



Les amas de galaxies

François Mernier

Modave, Pâques 2016

TABLE DES MATIERES

Introduction: Galaxies et grandeurs

Partie I: Amas et galaxies

Partie II: Au delà de l'optique

Partie III: Matière noire et cosmologie

Conclusions

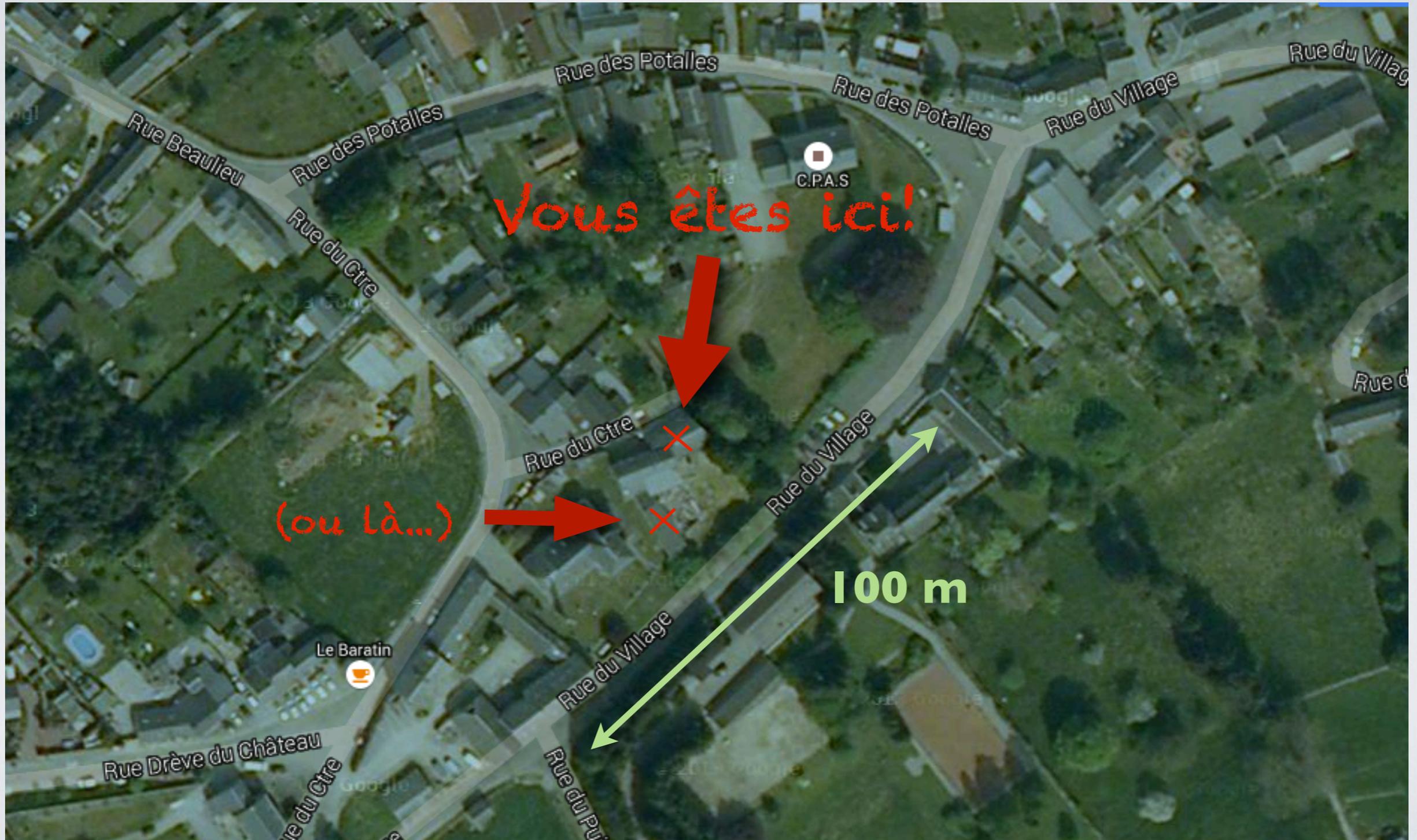


INTRODUCTION: GALAXIES ET GRANDEURS

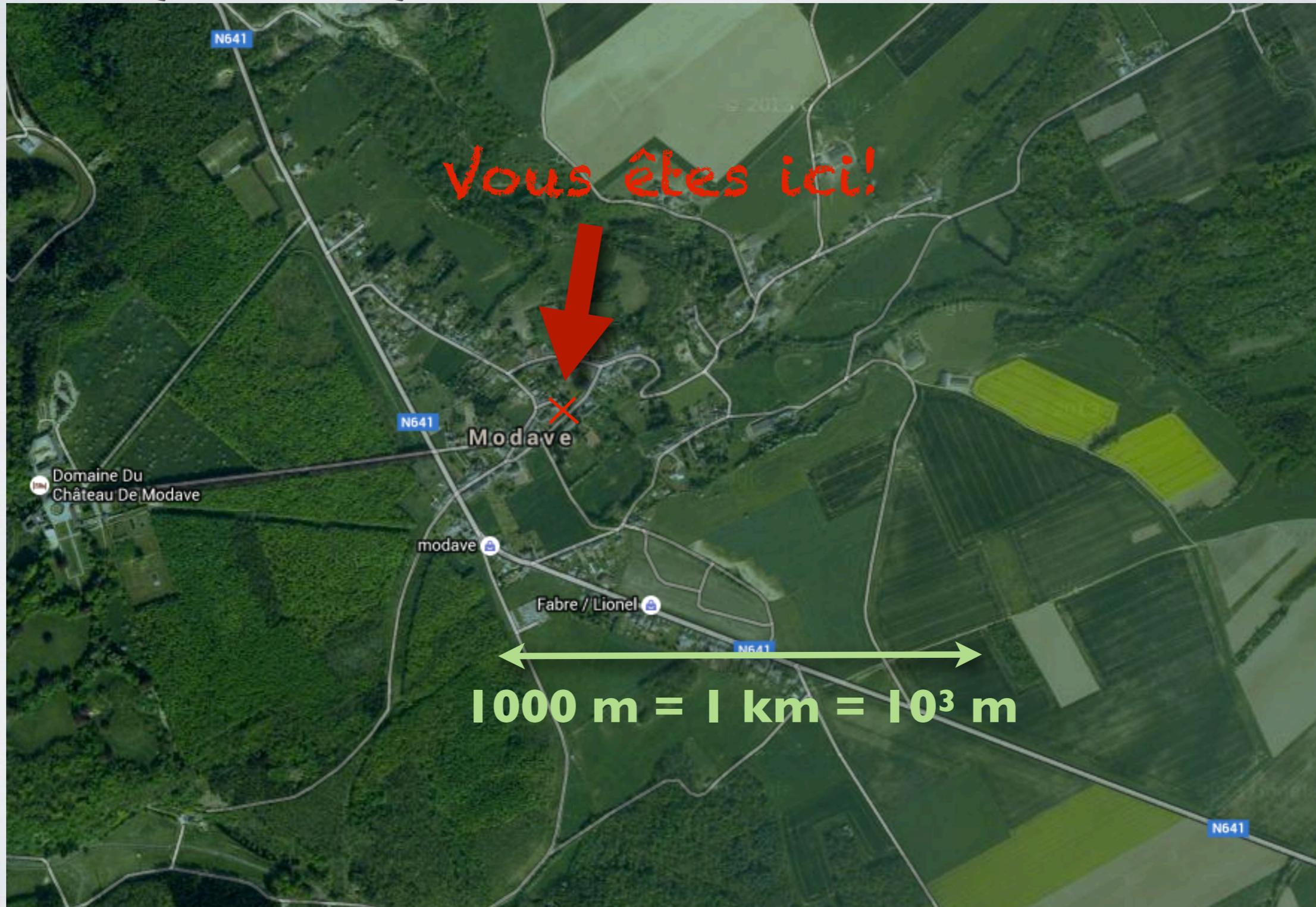
QUELQUES GRANDEURS...



QUELQUES GRANDEURS...



QUELQUES GRANDEURS...

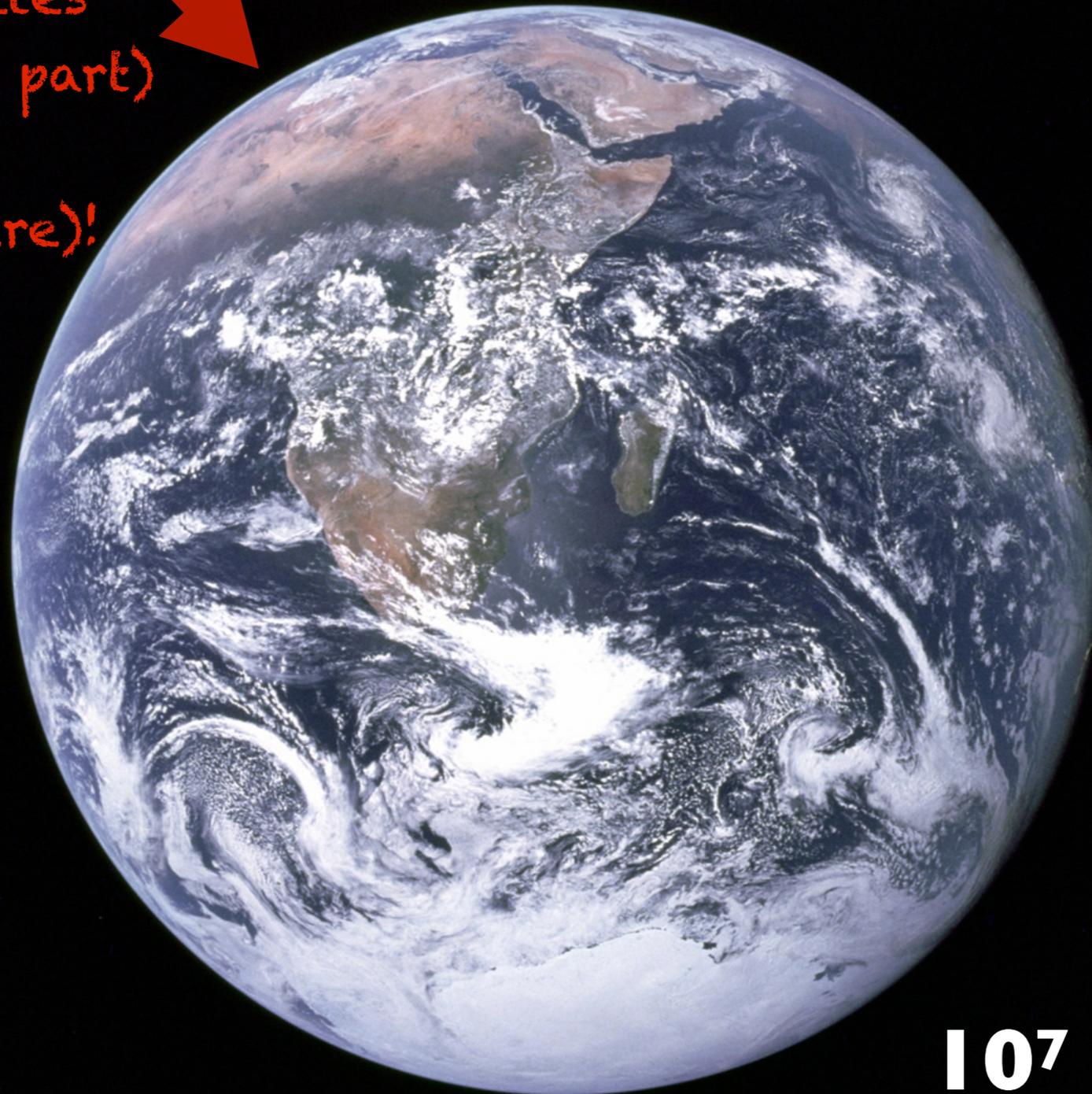


QUELQUES GRANDEURS...



QUELQUES GRANDEURS...

*Vous êtes
(quelque part)
ici
(derrière)!*



10^7 m

QUELQUES GRANDEURS...

Vous êtes ici!



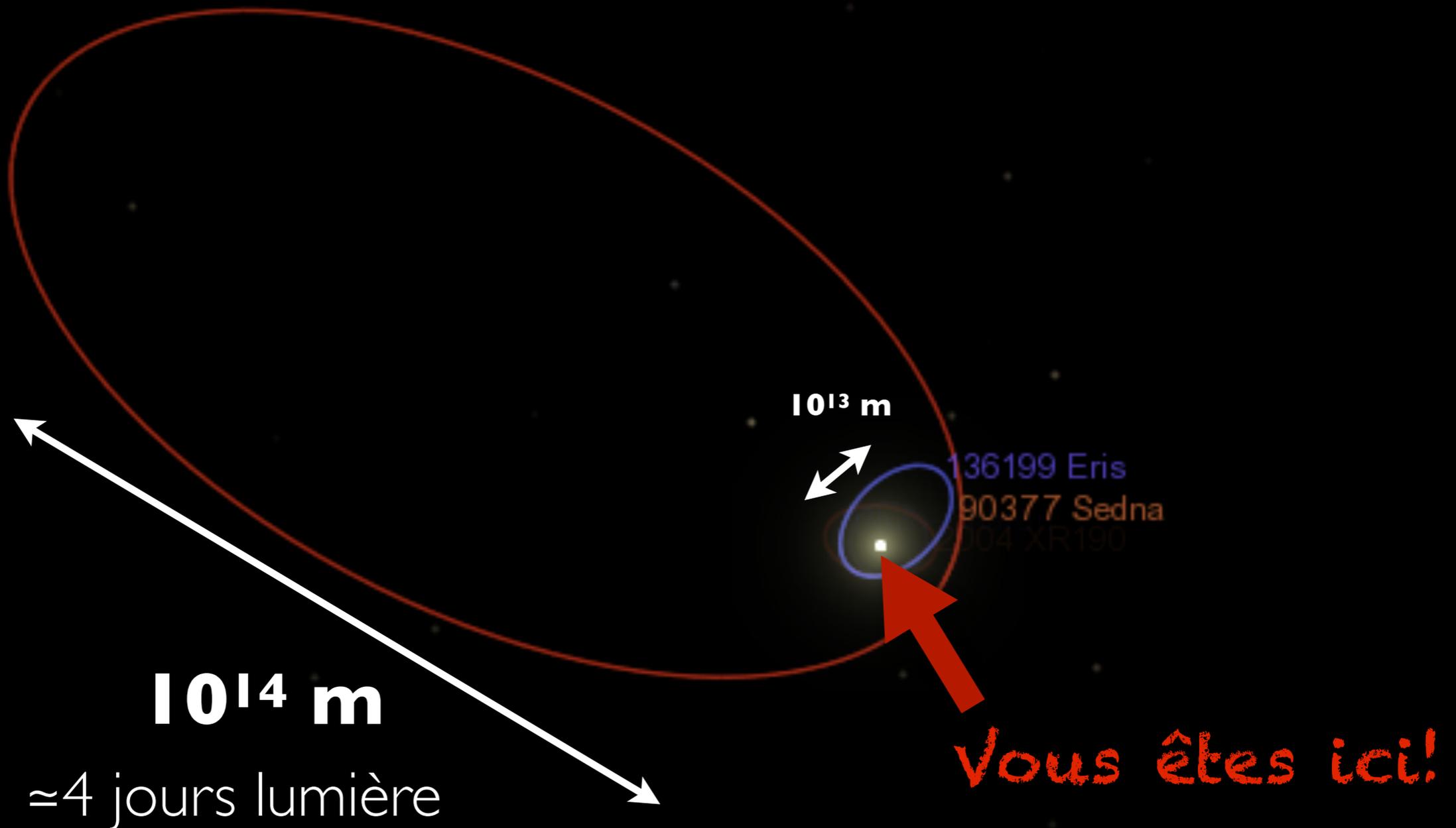
10^9 m

$\approx 3,3$ secondes lumière

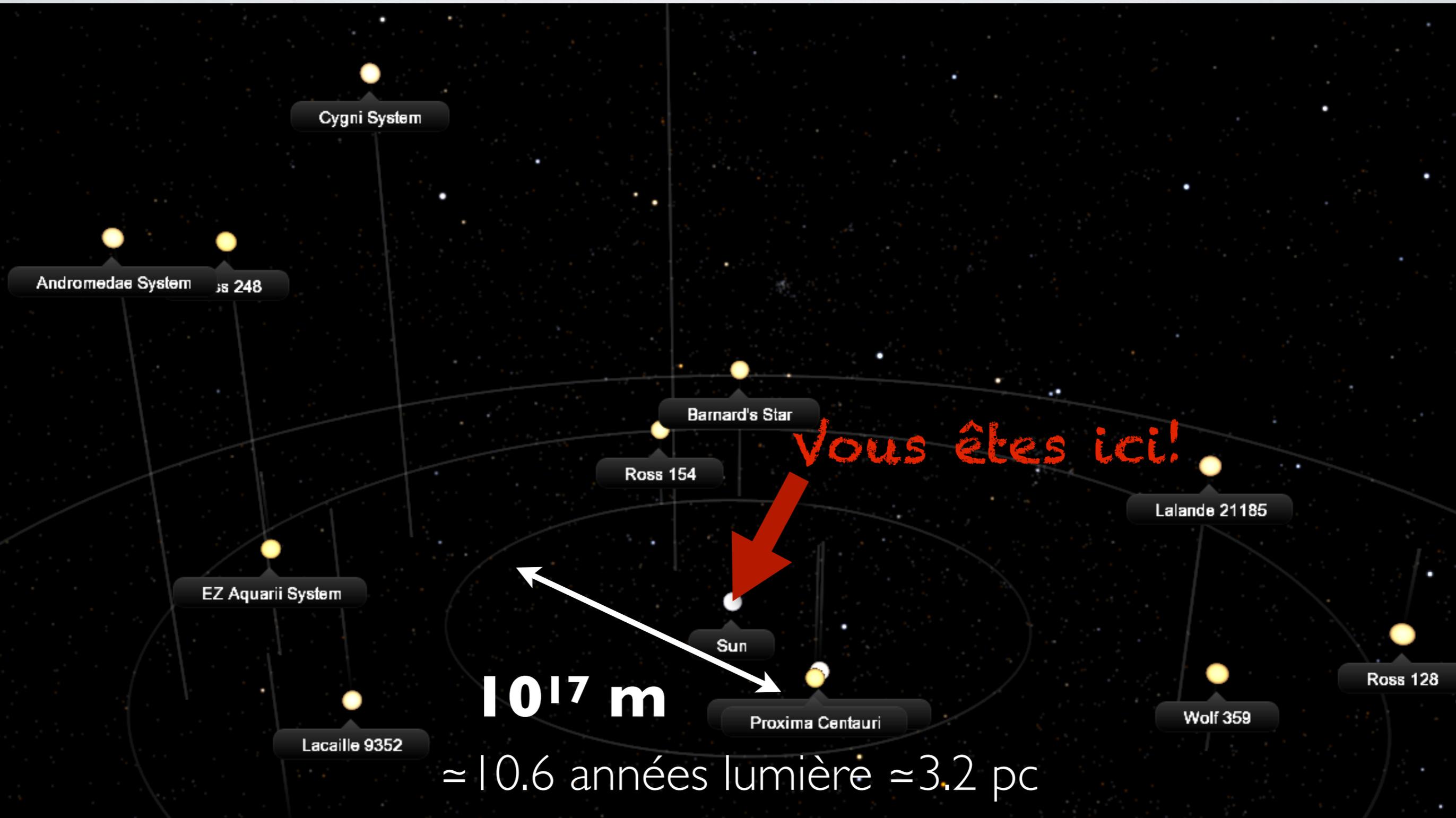
QUELQUES GRANDEURS...



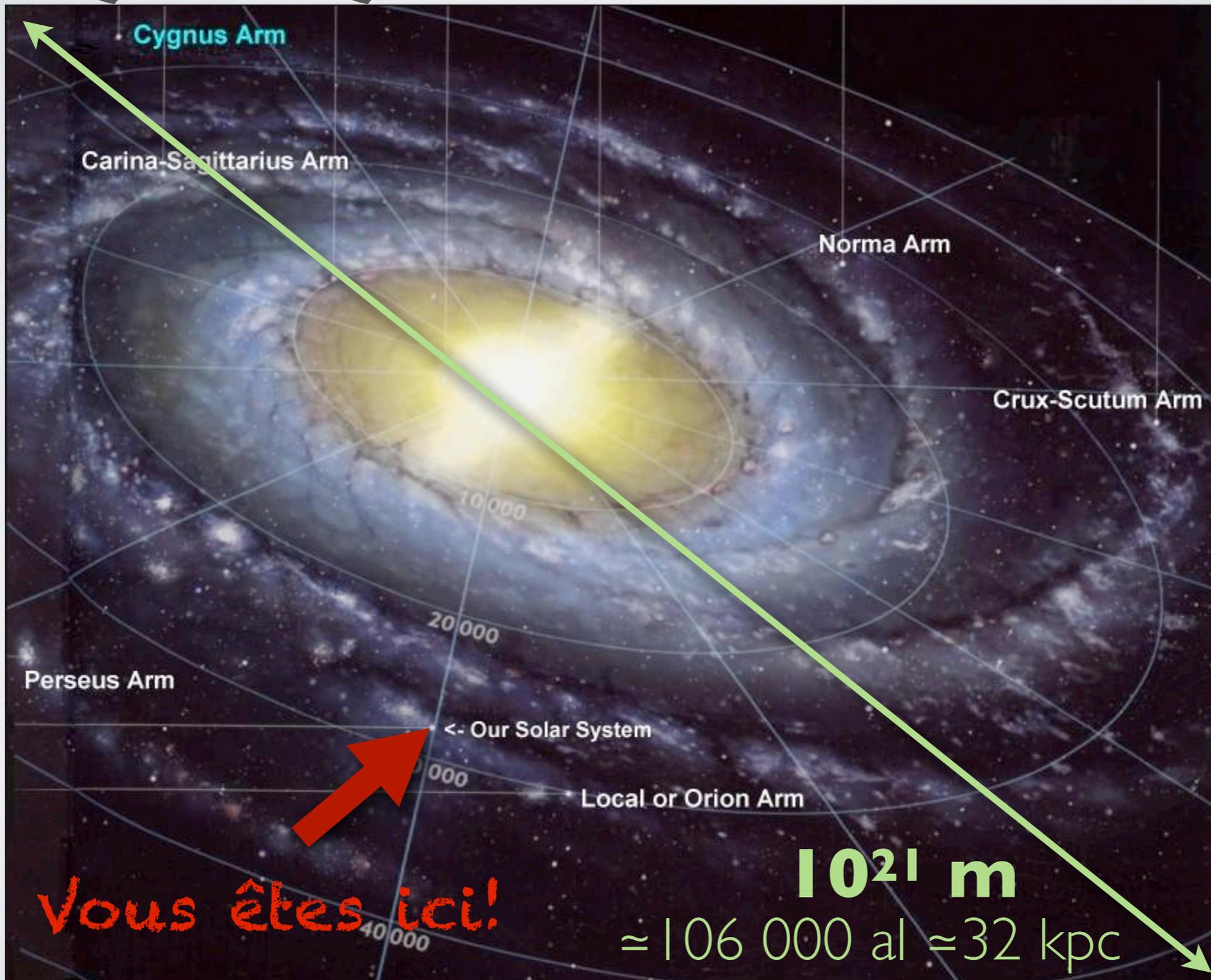
QUELQUES GRANDEURS...



QUELQUES GRANDEURS...

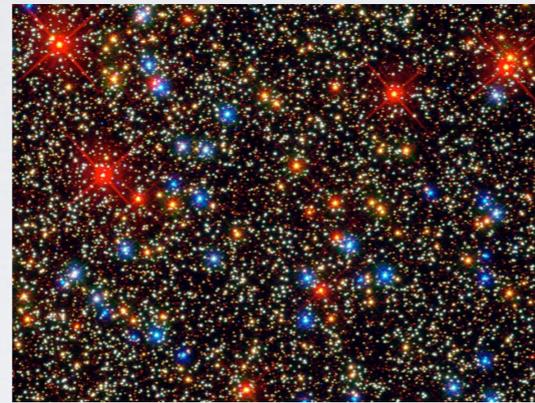


QUELQUES GRANDEURS...

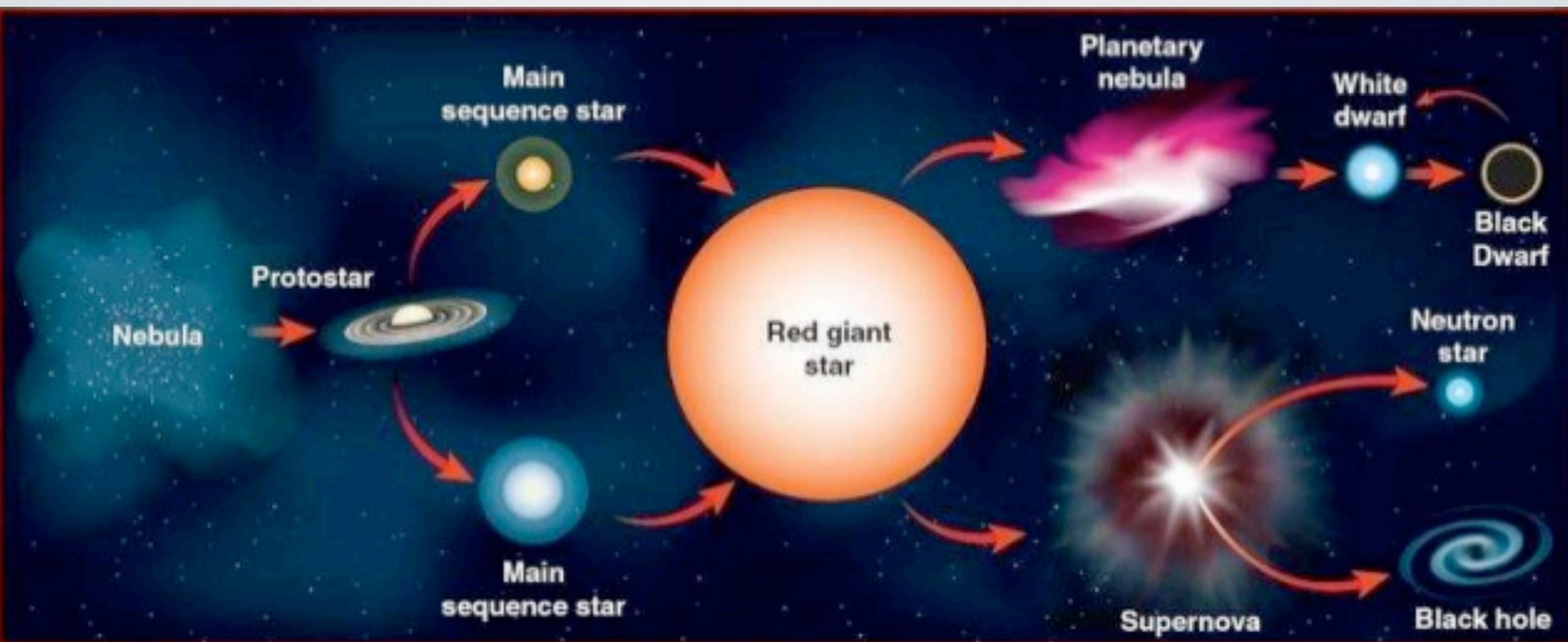


QU'Y A-T-IL DANS UNE GALAXIE?

- 1) ...des étoiles
- 2) ...du gaz
- 3) ...des poussières
- 4) ...et pleins d'autres choses (planètes, astéroïdes, humains, etc.)



PARENTHÈSE: FORMATION STELLAIRE



GALAXIES...

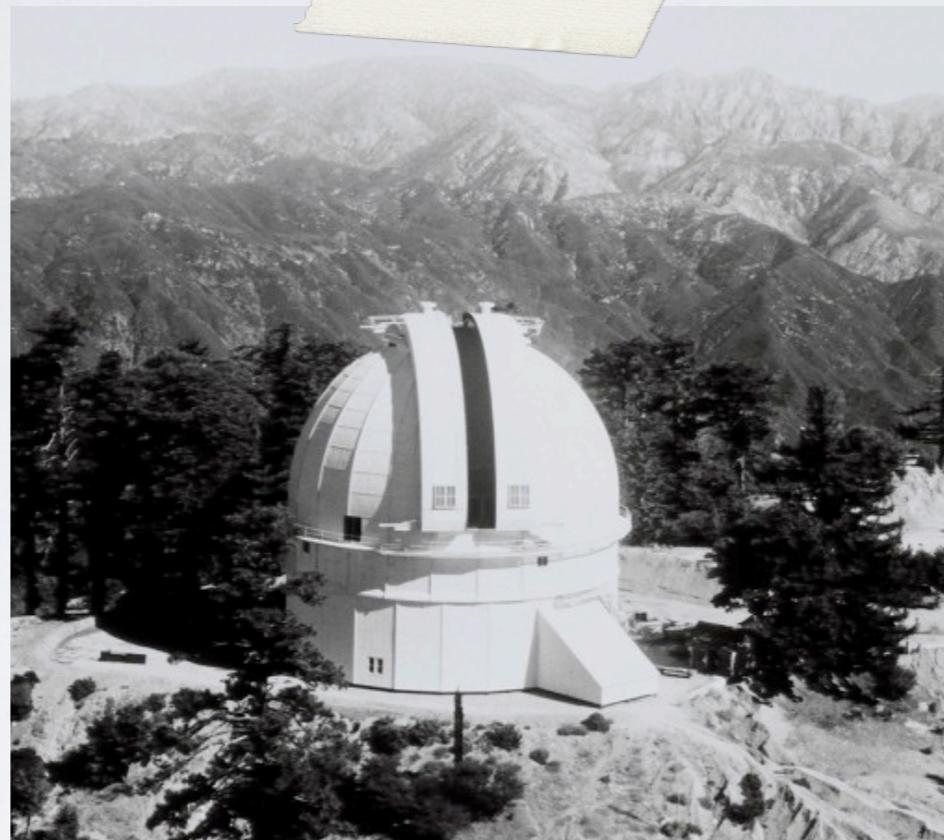
- Jusqu'au début du XXe siècle, l'Univers = Voie Lactée
- Mais... objets diffus de nature inconnue (“nébuleuses”) : intra- ou extra-galactiques ?



