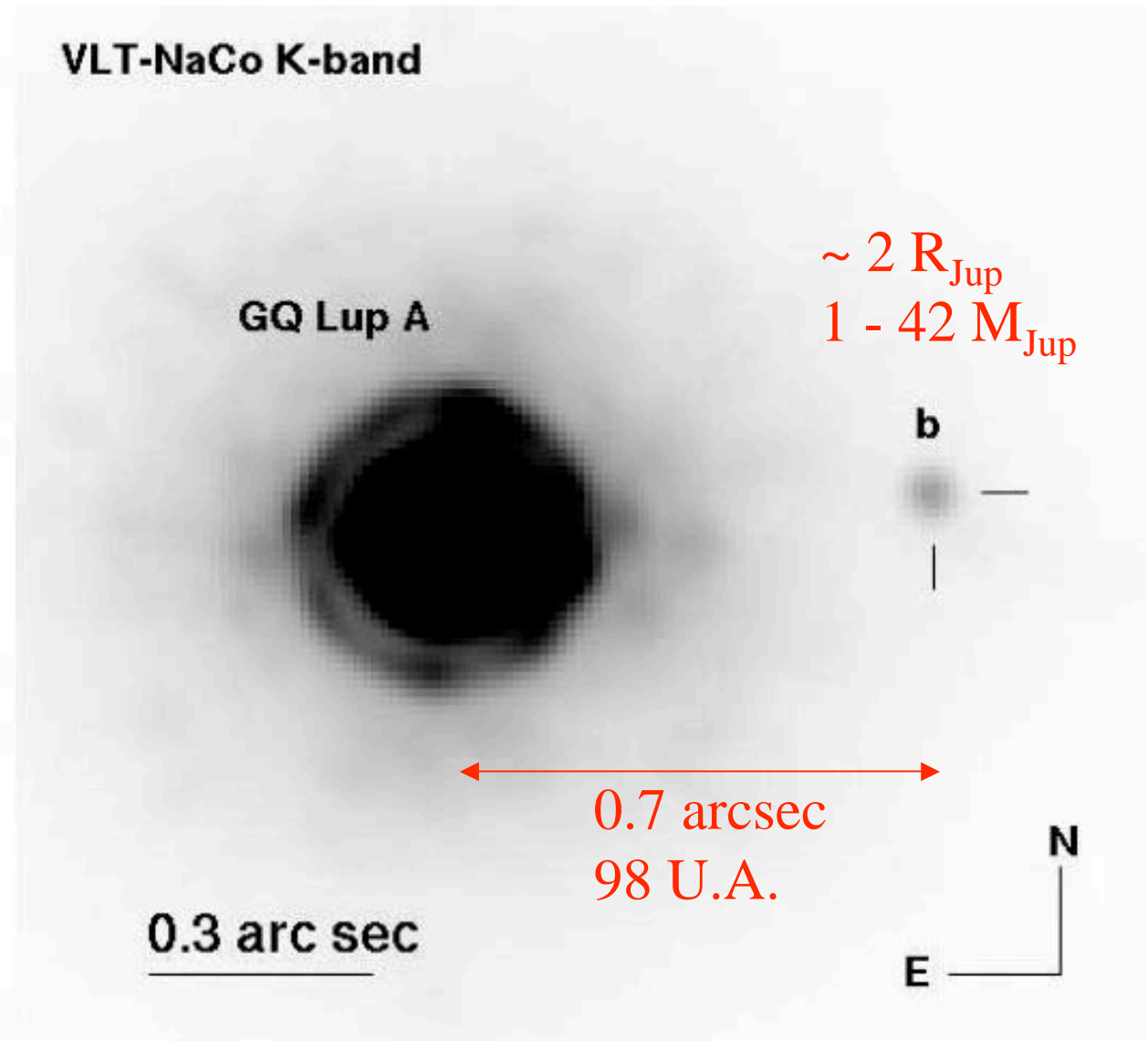
$\sim 2 R_{\text{Jup}}$   
 $1 - 42 M_{\text{Jup}}$

**b**

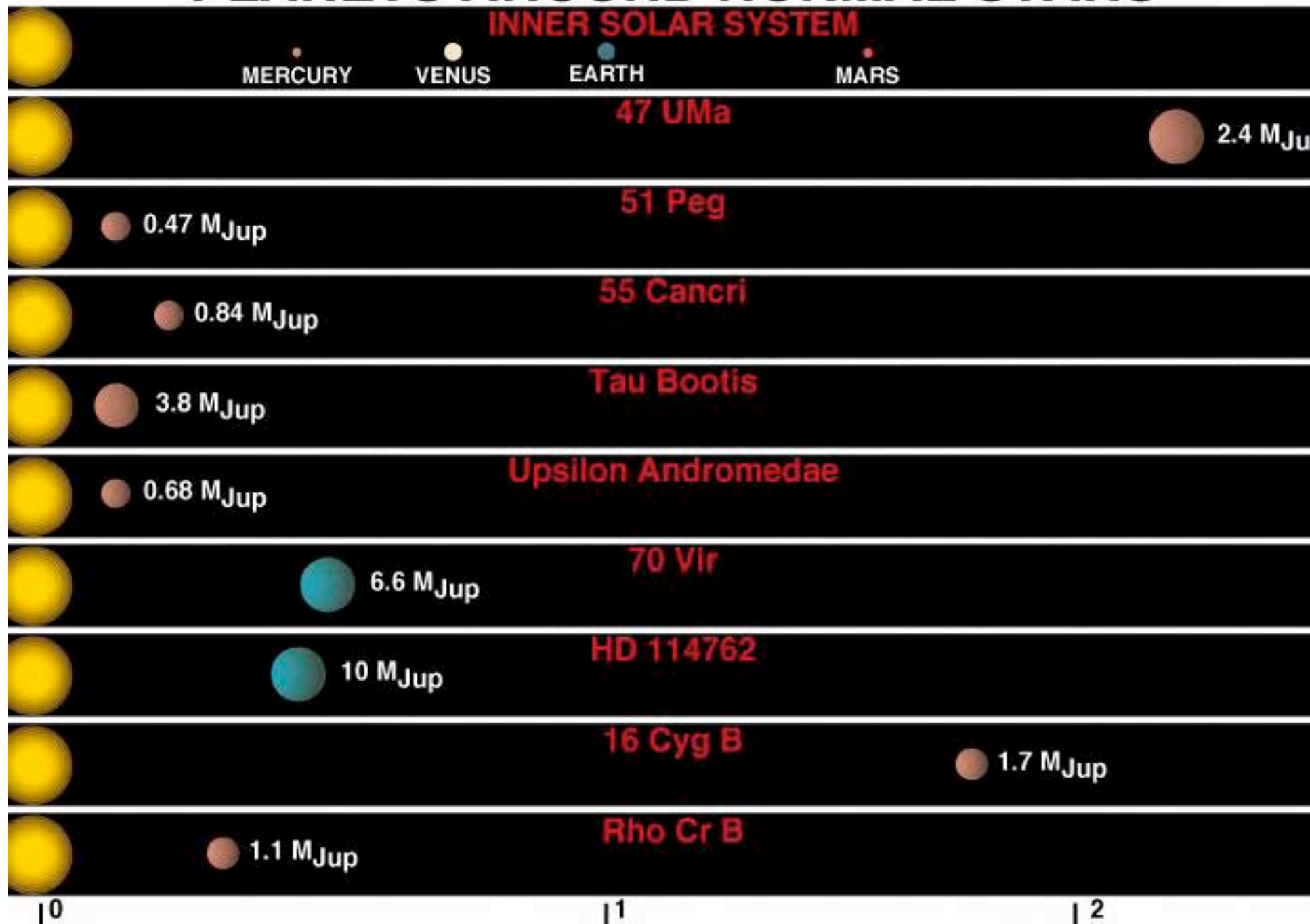
0.7 arcsec  
98 U.A.

