

Comment tester la Relativité Générale avec les futures données de l'instrument GRAVITY ?

Marion Grould

Directeurs

Thibaut Paumard & Guy Perrin

SF2A 2-5 Juin 2015



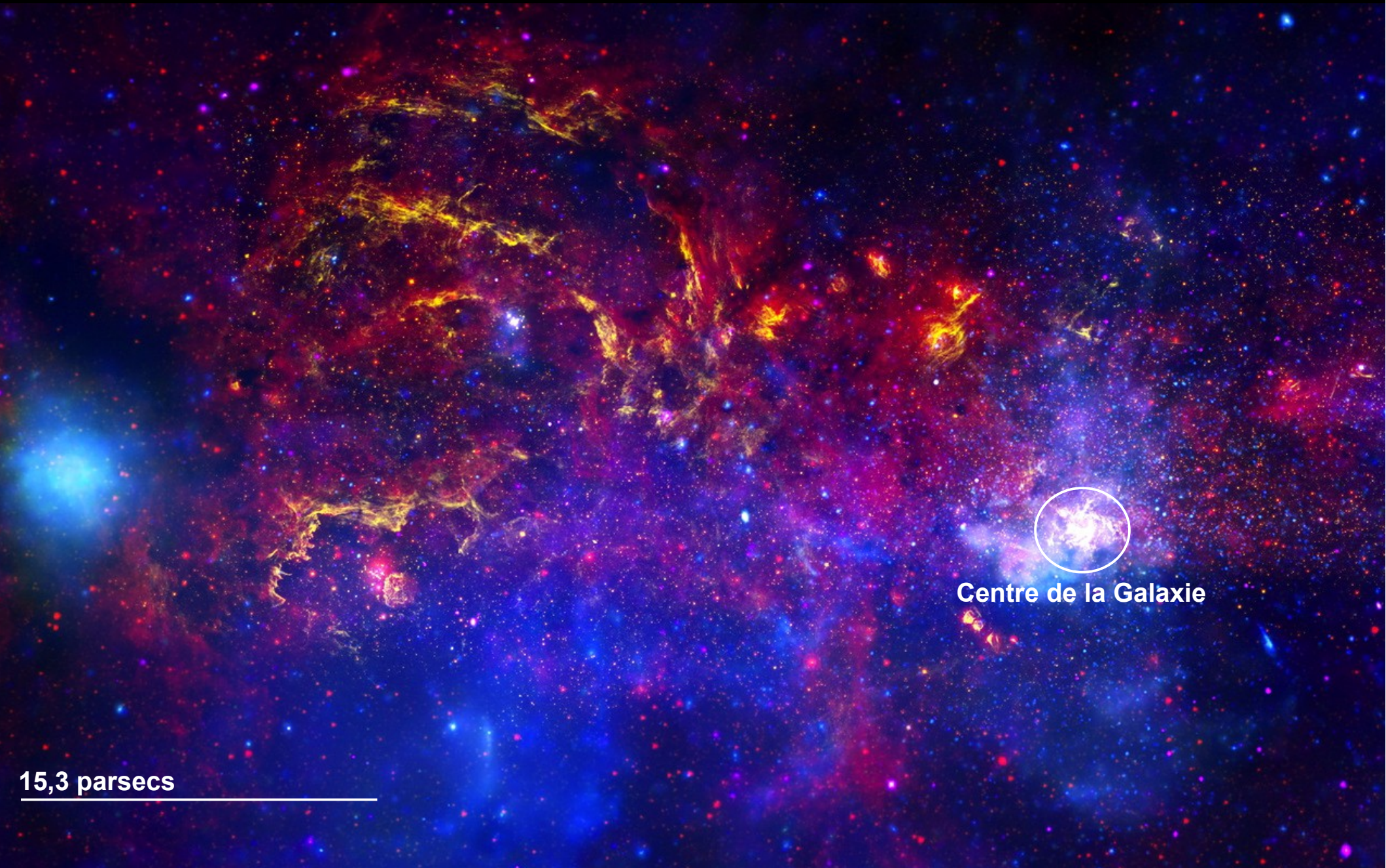
École Doctorale d'Astronomie & Astrophysique
d'Île-de-France

Laboratoire d'Études Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique

PLAN

1. En étudiant le Centre Galactique
2. En utilisant l'instrument GRAVITY
3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes
4. En ayant un modèle très précis

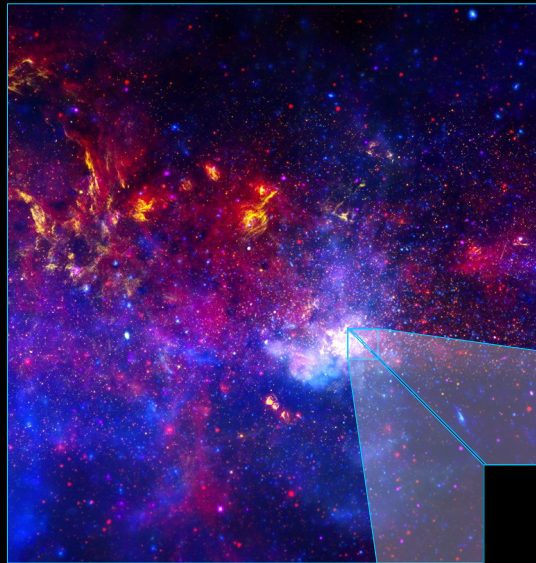
1. En étudiant le Centre Galactique



Centre de la Galaxie

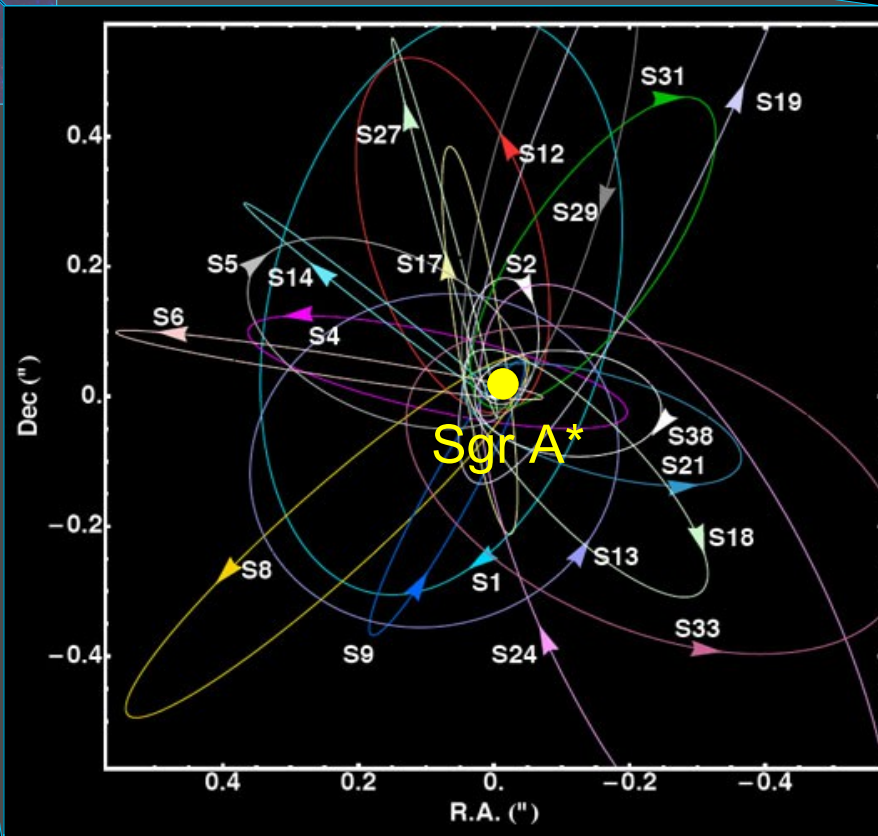
15,3 parsecs

1. En étudiant le Centre Galactique



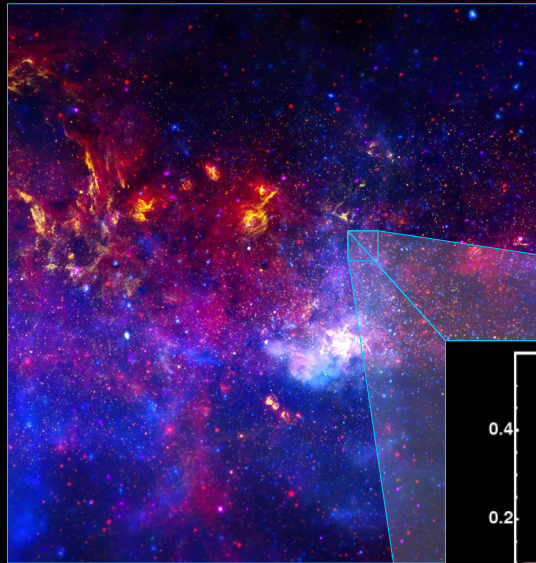
Amas S → Orbite de l'étoile S2
 $M_0 = 4,31 \pm 0,6 \times 10^6 M_\odot$

0,5''

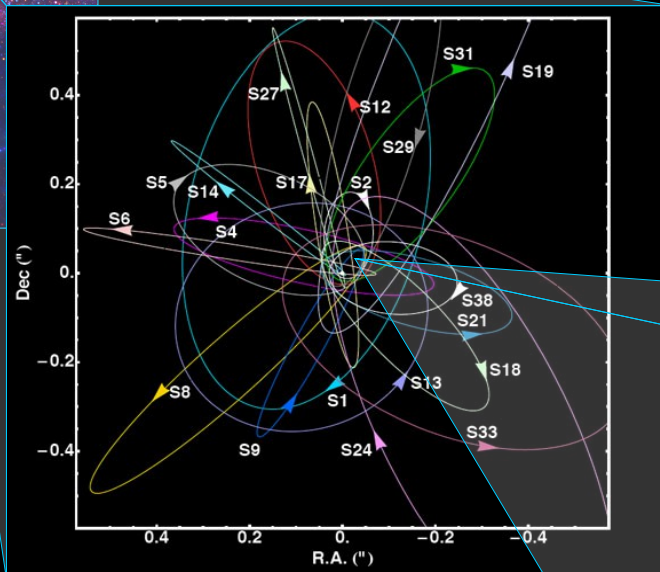


Gillessen S., et al.
ApJ, 692, 1075
(2009)

1. En étudiant le Centre Galactique



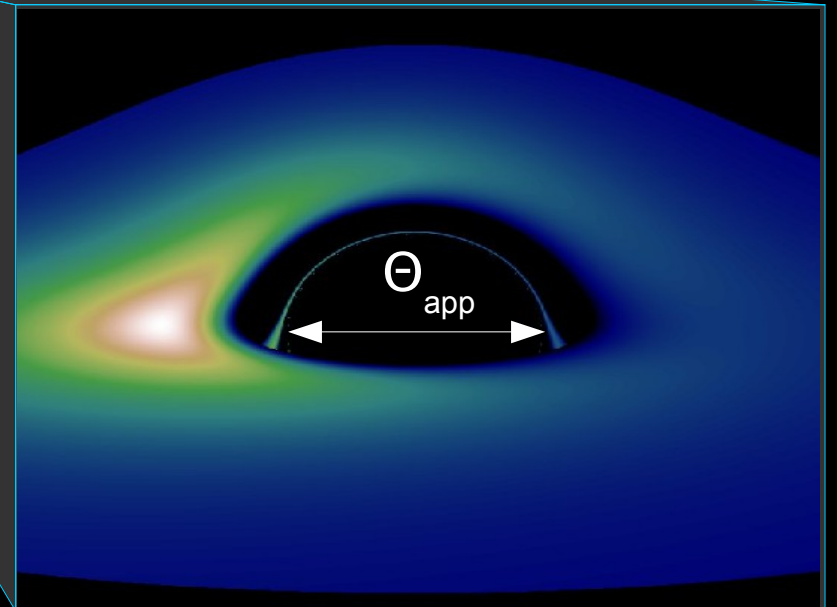
Amas S → Orbite de l'étoile S2
 $M_0 = 4,31 \pm 0,6 \times 10^6 M_\odot$



Taille apparente d'un trou noir de Schwarzschild vue depuis la Terre ($D \approx 8$ kpc): $\Theta_{app} \approx 53 \mu\text{as}$
Plus grand trou noir accessible !

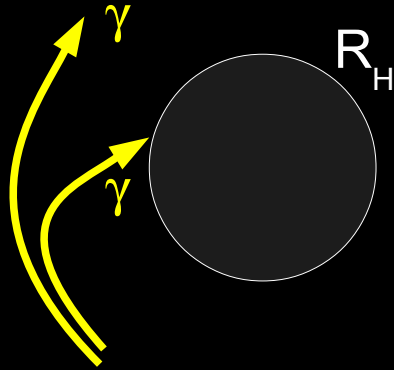
Gillessen S., et al.
ApJ, 692, 1075
(2009)

Image simulée, par GYOTO, d'un disque d'accrétion autour d'un trou noir de Schwarzschild



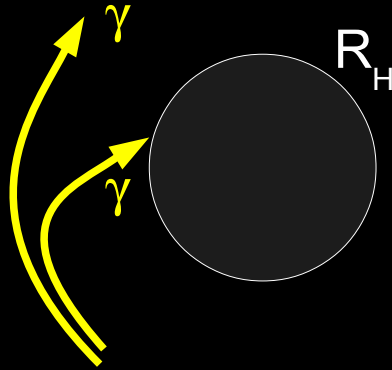
1. En étudiant le Centre Galactique

- a) A-t-on réellement un trou noir supermassif au centre de notre Galaxie ?
→ Y-a-t-il un horizon des évènements ?

