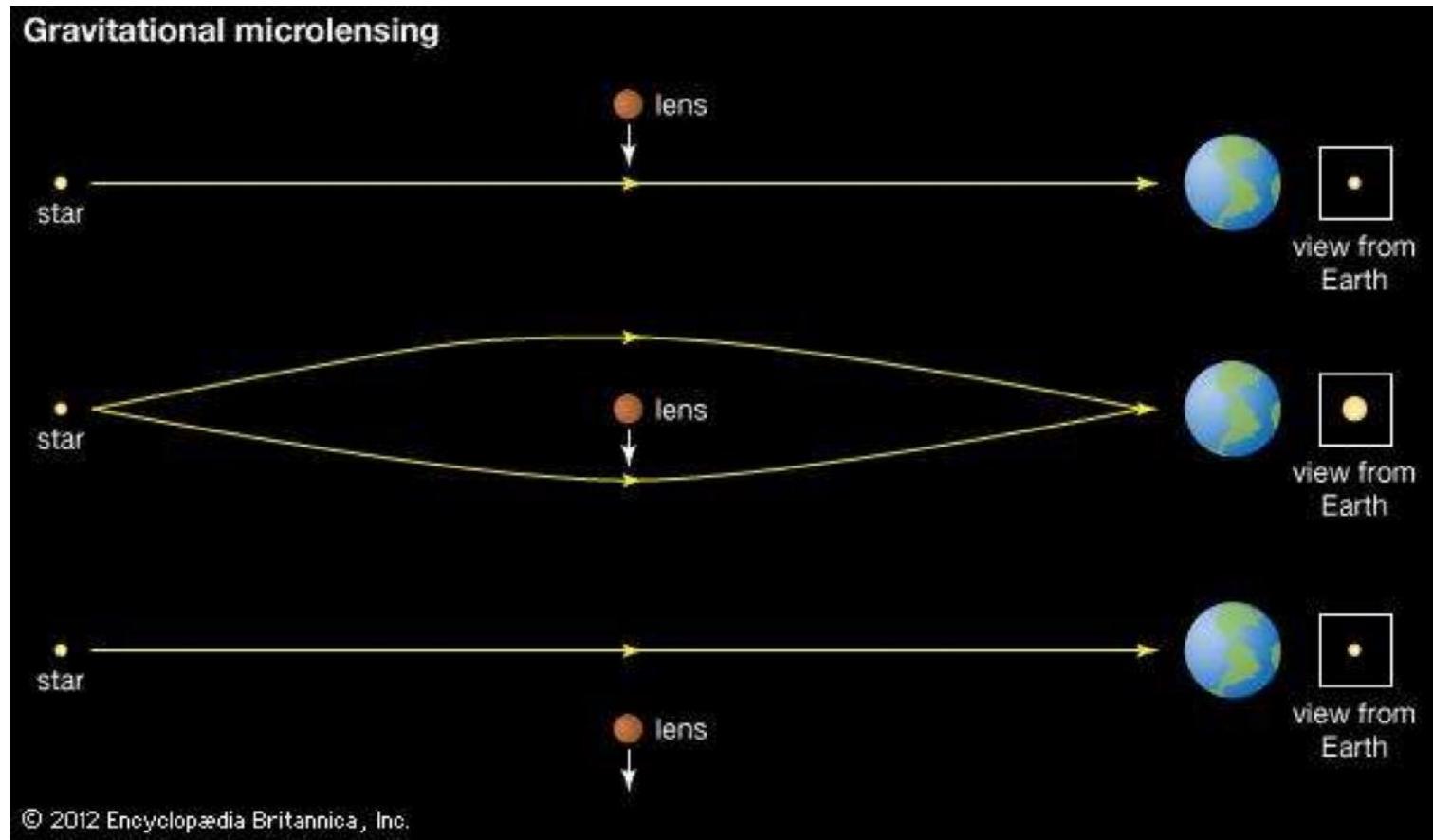


# Chapitre 11 (fin)

## Effet de lentille gravitationnelle

# Micro-lentilles gravitationnelles

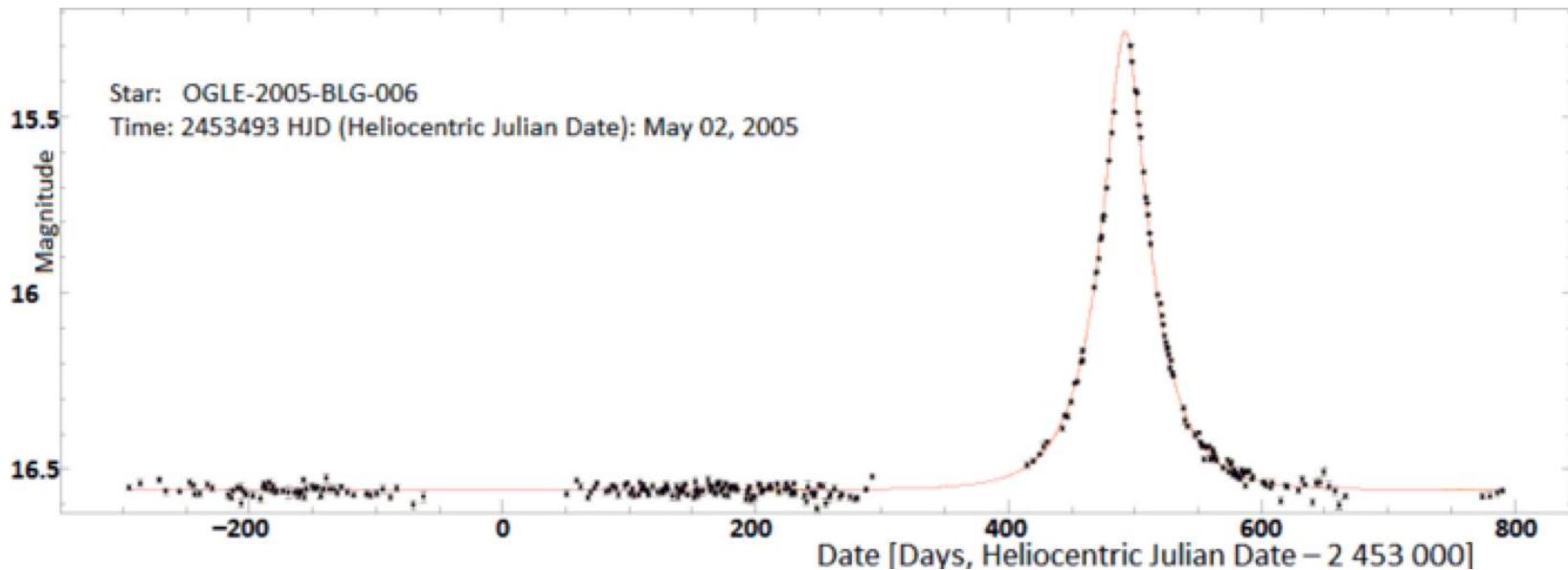


# Micro-lentilles gravitationnelles

L'effet de lentille entre étoiles dans notre Voie Lactée est en fait observable, contrairement aux craintes d'Einstein

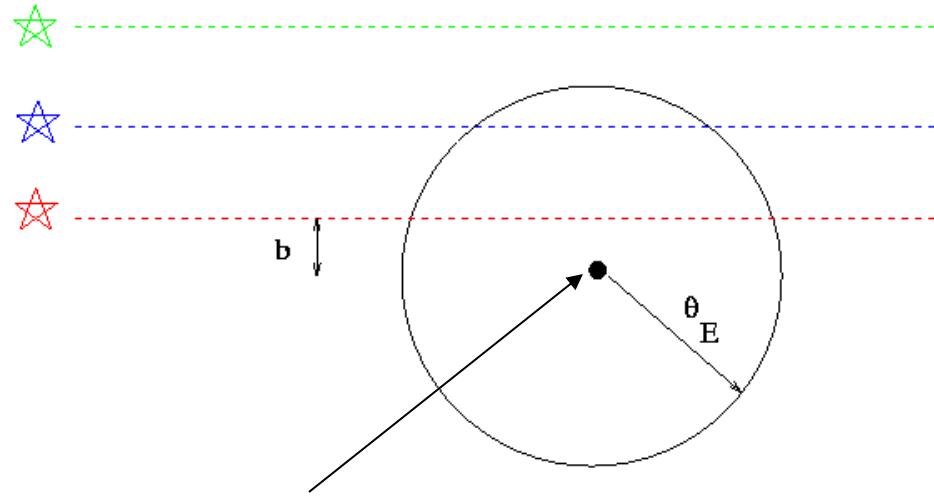
On cherche à observer non pas des images multiples d'étoiles mais l'amplification apparente de leur luminosité

Si la matière sombre dans la Voie Lactée est composée d'étoiles peu lumineuses, mais nombreuses, on devrait voir les étoiles d'arrière plan changer d'éclat.



# Micro-lentilles gravitationnelles

Etoile (brillante)  
d'arrière-plan



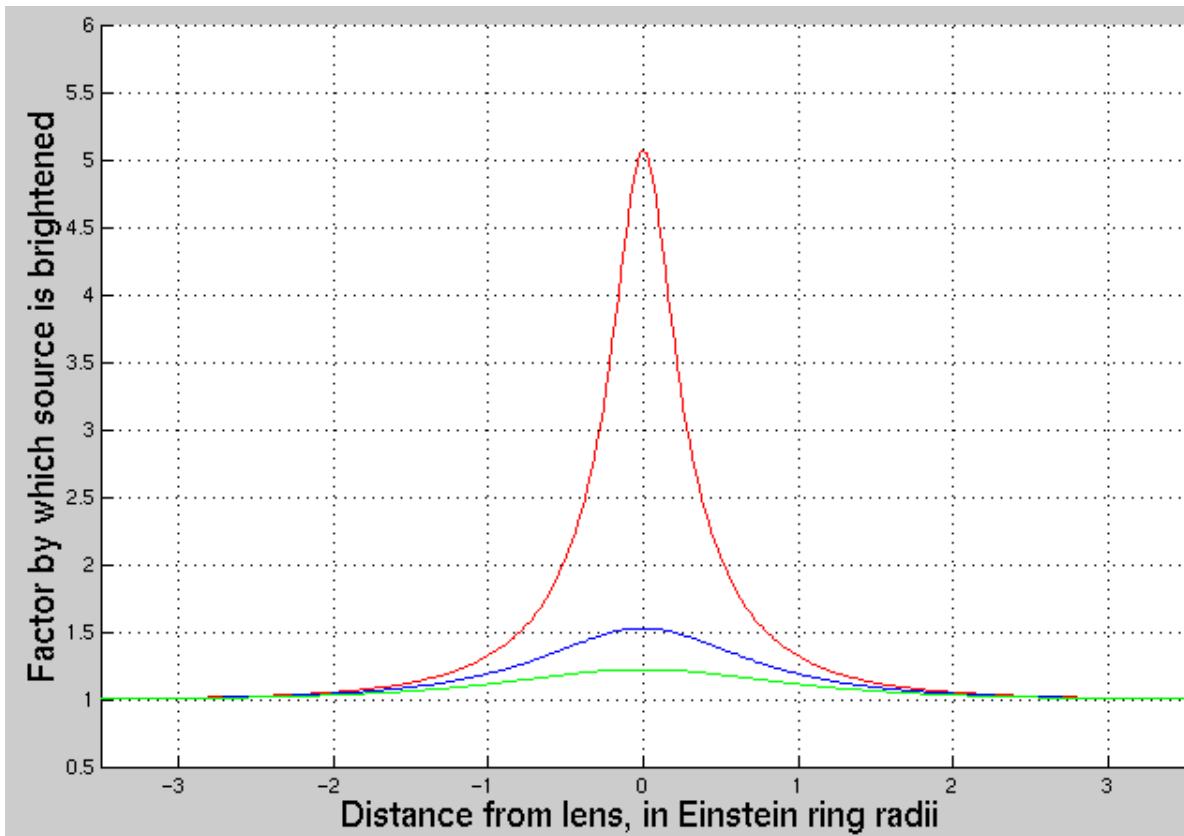
Etoile (sombre)  
d'avant-plan

Si  $u = b/\theta_E$  l'amplification maximum est donnée par:

$$A = \frac{u^2 + 2}{u\sqrt{u^2 + 4}}$$

Cas d'une lentille  
de masse ponctuelle

# Micro-lentilles gravitationnelles



Amplification en fonction de la distance angulaire à la lentille.  
L'échelle de temps dépend des vitesses relatives de la lentille et de l'étoile source.

# Microlensing Event MACHO-LMC-5

# Hubble Space Telescope ▪ ACS

Mt. Stromlo

Feb. 1993

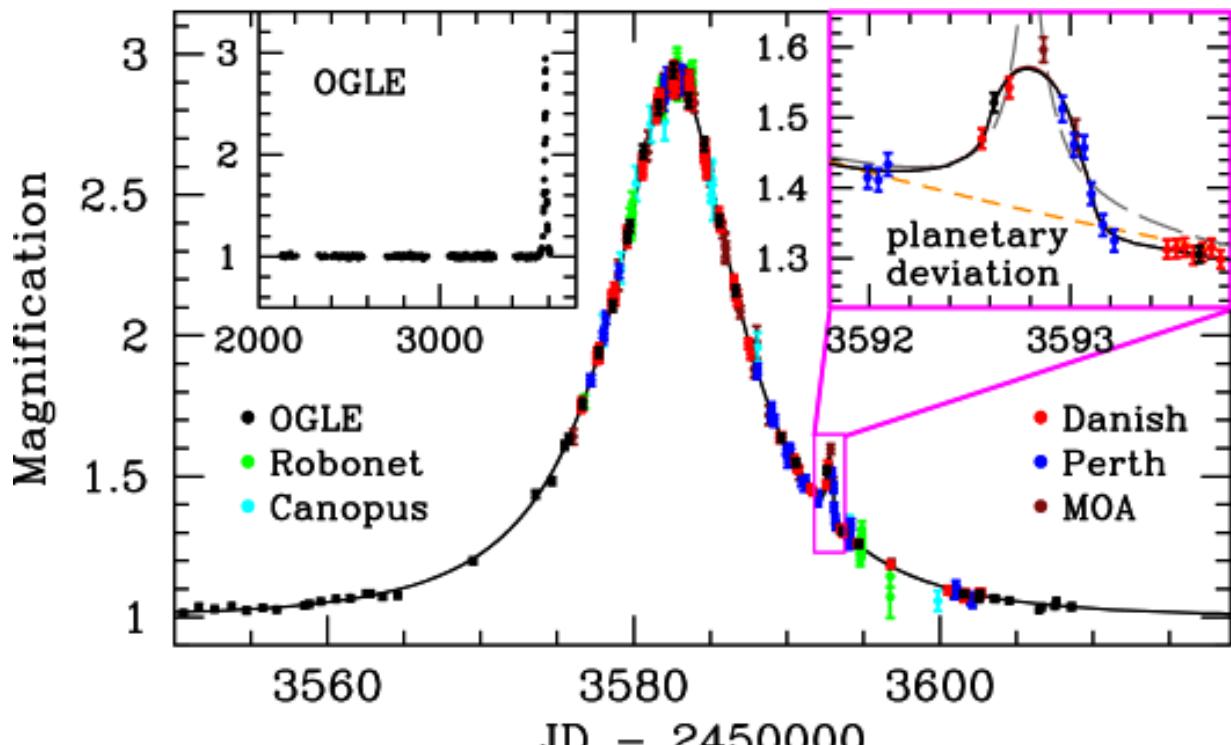
Jan. 1994

HST ACS/HRC

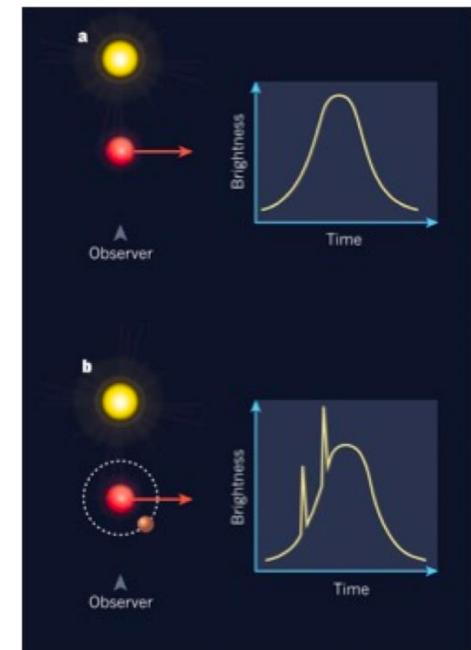
July 11, 2002

# Micro-lentilles gravitationnelles

Découverte d'une planète, en prime !



Date (jours Juliens)



## Résultats

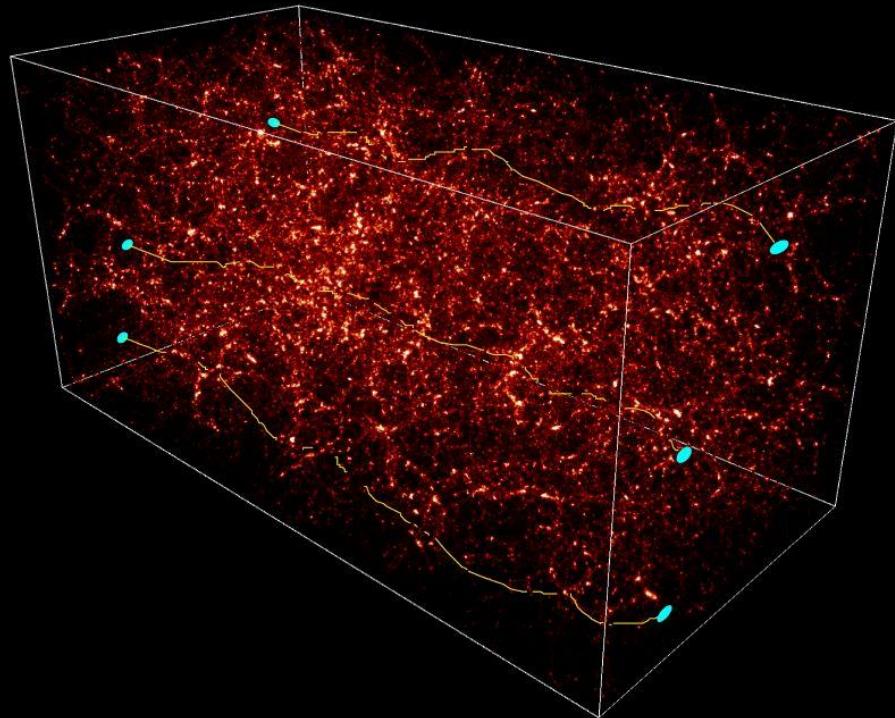
1. Environ 20 événements confirmés dans la direction du LMC et SMC
2.  $> 4000$  événements dans le bulbe galactique: plus qu'attendu
3. Durée: 30 à 239 jours (MACHO: MAssive Compact Halo Objects)
4. MACHO: seulement 20% de la masse sombre dans le halo de la Voie Lactée est composée d'étoiles de masse  $0.15 < M < 0.9$  masses solaires
5. EROS (Expérience pour la Recherche d'Objets Sombres): moins de 25% de la masse du halo est sous forme d'objet dont la masse  $10^{-7} < M < 1$  masses solaires
6. Pas d'événements très longs, ce qui élimine l'hypothèse de trous noirs « errants » de masse  $0.3 < M < 30$  masses solaires (ou du moins limite la densité en nombre de ses trous noirs)

