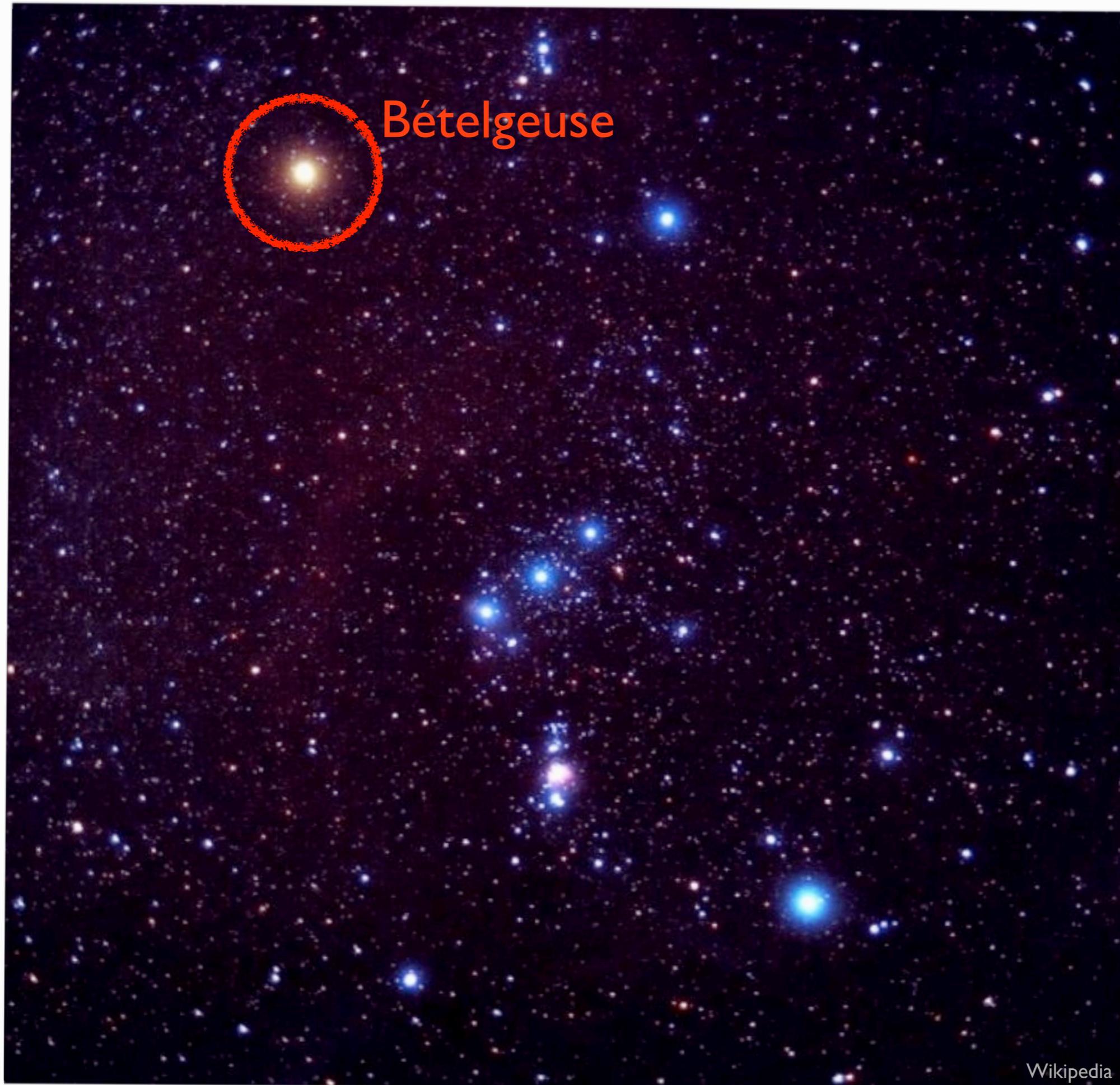


# Bételgeuse à Haute Résolution Angulaire



Pierre Kervella  
Observatoire de Paris



Bételgeuse

# Bételgeuse

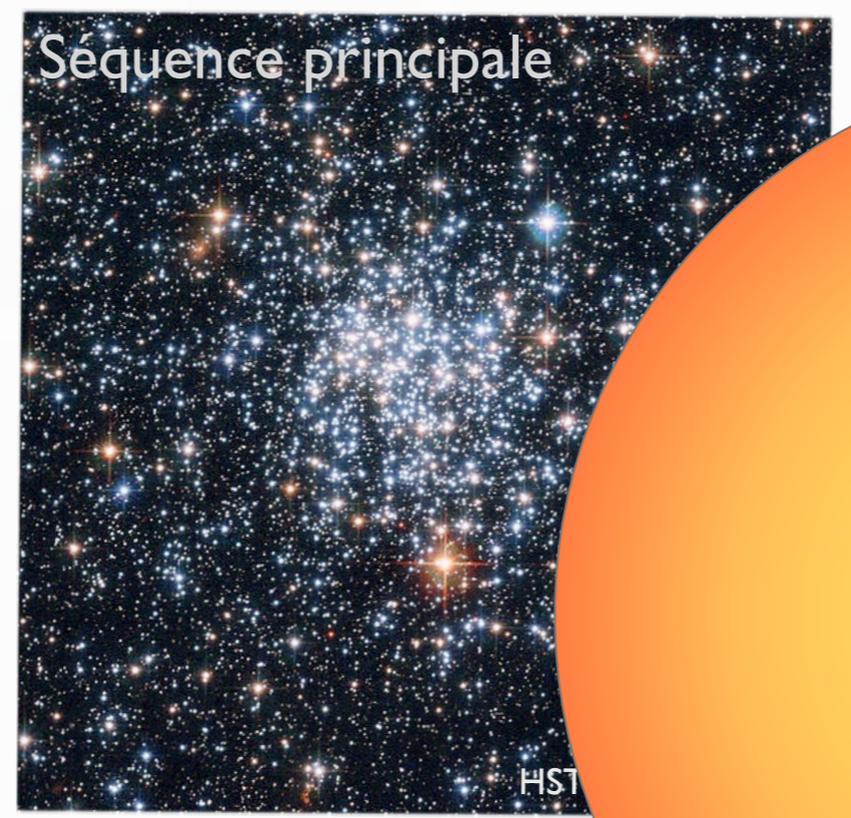
- Masse de 10-20 masses solaires ( $M_{\text{sol}}$ )
- Température de surface  $\sim 3500$  K
- Luminosité  $> 100\,000 L_{\text{sol}}$
- *Enormément* de chaleur produite au centre !
- Pour évacuer cette chaleur, l'étoile a *énormément* grossi:  $R \sim 1000 R_{\text{sol}}$
- La convection transporte l'énergie des profondeurs de l'étoile vers la surface



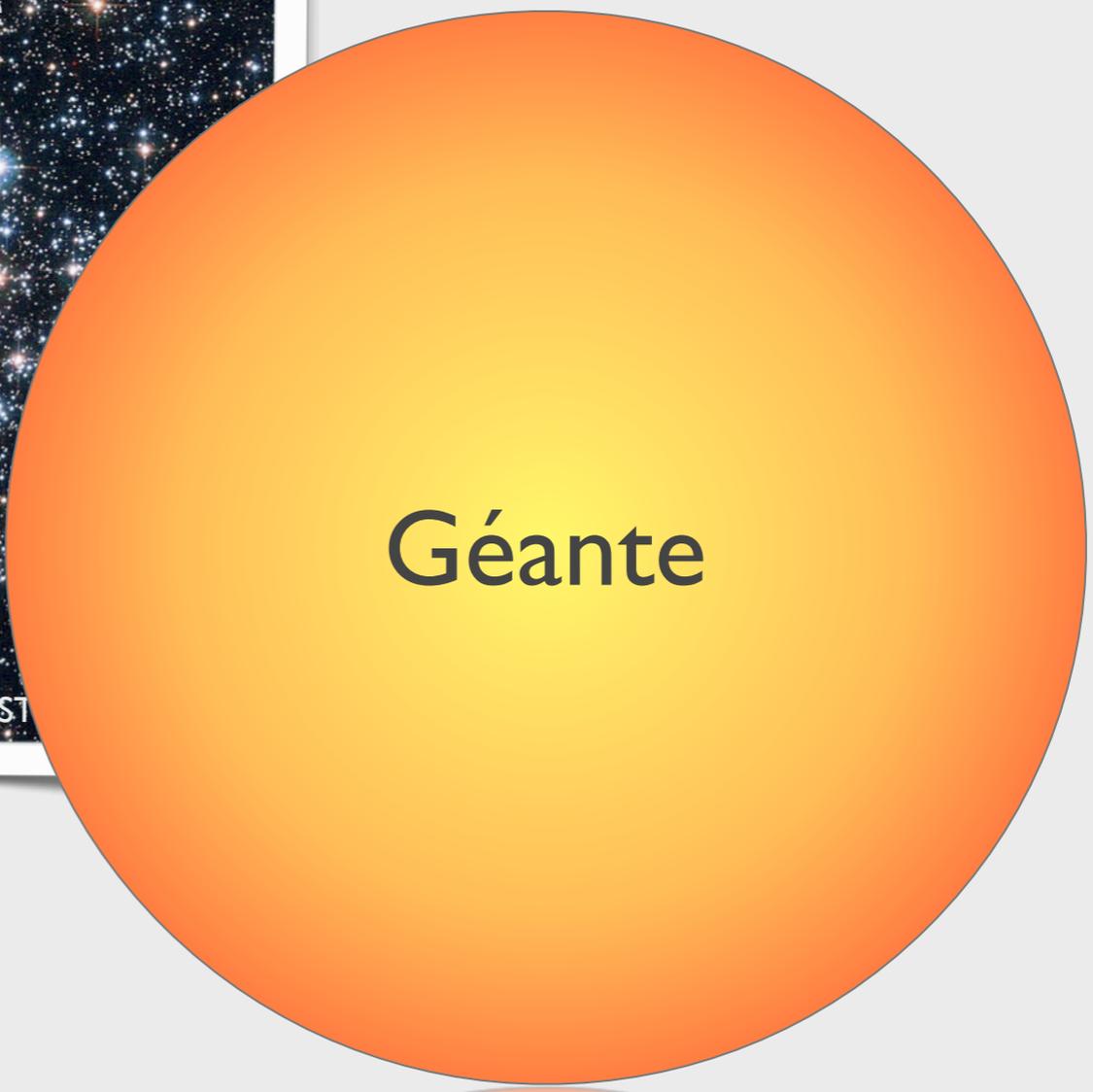
Nuage moléculaire



Protoétoile



Séquence principale



Géante

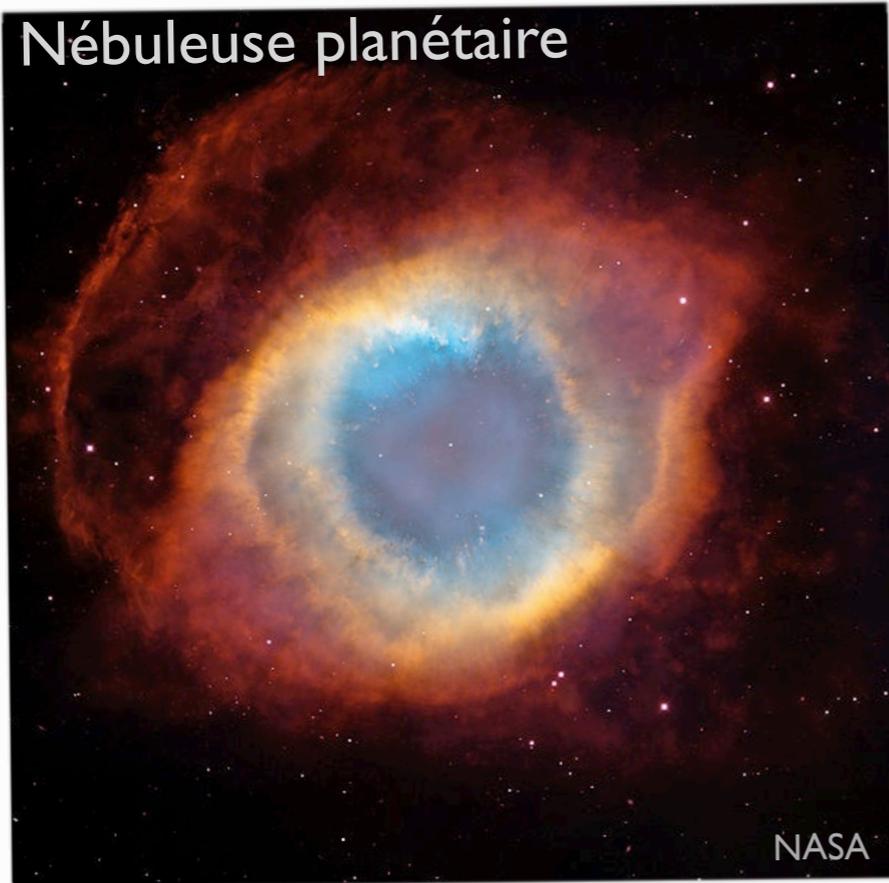
< 10 Msol

> 10 Msol

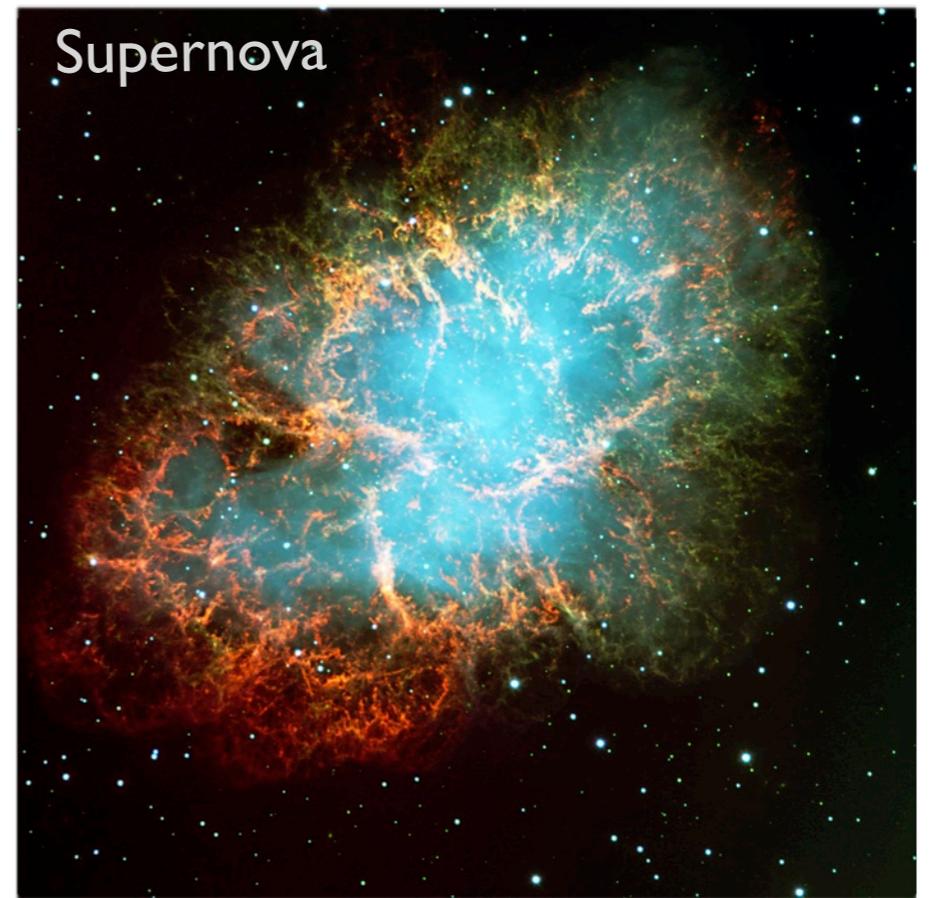
Etoile  
«AGB»

