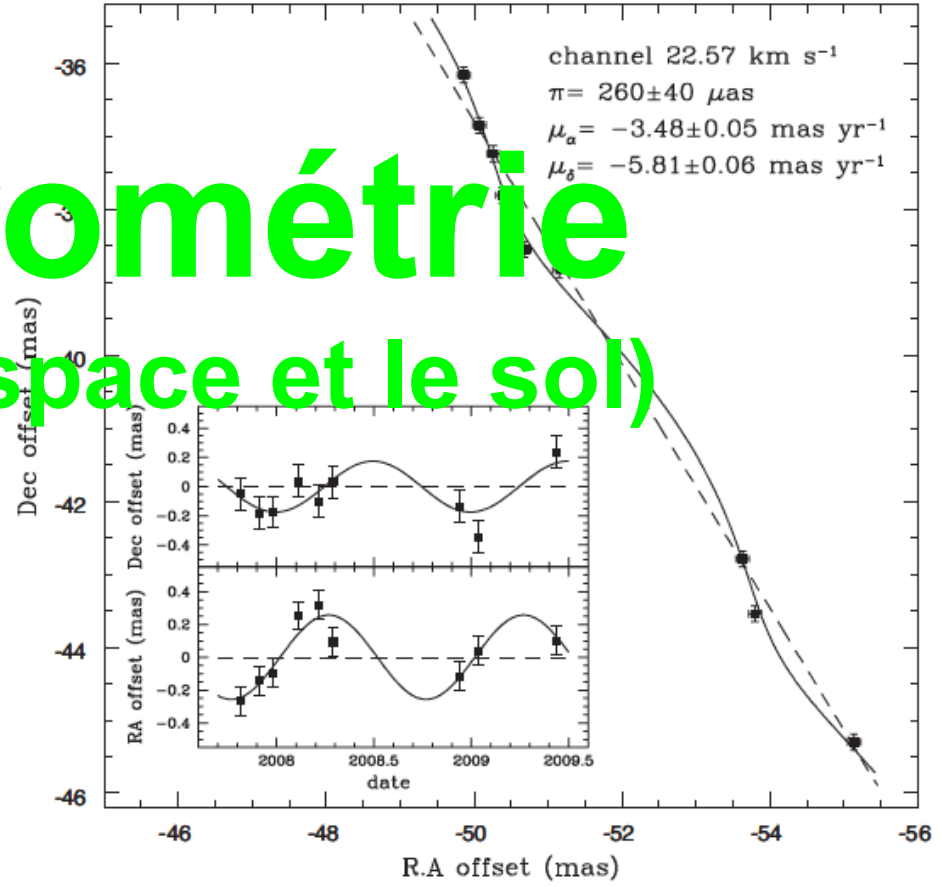


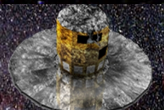
# L'astrométrie (depuis l'espace et le sol)



**Laurent Chemin**  
Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux



Crédits principaux vidéos, images :  
CNES, ESA, NASA, Astrium, ESO, JIVE,  
EVN, MPIFR, JVN, NRAO, LAB, OBSPM,  
UCLA, eMerlin,





- Principes de base de l'astrométrie
- Techniques astrométriques
  - Domaine spectral radio
  - Domaine spectral visible
- Applications
  - Système de référence
  - Voie Lactée : dynamique, trou noir
  - Mouvement réflexe des étoiles



# Astrométrie

- Mesure de la position des astres sur la sphère céleste
- Evolution de la position avec le temps
- Perte de l'intérêt observationnel à l'avènement de la spectroscopie (début 20e siècle)
- Regain d'intérêt depuis les années 1990

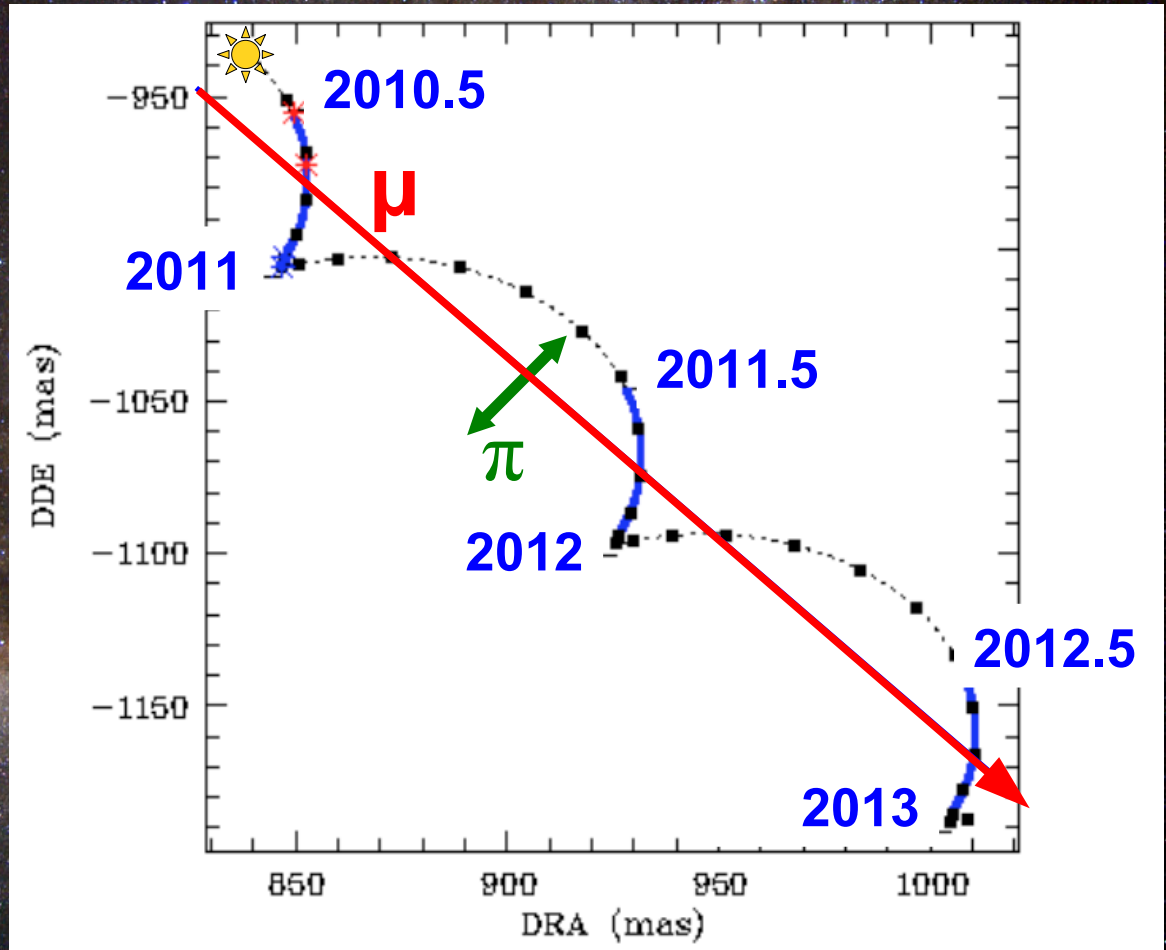


# Astrométrie

Mouvement  
propre ( $\mu$ )

+

Parallaxe ( $\pi$ )



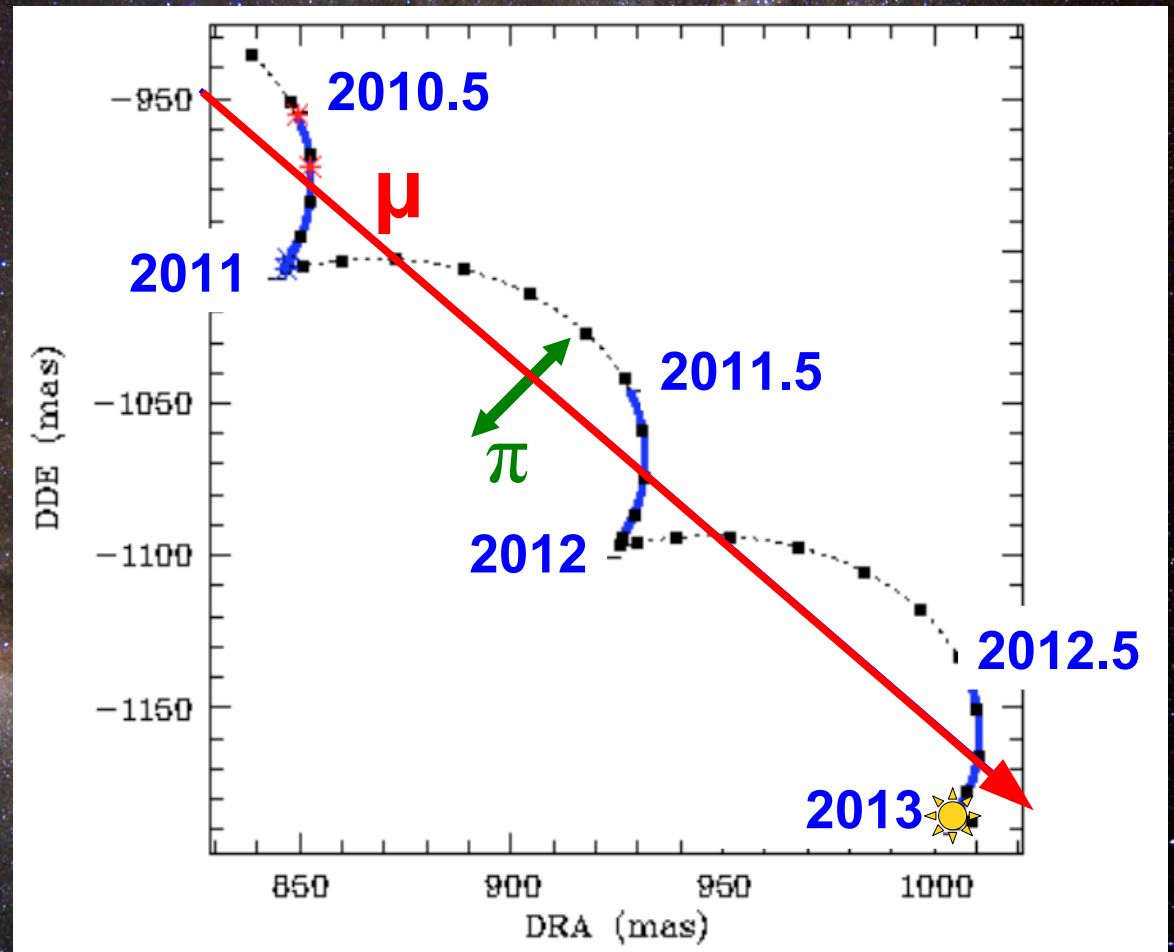


# Astrométrie

Mouvement  
propre ( $\mu$ )

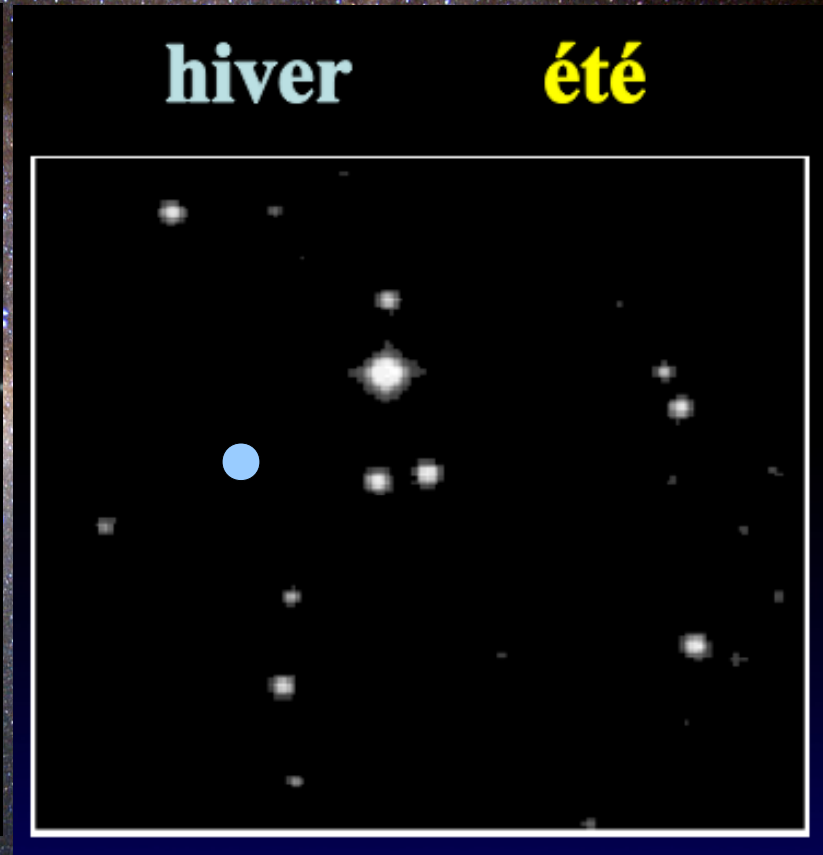
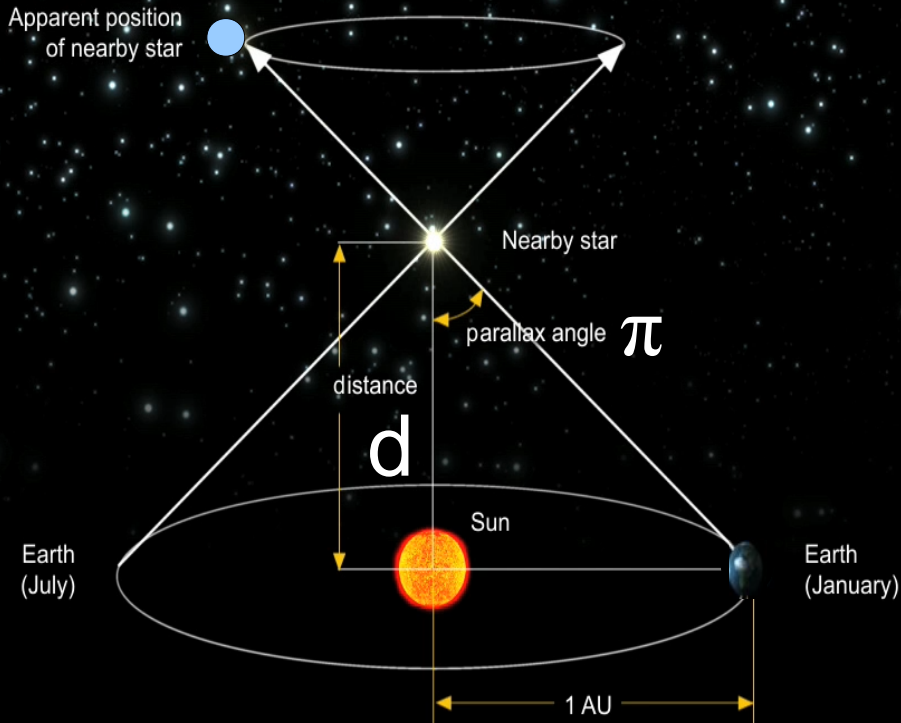
+

Parallaxe ( $\pi$ )





