

# LES TROUS NOIRS SUPERMASSIFS DANS L'UNIVERS

Suzy Collin-Zahn

LUTH, Observatoire de Paris-Meudon

*Commission Cosmologie de la SAF, 6 Mars 2010*

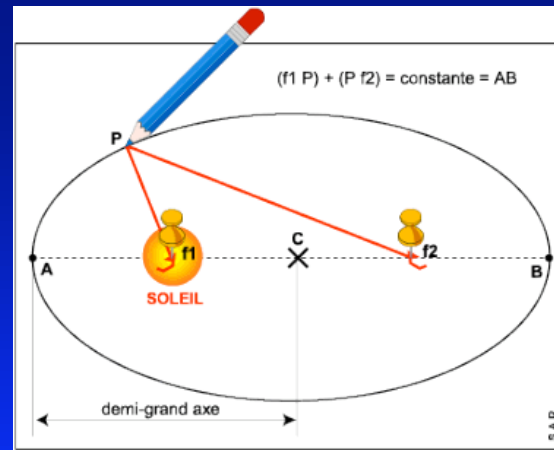
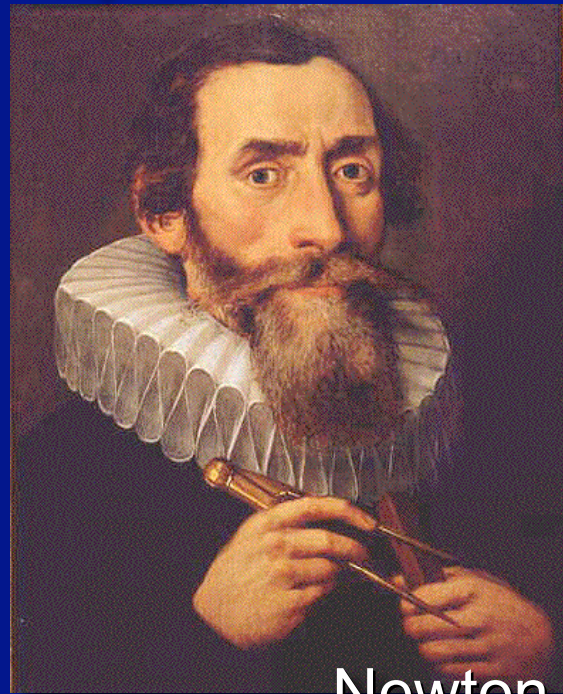
- Rappels historiques
- Notions sur les trous noirs
- quasars et trous noirs supermassifs (TNSM)
- Impact des TNSM sur la formation et l'évolution des galaxies

# RAPPELS HISTORIQUES

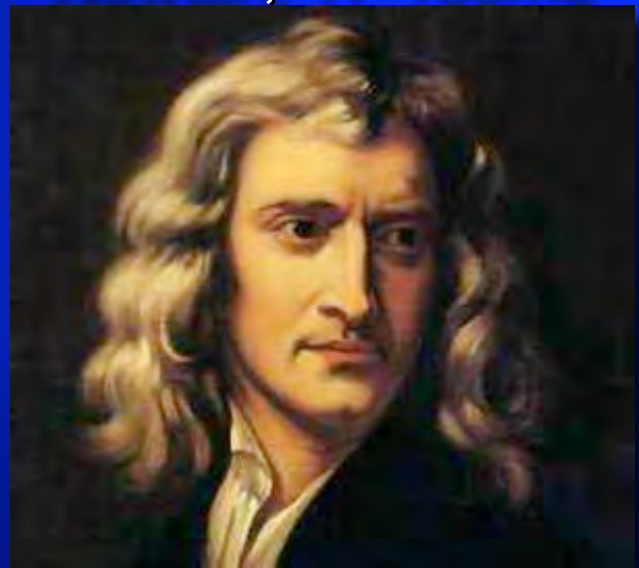
L'histoire des trous noirs remonte loin

Quelques étapes indispensables

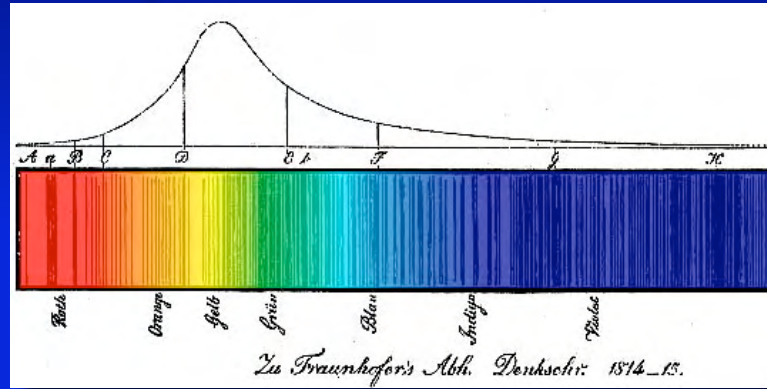
# Kepler, 16-17ème



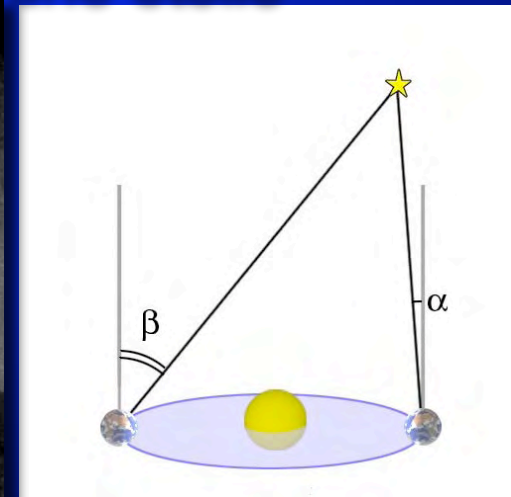
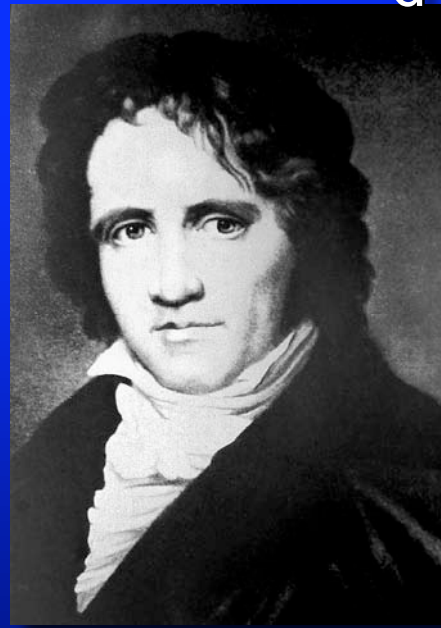
# Newton, 17-18ème



# Fraunhofer, 1820: spectroscopie appliquée au Soleil puis aux étoiles



Bessel, 1838: première distance d'une étoile



.... puis Maxwell, Planck, Mach...

Au XVIII<sup>ème</sup> siècle, Pierre Simon Laplace et John Mitchell avaient imaginé un astre bizarre, 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



**ILS AVAIENT ANTICIPÉ LES TNSM!**

Vingtième siècle, petite digression cosmologique

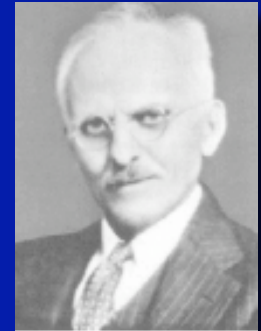
Il y a 90 ans, l'Univers était réduit à la Voie Lactée  
*(néanmoins intuition de Kant)*



**Shapley**

1920: « le grand débat »  
sur les « nébuleuses spirales »

1925: Hubble:  
première distance d'une « galaxie »



**Curtis**



**Henrietta  
Leavitt**

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



expansion de l'Univers

les ondes lumineuses sont « étirées »  
lors de leur propagation dans l'espace,  
Leurs longueurs d'onde augmentent  
d'autant plus que la source est plus lointaine.

**LES RAIES SPECTRALES SE DÉPLACENT VERS LE ROUGE**

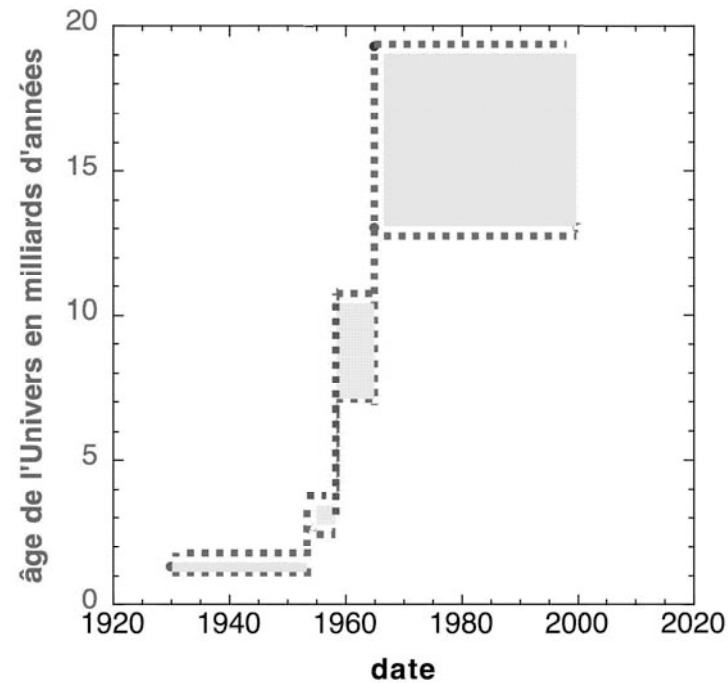
« redshift » :

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

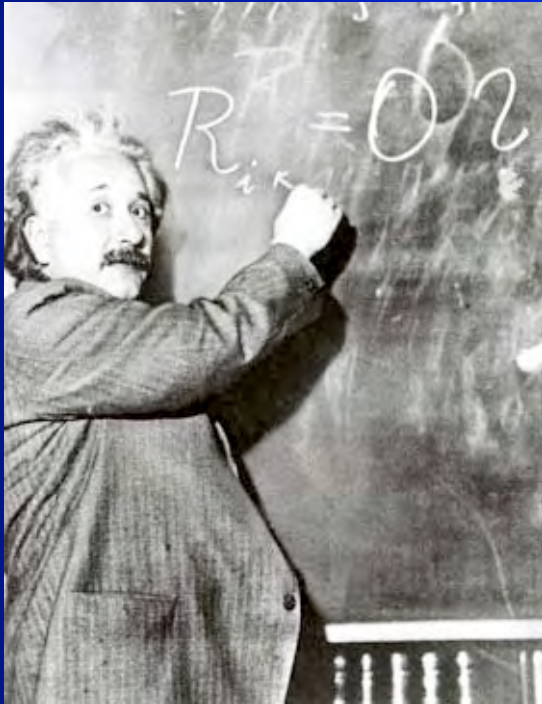


# L'Univers devient 100000 fois plus grand!

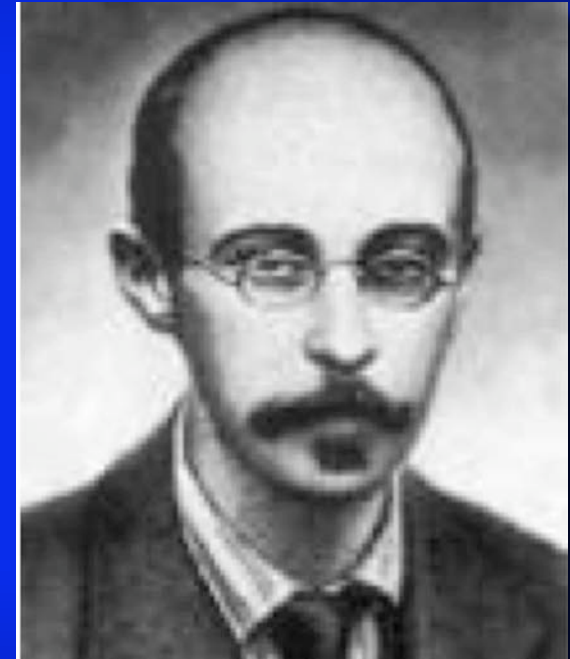
*en fait Hubble avait  
sous-estimé la taille  
et l'âge de l'U par  
un facteur 8*



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



Univers  
statique!  
(Constante  
cosmologique)



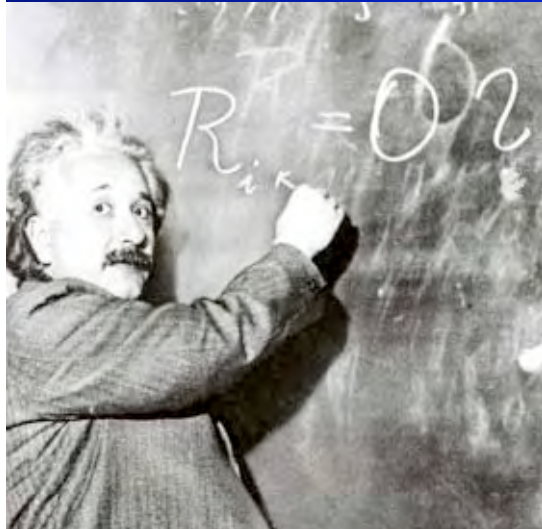
1922, Friedmann,  
prédit l'Univers en  
expansion

## UNE PETITE ERREUR DE JUGEMENT

Lettre du secrétaire de l'Académie des Sciences, Abbott,  
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 demi-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».