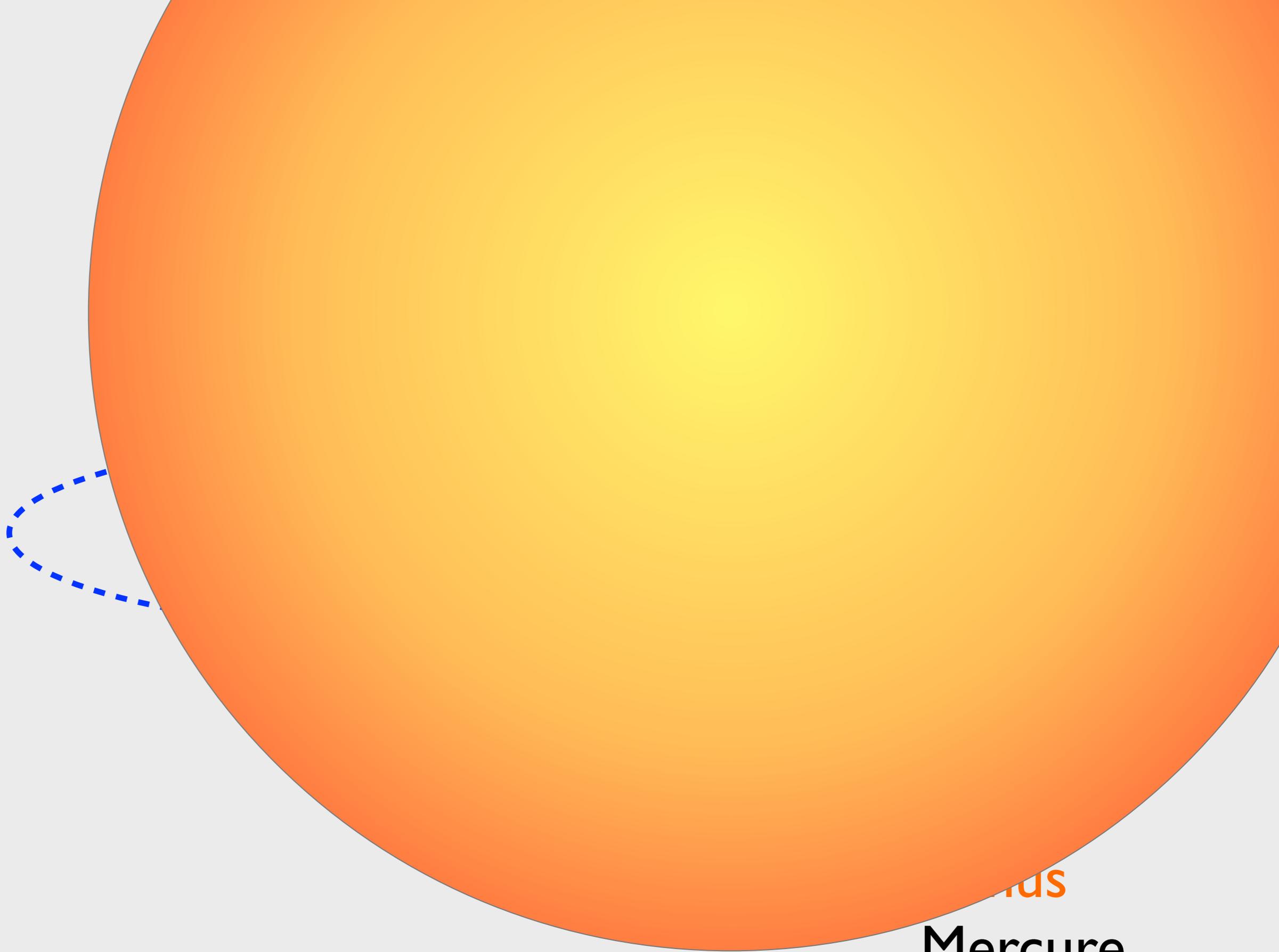
Supergéante

Nébuleuse planétaire



Supernova





Bételgeuse

Mercure

us

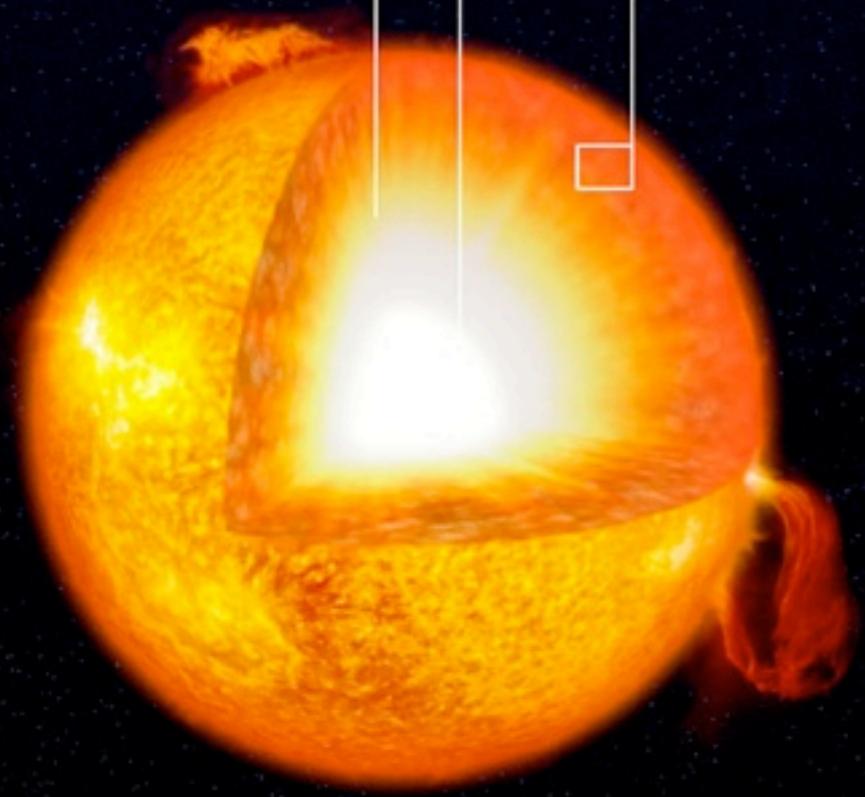
Zone radiative

Coeur

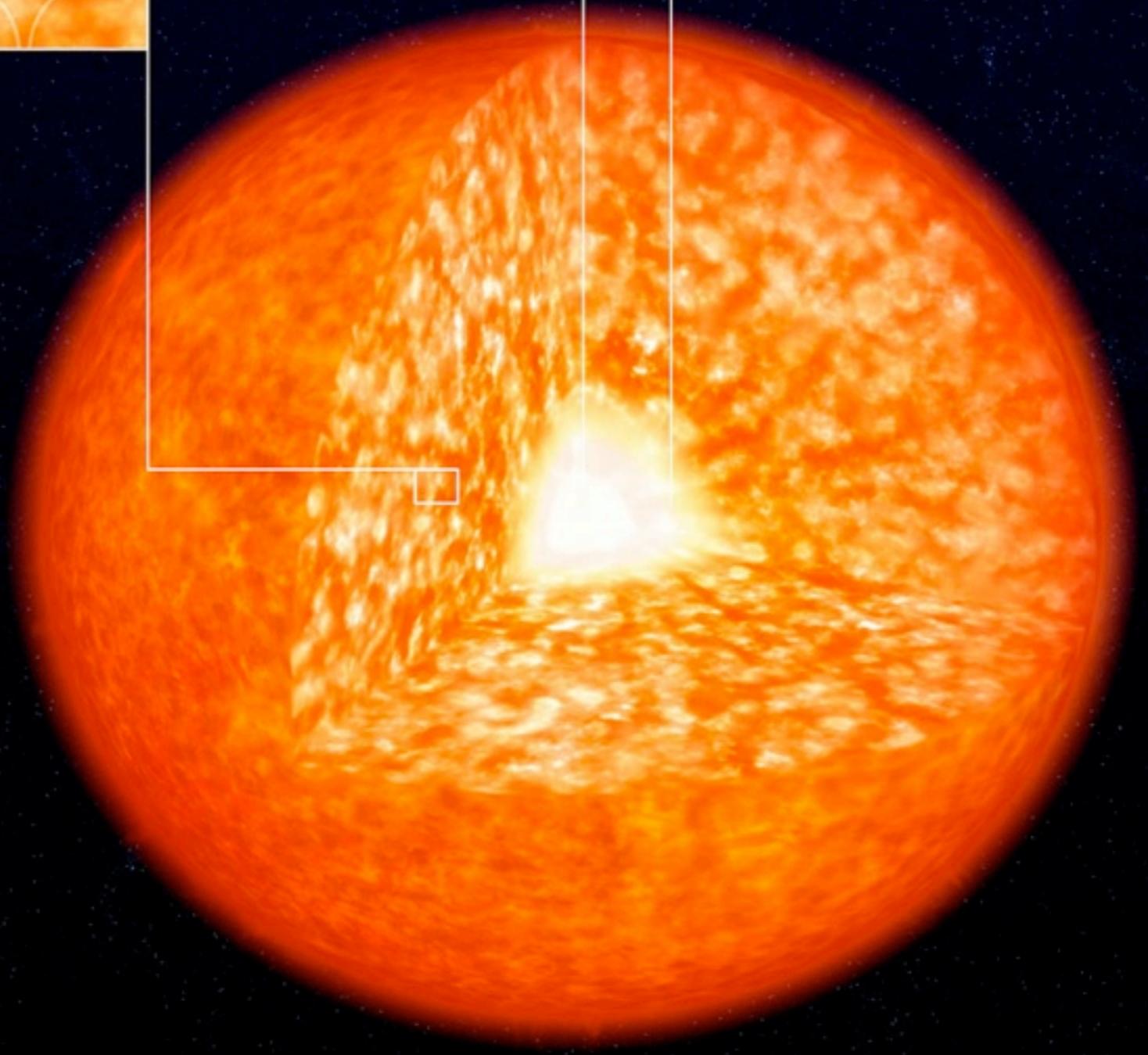
Zone convective

Coeur

Fusion en coquille

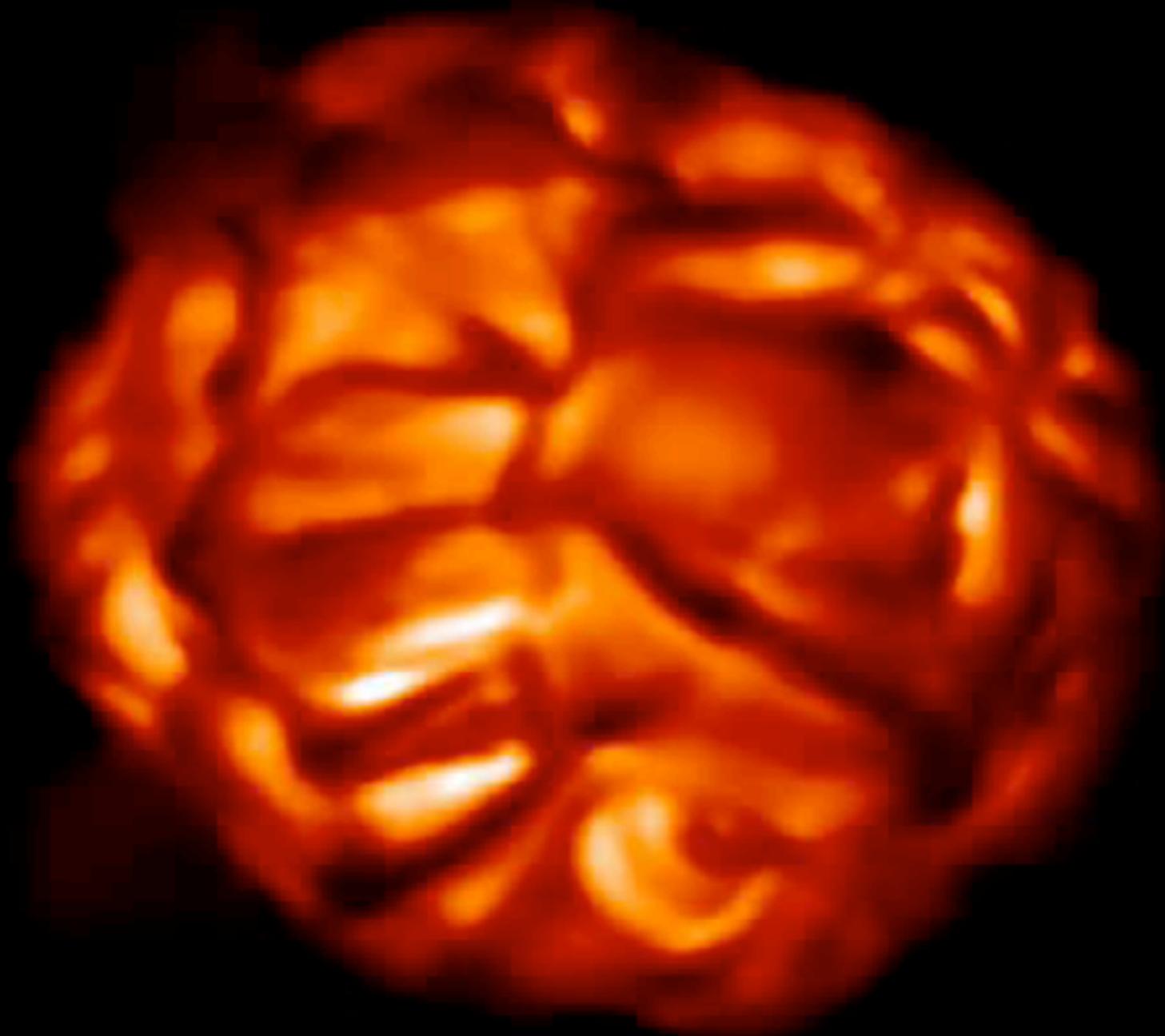


Soleil



(Super)géante rouge

st35gm04n26: Surface Intensity(1r), time( 0.0)=30.263 yrs  
Simulation de supergéante rouge (Bételgeuse)



B. Freytag

# Les questions ouvertes

Surface

Enveloppe

Milieu  
Interstellaire

- Quelle est la structure *réelle* de la convection à la surface de Bételgeuse ?
- Comment l'étoile perd-elle sa matière dans l'espace ?
- Quelle est la structure et la composition de son enveloppe circumstellaire ?
- Comment interagit l'étoile avec le MIS ?