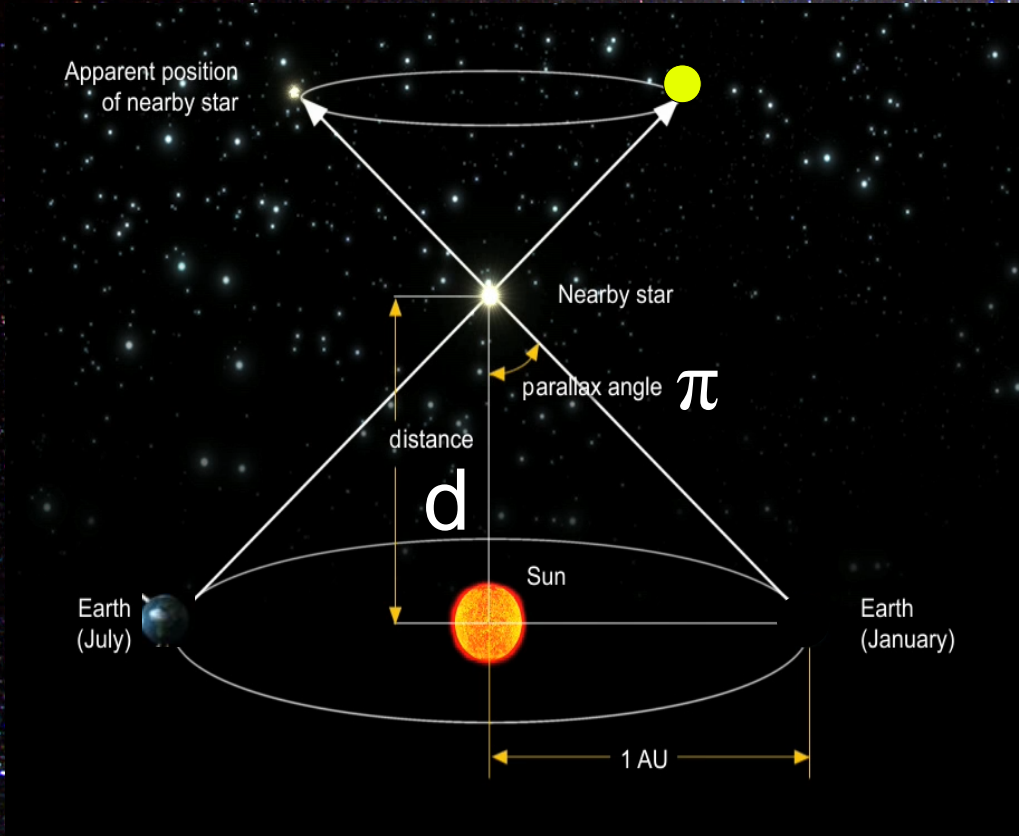
# Astrométrie



$$d = 1/\pi$$



# Astrométrie

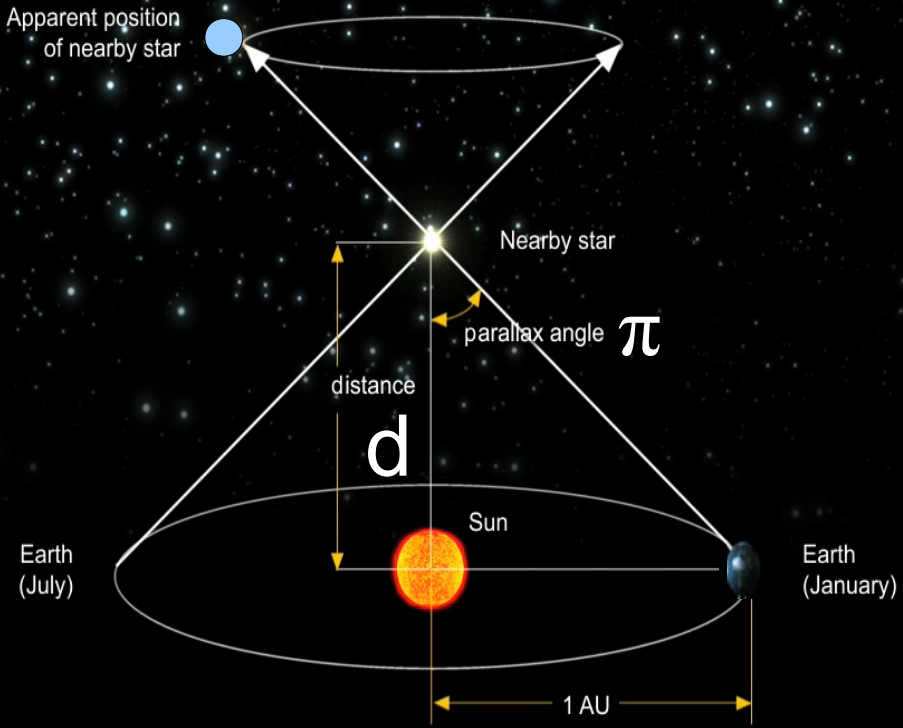


$$d = 1/\pi$$





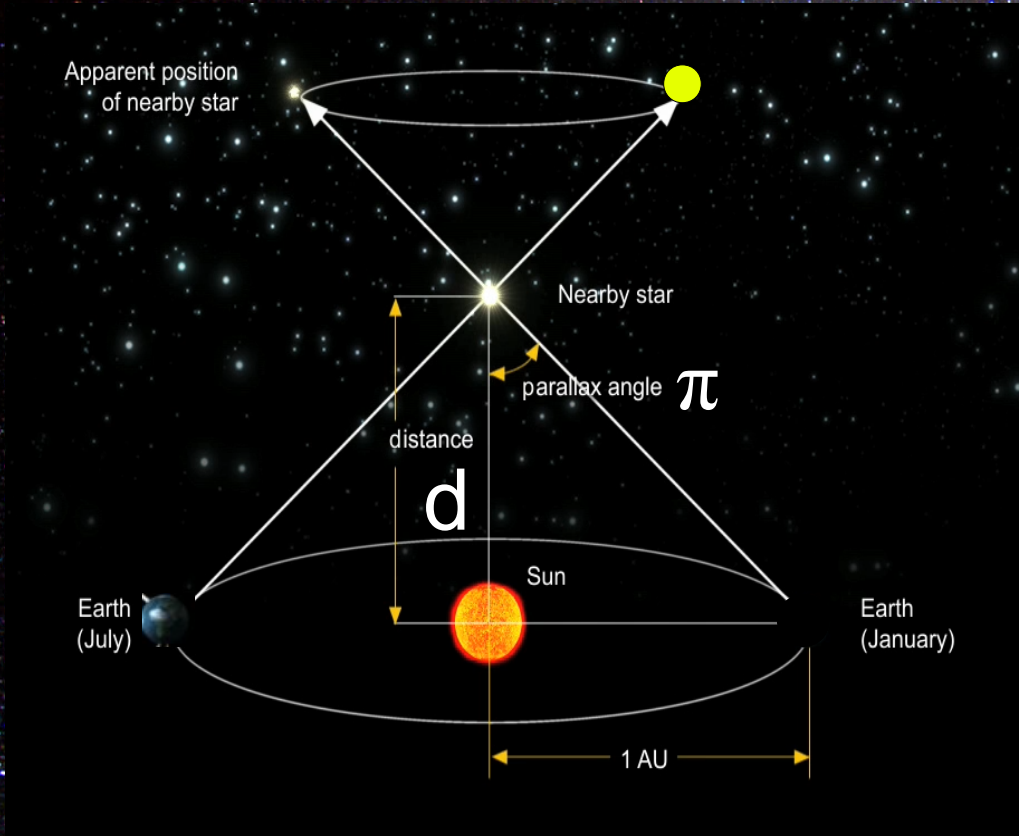
# Astrométrie



$$d = 1/\pi$$



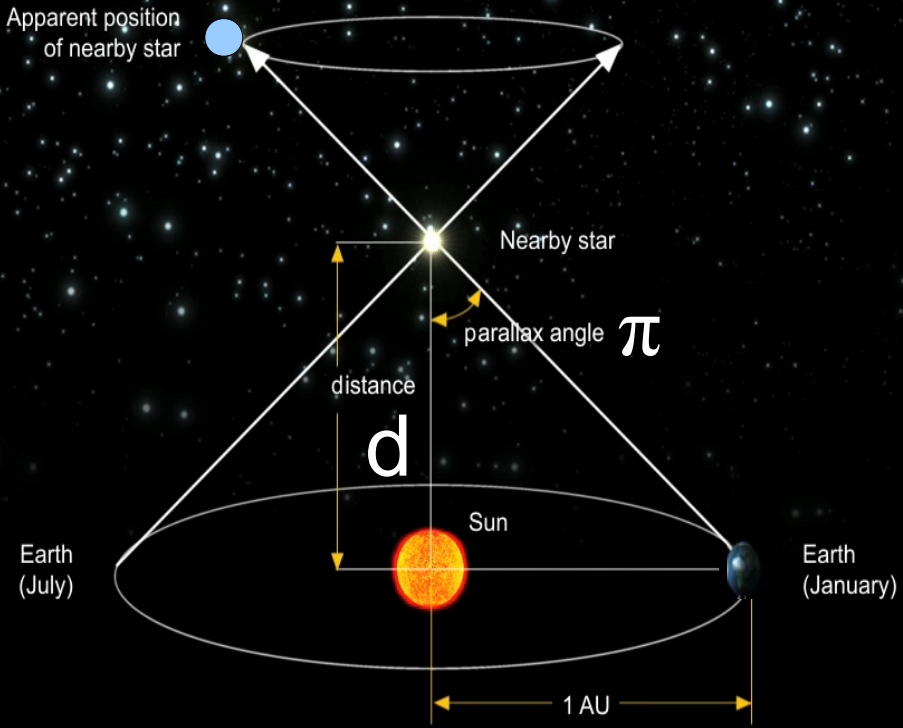
# Astrométrie



$$d = 1/\pi$$



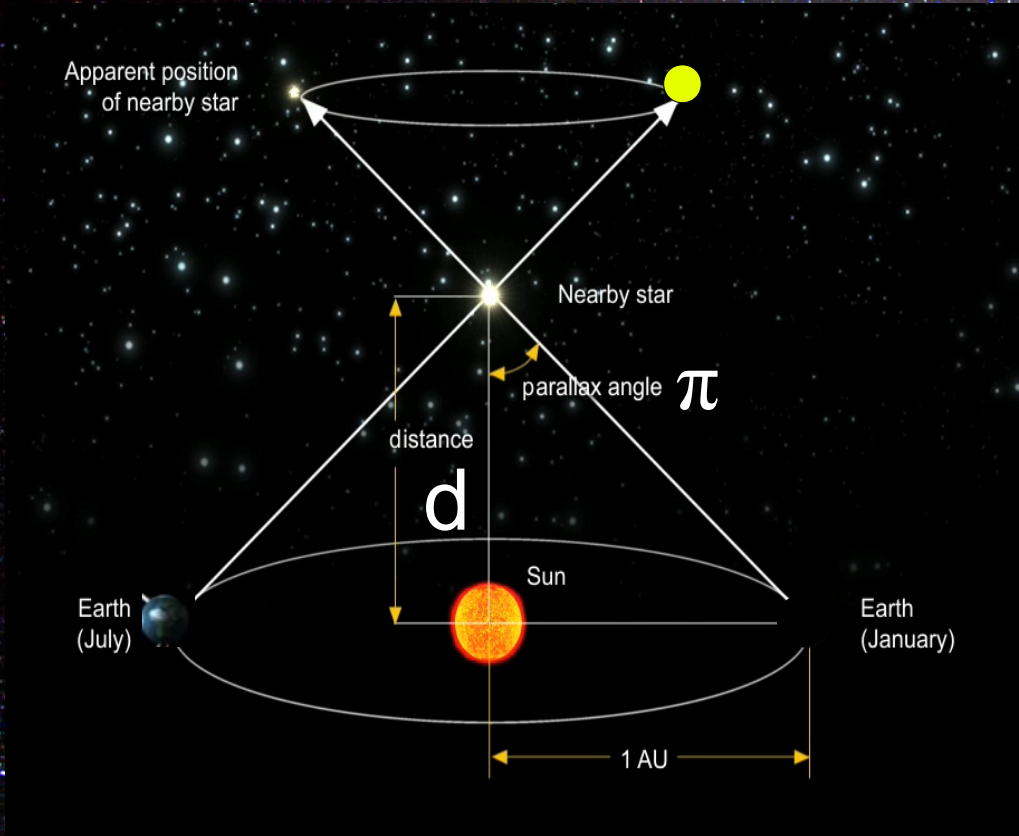
# Astrométrie



$$d = 1/\pi$$



# Astrométrie

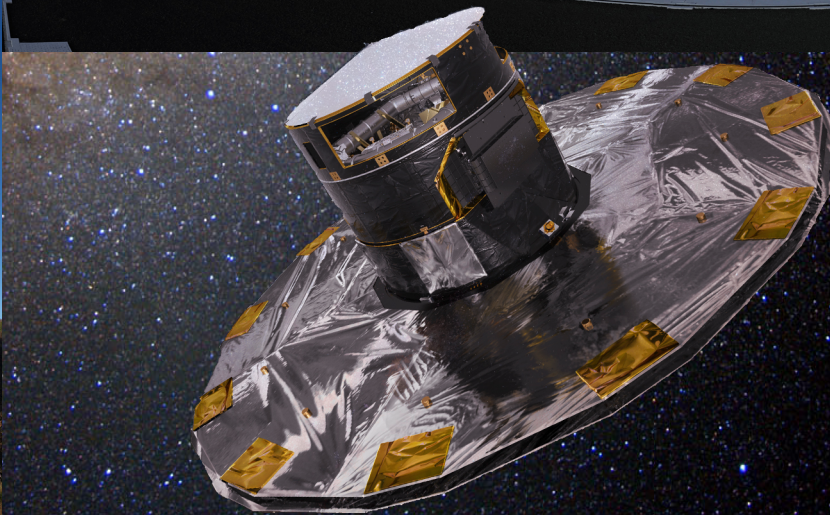
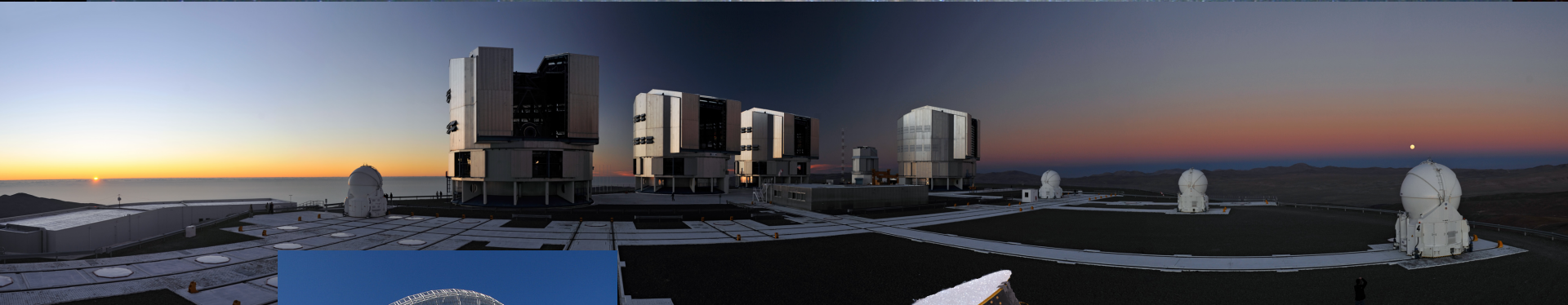


$$d = 1/\pi$$



# Plusieurs « astrométries »

- Localisation
  - Sol : VLBI, grands télescopes (ESO, VLT, NTT)
  - Espace : Hipparcos (1989-1992), Gaia (2014-2020)

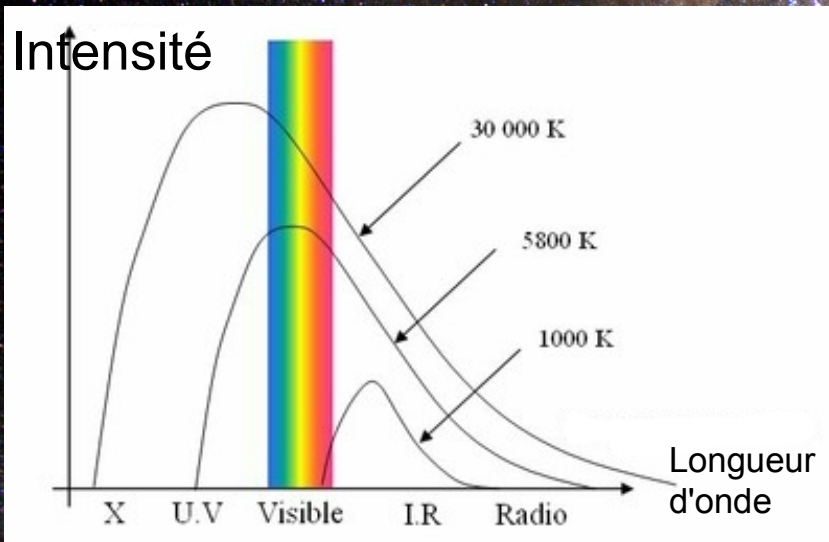




# Plusieurs « astrométries »

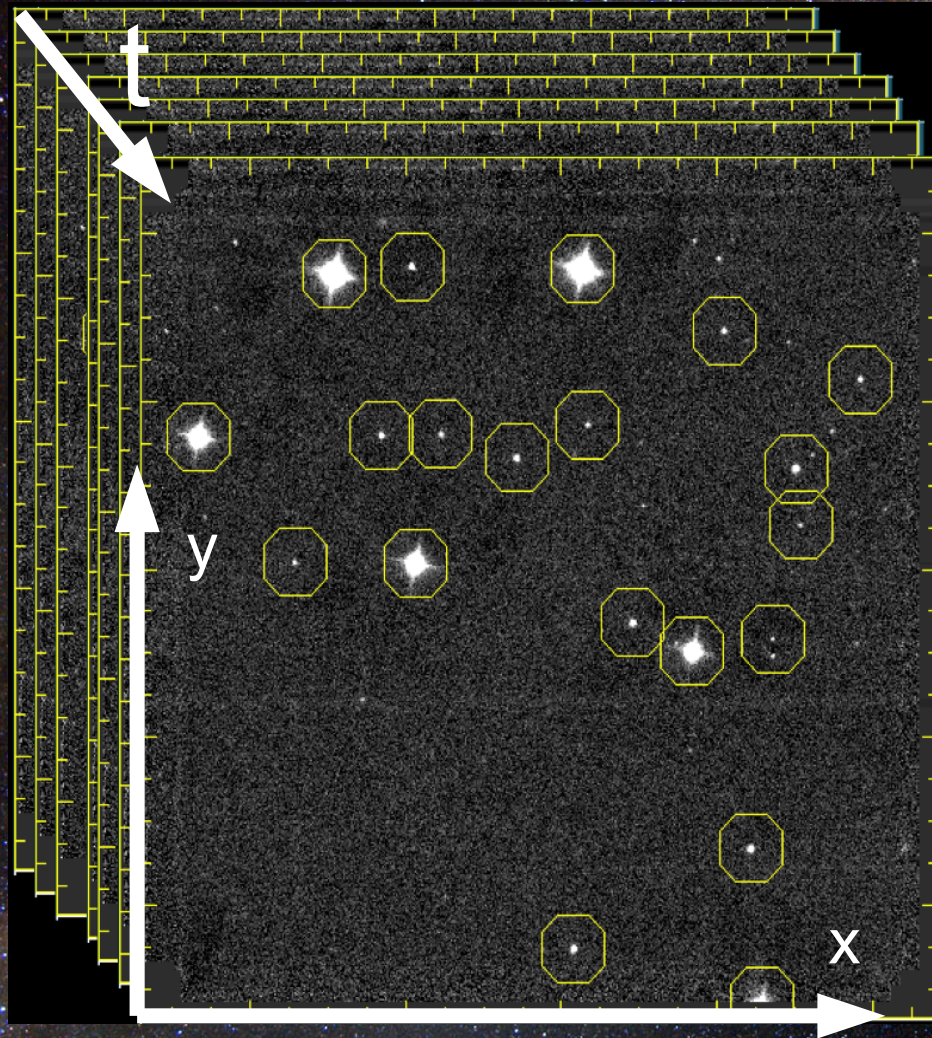
- Longueur d'onde
  - Visible, IR : Gaia, Hipparcos, grands télescopes
  - Radio : VLBI

Visible, IR : rayonnement thermique des étoiles





# Astrométrie optique/IR

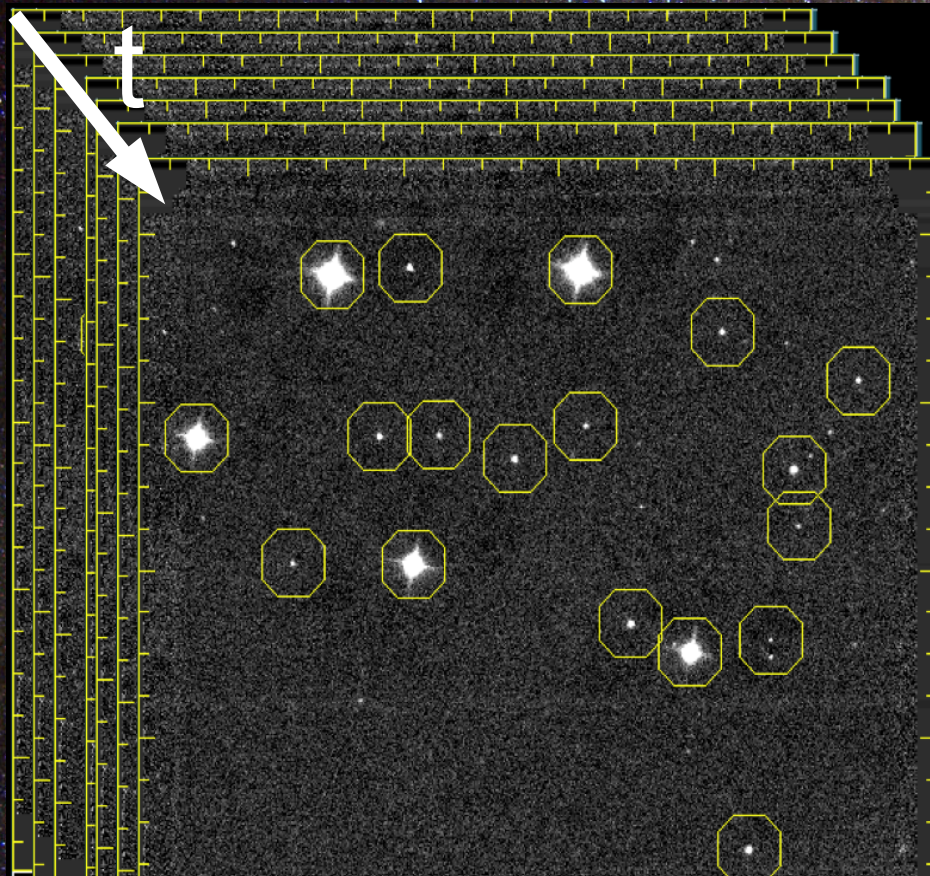


Objectif :

$$x(t), y(t) \rightarrow \alpha, \delta, \pi, \mu_{\alpha}, \mu_{\delta}$$



# Astrométrie optique/IR



$x(t), y(t)$  :  
Mesures  
(pixels)

$a, b$  :  
paramètres  
inconnus liés  
à la plaque  
photo/image  
CCD

5 inconnues par  
étoile:

Positions  $X, Y$  (as)  
mvt propre (as/an)  
Parallaxe (arcsec)

$F_{x,y}(t)$  :  
coefficients  
parallactiques

$$\begin{aligned} X_0 + \Delta X_0 + \mu_X (t - t_0) + \pi F_X (t) &= a_1^i x(t) + a_2^i y(t) + a_3^i \\ Y_0 + \Delta Y_0 + \mu_Y (t - t_0) + \pi F_Y (t) &= b_1^i x(t) + b_2^i y(t) + b_3^i \end{aligned}$$

$2 \times N_{\text{étoiles}} \times N_{\text{images}}$  équations,  $5 \times N_{\text{étoiles}} + 6 \times N_{\text{images}}$  inconnues

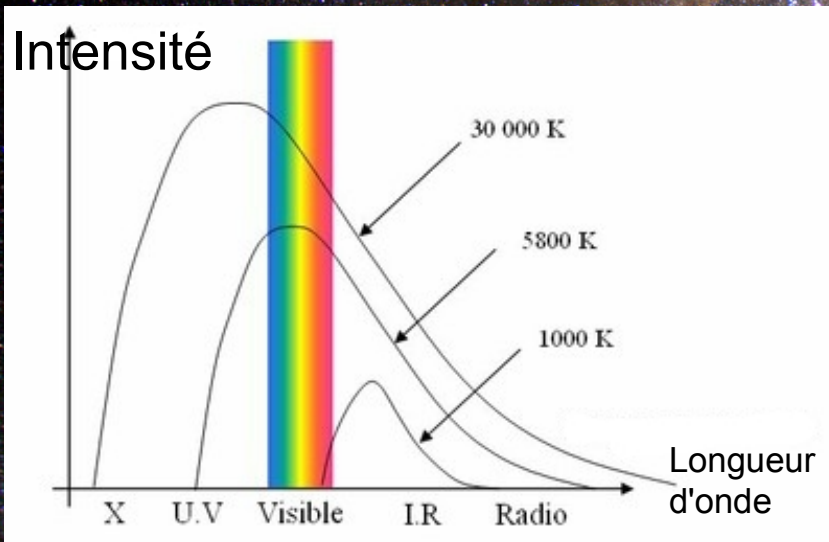




# Plusieurs « astrométries »

- Longueur d'onde
  - Visible, IR : Gaia, Hipparcos, grands télescopes
  - Radio : VLBI

Visible, IR : rayonnement thermique des étoiles



Radio : (GHz, cm) non thermique

Électrons accélérés dans un champ magnétique

Effet Maser



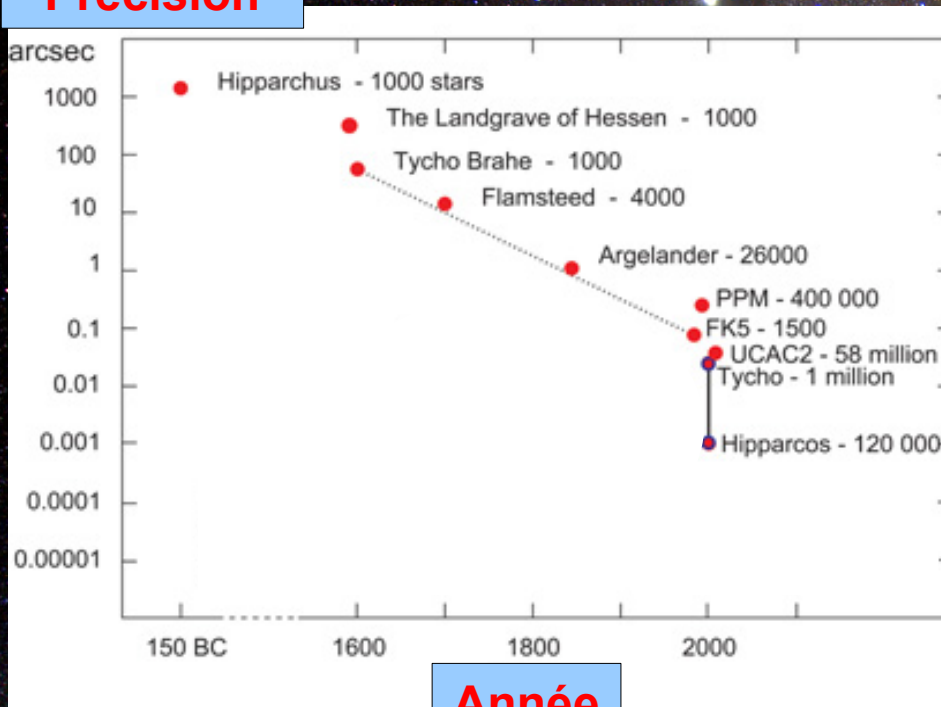
# Plusieurs « astrométries »

- Précision
  - Basse: Lunette méridienne
  - Moyenne : grands télescopes
  - Haute : Gaia, VLBI



# Astrométrie optique/IR

## Précision



Année

1 arcsec = 1/3600 degré

## Précisions astrométriques

Lunette méridienne : 50 mas

Tycho : 10 mas

Hipparcos : 1 mas

Pièce de 1 euro (2.3 cm) vue à Bagdad (4000 km)

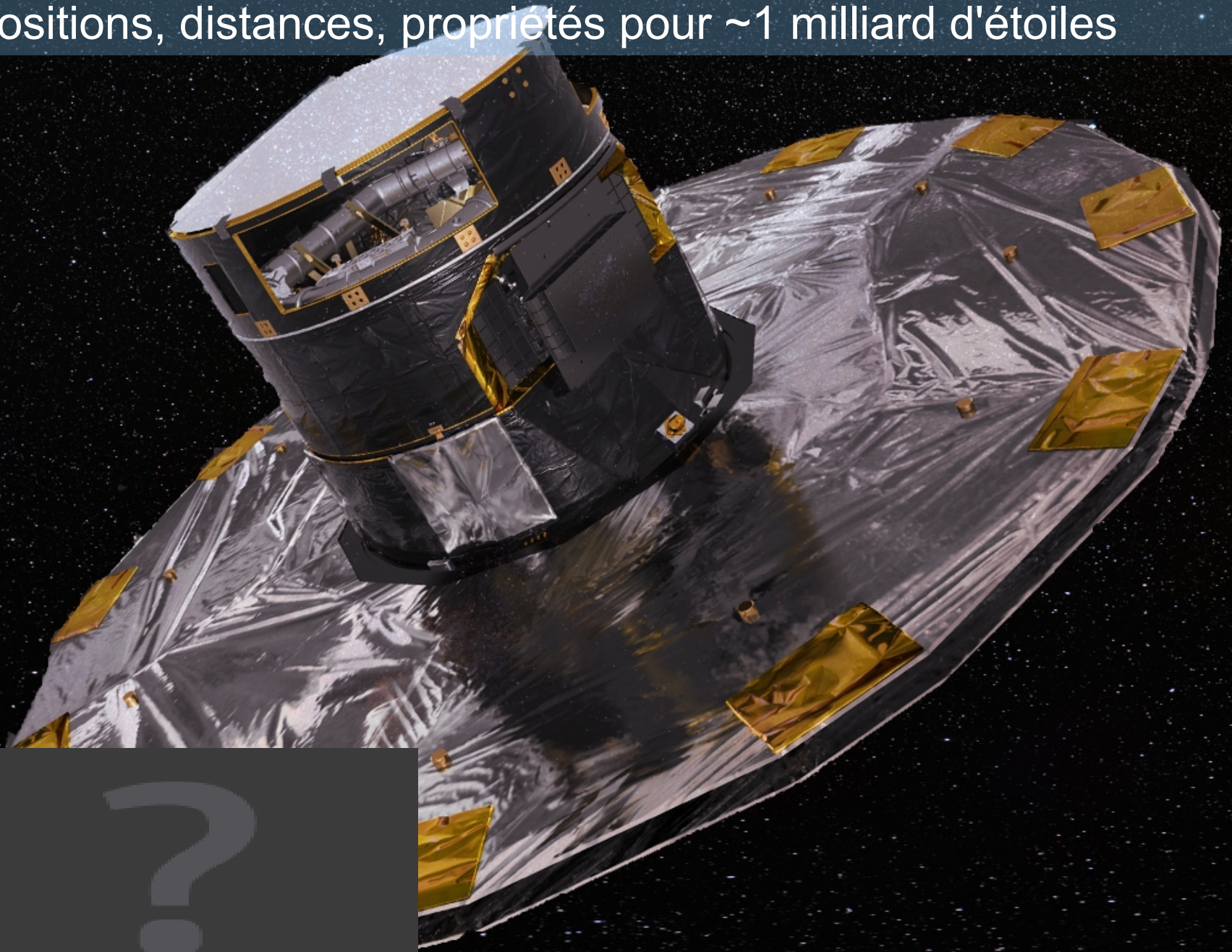
Gaia : 10  $\mu$ as ( $V < 12$ )

Pièce d'1 euro sur la lune (380 000 km)



- Exemple:  
Lunette  
méridienne  
à Bordeaux
- Précision  
de 50 mas  
( $1/72000^\circ$ )

