



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Chaire Galaxies et Cosmologie

Les noyaux qui changent de look

Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Aperçu de l'exposé

→ Les noyaux de type 1, 2, ou NLS1

→ Certains changent!

→ Les causes

→ Les quasars à haut redshift

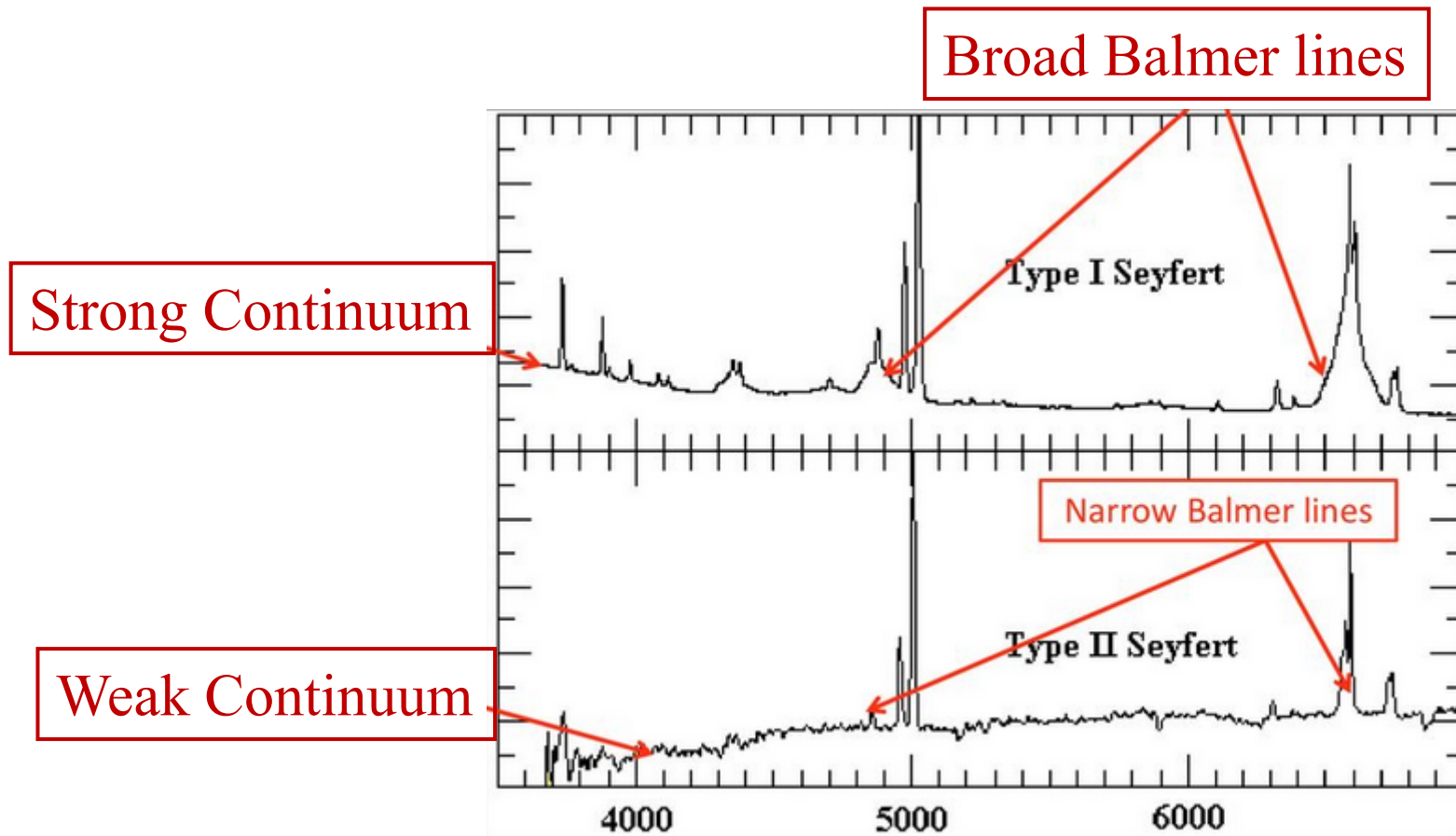
→ Polarisation

→ Modélisation

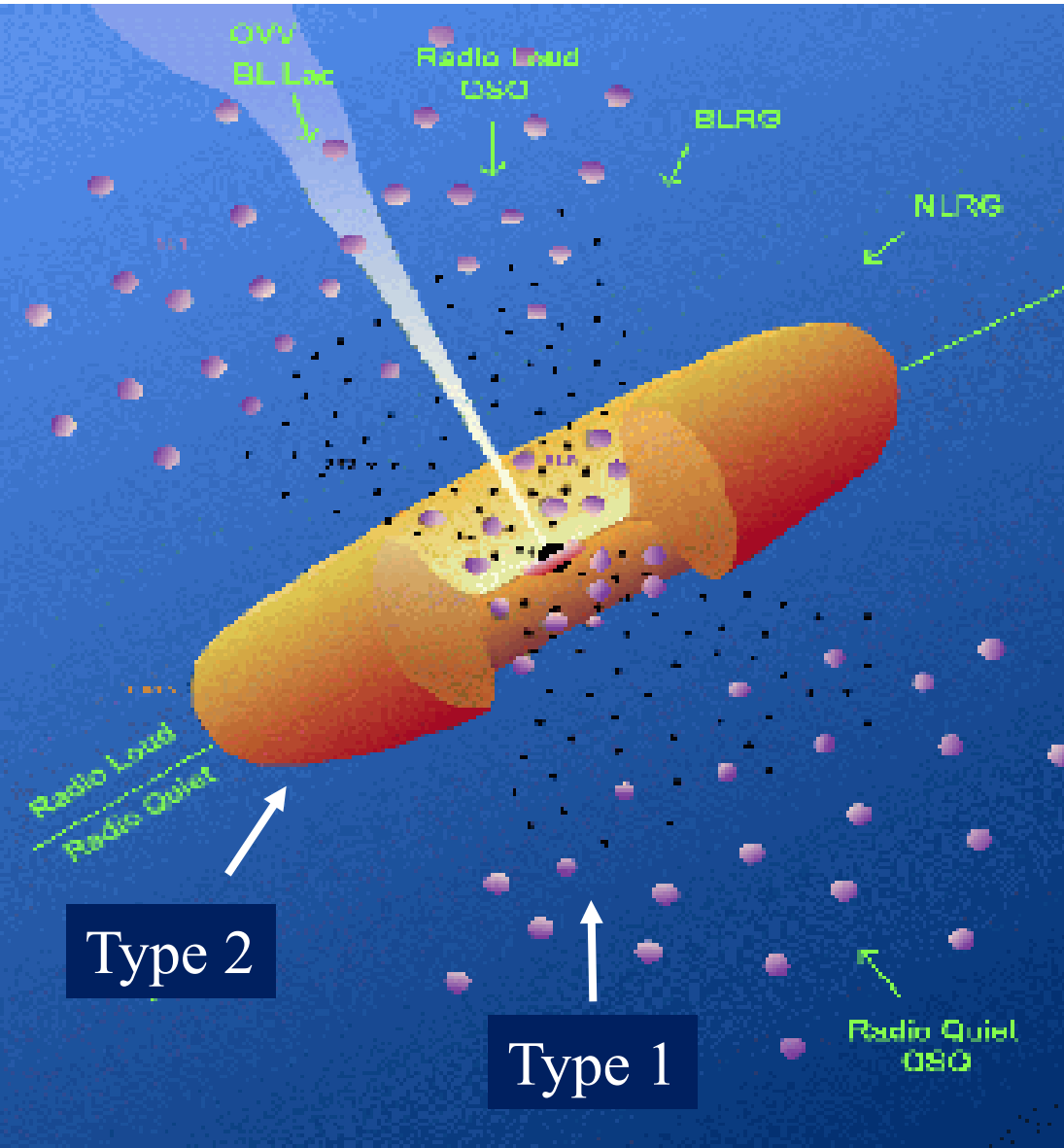


Les divers types d'AGN

AGN de Type 1 et 2: existence ou non de raies larges (BLR)
Accompagnées par un fort continuum



Unification par la géométrie



Interprétation
liée à l'angle de vue

**Les Sy 2 voient leur BLR
obscurcie par la
poussière**

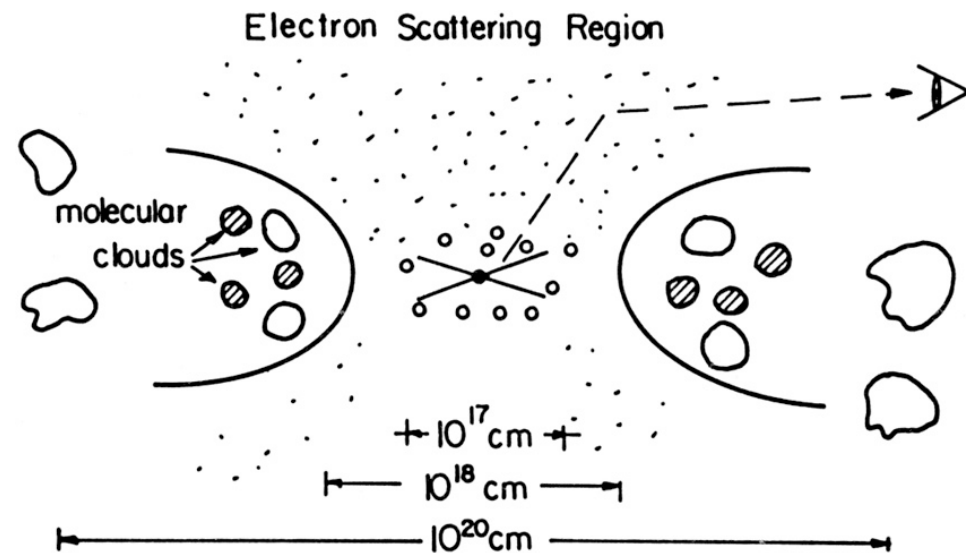
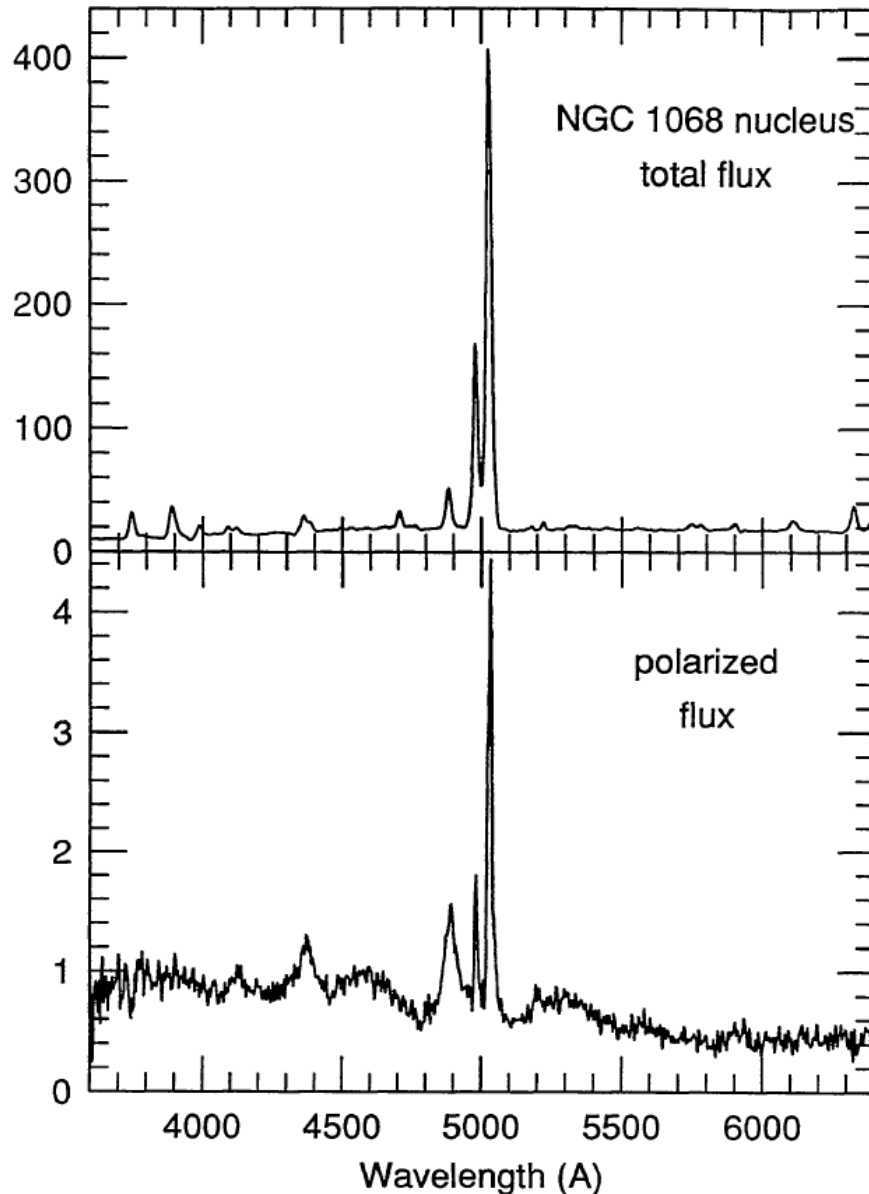
Confirmé par les
mesures de polarisation

➔ Mais plusieurs
différences intrinsèques
(gaz et poussière plus
abondants en Type 2)

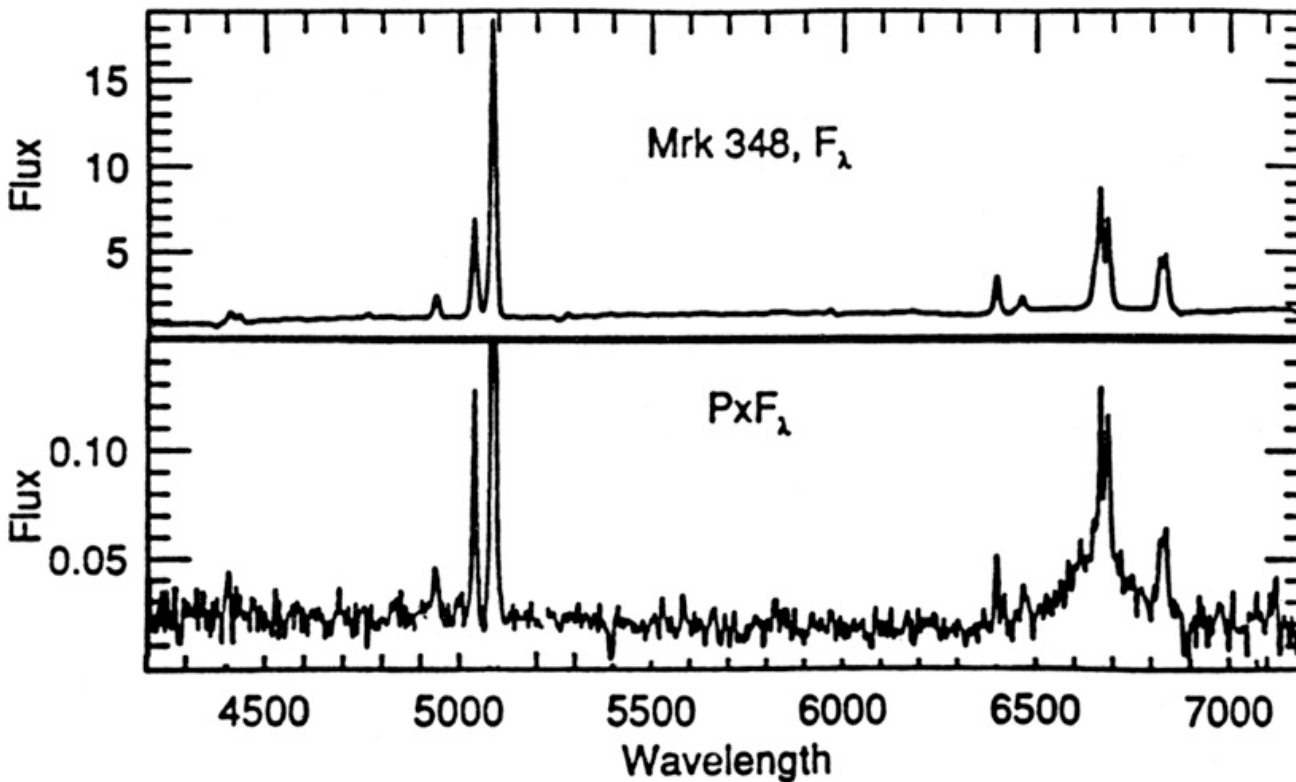
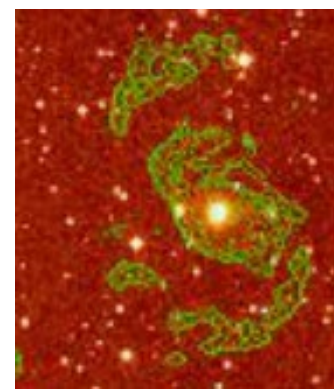
NGC 1068, Sy 2, test de polarisation



**En lumière polarisée
réfléchi sur les électrons de la
zone ionisée,
on aperçoit la BLR**



Mrk 348, Sy 2



**En lumière polarisée
la BLR cachée se
révèle**

Mais seulement 50%

Miller & Goodrich 1990

➔ 50% des Sy 2 n'ont pas de BLR cachée

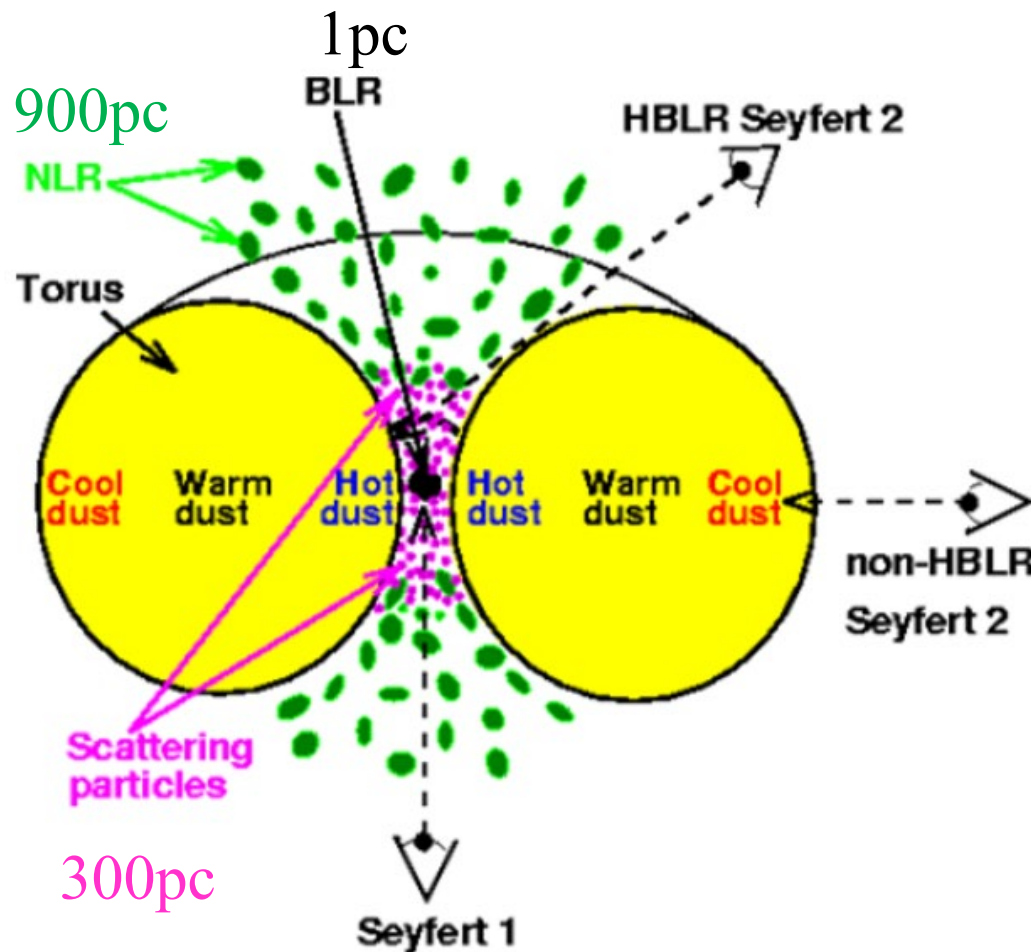
D'autre part, certaines galaxies varient de Sy 1 à Sy 2:

le disque d'accrétion disparaît? Des nuages obscurcissent dans le tore?

