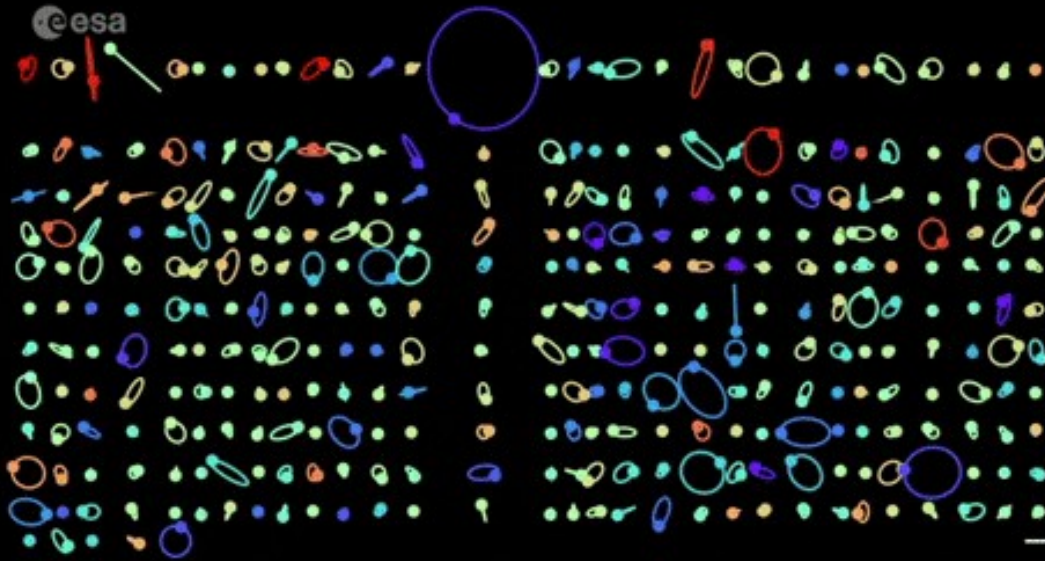




ULB



A.R.E.C.A

Association Réunionnaise d'Etude du Ciel Austral

Astrorun.com

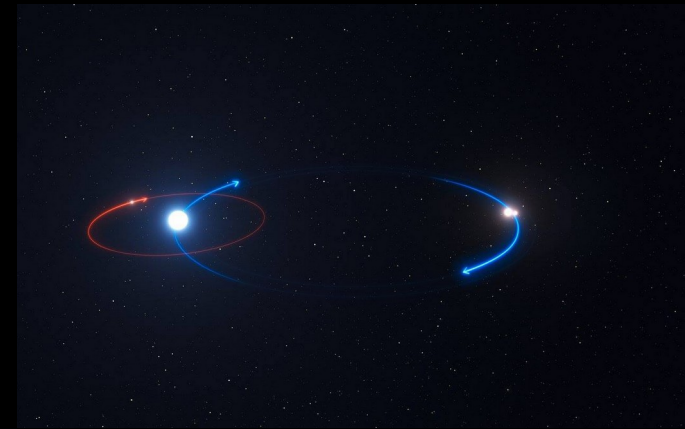
Vendredi 21 juillet 2023

La valse des étoiles doubles

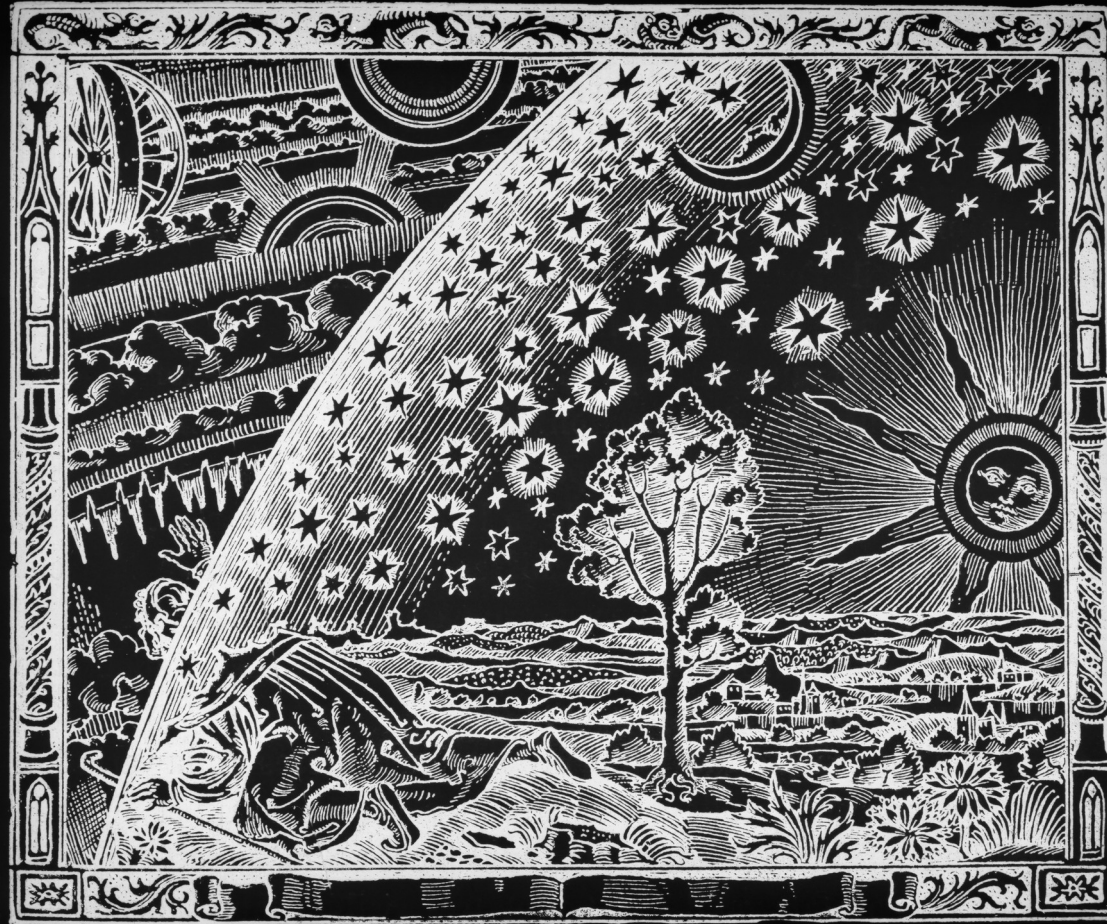


Thibault Merle – Astrophysicien
Université Libre de Bruxelles
Observatoire Royal de Belgique

