



**UPMC**  
SORBONNE UNIVERSITÉS

Astronomie, Astrophysique

Observer et comprendre l'Univers

Université inter-âges  
Paris-Sorbonne

Patrick Boissé, Institut d'Astrophysique de Paris  
Université Pierre et Marie Curie



**Lundi 23 janvier 2012**

**10. L'univers lointain**

# L'Univers lointain



# L'Univers lointain

Grande ourse



Le ciel profond de Hubble  
Des milliers de galaxies jusqu'à  
quelques milliards d'années lumière  
(HST)

# Plan du cours 10

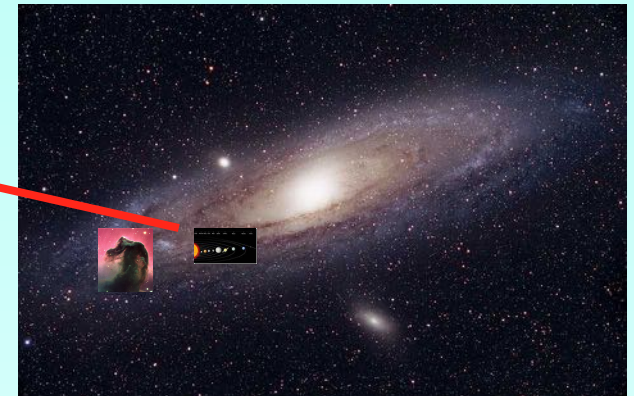
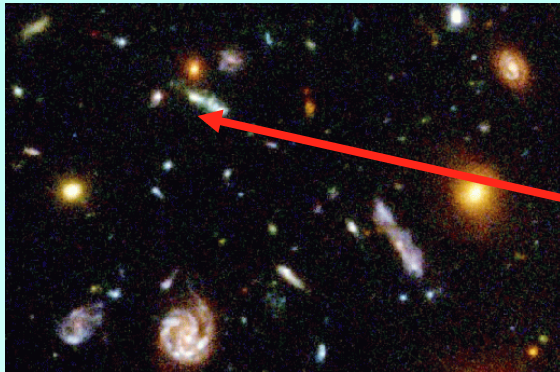


- L'expansion de l'Univers, relation  $V$ ,  $d$ ,  $t$
- Distribution des galaxies dans l'espace: amas, filaments, vides
- Quasars (+ supernovae, sursauts gamma)
- Le gaz intergalactique révélé par les quasars
- La formation des galaxies



# Se situer dans l'Univers

- système solaire : Terre, lune, planètes, soleil ( $\approx 10$  min-lumière)
- voisinage solaire: étoiles, nuages de gaz (quelques 10-100 a. l.)
- notre Galaxie, la voie lactée ( $\approx 100\ 000$  a. l.)
- galaxies proches (millions d'a. l.)
- galaxies lointaines et quasars (milliard d'a. l.)



# Les galaxies : « atomes » de l'Univers

Une galaxie =

- $\approx$  100 milliards d'étoiles
- du gaz
- un trou noir massif
- halo de matière noire

Sextette de Seyfert



Objet de Hoag



ESO325-G004

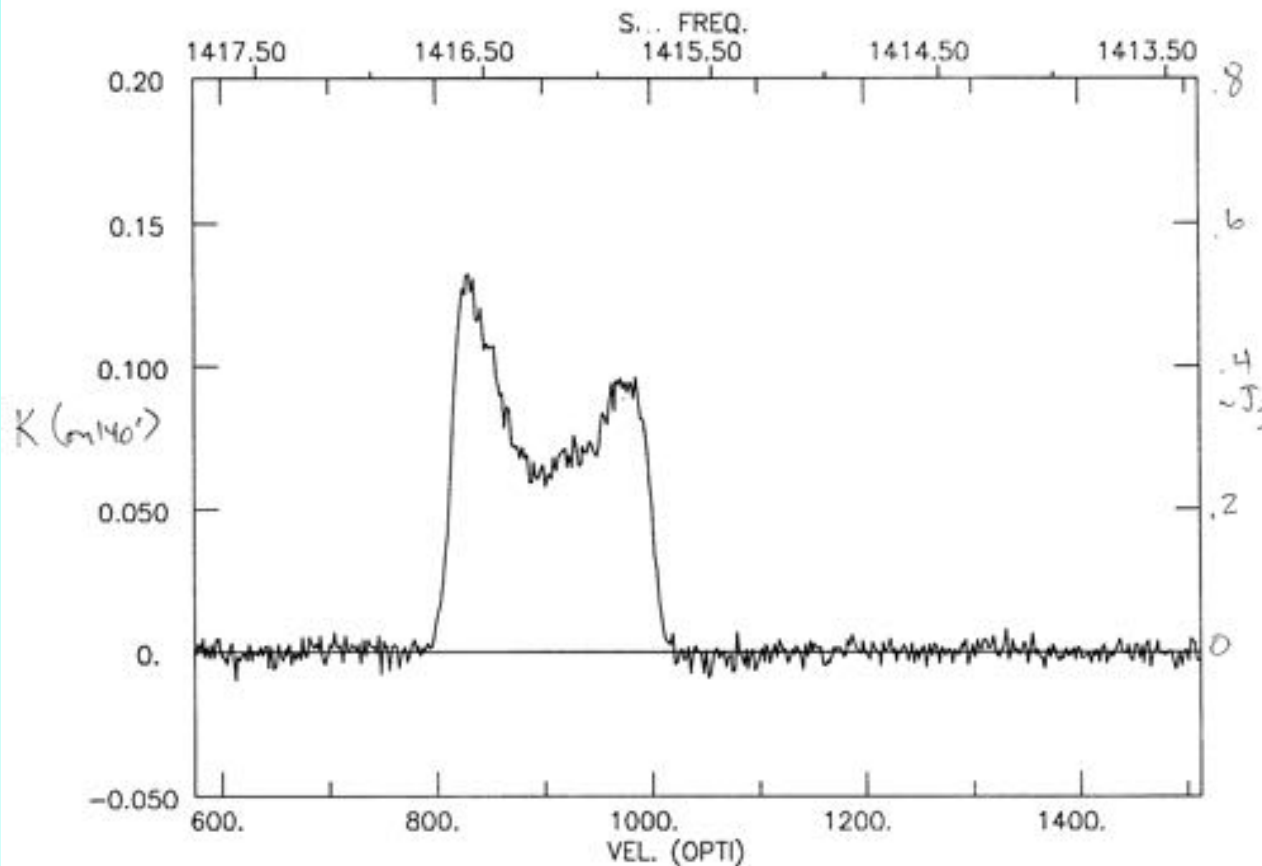
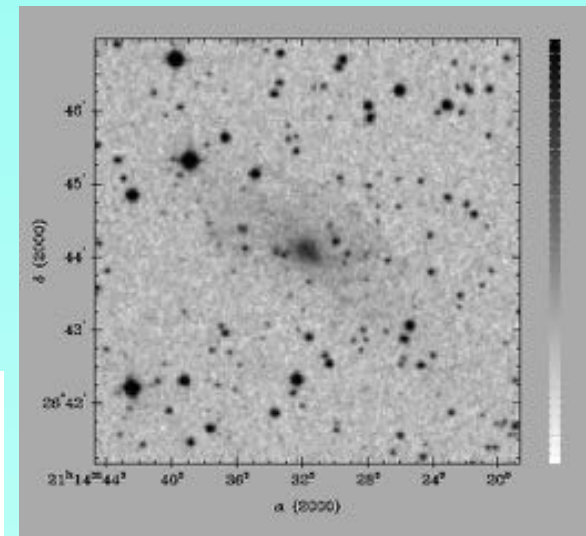


