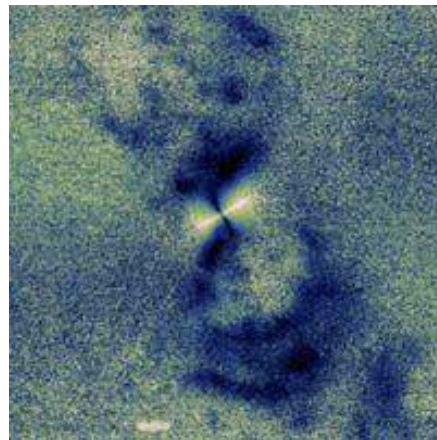




Institut de Planétologie et
d'Astrophysique de Grenoble

Trous noirs super-massifs et galaxies

Disques, tores et jets



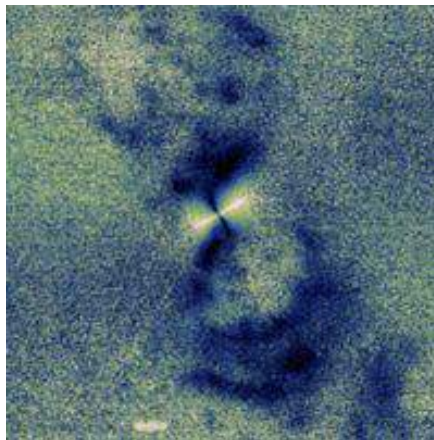
P.O. Petrucci
Collège de France 7 Déc. 2015



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

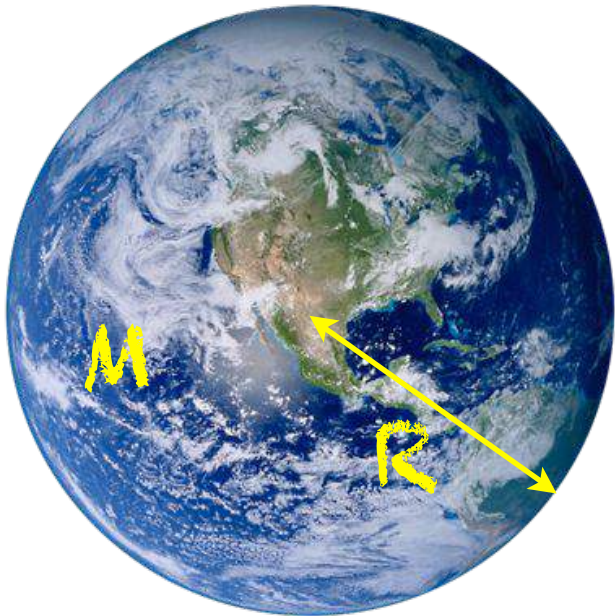
Généralités

La Vitesse de Libération

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

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

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

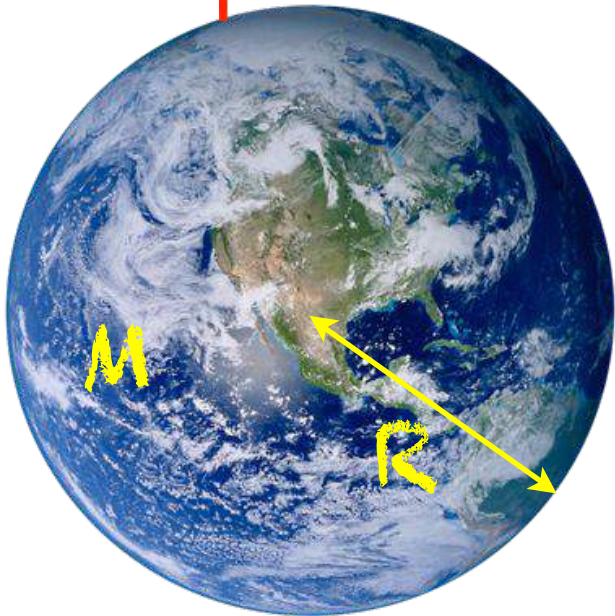


La Vitesse de Libération

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

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

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



La Vitesse de Libération

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

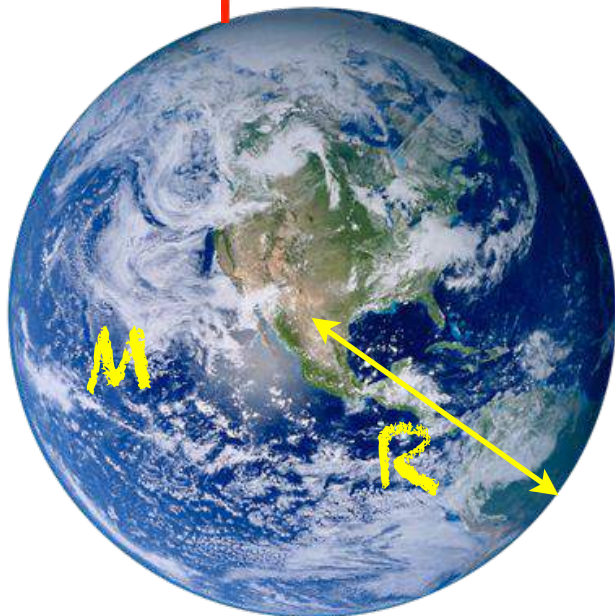
$$v_{lib} = \sqrt{2\mathcal{G}} \sqrt{\frac{M}{R}}$$

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

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:

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

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

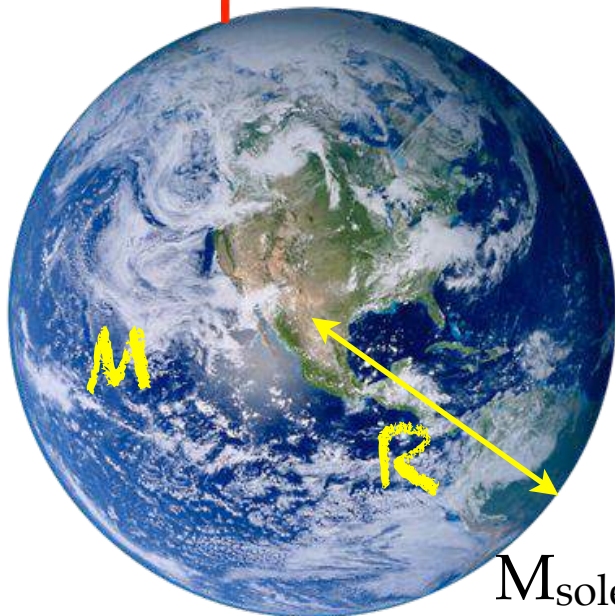
Application numérique:

- 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 !

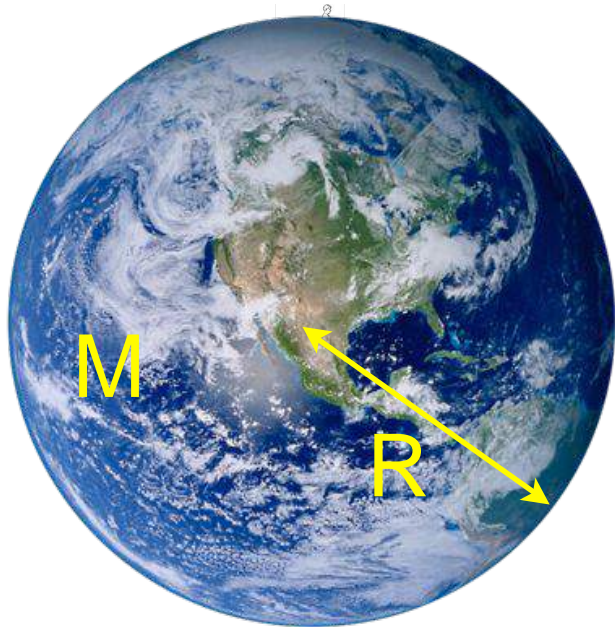
[Application numérique:](#)

➡ pour la Terre, $R_{lim} = 9 \text{ mm}$

➡ pour le Soleil, $R_{lim} = 3 \text{ km}$

La Gravitation

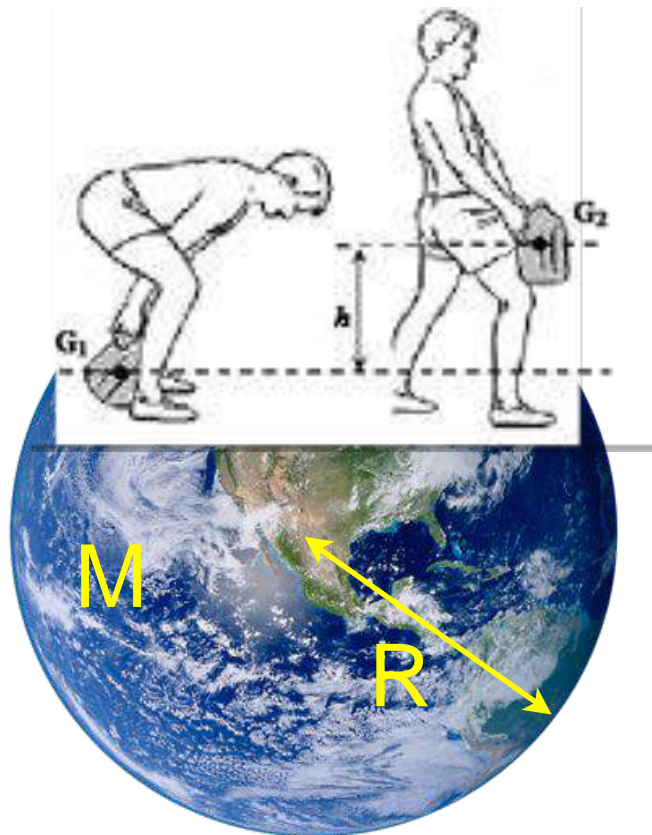
Une énorme source d'énergie



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:

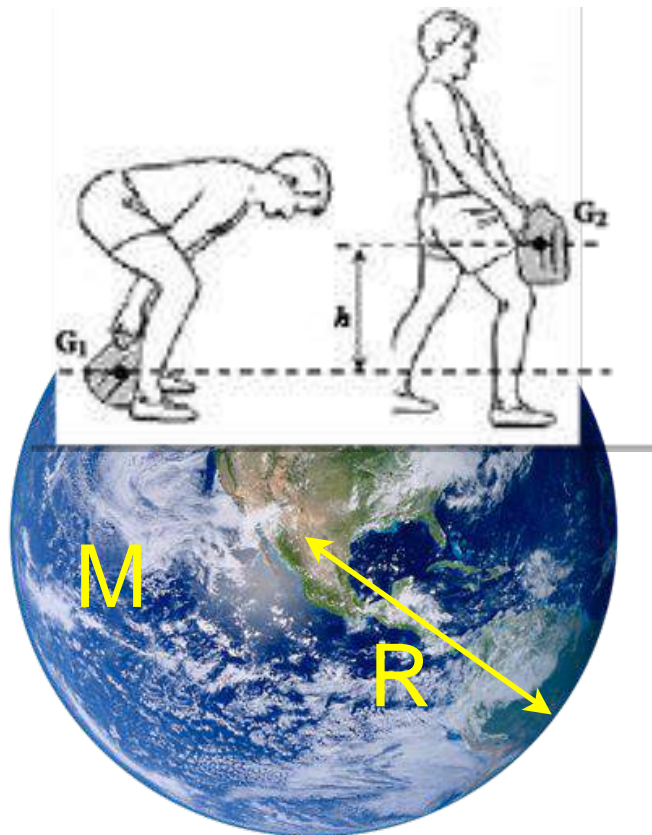


La Gravitation

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:

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

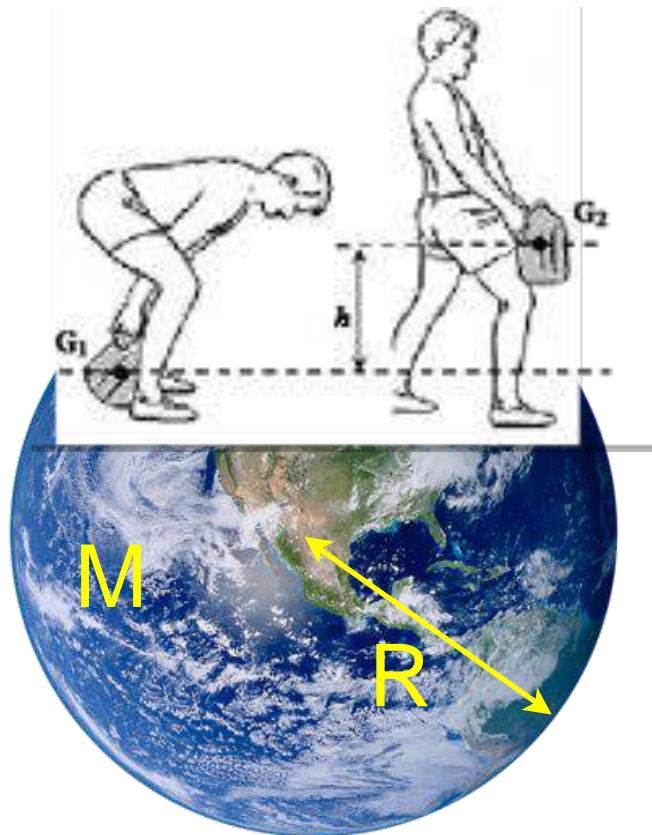


La Gravitation

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

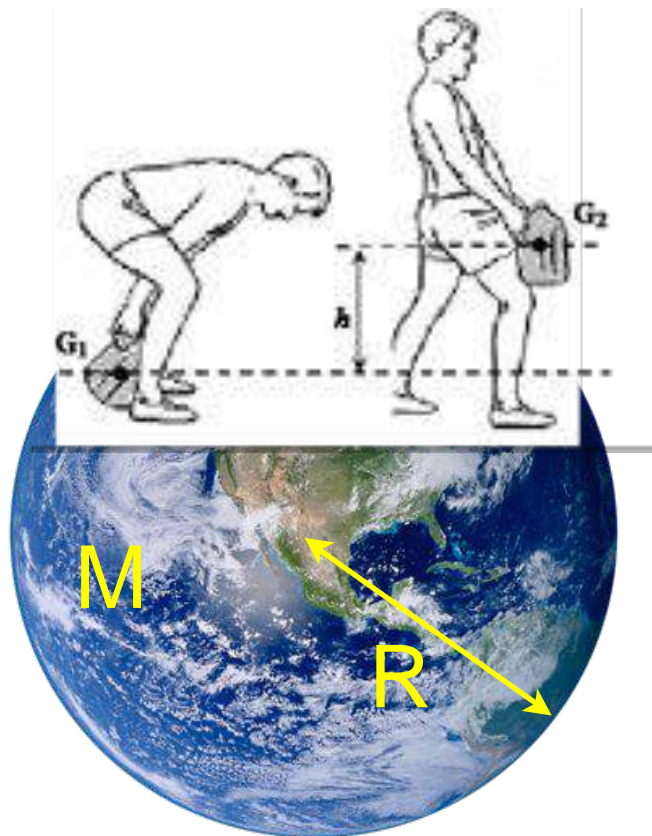
- $E_{grav} = 10$ Joules sur la terre
- $E_{grav} = 300$ Joules sur le soleil

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

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

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

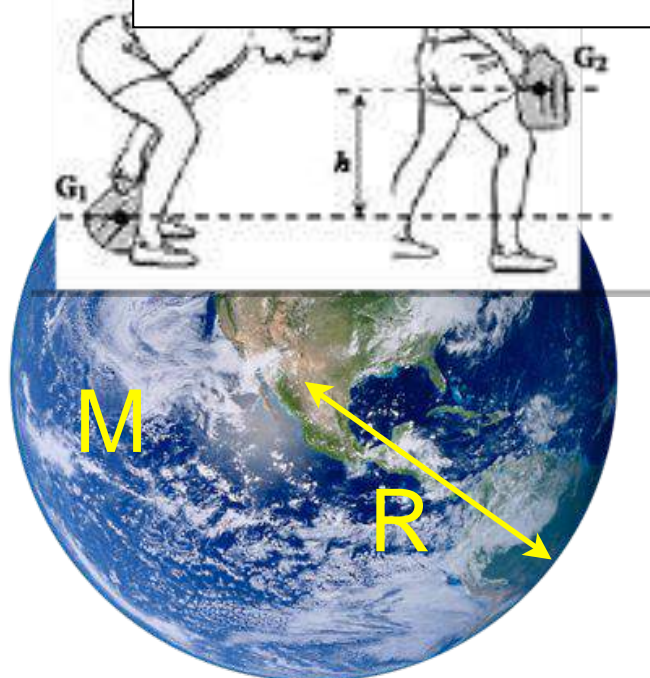
- $E_{grav} = 10^{12}$ Joules sur un trou noir de $10 M_{\text{soleil}}$
- $E_{grav} = 10^5$ Joules sur un trou noir de $10^8 M_{\text{soleil}}$

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_{grav} sera important!



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

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

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

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

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_{grav} sera important!

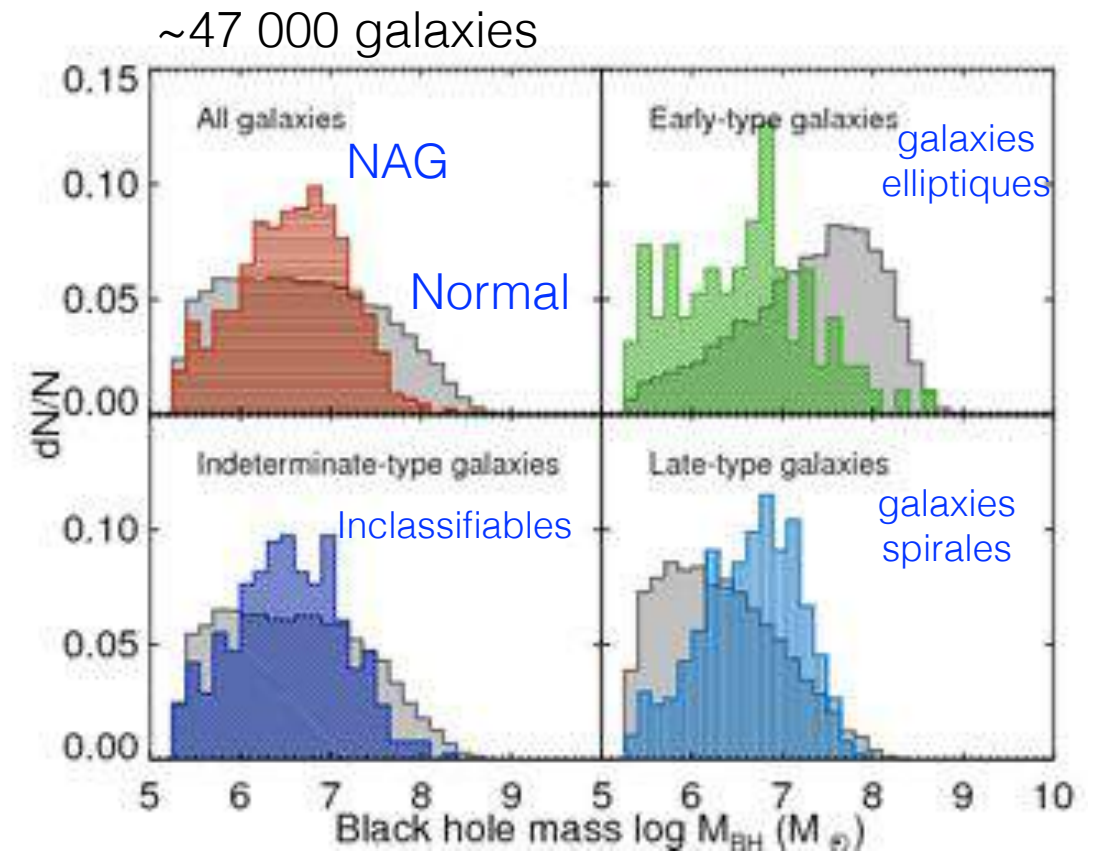
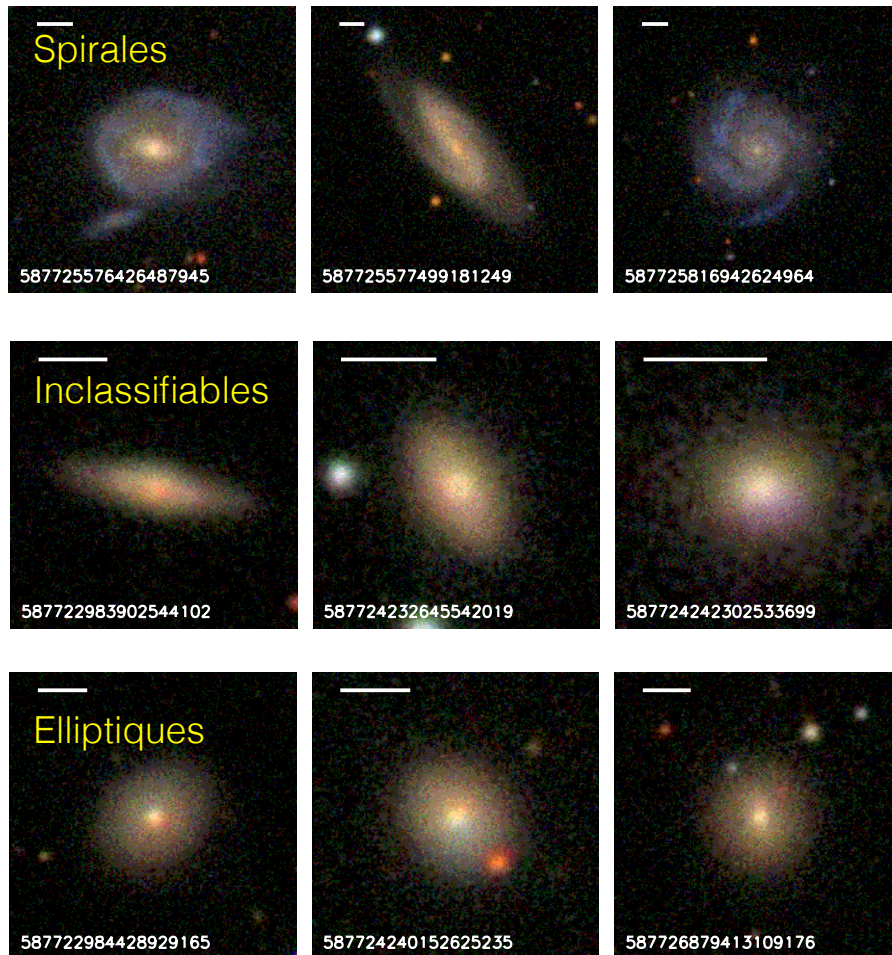
Certains astres rayonnent une telle énergie que l'hypothèse d'une libération d'énergie gravitationnelle sur un trou noir est la plus plausible!

- $E_{\text{grav}} = 10^{12}$ 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!

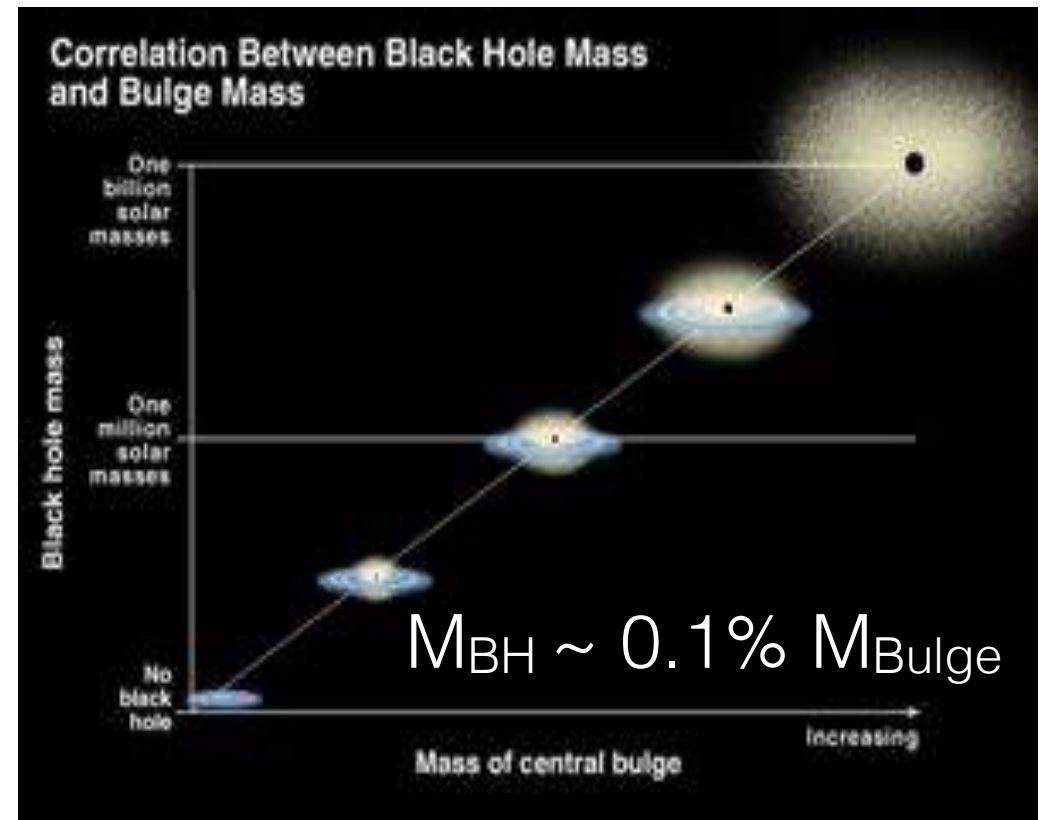
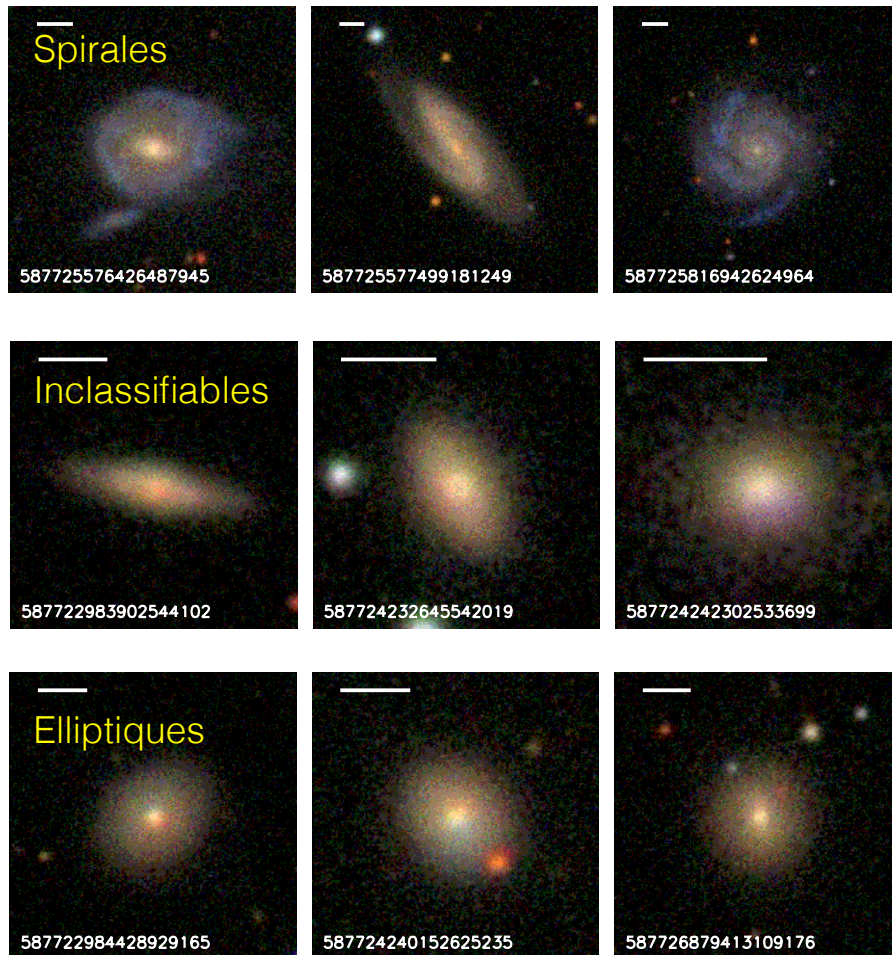
Des TNSM de Partout!



Schawinski et al. (2010)

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

Des TNSM de Partout!

