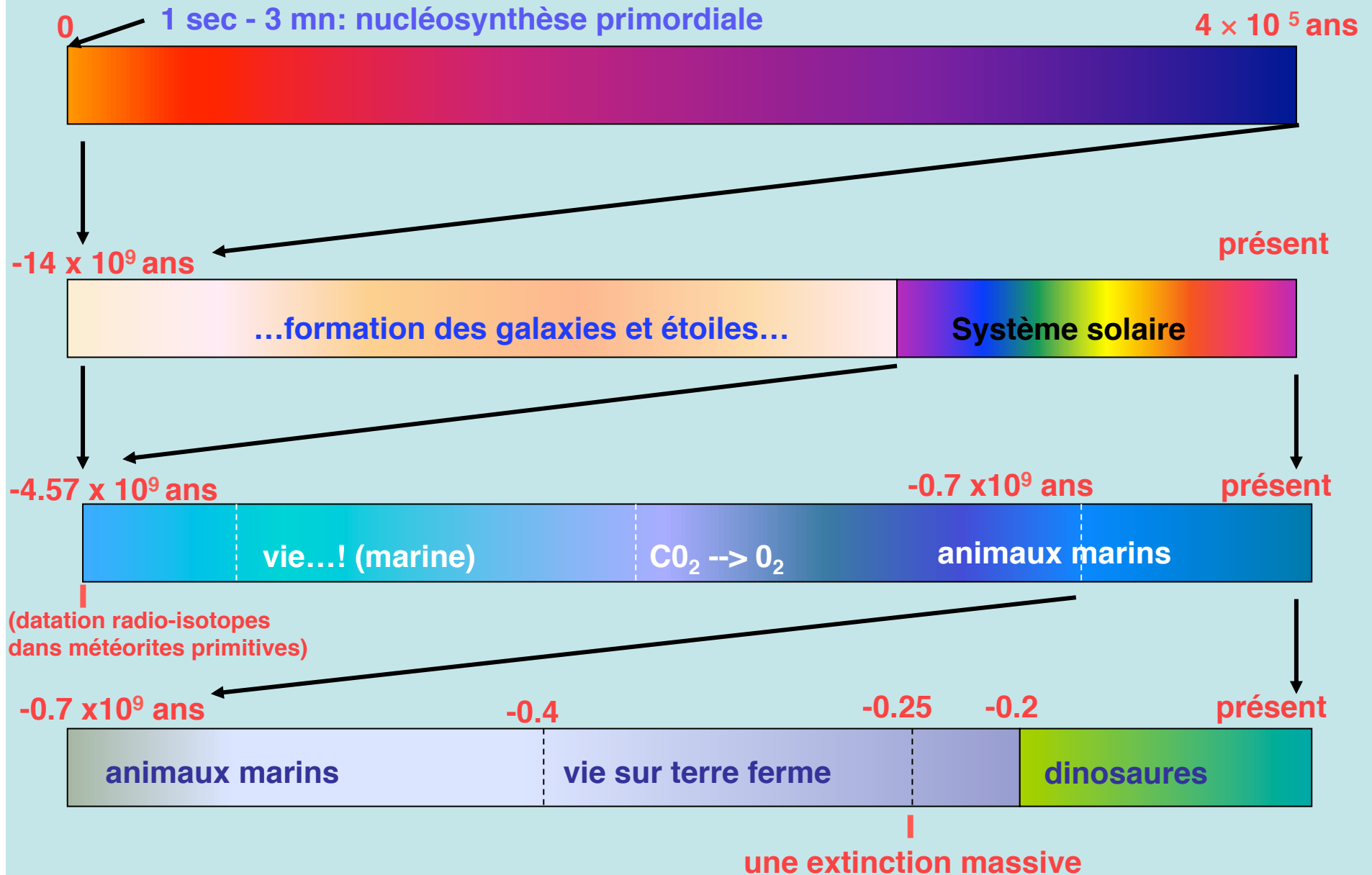
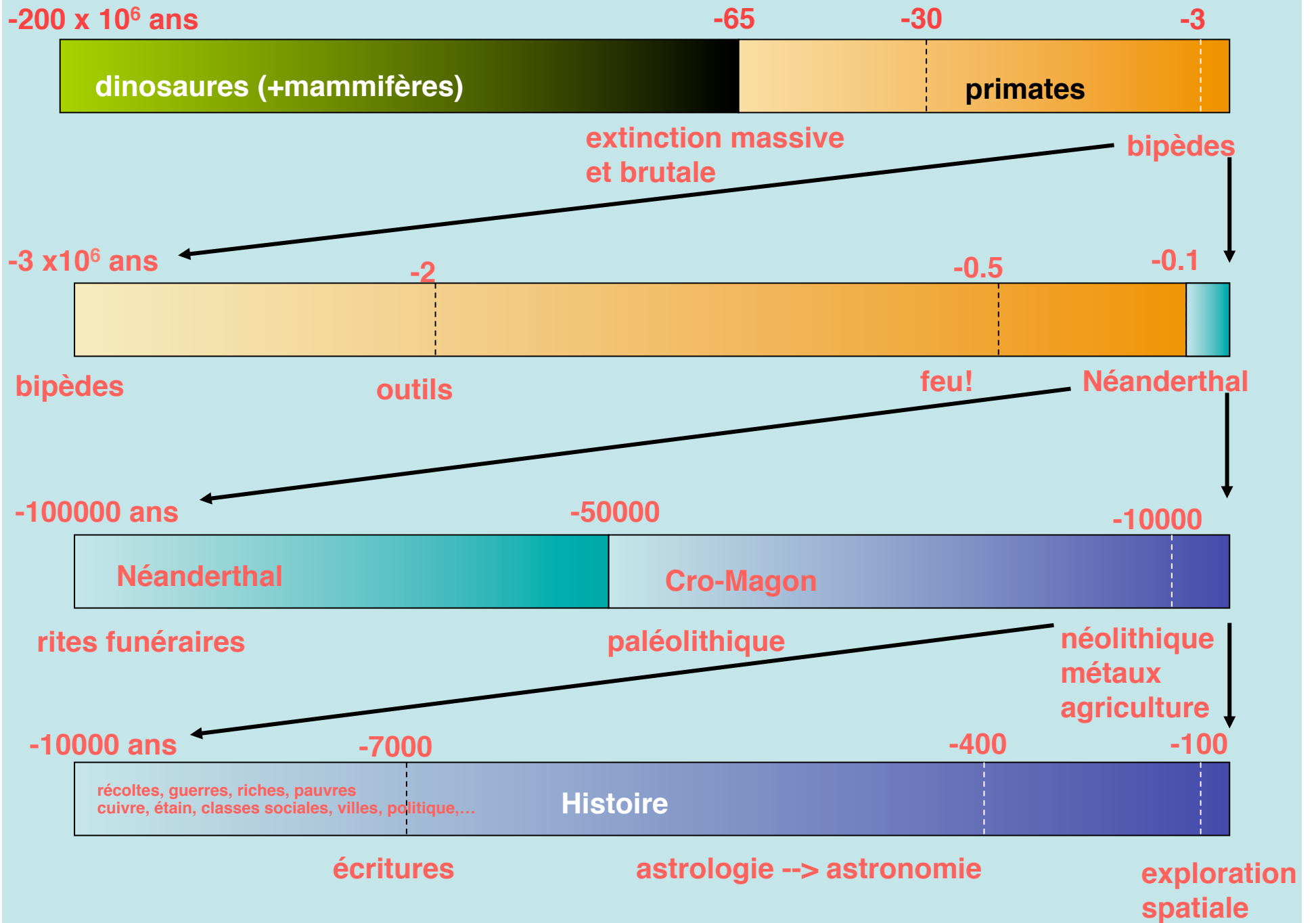
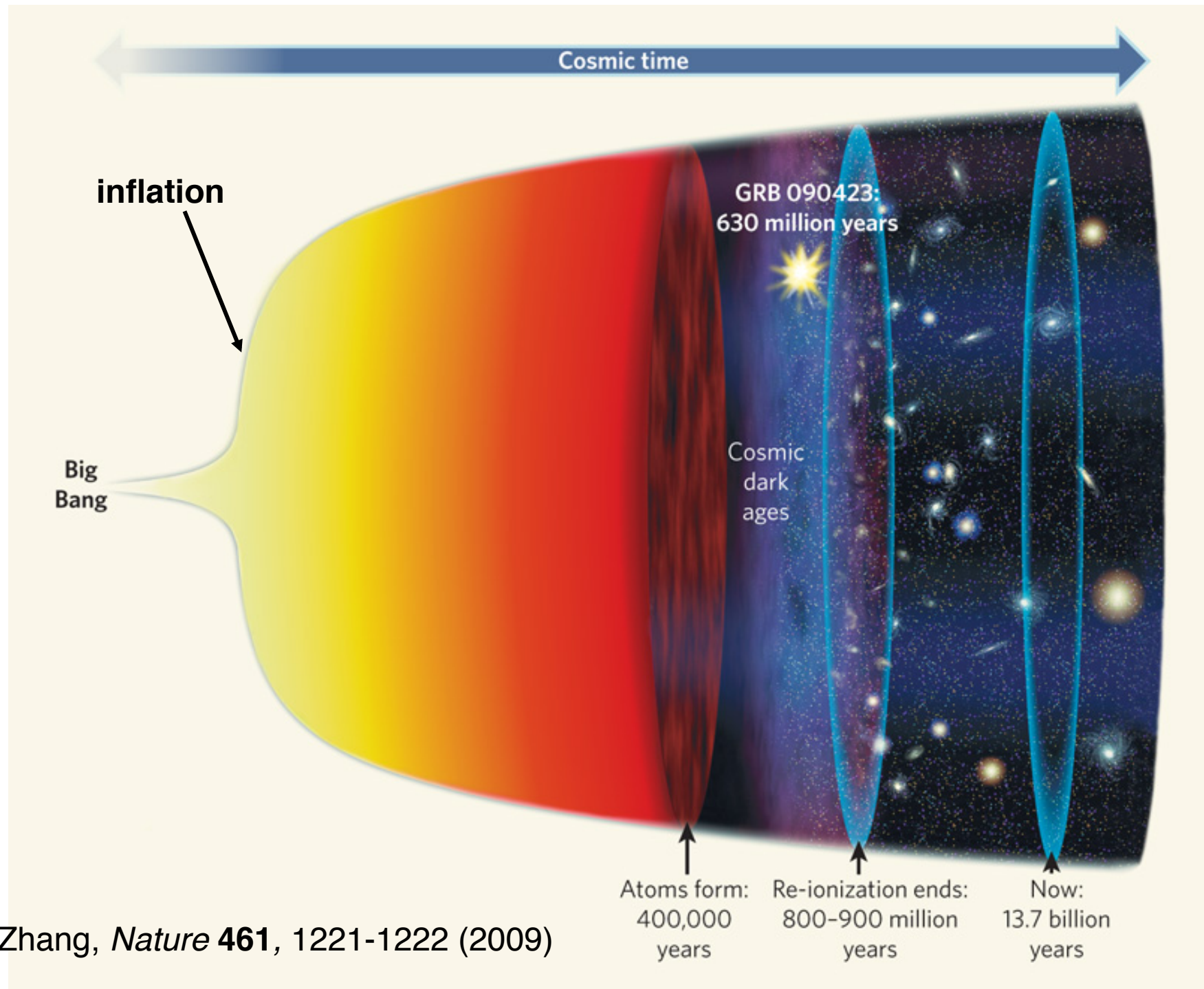


Echelles de temps

Univers devient transparent
 $T < 3000 \text{ K}$ (recombinaison)



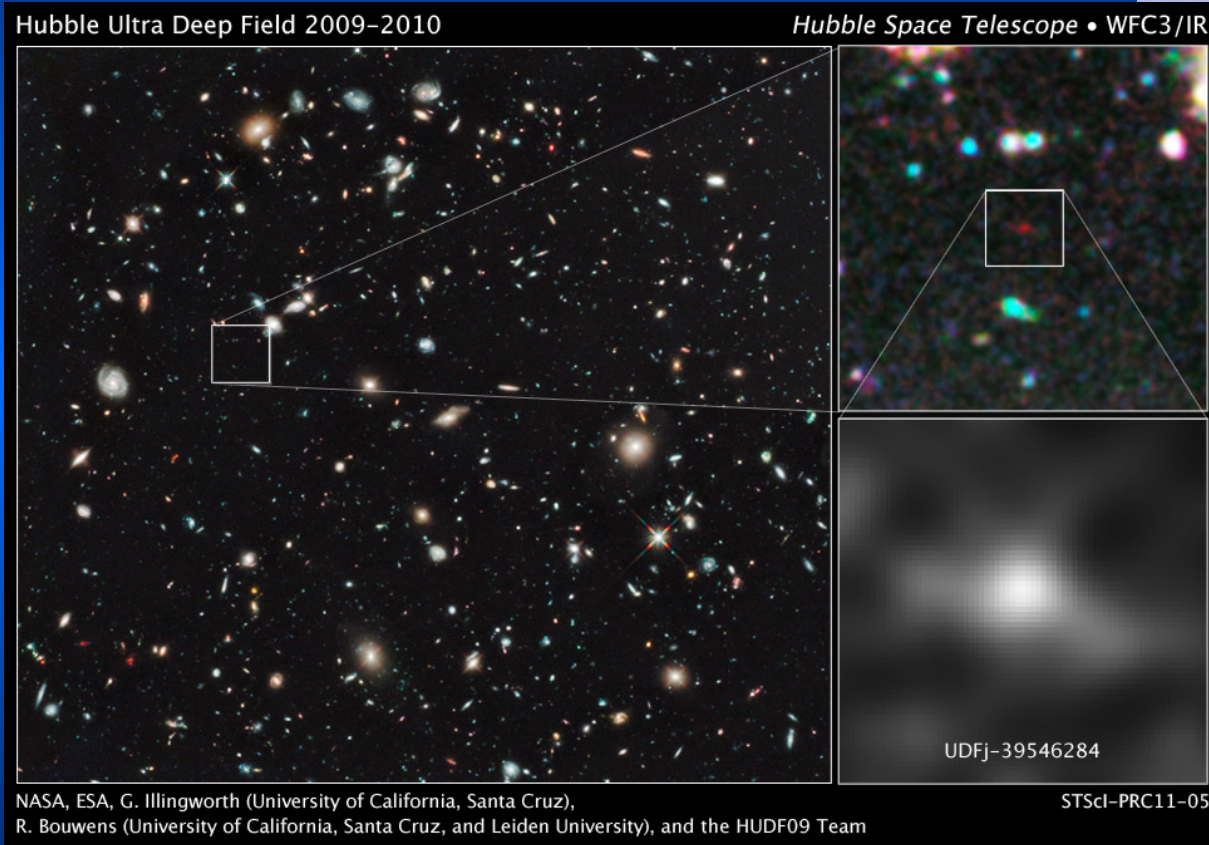




Zhang, *Nature* **461**, 1221-1222 (2009)

...suite:

- formation des galaxies et des étoiles



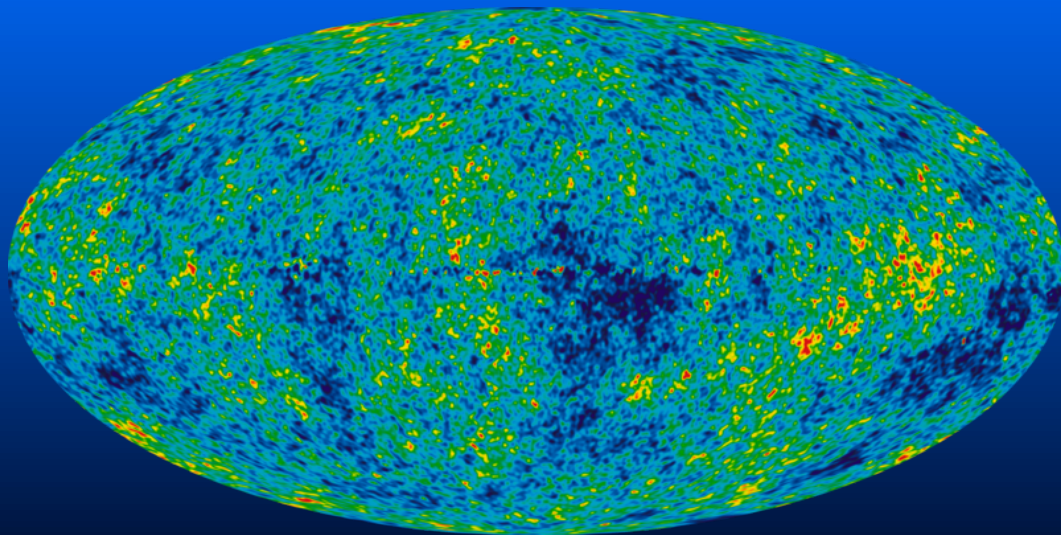
13.2 billion
light-years away

History of the Universe



quelques curiosités:

- Age estimé de l'Univers: 13.7 ± 0.2 milliards d'années
- Inflation: à 10^{-30} sec après le Big Bang, l'Univers s'expand d'un facteur 10^{22}
- 379 ± 8 milliers d'années après le Big Bang: recombinaison, l'Univers devient transparent



WMAP 2010

...suite:

- il y a 4.567 milliards d'années: formation des météorites primitives (durée: 3 millions d'années, cf. *Science* 2 nov. 2012)
- 3.8 milliards d'années: vie abondante dans les océans
- il y a plus de 460 millions d'années: insectes et crustacés
- 460 millions d'années: apparition des poissons
- 420 millions d'années: premières mousses hors de l'eau, puis premiers arthropodes sur terre ferme
- 370 millions d'années: premiers vertébrés à pattes
- 320 millions d'années: premiers reptiles
- 230 millions d'années: apparition dinosaures et mammifères

... suite:

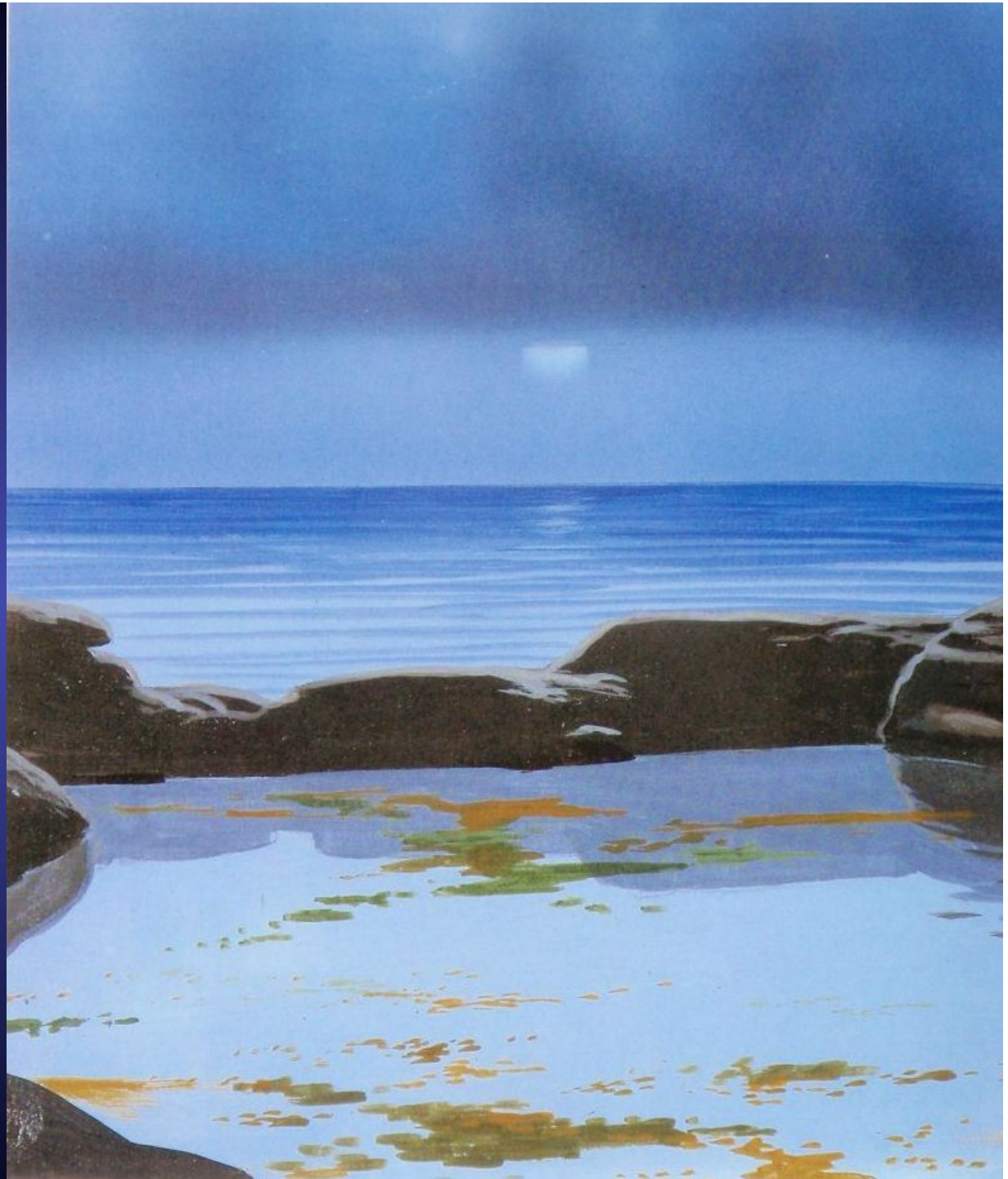
- 120 millions d'années: premières fleurs
- il y a 65 millions d' années: disparition des dinosaures, conquête de la Terre par les mammifères
- il y a ~ 50-100 millions d' années: apparition des fleurs, de l'herbe
- il y a 3 millions d' années: liaison des Amérique Nord et Sud par l' isthme de Panama → disparition marsupiaux sudaméricains
- il y a 2 millions d' années: premiers outils (Tanzanie)
- il y a 500000 ans: maîtrise du feu
- entre -120000 à -10000 ans: dernière période glaciaire (Würm)

il y a 3.8 milliards
d'années:

vie dans les océans
et marécages

atmosphère:
essentiellement CO₂

illustration tirée de "The History
of Earth",
W.K. Hartmann & R. Miller, 1991





jusqu'à -420 millions d'années: les terres émergées sont stériles (UV solaires ne sont pas filtrées par l'ozone O_3)

illustration tirée de "The History of Earth",
W.K. Hartmann & R. Miller, 1991

après 420 millions
d'années:
les plantes conquièrent
les terres émergées
(protection par l'ozone
 O_3)

