

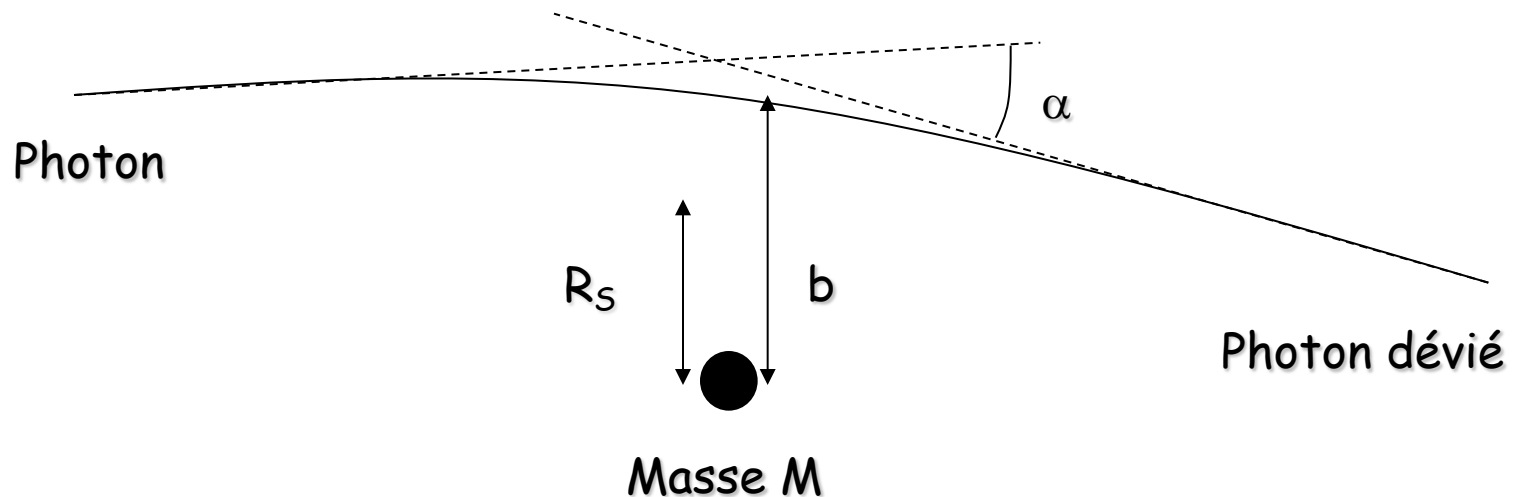
# Chapitre 12

## Effet de lentille gravitationnelle

# Effet de lentille gravitationnelle

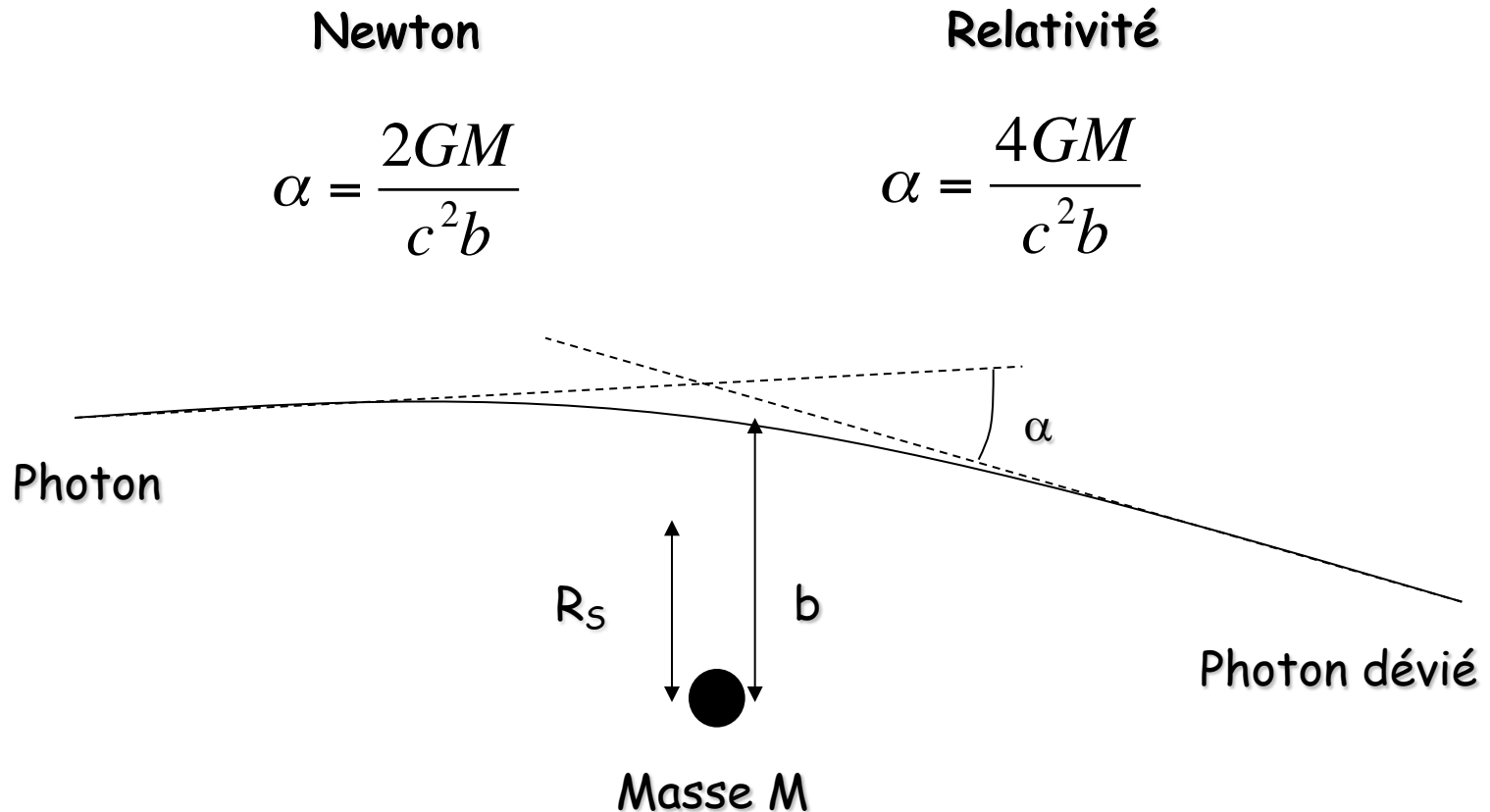
Effet de déviation de la **lumière** par la masse.

- Déjà évoqué par Newton mais problème de la masse du photon
- En relativité générale, la gravité déforme l'espace-temps et **incurve les géodésiques**. Les photons se déplacent alors le long de lignes courbes.



# Effet de lentille gravitationnelle

Angle de déflexion de la lumière: 2 fois plus grand en relativité générale qu'en théorie Newtonienne de la gravitation



Splendide confirmation de la relativité générale grâce à l'éclipse solaire de 1919.

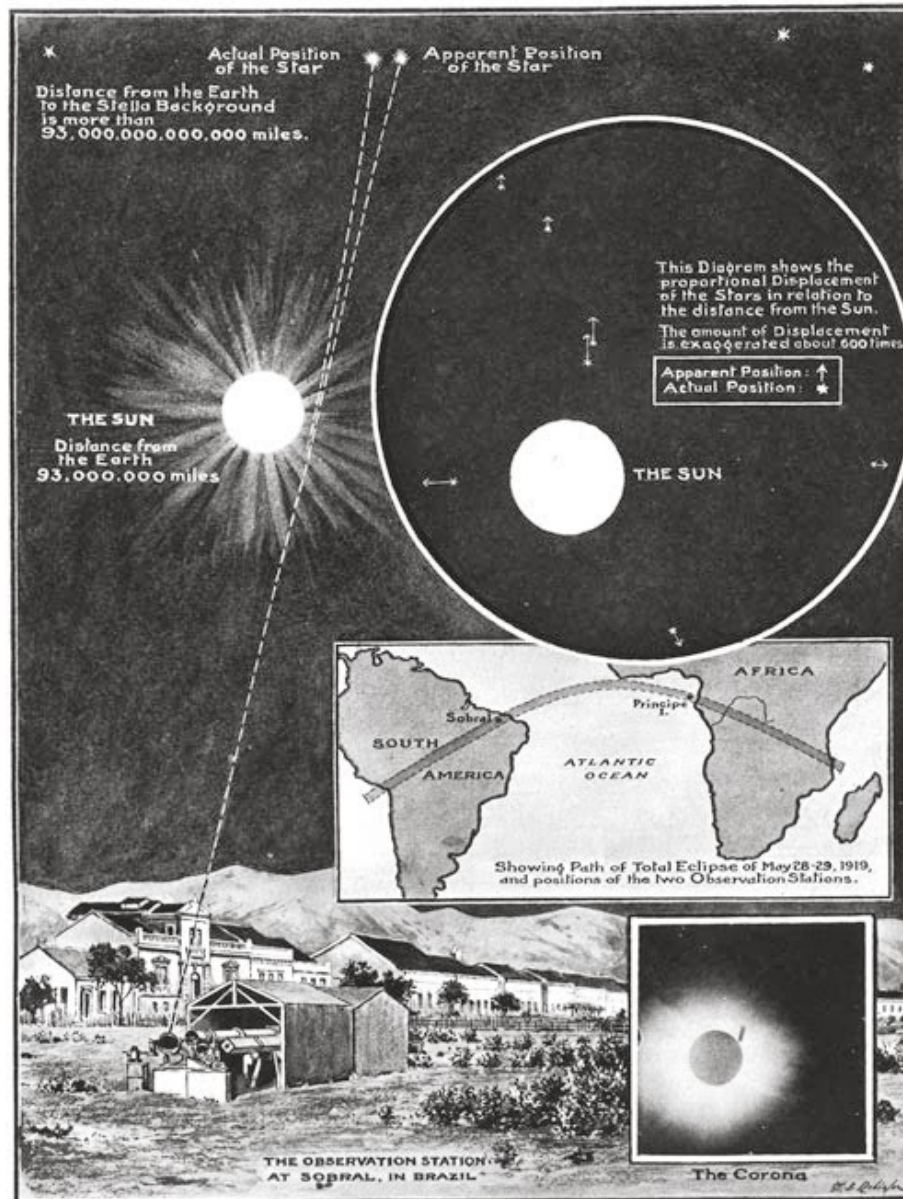




Splendide confirmation de la relativité générale grâce à l'éclipse solaire de 1919.



# Splendide confirmation de la relativité générale grâce à l'éclipse solaire de 1919.



# Effet de lentille gravitationnelle

Effet intéressant mais quelle est la probabilité pour l'observer ailleurs qu'autour du Soleil ?

La probabilité d'alignement presque parfait entre deux étoiles est de l'ordre de  $10^{-6}$

En plus, les angles de déflexion sont de  $\sim 10^{-3}$  secondes

-> Einstein lui-même pense qu'on ne pourra jamais rien observer

C'est la découverte des galaxies (années 20) qui change tout.

Zwicky calcule que la probabilité d'alignement entre deux galaxies est de l'ordre de  $10^{-3}$ . Les angles mis en jeu sont plus grands: quelques secondes d'arc.

-> L'effet est peut-être utile finalement !

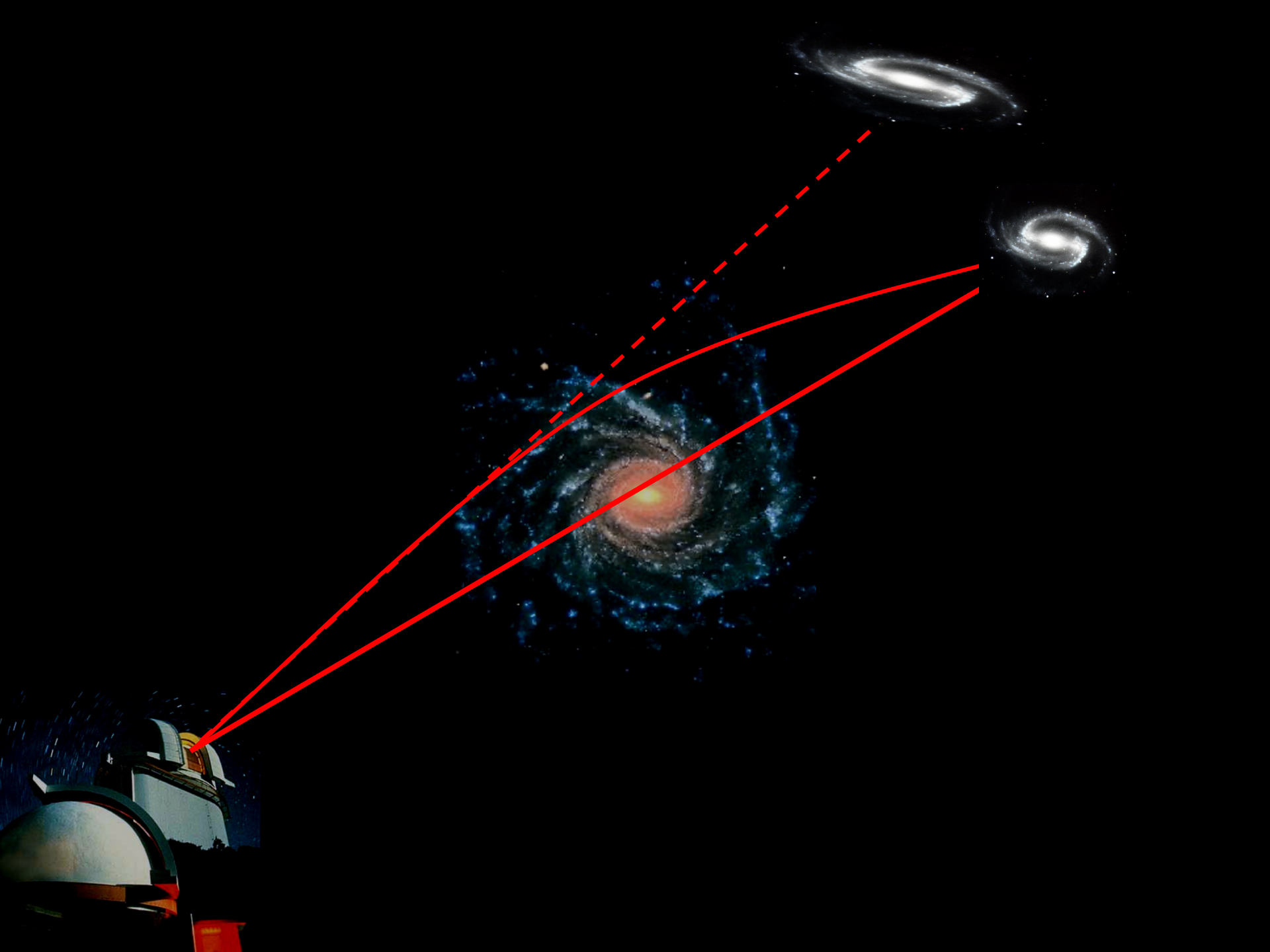
# Effet de lentille gravitationnelle

L'objet affecté par l'effet de lentille subit:

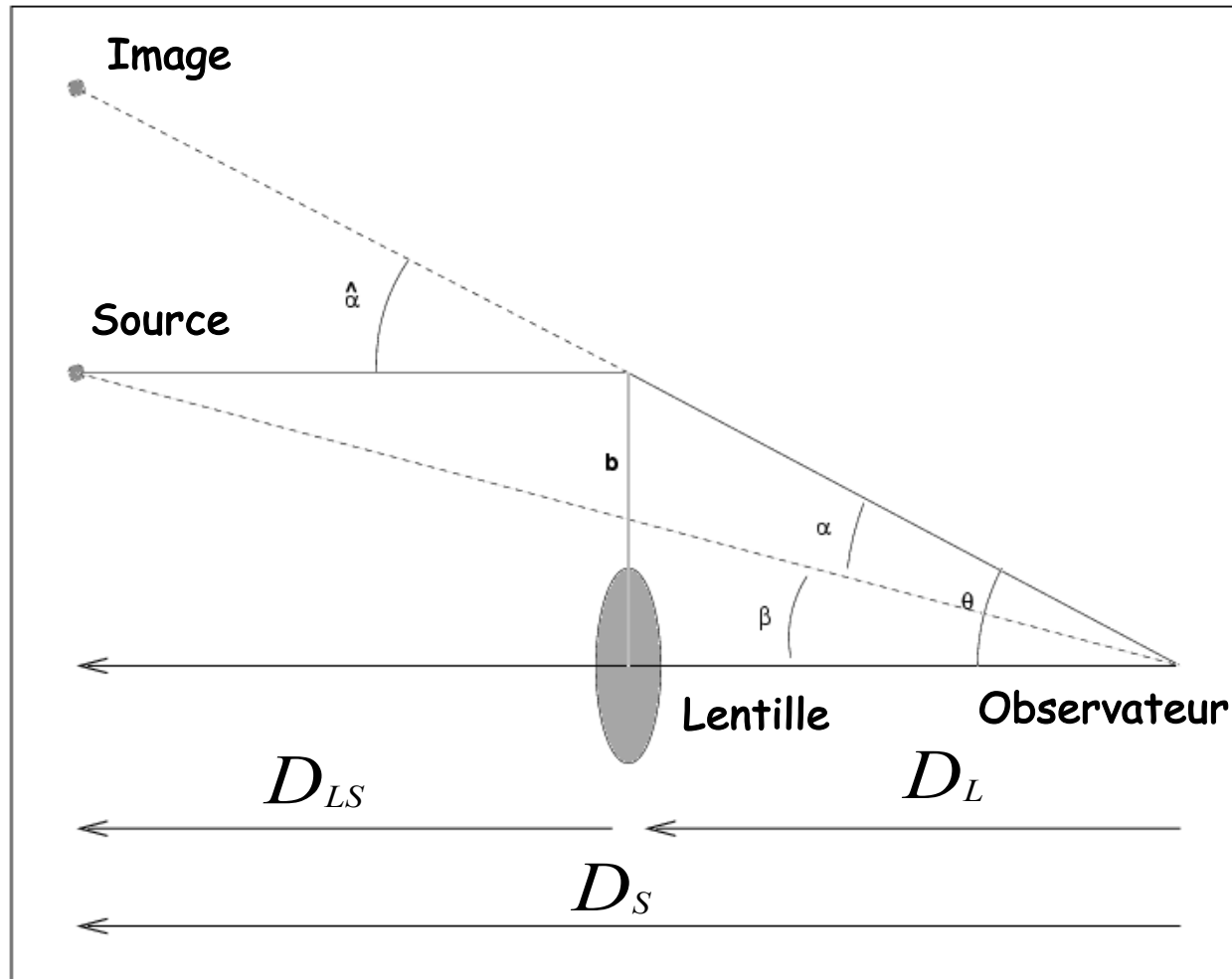
- un changement de position
- un changement de forme
- conservation de la brillance de surface
- une amplification lumineuse
- un éventuel dédoublement (ou plus !)

L'effet est **achromatique**

L'effet existe sous différents régimes: fort, faible, micro



# Equation de la lentille



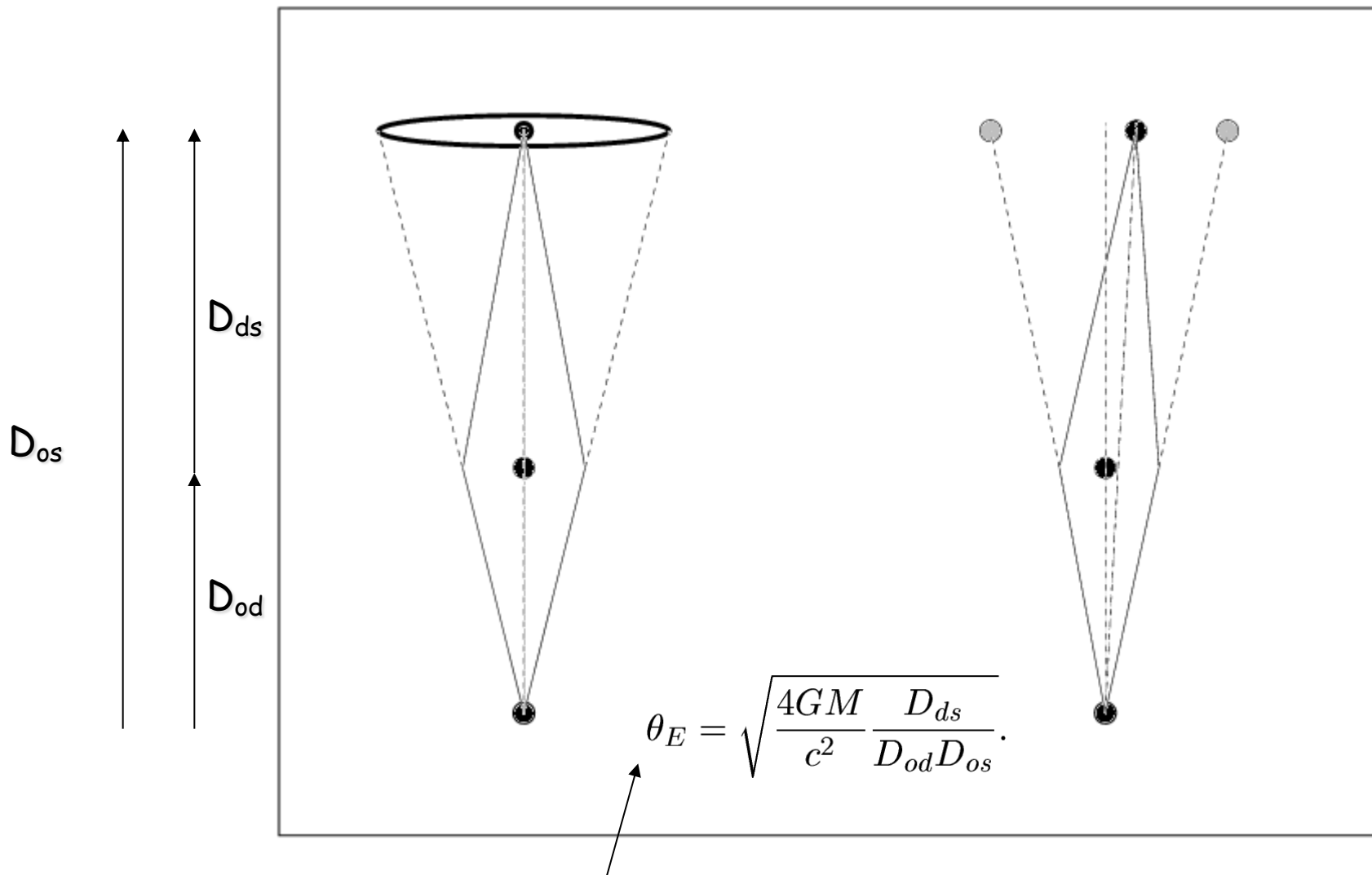
Equation de  
la lentille:

$$\beta = \theta - \alpha$$

Rayon d'Einstein  
(sans dimension)

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S}}$$

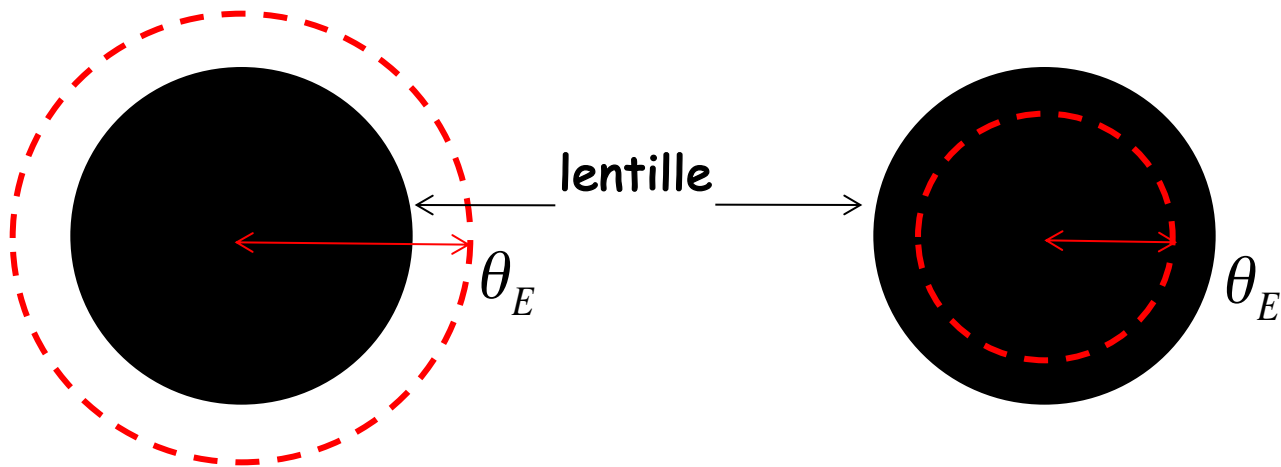
# Rayon d'Einstein



Rayon d'Einstein (sans dimension)

# Densité critique

Les images « mirages » se forment seulement si le rayon physique de la lentille est plus petit que son rayon d'Einstein



La densité surfacique de masse est souvent appelée «convergence»

$$\kappa(\theta) = \frac{\Sigma(D_L \theta)}{\Sigma_{cr}}$$



# Densité critique et régimes de « lensing »

$$\Sigma < \Sigma_{cr}$$

1 seule solution à l'équation de la lentille:  
Lentille “faible”

$$\Sigma = \Sigma_{cr}$$

Anneau d'Einstein: lentille forte

$$\Sigma > \Sigma_{cr}$$

+ lentille sphérique: 2 images mirages

+ lentille elliptique: 4 images mirages

+ noyau: 1 image supplémentaire

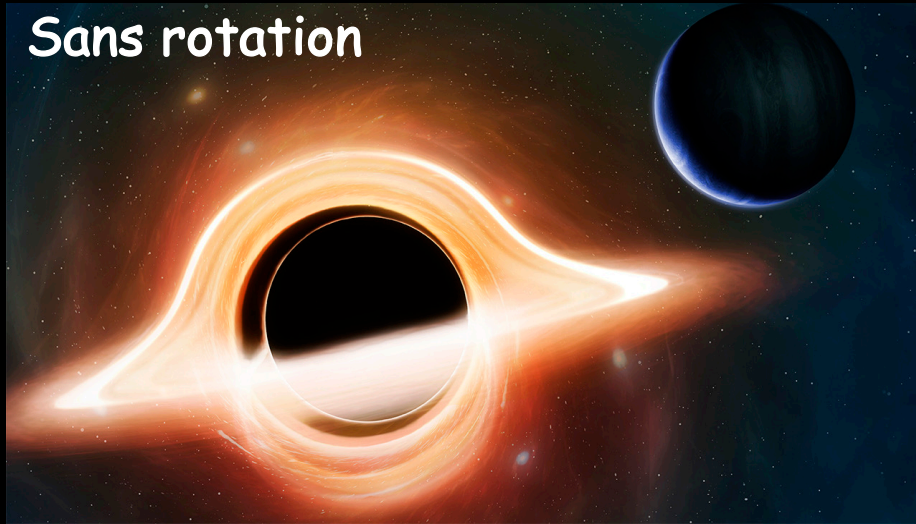
# Effet d'un trou noir de la masse de Jupiter



