

La formation des  
structures de l'Univers  
du Big Bang aux planètes

# The Known Universe

# The Known Universe

# de l'Astronomie à l'Astrophysique

Galilée : "Le  
Soleil est de  
feu, la Lune  
est pierreuse"

# de l'Astronomie à l'Astrophysique

Galilée : "Le  
Soleil est de  
feu, la Lune  
est pierreuse"



# de l'Astronomie à l'Astrophysique

Galilée : "Le  
Soleil est de  
feu, la Lune  
est pierreuse"



# de l'Astronomie à l'Astrophysique

Galilée : "Le  
Soleil est de  
feu, la Lune  
est pierreuse"



# de l'Astronomie à l'Astrophysique

Galilée : "Le  
Soleil est de  
feu, la Lune  
est pierreuse"



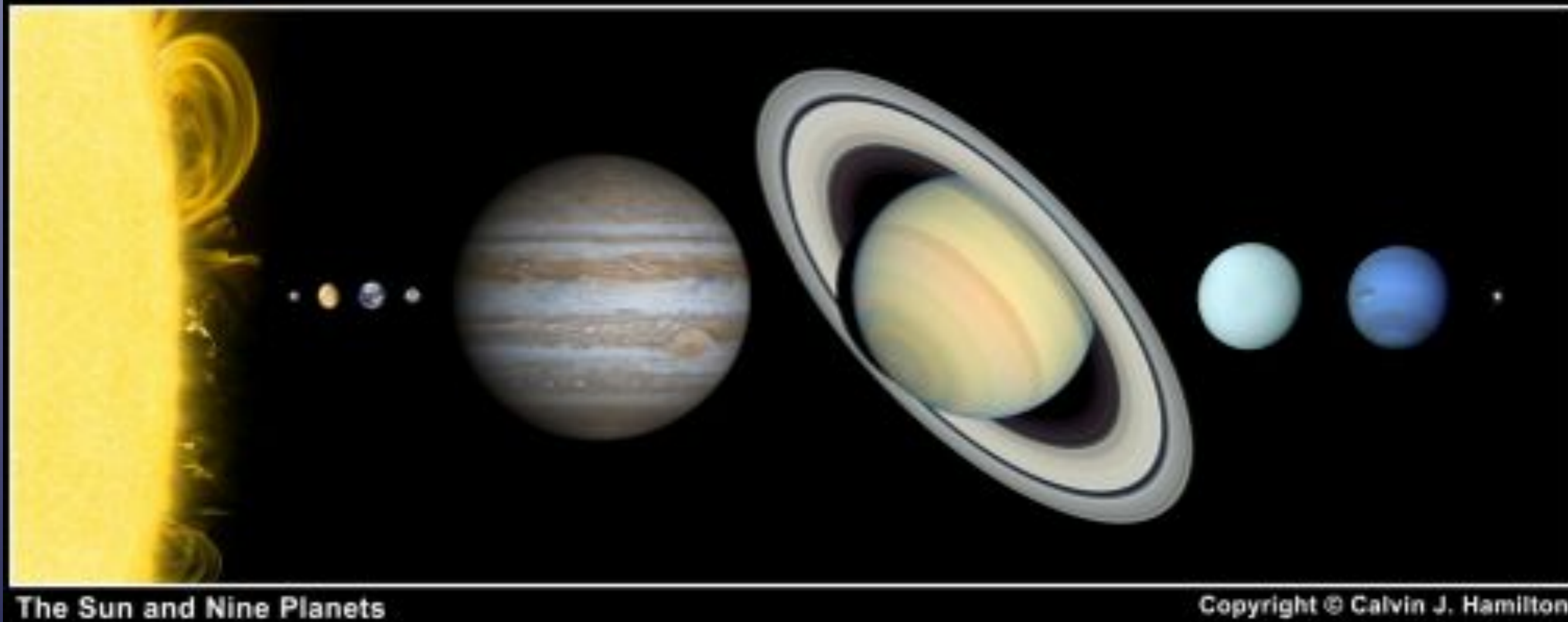


l'Univers est fait d'objets qui  
répondent aux **mêmes lois physiques**  
que sur Terre

on peut donc passer de  
l'**observation** (astronomie)

à la **compréhension** (astrophysique,  
astrochimie, astrobiologie...)

# de la Terre aux planètes



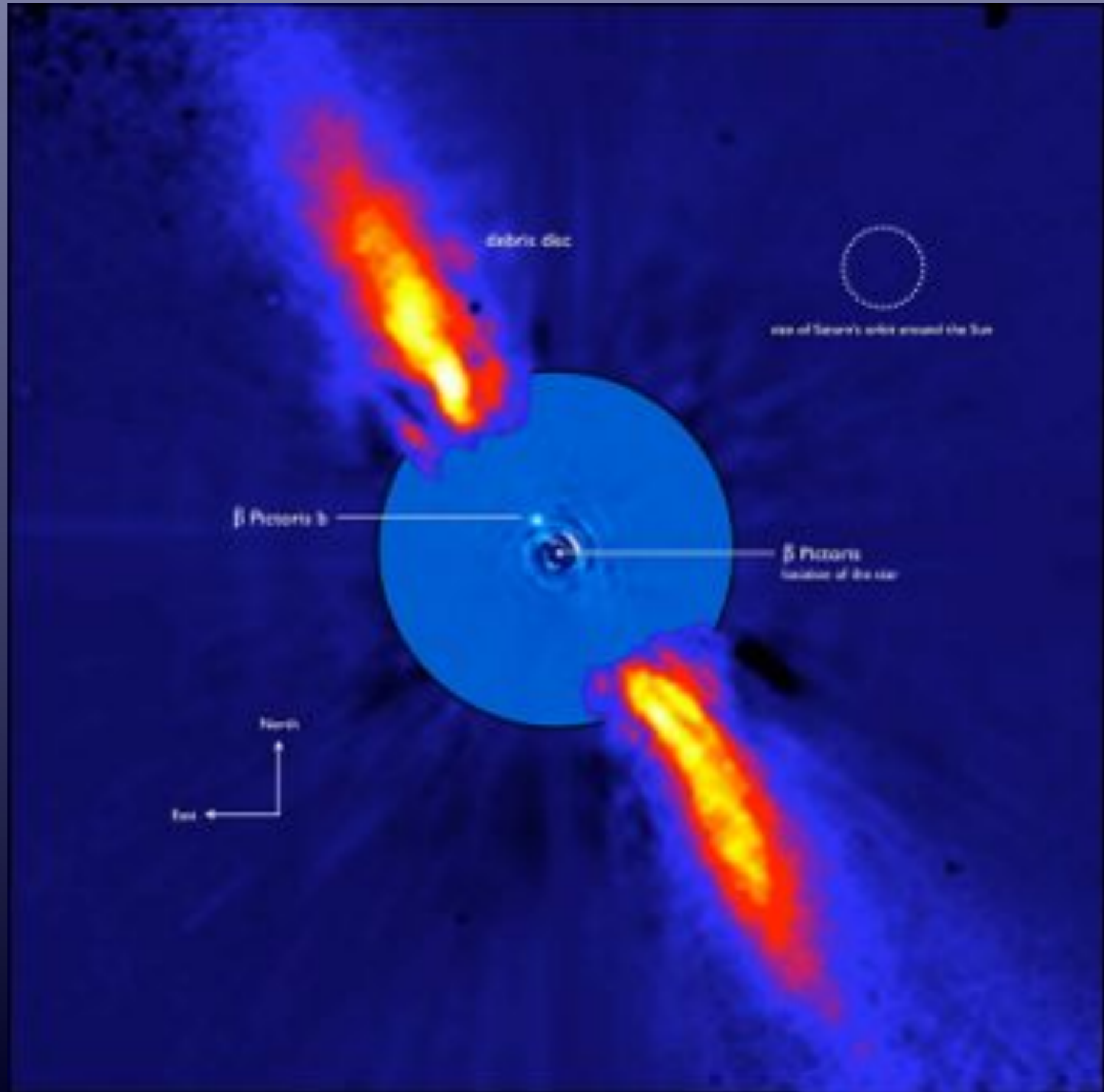
les planètes sont alignées dans un même plan :  
l'écliptique

-> hypothèse de la **Nébuleuse Primordiale** (Laplace)  
dans laquelle sont formées les planètes

un exemple  
proche :

## Beta Pictoris

ce disque  
contient des  
planètes, des  
comètes...

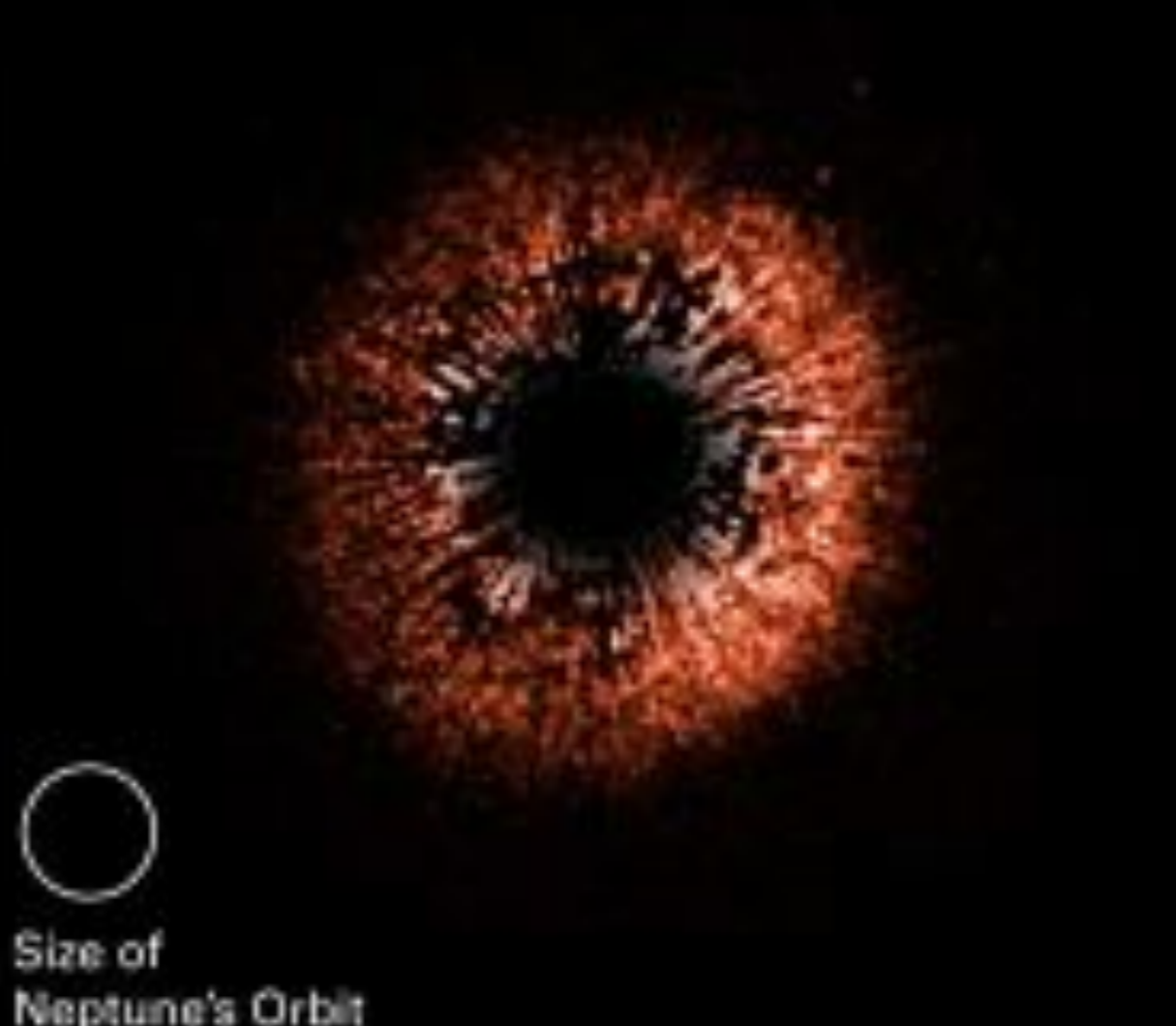


## Circumstellar Debris Disks

Hubble Space Telescope • ACS HRC

AU Microscopii

HD 107146



NASA, ESA, J. Krist (STScI/JPL), D.R. Ardila (JHU), D.A. Golimowski (JHU), M. Clampin (NASA/Goddard), H. Ford (JHU), G. Hartig (STScI), G. Illingworth (UCO-Lick) and the ACS Science Team

STScI-PRC04-33a



des étoiles...

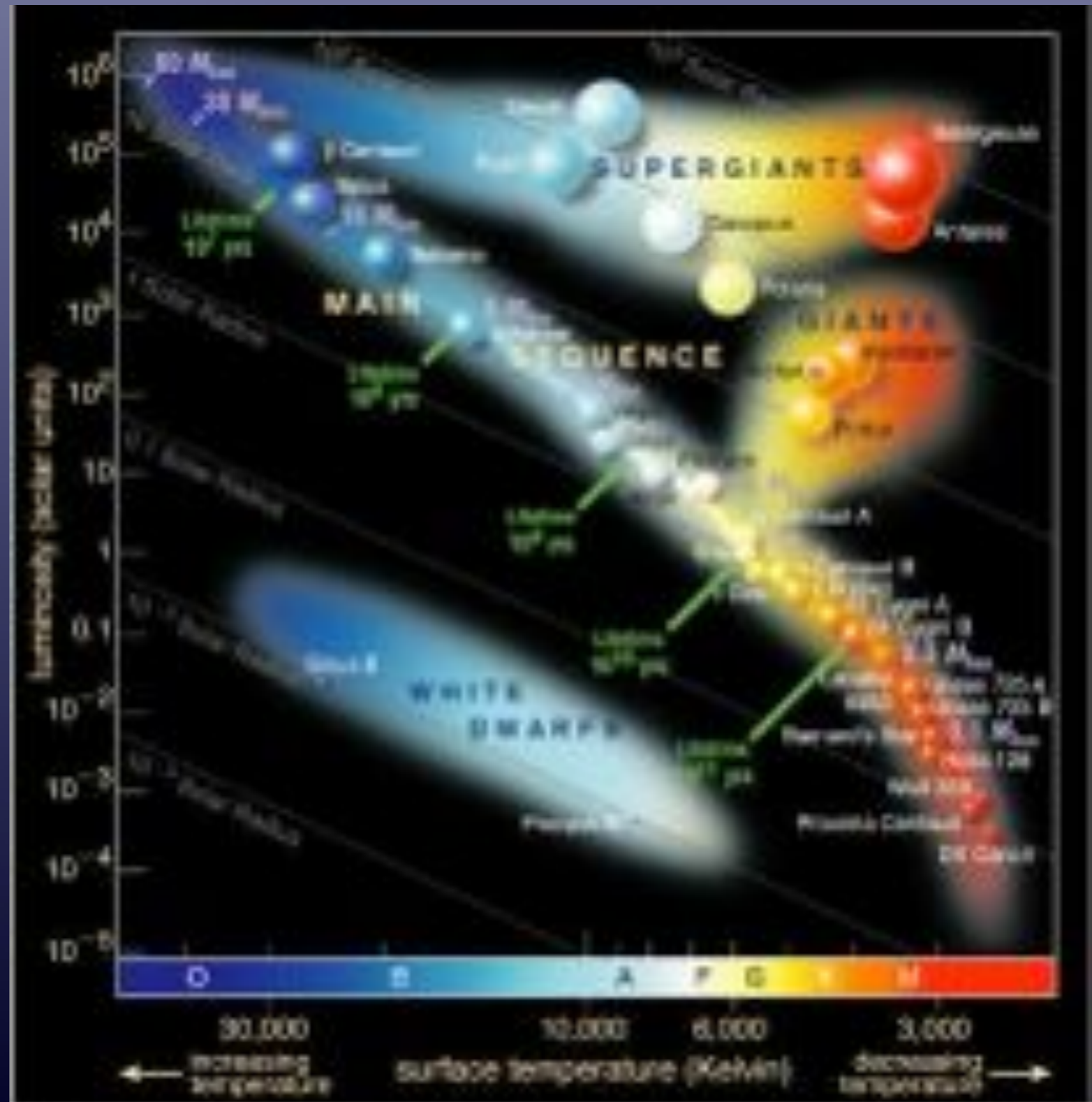


# vie et mort des étoiles

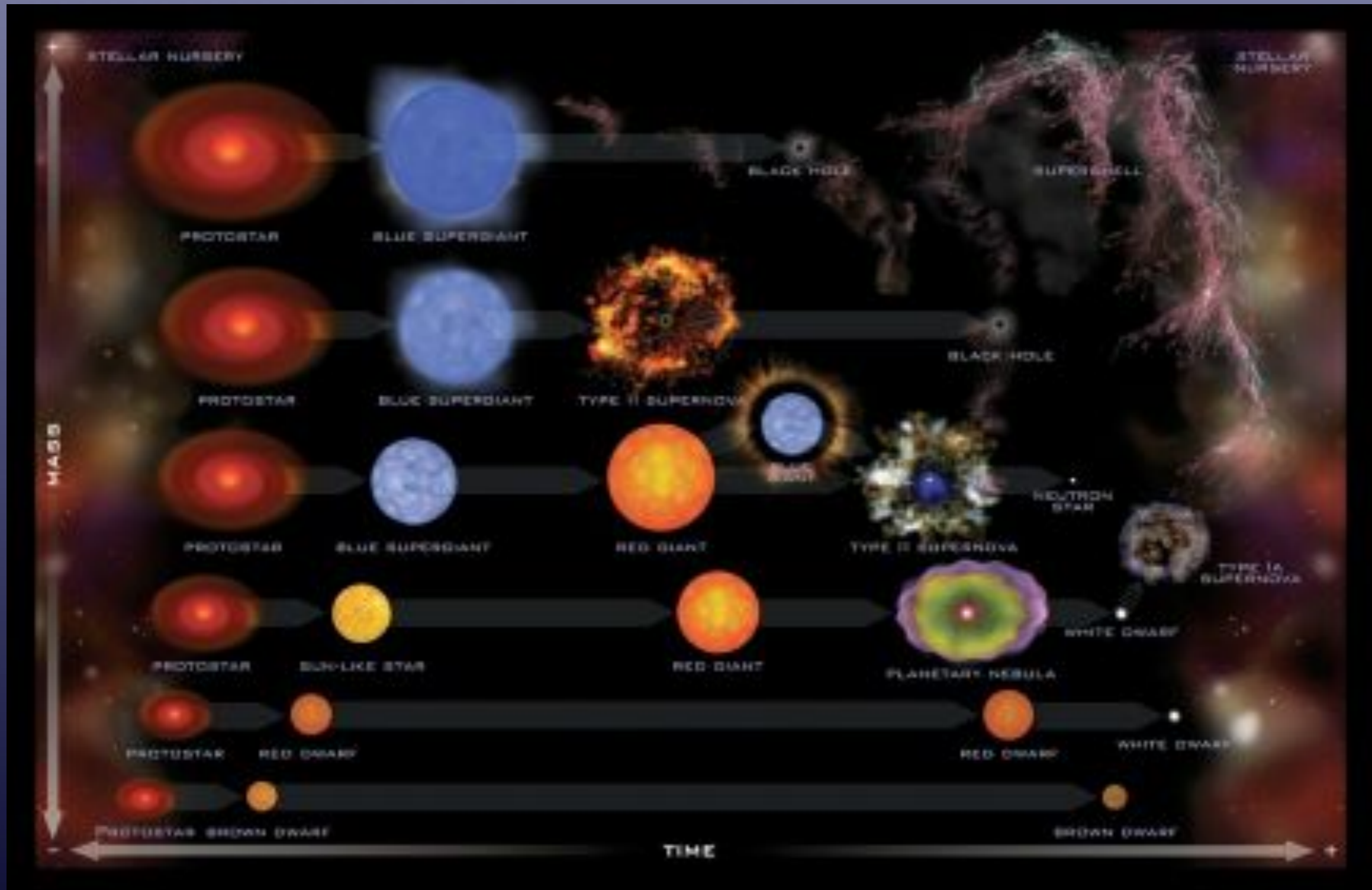
les étoiles ont une **évolution**, qui dépend essentiellement de leur **masse initiale**

Le Soleil et la Terre ont

**4,5 milliards d'années**



# vie et mort des étoiles



étoile ~ Soleil → géante rouge → **naine blanche** en  $10^{10}$  ans

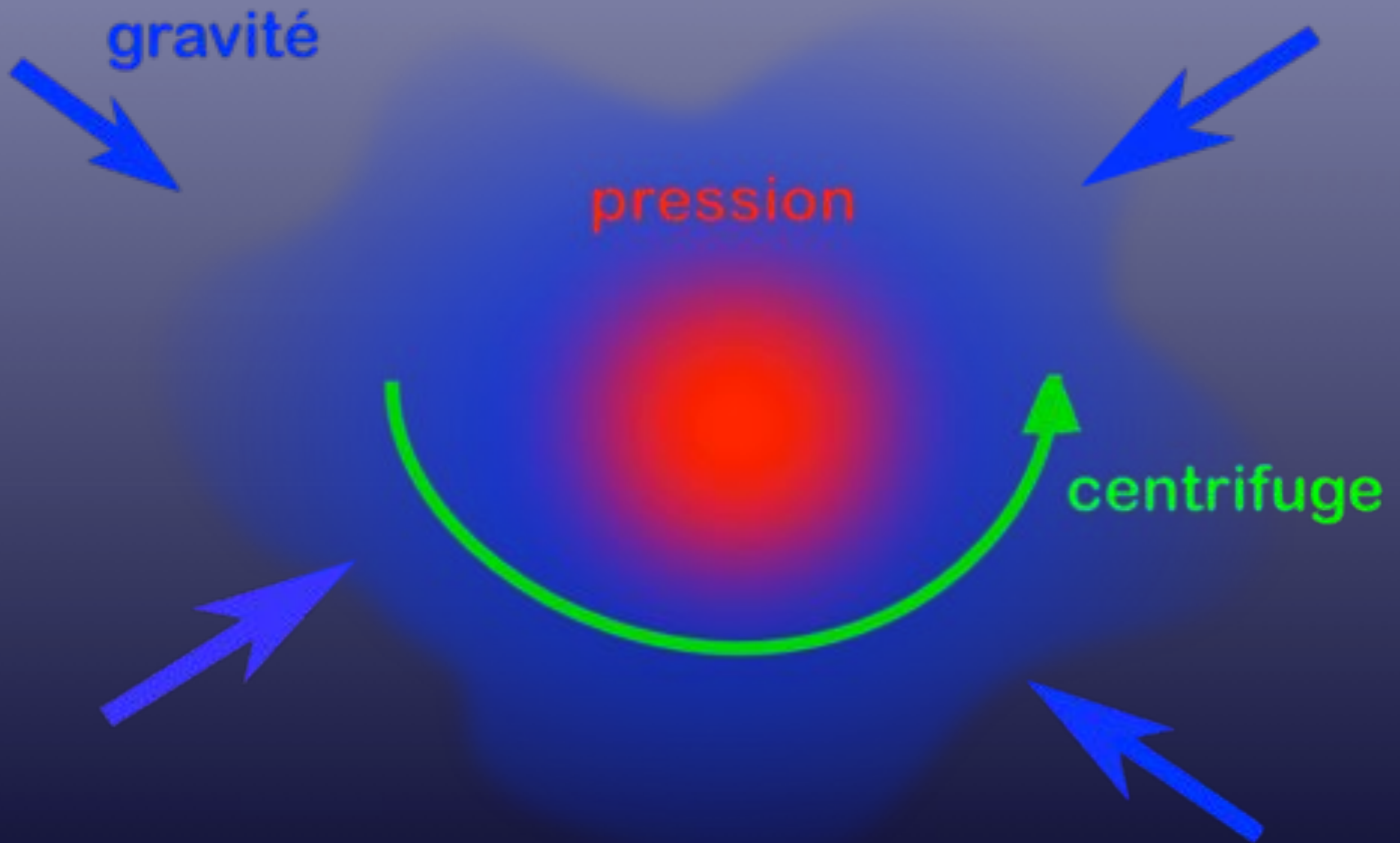
étoile > ~  $11 M_{\text{Soleil}}$  → supernova → **étoile à neutrons** ou **trou noir**