Ou bien Sy1 à raies étroites obscurcies? Manque de polariseur?

Combien de Sy1 cachées?

Selon l'ouverture du tore de poussière, la lumière polarisée ne sort pas



Seulement 35% des Sy2
pourrait révéler une BLR?

Association avec l'infrarouge
Moins d'extinction, plus chaud
→ Plus de BLR détectées

Heisler et al 1997

Il existe des différences
intrinsèques
**Sy2: plus de formation
d'étoiles, de gaz**

Sublimation du tore de poussière

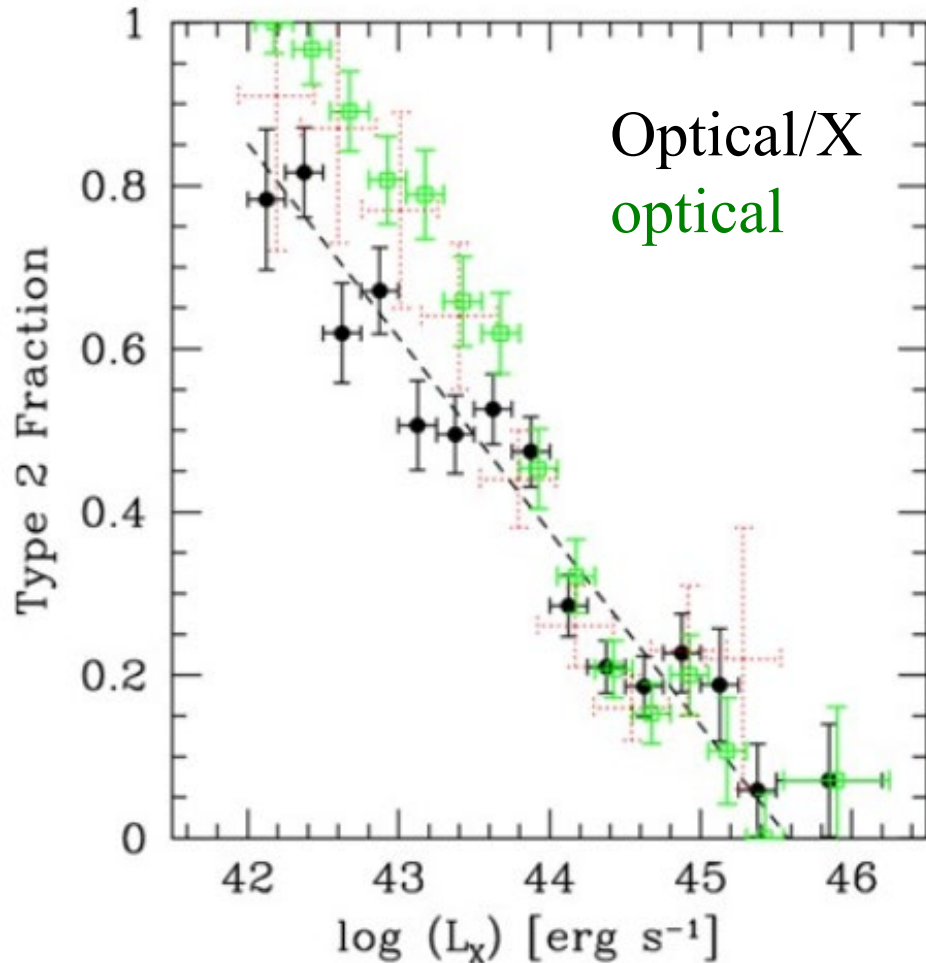
A haute luminosité de l'AGN central, le tore de poussière régresse

Fraction de Sy2 diminue

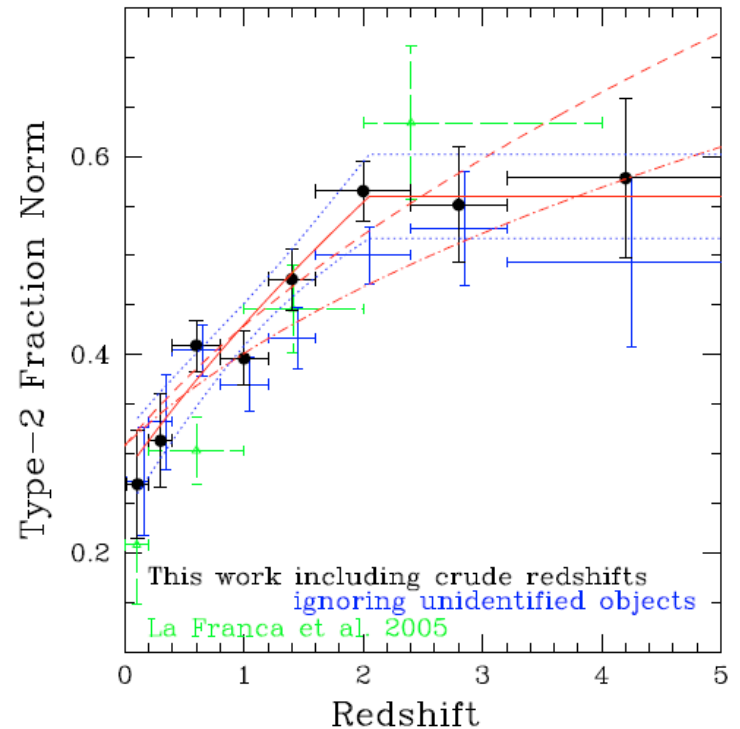
L'angle d'ouverture

est plus grand à forte L

Plus de gaz à grand z



Hasinger 2008



Exception du type NLS1

Narrow-line Seyfert 1 (NLS1) sont des AGN avec toutes les propriétés des types 1, mais ont des raies de Balmer étroites, une forte émission Fe II, et **extreme variabilité en rayons X**

Découverte: Osterbrock & Pogge (1985)

Fort taux de formation d'étoiles

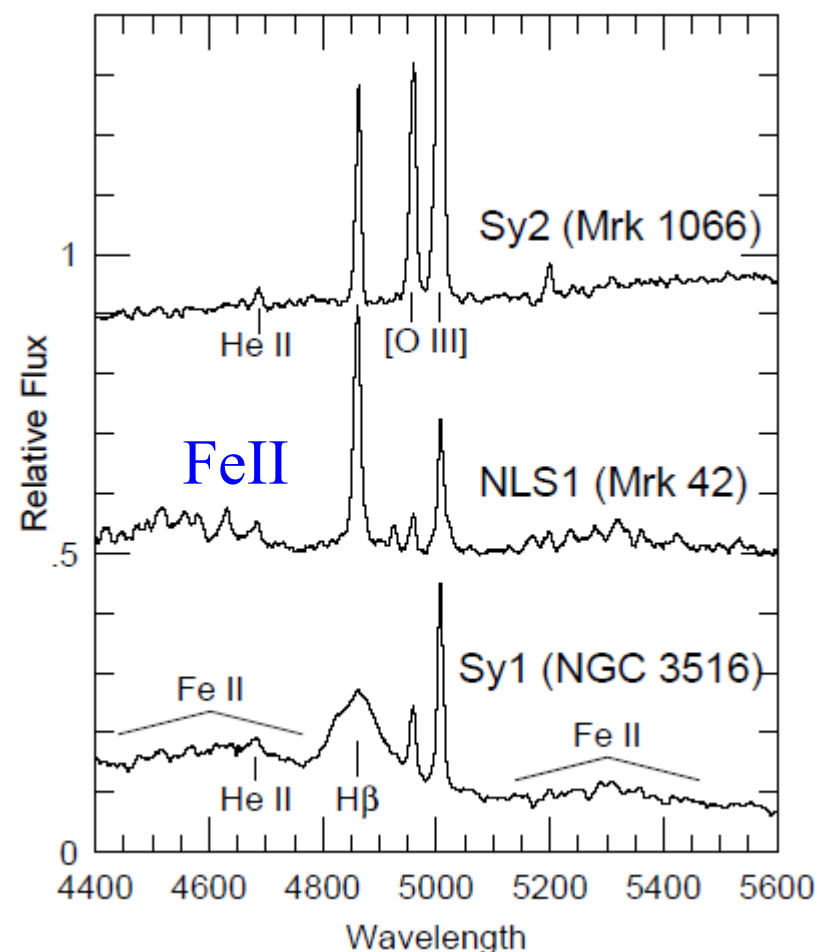
Faible M_{BH} , et fort Eddington L/L_{edd}

Radio spectre plat

Rayons gamma de $E > 100\text{MeV}$

→ jet relativiste

→ Anticorrelation entre FeII et [OIII]



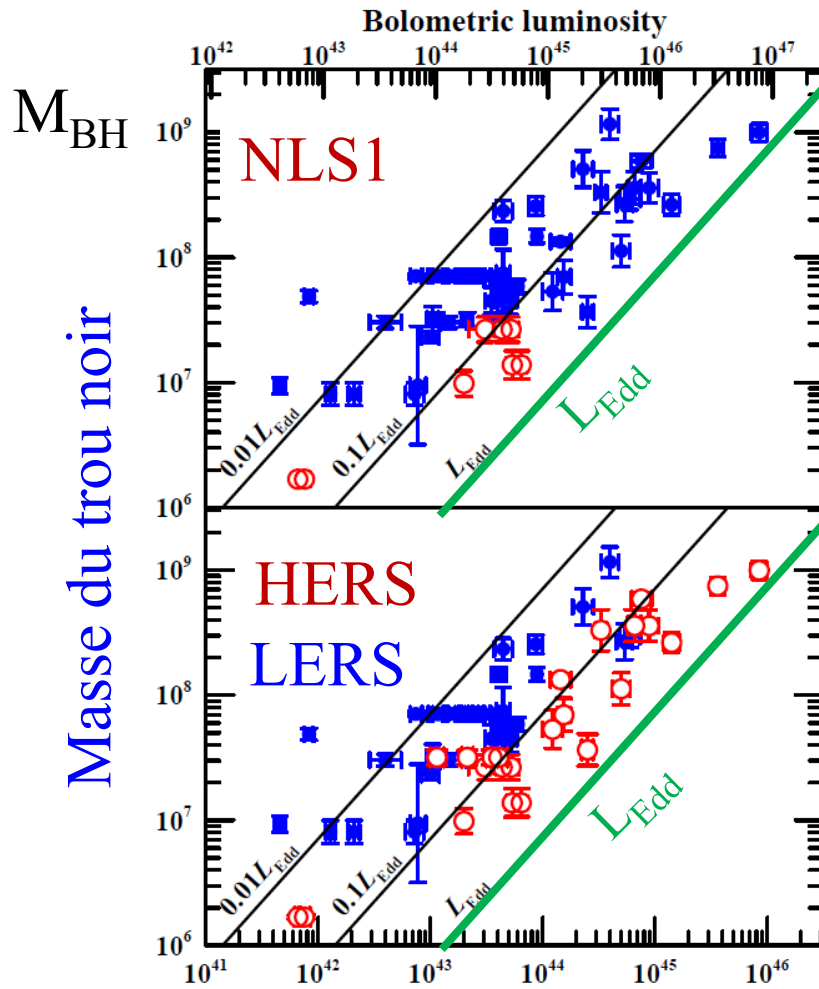
NLS1: trou noir en croissance

NLS1 M_{BH} faible

Par RM (reverberation mapping)

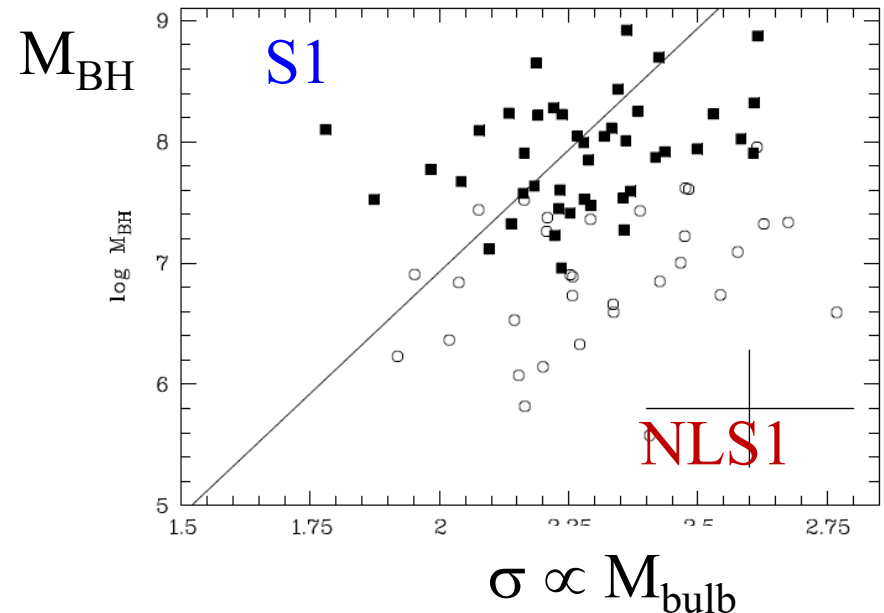
Après une fusion, BH en croissance?
Plutôt évolution séculaire (barre)

