

Galaxies: le mystère des univers-îles

1. La pré-histoire des galaxies

2. Ce que nous avons découvert au cours des 20 dernières années : 1990-2010

3. De la connaissance à l'ignorance...

... les grandes questions

David Elbaz - CEA Saclay - Service d'Astrophysique

Pré-histoire des galaxies

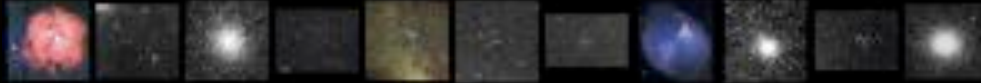
- **Etymologie:** *galaxie* de *gala* = lait en grec, *Via Lacta* pour les Romains.
- **Mythologie:** quelques gouttes de lait qu'Hercule fit jaillir en mordant le sein de Junon. Ou encore: le sillage enflammé laissé par Phaéton dans sa course désordonnée à travers le ciel sur le char du Soleil. Selon Ovide: le *chemin des Dieux*, la *voie de l'Immortalité*, qui conduisait les héros au palais de Jupiter. Les Arabes lui donnaient le nom de fleuve céleste.
- **Nature:** Aristote (384-322 av JC) regardait la V.L. comme un météore. Pourtant Démocrite (460-370 av JC), qui vivait quatre siècles avant notre ère, enseignait qu'elle devait être un amas d'étoiles trop petites et trop pressées pour pouvoir être discernées. Confirmation vingt siècles plus tard, en 1610, par Galilée (1564-1642) et sa lunette.
- Kant (1724-1804):« Histoire générale de la nature et théorie des cieux »
gravité (Newton 1687) + rotation \Rightarrow aplatissement disque \Rightarrow plan galactique
très grande échelle \Rightarrow lente période de rotation \Rightarrow mouvements imperceptibles
Nébuleuses = "univers-îles"
- Fin XVIII^e s.: puissance accrue des télescopes pour étudier les nébuleuses, catalogue de Charles Messier.

Les 110 nébuleuses du catalogue de Messier (1784 ! télescope 47cm)

M1: Crabe, reste de supernova



M20: Nébuleuse de Tifide



M31: Andromède



M42: Nébuleuse d'Orion



29 amas globulaires
(10 000 à 1 million d'étoiles
10 milliards d'années)

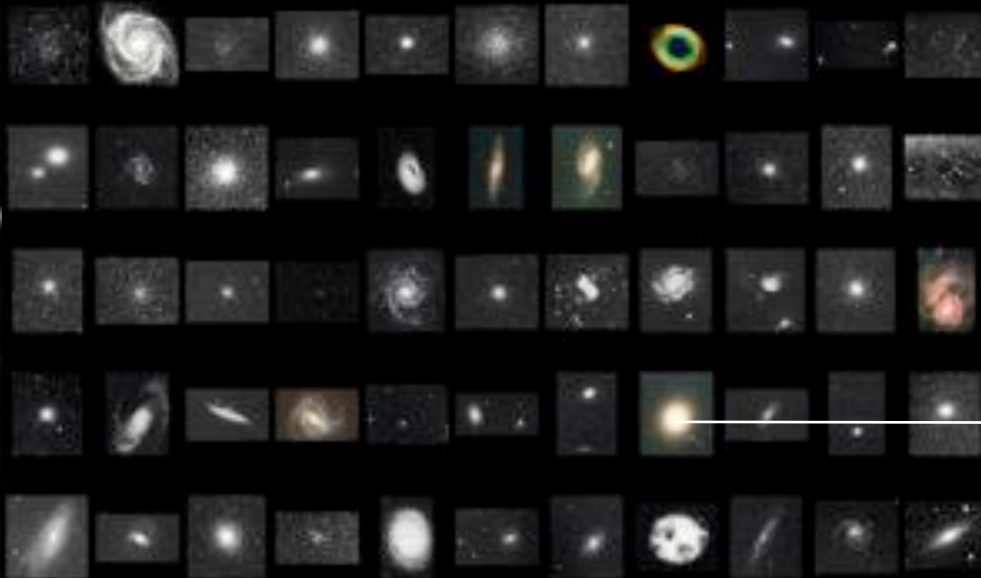
28 amas ouverts
(100 – 1000 étoiles de
de 200 millions d'années)

7 nébuleuses diffuses

4 nébuleuses planétaires

37 galaxies

M87: Galaxie elliptique



Pré-histoire des galaxies

- 1845: Lord Rosse (William Parsons) découvre l'existence de **deux populations** de nébuleuses grâce à son télescope de 1.80m:
 - les unes avec une distribution de lumière **régulière et elliptique**
 - les autres moins symétriques avec une **structure en spirale**.
- Il a aussi résolu l'intérieur des nébuleuses spiralées et découvert qu'elles étaient **constituées de sources ponctuelles**, ce qui renforçait l'hypothèse de Kant des univers-îles.
- A la fin du XIX^{ème} siècle, l'utilisation de **plaques photographiques** a révolutionné l'astronomie: on pouvait effectuer de longues poses et découvrir des objets invisibles à l'œil nu. On s'est alors attaqué à déterminer la forme de la Voie Lactée.
- Le Grand Débat du 26 avril 1920 au National Museum of Natural History de la Smithsonian Institution entre **Harlow Shapley** et **Heber Curtis**



M51 (les Chiens de Chasse)
vue par Lord Rosse

Heber Curtis : les nébuleuses spirales sont d'autres galaxies

- La nébuleuse spirale Andromède (M31) couvre 2° sur le ciel, d'autres qq secondes d'arc. Si même tailles et luminosités => distances > 1000 fois celle de M31 > taille de la V.L.

Harlow Shapley : les nébuleuses spirales sont des objets différents, plus petits

- Etoiles des nébuleuses spirales plus bleues que celles de la V.L.

Erreurs Curtis : Tailles M31 et VL = 3 kpc. 2 erreurs qui s'annulent : $d(M31) \times 10$, $\text{taille}(VL) \times 10$

Erreur Shapley : les étoiles de la VL sont plus rouges à cause de l'absorption par la poussière...

Le Grand Débat

- Curtis : distance de M31 = 100 kpc pour M31 à l'aide de novae => taille de 3 kpc ~ V.L. par Kapteyn, ce qui impliquait que M31 était une galaxie similaire à la V.L.
- 2 erreurs qui s'annulent chez Curtis:
 - (i) Supernovae pas novae => distance de M31 (\neq 100 kpc) = 773 kpc (2.52×10^6 a.l., Ribas +05)
 - **Energie totale rayonnée / supernova = 10^{51} ergs (10^{44} J) -> luminosité $\sim 10^{41}$ ergs/s = $10^8 L_{\odot}$**
 - **Energie totale rayonnée / nova = 10^{45} ergs (10^{38} J) -> luminosité $\sim 10^{39}$ ergs/s = $10^6 L_{\odot}$**
 - (ii) La taille de la V.L. (diamètre) n'est pas de 3 kpc mais de 30 kpc (extinction/poussière).

- Shapley : les étoiles des nébuleuses spirales sont plus bleues que celles de la V.L. => systèmes \neq mais étoiles de la V.L. vues **dans le plan du disque, subissent forte extinction par la poussière.**
- Utilisation des mesures de vitesses de rotation des étoiles des nébuleuses spirales réalisées par Adriaan van Maanen, qui impliqueraient des vitesses de rotation super-luminiques si les nébuleuses avaient été extragalactiques ! Mais ces mesures faites sur des plaques photos des mouvements propres des étoiles des nébuleuses au cours de plusieurs années étaient fausses !...
- **Les deux camps avaient utilisé au mieux leurs données:**
 - De son côté, Shapley avait proposé la meilleure estimation de la taille de la V.L. et de la position du soleil dans la V.L.
 - Curtis avait raison sur la véritable nature des nébuleuses spirales.

Ed Barnard au télescope de Lick (90 cm) en 1892



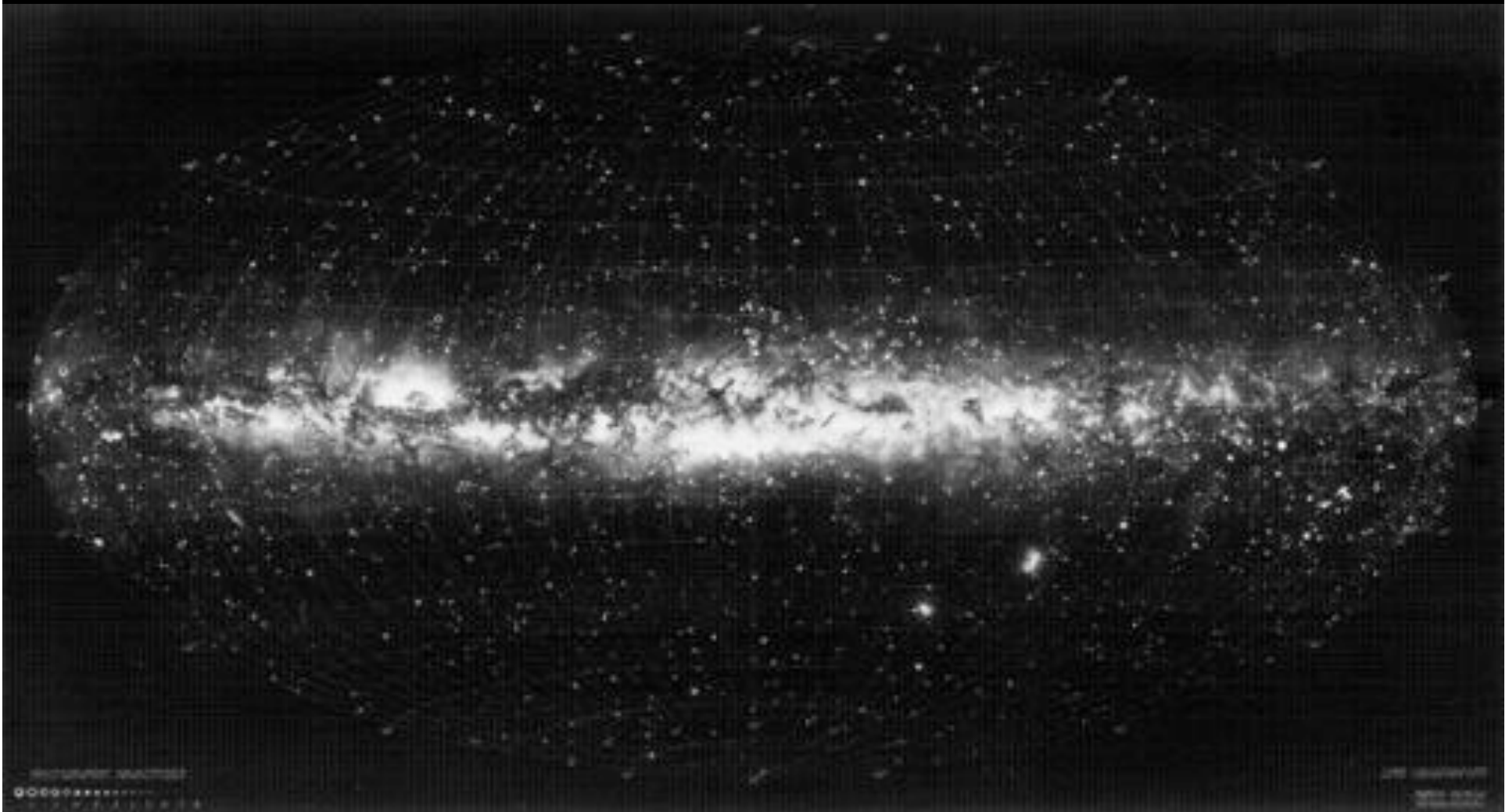
**“Serpent” ou nébuleuse “S” (Barnard 72), Edwin Barnard ApJ (1919):
“On the Dark Markings of the Sky with a Catalog of 182 such Objects”**

« Je pense que certaines d’entre elles vont bientôt autant attirer l’attention que les nébuleuses »

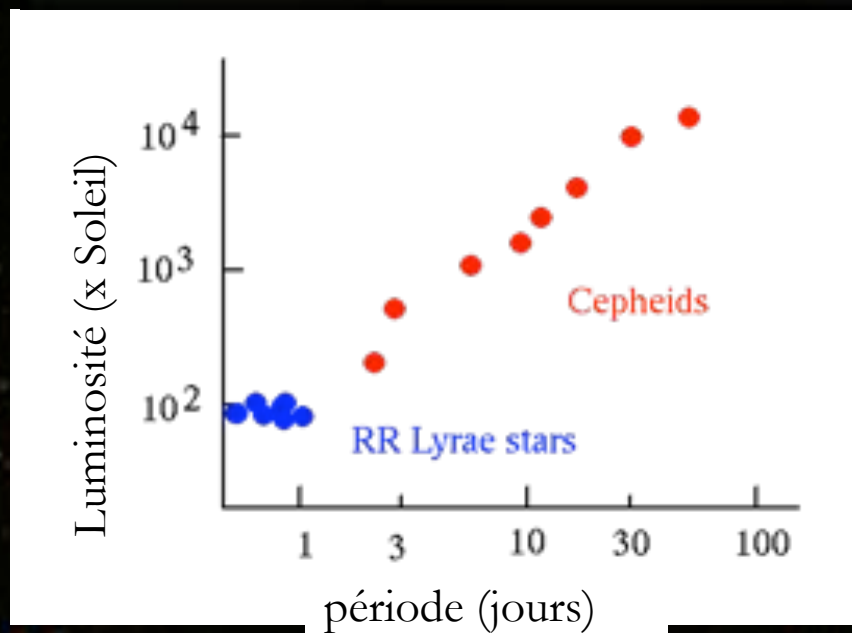


« Personne ne peut supposer un instant que cette trace soit autre chose qu’un vide entre les étoiles »

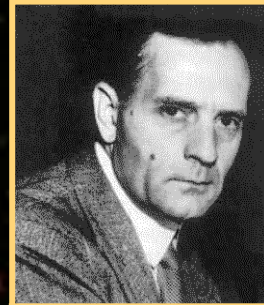
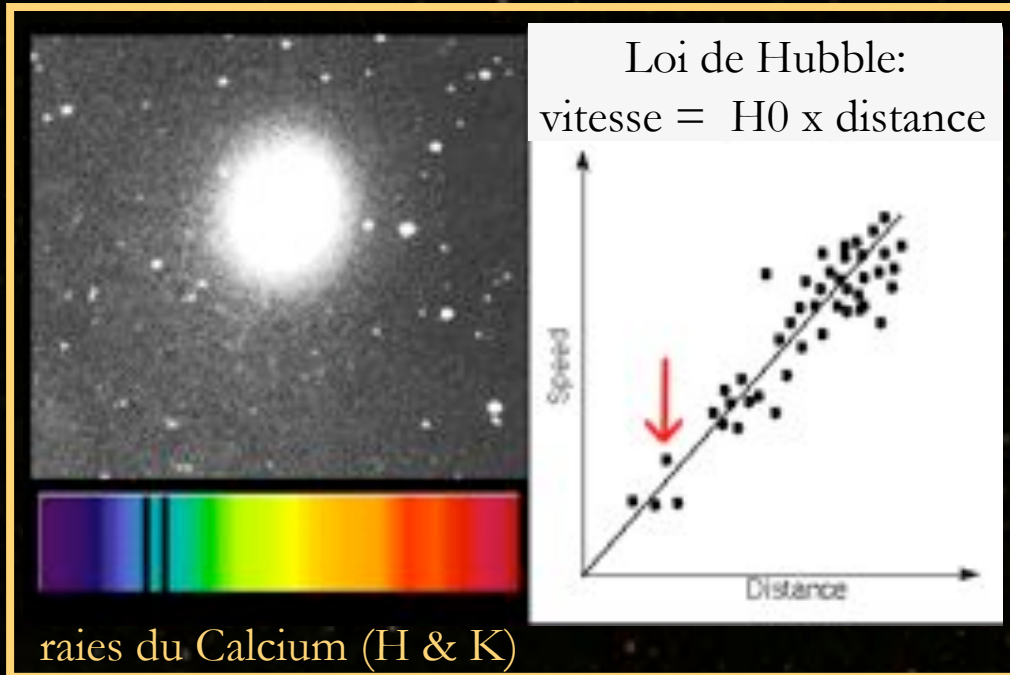
La Voie Lactée



Au-delà des parallaxes: les céphéïdes d'Henrietta Leavitt (1912)



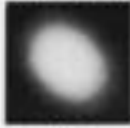
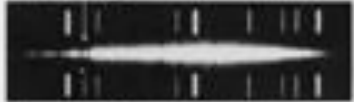








La découverte des galaxies et sa conséquence: l'univers a une histoire ...