Effet de lentille par les grandes structures

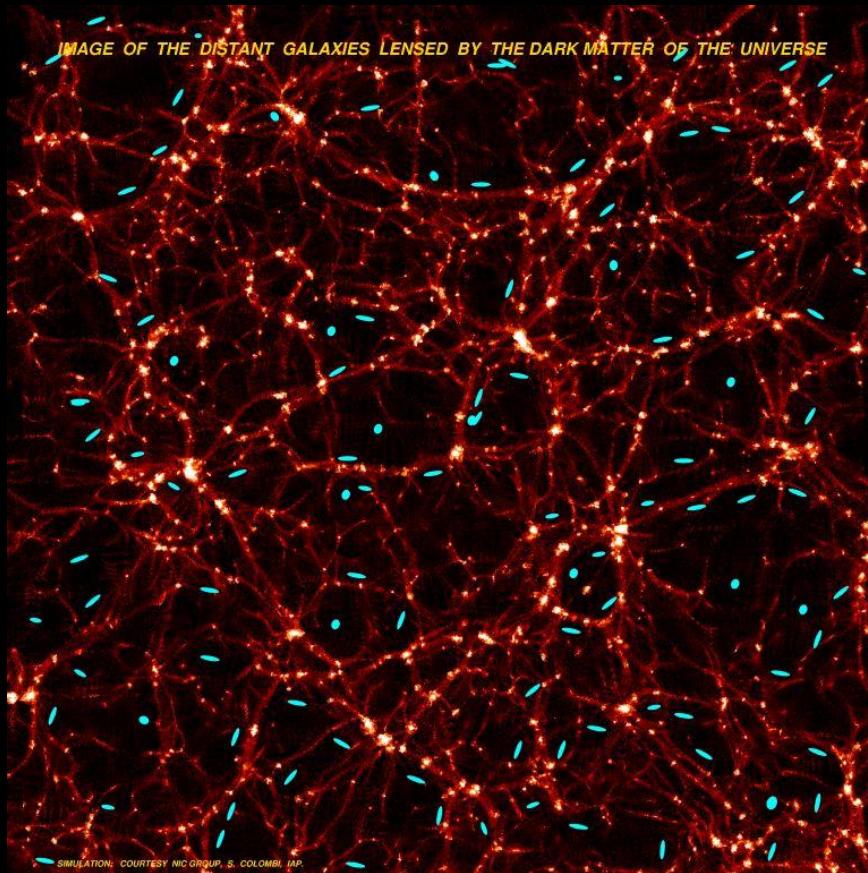
# Effet de lentille par les grandes structures

Déformations statistiques des galaxies d'arrière-plan

DEFLECTION OF LIGHT RAYS CROSSING THE UNIVERSE, EMITTED BY DISTANT GALAXIES



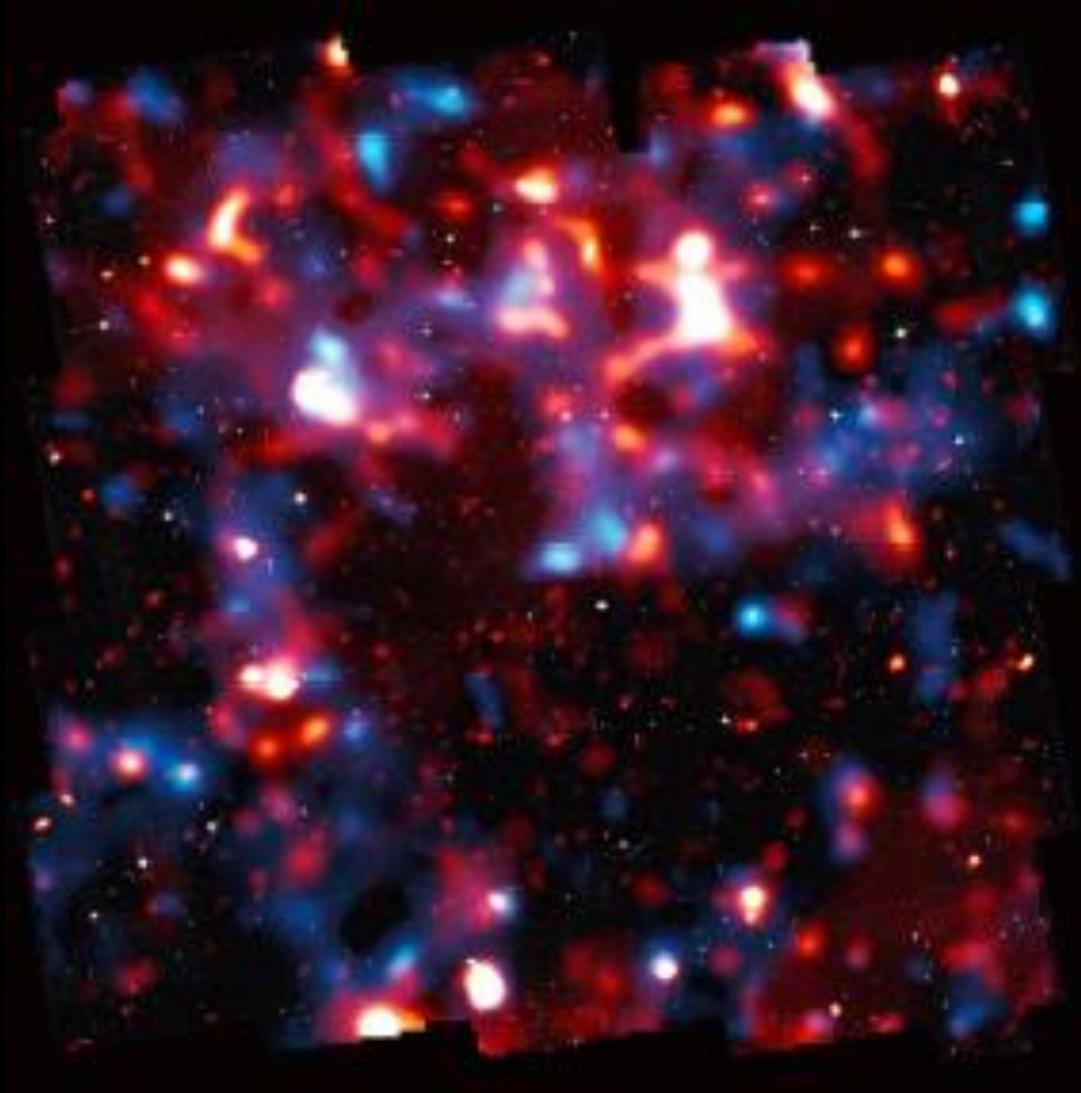
SIMULATION: COURTESY NIC GROUP, S. COLOMBI, IAP.



SIMULATION: COURTESY NIC GROUP, S. COLOMBI, IAP.

# Effet de lentille par les grandes structures

Matière visible (rouge) vs. sombre (bleu) dans les filaments cosmiques

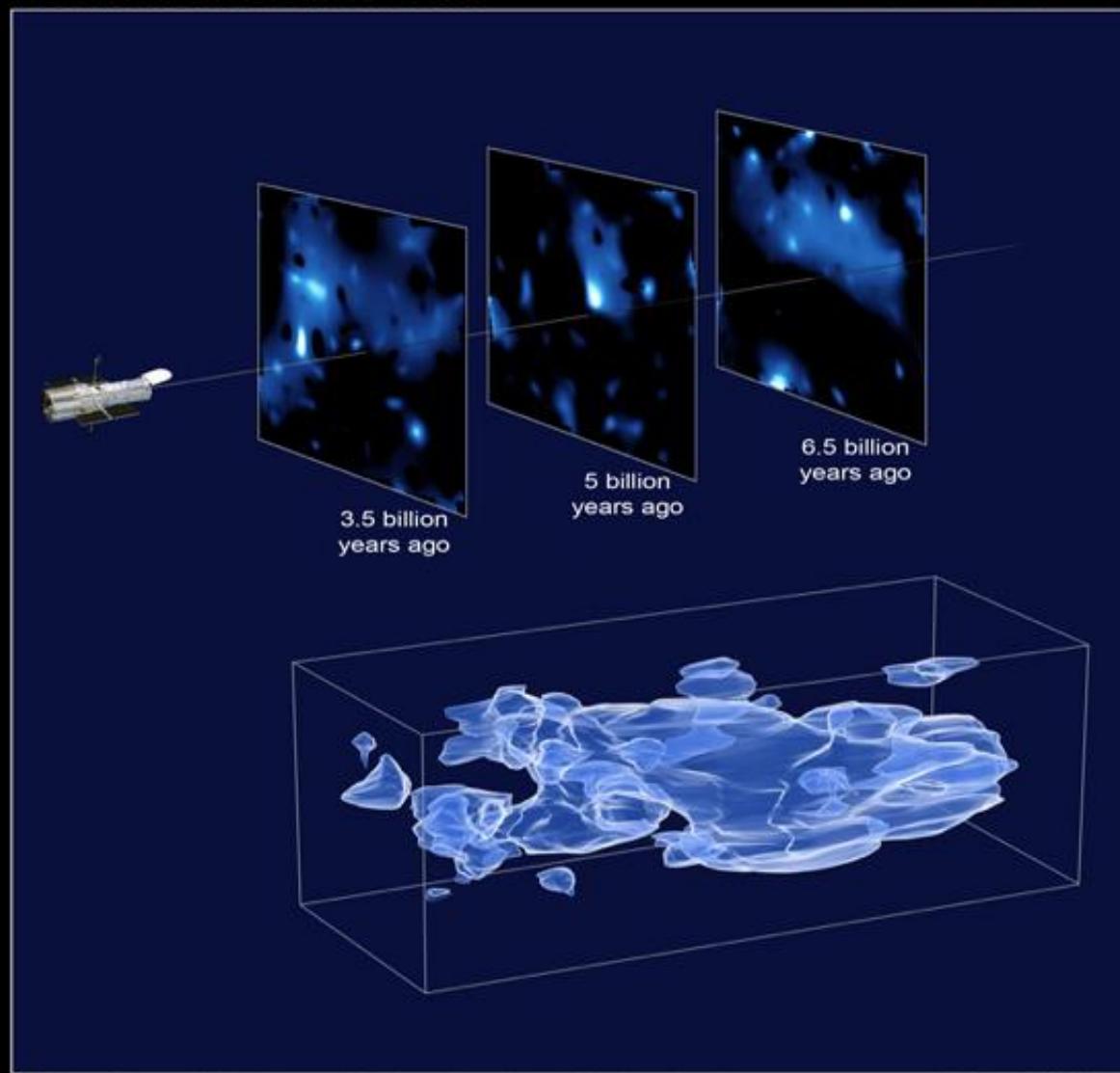


# Effet de lentille par les grandes structures

Première carte 3D de la matière sombre (2007)

Distribution of Dark Matter

HST • ACS/WFC



# La matière sombre existe !

- Courbes de rotation des galaxies spirales
  - Milieu intergalactique dans les amas
  - $M/L(\text{spirales}) < M/L(\text{elliptiques}) < M/L(\text{amas de galaxies})$
  - Amas double en interaction (« bullet cluster »)
  - Microlentilles dans notre Voie Lactée: **une partie** (max 20%) de la matière sombre est sous forme d'étoiles peu lumineuses
  - Filaments cosmiques
- > on arrive à identifier une petite partie de la matière sombre dans notre Voie Lactée (micro-lentille), et on cartographie la matière sombre dans les galaxies spirales, dans les elliptiques, et dans les amas!

# Chapitre 12

## Les Quasars

## La cosmologie

# Les quasars

Découverts dans le domaine radio dans les années 1950

Plusieurs centaines de sources radios non identifiées en optique

Sources compactes d'après des observations interférométriques

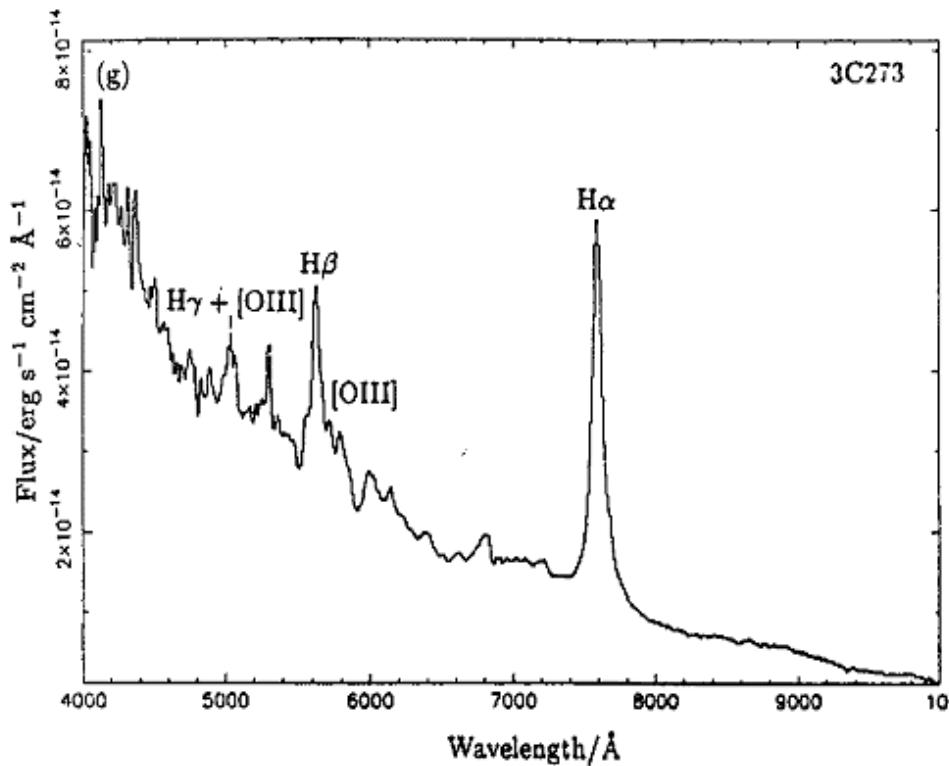
Découverte par Hazard (Cyril) de la première contrepartie optique grâce à une occultation lunaire en 1962 en profitant du fait que la taille de la lune est environ égale à la résolution des antennes (en 1962)



Exemple d'une  
occultation lunaire,  
(ici, l'étoile Aldébaran)

# Les quasars

Spectre optique obtenu à la suite de l'occultation lunaire



Quasar 3C273:

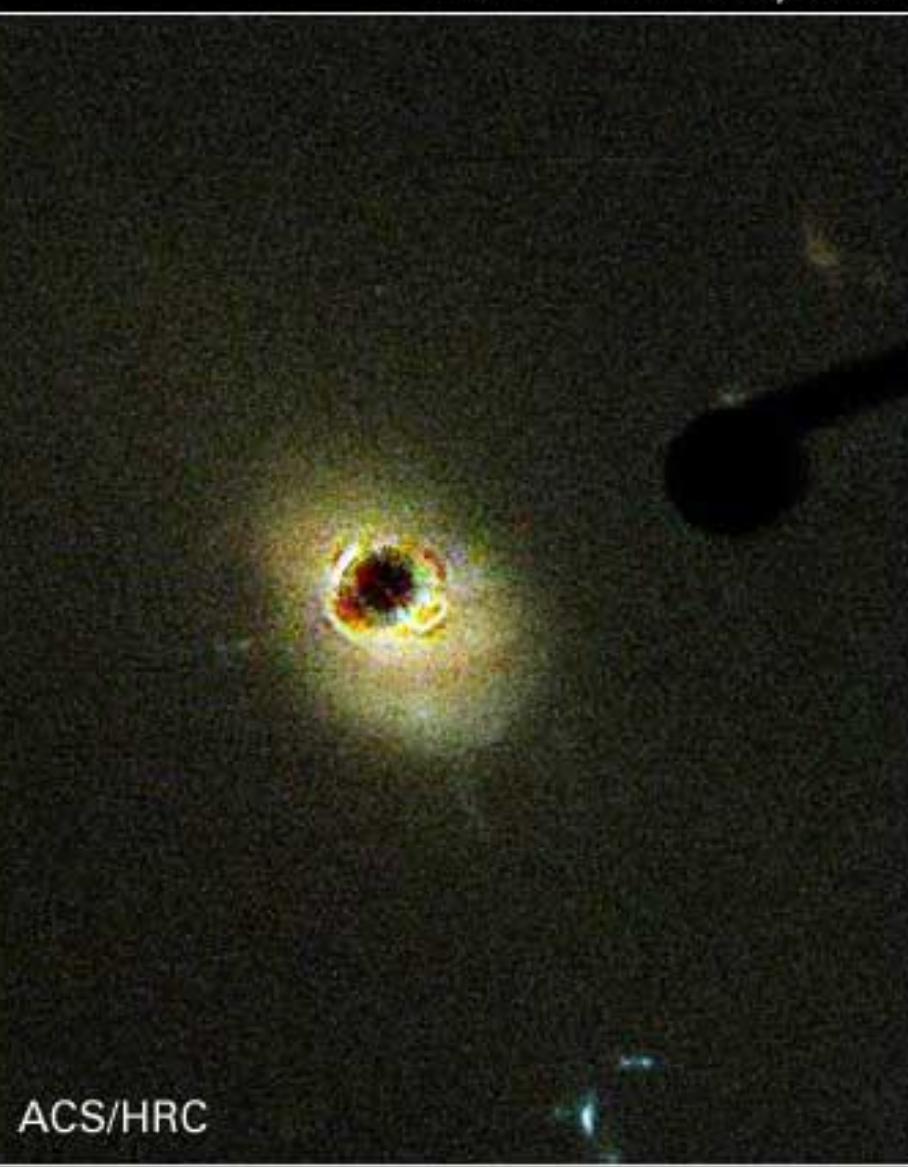
- raies très décalées vers le rouge
- spectre anormalement bleu
- apparence ponctuelle -> quasar = quasi-star