Mathur et al 2011



Luminosité optique

Peterson 2011

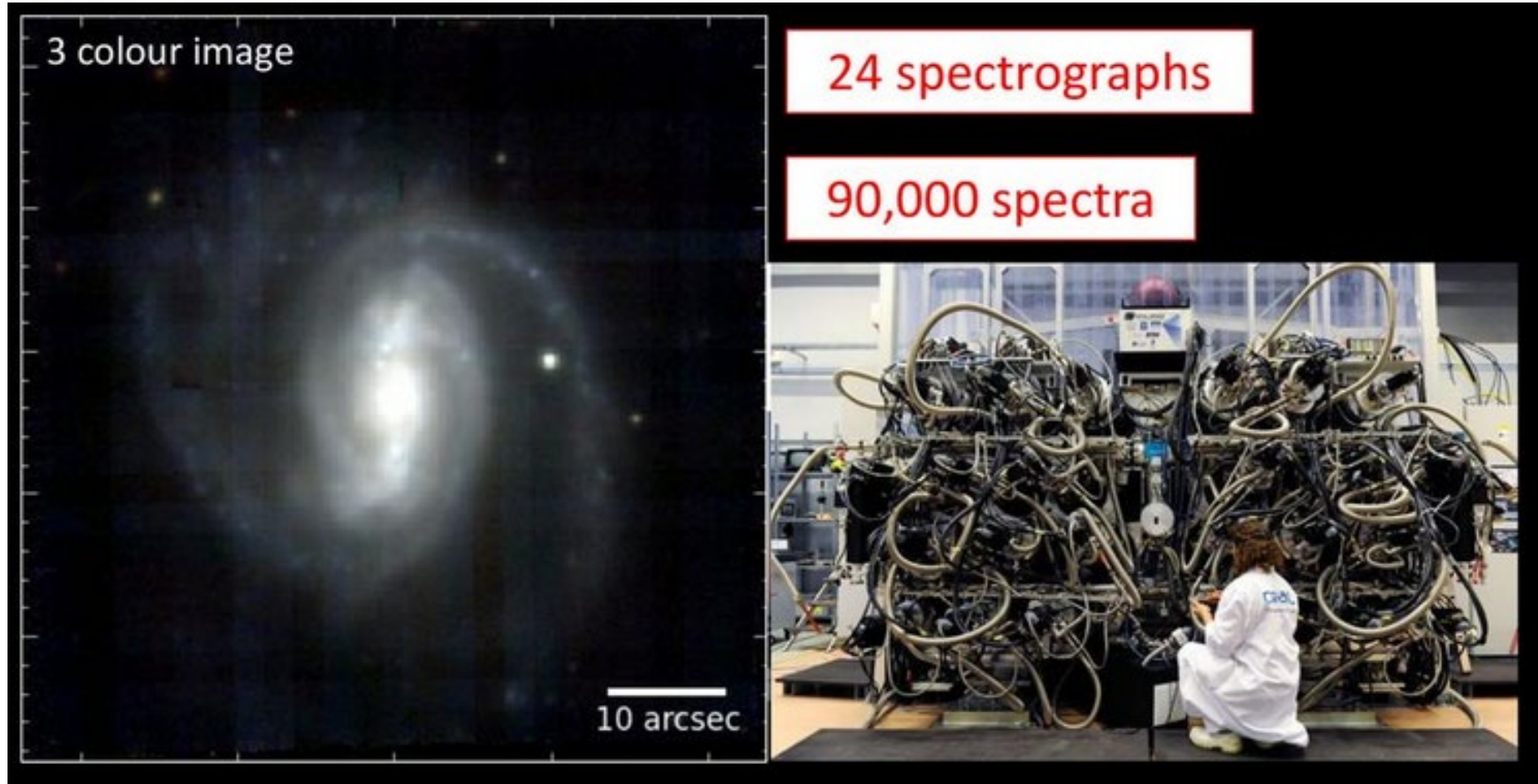


Grupe & Mathur 2004

Mrk1018: changements multiples de look

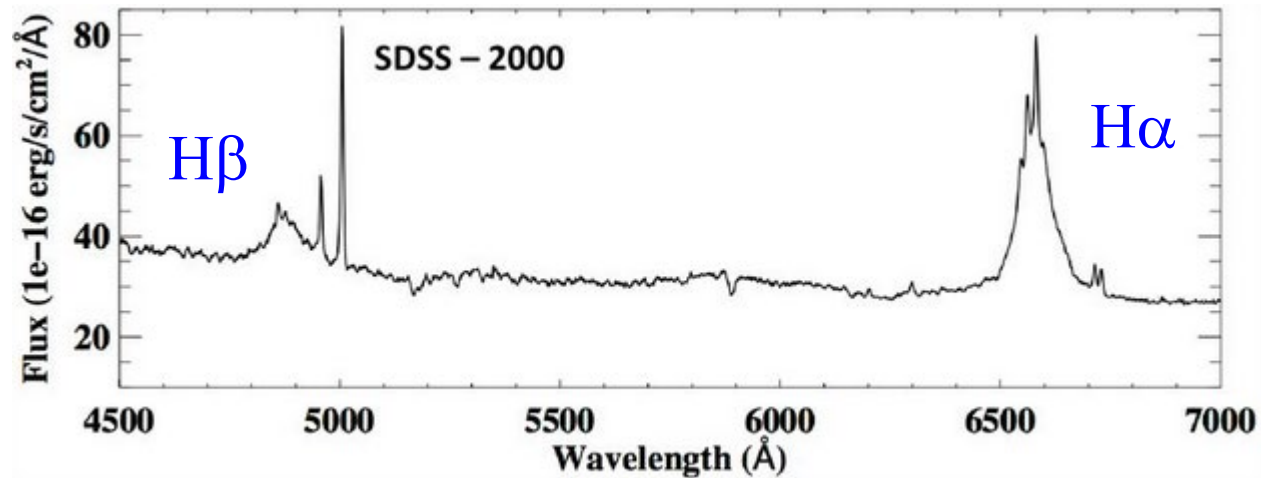
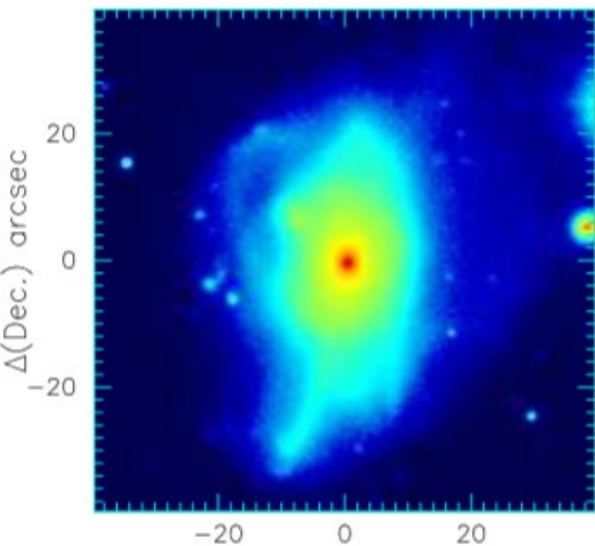
Observée avec MUSE au VLT-ESO: spectro intégral de champ

Découpage de l'image (slicer) + fibres et spectro



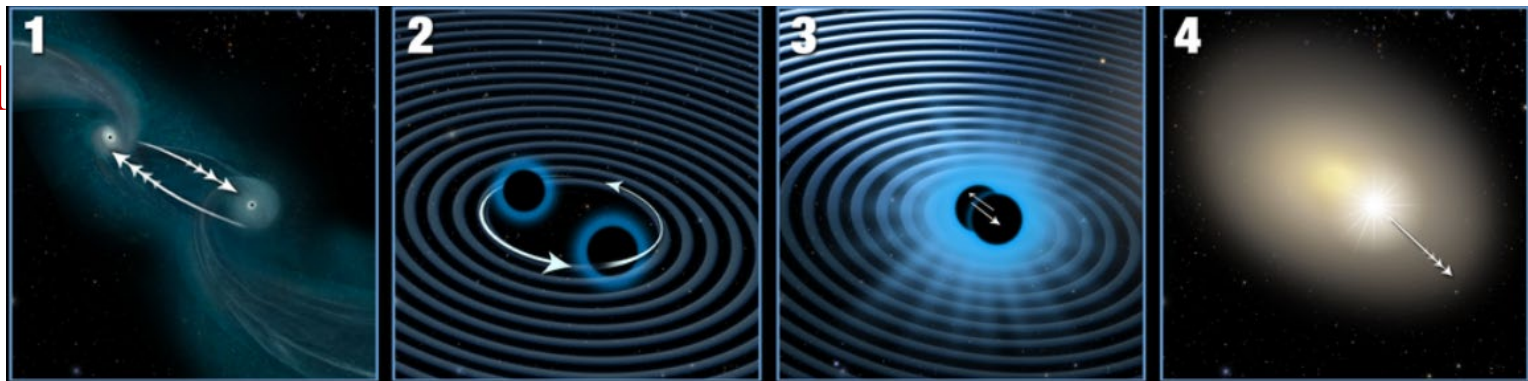
Mrk1018: Sy1.9 en 1975, Sy 1 en 2000

Type 1.9: H α plus large
H β raie étroite
→ Type 1.9 en 2015



Galaxie spirale barrée, avec des perturbations de marée (fusion?)
→ Trou noir binaire? (pas de paires de raies)

Kick
Gravitationnel
→ Recul
+oscillations



Kim et al 2018

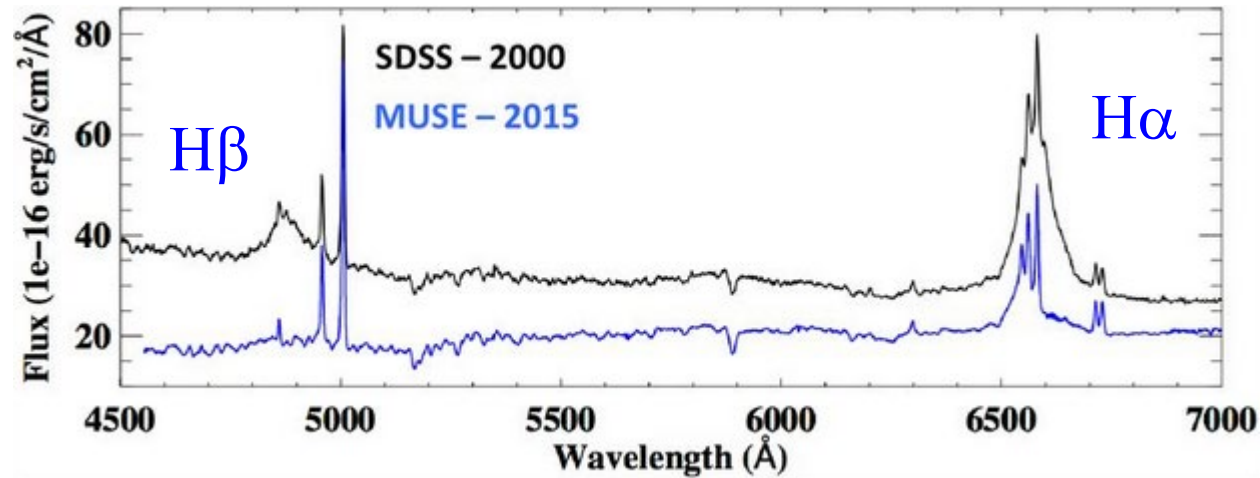
Mrk1018 change de look

Raies plus étroites, pas de continuum en 2015 avec MUSE

Variations d'extinction?

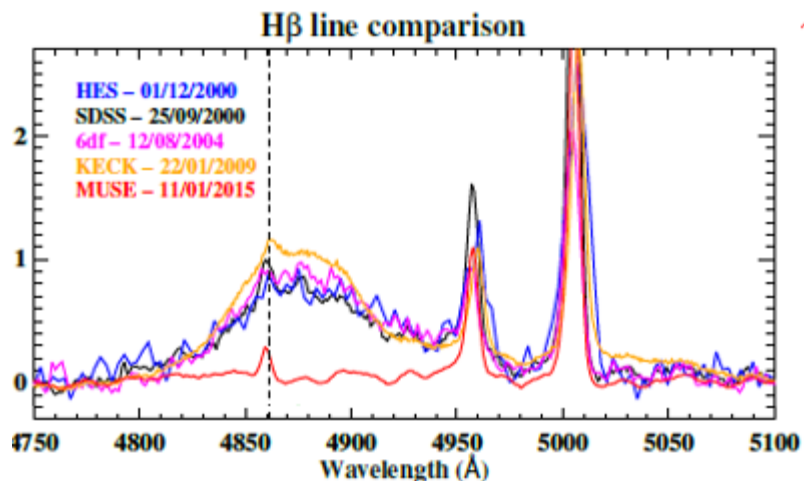
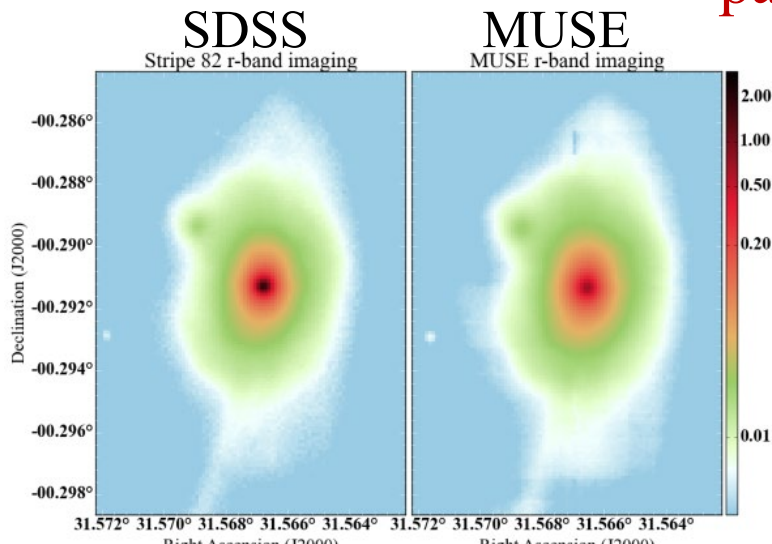
Non H β /H α

Ce serait dM/dt



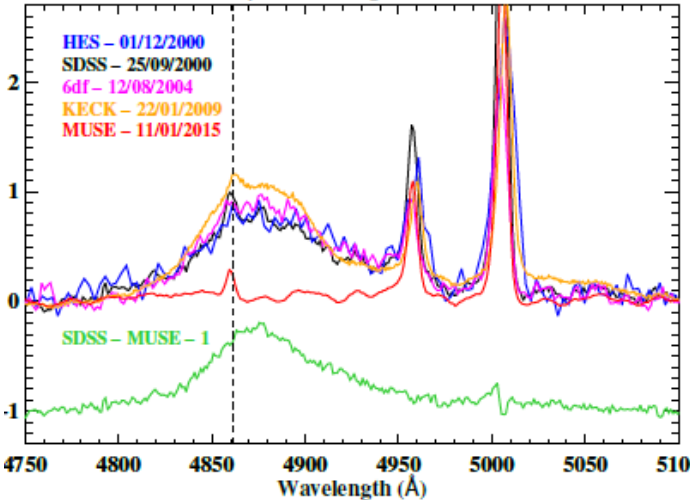
McElroy et al 2016

Les raies étroites sont à ~ 1 kpc, et ne varient pas sur des centaines d'années $\rightarrow$ calibrateur

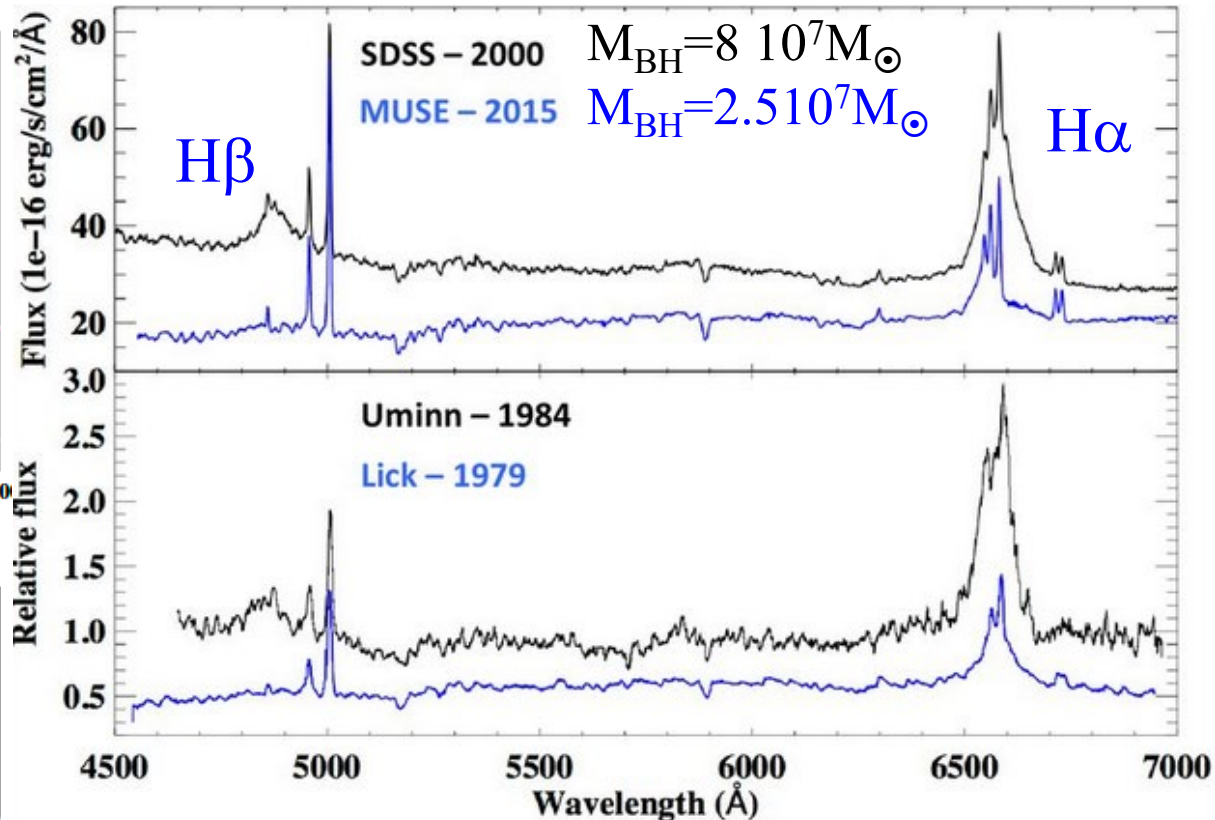
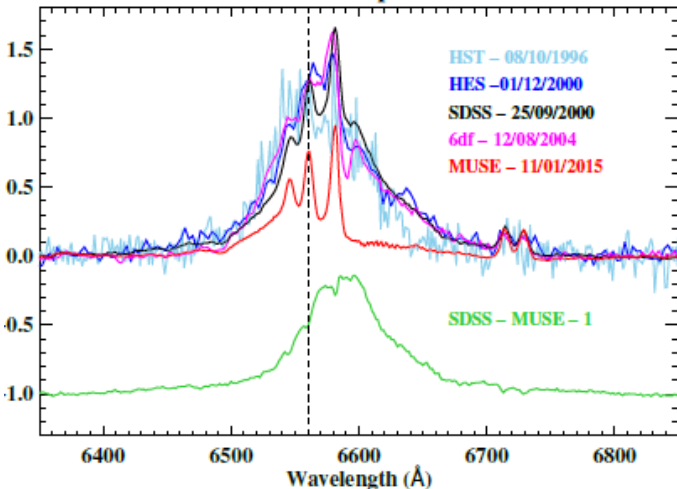


