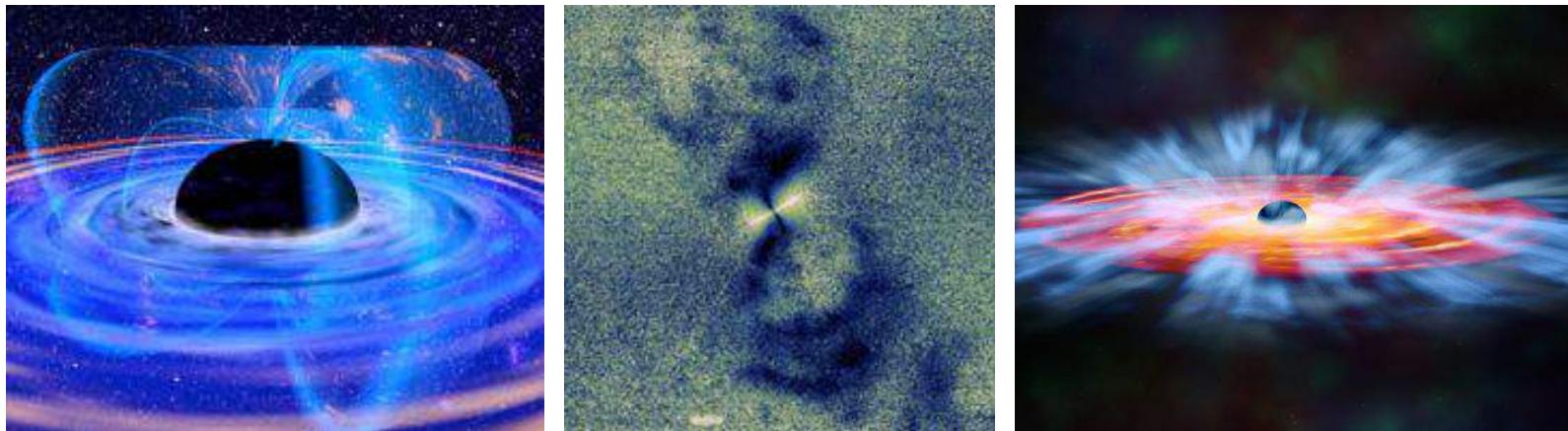


# Disques, tores et jets

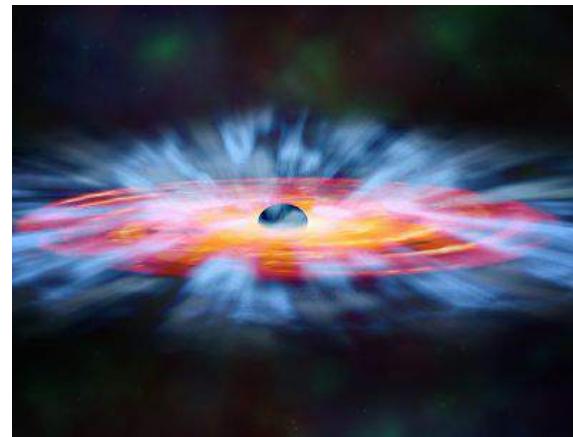
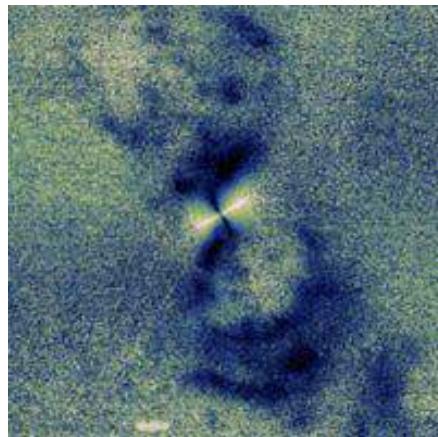


P.O. Petrucci  
Collège de France 7 Déc. 2015

# Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble

## Trous noirs super-massifs et galaxies

couronnes, vents  
Disques, tores et ~~jets~~



# Sommaire

- Noyaux Actifs de Galaxies (NAG): Généralités
- L'environnement des régions centrales des NAGs
  - Au plus proche du trou noir: disques et couronnes
  - Le tore de poussière: la partie « imageable » du NAG
  - Du NAG à la galaxie hôte: les vents
- Le cas de NGC 5548

# Noyaux Actifs de Galaxies

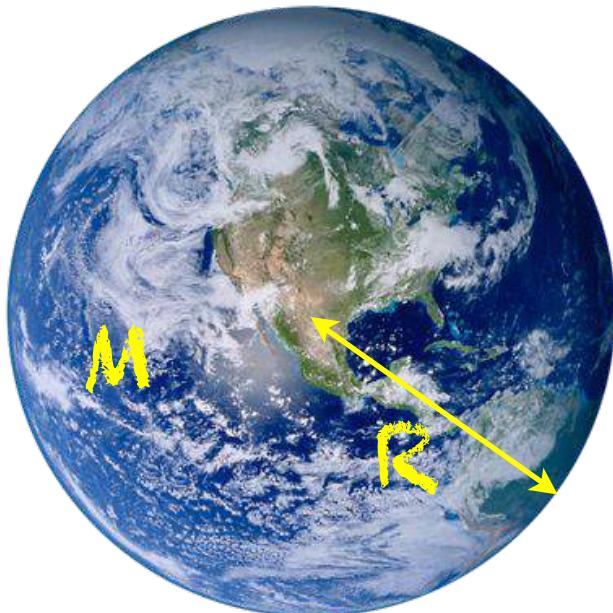
## Généralités

# La Vitesse de Libération

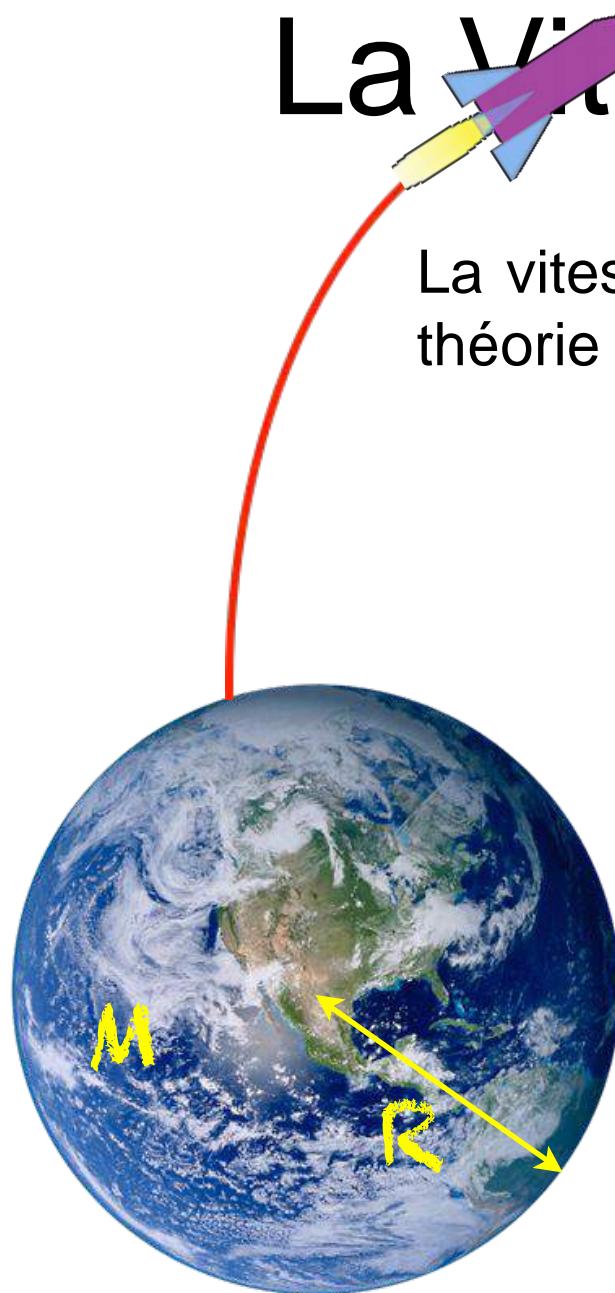
La vitesse de libération s'obtient directement à partir de la théorie de Newton:

$$v_{lib} = \sqrt{2G} \sqrt{\frac{M}{R}}$$

$$G = 6.67384 \times 10^{-11} m^3.kg^{-1}.s^{-2}$$



# La Vitesse de Libération

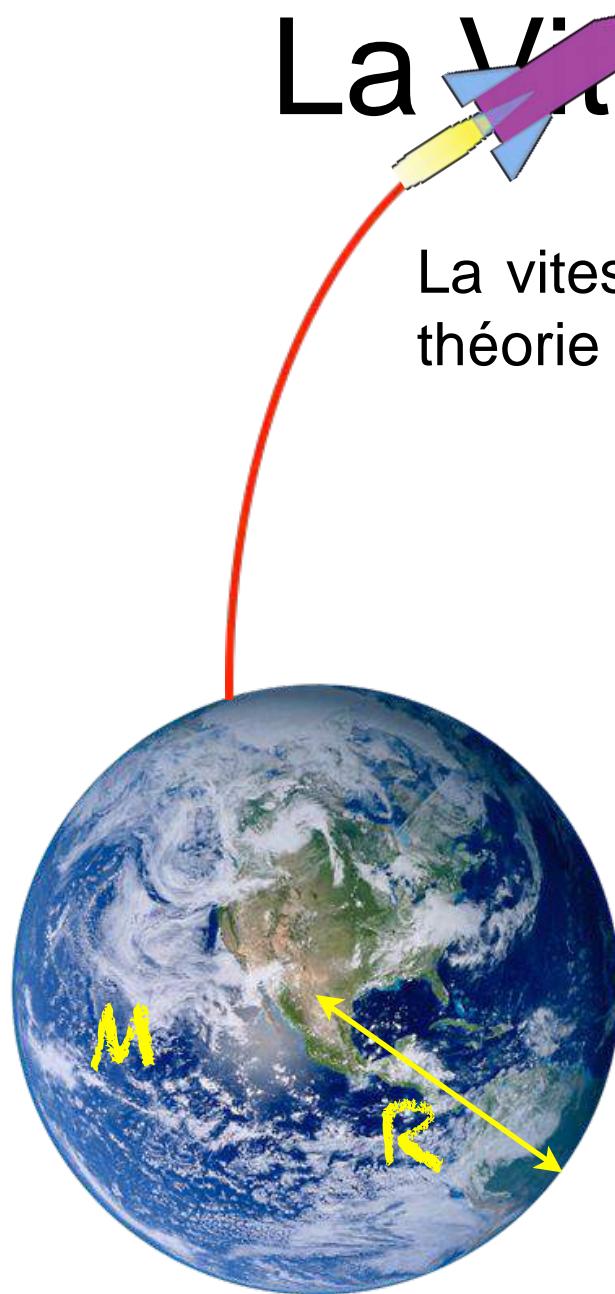


La vitesse de libération s'obtient directement à partir de la théorie de Newton:

$$v_{lib} = \sqrt{2G} \sqrt{\frac{M}{R}}$$

$$G = 6.67384 \times 10^{-11} m^3.kg^{-1}.s^{-2}$$

# La Vitesse de Libération



La vitesse de libération s'obtient directement à partir de la théorie de Newton:

$$v_{lib} = \sqrt{2G} \sqrt{\frac{M}{R}}$$

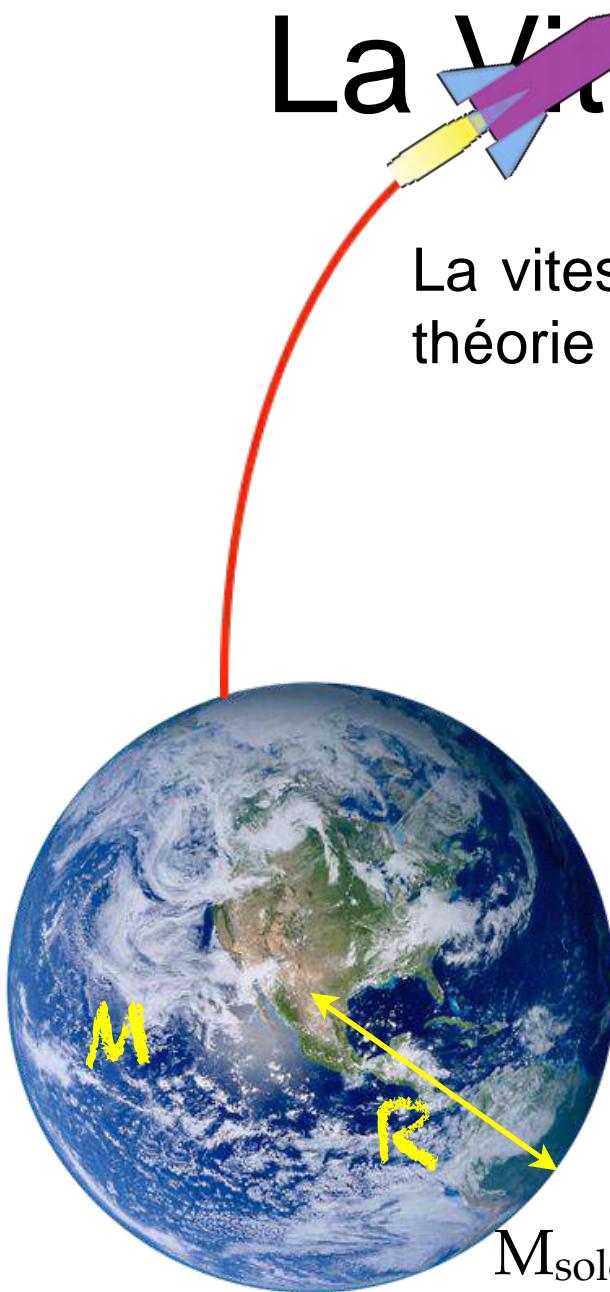
$$G = 6.67384 \times 10^{-11} m^3.kg^{-1}.s^{-2}$$

## Application numérique:

- pour la terre:

$$M_{terre} = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}, R_{terre} = 6400 \text{ km} \Rightarrow v_{lib} = 11 \text{ km/s}$$

# La Vitesse de Libération



La vitesse de libération s'obtient directement à partir de la théorie de Newton:

$$v_{lib} = \sqrt{2G} \sqrt{\frac{M}{R}}$$

$$G = 6.67384 \times 10^{-11} m^3.kg^{-1}.s^{-2}$$

## Application numérique:

- pour la terre:

$$M_{terre} = 6 \cdot 10^{24} \text{ kg}, R_{terre} = 6400 \text{ km} \Rightarrow v_{lib} = 11 \text{ km/s}$$

- pour le soleil:

$$M_{soleil} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}, R_{soleil} = 700 000 \text{ km} \Rightarrow v_{lib} = 615 \text{ km/s}$$

# Concept du Trou Noir

Autour d'un astre de masse  $M$ , on obtient  $v_{lib}=c$  que si le rayon de l'astre est inférieur ou égal à

$$v_{lib} = \sqrt{2G} \sqrt{\frac{M}{R}} > c \quad \rightarrow \quad R < R_{lim} = \frac{2G}{c^2} M = 2R_g$$

$R_{lim}$ =rayon de Schwarzschild

$R_g$ =rayon gravitationnel

# Concept du Trou Noir

Autour d'un astre de masse  $M$ , on obtient  $v_{lib}=c$  que si le rayon de l'astre est inférieur ou égal à

$$v_{lib} = \sqrt{2G} \sqrt{\frac{M}{R}} > c \quad \rightarrow \quad R < R_{lim} = \frac{2G}{c^2} M = 2R_g$$

$R_{lim}$ =rayon de Schwarzschild

$R_g$ =rayon gravitationnel

Alors la lumière elle-même ne peut s'échapper !

# Concept du Trou Noir

Autour d'un astre de masse  $M$ , on obtient  $v_{lib}=c$  que si le rayon de l'astre est inférieur ou égal à

$$v_{lib} = \sqrt{2G} \sqrt{\frac{M}{R}} > c \quad \rightarrow \quad R < R_{lim} = \frac{2G}{c^2} M = 2R_g$$

$R_{lim}$ =rayon de Schwarzschild

$R_g$ =rayon gravitationnel

Alors la lumière elle-même ne peut s'échapper !

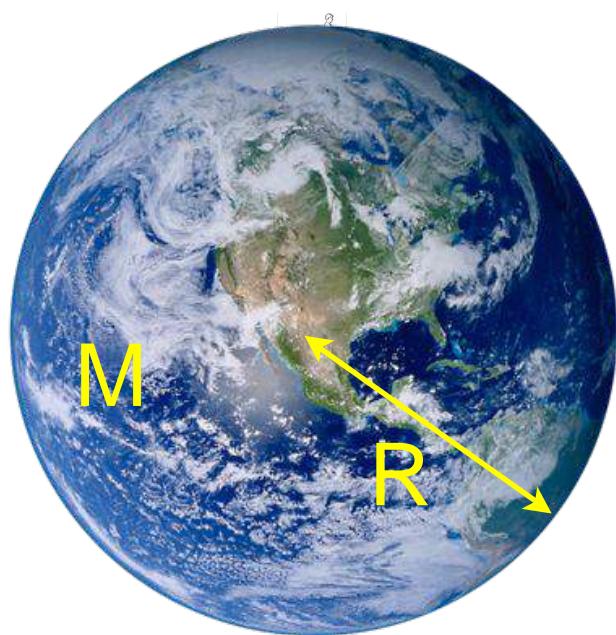
## Application numérique:

→ pour la Terre,  $R_{lim} = 9$  mm

→ pour le Soleil,  $R_{lim} = 3$  km

# La Gravitation

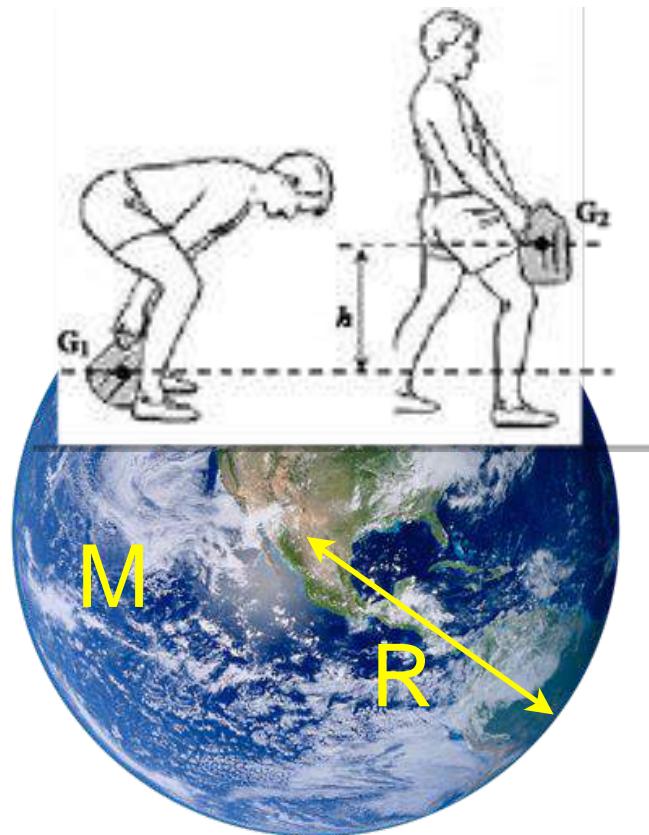
## Une énorme source d'énergie



# La Gravitation

## Une énorme source d'énergie

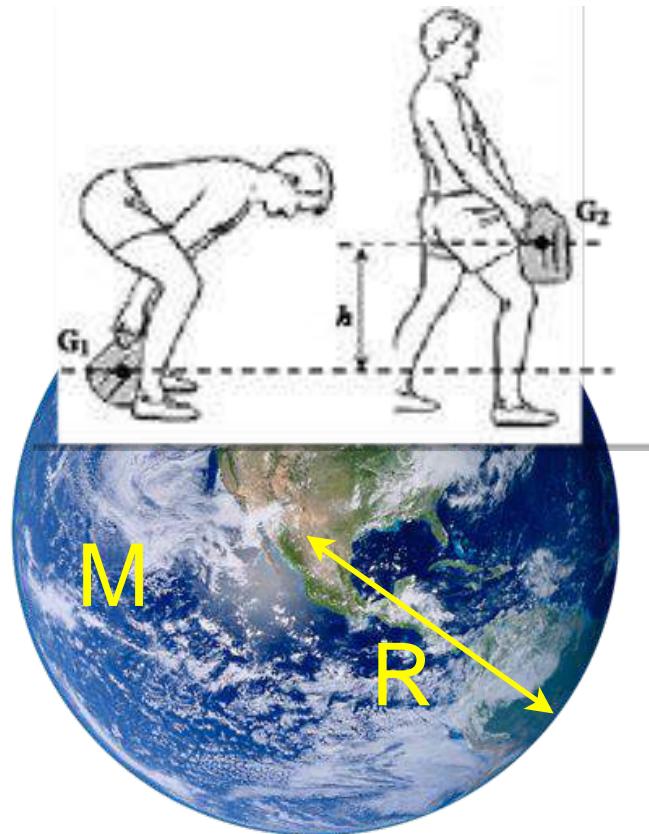
Pour soulever une masse  $m$  d'une hauteur  $h$ , sur une planète de rayon  $R$  et masse  $M$ , on doit fournir l'énergie:



# La Gravitation

## Une énorme source d'énergie

Pour soulever une masse  $m$  d'une hauteur  $h$ , sur une planète de rayon  $R$  et masse  $M$ , on doit fournir l'énergie:



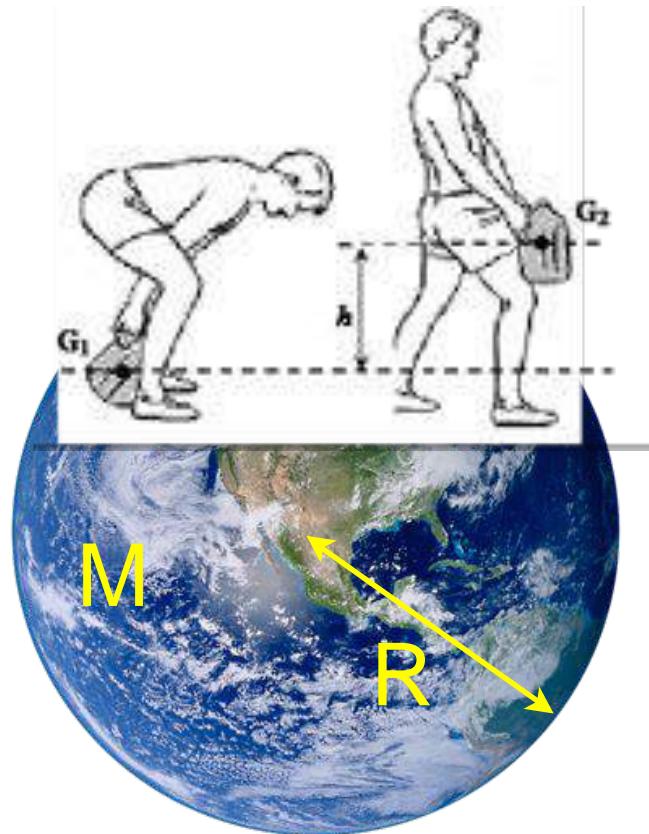
$$F_{grav} = \frac{GMm}{R^2}$$

$$E_{grav} = F_{grav}h = \frac{R_{lim}}{2R} \frac{h}{R} mc^2$$

# La Gravitation

## Une énorme source d'énergie

Pour soulever une masse  $m$  d'une hauteur  $h$ , sur une planète de rayon  $R$  et masse  $M$ , on doit fournir l'énergie:



$$F_{grav} = \frac{GMm}{R^2}$$
$$E_{grav} = F_{grav}h = \frac{R_{lim}}{2R} \frac{h}{R} mc^2$$

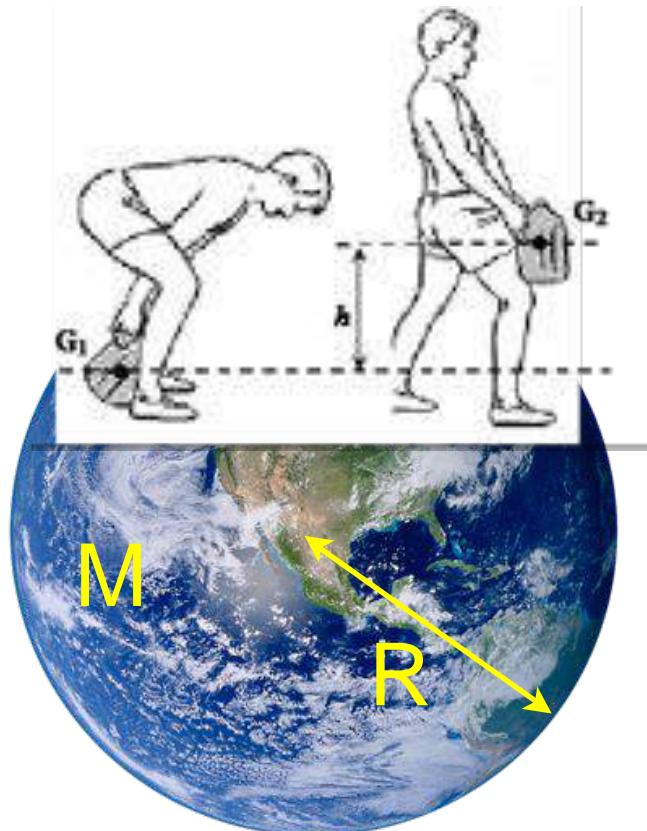
Application numérique:  $m=1\text{kg}$ ,  $h=1\text{m}$

- $E_{grav} = 10 \text{ Joules sur la terre}$
- $E_{grav} = 300 \text{ Joules sur le soleil}$

# La Gravitation

## Une énorme source d'énergie

Pour soulever une masse  $m$  d'une hauteur  $h$ , sur une planète de rayon  $R$  et masse  $M$ , on doit fournir l'énergie:



$$F_{grav} = \frac{GMm}{R^2}$$

$$E_{grav} = F_{grav}h = \frac{R_{lim}}{2R} \frac{h}{R} mc^2$$

Application numérique:  $m=1\text{kg}$ ,  $h=1\text{m}$

- $E_{grav} = 10 \text{ Joules sur la terre}$
- $E_{grav} = 300 \text{ Joules sur le soleil}$

Pour un trou noir  $R=R_{lim}$ :  $E_{grav} = \frac{h}{R} mc^2$

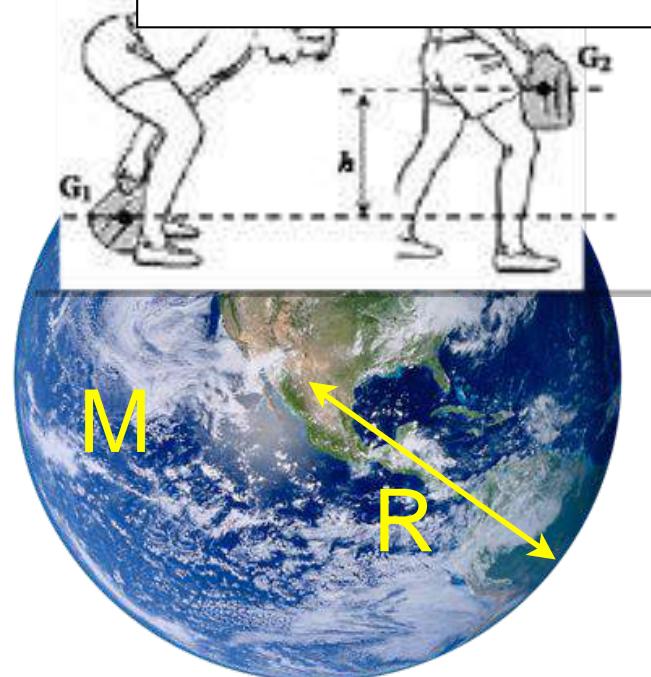
- $E_{grav} = 10^{12} \text{ Joules sur un trou noir de } 10 M_{\text{soleil}}$
- $E_{grav} = 10^5 \text{ Joules sur un trou noir de } 10^8 M_{\text{soleil}}$

# La Gravitation

## Une énorme source d'énergie

Pour soulever une masse  $m$  d'une hauteur  $h$ , sur une planète de rayon  $R$  et masse  $M$ , on doit fournir l'énergie:

Plus l'astre est compact plus  $E_{\text{grav}}$  sera important!



Application numérique:  $m=1\text{kg}$ ,  $h=1\text{m}$

- $E_{\text{grav}} = 10 \text{ Joules sur la terre}$
- $E_{\text{grav}} = 300 \text{ Joules sur le soleil}$

Pour un trou noir  $R=R_{\text{lim}}$ :  $E_{\text{grav}} = \frac{h}{R} mc^2$

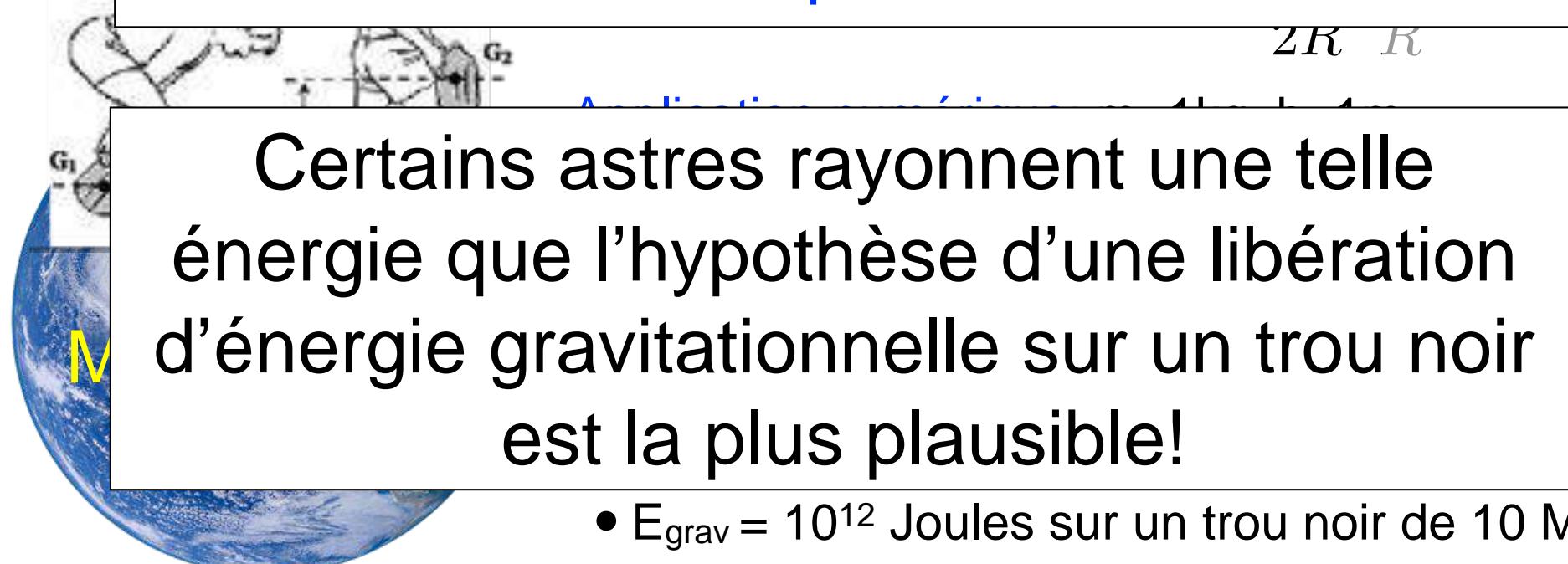
- $E_{\text{grav}} = 10^{12} \text{ Joules sur un trou noir de } 10 M_{\text{soleil}}$
- $E_{\text{grav}} = 10^5 \text{ Joules sur un trou noir de } 10^8 M_{\text{soleil}}$

# La Gravitation

## Une énorme source d'énergie

Pour soulever une masse  $m$  d'une hauteur  $h$ , sur une planète de rayon  $R$  et masse  $M$ , on doit fournir l'énergie :

Plus l'astre est compact plus  $E_{\text{grav}}$  sera important!