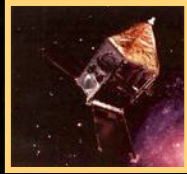
E. Hubble



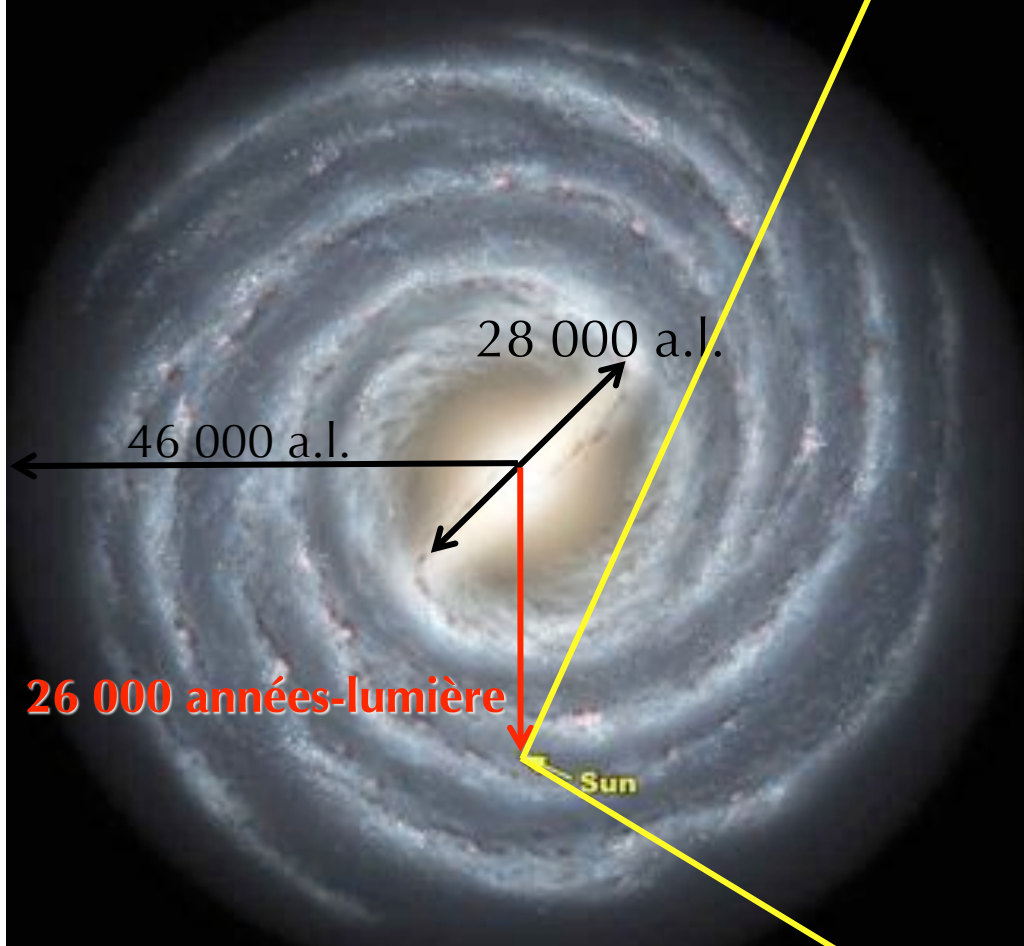
Télescope 2.50m Mt Wilson

| Cluster nebula in | Distance in light-years | Redshifts H + K |
|--|-------------------------|--|
|  Virgo | 78,000,000 |  1,200 km s ⁻¹ |
|  Ursa Major | 1,000,000,000 |  15,000 km s ⁻¹ |
|  Corona Borealis | 1,400,000,000 |  22,000 km s ⁻¹ |
|  Bootes | 2,500,000,000 |  39,000 km s ⁻¹ |
|  Hydra | 3,960,000,000 |  61,000 km s ⁻¹ |

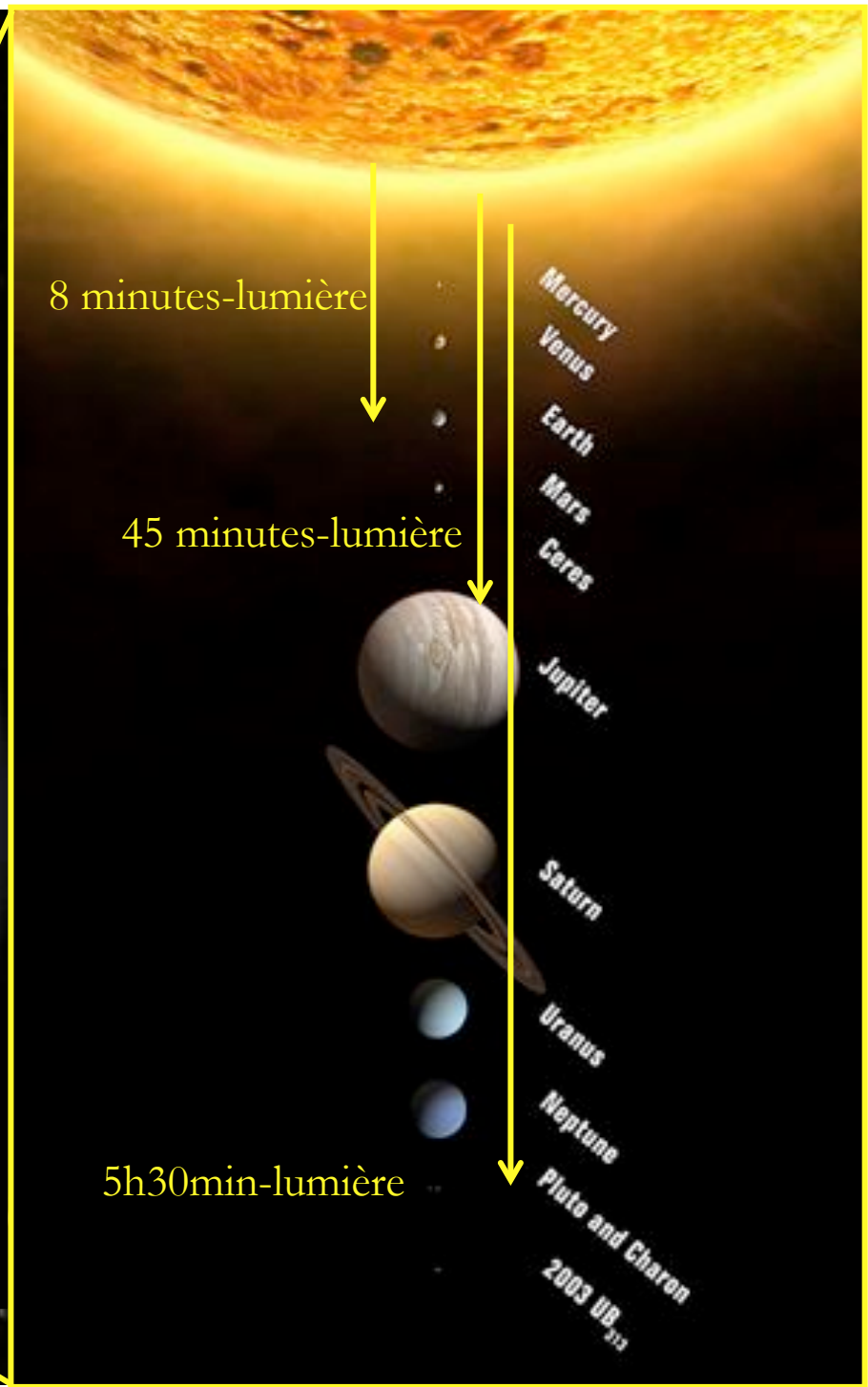
le satellite Hipparcos (1989 à 1993) a mesuré les distances des étoiles à 0.001 seconde d'arc près

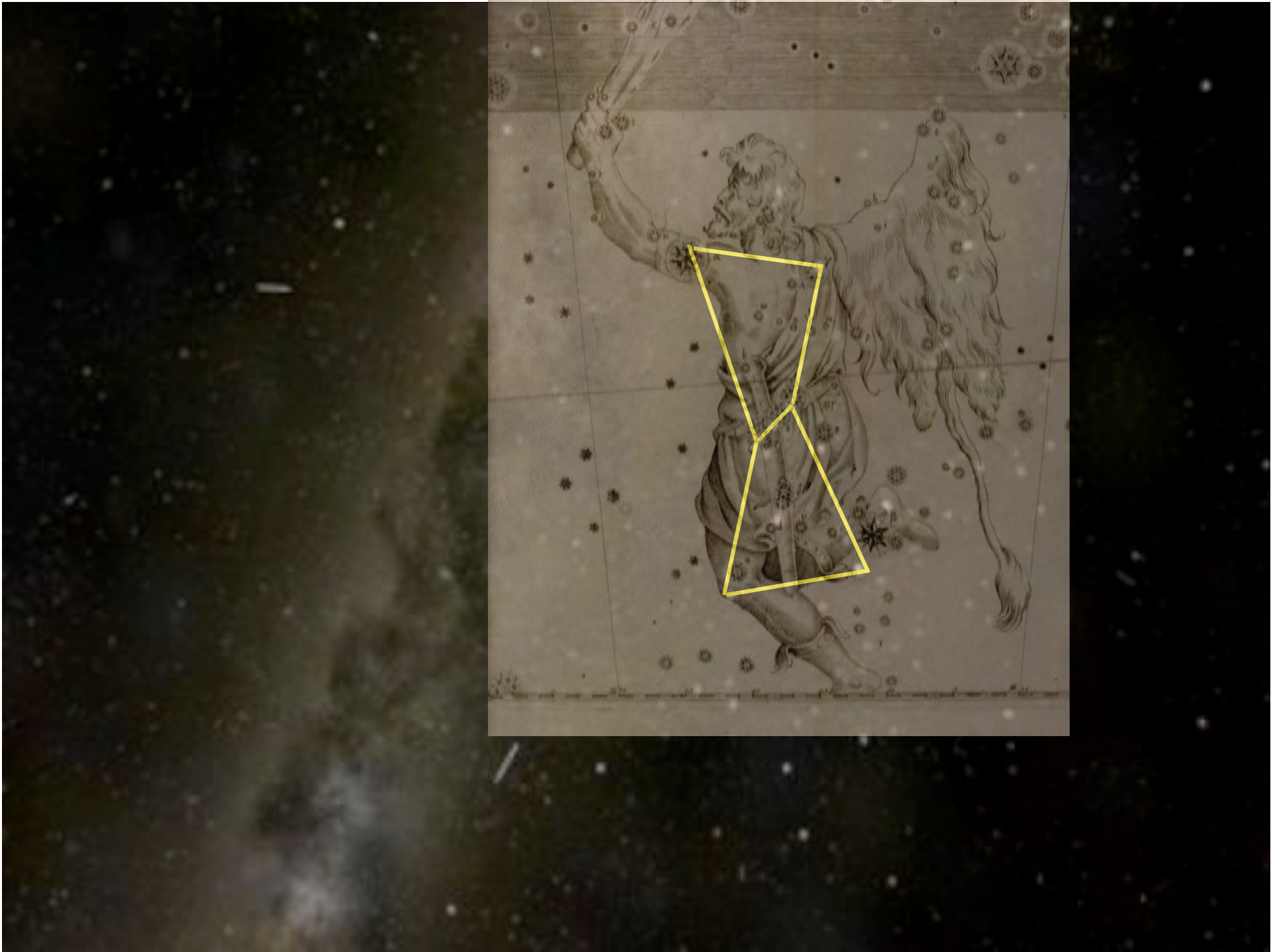


Voie Lactée



a.l.= année-lumière= 10 000 milliards de km
minute-lumière= 18 millions de km





**Virtual Voyage:
Milky Way to the Virgo Cluster**

HDTV Visual Excerpt from "Runaway Universe"

Courtesy NOVA/WGBH, PBS

Tom Lucas Productions

Voyage dans le cosmos créé avec des images réelles...

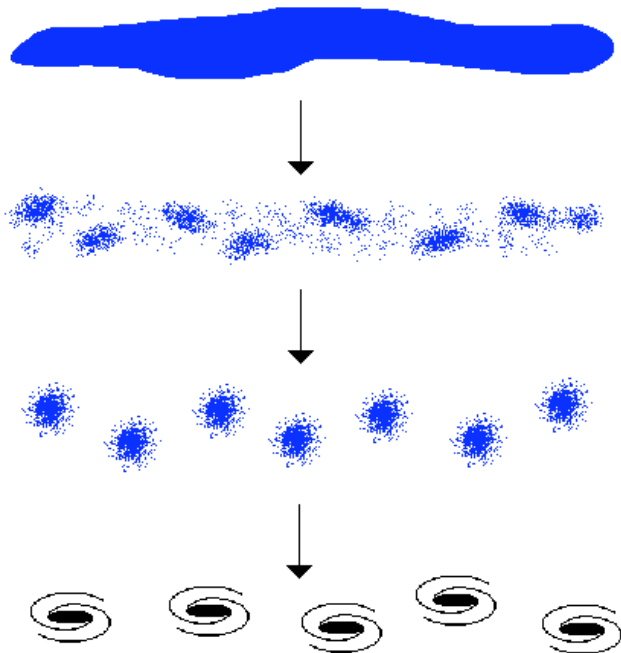
+ 100 000 étoiles Hipparcos + mesures distances galaxies (Brent Tully, université de Hawaï)

Comment les galaxies sont-elles nées ?