0.3 arc sec

N  
E

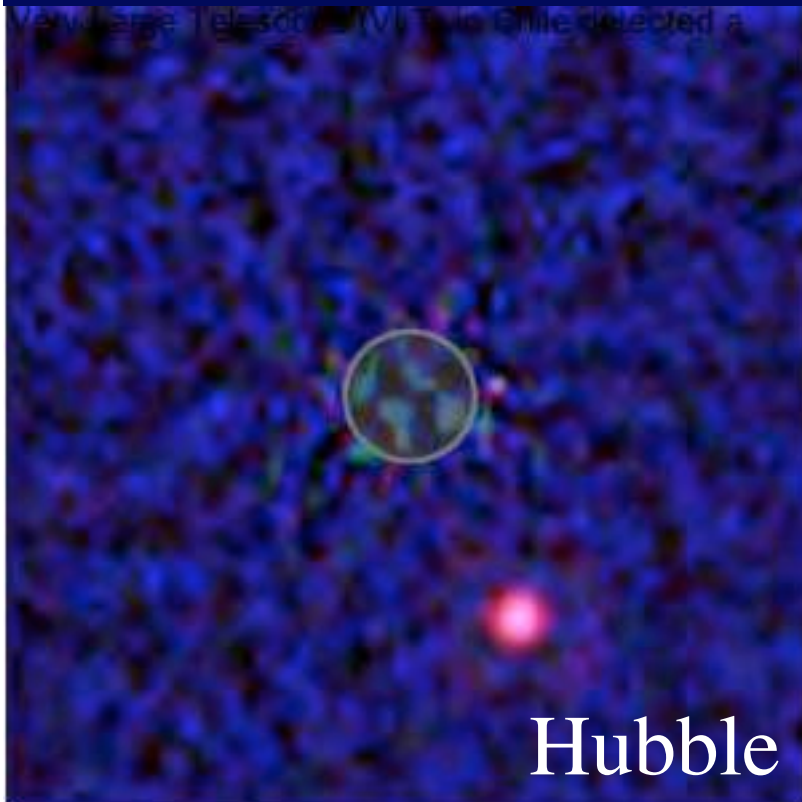


# PLANETS AROUND NORMAL STARS



# Planète de naine brune? ( Chauvin et al., 2004)

- Vue en infra-rouge
- grâce à l'optique adaptative



A Giant Planet Candidate near a Young Brown Dwarf \*  
Direct VLT/NACO Observations using IR Wavefront Sensing