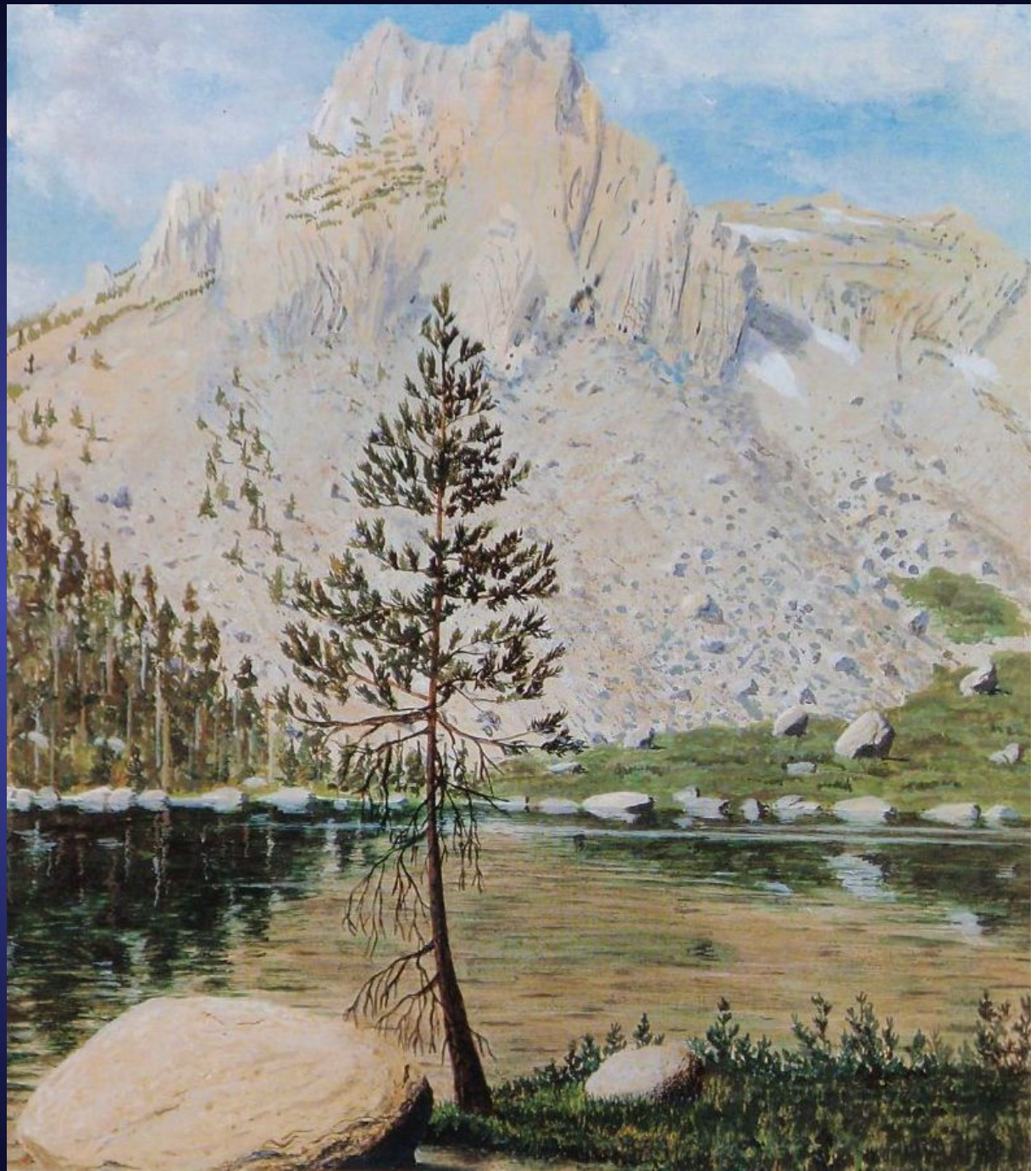
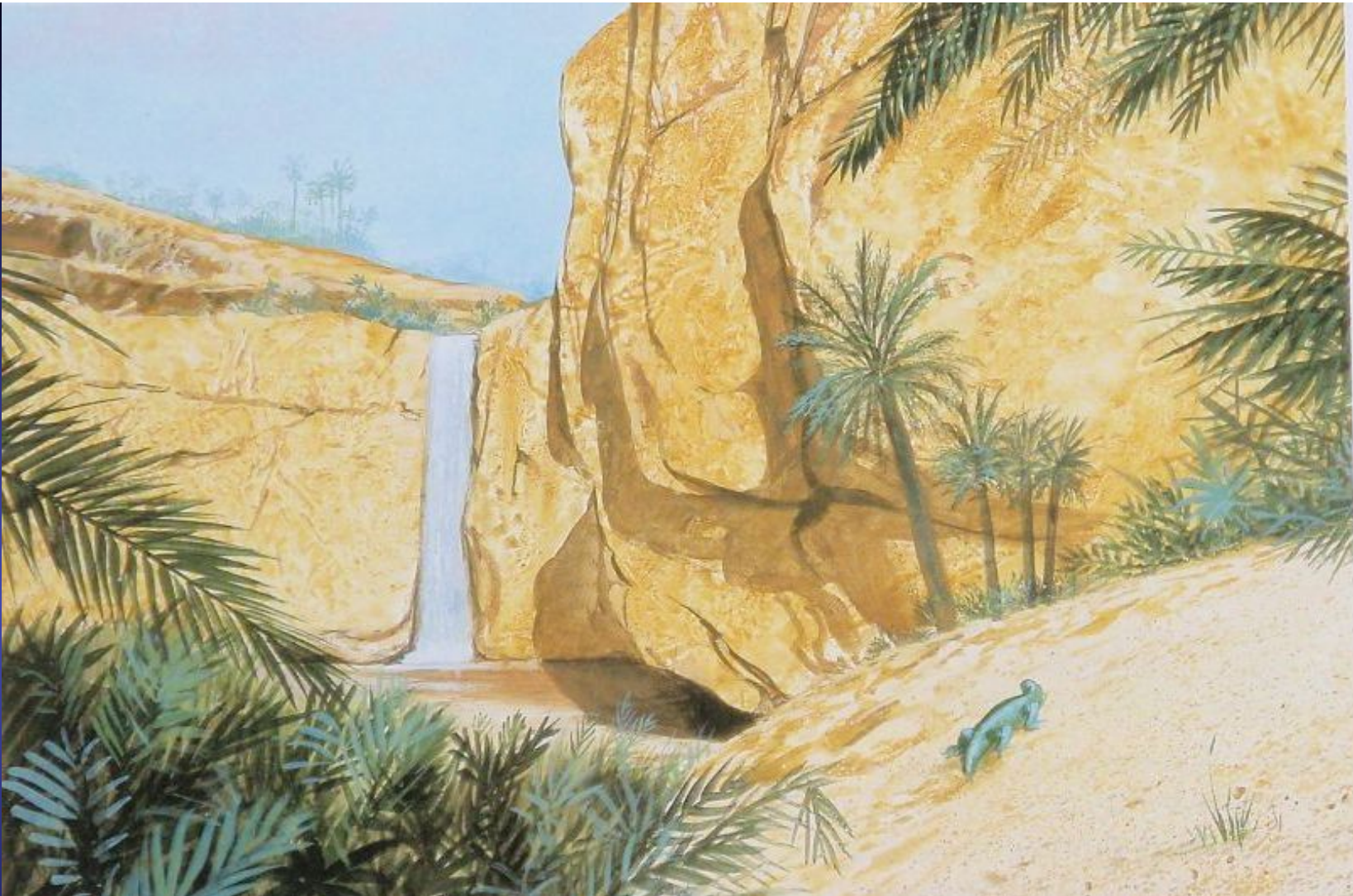


illustration tirée de "The History
of Earth",
W.K. Hartmann & R. Miller, 1991



230 millions d'années: les reptiles et mammifères
conquièreent les terres sèches

illustration tirée de "The History
of Earth",
W.K. Hartmann & R. Miller, 1991

il y a plus de 120 millions d'années: les plantes à fleurs, et plus tard l'herbe (70-50 millions d'années) apparaissent

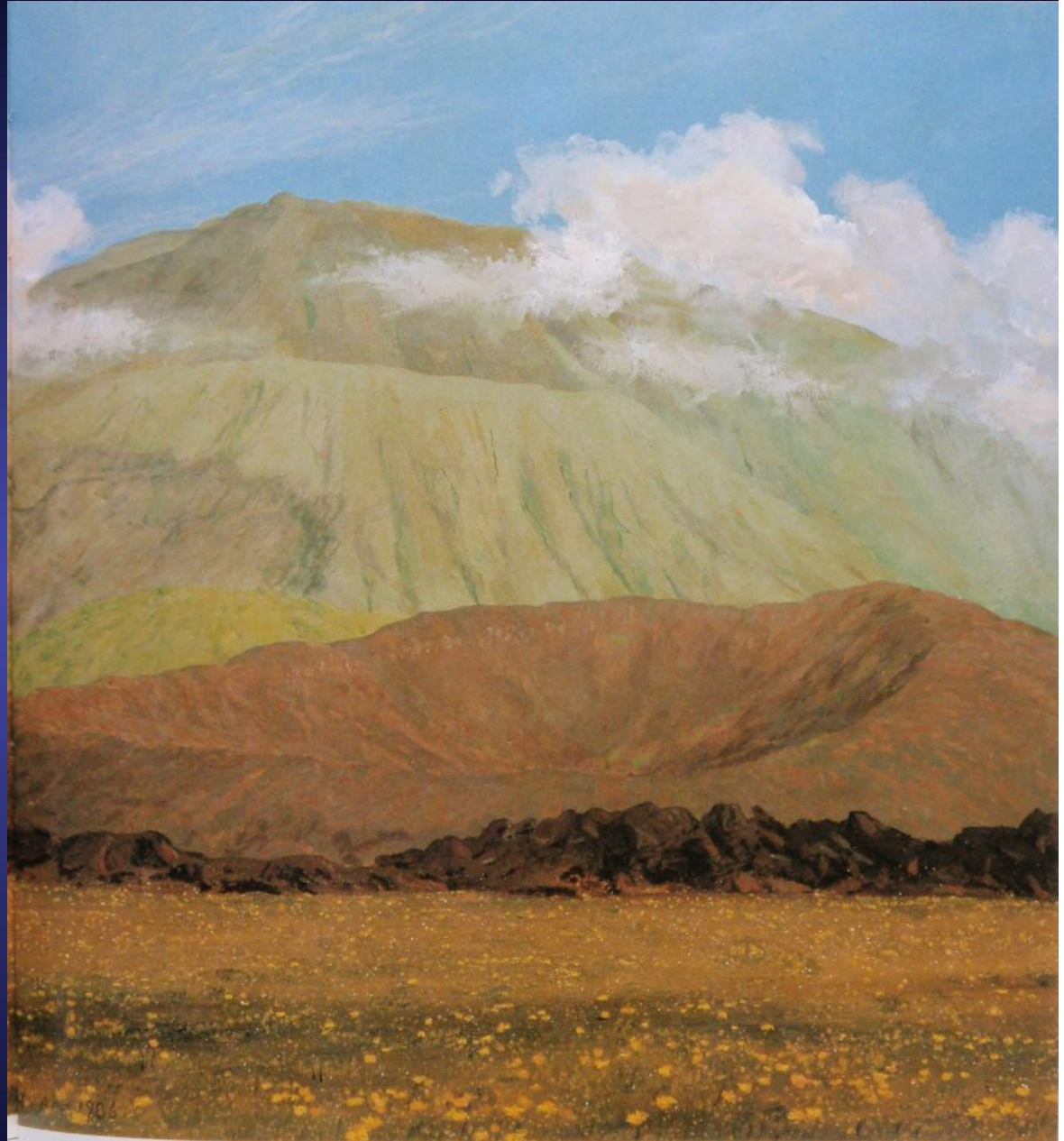
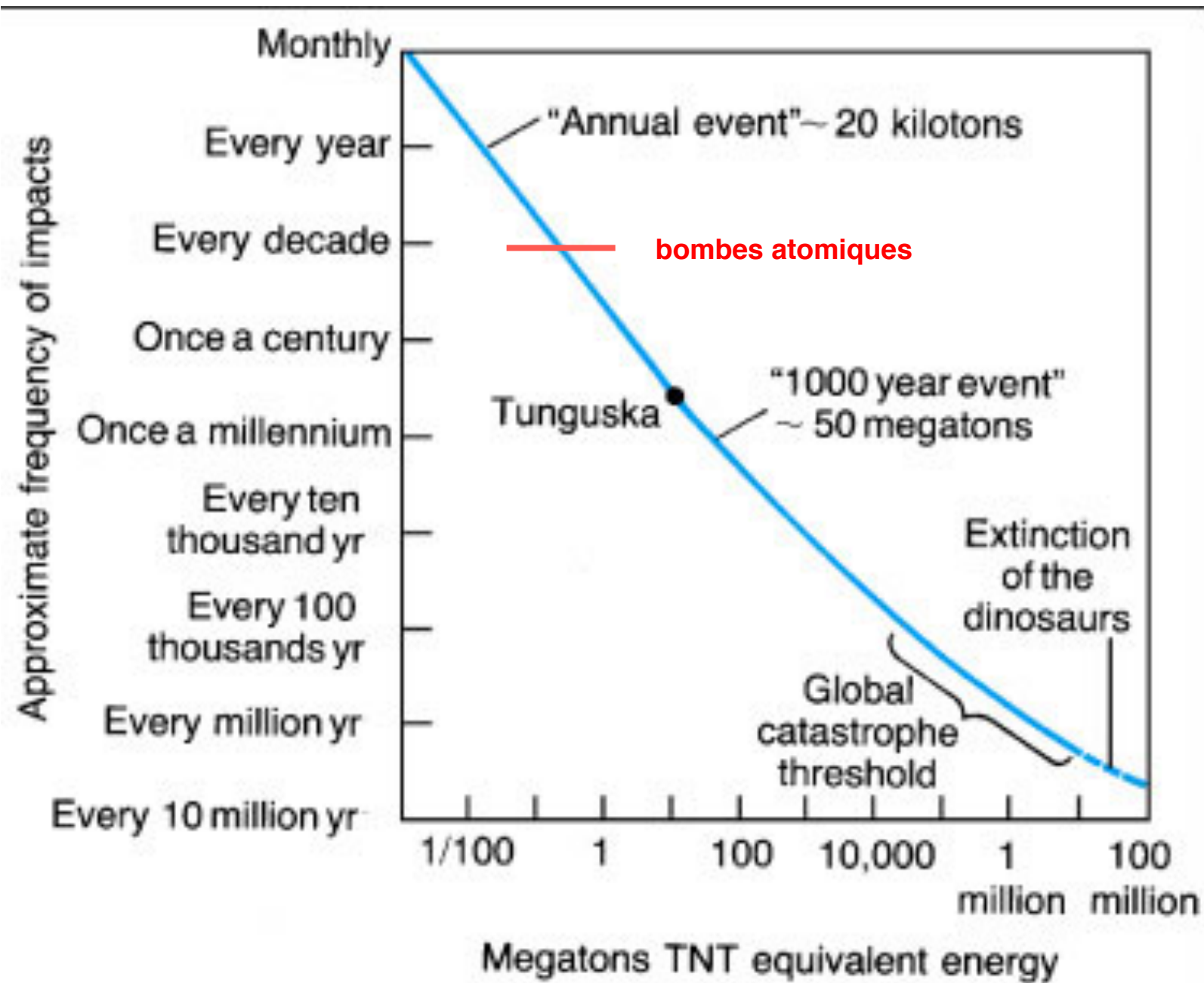


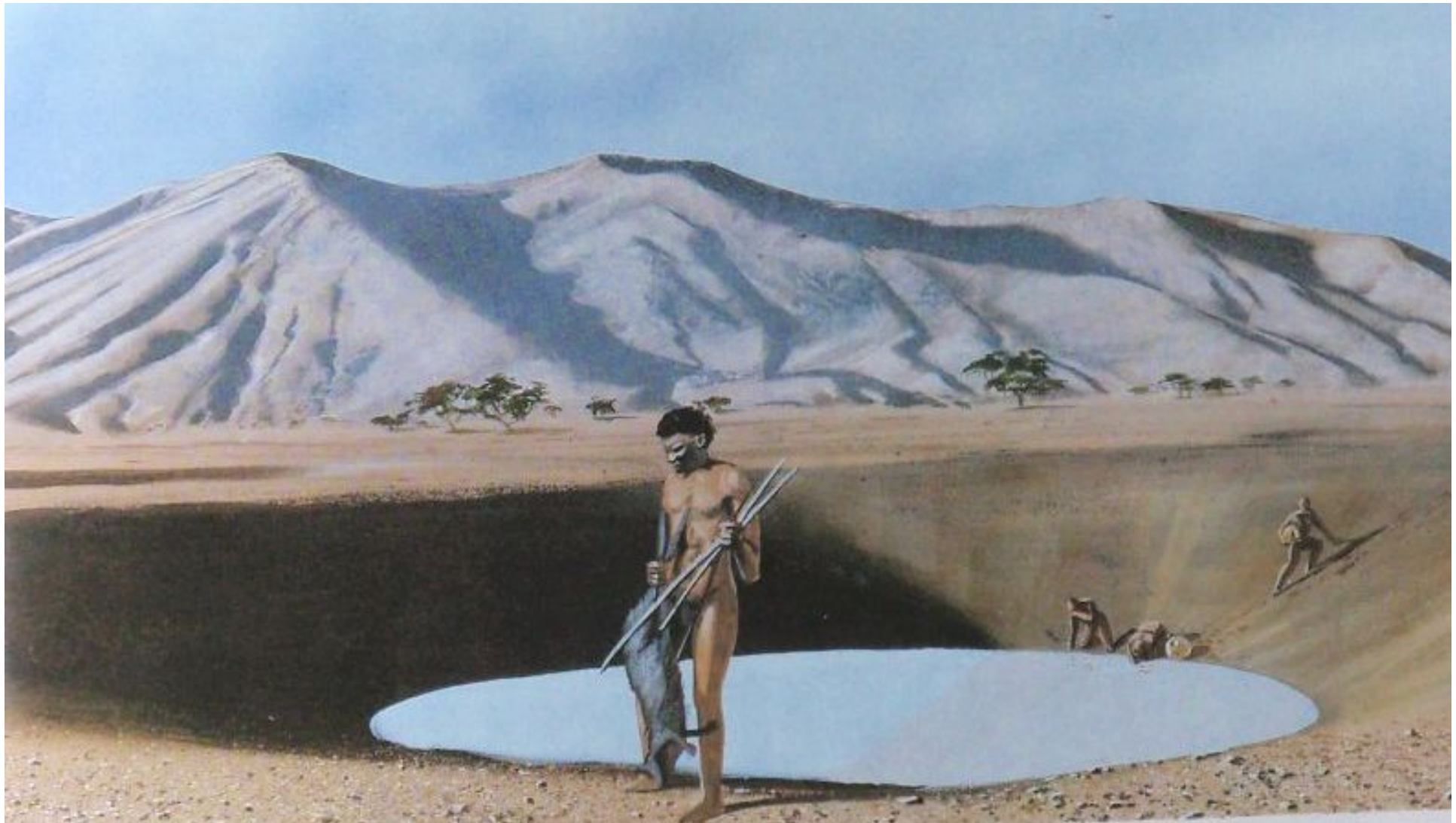
illustration tirée de "The History of Earth",
W.K. Hartmann & R. Miller, 1991

65 millions
d'années:
extinction
massive
crétacé-tertiaire



illustration tirée de
www.astrosurf.com/luxorion/impact-extinction3.htm





2 millions d'années: des hominidés
bipèdes utilisent des outils

illustration tirée de "The History
of Earth",
W.K. Hartmann & R. Miller, 1991





les mesures de distance

- taille de notre planète?
- distance de la Lune, des autres planètes?
- distances des étoiles?
- distances des galaxies?
- taille de l'Univers?