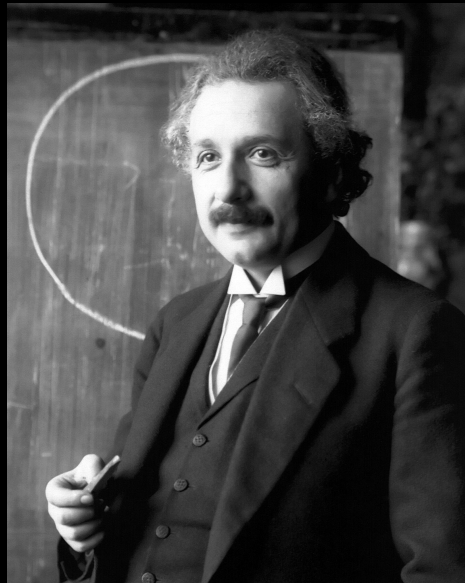


1. En étudiant le Centre Galactique

- a) A-t-on réellement un trou noir supermassif au centre de notre Galaxie ?
→ Y-a-t-il un horizon des évènements ?



- b) A-t-on un trou noir décrit par la Relativité Générale au centre de notre Galaxie ?



1. En étudiant le Centre Galactique

a) A-t-on un trou noir supermassif au centre de notre Galaxie ?

EHT (Event Horizon Telescope)
Interféromètre

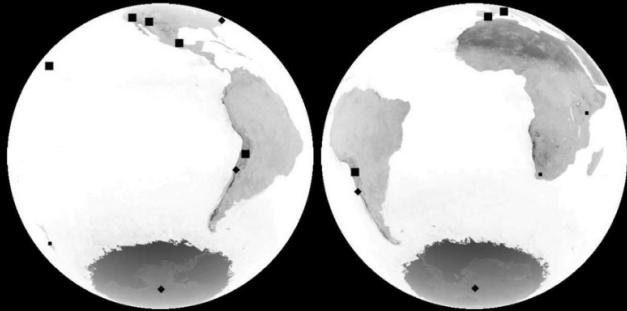
b) A-t-on un trou noir décrit par la Relativité Générale au centre de notre Galaxie ?

GRAVITY
Interféromètre

1. En étudiant le Centre Galactique

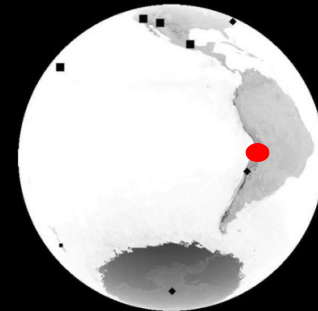
a) A-t-on un trou noir supermassif au centre de notre Galaxie ?

EHT (Event Horizon Telescope)
Interféromètre
VLBI : 13 stations



b) A-t-on un trou noir décrit par la Relativité Générale au centre de notre Galaxie ?

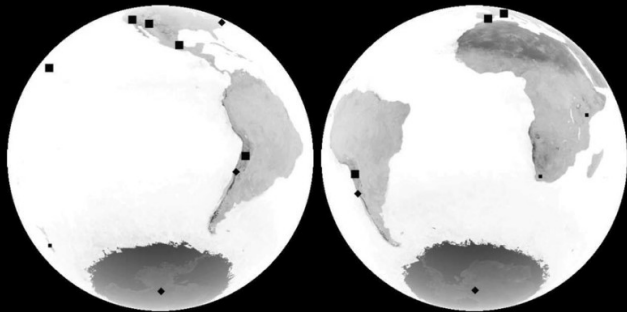
GRAVITY
Interféromètre
VLTI : 4 télescopes



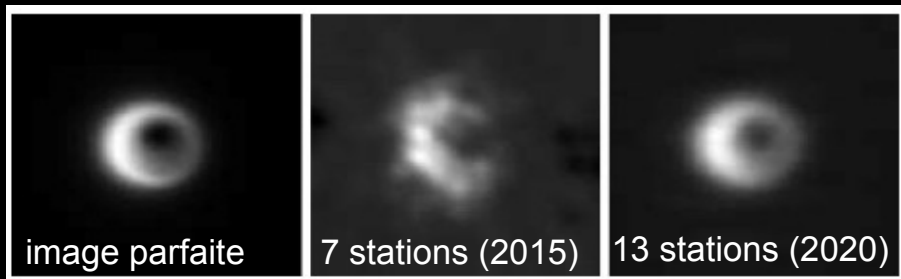
1. En étudiant le Centre Galactique

a) A-t-on un trou noir supermassif au centre de notre Galaxie ?

EHT (Event Horizon Telescope)
Interféromètre
VLBI : 13 stations



Radio → image de Sgr A*

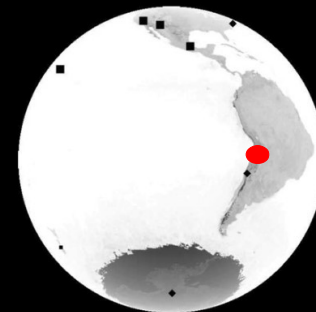


Simulation avec $a=0$ et $i=30^\circ$

Fish & Doeleman, Proc. IAU Symp 261 (2010)

b) A-t-on un trou noir décrit par la Relativité Générale au centre de notre Galaxie ?

GRAVITY
Interféromètre
VLTI : 4 télescopes



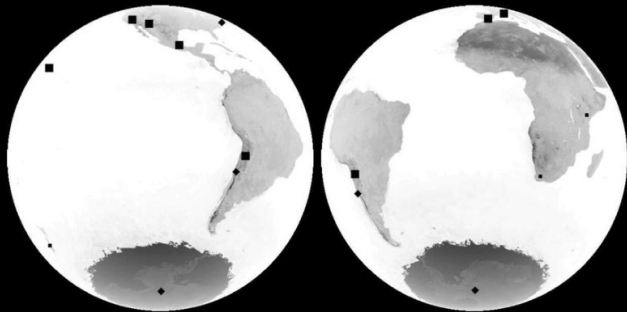
Infrarouge → étoiles

Comparaison des orbites des étoiles proches de Sgr A* observées par GRAVITY et celles obtenues en Relativité Générale

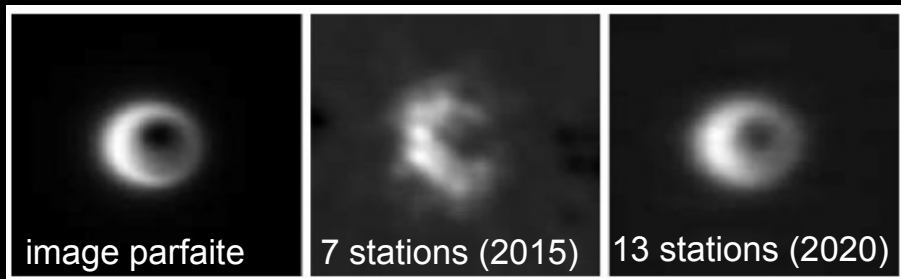
1. En étudiant le Centre Galactique

a) A-t-on un trou noir supermassif au centre de notre Galaxie ?

EHT (Event Horizon Telescope)
Interféromètre
VLBI : 13 stations



Radio → image de Sgr A*

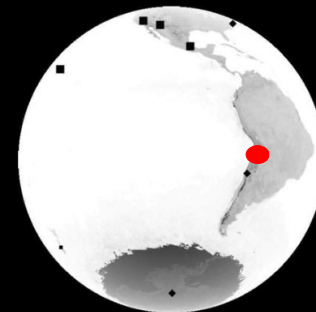


Simulation avec $a=0$ et $i=30^\circ$

Fish & Doeleman, Proc. IAU Symp 261 (2010)

b) A-t-on un trou noir décrit par la Relativité Générale au centre de notre Galaxie ?

GRAVITY
Interféromètre
VLTi : 4 télescopes



Infrarouge → étoiles

Comparaison des étoiles proches du centre galactique avec les étoiles par rapport à la Relativité Générale



2. En utilisant l'instrument GRAVITY

Interféromètre à 4 télescopes travaillant dans la bande K ($2-2,4 \mu\text{m}$)

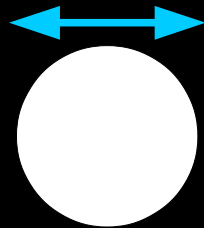


2. En utilisant l'instrument GRAVITY

Interféromètre à 4 télescopes travaillant dans la bande K (2-2,4 μm)



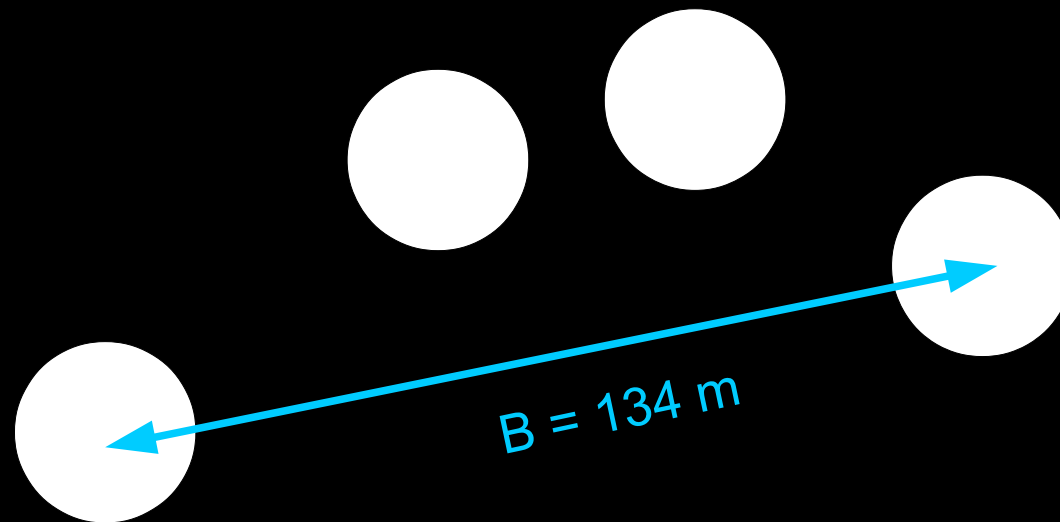
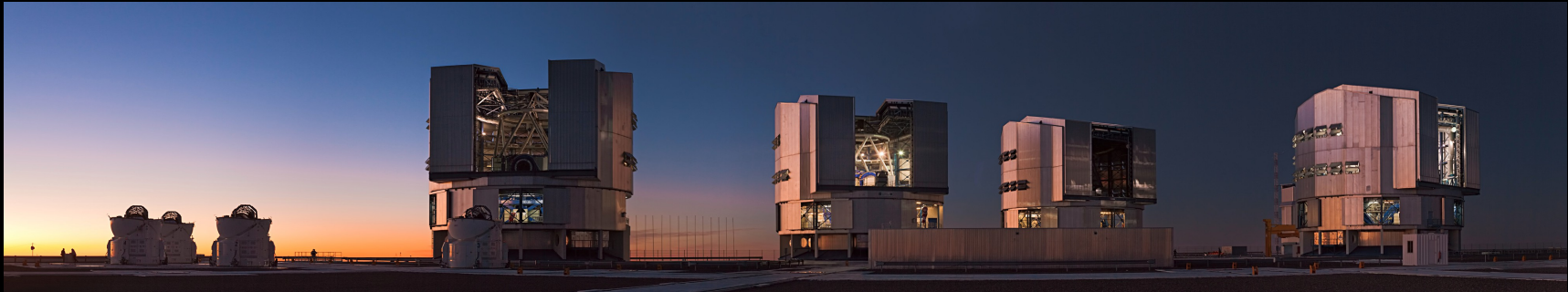
D = 8 m



Résolution angulaire avec 1 UT: $\lambda / D = 50$ mas

2. En utilisant l'instrument GRAVITY

Interféromètre à 4 télescopes travaillant dans la bande K (2-2,4 μm)



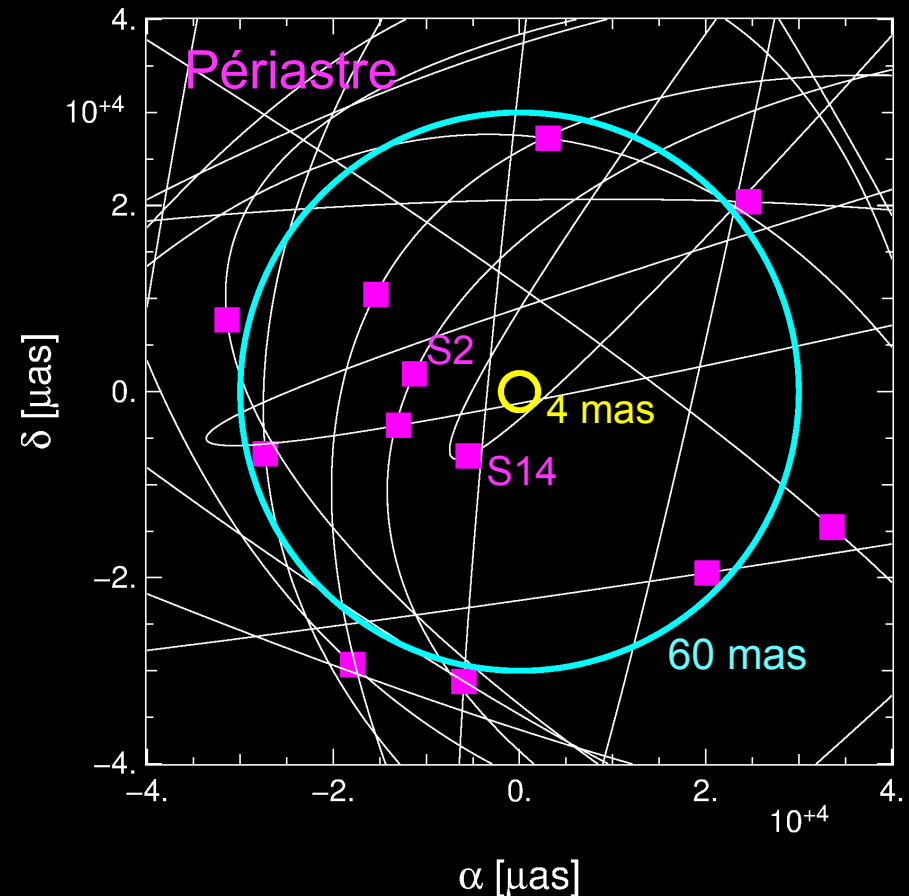
Résolution angulaire avec 4 UT: $\lambda / B = 4$ mas

