

---

# Les lentilles Gravitationnelles avec Gaia

CHRISTINE DUCOURANT

RESPONSABLE DU TRAITEMENT DE LA MORPHOLOGIE DES OBJETS EXTRAGALACTIQUE

LABORATOIRE D'ASTROPHYSIQUE DE BORDEAUX

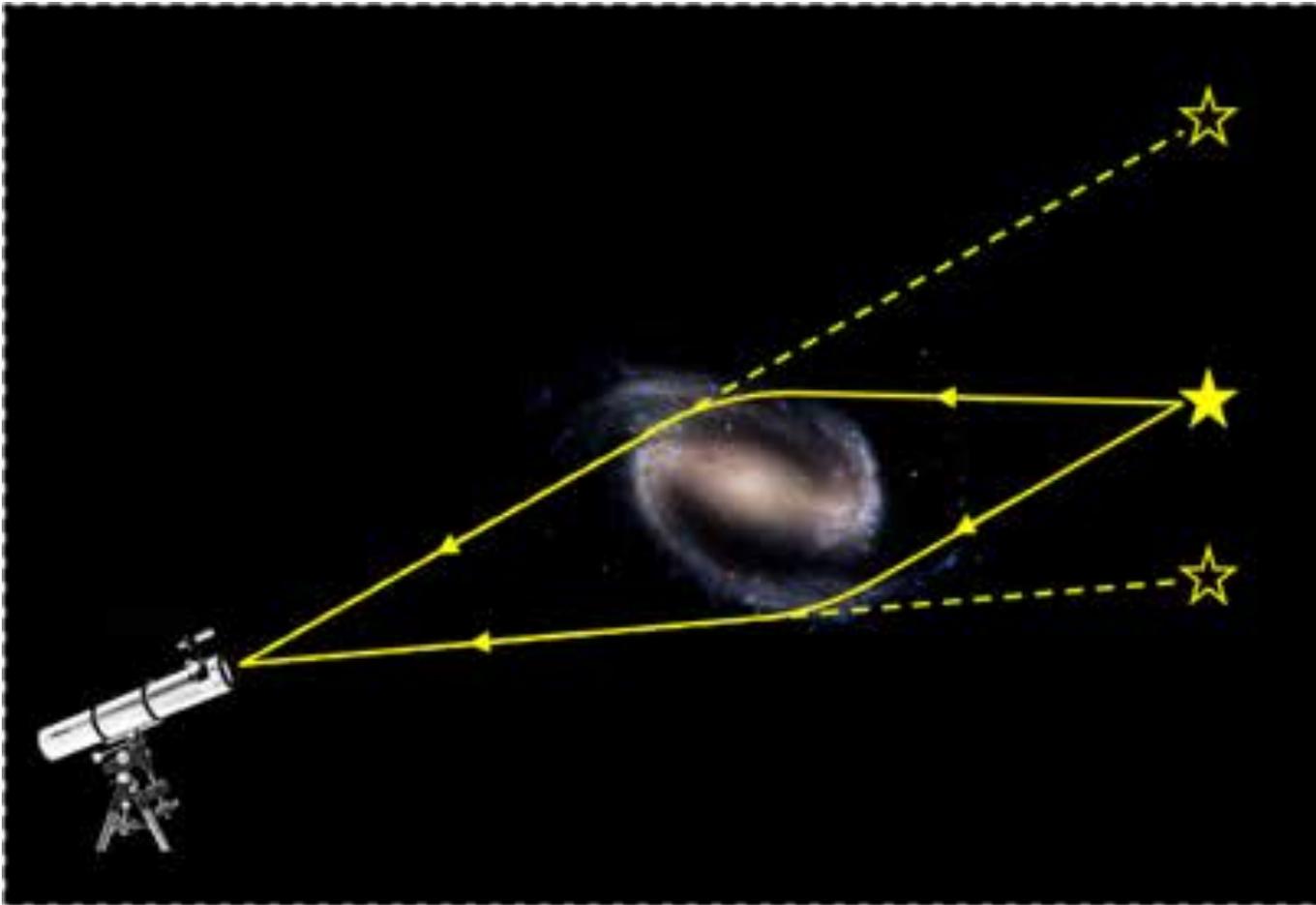
---



# GAIA OBSERVE LE CIEL ENTIER

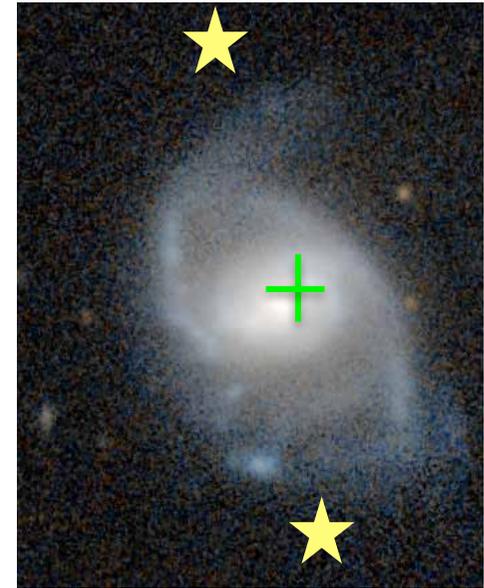
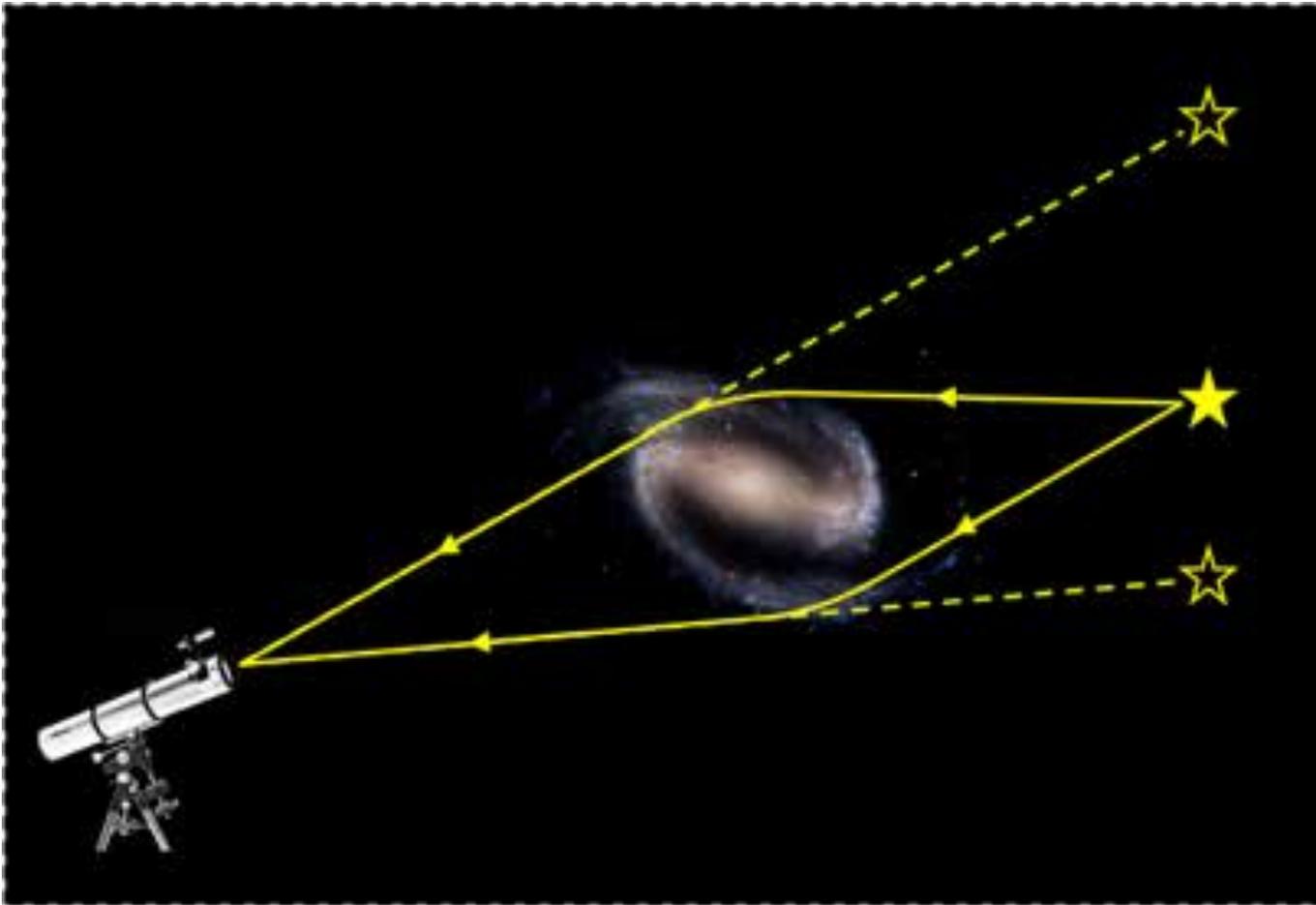
- Observe de nombreux objets extragalactiques :
  - ~2 millions de galaxies
  - ~1.6 millions de quasars
- Quelques centaines de ces quasars subissent un effet de **lentillage gravitationnel** (mirage gravitationnel)