# Exo-planètes.... ça existe



Artist's View of Planet around the Star HD 209458

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

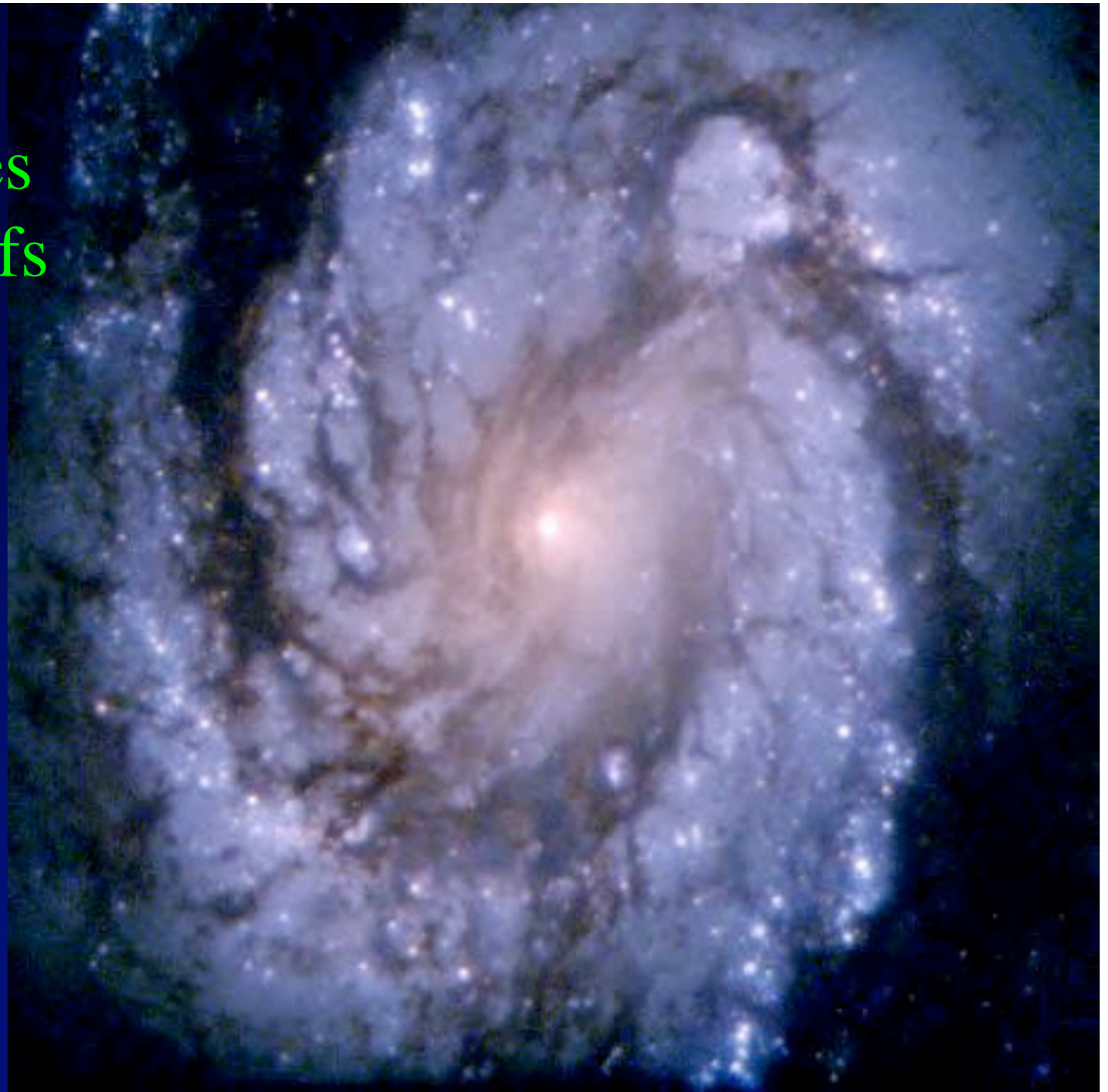
# Résoudre des étoiles à neutrons ?

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

**Crab Nebula**



Résoudre les  
noyaux actifs



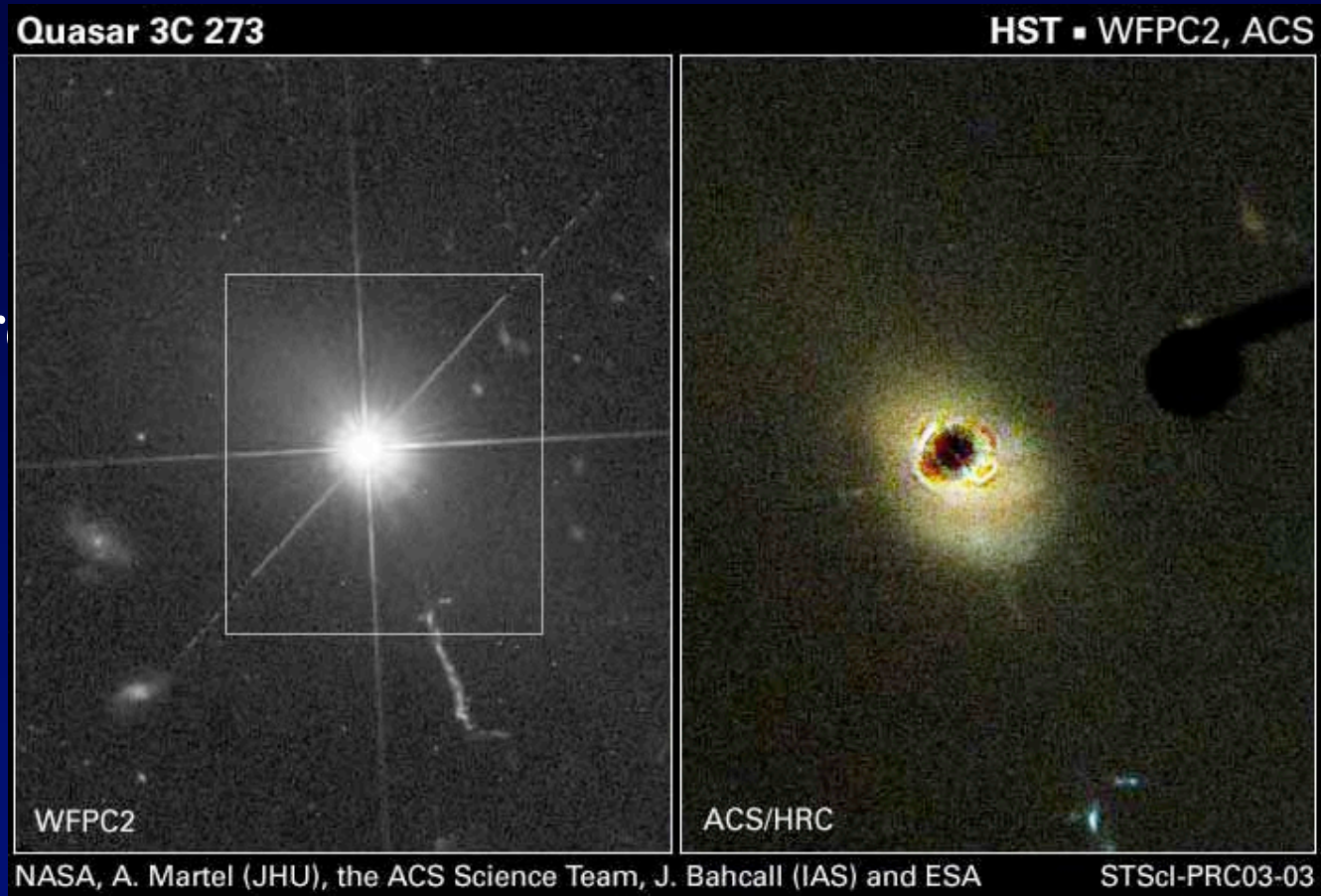
# Noyau et jet de la galaxie M81

- Est-ce une illusion d'optique ?