2. En utilisant l'instrument GRAVITY

Interféromètre à 4 télescopes travaillant dans la bande K (2-2,4 μm)



Résolution angulaire : 4 mas
Champ de vue de recherche : 2"
Modes : Imagerie et Astrométrie
Champ de vue scientifique : 60 mas



2. En utilisant l'instrument GRAVITY

Interféromètre à 4 télescopes travaillant dans la bande K (2-2,4 μm)



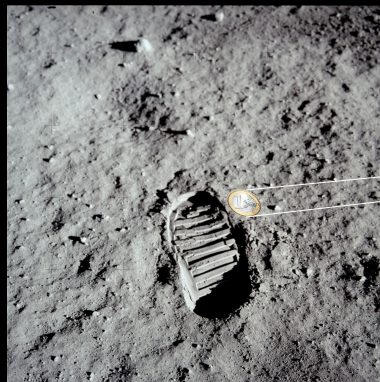
Résolution angulaire : 4 mas

Champ de vue de recherche : 2"

Modes : Imagerie et Astrométrie

Champ de vue scientifique : 60 mas

Précision astrométrique : 10 μas ($< 53 \mu\text{as}$)



10 μas



2. En utilisant l'instrument GRAVITY

Interféromètre à 4 télescopes travaillant dans la bande K (2-2,4 μm)



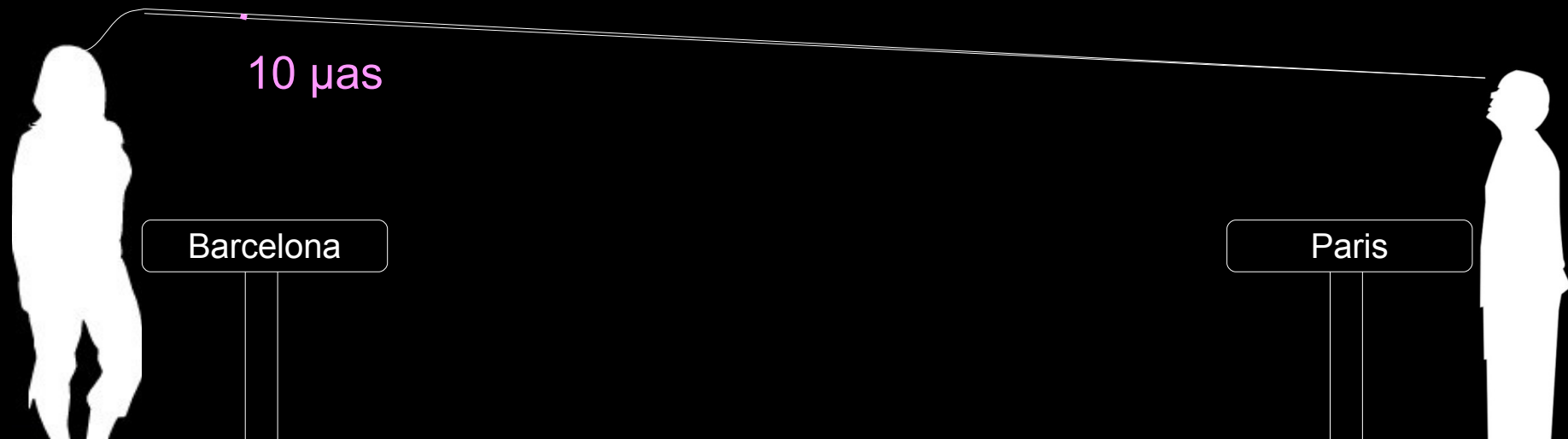
Résolution angulaire : 4 mas

Champ de vue de recherche : 2"

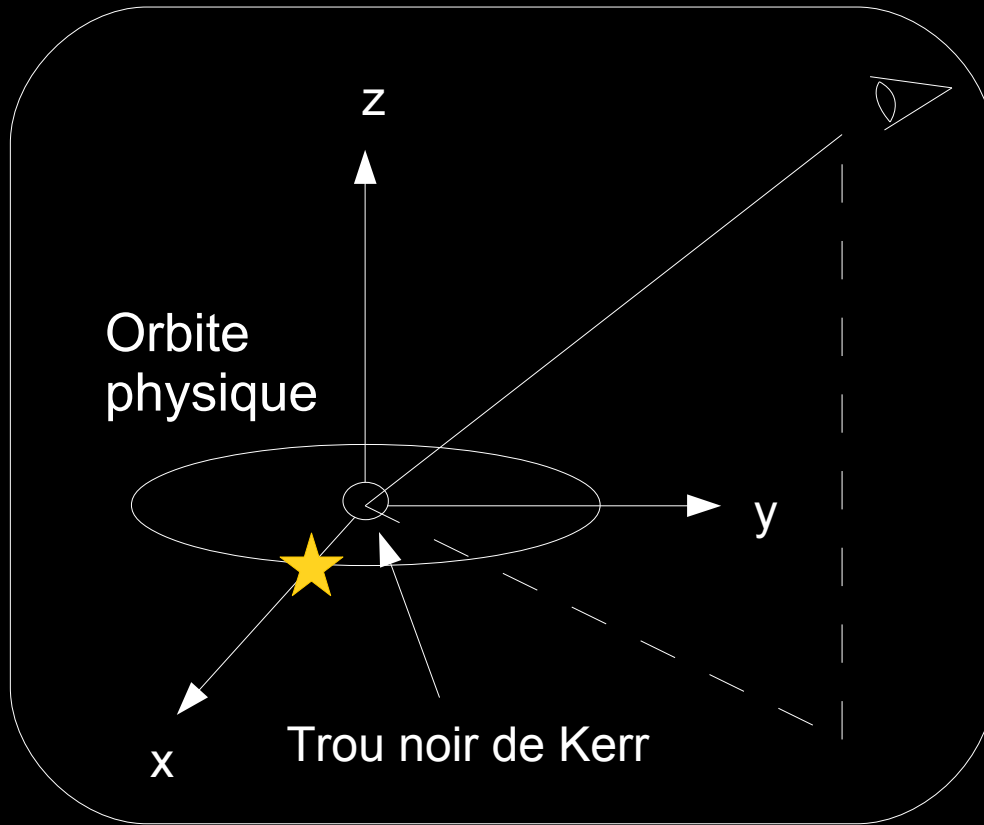
Modes : Imagerie et Astrométrie

Champ de vue scientifique : 60 mas

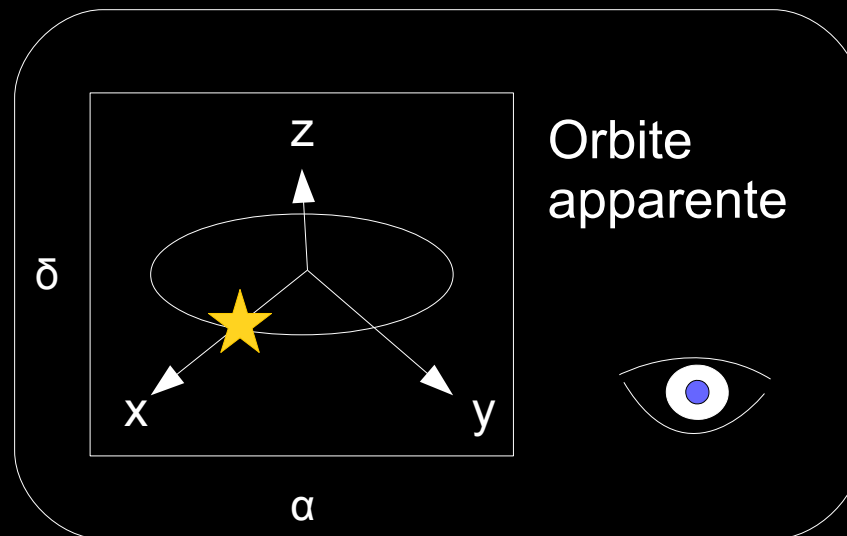
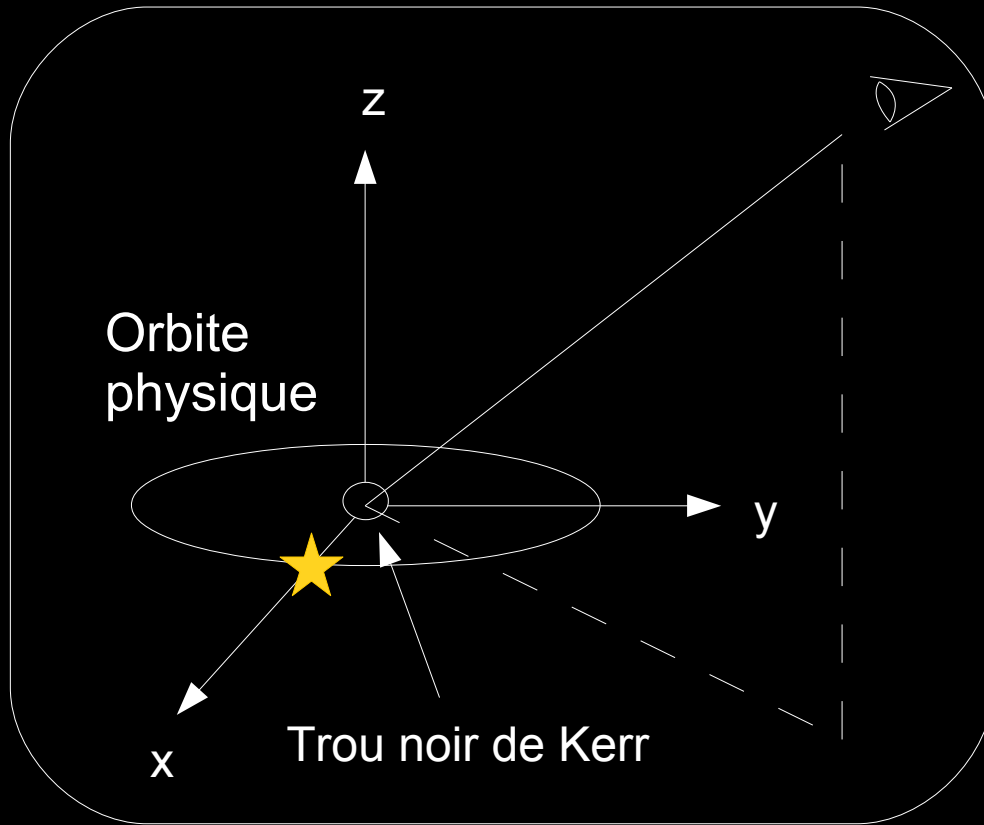
Précision astrométrique : 10 μas ($< 53 \mu\text{as}$)



