

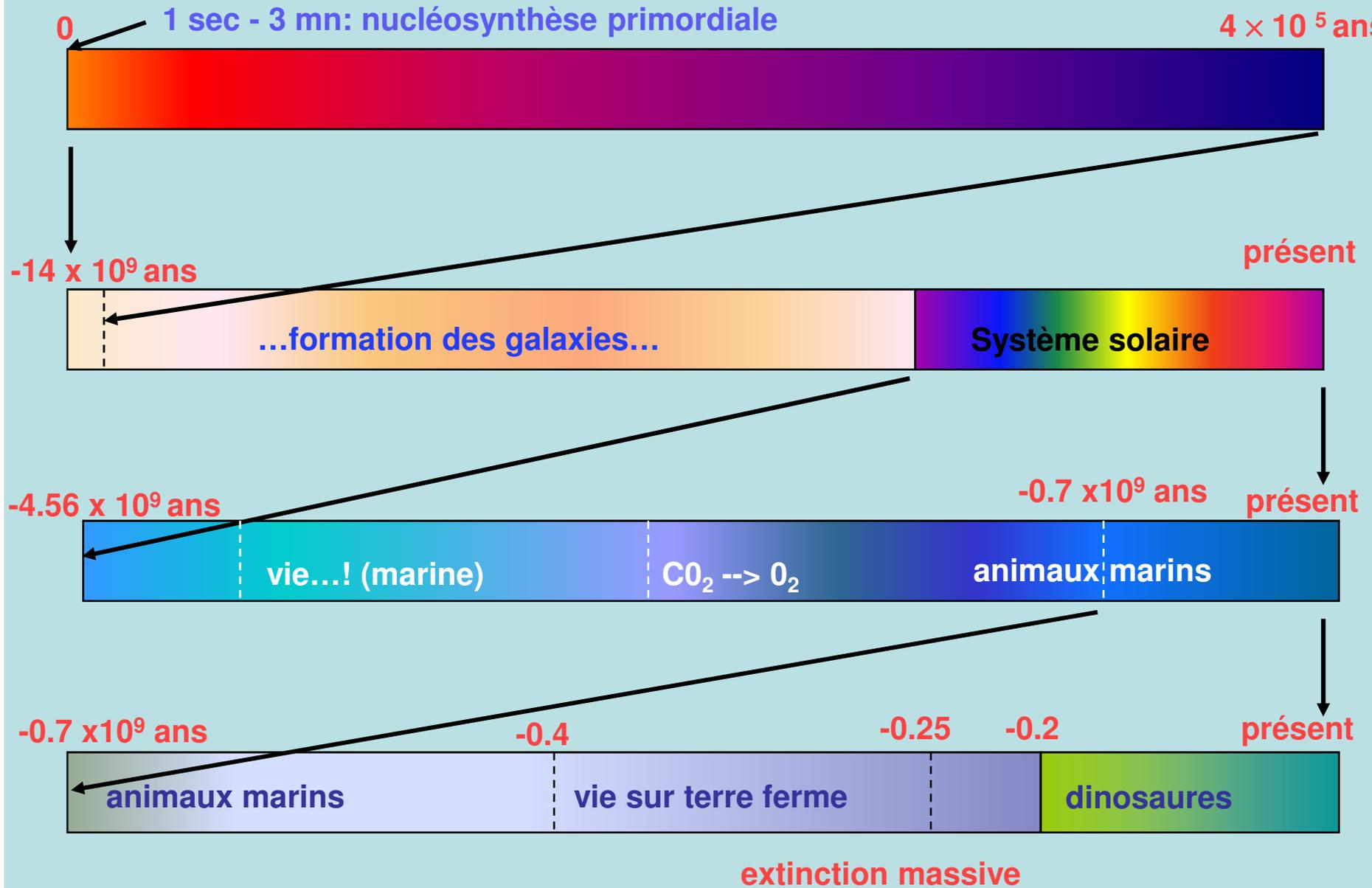
# Ordres de grandeurs en astrophysique

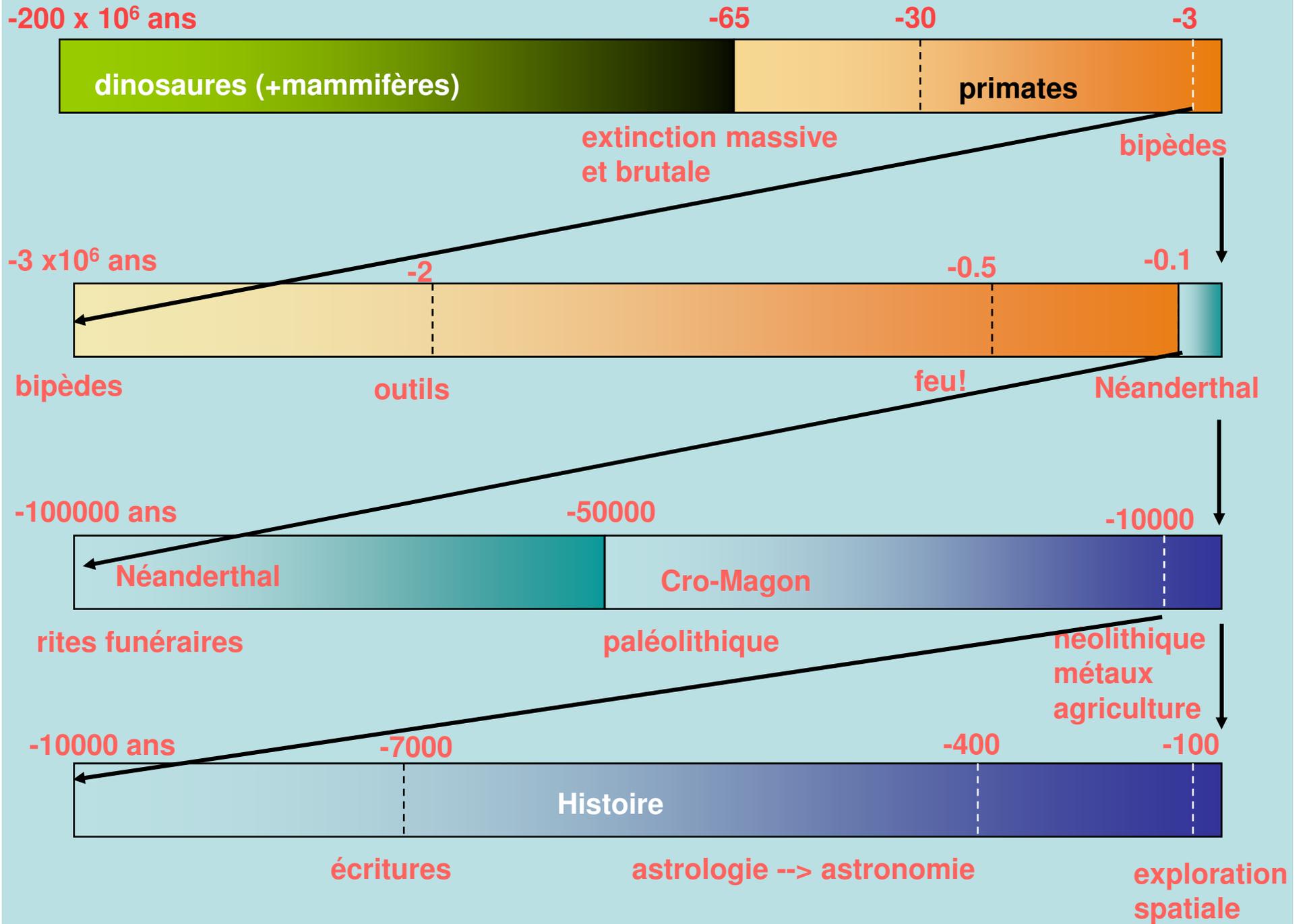
LP210 – 2009

B. Sicardy – B. Semelin

# Echelles de temps

Univers transparent





# Méthode de datation: le carbone 14

Le  $^{14}\text{C}$  (1 % du carbone dans l'atmosphère) est un isotope radioactif du  $^{12}\text{C}$ :

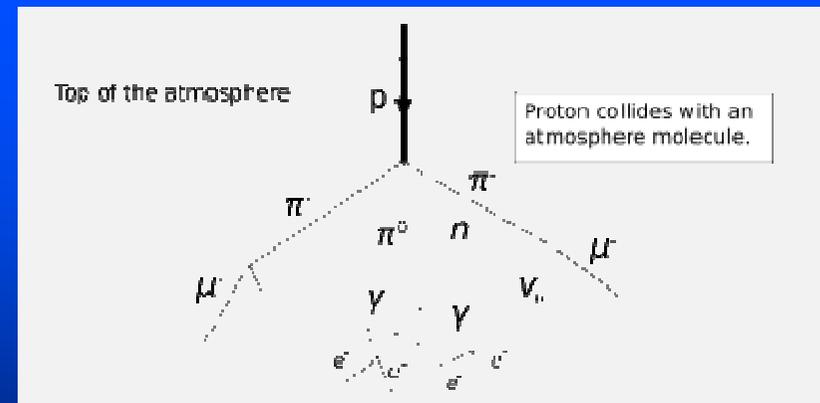
Demie vie:  $\tau = 5730 \pm 40$  ans

Désintégrations:  $13.5 \text{ min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$

Il faut en produire autant pour maintenir la concentration moyenne.

Source du  $^{14}\text{C}$  atmosphérique: rayons cosmiques

Des protons relativistes bombardent l'atmosphère



Organisme vivant: concentration en  $^{14}\text{C}$  égale à l'atmosphère (respiration, photosynthèse)

Organisme mort: plus d'échange avec l'atmosphère  
baisse de concentration suivant la demie-vie du  $^{14}\text{C}$

## Autres méthodes de datation

### Méthode potassium/argon: datation des roches

- Lors de sa formation une roche ne contient pas d'argon (dégazée)
- Réaction:  $^{40}\text{K} + e^- \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \gamma$ .
- Demie-vie de  $^{40}\text{K}$ :  $\tau = 1.25 \cdot 10^9$  ans
- Le taux d'Ar piégé dans la roche augmente avec le temps.

### Méthode Uranium/Thorium:

- Datation coraux, stalagmites, coquillages, squelettes
- $^{234}\text{U} \rightarrow ^{230}\text{Th}$ : demie-vie  $\tau \sim 80\,000$  ans
- L'Uranium est soluble dans l'eau de mer, le Thorium sédimente.
  - ⇒ Pas de Th dans les coraux vivants
  - ⇒ Th apparait dans les coraux morts.

# Quelques temps caractéristiques en astrophysique I

Mort thermodynamique de l'univers:

- Fin de la formation stellaire:  $10^{14}$  ans
- Galaxies  $\rightarrow$  trou noir super-massifs :  $10^{16}$  -  $10^{17}$  ans
- Désintégration des protons :  $10^{36}$  –  $10^{38}$  ans (hors TN)
- Evaporation des trous noirs :  $10^{100}$  ans

Scénario scientifiquement incertain!

# Quelques temps caractéristiques en astrophysique II

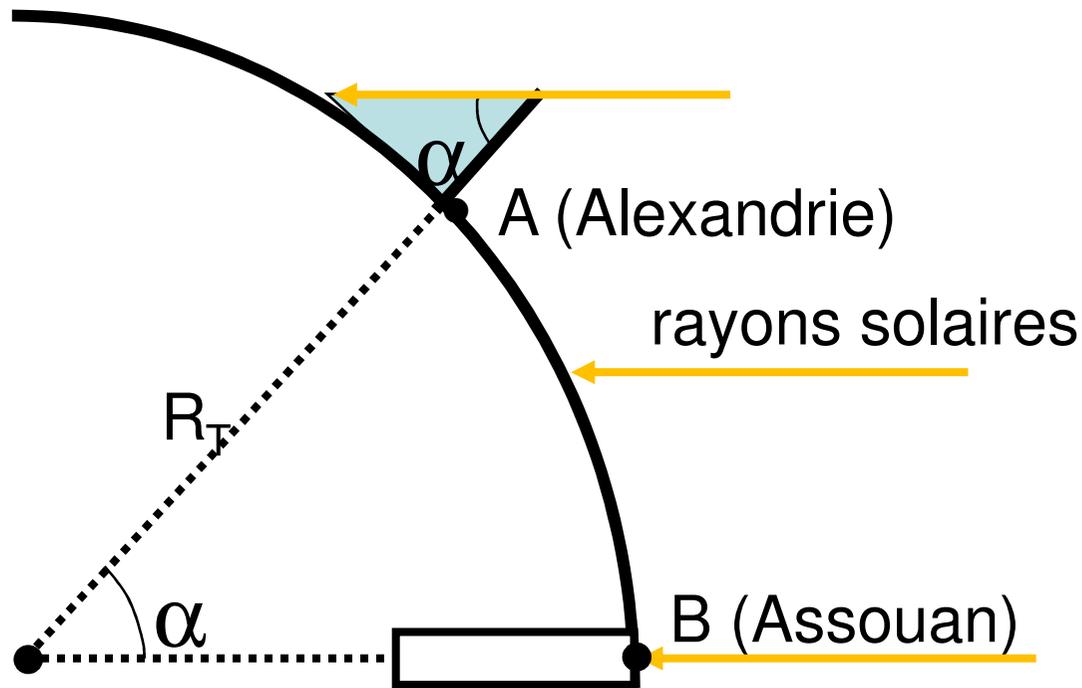
- ✓ Age estimé de l'Univers:  $13.7 \pm 0.2$  milliards d'années
- ✓ Inflation:  $10^{-30}$  sec après le BB, l'Univers se dilate d'un facteur  $10^{22}$
- ✓ 379 000 ans après le BB: recombinaison, l'Univers devient transparent
- ✓ Rotation d'une galaxie:  $\sim 10^8$  ans
- ✓ Vie d'une étoile:  $10^7$  à  $10^{10}$  ans
- ✓ Formation d'une étoile:  $10^4$  à  $10^6$  ans
- ✓ Pic de luminosité d'une supernovae: qq mois
- ✓ Sursauts Gamma:  $10^{-3}$  sec à qq minutes
- ✓ Effondrement gravitationnel d'une naine blanche: 1 sec
- ✓ Rotation des pulsars:  $10^{-3}$  à 10 sec