NGC 6822

GALAXIES...

- Edwin Hubble détermine la distance de ces “nébuleuses” en étudiant leurs Céphéides (étoiles variables)
- Relation période-distance:



Mount Wilson Observatory (Californie, USA)



Edwin P. Hubble

$$5 \log d = M_V + a \log P - b(M_V - M_I) + c$$

a, b et c = constantes à déterminer (calibration)

GALAXIES...

Résultats...

- Ces objets ont des distances plus grandes que la Voie Lactée !
- Il s'agit donc d'autres "Voies Lactées" ("Univers-îles") !



N.G.C. 6822, A REMOTE STELLAR SYSTEM¹

By EDWIN HUBBLE

ABSTRACT

A study of N.G.C. 6822.—The object is a very faint cluster of stars and nebulae, about $20' \times 10'$, resembling the Magellanic Clouds. Detailed investigations confirm the similarity and show that it extends to many structural features of these systems. Familiar relations such as those connecting periods and luminosities of Cepheids, luminosities of brightest stars involved in diffuse nebulae, and frequencies of the most luminous stars in the systems are consistent when applied to N.G.C. 6822, the first object definitely assigned to a region outside the galactic system.

Variable stars.—Eleven of the fifteen variables found in the cluster are Cepheids. A system of photographic magnitudes has been established from comparisons with the two nearest Selected Areas; and periods, light-curves, and magnitudes have been determined for the Cepheids. The periods range from 12 to 64 days and the magnitudes at maximum, from 17.45 to 19.05. The period-luminosity relation is conspicuous, and a comparison with Shapley's general curve in *Harvard Circular*, No. 280, indicates a distance for N.G.C. 6822 of 214,000 parsecs. $m-M = 21.65$.

Nebulae.—Five diffuse nebulae are involved in the cluster. The four brightest show emission spectra similar to those of the diffuse galactic nebulae. A radial velocity of $+25$ km/sec., uncorrected for solar motion, has been derived from one slit spectrogram of the brightest nebula. The mean diameter of the diffuse nebulae, about 40 parsecs, is comparable with those of the largest nebulae in other systems. In addition to the diffuse nebulae, several small objects are present which are probably non-galactic nebulae whose images are superposed on that of the cluster.

Star counts.—The distribution of apparent photographic magnitudes has been determined down to 19.4, corresponding to absolute magnitude -2.25 . The brightest stars in the system are of absolute magnitude about -5.8 . When a mean color-index of $+1.35$ is assigned to the cluster stars, their frequencies are very similar to those of the absolute visual magnitudes in the vicinity of the sun.

Luminosity and space density.—The surface brightness of the central core is about 22.1 photographic magnitudes per square second of arc. This value leads to a total absolute magnitude of -12.0 for the core, or -12.7 for the entire system, and to a space density of about 6.1 absolute magnitudes per cubic parsec for the core, or 8.8 for the entire system.

Cepheid criterion of distance.—Since the Cepheid criterion appears to function normally in N.G.C. 6822, its value as a means of exploring extragalactic space is considerably enhanced.

Influence of instruments on observations of nebulae.—A summary of the early observations of N.G.C. 6822 illustrates the confusion which may arise from disregarding the limitations of various types of instrument and emphasizes the caution required in discussing observations of nebulae.

N.G.C. 6822 is a faint irregular cluster of stars with several small

1925

EXTRA-GALACTIC NEBULAE¹

By EDWIN HUBBLE

ABSTRACT

This contribution gives the results of a statistical investigation of 400 extragalactic nebulae for which Hubble has determined total visual magnitudes. The list is complete for the brighter nebulae in the northern sky and is representative to 12.5 mag. or fainter.

The classification employed is based on the forms of the photographic images. About 3 per cent are irregular, but the remaining nebulae fall into a sequence of type forms characterized by rotational symmetry about dominating nuclei. The sequence is composed of two sections, the elliptical nebulae and the spirals, which merge into each other.

Luminosity relations.—The distribution of magnitudes appears to be uniform throughout the sequence. For each type or stage in the sequence, the total magnitudes are related to the logarithms of the maximum diameters by the formula,

$$m_T = C - 5 \log d,$$

where C varies progressively from type to type, indicating a variation in diameter for a given magnitude or vice versa. By applying corrections to C , the nebulae can be reduced to a standard type and then a single formula expresses the relation for all nebulae from the Magellanic Clouds to the faintest that can be classified. When the minor diameter is used, the value of C is approximately constant throughout the entire sequence. The coefficient of $\log d$ corresponds with the inverse-square law, which suggests that the nebulae are all of the same order of absolute luminosity and that apparent magnitudes are measures of distance. This hypothesis is supported by similar results for the nuclear magnitudes and the magnitudes of the brightest stars involved, and by the small range in luminosities among nebulae whose distances are already known.

Distances and absolute dimensions.—The mean absolute visual magnitude, as derived from the nebulae whose distances are known, is -15.2 . The statistical expression for the distance in parsecs is then

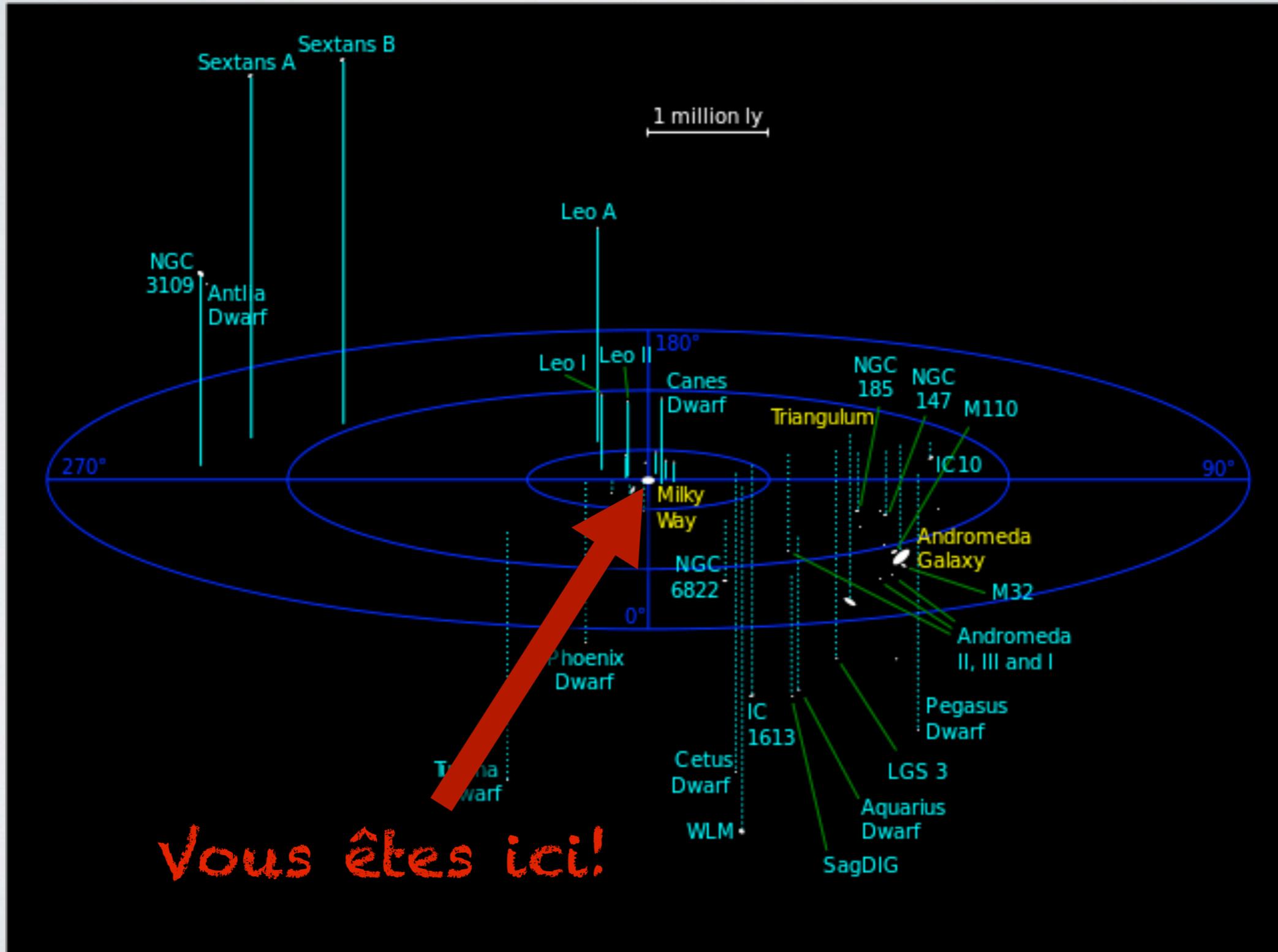
$$\log D = 4.04 + 0.2 m_T,$$

where m_T is the total apparent magnitude. This leads to mean values for absolute dimensions at various stages in the sequence of types. Masses appear to be of the order of $2.6 \times 10^8 \odot$.

Distribution and density of space.—To apparent magnitude about 16.7, corresponding to an exposure of one hour on fast plates with the 60-inch reflector, the numbers of nebulae to various limits of total magnitude vary directly with the volumes of space represented by the limits. This indicates an approximately uniform density of space, of the order of one nebula per 10^{22} cubic parsecs or 1.5×10^{-34} in C.G.S. units. The corresponding radius of curvature of the finite universe of general relativity is of the order of 2.7×10^{22} parsecs, or about 600 times the distance at which normal nebulae

1926

LE GROUPE LOCAL



SEQUENCE DE HUBBLE

Hubble's Galaxy Classification Scheme

+ différentes tailles !!

gE > E > cE > dE



E0

E3

E6

+ cD



S0

Sa

Sb

Sc

Irr

SB0

SBa

SBb

SBc

GRAND NUAGE DE MAGELLAN

Irr

PETIT NUAGE DE MAGELLAN

Irr

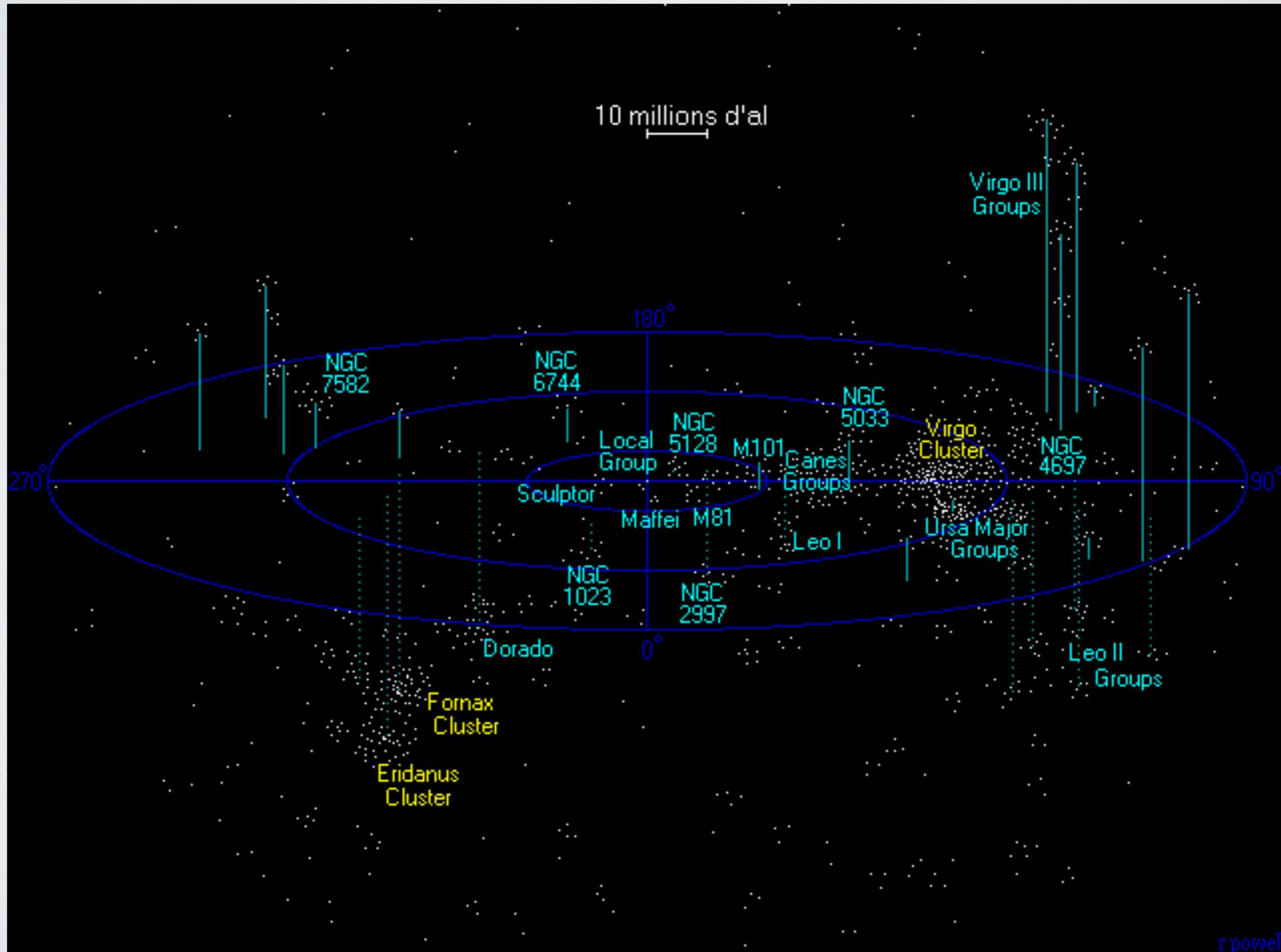
GALAXIE D'ANDROMÈDE (M31)

Sb

GALAXIE DU TRIANGLE (M33)

Sc

LE SUPERAMAS DE LA VIERGE



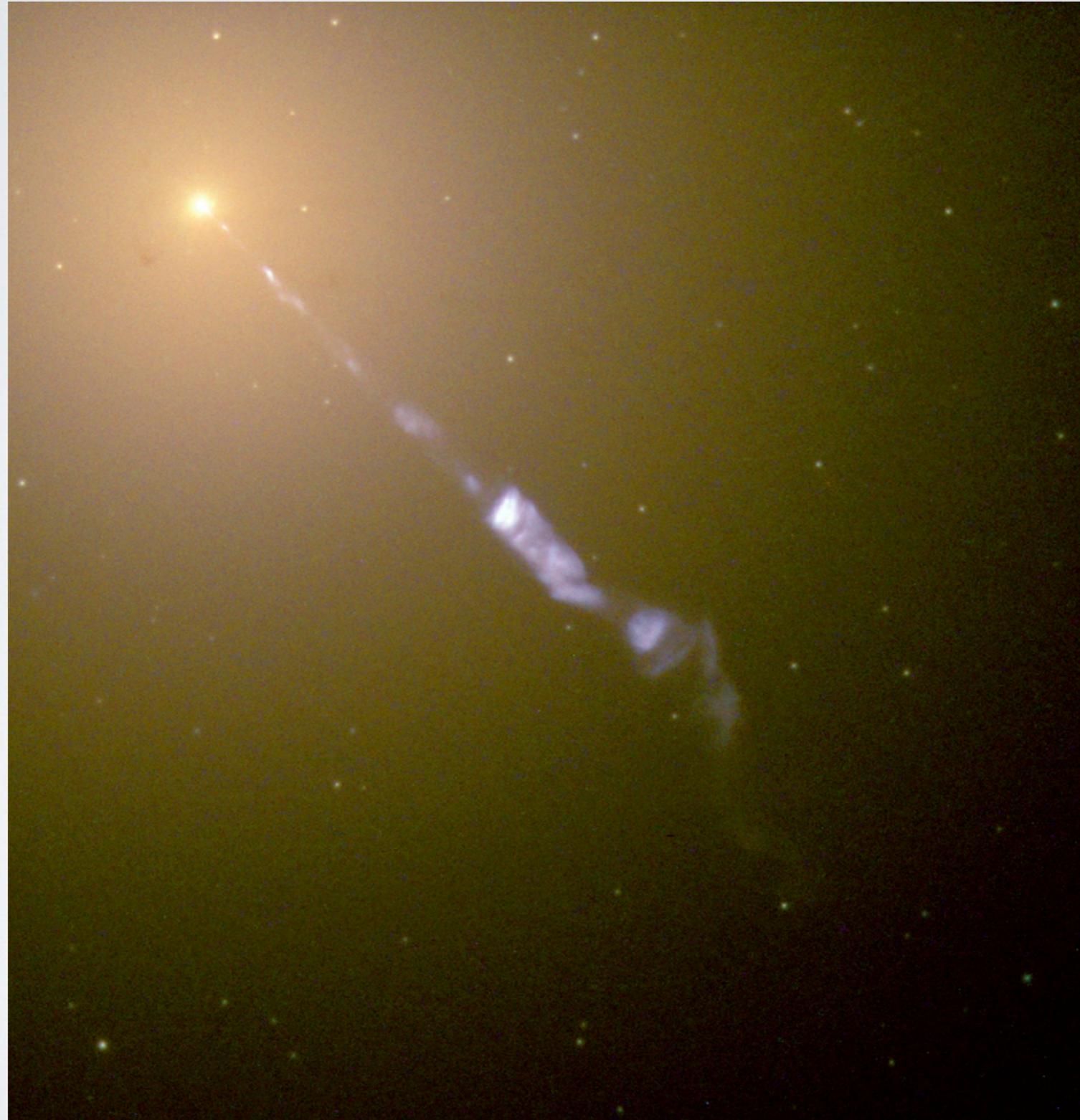
r powell

L'AMAS DE LA VIERGE

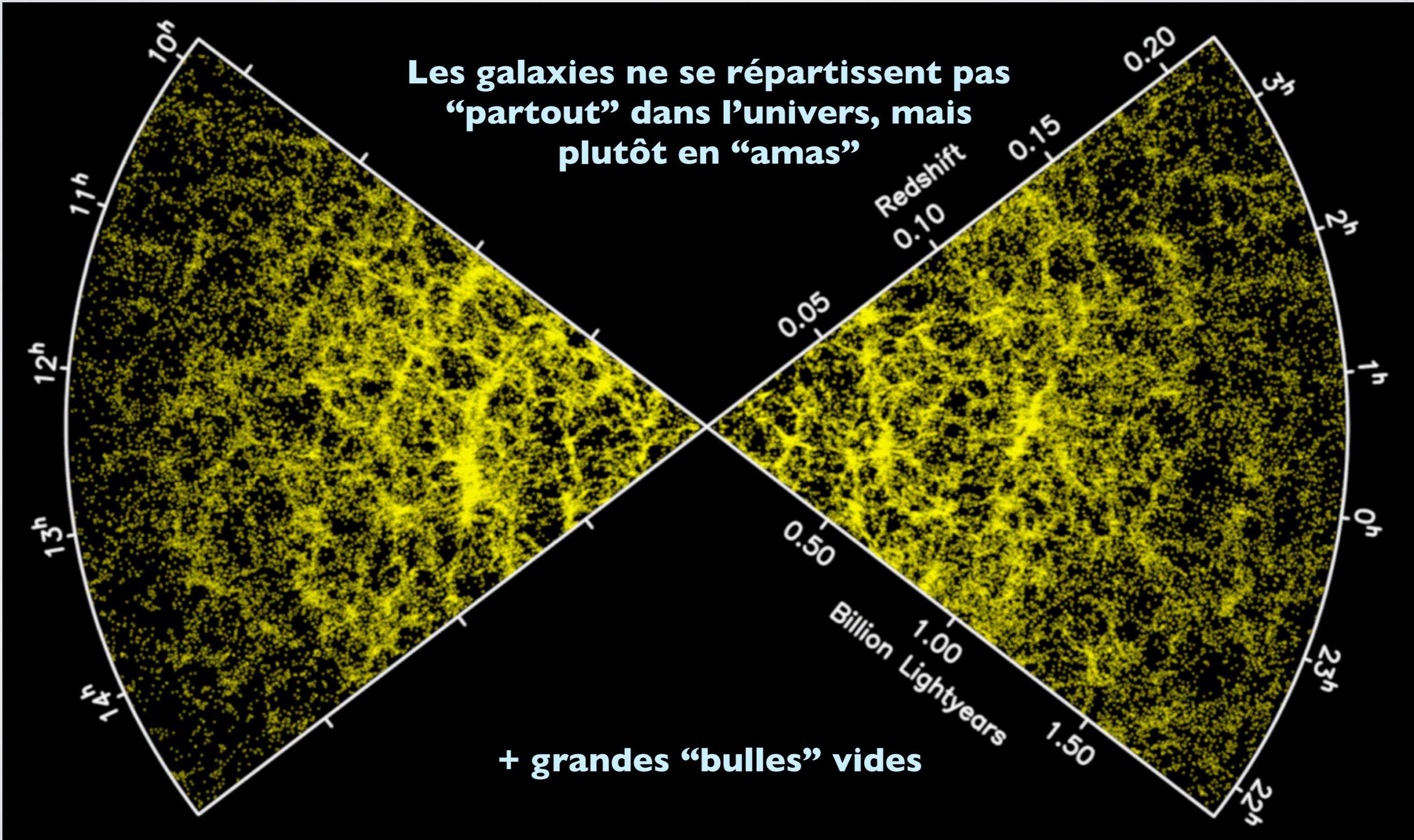
M87

cD

M87



UN UNIVERS VRAIMENT HOMOGÈNE ?



PARTIE I: AMAS ET GALAXIES

VOUS AVEZ DIT AMAS DE GALAXIES?

- Amas = surdensité de galaxies dans un angle solide donné
- Si on classe les galaxies par brillance décroissante:
 - ⇒ M_k = magnitude de la $k^{\text{ème}}$ plus brillante galaxie de l'amas



George O. Abell

- **Critère d'Abell (1958):** Un amas de galaxies est une concentration de

✓ plus de 50 galaxies de magnitude M compris entre $M_3 < M < M_3+2$

✓ localisées dans un cercle de rayon angulaire $\theta_a < 1.7'/z$

(z est estimé par rapport à la galaxie M_{10} , supposée de magnitude identique dans tous les amas)

~4000
amas

SEQUENCE DE HUBBLE

Hubble's Galaxy Classification Scheme

+ différentes tailles !!

gE > E > cE > dE



E0

E3

E6

+ cD



S0

Sa

Sb

Sc

Irr

SB0

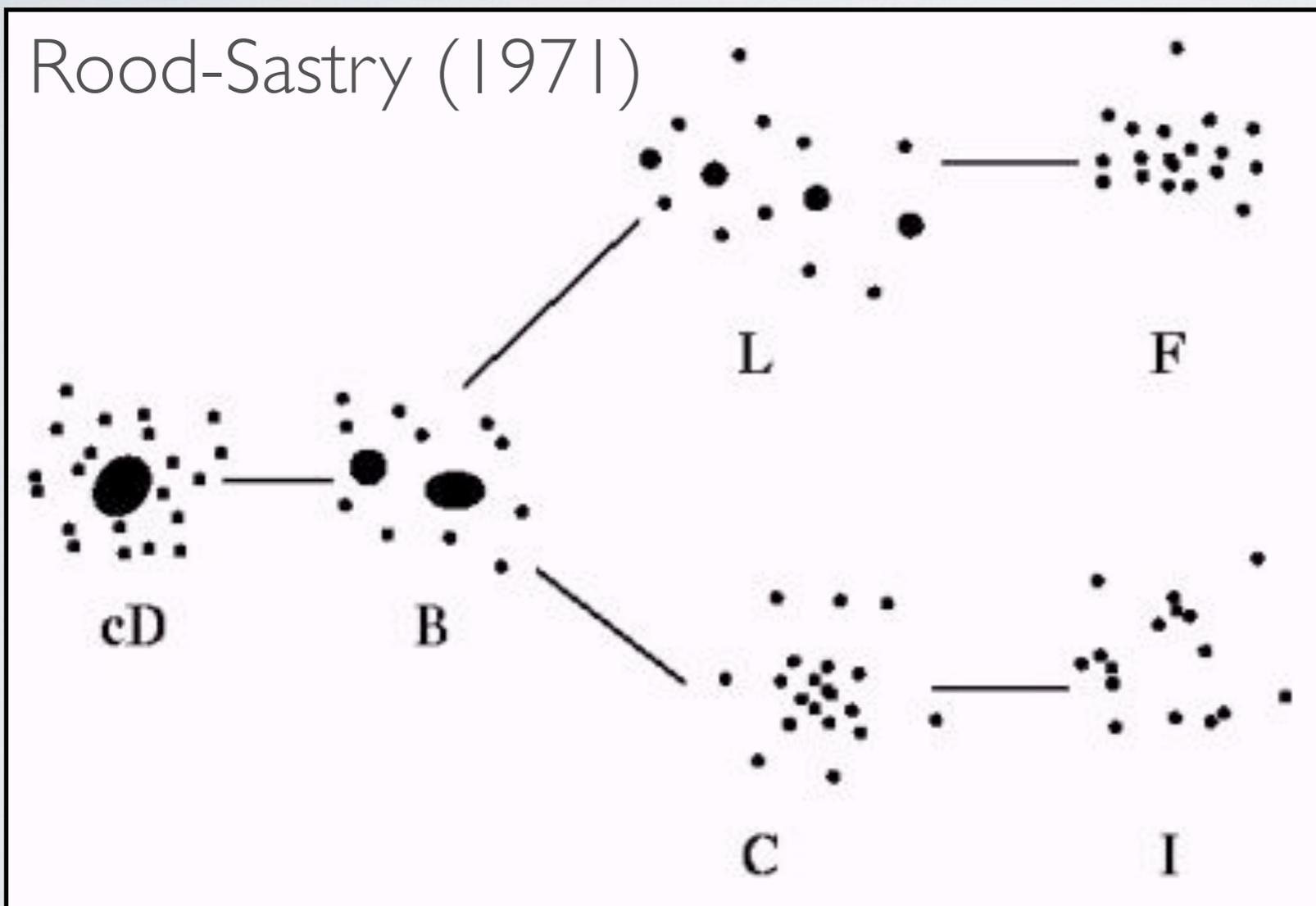
SBa

SBb

SBc

CLASSIFICATION D'AMAS

Rood-Sastry (1971)



- **cD**: galaxie **cD** au centre
- **B**: système **B**inaire de galaxies au centre
- **L**: disposition **L**inéaire des plus massives galaxies
- **C**: **C**entre avec beaucoup de galaxies
- **F**: système oblate ou aplati (**F**lattened)
- **I**: système **I**rrégulier

QUELQUES EXEMPLES...

$z=0.077$

| 138 000 000 a.l.

**Abell 2029
(cD)**

QUELQUES EXEMPLES...

$z=0.030$

429 000 000 a.l.

Abell 2199
(cD)

QUELQUES EXEMPLES...

$z=0.046$

665 000 000 a.l.

**Abell 4059
(cD)**

QUELQUES EXEMPLES...

$z=0.023$

327 000 000 a.l.

**Abell 1656
(B)**

= amas de "Coma"
("Chevelure de Bérénice")

QUELQUES EXEMPLES...

$z=0.018$

255 000 000 a.l.

**Abell 426
(L)**

= amas de Persée

QUELQUES EXEMPLES...

$z=0.072$

| 060 000 000 a.l.

Abell 2065
(C)

QUELQUES EXEMPLES...

$z=0.055$

800 000 000 a.l.

Abell 1060
(C)

= amas de l'Hydre

QUELQUES EXEMPLES...

$z=0.022$

313 000 000 a.l.

Abell 1367
(F)

= amas du Lion

QUELQUES EXEMPLES...

$z=0.037$

532 000 000 a.l.

Abell 2151
(I)

= amas d'Hercules

DYNAMIQUE

Chose frappante...