Mrk1018 a changé au moins 2 fois

H β line comparison

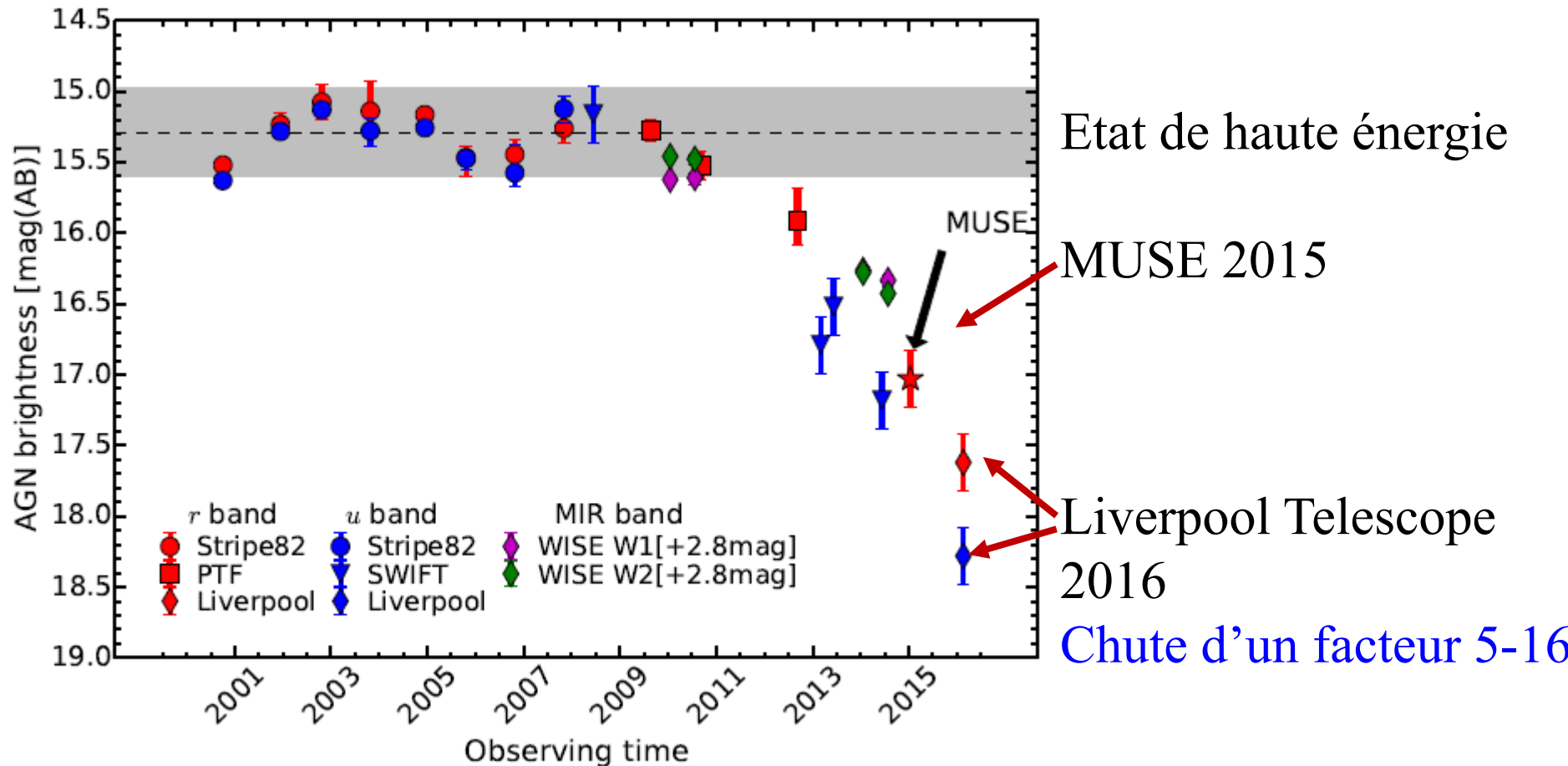


H α line comparison



La raie devient très asymétrique:
L'excès dans la phase Sy1 est redshifté
 M_{BH} différents: inclinaison?
BLR non-équilibre?

Mrk1018 avec une période de 30 ans



1979-84

1984-2014

2015-21

Type 2

Type 1

Type 2

30 ans

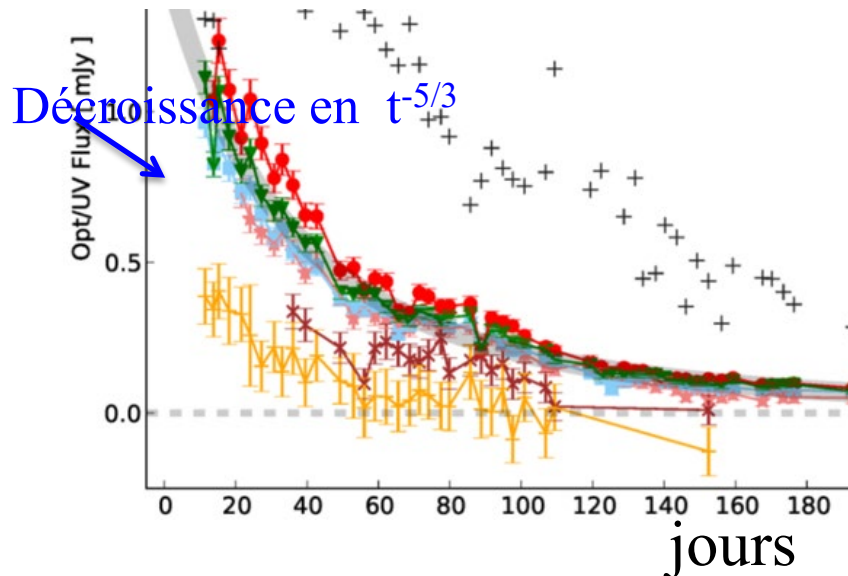
Mrk1018: causes du changement

Taux d'accrétion augmenté soudainement?

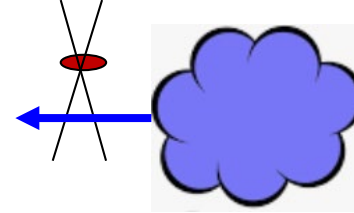
TDE étoile détruite par les marées du trou noir

Durée: montée rapide qqes semaines à L_{Edd} , puis descente en mois ou dizaines années, loi en $t^{-5/3}$ Pas de X durs

➔ La variation temporelle de luminosité ne correspond pas



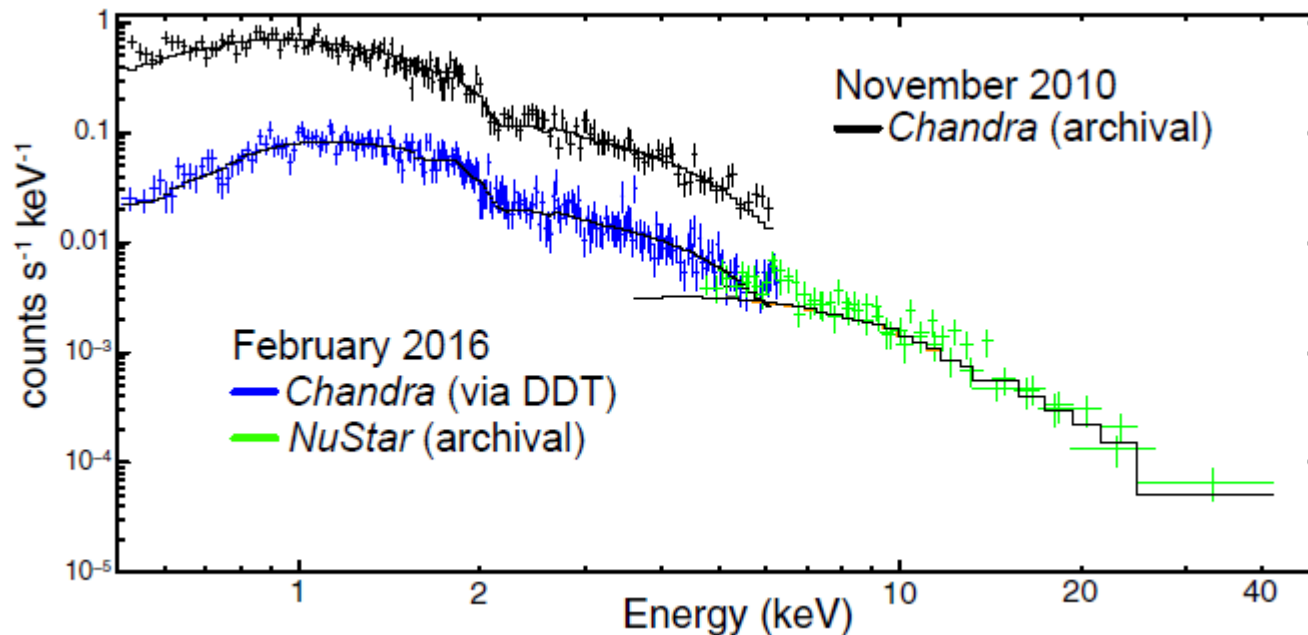
Mrk1018: obscuration?



Passage d'une haute colonne densité de gaz+poussière devant AGN

Taille nuage 10^{-2} pc, $V \sim 300$ km/s, temps ~ 30 ans

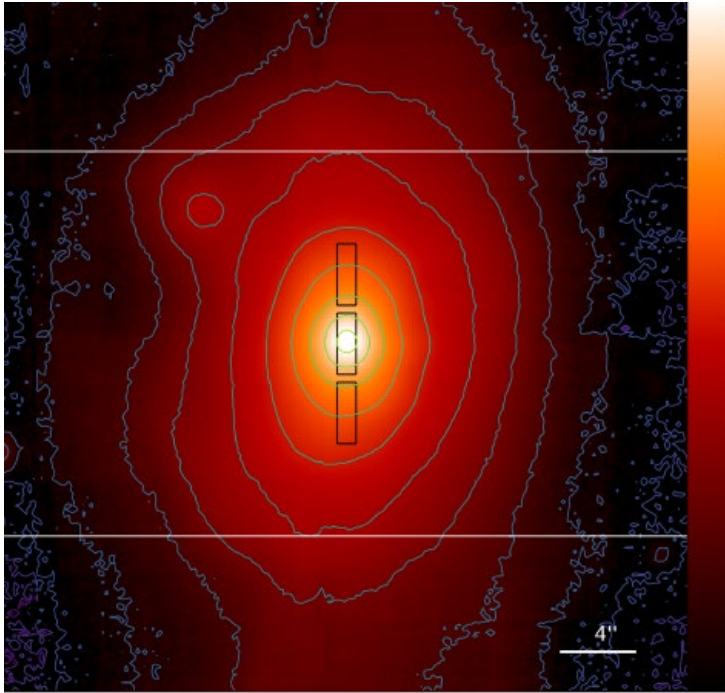
Ou bien 10^{-1} pc, $V \sim 3000$ km/s, orbitant à $R = 100$ pc



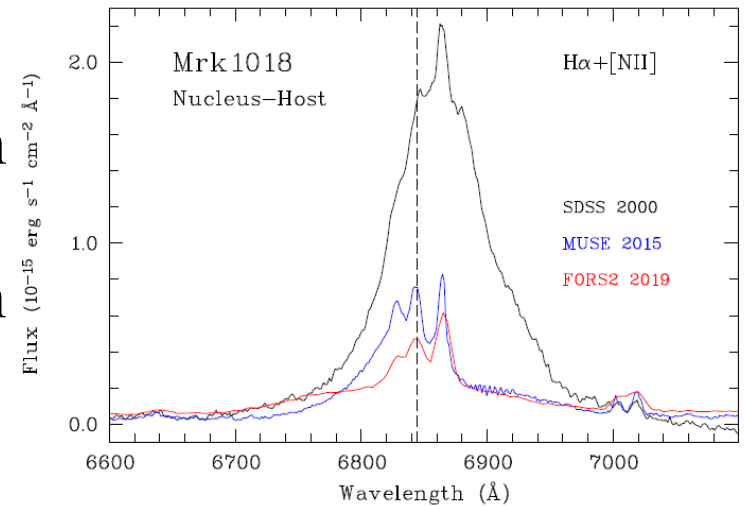
Toutefois, pas de signe d'obscuration dans le spectre X
ou en optique (rougissement..), mais très fort A_V ??

Husemann et al 2016

Test de la polarisation



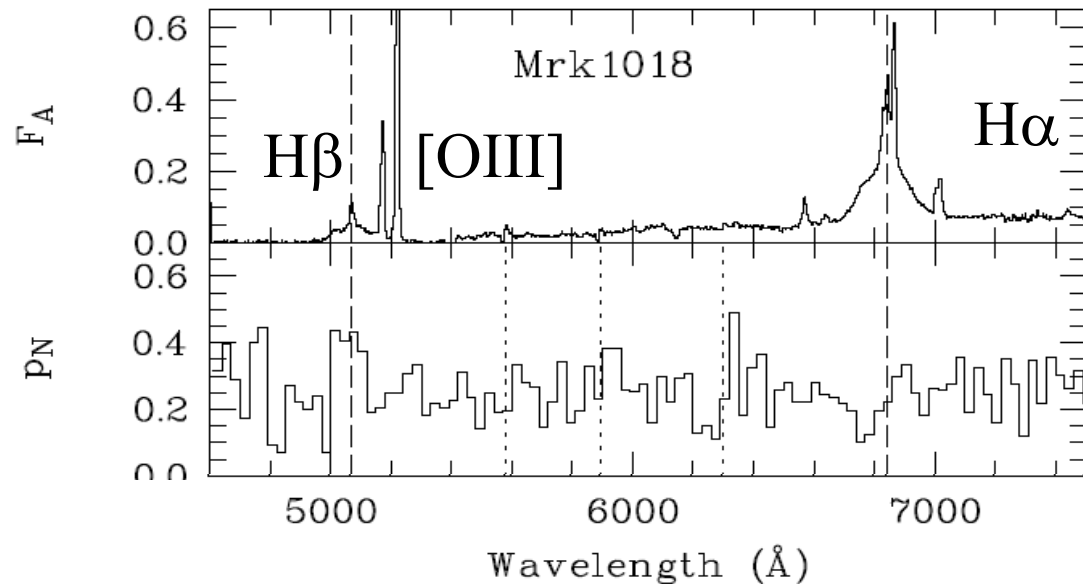
Mesurée en
2019
Faible Lum



Pas de polarisation

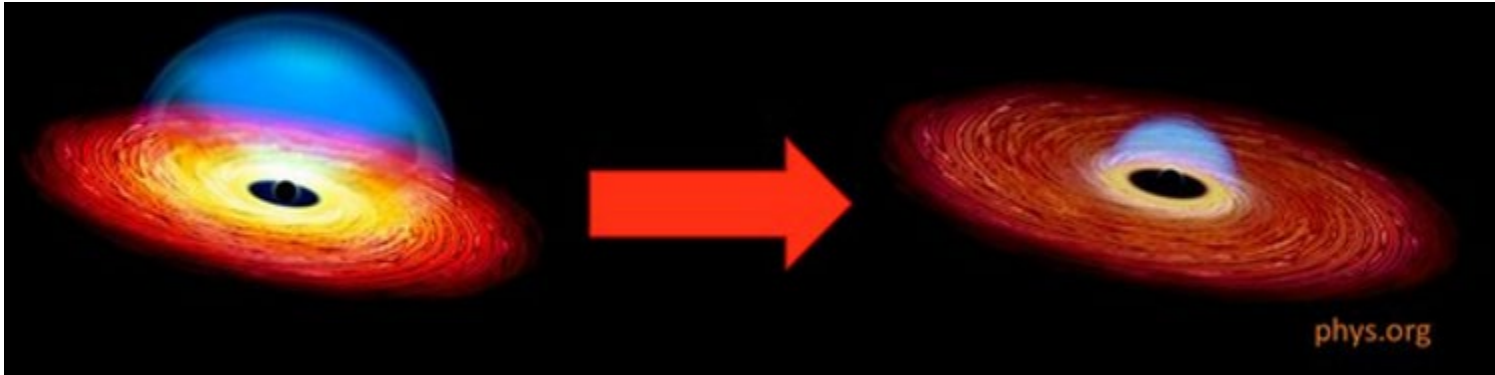
→ L'état Sy2 n'est pas dû
à de l'obscurisation par la
Poussière

Aile bleue en 2000,
Disparaît en 2015
Re-aparaît en 2019



Hutsemekers et al 2020

Mrk1018: le déclin de luminosité du disque

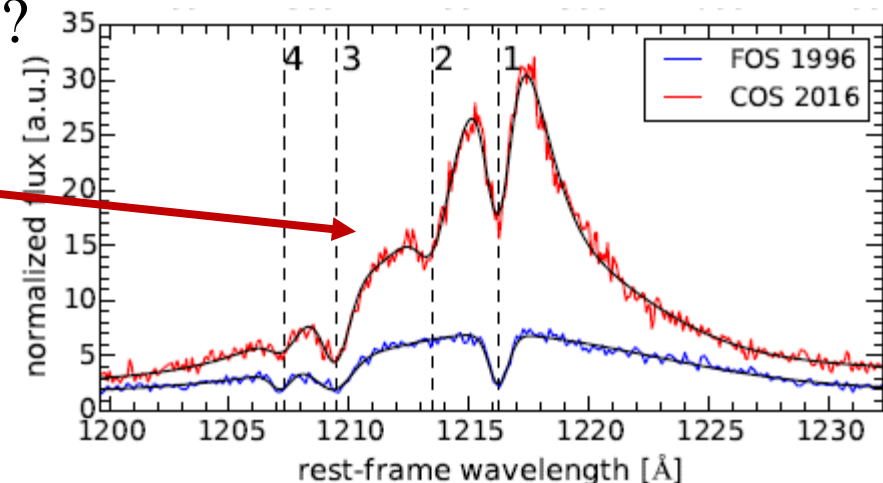


$$L \propto T^4$$

Conséquences sur la BLR? 6 fois moins de flux en Type 2
 L_X (2-10keV) déclin d'un facteur 8 entre 2010 et 2016

Soit le disque n'est pas en équilibre,
Ou le disque perd sa partie centrale?

Nouveau absorbant $\text{Ly}\alpha$
Outflow?



Mrk1018: destruction de marée, compagnon

Mrk1018 vient de subir une fusion mineure, qui a pu détruire une partie du disque

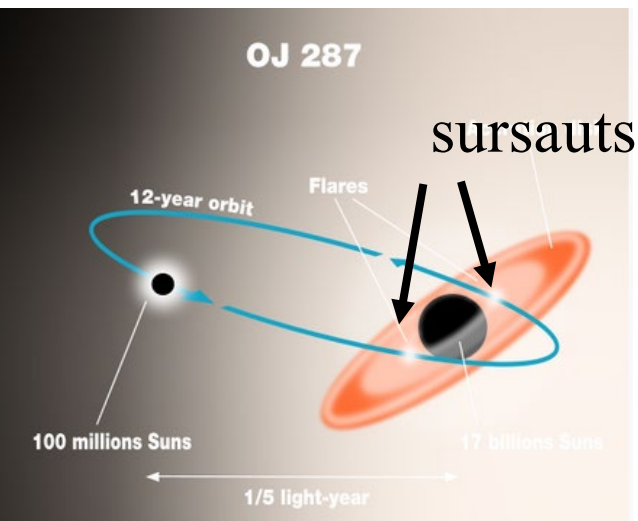
Y-aurait-il un trou noir binaire?