# Effet à proximité d'un trou noir

## Simulations

Sans rotation

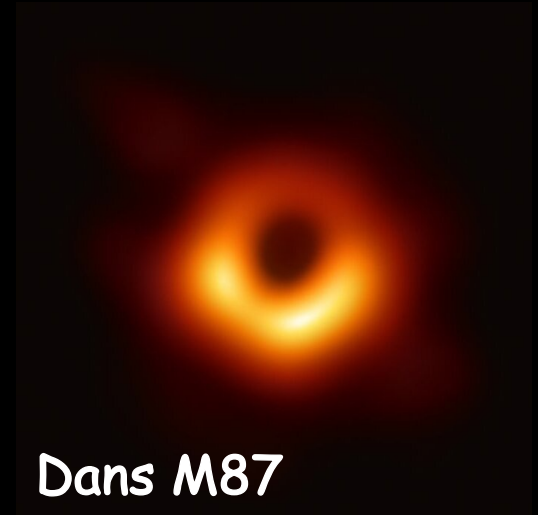


Avec rotation

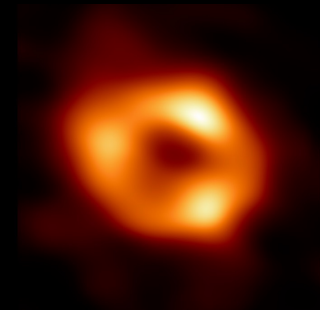


## Observations

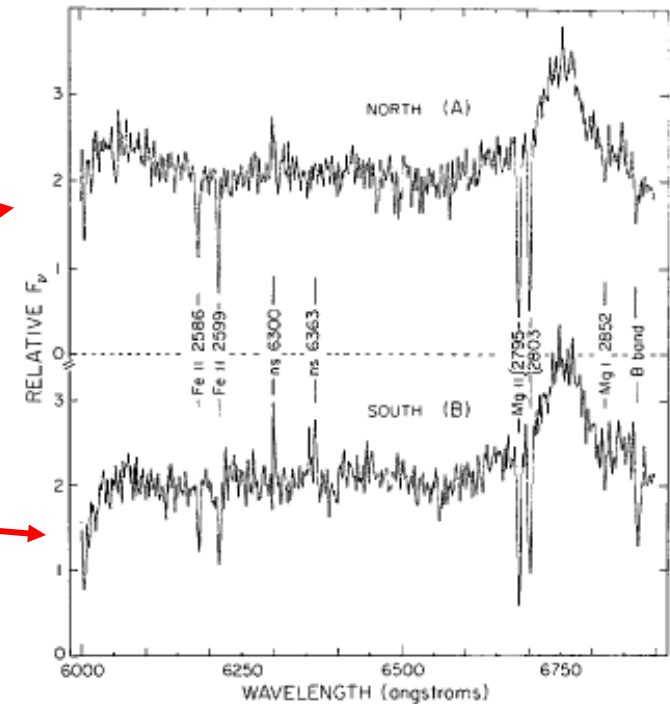
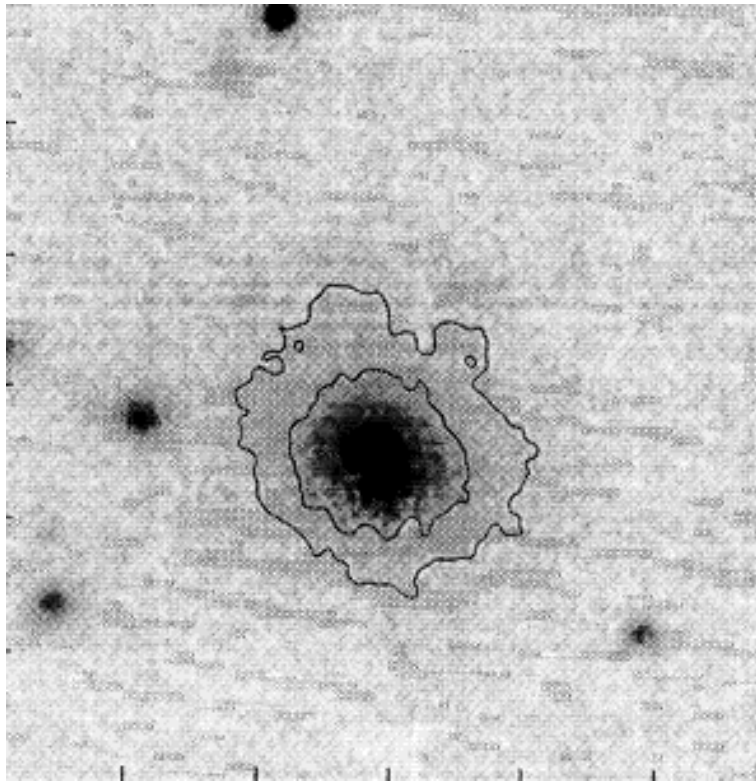
Dans M87



Dans la Voie Lactée



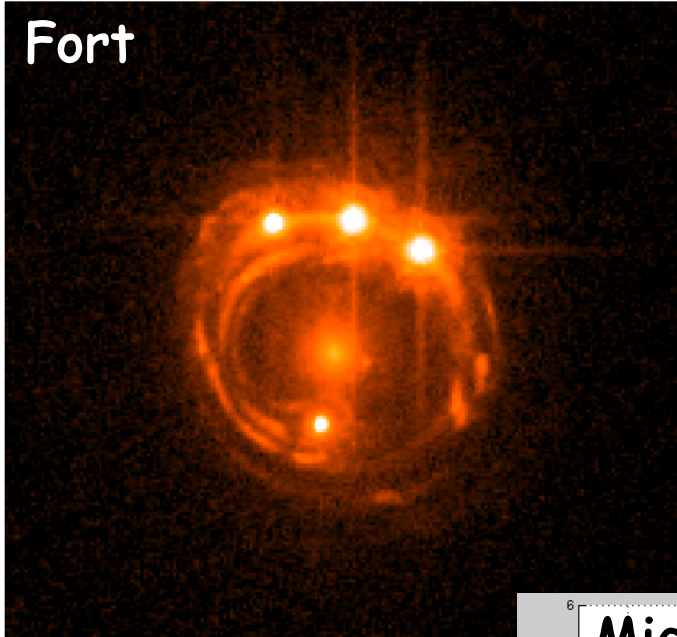
# Première lentille gravitationnelle: Q0957+561 (en 1979)



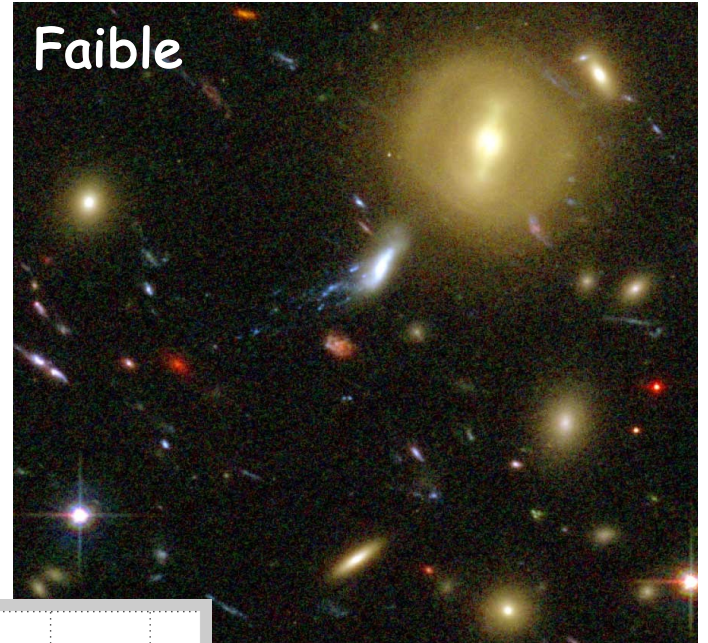
Deux quasars ou un mirage ?