*Haute Résolution Angulaire !*

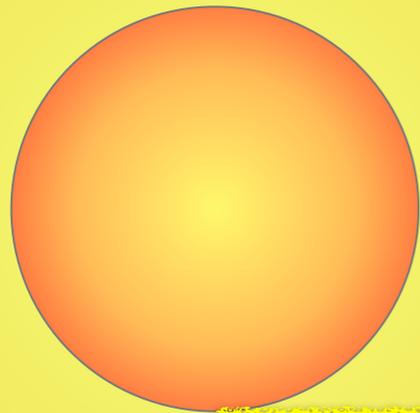
Photosphère

Enveloppe interne  
1-10  $R_*$

Enveloppe moyenne  
10-100  $R_*$

Enveloppe externe  
100-10<sup>4</sup>  $R_*$

MIS



0.25 arcsec

2.5 arcsec

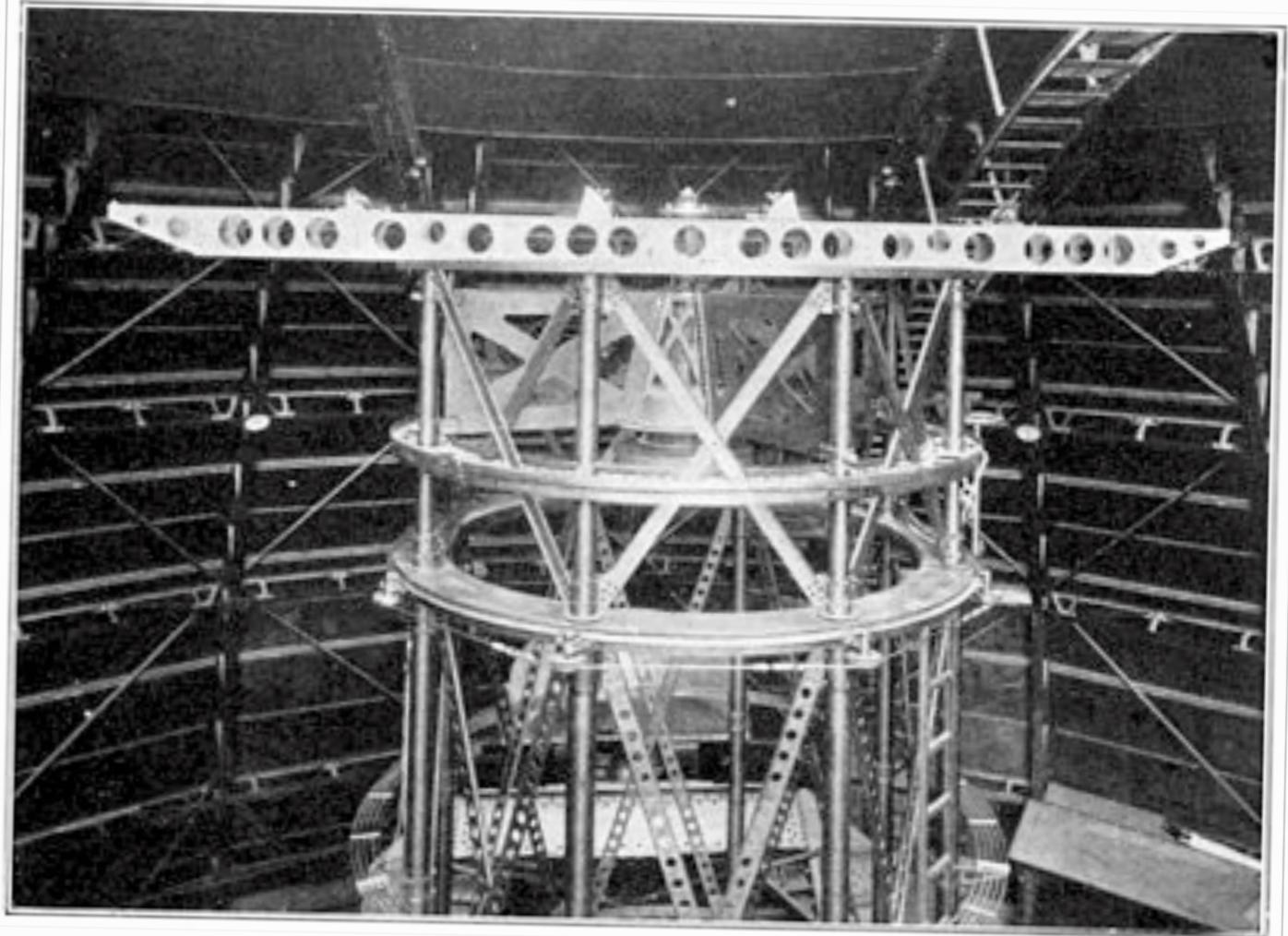
4 arcmin

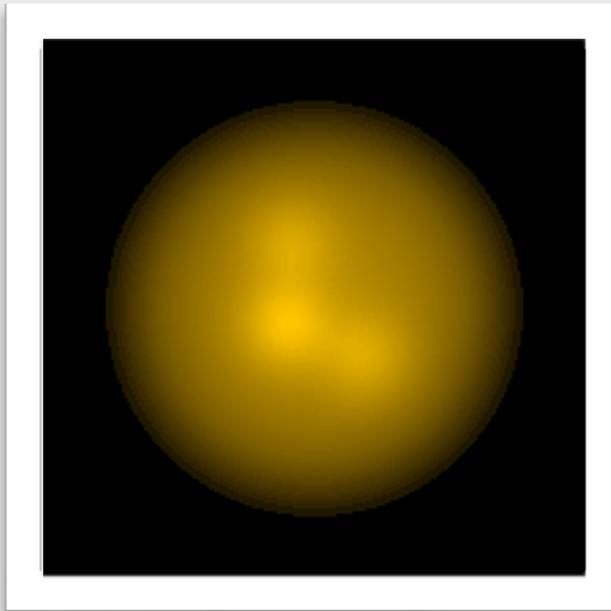
0.025 arcsec



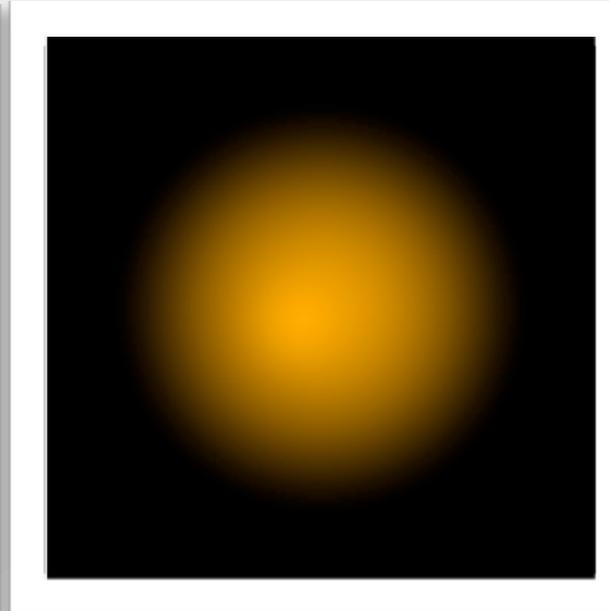
# La Surface

- Bételgeuse a été la première étoile dont la taille angulaire a été mesurée (Michelson & Pease 1921)
- Son disque mesuré a un diamètre d'angle de diam
- Les interféromètres ont permis de détailler la surface (à l'infrarouge)
- Le télescope Hubble a permis de voir l'image de la ch

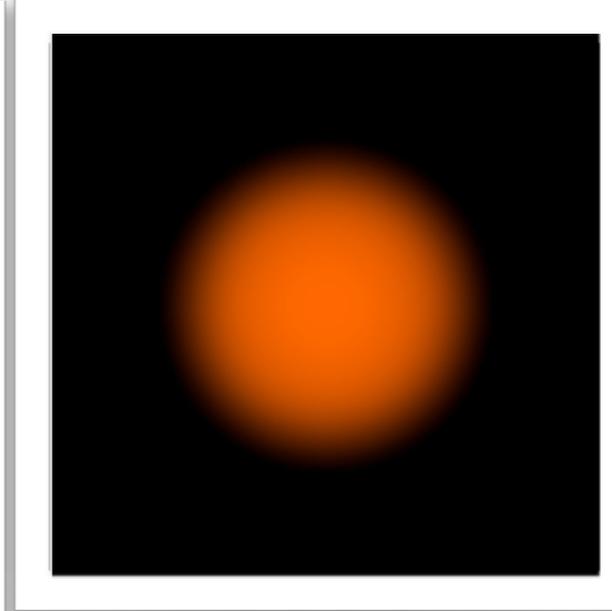




700 nm



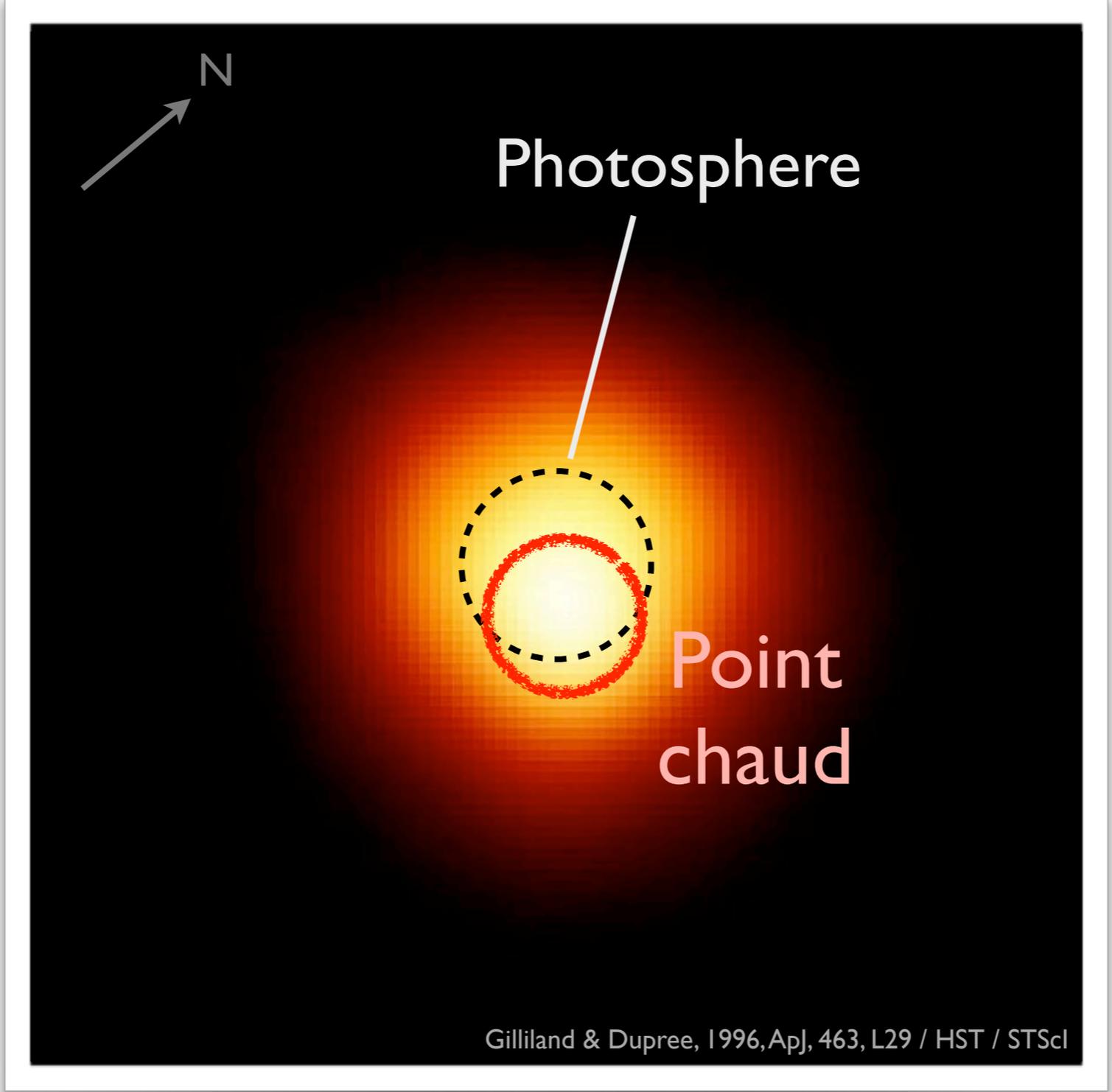
905 nm



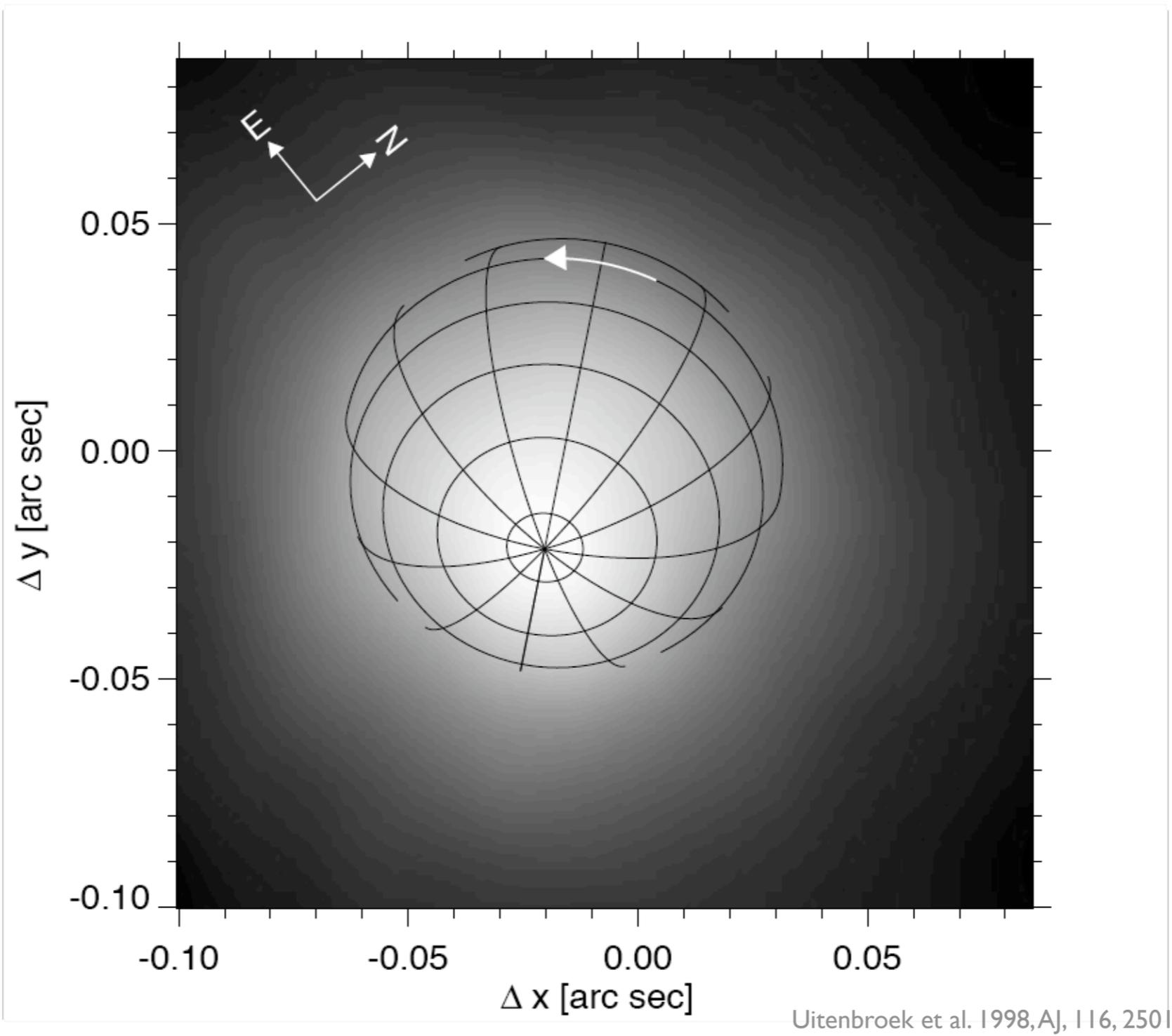
1280 nm

Young et al. (2000)





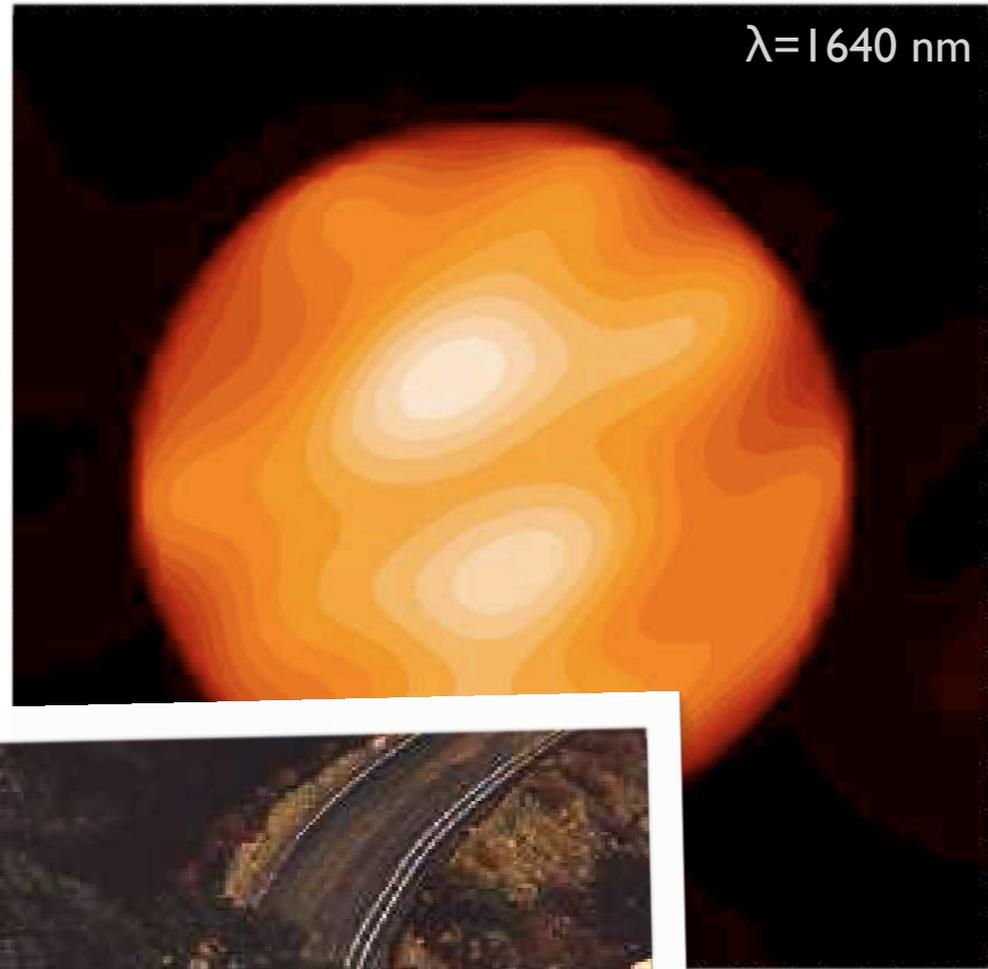
Gilliland & Dupree, 1996, ApJ, 463, L29 / HST / STScI



