

LES TROUS NOIRS SUPERMASSIFS
OU
COMMENT LA COSMOLOGIE NOUS Y A AMENÉS
COMMENT ILS NOUS FONT Y RETOURNER

Suzy Collin-Zahn

LUTH, Observatoire de Paris-Meudon,
2009, « Année Mondiale de l'Astronomie »

- Quelques idées générales
- Brève histoire de la cosmologie, avec des remarques personnelles
- Notions sur les trous noirs
- Les trous noirs supermassifs dans l'Univers
- Conclusion

QUELQUES IDEES GENERALES

- La théorie et l'observation en astronomie
- « La marche au hasard » de la recherche
- S'habituer aux nombres « astronomiques »
- Observation, Simulation, Imagination

OBSERVATION ET THEORIE

Ils ont besoin l'un de l'autre

Ont été prédits théoriquement

- L'expansion de l'Univers
- Les trous noirs
- Les étoiles à neutrons
- Le rayonnement cosmologique...

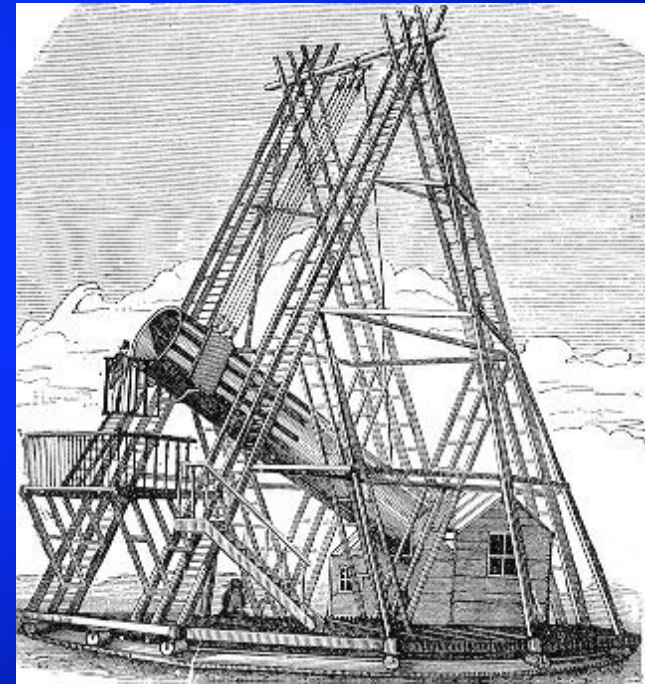
Ont été découverts sans être cherchés

- Les quasars
- Les pulsars
- Les éruptions gamma
- Les « Jupiters chauds »...

Pour faire progresser la Science,
les instruments doivent être de plus en plus performants:
la Science suit les progrès de la technologie



17ème siècle:
lunette de
Galilée



18ème siècle:
téléscope
d'Herschel



1948: inauguration du
5m de Palomar



1998: 1ère lumière du
1er VLT de 8m de l'ESO

2020?

ELT de 42m de l'ESO



La radioastronomie



1940: radiotélescope de Reber
construit dans son jardin à Chicago

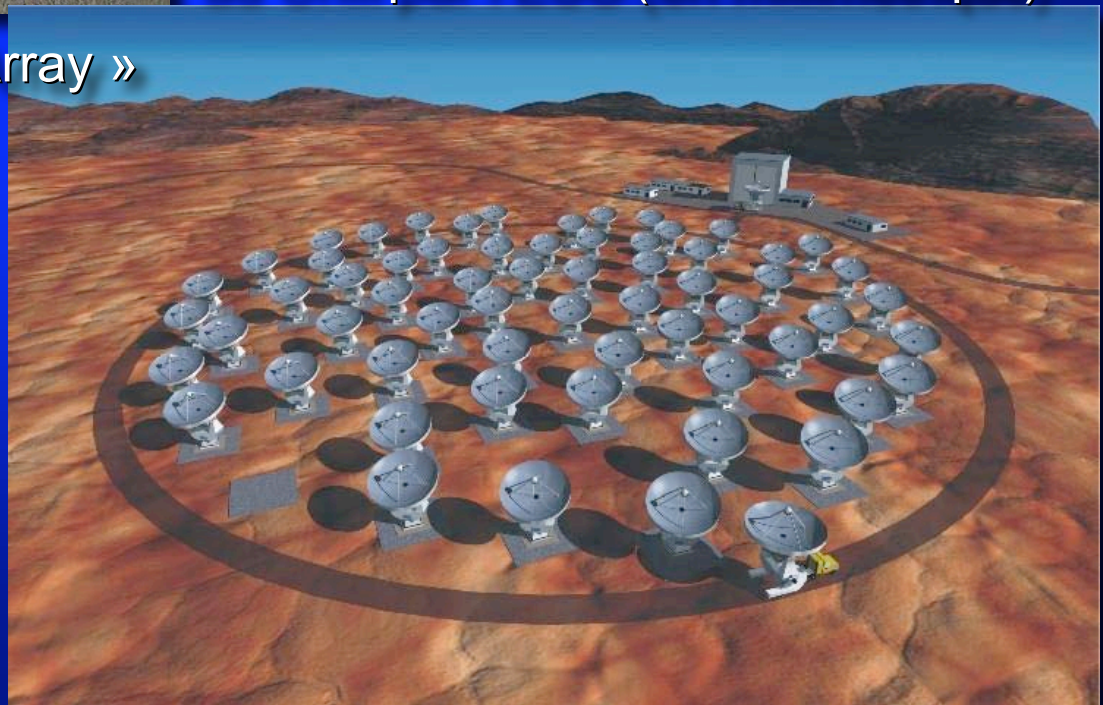
Années 1960:
grand radiotélescope de Nançay





Années 1980: Le « Very Large Array »
au Nouveau Mexique

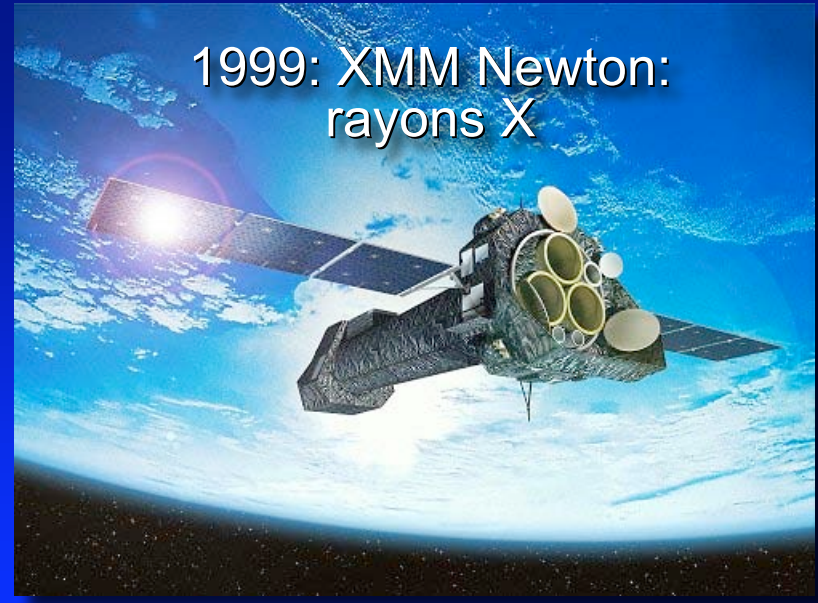
années 2000: construction d'ALMA
au Chili par l'ESO (en millimétrique)



1992: Hubble
Visible et UV



1999: XMM Newton:
rayons X



2014? JWST
infrarouge



Les instruments
spatiaux

« La marche au hasard » de la recherche

La science ne progresse pas linéairement mais par à-coups, elle stagne souvent, recule parfois.

Exemples:

Oubliés pendant presque 2000 ans, Aristarque, Erathostène et d'autres, au bénéfice de la « physique » d'Aristote!

Nombreux exemples d'erreurs dans l'astrophysique moderne.

Lorsque l'observation précède la théorie, on ne la comprend pas.

Lorsque la théorie précède l'observation, on ne la croit pas.

Les mesures en astronomie

- les distances :

1 année-lumière= 10000 milliards de km
(distance Terre-Soleil= 150 millions de km)



Temps et espace sont étroitement liés
On ne voit qu'une « tranche » d'Univers

- les durées:

Collision entre deux galaxies: 100 millions d'années

Durée de vie d'une étoile:

comme le Soleil : milliards d'années

Étoiles massives: millions d'années

-Les nombres:

200 milliards d'étoiles dans la Voie Lactée; 100 000 milliards de galaxies dans l'Univers observable

-les masses volumiques:

1 tonne par cm^3 dans une naine blanche

100 millions de tonnes par cm^3 dans une étoile à neutrons

1 atome par m^3 dans l'espace intergalactique

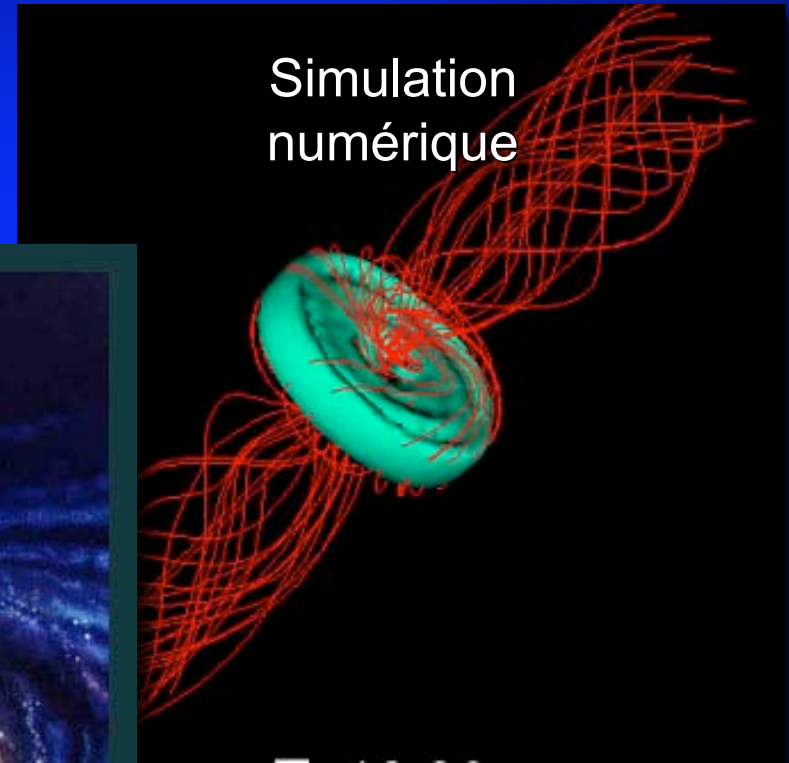
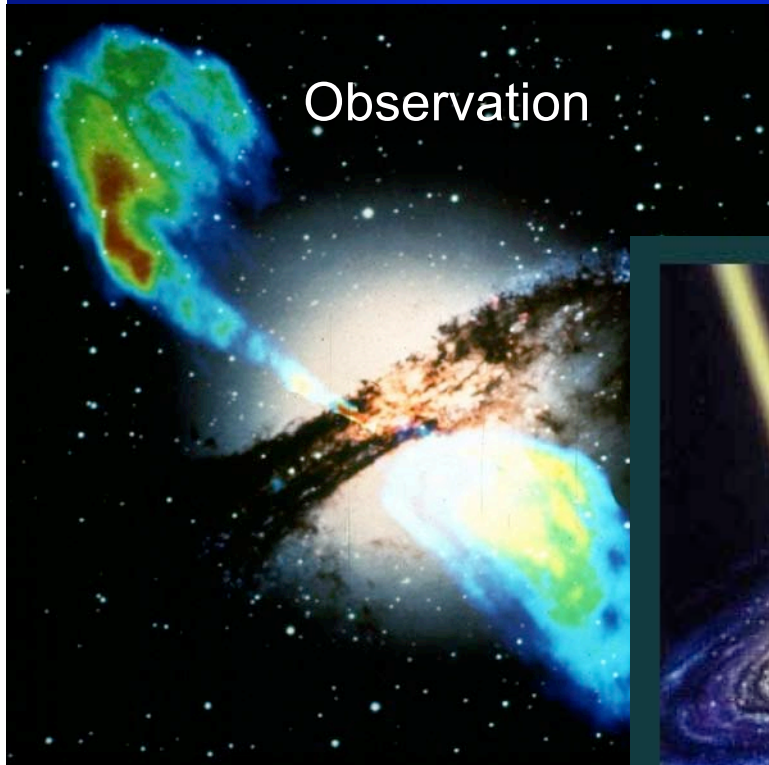
-Les températures:

des milliards de degrés dans les GRB, quasars, etc

- -265°C dans l'espace interstellaire

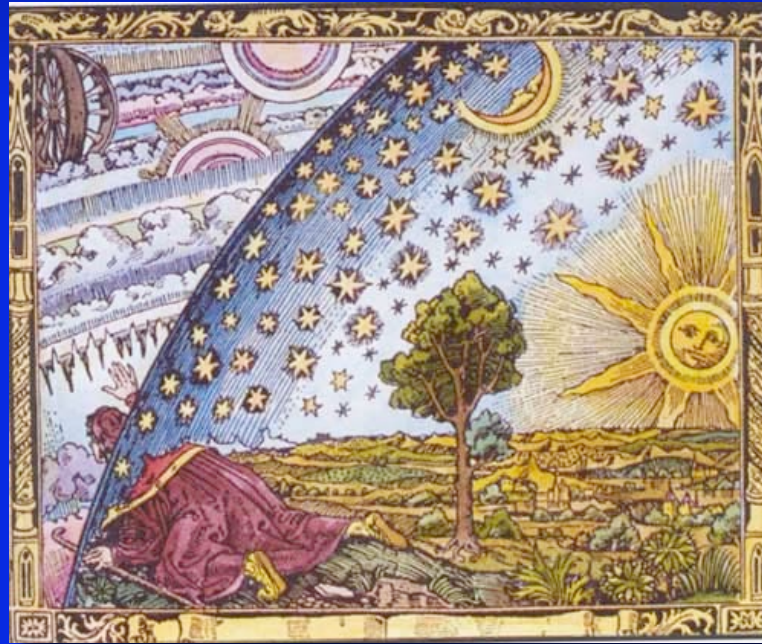
Observation, Simulation, Imagination

Prendre garde à les distinguer!



BREVE HISTOIRE DE LA COSMOLOGIE

Cosmologie: histoire et structure de l'Univers



Mais nous sommes à l'intérieur...

Il faut

Pre-supposer des principes

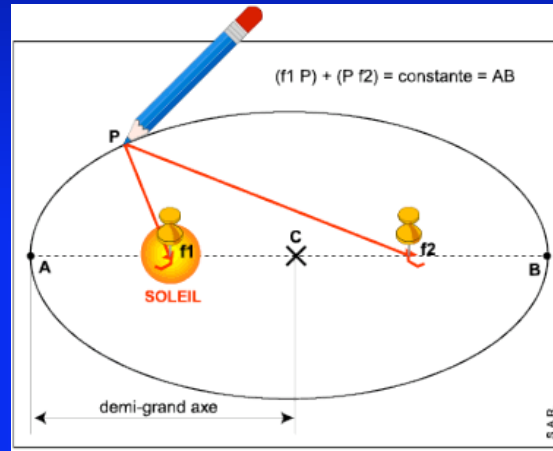
Appliquer les lois de la physique

Reproduire les observations

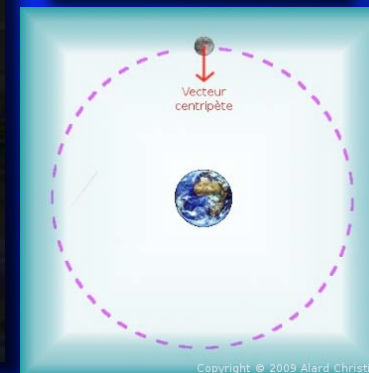
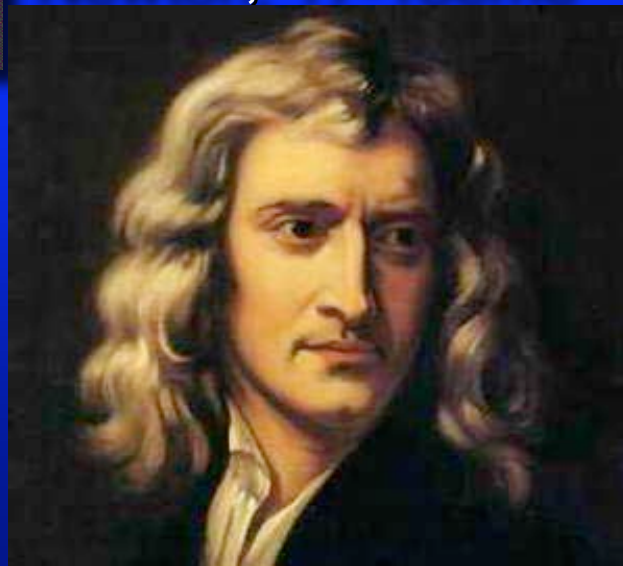
Pour arriver à ce que l'on sait actuellement,
il a fallu passer par de nombreuses étapes

Les fondements de la cosmologie remontent loin

Kepler, 16-17ème



Newton, 17-18ème

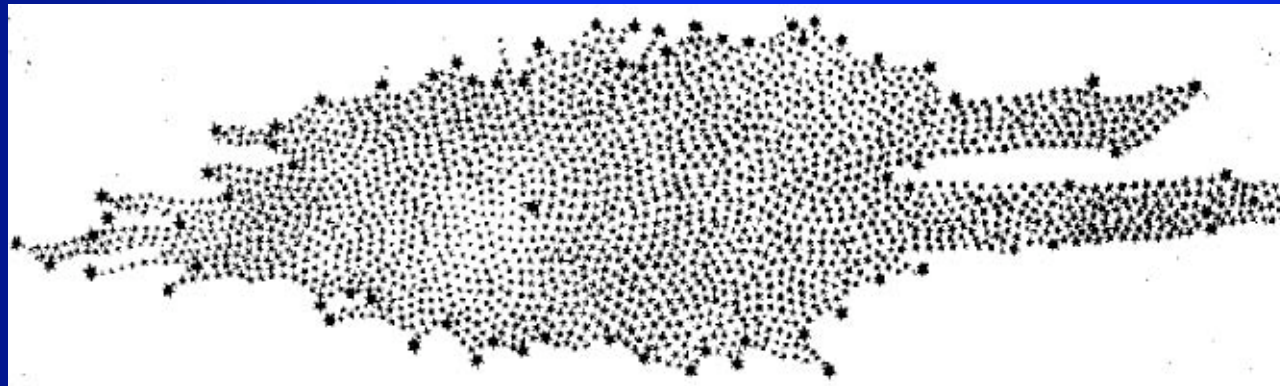


Herschel, 18-19ème



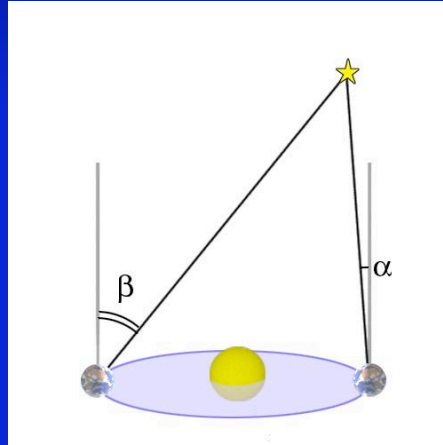
Forme de la Galaxie:

Mais il déduit la distance en supposant toutes les étoiles de même luminosité!