Avec une période orbitale de 30-60ans?

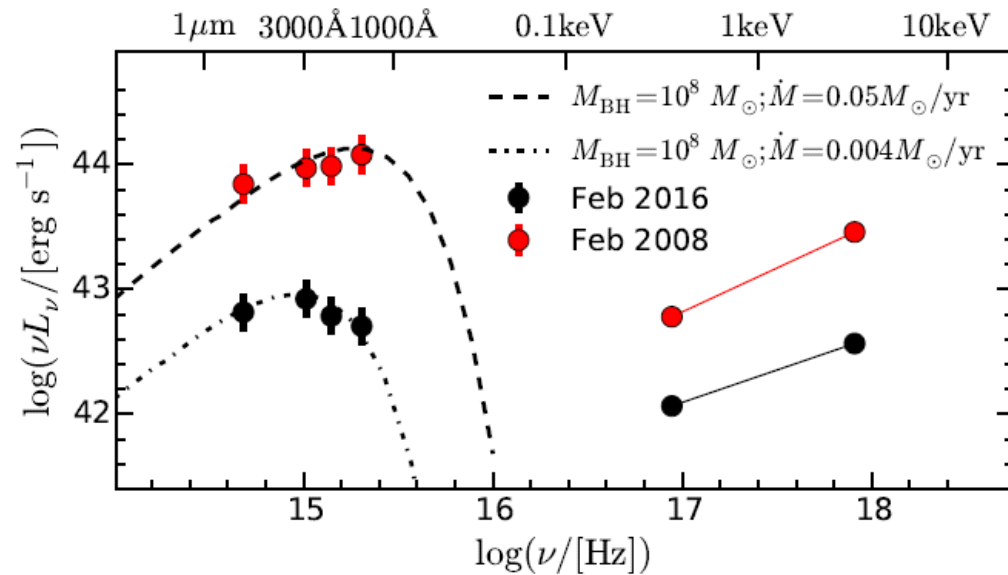
OJ 287, période 12 ans

Ou bien un vent? Nouvelle absorption Ly α

V=-700km/s

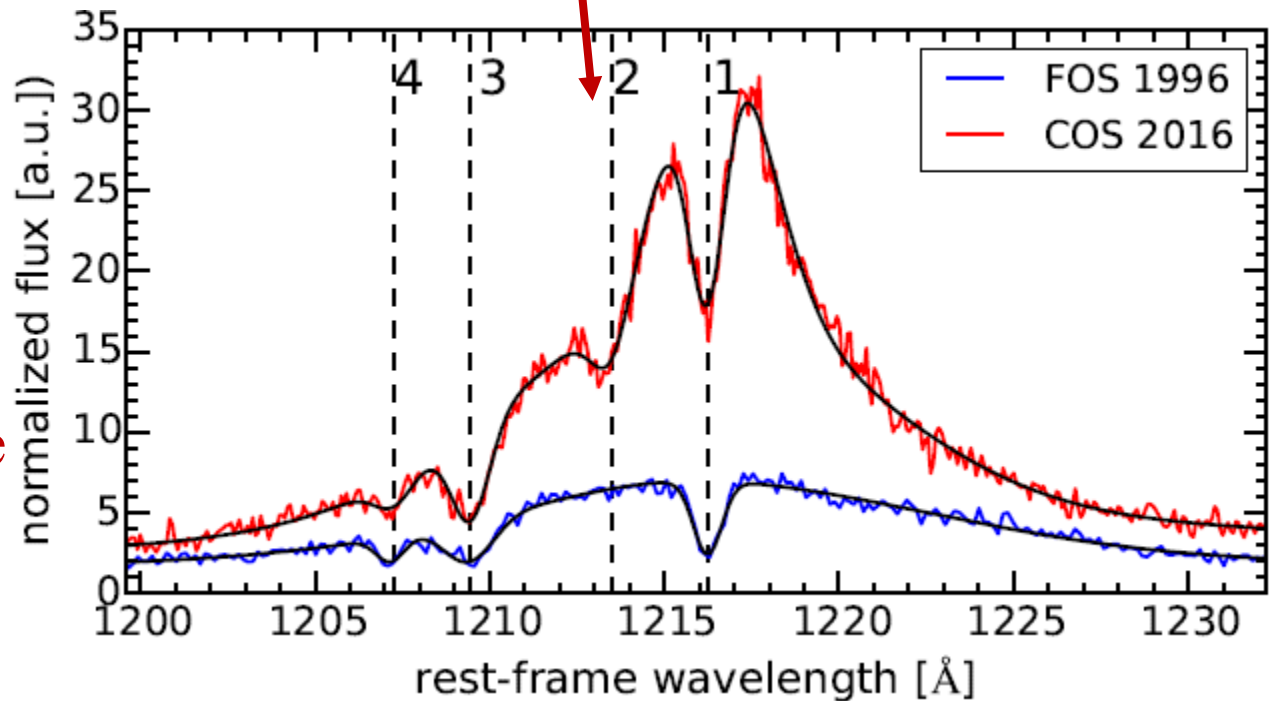


Variation de Ly α (HST)



Nouvelle composante étroite
Ly α en absorption

Nouveau! ($V = -700 \text{ km/s}$)



Le continuum est
celui d'un disque
à géométrie mince

Emission thermique
Optiquement épais

Mrk1018: SMBH binaire

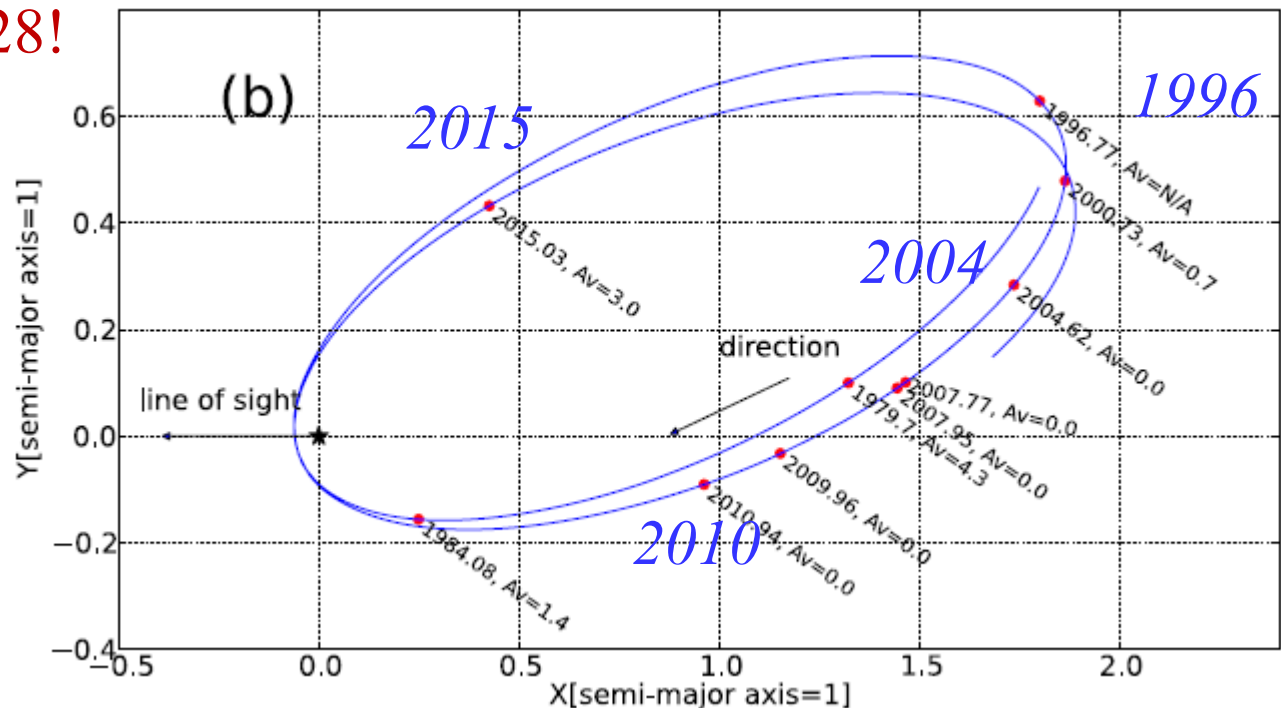
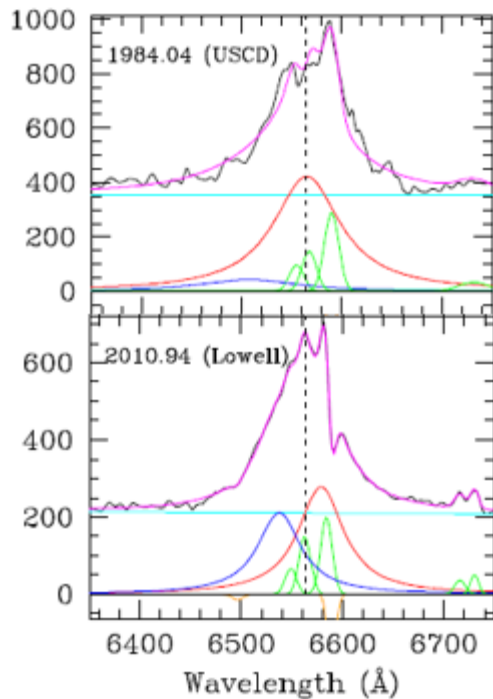
Les raies larges montrent un offset en vitesse, période 30ans

Hypothèse du recul du trou noir

Le disque d'accrétion est perturbé par l'orbite du companion, et passe par des phases d'instabilité

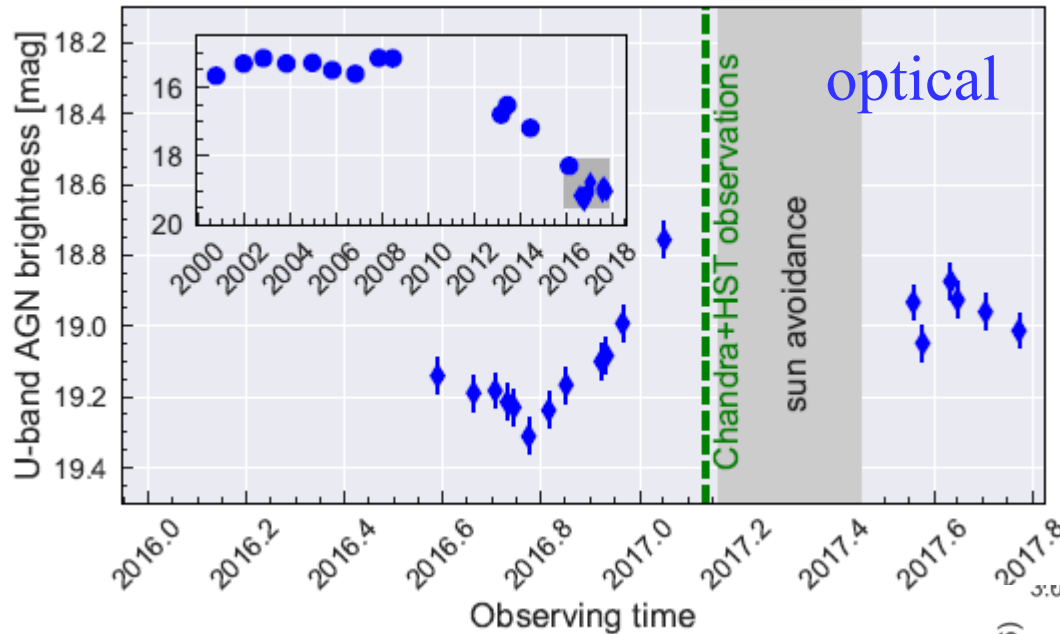
Si le scénario est plausible, voir en 2028!

Grand axe = 0.004pc $i=49^\circ$


$$e=0.94$$

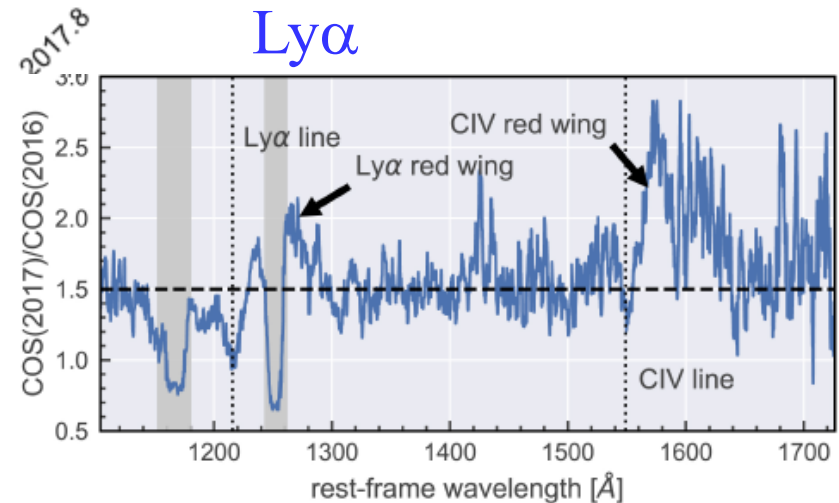
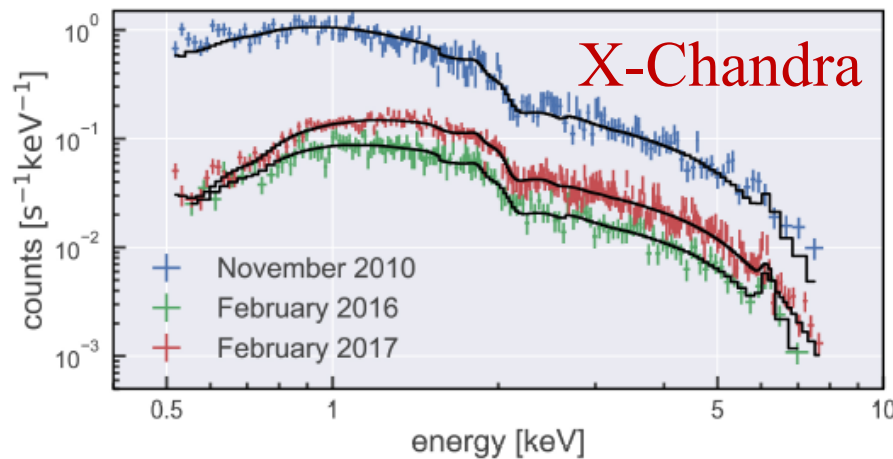
Kim et al 2018

Mrk1018: se réveille en 2017?



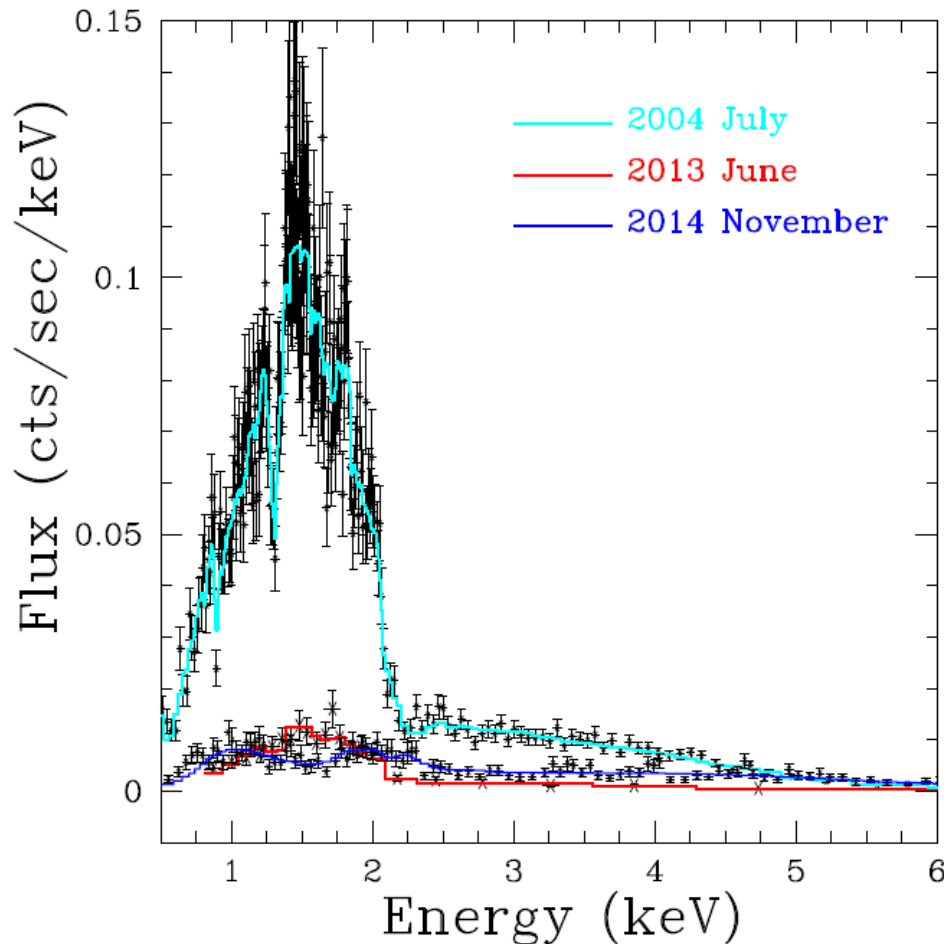
Fausse alerte!

