

Dynamique des étoiles au voisinage d'un trou noir supermassif

Jean-Baptiste Fouvry, IAP
fouvry@iap.fr

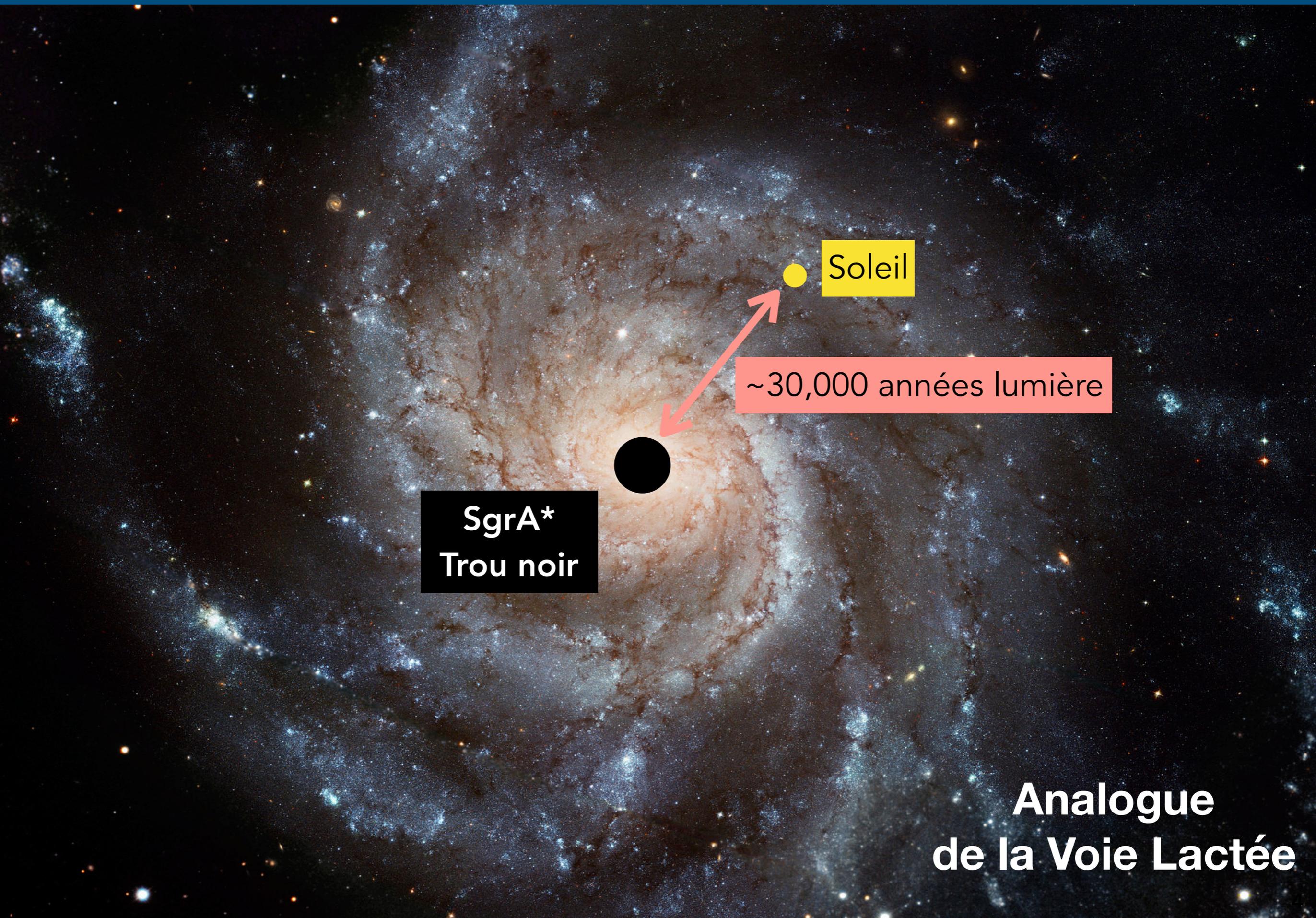
IAP, Nuit de l'Astronomie
Juin 2020

La Voie Lactée





**Analogue
de la Voie Lactée**



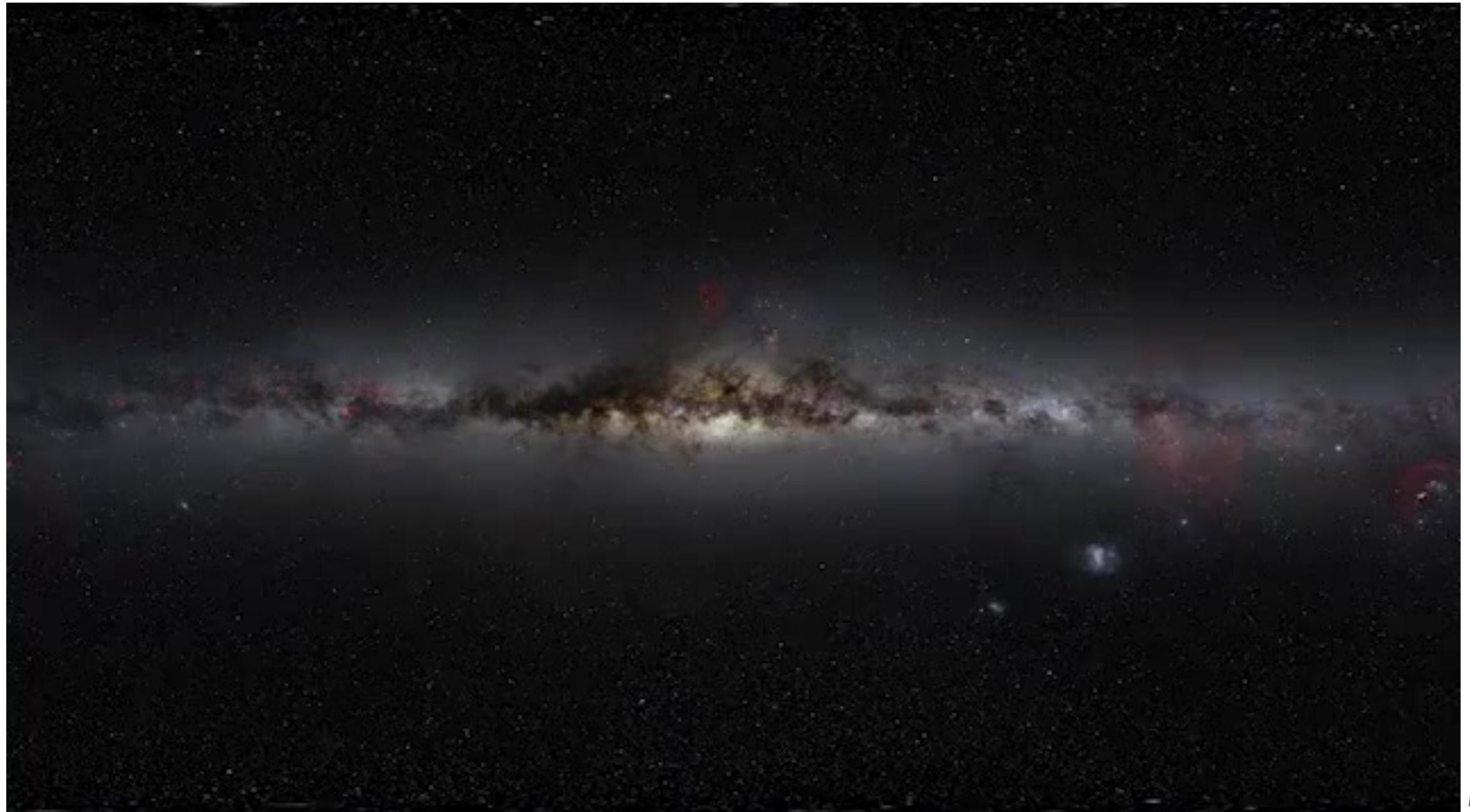
Soleil

~30,000 années lumière

SgrA*
Trou noir

Analogue
de la Voie Lactée

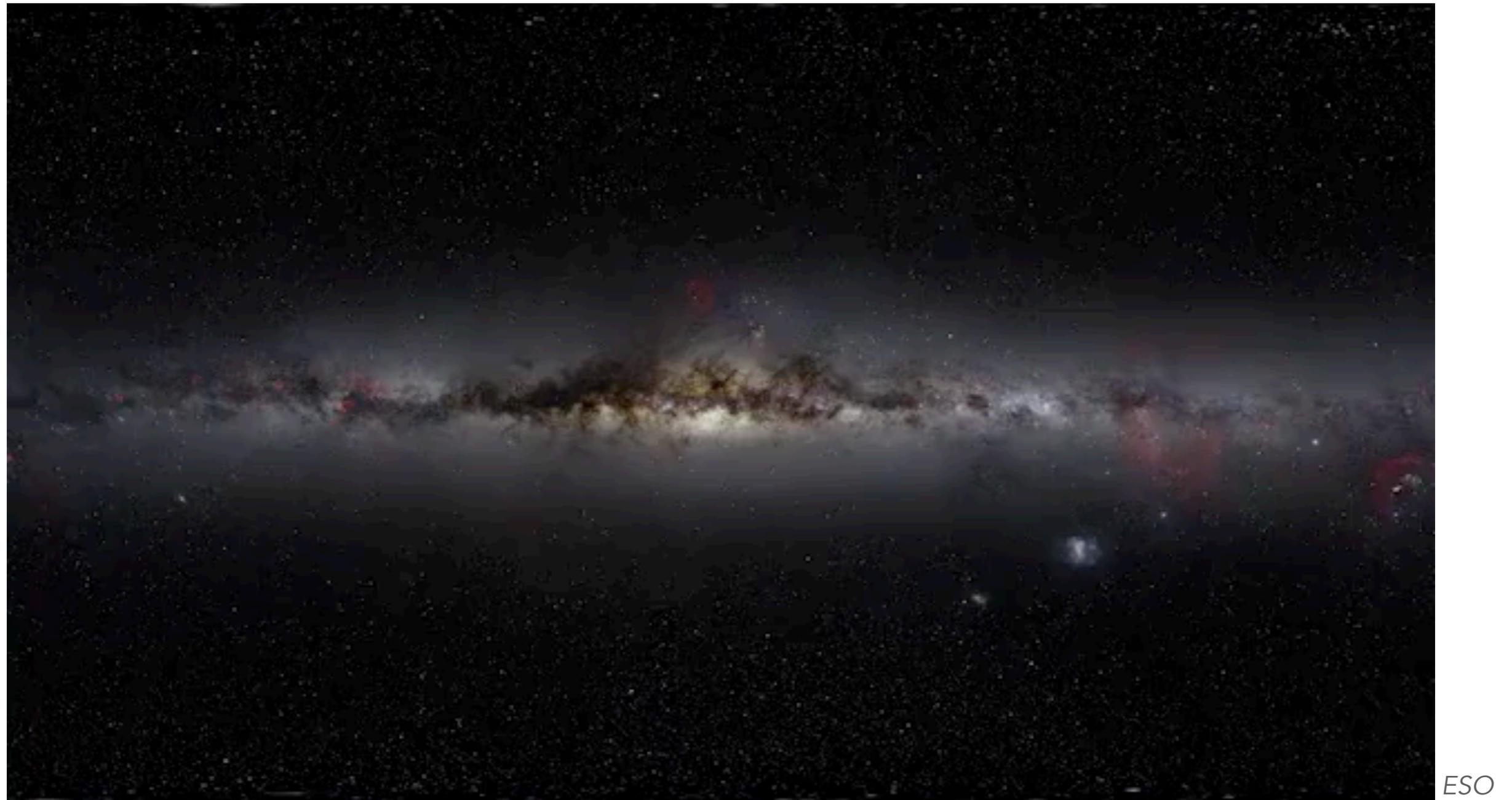
SgrA*, notre centre galactique



Voie Lactée (10^{17} km)

ESO

SgrA*, notre centre galactique

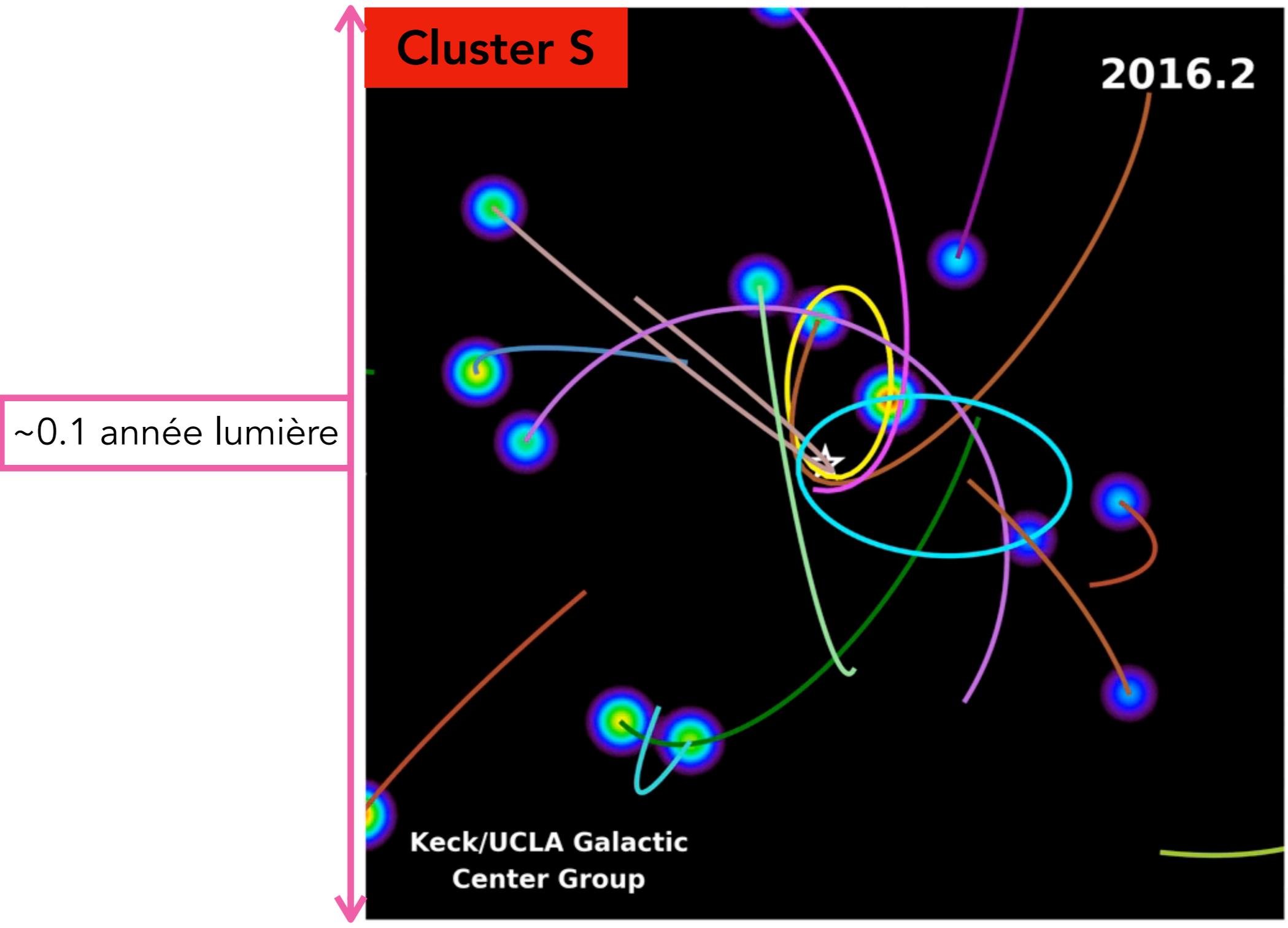


ESO



Zoom (x10,000,000)

SgrA*, au centre de la Voie Lactée



Quelle est la diète des **trous noirs supermassifs** ?

Dynamique et Relaxation

Comment les étoiles évoluent-elles ?



Encre dans l'eau

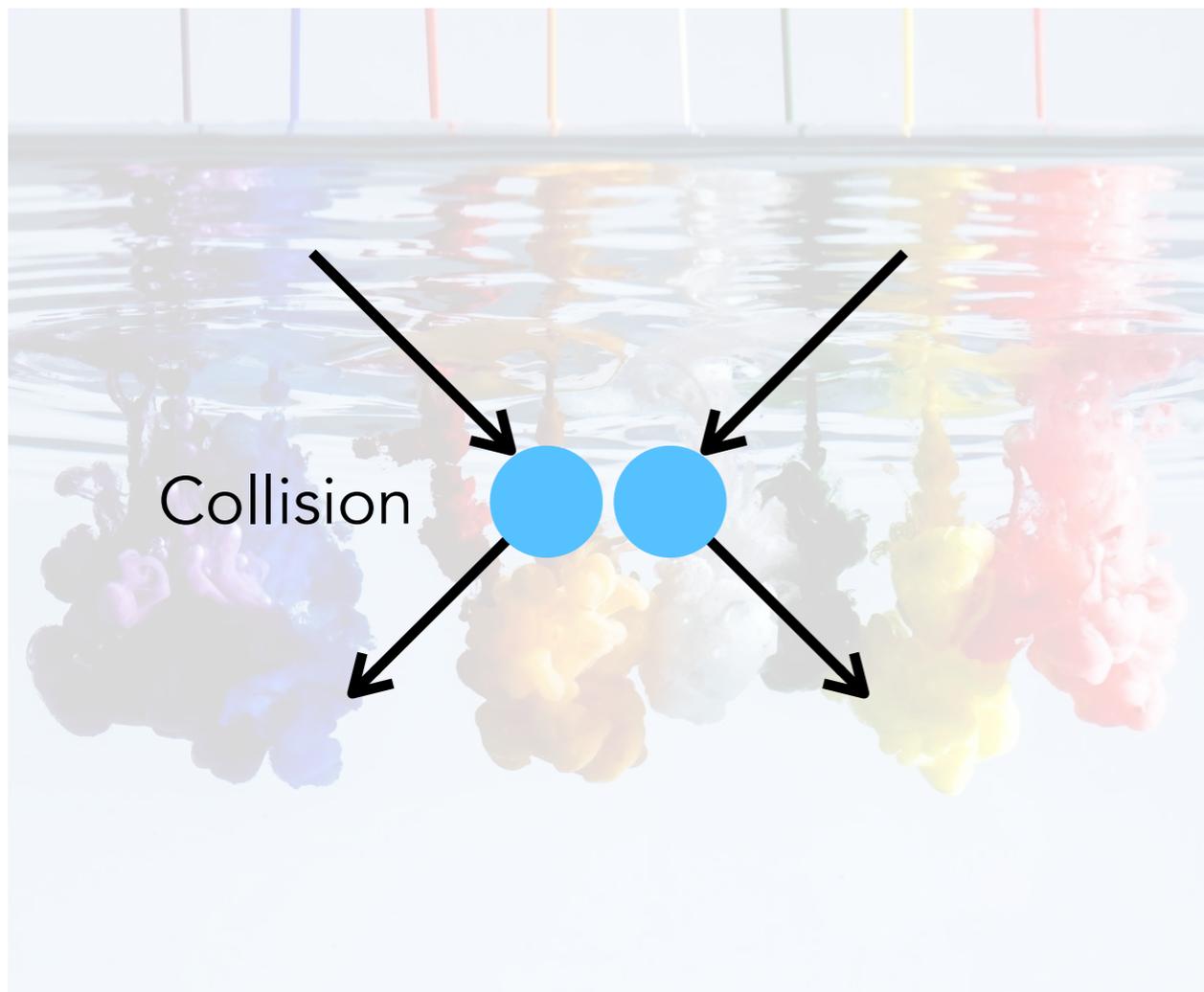


Etoiles dans une galaxie

Diffusion

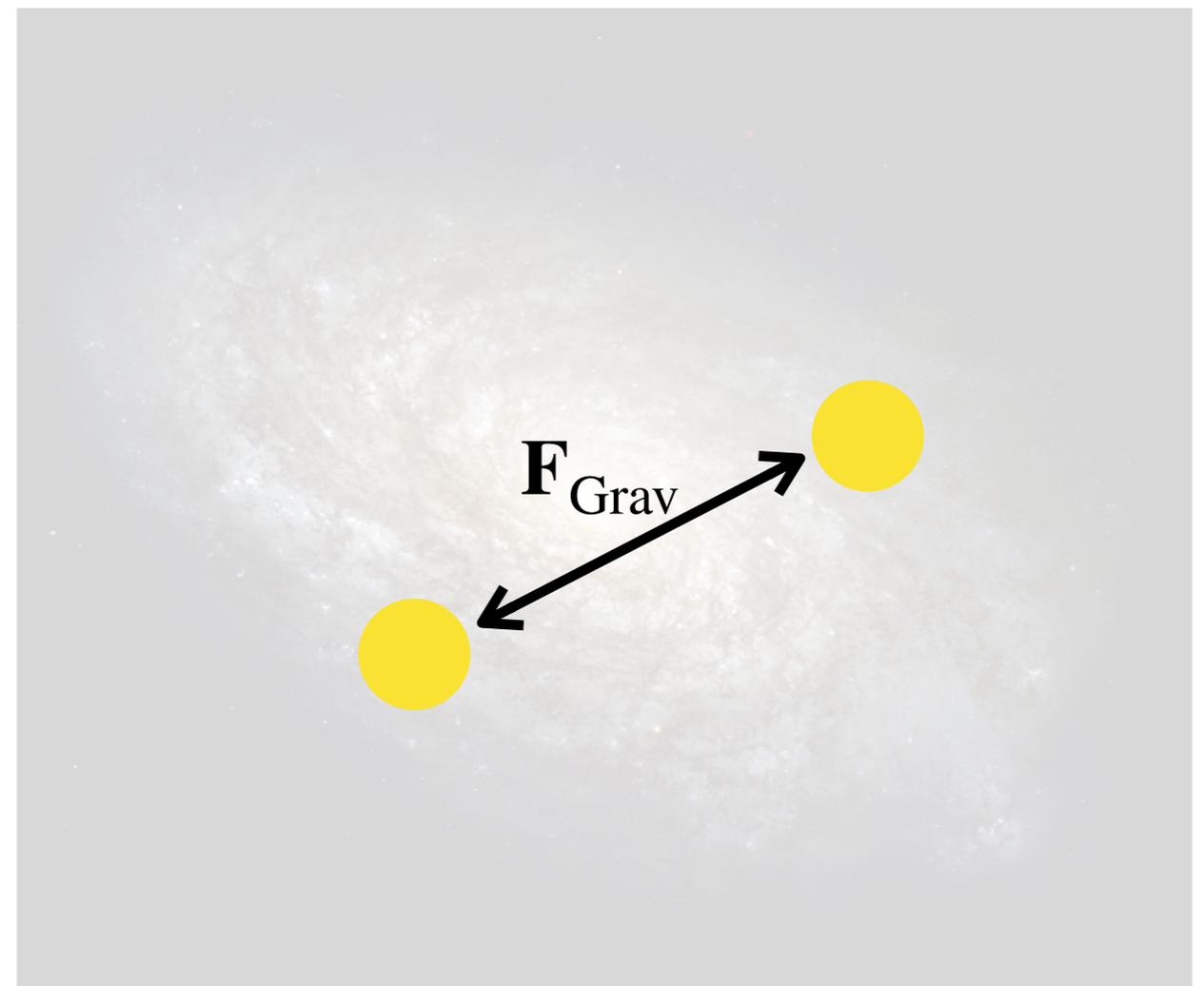
Comment les systèmes diffusent-ils ?

Encre dans l'eau



Interaction **locale**

Etoiles dans une galaxie

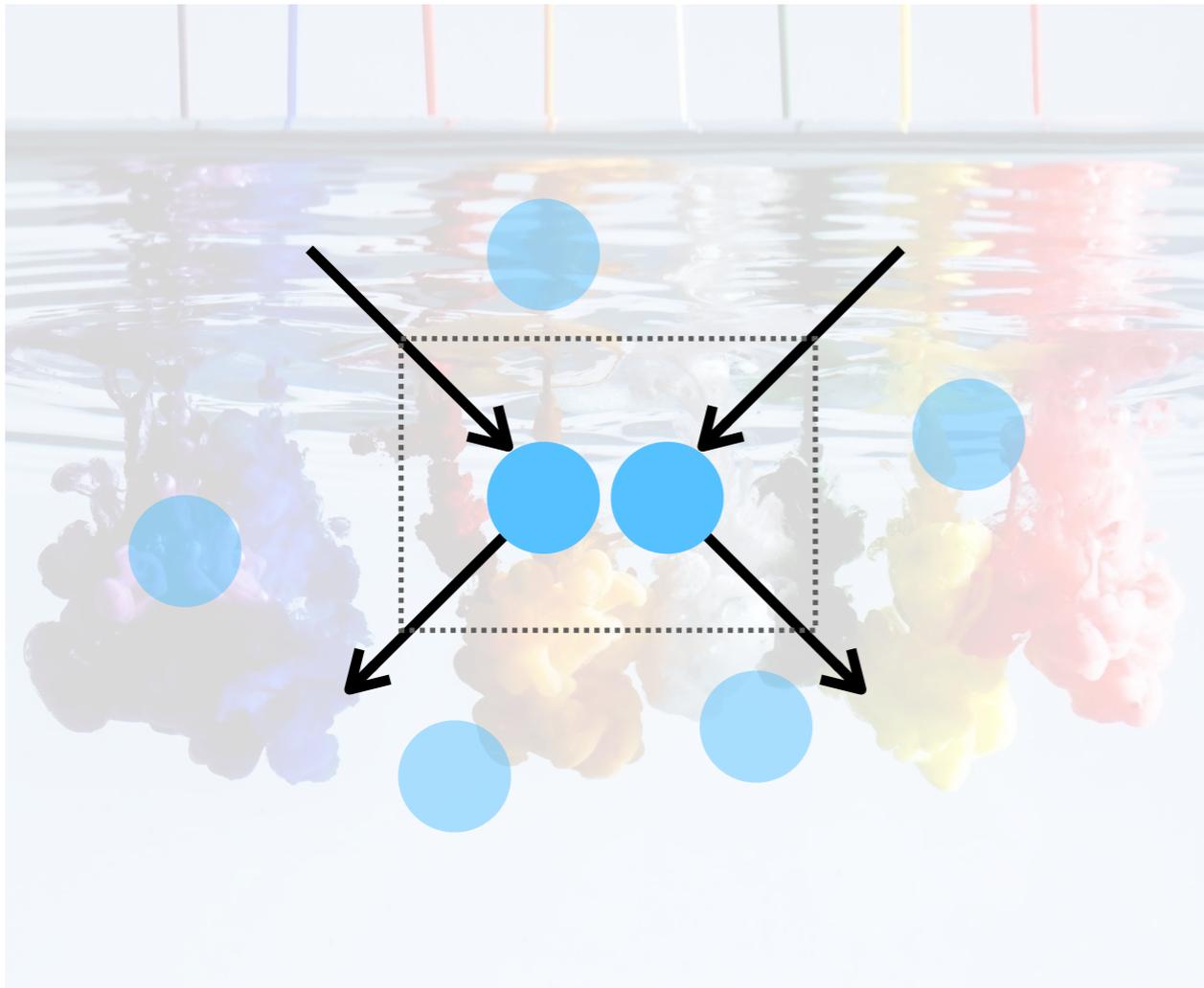


Interaction à **longue portée**

Diffusion

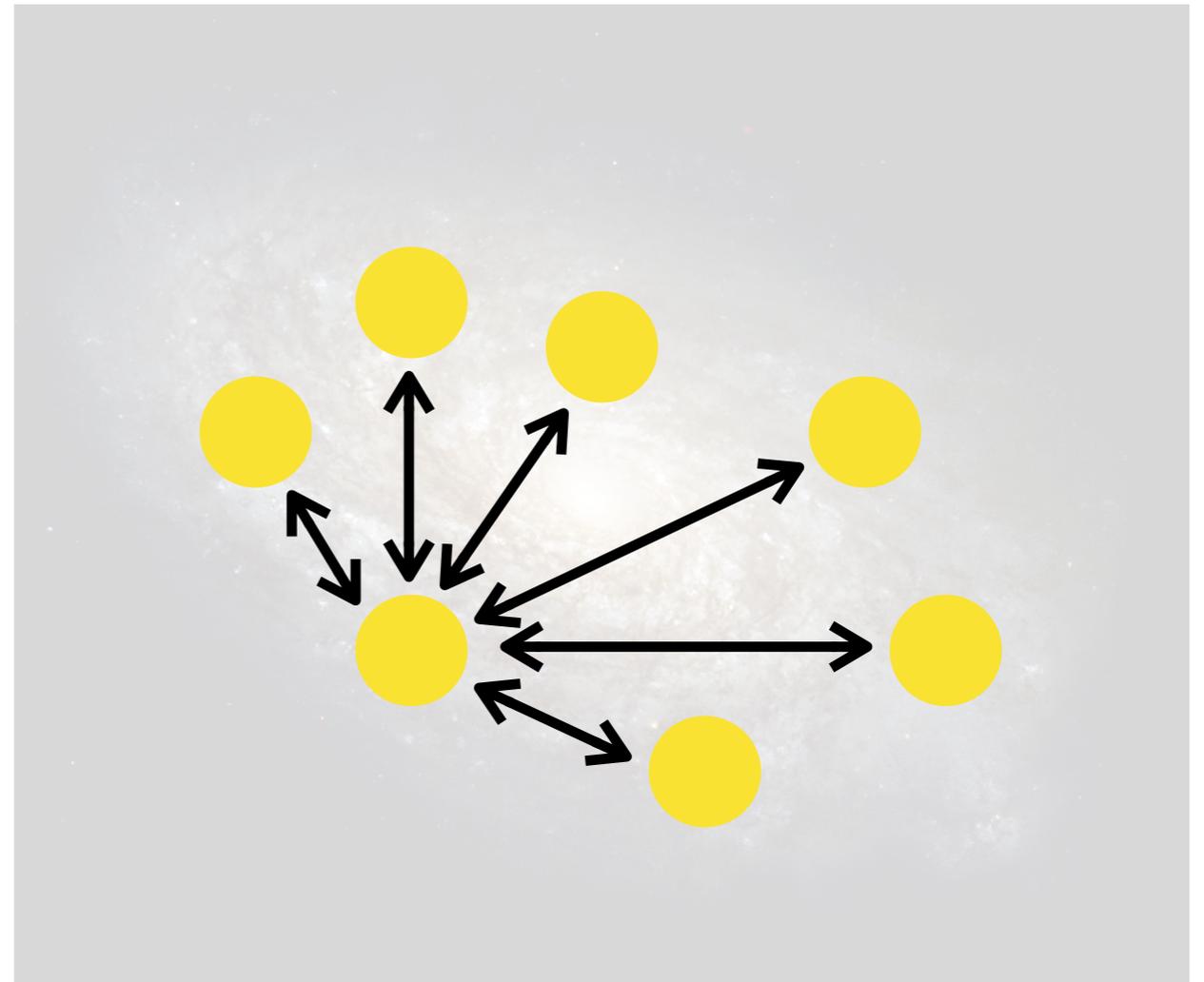
Comment les systèmes diffusent-ils ?