Difficultés:

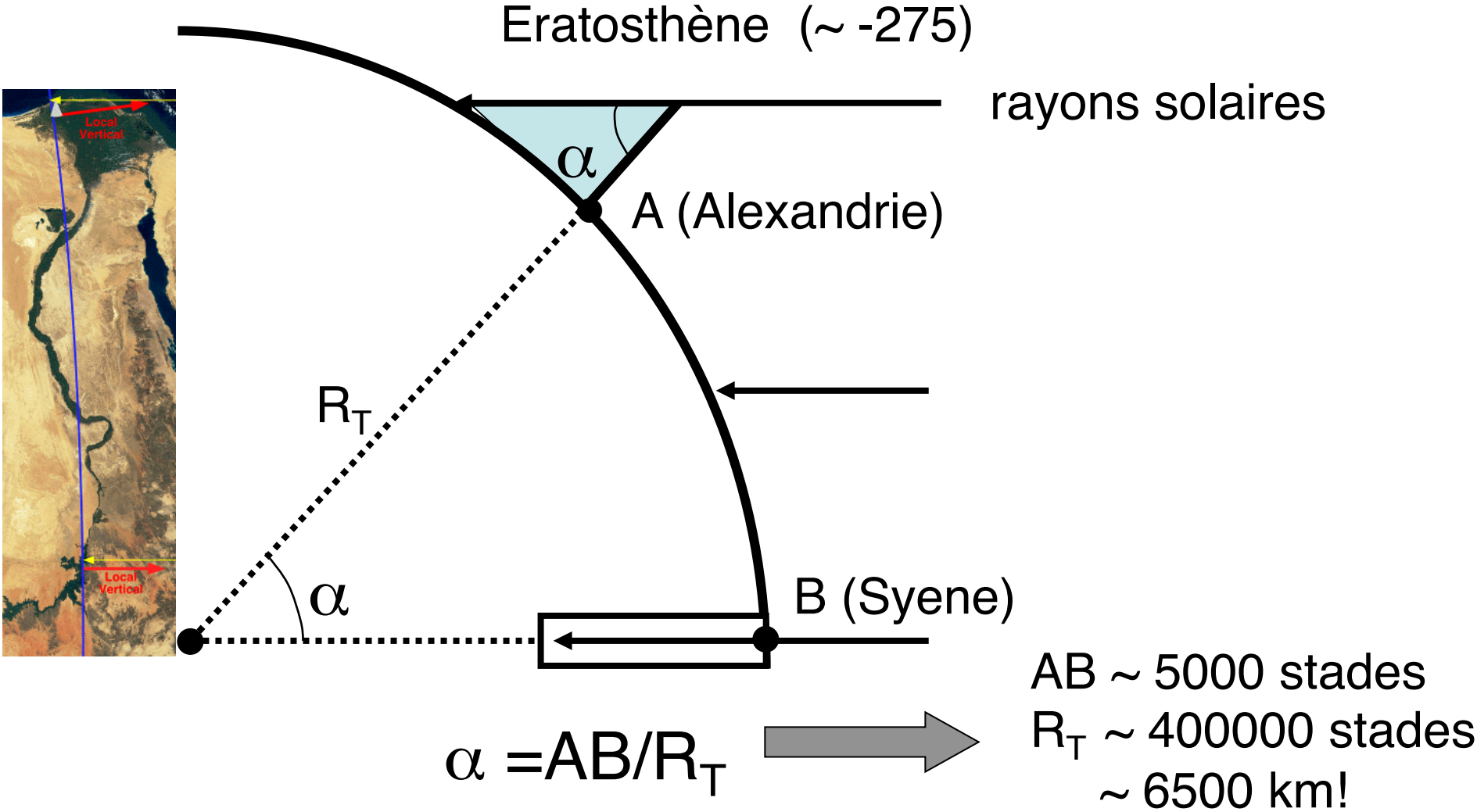
- les distances sont énormes et très différentes:
il y a un facteur 10^{17} entre la distance Terre-Lune et la taille de l'Univers
- les méthodes directes (parallaxes) ne fonctionnent que pour le "voisinage" du système solaire
- les méthodes indirectes deviennent de plus en plus imprécises à mesure que l'on s'éloigne dans l'Univers

The known universe

(American Museum of natural history)

Distance	Années Lumières
Himalya	
Tibet	
Satellites artificiels (GPS)	
Lune	1 seconde
Saturne	1 heure
Système Solaire	1 jour
Etoile la plus proche (sigma centaure)	4.3 al
Signal radio	70 al
Longueur de la Galaxie	100 000 al
Galaxie la plus proche (GNM)	
Galaxies proches	100 000 000 al
Structure amas	
CMB	13 700 000 000 al

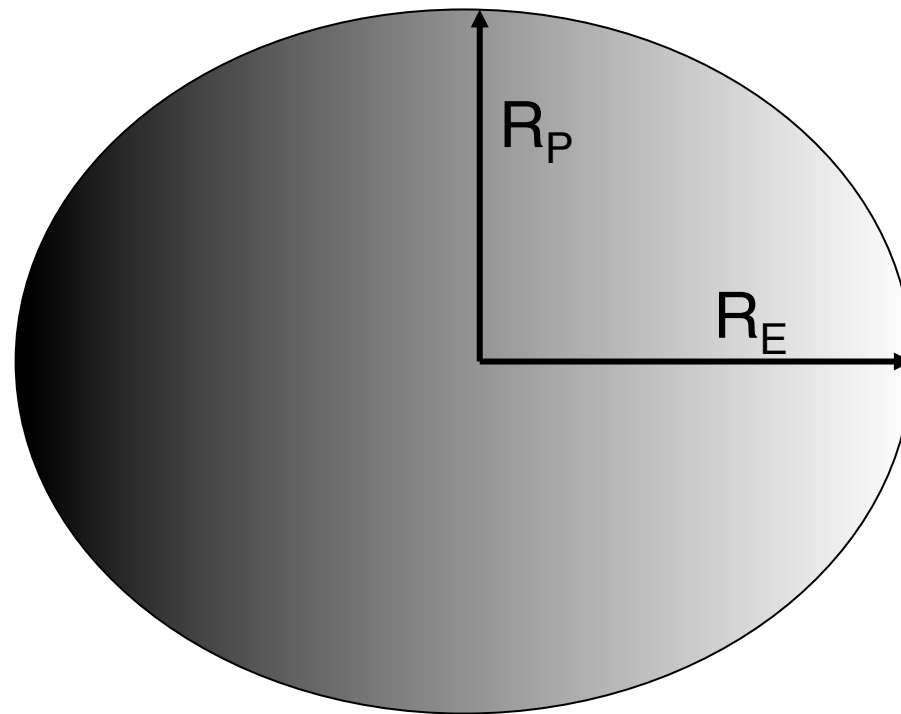
le rayon de la Terre



le rayon de la Terre

XVIII ème siècle: même méthode,
mais plus précise

Expéditions en France, Laponie et Pérou →
aplatissement de la Terre.



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

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

petit rappel historique:

lors de sa création (Révolution française), le mètre était défini comme la 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

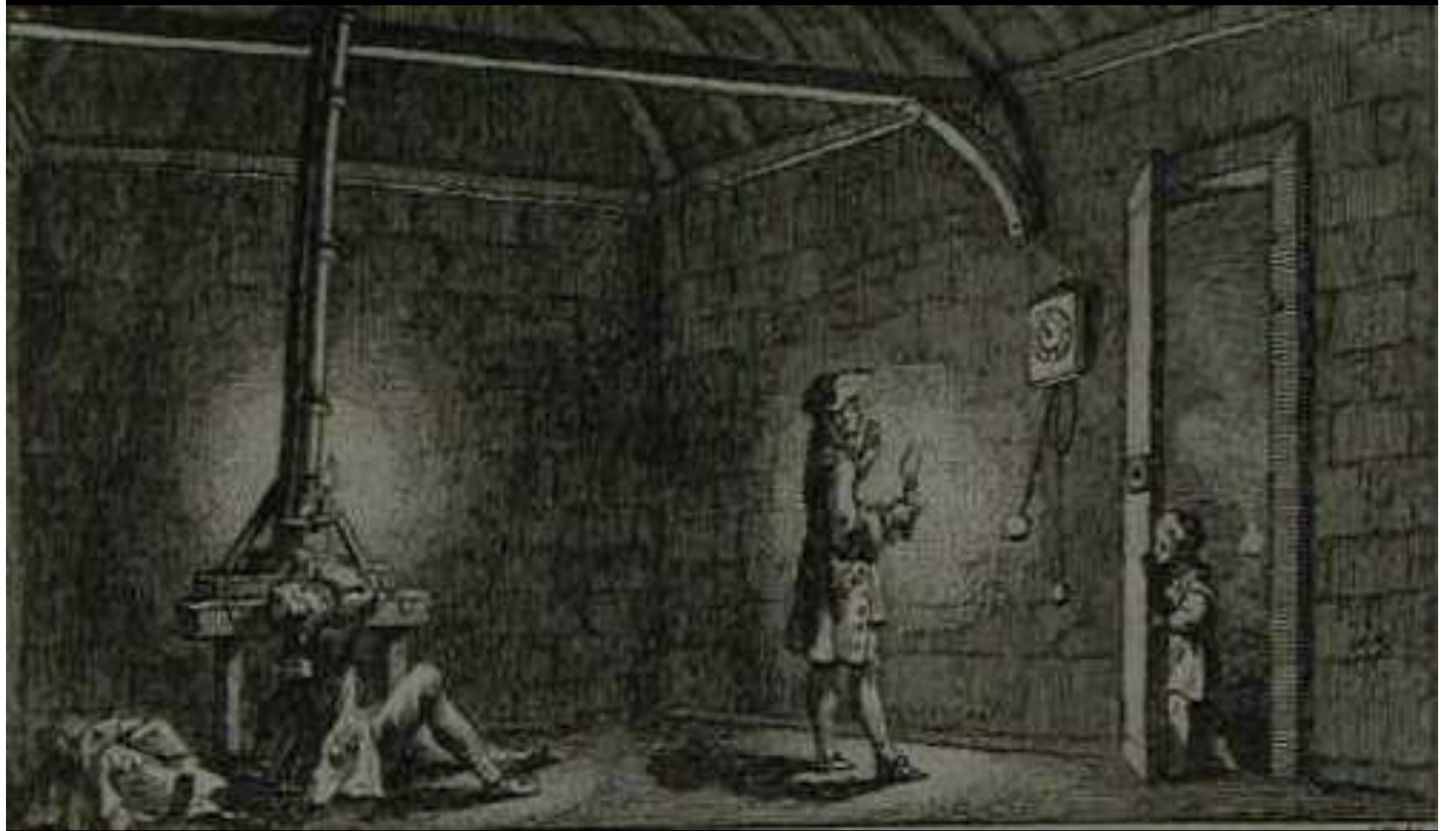
En fait (aplatissement), le rayon équatorial vaut 6378 km

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

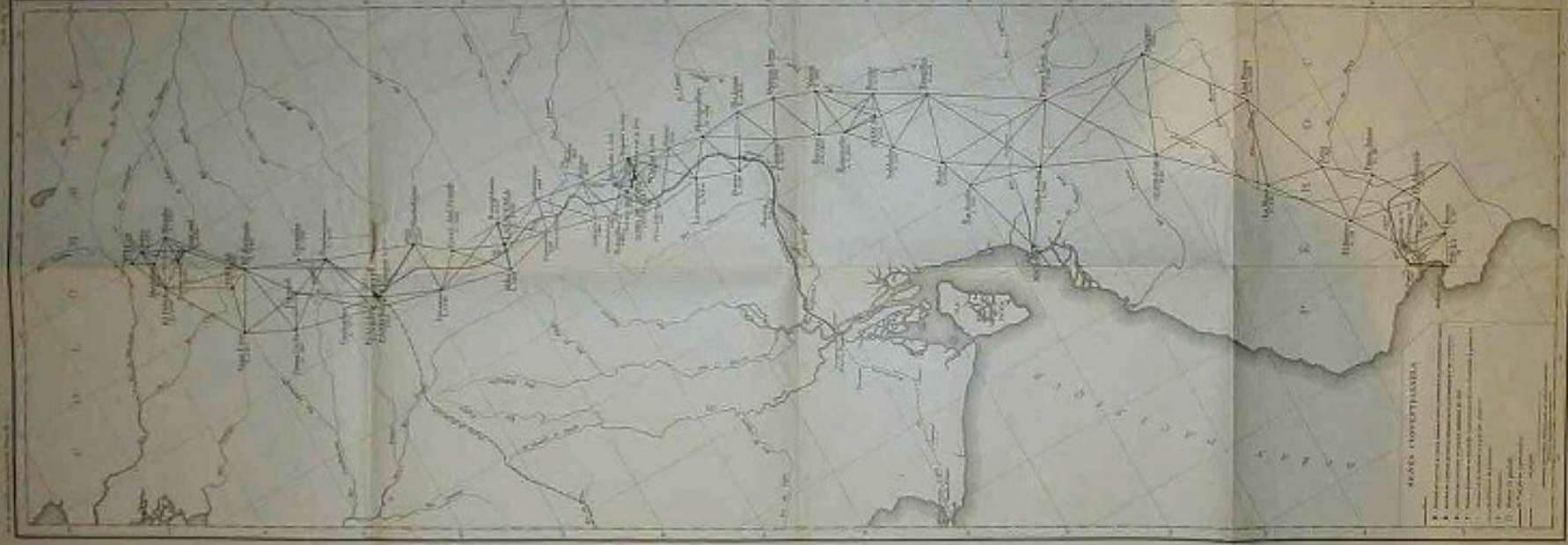
Donc on a *exactement* (et par définition!):

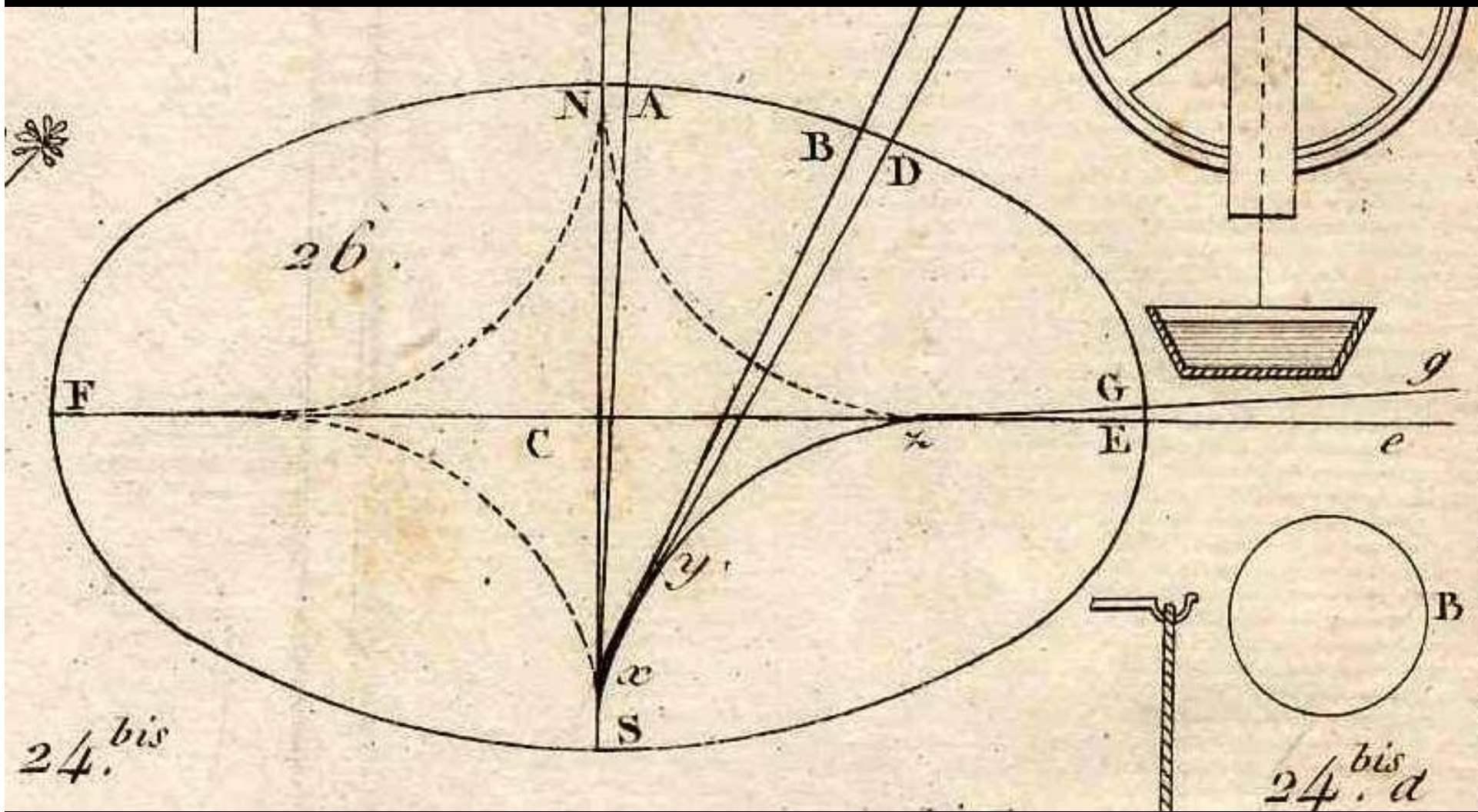
$$c = 299\,792\,458 \text{ m sec}^{-1}$$





ARC DE MÉRIDIEN ÉQUATORIAL.

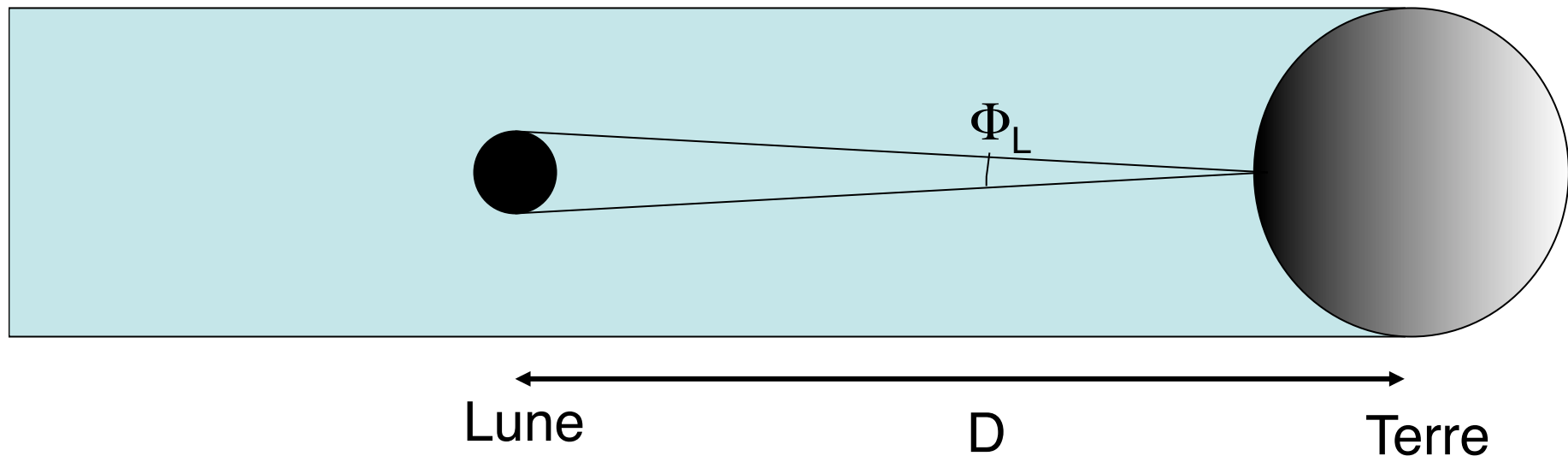




distance Terre-Lune

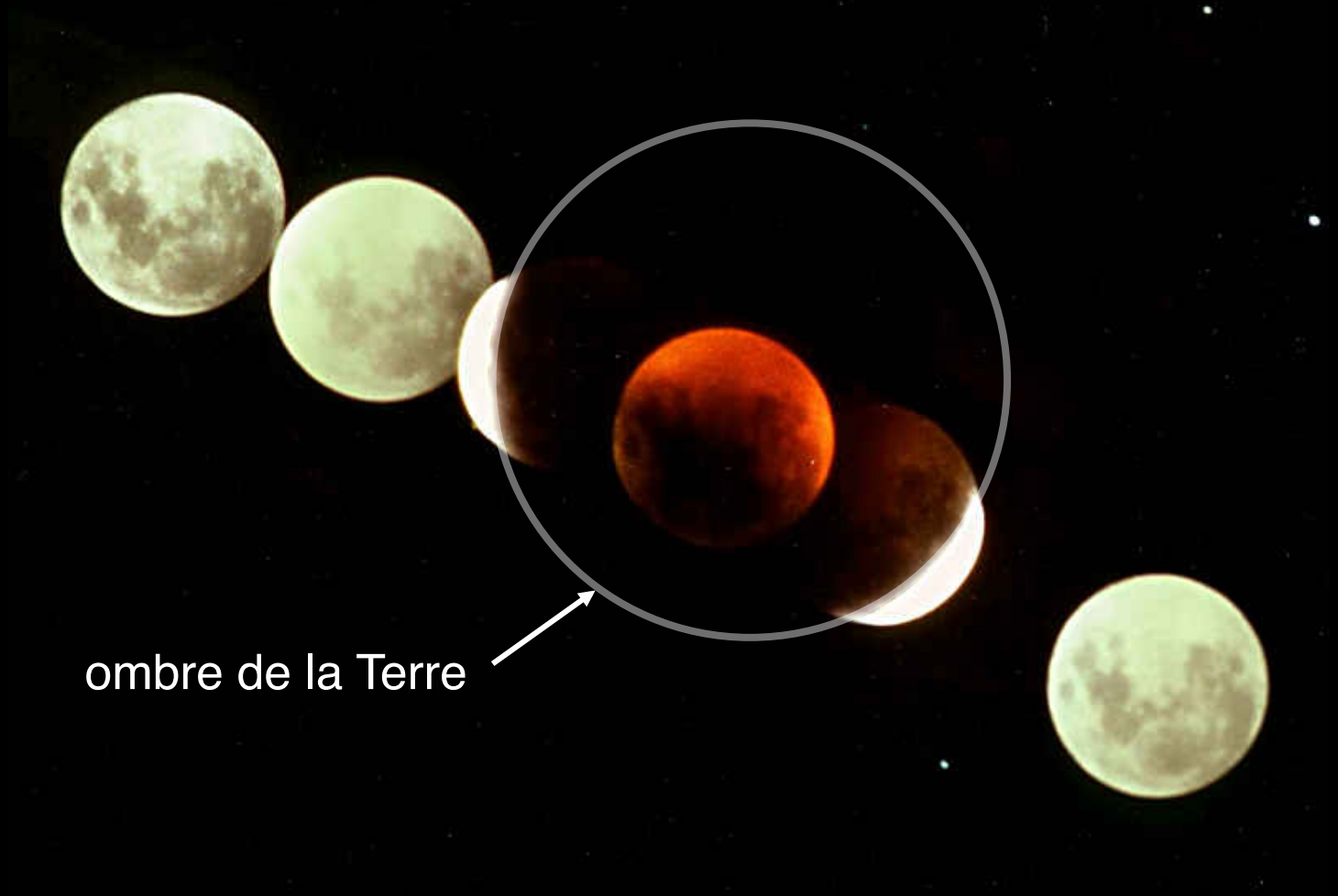
Aristarque de Samos (~ 300)

