



dépasser les frontières



ENS DE LYON

Mirages Cosmiques

Johan Richard

Astronome,

Observatoire de Lyon

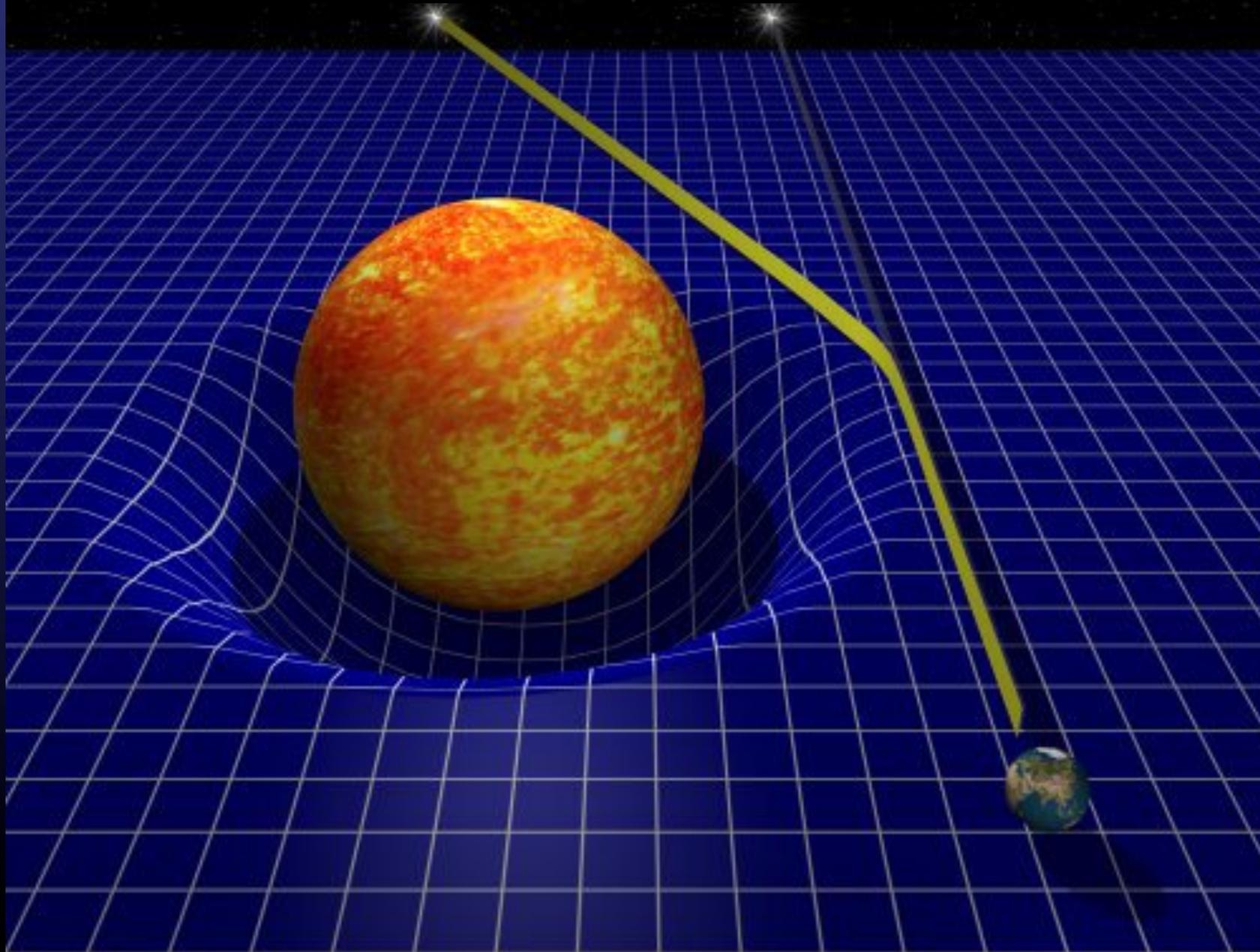


Mirages cosmiques

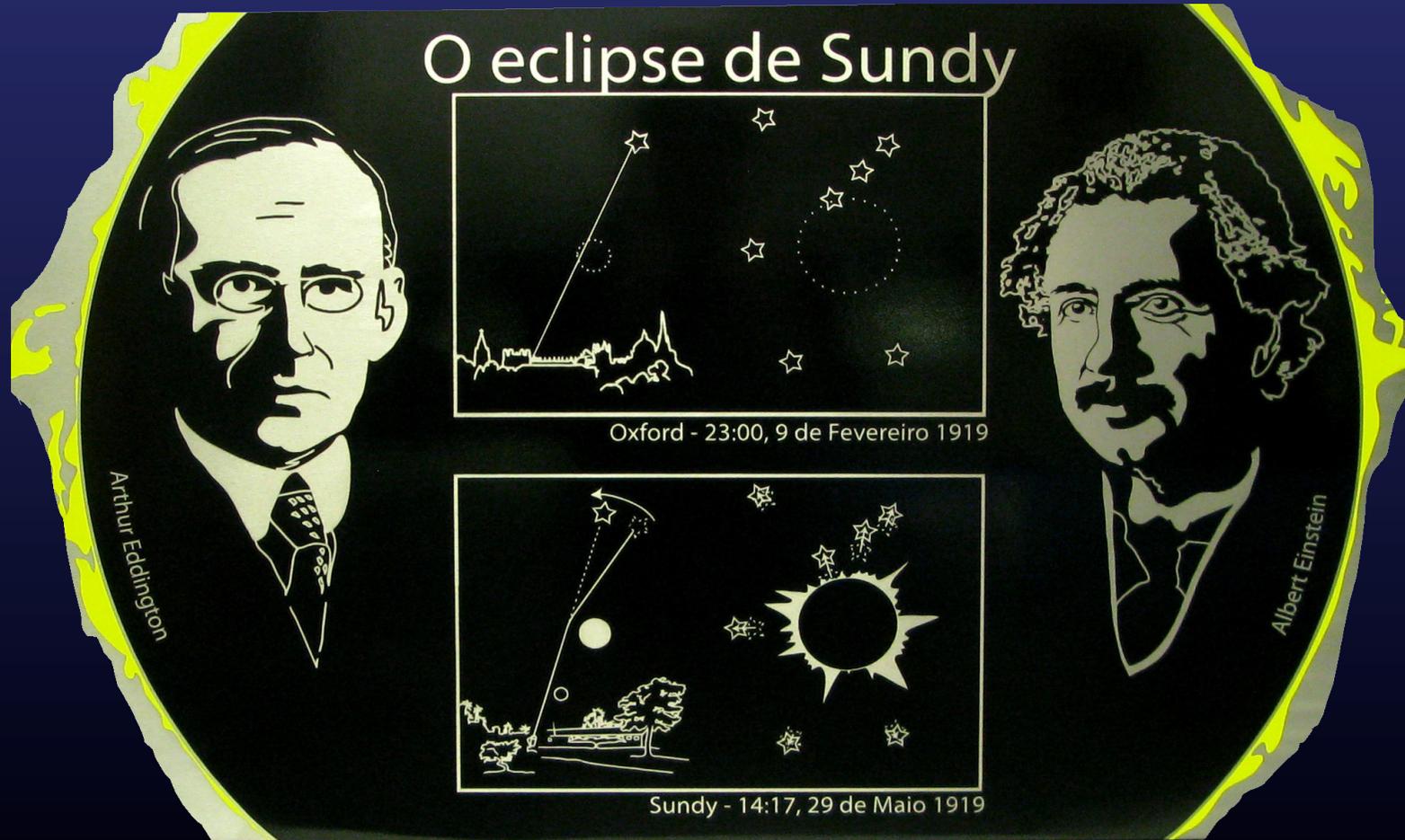
- Principe, historique
- Mirages cosmiques comme traceurs de matière noire
- Applications extragalactiques

Position réelle

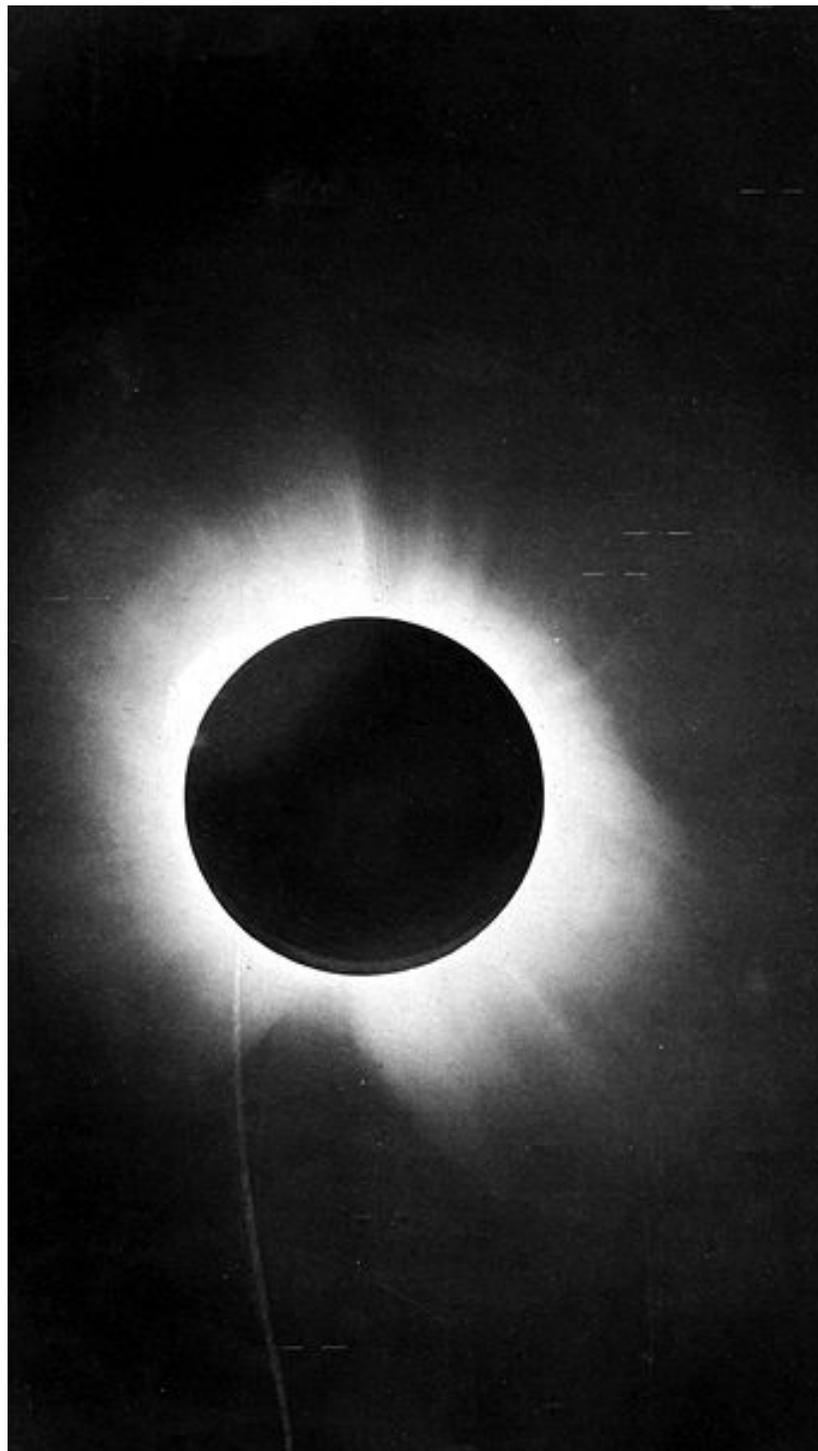
Position observée



Expérience d'A. Eddington



Eclipse solaire du 29 Mai 1919, île de Príncipe



* Actual Position of the Star
 * Apparent Position of the Star
 Distance From the Earth to the Stella Background is more than 93,000,000,000,000 miles.

THE SUN
 Distance from the Earth 93,000,000 miles

This Diagram shows the proportional Displacement of the Stars in relation to the distance from the Sun. The amount of Displacement is exaggerated about 600 times.

Apparent Position: ↑
 Actual Position: *

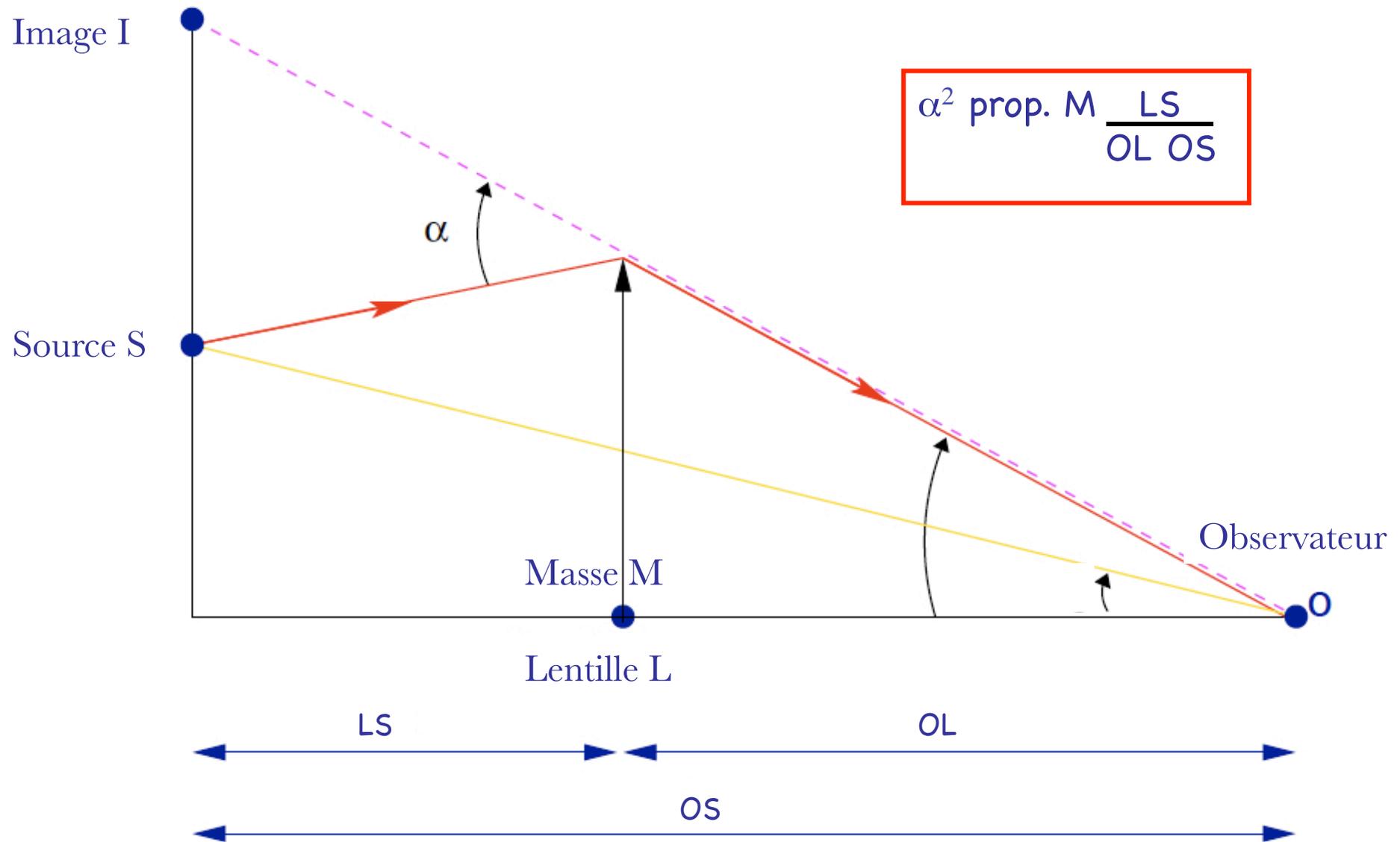
THE SUN

SOUTH AMERICA AFRICA
 ATLANTIC OCEAN
 Showing Path of Total Eclipse of May 28-29, 1919, and positions of the two Observation Stations.

THE OBSERVATION STATION AT SOBRAL, IN BRAZIL

The Corona

“Optique Gravitationnelle”

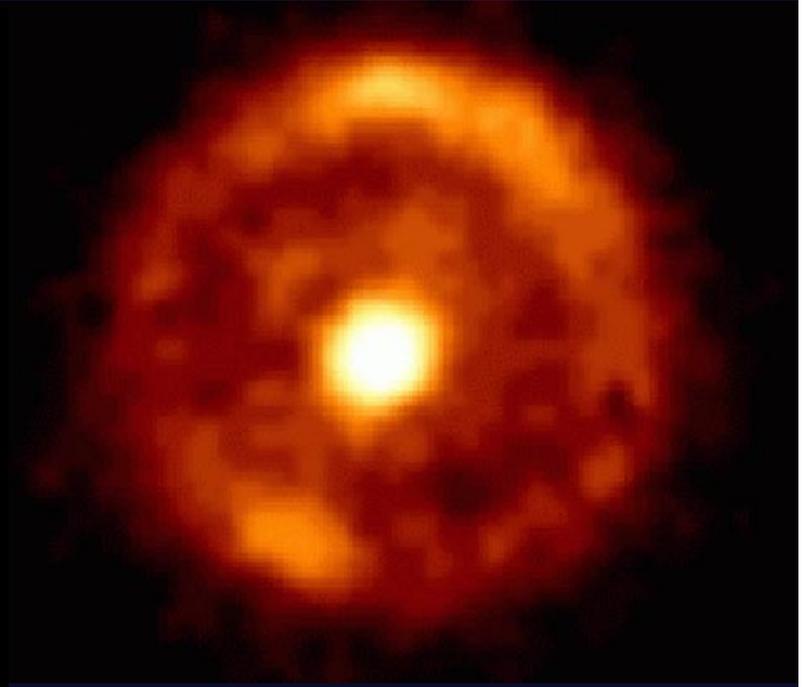




Lentille symétrique: Anneau d'Einstein

Gravitationslinsen (III)

Eine symmetrische Linse



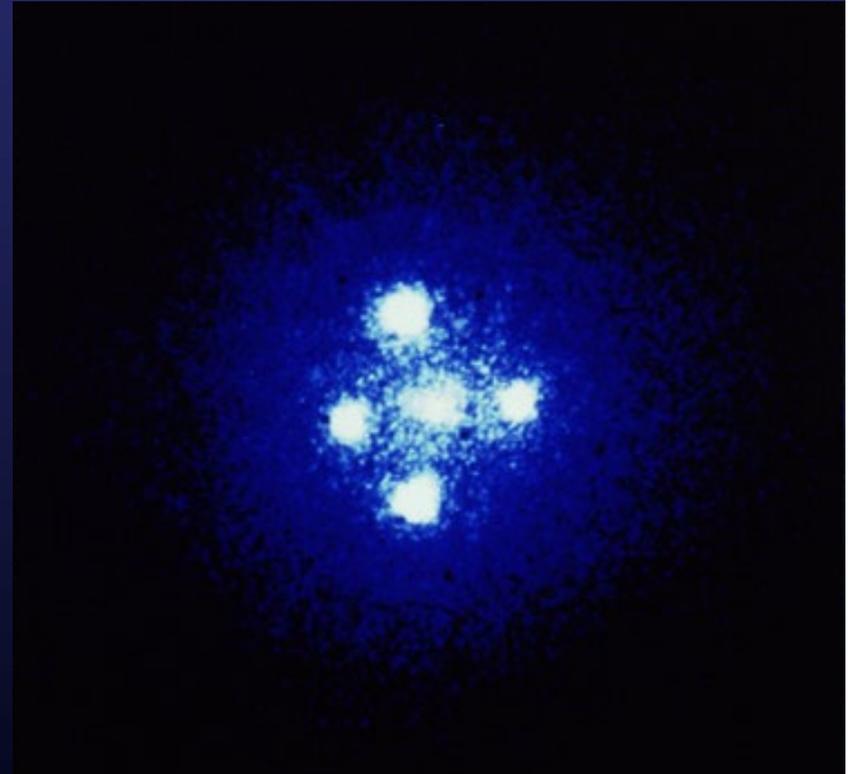
Anneau de rayon R_e



Lentille elliptique: Croix d'Einstein

Gravitationslinsen (IV)

Eine asymmetrische Linse



Première croix:
Quasar quadruple



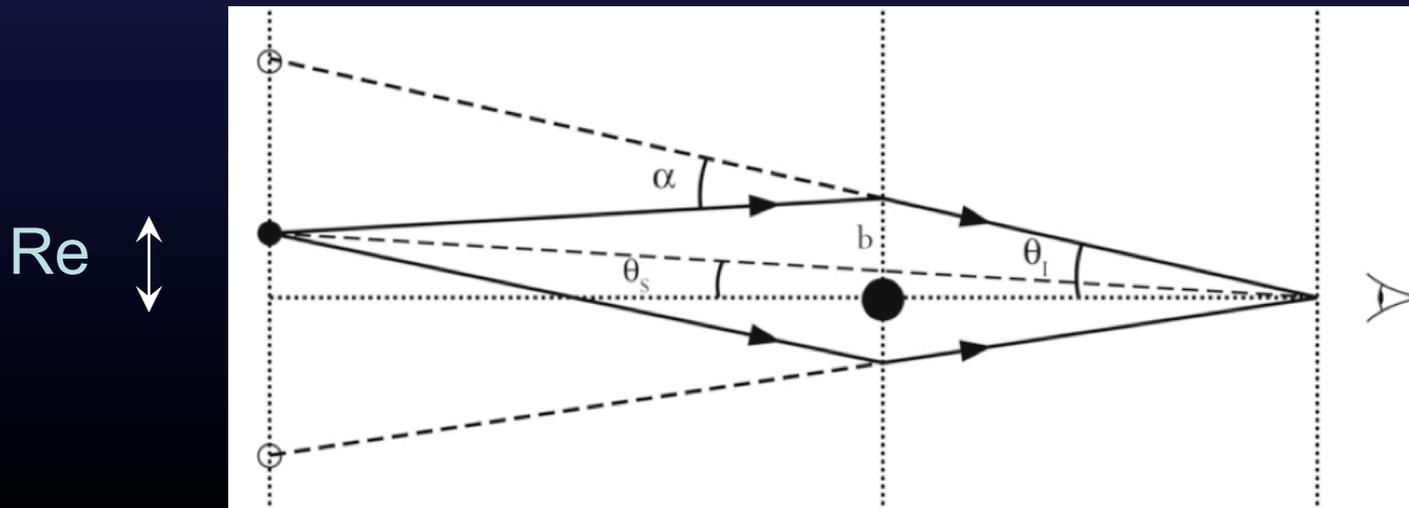


Rayon d'Einstein

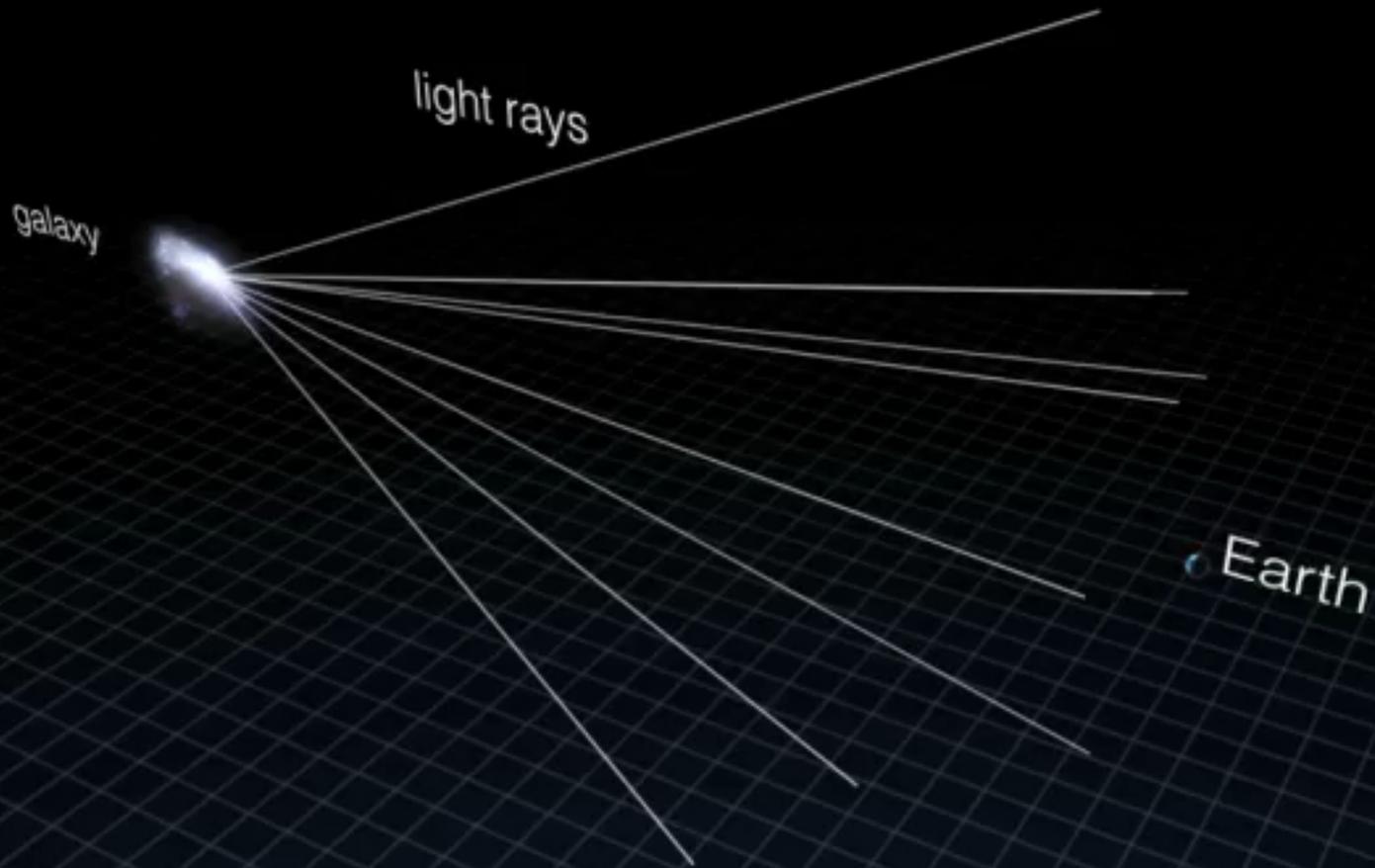
Echelle de l'effet de lentille gravitationnelle

$$1'' = (1/3600)^\circ$$

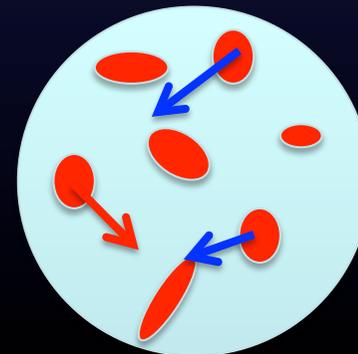
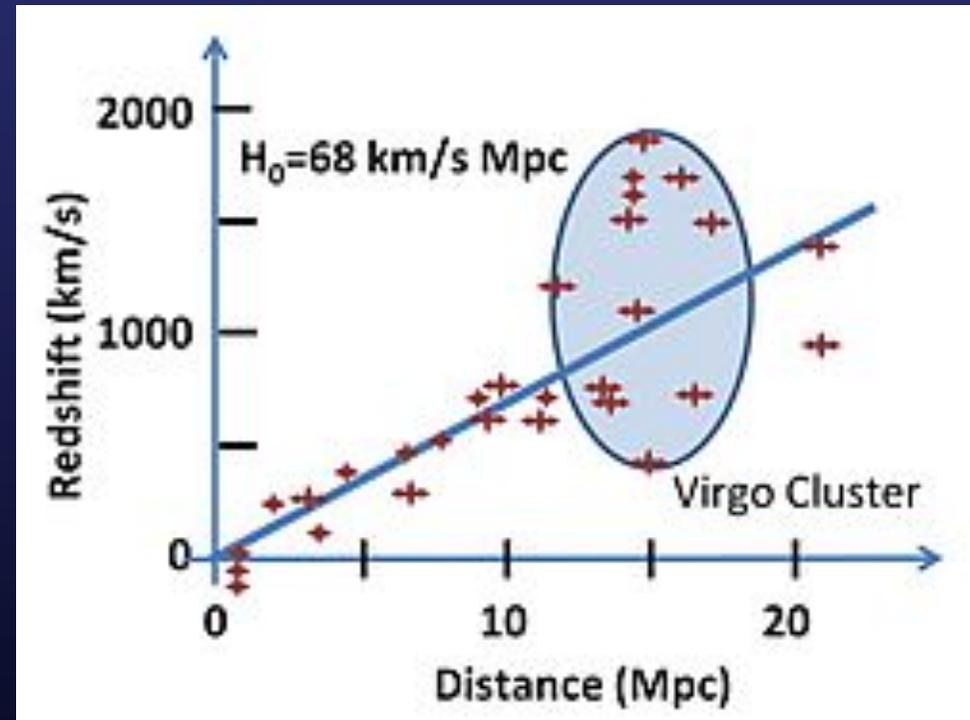
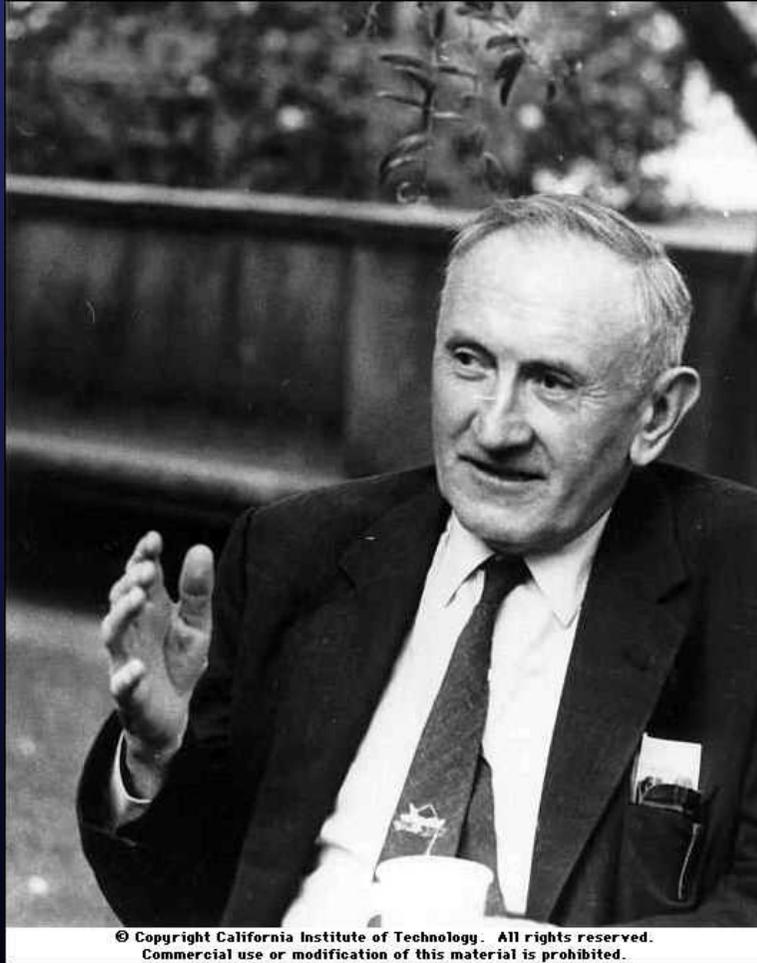
- | | Re |
|--------------------------------------|---------|
| • Soleil + étoile: | 41'' |
| • Etoile + étoile: | 0.001'' |
| • Galaxie + Galaxie (~1 + 5 Md a-l): | 1'' |



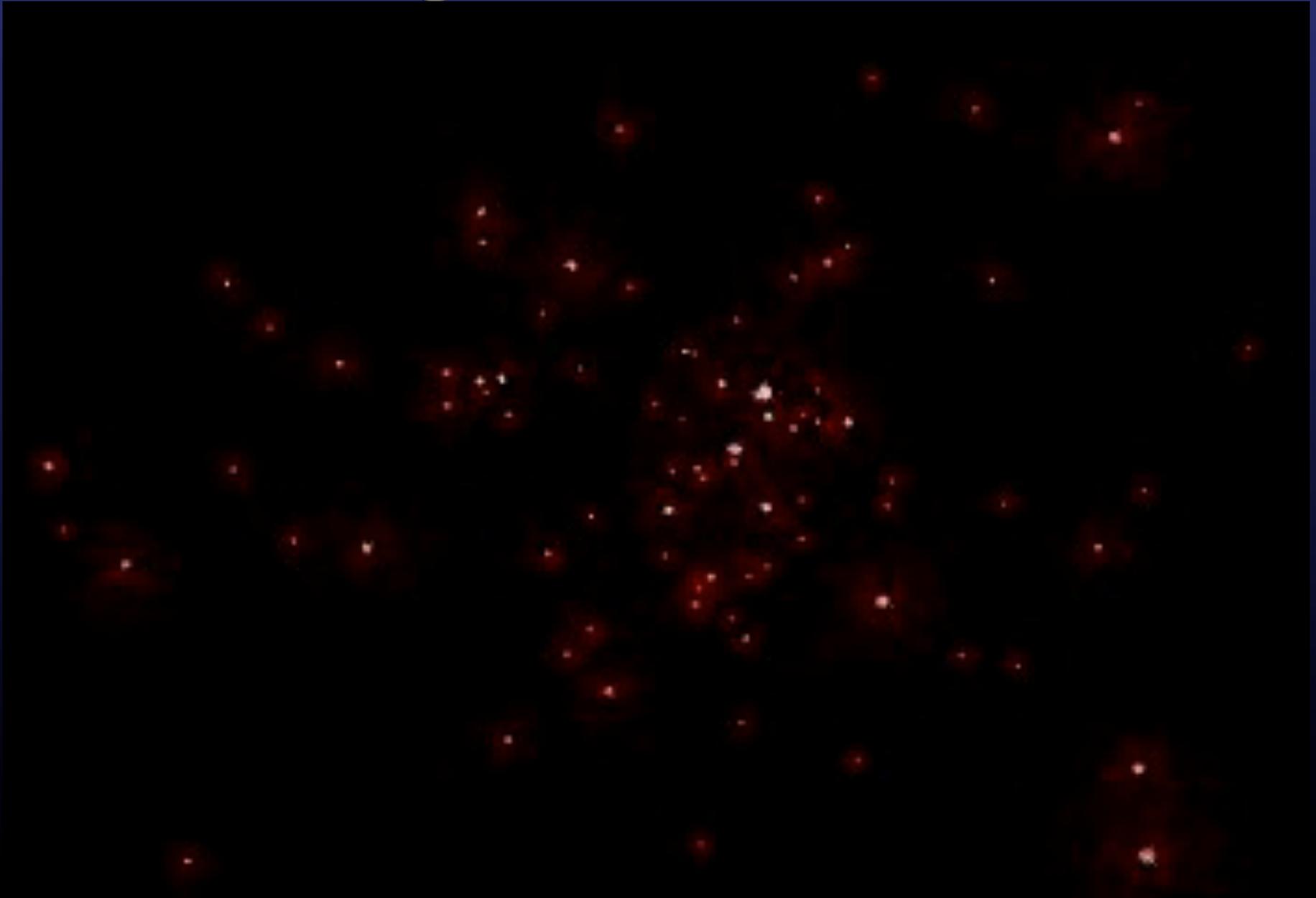
Images multiples



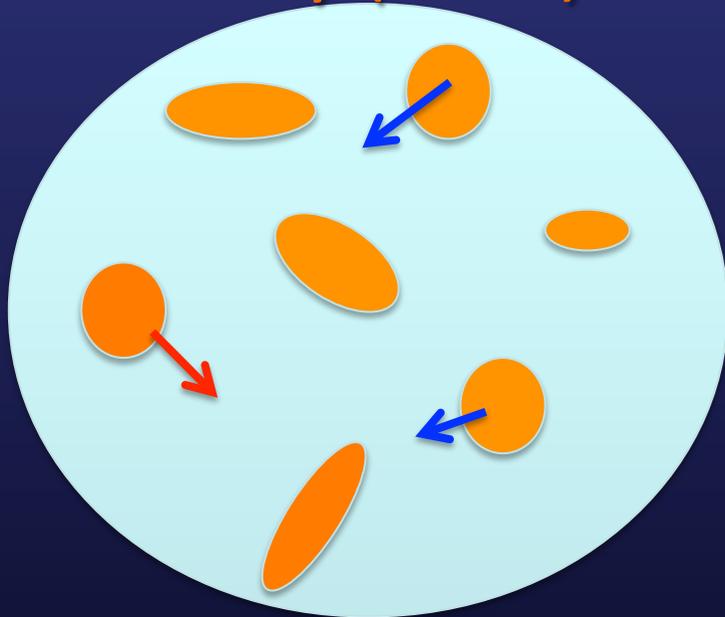
Fritz Zwicky (1933)