# Les 3 régimes de lentille

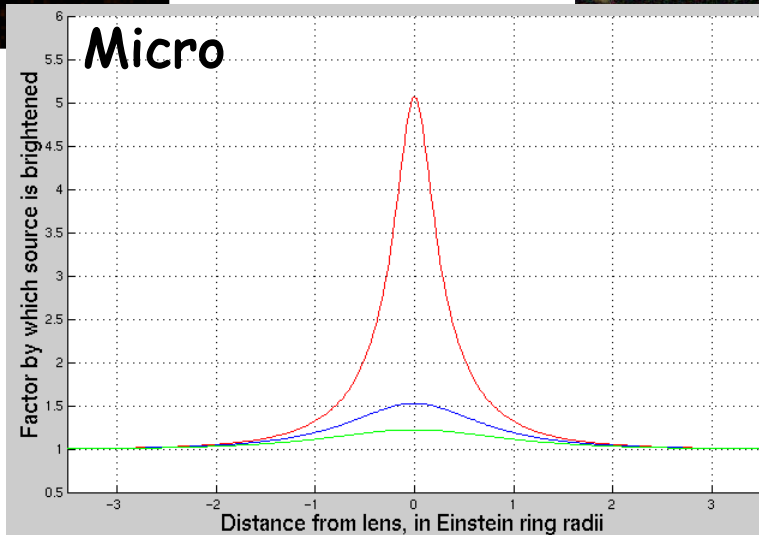
Fort



Faible



Micro

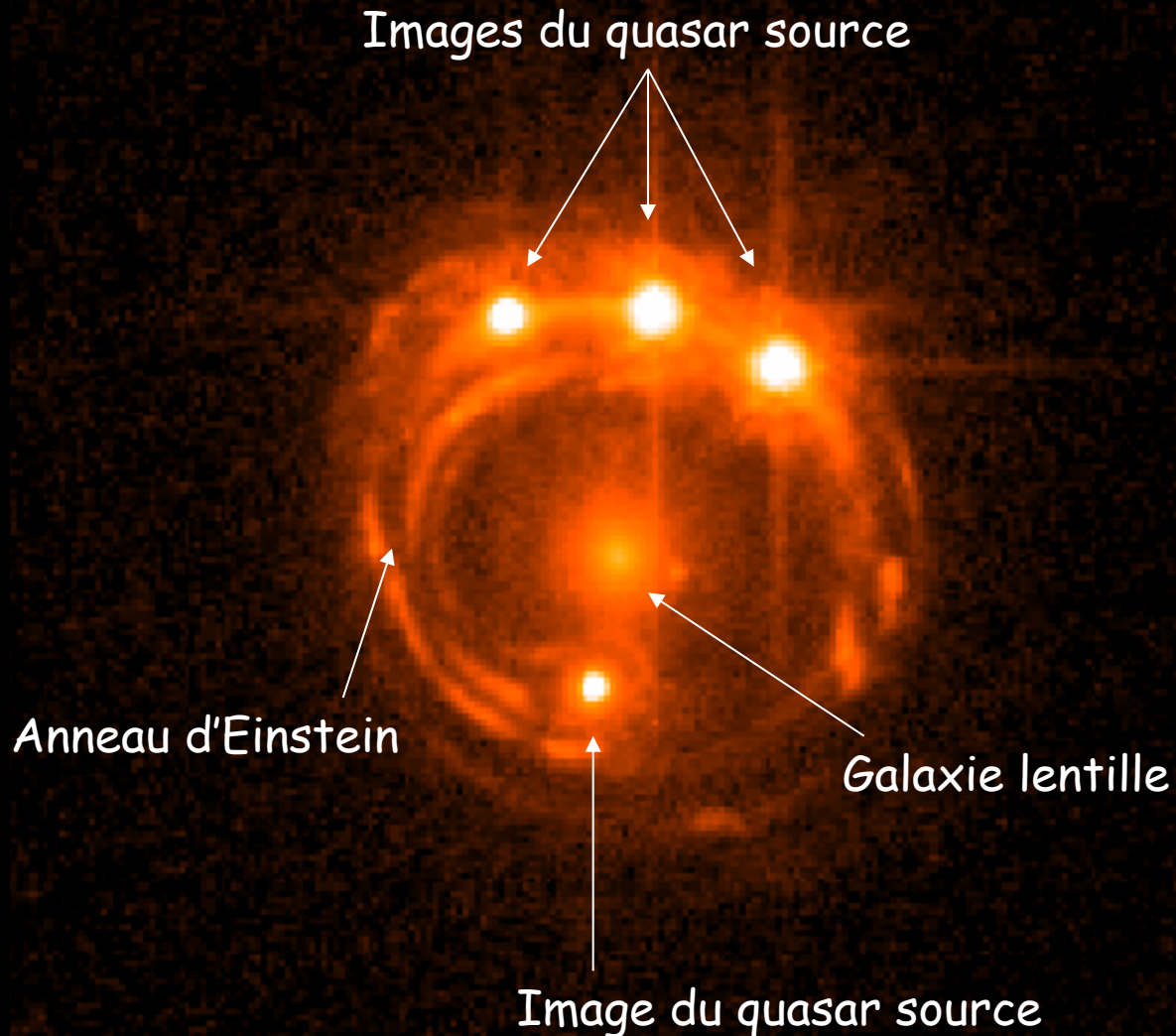


**Effet de lentille forte**



# Le mirage quadruple RX J1131-123

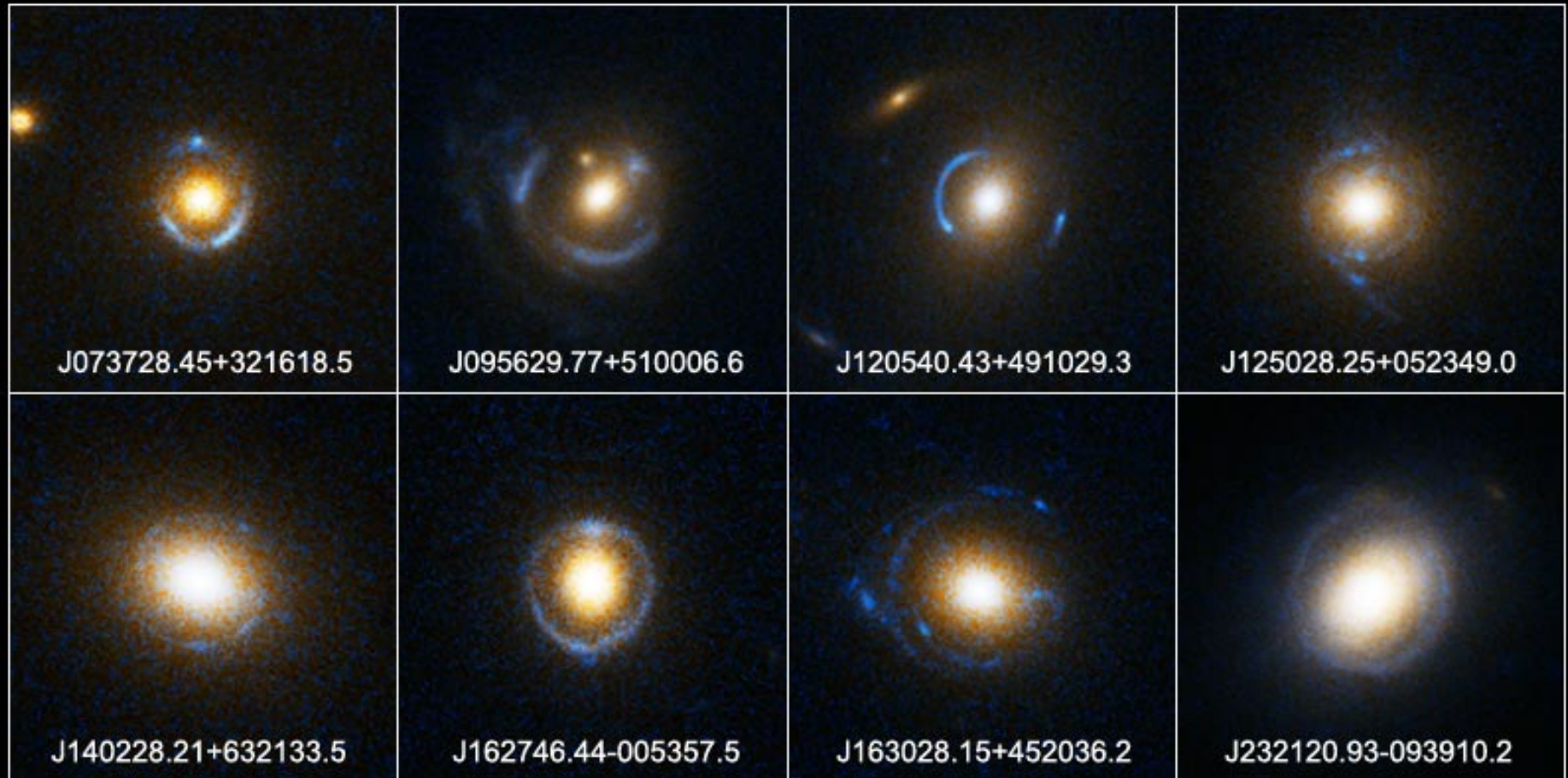
HST / ACS



En cas d'alignement presque parfait on observe un anneau d'Einstein utile pour mesurer la masse de la lentille

## Einstein Ring Gravitational Lenses

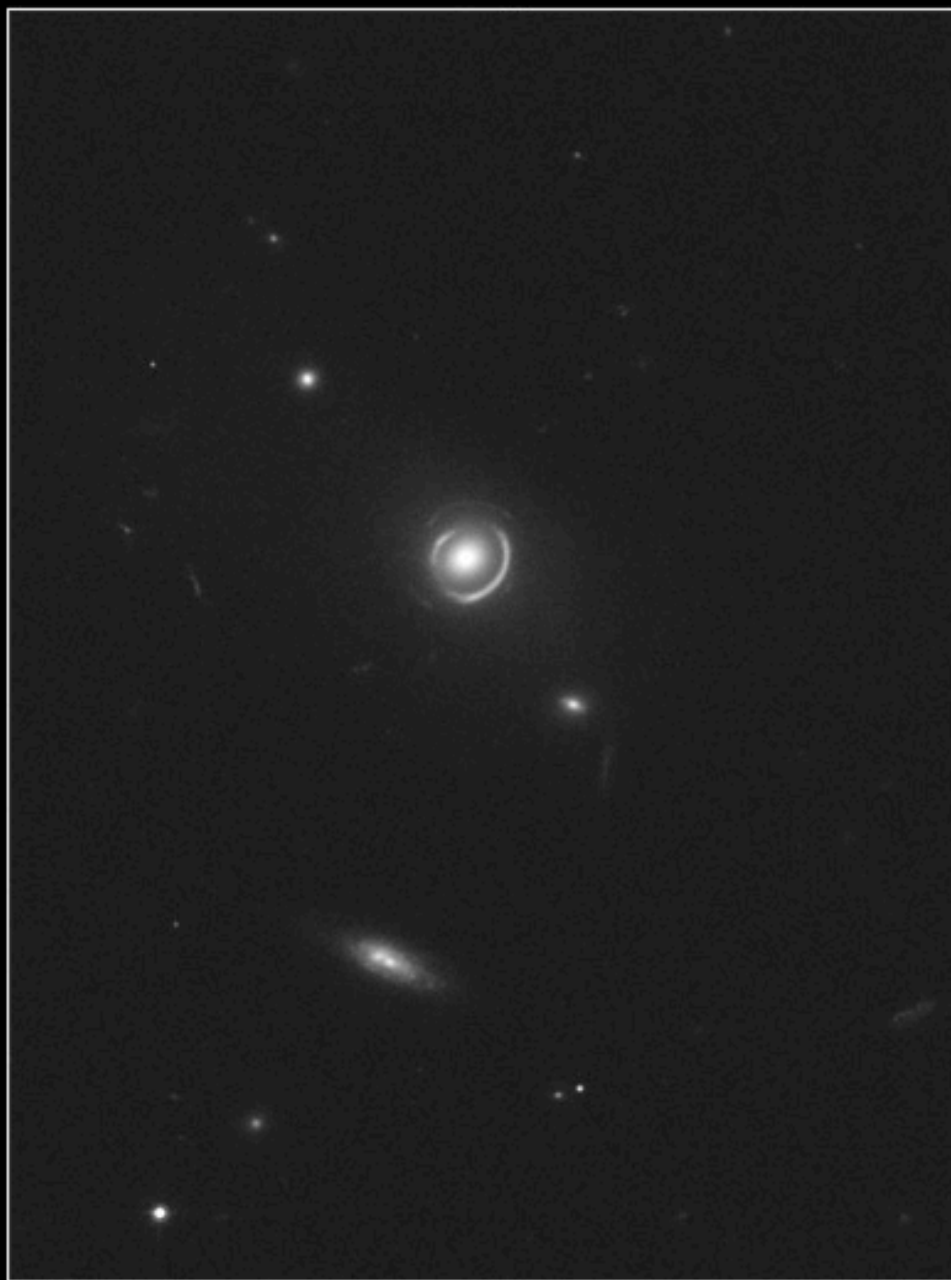
*Hubble Space Telescope* ■ ACS



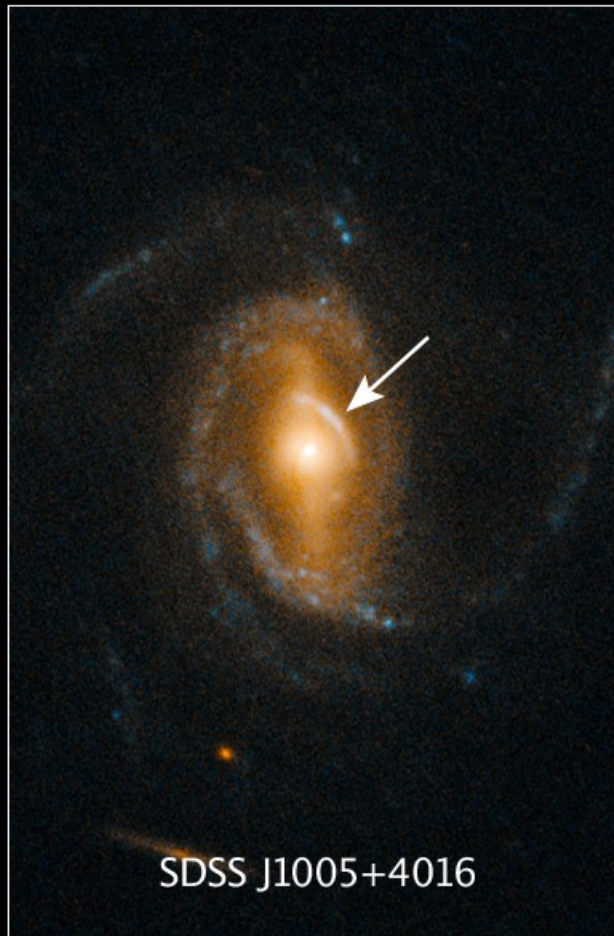
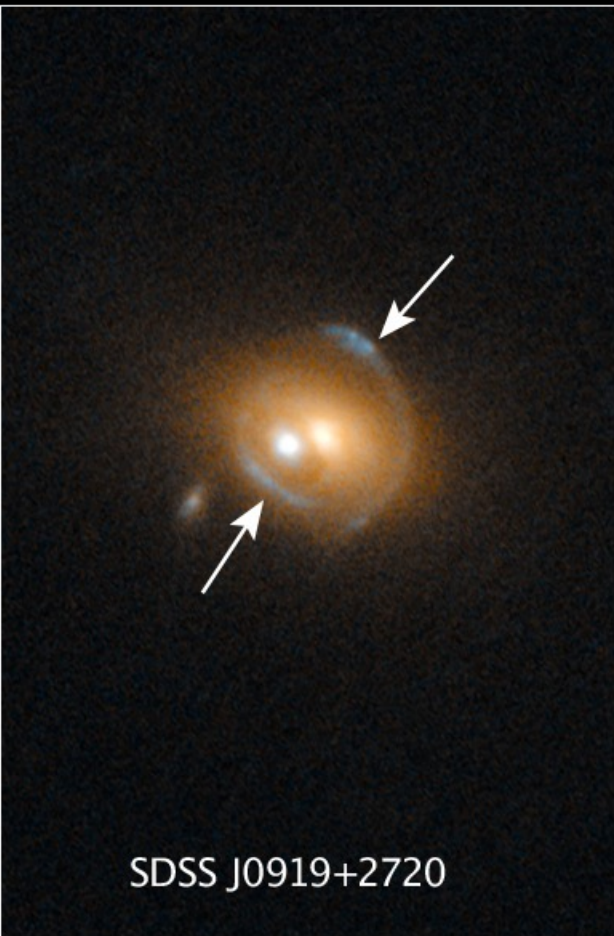
NASA, ESA, A. Bolton (Harvard-Smithsonian CfA), and the SLACS Team