# Les mesures de distance:

## Rayon de la Terre

Erathosthène : (~ -275)

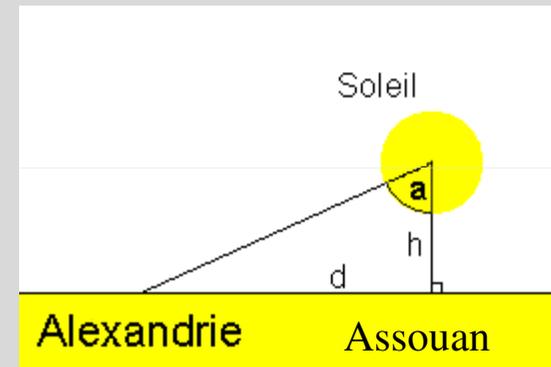


$$AB = \alpha \times R_T \longrightarrow$$

AB ~ 5000 stades (1 stade égyptien ≈ 158 m)  
 $R_T$  ~ 40000 stades  
~ 6500 km!

L'erreur d'Anaxagore : - 430

La terre est plate!

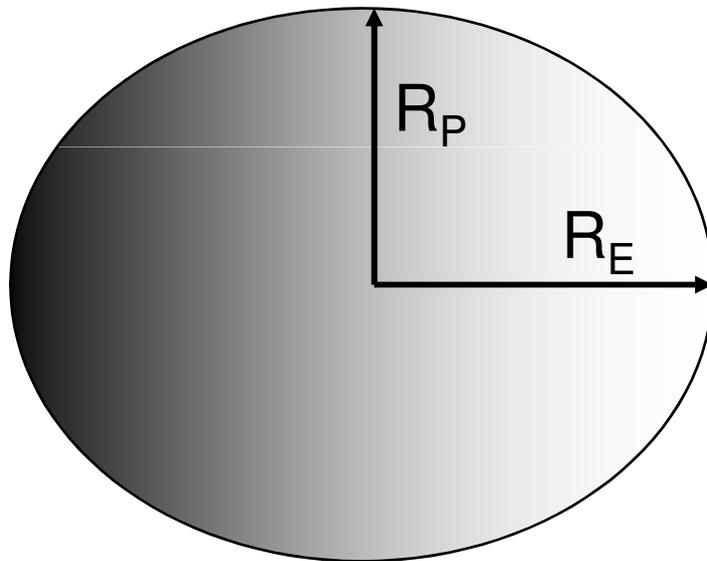


$h \sim 6500$  km

# Aplatissement de la Terre

XVIII ème siècle: même méthode, mais plus précise

Expéditions en France, Laponie (Maupertuis) et au Pérou (La Condamine)



$$R_E = 6378 \text{ km}$$

$$R_P = R_E - 21 \text{ km}$$

Autre preuve:

Un pendule de période 1 sec mesure 3.5 mm de plus à Cayenne qu'à Paris (Richer, 1671)

## Petit historique de la définition du mètre:

1675: longueur du pendule de demi-période 1 sec (0.9937 m)

1790: 1/10 000 000 ème partie de la distance pôle-équateur.

Donc par définition: circonférence de la Terre (le long d'un méridien) = 40000 km, et donc  $R_T = 40000/2\pi = 6366$  km

En fait (aplatissement), le rayon équatorial vaut 6378 km

1960: 1 650 765,73 $\lambda$  d'une radiation de l'isotope 86 du krypton

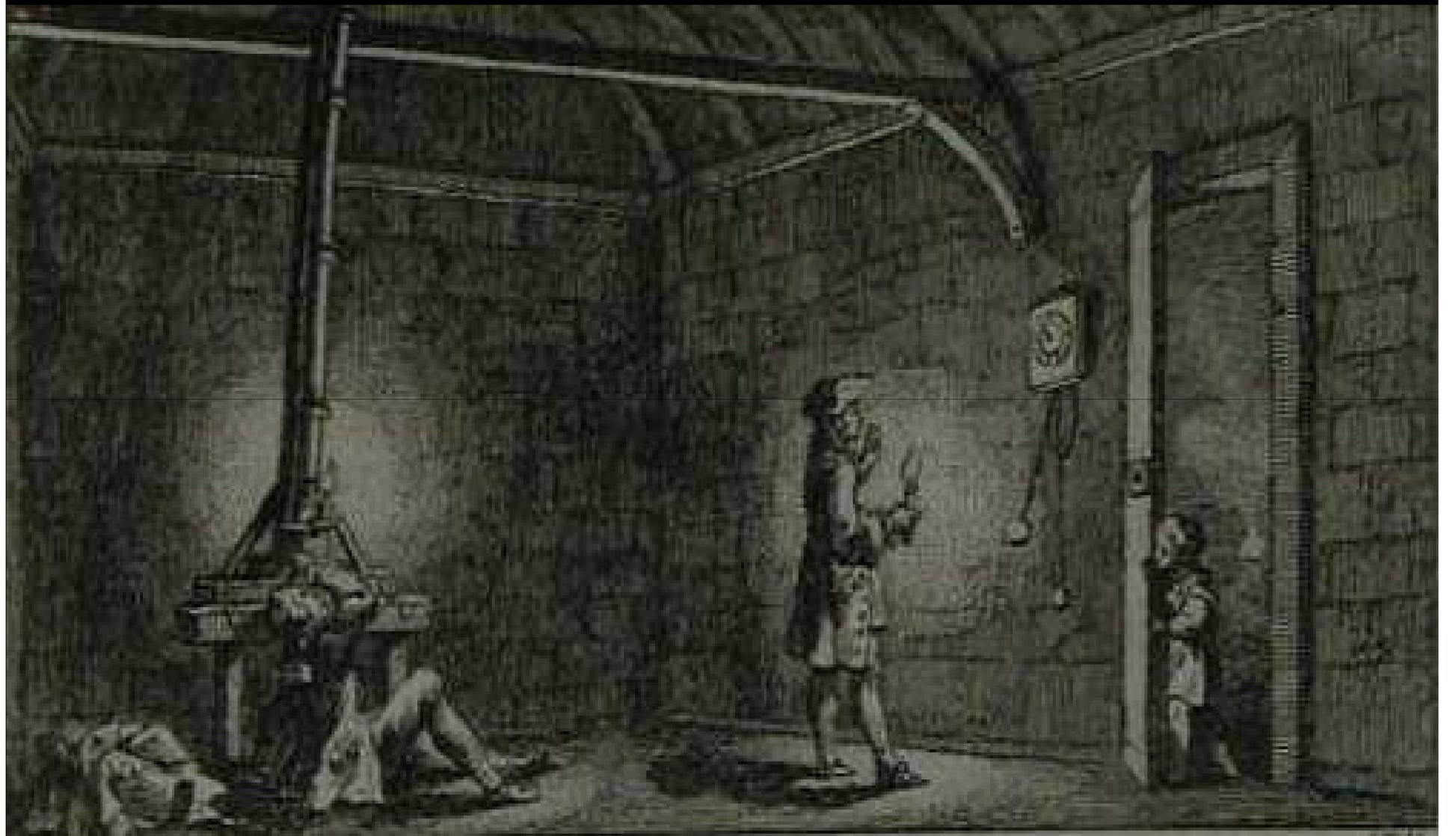
Rendu nécessaire par l'utilisation du laser pour mesurer les distances

1983: 1 mètre = distance parcourue par la lumière dans le vide pendant 1/299 792 458 seconde.

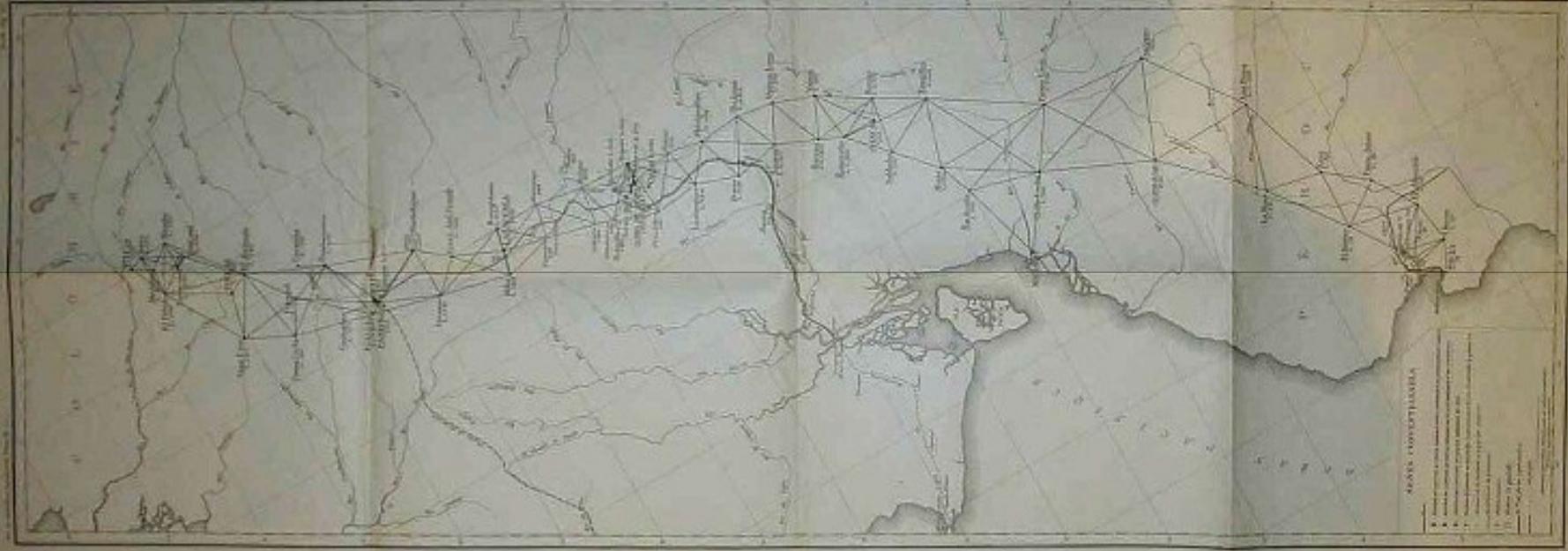
Donc on a par définition:  $c = 299\,792\,458\text{ m sec}^{-1}$

Seule la définition de la seconde peut encore évoluer...





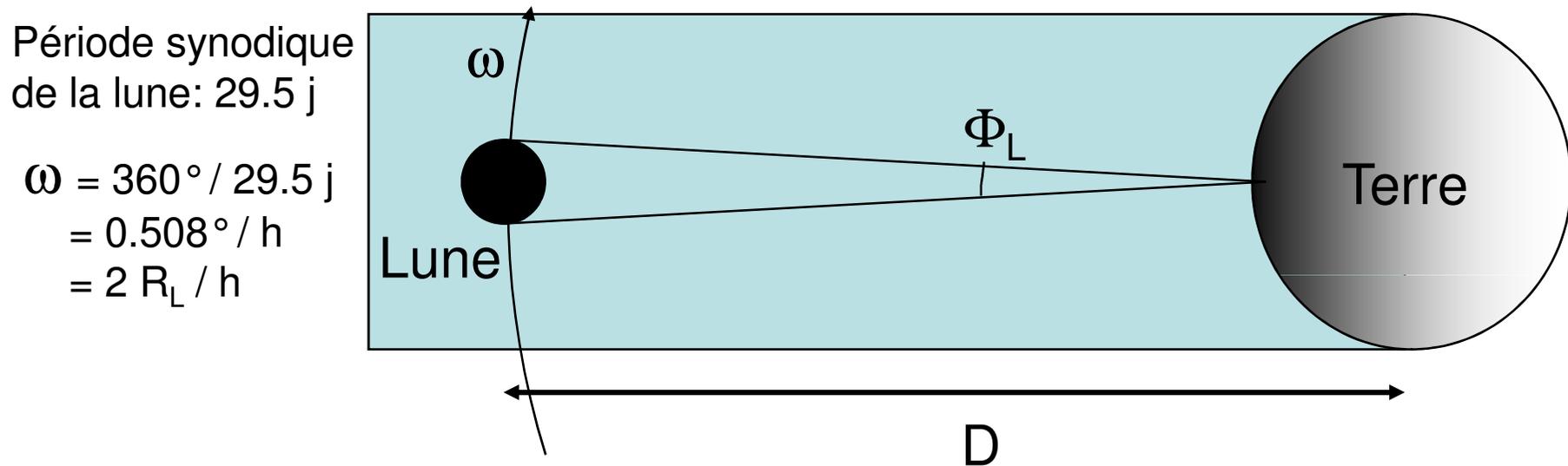
ARC DE MÉRIDIEN ÉQUATORIAL.