# QU'EST-CE QU'UNE LENTILLE GRAVITATIONNELLE?



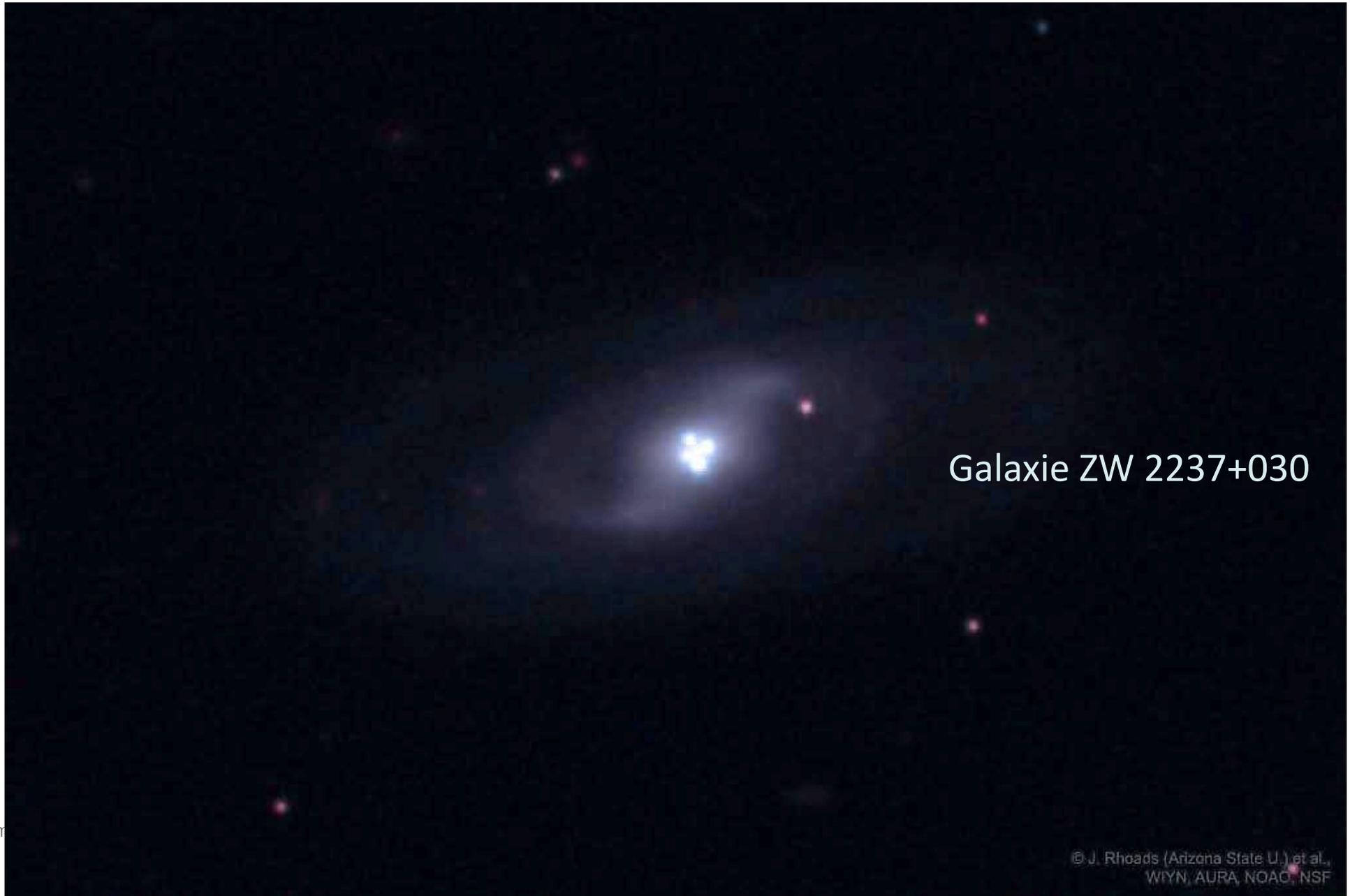
- C'est le résultat de la courbure de la lumière d'une source distante par un objet massif sur la ligne de visée
- Phénomènes rares, difficiles à trouver.