STScI-PRC05-32

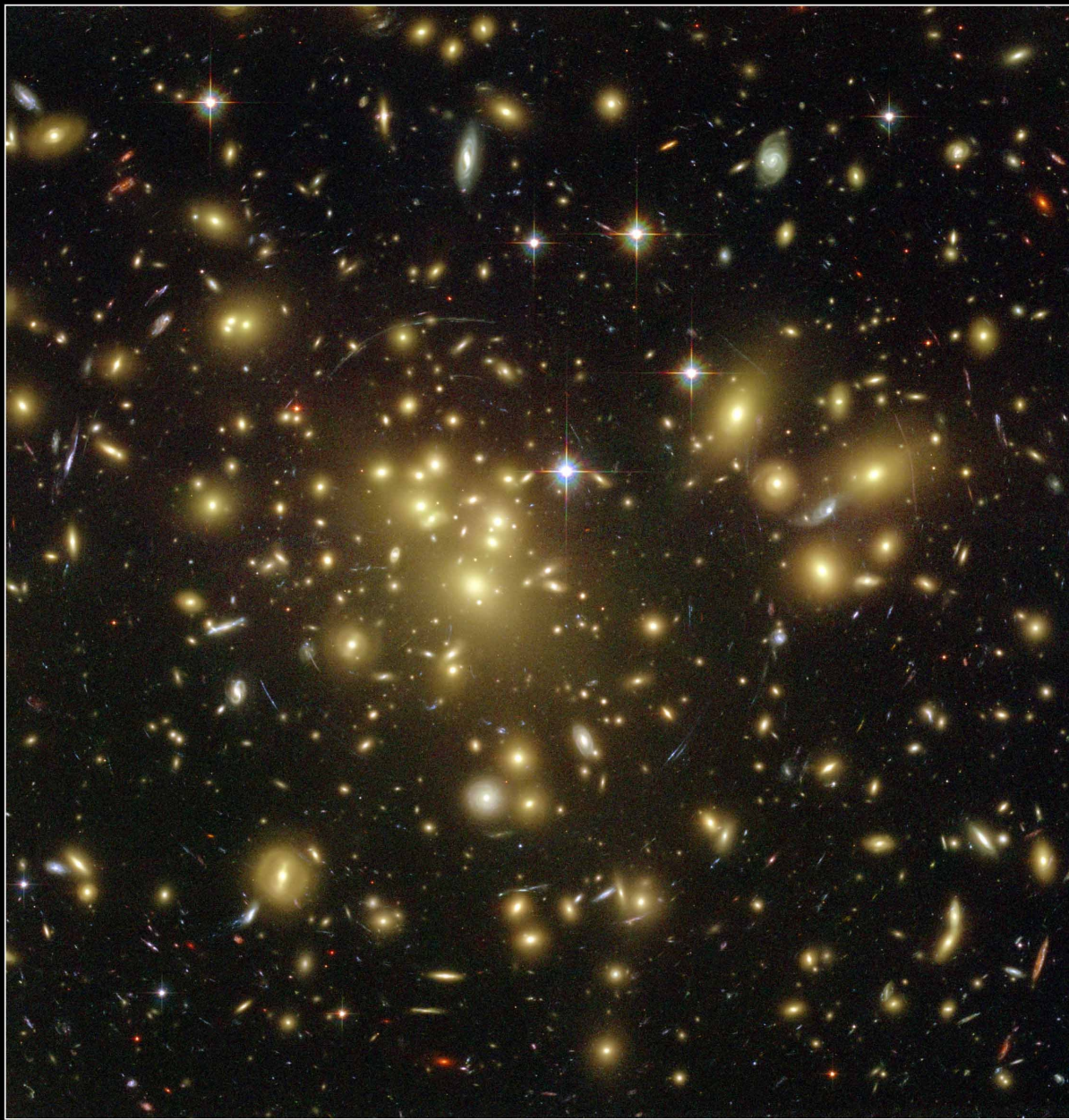




## Quasar Lenses ■ *Hubble Space Telescope* ■ WFC3

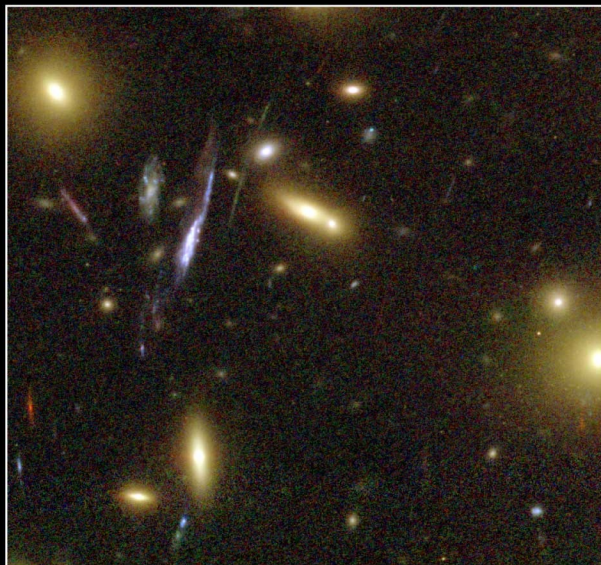
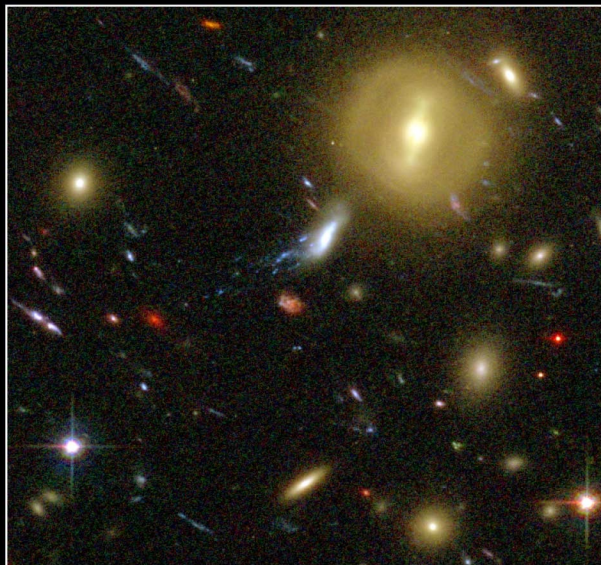






**Galaxy Cluster Abell 1689**  
**Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys**





## **Galaxy Cluster Abell 1689 Details**

**Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys**

NASA, N. Benitez (JHU), T. Broadhurst (The Hebrew University), H. Ford (JHU), M. Clampin (STScI), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO/Lick Observatory), the ACS Science Team and ESA • STScI-PRC03-01b