# Retour aux trous noirs: Einstein, encore, RG l'espace-temps est courbé par les masses



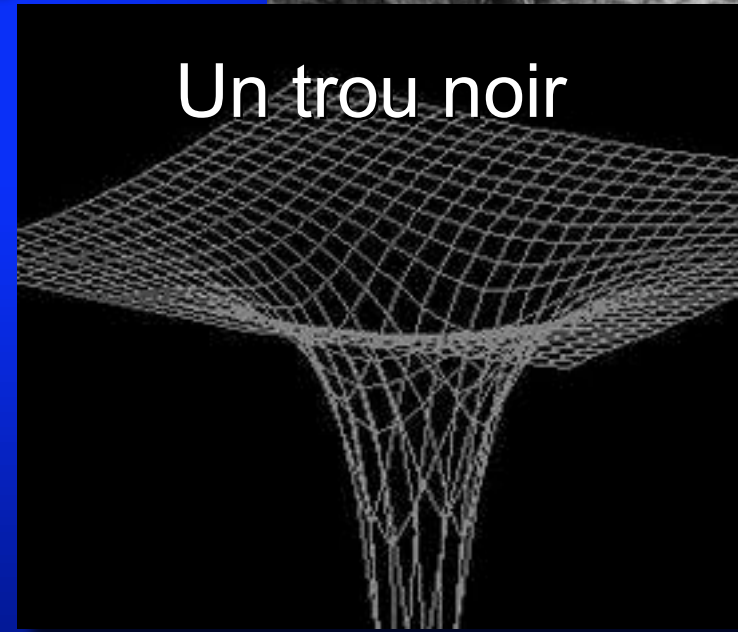
Karl Schwarzschild fait  
immédiatement (1916)  
la théorie des  
trous noirs



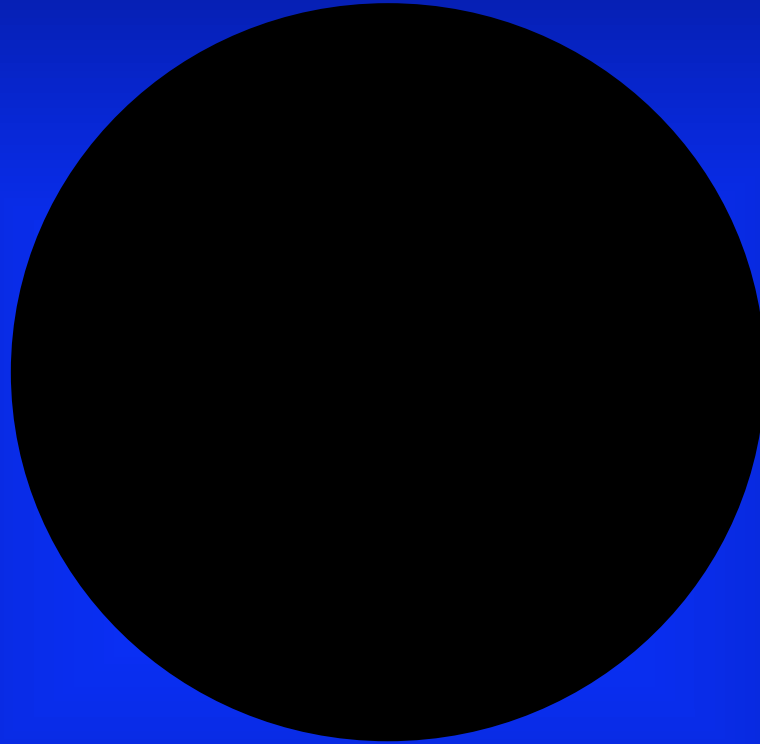
un corps ordinaire



Un trou noir



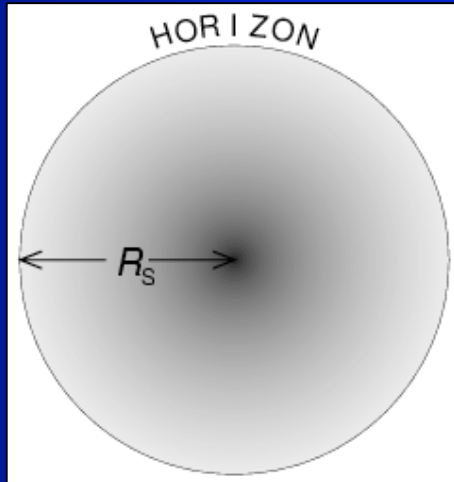
# Les trous noirs



???

## QU'EST-CE QU'UN TROU NOIR?

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



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

*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)

« C'est un objet très ennuyeux »

3 paramètres seulement:

Masse: déterminée observationnellement

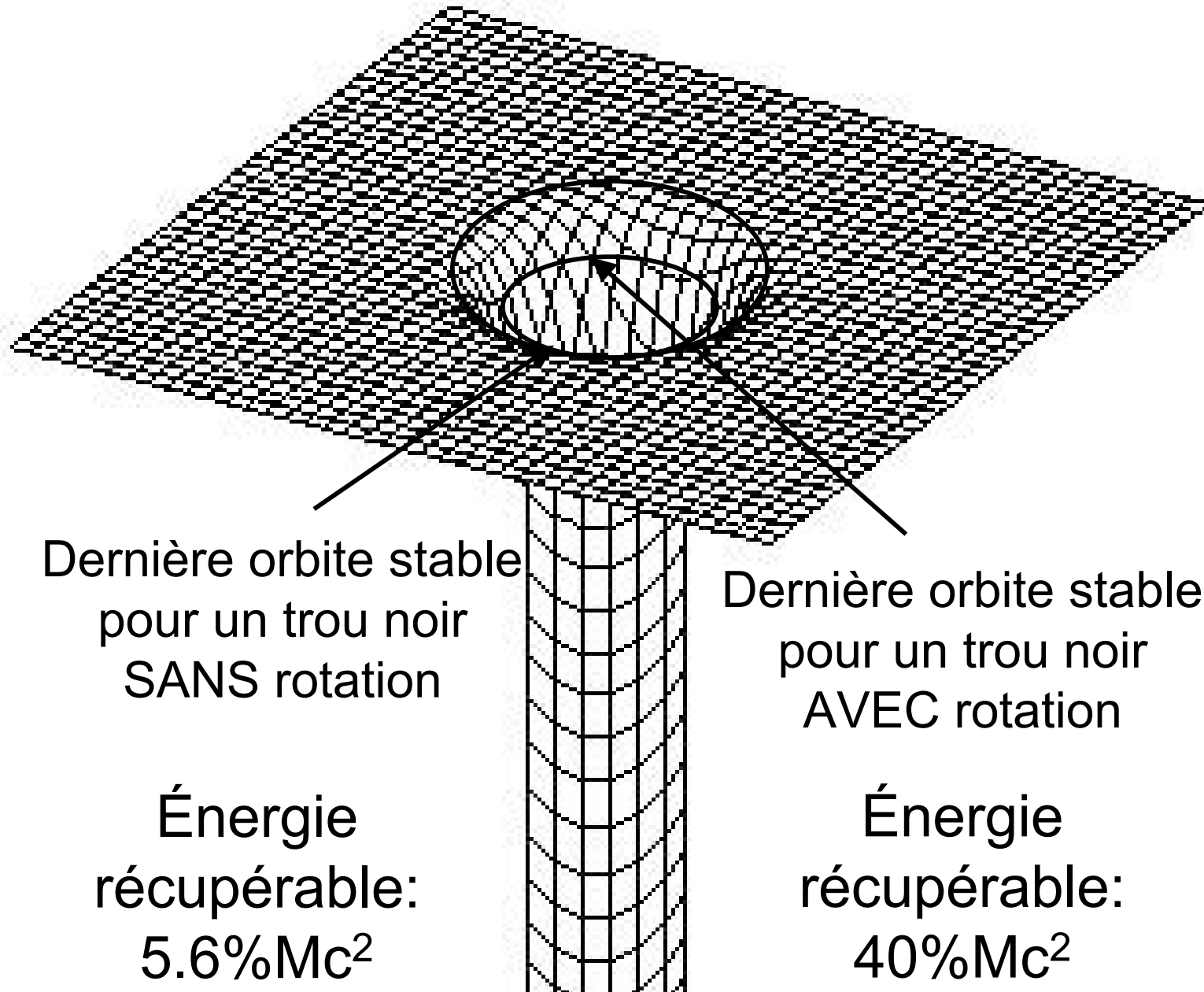
Spin: de même (hum...)

Charge électrique: supposée nulle

On ne sait RIEN de ce qui se passe à l'intérieur

Singularité / Gravitation quantique?

(branes, cordes...)



Dernière orbite stable  
pour un trou noir  
SANS rotation

Énergie  
récupérable:  
5.6%Mc<sup>2</sup>

Dernière orbite stable  
pour un trou noir  
AVEC rotation

Énergie  
récupérable:  
40%Mc<sup>2</sup>



# LES TROUS NOIRS “STELLAIRES”

à la fin de sa vie, une étoile massive 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 SUPERMASSIFS

(TNSM, SMBH)

de un million à plusieurs milliards de masses solaires

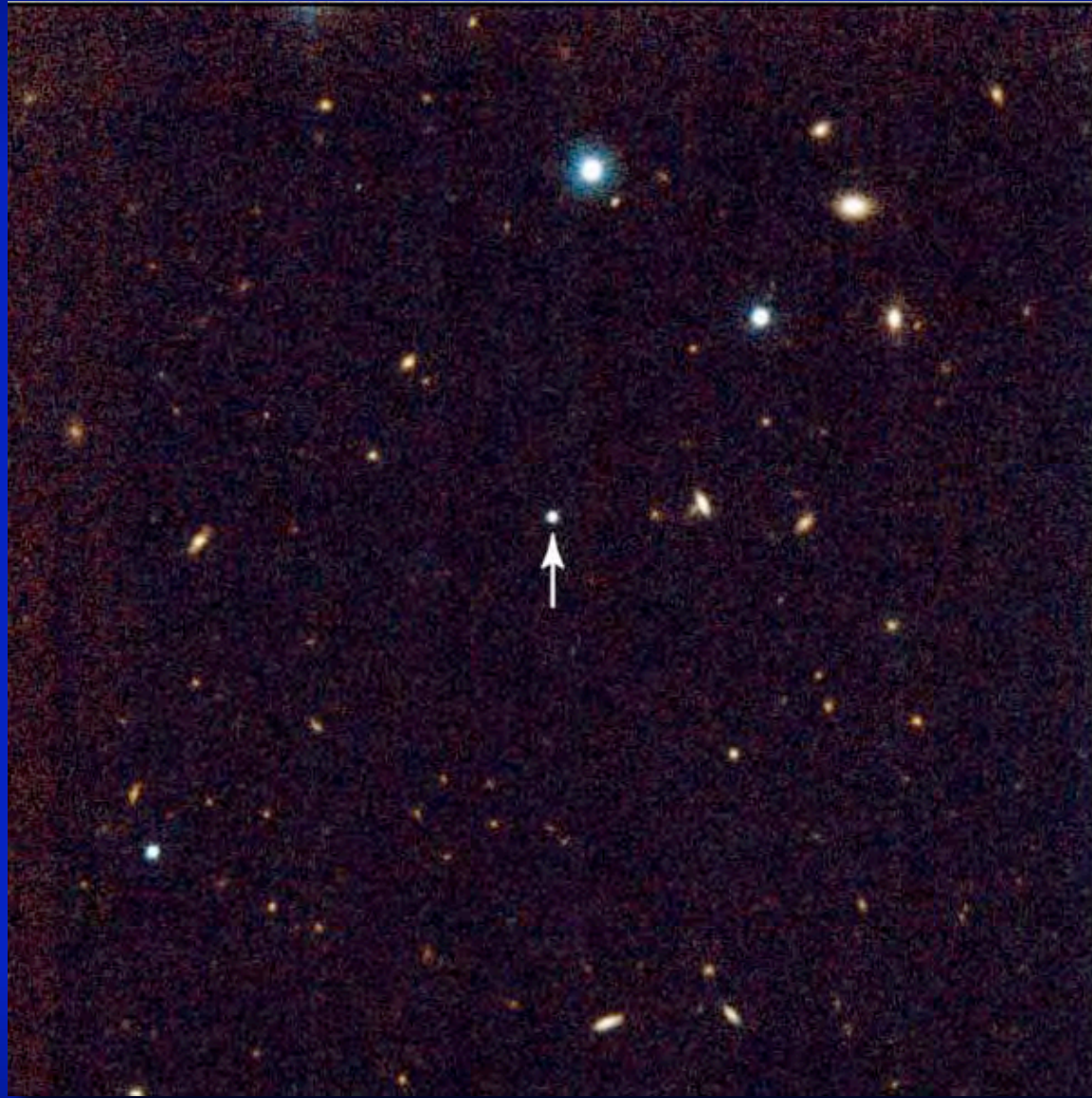
# 1963: DECOUVERTE DES PREMIERS « QUASARS »

identification de “radio-sources”  
avec des « étoiles » ayant d’intenses raies spectrales  
**très décalées vers le rouge (“redshift”  $Z > 0.1$ )**