NGC 1300



# Fuite des galaxies : l'expansion de l'Univers

Exemple : la galaxie UGC 11707, mesure radio



$V \approx 900 \text{ km/s}$

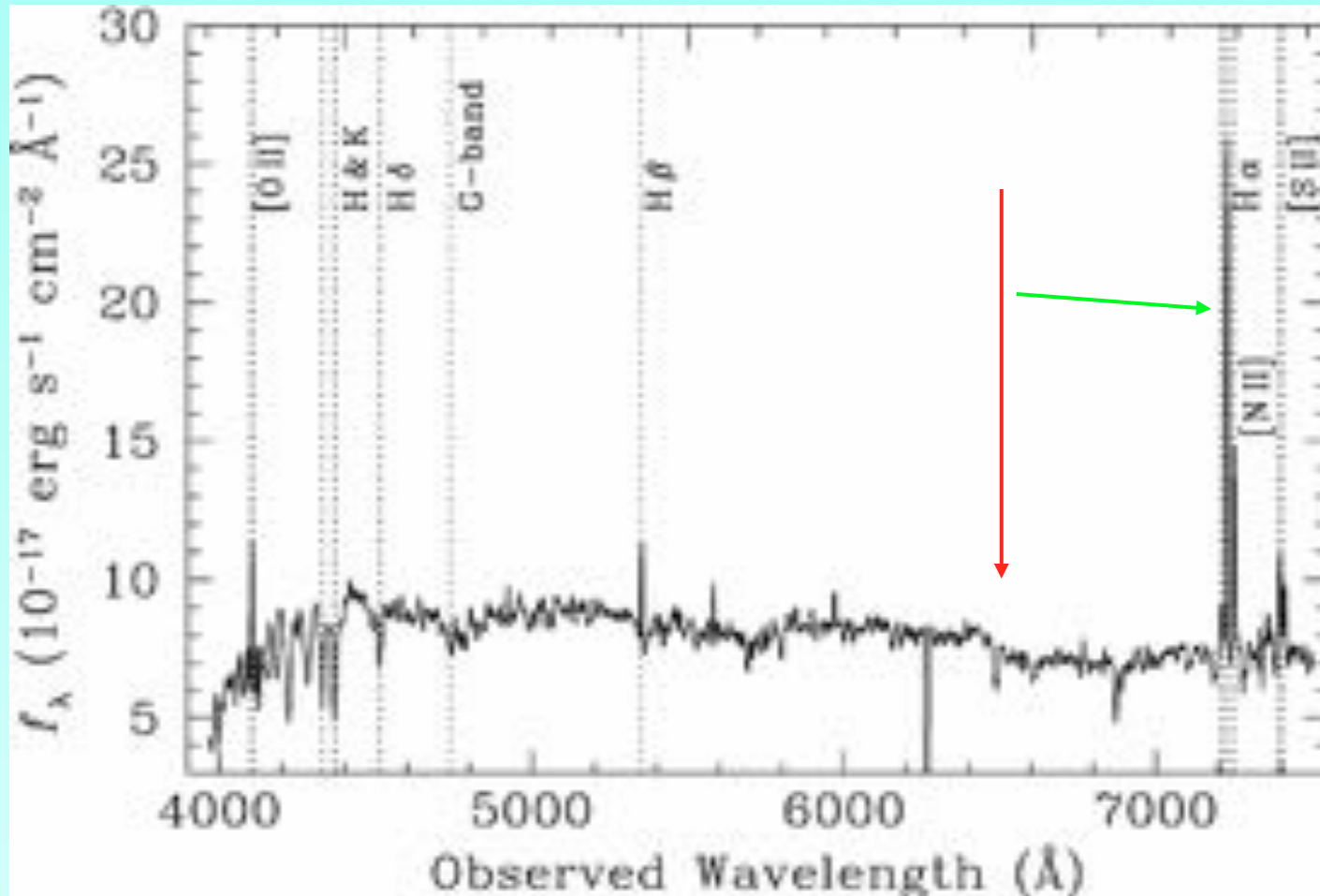
$\Delta V \approx 200 \text{ km/s}$



# Fuite des galaxies : mesure optique

Mesure des raies d'absorption ou d'émission :  $V \approx 30\,000$  km/s

Michael Richmond

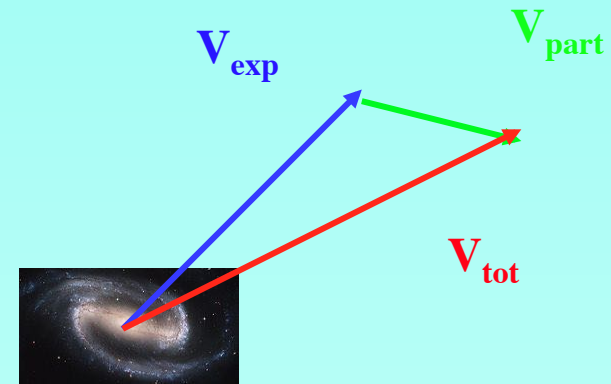


# Mouvement des galaxies

Mouvement général de fuite  
cf points sur un ballon gonflé

+

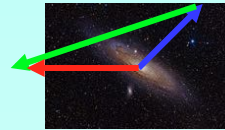
Mouvement « particulier »  
(par ex dans un groupe)



Effet Doppler :

$$\lambda_{\text{obs}} = (1 + z) \lambda_{\text{labo}}$$

$$v_{\text{obs}} = v_{\text{labo}} / (1 + z)$$



Loi de Hubble (1929)

$$V_{\text{exp}} \approx cz \approx H_0 D \quad (V \ll c)$$

$V_{\text{exp}}$  ou  $z \rightarrow D$  et  $\Delta t$

Observateur



# Distribution des galaxies dans l'Univers

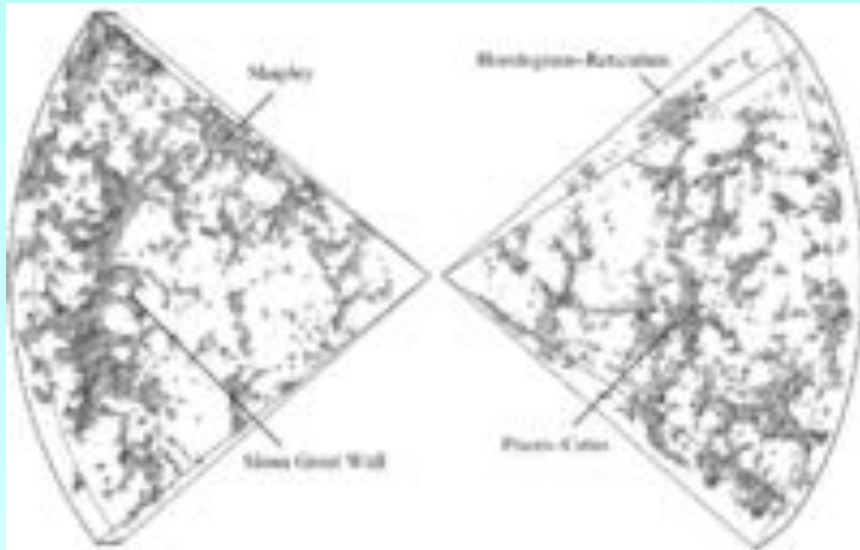
**Pas du tout homogène :**

- groupes
- amas
- filaments
- vides

Sextette de Seyfert

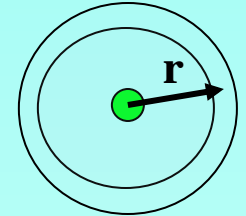


Coma/wikipedia

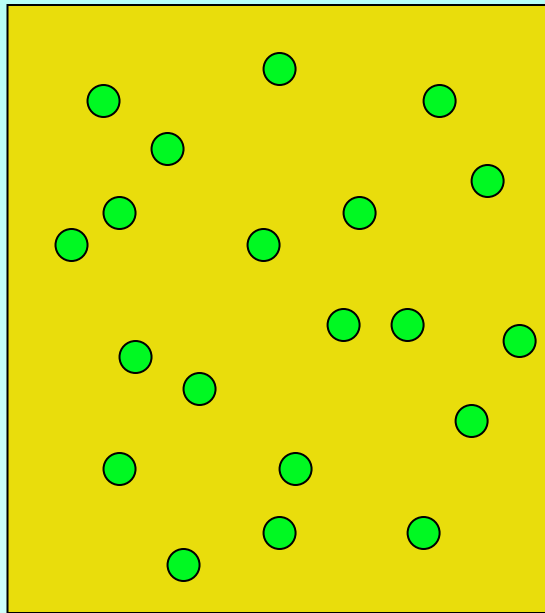


# Distribution des galaxies dans l'Univers

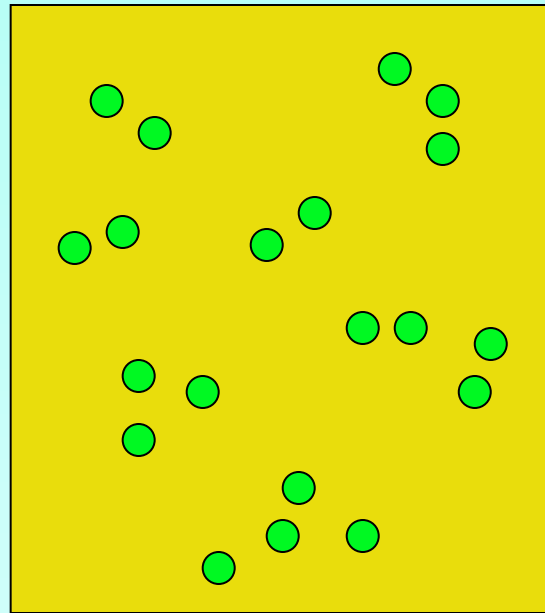
Mesure objective du « regroupement » :  
la fonction de corrélation à deux points,  $\xi(r)$