FED-tWIN



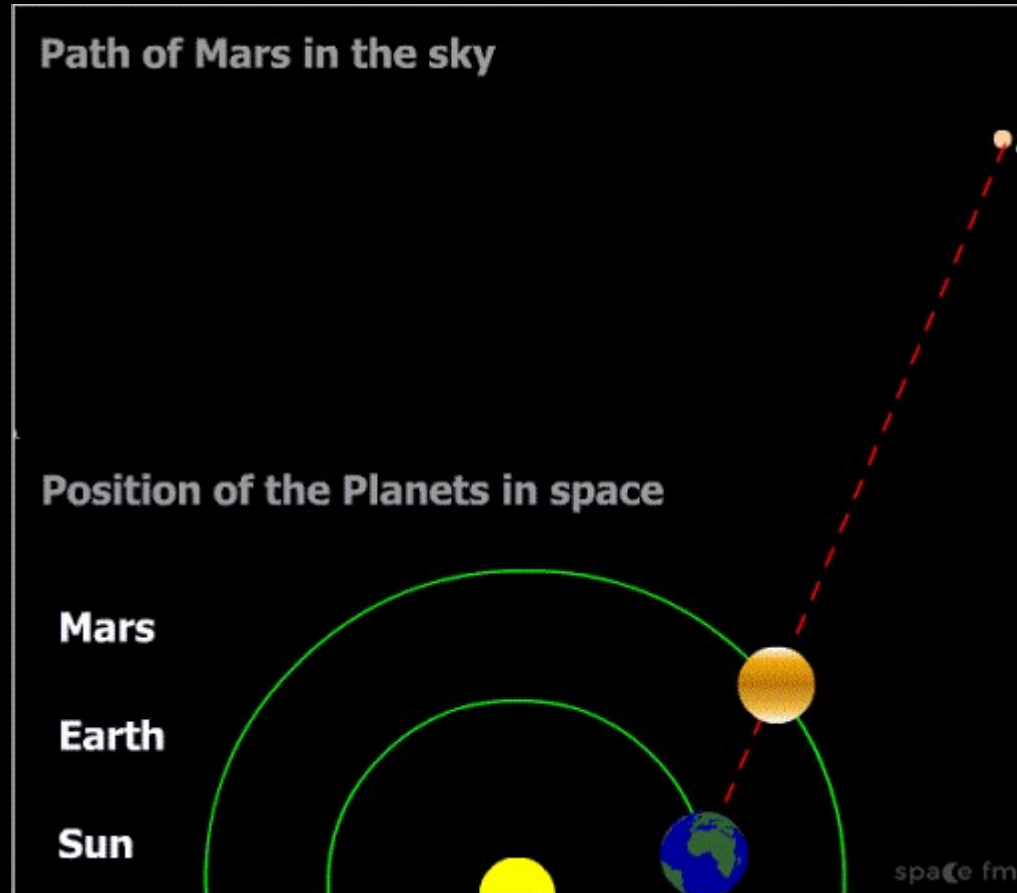
La sphère des fixes



Mouvement apparent de Mars



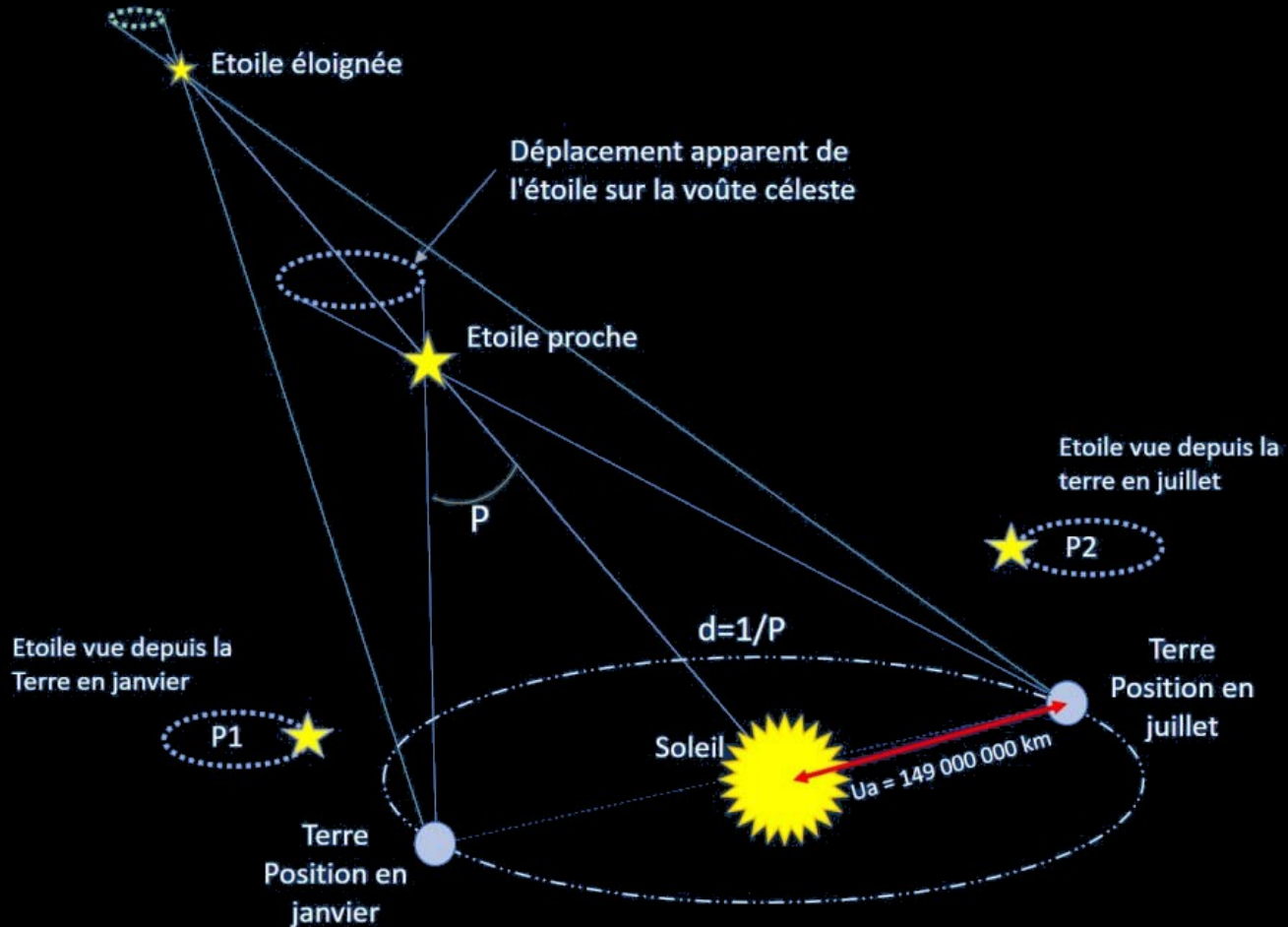
Mouvement apparent de Mars



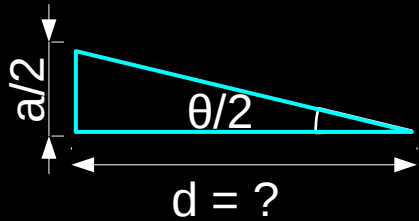
Mouvement apparent des étoiles



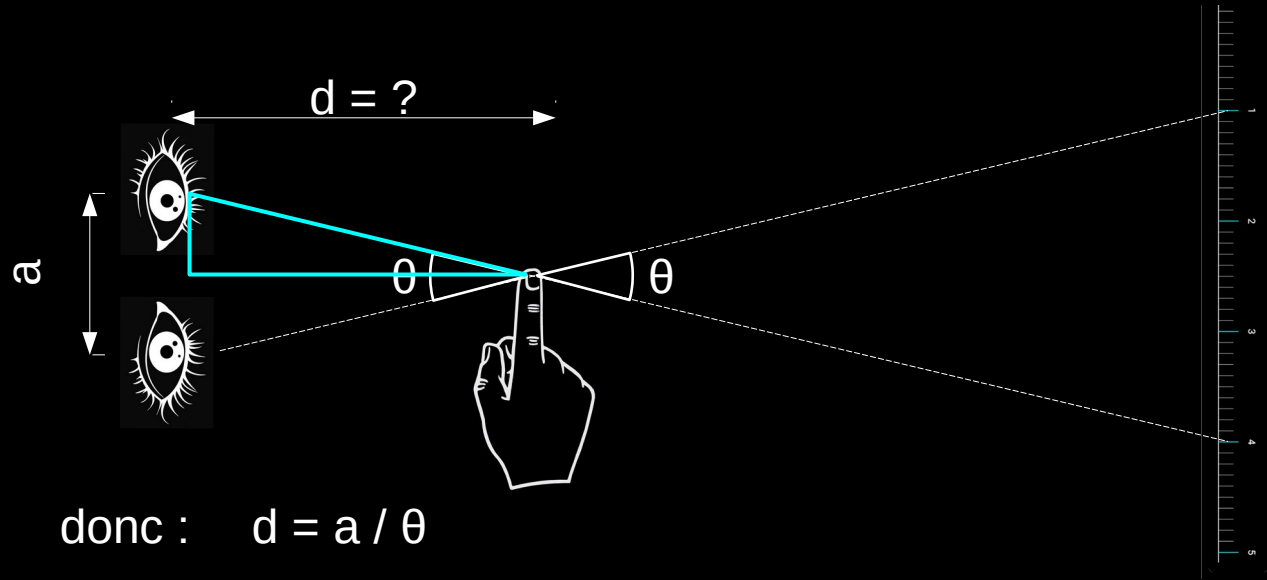
La parallaxe annuelle



Triangulation



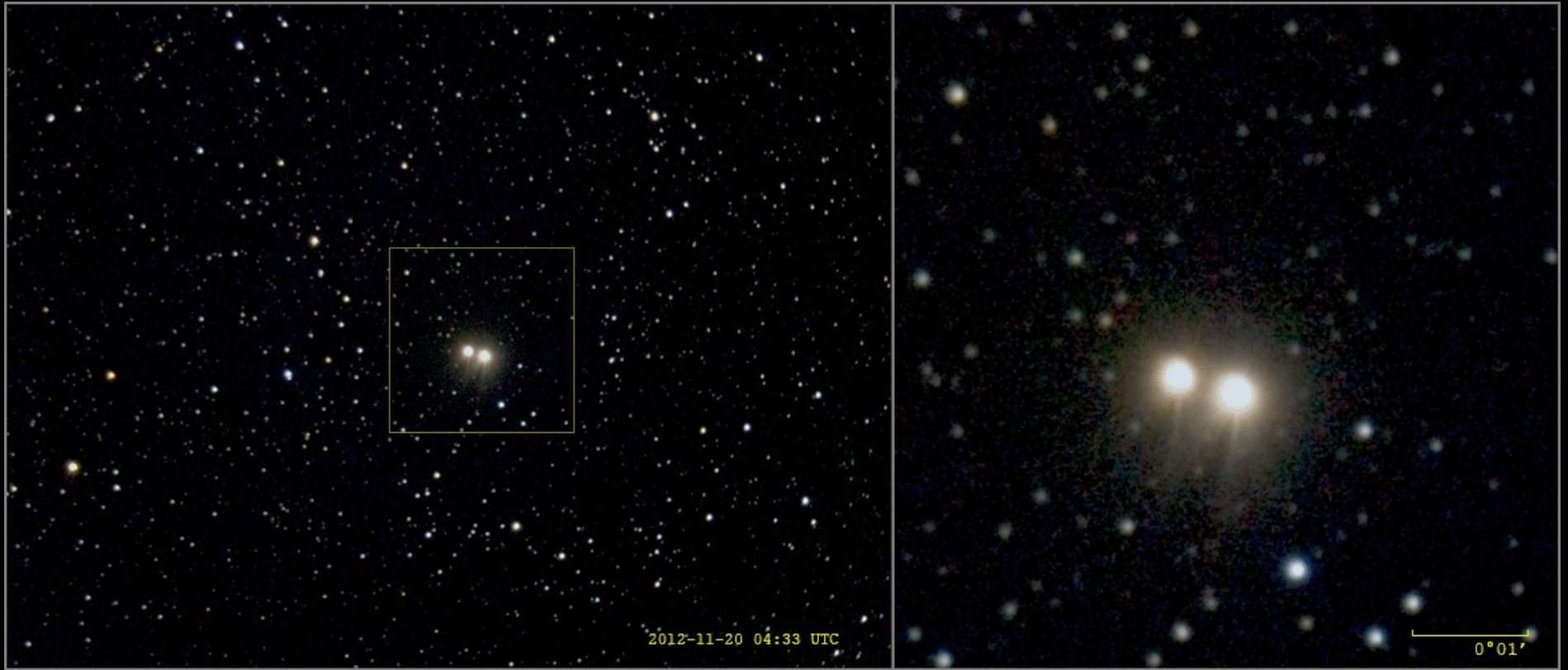
$$\tan(\theta/2) = a / (2d)$$
$$d = (a/2) / \tan(\theta/2)$$