Les 2 scénarios de formation des galaxies en compétition :
top-down et **bottom-up**

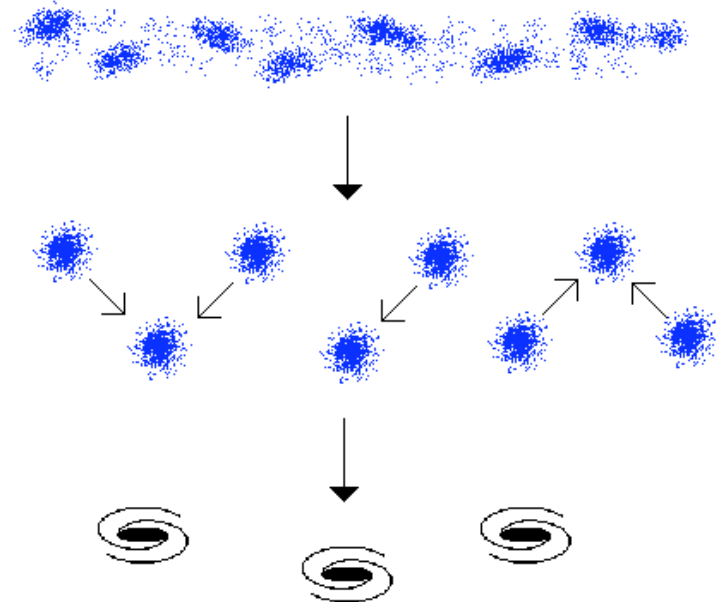
Top-Down Structure Formation

in a top-down scenario, large pancakes of matter form first, then fragment into galaxy-sized lumps

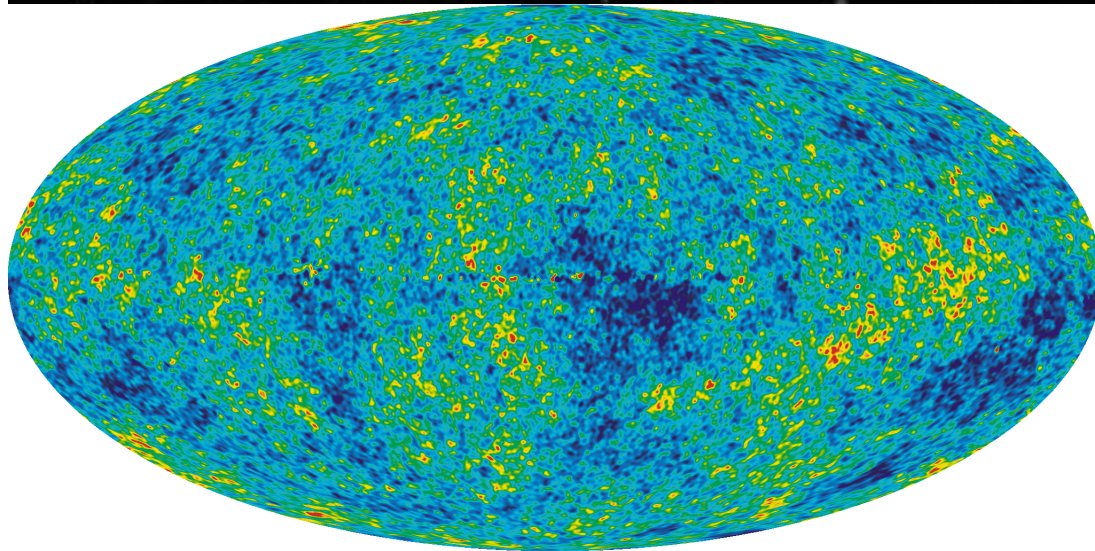


Bottom-Up Structure Formation

in a bottom-up scenario, small, dwarf galaxy-sized lumps form first, then merger to make galaxies and clusters of galaxies



Comment un univers primordial aussi homogène a-t-il pu donner naissance aux structures que nous connaissons aujourd'hui ?



Fluctuations primordiales:
 $\delta\rho/\rho = \delta T/T \approx 10^{-5}$



galaxies: $\delta\rho/\rho \approx 10^6$

Ce que nous avons découvert au cours des 20 dernières années : 1990-2010

1. L'histoire des galaxies est dans notre assiette...
2. Plonger dans le ciel pour retrouver la mémoire
 - Une seule marche d'escalier pour remonter 12 milliards d'années en arrière
 - Vers une chronologie cosmique de la naissance des galaxies

L'histoire des galaxies est dans notre assiette...

- A l'origine, le Big Bang a donné naissance à des atomes d'H, d'He et un petit peu d'éléments légers (Li, Be, B). Le reste est né dans les galaxies

On a pesé les galaxies au cours des dernières années ainsi que leur composition

- En moyenne 1 galaxie / boîte de 20 millions d'années-lumière de côté
- 1 kg d'étoiles contient 4% d'He non primordial + 2% métaux (60% O, 7% Fe, et C,N 7,5 %)
- Métaux= atomes plus lourds que l'hydrogène

Chaque atome est né dans le coeur d'une étoile en produisant ~8% de lumière ! ($E= mc^2$)

- Galaxies (étoiles, milieu interstellaire) + milieu intergalactique = 2×10^{-30} kg "métaux"/m³
- Dans une assiette d'univers, il y a :
 5×10^{-30} kg d'He (0,74%) + 2×10^{-30} kg d'O (0,8%), Fe (0,86%), C,N (0,75%)

d'éléments lourds = cendres issues de la combustion des étoiles dans les galaxies

Grâce aux cendres contenues dans une "assiette d'univers", on peut calculer combien de lumière les galaxies ont produit au cours de toute l'histoire de l'univers !

Nucléosynthèse: $p \rightarrow He \rightarrow C, N, O, \dots$

$$m_p = 0.93828 \text{ GeV}, m_n = 0.93857 \text{ GeV}$$

Energie de liaison H \rightarrow He: 7 MeV

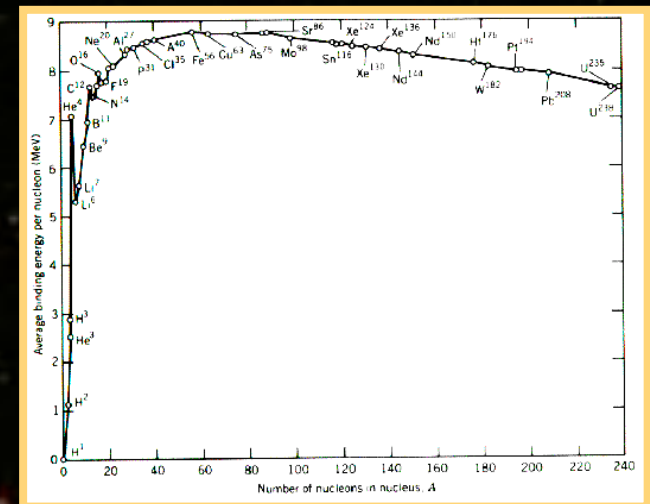
Lorsqu'un $p \rightarrow He$

il produit 7MeV par unité de 0.93828 GeV

Donc :

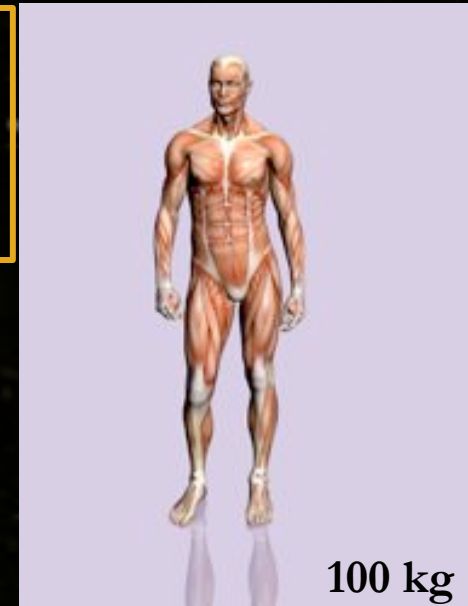
0.74 % de la masse est convertie en lumière

He \rightarrow C, N, O: + 0.5 MeV



Quelle quantité de lumière a-t-elle été rayonnée pour former un... ...être humain ?

300 Mega-Joules de lumière
/ être humain
De quoi porter 1 tonne d'eau
à ébullition !



| Élément chimique | Pourcentage en poids | Où trouver ces élément dans le corps humain? |
|---------------------------|----------------------|--|
| Oxygène | 65 | fluides et tissus (carbohydrates, protéines, graisses, ADN, ARN, eau corporelle, os) |
| Carbone | 18 | partout (carbohydrates, protéines, graisses, ADN, ARN) |
| Hydrogène | 10 | fluides et tissus (carbohydrates, protéines, graisses, ADN, ARN, eau corporelle, os) |
| Azote | 3 | fluides et tissus (protéines, graisses, ADN, ARN) |
| Calcium | 1.5 | partout (os en particulier) |
| Phosphore | 1 | urine, protéines, graisses, ADN, ARN, os |
| Potassium | 0.4 | eau corporelle |
| Soufre | 0.3 | protéines |
| Sodium | 0.2 | fluides et tissus (eau corporelle en particulier) |
| Chlore | 0.2 | eau corporelle |
| Magnésium | 0.1 | partout (enzyme permettant synthèse ADN) |
| Iode | 0.1 | enzymes aidant la synthèse d' hormones |
| Fer | 0.1 | enzymes permettant transport oxygène du sang |

| | | |
|---------------------------|--------------|-----------------------------------|
| Cuivre | trace | enzymes |
| Zinc | trace | enzymes (stabilise ces dernières) |
| Sélénium | trace | enzymes |
| Molybdène | trace | enzymes |
| Fluor | trace | os et dents |
| Manganèse | trace | enzymes permettant synthèse ADN |
| Cobalt | trace | enzymes |
| Lithium | trace infime | enzymes |
| Stroncium | trace infime | enzymes |
| Aluminium | trace infime | enzymes |
| Silicium | trace infime | muscles et peau |
| Plomb | trace infime | enzymes |
| Vanadium | trace infime | enzymes |
| Arsenic | trace infime | enzymes |
| Brome | trace infime | enzymes |



L'équivalent de
1400 ampoules
de 60W allumées
pendant l'heure de
cette conférence

L'histoire des galaxies est dans notre assiette...

Si vous regardez le ciel :

- de nuit
- pas dans le plan zodiacal
- pas dans le plan de la Voie Lactée (234 milliards d'étoiles de $1/3 M_{\text{sol}}$ et poussière interstellaire)
- pas dans la direction d'un cirrus galactique

Il reste quelques trous... (ex. le trou de Lockman, pas plus que la taille de la lune !)

Si vous utilisez une antenne radio d' 1 m^2 et que vous collectez la lumière de 10% du ciel, vous recevrez... **1 milliardième de Watt de lumière !**

Cette lumière possède une couleur, une température, un domaine de longueurs d'ondes ou de fréquence bien spécifique, autour de 1 cm dans le domaine radio. C'est le rayonnement thermique dû au Big Bang.

Grâce au télescope spatial Hubble (optique) et COBE (infrarouge) + X, gamma, on a aujourd'hui mesuré la lumière du ciel extragalactique sur tout le spectre électromagnétique (toutes les couleurs):

45 milliardièmes de Watt de lumière / m^2 sur 10% du ciel

Les cendres trouvées dans notre assiette d'univers expliquent...:

40 milliardièmes de Watt de lumière / m^2 sur 10% du ciel

On y est presque ! D'où viennent les 5% manquants ?

Mais d'abord: où, comment et quand cette lumière est-elle née ?

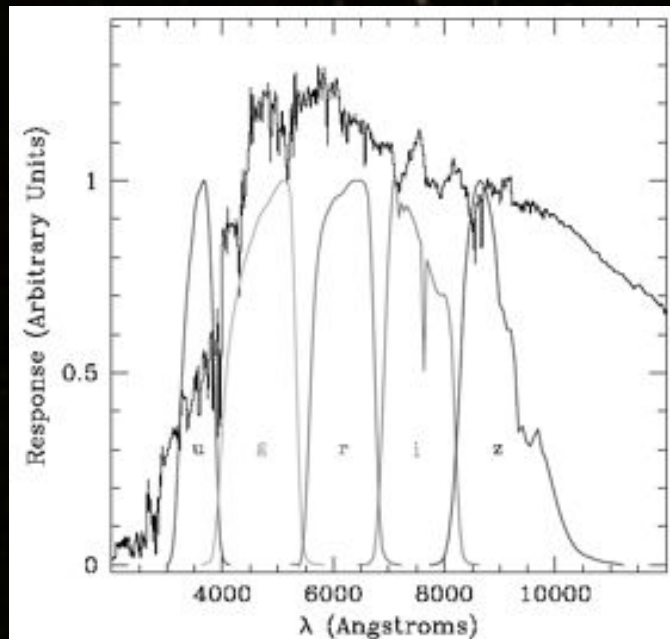
Pour le comprendre il va nous falloir: plonger dans le ciel pour retrouver la mémoire

Ce que nous avons découvert au cours des 20 dernières années : 1990-2010

1. L'histoire des galaxies est dans notre assiette...
2. Plonger dans le ciel pour retrouver la mémoire
 - Une seule marche d'escalier pour remonter 12 milliards d'années en arrière
 - Vers une chronologie cosmique de la naissance des galaxies



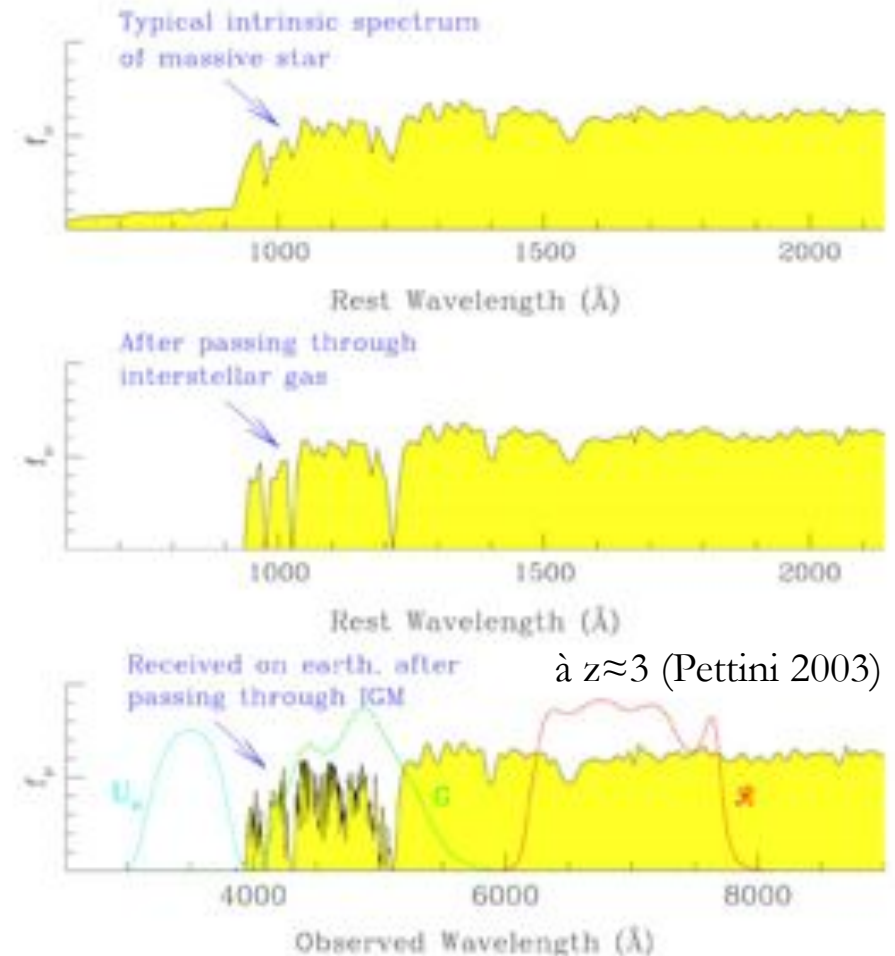
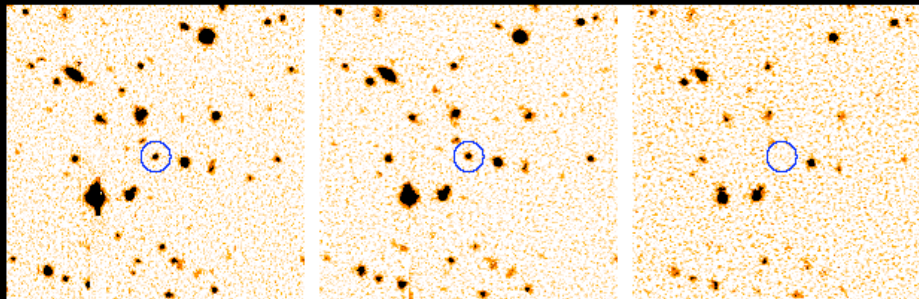
Une seule marche d'escalier pour remonter 12 milliards d'années en arrière