Grande variabilité
sans doute plus sensible
à bas flux



Krumpe et al 2017

Mrk590: déclin d'un facteur 100



Changement rapide de Sy1 à Sy2, avec disparition de BLR

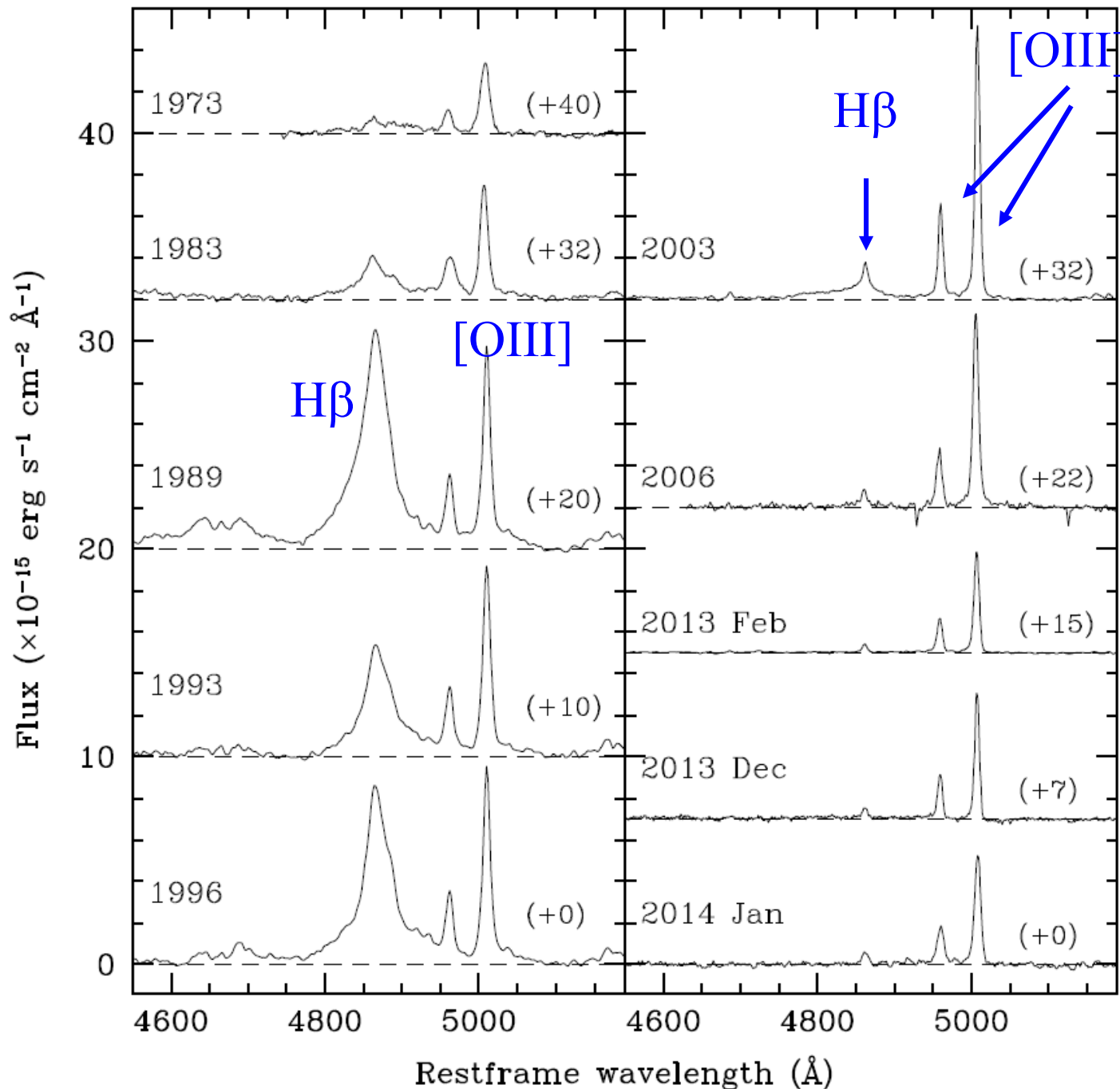
→ Sy2 pas seulement à cause de l'obscurisation
(IR devrait apparaître quand Opt/UV disparaît)

Changement de structure du disque d'accrétion

→ Changement du taux d'accrétion
Il y a 40ans

$M_{\text{BH}} = 5 \cdot 10^7 M_{\odot}$ par cartes de réverbération

Mrk590

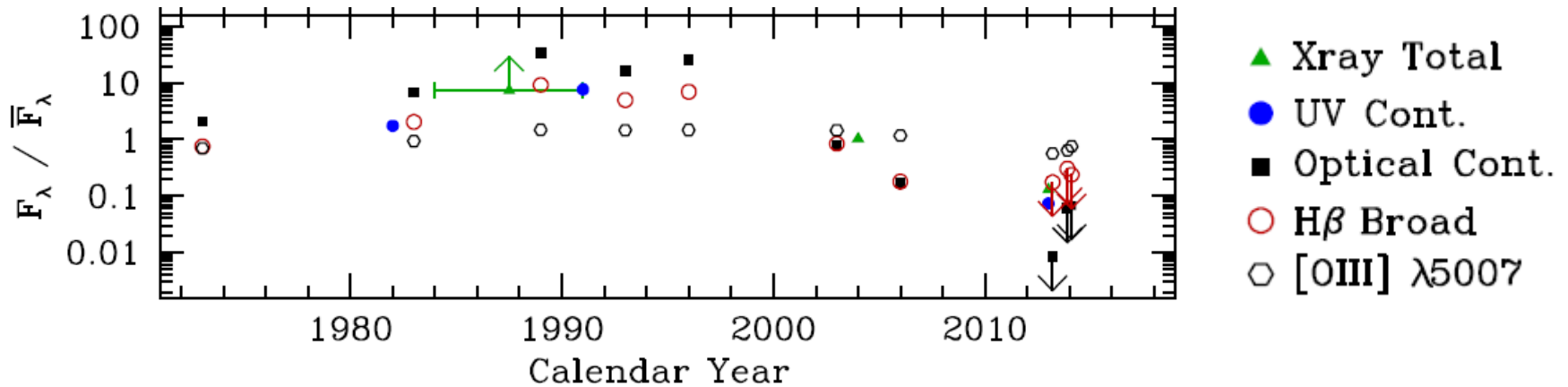


H β disparaît
Mais [OIII]
Augmente
NLR très
proche?

Variations du
Continuum
15ans période?

Gas BLR présent
Mais non ionisé

Mrk590 pendant 40ans



Cause: ne peut pas être l'obscurisation, car devrait affecter différemment les diverses longueurs d'ondes
Supprimer X et UV, et apparaître en infrarouge (émission poussière)

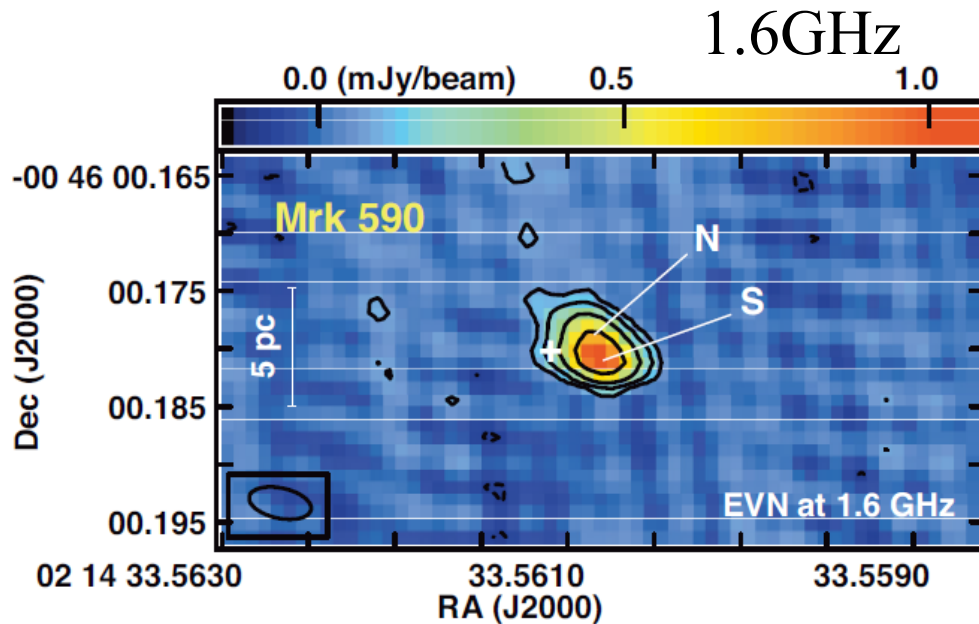
➔ Événement d'accrétion il y a 40 ans de $1-2 M_{\odot}$

Variation de $H\beta$ maximale: $P(\text{rot}) = 8 \text{ ans}$, taille de la BLR 10 jours-lum

Gaz présent, mais événement ionisant, créant BLR, $[OIII] < 3 \text{ pc}$

Se propage ensuite plus loin

Mrk590: VLBI



En 2016 (*Koay et al*) source ponctuelle uniquement, variable Entre 1995-2015

Découverte d'un jet radio de 1pc de long (*Yang et al 2021*)

Si $v \sim 0.1c$, durée de vie 30 ans
Correspondant à une accrétion à l'origine du look Sy1

En 2018, Mrk590 se réveille
Flux UV et X s'accroissent
à nouveau

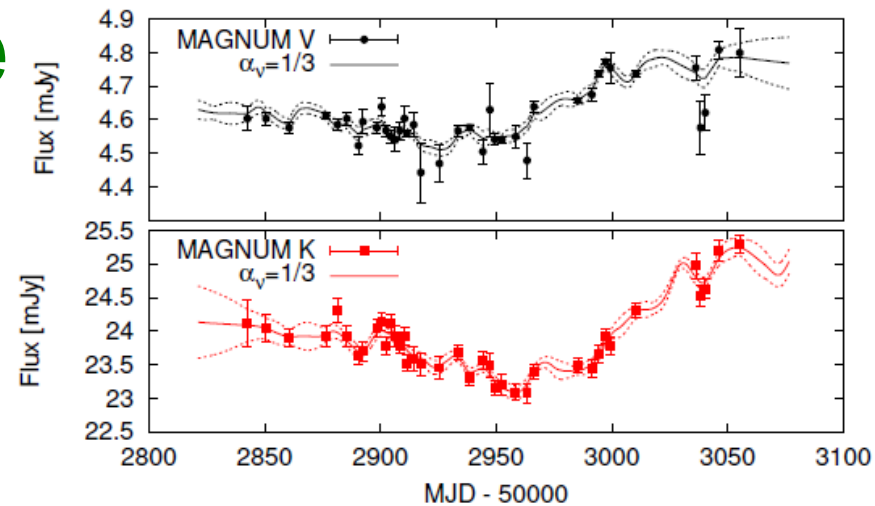
Mathur et al 2018

Mrk590: tore de poussière

Par réverbération optique-IR

Le rayon interne du tore passe à 32j-lum en 2004 à peine plus que la BLR (26j-lum)

Il était de 70j-lum en 1998 (Sy1)



Carte de réverbération

En à peine 4 ans, le tore de poussière s'est reconstitué

Le temps de chute libre est bien supérieur

→ La poussière se reforme à partir du gaz et éléments lourds existants

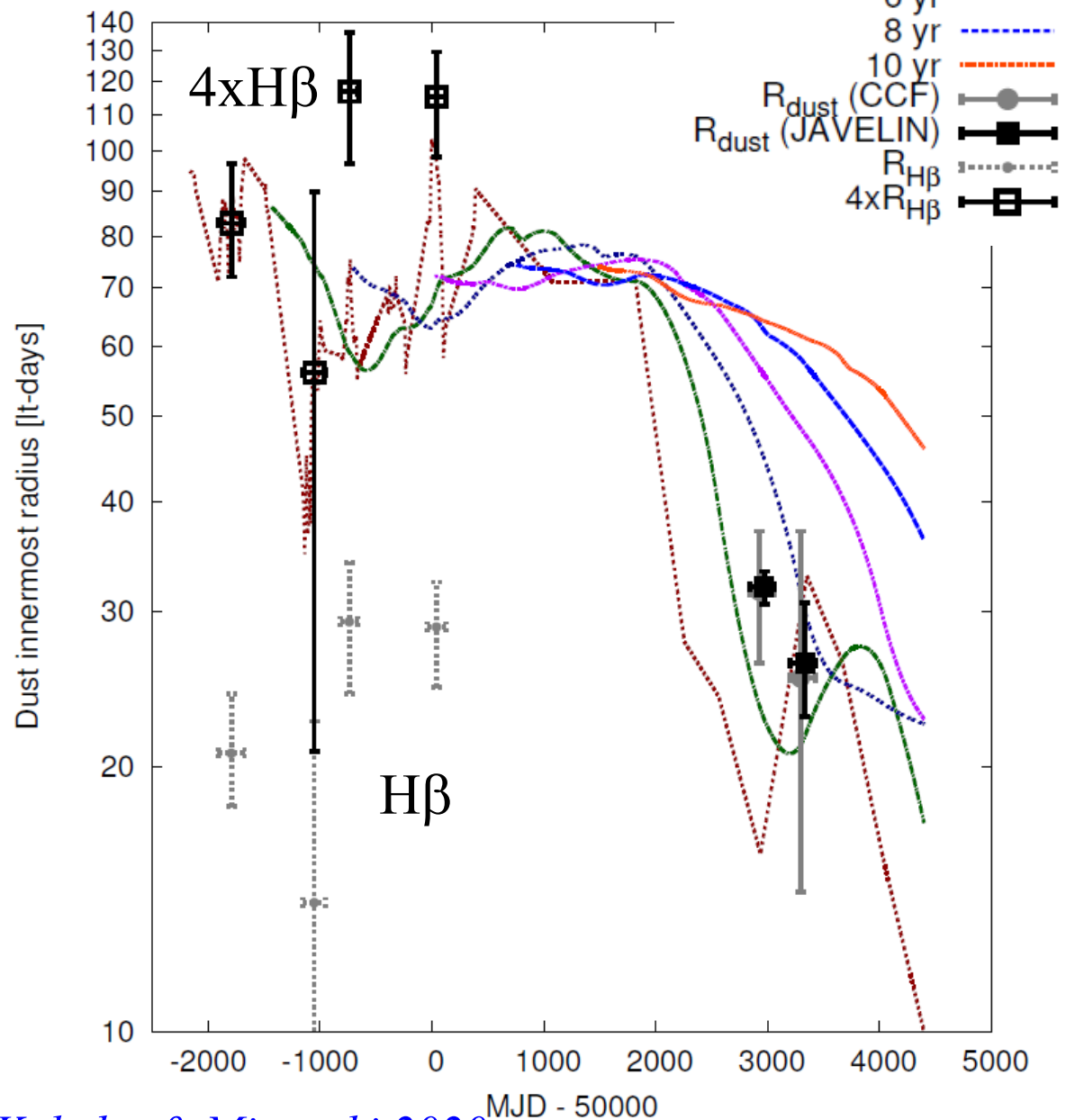
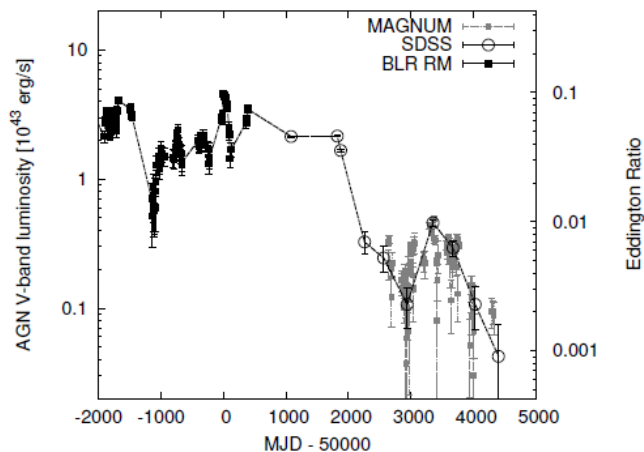


Mrk590 torus

Evolution du rayon de
sublimation de la
Poussière 70j $\rightarrow$ 20j

Température de $\sim 1500\text{K}$
Olivine, graphène, silice

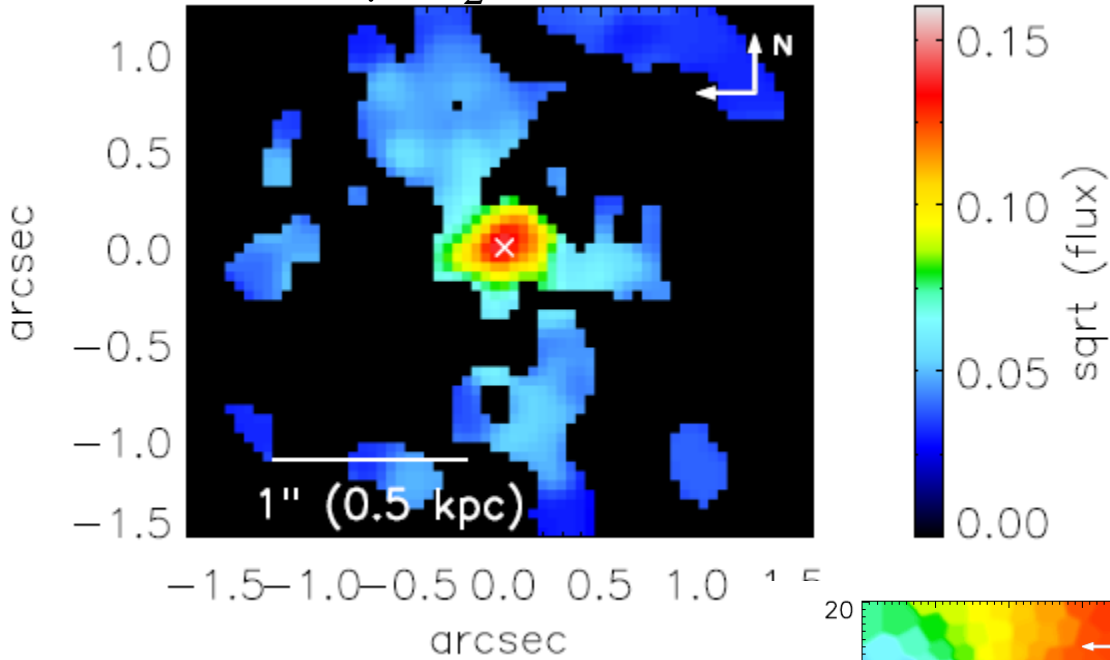
En 4 ans, la poussière se
reformé in situ