Amas de galaxies: simulations



Fritz Zwicky (1933)



Théorème du Viriel:

$$\langle K \rangle = - \langle U \rangle$$

Energie cinétique
du système ('agitation')

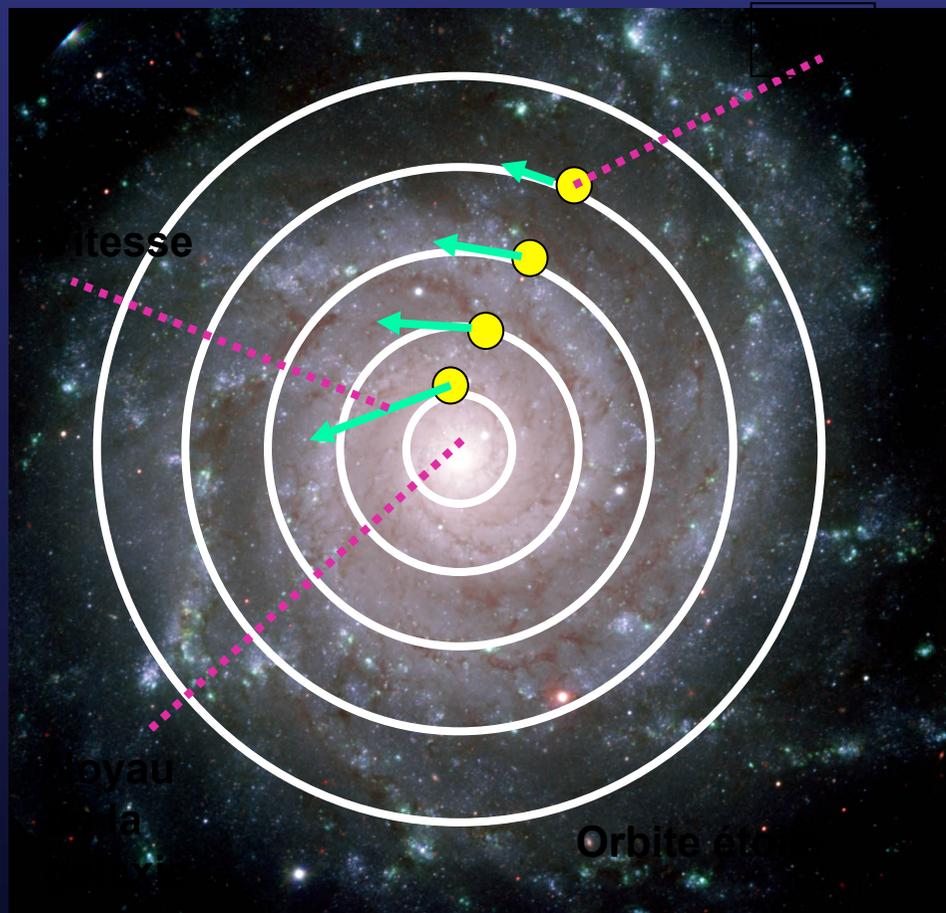
=

Energie potentielle gravitationnelle
(liée à la masse totale)

**La masse totale de l'amas de galaxies de Coma est
100 à 500 x supérieure à la somme des masses de ses galaxies**

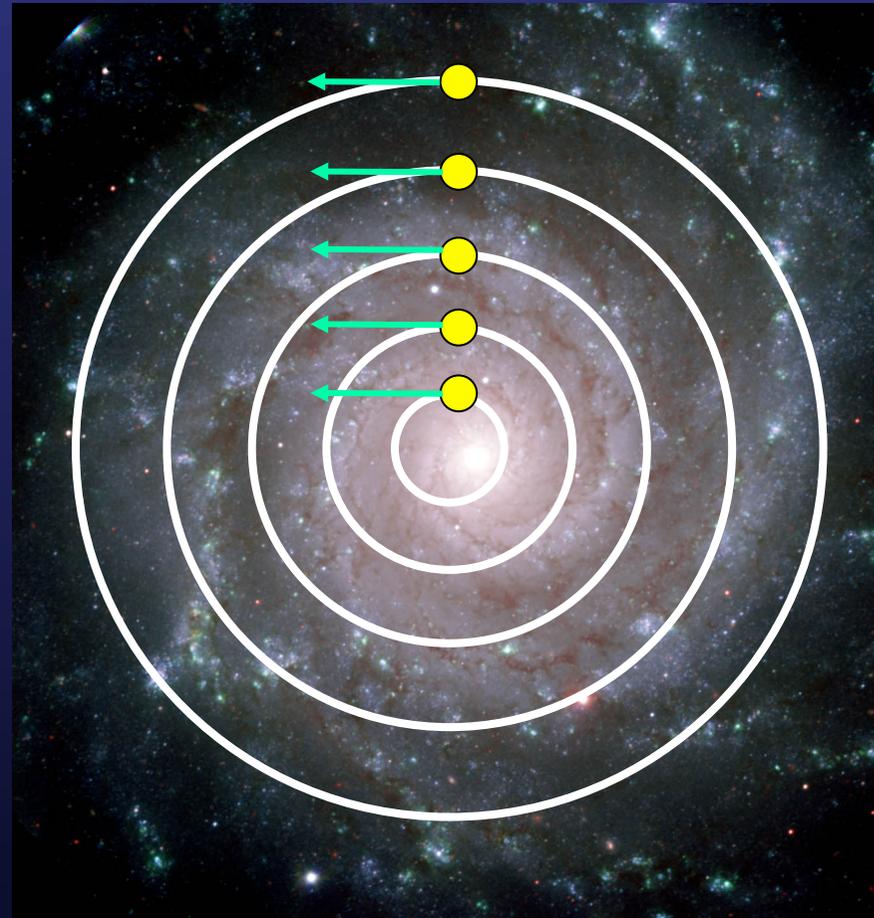
Galaxie spirale: exemple d'Andromède





Newton :

Loin du centre, la force de gravitation et la vitesse diminuent.



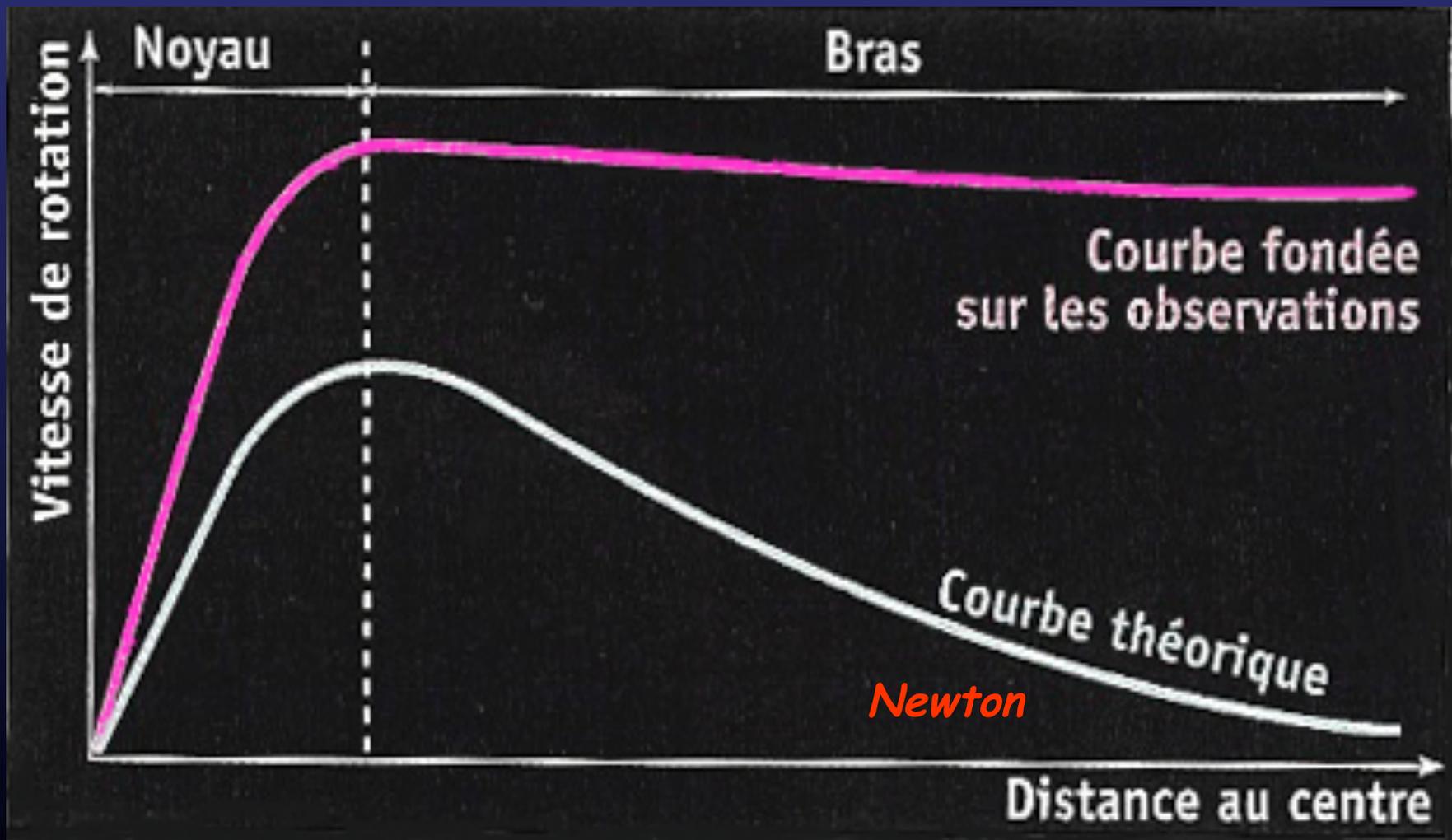
Observations :

Les vitesses sont constantes

Vera Rubin 1970

Des vitesses à problème

- Etude de la **vitesse de rotation** des étoiles au sein des **galaxies spirales**
 - La vitesse devrait diminuer à mesure que la distance au noyau galactique augmente
 - Les prédictions de vitesse sont calculées à partir de la masse des objets visibles (Newton et Kepler)
 - Au contraire la vitesse dans les bras spiraux est quasi constante.
- Problème similaire à celui relevé par Fritz Zwicky en 1933



Supposition : matière noire

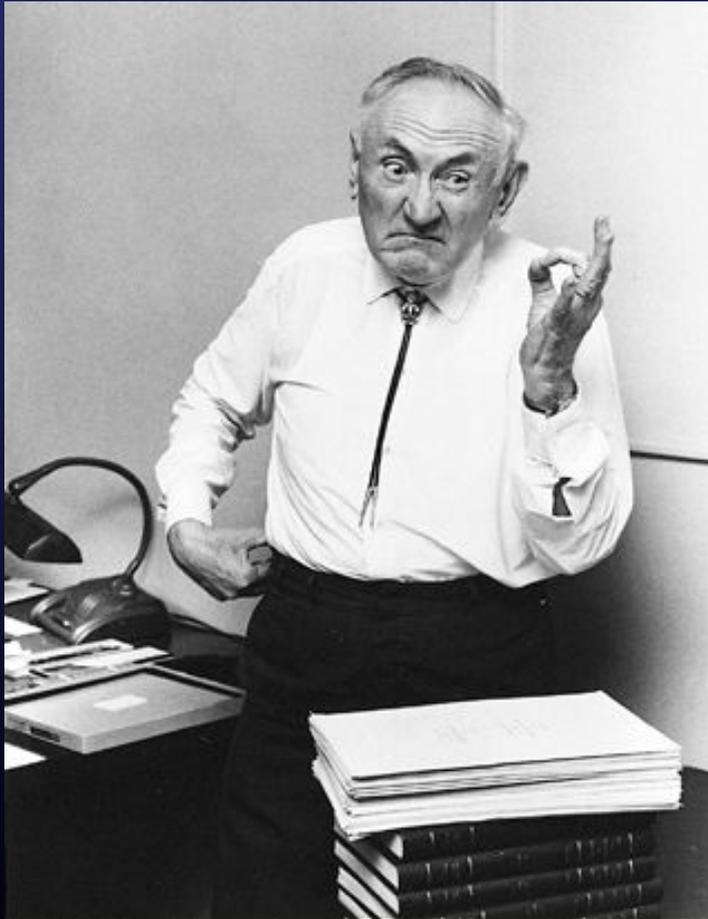
- Pour expliquer cette dynamique, on suppose la présence d'un halo de **matière noire** autour des galaxies spirales dont la masse serait 5 à 10 fois plus importante que celle des galaxies.
- **90%** de la **matière de l'Univers** serait composée de cette matière noire, invisible par nos instruments dont la nature reste encore inconnue.
- L'étude sur plus de 200 autres galaxies confirme ces résultats.

Balances cosmiques

- La « masse lumineuse » = masse déduite de la présence des étoiles et des gaz qui émettent un rayonnement électromagnétique
- La masse dynamique = masse véritable, déduite de son influence gravitationnelle.

Masse dynamique = 10 à 100x Masse lumineuse !

Fritz Zwicky: le précurseur



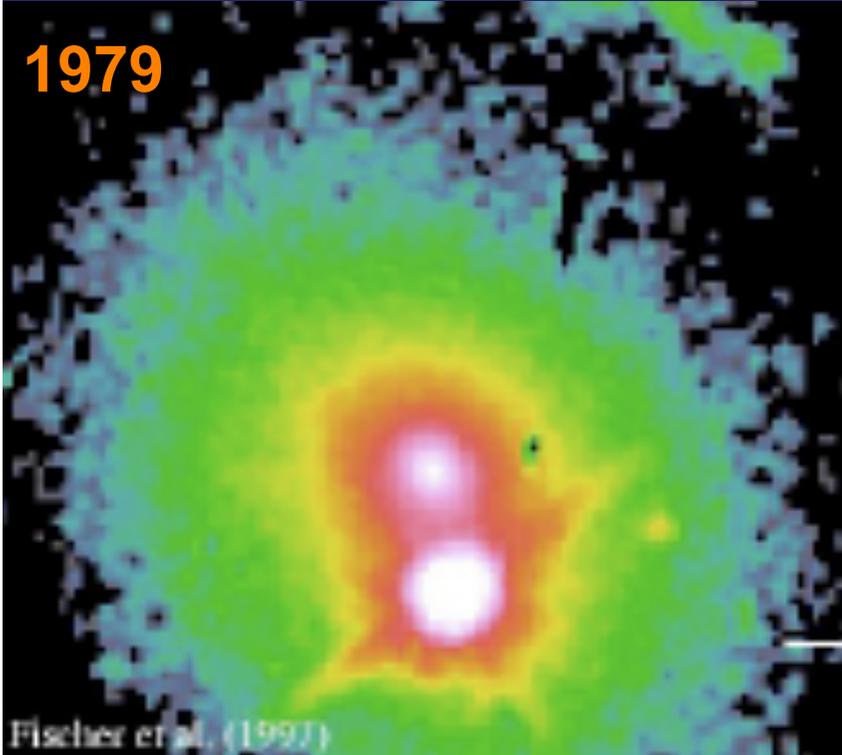
Groupes et amas de galaxies contiennent une majorité de **matière noire**, n'émettant pas de rayonnement.

1937: **Telescope gravitationnel**

- Groupe de galaxies + Galaxie: 10''
- Amas de galaxies + Galaxie: 30''

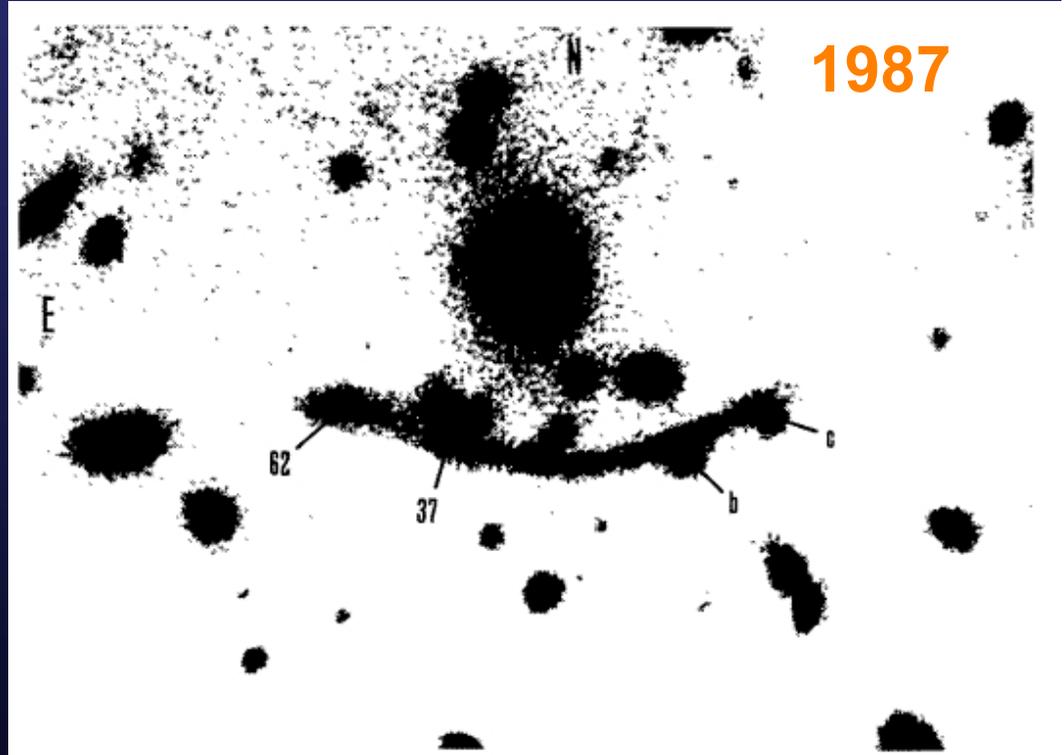
Historique plus récente

1979



Walsh: première
Image double

1987

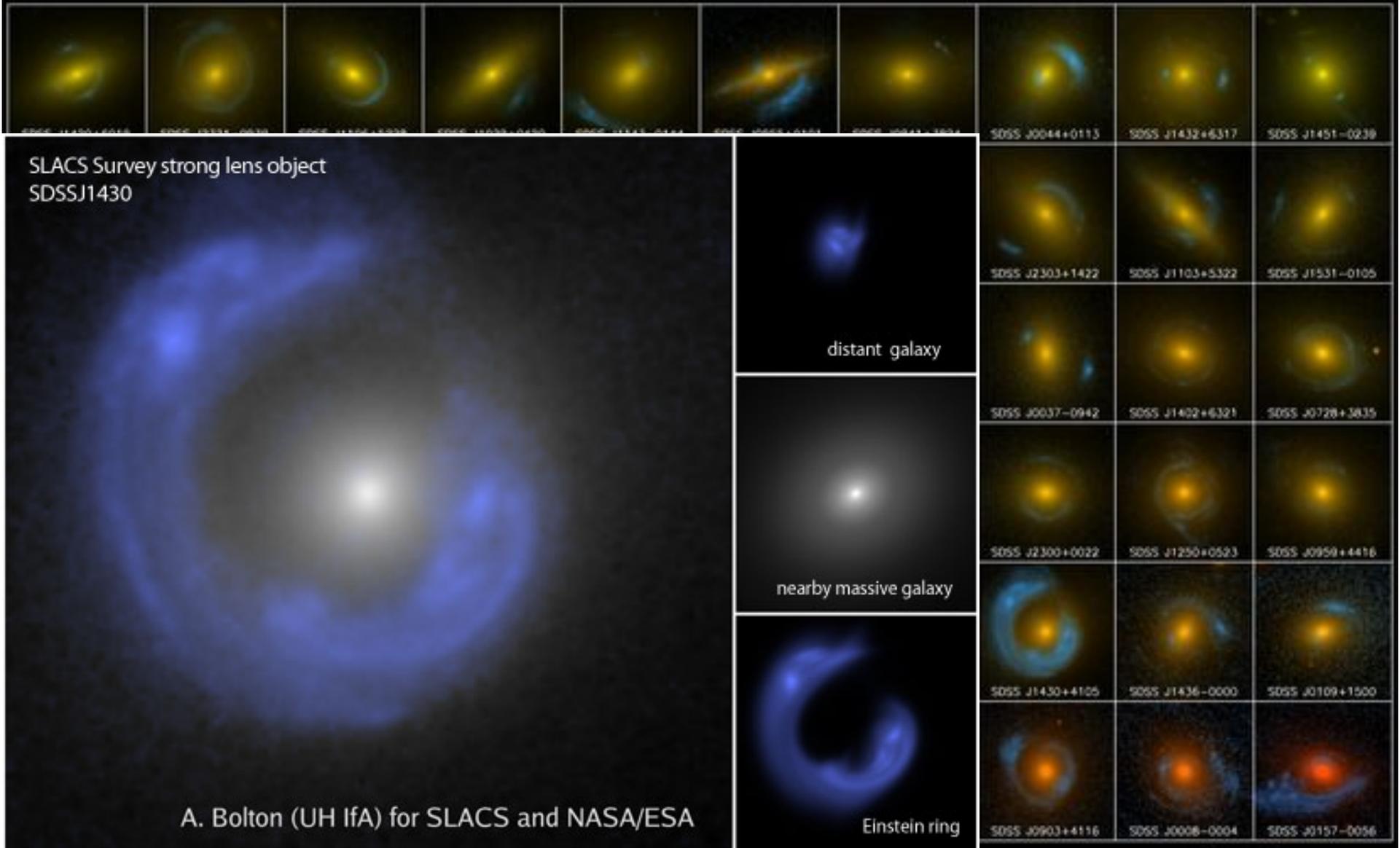


Soucail: première confirmation d'un
arc géant à 8.4 Mds a.-l.

Exemples de lentilles: galaxies



Exemples de lentilles: galaxies





Exemples de lentilles:
amas de galaxies

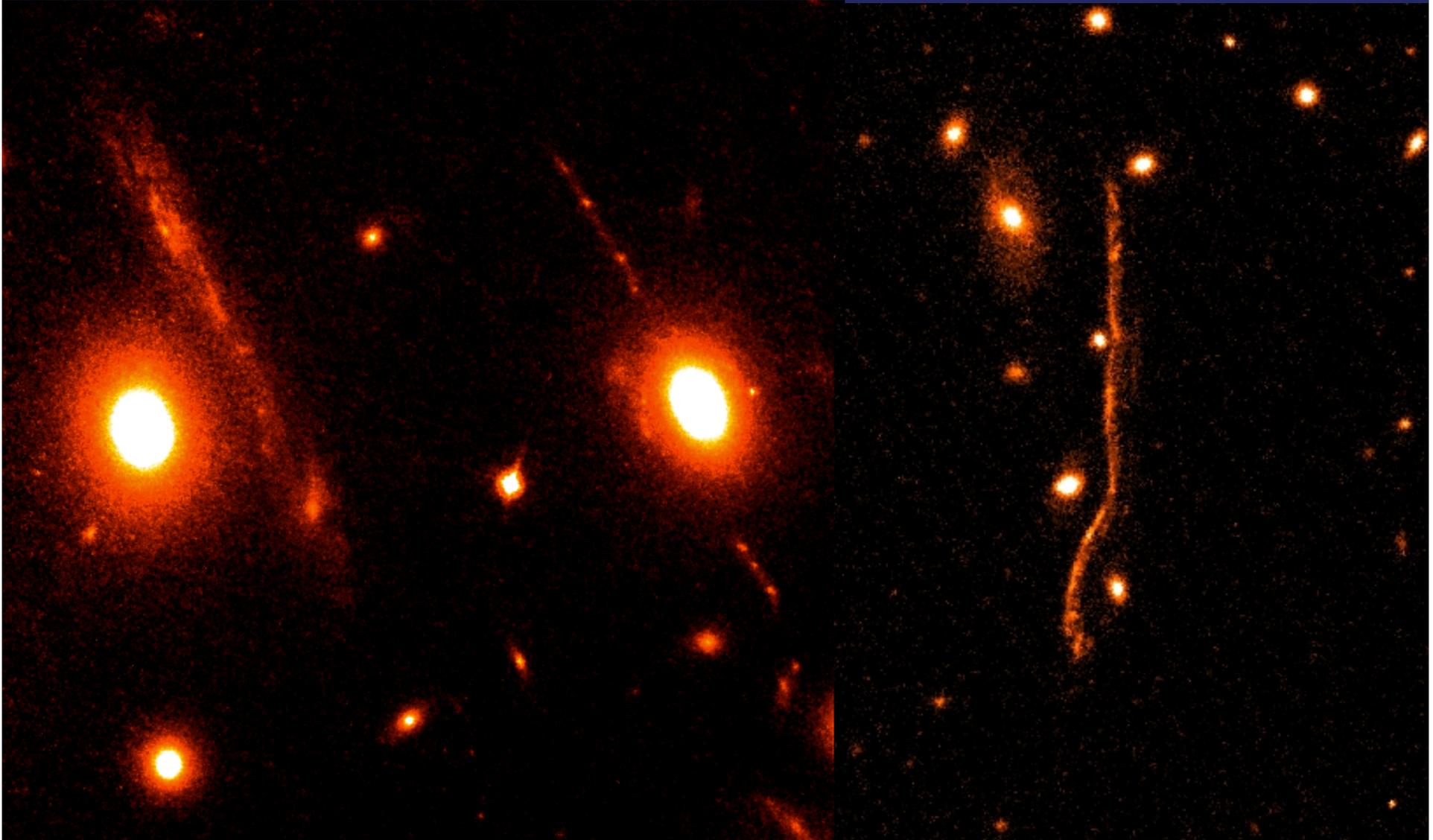
Abell 2218

Exemples de lentilles: amas de galaxies



Abell 2218

Arcs “droits” et “serpents”

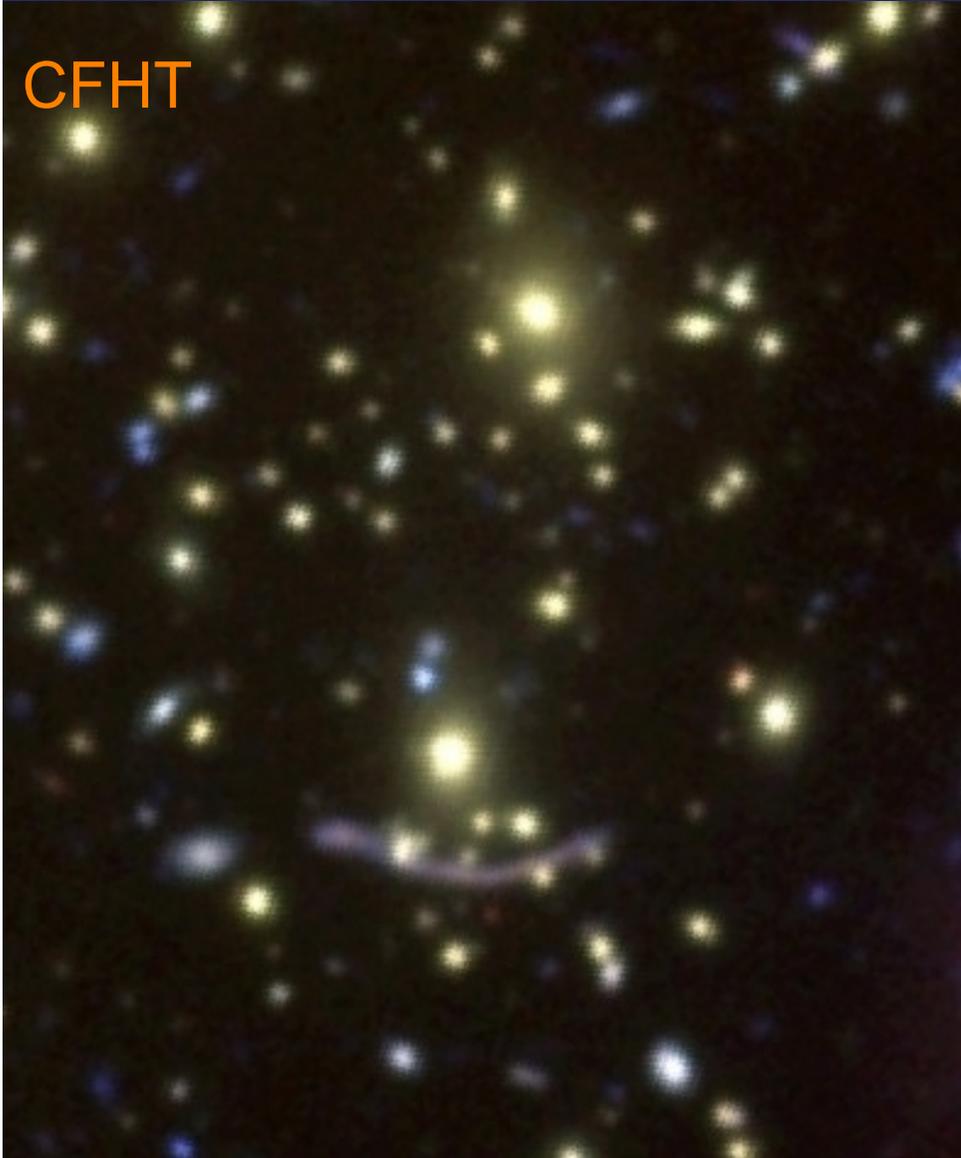


Le pouvoir de Hubble



Le pouvoir de Hubble

CFHT



HST



Le pouvoir de Hubble



Abell 1689



>30 galaxies, 100 images



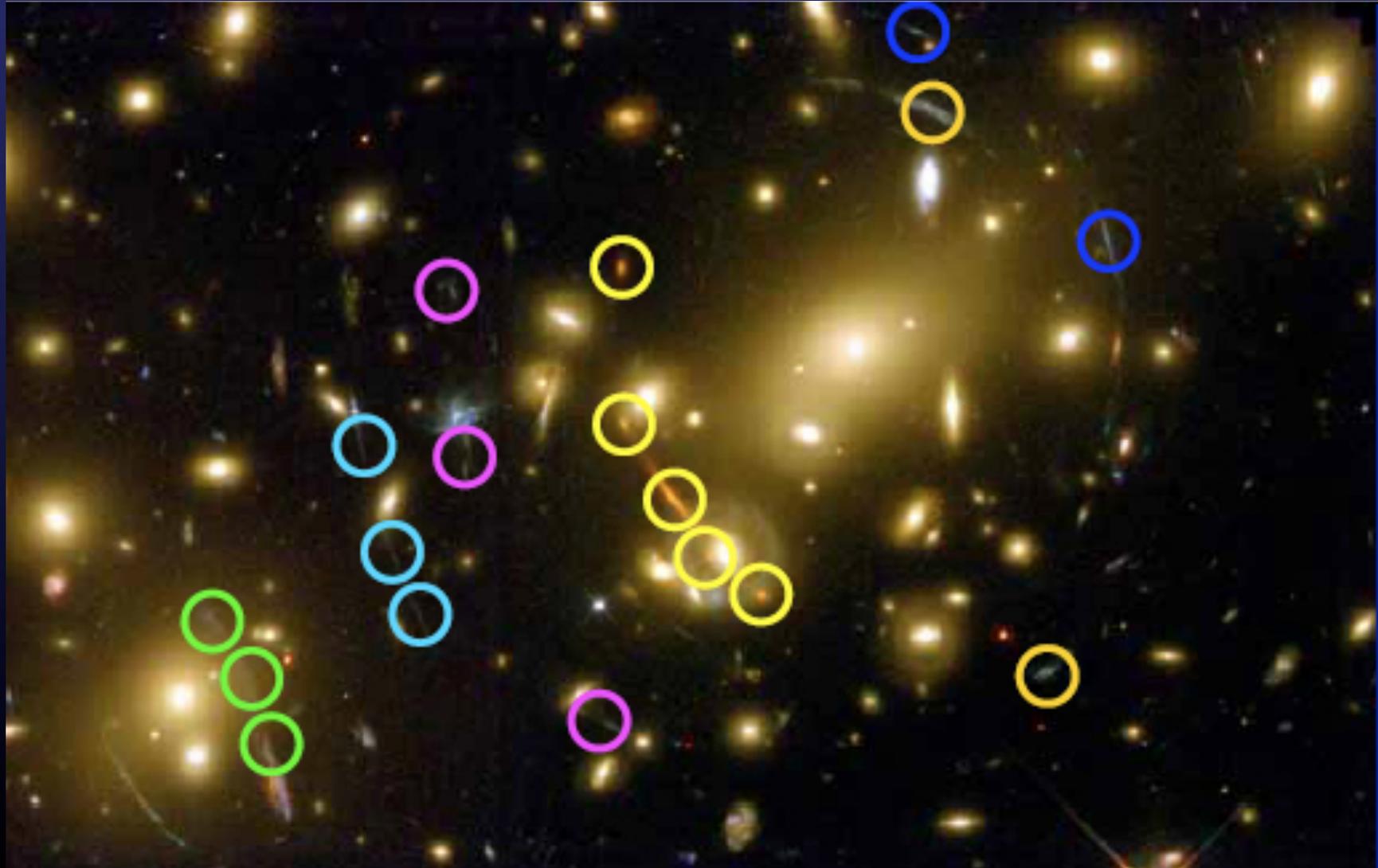
Mirages cosmiques

- Principe, historique
- Mirages cosmiques comme traceurs de matière noire
- Applications extragalactiques

Mesurer la masse des amas

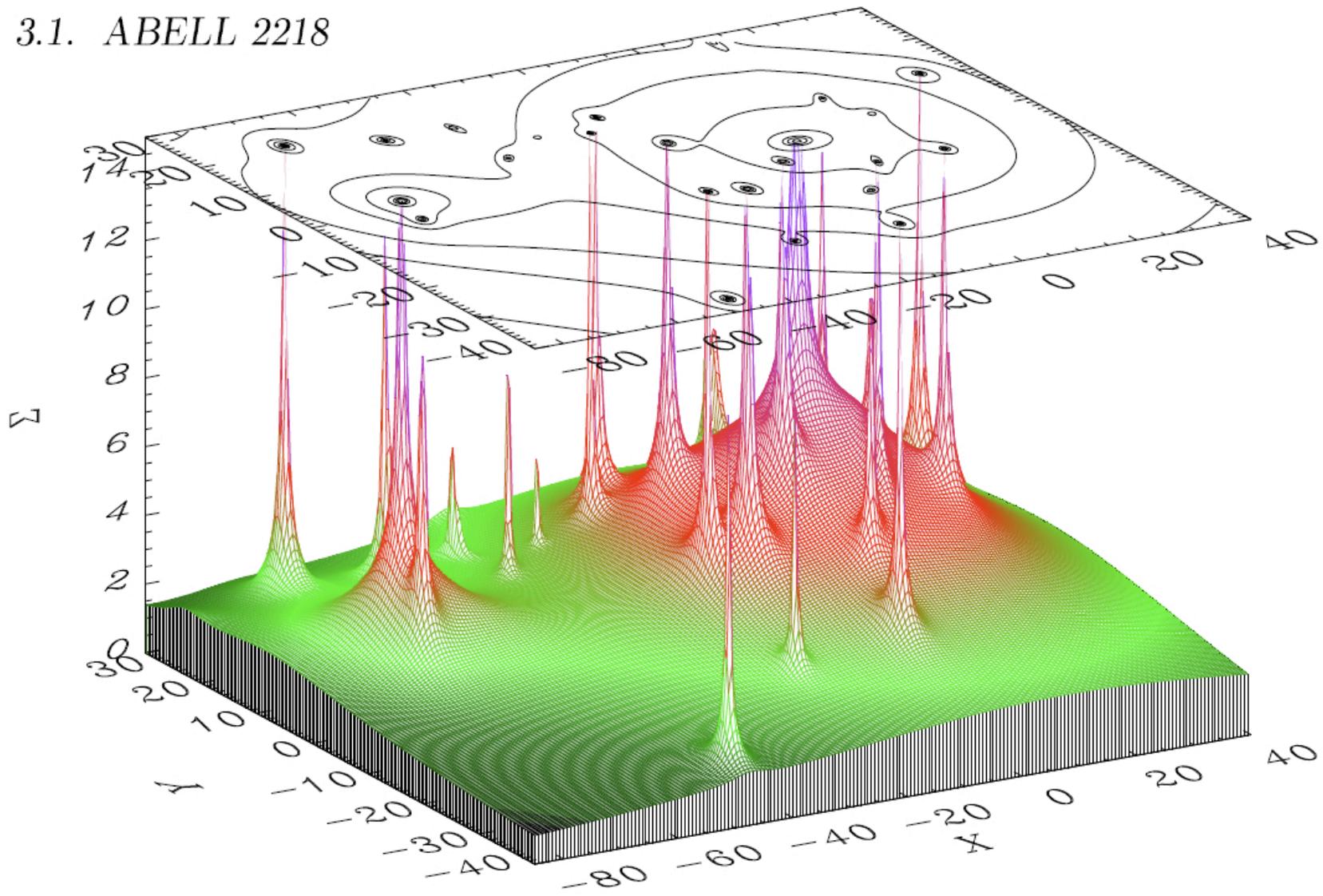
- La formation des structures les plus massives dépend des **paramètres fondamentaux de la cosmologie**: amplitude et taille des fluctuations de matière, facteur d'expansion de l'Univers.
- L'essentiel de la masse des amas est dominé par la **matière sombre**, don't on cherche à connaître la quantité et la répartition.