RED

GREEN

UV



Galaxie la plus distante $z=6.96$ (750 Myr ap.BB, Iye +06)

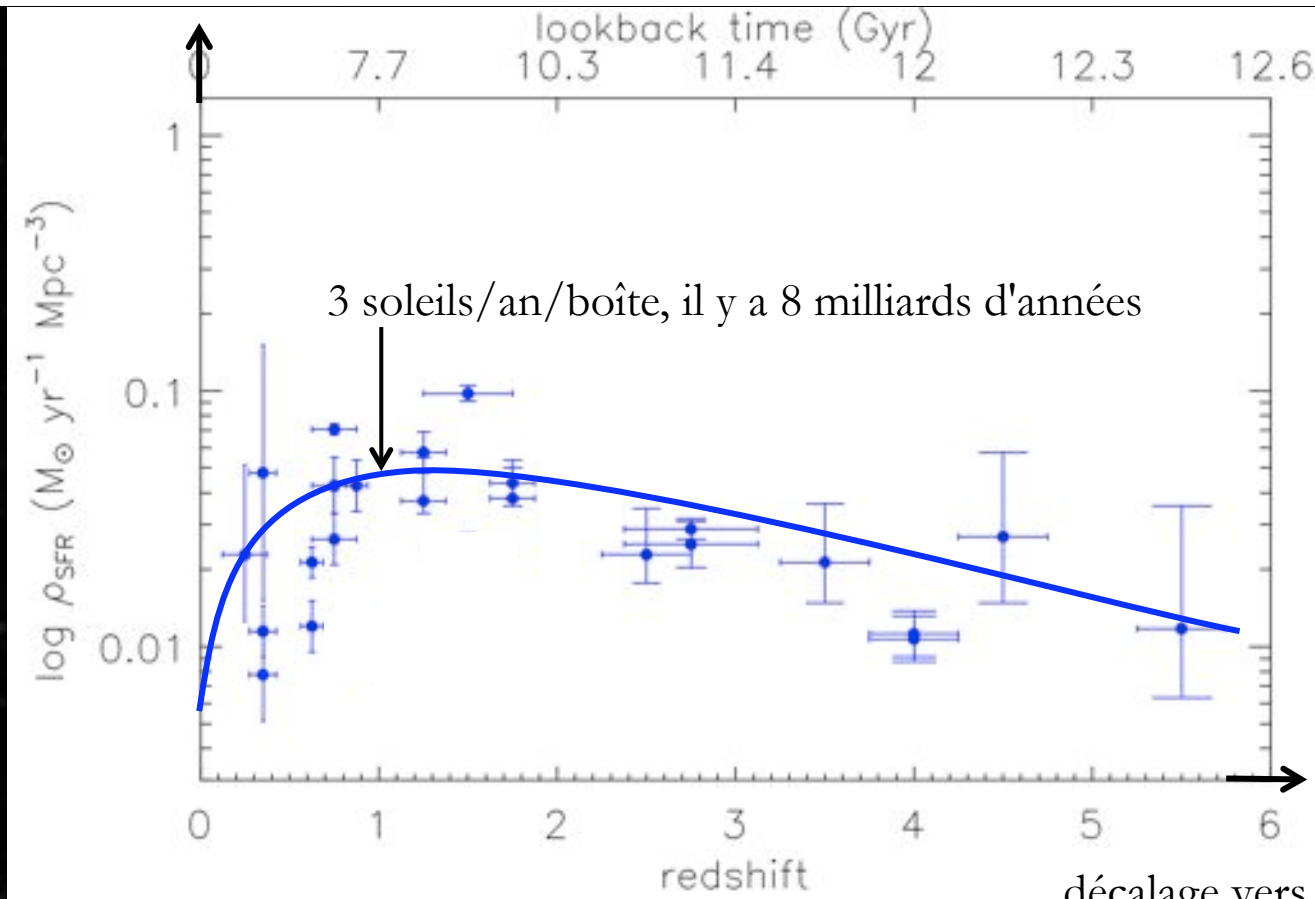
Tel 8.2m Subaru



+ distant quasar CFHQS J2329-0301 $z=6.43$, Avril 2009: GRB " $z=8.3$ "...

Histoire cosmologique de la formation d'étoiles

Masse d'étoiles qui naissent chaque année dans une boîte de 3 millions d'années-lumière de côté



décalage vers le rouge
= temps (vers le passé)

Visualisation en 3D de la Nébuleuse d'Orion

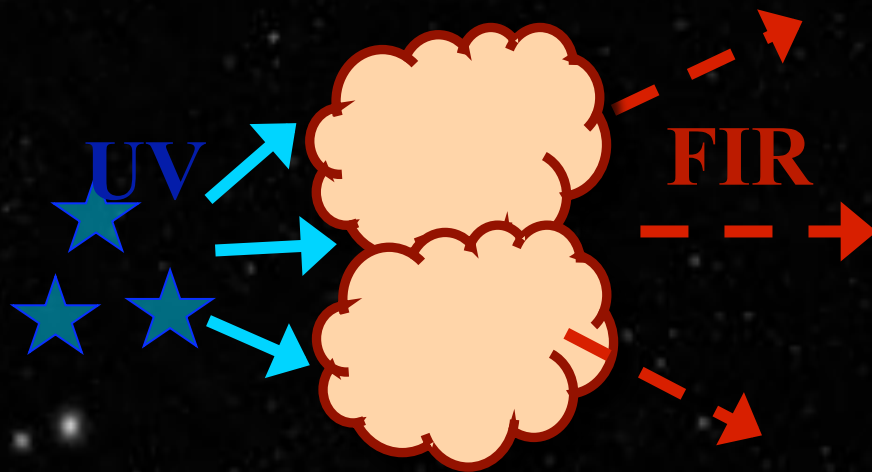


Credits: (proplyds = protoplanetary disks)
David R. Nadeau, Jon Genetti, *San Diego Supercomputer Center*
Carter Emmart, Erik Wesselak, Dennis Davidson, *Hayden Planetarium*
C. R. O'Dell and Zheng Wen, *Rice University*.

Formation d'étoiles

Production d'éléments lourds

Formation de poussière

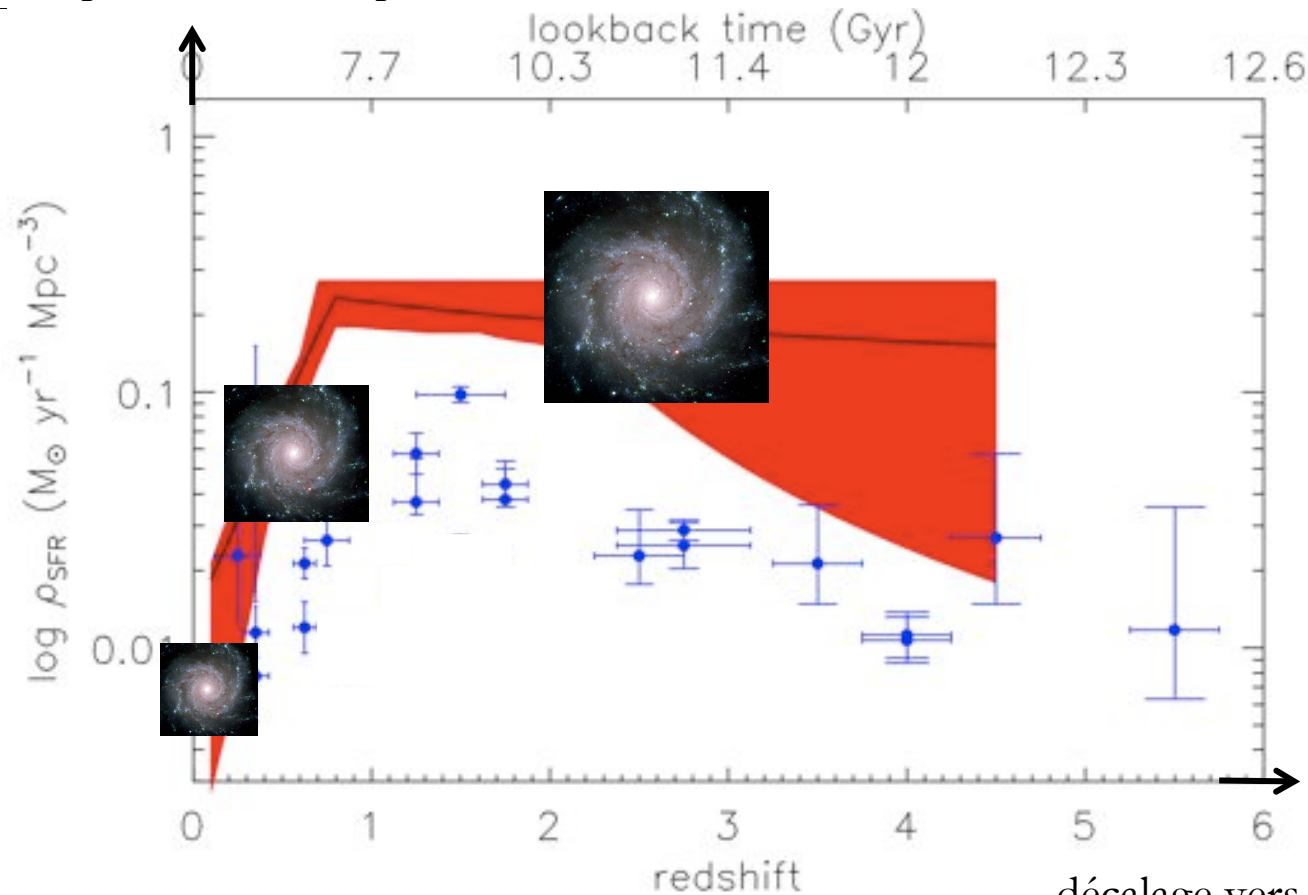


Les étoiles massives naissent dans des
Nuages Moléculaires Géants (GMC)
Leur durée de vie est trop courte pour qu'elles
s'en échappent...

Leur rayonnement ultra-violet est absorbé par
la poussière, qui rayonne à son tour en IR

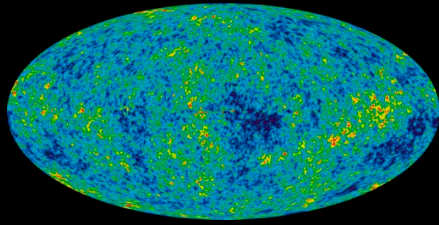
Histoire cosmologique de la formation d'étoiles

Masse d'étoiles qui naissent chaque année dans une boîte de 3 millions d'années-lumière de côté

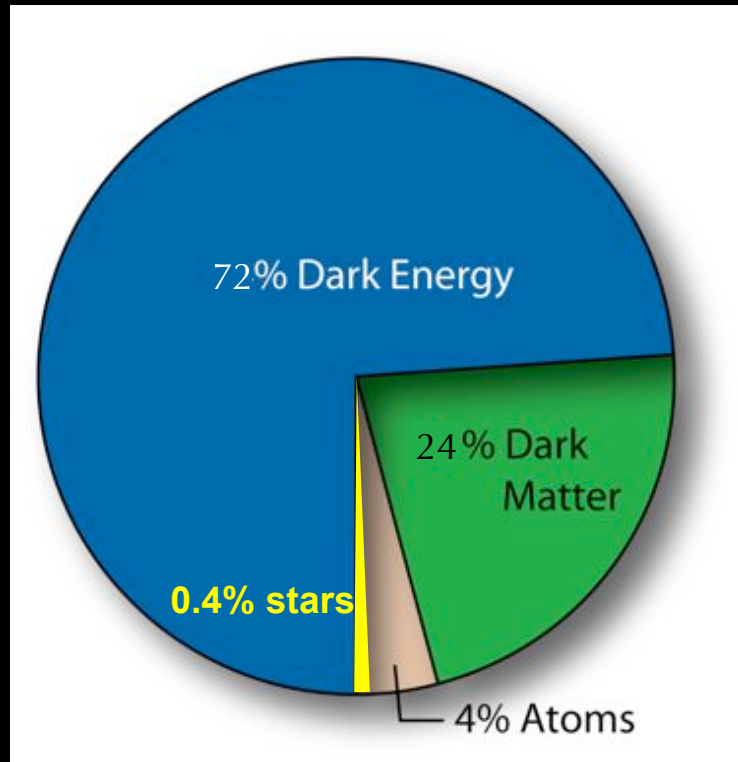


décalage vers le rouge
= temps (vers le passé)

Près de la moitié des étoiles des galaxies sont nées au cours des derniers 8 milliards d'années de l'histoire de l'univers, et près de 80% durant les derniers 10 milliards d'années...