Encre dans l'eau



Interaction **deux à deux**

Etoiles dans une galaxie



Interaction **collective**

Diffusion

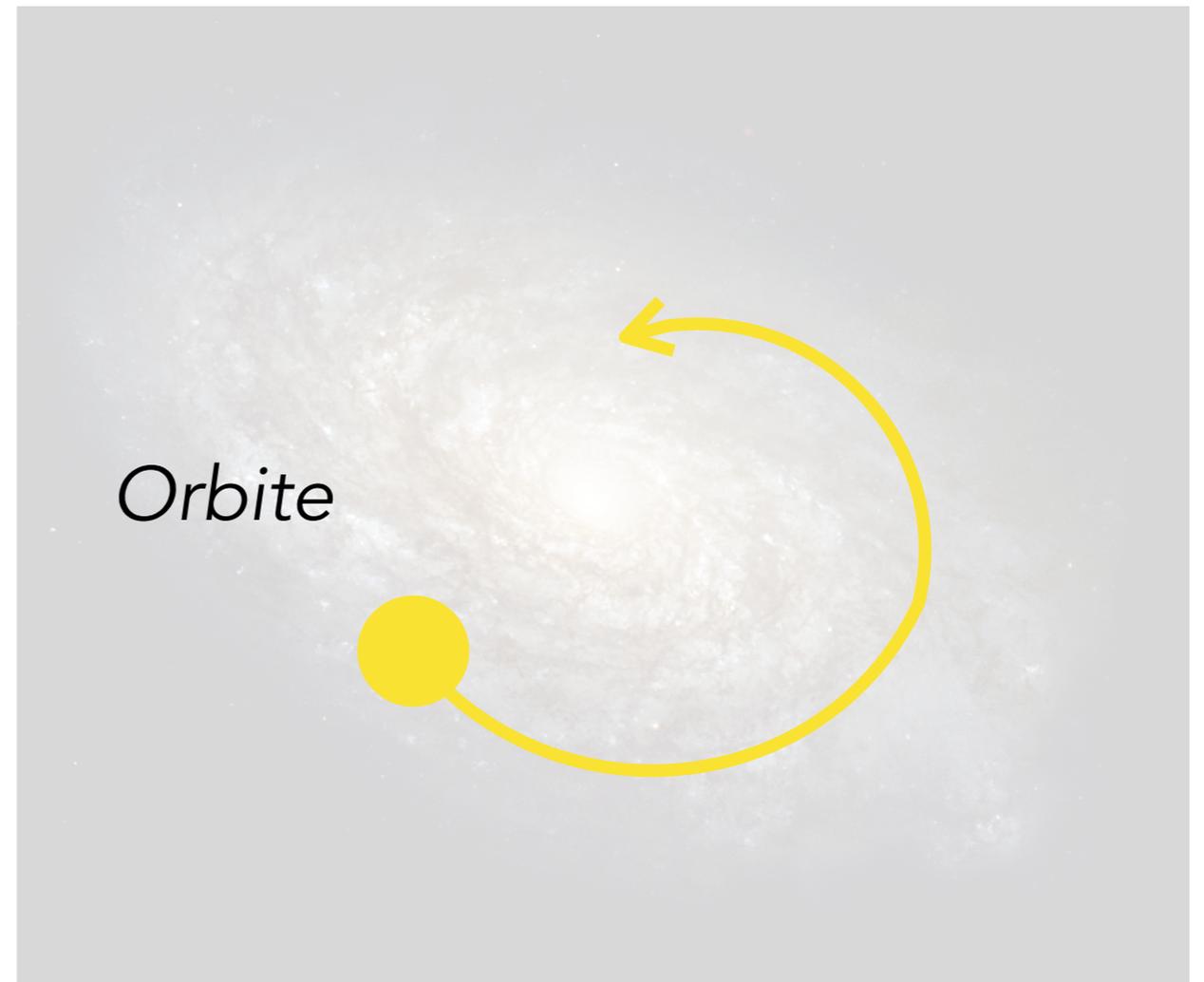
Comment les systèmes diffusent-ils ?

Encre dans l'eau



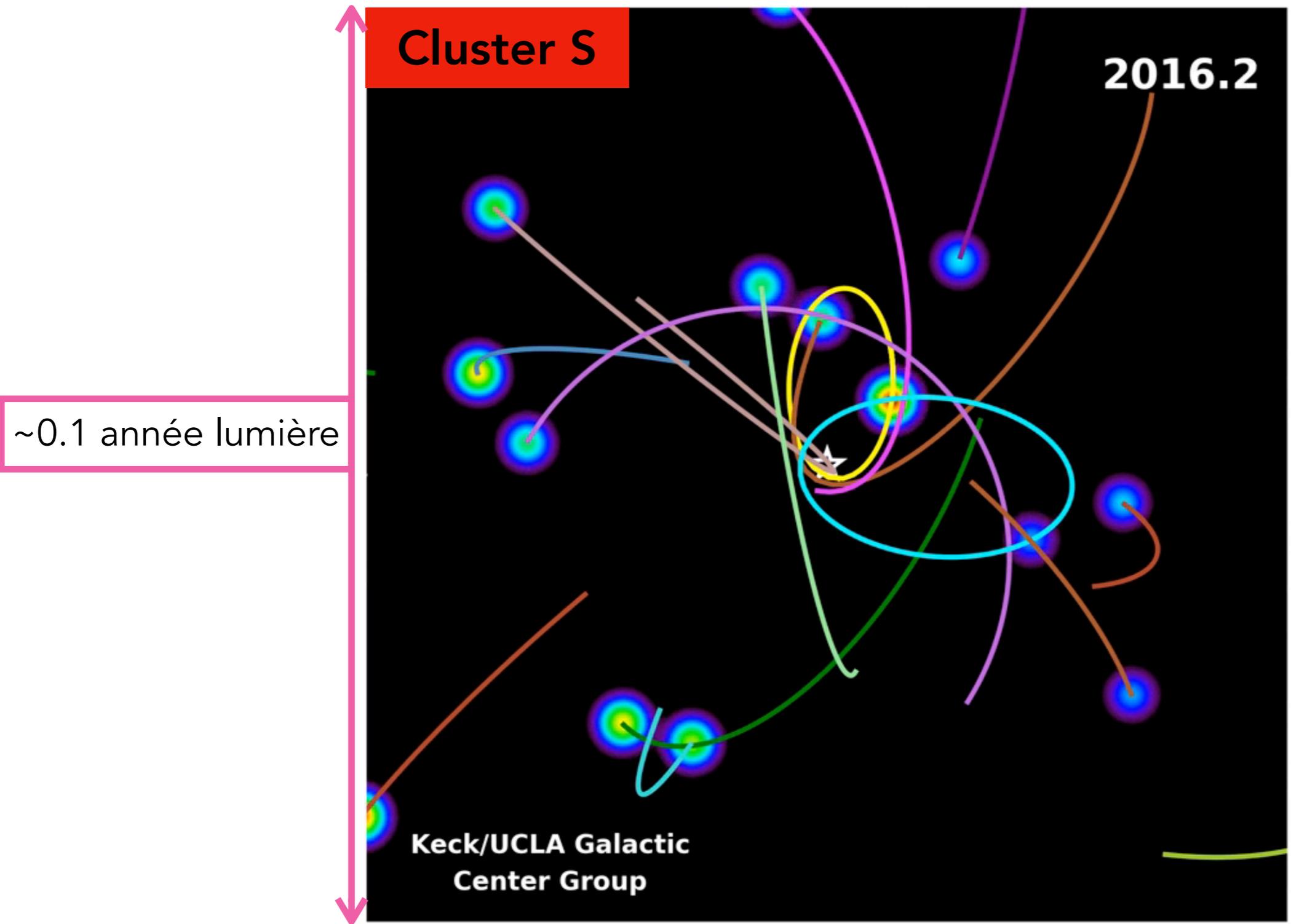
Trajectoire **erratique**

Etoiles dans une galaxie



Trajectoire **régulière**

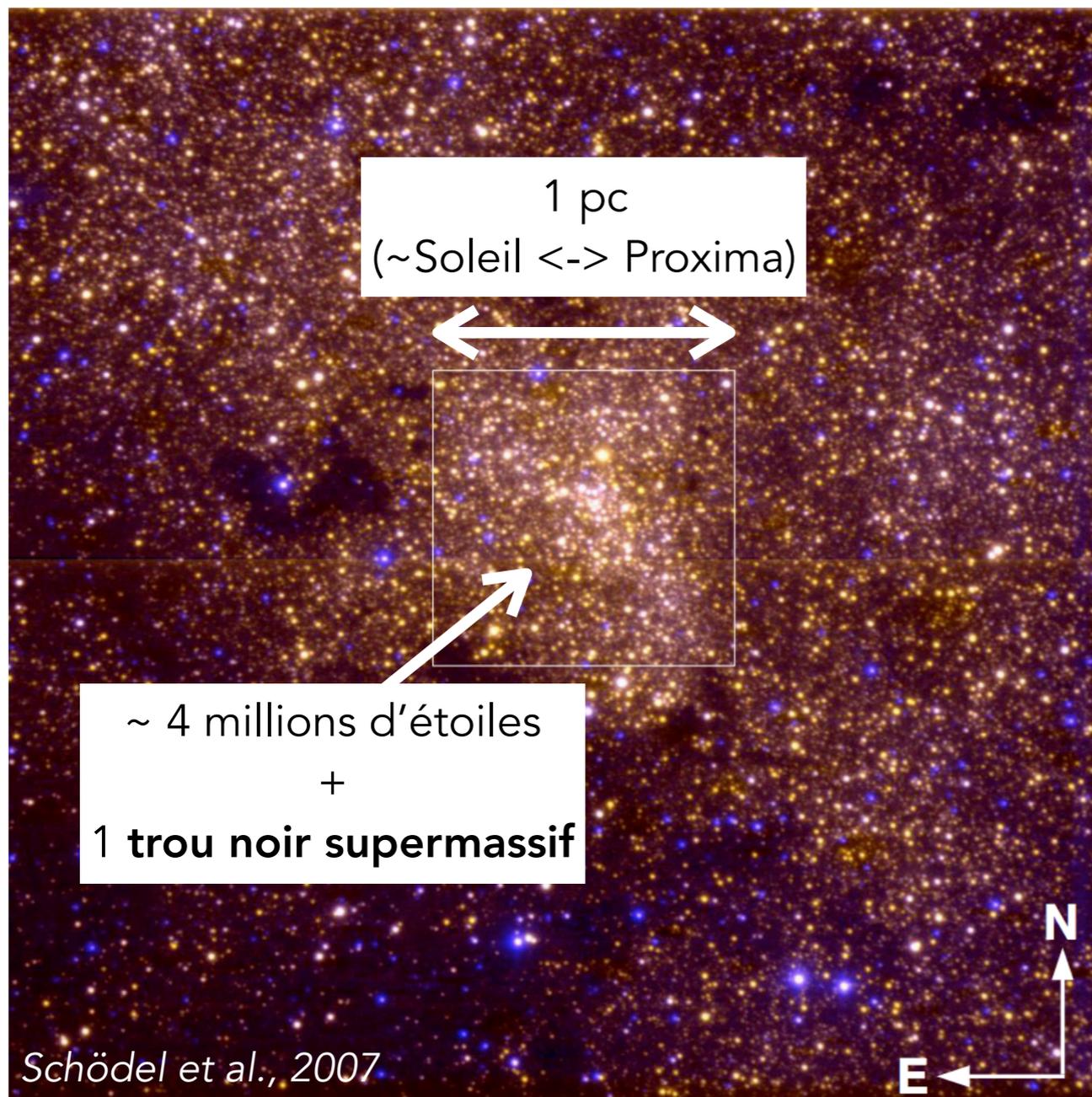
SgrA*, au centre de la Voie Lactée



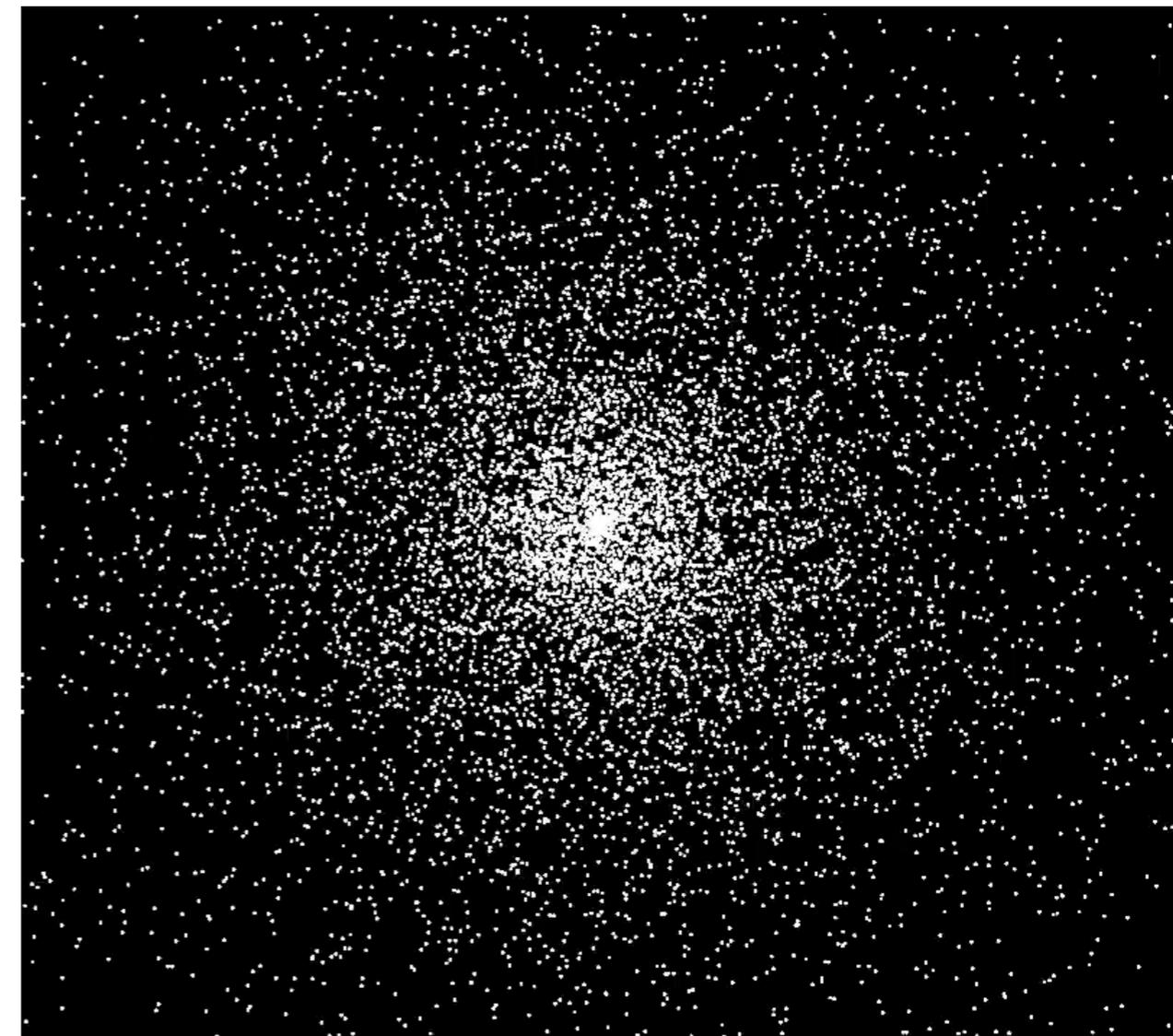
Quelle est la diète des **trous noirs supermassifs** ?

Un environnement extrêmement dense

Se comporte comme un **gaz d'étoiles**



Observations du VLT



Simulations numériques

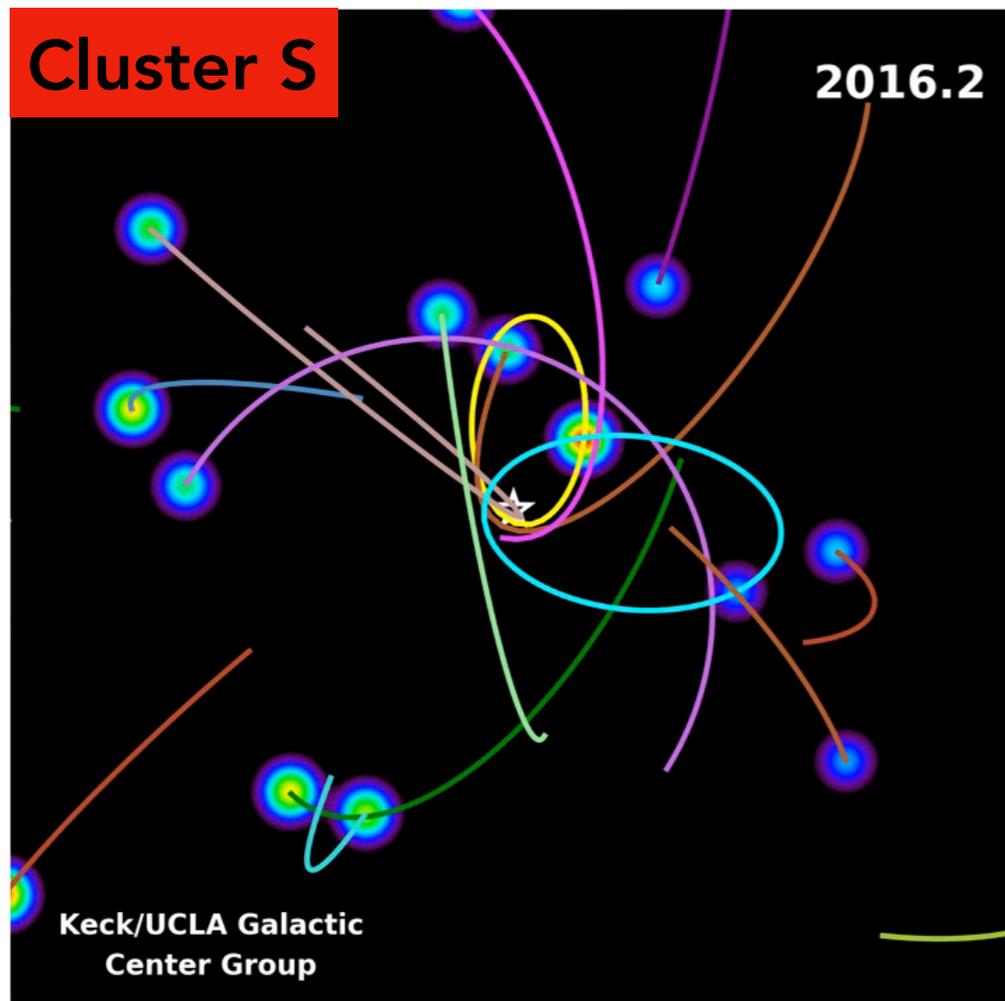
Une dynamique simple ?

Le trou noir central est **supermassif**

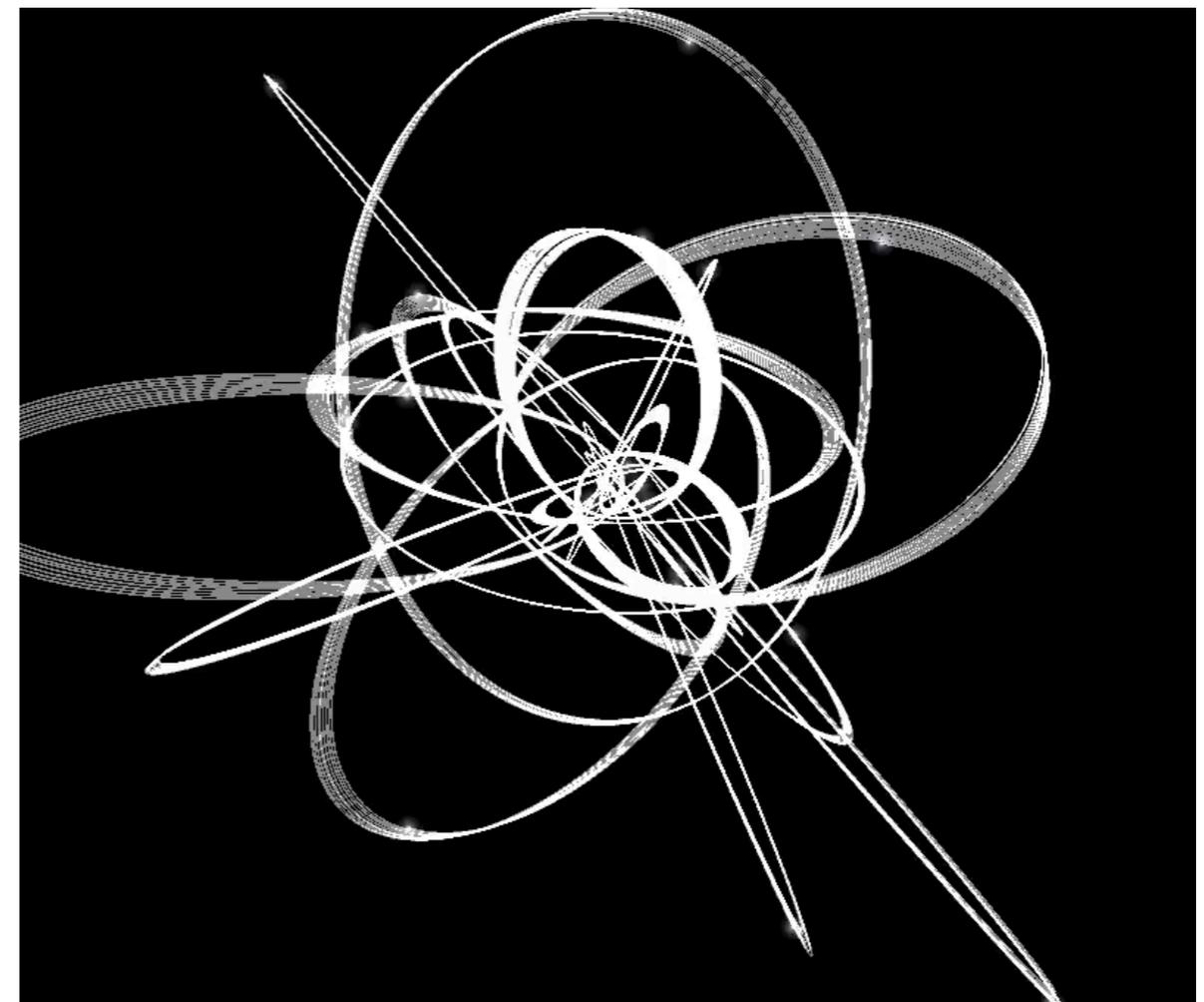
$$M_{\text{SgrA}} \simeq 4,200,000 \times M_{\text{Soleil}}$$

vs.

$$M_{\text{Soleil}} \simeq 330,000 \times M_{\text{Terre}}$$



Observations du Keck



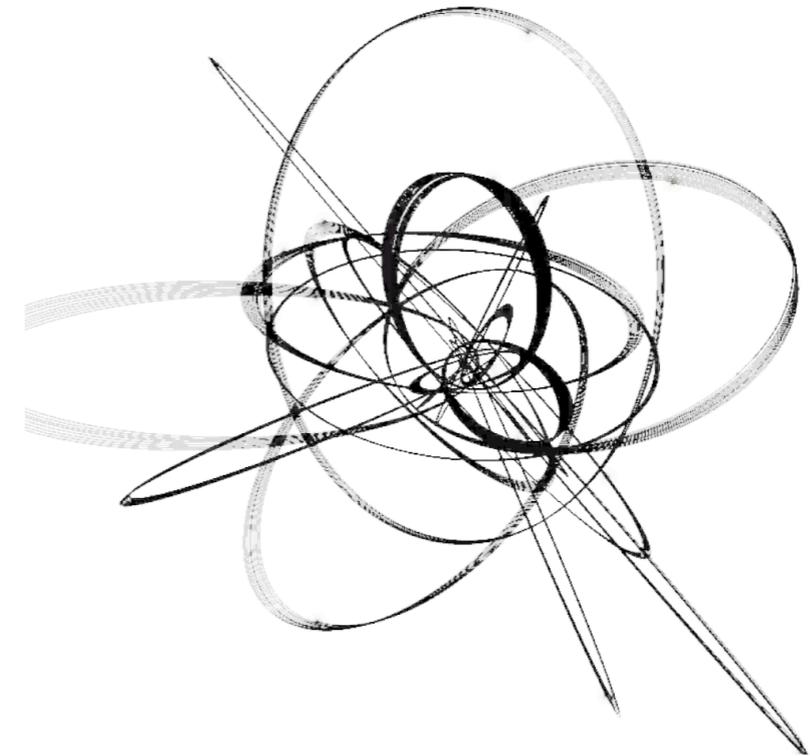
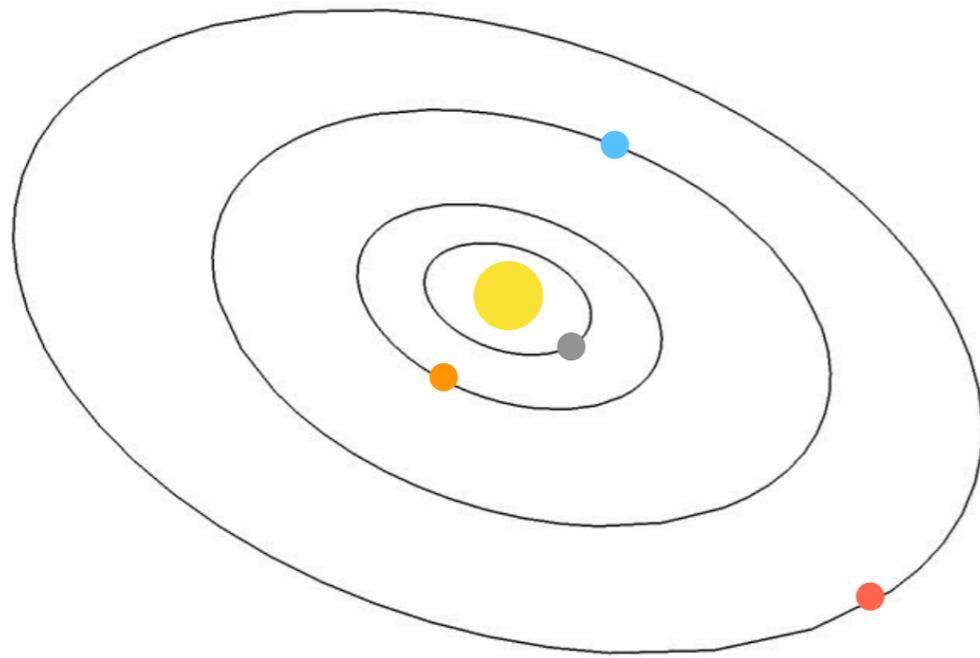
Simulations numériques

Comme la Terre autour du Soleil, les étoiles suivent des **orbites Képlériennes**.