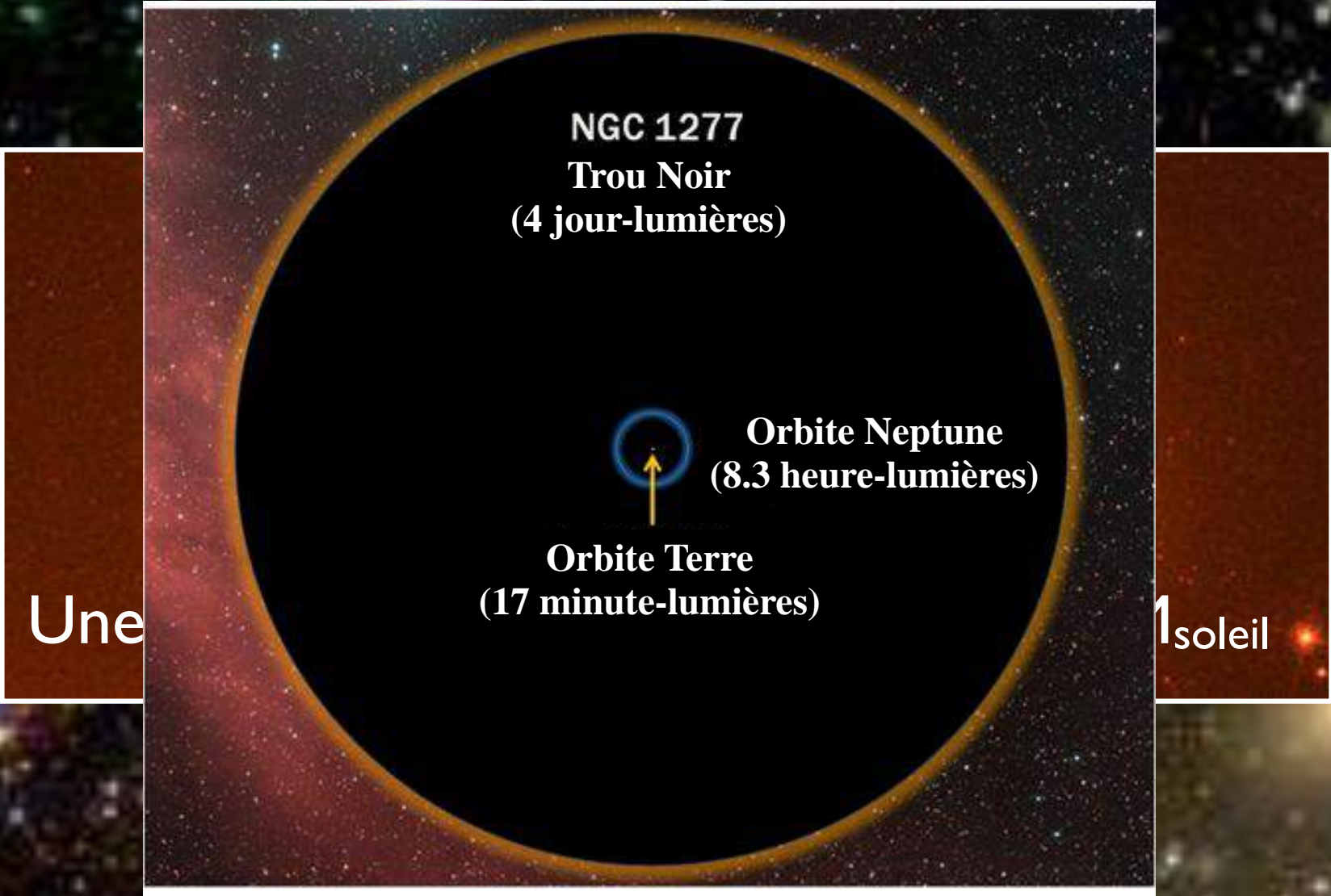


<http://zoo1.galaxyzoo.org/>

LE TNSM de NGC 1227

The background image shows a vast field of galaxies in various colors (blue, green, yellow, red) against a dark space. A central rectangular inset with a white border shows a dense, reddish-brown field of stars, with a bright yellow-white star at the center.

Une masse estimée de 17 milliards de M_{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⁻¹ correspond à 10^{-3} -1 M_{soleil} par an

- Tout une [zoologie](#): quasar, galaxies de Seyfert, blazar,

Au plus proche du trou noir

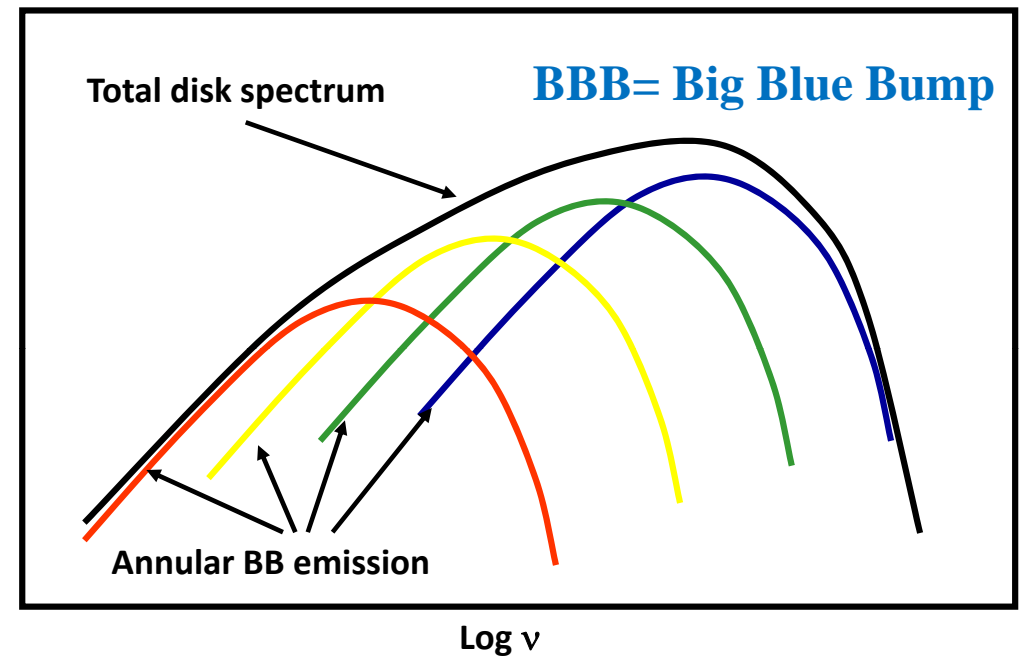
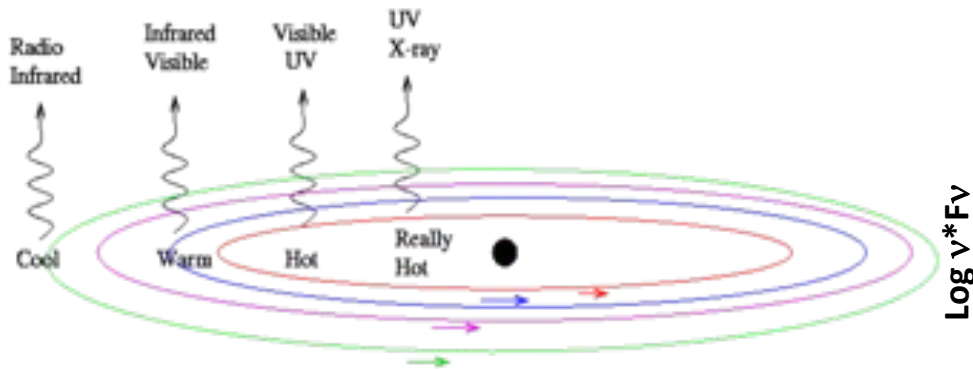
Disques et Couronnes

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...)

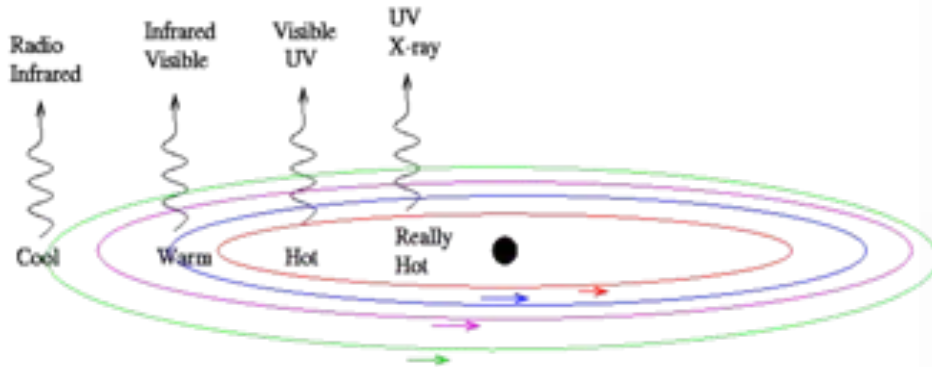
Disque: Théorie

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

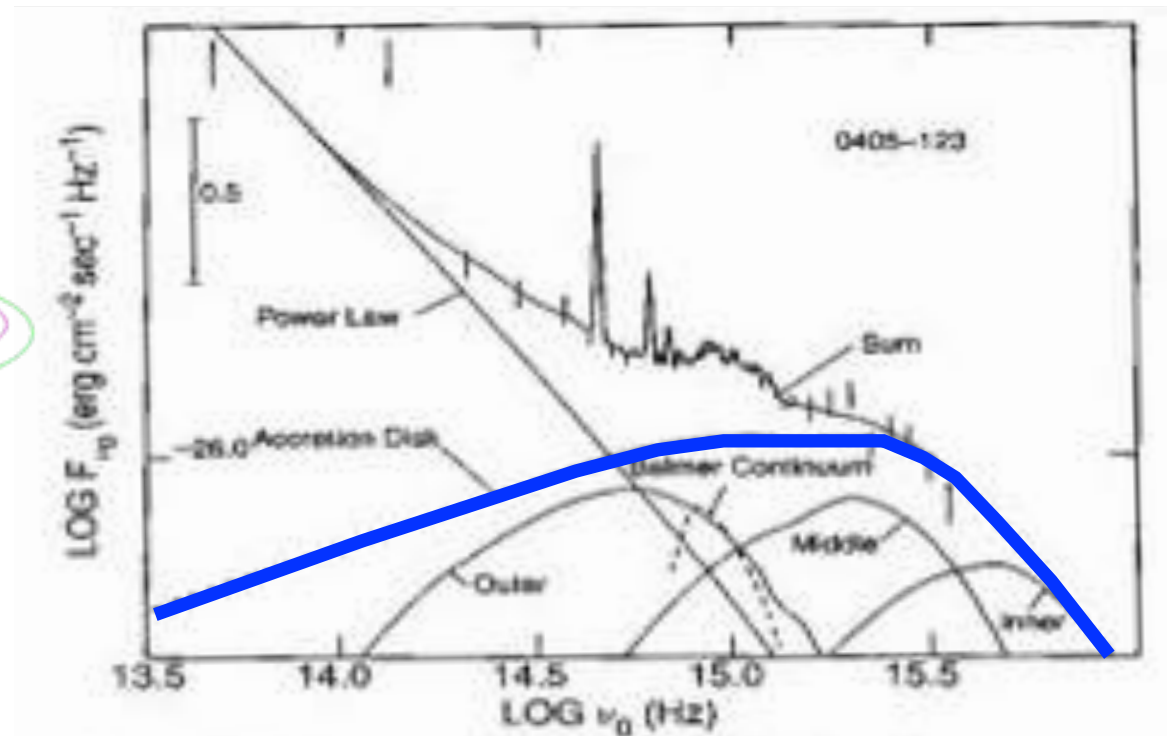


Disque: Théorie

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

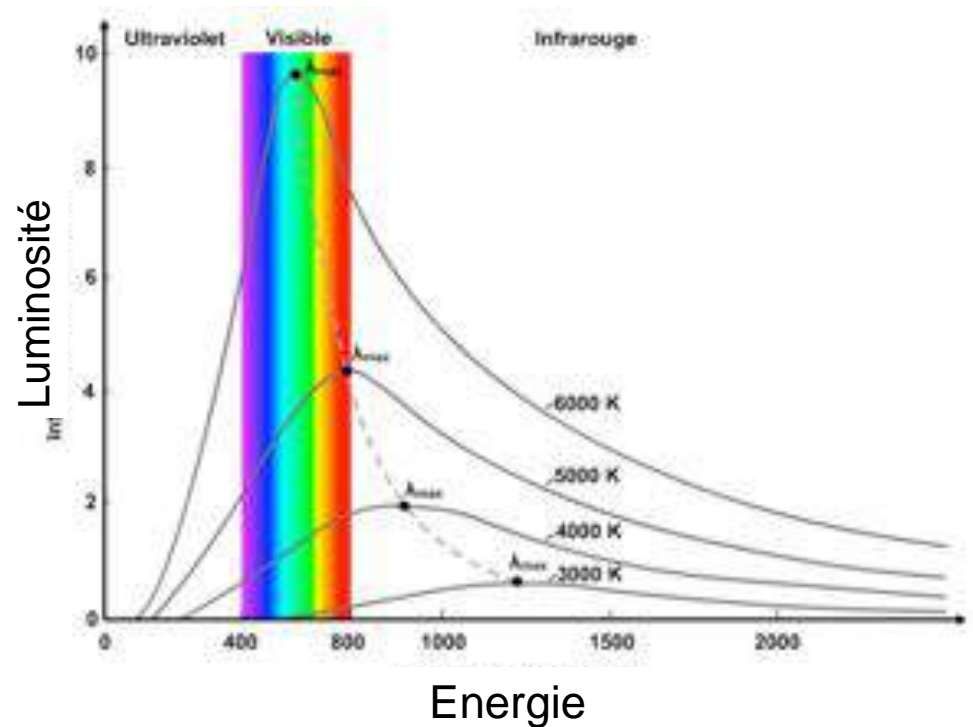


Pour les NAG, émission dans l'optique-UV



Des Disques Chauds

Corps Noir



Le **flot d'accrétion** 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

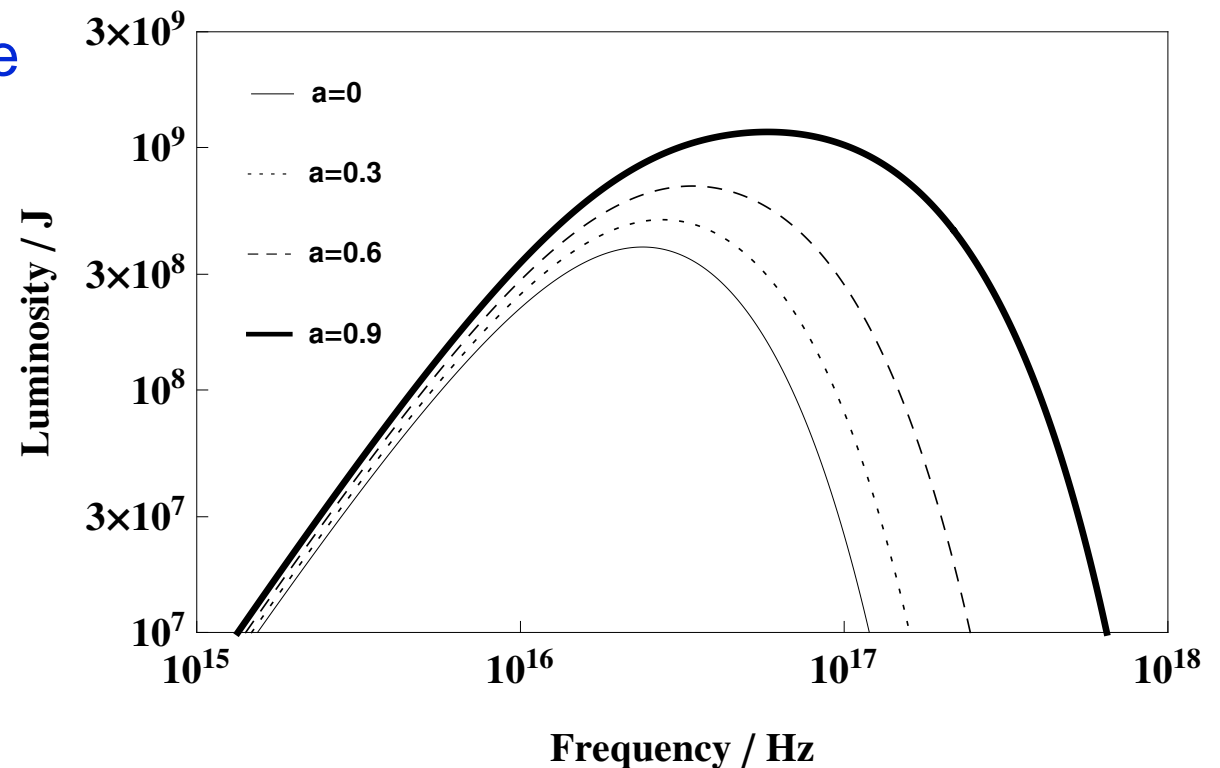
- Pour un trou noir (M,a) l'émission totale est caractérisée par son rayon interne R_{in} et son taux d'accrétion \dot{M}

Rayon de la dernière orbite stable

- Schwarzschild $R_{in} = 6R_G$
- Kerr $R_{in} = R_G$

- Taille angulaire très petite

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



Mesures Directes

via Macro-Micro Lensing



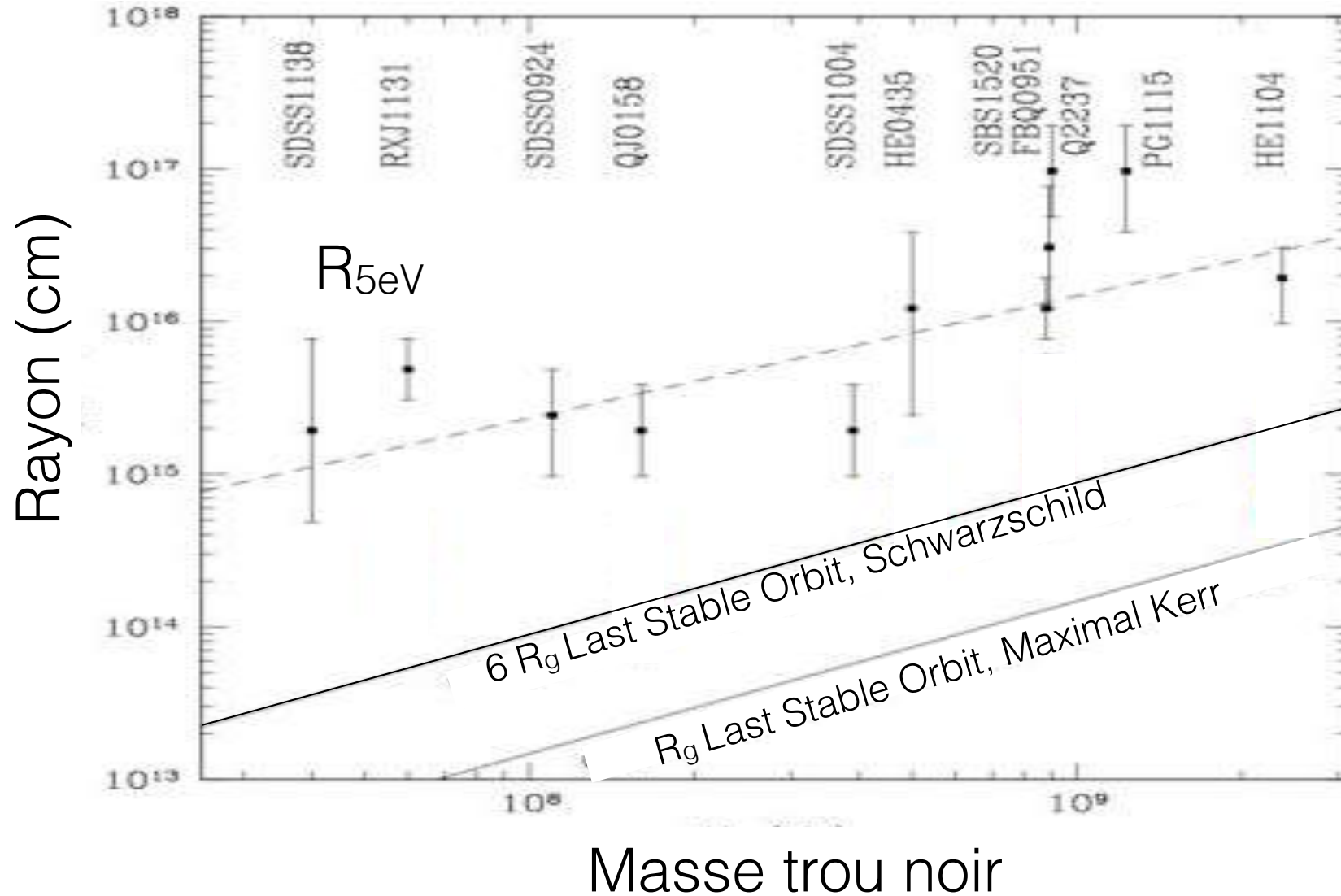
www.eso.org



www.eso.org

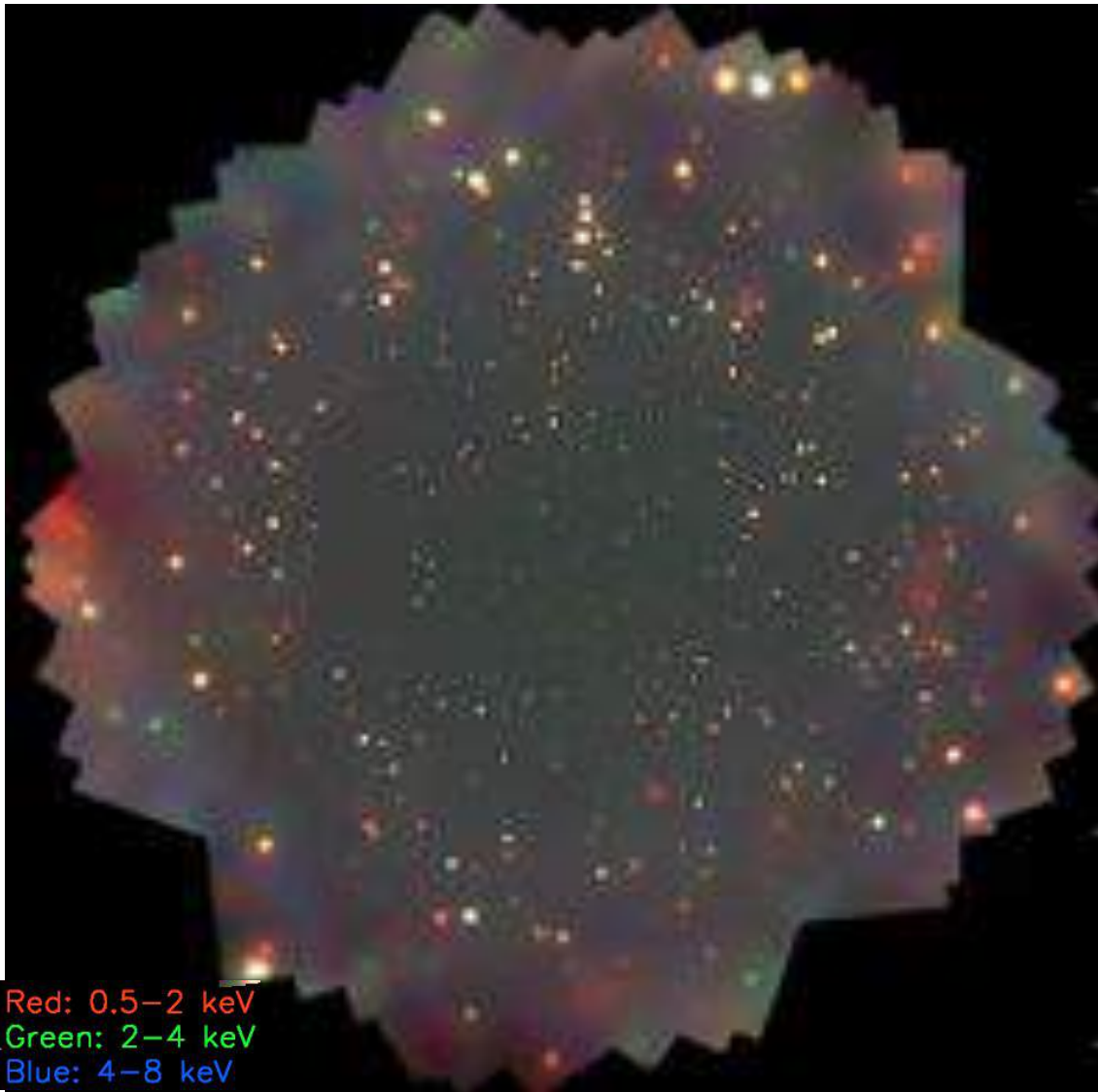
Mesures Directes de la Taille du Disque

Morgan et al. (2010)



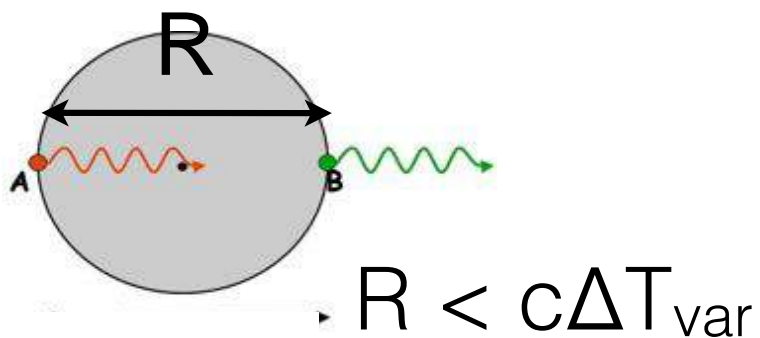
Au delà de l'UV...