# QU'EST-CE QU'UNE LENTILLE GRAVITATIONNELLE?



- L'observateur voit plusieurs images de la sources d'arrière plan

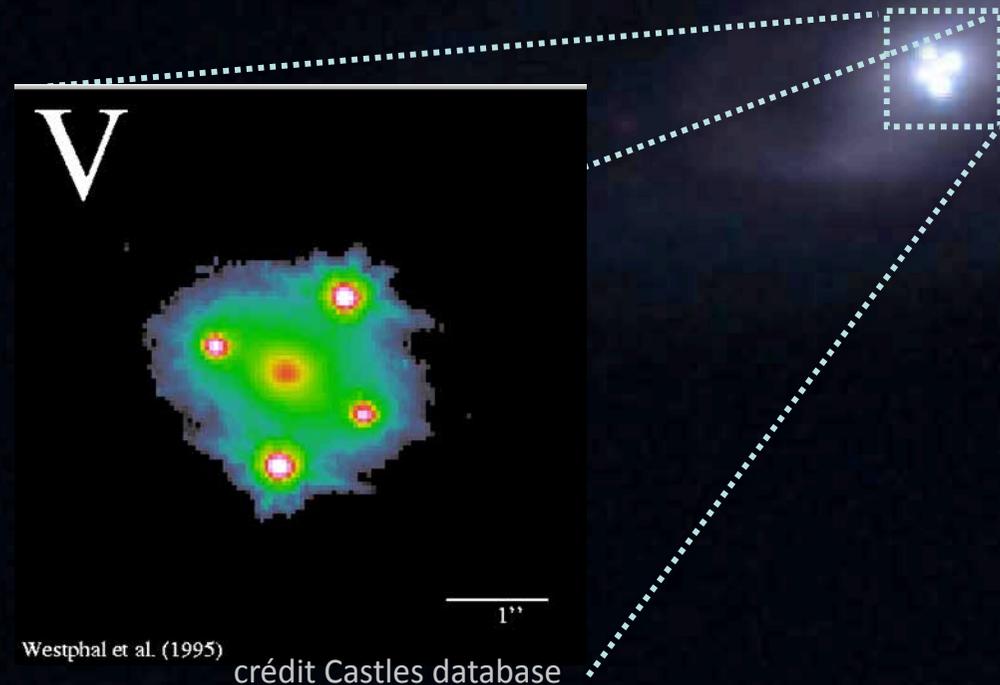
# LA CROIX D'EINSTEIN



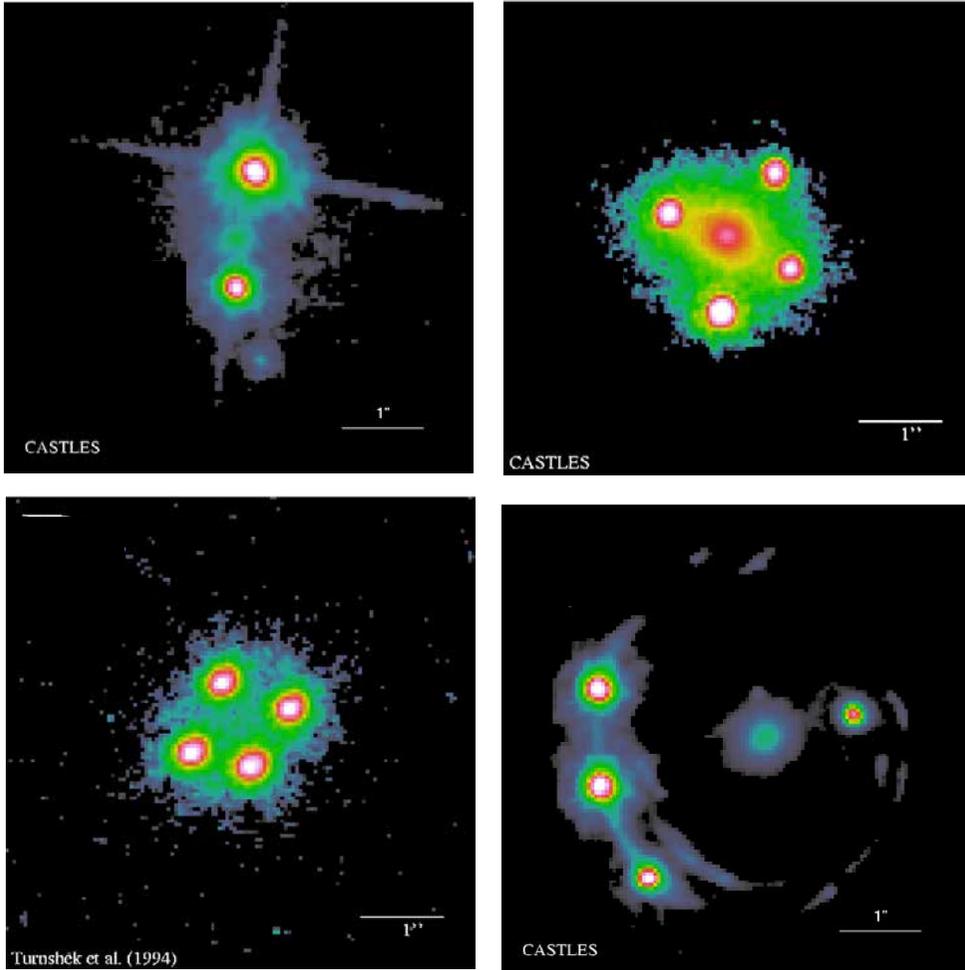
Galaxie ZW 2237+030

# LA CROIX D'EINSTEIN

Vue avec le télescope spatial Hubble



# CARACTÉRISTIQUES



- On observe généralement 2 ou 4 images de la sources d'arrière plan
- Ecartement des images est différents selon la masse de la galaxie déflectrice et sa répartition.
- **Taille typique  $\sim 1''$**  (taille angulaire d'un ballon de basket vu à 50 km).
- Les images sont plus brillantes que la source d'arrière plan, il y a **amplification** du signal.

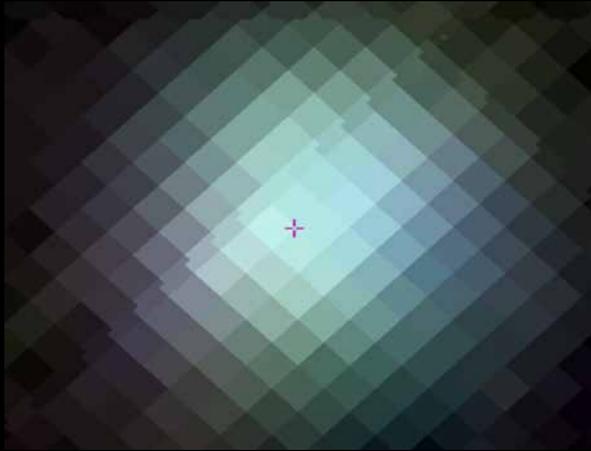
**Images prises par le Télescope spatial Hubble**  
crédit Castles database

# QUE NOUS APPRENNENT LES LENTILLES ?

- Télescope gravitationnel : amplifie le signal de l'objet d'arrière plan et permet d'observer les toutes premières galaxies qui sont les plus distantes.
- Permettent mesurer la masse du défecteur (y compris sa masse cachée) et de sonder sa répartition.
- Permettent une mesure de la constante cosmologique de Hubble  $H_0$  (liée au taux d'expansion actuel de l'Univers).