# Quasar 3C 273

HST • WFPC2, ACS



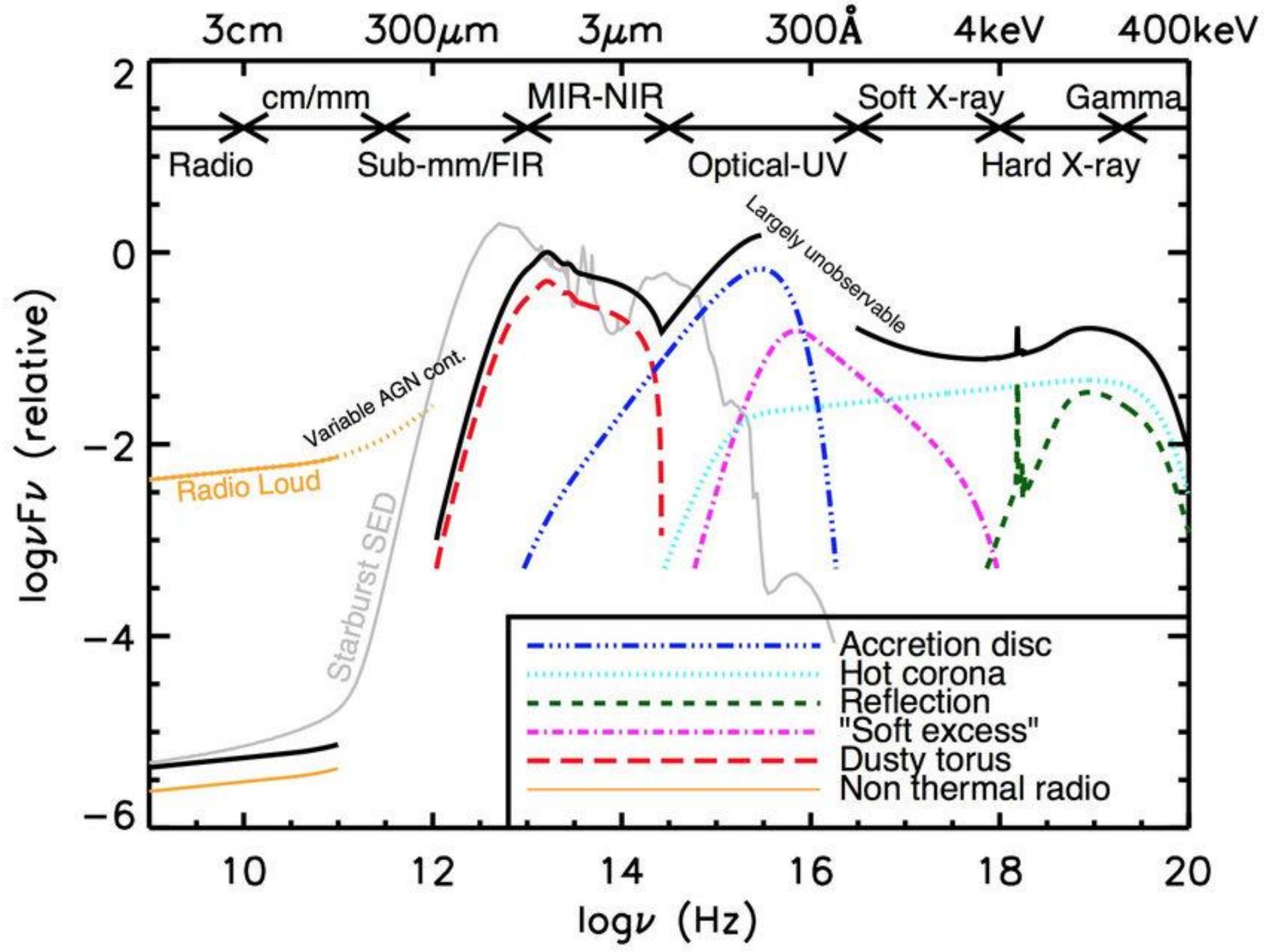
WFPC2



ACS/HRC

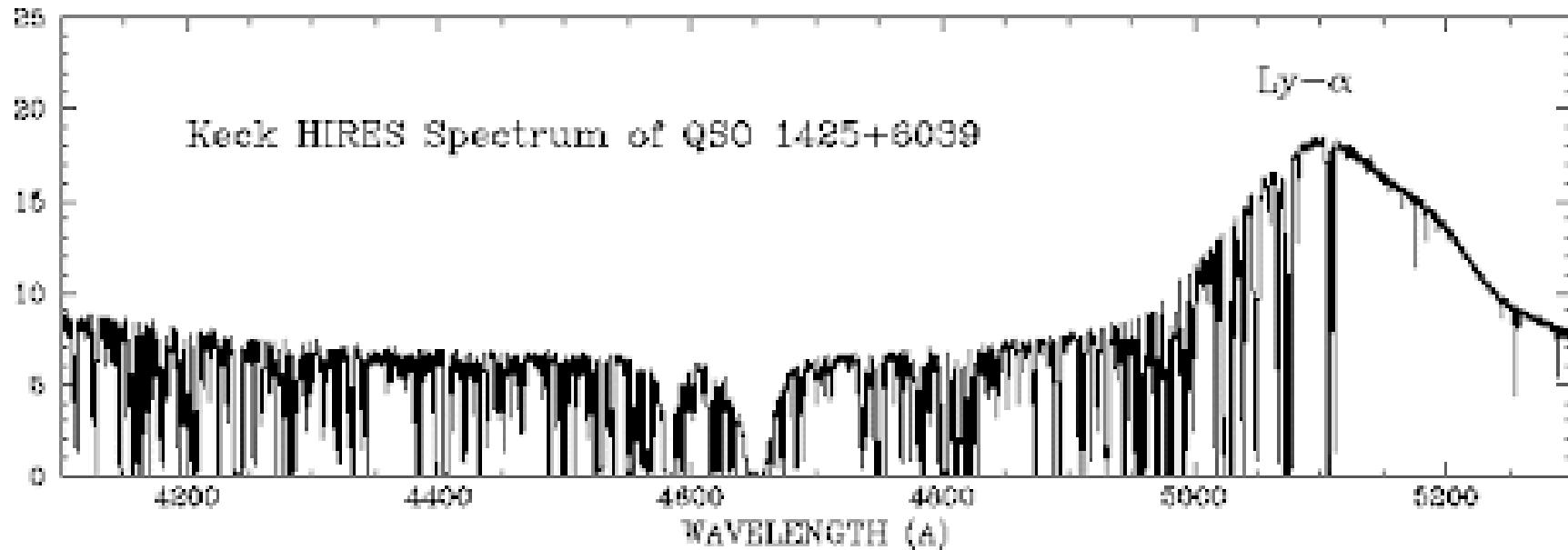
# Les quasars

- Très brillants: magnitudes absolue  $M < -22$  (des fois  $M \sim -30$ ) pour comparaison  $M_\odot = 5$ , et  $M_{\text{voie lactée}} = -20,5$ 
  - > les quasars sont aussi brillants qu'une galaxie entière
- Très bleus: processus de rayonnement très énergétique
- Rayonnement depuis les rayons gammas jusqu'aux ondes radio
  - > plusieurs processus de rayonnement
- Spectre continu et de raies
- Raies larges -> rotation rapide
- Variabilité photométrique importante et rapide
- Décalage vers le rouge très important

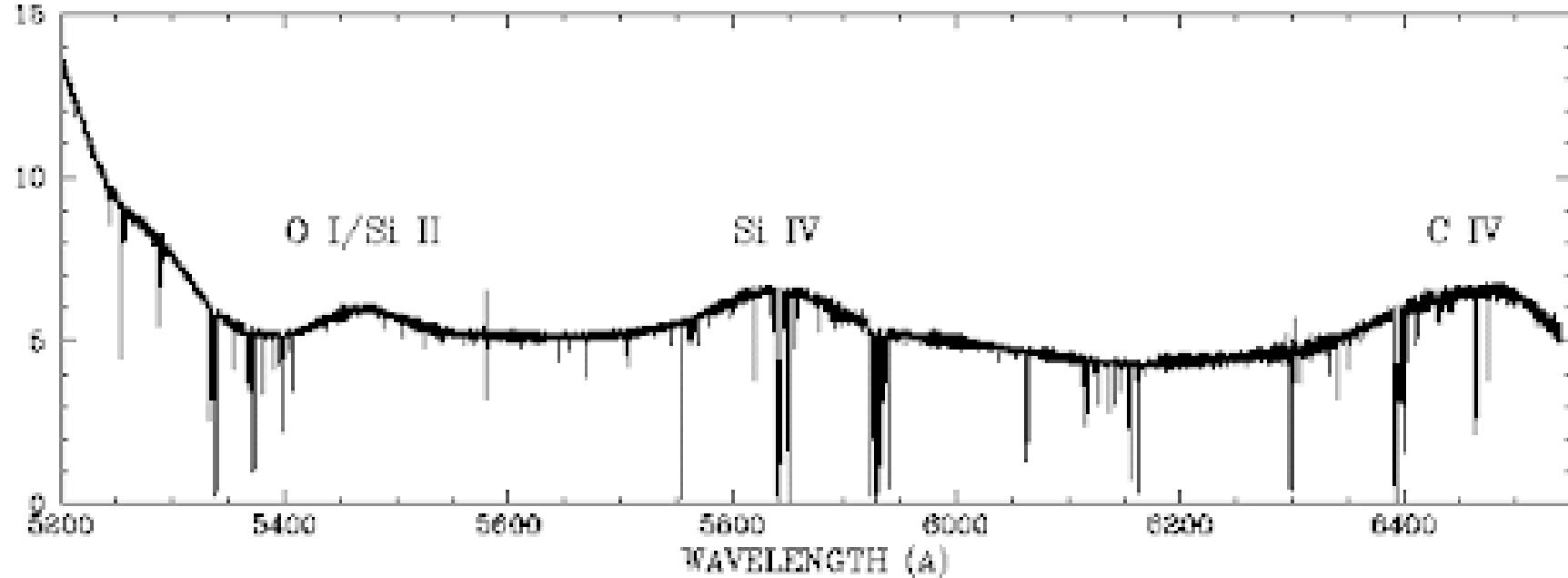


# Forêt de Lyman (absorption par l'Hydrogène sur la ligne de visée)

RELATIVE INTENSITY

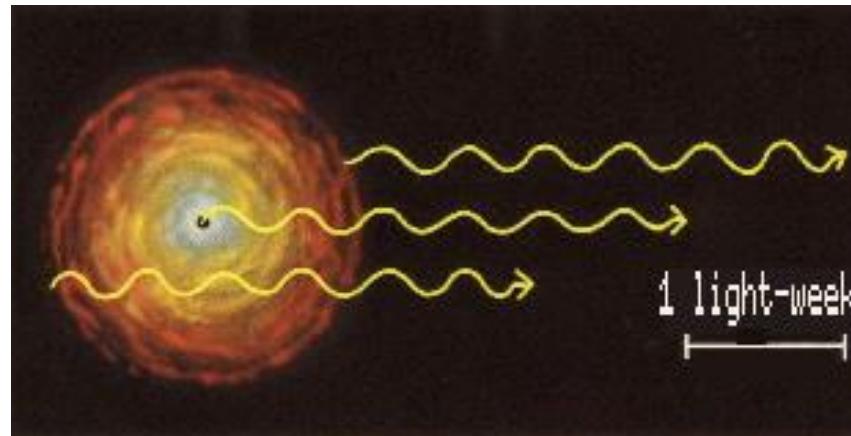


RELATIVE INTENSITY



# Les quasars

Estimation de la taille de la région émettant le spectre continu d'après l'échelle caractéristique de variabilité photométrique (courbe de lumière) sur quelques jours.



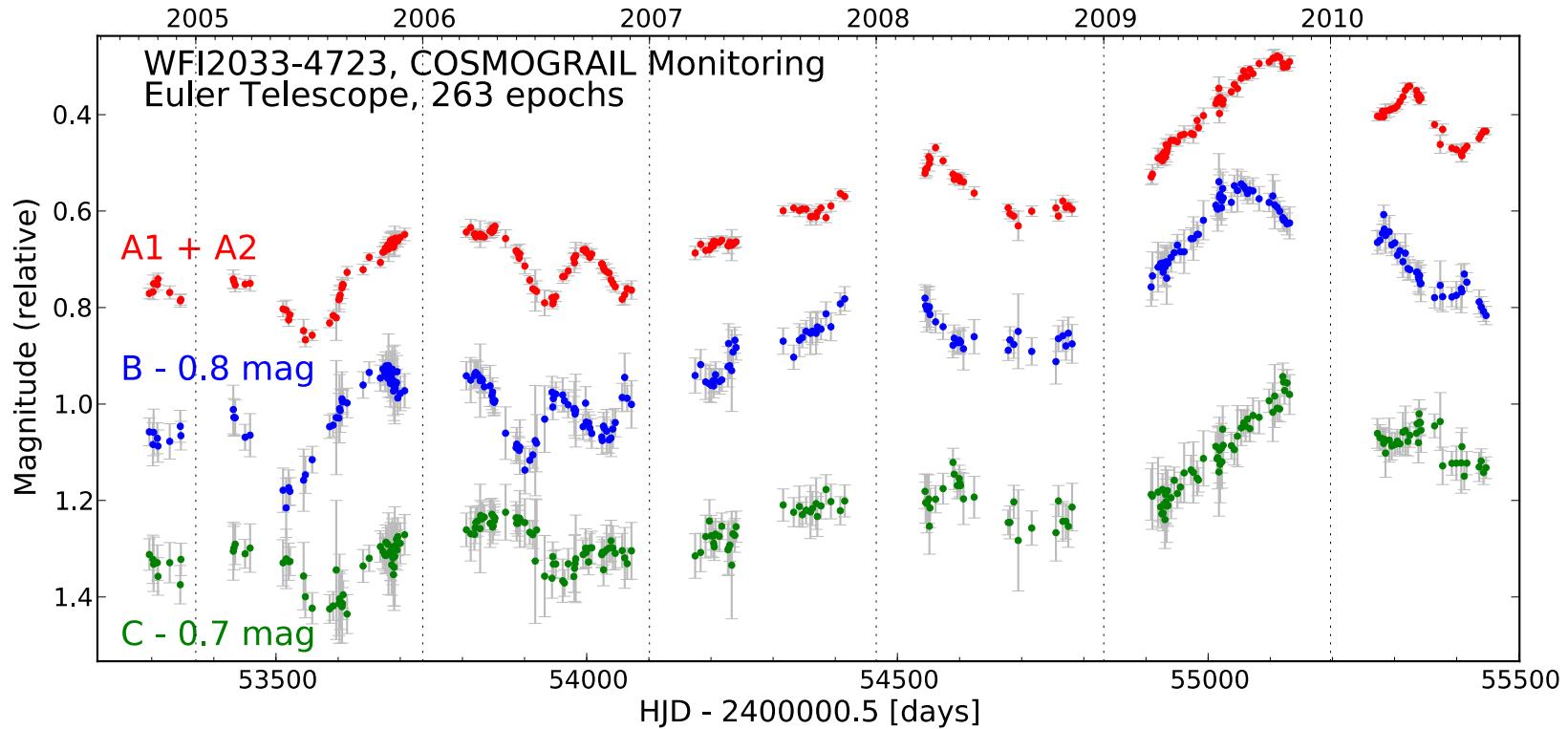
Si toute la zone d'émission montre les mêmes variations photométriques simultanément.

Le signal lumineux venant différents endroits de la région est vu par l'observateur avec un délai qui dépend de sa taille

-> taille caractéristique ~ quelques jours lumière

# Les quasars

## Exemple de courbe de lumière



# Les quasars

Source de rayonnement dans les quasars:

-> accrétion de matière sur un trou noir supermassif  
(partie continue du spectre)

Trou noir supermassif:  $M \sim 10^6 - 10^{10} M_\odot$

Différent d'une étoile à neutron, qui aurait  $M \sim 10 M_\odot$  !

# Les quasars: source d'énergie

Pourquoi un trou noir ?

La luminosité d'un quasar est de l'ordre de  $L = 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$

Même si le quasar ne « brûle que » pendant  $10^8$  ans l'énergie totale libérée est de  $E = 10^{63} \text{ erg}$  !

Par fusion de l'hydrogène on produit  $E = kMc^2$  si  $M$  est la masse totale de combustible.

$k$  -> efficacité des réactions nucléaires dans les étoiles  $\sim 0.008$ , au mieux

$k$  est aussi l'énergie de liaison par nucléon, c'est à dire que  $0.008 m_p c^2$  est libérée à chaque fusion.

La masse totale à transformer en énergie serait  $M = E / kc^2$

$M = 2 \times 10^{11} M_\odot$  - la fusion de l'hydrogène ne peut pas expliquer la luminosité des quasars.

# Les quasars

Le rayon de Schwarzschild d'une masse est

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

->  $R_S = 3 \times 10^{16}$  cm  $\sim$  quelques semaines lumière

Le rayon de Schwarzschild est comparable (voire même plus grand que) à la taille physique de la zone d'émission  
=> aucun rayonnement ne devrait sortir.

Donc, soit:

1.  $R_S$  est surestimé (et donc  $M$ )
2. l'efficacité  $k$  du phénomène à l'origine de l'émission est bien plus grande que celle de la fusion nucléaire  
=> l'accrétion de matière a  $0,06 < k < 0,30$

# Les quasars

La source d'énergie principale des quasars est l'accrétion de matière dont le spectre est une loi de puissance:

$$F_\nu = \nu^{-\alpha}$$

qui correspond au spectre continu observé et qui est compatible avec la variabilité observée.

La température au centre du disque est plus élevée qu'aux bords  
-> rayonnement plus bleu au centre qu'aux bords.

L'efficacité  $k$  dépend de la rotation du trou noir. Elle atteint un maximum à  $k \sim 0,3$  après quoi le trou noir est détruit.

# Les quasars et luminosité d'Eddington

Il existe une limite à la luminosité des quasars, lorsque la pression de radiation du rayonnement sortant compense la gravité

$$F_{\text{rad}} = F_{\text{grav}}$$

Le gaz est totalement ionisé  $\rightarrow$  plasma donc les électrons subissent la pression de radiation et les protons aussi, par réaction.

Quantité de mouvement  $p = E/c$  des photons transférée aux électrons après pondération par la section efficace de Thompson,  $\sigma_T$

$$\sigma_T \frac{L}{4\pi r^2 c} = \frac{GMm_p}{r^2}$$

$$L_{\text{edd}} = \frac{4\pi G c m_p}{\sigma_T} M$$

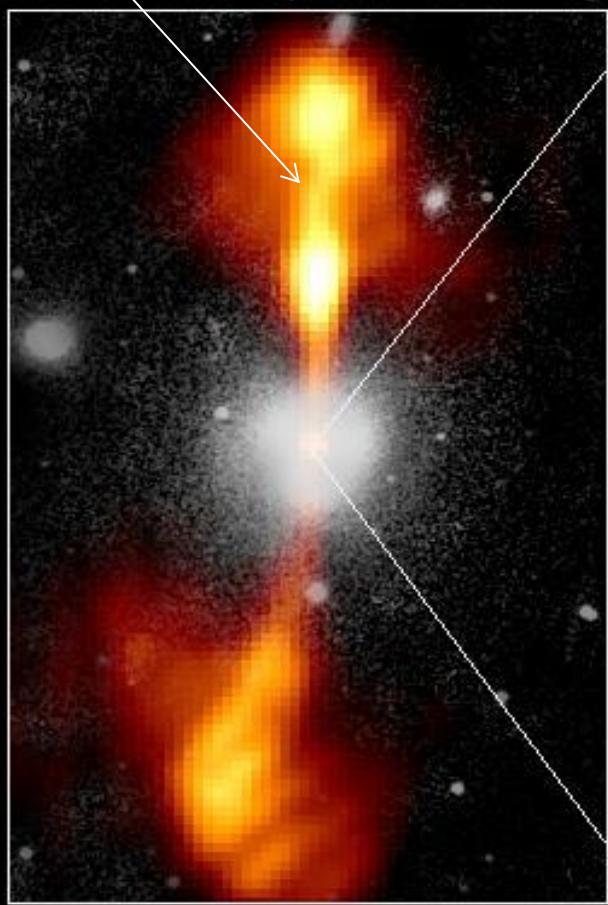
$$\begin{aligned} L_{\text{Edd}} &= \frac{4\pi G M m_p c}{\sigma_T} \\ &\cong 1.26 \times 10^{31} \left( \frac{M}{M_\odot} \right) \text{W} = 1.26 \times 10^{38} \left( \frac{M}{M_\odot} \right) \text{erg/s} = 3.2 \times 10^4 \left( \frac{M}{M_\odot} \right) L_\odot \end{aligned}$$