Pour les étoiles : $\tan \theta = \theta$

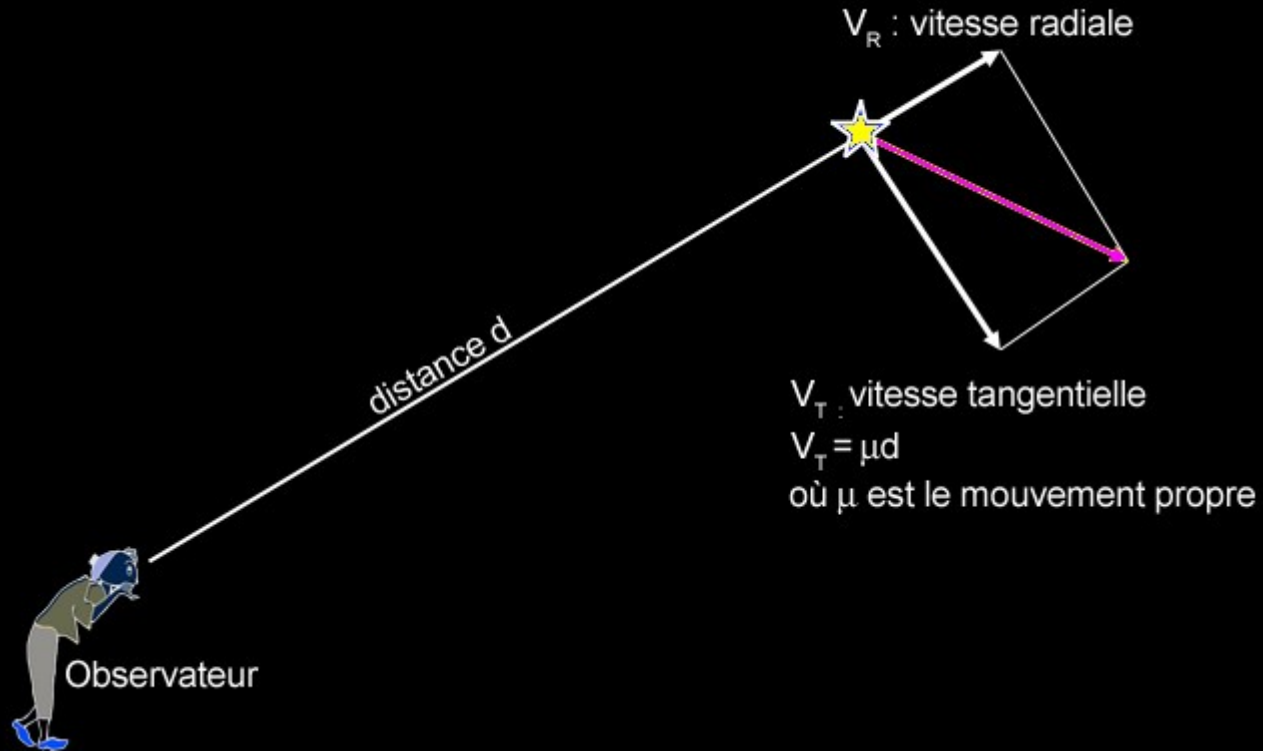
donc : $d = a / \theta$

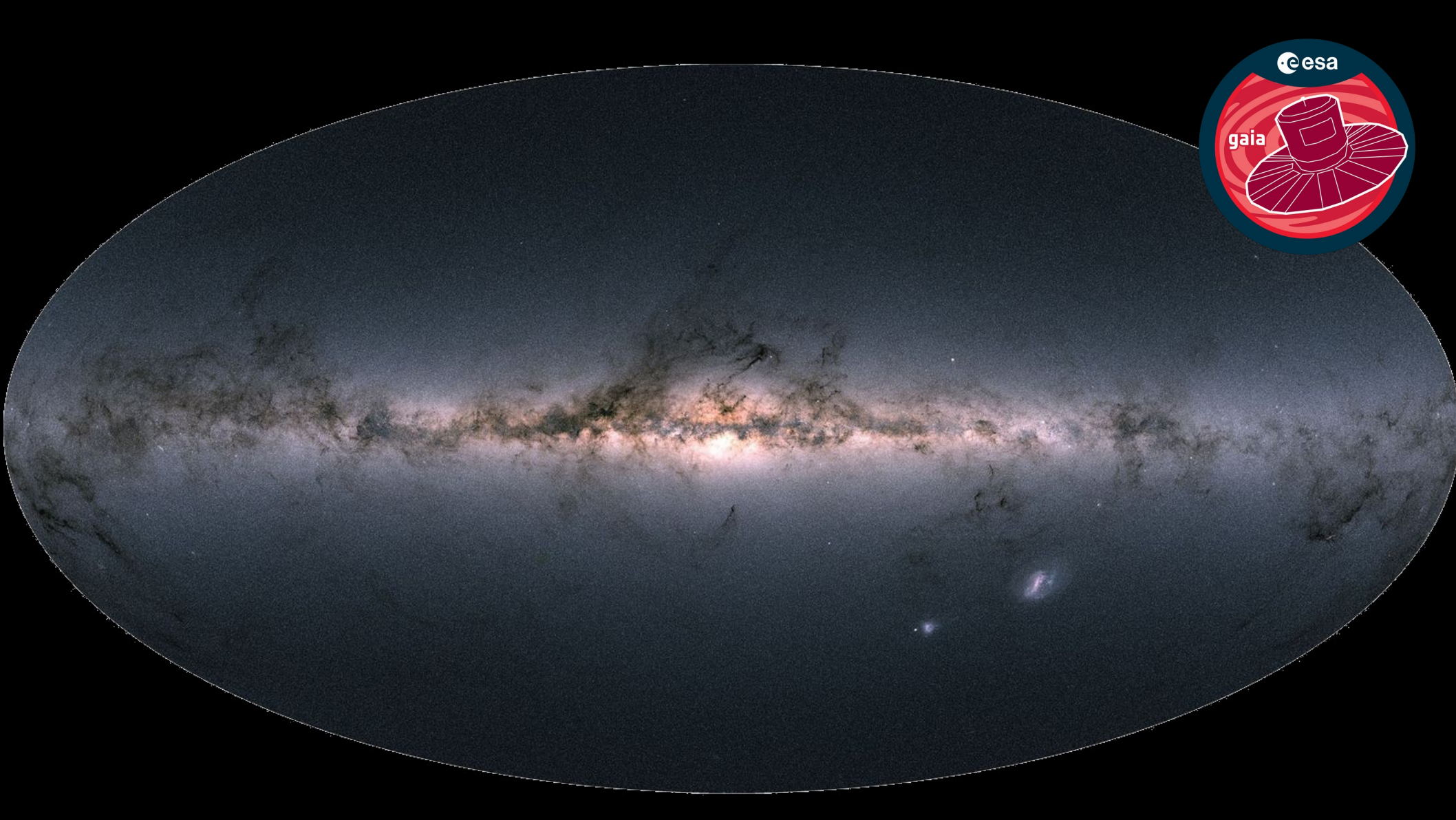
Mouvement propre des étoiles

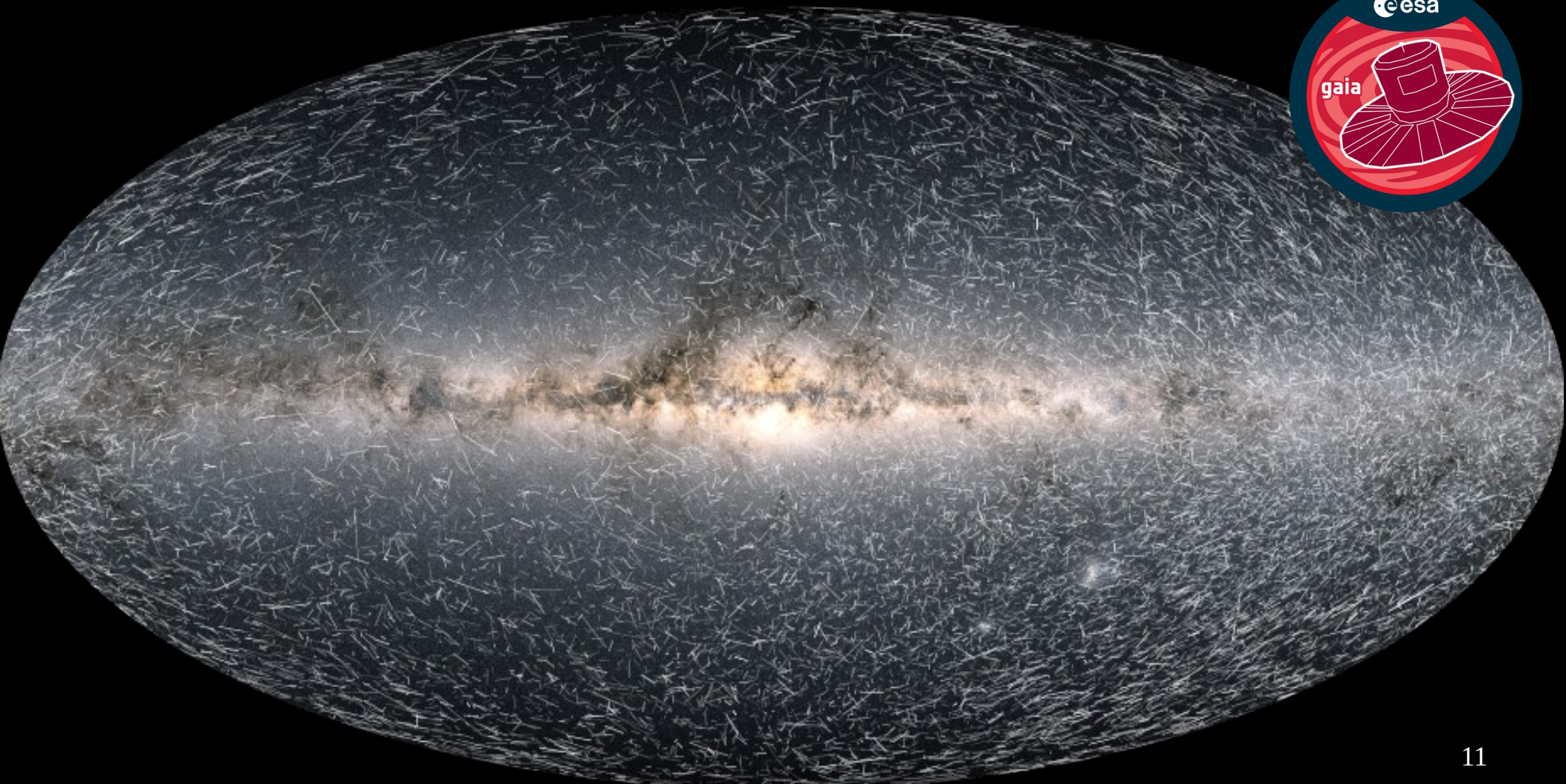


61 Cyg a un déplacement de 5 arcsec / an

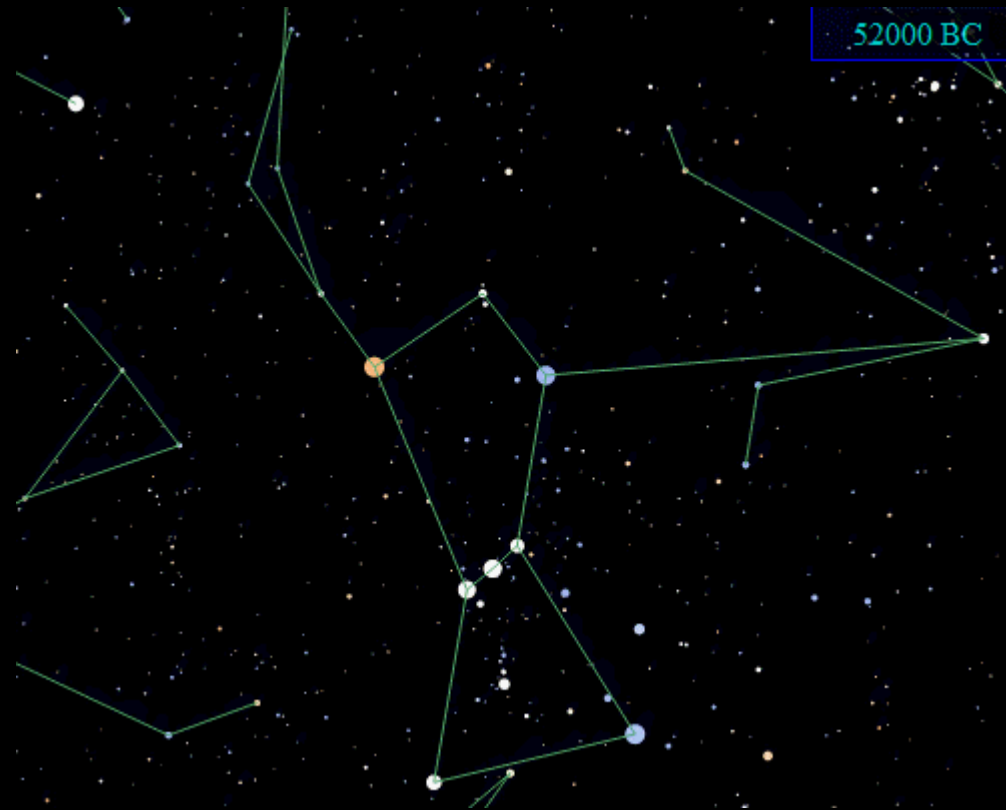
Vitesse tangentielle







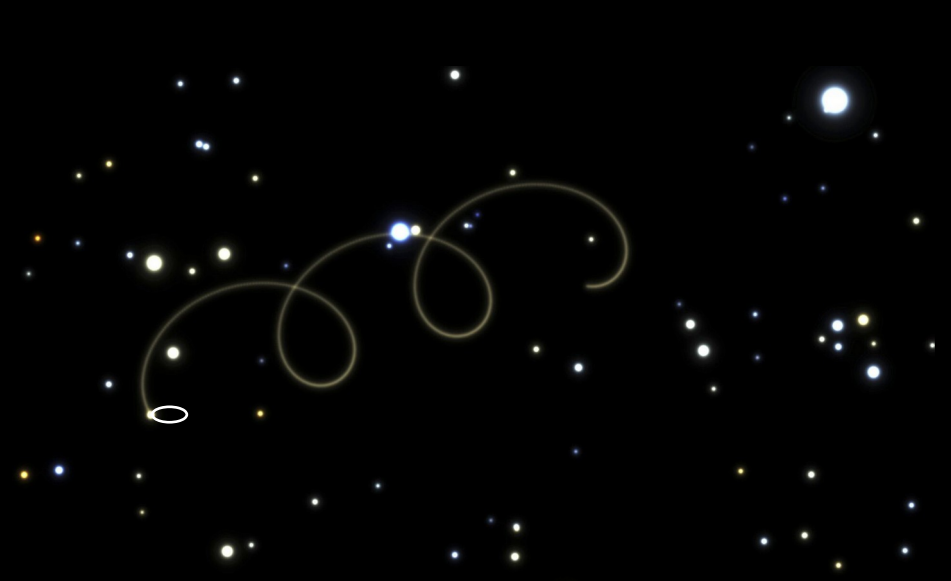
La sphère des fixes ?



Composition des mouvements



parallaxe annuelle



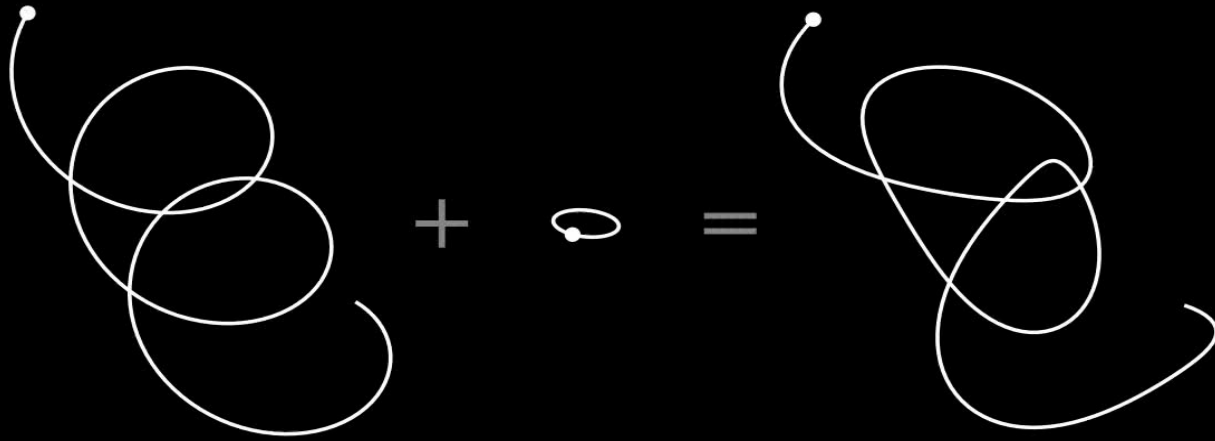
parallaxe annuelle + mouvement propre

Composition des mouvements



parallaxe annuelle + mouvement propre + mouvement orbital

Composition des mouvements

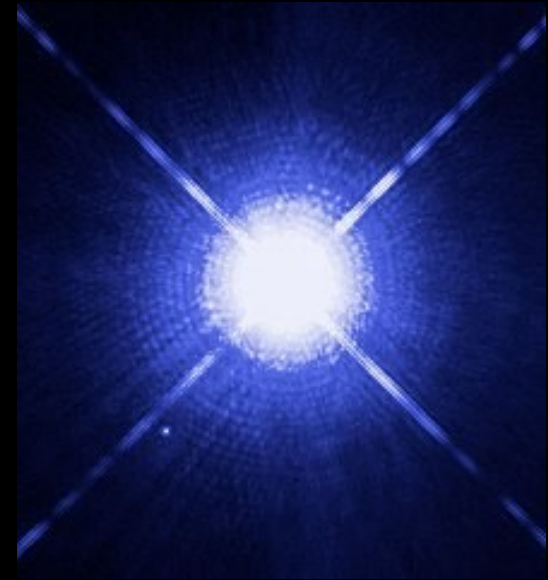


Systemes binaires

Quelle est l'étoile la plus brillante du ciel ?

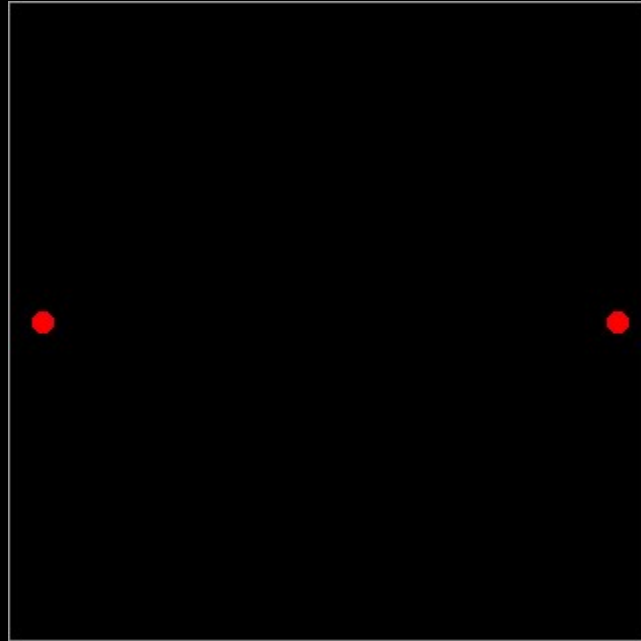


Constellation du Grand Chien

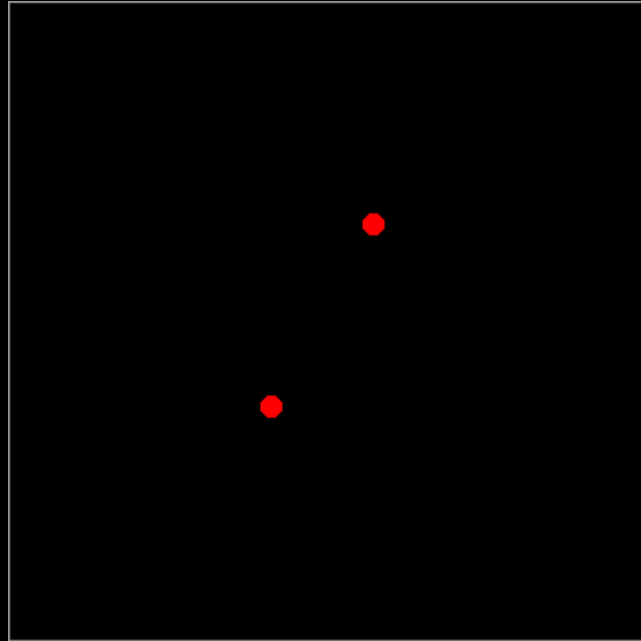


Sirius

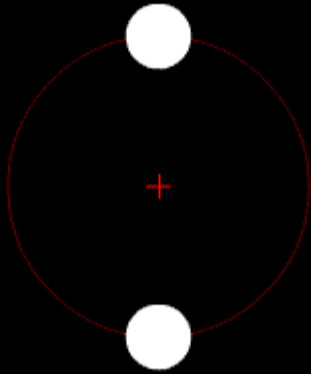
Orbite circulaire



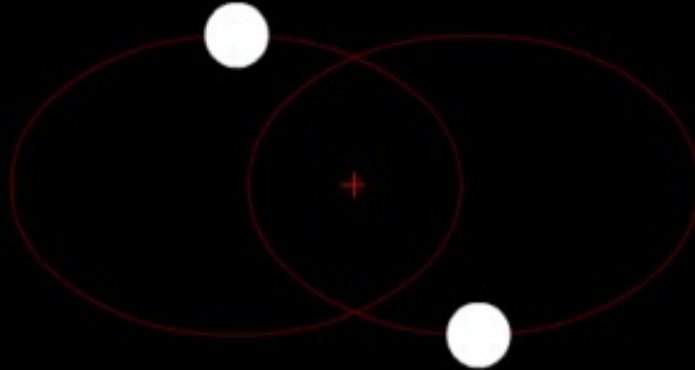
Orbite elliptique



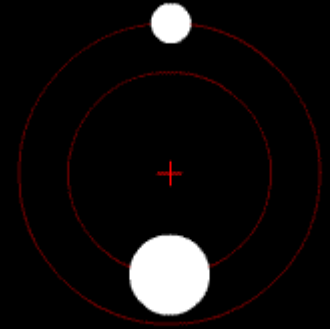
Centre de masse d'une binaire



Etoiles doubles jumelles

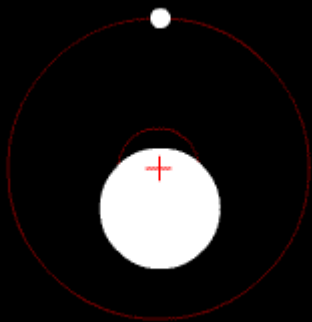


Etoiles doubles jumelles



Etoiles doubles de
différentes masses

Centre de masse d'une binaire



Sans mouvement propre



Avec mouvement propre

Les lois de Kepler



1571 – 1630

1. Loi des orbites

Les planètes du Système Solaire décrivent des ellipses dont le Soleil occupe l'un des foyers

2. Loi des aires

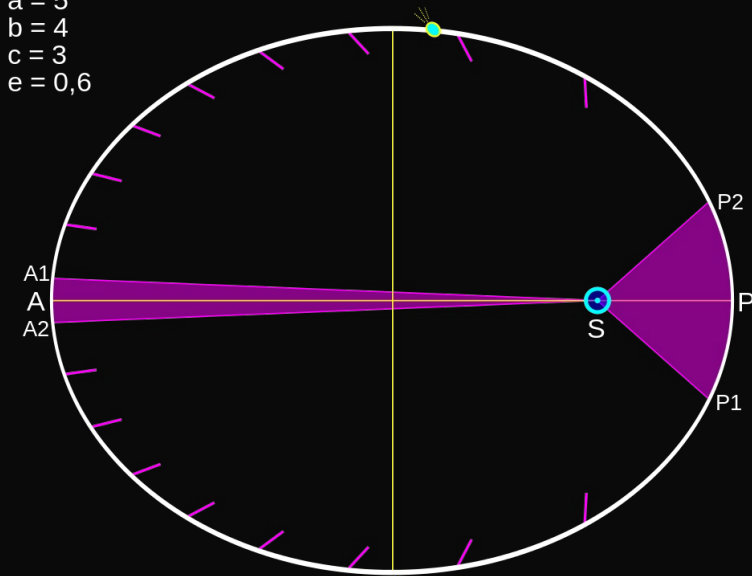
La ligne joignant le Soleil à une planète balaie des aires égales en des temps égaux

3. Loi des périodes

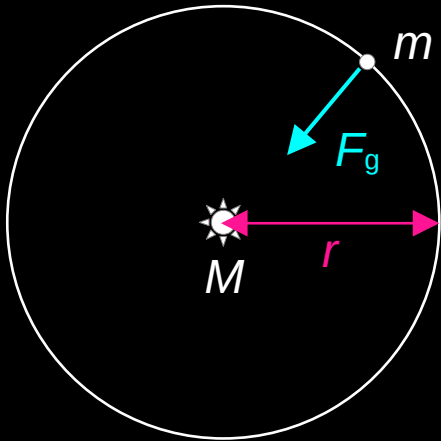
Le carré de la période orbitale P d'une planète est directement proportionnel au cube du demi grand-axe a de la trajectoire elliptique

$$P^2 / a^3 = k \quad \text{avec } k \text{ constant}$$

$$\begin{aligned} a &= 5 \\ b &= 4 \\ c &= 3 \\ e &= 0,6 \end{aligned}$$



La 3^{ème} loi de Kepler démontrée par Newton



Force gravitationnelle : $F_g = GMm / r^2$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$$

Mouvement circulaire uniforme : $F_c = mv^2 / r$

Système à l'équilibre du point de vue de la rotation :

$$F_g = F_c \Leftrightarrow GMm / r^2 = mv^2 / r$$

Vitesse de révolution : $v = 2\pi r / P$

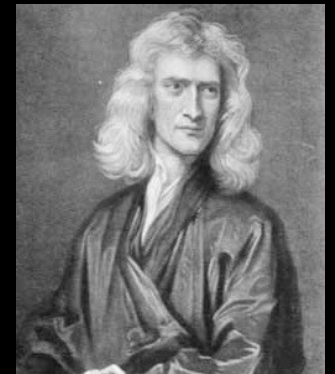
P : période de révolution

$$GM / r^2 = (2\pi r / P)^2 / r \Leftrightarrow GM / r^2 = 4\pi^2 r / P^2$$

$$\Leftrightarrow GM / 4\pi^2 = r^3 / P^2$$

En inversant :

$$P^2 / r^3 = 4\pi^2 / GM$$



1643 – 1727



La 3^{ème} loi de Kepler avec les bonnes unités !

3^{ème} loi de Kepler : $P^2 / r^3 = 4\pi^2 / GM$ avec $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Pour le système Soleil – Terre :

$$P = 1 \text{ a} = 365,25 \times 24 \times 60 \times 60 = 3,1557 \times 10^7 \text{ s}$$

$$r = 1 \text{ ua} = 150 \text{ millions de km} = 1,50 \times 10^{11} \text{ m}$$

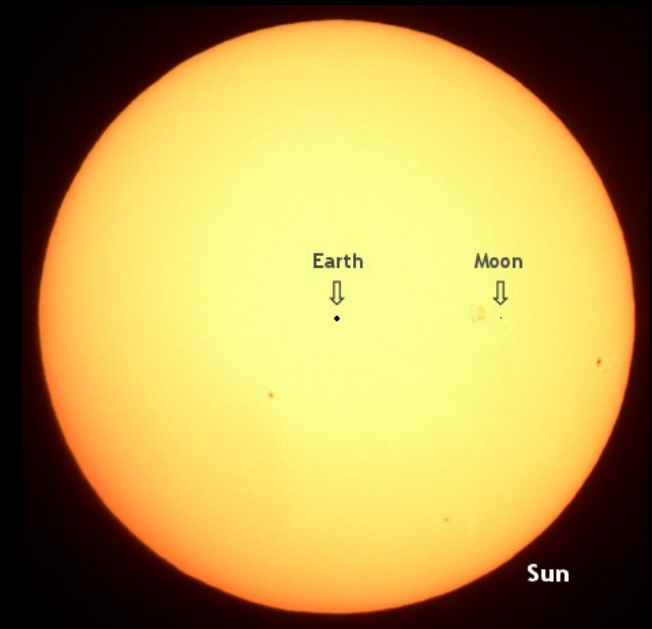
La masse du Soleil est :

$$M = (4\pi^2 / G) (r^3 / P^2)$$

$$M = 2,01 \times 10^{30} \text{ kg}$$

On note cette masse $M_{\odot} = 2,01 \times 10^{30} \text{ kg}$

Pour comparaison la masse de la Terre est : $5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$





La 3^{ème} loi de Kepler avec les bonnes unités !