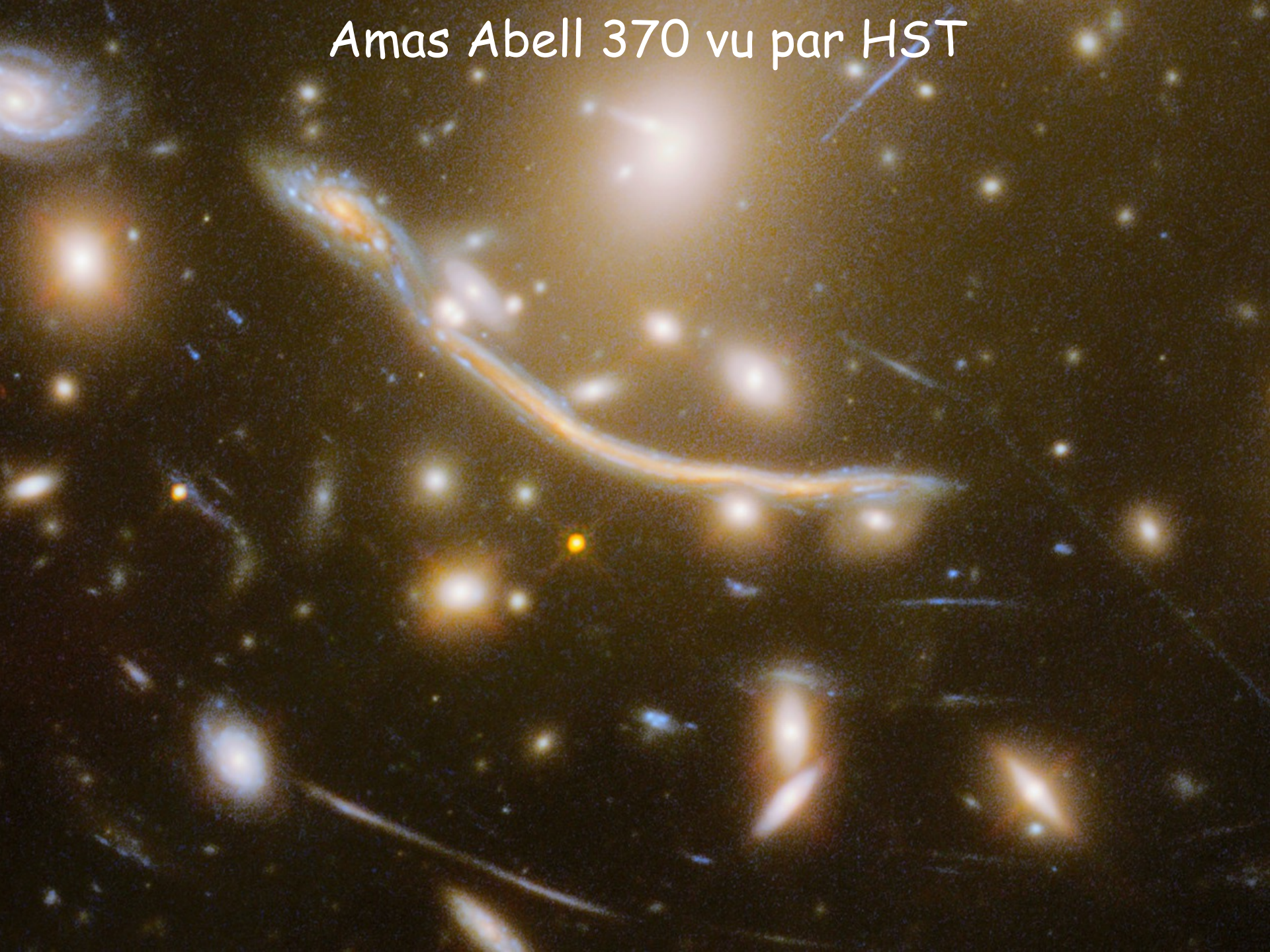


# Amas Abell 370 vu par HST



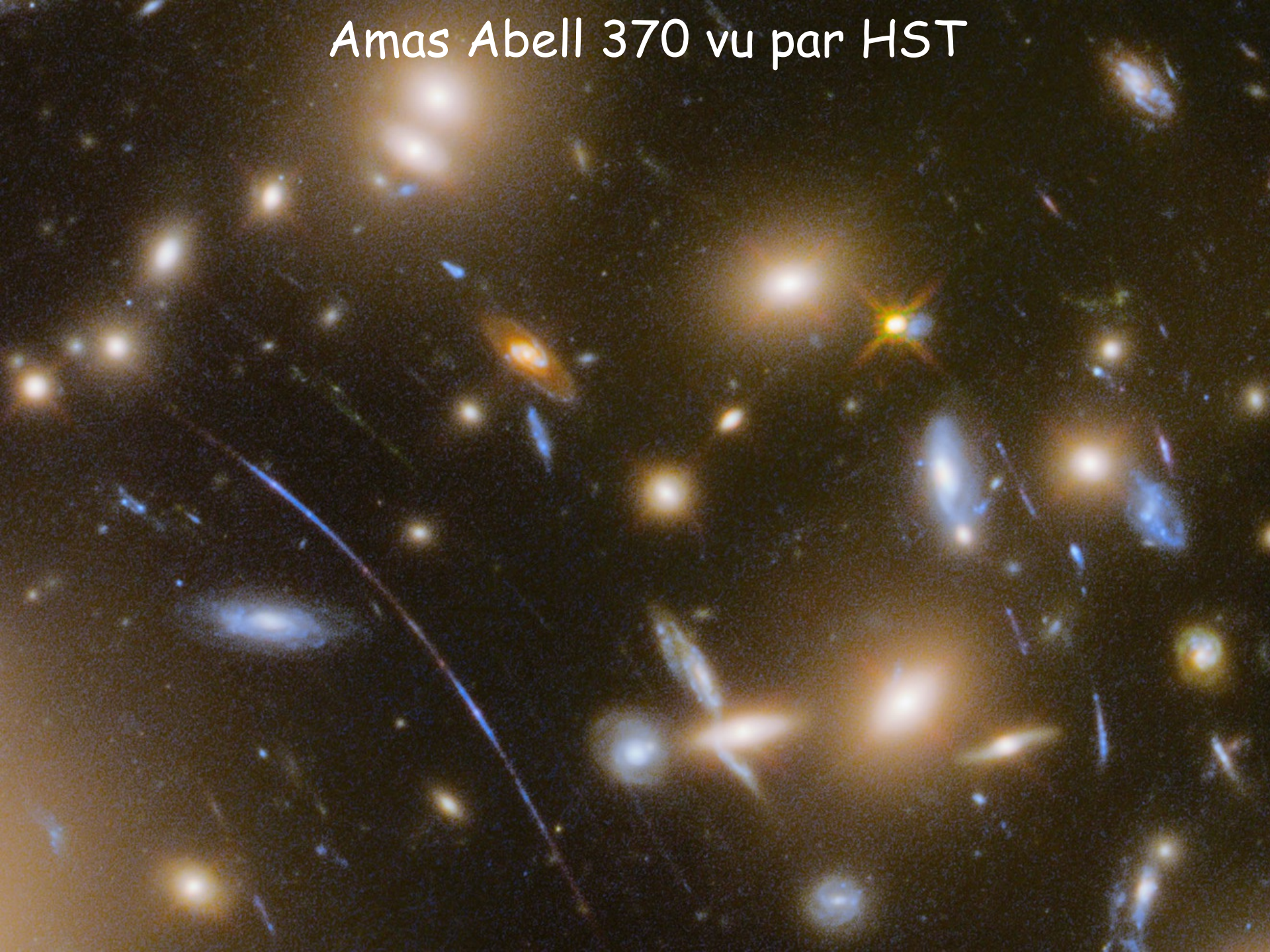


Amas Abell 370 vu par HST



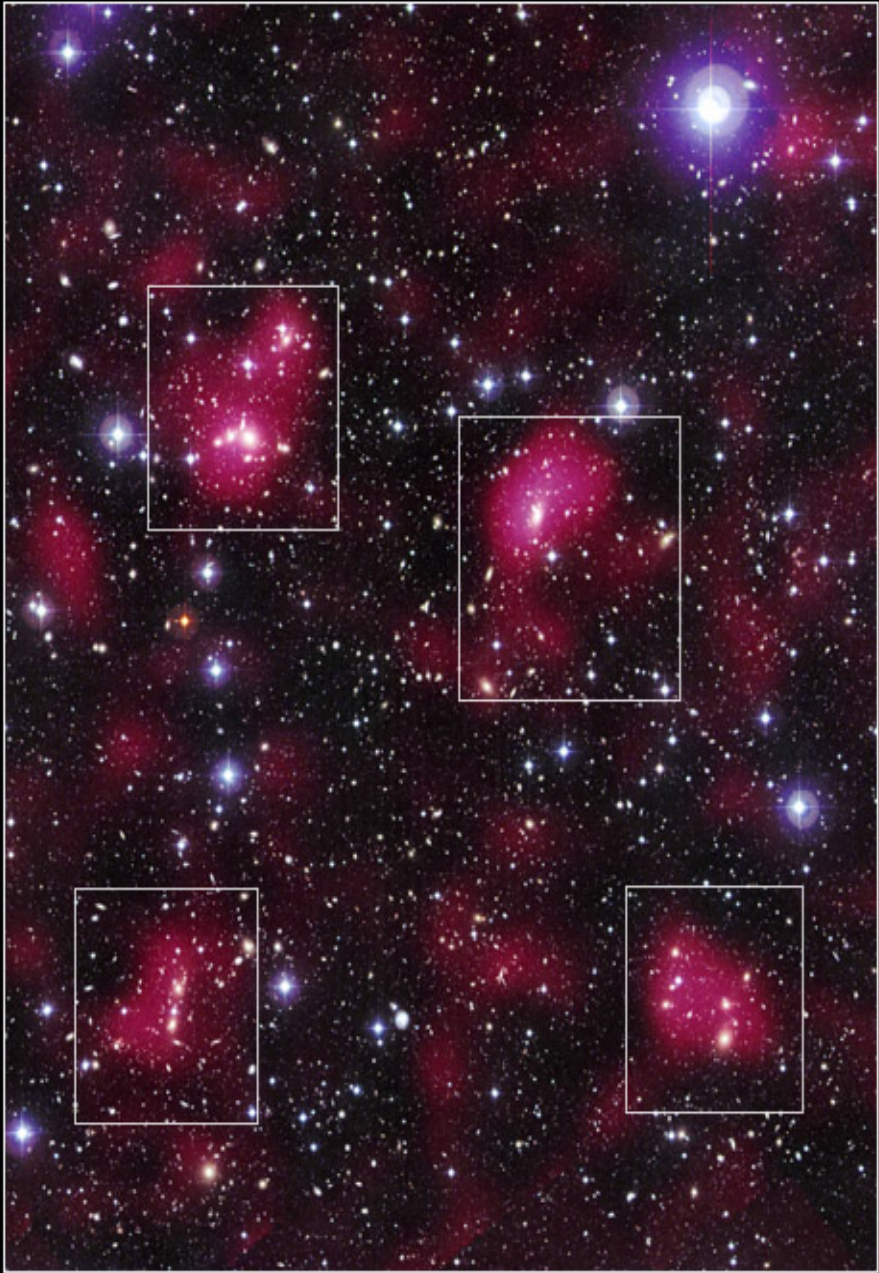


Amas Abell 370 vu par HST



Effet de lentille faible







# Choc entre deux amas (« Bullet cluster »)

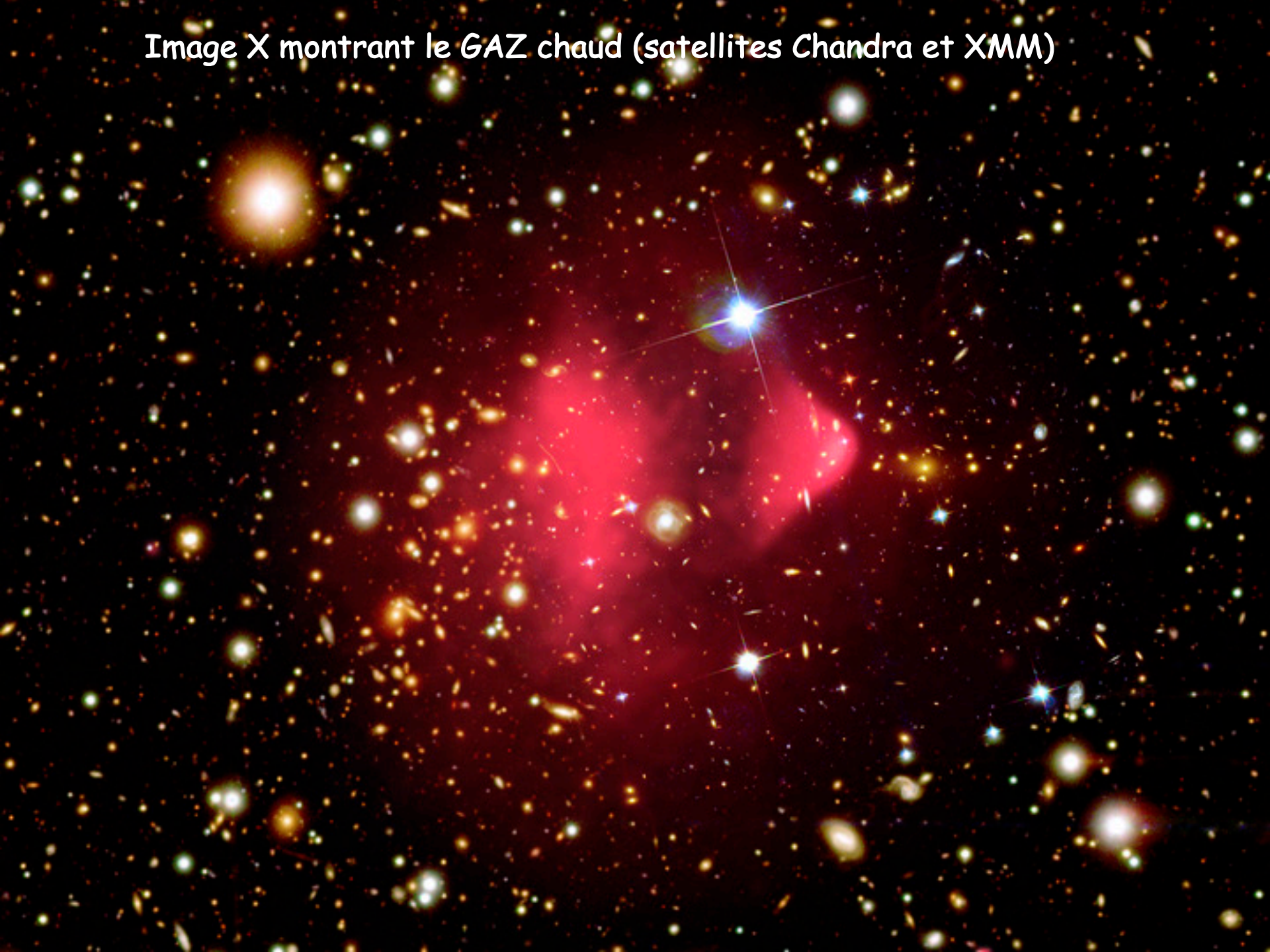


Carte de masse en utilisant l'effet de lentille sur des milliers de galaxies d'arrière-plan.  
Masse TOTALE (en bleu)

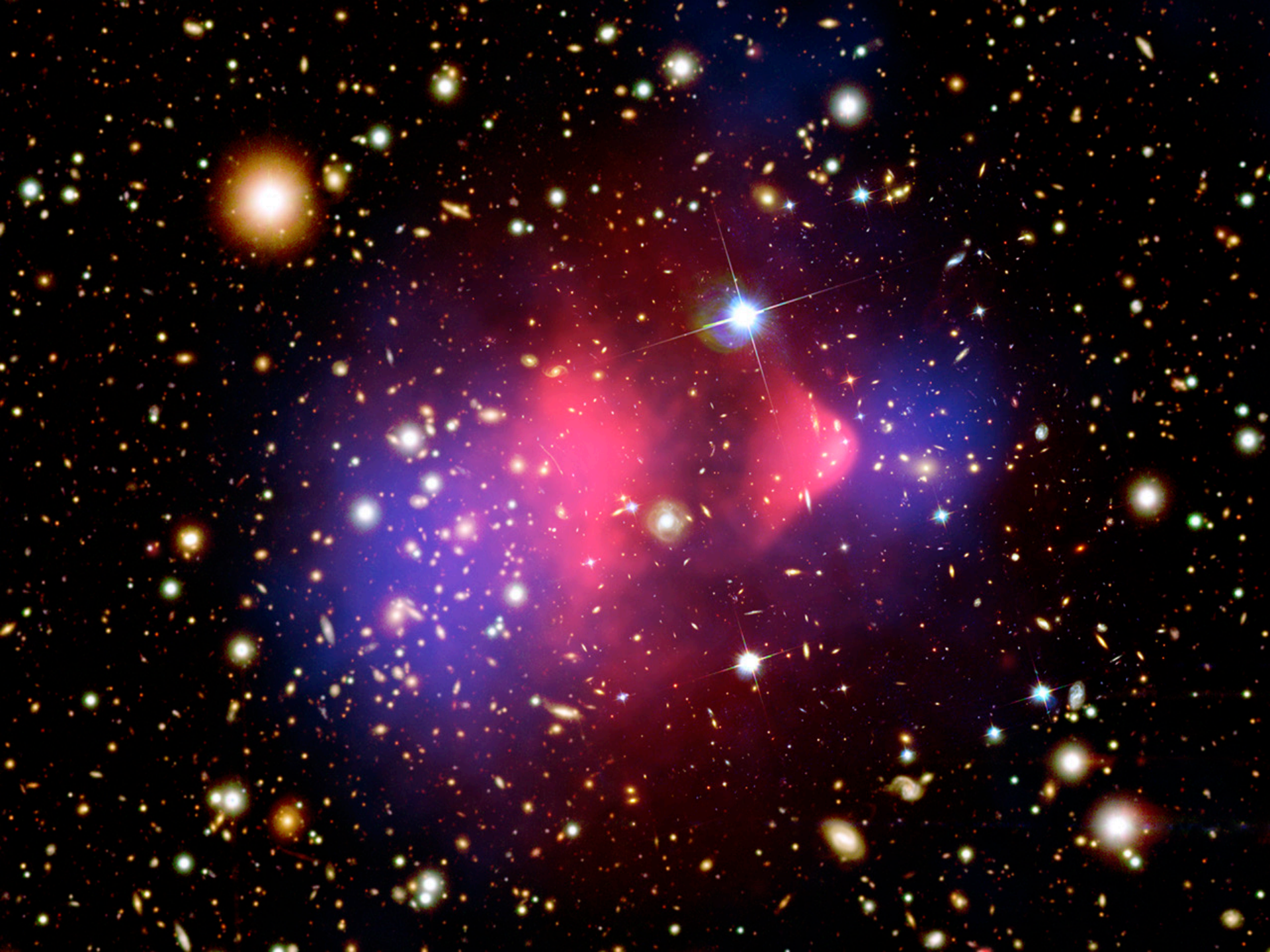




Image X montrant le *GAZ* chaud (satellites Chandra et XMM)

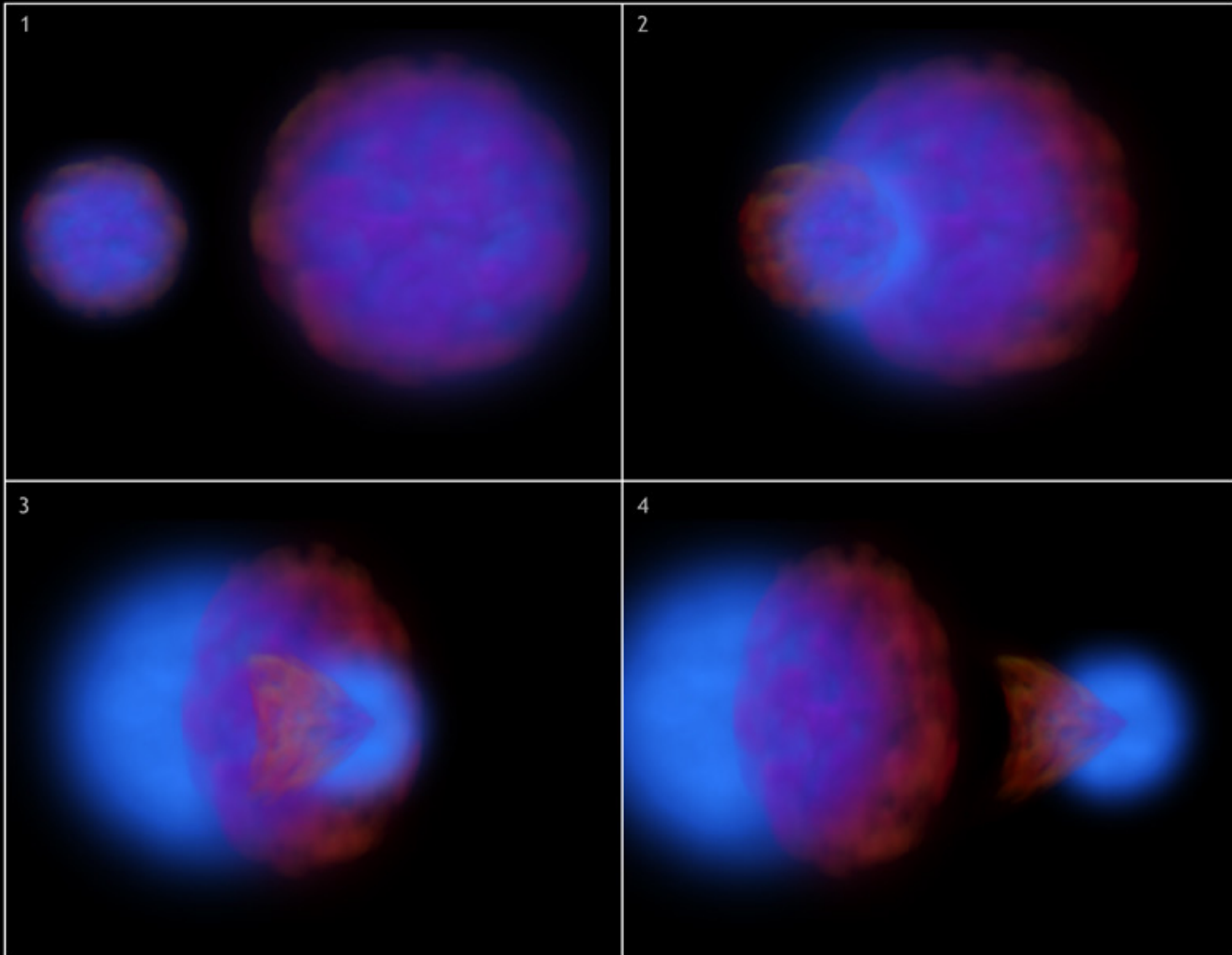






# Choc entre deux amas

Simulation numérique: matière sombre en bleu, gaz en rouge.