st35gm04n26: Surface Intensity(1r), time( 0.0)=30.263 yrs



$\lambda=1640$  nm

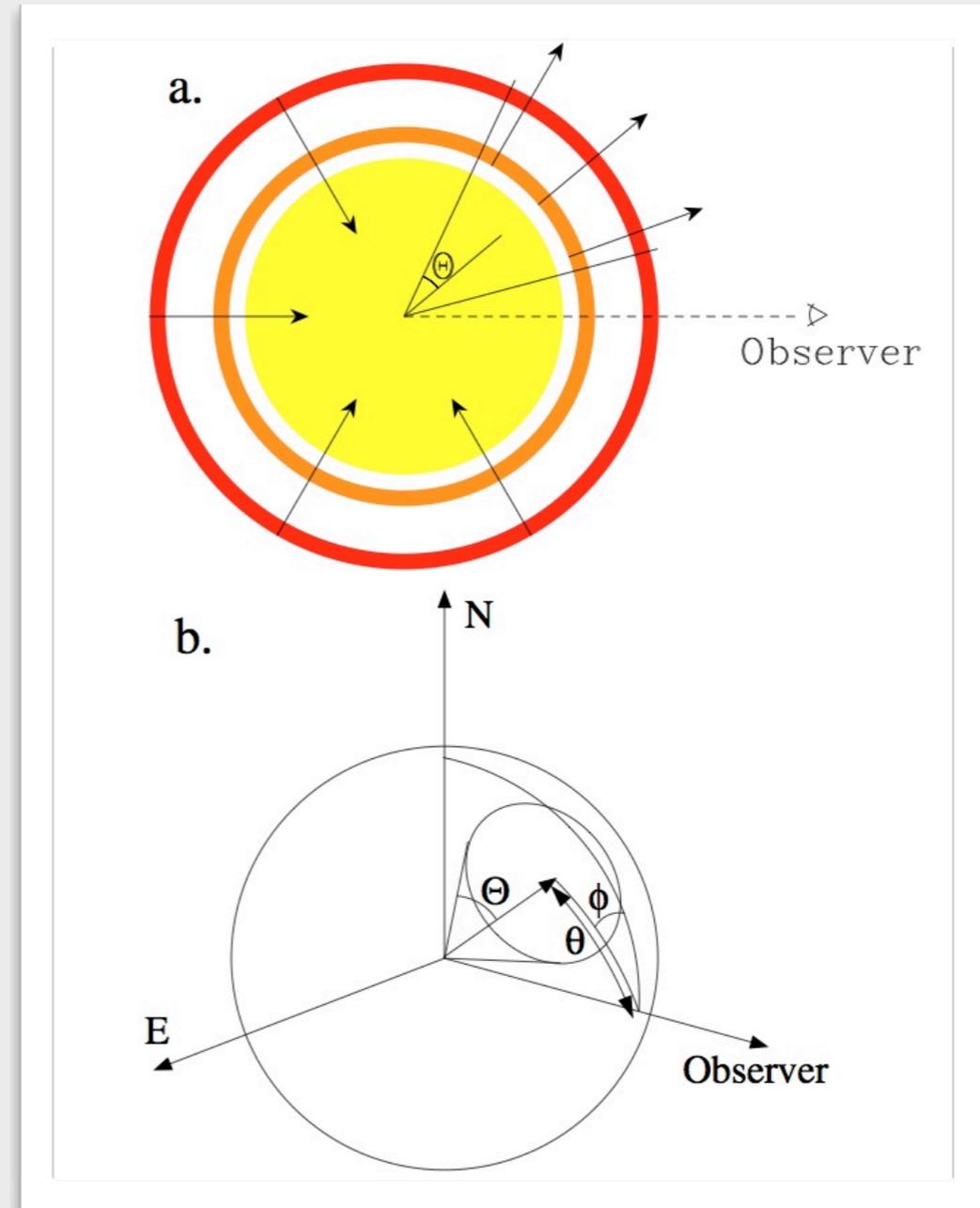
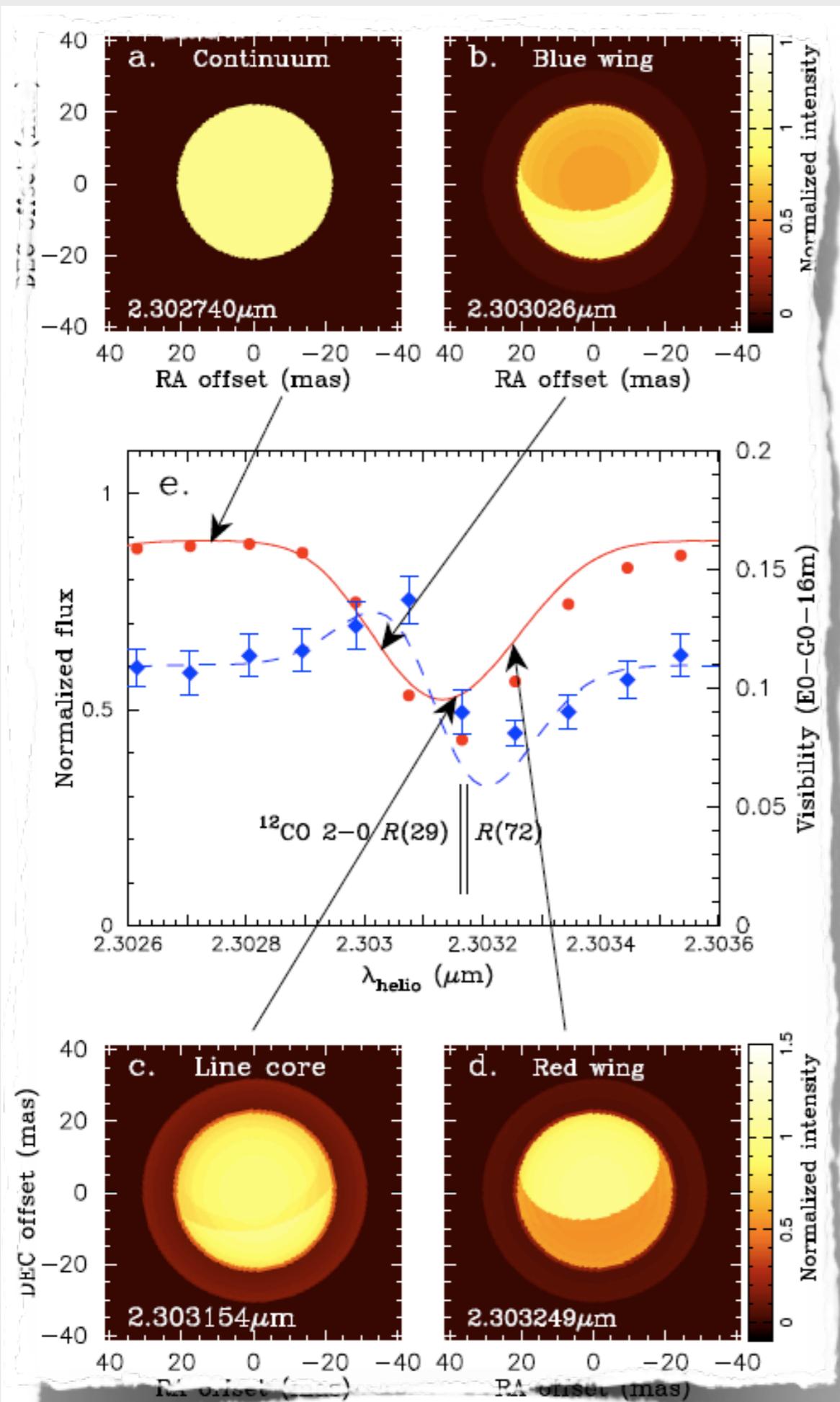


Fre

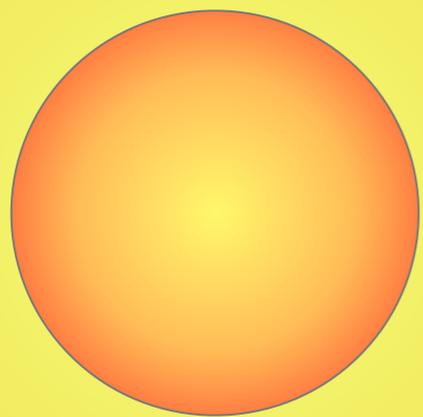


truite  
(09)

# Du gaz CO en mouvement...



Photosphère



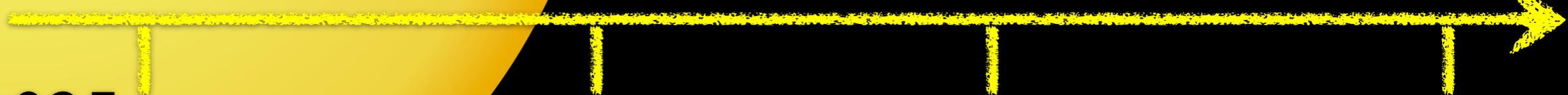
Enveloppe  
interne  
1-10  $R_*$

0.25 arcsec

2.5 arcsec

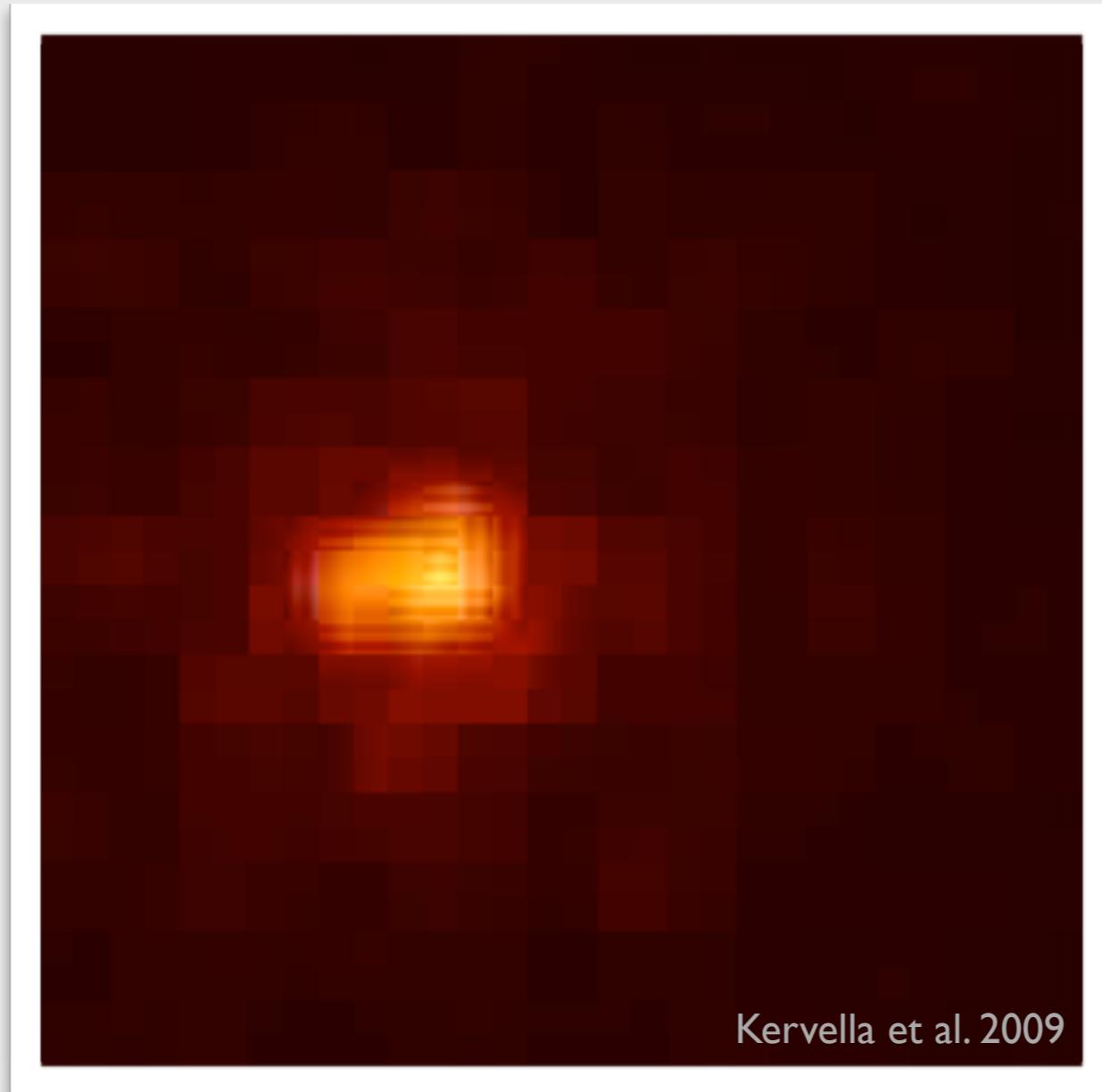
4 arcmin

0.025 arcsec

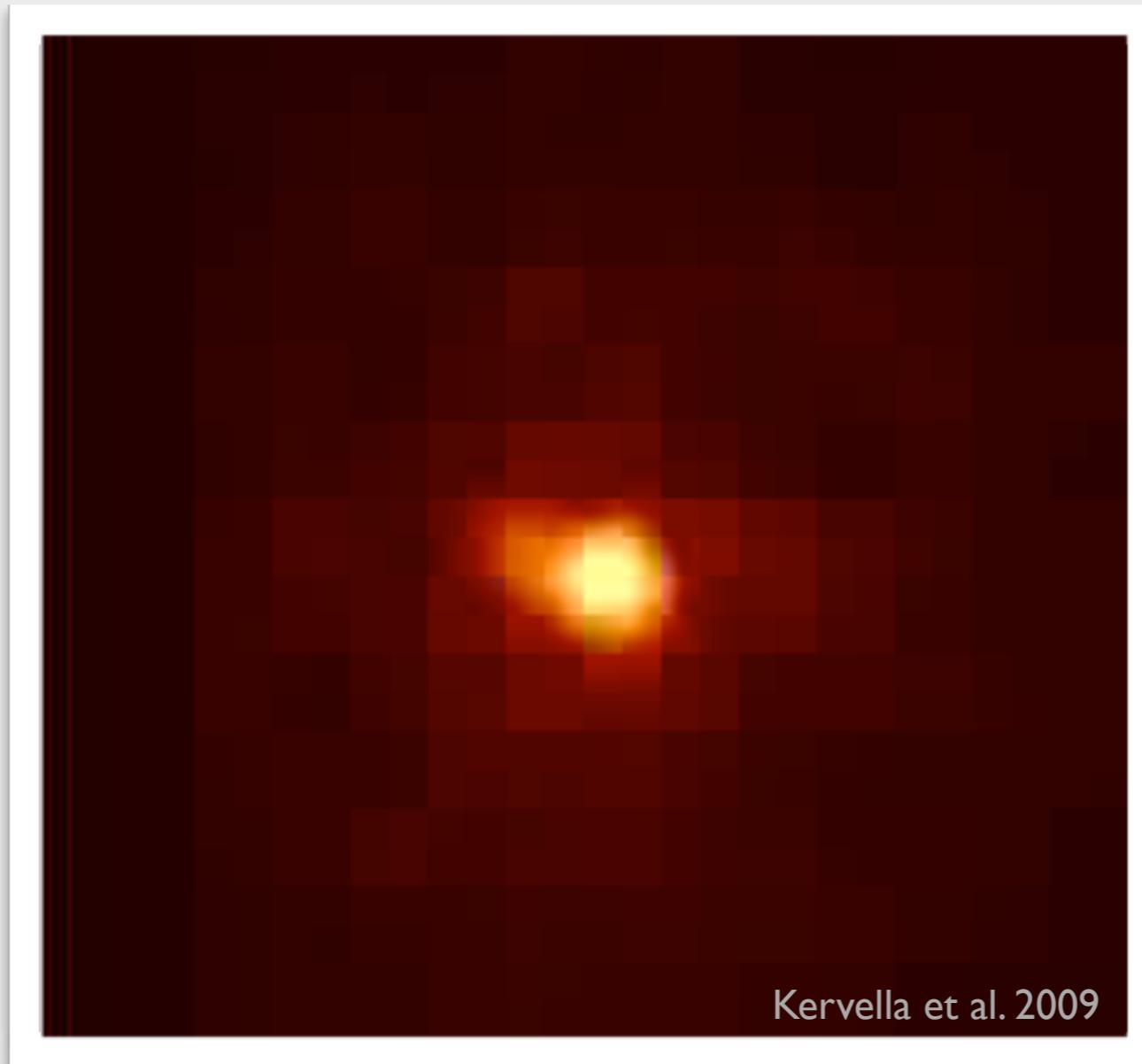


# L'enveloppe proche

- Les grands télescopes optiques au sol (classe 8-10m) permettent de résoudre la zone proche de la surface ( $\theta \sim 50-100$  mas) en infrarouge proche
- Une optique adaptative est indispensable !
- Observations également en radio