- Les galaxies les plus massives
 1. sont au centre des amas
 2. sont (presque) toutes des elliptiques
 3. sont plus “rouges” que les galaxies (spiraales) environnantes

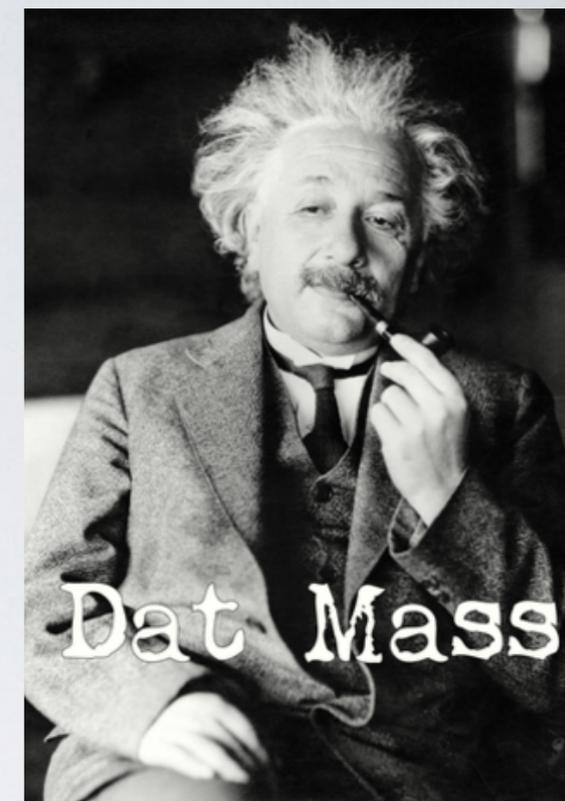


DYNAMIQUE

- Masse d'une galaxie similaire à la Voie Lactée:

100 milliards
 M_{\odot}

- À l'échelle d'un amas, potentiel gravitationnel **énorme** !
- Les galaxies s'attirent entre elles, surtout au centre de l'amas (pot. grav. >>>)
- Elles interagissent et peuvent même entrer en collision
 - Les étoiles, trop espacées, n'entrent (presque) jamais en collision
 - Les régions gazeuses, elles, collisionnent et forment de nouvelles étoiles (chaudes et massives)



DYNAMIQUE

Galaxies des antennes

DYNAMIQUE

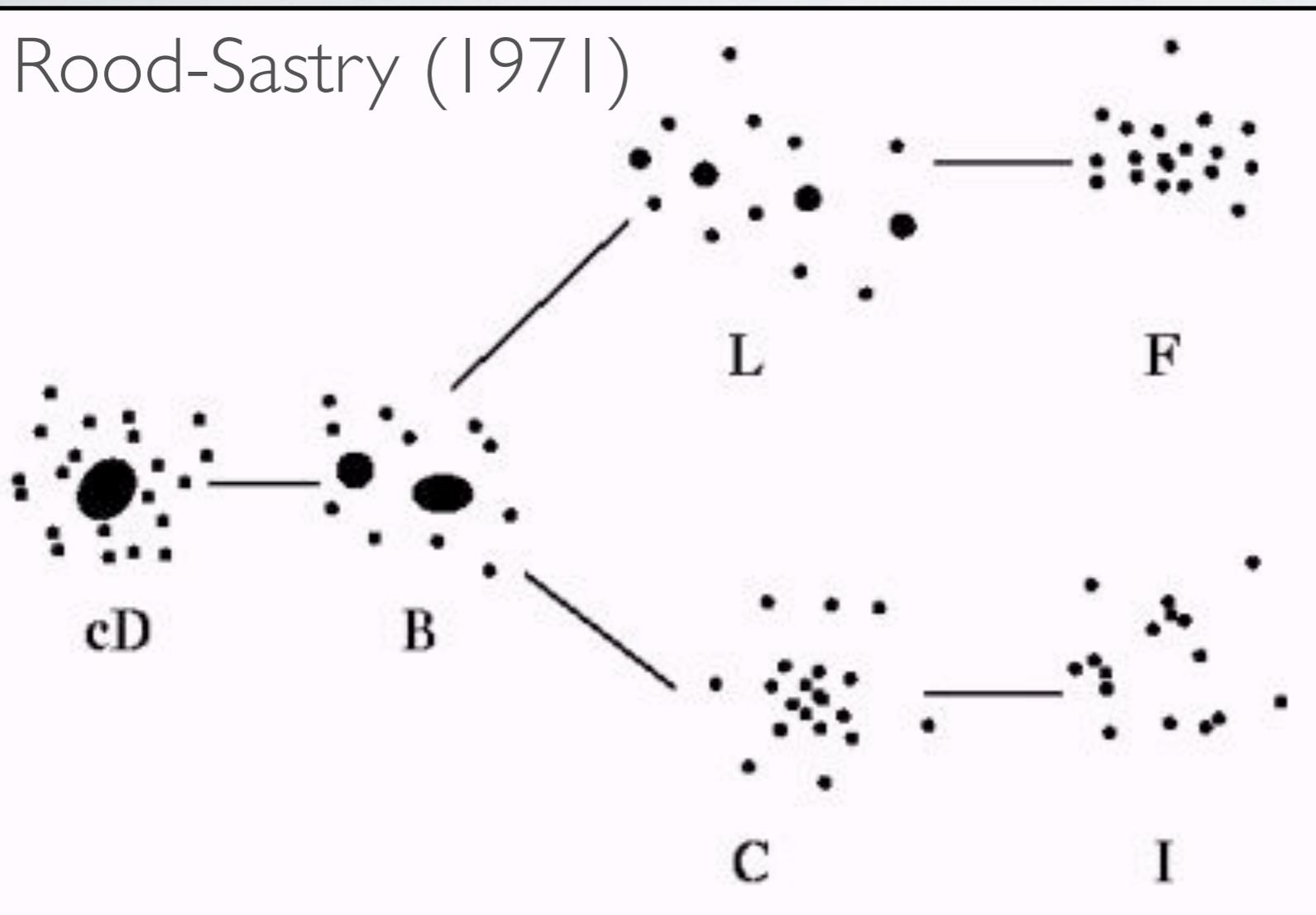
- Après collision, il ne reste plus qu'une galaxie (plus massive)...



• **...elliptique, et “rouge” !!**

DYNAMIQUE

Rood-Sastry (1971)



Conclusion:

- Les galaxies dans un amas ont tendance à s'agglutiner au centre
- Elles interagissent (et collisionnent) souvent
- Au centre : galaxie massive elliptique (cD) "mange" les galaxies plus petites
- Explique la structure en "filaments" que l'on voit à grande échelle

DYNAMIQUE

Conclusion:

- Les galaxies dans un amas ont tendance à s'agglutiner au centre
- Elles interagissent (et collisionnent) souvent
- Au centre : galaxie massive elliptique (cD) "mange" les galaxies plus petites
- Explique la structure en "filaments" que l'on voit à grande échelle

TEMPS DE TRAVERSEE

- Pour un amas de taille (ou diamètre) D et une dispersion des vitesses des galaxies σ :

$$t_{\text{cross}} \sim D/\sigma$$

- Estimons le temps de traversée pour l'amas de l'Hydre !

- **Hypothèses:**

- Redshift $z \approx 0.055$
- Distance $d \approx 800\,000\,000$ a.l.
- Rayon angulaire $\theta_a \approx 1.7'/z$
- Dispersion des vitesses $\sigma \approx 1000$ km/s (typique)

- **Réponse:** $t_{\text{cross}} \sim 4.3$ milliards d'années

- Âge de notre Univers: 13.7 milliards d'années !
- Les galaxies n'ont pu parcourir que max. ~ 3 "orbites" !
- Les amas ne sont jamais vraiment relaxés (au contraire de la Terre autour du Soleil par ex.), mais sont en perpétuels mouvements... et évolutions !



Hydre





PARTIE II: AU DELÀ DE L'OPTIQUE

RAPPEL: LONGUEURS D'ONDE

INTRODUCTION TO THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

When you tune your radio, watch TV, send a text message, or pop popcorn in a microwave oven, you are using electromagnetic energy. You depend on this energy every hour of every day. Without it, the world you know could not exist.

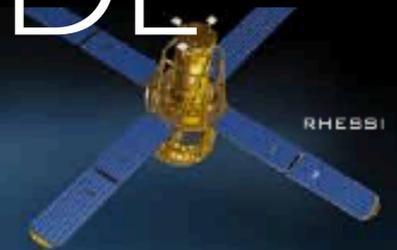
Electromagnetic energy travels in waves and spans a broad spectrum from very long radio waves to very short gamma rays. The human eye can only detect only a small portion of this spectrum called visible light. A radio detects a different portion of the spectrum, and an x ray machine uses yet another portion. NASA's scientific instruments use the full range of the electromagnetic spectrum to study the Earth, the solar system, and the universe beyond.

OUR PROTECTIVE ATMOSPHERE

Our Sun is a source of energy across the full spectrum, and its electromagnetic radiation bombards our atmosphere constantly. However, the Earth's atmosphere protects us from exposure to a range of higher energy waves that can be harmful to life. Gamma rays, x rays, and some ultraviolet waves are "ionizing," meaning these waves have such a high energy that they can knock electrons out of atoms. Exposure to these high energy waves can alter atoms and molecules and cause damage to cells in organic matter. These changes to cells can sometimes be helpful, as when radiation is used to kill cancer cells, and other times not, as when we get sunburned.

Seeing Beyond our Atmosphere

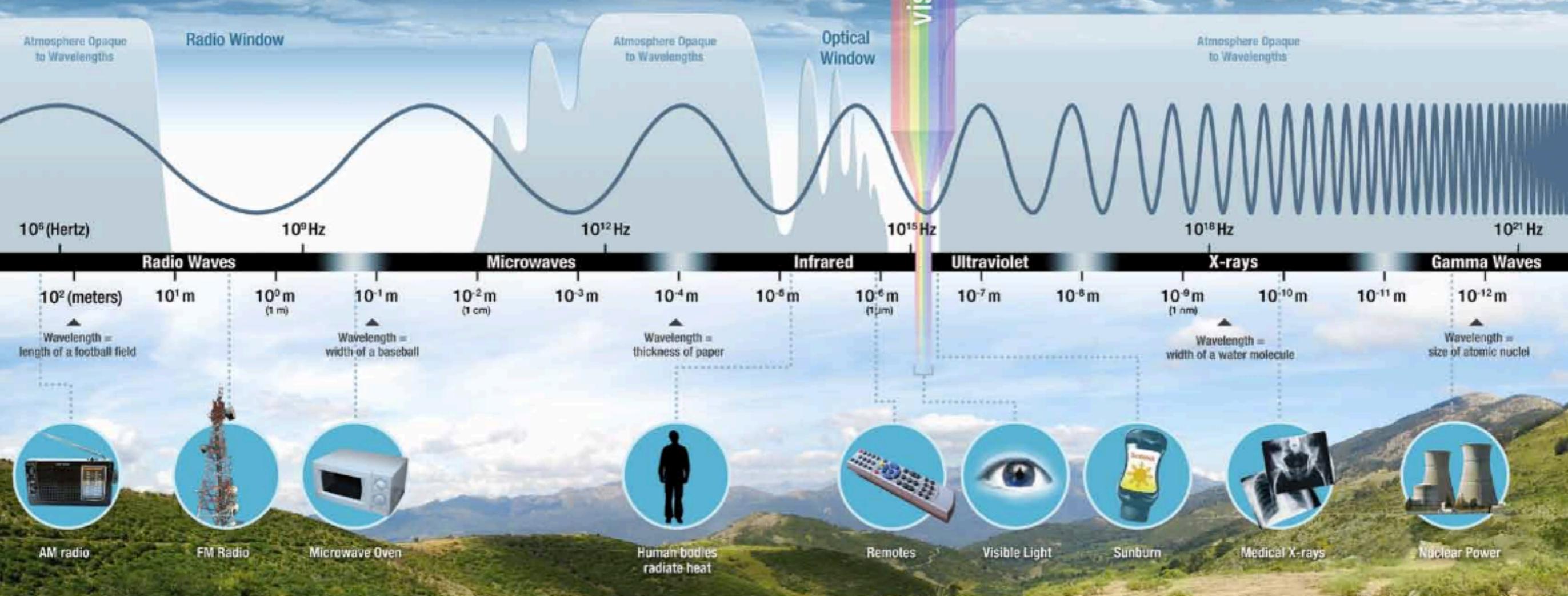
NASA spacecraft, such as RHESSI, provide scientists with a unique vantage point, helping them "see" at higher-energy wavelengths that are blocked by the Earth's protective atmosphere.



ATMOSPHERIC WINDOWS

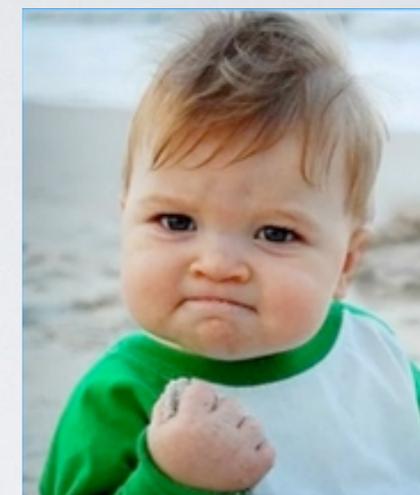
Electromagnetic radiation is reflected or absorbed mainly by several gases in the Earth's atmosphere, among the most important being water vapor, carbon dioxide, and ozone. Some radiation, such as visible light, largely passes (is transmitted) through the atmosphere. These regions of the spectrum with wavelengths that can pass through the atmosphere are referred to as "atmospheric windows." Some microwaves can even pass through clouds, which make them the best wavelength for transmitting satellite communication signals.

While our atmosphere is essential to protecting life on Earth and keeping the planet habitable, it is not very helpful when it comes to studying sources of high energy radiation in space. Instruments have to be positioned above Earth's energy absorbing atmosphere to "see" higher energy and even some lower energy light sources such as quasars.



LES AMAS DE GALAXIES EN RAYONS X

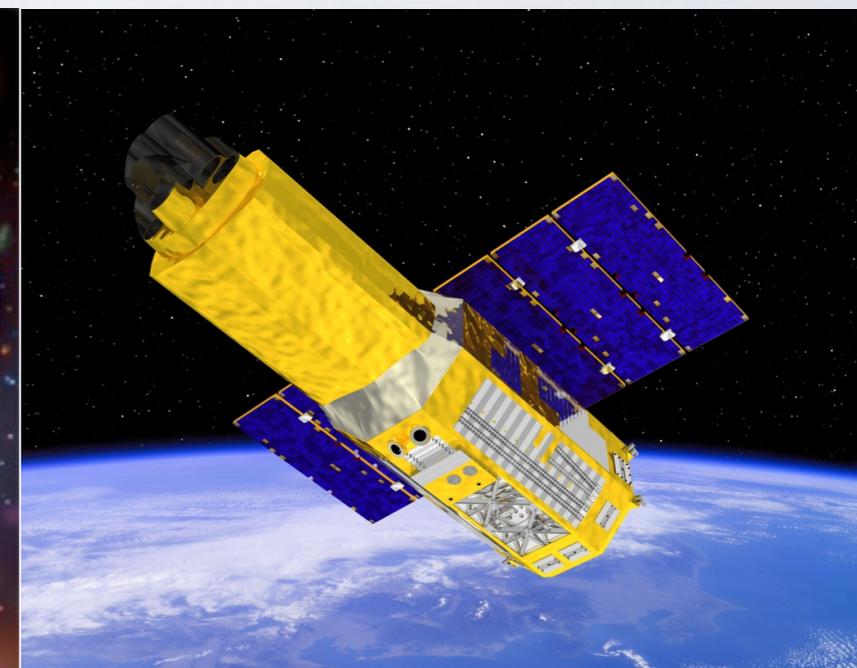
- Les rayons X ne traversent pas l'atmosphère (heureusement !)
- On doit donc envoyer des observatoires à rayons X dans l'espace (=satellites)



XMM-Newton



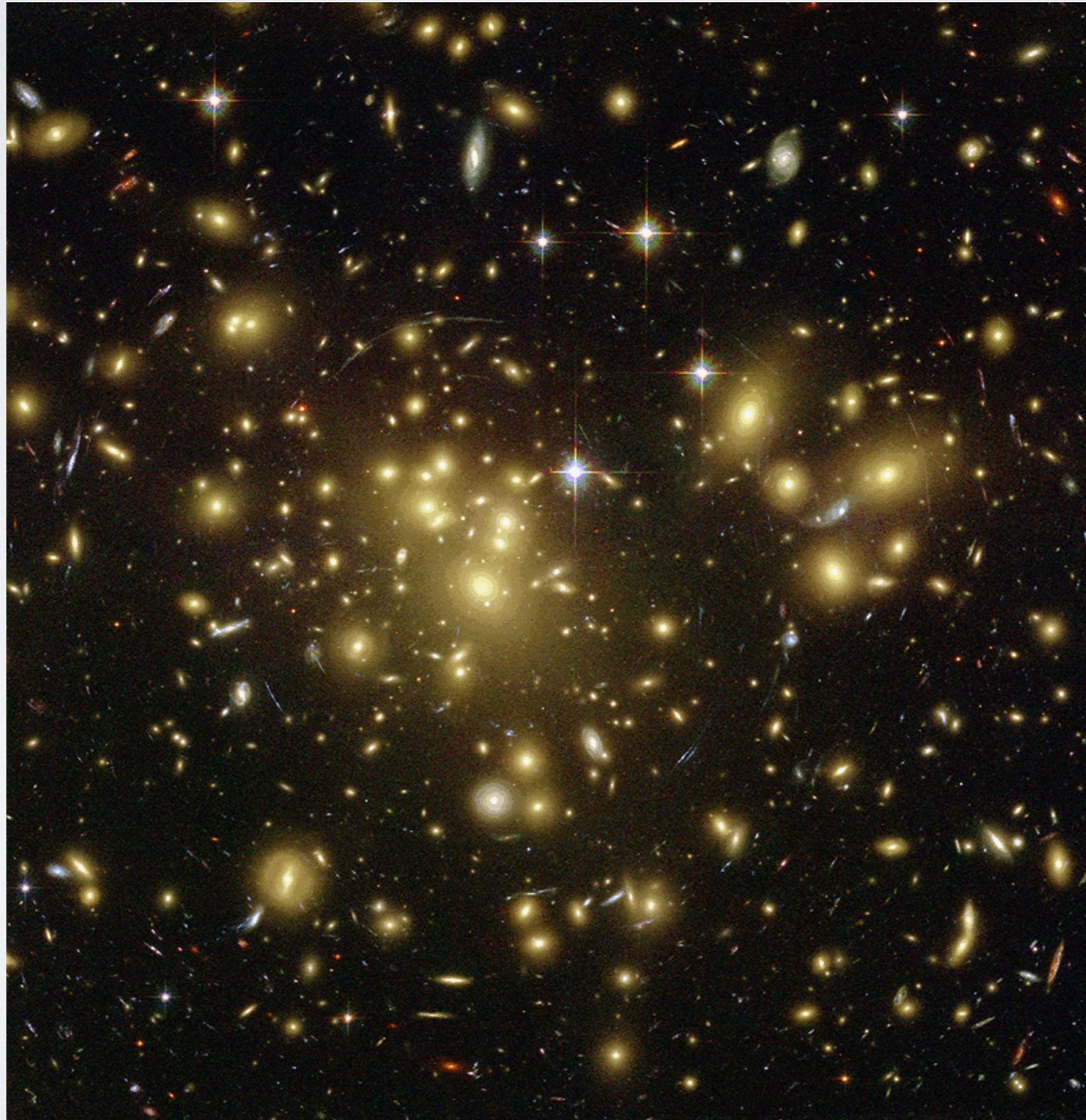
Chandra



Suzaku



LES AMAS DE GALAXIES EN RAYONS X



Optique

Abell 1689

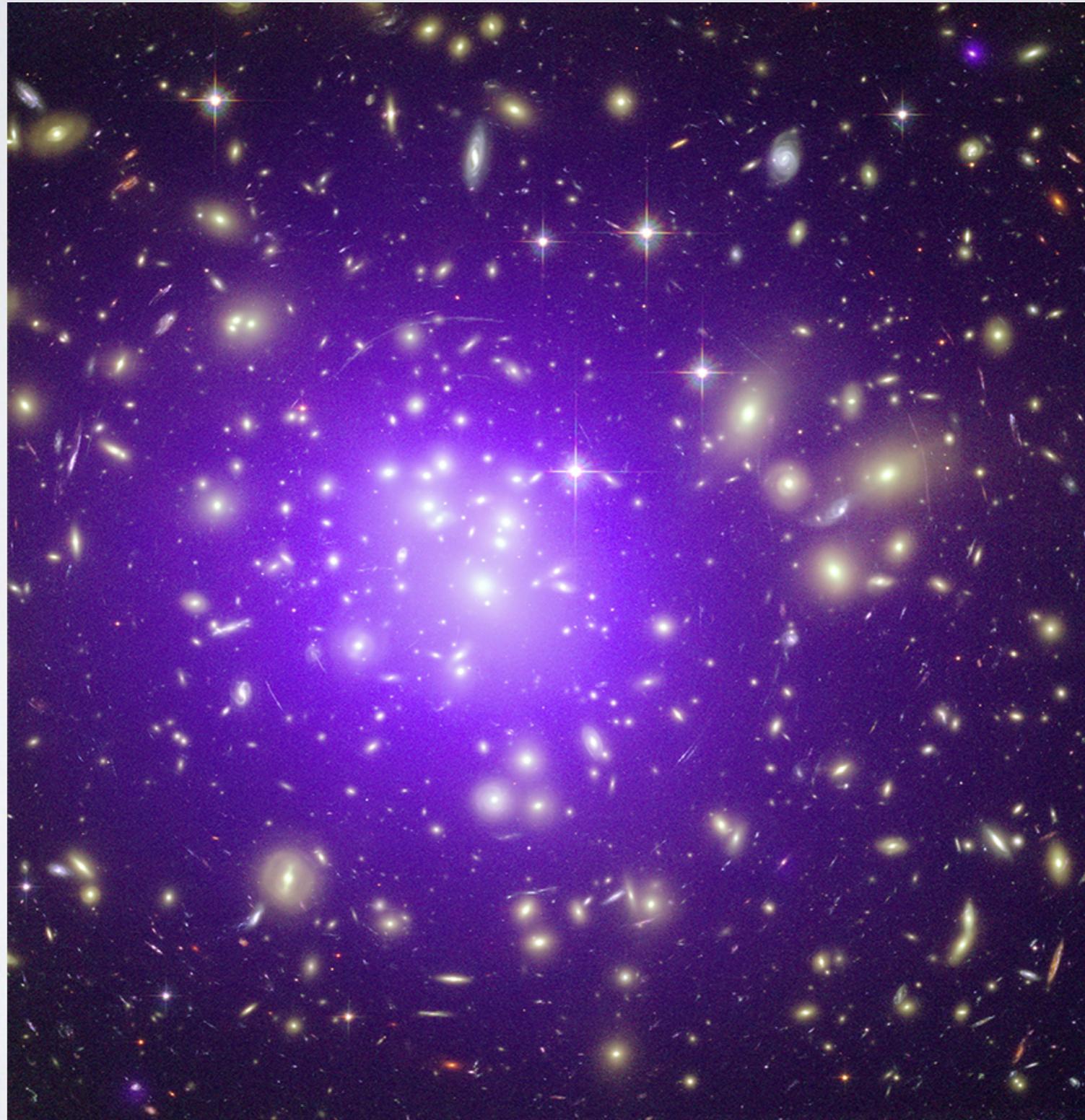
LES AMAS DE GALAXIES EN RAYONS X



Rayons X

Abell 1689

LES AMAS DE GALAXIES EN RAYONS X



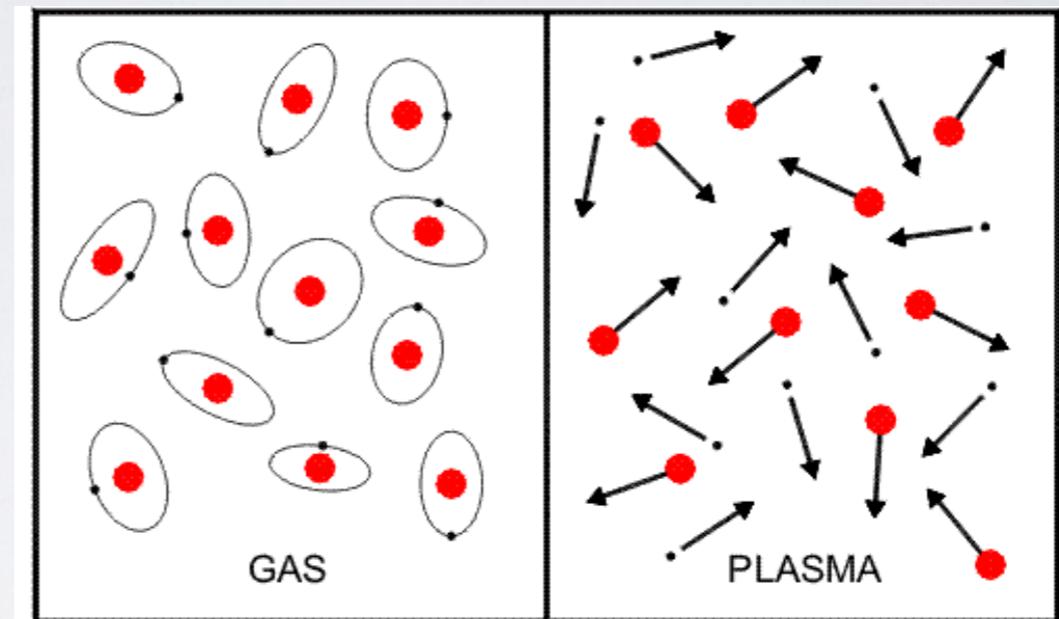
Rayons X

Optique

Abell 1689

LE MILIEU INTRA-AMAS

- Emission diffuse en rayons X = gaz...
 - ...très chaud (10^7 - 10^8 K !)
 - ...ionisé (=plasma)
 - ...tênu ($100 - 10\,000$ e-/m³)



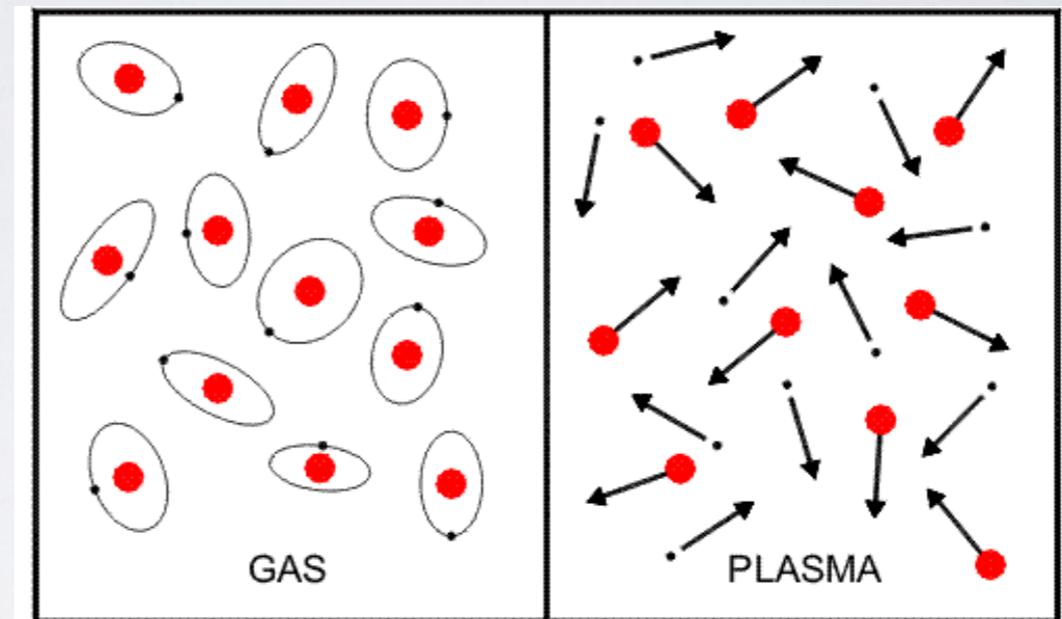
$$\epsilon_X \sim \rho^2$$



Matière
“galactique”

LE MILIEU INTRA-AMAS

- Emission diffuse en rayons X = gaz...
 - ...très chaud (10^7 - 10^8 K !)
 - ...ionisé (=plasma)
 - ...tênu ($100 - 10\ 000$ e-/m³)