19ème siècle

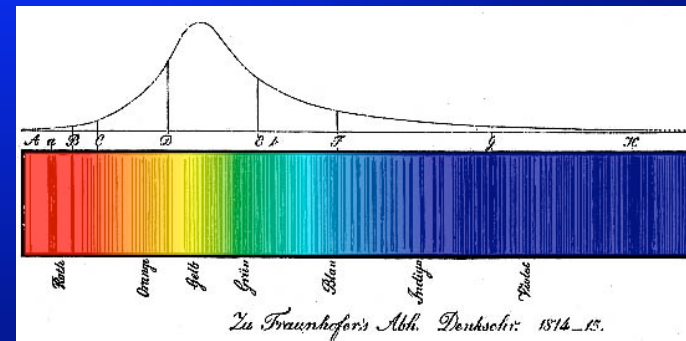
Bessel: 1832, première distance d'une étoile



30 ans plus tard:
1000 distances connues

Fraunhofer: spectroscopie appliquée au
Soleil puis aux étoiles

Permettra de déterminer
les conditions physiques
les compositions chimiques
et l'âge des étoiles



Vingtième siècle

Il y a 90 ans, l'Univers était réduit à la Voie Lactée
(néanmoins intuition de Kant des « Univers Iles »)



Shapley

1920: « le grand débat »

les « nébuleuses spirales »
font-elles partie de la Voie Lactée?
pas de conclusion



Curtis

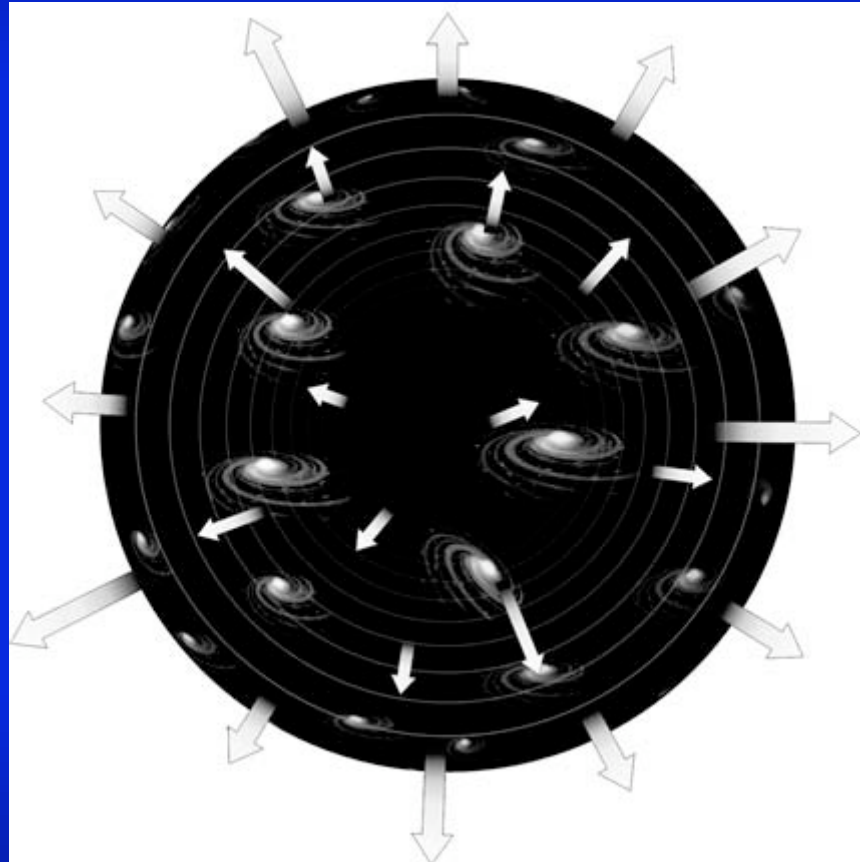
Réponse en 1925 par Hubble:
première distance d'une « galaxie »



déterminée grâce à la
relation période-luminosité
des Céphéïdes découverte
par Henrietta Leavitt qui,
étant femme, n'avait pas
le droit d'observer et n'était
même pas docteur

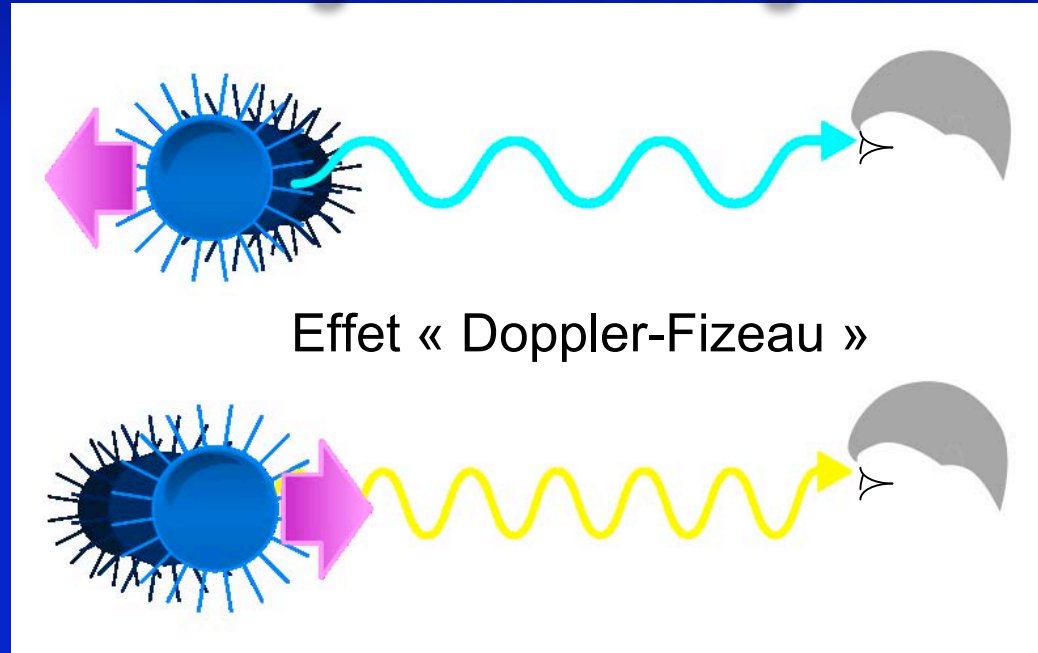


1930: loi de Hubble :
vitesses d'éloignement proportionnelles
aux distances des galaxies

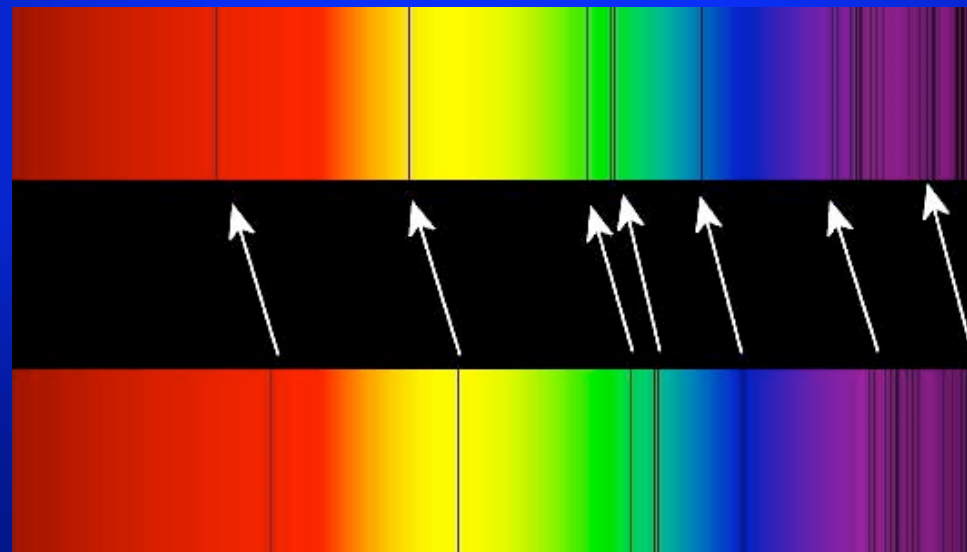


expansion de l'Univers

Explication: détermination des vitesses d'éloignement des galaxies



Si la source s'éloigne



les raies spectrales sont décalées vers le rouge

En fait, il ne s'agit pas d'un réel « effet Doppler » :
les ondes lumineuses sont « étirées »
lors de leur propagation dans l'espace,
par suite de l'expansion de l'Univers.
Leurs longueurs d'onde augmentent
d'autant plus que la source est plus lointaine.

LES RAIES SPECTRALES SE DÉPLACENT VERS LE ROUGE

On appelle « redshift » la quantité :

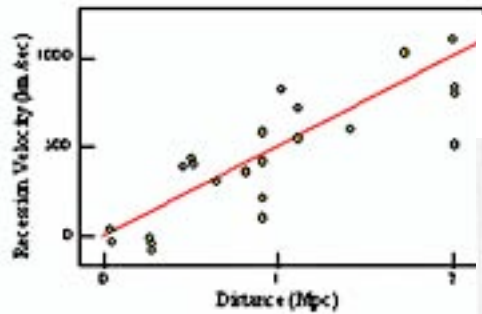
$$z = \frac{\lambda(\text{mesurée}) - \lambda(\text{réelle})}{\lambda(\text{réelle})}$$

Le redshift est d'autant plus grand que
l'objet est plus lointain

Si on mesure z , on a la distance

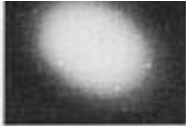
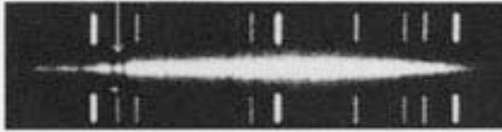



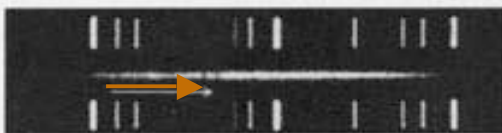

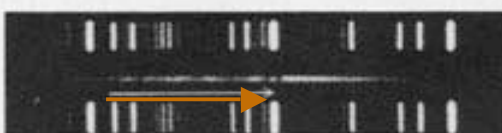

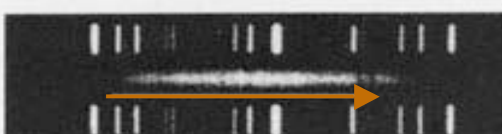
Décalages et distances dans l'Univers « proche »

Hubble's Data (1929)



Vitesse de récession
+ loi de Hubble
Distance = $H \times v$

↓
distance

Amas de galaxies	Distance en Années-lumière	Redshifts	décalage
 Virgo	78,000,000	 1,200 km s ⁻¹	Z=0.004
 Ursa Major	1,000,000,000	 15,000 km s ⁻¹	Z=0.005
 Corona Borealis	1,400,000,000	 22,000 km s ⁻¹	Z=0.073
 Bootes	2,500,000,000	 39,000 km s ⁻¹	Z=0.13
 Hydra	3,960,000,000	 61,000 km s ⁻¹	Z=0.20

LA VOIE LACTÉE, NOTRE « GALAXIE »

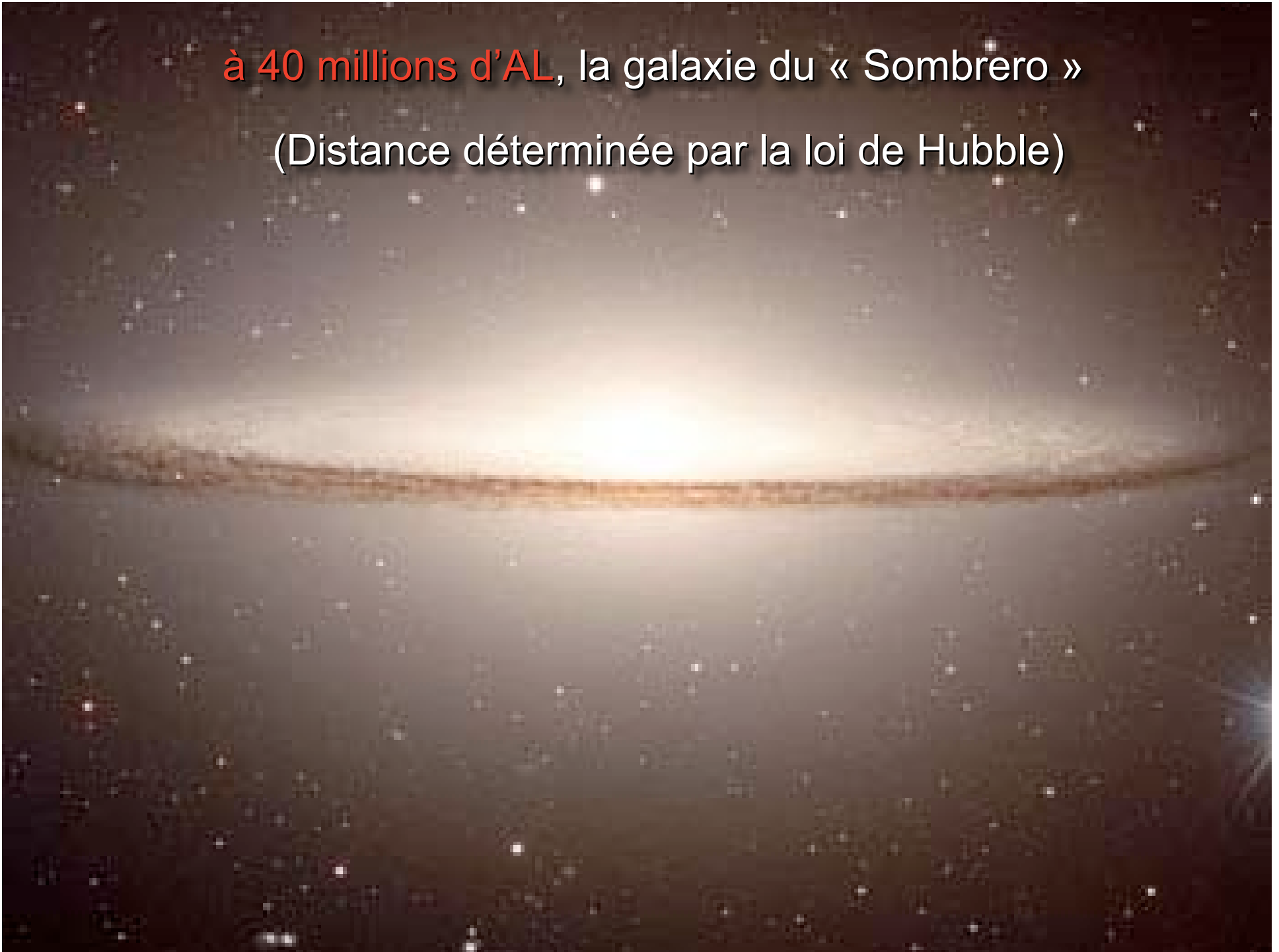
60 000 années-lumière



à 2 millions d'AL, la galaxie d'Andromède
(distance déterminée directement)