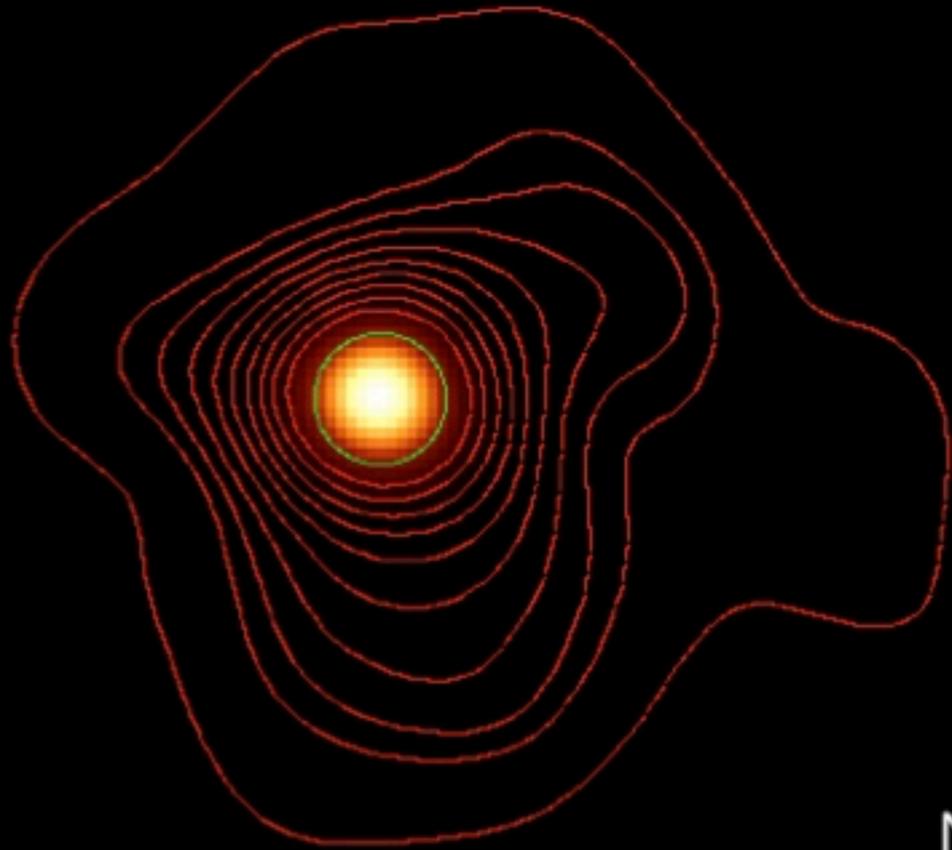
Optique adaptative VLT/NACO  
 $\lambda = 1.2 \mu\text{m}$ ,  $\Delta t = 7.2 \text{ ms}$



Après recentrage et sélection

Betelgeuse  
L-R deconvolved

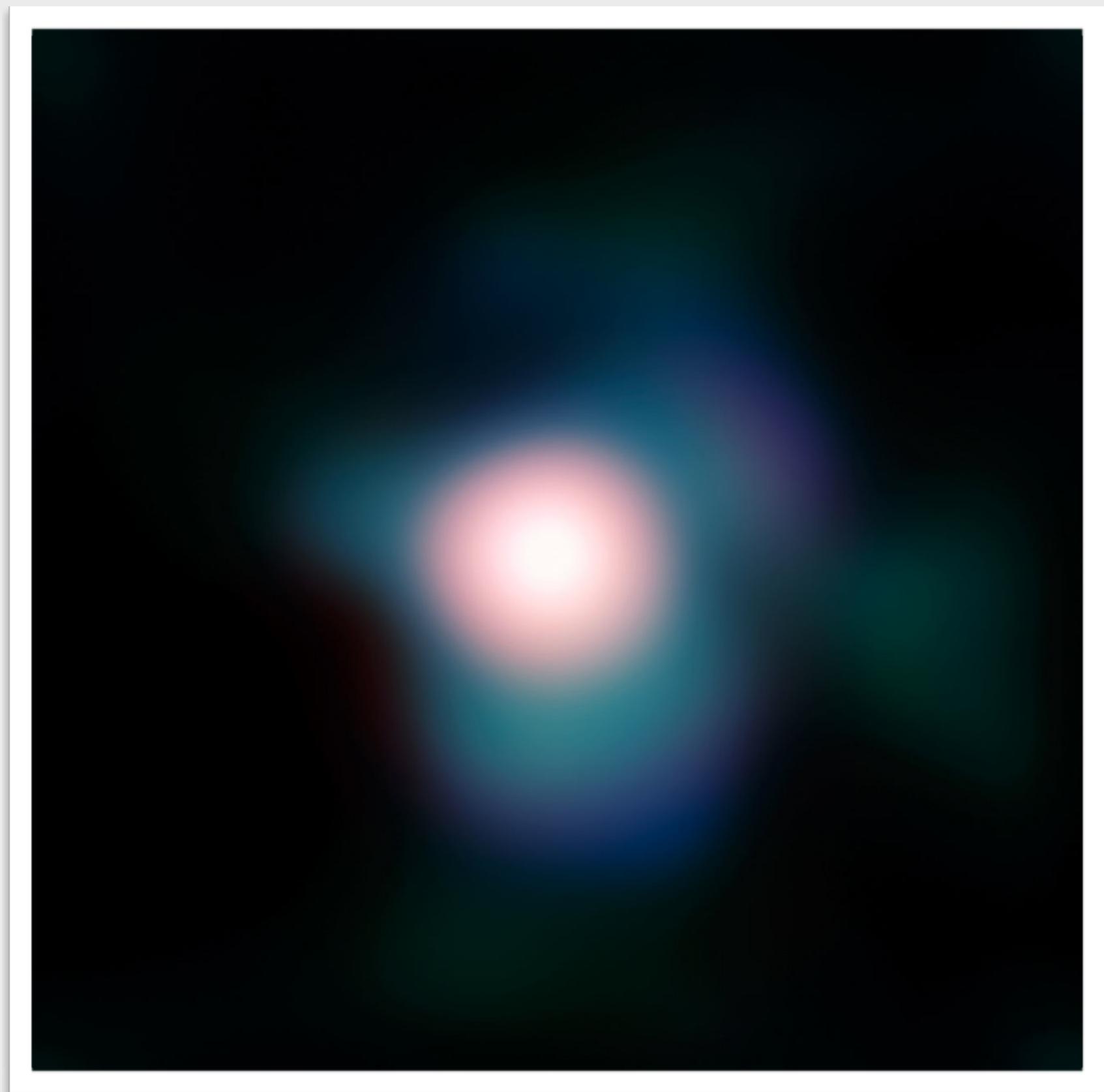
1.04  $\mu\text{m}$

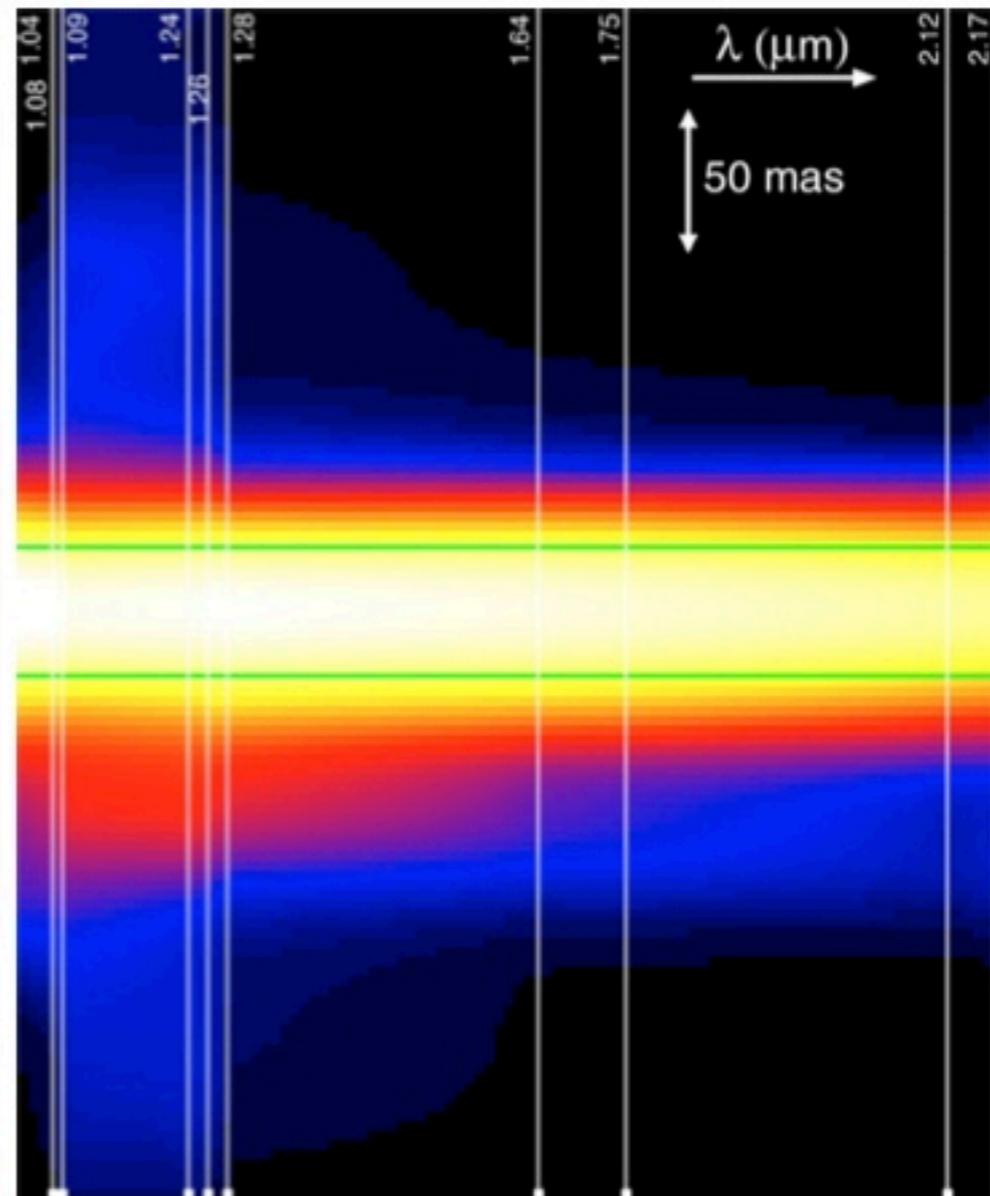
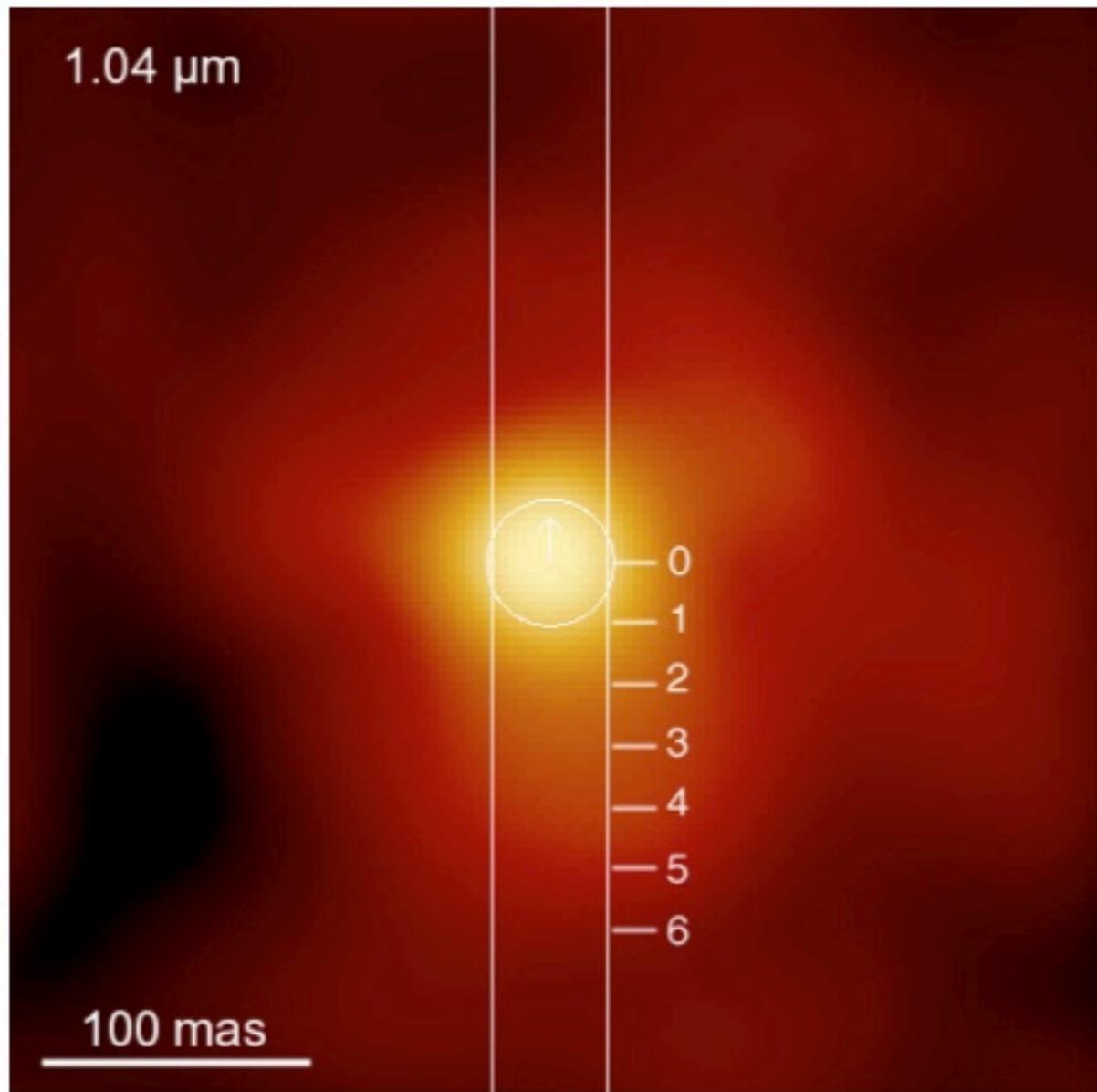