# Core of Galaxy NGC 4261

Emission synchrotron  
radio à grande échelle

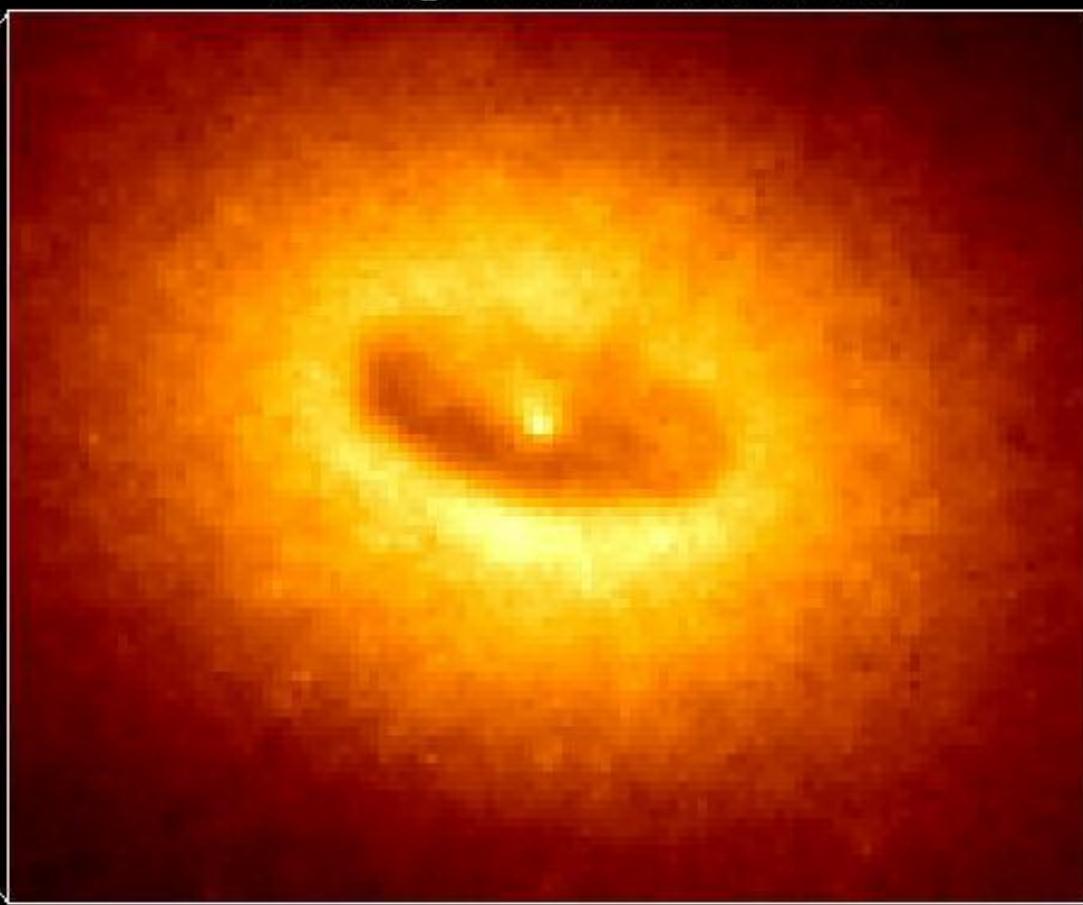
Hubble Space Telescope  
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image



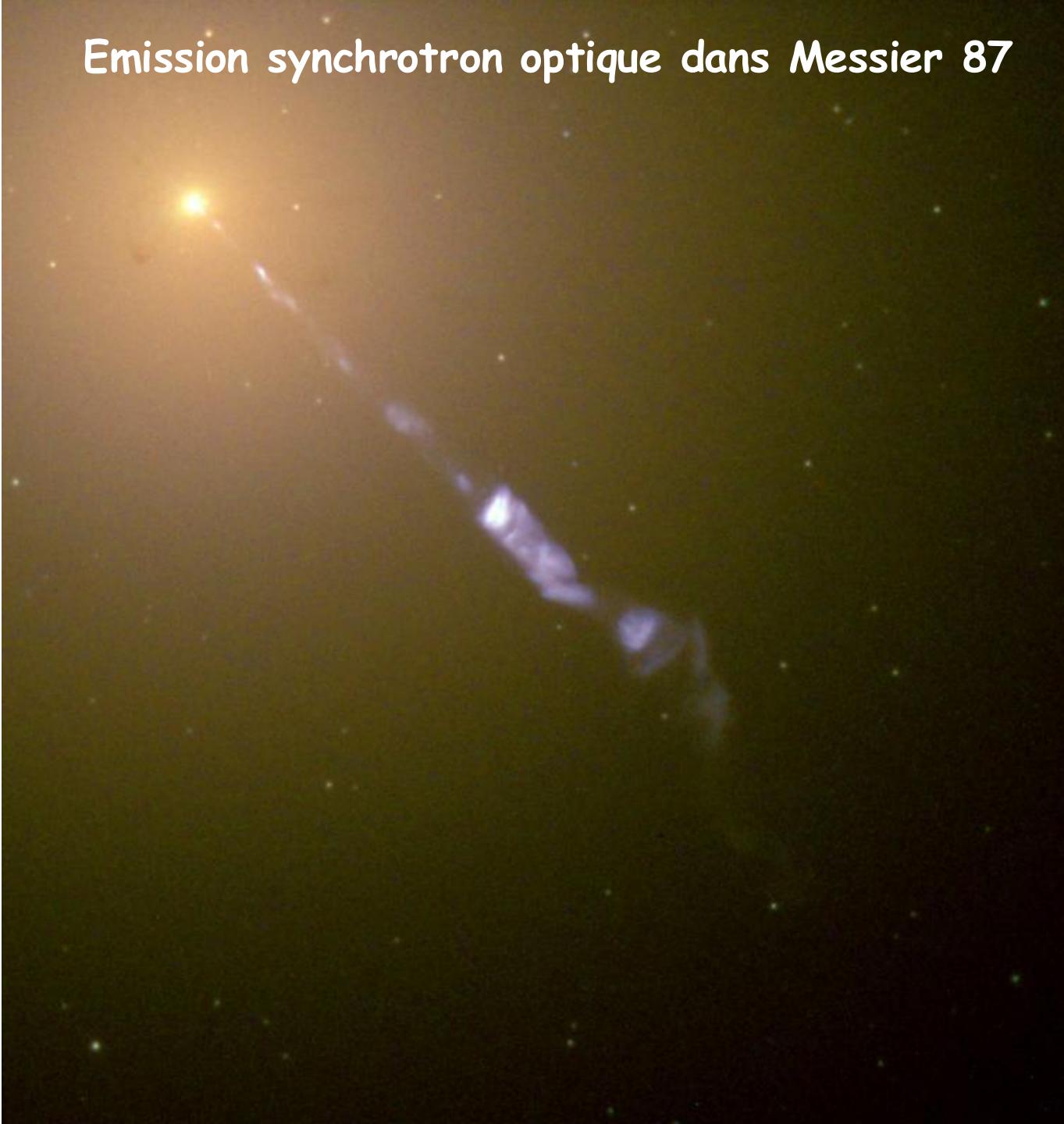
380 Arc Seconds  
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



1.7 Arc Seconds  
400 LIGHTYEARS

# Emission synchrotron optique dans Messier 87



# Les quasars: modèles « unifiés »

Très grande diversité de quasars:

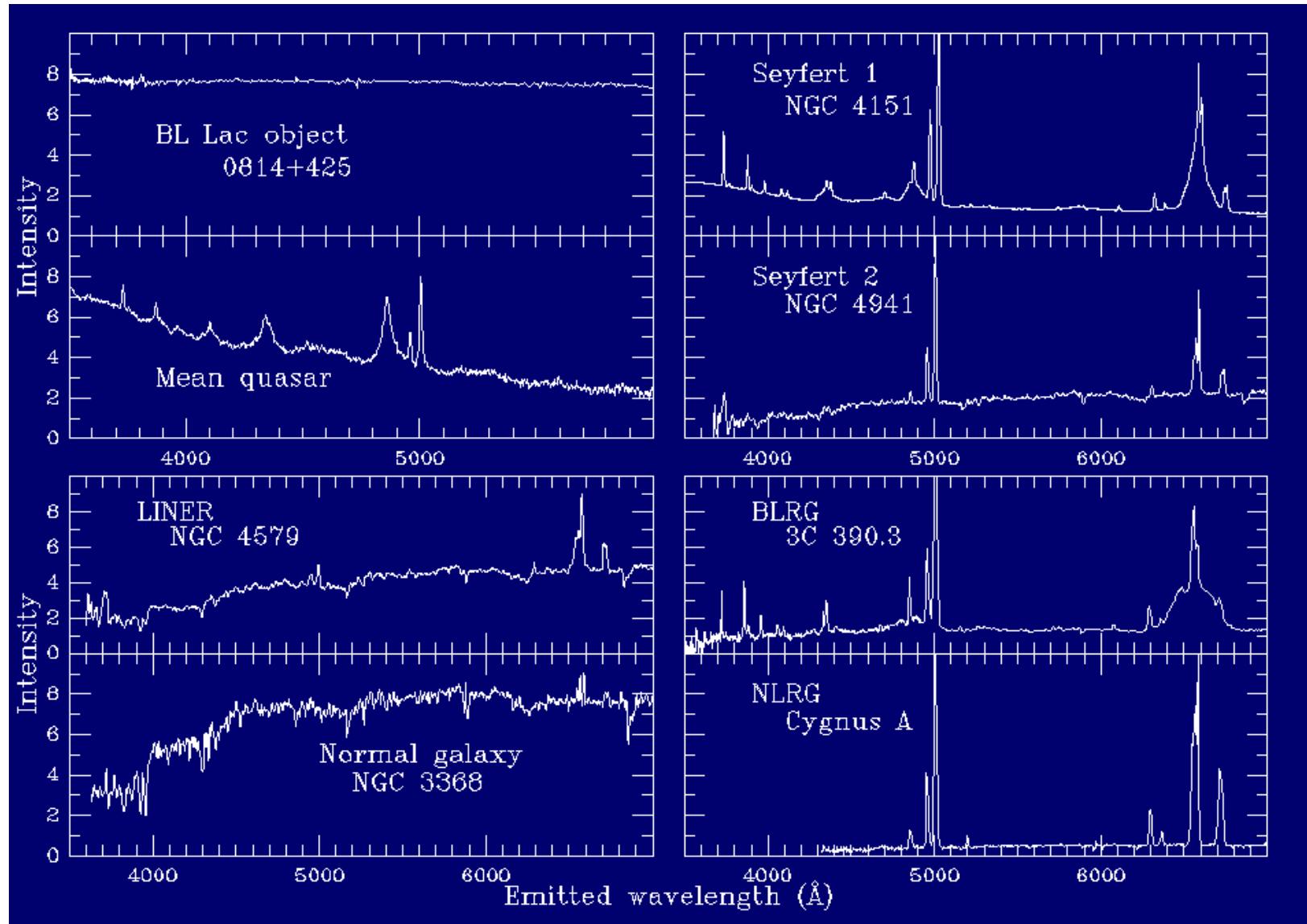
- certains ont des raies larges
- certains ont des raies étroites
- certains n'émettent qu'en radio
- certains sont très rouges

-> 1 seul modèle pour expliquer tout:

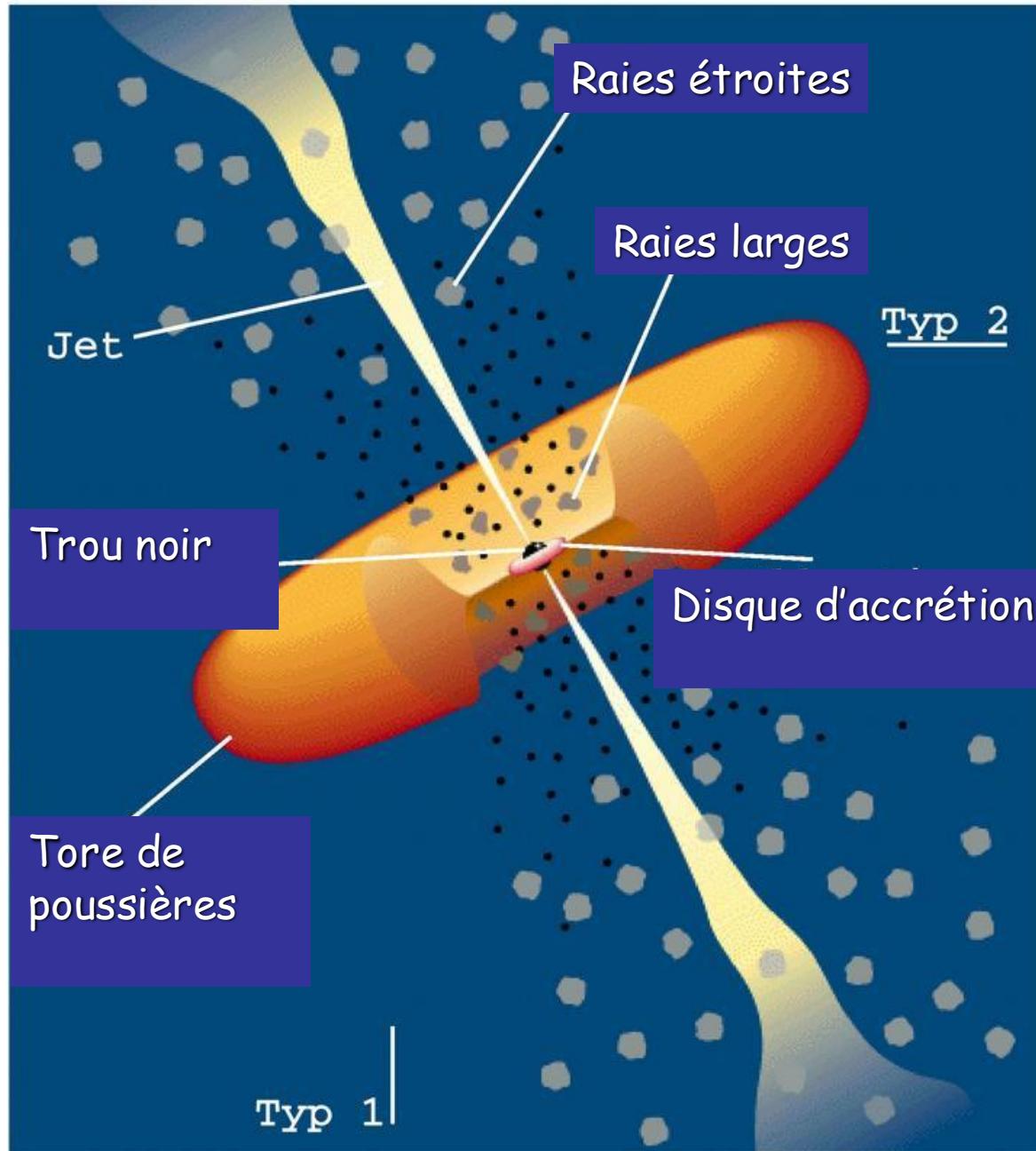
Les différences entre quasars ne sont que des effets d'orientation

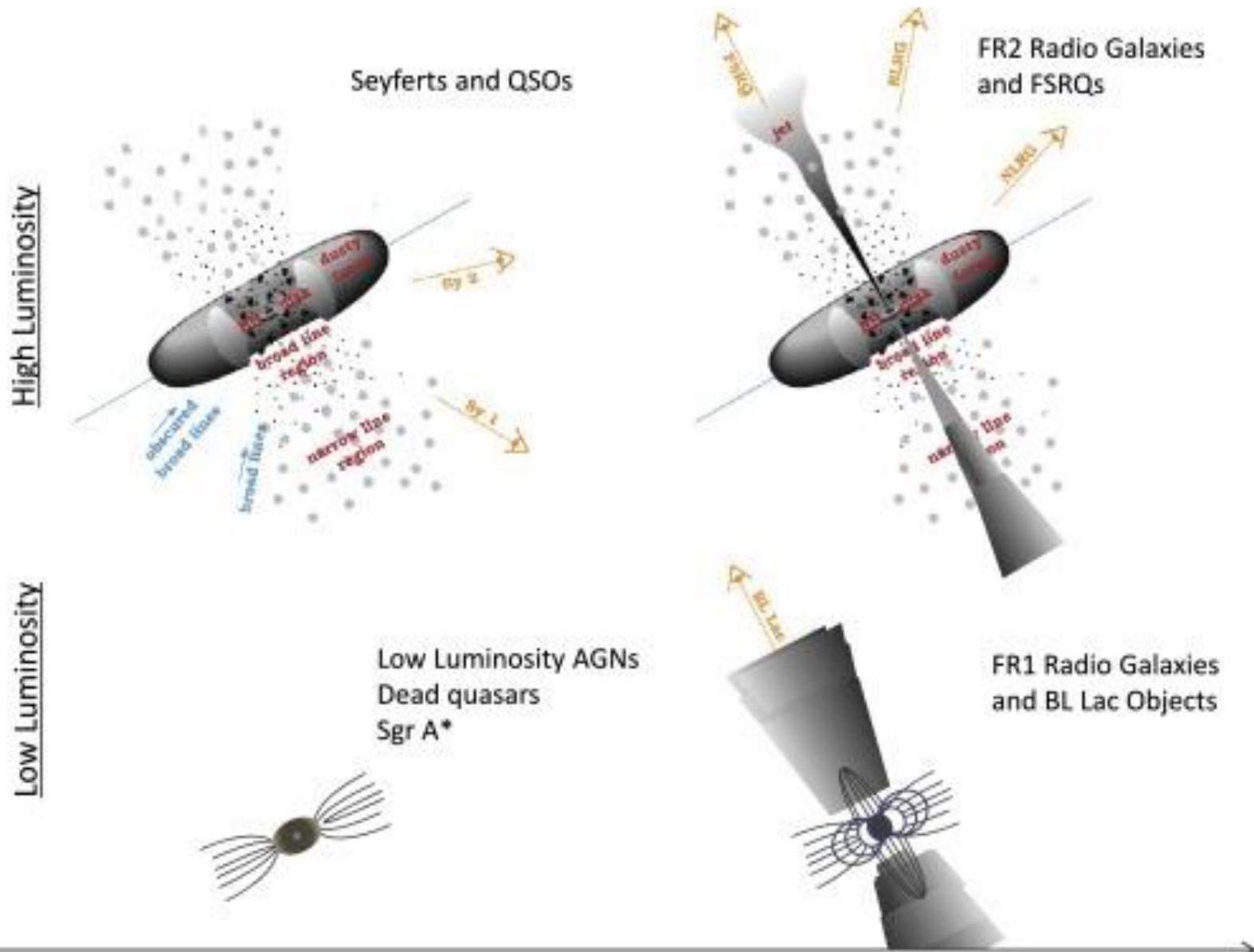
# Les quasars: modèles « unifiés »