Chandra deep field

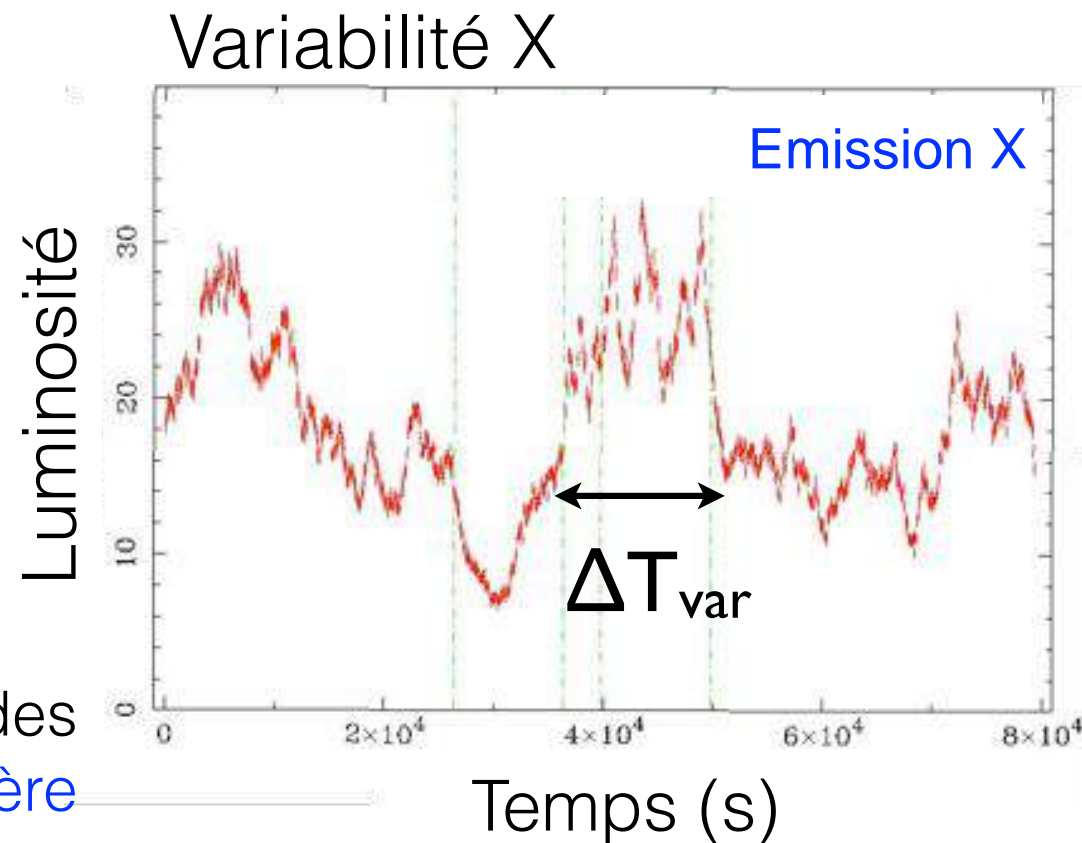


- Tous les NAG émettent en X
- Le disque d'accrétion n'est pas assez chaud pour émettre dans les X
- Une autre source est présente: la **couronne**

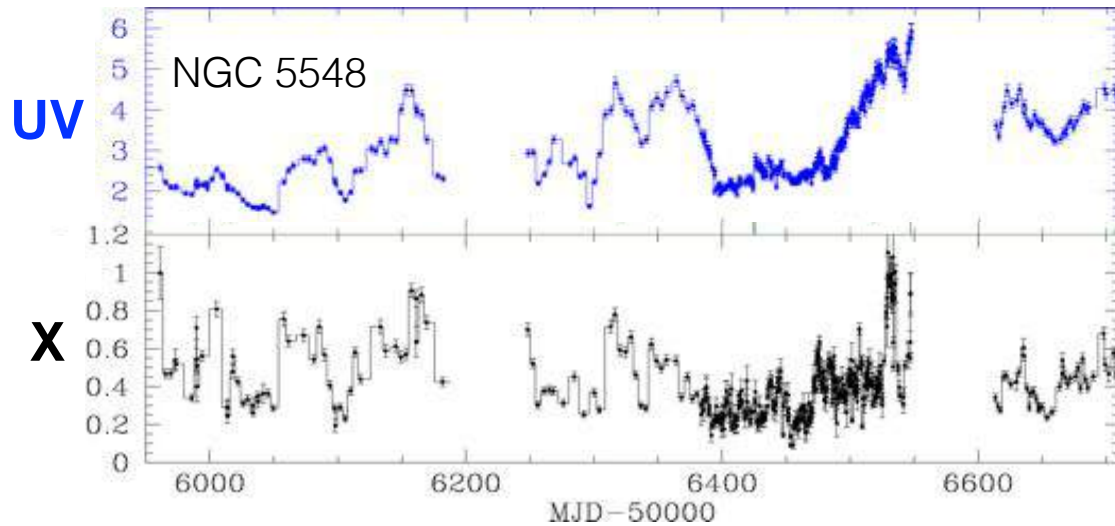
Une Couronne de Petite Taille



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

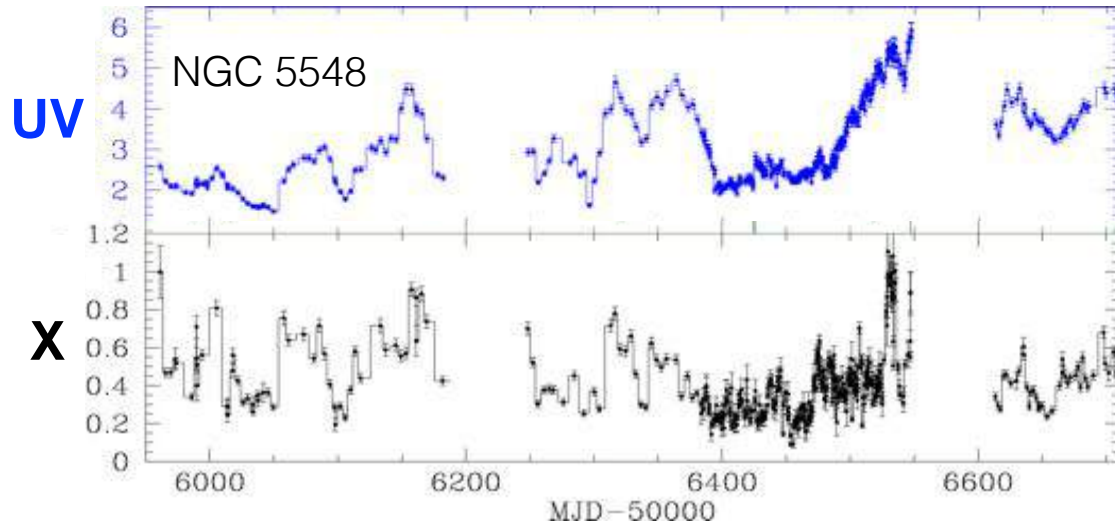


Proche du Disque



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

Proche du Disque

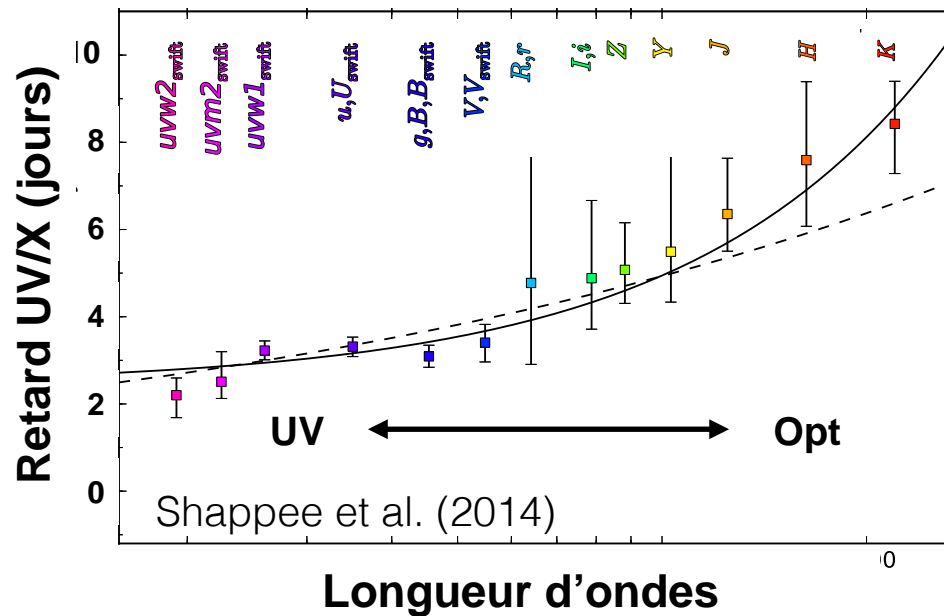


- Observations simultanées Opt/UV/X

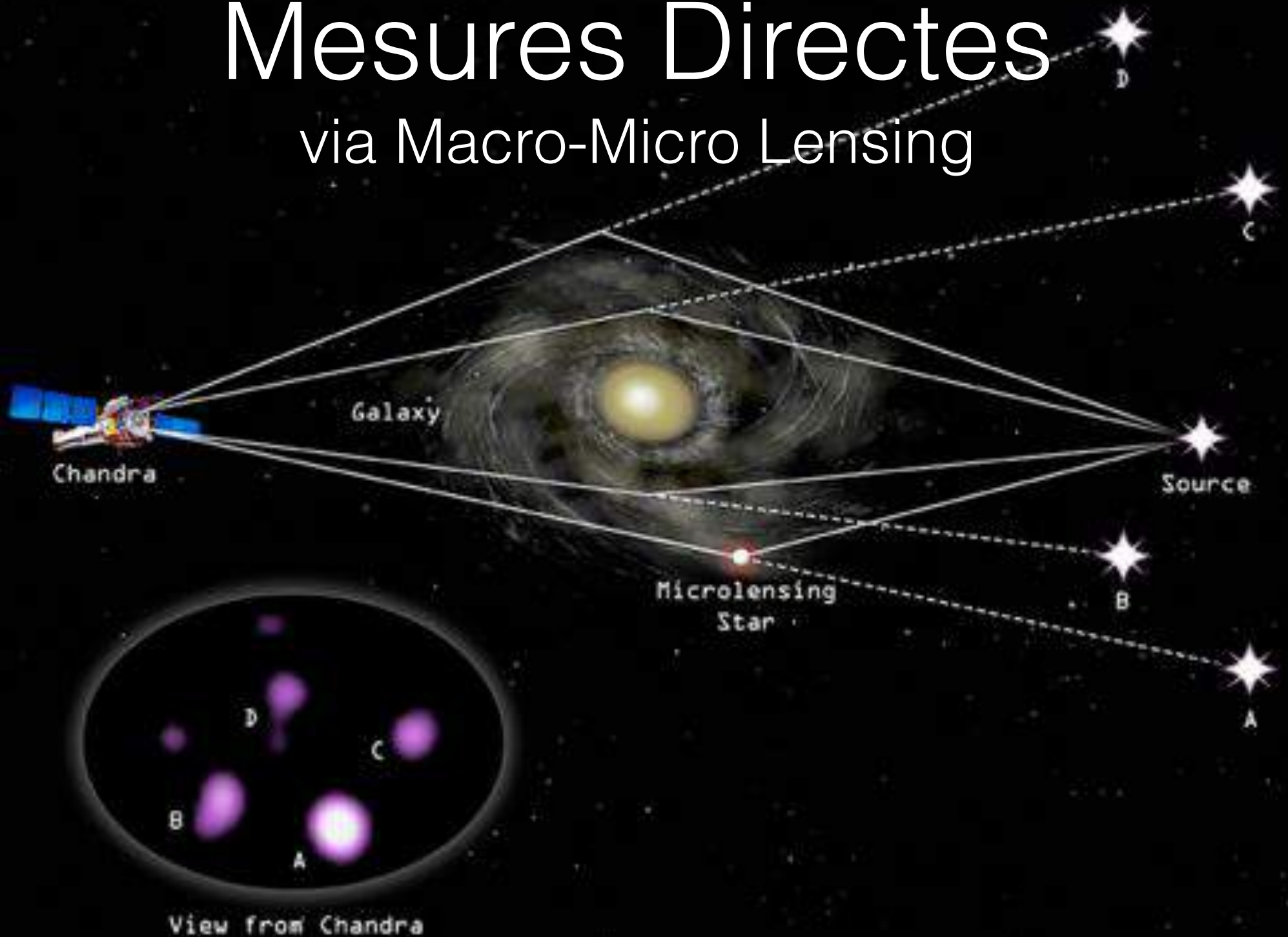
- Délai entre l'Opt/UV et l'X

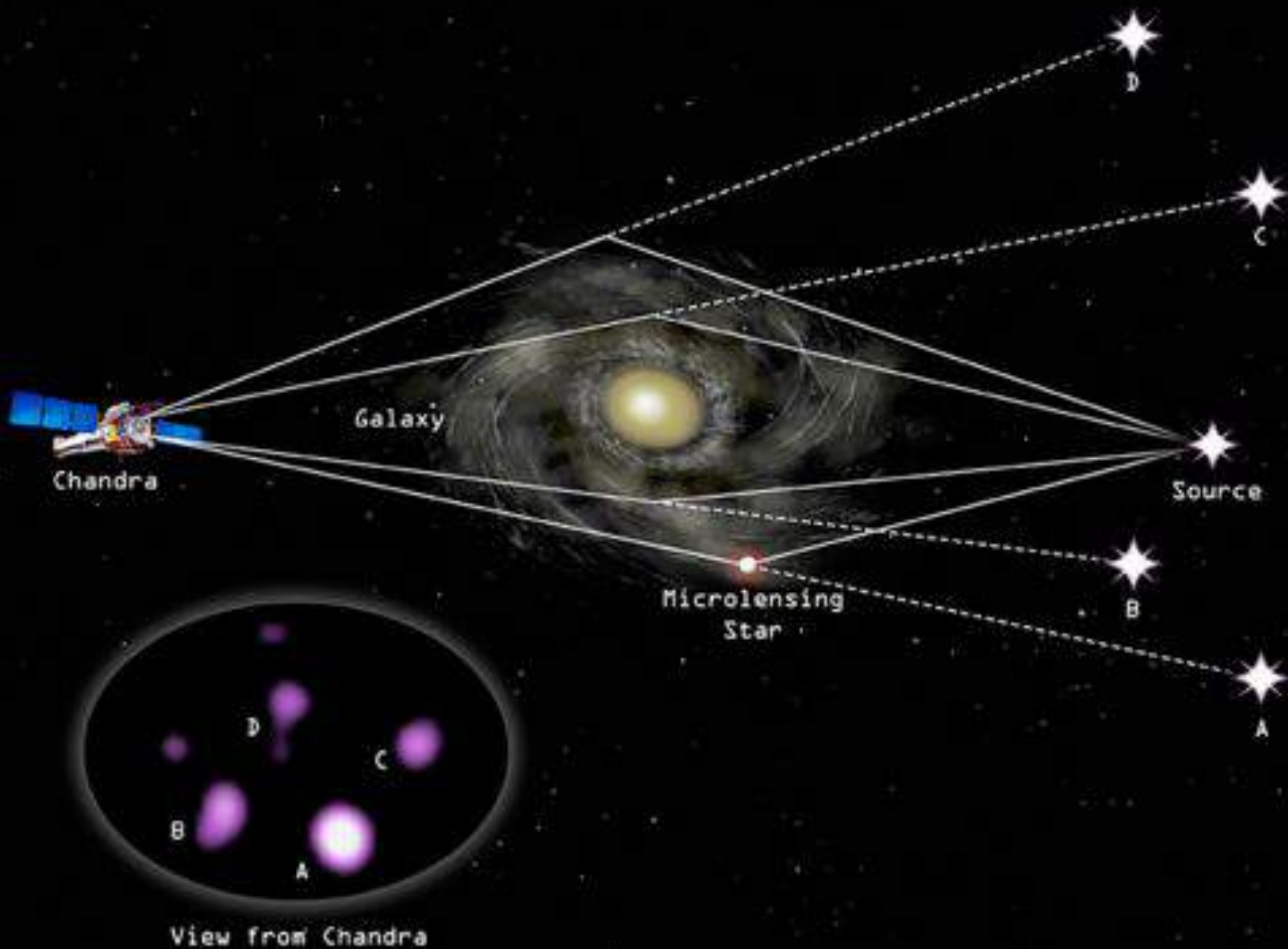
- Distance régions UV/X < jour lumière

$< 100 R_g$
 pour $M_{BH} = 10^8 M_{\text{soleil}}$

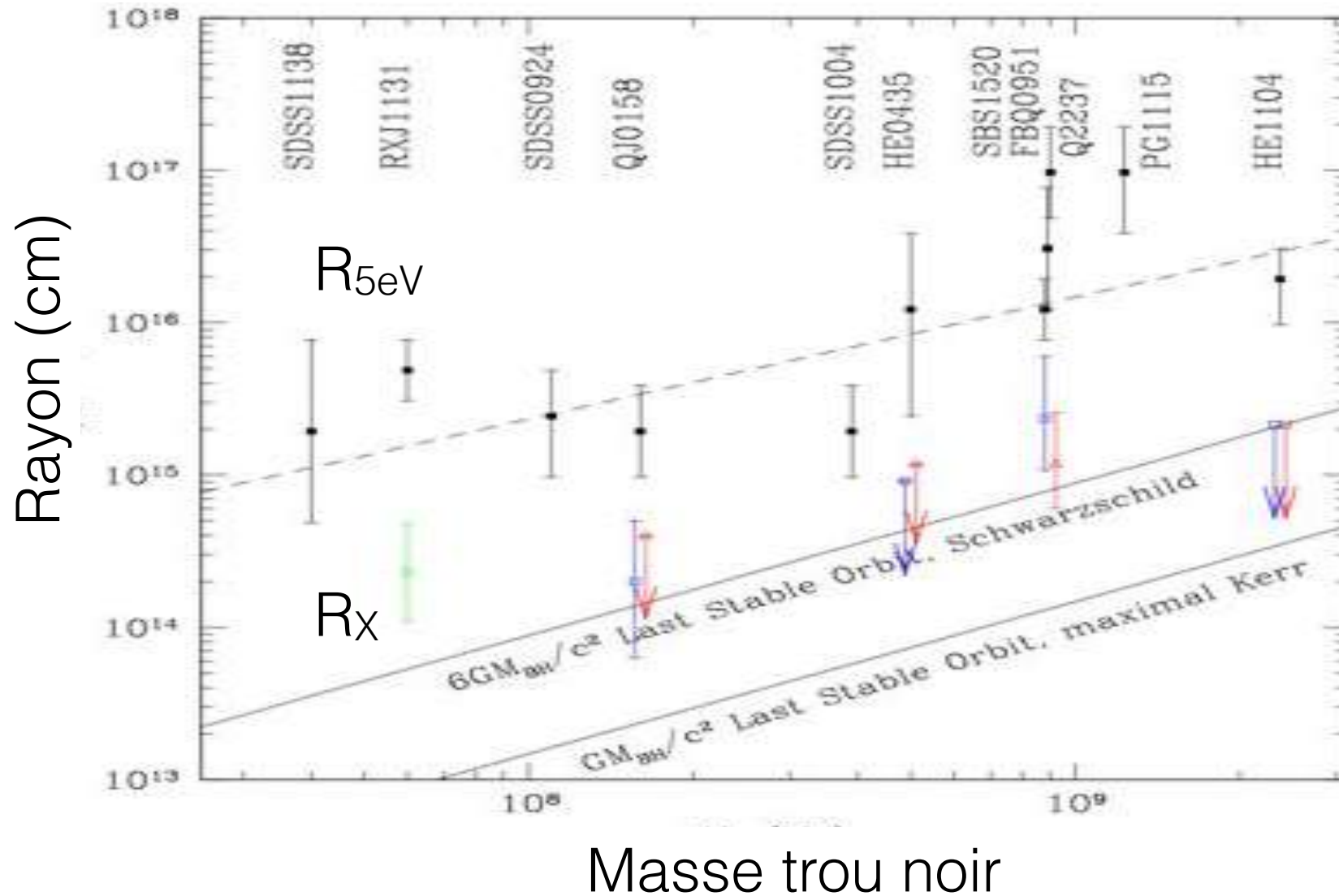


Mesures Directes via Macro-Micro Lensing





Mesures Directes de la Taille de la couronne

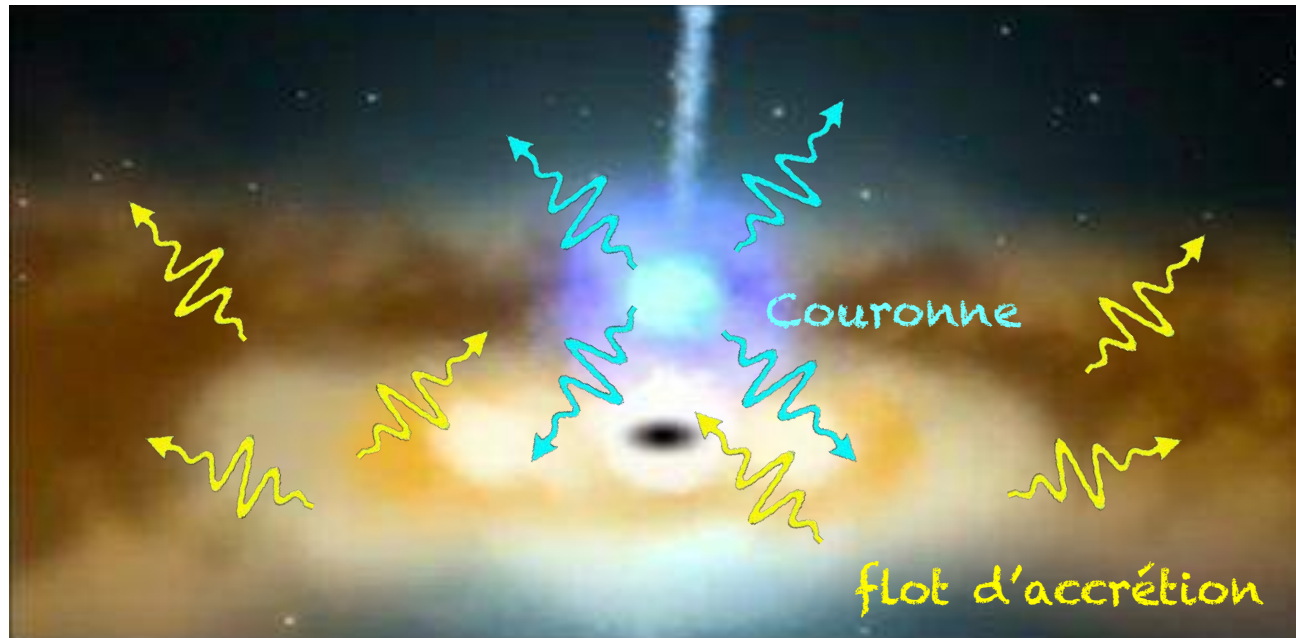


Une Couronne au dessus du Disque?



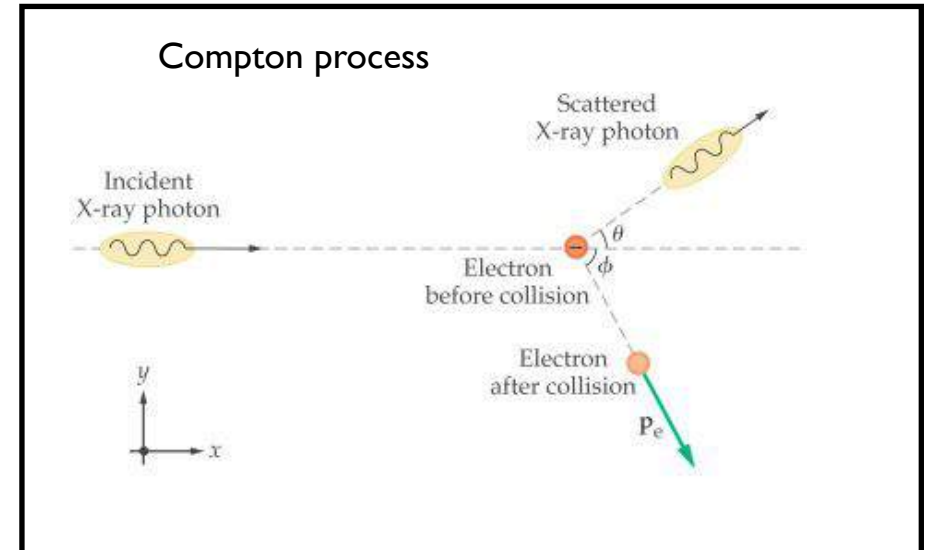
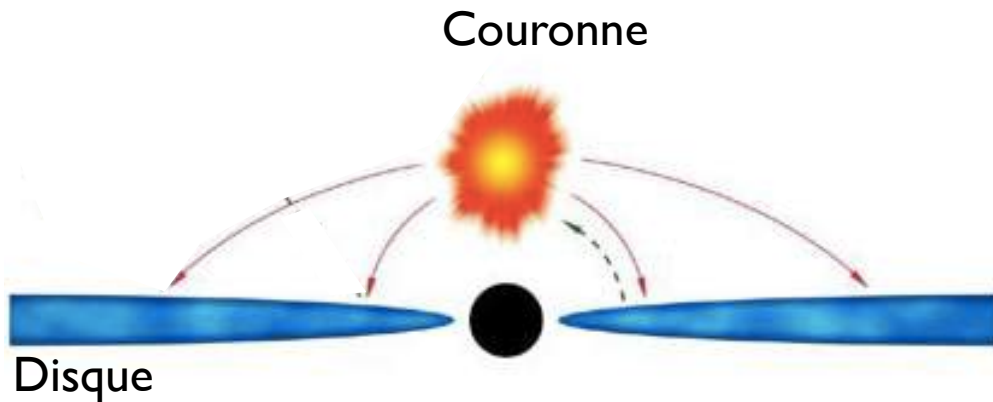
- L'émission X de la couronne chauffe le disque
- L'émission UV du disque refroidit la couronne
- Une partie de l'émission X est réfléchi par le disque

Une Couronne au dessus du Disque?



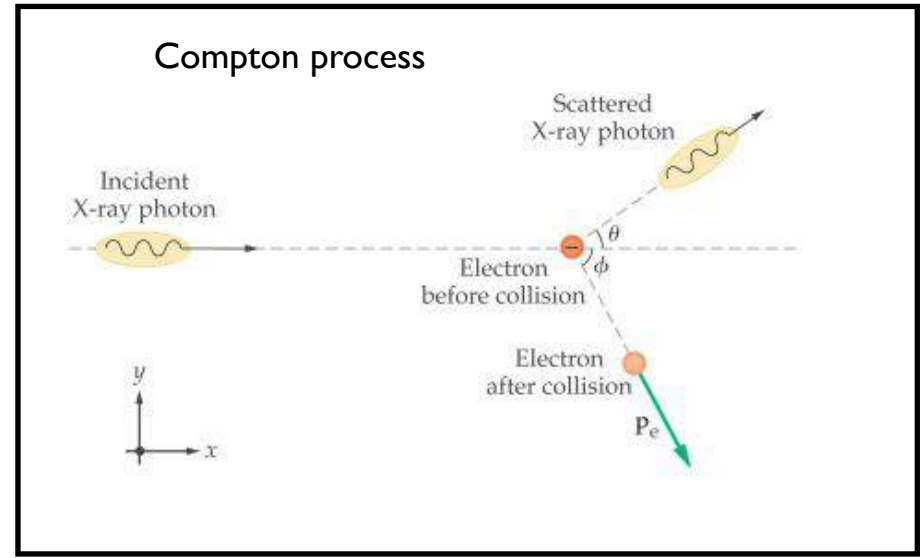
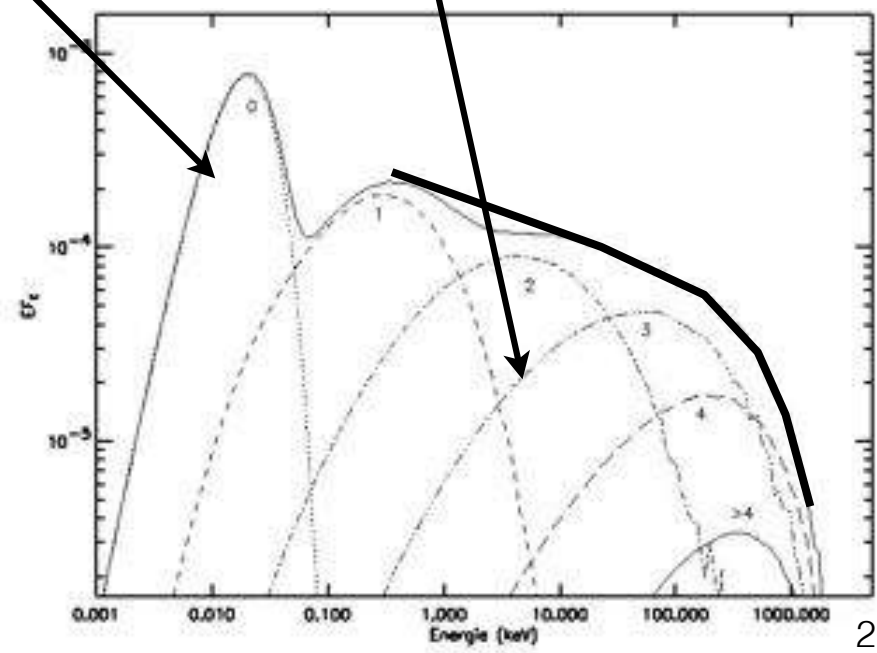
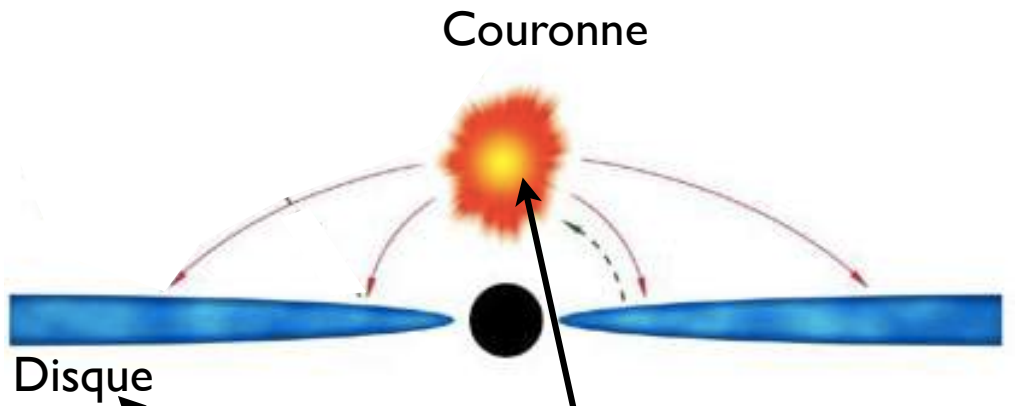
- L'émission X de la couronne chauffe le disque
- L'émission UV du disque refroidit la couronne
- Une partie de l'émission X est réfléchi par le disque