Modèles d'amas-lentilles

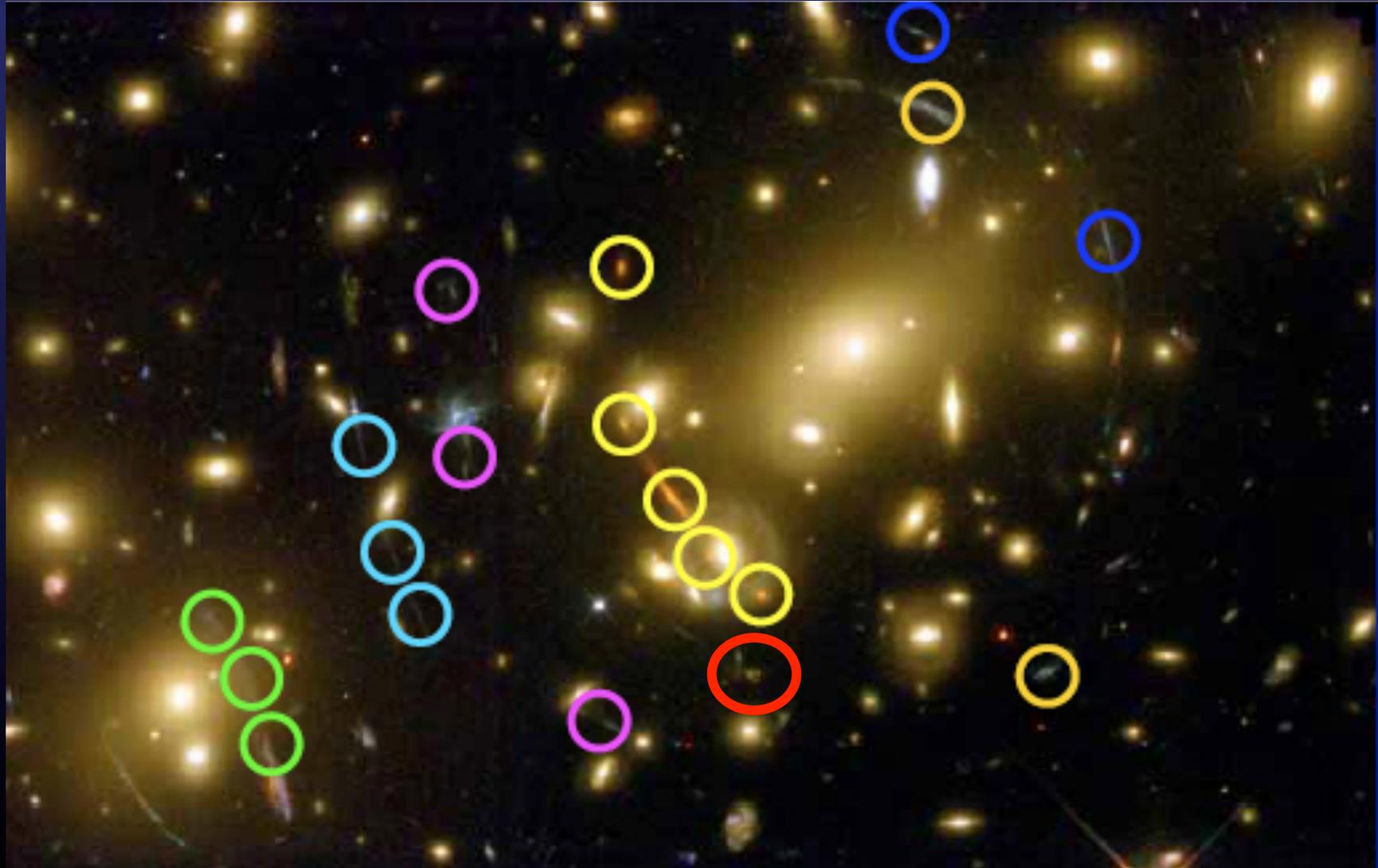


Modèles d'amas-lentilles

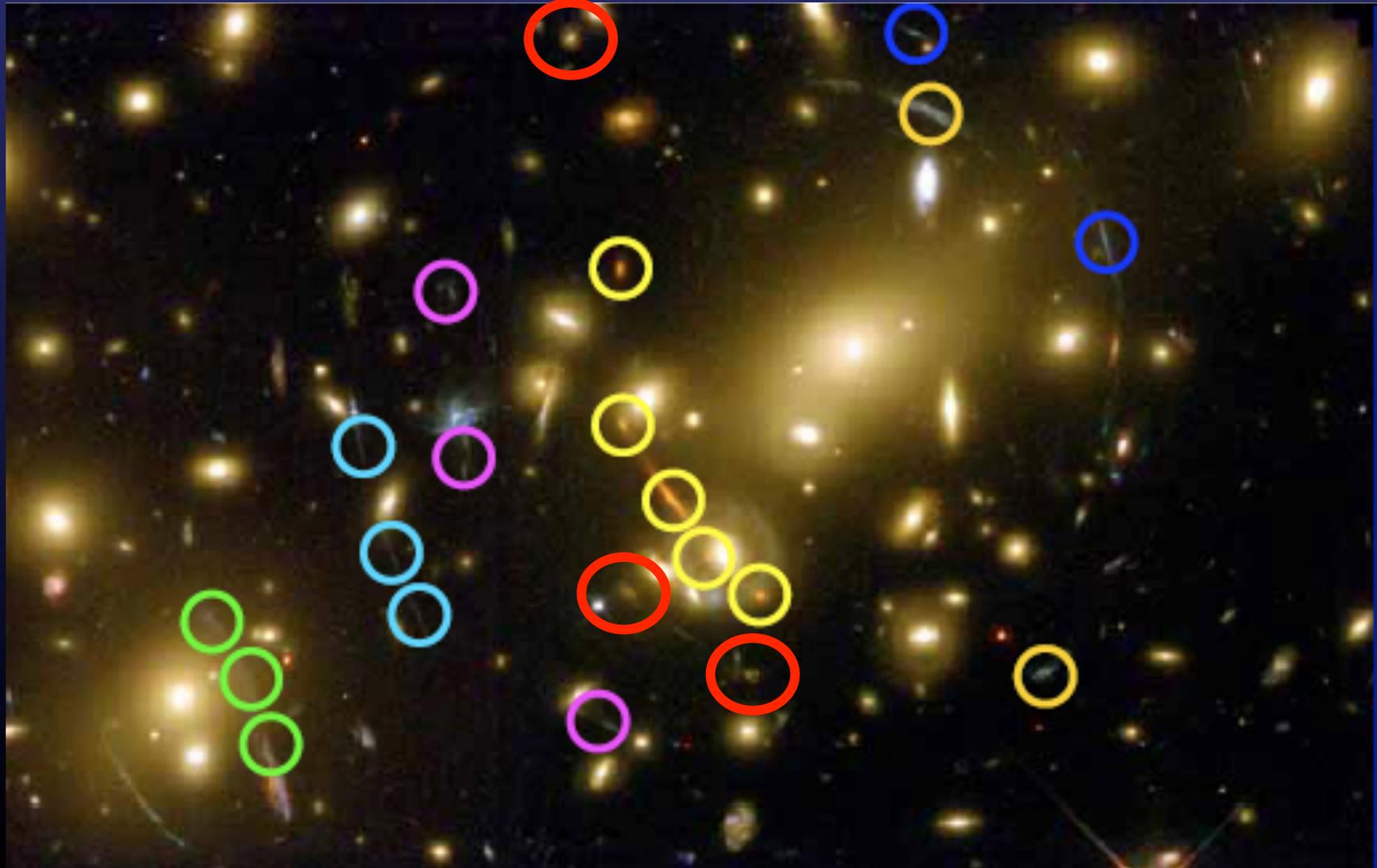
3.1. ABELL 2218

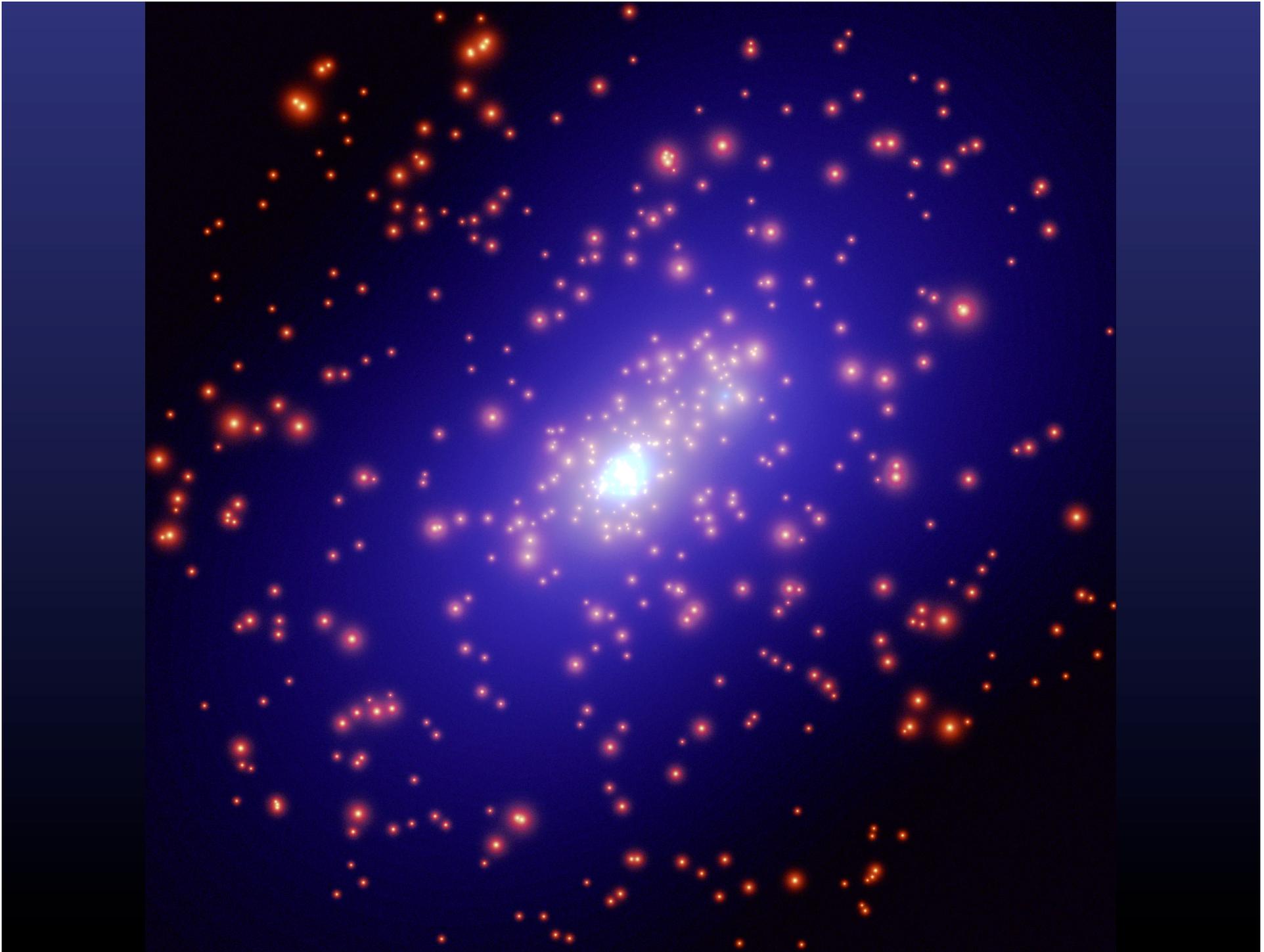


Prédictions

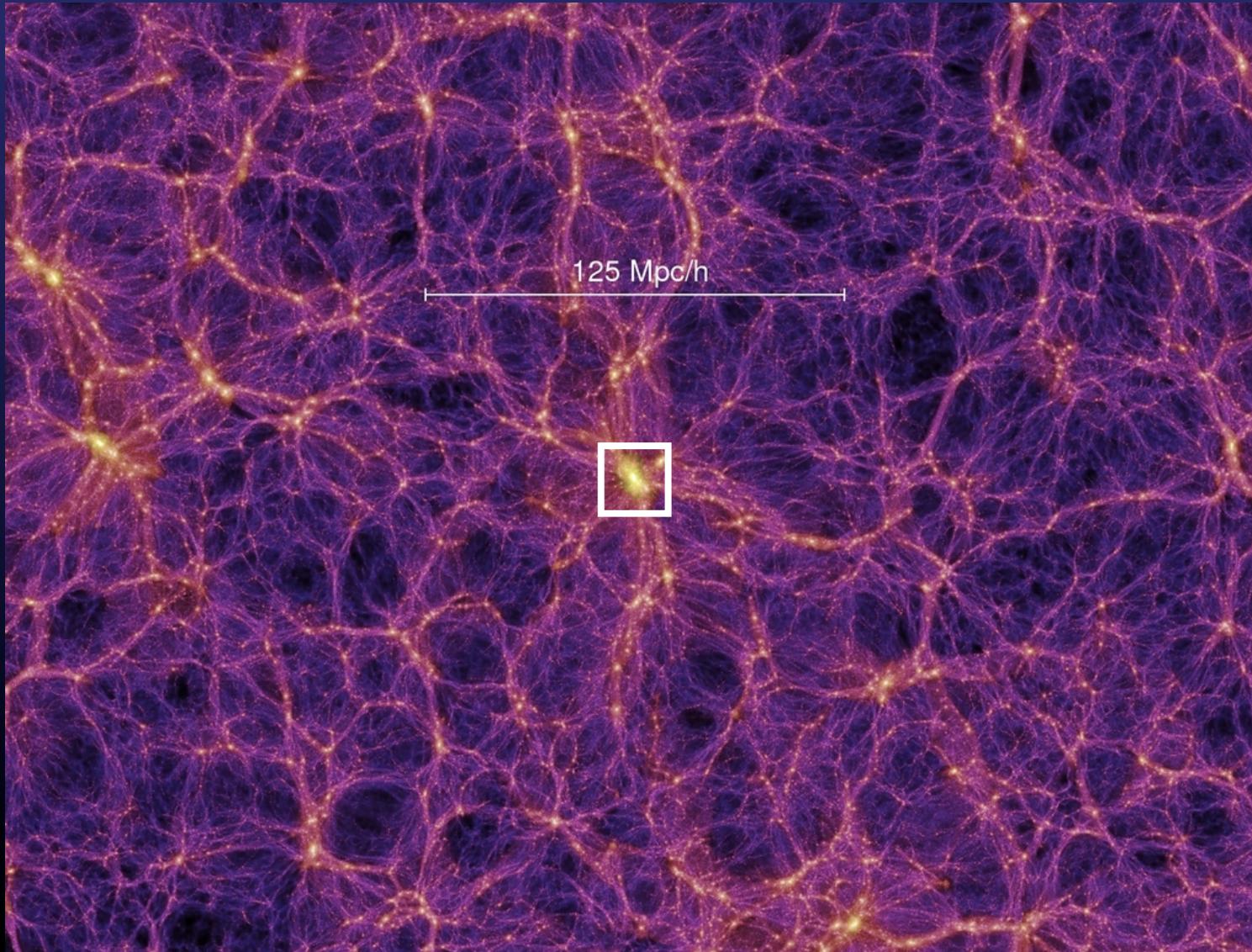


Prédictions

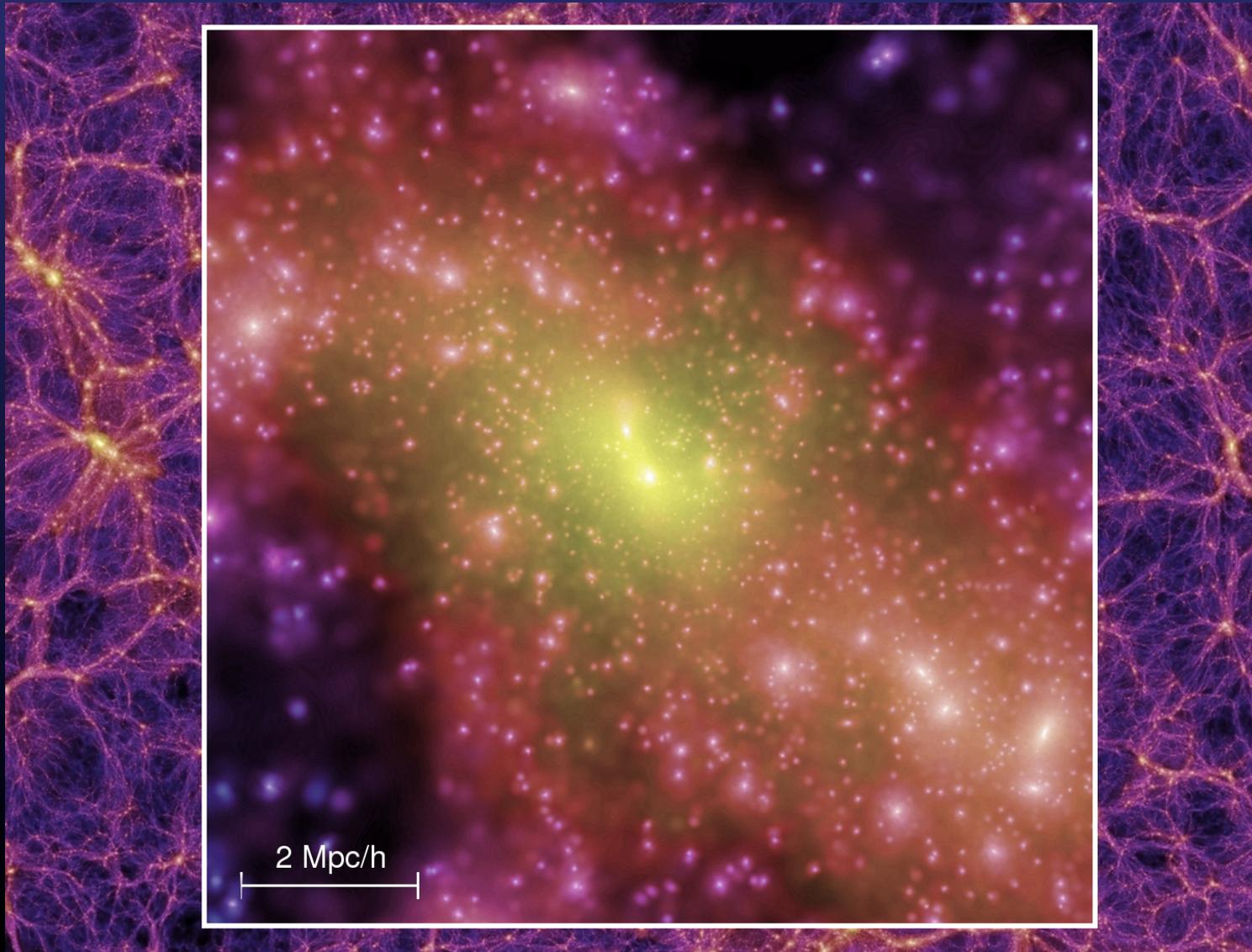




Matière noire dans les amas



Matière noire dans les amas



'Régimes' de lentille

Observateur

Amas de galaxies

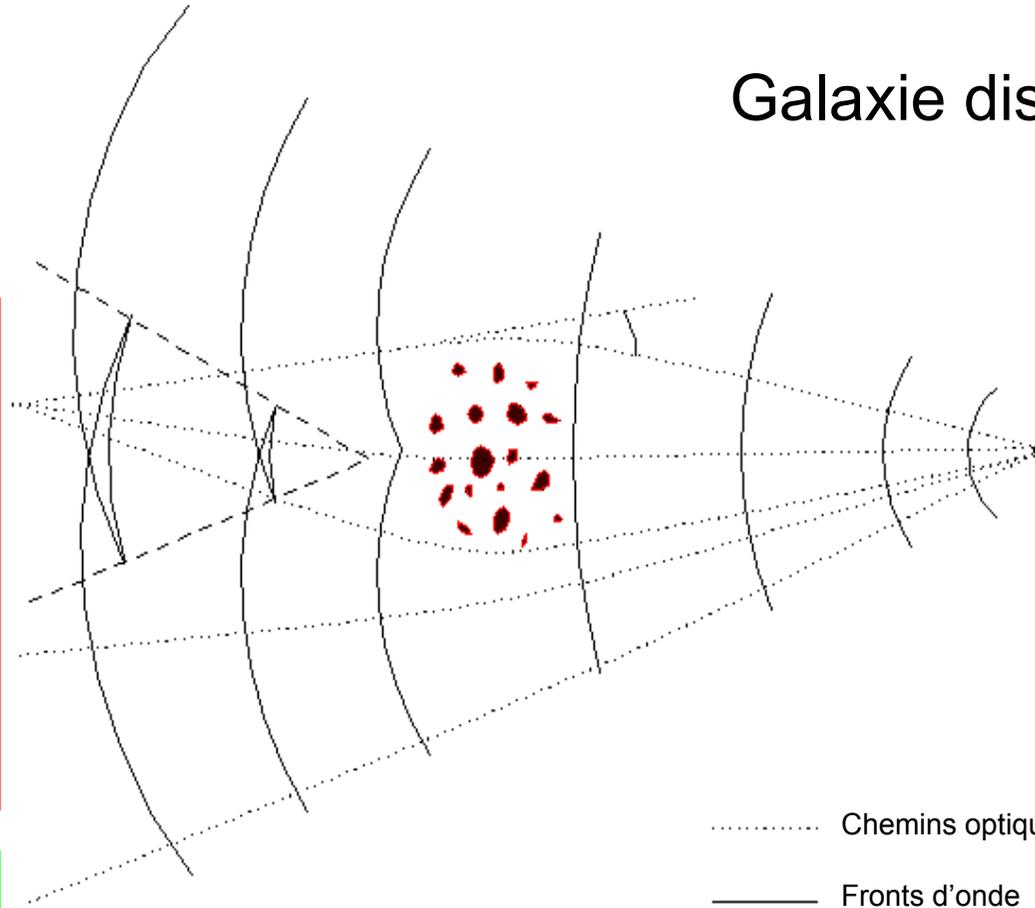
Galaxie distante

Non-Linear

Multiple
Images

Arclets

Weak Shear

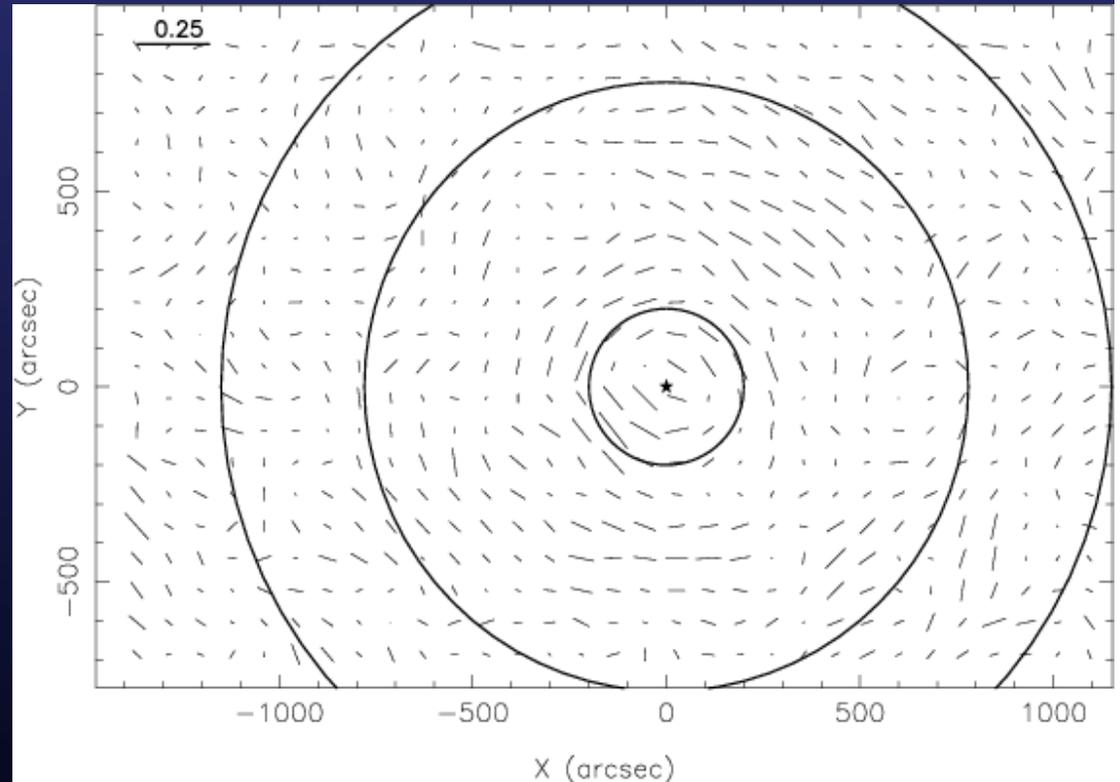
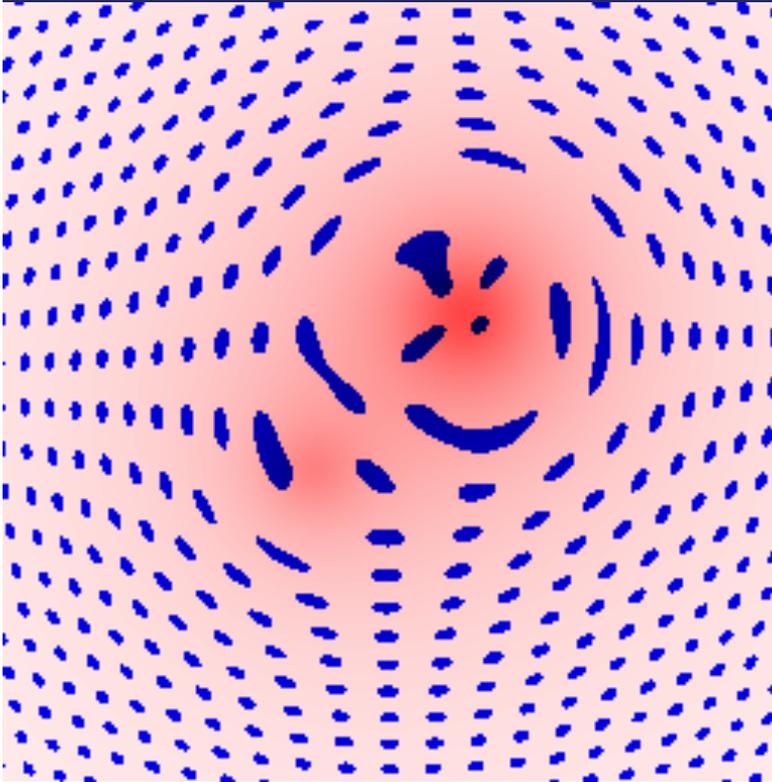


..... Chemins optiques

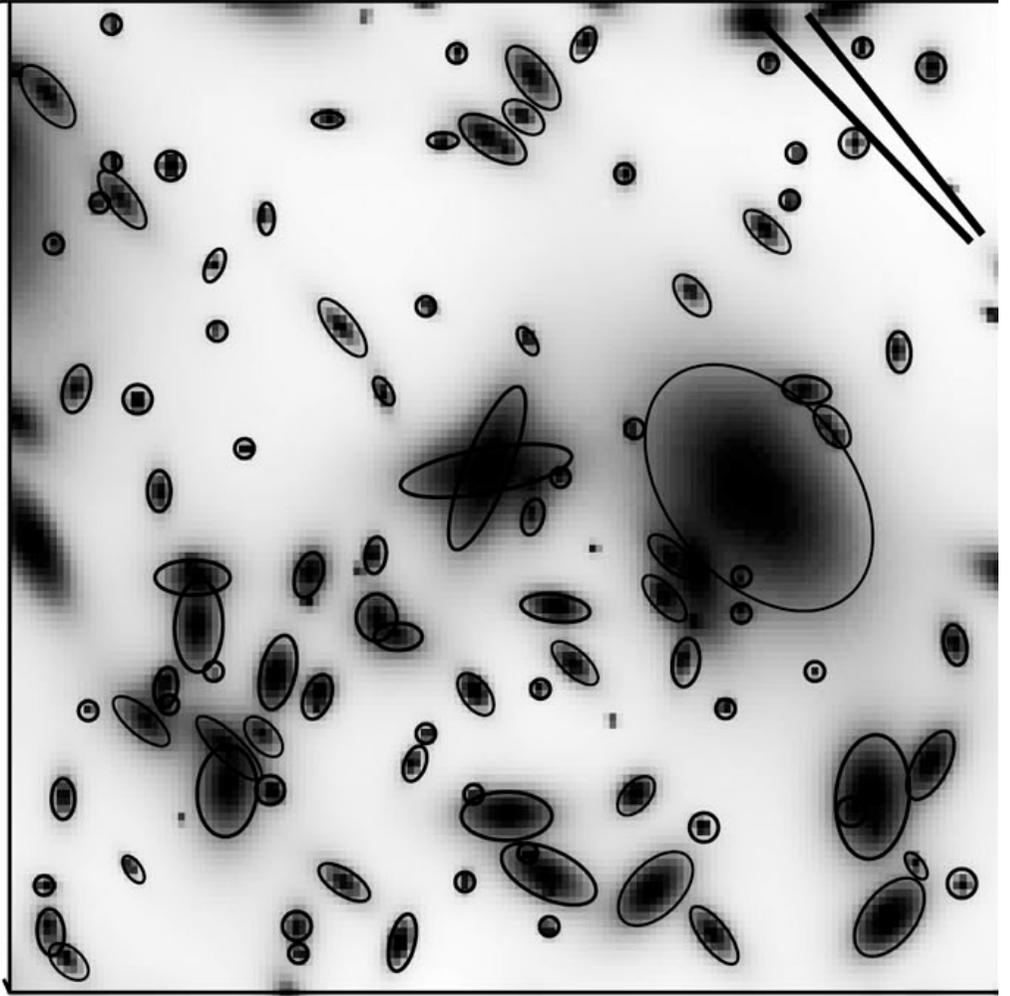
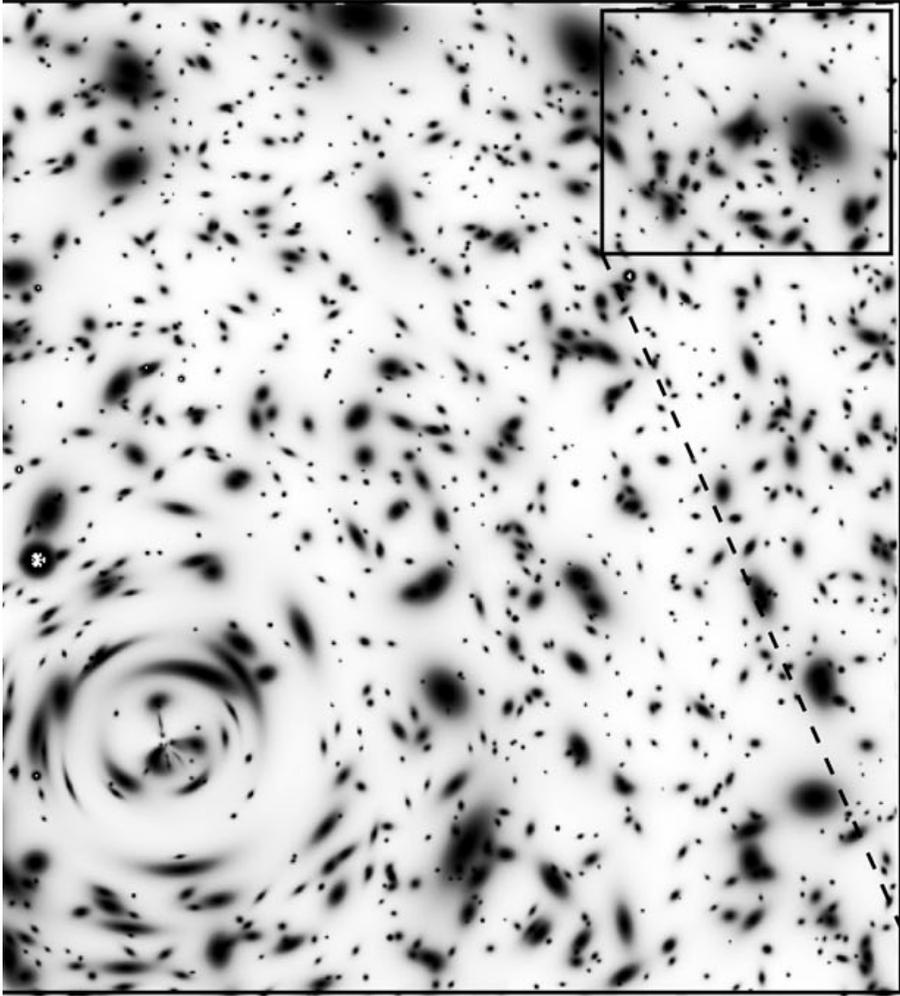
——— Fronts d'onde