Systemes Képlériens

Systeme solaire

Centre galactique



Planètes

Objet léger

Etoiles

Soleil

Objet lourd

Trou noir

$N \simeq 10$

Nombre de "particules"

$N \simeq 10^6$

Symétrie **planaire**

Forme du système

Symétrie **sphérique**

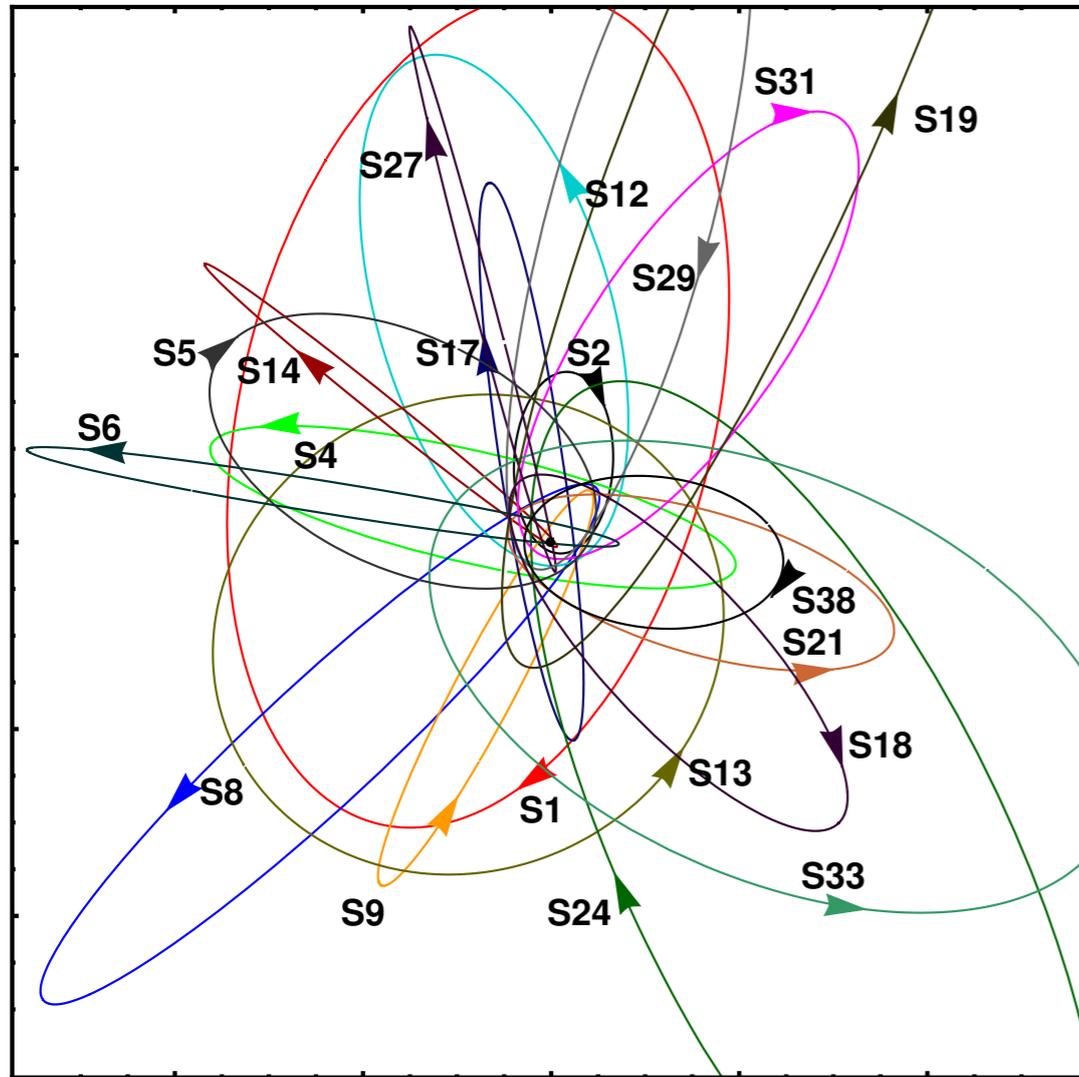
Orbites **quasi-circulaires**

Forme des orbites

Orbites **très excentriques**

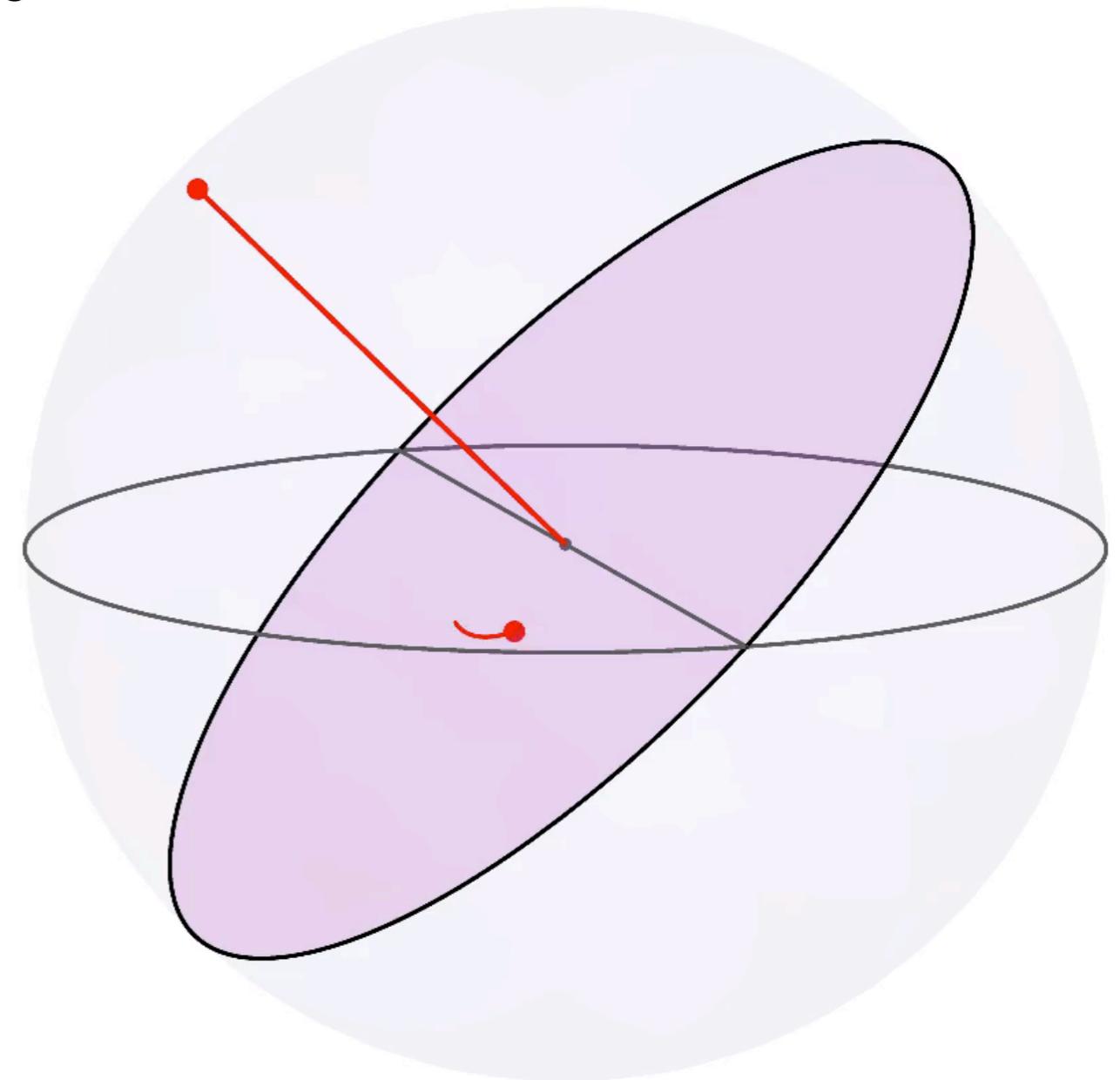
Une orbite Képlérienne

Le trou noir domine l'évolution des étoiles



Gillessen et al., 2009

Observations du VLT

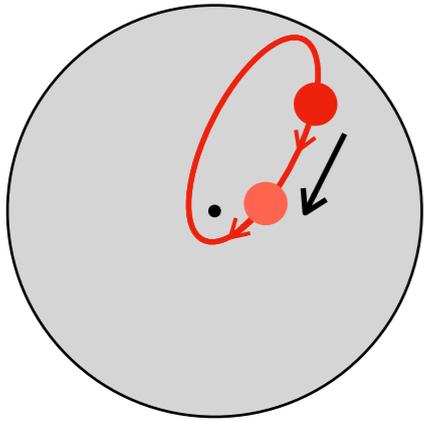


Orbite typique

Qu'est-ce qu'une orbite ?

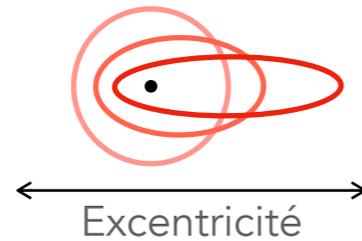
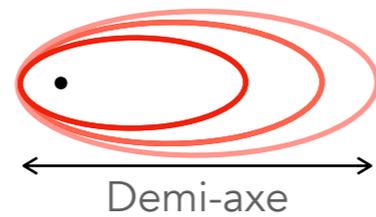
Décrire une orbite

Position de l'étoile

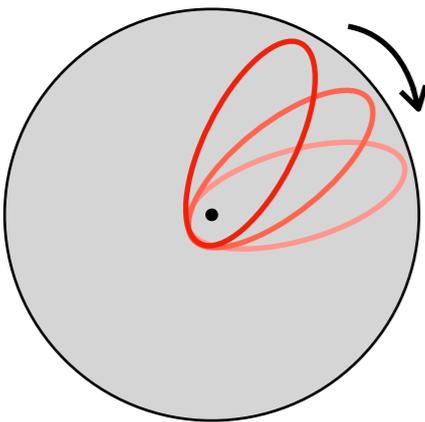


Mouvement dynamique

Forme de l'orbite

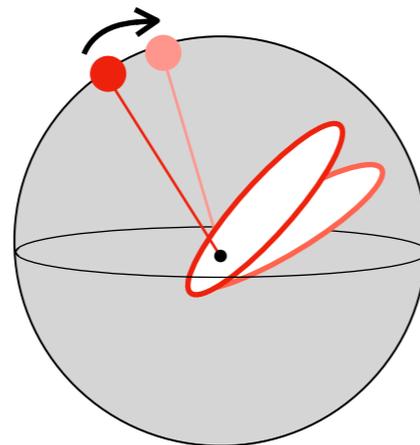


Phase de l'orbite

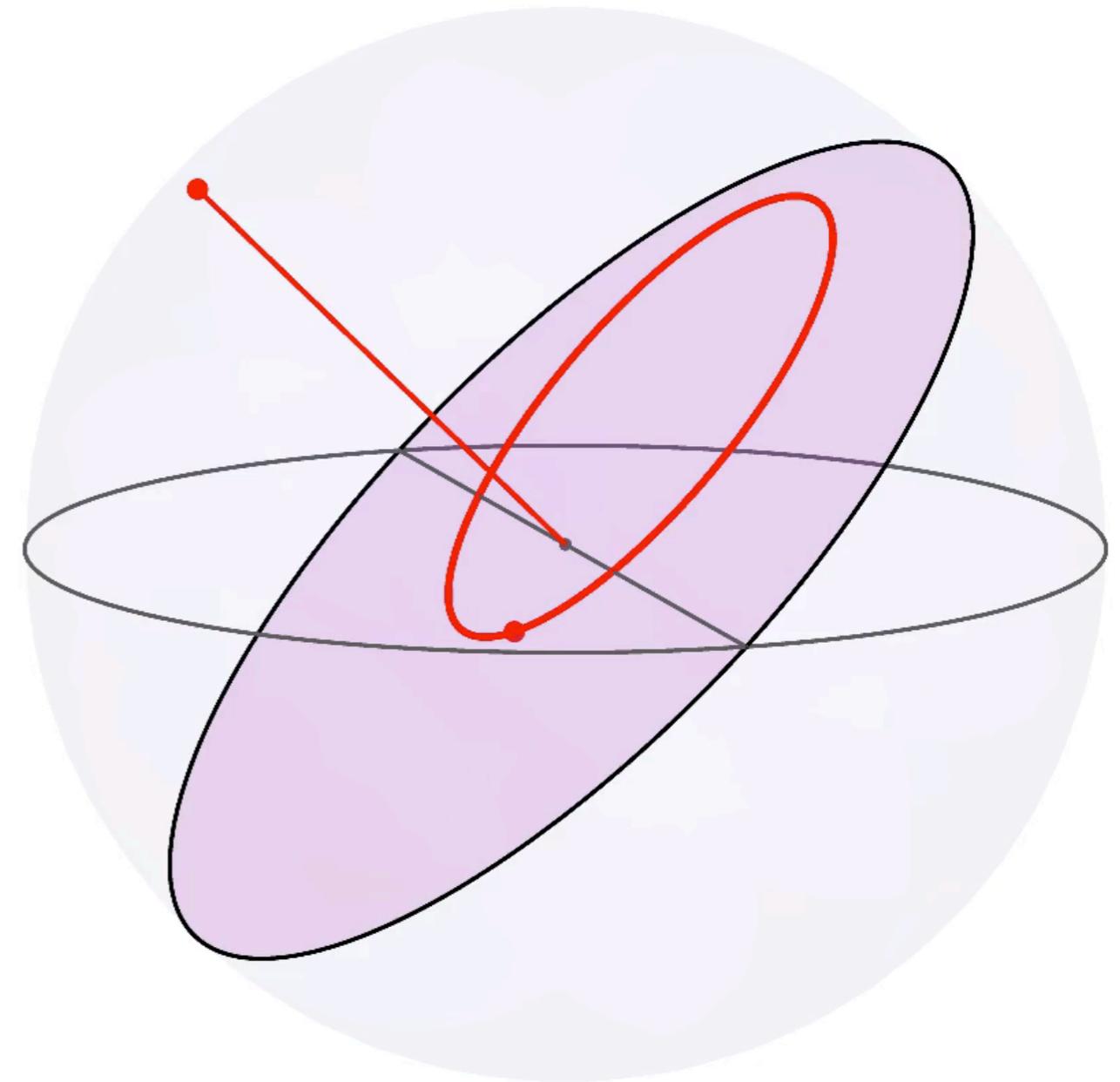


Phase du péricentre

Orientation de l'orbite



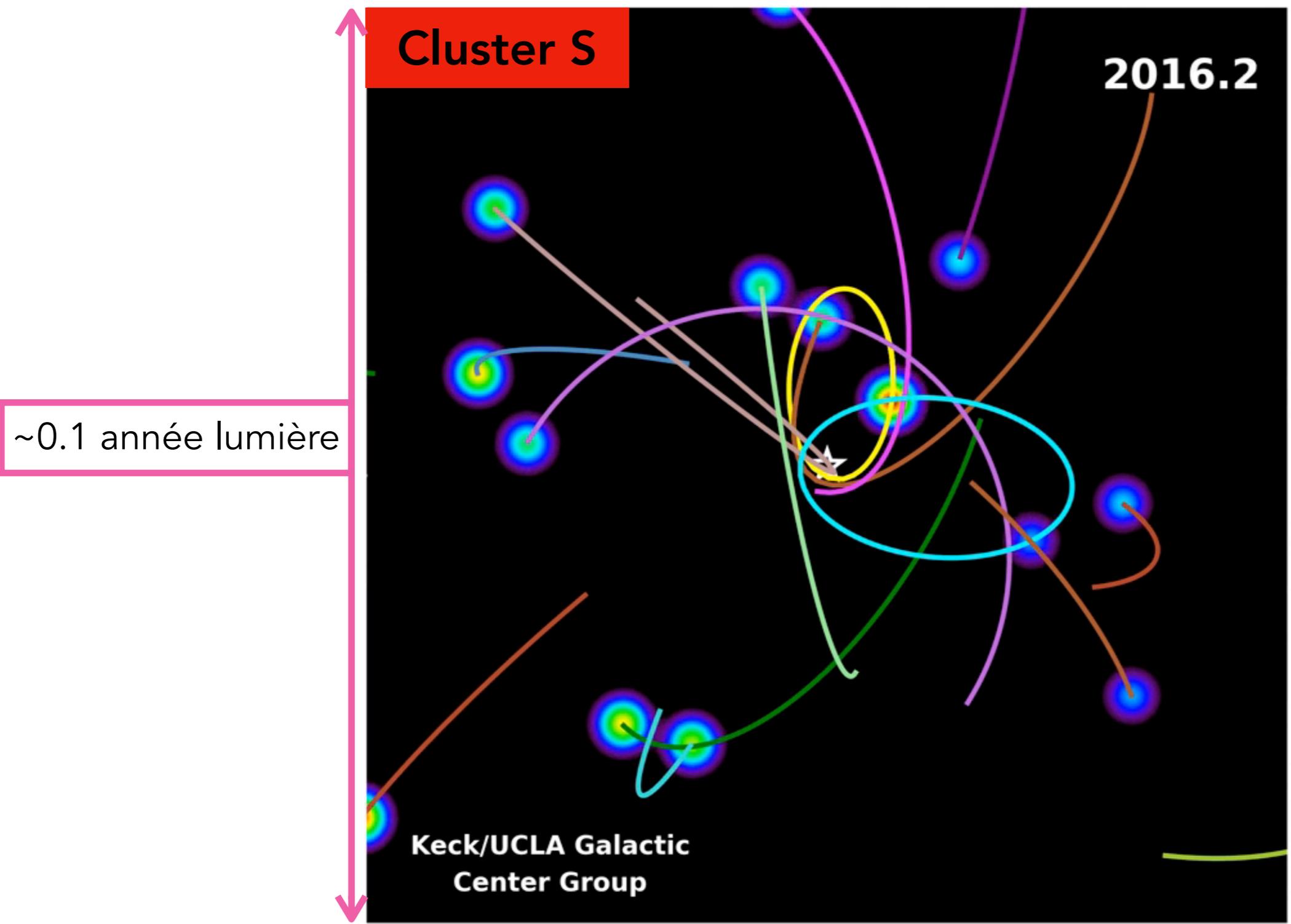
Orientation spatiale



Orbite Képlérienne

Comment observer ces systèmes ?

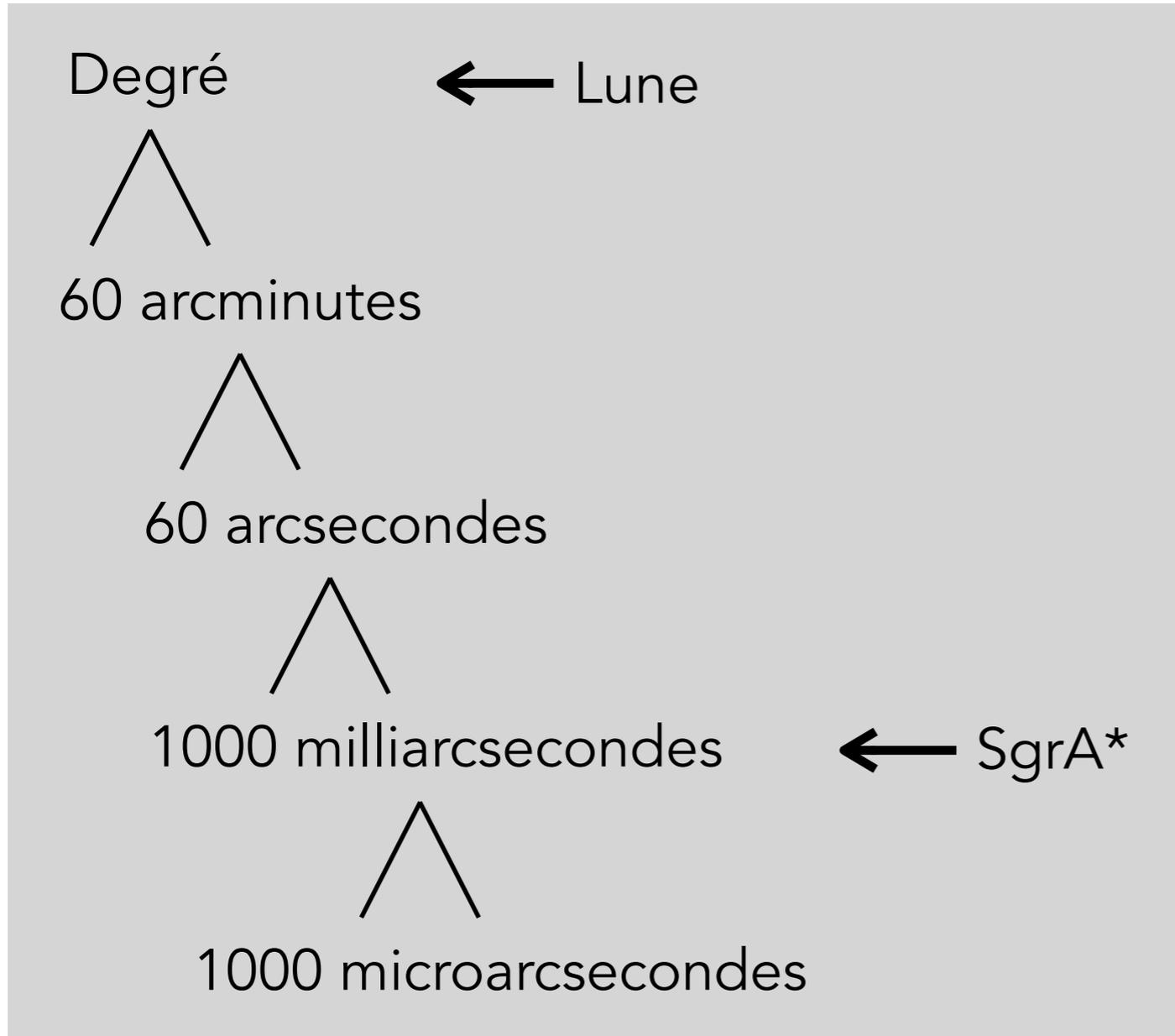
SgrA*



Comment observer encore plus précisément cette région ?

Résolution angulaire

Aptitude à distinguer deux objets proches dans le ciel



0.5 degrés, i.e. 30 arcminutes

Résolution angulaire

Aptitude à distinguer deux objets proches dans le ciel

Degré



60 arcminutes



60 arcsecondes



1000 milliarcsecondes



1000 microarcsecondes

- + Œil humain
1 arcminute
- + Perturbations atmosphériques
1 arcseconde
- + Télescope Hubble
50 milliarcsecondes
- + Télescope terrestre + optique adaptative
50 milliarsecondes
- + Horizon de SgrA*
10 microarcsecondes

Grand télescope => Meilleure **résolution**

Mais

Résolution ~ diamètre miroir

Coût ~ (diamètre miroir)³

Interférométrie

Plutôt que de construire un gros télescope, on en construit de nombreux petits dont on combine les mesures

Avantages :

- + Même résolution angulaire à bien plus faible coût

Désavantages :

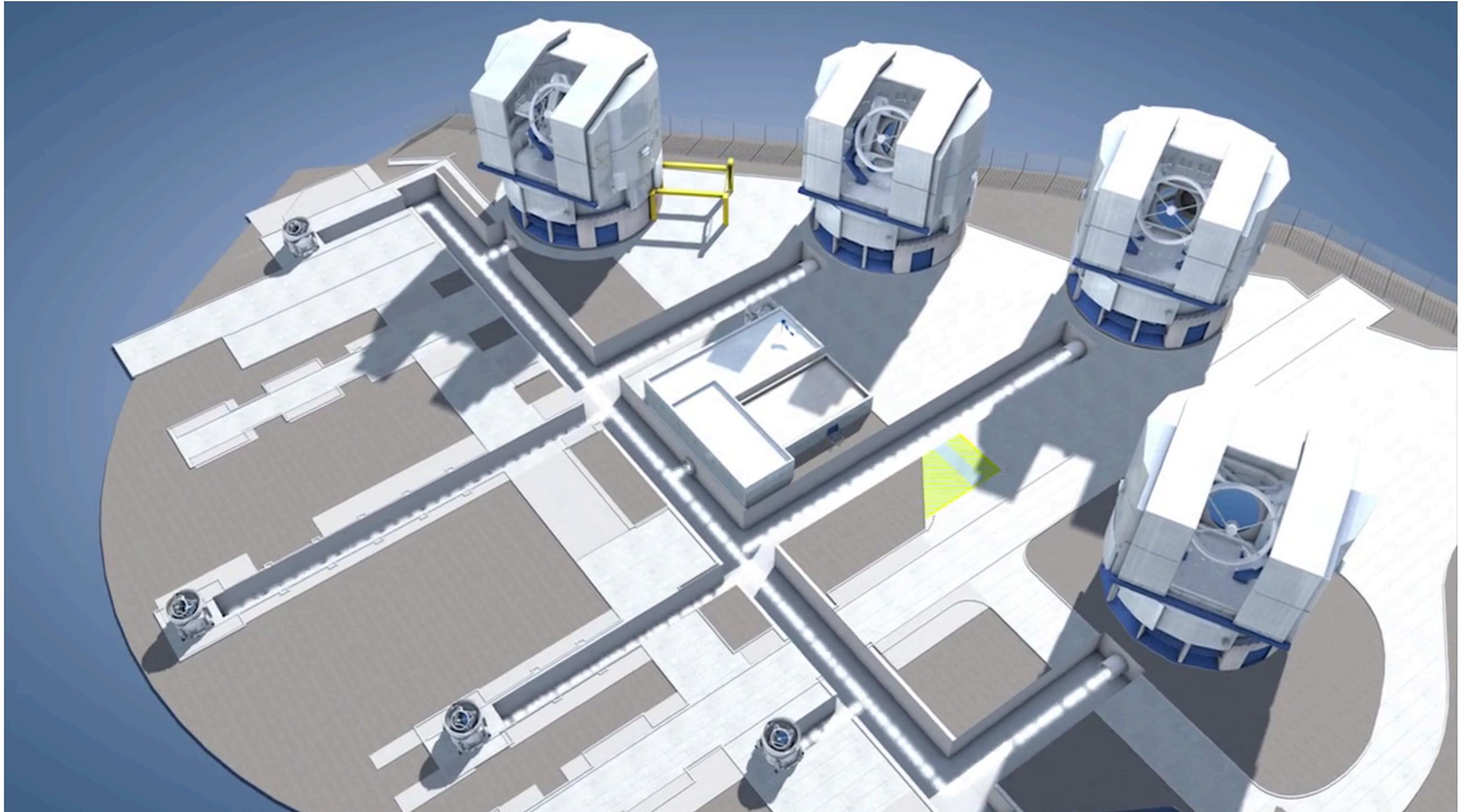
- + Bien moins de lumière collectée
- + Certaines informations sur l'image sont perdues
- + Il faut combiner les signaux des deux télescopes sans perdre l'information sur la phase