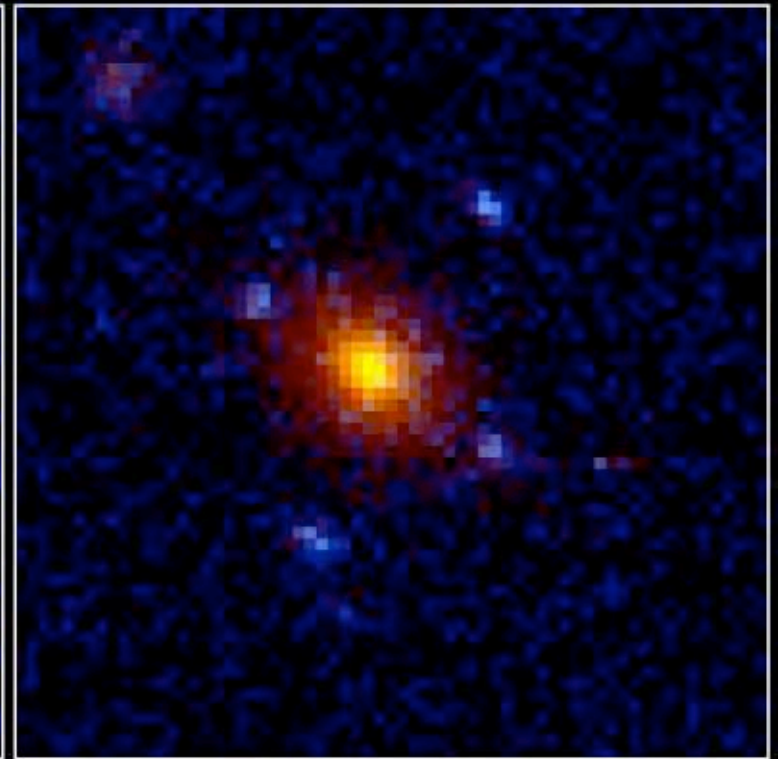
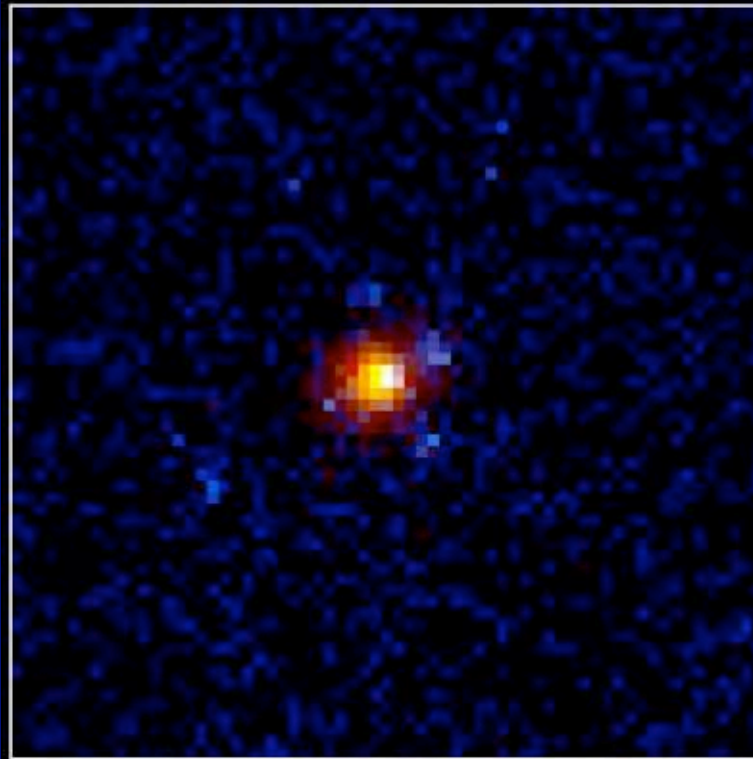
# Quasars, etc...

- Record
- .