----- Images Multiples

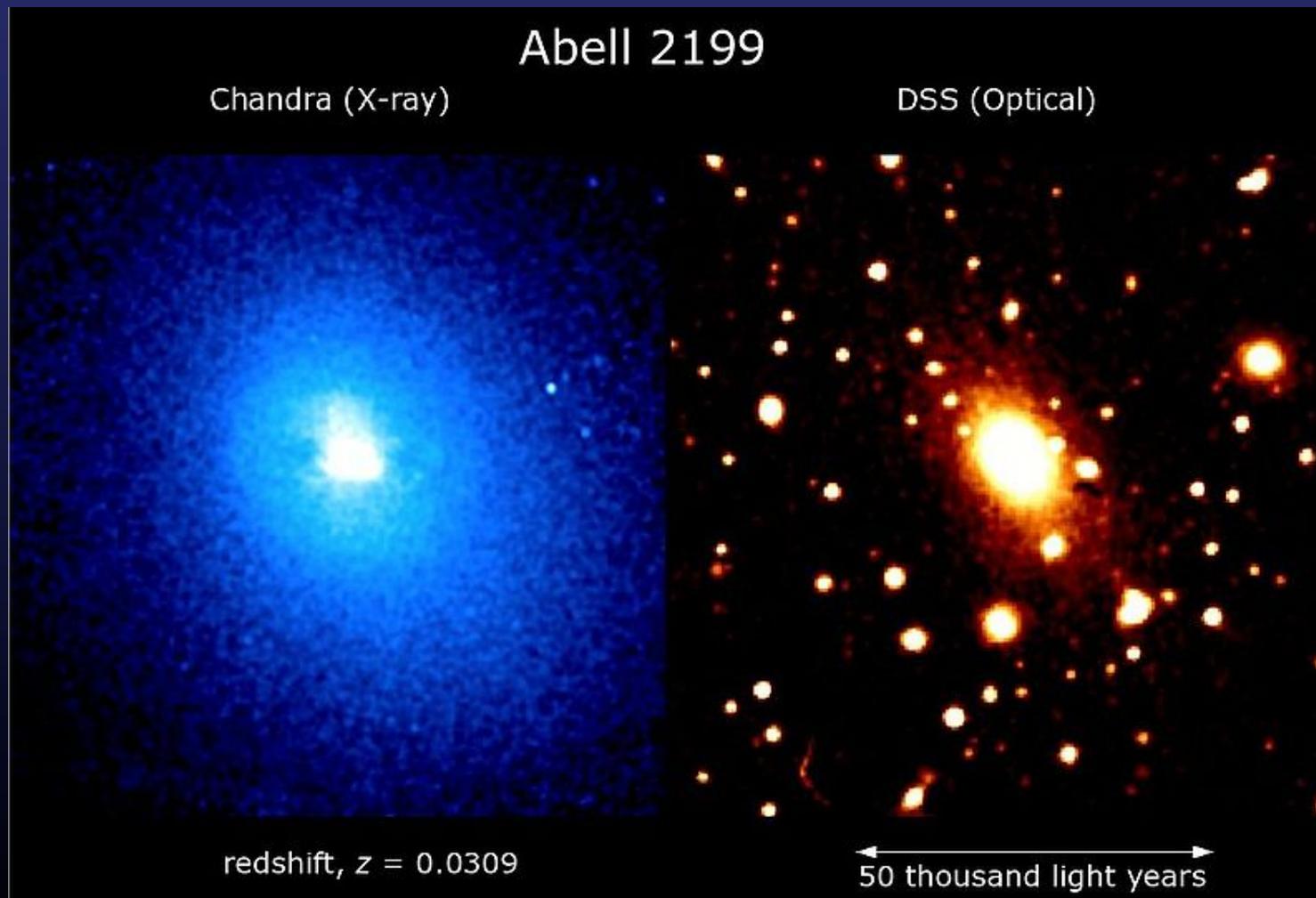
Effet de lentille faible: distortions



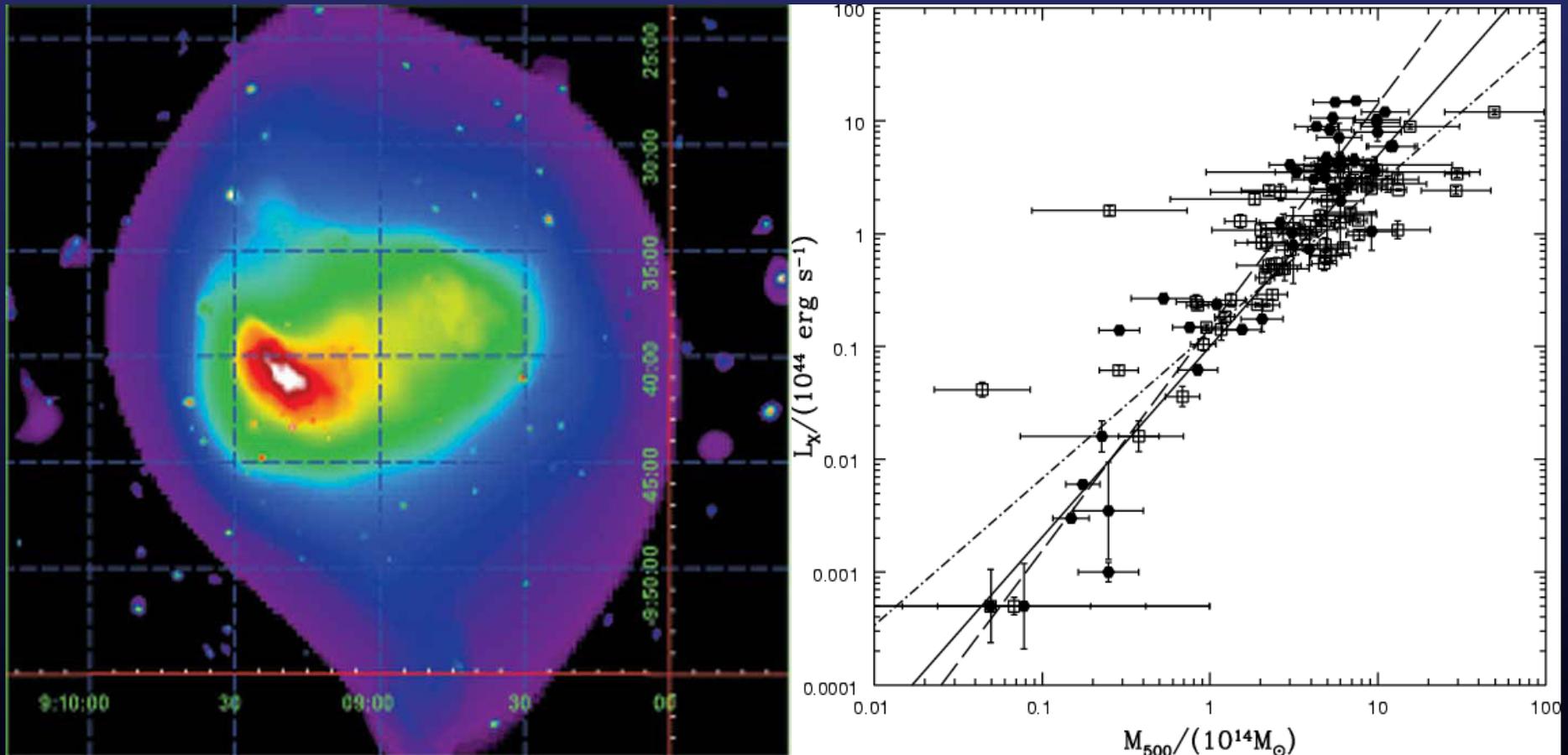
Mesure statistique sur un grand nombre de galaxies
d'arrière plan : grandes échelles



Le milieu intra-amas

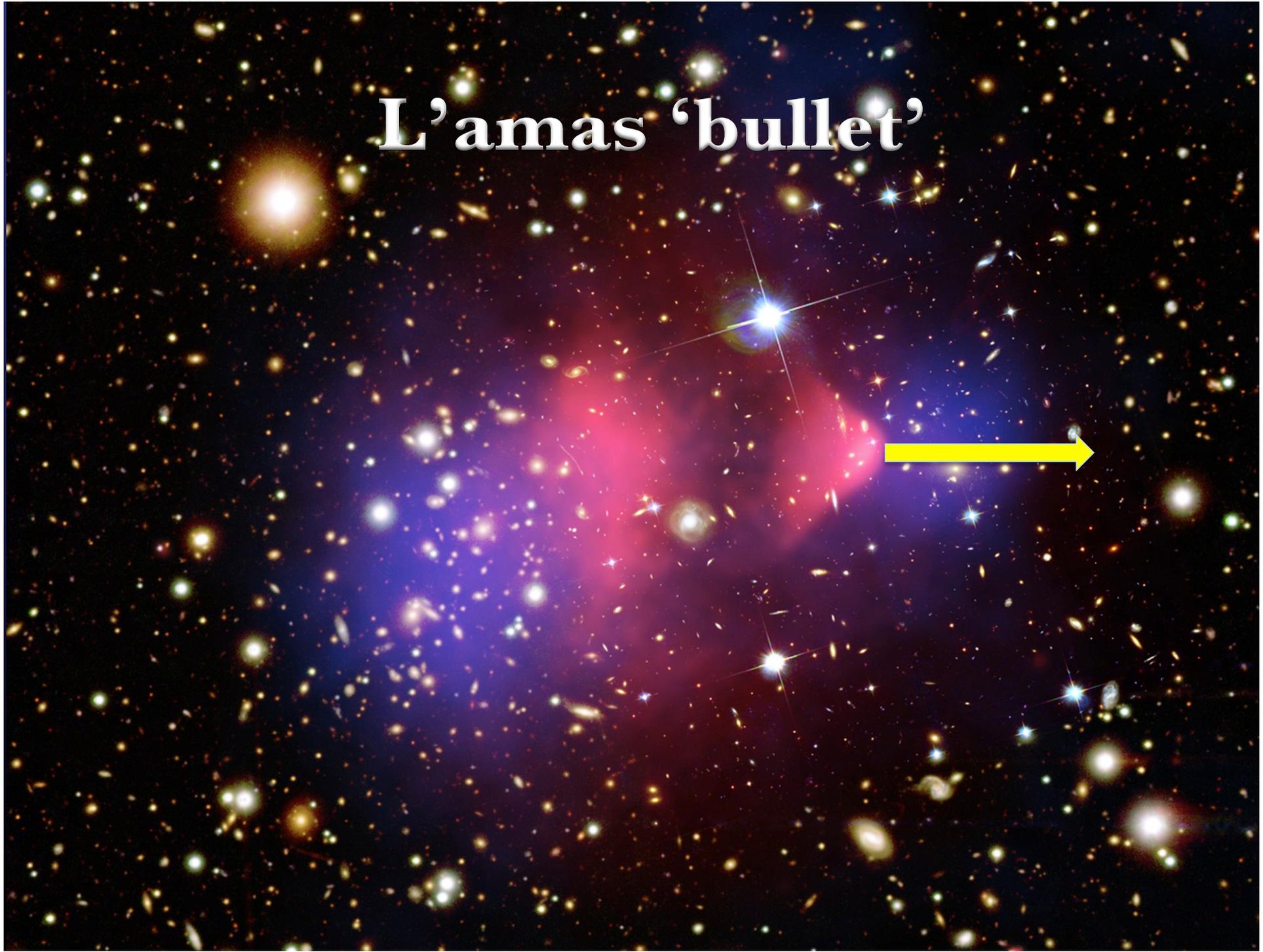


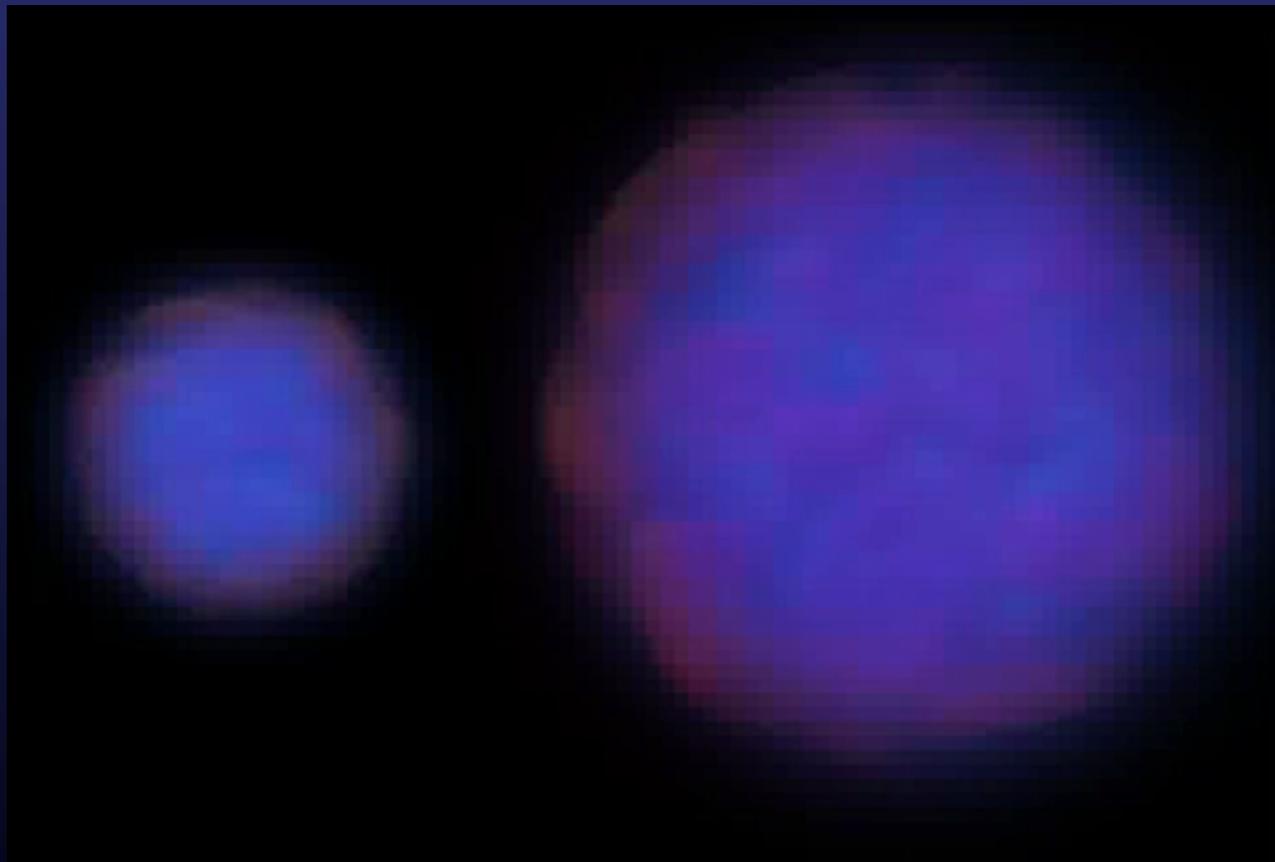
Gaz X



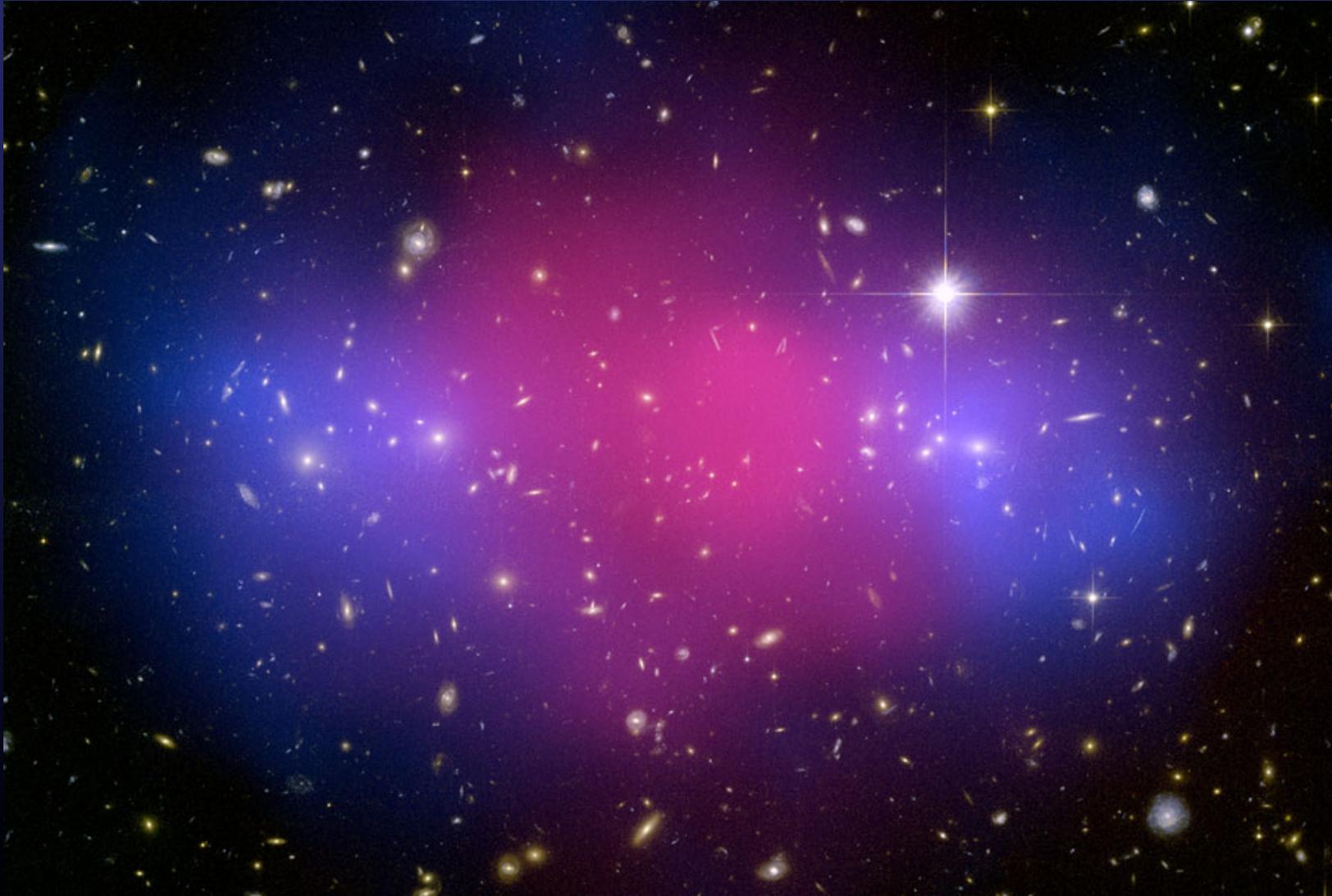
Mesure de la luminosité totale du gaz supposé en équilibre hydrostatique : calibration MX - Mtotale

L'amas 'bullet'



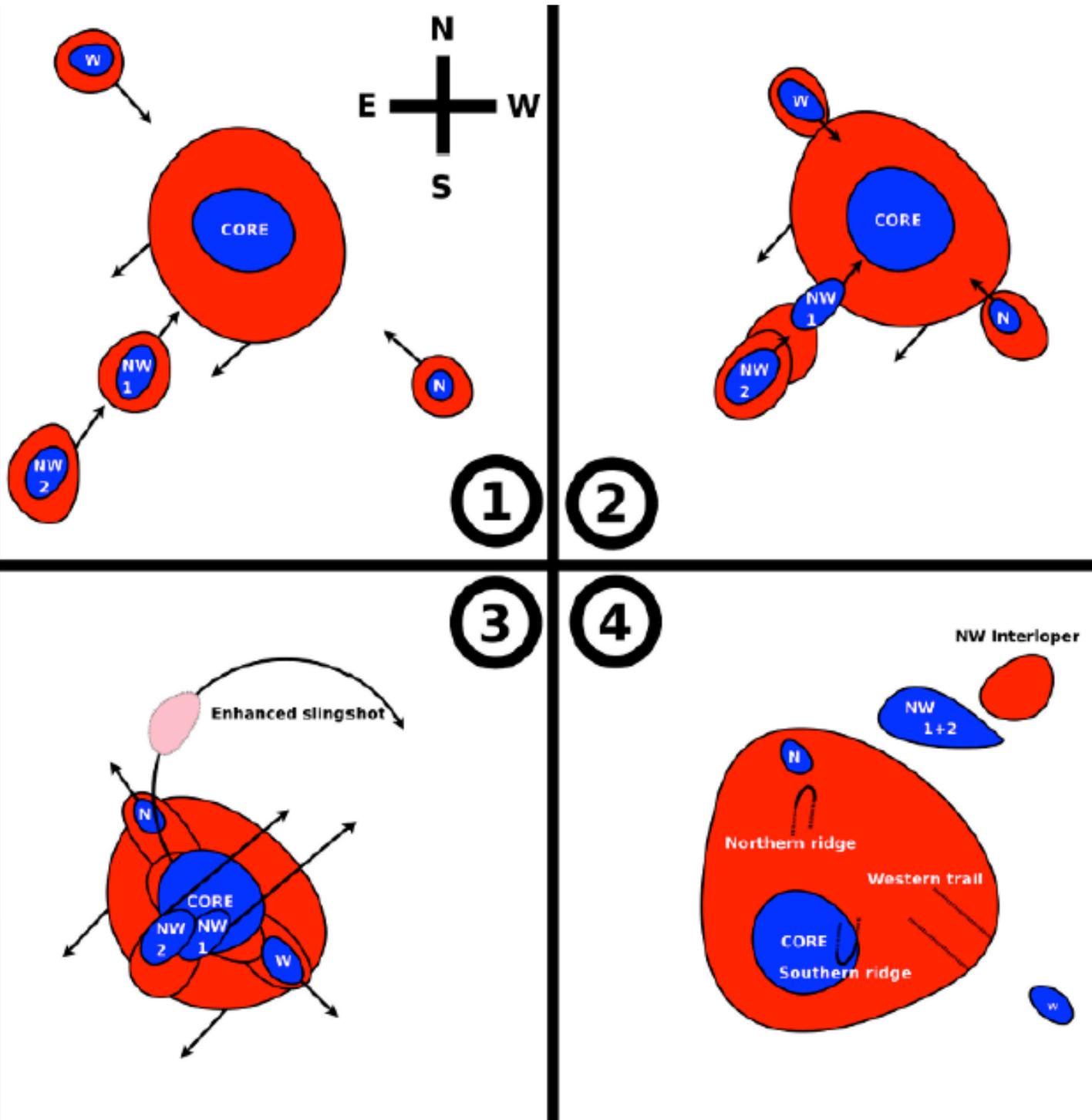


Un autre amas 'bullet'



L'amas de 'Pandore'





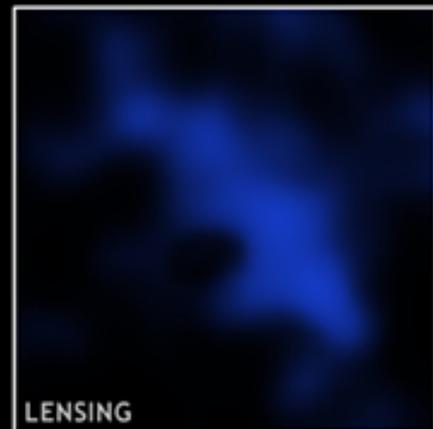
L' 'Accident de train'



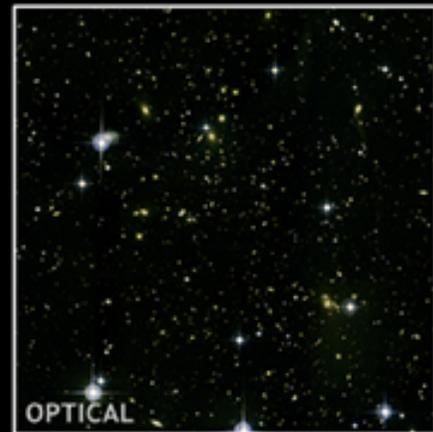
COMPOSITE



X-RAY



LENSING



OPTICAL

MACS0717: un filament de matière noire



Mirages cosmiques

- Principe, historique
- Mirages cosmiques comme traceurs de matière noire
- Applications extragalactiques

“Télescopes Gravitationnels”

Les amas-lentilles sont des **outils** pour étudier les galaxies distantes



- Font apparaître les galaxies **plus grandes**
- Font apparaître les galaxies **plus brillantes**



- Le champ de vue est réduit
- Ils n'existent que dans certaines régions du ciel

Applications extragalactiques



1. Galaxies distantes à haute résolution
Evolution du contenu des galaxies



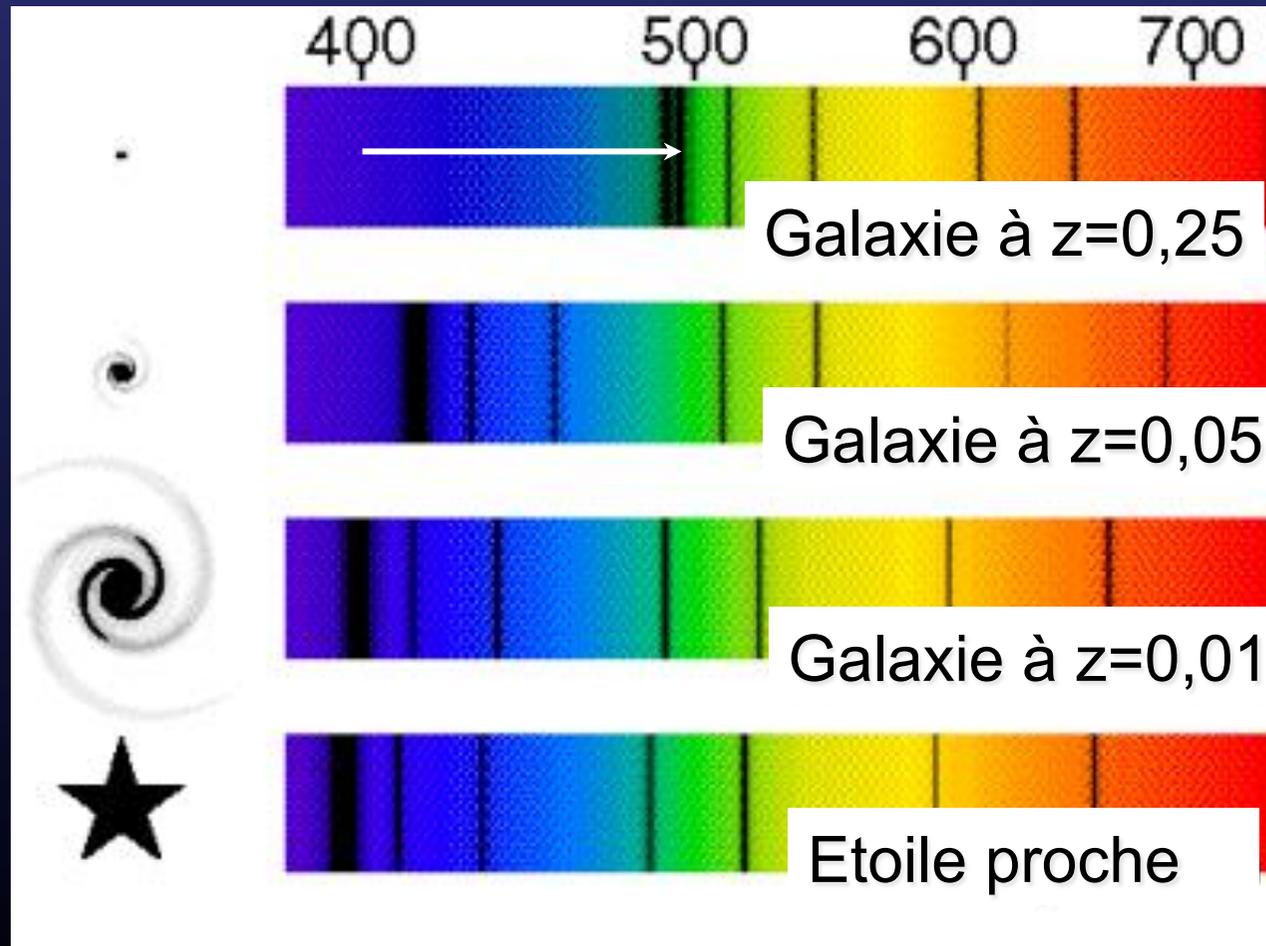
2. Galaxies les plus distantes
Formation des premières galaxies



3. Galaxies “poussiéreuses”
Le côté obscur de la formation des étoiles

Décalage vers le rouge

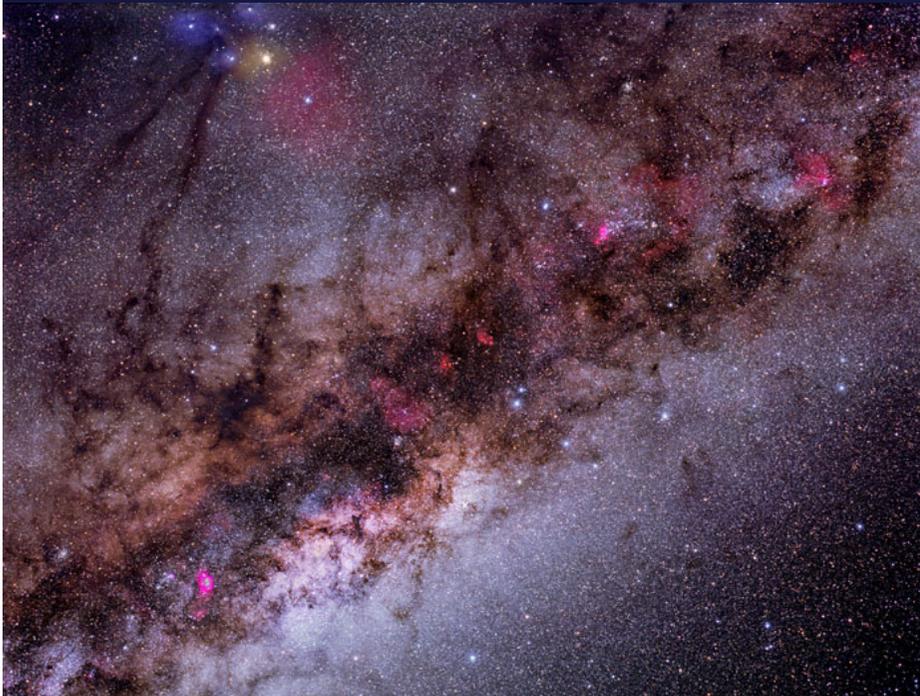
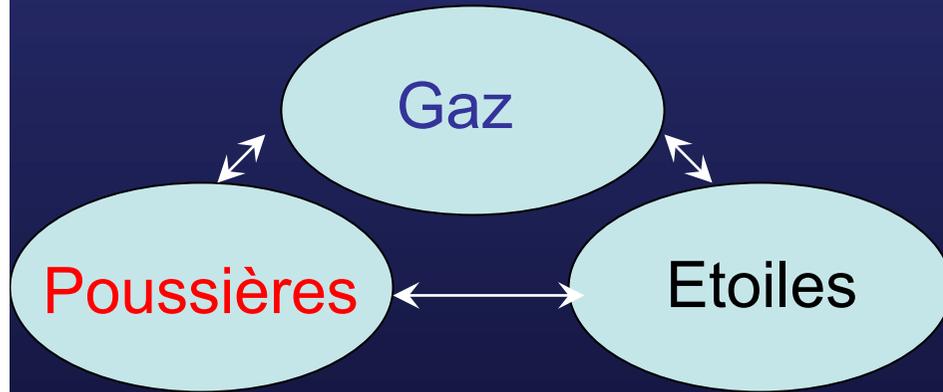
UV