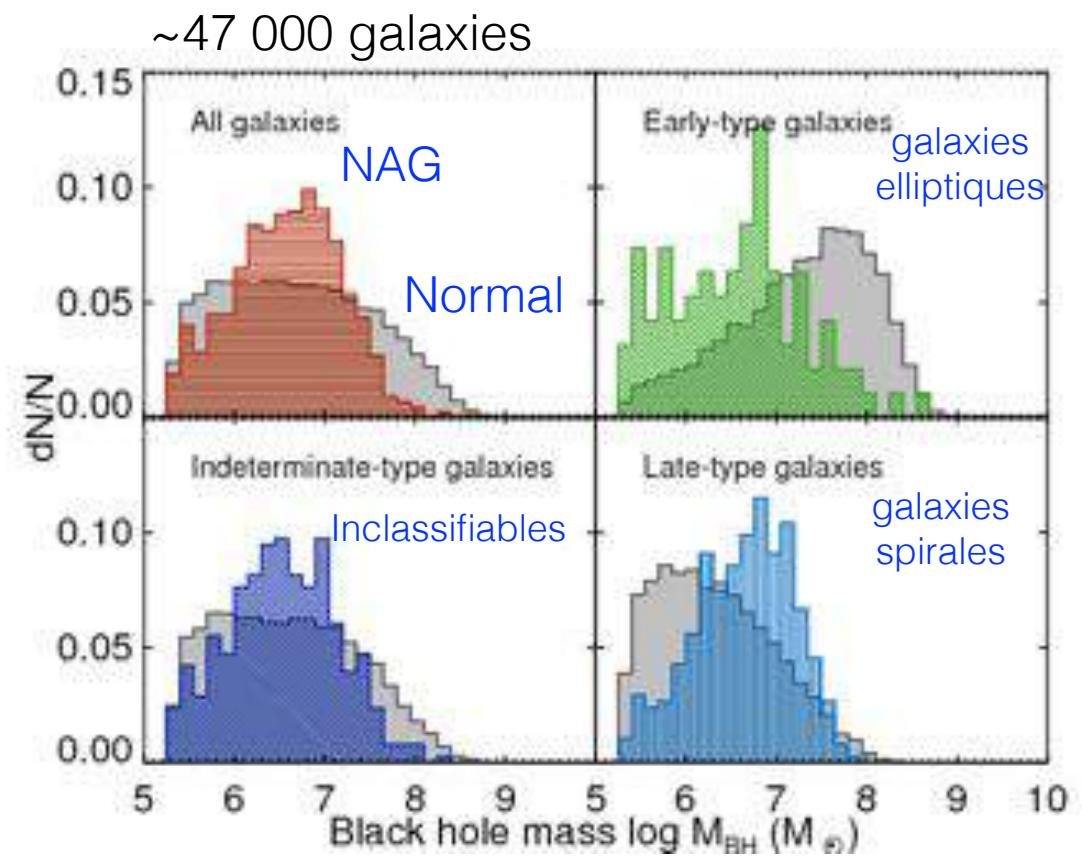
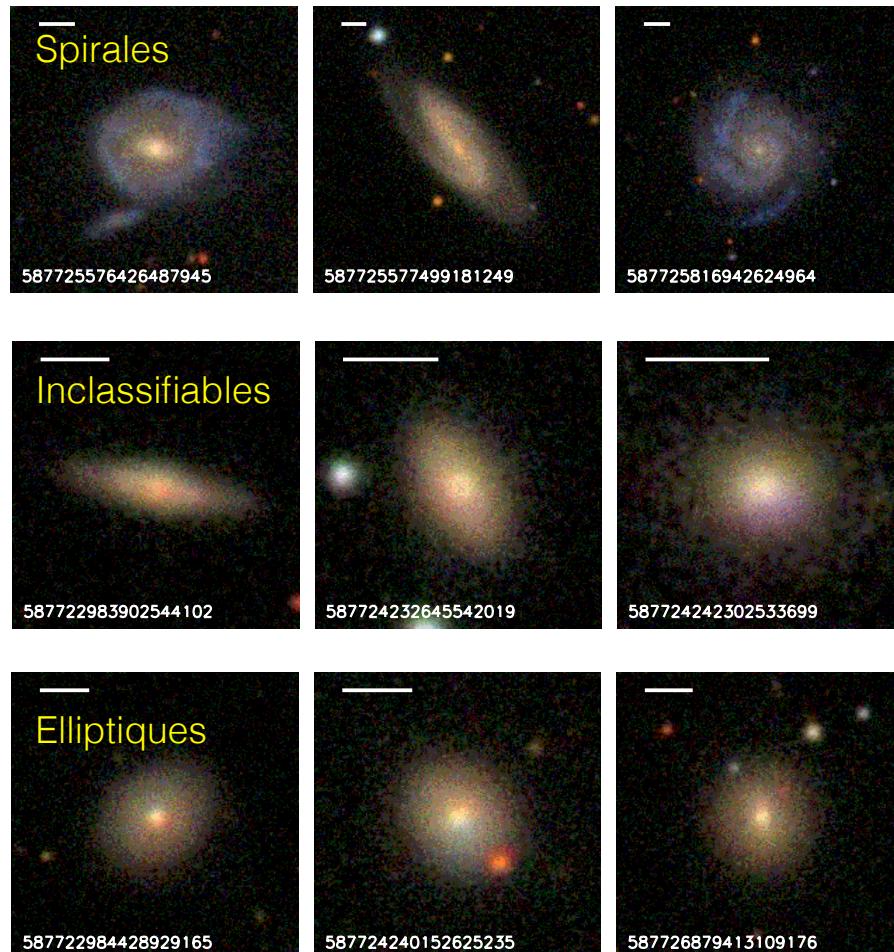
Certains astres rayonnent une telle énergie que l'hypothèse d'une libération d'énergie gravitationnelle sur un trou noir est la plus plausible!

- $E_{\text{grav}} = 10^{12}$  Joules sur un trou noir de  $10 M_{\text{soleil}}$
- $E_{\text{grav}} = 10^5$  Joules sur un trou noir de  $10^8 M_{\text{soleil}}$

# Des trous noirs super-massifs (TNSM) de partout!

# Des trous noirs super-massifs (TNSM) de partout!

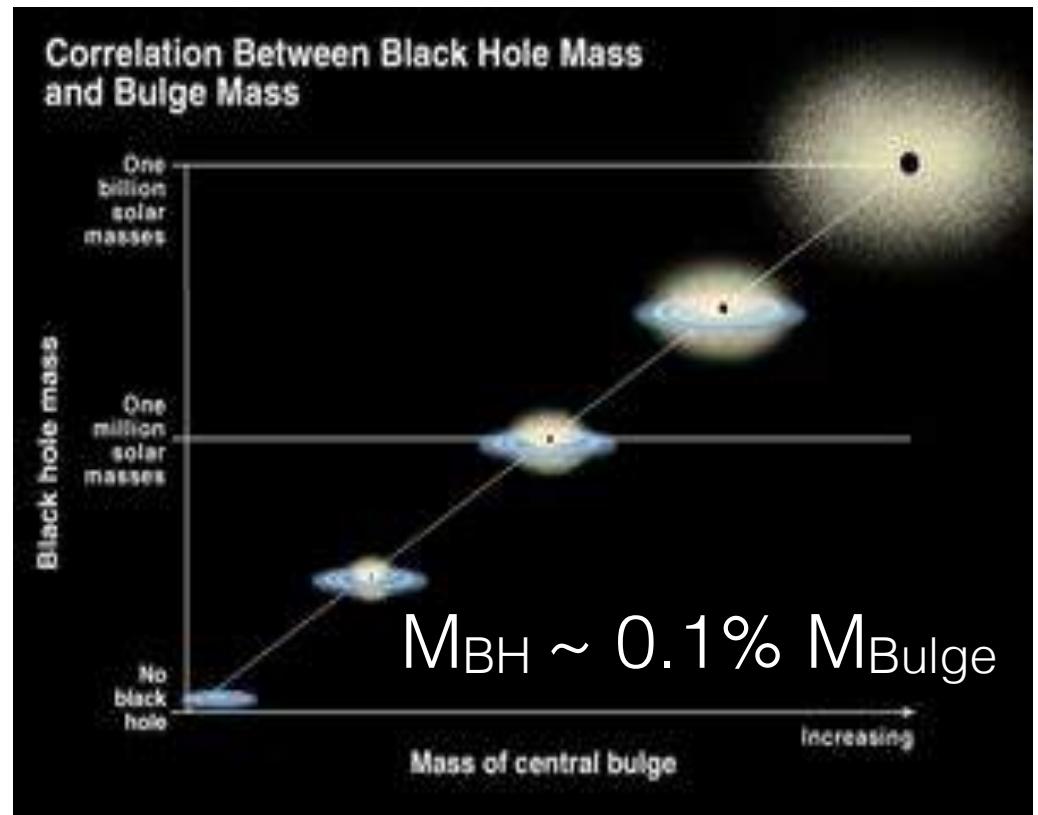
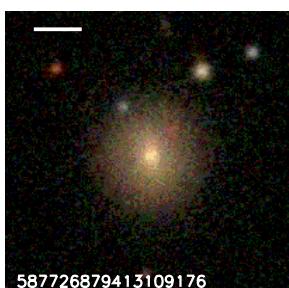
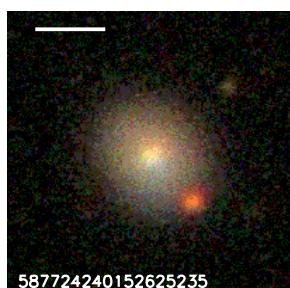
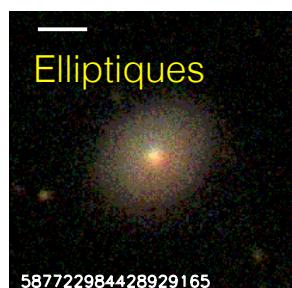
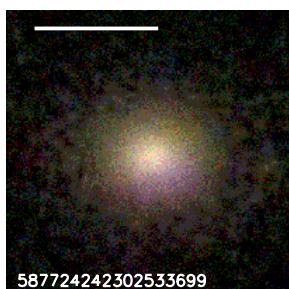
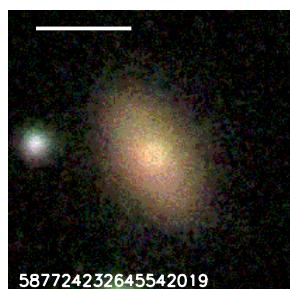
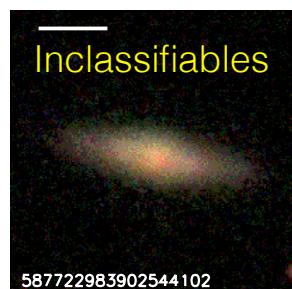
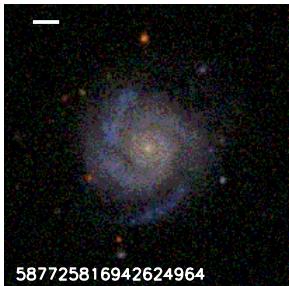
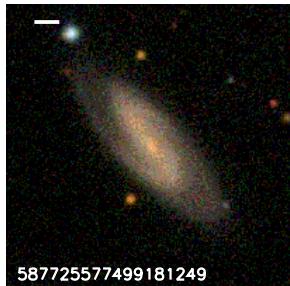
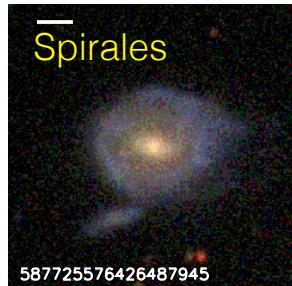
# Des TNSM de Partout!



Schawinski et al. (2010)

<http://zoo1.galaxyzoo.org/>

# Des TNSM de Partout!

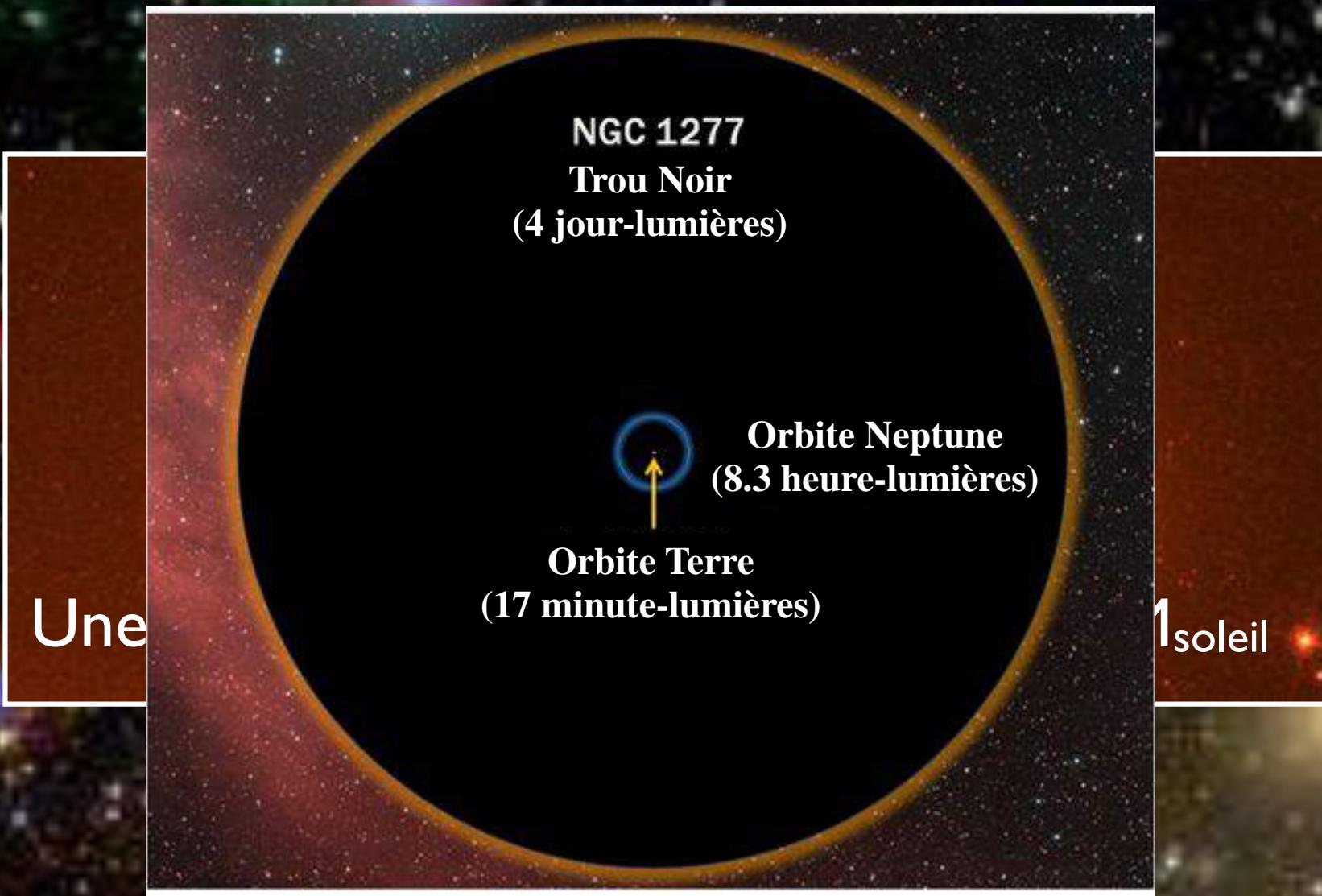


<http://zoo1.galaxyzoo.org/>

# LE TNSM de NGC 1227



Une masse estimée de 17 milliards de  $M_{\text{soleil}}$



# Les TNSM “Actifs”

- Présents dans les régions centrales de 10% des galaxies.  
On les appelle: Noyaux Actifs de Galaxies (NAG)

# Les TNSM “Actifs”

- Présents dans les régions centrales de 10% des galaxies.  
On les appelle: Noyaux Actifs de Galaxies (NAG)
- Actifs?

$$\frac{\text{Luminosité radio}}{\text{Luminosité totale}} \quad (\text{NAG}) > 10 \quad \frac{\text{Luminosité radio}}{\text{Luminosité totale}} \quad (\text{Voie Lactée})$$

$$\frac{\text{Luminosité X}}{\text{Luminosité totale}} \quad (\text{NAG}) > 10^4 \quad \frac{\text{Luminosité X}}{\text{Luminosité totale}} \quad (\text{Voie Lactée})$$

# Les TNSM “Actifs”

- Présents dans les régions centrales de 10% des galaxies.  
On les appelle: **Noyaux Actifs de Galaxies (NAG)**
- Actifs?

$$\frac{\text{Luminosité radio}}{\text{Luminosité totale}} \quad (\text{NAG}) > 10 \quad \frac{\text{Luminosité radio}}{\text{Luminosité totale}} \quad (\text{Voie Lactée})$$
$$\frac{\text{Luminosité X}}{\text{Luminosité totale}} \quad (\text{NAG}) > 10^4 \quad \frac{\text{Luminosité X}}{\text{Luminosité totale}} \quad (\text{Voie Lactée})$$

- La puissance rayonnée par un NAG ne peut s'expliquer que par l'accrétion de matière sur un trou noir super-massif  
Luminosité entre  $10^{43}$ - $10^{46}$  erg.s<sup>-1</sup> correspond à  $10^{-3}$ - $1$  M<sub>soleil</sub> par an
- Tout une **zoologie**: quasar, galaxies de Seyfert, blazar, ....

# Au plus proche du trou noir

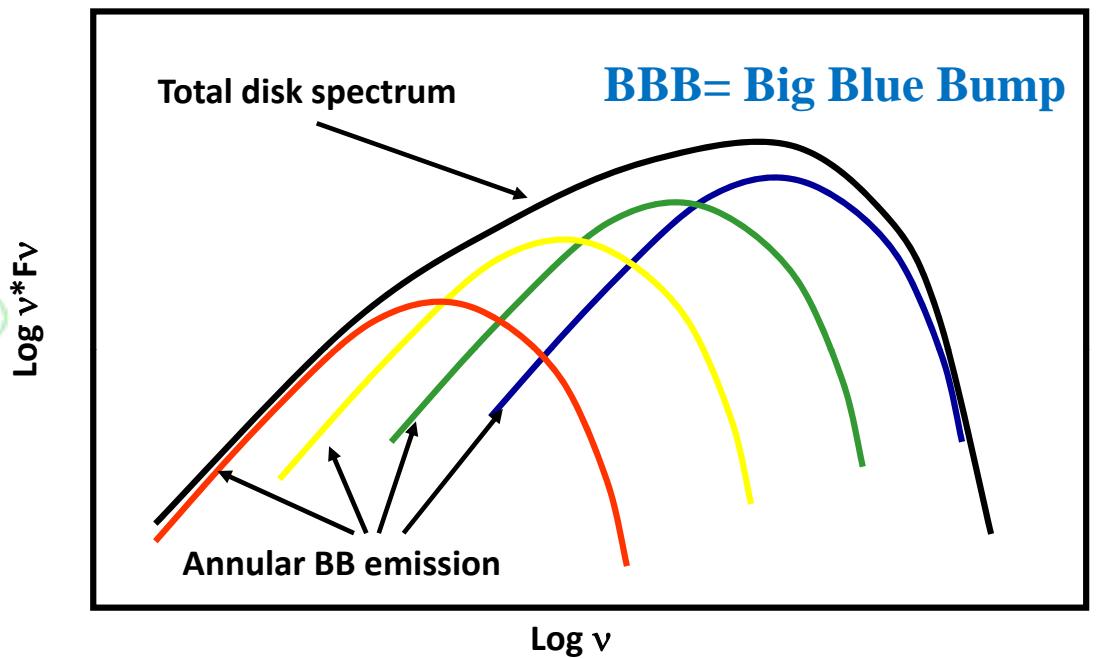
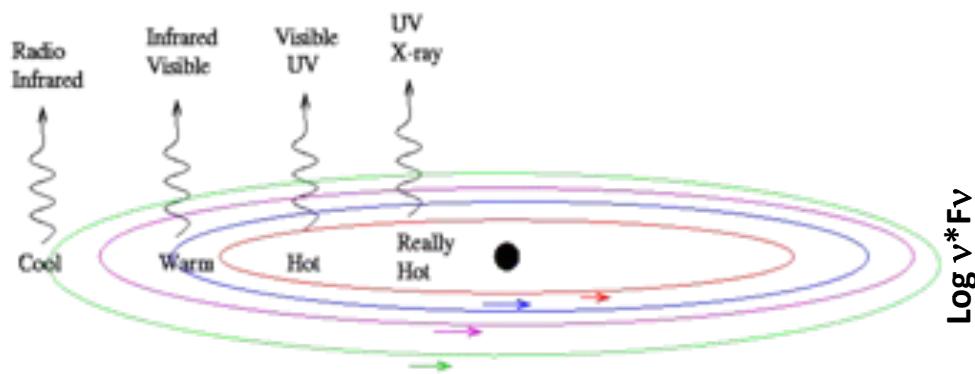
## Disques et Couronnes

# Disque: Théorie

- Conservation du moment cinétique: matière en rotation
- Pour tomber sur le trou noir, la matière doit perdre son moment cinétique (turbulence, frottement, etc....)

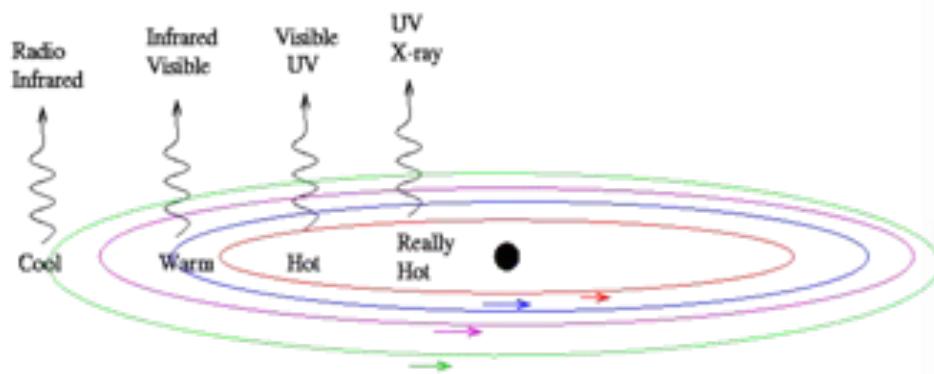
# Disque: Théorie

- Théorie du disque d'accrétion (Sunyaev & Titarchuk 1973):
  - Chaque anneau du disque émet comme un corps noir

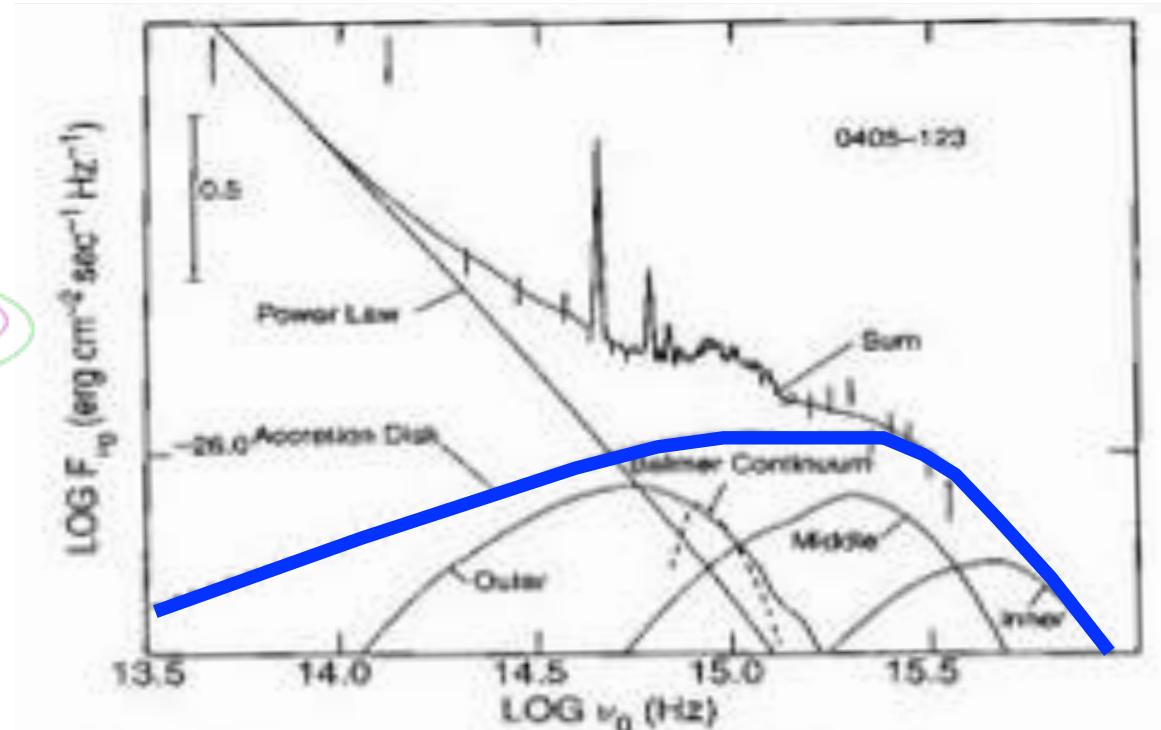


# Disque: Théorie

- Théorie du disque d'accrétion (Sunyaev & Titarchuk 1973):
  - Chaque anneau du disque émet comme un corps noir

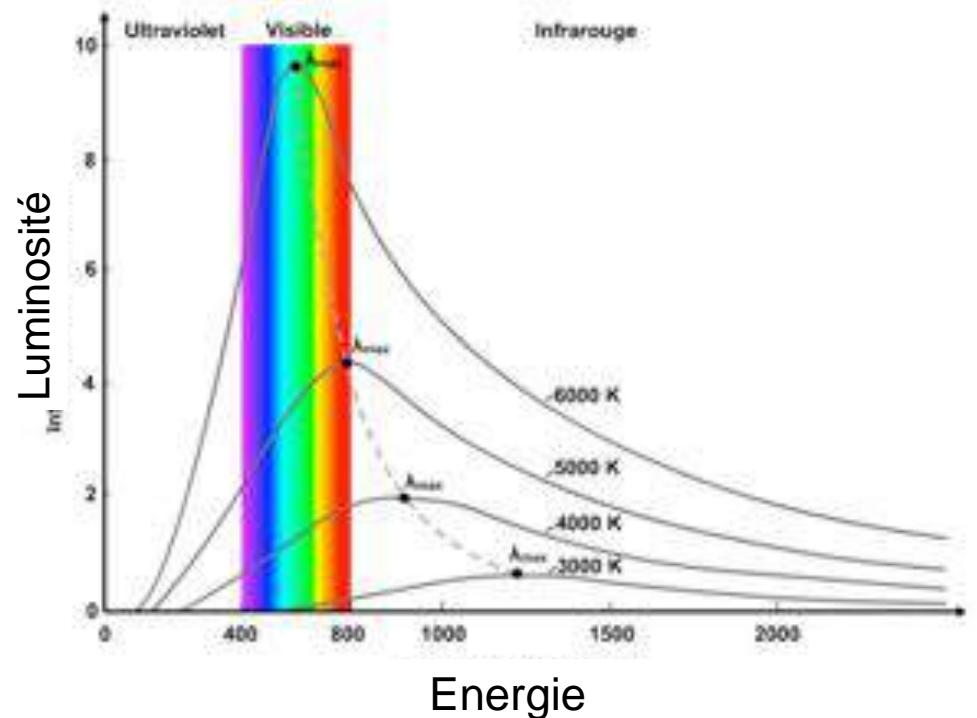


Pour les NAG, émission dans l'optique-UV



# Des Disques Chauds

## Corps Noir



Le [flot d'accréation](#) rayonne en [opt-UV](#) comme un métal chauffé à blanc: [émission de corps noir](#) (à 100 000 degrés!)

# Plus ça Tourne Plus c'est Chaud

- Pour un trou noir ( $M, a$ ) l'émission totale est caractérisée par son rayon interne  $R_{in}$  et son taux d'accréation  $Mdot$

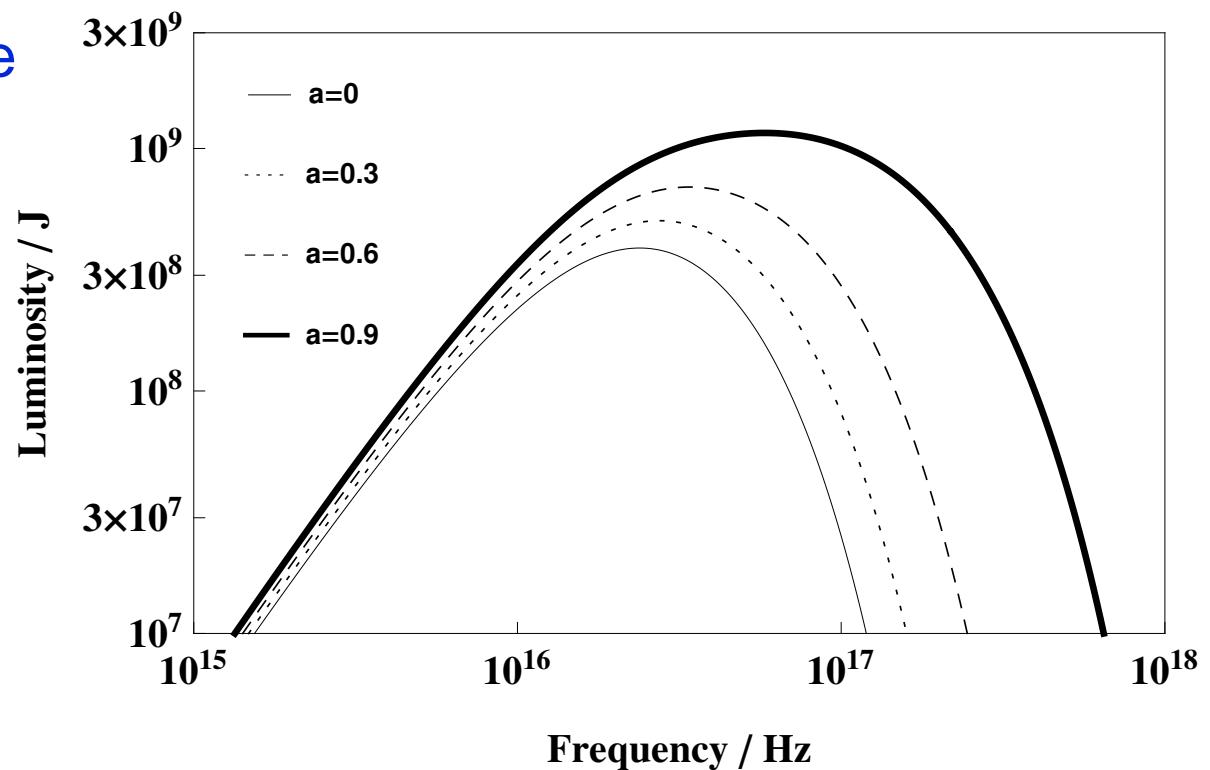
Rayon de la dernière orbite stable

- Schwarzschild  $R_{in} = 6R_G$

- Kerr  $R_{in} = R_G$

- Taille angulaire très petite

$1 R_g \text{ à } 1 \text{ Mpc} \rightarrow 10^{-6} \text{ arcsec}$



# Mesures Directes via Macro-Micro Lensing



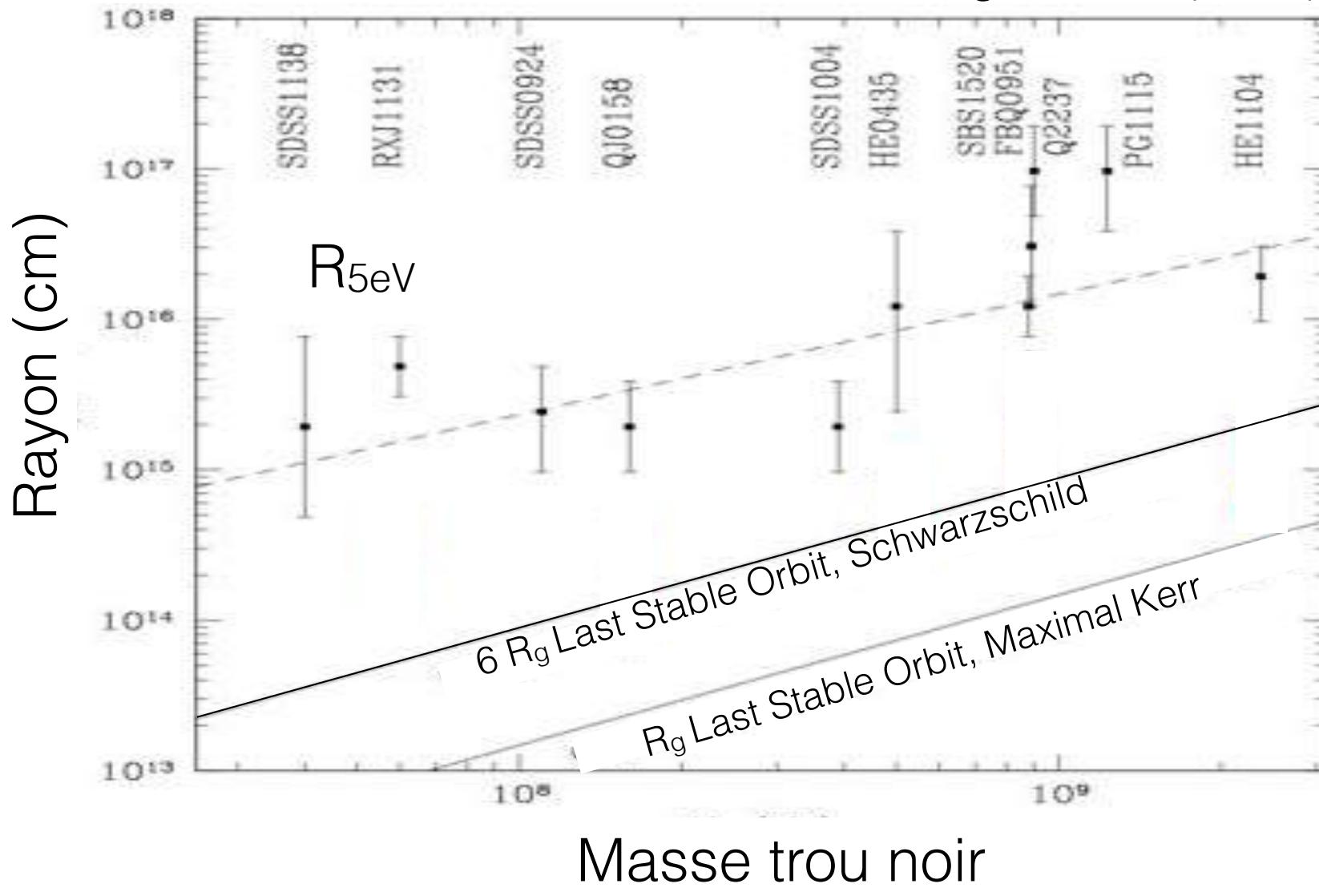
[www.eso.org](http://www.eso.org)