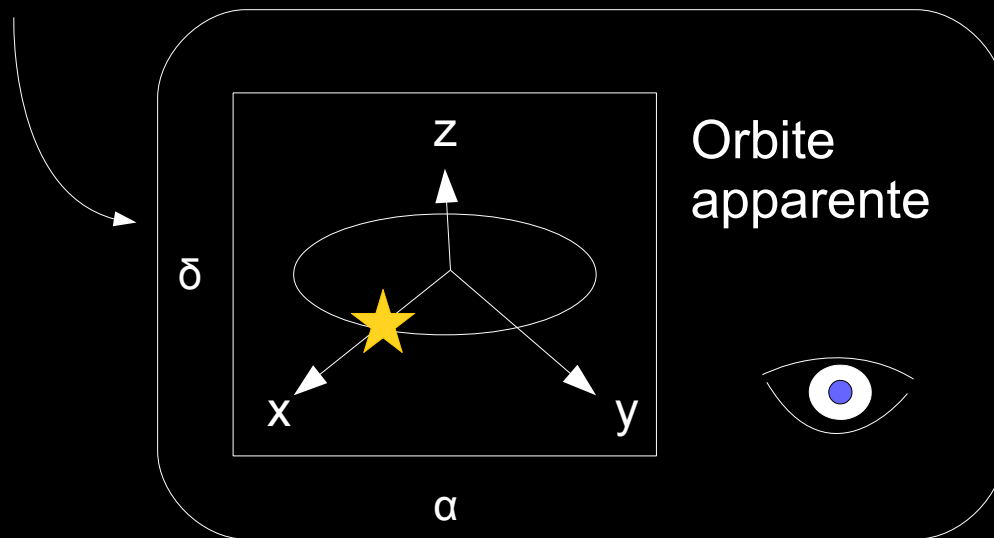
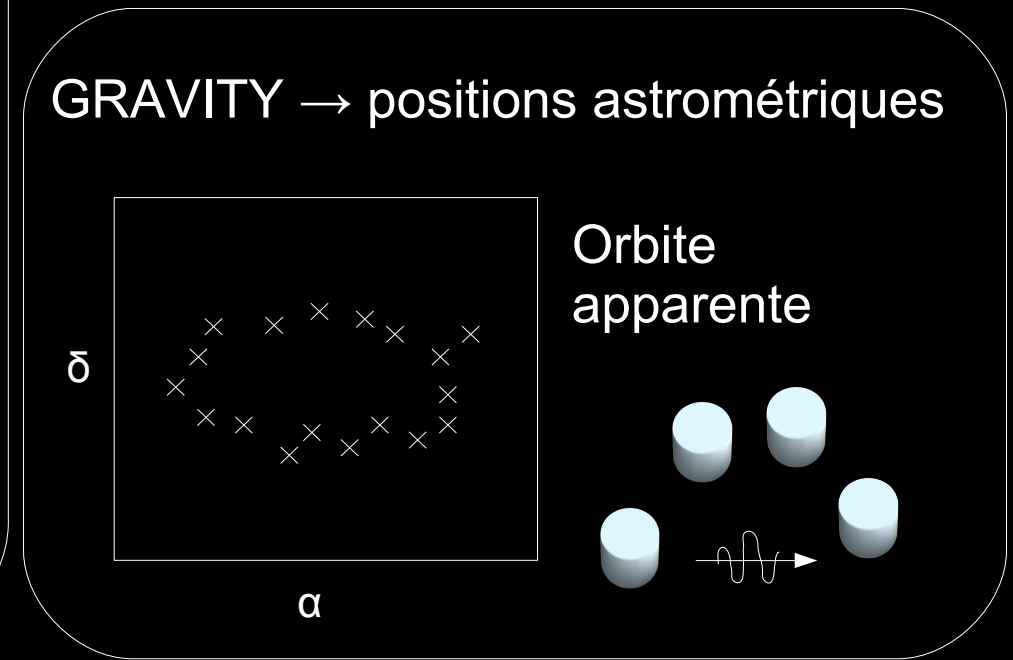
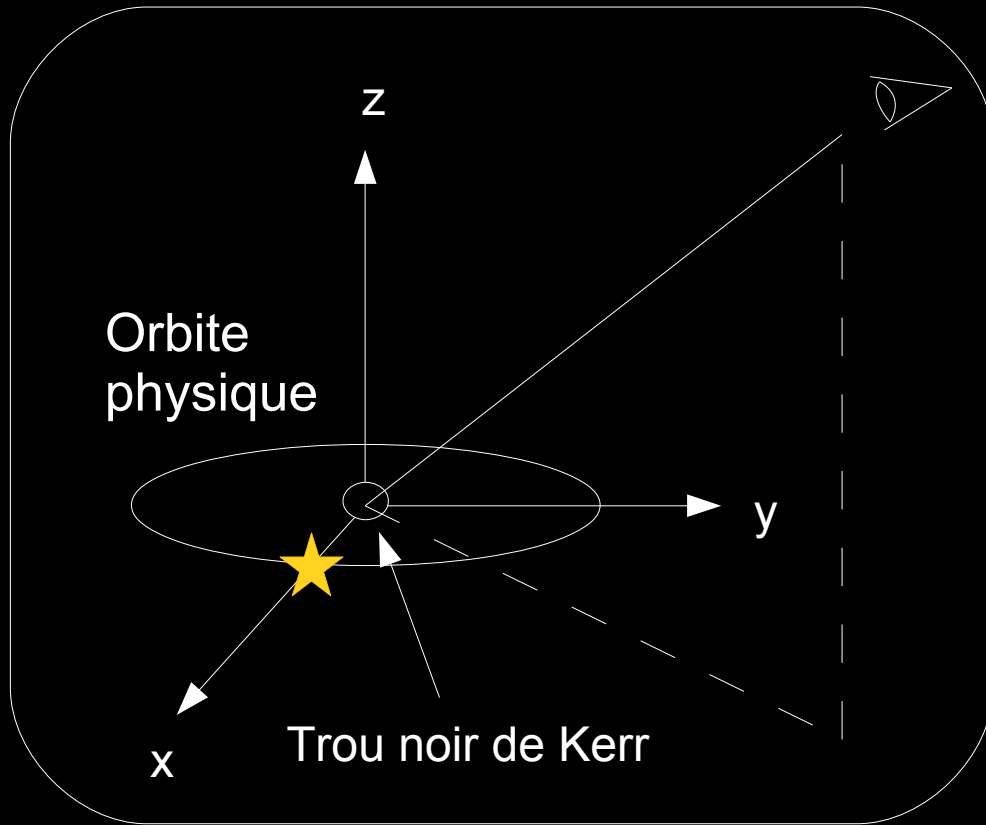
3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes



3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes



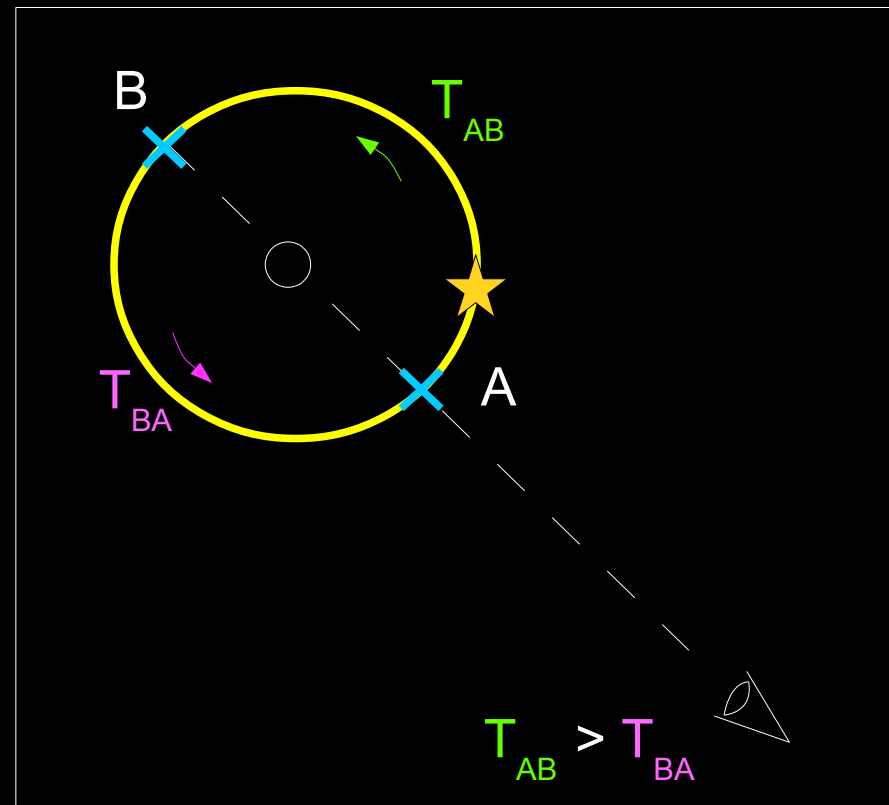
3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes



Ajustements
(M , a , D , i , etc)

3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes

Prendre en compte plusieurs effets :
→ l'effet Römer

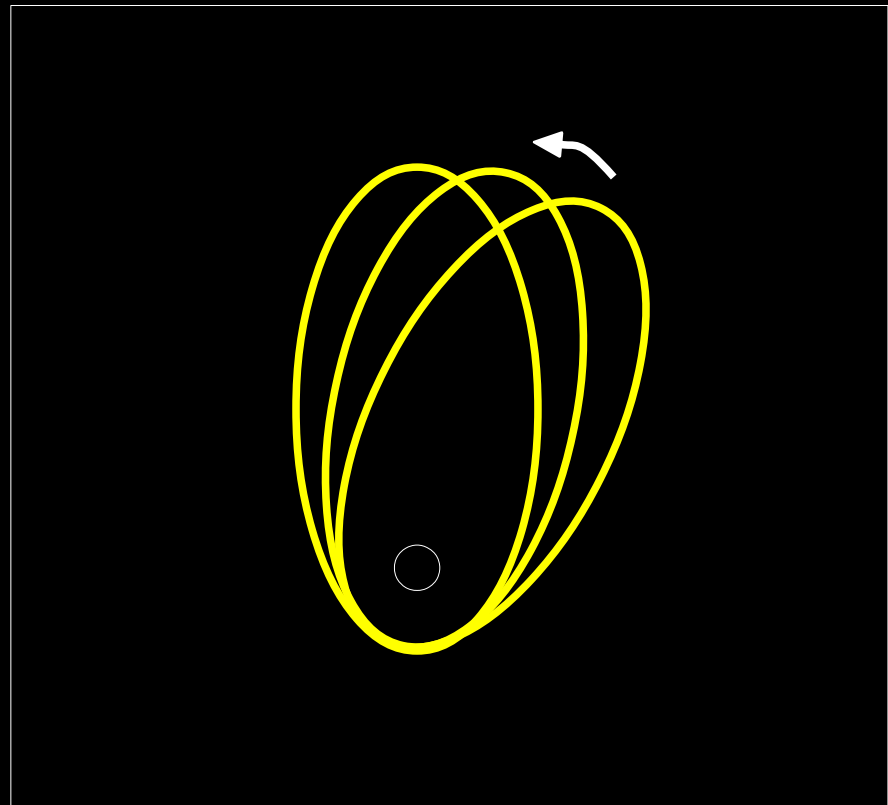


3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes

Prendre en compte plusieurs effets :

→ l'effet Römer

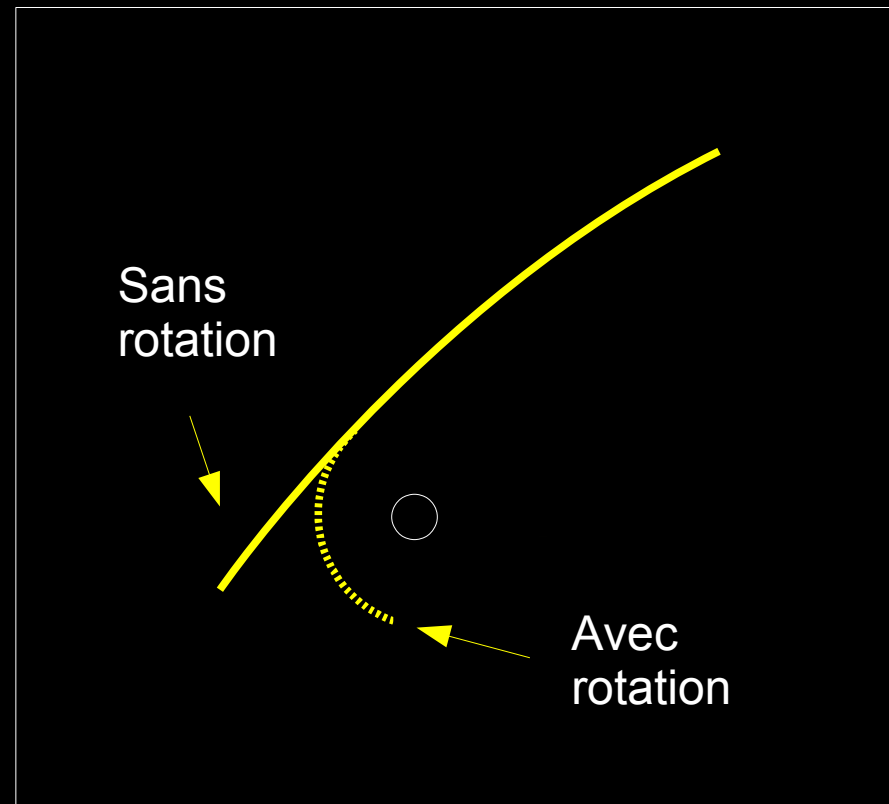
→ l'avance du périastre



3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes

Prendre en compte plusieurs effets :

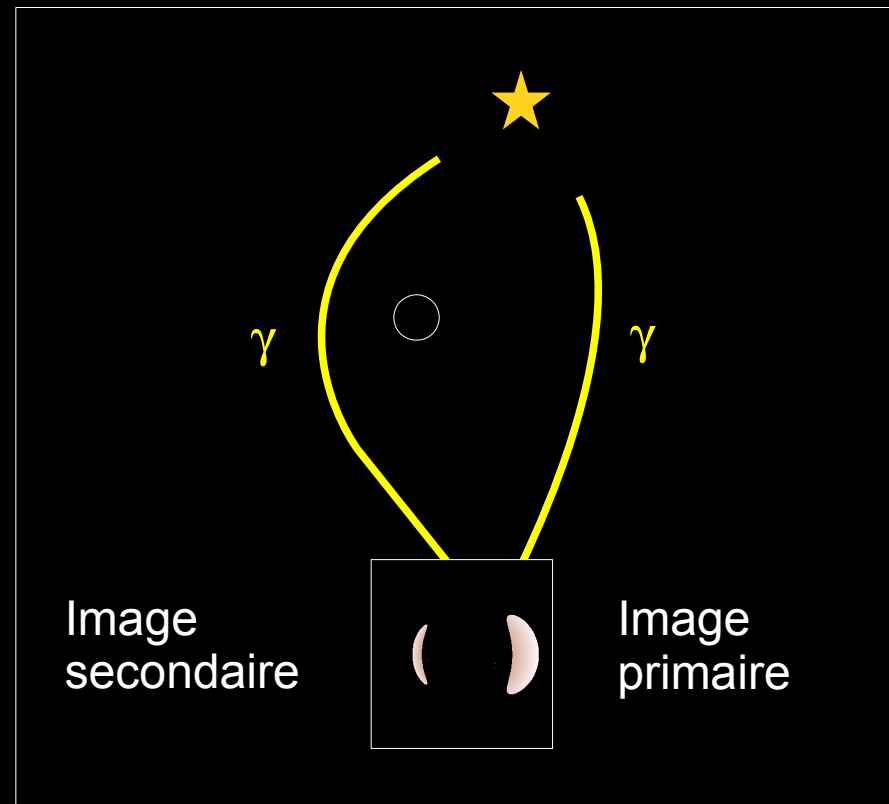
- l'effet Römer
- l'avance du périastre
- l'effet Lense-Thirring