## 1964: LE DÉCALAGE NE PEUT ÊTRE QUE COSMOLOGIQUE

Les quasars sont donc très éloignés:  
des milliards d’années-lumière

Un quasar de  $z=6$  (« 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

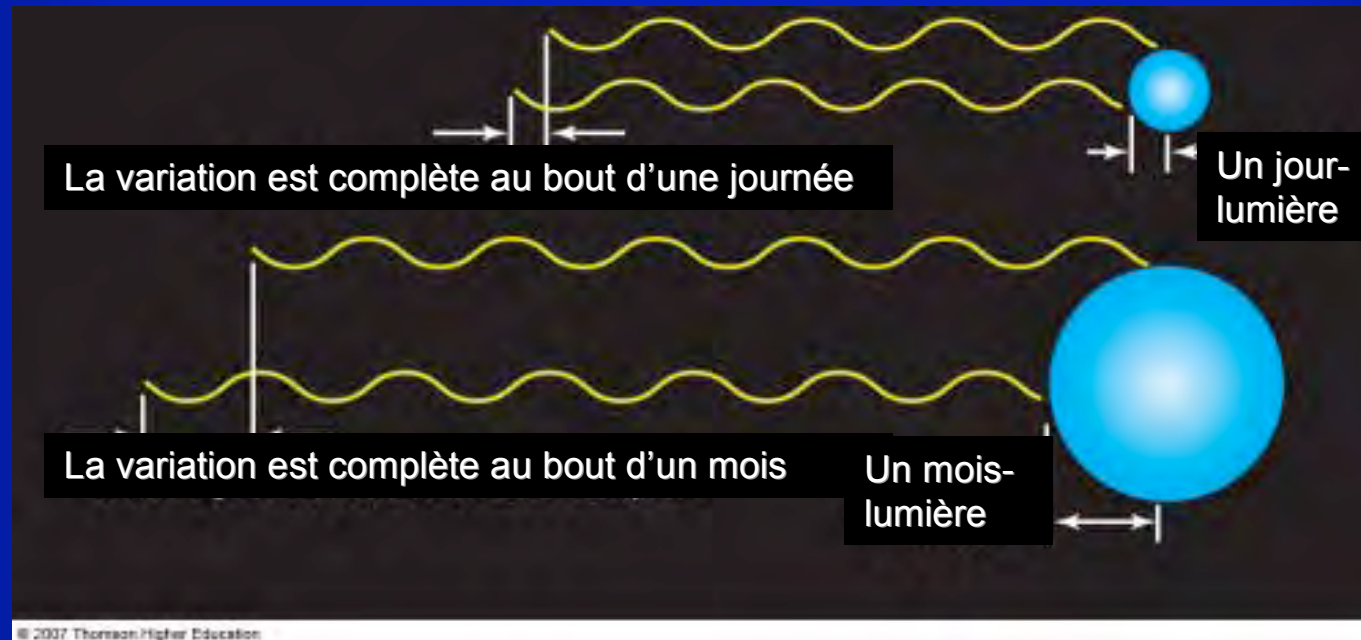
UN QUASAR ÉMET AUTANT DE LUMIÈRE  
QUE 1000 GALAXIES

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

# Principe de causalité



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

Impossible! Disent certains  
IL FAUT INVENTER UNE NOUVELLE PHYSIQUE:  
“CONTROVERSE DU REDSHIFT”

**POURTANT C'EST POSSIBLE  
AVEC UN TROU NOIR**  
*(Salpeter, Zeldovich, dès 1964)*

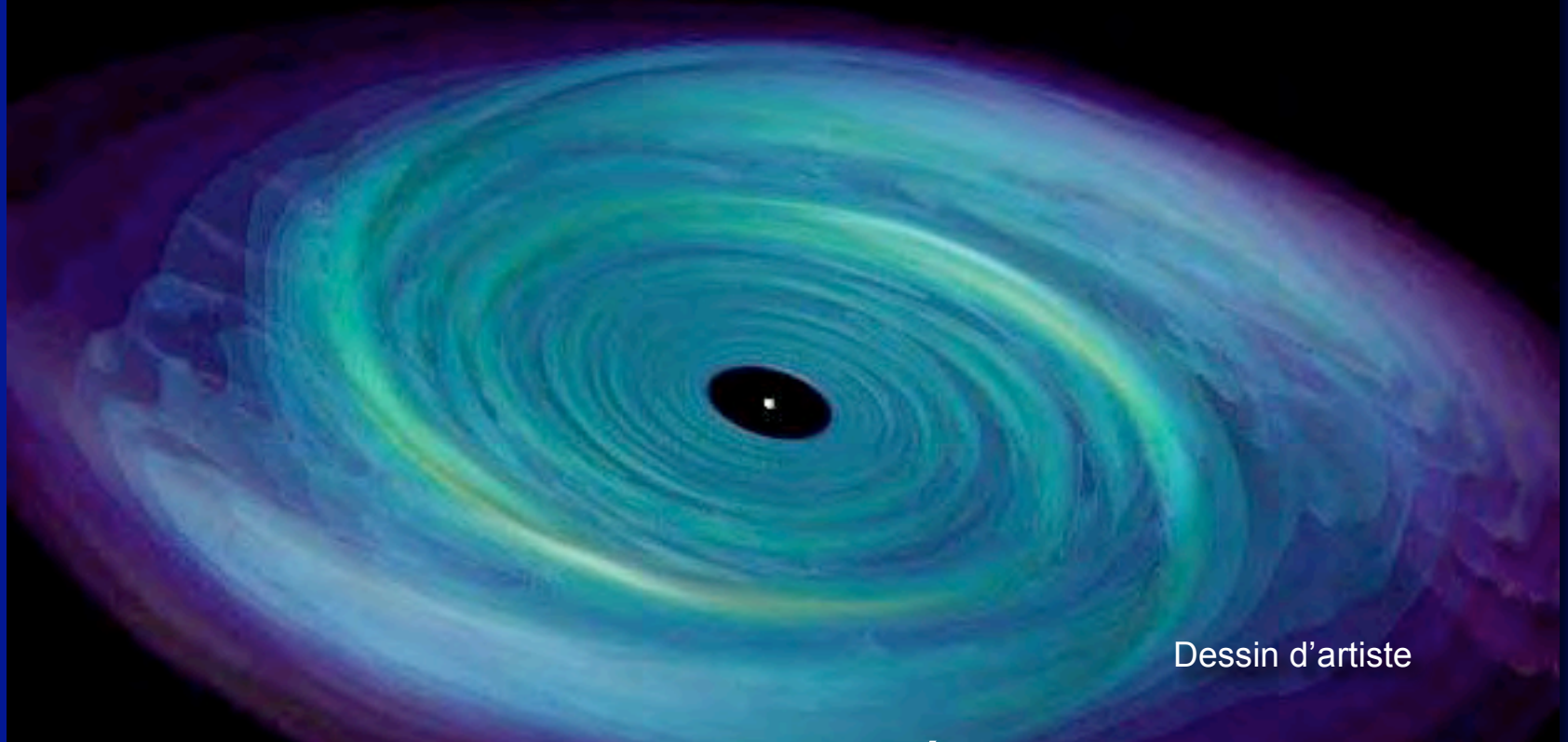
Mais comment un trou noir peut-il « rayonner »?

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

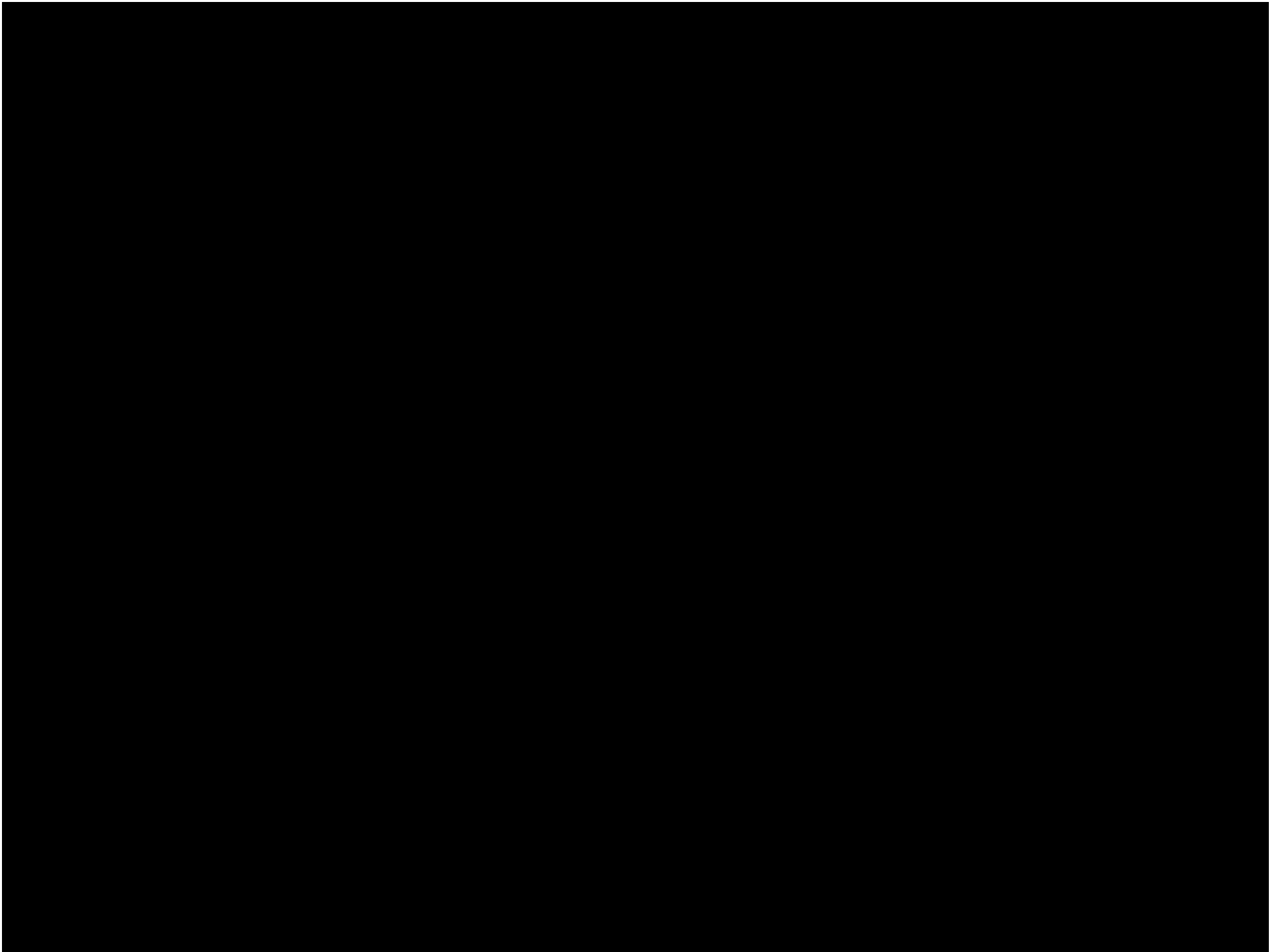


Dessin d'artiste

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)*



On a maintenant plusieurs preuves  
de l'existence du trou noir et du disque d'accrétion

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)  
qui peut permettre de connaître le « spin » du TNSM

# LES QUASARS RAPPELLENT DES OBJETS PROCHES

1. C. Seyfert, 1943: “Nuclear emission in spiral nebulae”

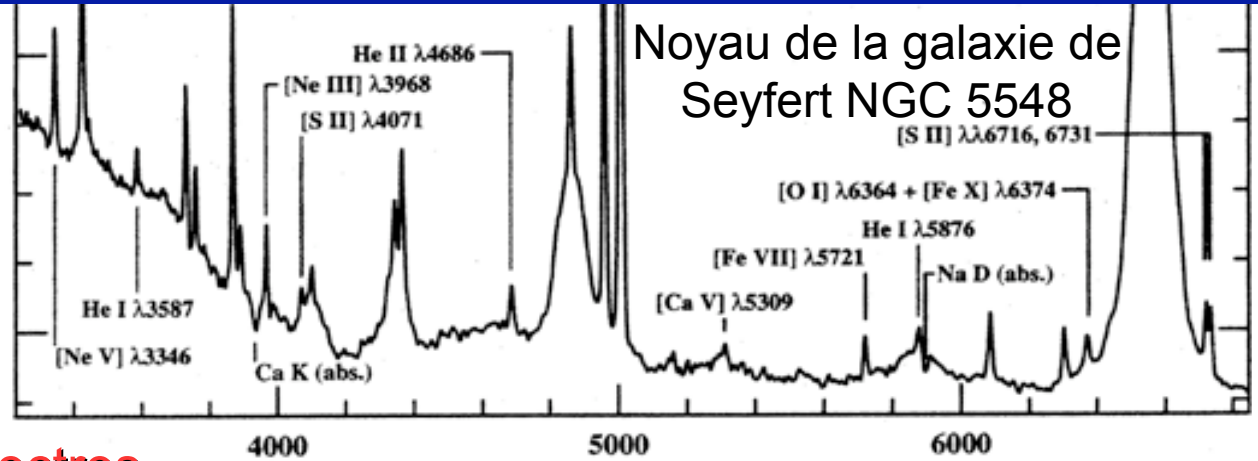
6 galaxies à noyau très brillant, d’aspect stellaire, très bleu, avec des raies en émission intenses et larges (8000km/s)

personne n’y prête attention,

il y a maintenant des dizaines de milliers de “galaxies de Seyfert”