# sphères, disques...

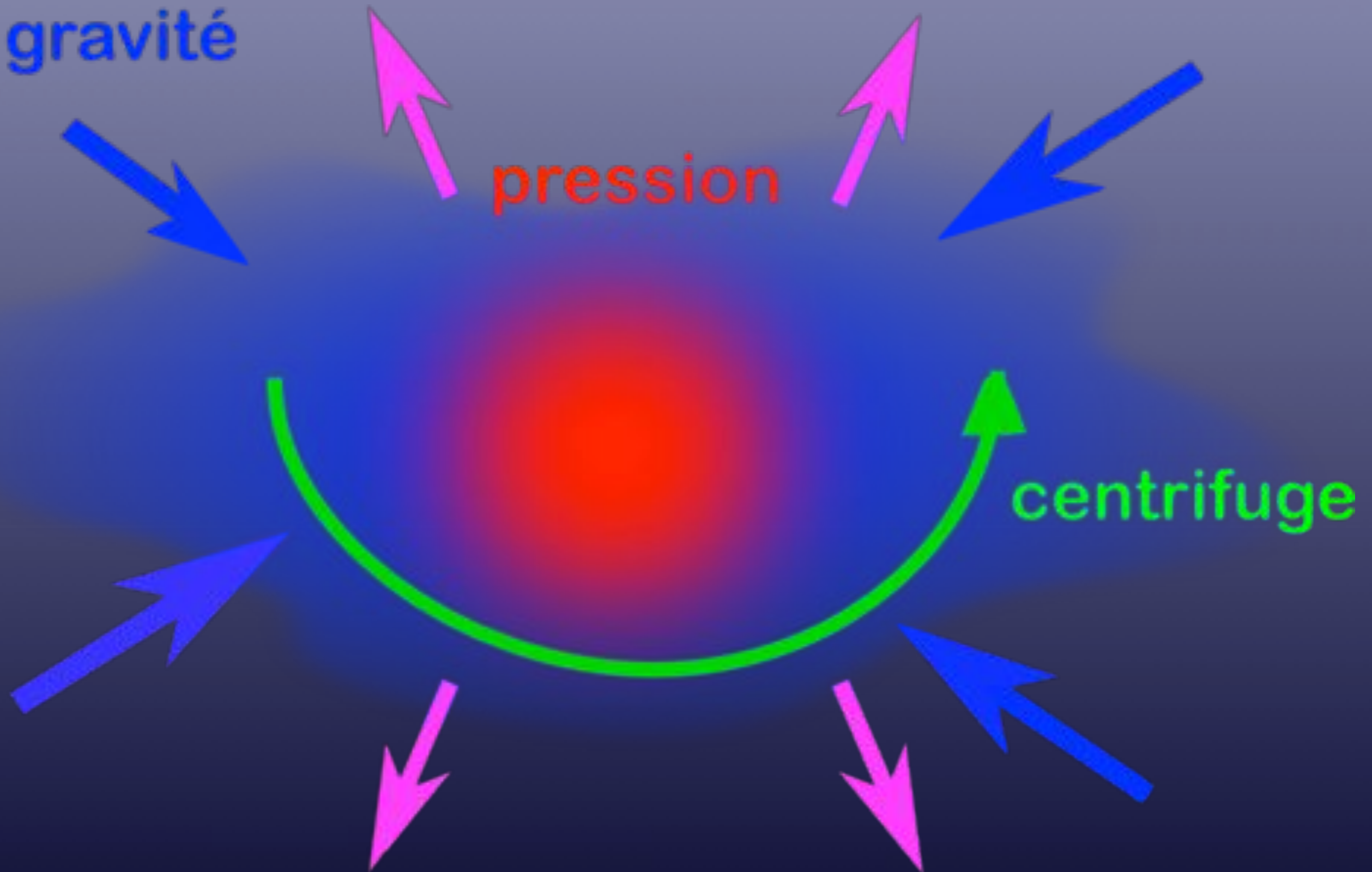
- les structures sont formées lorsque la matière s'effondre sous l'effet de sa gravité
- l'effondrement est stoppé par la pression
  - -> **structures sphériques** (Soleil, planètes...)
- ou par la force centrifuge
- (conservation du moment cinétique)
  - -> **disques** (galaxies, anneaux de Saturne...)
- ou par les deux (machins plus compliqués...)



gravité

pression

centrifuge

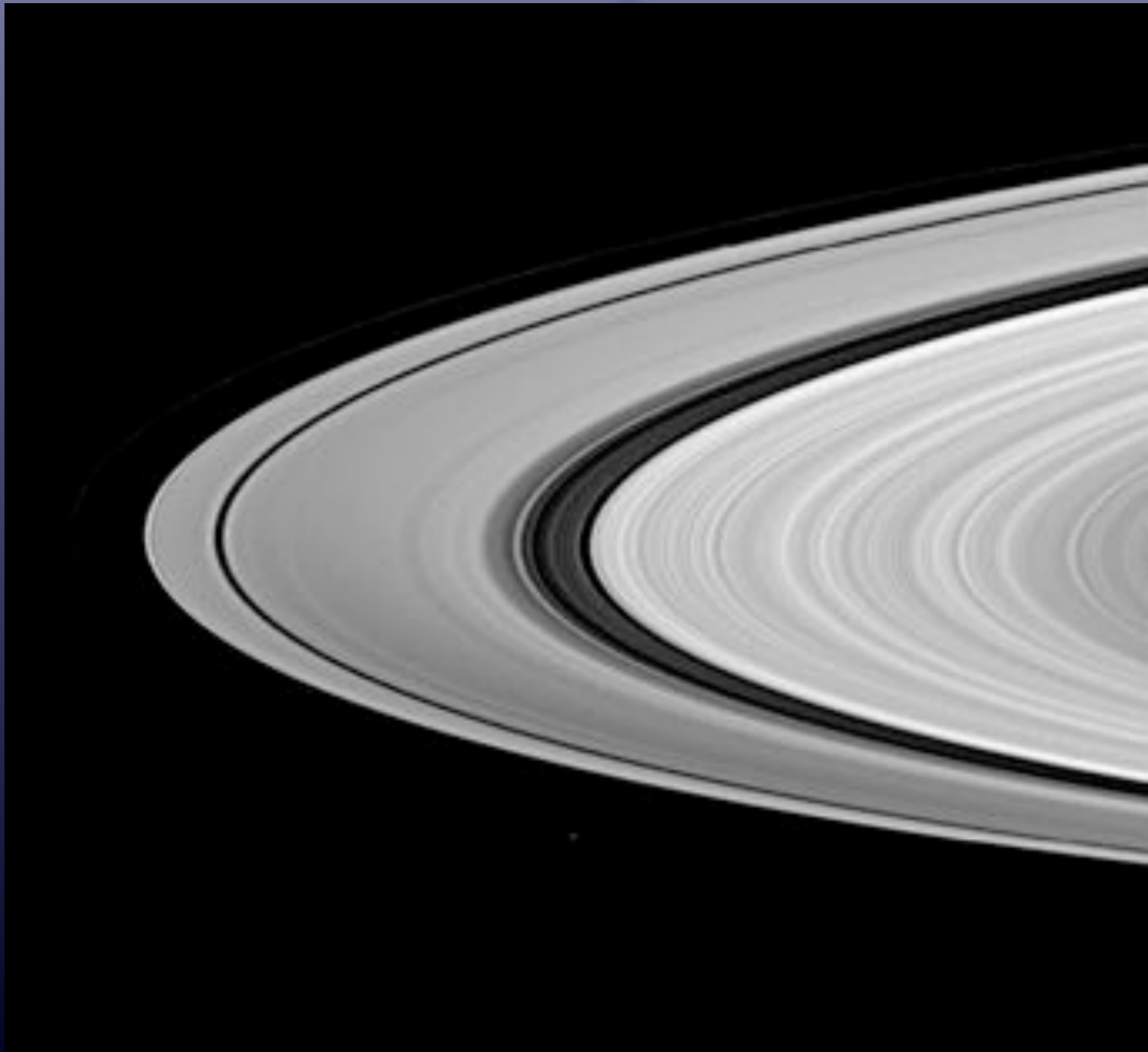


le gaz rayonne et se refroidit  
-> l'effondrement peut se poursuivre -> disque

le plus bel exemple de disque



le plus bel exemple de disque



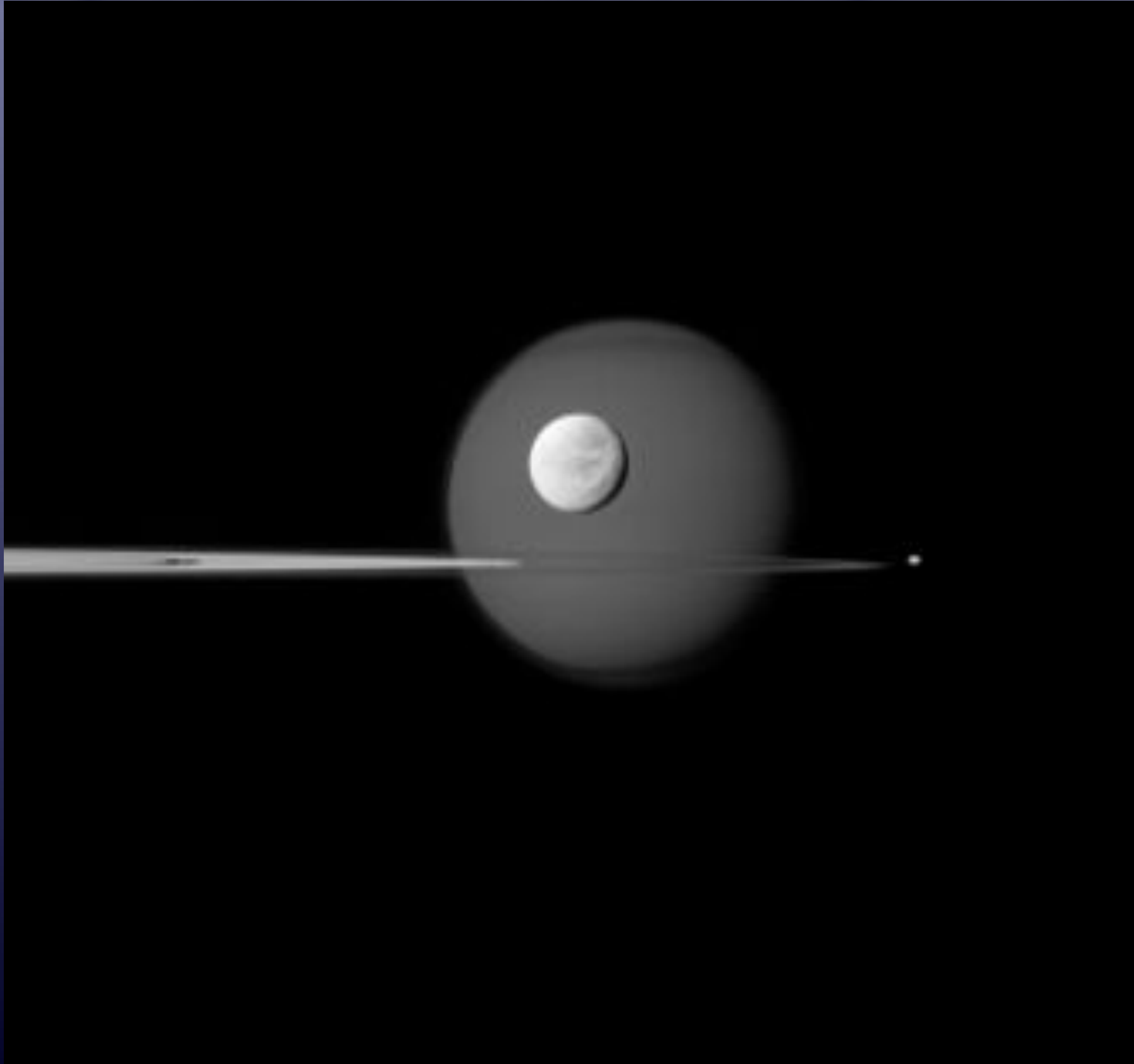
le plus bel exemple de disque

le plus bel exemple de disque

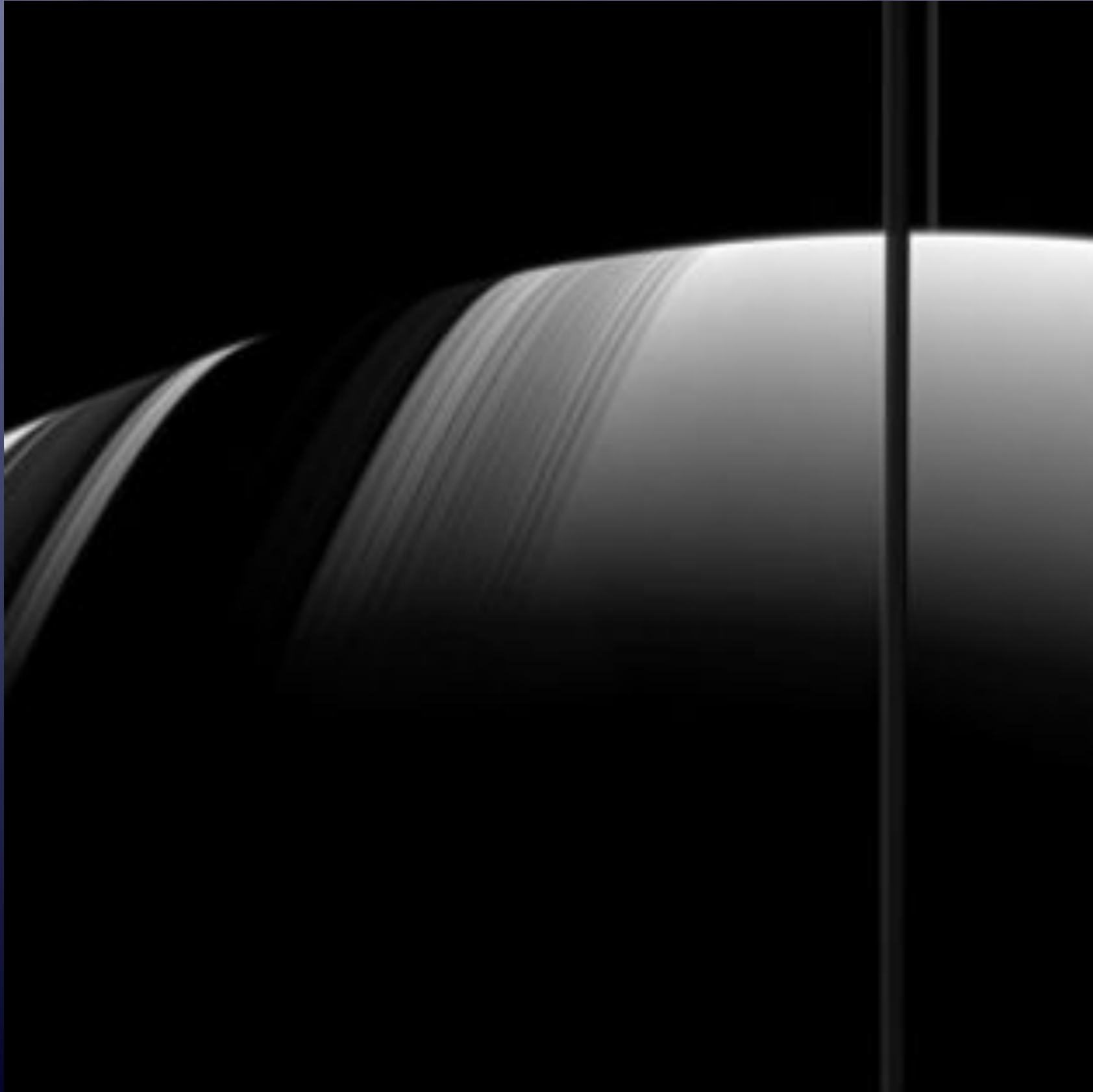




# le plus bel exemple de disque



le plus bel exemple de disque



# vie et mort des étoiles

- **équilibre hydrostatique** entre la gravité et la pression
- pression (chaleur) entretenue par les réactions de **fusion nucléaire**
- essentiellement **H  $\rightarrow$  He**
- puis **He  $\rightarrow$  C, O**, puis d'autres réactions formant des éléments plus lourds

## Nucléosynthèse :

- H, He,  ${}^7\text{Li}$  ont été formés lors de la **nucléosynthèse primordiale** ( $t=100$  à  $1000$  s après le Big Bang,  $T=10^9$  à  $3 \cdot 10^8$  °K)
- C, O, N formés dans les étoiles
- presque tout le reste dans les **explosions de supernovae**
- **poussière d'étoiles !**

# notre Galaxie : la Voie Lactée







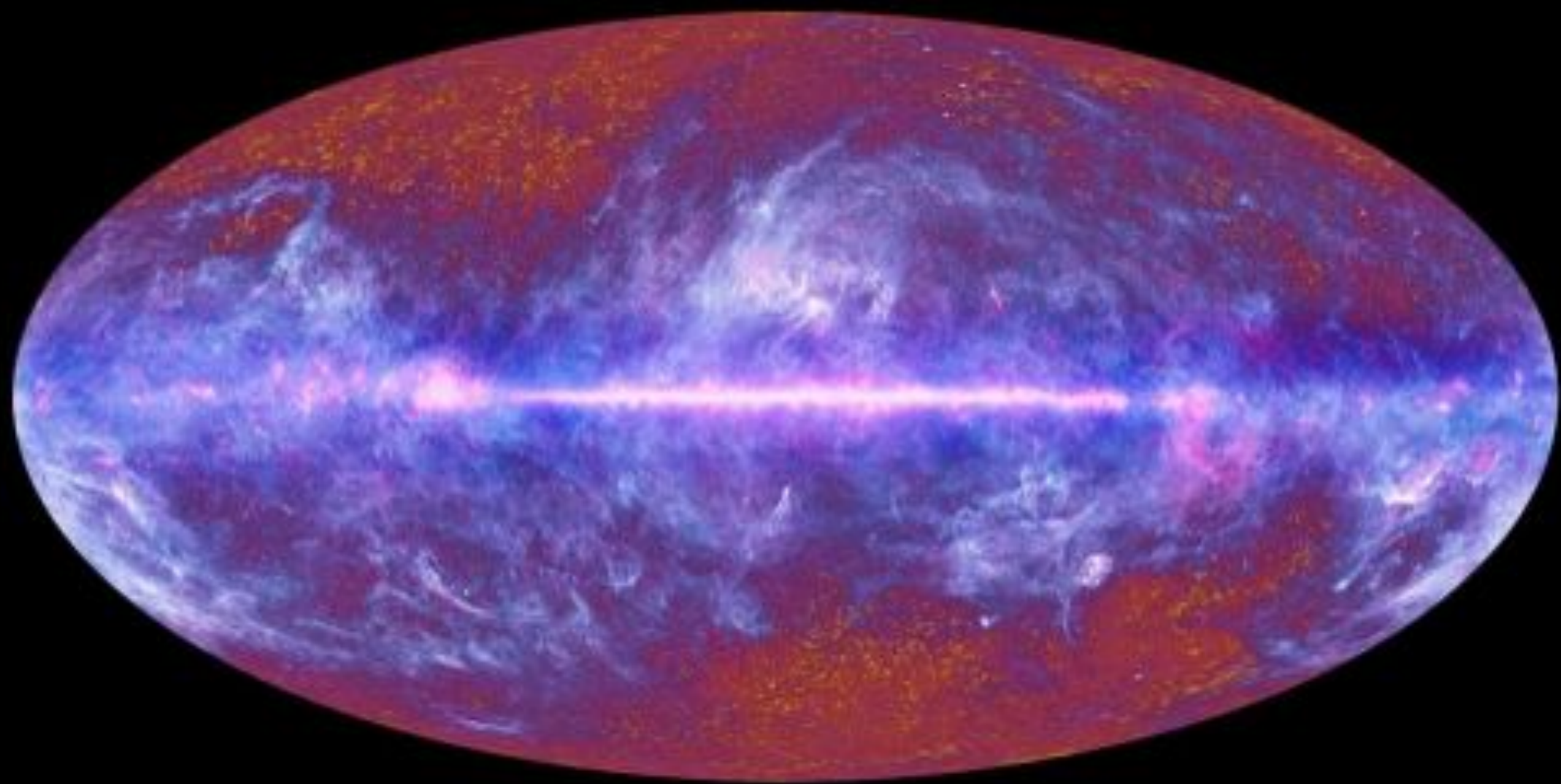
© Alex Tudorica



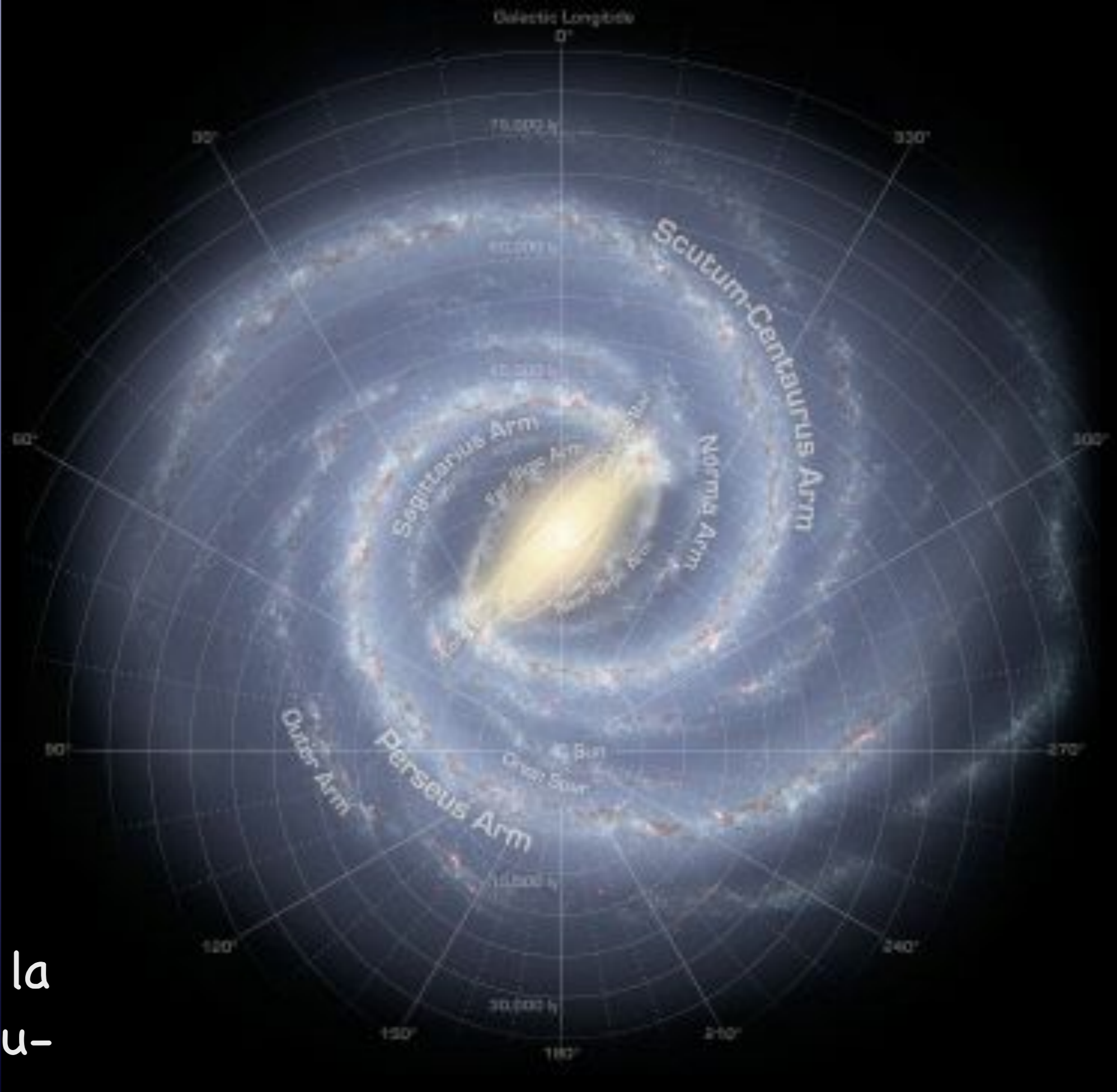
© Alex Tudorica







# notre Galaxie : la Voie Lactée



si on  
pouvait la  
voir d'au-  
dessus

# Galaxies spirales













Spiral Galaxy NGC 4622



Barred Spiral Galaxy NGC 1300



# Galaxies spirales

valeurs typiques :