# Lentilles gravitationnelles classiques (Zwicky ca. 1950)

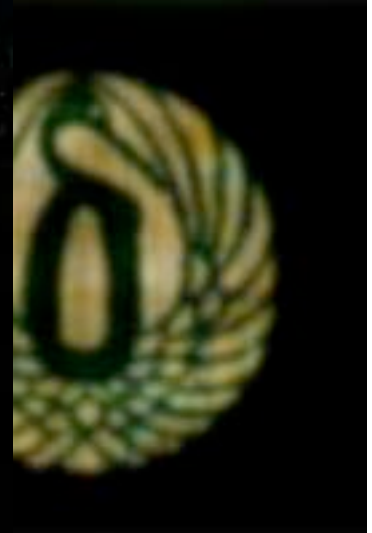
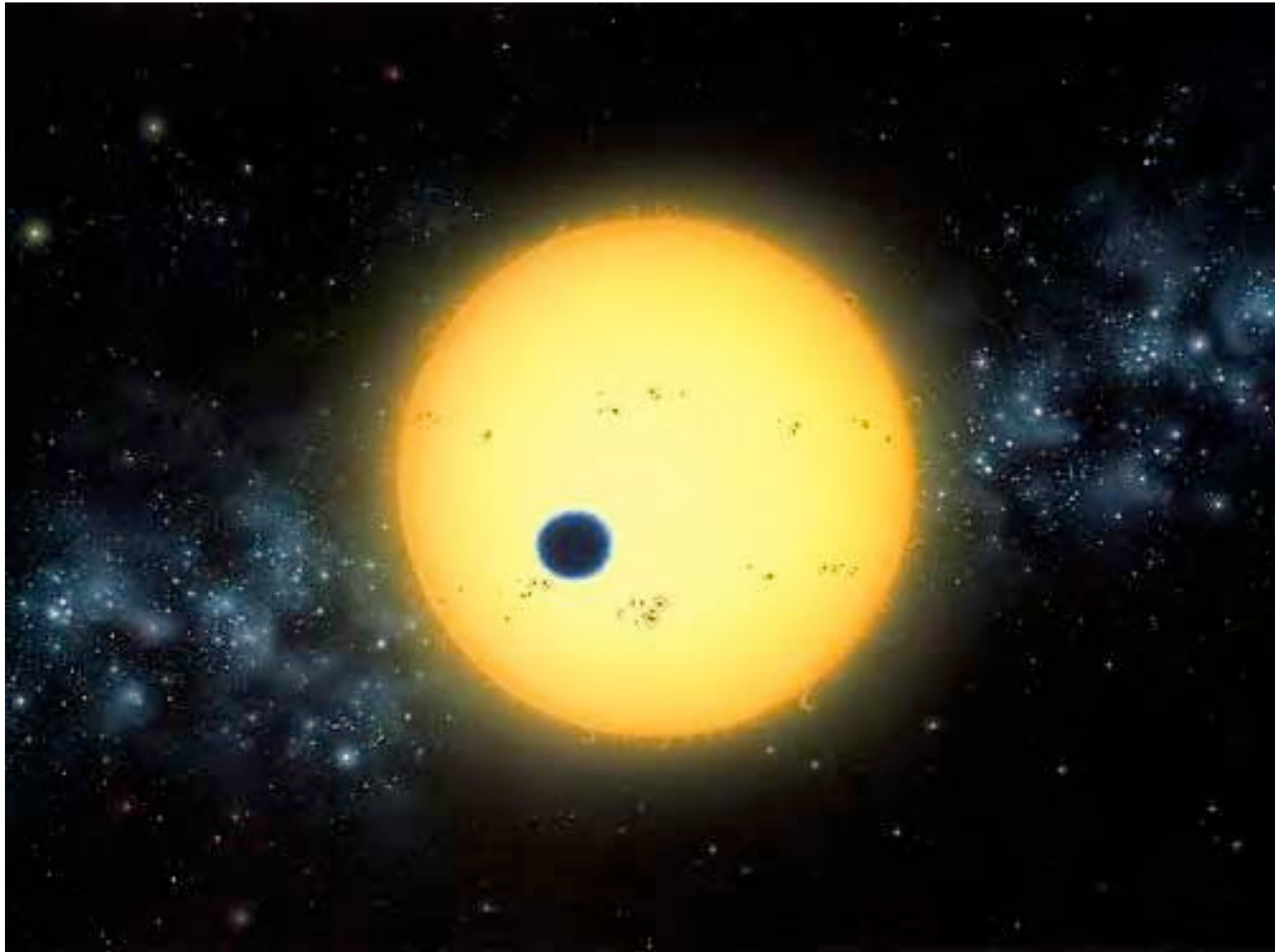
- Lointaines  $> 100$  Mparsecs