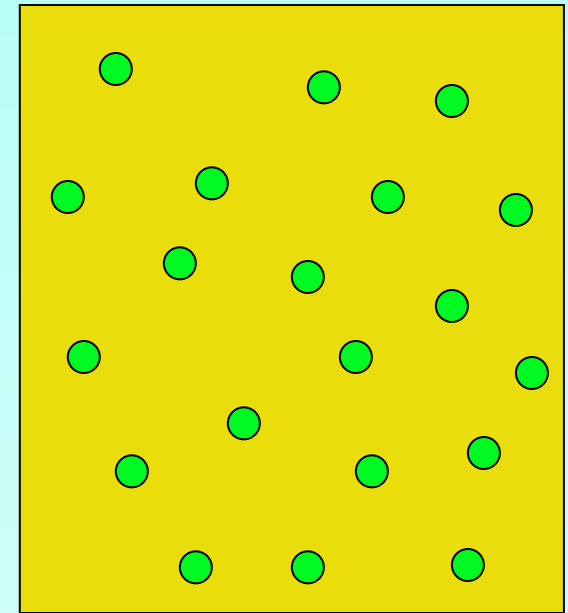
$\xi(r) \approx 0$



$\xi(r) > 0$



$\xi(r) < 0$

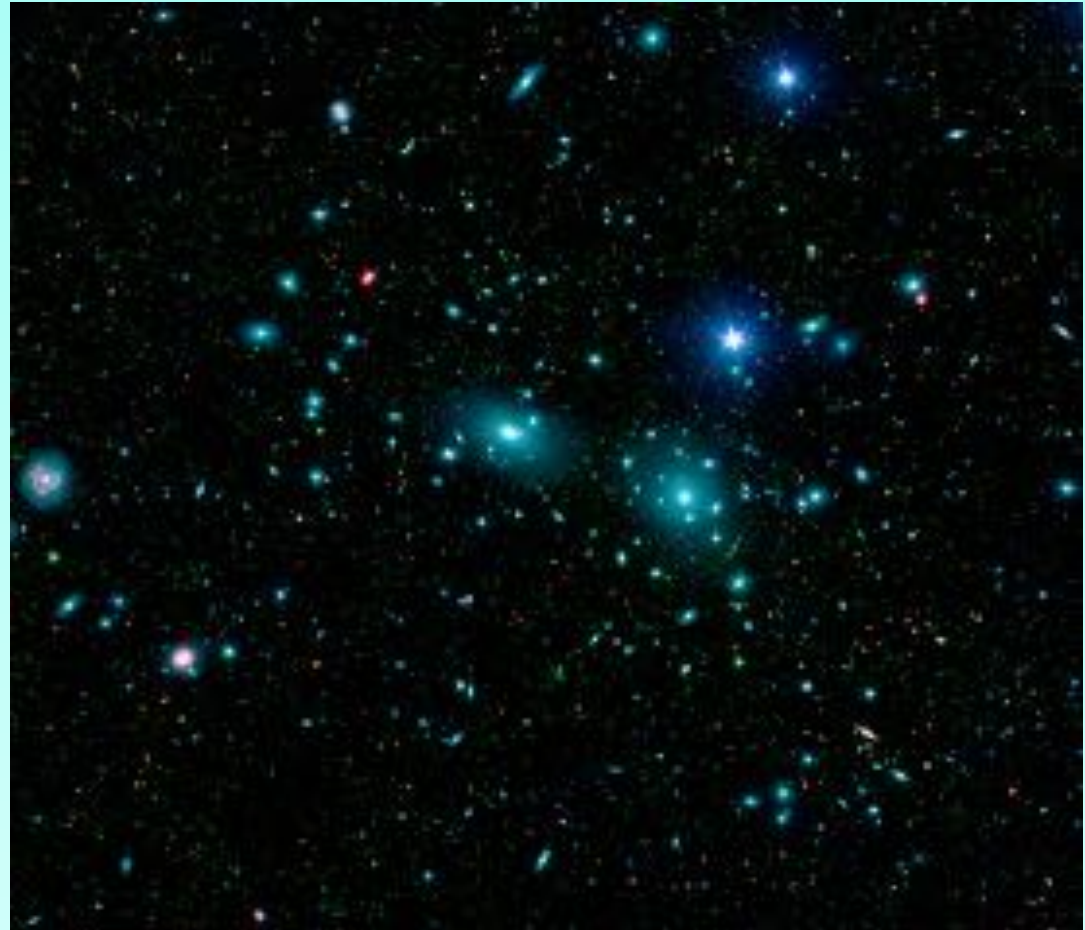


# Portrait d'un amas de galaxies : Coma (A1656)

## lumière visible

Amas Coma/wikipedia

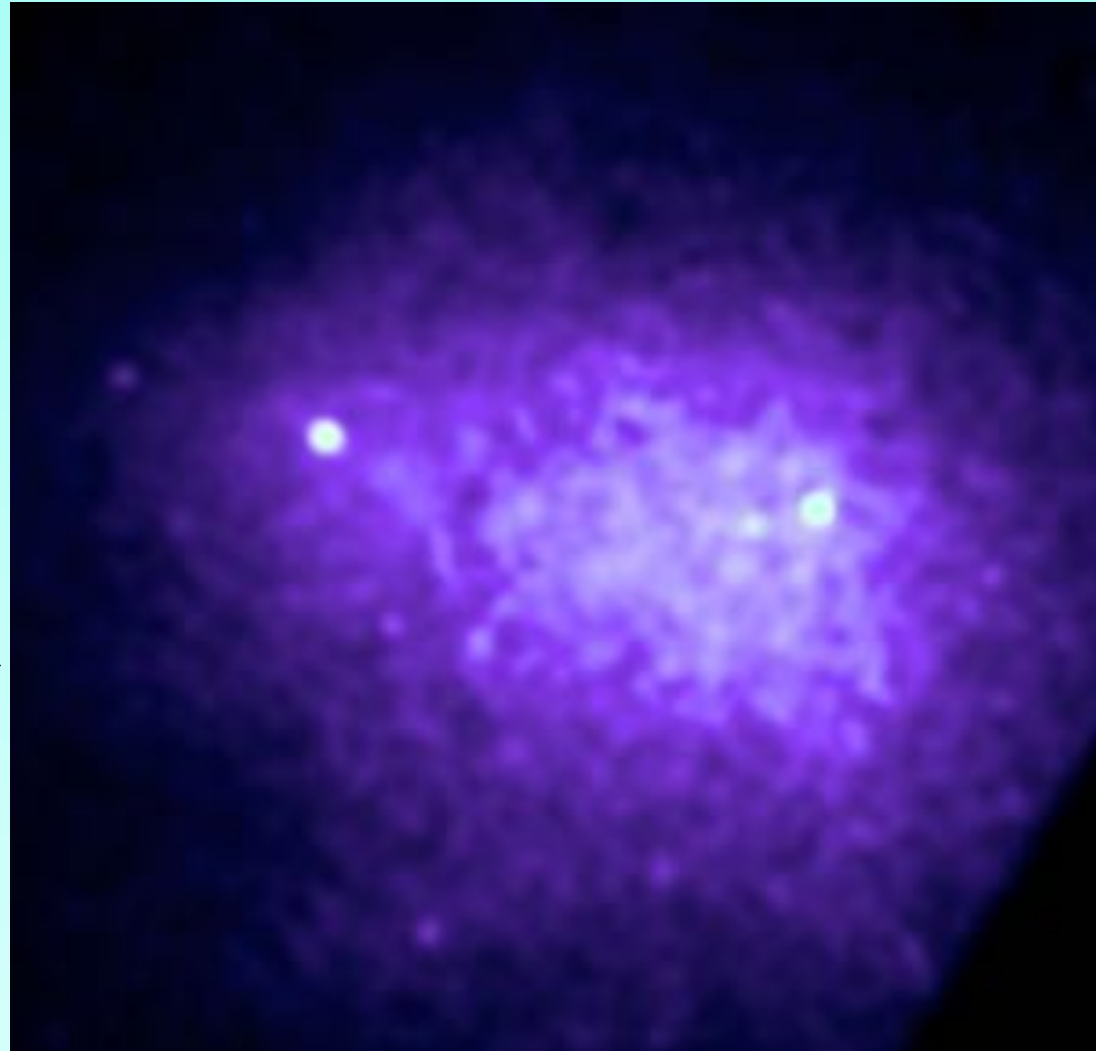
- Galaxie(s) elliptique(s) géantes au centre
- $\approx 1000$  galaxies
- vitesses particulières élevées ( $\approx 1000\text{km/s}$ )
- théorème du Viriel  
--> matière noire  
Zwicky (1933)



# Portrait d'un amas de galaxies : Coma rayons X

Coma/Chandra

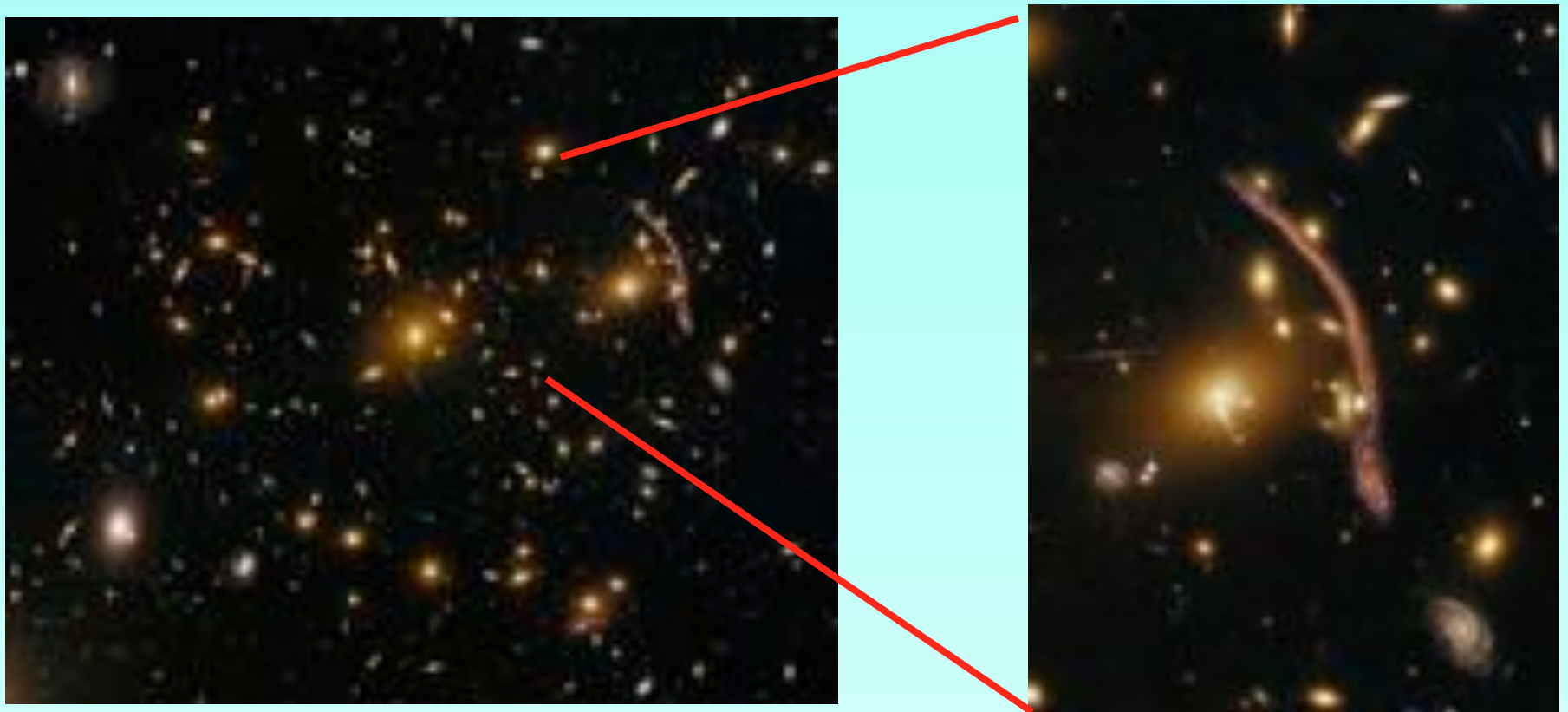
- Emission diffuse  
+ sources
- gaz très chaud:  
  
100 millions de degrés !
- équilibre « hydrostatique »  
  
--> matière noire !



23 janvier 2012

# Les amas : des télescopes gravitationnels

Un exemple remarquable : Abel 370 ( $z = 0,375$ )



**Modélisation des images --> matière noire !**

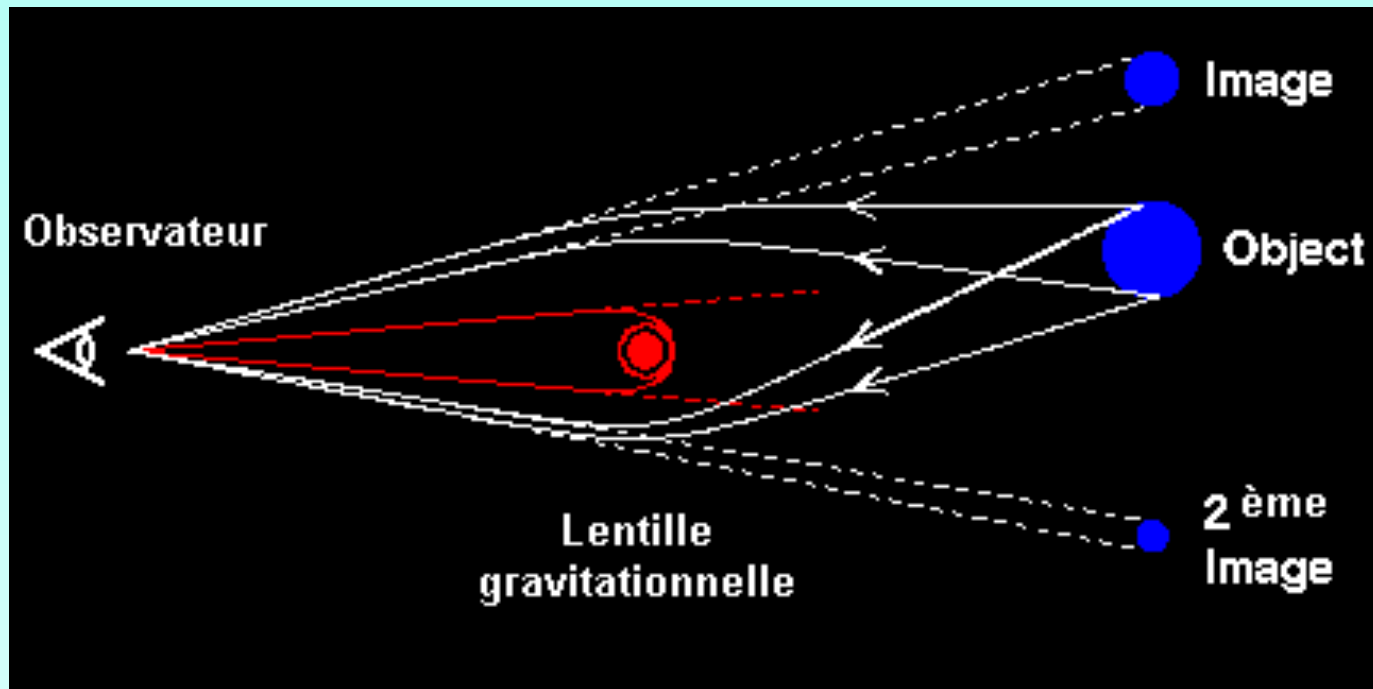
# Les amas : des télescopes gravitationnels