Interféromètre Gravity – VLTI – Chili



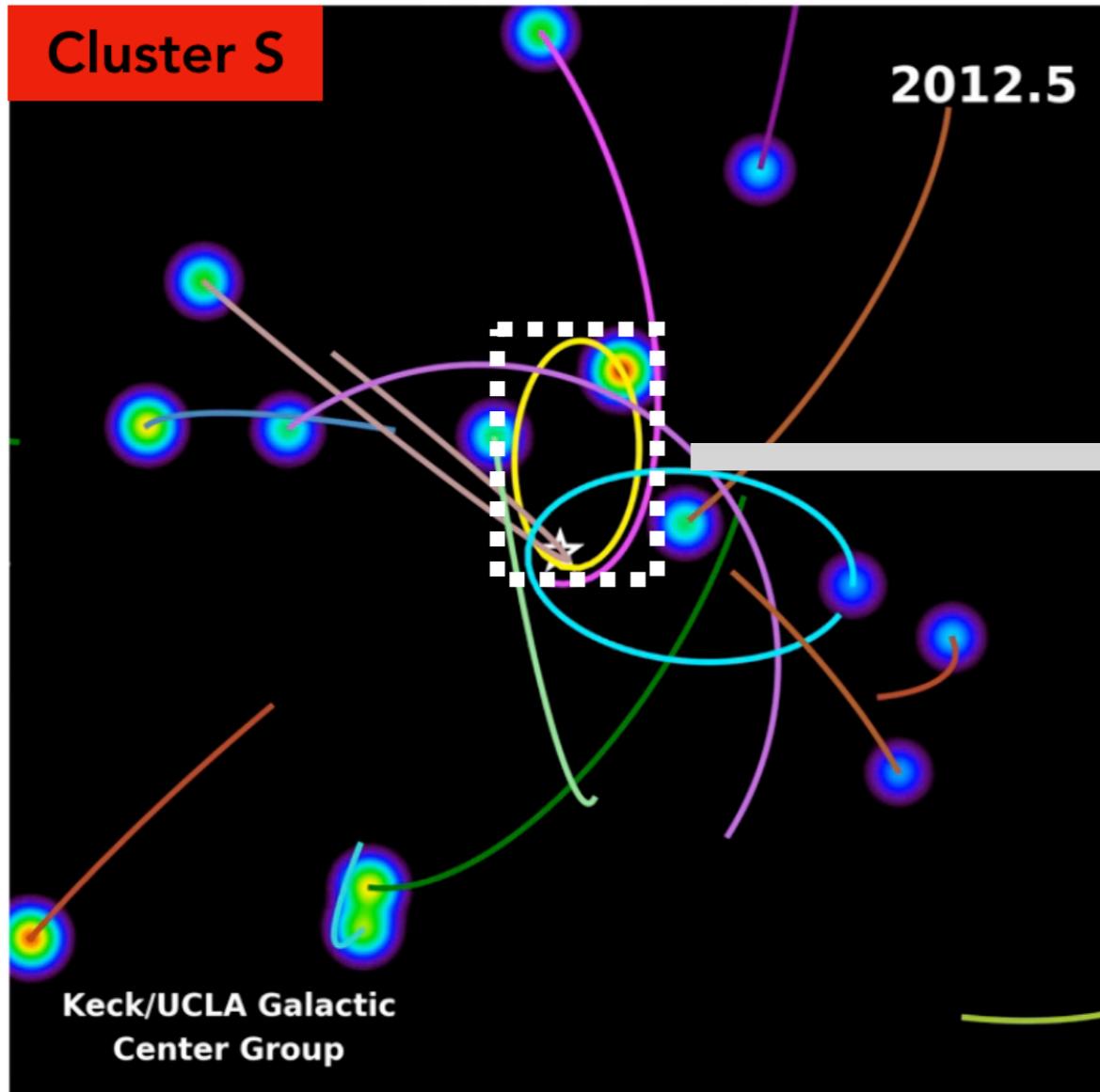
Very Large Telescope Interferometer – VLTI



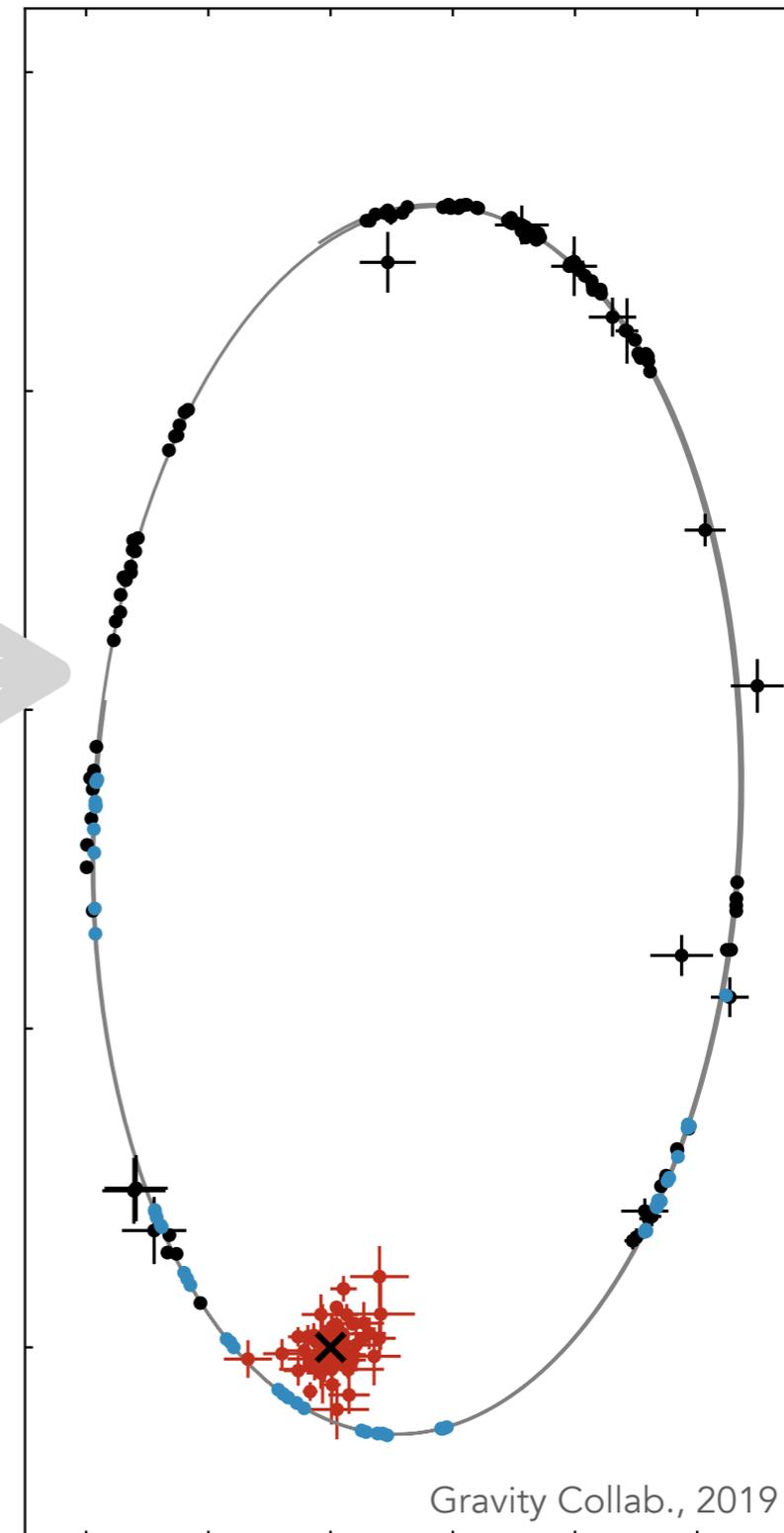
Equivalent à un télescope de **130m** de diamètre

Observation de S2

Observation de S2 (Gravity)

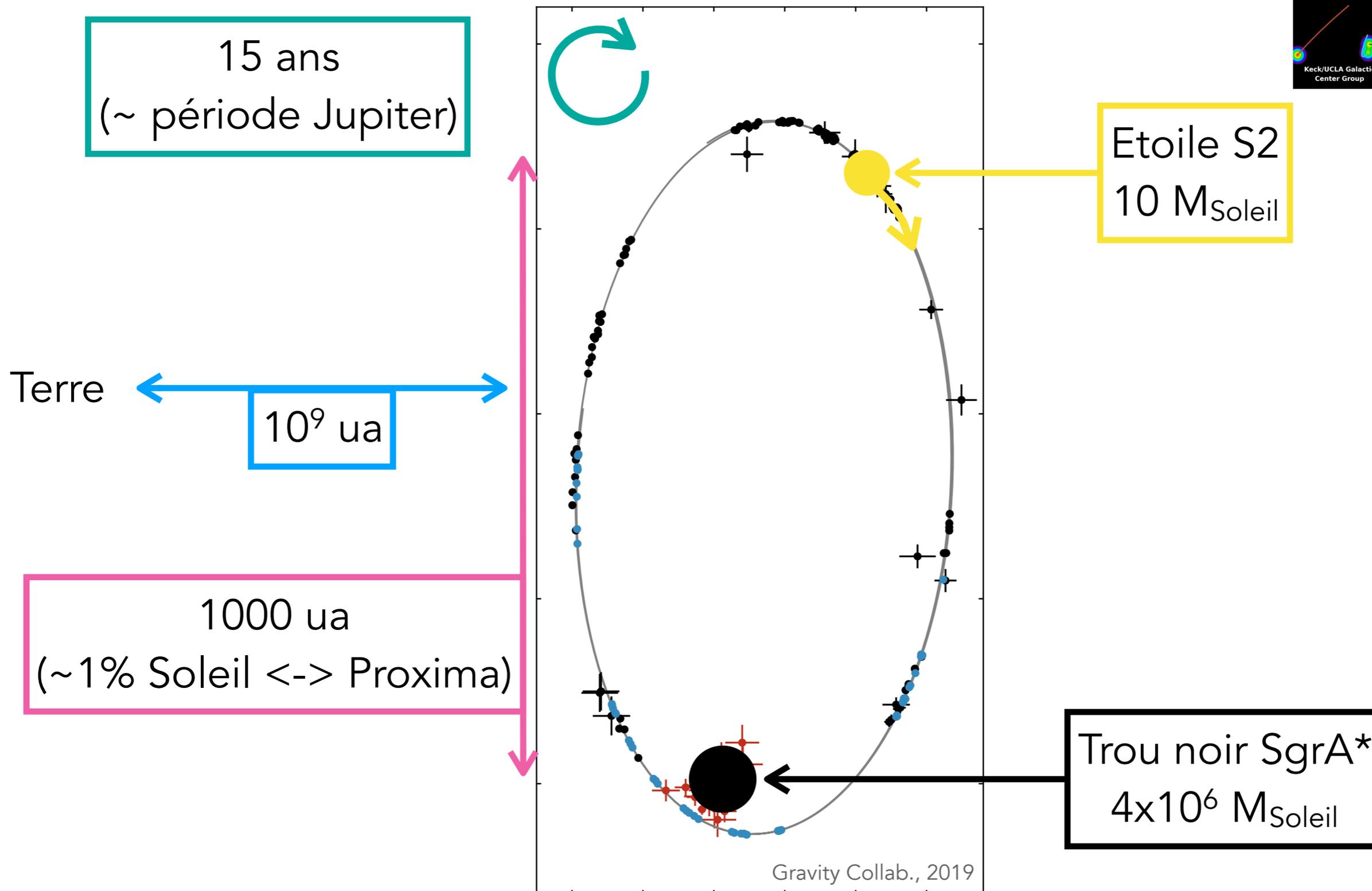
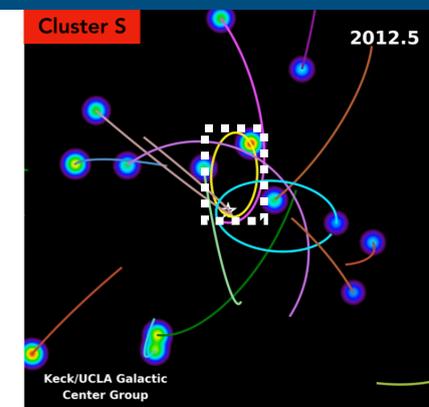


Télescope classique



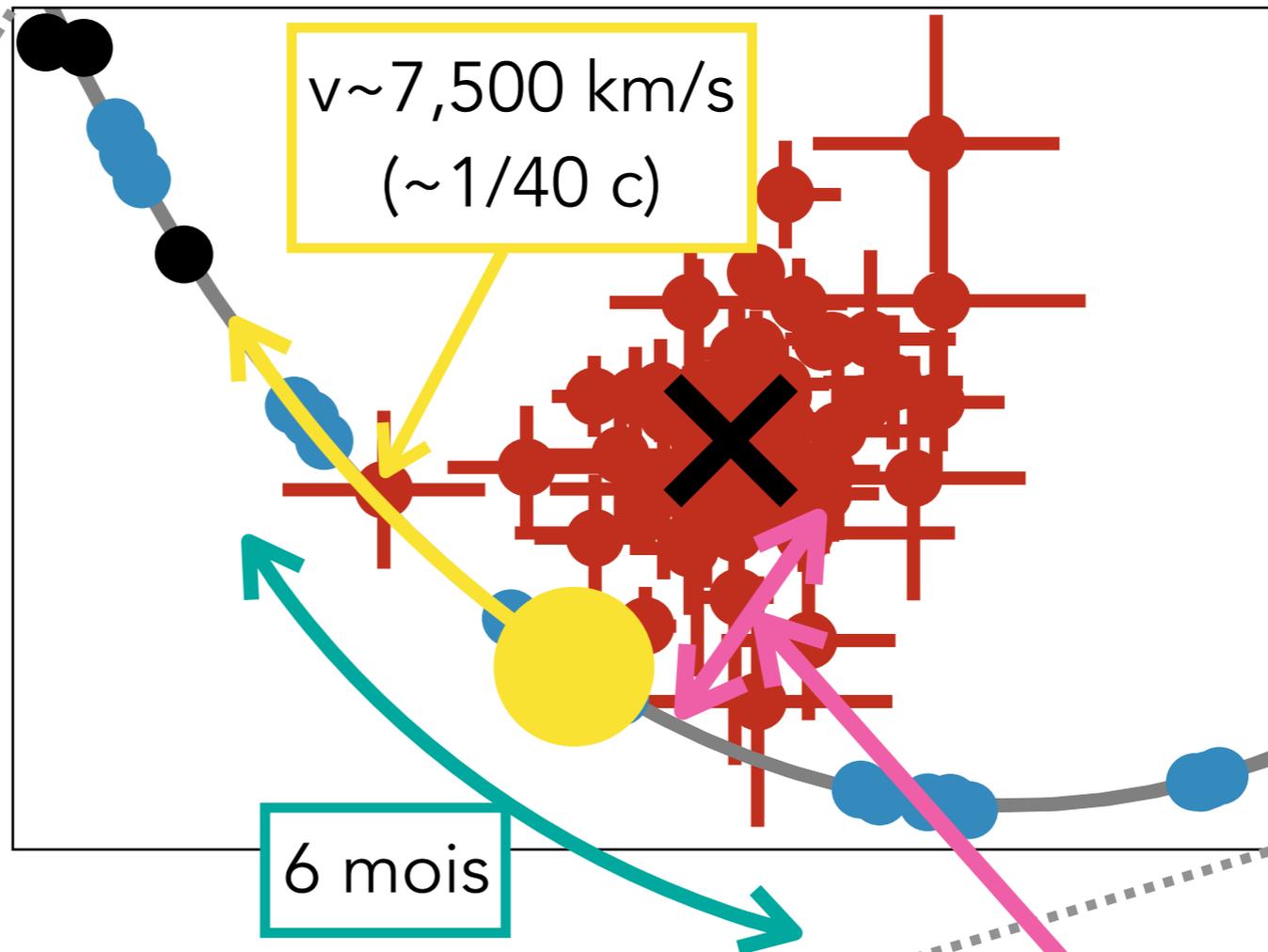
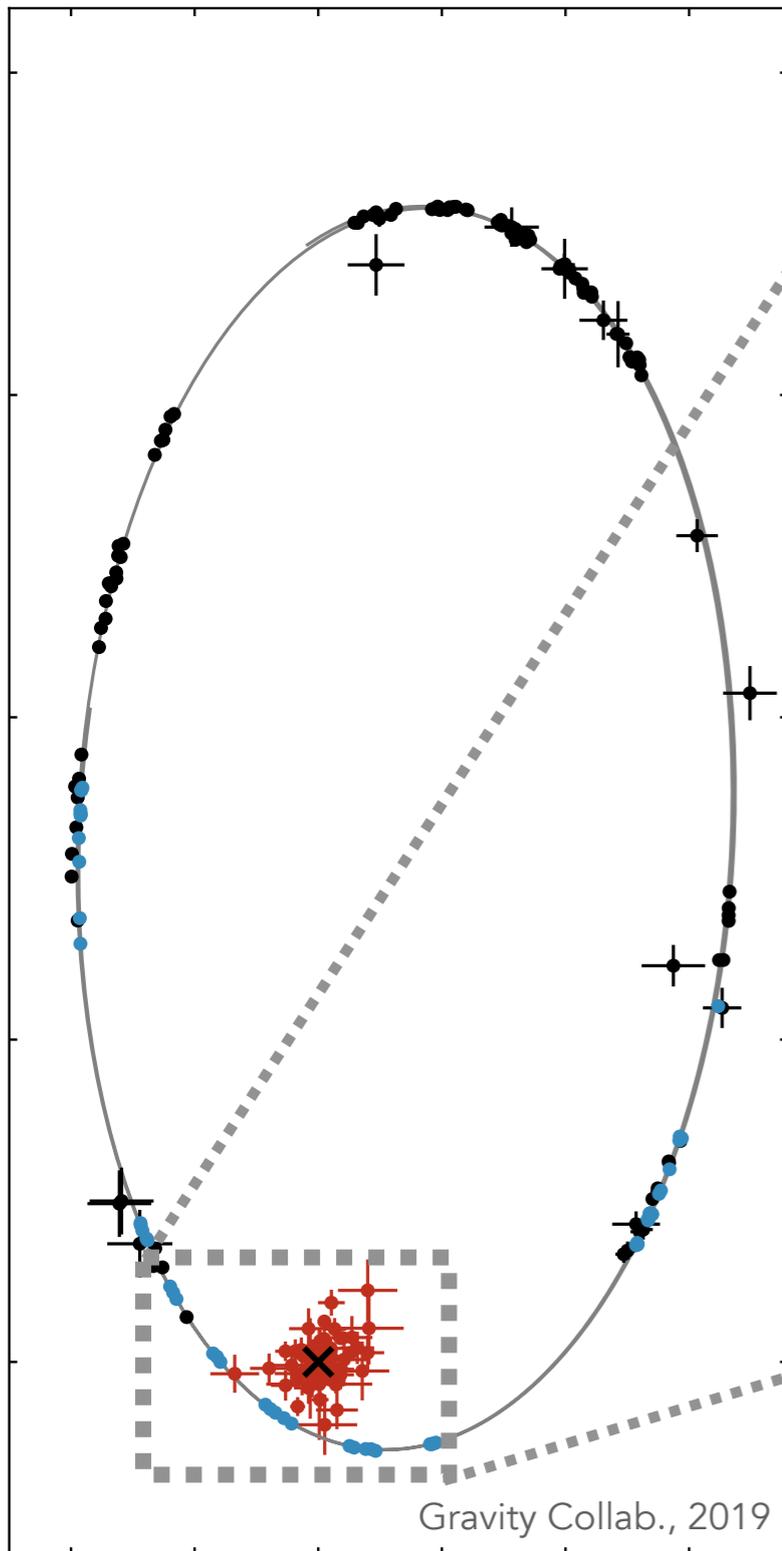
Télescope interférométrique

Observation de S2 (Gravity)

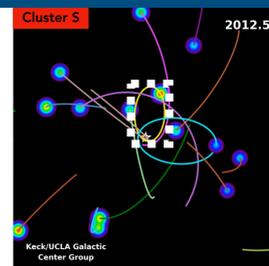


Passage au péricentre

Observation de S2 (Gravity)

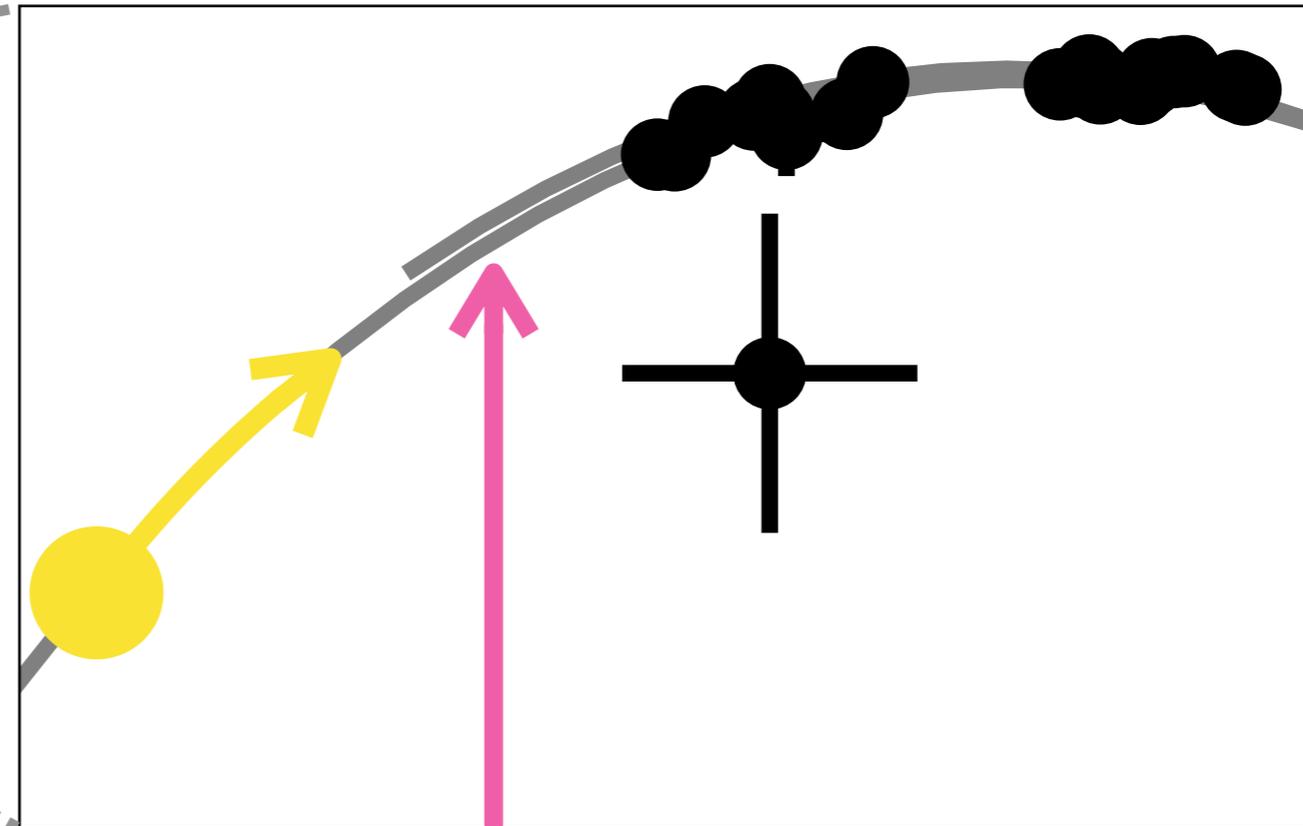
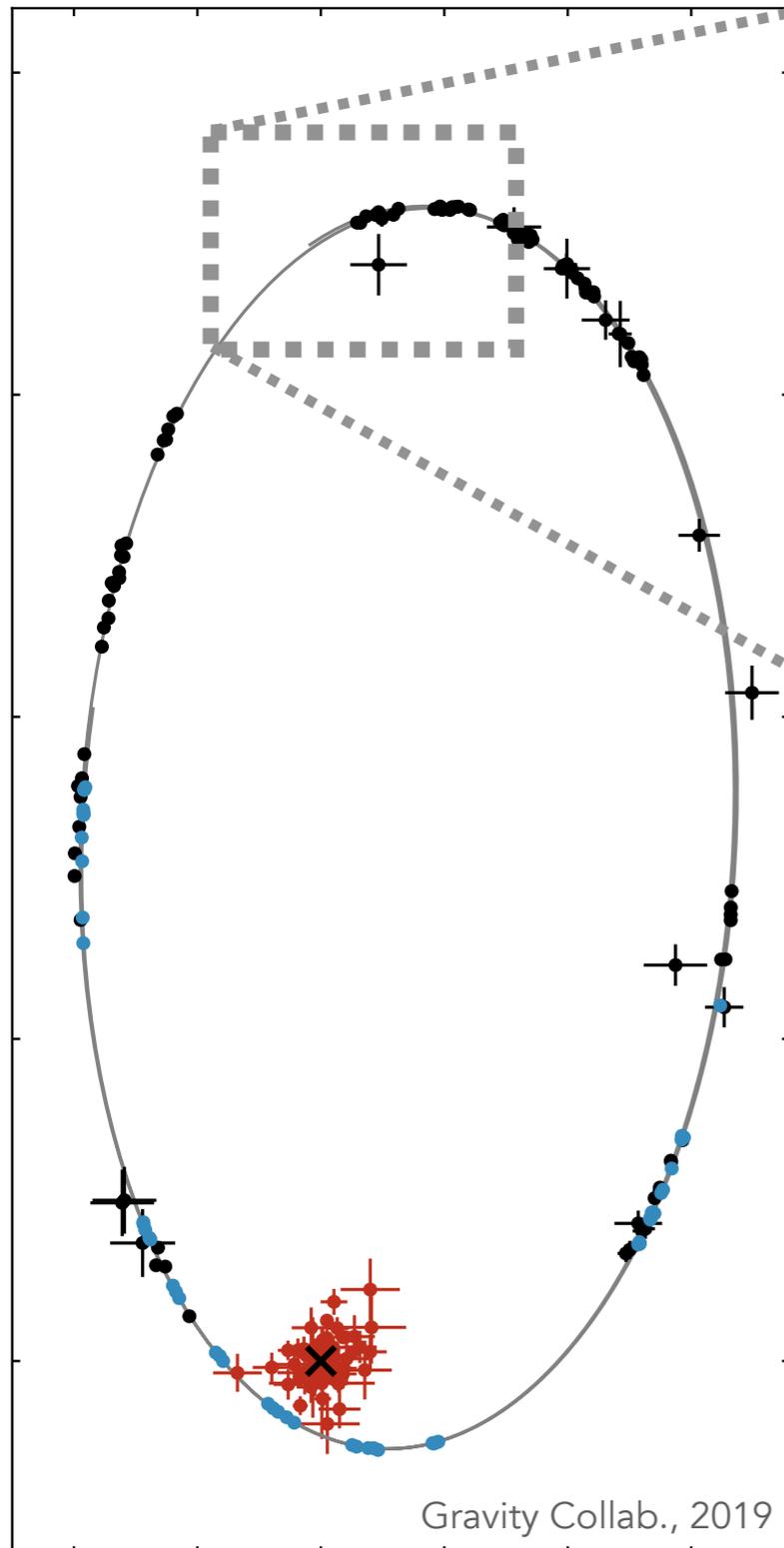


100 ua
($\sim 2x$ Soleil \leftrightarrow Neptune)



Précession relativiste

Observation de S2 (Gravity)