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



ombre sur la Lune: $R_L \sim R_T/3$ (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 $D \sim 60 R_T \sim 380000$ km)



ombre de la Terre

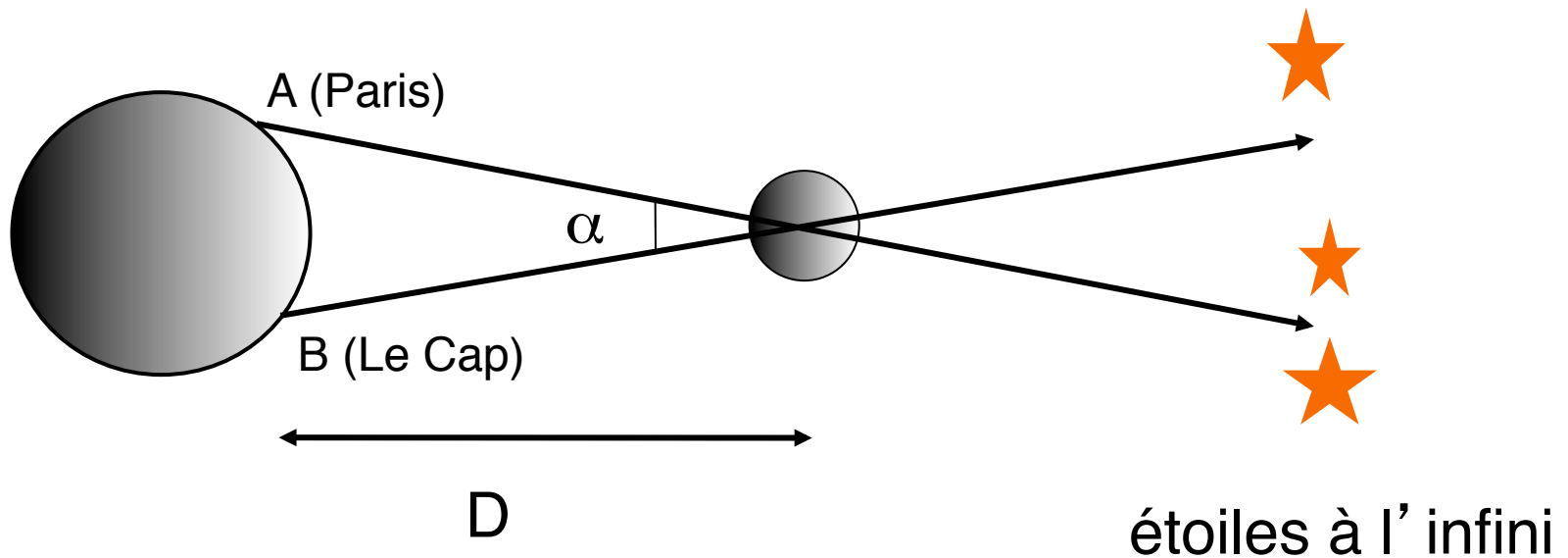
Lunar Eclipse June 4/5 1993 (<http://www.assa.org.au>)

Copyright © 1999 Arthur Beales

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

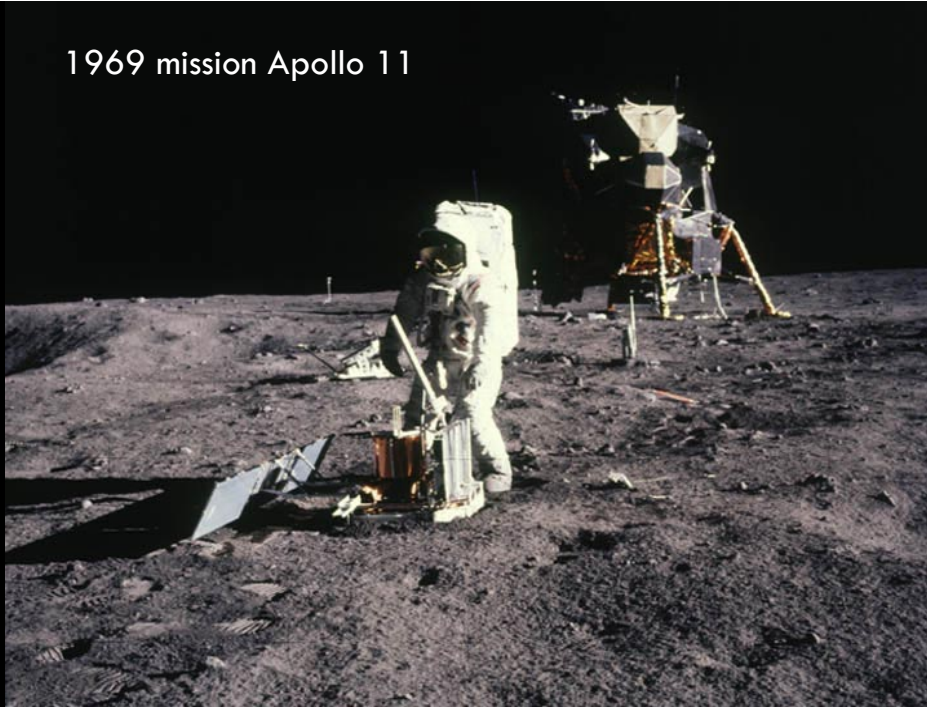
distance Terre-Lune

Renaissance et après: utilisation de la parallaxe *diurne* (ou terrestre)

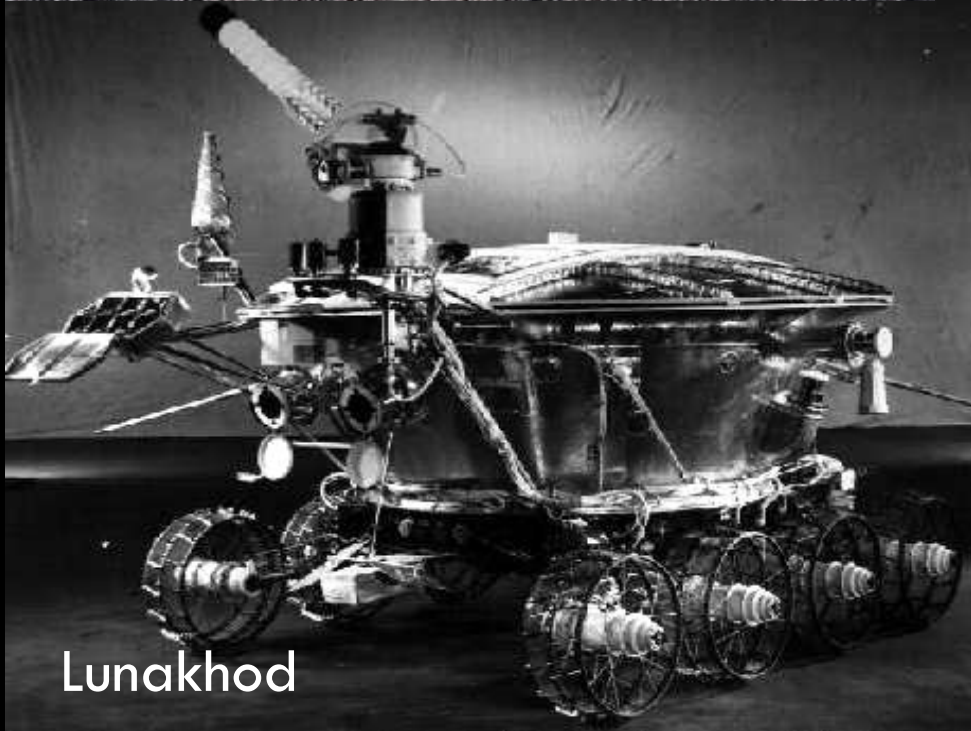


$$D = AB/\alpha$$

1969 mission Apollo 11



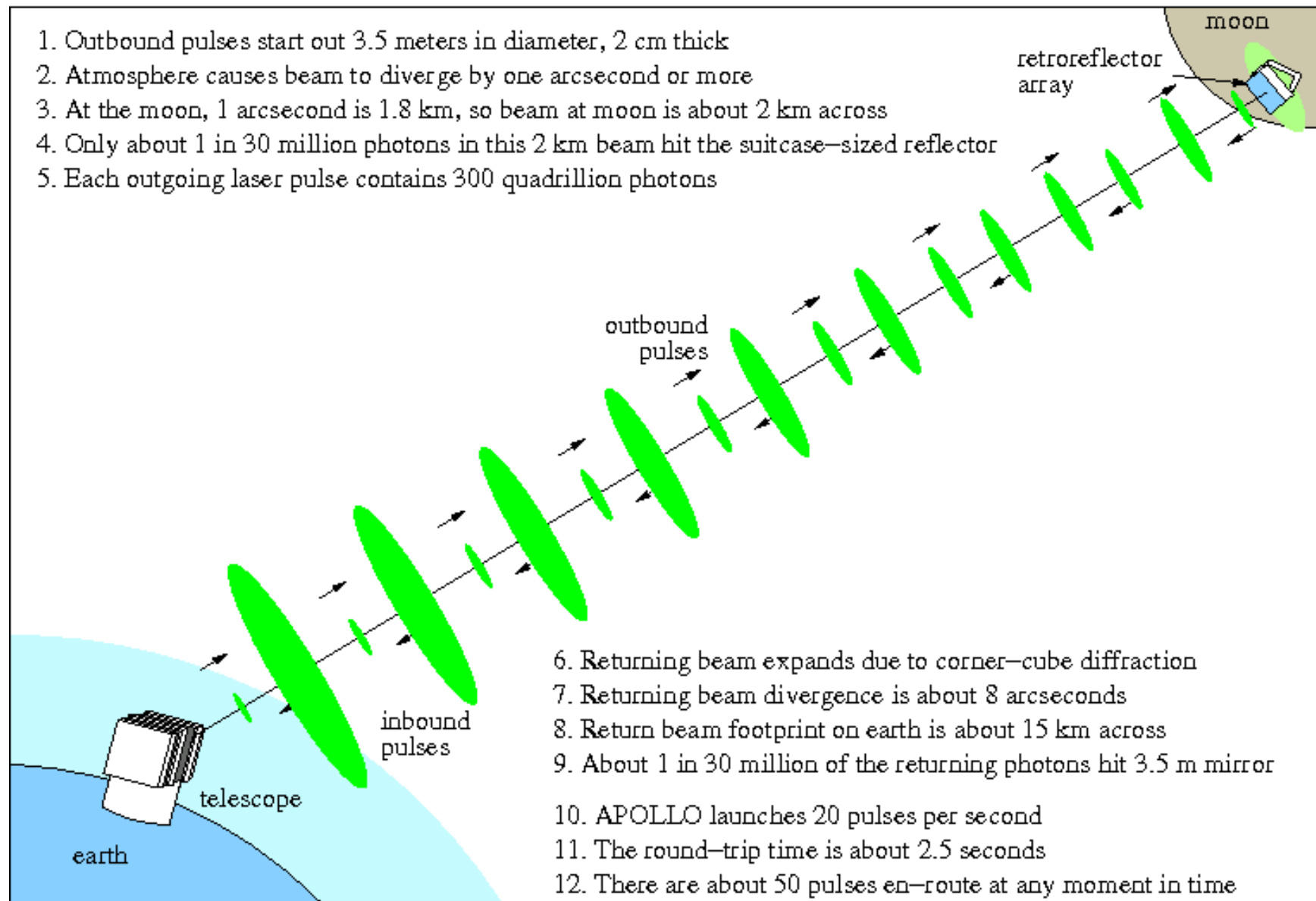
Réflecteur sur la Lune



Lunakhod

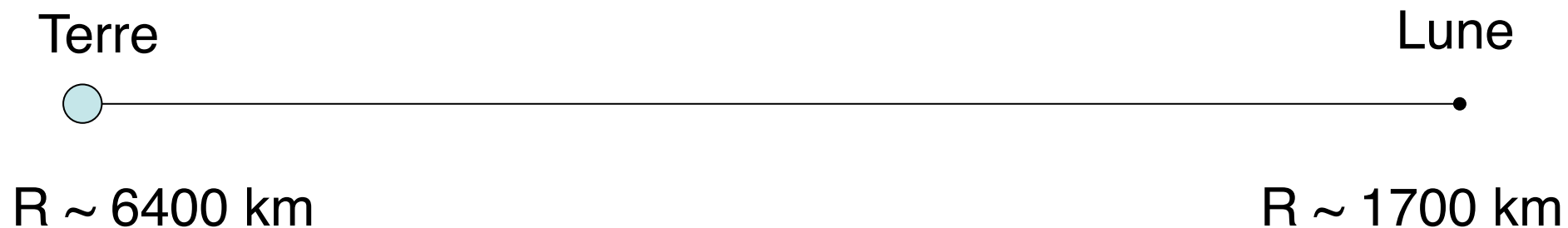
TELEMETRIE LASER-LUNE





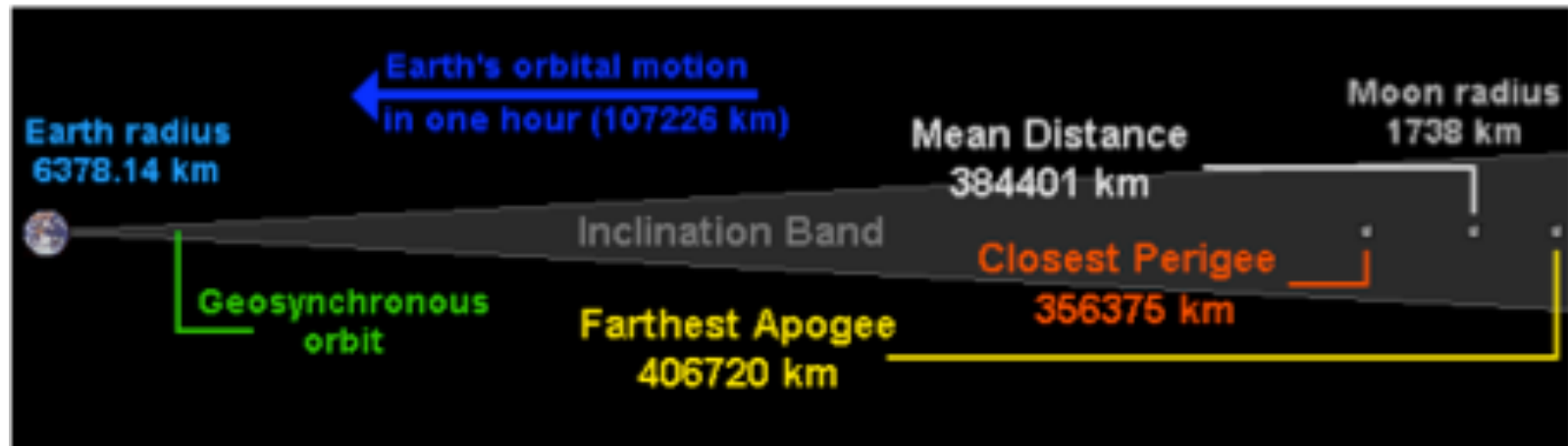
(T. Murphy)

distance Terre-Lune)



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

distance Terre-Lune



distance moyenne Terre-Lune
~ 384 400 km (~ 60 rayons terrestres)
~ 1.3 seconde-lumière

unité d'angle: la seconde d'arc

rappel:

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

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

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

donc: $1^\circ = 3600''$

et:

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

quelques ordres de grandeur:

- diamètre angulaire du Soleil \sim diamètre angulaire de la Lune \sim 30 arcmin
- limite de résolution de l'œil humain \sim 2 arcmin
- diamètre angulaire de Vénus \sim 1 arcmin
- étalement des images stellaires par turbulence atmosphérique \sim 1 arcsec (« seeing »)

unité astronomique (UA)

Soleil



Terre



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

depuis août 2012 définition
de l'Union Astronomique Internationale (UAI) :
1 UA = 149 597 870 700 m exactement!

UA: unité naturelle pour distances
dans le système solaire

demi grand-axe orbites:

Mercury: 0.4 UA

Venus: 0.7 UA

Mars: 1.5 UA

Jupiter: 5.2 UA

...

Pluton: 40 UA (~ 5.5 heures)

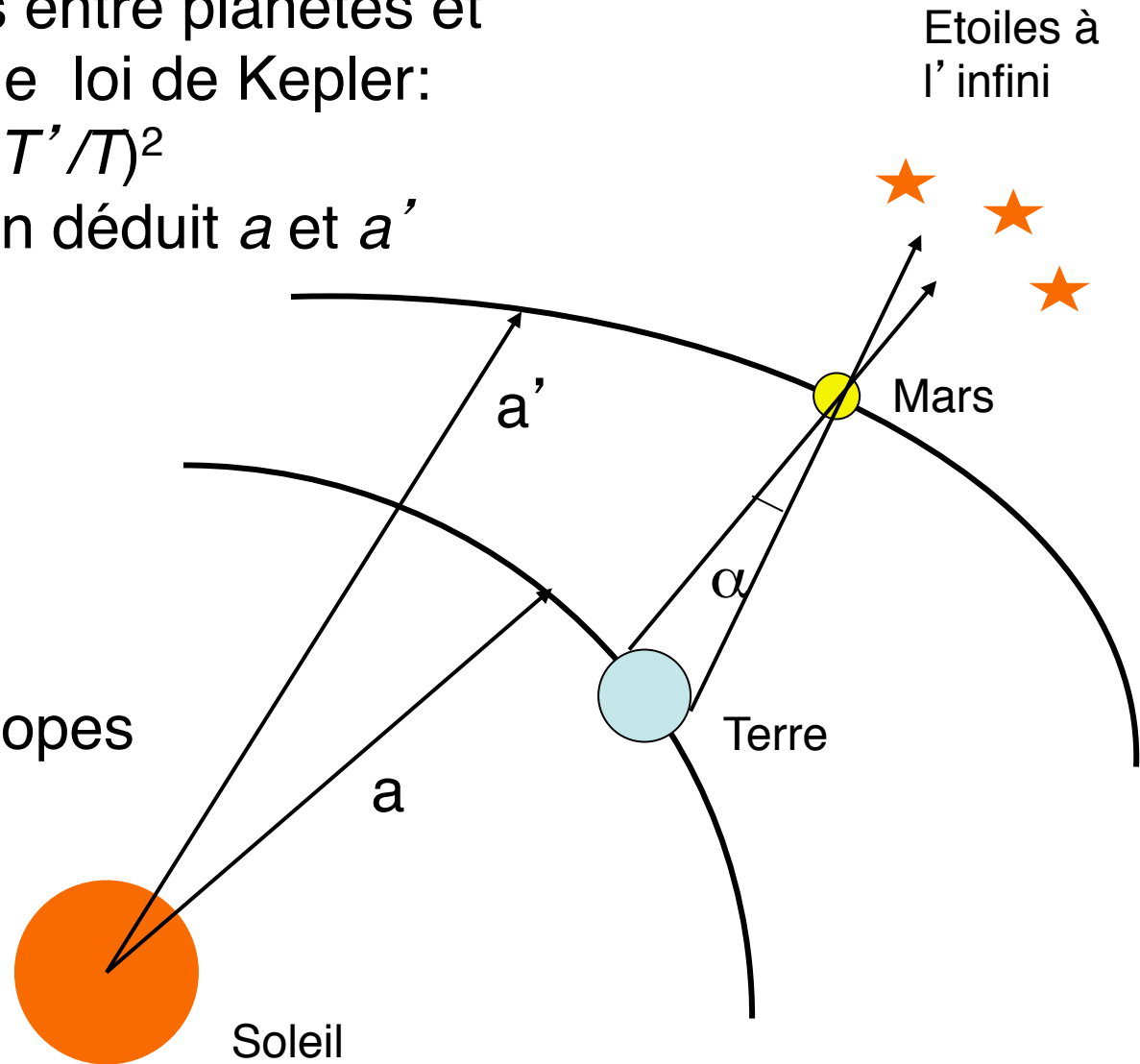
distance Terre-Soleil

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

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

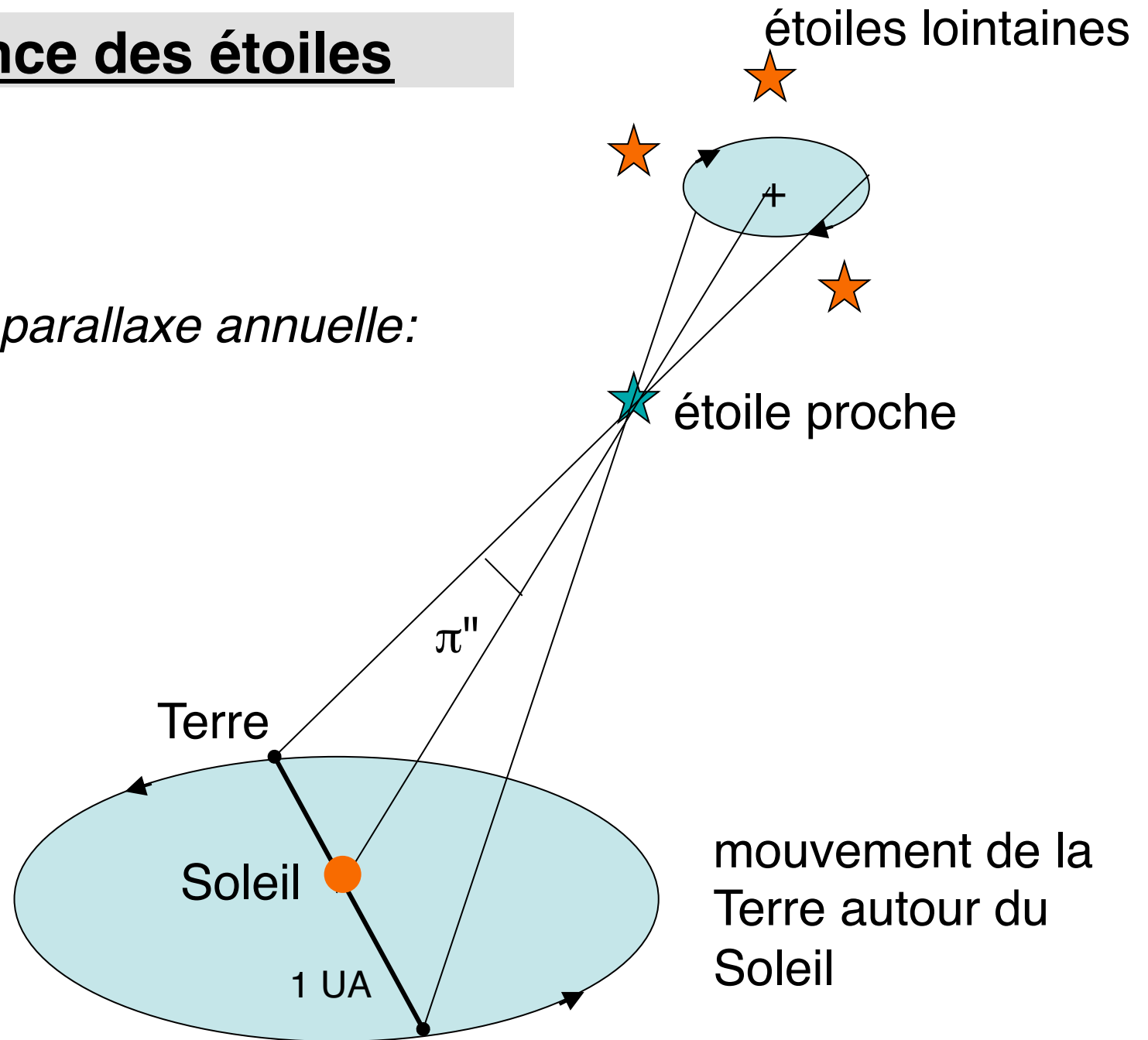
α donne $a' - a \rightarrow$ on déduit a et a'