# Distance Terre-Lune:

Aristarque de Samos ( ~ - 300)

Observation des éclipses de Lune: Ombre de la Terre sur la Lune



✓ La lune met 3 heures pour traverser l'ombre (éclipse centrale)

$$\Rightarrow R_L \sim R_T/3 \quad (\text{en fait } R_T/3.7)$$

✓ Diamètre angulaire lunaire:  $\Phi_L \sim 2R_L/D \sim 1/2$  degrés

➔  $D \sim 2R_T/3\Phi_L \sim 75 R_T$  (en fait  $D \sim 60 R_T \sim 380000 \text{ km}$ )

Hipparque (- 150): Prise en compte du cône ombre/pénombre



ombre de la Terre

Lunar Eclipse June 4/5 1993 (<http://www.assa.org.au>)

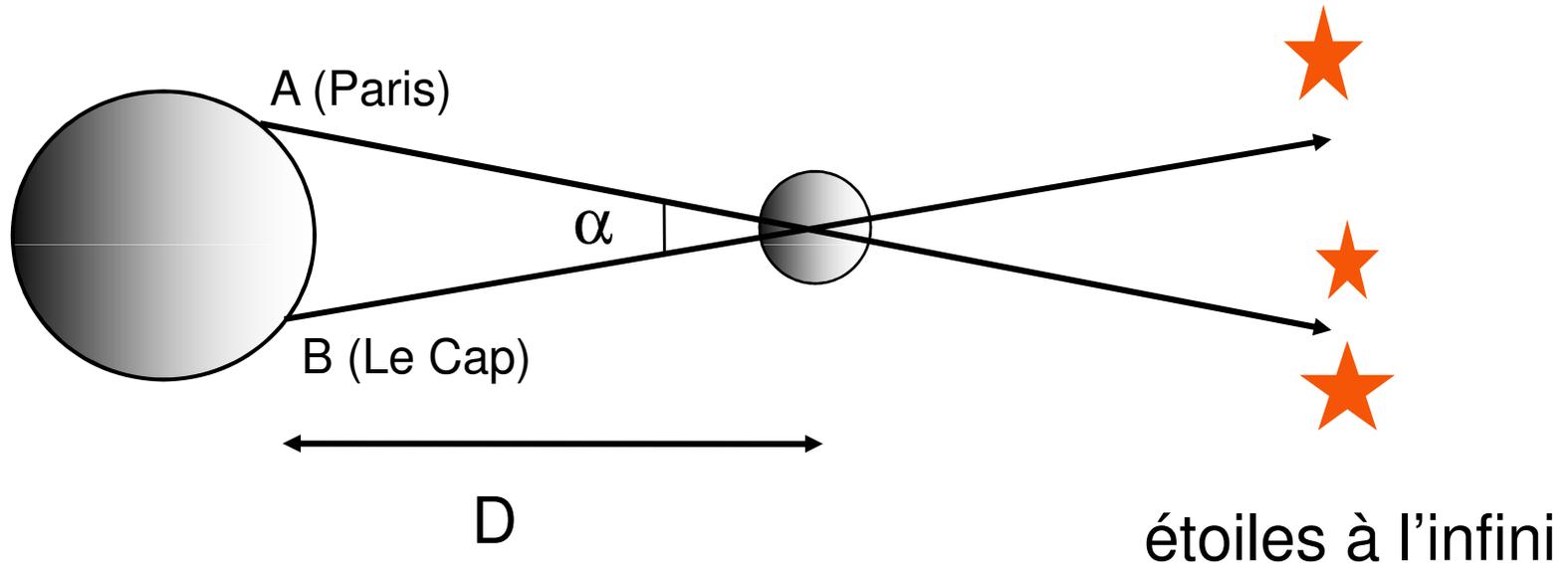
Copyright © 1999 Arthur Beales

photo Arthur Beales, <http://www.assa.org.au/gallery/beales/>

## Distance Terre-Lune:

1751: De Lalande (21 ans !) et Lacaille.

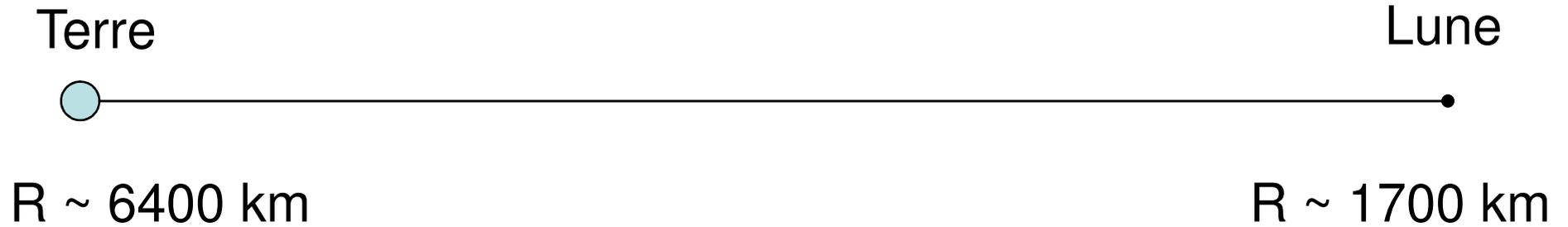
Utilisation de la parallaxe *diurne* (ou terrestre)



$$D = AB/\alpha$$

Remarque: D varie entre 356 000 et 406 000 km suivant la position sur l'orbite

## distance Terre-Lune



distance moyenne Terre-Lune  
~ 380 000 km (~ 60 rayons terrestres)  
~ 1.3 seconde-lumière

## Unité d'angle: la seconde d'arc

### Rappel:

$$\pi \text{ radian} = 180^\circ \text{ (degré)}$$

$$1^\circ = 60' \text{ (arcmin)}$$

$$1' = 60'' \text{ (arcsec)}$$

$$\text{donc: } 1^\circ = 3600''$$

$$\text{et: } 1'' = \pi / (180 \times 3600) \sim 5 \times 10^{-6} \text{ rad}$$

## Quelques ordres de grandeur:

- Diamètre angulaire du Soleil ~ diamètre angulaire de la Lune  
~ 30 arcmin
- Limite de résolution de l'œil humain ~ 2 arcmin
- Diamètre angulaire de Vénus ~ 1 arcmin
- Etalement des images stellaires par turbulence atmosphérique  
~1 arcsec ( « seeing », dans le visible)
- Résolution des meilleurs interféromètres radio: ~  $10^{-3}$  arcsec

## Unité astronomique (UA)

Soleil



Terre



1 UA = distance moyenne Terre-Soleil  
~ 150 millions km ( $1.5 \times 10^{11}$  m)  
~ 8 minutes-lumière

UA: unité naturelle pour distances  
dans le système solaire

Demi grand-axe orbites:

Mercure: 0.4 UA

Vénus: 0.7 UA

Mars: 1.5 UA

Jupiter: 5.2 UA

...

Pluton: 40 UA (~ 5.5 heures lumière)

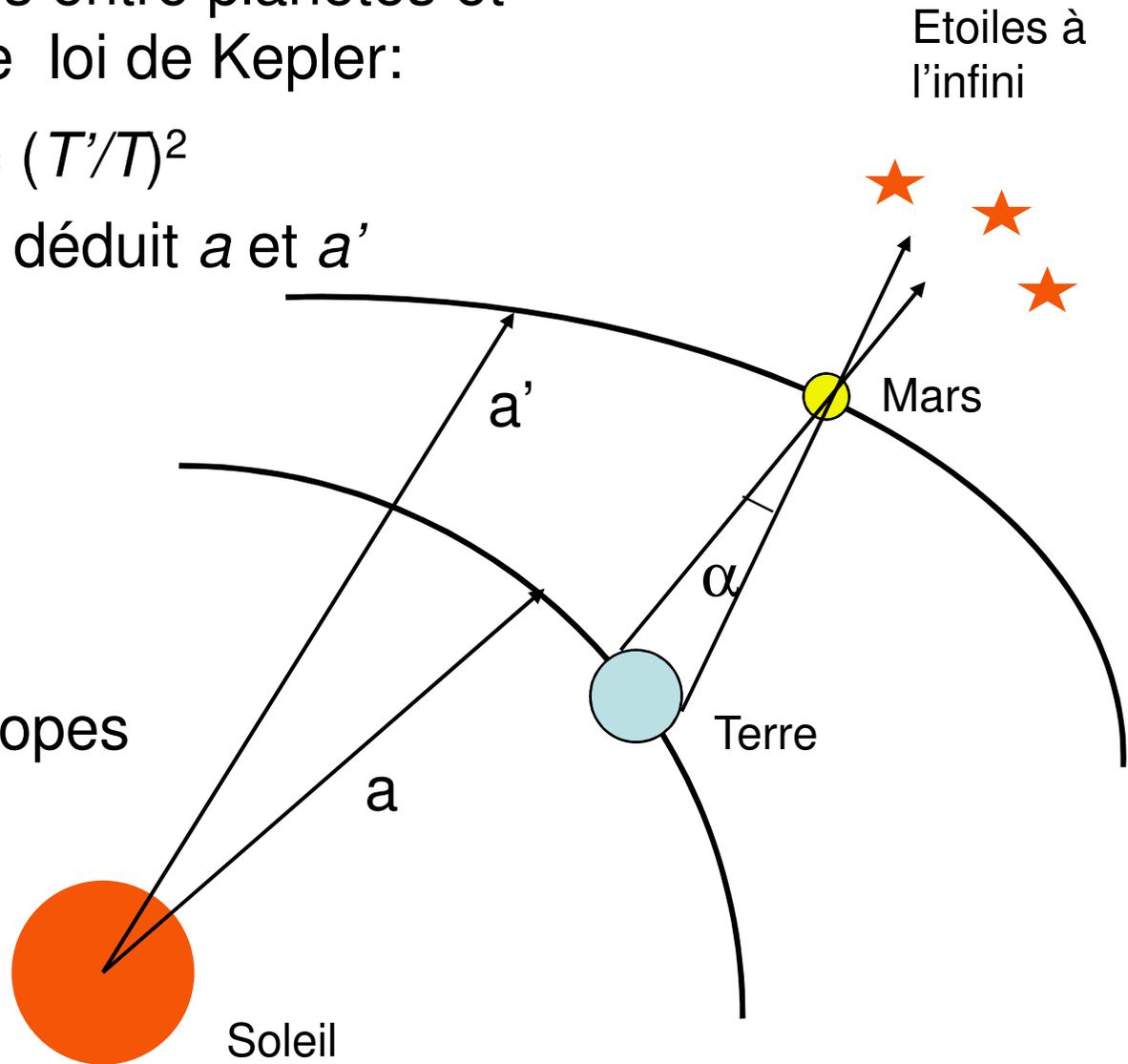
# Distance Terre-Soleil

Mesure des distances entre planètes et utilisation de la 3ème loi de Kepler:

$$(a'/a)^3 = (T'/T)^2$$

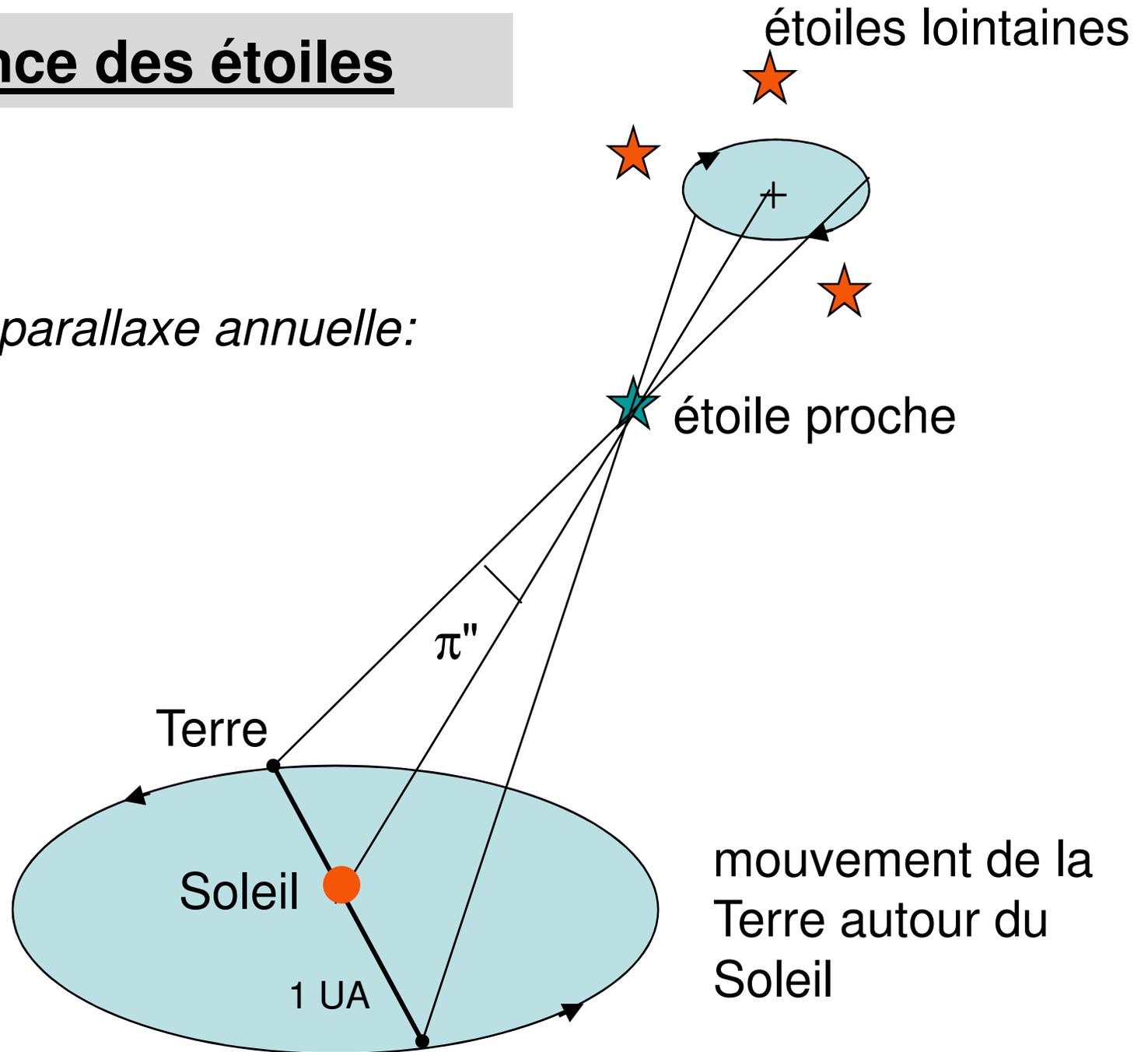
$\alpha$  donne  $a' - a \Rightarrow$  on déduit  $a$  et  $a'$

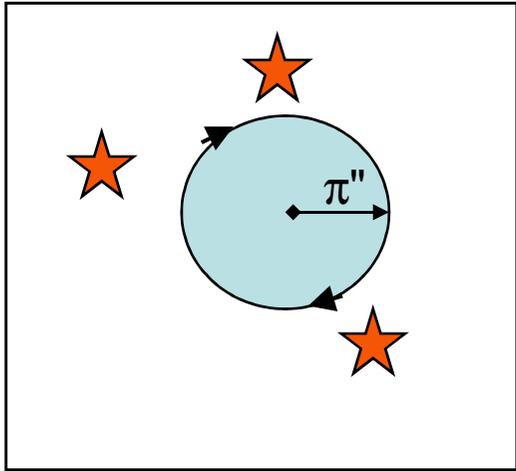
$\alpha \sim 20''$  au plus  $\Rightarrow$   
nécessite des télescopes



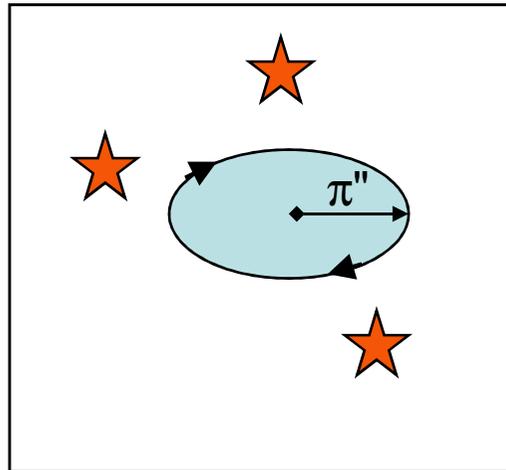
# Distance des étoiles

Méthode de *parallaxe annuelle*:

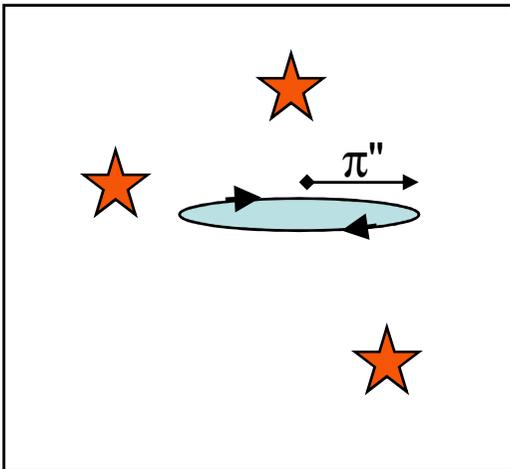




près du pôle écliptique

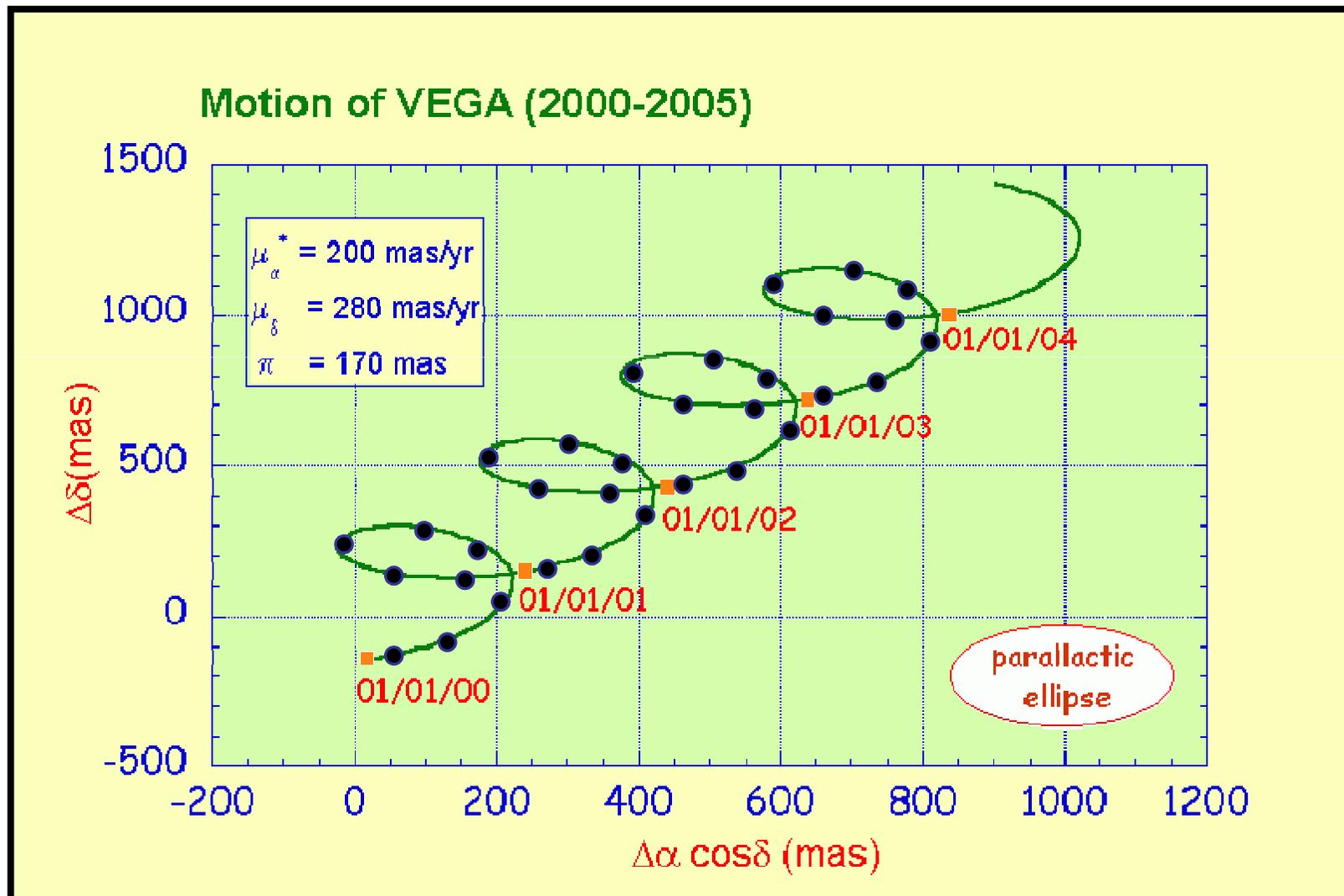


position quelconque

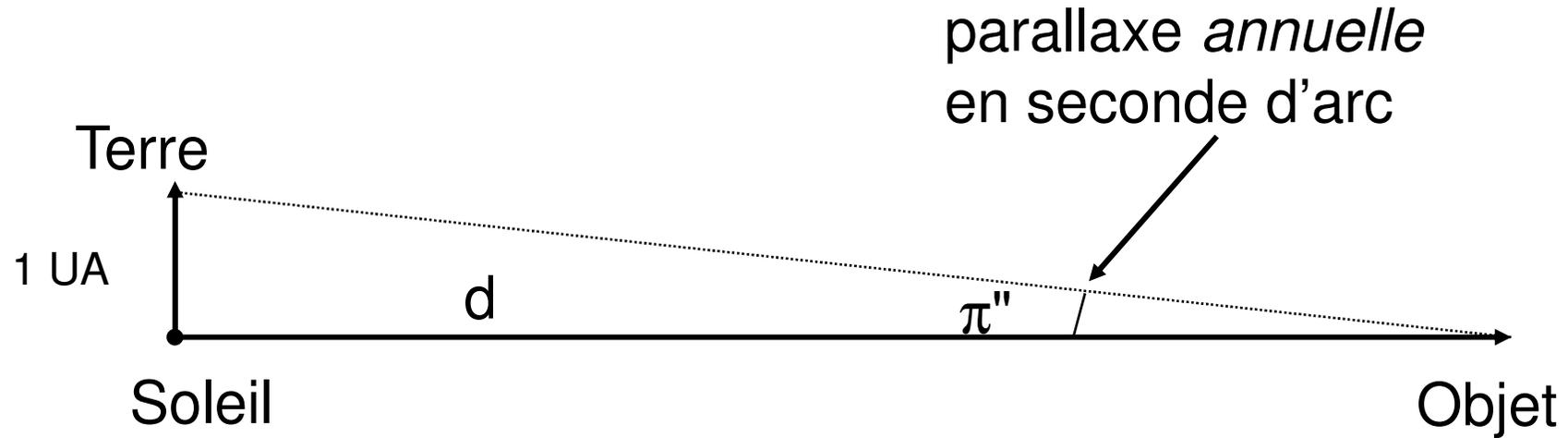


près du plan écliptique

# Mouvements de Véga dans le ciel (déduit de la mission ESA/Hipparcos)



## Définition du parsec (parallax second)



$$d_{\text{parsec}} = 1/\pi''$$

## Quelques valeurs typiques de distances

$$\begin{aligned} 1 \text{ parsec (pc)} &= 1 \text{ UA}/(1 \text{ arcsec en radian}) \\ &= 1 \text{ UA} \times (180 \times 3600) / \pi \sim \mathbf{206000 \text{ UA}} \end{aligned}$$

Quantités utiles:  $1 \text{ pc} \sim 3.1 \times 10^{16} \text{ mètres}$   
 $\sim 3.3 \text{ années-lumière (al)}$

Ex. *Proxima du Centaure*: (plus proche étoile connue)