- 200 milliards d'étoiles
- rayon  $\sim 30$  kpc  $\sim 100\,000$  années-lumière
- $v_{\text{rotation}} \sim 200$  km/s
- $T_{\text{rotation}} \sim 250$  millions d'années au Soleil
- $\rightarrow 6^\circ$  depuis Lucy,  $12^\circ$  depuis Toumaï, 1 tour depuis la naissance des dinosaures,  $2''$  depuis Astérix...
- étoiles sur des orbites quasi-circulaires + agitation "thermique"  $\sim 30$  km/s
- gaz ( $\sim 5-10\%$  de la masse des étoiles) : phases froide (nuages), tiède, chaud,  $c_s \sim 5$  km/s
- champ magnétique et rayons cosmiques
- équipartition :  $P_{\text{gaz}} \sim P_{\text{mag}} \sim P_{\text{cosmiques}} \rightarrow$  systèmes couplés

# gaz interstellaire





# gaz interstellaire







# gaz interstellaire



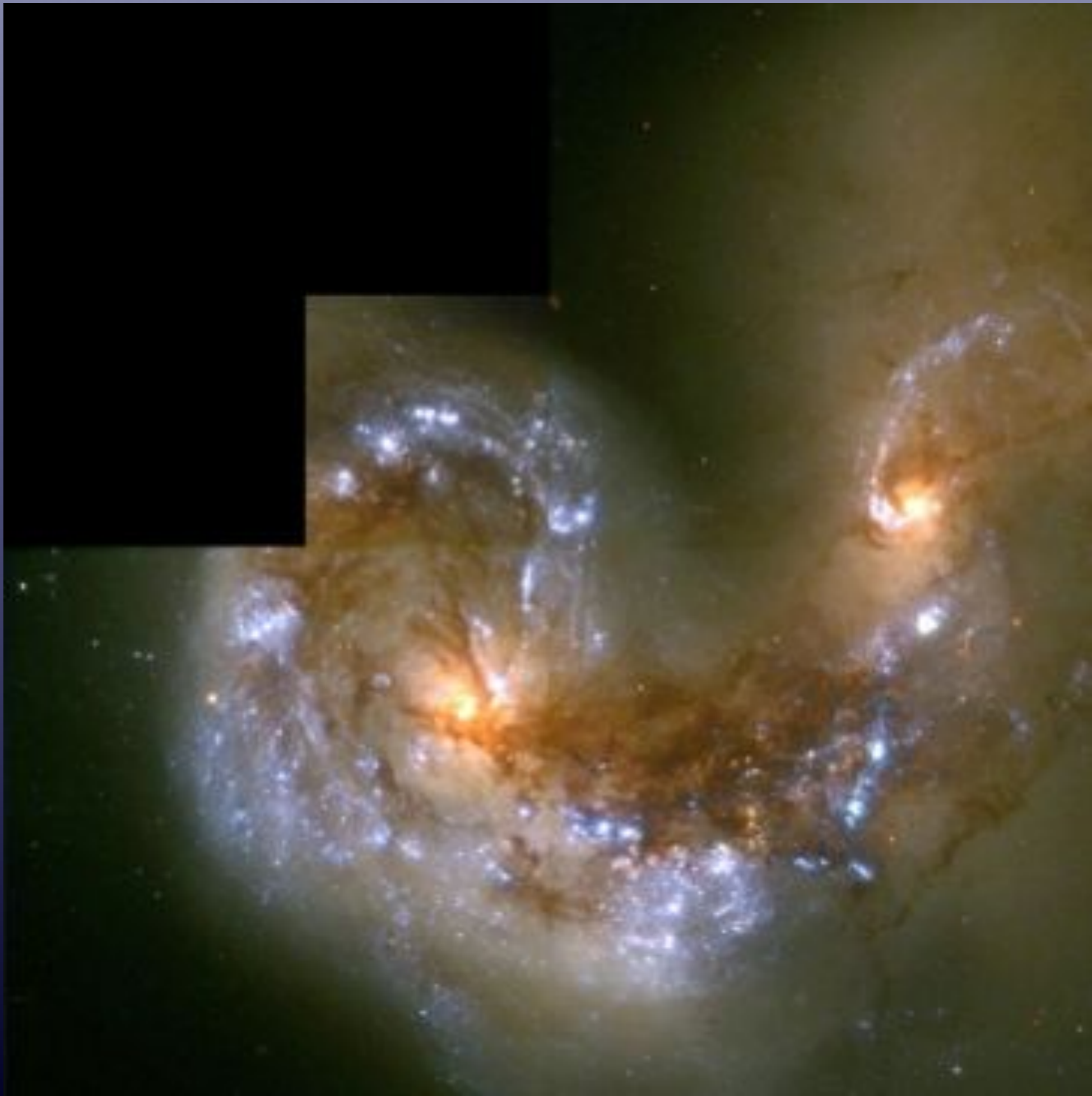
# gaz interstellaire

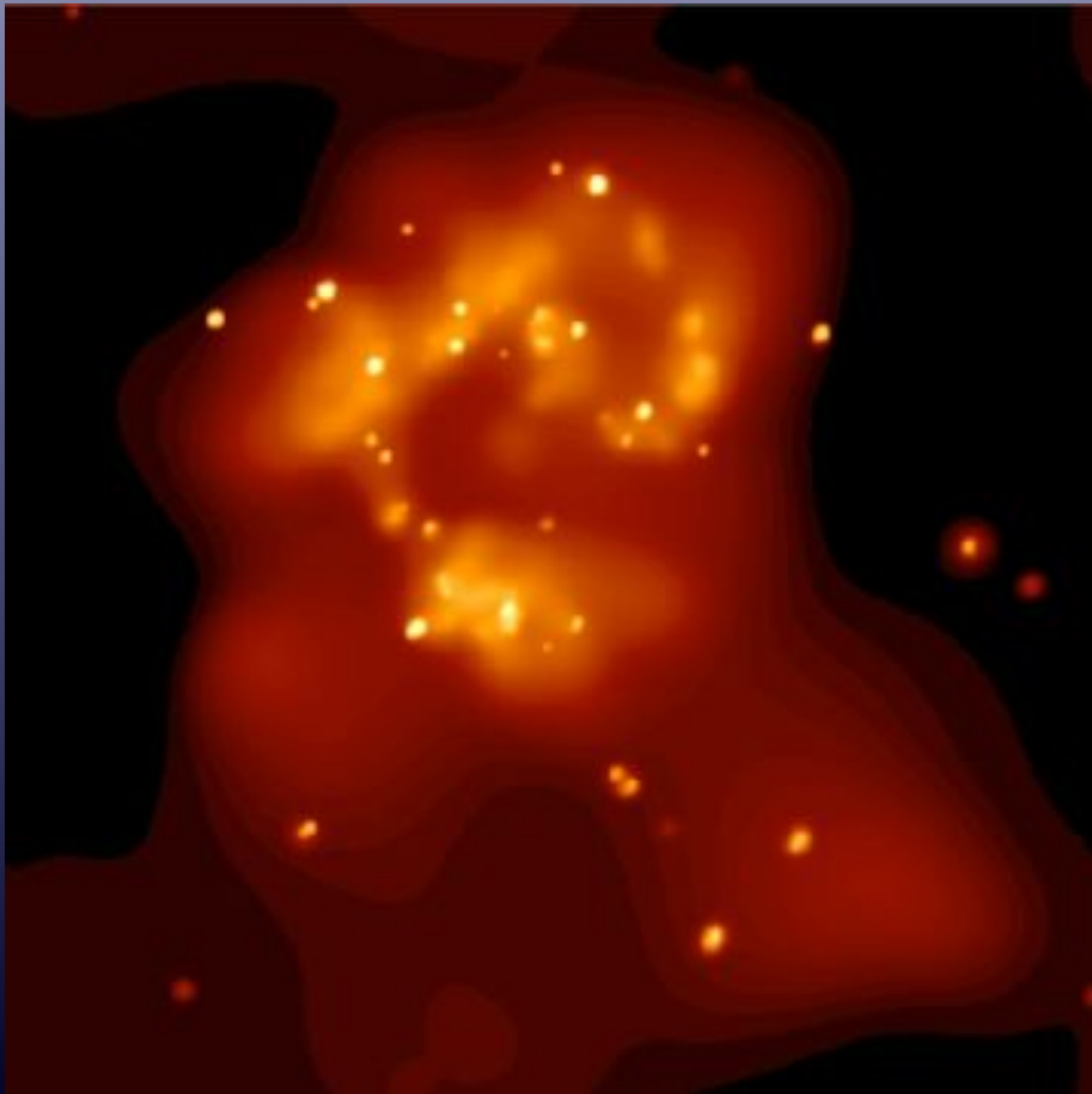




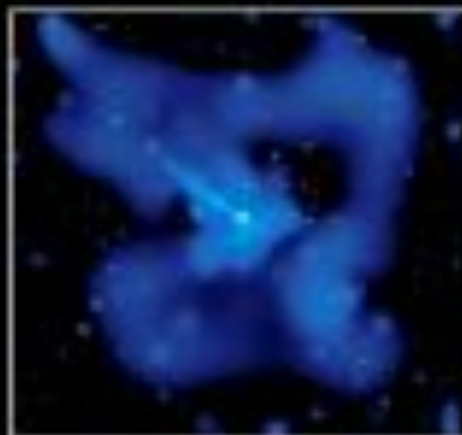
# interactions et collisions de galaxies











CHANDRA X-RAY



DSS OPTICAL



NRAD RADIO  
CONTINUUM



NRAD RADIO  
(21-CM)

# amas de galaxies

- les galaxies sont le plus souvent en amas
- la Voie Lactée a des galaxies satellites (nuages de Magellan)
- elle appartient au groupe local de galaxies
- qui se précipite vers l'amas de la Vierge



amas de Coma

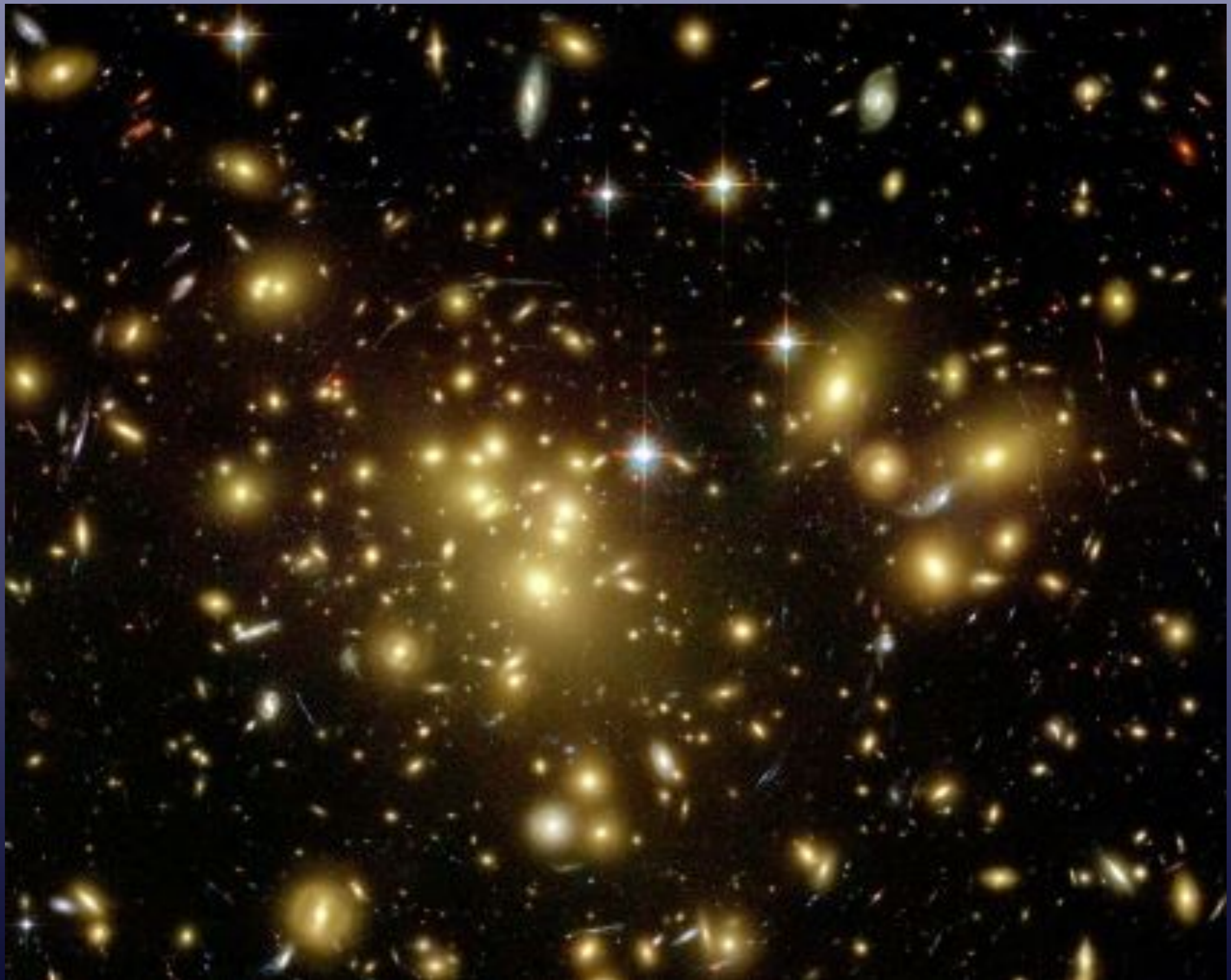


Amas de la Vierge



la chaîne de Markarian,  
au centre de l'amas de la Vierge





Amas d'Abell

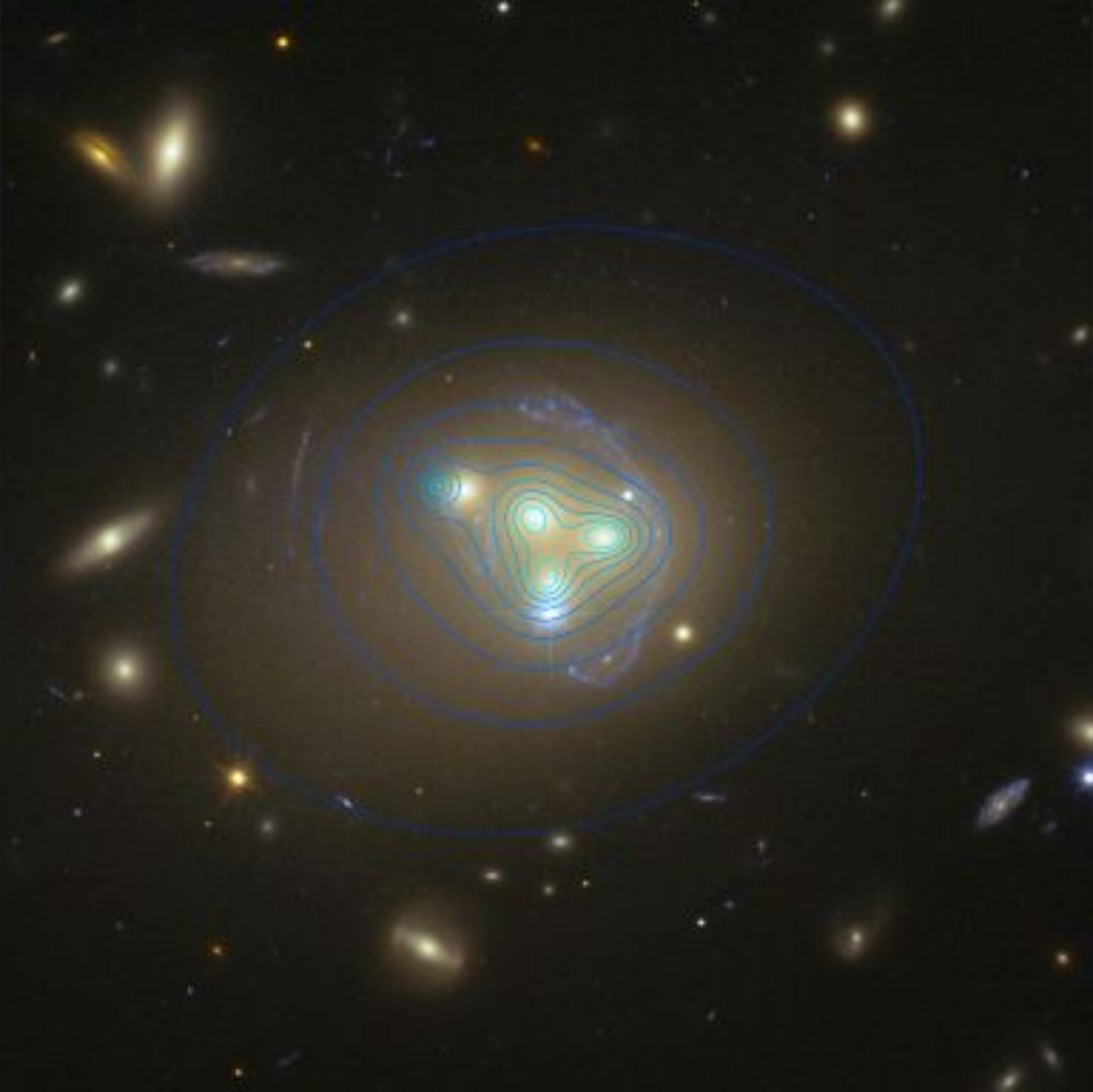
# un mirage gravitationnel



# l'amas de galaxies 1E 0657-56



galaxies, gaz (rouge) et matière noire (bleu)



# expansion de l'Univers

- Einstein, 1917 : Relativité Générale. Constante d'intégration  $\Lambda$  pour permettre un Univers statique

- Hubble, 1929 : les galaxies s'éloignent de nous avec une loi :

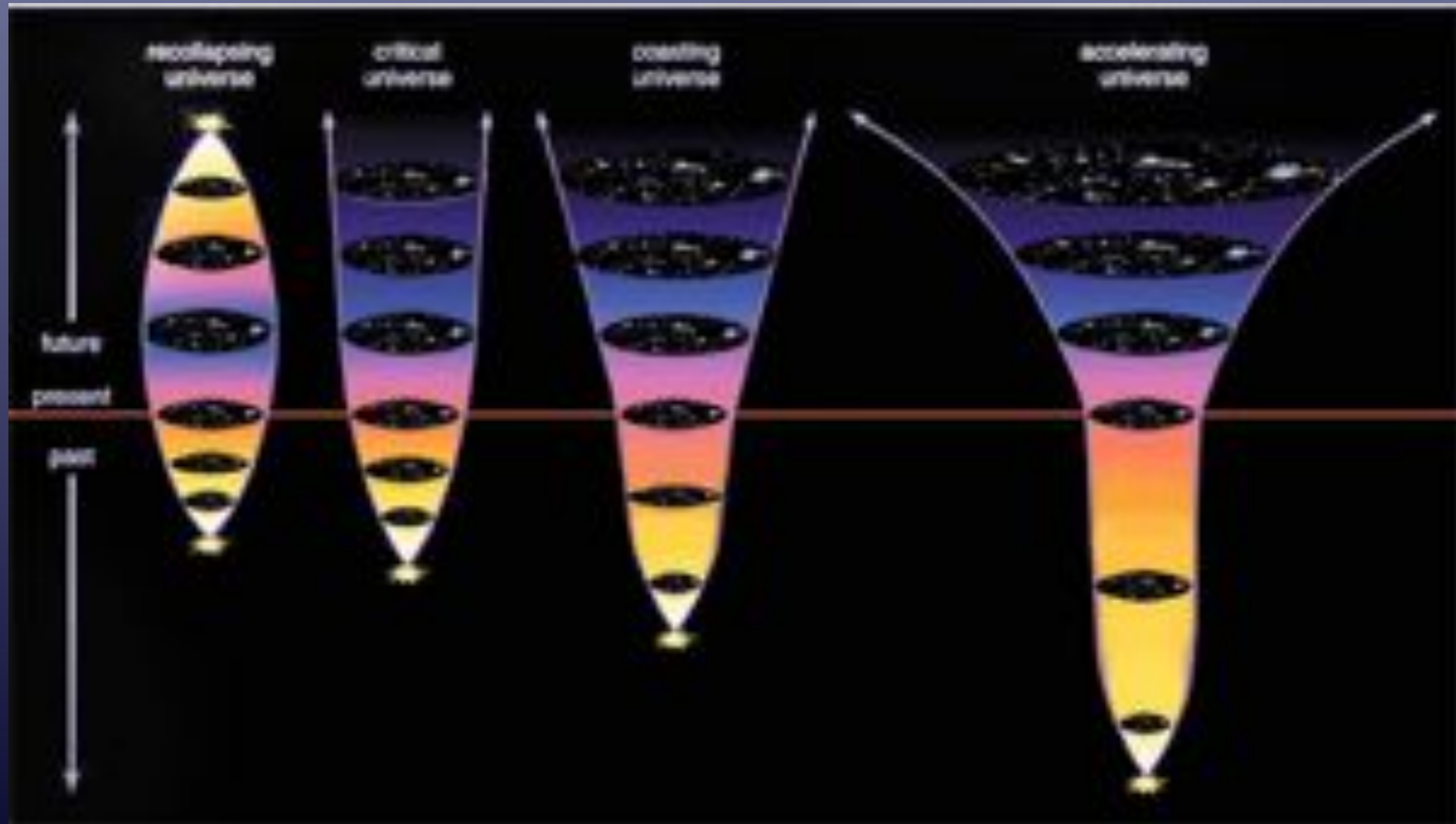
$$v_{exp} = Hd$$

où  $H = 70 \text{ kms}/(s.Mpc)$

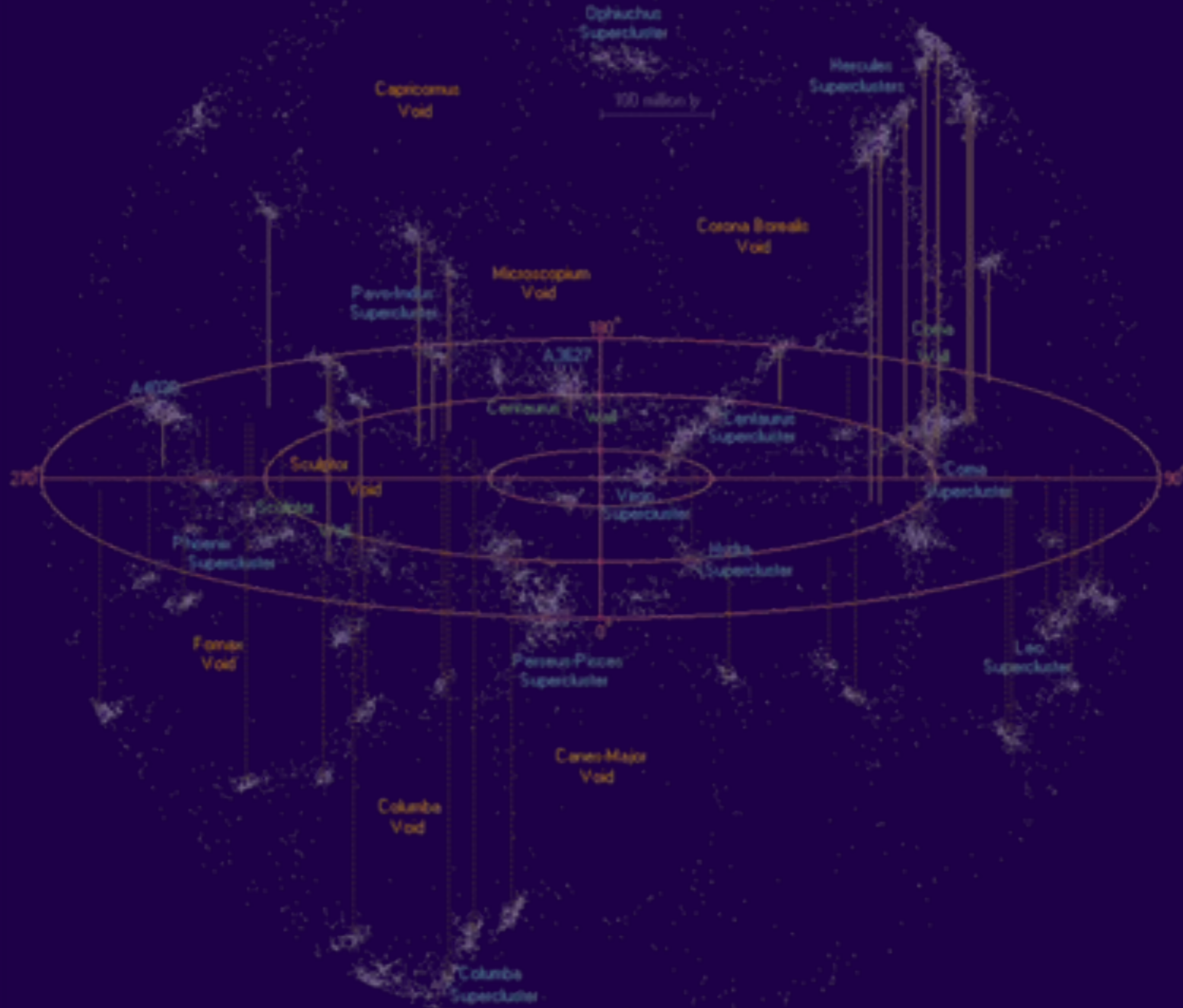
$$1 \text{ Mpc} = 3.10^6 \text{ années-lumière}$$

- Einstein : "la plus grande erreur de ma vie !"  
...mais pas si faux que ça (?)