## Déflexion de la lumière (RG, Einstein 1915)

--> image(s) amplifiée(s)/déformée(s) de galaxies d'arrière-plan  
optimum pour  $z_g \approx z_{\text{lentille}} / 2$

amas

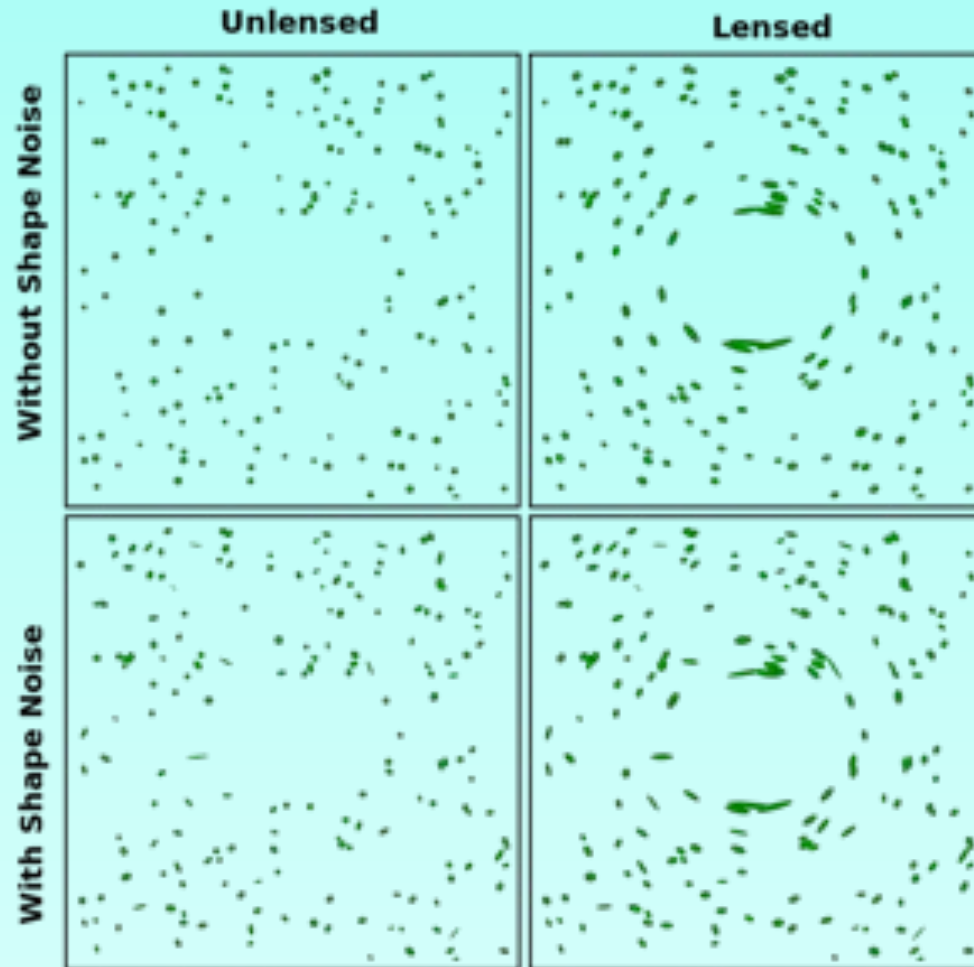
Galaxies lointaines





# Cartographier la matière noire

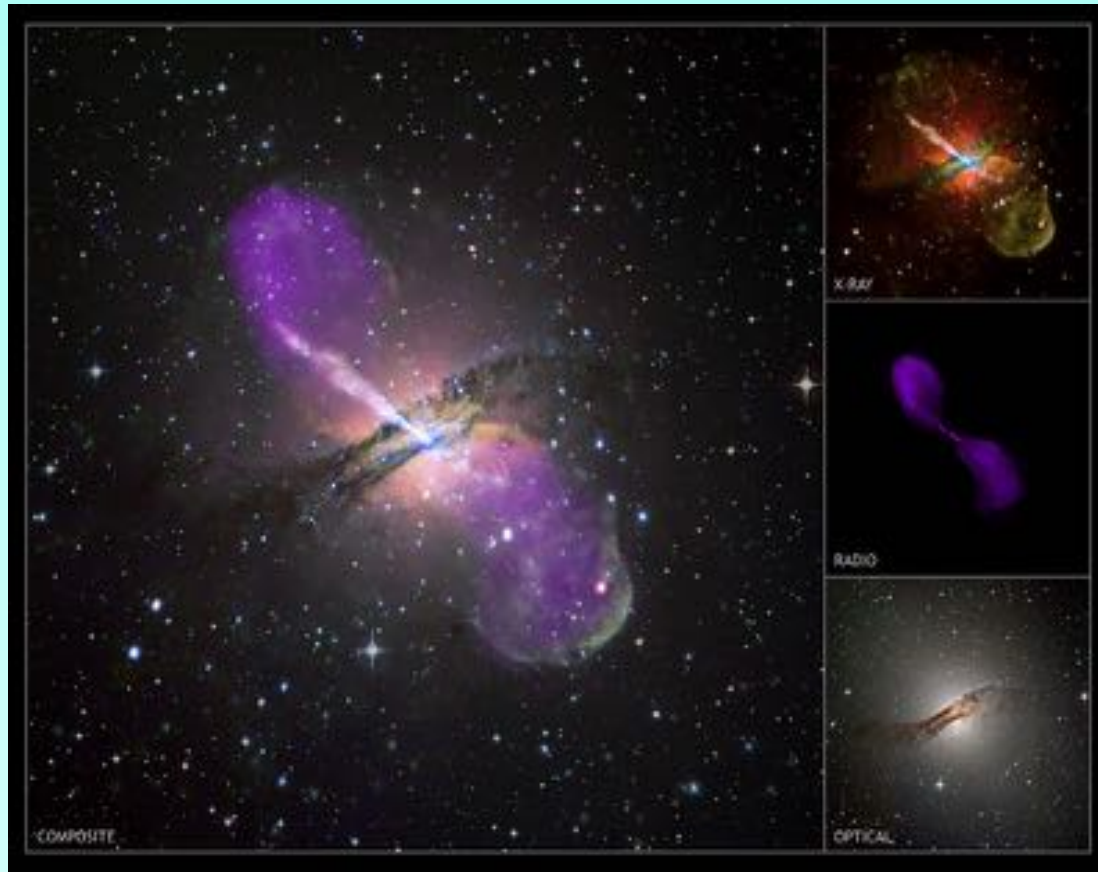
Principe: mesurer la déformation des galaxies d'arrière-plan



# La découverte des quasars

## Identification des sources radio ( $\approx 1960$ )

Centaurus A



Cambridge



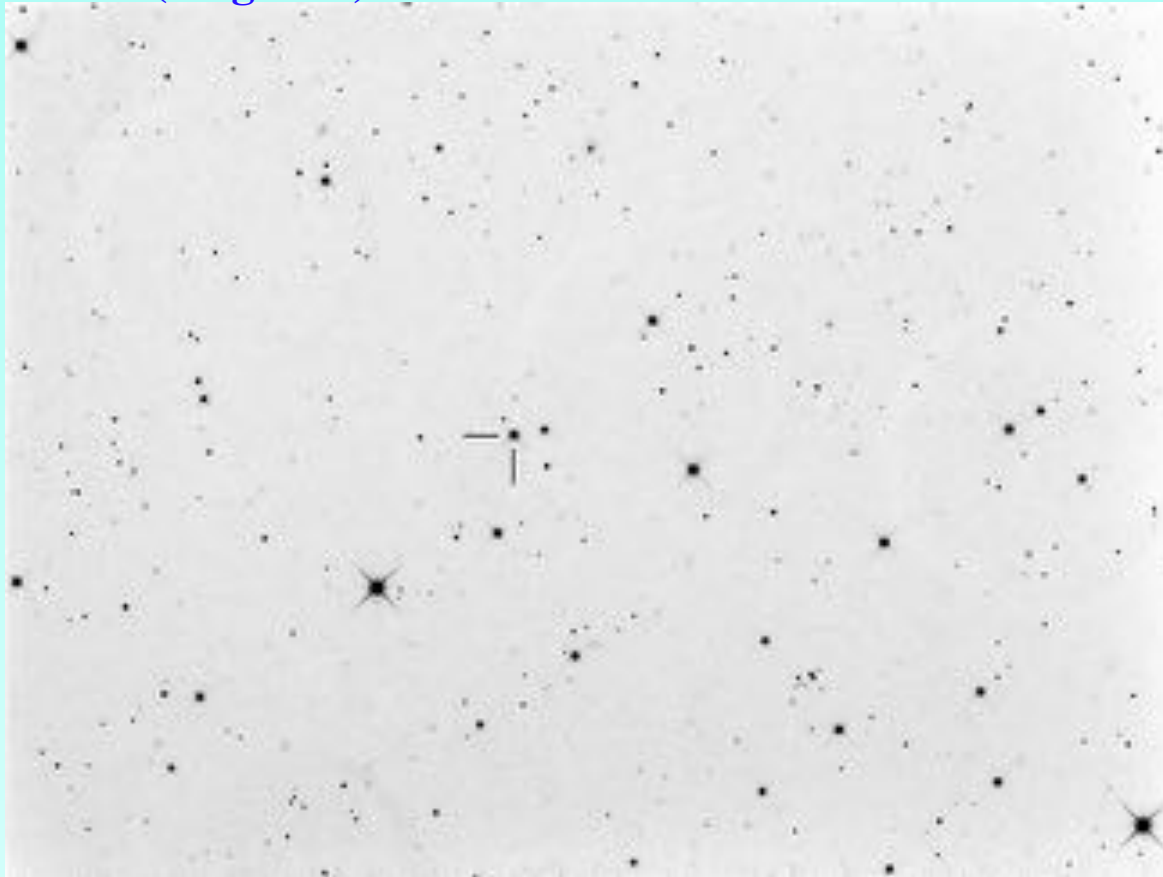
## Radiogalaxies (Cent. A)

# La découverte des quasars

ou quasi-stellar objects (QSOs)