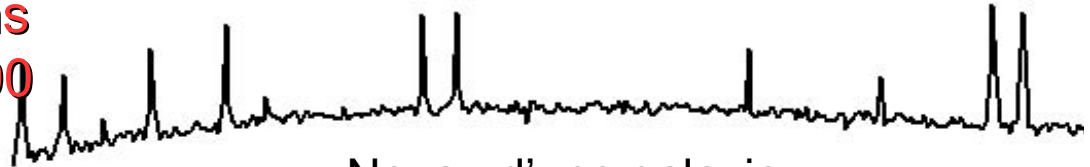
Une « galaxie de Seyfert »,  
NGC5548,  
Télescope Spatial Hubble



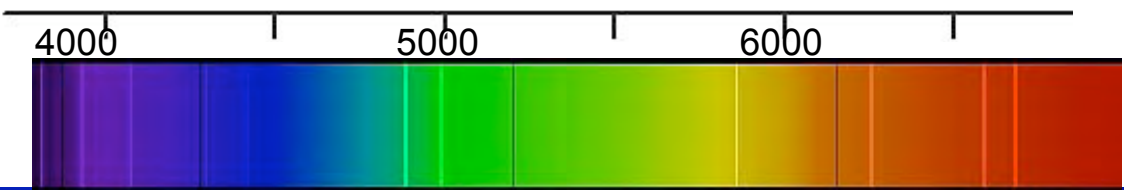


Noyau de la galaxie de Seyfert NGC 5548

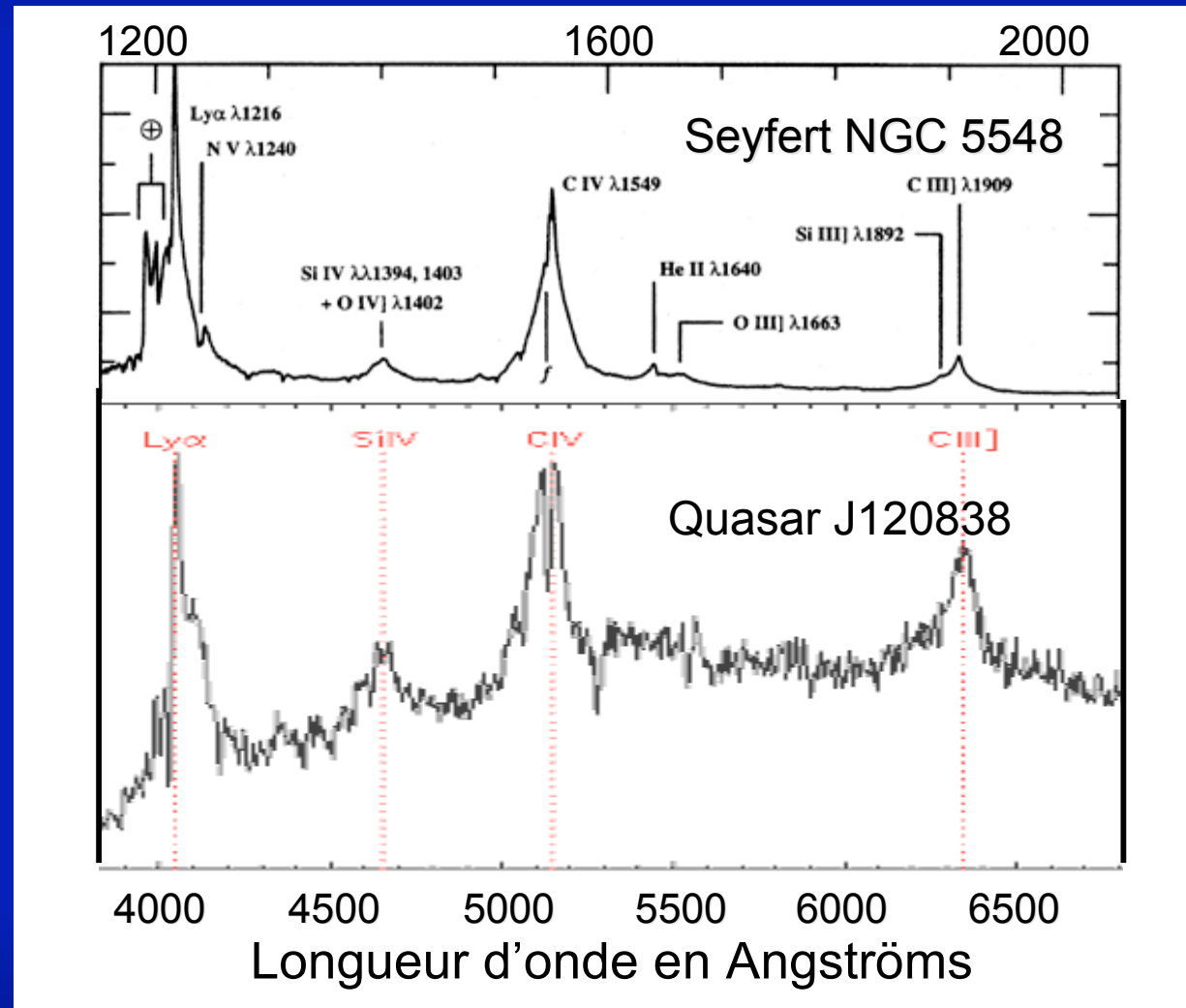
Spectres  
obtenus dans  
les années 90



Noyau d'une galaxie  
spirale normale



# Comparaison du spectre d'un quasar et d'une galaxie de Seyfert (avec Hubble et VLT)



## 2. radio-galaxies

1952:identification de deux sources “radio” très intenses avec les galaxies Cygnus A et Virgo A: des “radio-galaxies”

Photo de Cygnus A obtenue en 1952 au Palomar



Le rayonnement radio provient de particules chargées très rapides dans un champ magnétique (rayonnement synchrotron).