# expansion de l'Univers



la structure de l'Univers  
sur  $5 \cdot 10^8$  années-lumière

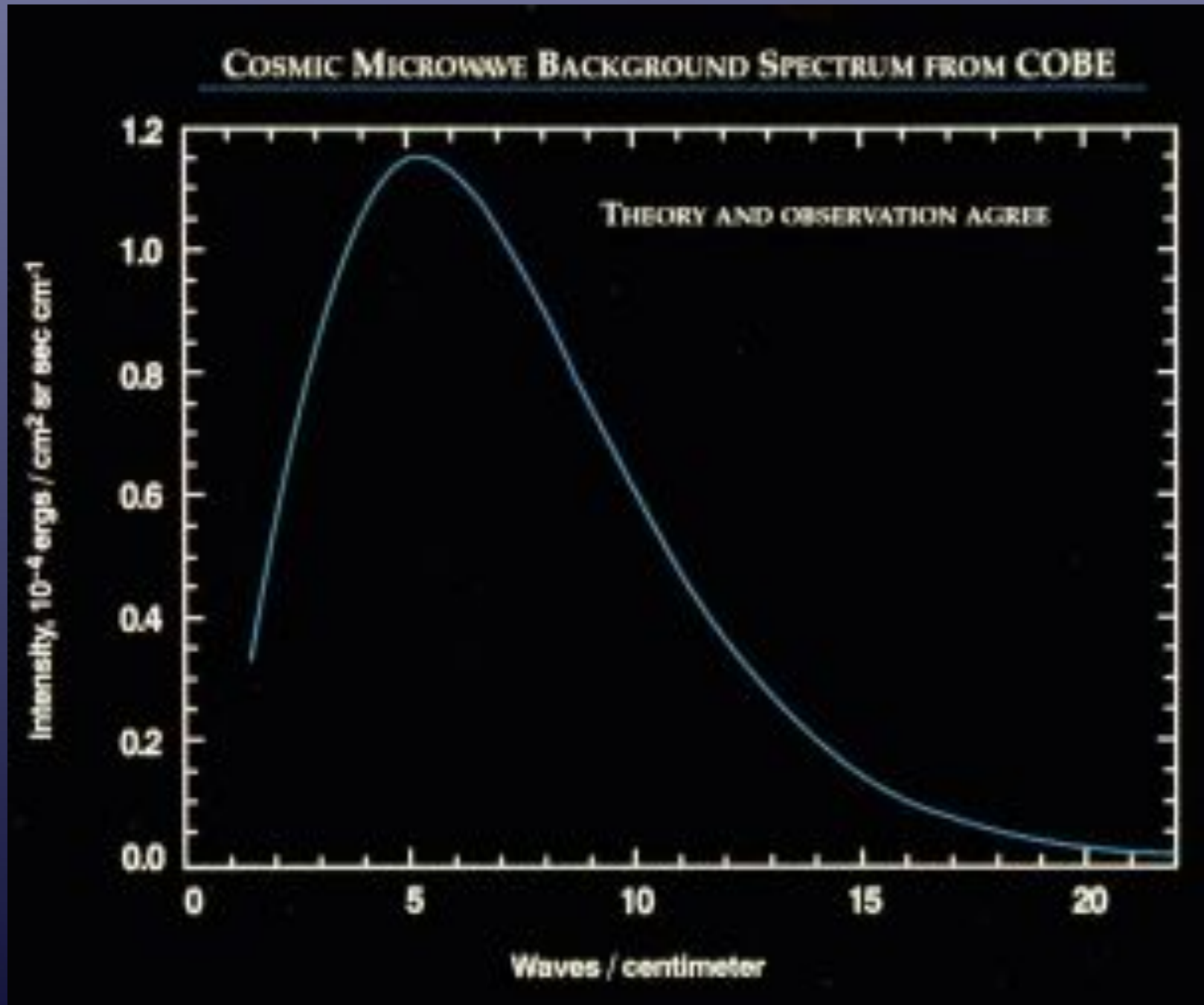




# rayonnement cosmologique

- Lemaître, années 30 : "atome primordial"
- Gamow, 1949 : nucléosynthèse primordiale
- Alpher, Herman : prédiction du fond de rayonnement
- Hoyle : le nom "Big Bang"
- Penzias et Wilson, 1964 : découverte du rayonnement cosmologique
- le rayonnement de corps noir le plus pur jamais mesuré !

# rayonnement cosmologique

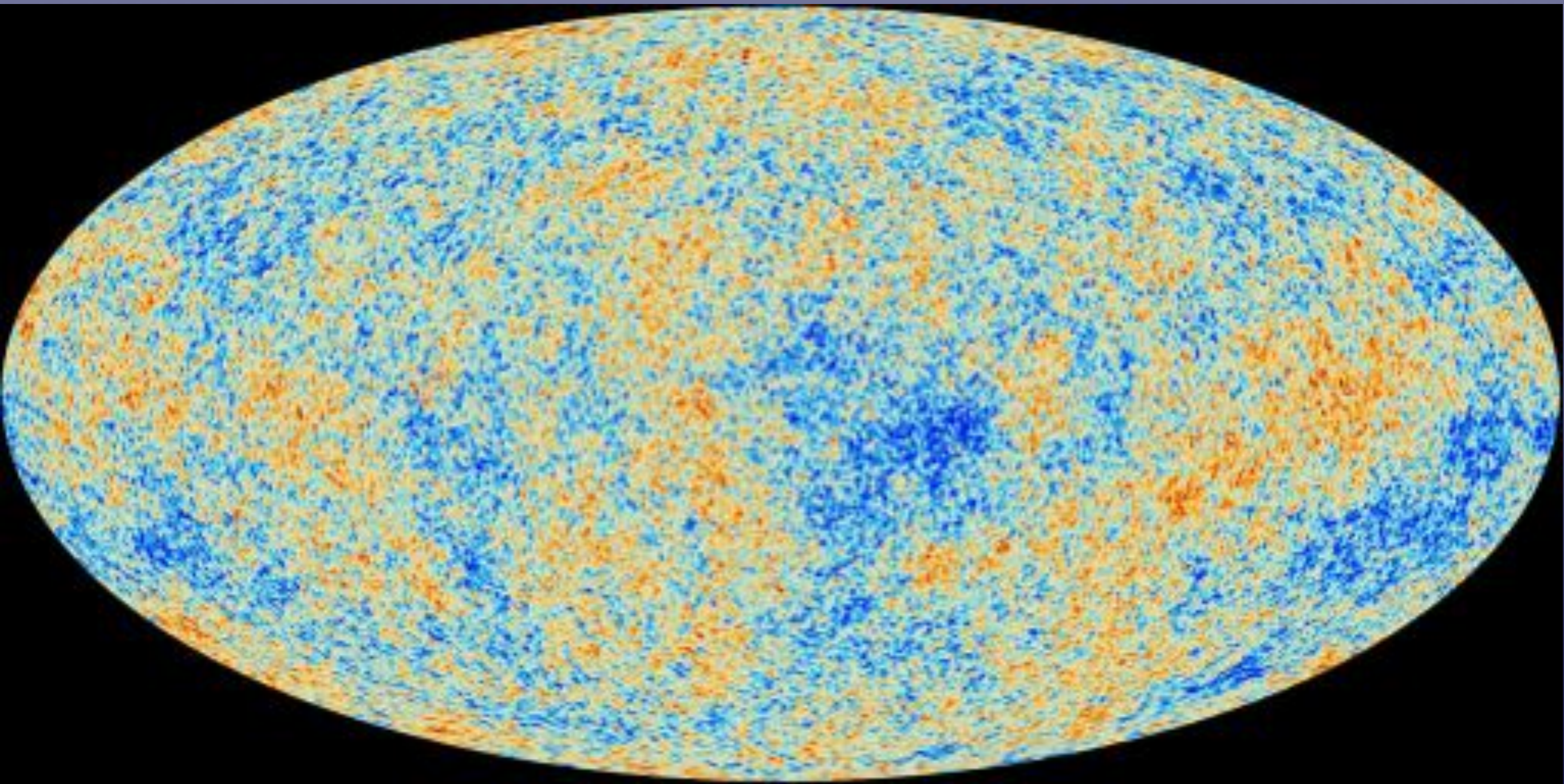


- rayonnement émis lorsque l'Univers avait 379 000 ans,  $T=3000$  °K
- découplage photons-matière
- $T=2,78$ °K aujourd'hui à cause de l'expansion
- fluctuations  $\sim 10^{-5}$ °K
- $\rightarrow$  conditions initiales pour la croissance des structures par effondrement gravitationnel

mais où sont les barres d'erreur ?

# rayonnement cosmologique

les résultats de Planck !



les résultats de Planck !

les résultats de Planck !

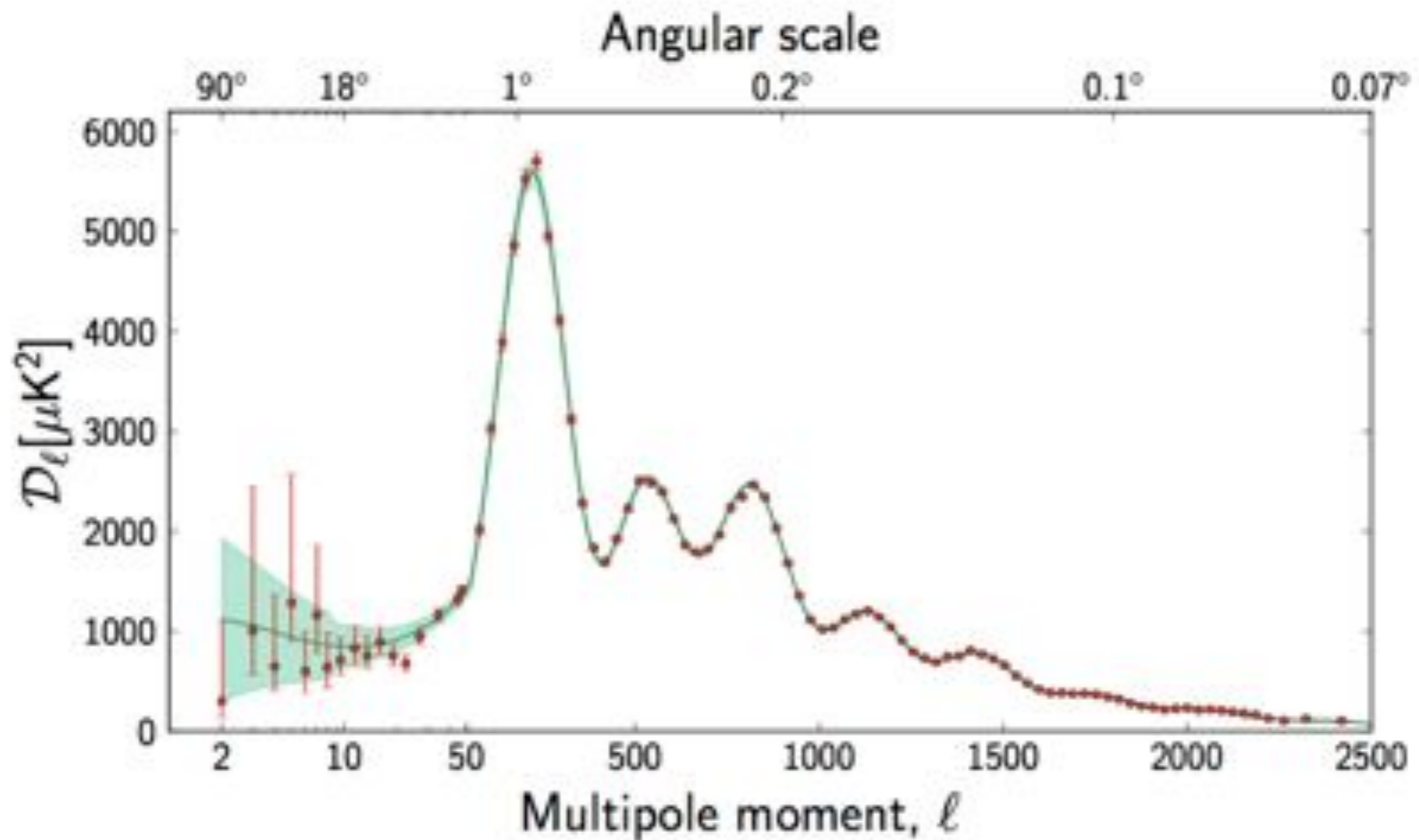
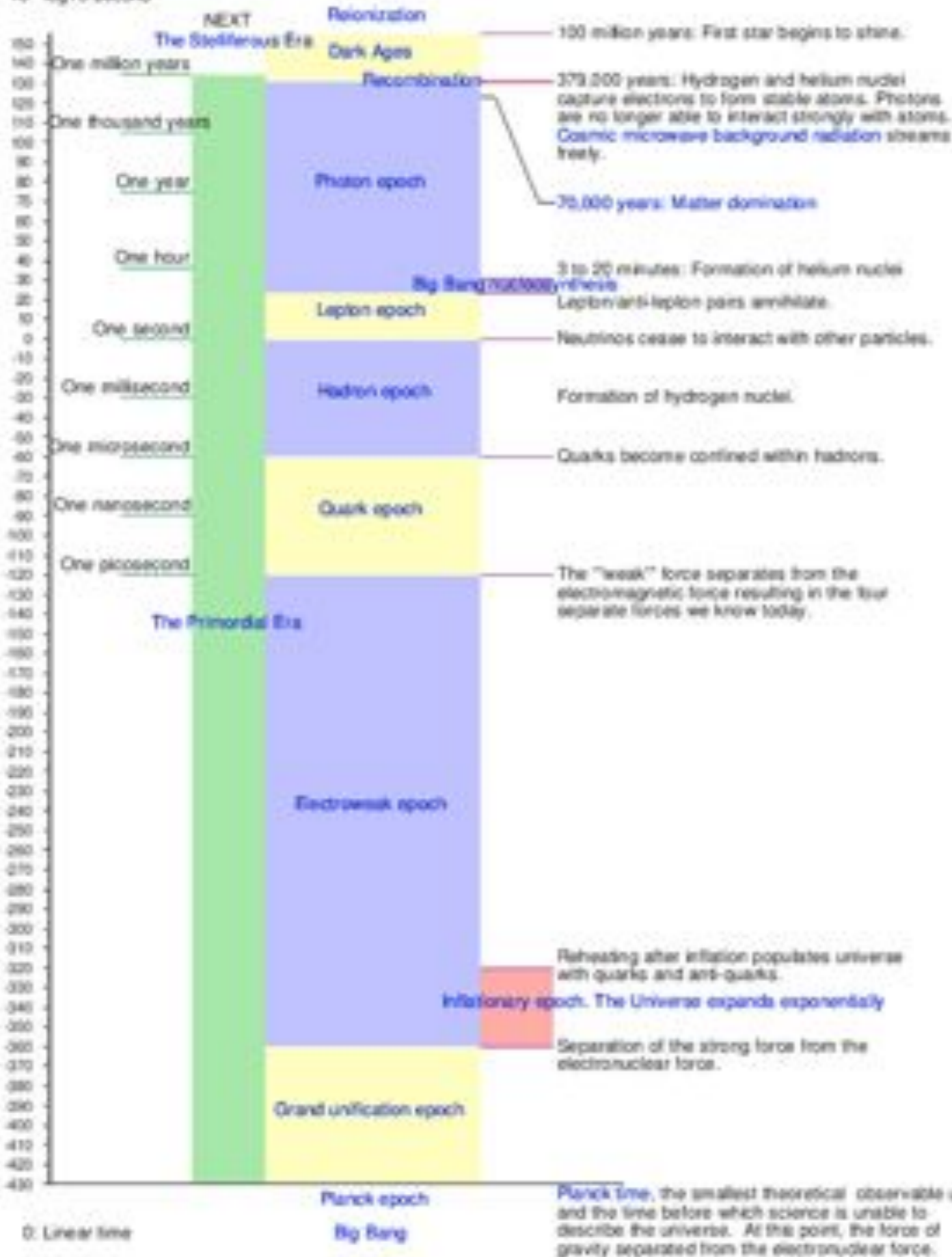


Figure 37. The 2013 *Planck* CMB temperature angular power spectrum. The error bars include cosmic variance, whose magnitude is indicated by the green shaded area around the best fit model. The low- $l$  values are plotted at 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9.5, 11.5, 13.5, 16, 19, 22.5, 27, 34.5, and 44.5.

les résultats de Planck !

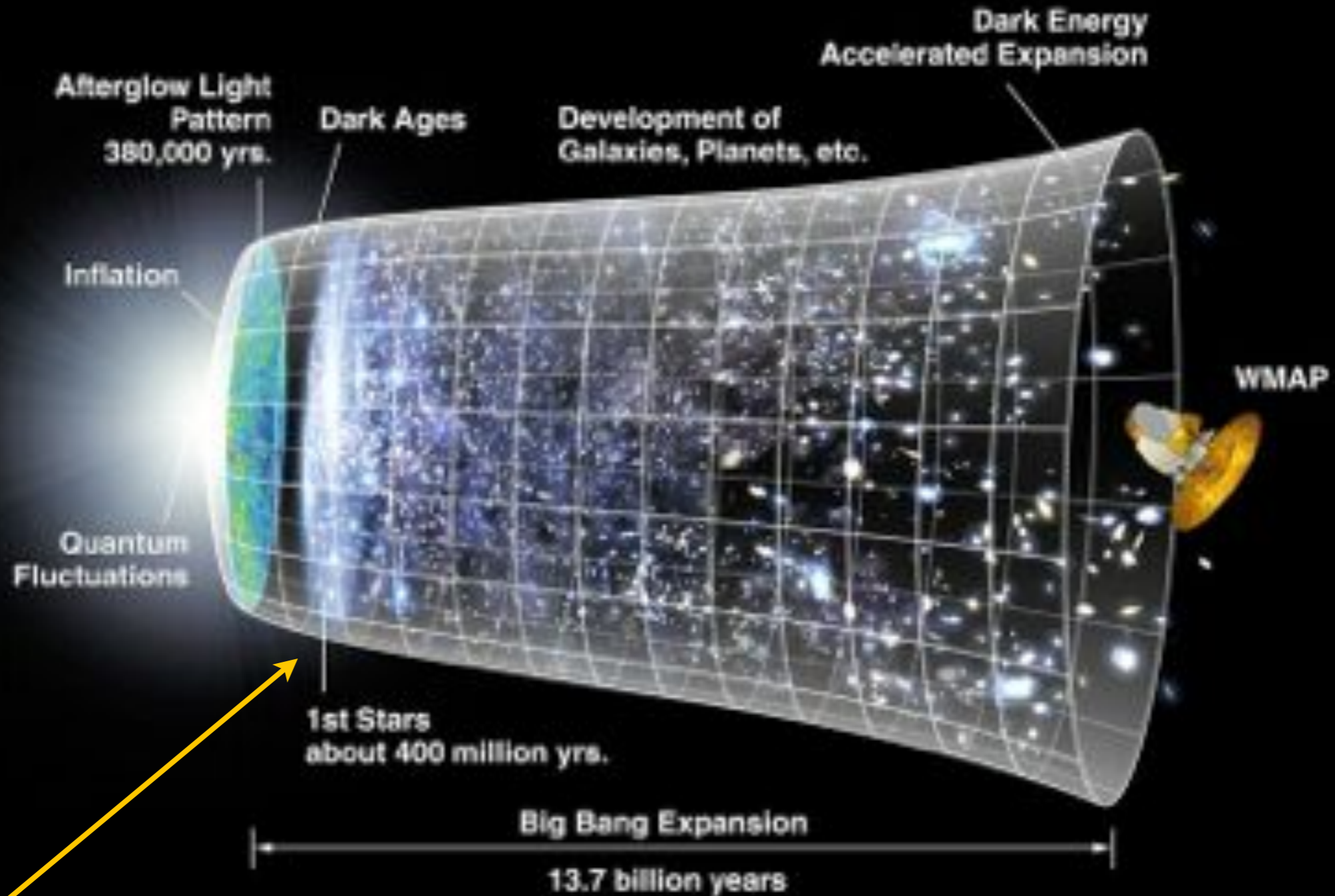
Logarithmic time:  
 $10^{-\log_{10} \text{second}}$



# les premiers âges de l'Univers

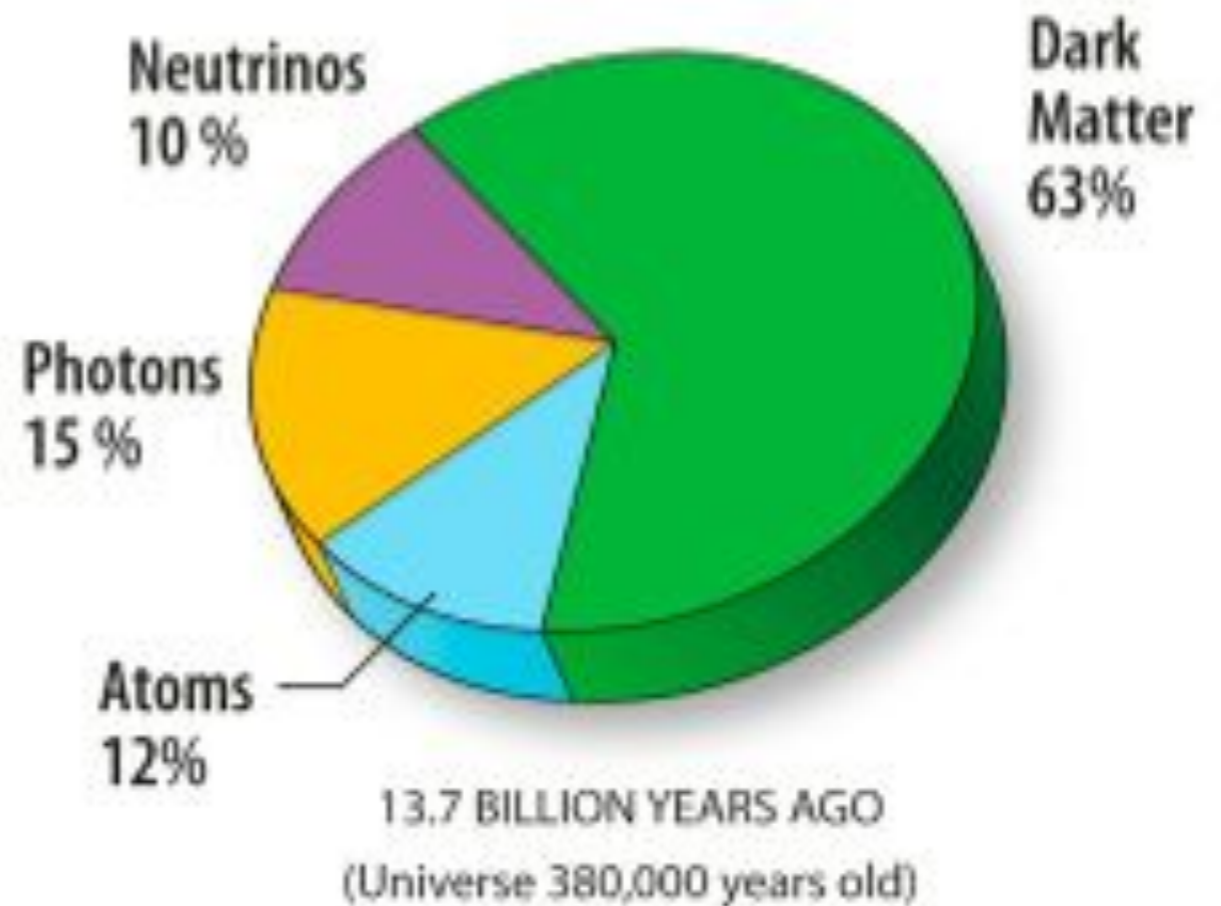
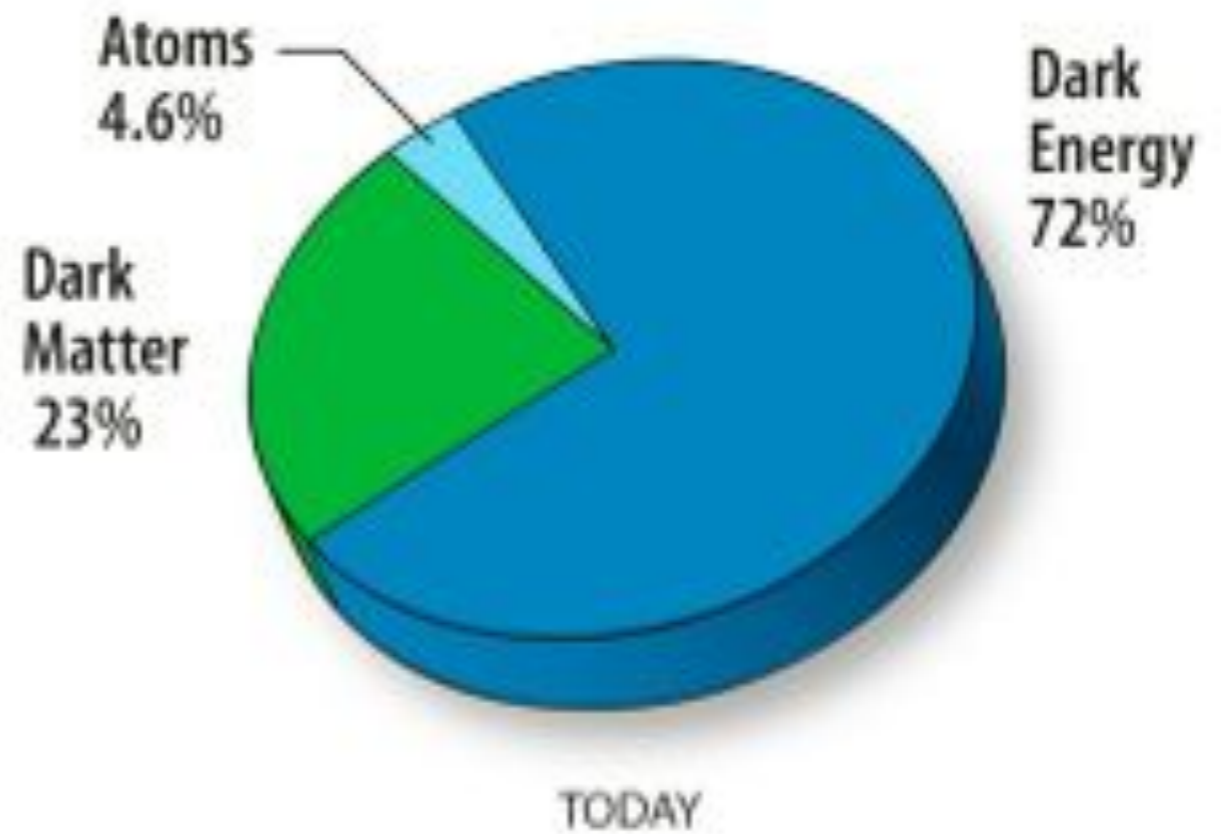