3ème loi de Kepler : $P^2 / r^3 = 4\pi^2 / GM$ (1) avec $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Nouveau choix d'unités basé sur le système Soleil – Terre :

- Périodes de révolution exprimées en années (a)
- Rayons (demi-grand axes) exprimés en unités astronomiques (ua)
- Masses exprimées en masses solaires (M_{\odot})

3ème loi de Kepler : $P^2 / r^3 = 1/M$ (2)

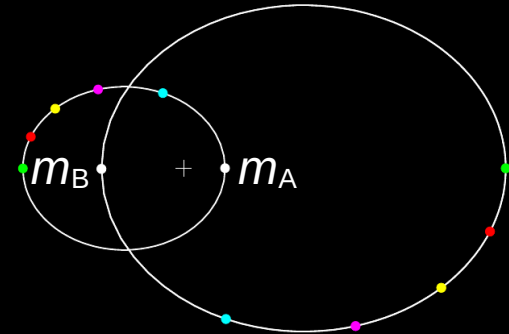
Système Soleil – Mars : on connaît la période de révolution de Mars $P = 1.88 \text{ a}$

- $r = (GM/4\pi^2)^{1/3} P^{2/3} = (6,67 \times 10^{-11} \times 2,01 \times 10^{30} / 4\pi^2)^{1/3} (1.88 \times 365,25 \times 24 \times 3600)^{2/3}$
 $r = 2,29 \times 10^{11} \text{ m}$
- $r = M^{1/3} P^{2/3} = 1.88^{2/3} = 1,52 \text{ ua}$

Les lois de Kepler adaptées aux binaires

1. Loi des orbites

Les étoiles décrivent des orbites elliptiques autour d'un centre de masse qui est le foyer commun des orbites absolues



2. Loi des aires

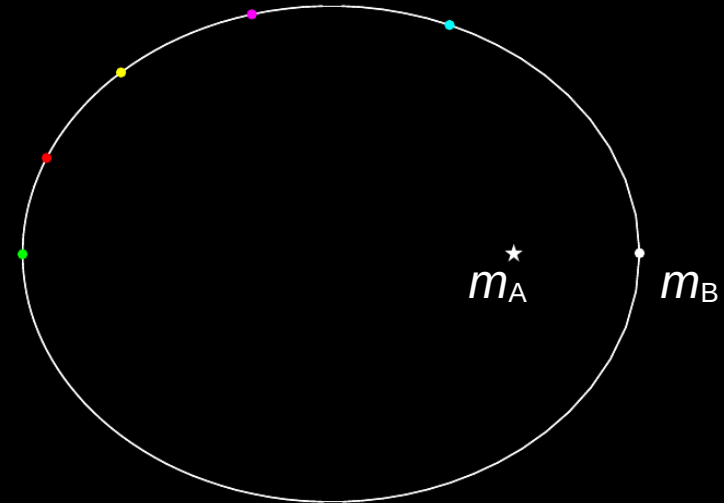
La ligne joignant les étoiles balaie des aires égales en des temps égaux

3. Loi des périodes

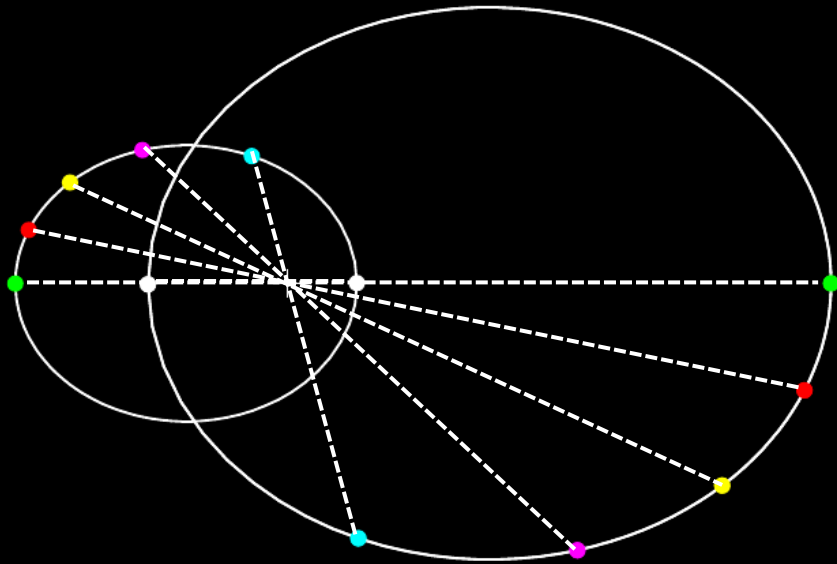
Le carré de la période orbitale P est proportionnel au cube du demi grand-axe a

$$P^2 / a^3 = 4\pi^2 / G(m_A + m_B) \quad \text{en unités SI}$$

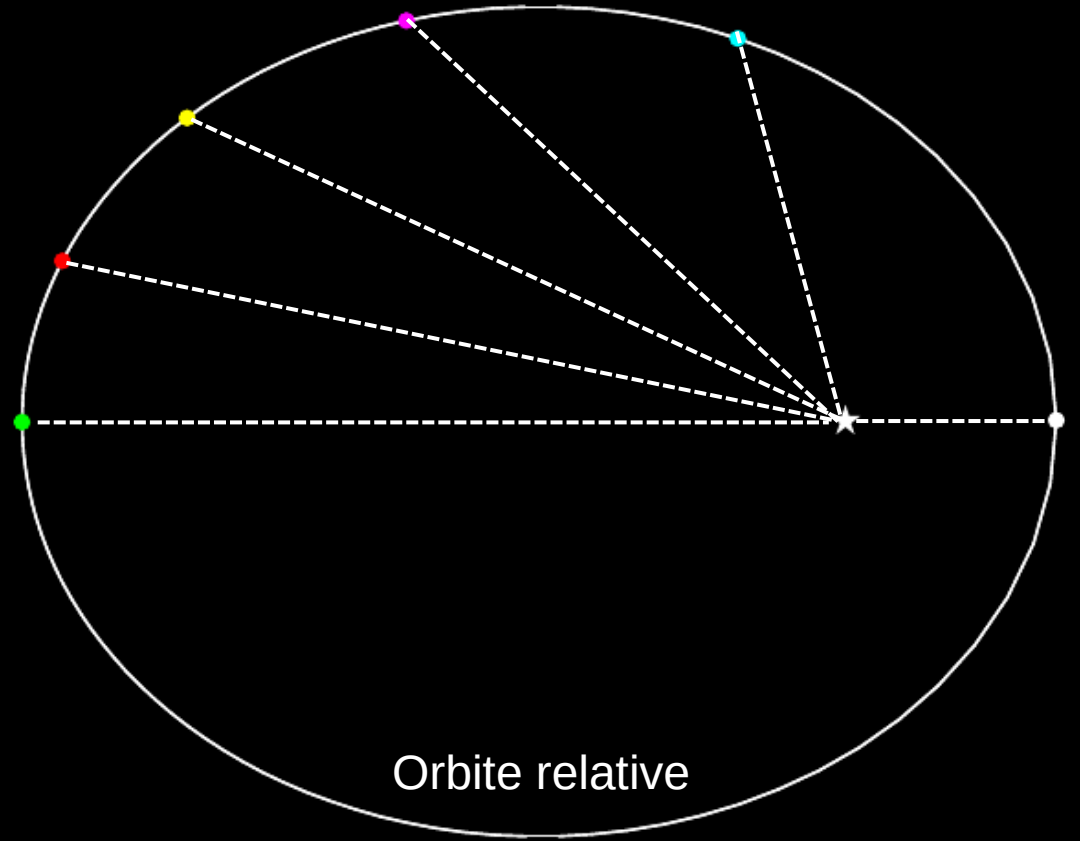
$$P^2 / a^3 = 1 / (m_A + m_B) \quad \text{en unités Soleil – Terre}$$



Choix du référentiel



Orbites absolues

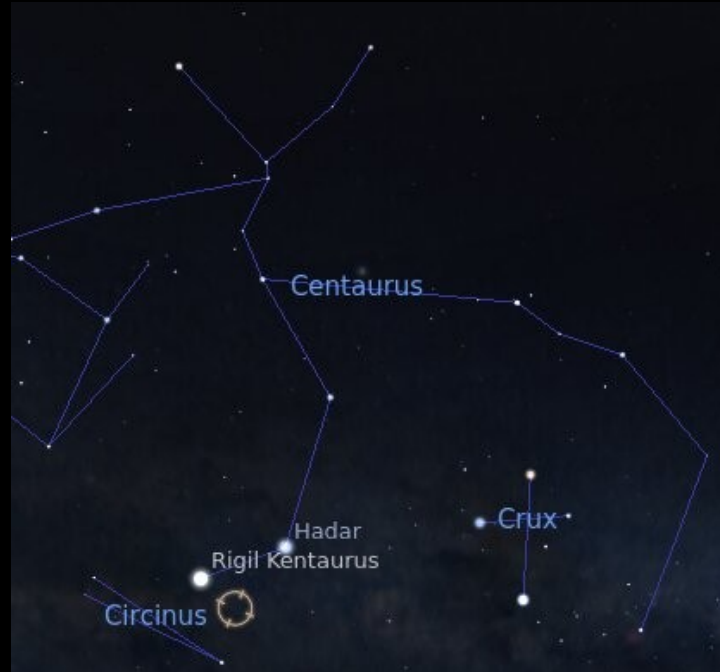


Orbite relative

Systemes triples



Quelle est l'étoile la plus proche de nous ?

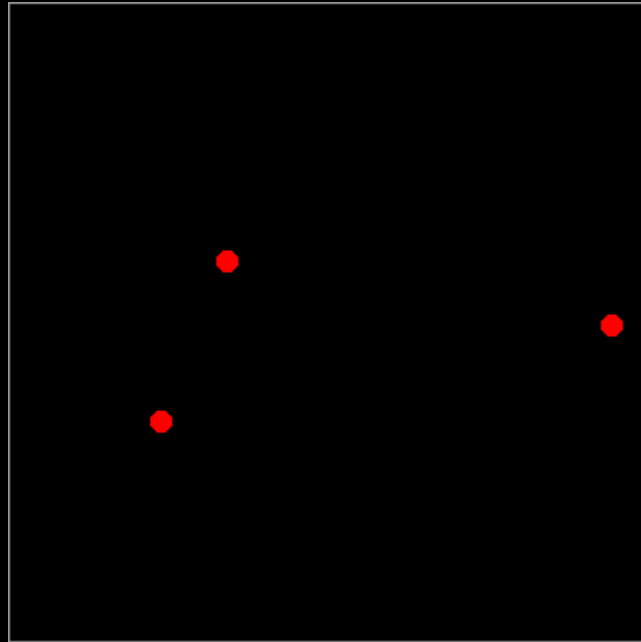


Constellation du Centaure

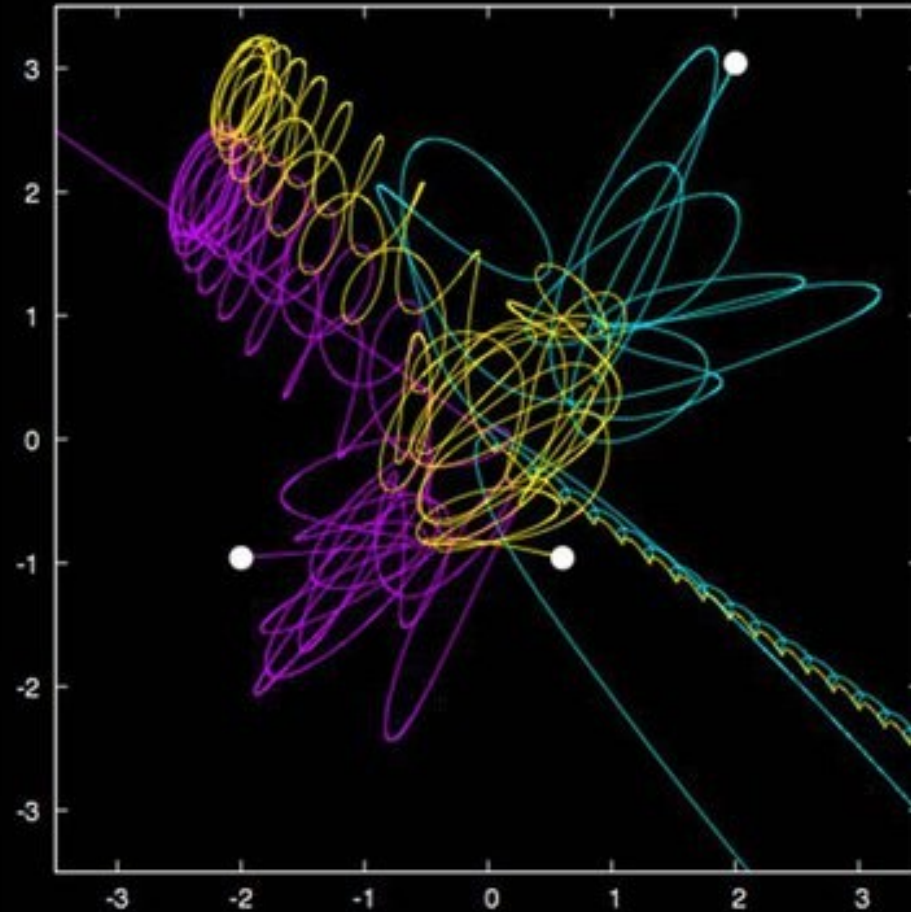


Proxima Cen

Triple démocratique (instable)



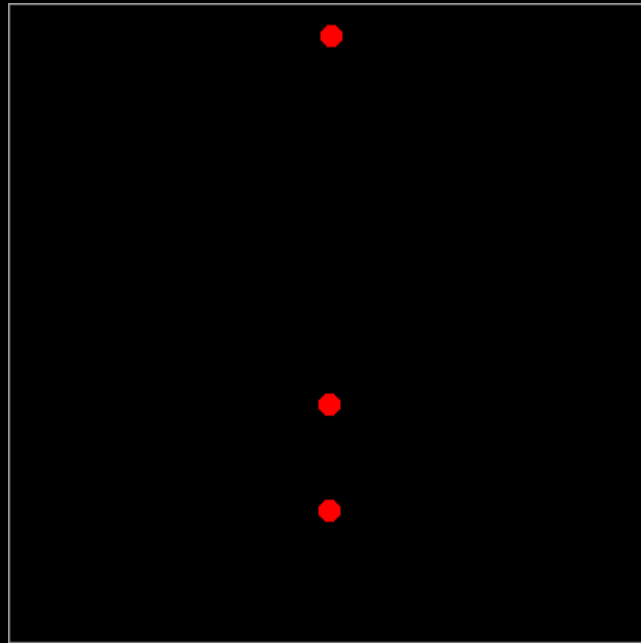
Triple démocratique (instable)