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

**Presque personne n'y prête attention**





# CYGNUS A

VLA 6cm

300000 années-lumière

VLBI 1.3cm

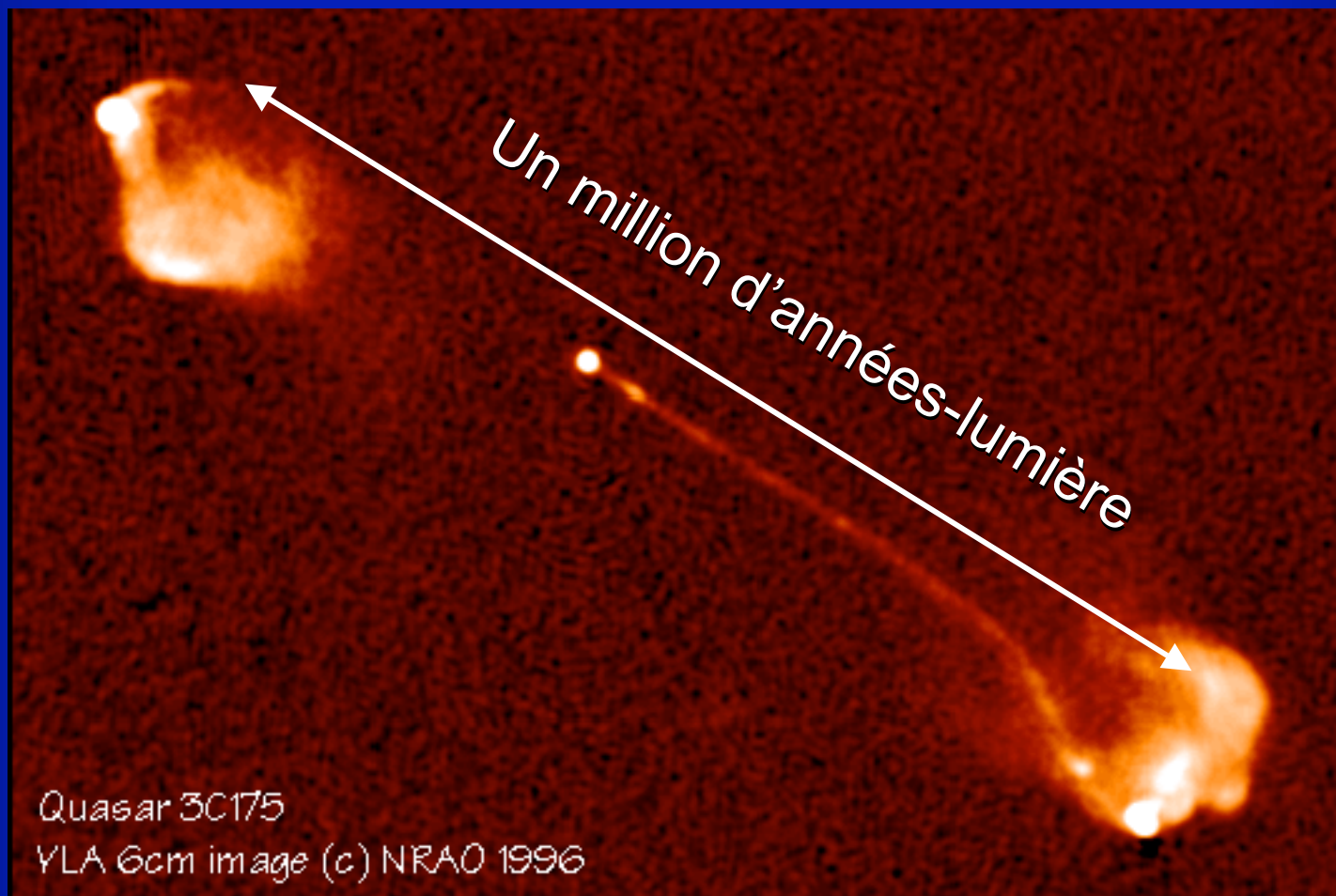
220 années-lumière

VLBI 7mm

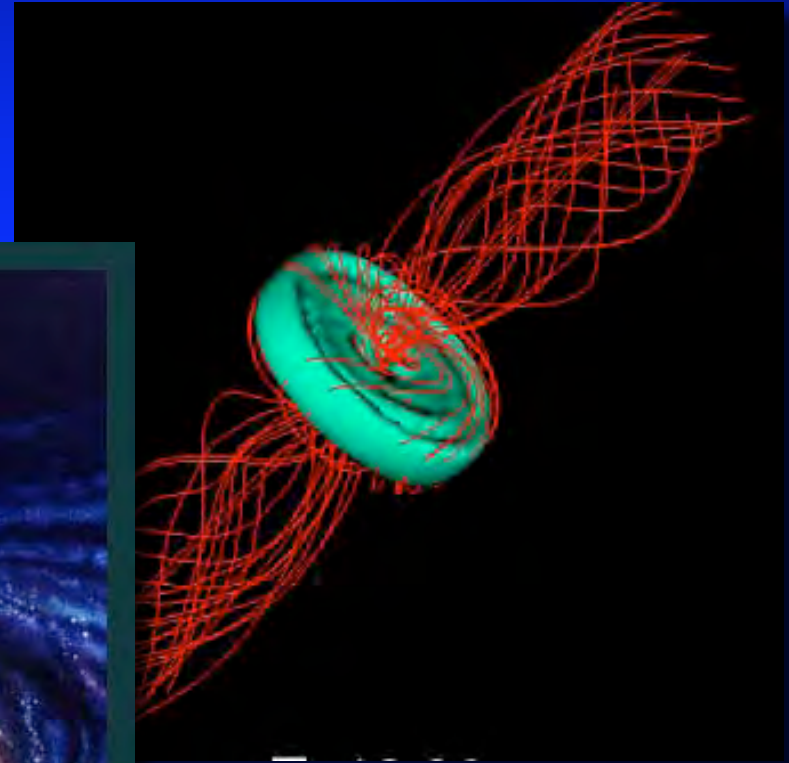
6,6 années-lumière

Carte radio obtenue  
dans les années 1980

## Carte radio d'un quasar:



# Radio-galaxies et TNSM radio



DONC LES QUASARS SONT DES

**“noyaux actifs de galaxies”**

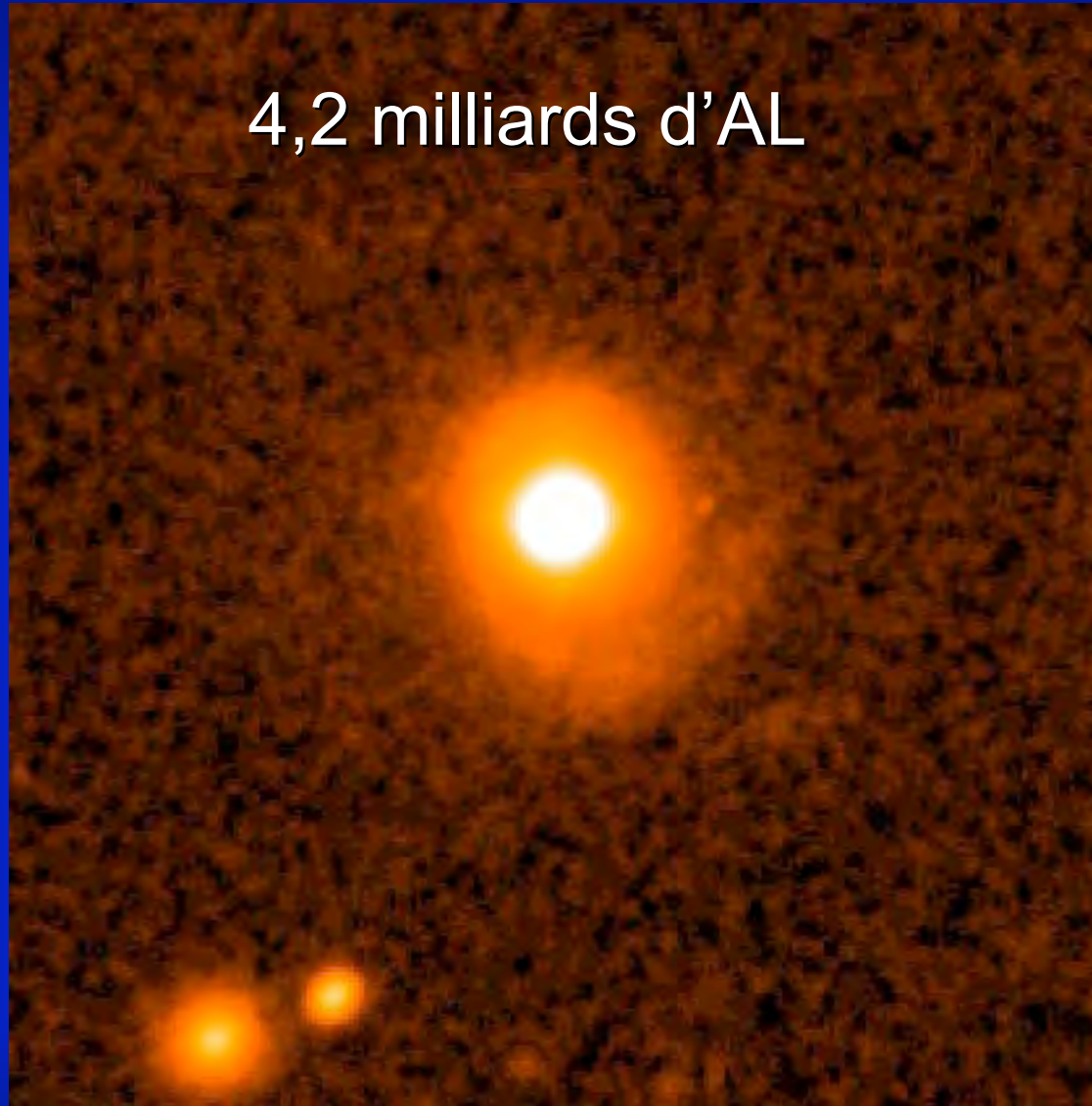
comme les galaxies de Seyfert et les radio-galaxies,  
mais dans un état **“très actif”**

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

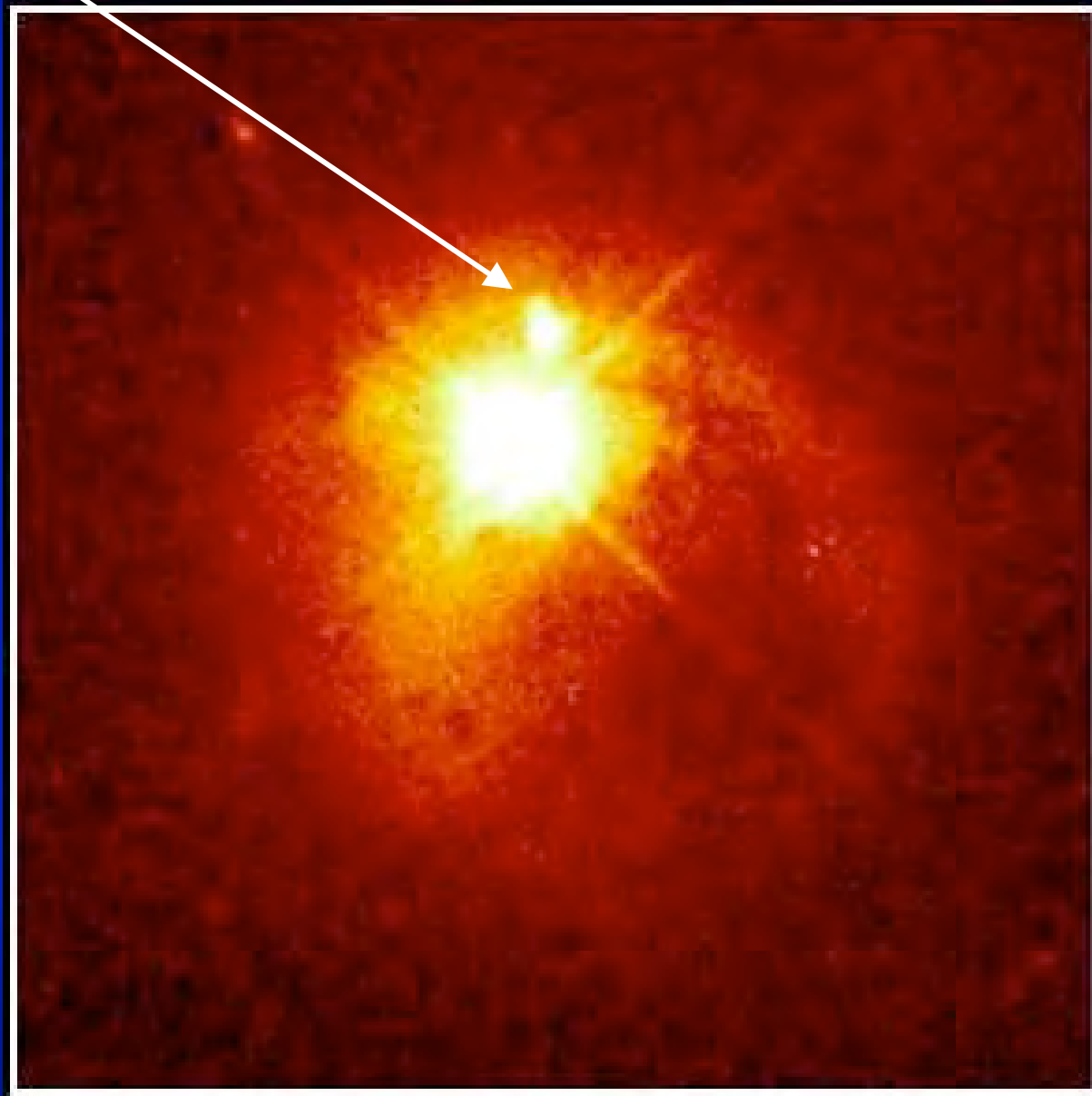
**“galaxies -hôtes”**

à des milliards d'années-lumière de distance.

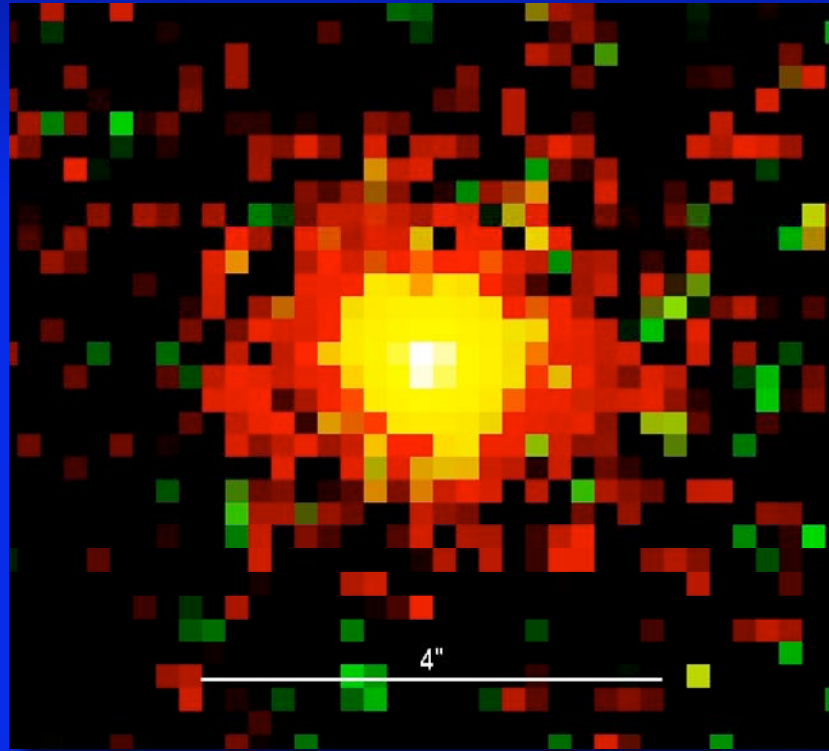
4,2 milliards d'AL



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



CFHQSJ2329-030,  
 $z=6.43$ , 12.8 milliards d'années-lumière



Les galaxies « à noyaux actif » 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

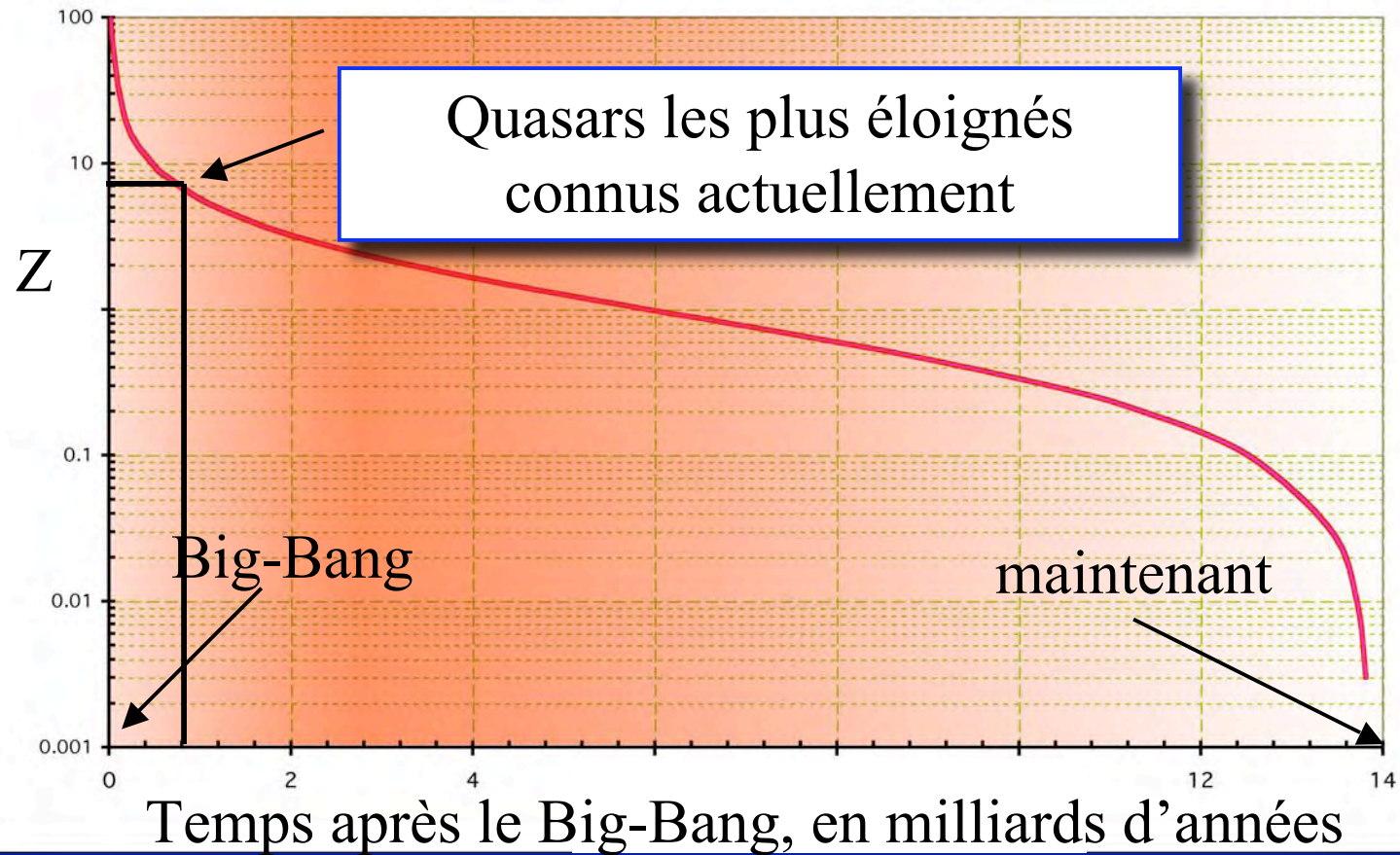
POURQUOI?