# histoire des structures

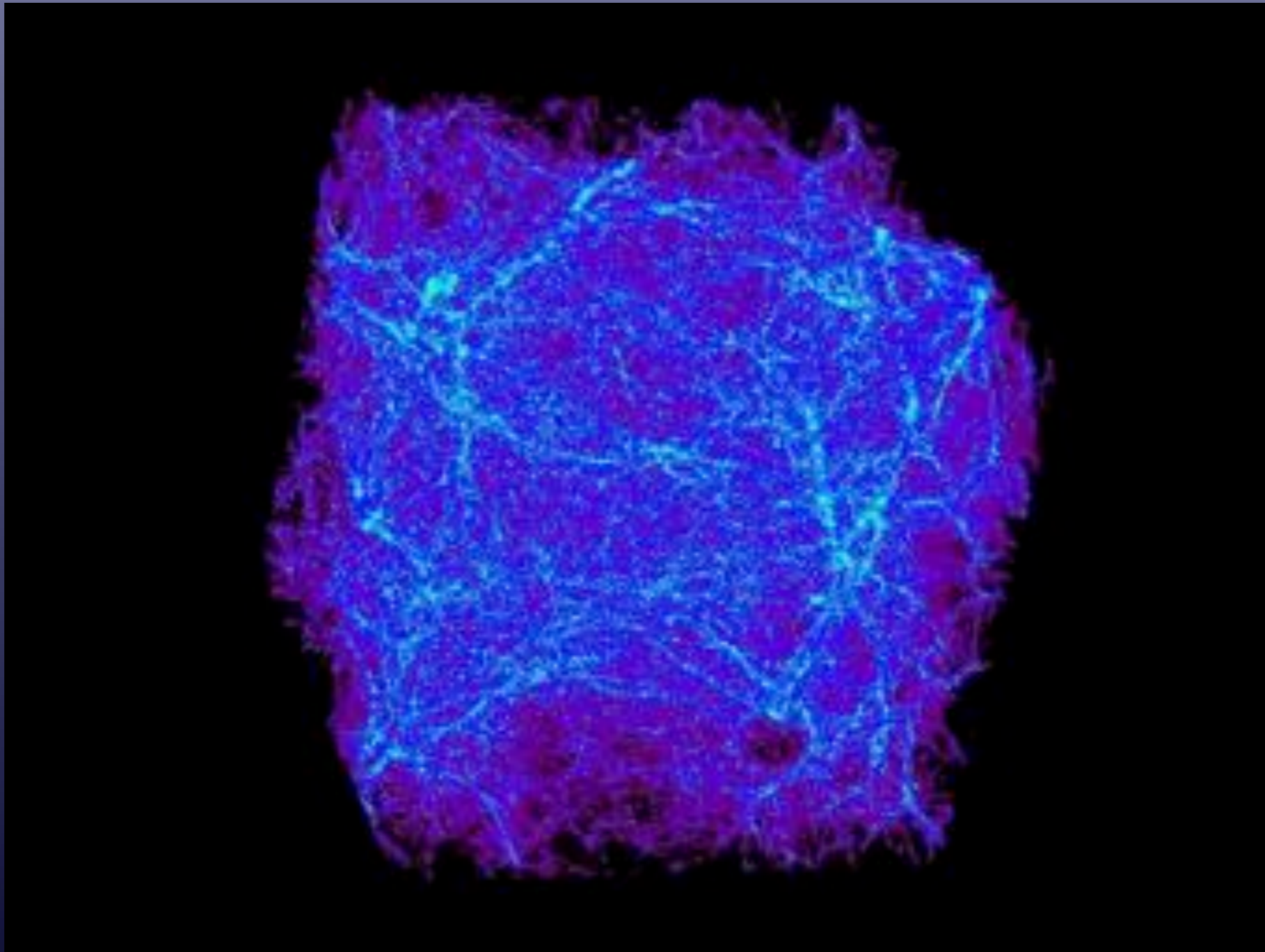


un des objectifs de LOFAR

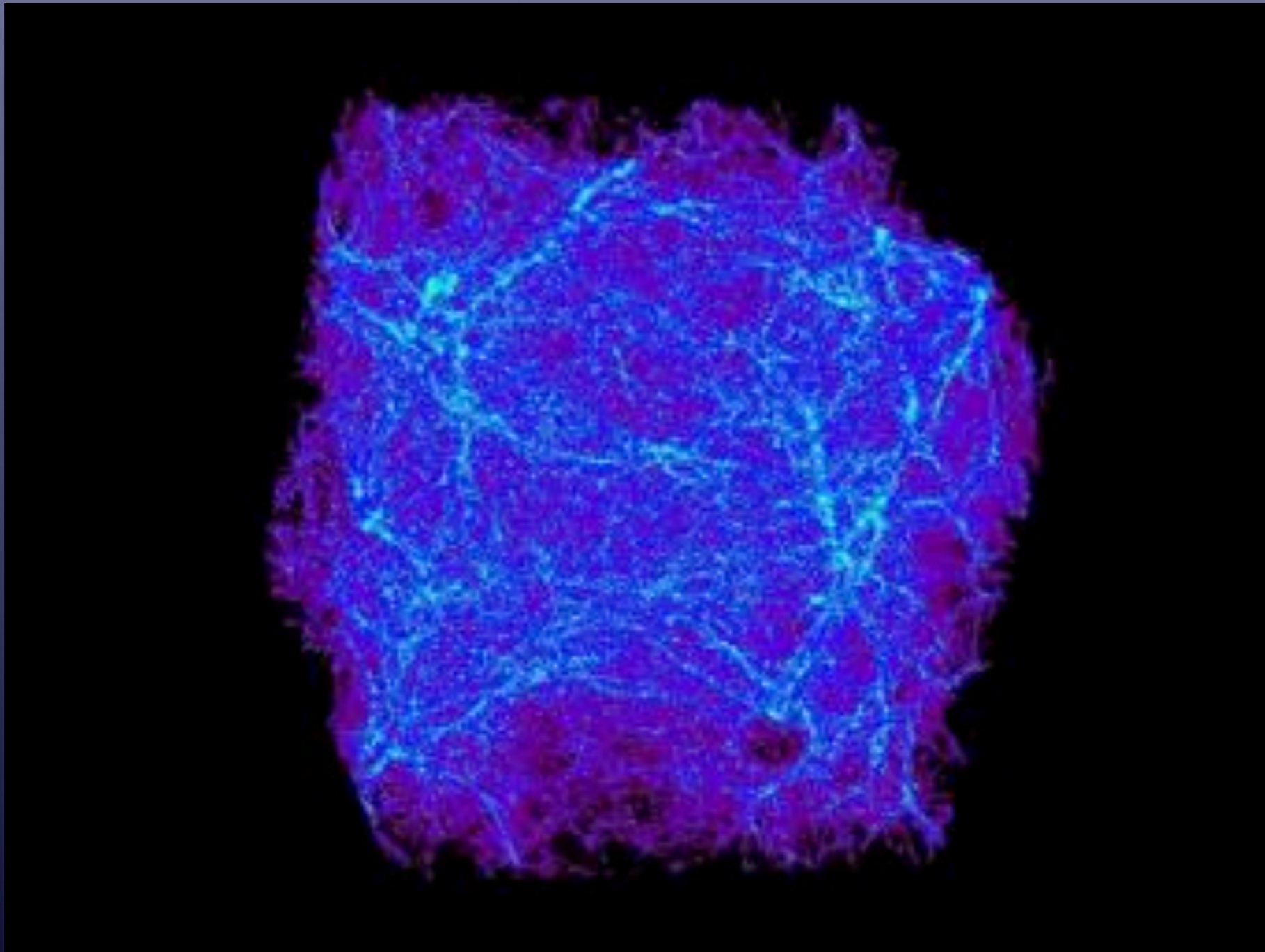
# la composition de l'Univers

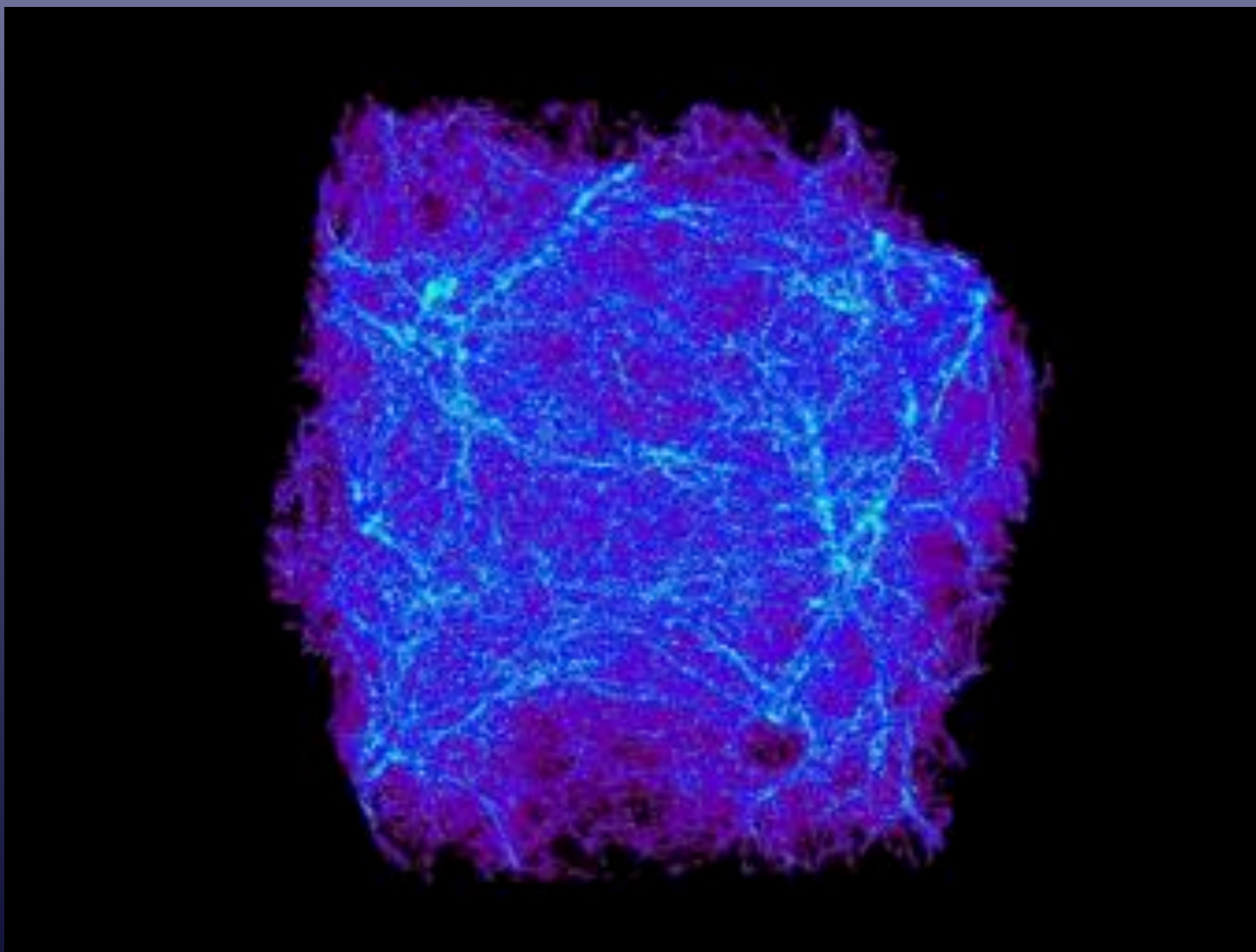


# simulations cosmologiques



# simulations cosmologiques





# simulations cosmologiques

- matière noire et gaz
- effondrement gravitationnel de la matière noire
- -> formation de filaments qui s'entrecroisent
- -> amas de galaxies aux noeuds du réseau
- l'effondrement se poursuit le long des filaments
- grands vides
- le gaz tombe dans les puits de potentiel gravitationnel
- très peu de paramètres !
- les simulations reproduisent la structure de l'Univers jusqu'à la formation des galaxies

la suite...

# la suite...

- le gaz est concentré et chauffé dans les puits de potentiel créé par la matière sombre



# la suite...

- le gaz est concentré et chauffé dans les puits de potentiel créé par la matière sombre
- compétition entre gravité, pression, force centrifuge

# la suite...

- le gaz est concentré et chauffé dans les puits de potentiel créé par la matière sombre
- compétition entre gravité, pression, force centrifuge
- mais le gaz rayonne et tend à se refroidir

# la suite...

- le gaz est concentré et chauffé dans les puits de potentiel créé par la matière sombre
- compétition entre gravité, pression, force centrifuge
- mais le gaz rayonne et tend à se refroidir
- bien plus difficile à modéliser !

# la suite...

- le gaz est concentré et chauffé dans les puits de potentiel créé par la matière sombre
- compétition entre gravité, pression, force centrifuge
- mais le gaz rayonne et tend à se refroidir
- bien plus difficile à modéliser !
  - équation d'état du gaz, poussières

# la suite...

- le gaz est concentré et chauffé dans les puits de potentiel créé par la matière sombre
- compétition entre gravité, pression, force centrifuge
- mais le gaz rayonne et tend à se refroidir
- bien plus difficile à modéliser !
  - équation d'état du gaz, poussières
  - transfert de rayonnement

# la suite...

- le gaz est concentré et chauffé dans les puits de potentiel créé par la matière sombre
- compétition entre gravité, pression, force centrifuge
- mais le gaz rayonne et tend à se refroidir
- bien plus difficile à modéliser !
  - équation d'état du gaz, poussières
  - transfert de rayonnement
  - turbulence

# la suite...

- le gaz est concentré et chauffé dans les puits de potentiel créé par la matière sombre
- compétition entre gravité, pression, force centrifuge
- mais le gaz rayonne et tend à se refroidir
- bien plus difficile à modéliser !
  - équation d'état du gaz, poussières
  - transfert de rayonnement
  - turbulence
  - formation d'étoiles et de planètes

# la suite...

- le gaz est concentré et chauffé dans les puits de potentiel créé par la matière sombre
- compétition entre gravité, pression, force centrifuge
- mais le gaz rayonne et tend à se refroidir
- bien plus difficile à modéliser !
  - équation d'état du gaz, poussières
  - transfert de rayonnement
  - turbulence
  - formation d'étoiles et de planètes
  - champ magnétique, chimie, biologie...



# la suite...

- le gaz est concentré et chauffé dans les puits de potentiel créé par la matière sombre
- compétition entre gravité, pression, force centrifuge
- mais le gaz rayonne et tend à se refroidir
- bien plus difficile à modéliser !
  - équation d'état du gaz, poussières
  - transfert de rayonnement
  - turbulence
  - formation d'étoiles et de planètes
  - champ magnétique, chimie, biologie...
  - etc...

# la suite...

ça devient compliqué !

un univers pour l'OSUC !

# galaxies spirales

- un Trou Noir supermassif au centre, 100 000 à 1 milliard  $M_{\text{Soleil}}$  (pourquoi ?)
- la structure spirale est une **instabilité gravitationnelle**
- “**plasma**” dont les particules individuelles sont les étoiles en interaction par l'autogravité
- l'instabilité spirale permet une **poursuite lente de l'effondrement gravitationnel**

# galaxies spirales

- le gaz ( $c_s \sim 5$  km/s) est plus "froid" que les étoiles ( $c_s \sim 30$  km/s)
- -> tombe dans le potentiel des bras spiraux, forme des ondes de choc
- -> effondrement gravitationnel local
- -> formation de nouvelles étoiles

Barred Spiral Galaxy NGC 1300



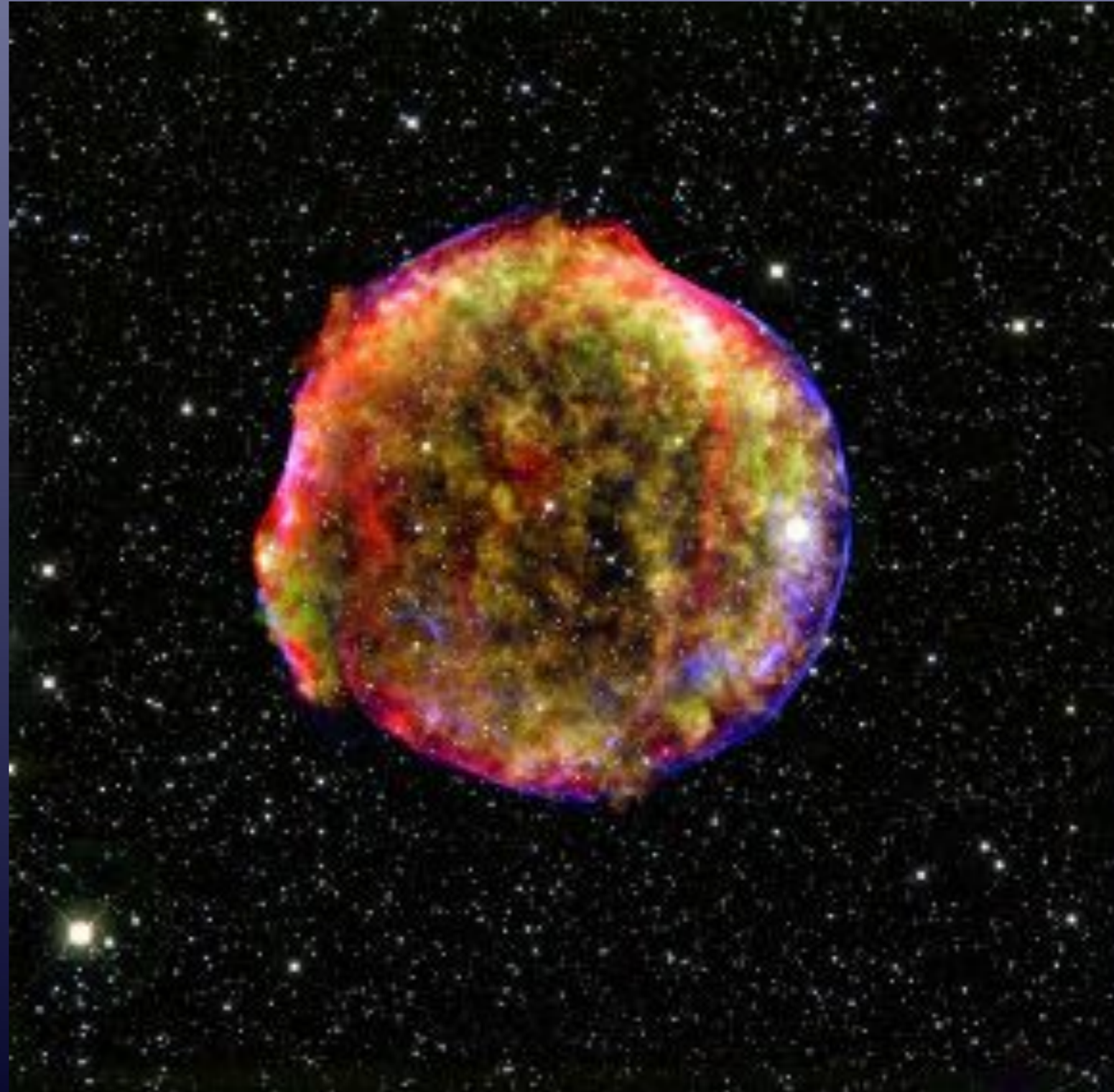
# formation d'étoiles

- par effondrement de nuages de gaz
- -> "nurseries" d'étoiles
- contagion : une étoile massive -> évolution très rapide -> explosion de supernova -> onde de choc -> nouvelles étoiles
- nucléosynthèse

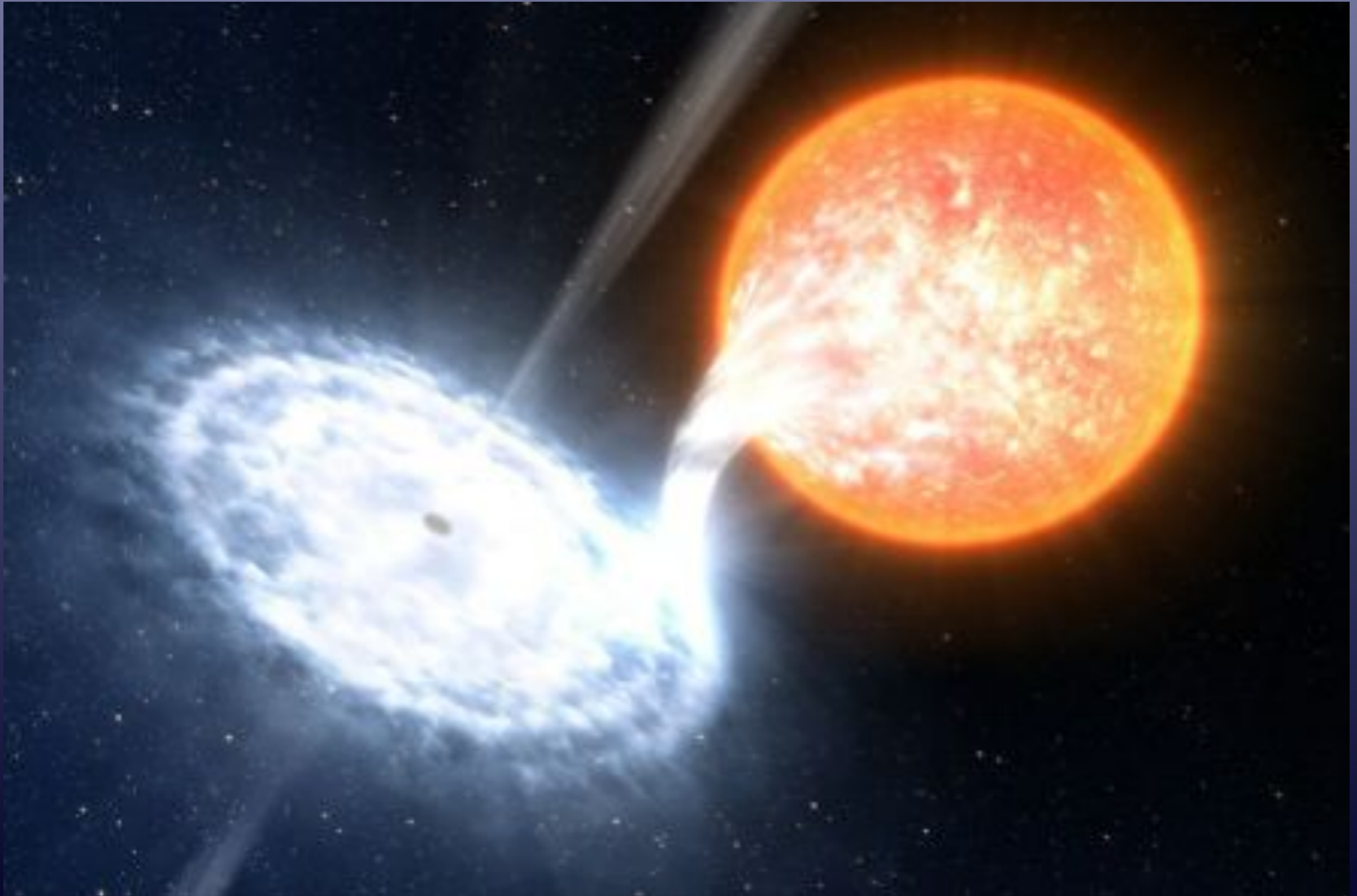


# formation d'étoiles

- par effondrement de nuages de gaz
- -> "nurseries" d'étoiles
- contagion : une étoile massive -> évolution très rapide -> explosion de supernova -> onde de choc -> nouvelles étoiles
- nucléosynthèse