Positions, distances, propriétés pour ~1 milliard d'étoiles





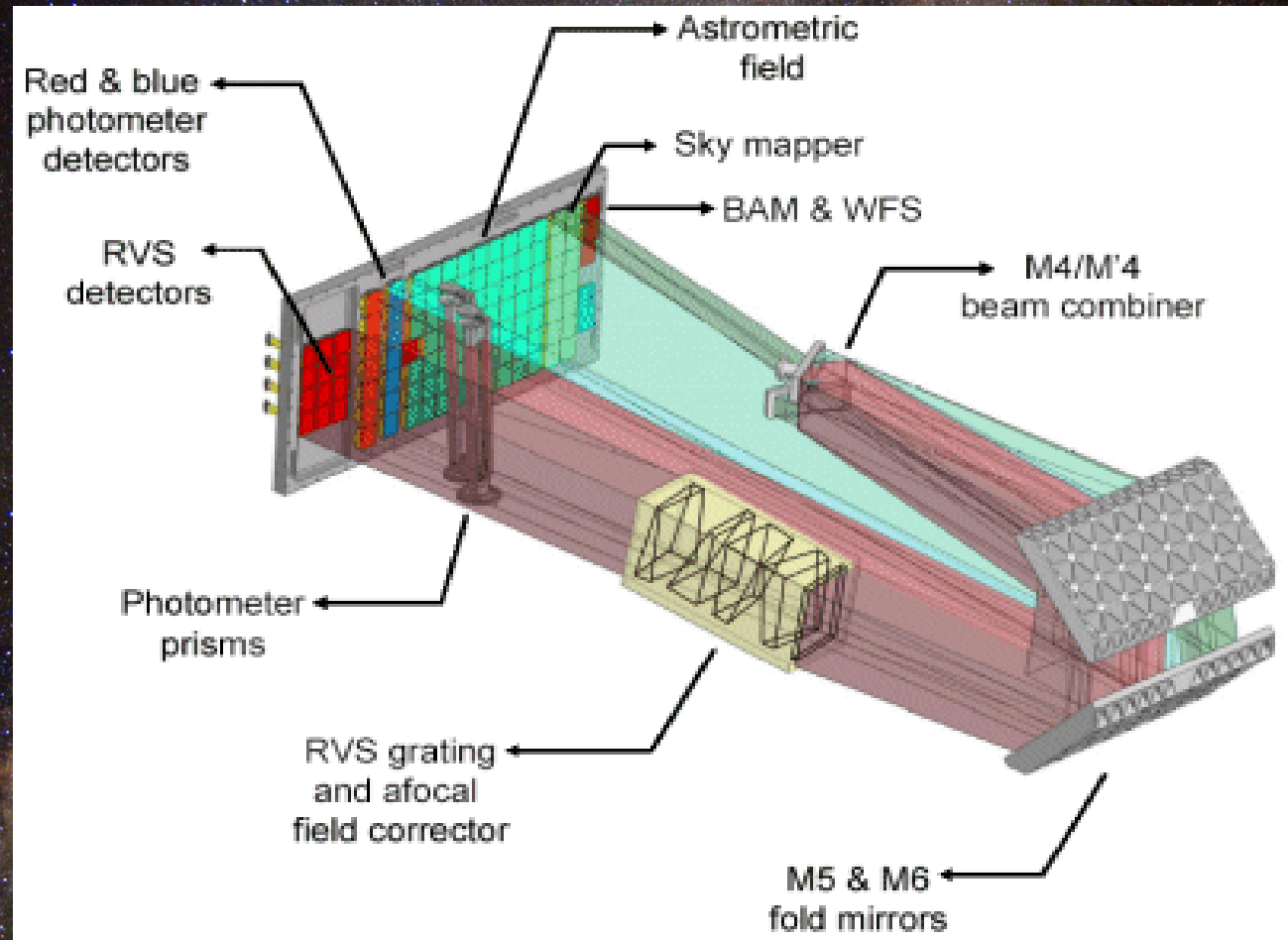
# Gaia : 3 instruments



**ASTRO**  
astrométrie

**BP-RP**  
photométrie

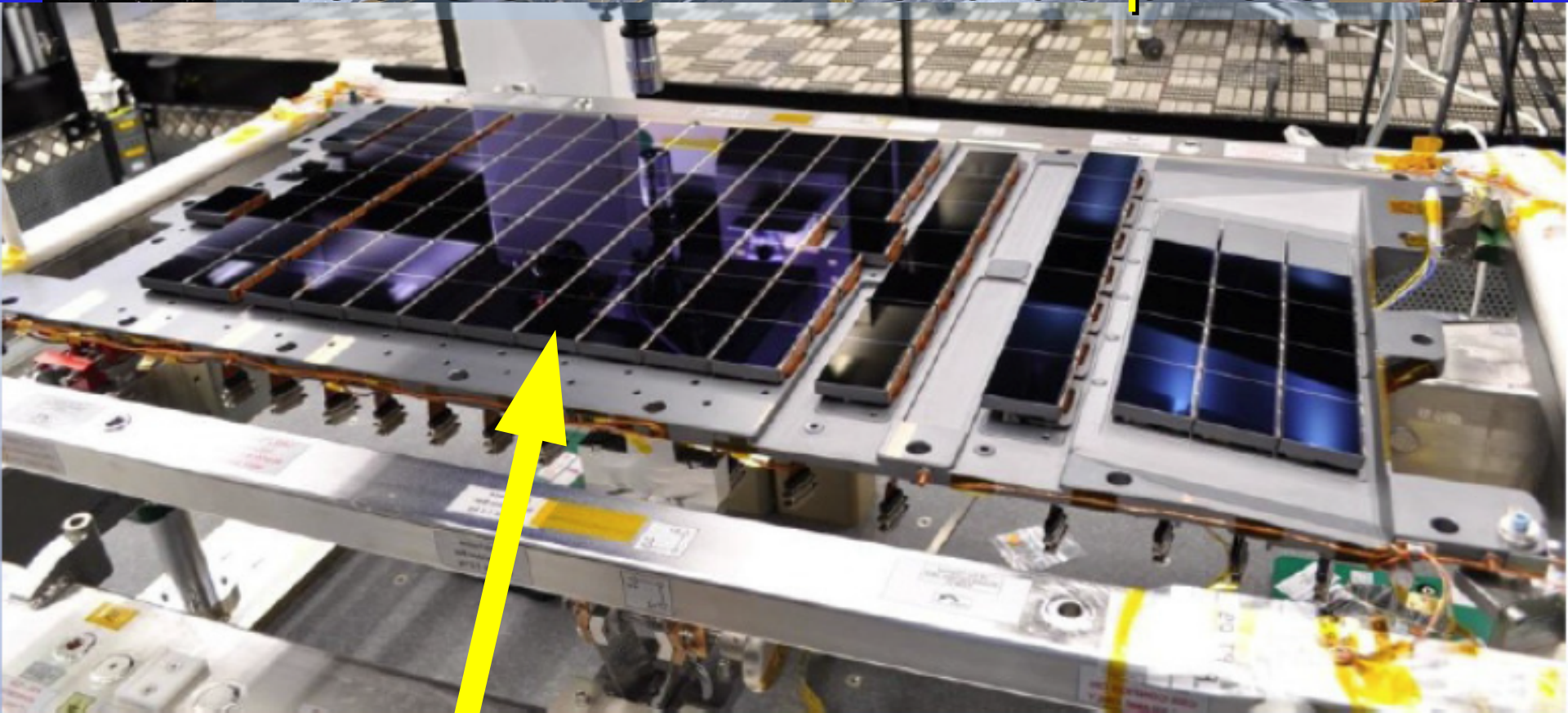
**RVS**  
spectroscopie





# Gaia : le plan focal

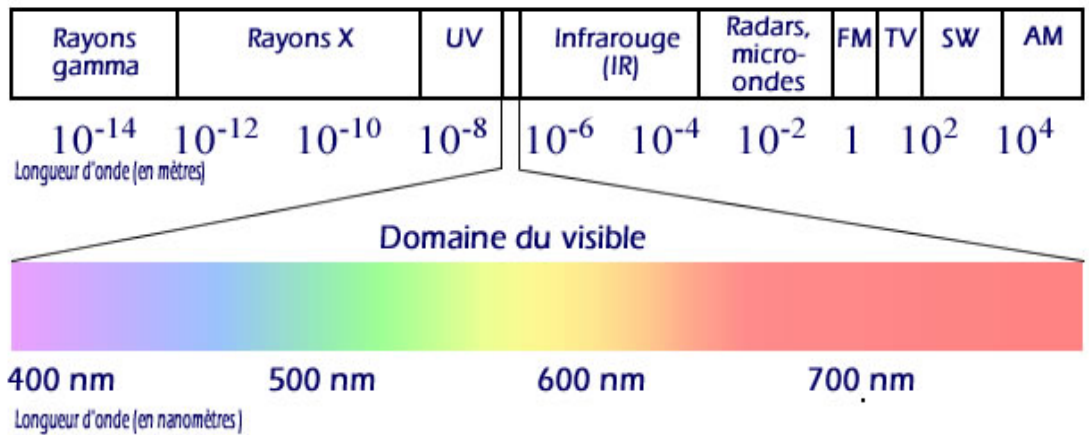
106 CCD = 1 milliard de pixels !



ASTRO

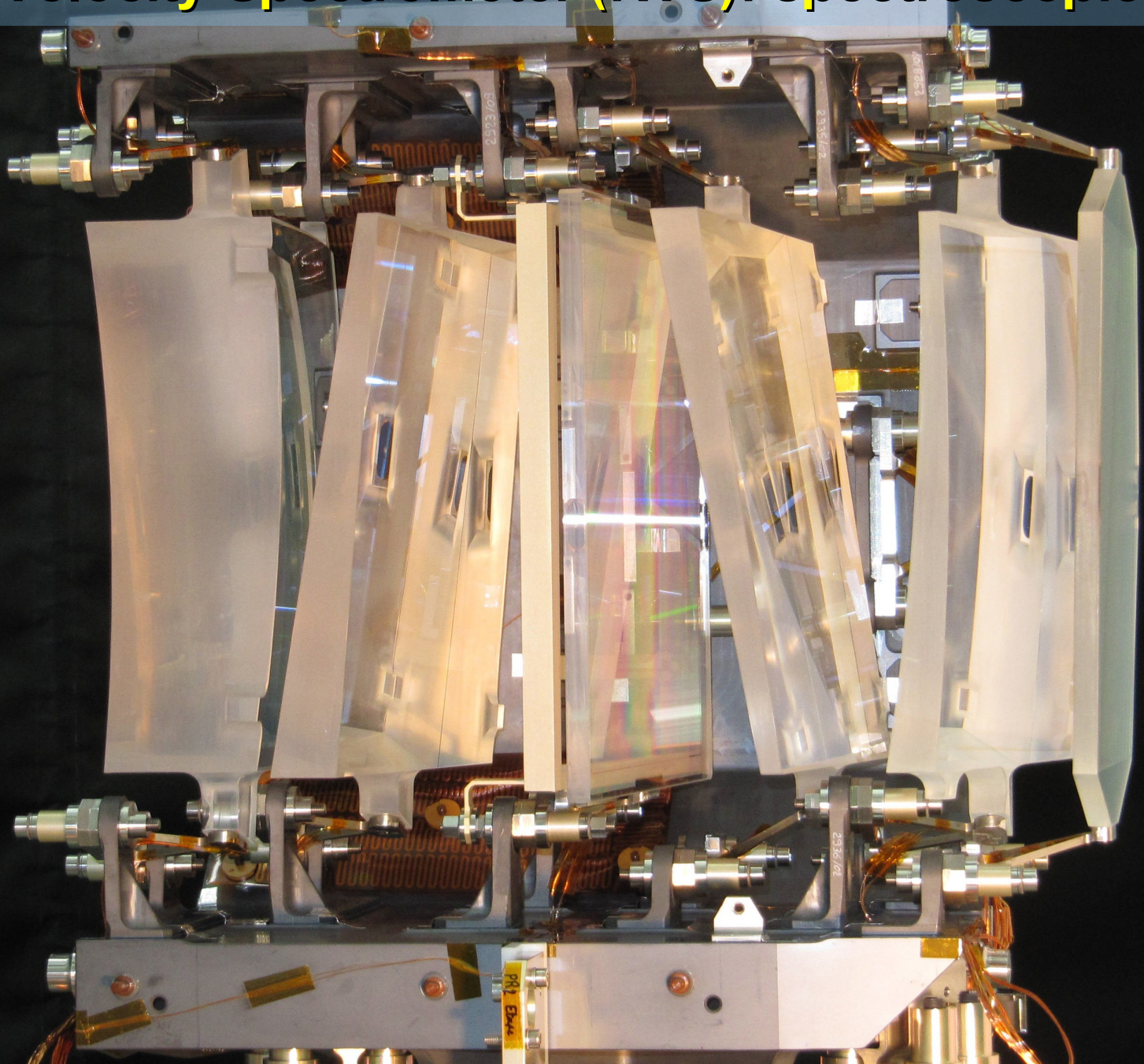


# Blue-Red Photometer





# Radial Velocity Spectrometer (RVS): spectroscopie

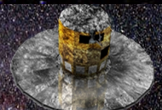
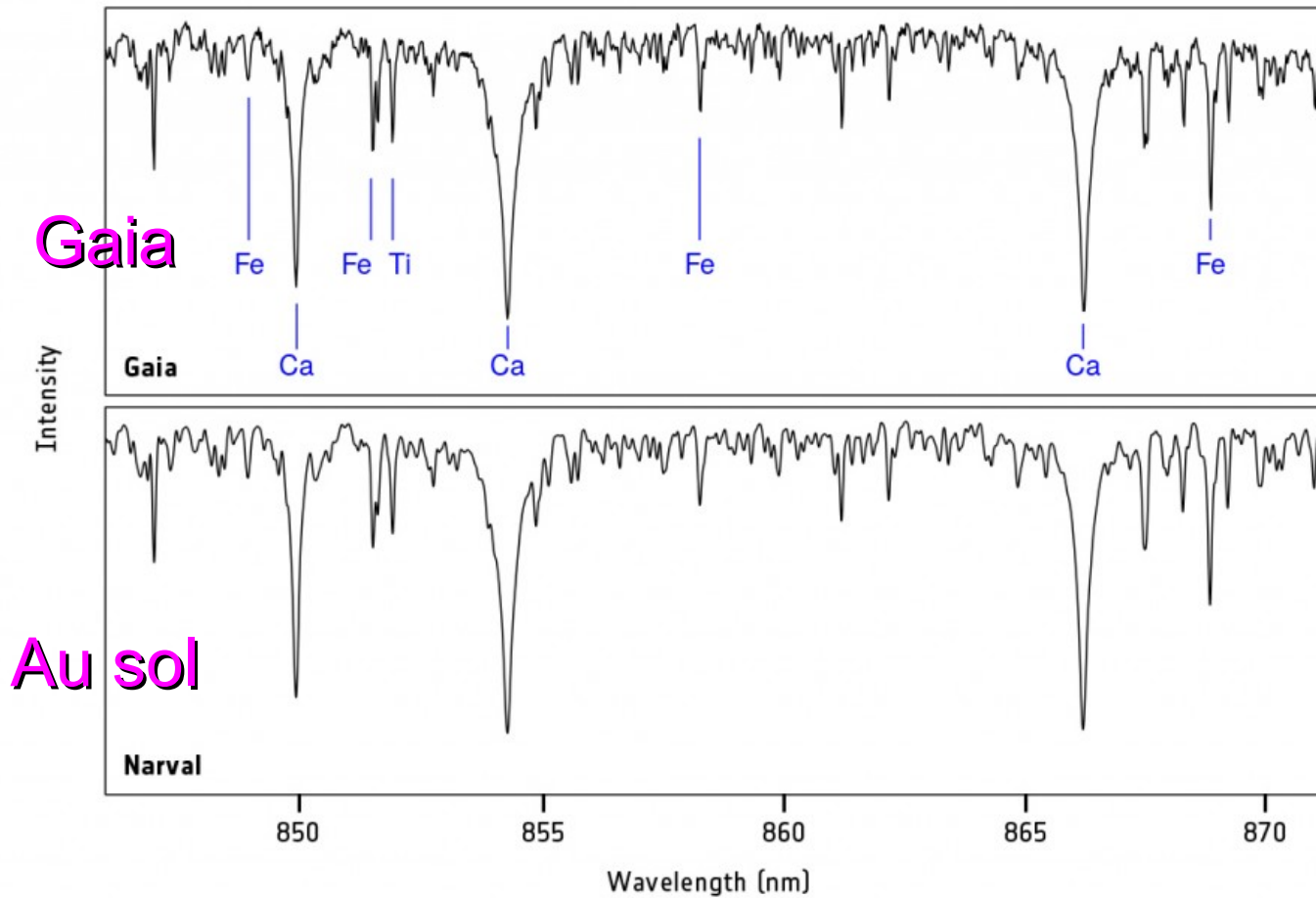




# Premier spectre du RVS



## Etoile HIP86564





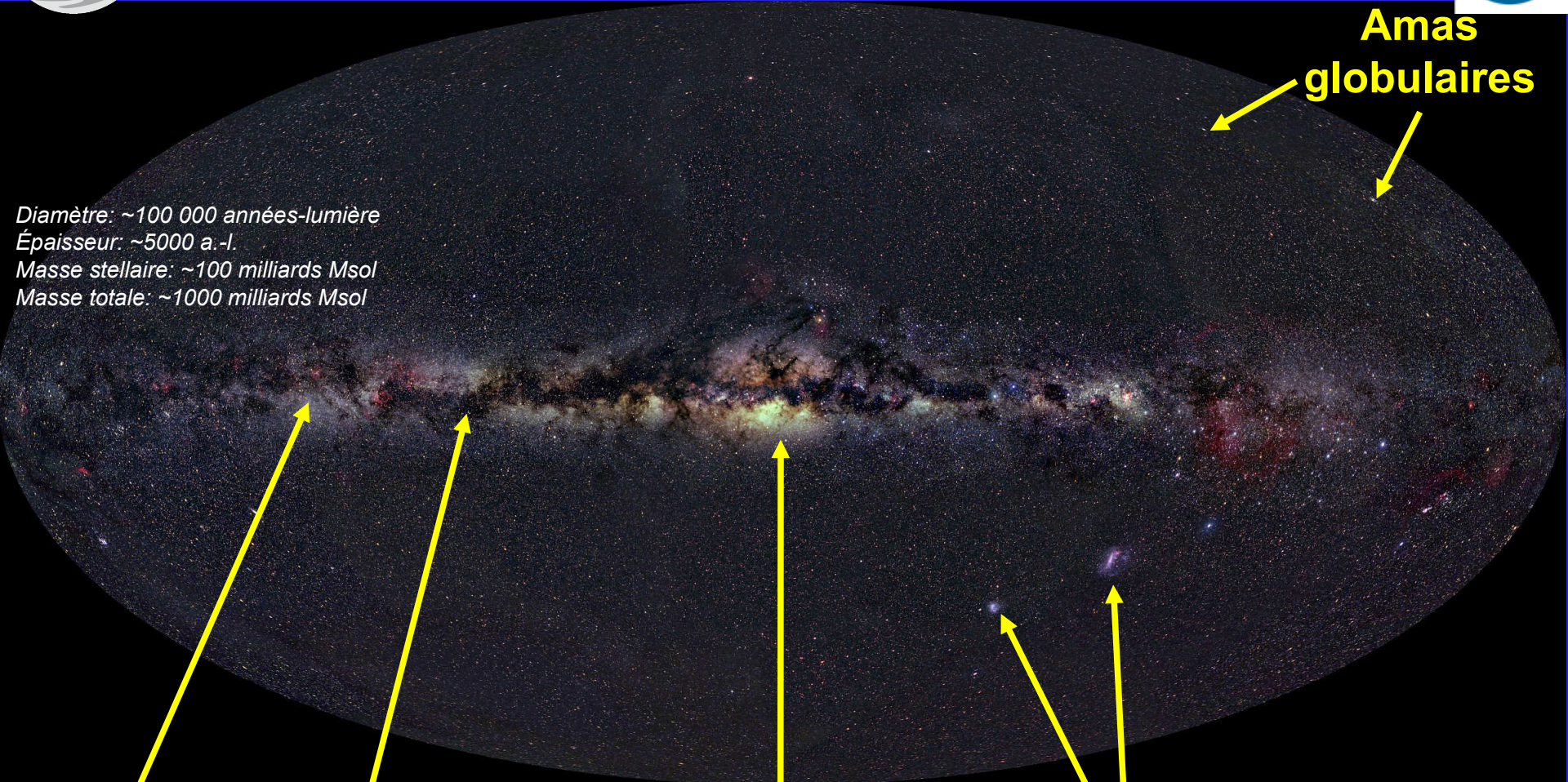
# Objectif scientifique principal de Gaia



**Mieux connaître notre Galaxie :  
1ère cartographie "en 6D"**



# La Voie Lactée

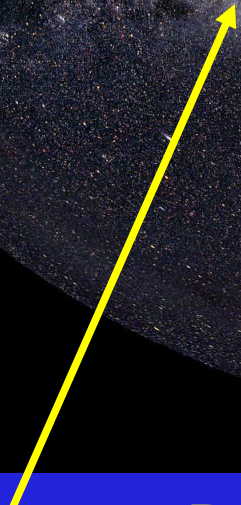


Amas globulaires



Diamètre: ~100 000 années-lumière  
Épaisseur: ~5000 a.-l.  
Masse stellaire: ~100 milliards Msol  
Masse totale: ~1000 milliards Msol

Disque



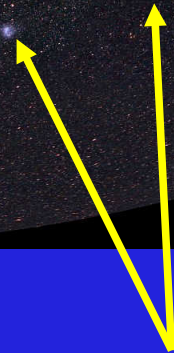
Poussières



Bulbe



Nuages de Magellan



Laurent Chemin





# La Voie Lactée ?

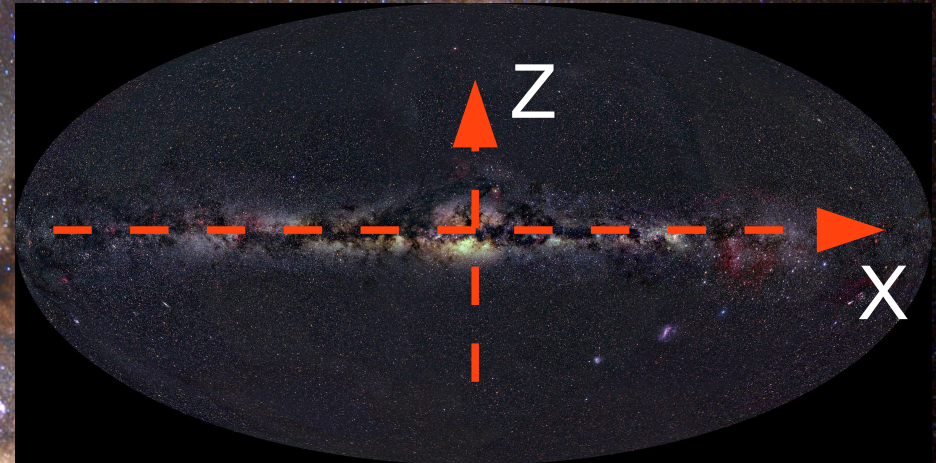
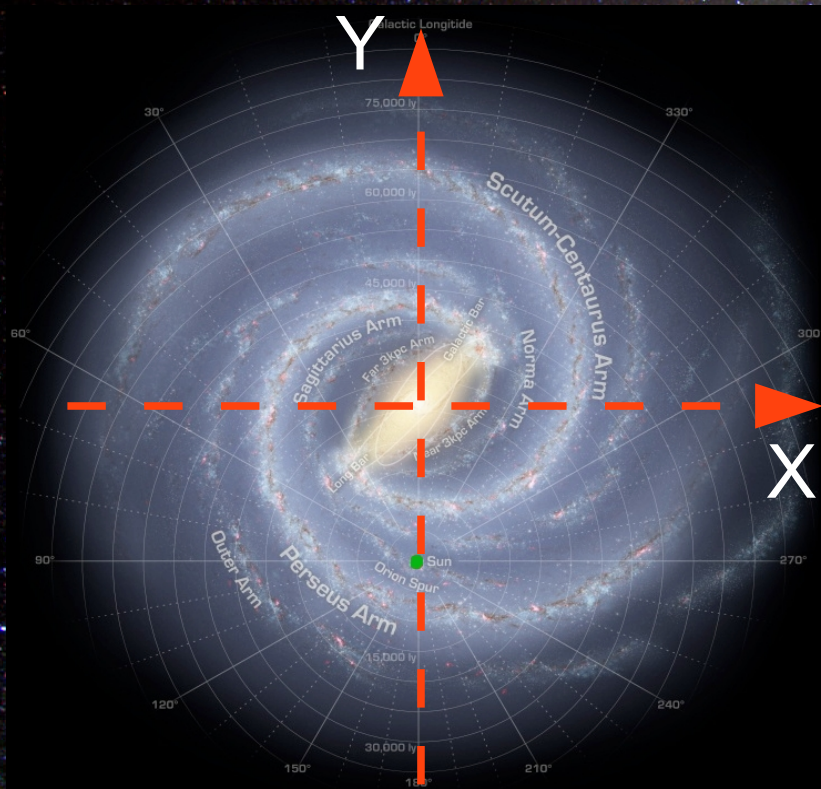


Ceci est une illustration, pas une photo





# 3D des positions: 3 coordonnées X, Y, Z + 3D des vitesses: 3 coordonnées $V_x, V_y, V_z$



Position: ascension droite, déclinaison et parallaxe (ASTRO)

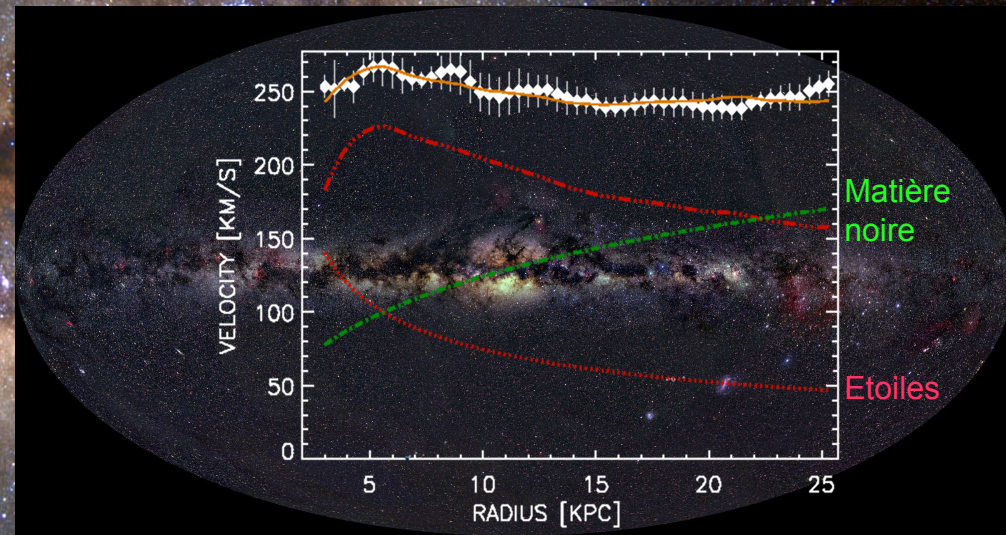
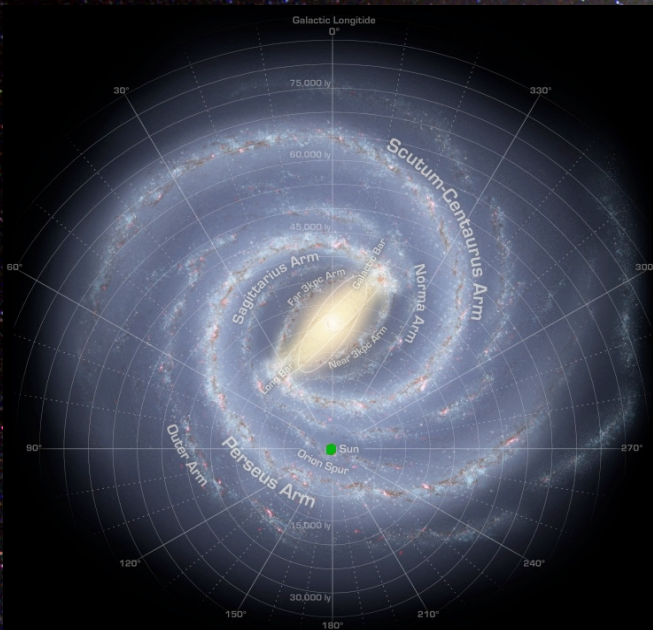
Vitesse: Mouvements propres (ASTRO) et des vitesses radiales (RVS)