# POURQUOI GAIA EST UN RELEVÉ CLÉ

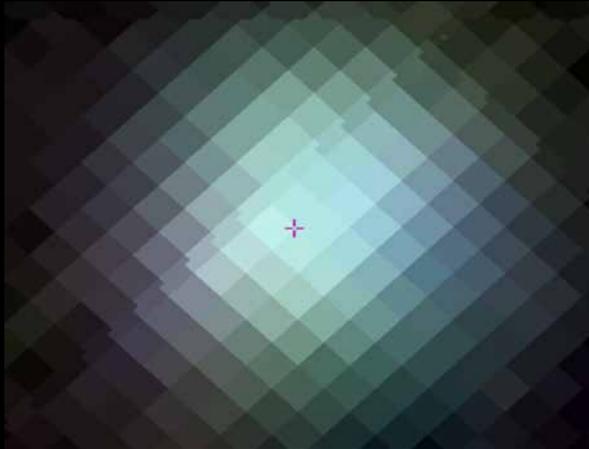
H1413+117  
vu du sol (SDSS9)



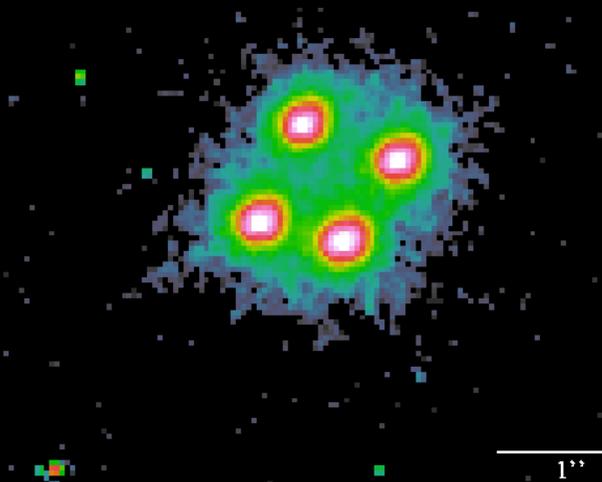
- La turbulence atmosphérique mélange les images des sources proches (ici les composantes d'une lentille compacte)
- La séparation minimale angulaire de deux sources pour pouvoir les distinguer depuis le sol est  $\sim 1''$   
(Rappel :  $1^\circ = 3600''$ , Jupiter =  $46''$ )

# POURQUOI GAIA EST UN RELEVÉ CLÉ

H1413+117  
vu du sol (SDSS9)



vu de l'espace (HST)



Turnshek et al. (1994)

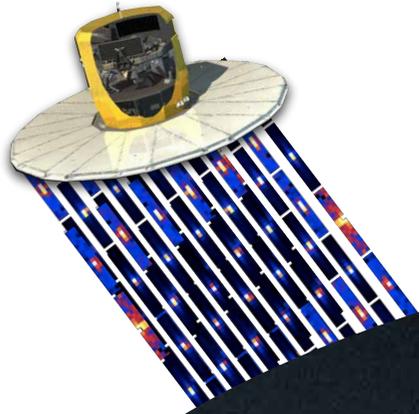
1''  
crédit Castles database

- La turbulence atmosphérique mélange les images des sources proches (ici les composantes d'une lentilles compacte)
- La séparation minimale angulaire de deux sources pour pouvoir être distinguées depuis le sol est  $\sim 1''$

*(Rappel :  $1^\circ = 60' = 3600''$ , Jupiter =  $46''$ )*

- La plupart des mirages gravitationnels ne seront détectables que depuis l'ESPACE
- **Gaia est le premier relevé spatial astrométrique complet sur le ciel qui balaye tout le ciel sans choisir ses cibles.**