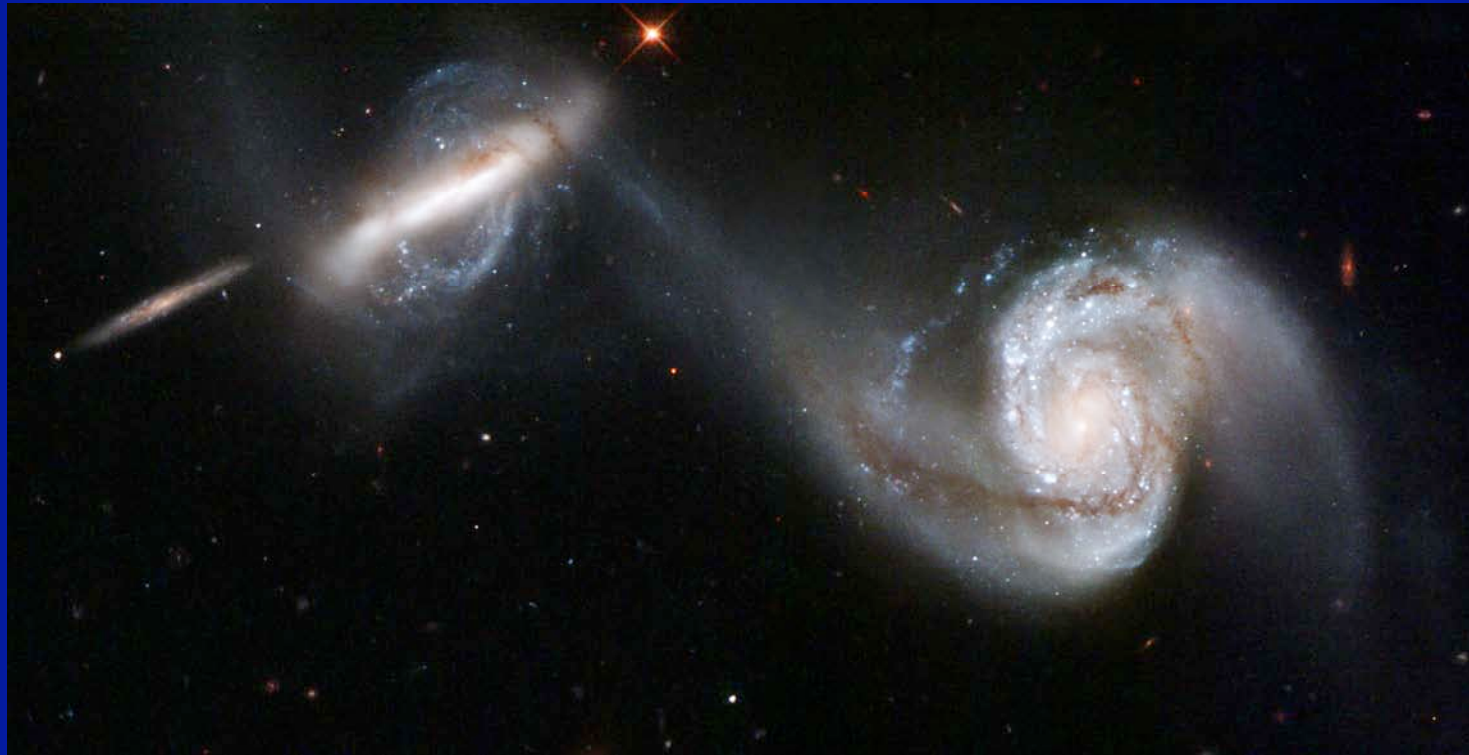
à 40 millions d'AL, la galaxie du « Sombrero »
(Distance déterminée par la loi de Hubble)



À 170 millions d'AL, une galaxie « tordue » par le passage d'une autre galaxie



à 300 millions d'AL, plusieurs galaxies en collision



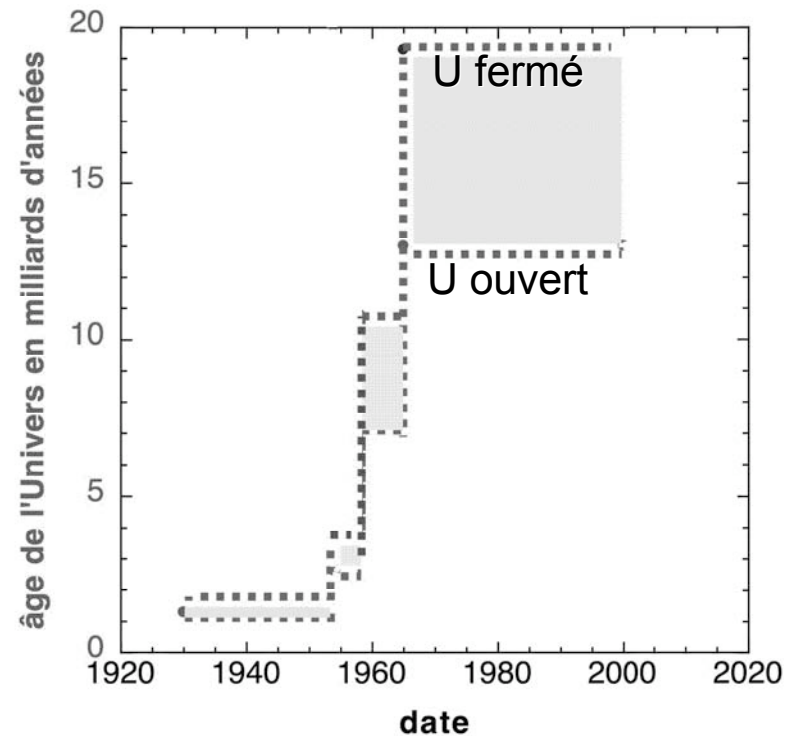
Noter que les collisions sont de plus en plus fréquentes à mesure qu'on s'éloigne

à 2 milliards d'AL, un « amas » de galaxies, Abell 1689

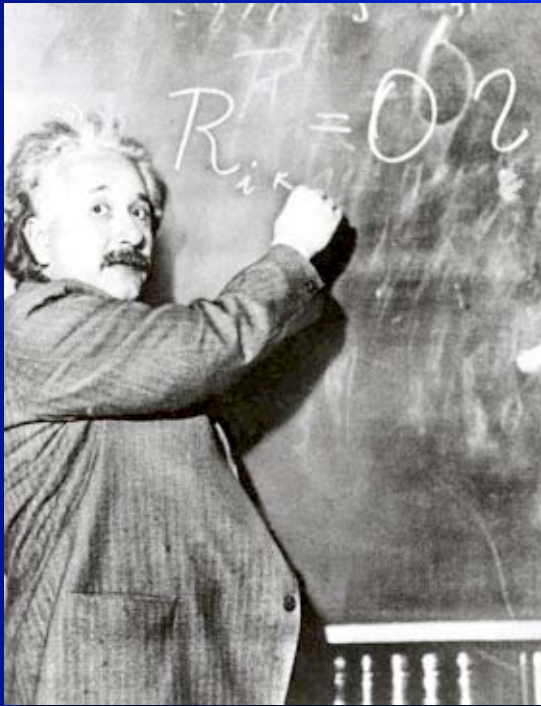
Noter les « arcs gravitationnels »



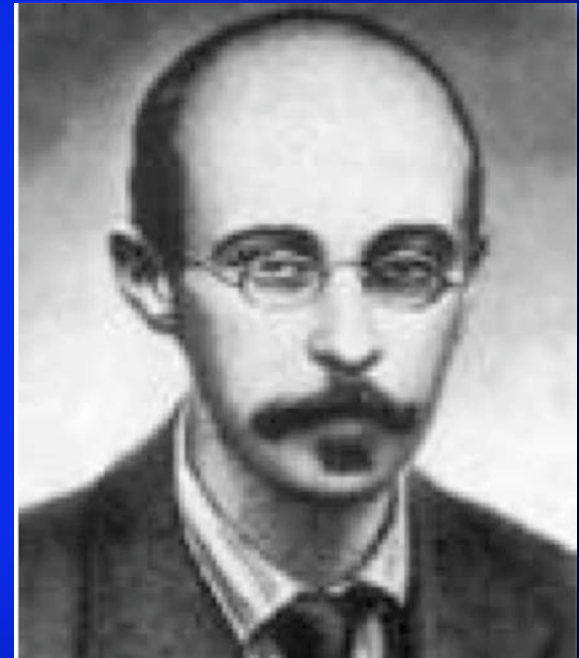
Avec Hubble, l'Univers devient 100000 fois plus grand
*en fait Hubble avait sous-estimé la taille et l'âge de l'U
par un facteur 8*



EINSTEIN: Relativité Générale, 1915
Espace-temps courbé par les masses
S'applique à l'Univers entier



Univers
statique!
Einstein se
trompe



1922, Friedmann, prédit
l'Univers en expansion
(Einstein ne le croit pas)

(il meurt désespéré en 1925)

UNE PETITE ERREUR DE JUGEMENT

Lettre du secrétaire de l'Académie des Sciences de Washington, à qui l'on avait proposé un débat sur la Relativité Générale en 1920

« Je préférerais un sujet sur lequel il y ait plus d'une douzaine de membres de l'Académie suffisamment compétents pour comprendre au moins quelques mots... Je prie Dieu que le progrès de la Science envoie la relativité dans quelque région de l'espace au delà de la quatrième dimension, d'où elle ne reviendra jamais nous ennuyer».

Si l'Univers est en expansion
cela signifie qu'à un moment dans le passé
toutes les galaxies étaient confondues

1932: « atome initial » de Lemaitre

Mais puisque l'Univers était aussi plus dense,
il devait être plus chaud (loi de la thermodynamique)

C'est le Big-Bang (baptisé ainsi par Hoyle)

Gros problème: comme la constante de Hubble était trop
grande, l'Univers n'avait que 2 milliards d'années, et était
plus jeune que le Soleil!



Théorie de l'Univers stationnaire de Bondi et Hoyle

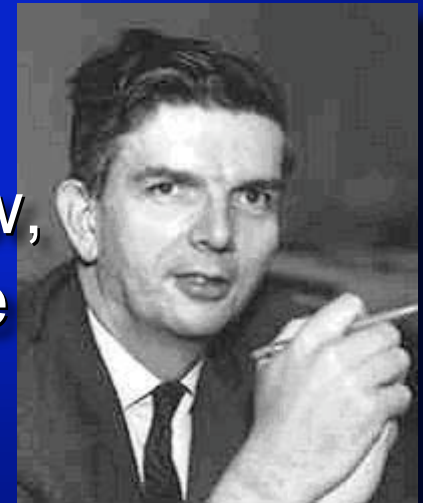
Les années soixante: le Big-Bang existe!

1965, Penzias et Wilson:
découvrent par hasard
le rayonnement cosmologique à 3K



Prix Nobel

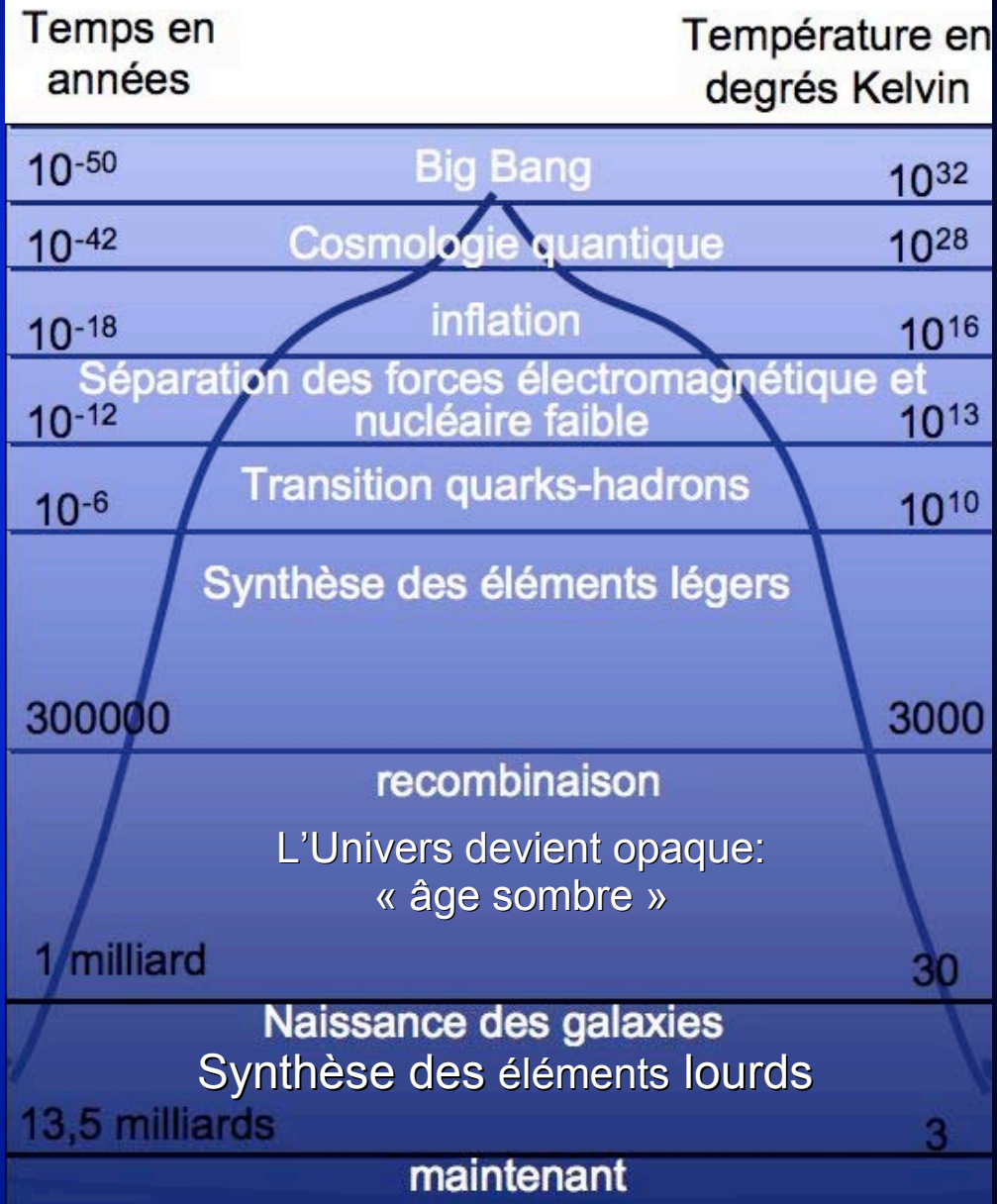
prédit 25 ans plus tôt par Gamow,
recherché activement par Dicke
et trouvé l'année suivante
Pas de prix Nobel



De 1970 à 2000:
élaboration du modèle « standard » CDM
(Cold Dark Matter)

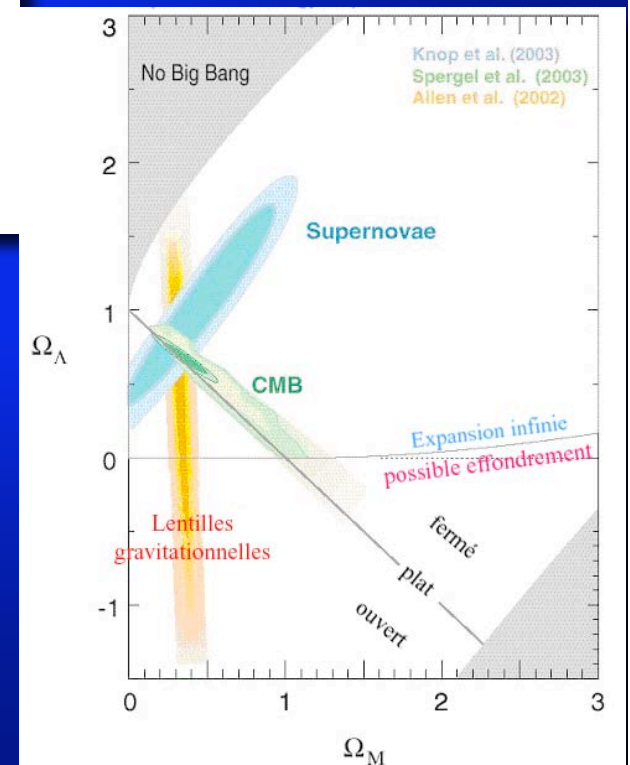
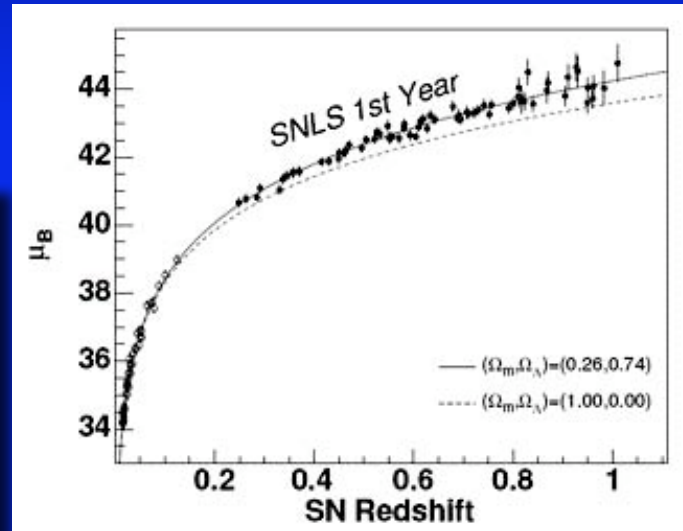
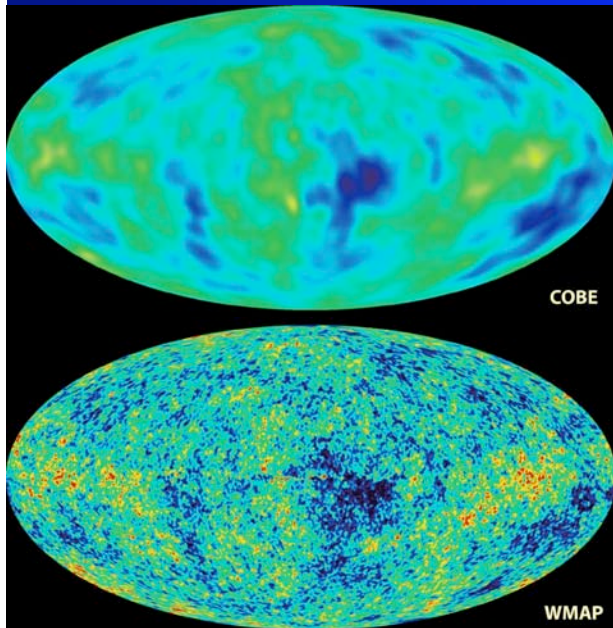
- Controverse sur la constante Hubble et la structure de l'Univers (fermé ou non?)
- On s'aperçoit qu'il y a 99% de matière « invisible »:
- 90% est non baryonique
- sous quelle forme est la matière baryonique invisible (naines brunes...)?
- formation hiérarchique des grandes structures puis des galaxies (avant, on croyait les galaxies immuables)
- inflation

La « cloche » cosmologique



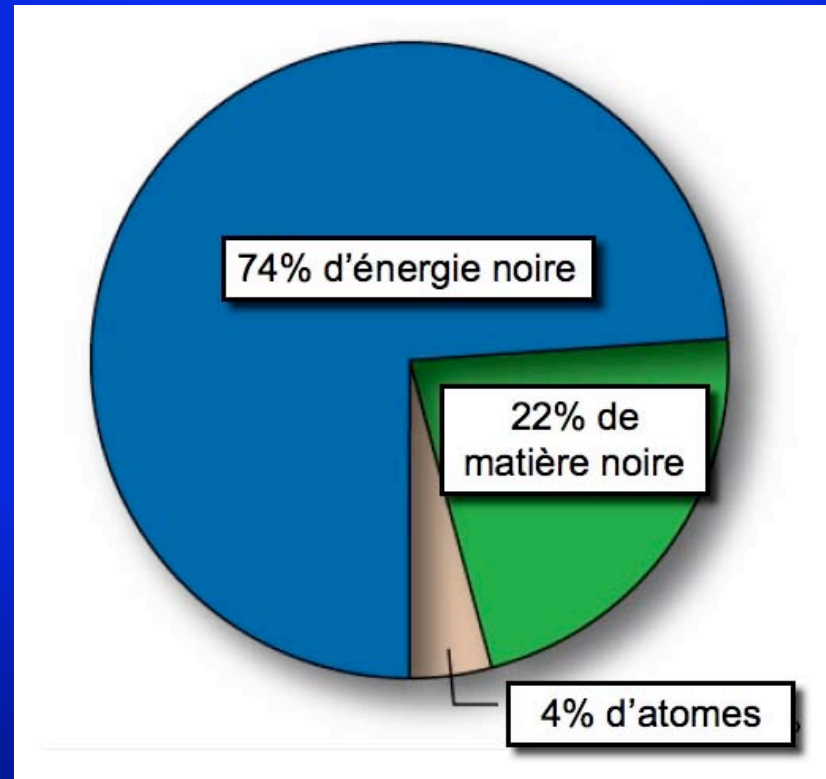
Les révolutions des années 2000

I. WMAP, relevé de SN1a, lentilles gravitationnelles





L'univers est formé pour les 3/4 « d'énergie noire »
dont on ignore complètement la nature!