*Lorsque nous regardons loin dans l'espace,  
nous regardons aussi loin dans le passé,*

LES QUASARS SONT DONC DES OBJETS DU PASSÉ



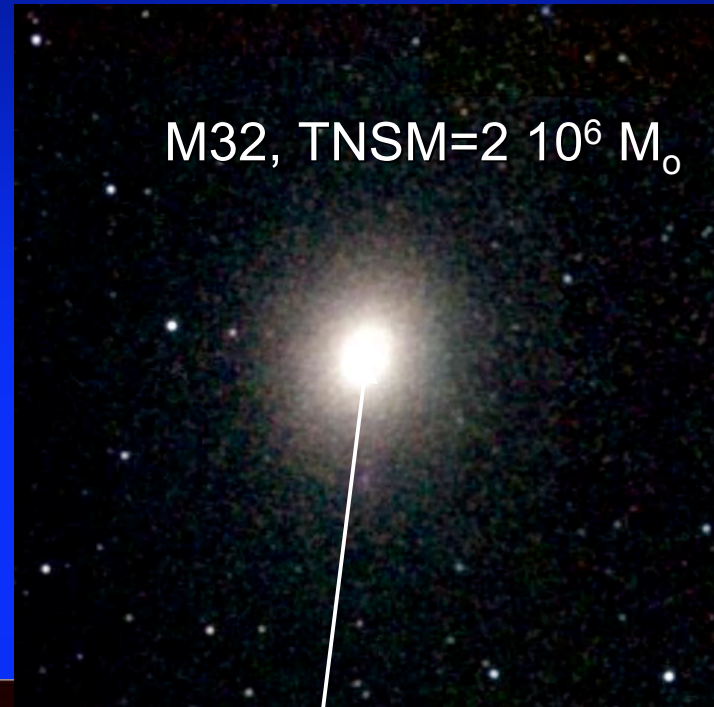
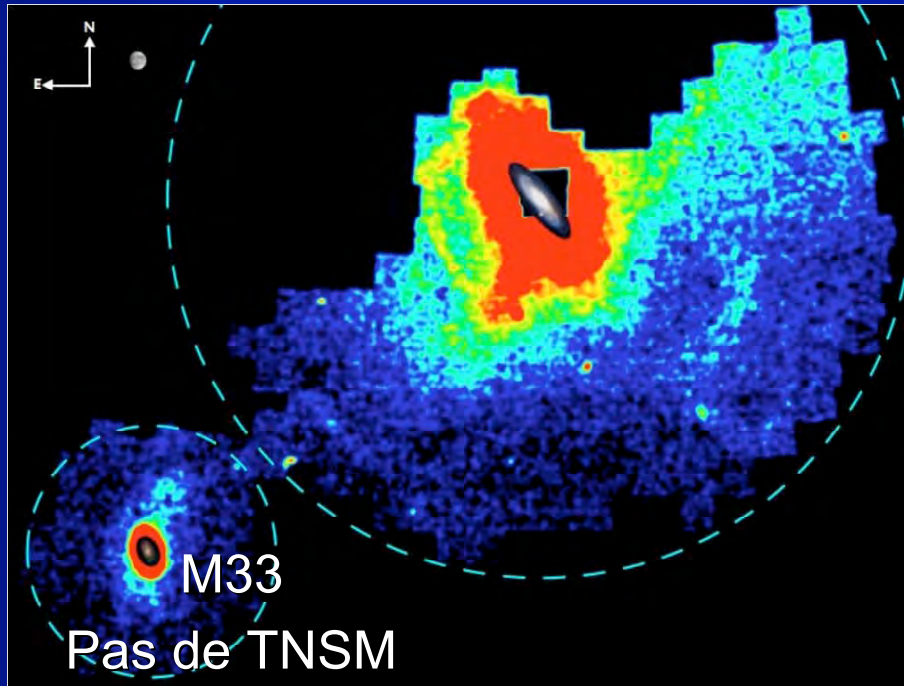
$H_0 = 68 \text{ km/s/Mpc}$ ,  $\Omega_m = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.7$



à 2 millions d'AL, la galaxie d'Andromède

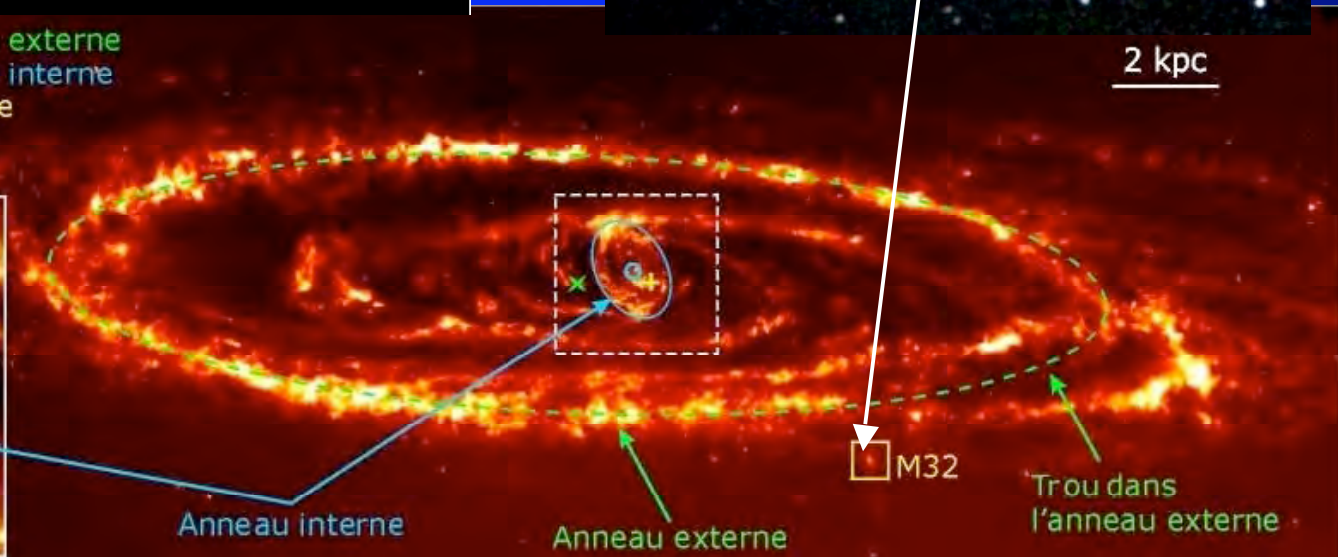
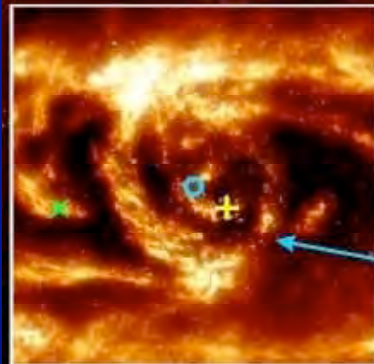


# Andromède n'est pas si calme...



2 kpc

- × Centre de l'anneau externe
- Centre de l'anneau interne
- + Centre de la galaxie



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



à 300 millions d'AL, plusieurs galaxies en collision

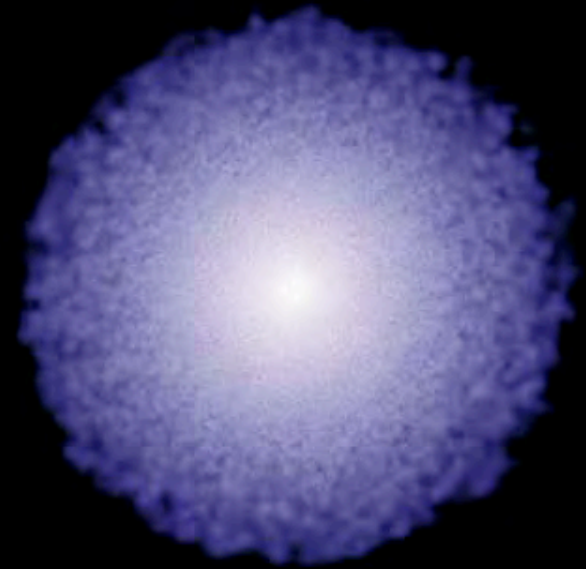
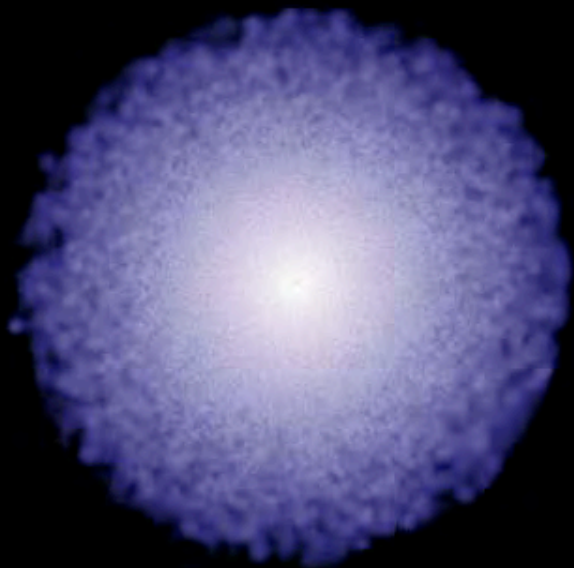


Les collisions sont de plus en plus fréquentes et violentes à mesure qu'on s'éloigne


Or les interactions et les fusions entre les galaxies entraînent l'accrétion sur le TNSM

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

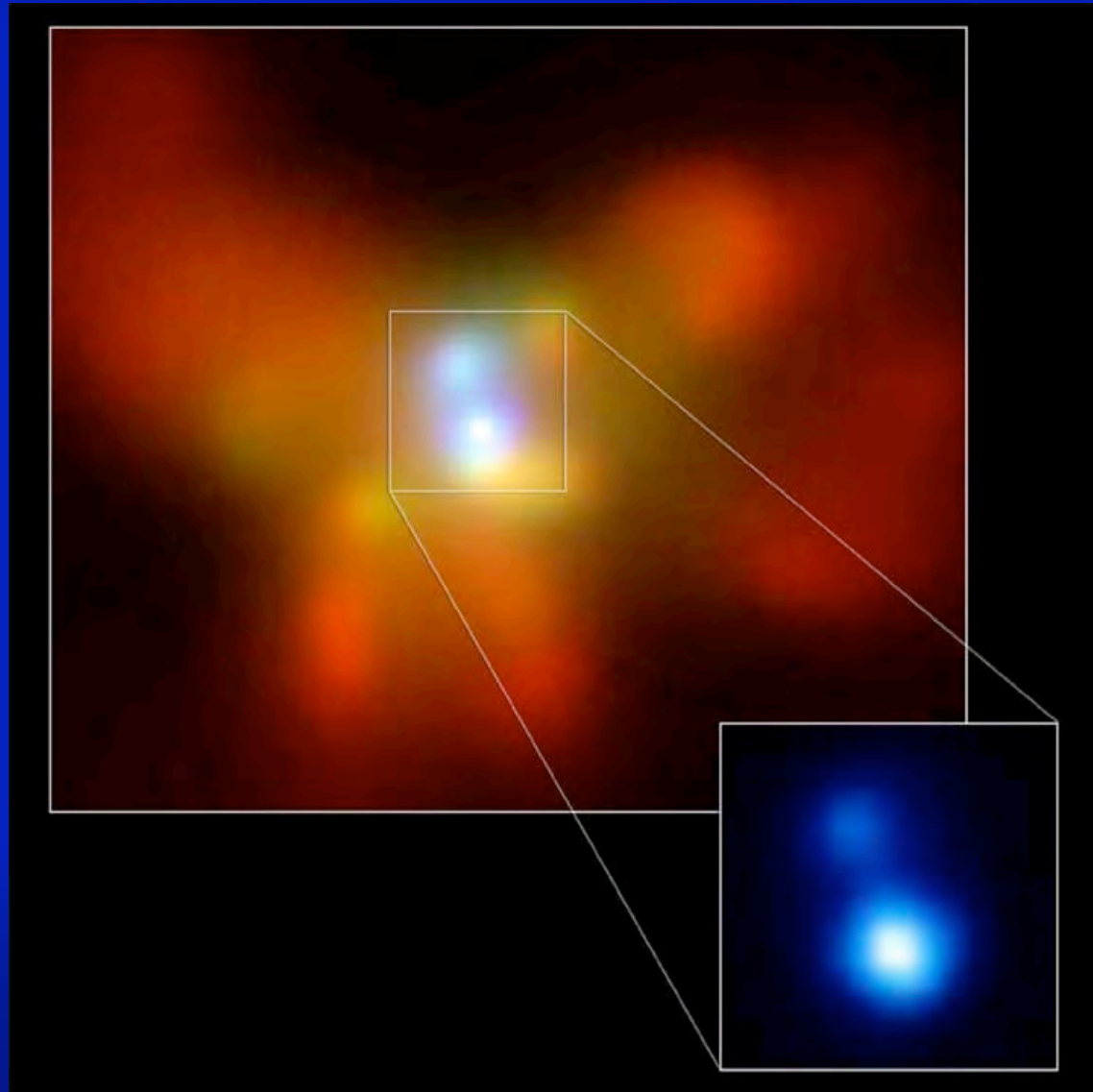
T = 0 Myr



10 kpc/h



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

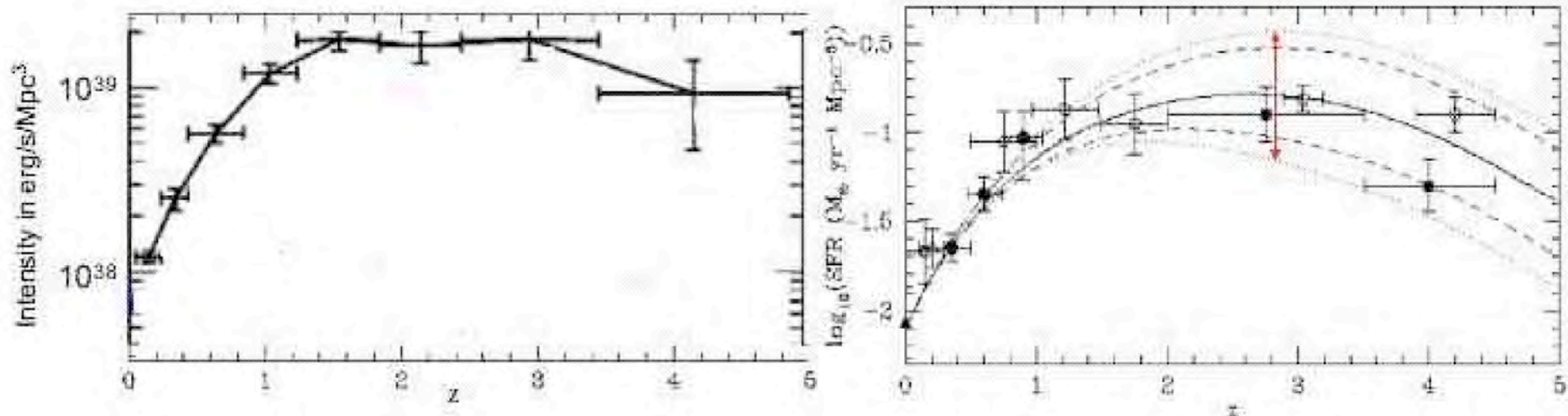






- Les collisions de galaxies induisent à la fois
- l'activité du noyau
  - une formation intense d'étoiles

Ce qui explique la forte corrélation entre  
quasars et formation stellaire



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



Il doit y en avoir de nombreux autour de nous.  
Où sont-ils?