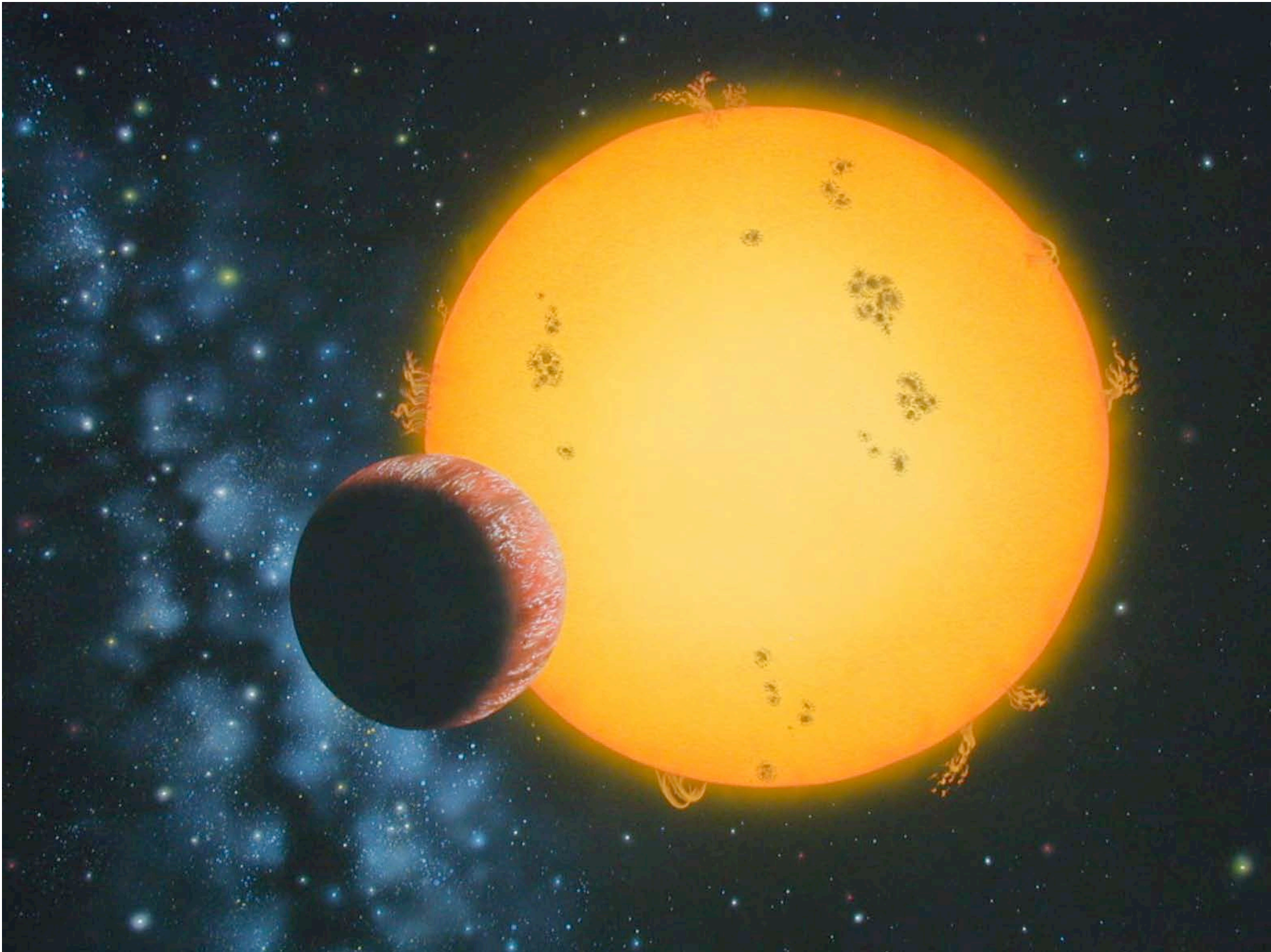


**Gravitational Lenses**

HST • WFPC2

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



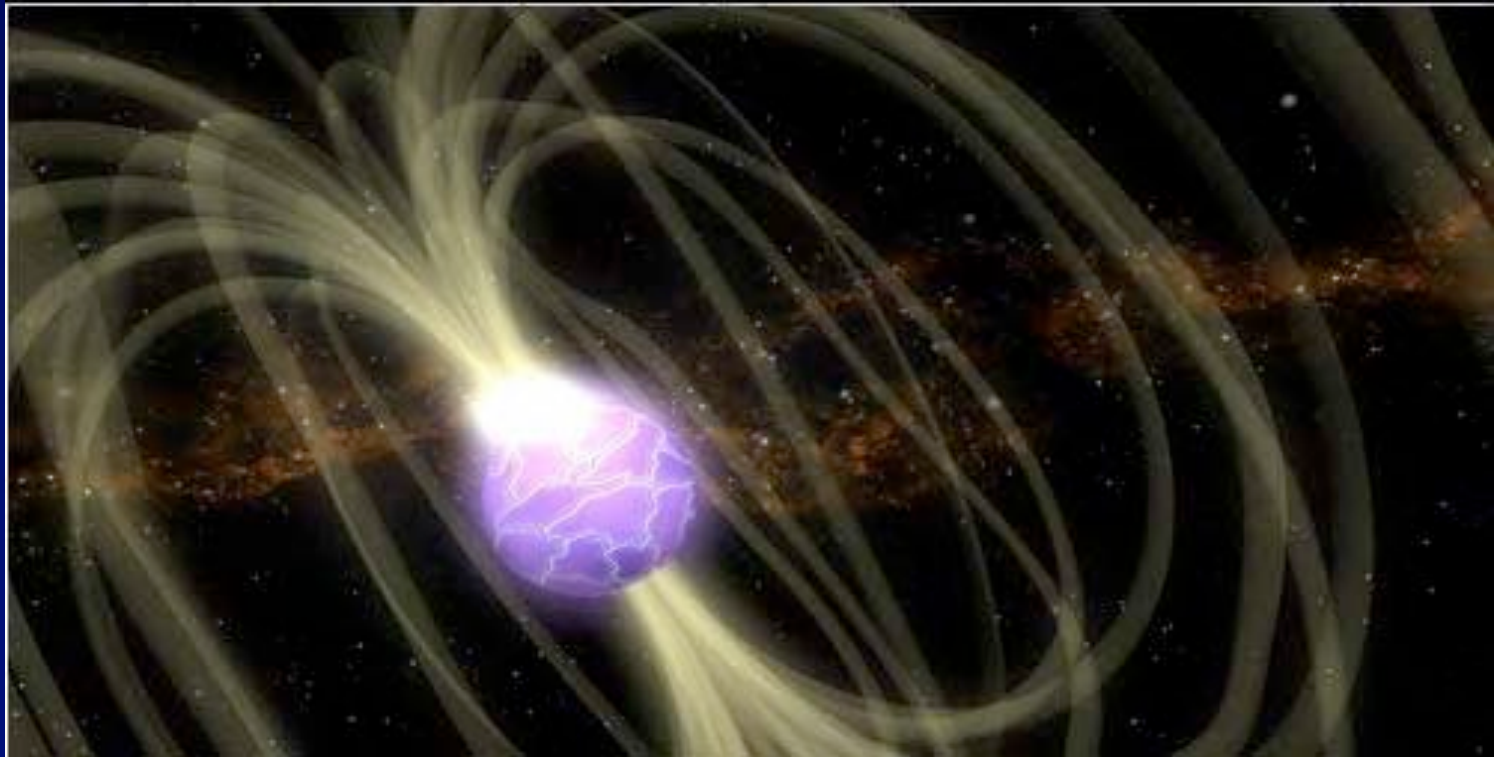




# Objets compacts

- Ouverture de 100 000 km

Magnétar (vue d'artiste)



# Pourquoi la coronographie ?

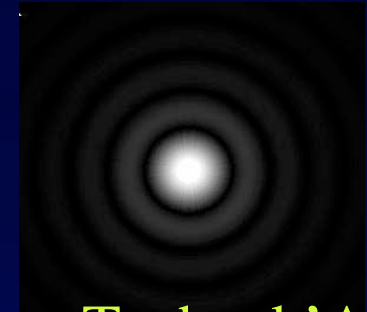
- Voir le faible près du brillant:
  - Couronne solaire ( Lyot, 1950 « Flammes du Soleil »)
  - Disques circumstellaires ( Lagrange et al. ) et enveloppes
  - Exo-planètes
  - environnement d 'objets ponctuels : pulsars, noyaux actifs de galaxies, sursauts gamma