# Structure - Dynamique

- Morphologie du disque Galactique
- Nombre de bras spiraux
- Taille du disque et du halo stellaires

- Vitesses (azimutales)
- Masse totale gravitante
- Masses stellaire (disque, bulbe, halo)

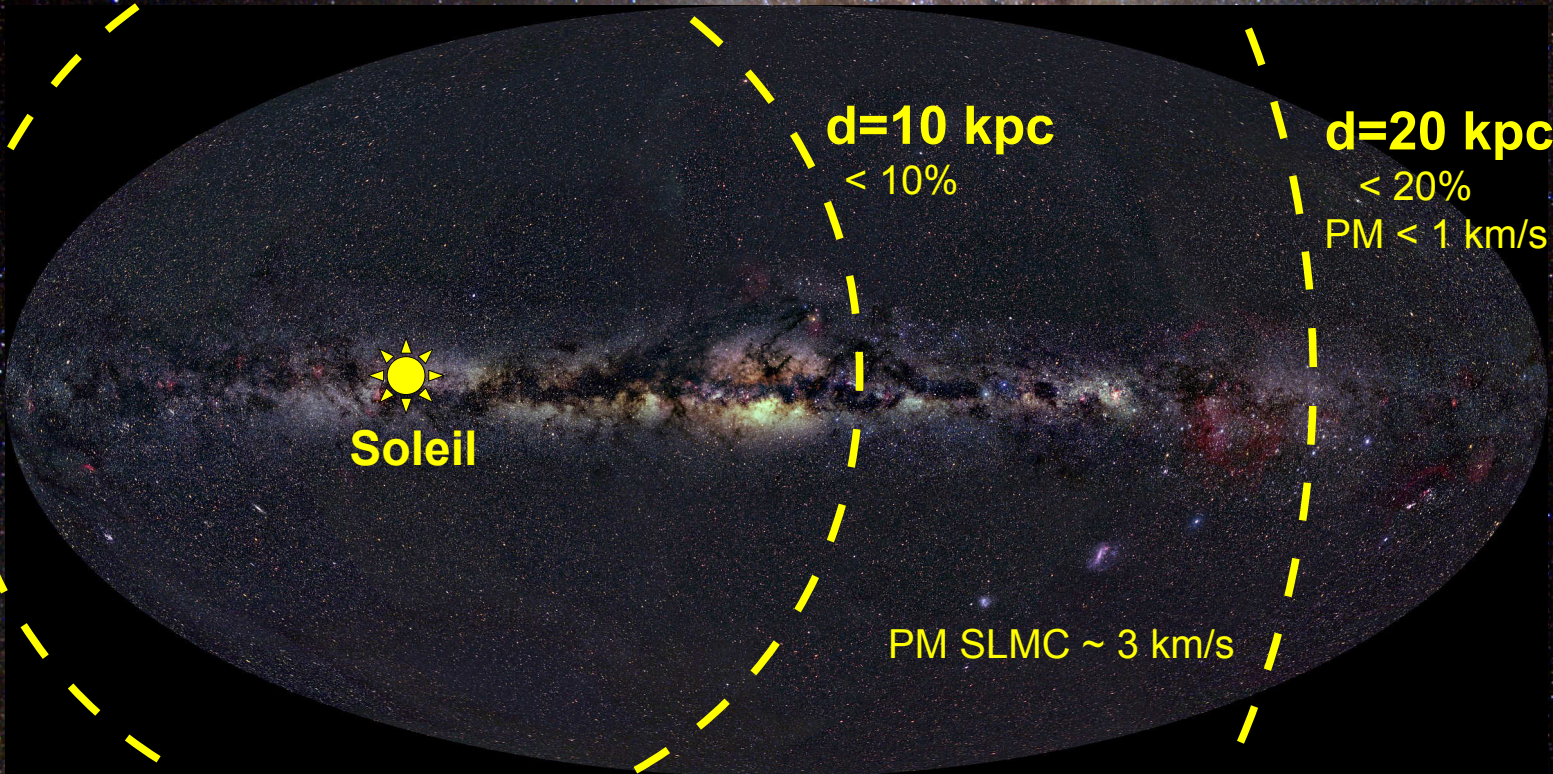


- Position du Soleil
- Forme du bulbe
- Longueur de la barre
- Forme du disque externe

- Propriétés du halo de matière noire



# Quelles précisions pour Gaia ?







# Astrométrie optique/IR

Mission Gaia : astrométrie pour  $V < 20$   
précision  $\sim 10$  microarcsec ( $= 1/360\,000\,000$  degrés) pour  $V < 12$

## QUESTIONS :

Quelle sera la parallaxe (en arcsec) et la distance (en pc) d'une étoile de type solaire de magnitudes apparentes  $V=12$  et  $V=20$ ?

Gaia pourra-t-il les observer ?

$$\text{Magnitude apparente} = \text{Magnitude absolue} - 5 (\log(p)+1)$$

Soleil : Magnitude absolue  $M_{\text{abs}}(V) \sim 4.2$



# Astrométrie optique/IR

Mission Gaia : astrométrie pour  $V < 20$   
précision  $\sim 10$  microarcsec ( $= 1/360\,000\,000$  degrés) pour  $V < 12$

## QUESTIONS :

Quelle sera la parallaxe (en arcsec) et la distance (en pc) d'une étoile de type solaire de magnitudes apparentes  $V=12$  et  $V=20$ ?

Gaia pourra-t-il les observer ?

$$\text{Magnitude apparente} = \text{Magnitude absolue} - 5 (\log(p)+1)$$

Soleil : Magnitude absolue  $M_{\text{abs}}(V) \sim 4.2$

$$V=12 : p = 10^{((M_{\text{abs}}-M_{\text{app}})/5 - 1)} = 10^{(-2.56)} = 0.003''$$
$$d = 1/p = 363 \text{ pc} = 100 \text{ a.l.}$$

$$V=20 : p = 70 \text{ microarcsec}, d = 14.5 \text{ kpc}$$



# Astrométrie optique/IR

Mission Gaia : astrométrie pour  $V < 20$   
précision  $\sim 10$  microarcsec ( $= 1/360\,000\,000$  degrés) pour  $V < 12$

## QUESTIONS :

Quelle sera la parallaxe (en arcsec) et la distance (en pc) d'une étoile de type solaire de magnitudes apparentes  $V=12$  et  $V=20$ ?

Gaia pourra-t-il les observer ?

$$\text{Magnitude apparente} = \text{Magnitude absolue} - 5 (\log(p)+1)$$

Soleil : Magnitude absolue  $M_{\text{abs}}(V) \sim 4.2$

$$V=12 : p = 10^{((M_{\text{abs}}-M_{\text{app}})/5 - 1)} = 10^{(-2.56)} = 0.003''$$
$$d = 1/p = 363 \text{ pc} = 100 \text{ a.l.}$$

$$V=20 : p = 70 \text{ microarcsec}, d = 14.5 \text{ kpc}$$

**Gaia OK !**



# Astrométrie optique/IR

Mission Gaia : astrométrie pour  $V < 20$   
précision  $\sim 10$  microarcsec ( $= 1/360\,000\,000$  degrés) pour  $V < 12$

## QUESTIONS :

Pourra-t-on mesurer la parallaxe d'étoiles type solaire et Bételgeuse dans le Grand Nuage de Magellan ( $d=158\,000$  a.l.,  $3.3$  a.l.=1 pc) avec Gaia ?

$$\text{Magnitude apparente} = \text{Magnitude absolue} - 5 (\log(p)+1)$$

Soleil :  
Mabs (V)  $\sim 4.2$

Bételgeuse :  
Mabs (V)  $\sim -7.2$



# Astrométrie optique/IR

Mission Gaia : astrométrie pour  $V < 20$   
précision  $\sim 10$  microarcsec ( $= 1/360\,000\,000$  degrés) pour  $V < 12$

## QUESTIONS :

Pourra-t-on mesurer la parallaxe d'étoiles type solaire et Bételgeuse dans le Grand Nuage de Magellan ( $d=158\,000$  a.l.,  $3.3$  a.l.=1 pc) avec Gaia ?

$$\text{Magnitude apparente} = \text{Magnitude absolue} - 5 (\log(p)+1)$$

Soleil :

$$M_{\text{abs}} (V) \sim 4.2$$

$$M_{\text{app}} = 4.2 - 5(\log(1/48000)+1) = 22.6$$

Bételgeuse :

$$M_{\text{abs}} (V) \sim -7.2$$

$$M_{\text{app}} = -7.2 - 5(\log(1/48000)+1) = 11.2$$



# Astrométrie optique/IR

Mission Gaia : astrométrie pour  $V < 20$   
précision  $\sim 10$  microarcsec ( $= 1/360\,000\,000$  degrés) pour  $V < 12$

## QUESTIONS :

Pourra-t-on mesurer la parallaxe d'étoiles type solaire et Bételgeuse dans le Grand Nuage de Magellan ( $d=158\,000$  a.l.,  $3.3$  a.l.=1 pc) avec Gaia ?

$$\text{Magnitude apparente} = \text{Magnitude absolue} - 5 (\log(p)+1)$$

Soleil :

$$M_{\text{abs}} (V) \sim 4.2$$

$$M_{\text{app}} = 4.2 - 5(\log(1/48000)+1) = 22.6$$

Bételgeuse :

$$M_{\text{abs}} (V) \sim -7.2$$

$$M_{\text{app}} = -7.2 - 5(\log(1/48000)+1) = 11.2$$

**NON**

**OUI**



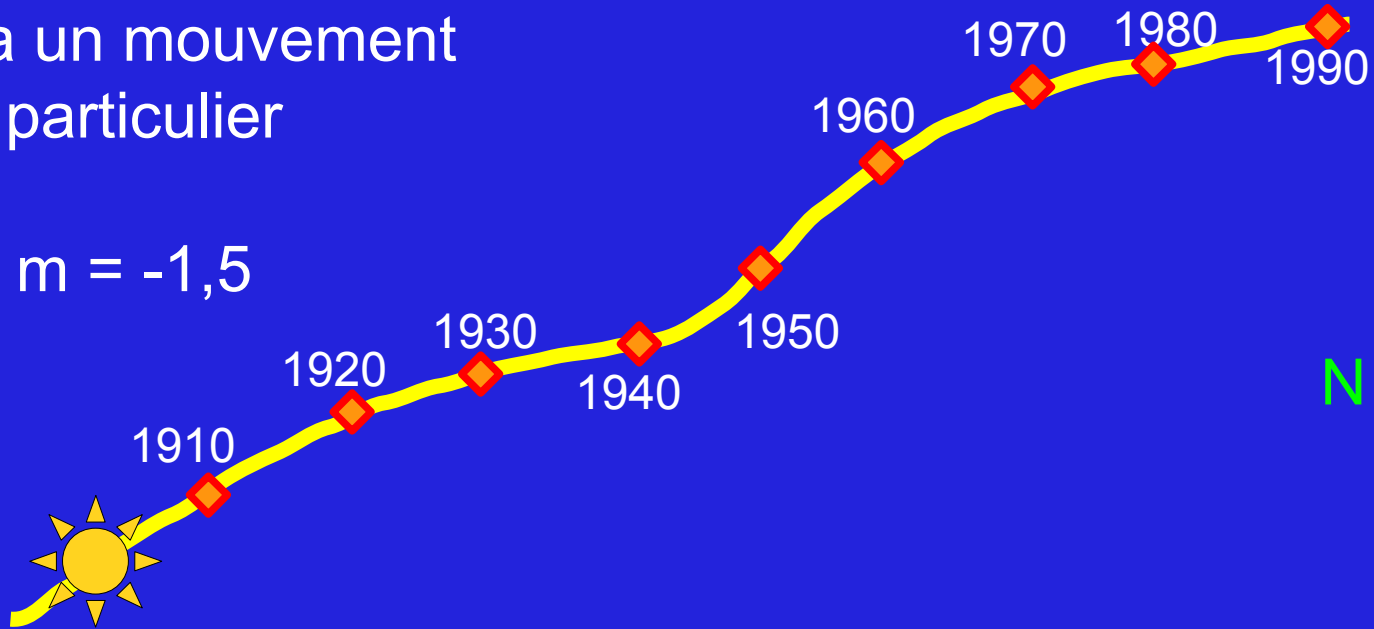
# Astrométrie optique/IR



Bessel : 1844

Sirius a un mouvement propre particulier

Sirius :  $m = -1,5$





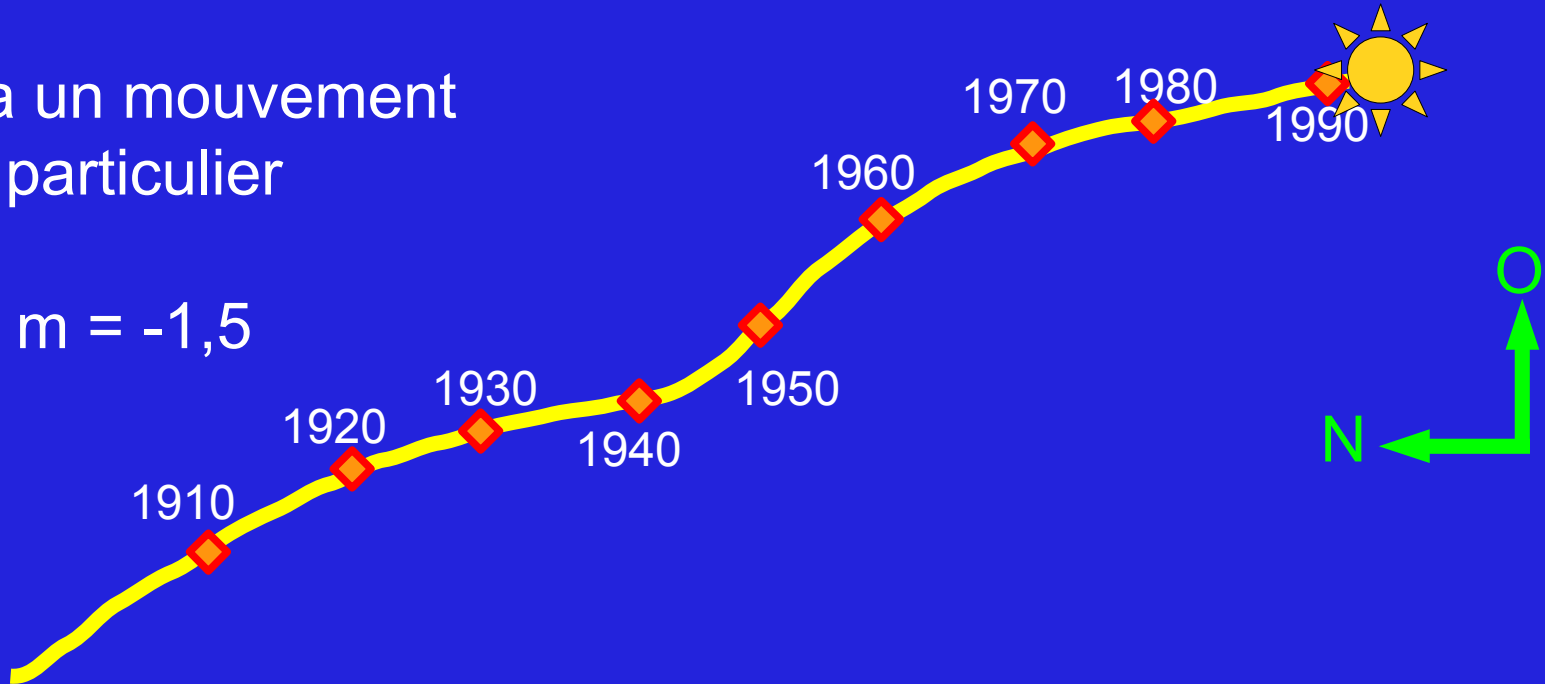
# Astrométrie optique/IR



Bessell : 1844

Sirius a un mouvement propre particulier

Sirius :  $m = -1,5$







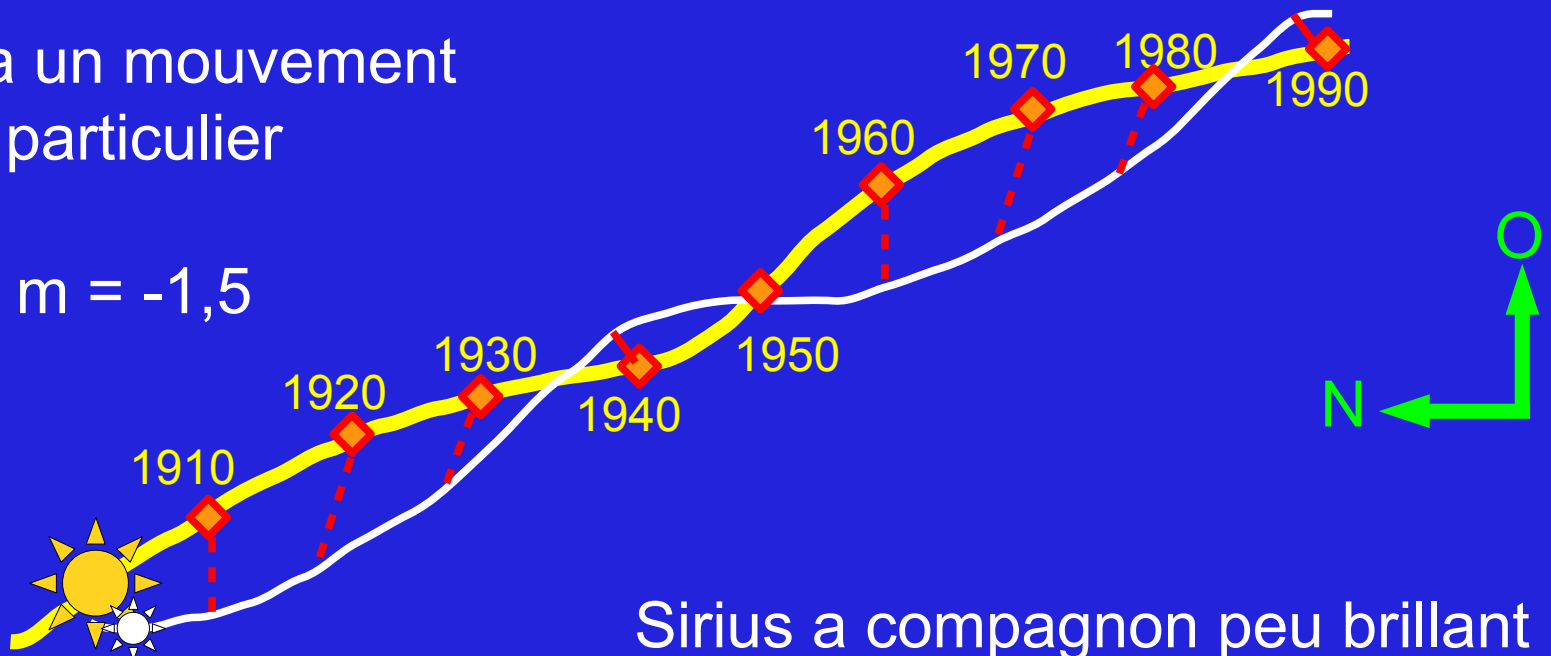
# Astrométrie optique/IR



Bessel : 1844

Sirius a un mouvement propre particulier

Sirius :  $m = -1,5$



Sirius a compagnon peu brillant :  
binaire astrométrique



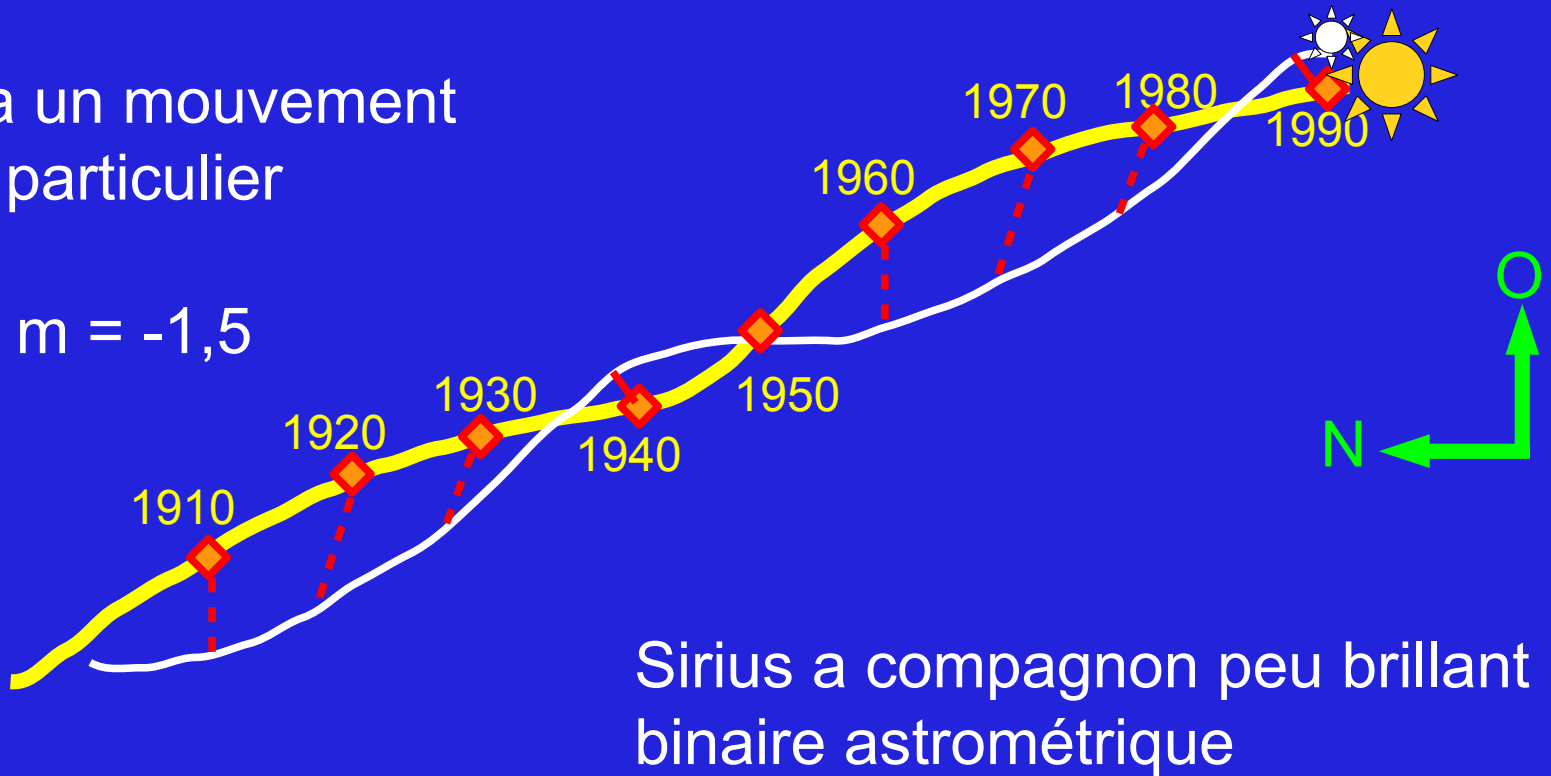
# Astrométrie optique/IR



Bessell : 1844

Sirius a un mouvement propre particulier

Sirius :  $m = -1,5$



Sirius a compagnon peu brillant : binaire astrométrique



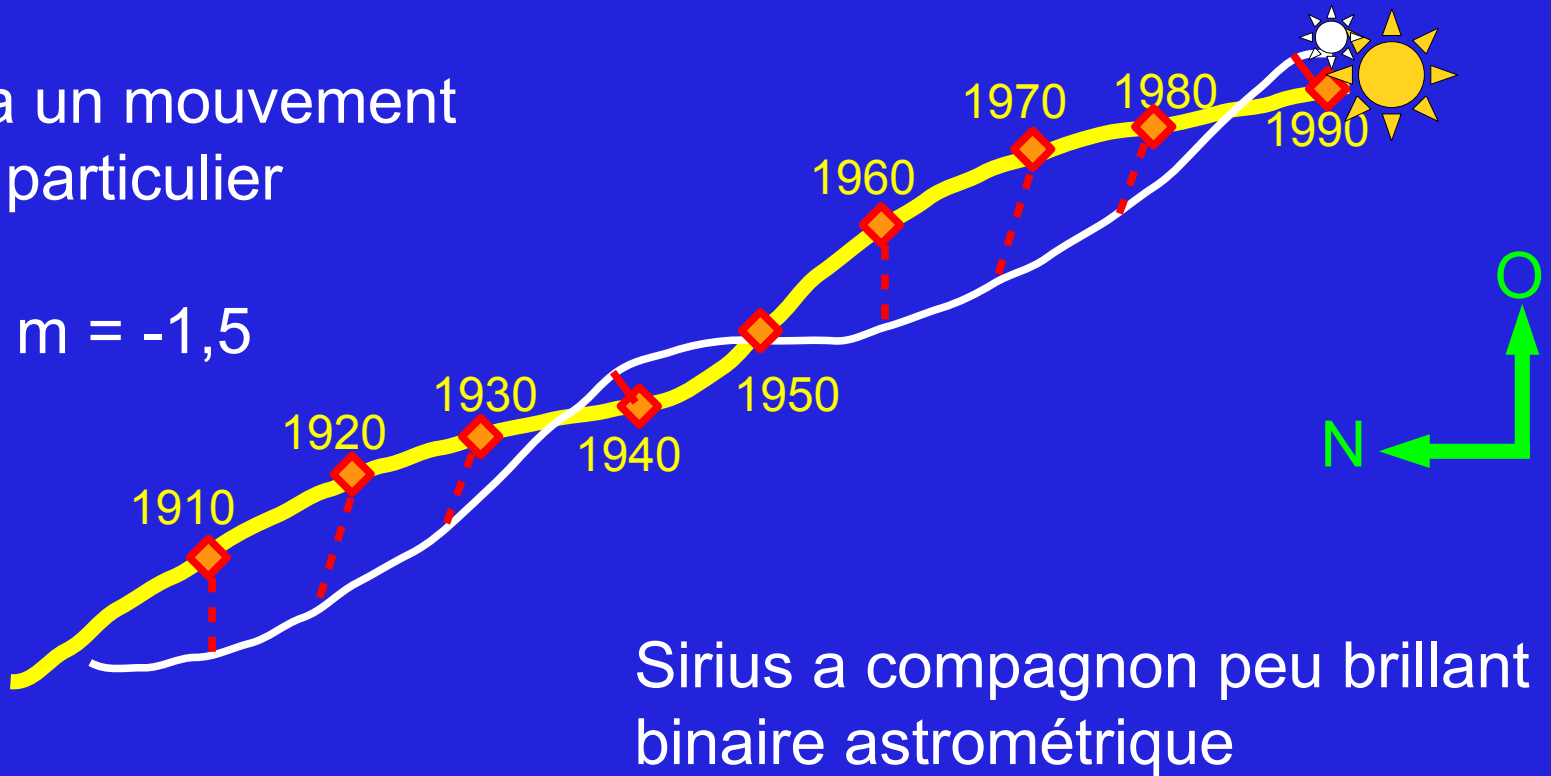
# Astrométrie optique/IR



Bessell : 1844

Sirius a un mouvement propre particulier

Sirius :  $m = -1,5$



Sirius a compagnon peu brillant :  
binaire astrométrique



# Astrométrie optique/IR



Sirius = binaire astrométrique - Mouvement réflexe (wobble)