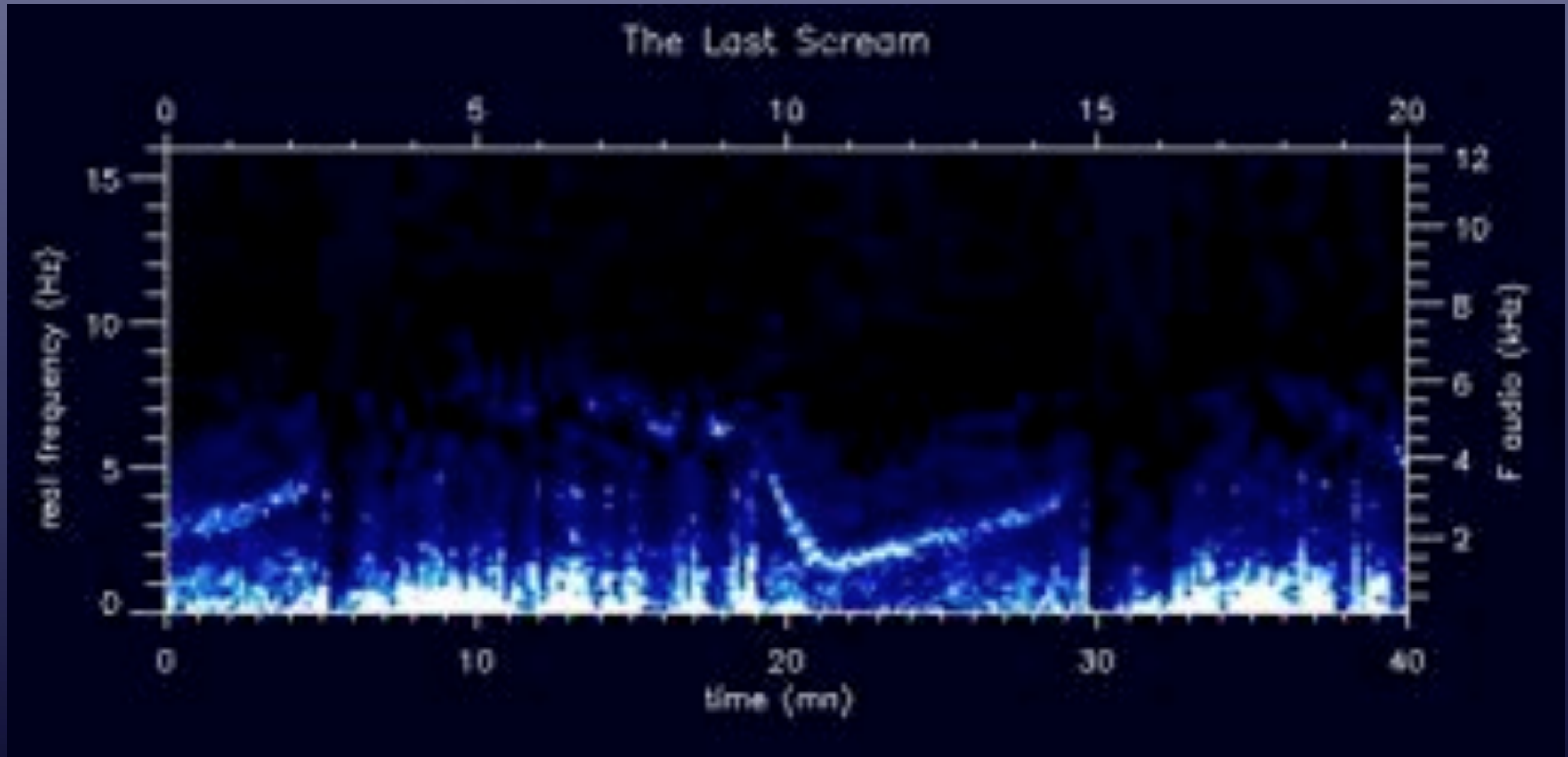


# trous noirs stellaires





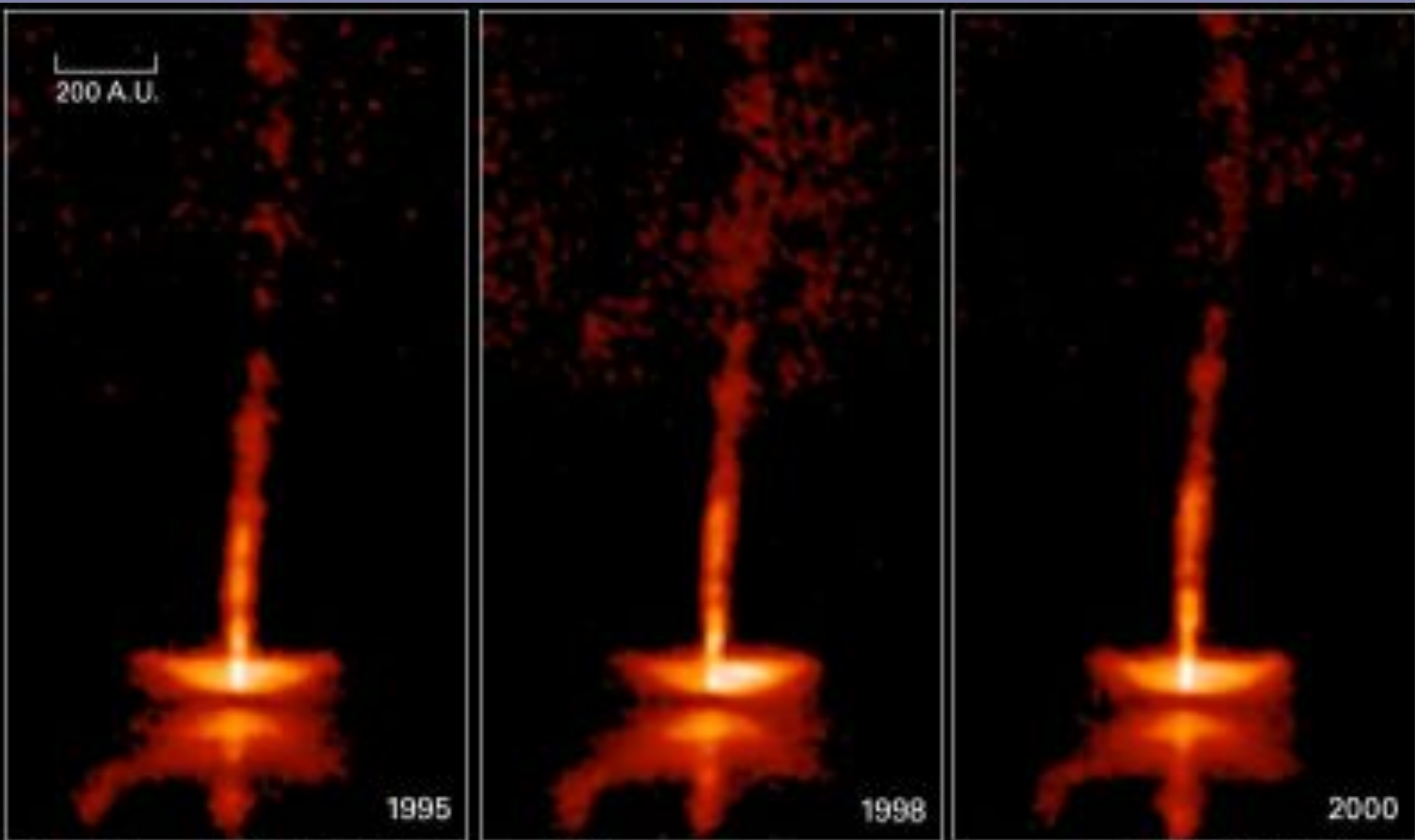
# trous noirs stellaires



étoiles jeunes



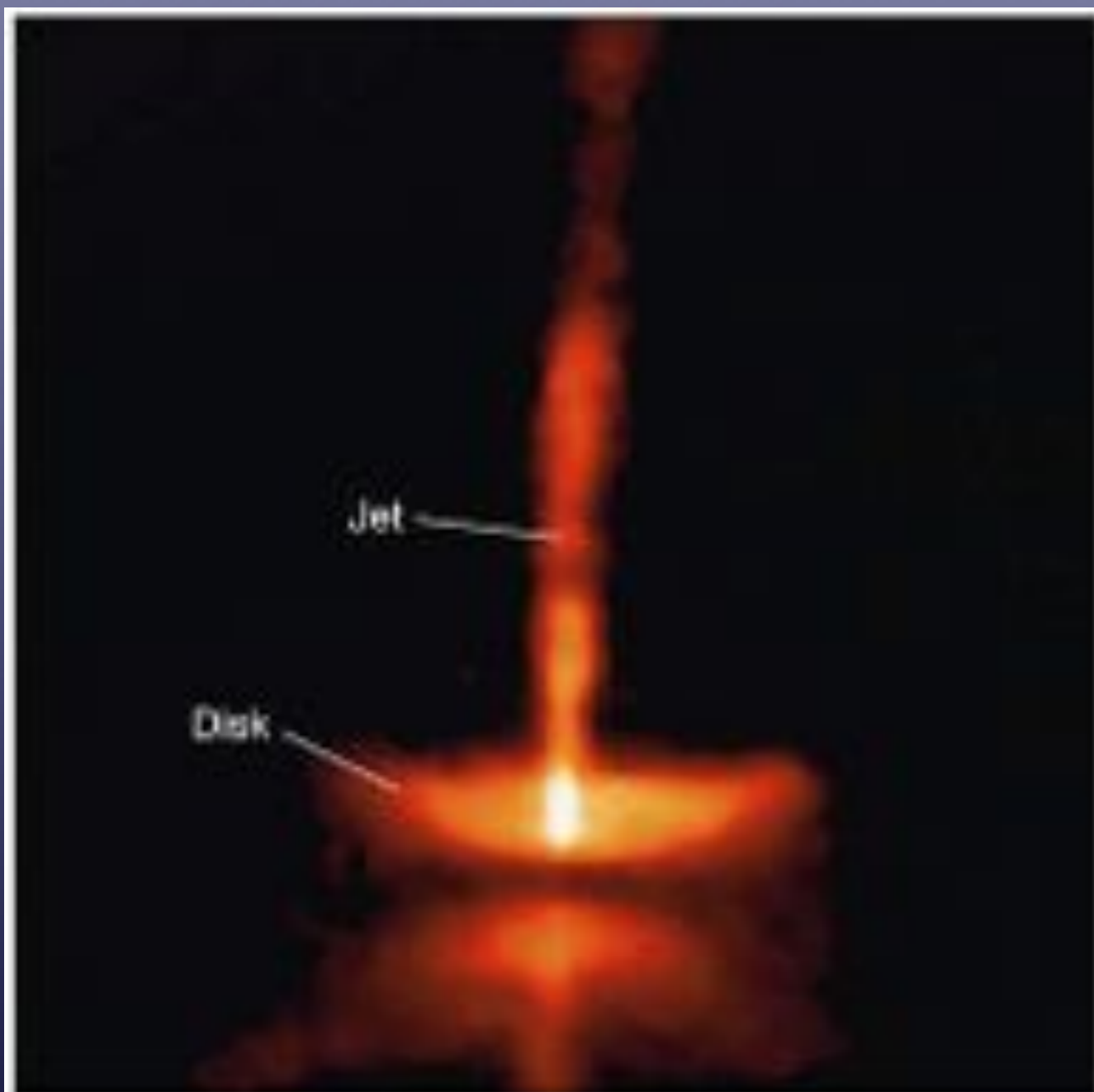




### The Dynamic HH 30 Disk and Jet

HST • WFPC2

NASA and A. Watson (Instituto de Astronomía, UNAM, México) • STSci-PRC00-32b

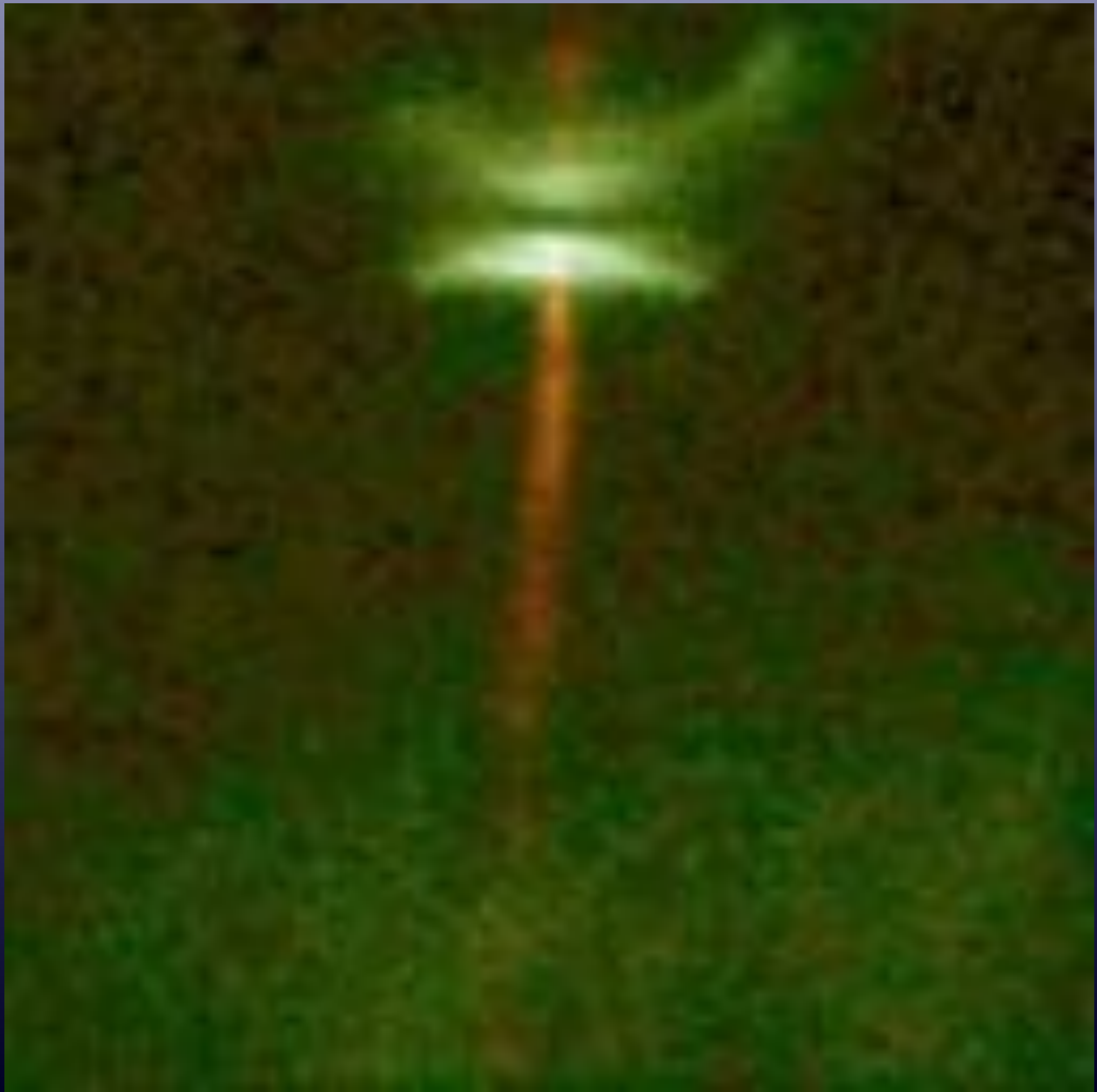


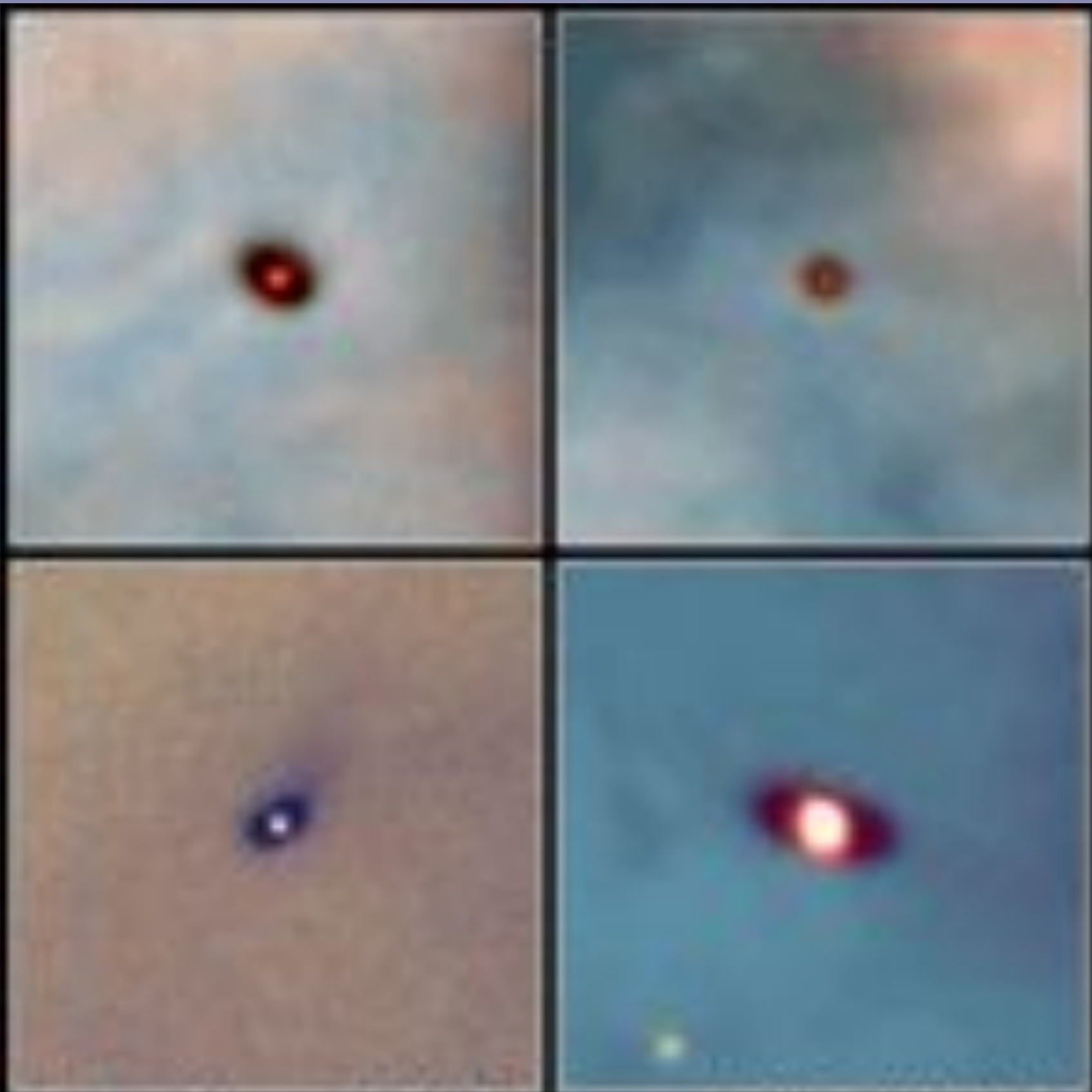
(a)

(b)



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.