II. Un nouvel ingrédient à prendre en compte
dans la formation des structures:

LES TROUS NOIRS SUPERMASSIFS

QU'EST-CE QU'UN TROU NOIR?

Un objet dont le champ de gravité est tellement intense ni lumière ni particules ne peuvent s'en échapper.

Au XVIII^{ème} siècle, Pierre Simon Laplace et John Mitchell avaient imaginé la possibilité de leur existence, mais en supposant que les particules de lumière ont une masse:

si une étoile était 500 fois plus grande que le Soleil, sa « vitesse de libération » serait égale à la vitesse de la lumière

300000km/s (sur Terre = 11 km/s),
donc même la lumière ne pourrait s'échapper

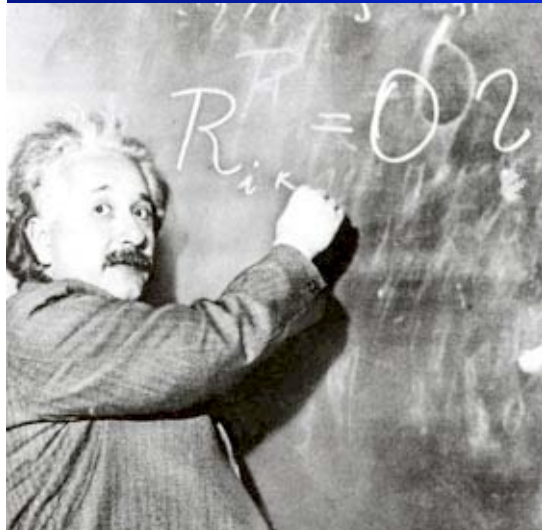


Vitesse de libération:
Ecinétique=Epotentielle

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

EINSTEIN: Relativité Générale, 1915

Il n'y a pas de force de gravitation, mais l'espace est courbé par les masses



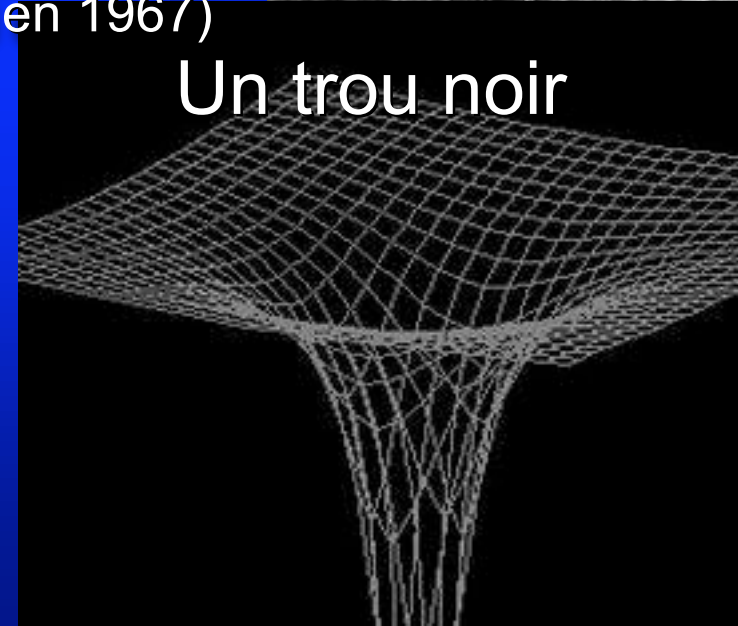
Karl Schwarzschild fait
immédiatement (1916)
la théorie des
“trous noirs”
(qui s'appelleront ainsi en 1967)

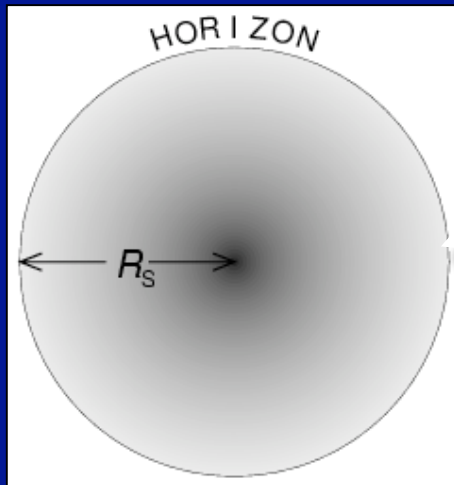


un corps ordinaire



Un trou noir





Frontière immatérielle

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

M = masse du trou noir
 c = vitesse de la lumière
 G = constante de la gravitation

Le rayon d'un trou noir est proportionnel à sa masse

3 km pour le Soleil
3 milliards de km pour un milliard de masses solaires,
(soit 3 heures-lumière)

LES TROUS NOIRS “STELLAIRES”

à la fin de sa vie, une étoile massive (> 10 masses solaires) explose en expulsant ses couches extérieures:

c'est **une SUPERNOVA**,

tandis que le cœur s'effondre en donnant

1. ou bien **une ÉTOILE À NEUTRONS**

(si sa masse est inférieure à 3 masses solaires)

2. ou bien **un TROU NOIR**

(si sa masse est supérieure à 3 masses solaires)

Mais nous allons nous intéresser à d'autres trous noirs:

LES TROUS NOIRS GÉANTS

(OU "SUPERMASSIFS")

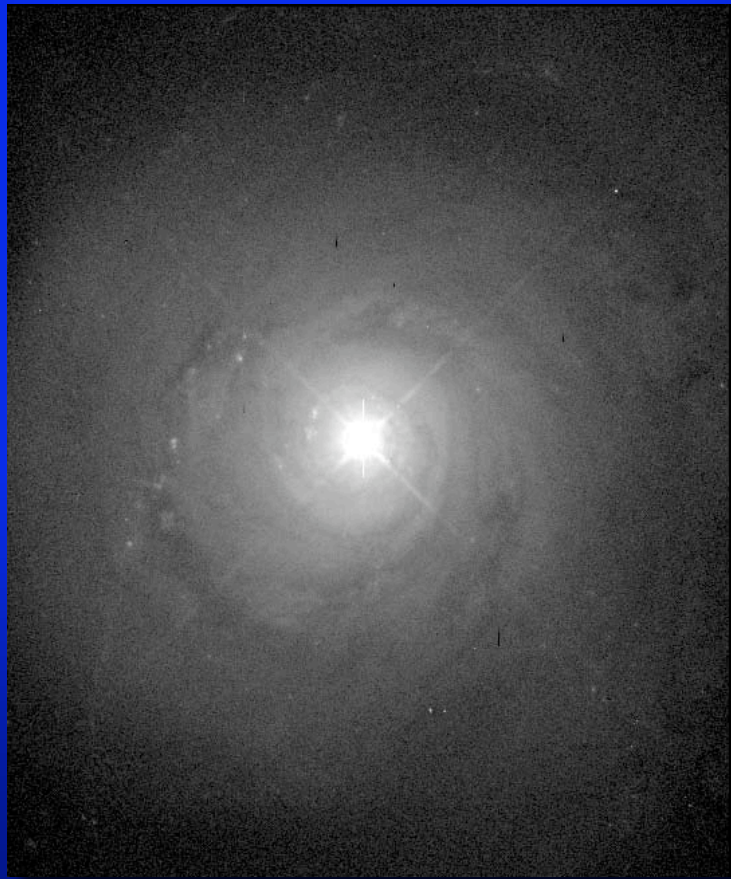
de un million à plusieurs milliards de masses solaires

Tout commence en 1943 avec un article de C. Seyfert
“Nuclear emission in spiral nebulae”

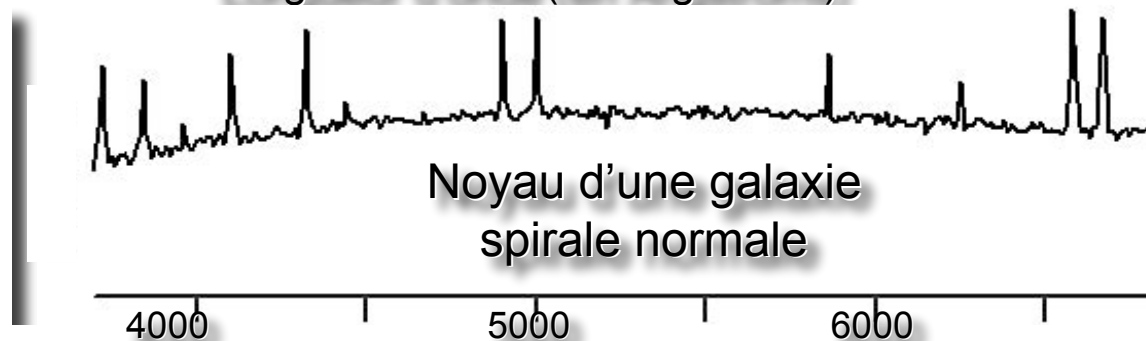
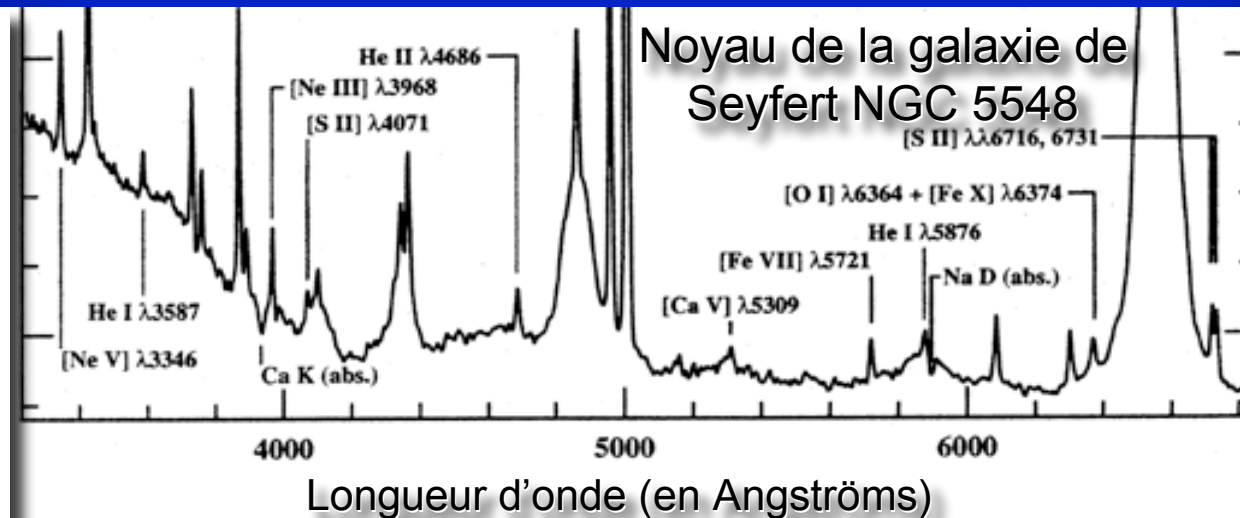
Une « galaxie de Seyfert », NGC5548,
photographiée récemment par le Télescope Spatial Hubble



Carl Seyfert
reste inconnu
pendant sa vie



Les noyaux des galaxies de Seyfert ont des spectres très différents des noyaux de galaxies normales



puis en 1954

identification de deux sources “radio” très intenses
avec les galaxies Cygnus A et Virgo A:
on les appelle des “radio-galaxies”

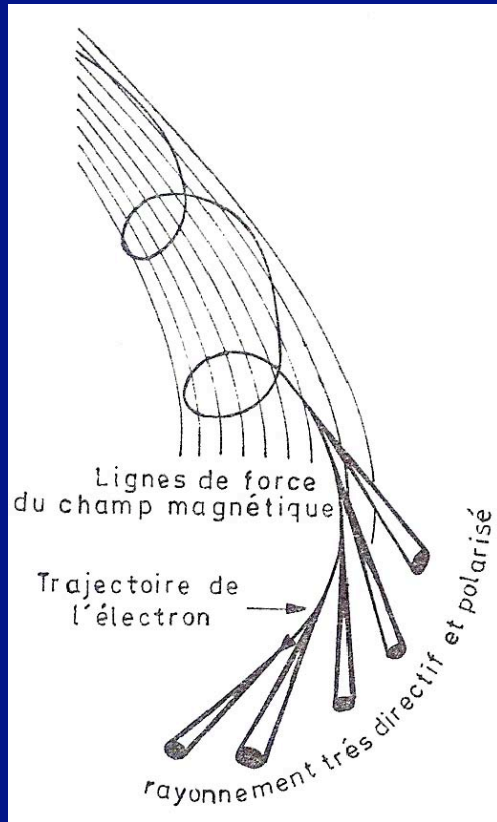
Photo de Cygnus A obtenue
en 1952 au Palomar



Le rayonnement radio
 (“synchrotron”) provient de
particules chargées “relativistes”.

L'énergie est stockée dans ces
particules pendant 1/100 ème de
la vie de la galaxie, mais elle est
au moins égale à ce que la galaxie
rayonne pendant toute sa vie!

Mais presque personne n'y prête attention...