## Exemples de spectres optiques de quasars



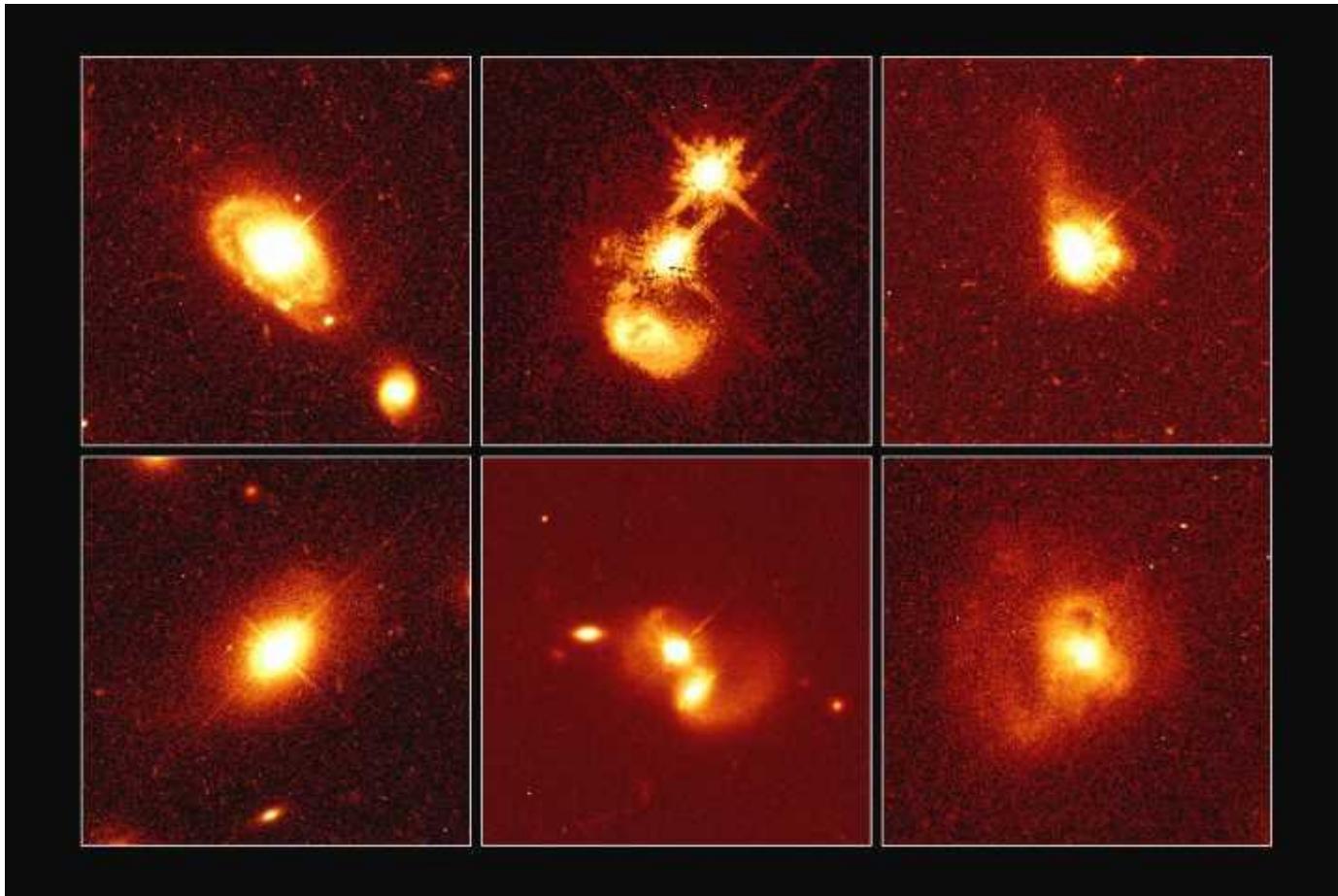
# Les quasars: modèles « unifiés »





# Les quasars

Galaxies « hôtes » de quasars de tous les types morphologiques



Quasars souvent associés aux collisions entre galaxies

# Chapitre 12

# Cosmologie

# Cosmologie

## Faits observationnels:

- Le ciel est noir la nuit !
- La distribution des galaxies est uniforme, sur de grandes échelles angulaires
- On observe un rayonnement fossile à  $T=2,73$  K, isotrope, avec de faibles oscillations  $\Delta T/T \sim 10^{-5}$
- Le spectre du rayonnement de corps noir cosmologique est en parfait accord avec la théorie (du Big Bang)
- La quasi-totalité des galaxies s'éloigne de nous
- Les étoiles les plus vieilles ont un âge de 13,2 milliards d'années

# Cosmologie

## Le ciel est noir: paradoxe d'Olber

Si l'univers était infini, statique, et contenait une infinité d'étoiles, le ciel devrait être lumineux la nuit.

Ce n'est pas le cas donc l'une des hypothèses, au moins, est fausse.



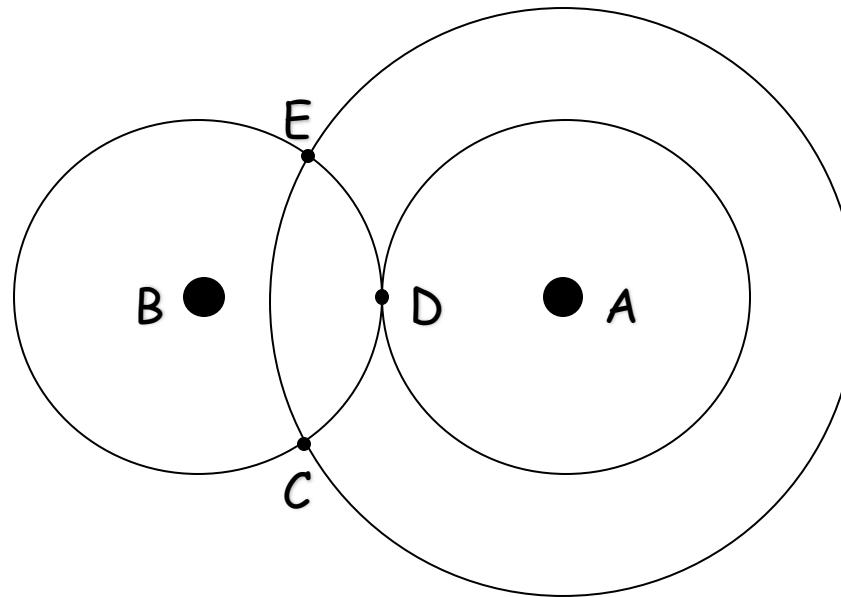
# Cosmologie

Le ciel est noir: paradoxe d'Olber

- L'Univers n'est pas statique
- Le décalage vers le rouge fait « sortir » une partie du rayonnement du domaine visible
- Les étoiles ne sont pas en nombre infini
- Les étoiles ont un temps de vie fini

# Cosmologie

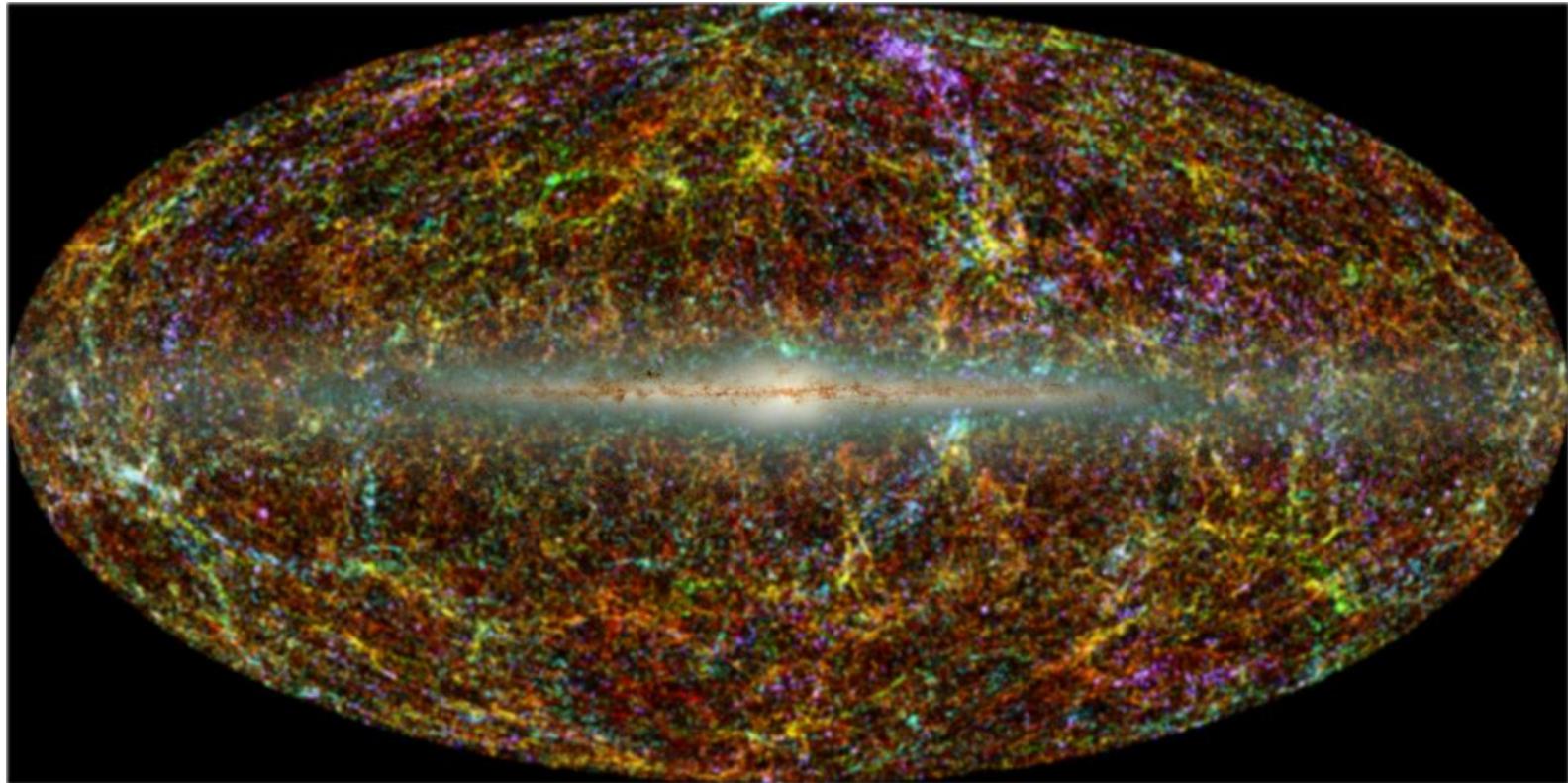
L'Univers est isotrope en tout point, et de ce fait, homogène: c'est le principe cosmologique



Si l'Univers est isotrope autour de B, alors les densités de matière en C et D sont les mêmes. L'isotropie autour de A impose par ailleurs que les densités en C et E sont les mêmes, donc les densités en C, D et E sont les mêmes et l'Univers est homogène.

# Cosmologie

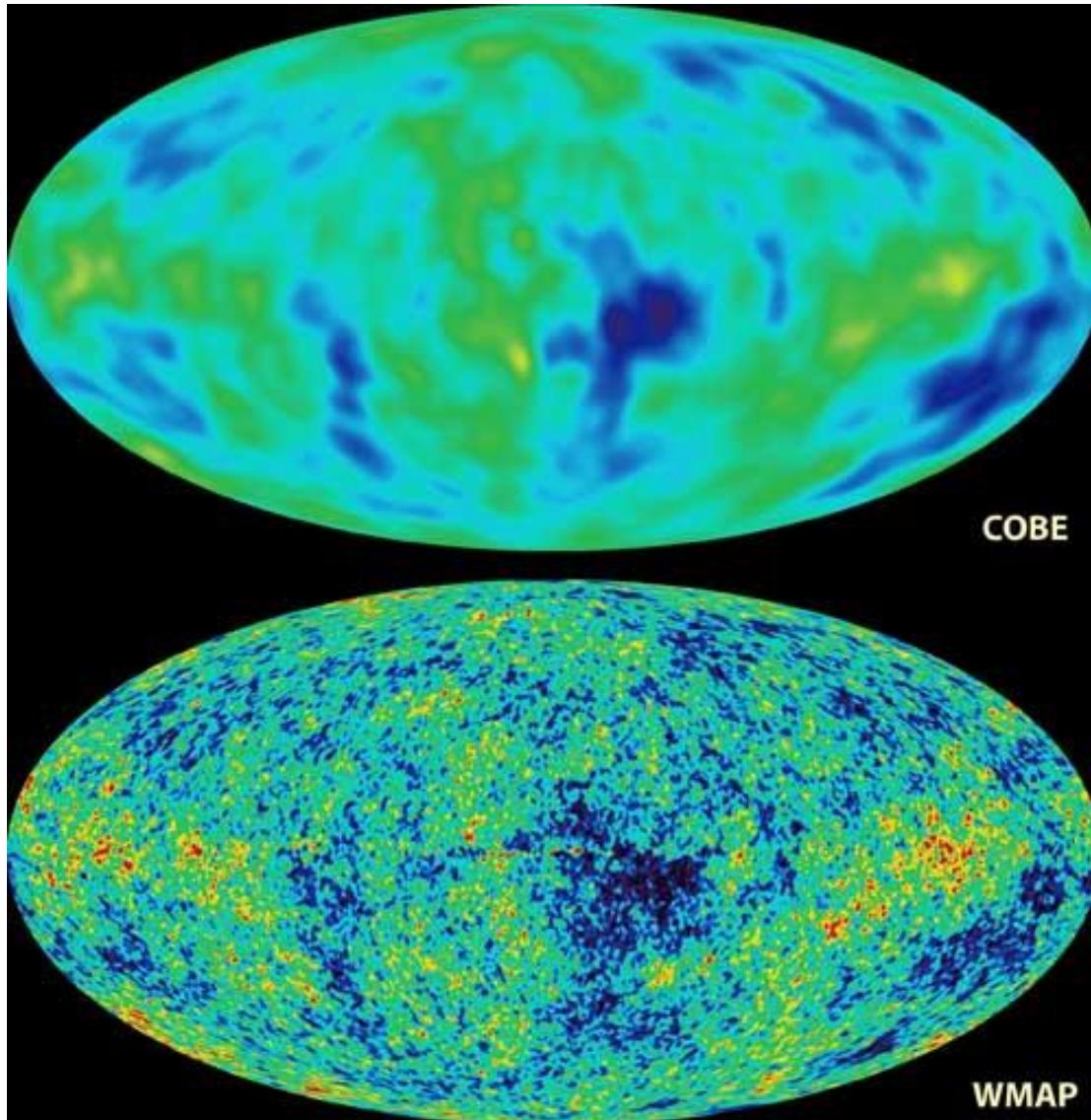
## Illustration de l'homogénéité



Carte infrarouge du ciel montrant une distribution uniforme des galaxies sur des échelles de plusieurs degrés. Sur des échelles inférieures, la distribution n'est pas du tout uniforme.

# Fond de rayonnement cosmologique

Inhomogénéités à petite échelle



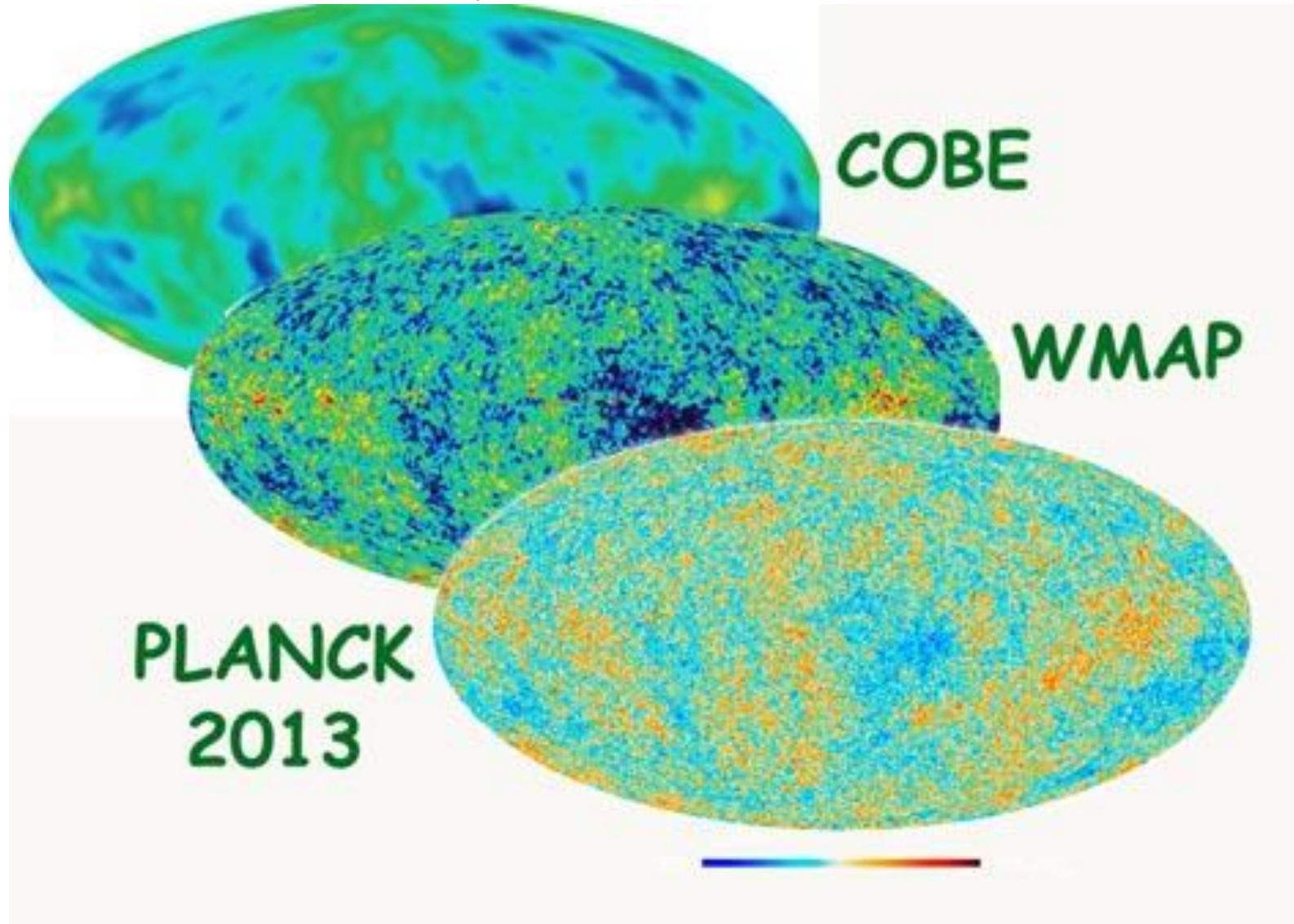
Wilkinson Microwave  
Anisotropy Probe,  
Spergel et al. 2006, 2009

Mesure des fluctuations  
de température

$$\Delta T/T \sim 10^{-5}$$

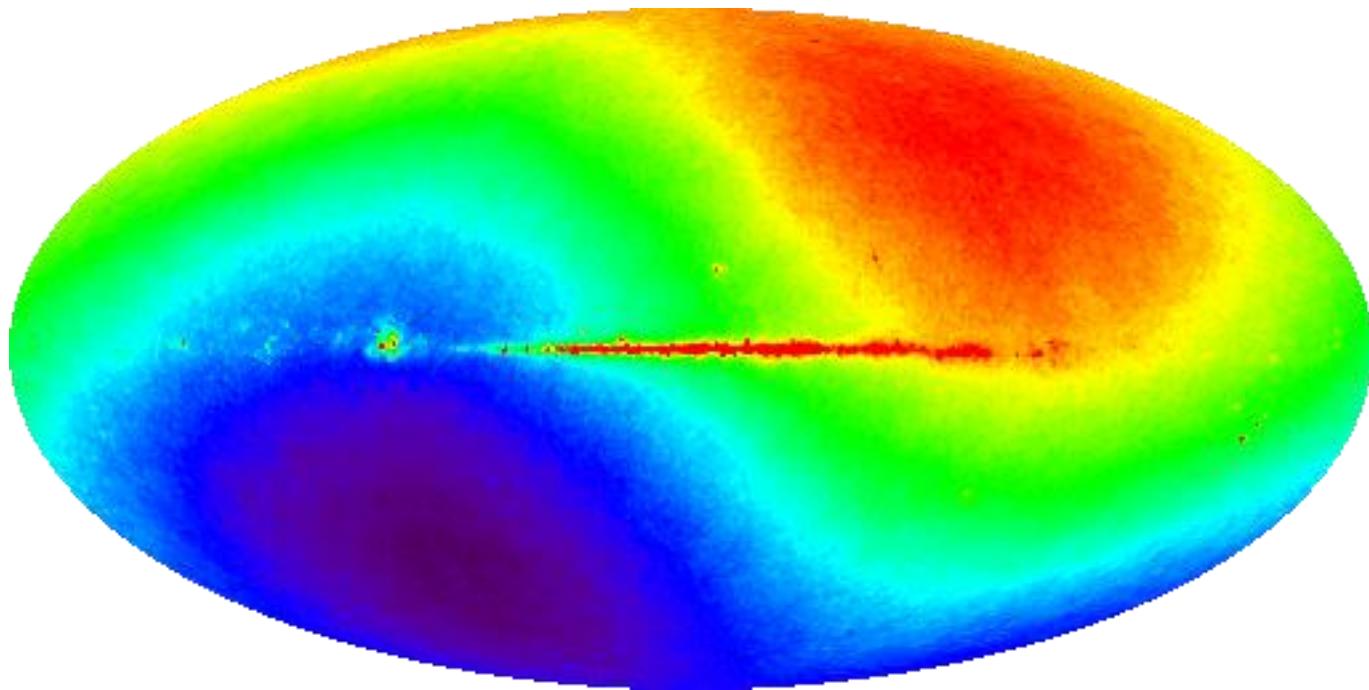
Rayonnement résiduel  
quand l'Univers avait  
seulement 380000 ans  
après le Big-Bang