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

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



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

*Exemple : Andromède, 30 millions de masses solaires*

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

**LA PREUVE DONNÉE PAR NOTRE GALAXIE**



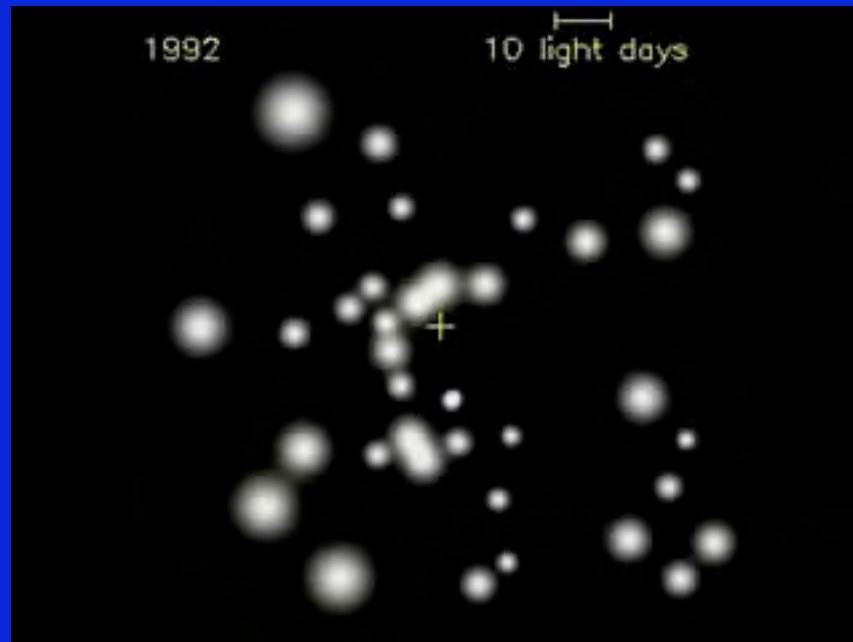
The Centre of the Milky Way  
(VLT YEPUN + NACO)

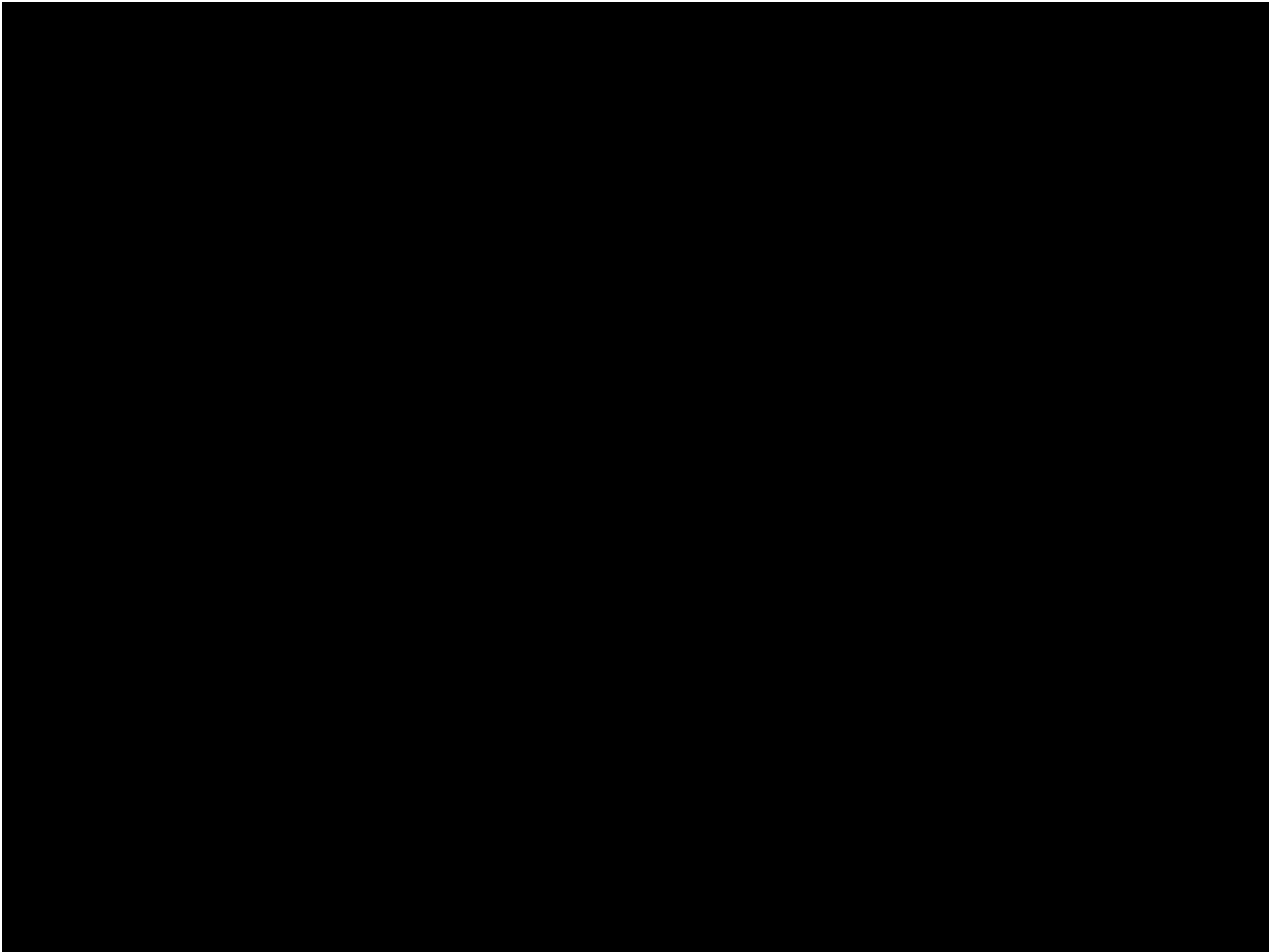
ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

©European Southern Observatory



# Mouvements des étoiles: Vitesse sur la sphère céleste







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



un milliard de masses solaires

un million de masses solaires

pas de trou noir?

Masse du trou noir

un million de masses solaires

un milliard de masses solaires

mille milliards de masses solaires

Masse du bulbe

Position de M31

Position de notre Galaxie

Position de Virgo A

OR

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

## POURQUOI CETTE RELATION?

I. PARCE QUE LE TROU NOIR A UNE INFLUENCE SUR L'ÉVOLUTION DE LA GALAXIE ENTIÈRE?

Mais dans quel sens?

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

Mais comment?

# I. Influence du TNSM: bloquant, ou catalyseur?

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



50000 AL



Ondes sonores

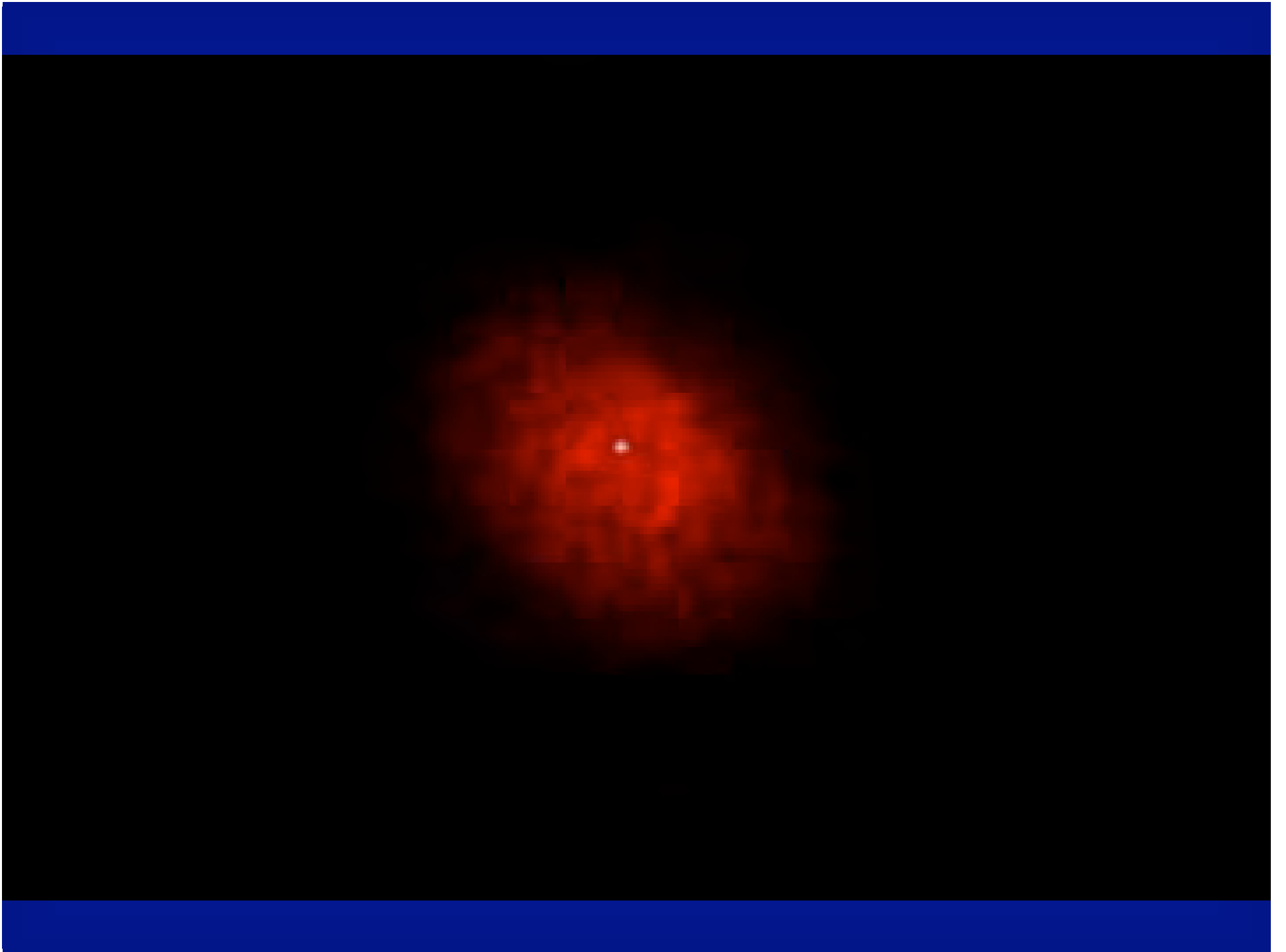
Le gaz est chauffé à plusieurs millions de degrés par les ondes provenant de l'environnement du trou noir. Cela arrête la formation des étoiles et l'accrétion de gaz par la galaxie.