Comment fait-on ce calcul? Très simple

1. Énergie **minimum** emmagasinée =
énergie magnétique $\propto B^2$

plus énergie des particules: $\propto \int B^2 N(E) dE$

2. $N(E) \propto$ Intensité (ν) observée

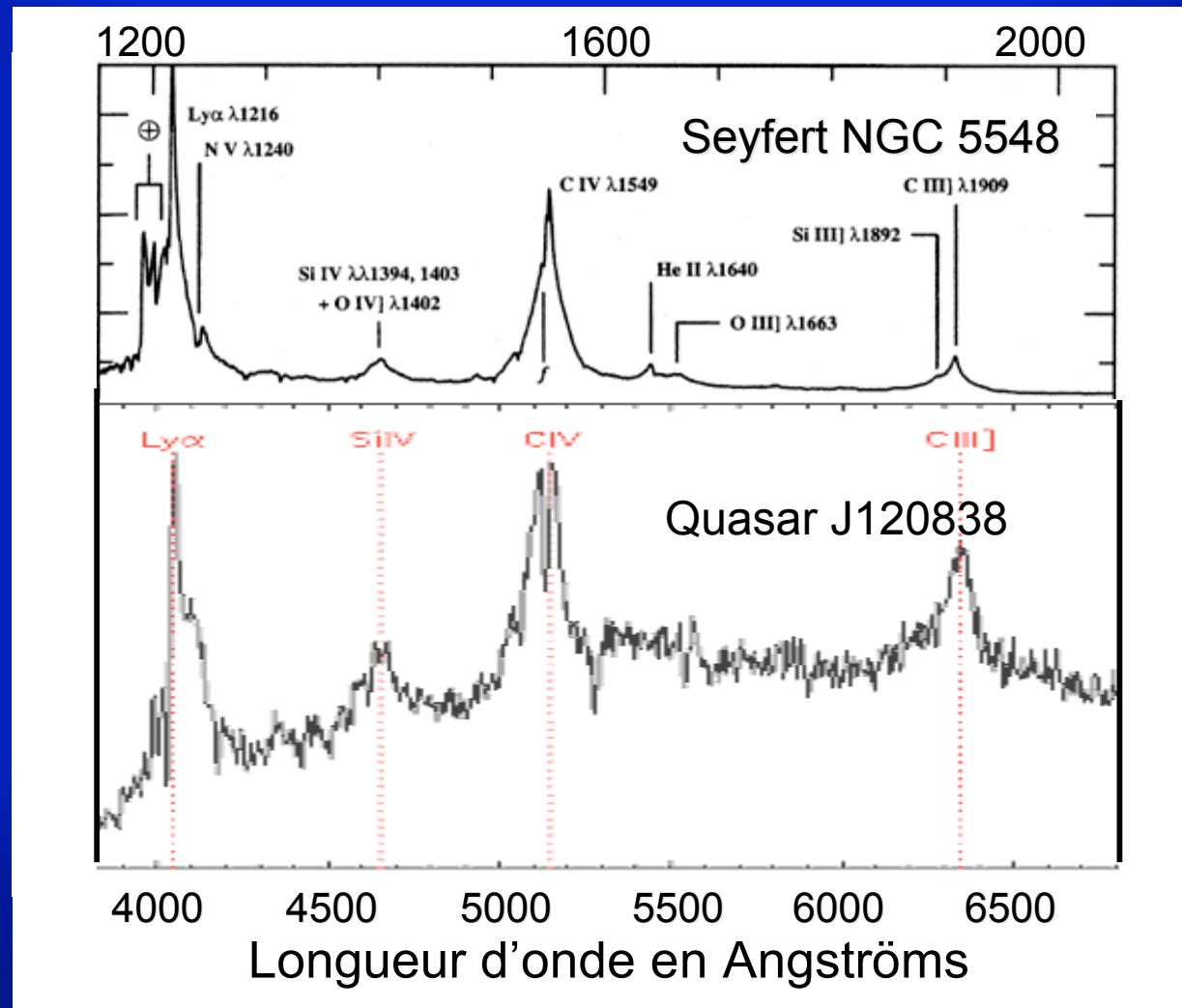
Donc 2 équations, 2 inconnues

1963: DECOUVERTE DES PREMIERS « QUASARS »

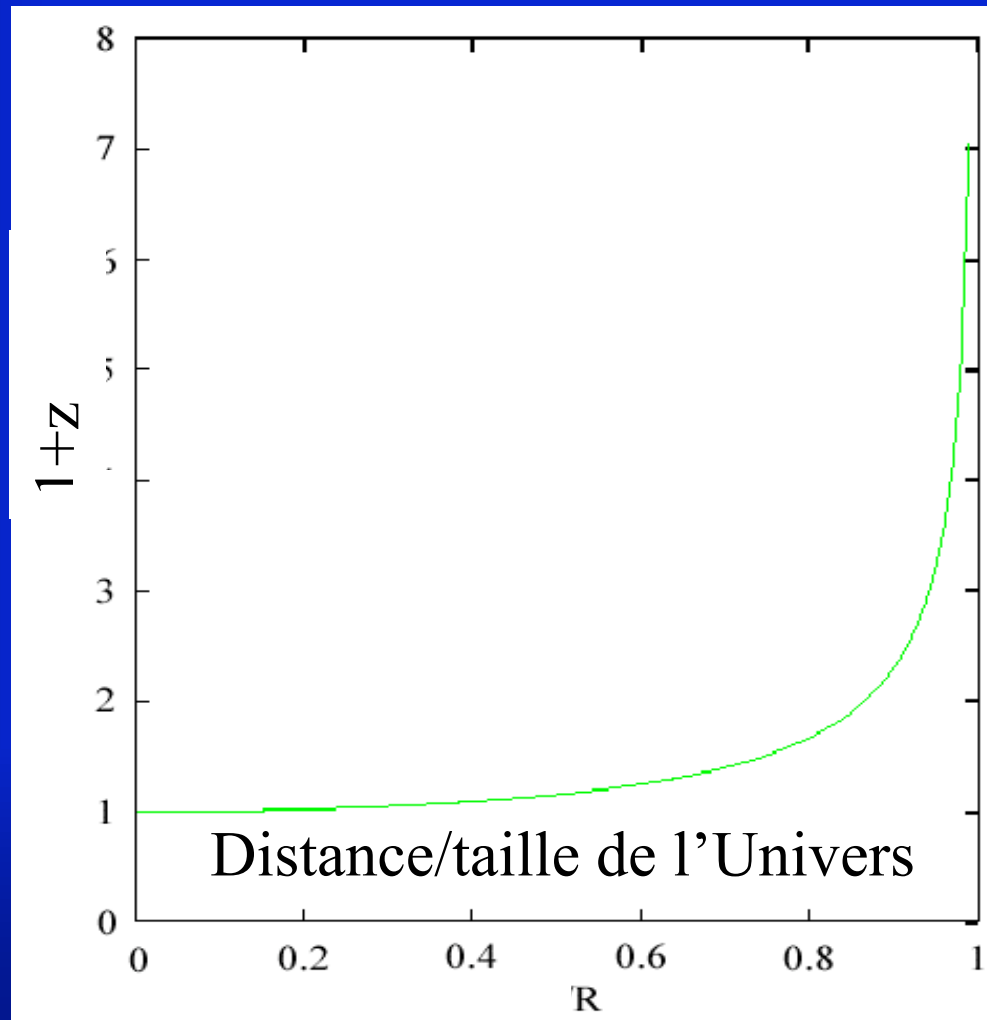
identification de “radio-sources”
avec des « étoiles » de grand
décalage spectral vers le rouge (“redshift” Z)

Comparaison du spectre d'un quasar et d'une galaxie de Seyfert:
celui du quasar est identique à celui de la galaxie de Seyfert
mais il est décalé vers le rouge

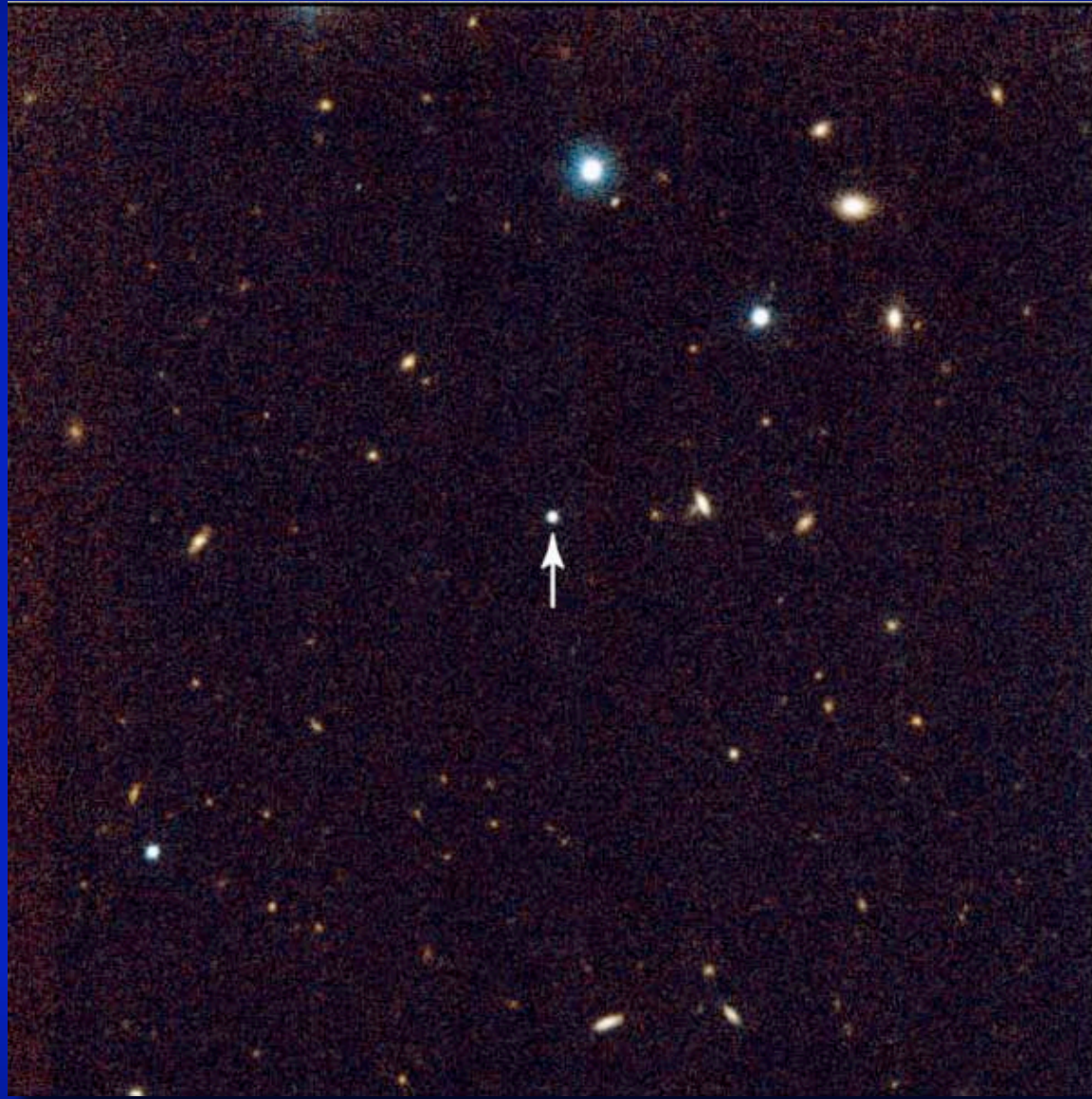
Noter
que ces
spectres
ont été
obtenus
bien
plus tard



Les quasars ont des redshifts très grands
Ils sont donc très éloignés:
des milliards d'années-lumière



Un quasar situé à 12 milliards d'années-lumière



Les galaxies aussi brillantes que le quasar
sont bien plus proches que lui

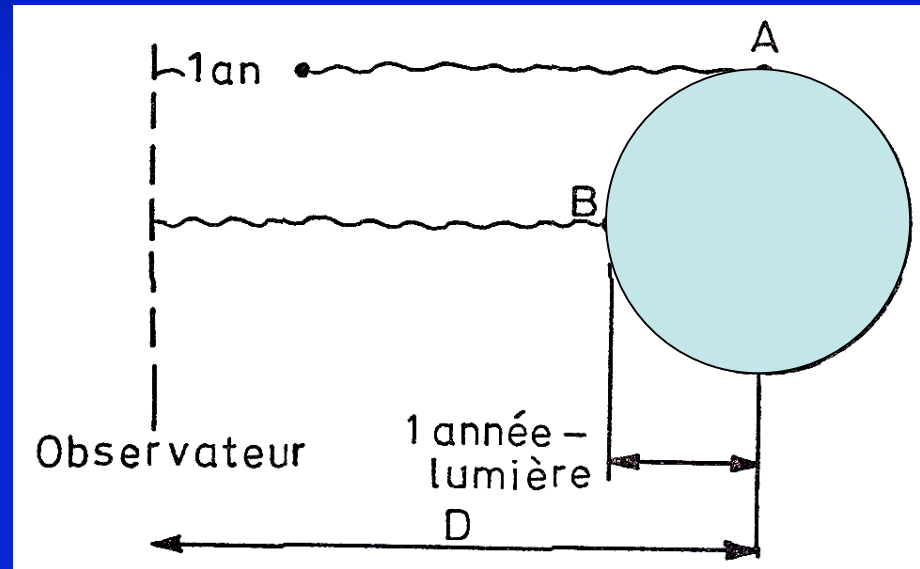
LES QUASARS SONT EN FAIT TERRIBLEMENT PUISSANTS

UN QUASAR ÉMET AUTANT DE LUMIÈRE
QUE 1000 GALAXIES

Mais ils varient rapidement
(en quelques jours, voire quelques heures)

ILS SONT DONC TRÈS “PETITS”

LA TAILLE D'UN QUASAR EST DE L'ORDRE DE
QUELQUES HEURES-LUMIÈRE,
SOIT UN MILLIARDIÈME DE LA TAILLE D'UNE GALAXIE



Dimension maximum d'une source variable.

Des variations importantes ne peuvent être observées dans un laps de temps inférieur à celui que met la lumière à se propager à travers la source.

Si on observe des variations en un temps T , cela signifie que la dimension de la source est inférieure à T/c , où c est la vitesse de la lumière.

COMMENT EXPLIQUER UNE SI GRANDE PUISSANCE
DANS UN VOLUME AUSSI PETIT?

AVEC UN TROU NOIR!

IMPOSSIBLE! DISENT CERTAINS



« CONTROVERSE DU REDSHIFT »

qui dure 15 ans

Mais comment un trou noir peut-il « rayonner »?

IL "AVALE" LA MATIÈRE QUI L'ENTOURE
ET QUI A UNE VITESSE PROCHE DE LA LUMIÈRE

Juste avant d'être engloutie pour toujours
elle rayonne intensément,
comme une météorite arrivant dans l'atmosphère terrestre
...mais avec une vitesse 10 000 fois plus grande

IL SE CRÉE UN « DISQUE D'ACCRÉTION »
AUTOUR DU TROU NOIR



Dessin d'artiste

C'EST LUI QUI DONNE SON ÉCLAT AU QUASAR
IL RAYONNE AVEC UNE EFFICACITÉ POUVANT
ALLER JUSQU'À 30% DE MC^2

On calcule que
la puissance générée est celle de 1000 galaxies
pour une taille de quelques heures-lumière

*Équilibre entre la force gravitationnelle et la pression de radiation
donne la luminosité maximum d'un objet de masse M*

$$\text{Ledd} \sim 10^{40} (M / 10^9 M_{\odot}) \text{ Watts}$$

(Ledd vient du nom d'Eddington)

Ce sont justement la luminosité et la taille d'un
quasar typique

Video 1

On a maintenant plusieurs preuves de l'existence d'un trou noir et d'un disque d'accrétion dans les quasars et les noyaux de "galaxies de Seyfert"

Par exemple: les raies spectrales formées dans le disque d'accrétion tout près du TN sont « étirées » par un effet gravitationnel très intense (de Relativité Générale)

MAIS QUE SONT LES QUASARS?

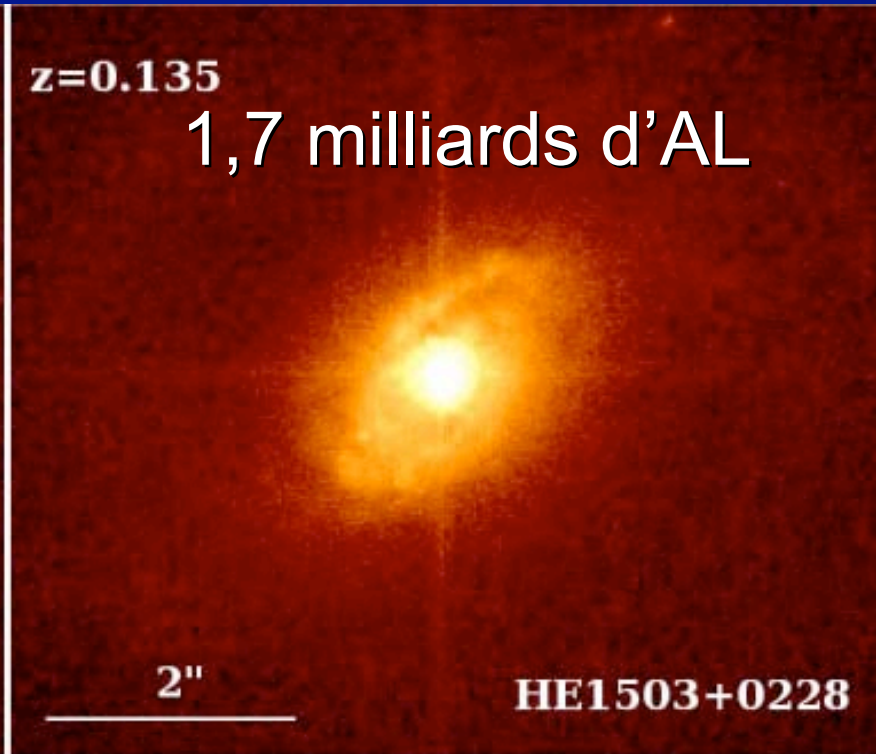
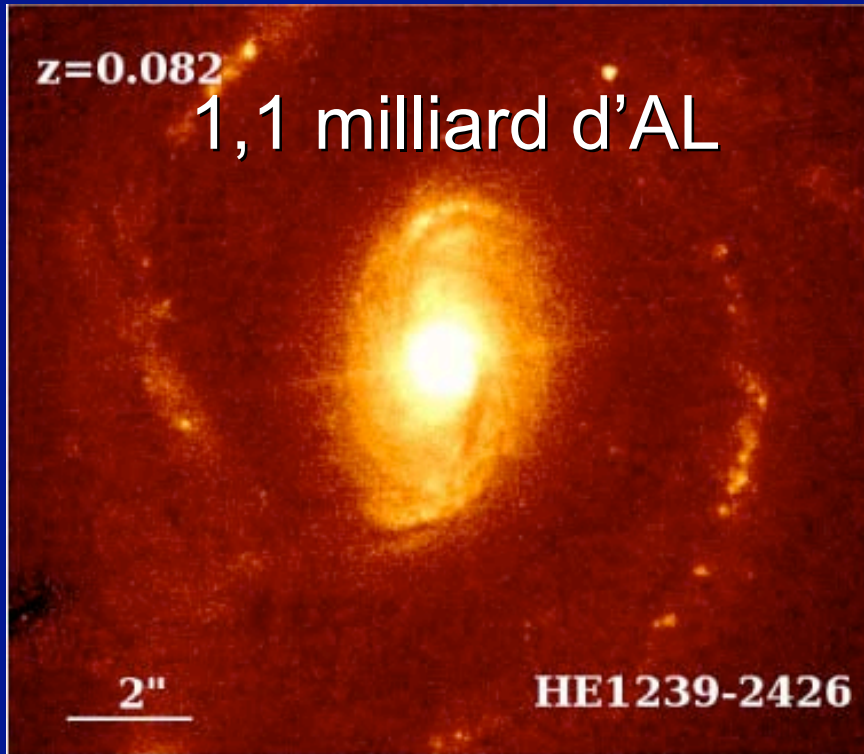
Ce sont des “**noyaux de galaxies**” dans un état “**très actif**” car le trou noir a beaucoup de gaz à avaler.

Grâce au télescope spatial de Hubble et aux très grands télescopes au sol munis d'une optique “adaptative”, on arrive maintenant à distinguer les

“**galaxies -hôtes**”

à des milliards d'années-lumière de distance.