# Fond de rayonnement cosmologique



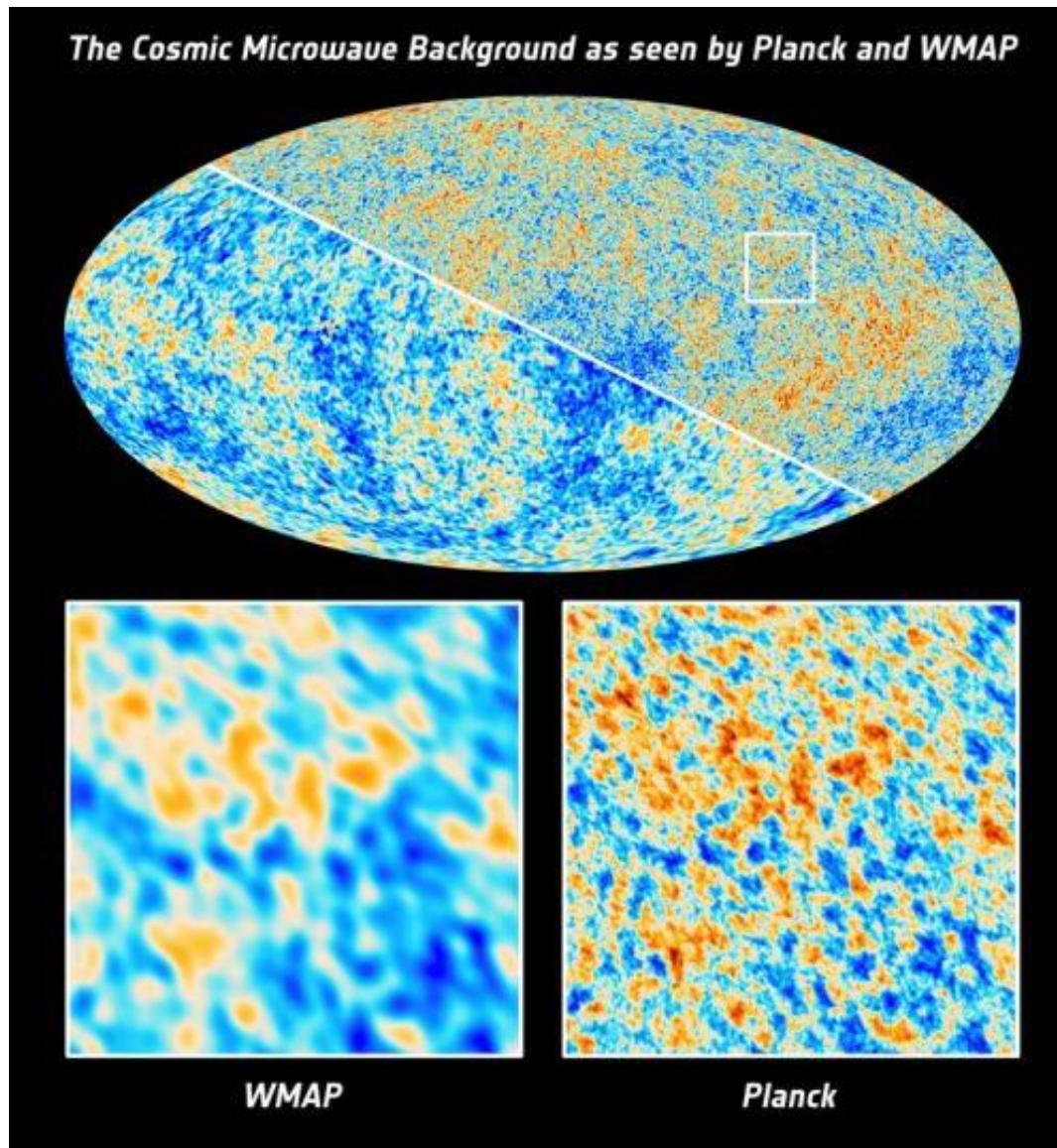
Carte du satellite Planck

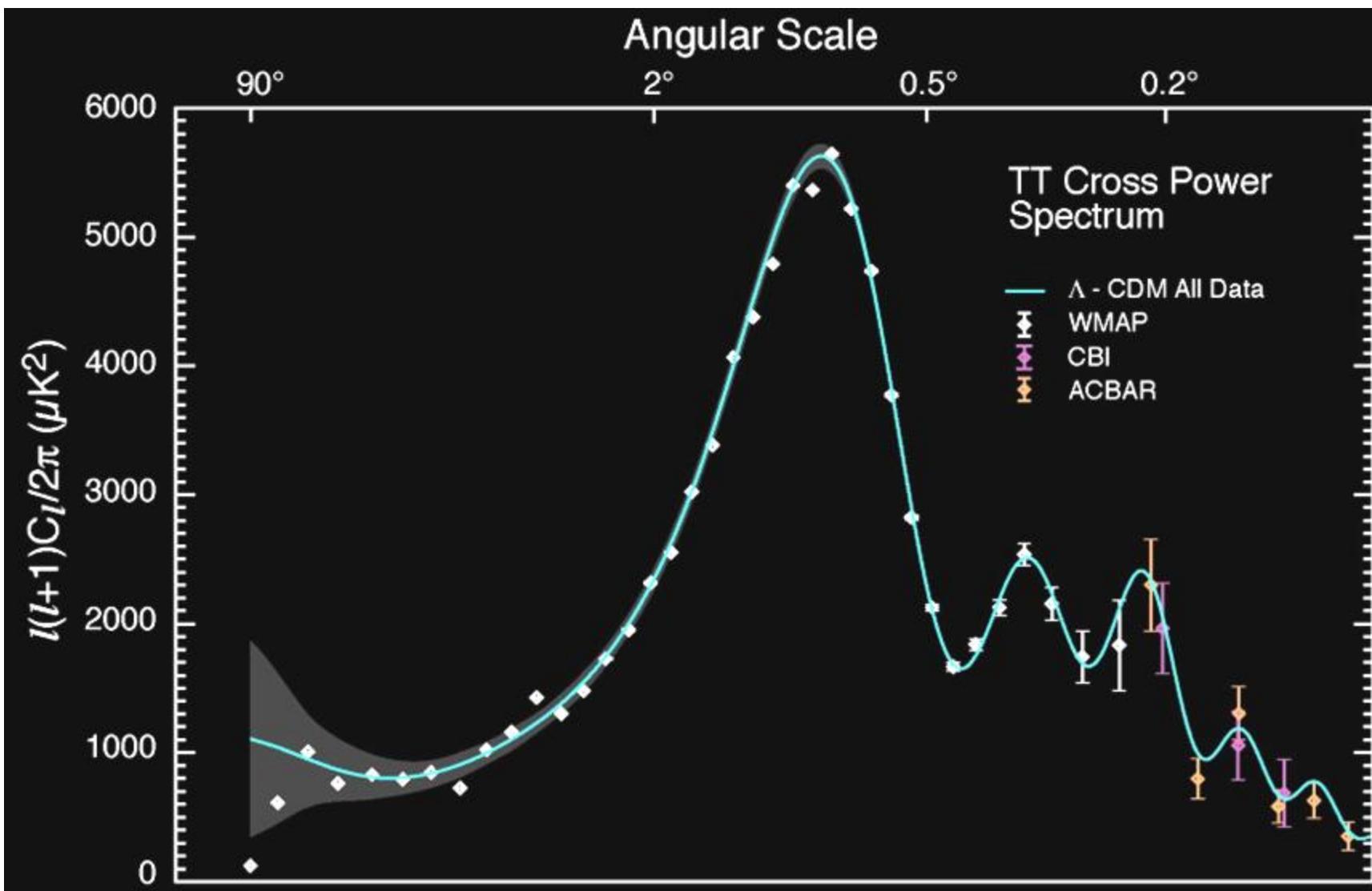
# Dipôle cosmologique reflétant le mouvement de la Voie Lactée



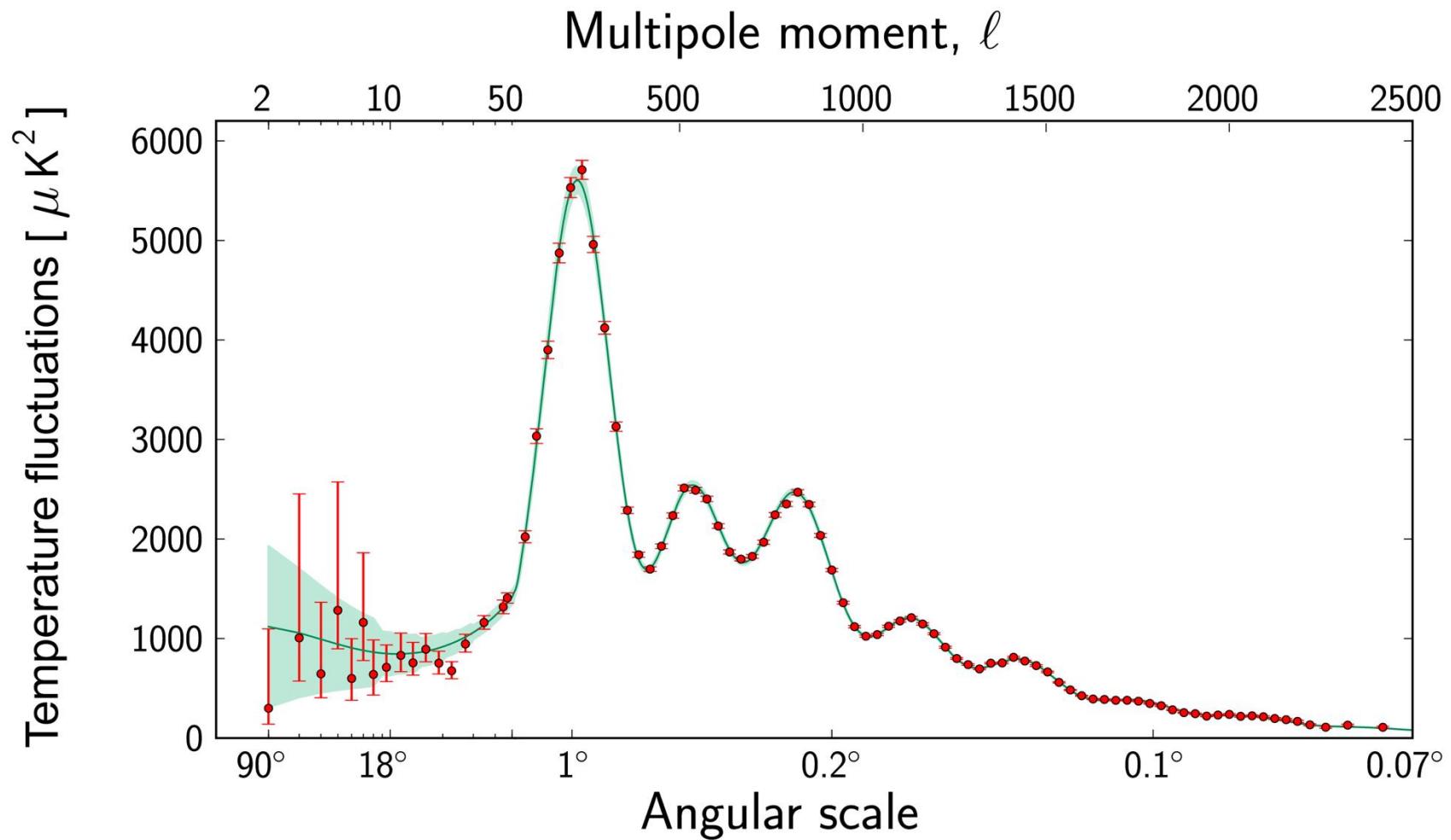
Carte du satellite Planck

# Fond de rayonnement cosmologique





# Derniers résultats de Planck (2018)



# Cosmologie

L'Univers est en expansion: Loi de Hubble-Lemaître, 1929



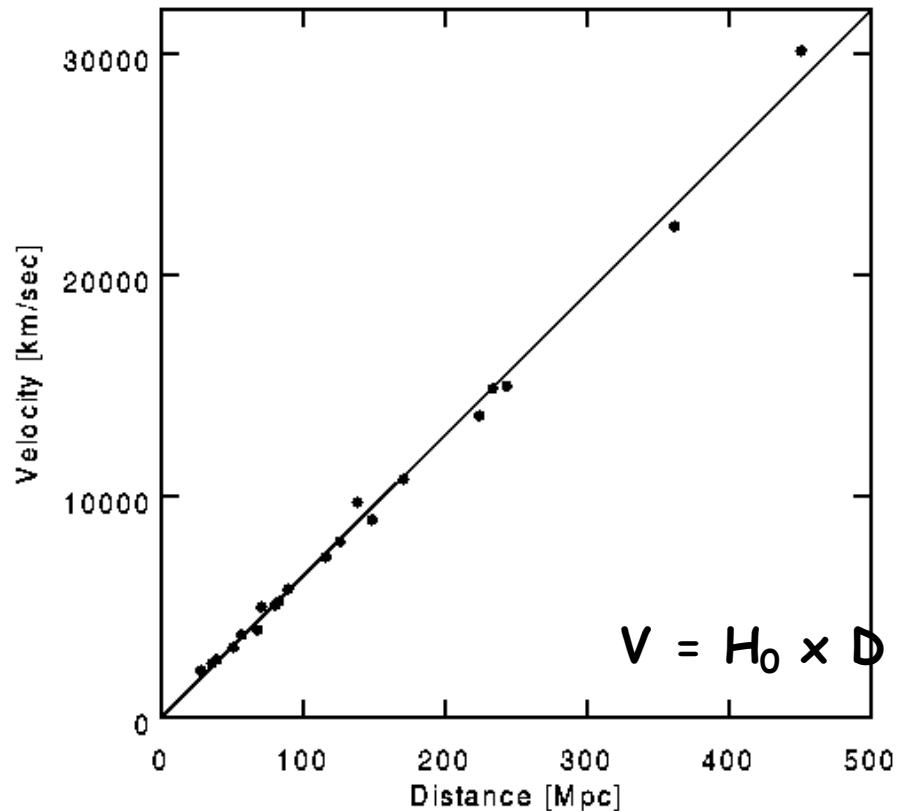
Loi linéaire entre la  
distance et la vitesse  
de fuite des galaxies

Edwin Hubble (1889-1953)

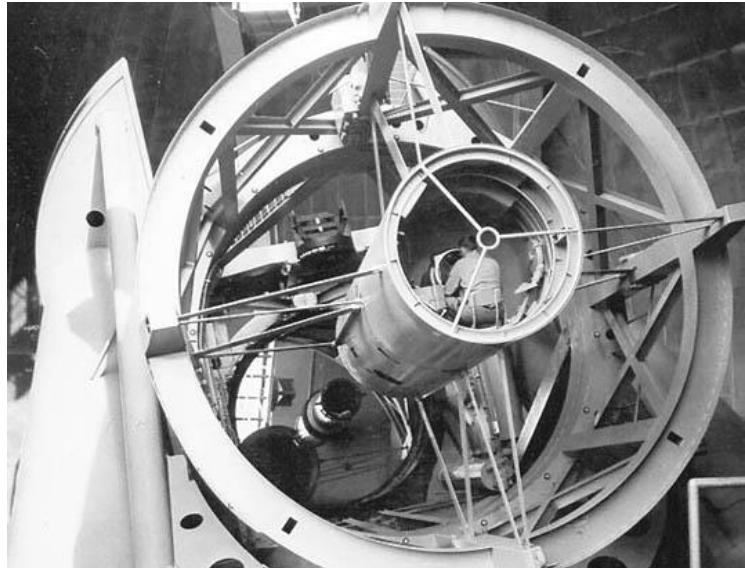
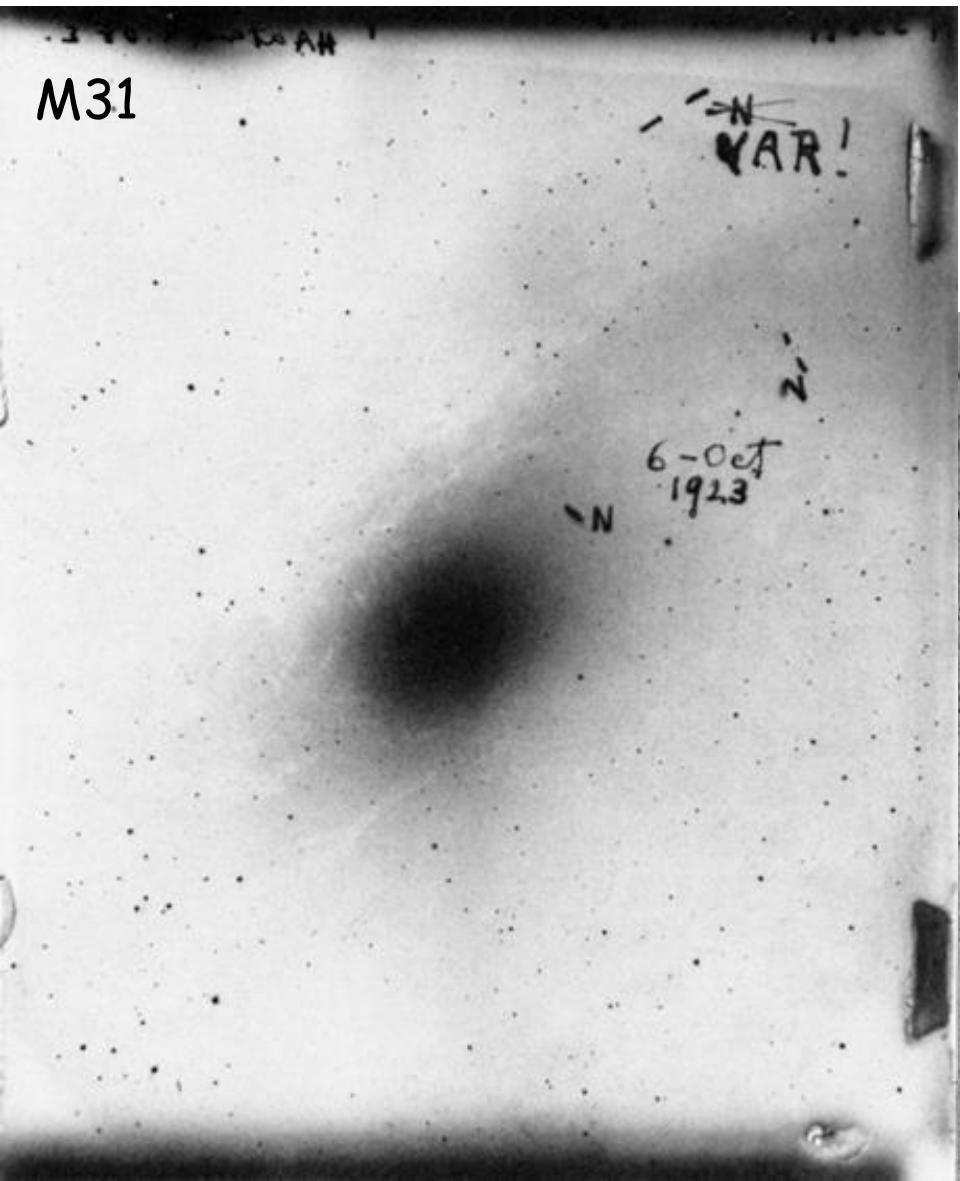