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

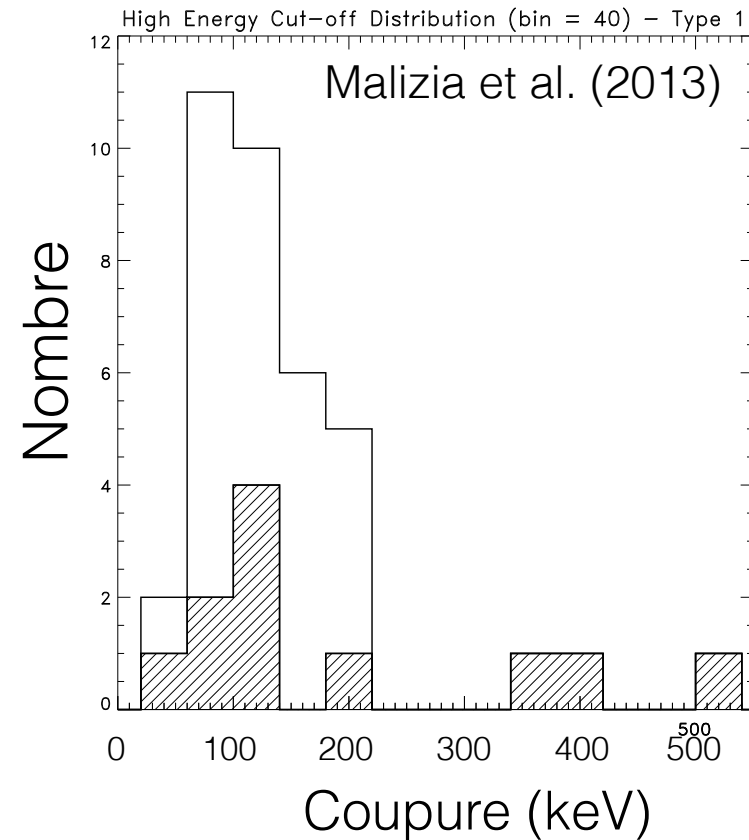
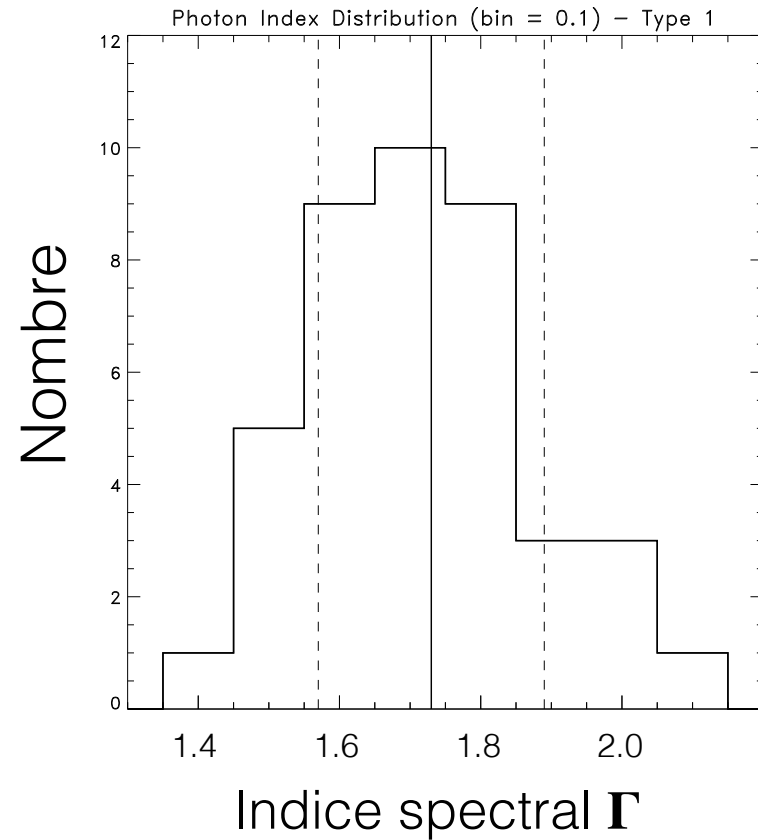


- Spectre en loi de puissance coupé exponentiellement

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

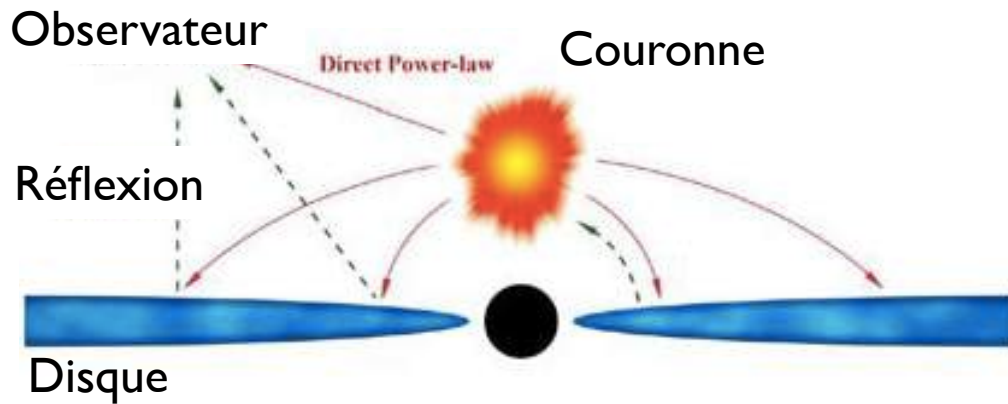
- E_c de l'ordre de la température des électrons de la couronne

Une Couronne très Chaude



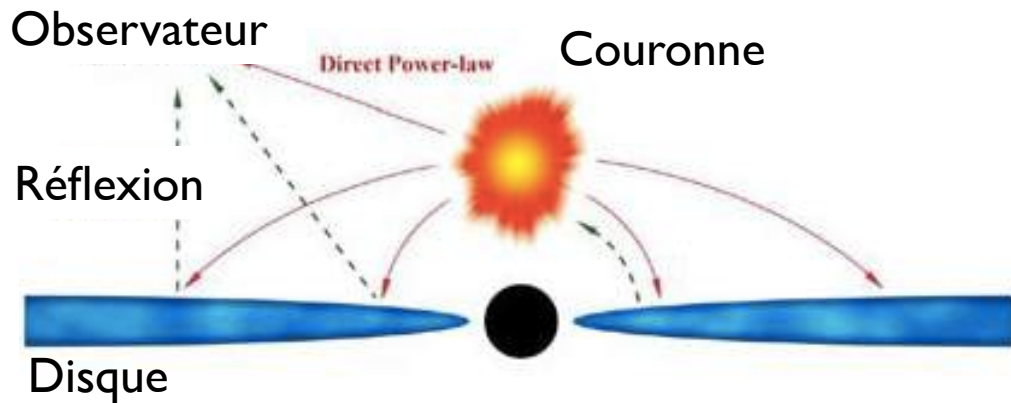
La couronne a une température de quelques centaines de keV i.e. $\sim 10^9$ K

Composantes en Reflexion

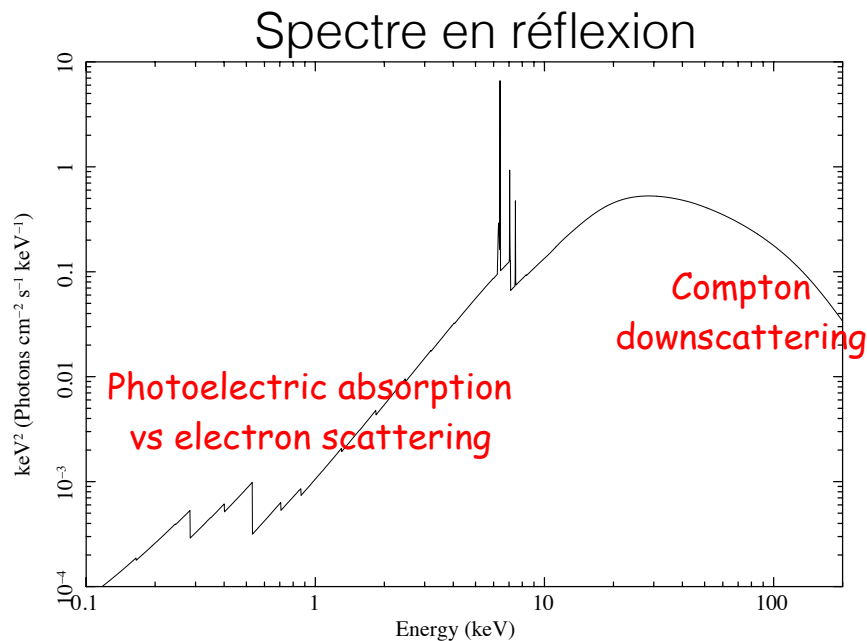


- Une partie du rayonnement X de la couronne illumine le disque

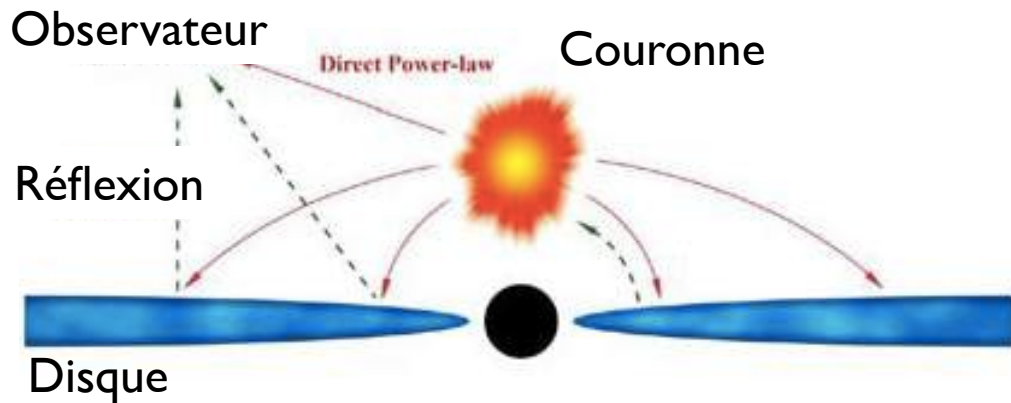
Composantes en Reflexion



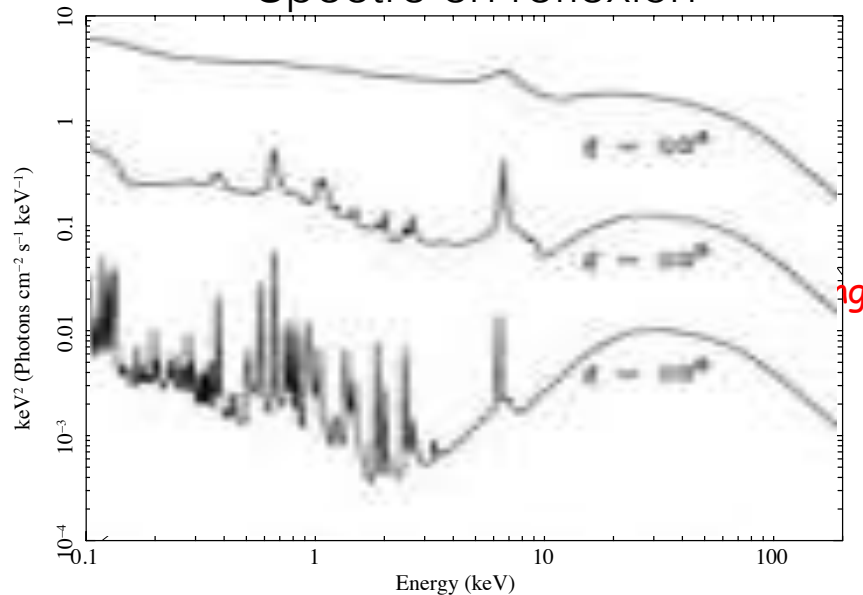
- Une partie du rayonnement X de la couronne illumine le disque
- Le spectre en réflexion est dominé par la raie du Fer et une bosse à ~ 30 keV



Composantes en Reflexion

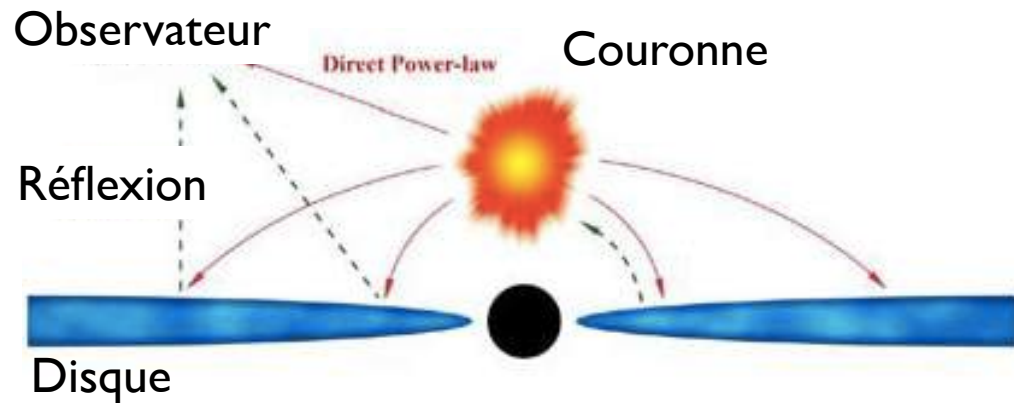


Spectre en réflexion

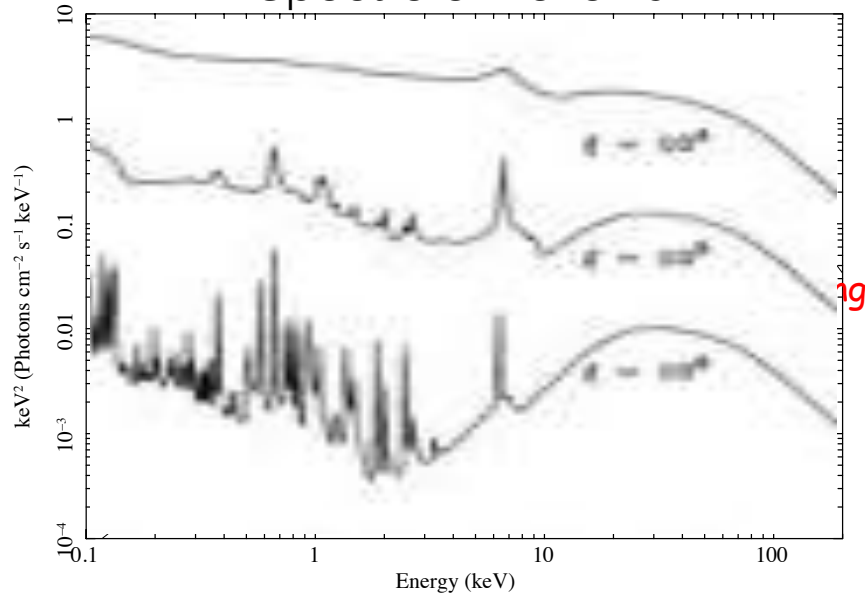


- Une partie du rayonnement X de la couronne illumine le disque
- Le spectre en réflexion est dominé par la raie du Fer et une bosse à ~ 30 keV
- Le spectre en réflexion dépend fortement de l'état d'ionisation du disque

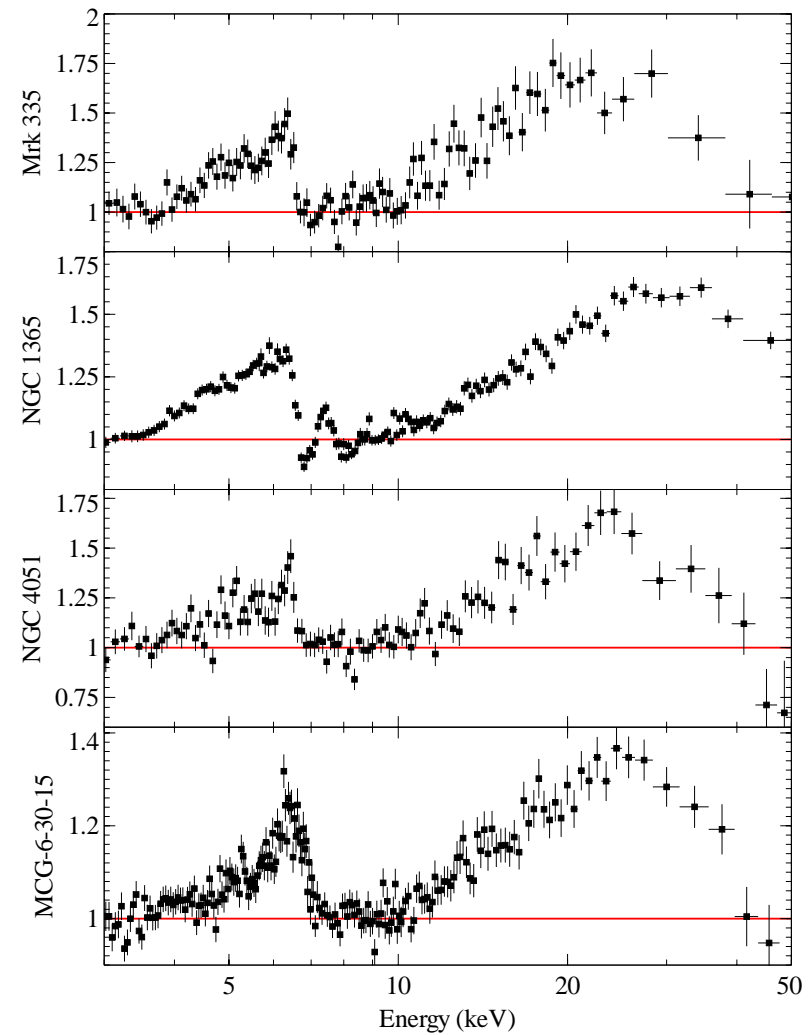
Composantes en Reflexion



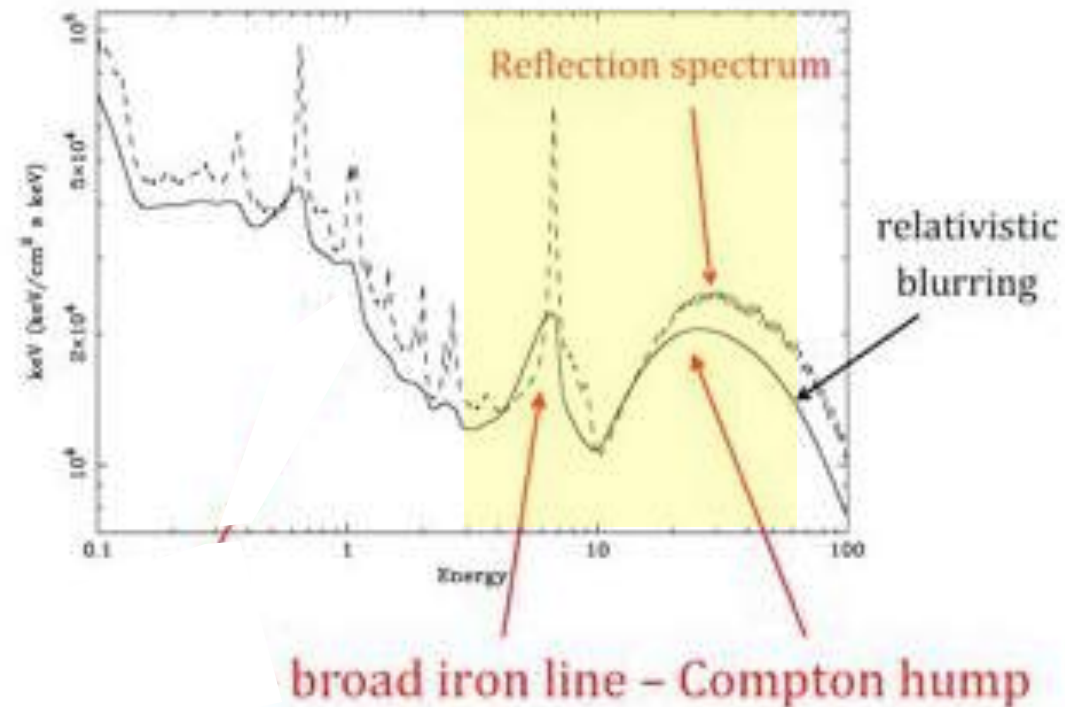
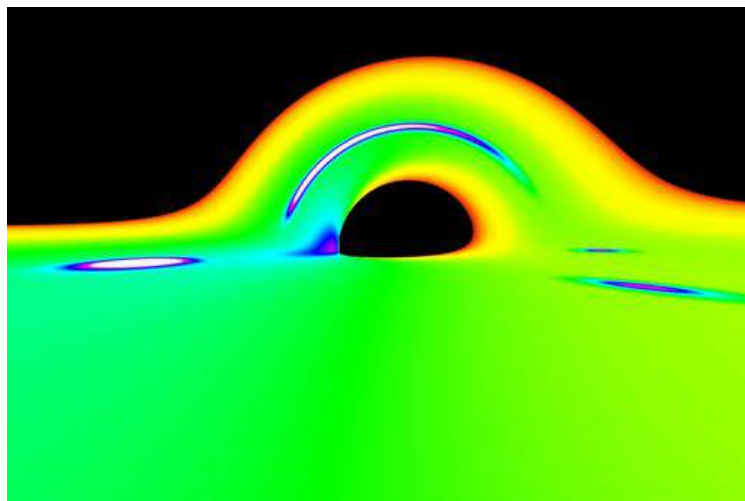
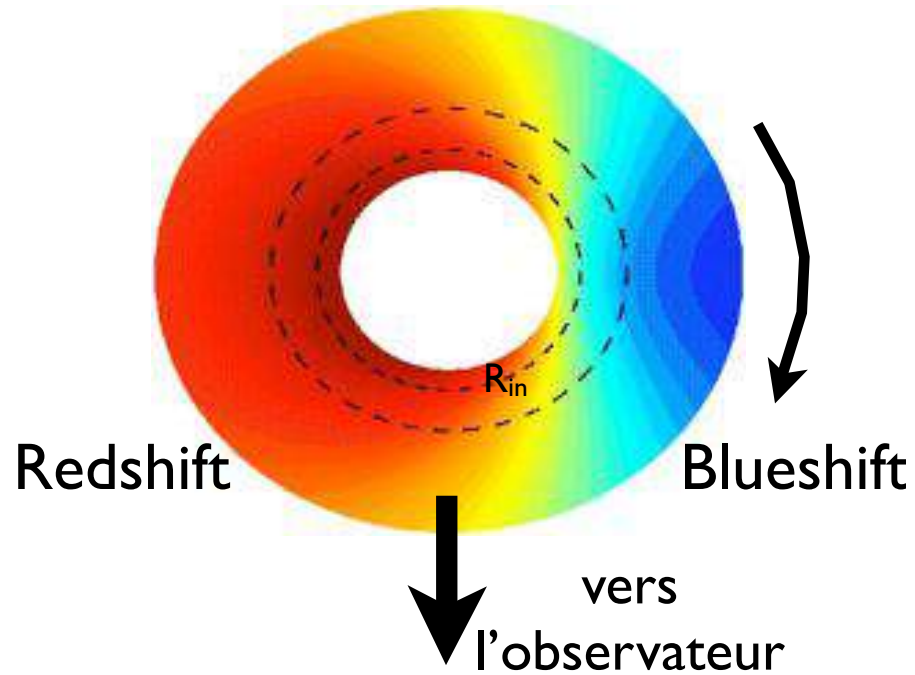
Spectre en réflexion



Observation (NuSTAR)

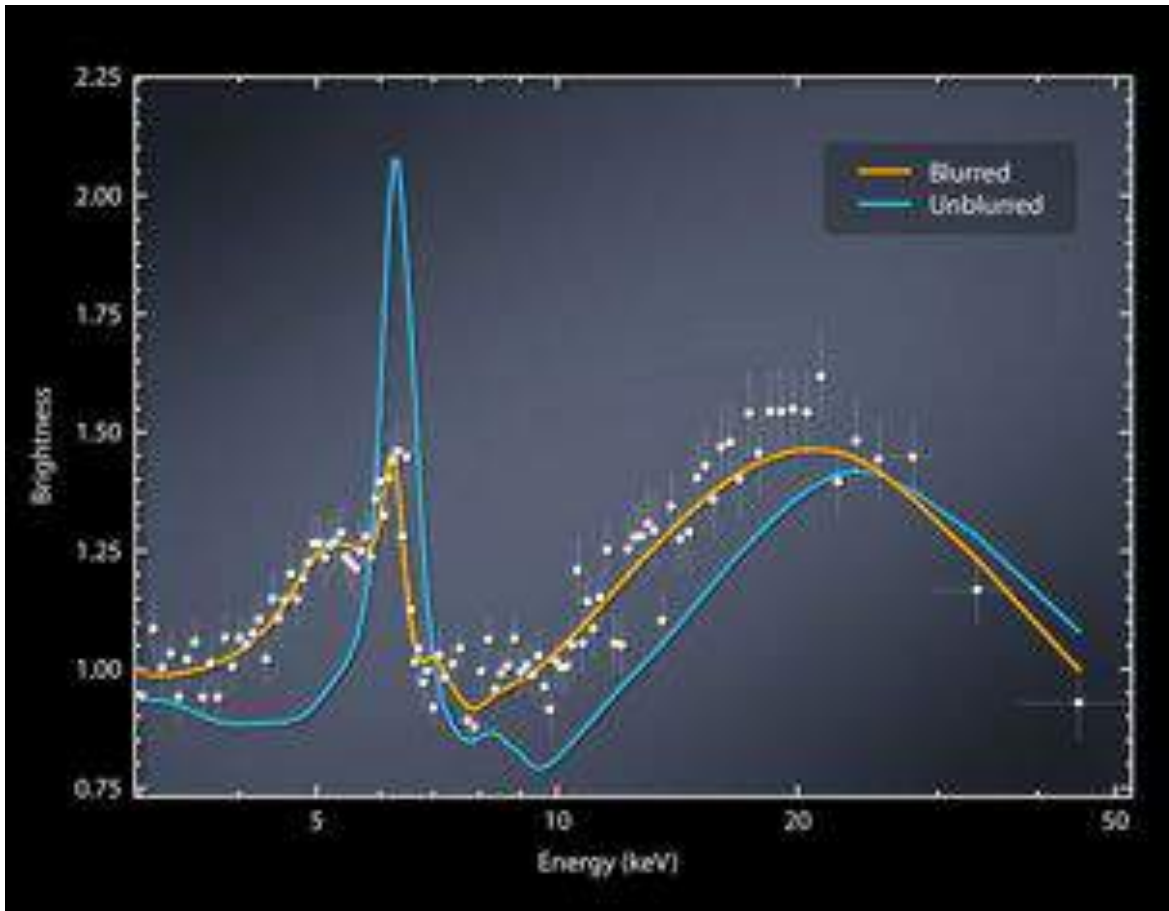


Effets relativistes



Effets relativistes

Mkn 335

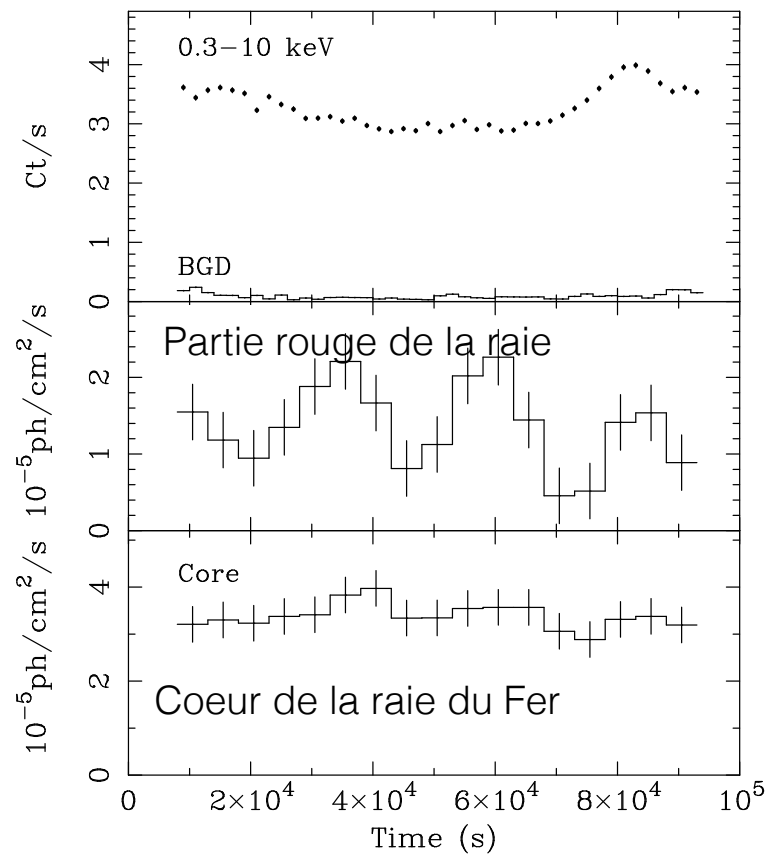


- Mkn 335 observé par NuSTAR dans un état de bas flux
- Spectre consistant avec une couronne entre 2 et 10 R_g au dessus du disque
- Trou noir proche d'un trou noir de Kerr en rotation maximale