[www.eso.org](http://www.eso.org)

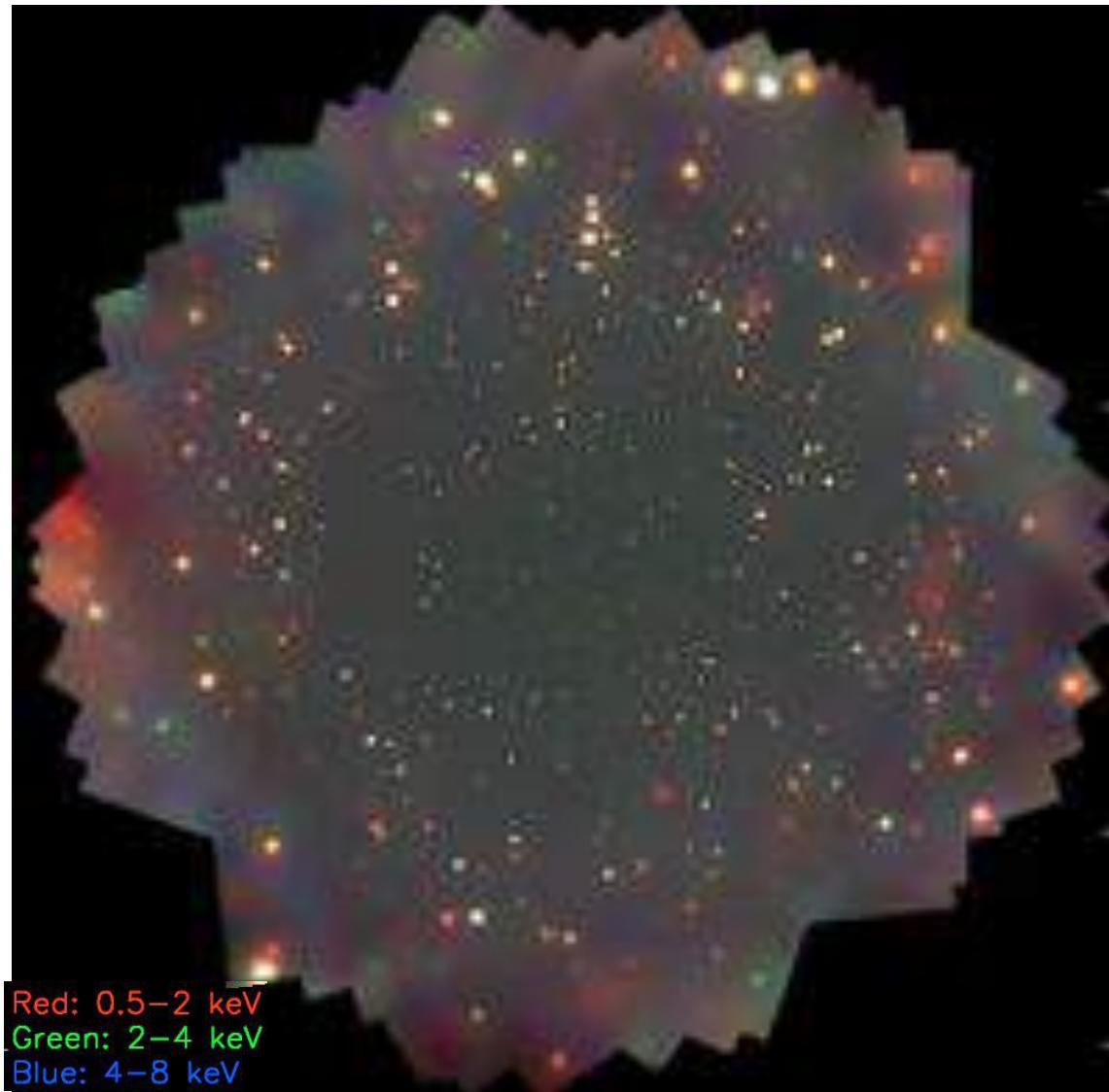
# Mesures Directes de la Taille du Disque

Morgan et al. (2010)



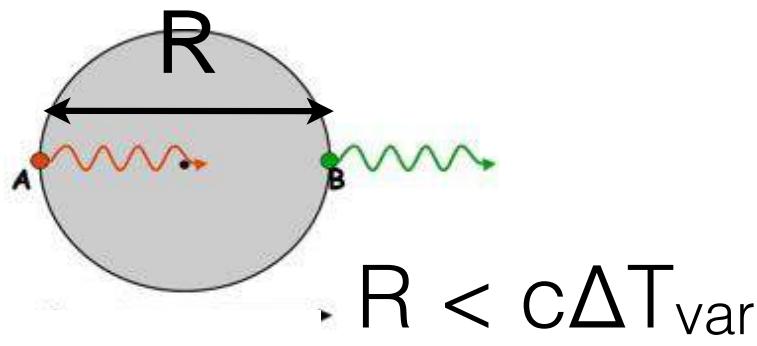
# Au dela de l'UV...

Chandra deep field



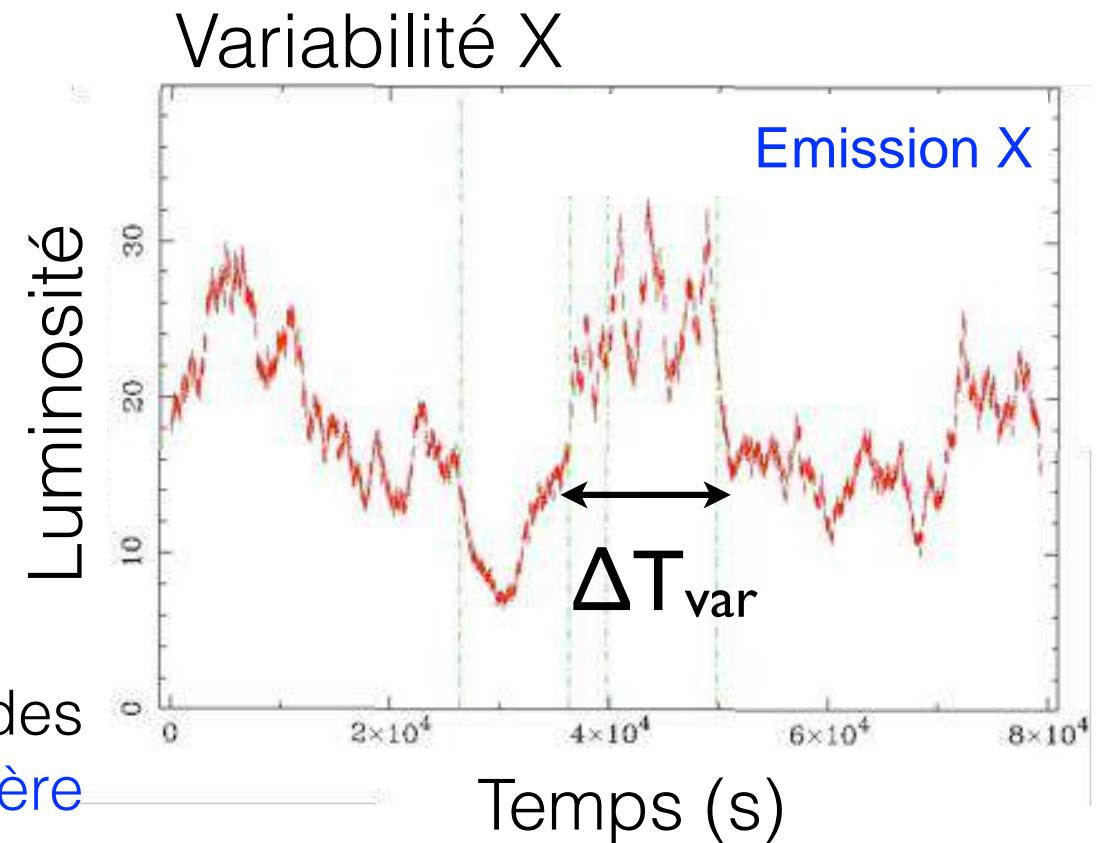
- Tous les NAG émettent en X
- Le disque d'accrétion n'est pas assez chaud pour émettre dans les X
- Une autre source est présente: la **couronne**

# Une Couronne de Petite Taille

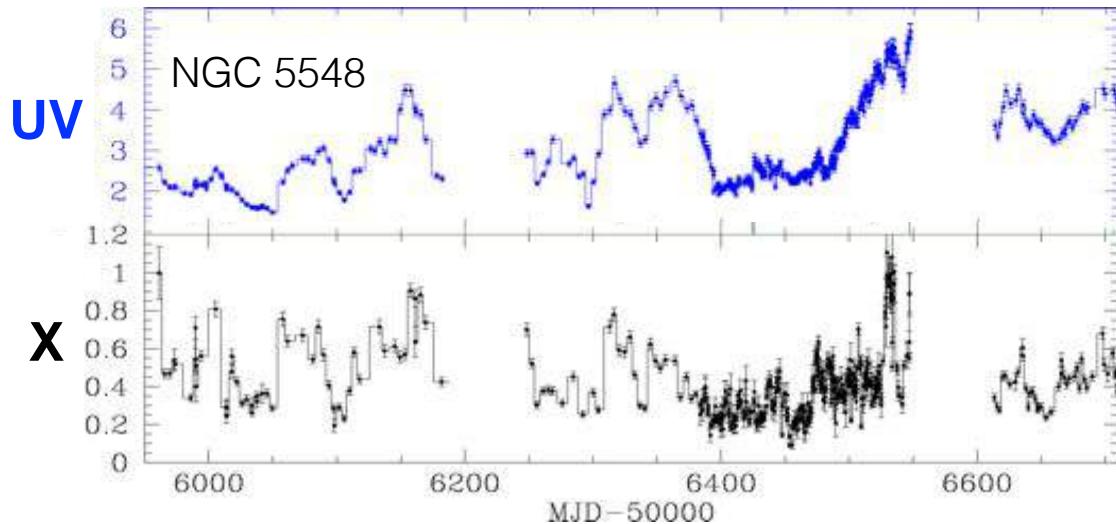


$$R < c\Delta T_{\text{var}}$$

→ Les régions émettrices ont des tailles de quelques minutes lumière (distance Terre-Soleil)

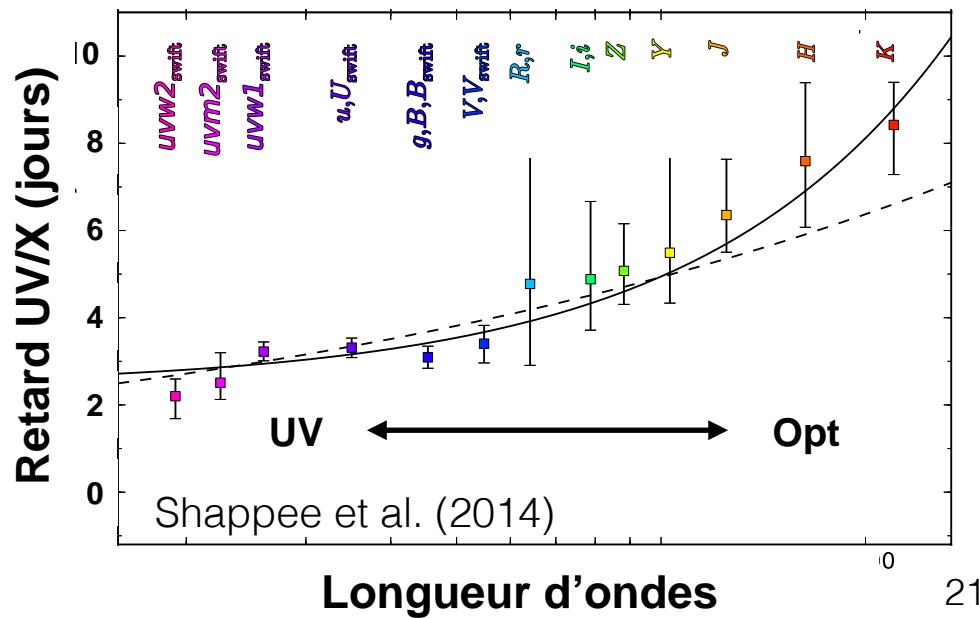
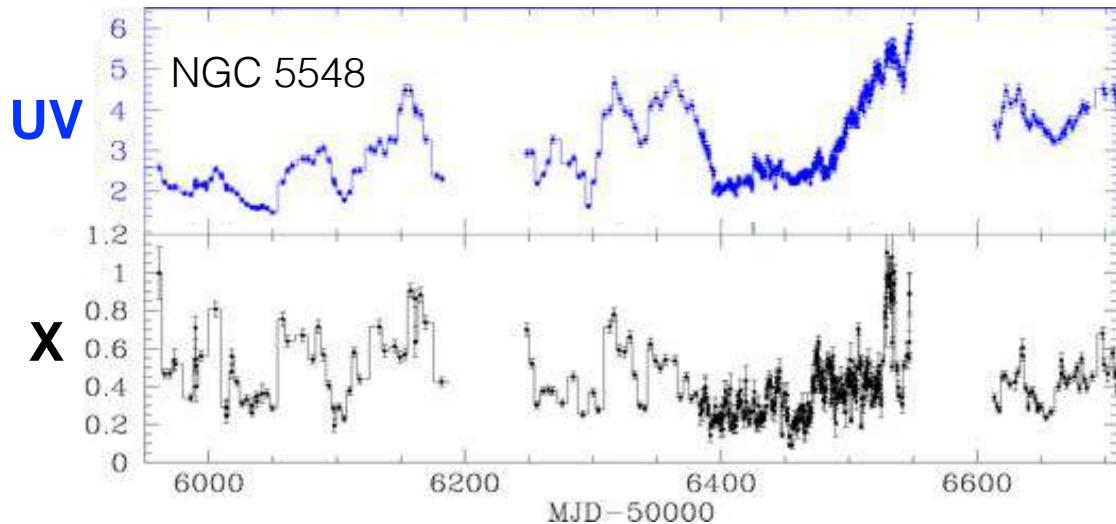


# Proche du Disque



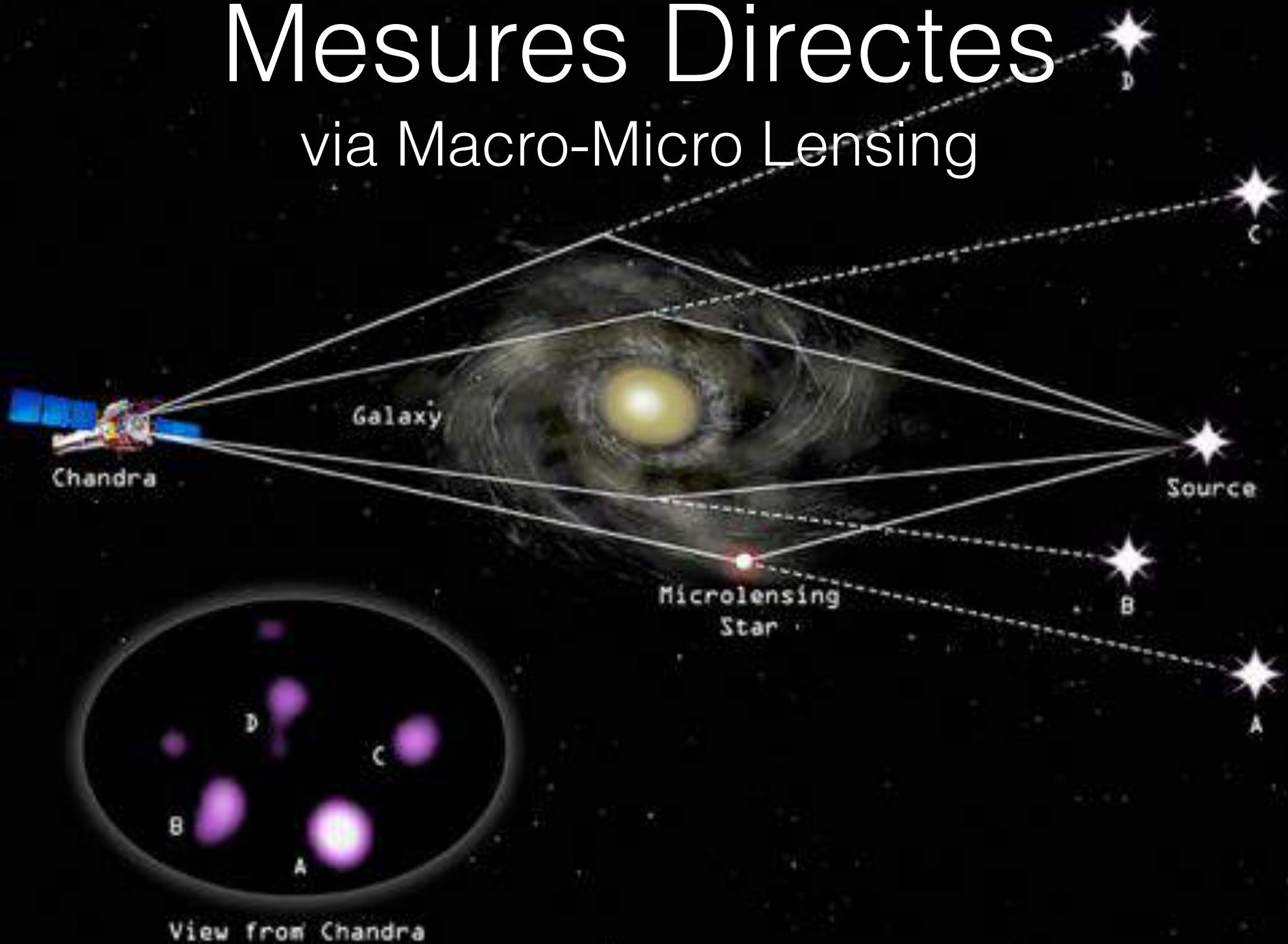
- Observations simultanées Opt/UV/X
- Délai entre l'Opt/UV et l'X

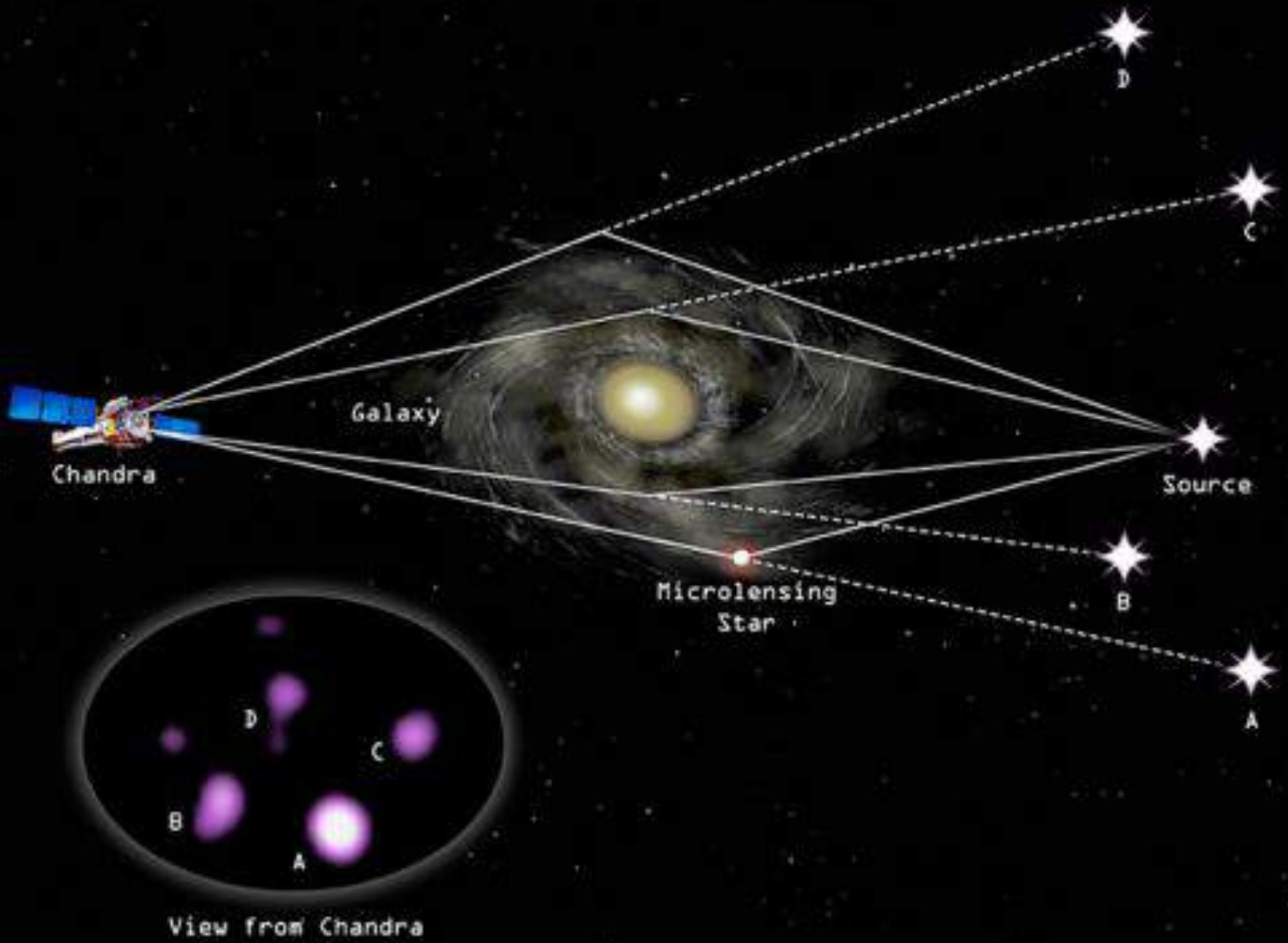
# Proche du Disque



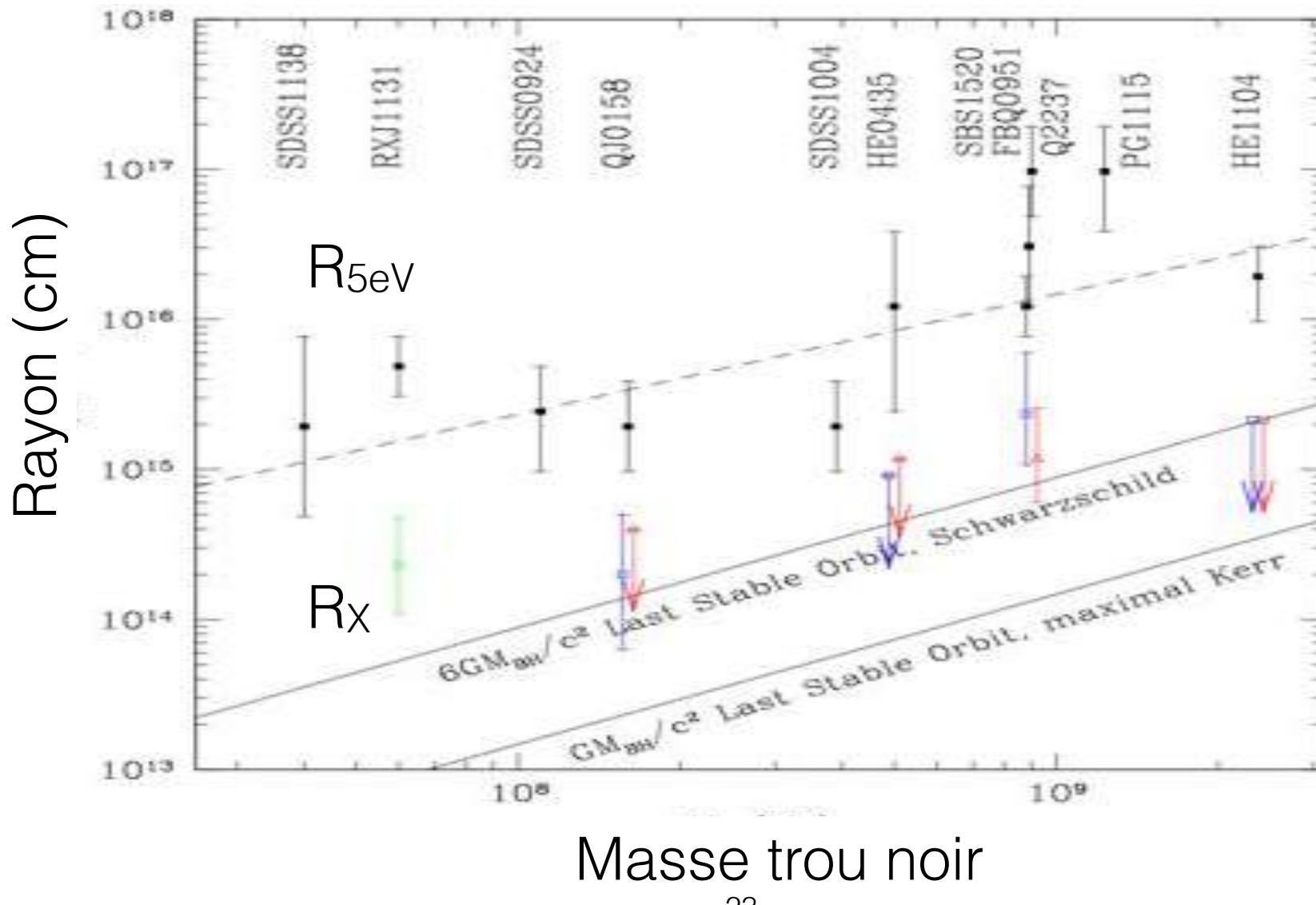
- Observations simultanées Opt/UV/X
- Délai entre l'Opt/UV et l'X
- Distance régions UV/X < jour lumière  
 $< 100 R_g$   
pour  $M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\text{soleil}}$

# Mesures Directes via Macro-Micro Lensing





# Mesures Directes de la Taille de la couronne

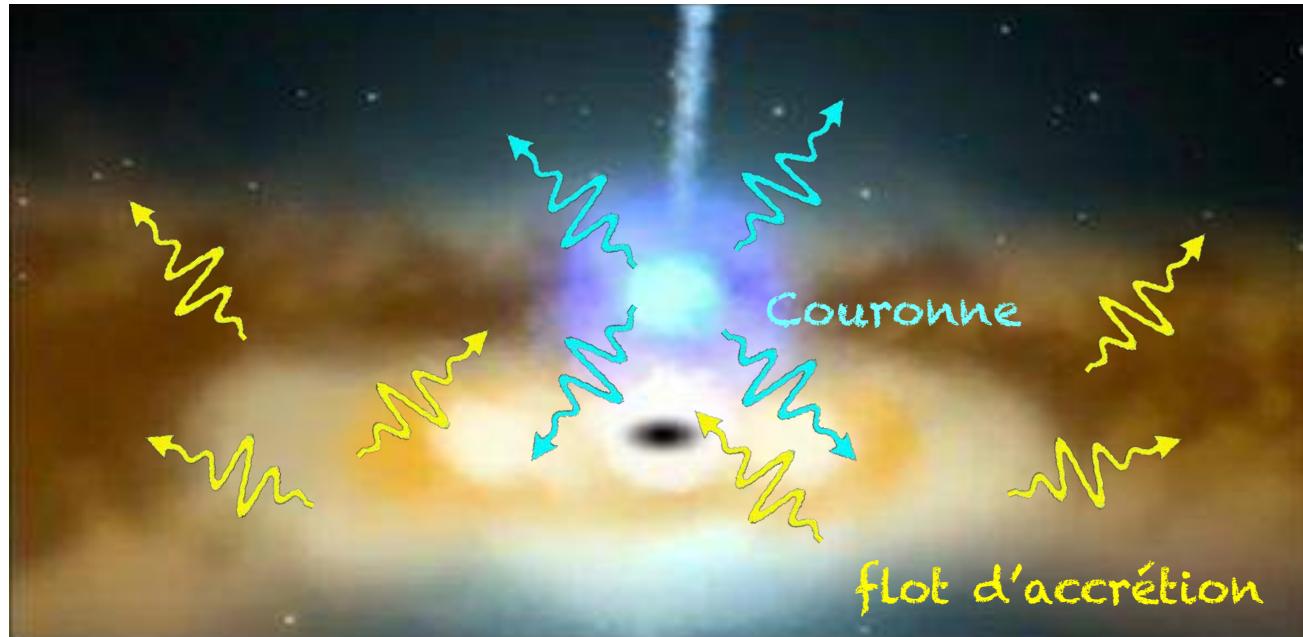


# Une Couronne au dessus du Disque?



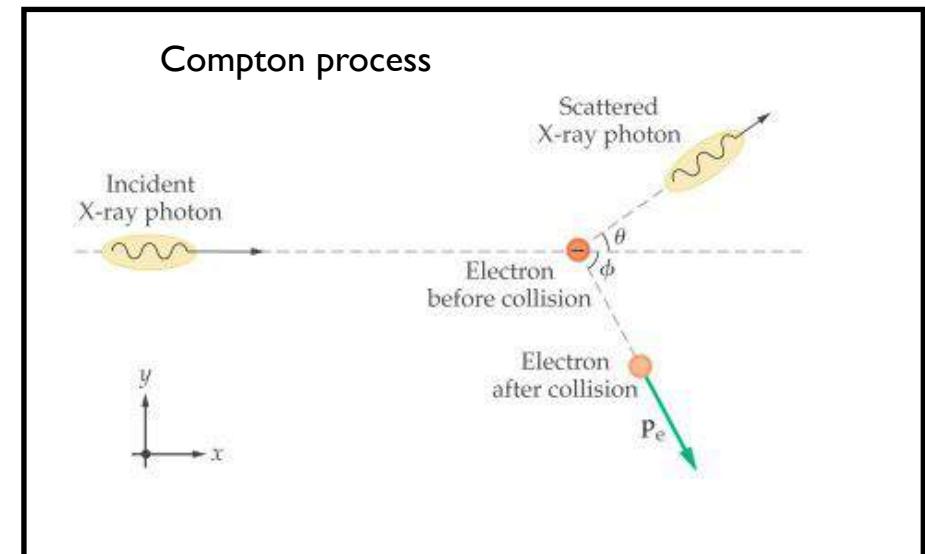
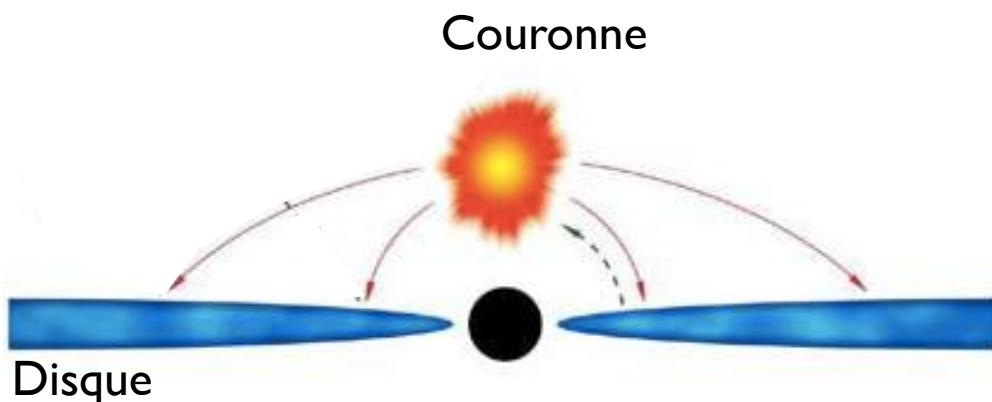
- L'émission X de la couronne chauffe le disque
- L'émission UV du disque refroidit la couronne
- Une partie de l'émission X est réfléchit par le disque