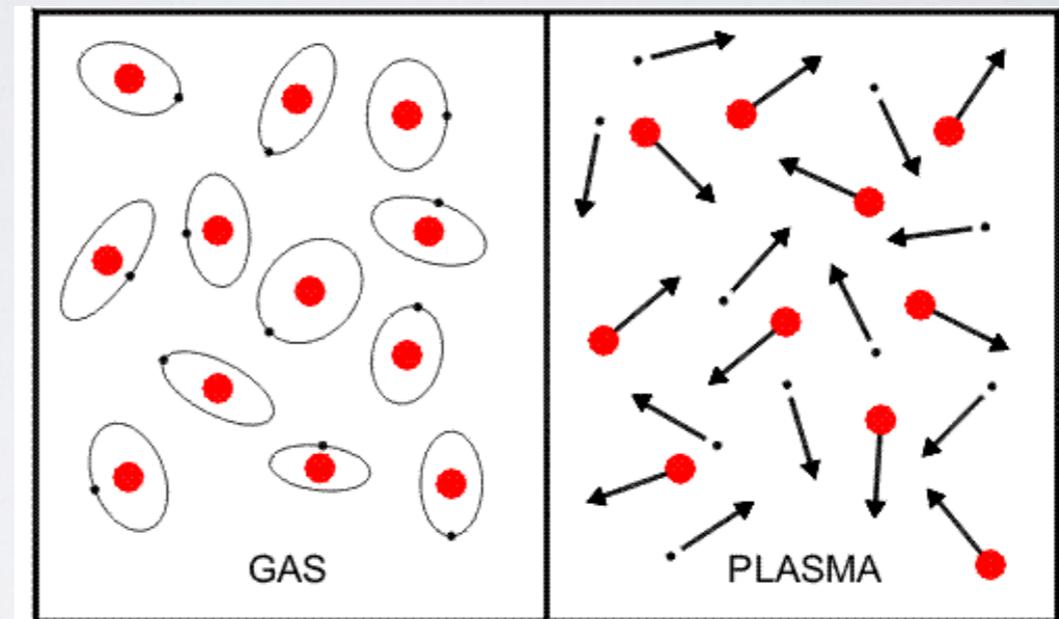
$$\epsilon_X \sim \rho^2$$

~20%

Matière
“galactique”

LE MILIEU INTRA-AMAS

- Emission diffuse en rayons X = gaz...
 - ...très chaud (10^7 - 10^8 K !)
 - ...ionisé (=plasma)
 - ...tênu ($100 - 10\ 000$ e-/m³)



$$\epsilon_X \sim \rho^2$$

~20%

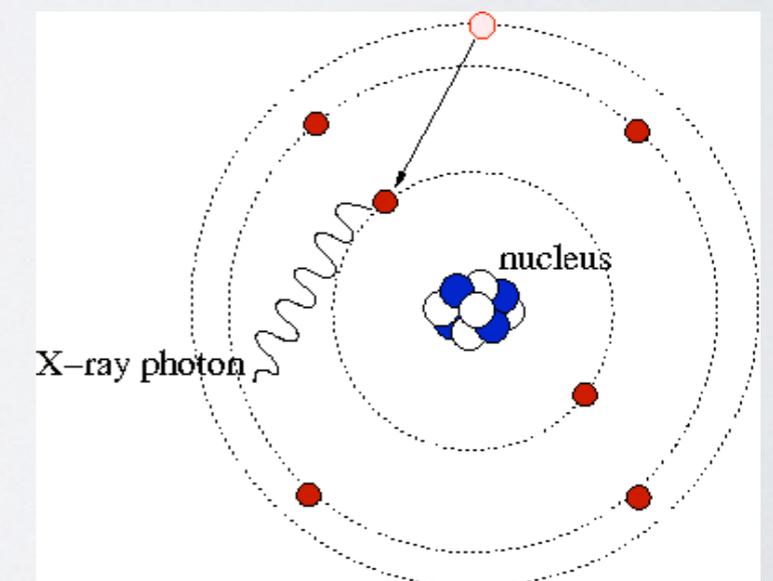
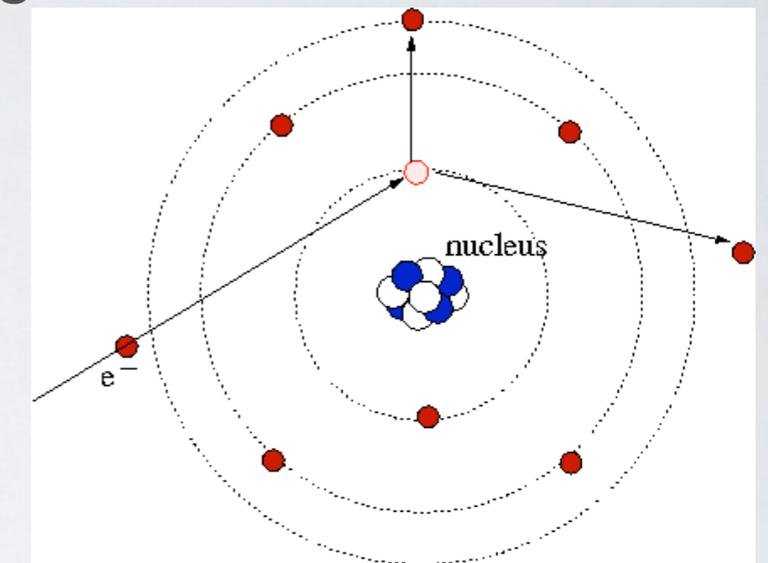
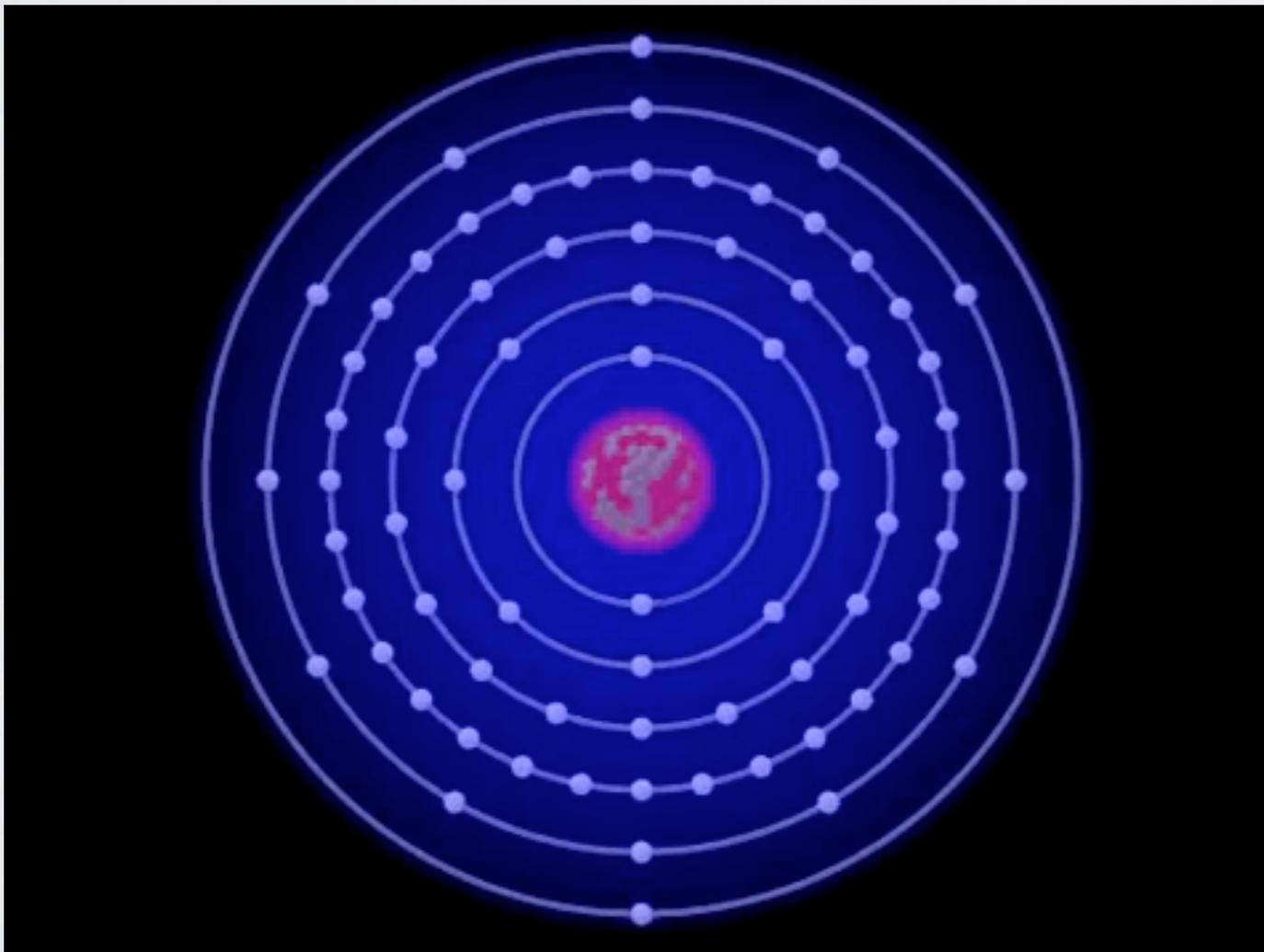
~80%

Matière
“galactique”

Matière intra-amas

SPECTRES X

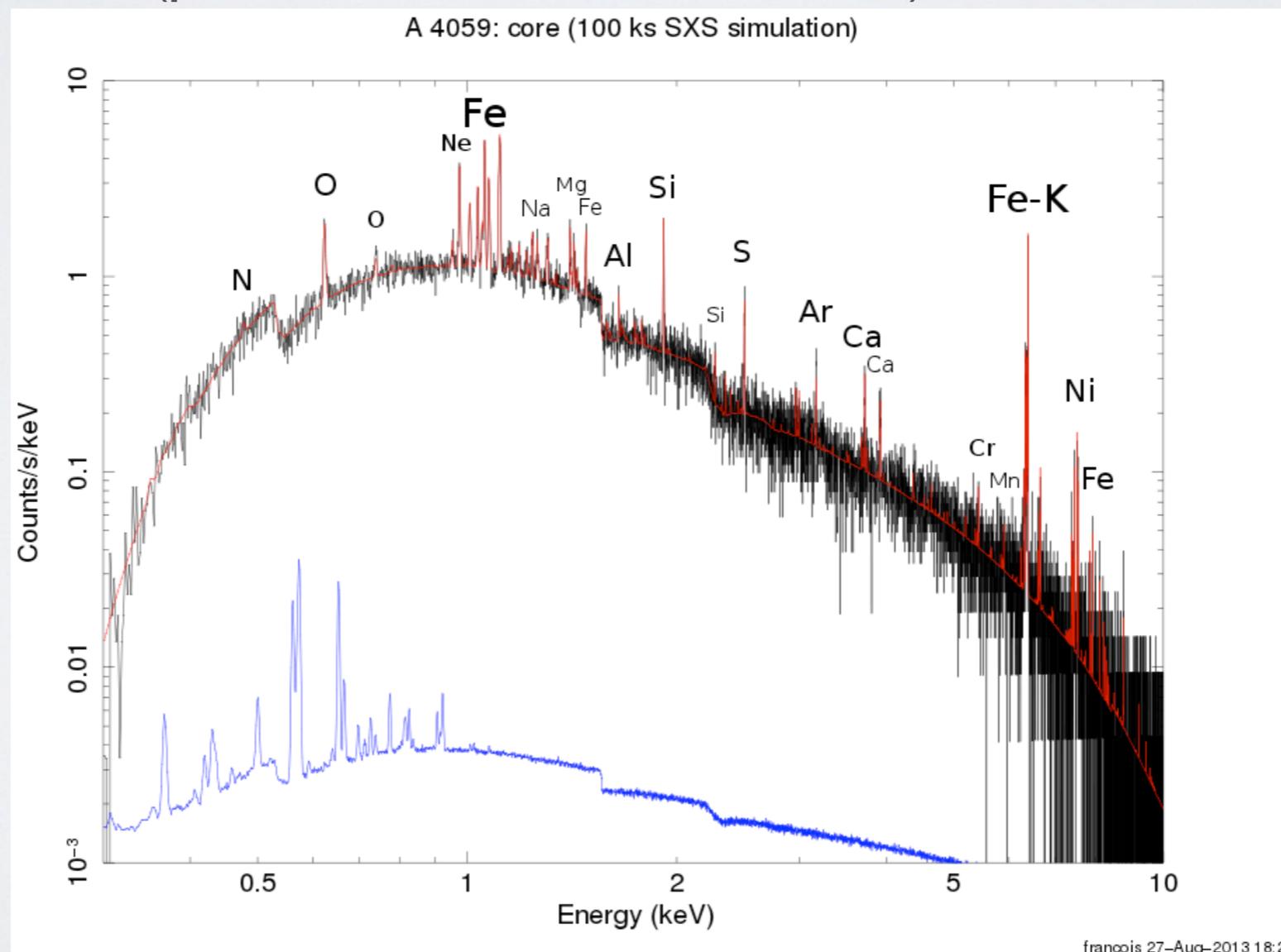
- Le plasma émet en rayons X par émission *Bremsstrahlung*
- + raies d'émission (par ex. dues à des collisions,...)



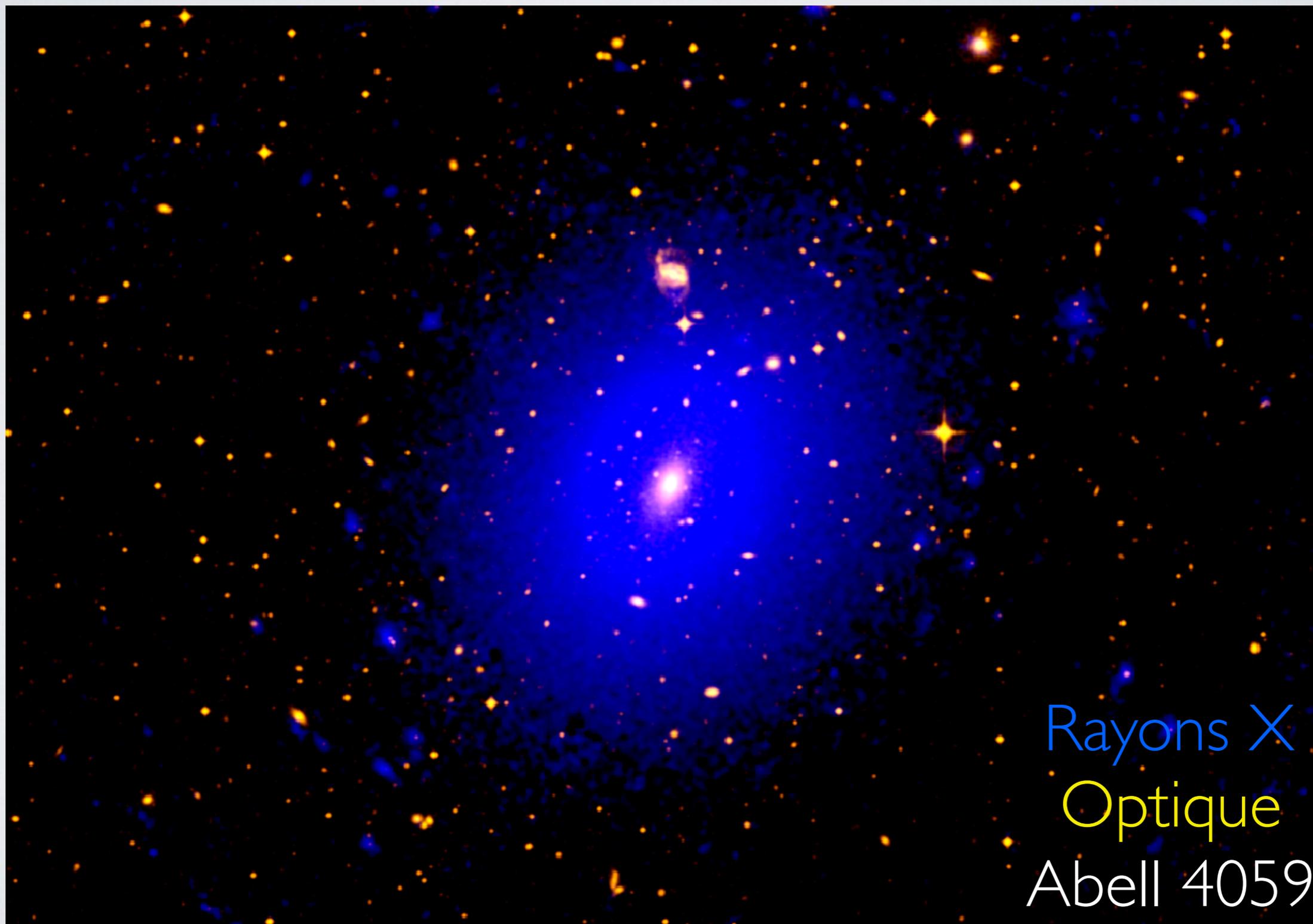
0%

SPECTRES X

- Le plasma émet en rayons X par émission *Bremsstrahlung*
- + raies d'émission (par ex. dues à des collisions,...)



LES AMAS DE GALAXIES EN RAYONS X



Rayons X
Optique
Abell 4059

LES AMAS DE GALAXIES EN RAYONS X



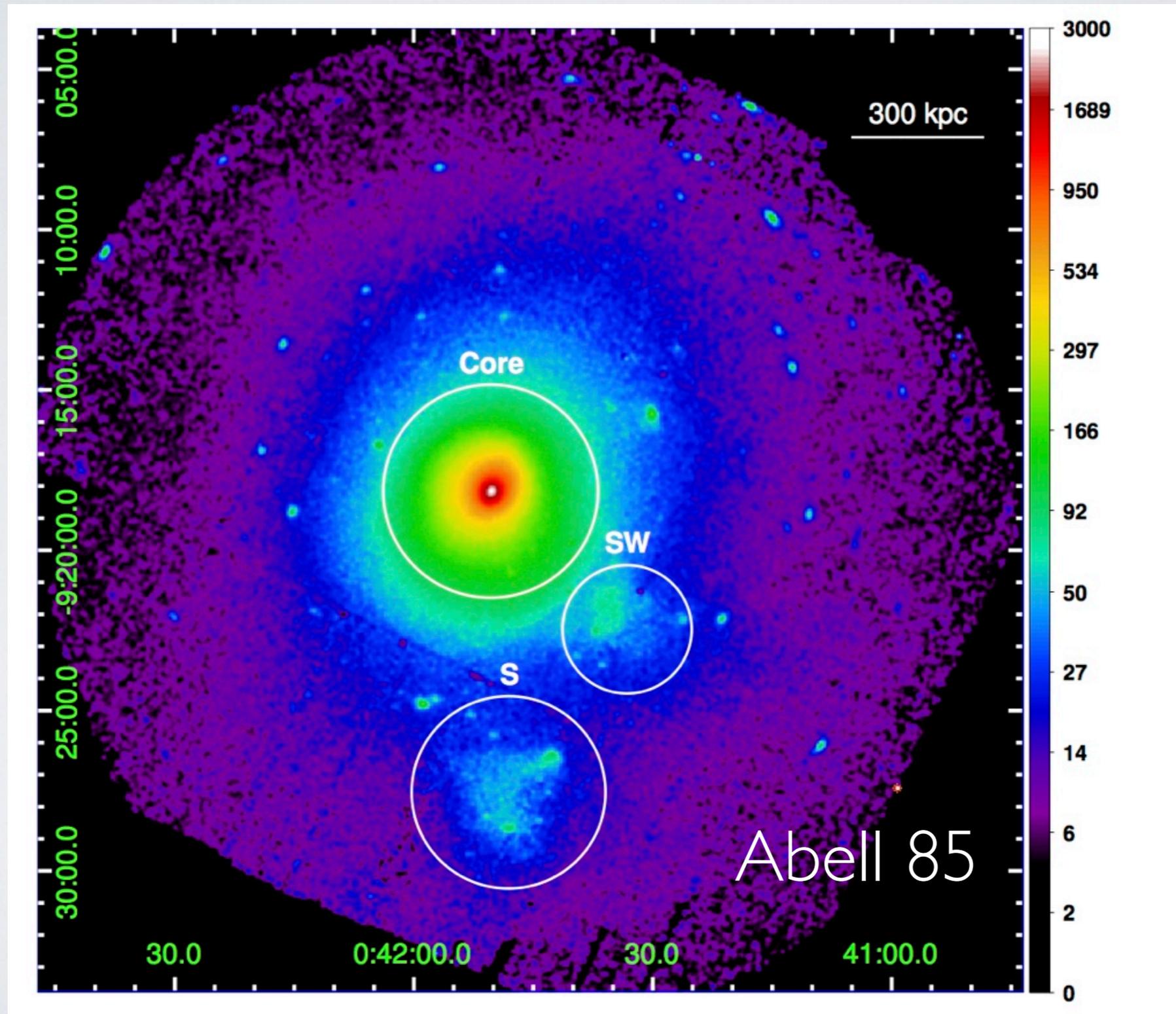
M87

LES AMAS DE GALAXIES EN RAYONS X



Perseus

LES AMAS DE GALAXIES EN RAYONS X

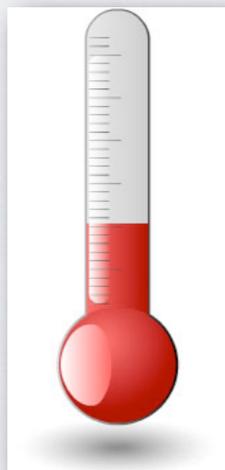


LE MILIEU INTRA-AMAS

Deux remarques intéressantes sur ce gaz intra-amas...

1. Abundances chimiques

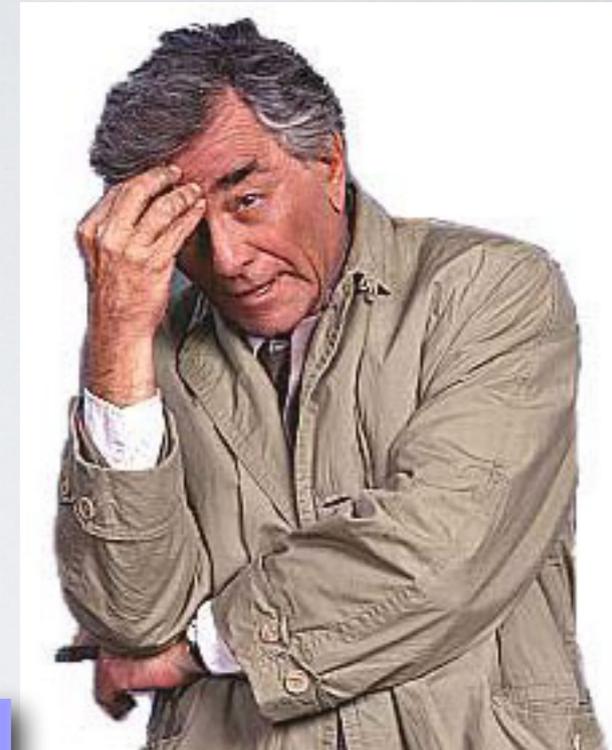
2. Température



CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS

numéro atomique	87	223	masse atomique en g.mol ⁻¹	
symbole	Fr			
	0,7		électronégativité	
	Francium			

I	H																	He
II	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
III	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
IV	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
V	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
VI	Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
VII	Fr	Ra	Ac															
			VI	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	
			VII	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr	



I. ABUNDANCES CHIMIQUES

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

<http://www.periodni.com/fr/>

ÉTAT PHYSIQUE (25 °C; 101 kPa)
 Ne - gaz Fe - solide
 Hg - liquide Tc - synthétique

Copyright © 2012 Eni Generali

(1) Pure Appl. Chem., 81, No. 11, 2131-2156 (2009)
 La masse atomique relative est donnée avec cinq chiffres significatifs. Pour les éléments qui n'ont pas de nucléides stables, la valeur entre parenthèses indique le nombre de masse de l'isotope de l'élément ayant la durée de vie la plus grande. Toutefois, pour les trois éléments (Th, Pa et U) qui ont une composition isotopique terrestre connue, une masse atomique est indiquée.

LANTHANIDES

57 138.91 La LANTHANE	58 140.12 Ce CÉRIUM	59 140.91 Pr PRASÉODYME	60 144.24 Nd NÉODYME	61 (145) Pm PROMÉTHIUM	62 150.36 Sm SAMARIUM	63 151.96 Eu EUROPIUM	64 157.25 Gd GADOLINIUM	65 158.93 Tb TERBIUM	66 162.50 Dy DYSPROSIUM	67 164.93 Ho HOLMIUM	68 167.26 Er ERBIUM	69 168.93 Tm THULIUM	70 173.05 Yb YTTERBIUM	71 174.97 Lu LUTÉTIUM
------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	------------------------------------

ACTINIDES

89 (227) Ac ACTINIUM	90 232.04 Th THORIUM	91 231.04 Pa PROTACTINIUM	92 238.03 U URANIUM	93 (237) Np NEPTUNIUM	94 (244) Pu PLUTONIUM	95 (243) Am AMÉRICIUM	96 (247) Cm CURIUM	97 (247) Bk BERKÉLIUM	98 (251) Cf CALIFORNIUM	99 (252) Es EINSTEINIUM	100 (257) Fm FERMIUM	101 (258) Md MENDELÉVIUM	102 (259) No NOBÉLIUM	103 (262) Lr LAWRENCIUM
-----------------------------------	-----------------------------------	----------------------------------------	----------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	------------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	--------------------------------------

I. ABUNDANCES CHIMIQUES

- On a détecté dans le plasma intra-amas...

- du fer (Fe)



- de l'oxygène (O)



- d'autres éléments lourds (Ne, Mg, Si, S, Ar, Ca, Ni,...)

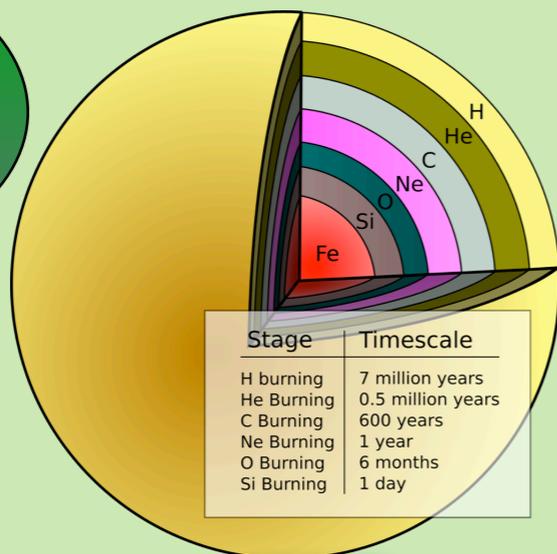
- Or, au début de l'Univers: H (~75%) et He (~25%) seulement !
- Le seul moyen de former des éléments lourds = les étoiles (supernovae)
- Ce gaz est donc sans cesse enrichi par les restes de supernovae des galaxies !

I. ABUNDANCES CHIMIQUES

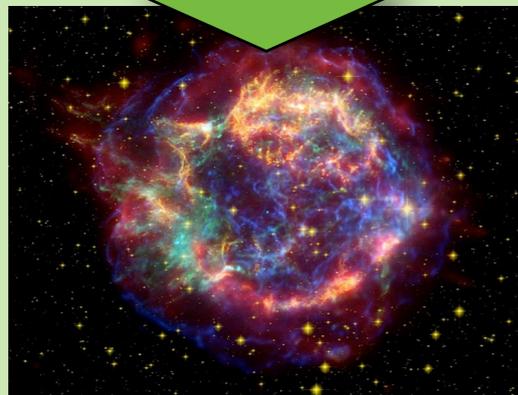
- Ce gaz est donc sans cesse enrichi par les restes de supernovae des galaxies !

- I) Par quels types de supernovae?