Cosmology



WMAP 5

$H_0 = 70.1 \pm 1.3 \text{ km.s}^{-1}.\text{Mpc}^{-1}$

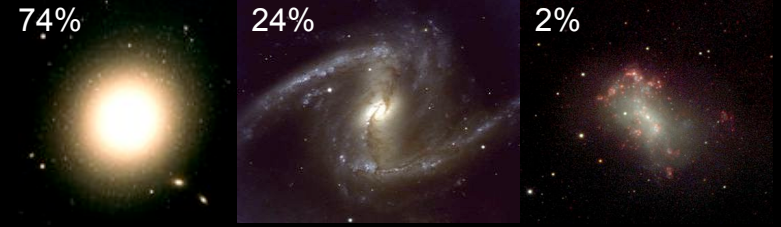
Age of universe ($z=0$) = 13.7 Gyr

lookback ($z=2$) = 10.4 Gyr

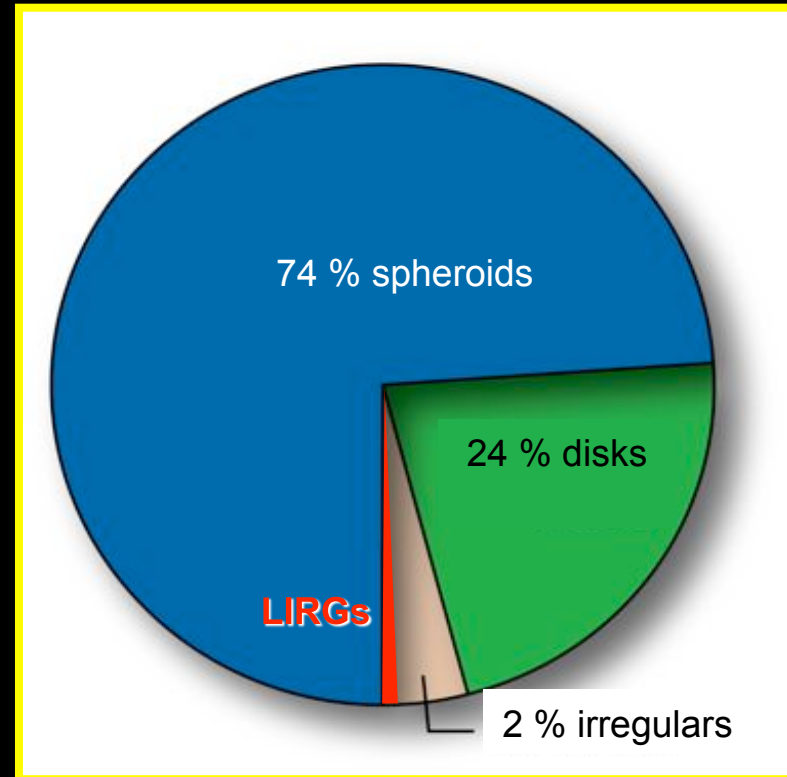
74%

24%

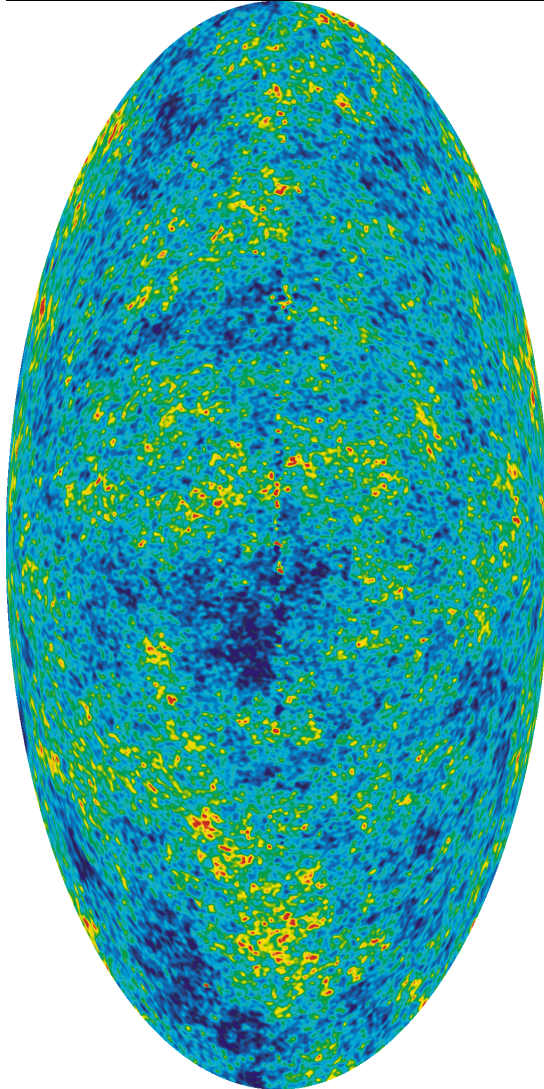
2%



Galaxies



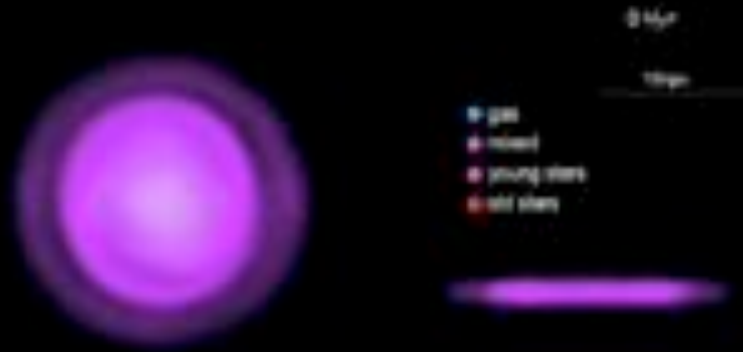
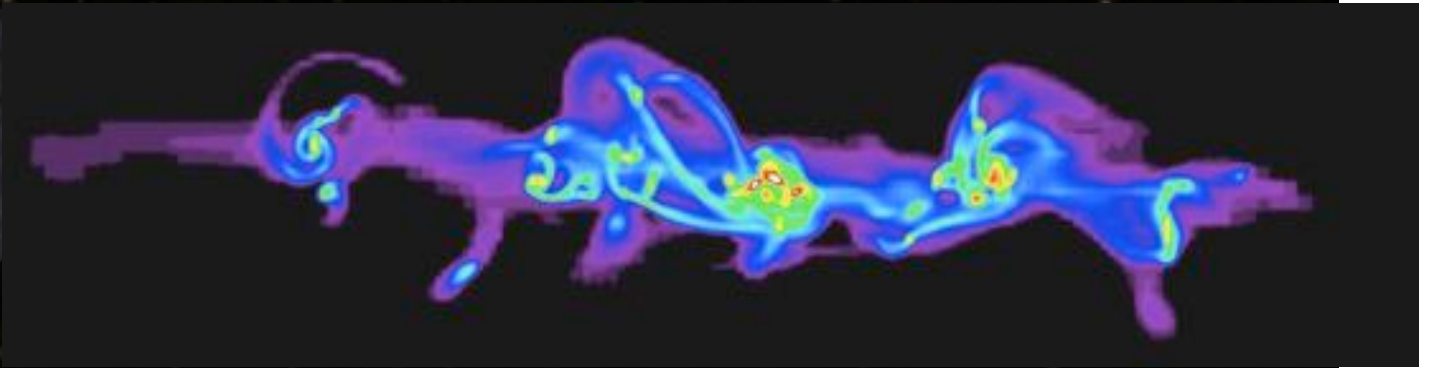
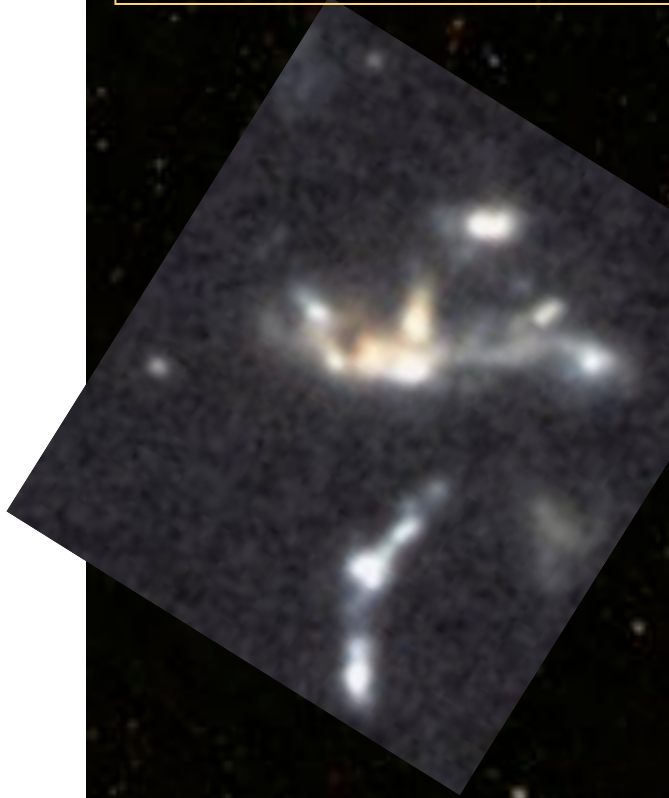
La formation hiérarchique des galaxies



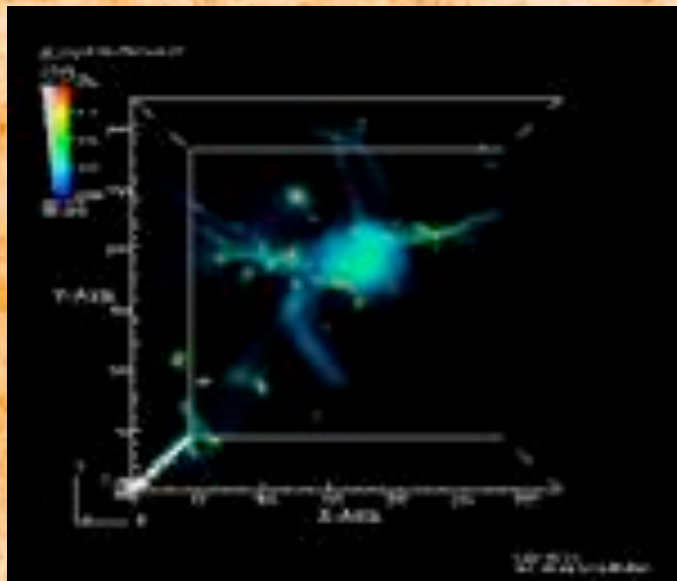
RAMSES web
N. Teyssie (CEA Saclay) / Projet Horizon

CLUSTER 4
 $10^{14} h^{-1} M_{\odot}$

Clumpy galaxies at high redshift: a new mode of disk and spheroid formation? (Bournaud et al)

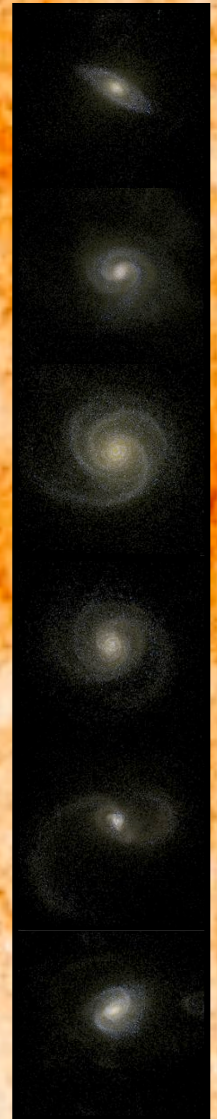


Une image virtuelle de l'univers âgé de 1,5 milliards d'années: des filaments de gaz froid nourrissent les disques galactiques



Simulation numérique du projet HORIZON
(R.Teyssier - CEA Saclay et al.)

Ordinateur MareNostrum (Barcelone): 94 mille milliards d'opérations/seconde





De la connaissance à l'ignorance : les grandes questions

1. Morphogénèse cosmique: d'où vient la forme des galaxies ? (comment former un disque large et fin comme celui de la Voie Lactée si les fusions sont nombreuses ?)
2. Si les galaxies naissent par fusions successives, pourquoi les galaxies les plus massives sont-elles nées en premier ?... (*downsizing*)
3. Comment naissent les étoiles dans les galaxies ? De manière "naturelle" ou bien de façon provoquée (fusions de galaxies, jets de noyaux actifs)
4. Pourquoi les galaxies possèdent-elles un trou noir supermassif d' $1/700^{\text{ème}}$ de leur masse (bulbe stellaire) ? (loi de Magorrian)
5. Quel mécanisme a causé "la mort des galaxies" ?

Cataclysme cosmologique ?...

Blanc: lumière visible, montrant les étoiles
(3.5m Kitt Peak)

Violet: gaz chaud en hydrogène
(raie H α), image HST.

Un vent galactique
s'échappe à 300 km/s de la
galaxie Messier 82



Mark Westmoquette (University College London), Jay Gallagher (University of Wisconsin-Madison),
Linda Smith (University College London), WIYN//NSF, NASA/ESA

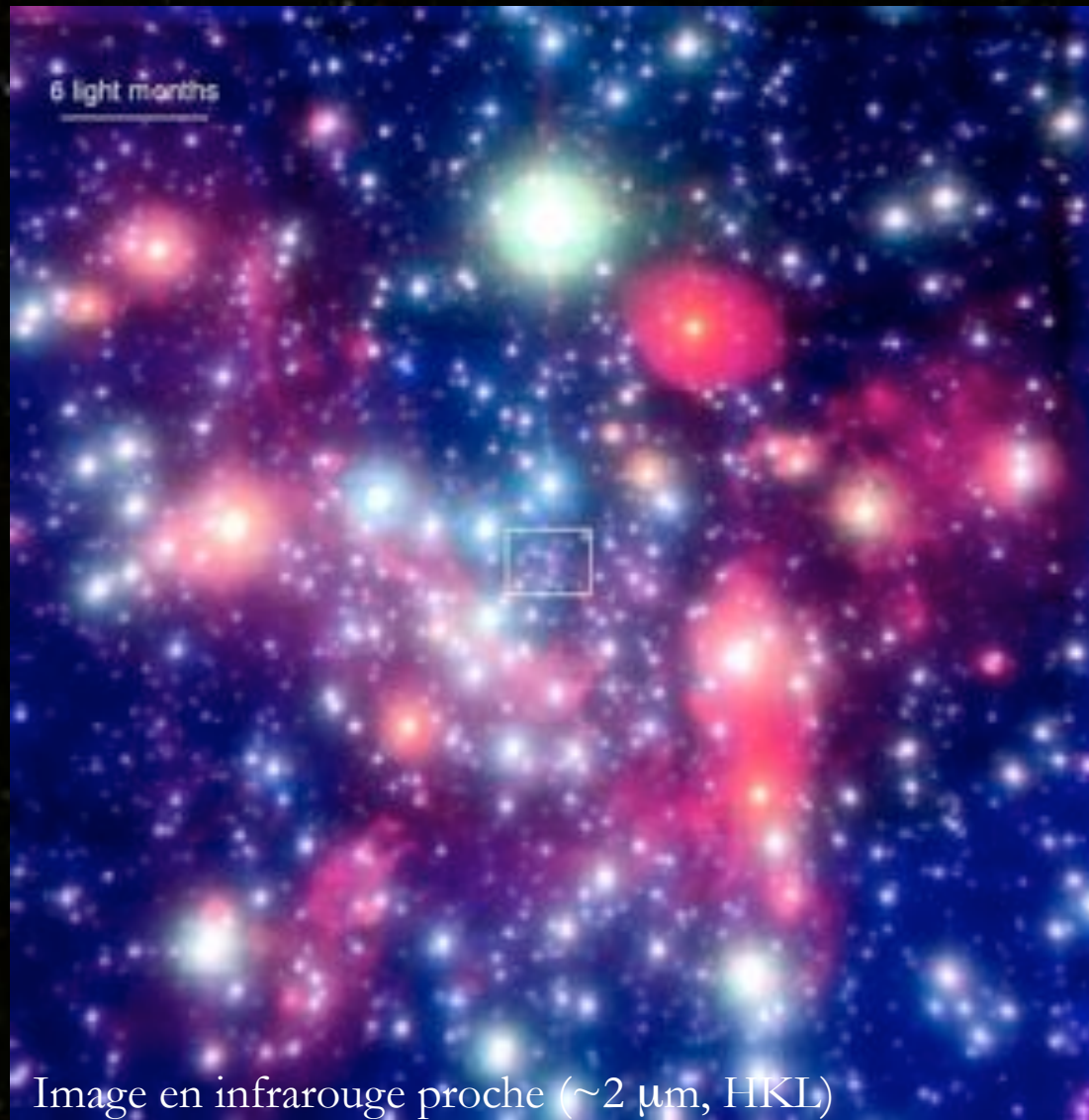
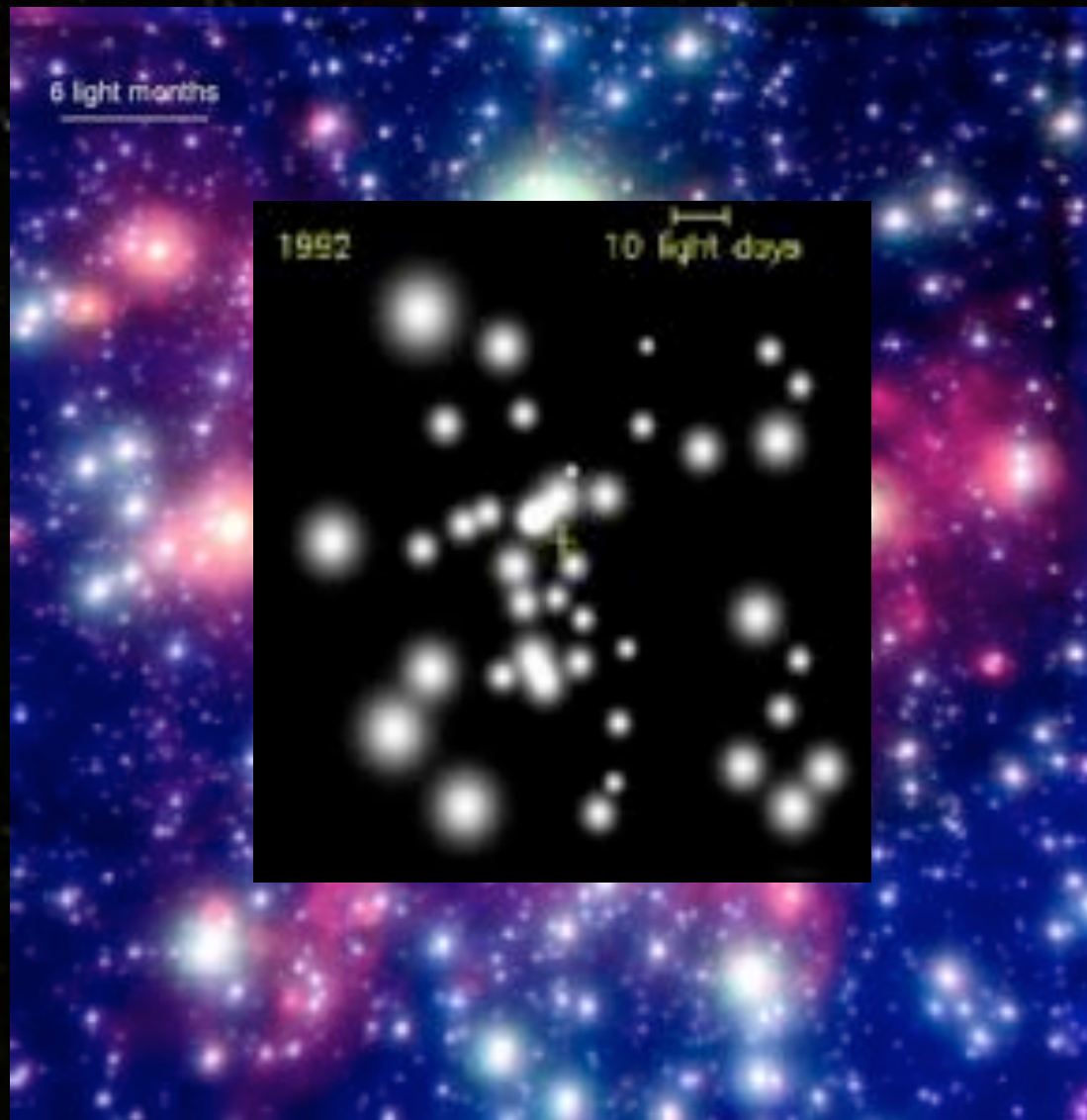