Relation  
Période-luminosité  
Pour les Chépheides

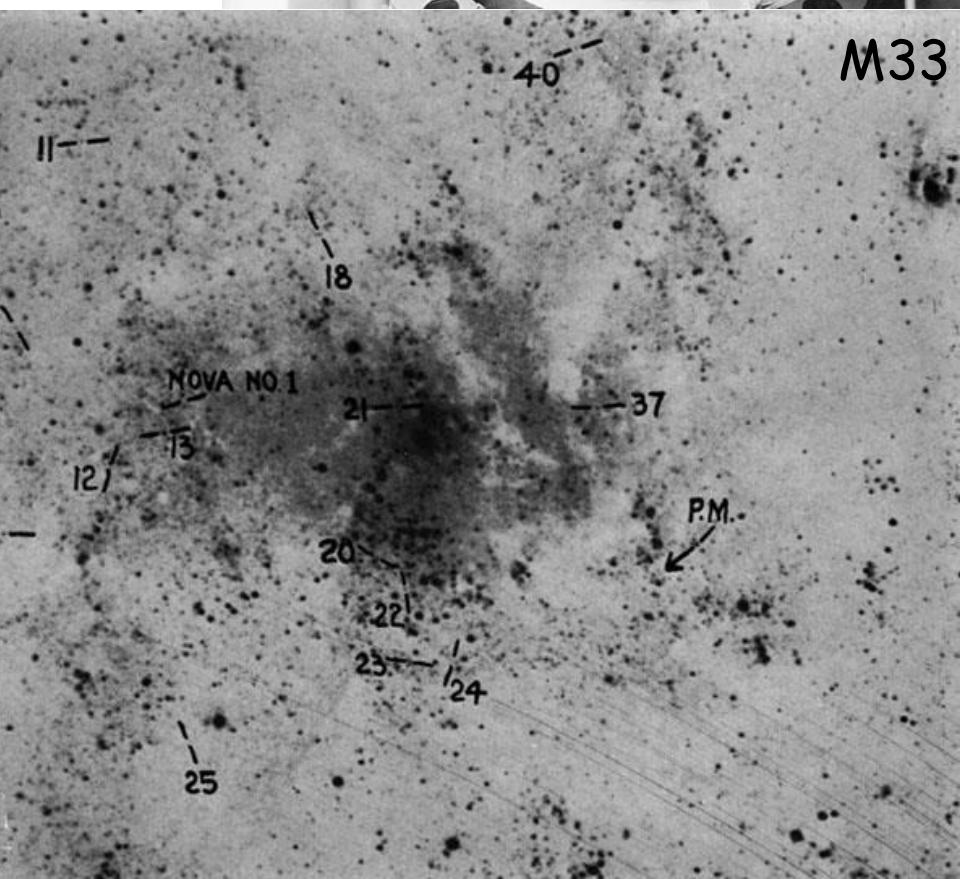
Henrietta Leavitt (1868-1921)



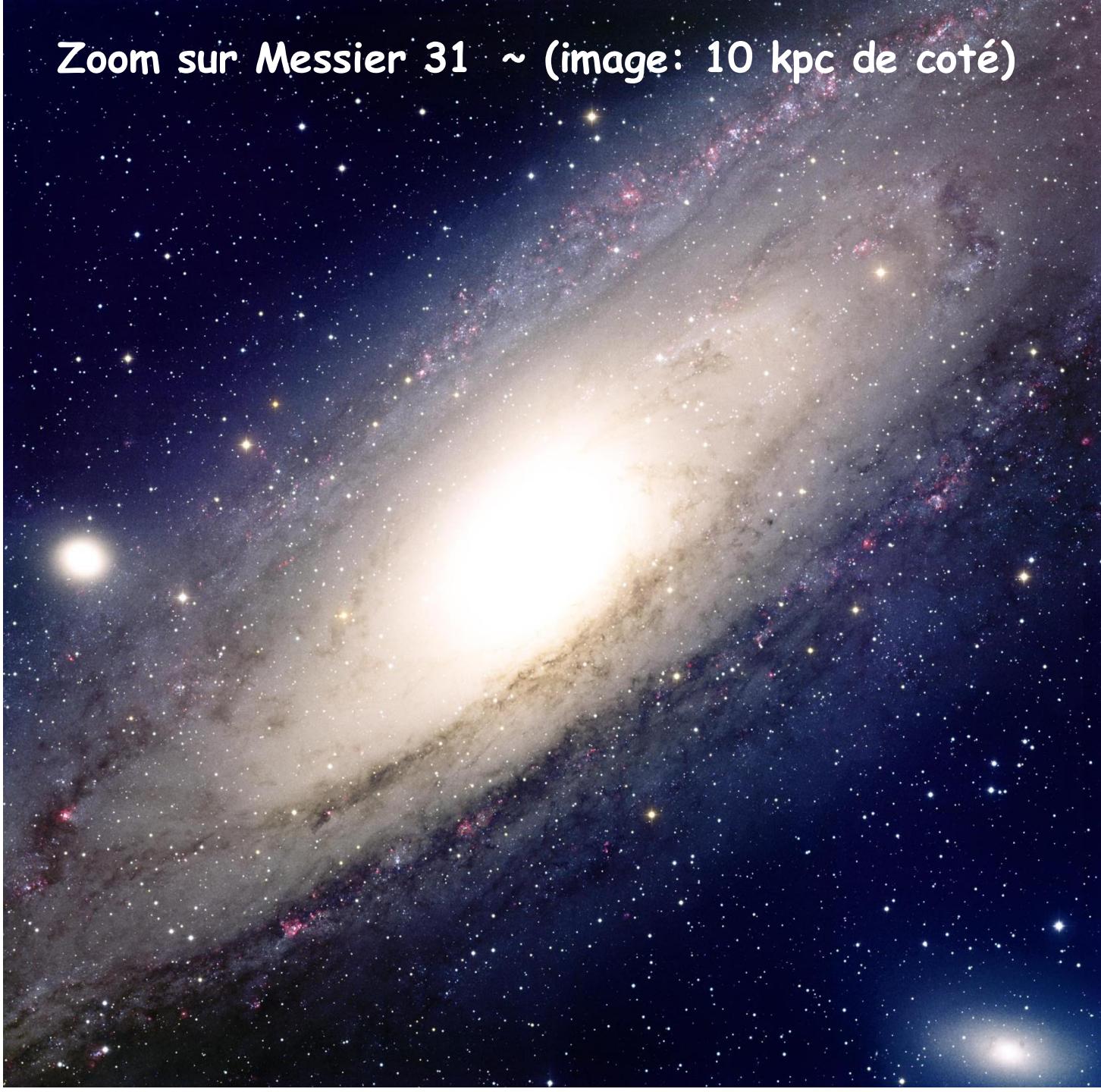
M31



M33

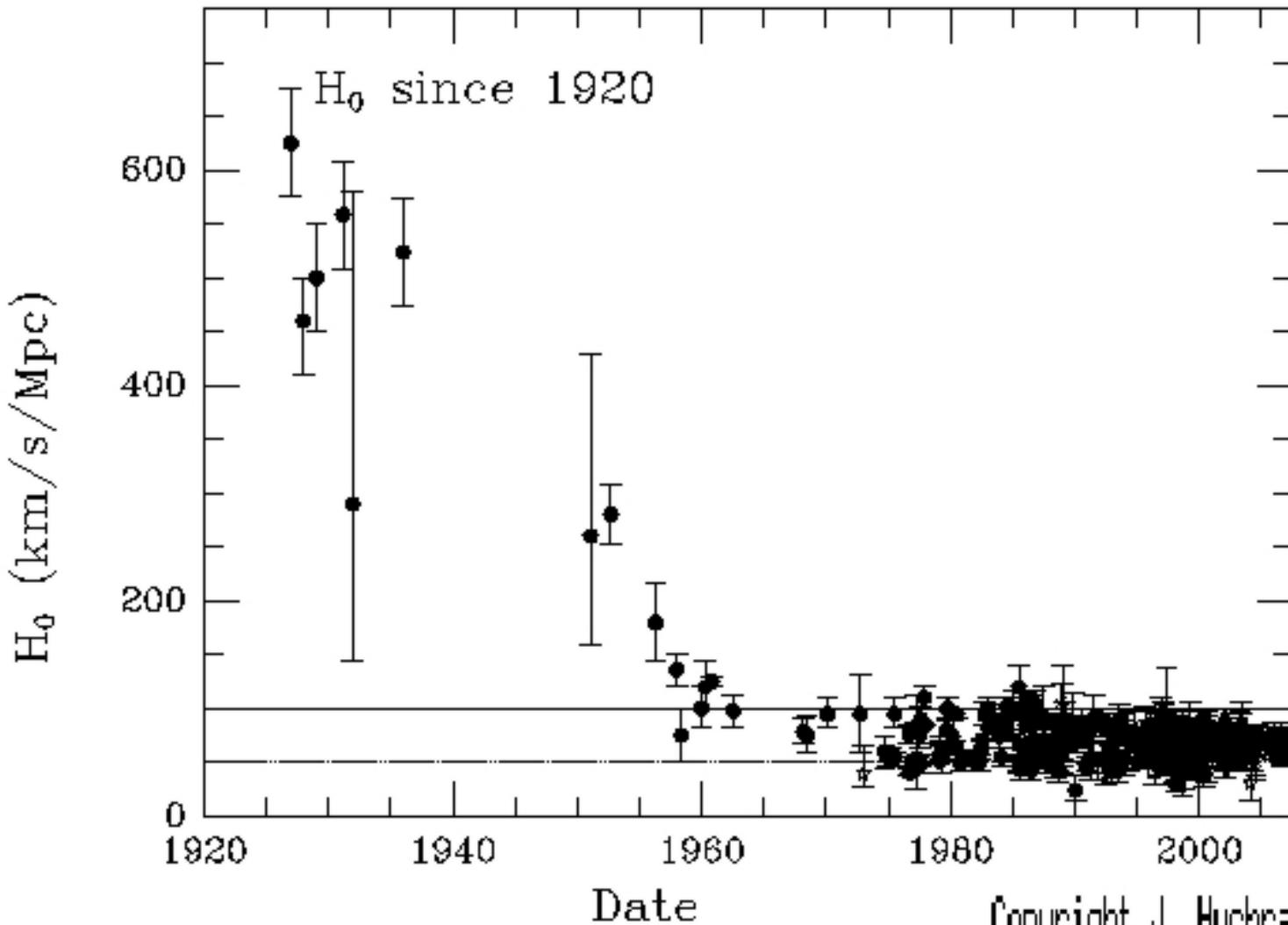


Zoom sur Messier 31 ~ (image: 10 kpc de coté)



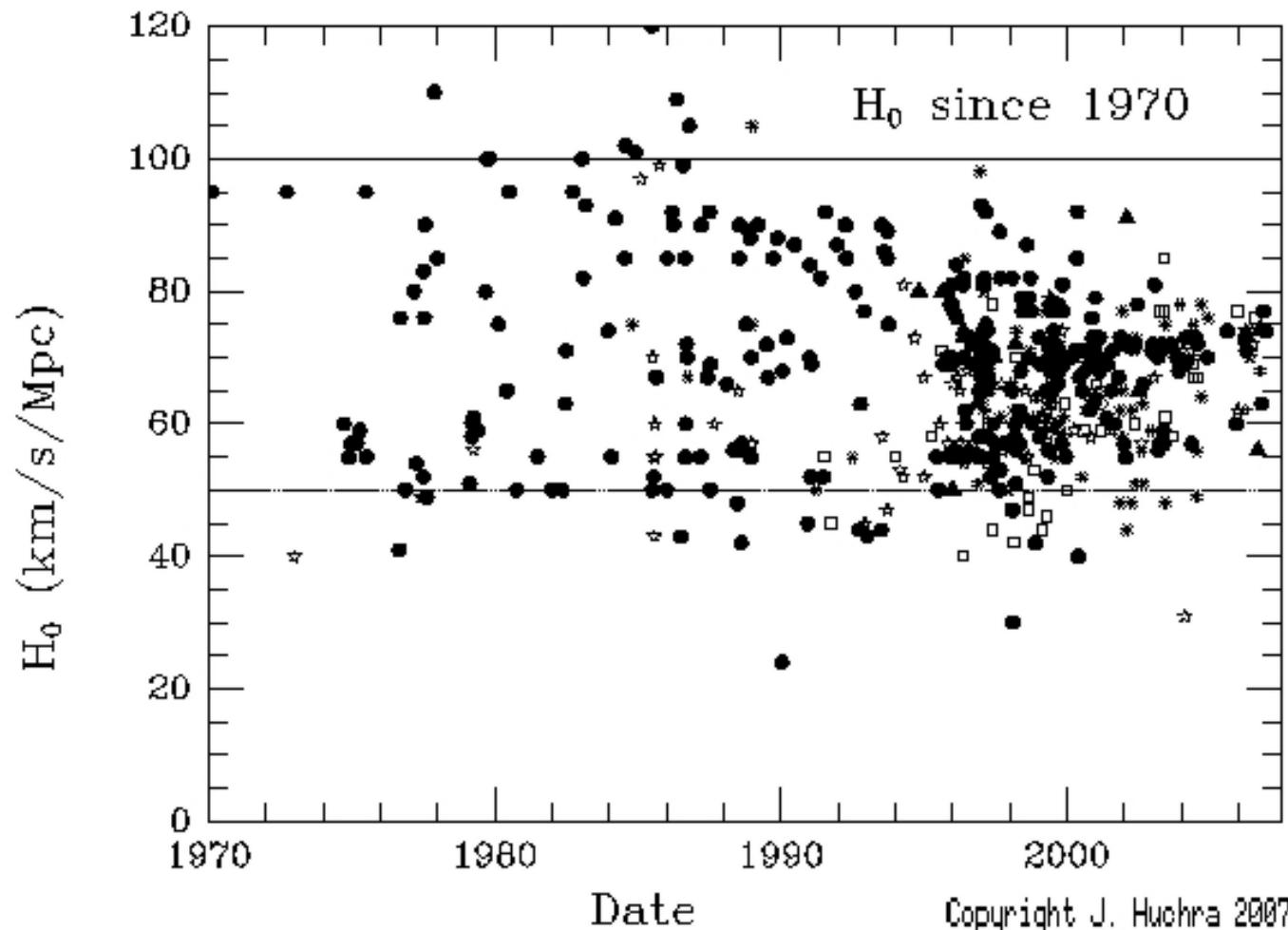
# Cosmologie

Détermination problématique de  $H_0$  et donc des distances !



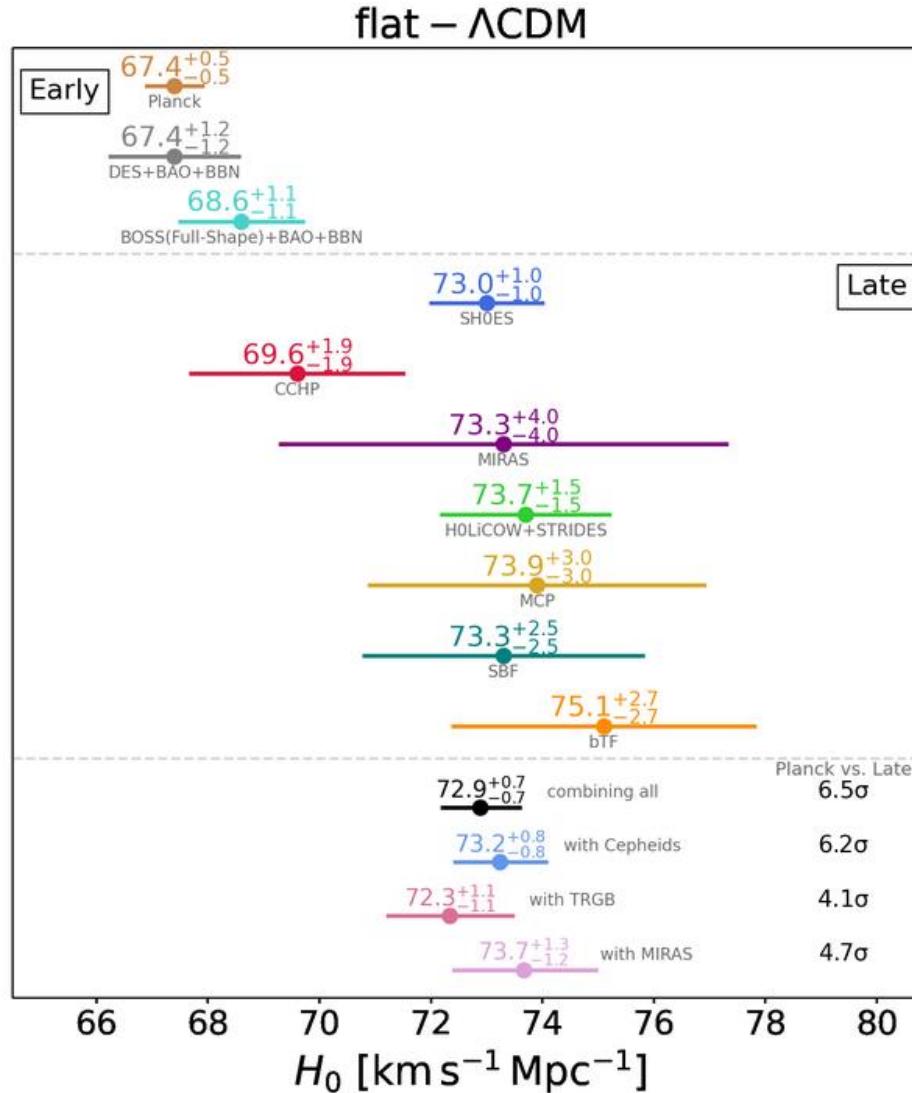
# Cosmologie

Détermination problématique de  $H_0$  et donc des distances !



# Cosmologie

## Situation actuelle: la « tension de Hubble »



# Signification de la constant de Hubble ( $H_0$ )

# Cosmologie

## Signification de la constante Hubble

$H_0$  a la dimension de l'inverse d'un temps: [km/s/Mpc]:

$1/H_0$  est le temps mis pour que tous les points de l'Univers soient en contact:

$$\begin{aligned}1/H_0 &= 9,78 \times 10^9 \text{ ans, si } H_0 = 100 \text{ km/s/Mpc} \\&= 13,7 \times 10^9 \text{ ans, si } H_0 = 72 \text{ km/s/Mpc}\end{aligned}$$

De la même façon, « la taille de l'Univers » est donnée par

$$c = H_0 \times R_H$$

$$\begin{aligned}R_H &= c/H_0 = 2997 \text{ Mpc (si } H_0 = 100) \\R_H &= c/H_0 = 4262 \text{ Mpc (si } H_0 = 72)\end{aligned}$$

# Cosmologie

## Signification de la constante Hubble

Univers (simplifié) sphérique en expansion radiale. Si  $x$  est le rayon à un temps  $t_0$  choisi tel qu'il corresponde à l'époque actuelle, on exprime le rayon de la sphère à un temps  $t$  comme

$$r(t) = a(t)X$$

où  $a(t)$  est le facteur d'expansion.