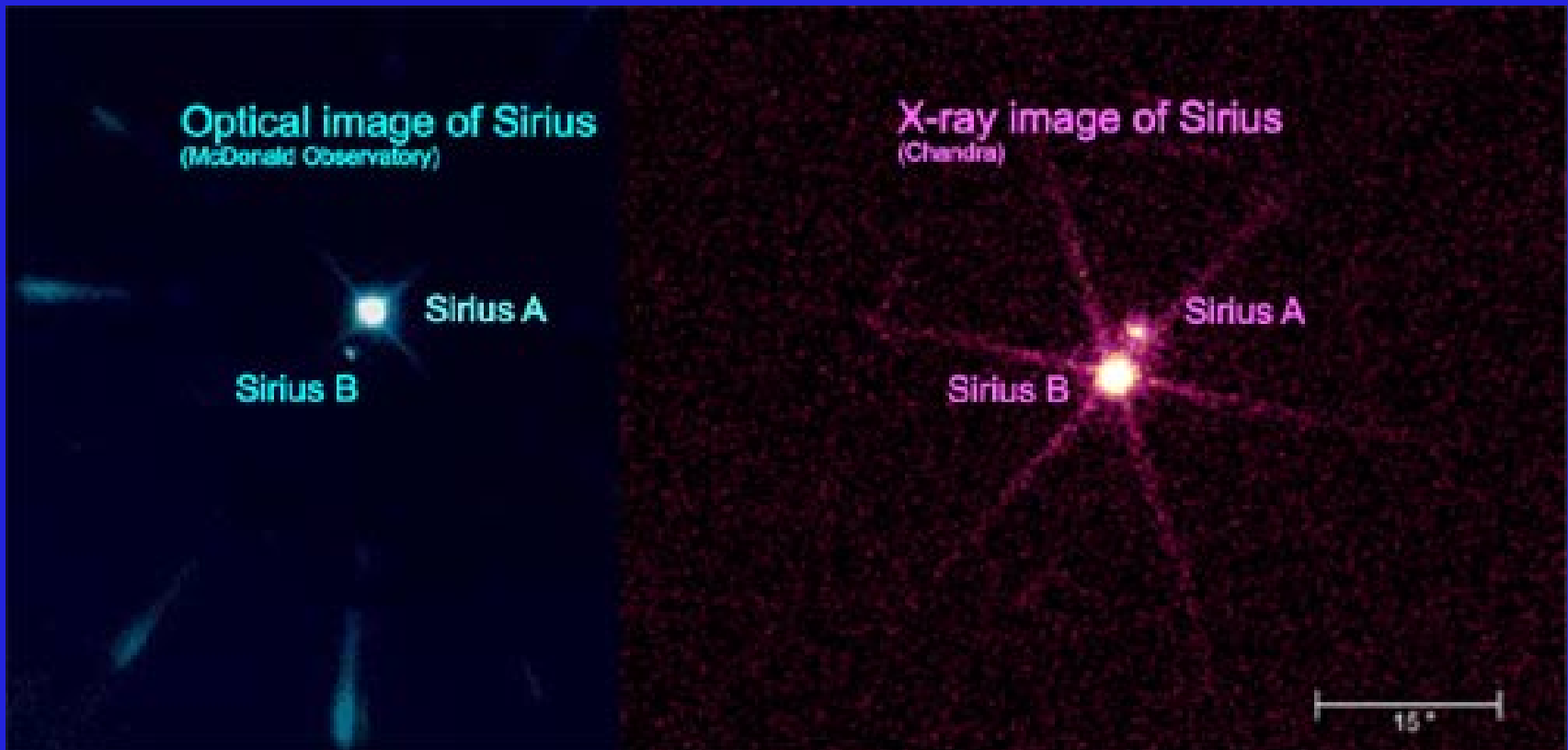


# Astrométrie optique/IR



Sirius = binaire astrométrique - Mouvement réflexe (wobble)

binaire photométrique confirmée en 1862



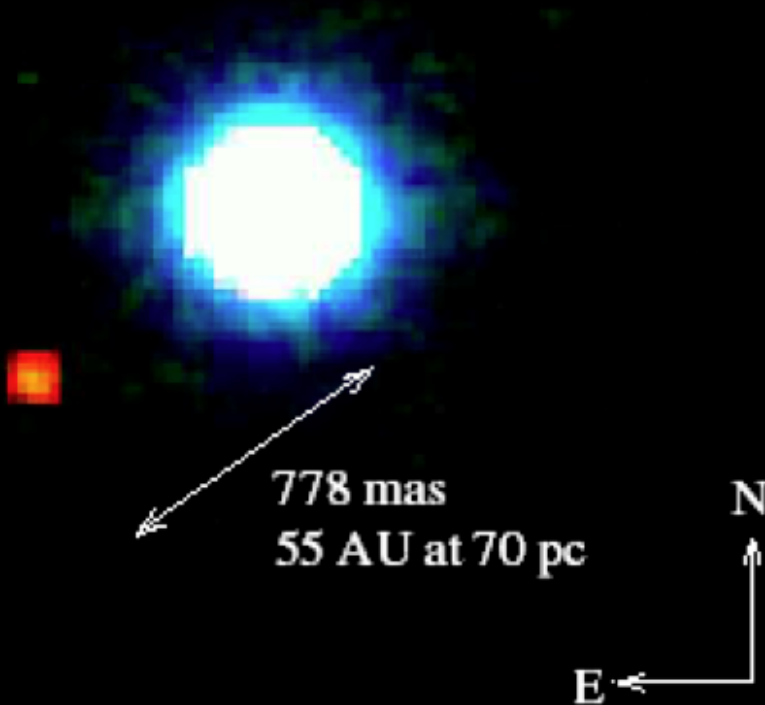


# Astrométrie optique/IR



2MASSWJ1207334-393254

VLT/Naco Chauvin et al. 2005



- Quelle est la nature du compagnon ?

Naine brune  
Exoplanète

- Besoin de la distance
- Astrométrie  
ESO-NTT (V,R,I)

Ducourant et al. 2008

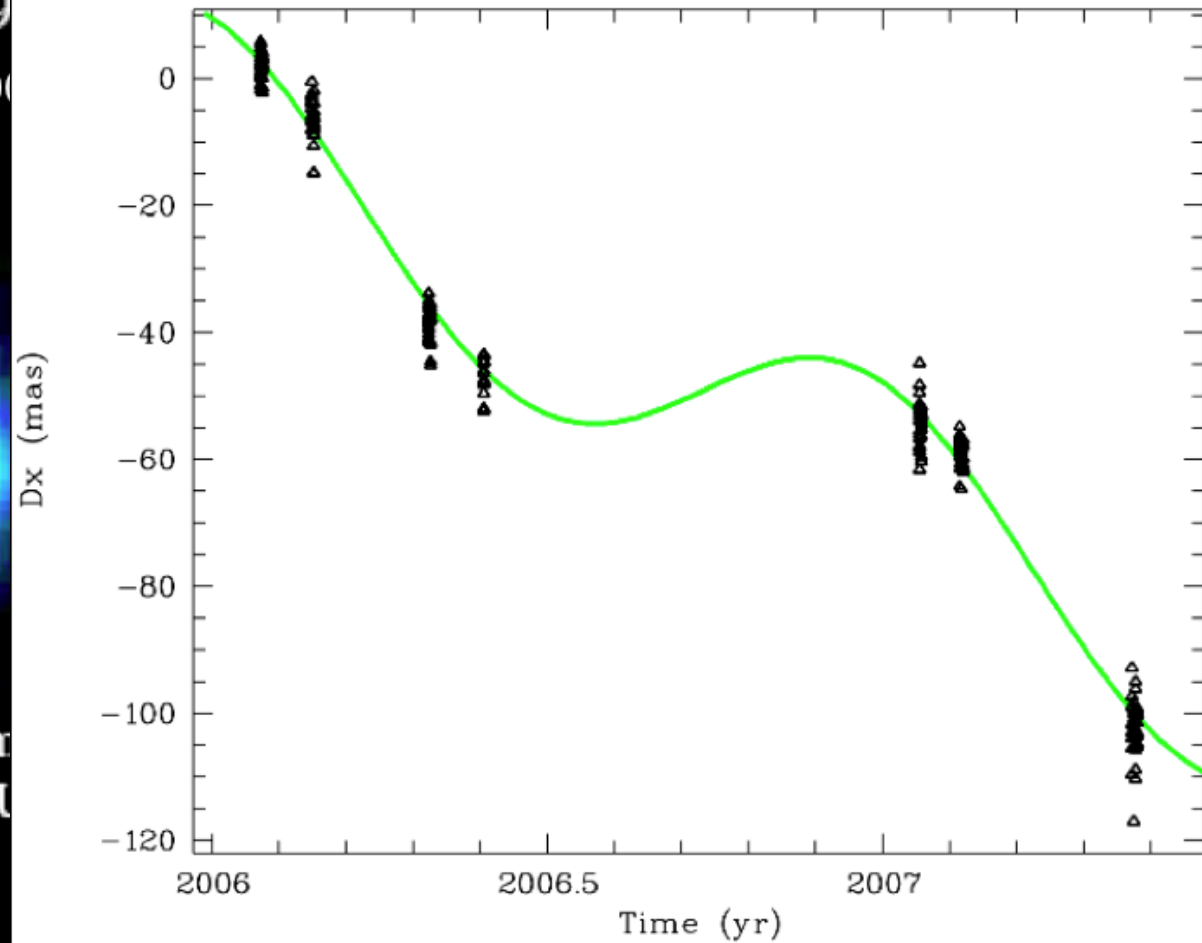
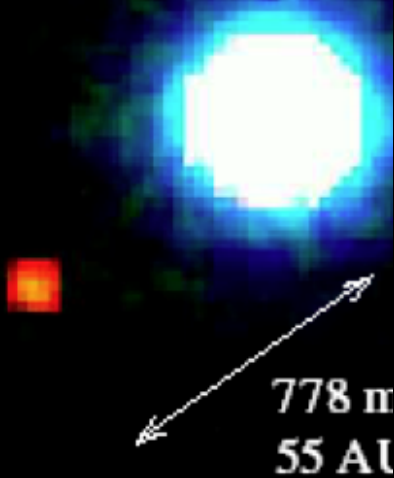


# Astrométrie optique/IR



2MASSWJ1207334-392254

VLT/Naco Chauvin et al. 2005



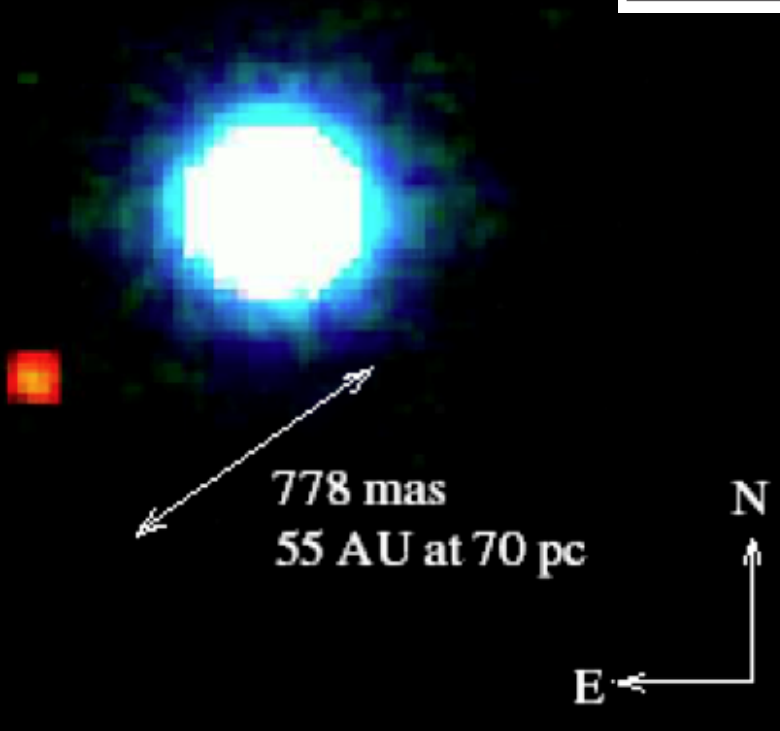


# Astrométrie optique/IR



2MASSWJ1207334-393254

VLT/Naco Chauvin et al. 2005



Authors	year	Distance (pc)	Method
Chauvin et al.	2004	$70 \pm 20$	photometry
Mamajek	2005	$53.3 \pm 6.0$	moving cluster
Song et al.	2006	$59 \pm 7$	scale proper motion
Biller & Close	2007	$58.8 \pm 5.5$	trig. parallax
Gizis et al.	2007	$54^{+3.2}_{-2.8}$	trig. parallax
Mamajek & Meyer	2007	$66 \pm 5$	moving cluster
This work	2007	$52.4 \pm 1.1$	trig. parallax





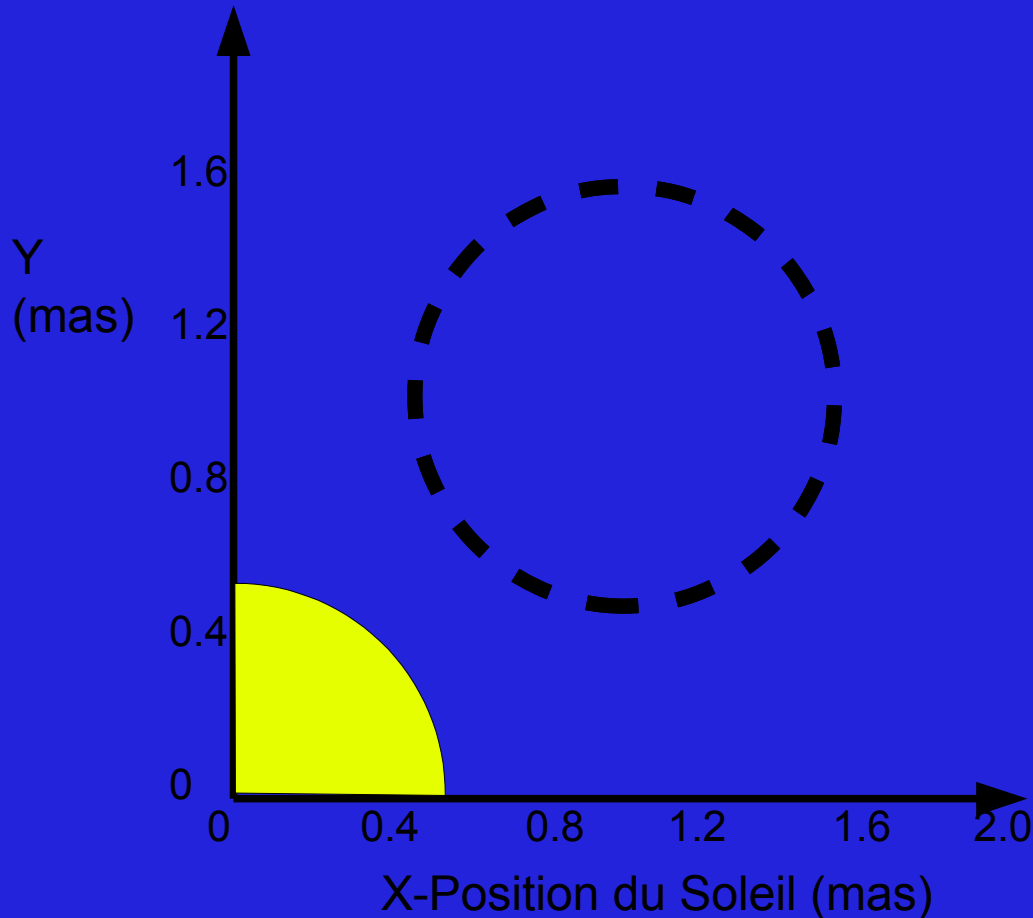


# Astrométrie optique/IR



Gaia : ~10 000 exoplanètes (transits et mouvements réflexes)

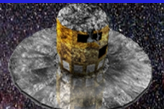
Précision  $1\sigma \sim 10 \mu\text{as}$  pour  $V < 12$



Mouvement réflexe du soleil  
(Jupiter seul)  
 $d=10 \text{ pc} \sim 1 \text{ mas}$

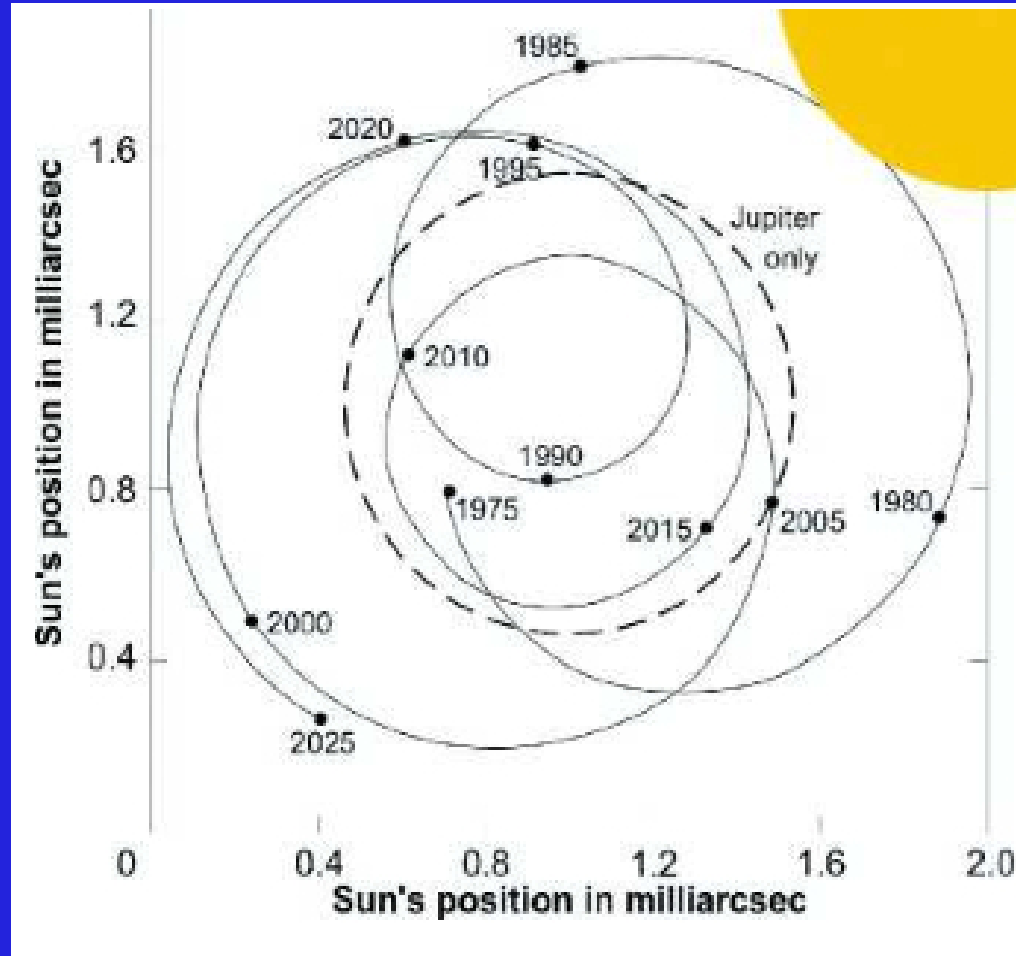
Signal détectable à  $10\sigma$  par Gaia ?  
 $10\sigma \sim 100 \mu\text{as}$   
 $\rightarrow d=100 \text{ pc} (V \sim 9)$   
Détection OK

Signal détectable à  $3\sigma$  ?  
 $3\sigma \sim 30 \mu\text{as}$   
 $\rightarrow d=360 \text{ pc} (V \sim 12)$   
Détection OK  
limite supérieure  $\sim 1200 \text{ a.l.}$



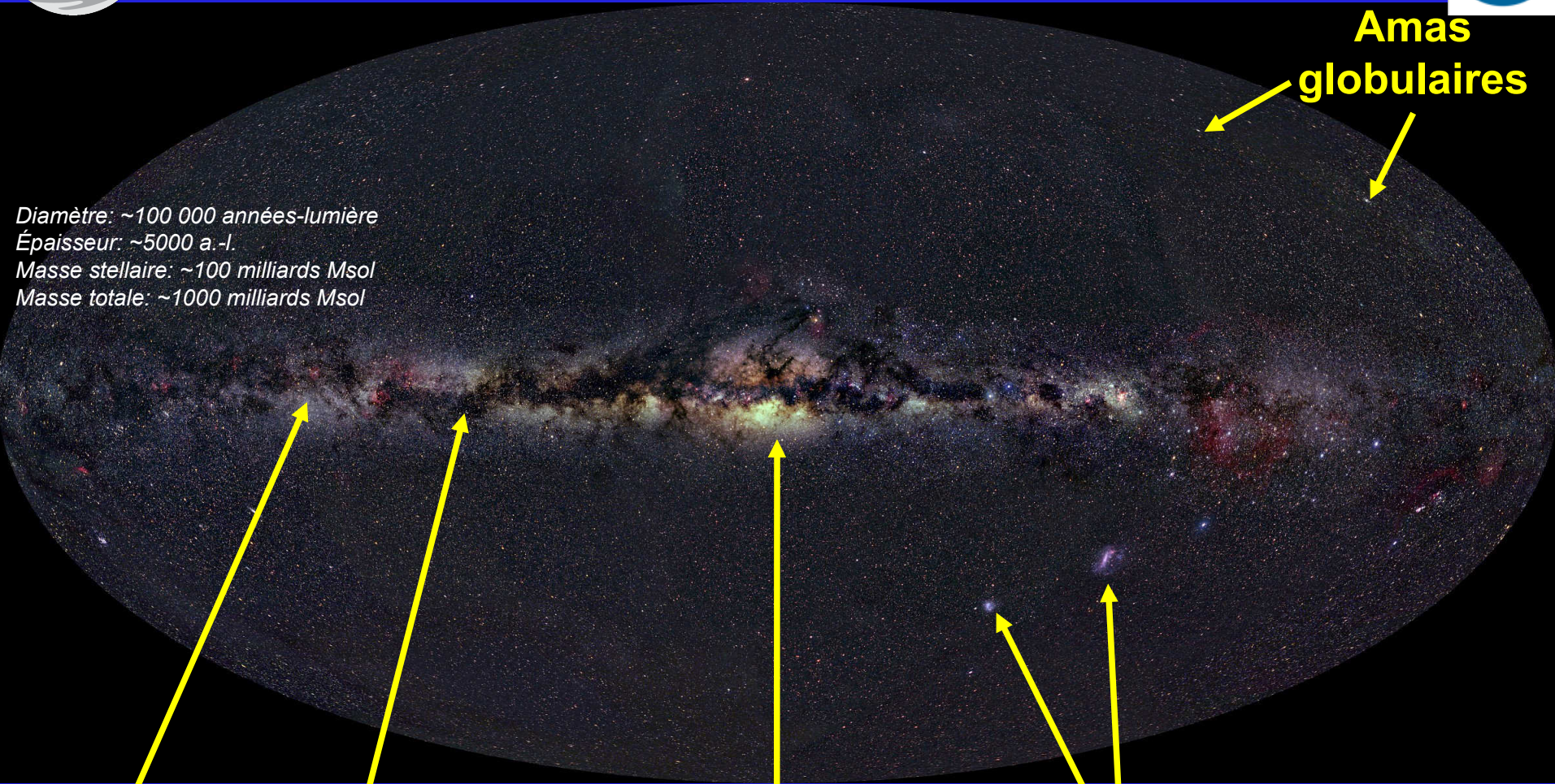


# Astrométrie optique/IR





# Centre Galactique



Amas globulaires

Diamètre: ~100 000 années-lumière  
Épaisseur: ~5000 a.-l.  
Masse stellaire: ~100 milliards Msol  
Masse totale: ~1000 milliards Msol