Cavités

Trou noir

Galaxie de  
Seyfert  
NGC1275

50000 AL





et au contraire, le quasar HE0450–2958

Galaxie à formation  
intense d'étoiles



quasar →

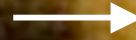


1''

Jet  
infrarouge



Étoile de  
champ →



Probablement les deux effets jouent:  
autres observations nécessaires

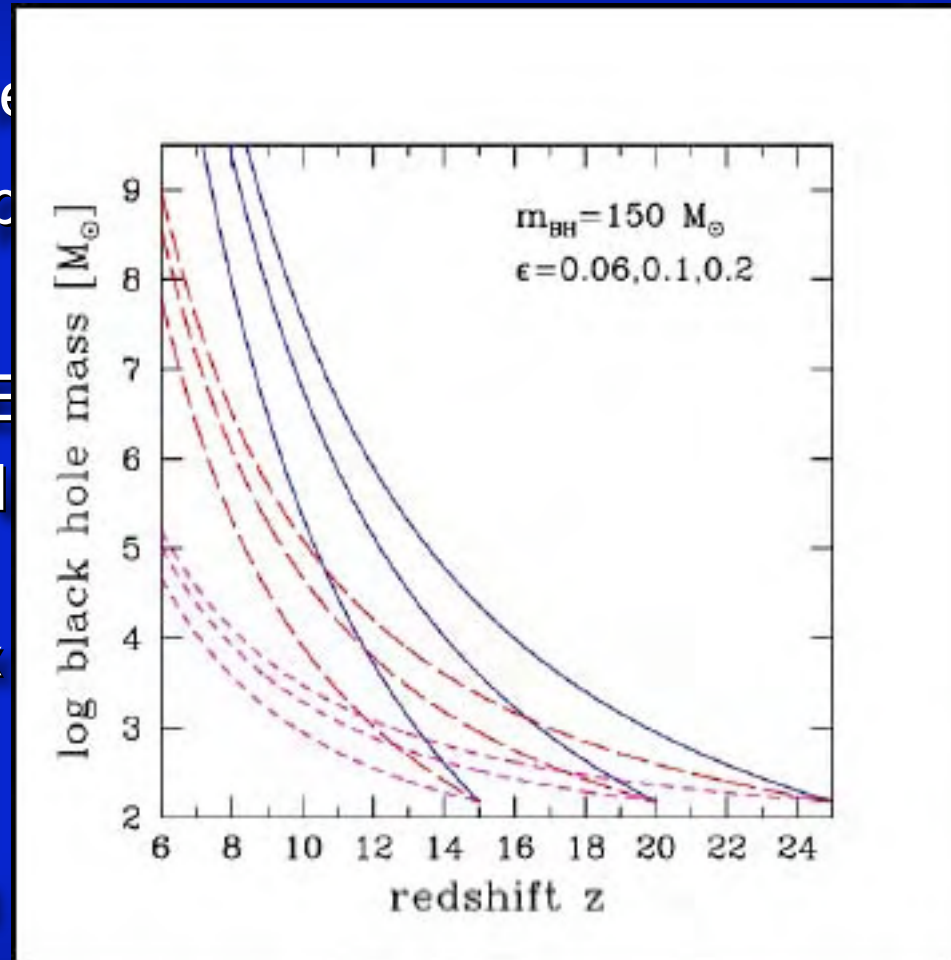


# Comment les TNSM naissent-ils?

Comme  
Avant ou après

COMME  
MOINS D'UN

On



TNSM?

de masse?

$10^9 - 10^{10} M_{\odot}$

LE BIG-BANG?

?

n...

## **1. Masse des premiers trous noirs**

Cadavres des étoiles de population III  
 $M \sim 100-600$  masses solaires

Instabilité due à la Relativité Générale  
 $M \sim 10^5-10^6$  masses solaires

## **2. Grossissement des trous noirs par fusion**

Contribution positive

Contribution négative  
(fusée gravitationnelle)

## **3. Grossissement des trous noirs par accrétion**

au dessous de la limite d'Eddington  
(continue ou intermittente)

au dessus de la limite d'Eddington  
(l'excès est-il expulsé ou accrété?)

Et les trous noirs « intermédiaires », existent-ils?

$\Omega$  Centauri, un amas globulaire?

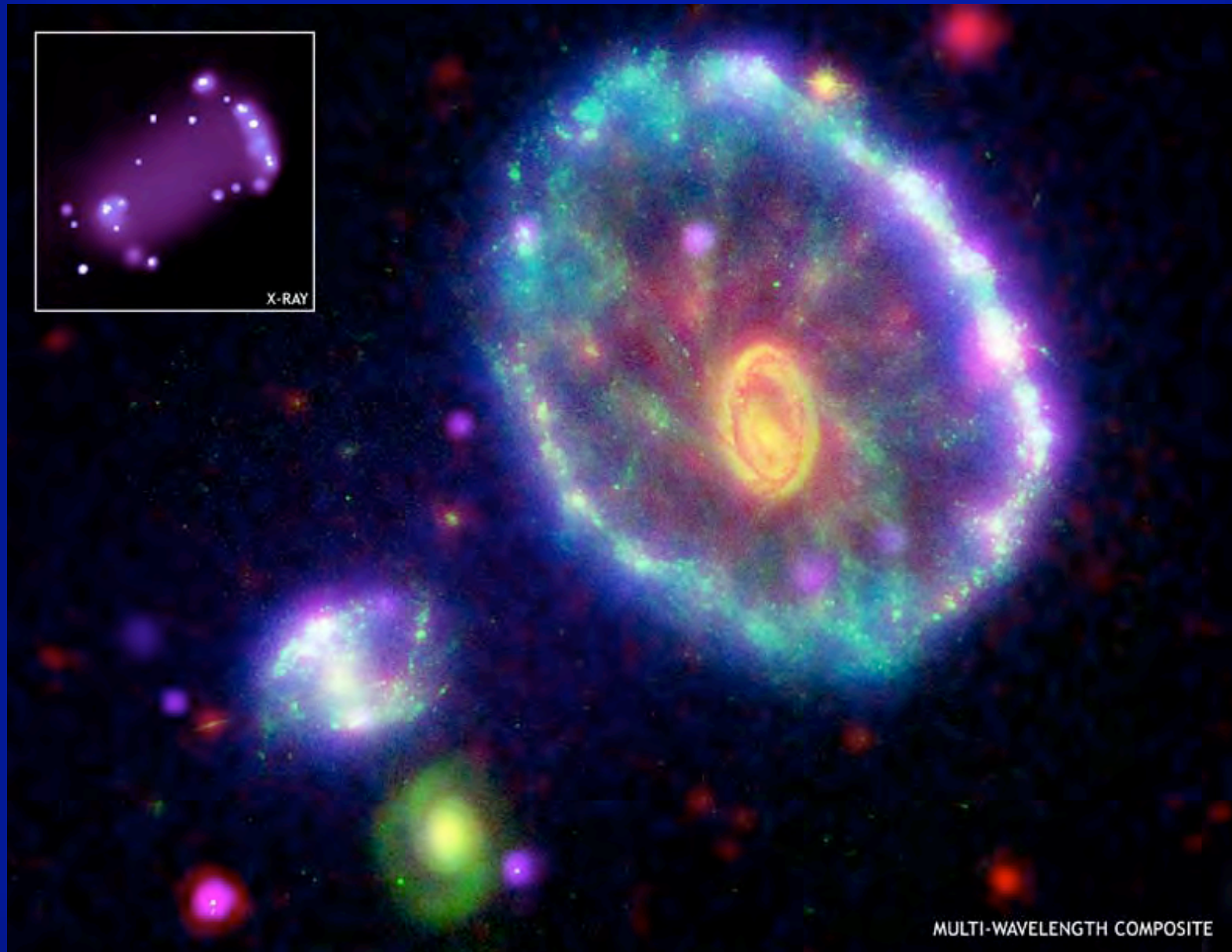
c'est plutôt une petite galaxie  
qui a été capturée par la nôtre.

Elle contient un trou noir de 40000 masses solaires

Ce n'est pas un TNI, C'est un PETIT TNSM



# Les « ULX », TN de masse $\sim 10\text{-}10000M_{\odot}$

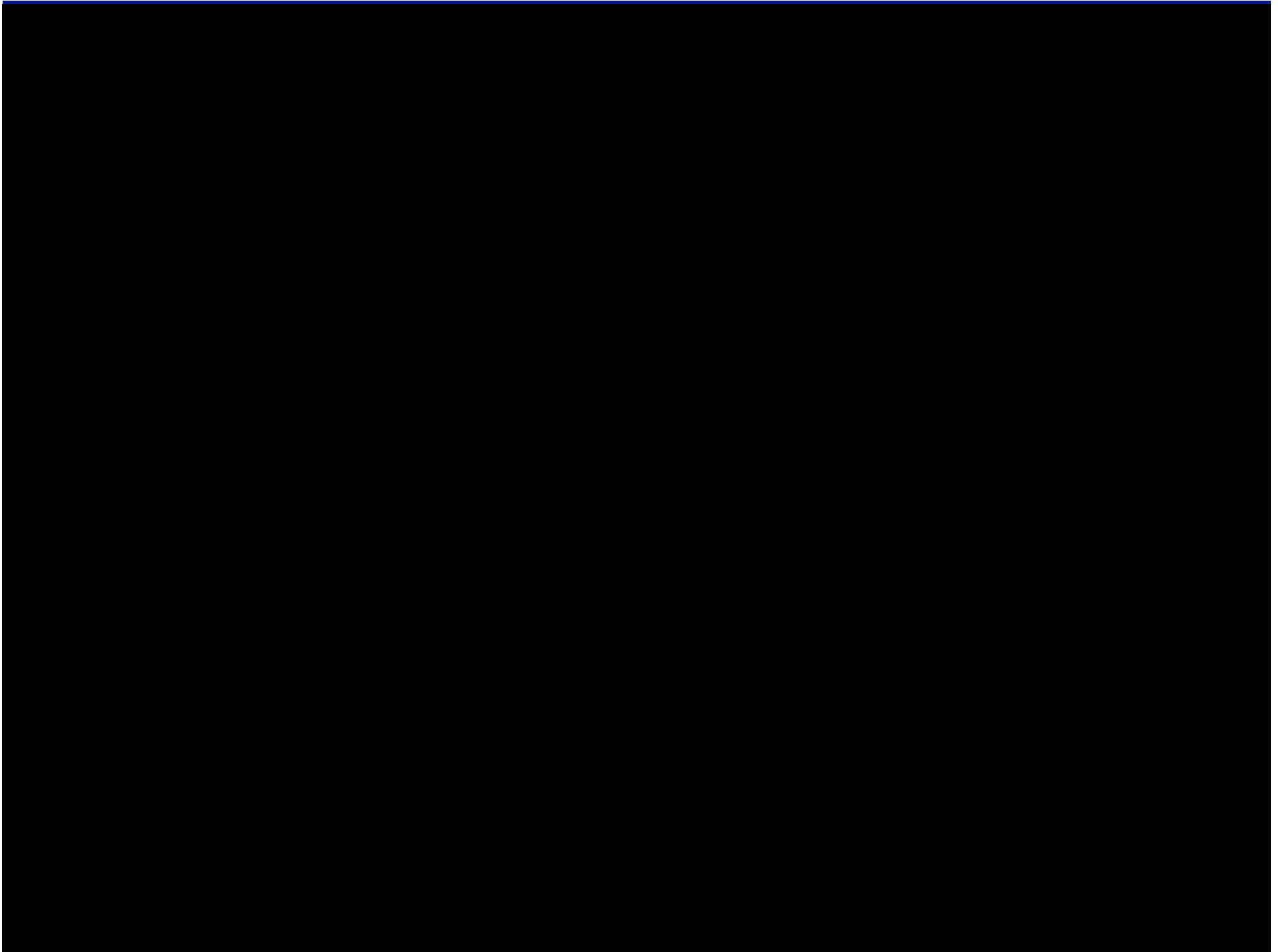


# LES TROUS NOIRS MASSIFS ETEINTS PEUVENT-ILS SE RALLUMER?

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.

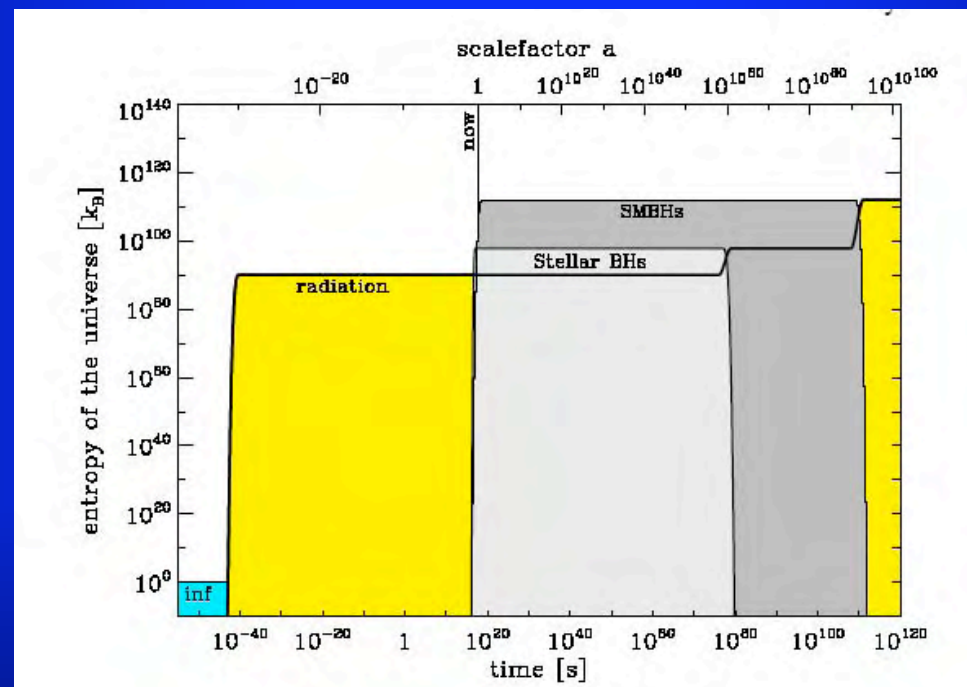
On calcule que dans quatre milliards d'années, notre Galaxie subira une collision avec la galaxie d'Andromède, qui conduira peut-être à une fusion, et le trou noir central sera sans doute fortement réactivé



Les TNSM ont-ils une influence  
sur le destin de l'Univers dans son ensemble?

Si l'U est un système isolé,  
Les TNSM dominent toutes les autres sources d'entropie  
par un facteur  $10^6$

Mais elle atteindra une constante dans  $10^{12}$  ans



En fait le destin réel de l'Univers dépend de l'évolution  
de l'énergie noire...



## 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

MAIS DE NOMBREUX PROBLÈMES DEMEURENT...

FIN



S C I E N C E S & H I S T O I R E

# Des quasars aux trous noirs

Suzy Collin-Zahn