**“core-collapse”
supernovae**
(étoiles massives)

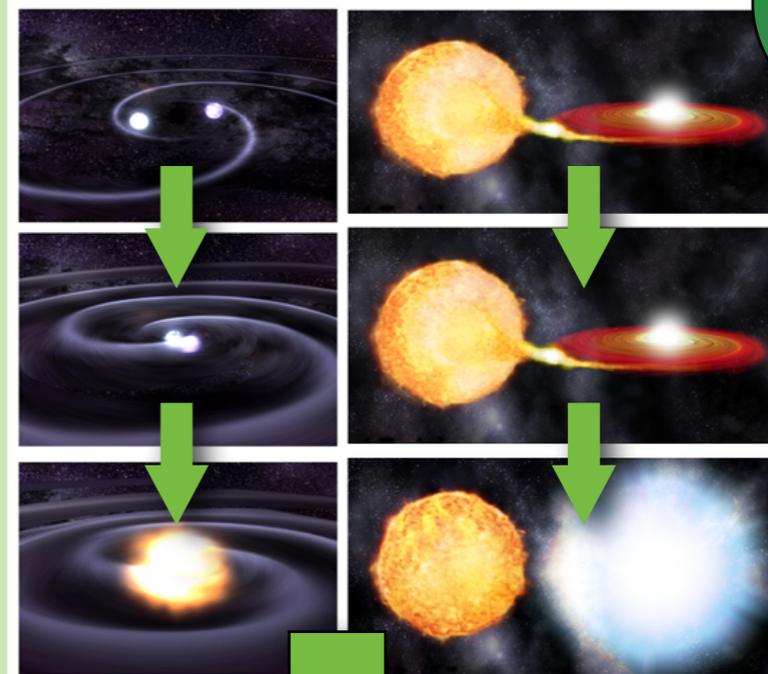


O, Ne, Mg, Si

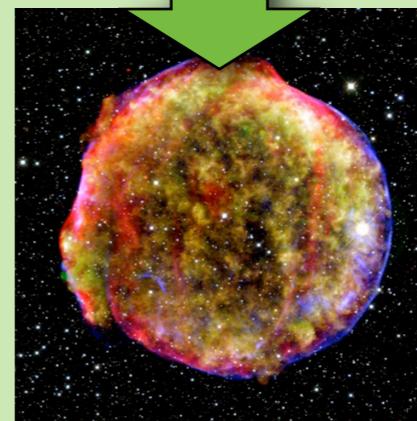


Cassiopea A (SN II)

**Supernovae
de Type Ia**
(étoiles peu massives)



Si, S, Ar, Ca, Fe, Ni

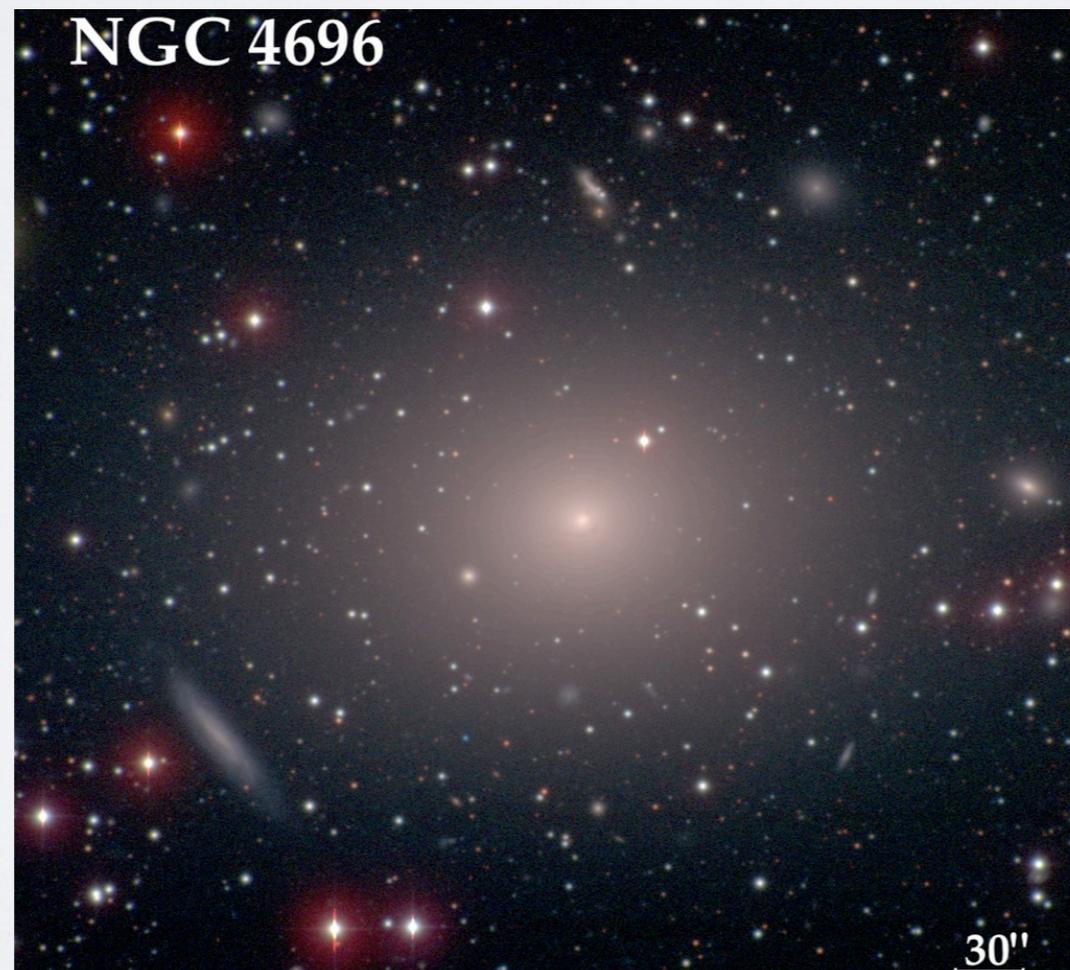


Tycho (SN Ia)

I. ABUNDANCES CHIMIQUES

- Ce gaz est donc sans cesse enrichi par les restes de supernovae des galaxies !
 - I) Par quels types de supernovae?

Optique

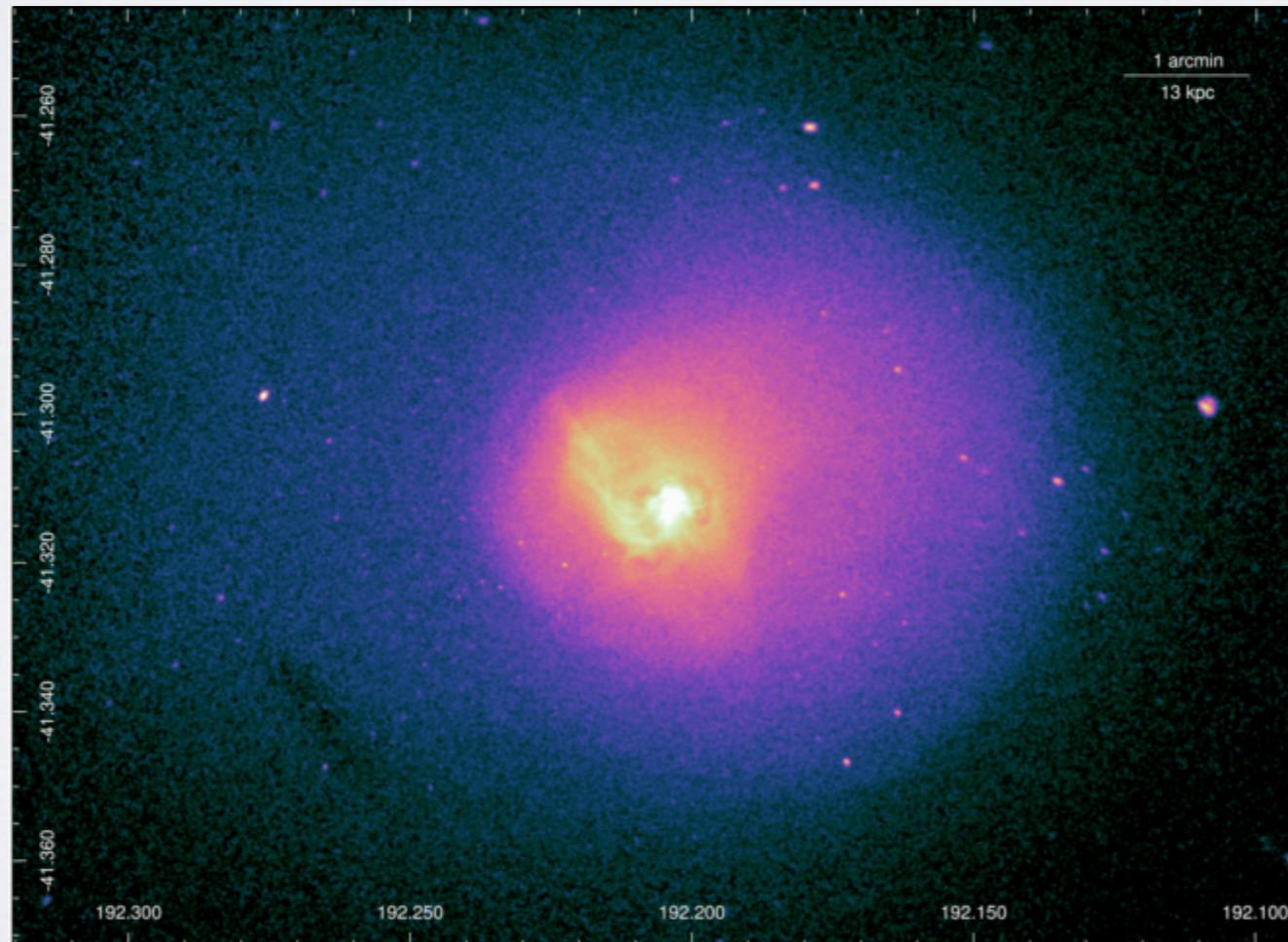


Amas du Centaure
(Abell 3526)

I. ABUNDANCES CHIMIQUES

- Ce gaz est donc sans cesse enrichi par les restes de supernovae des galaxies !
 - I) Par quels types de supernovae?

Rayons X

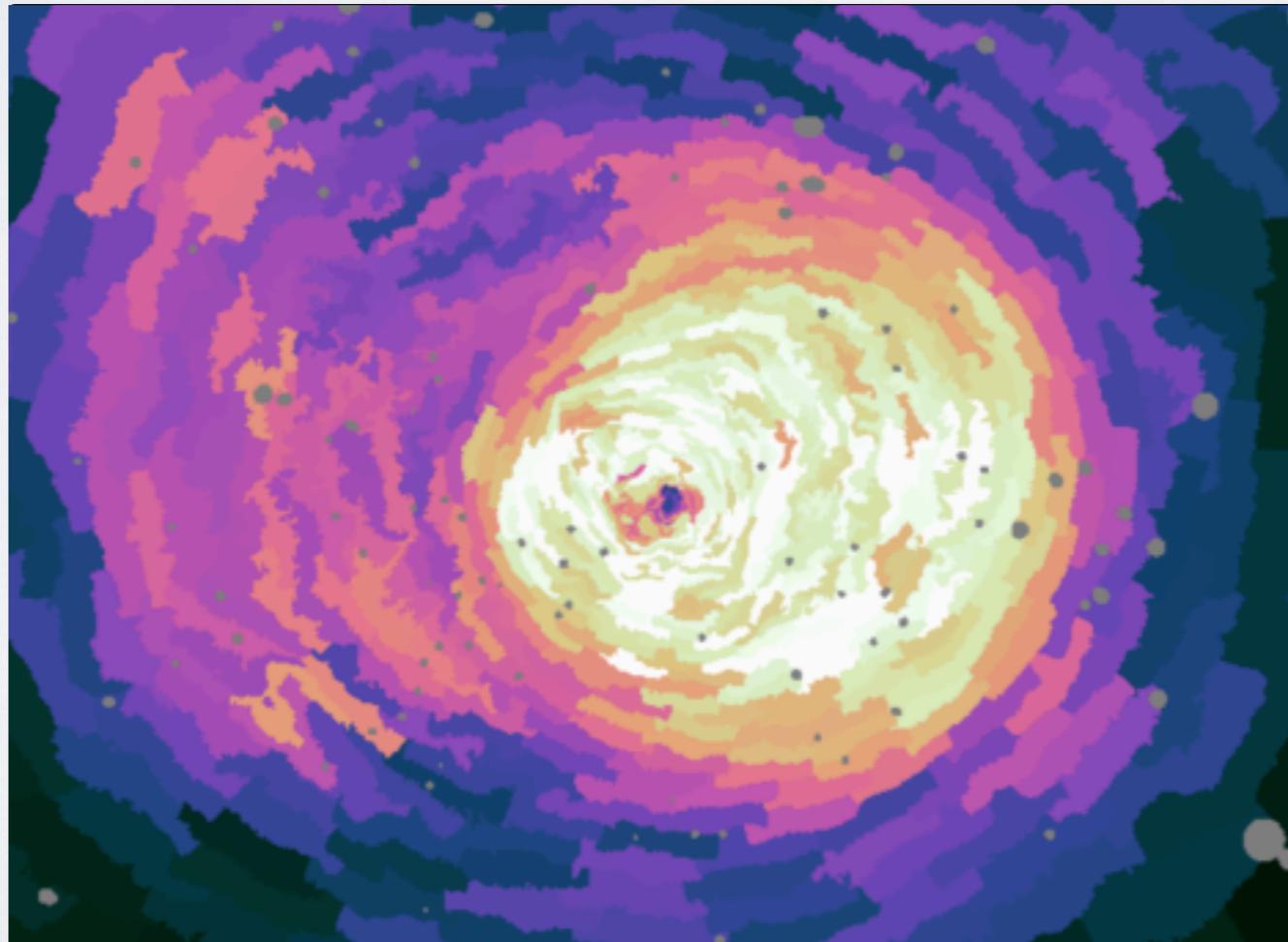


Amas du Centaure
(Abell 3526)

I. ABUNDANCES CHIMIQUES

- Ce gaz est donc sans cesse enrichi par les restes de supernovae des galaxies !
 - I) Par quels types de supernovae?

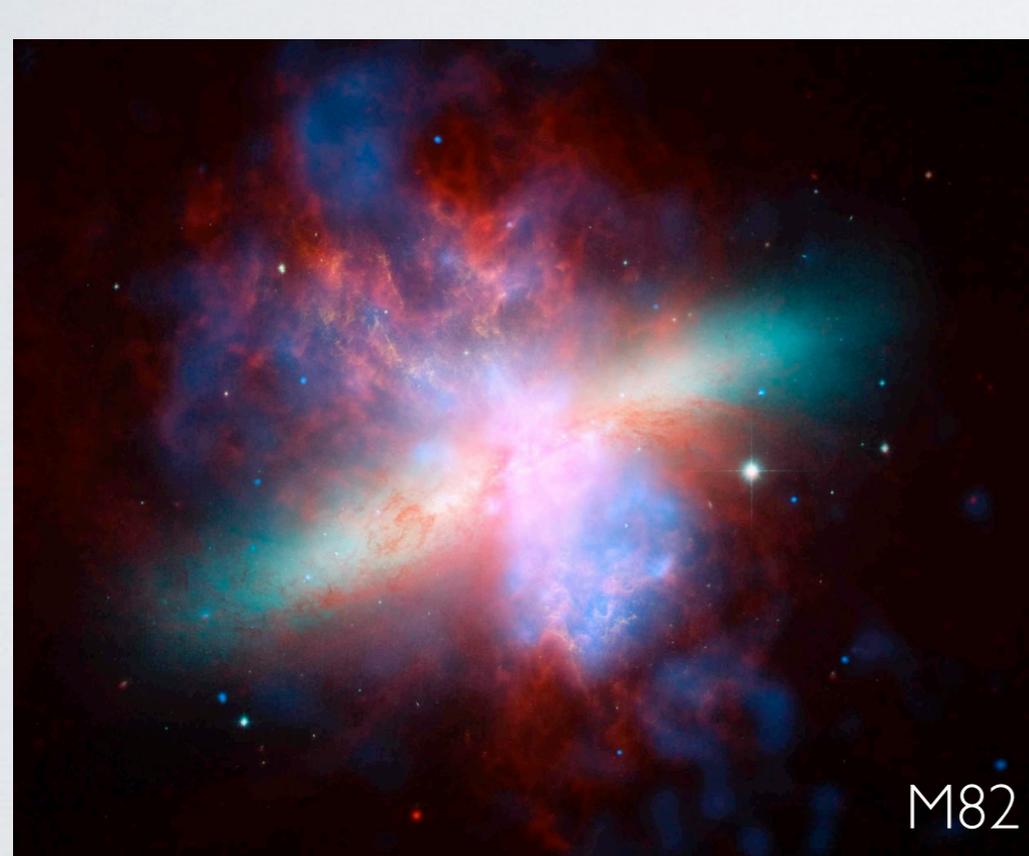
Métaux



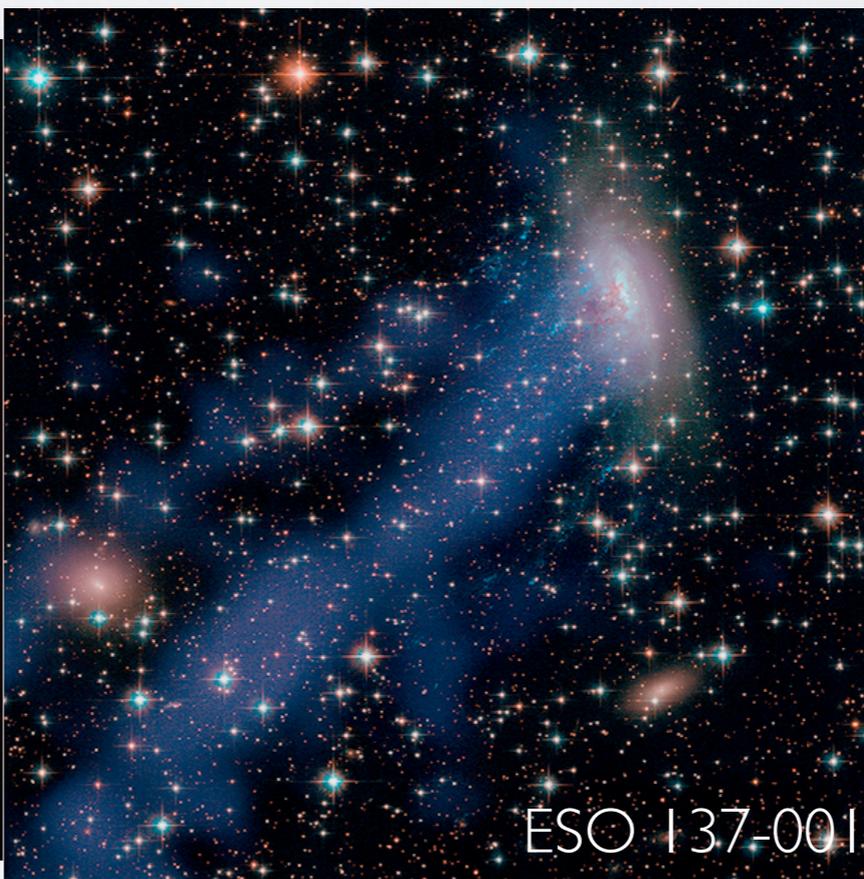
Amas du Centaure
(Abell 3526)

I. ABUNDANCES CHIMIQUES

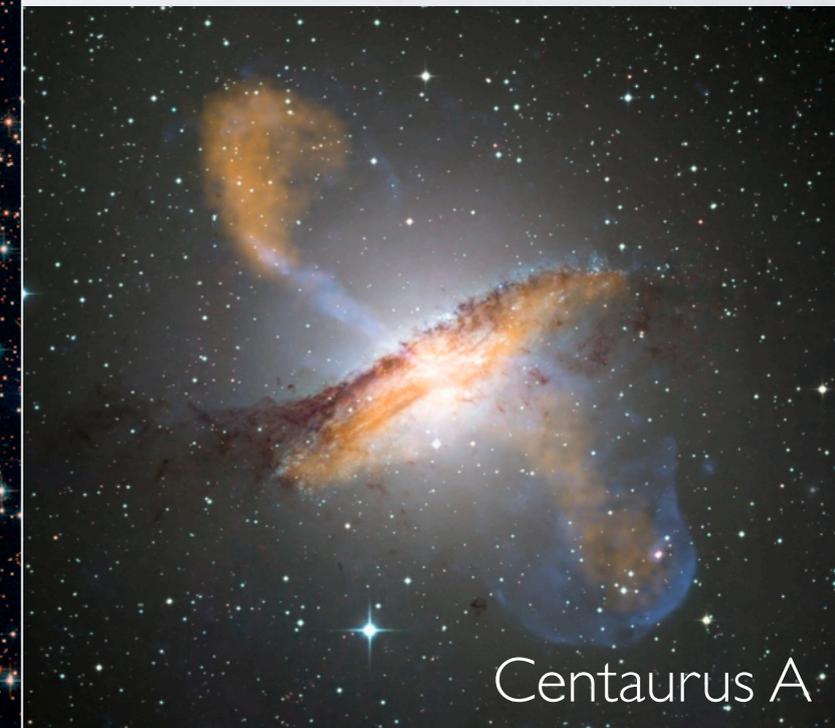
- Ce gaz est donc sans cesse enrichi par les restes de supernovae des galaxies !
- 2) Par quels types de transport?



Vents des supernovae



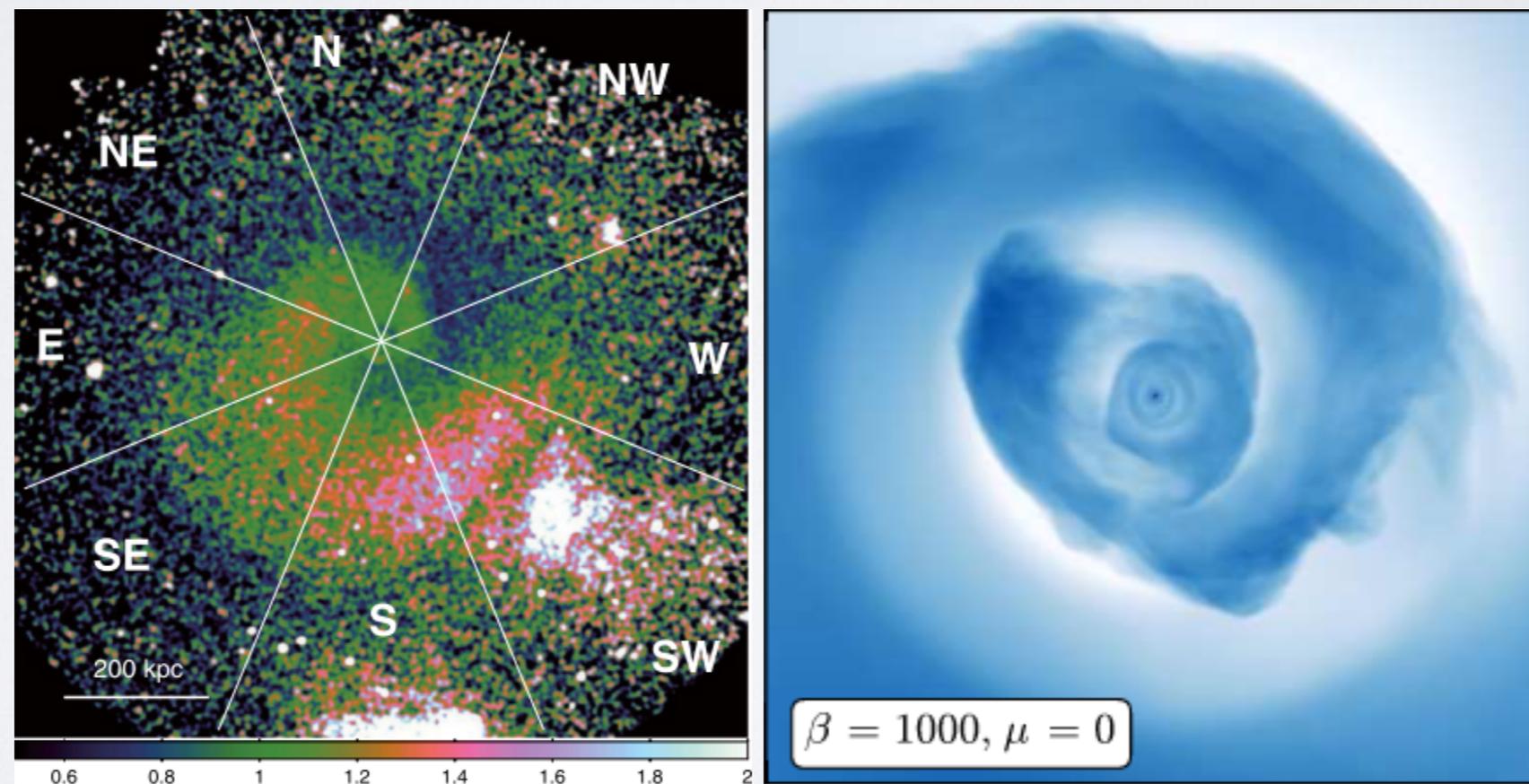
“Ram-pressure”



Trous noirs
supermassifs

I. ABUNDANCES CHIMIQUES

- Ce gaz est donc sans cesse enrichi par les restes de supernovae des galaxies !
- 2) Par quels types de transport?

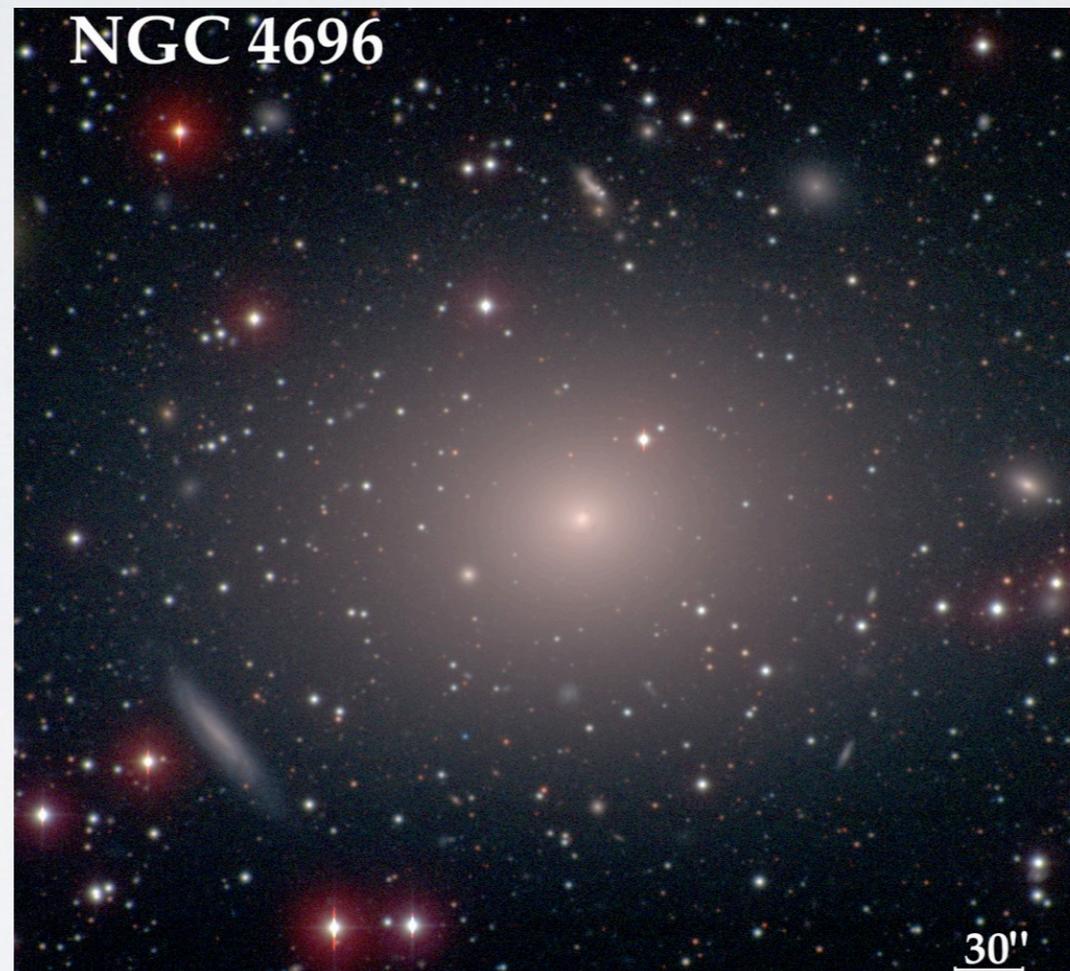


“Sloshing”

2. TEMPERATURE

- Le plasma au coeur de l'amas est plus qu'en dehors du coeur.

Optique

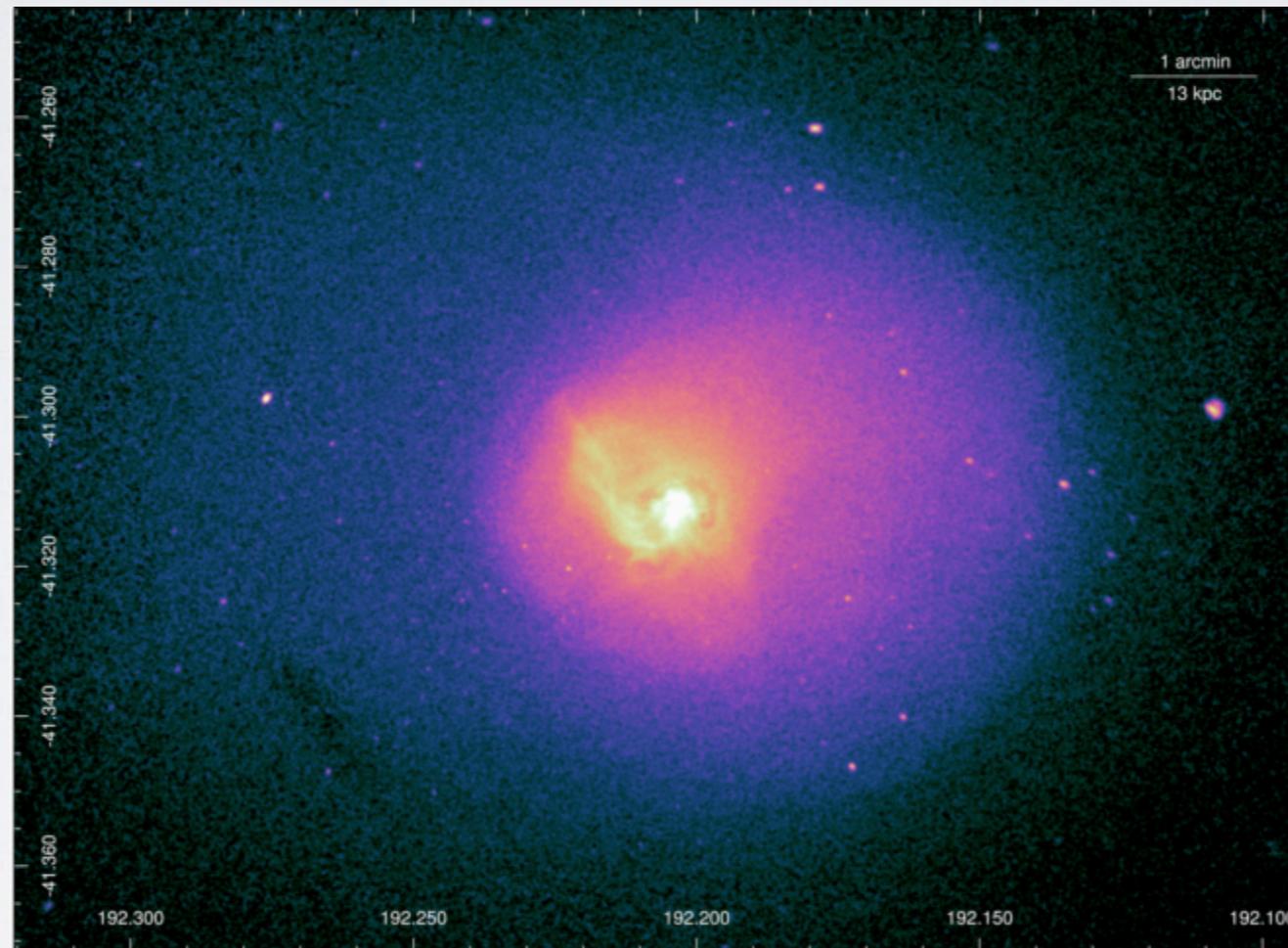


Amas du Centaure
(Abell 3526)

2. TEMPERATURE

- Le plasma au coeur de l'amas est plus qu'en dehors du coeur.