Disque

Poussières

Bulbe

Nuages de Magellan



Laurent Chemin





# Centre Galactique



Astrométrie  
des étoiles en  
direction de  
SgrA\*

Very Large  
Telescope

Infrarouge  
(1.6 $\mu$ m)

Optique  
adaptive

$\sim 0.2\text{--}0.3$  mas



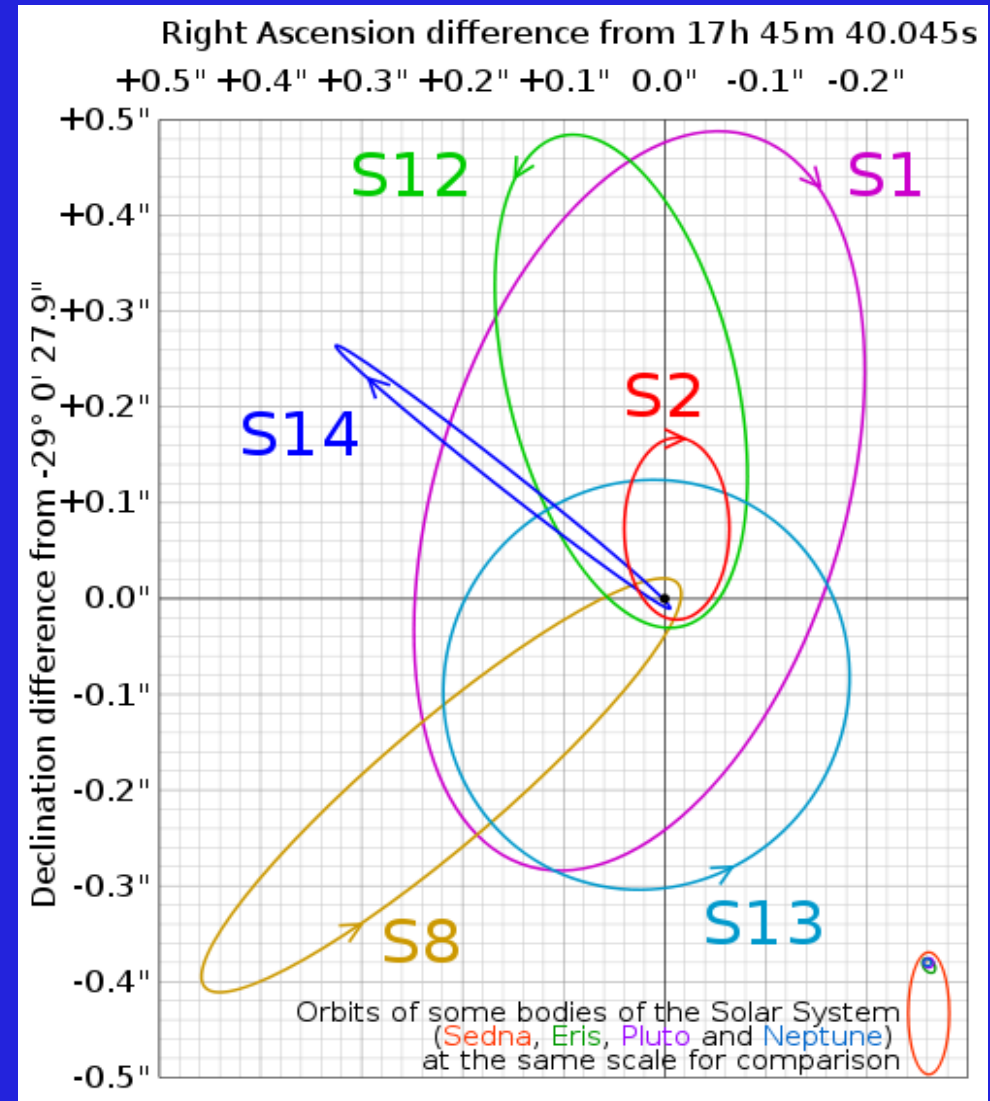


# Centre Galactique



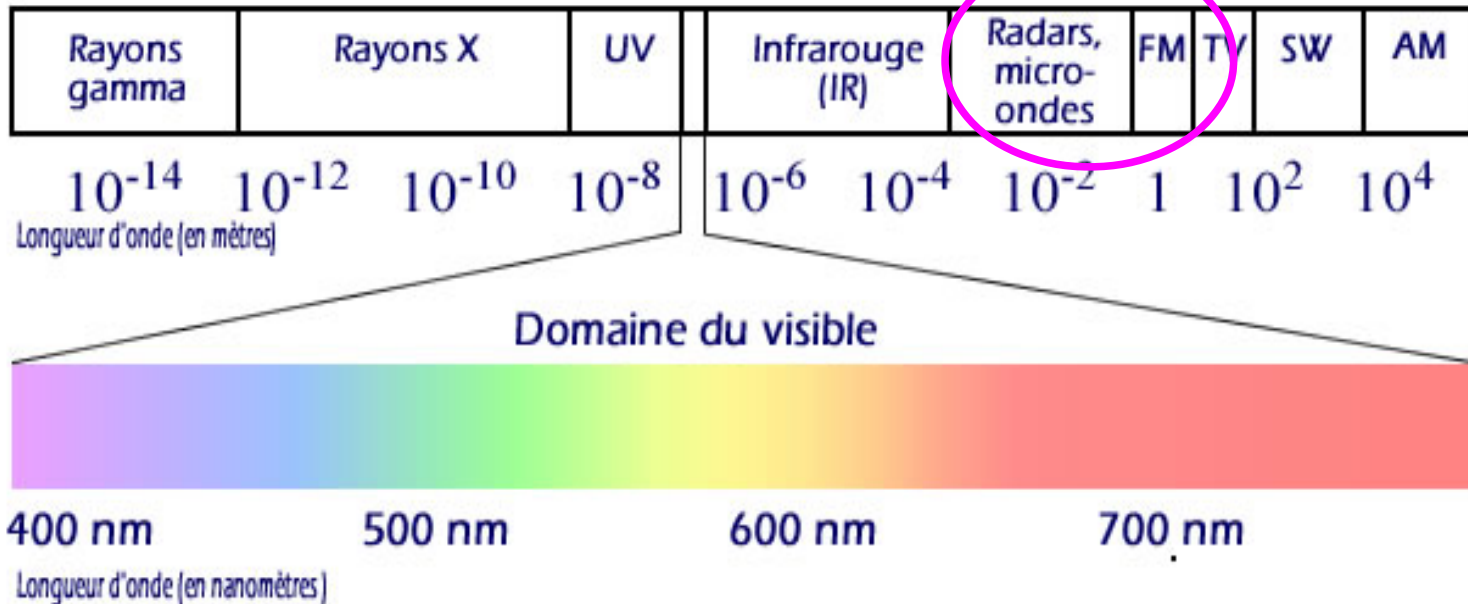
- Astrométrie infrarouge (1.6 $\mu$ m) des étoiles en direction de SgrA\*
- VLT (optique adaptative) 0.2–0.3 mas precision
- $T^2/r^3=4\pi^2/GM$
- Masse centrale :
  - 4.1  $10^6$  Msol
  - taille plus petite que le système solaire

→ trou noir supermassif





# Domaine spectral radio





# Interféromètre millimétrique ALMA





# Astrométrie en radio



VLBI=Very Long Baseline Interferometry

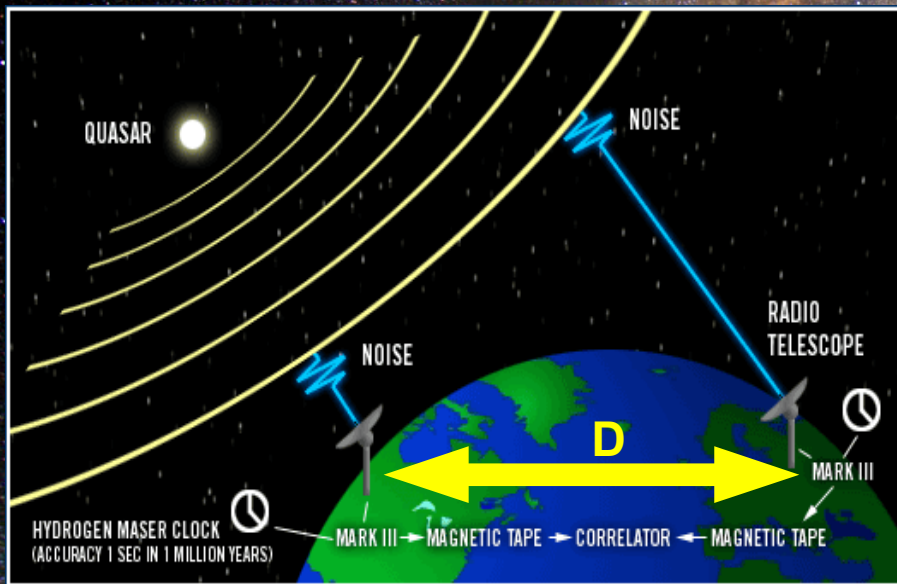
Interférométrie à ligne de base très longue





# Astrométrie par VLBI

## Very Long Baseline Interférométrie Interférométrie radio à ligne de base très longue



Très grande résolution angulaire  
précision astrométrique

Résolution angulaire  $\sim \lambda/D$

$\lambda = 5 \text{ cm}$ ,  $D=5000 \text{ km}$

$R \sim 0.0000006^\circ \sim 0.002''$

Précision astrométrique :

1-10/100000''

Aucun instrument ne fait mieux



# Astrométrie par VLBI



Réseaux VLBI : EVN

EUROPEAN  
VLBI  
NETWORK

jive  
JOINT INSTITUTE FOR VLBI IN EUROPE





# Astrométrie par VLBI



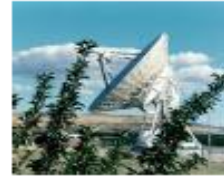
## Réseaux VLBI : VLBA



Mauna Kea  
Hawaii



Owens Valley  
California



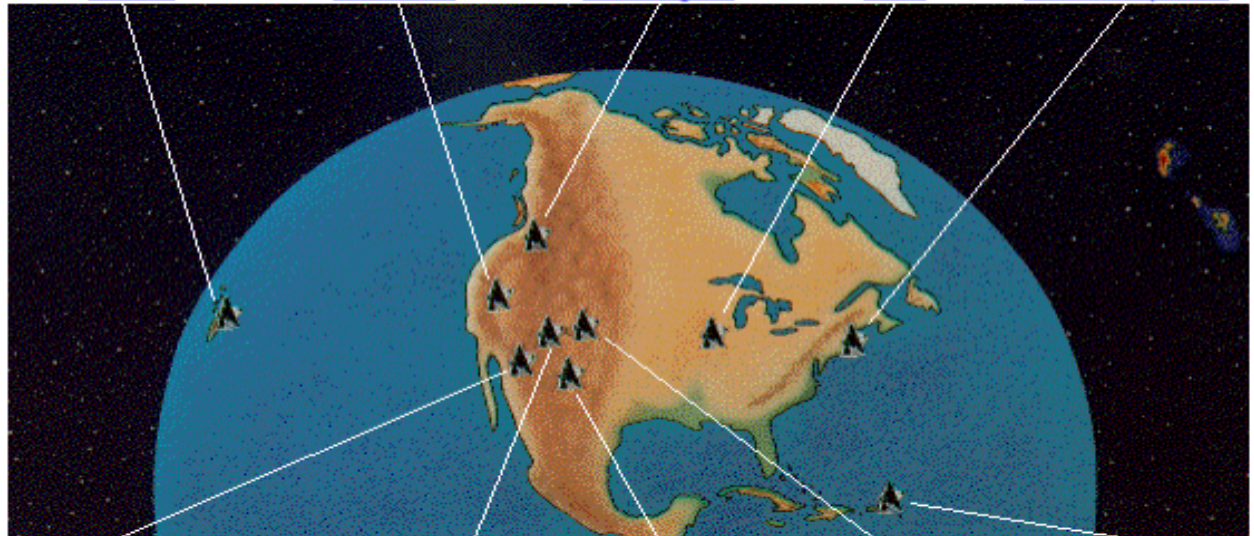
Brewster  
Washington



North Liberty  
Iowa



Hancock  
New Hampshire



Kitt Peak  
Arizona



Pie Town  
New Mexico



Fort Davis  
Texas



Los Alamos  
New Mexico



St. Croix  
Virgin Islands



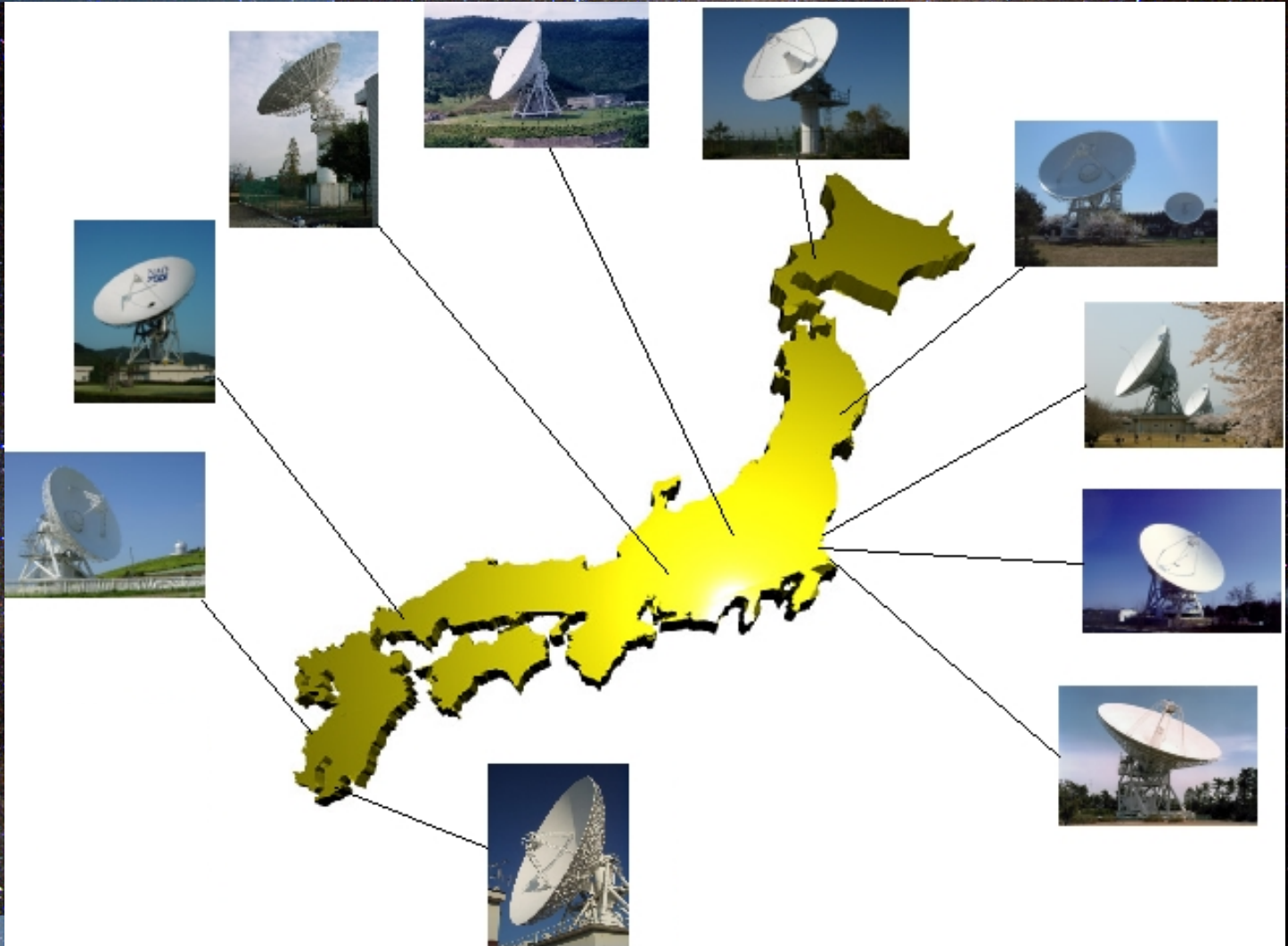


# Astrométrie par VLBI



Réseaux VLBI : JVN

Ligne de  
base maxi ~  
2500 km





# Astrométrie par VLBI

## Réseaux VLBI : eMerlin

Ligne de  
base maxi ~  
400 km





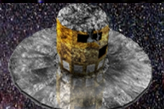
# Astrométrie par VLBI



## Autre réseau

IVS : International VLBI Service

Réparti sur toute le globe Géodésie et  
Astrométrie : référentiel de l'espace



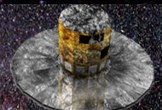


# Astrométrie par VLBI

## Intérêts scientifiques (voir site EVN)

### Imagerie à très haute résolution, astrométrie

- Définition du repère de référence céleste
- Structure et dynamique de la Voie Lactée
- Jets galactiques, noyaux galactiques actifs/trous noirs supermassifs
- Vents stellaires
- Objets compacts binaires (étoiles, pulsar, etc.)
- etc...





# Observables astrométriques du VLBI



Corrélation croisée des signaux issus des antennes  
réalisé par le corrélateur

$$\mathbf{V}_\nu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle \mathbf{E}_\nu(\mathbf{r}_1) \mathbf{E}_\nu^*(\mathbf{r}_2) \rangle$$

$$V_\nu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \int I_\nu(\mathbf{s}) e^{-2\pi i \nu \mathbf{s} \cdot (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) / c} d\Omega$$

- $V$  est la fonction de cohérence spatiale du champ électrique  $E$
- $I$  est l'intensité du rayonnement
- Un interféromètre mesure  $V$  (on fait une TF inverse pour avoir  $I$ )





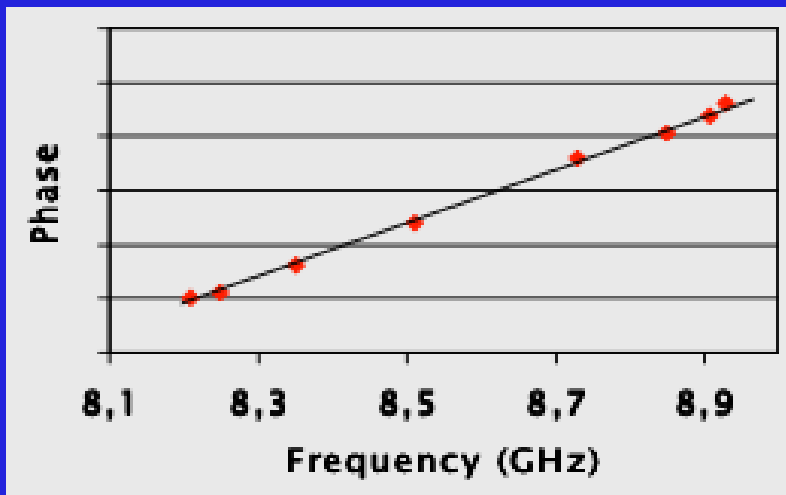
# Observables astrométriques du VLBI



$\Phi(\eta, t)$  = phase de la frange d'interférence

Retard de phase  $\tau_\phi = \Phi / (2 \cdot \pi \cdot \eta)$

Retard de groupe  $\tau_{\text{groupe}} = d\Phi / d(2 \cdot \pi \cdot \eta)$



$\tau_\phi$  Très précis  $\sim 1$  ps  
mais ambigu car  $\Phi$   
connue seulement  
modulo  $360^\circ$

$\tau_{\text{groupe}}$  Moins précis  $\sim 10$  ps  
Mais pas ambigu

→ observable principale



# Astrométrie VLBI (sans imagerie)

Défi : Modéliser  $\tau_{\text{groupe}}$

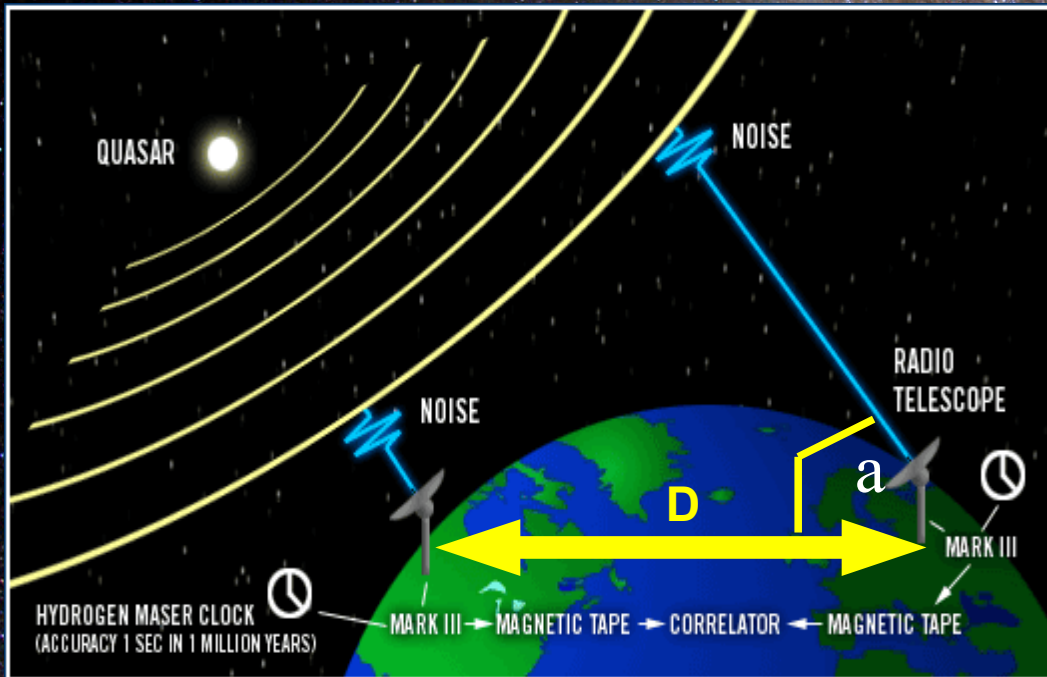
$$\tau_{\text{groupe}} = \tau_{\text{géométrique}} + \tau_{\text{instrumental}} + \tau_{\text{atmosphérique}} + \dots$$

- Retards géométriques
  - différence du temps d'arrivée des ondes ( $\sim 1-10$  ms)
    - ondes planes ou incurvées, retard gravitationnel (Soleil)
- variation des positions des antennes
  - mouvement par tectonique des plaques
  - effets de marée: de la Terre ferme, océans
  - pression atmosphérique