# Une Couronne au dessus du Disque?



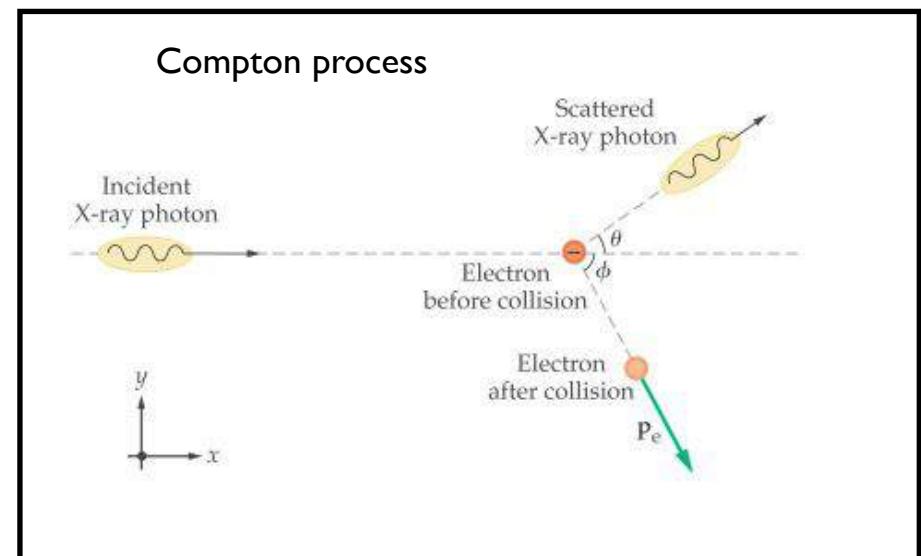
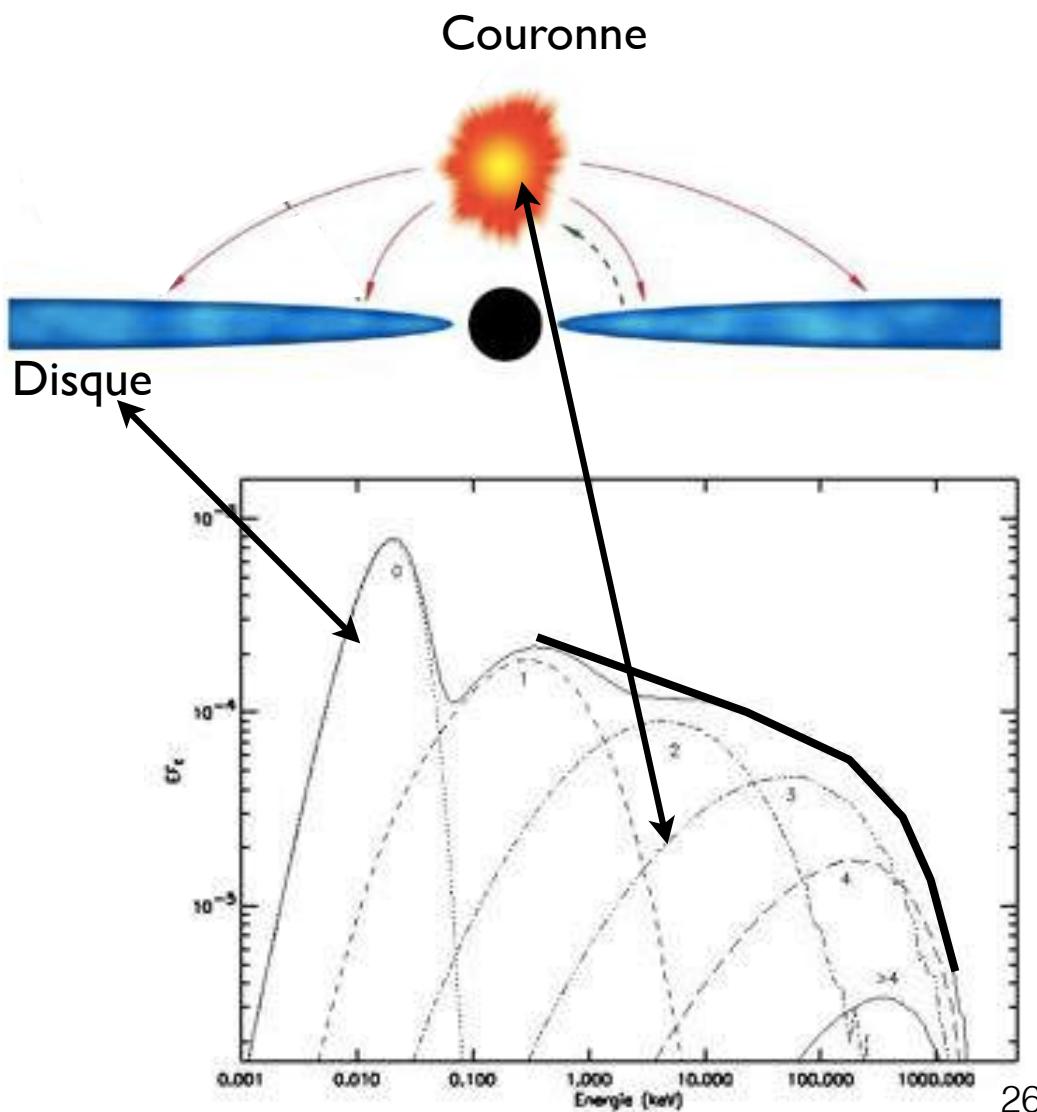
- L'émission X de la couronne chauffe le disque
- L'émission UV du disque refroidit la couronne
- Une partie de l'émission X est réfléchie par le disque

# Une Couronne Thermique



- Les photons UV du disque sont comptonisés par les électrons chauds de la couronne
- En quelques interactions, les photons UV deviennent des photons X

# Une Couronne très Chaude

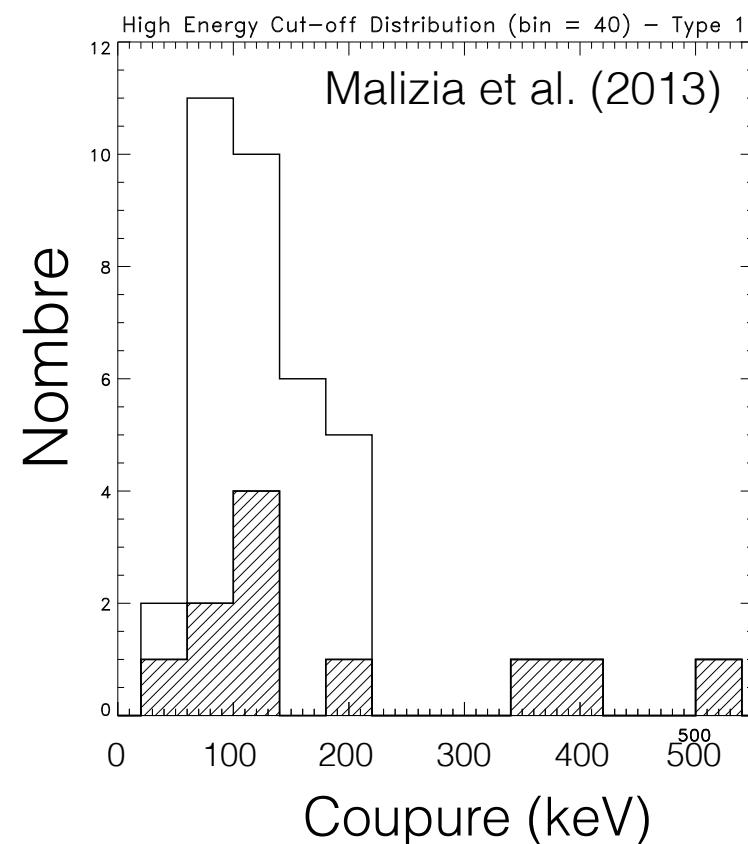
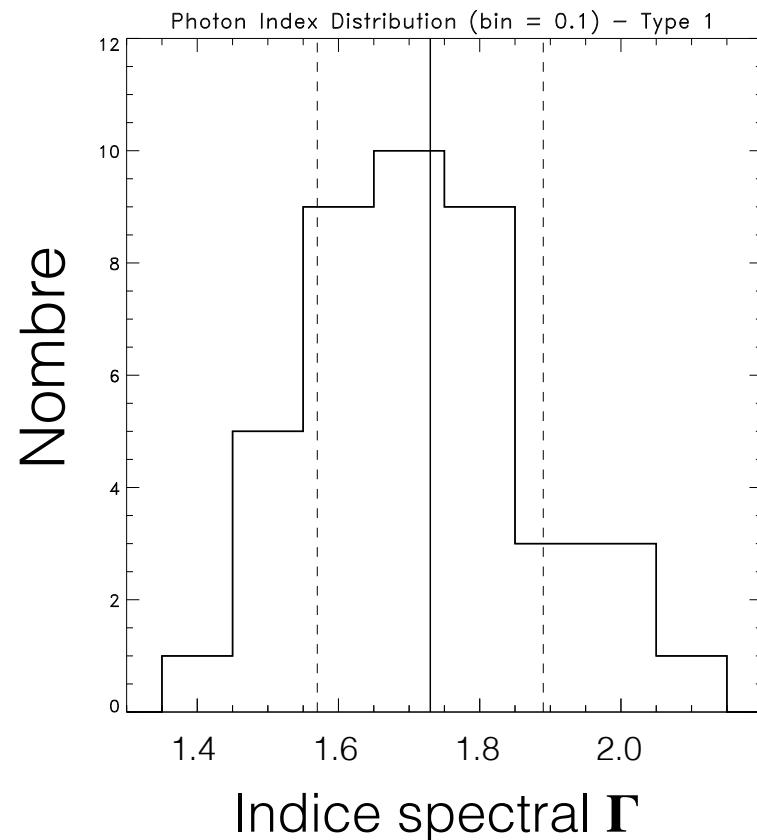


- Spectre en loi de puissance coupé exponentiellement

$$F_E \propto E^{-\Gamma} \exp\left(-\frac{E}{E_c}\right)$$

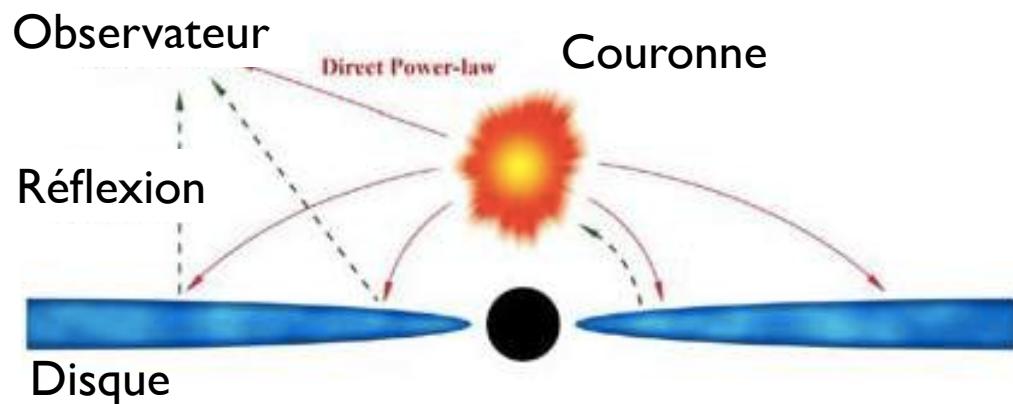
- $E_c$  de l'ordre de la température des électrons de la couronne

# Une Couronne très Chaude



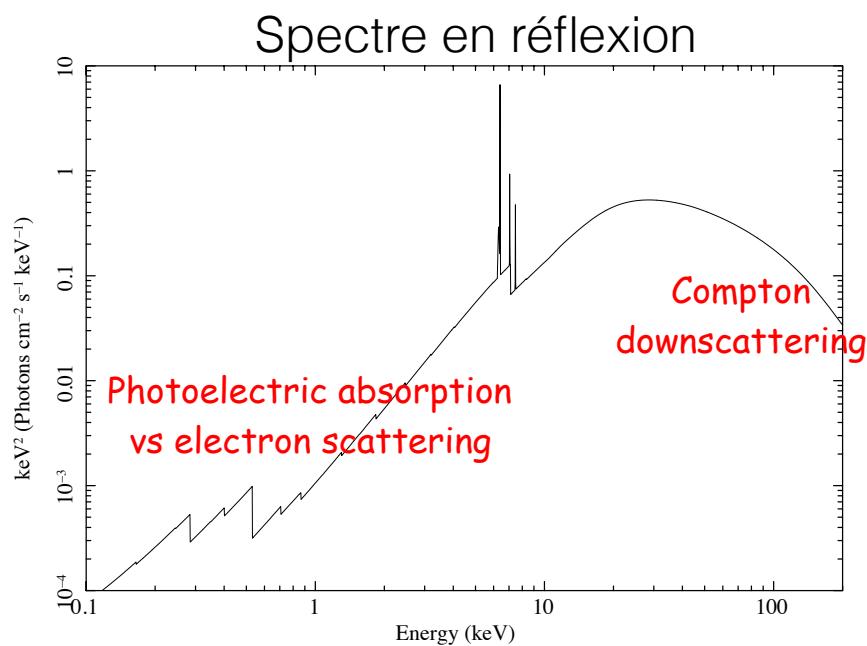
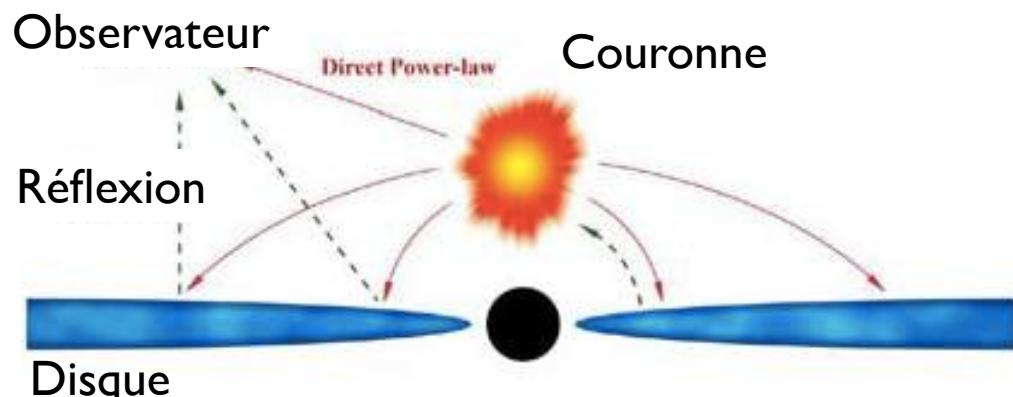
La couronne a une température de quelques centaines de keV i.e.  $\sim 10^9$  K

# Composantes en Reflexion



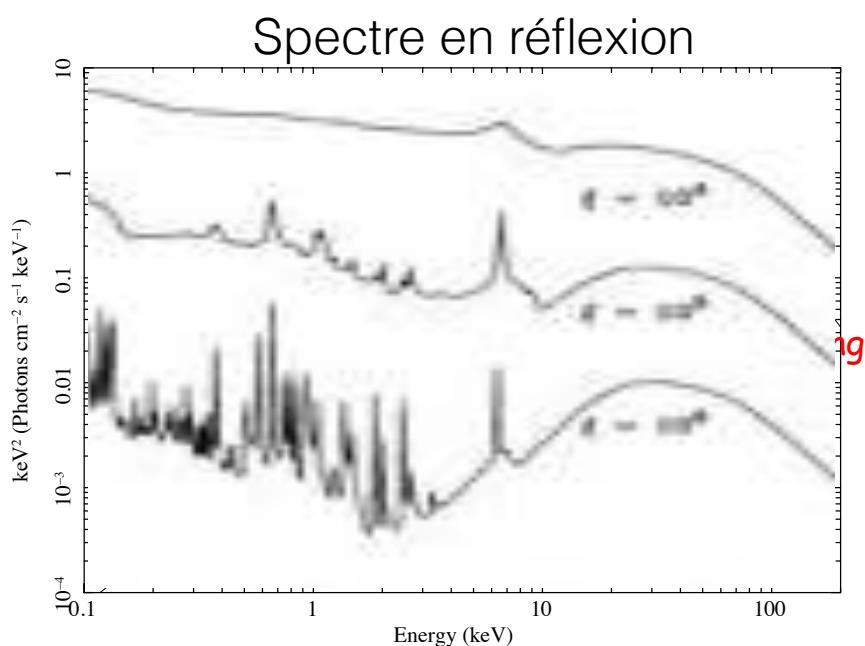
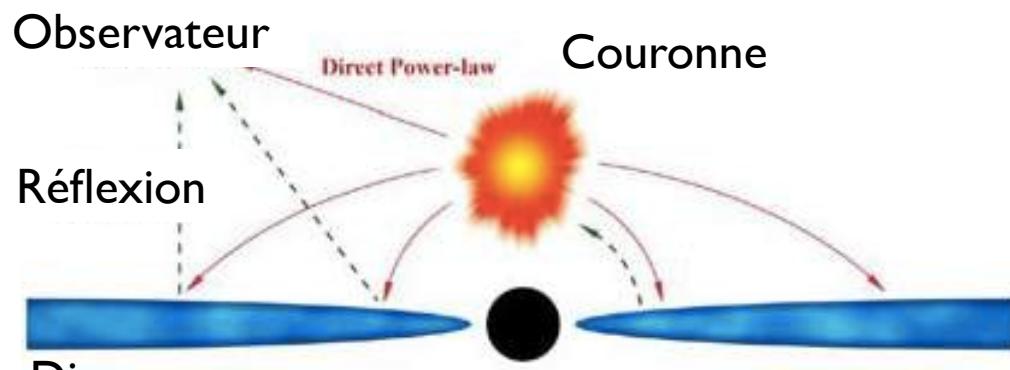
- Une partie du rayonnement X de la couronne illumine le disque

# Composantes en Reflexion



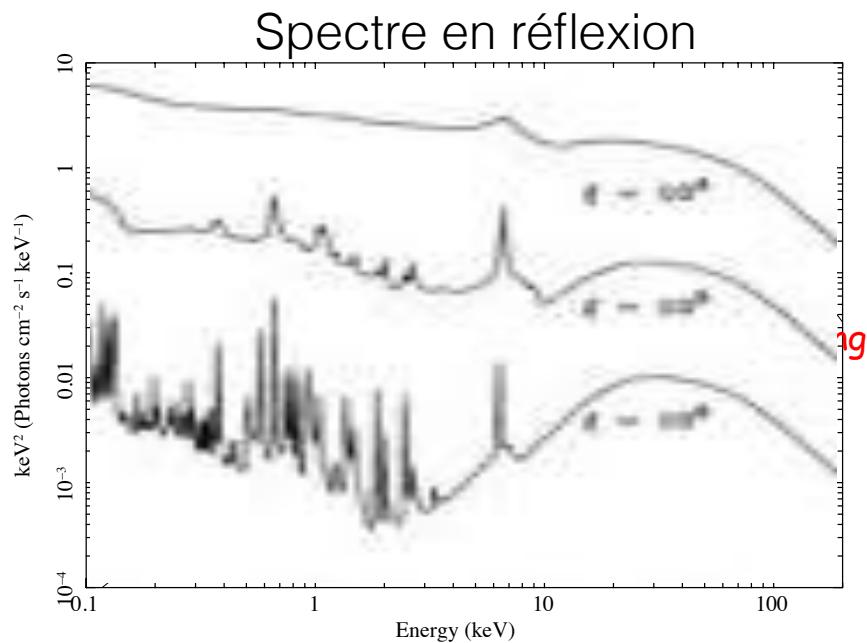
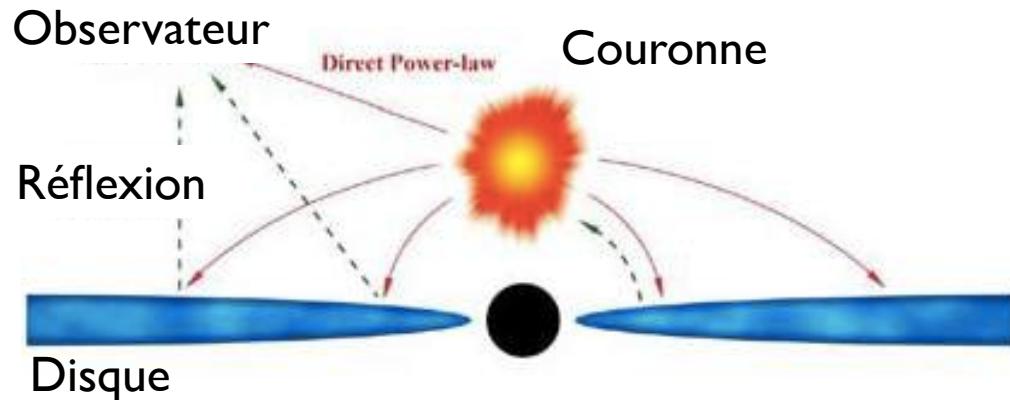
- Une partie du rayonnement X de la couronne illumine le disque
- Le spectre en réflexion est dominé par la raie du Fer et une bosse à ~30 keV

# Composantes en Reflexion

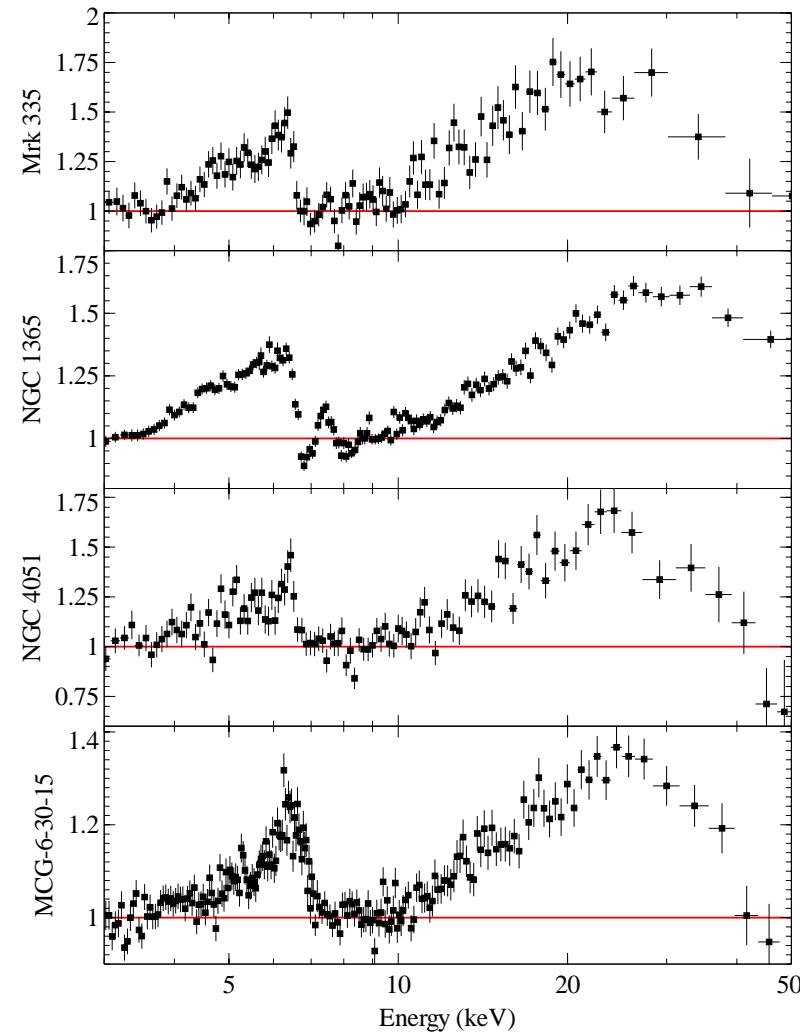


- Une partie du rayonnement X de la couronne illumine le disque
- Le spectre en réflexion est dominé par la raie du Fer et une bosse à ~30 keV
- Le spectre en réflexion dépend fortement de l'état d'ionisation du disque

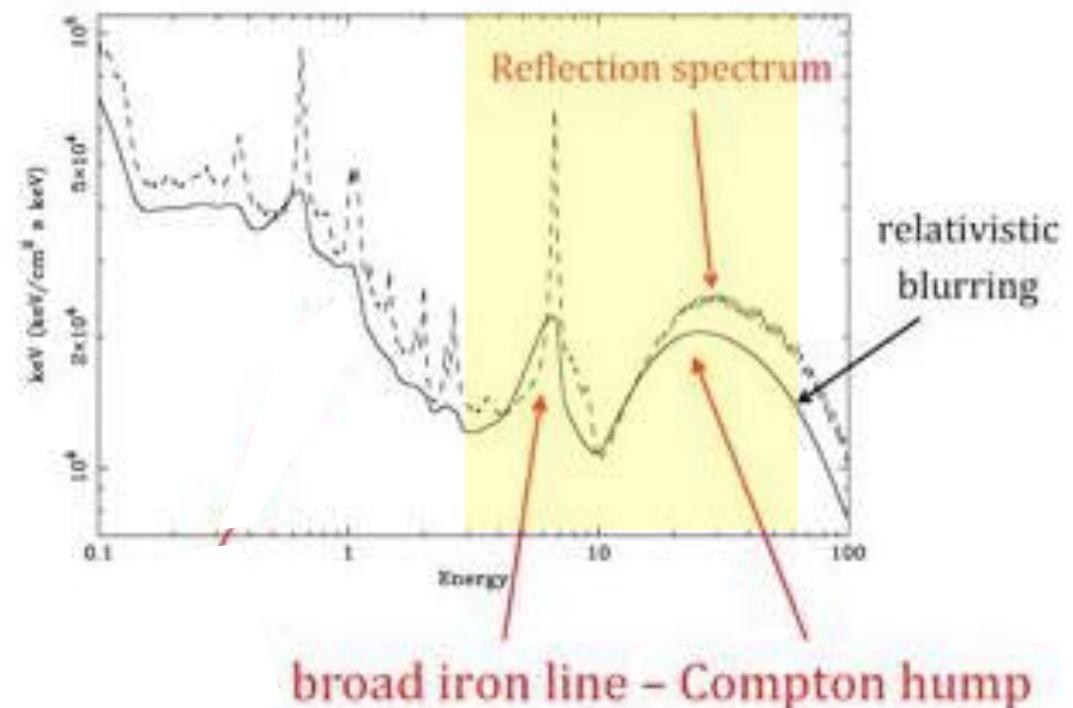
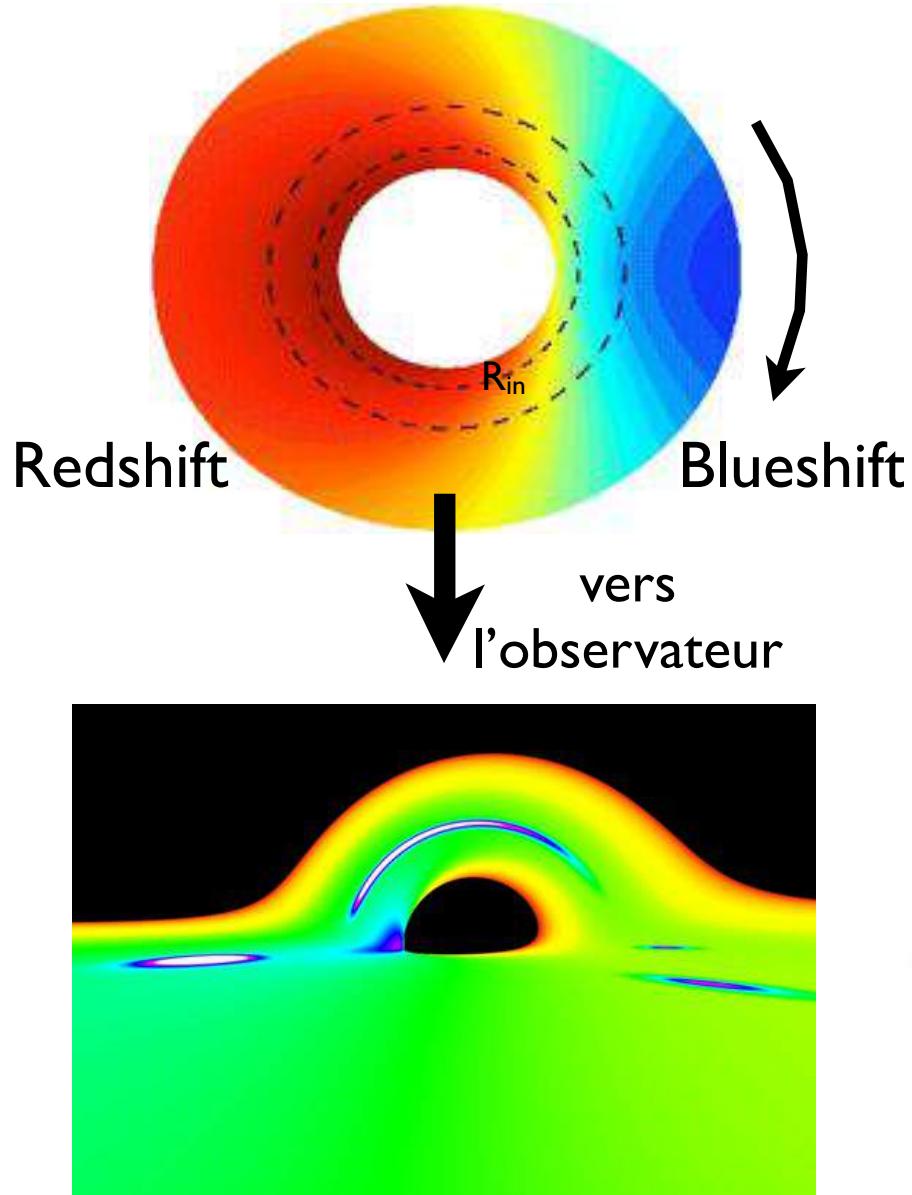
# Composantes en Reflexion



Observation (NuSTAR)