Kokubo & Minezaki 2020

Mrk590: anneau de gaz

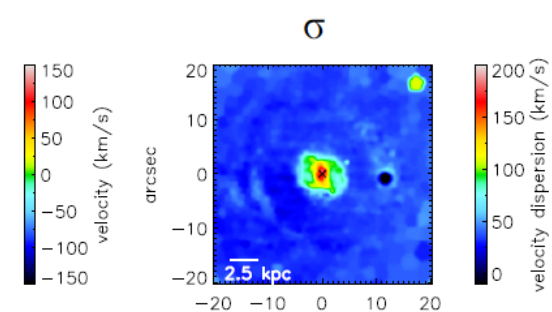
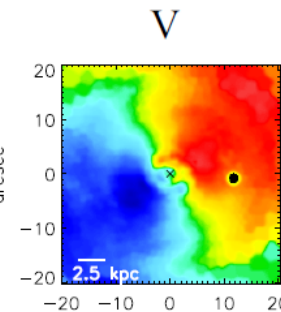
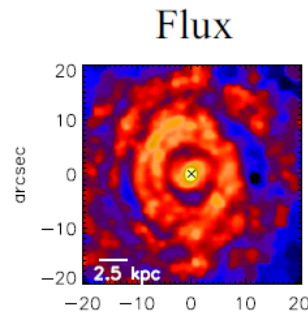
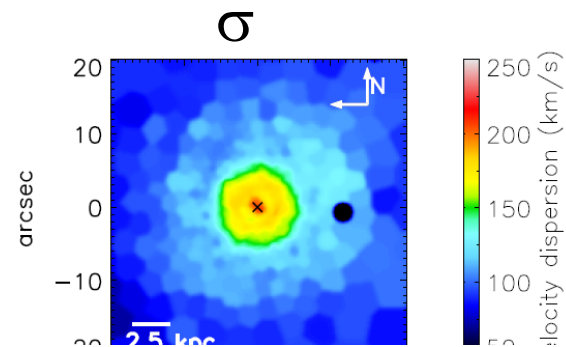
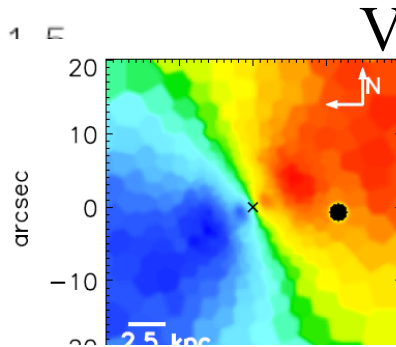
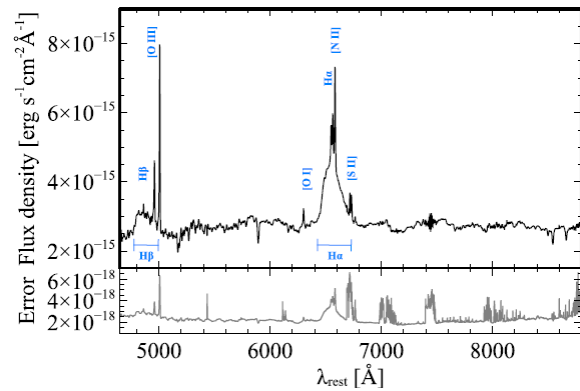
Carte 2μ H₂



Après 2017, les raies larges ré-apparaissent, le flux remonte

Reservoir de gaz + outflow

Cinématique des étoiles





NGC1566

Une des plus anciennes,
Suivie 1954-74 en optique

Sy 1.8 $\rightarrow$ Sy 1.1 $\rightarrow$ Sy 1.8

Sursauts secondaires, pendant la
décroissance 2016-21

UV/optique délai de qqes jours sur X
proportionnel a M_{BH}

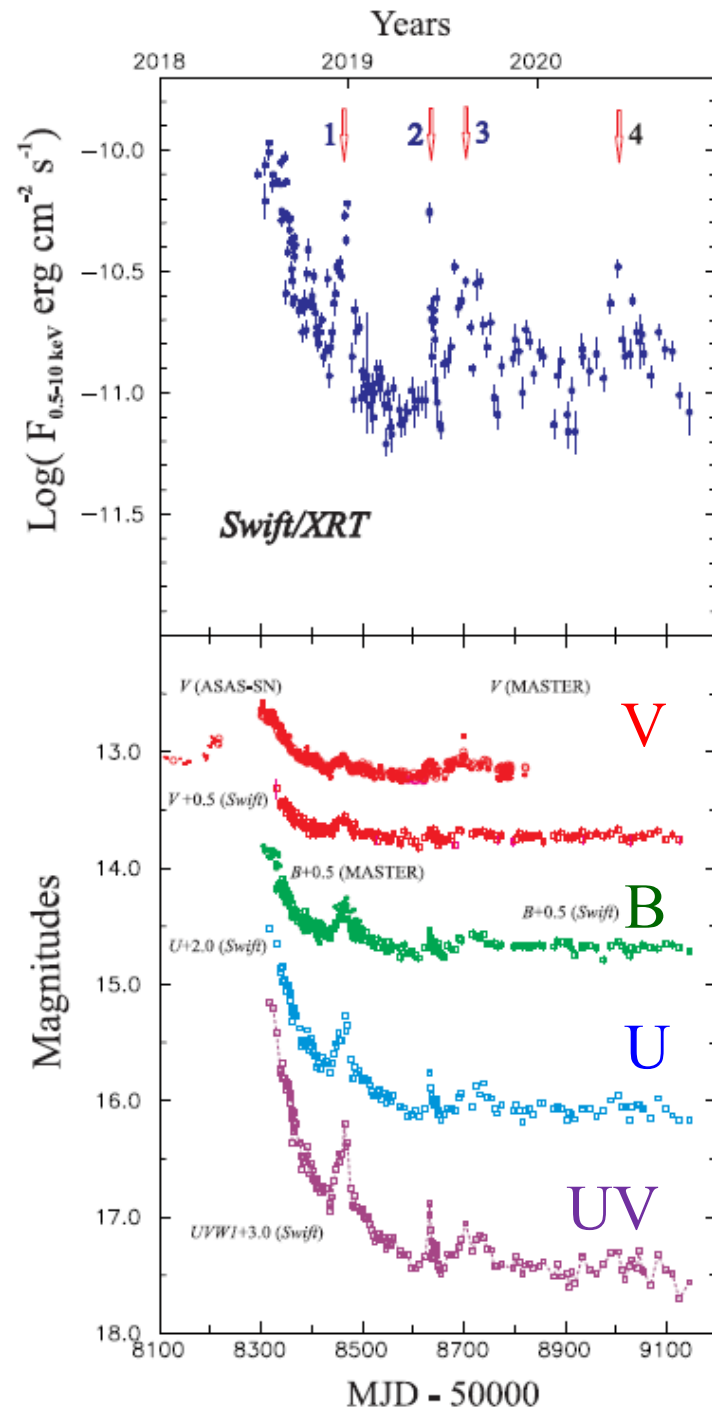
$\rightarrow$ Irradiation X du disque

Montée et déclin ~ 9 mois

Sursauts 10-20 jours

Traits récurrents dans les AGN-CL

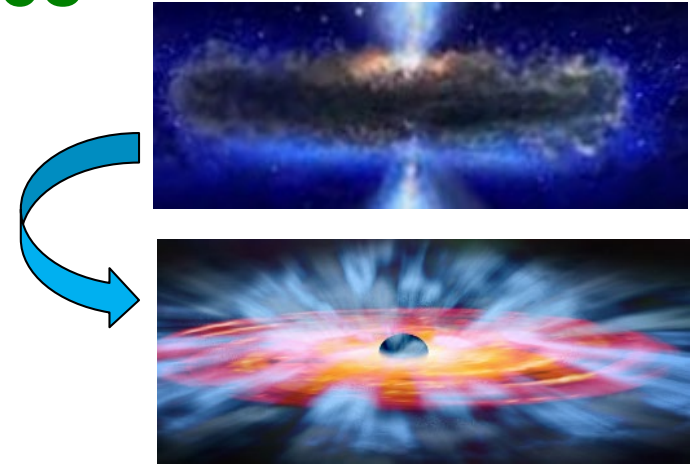
Rapides N1566: M_{BH} peu massif



Caractéristiques générales

Toujours une montée /descente en des temps de l'ordre de l'année

Suivie de sursauts plus brefs, 10jours



Obscuration: ne peut être éliminée, surtout in situ

Accrétion plus grande $\rightarrow$ UV $\rightarrow$ sublimation de la poussière

Variations concomitantes de $H\alpha/H\beta$, plus fort dans les états bas $\rightarrow$ poussière

Origine de la montée? TDE, SN ne correspondent pas (spectre, durée)
Capture de l'enveloppe des étoiles?

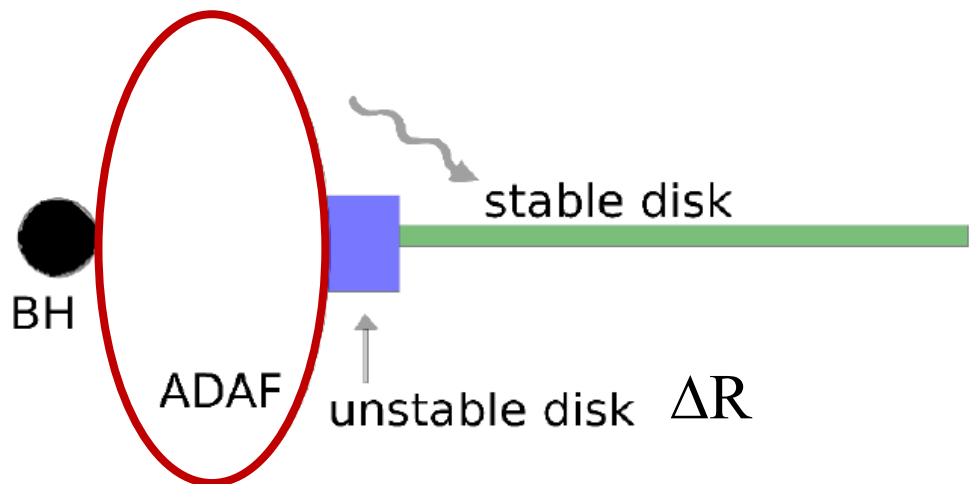
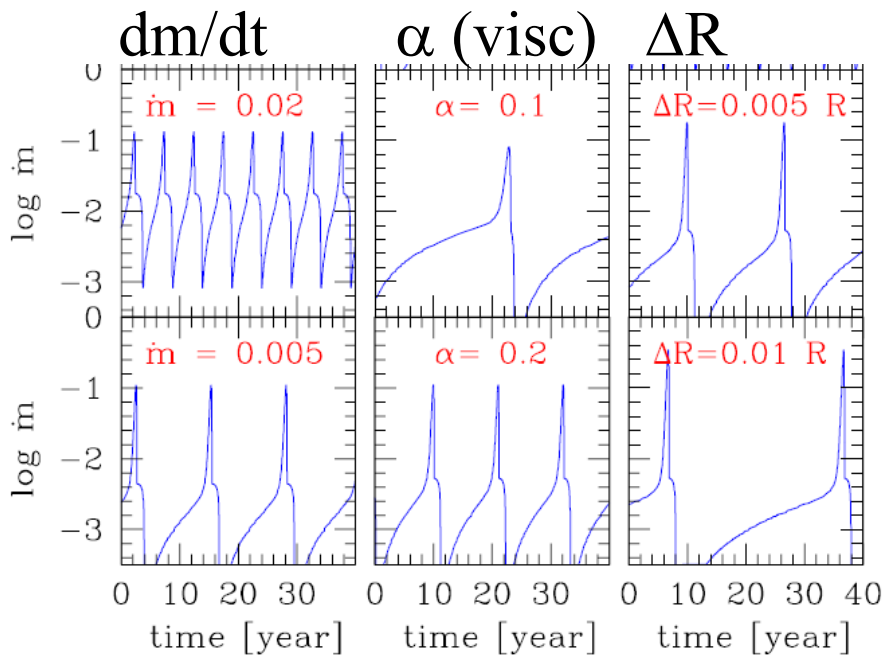
λ_{Edd} peut passer de 0.1 a $<1\%$

NGC1566, N4151, N5548



Mécanisme possible: instabilités
de la pression de radiation, dans l'anneau
Entre la couronne ADAF et le disque

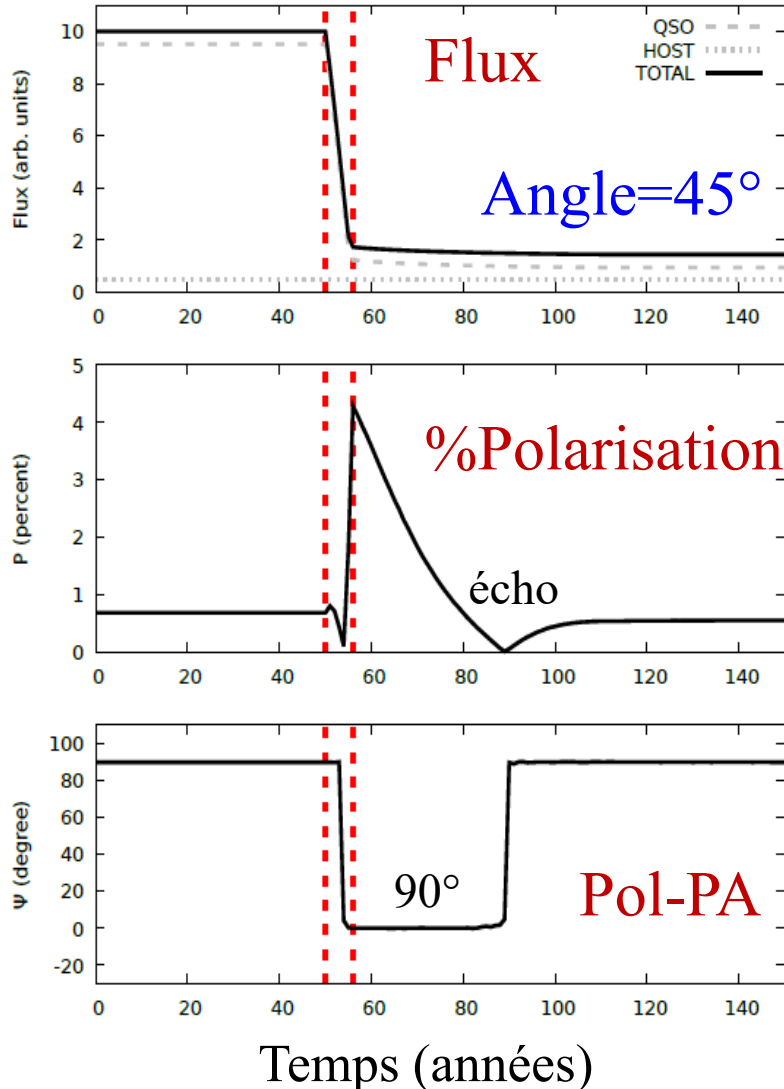
→ Sursauts multiples sur des échelles de
temps courtes, car **anneau étroit**