Elles sont souvent très perturbées par des collisions avec d'autres galaxies



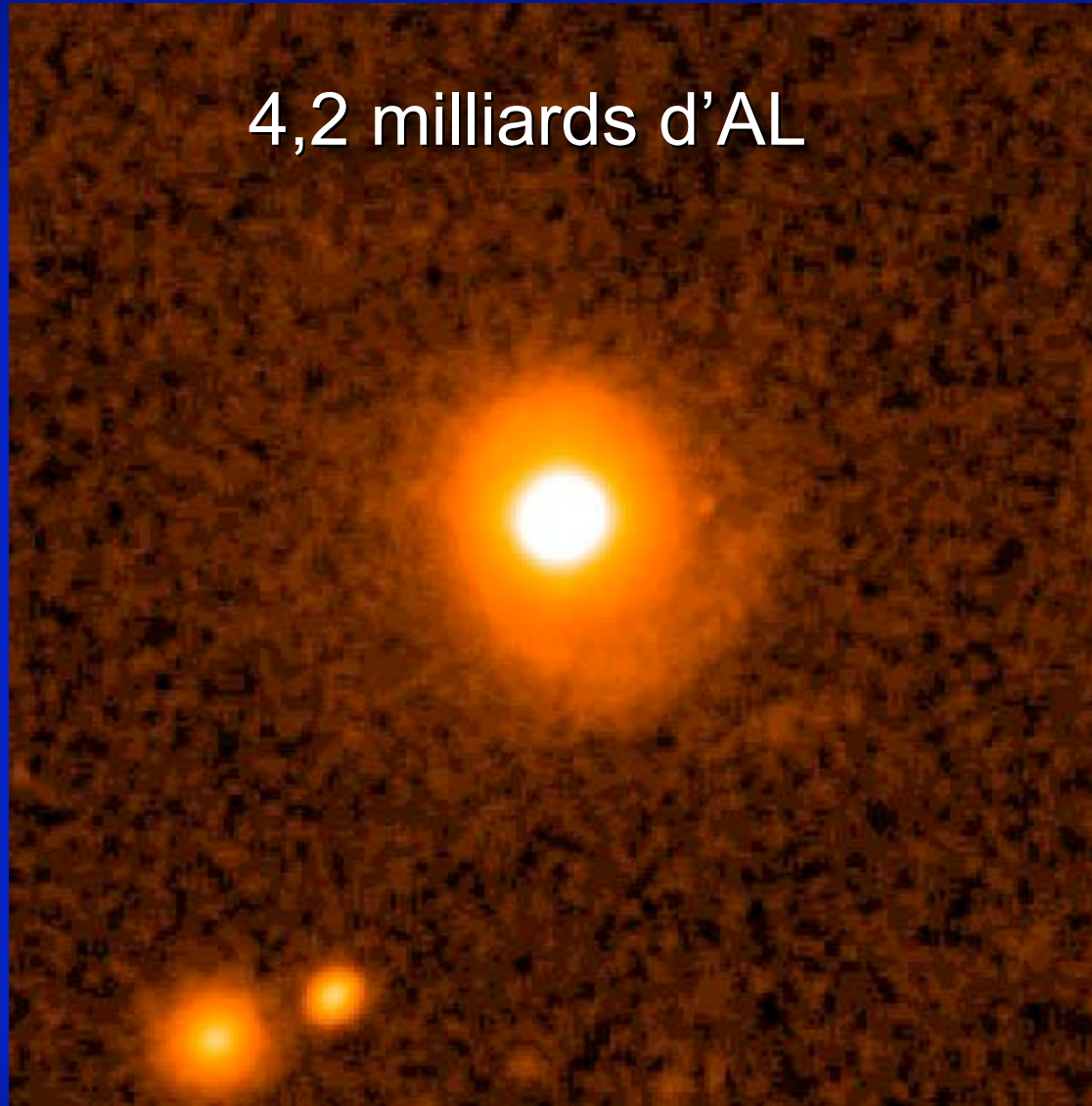
Two Quasars with Their Host Galaxy
(HST)

ESO PR Photo 28a/05 (September 14, 2005)

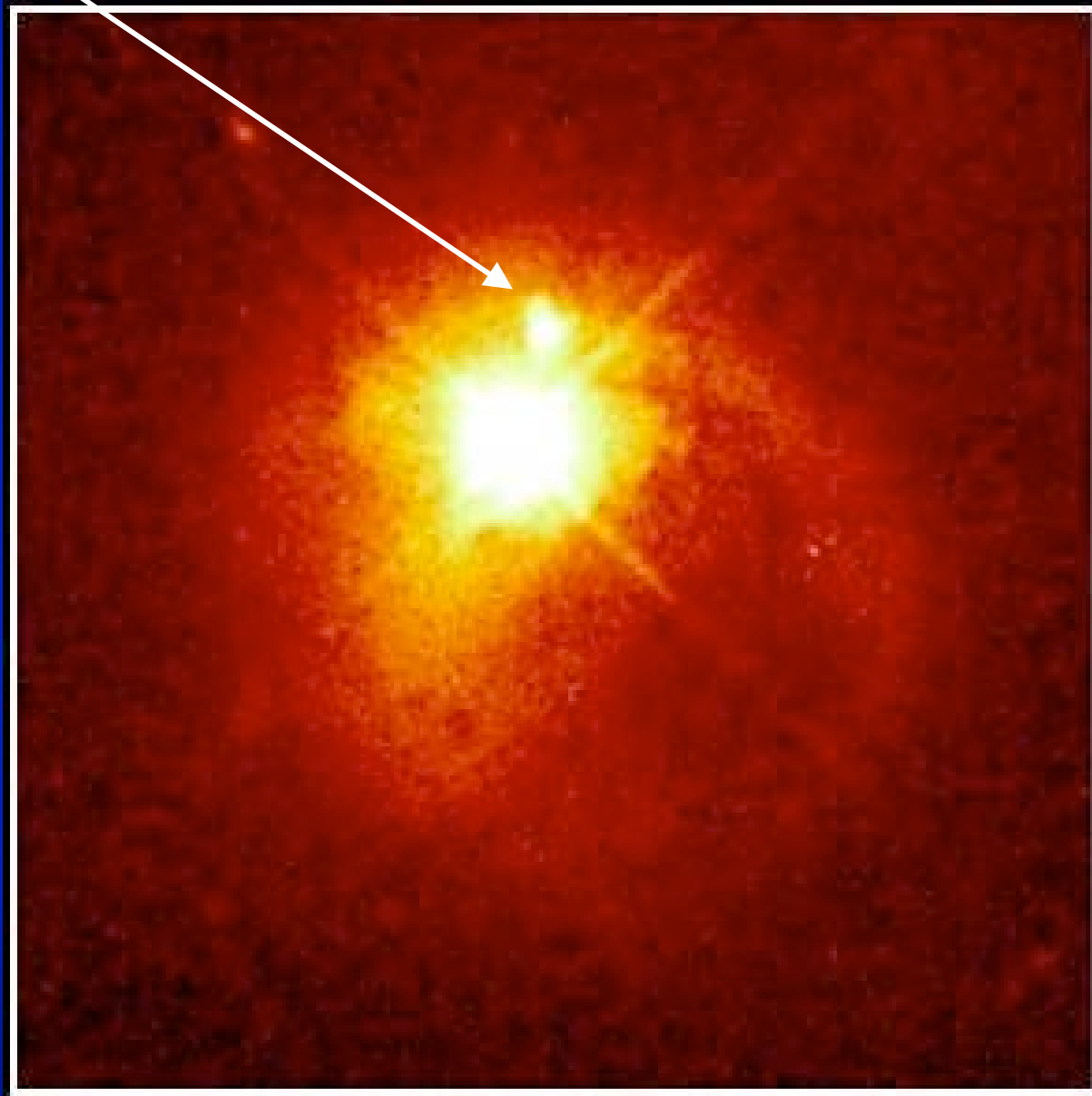
© ESO



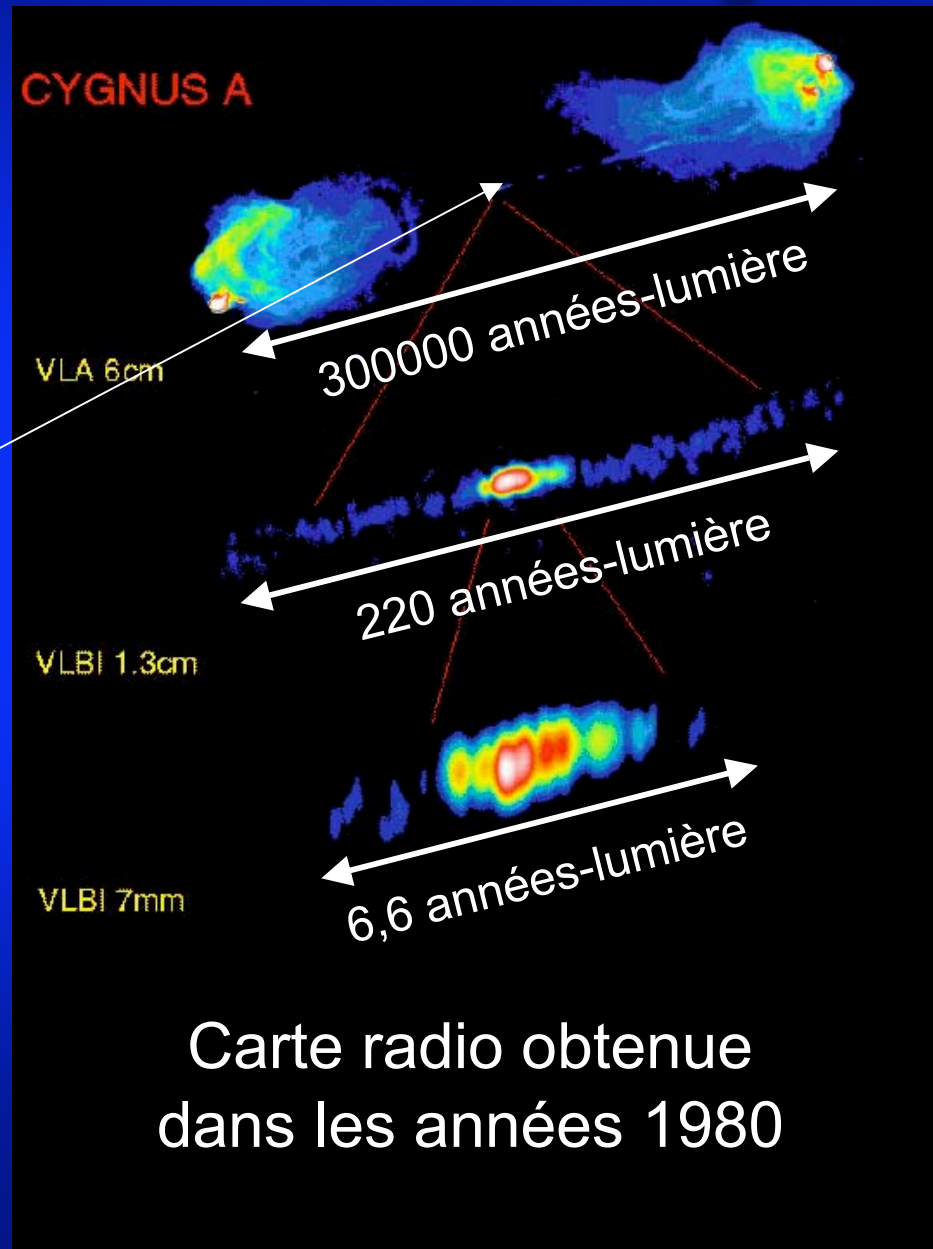
4,2 milliards d'AL



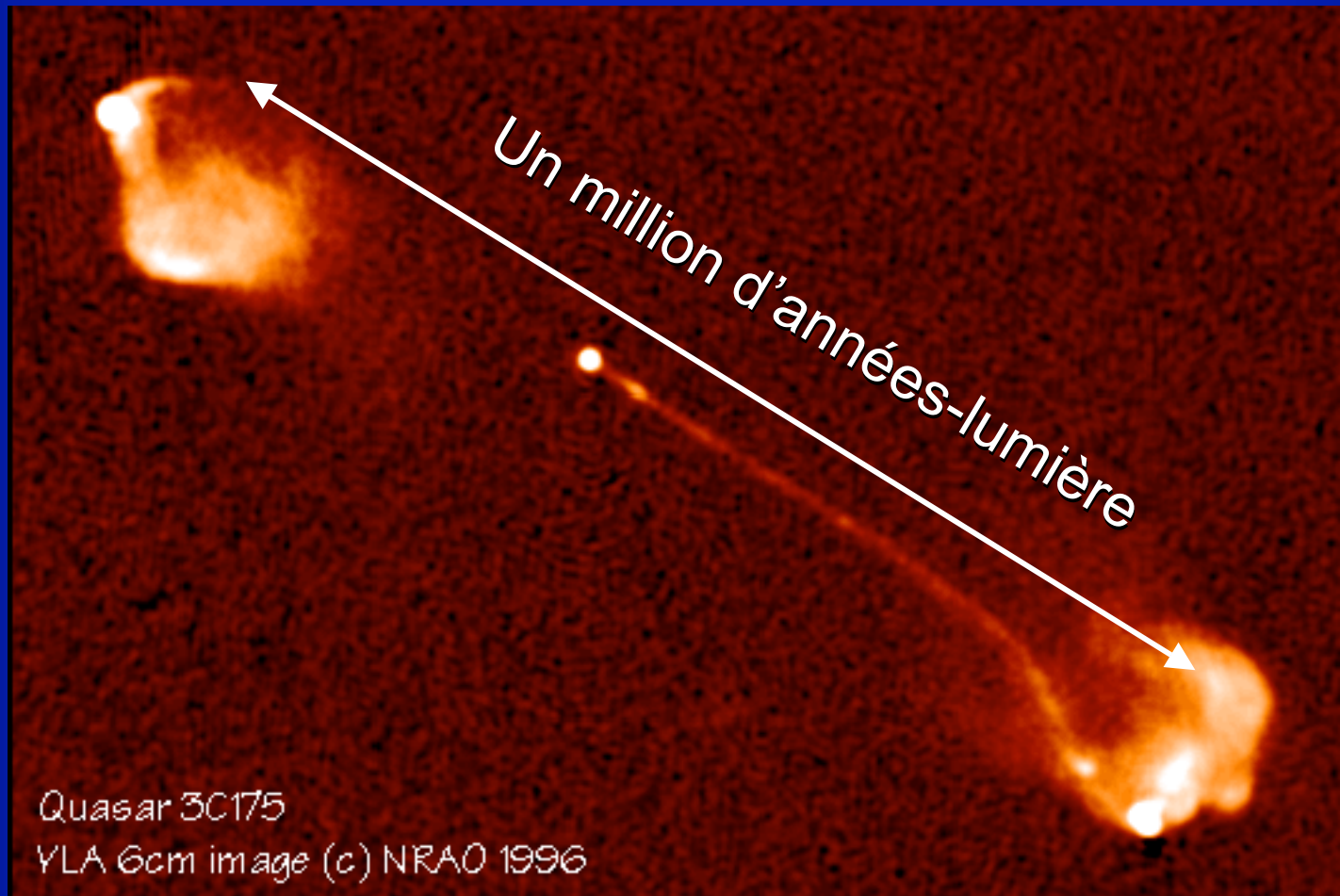
Galaxie en train d'être "avalée" par un quasar



Les radio-galaxies contiennent aussi un noyau possédant un trou noir géant



Carte radio d'un quasar:
elle ressemble à s'y méprendre à celles des radio-galaxies





Les galaxies de Seyfert et les radio-galaxies

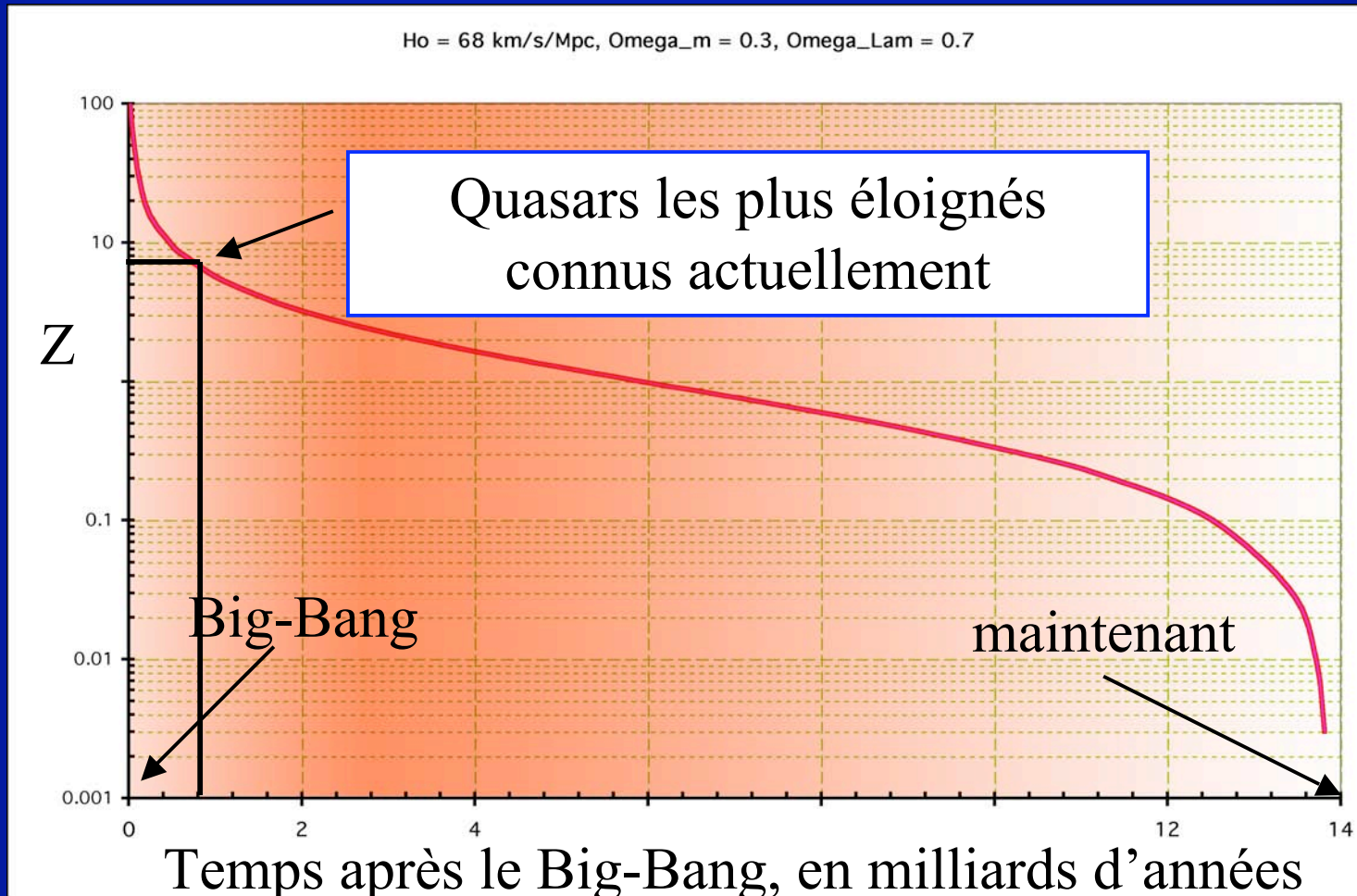
(qui sont proches de nous : décalage faible)

contiennent aussi des Trous Noirs Supermassifs
**mais ils sont en moyenne cent fois moins puissants
que les quasars**

IL N'Y A PAS DE QUASARS PROCHES DE NOUS

POURQUOI?