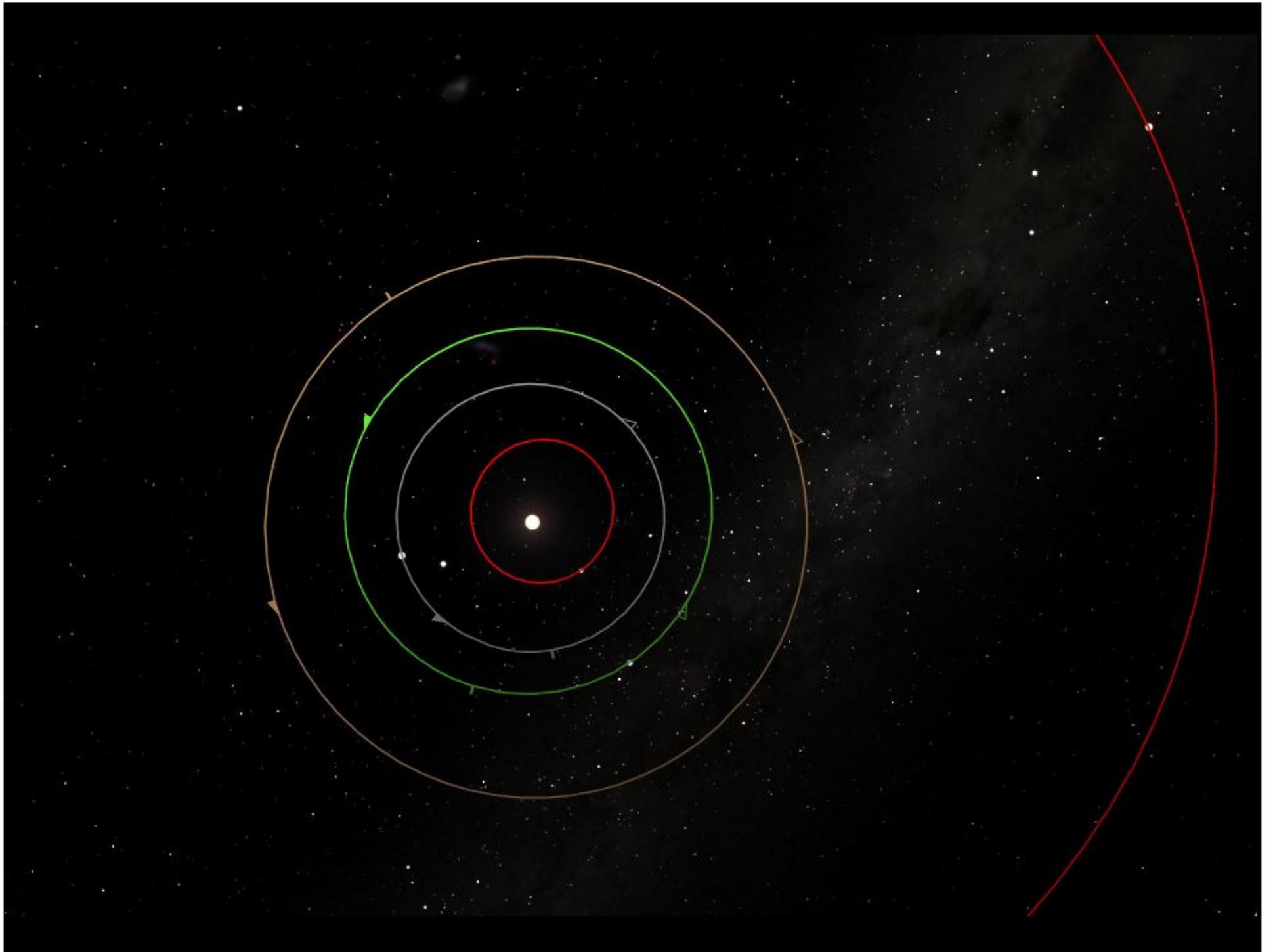
$$\pi'' \sim 0.76 \text{ arcsec} \rightarrow d \sim 1.3 \text{ pc} \sim 4.2 \text{ al}$$

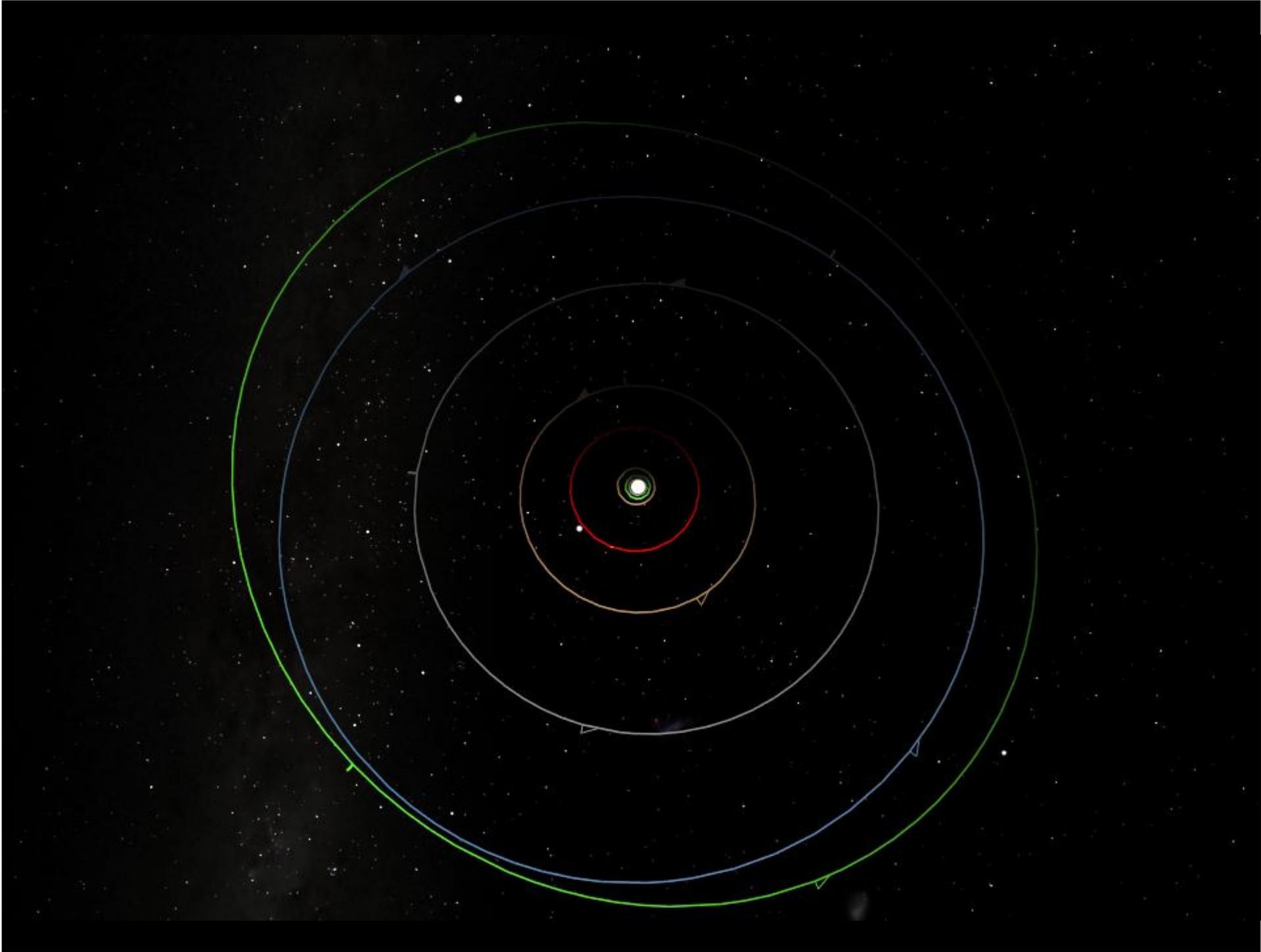
## Détermination de distance par la mesure de la paralaxe

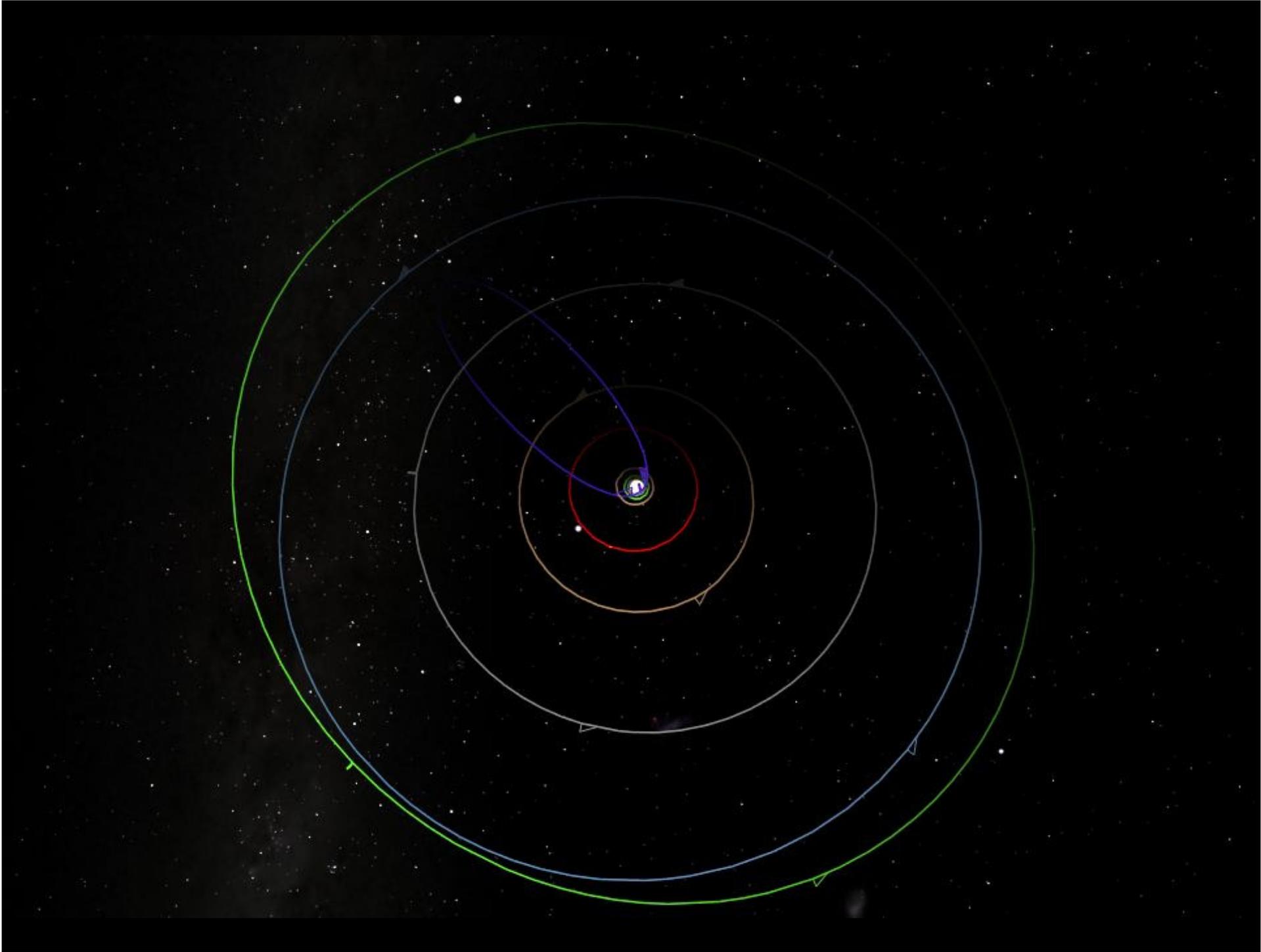
- Observations au sol: limite  $> \sim 0.05'' \rightarrow d < \sim 20 \text{ pc}$   
quelques centaines d'étoiles

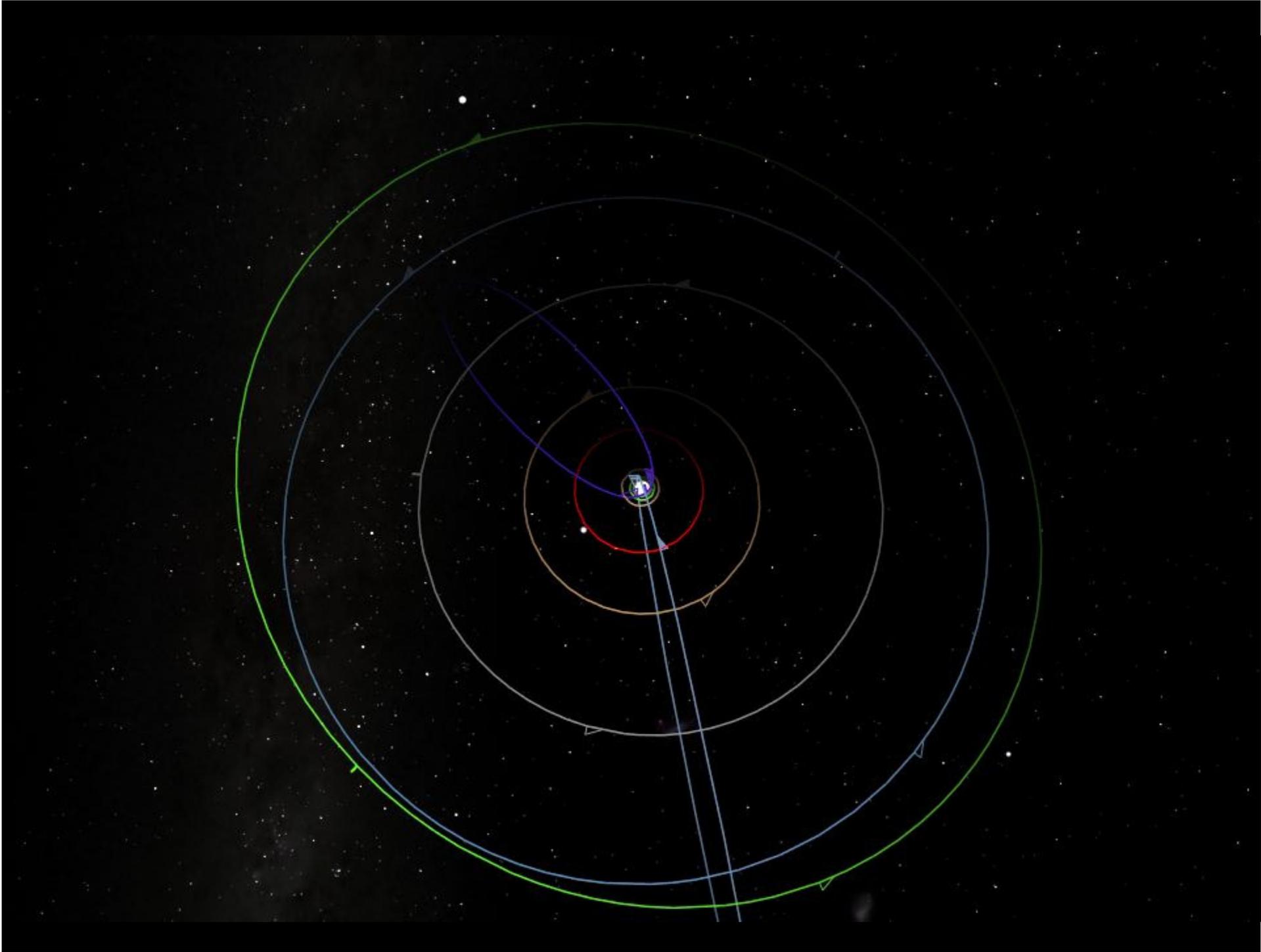
- Mission ESA/Hipparcos (début 1990's):  
limite  $> \sim 0.001'' = 1 \text{ mas} \rightarrow d < \sim 1000 \text{ pc} = 1 \text{ kpc}$   
environ 100 000 étoiles