# POURQUOI GAIA EST UN RELEVÉ CLÉ

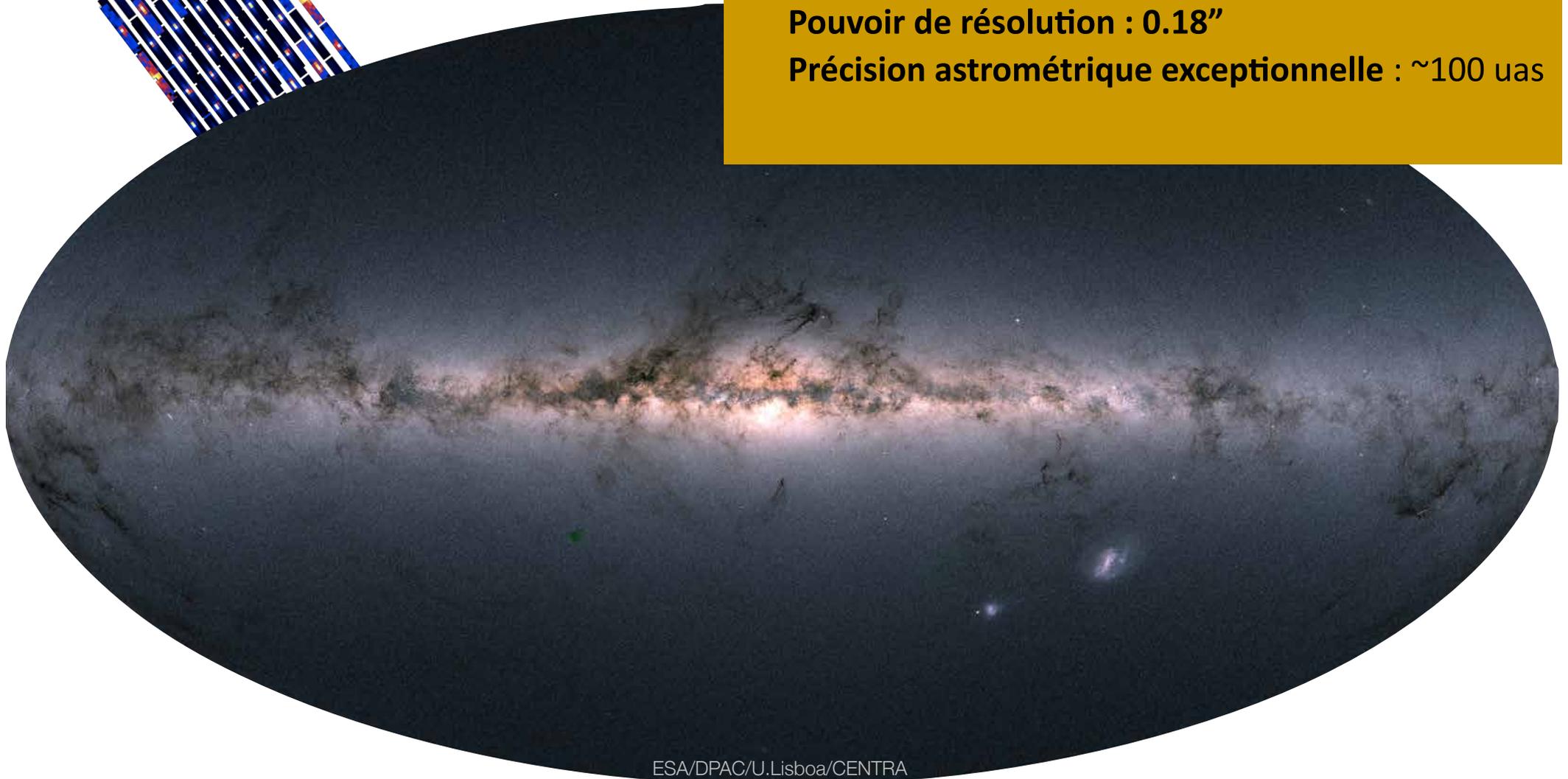


**Fantastique potentiel pour les lentilles**

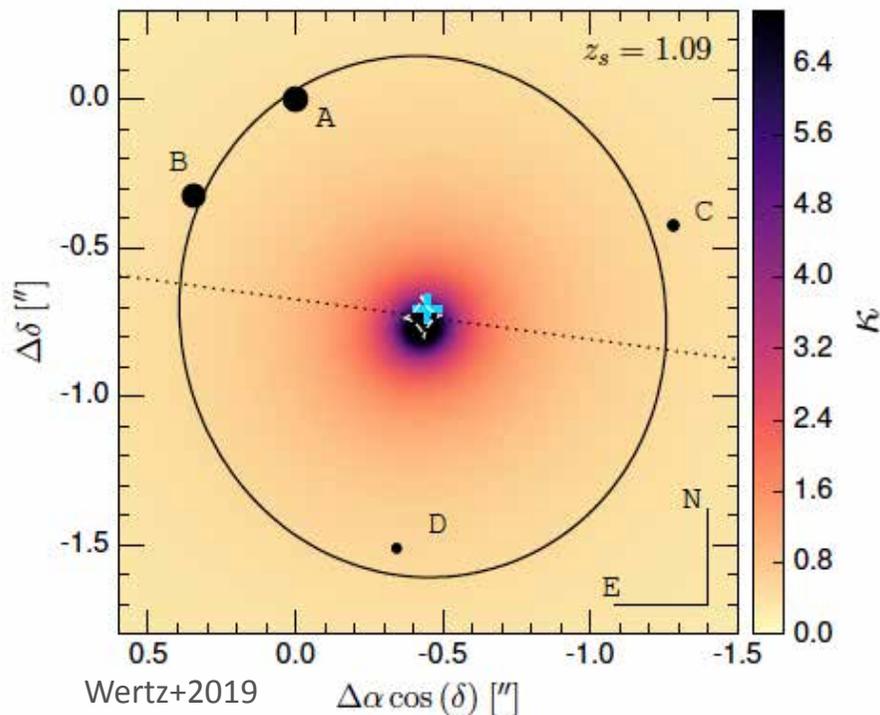
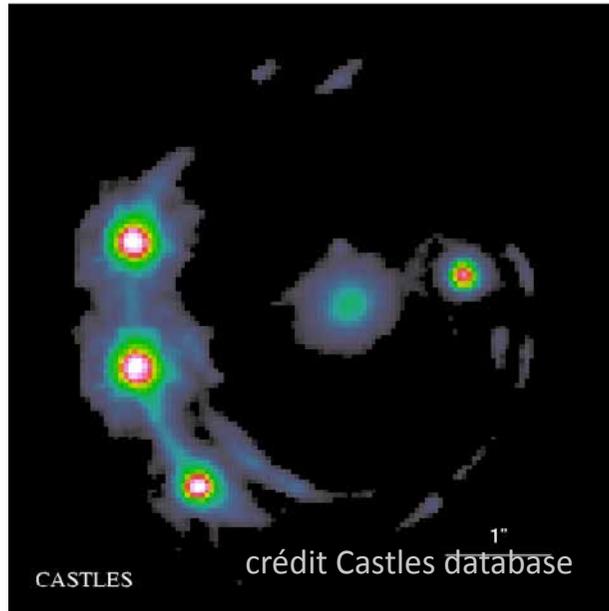
**Relevé sur tout le ciel**