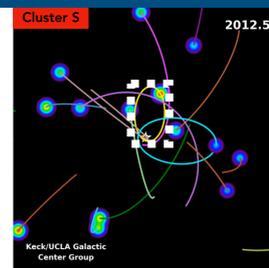


Précession de l'orbite
12' (=0.2°) par orbite

L'étoile S2 est en avance :
+ Orbite **non fermée**
+ Précession **prograde**

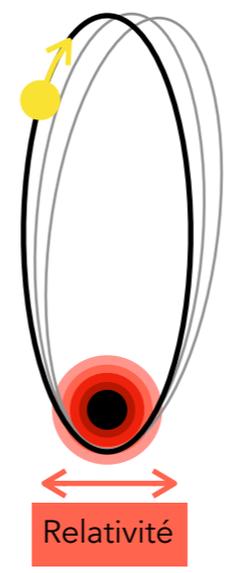
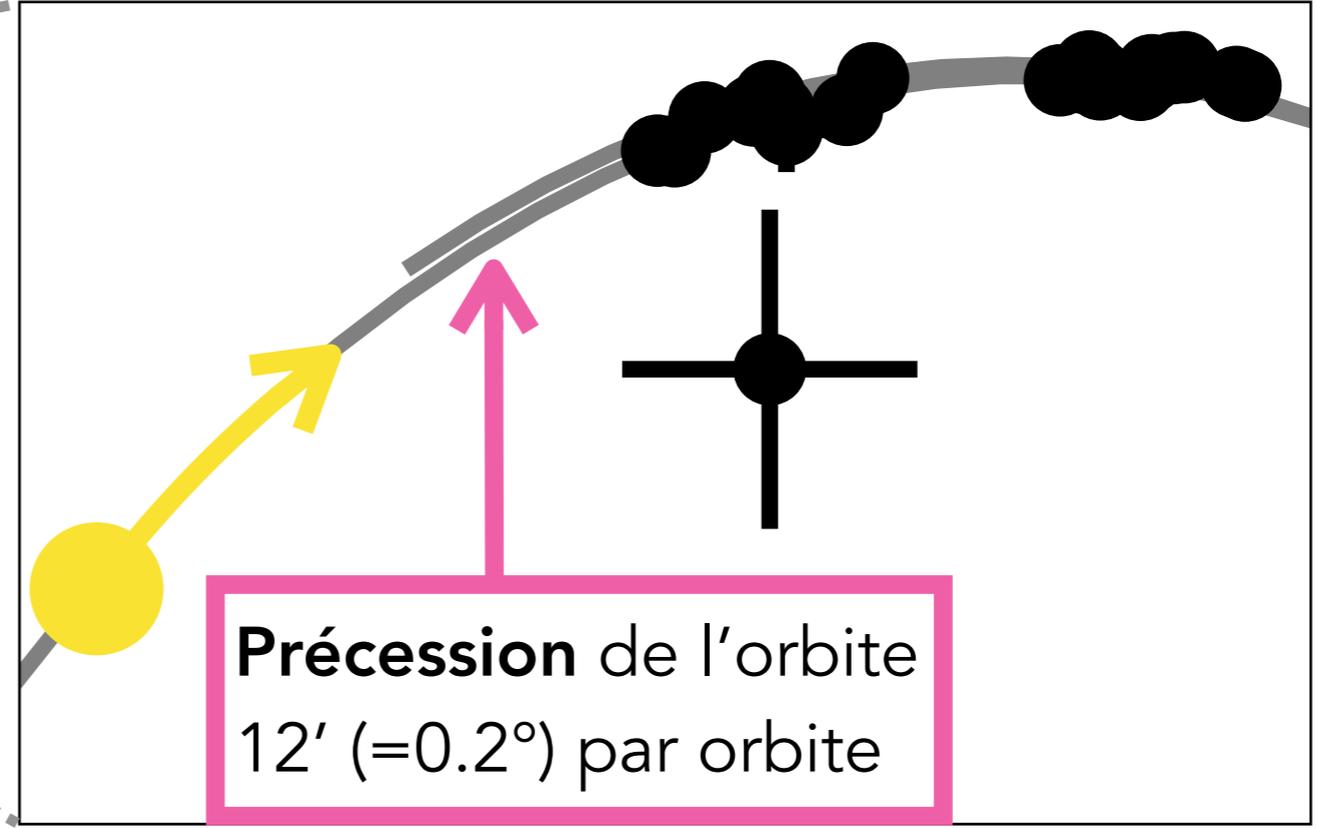
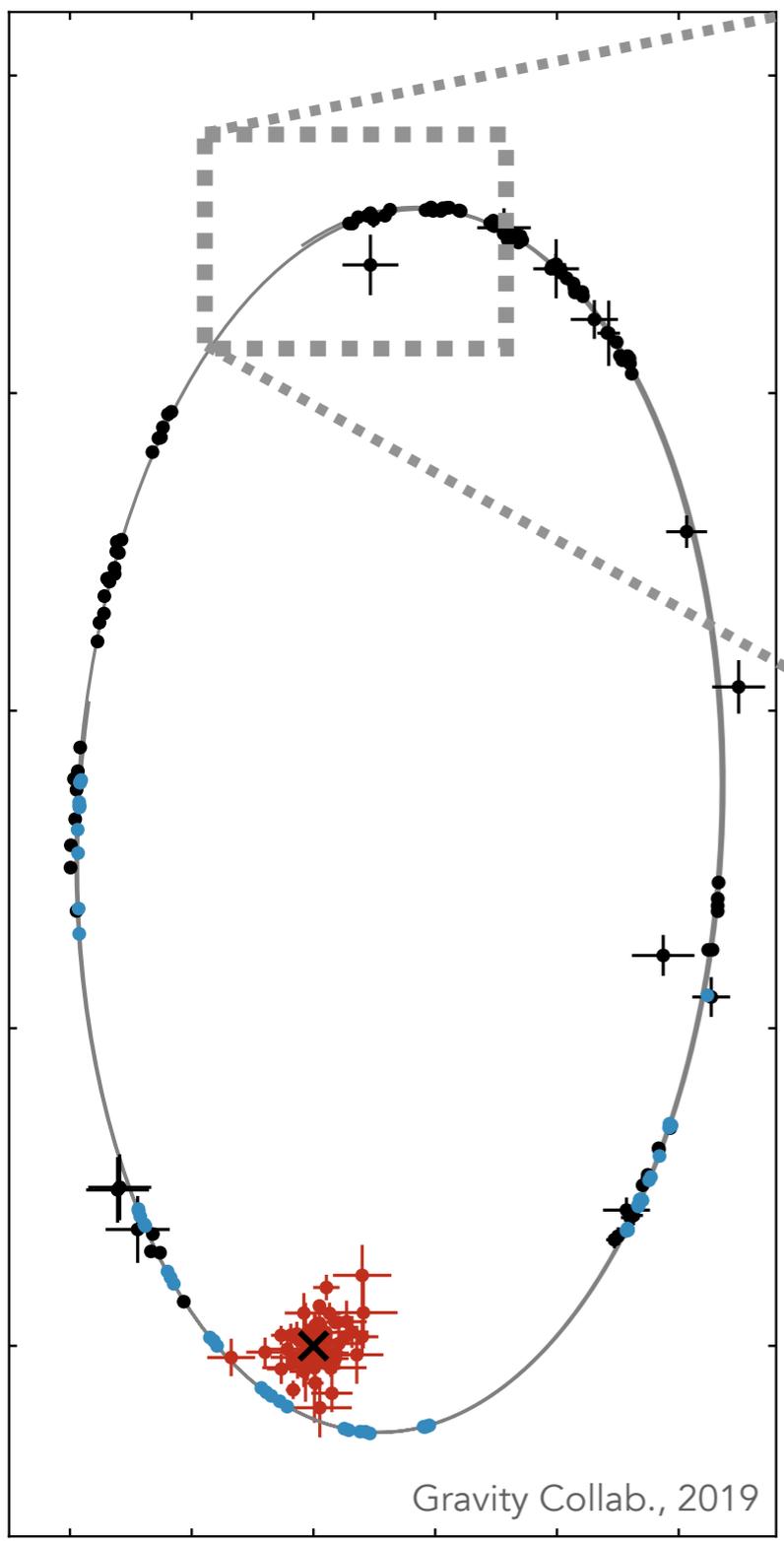


Effets relativistes



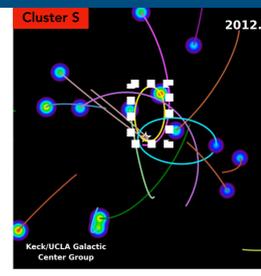
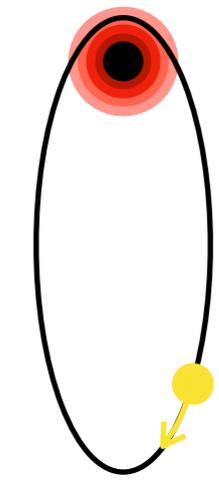
Précession relativiste

Observation de S2 (Gravity)



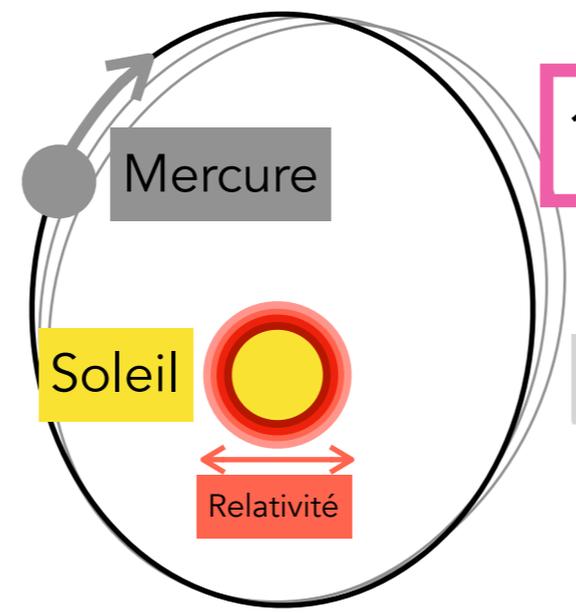
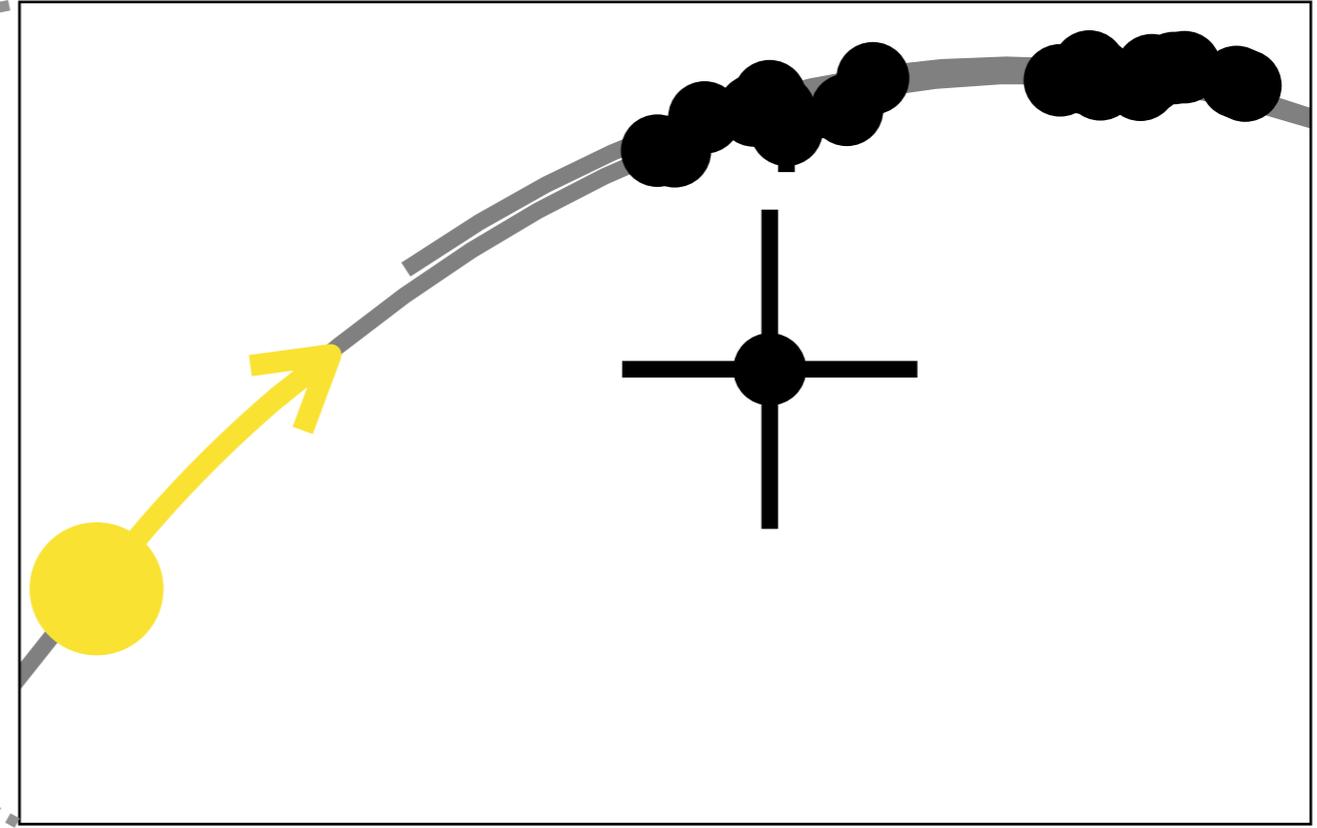
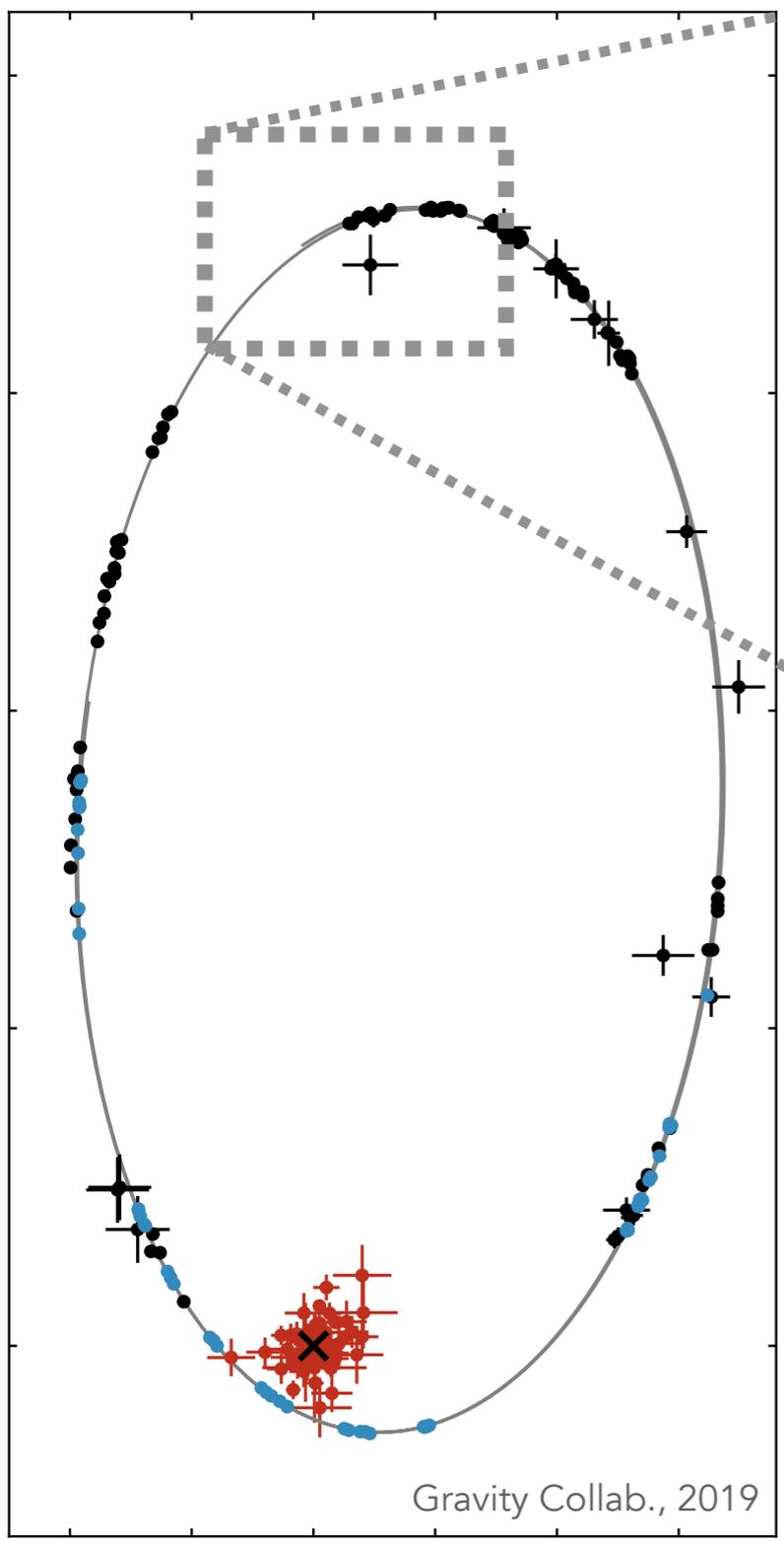
Précession du péricentre →

~ 1000 orbites
~ 15,000 ans



Précession relativiste

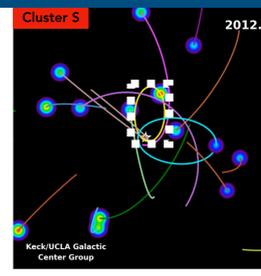
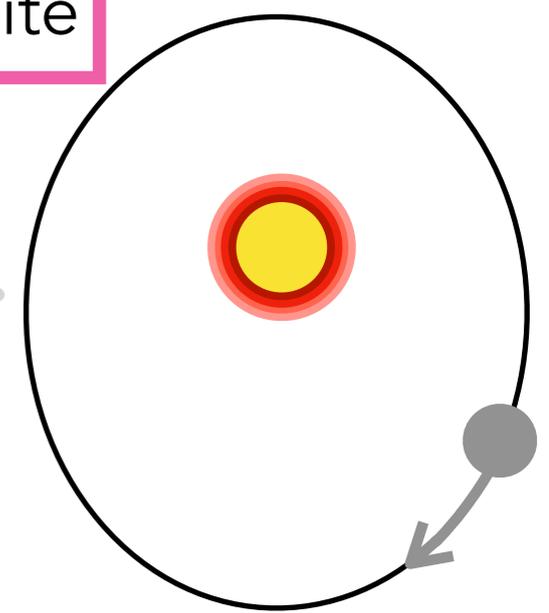
Observation de S2 (Gravity)



1''(=0.0002°) par orbite

Précession du péricentre

~ 650,000 orbites
~ 150,000 ans

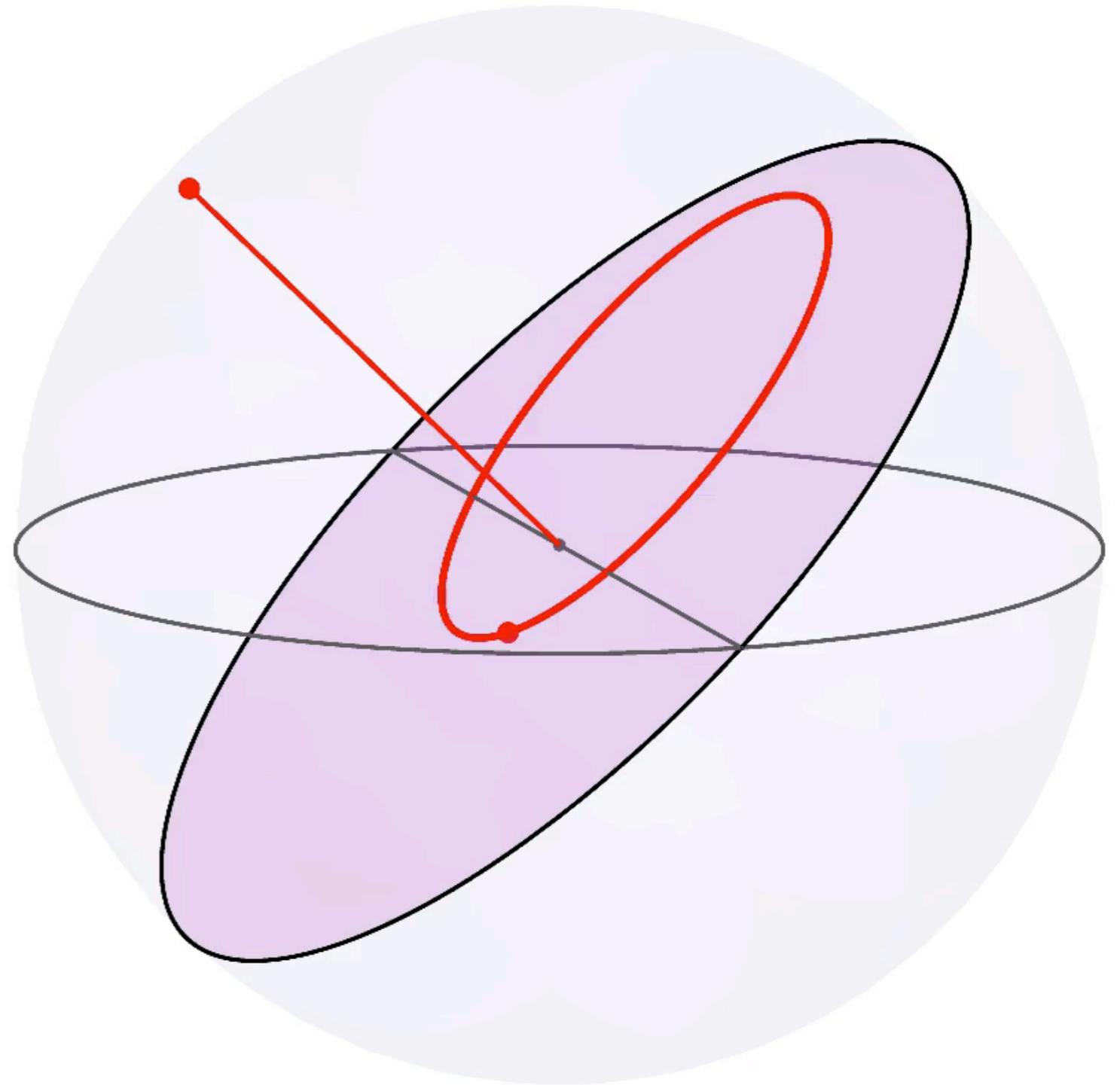


Précession du péricentre

Origines de la **précession** :

- + Effets **relativistes** du trou noir
- + Perturbations des **autres étoiles**

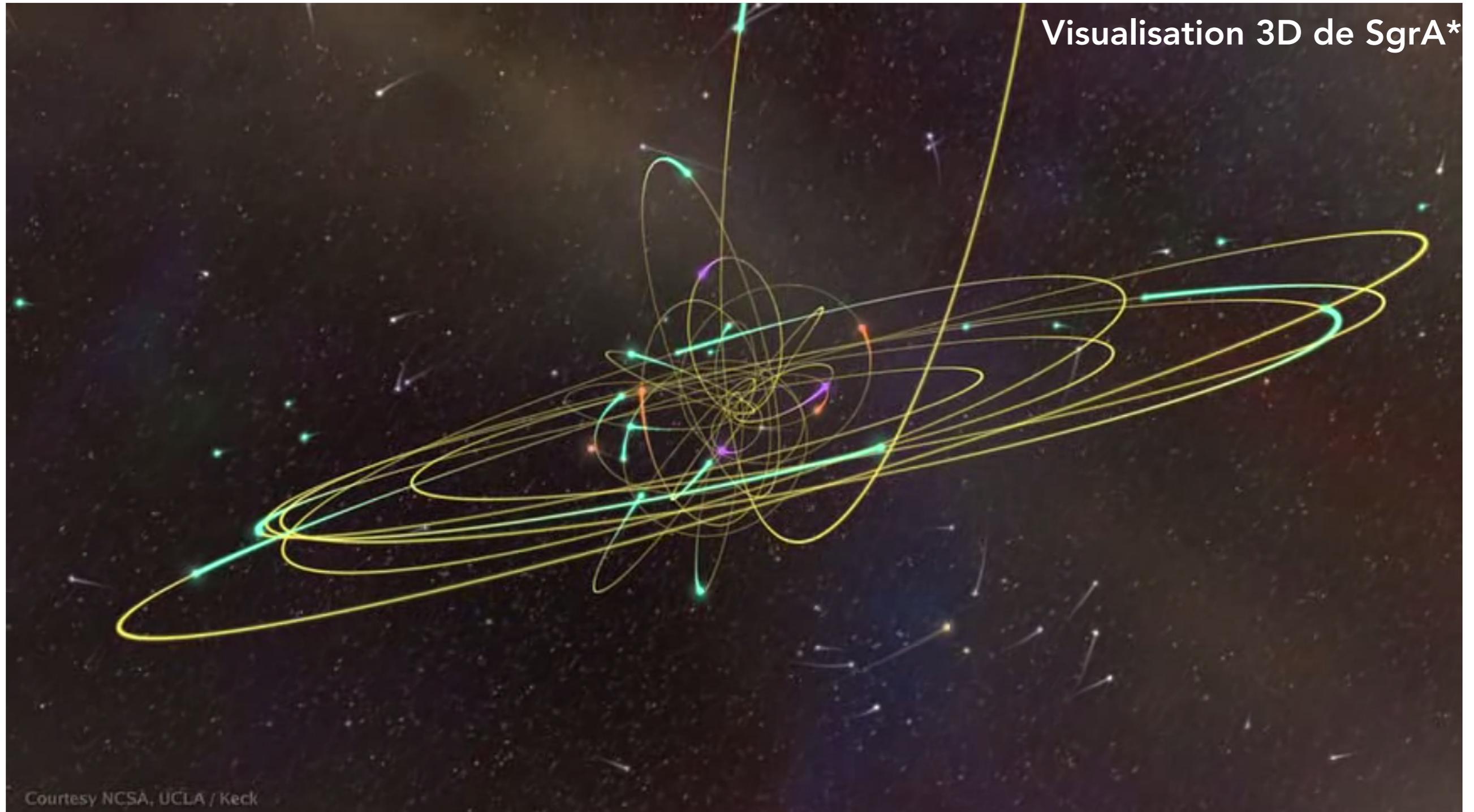
~30,000 ans
pour S2



Les orbites tournent dans leur plan.

Orientation des étoiles

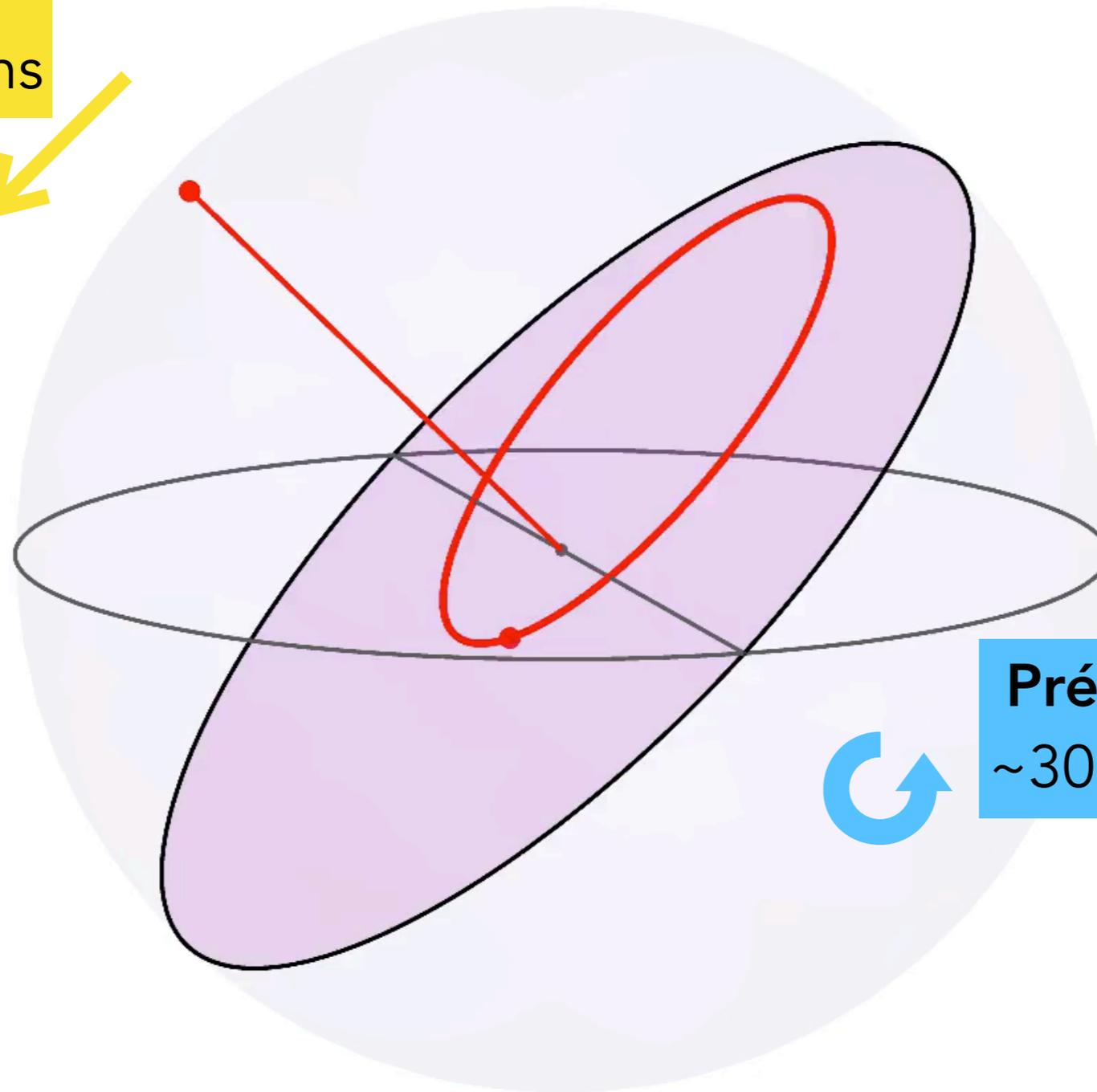
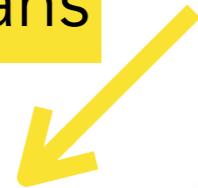
Les orbites sont dans **toutes les directions**



Comment les orbites changent-elles d'**orientations** ?