IR

Spectre de la lumière visible

Formation d'étoiles et évolution des galaxies



Accrétion



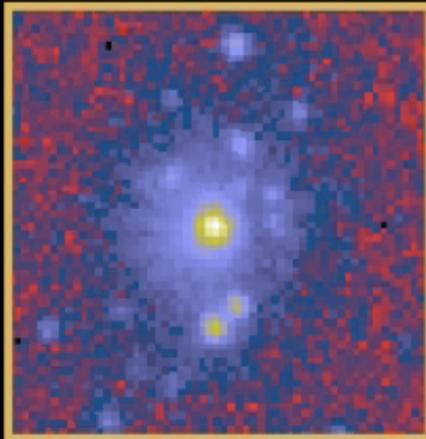
Fusion



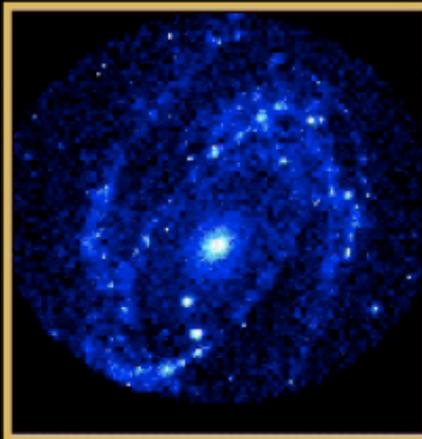
Fusion de galaxies



Longueurs d'onde



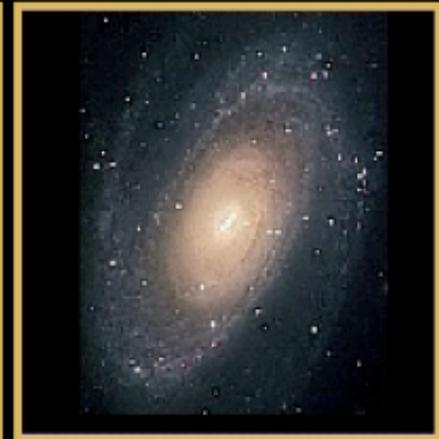
X-Ray: ROSAT



Ultraviolet: ASTRO-1



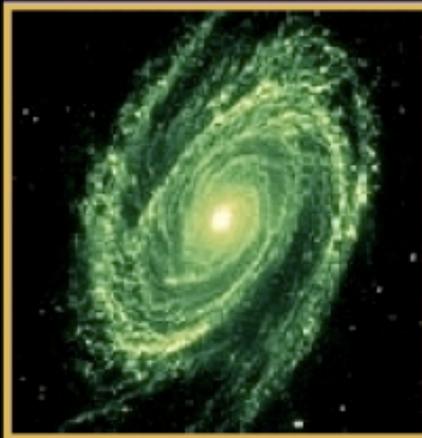
Visible: DSS



Visible: R. Gendler



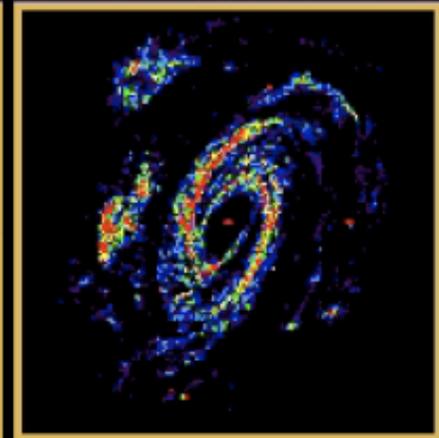
Near-Infrared: Spitzer



Mid-Infrared: Spitzer

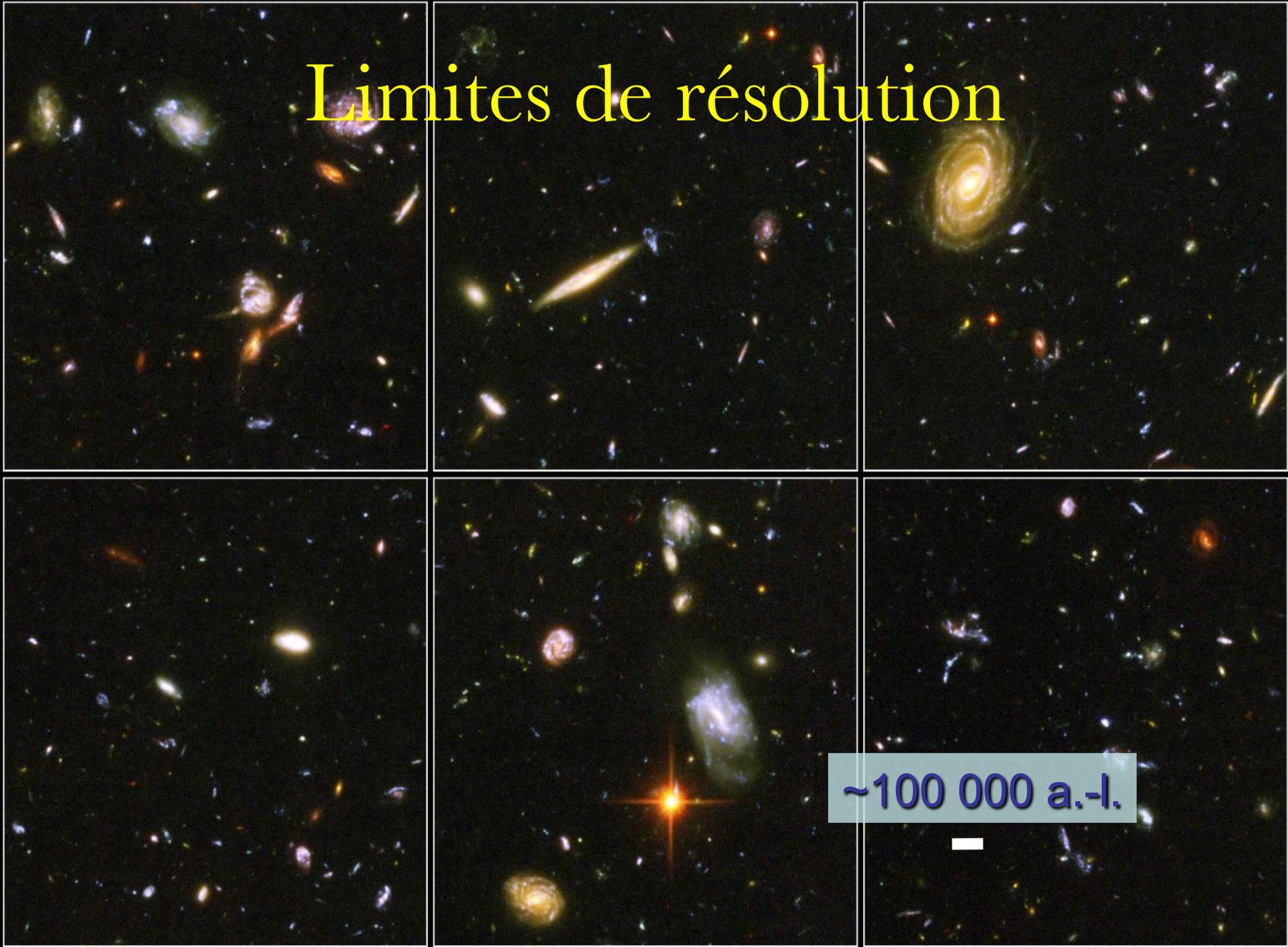


Far-Infrared: Spitzer



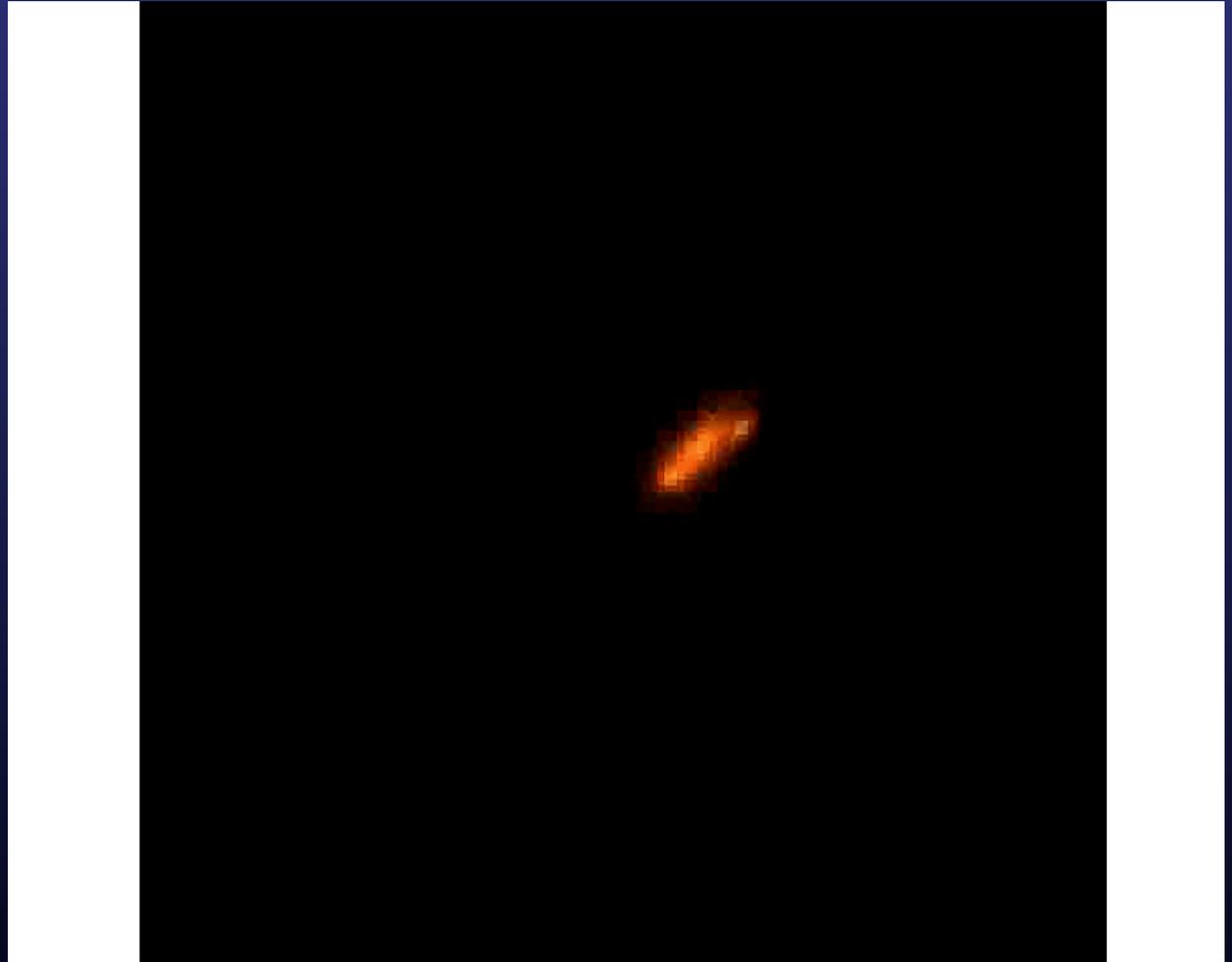
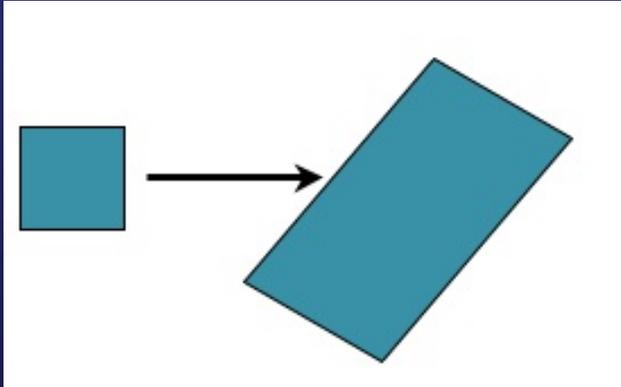
Radio: VLA

Limites de résolution

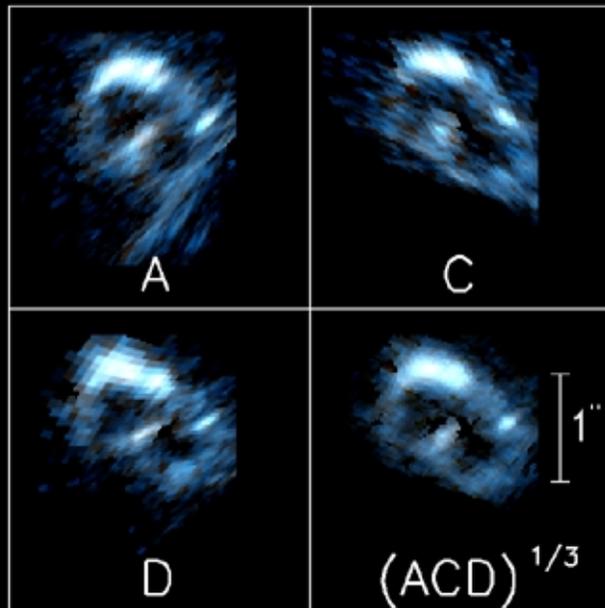


~100 000 a.-l.

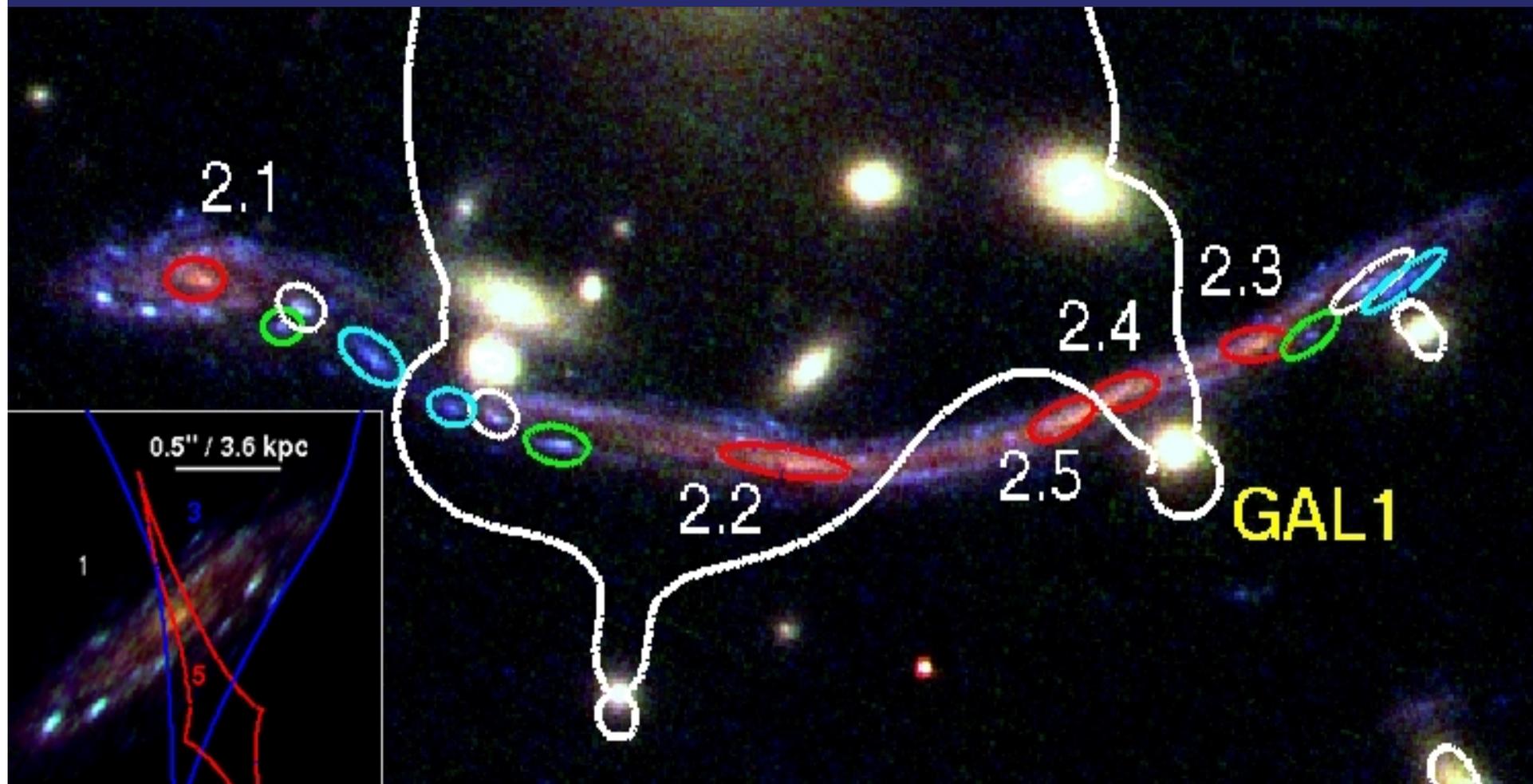


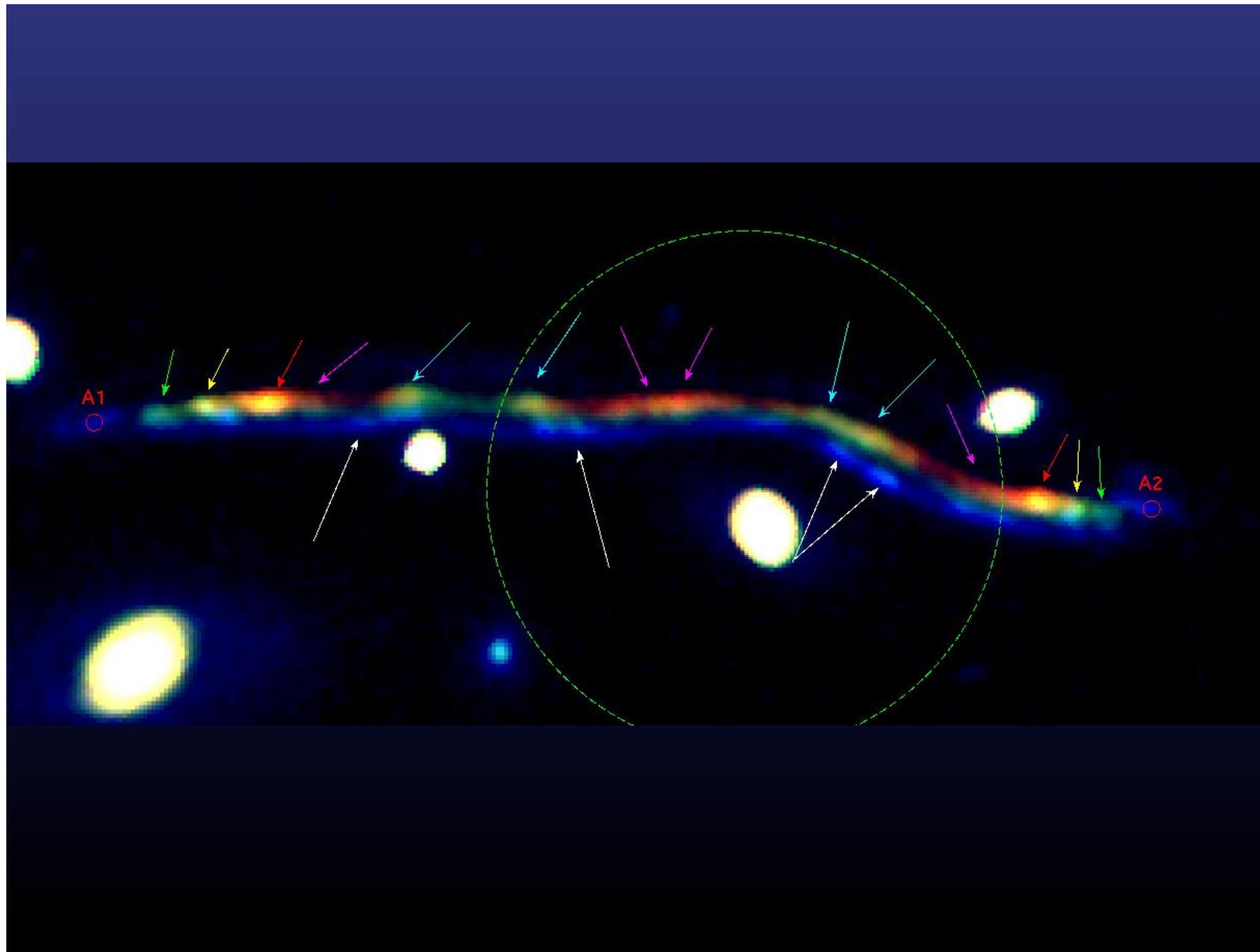


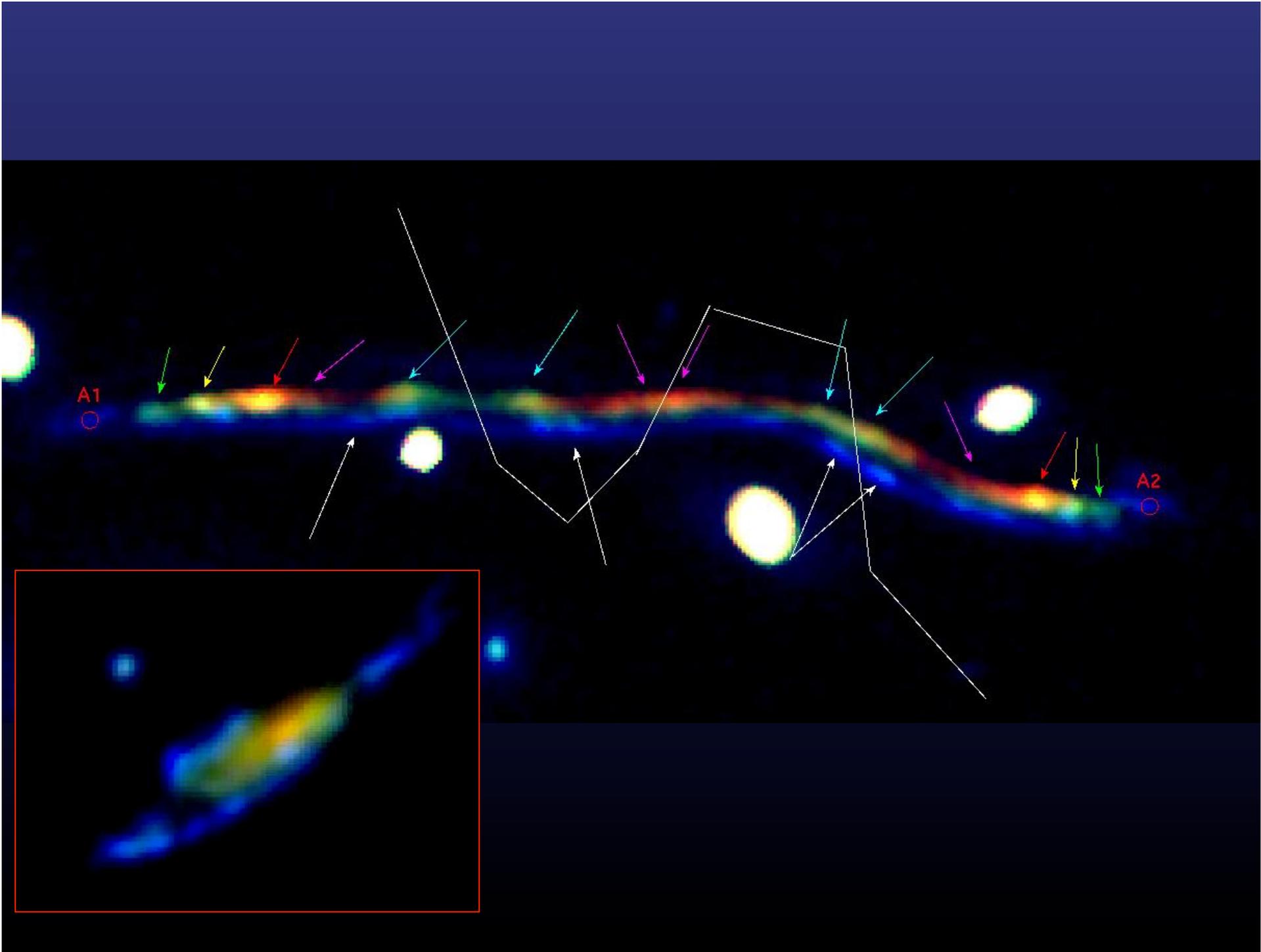










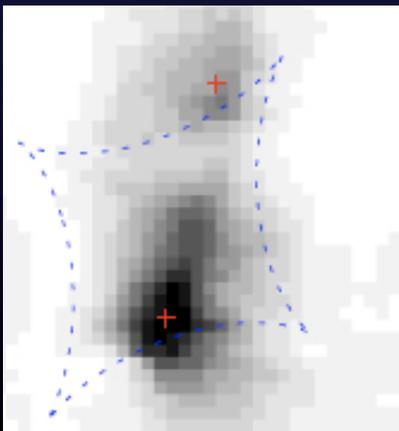


L' "œil cosmique"



Distance lentille: 6.5 Md a-l
Distance galaxie: 11.6 Md a-l

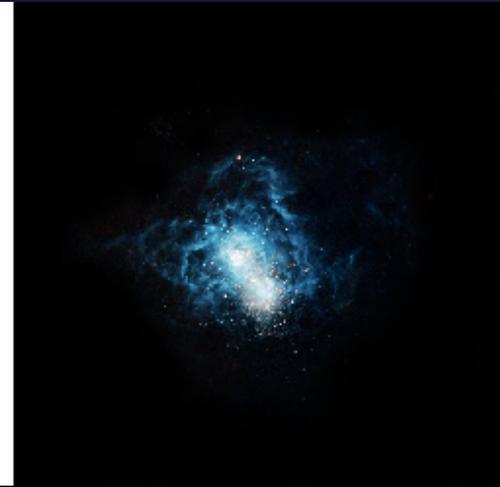
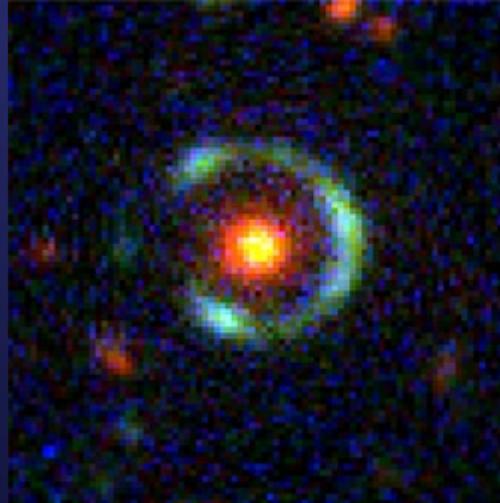
Forme de l' "oeil d'Horus"

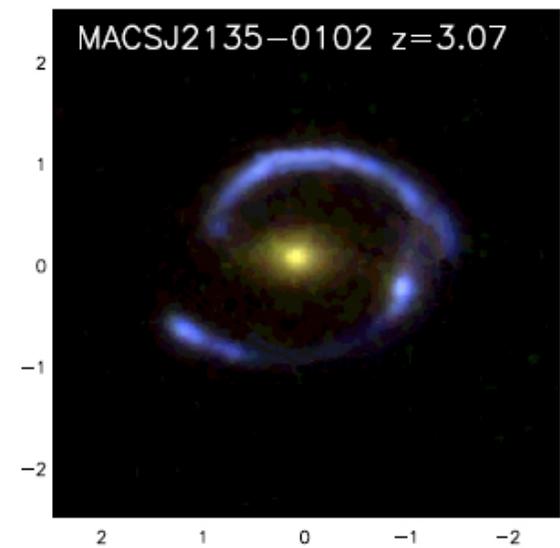
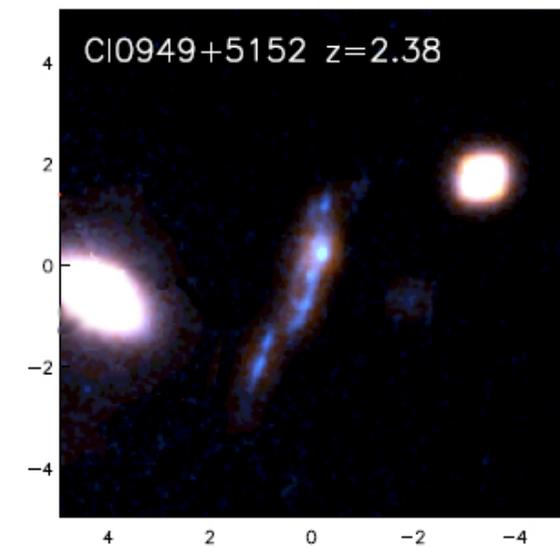
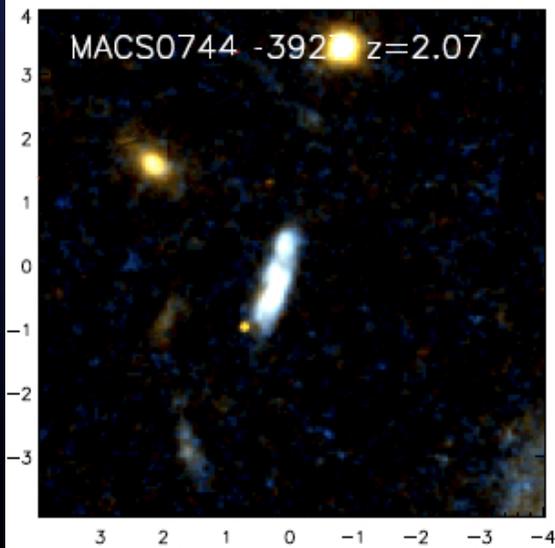
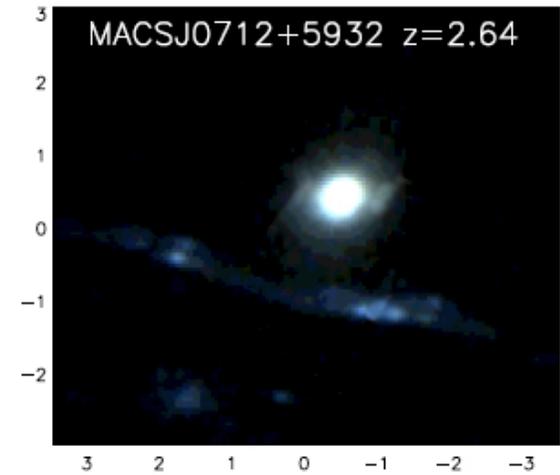
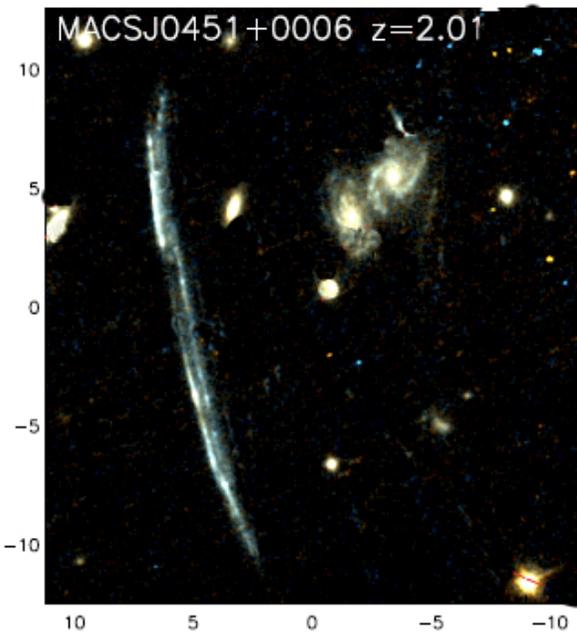
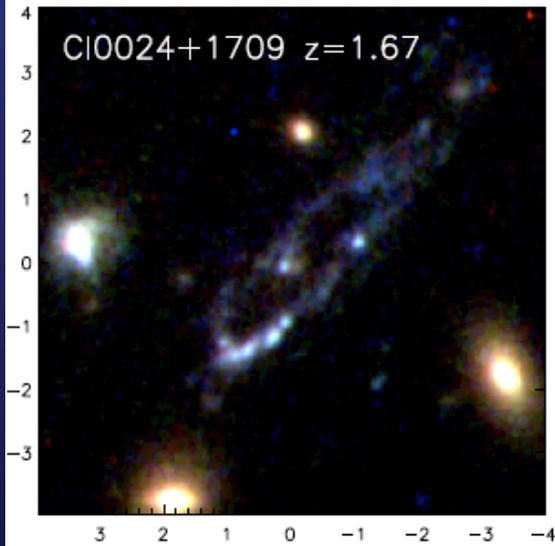


3000 a.-l.

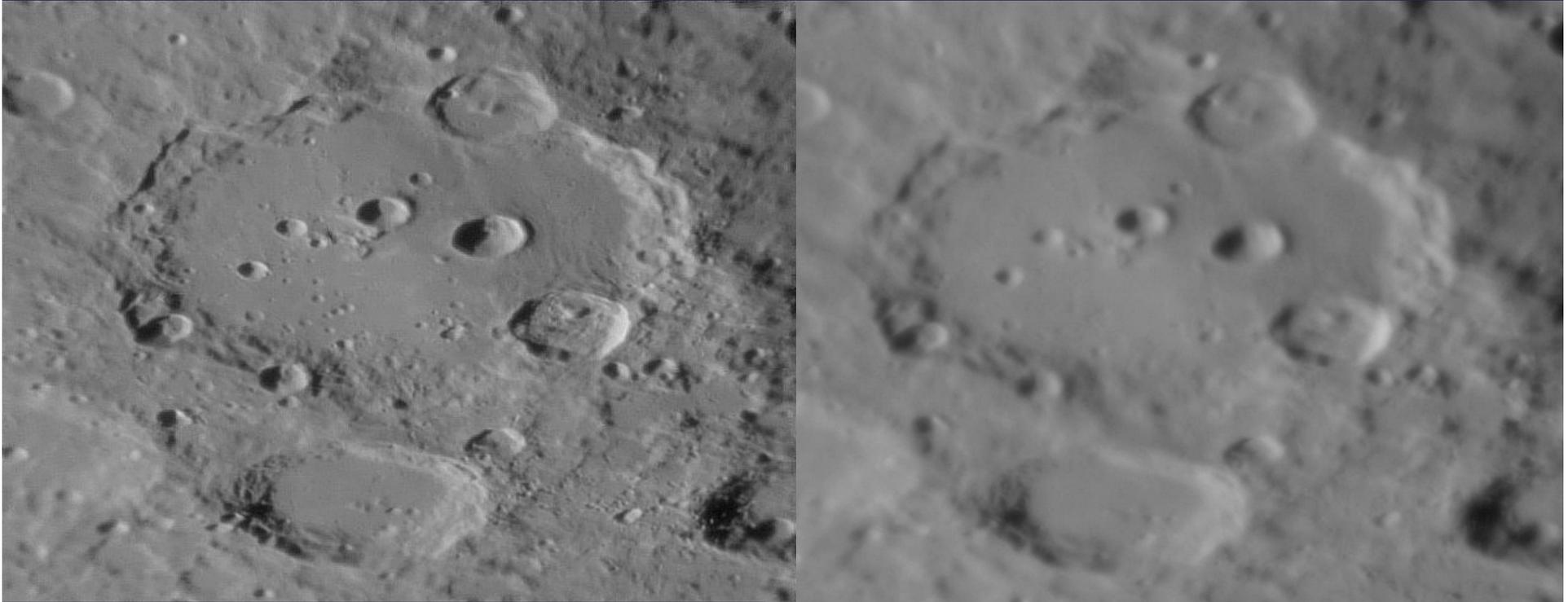
Reconstruction de
la galaxie "source"

Le “Fer à cheval”





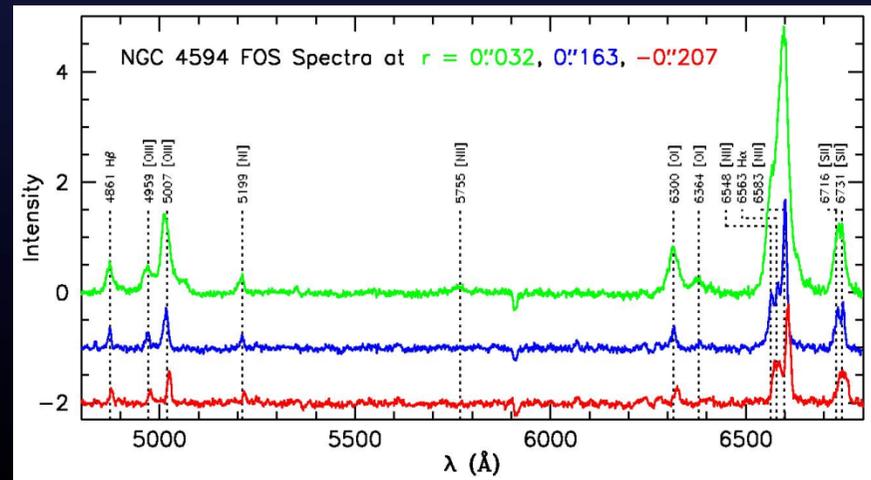
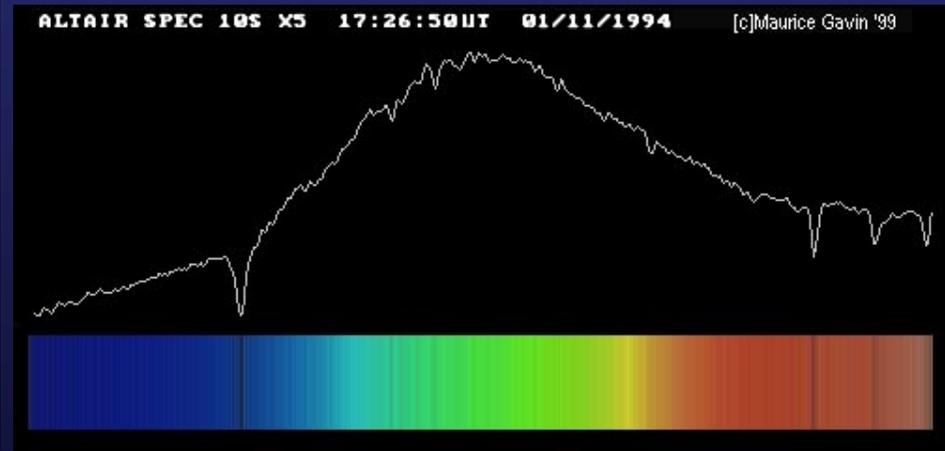
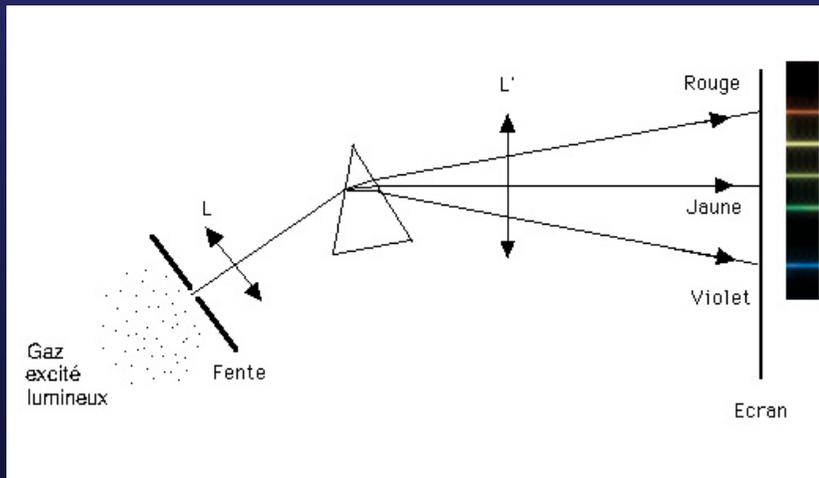
Effet de l'atmosphère