**Pouvoir de résolution : 0.18''**

**Précision astrométrique exceptionnelle :  $\sim 100$   $\mu$ as**

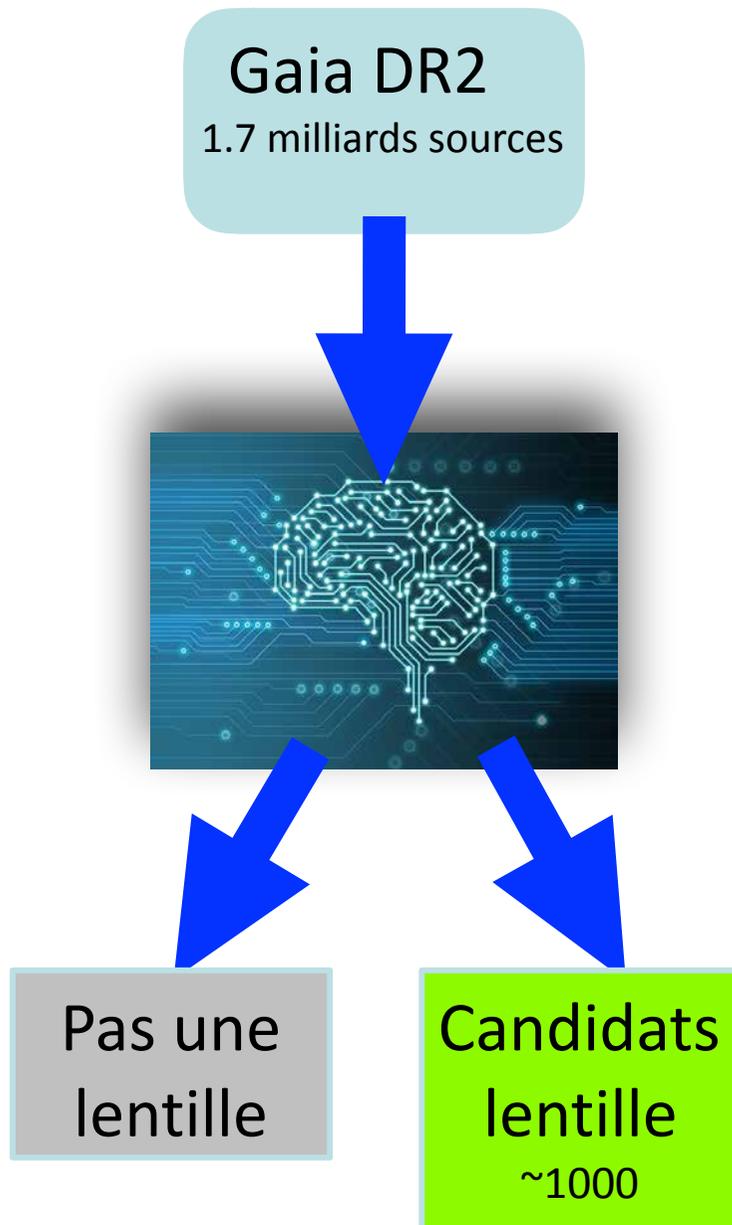


# COMMENT TROUVER DES LENTILLES GRAVITATIONNELLES ?



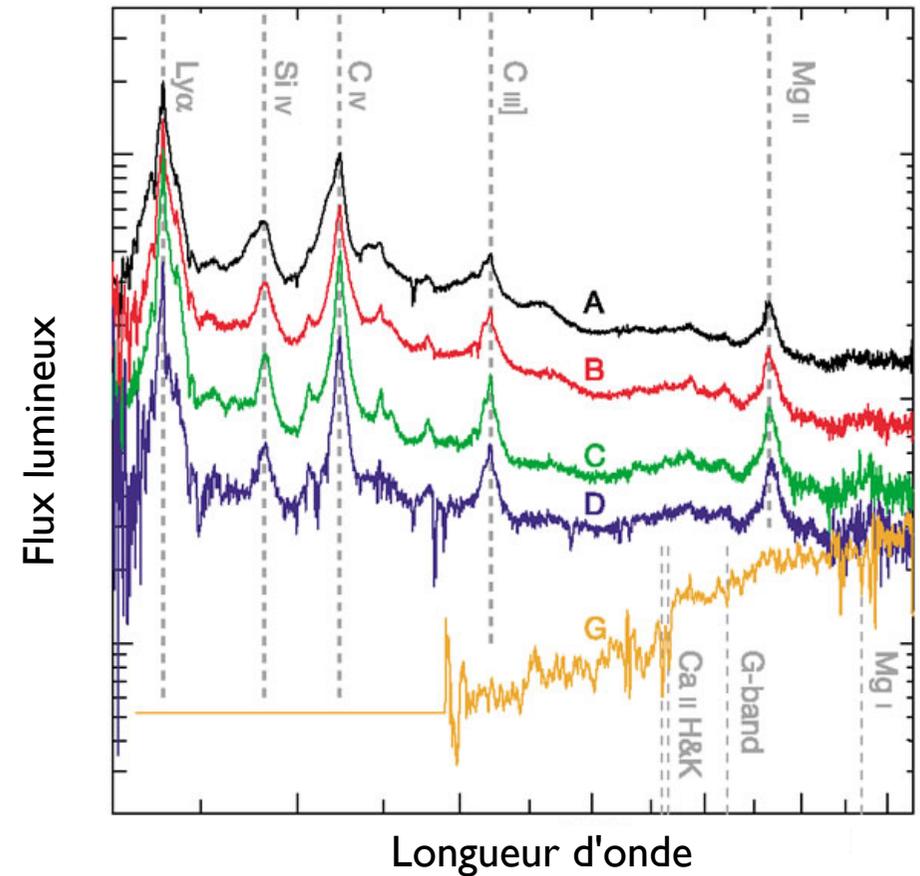
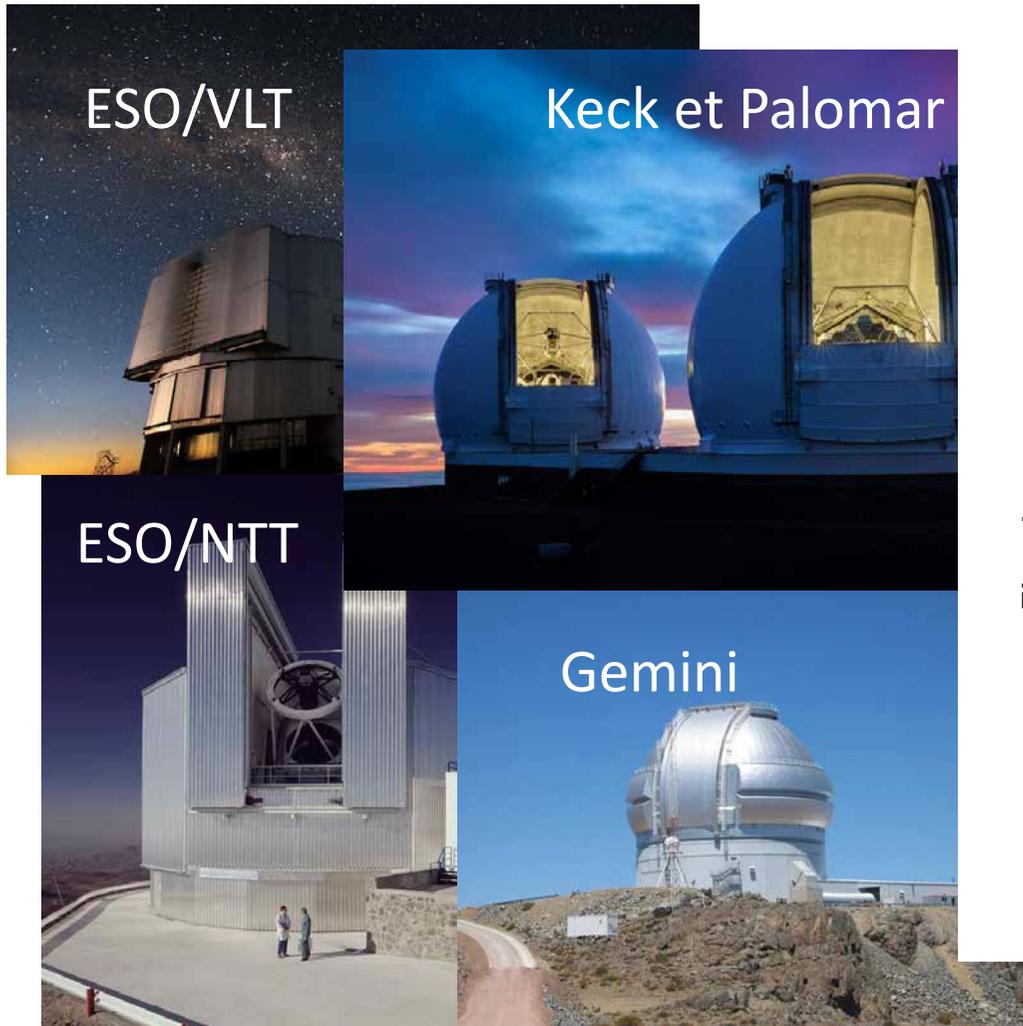
- Les position et les magnitudes des diverses images ne sont pas aléatoires.
- Les configurations associées à un mirage gravitationnel peuvent être prédites par un modèle.