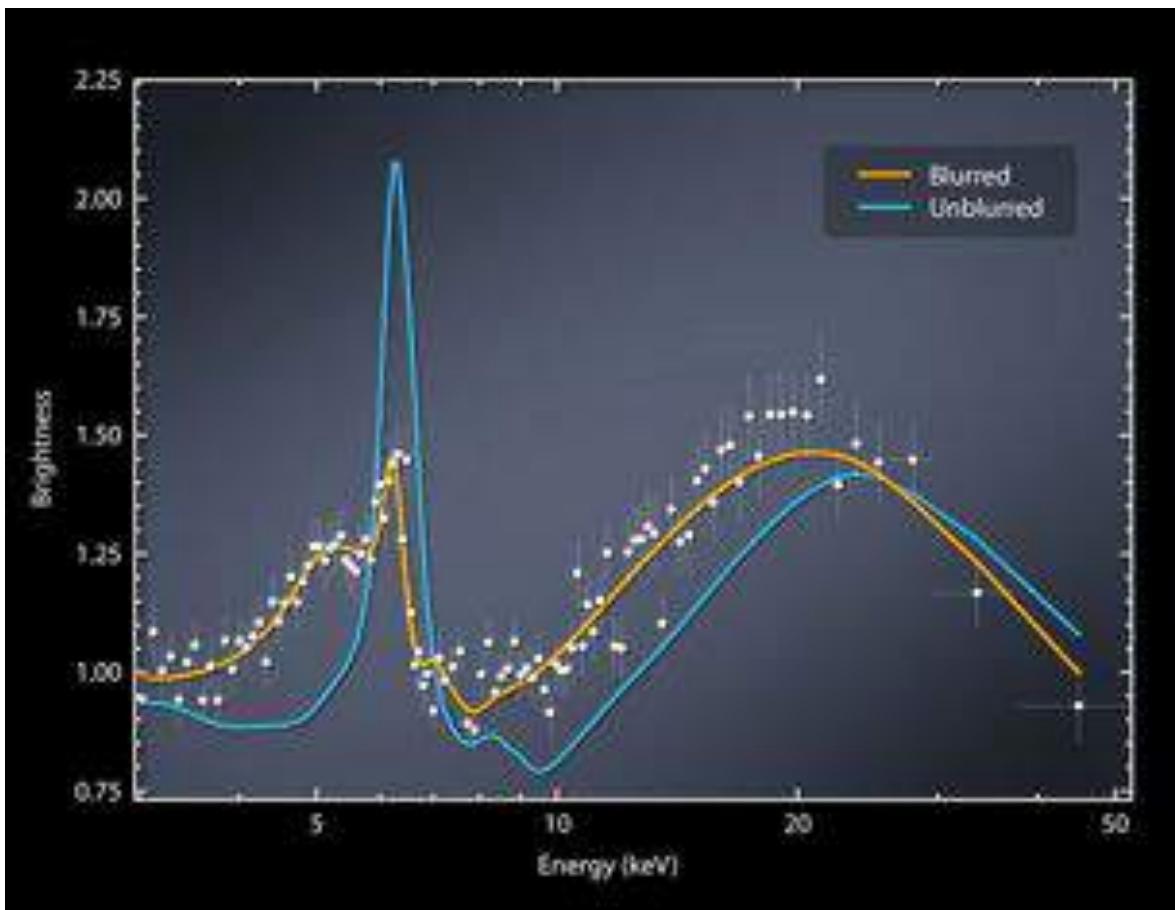


# Effets relativistes



# Effets relativistes

Mkn 335

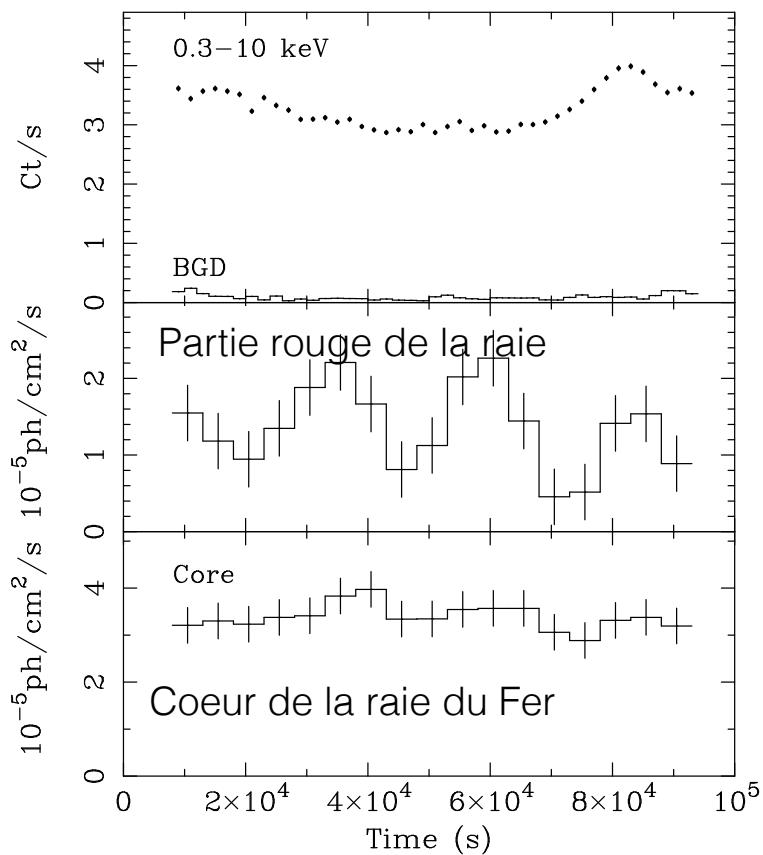


- Mkn 335 observé par NuSTAR dans un état de bas flux
- Spectre consistant avec une couronne entre 2 et 10  $R_g$  au dessus du disque
- Trou noir proche d'un trou noir de Kerr en rotation maximale

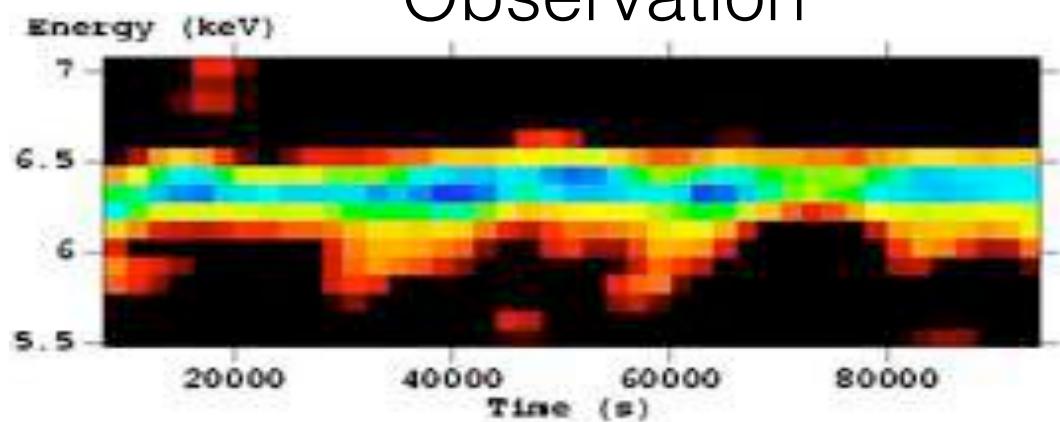
Parker et al. (2014)

# Effets relativistes

NGC 3516



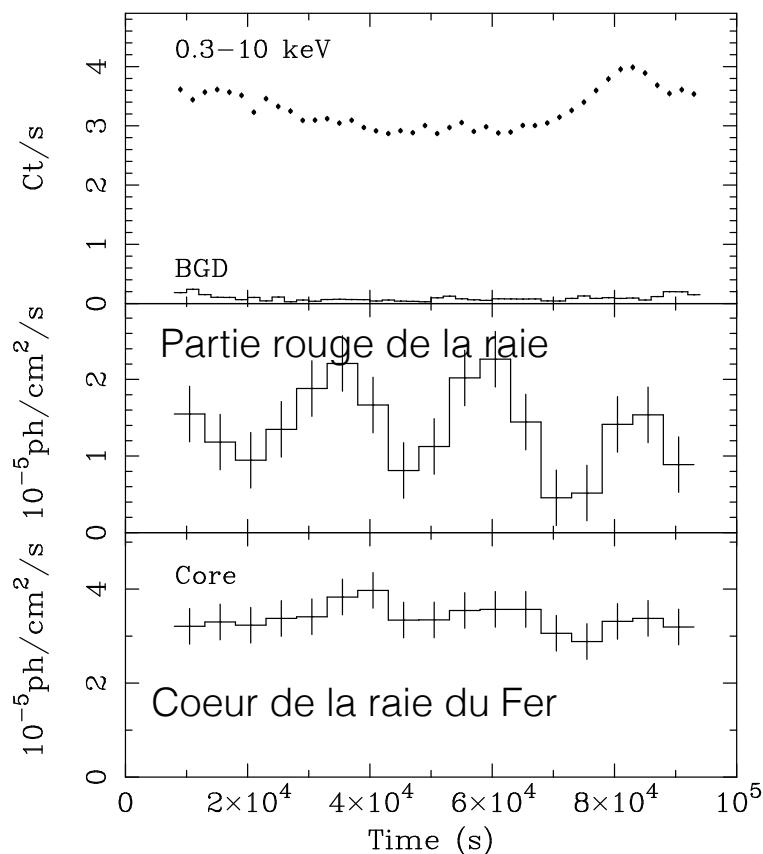
Observation



Iwasawa et al. (2004)

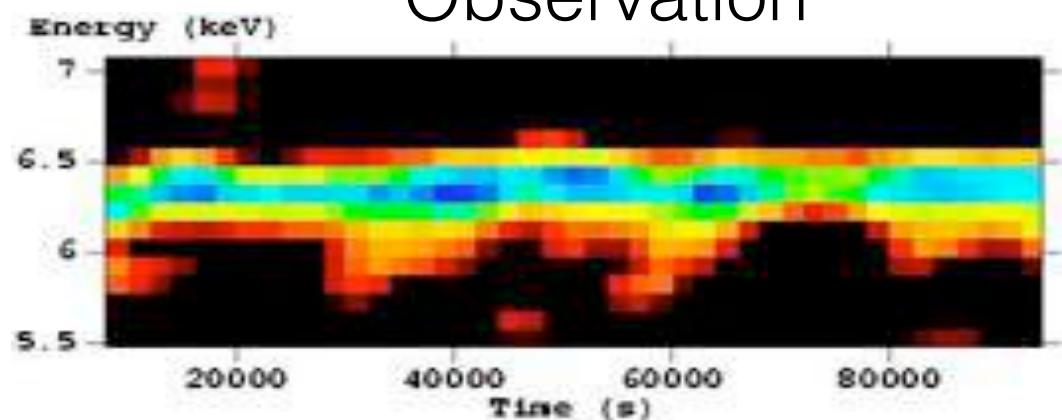
# Effets relativistes

NGC 3516

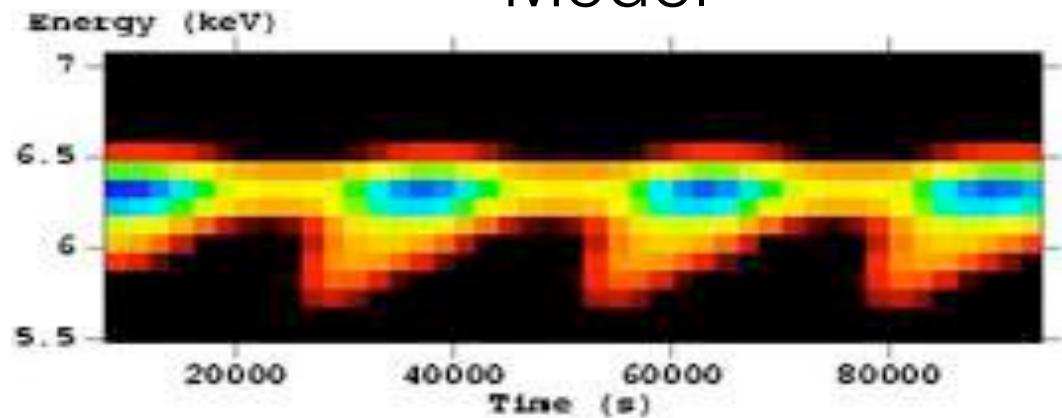


Iwasawa et al. (2004)

Observation

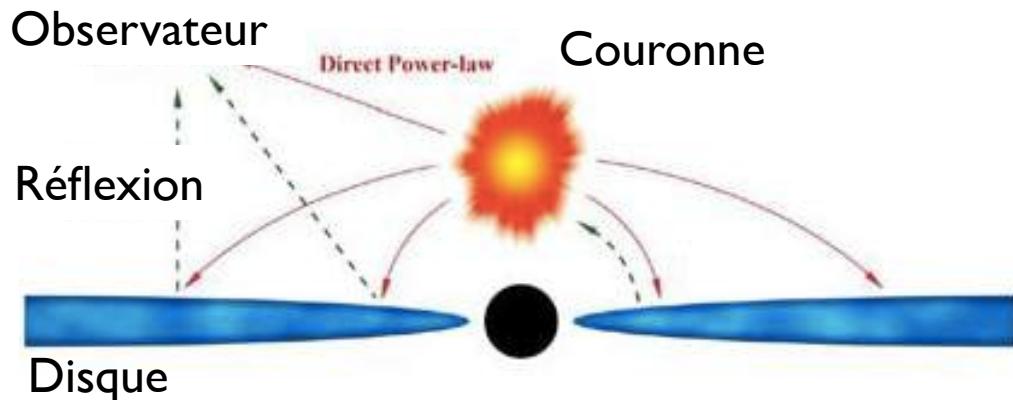


Model



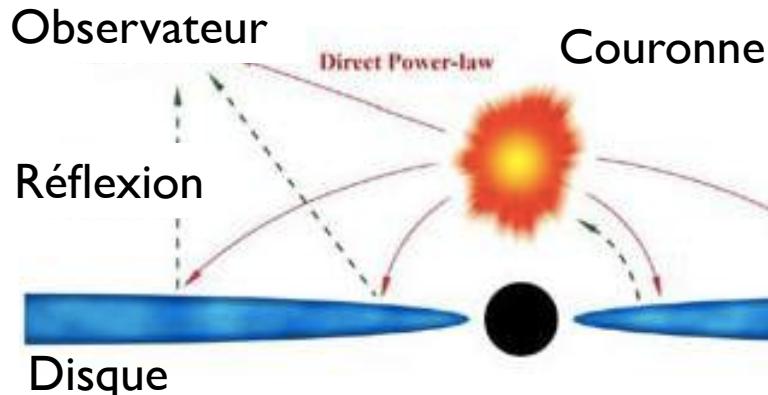
En accord avec une source X à un rayon  $\sim 10 R_g$  tournant avec le disque

# Réverbération



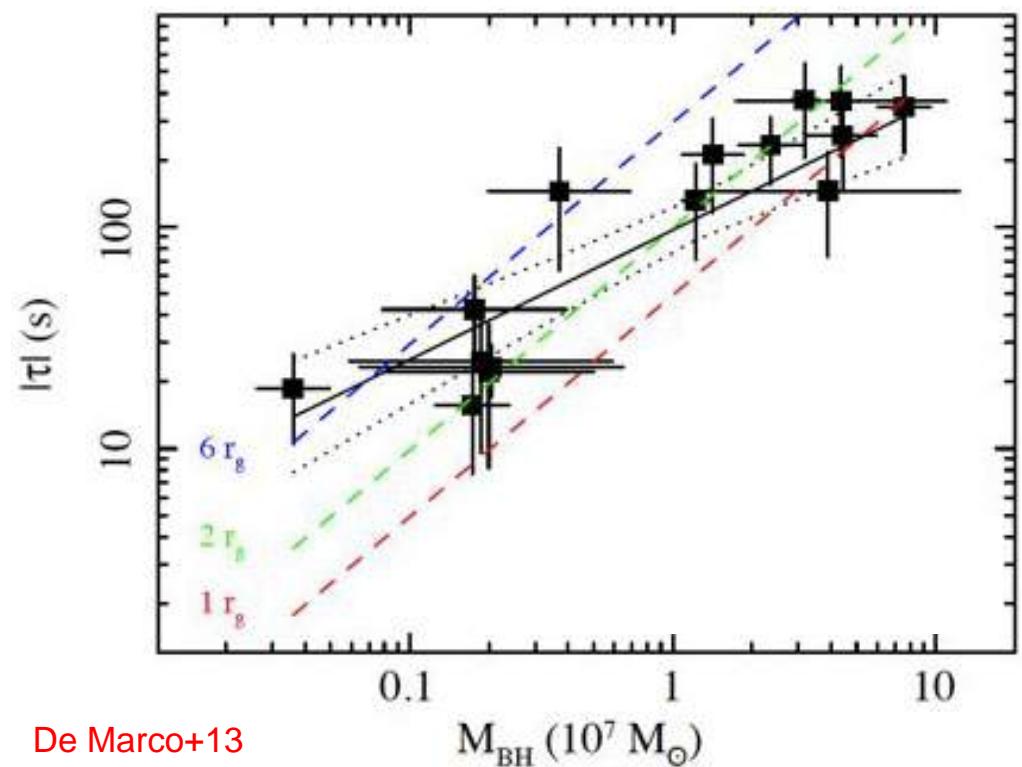
Retard temporelle entre  
l'émission de la couronne et  
la réflexion

# Réverbération



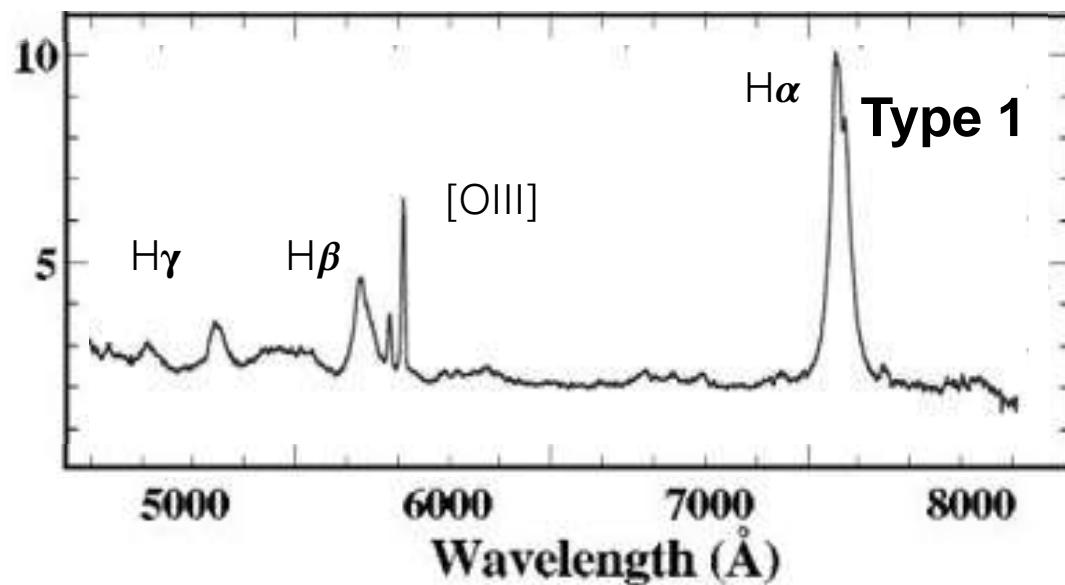
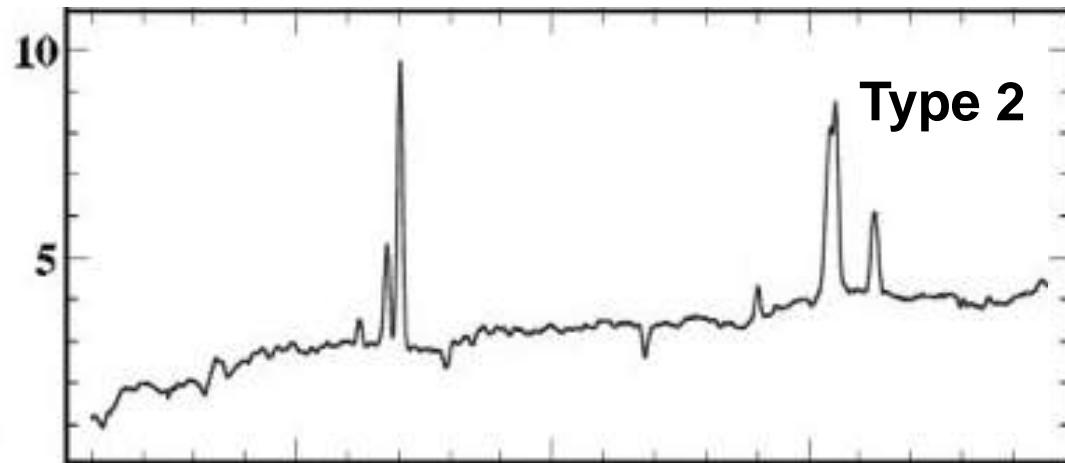
Retard temporelle entre l'émission de la couronne et la réflexion

- Retard de quelques centaines de secondes
- En accord avec une source X à une hauteur de quelques  $R_g$  au dessus du disque



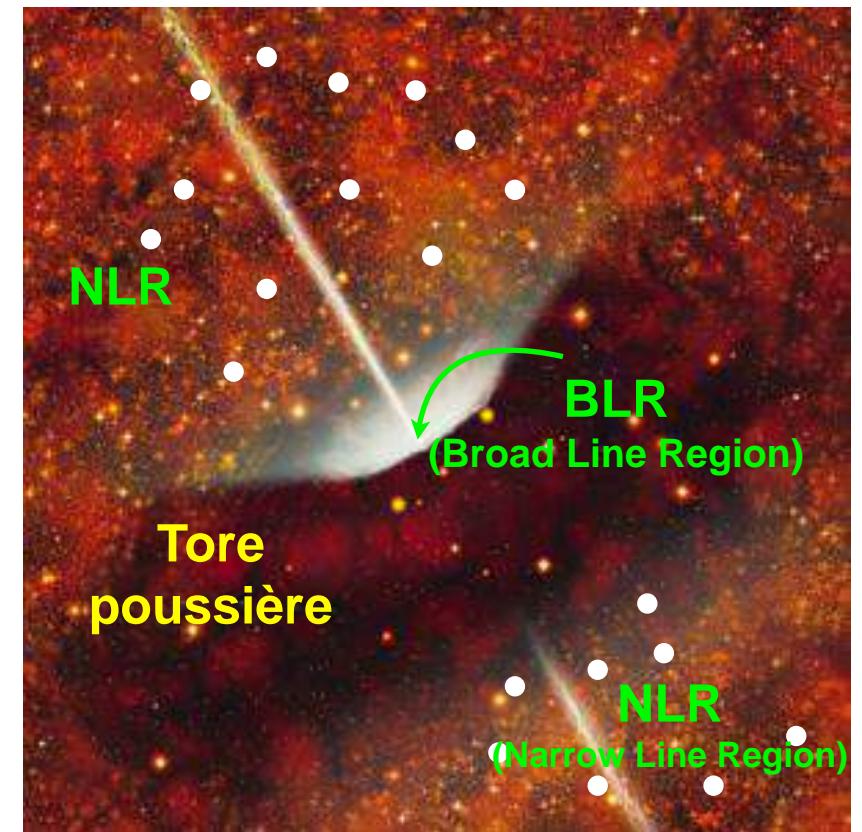
# Le tore de poussière: la partie « imageable » du NAG

# Des Raies Larges ou pas...



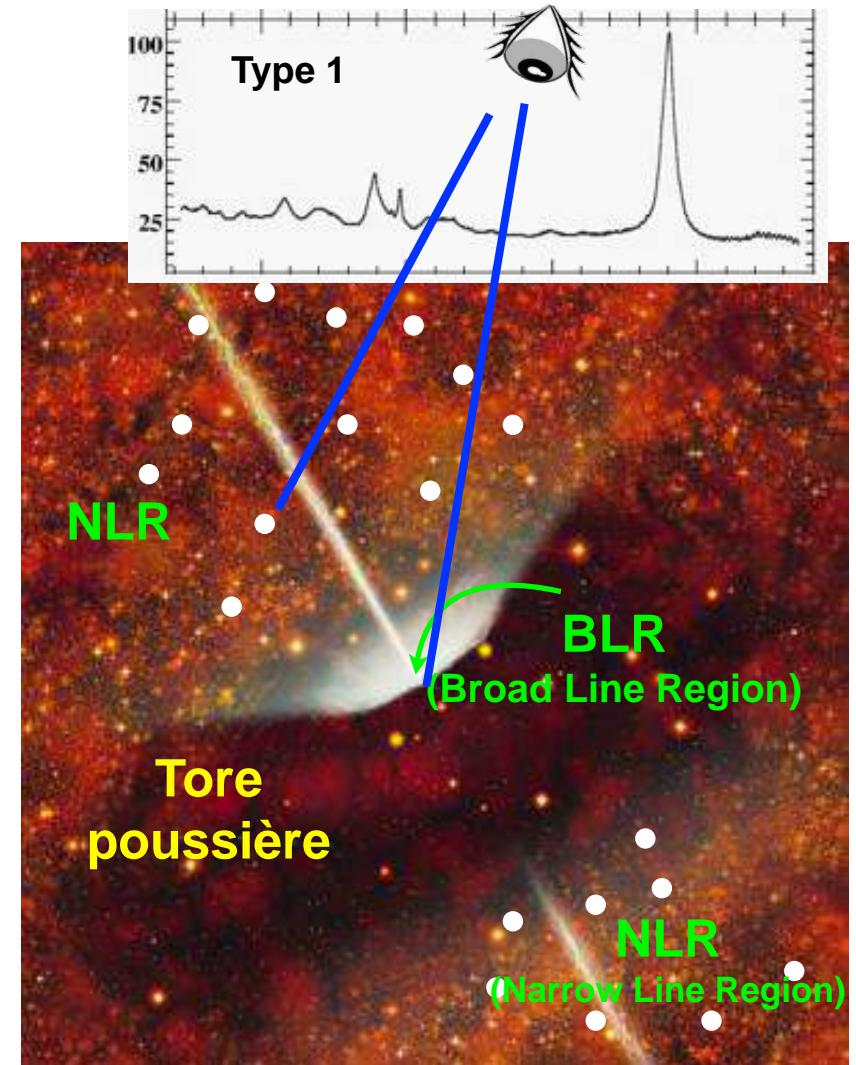
- Certains NAG ont des raies larges dans leurs spectres optiques, d'autres non.
- Raies larges et ionisées signatures de matière en mouvement ( $\sim 10^4$  km/s) chauffée à  $\sim 20\,000$  K.
- Raies étroites et ionisées signatures de matière en mouvement ( $\sim 500$  km/s) chauffée à  $\sim 16\,000$  K.

# Le Modèle d'Unification



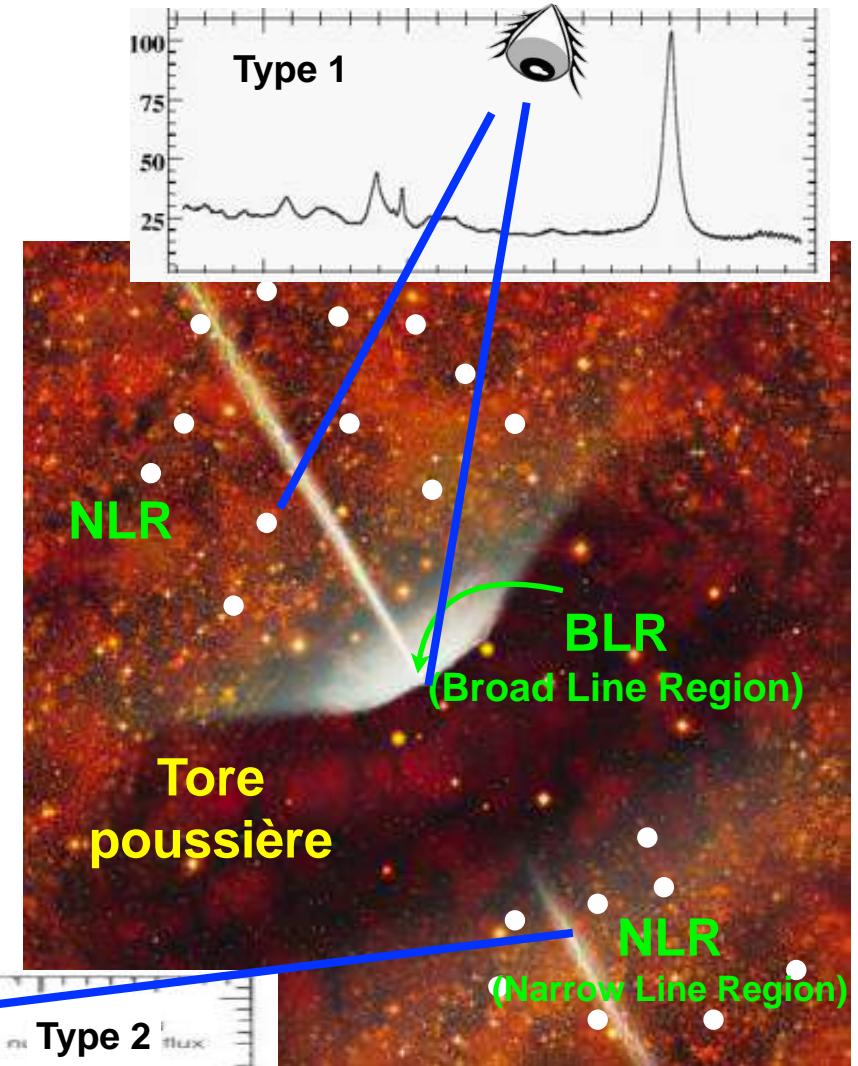
# Le Modèle d'Unification

- Les raies larges proviennent de la BLR (Broad Line Region), proche du trou noir. Les raies étroites de la NLR (Narrow Line Region), bien plus loin du trou noir

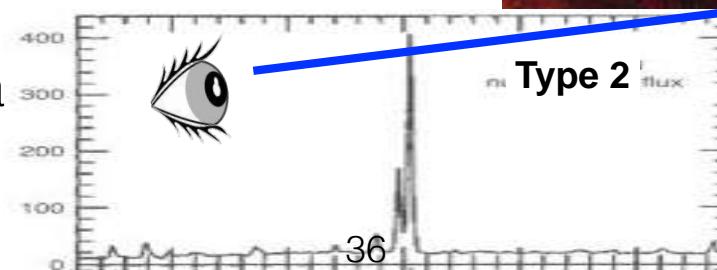


# Le Modèle d'Unification

- Les raies larges proviennent de la BLR (Broad Line Region), proche du trou noir. Les raies étroites de la NLR (Narrow Line Region), bien plus loin du trou noir

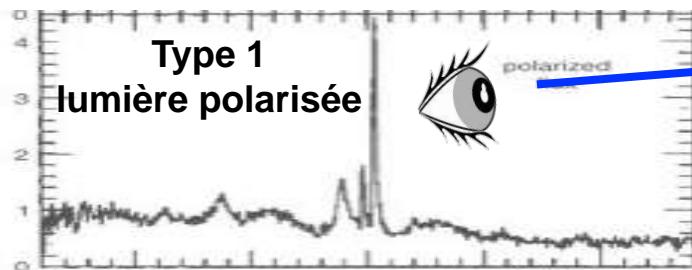


- A grand angle seule la NLR est visible

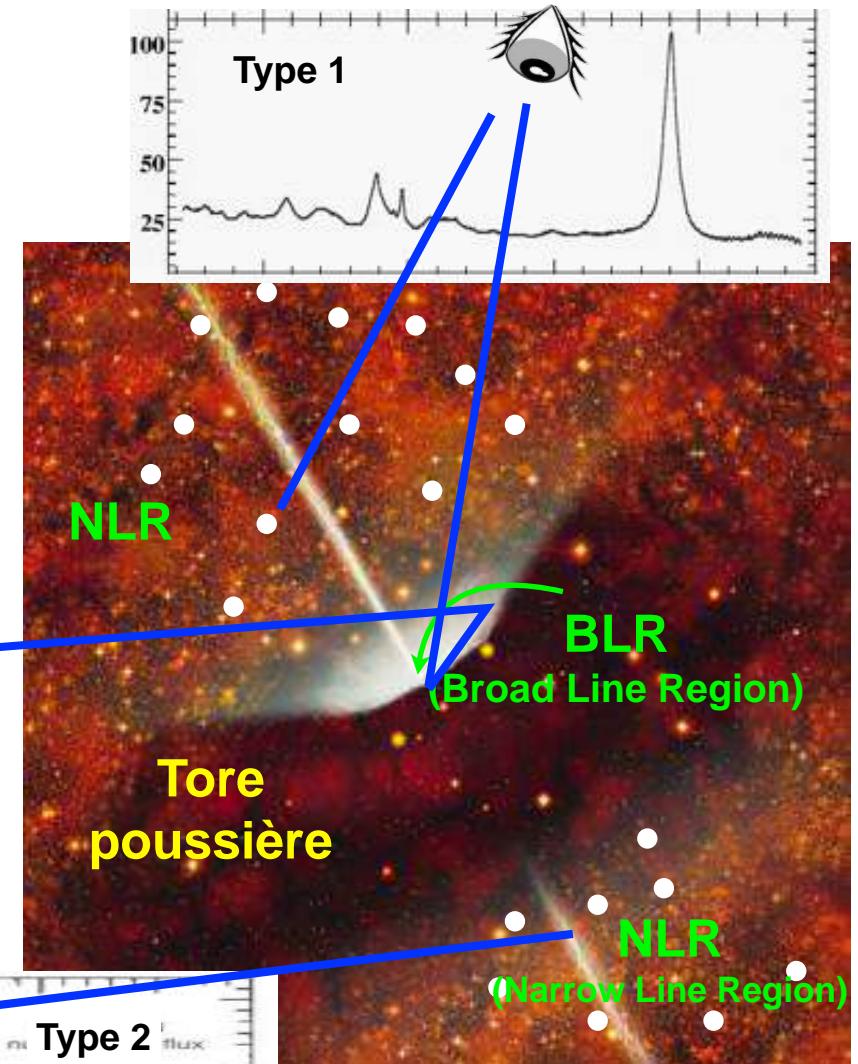
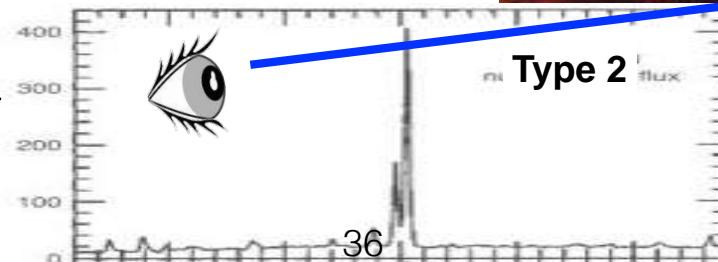