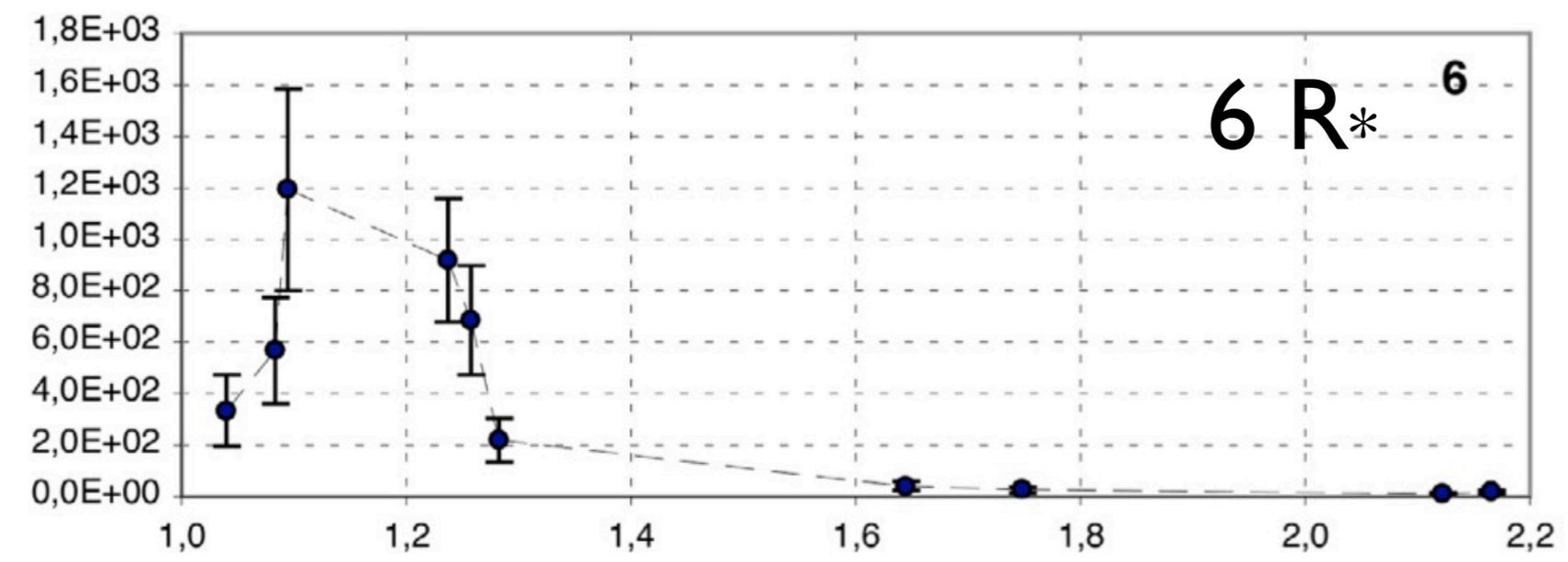
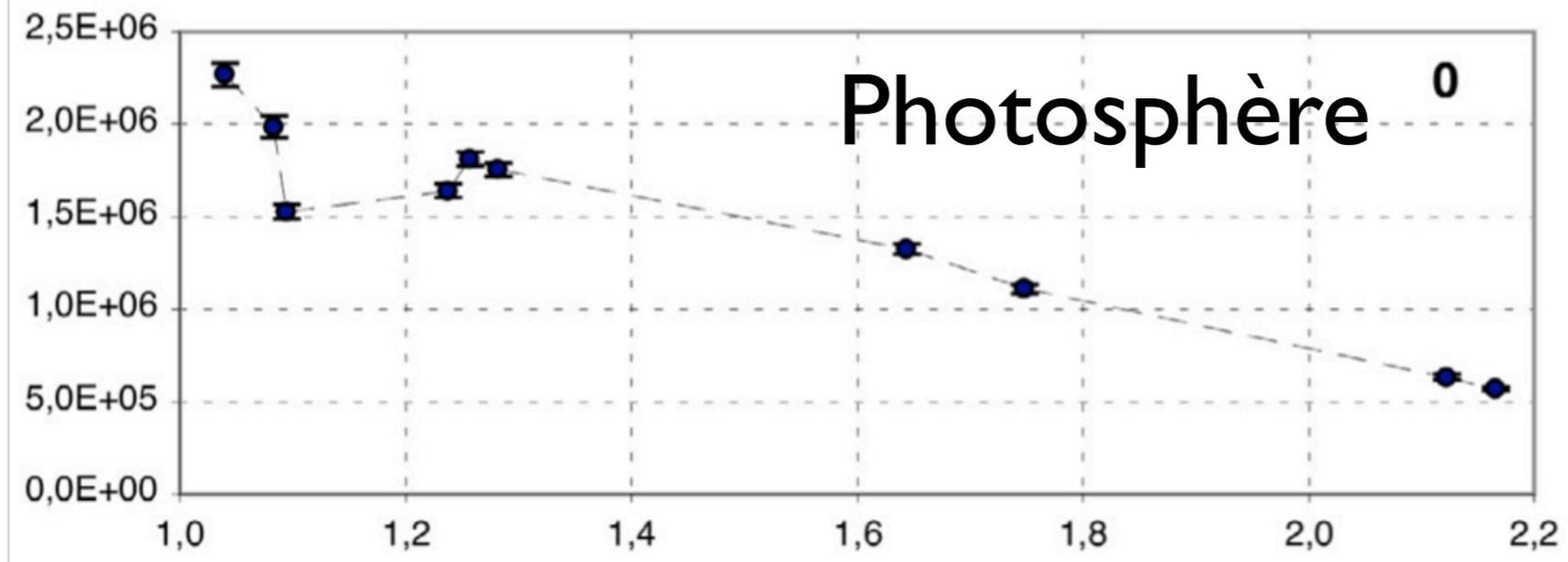
100 mas