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

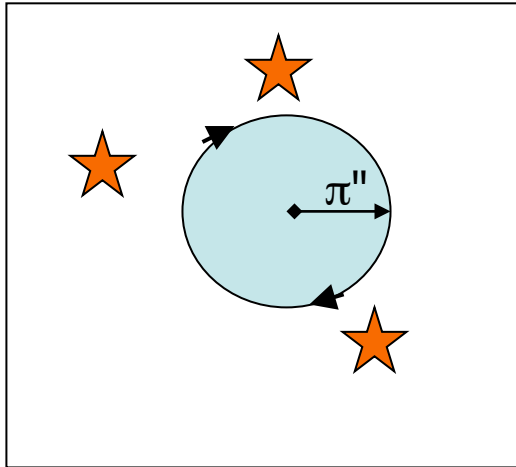


distance des étoiles

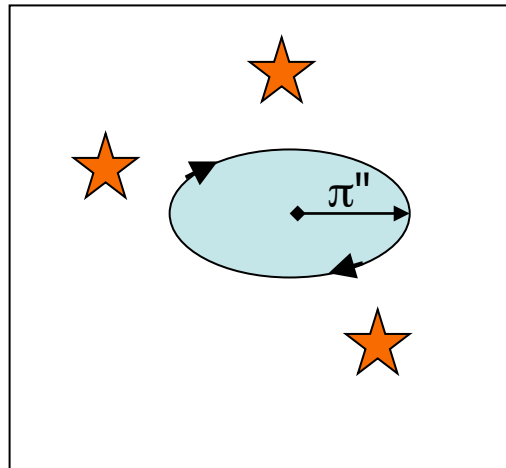
méthode de *parallaxe annuelle*:



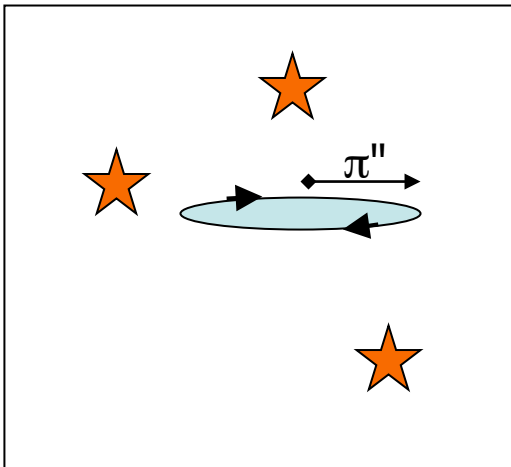
mouvement de la
Terre autour du
Soleil



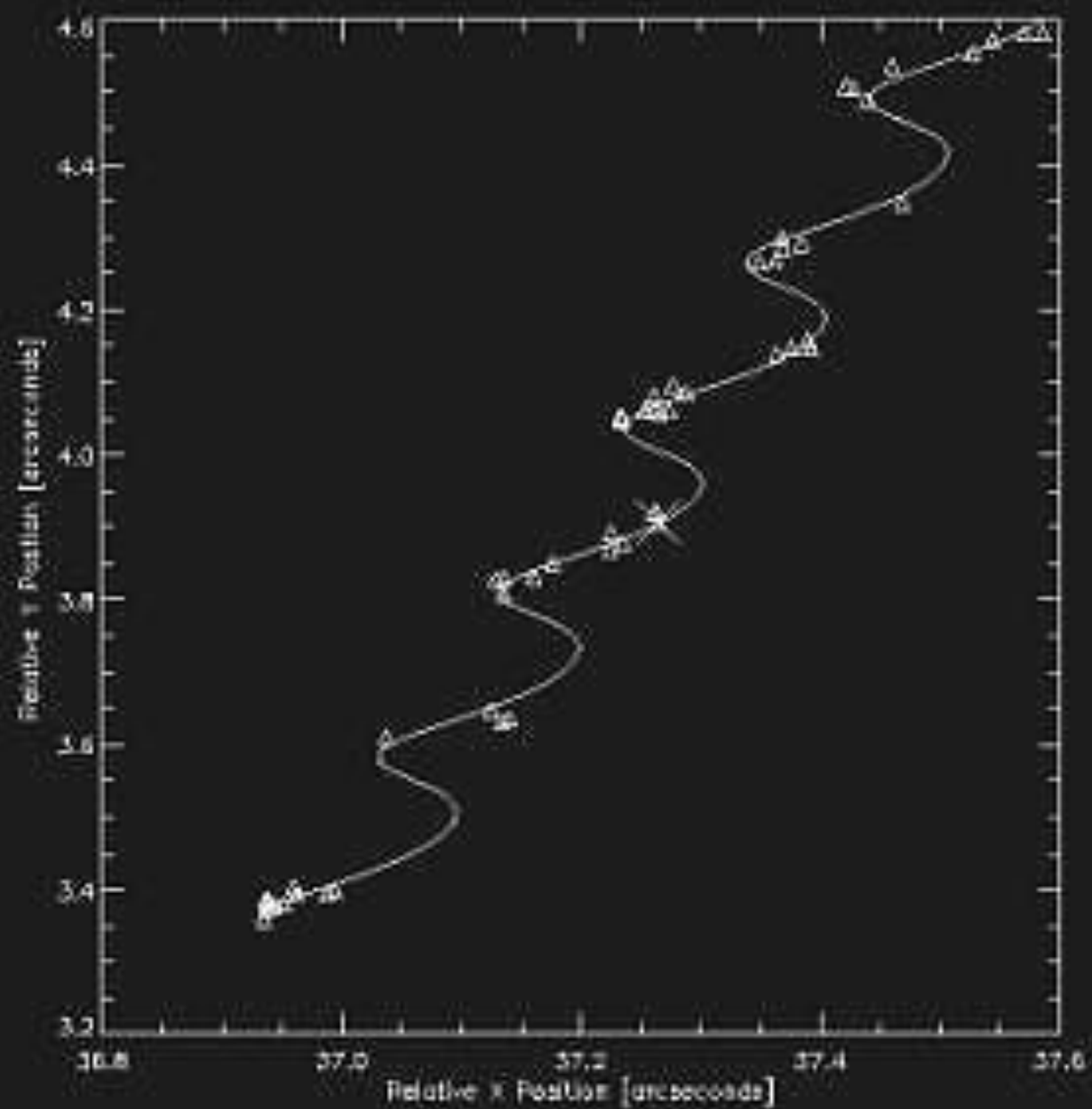
près du pôle écliptique



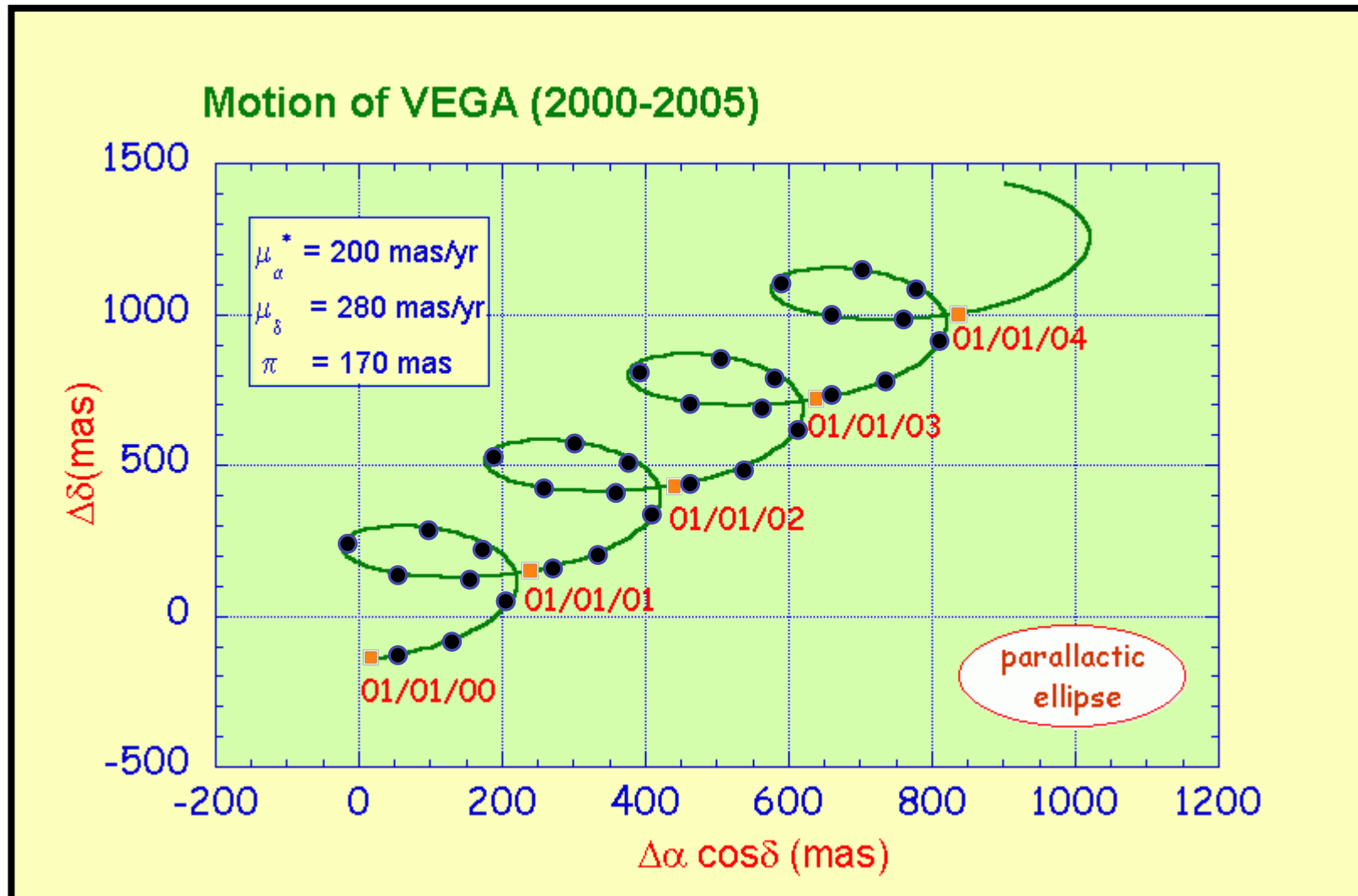
position quelconque



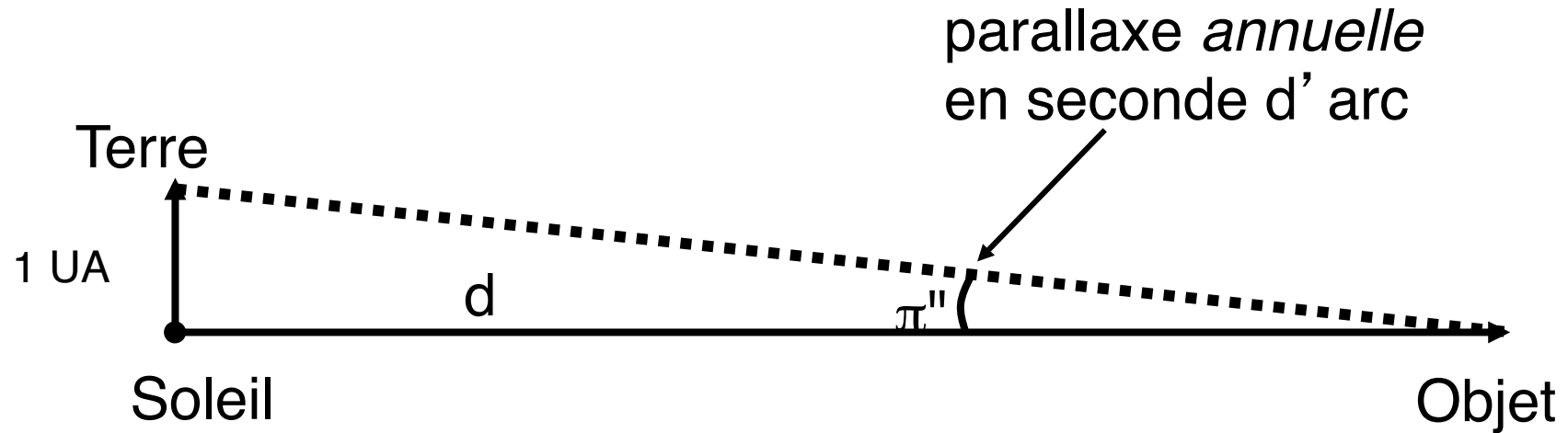
près du plan écliptique



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 pc $\sim 3.1 \times 10^{16}$ mètres
 ~ 3.3 années-lumière (al)

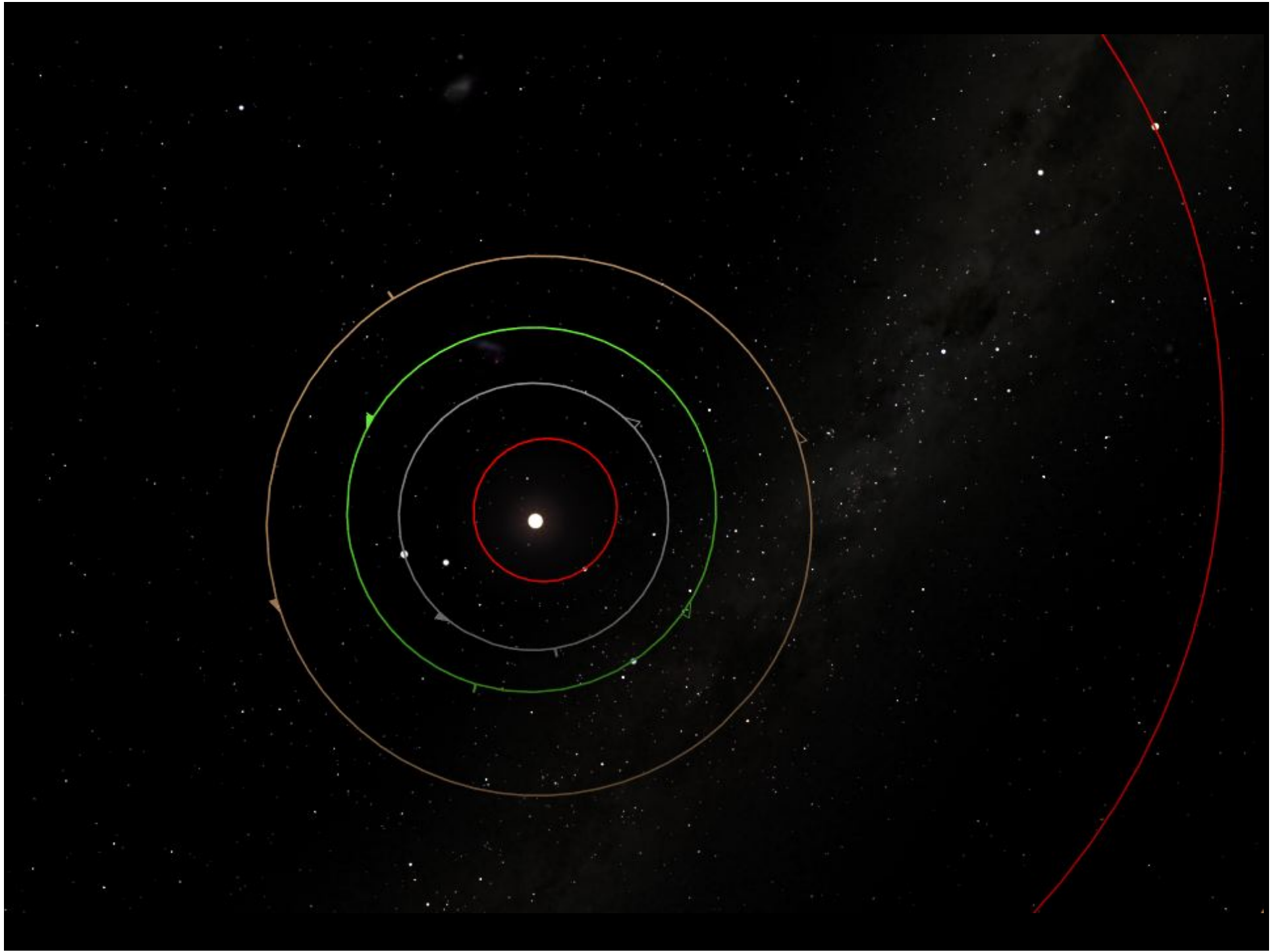
ex. *Proxima du Centaure*: (plus proche étoile connue)

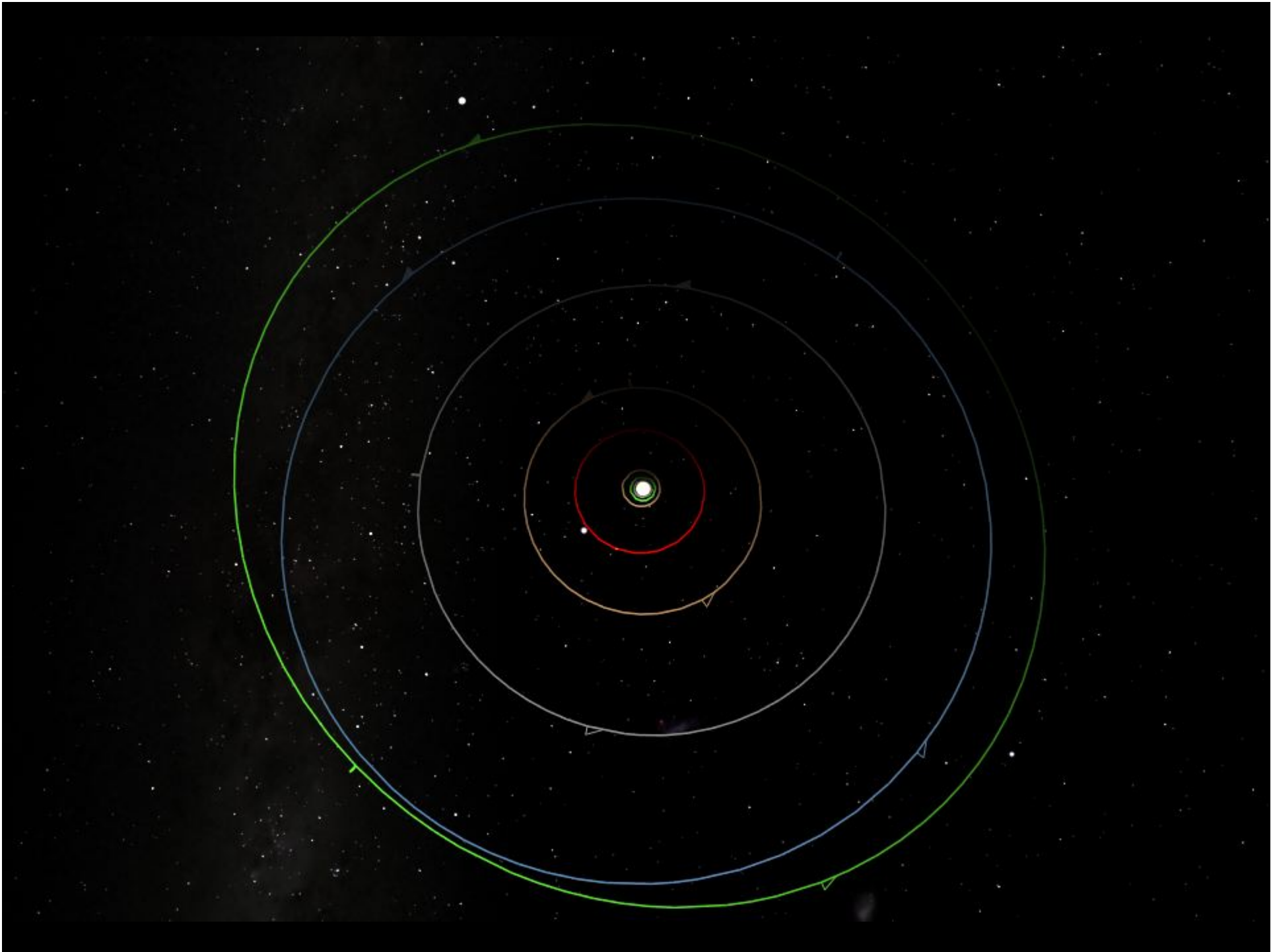
$$\pi'' \sim 0.76 \text{ arcsec} \rightarrow d \sim 1.3 \text{ pc} \sim 4.2 \text{ al}$$