Protoplanetary Disks  
Orion Nebula

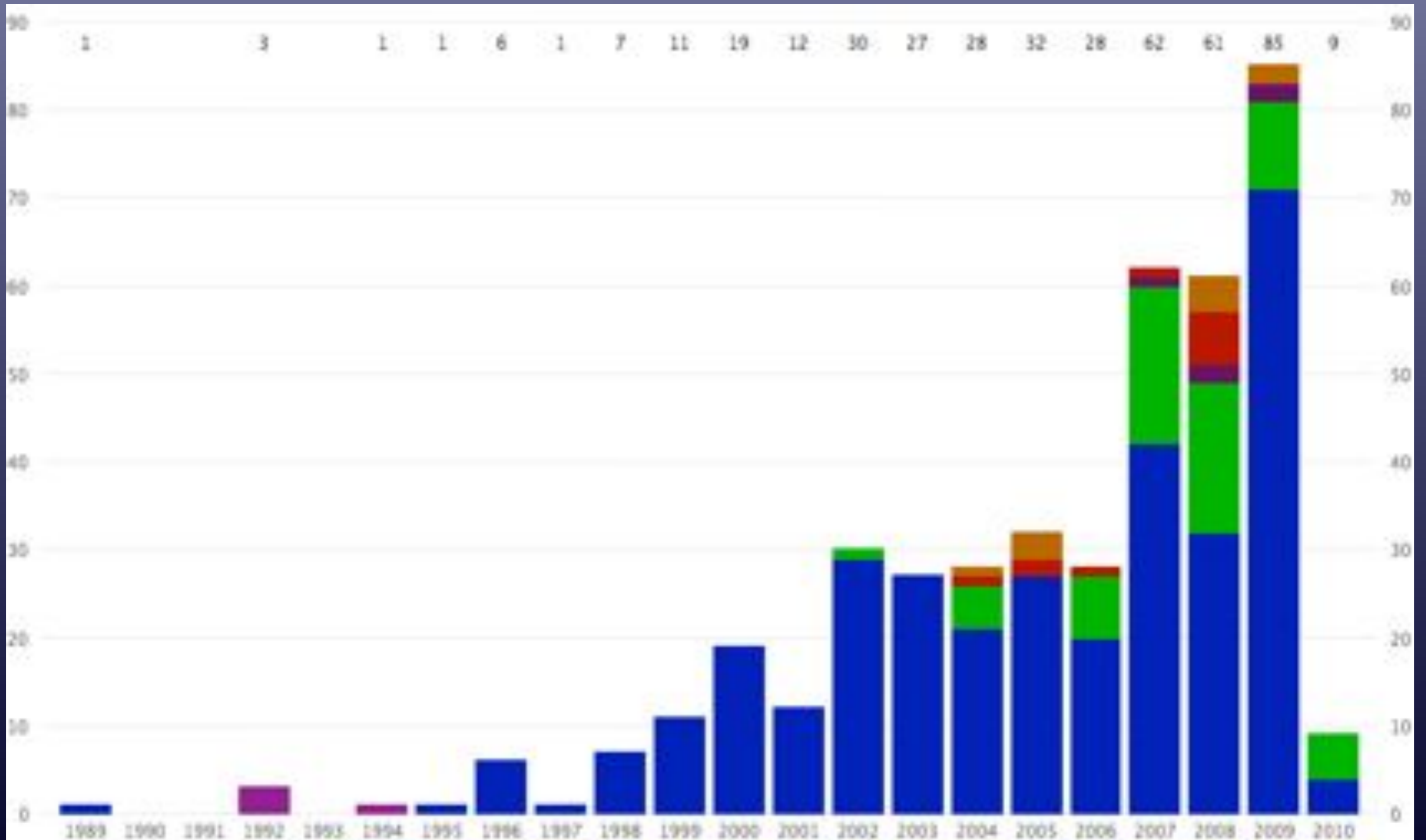
HST - WFPC2

PRC95-45a - ST ScI OPO - November 20, 1995

M. J. McCaughrean (MPLA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA



# exoplanètes

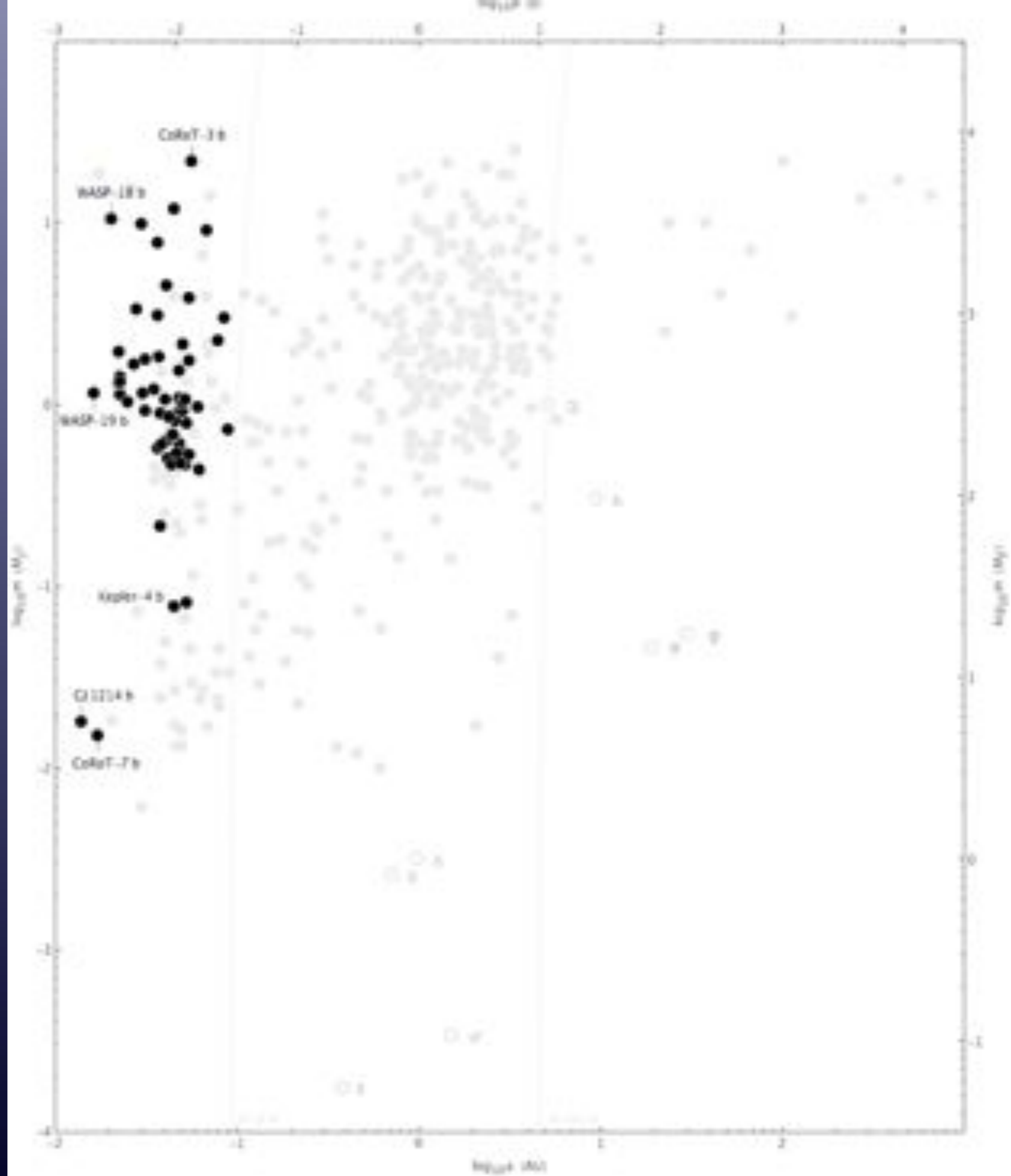


# exo planètes

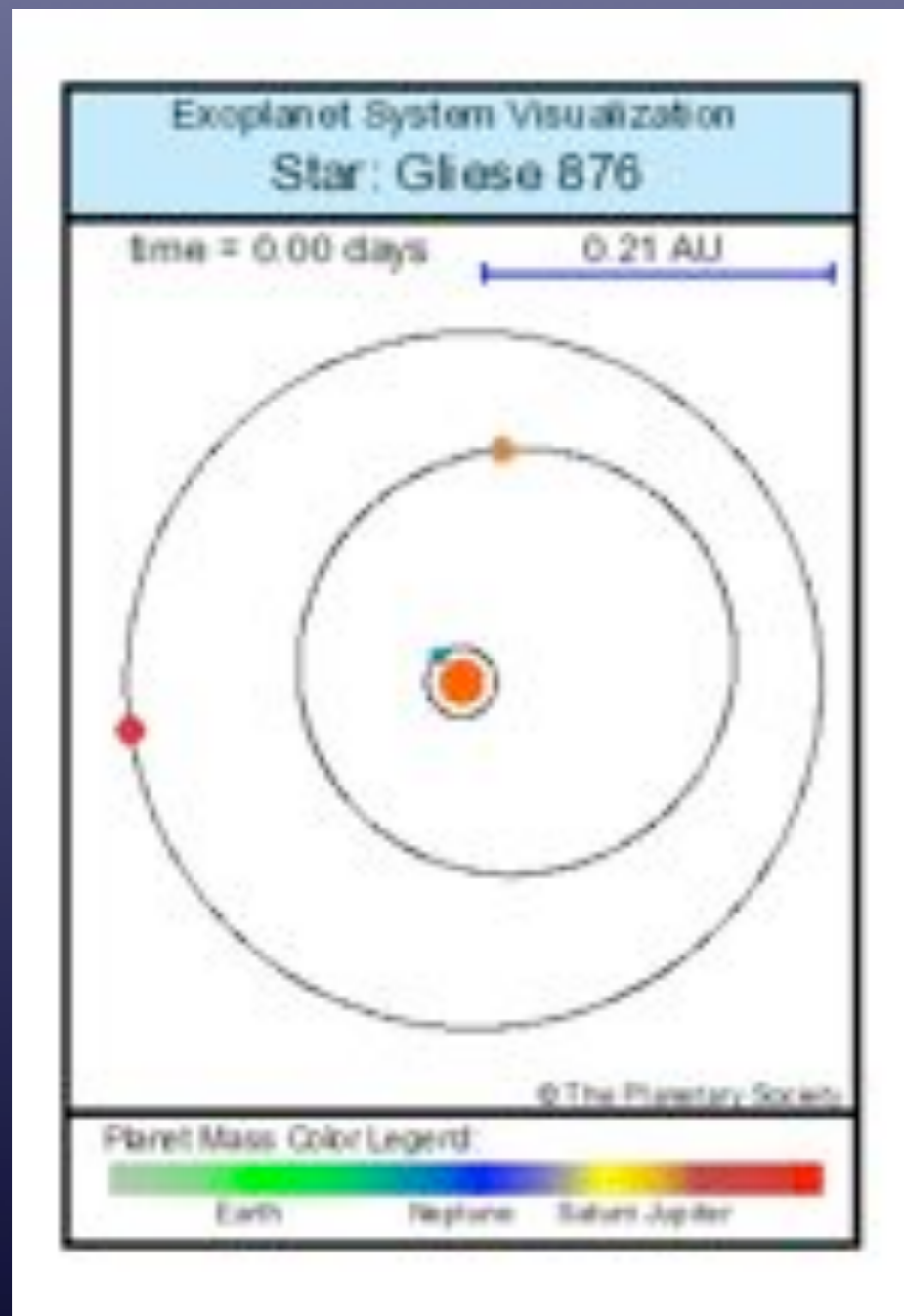
plus de 400  
connues

“Jupiters  
chauds”

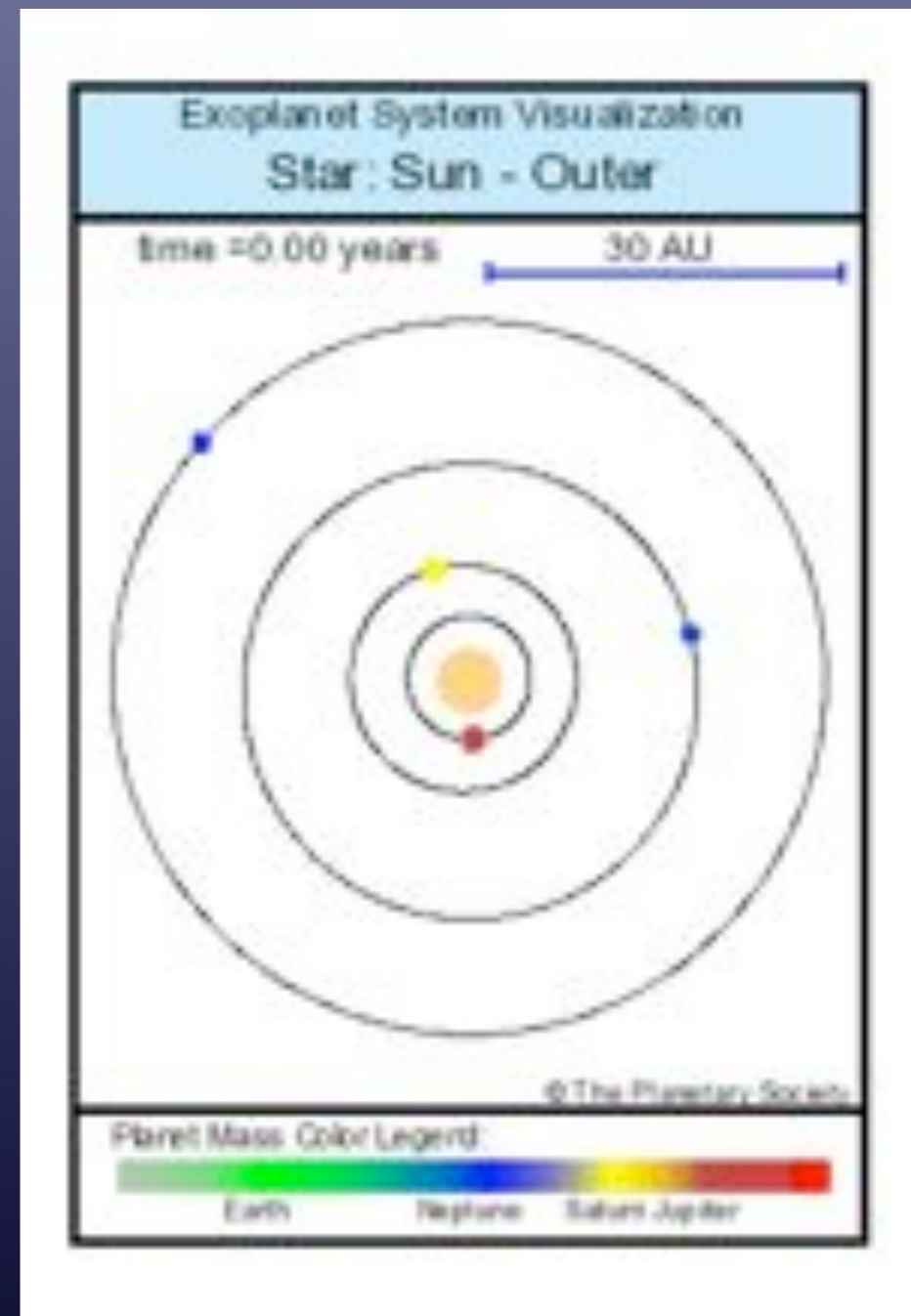
planètes de  
type  
terrestre ?



# systemes multiples



Gliese 876

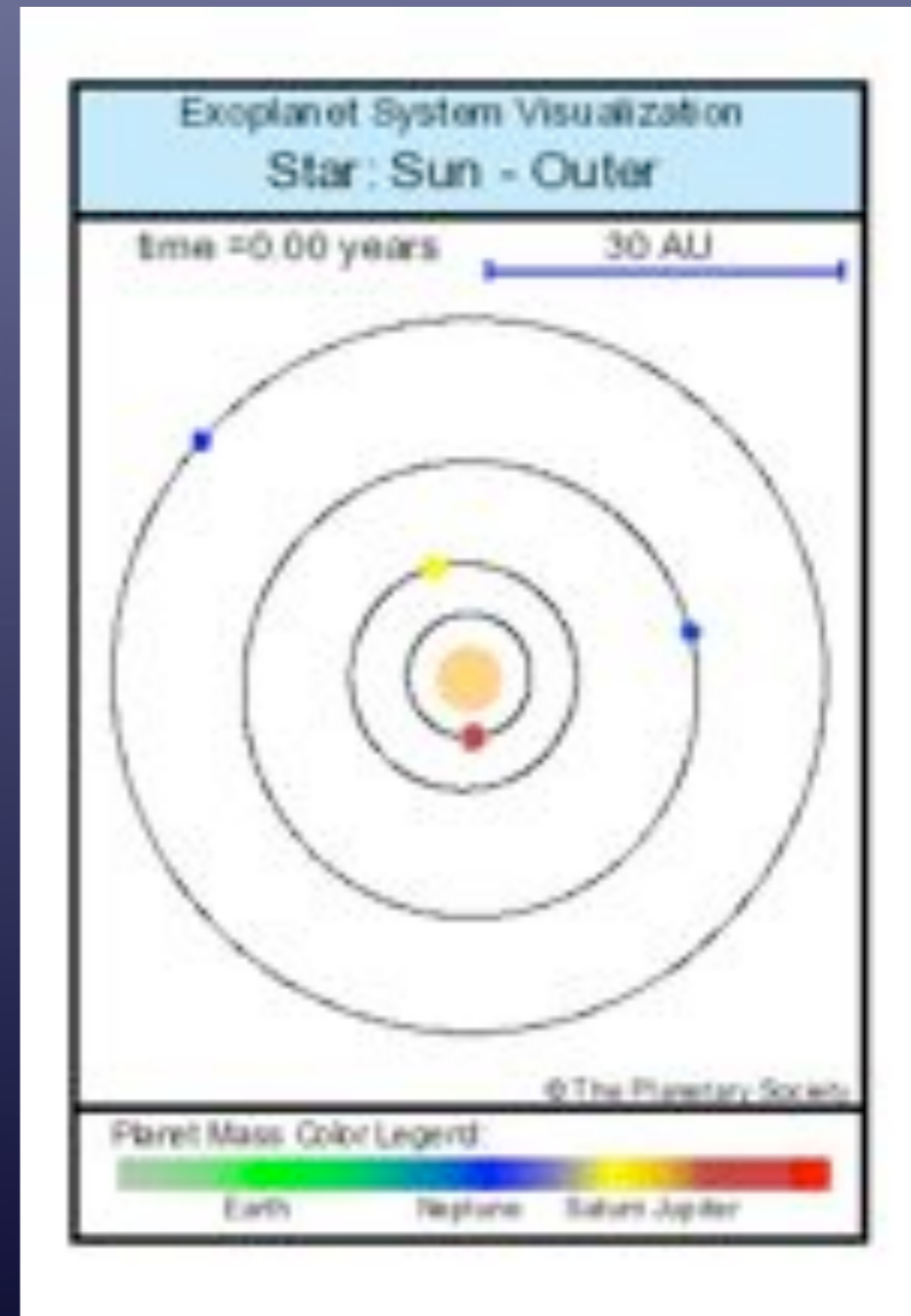


Soleil, Jupiter-Neptune

# systemes multiples

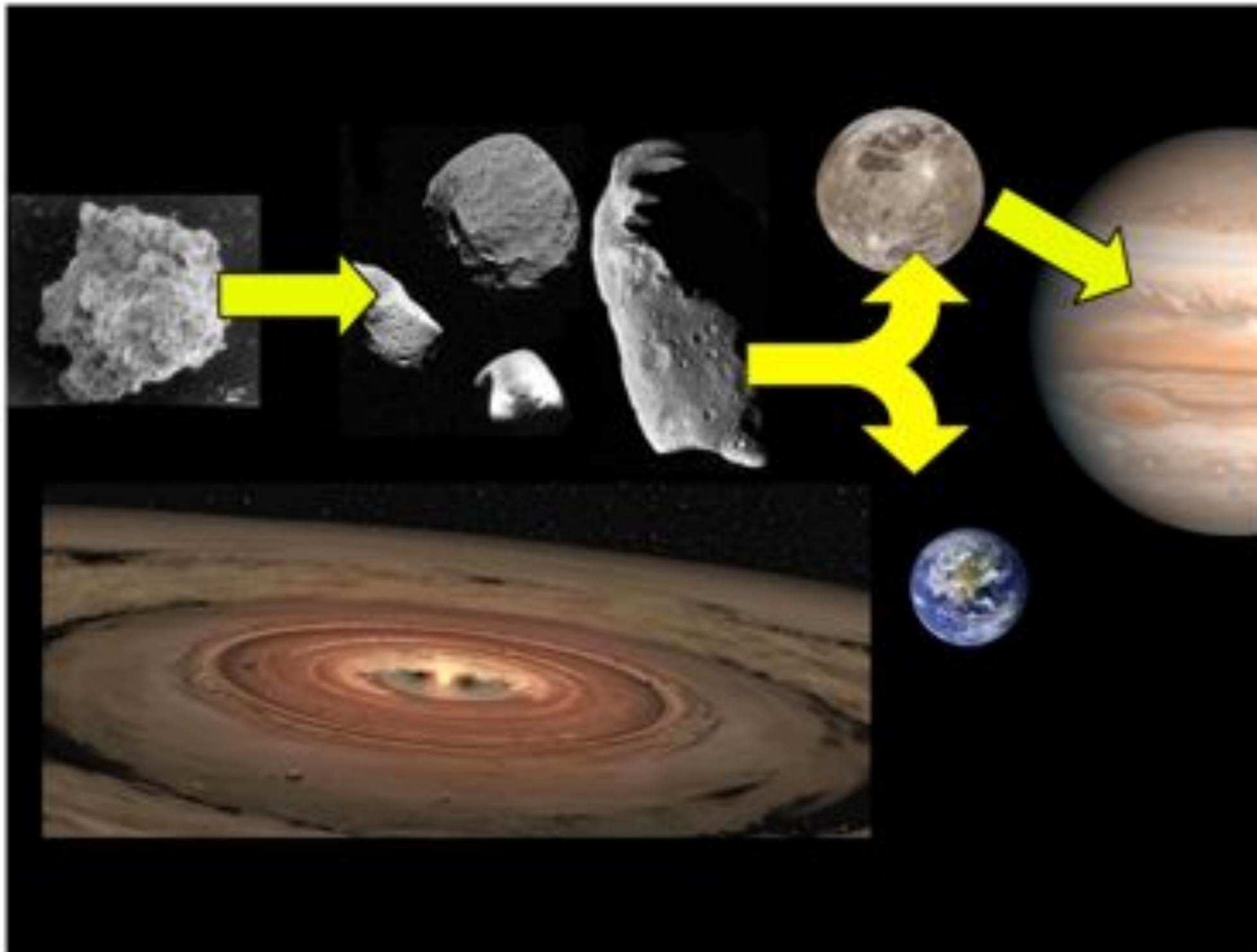


Gliese 876



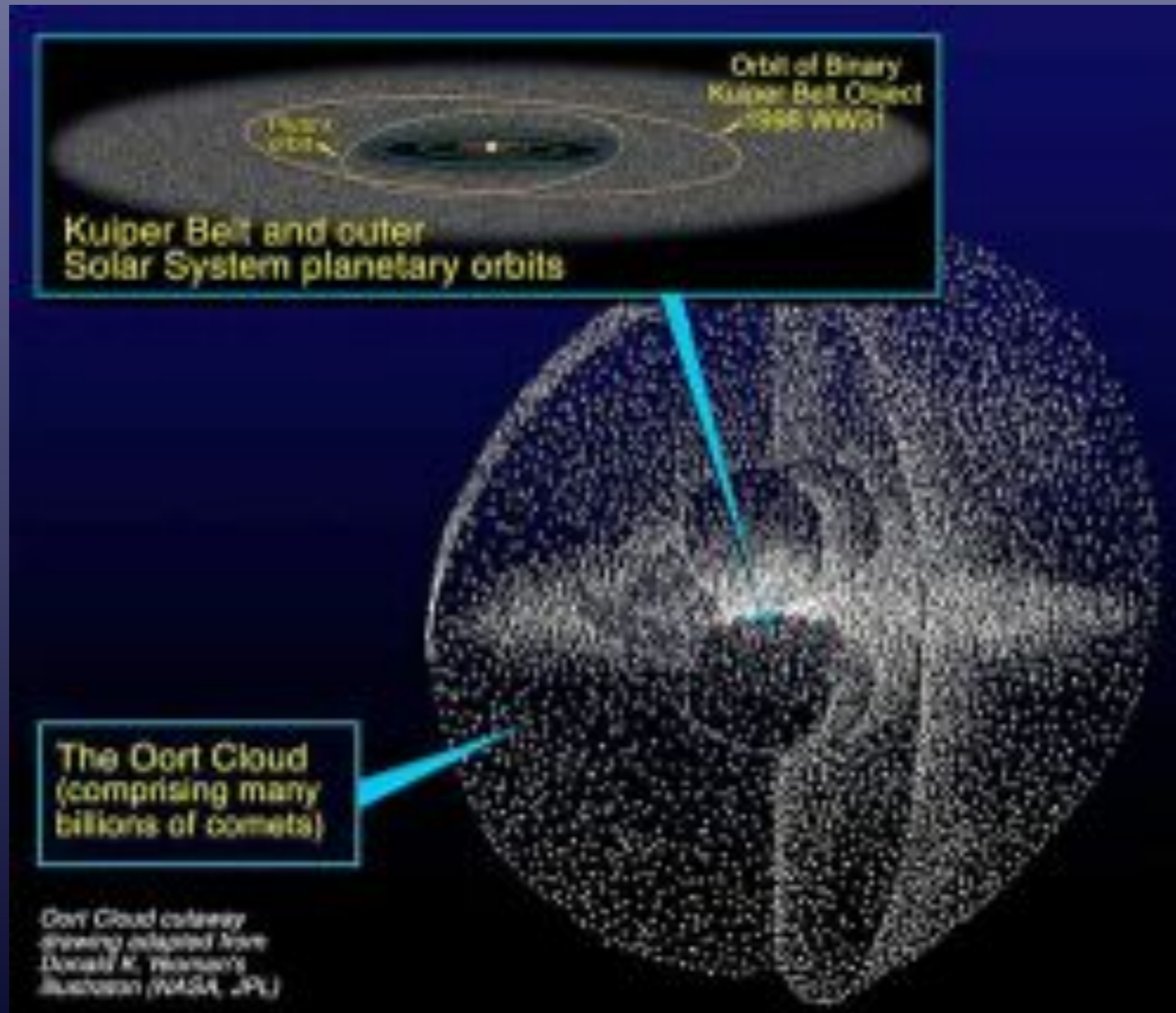
Soleil, Jupiter-Neptune

# formation des planètes



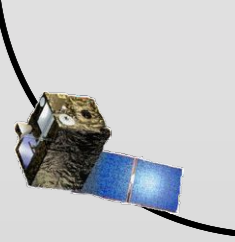
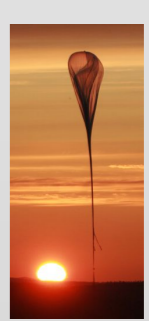
- disque de gaz et de poussières
- collisions, collage des grains → **planétésimaux**
- croissance des planétésimaux → planètes
- formation de Jupiter en  $\sim 8 \cdot 10^6$  **ans**
- puis des autres planètes