E  
N

Kervella et al. 2009, A&A, 504, 115

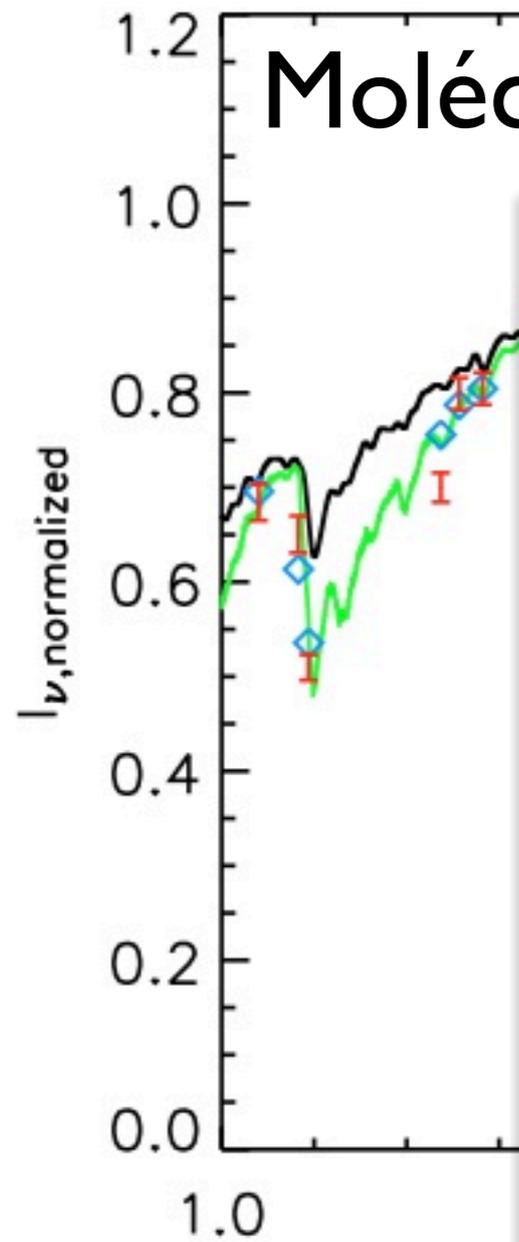






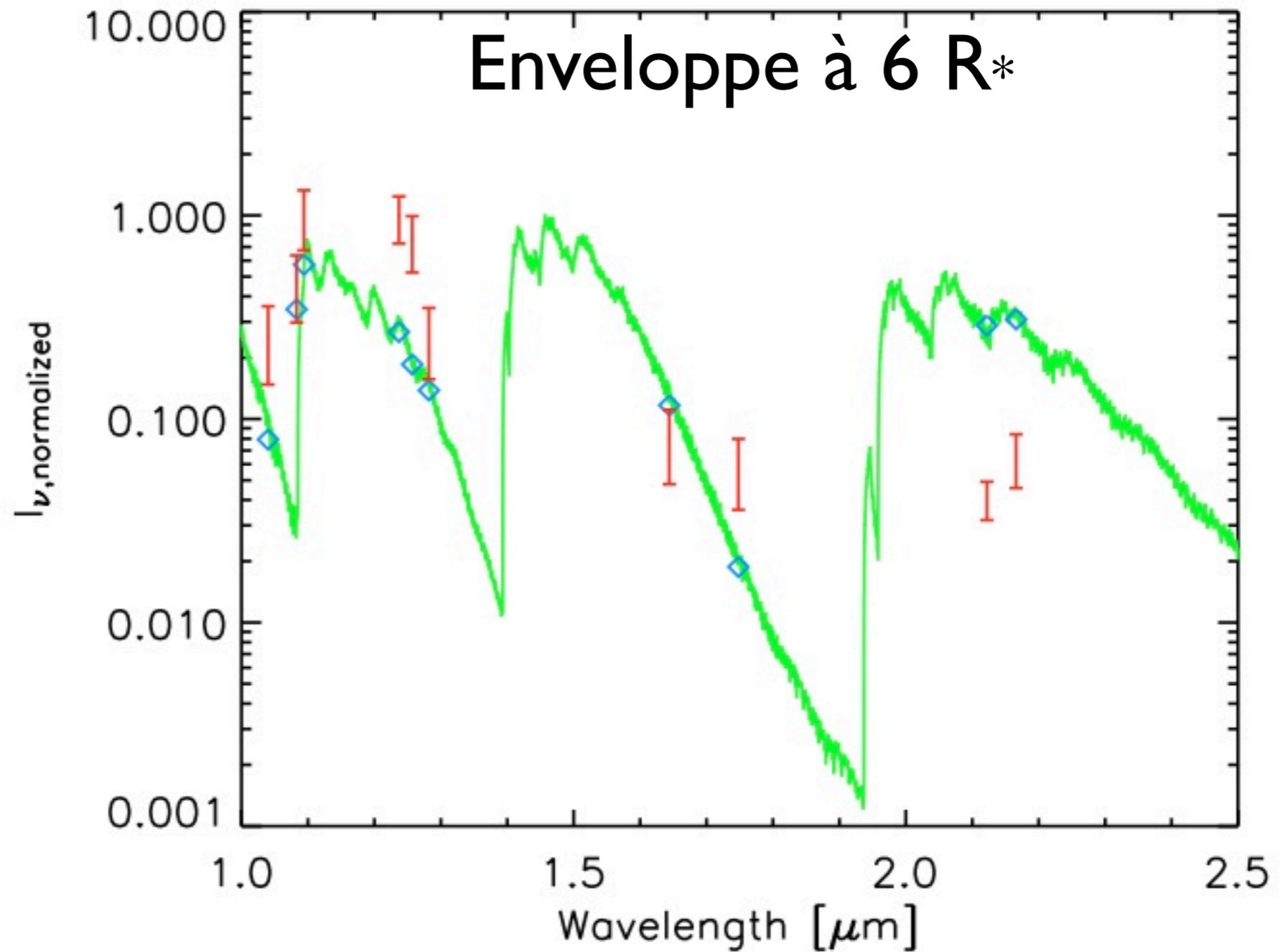
Radius: 0  $R_*$

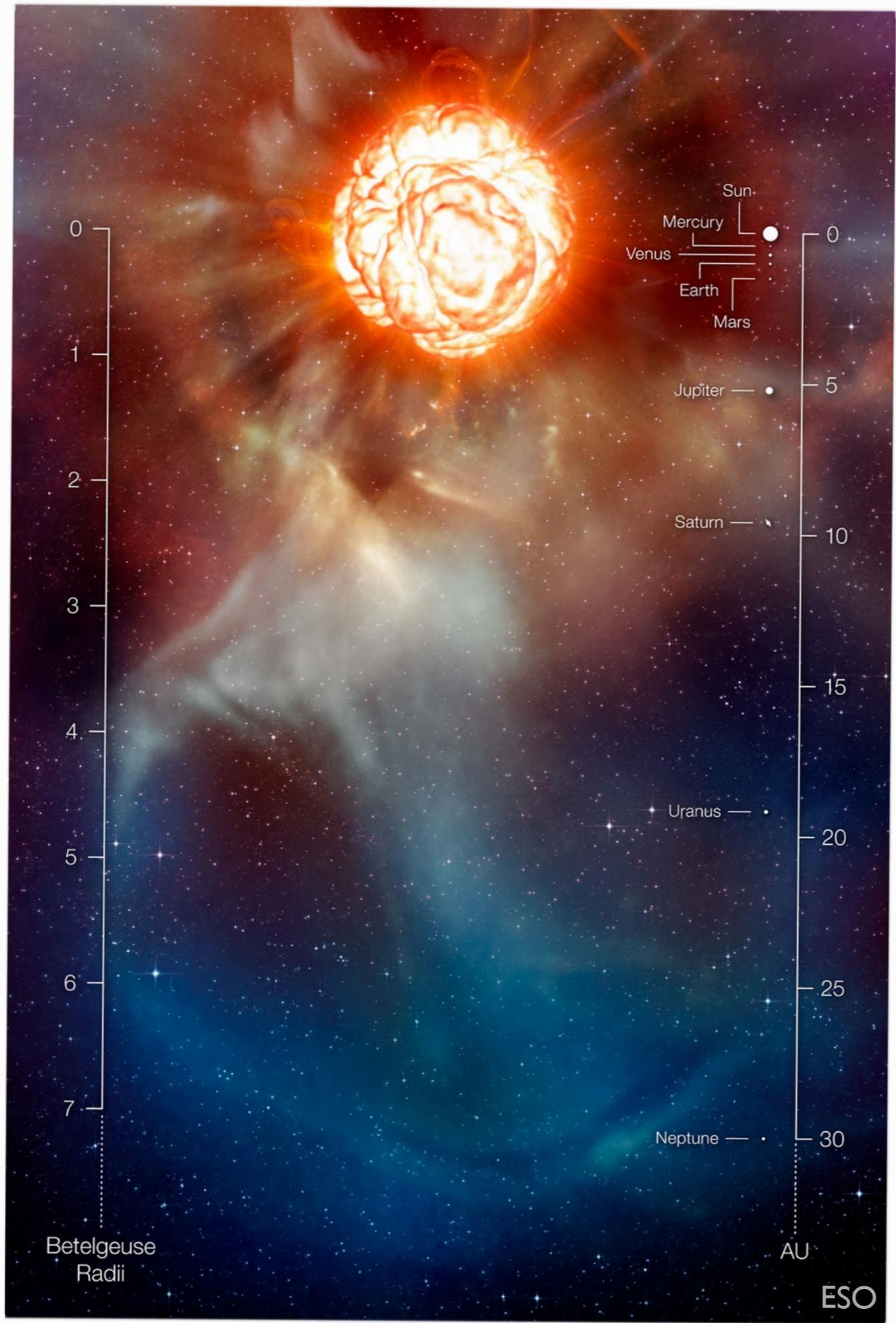
# Molécule CN devant l'étoile



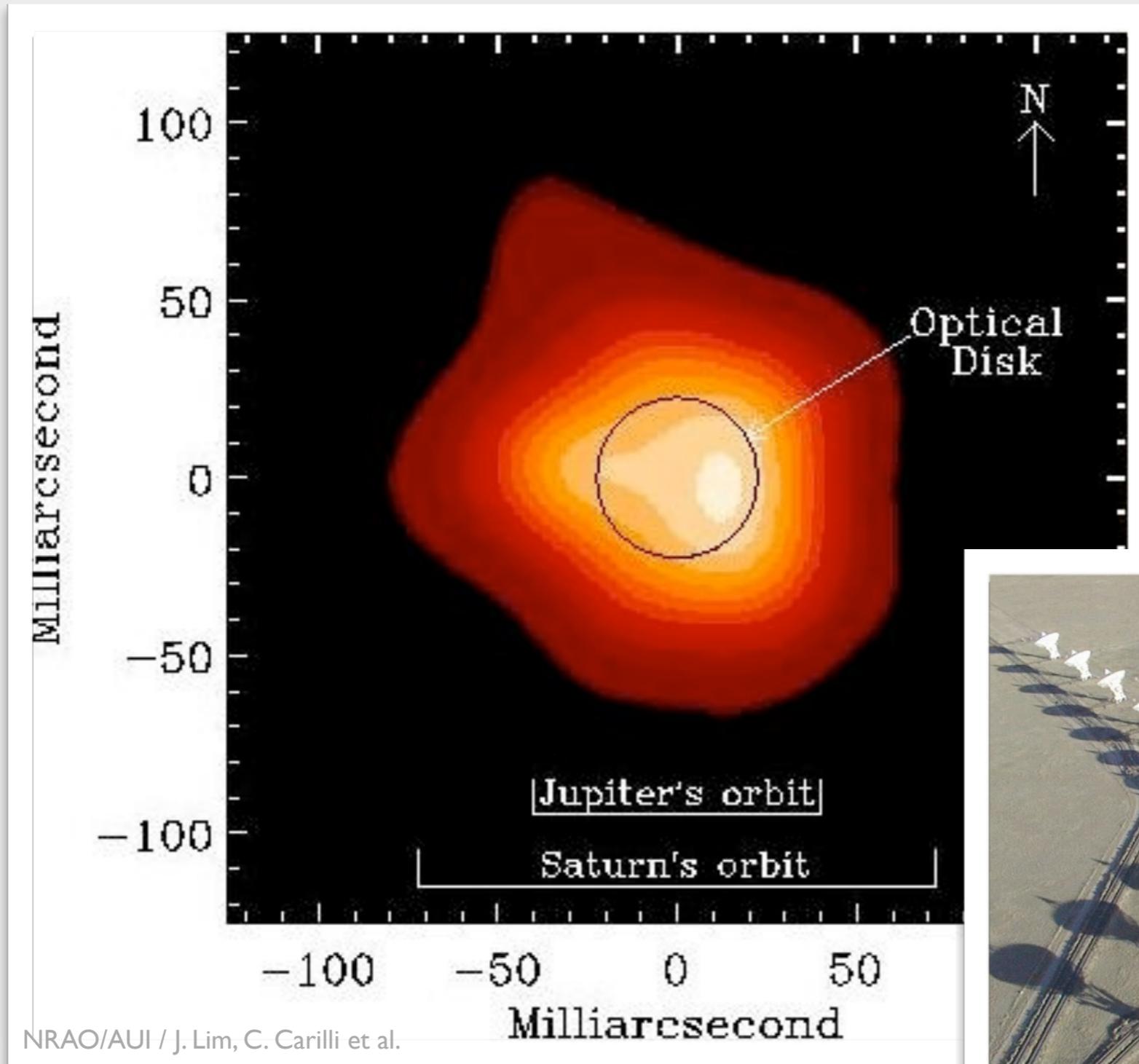
Radius: 6  $R_*$

# Enveloppe à 6 $R_*$

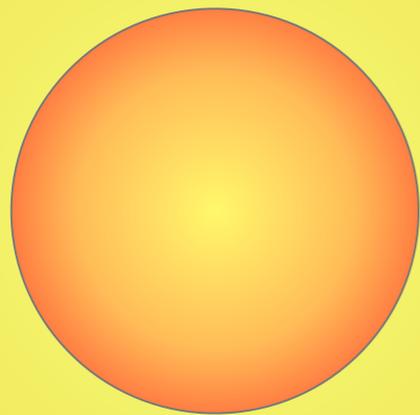




# Observations à $\lambda = 7\text{mm}$



Photosphère



Enveloppe  
interne  
1-10  $R_*$

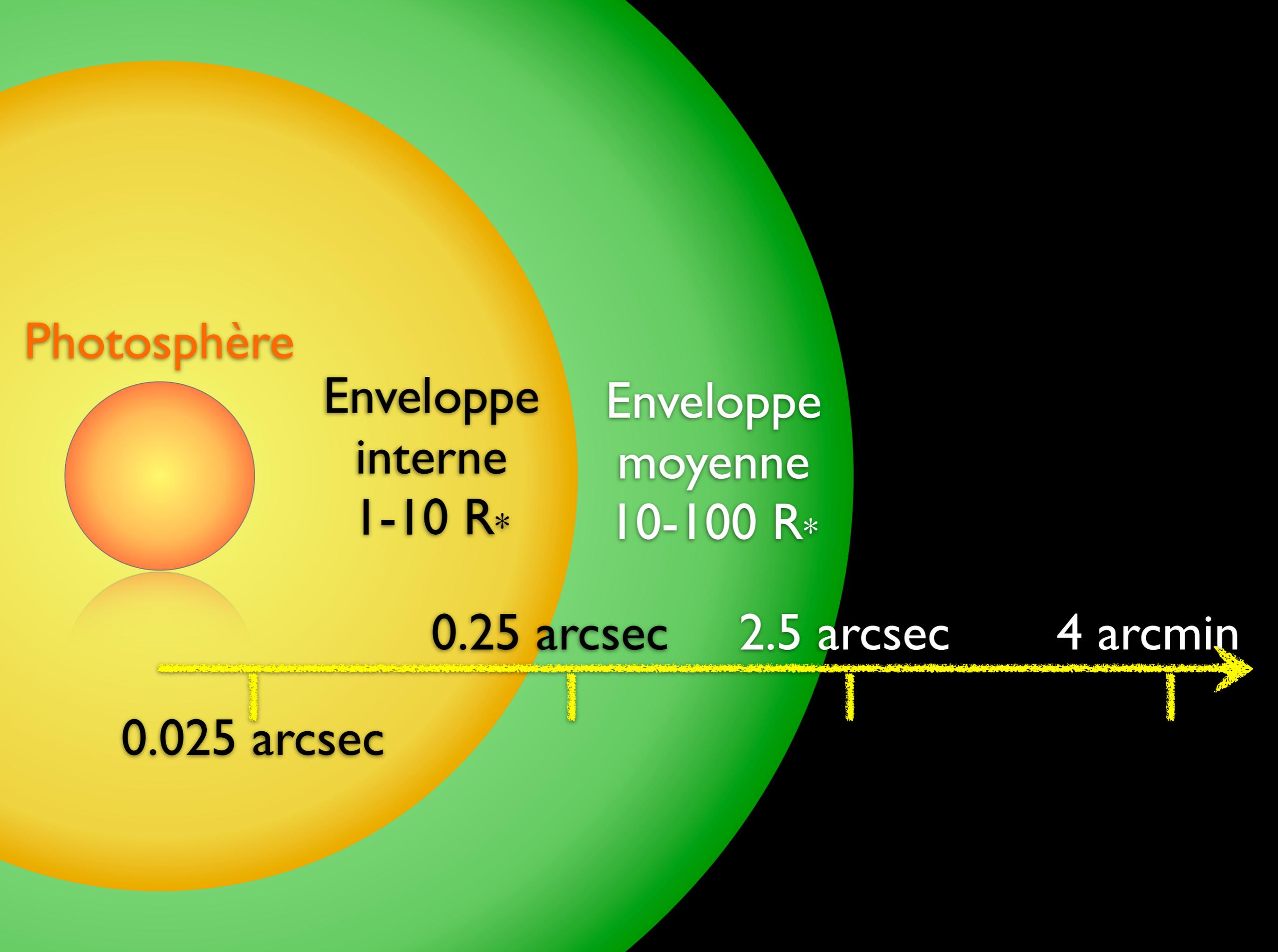
Enveloppe  
moyenne  
10-100  $R_*$

0.25 arcsec

2.5 arcsec

4 arcmin

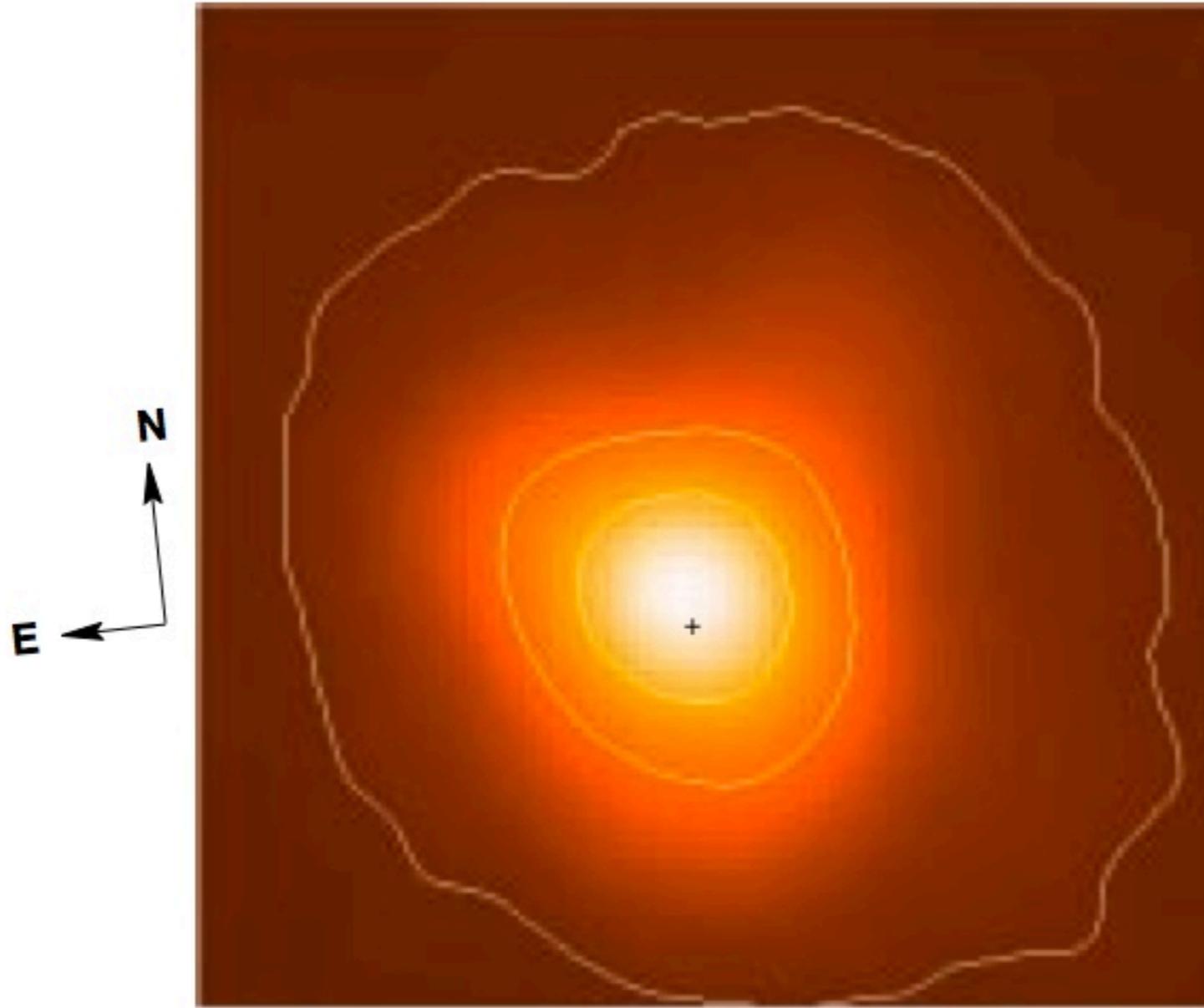
0.025 arcsec



# L'enveloppe intermédiaire

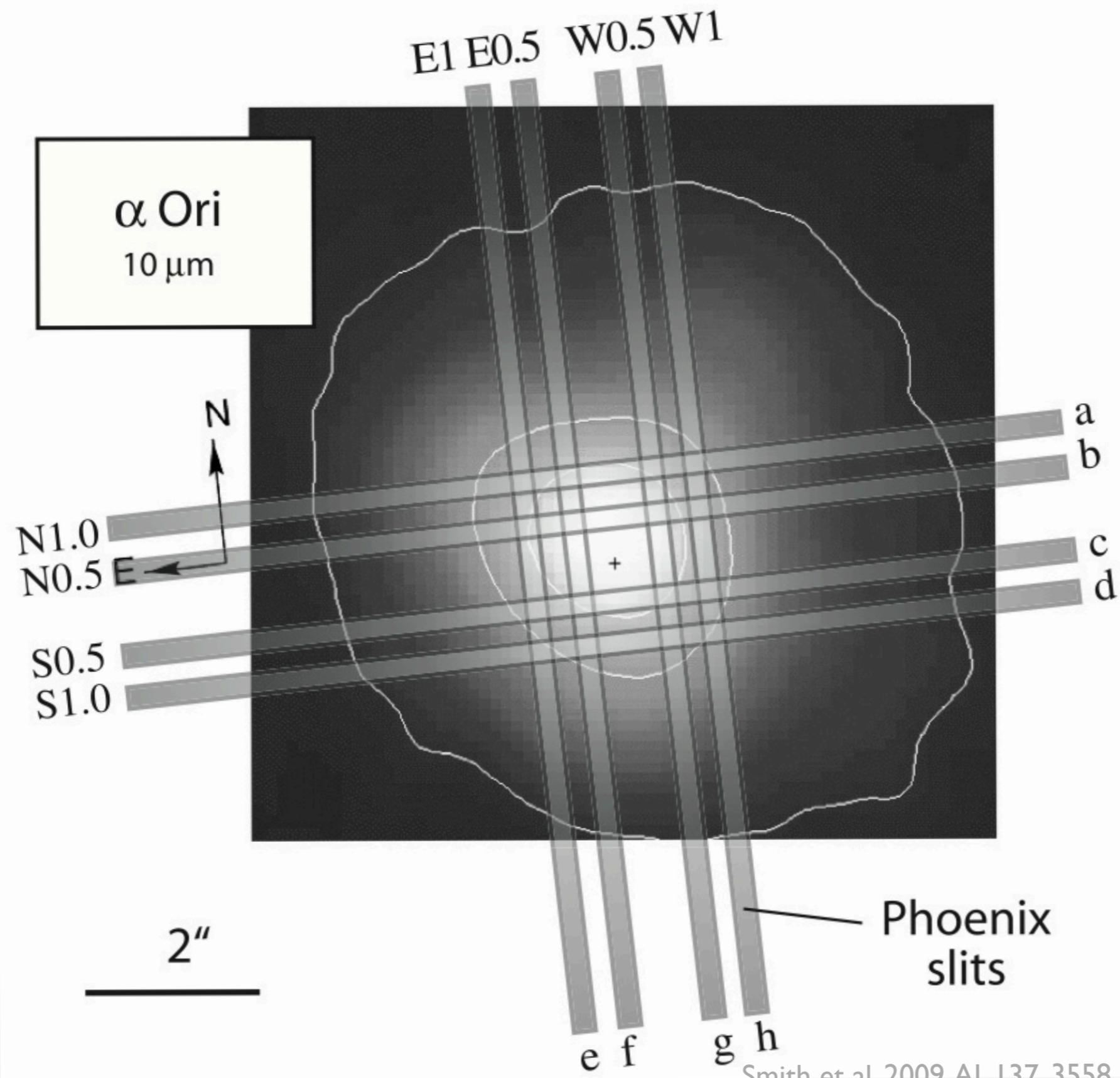
- 10-100 rayons stellaires
- Présence de molécules («MOLsphere»)
- Zone de formation de la poussière