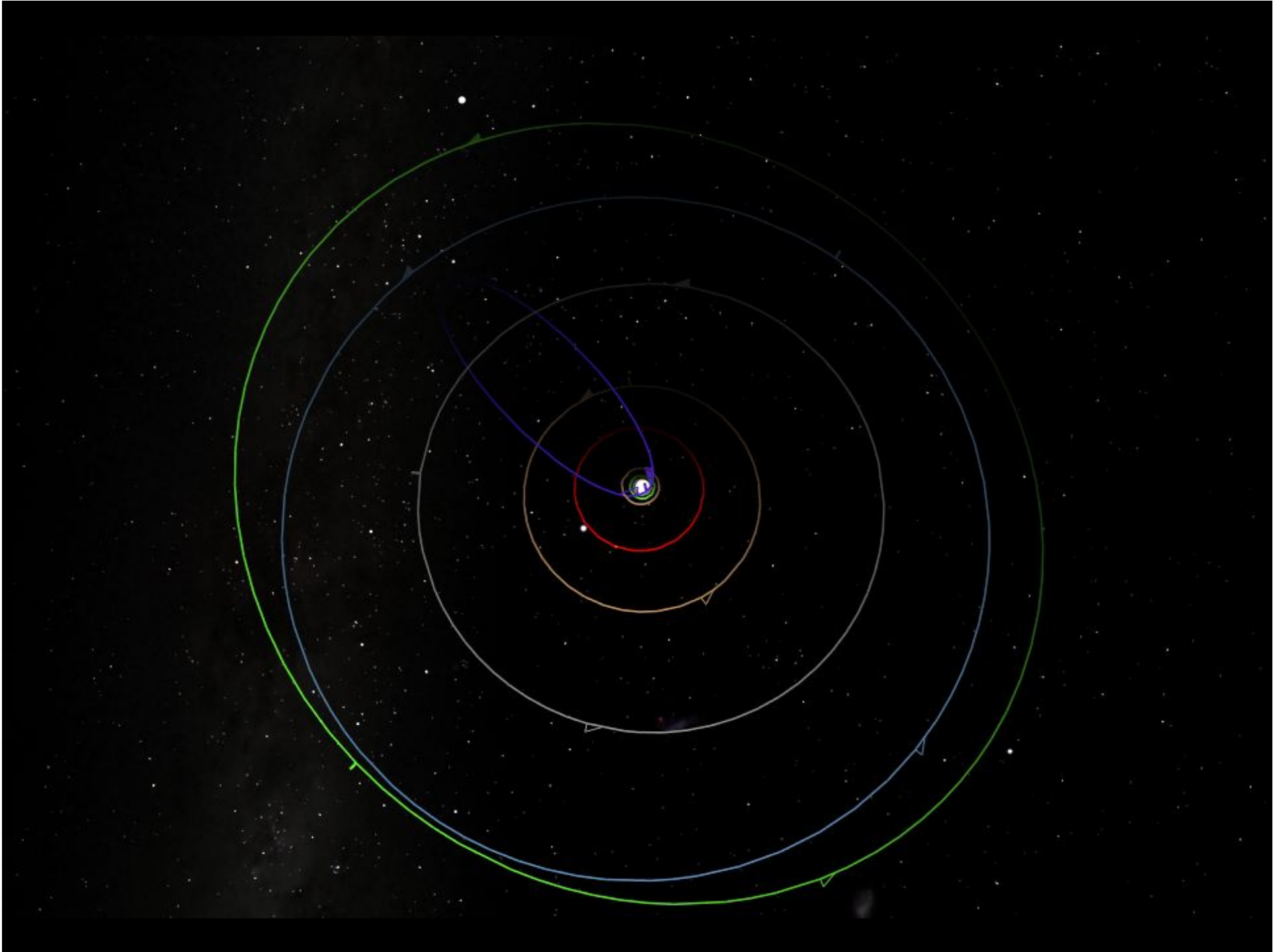
observations du sol: limite $> \sim 0.05''$ $\rightarrow d < \sim 20$ pc
quelques centaines d'étoiles

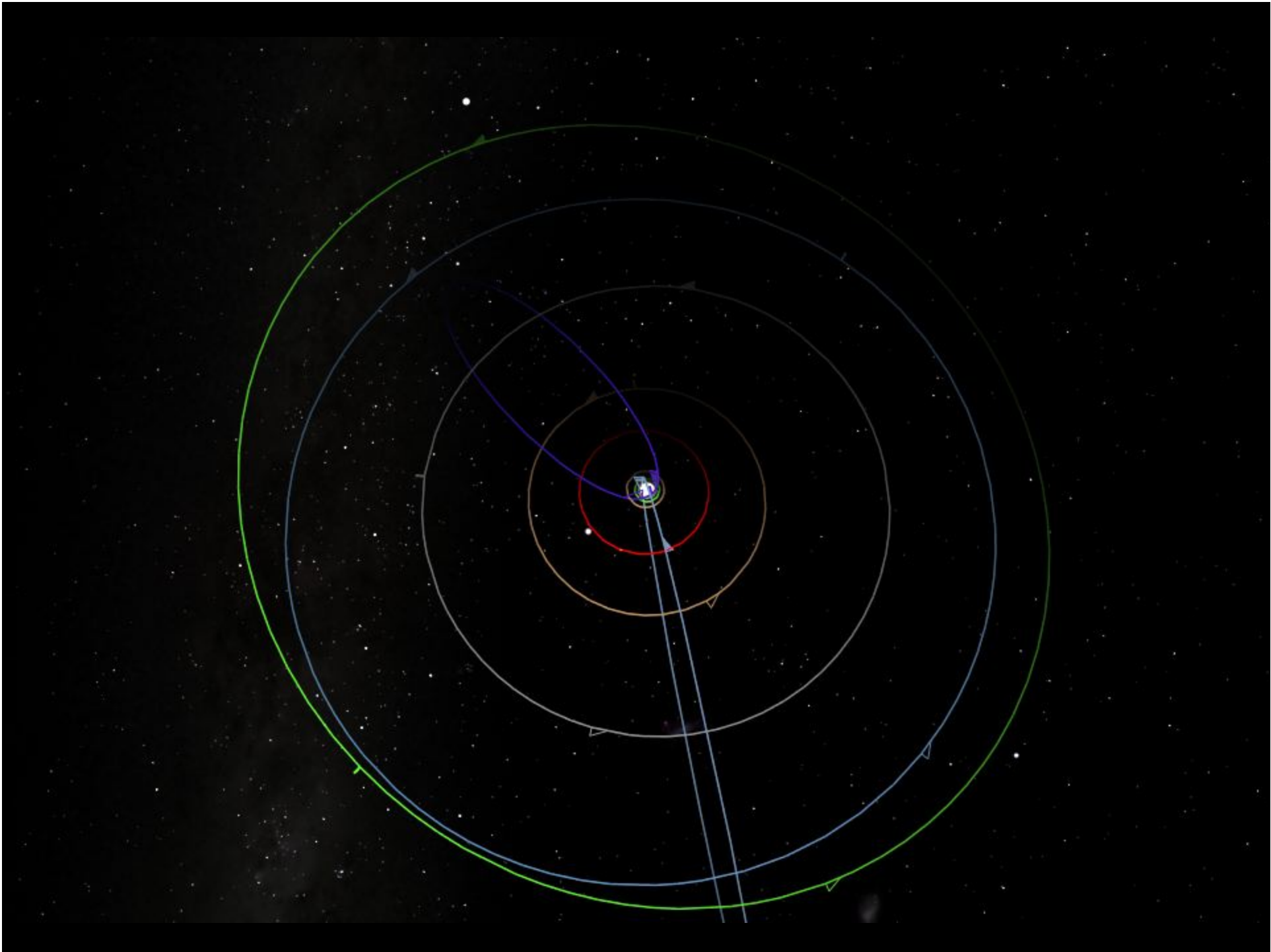
mission ESA/Hipparcos (début 1990's):
limite $> \sim 0.001'' = 1$ mas $\rightarrow d < \sim 1000$ pc (1 kpc)
environ 100 000 étoiles

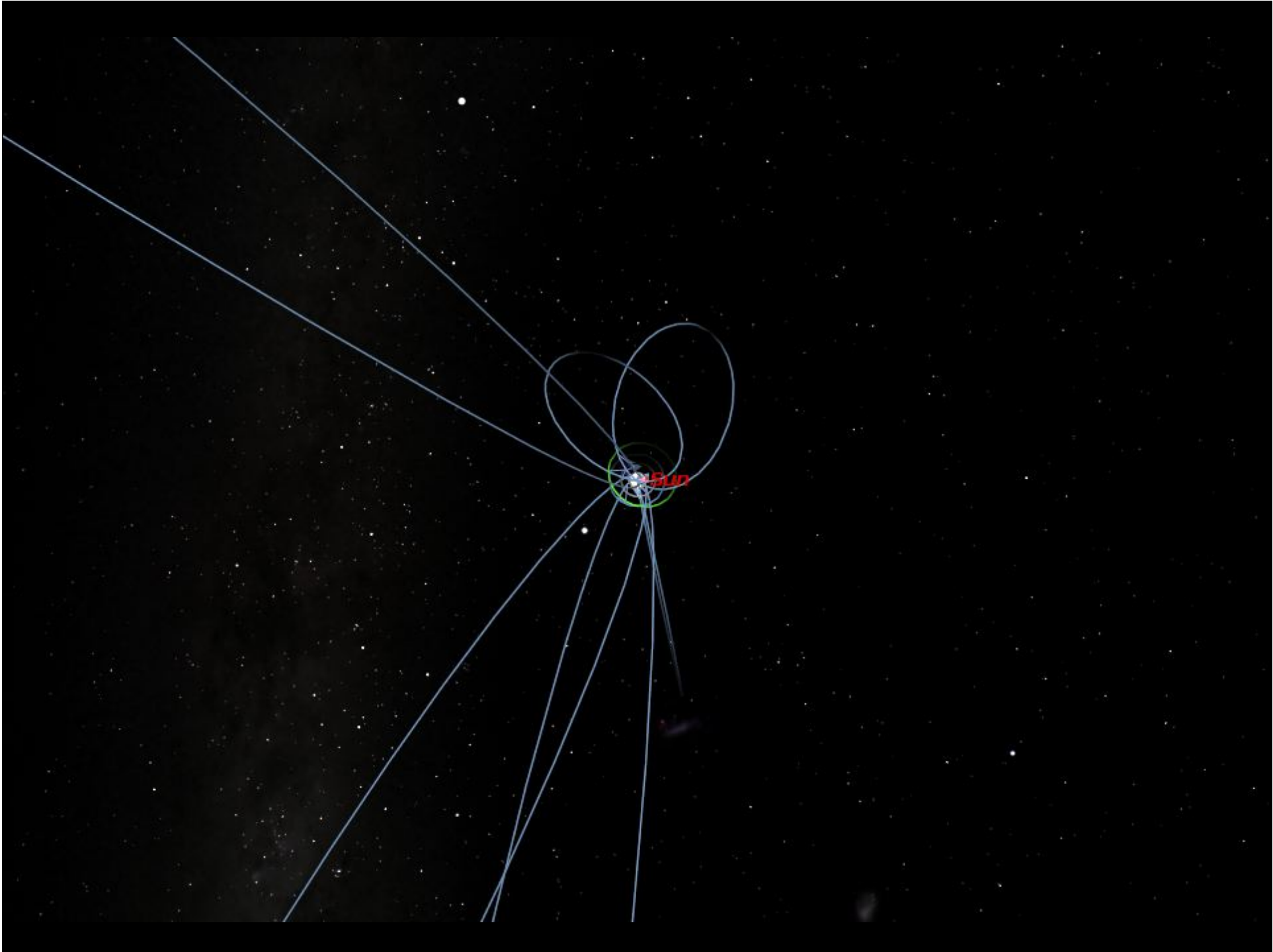
mission ESA/Gaia (> 2010):
limite $> \sim 10^{-5}$ arcsec $\rightarrow d < \sim 100000$ pc = 100 kpc



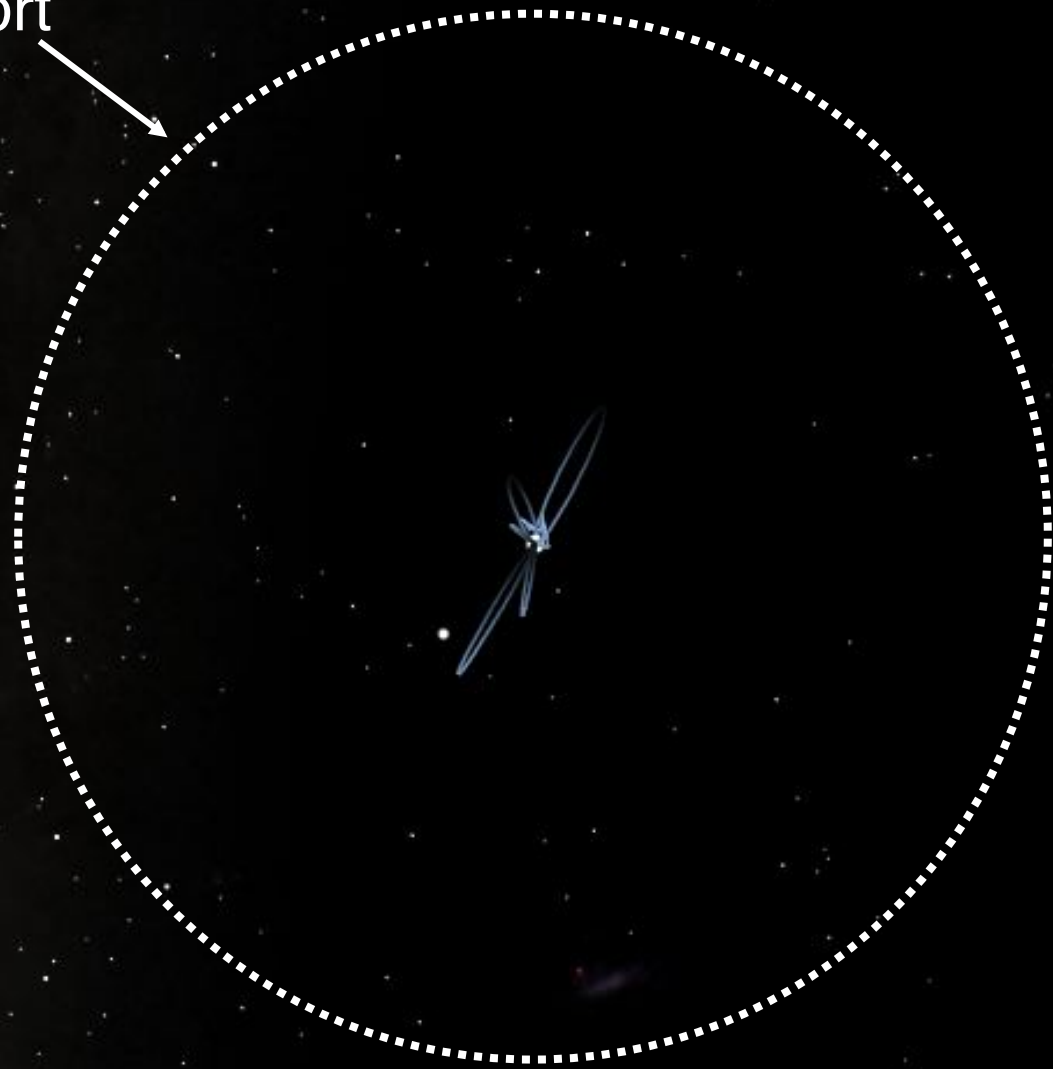




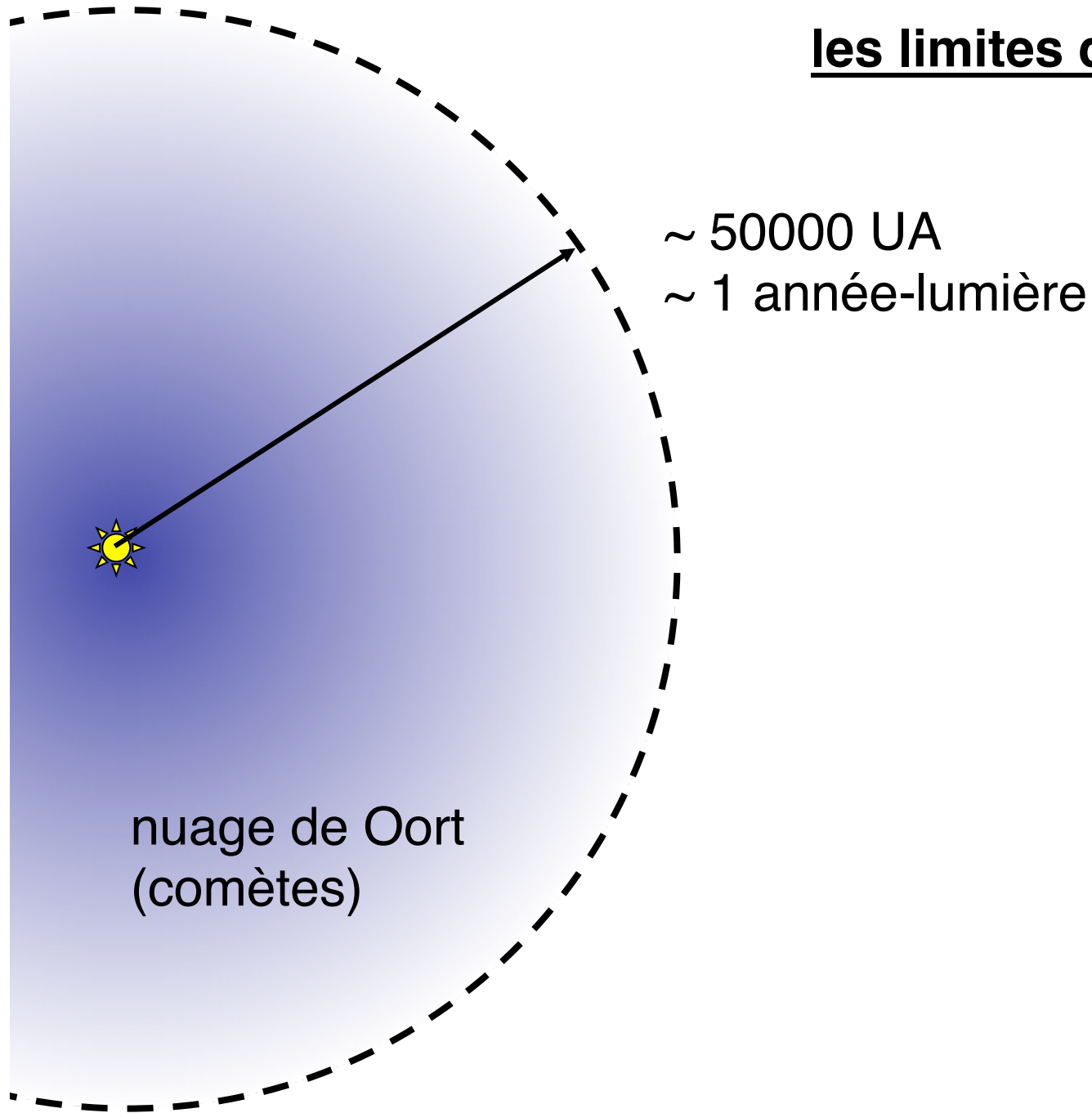




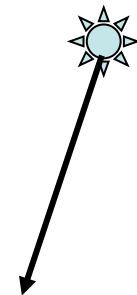
nuage de Oort



les limites du système solaire

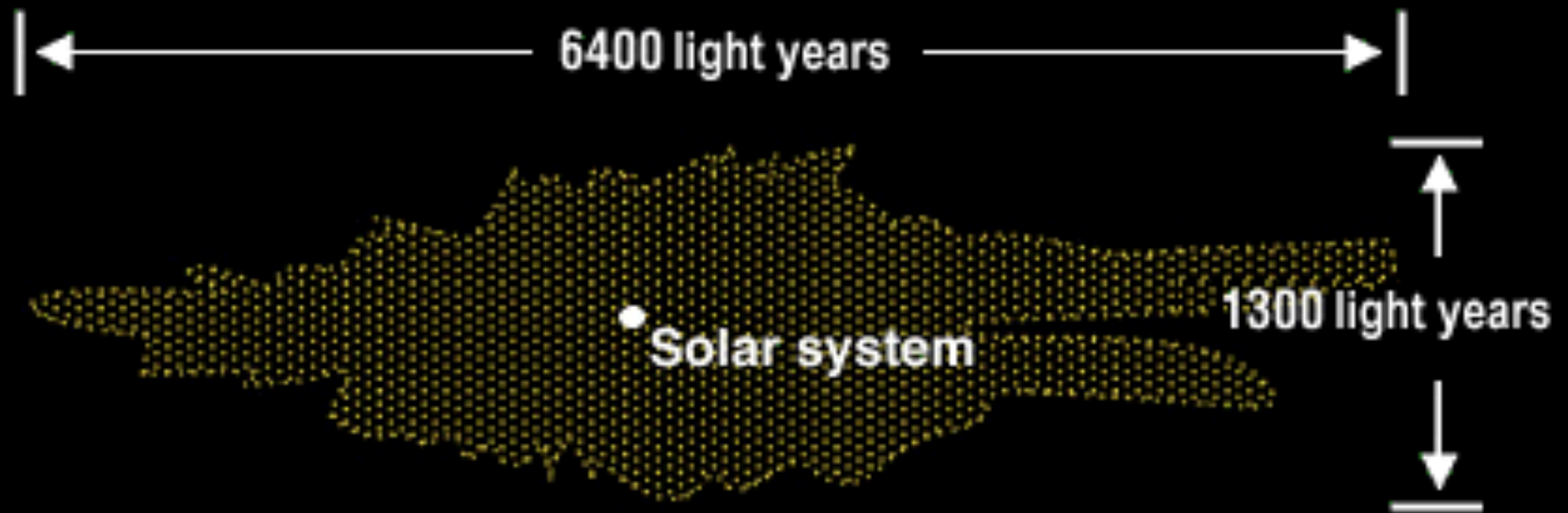


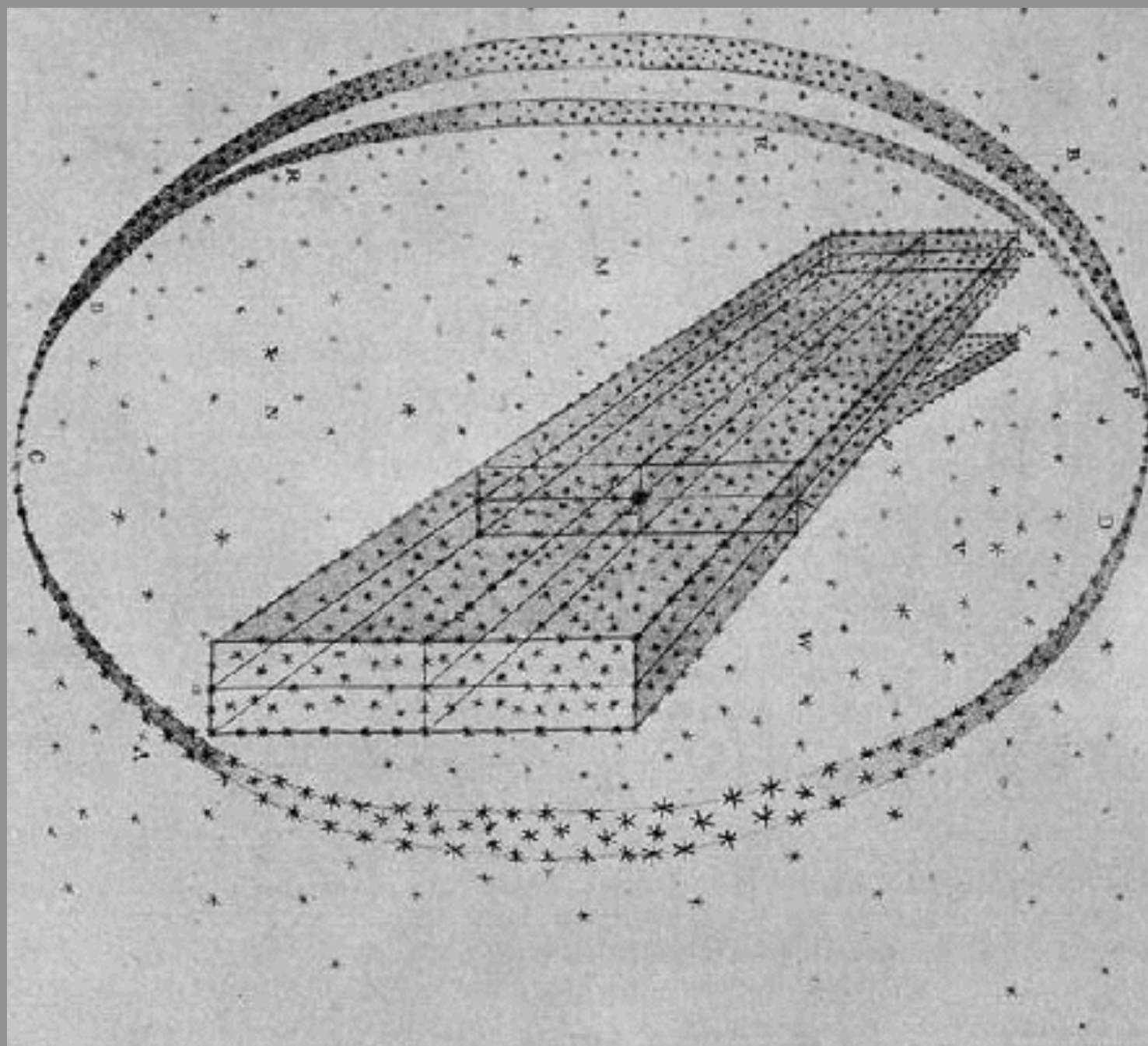
proxima du
Centaure
~ 4.2 a.l.