Objets d'apparence stellaire: « quasi-stars » ou quasars

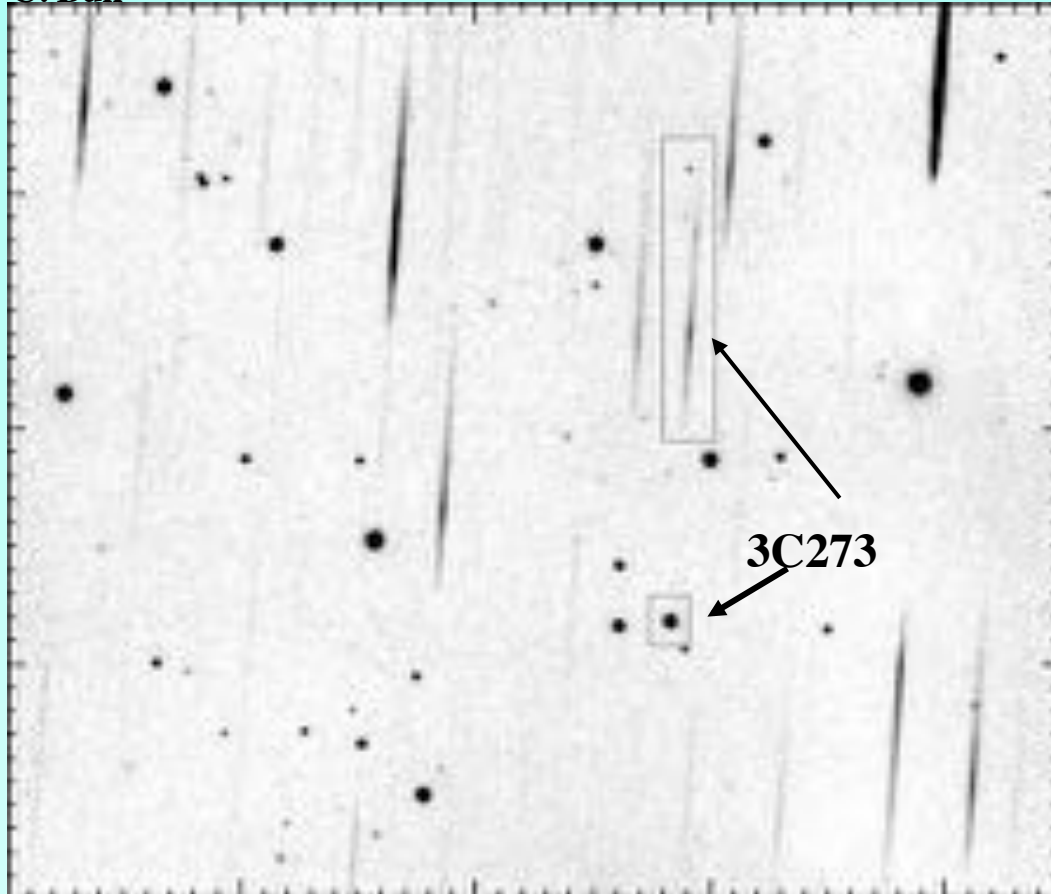
3C273 (mag  $\approx 12$ )



# Nature et distance des quasars ?

--> spectroscopie (étoiles radio ? autre type d'objets ?)

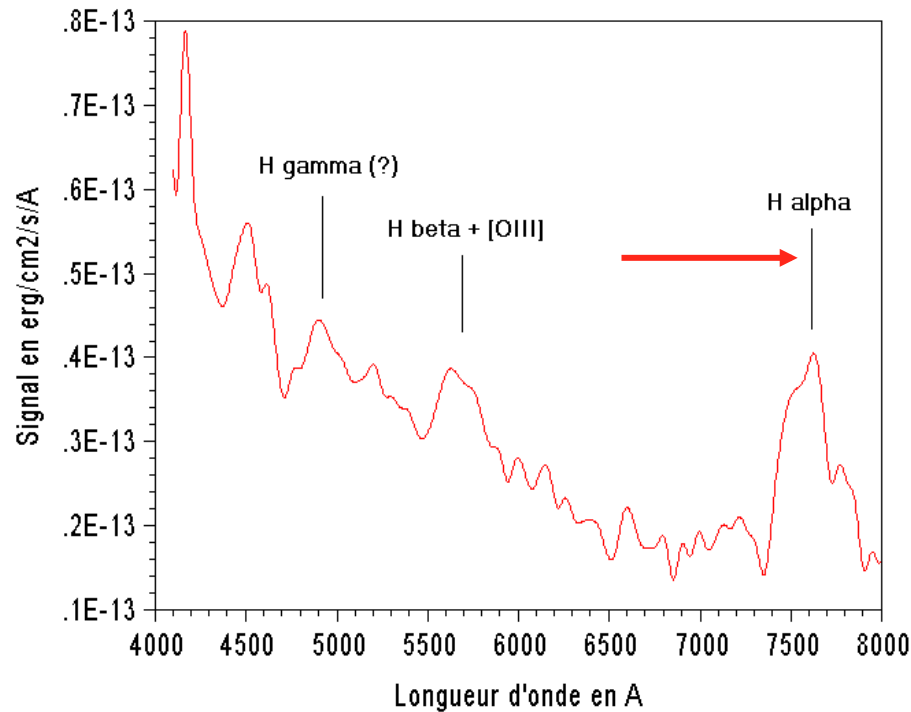
C. Buil



# Caractéristiques des quasars

C. Buil

SPECTRE ETALONNE DE 3C273

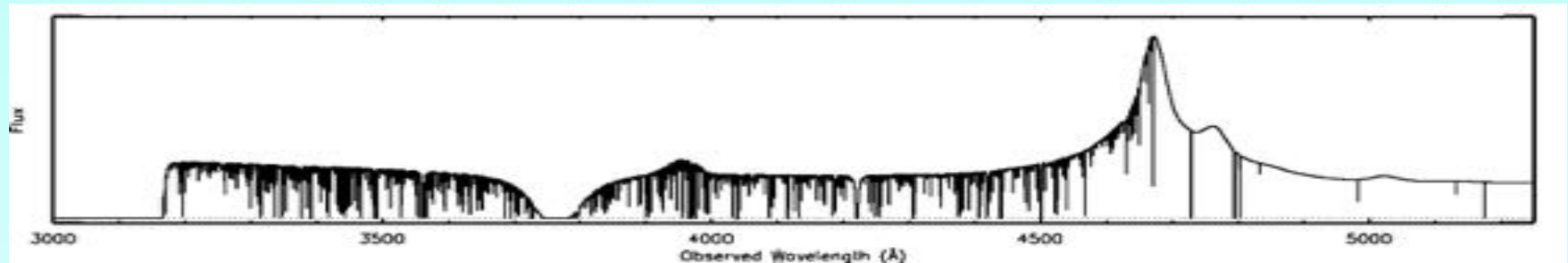


**Raies d'émission décalées**

**$z = 0,158$  (M. Schmidt 1963)**

**+ raies d'absorption**

$z \approx 2,9$

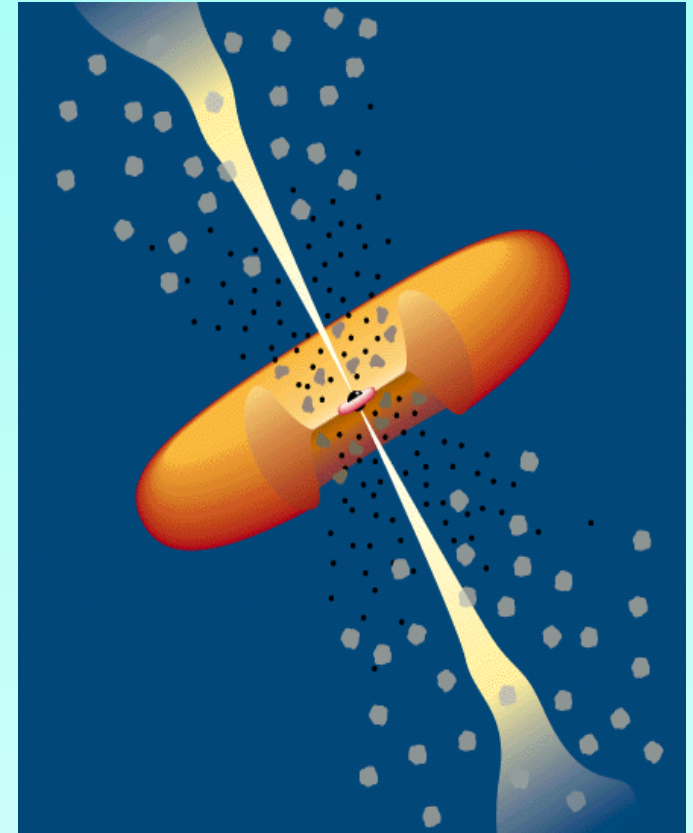


# Qu'est-ce qu'un quasar ?

Quasar = noyau actif d'une galaxie

- trou noir supermassif
- disque d'accrétion (rayonnement continu)
- nuages ionisés en mouvement (raies)
- jets (radio, visible)

3C273/jet



Faible fraction des galaxies « actives »