# $\alpha$ Orionis

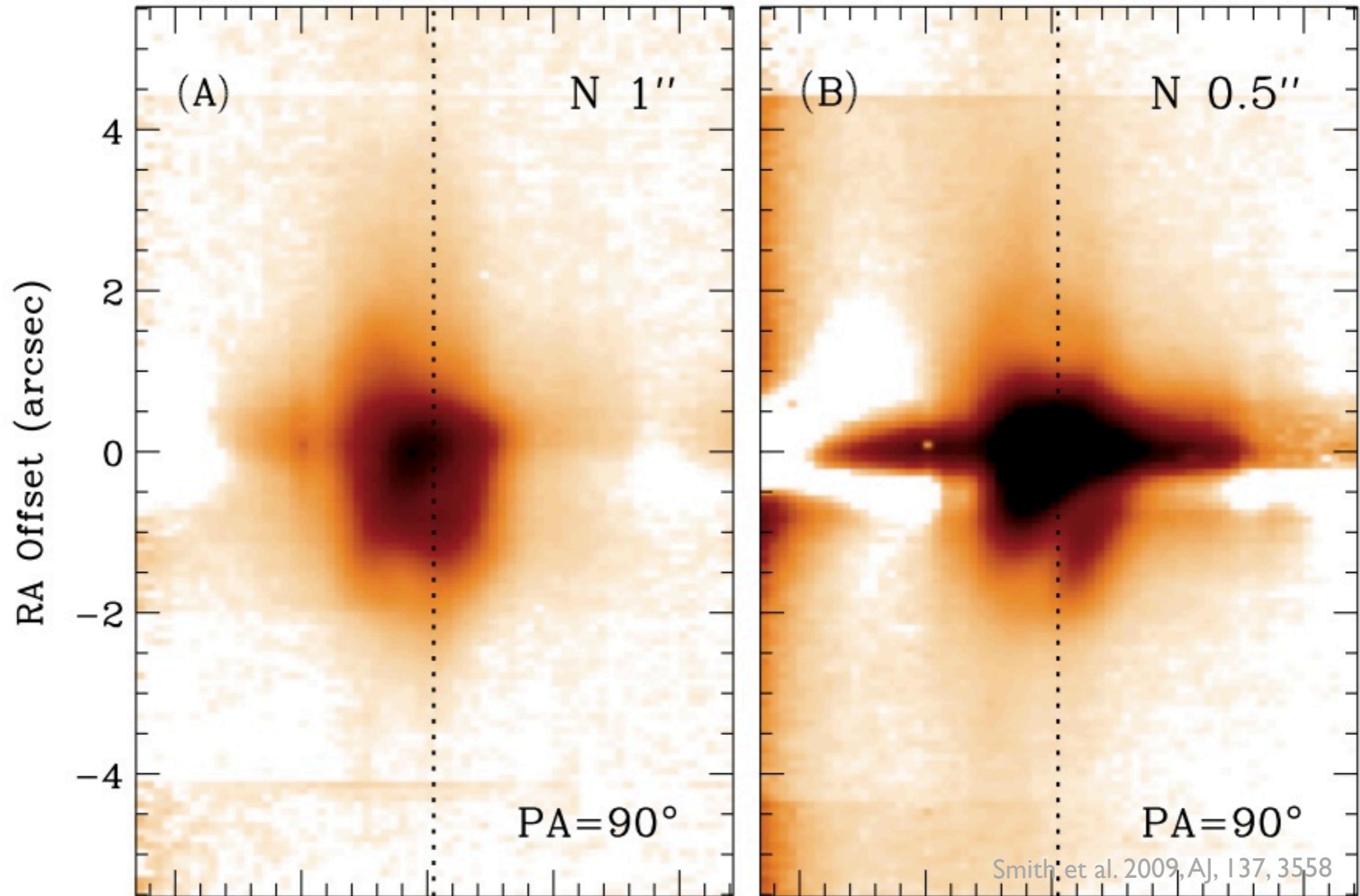


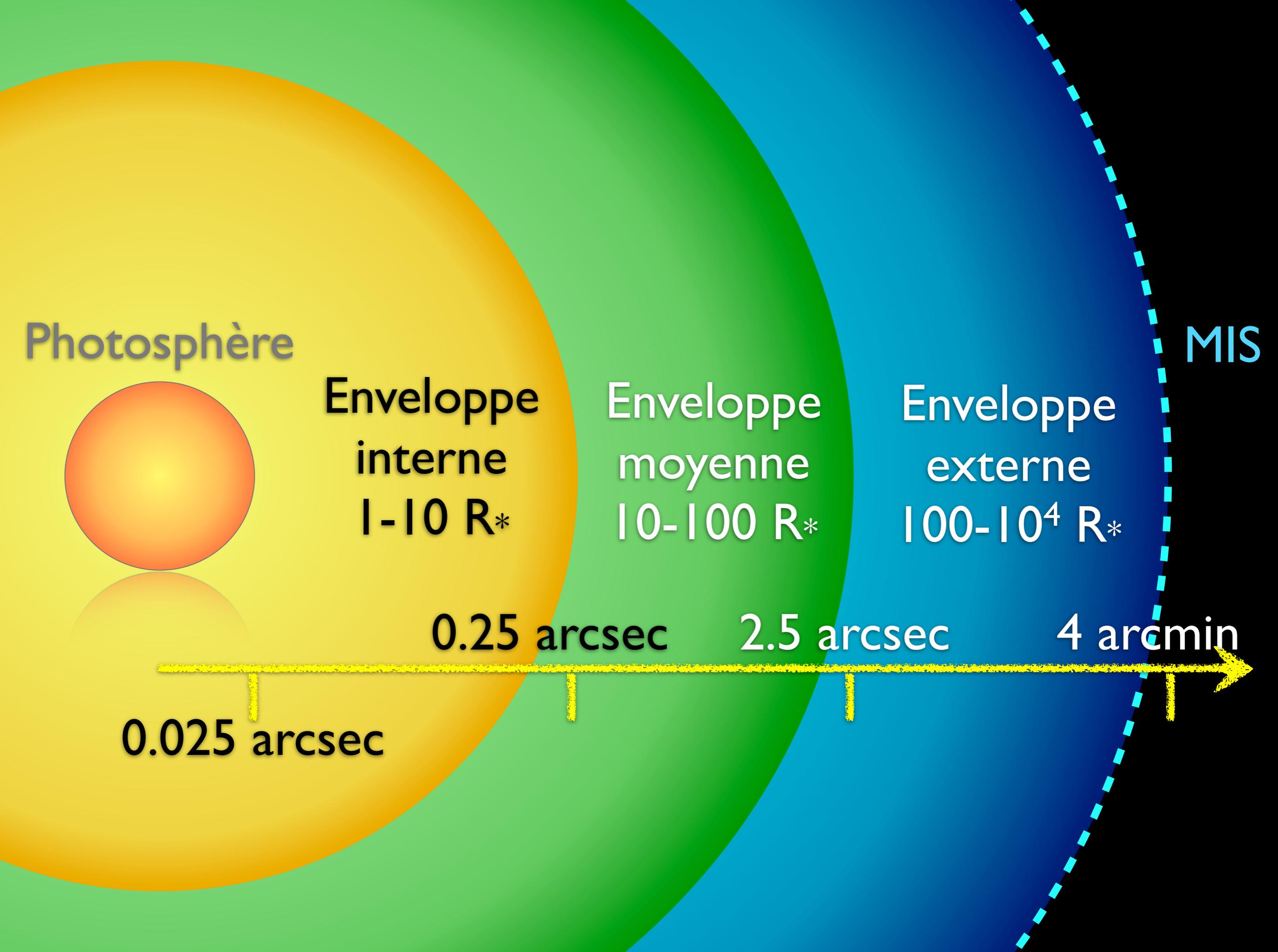
Observations à  $\lambda = 10\mu\text{m}$

Hinz et al. 1998, Nature, 395, 251

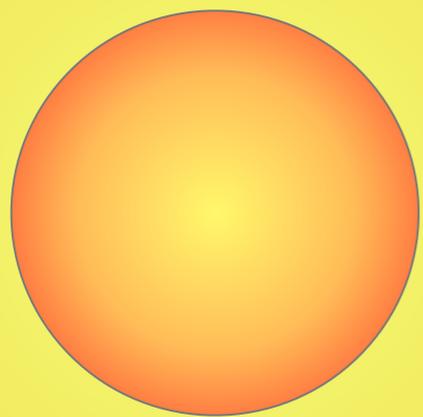


Raie de CO à 4.6  $\mu\text{m}$





Photosphère



Enveloppe  
interne  
1-10  $R_*$

Enveloppe  
moyenne  
10-100  $R_*$

Enveloppe  
externe  
100-10<sup>4</sup>  $R_*$

MIS

0.25 arcsec

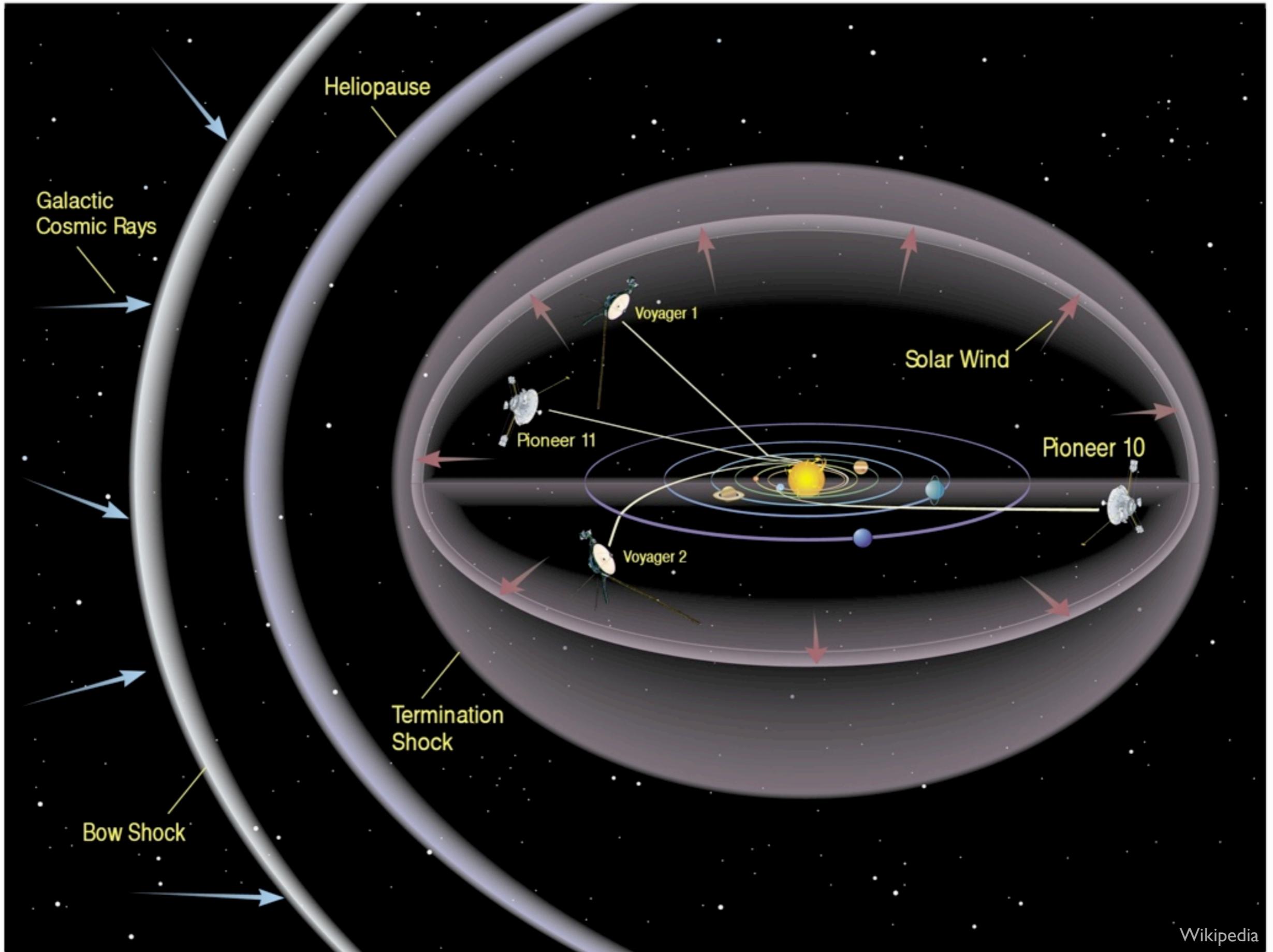
2.5 arcsec

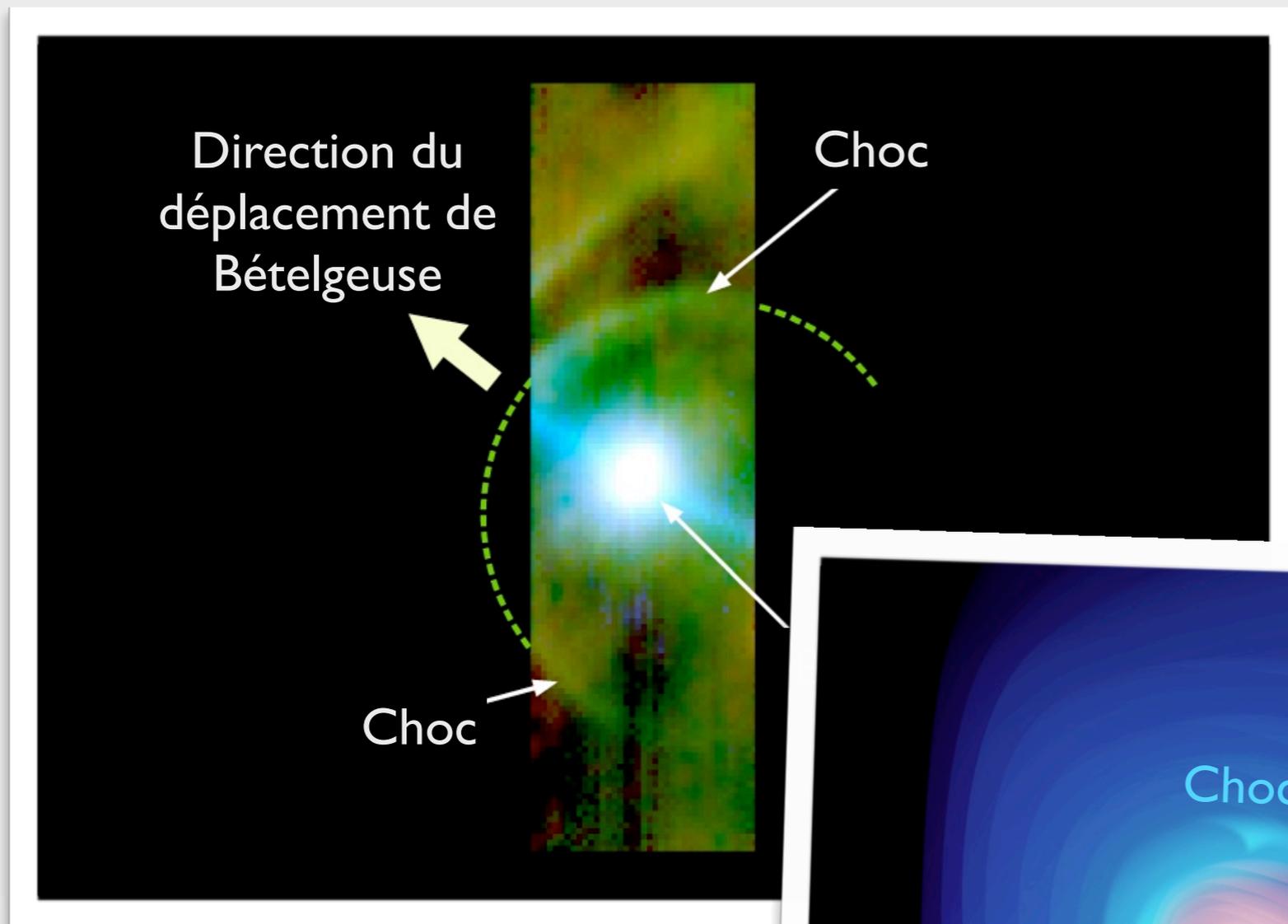
4 arcmin

0.025 arcsec

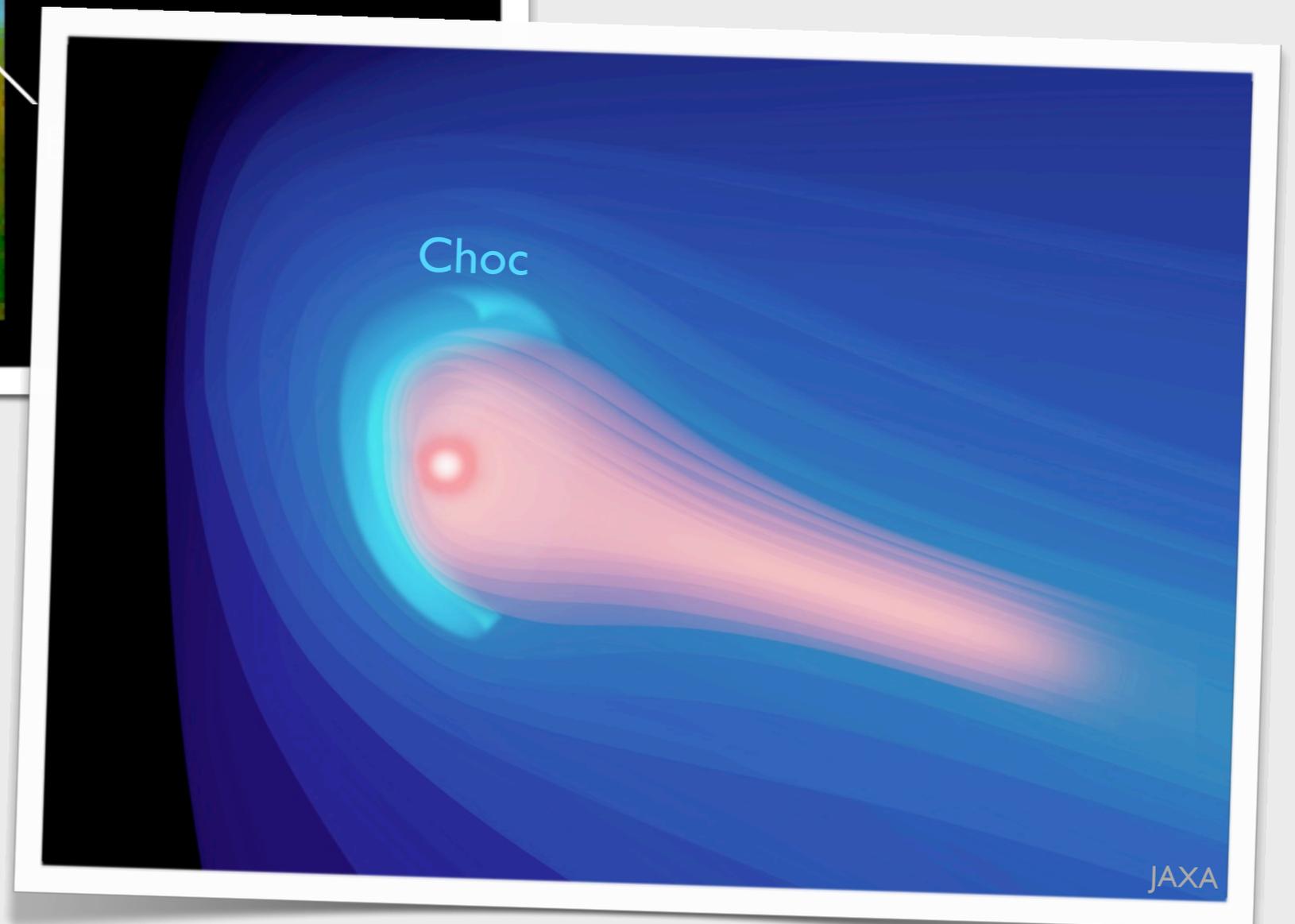
# L'enveloppe externe

- Le milieu circumstellaire (interplanétaire pour le Soleil) désigne le volume d'espace soumis au vent de l'étoile
- Le vent solaire ralentit à une vitesse subsonique à partir de 90-100 unités astronomiques
- Au-delà de cette limite (le *choc terminal*) le MIS interagit avec le vent solaire





# Choc terminal de Bételgeuse



# Conclusion

- De nombreux programmes d'observation sont en cours
- Bételgeuse sera un objectif important pour les futurs très grands télescopes (attention à la saturation...)
- Si elle explose en supernova, le spectacle sera grandiose !