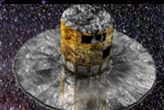


# Astrométrie par VLBI

## Very Long Baseline Interférométrie



$$D \cos(a) = c \tau_{\text{géométrique}}$$



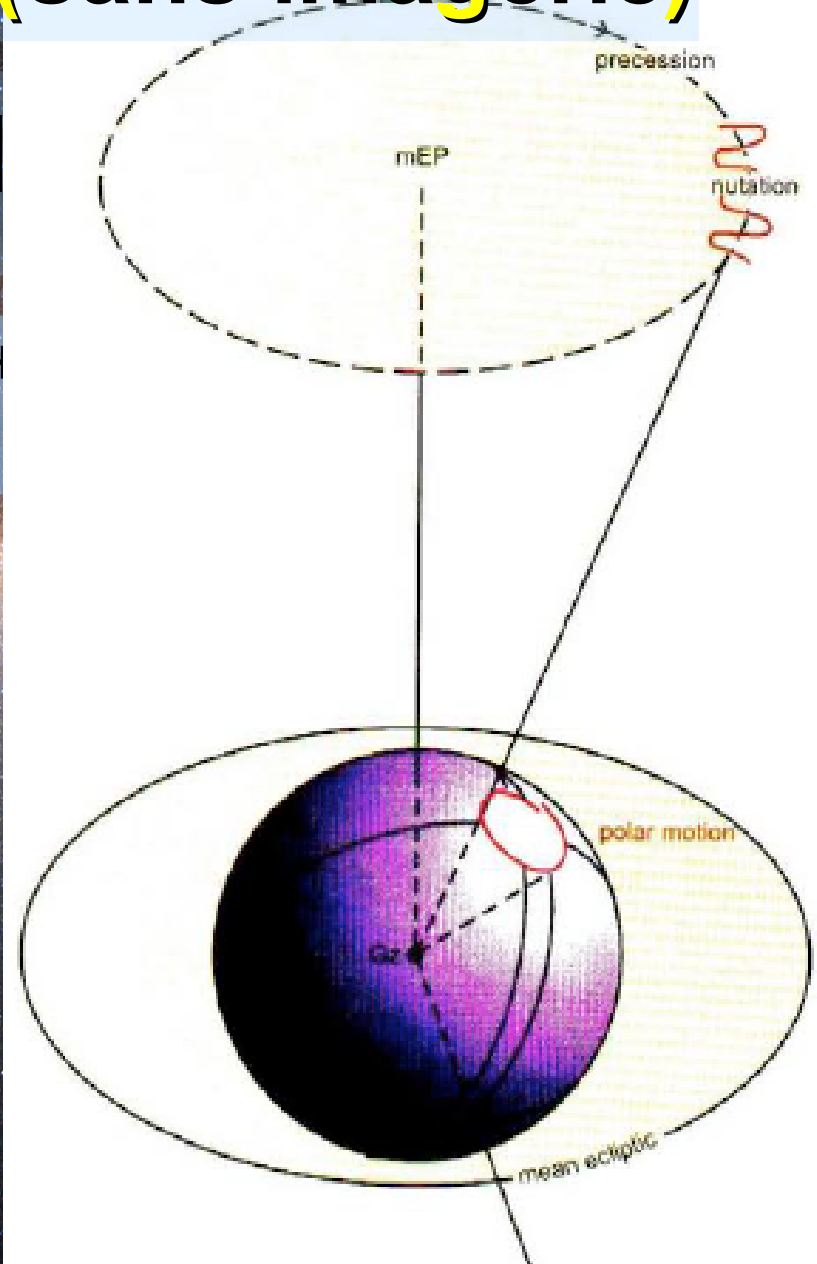


# Astrométrie VLBI (sans imagerie)

## Défi : Modél

$$\tau_{\text{groupe}} = \tau_{\text{géométrique}} + \tau_{\text{instrumental}}$$

- Retards géométriques
  - Orientation par rapport au plan écliptique et rotation de la Terre (Géodésie)
    - Rotation de la Terre
    - Mouvement polaire
    - Nutation
    - Précession





# Astrométrie VLBI (sans imagerie)

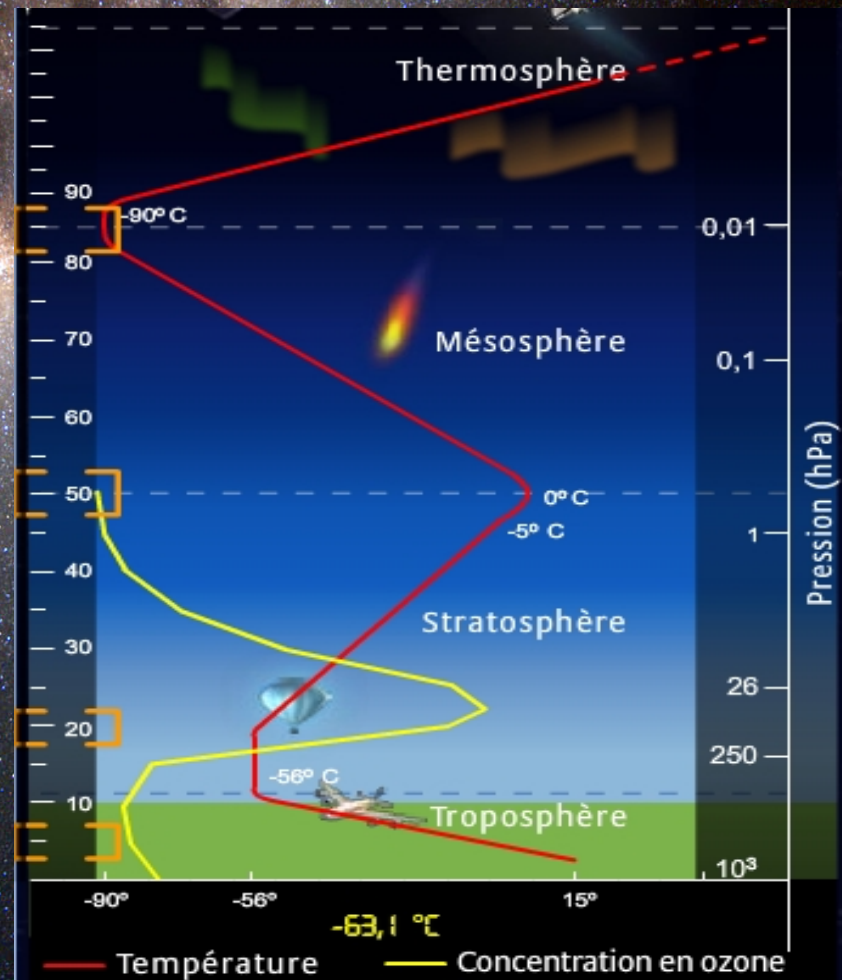
## Défi : Modéliser $\tau_{\text{groupe}}$

$$\tau_{\text{groupe}} = \tau_{\text{géométrique}} + \tau_{\text{instrumental}} + \tau_{\text{atmosphérique}} + \dots$$

- Retards instrumentaux
  - Câbles
  - Horloges

Retards atmosphériques:

- Troposphère
- Ionosphère



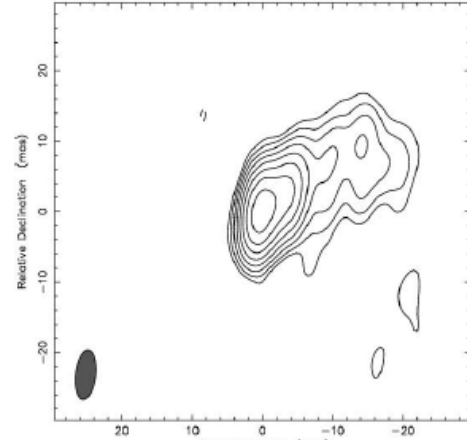


# Astrométrie VLBI (sans imagerie)



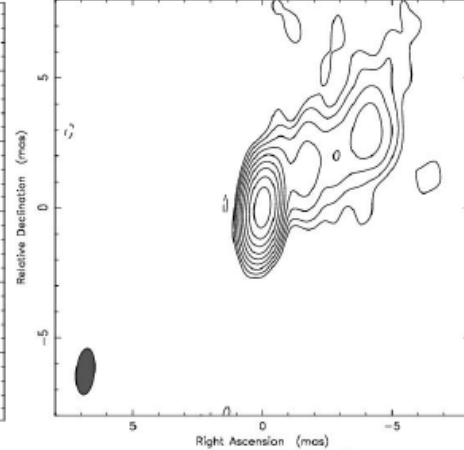
## Autres retards: structure des sources

Clean RR map. Array: BFGHKLMMNNOOPSTKW  
0458-020 at 2.302 GHz 2002 Jan 16



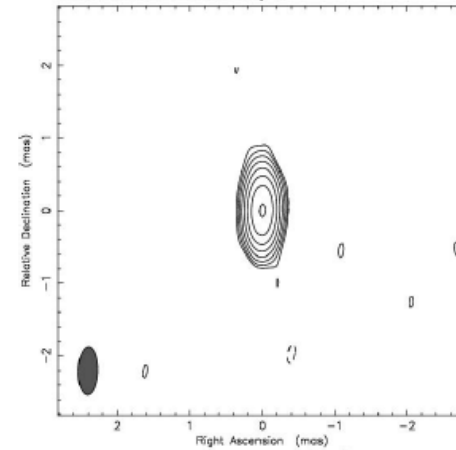
Map center: RA: 05 01 12.810, Dec: -01 59 14.256 (2000.0)  
Map peak: 0.415 Jy/beam  
Contours: 0.00195 Jy/beam x (-1 1 2 4 8 16 32 64  
Contours: 126 )  
Beam FWHM: 7.01 x 2.85 (mas) at -6.43°

Clean RR map. Array: BFGHKLMMNNOOPSTKW  
0458-020 at 8.646 GHz 2002 Jan 16



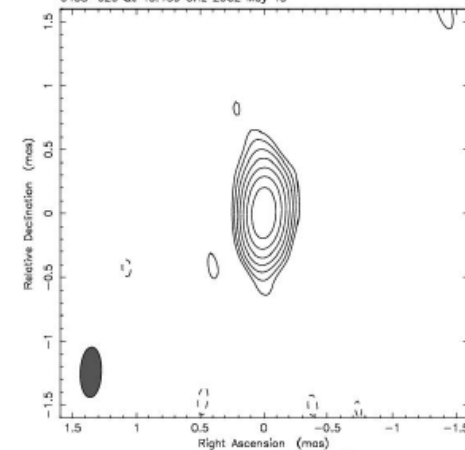
Map center: RA: 05 01 12.810, Dec: -01 59 14.256 (2000.0)  
Map peak: 0.727 Jy/beam  
Contours: 0.00168 Jy/beam x (-1 1 2 4 8 16 32 64  
Contours: 128 256 )  
Beam FWHM: 1.8 x 0.719 (mas) at -5.72°

Clean RR map. Array: BFHKLMMNOPS  
0458-020 at 24.439 GHz 2002 May 15



Map center: RA: 05 01 12.810, Dec: -01 59 14.256 (2000.0)  
Map peak: 0.896 Jy/beam  
Contours: 0.00654 Jy/beam x (-1 1 2 4 8 16 32 64  
Contours: 128 )  
Beam FWHM: 0.665 x 0.269 (mas) at -1.66°

Clean RR map. Array: BFHKLMMNOPS  
0458-020 at 43.139 GHz 2002 May 15



Map center: RA: 05 01 12.810, Dec: -01 59 14.256 (2000.0)  
Map peak: 0.664 Jy/beam  
Contours: 0.00533 Jy/beam x (-1 1 2 4 8 16 32 64 )  
Contours: 128 )  
Beam FWHM: 0.396 x 0.164 (mas) at -2.32°

S-band  
2.3 GHz  
13.6cm

X-band  
8.6 GHz  
3.6cm

K-band  
24 GHz  
1.2cm

Q-band  
43 GHz  
0.7cm



Sources de plus en plus ponctuelles: meilleur pour l'astrométrie



# Astrométrie VLBI (sans imagerie)



## Définition du repère de référence céleste

Fournit les coordonnées officielles (IAU)  
de toutes sources dans le ciel

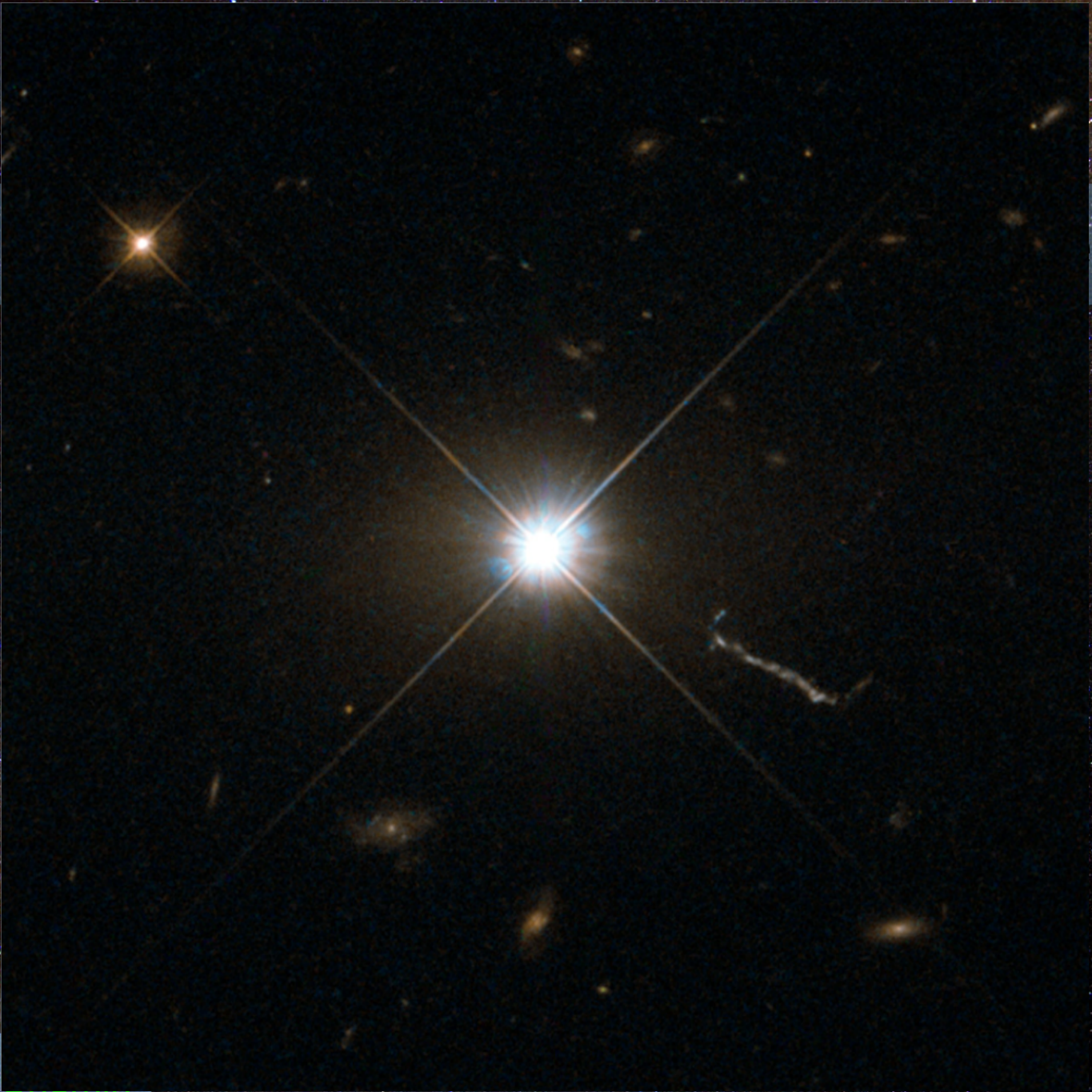
- Quasars
- Objets extragalactiques distants
- Mouvements propres nuls
- Parallaxes non détectables
- → Fixes sur la sphère céleste:  
références parfaites



Défini

ste

3C273  
(visible)



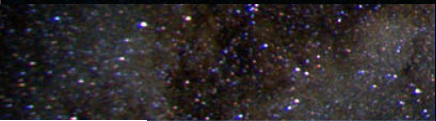
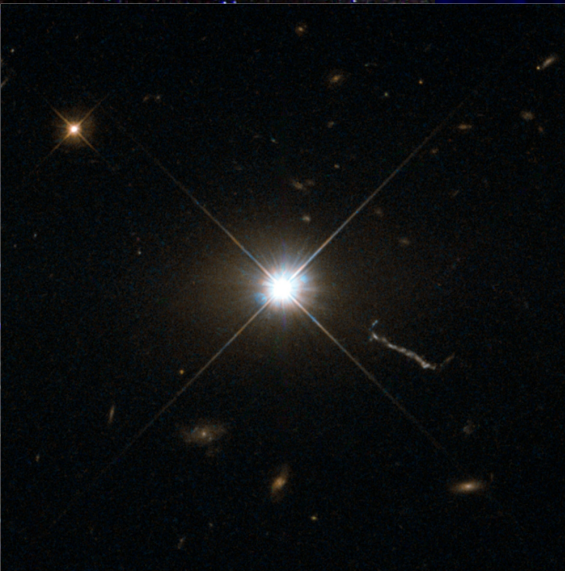
Laurent





Définitio

3C273  
(radio)



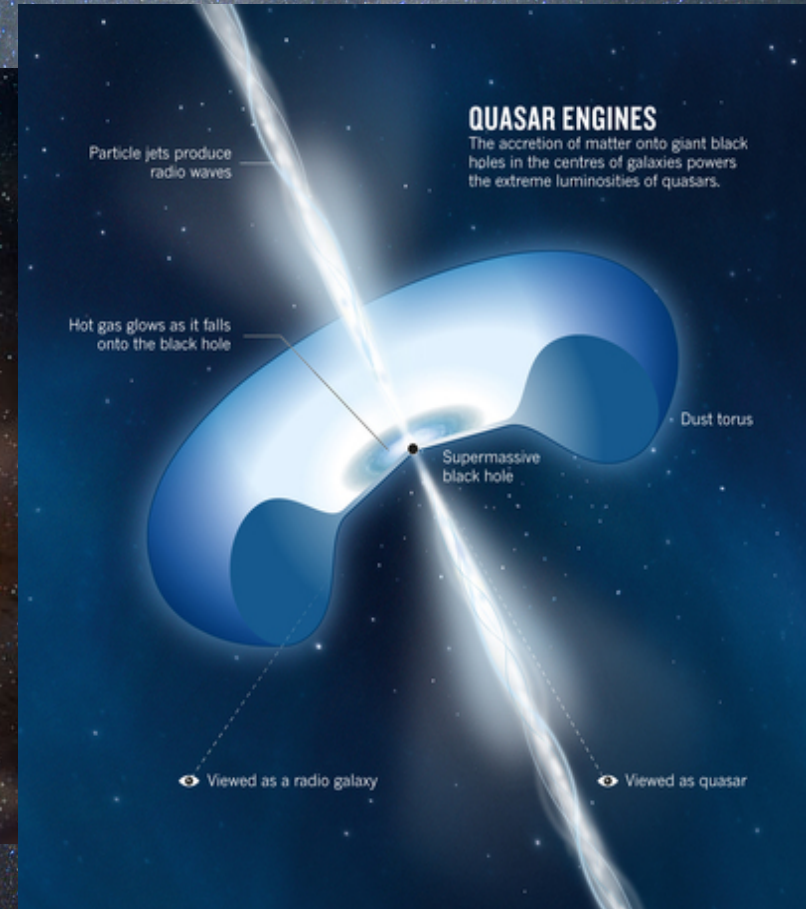
Laurent Cher



# Astrométrie VLBI (sans imagerie)



## Définition du repère de





# Astrométrie VLBI (sans imagerie)



## Définition du repère de référence céleste

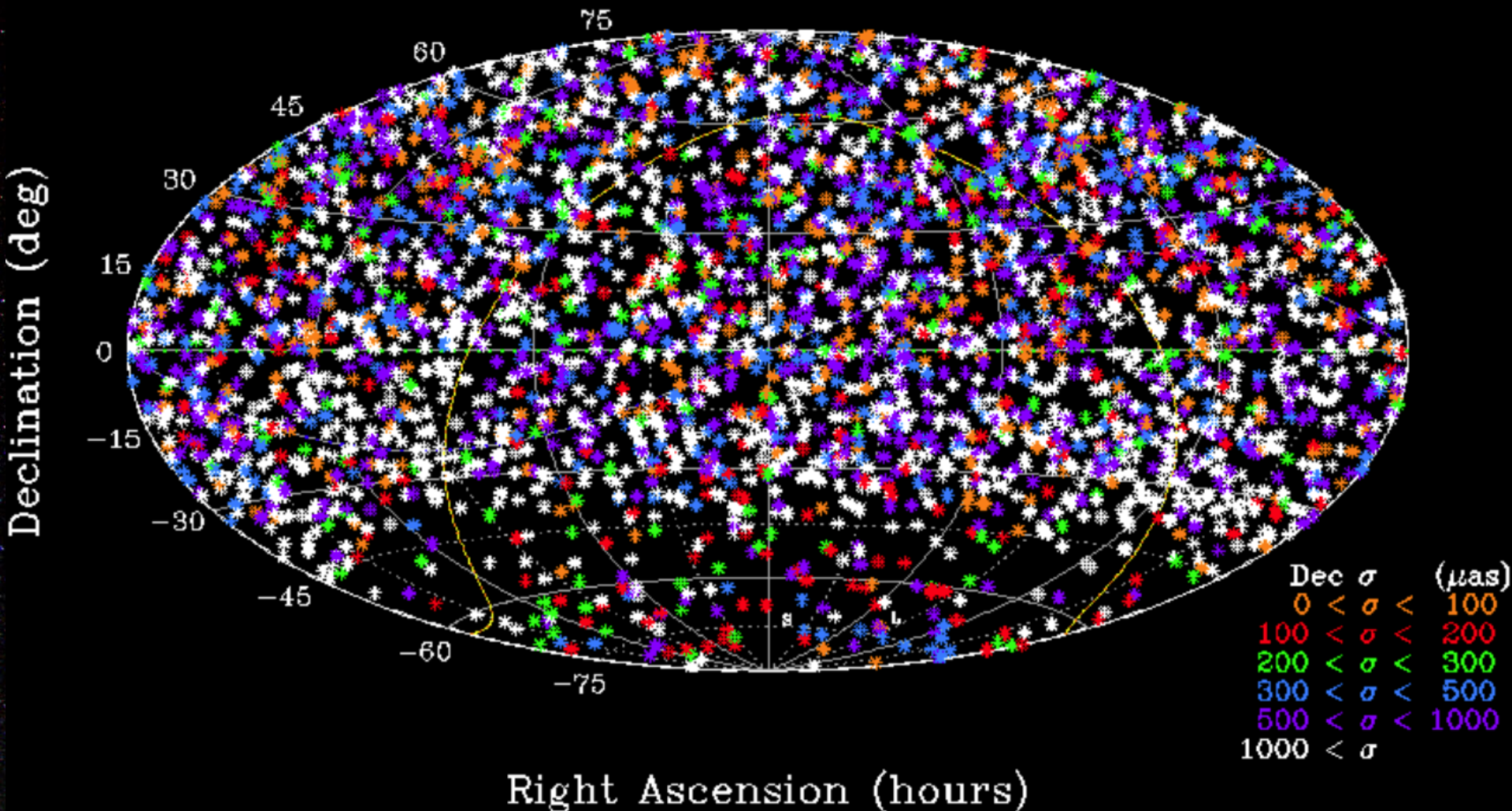
International Celestial Reference Frame 2 (2009)

3414 sources

2.3-8.4 GHz (13.6-3.6 cm)



# Astrométrie VLBI (sans imagerie)





# Astrométrie VLBI (sans imagerie)



## Définition du repère de référence céleste

International Celestial Reference Frame 2 (2009)

3414 sources

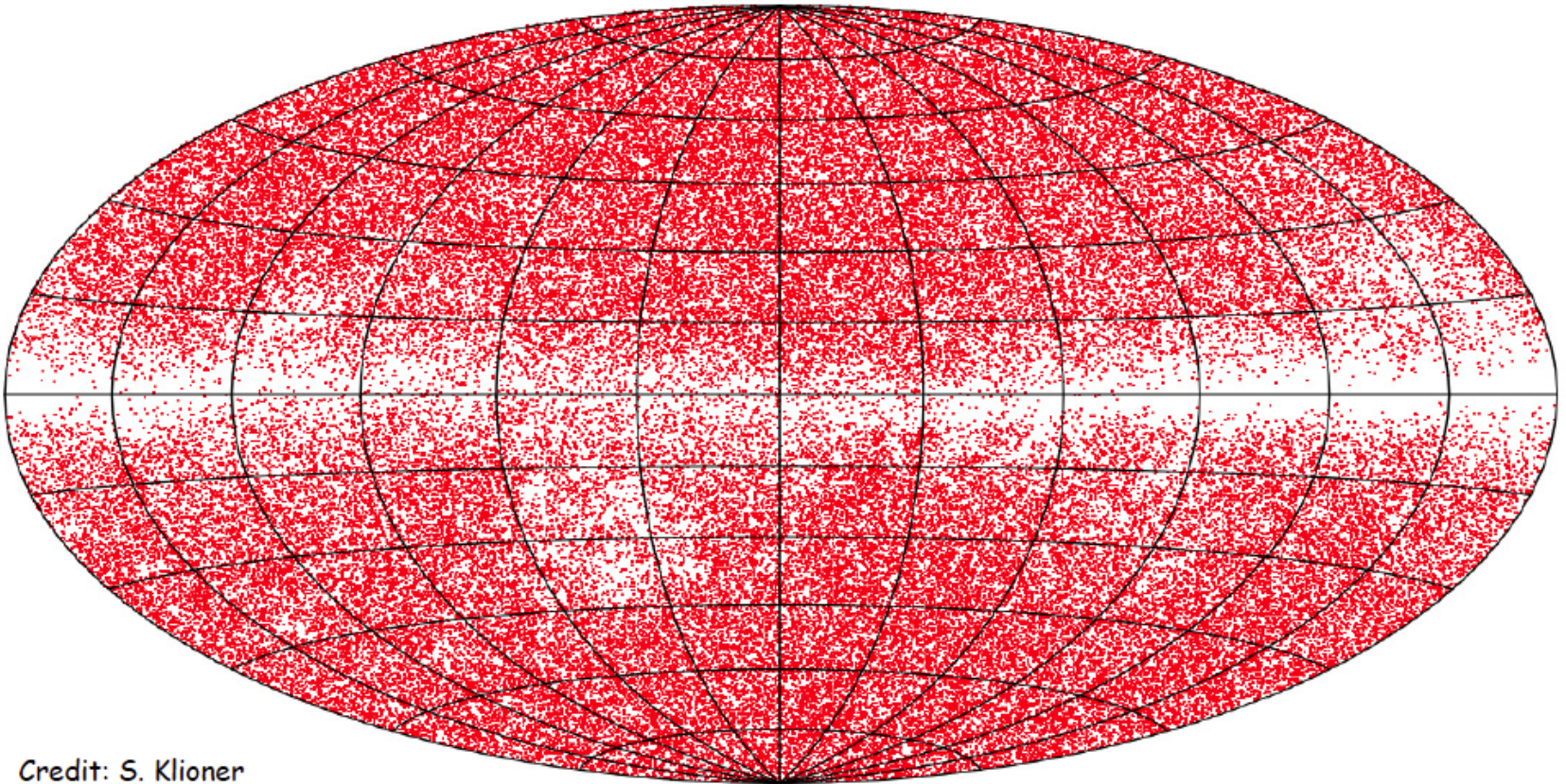
2.3-8.4 GHz (13.6-3.6 cm)