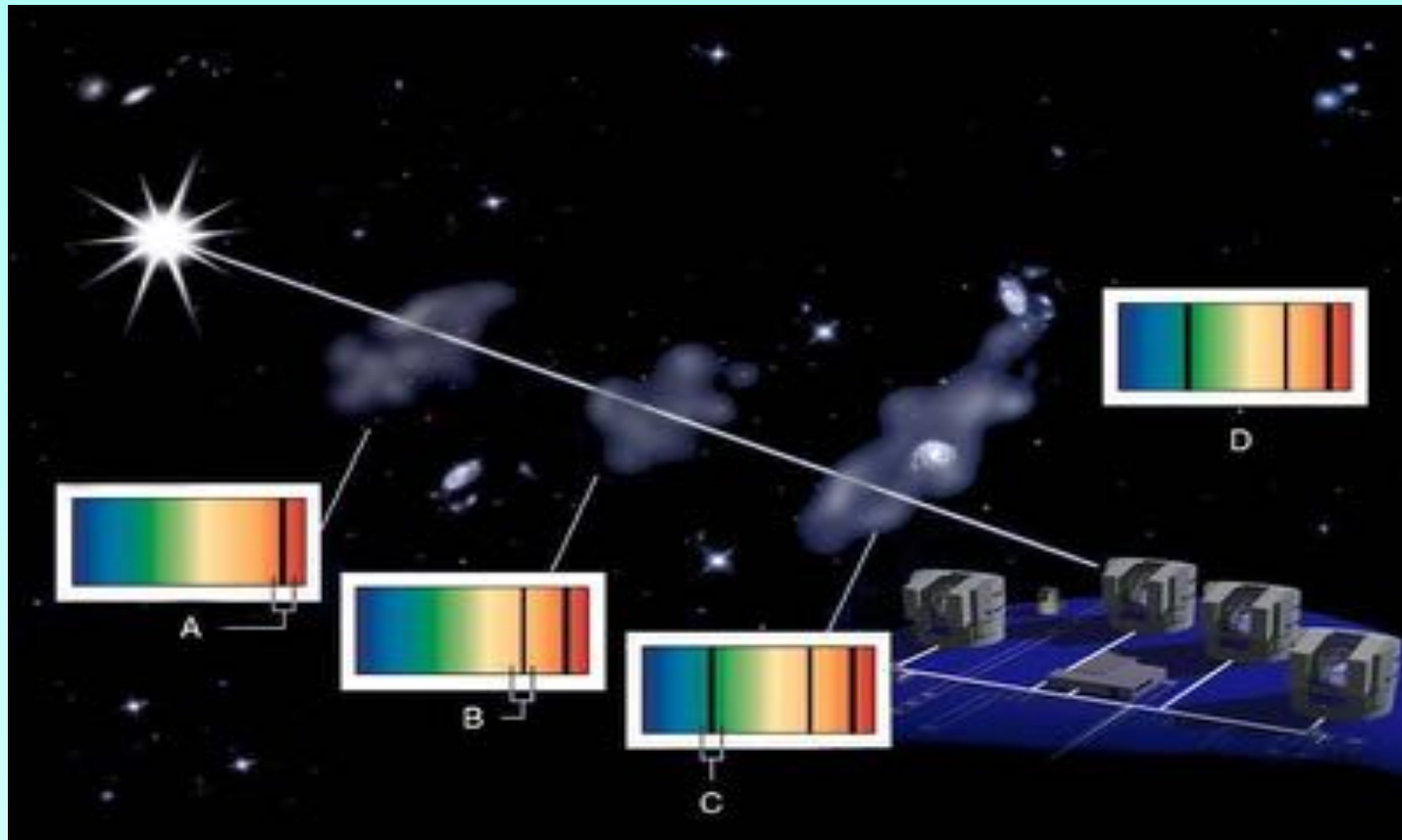
... mais beaucoup ont un trou noir.

# Raies d'absorption des quasars

gaz situé sur la ligne de visée :

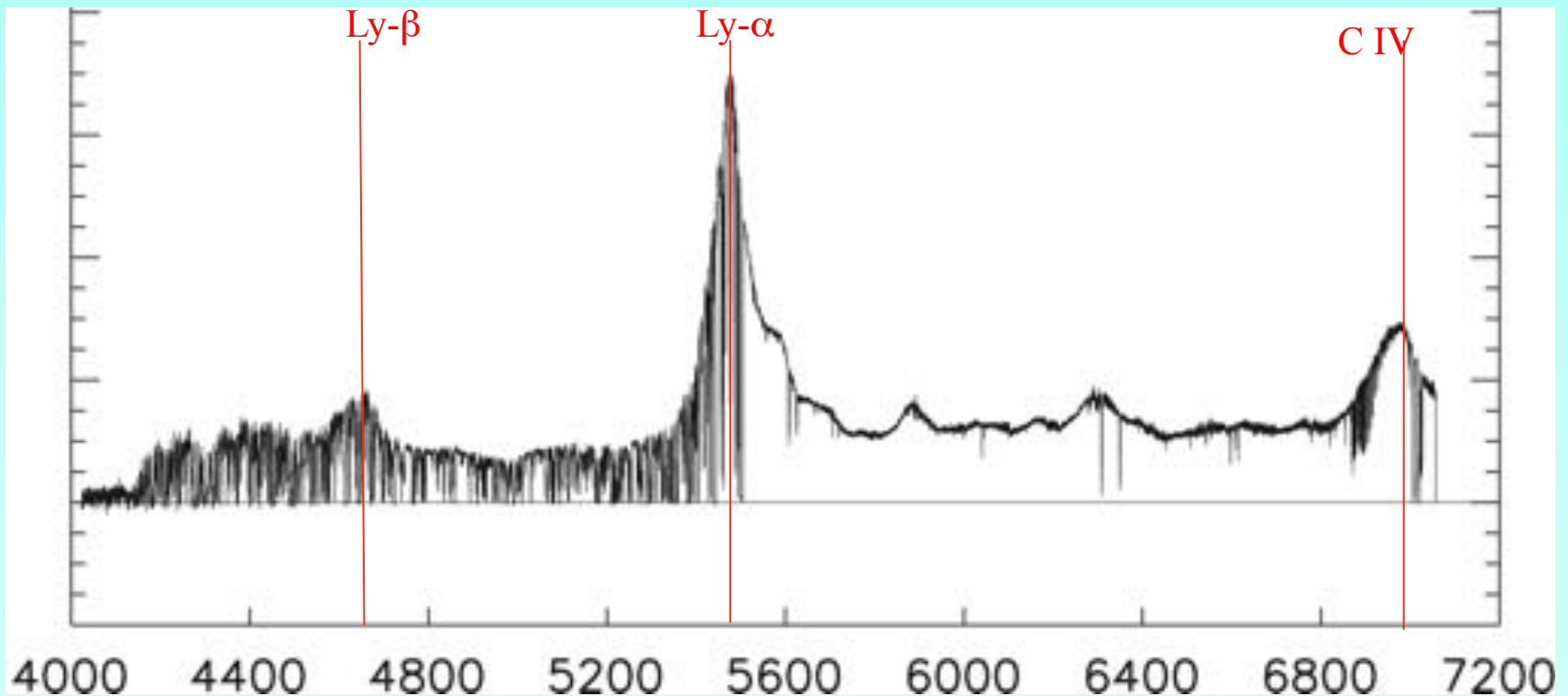
galaxies, nuages intergalactiques, gaz proche du quasar ...

**Quasars = sondes de l'univers lointain**



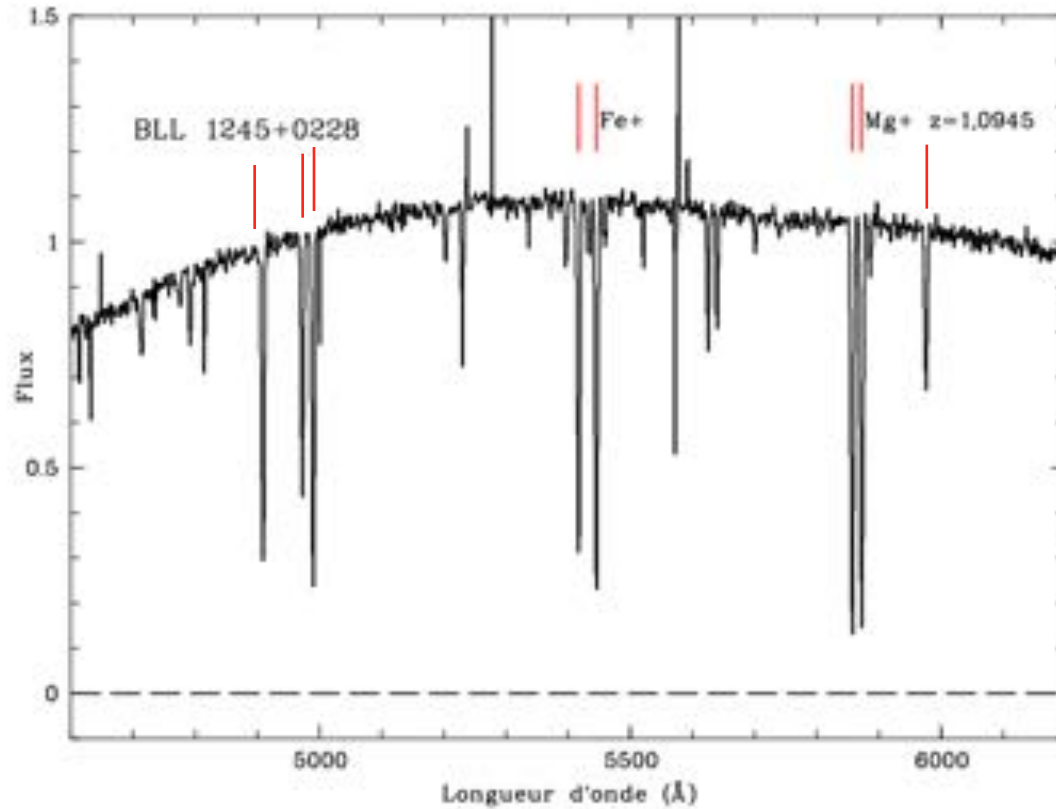
# Exemple de spectre d'un quasar lointain

- Raies d'émission : décalage vers le rouge du quasar,  $z_{em} \approx 4$
- Raies d'absorption très nombreuses  $z_{abs} \leq 4$  (forêt Ly $\alpha$  de H)
  - > nombreux « systèmes » de raies (système = objet absorbant)





# Un système de raies d'absorption ( $z_{\text{abs}} \approx 1$ )

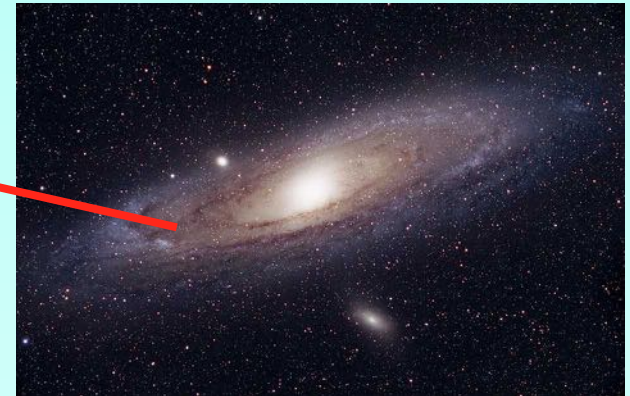


# Divers types d'« absorbants » / galaxies

- Disques de galaxies

- grande quantité de gaz
- éléments lourds abondants
- molécules ( $H_2$ , CO...)
- poussières

quasar



# Divers types d'« absorbants » / halos

- Halos de galaxies

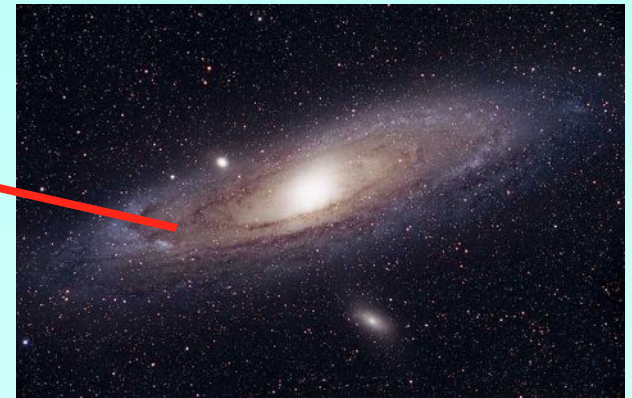
- faible quantité de gaz
- éléments lourds abondants
- gaz ionisé