# EXPLOITATION DE LA GAIA DR2



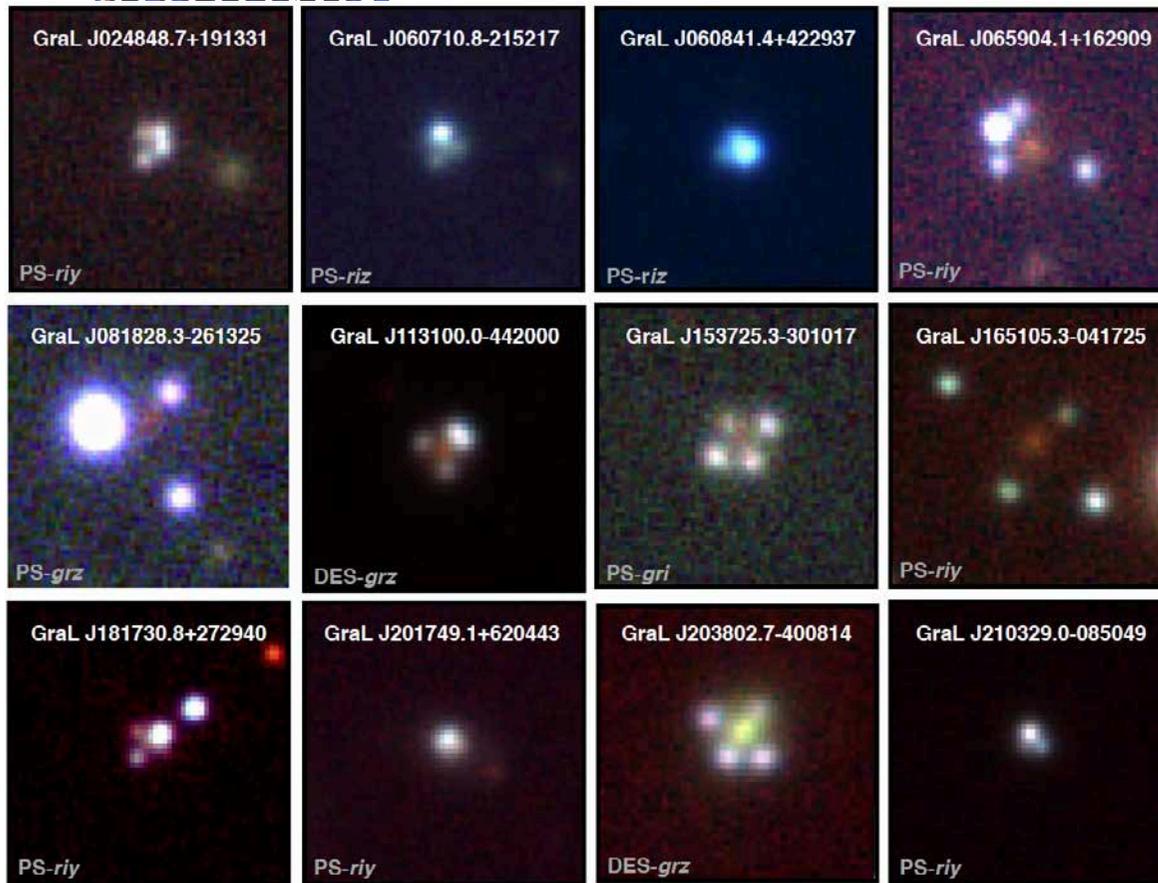
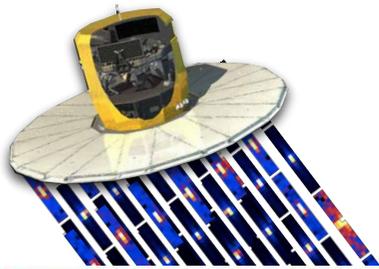
- Le groupe Gaia GraL a développé un programme utilisant l'**intelligence artificielle** pour explorer à l'**aveugle** les **1.7 milliards** de sources de la Gaia DR2 (**positions et magnitudes**).
- A sélectionné **quelques millions de groupements de sources plausibles** en magnitude et en position.
- A confronté ces configurations à un **programme d'intelligence artificielle** entraîné à **reconnaitre des configurations de lentilles** gravitationnelle et a calculé leur **probabilité d'être une lentille**.

# VALIDATION SPECTROSCOPIQUE



- Seule une observation spectroscopique permet de confirmer que les images ont la même signature , il s'agit donc de la même source.

# RÉSULTATS DANS LA GAIA DR2



Stern+2021

## Publications

Stern, D. Krone-Martins, A., Djorgovski, G., et al., in prep  
Krone-Martins, A., Delchambre, L.; Stern D., et al., arXiv:1912.08977  
Wertz, O.; Stern, D.; Krone-Martins, A. et al., A&A, 628, A17, 2019.  
Delchambre, L.; Krone-Martins, A.; Wertz, O., et al., A&A, 622, A165, 2019.  
Ducourant, C.; Wertz, O.; Krone-Martins, A., et al., A&A, 618, A56, 2018.  
Krone-Martins, A.; Delchambre, L.; Wertz, O. et al., A&A, 616, L11, 2018.

# 14

nouveaux mirage à 4 images

# 33%

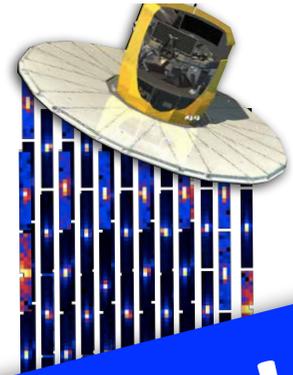
augmentation du nombre connu de mirages à 4 images (on en connaissait 41 seulement)

# 6

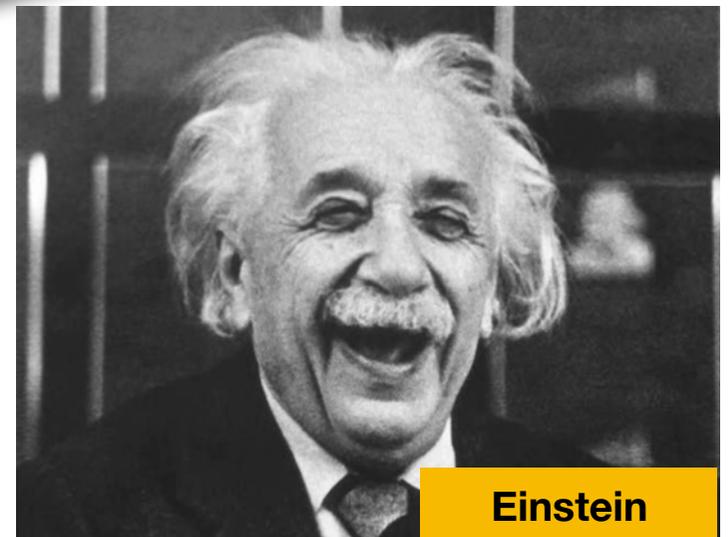
Publications scientifiques en 3 ans

# EXPLOITATION DE LA GAIA DR3 1<sup>ERE</sup> PARTIE

- Gaia EDR3 : ~2 milliards de sources
- Plus de **complétude** aux petites séparations
- De nombreux **nouveaux candidats** à découvrir!!!!