Par définition  $a(t_0)=1$  puisque  $r(t_0)=x$

Les coordonnées  $X$  sont les coordonnées comobiles.

# Cosmologie

## Signification de la constante Hubble

Quand le temps s'écoule les coordonnées changent et la vitesse d'un point s'obtient en dérivant par rapport au temps:

$$V(r,t) = \frac{d}{dt} r(t) = \frac{da}{dt} X$$

$$V(r,t) = \frac{\dot{a}}{a} r(t) = H(t) r(t)$$

La vitesse de fuite vue par un observateur « actuel », dans son temps  $t_0$  est simplement

$$V(r,t_0) = H(t_0) r$$

$$V = H_0 D$$

Décalage vers le rouge cosmologique

# Cosmologie

## Expansion et décalage vers le rouge

Les photons sont aussi affectés par l'expansion de l'Univers:

Considérons deux observateurs séparés de  $dr$ , ce qui correspond à une différence de vitesse  $dv = H(t) dr$

Cette différence de vitesse se traduit par un décalage vers le rouge

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = dz$$

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{dV}{c} = \frac{H(t)}{c} dr$$

Et  $dt = dr/c$

$$\frac{H(t)}{c} dr = H(t) dt$$

# Cosmologie

## Expansion et décalage vers le rouge

$$\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{H(t)}{c} dr = H(t) dt$$

D'après la définition de  $H(t)$ , on a aussi  $H(t) = \frac{\dot{a}}{a}$

D'où  $\frac{d\lambda}{\lambda} = \frac{da}{a}$  et donc  $\lambda_e(a) = Ka$

À  $t=t_0$  (ou  $a=1$ ) la longueur d'onde du photon est celle observée sur Terre, donc

$$\lambda_e(a) = a \square \lambda_{obs}$$

$$\lambda_{obs} = \lambda_e(1) = 1 \square \lambda_e(1)$$

d'où  $\frac{\lambda_{obs}}{\lambda_e} = \frac{1}{a} = 1 + z$

# Cosmologie

## Expansion et décalage vers le rouge

Relation fondamentale en cosmologie

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

# Cosmologie

Conversion des redshifts en distances fait intervenir la relativité générale

Distance diamètre angulaire:  $D_A(z) = \sqrt{\frac{\pi R^2}{\omega}}$

Distance luminosité:  $D_L(z) = \sqrt{\frac{L}{4\pi F}}$

R: rayon physique de l'objet

$\omega$ : angle solide sous-tendu par l'objet

L: luminosité

F: flux reçu par l'observateur

Les deux distances ne sont pas égales !

$$D_L(z) = (1+z)^2 \square D_A(z)$$

# Cosmologie

## Densité et devenir de l'Univers

Pour un système lié  $E_T < 0$

Pour une particule de masse  $m$  située à une distance  $R$  du reste de l'univers

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GMm}{R}$$

$$H_0^2 R^2 = \frac{2GM}{R}$$

Si la densité de l'Univers est constante on obtient

$$H_0^2 R^2 = \frac{2G}{R} \square \frac{4}{3} \pi R^3 \rho \quad \Rightarrow \quad \rho_{crit} = \frac{3}{8} \square \frac{H_0^2}{G\pi} \sim 10^{-29} \text{ g/cm}^3$$

# Cosmologie

L'avenir de l'Univers dépend de son contenu

Si  $\rho > \rho_{crit}$  l'Univers va se contracter -> « big crunch »

Si  $\rho = \rho_{crit}$  l'Univers est en expansion infinie

Si  $\rho < \rho_{crit}$  l'Univers est en expansion infinie accélérée

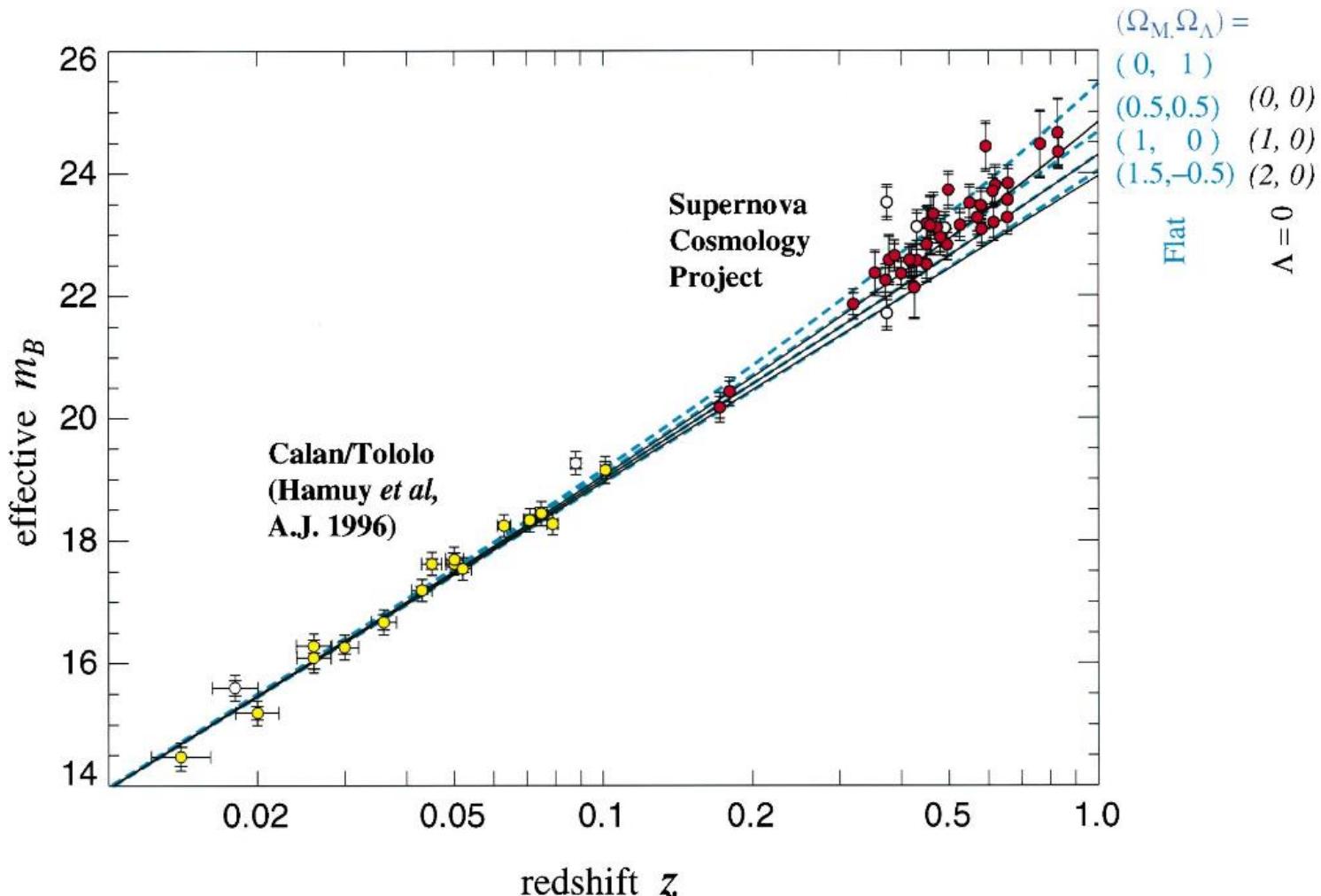
On donne le plus souvent les densités de matière baryonique, matière noire, et d'énergie en unité de la masse critique.

Par exemple

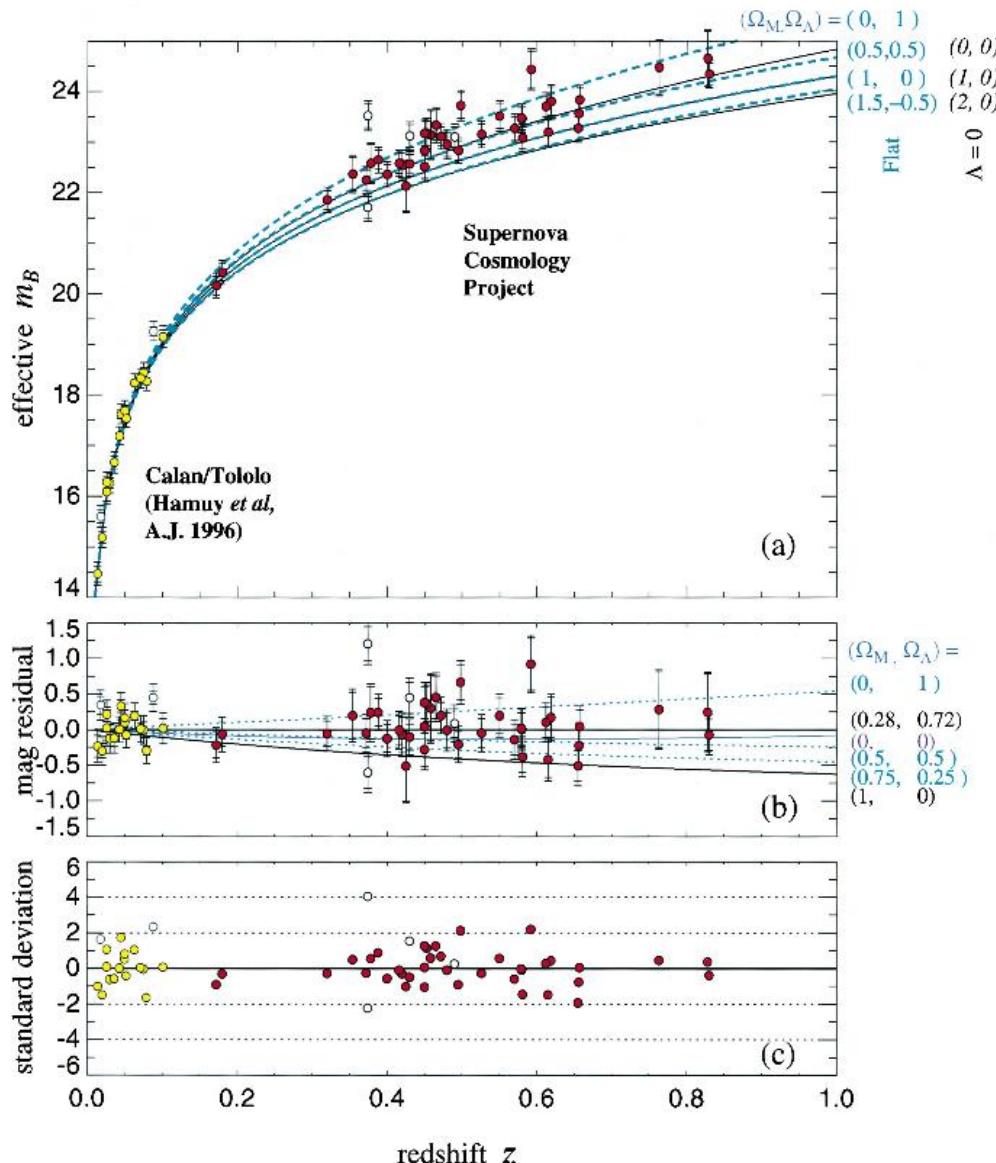
$$\Omega_m = \frac{\rho_m}{\rho_{crit}} \sim 0,3 \qquad \Omega_\Lambda = \frac{\rho_\Lambda}{\rho_{crit}} \sim 0,7$$

Qui sont des nombres sans dimension

# Expansion accélérée



# Expansion accélérée



(Perlmutter et al. 1999, ApJ, 517, 565)

# Machines cosmologiques de la prochaine décennie



Euclid: grand champ ESA  
Optique et IR + spectro  
Lancé en 2023



Roman: grand champ IR +  
spectro intégrale de champ  
(Lancement en 2027?)

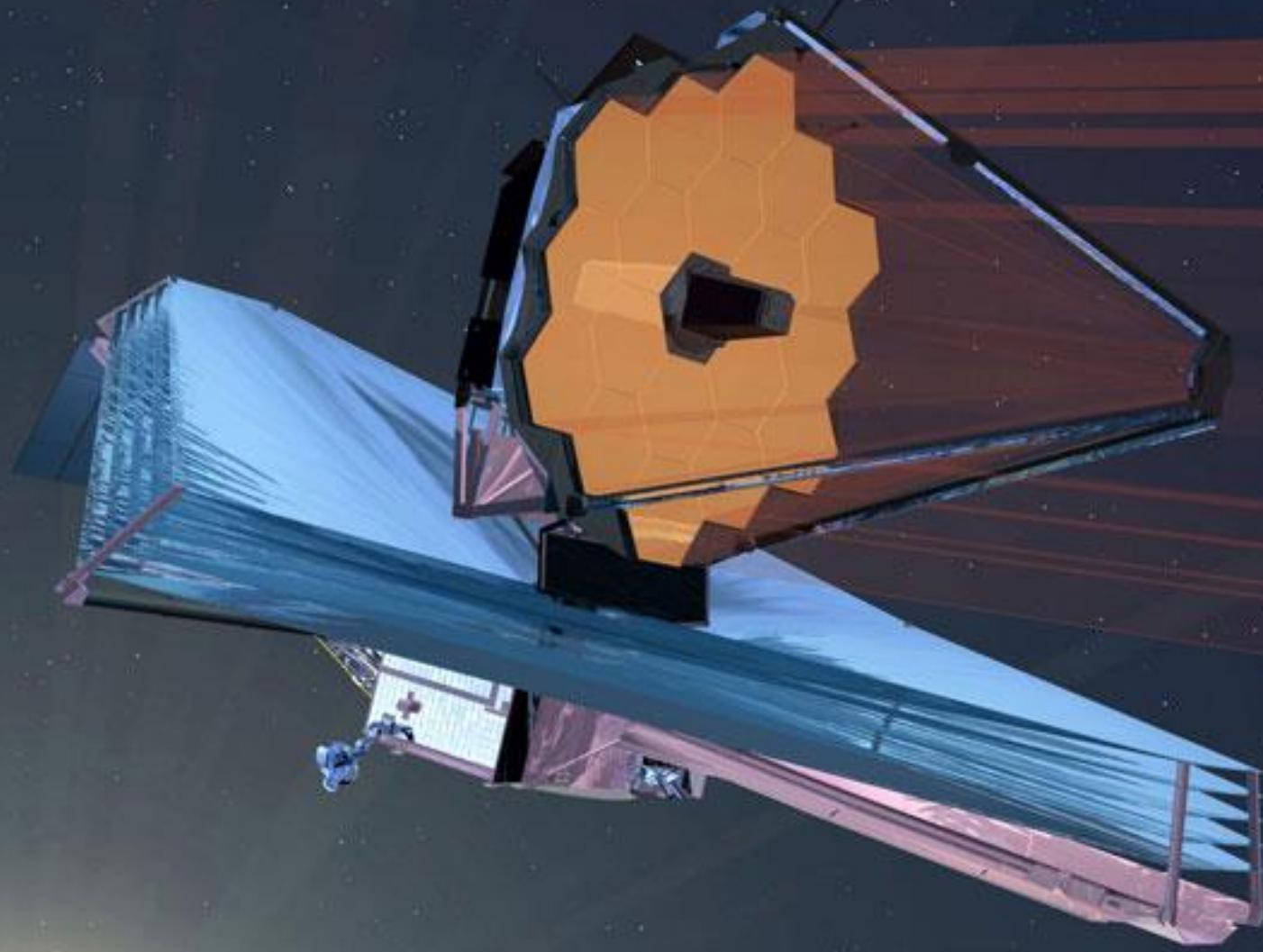


LSST: 8m grand champ optique.  
5 filtres. Tout le ciel toute les  
semaine (début en 2026?)



JWST: 6.5m, imagerie et spectro IR

# Machines cosmologiques de la prochaine décennie



JWST: 6.5m, imagerie et spectro IR

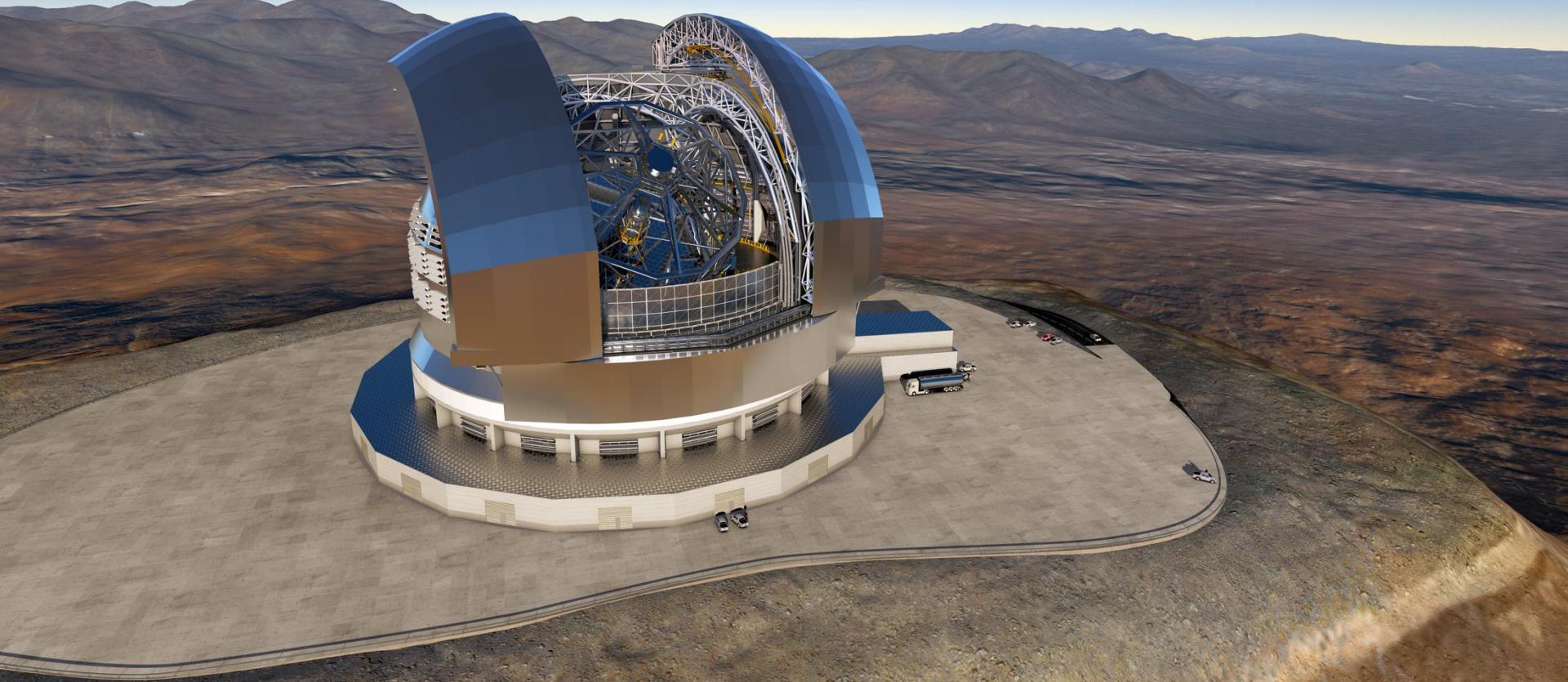
# Machines cosmologiques de la prochaine décennie



Credit: Arianespace - ESA - NASA

Lancement en 2018 depuis Kourou

# Machines cosmologiques de la prochaine décennie



E-ELT (39m de diamètre) au Chili. En construction.

# Machines cosmologiques de la prochaine décennie

120 m

100 m

80 m

60 m

40 m

20 m