3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes

Prendre en compte plusieurs effets :

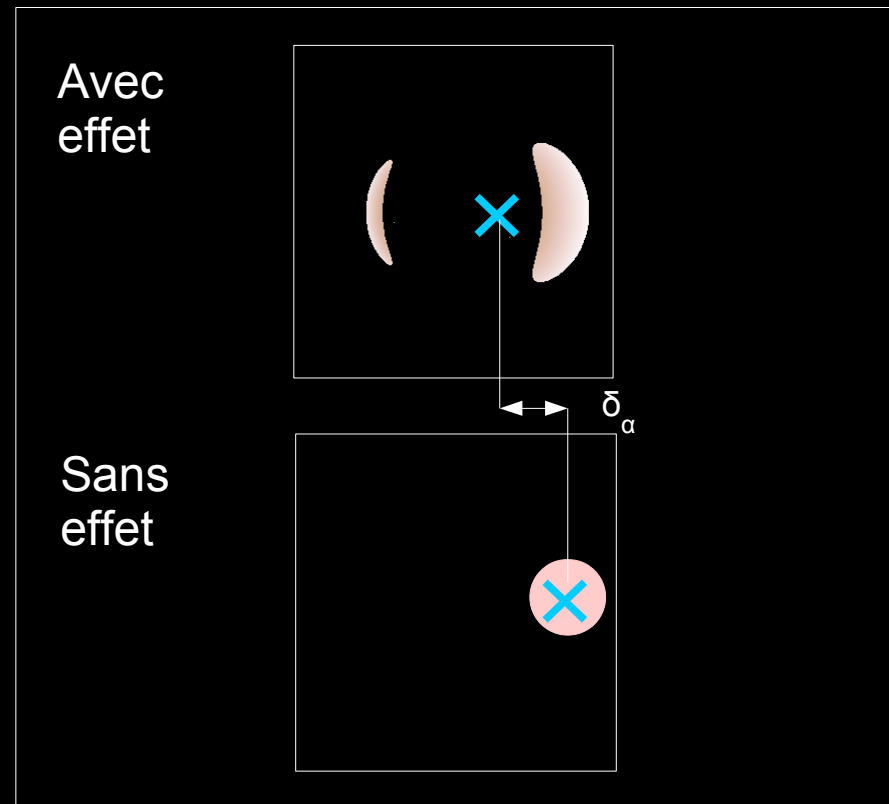
- l'effet Römer
- l'avance du périastre
- l'effet Lense-Thirring
- les effets de lentille gravitationnelle



3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes

Prendre en compte plusieurs effets :

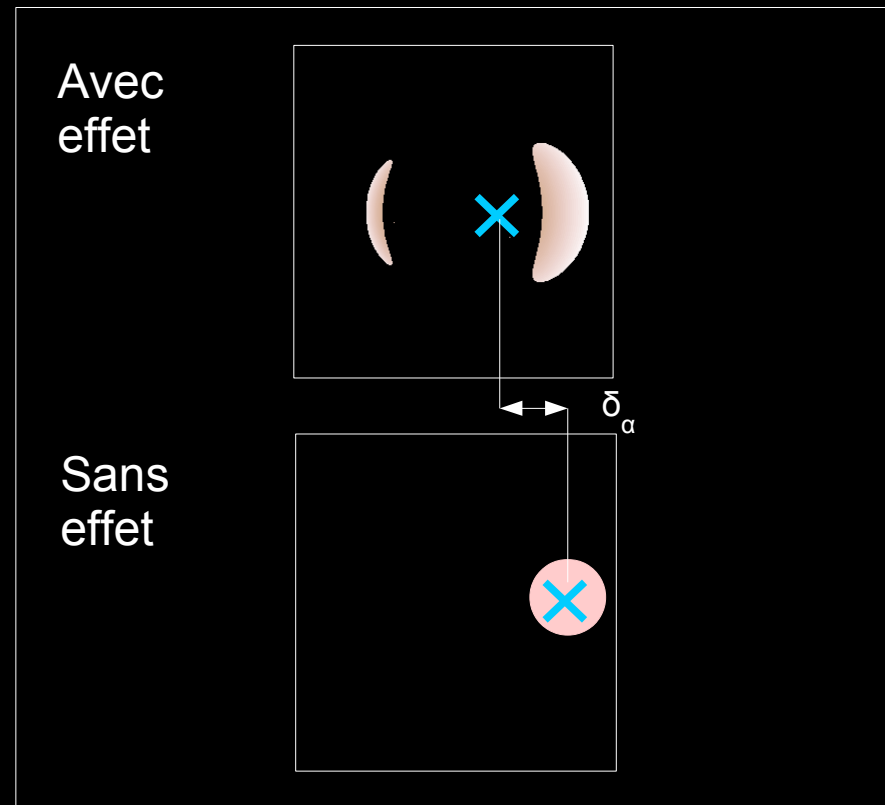
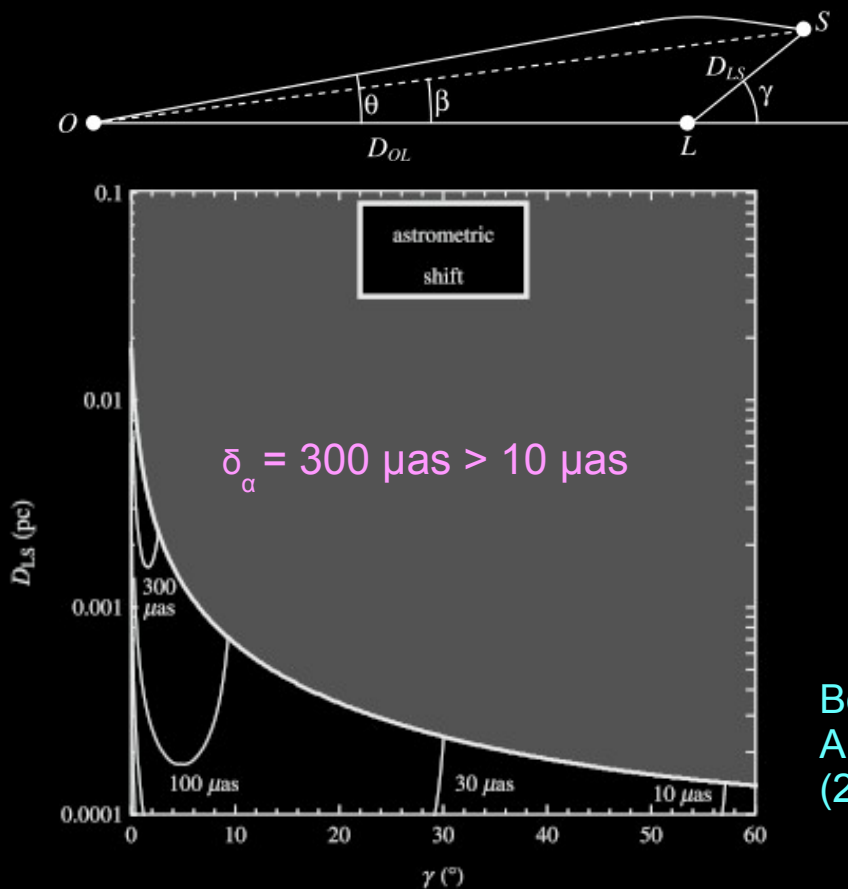
- l'effet Römer
- l'avance du périastre
- l'effet Lense-Thirring
- les effets de lentille gravitationnelle



3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes

Prendre en compte plusieurs effets :

- l'effet Römer
- l'avance du périastre
- l'effet Lense-Thirring
- les effets de lentille gravitationnelle

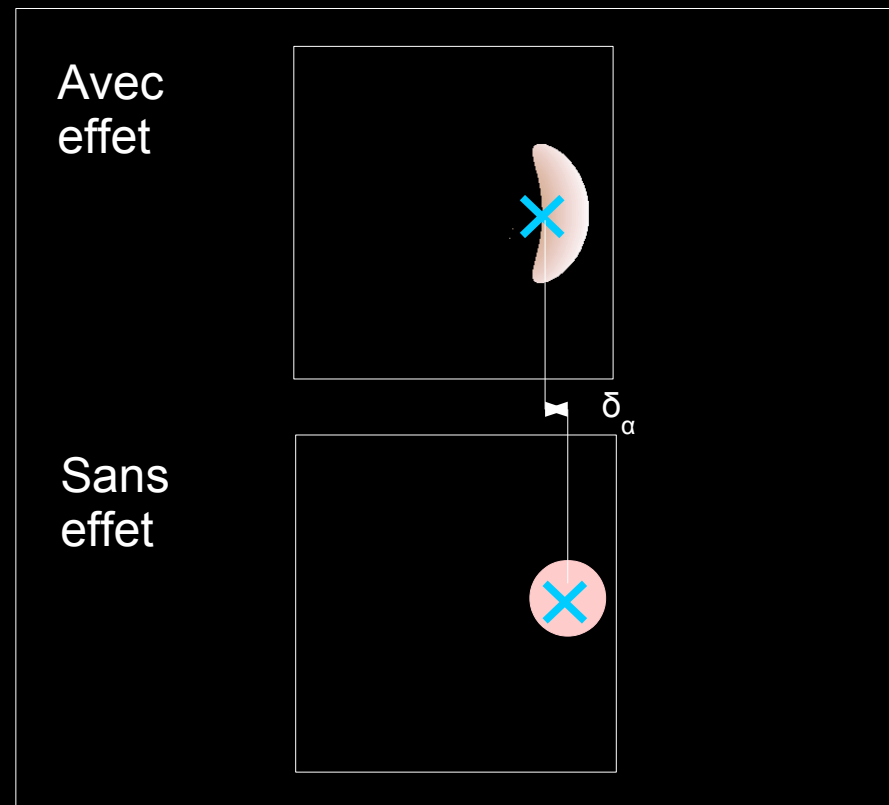


Bozza V., et al.
ApJ, 753, 56
(2012)

3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes

Prendre en compte plusieurs effets :

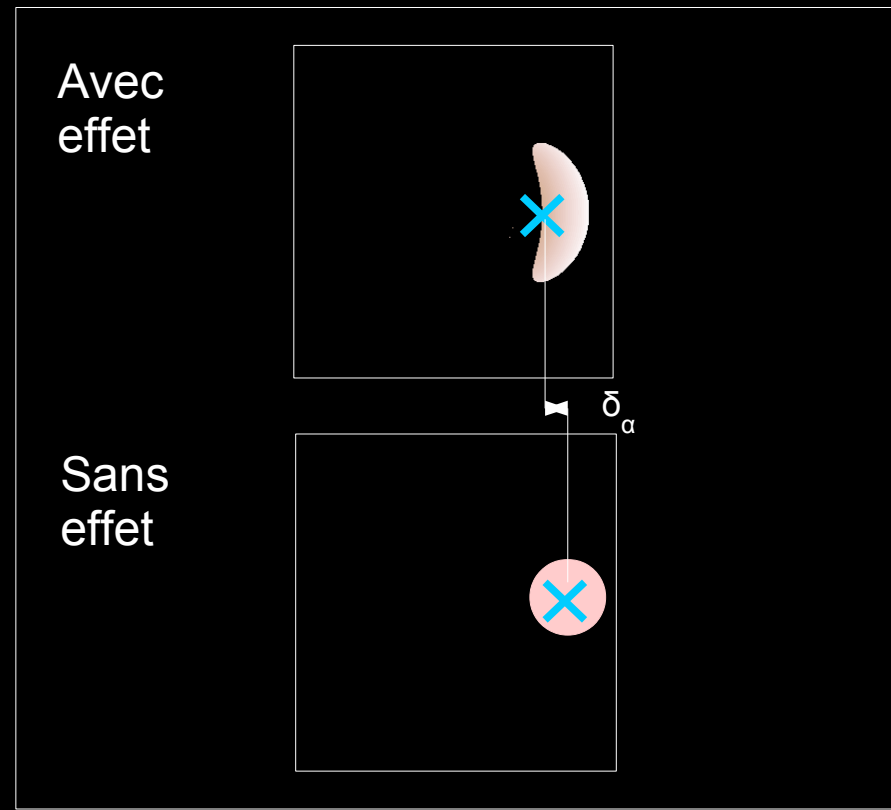
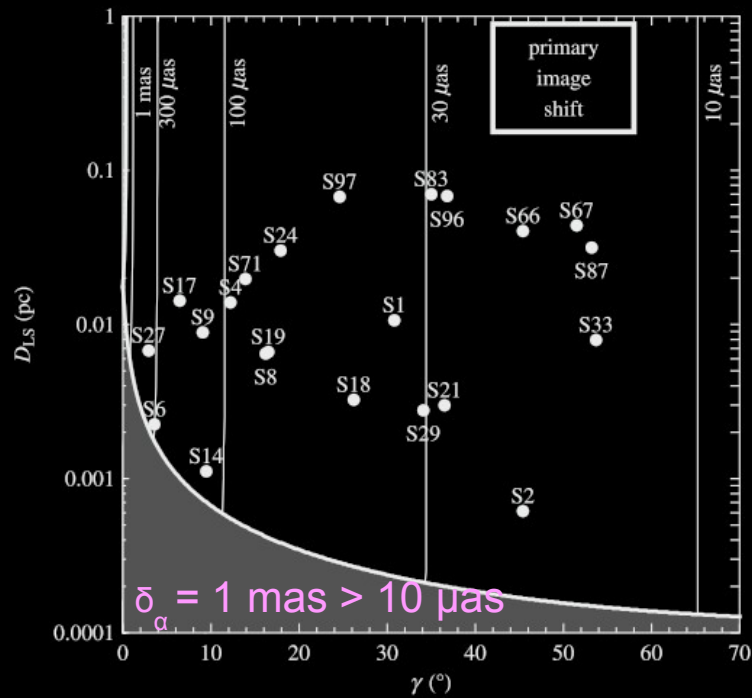
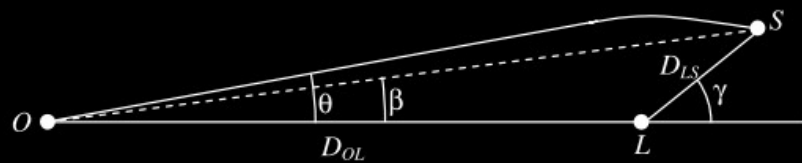
- l'effet Römer
- l'avance du périastre
- l'effet Lense-Thirring
- les effets de lentille gravitationnelle