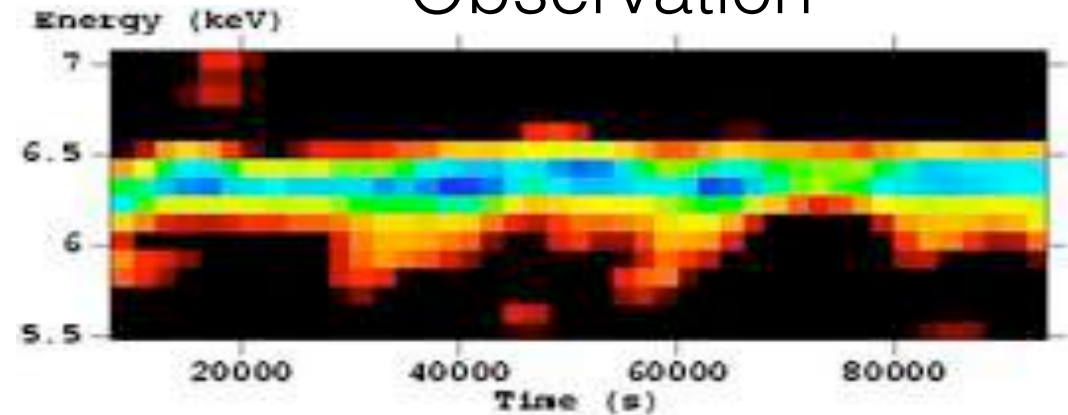
Parker et al. (2014)

Effets relativistes

NGC 3516



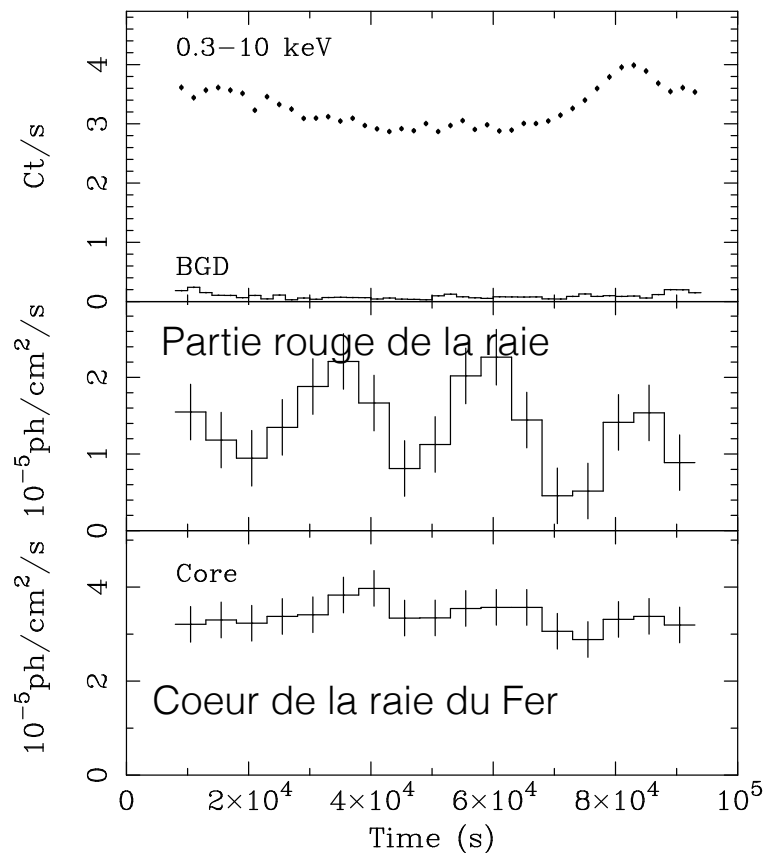
Observation



Iwasawa et al. (2004)

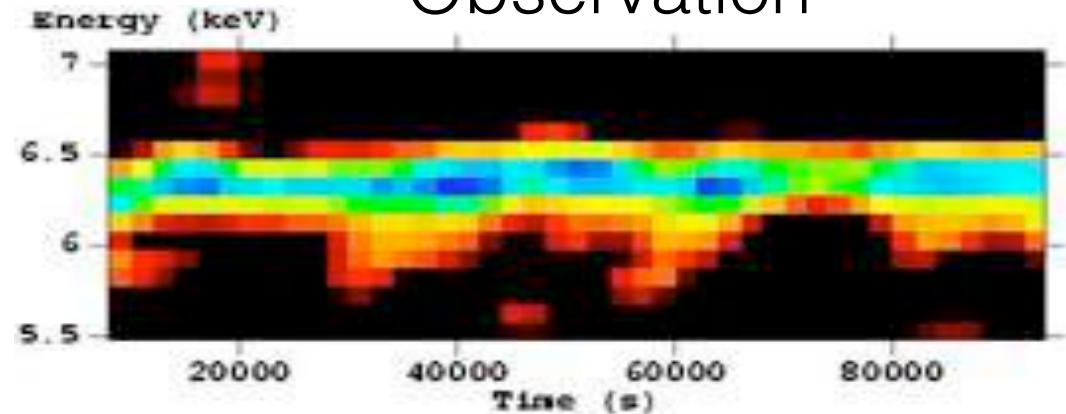
Effets relativistes

NGC 3516

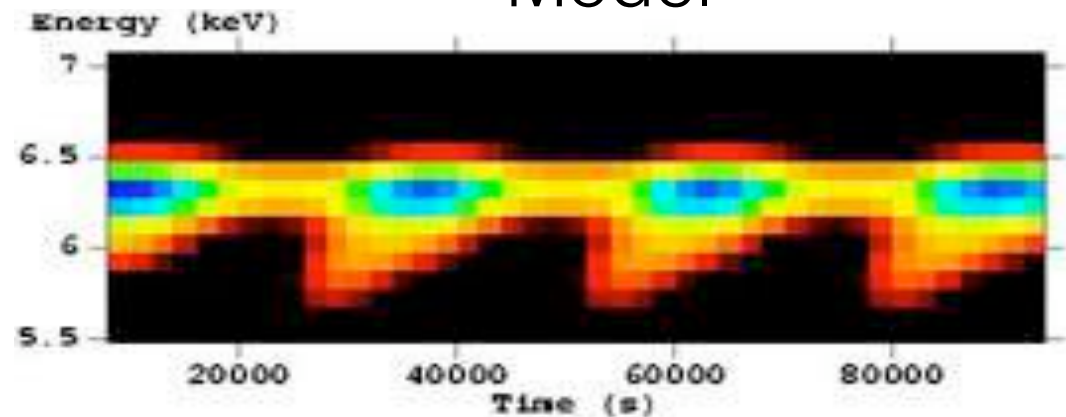


Iwasawa et al. (2004)

Observation

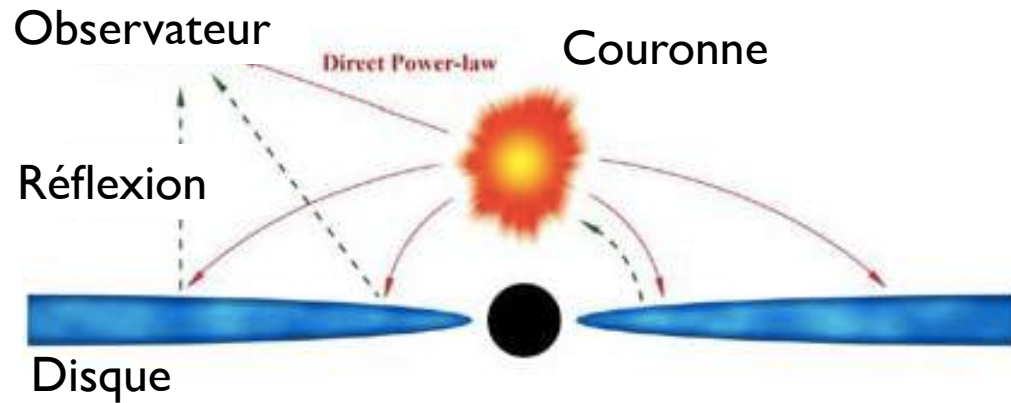


Model



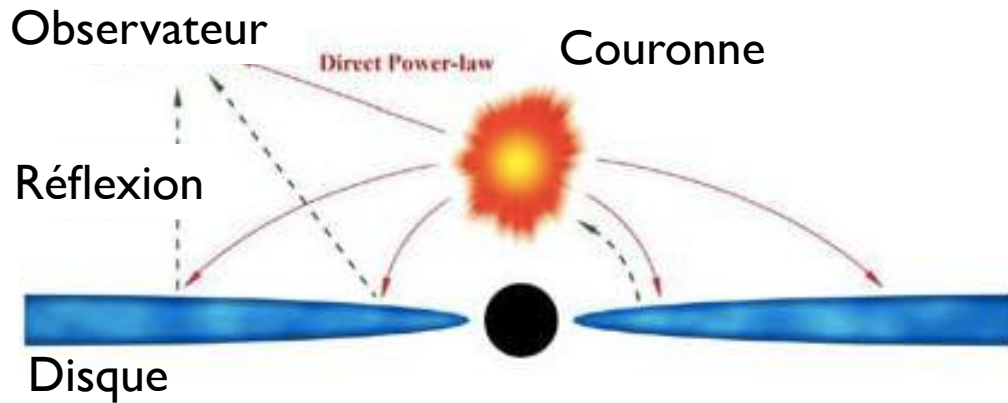
En accord avec un source X à un rayon $\sim 10 R_g$ tournant avec le disque

Réverbération



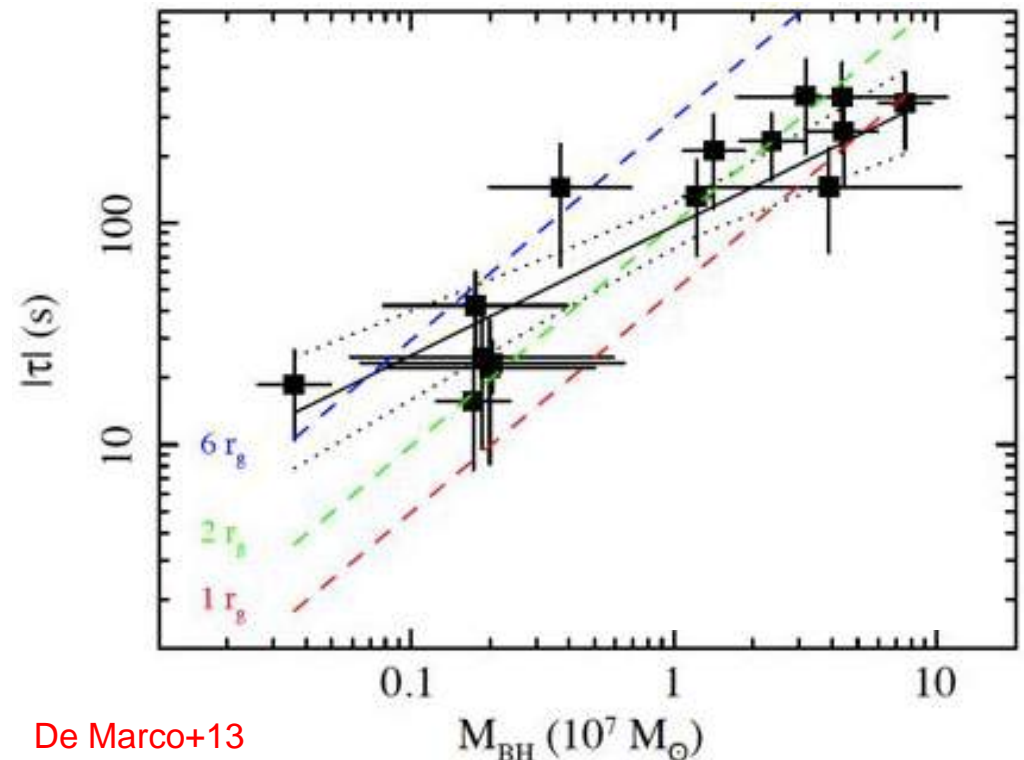
Retard temporelle entre l'émission de la couronne et la réflexion

Réverbération



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

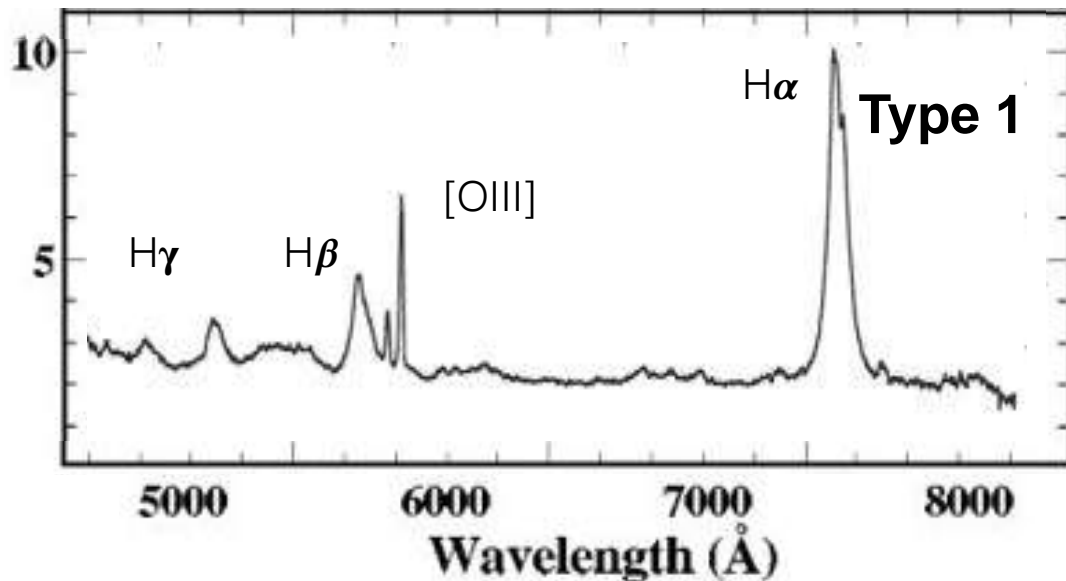
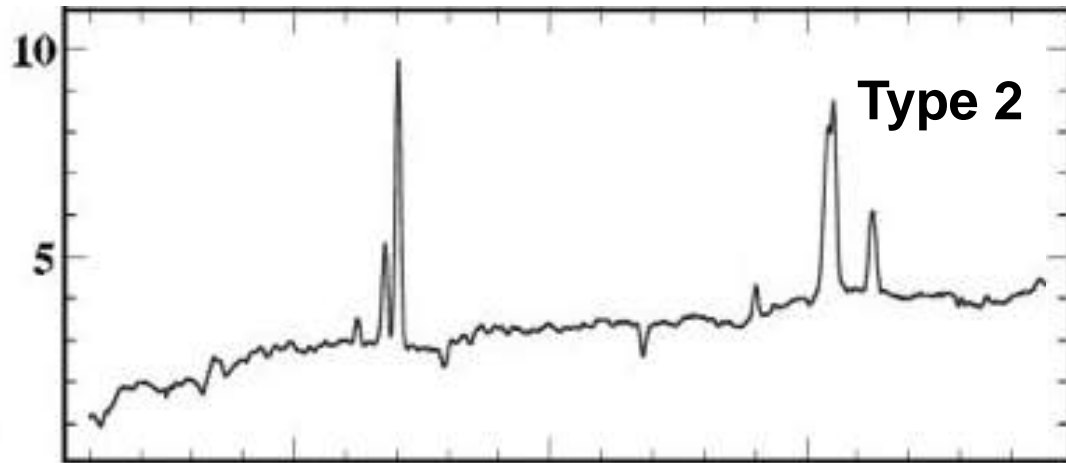
- Retard de quelques centaines de secondes
- En accord avec une source X à une hauteur de quelques R_g au dessus du disque



De Marco+13

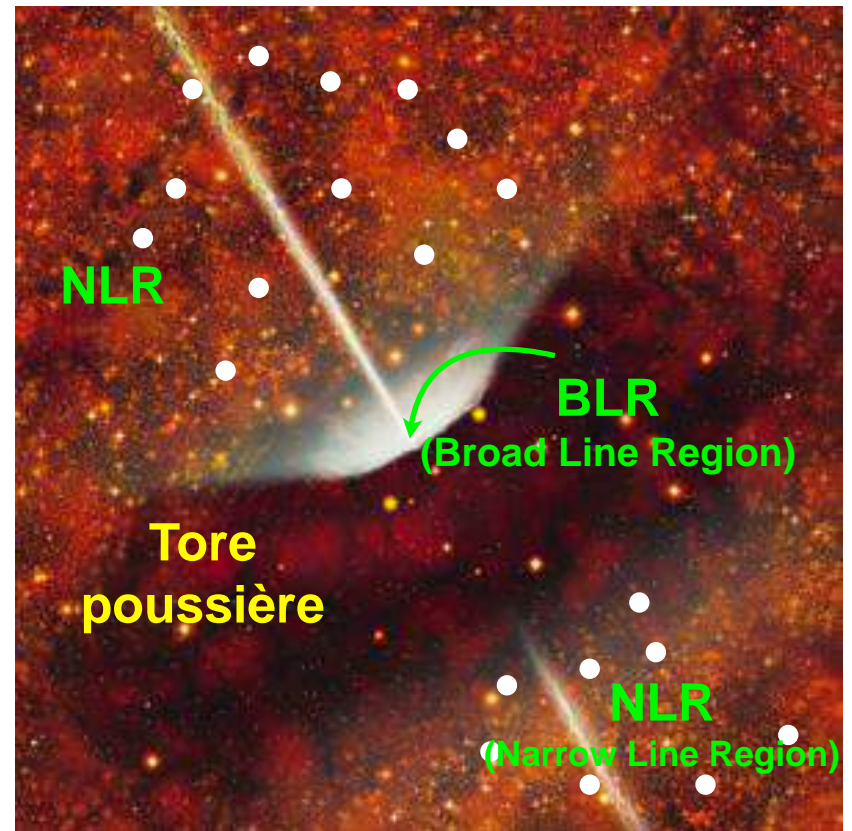
Le tore de poussière:
la partie « imageable » du
NAG

Des Raies Larges ou pas...



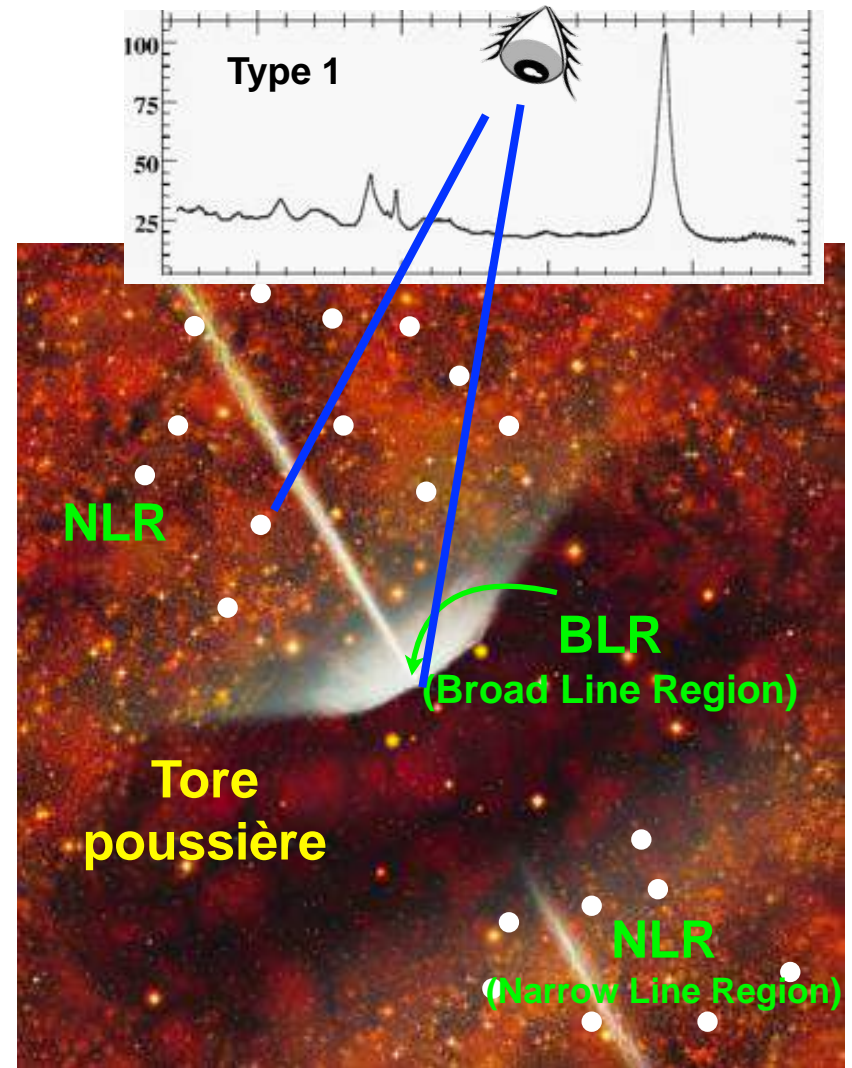
- Certains NAG ont des raies larges dans leurs spectres optiques, d'autres non.
- Raies larges et ionisées signatures de matière en mouvement ($\sim 10^4$ km/s) chauffée à $\sim 20\,000$ K.
- Raies étroites et ionisées signatures de matière en mouvement (~ 500 km/s) chauffée à $\sim 16\,000$ K.

Le Modèle d'Unification



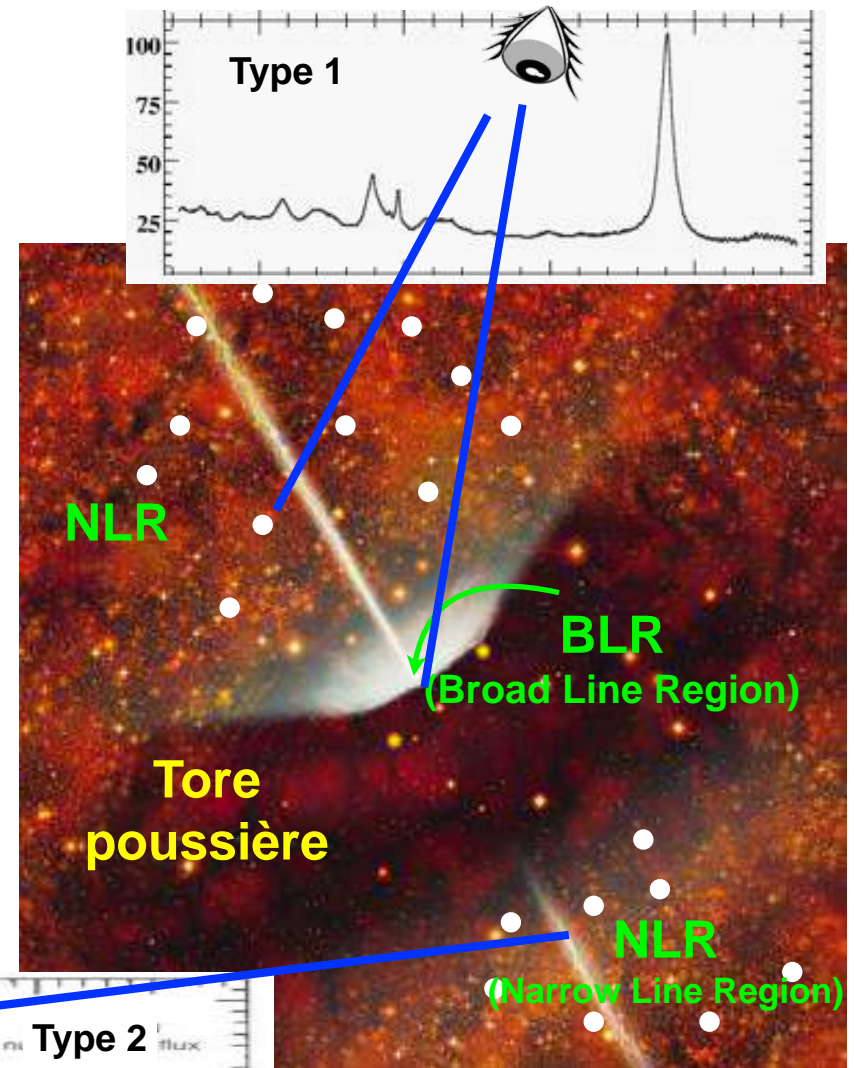
Le Modèle d'Unification

- 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

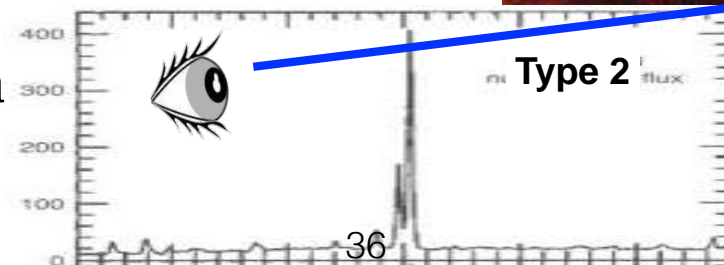


Le Modèle d'Unification

- 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

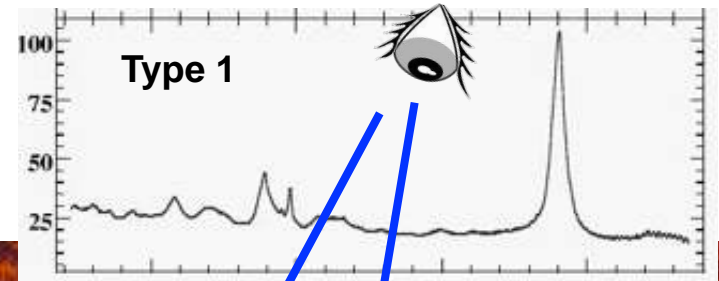
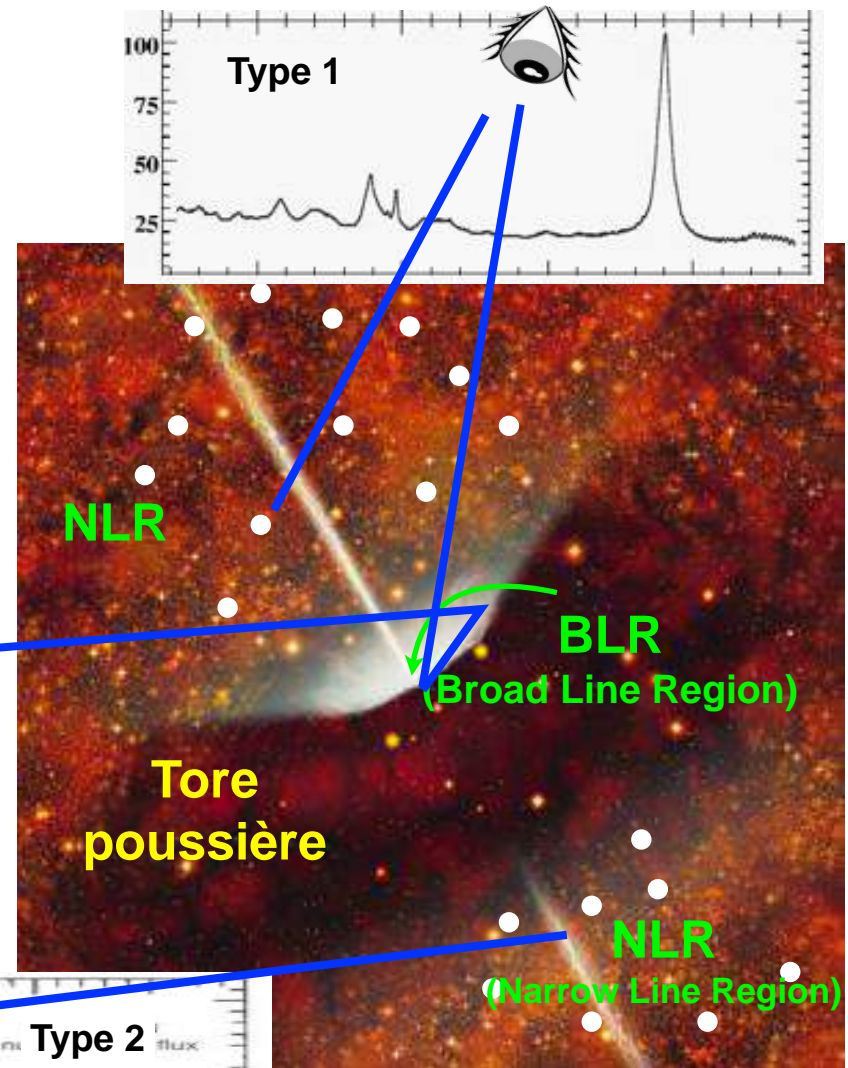
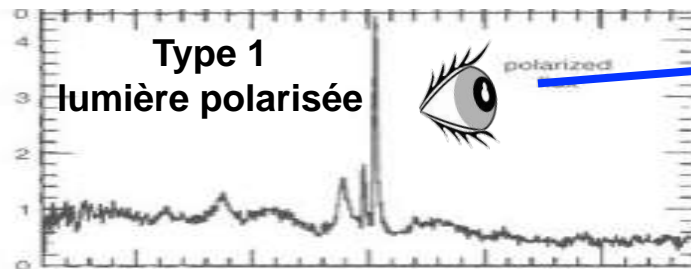