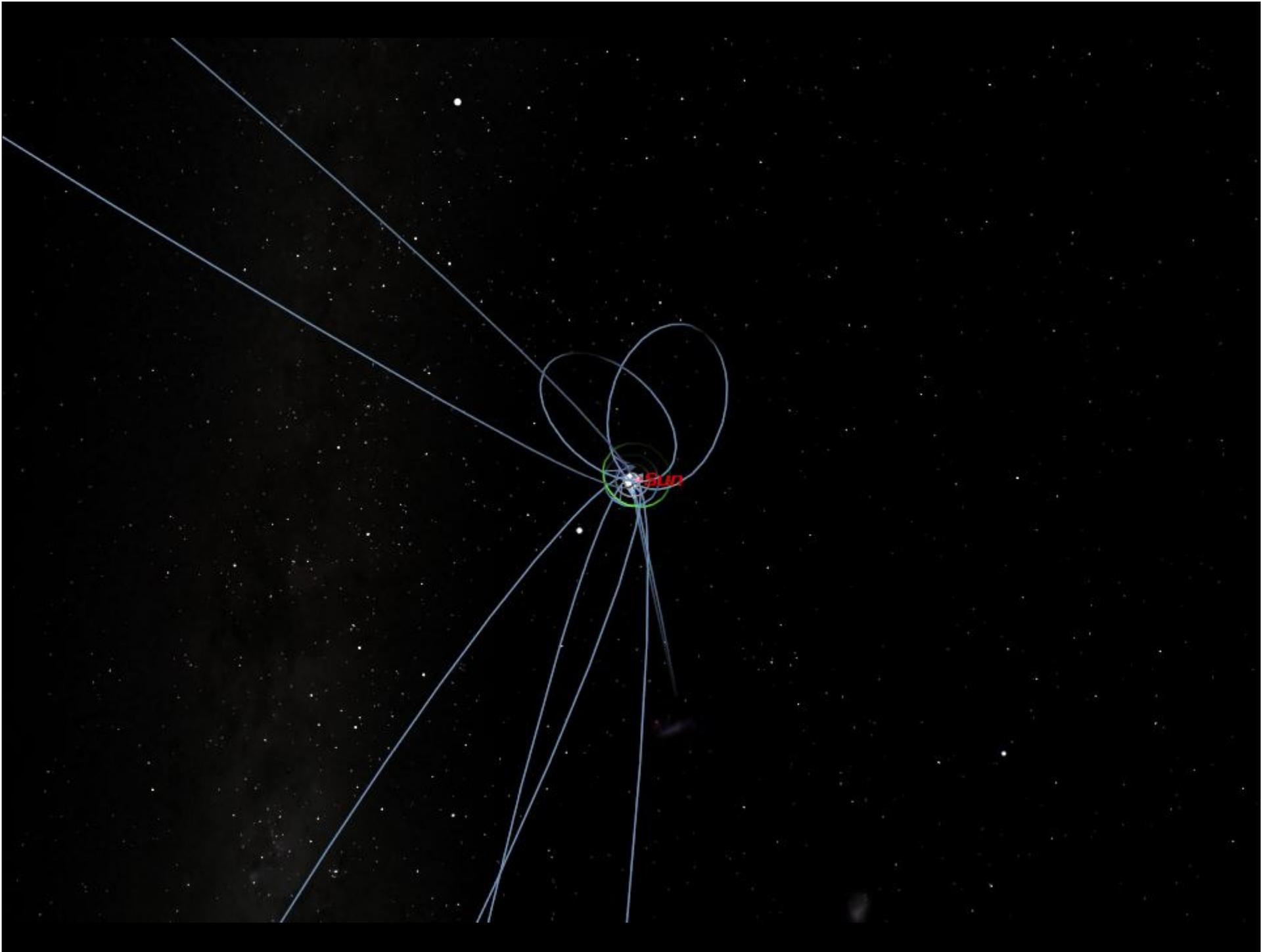
- Mission ESA/Gaia (> 2010):  
limite  $> \sim 10^{-5} \text{ arcsec} \rightarrow d < \sim 100000 \text{ pc} = 100 \text{ kpc}$







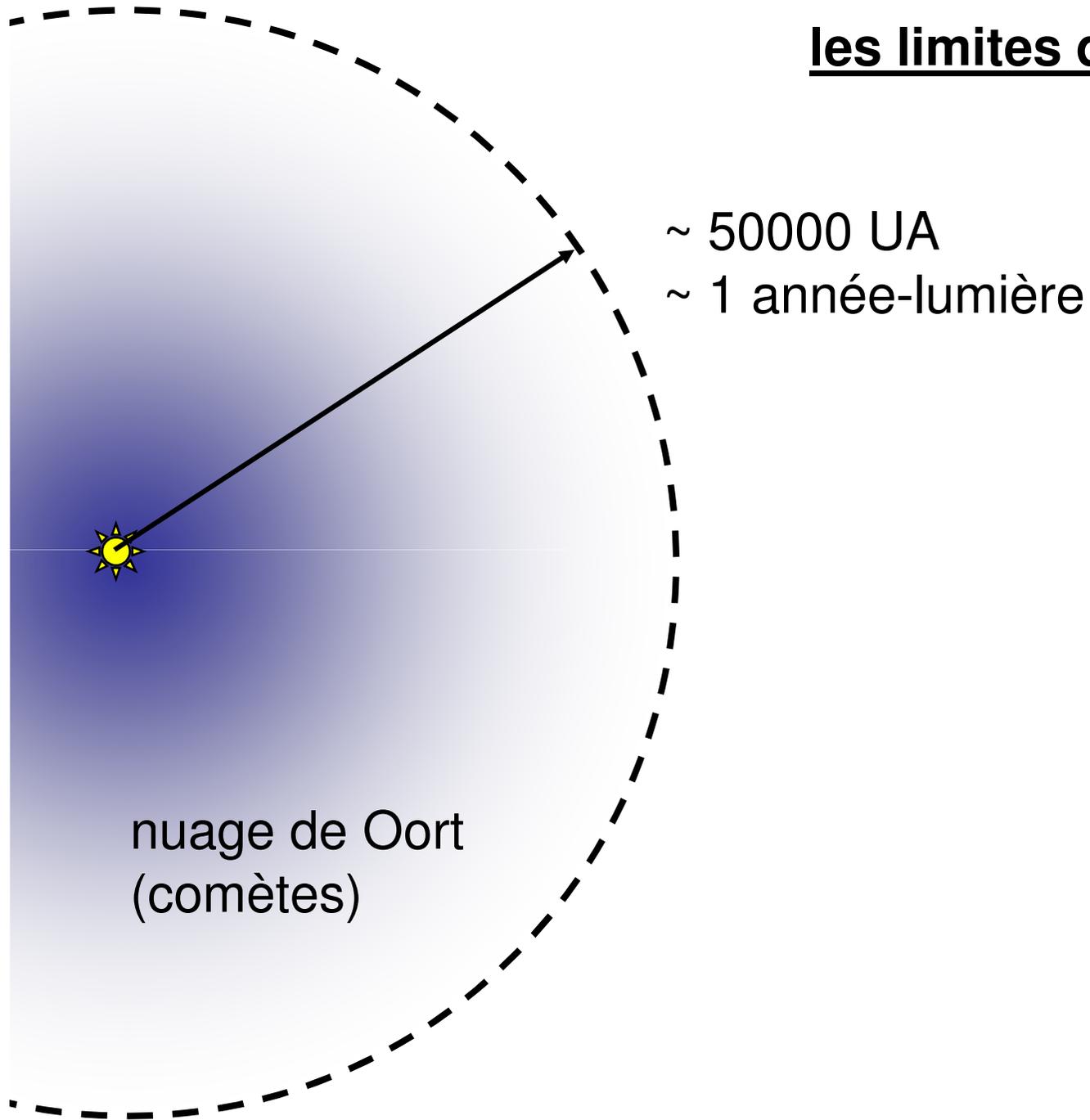




nuage de Oort



## les limites du système solaire

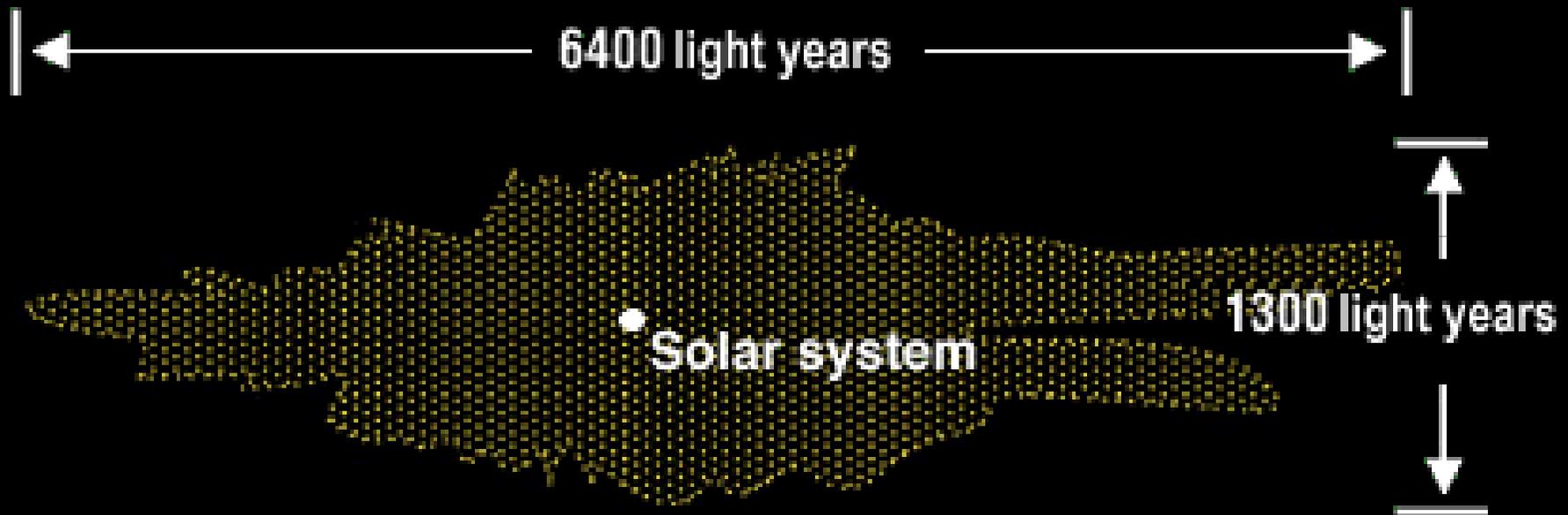


proxima du  
Centaure  
~ 4.2 a.l.