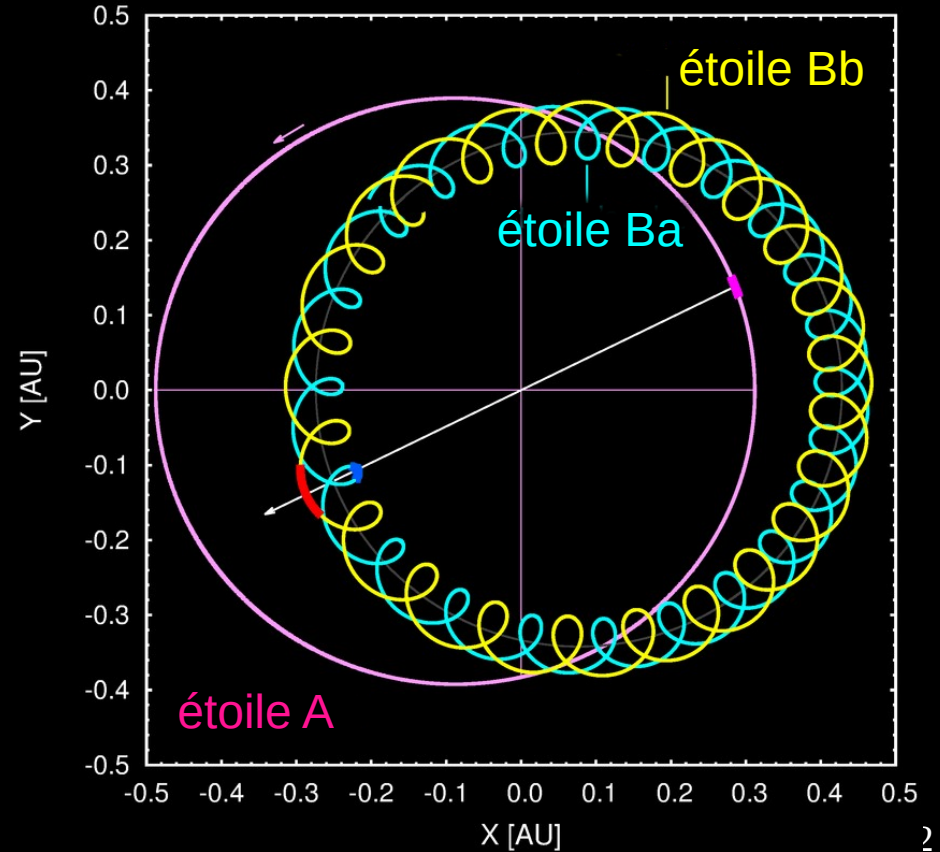
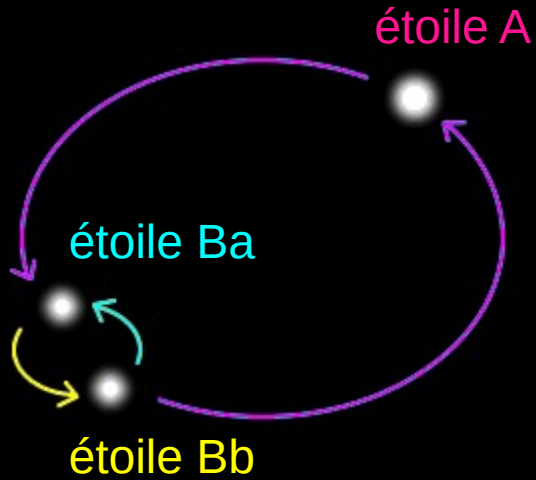
Instabilité gravitationnelle

.

Triple hiérarchique (stable)



Triple hiérarchique (stable)



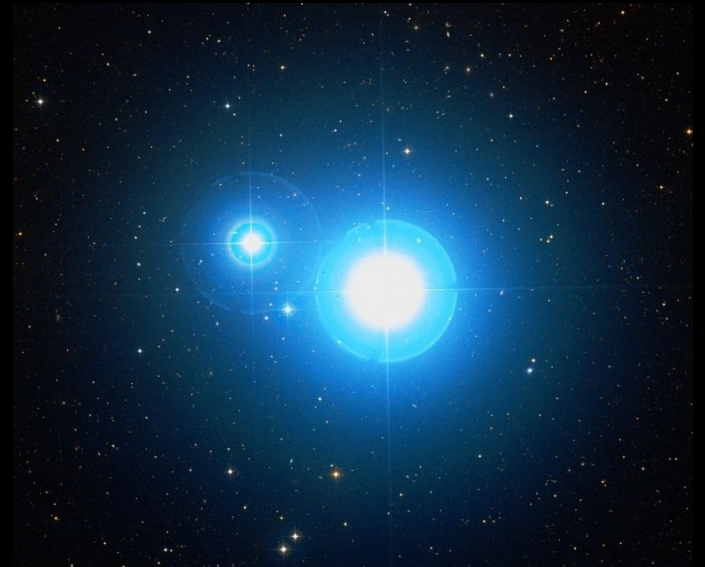
Systemes quadruples



Quelle est la première étoile double connue ?

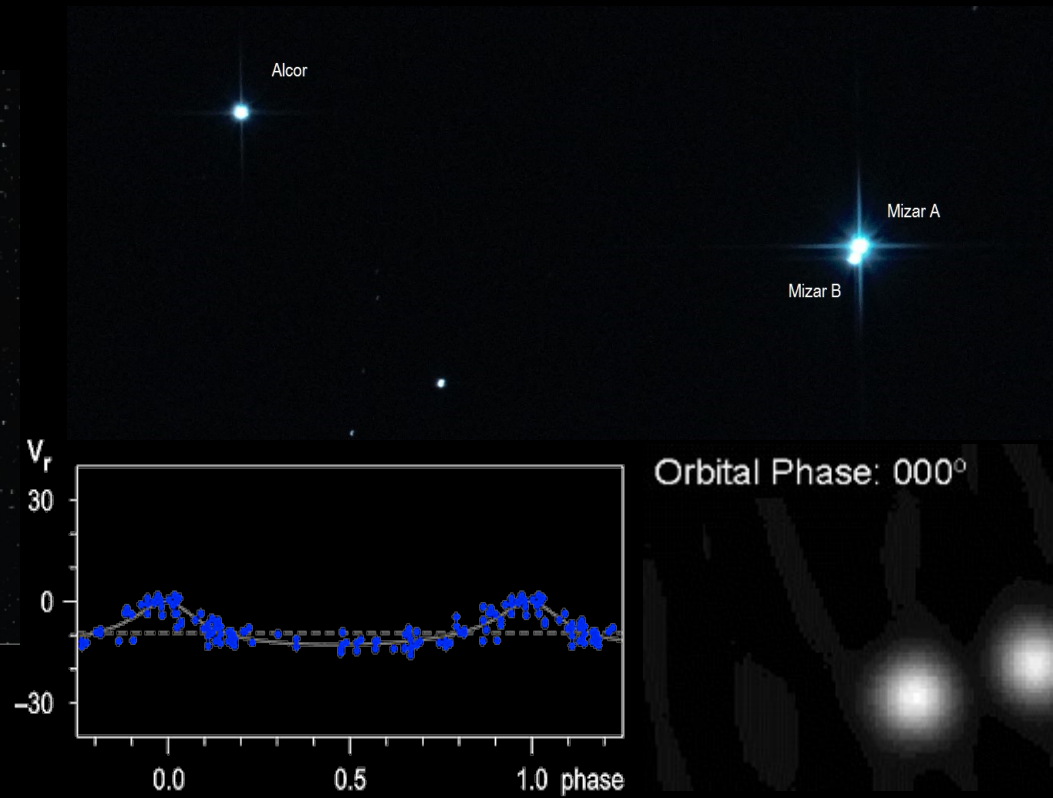
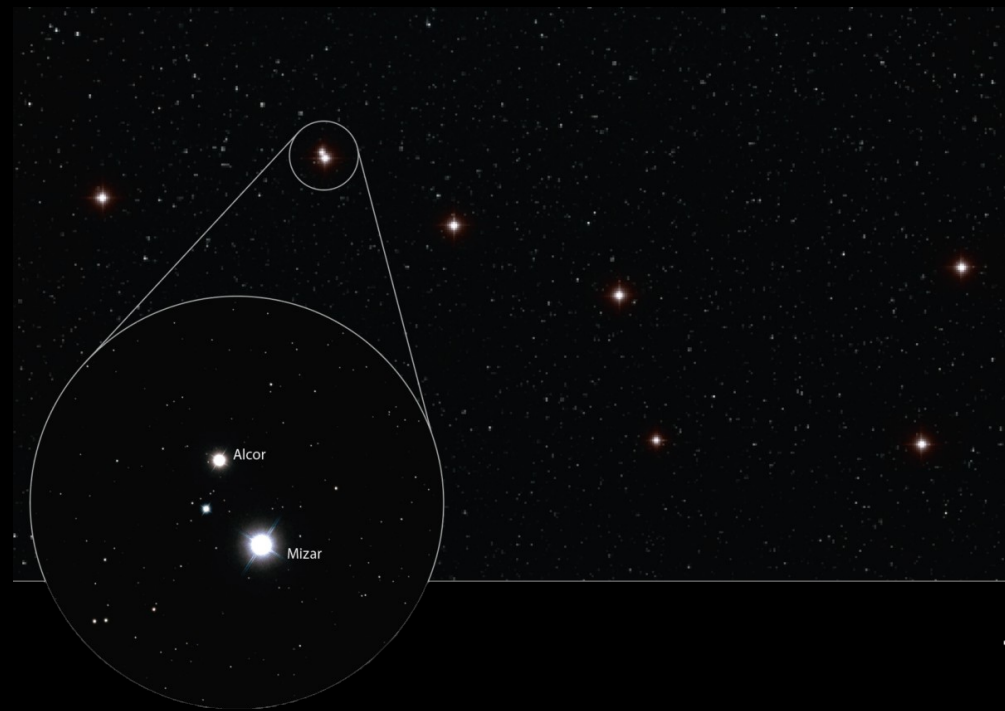


Constellation de la Grande Ourse



Mizar & Alcor

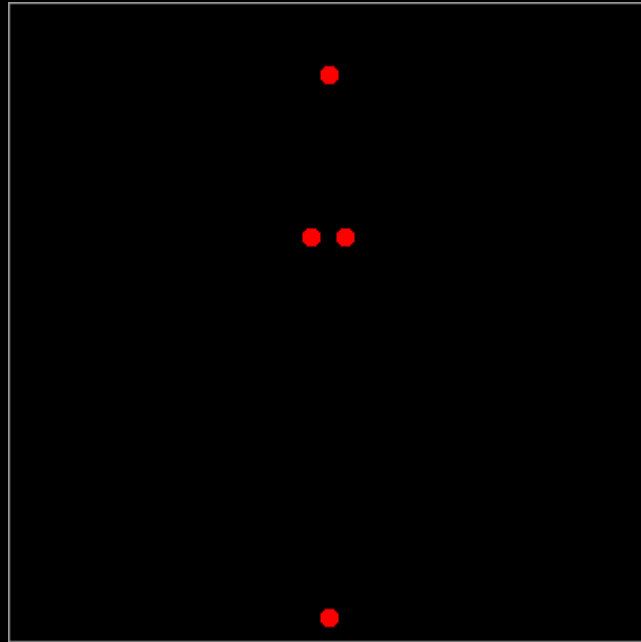
Systemes quadruples



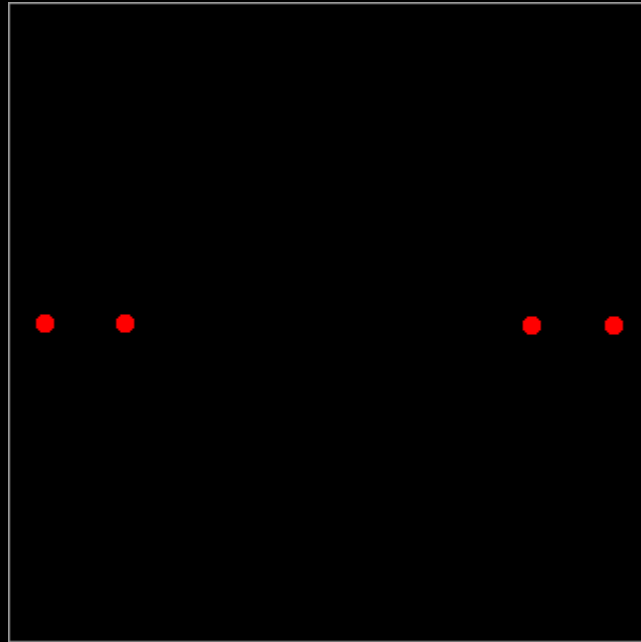
Mizar Ba

Mizar Aa,Ab

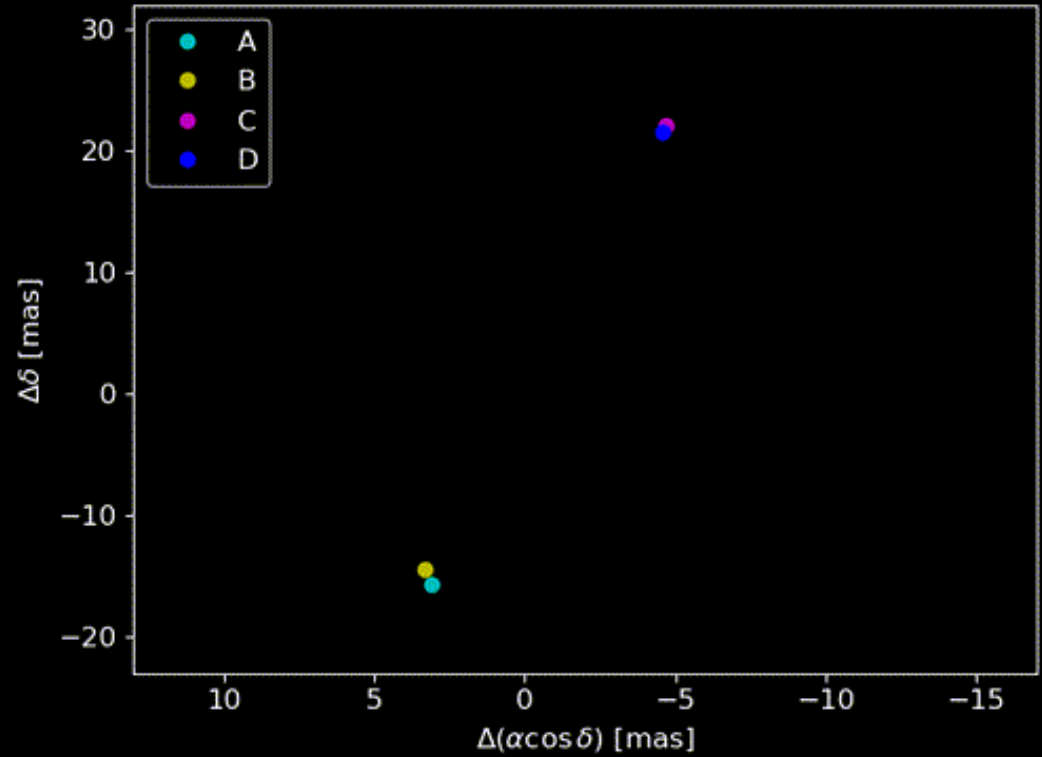
Quadruple 1+3 (stable)



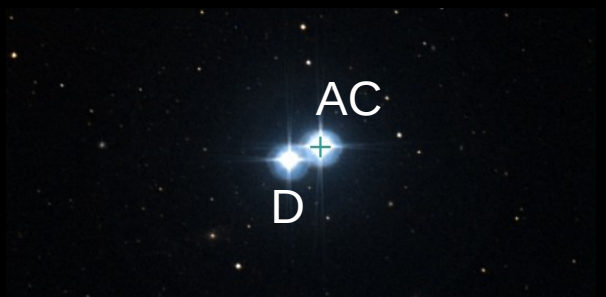
Quadruple 2+2 (stable)