# Le Modèle d'Unification

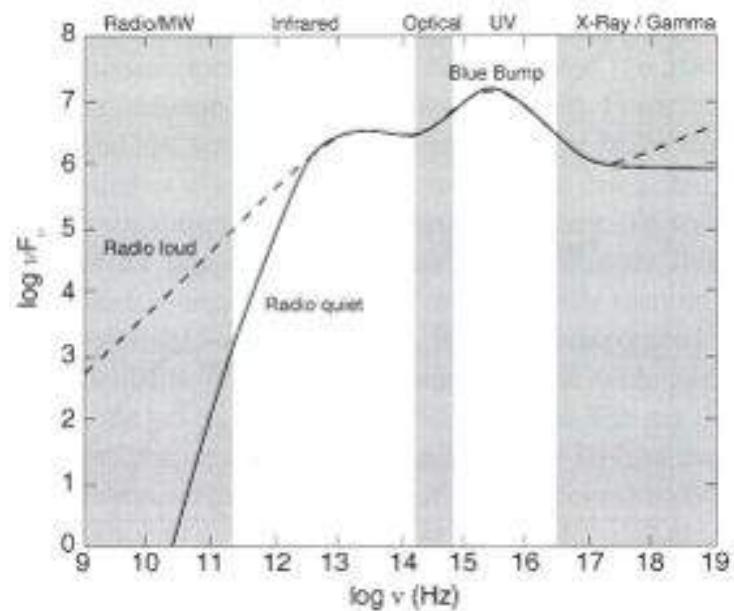
- Les raies larges proviennent de la BLR (Broad Line Region), proche du trou noir. Les raies étroites de la NLR (Narrow Line Region), bien plus loin du trou noir
- A grand angle, seule la lumière provenant de la BLR et réfléchie (i.e. polarisée) sur la matière environnante serait visible



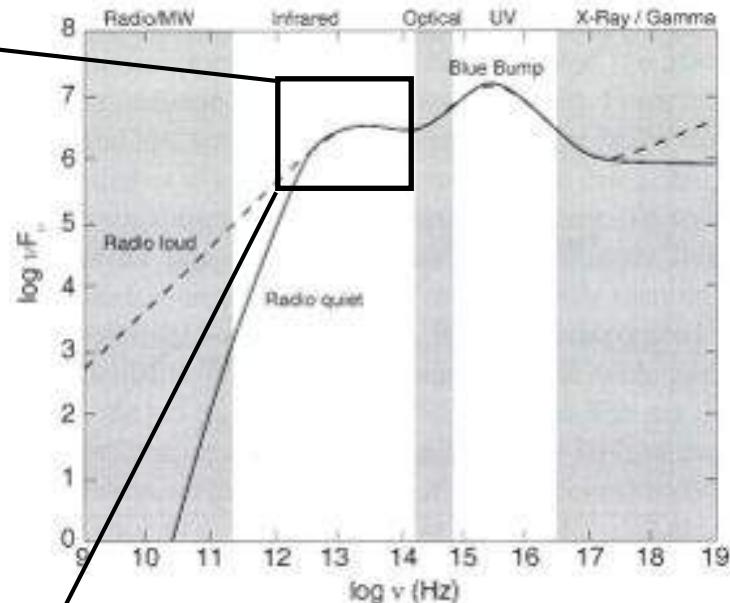
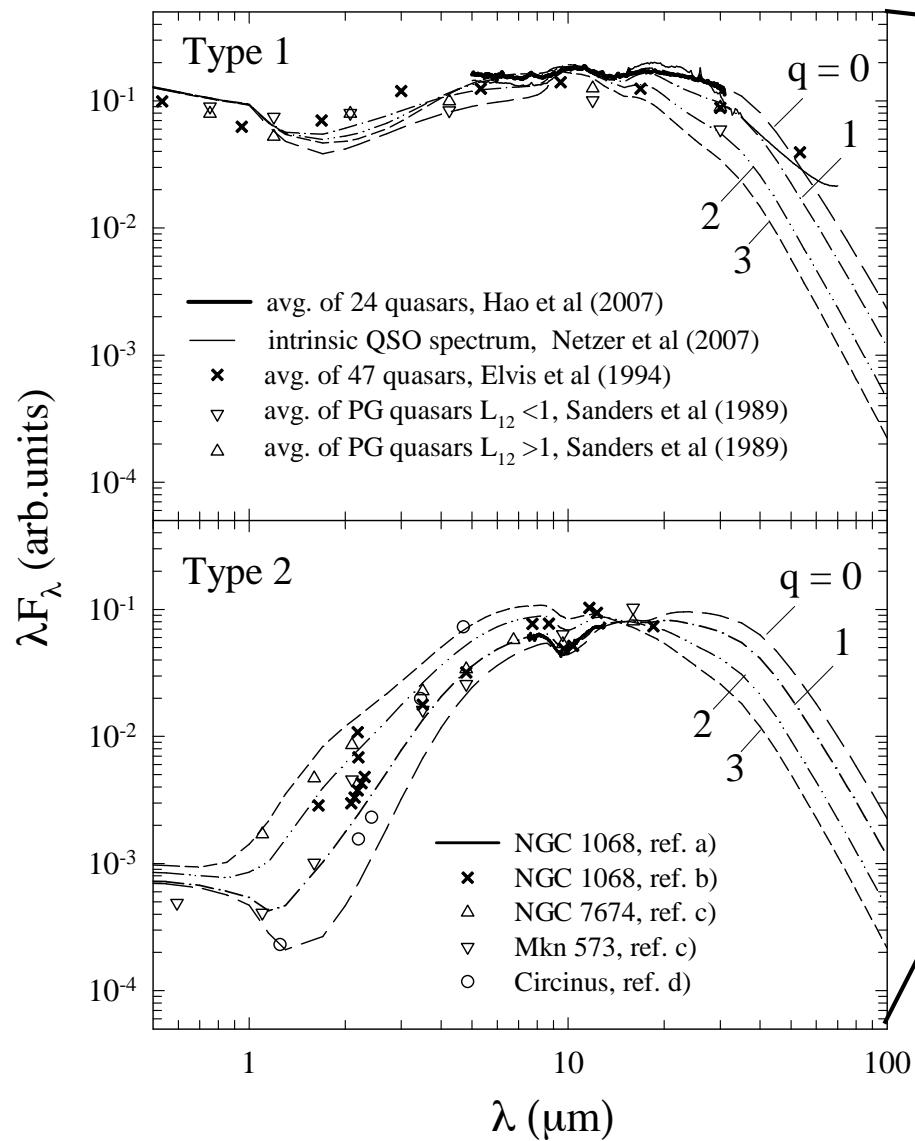
- A grand angle seule la NLR est visible



# Une Forte Emission IR



# Une Forte Emission IR

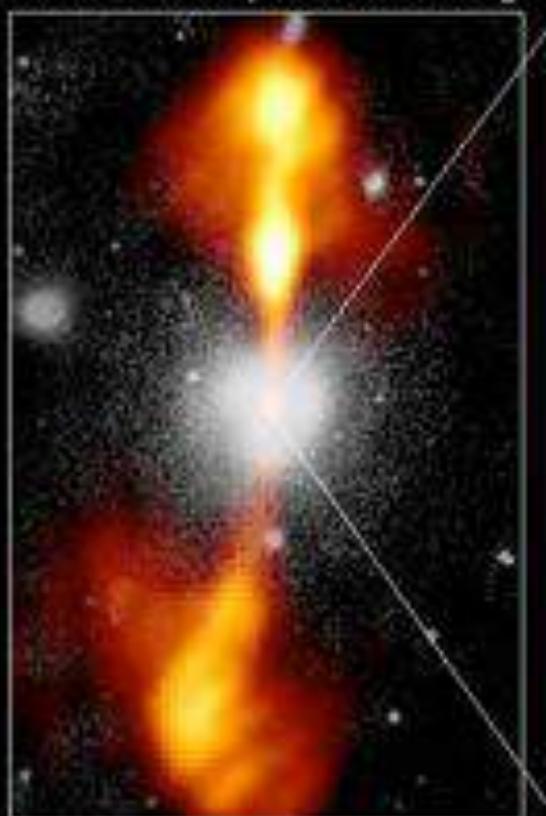


- Signatures de poussières chaudes (raies silicates en absorption)
- Peu compatibles avec un tore, mais plutôt avec un ensemble de petits nuages

# Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope  
Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image

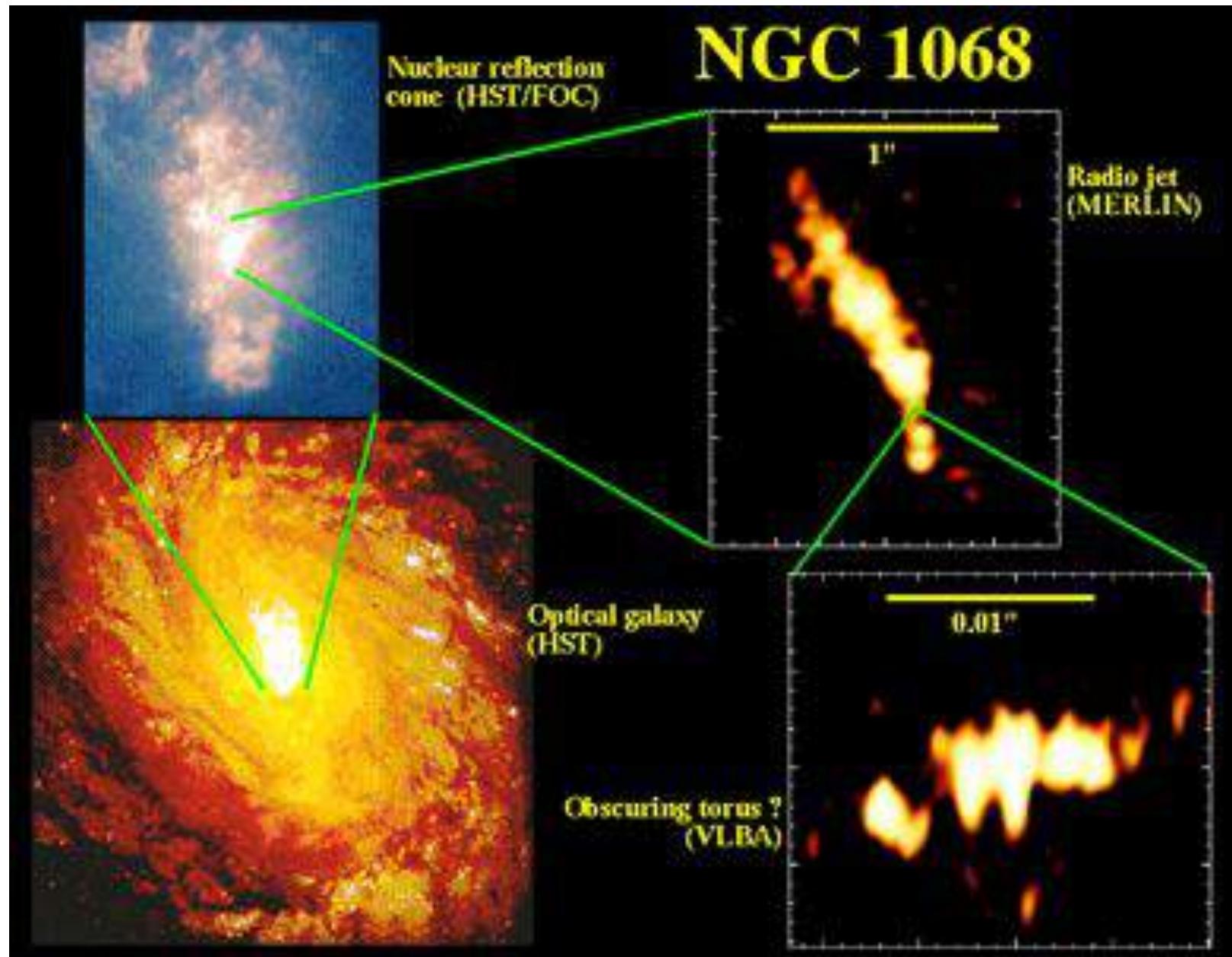


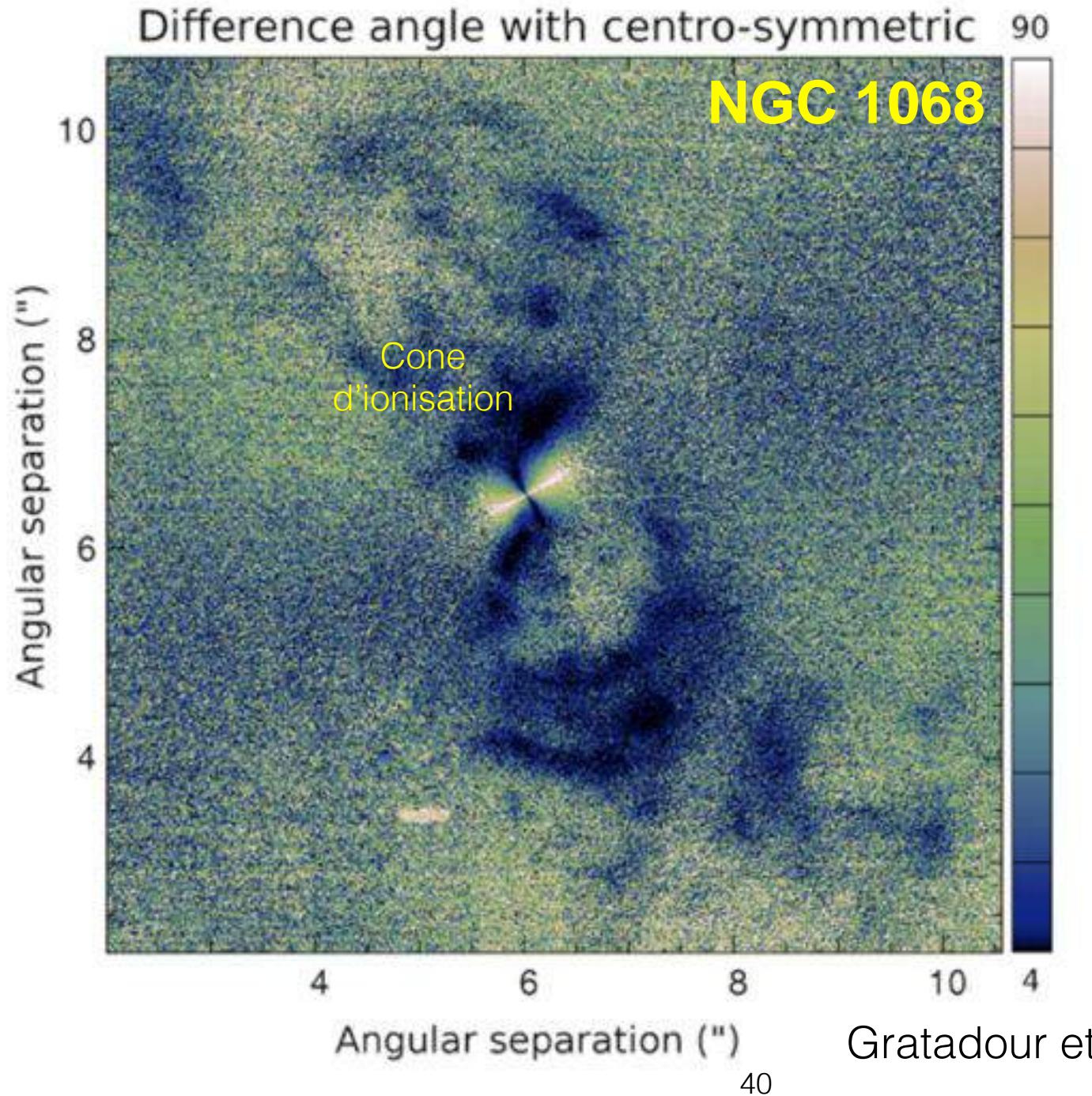
380 Arc Seconds  
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk



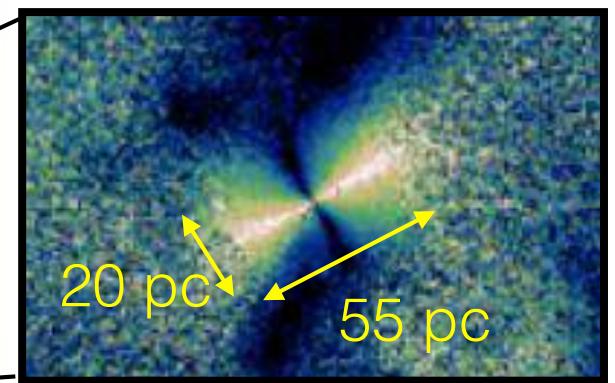
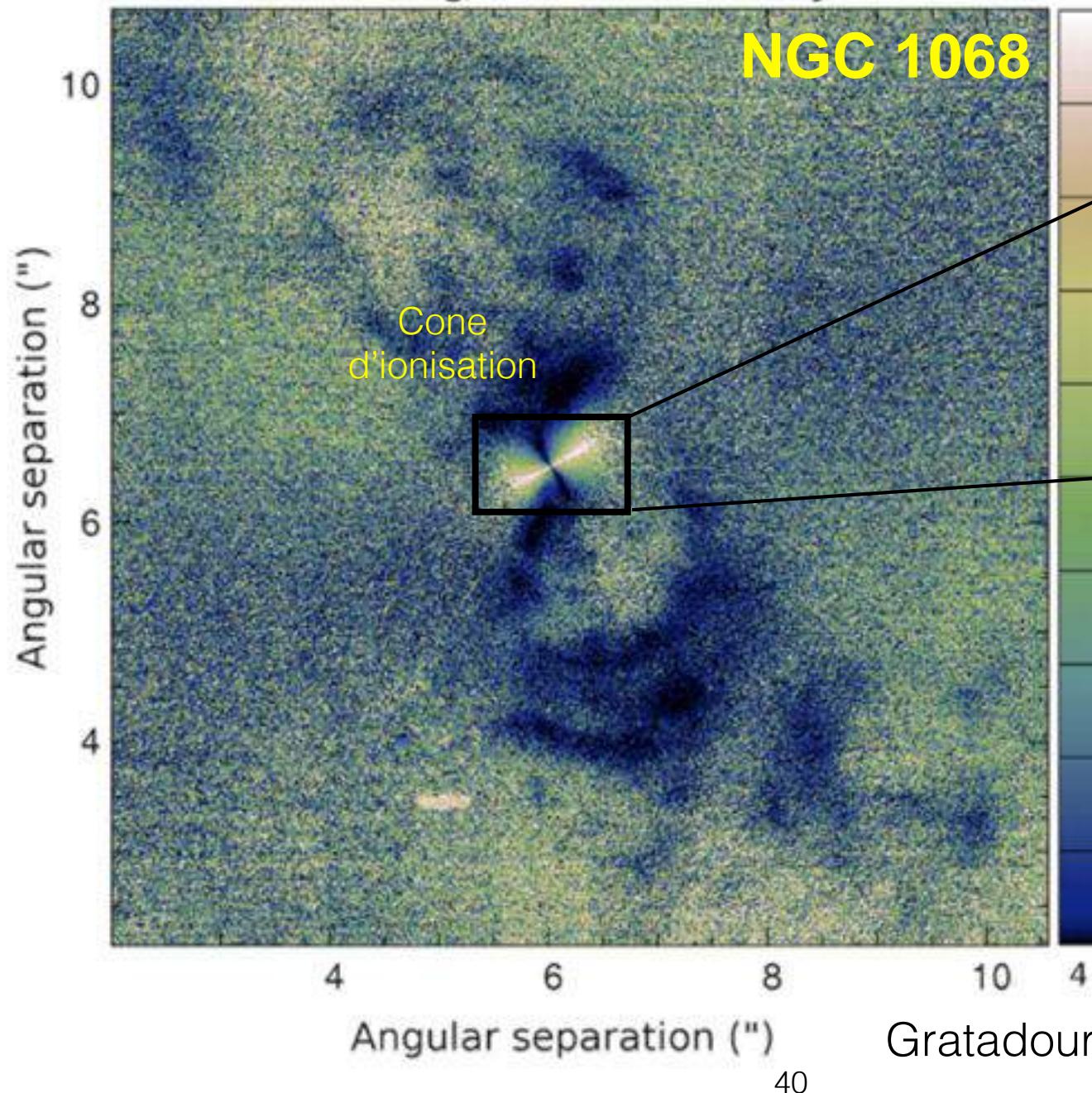
17 Arc Seconds  
400 LIGHTYEARS



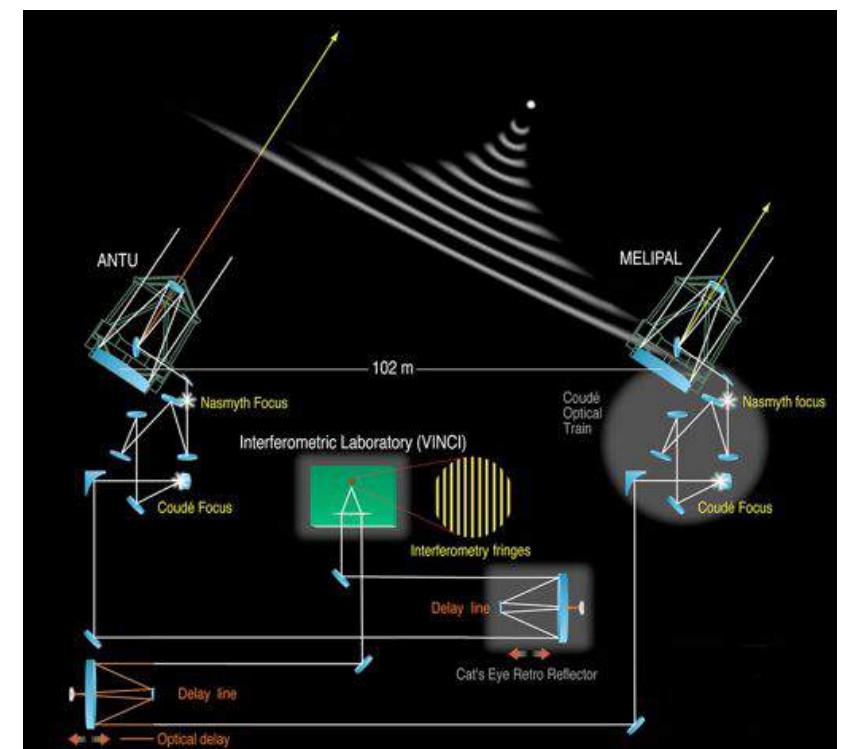


Gratadour et al. (2015)

Difference angle with centro-symmetric



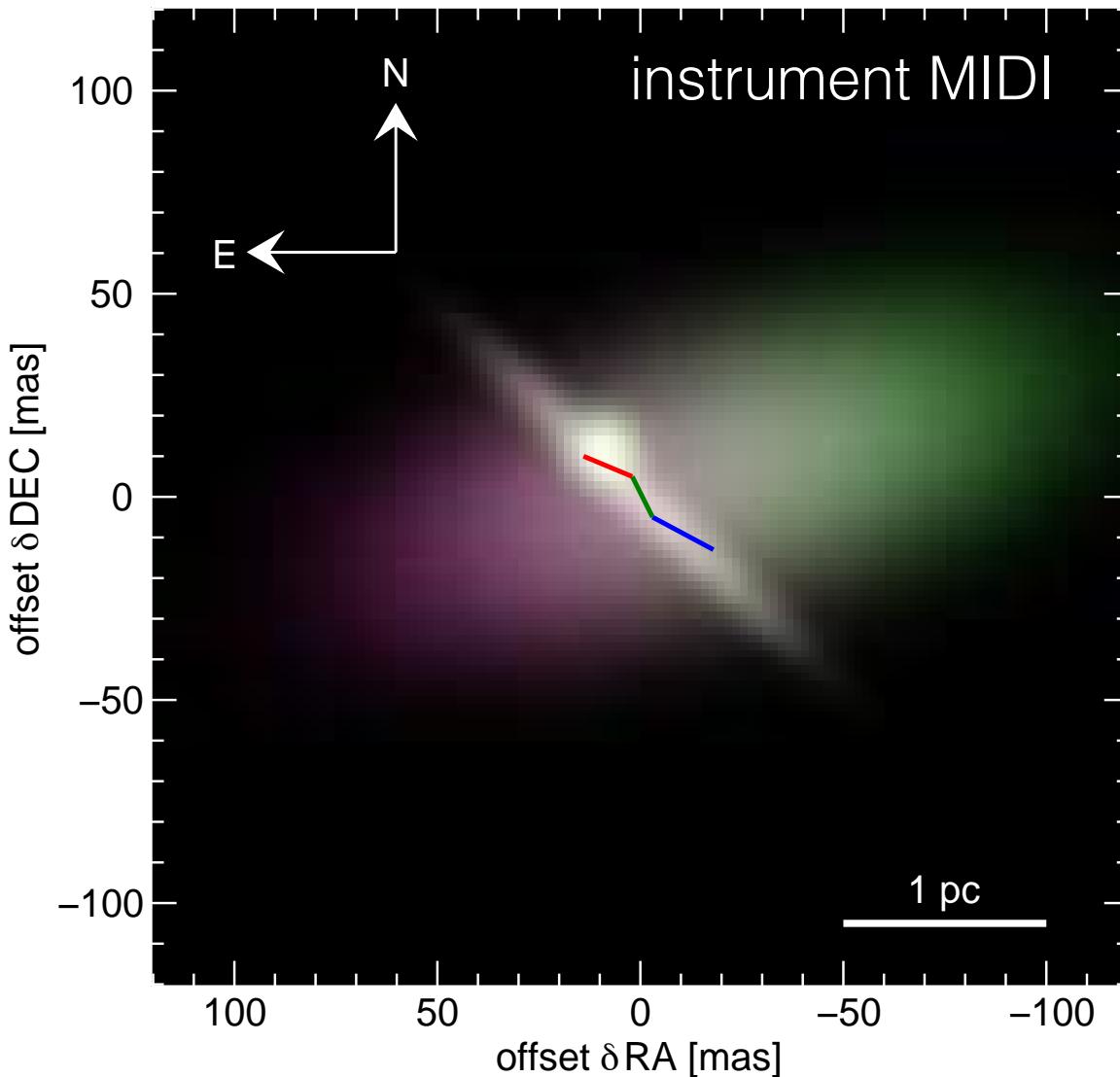
# L'Aide de l'Interférométrie



VLTI, Paranal, Chili

# Une Structure Complexe

3 component model of the Circinus dust emission

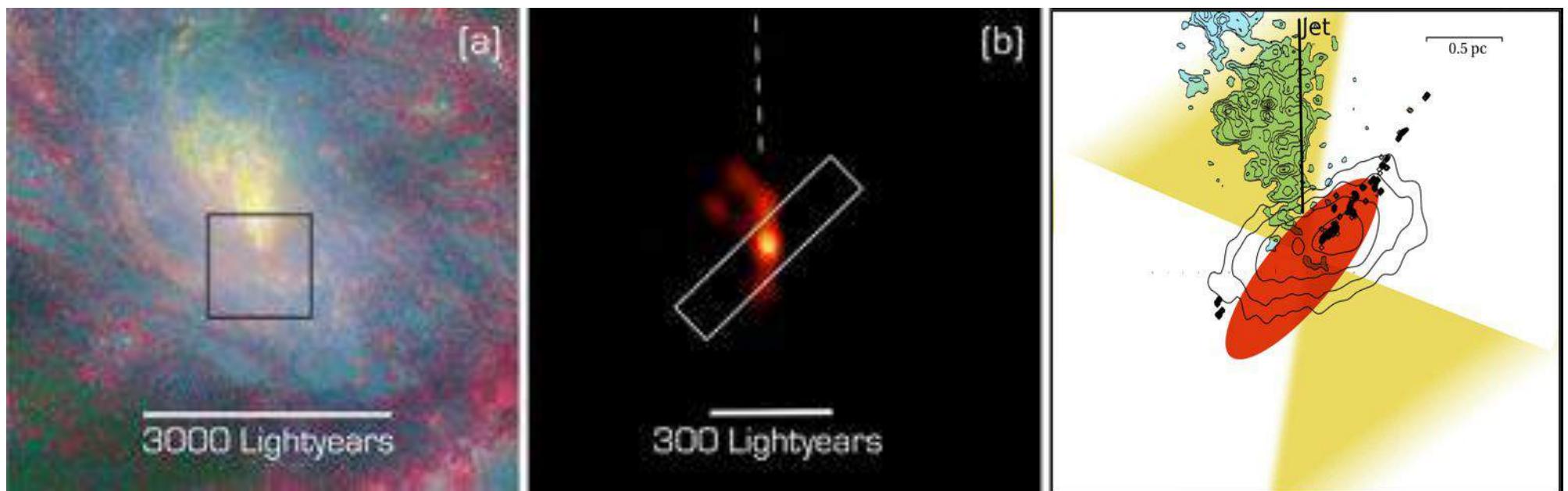


L'émission IR peut se décomposer en 3 composantes:

- Une source ponctuelle non résolue
- Un disque fortement incliné
- Une région étendue avec forte présence de silicate

# Une Structure Complexe

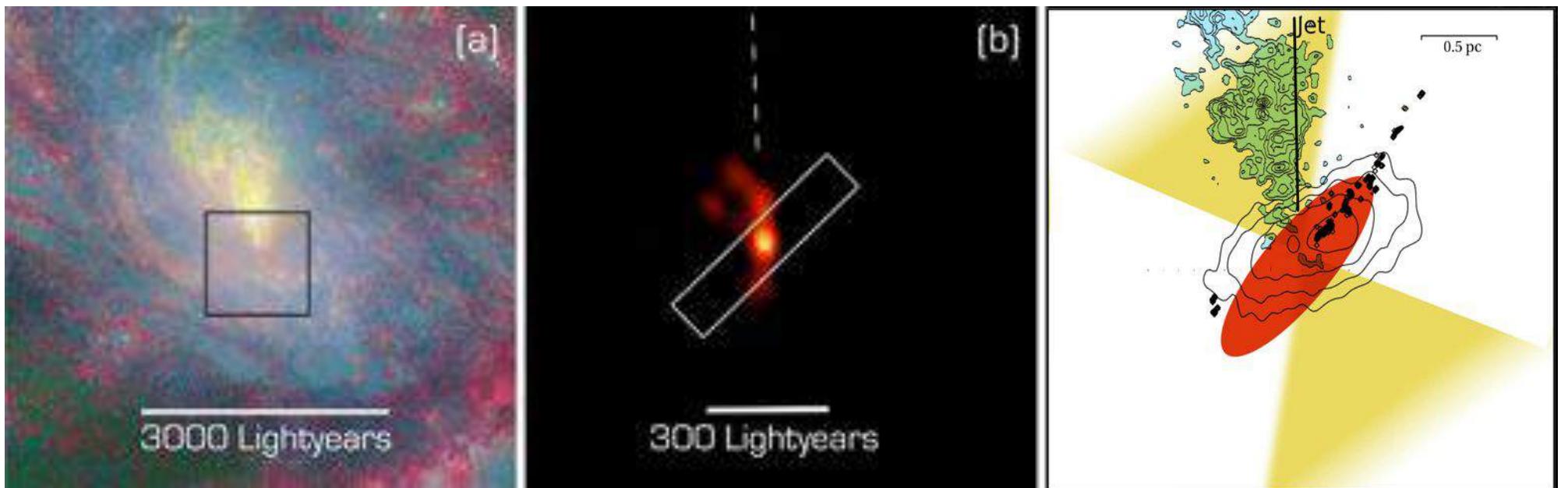
NGC 1068



Raban et al. (2008)

# Une Structure Complexe

NGC 1068



Raban et al. (2008)