- A grand angle seule la NLR est visible

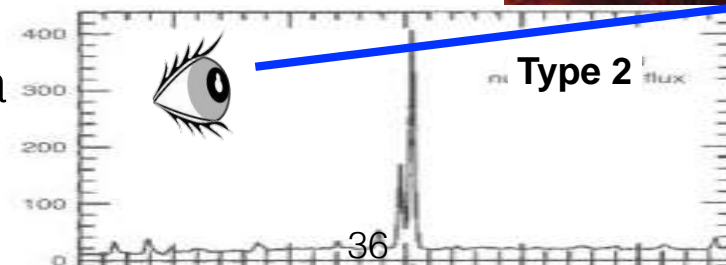


Le Modèle d'Unification

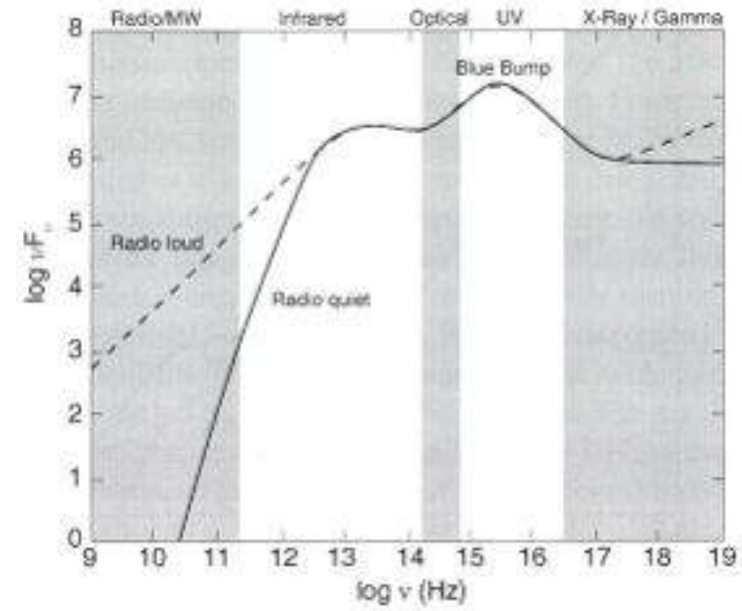
- Les raies larges proviennent de la BLR (Broad Line Region), proche du trou noir. Les raies étroites de la NLR (Narrow Line Region), bien plus loin du trou noir
- A grand angle, seule la lumière provenant de la BLR et réfléchi (i.e. polarisée) sur la matière environnante serait visible



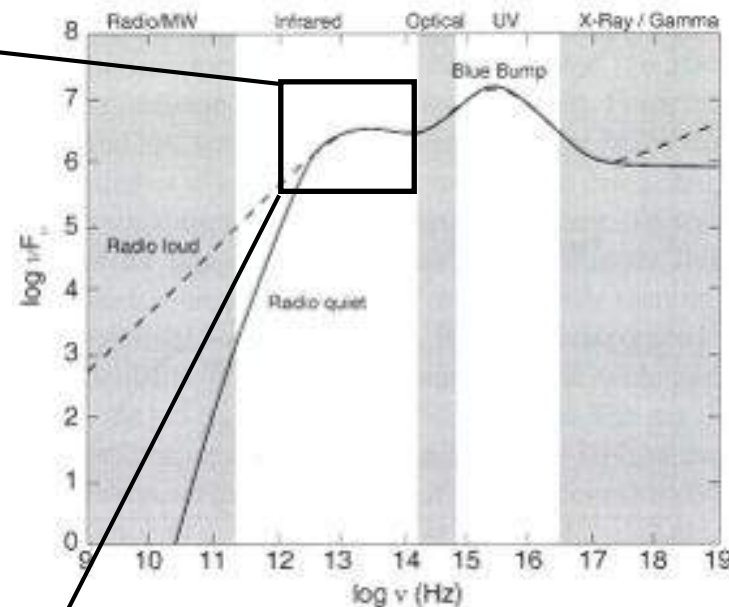
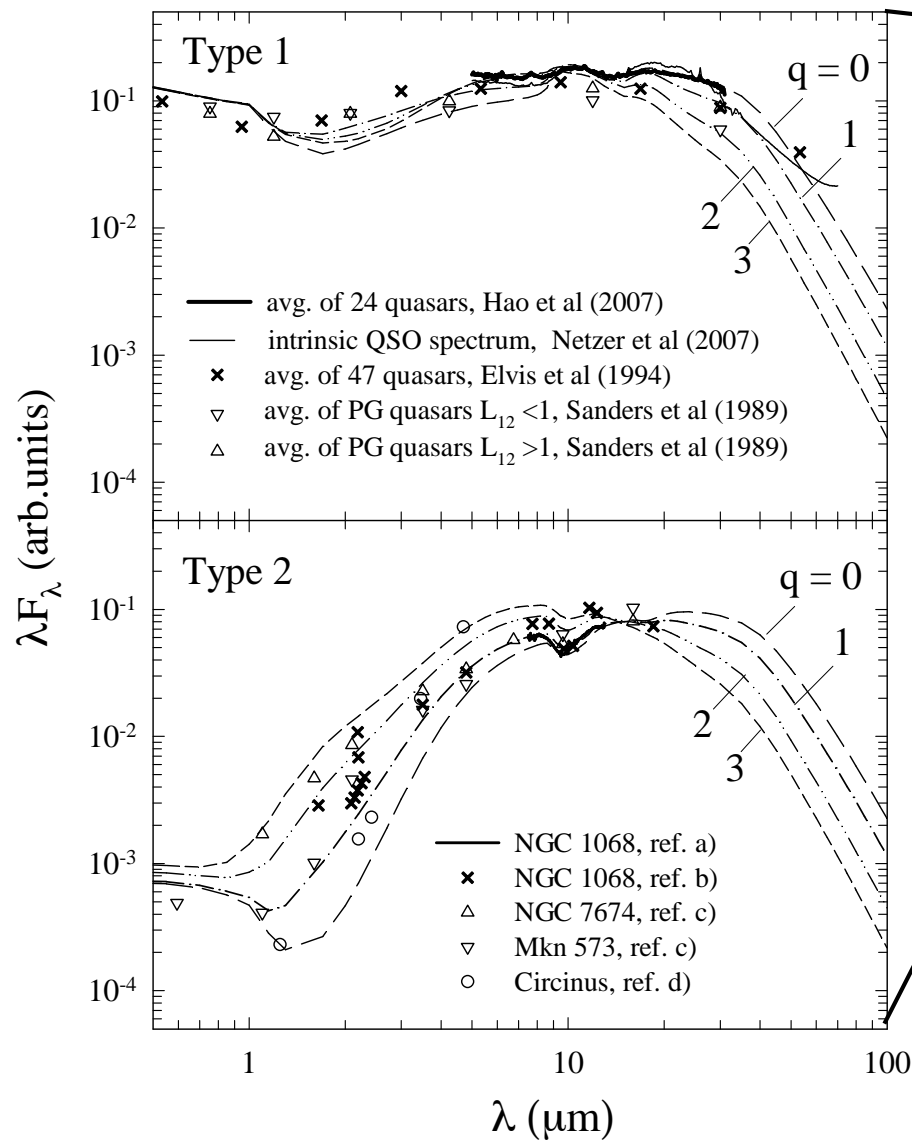
- A grand angle seule la NLR est visible



Une Forte Emission IR



Une Forte Emission IR



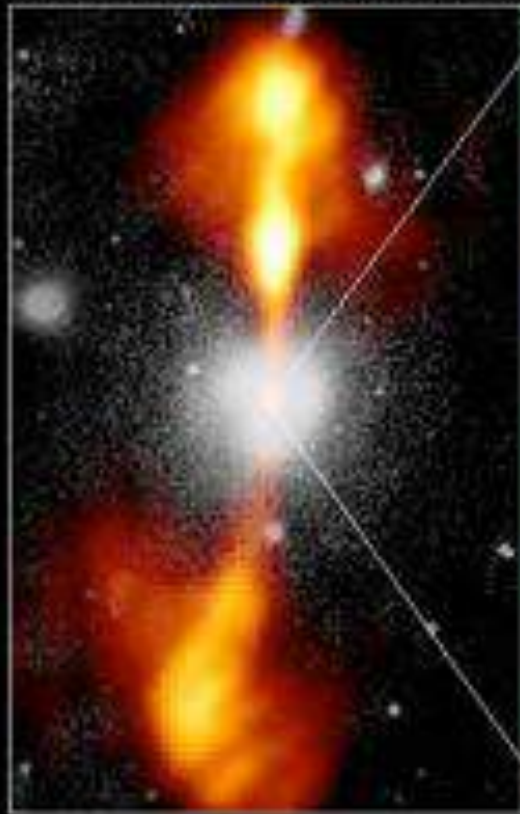
- Signatures de poussières chaudes (raies silicates en absorption)
- Peu compatibles avec un tore, mais plutôt avec un ensemble de petits nuages

Core of Galaxy NGC 4261

Hubble Space Telescope

Wide Field / Planetary Camera

Ground-Based Optical/Radio Image

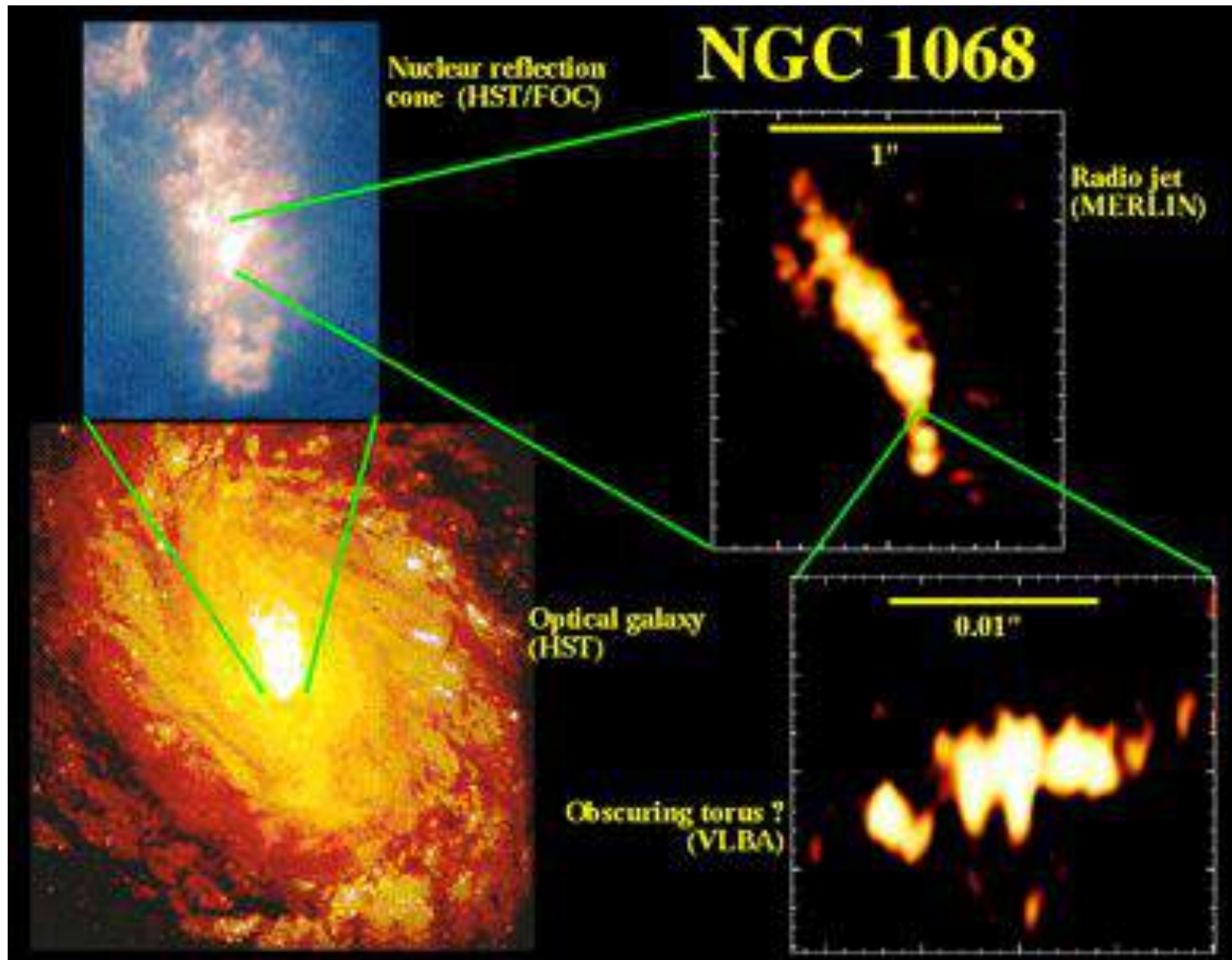


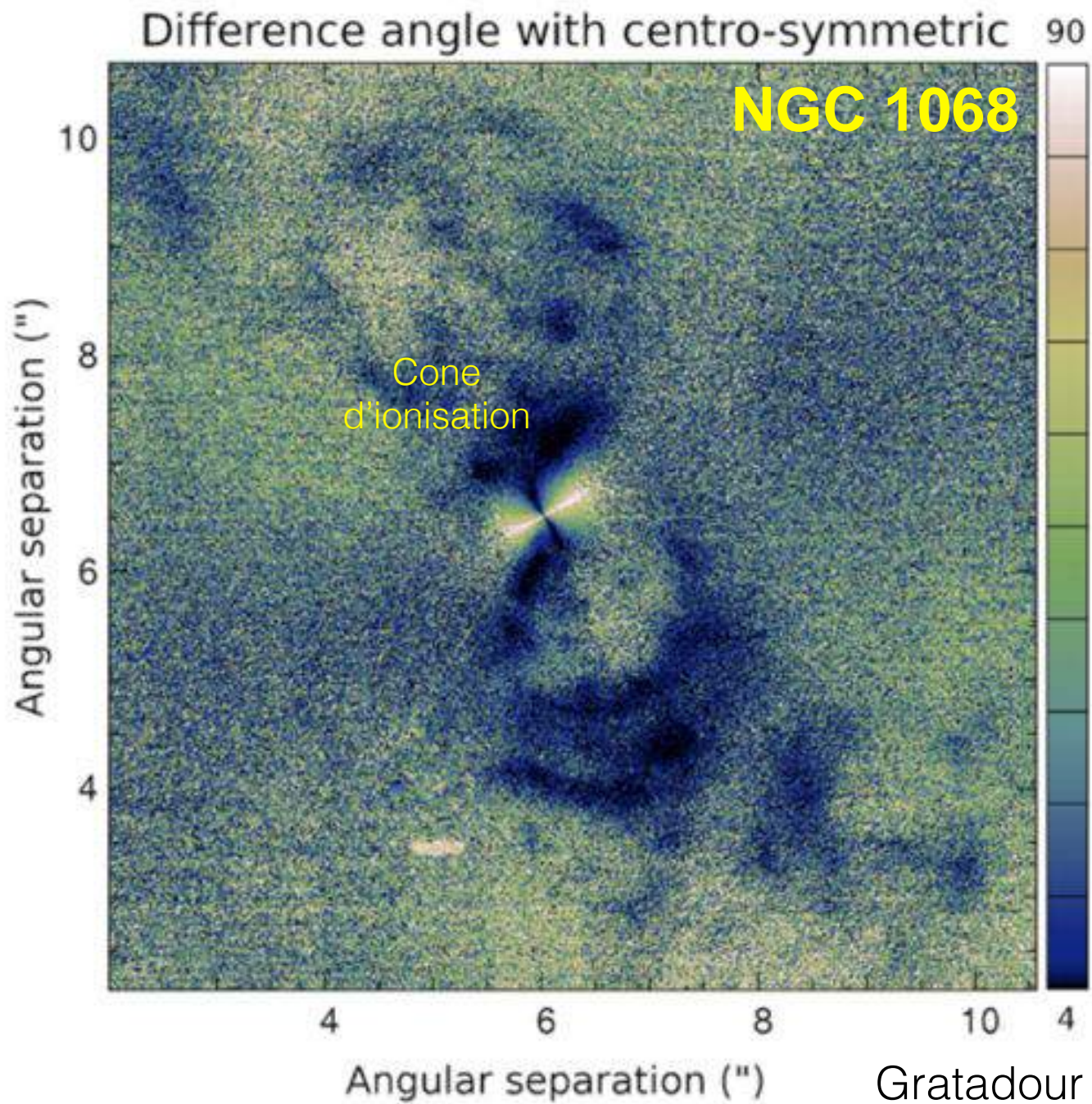
380 Arc Seconds
88,000 LIGHTYEARS

HST Image of a Gas and Dust Disk

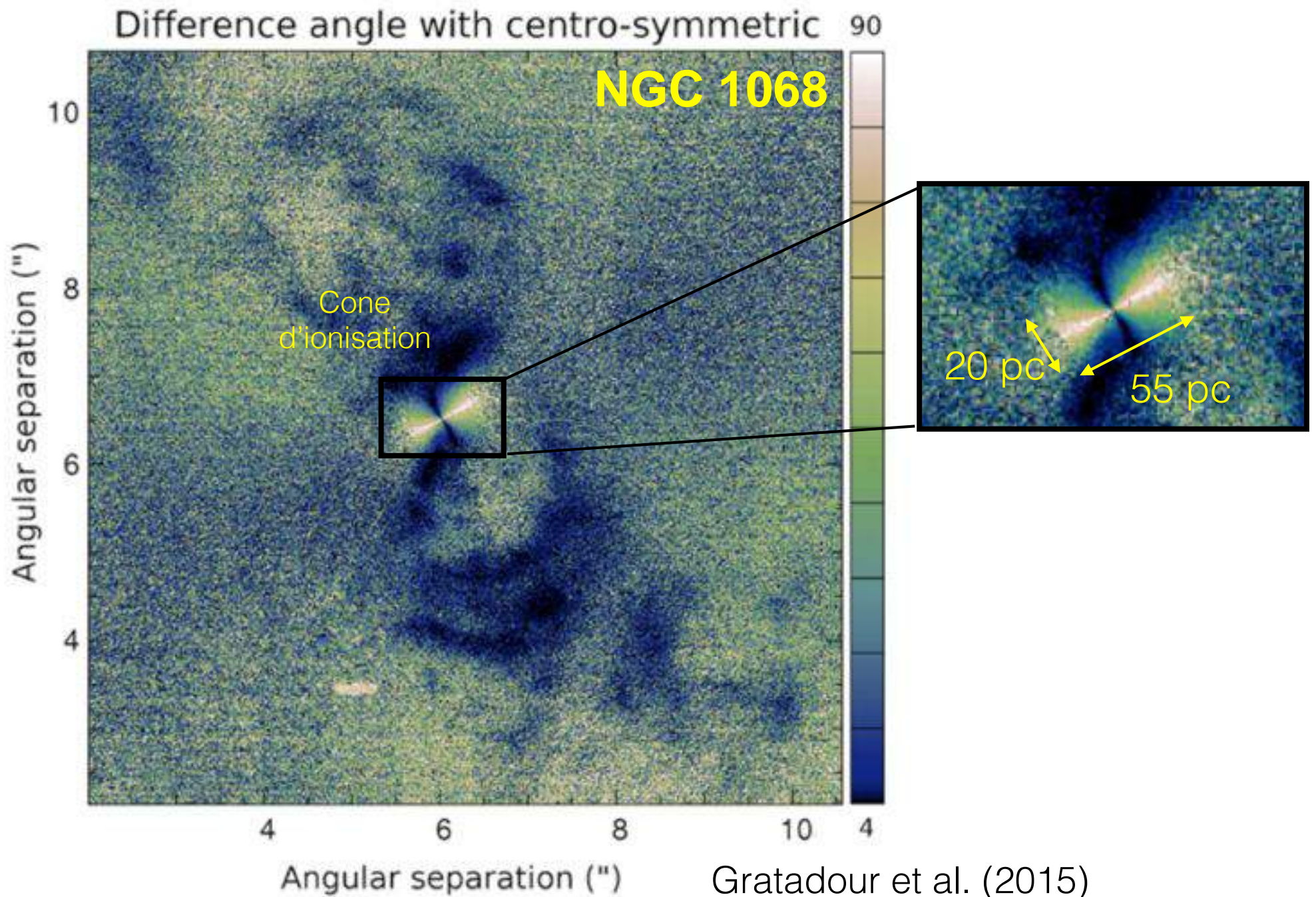


17 Arc Seconds
400 LIGHTYEARS





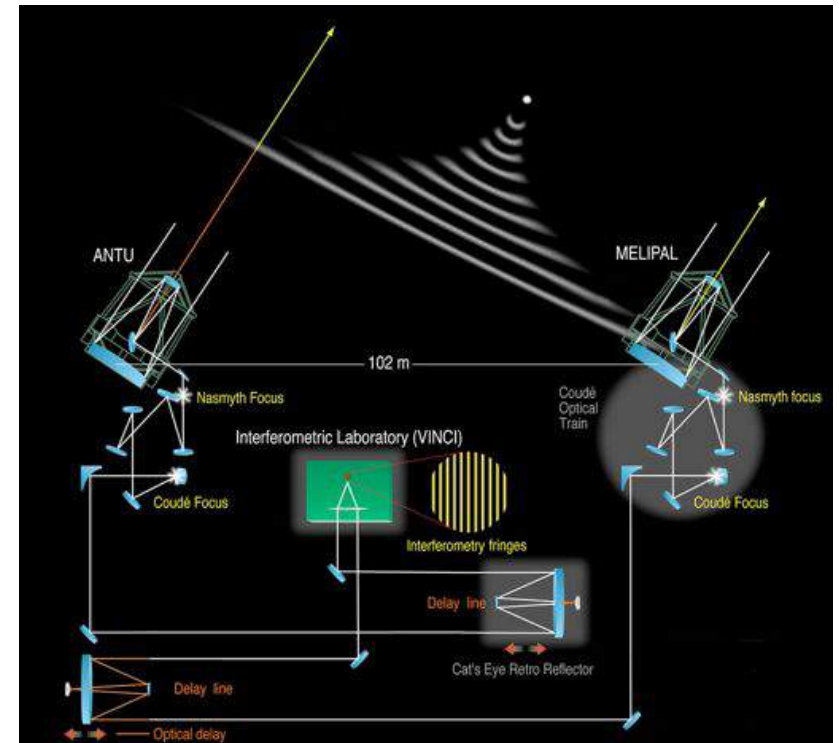
Gratadour et al. (2015)



L'Aide de l'Interférométrie

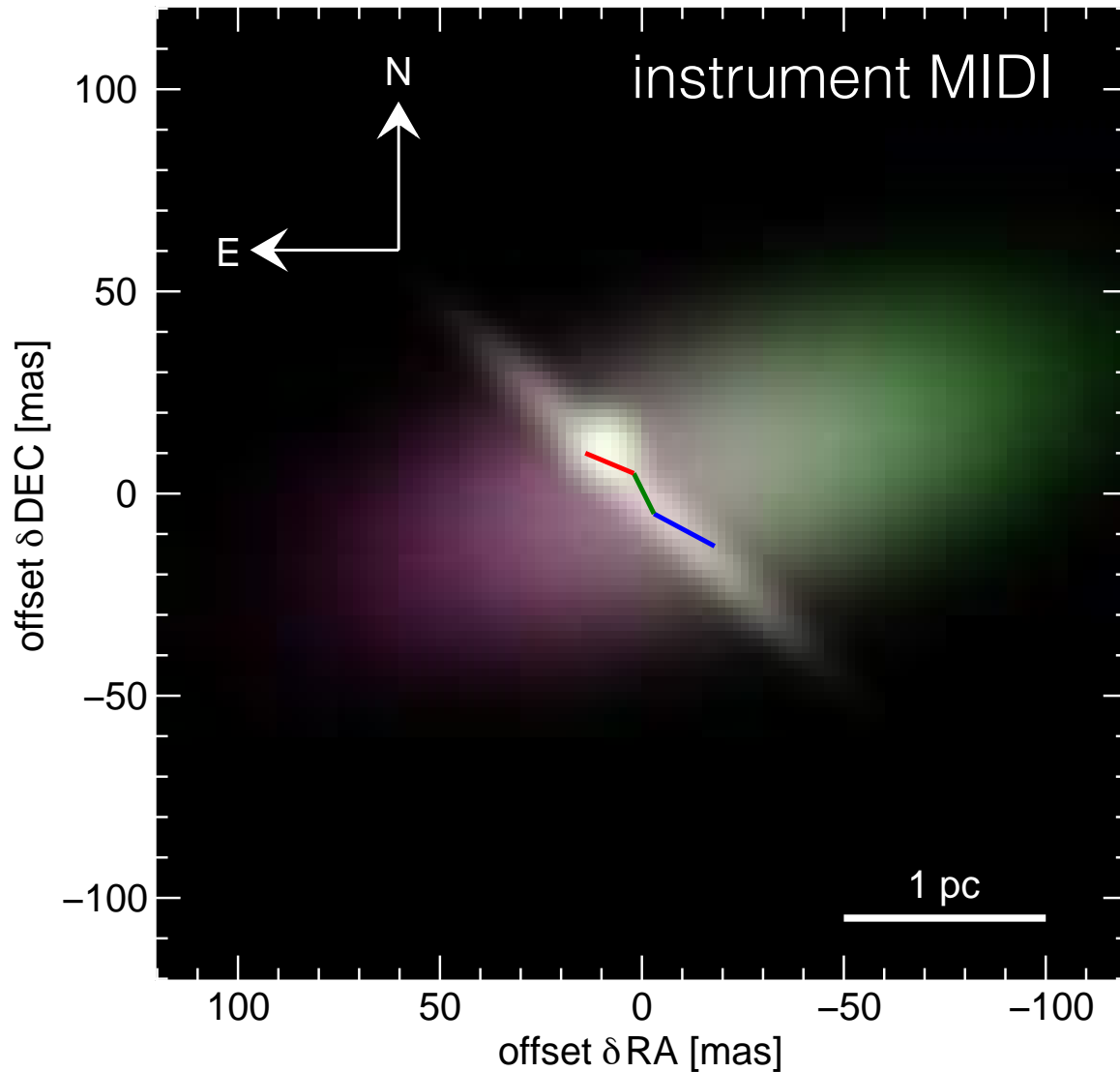


VLT, Paranal, Chili



Une Structure Complexe

3 component model of the Circinus dust emission

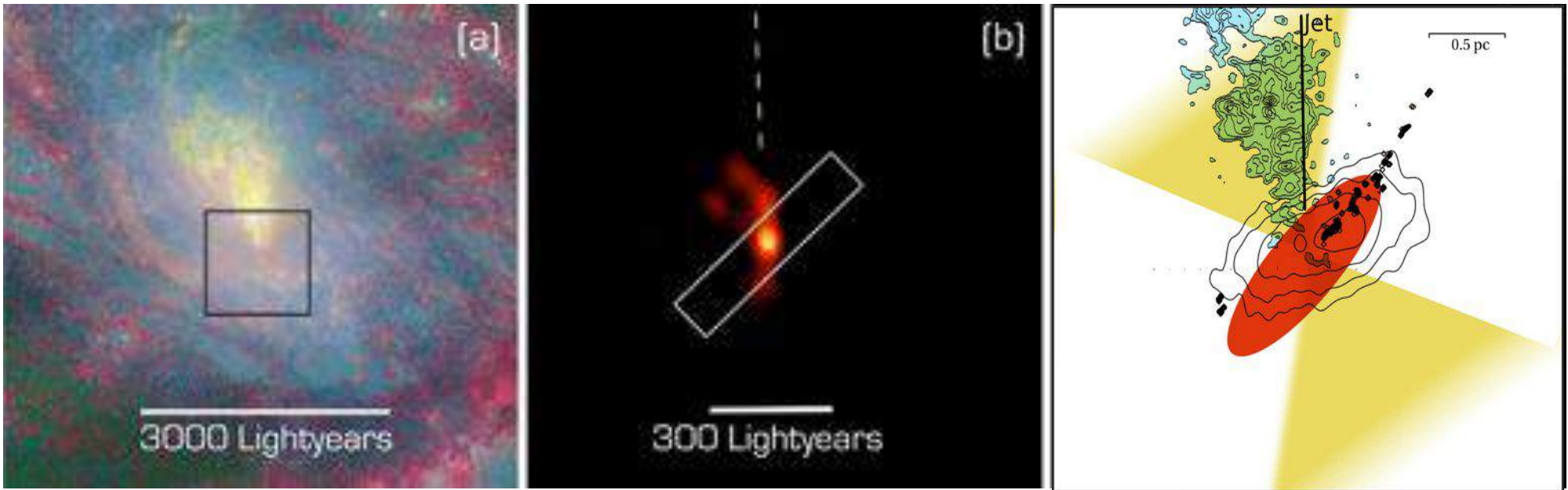


L'émission IR peut se décomposer en 3 composantes:

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

Une Structure Complexe

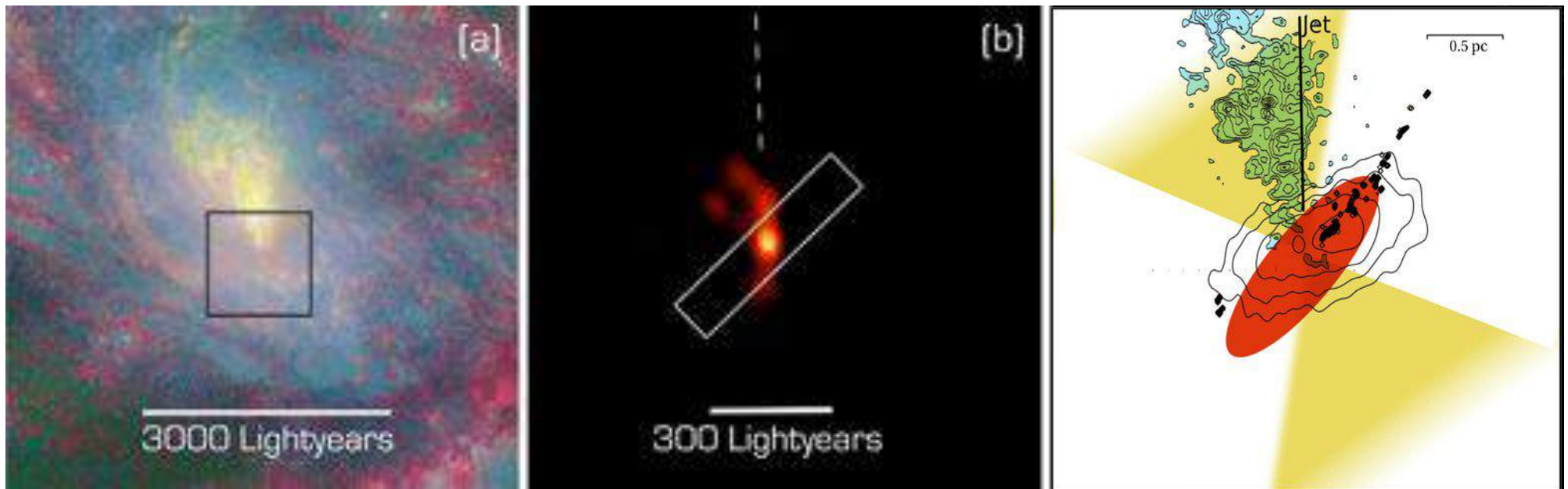
NGC 1068



Raban et al. (2008)

Une Structure Complexe

NGC 1068



Raban et al. (2008)

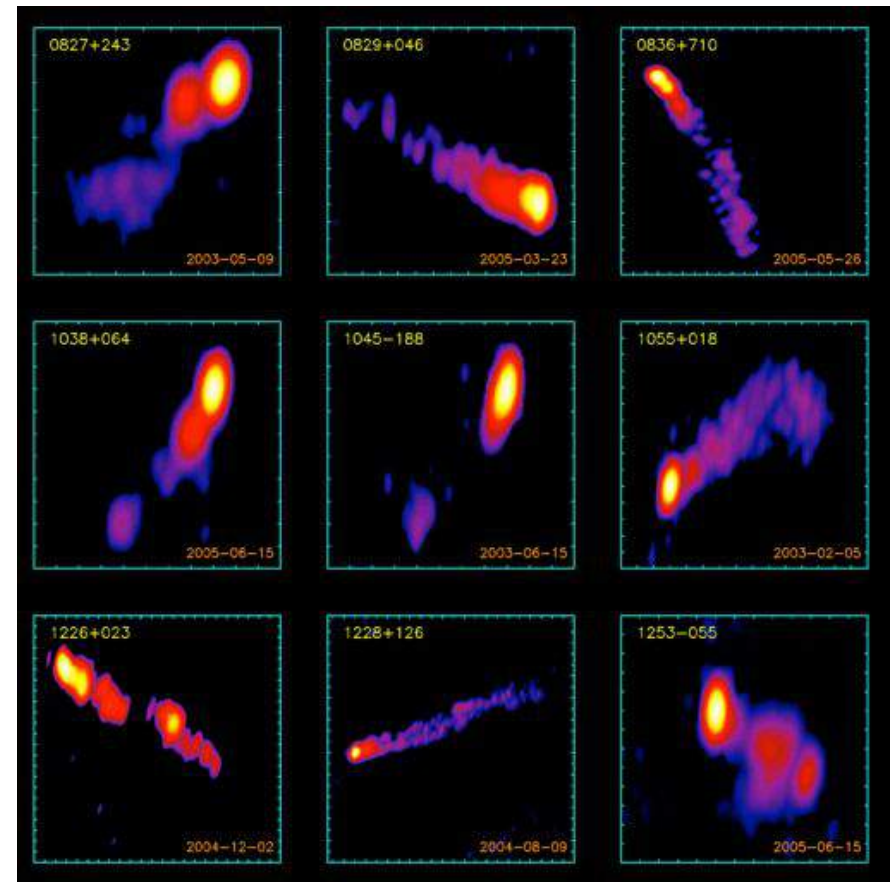
Interféromètres de 2nd génération (tel que Gravity),
combinant 4 télescopes, devraient apporter de
nouveaux résultats bientôt

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)



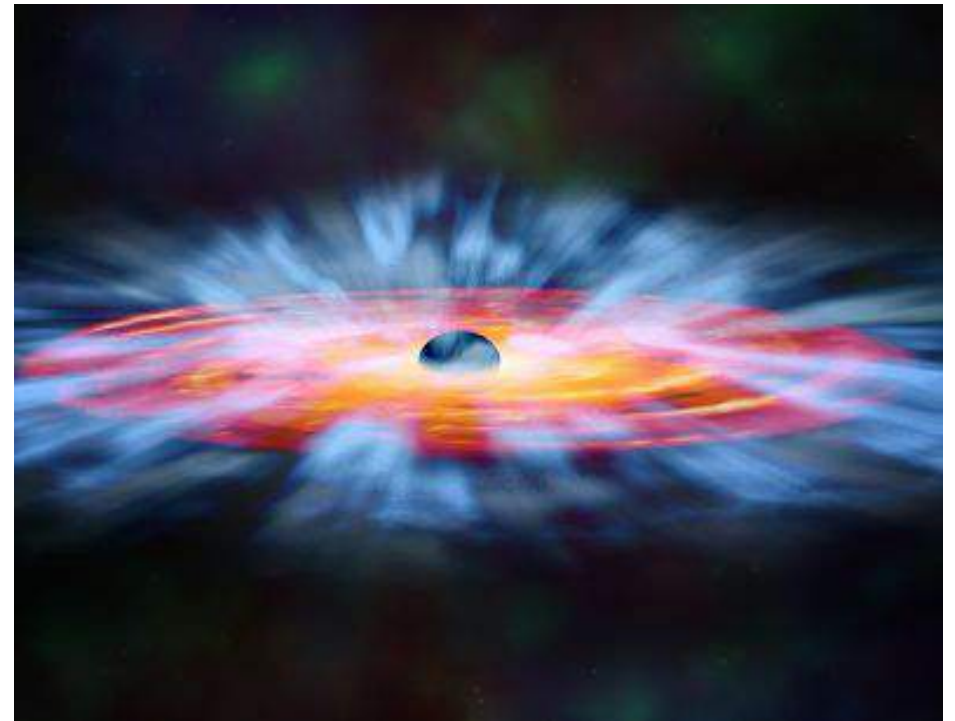
Projet MOJAVE

Des Jets, des Vents

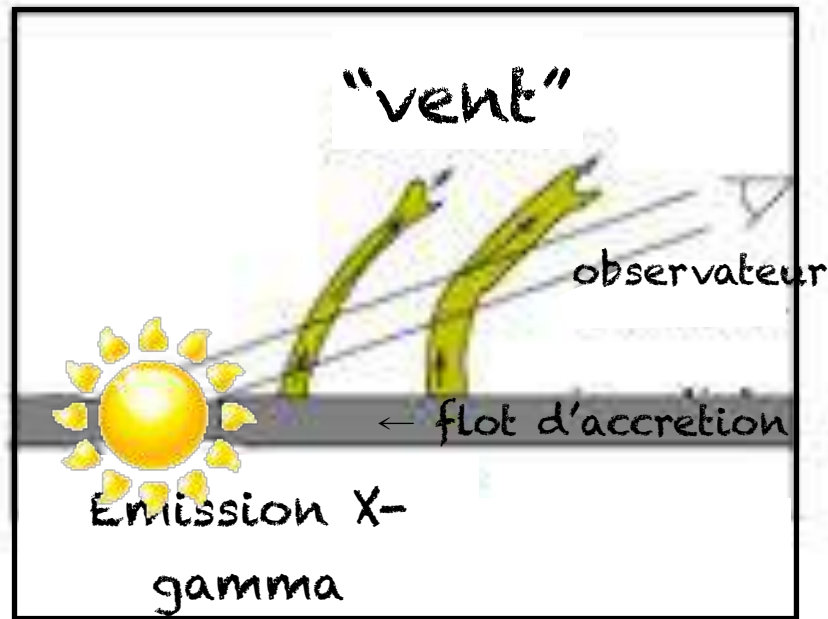
- Certains NAG ($\sim 10\%$) possèdent des jets rapides ($\sim c$), très collimatés

(cf. prochain séminaire de G. Henri)

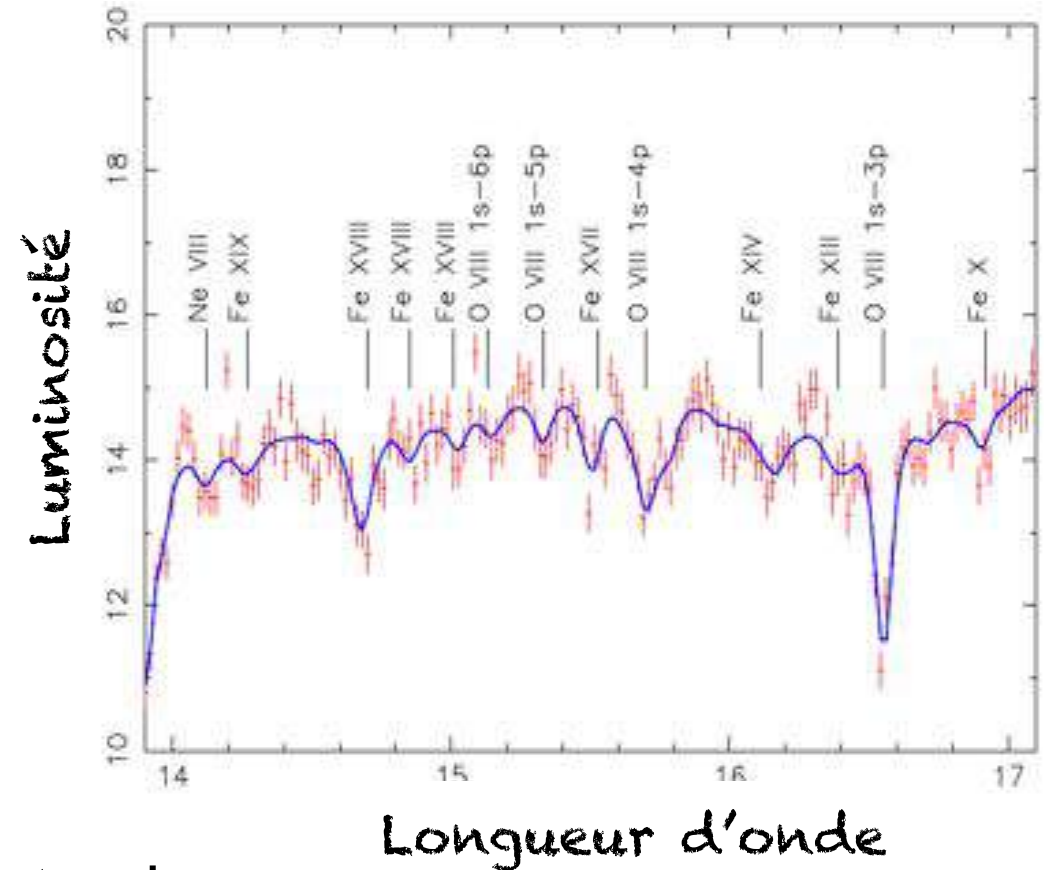
- La majorité ne possède que des vents plus lents (10^2 - 10^4 km/s)