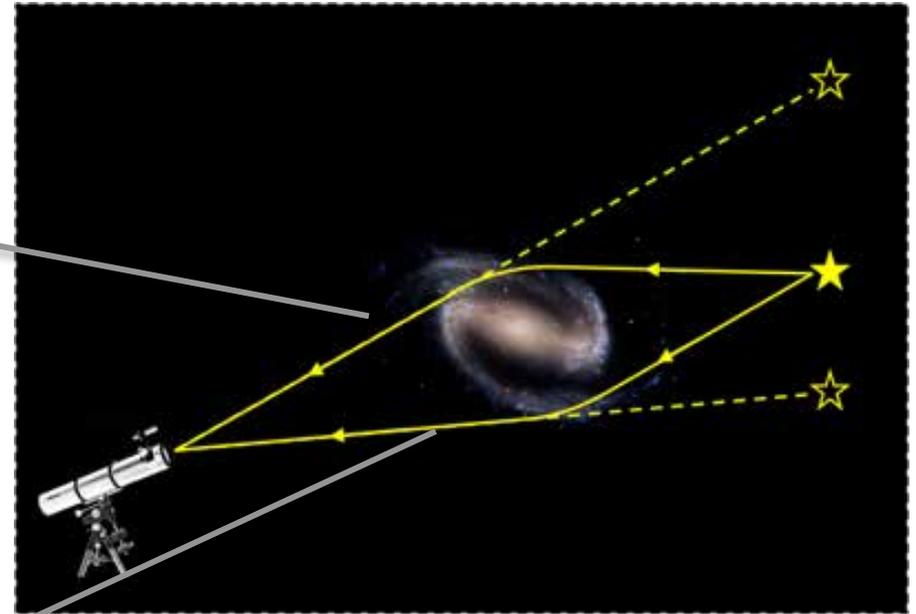
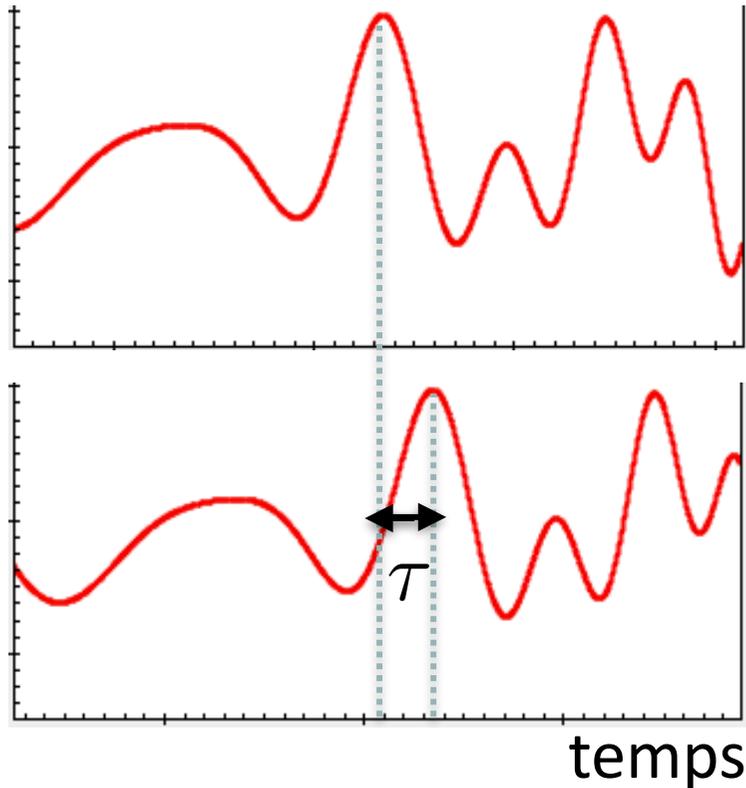
**Le travail vient de commencer!**  
**Merci**



**Einstein**

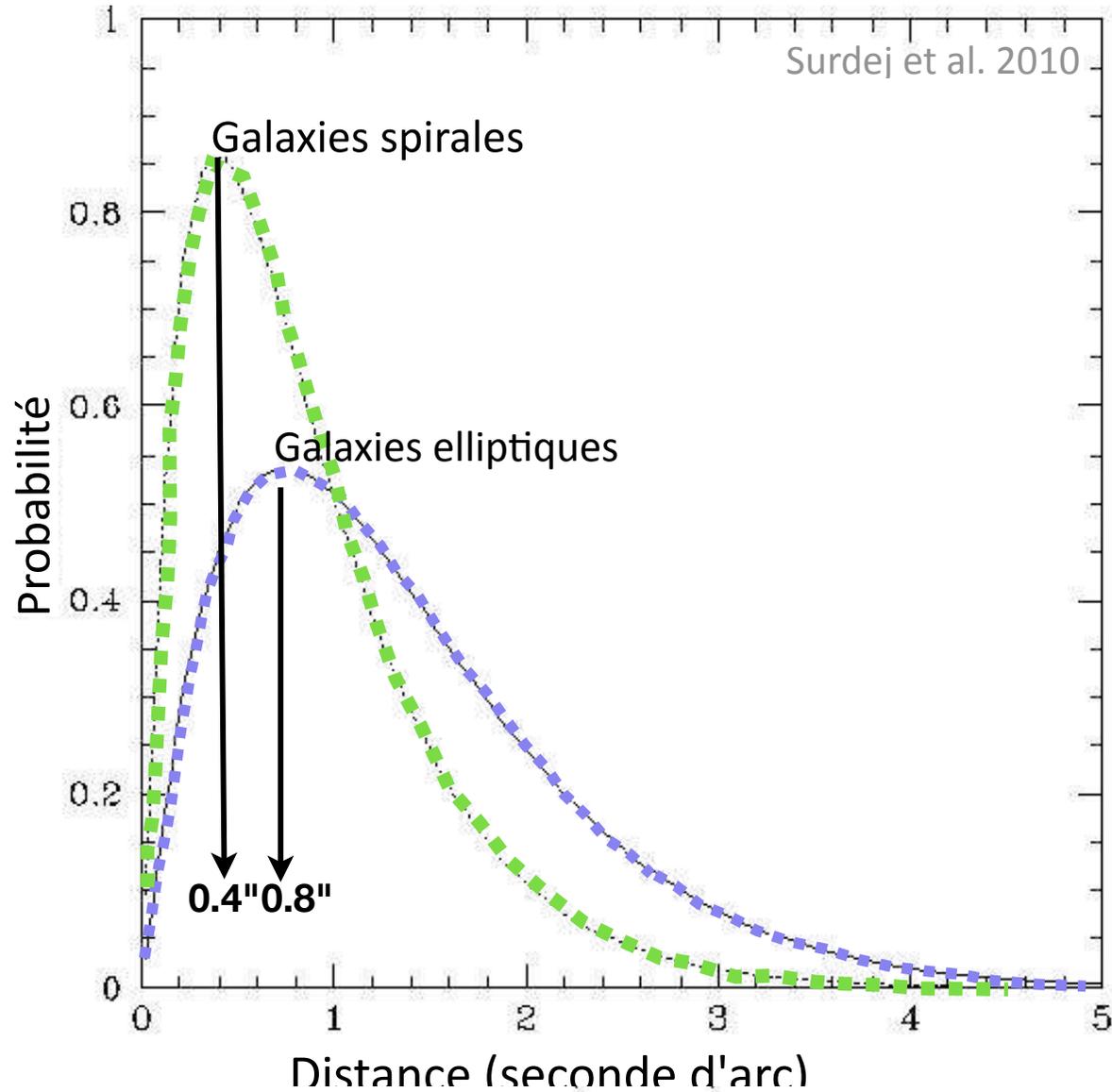
# DÉLAIS TEMPORELS

Magnitude



- Les différents trajets optiques ont des longueurs différentes entraînant un **décalage** entre la détection d'une variation d'éclat de la source dans les **différentes images**.

# SÉPARATION TYPIQUE DES IMAGES



- Les galaxies elliptiques produiront des "mirages" aux images typiquement séparées de  $\sim 0.8$  secondes d'arc.
- Les galaxies spirales, moins massives, produiront des mirages plus compacts ( $\sim 0.4$ ").



<https://www.cfa.harvard.edu/seuforum/einstein/>

- Un objet très massif se déplace dans le champs de visée. La gravité courbe l'espace. Les trajets lumineux des galaxies d'arrière plan sont courbés, les faisant apparaître distordues et plus brillantes.