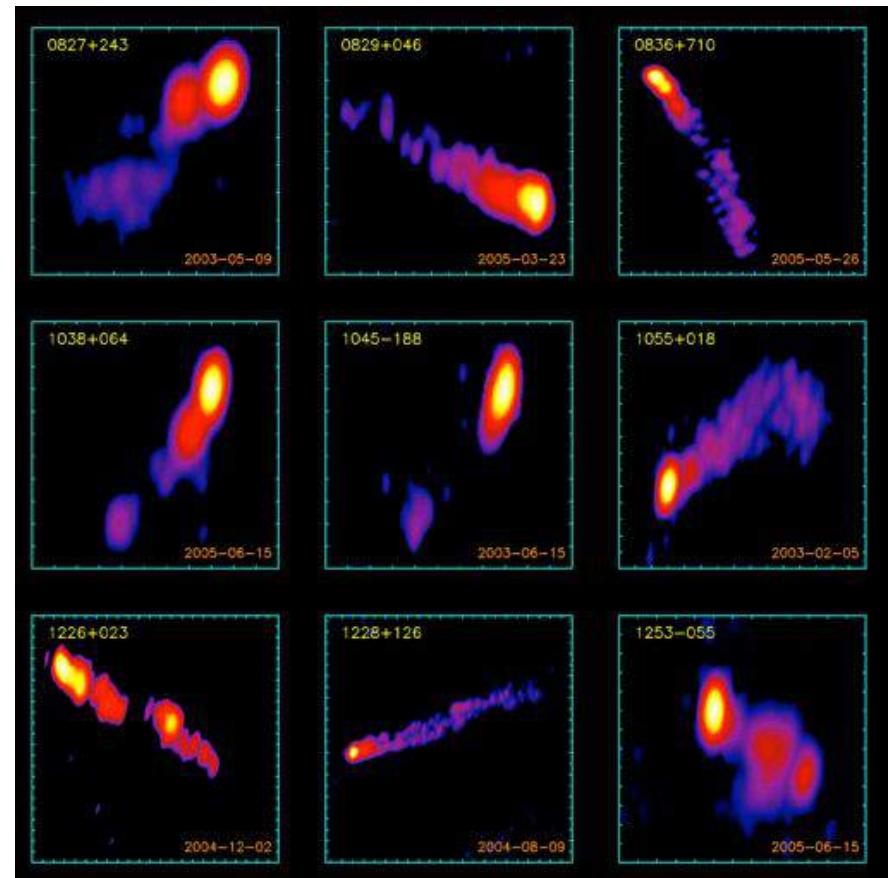
Interféromètres de 2nd génération (tel que Gravity), combinant 4 télescopes, devraient apporter de nouveaux résultats bientôt

# Du NAG à la galaxie hôte: les vents

# Des Jets, des Vents

- Certains NAG ( $\sim 10\%$ ) possèdent des jets rapides ( $\sim c$ ), très collimatés

(cf. prochain séminaire de G. Henri)



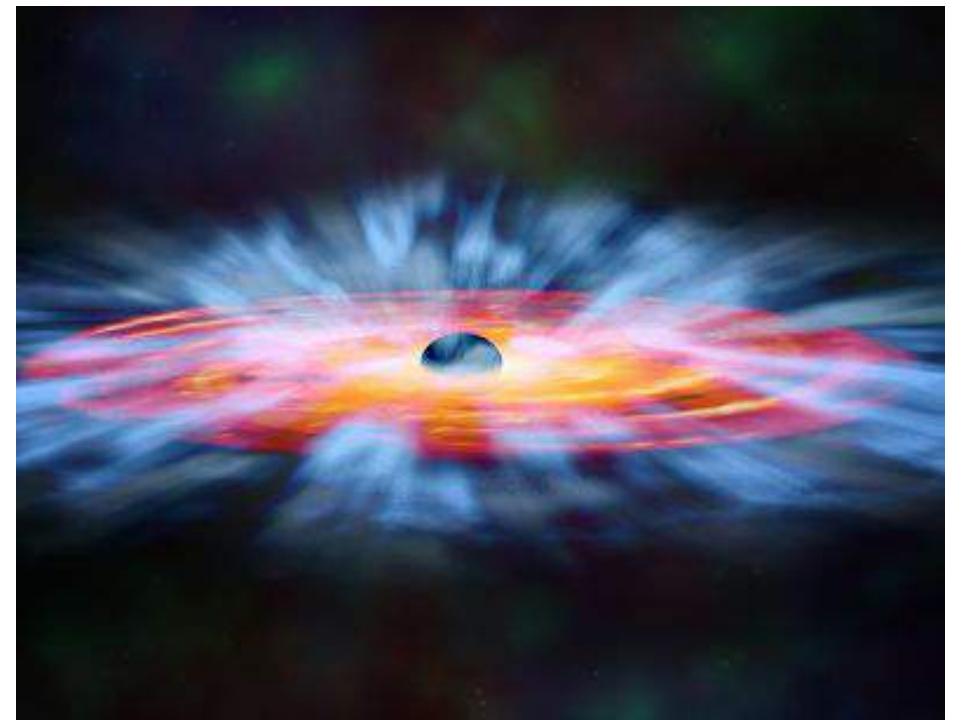
Projet MOJAVE

# Des Jets, des Vents

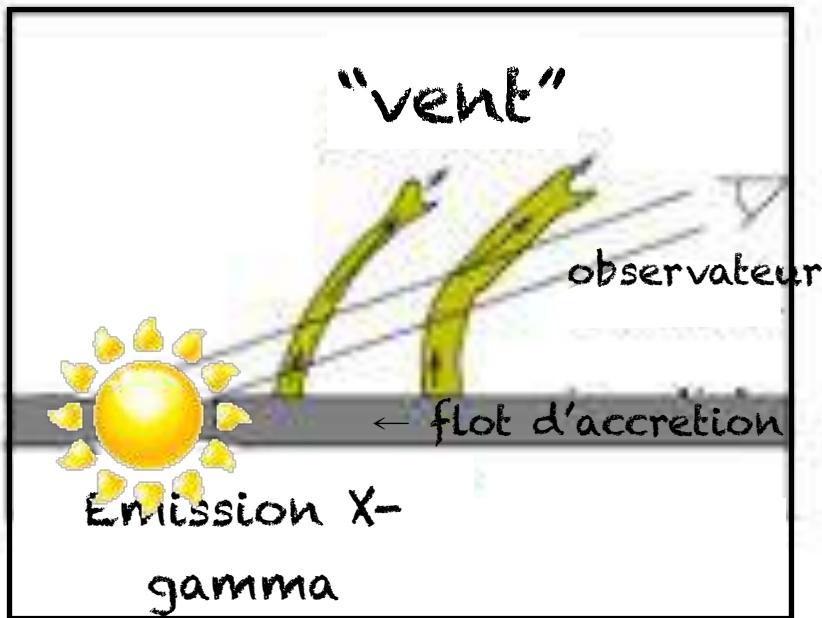
- Certains NAG ( $\sim 10\%$ ) possèdent des jets rapides ( $\sim c$ ), très collimatés

(cf. prochain séminaire de G. Henri)

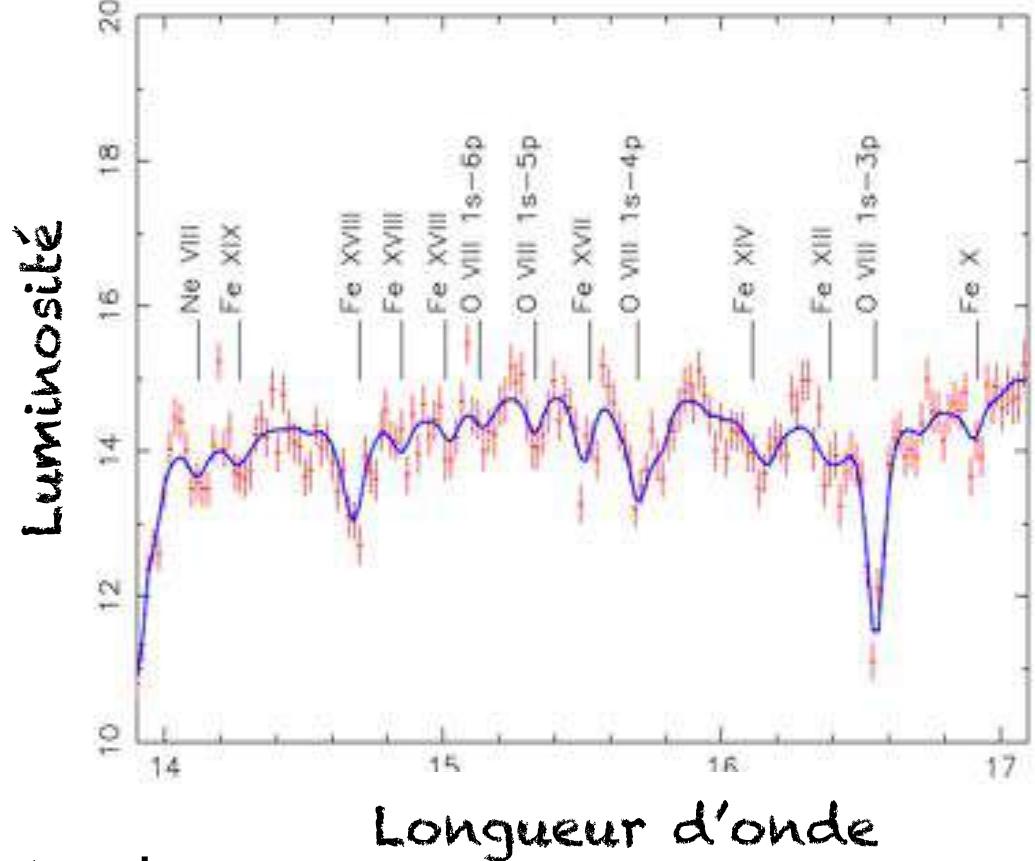
- La majorité ne possède que des vents plus lents ( $10^2$ - $10^4$  km/s)



# Des Vents Ionisés



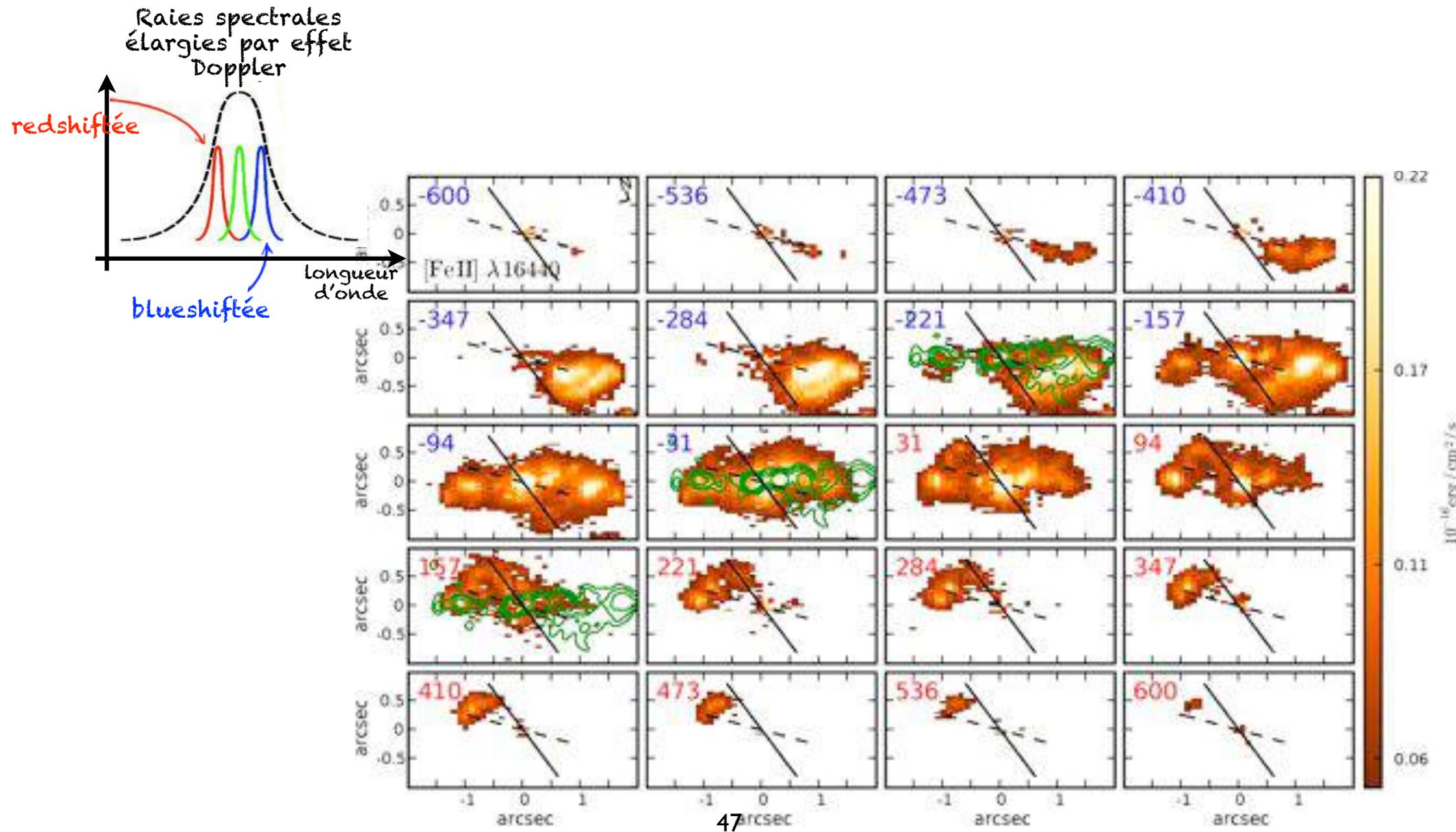
Ex: Mkn 509



- De nombreuses espèces atomiques
- Des vitesses entre +40 et -300 km/s

# Des Vents Ionisés

# Des Vents Ionisés

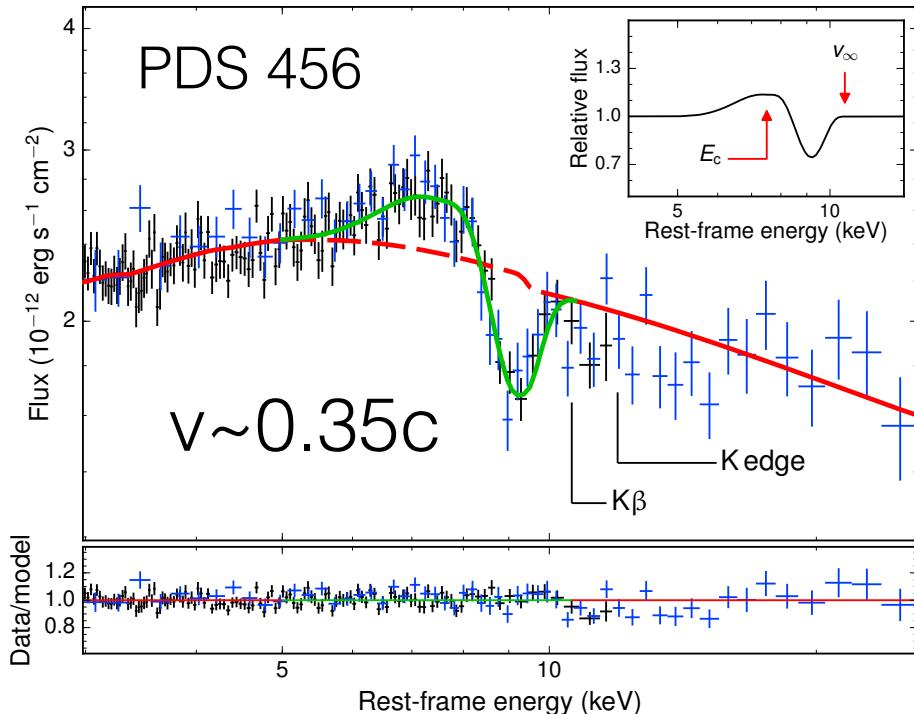


# Des Vents Massifs



- 400 fois la masse du Soleil qui s'échappe chaque année à une vitesse de 8000 kilomètres par seconde
- deux millions de millions de fois la puissance du Soleil
- 100 fois la luminosité de la Voie Lactée
- ...

# UFOs: Ultra Fast Outflows



Nardini et al. (2015)

- Profile P-Cygni caractéristiques de flots de matière
- Les UFOs peuvent atteindre une fraction de la vitesse de la lumière
- Ils peuvent influencer l'évolution de la galaxie hôte