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



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

# Voir les planètes d 'étoiles



Tache d 'Airy

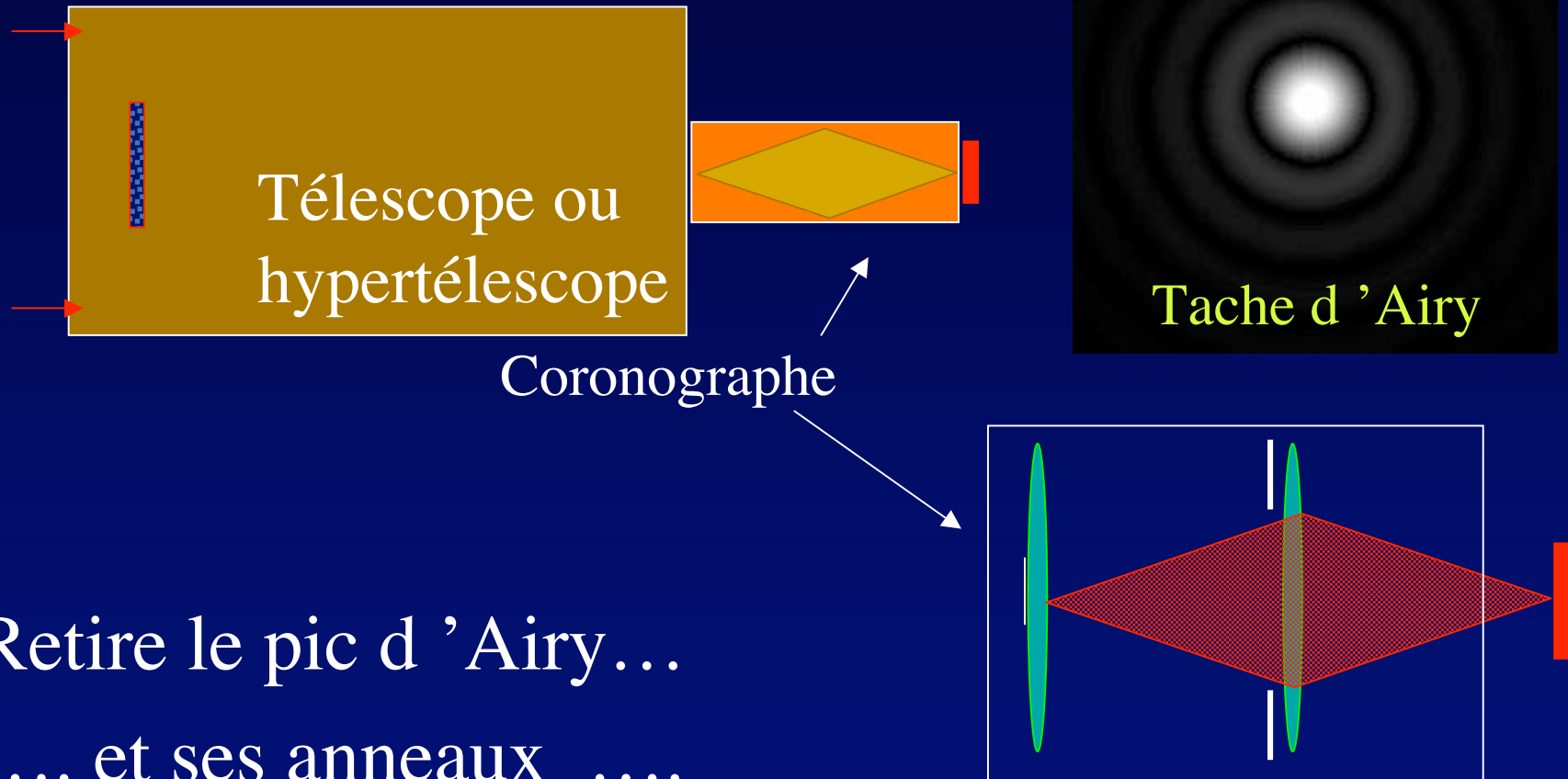
- un problème de lumière parasite plus que de résolution :  $\text{contraste Terre/Soleil} = 10^{-10}$  ( visible)
- Éliminer de l 'image les « éclaboussures » de lumière de l 'étoile
  - Masquer l 'image stellaire....
  - .... et ses anneaux de diffraction
  - ....et la contribution du bosselage de l 'optique....
  - .....et celle des hétérogénéités de transparence



# Comment ?

- Nettoyer les « éclaboussures diffractives » de lumière
- En corrigeant
  - Les imperfections de l'optique
  - ou de l'atmosphère
  - Et la diffraction par les bords d'une optique parfaite : anneaux d'Airy

# Principe de la coronagraphie



- Retire le pic d'Airy...
- .... et ses anneaux ....
- Sans affecter la planète

## Cas d'une optique parfaite:

- Noircissement complet possible avec légère apodisation et coronographe Lyot ou Roddier (Aime et Soummer 2002)
- Voie intéressante

# Cas d'une optique parfaite: noircir l'image stellaire, avec ses anneaux de diffraction



Tache d'Airy

- 1- en adoucissant la transition au bord de l'ouverture: « apodisation »
  - Perte de lumière, et de résolution
- 2- en reprenant l'image focale ( Lyot, Roddier, Rouan, Soummer)
- 3- par interférence avec séparatrice ( J.Gay)



Résidu causé par le bosselage de l'onde :

# Formule de Maréchal

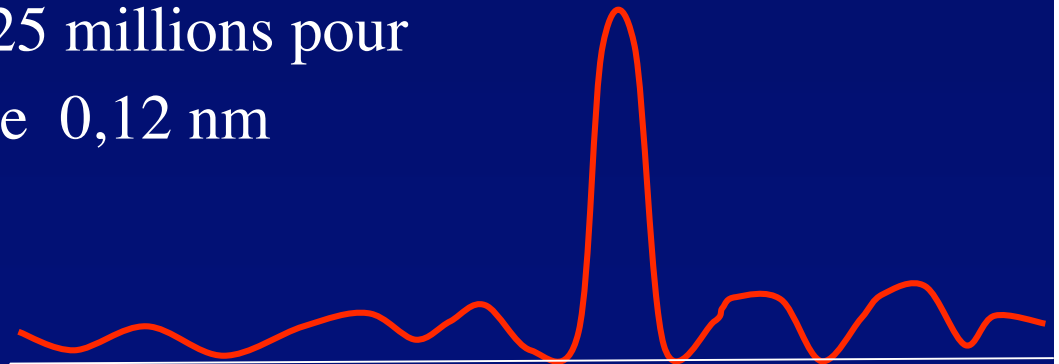
Pic/halo

$$G = N / \sigma^2$$

Nombre de bosses

Erreur de phase

- Exemple: à  $\lambda = 500\text{nm}$ ,  $G = 25$  millions pour 1000 bosses d'amplitude 0,12 nm