Quadruple 2+2



Systemes à plus haut degré de multiplicité



65 UMa A = DN UMa

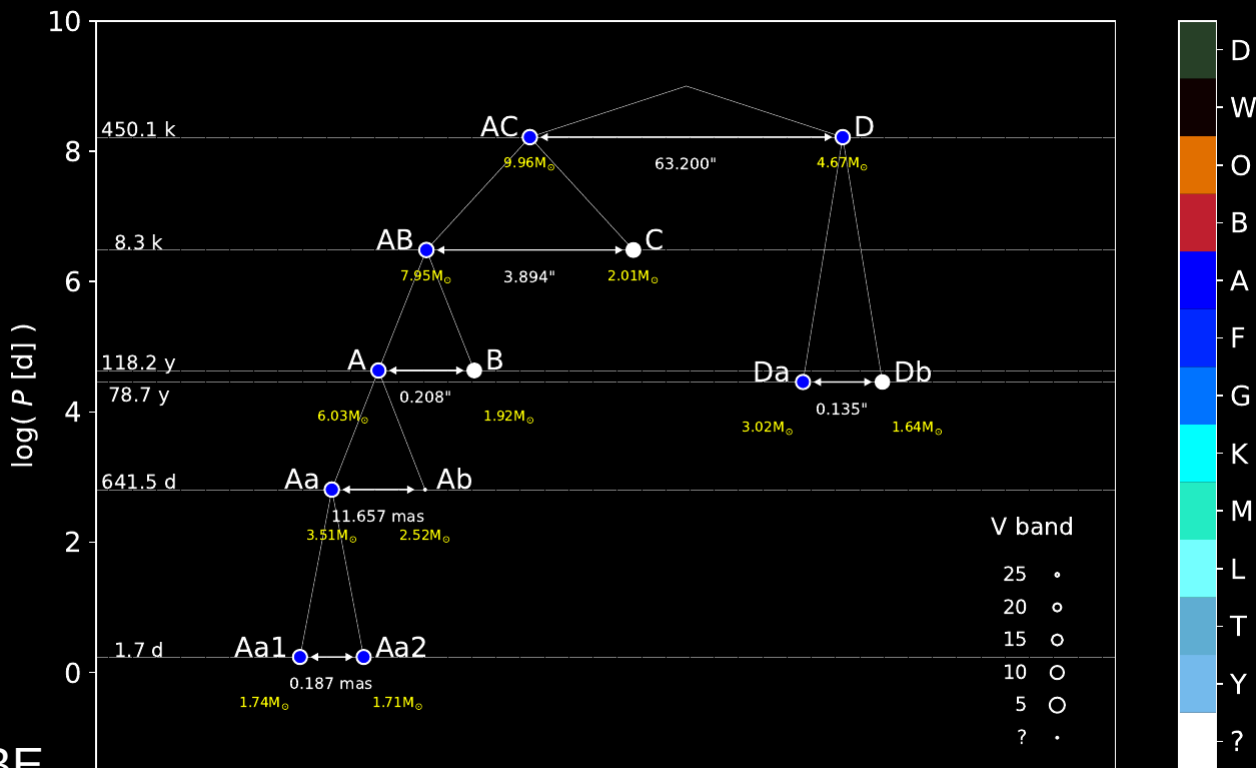
65 UMa AB, C est une binaire à mouvement propre commun

65 UMa A, B est une BV

65 UMa Aa, Ab est une BS2 et BE

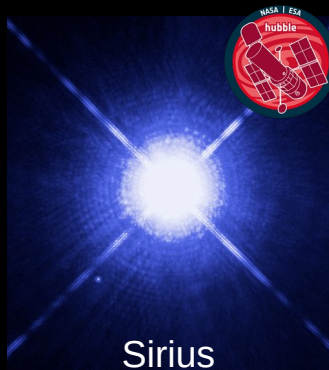
65 UMa Aa1, Aa2 est une BS2 et BE

65 UMa Da,Db est une BA



65 UMa : 5 niveaux hiérarchiques !

Les systèmes multiples, mais pourquoi ?



Sirius



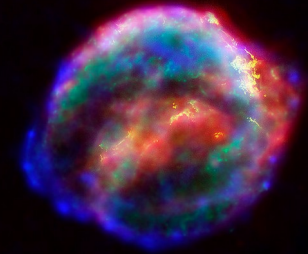
Nébuleuse de l'Anneau du Sud



NGC 4526

SN 1994 D

Chandra/Hubble/Spitzer



SN 1604



Betelgeuse



η Car



V838 Mon

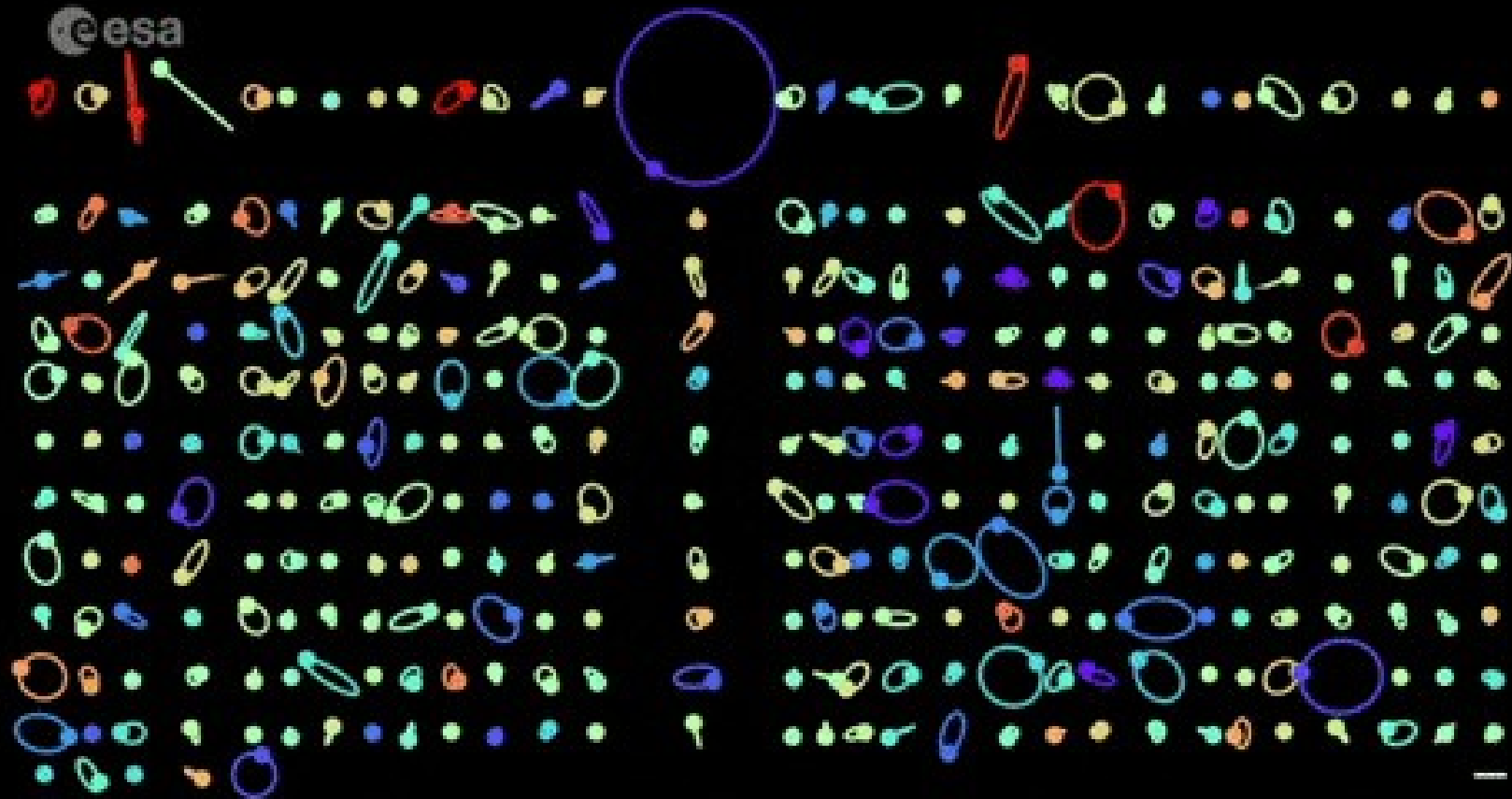


GW 150914

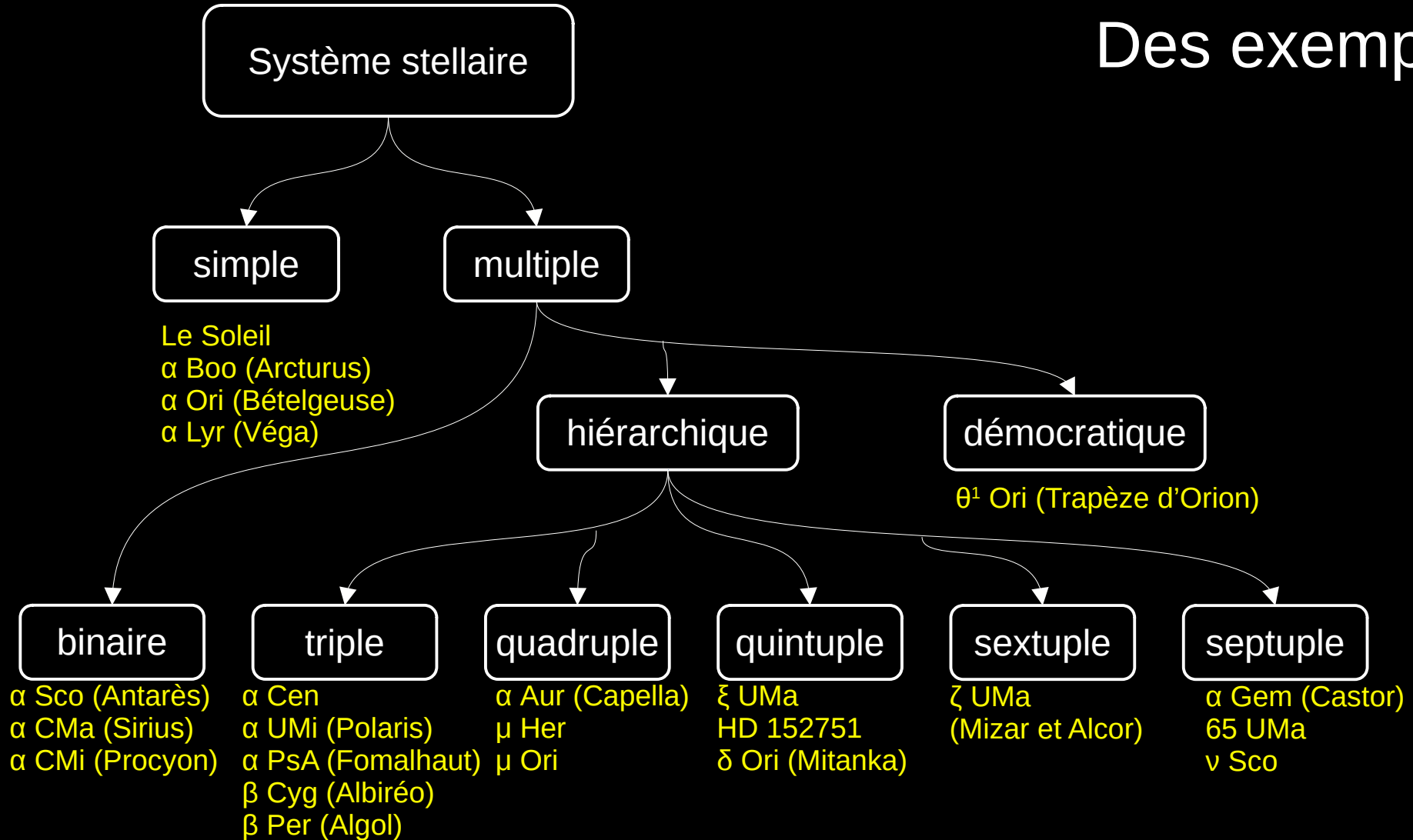
La valse des étoiles doubles



Merci de votre attention !



Des exemples

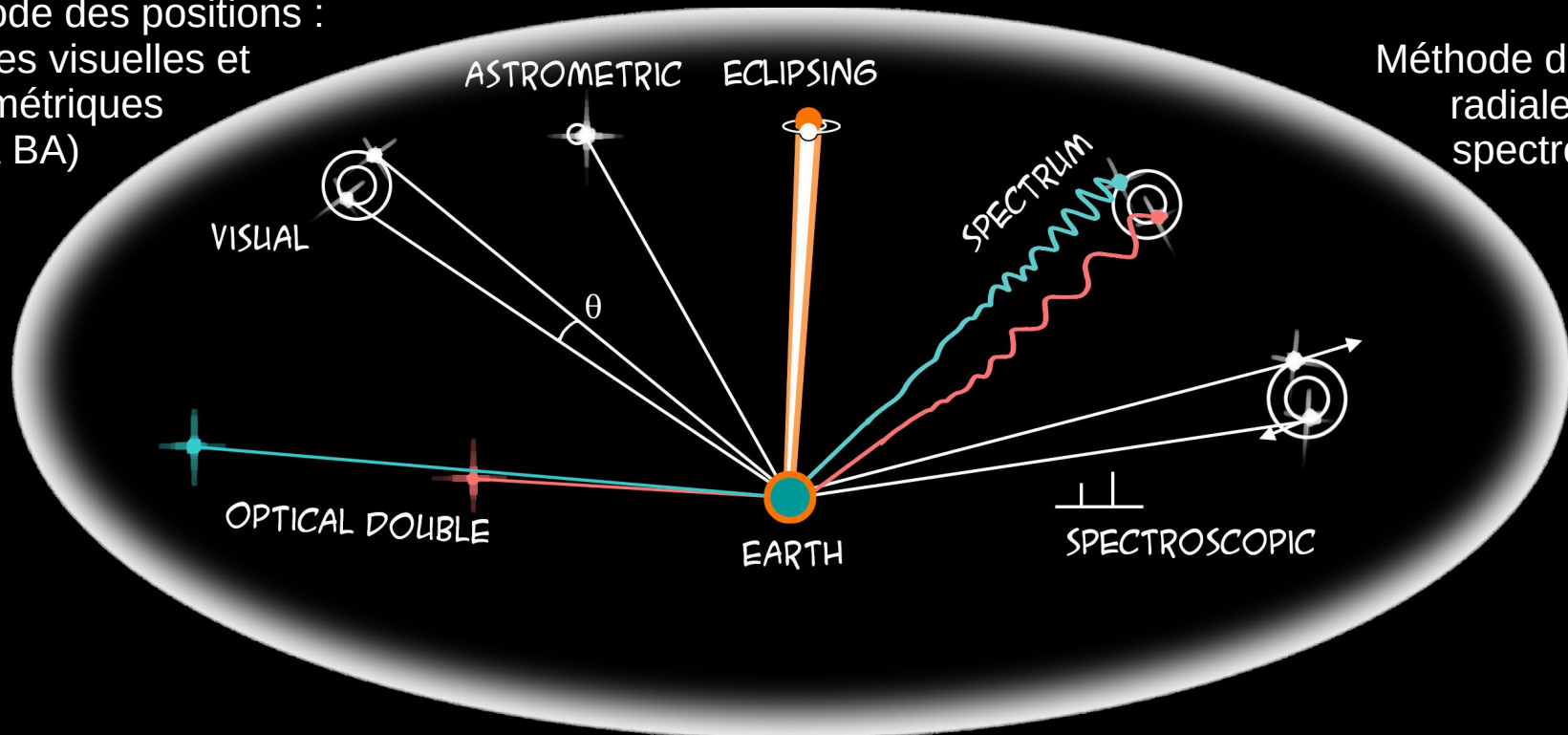


Comment les détecte-t-on ?