# Observation de NGC 5548

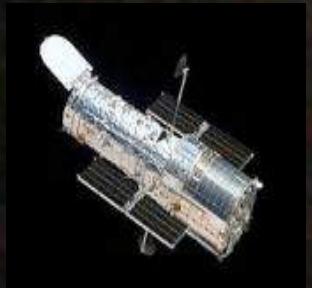


240 millions  
d'années lumière  
de la Terre

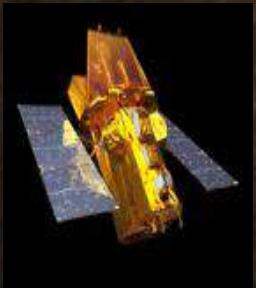
# Observation de NGC 5548

240 millions  
d'années lumière  
de la Terre

Hubble



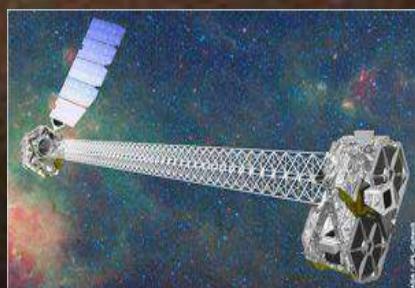
Swift



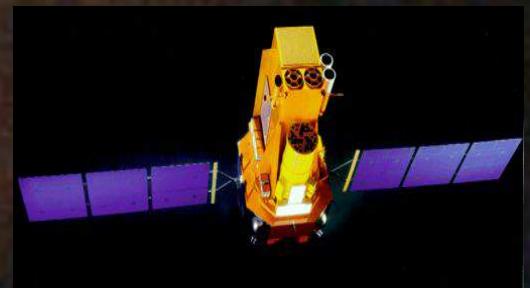
XMM



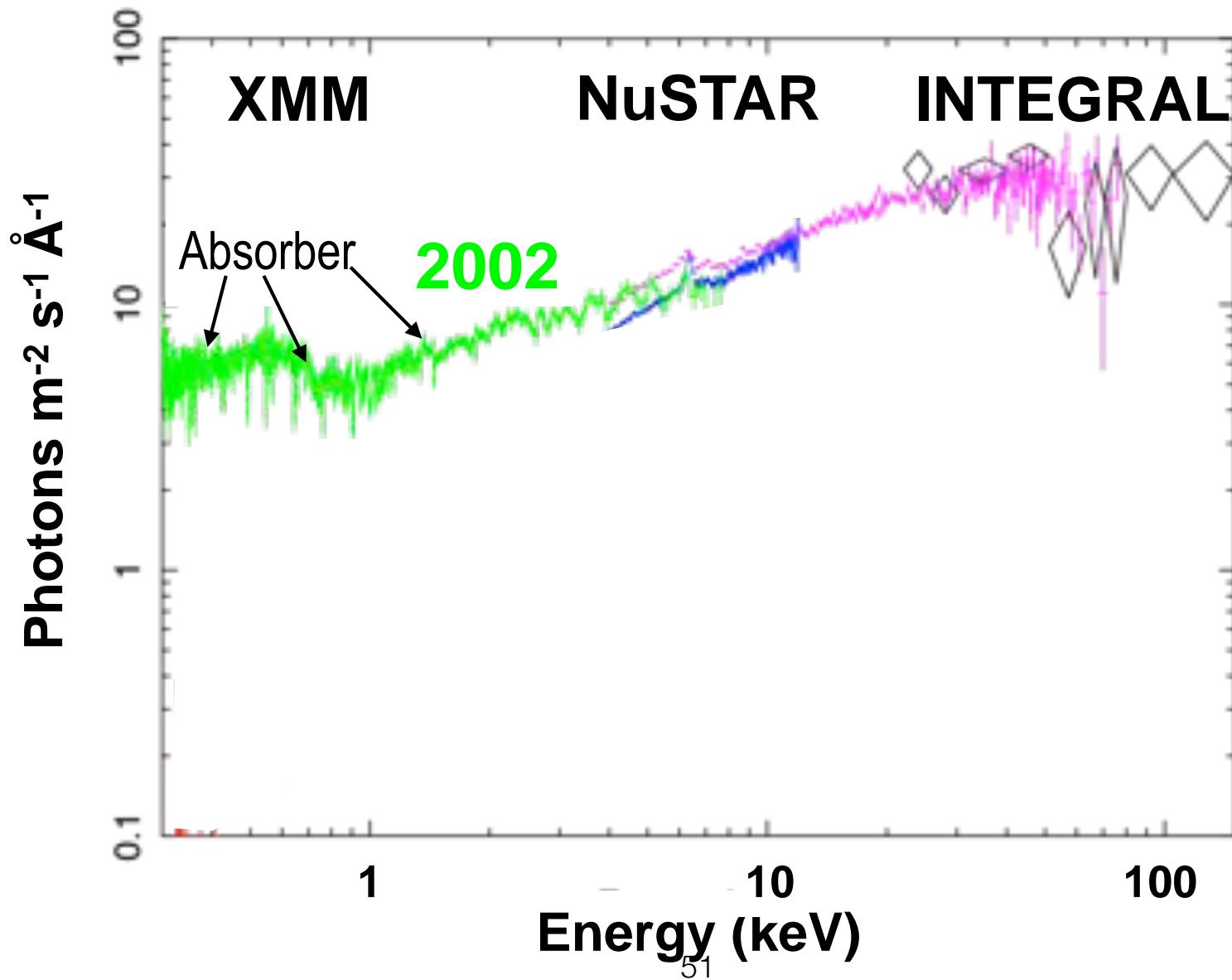
NuSTAR



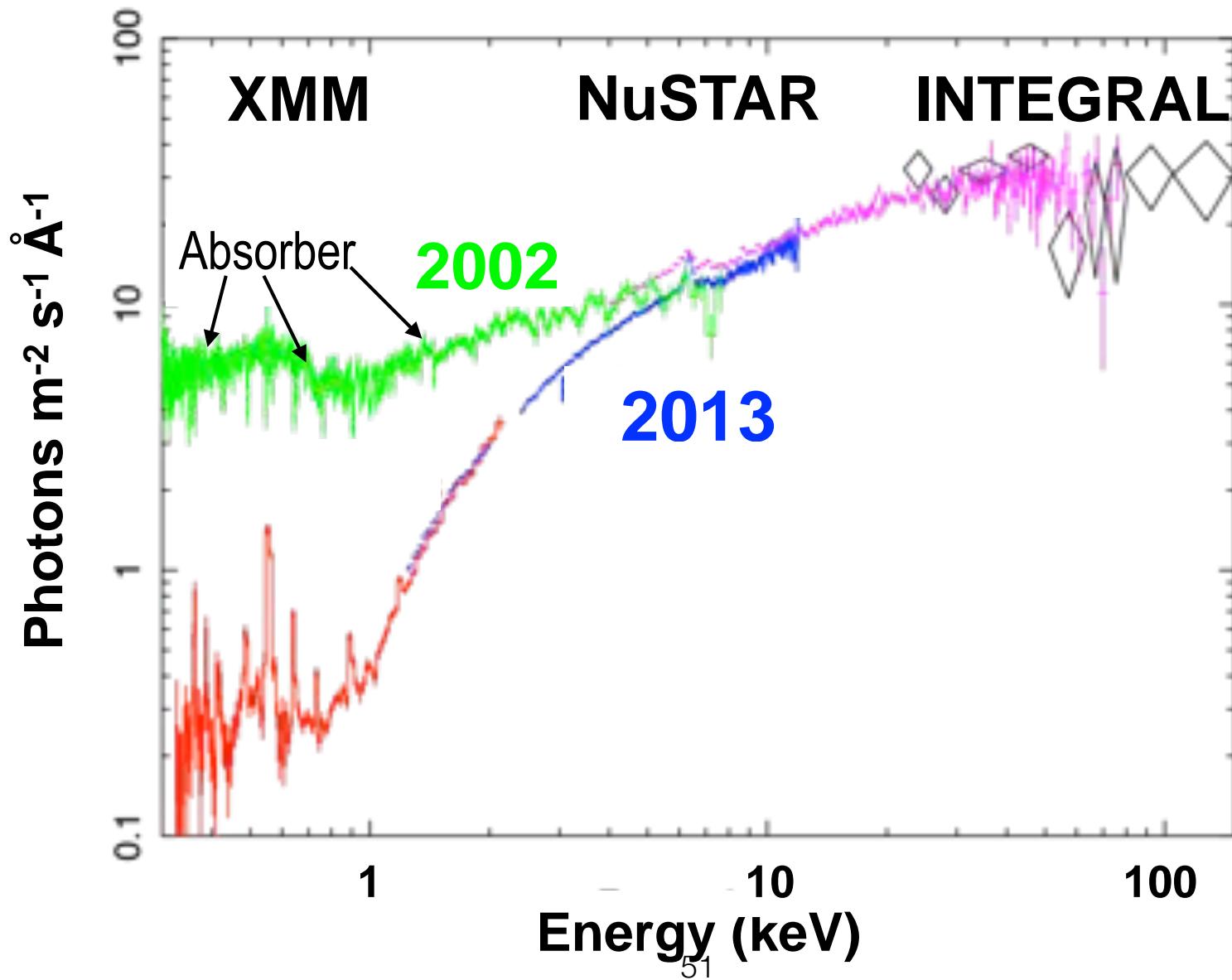
INTEGRAL



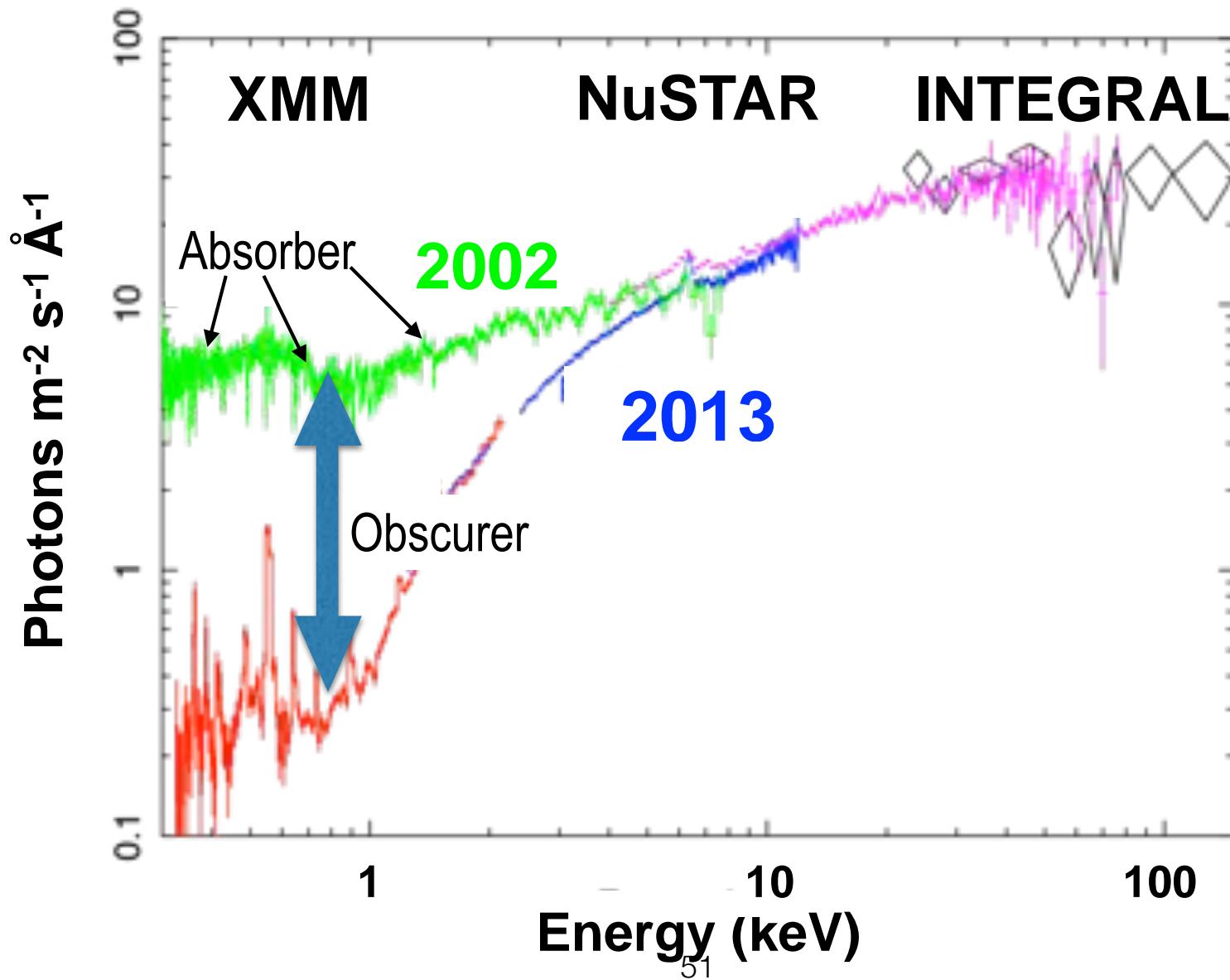
# Obscuration



# Obscuration

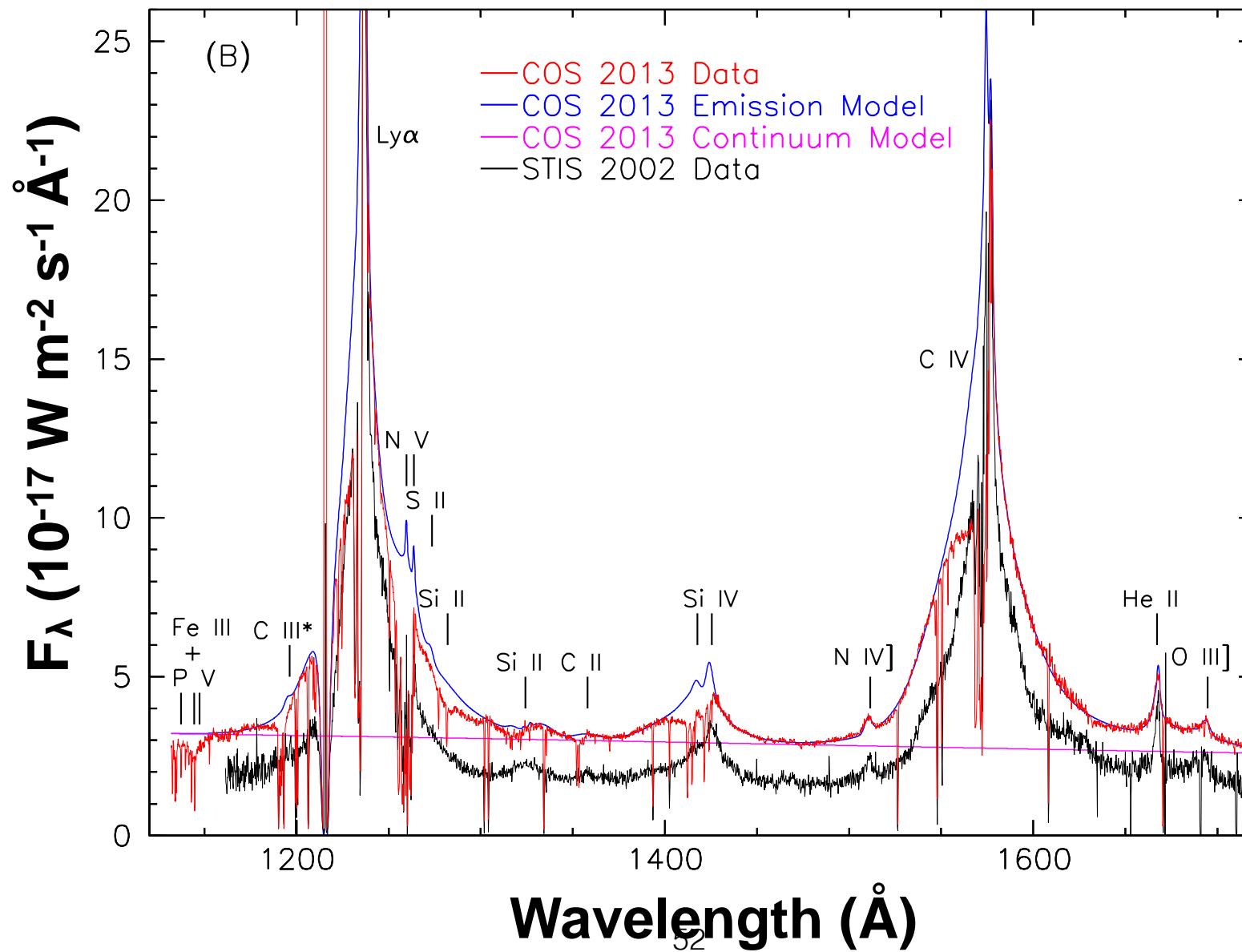


# Obscuration

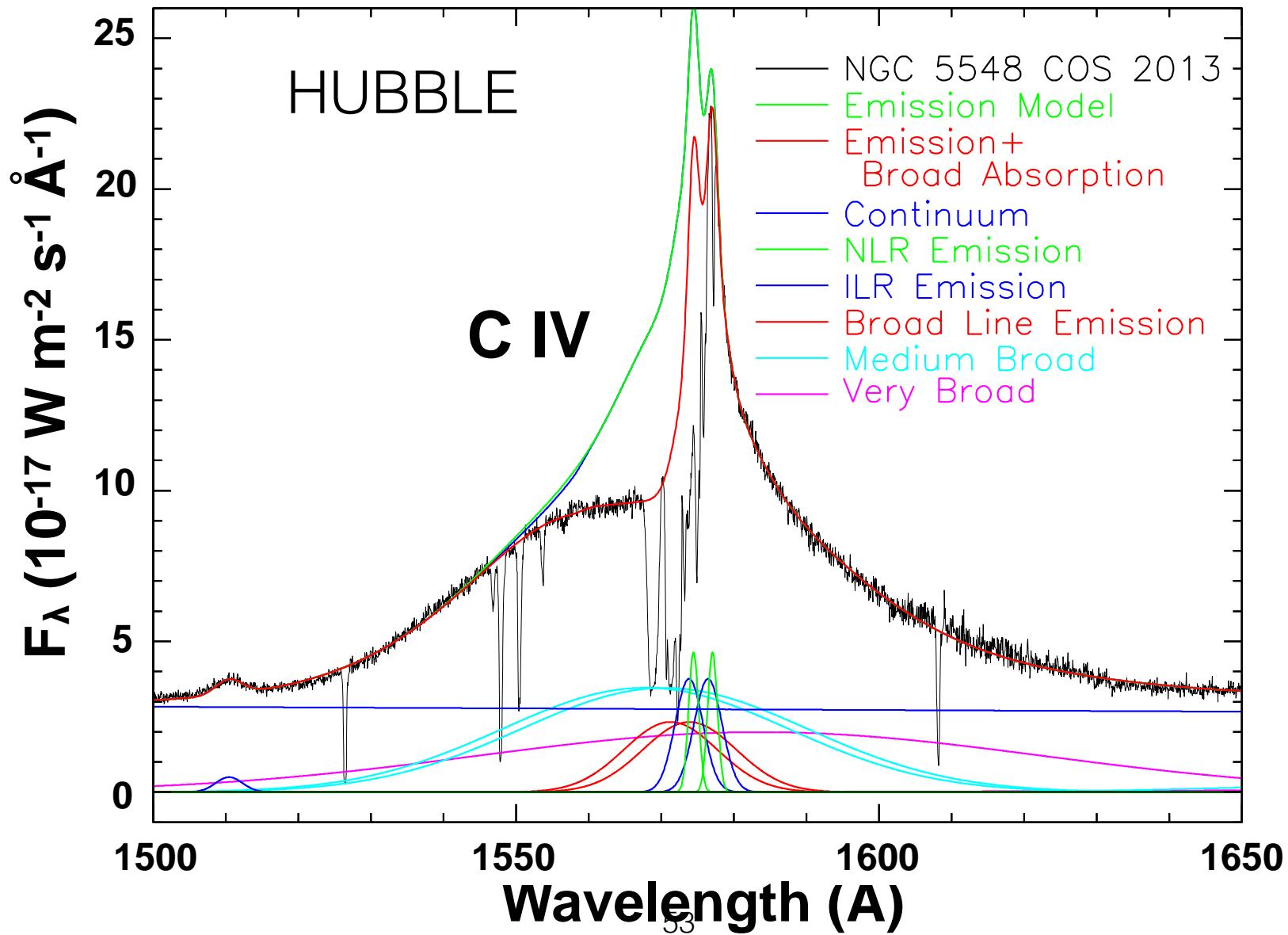


# Obscuration

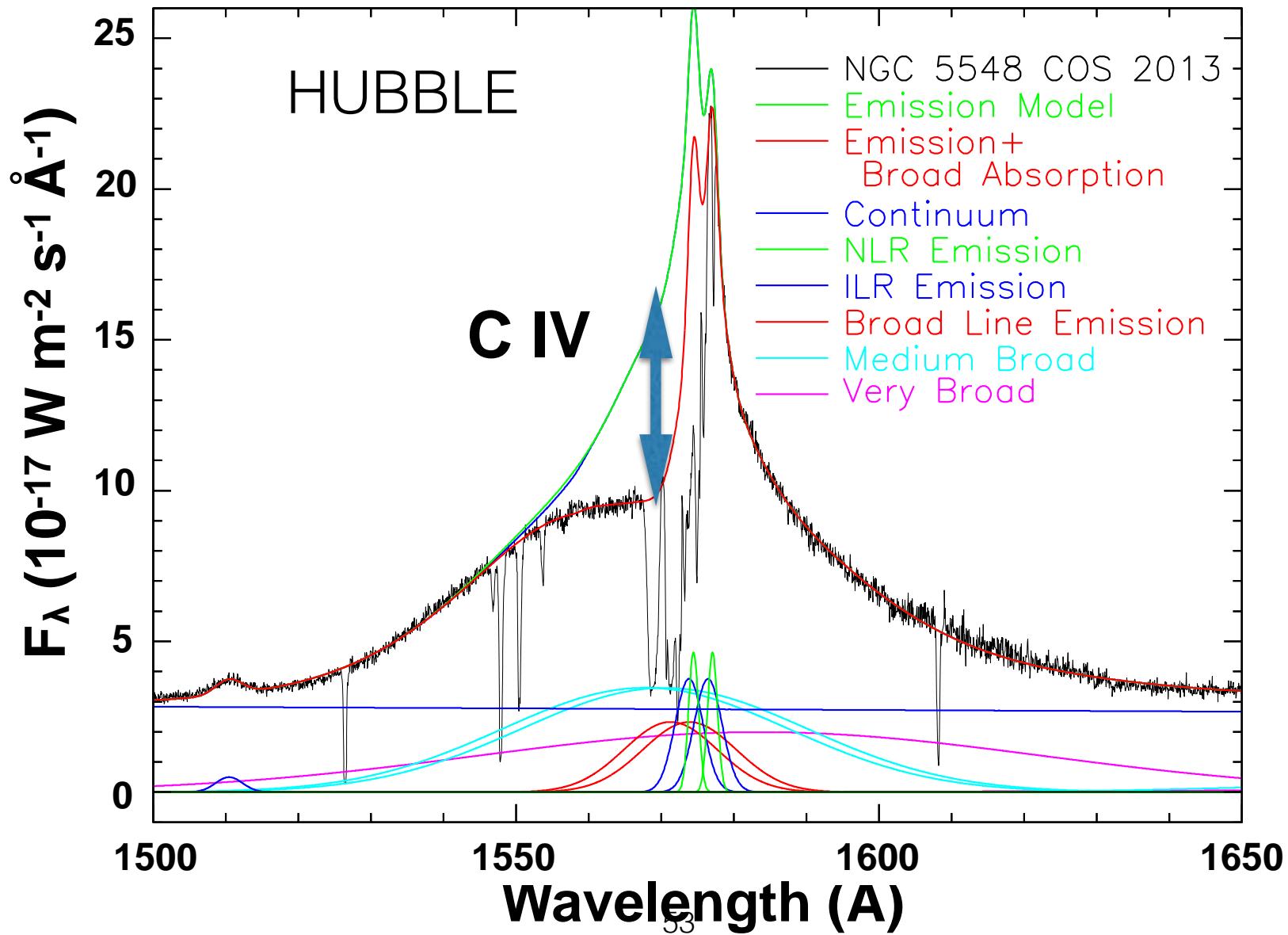
HUBBLE



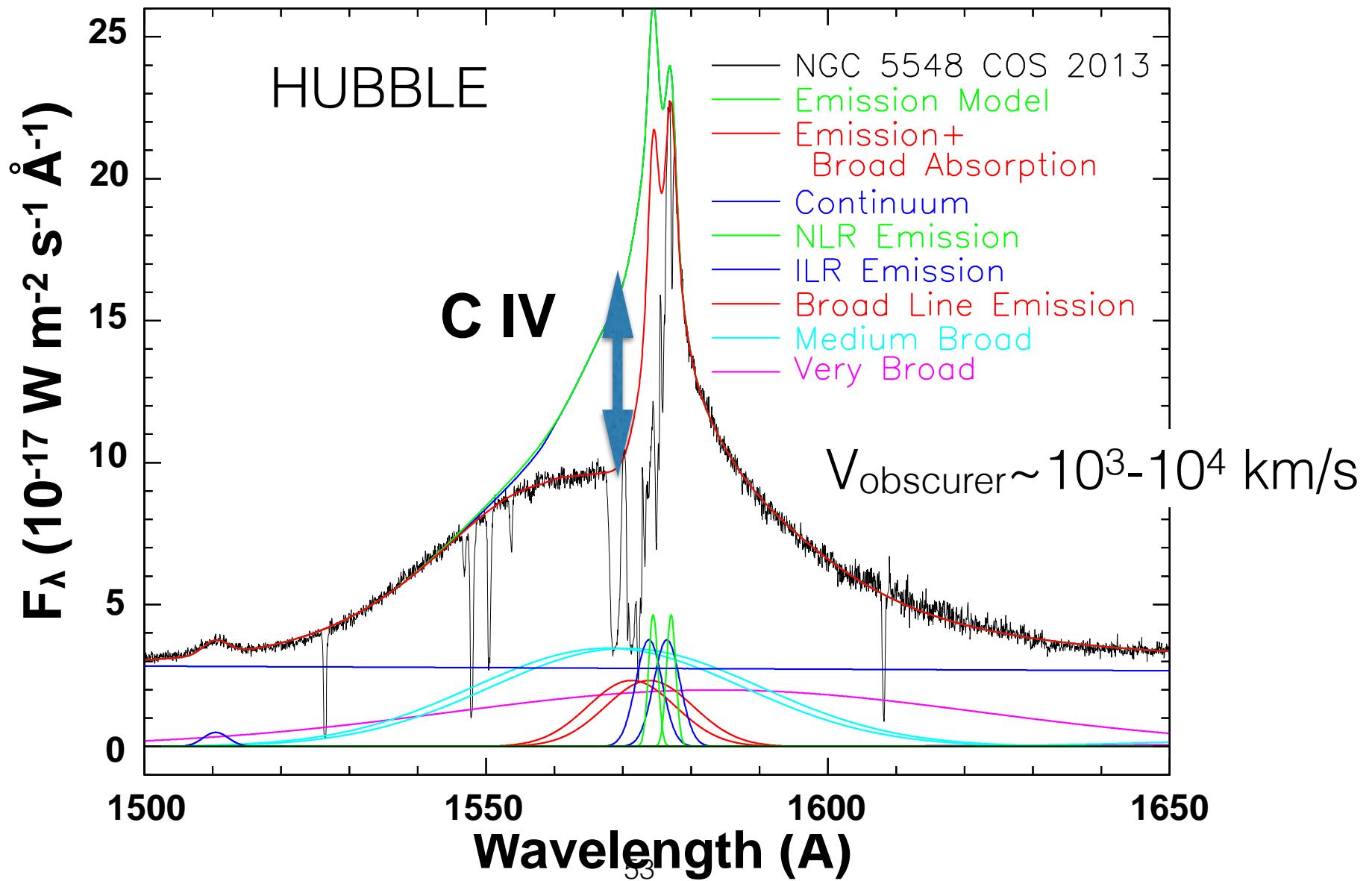
# Obscuration



# Obscuration



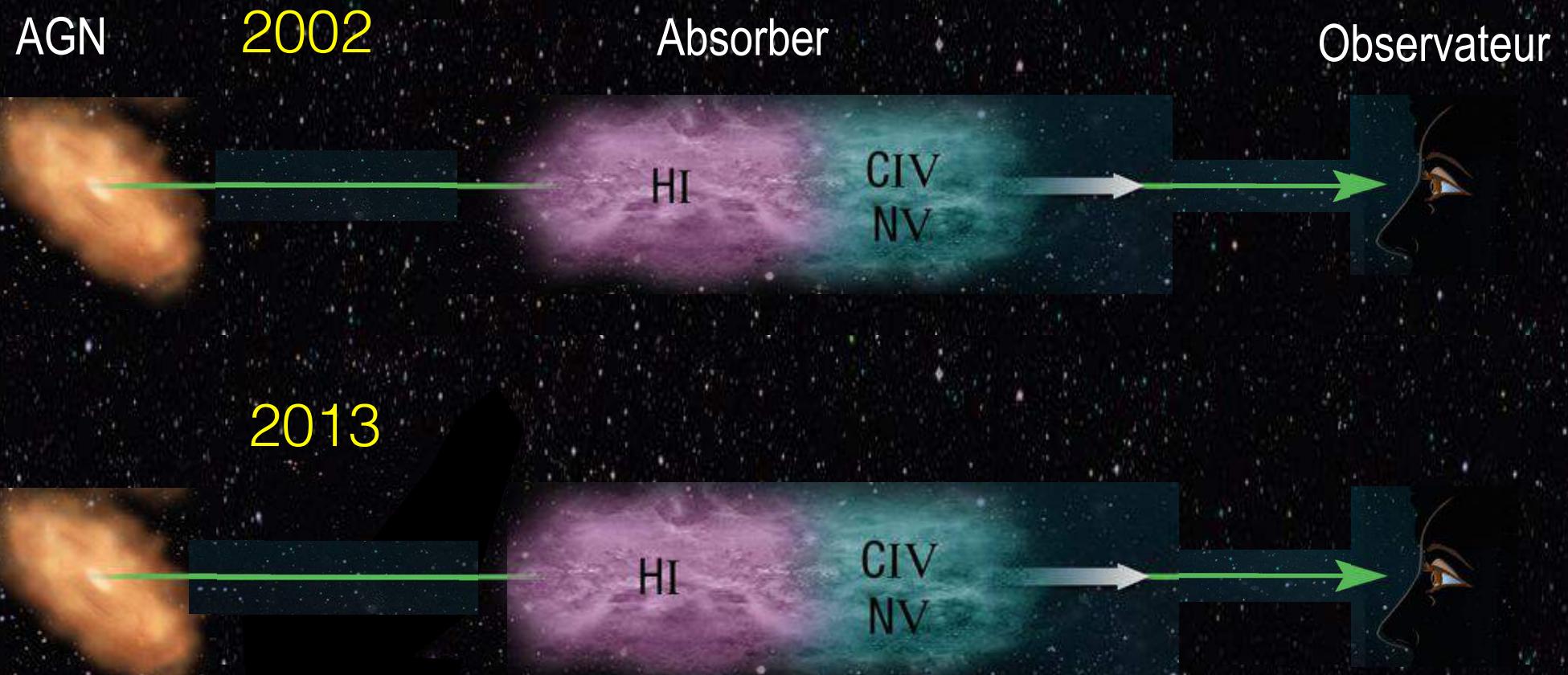
# Obscuration



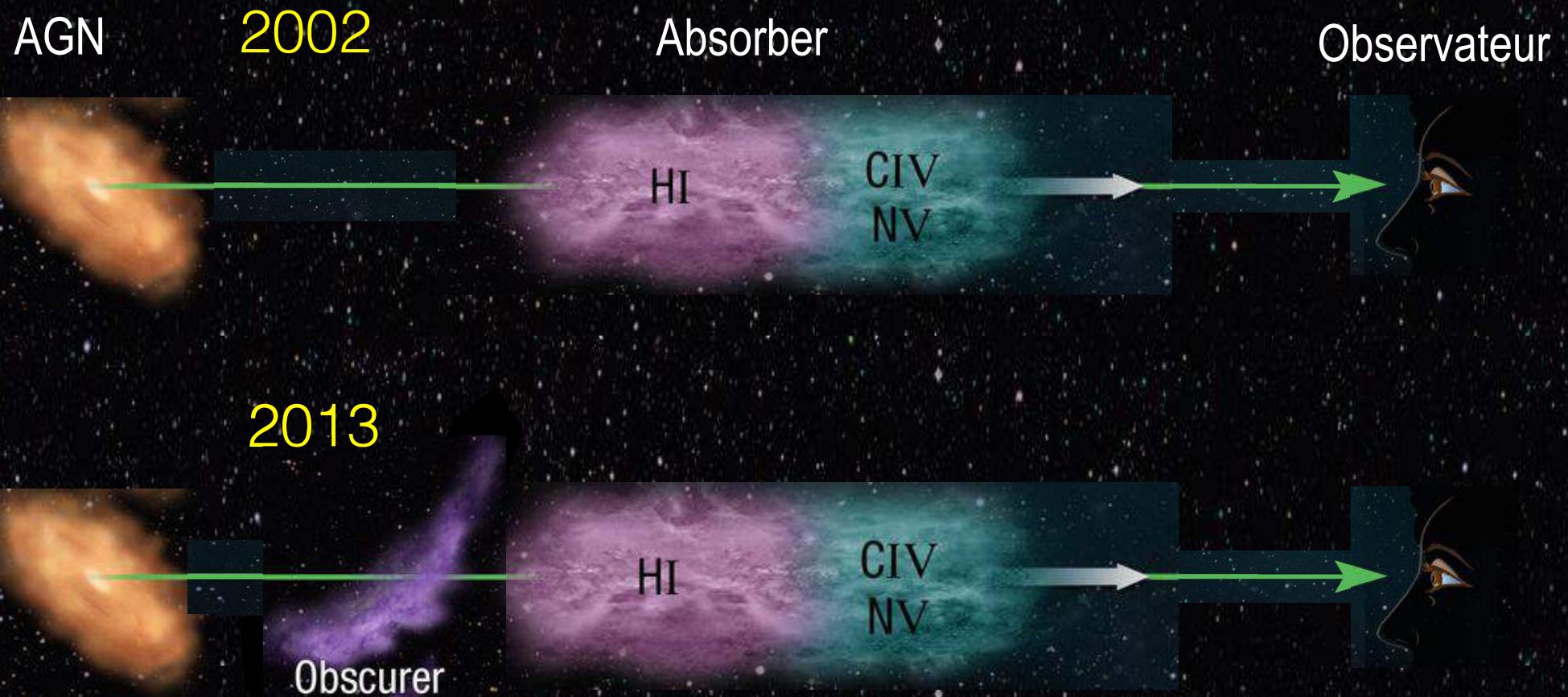
# Effet d'écran



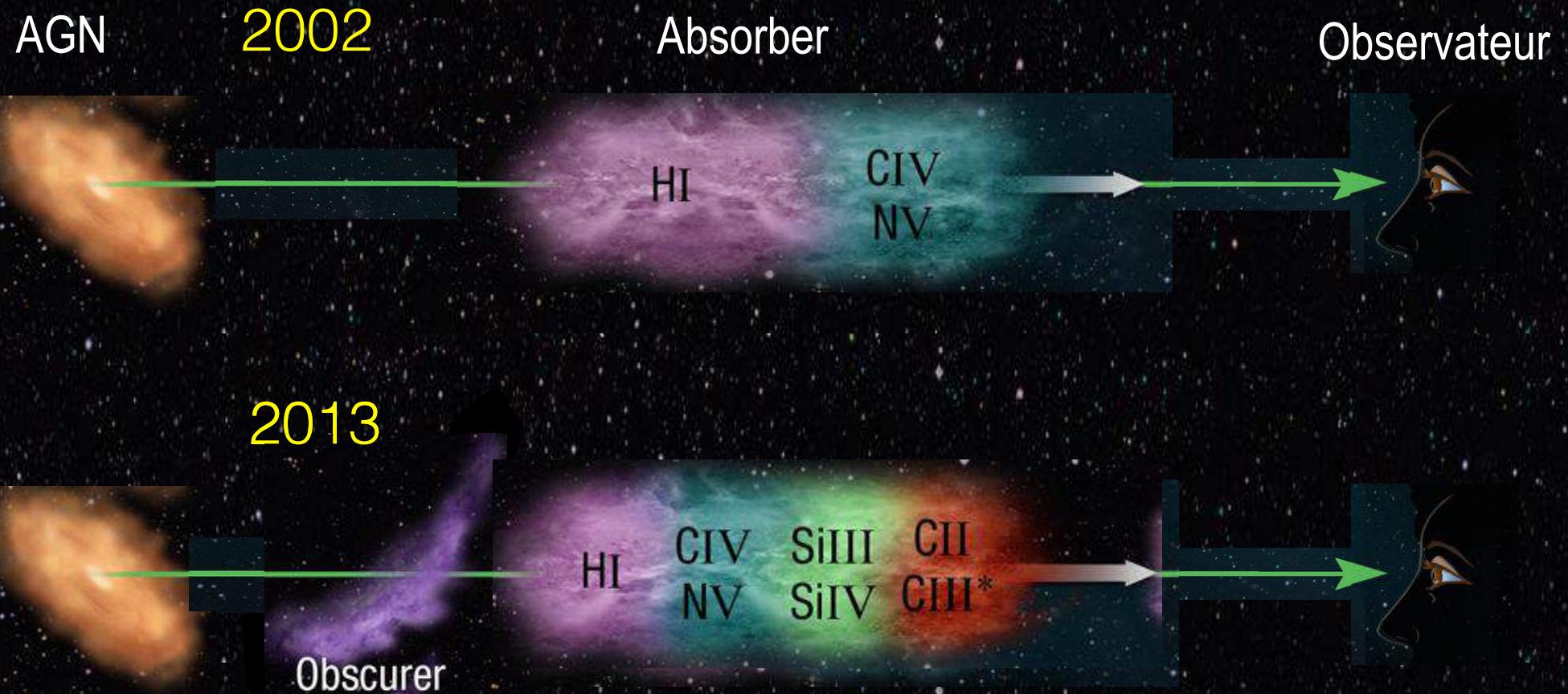
# Effet d'écran



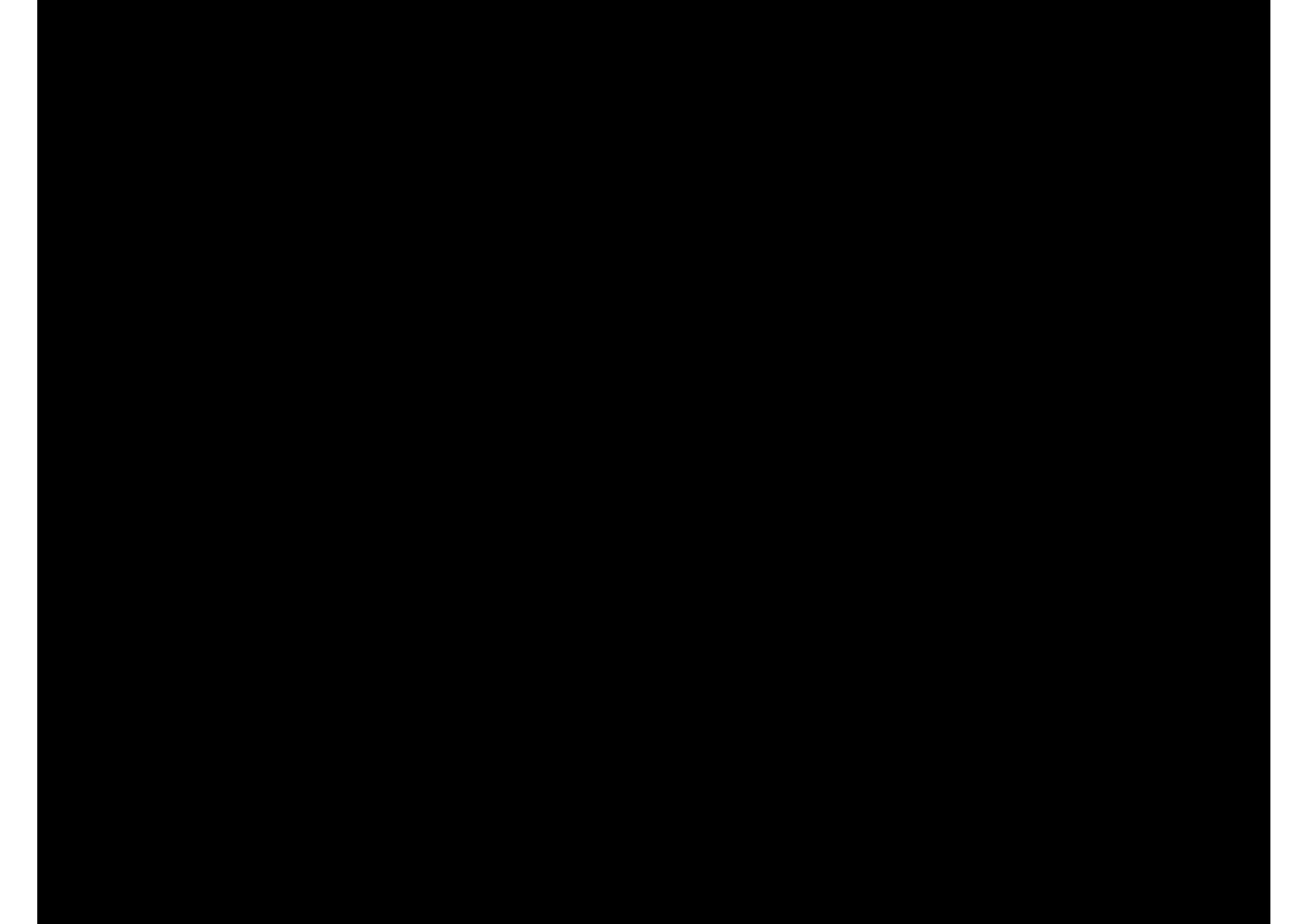
# Effet d'écran

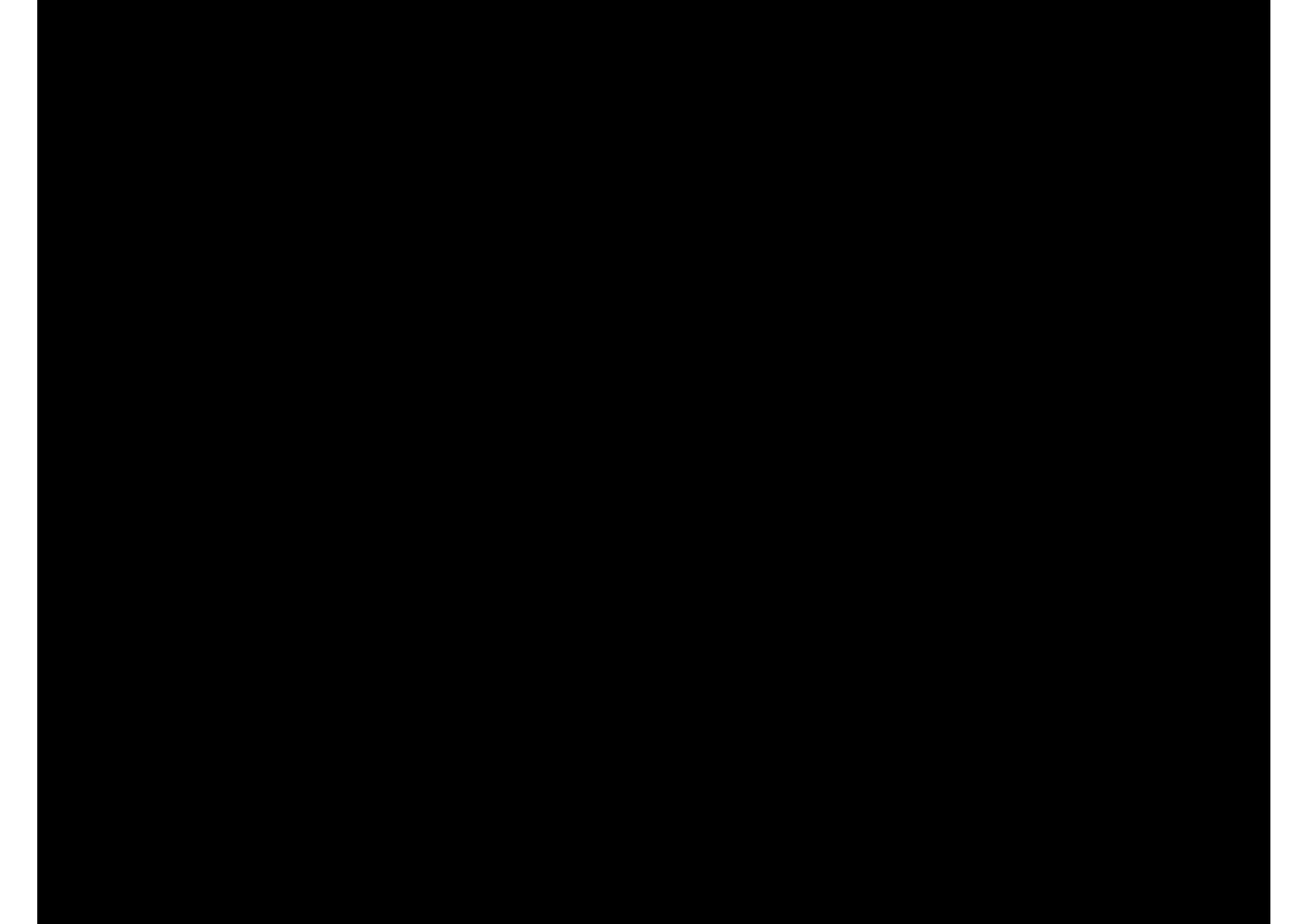


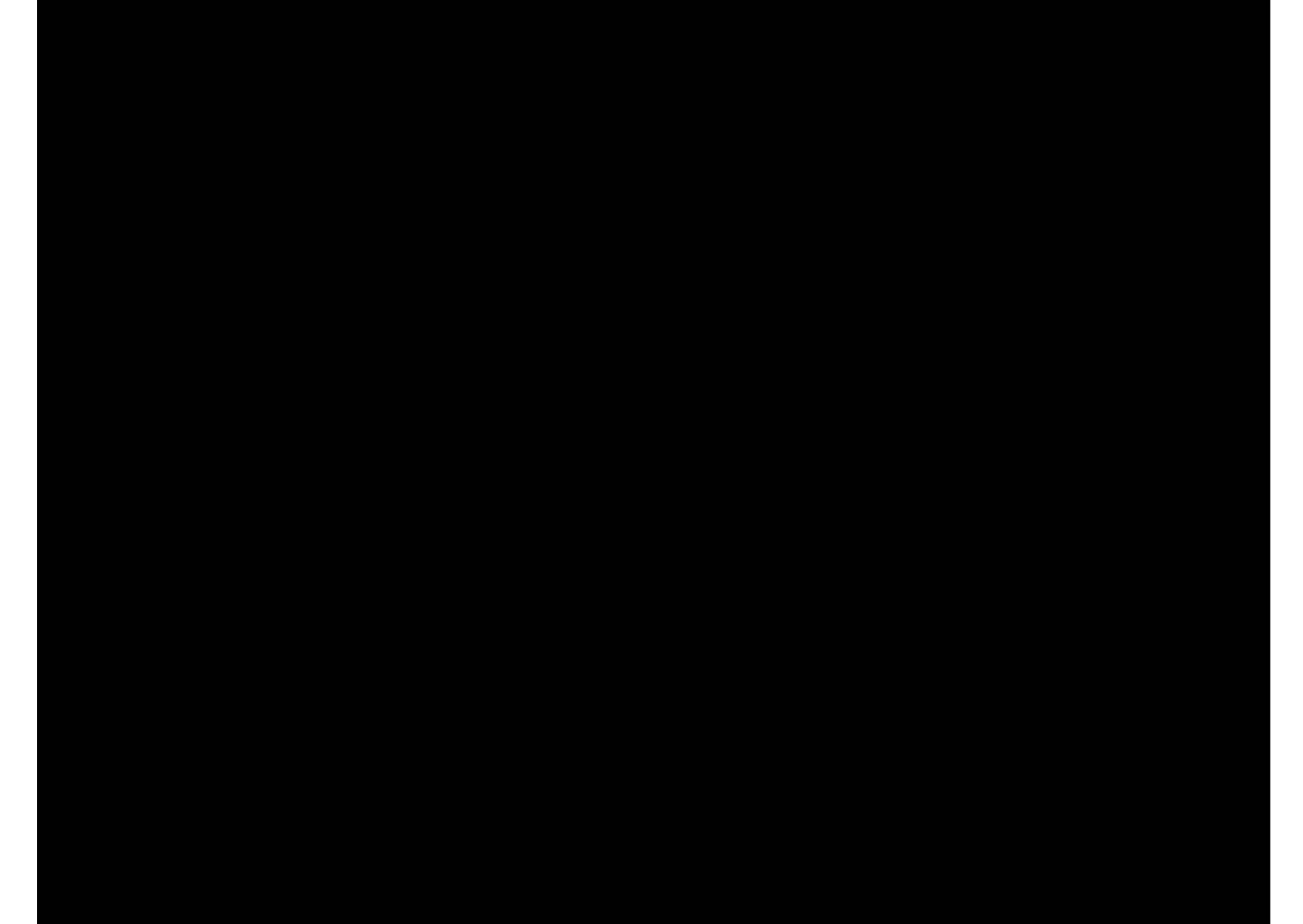
# Effet d'écran



L' « obscurer » bloque l'émission en provenance de l'AGN et protège le gaz environnant qui devient plus froid







MERCI!

MERCI!