Des Vents Ionisés



Ex: Mkn 509



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

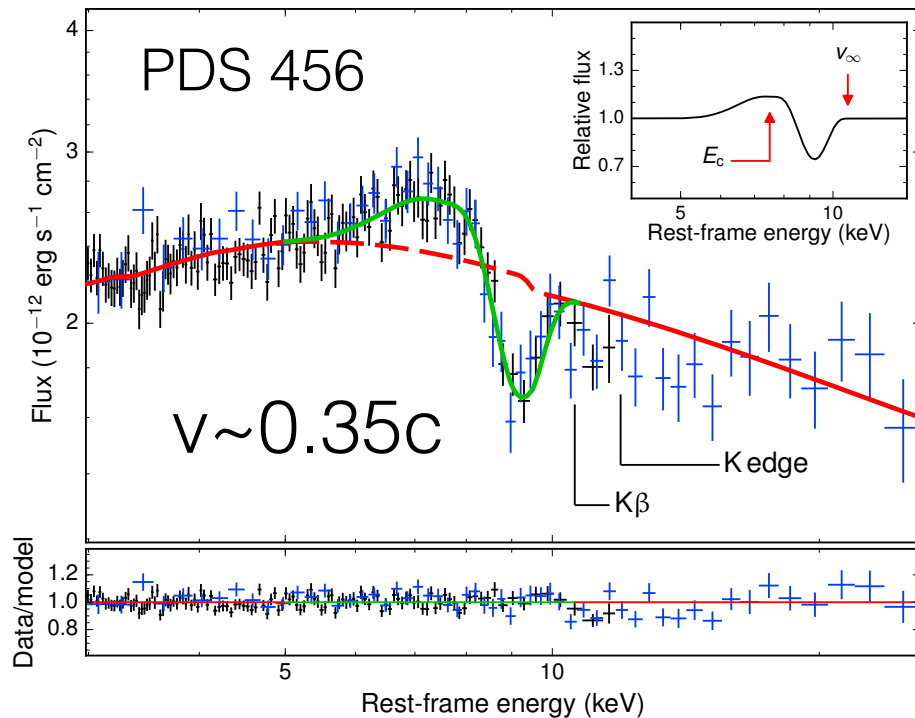
Des Vents Ionisés

Des Vents 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

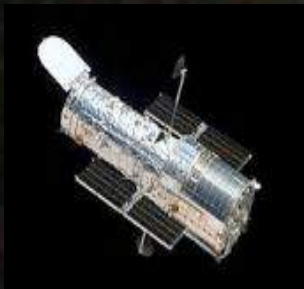
Observation de NGC 5548

240 millions
d'années lumière
de la Terre

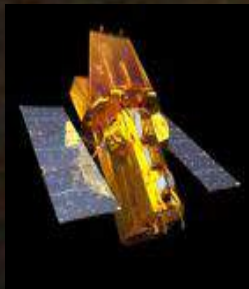
Observation de NGC 5548

240 millions
d'années lumière
de la Terre

Hubble



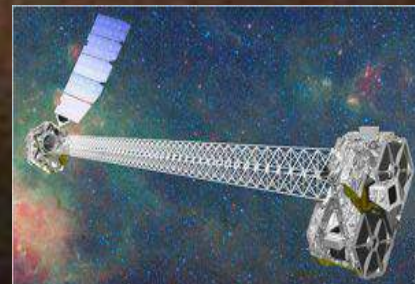
Swift



XMM



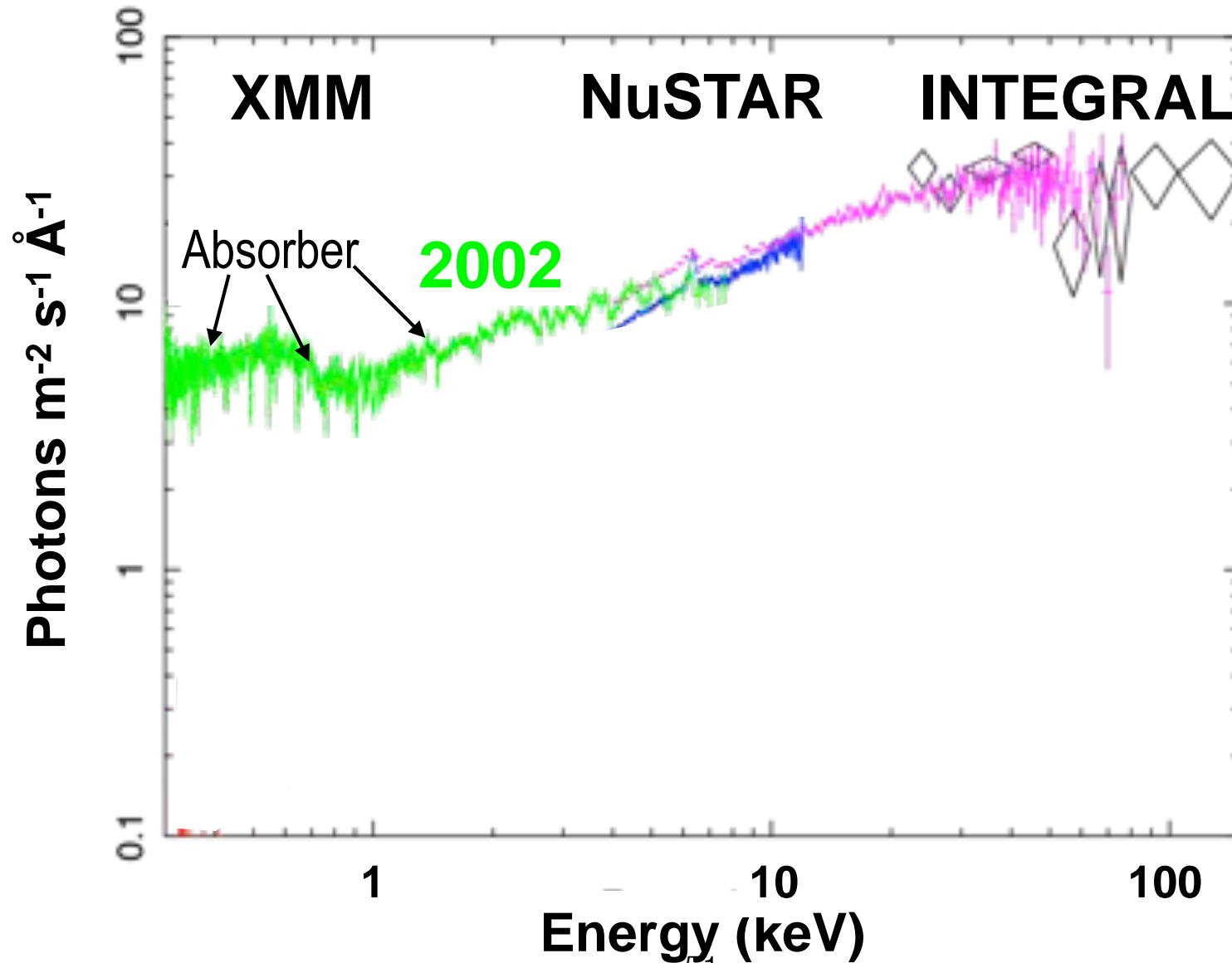
NuSTAR



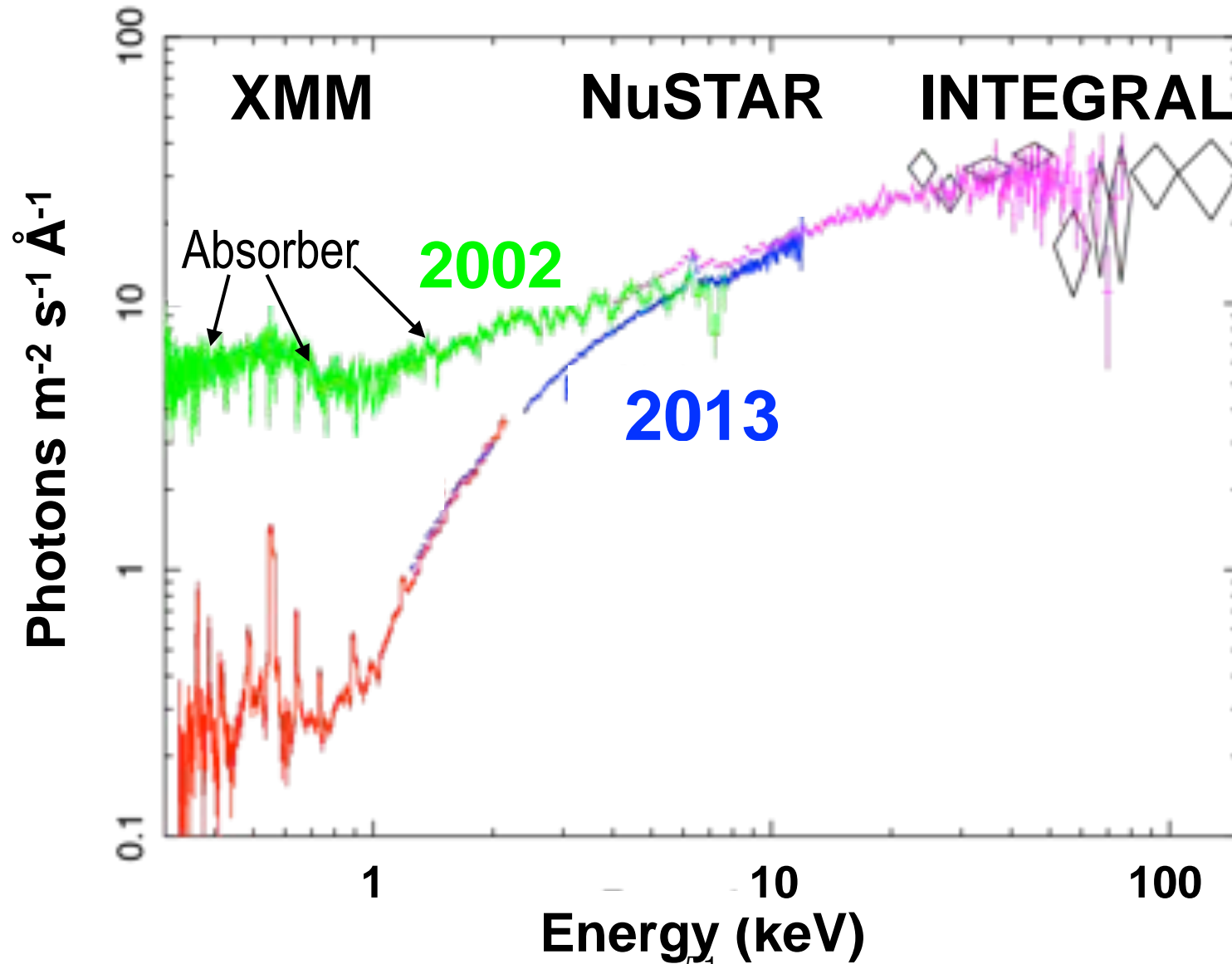
INTEGRAL



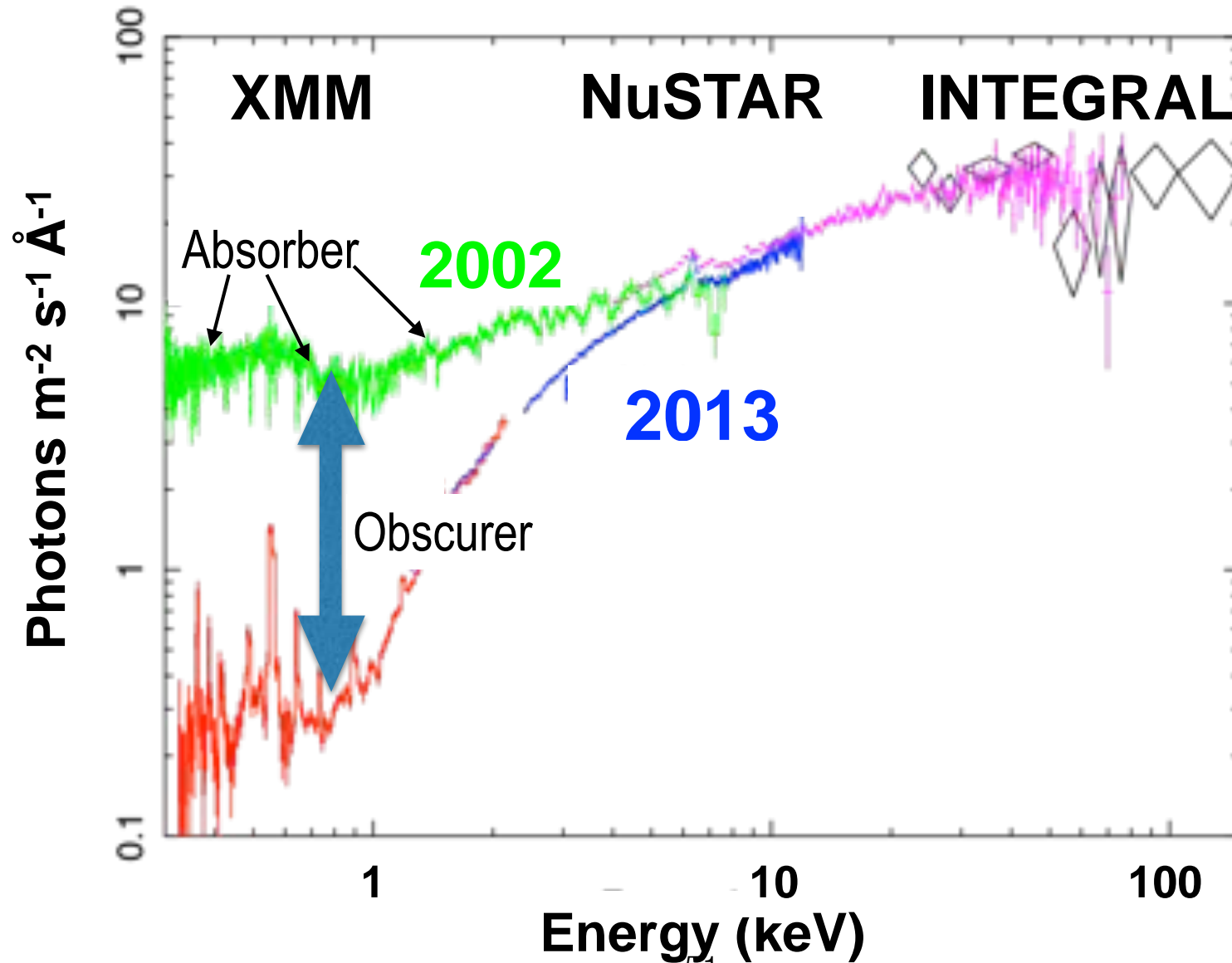
Obscuration



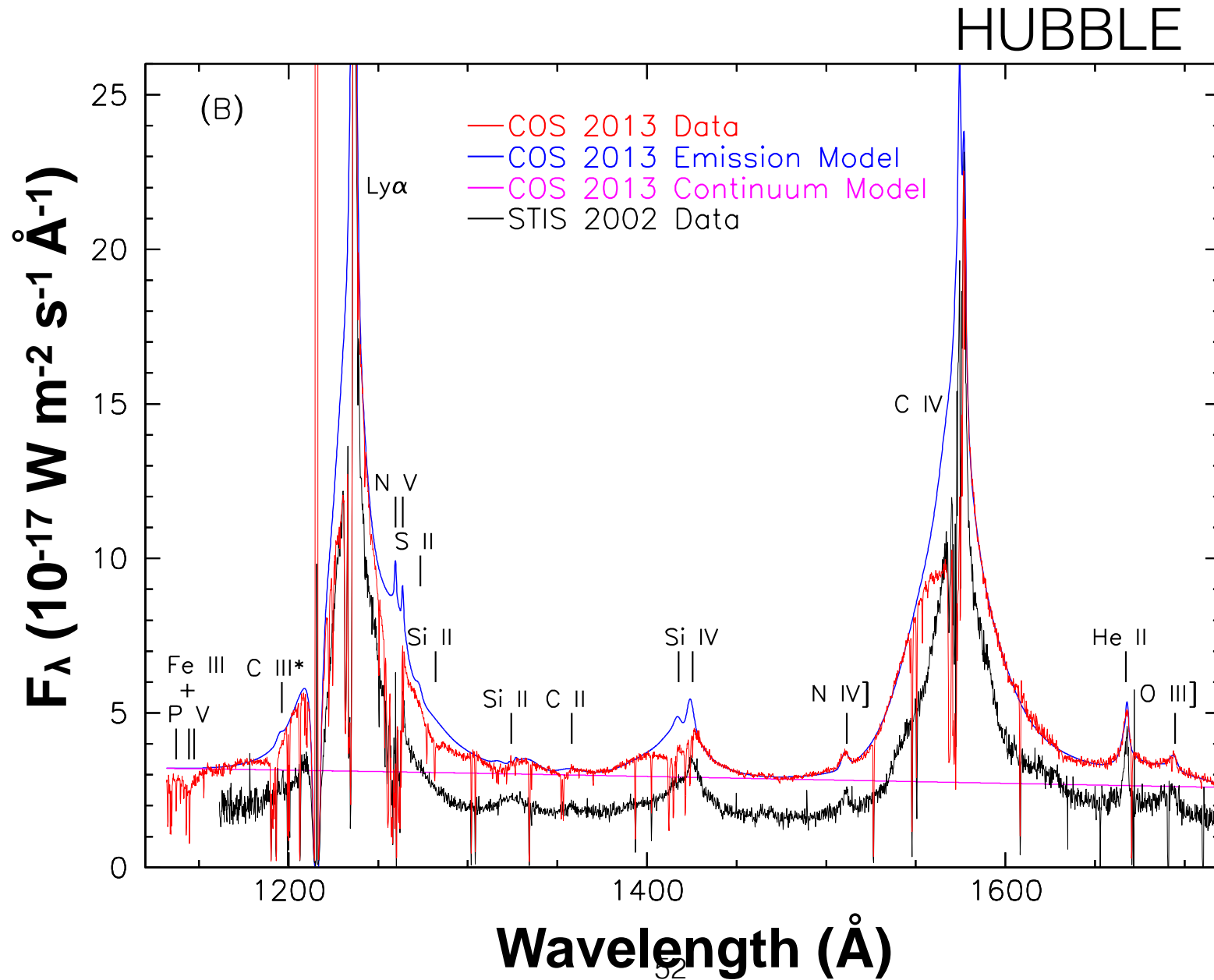
Obscuration



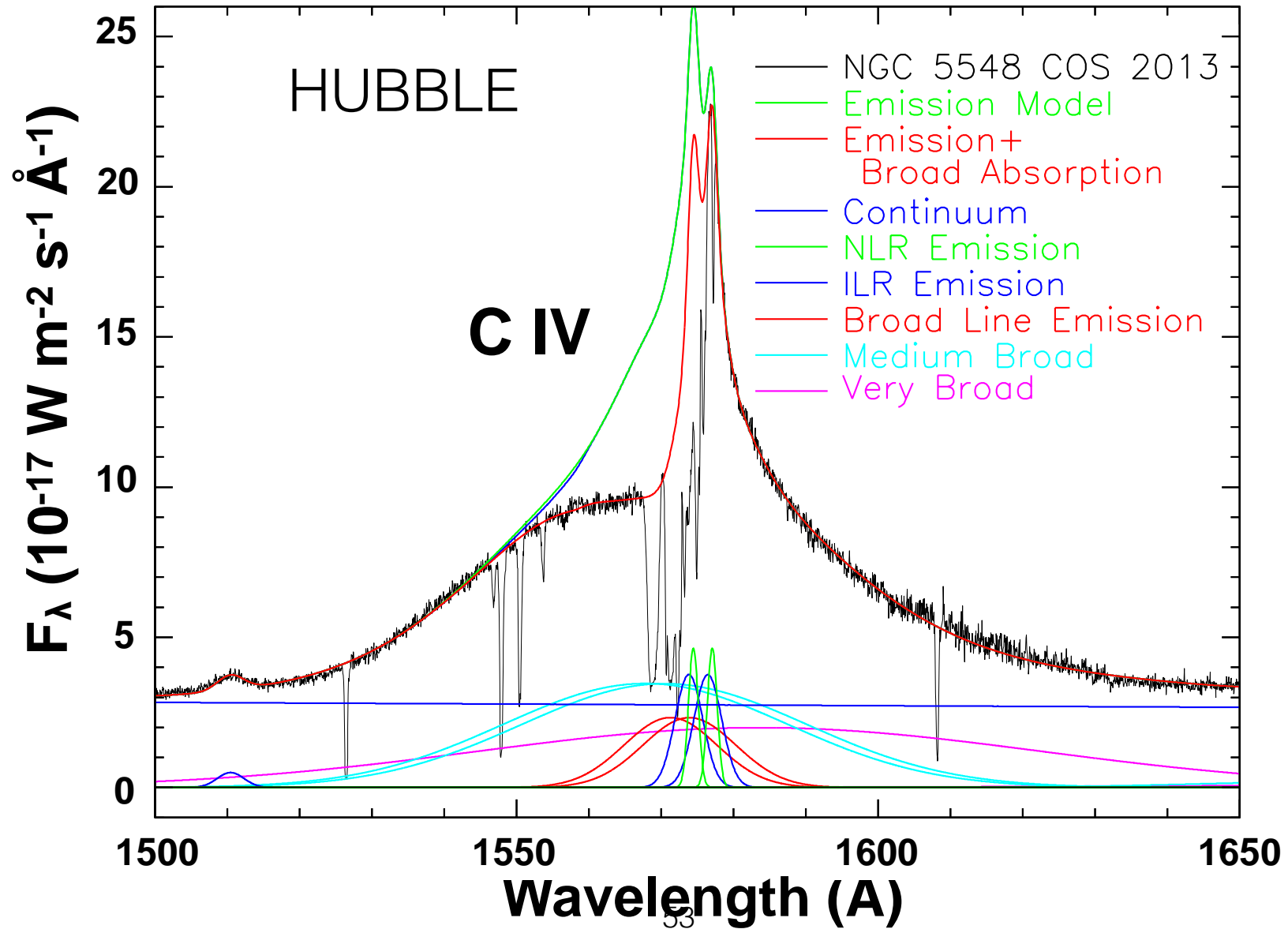
Obscuration



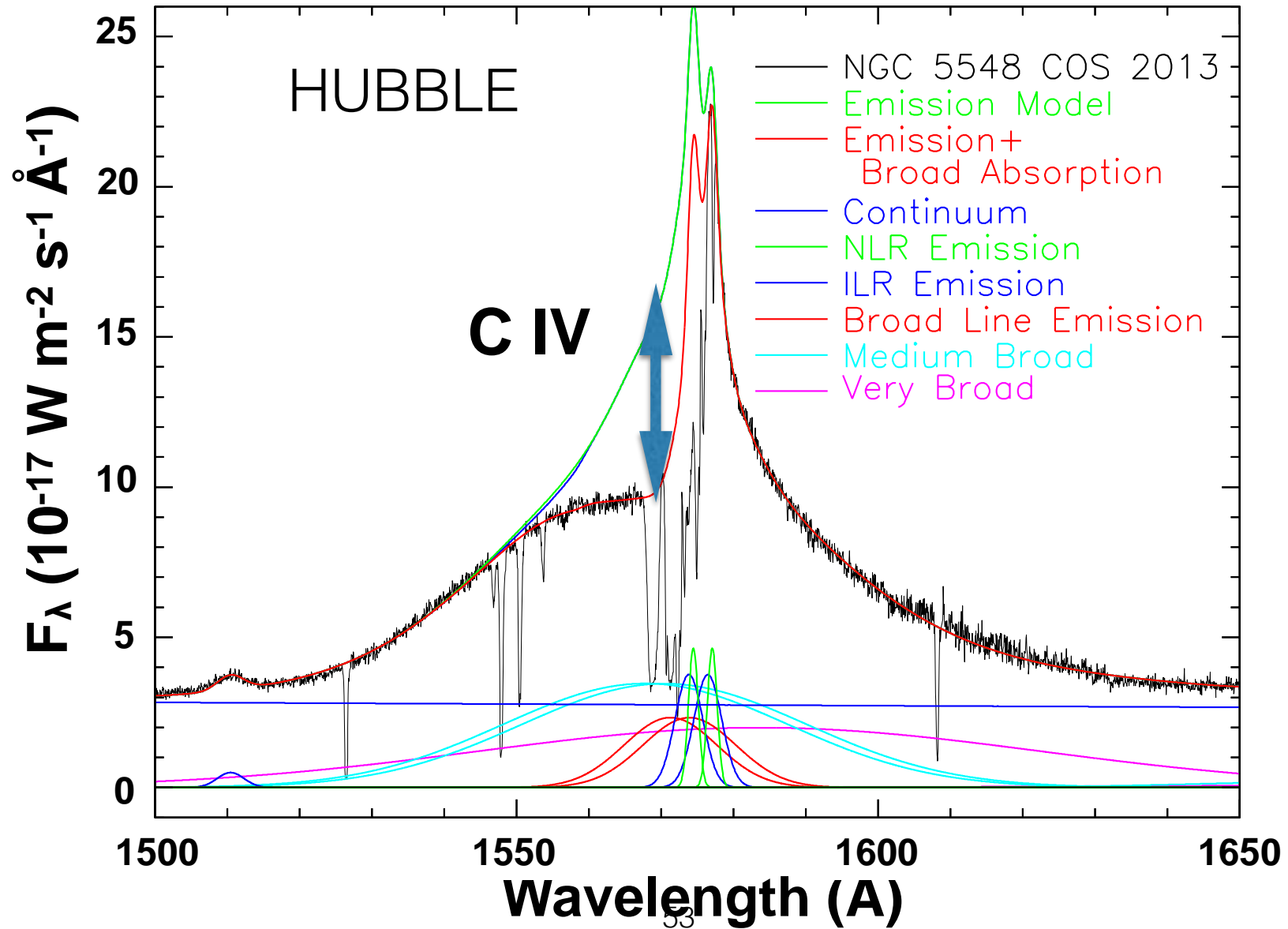
Obscuration



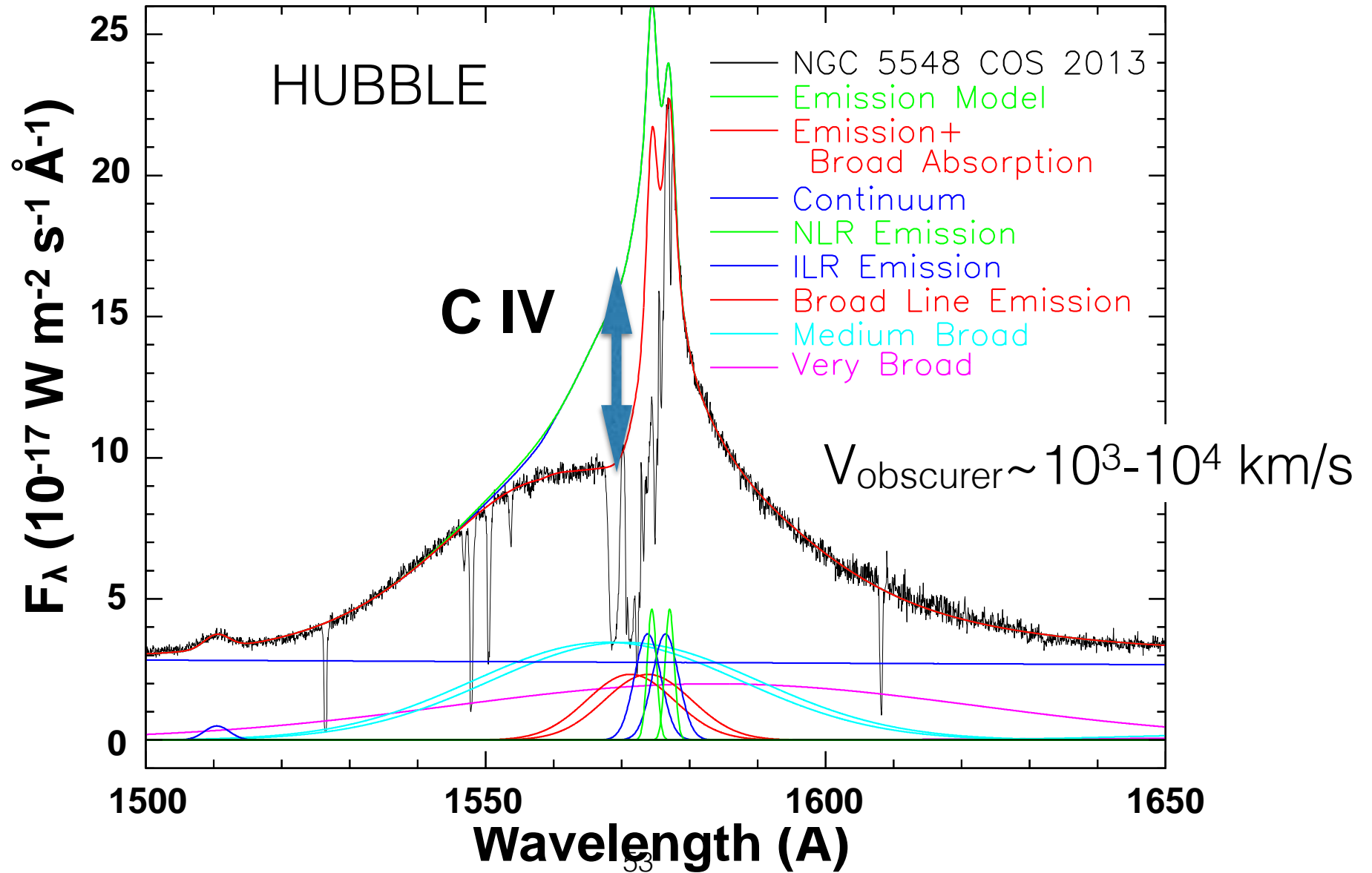
Obscuration



Obscuration



Obscuration



Effet d'écran

AGN

2002

Absorber

Observateur



Effet d'écran

AGN

2002

Absorber

Observateur



2013



Effet d'écran

AGN

2002

Absorber

Observateur



2013

Obscurer



Effet d'écran

AGN

2002

Absorber

Observateur

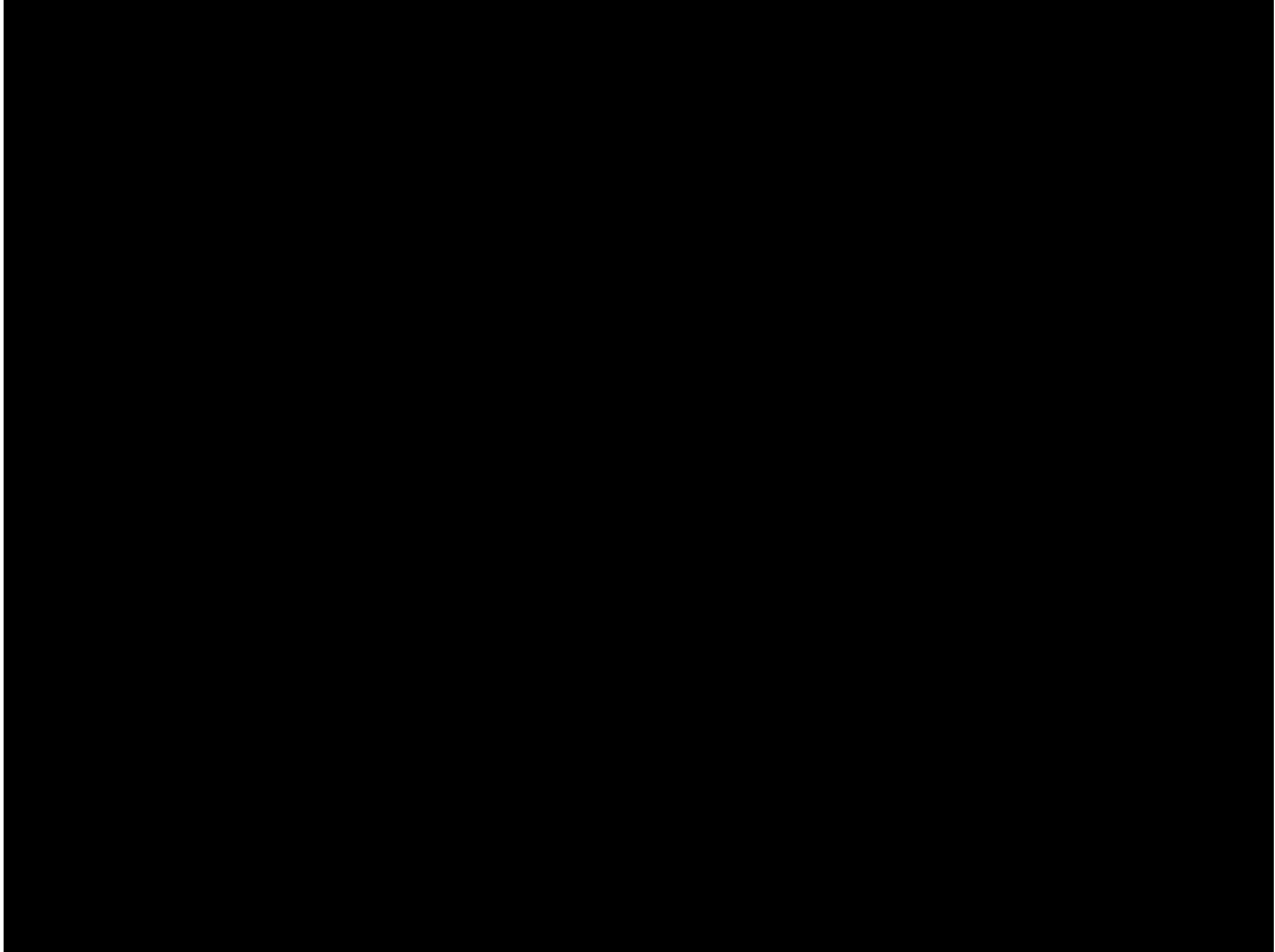


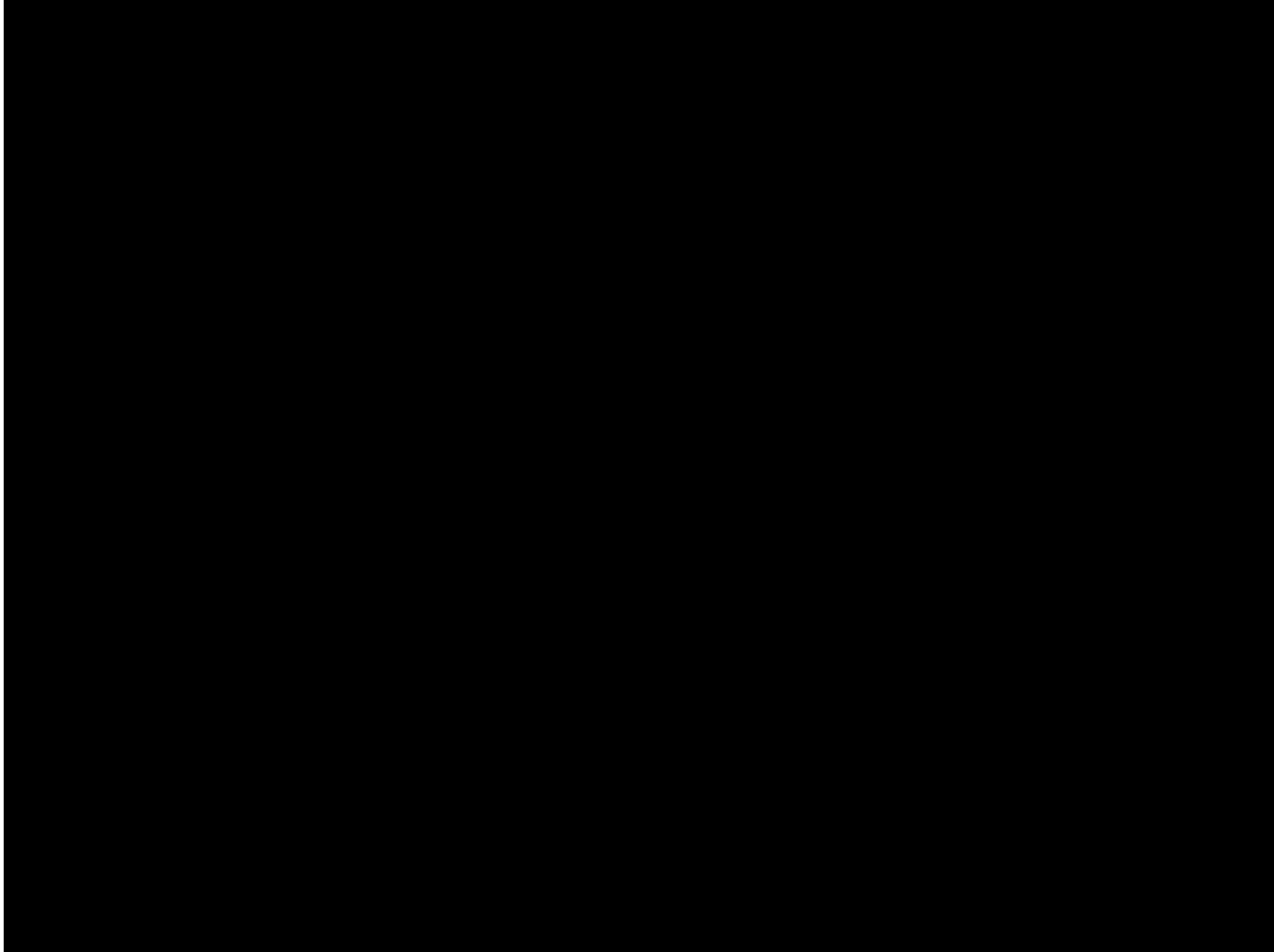
2013

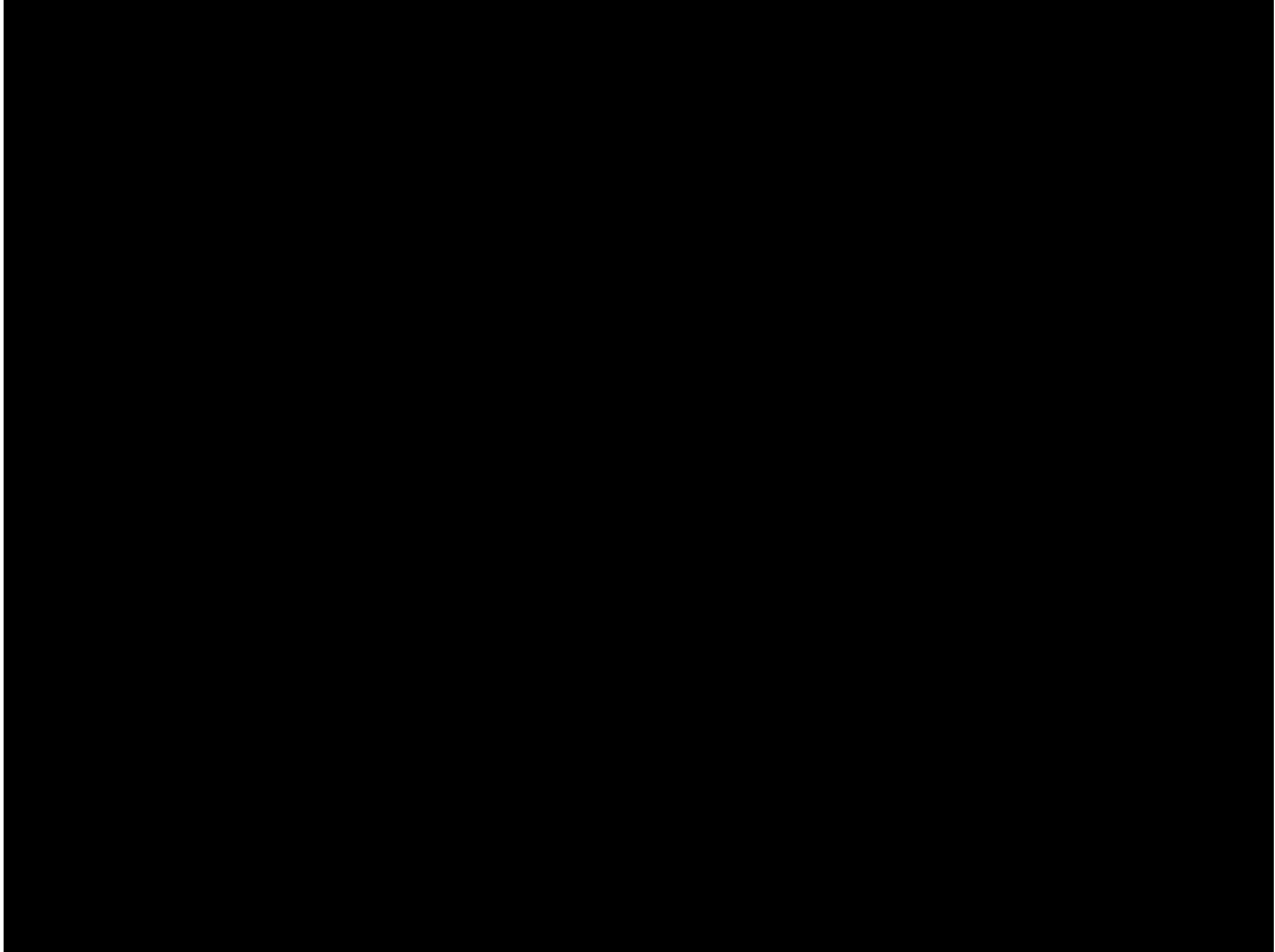
Obscurer



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







A photograph of a starry night sky with the word "MERCI!" overlaid in yellow. The sky is filled with numerous stars of varying brightness and colors, including white, yellow, and red. The text "MERCI!" is centered in the image in a bold, yellow, sans-serif font.

MERCI!

A photograph of a starry night sky, likely a star cluster or galaxy, with the word "MERCI!" overlaid in yellow text. The stars are of various colors, including white, yellow, and red, and are scattered across the dark background. The text "MERCI!" is centered in the image.

MERCI!