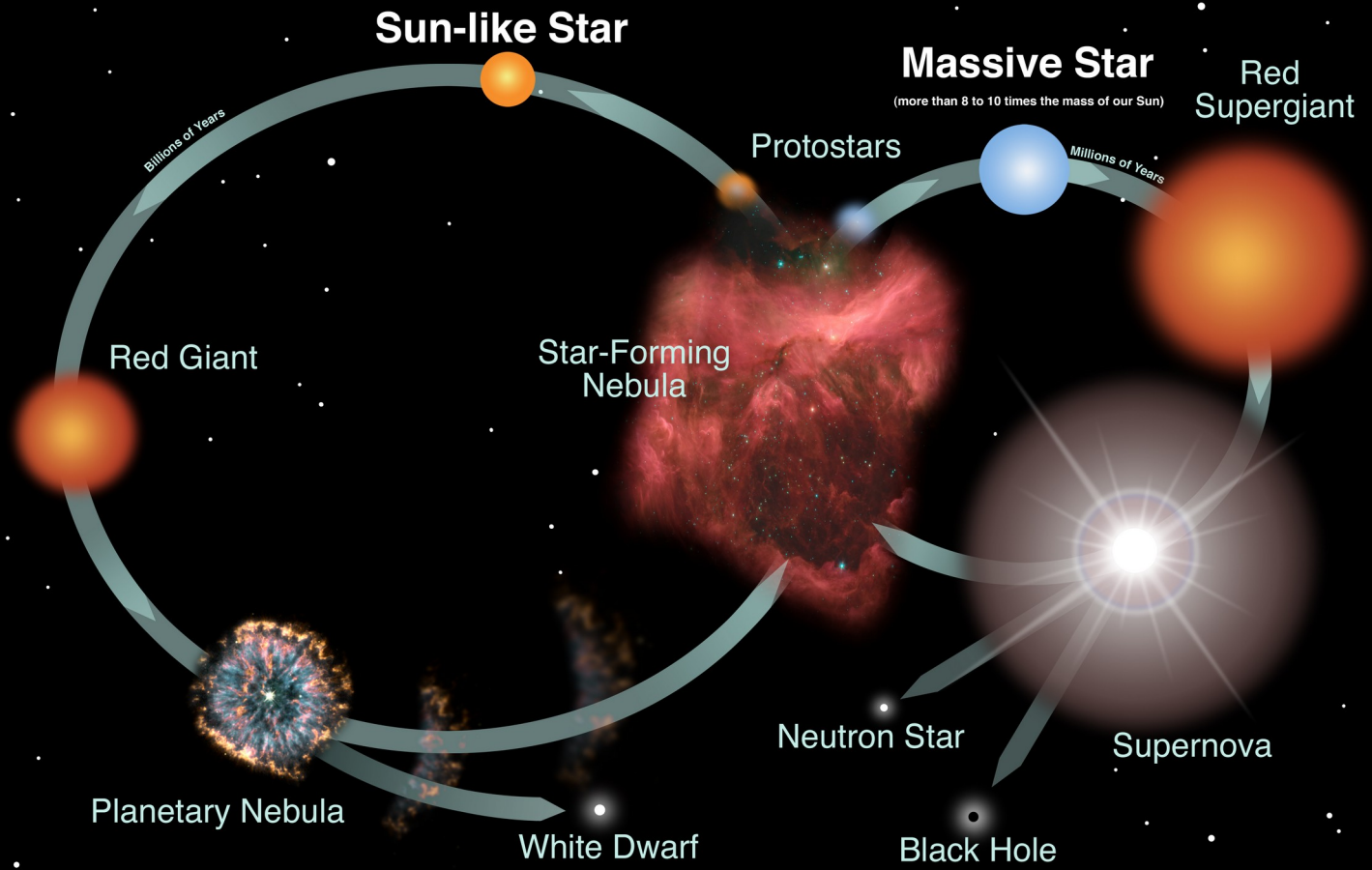
Méthode des transits :
binaires à éclipses (BE)

Méthode des positions :
binaires visuelles et
astrométriques
(BV & BA)

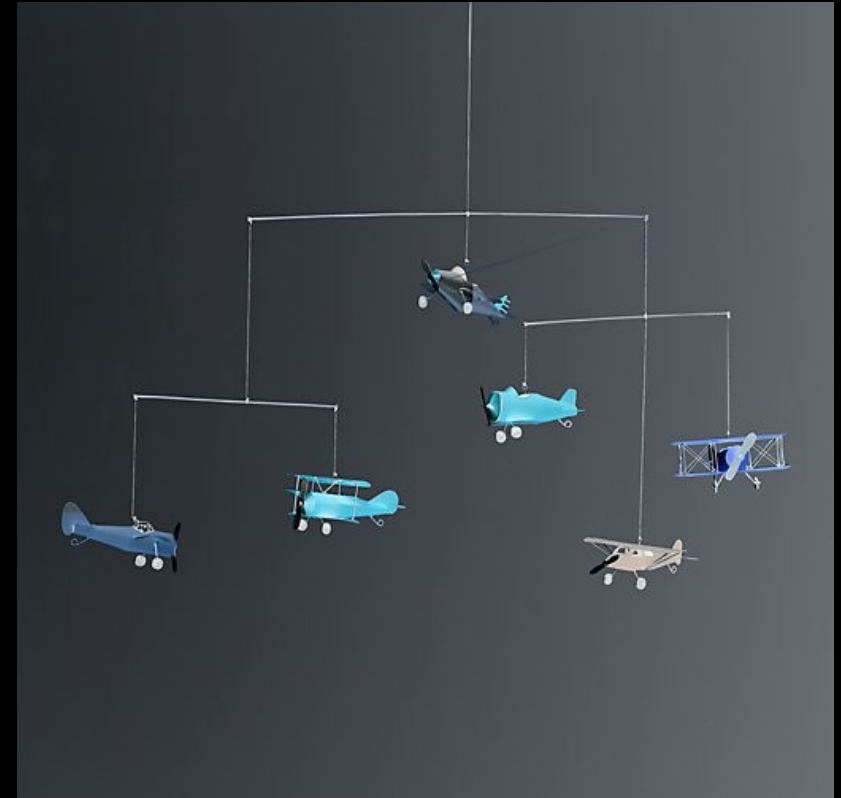
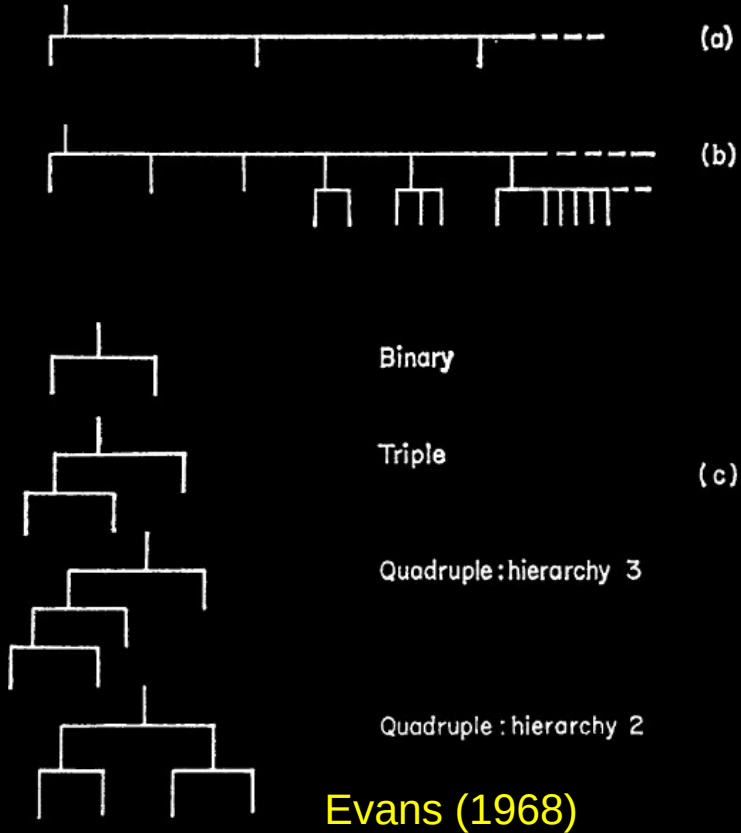
Méthode des vitesses
radiales : binaires
spectroscopiques
(BS)



Evolution stellaire des étoiles solitaires



Diagrammes en mobile



Diagrammes en mobile



(a)

Multiplex

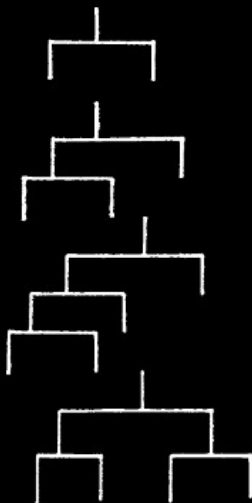
(a) Diagramme mobile du Soleil et des planètes: 1 seul niveau hiérarchique

Soleil (Sol a), Mercure (Sol b), Vénus (Sol c), Terre (Sol d), ...



(b)

(b) Diagramme mobile du Soleil, des planètes et de leurs satellites : 2 niveaux hiérarchiques



Binary

Triple

Quadruple : hierarchy 3

Quadruple : hierarchy 2

(c)

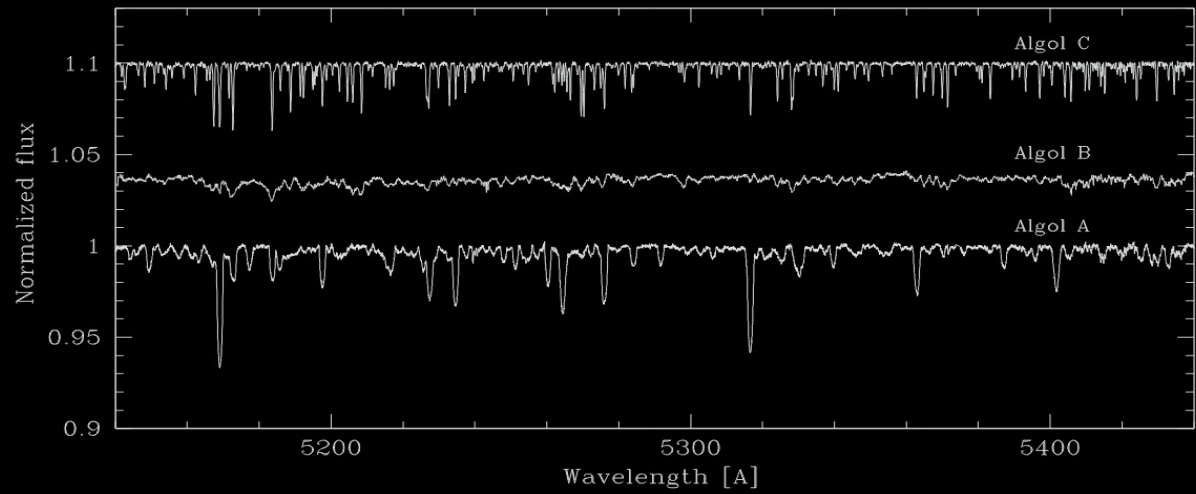
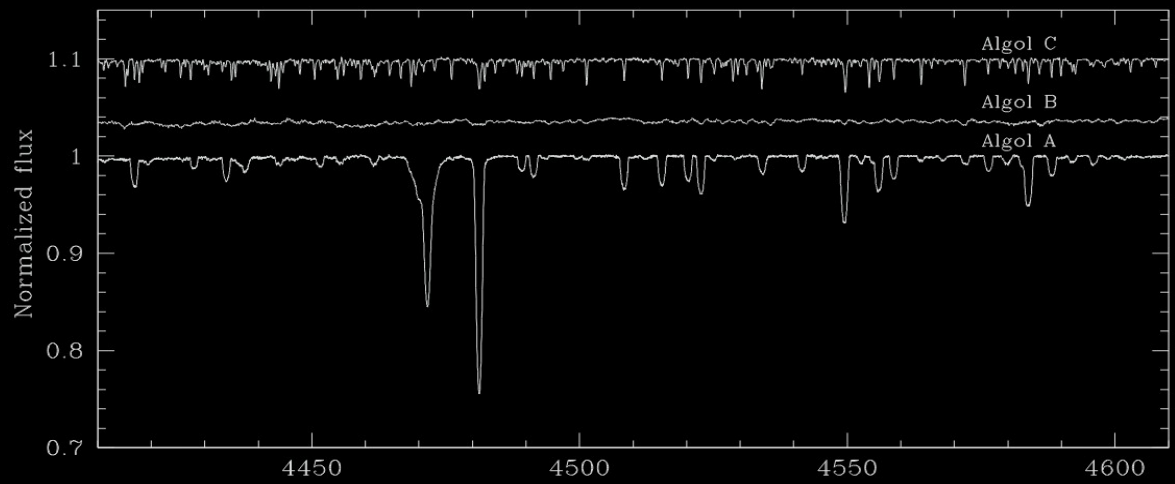
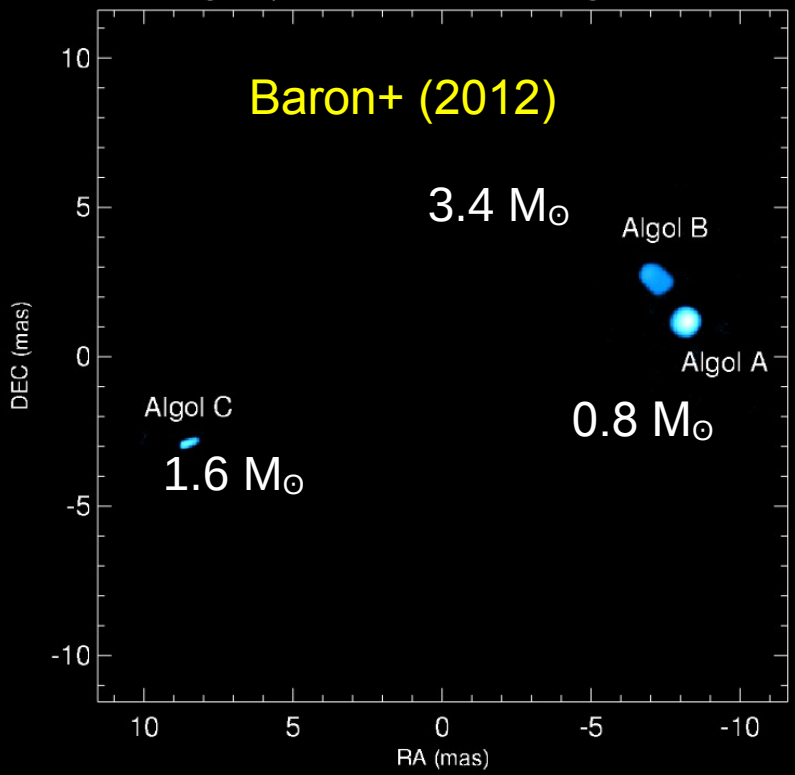
(c) Simplex

- Binaire : 1 niveau hiérarchique
- Triple : 2 niveaux hiérarchiques
- Quadruples : 2 architectures possibles
 - 3 niveaux hiérarchiques
 - 2 niveaux hiérarchiques

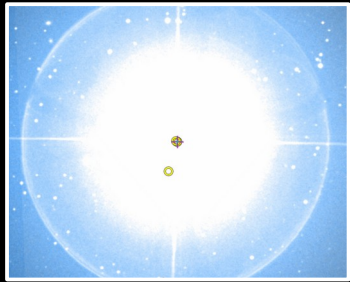
Evans (1968)

The Algol system

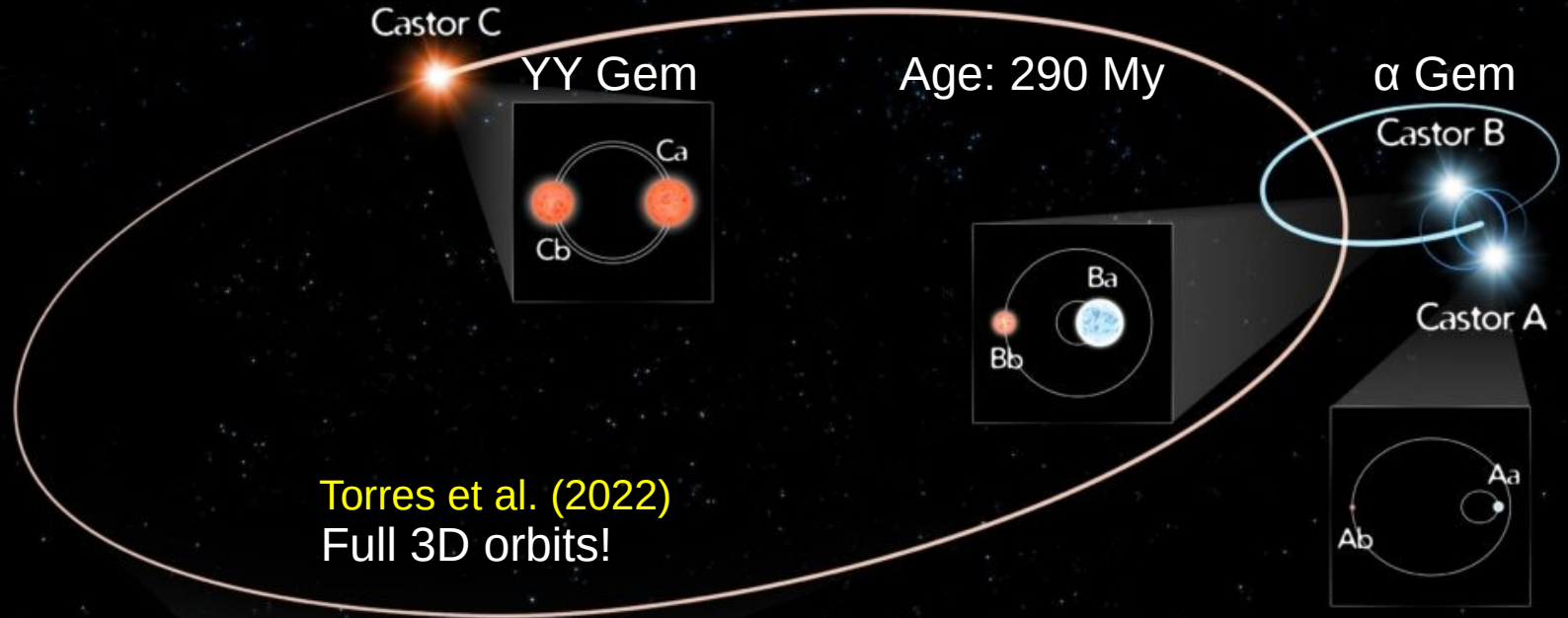
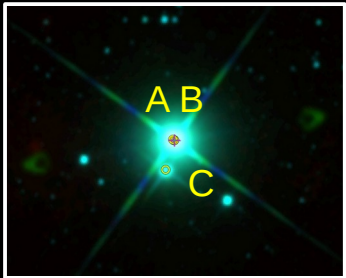
Algol triple reconstruction - 12 August 2009