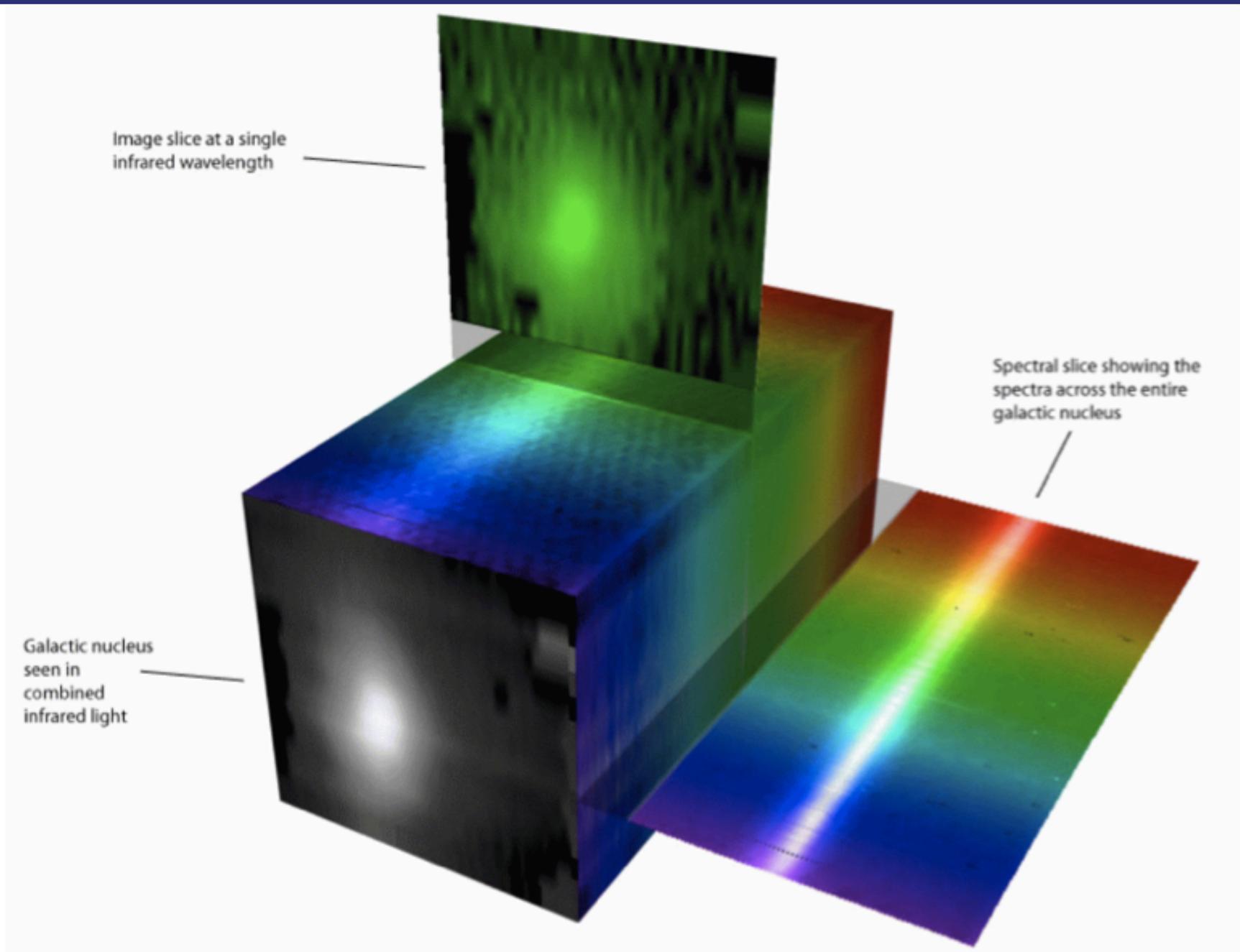


Optique adaptative

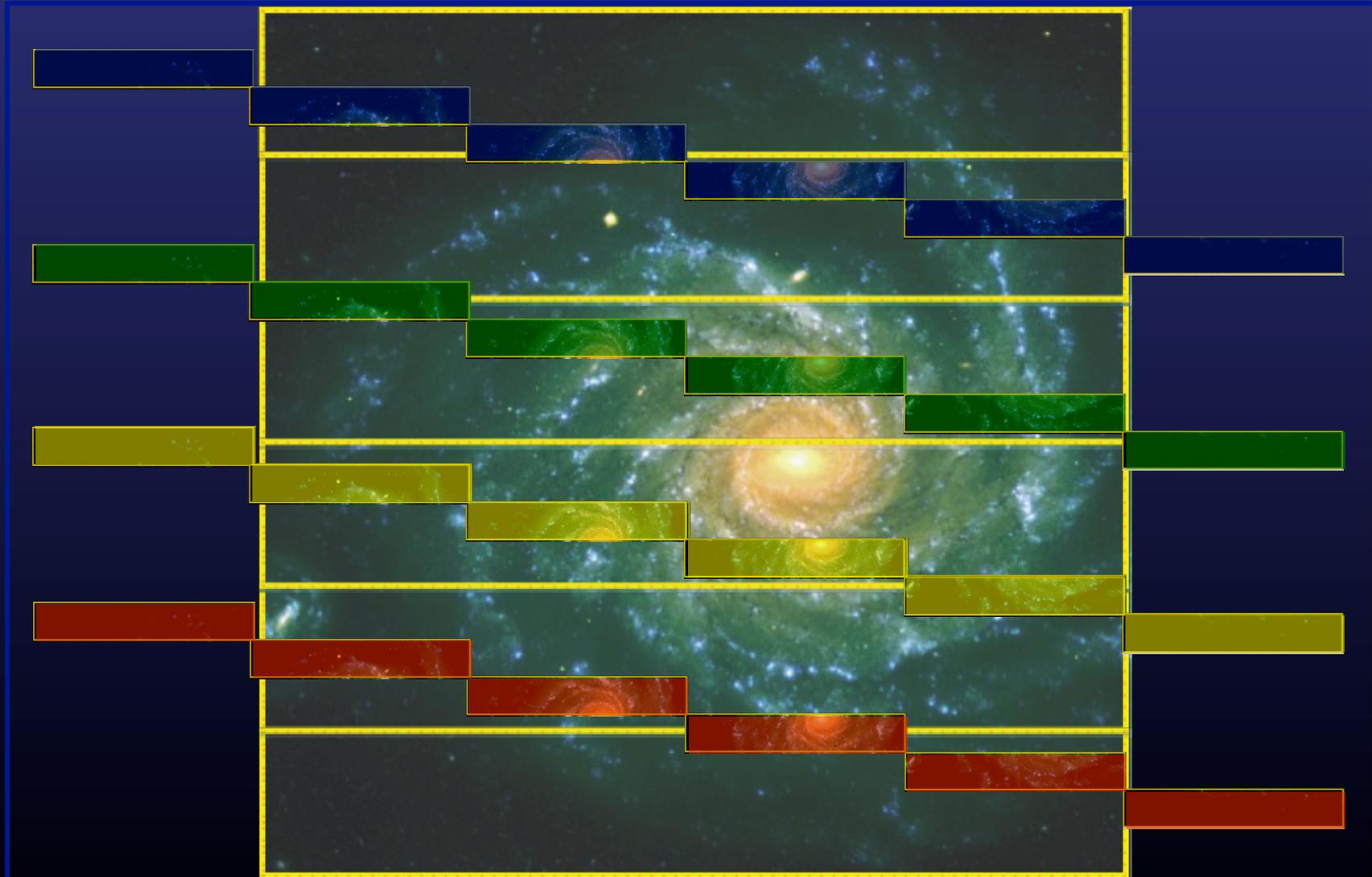


Spectroscopie

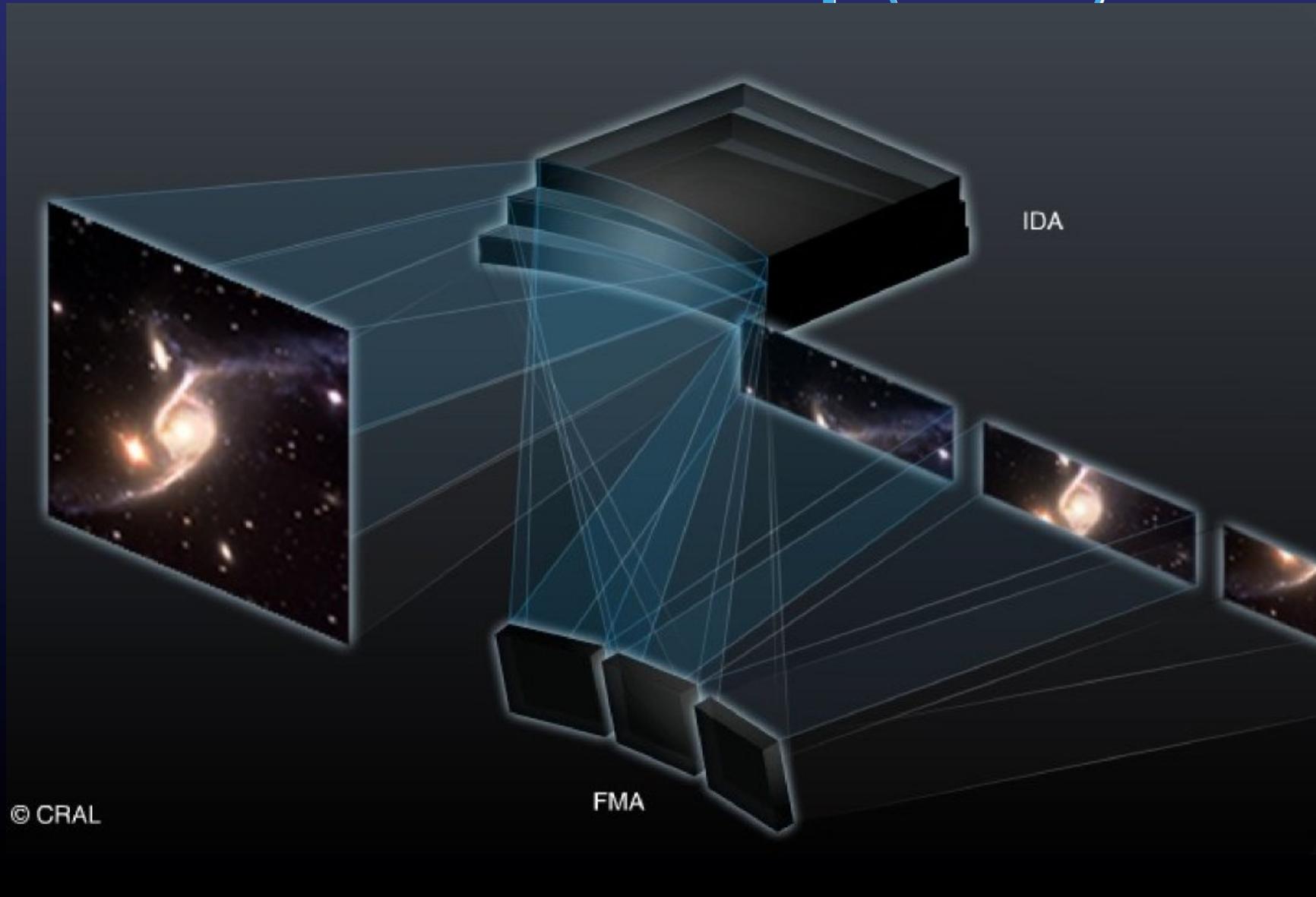


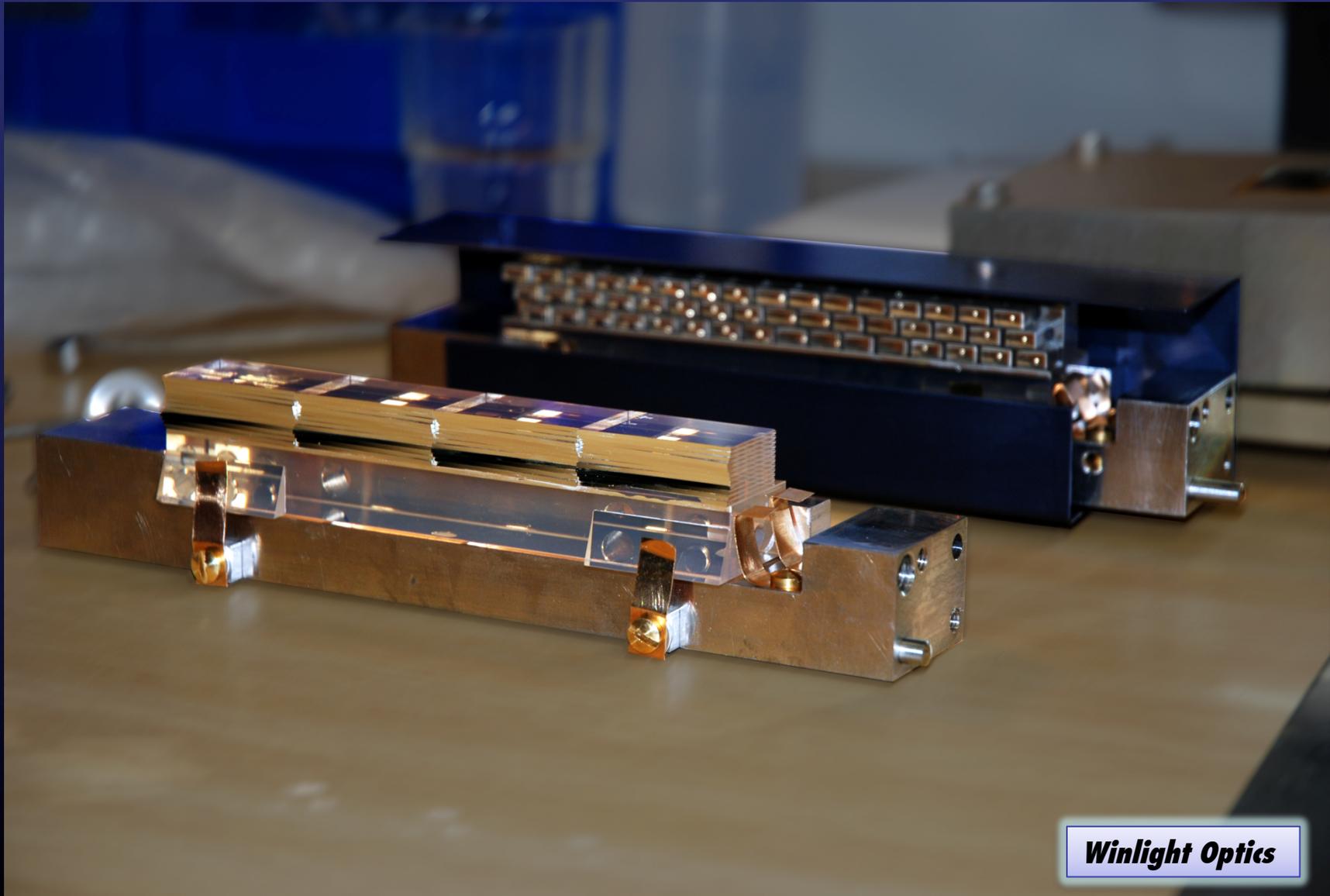


Spectroscopie 3D



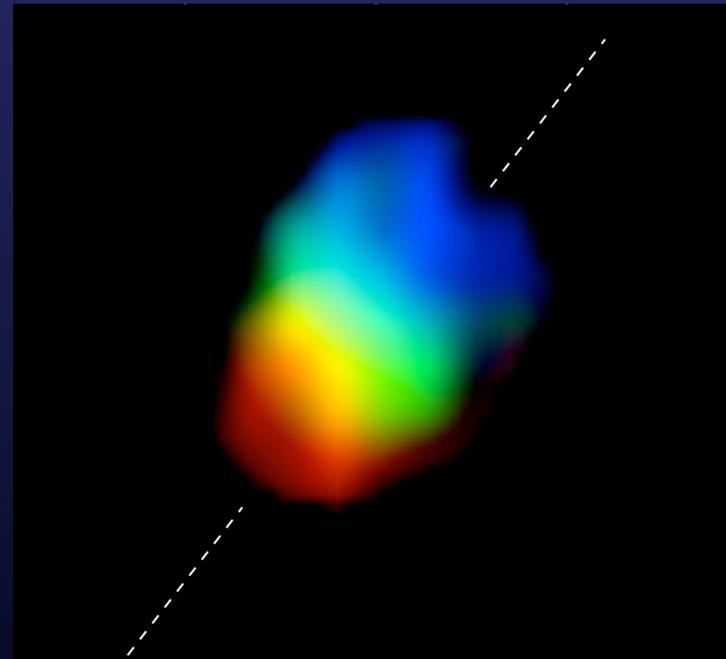
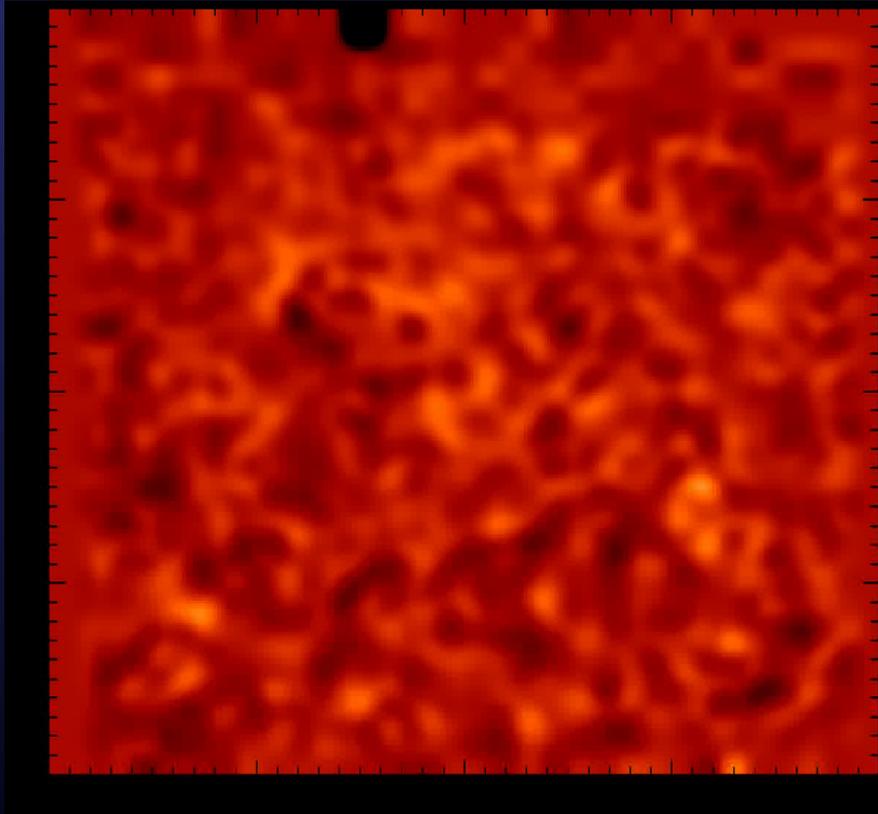
Principe du découpeur de Champ (slicer)



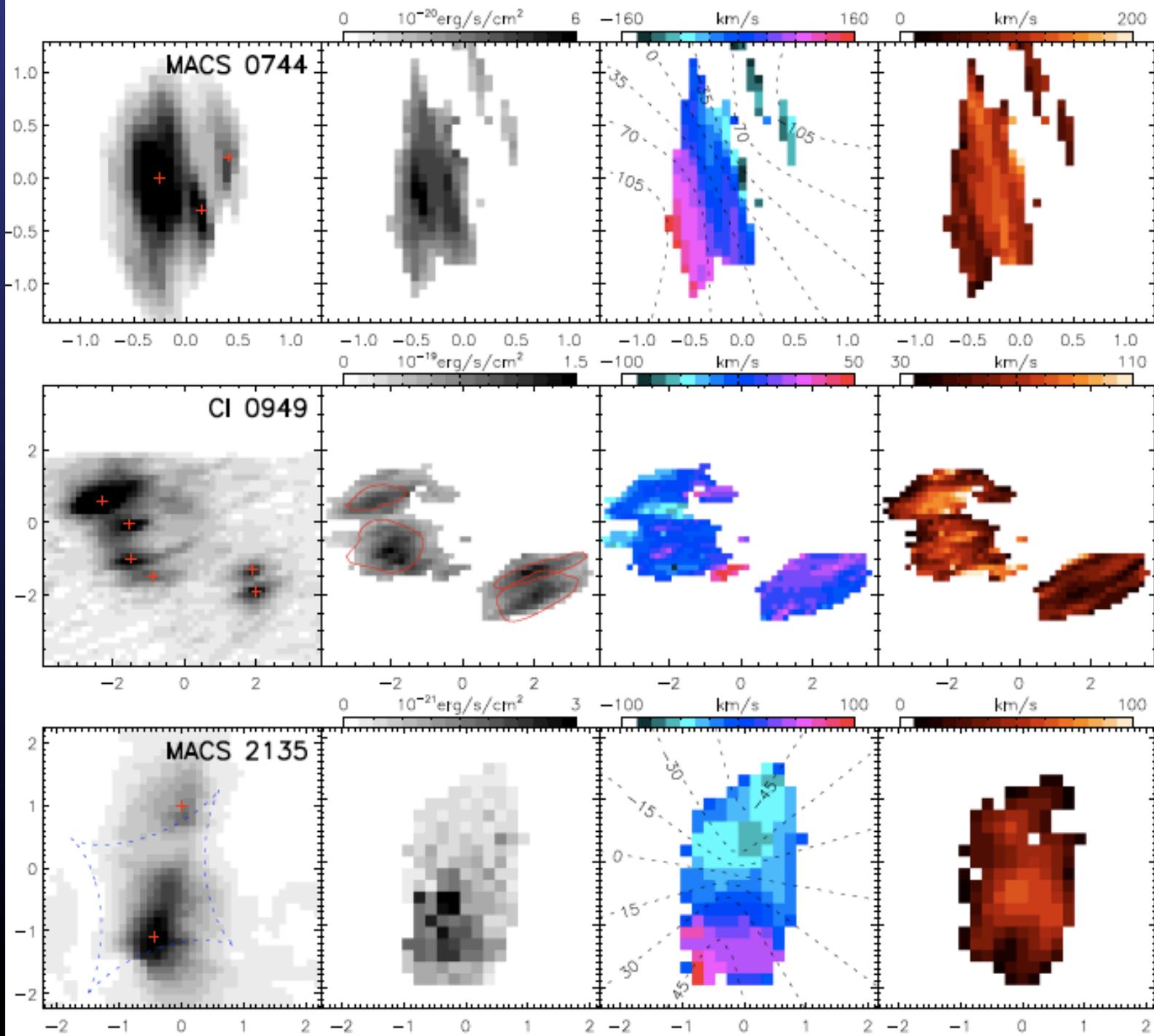


Winlight Optics

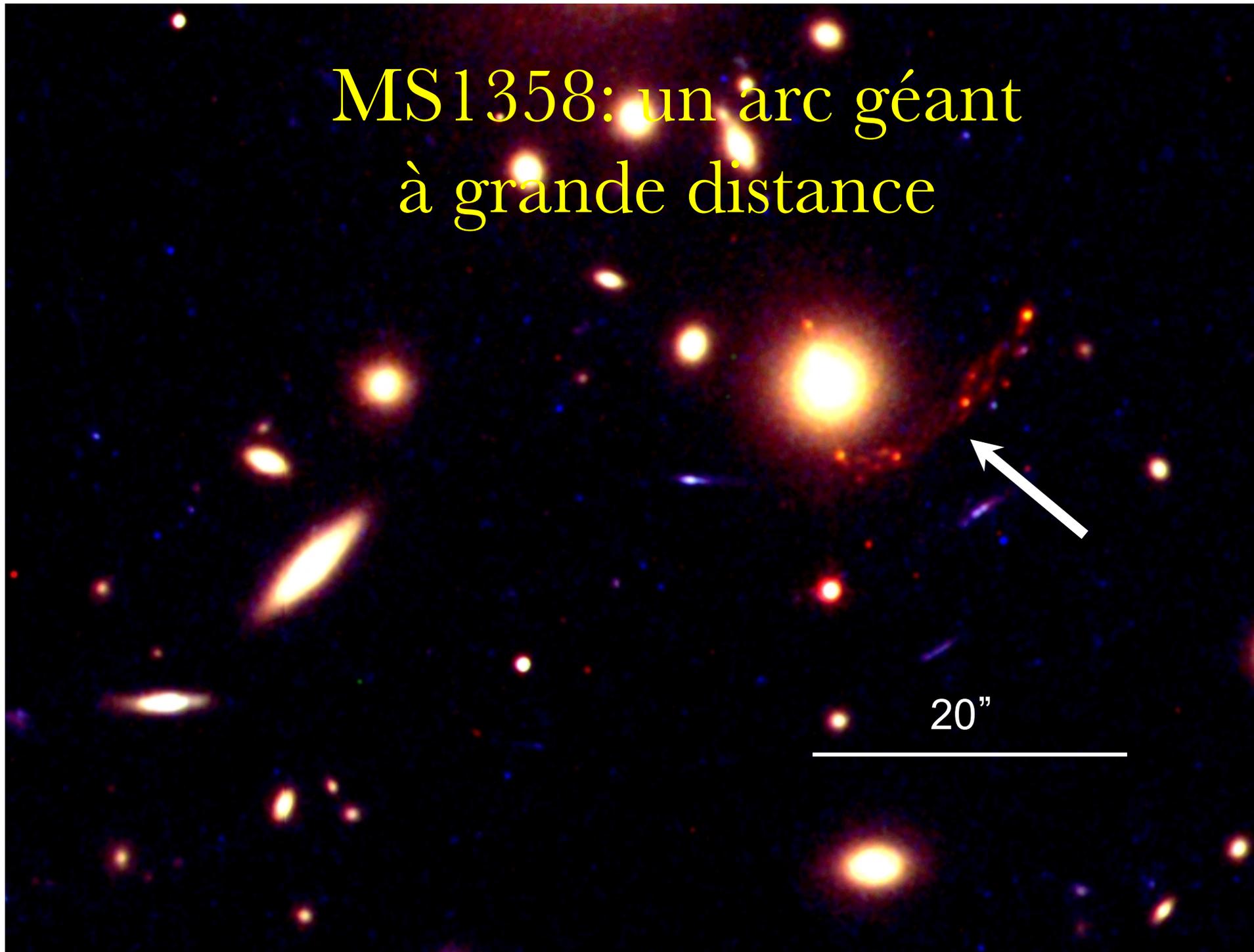
Mesure de rotation



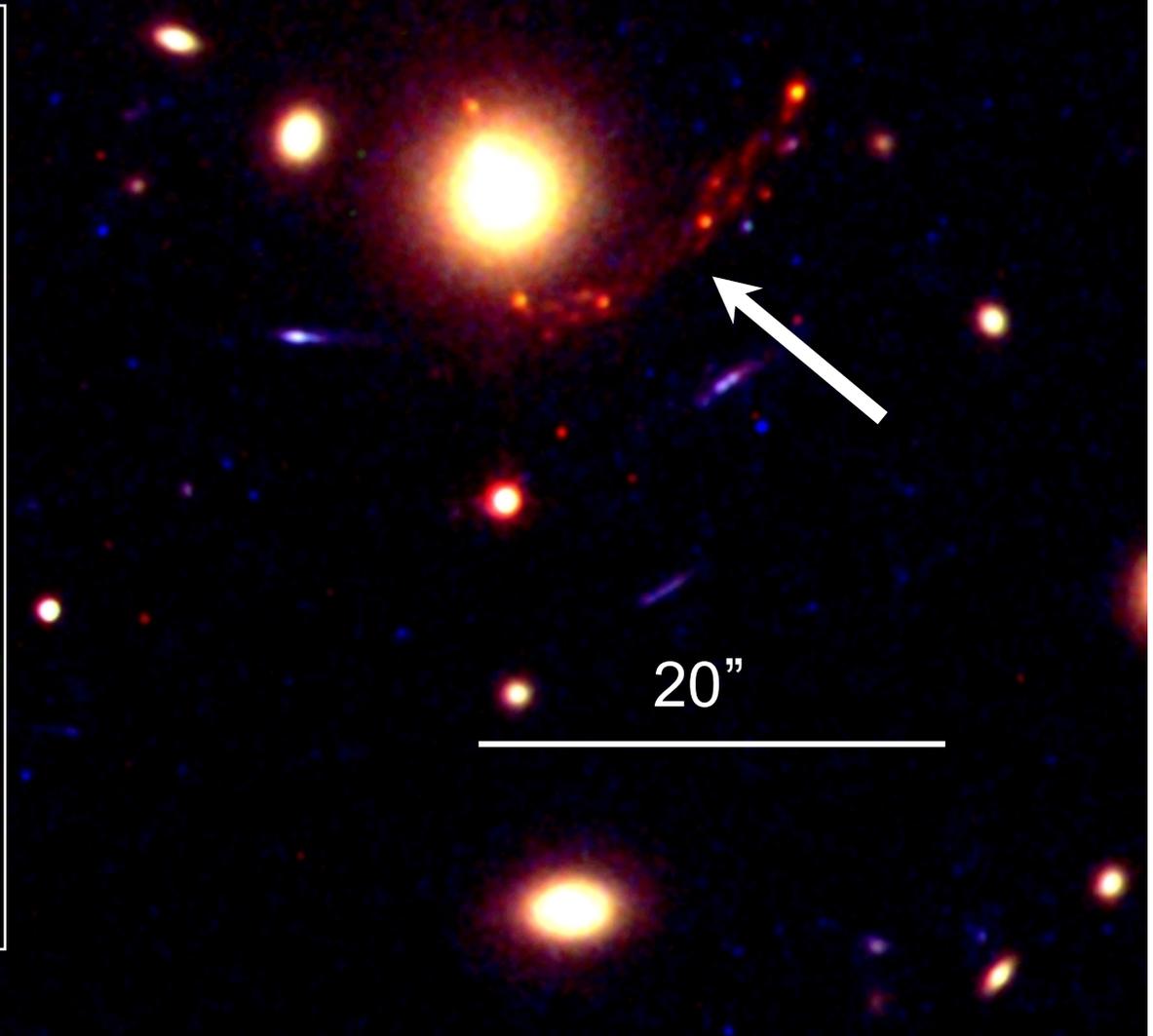
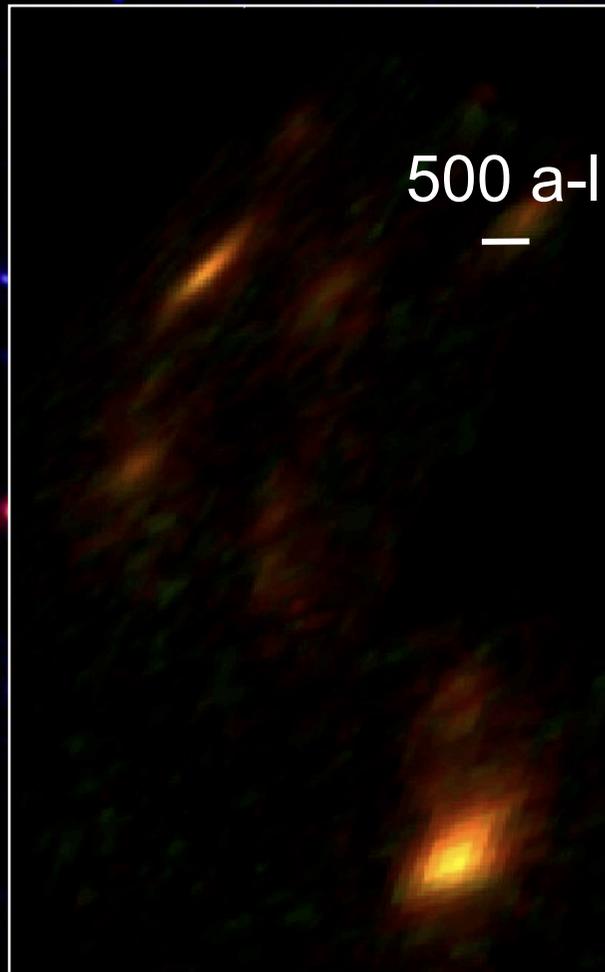
La rotation d'une galaxie distante
nous renseigne sur sa structure interne



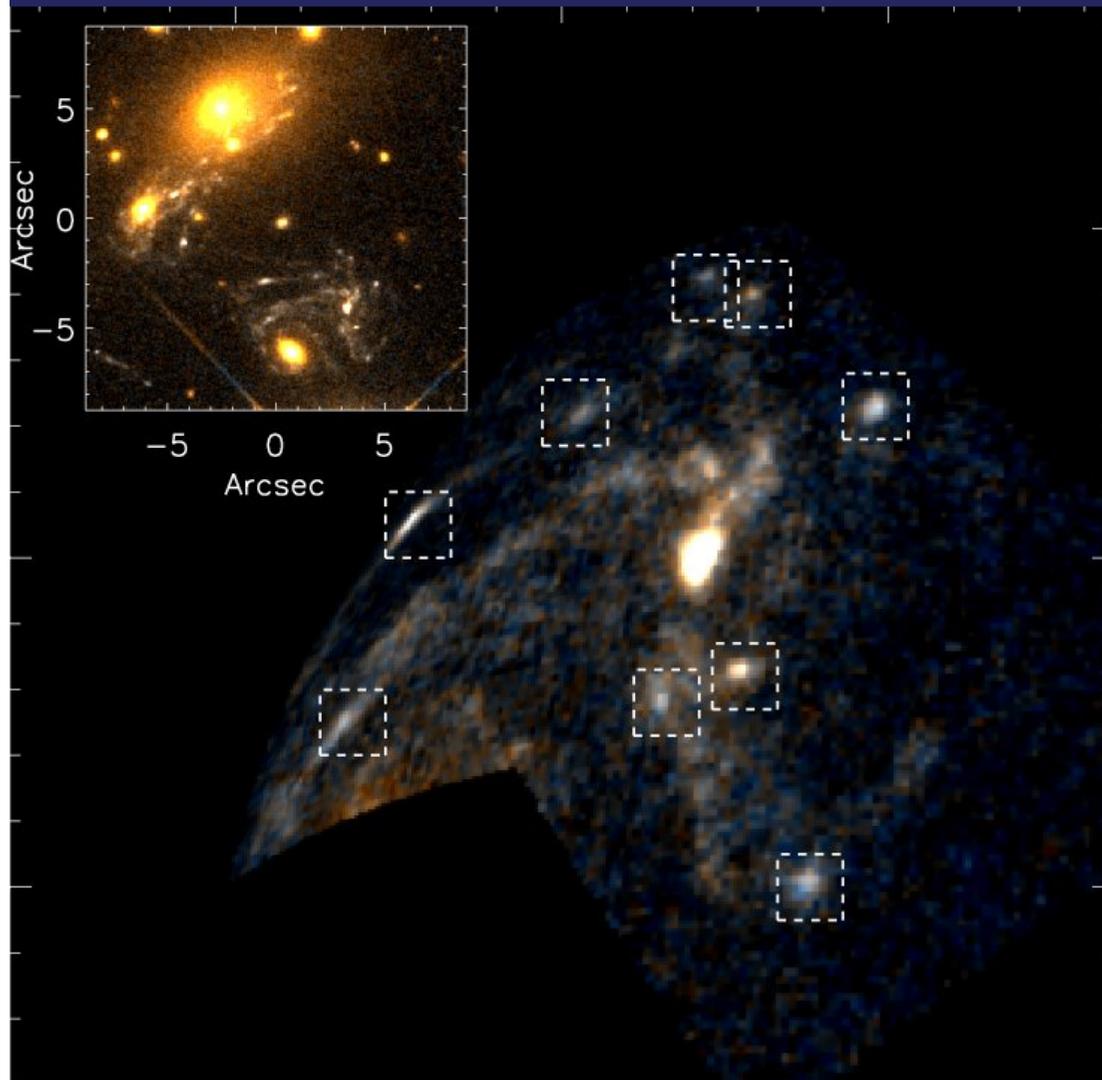
MS1358: un arc géant
à grande distance



MS1358: un arc géant à grande distance



Régions de formation stellaire



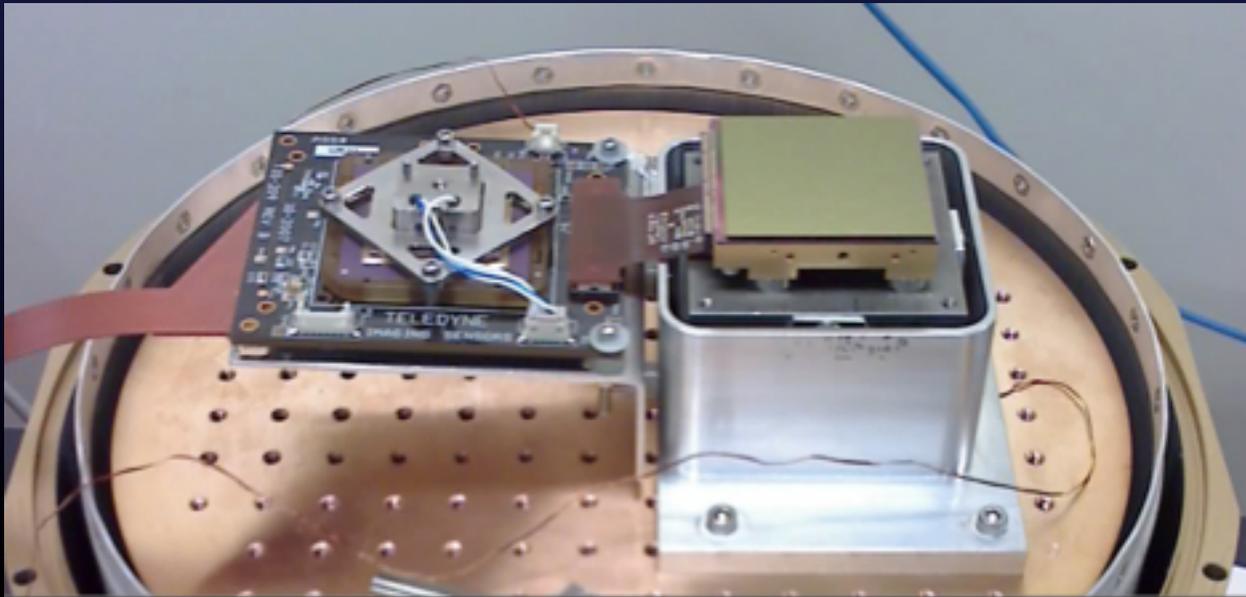
- A l'aide du **microscope gravitationnel** on résout des régions où se forment des étoiles jeunes
- Ces régions étaient plus **compactes** par le passé: conditions physiques différentes !