Image en infrarouge proche ($\sim 2 \mu\text{m}$, HKL)

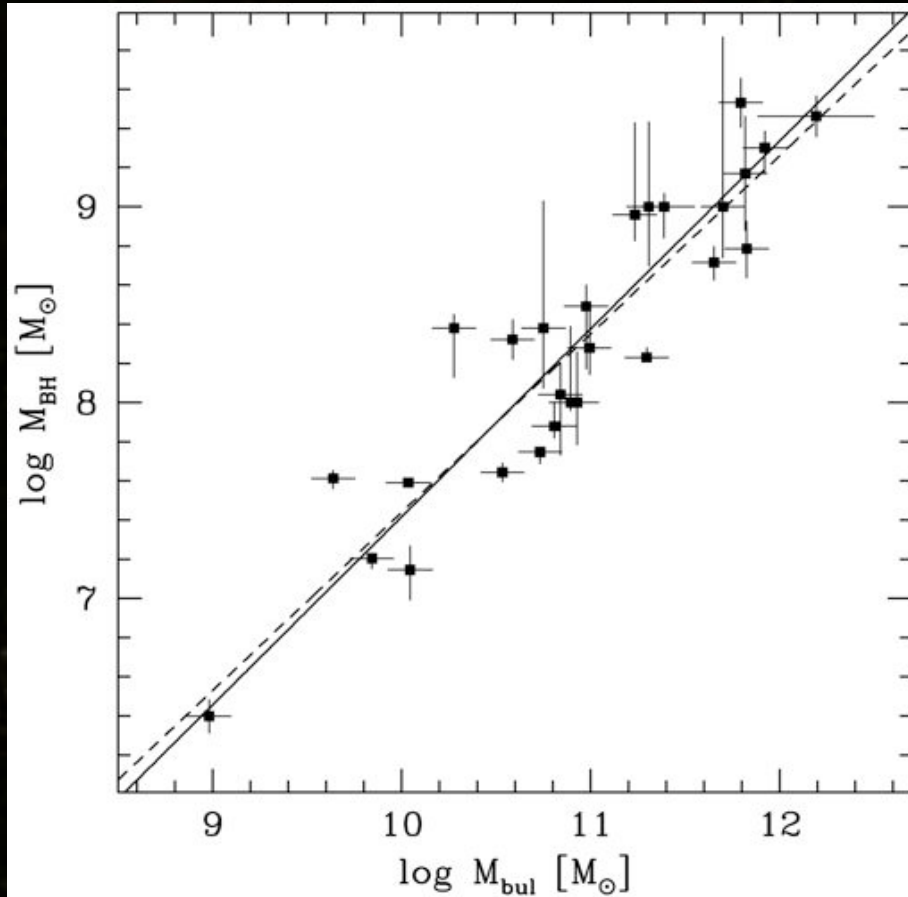


Trou noir central de la Voie Lactée: Sagittarius A*, masse= 3,6 millions de masses solaires
Schodel et al. (Nature 419, 694, 2002) :

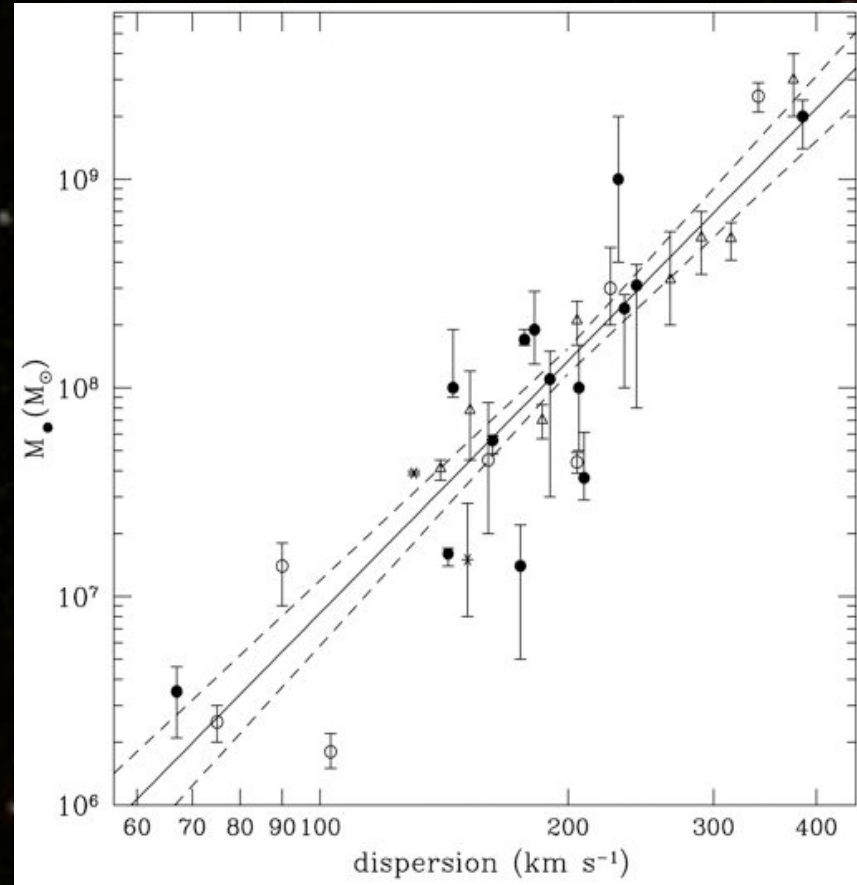
"A star in a 15.2-year orbit around the supermassive black hole at the centre of the Milky Way"

Chaque galaxie (bulbe) contient un trou noir supermassif en son centre de près d' $1/700^{\text{ème}}$ de la masse de son bulbe stellaire !

Loi de Magorrian



Marconi & Hunt 03

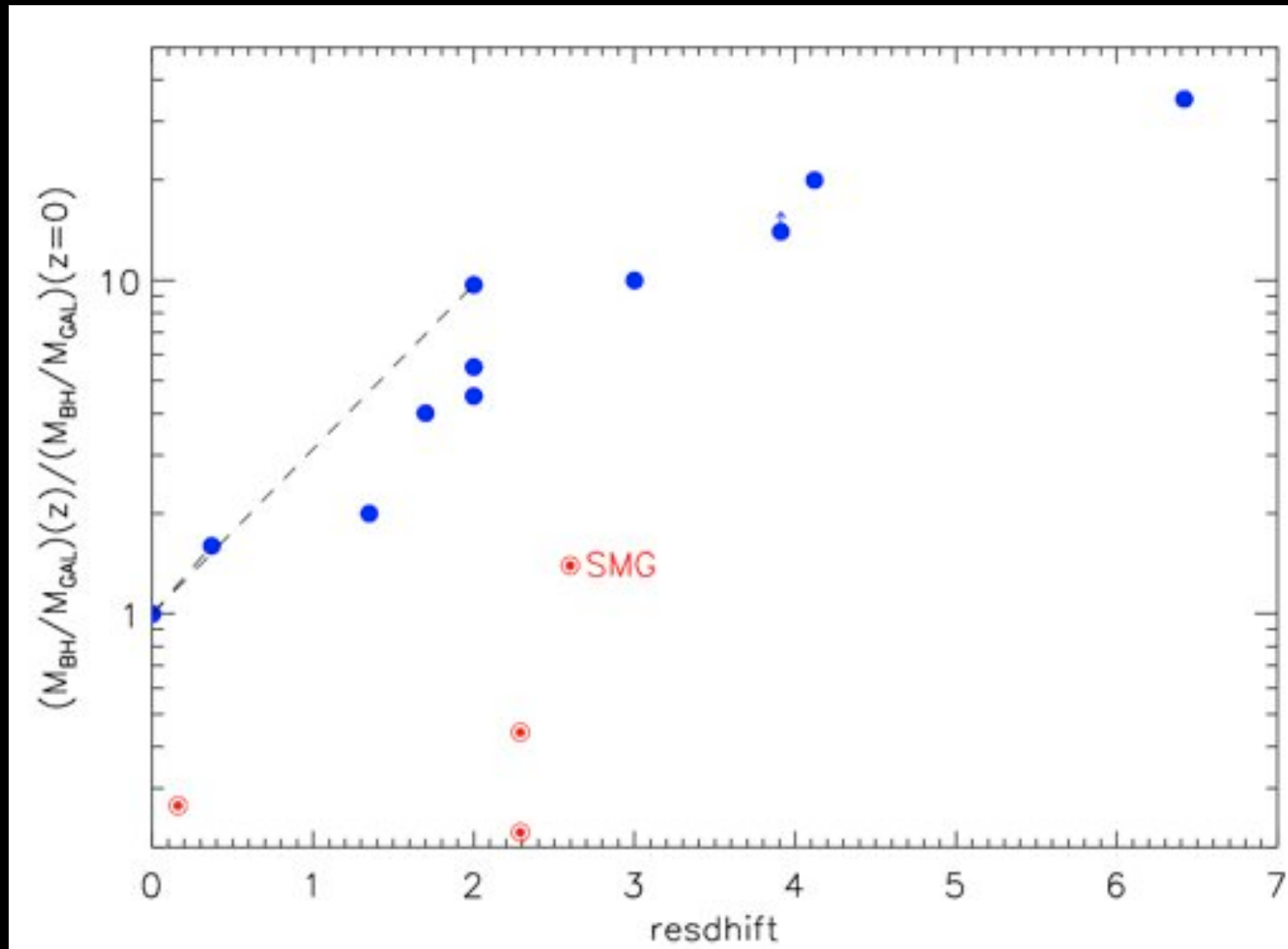


Tremaine et al.

Gebhardt et al. (2000), Ferrarese & Merritt (2000) c.f. Magorrian (1998)

$M_{\text{bulge}}^*/M_{\text{BH}} = 500$ (Marconi & Hunt 03, McLure & Dunlop 01, Ferrarese +06), **700** (Kormendy & Gebhardt 01)
or **830** (McLure & Dunlop 02)

Qui fut le premier du trou noir ou des étoiles ?

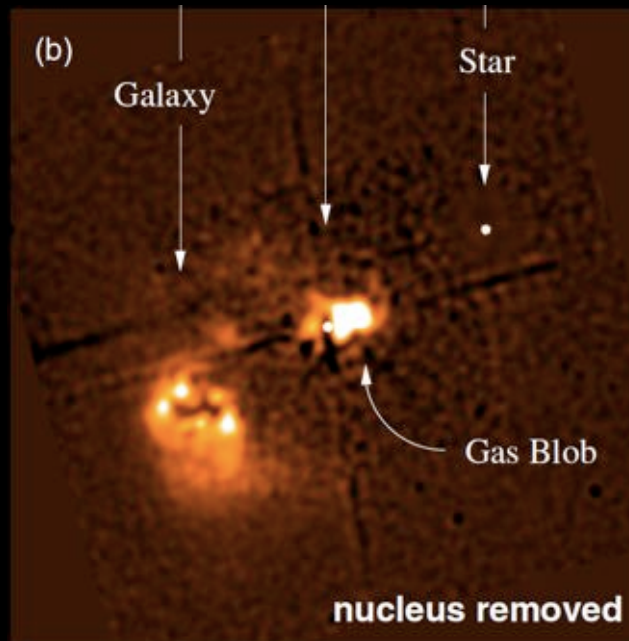


Découverte d'un « quasar nu » (HE 0450 - 2958)

Magain et al 2005, Nature

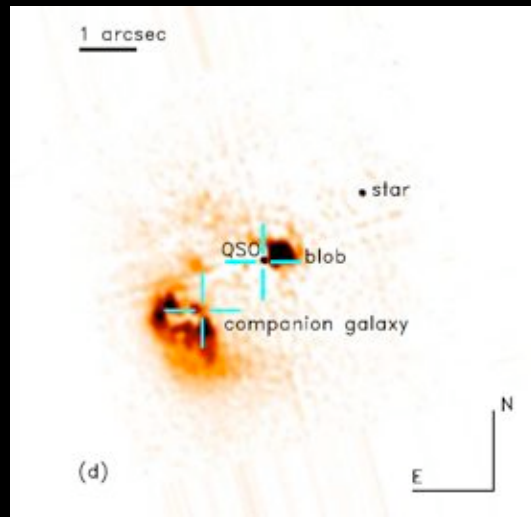
Époque: - 3 milliards d'années

Masse du trou noir supermassif: ~100 millions de masses solaires



Premières présomptions: fin des années 90 (John Bahcall, mais...)