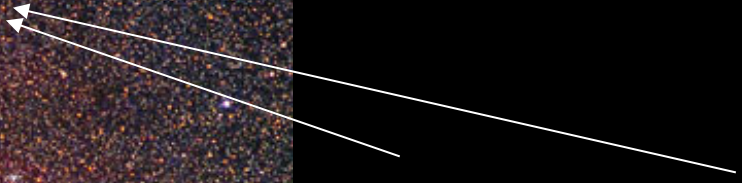




Herschel's Galaxy model







distances interstellaires
~ 1 pc

notre Galaxie (« Voie Lactée »)

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



épaisseur disque $\sim 2 \text{ kpc}$



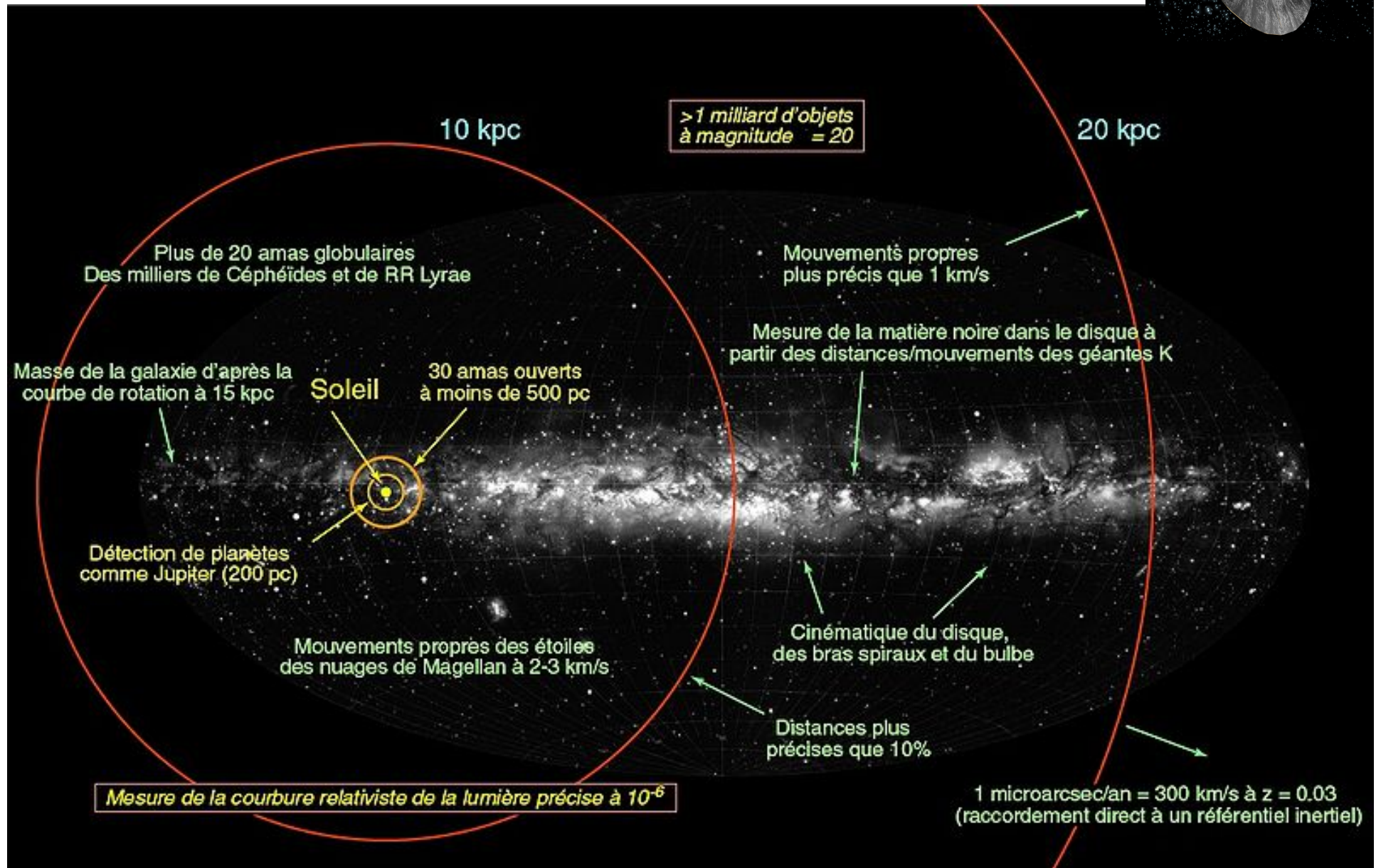
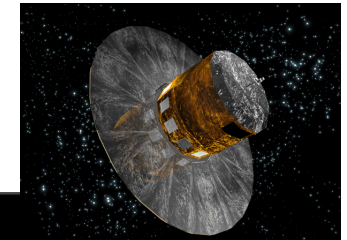
position Système Solaire

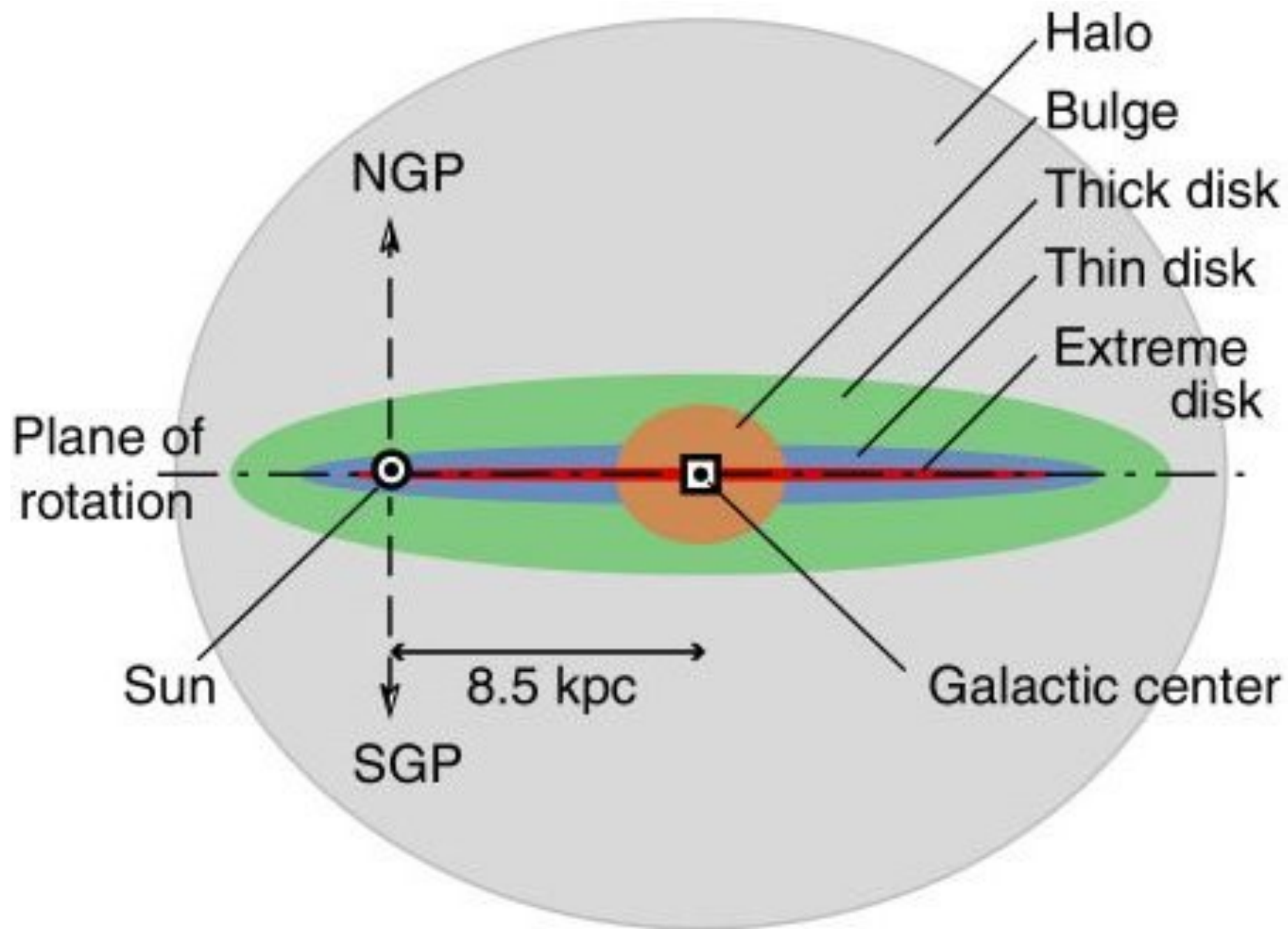
$\sim 8.5 \text{ kpc}$



volume accessible Hipparcos

Gaia





diamètre $\sim 100\,000$ a.l., ou $30\,000$ pc



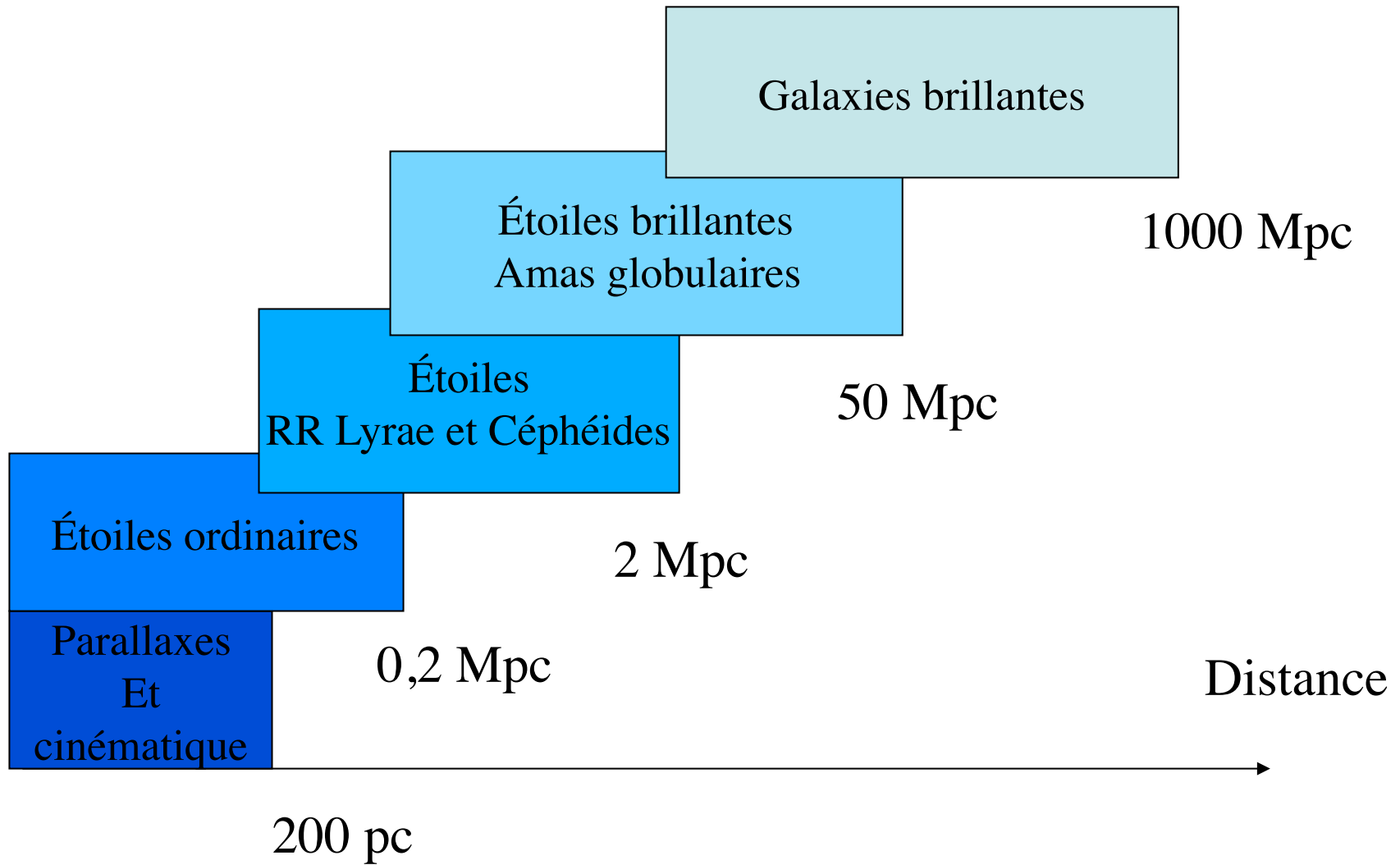
révolution du
Soleil \sim
 230 millions
d'années