# Choc entre deux amas

Dans les observations et la simulation les distributions de gaz et de matière sombre sont différentes:

1. Le gaz est un fluide -> subit des turbulences -> il est ralenti lors de l'interaction entre les amas.
  2. La matière sombre n'interagit pas avec elle-même (pas de collisions), elle n'est pas ralentie par l'interaction entre les amas.
- > preuve de l'existence de matière sombre qui ne se comporte pas comme la matière « ordinaire »

**Micro-lentilles gravitationnelles**



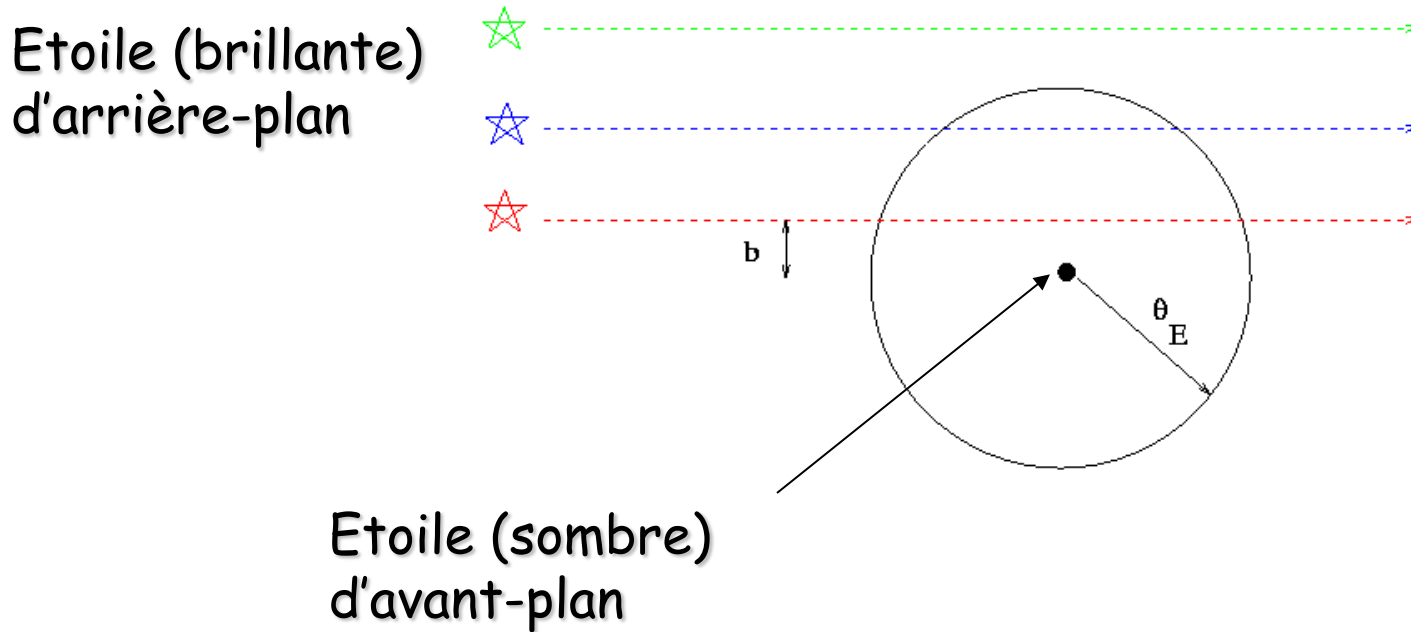
# Micro-lentilles gravitationnelles

L'effet de lentille entre étoiles dans notre Voie Lactée est en fait observable, contrairement aux craintes d'Einstein

On cherche à observer non pas des images multiples d'étoiles mais l'amplification apparente de leur luminosité

Si la matière sombre dans la Voie Lactée est composée d'étoiles peu lumineuses, mais nombreuses, on devrait voir les étoiles d'arrière plan changer d'éclat.

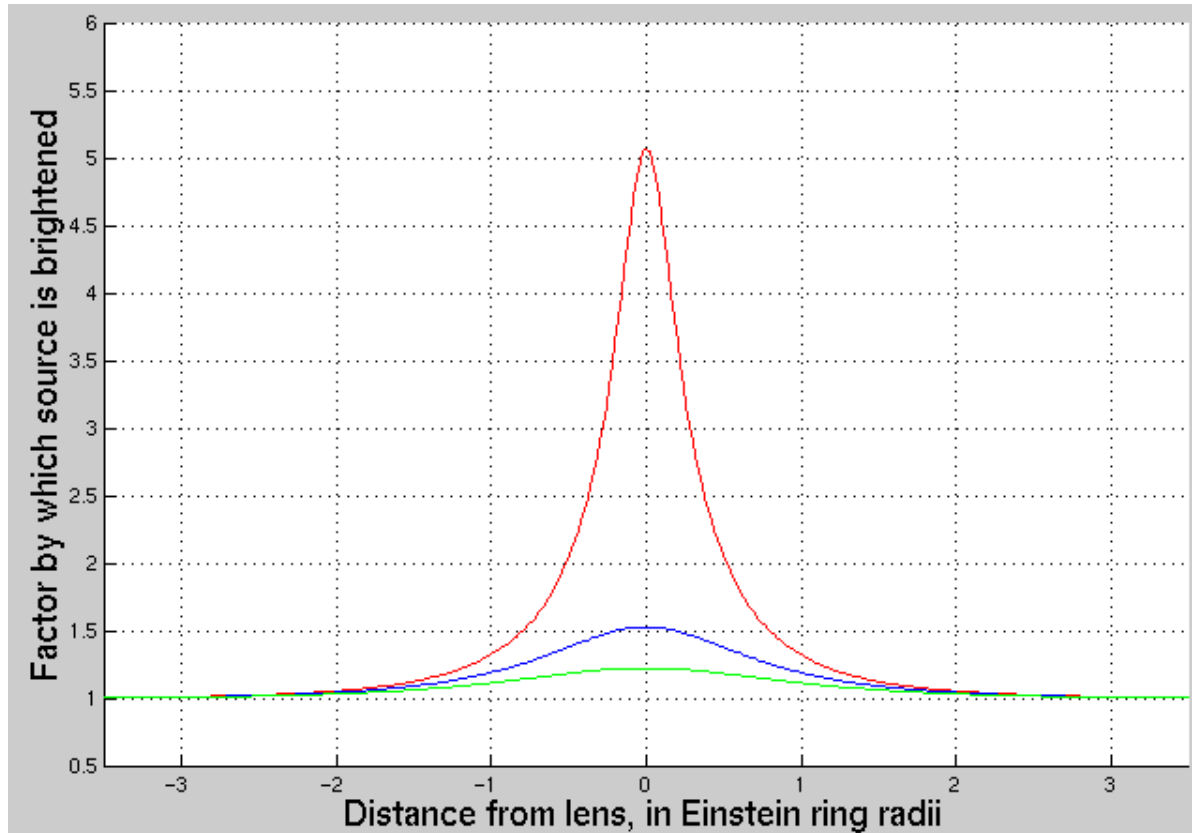
# Micro-lentilles gravitationnelles



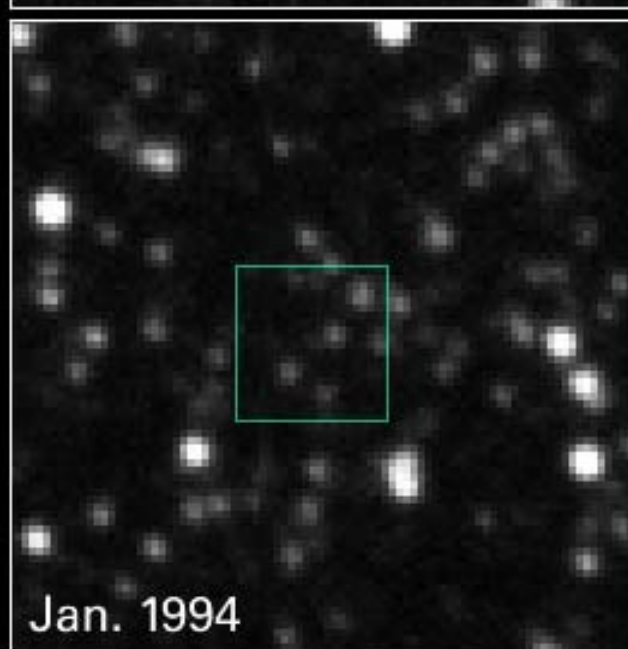
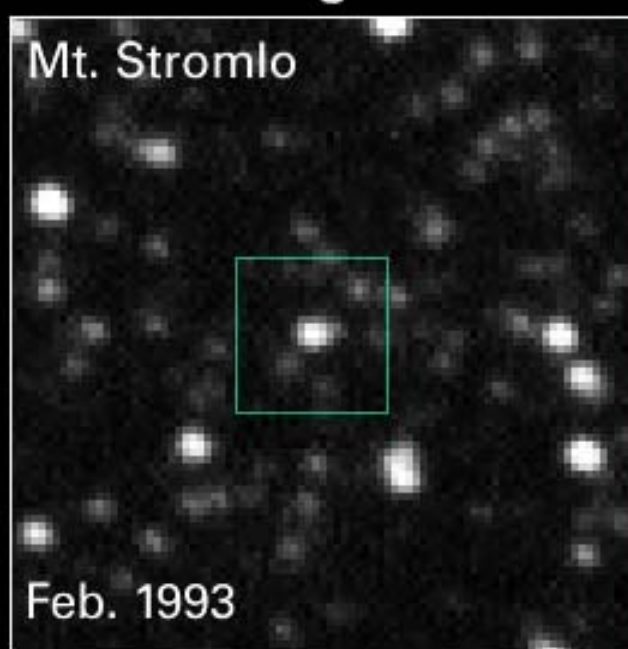
Si  $u = b/\theta_E$  l'amplification maximum est donnée par:

$$A = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

# Micro-lentilles gravitationnelles

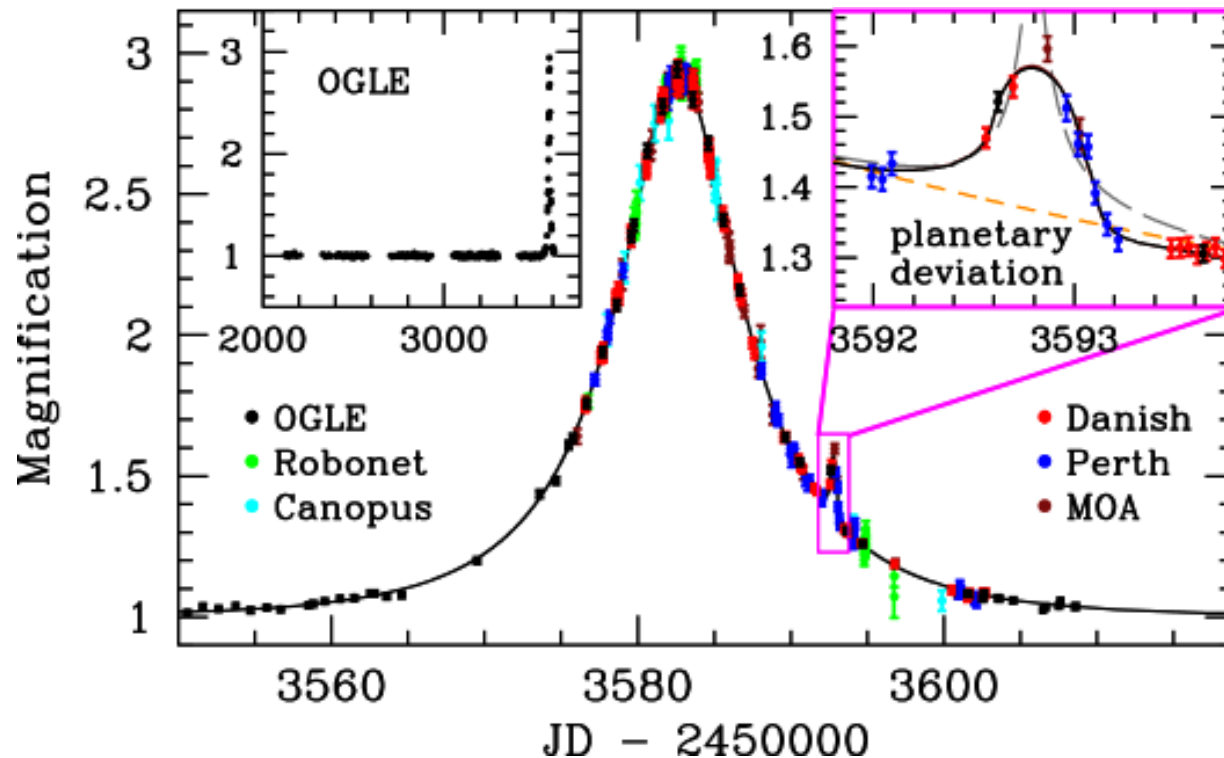


Amplification en fonction de la distance angulaire à la lentille.  
L'échelle de temps dépend des vitesses relatives de la lentille et de l'étoile source.



# Micro-lentilles gravitationnelles

Découverte d'une planète, en prime !