Galaxies les plus distantes

Effet de distance: objets plus faibles

x 8 entre $z = 3$ (11.6 Md années)
 et $z = 7$ (12.7 Md années)

Décalage vers le rouge: $z > 7$ UV \longrightarrow IR

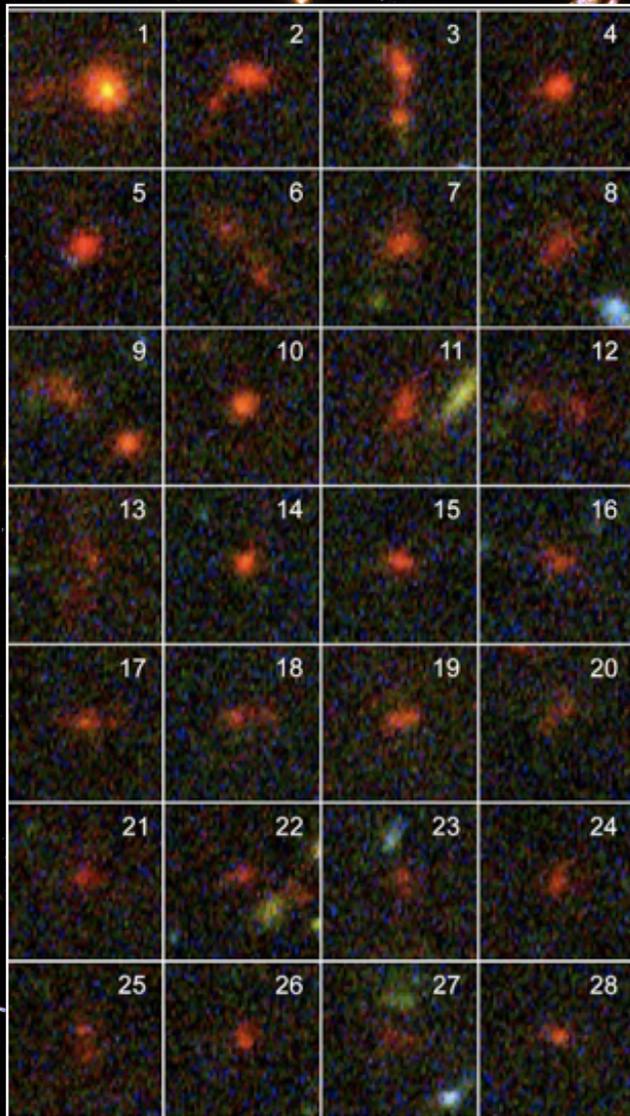


Detecteur
infrarouge

Hubble Ultra Deep Field

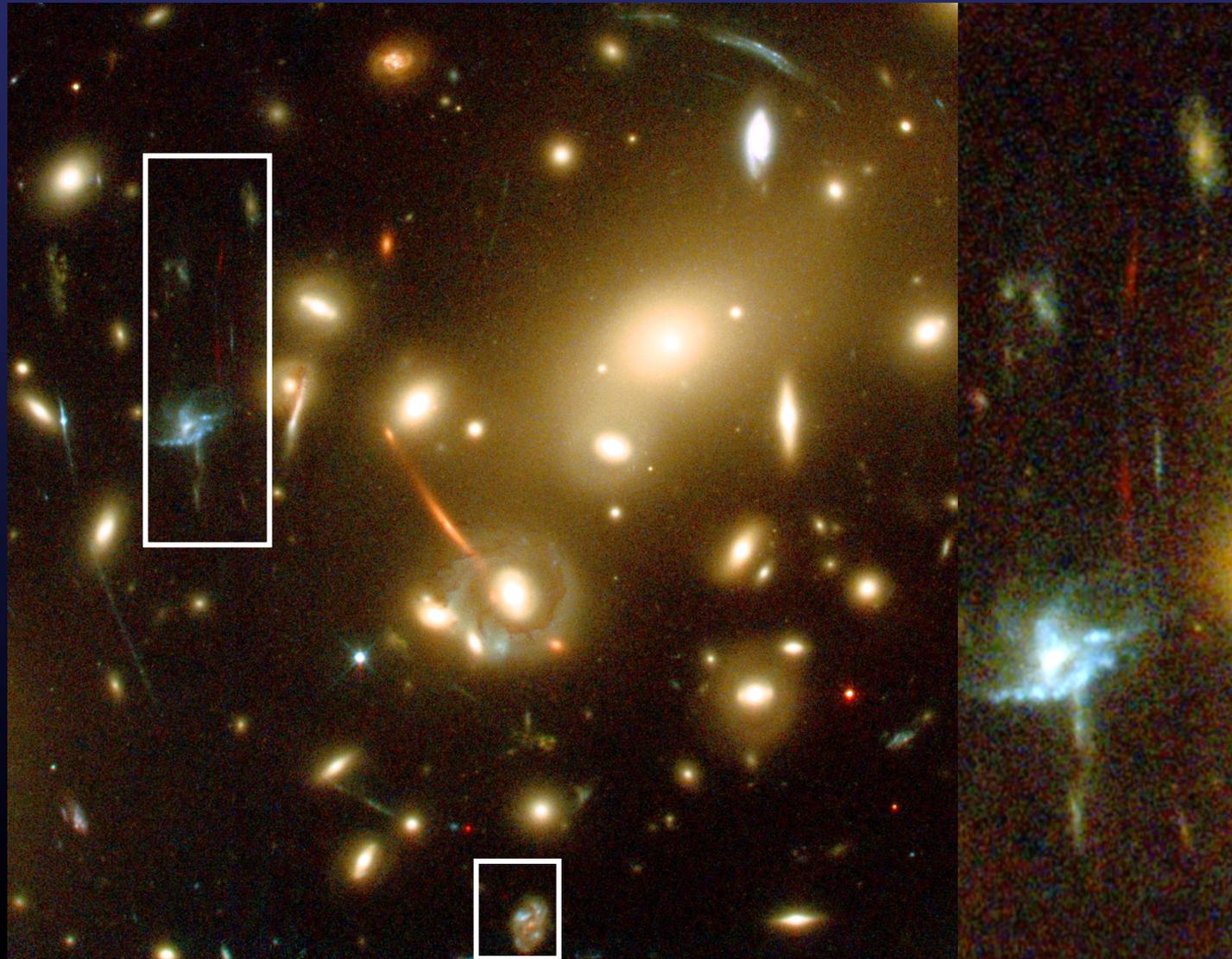


Hubble Ultra Deep Field



- Champ ultra-profond
- 11 jours d'observation
- ~ 30 000 galaxies dans le champ
- ~ 30 galaxies très distantes
(~12 Md années-lumière)
- magnitude ~ 30 (4 Md de fois plus faible que la vision humaine)

Abell 2218: une galaxie au berceau



2 images

symétriques

couleur rouge:

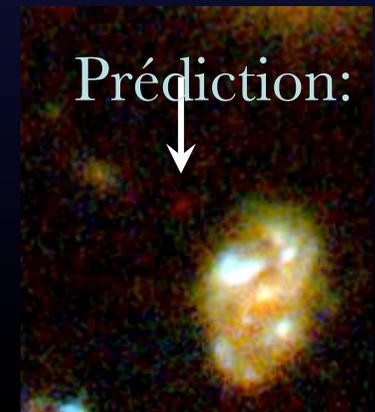
distance 12.7

Md a.l.

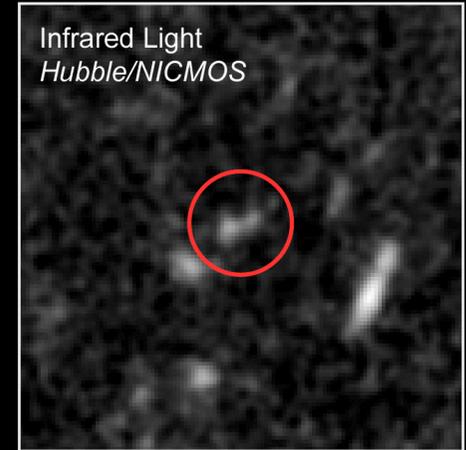
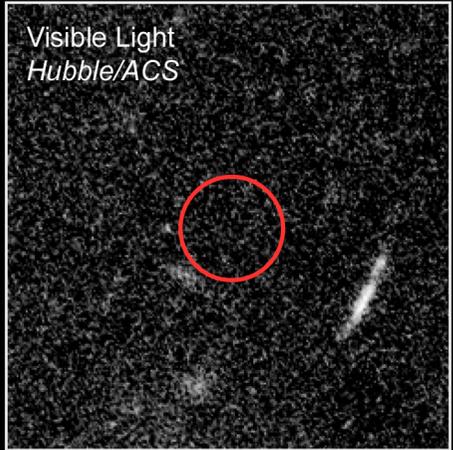
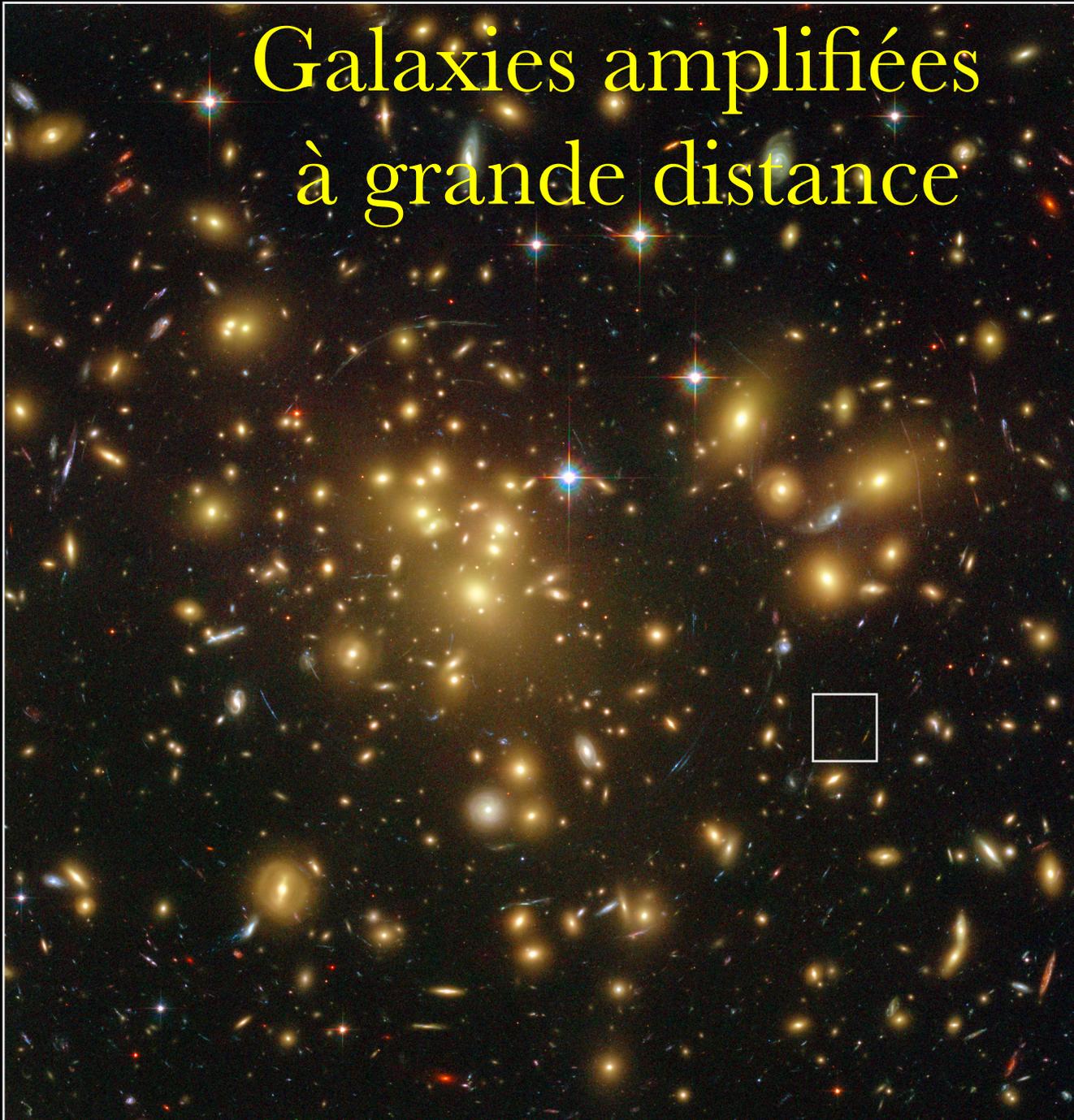
Amplification

x 30

Prédiction:

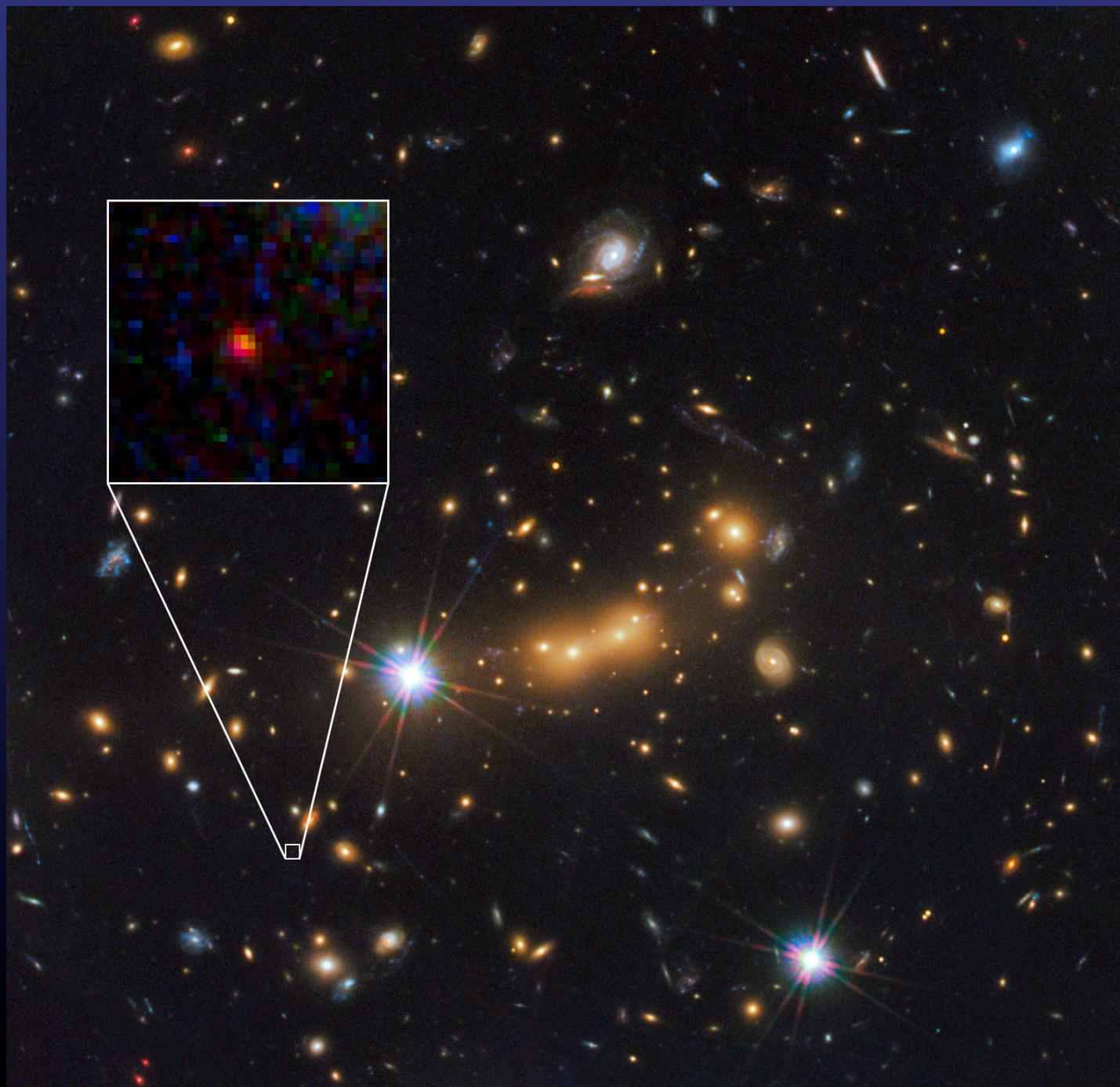


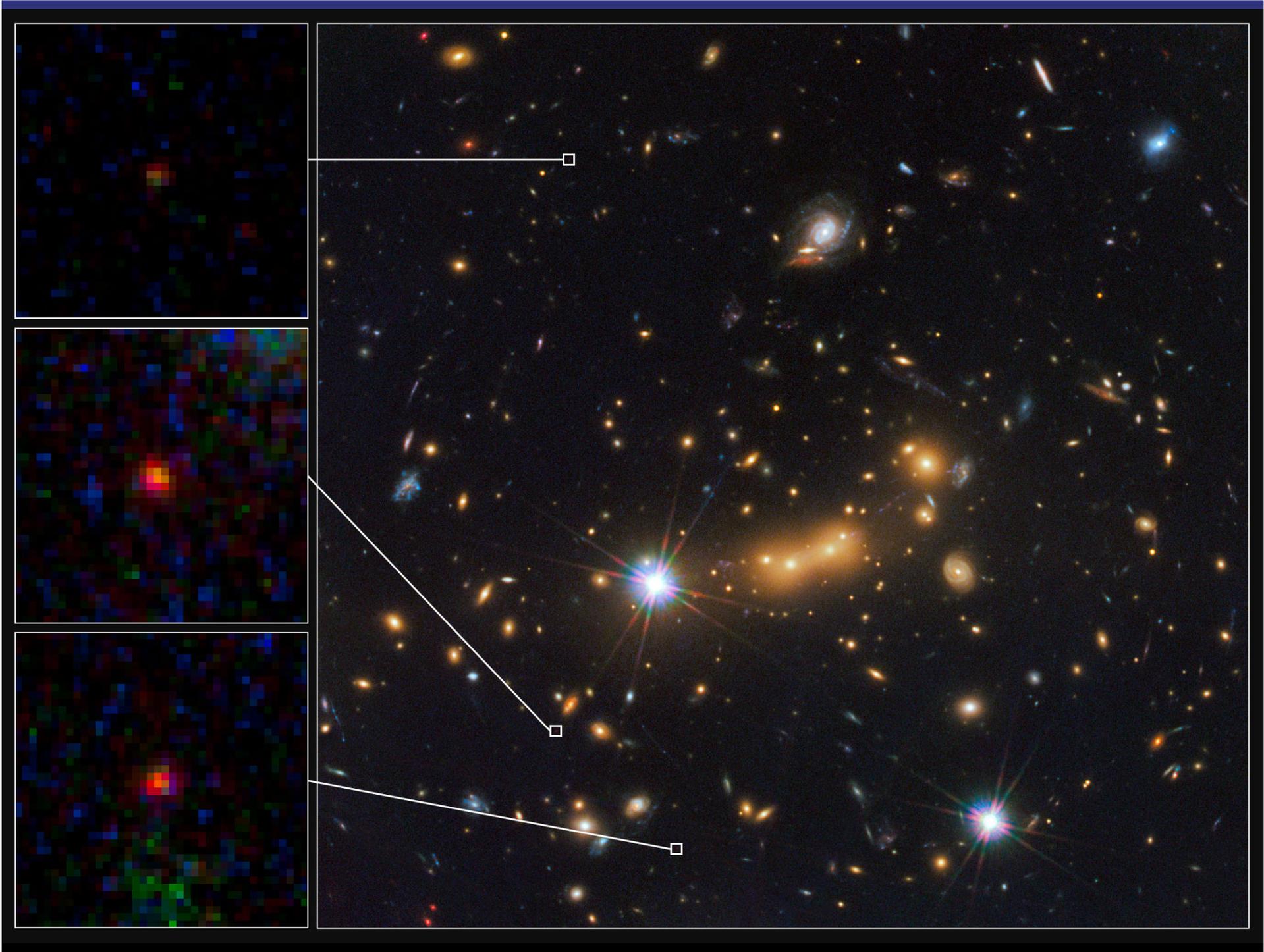
Galaxies amplifiées à grande distance



- ~ 20 galaxies
distantes, avec
amplification x10

Complémentaire à
l'Ultra Deep Field





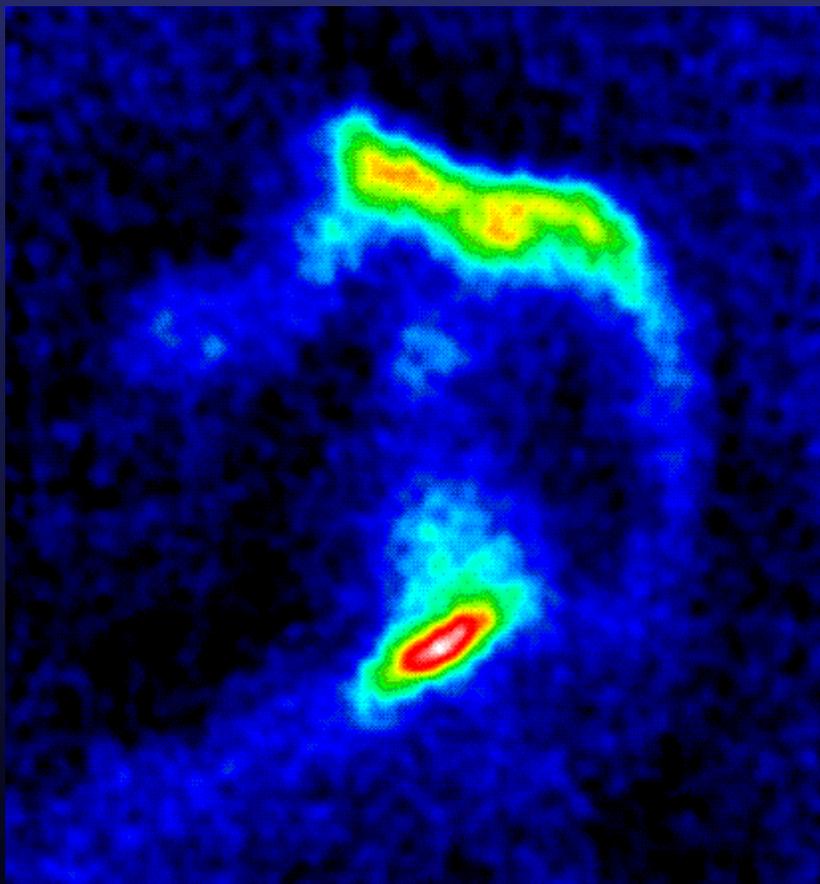
Galaxies “poussiéreuses”



Nébuleuse “tête de cheval”

- Les **nébuleuses obscures** cachent des régions d'étoiles en formation
- La lumière **infrarouge** nous renseigne sur l'intérieur de la nébuleuse de par sa température

Galaxies “poussiéreuses”

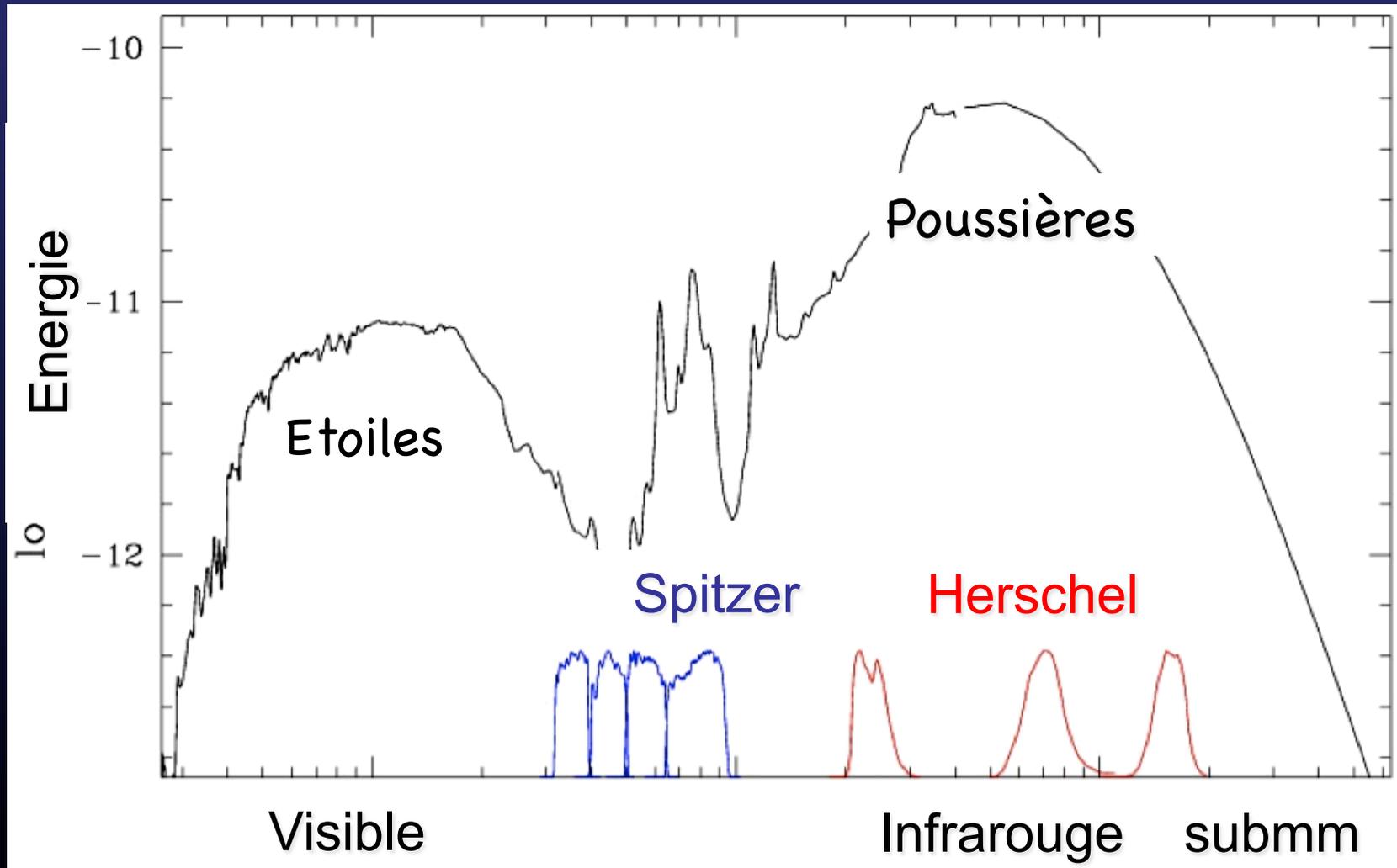


Nébuleuse “tête de cheval”

- Les **nébuleuses obscures** cachent des régions d'étoiles en formation
- La lumière **infrarouge** nous renseigne sur l'intérieur de la nébuleuse de par sa température

Qu'a bien pu avaler le cheval ?

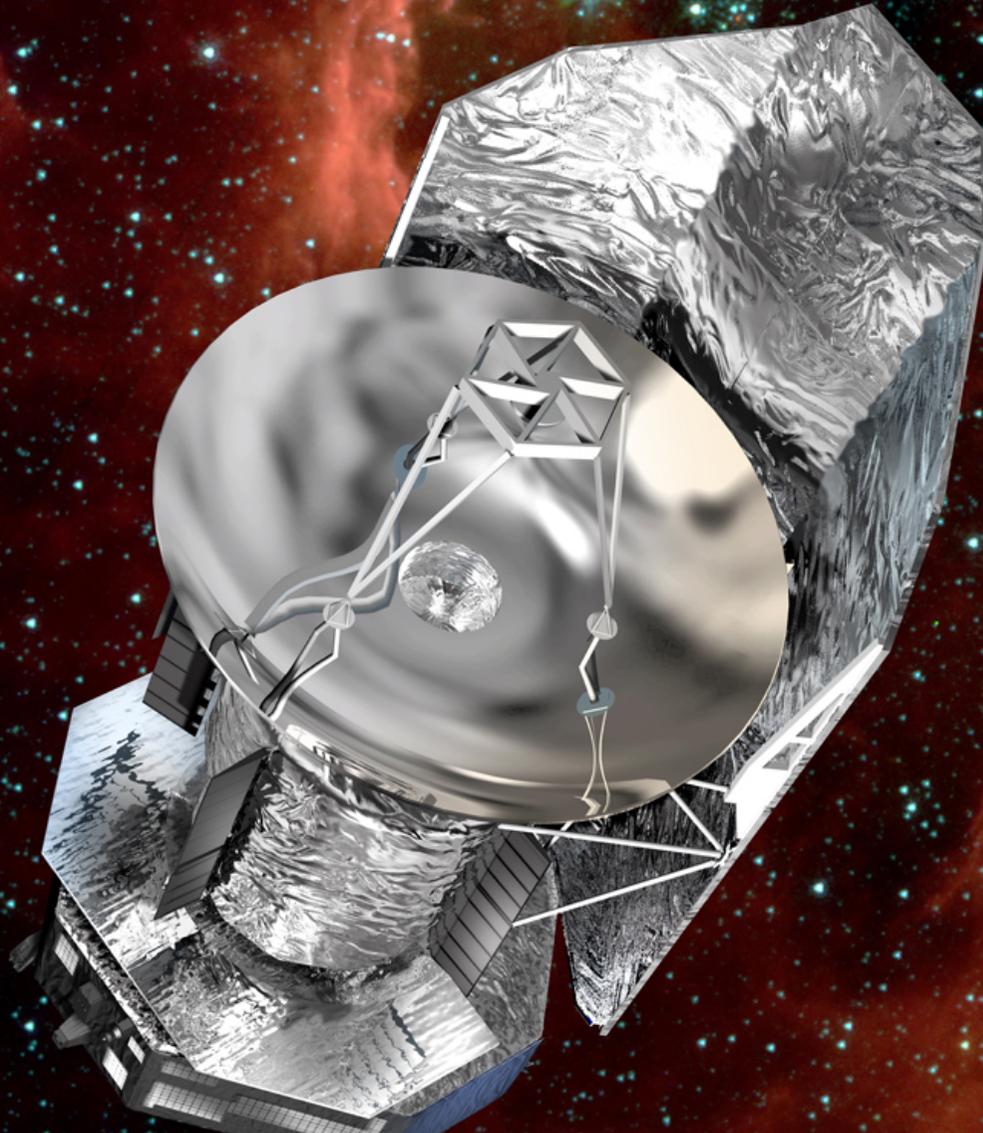
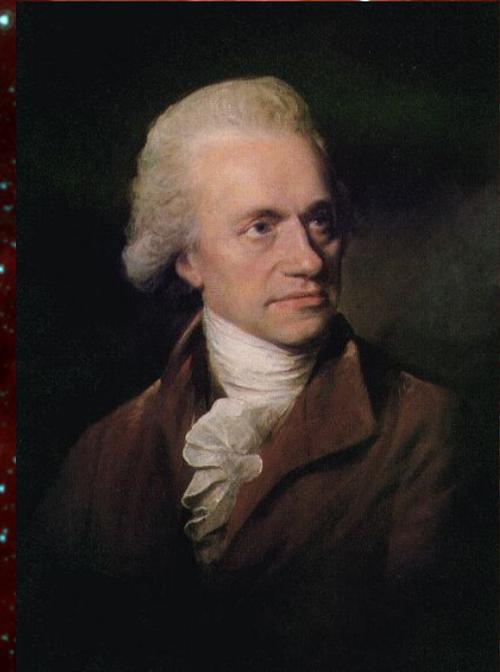
Galaxies “poussiéreuses”



Spitzer

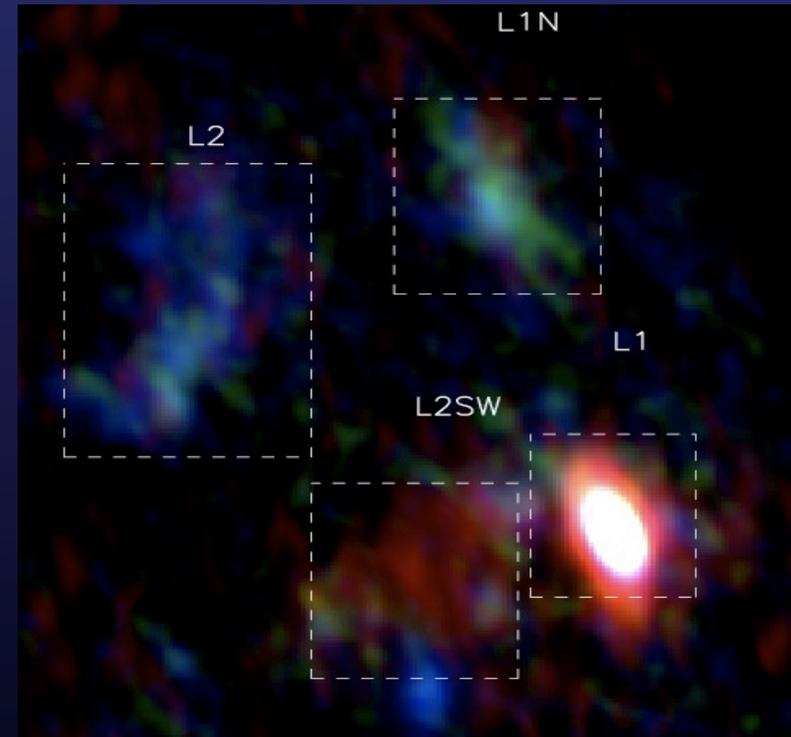


Herschel



Questions recherchées

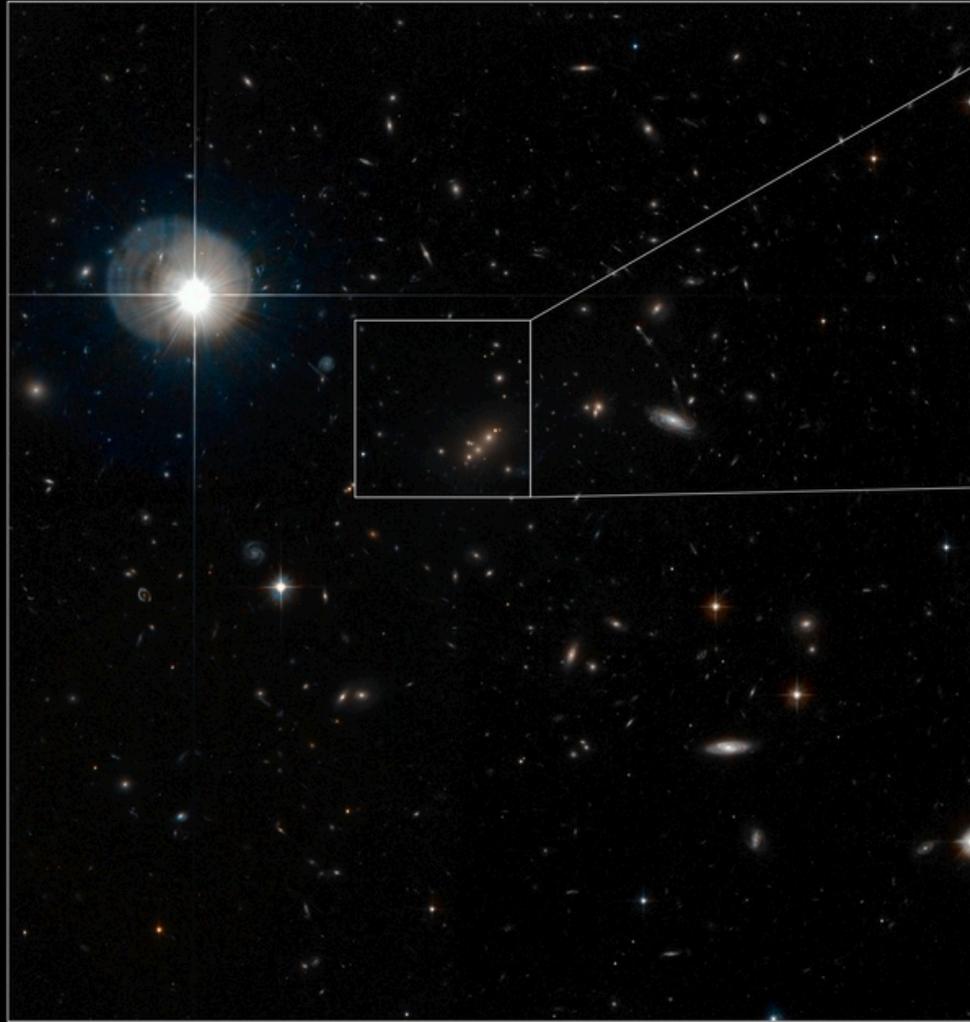
- Quelles sont les **propriétés physiques** (température, densité) et **chimiques** (éléments) de la poussière ?
- Quelle est la contribution de la **formation stellaire cachée** par la poussière ?