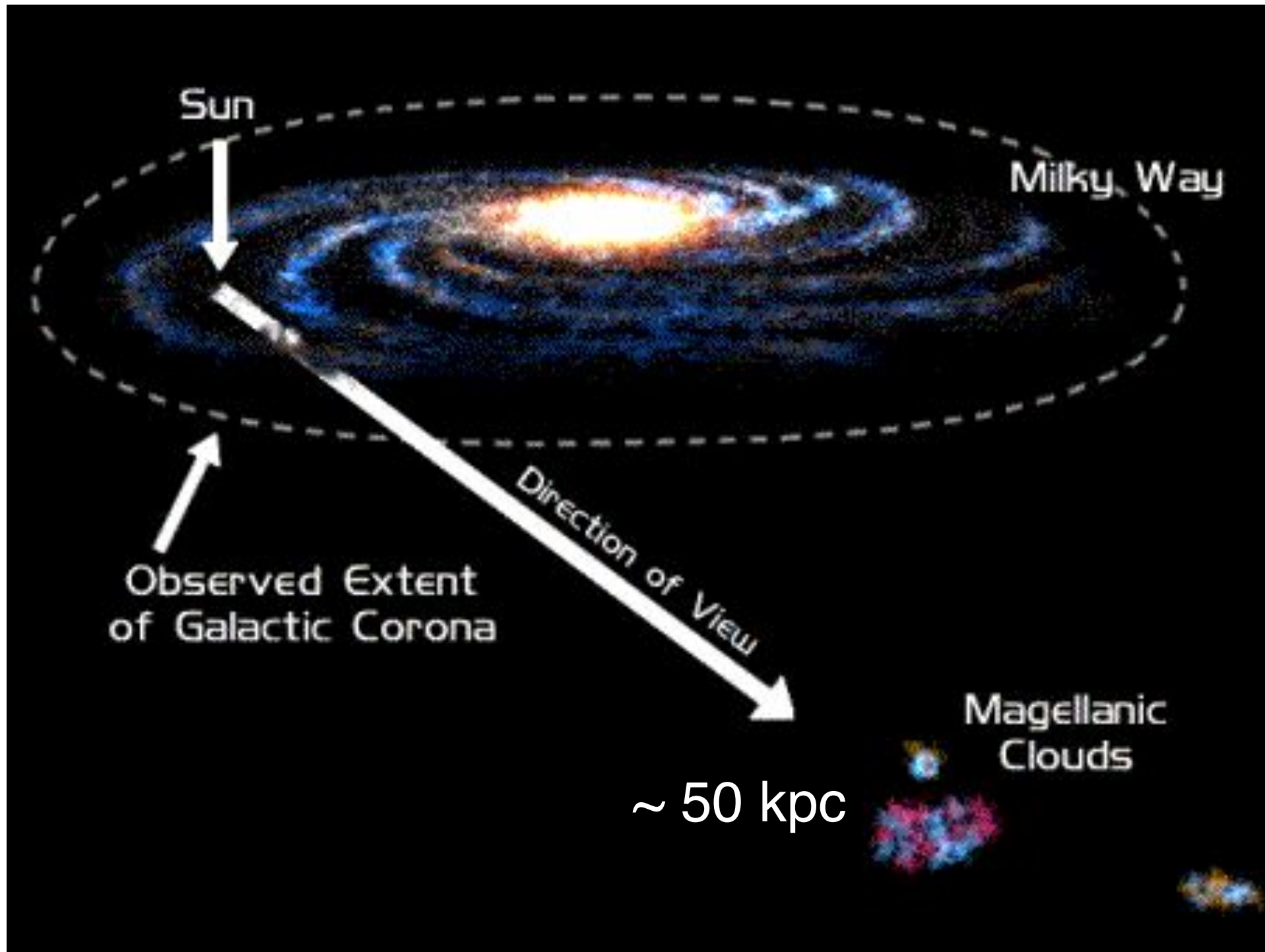
vitesse \sim
 225 km sec⁻¹

population \sim
 100 milliards d'étoiles

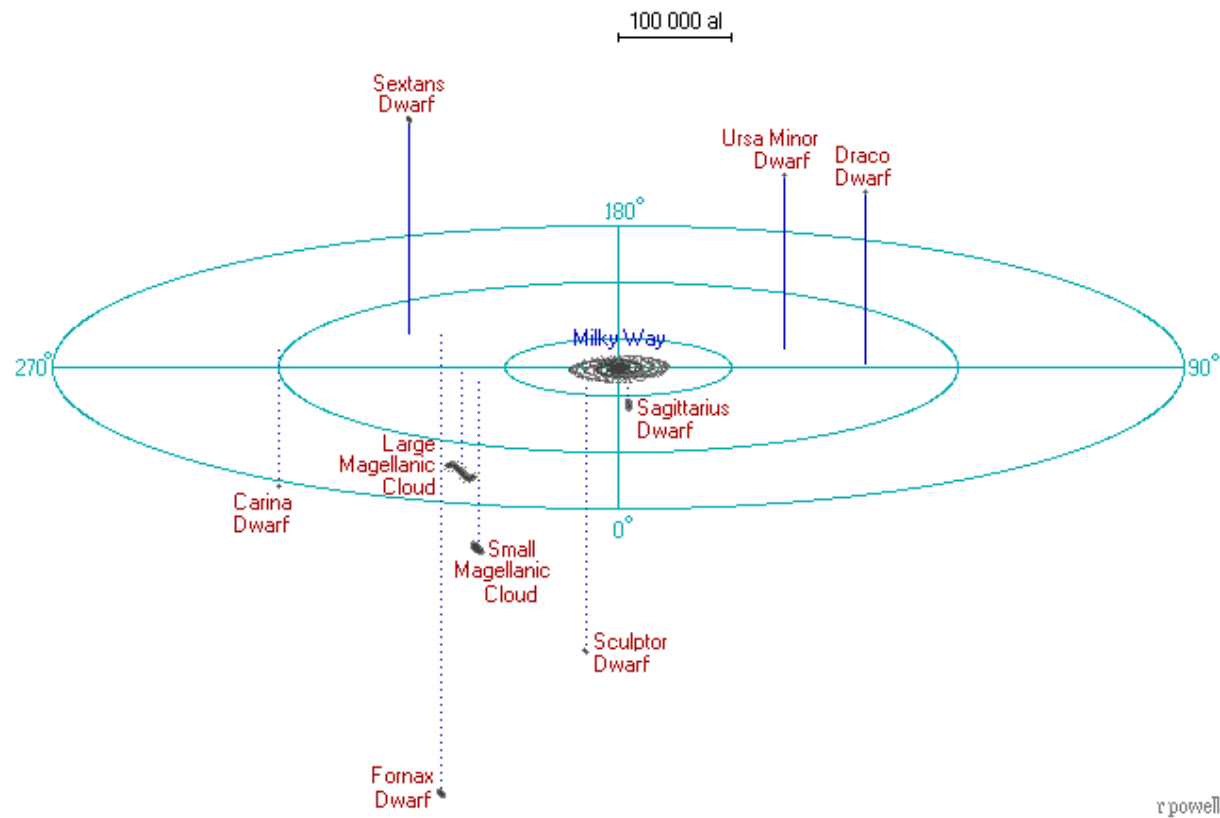


Echelle des distances

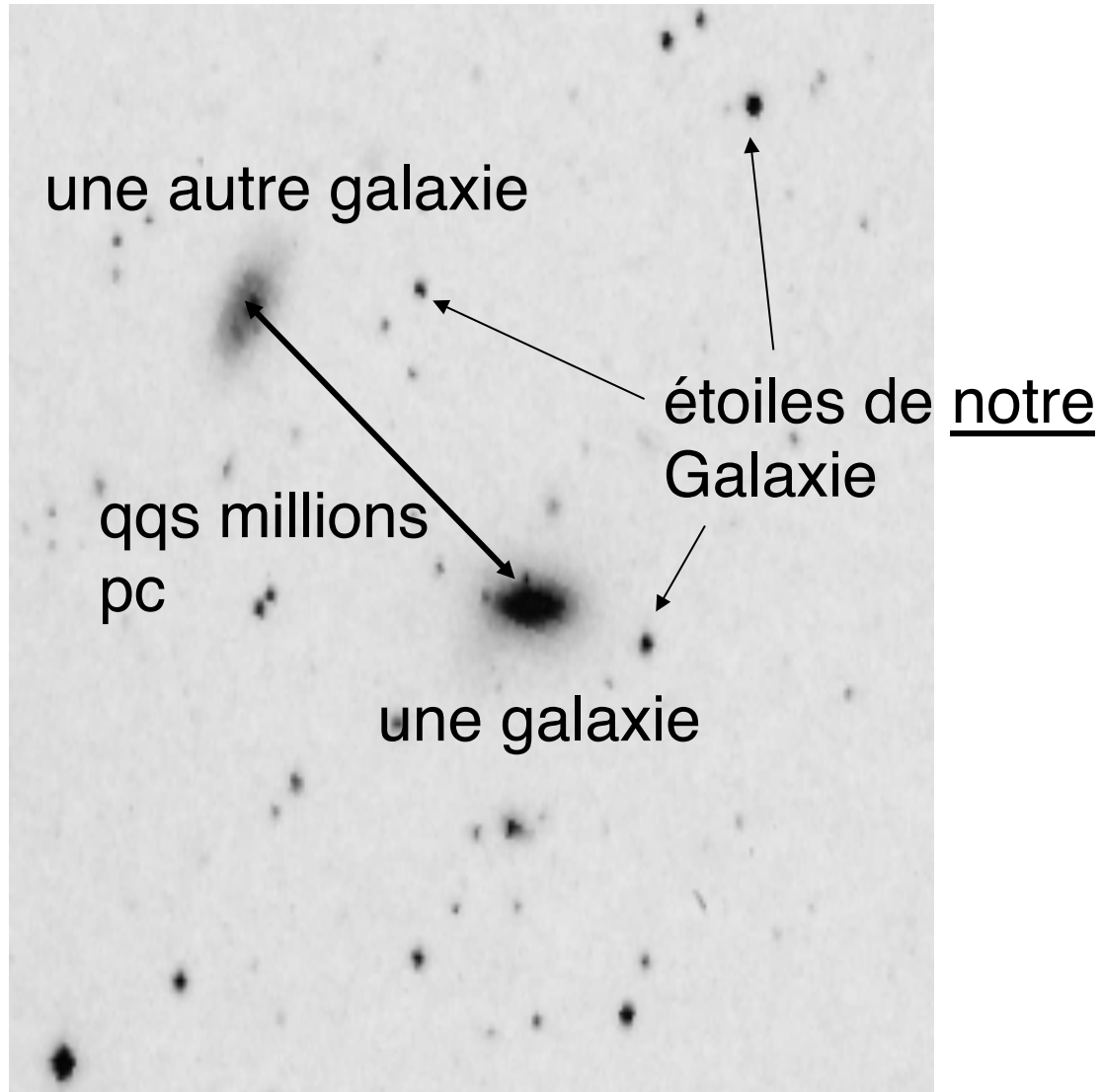




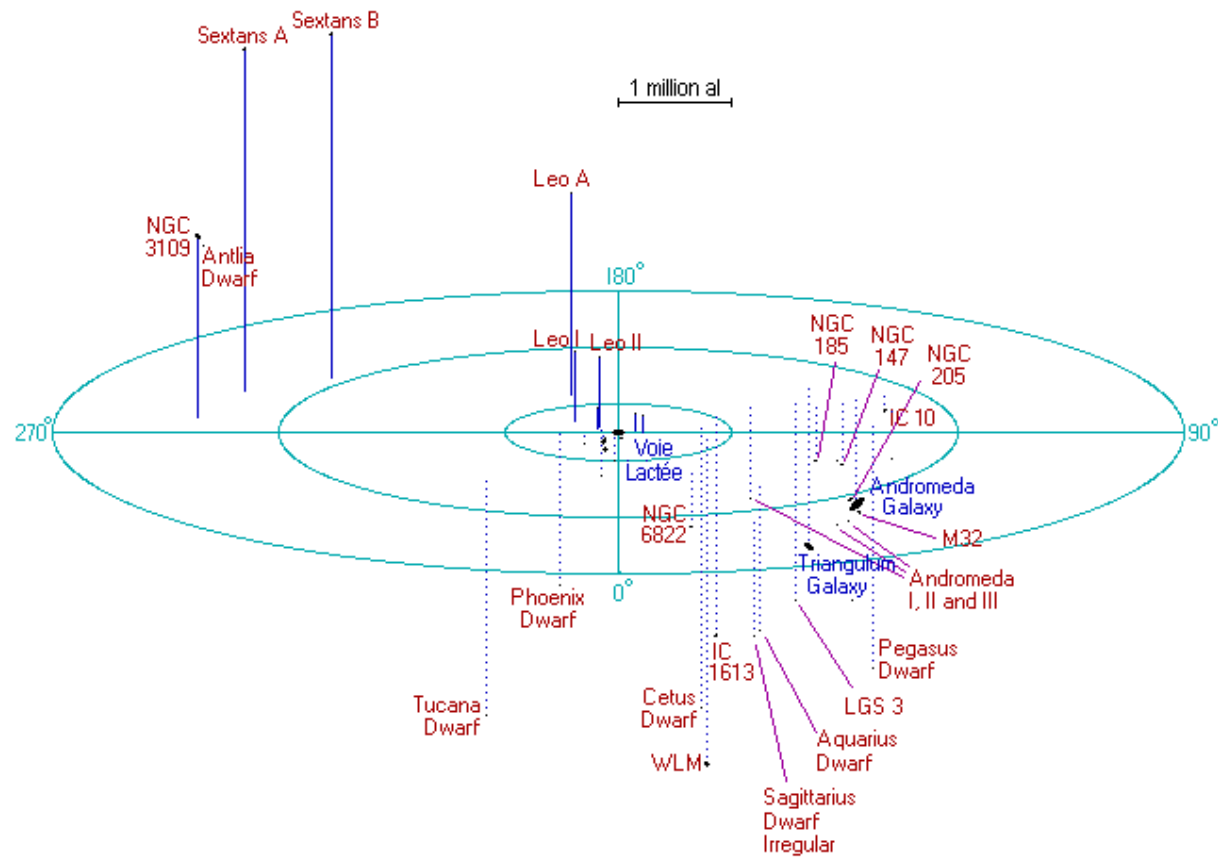
Voisinage galactique local



Distances inter-galactiques:



Le groupe local

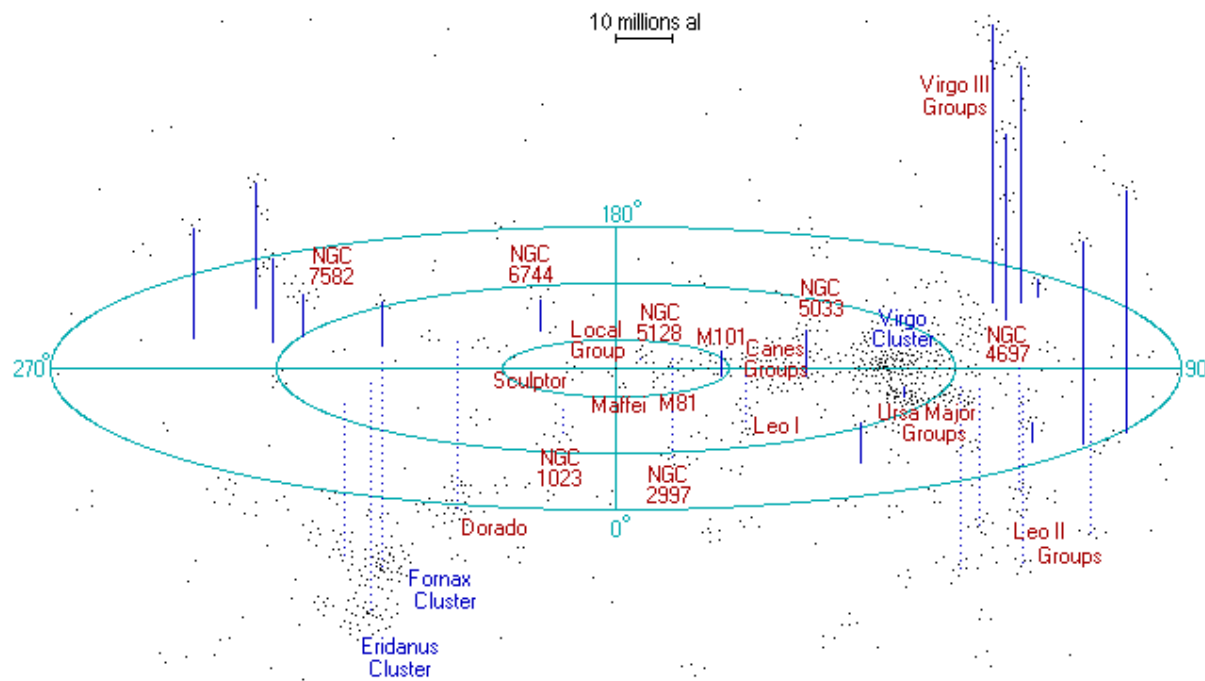


r powell

La galaxie d'Andromède



Le super-Amas de la Vierge



ZOOLOGIE DES GALAXIES



Elliptical Galaxy in the OACDF2 Field

ESO1

Whirlpool Galaxy • M51



Hubble
Heritage



Hubble
Heritage



The Sombrero Galaxy (VLT ANTU + FORS1)

ESO PR Photo 07a/00 (22 February 2000)

© European Southern Observatory



Interacting Galaxy System NGC 6745



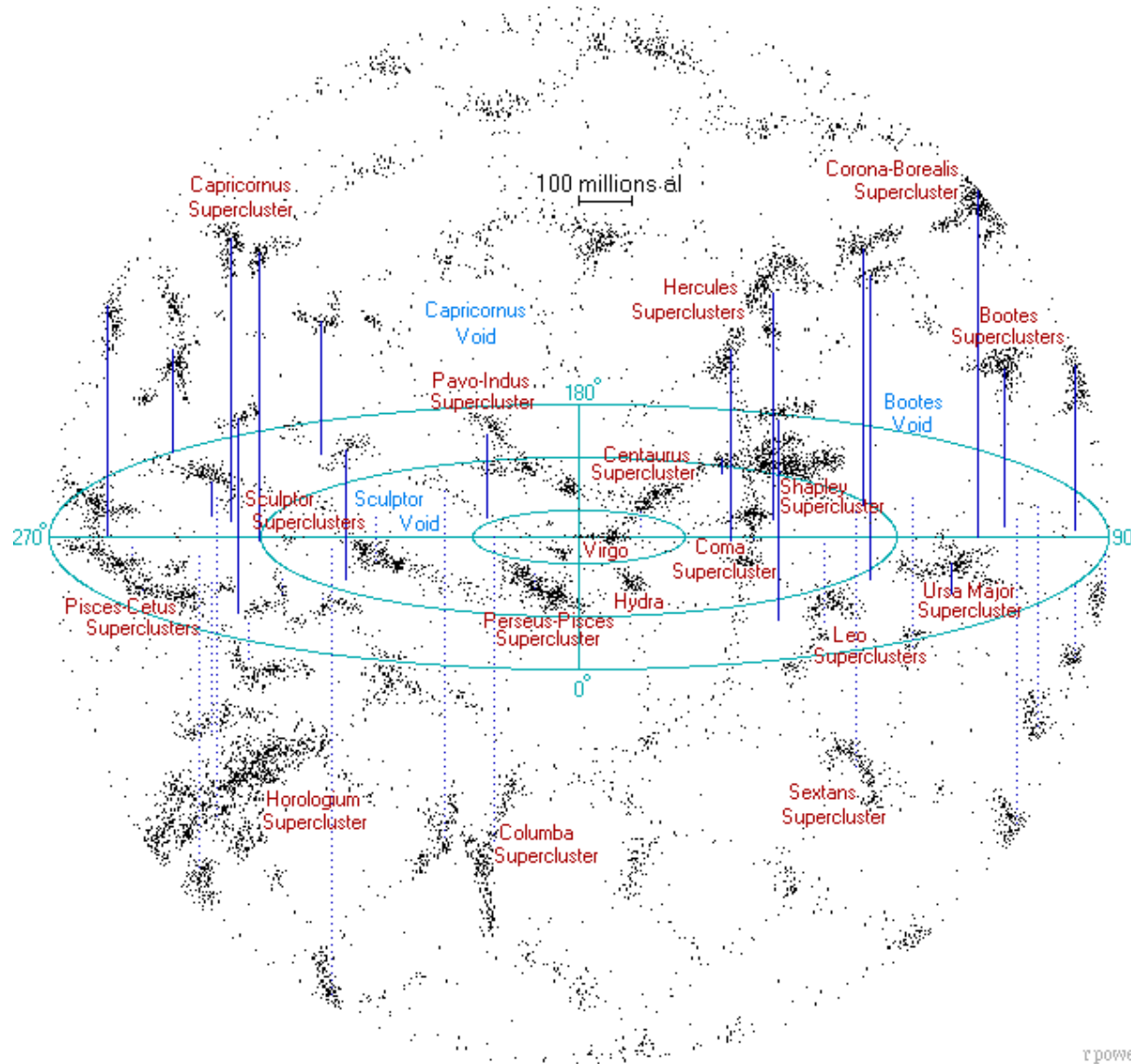
Hubble
Heritage

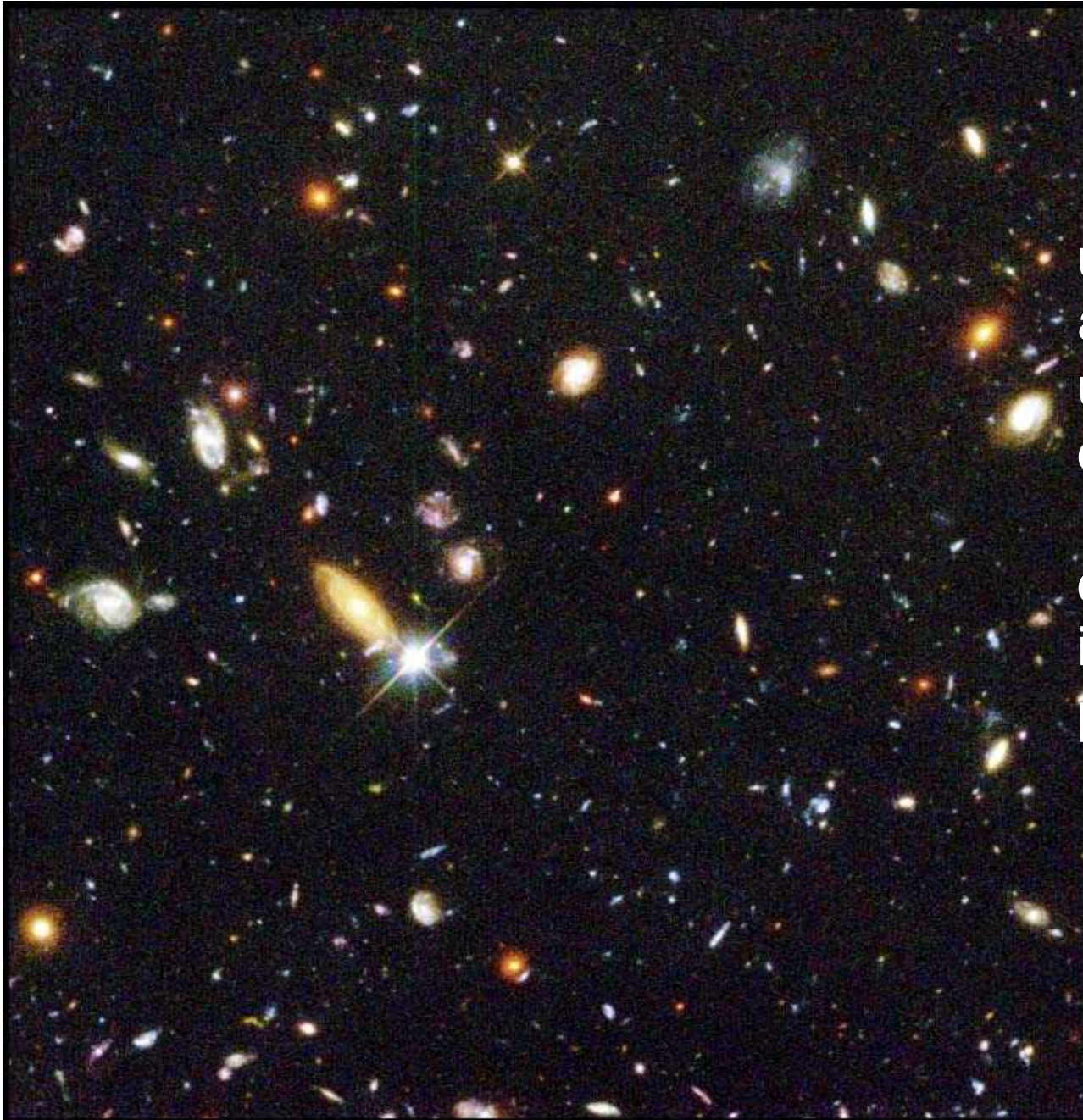
Galaxy ESO 510-G13



Hubble
Heritage

Super-amas





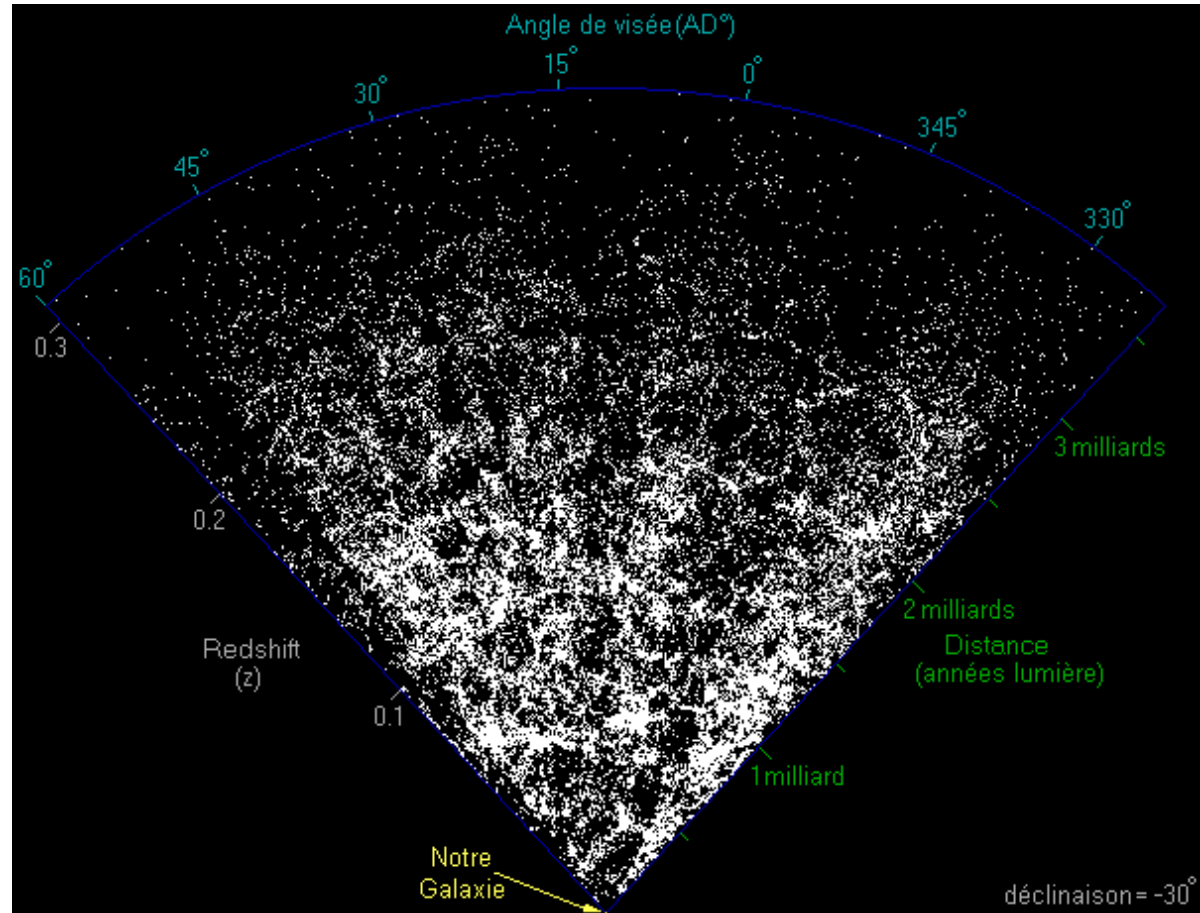
un « trou de serrure »
à travers notre galaxie:
une seule étoile, des
centaines de galaxies

distances
intergalactiques ~
plusieurs Mpc

Hubble Deep Field

HST · WFPC2

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



50 000 galaxies

Super-amas de galaxie

Quelques centaines de millions d'années lumière