Lorsque nous regardons *loin dans l'espace*,
nous regardons aussi *loin dans le passé*,
juste après le Big Bang



LES QUASARS SONT DES OBJETS DU PASSÉ

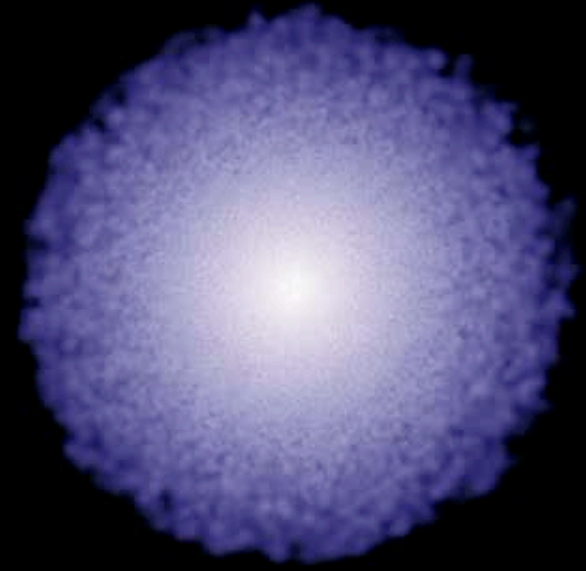
Ce sont les interactions et surtout les collisions entre les galaxies qui causent l'accrétion sur le trou noir

Or dans le passé, les galaxies étaient beaucoup plus proches, les collisions étaient beaucoup plus fréquentes

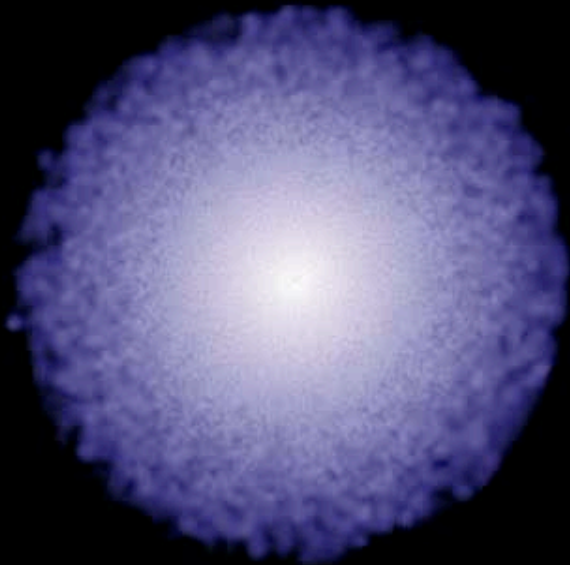


Dans le passé, il y avait beaucoup plus de gaz à avaler que maintenant, le trou noir était donc plus puissant, produisant un quasar

T = 0 Myr



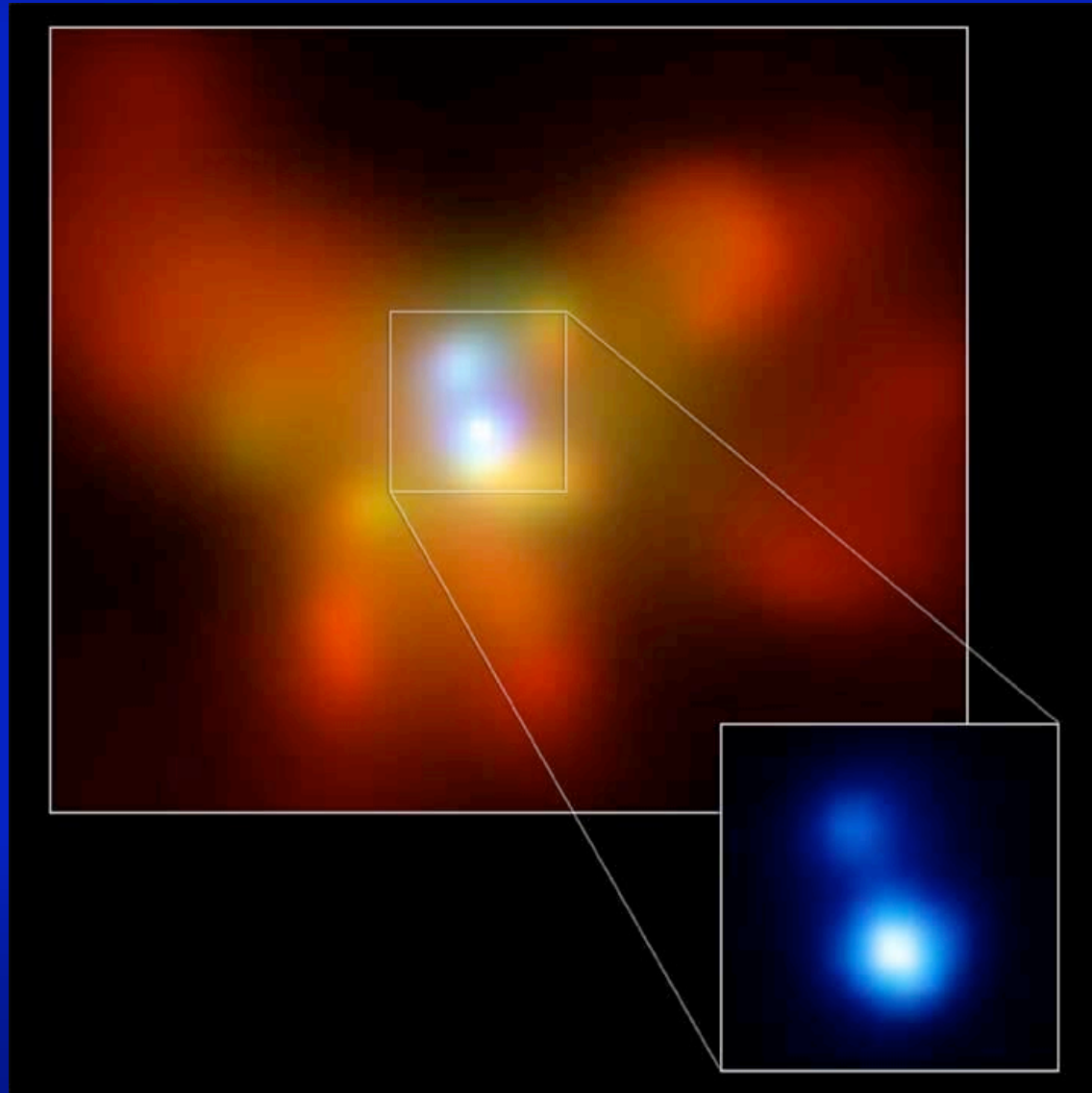
Video 2



10 kpc/h



NGC 6240, une galaxie vue en rayons X,
avec 2 trous noirs supermassifs (Komossa, 2003)



AU BOUT DE CENT MILLIONS D'ANNÉES ENVIRON
LE QUASAR A AVALÉ TOUT CE QUI ÉTAIT À SA PORTÉE,
IL S'ÉTEINT

QUE DEVIENT-IL ALORS?

Il doit y en avoir de nombreux invisibles
autour de nous, mais où sont-ils?

Il faut déterminer la masse d'objets proches

COMMENT FAIT-ON POUR DÉTERMINER LA MASSE D'UN TROU NOIR?

on étudie les mouvements autour
du trou noir hypothétique

*PLUS LES MOUVEMENTS SONT RAPIDES,
PLUS LA MASSE EST GRANDE*

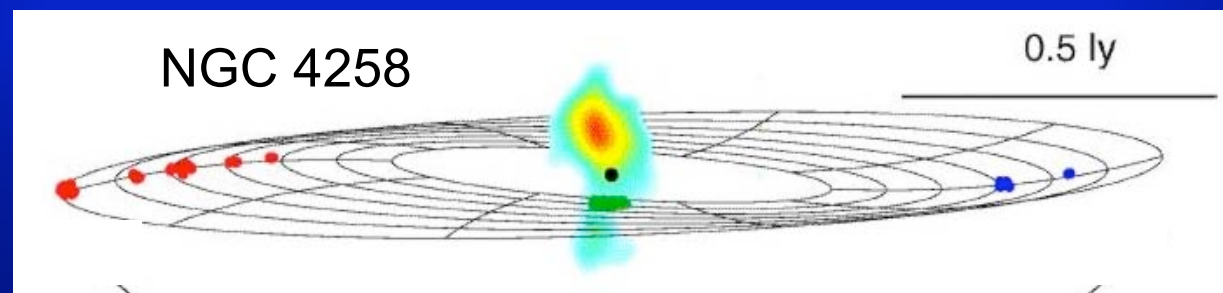
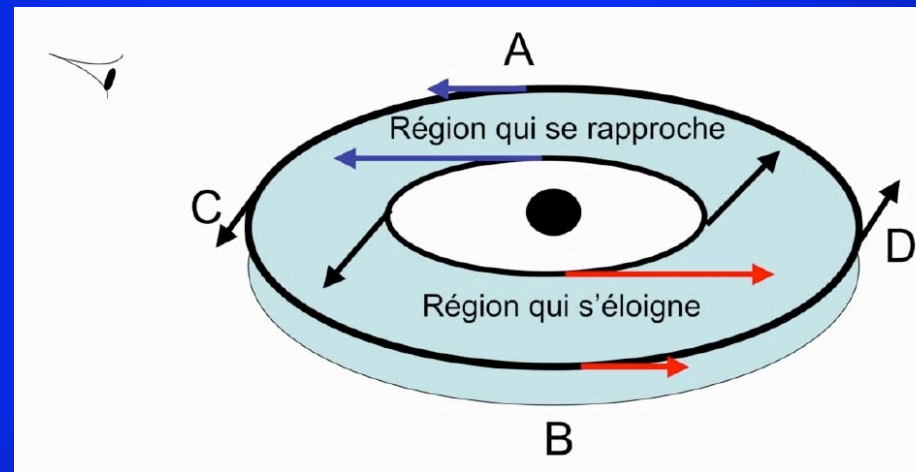
(pour une distance donnée)

Étude spectrale:

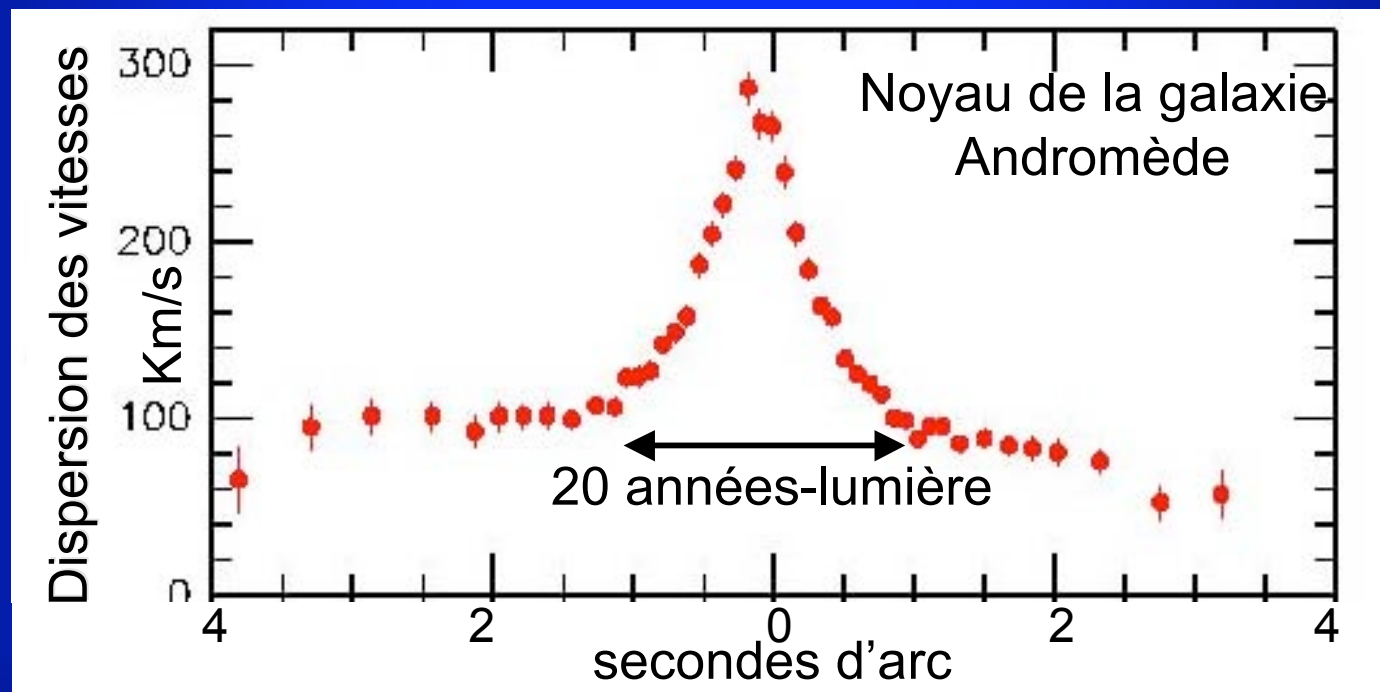
L'effet Doppler donne la vitesse projetée sur la ligne de visée

Dans les années 1990, avec les grands télescopes et le Hubble, on commence à déterminer les masses des coeurs des galaxies, en étudiant les mouvements des étoiles ou du gaz environnant

1. Mesure des vitesses de rotation Keplerienne des étoiles ou du gaz autour du centre des galaxies spirales



2. Mesure des dispersions des vitesses des étoiles ou du gaz autour du centre des galaxies





LES NOYAUX DES GALAXIES « NORMALES »
RECÈLENT D'ÉNORMES MASSES,
MAIS ELLES SONT INVISIBLES!

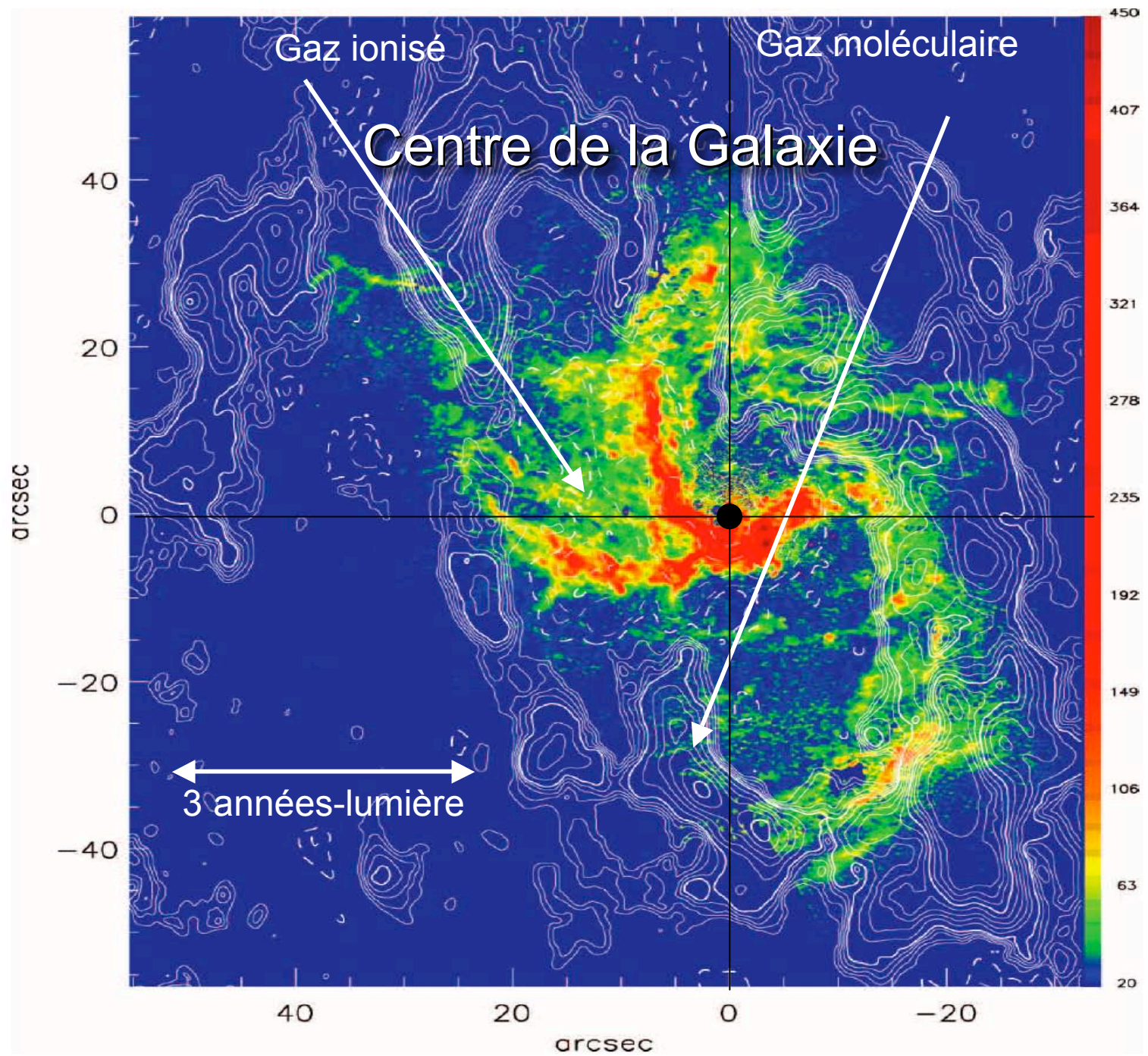
Exemple: pour Andromède: 30 millions de masses solaires

Pour NGC 4258: 43 millions de masses solaires

EST-CE QUE CE SONT DES TROUS NOIRS SUPERMASSIFS,
RESTES DES QUASARS?