3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes

Prendre en compte plusieurs effets :

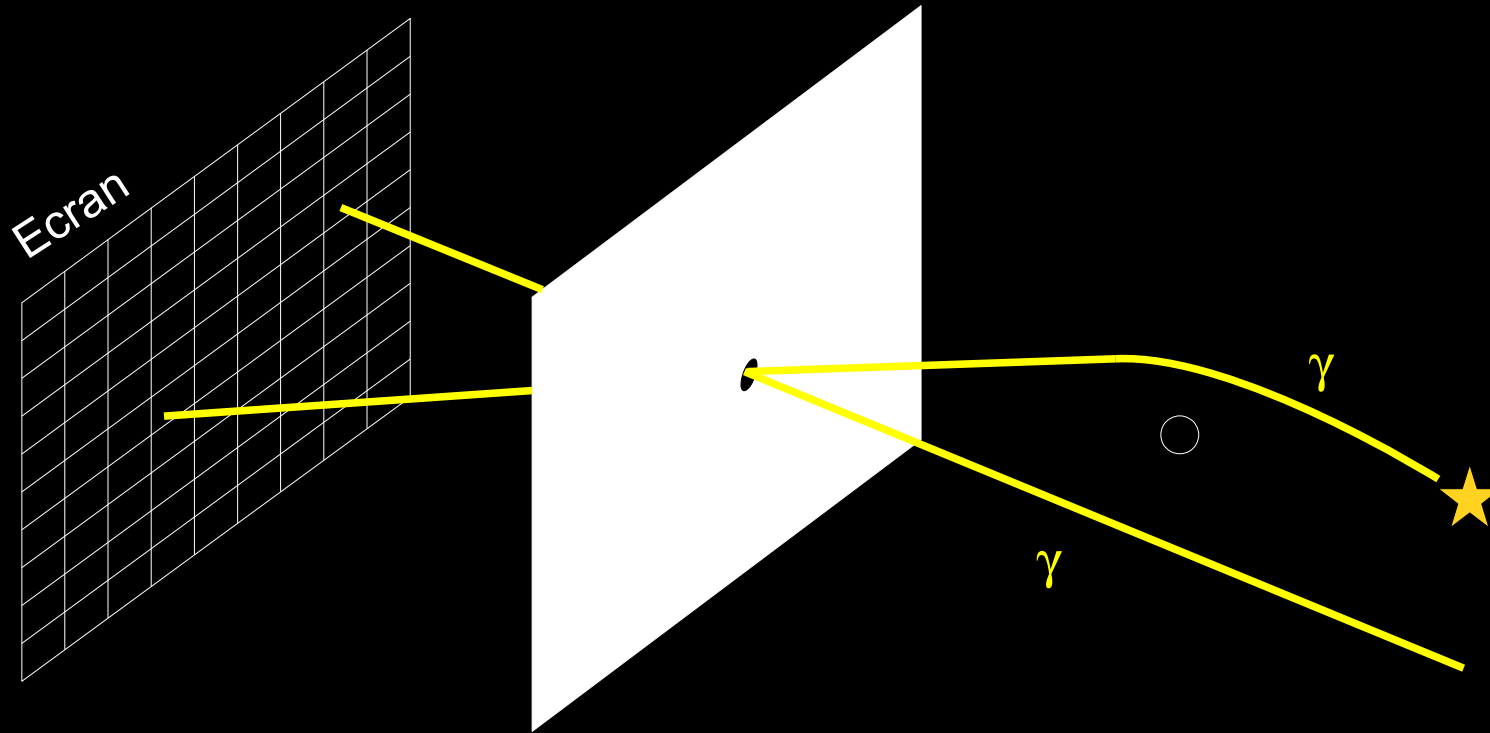
- l'effet Römer
- l'avance du périastre
- l'effet Lense-Thirring
- les effets de lentille gravitationnelle



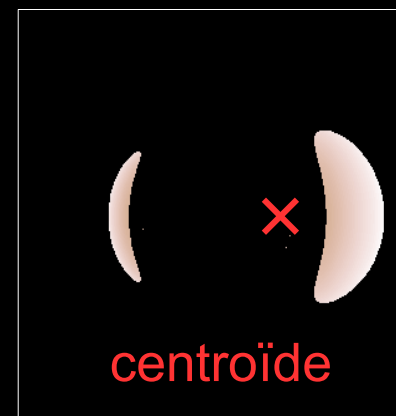
Bozza V., et al.
ApJ, 753, 56
(2012)

3. En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes

GYOTO : traceur de rayons développé par [Vincent et al. \(2011\)](#)



Positions apparentes avec GYOTO :



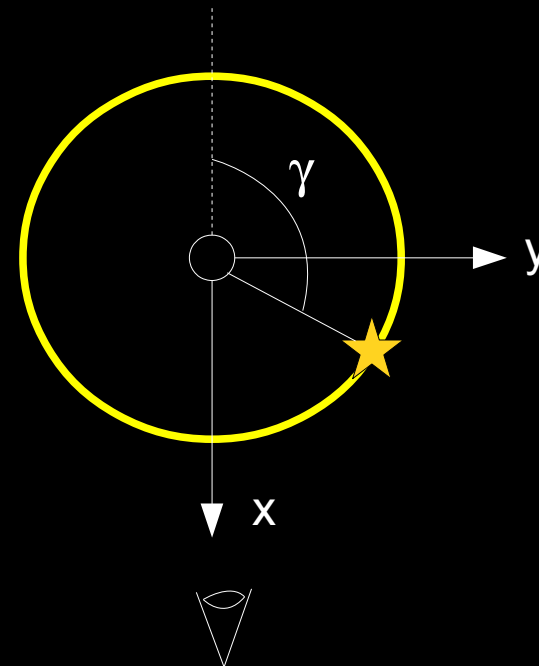
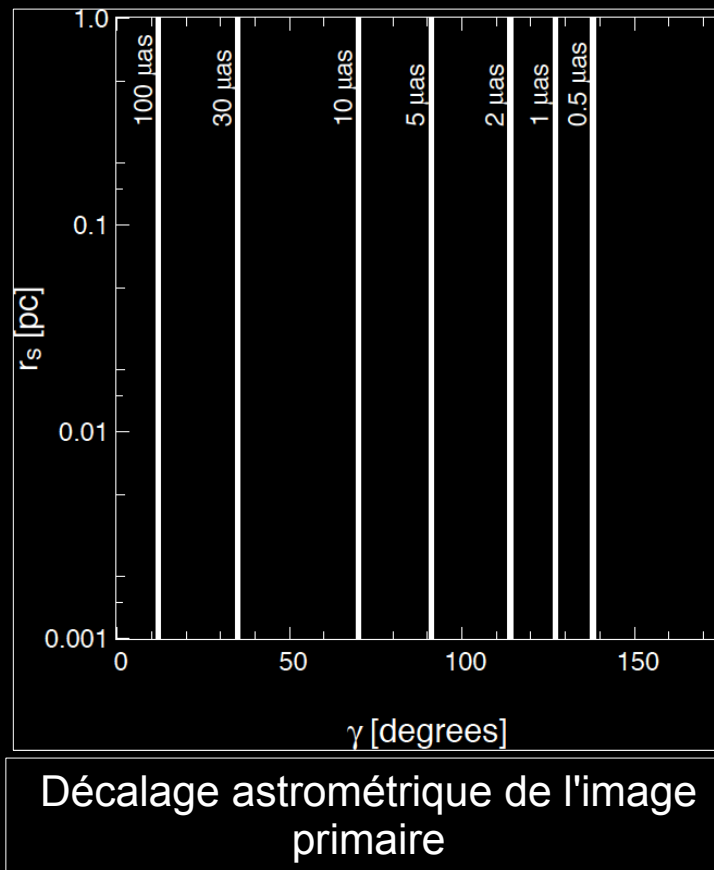
4. En ayant un modèle très précis

Précision du modèle $\ll 10 \mu\text{as} \rightarrow \leq 1 \mu\text{as}$

4. En ayant un modèle très précis

Précision du modèle $\ll 10 \mu\text{as} \rightarrow \leq 1 \mu\text{as}$

- prendre en compte les effets de lentille gravitationnelle



4. En ayant un modèle très précis

Précision du modèle $\ll 10 \mu\text{as} \rightarrow \leq 1 \mu\text{as}$

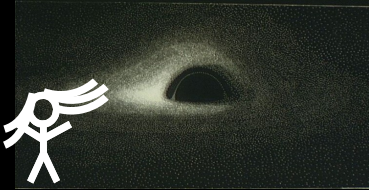
- prendre en compte les effets de lentille gravitationnelle
- l'intégration des photons : validation de GYOTO en champ faible et en champ fort

4. En ayant un modèle très précis

Précision du modèle $\ll 10 \mu\text{as} \rightarrow \leq 1 \mu\text{as}$

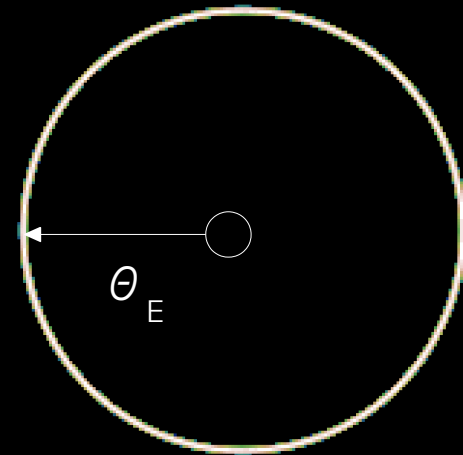
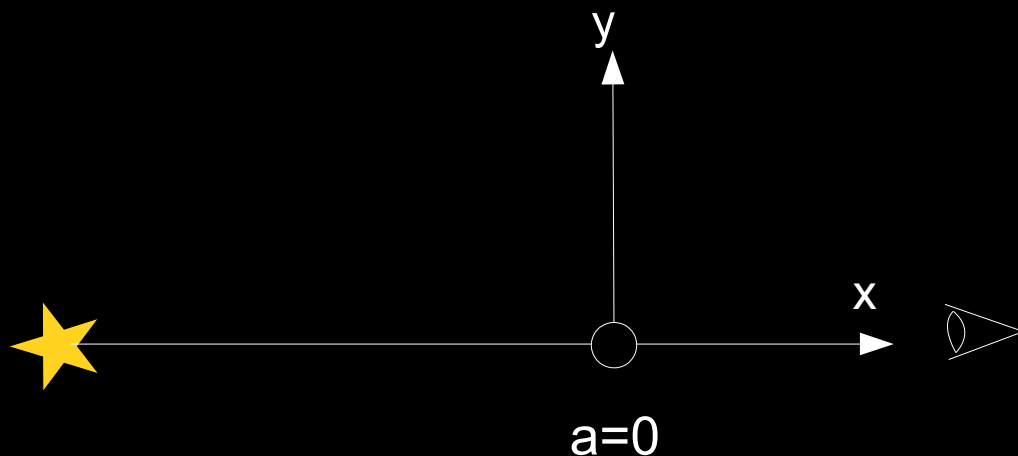
- prendre en compte les effets de lentille gravitationnelle
- l'intégration des photons : validation de GYOTO en champ faible et en champ fort

En champ faible : comparaison de GYOTO avec des formules analytiques développées par [Sereno et al. \(2008\)](#)



Par exemple :