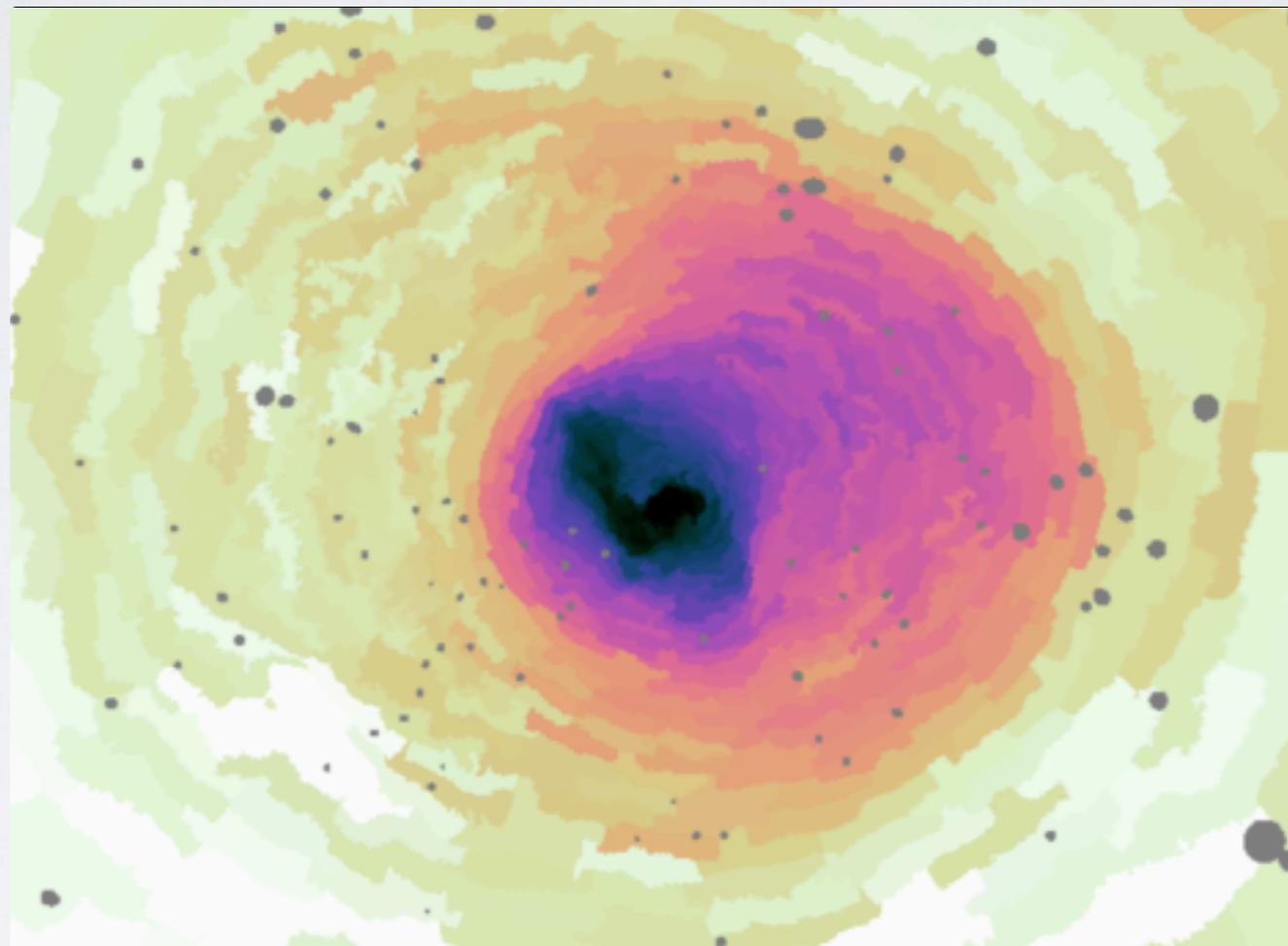
Rayons X



Amas du Centaure
(Abell 3526)

2. TEMPERATURE

- Le plasma au coeur de l'amas est plus **froid** qu'en dehors du coeur.

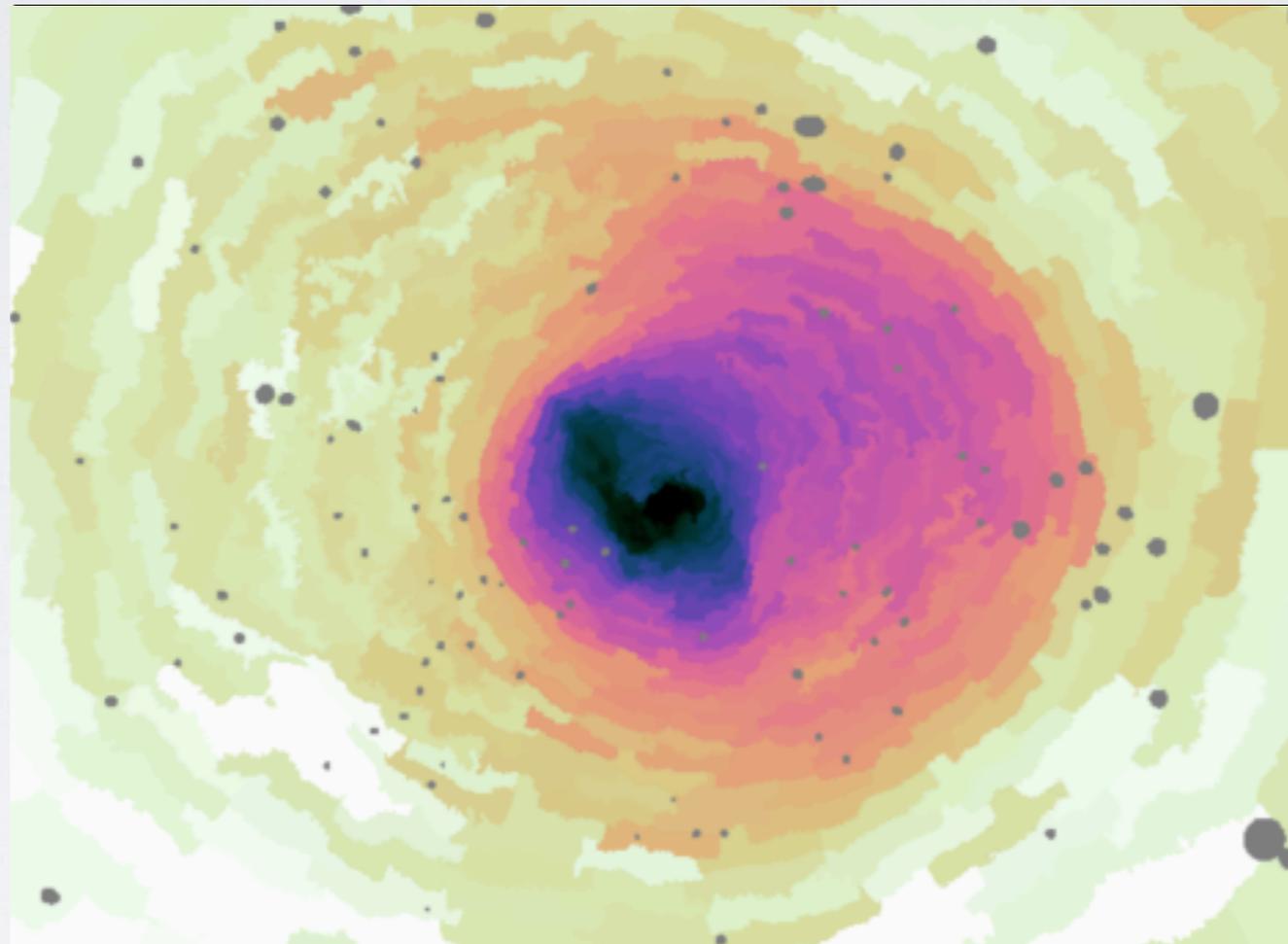


Température

Amas du Centaure
(Abell 3526)

2. TEMPERATURE

- Le plasma au coeur de l'amas est plus **froid** qu'en dehors du coeur.



Amas du Centaure
(Abell 3526)

Température

- En émettant des rayons X au coeur, le plasma se refroidit
- $PV = nRT \rightarrow$ la pression diminue
- Davantage de gaz devrait tomber au centre, et se refroidir encore plus (“cooling flow”)
- **Problème: le gaz au centre est moins froid que prévu!**

2. TEMPERATURE

Cooling flow problem: Le plasma au coeur de l'amas est plus froid qu'en dehors du coeur... mais pas assez !



• **Peut-être que du gaz très froid est présent au coeur, mais qu'on ne le détecte pas?**

➔ Dur à croire, car aucune formation stellaire dans la galaxie cD au centre

• **Et si le gaz froid du centre était réchauffé ?**

➔ Oui, mais par quoi?

✓ Supernovae?

✓ Trous noirs supermassifs au centre des galaxies centrales?



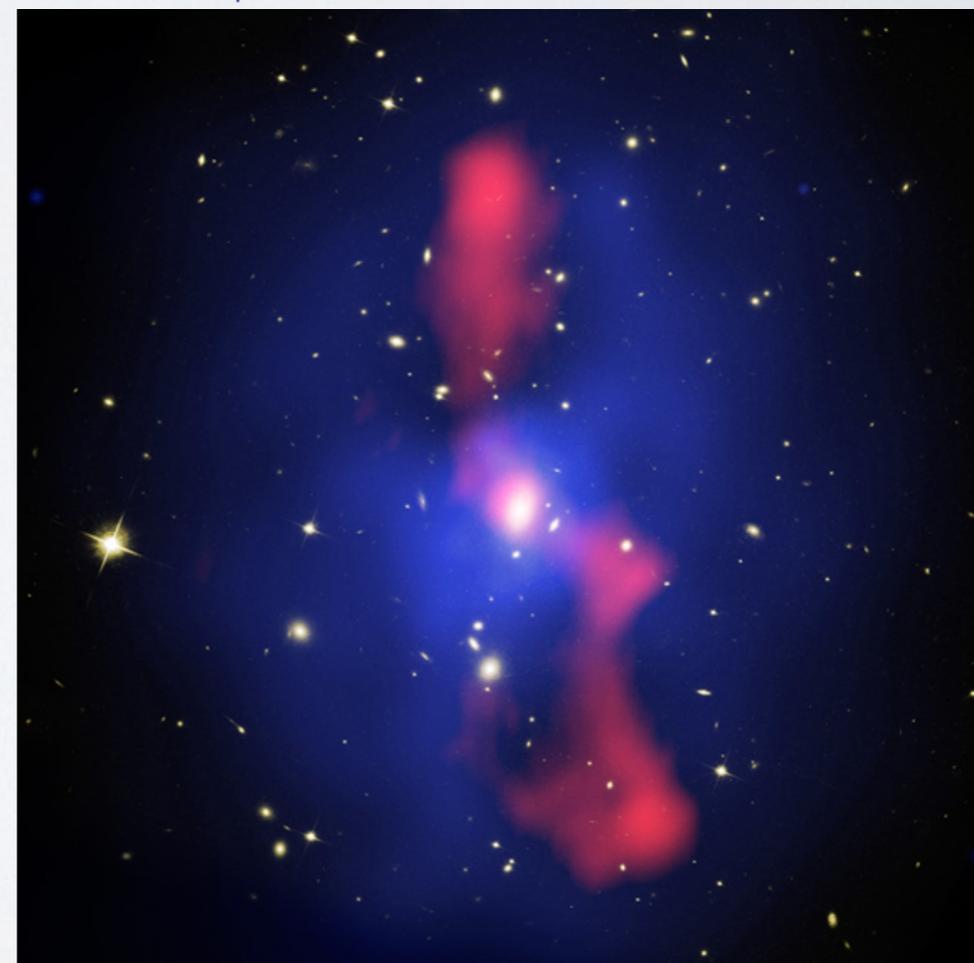
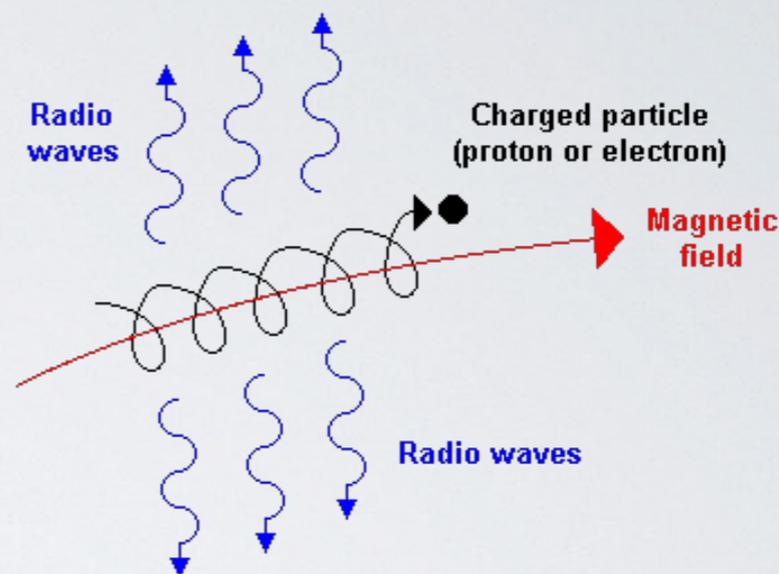
LES AMAS DE GALAXIES EN ONDES RADIO



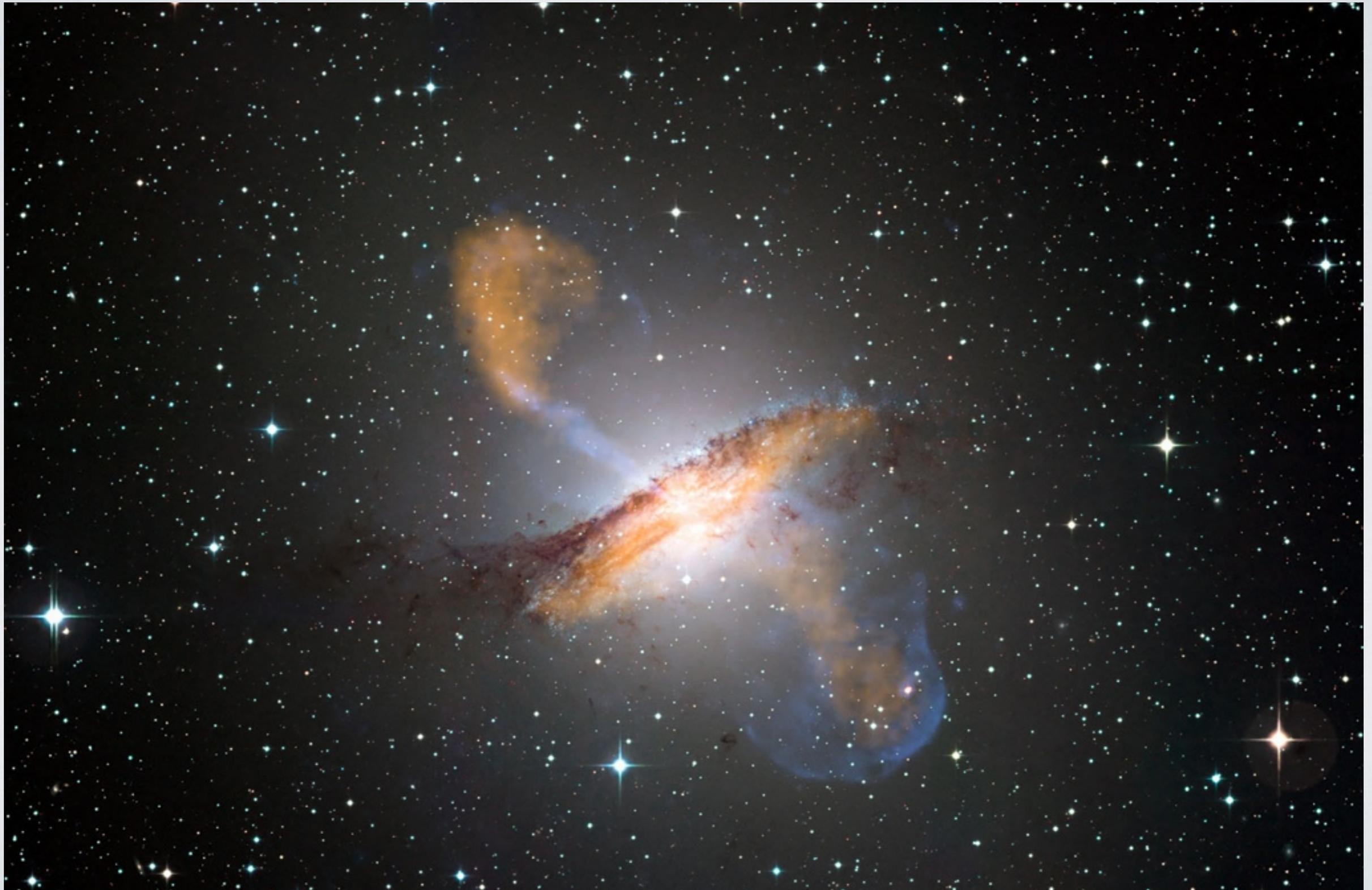
VLA - Very Large Array
Plains of San Augustin, New Mexico
by JC Karjanis 2008

LES AMAS DE GALAXIES EN ONDES RADIO

- Jets radio: jets de particules (vitesses relativistes) émanant de trous noirs supermassifs au centre de galaxies
- = accélérations d'électrons (par effet synchrotron, etc)

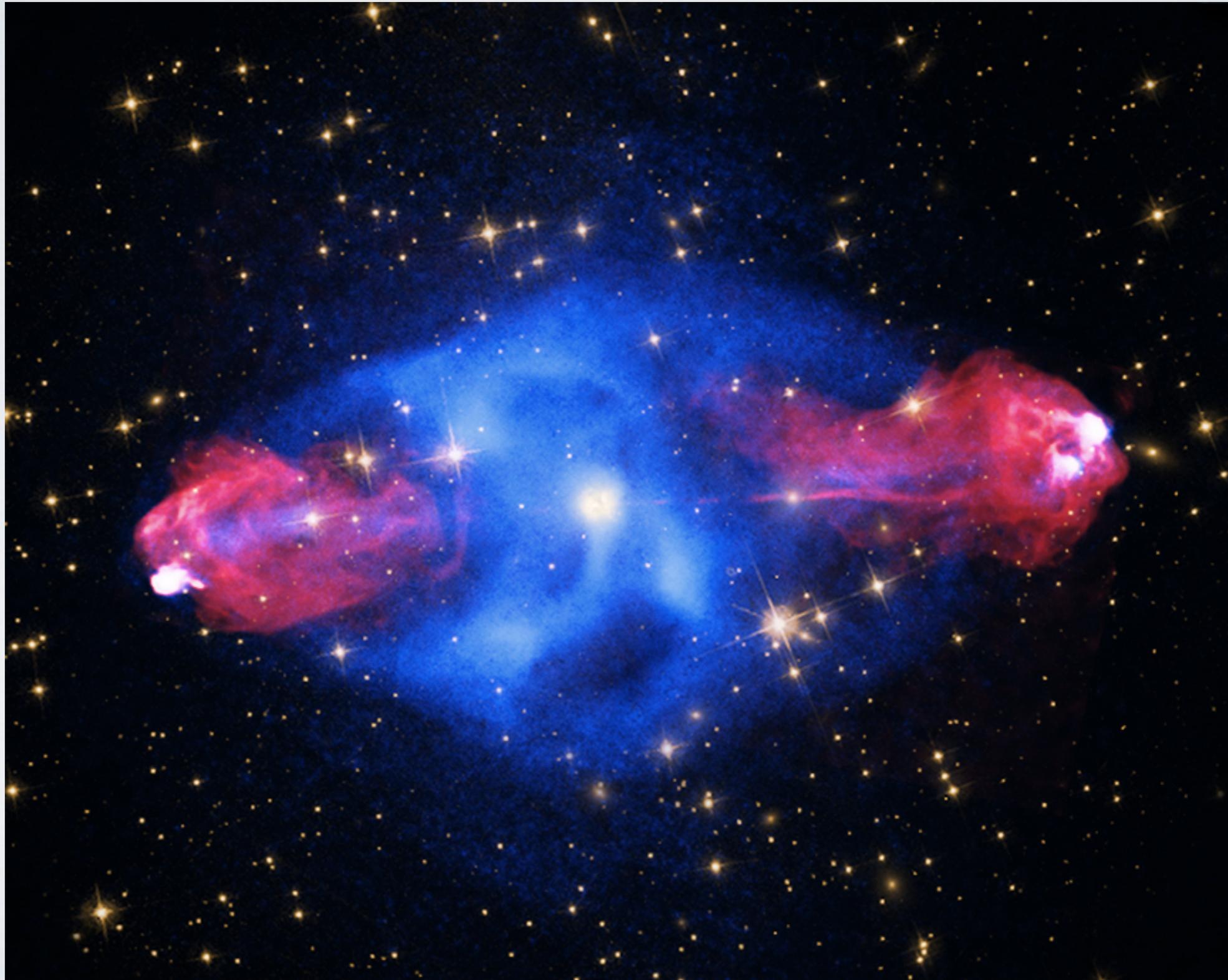


LES AMAS DE GALAXIES EN ONDES RADIO



Centaurus A (multi-longueurs d'onde)

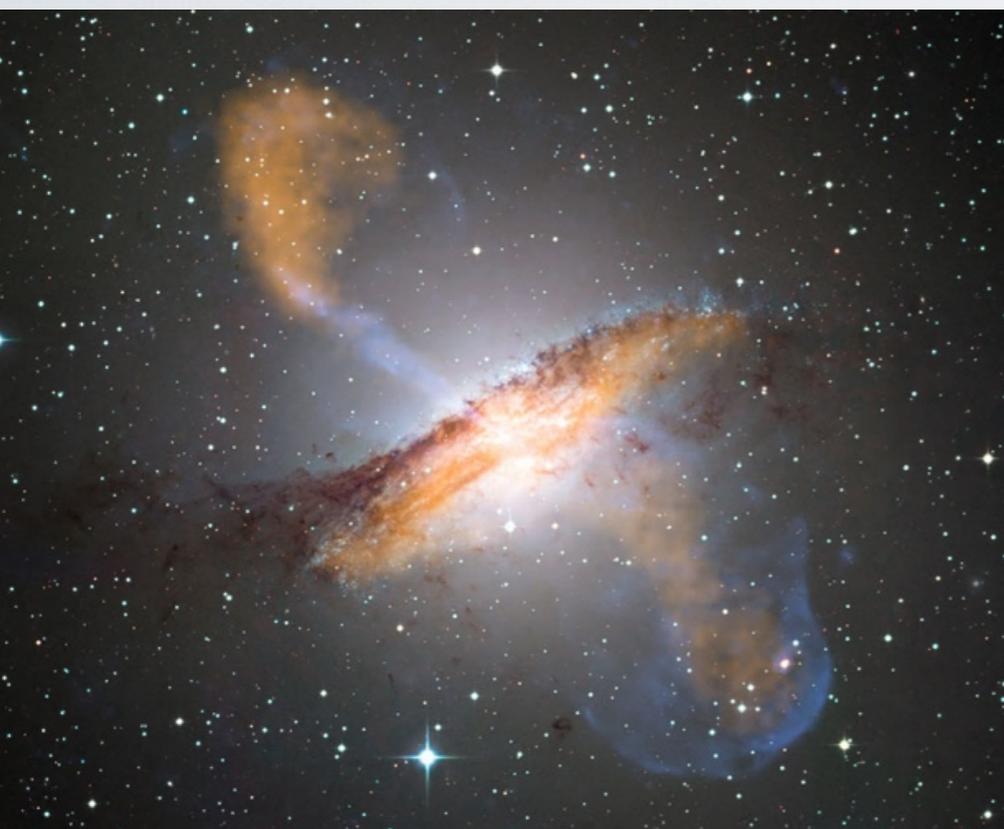
LES AMAS DE GALAXIES EN ONDES RADIO



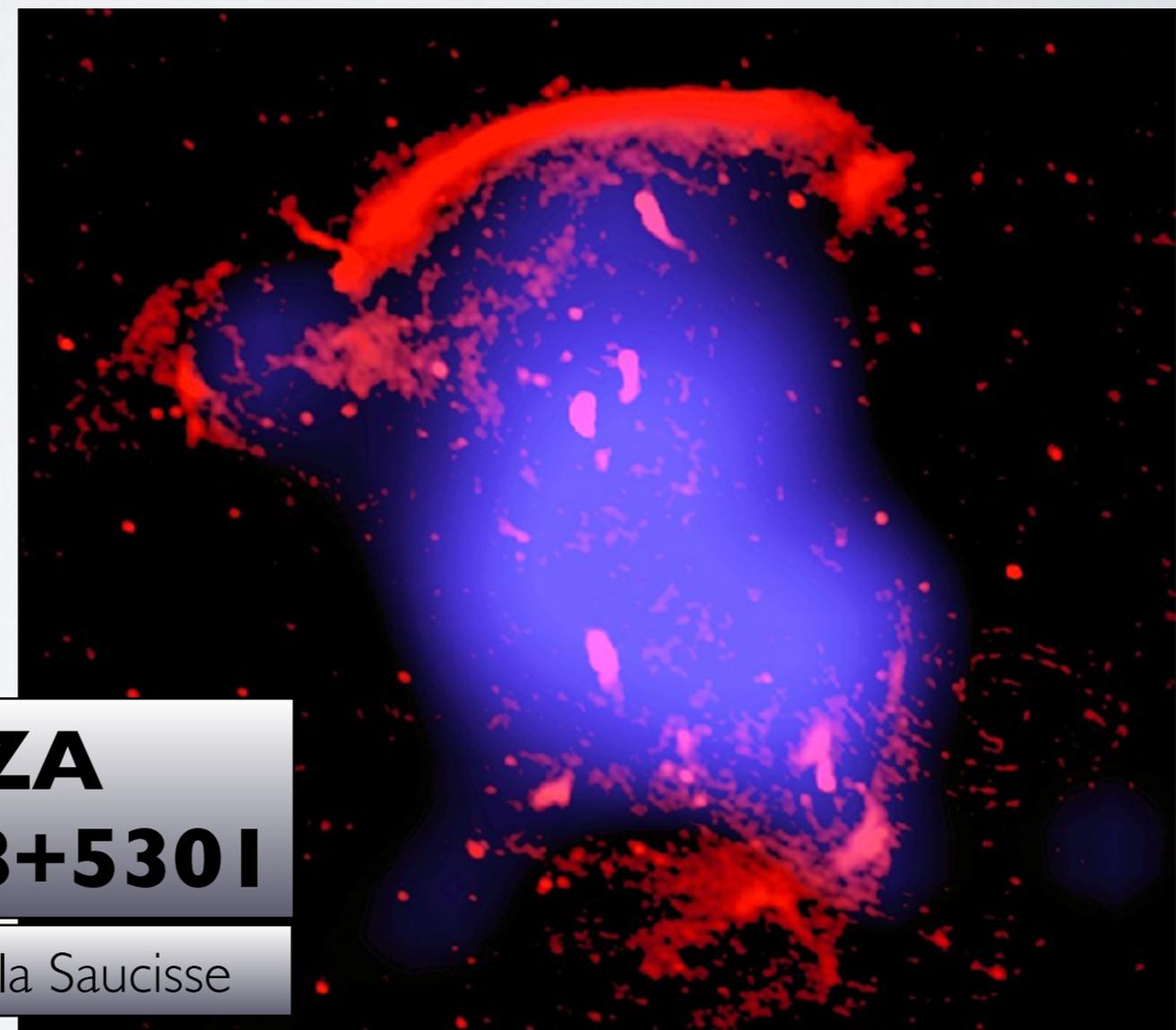
Cygnus A (multi-longueurs d'onde)