The Castor sextuplet (α Gem (2+2) + YY Gem)



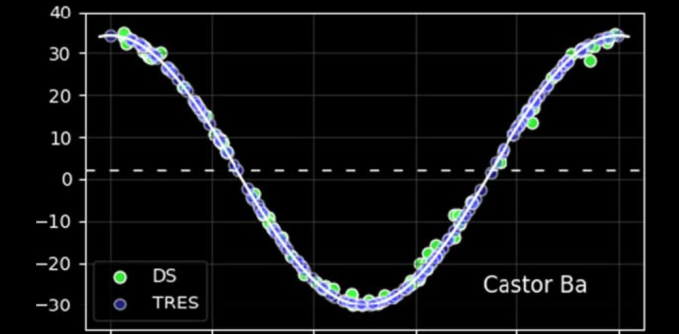
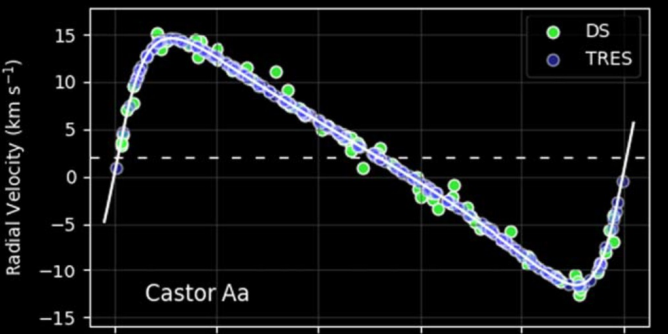
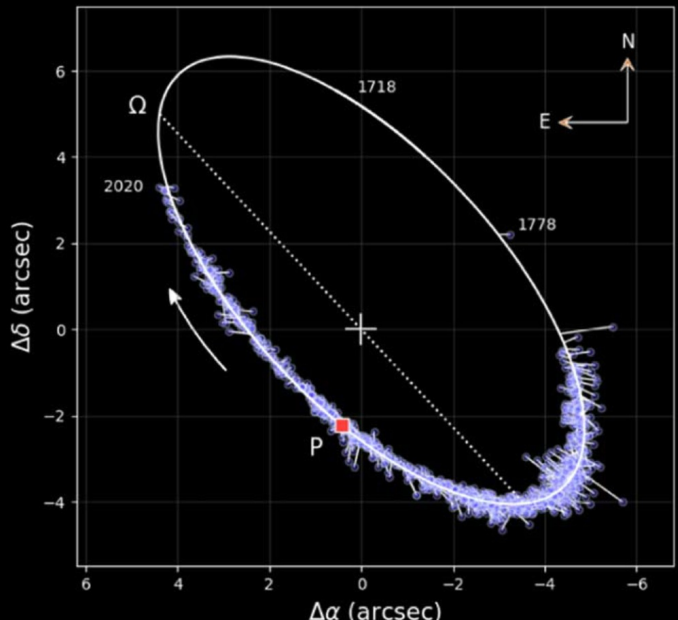
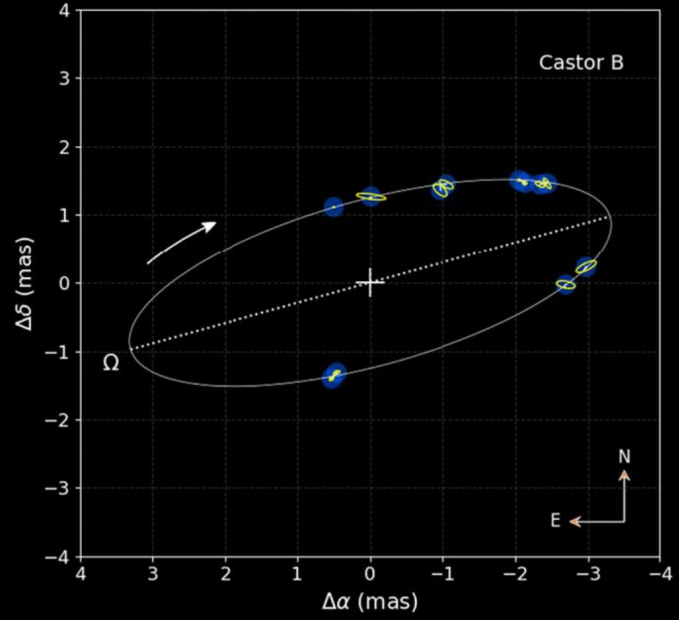
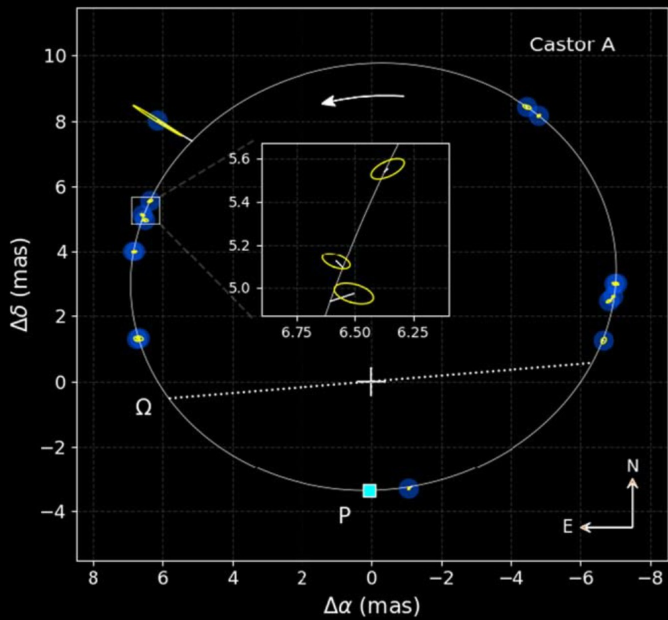
$\sim 13'$



Torres et al. (2022)
Full 3D orbits!

- Castor Aa, Ab (AIV+MV): 9.2 d, $e = 0.48$, $a = 0.12$ au (SB1)
- Castor Ba, Bb (AIV+MV): 2.9 d, $e = 0$, $a = 0.05$ au (SB1)
- Castor A,B: 459.1 y, $e = 0.34$, $a = 102$ au (VB)
- Castor Ca, Cb (MV+MV): 0.8 d, $e = 0$, $a = 0.02$ au (EB+SB2)
- Castor AB,C: ~ 14.5 ky, $a > 1060$ au

The Castor sextuplet (α Gem (2+2) + YY Gem)



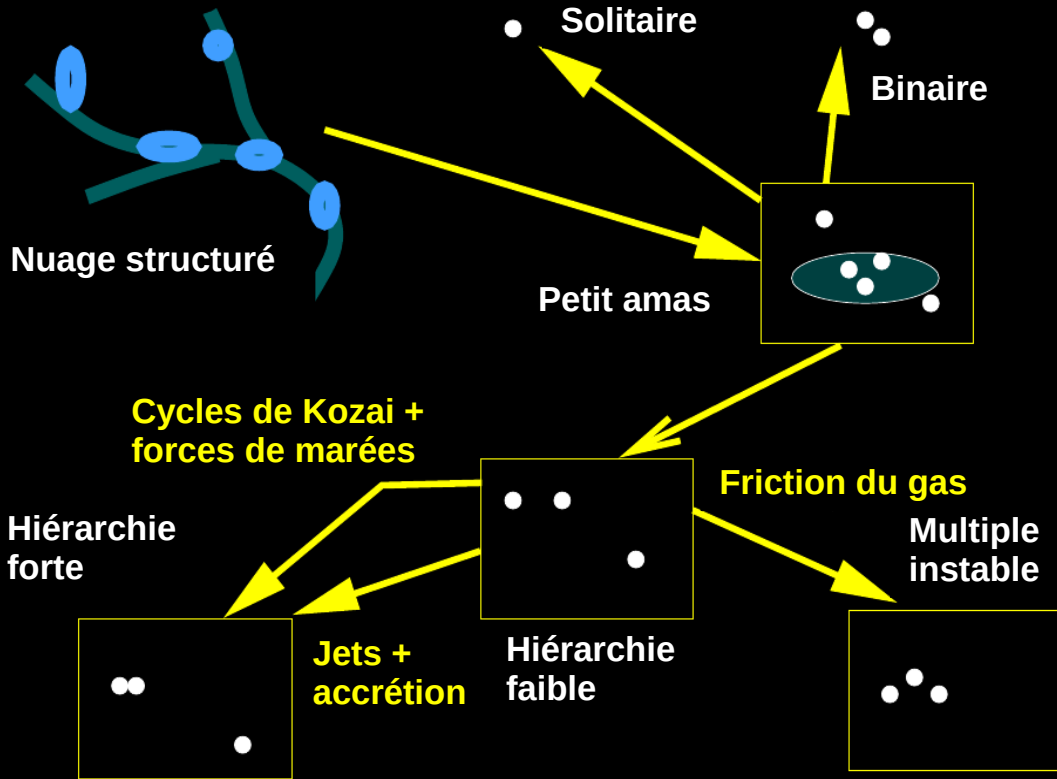
$$M_{Aa} = 2.37 \pm 0.02 M_{\odot}$$

$$M_{Ab} = 0.386 \pm 0.002 M_{\odot}$$

$$M_{Ba} = 1.79 \pm 0.02 M_{\odot}$$

$$M_{Bb} = 0.387 \pm 0.002 M_{\odot}$$

Comment se forment-ils ?



nuages moléculaires

↓
amas ouverts

↓
mini-amas

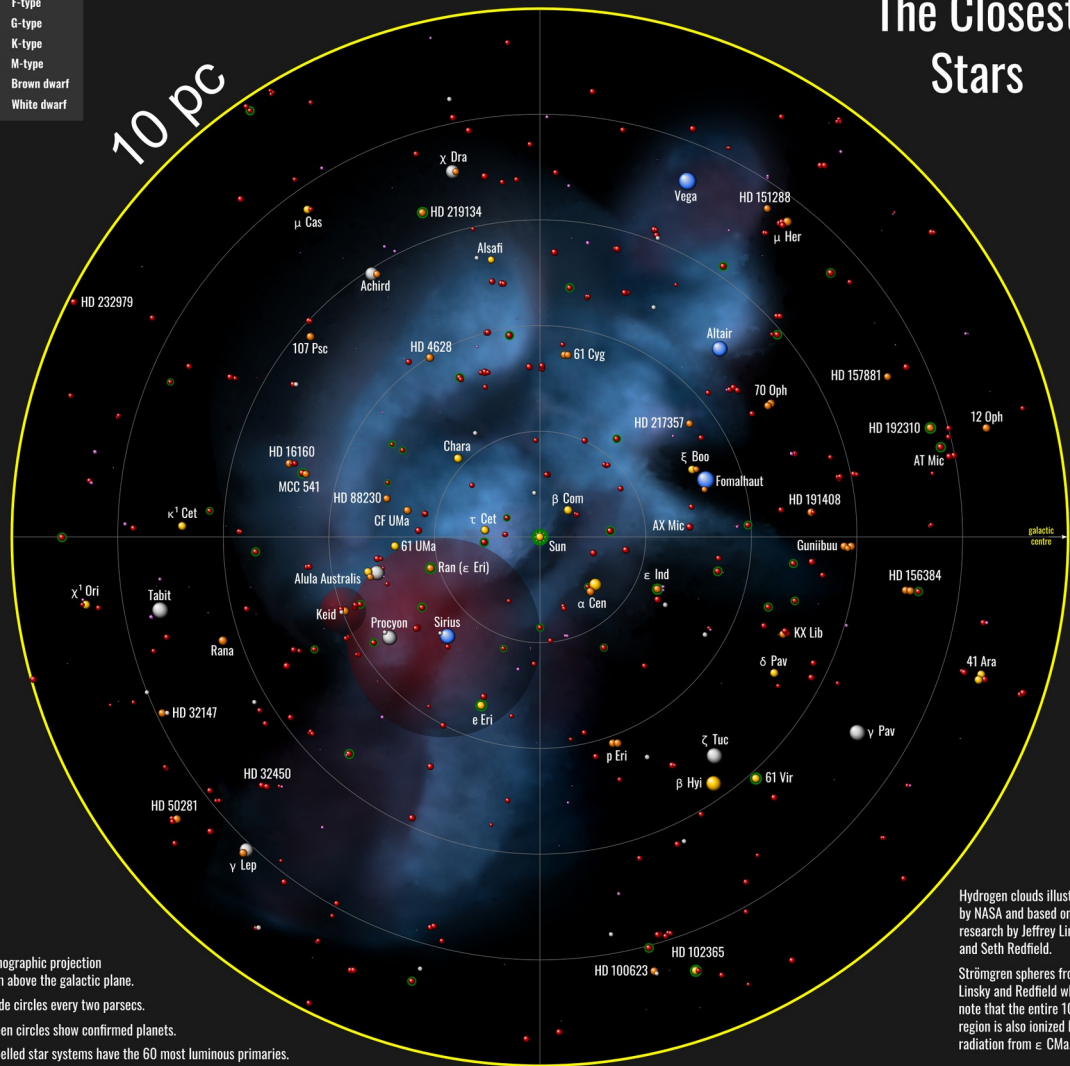
↓
associations

↓
groupes mobiles

↓
étoiles de champ et
étoiles à haute vitesse

- A-type
- F-type
- G-type
- K-type
- M-type
- Brown dwarf
- White dwarf

The Closest Stars



Orthographic projection from above the galactic plane.
 Guide circles every two parsecs.
 Green circles show confirmed planets.
 Labelled star systems have the 60 most luminous primaries.

Hydrogen clouds illustrated by NASA and based on research by Jeffrey Linsky and Seth Redfield.

Strömgren spheres from Linsky and Redfield who note that the entire 10 pc region is also ionized by radiation from ε CMa.

Le voisinage solaire

10 pc = 33 années-lumières

O	0	~340 systèmes stellaires	~460 étoiles
B	0		
A	4		
F	8		
G	18		
K	38		
M	249		
Naines brunes	95		
Naines blanches	20		
Etoiles solitaires	246	73%	53%
Binaires	69	20%	30%
Triples	19	6%	12%
Quadruples	3	} 1%	} 3%
Quintuples	2		
			53

Based on the catalog of stars, brown dwarfs and planets described in "The 10 pc sample in the Gaia era", Reylé, Jardine et al, Astronomy & Astrophysics (2021).

Le voisinage solaire jusqu'à 10 pc