- $R_{\text{halo}} \approx 3 \text{ à } 5 R_*$

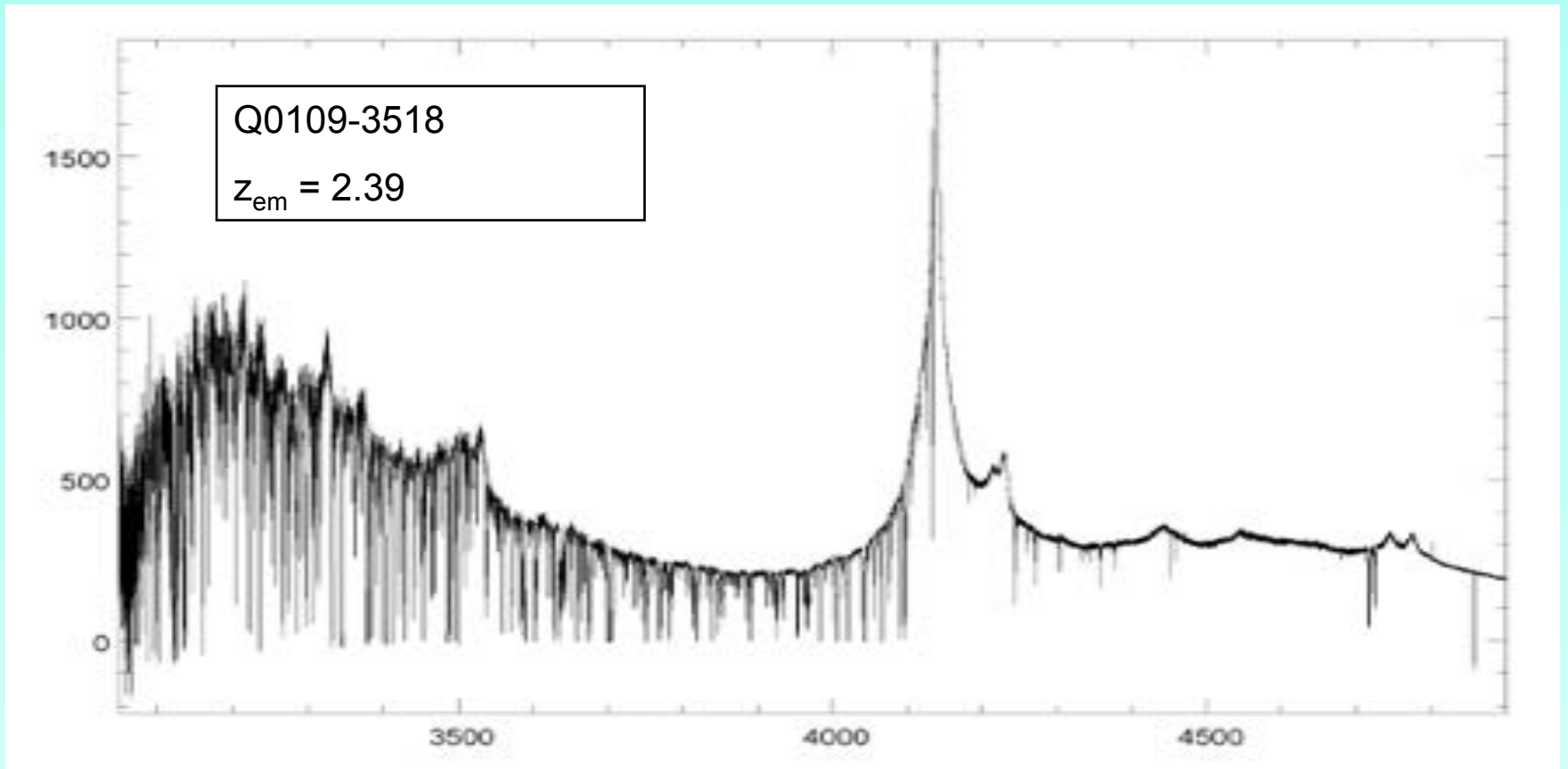
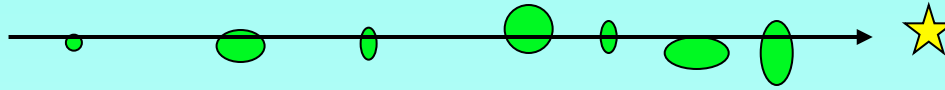
- Origine

- gaz éjecté ?
- gaz du MIG en chute ?

quasar



# Divers types d'absorbants: nuages intergalactiques



# Les nuages intergalactiques

## Propriétés :

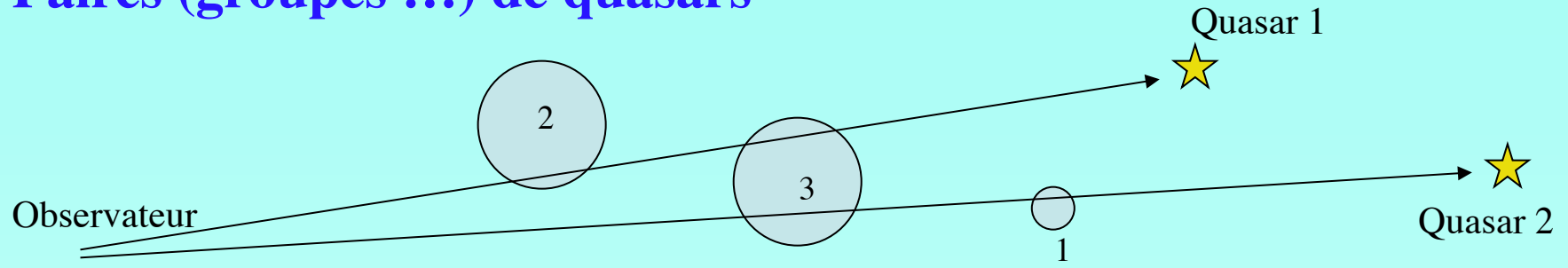
- très nombreux dans l'univers lointain
- rares dans l'univers proche (spectres UV du HST)

## que sont devenus les nuages de l'univers lointain ?

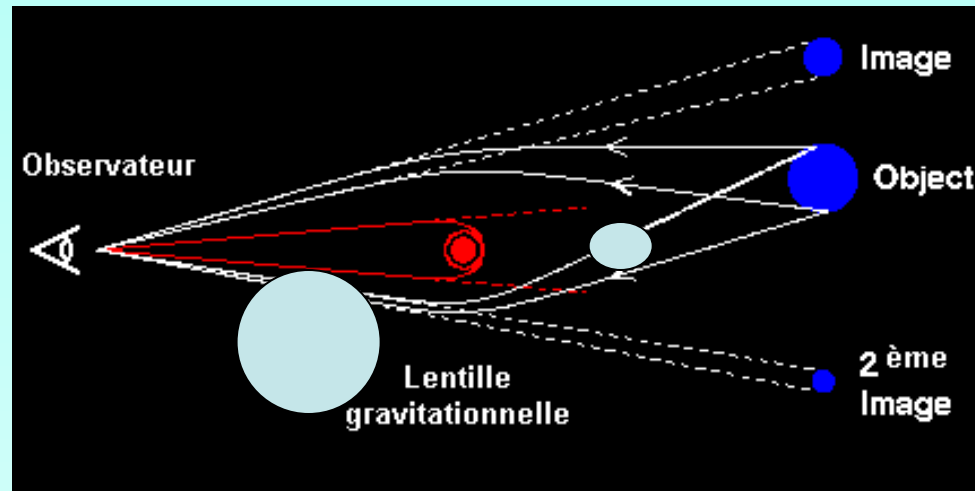
- le gaz n'est **pas primordial** (contient C, O etc) : origine ?
  - 1ère génération d'étoiles avant les galaxies ?
  - échange de gaz : galaxies  $\leftrightarrow$  MIG ?
- **Taille des nuages ?**
  - > paires de quasars ou mirages gravitationnels

# Taille des nuages intergalactiques

## Paires (groupes ...) de quasars



## Mirages gravitationnels



Quasar jumeau

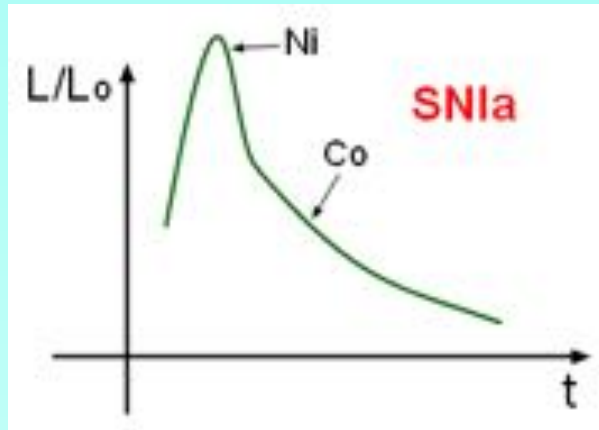


--> taille supérieure à 10 fois la taille des galaxies

# Supernovae Ia, sursauts $\gamma$

## SN Ia

(prix Nobel 2011 Perlmutter, Schmidt et Riess)



SN1994d/NGC 4526



Luminosité au maximum universelle

--> **chandelles standard**

## Sursauts $\gamma$ (GRB courts/longs)

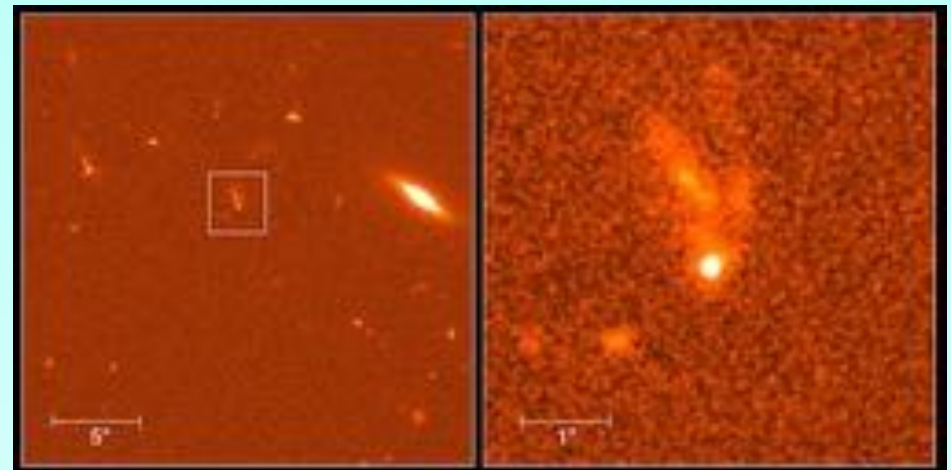
Très brillants (... mais éphémères)

--> très bonnes « sondes »