LES AMAS DE GALAXIES EN ONDES RADIO

- Pourrait expliquer (**en partie**) le “cooling flow problem”
- Pourrait expliquer (**en partie**) le processus d’enrichissement du milieu intra-amas



Centaurus A (multi-longueurs d'onde)



CIZA

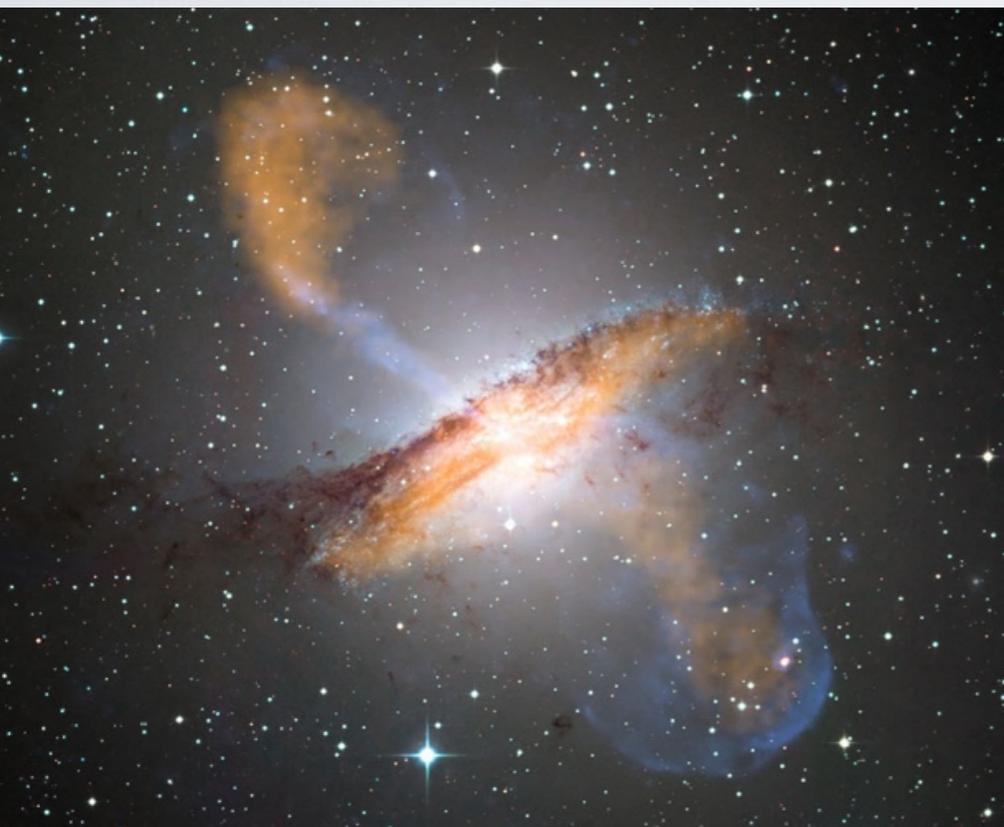
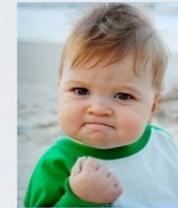
J2242.8+5301

= amas de la Saucisse

- **Mais... autre question...**

LES AMAS DE GALAXIES EN ONDES RADIO

- Pourrait expliquer (**en partie**) le “cooling flow problem”
- Pourrait expliquer (**en partie**) le processus d’enrichissement du milieu intra-amas



Centaurus A (multi-longueurs d'onde)



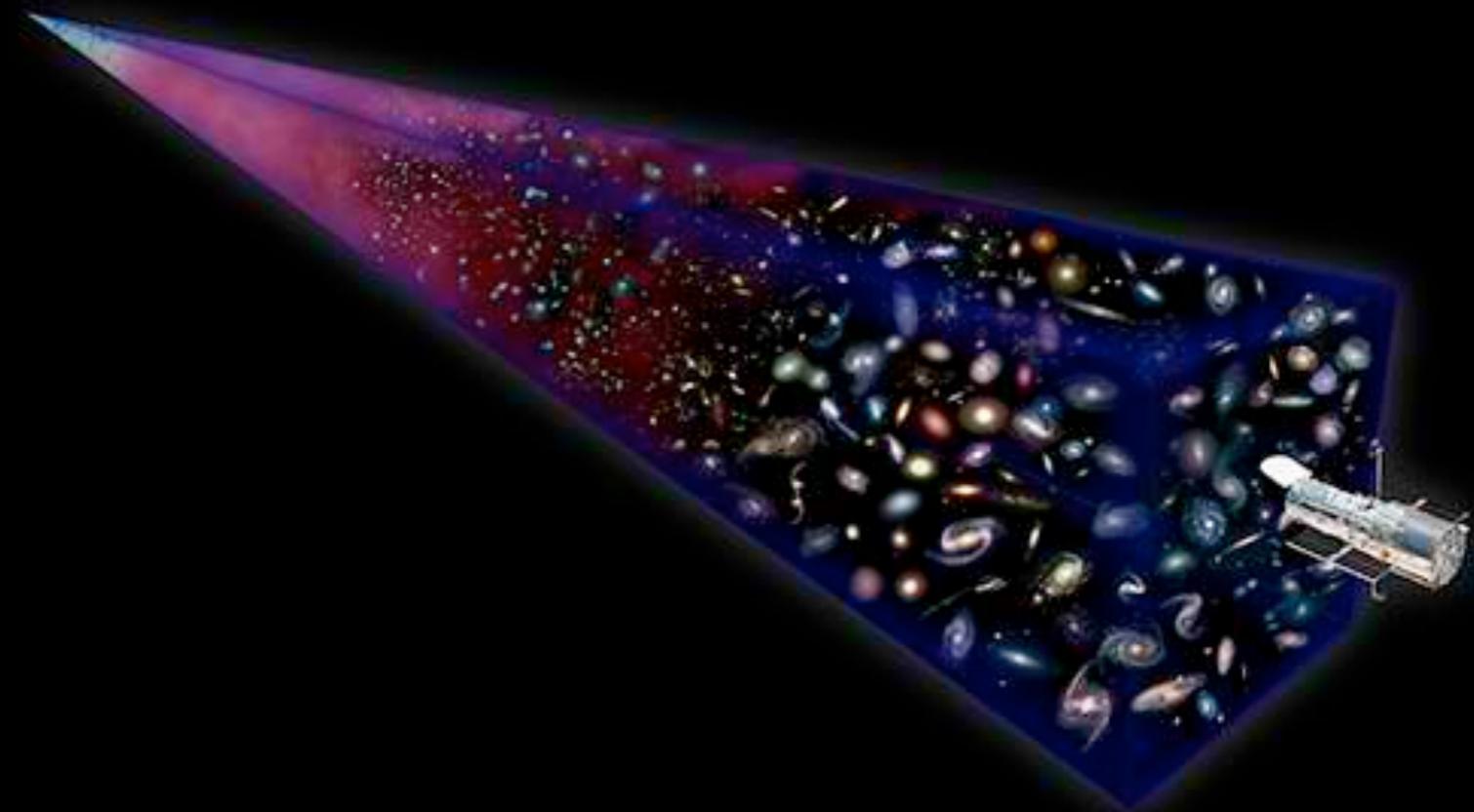
CIZA

J2242.8+5301

= amas de la Saucisse

- Mais... autre question...

PARTIE III: MATIERE NOIRE ET COSMOLOGIE



MASSE DYNAMIQUE D'UN AMAS

- Pour un système en équilibre dynamique (théorème du viriel):

$$M_{\text{dyn}} \sim 2R\sigma^2/G$$

$$G = 6,674 \times 10^{-11} \text{ N m}^2/\text{kg}^2$$

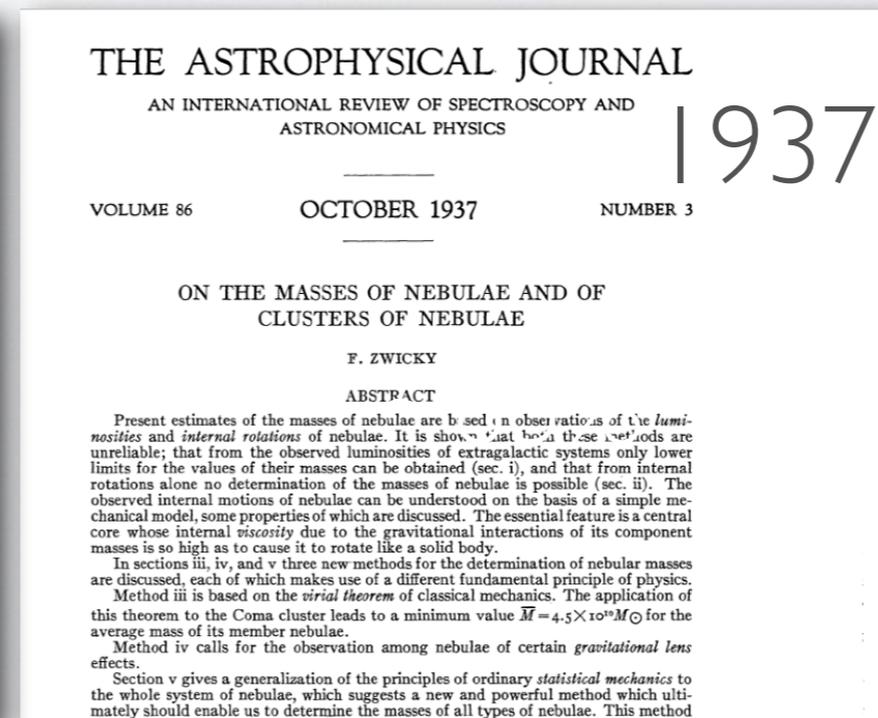
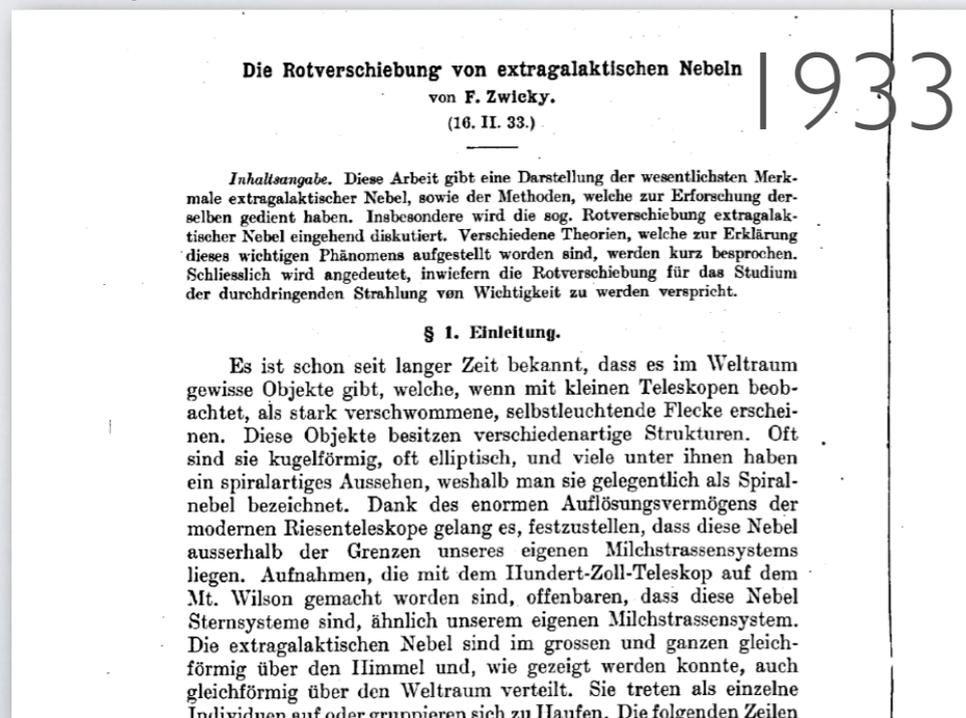
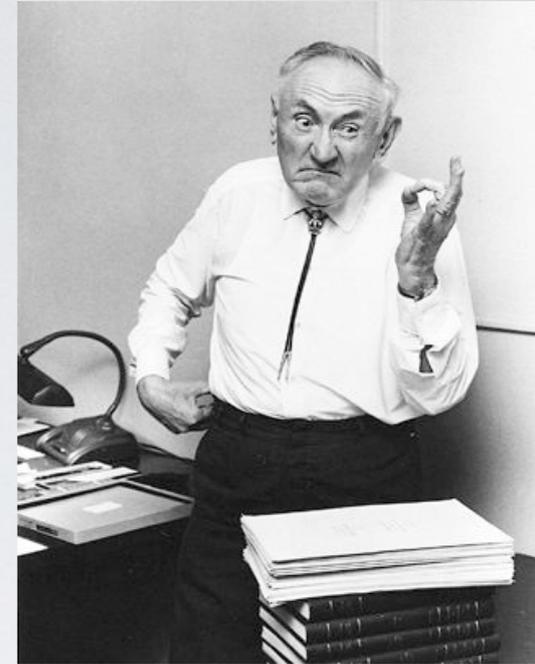
- Fritz Zwicky (1933) calcula M_{dyn} d'un groupe de 7 galaxies dans l'amas de Coma...

- $M_{\text{dyn}} \approx 3 \times 10^{15} M_{\odot}$

- ...mais également la masse visible (=lumineuse: étoiles, gaz, etc...)

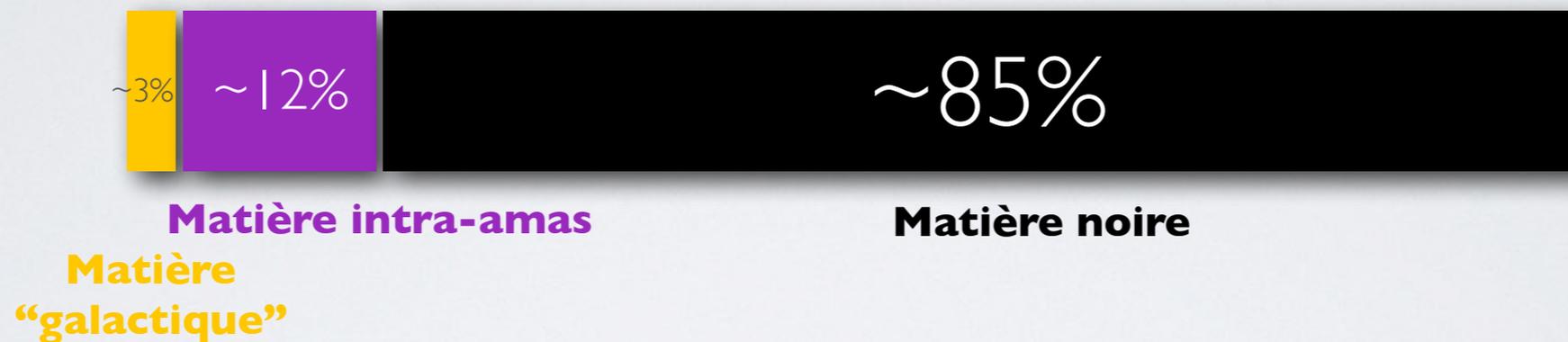
- $M_{\text{lum}} \approx 10^{13} M_{\odot}$

- Pour expliquer les mouvements des galaxies, il faudrait donc **~300** fois plus de matière que ce qui n'est visible !!

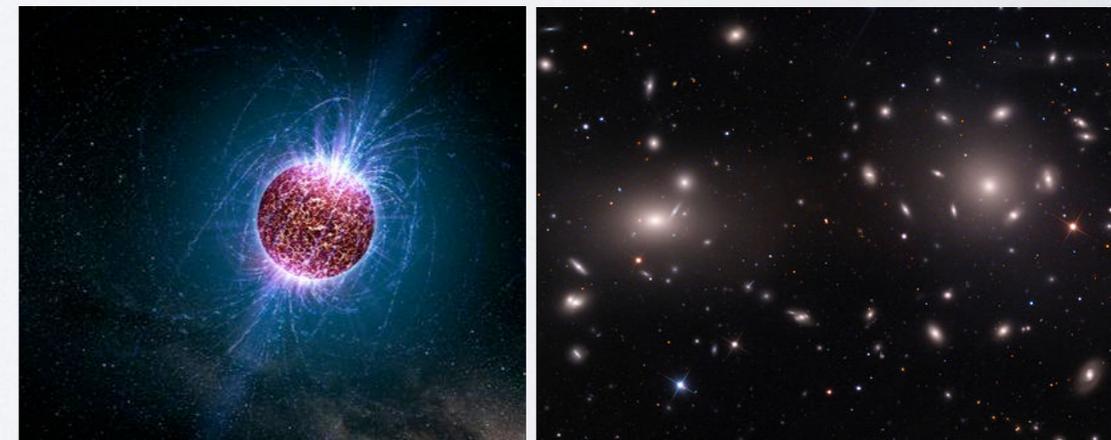


MATIERE NOIRE

- Aujourd'hui on sait qu'il y a ~5 fois plus de matière noire que de matière visible (inclus le milieu intra-amas) !

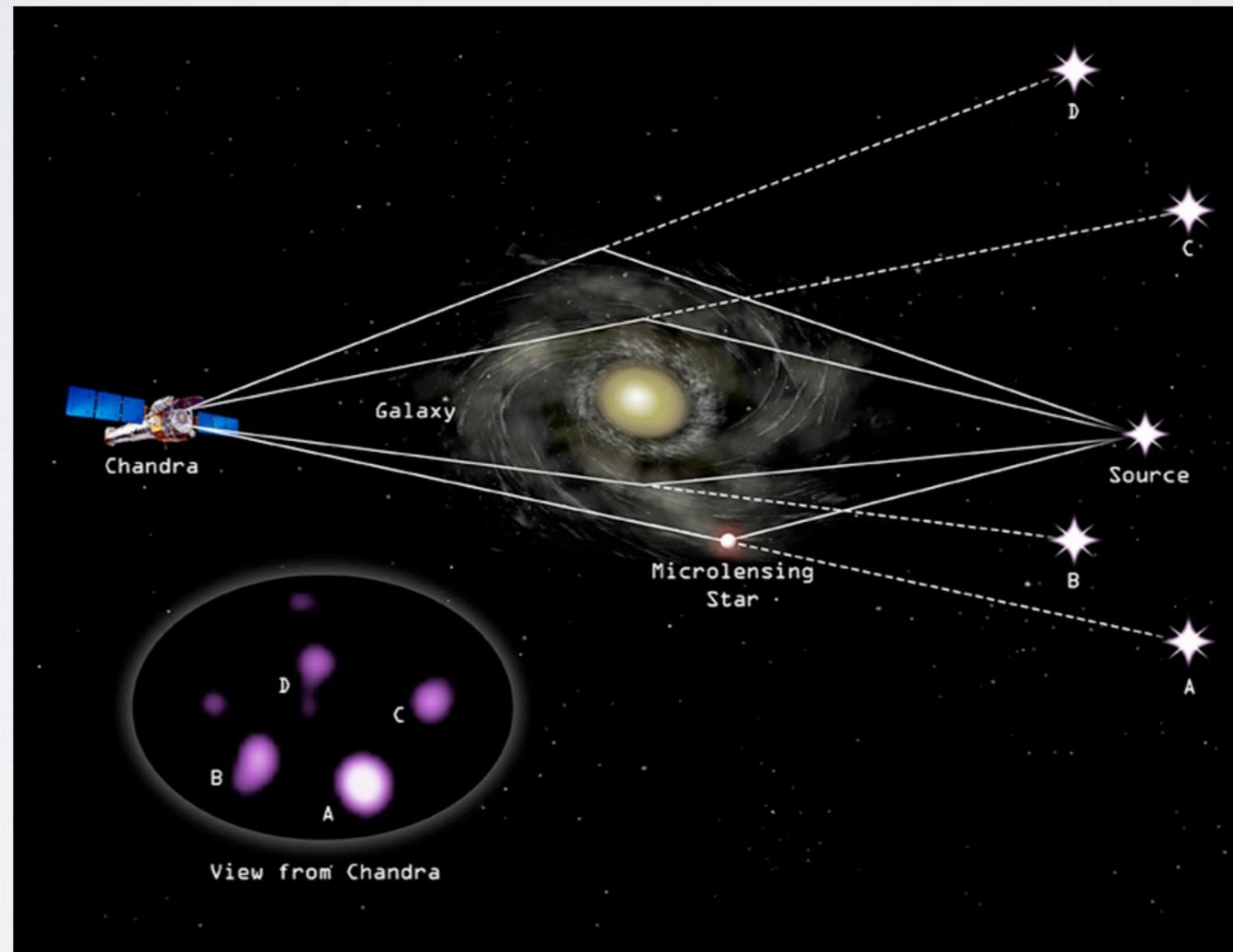


- Il doit y en avoir autour des galaxies ("halos") mais aussi entre les galaxies
- Selon les meilleurs modèles, cette matière noire devrait être "froide" (c.à.d. se déplacer lentement)
- Elle devrait, à partir de petites structures, en former des plus grandes (idem galaxies et amas !)
- Nature inconnue !
 - MACHOs (MAssive Compact Halo Objects)?
 - WIMPs (Weakly Interactive Massive Particles)?
 - Axions?



MATIERE NOIRE

- Lentille gravitationnelle:



- On peut maintenant cartographier la matière noire dans les amas !

MATIERE NOIRE

- On peut maintenant cartographier la matière noire dans les amas !

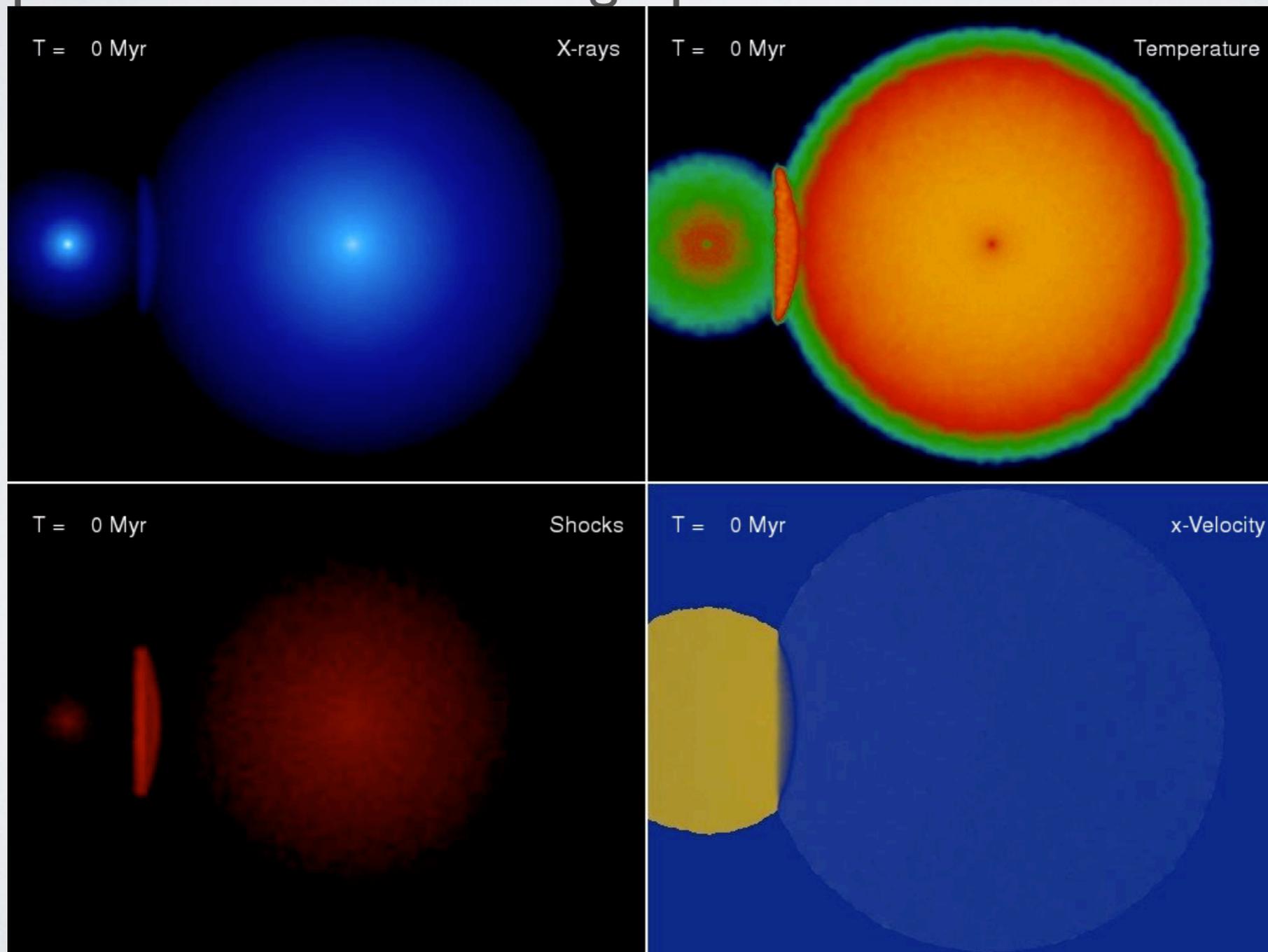


**amas du
Boulet**

“Bullet
cluster”

MATIERE NOIRE

- On peut maintenant cartographier la matière noire dans les amas !



**amas du
Boulet**

“Bullet
cluster”

MATIERE NOIRE

- On peut maintenant cartographier la matière noire dans les amas !



**amas du
Boulet**

“Bullet
cluster”

MATIERE NOIRE

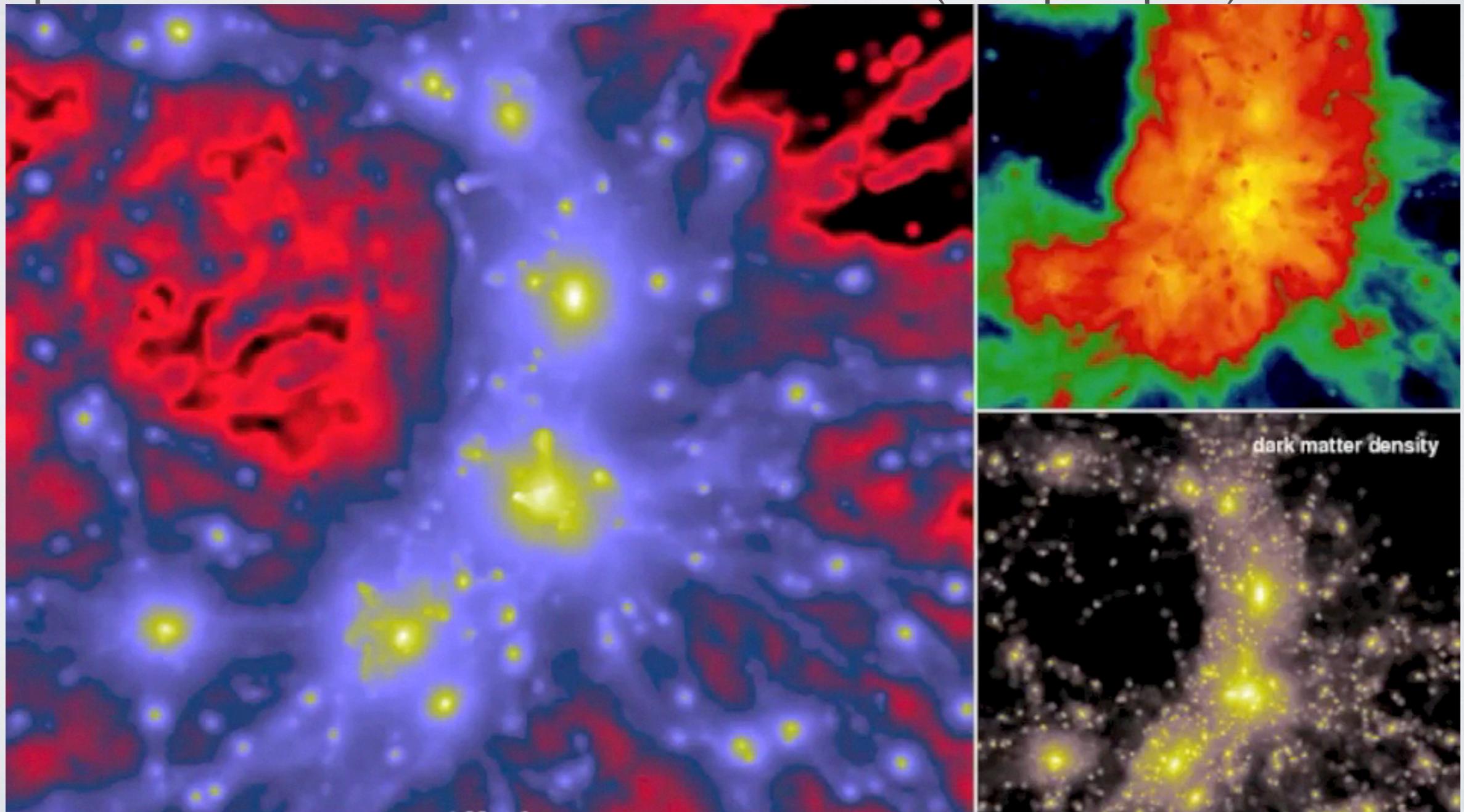
- On peut maintenant cartographier la matière noire dans les amas !