LES ANNÉES 2000:
L'INVASION DES TROUS NOIRS GÉANTS

LA PREUVE DONNÉE PAR NOTRE GALAXIE





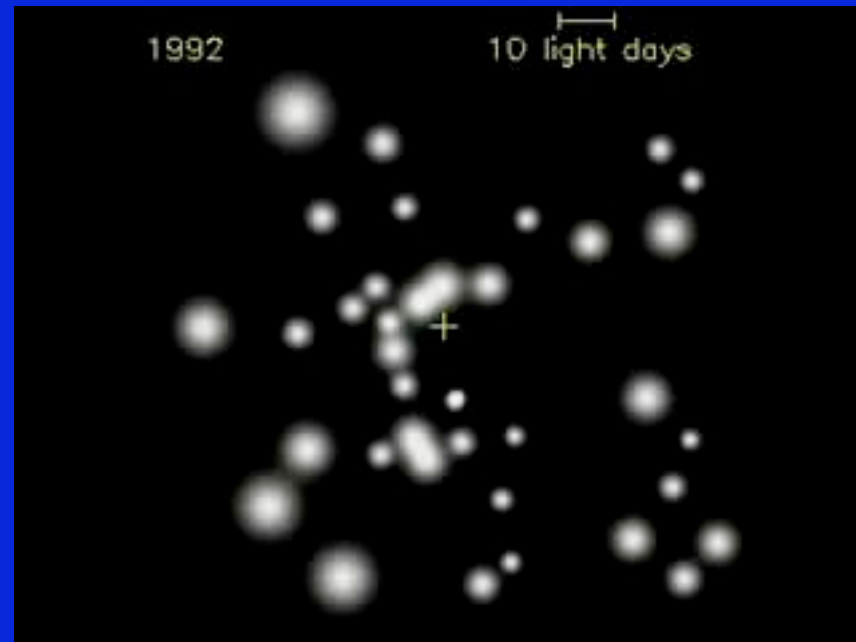
The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

©European Southern Observatory



Mouvements des étoiles sur la sphère céleste



Video 3

Ajout des vitesses Doppler: mouvements à 3D

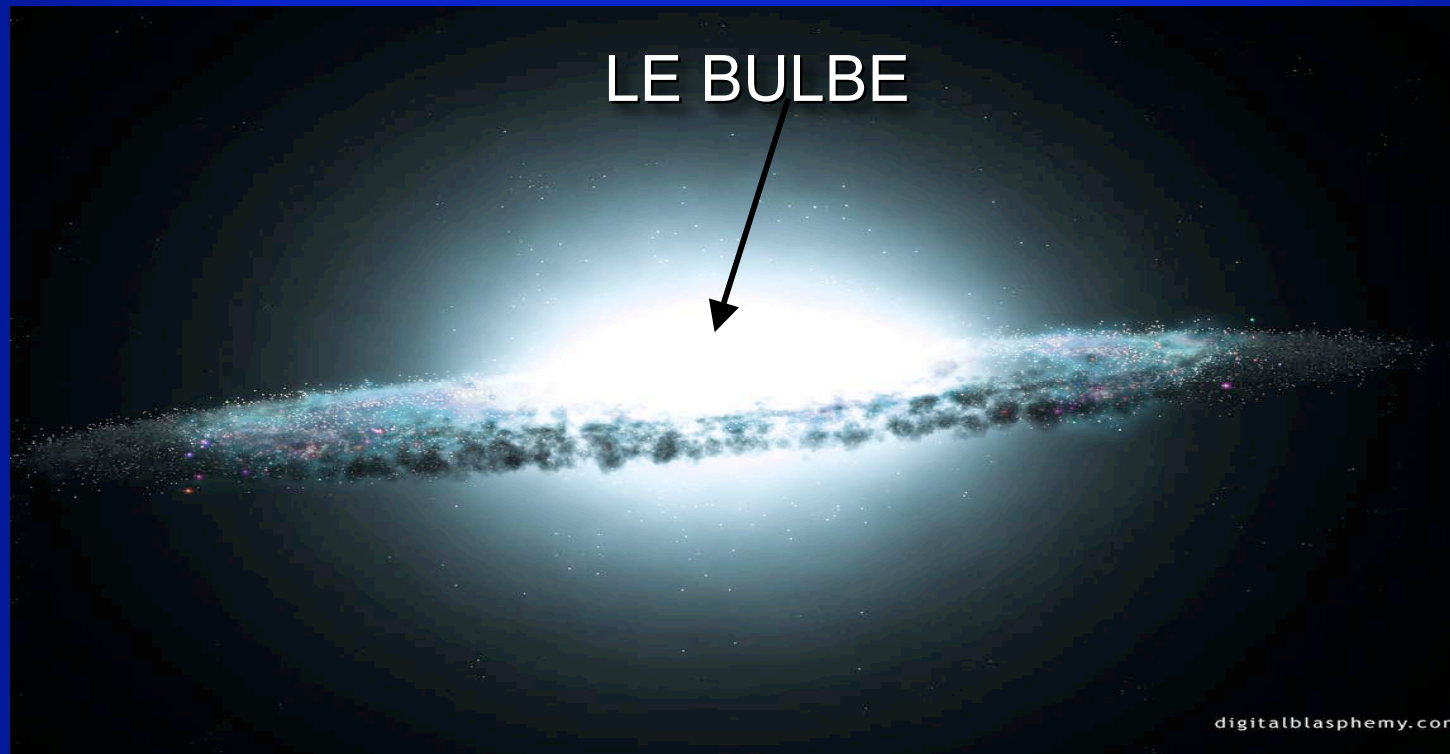
Video 4



Notre Galaxie possède
un trou noir de 3,5 millions de masses solaires

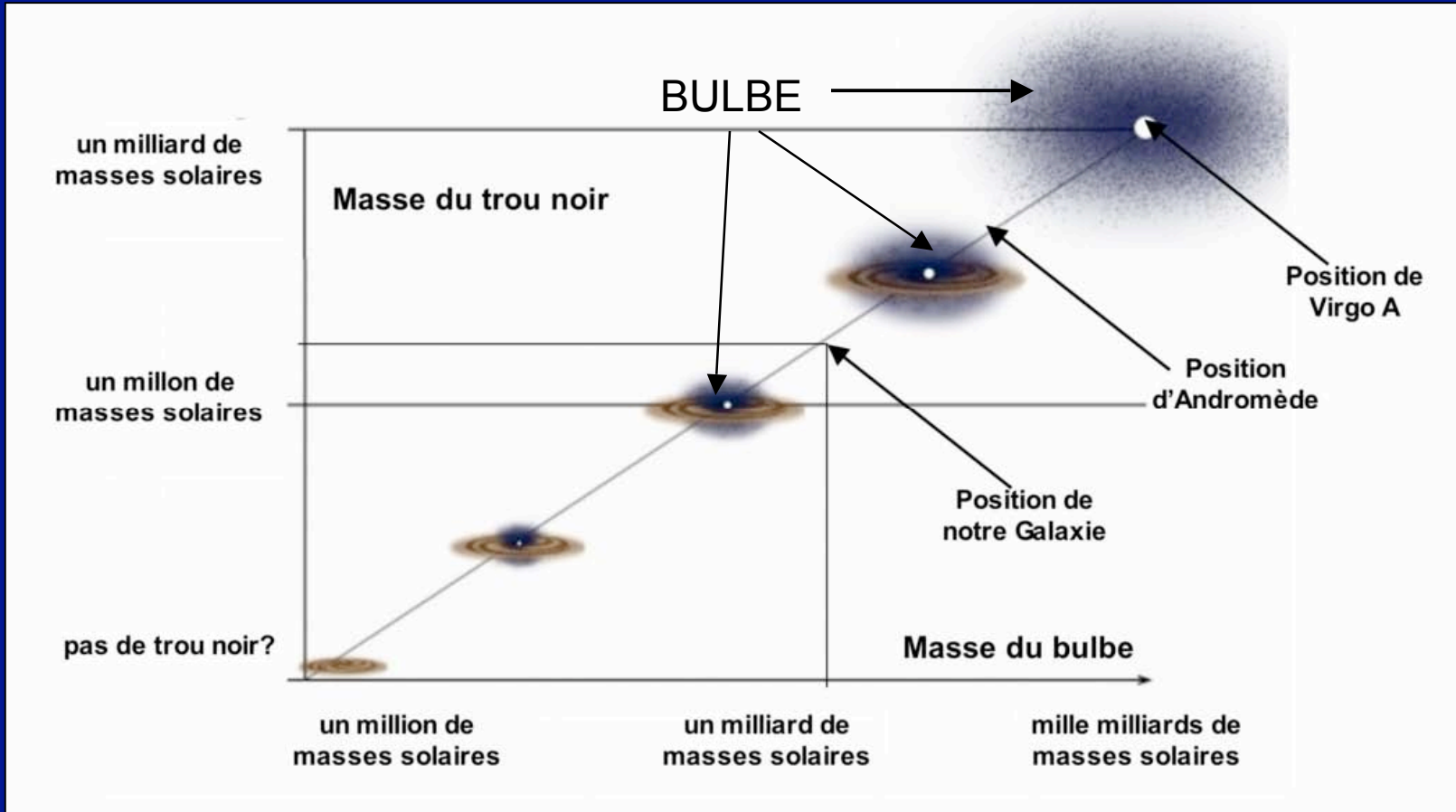
UNE DÉCOUVERTE RÉCENTE

MASSE DU TROU NOIR = 1/1000 MASSE DU BULBE



OR

RAYON DU TROU NOIR = 1/100 000 000 RAYON DU BULBE!



POURQUOI CETTE RELATION?

I. PARCE QUE LES TROUS NOIRS ET LES GALAXIES SE FORMENT ENSEMBLE AU DÉBUT DE LA VIE DE L'UNIVERS

II. PARCE QUE LE TROU NOIR A UNE INFLUENCE SUR L'ÉVOLUTION ULTÉRIEURE DE LA GALAXIE TOUTE ENTIÈRE

Exemple: la galaxie de Seyfert NGC 1275 au centre
de l'amas de Persée



En rayons X

Ondes sonores

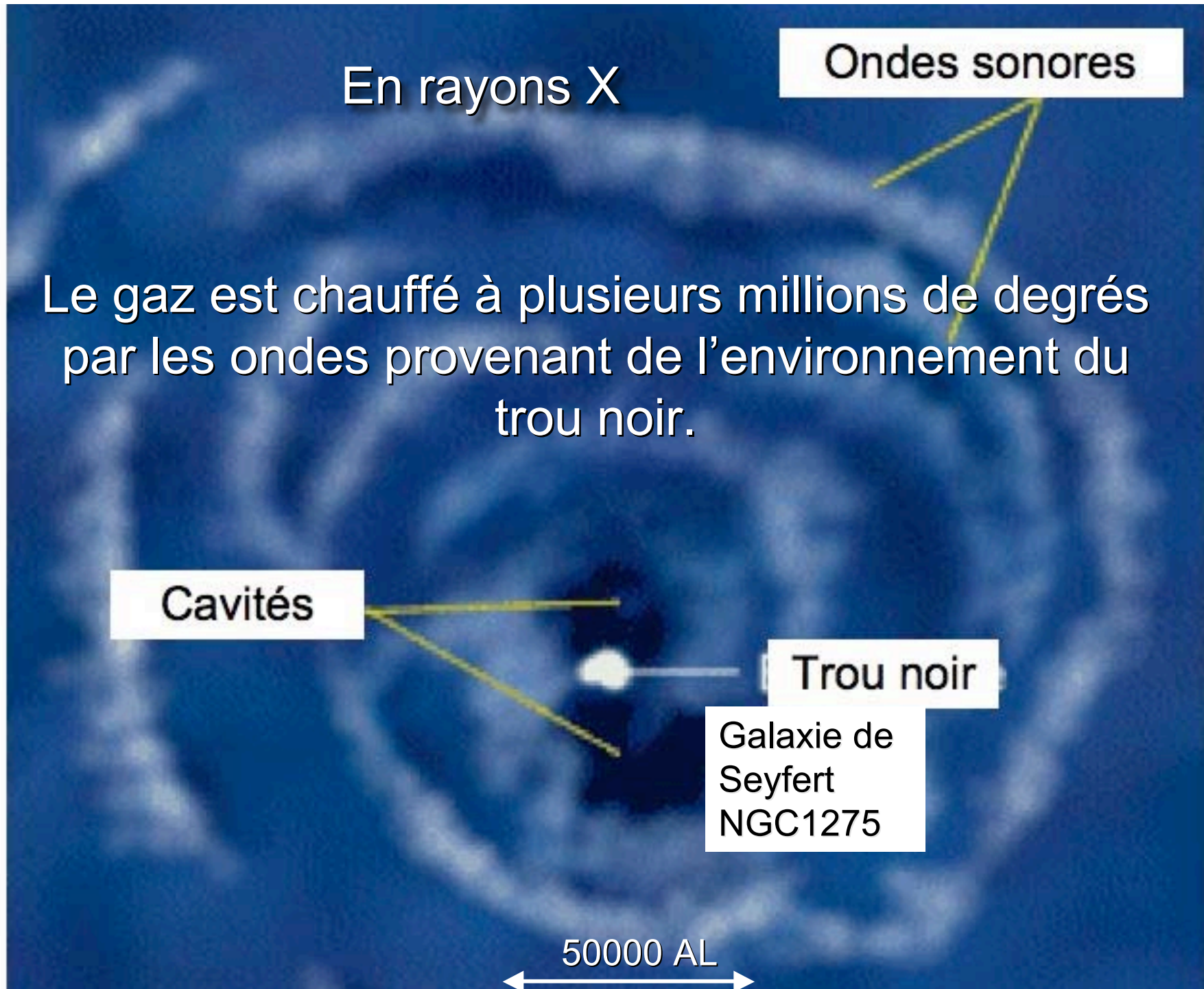
Le gaz est chauffé à plusieurs millions de degrés par les ondes provenant de l'environnement du trou noir.

Cavités

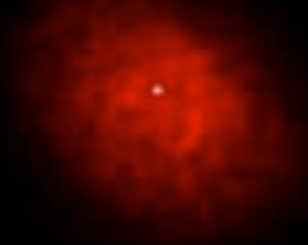
Trou noir

Galaxie de
Seyfert
NGC1275

50000 AL



Video 5



Une toute récente découverte (2008):

un trou noir de 40000 masses solaires
au centre d'un amas d'étoiles
dans le halo de notre Galaxie:
c'est sans doute une petite galaxie
qui a été capturée par la nôtre.

C'est le plus petit trou noir supermassif à ce jour

EXISTE-T-IL DES "TROUS NOIRS INTERMÉDIAIRES"

ENTRE 10 ET 10000 MASSES SOLAIRES?

Oui, mais ils ne sont pas au centre des galaxies

(ce sont les ULX, Ultra Luminous X-ray Sources)

Video 6

LES TROUS NOIRS MASSIFS ETEINTS PEUVENT-ILS SE RALLUMER?

Oui, il suffit qu'un nuage de gaz tombe sur le trou noir

C'est ce qui s'est passé il y a 5 millions d'années dans notre Voie Lactée, et qui se reproduira certainement un jour.

On calcule que dans quatre milliards d'années, notre Galaxie subira une collision avec la galaxie d'Andromède, qui conduira peut-être à une fusion, et le trou noir central sera sans doute fortement réactivé

Video 7

CONCLUSIONS

LA FORMATION ET L'ÉVOLUTION DES GALAXIES
EST ÉTROITEMENT LIÉE
A CELLE DES TROUS NOIRS SUPERMASSIFS

PRESQUE TOUTES LES GALAXIES
CONTIENNENT UN TROU NOIR SUPERMASSIF
ET SONT PASSÉES PAR LE STADE DE QUASAR

QUELQUES QUESTIONS ACTUELLES RELATIVES AUX TROUS NOIRS SUPERMASSIFS

- Est-ce que ce sont les TNs supermassifs ou les étoiles qui se sont formés les premiers?
- Comment former des TN d'un milliard de masses solaires en quelques centaines de millions d'années? TNs préexistants?
- Est-ce que les TNs supermassifs vont permettre de résoudre certains problèmes du modèle cosmologique standard (feed-back, par exemple)?
- Rôle des TNs supermassifs dans l'entropie et le destin de l'Univers...