# aux confins du système

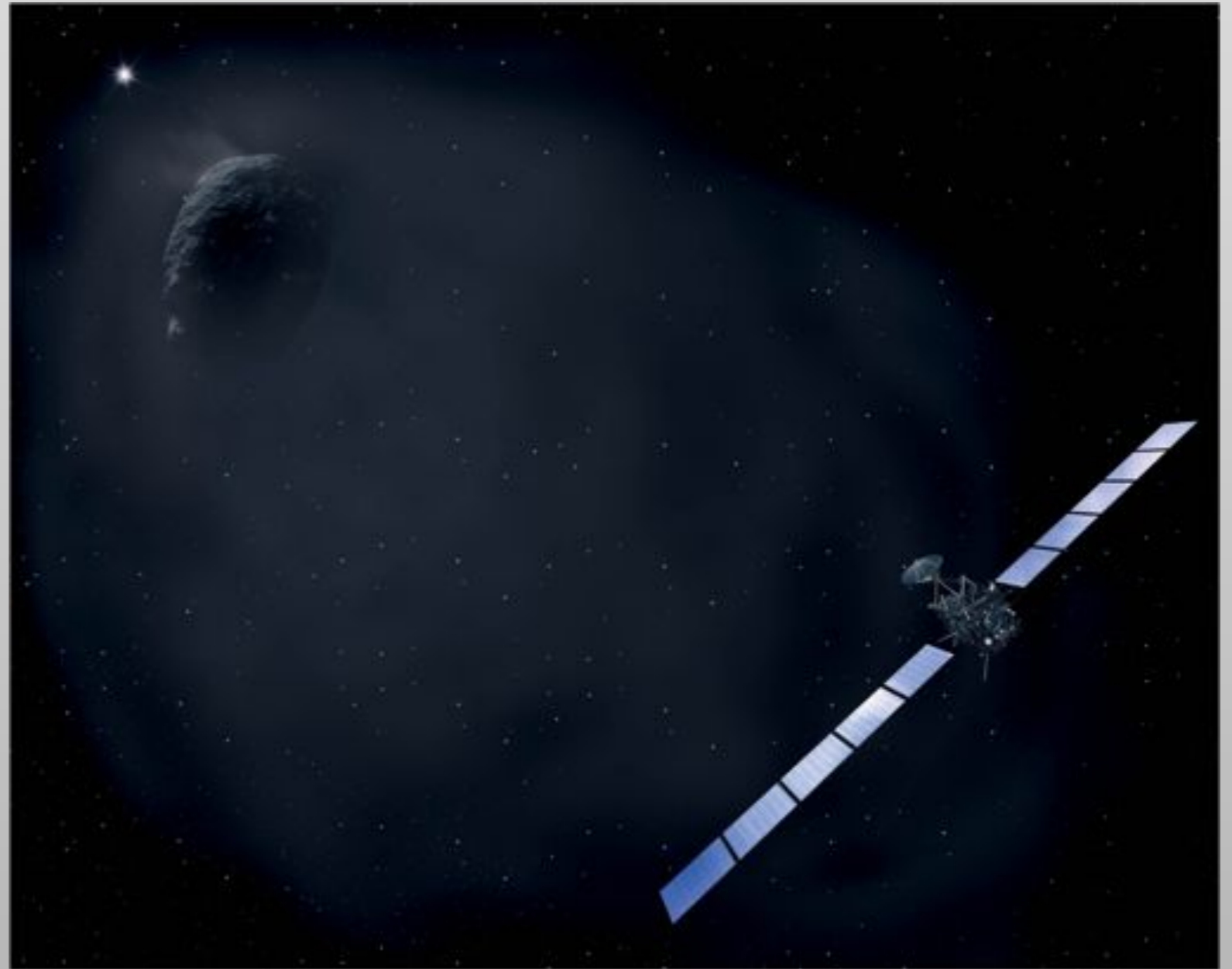


# la comète !

---

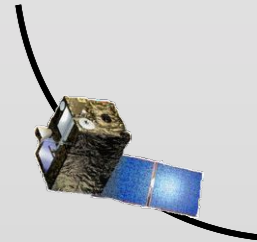
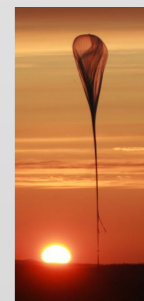


- Rosetta,  
lancée en  
2004 par  
l'Agence  
Spatiale  
Européenne  
(ESA)



# la comète !

---

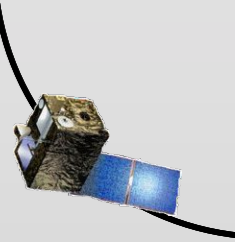
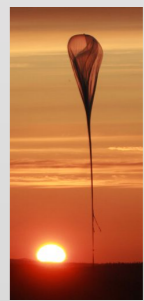


Comète  
Hale-Bopp  
vue depuis  
la Terre,  
1997

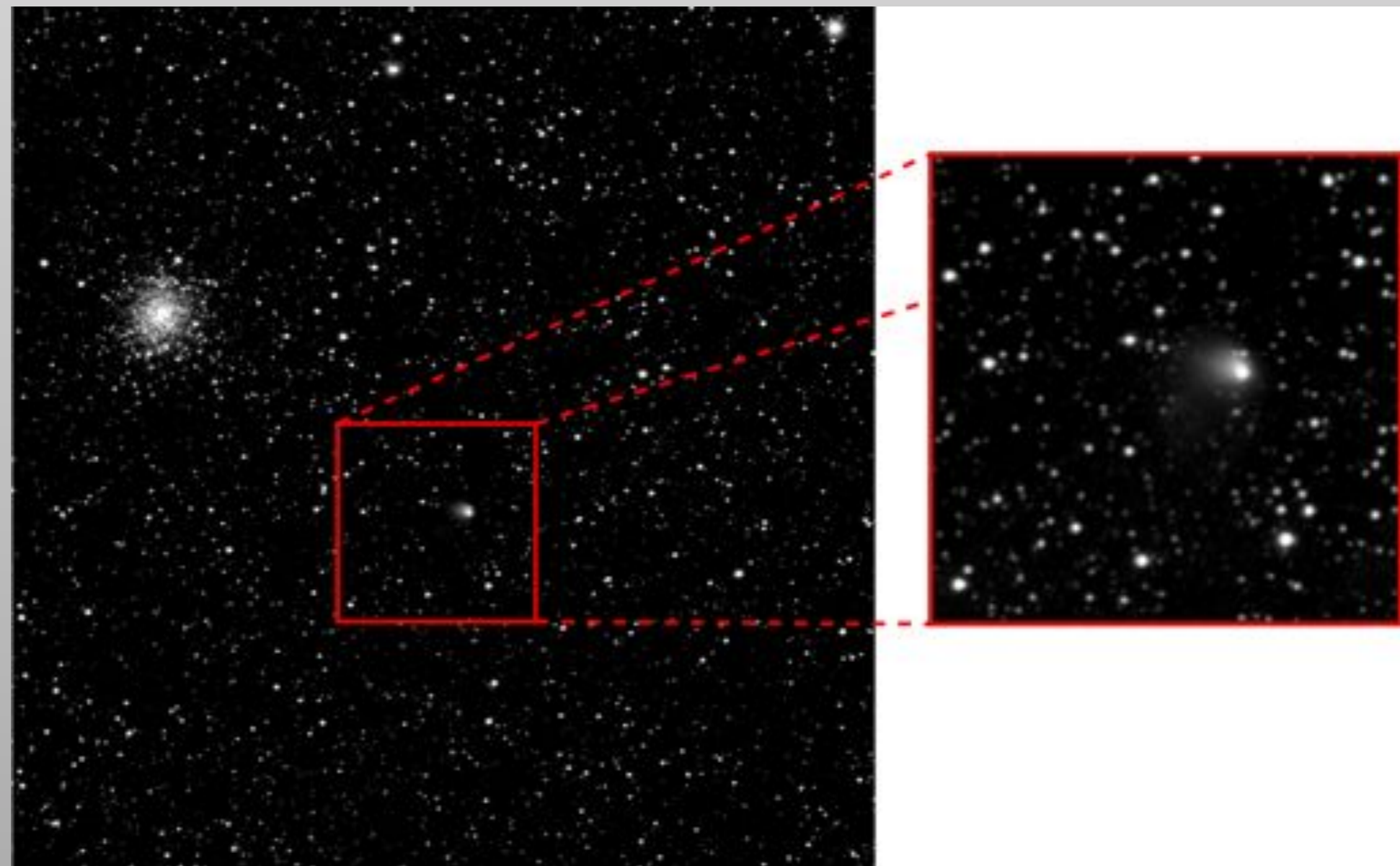




# la comète !

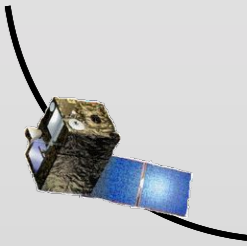
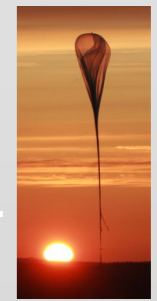


- Janvier 2014 : réveil de Rosetta
- encore des millions de kilomètres !

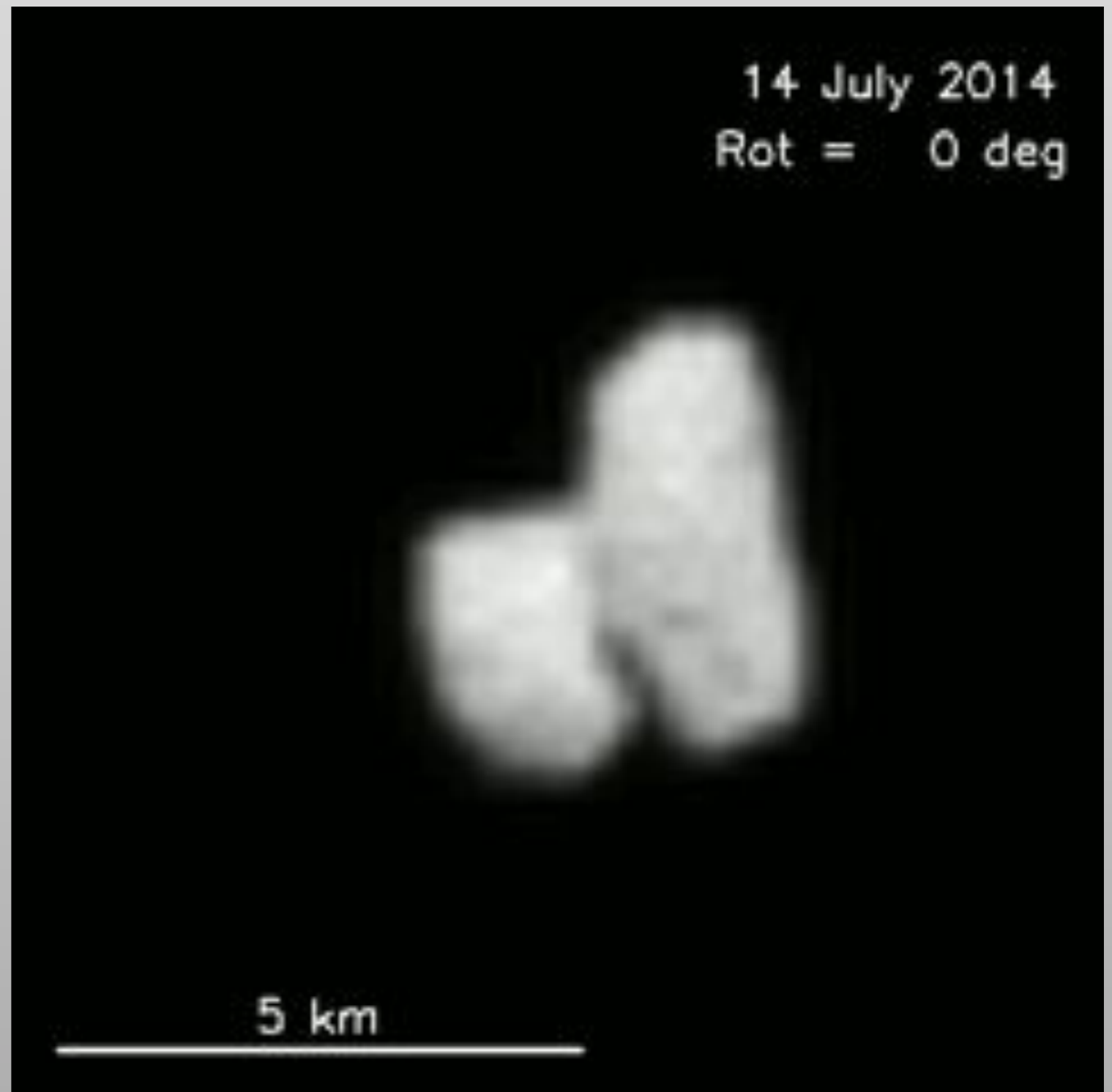


(avril 2014)

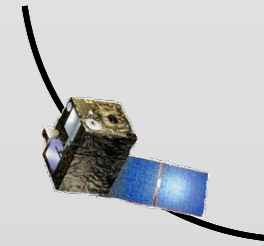
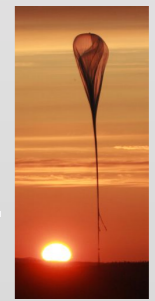
# la comète !



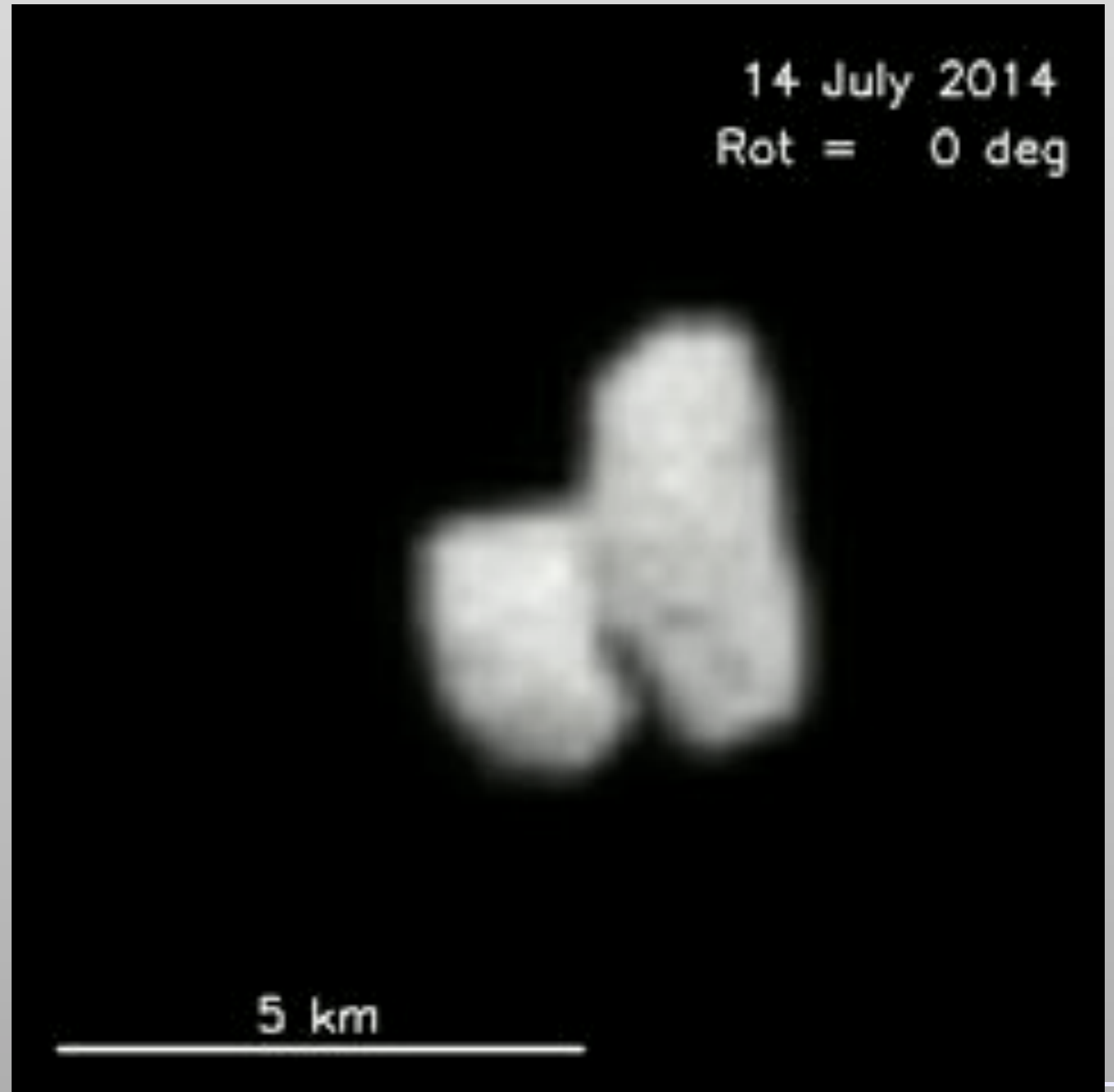
- Juillet 2014 :  
on s'approche !



# la comète !

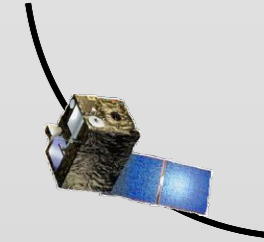
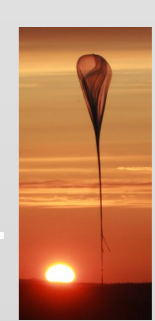


- Juillet 2014 :  
on s'approche !



# la comète !

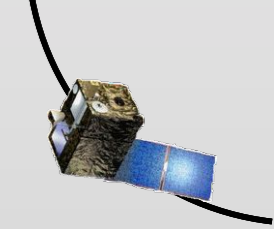
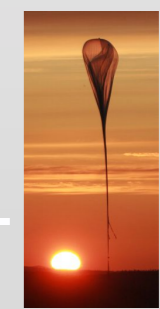
---



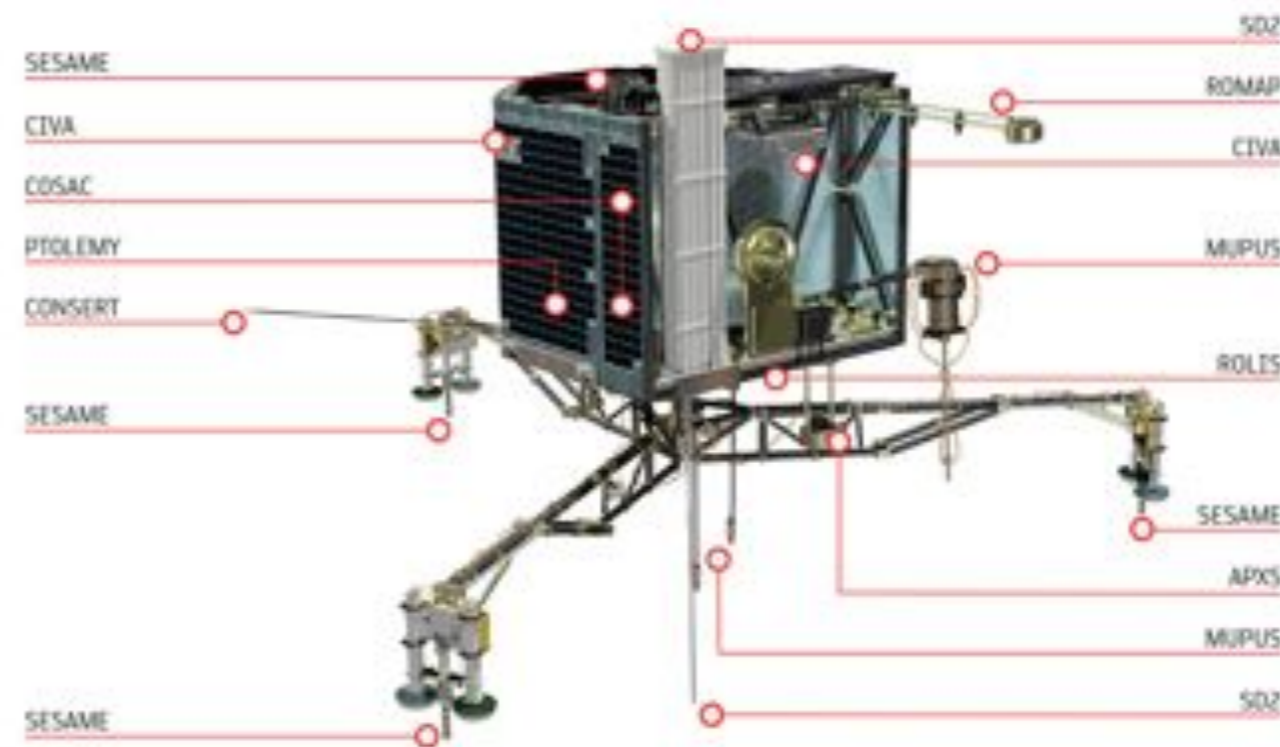
- Août 2014 : rendez-vous

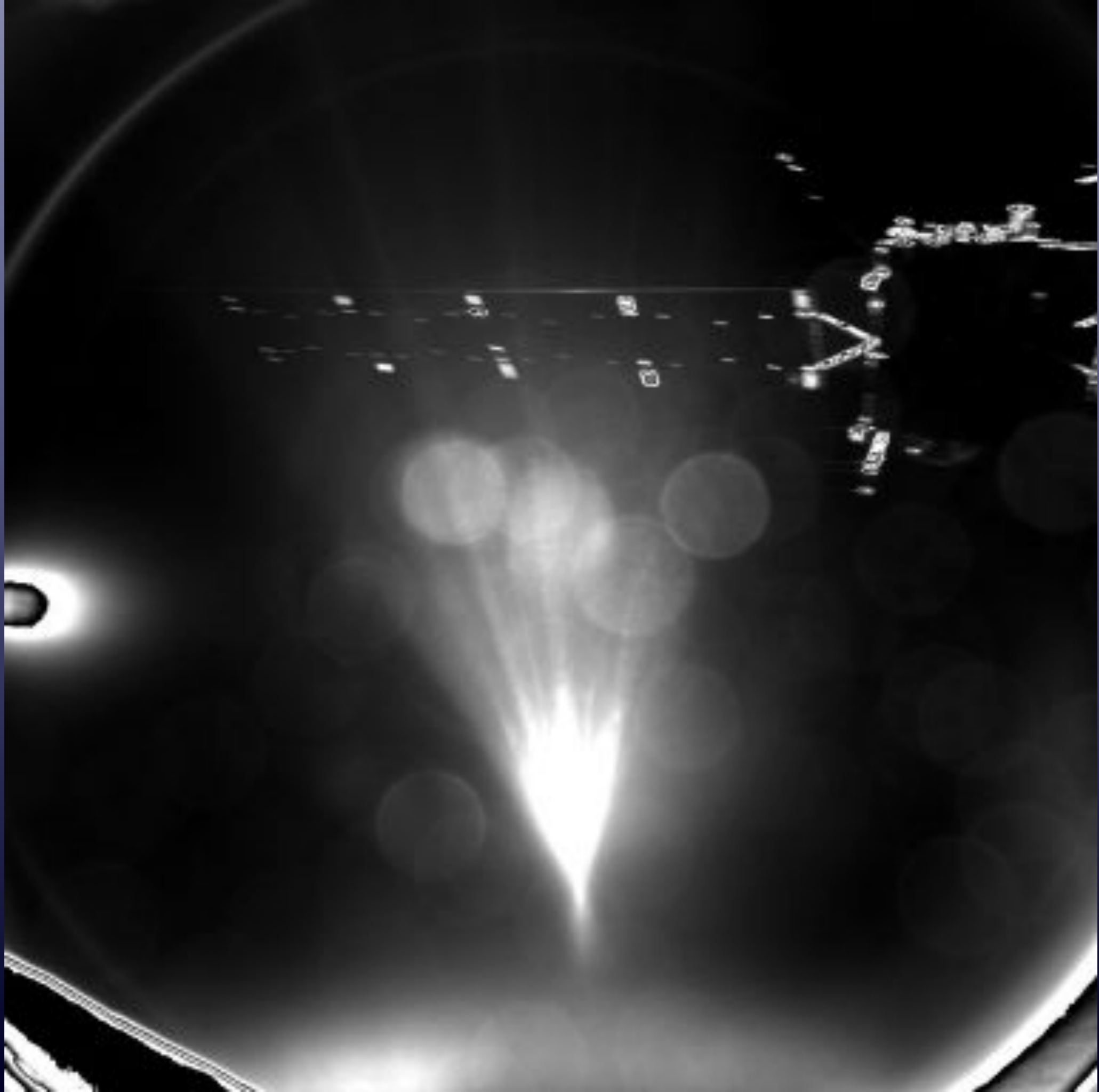


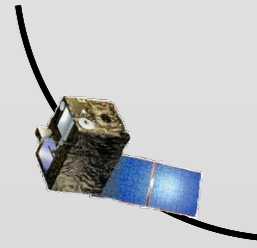
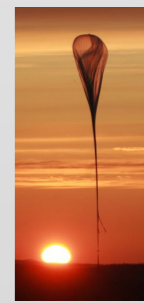
# la comète !



- 12 novembre : atterrissage de Philae







# 31 janvier au 25 mars