Futur : ICRF3:

plus de sources, plus hautes fréquences



# Bientôt : Repère de référence céleste avec Gaia (100-500 000 QSOs)

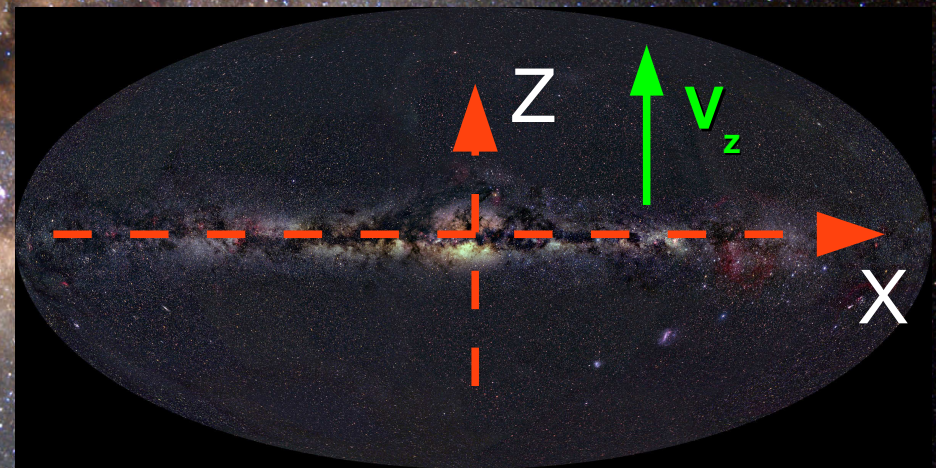
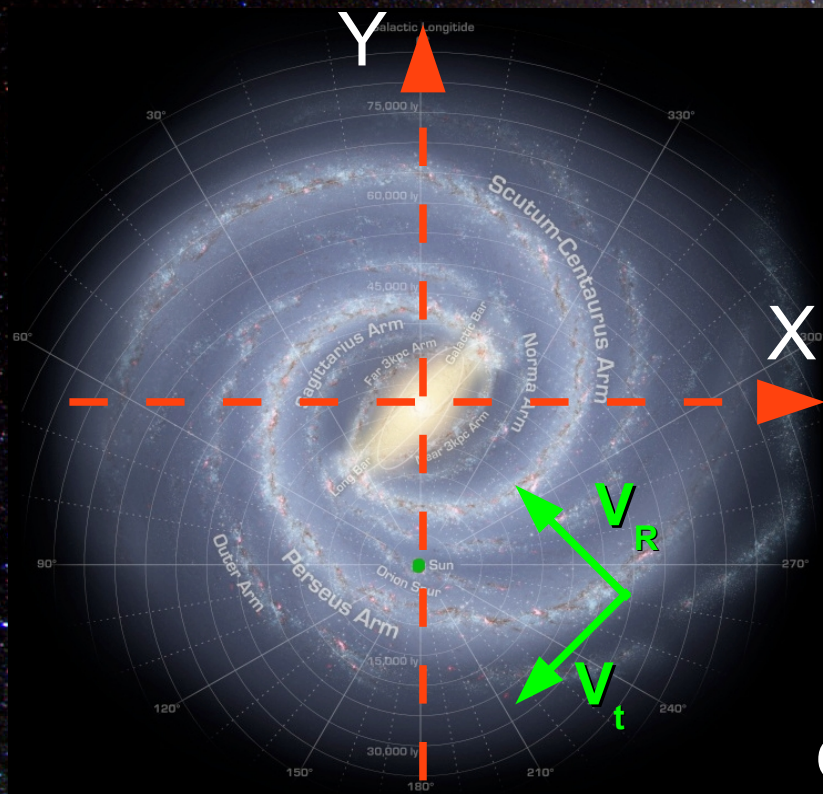


Credit: S. Klioner



# Astrométrie VLBI (avec imagerie)

## Structure, cinématique & dynamique VL



Coordonnées de position X, Y, Z  
Coordonnées cinématiques  $V_x, V_y, V_z$



# Astrométrie par VLBI



## Structure, cinématique & dynamique VL

$U = \mathbf{V}_R$  : vitesse radiale,  $V = \mathbf{V}_t$  : vitesse tangentielle (rotation),

$W = \mathbf{V}_z$  vitesse en z

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = B \begin{bmatrix} v_r \\ k \frac{\mu \alpha}{\pi} \\ k \frac{\mu \delta}{\pi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{\odot} \\ v_{\odot} \\ w_{\odot} \end{bmatrix}$$

$B = M1 \ M2 \quad M1$

$$\begin{bmatrix} -0.06699 & -0.87276 & -0.48354 \\ +0.49273 & -0.45035 & +0.74458 \\ -0.86760 & -0.18837 & +0.46020 \end{bmatrix}$$

M2

$$\begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & -\cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta & 0 & -\sin \delta \\ 0 & -1 & 0 \\ -\sin \delta & 0 & -\cos \delta \end{bmatrix}$$

$k = 4.74$  Equivalent d'1 ua/an en km/s





# Astrométrie par VLBI



## Structure, cinématique & dynamique VL

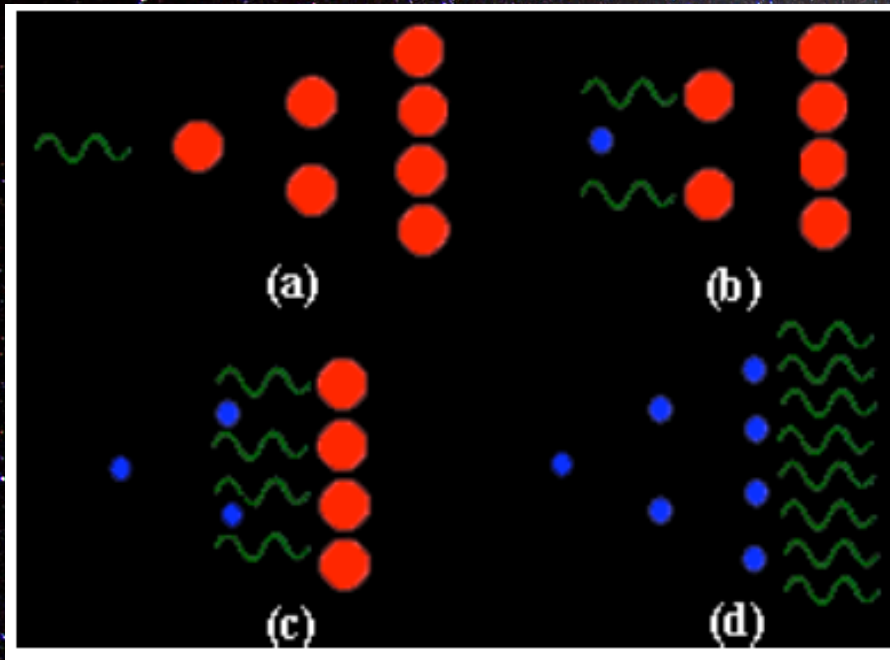
Reid et al. 2014 : Observations VLBA, JVN, EVN

Masers étoiles jeunes : eau, méthanol

Basse latitude Galactique (complémentaire à Gaia)



# Maser : microwave amplification by stimulated emission of radiation



niveau d'énergie bas

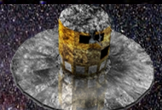


niveau d'energie élevé



- (a) Molécules à un niveau d'énergie élevé. Photon incident (fréq.  $f$ ., radio/GHz) traverse le milieu.  
(b) Il stimule l'émission de la 1<sup>ère</sup> molécule  $\rightarrow$  2 photons de fréq.  $f$  (en phase)  
(c) Ces photons stimulent l'émission des 2 molécules suivantes  $\rightarrow$  4 photons de fréquence  $f$ .  
(d) le processus continue: nb photons final est  $\times 8$  le nb initial  $\rightarrow$  **AMPLIFICATION**

Régions de formation d'étoiles, étoiles jeunes massives  $\rightarrow$   
structure spirale des galaxies





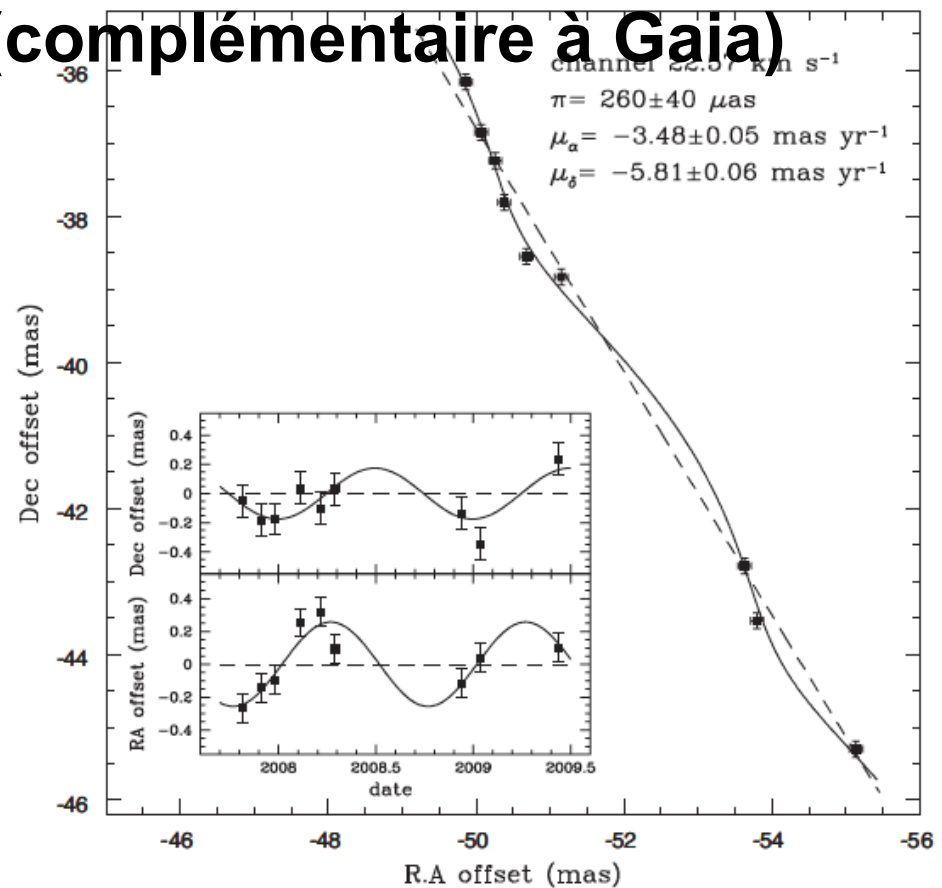
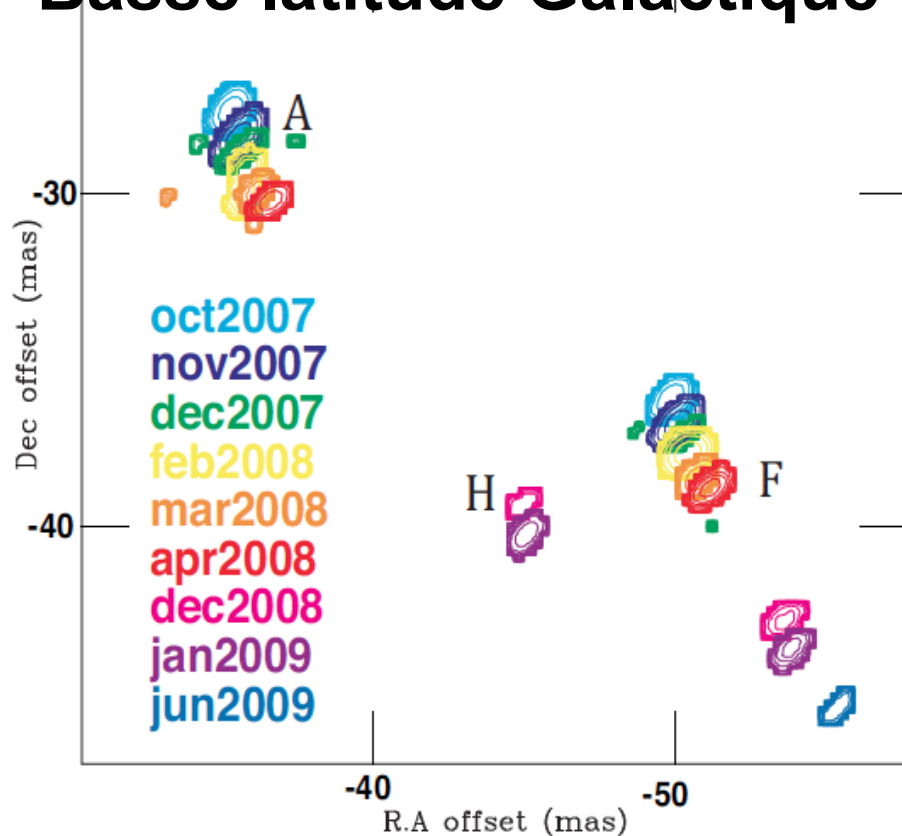
# Astrométrie par VLBI



## Structure, cinématique & dynamique VL

Reid et al. 2014 : Observations VLBA, JVN, EVN  
Masers étoiles jeunes : eau, méthanol

### Basse latitude Galactique (complémentaire à Gaia)





# Astrométrie par VLBI



## Structure, cinématique & dynamique VL

Reid et al. 2014 : Observations VLBA, JVN, EVN  
Masers étoiles jeunes : eau, méthanol

Source	Alias	R.A. (hh:mm:ss)	Dec. (dd:mm:ss)	Parallax (mas)	$\mu_x$ (mas y <sup>-1</sup> )	$\mu_y$ (mas y <sup>-1</sup> )	$v_{LSR}$ (km s <sup>-1</sup> )	Spiral Arm
G095.29-00.93		21:39:40.51	+51:20:32.8	0.205± 0.015	-2.75± 0.20	-2.75± 0.25	-38± 5	Per
G097.53+03.18		21:32:12.43	+55:53:49.7	0.133± 0.017	-2.94± 0.29	-2.48± 0.29	-73± 5	Out
G100.37-03.57		22:16:10.37	+52:21:34.1	0.291± 0.010	-3.77± 0.60	-3.12± 0.60	-37± 10	Per
G105.41+09.87		21:43:06.48	+66:06:55.3	1.129± 0.063	-0.21± 1.20	-5.49± 1.20	-10± 5	Loc
G107.29+05.63	IRAS 22198+6336	22:21:26.73	+63:51:37.9	1.288± 0.107	-2.47± 1.40	0.26± 1.40	-11± 5	Loc
G108.18+05.51	L 1206	22:28:51.41	+64:13:41.3	1.289± 0.153	0.27± 0.50	-1.40± 1.95	-11± 3	Loc
G108.20+00.58		22:49:31.48	+59:55:42.0	0.229± 0.028	-2.25± 0.50	-1.00± 0.50	-49± 5	Per
G108.47-02.81		23:02:32.08	+56:57:51.4	0.309± 0.010	-2.45± 1.00	-3.00± 0.70	-54± 5	Per
G108.59+00.49		22:52:38.30	+60:00:52.0	0.398± 0.031	-5.55± 0.40	-3.38± 0.40	-52± 5	Per
G109.87+02.11	Cep A	22:56:18.10	+62:01:49.5	1.430± 0.080	0.50± 1.50	-3.70± 1.00	-7± 5	Loc
G111.23-01.23		23:17:20.79	+59:28:47.0	0.288± 0.044	-4.28± 0.60	-2.33± 0.60	-53± 10	Per
G111.25-00.76		23:16:10.36	+59:55:28.5	0.294± 0.016	-2.45± 0.60	-2.10± 0.60	-43± 5	Per
G111.54+00.77	NGC 7538	23:13:45.36	+61:28:10.6	0.378± 0.017	-2.45± 0.24	-2.44± 0.25	-57± 5	Per
G121.29+00.65	L 1287	00:36:47.35	+63:29:02.2	1.077± 0.039	-0.86± 0.76	-2.29± 0.82	-23± 5	Loc
G122.01-07.08	IRAS 00420+5530	00:44:58.40	+55:46:47.6	0.460± 0.020	-3.70± 0.50	-1.25± 0.50	-50± 5	Per
G123.06-06.30	NGC 281	00:52:24.70	+56:33:50.5	0.355± 0.030	-2.79± 0.62	-2.14± 0.70	-30± 5	Per
G123.06-06.30	NGC 281W	00:52:24.20	+56:33:43.2	0.421± 0.022	-2.69± 0.31	-1.77± 0.29	-29± 3	Per
G133.94+01.06	W 3OH	02:27:03.82	+61:52:25.2	0.512± 0.010	-1.20± 0.32	-0.15± 0.32	-47± 3	Per
G134.62-02.19	S Per	02:22:51.71	+58:35:11.4	0.413± 0.017	-0.49± 0.35	-1.19± 0.33	-39± 5	Per
G135.27+02.79	WB 89-437	02:43:28.57	+62:57:08.4	0.167± 0.011	-1.22± 0.30	0.46± 0.36	-72± 3	Out
G160.14+03.15		05:01:40.24	+47:07:19.0	0.244± 0.006	0.87± 0.35	-1.32± 0.29	-18± 5	...
G168.06+00.82	IRAS 05137+3919	05:17:13.74	+39:22:19.9	0.130± 0.040	0.50± 0.24	-0.85± 0.17	-27± 5	Out
G176.51+00.20		05:37:52.14	+32:00:03.9	1.038± 0.021	1.84± 1.00	-5.86± 1.00	-17± 5	Loc
G182.67-03.26		05:39:28.42	+24:56:32.1	0.149± 0.011	0.16± 0.32	-0.17± 0.32	-7± 10	Out
G183.72-03.66		05:40:24.23	+23:50:54.7	0.570± 0.013	0.13± 1.20	-1.40± 1.20	3± 5	Per
G188.79+01.03	IRAS 06061+2151	06:09:06.97	+21:50:41.4	0.496± 0.103	-0.10± 0.50	-3.91± 0.50	-5± 5	Per
G188.94+00.88	S 252	06:08:53.35	+21:38:28.7	0.476± 0.006	0.02± 0.30	-2.02± 0.30	8± 5	Per
G192.16-03.81		05:58:13.53	+16:31:58.9	0.660± 0.040	0.70± 0.78	-1.80± 0.86	5± 5	Per
G192.60-00.04	S 255	06:12:54.02	+17:59:23.3	0.628± 0.027	-0.14± 0.67	-0.84± 1.80	6± 5	Per
G192.60-01.15	S 255	06:14:37.08	+13:49:36.7	0.189± 0.012	-0.42± 0.20	-0.12± 0.20	19± 5	Out
G209.00-19.38	Orion Nebula	05:35:15.80	-05:23:14.1	2.410± 0.030	3.30± 1.50	0.10± 1.50	3± 5	Loc
G211.59-01.05		06:52:45.32	+01:40:23.1	0.228± 0.007	-0.93± 0.24	0.71± 0.26	45± 5	...





# Astrométrie par VLBI



Structure,

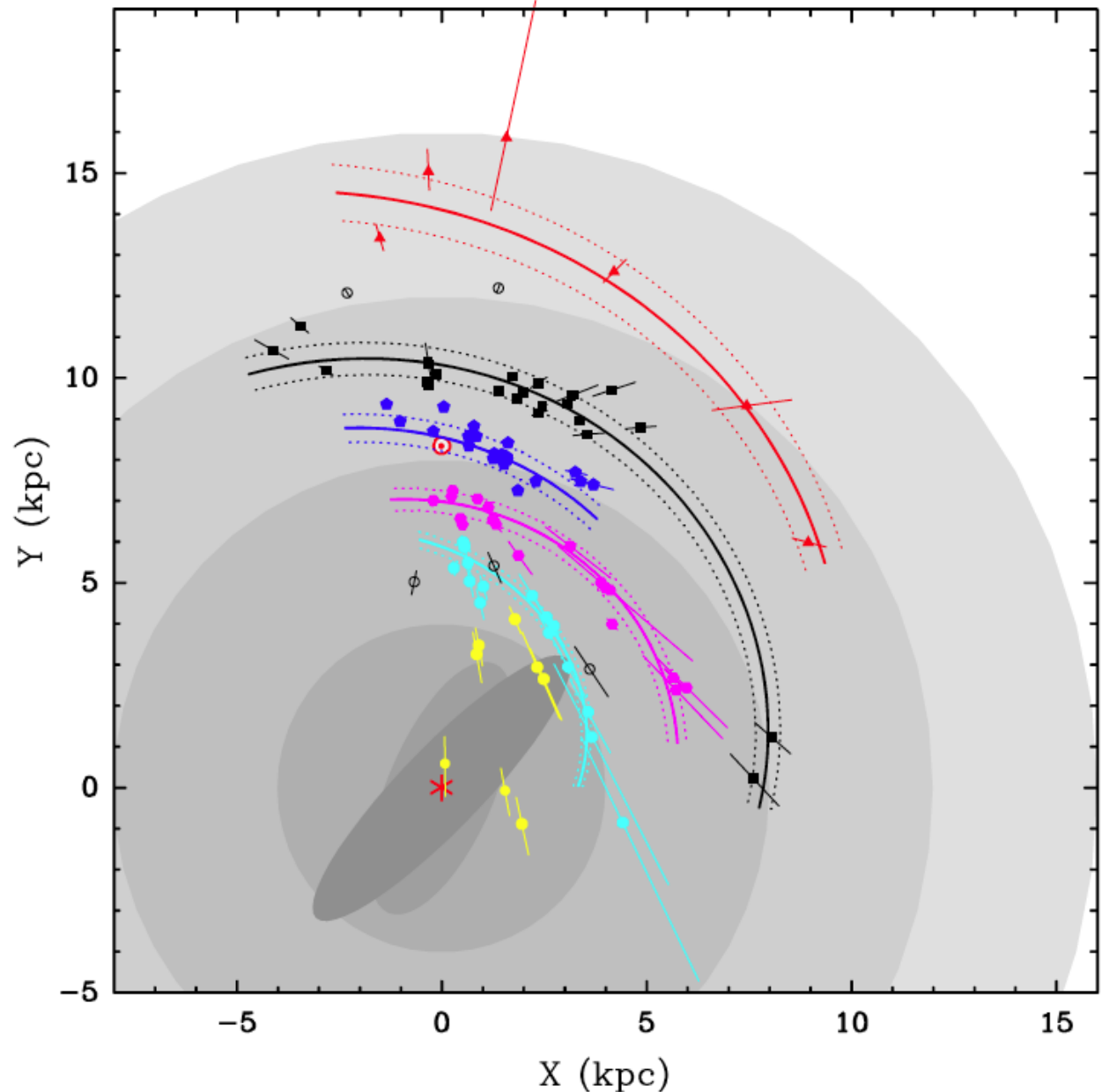
## Résultats

La Voie  
Lactée  
EST une  
galaxie  
spirale

$R_0 = 8.34$  kpc

Valeur IAU

$R_0 = 8.5$  kpc





# Astrométrie par VLBI



## Structure, cinématique & dynamique VL

### Résultats

La courbe de rotation est plate

$$\Theta_0 = 240 \text{ km/s}$$

$$V_t = \Theta_0 + V_0 \\ = 252 \text{ km/s}$$

Valeur IAU

$$\Theta_0 = 220 \text{ km/s}$$