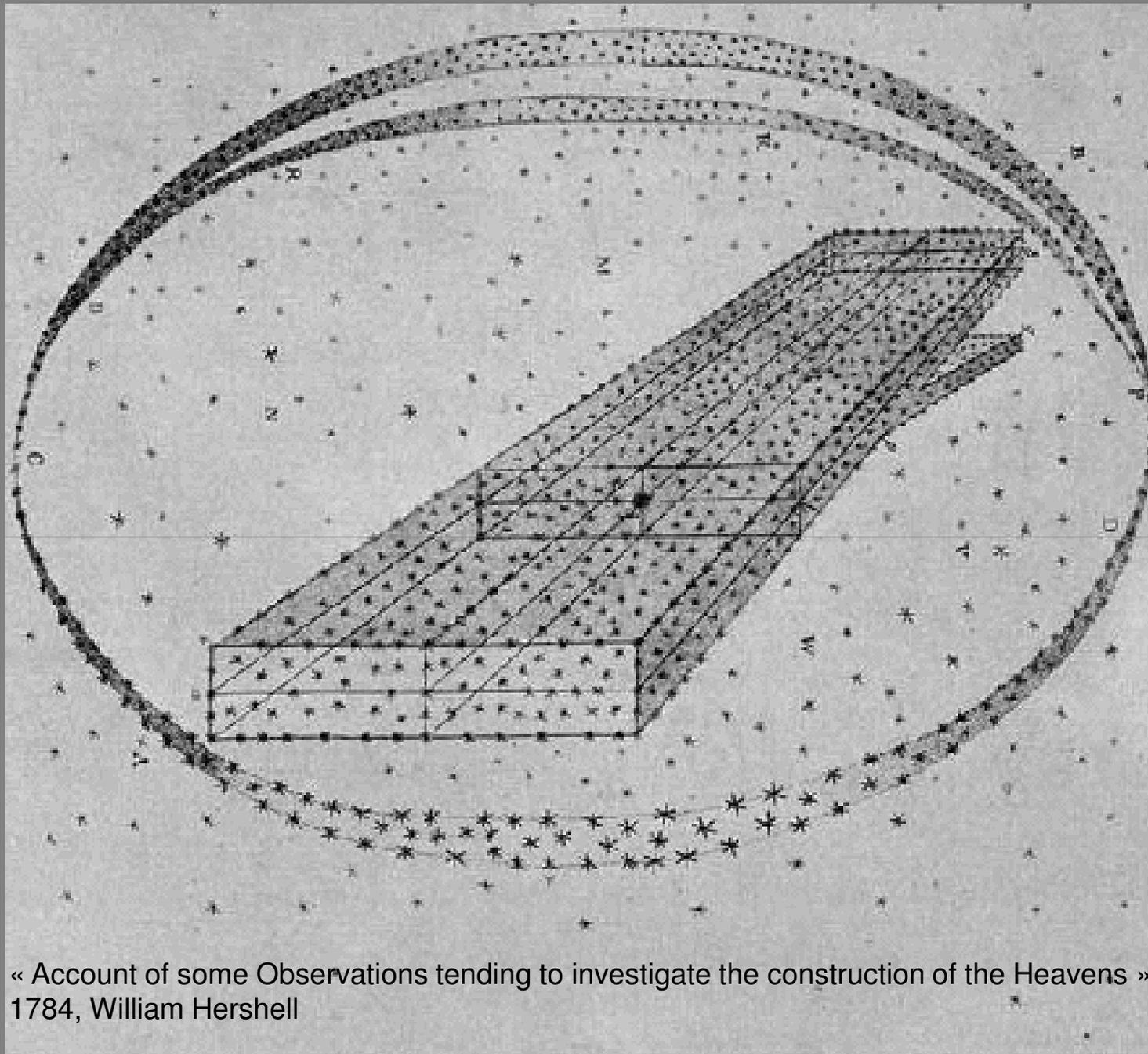


## Herschel's Galaxy model

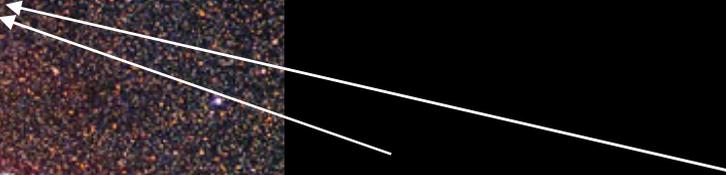


### Hypothèses:

- Soleil au centre
- Etoiles de même luminosité
- Pas extinction



« Account of some Observations tending to investigate the construction of the Heavens »  
1784, William Hershell



distances interstellaires  
~ 1 pc

# Notre Galaxie (« Voie Lactée »)

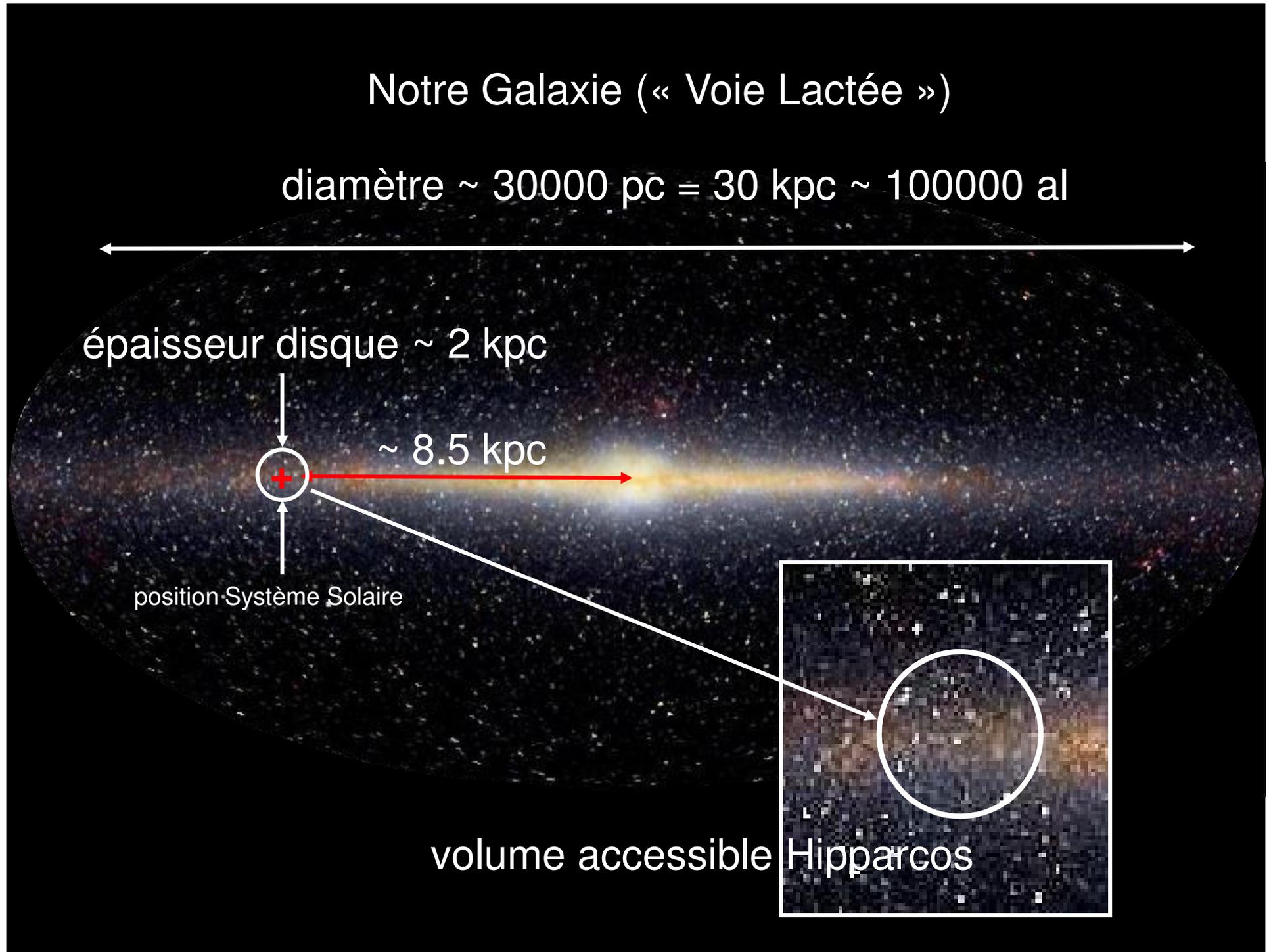
diamètre  $\sim 30000 \text{ pc} = 30 \text{ kpc} \sim 100000 \text{ al}$