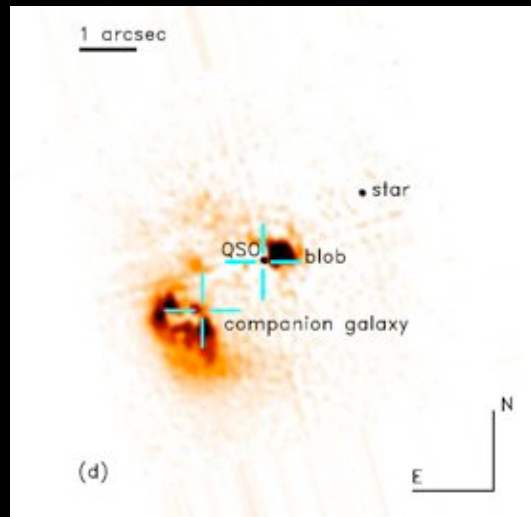
A la recherche de la « galaxie-hôte » du quasar... dans l'infrarouge



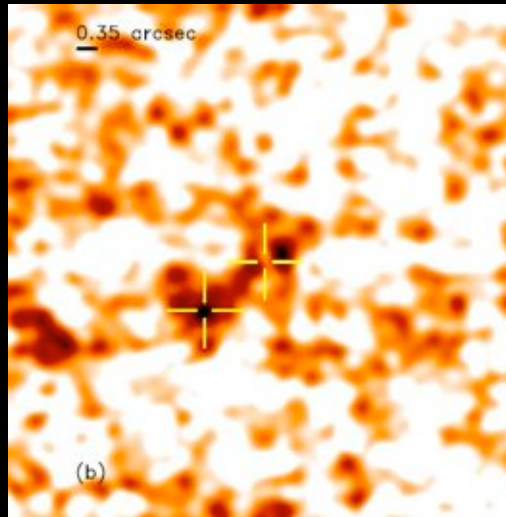
Hubble space telescope



A la recherche de la « galaxie-hôte » du quasar... dans l'infrarouge



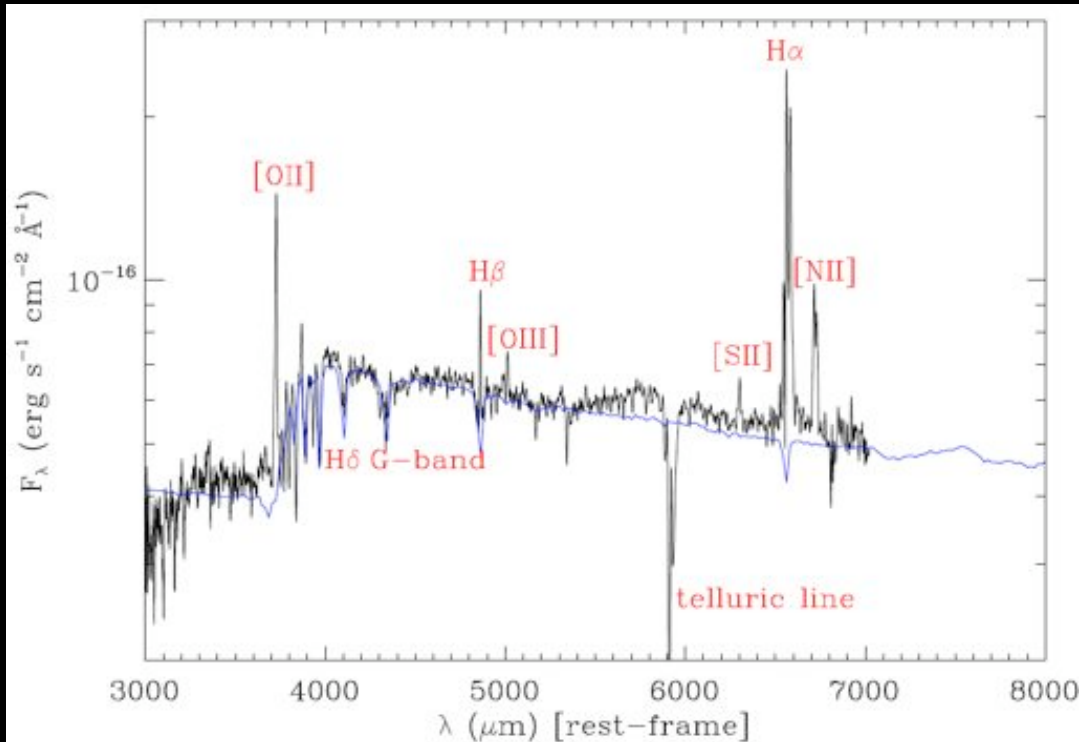
Hubble space telescope



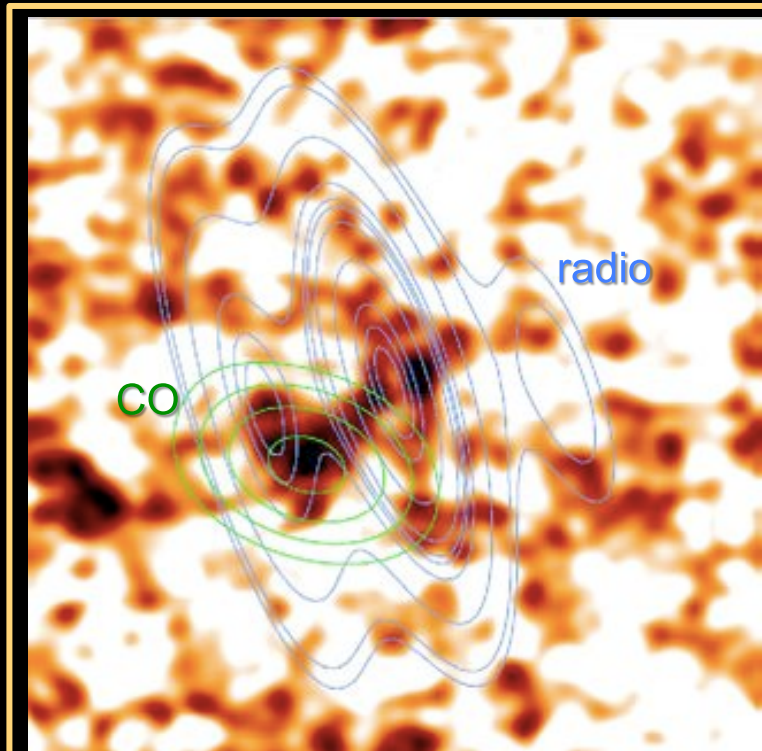
Caméra VISIR au VLT (ESO)



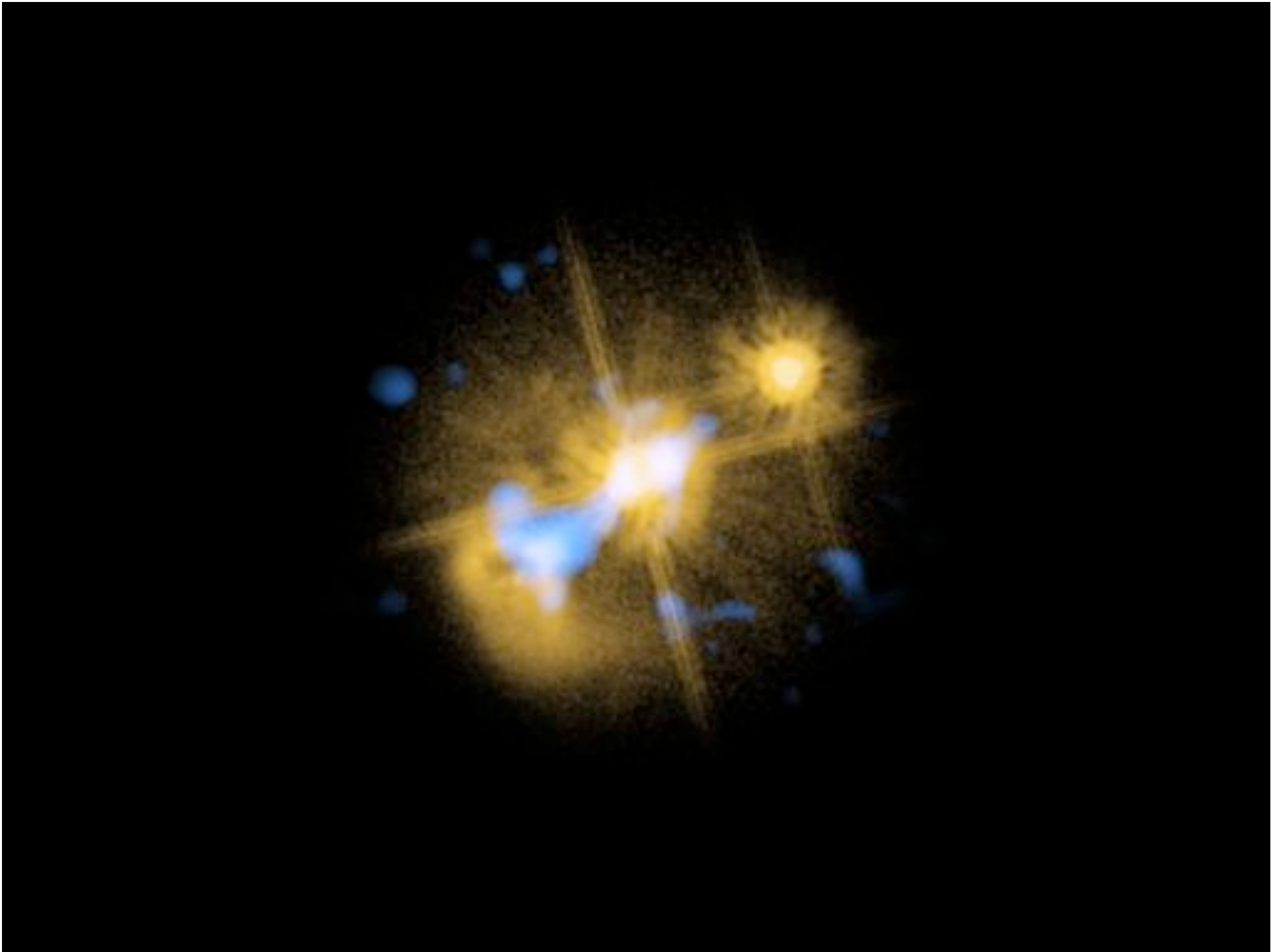
Naissance d'une galaxie, induite par le jet d'un quasar ?



Age des étoiles ~200 millions d'années
Masse de la galaxie ~ 70 milliards de masses solaires
Taux de formation d'étoiles ~ 350 masses solaires / an



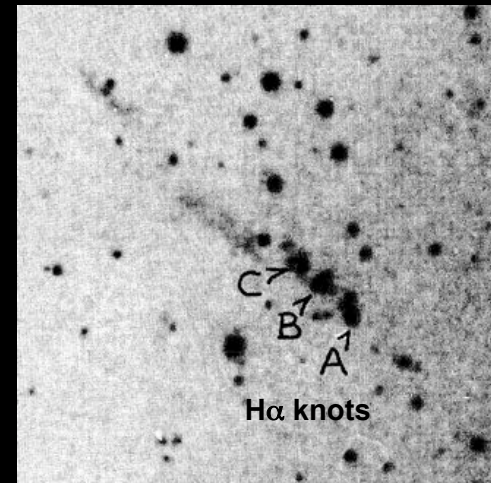
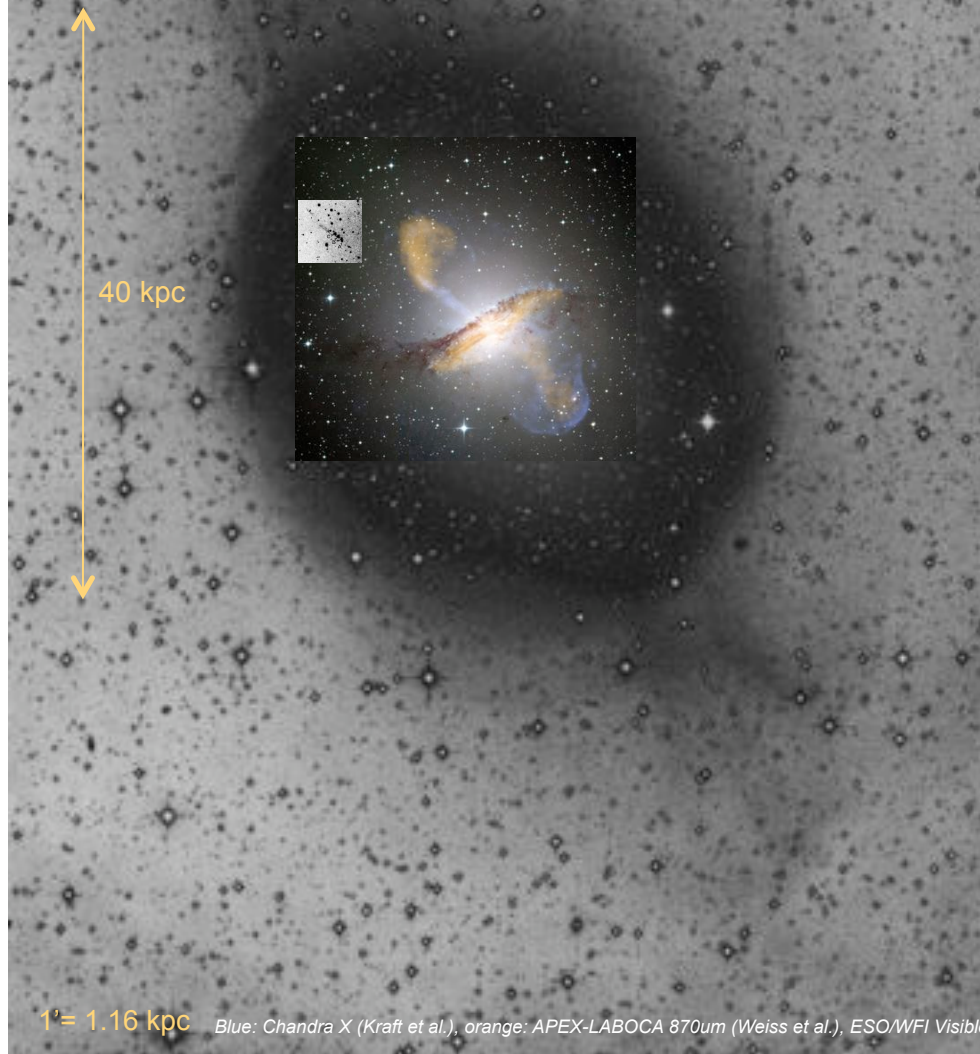
Bleu: radio (6.2 GHz, ATCA, Feain+07)
Vert: molécules (Papadopoulos +08, ATCA)



Formation stellaire induite:

le cas de Centaurus A

Galaxie radio la plus proche de nous (11 M.a)
Trou noir: 100 millions de masses solaires
Vitesse des jets: 0.5 x vitesse de la lumière !