Les orbites changent aussi d'orientation

Orientation
~1,000,000 ans



Précession
~30,000 ans

Deux échelles de temps :

Précession



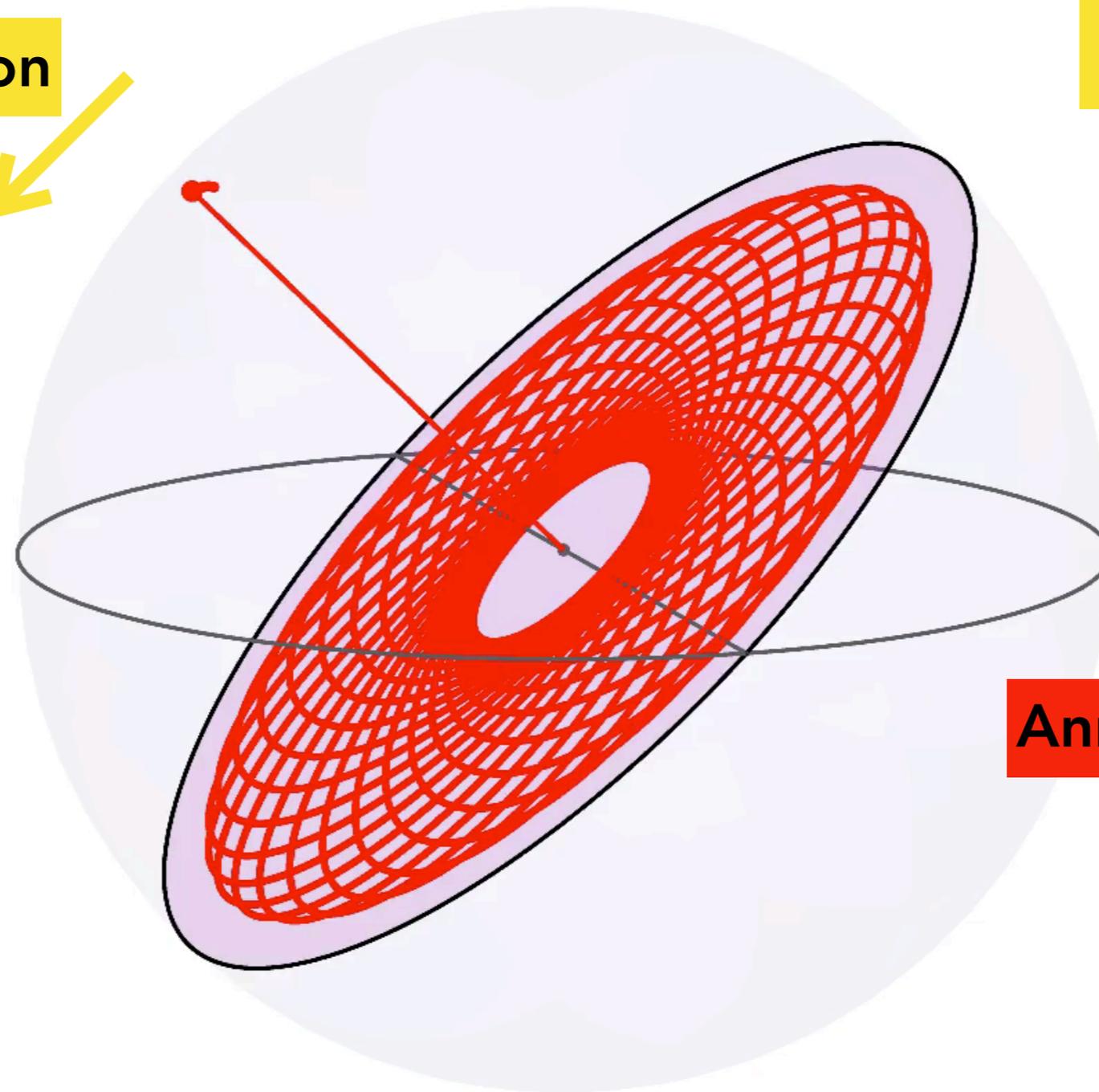
Orientation

Orientation des orbites

Orientation



Temps typique
~1,000,000 ans



Anneau

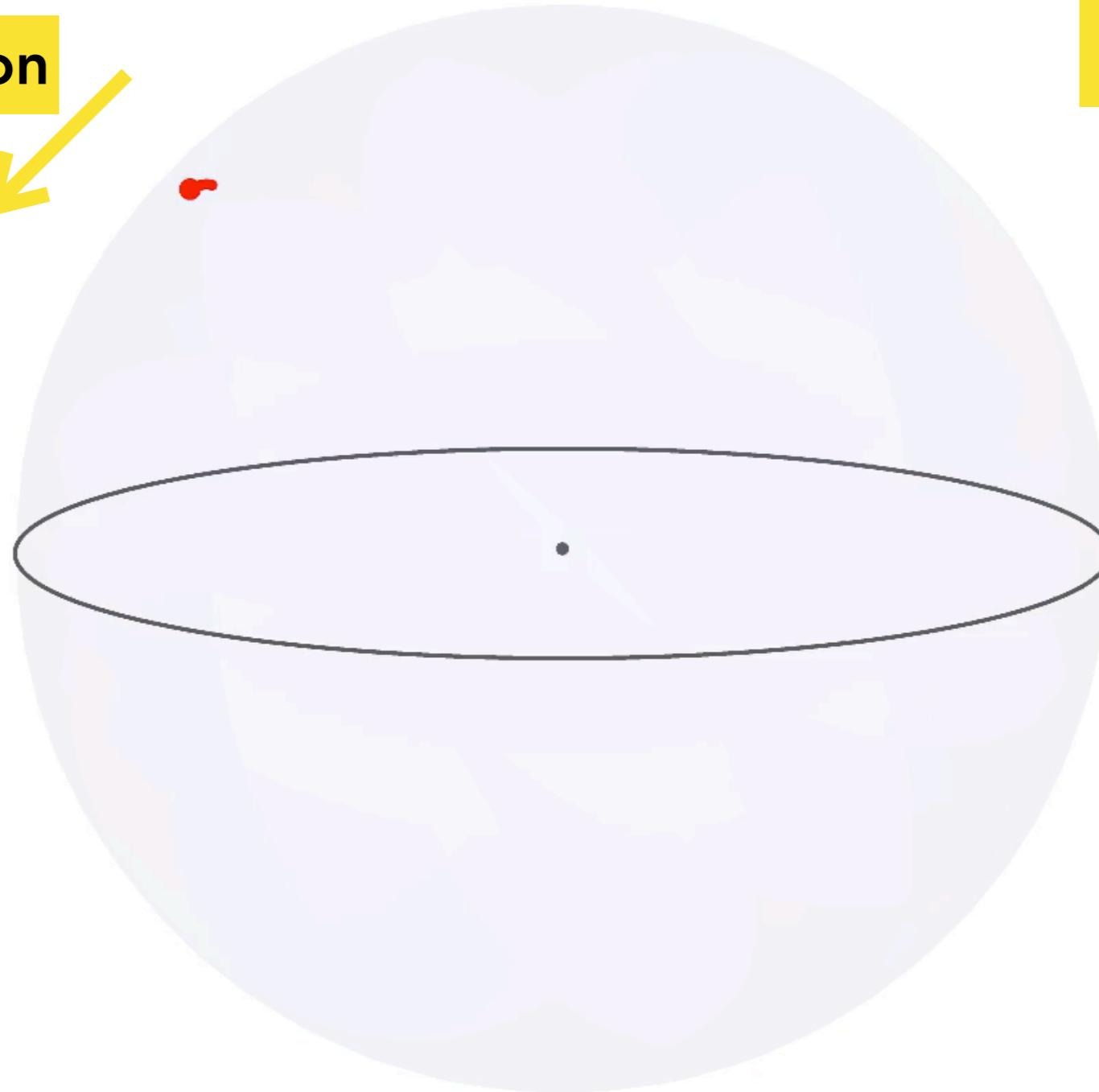
Après la précession complète de l'orbite, les **ellipses** deviennent des **anneaux**.

Orientation des orbites

Orientation



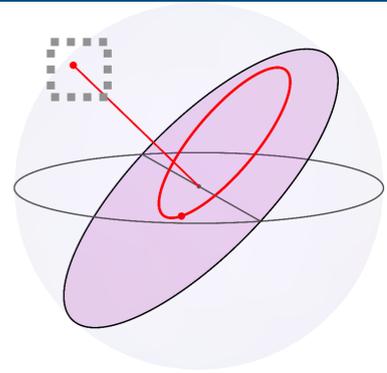
Temps typique
~1,000,000 ans



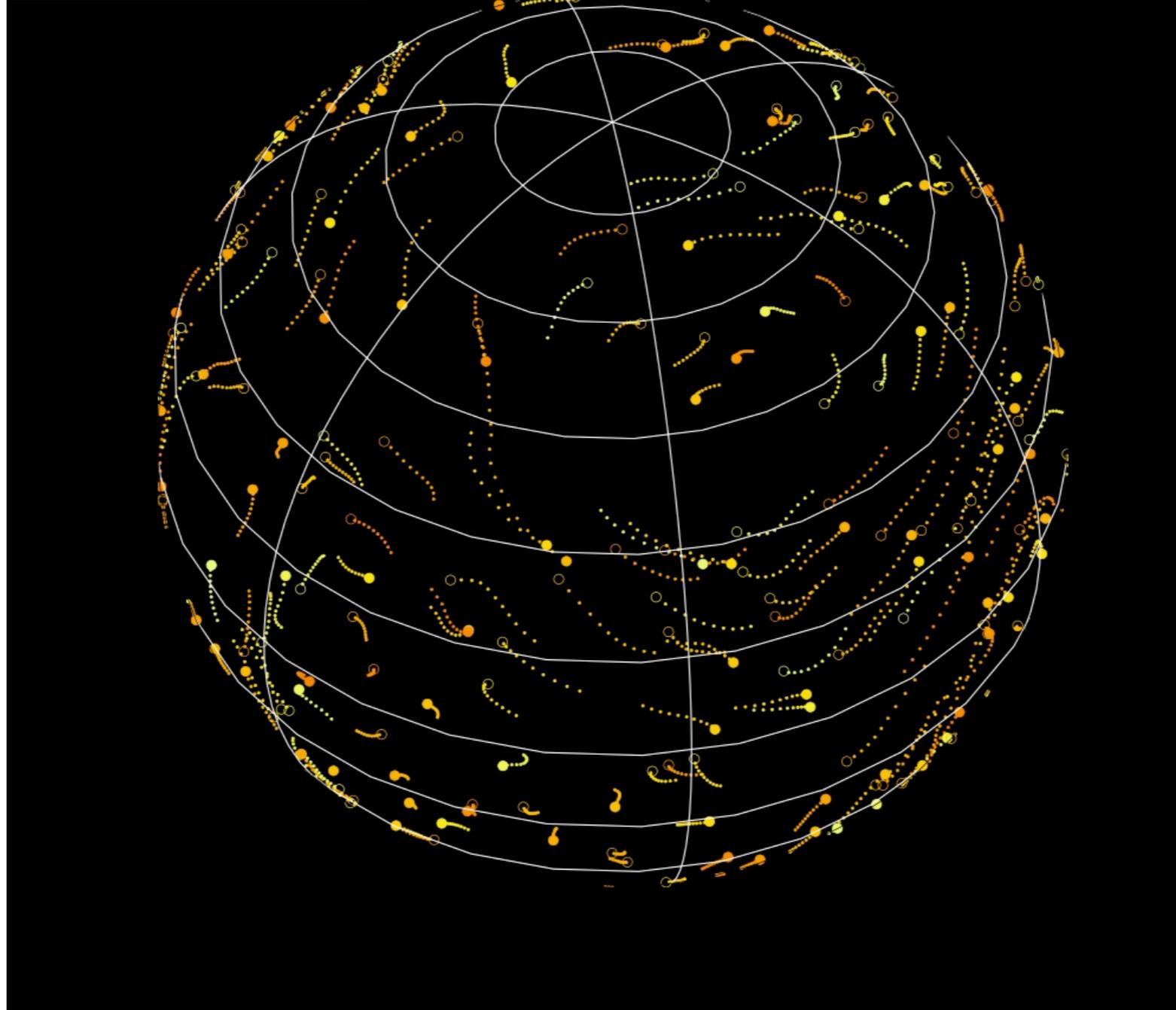
L'orientation de l'orbite devient alors un **point sur la sphère**.

Diffusion des orientations orbitales

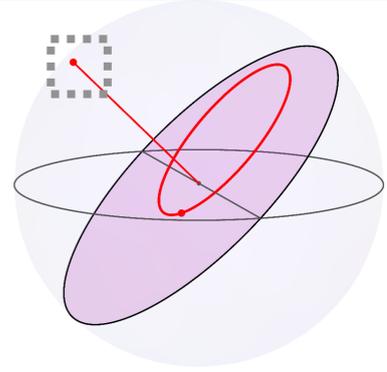
Les orientations des orbites interagissent et évoluent **erratiquement**



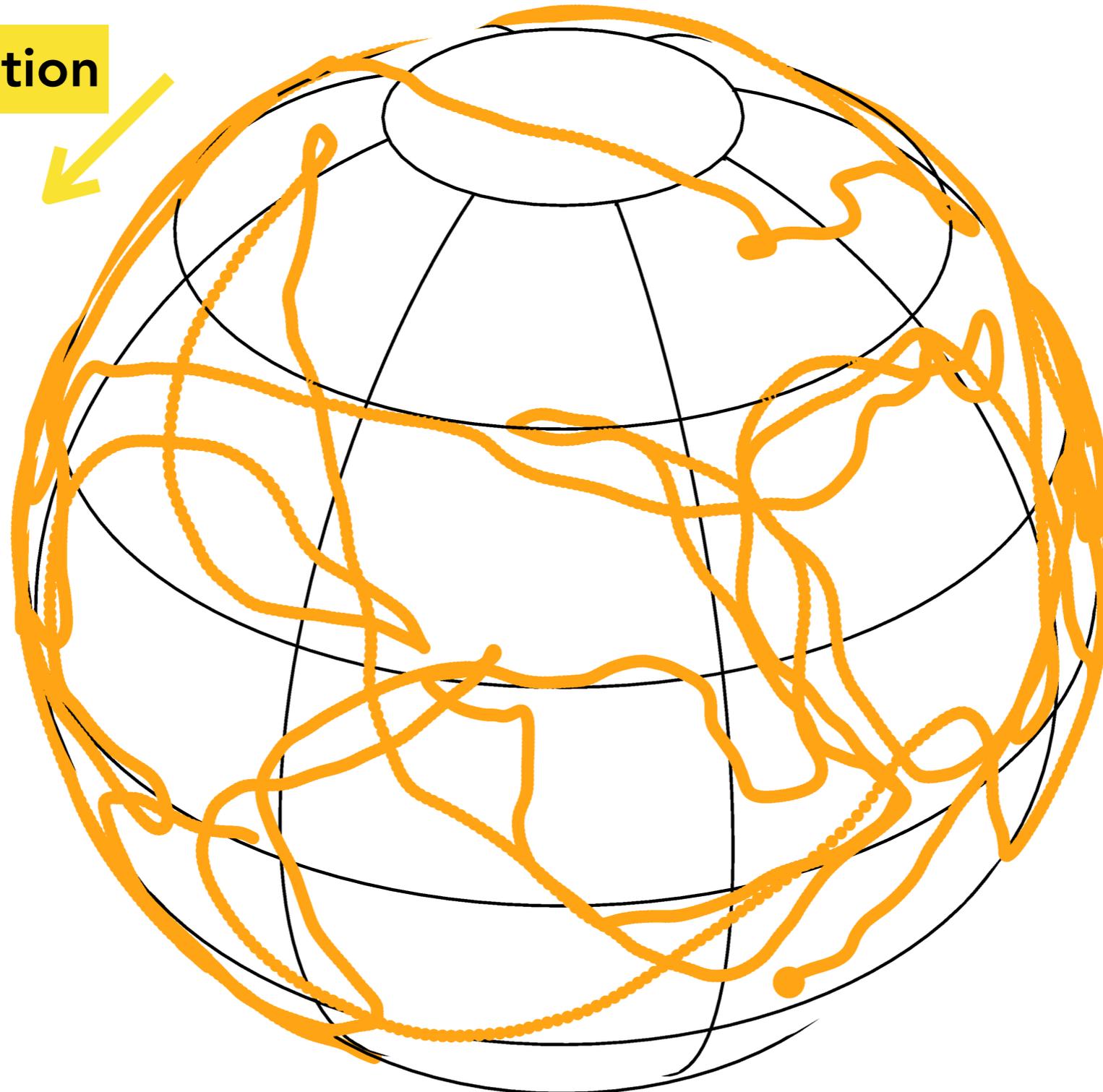
Temps typique
~1,000,000 ans



Evolution typique d'une orientation



Orientation

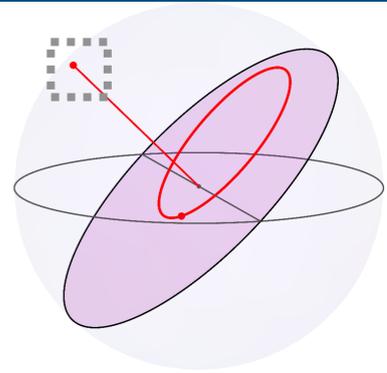


Temps typique
~1,000,000 ans

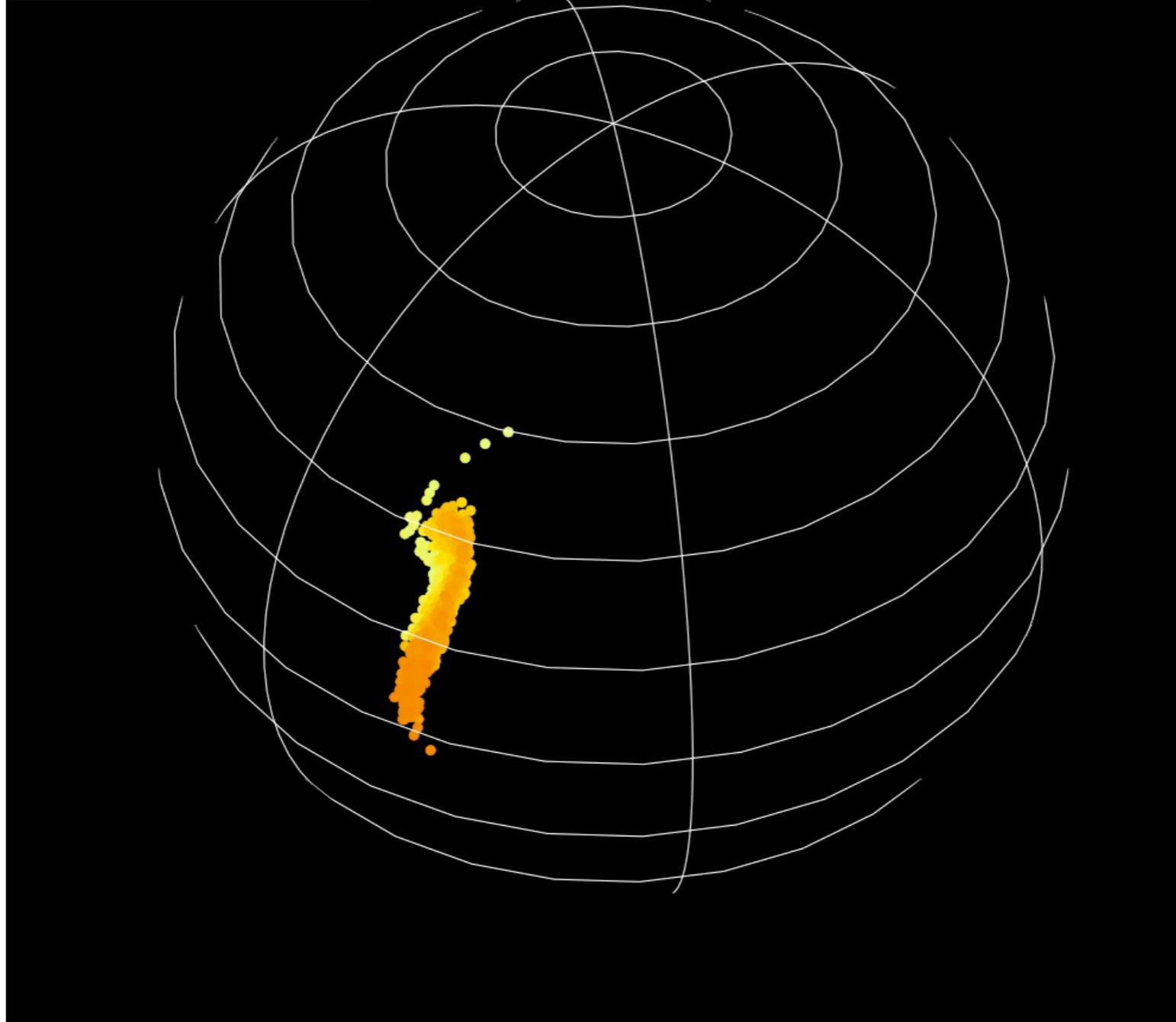
L'orientation de l'étoile suit une **marche aléatoire**.

Diffusion d'une tache d'étoiles

Le système se **mélange**, et les étoiles oublient leurs **voisines**.

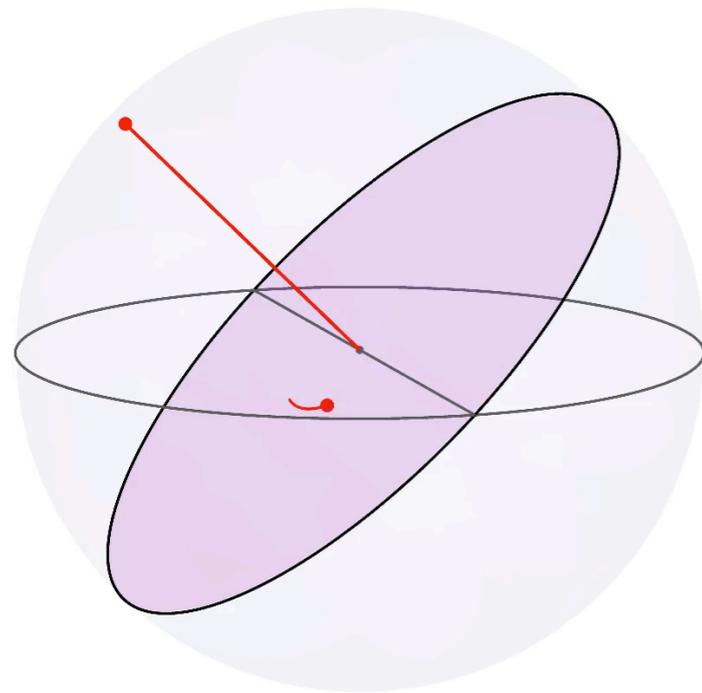


Temps typique
~1,000,000 ans



Dynamique d'une étoile

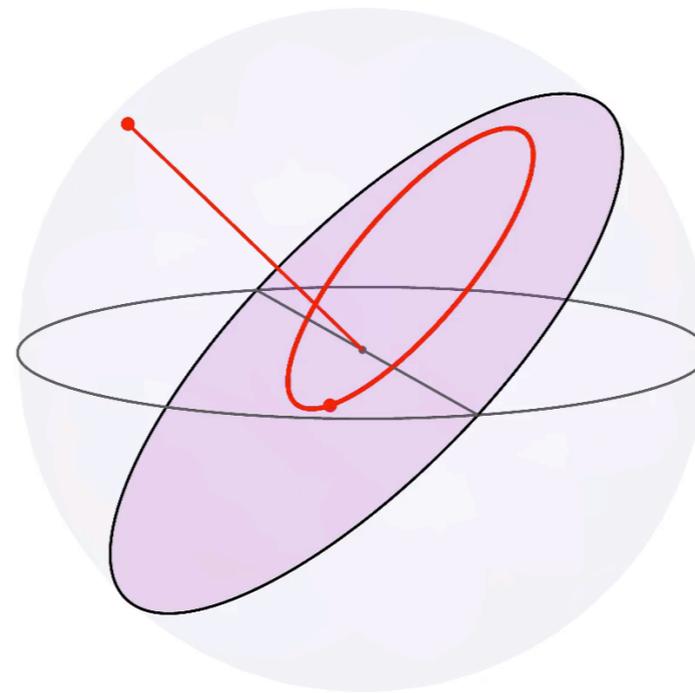
Etoiles



15 ans

Mouvement **orbital**

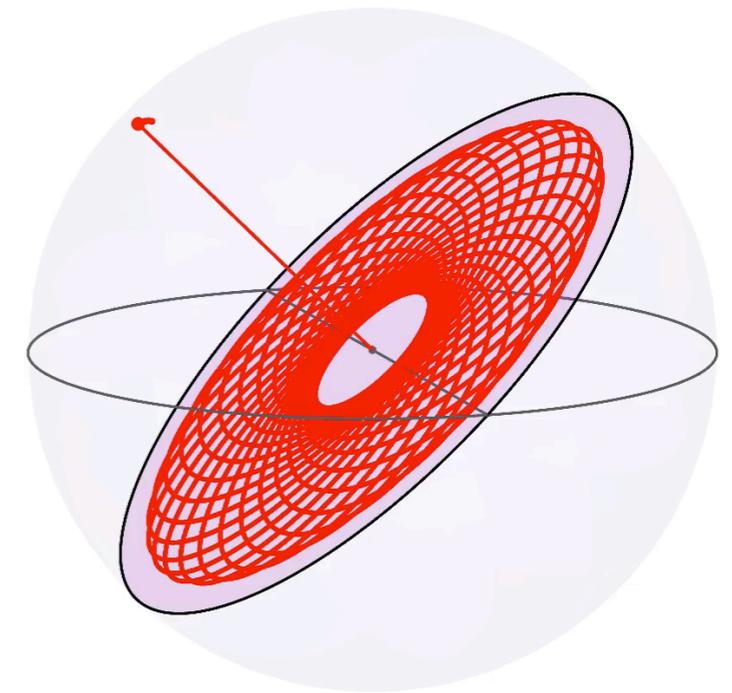
Ellipses



30,000 ans

Précession **péricentre**

Anneaux



1,000,000 ans

Précession **orientation**

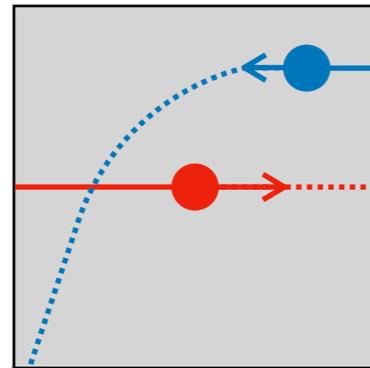
SgrA* a 10,000,000,000 années, on peut attendre encore un peu...