Abell 2744

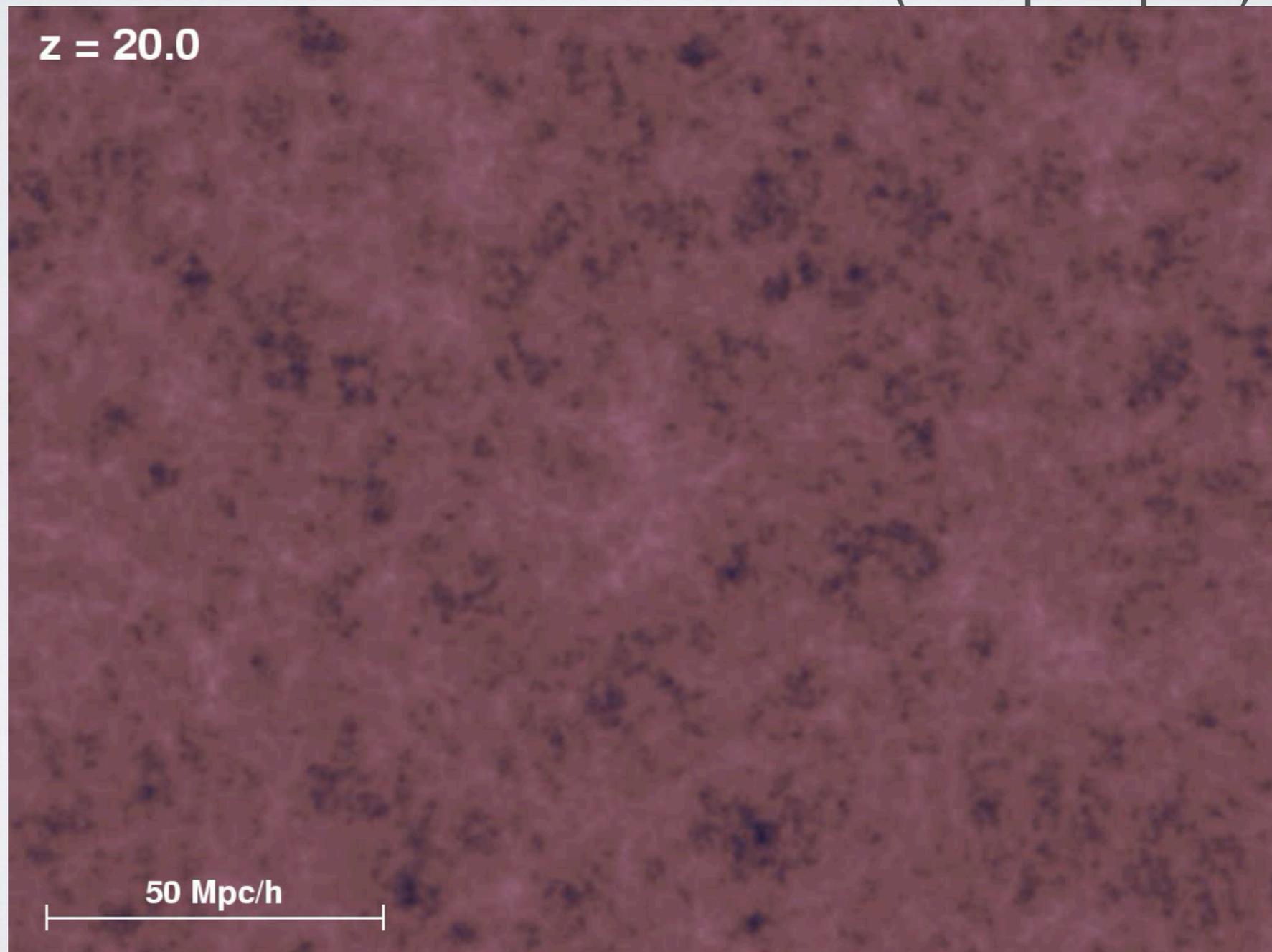
COSMOLOGIE

- Aujourd'hui: en prenant en compte la matière noire, les simulations reproduisent fidèlement la formation des amas (...ou presque!!)



COSMOLOGIE

- Aujourd'hui: en prenant en compte la matière noire, les simulations reproduisent fidèlement la formation des amas (...ou presque!!)



COSMOLOGIE

- Aujourd'hui: en prenant en compte la matière noire, les simulations reproduisent fidèlement la formation des amas (...ou presque!!)



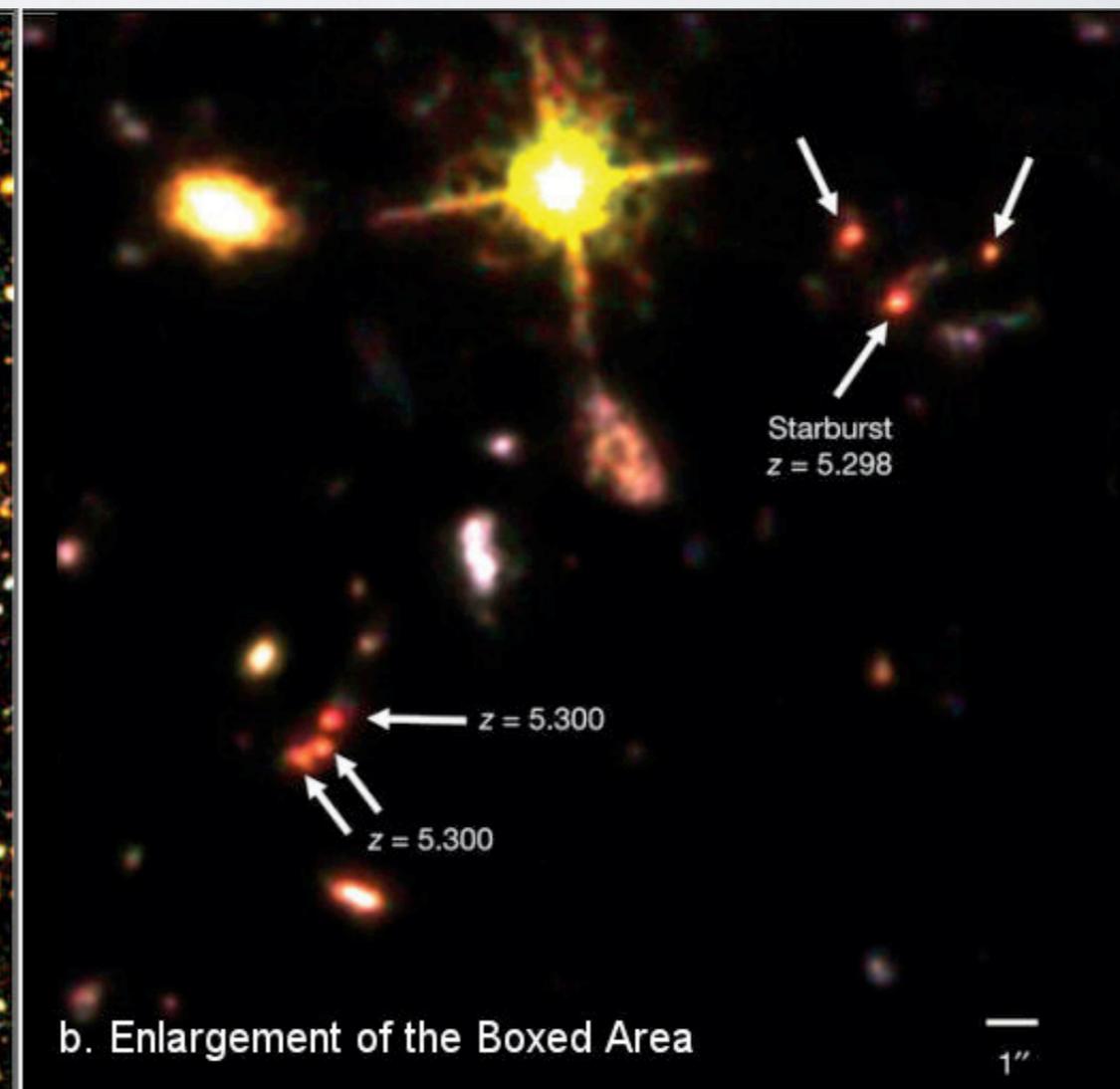
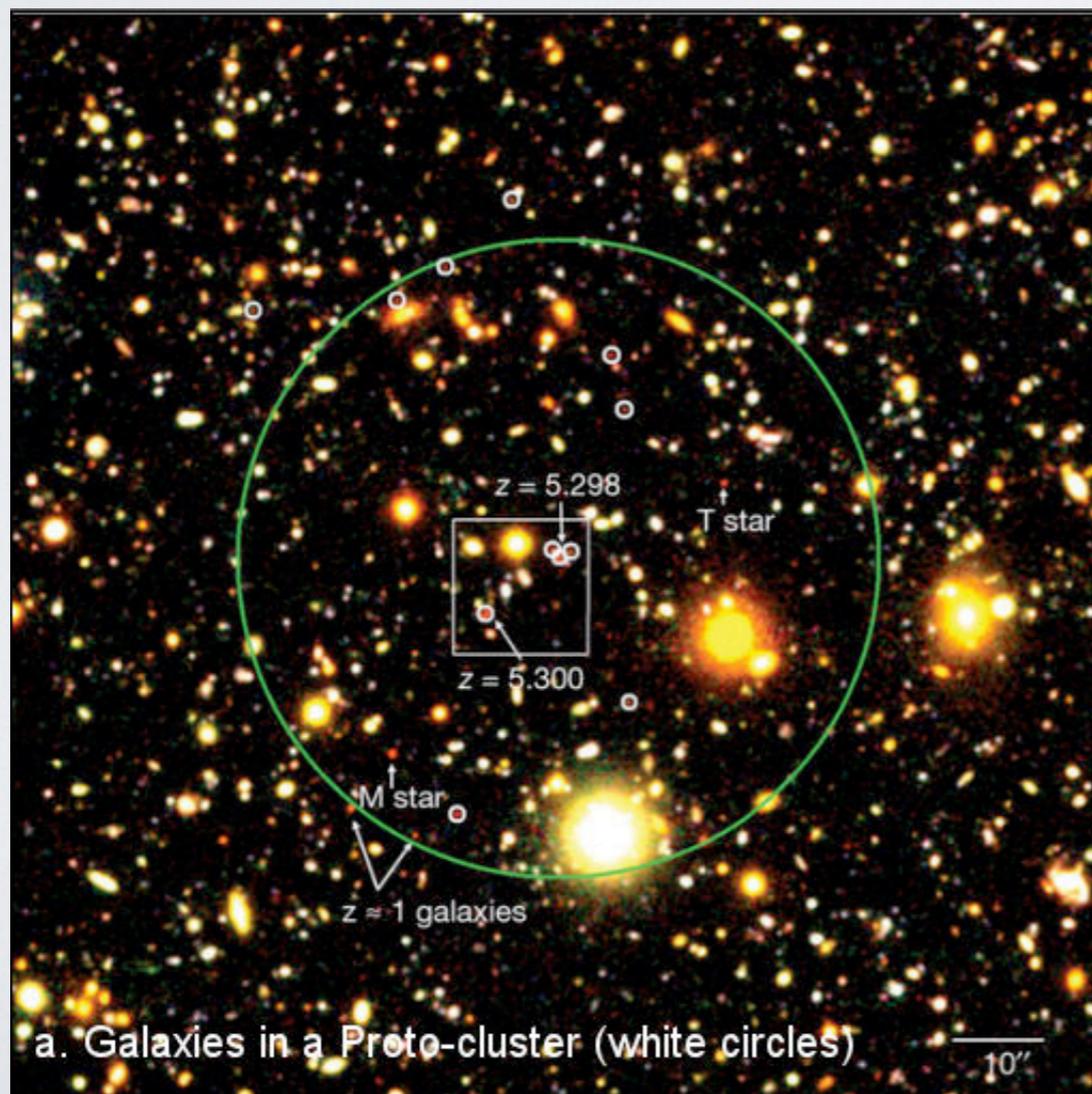
COSMOLOGIE

- Aujourd'hui: en prenant en compte la matière noire, les simulations reproduisent fidèlement la formation des amas (...ou presque!!)

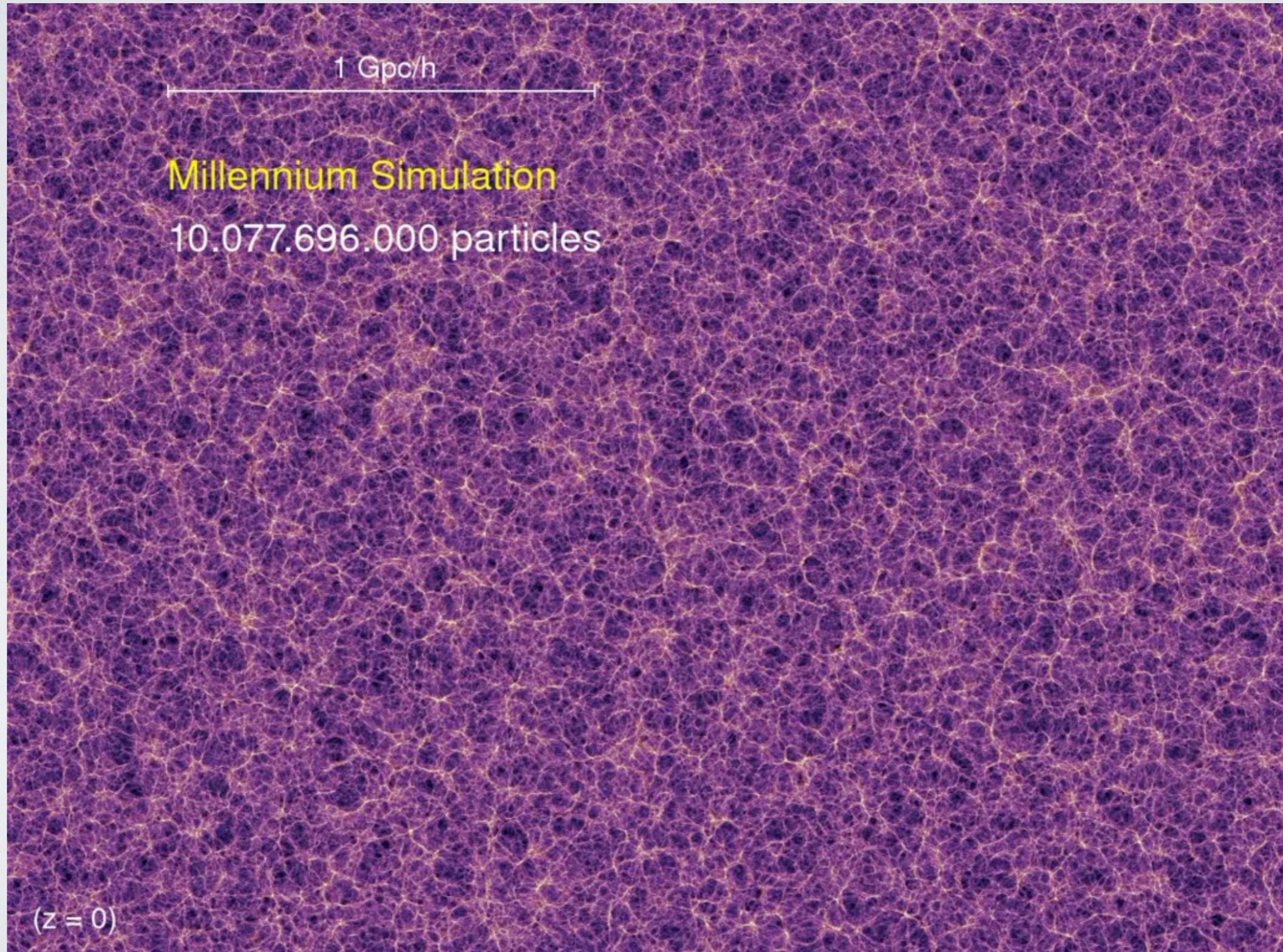


COSMOLOGIE

- Pour confirmer les simulations nouveau défis:
 - ✓ Observer les “filaments” qui relient les amas
 - ✓ Observer des proto-amas (formés à $z \geq 6$; 1 milliards d’années après le Big Bang)



COSMOLOGIE



COSMOLOGIE

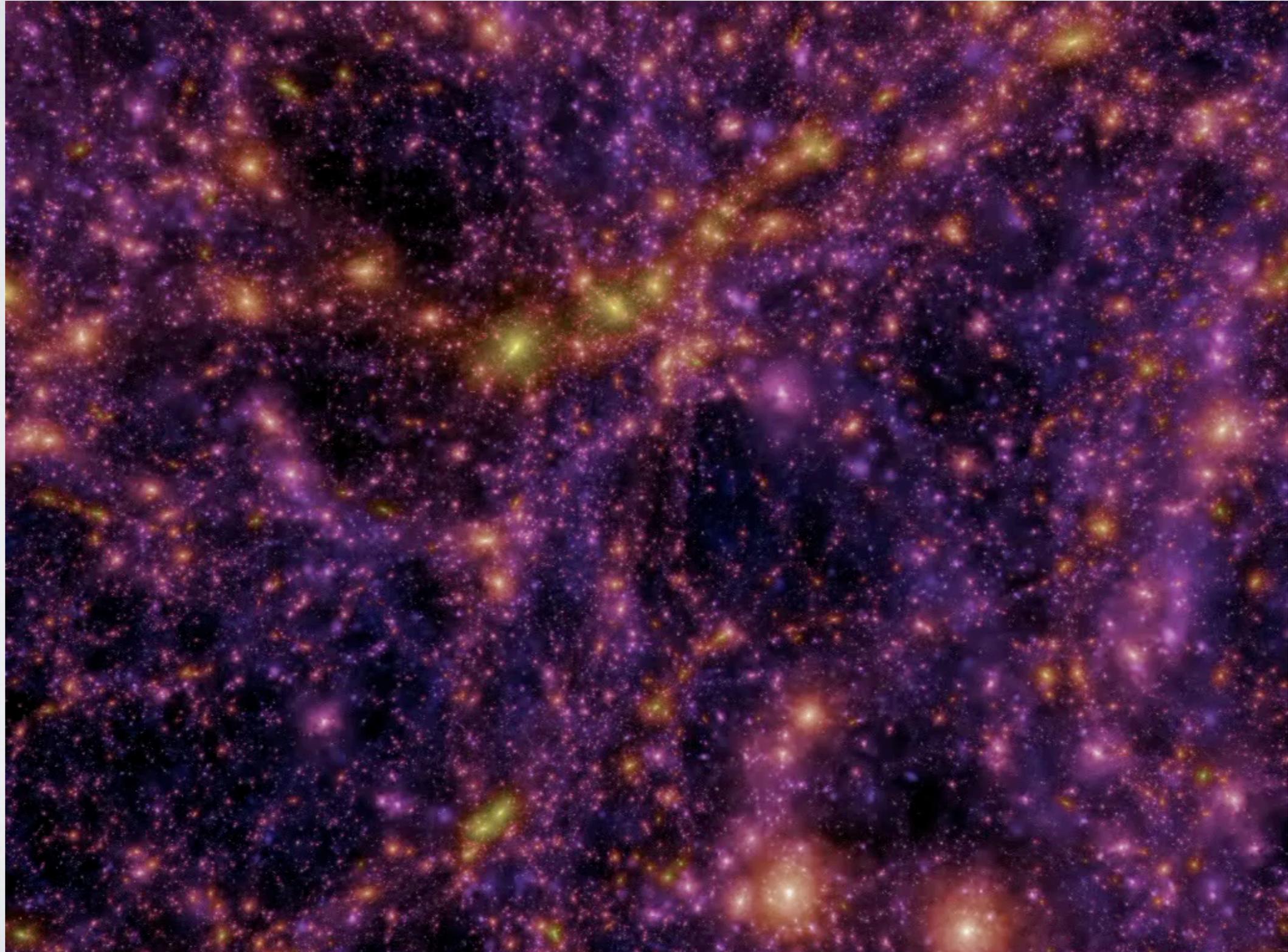
EAGLE: Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments

The evolution of intergalactic gas. Colour encodes temperature

$z = 19.8$
 $t = 0.2 \text{ Gyr}$
 $L = 25.0 \text{ cMpc}$

Simulation by the EAGLE collaboration
Visualisation by Jim Geach & Rob Crain

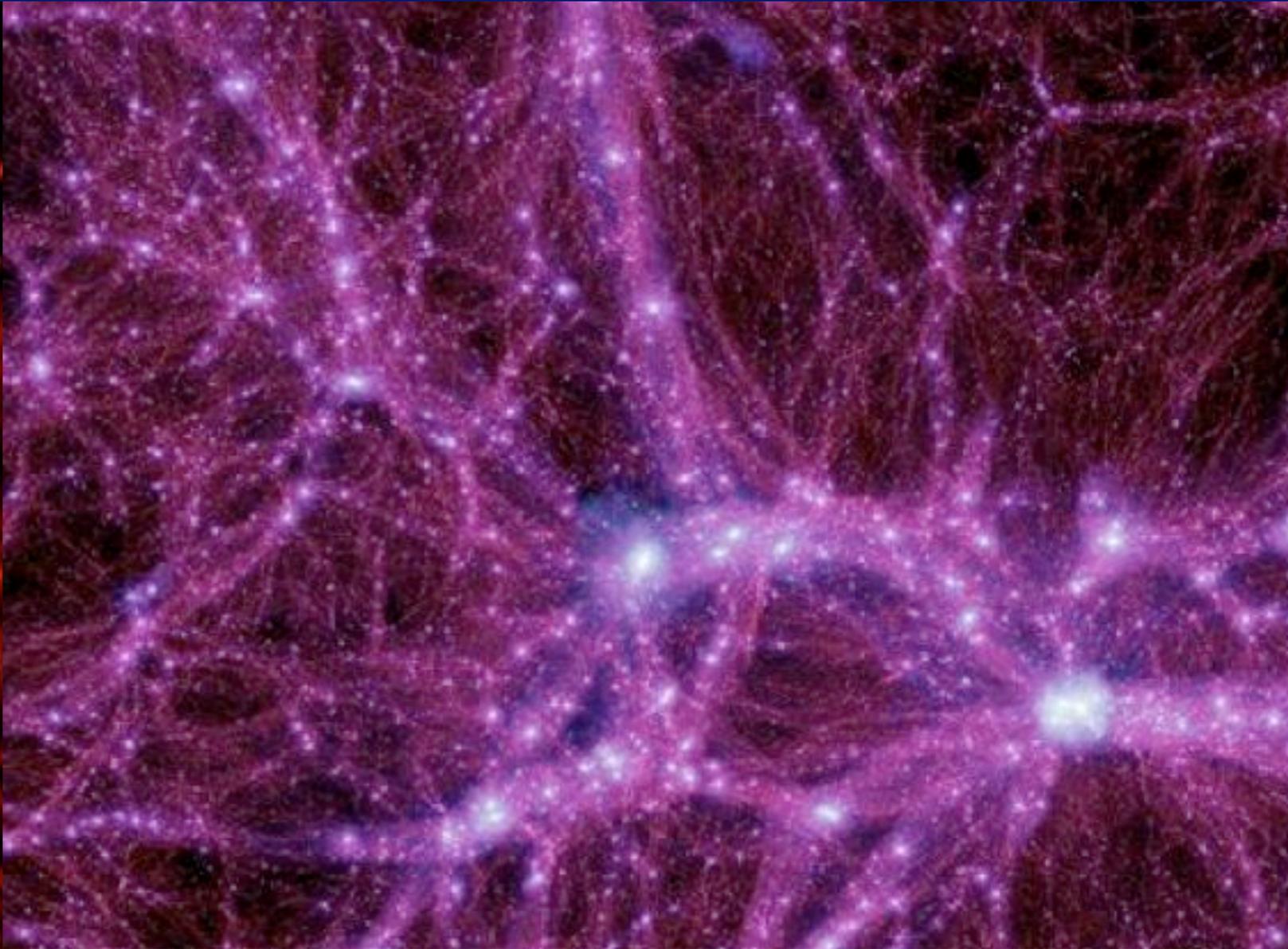
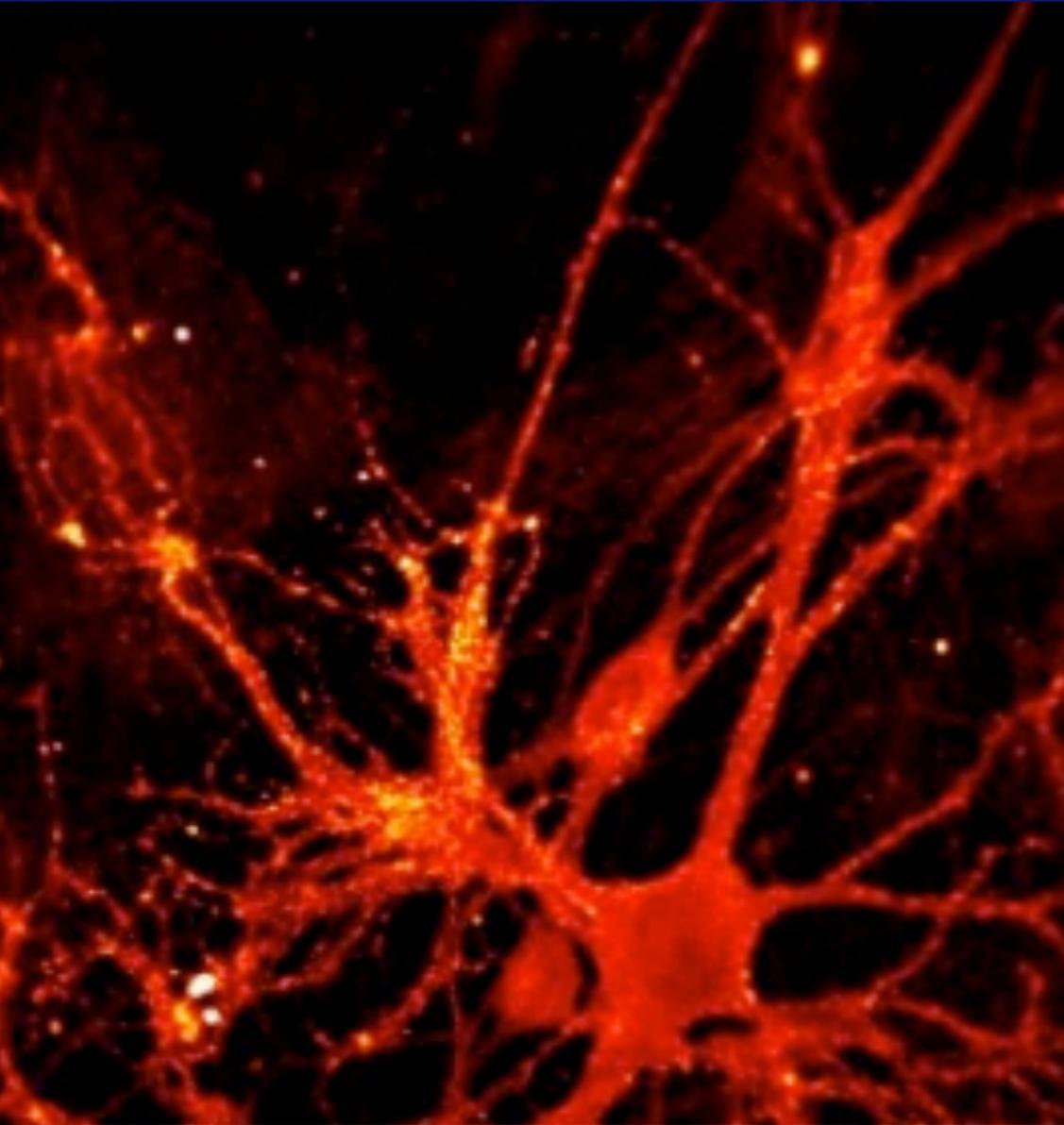
COSMOLOGIE



CONCLUSIONS

- Amas de galaxies: les plus larges structures de l'Univers
- Sont influencés par la cosmologie (expansion de l'Univers,...)... **GRANDES ECHELLES**
- ...mais aussi par les étoiles ! **PETITES ECHELLES**

- La lumière optique ne révèle pas tous les mystères de l'Univers...
- Planètes, étoiles, galaxies,... ne forment qu'une infime partie de l'Univers...



FIN ;-)