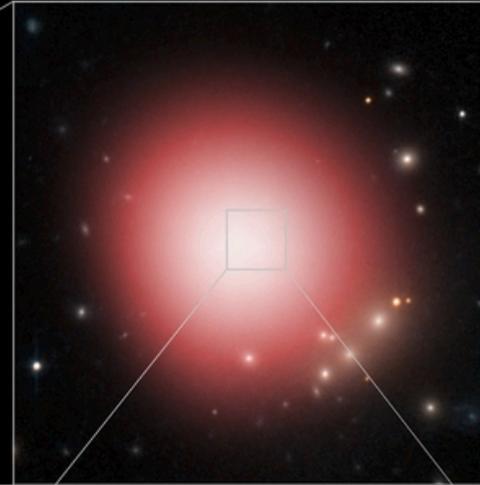
Première source sub-mm

Une galaxie poussiéreuse distante

Hubble/ACS



APEX/LABOCA



SMA

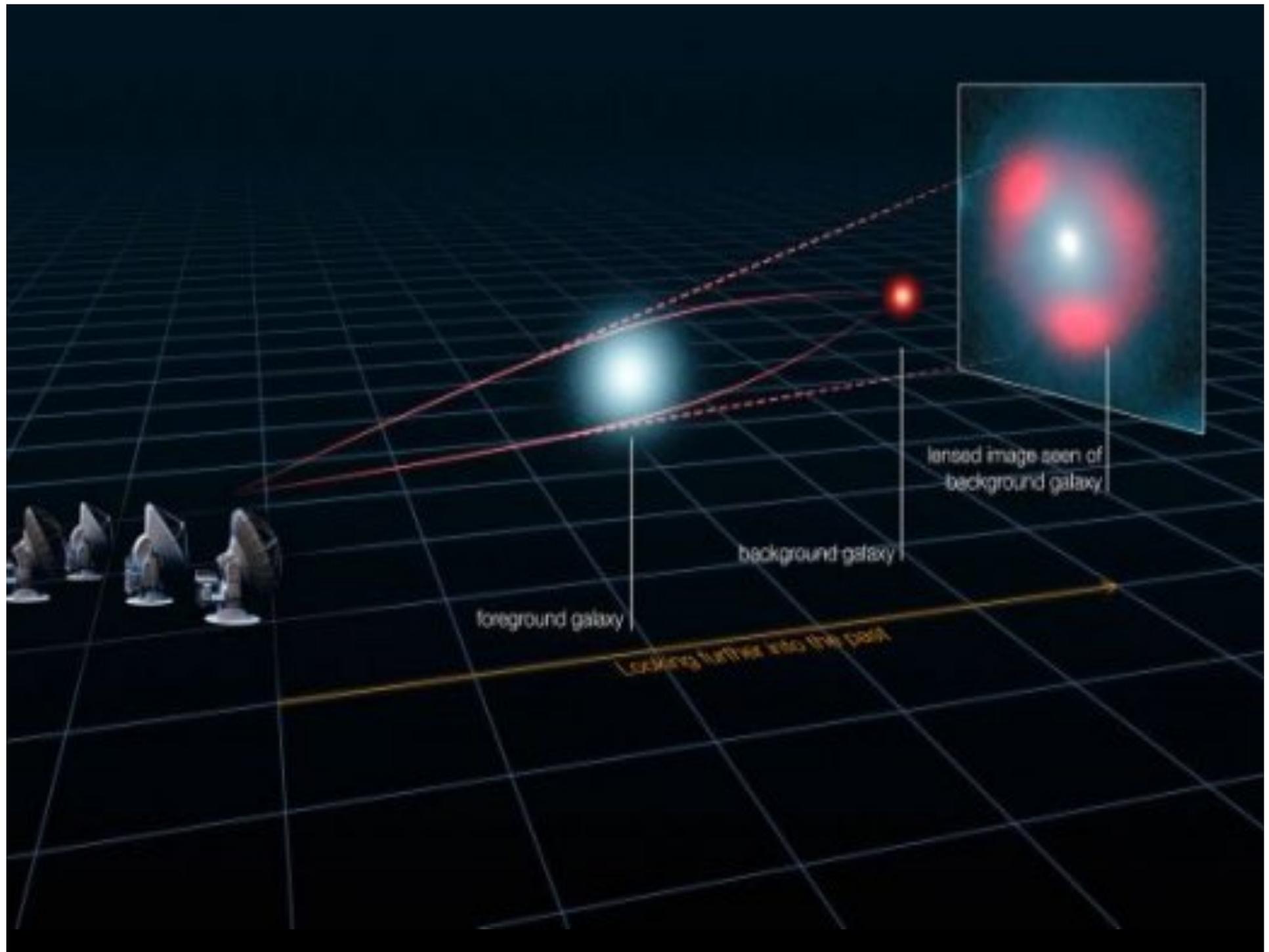


ALMA



ALMA





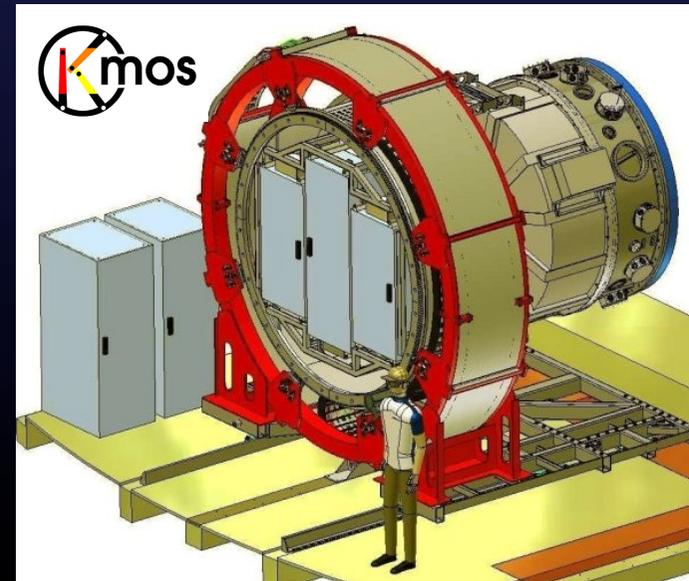
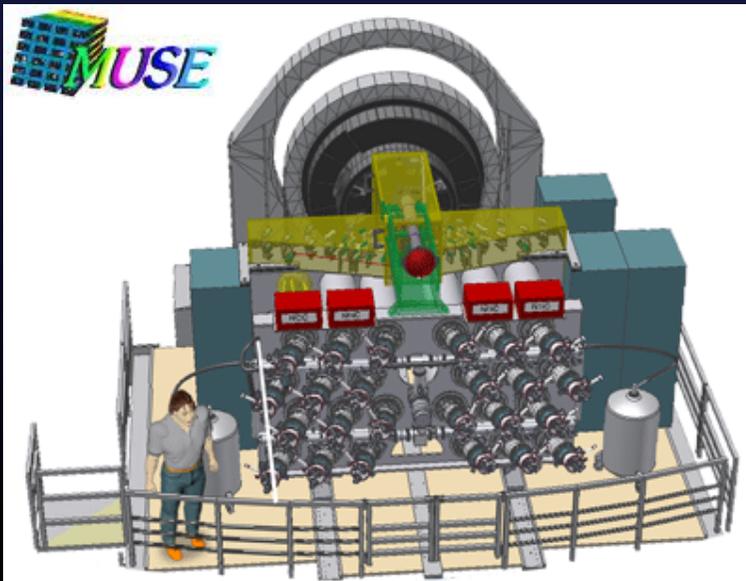
Généralisation de l'utilisation des amas-lentilles

- L'utilisation de lentilles gravitationnelles est une technique **à l'avant-garde** de l'astrophysique observationnelle
- L'étude des objets intrinsèquement plus faibles est **complémentaire** à celle des objets plus brillants
- Actuellement quelques **100 amas-lentilles** sont bien modélisés et peuvent être utilisés comme télescopes gravitationnels

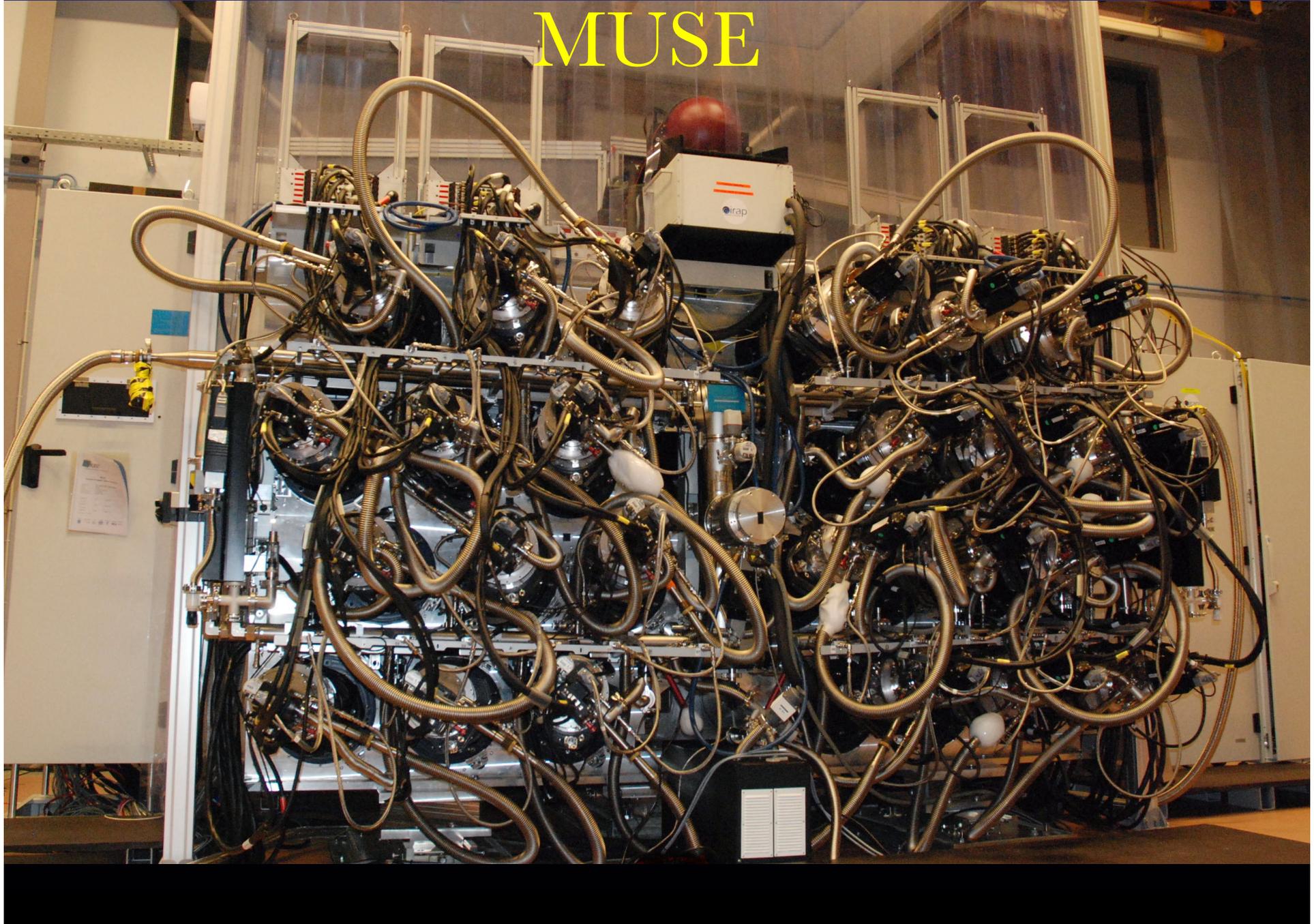
Perspectives (sol)

- Instruments de seconde génération pour le Keck et le VLT (2013)

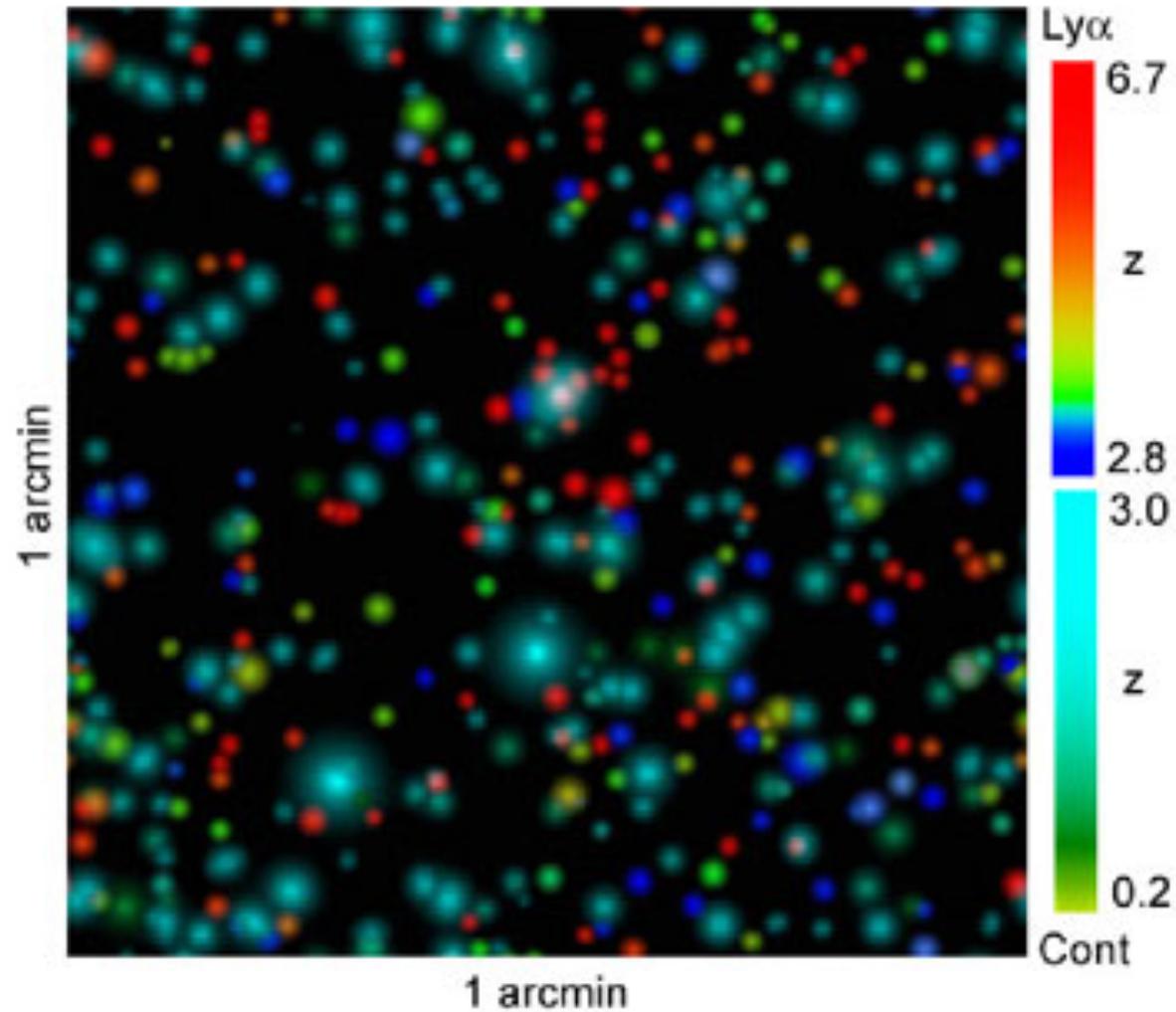
Spectrographie “intégrale” ou multi-objets
Généralisation de l’optique adaptative



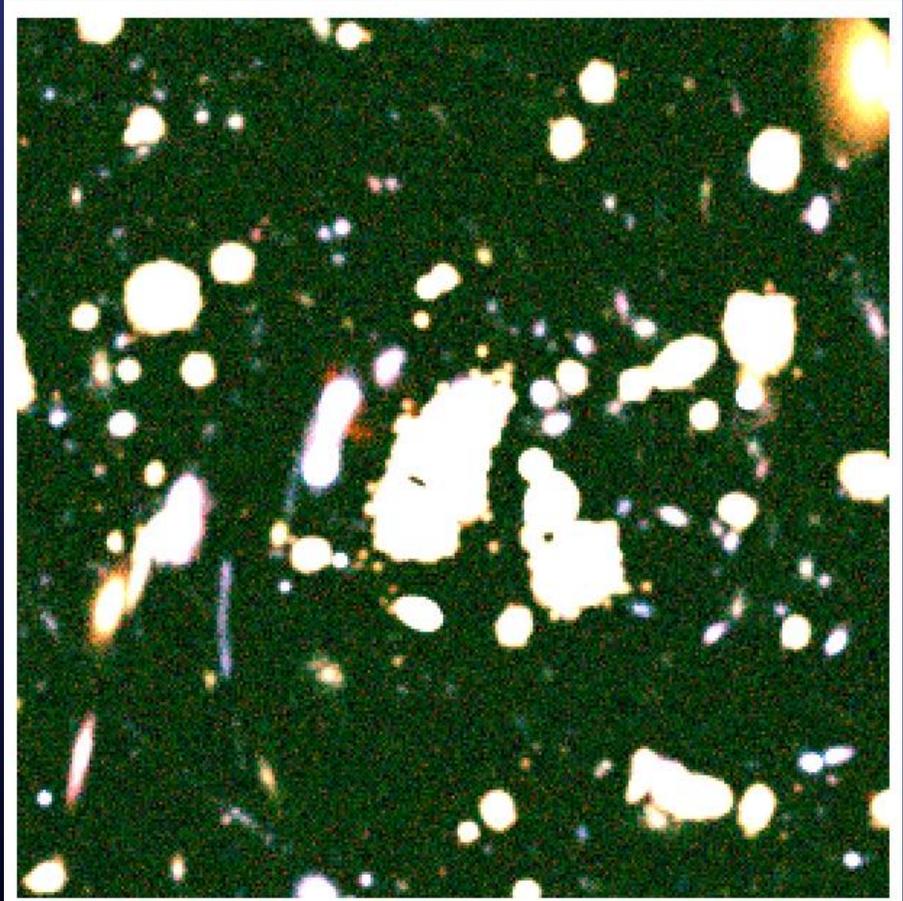
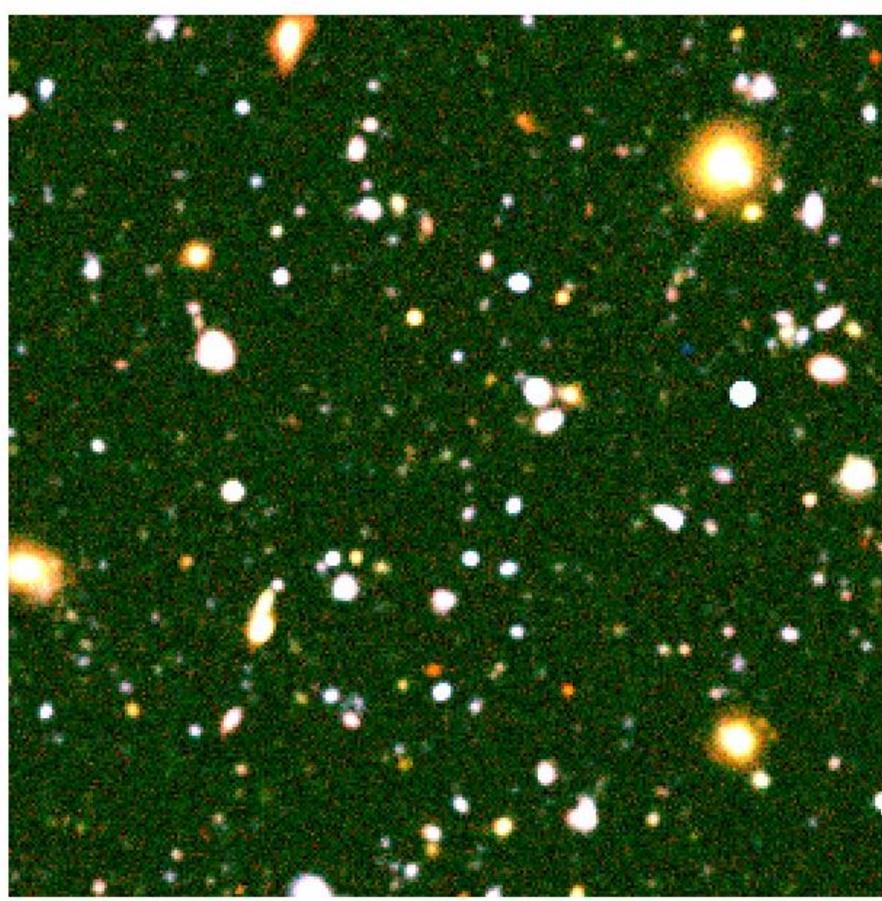
MUSE



Vue en 3D avec MUSE



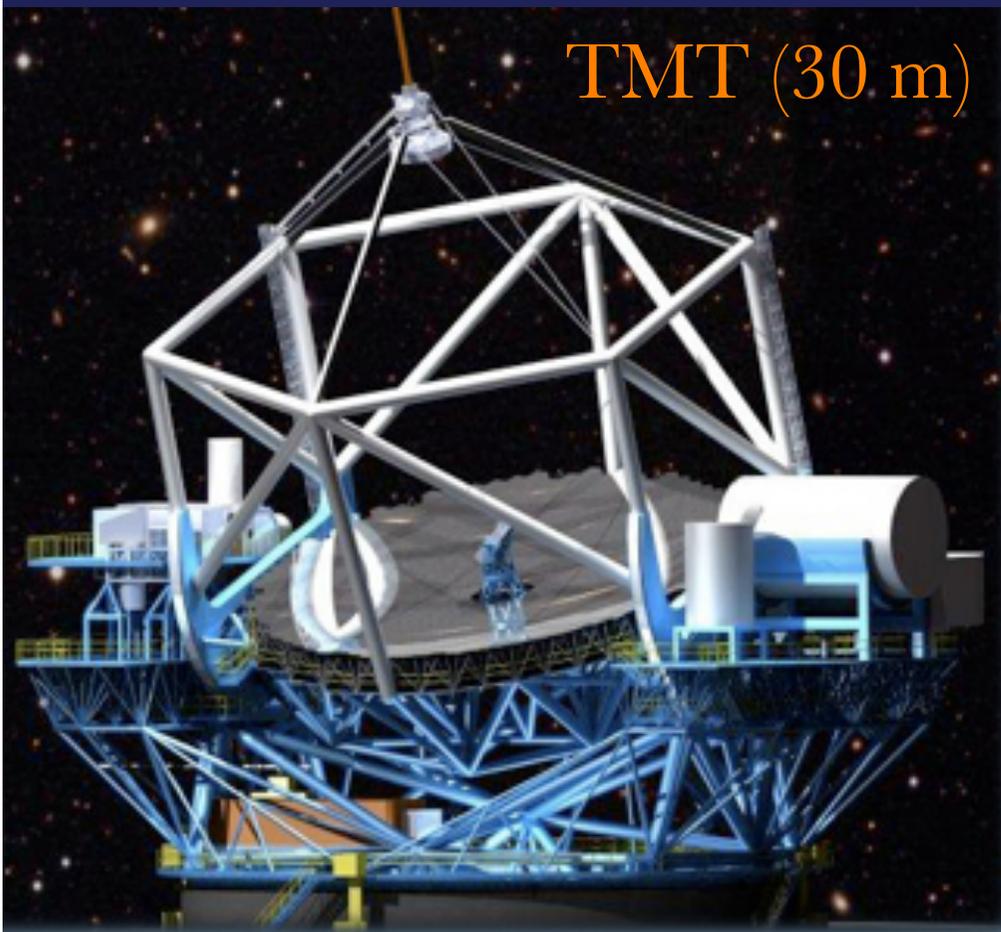
MUSE et un amas



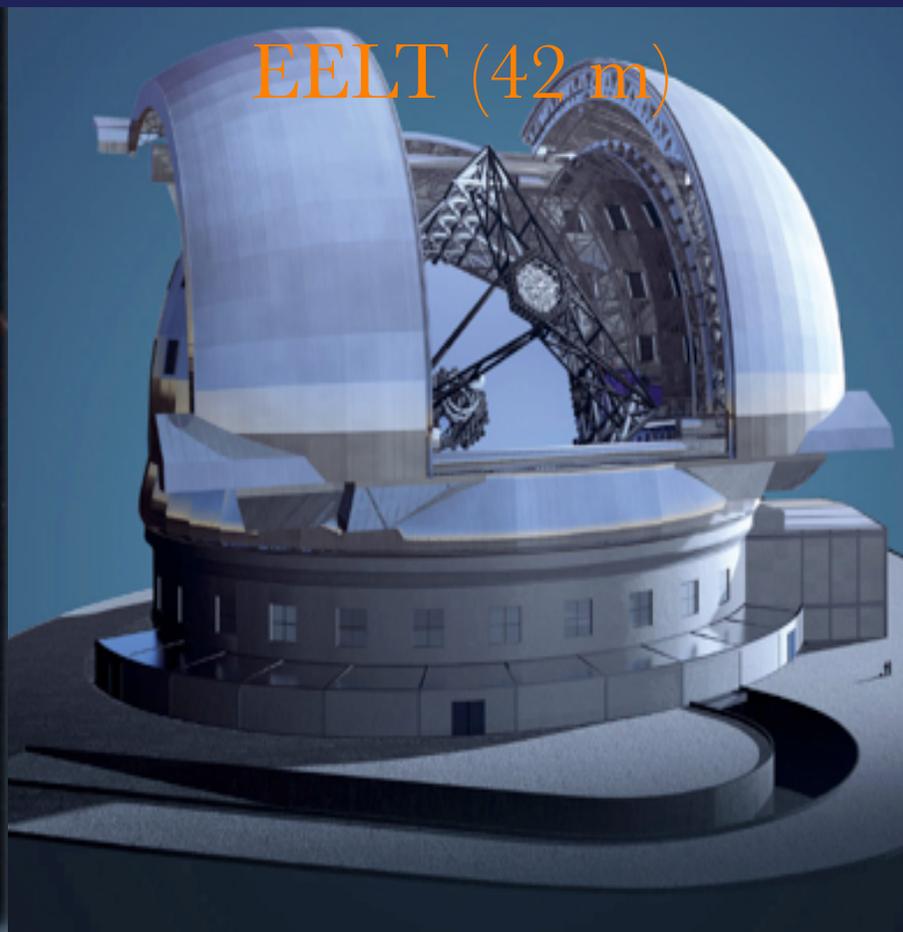
Perspectives (sol)

Télescopes de taille extrême (~2020)

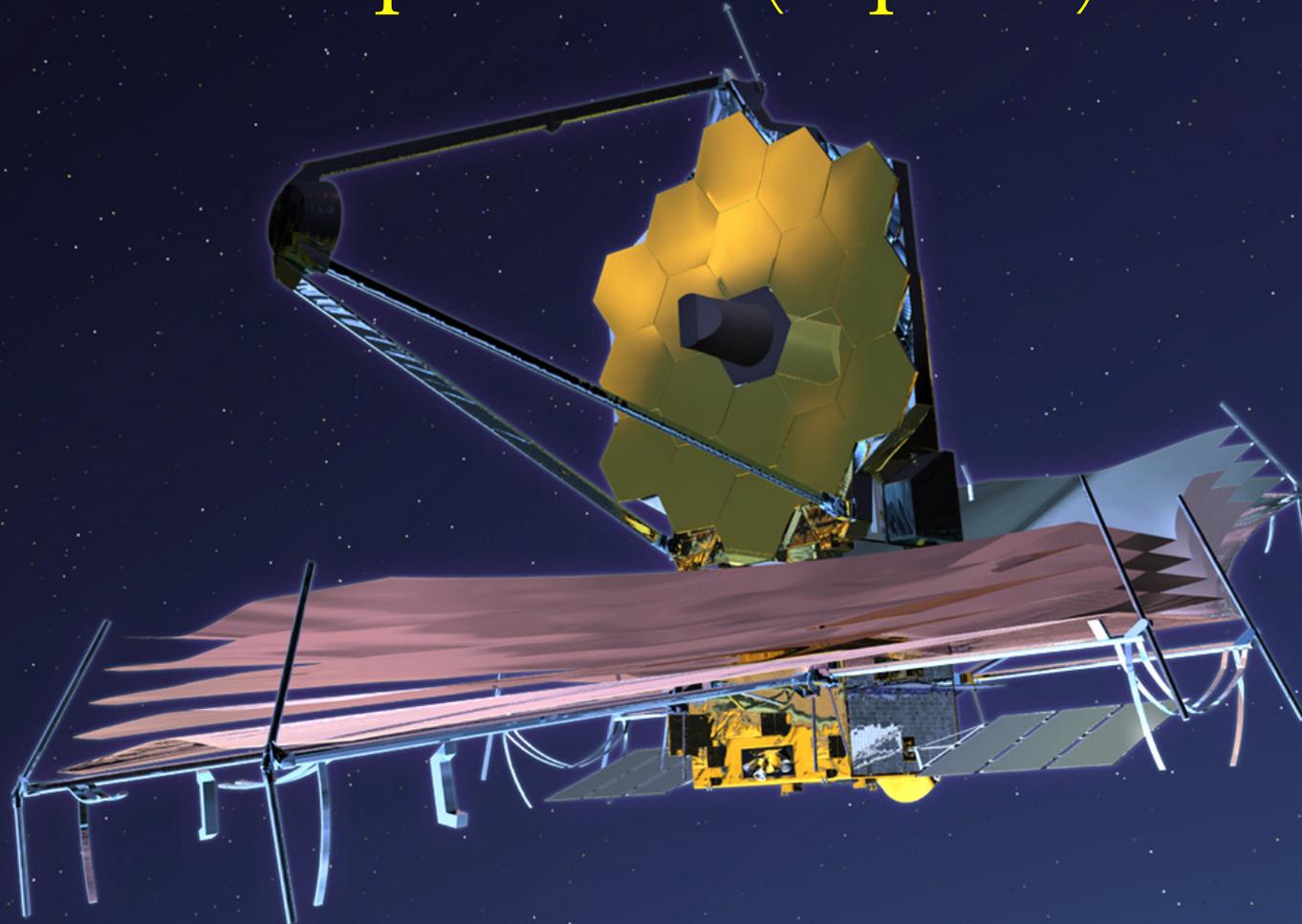
TMT (30 m)



EELT (42 m)

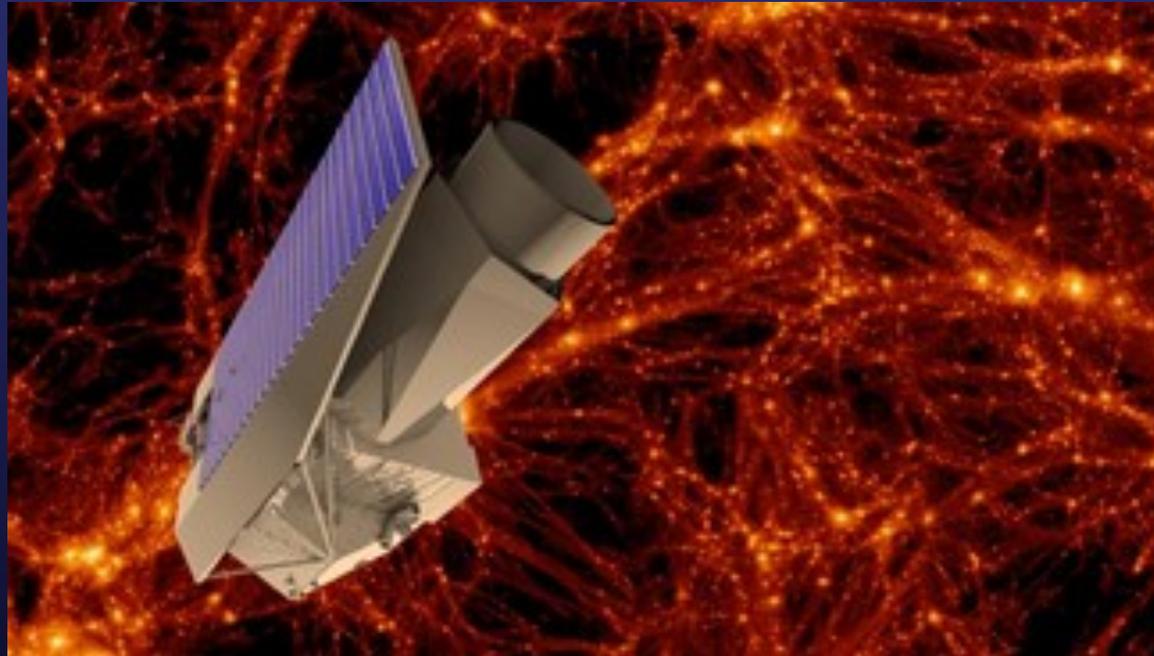


Perspectives (espace)



JWST - James Webb Space Telescope (~2020)

EUCLID et LSST (2018-2019)



EUCLID: Mission de ESA+NASA: 15000 deg² résolution 0.2".
LSST (USA+France+Chili): 20000 deg², résolution 0.6"

→ Prédiction de détection de milliers d'amas de galaxies.

<http://www.spacewarps.org>

SPACEWARPS

Classify

About

Spotter's Guide

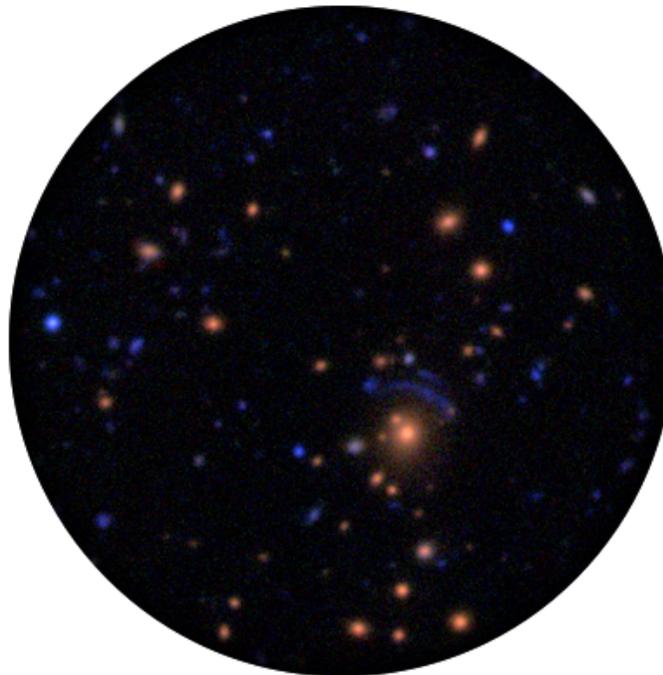
Discuss

Profile

FAQ

Imagine a galaxy, behind another galaxy.
Think you won't see it? Think again.

Massive galaxies warp space-time around themselves, bending light rays so that we can see around them. They're the Universe's own telescopes, but these gravitational lenses are very rare: we need your help to find them!



Help scientists identify these very rare astronomical objects.



Find out more about the lenses you might in Space Warps.



Take a look to see what's happening.

[Get Started](#)