Déflexions

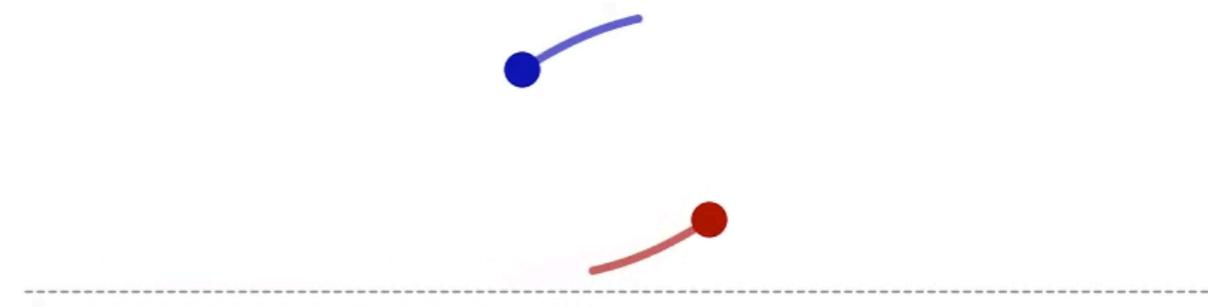
Temps typique
~1,000,000,000 ans

Que voit une étoile le long de sa **trajectoire elliptique** ?

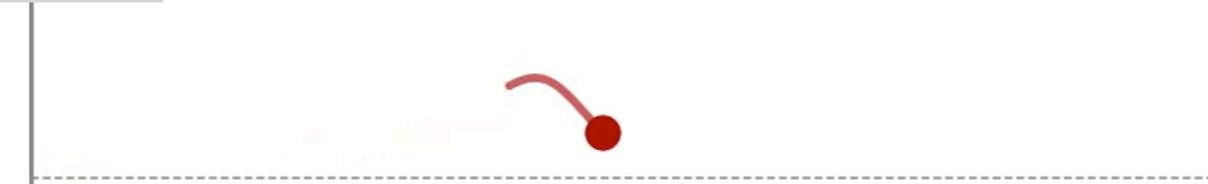
Déflexions
locales



Zoom sur l'orbite

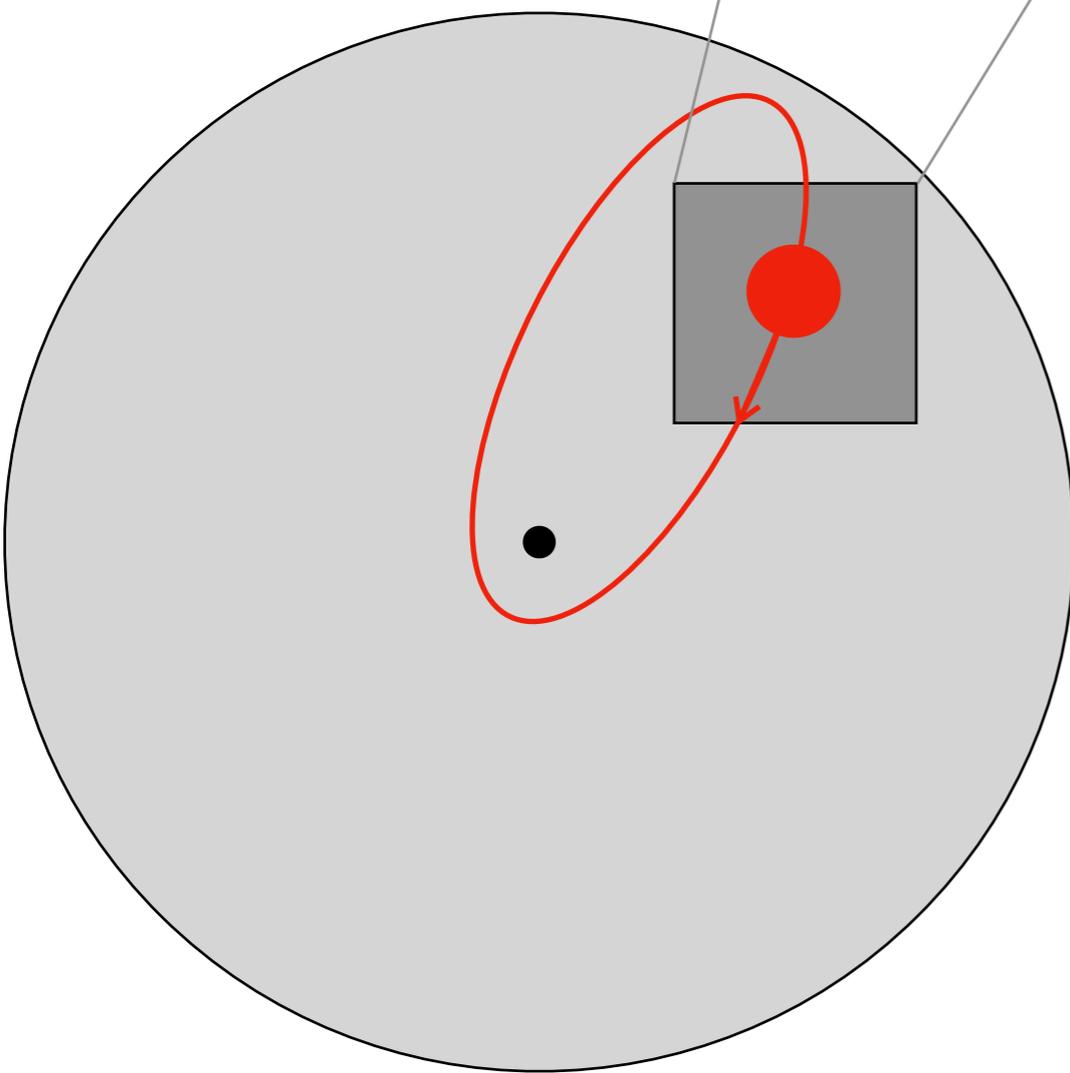


Vitesse



Changement
de vitesse

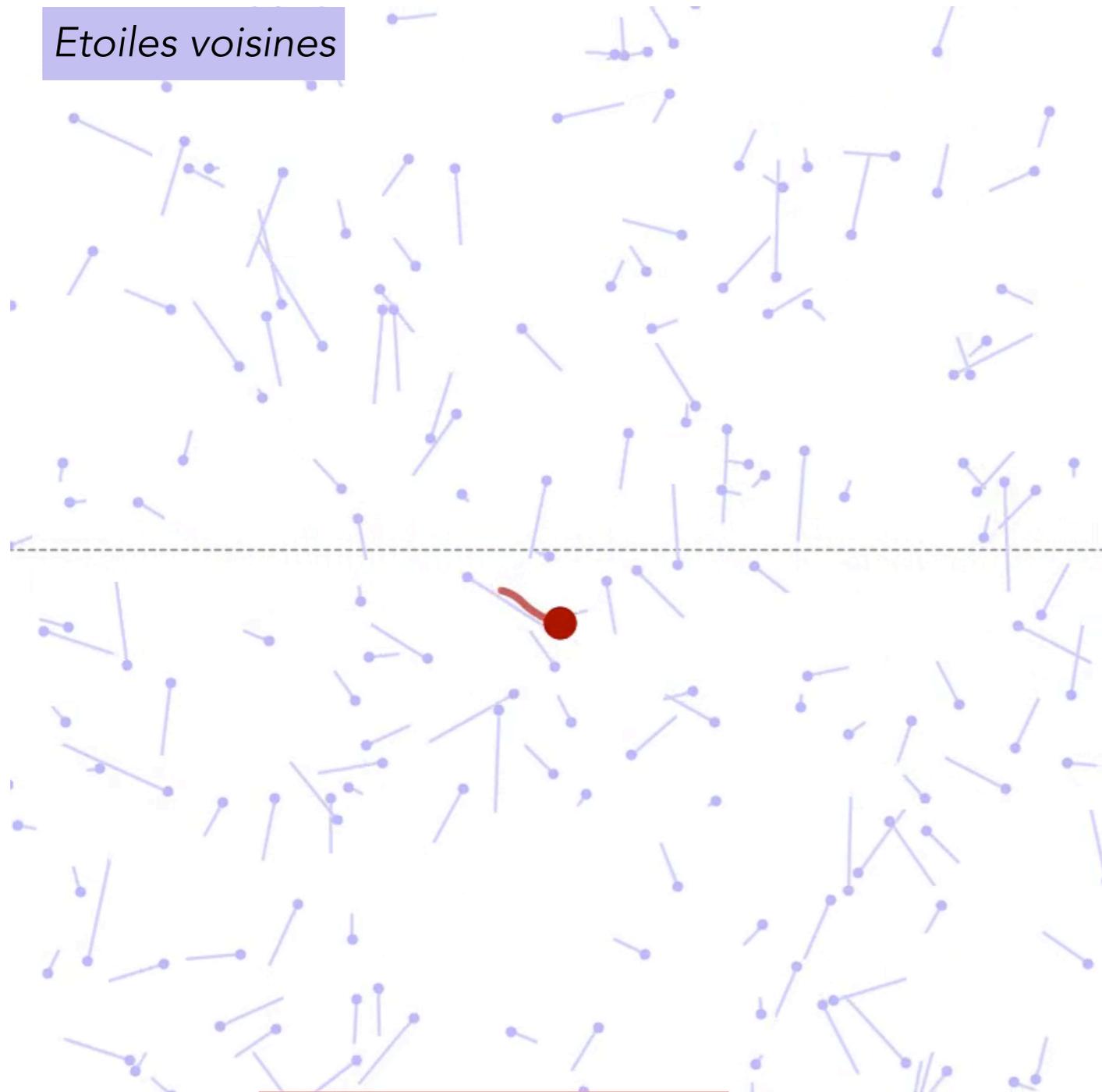
Temps



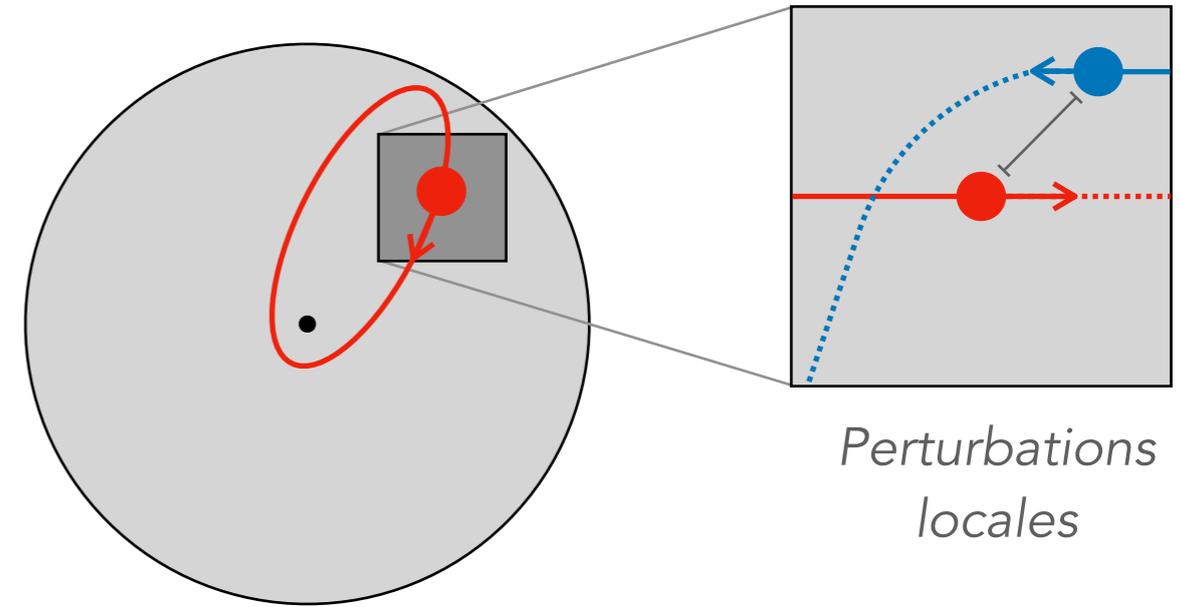
Déflexions

L'étoile a beaucoup de **proches voisines**

Etoiles voisines

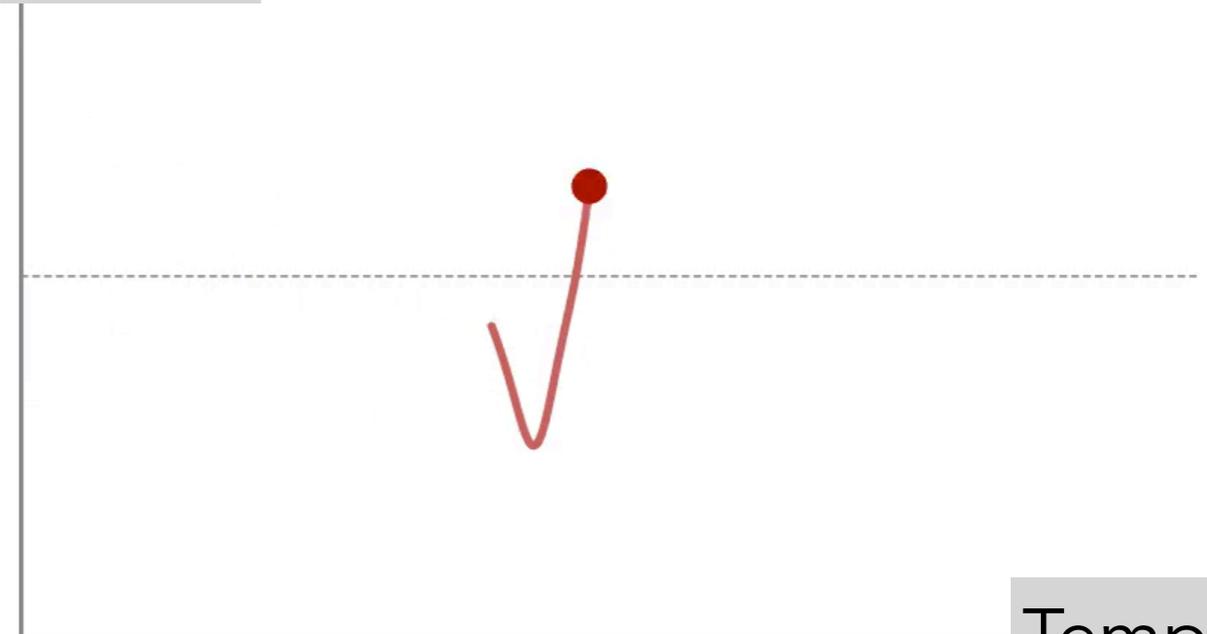


Temps typique
~1,000,000,000 ans



Série de **déflexions**

Vitesse



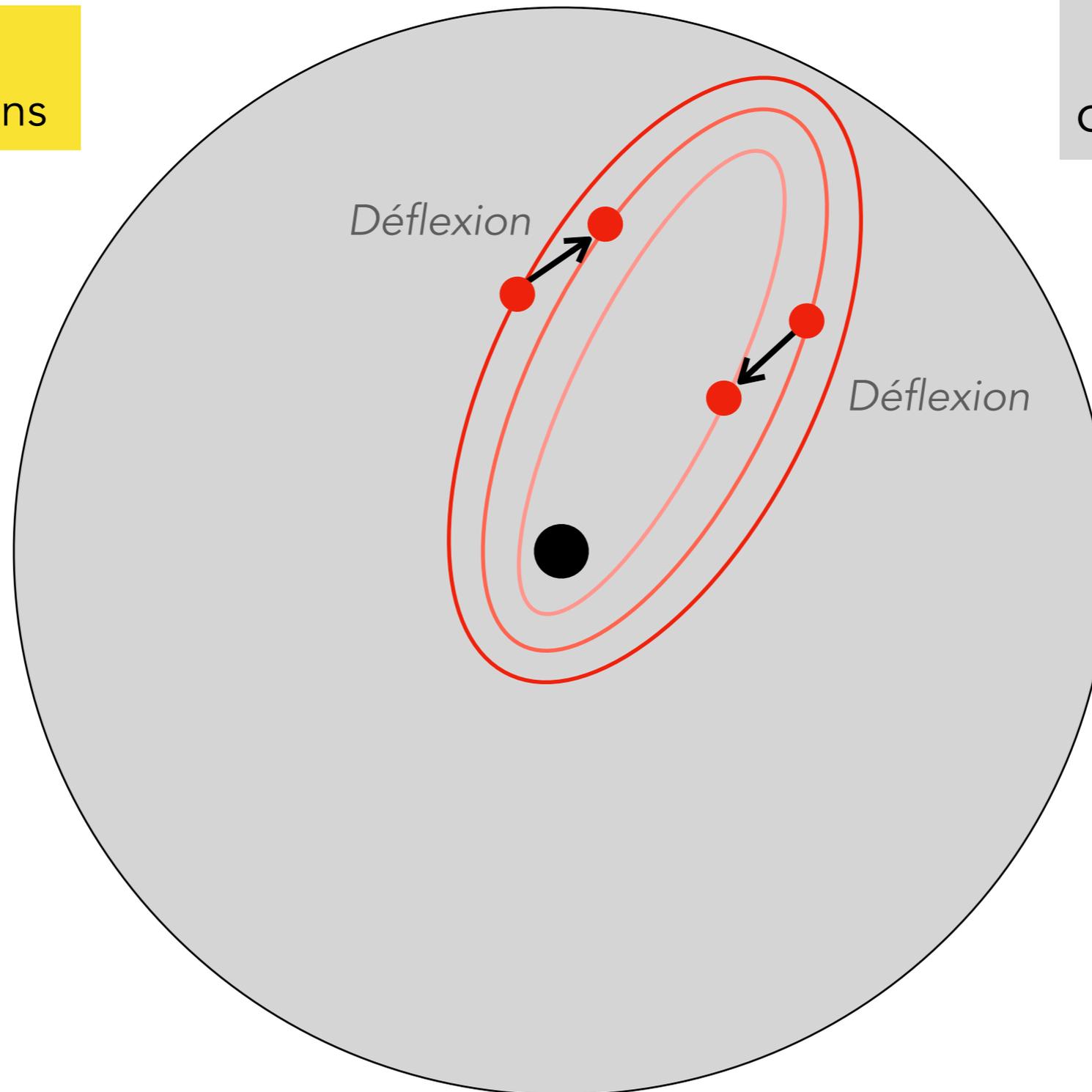
Marche **aléatoire**

Temps

Déflexions

Temps typique
~1,000,000,000 ans

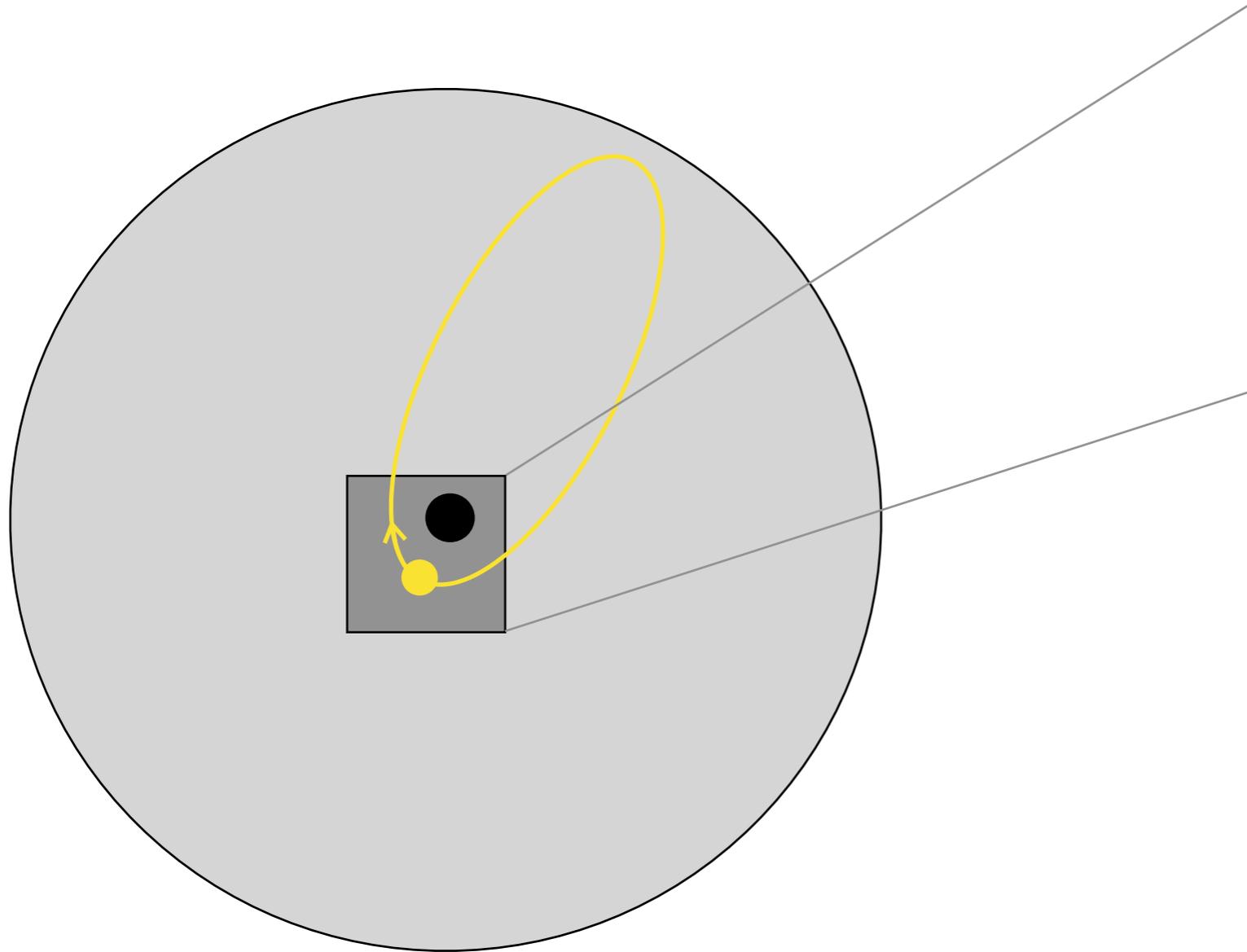
L'étoile "saute"
d'orbite en orbite



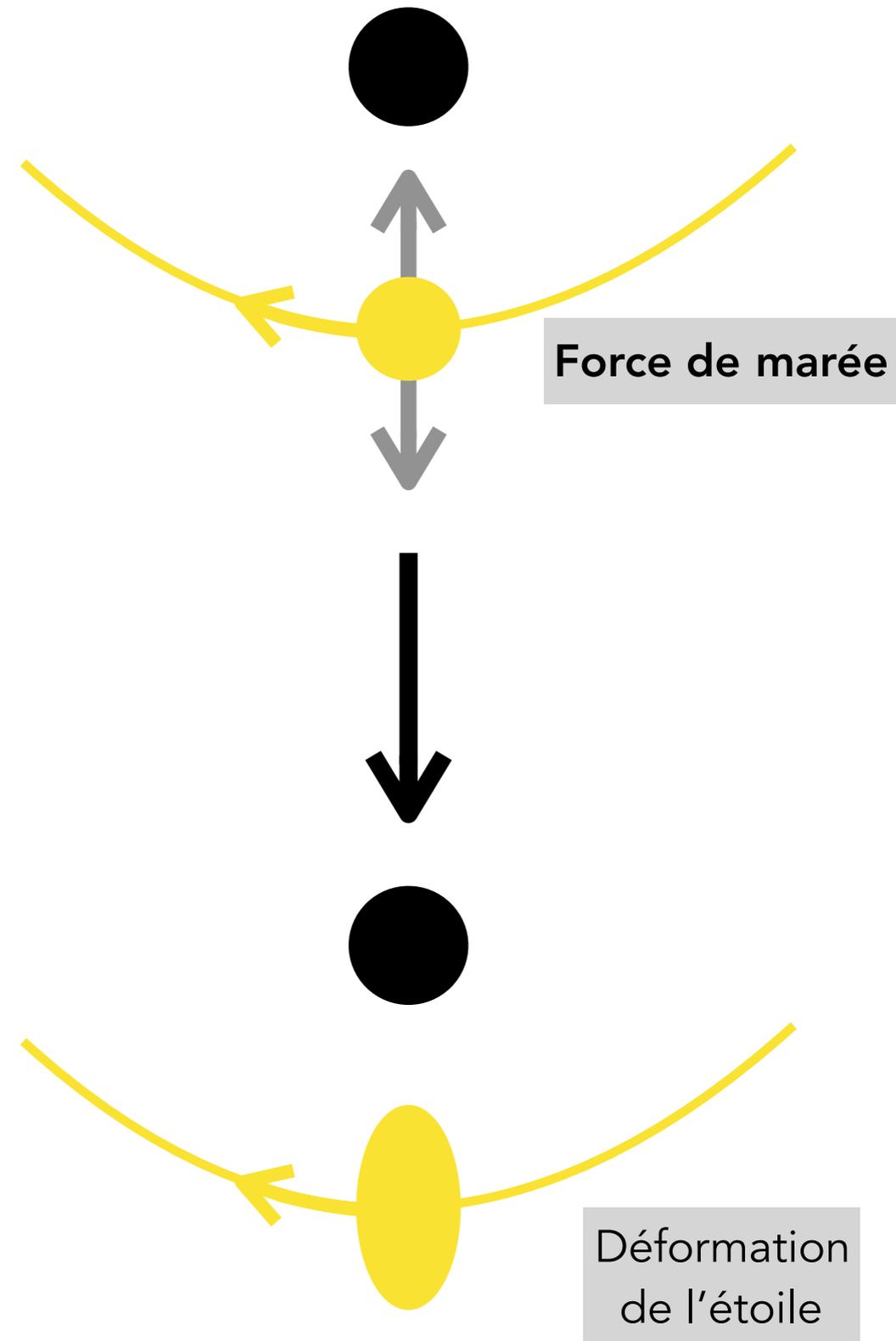
Les déflexions amènent l'étoile toujours **plus proche du trou noir**.

Le voisinage du trou noir

Que ressent une étoile au voisinage du trou noir ?

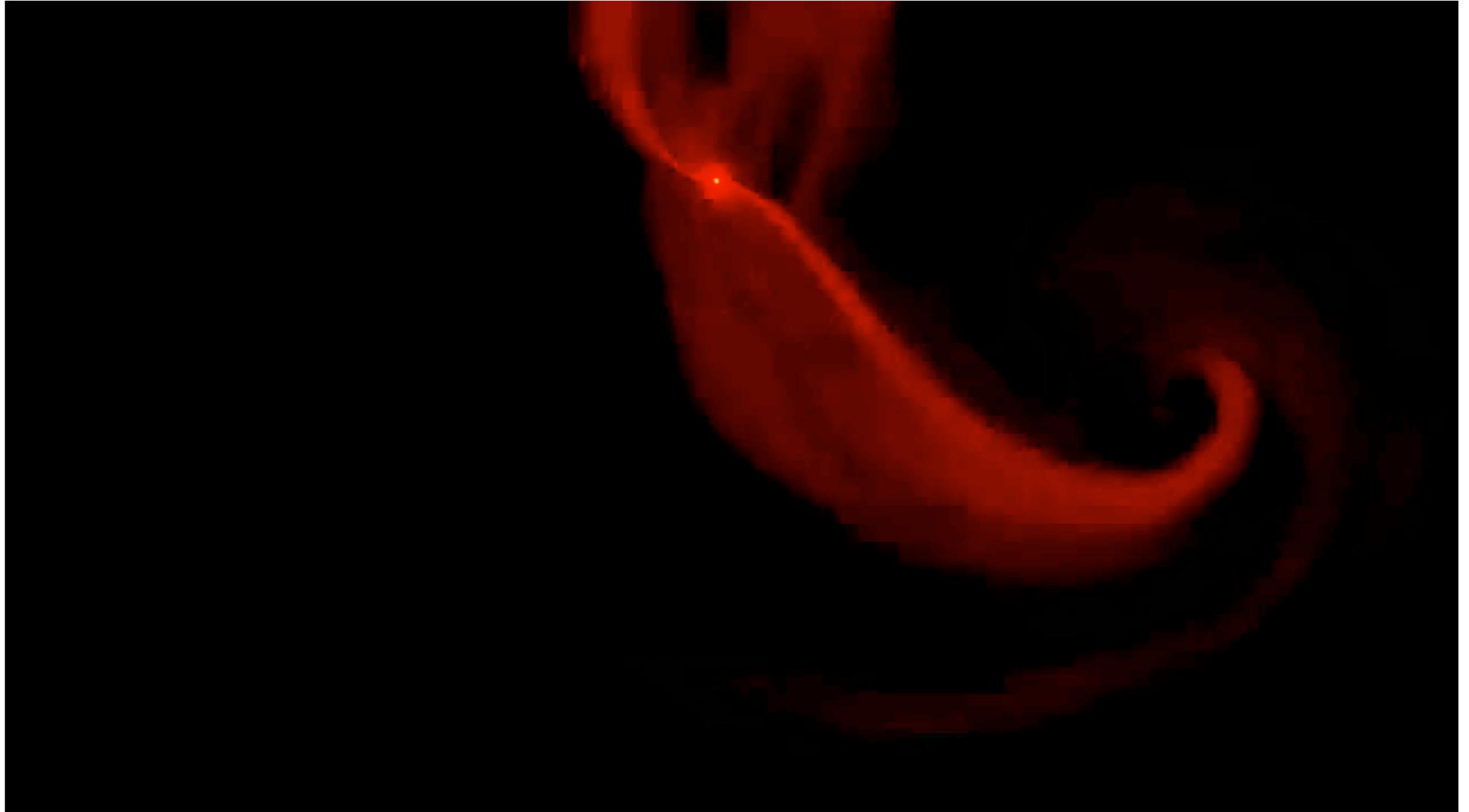


Très proche du trou noir,
l'étoile n'est plus un point.