- Rayon de l'anneau d'Einstein

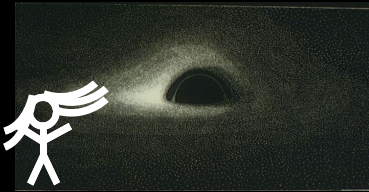


4. En ayant un modèle très précis

Précision du modèle $\ll 10 \mu\text{as} \rightarrow \leq 1 \mu\text{as}$

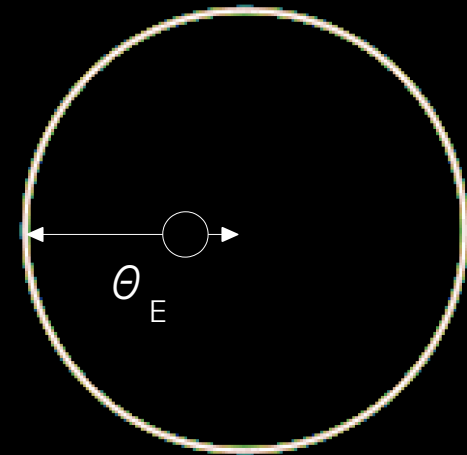
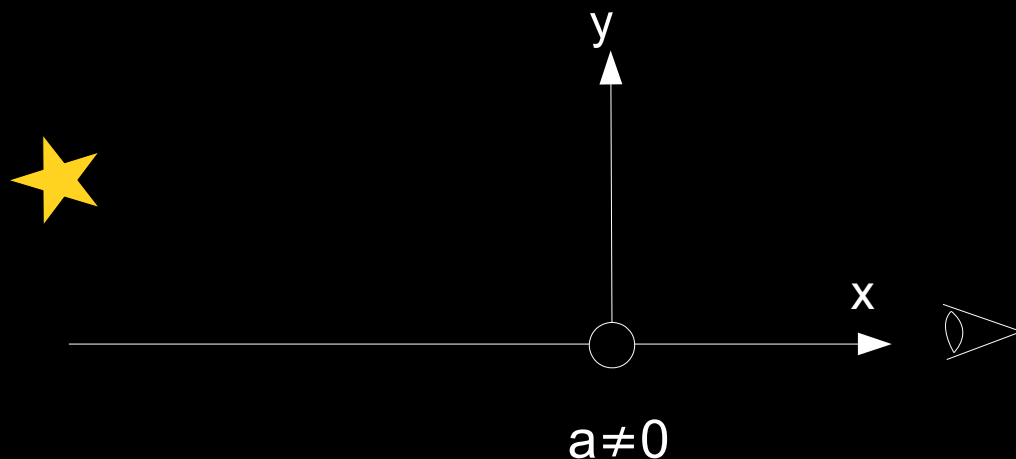
- prendre en compte les effets de lentille gravitationnelle
- l'intégration des photons : validation de GYOTO en champ faible et en champ fort

En champ faible : comparaison de GYOTO avec des formules analytiques développées par [Sereno et al. \(2008\)](#)



Par exemple :

- Rayon de l'anneau d'Einstein

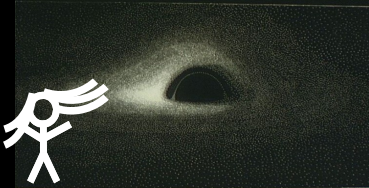


4. En ayant un modèle très précis

Précision du modèle $\ll 10 \mu\text{as} \rightarrow \leq 1 \mu\text{as}$

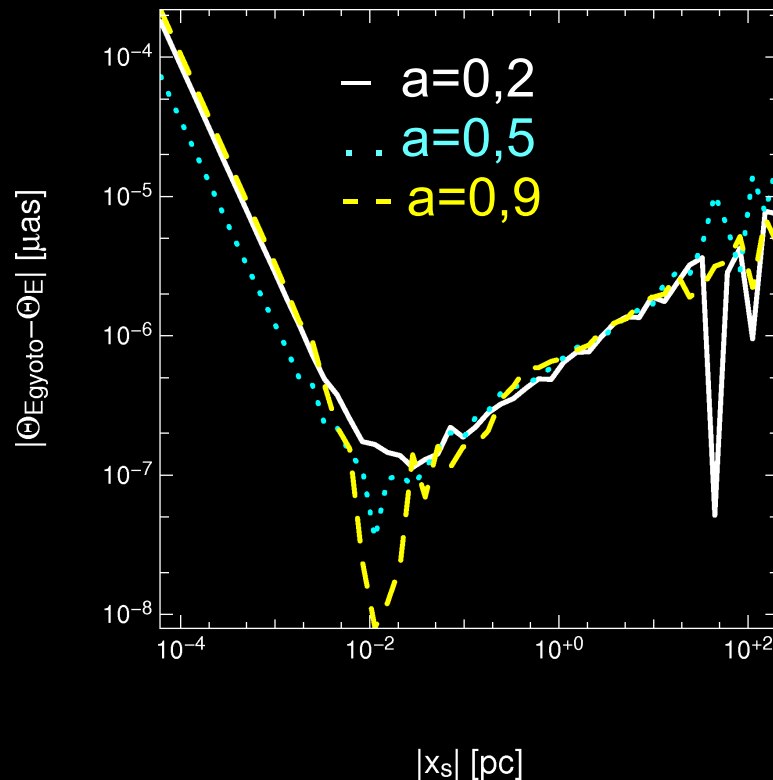
- prendre en compte les effets de lentille gravitationnelle
- l'intégration des photons : validation de GYOTO en champ faible et en champ fort

En champ faible : comparaison de GYOTO avec des formules analytiques développées par [Sereno et al. \(2008\)](#)



Par exemple :

- Rayon de l'anneau d'Einstein



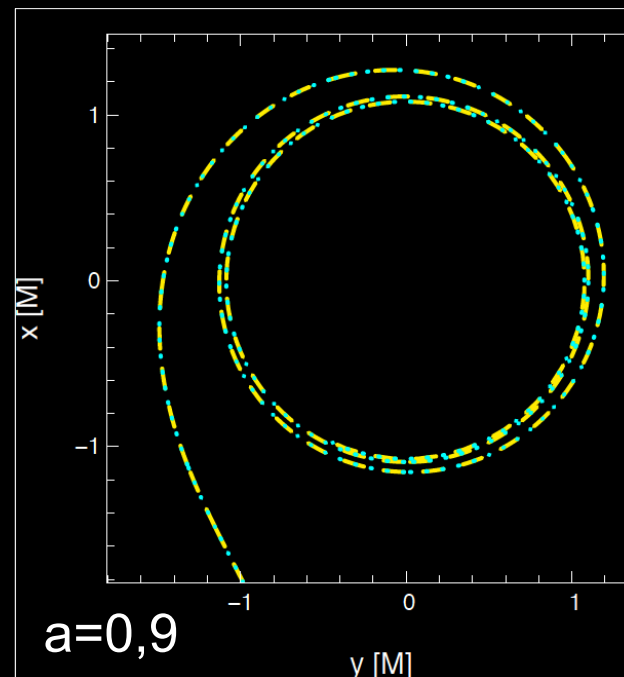
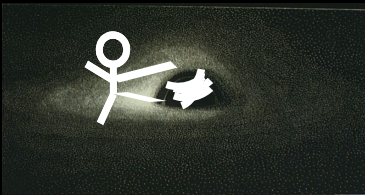
$$|\theta_{\text{Egyoto}} - \theta_E| < 10^{-3} \mu\text{as}$$
$$\Delta \theta_E < 10^{-3} \mu\text{as}$$

4. En ayant un modèle très précis

Précision du modèle $\ll 10 \mu\text{as} \rightarrow \leq 1 \mu\text{as}$

- prendre en compte les effets de lentille gravitationnelle
- l'intégration des photons : validation de GYOTO en champ faible et en champ fort

En champ fort: comparaison de GYOTO avec un autre traceur de rayons, GeoKerr, développé par Dexter et al. (2009)



.. GYOTO
-- GeoKerr

$\delta x, \delta y < 10^{-3} \mu\text{as}$

Conclusion & perspectives

Comment tester la Relativité Générale avec les futures données de l'instrument GRAVITY ?

En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes précis avec GYOTO.

→ importance des effets de lentille

→ GYOTO valide et précis

Conclusion & perspectives

Comment tester la Relativité Générale avec les futures données de l'instrument GRAVITY ?

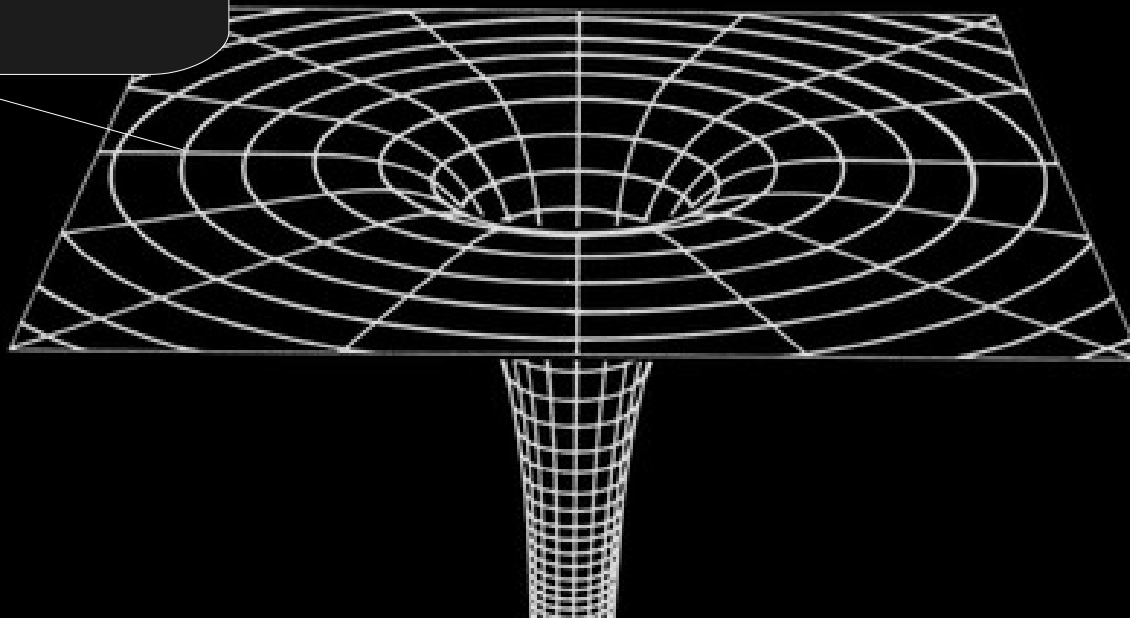
En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes précis avec GYOTO.

→ importance des effets de lentille

→ GYOTO valide et précis

Mettre en place le modèle

→ contrainte sur le temps de calcul des images GYOTO



Conclusion & perspectives

Comment tester la Relativité Générale avec les futures données de l'instrument GRAVITY ?

En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes précis avec GYOTO.

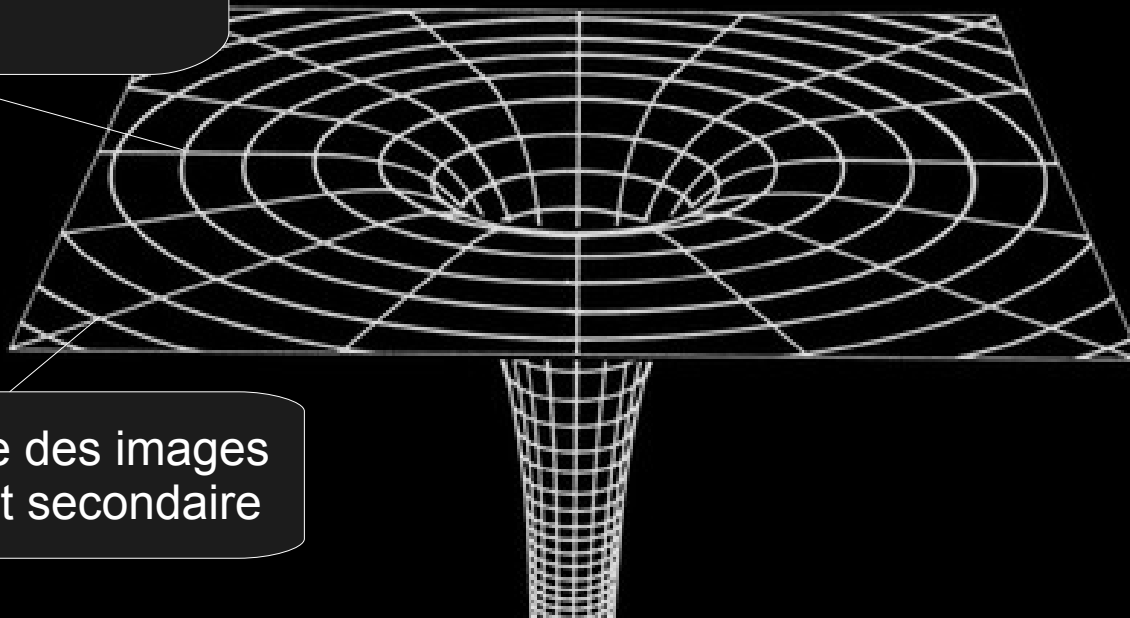
→ importance des effets de lentille

→ GYOTO valide et précis

Mettre en place le modèle

→ contrainte sur le temps de calcul des images GYOTO

Découpage des images primaire et secondaire



Conclusion & perspectives

Comment tester la Relativité Générale avec les futures données de l'instrument GRAVITY ?

En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes précis avec GYOTO.