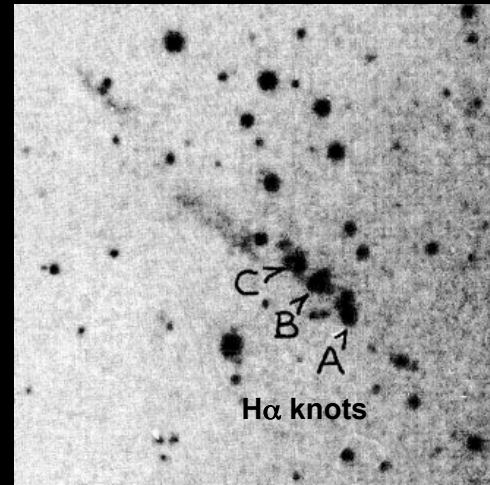
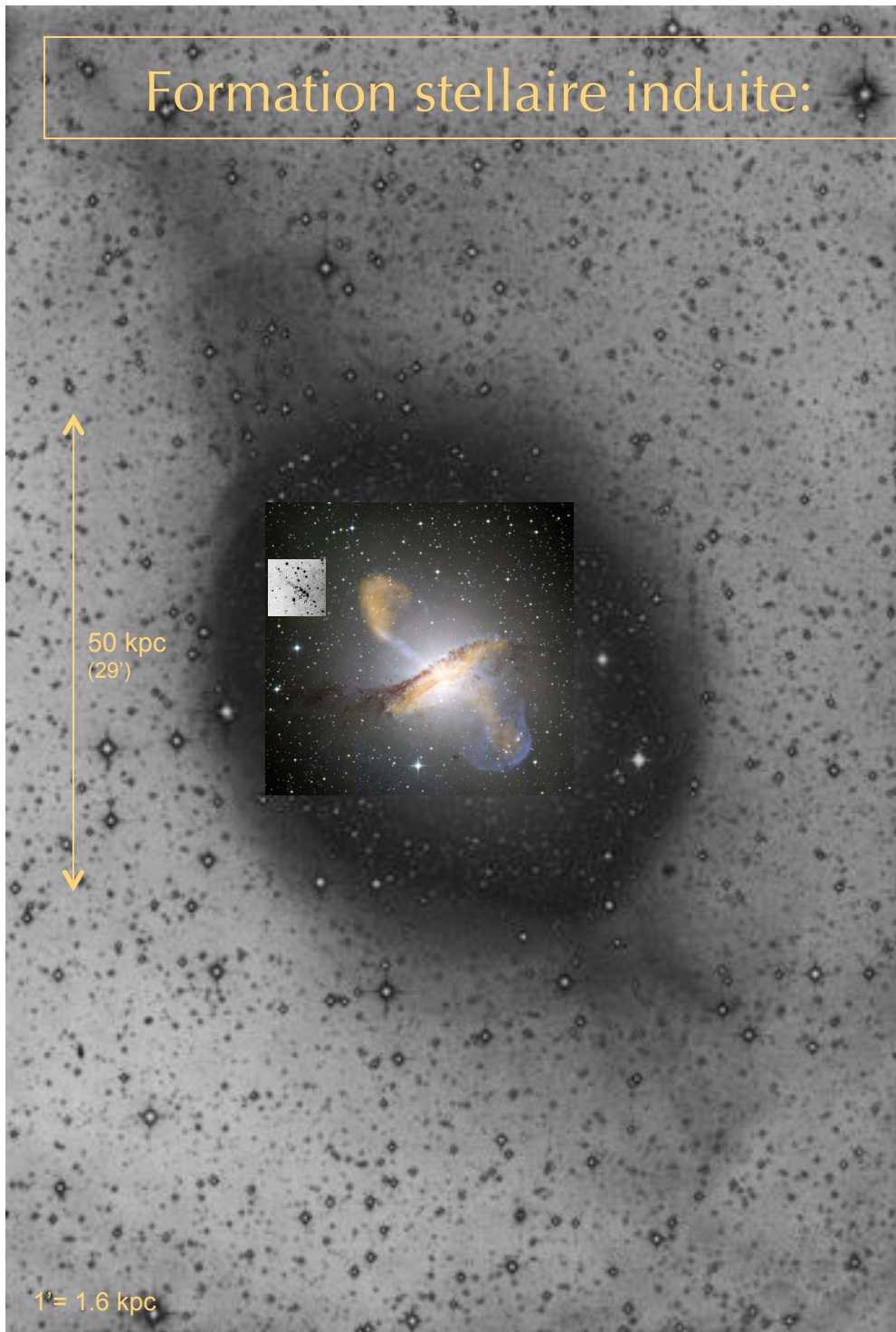


Blanco +75: (1) extended gaseous filaments with knots
(2) Bright knots with strong H α and UV
(3) Loose chains of blue compact objects

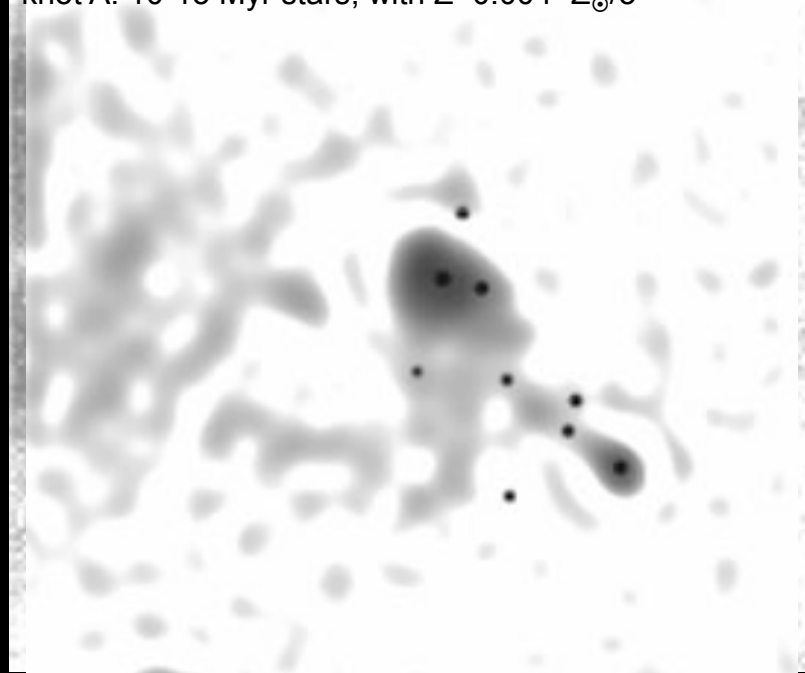
The filamentary structure as a whole is suggestive of a jet which originated from the galaxy during an earlier explosive phase.

Formation stellaire induite:

le cas de Centaurus A



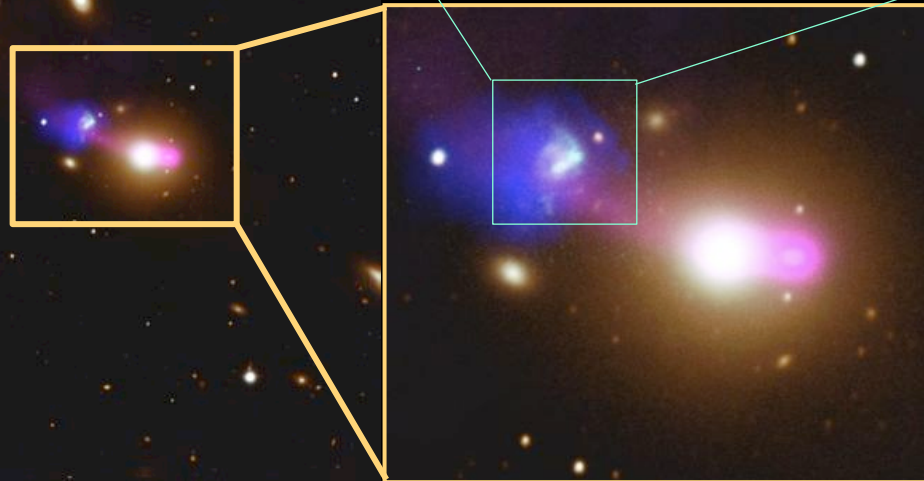
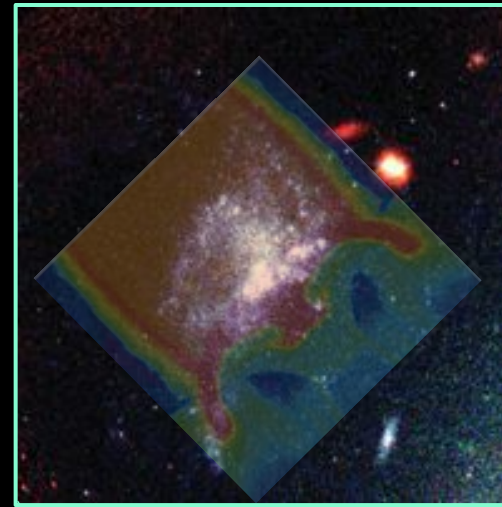
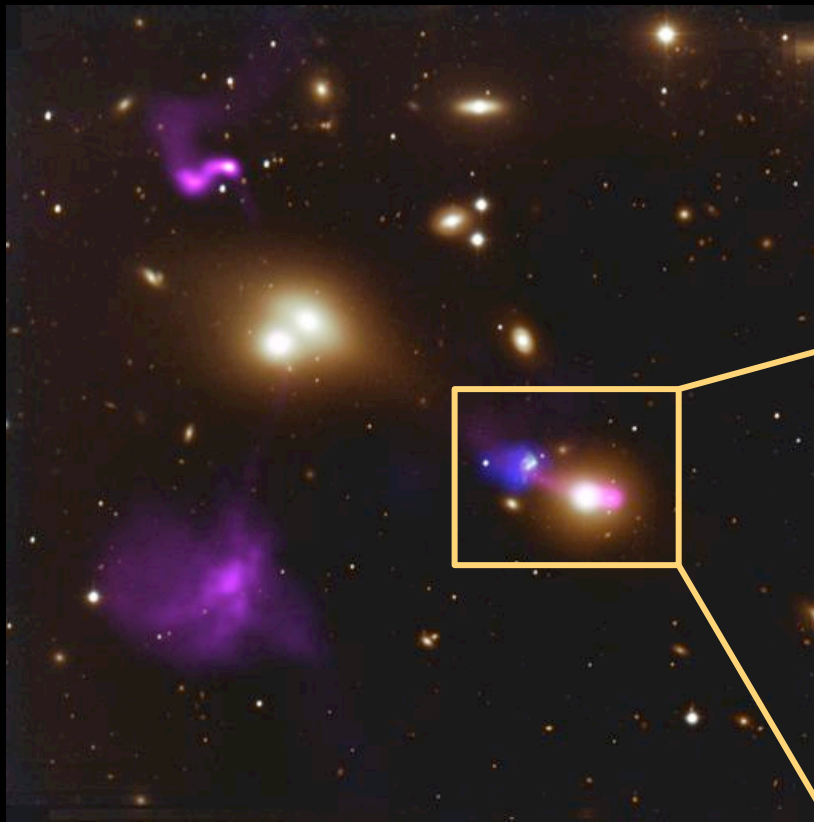
Rejkuba +02 (Magellan @ Las Campanas + FORS)
knot A: 10-15 Myr stars, with $Z=0.004=Z_{\odot}/5$



La galaxie de Minkowski

Age de la galaxie: 7.5 millions d'années !

Masse: 190 millions de masses solaires



"Rétroaction négative": les galaxies tueuses...

Perseus A (NGC1275)

X-ray

100 kpc

Optical: Red, Green, Blue

radio

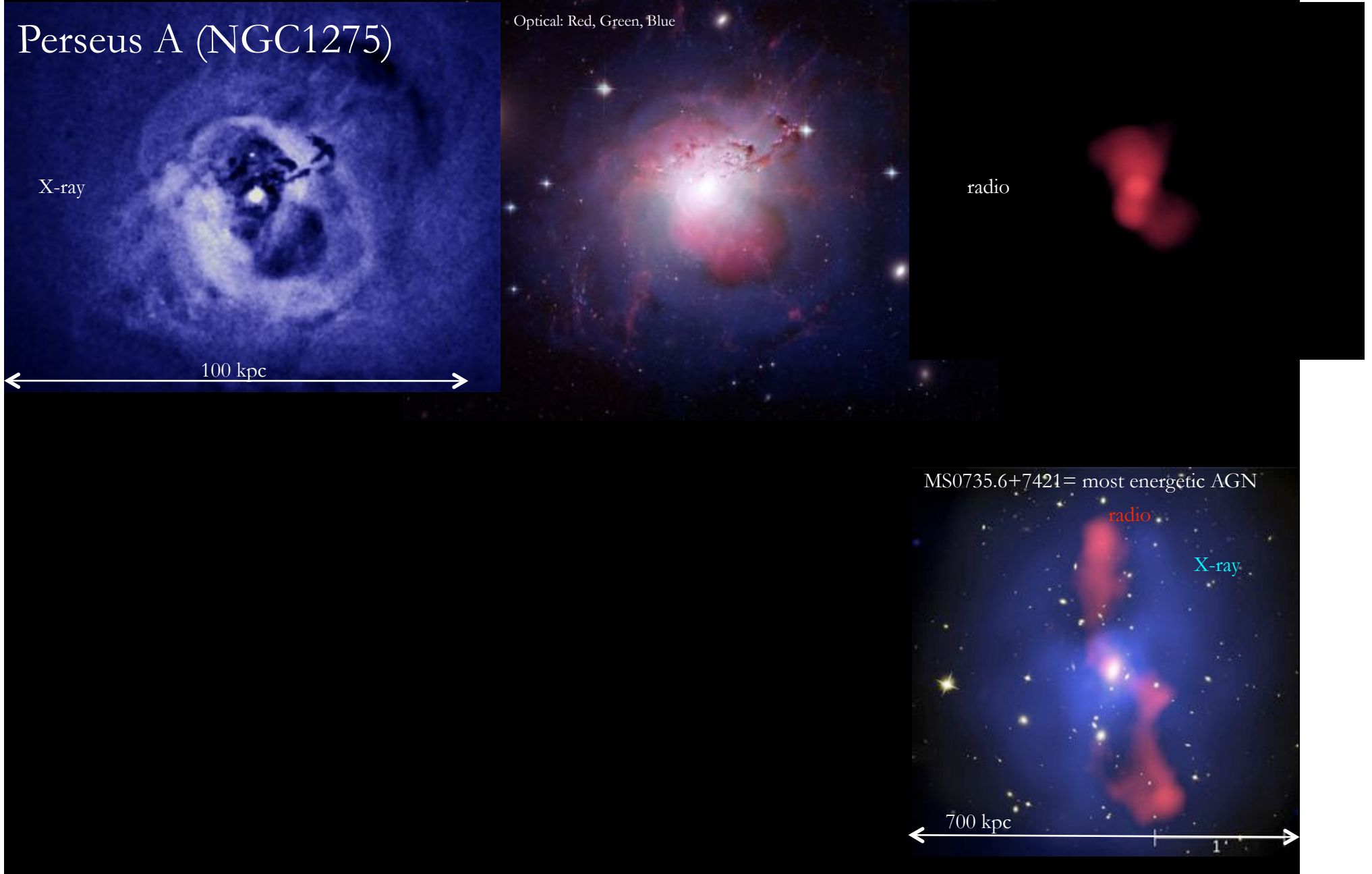
MS0735.6+7421 = most energetic AGN

radio

X-ray

700 kpc

1"



DAVID ELBAZ

BIENVENUE
SCIENCE
LIVRES
CONFERENCES
RADIO
FILMS
SPECTACLES



David Elbaz, astrophysicien, est chef du laboratoire Cosmologie et Evolution des Galaxies au Service d'Astrophysique du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA Saclay). Ses travaux sur la formation des galaxies ont été primés par le Prix Chrétien de la Société Américaine d'Astronomie (2000). Il enseigne un cours sur la formation des galaxies (master M2) à l'Ecole Doctorale d'Astronomie & d'Astrophysique de Paris.

Parallèlement à ses activités de recherche en astrophysique, il travaille à la diffusion des connaissances scientifiques à travers l'écriture de romans (« le Vase de Pépi », «...et Alice Tao se souvint du futur »), des conférences, des spectacles (« Magicosmologie en Duo », « Jonglerie Astrale »), des documentaires (« l'astronome et l'indien »), des émissions de radio.



Quasars: tueurs ou créateurs de galaxie

Par Astrophysique TV

14:51

« » ⌂ DailyMotion

<http://david.elbaz3.free.fr>