Rupture par effet de marée

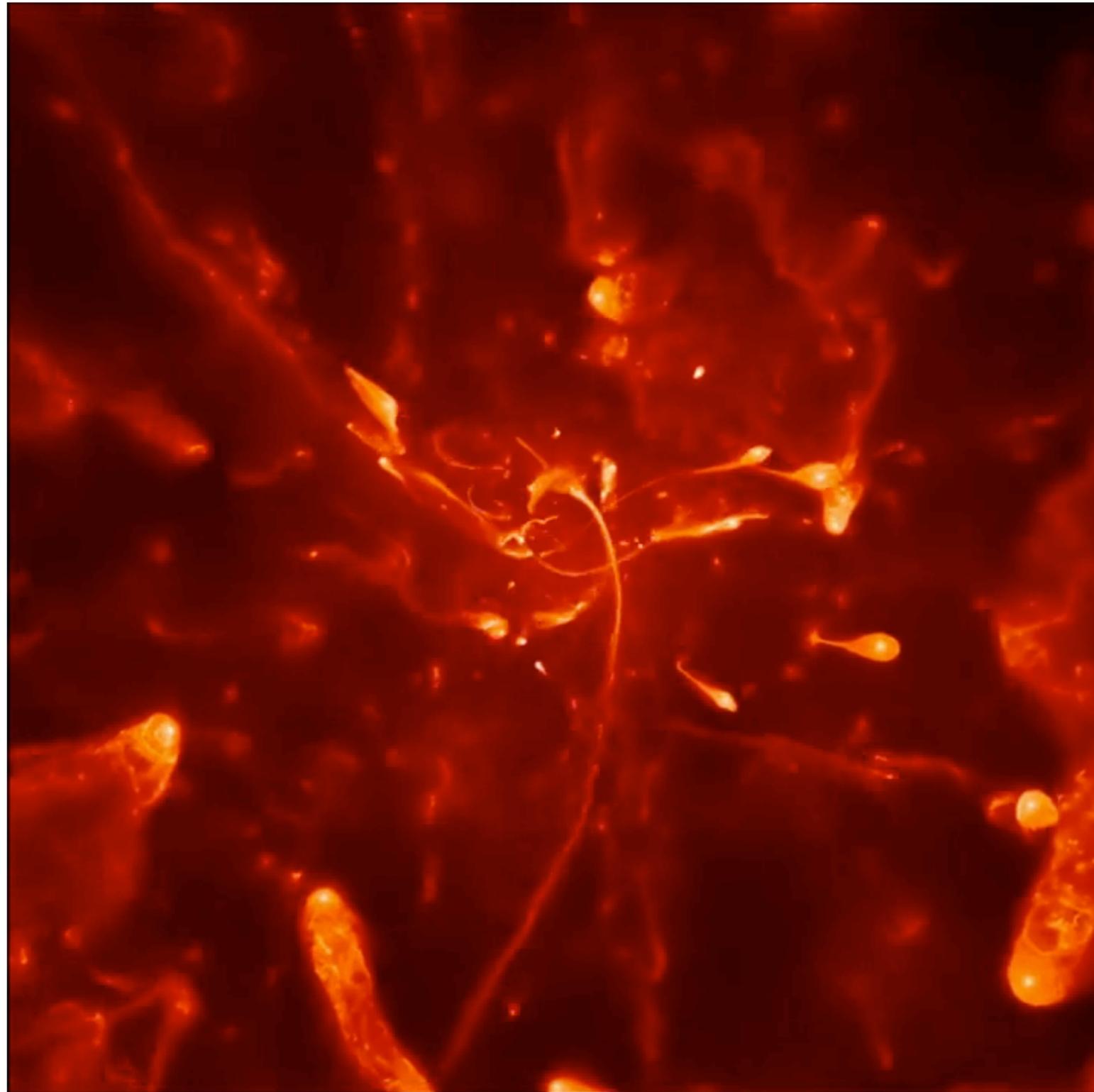
Tidal Disruption Events



J. Guillochon

Les étoiles sont **déchirées** par le trou noir central.

Vents stellaires

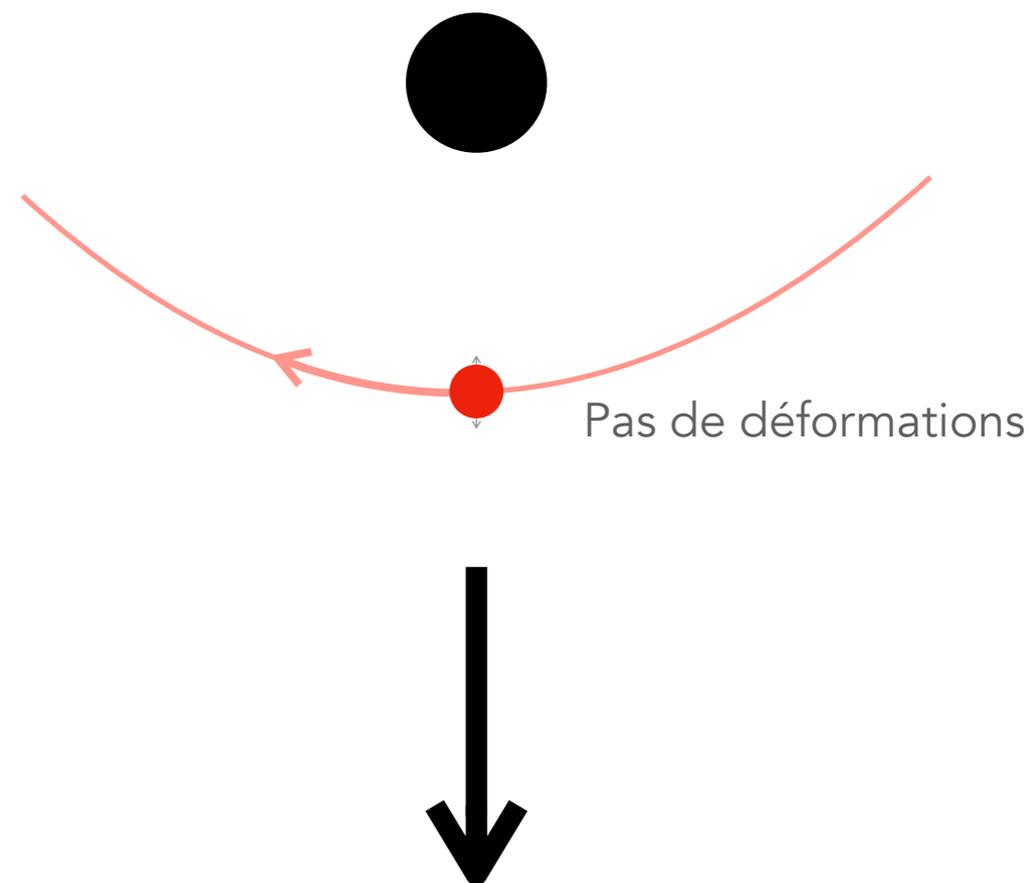
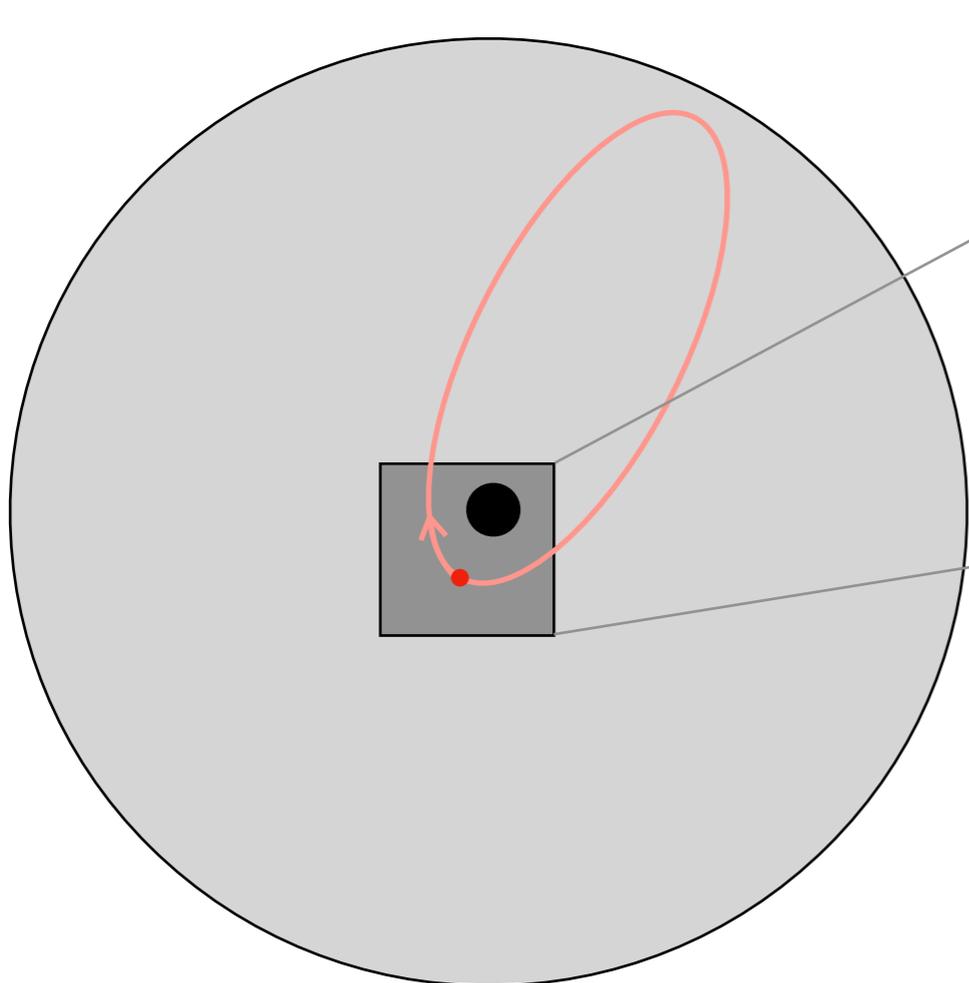


N. Luetzgendorf

Le gaz est **arraché** des étoiles proche du trou noir.

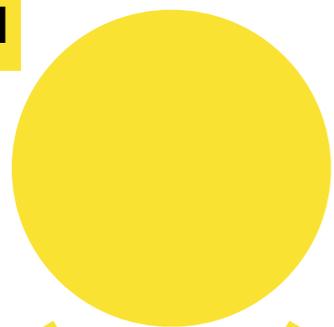
Encore plus proche du trou noir

Que ressent un **objet compact** au voisinage du trou noir ?



Les objets compacts (étoiles à neutrons, trous noirs) sont **très petits**

Soleil



1,400,000 km

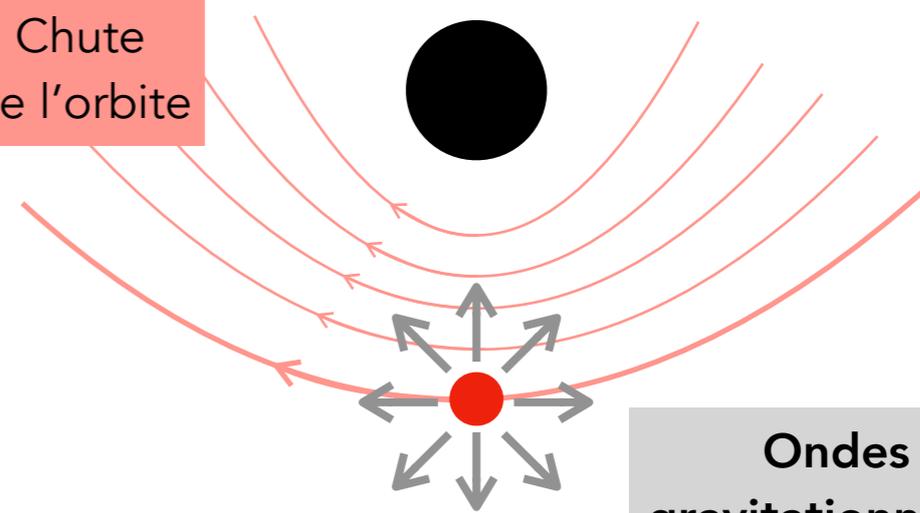
Même masse

Etoile à neutron



30 km

Chute de l'orbite

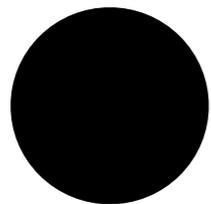


Descente spiralée avec rapport de masse extrême

Extreme Mass Ratio Inspirals

Temps typique
~quelques mois

Trou noir supermassif

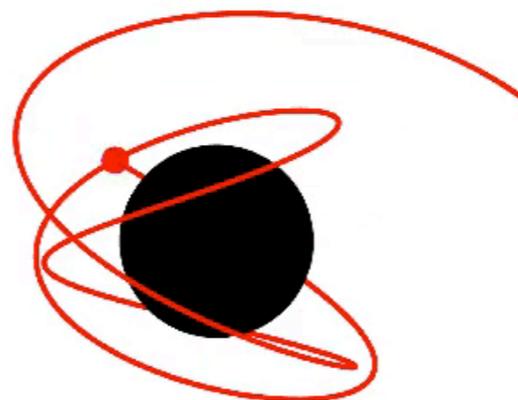


$\sim 4,000,000 M_{\text{Soleil}}$

Etoile à neutrons



$\sim 2 M_{\text{Soleil}}$

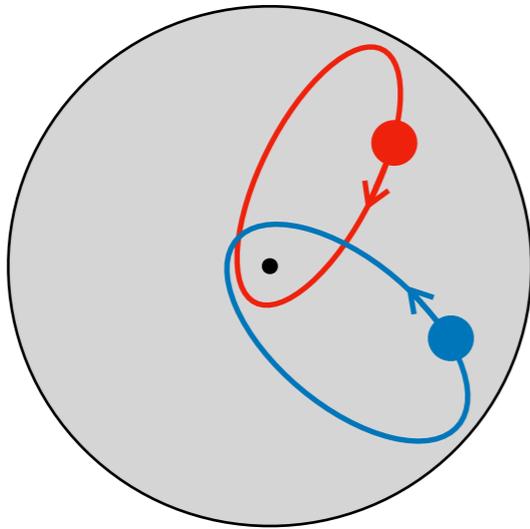


Ondes gravitationnelles

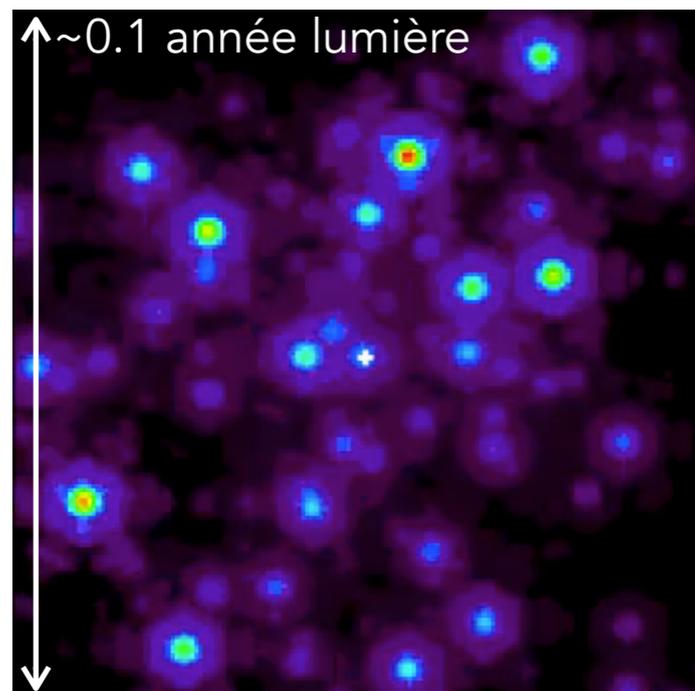
L'émission d'ondes gravitationnelles entraîne une **chute inévitable**.

Et dans le futur ?

Nouvelles orbites d'étoiles



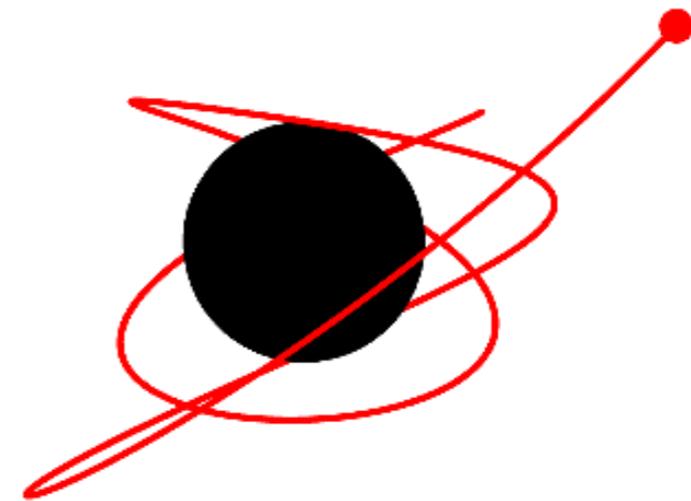
(Très) Grand télescope (~30m)



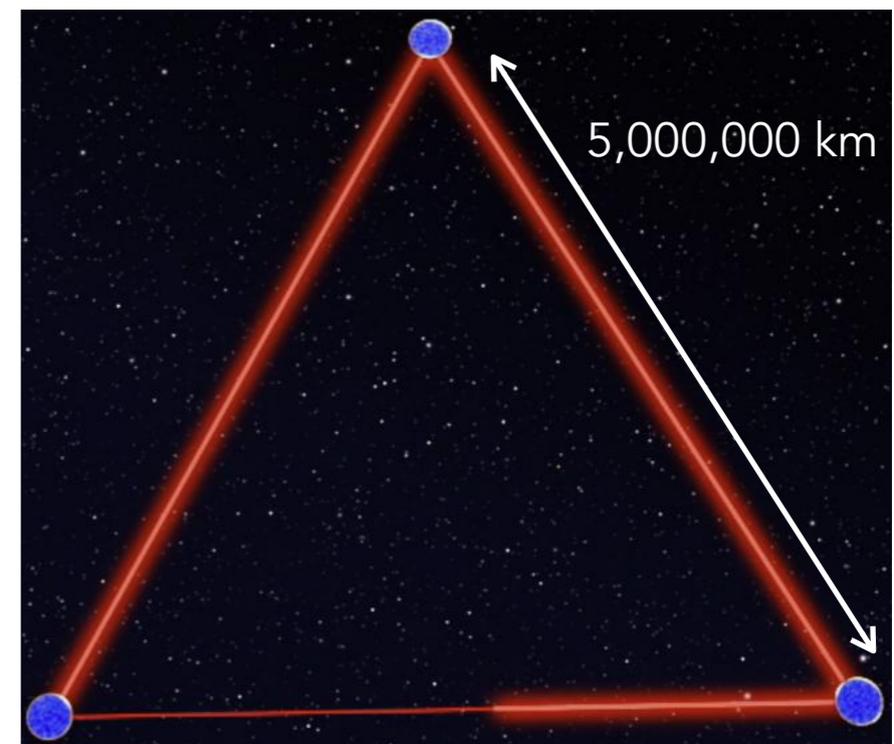
UCLA

Observations attendues

Chute des **objets compacts**



Interféromètre spatial LISA

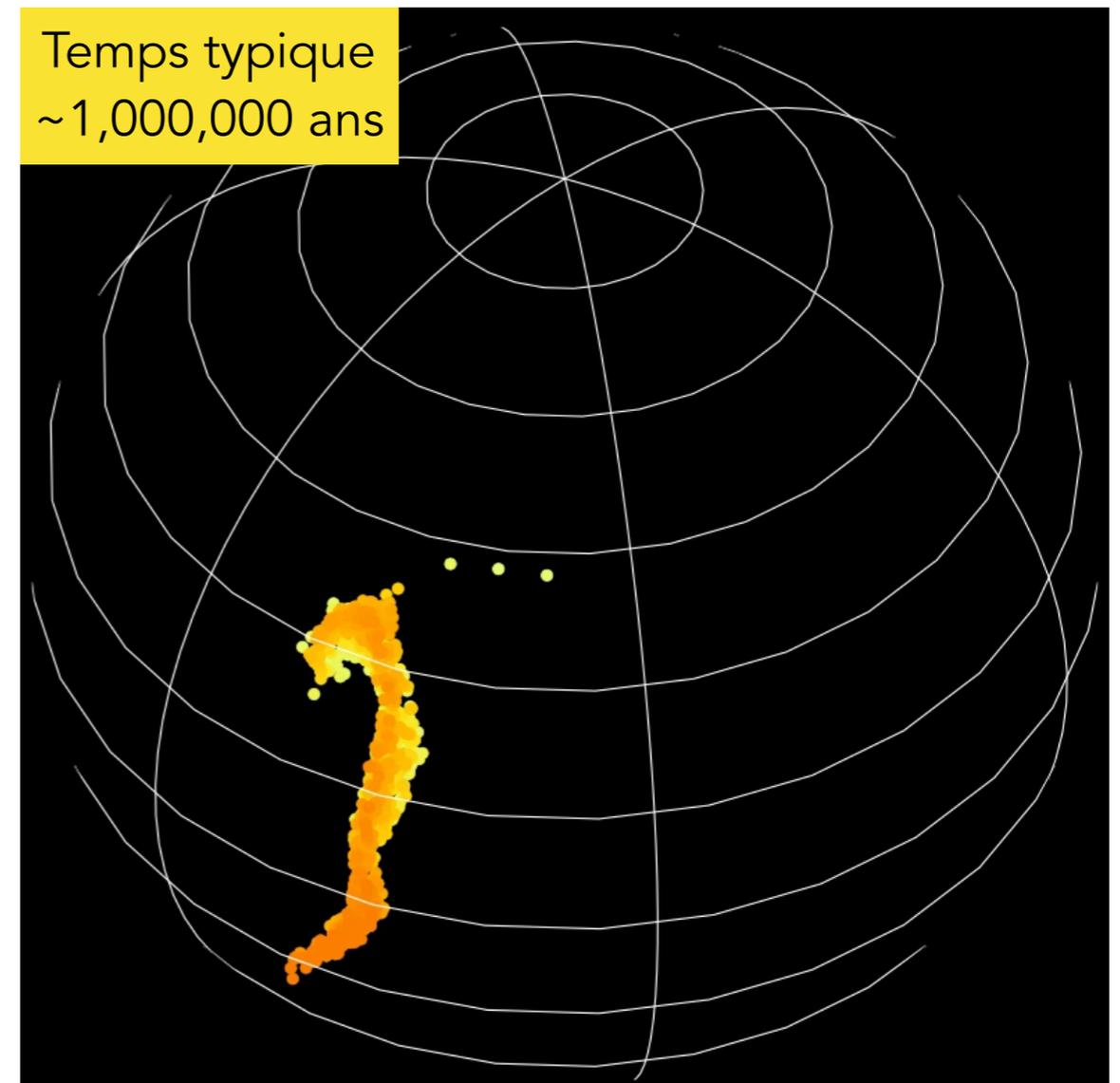


Dynamique des centres galactiques

Etudier la dynamique des étoiles, c'est étudier la "diffusion d'encre"



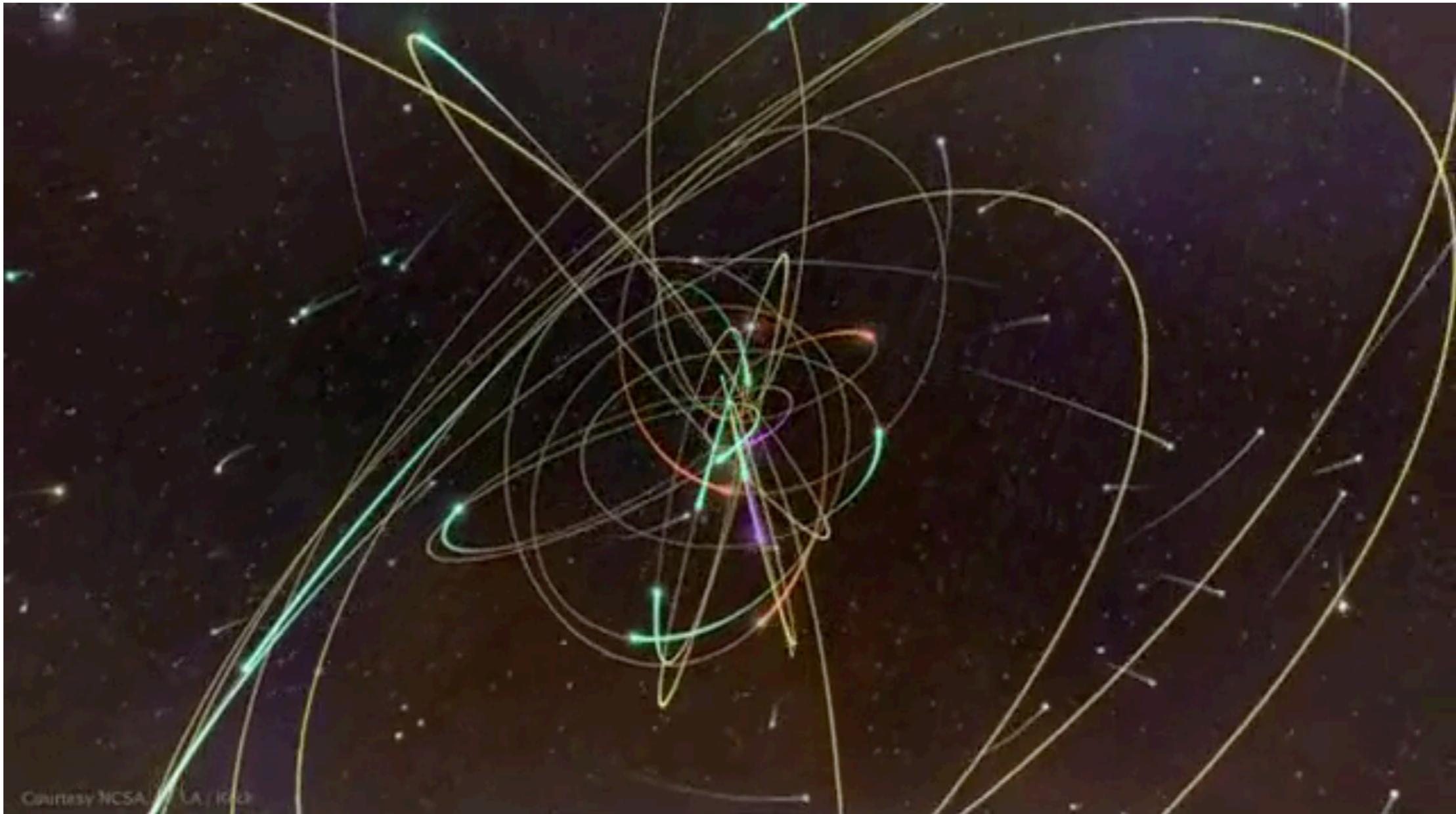
Encre dans l'eau



Orientations des étoiles

Centres galactiques

Visualisation de **SgrA***



UCLA

Les centres galactiques, un formidable "laboratoire astrophysique"

Dense (1,000,000x plus qu'autour du Soleil)

Relativiste (Trou noir 4,000,000x plus lourd que le Soleil)

Loin (10,000,000x plus petit que la Lune dans le ciel)

Bruyant (Grande source d'ondes gravitationnelles)