→ importance des effets de lentille

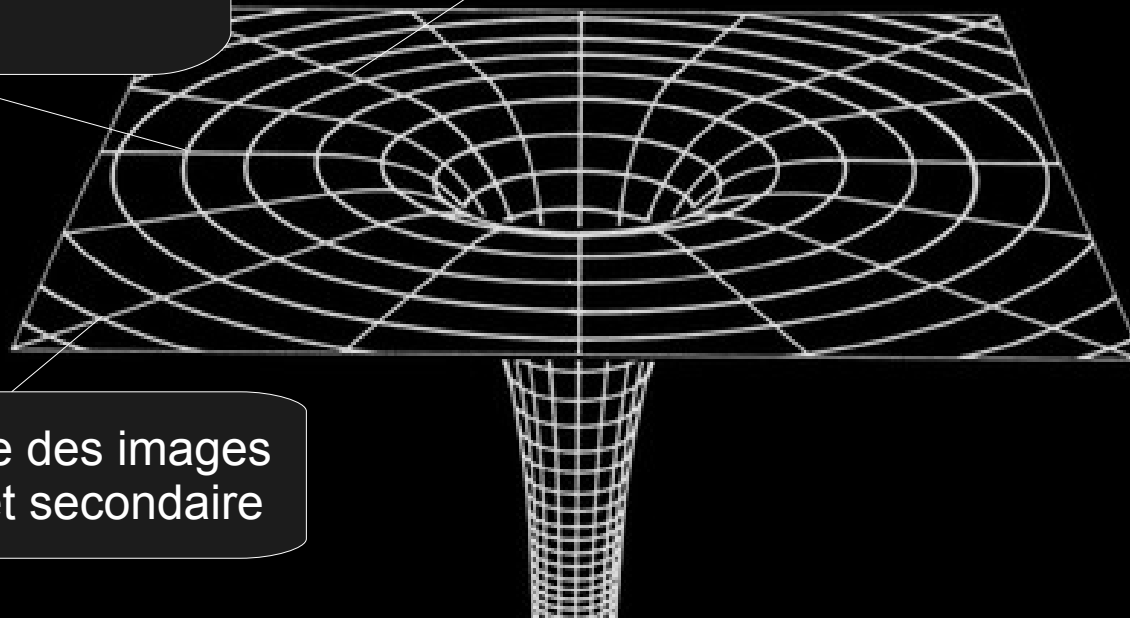
→ GYOTO valide et précis

Mettre en place le modèle

→ contrainte sur le temps de calcul des images GYOTO

MPI

Découpage des images
primaire et secondaire



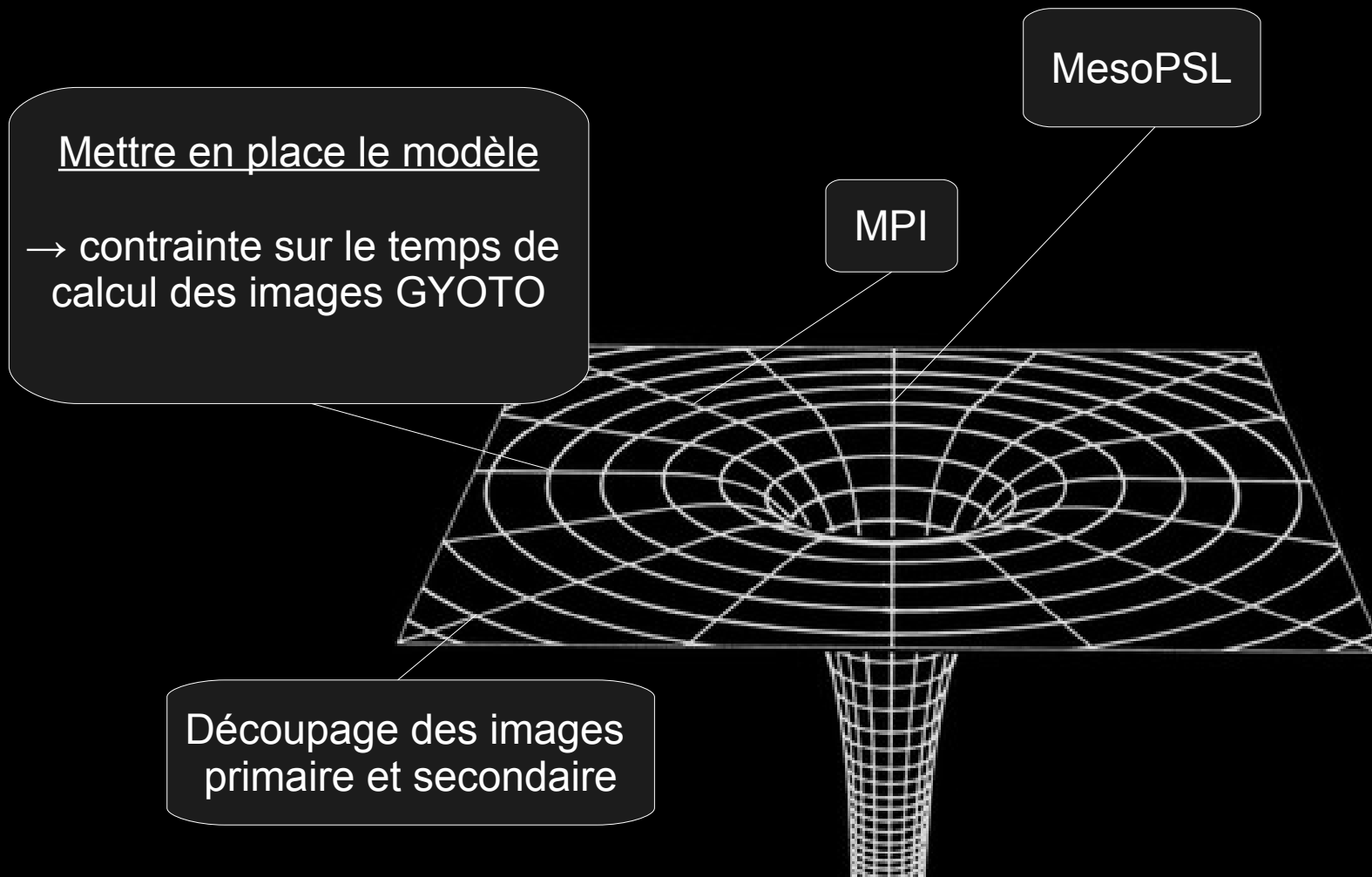
Conclusion & perspectives

Comment tester la Relativité Générale avec les futures données de l'instrument GRAVITY ?

En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes précis avec GYOTO.

→ importance des effets de lentille

→ GYOTO valide et précis



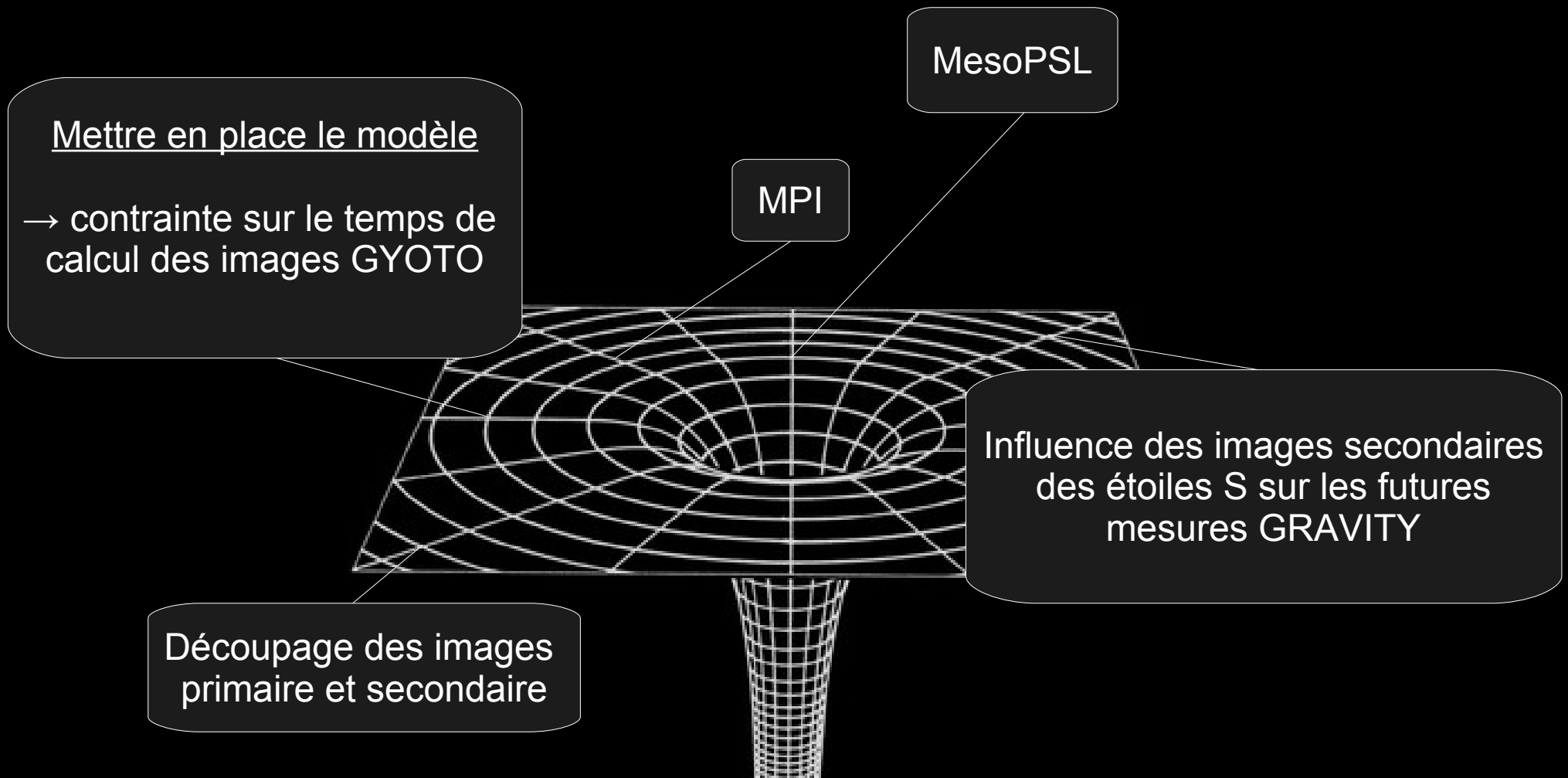
Conclusion & perspectives

Comment tester la Relativité Générale avec les futures données de l'instrument GRAVITY ?

En construisant un modèle d'orbites relativistes apparentes précis avec GYOTO.

→ importance des effets de lentille

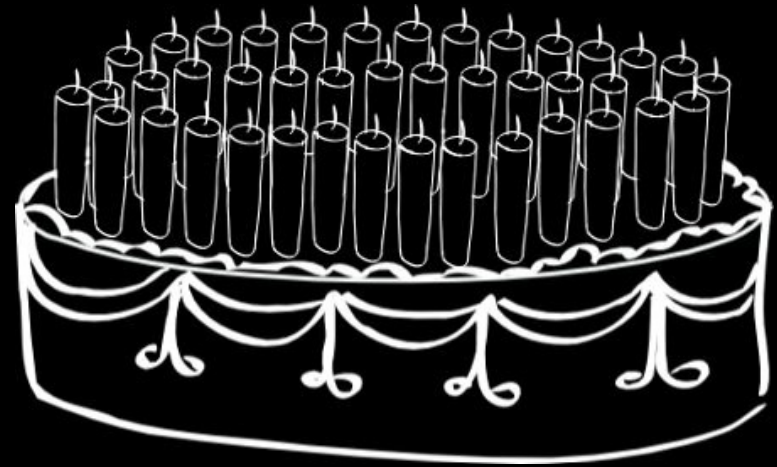
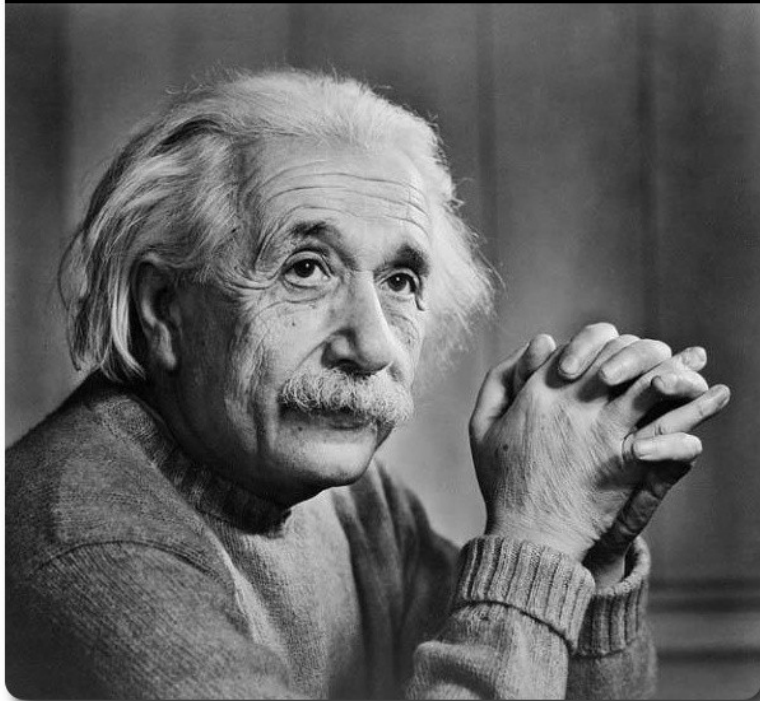
→ GYOTO valide et précis



MERCI.

**A person who never made a
mistake never tried anything new.**

- Albert Einstein



Joyeux anniversaire