*soit.....*

un télescope bosselé ( faiblement),  
avec un coronographe parfait

Onde bosselée

- Onde du télescope:

$$e^{i\phi(x,y)} \quad \text{ou} \quad 1 + i\phi(x,y) \quad \text{si bosselage faible}$$

- un coronographe parfait annule le premier terme, il reste la perturbation  $i\phi(x,y)$

- Transformée de Fourier symétrique, en intensité ( Boccaletti et al., 2002)

- Pas de pic central car  $\phi(x,y)$  est à moyenne nulle

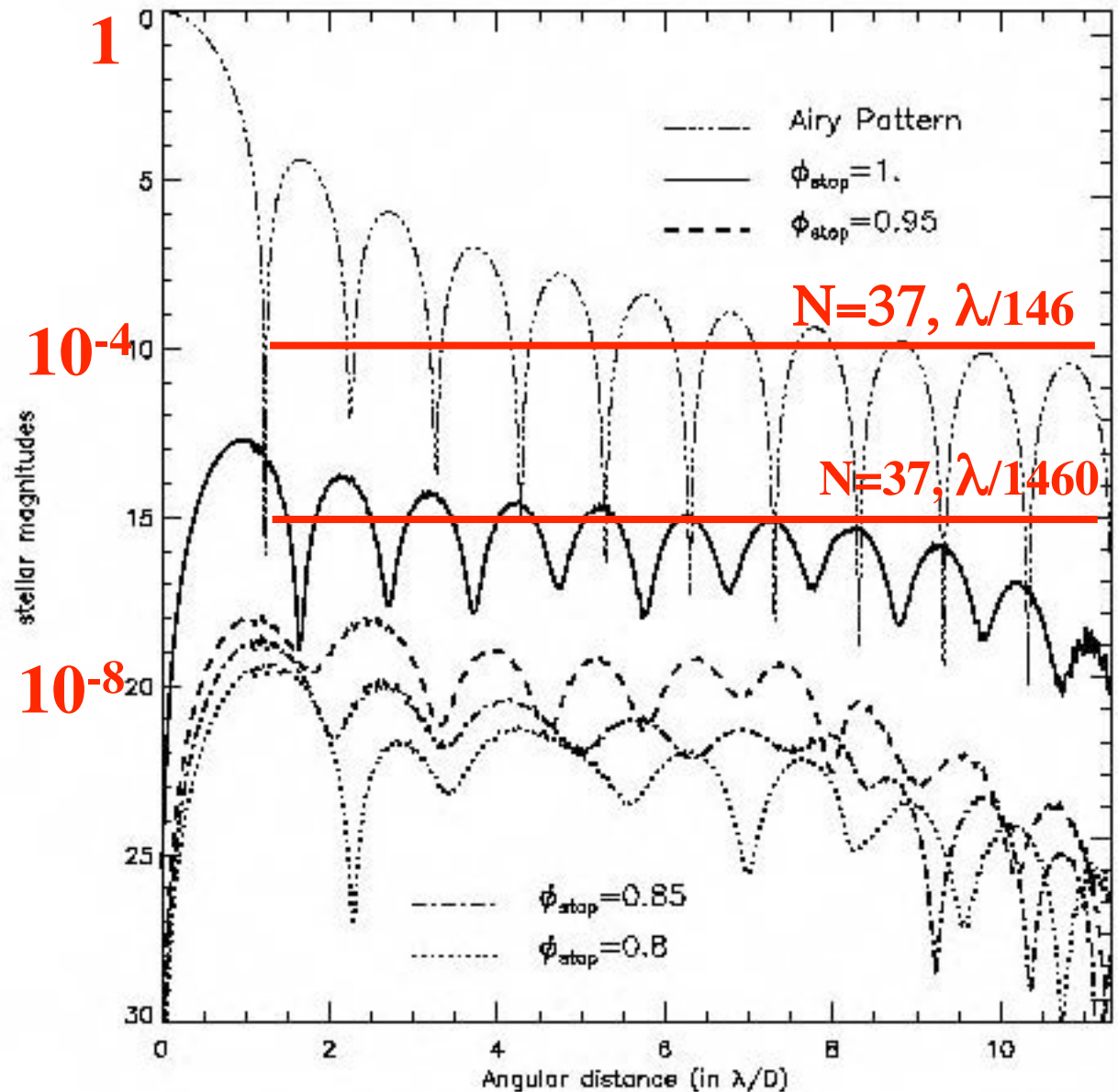
Rappel:

# optique bosselée et coronographe parfait

- Si l'onde est faiblement bosselée:  
$$e^{i\phi(x,y)} = 1 + i\phi(x,y)$$
  - Retire le terme constant de  $1 + i\phi(x,y)$
- Rend réel  $i\phi(x,y) \Rightarrow$  « ombre volante »  $\phi(x,y)$
- Un coronographe parfait transforme le bosselage de l'onde en « ombre volante/ »

# Coronographe 4 quadrants de D.Rouan

- Utilisable dans  
l'image  
hypertelescope



Résidu stellaire, moyenné angulairement  
( Riaud et al., PASP 2001)

# Après le coronographe: nettoyage cohérent et incohérent pour coronographie extrême

- Cohérent: soustraire de l'onde une copie
- Incohérent: soustraire de l'image détectée une image de référence