Emission optique associée --> z

Explosion d'une étoile massive

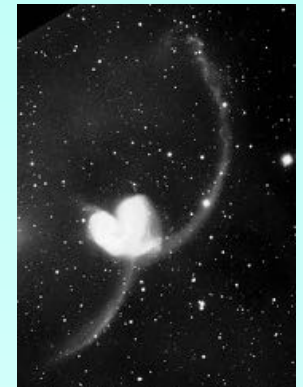
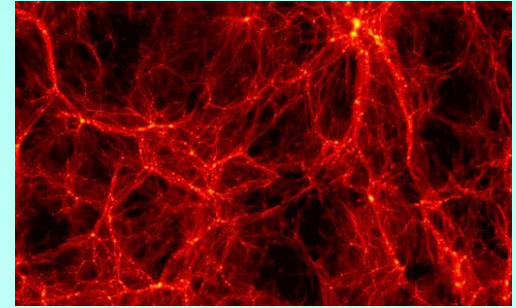
GRB990123/HST



# Vers un scénario global (cf cours 11)

- La matière noire s'organise sous l'effet de la gravitation
- Formation d'un réseau complexe de filaments/halos
- Le gaz tombe dans les régions denses
- Formation de galaxies dans les régions denses
- Fusion des halos et galaxies (formation d'étoiles)

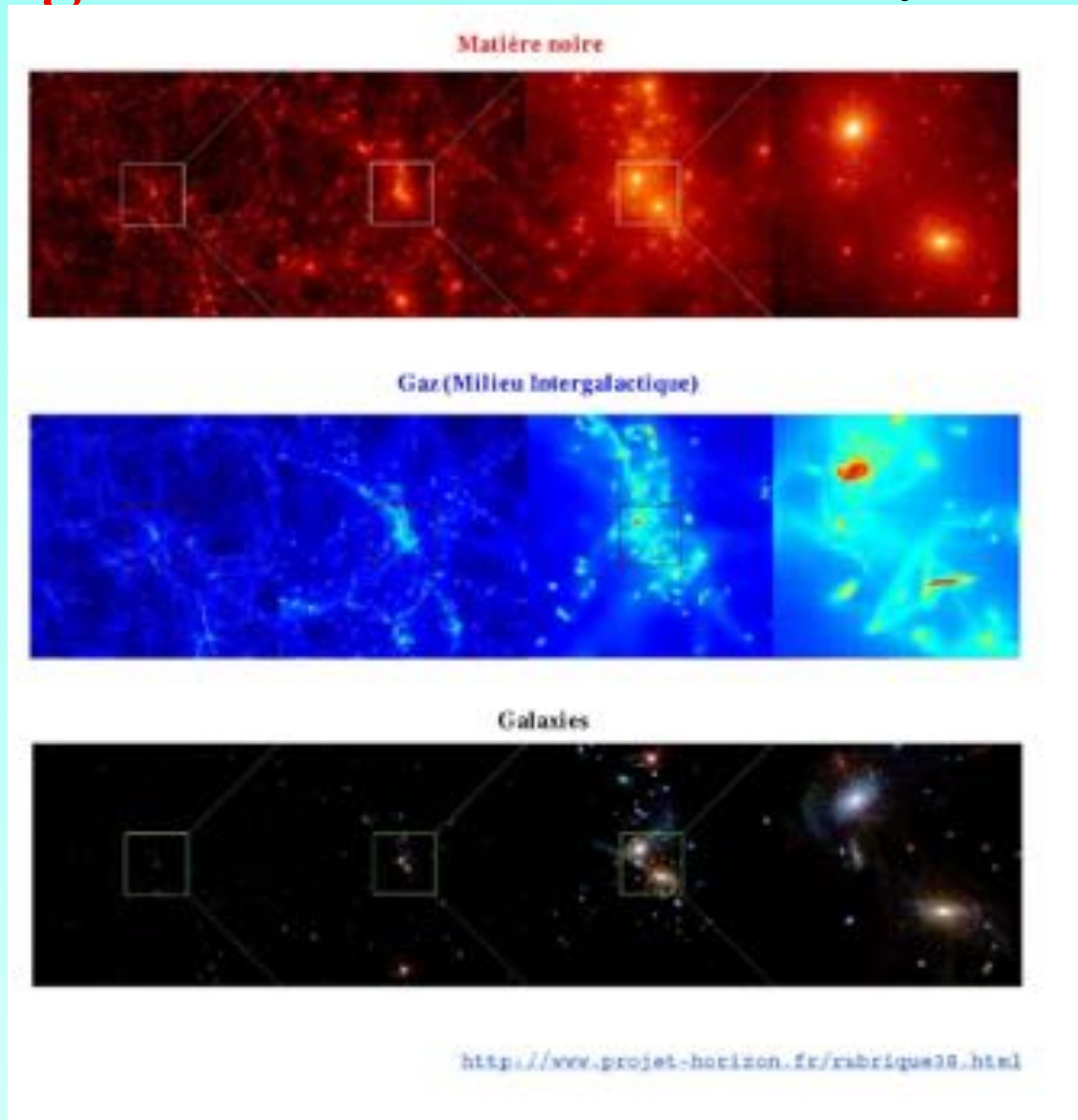
B. Moore





# Scénario global

Projet Horizon



# Résumé du cours 10

- **L'expansion de l'Univers:  $V \rightarrow d \rightarrow t$  (accès à l'histoire)**
- **Distribution complexe des galaxies dans l'espace**
- **Mouvements, mirages ... : la matière noire domine !**
- **Gaz intergalactique très abondant et structuré**
- **Scénario d'évolution de l'Univers et cosmologie: cf cours 11**

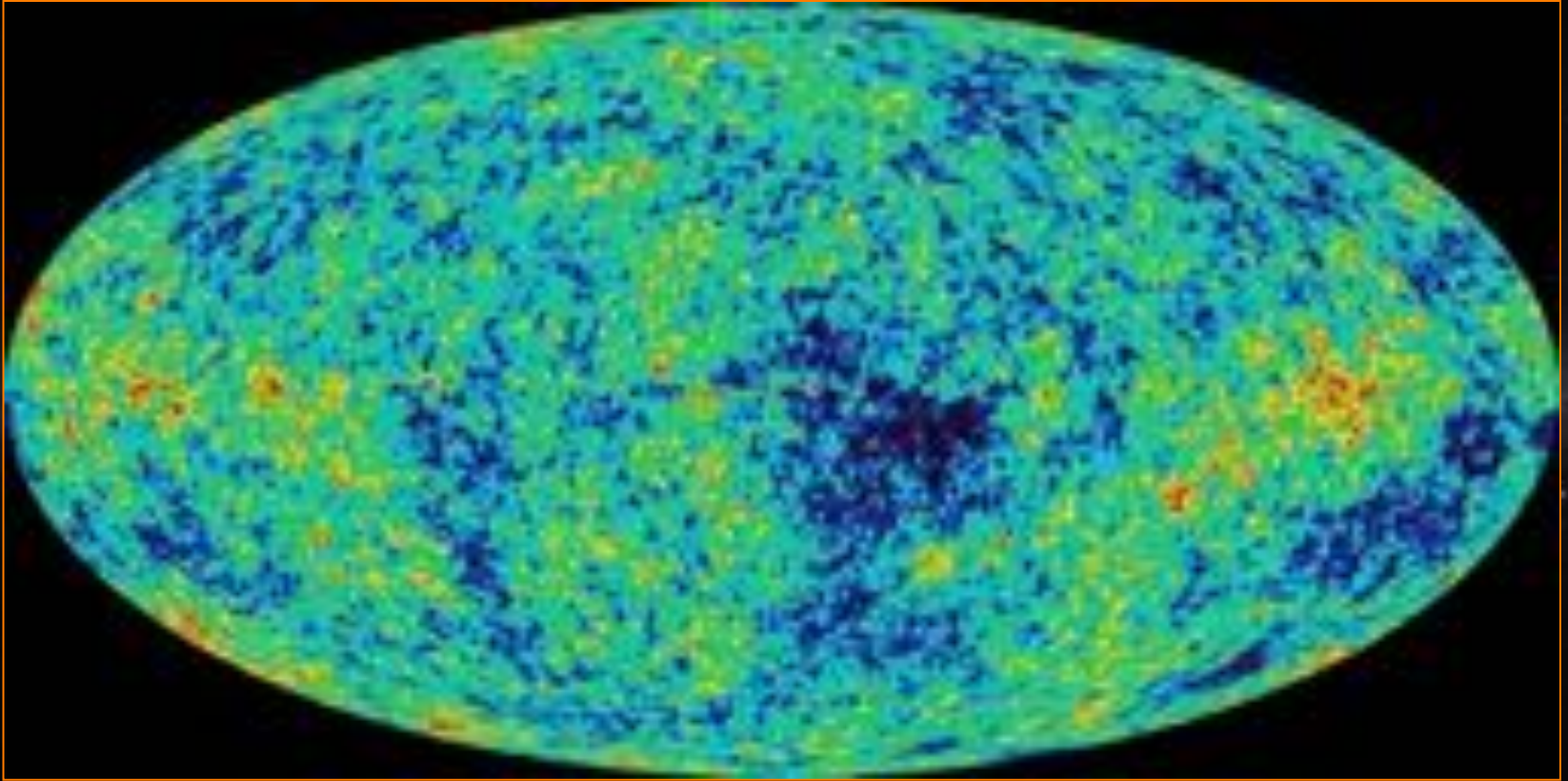
# Prochains cours

Cours n°11 – La cosmologie moderne: un Univers en évolution,  
par F. Daigne – Lundi 30 janvier



# Prochains cours


Cours n°11 – La cosmologie moderne: un Univers en évolution,  
par F. Daigne – Lundi 30 janvier



La carte du rayonnement fossile  
(WMAP)

# Prochains cours

Construire la vision moderne de l'Univers

1. Introduction: qu'est ce que l'astrophysique
  2. Notre étoile, le Soleil
  3. De la lunette de Galilée  
aux télescopes spatiaux :  
l'observation en astronomie
  4. Panorama du système solaire
  5. A la recherche d'autres mondes,  
les exoplanètes
  6. Vie et mort des étoiles
  7. Explosions et monstres cosmiques :  
supernovae, étoiles à neutrons, trous noirs
  8. Les nuages interstellaires  
et la formation des étoiles
  9. La Voie Lactée et les galaxies proches
  10. L'Univers lointain
  11. La cosmologie moderne :  
un Univers en évolution
  12. Conclusion :  
les défis pour l'astrophysique contemporaine
- 

# Page web du cours

Les transparents + quelques liens + une courte bibliographie

[http://www.iap.fr/users/daigne/FD\\_IAP/UIA2011.html](http://www.iap.fr/users/daigne/FD_IAP/UIA2011.html)

Courriels :

Patrick Boissé : [boisse@iap.fr](mailto:boisse@iap.fr)  
Frédéric Daigne : [daigne@iap.fr](mailto:daigne@iap.fr)