épaisseur disque  $\sim 2 \text{ kpc}$

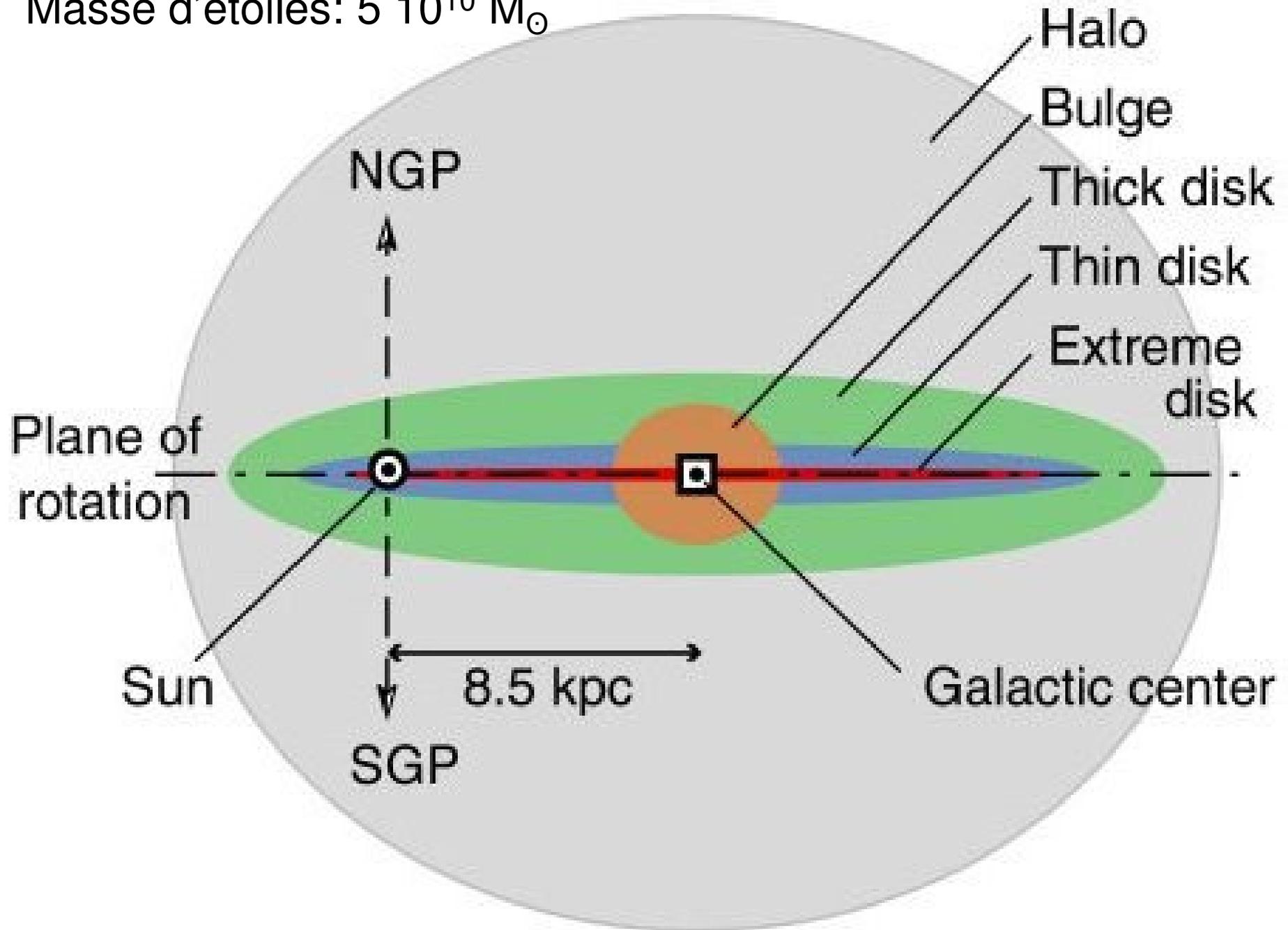
$\sim 8.5 \text{ kpc}$

position Système Solaire

volume accessible Hipparcos



Masse d'étoiles:  $5 \cdot 10^{10} M_{\odot}$



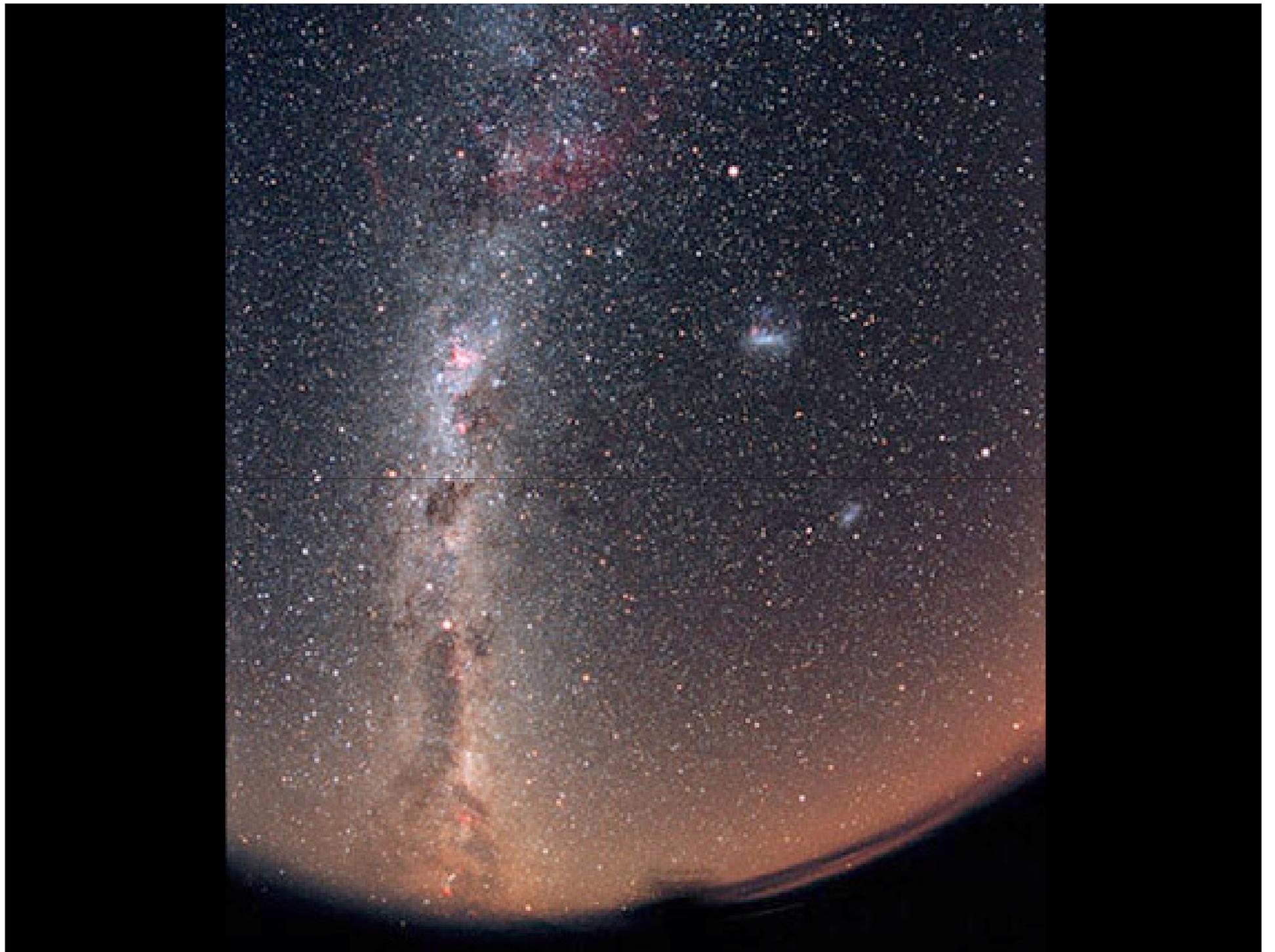
diamètre ~ 100 000 a.l., ou 30 000 pc

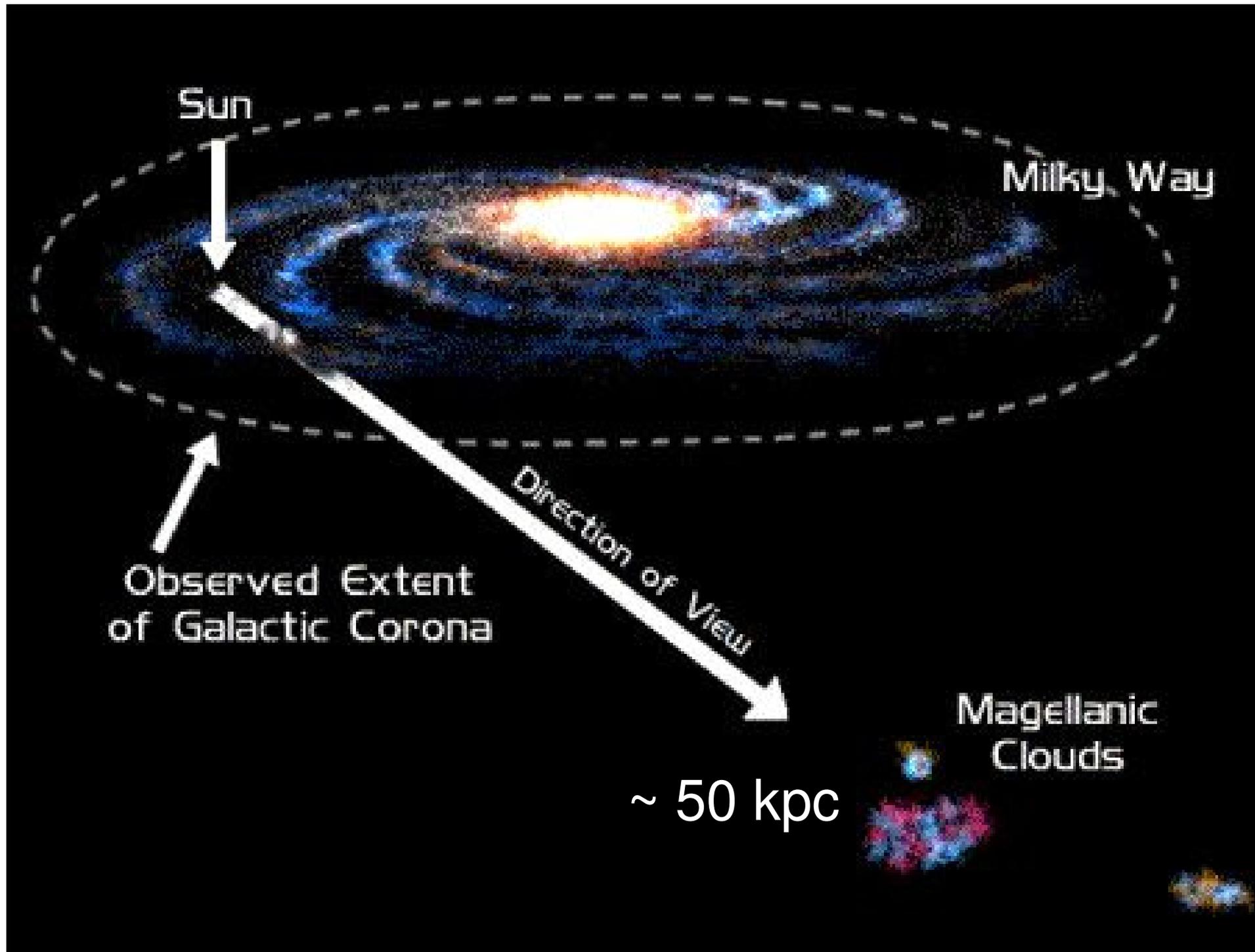


révolution du  
Soleil ~  
230 millions  
d'années

vitesse ~  
225 km sec<sup>-1</sup>

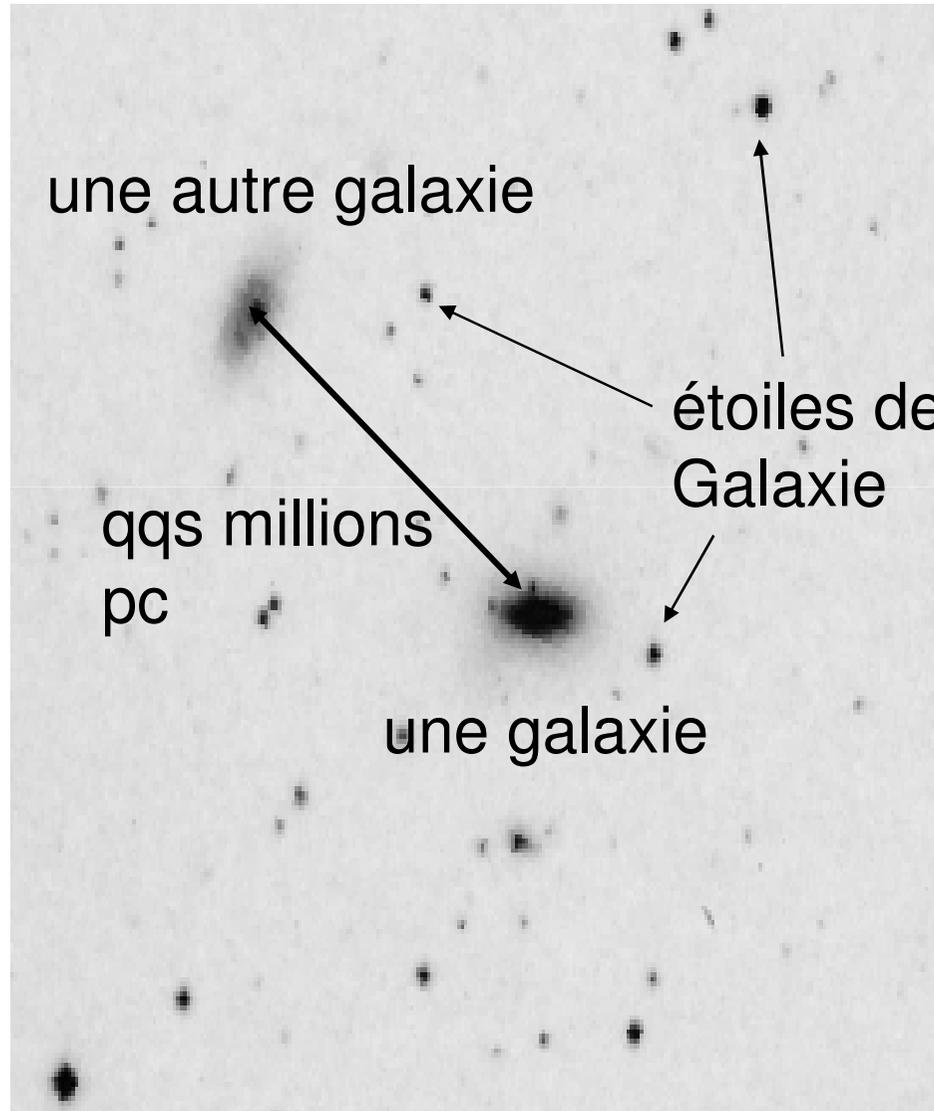
population ~  
100 milliards d'étoiles

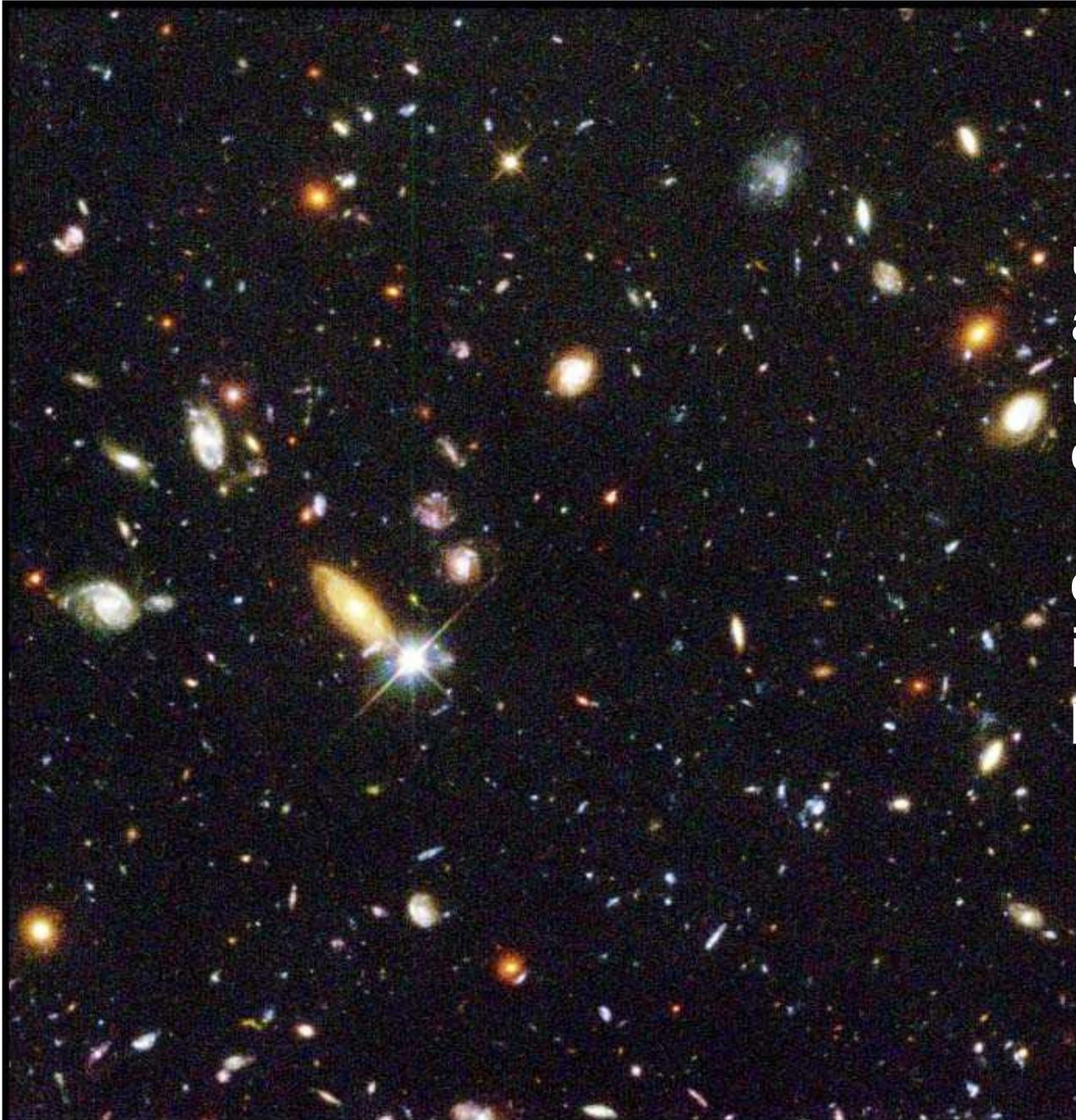




## Distances inter-galactiques:

Voie Lactée – M31: 700 000 pc





un « trou de serrure »  
à travers notre galaxie:  
une seule étoile, des  
centaines de galaxies

distances  
intergalactiques ~  
plusieurs Mpc

**Hubble Deep Field**

**HST · WFPC2**

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