Date (jours Juliens)

# Résultats

1. Environ 20 évènements confirmés dans la direction du LMC et SMC
2. > 4000 évènements dans le bulbe galactique: plus qu'attendu
3. Durée: 30 à 239 jours (MACHO: MAssive Compact Halo Objects)
4. MACHO: seulement 20% de la masse sombre dans le halo de la Voie Lactée est composée d'étoiles de masse  $0.15 < M < 0.9$  masses solaires
5. EROS (Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres): moins de 25% de la masse du halo est sous forme d'objet dont la masse  $10^{-7} < M < 1$  masses solaires
6. Pas d'événements très longs, ce qui élimine l'hypothèse de trous noirs « errants » de masse  $0.3 < M < 30$  masses solaires

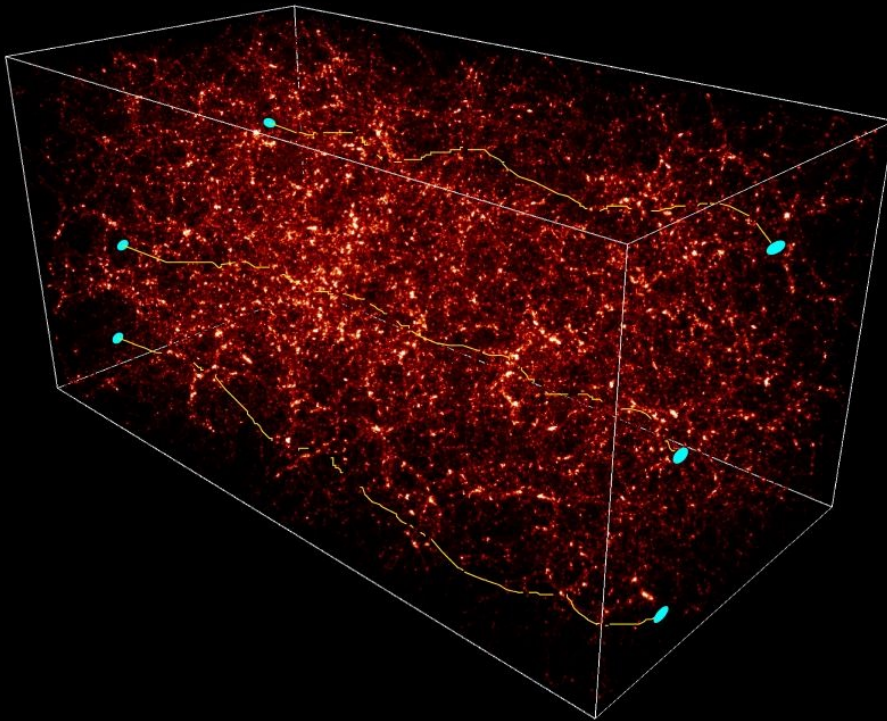
**Effet de lentille par les grandes structures**



# Effet de lentille par les grandes structures

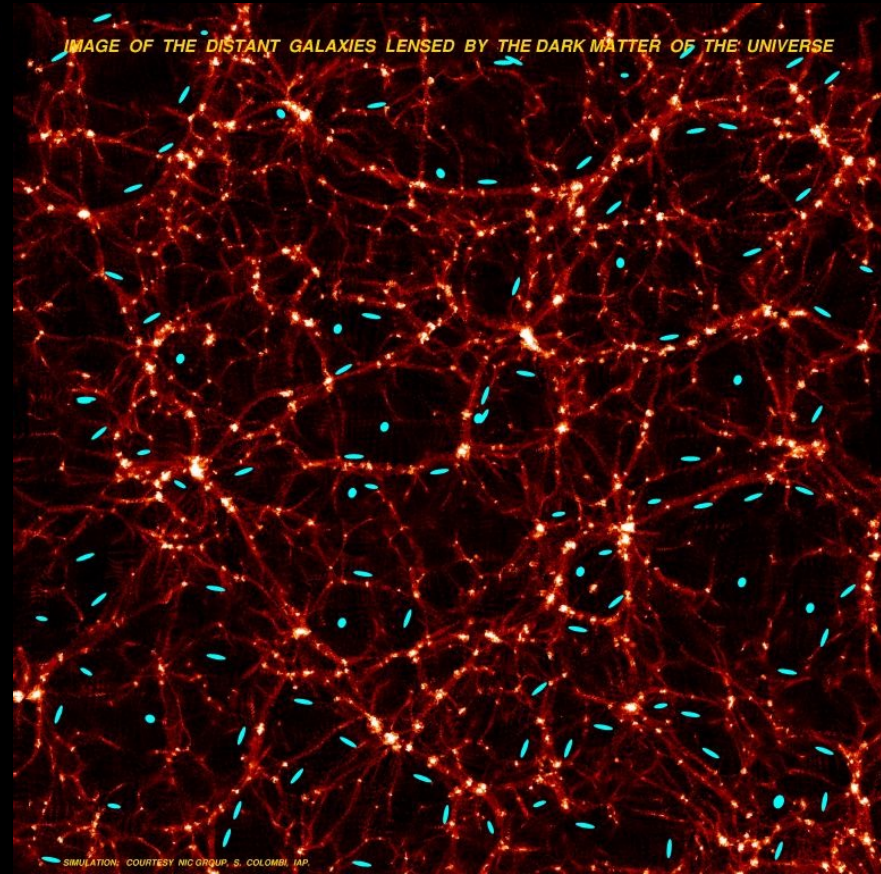
## Déformations statistiques des galaxies d'arrière-plan

DEFLECTION OF LIGHT RAYS CROSSING THE UNIVERSE, EMITTED BY DISTANT GALAXIES



SIMULATION: COURTESY NIC GROUP, S. COLOMBI, IAP.

IMAGE OF THE DISTANT GALAXIES LENSED BY THE DARK MATTER OF THE UNIVERSE

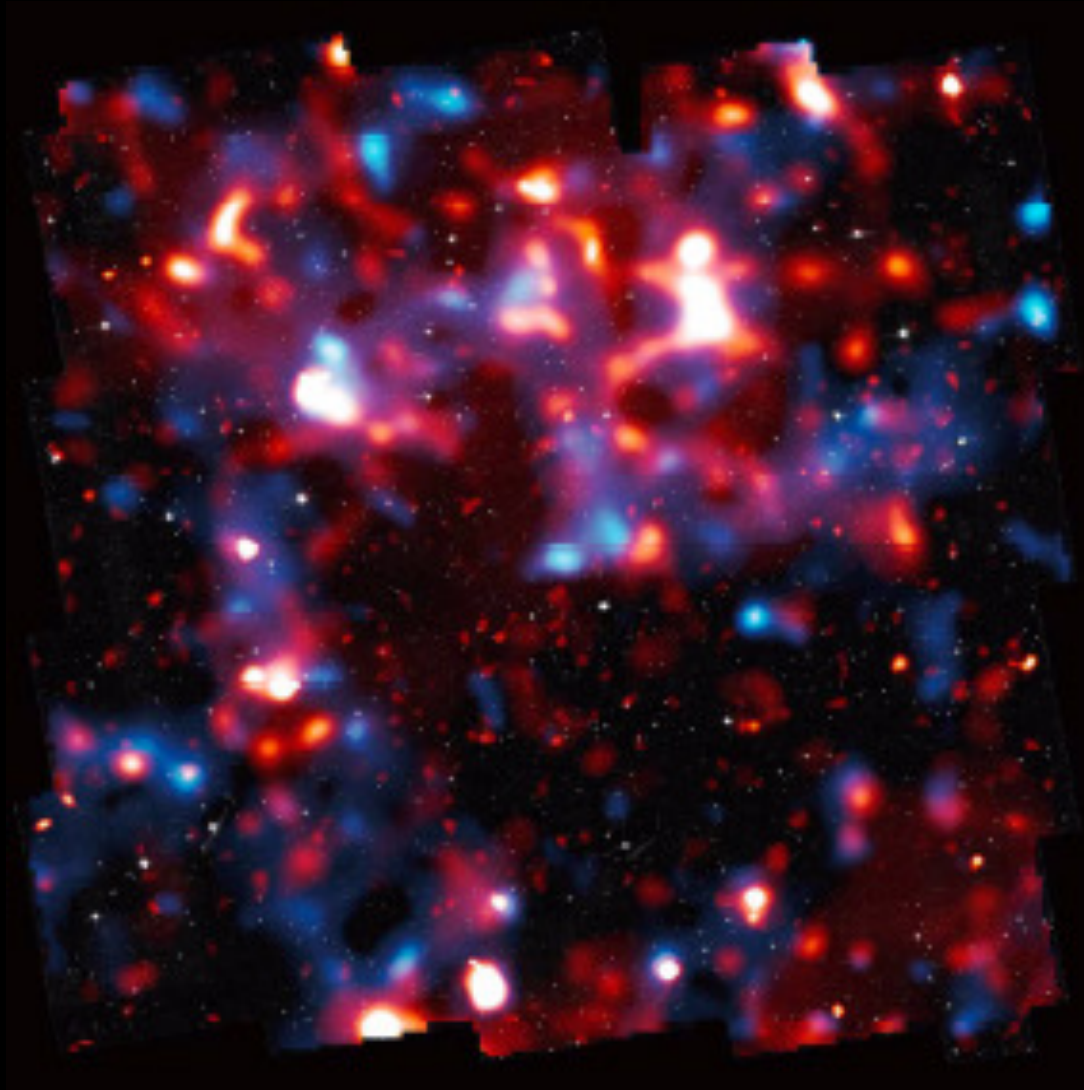


SIMULATION: COURTESY NIC GROUP, S. COLOMBI, IAP.



# Effet de lentille par les grandes structures

Matière visible (rouge) vs. sombre (bleu) dans les filaments cosmiques

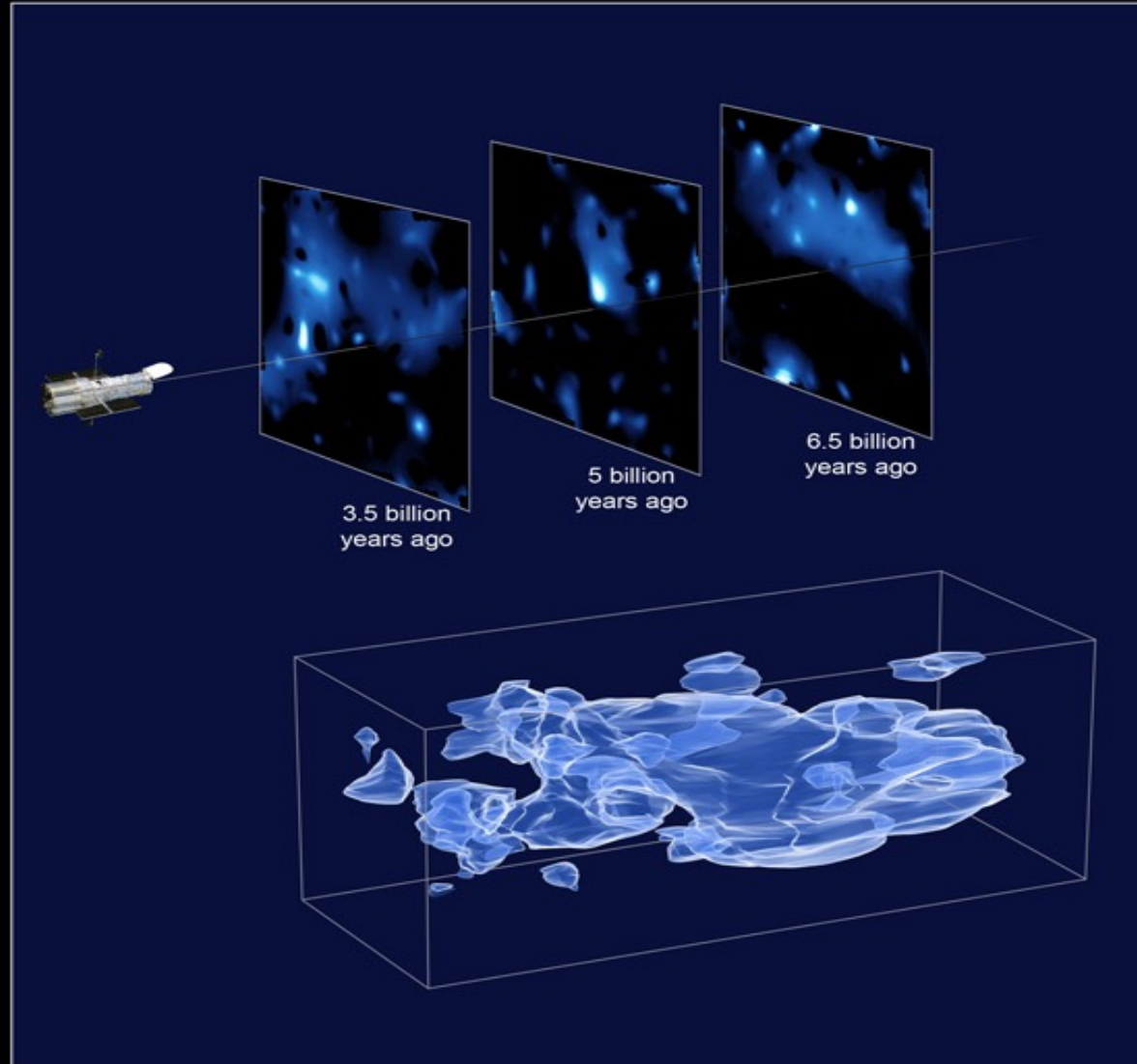


# Effet de lentille par les grandes structures

Première carte 3D de la matière sombre (2007)

Distribution of Dark Matter

HST ■ ACS/WFC



# La matière sombre existe ! (?)

- Courbes de rotation des galaxies spirales
  - Milieu intergalactique dans les amas
  - $M/L(\text{spirales}) < M/L(\text{elliptiques}) < M/L(\text{amas de galaxies})$
  - Amas double en interaction (« bullet cluster »)
  - Microlentilles dans notre Voie Lactée: **une partie** (max 20%) de la matière sombre est sous forme d'étoiles peu lumineuses
  - Filaments cosmiques
- > on arrive à mettre en évidence une partie de la matière sombre dans notre Voie Lactée, dans les galaxies spirales, dans les elliptiques, et dans les amas, mais pas toute la matière sombre !