Sniegowska et al 2020

Etude de la polarisation

Distinguer entre obscurisation/absorption et réelles variations de L



Simulations du transfert radiatif et de la polarisation

Après un sursaut de l'accrétion d'un facteur 10

Selon l'angle de vue par rapport à l'axe du disque d'accrétion

Prédiction d'un sursaut de polarisation pour Mrk1018 après son déclin

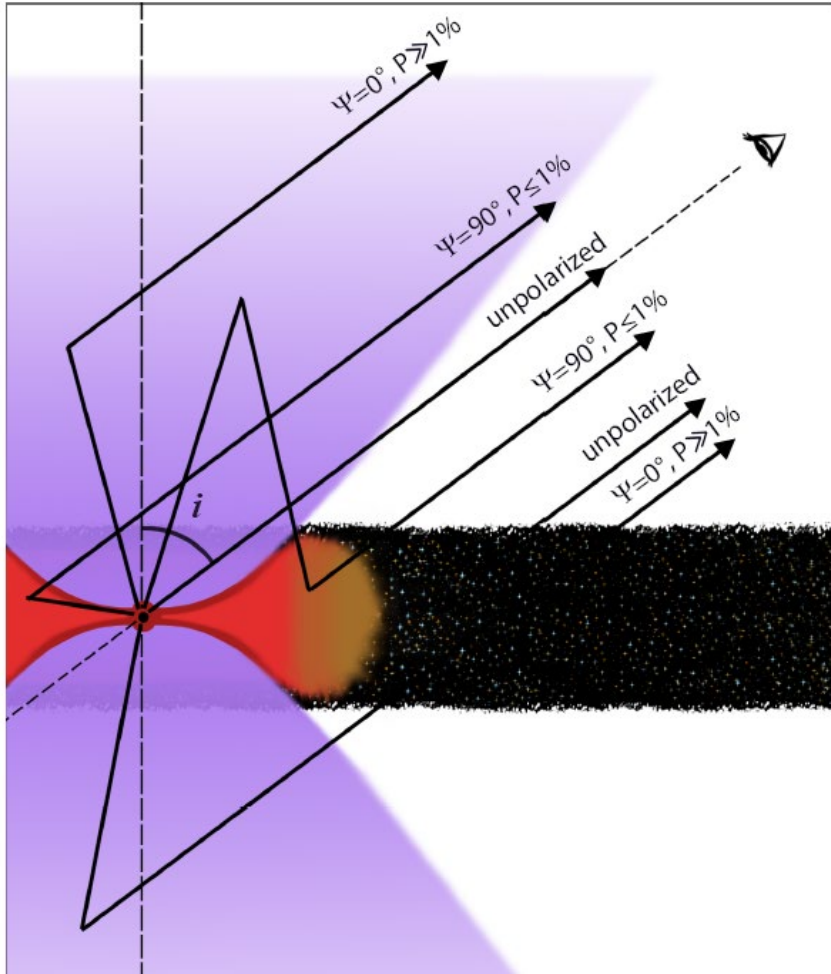
Polarisation en fonction du temps

Cas de Mrk1018

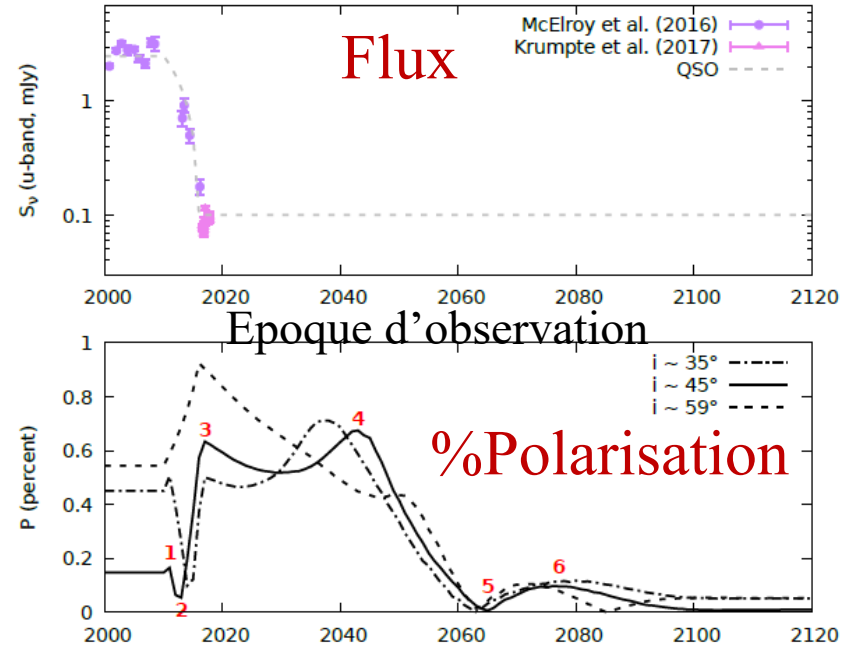
Chute de luminosité d'un facteur 25

Ψ Angle de polarisation

$\Psi = 0$ // axe Oz



Marin & Hutsemekers 2020



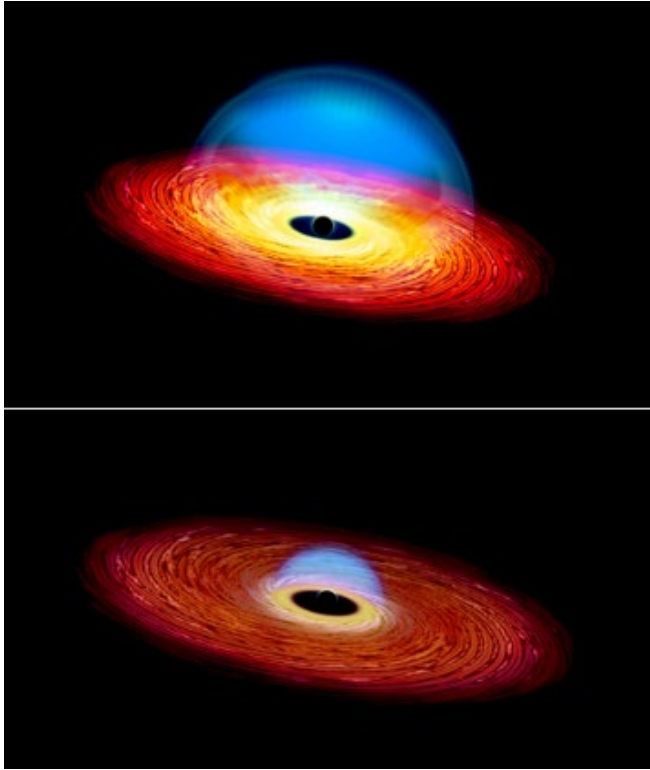
- 1- réponse retardée
- 2- // et $\perp$ s'annulent
- 3- echo max pol, cone supérieur
- 4- echo max pol, cone inférieur
- 5-6- multiples échos

Le quasar qui change de look

J0159-0033, $z=0.31$, quasar

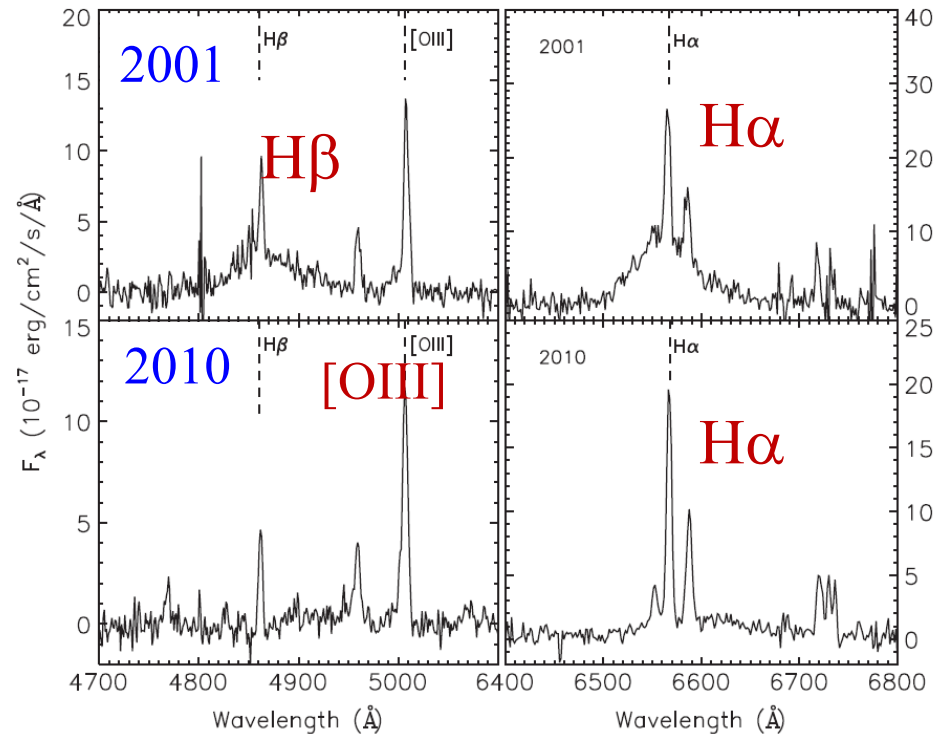
Passe de AGN-1 vers AGN-1.9 de 2000 à 2010

Chute de flux d'un facteur 6, optique et X
Pas d'obscurantion



→ Permet d'étudier la galaxie hôte, éblouie par le QSO

LaMassa et al 2015



Rayons-X pas d'absorption

$$M_{\text{BH}} = 2.2 \cdot 10^8 M_{\odot}$$

$$L/L_{\text{Edd}} = 0.04$$

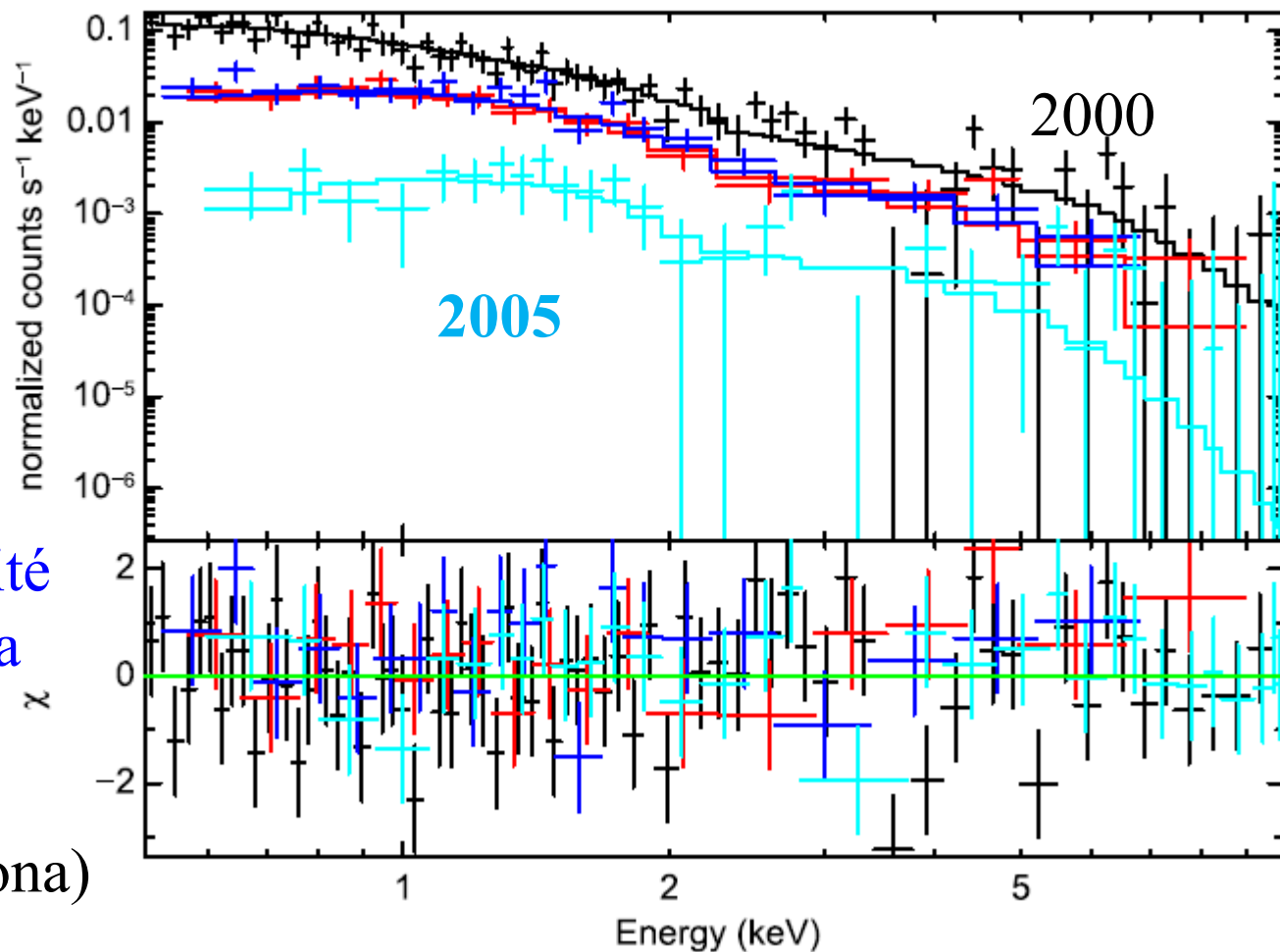
Chute à 0.007

$$R_{\text{BLR}} = 35 j\text{-lum}$$

1998-2000 état
haut AGN-1

Puis chute d'activité
De la BLR, mais la
NLR non affectée
(trop loin)

Optique et X (corona)
Proches du centre



Possible mécanisme

Le quasar J0159-0033, $z=0.31$, $M(\text{BH}) \sim 10^8 M_\odot$

Destruction d'une étoile par effet de marée: TDE

Loi de décroissance

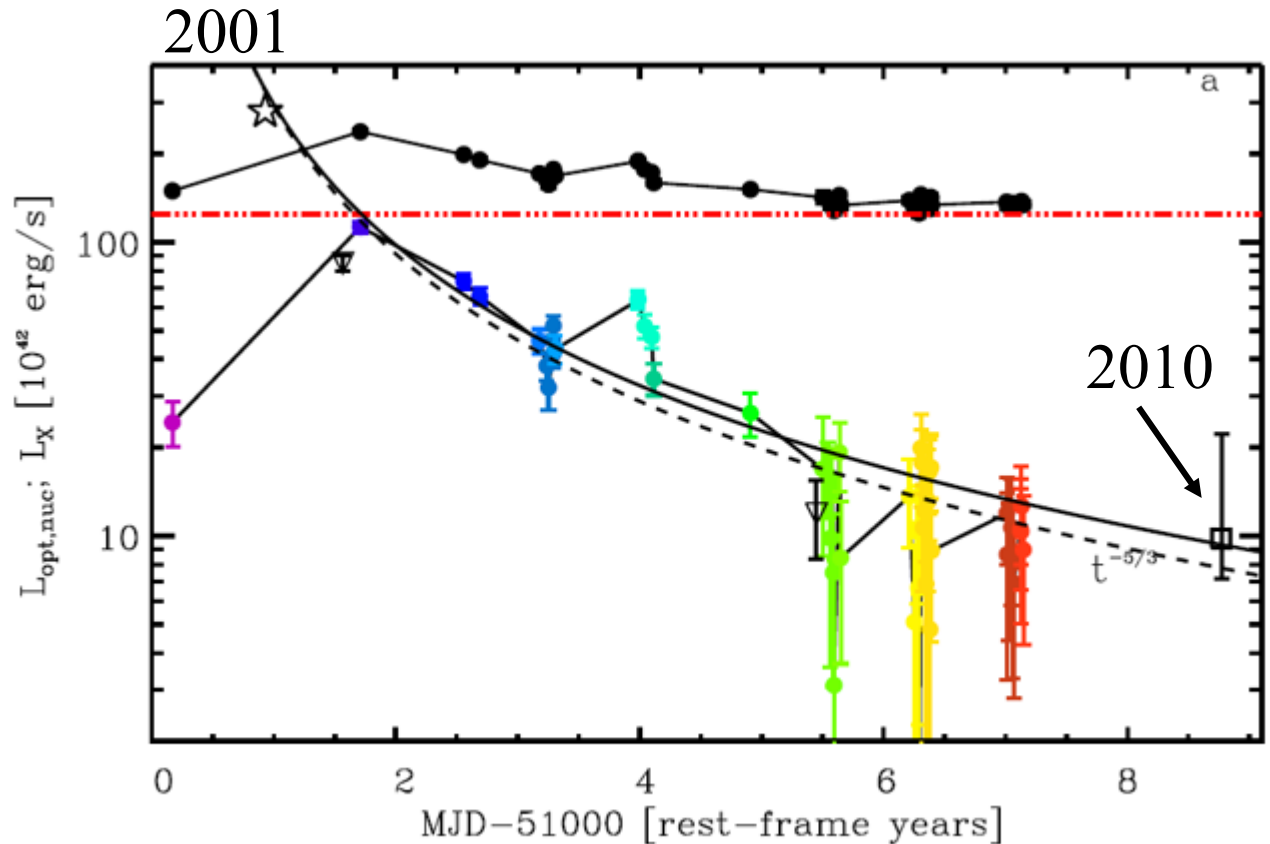
$t^{-5/3}$

Surface émettrice

$R_{\text{photosphérique}}$

$\sim 100 R_s$

Température $\sim 10^4 \text{K}$

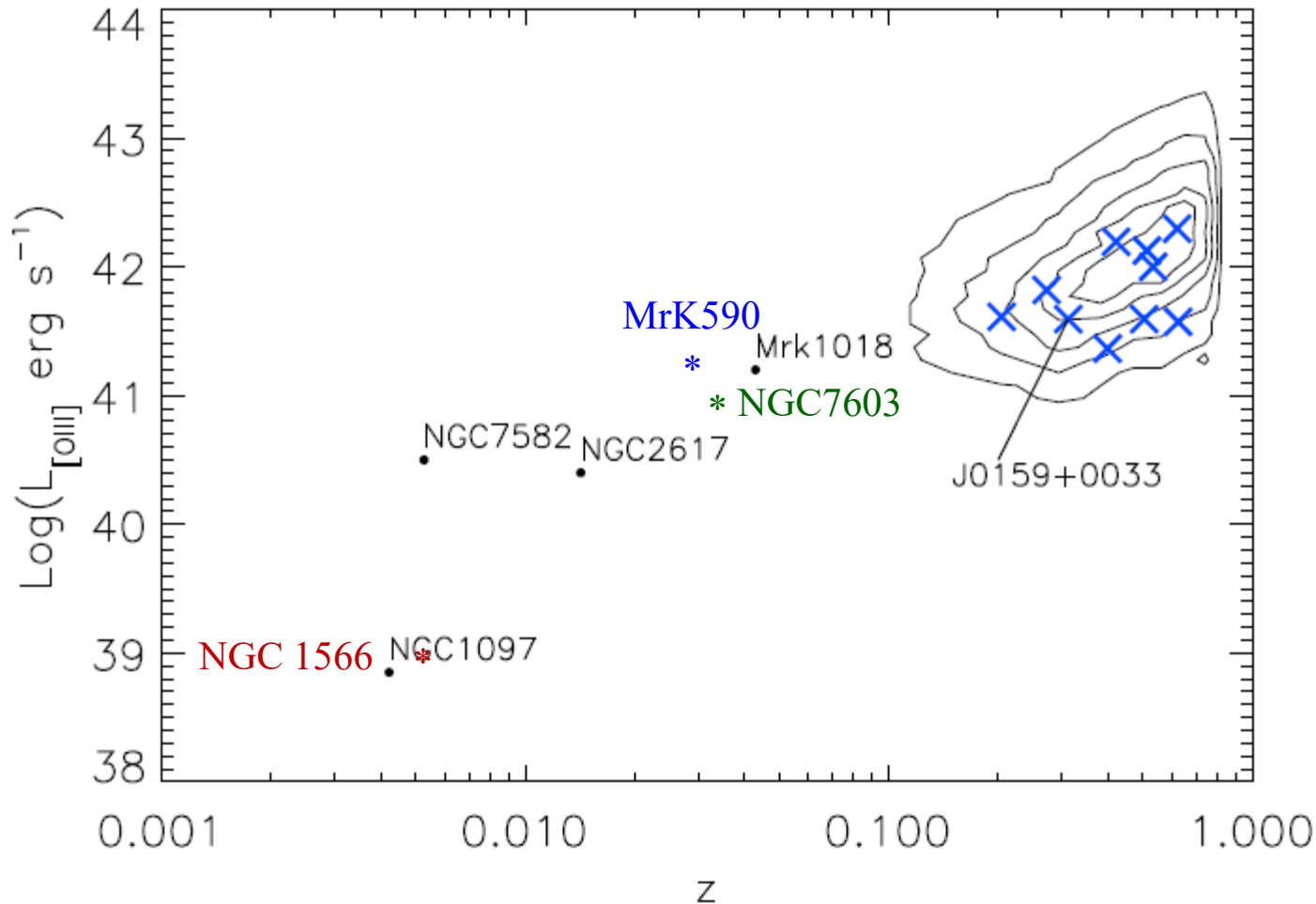


Compatible avec le spectre – Il existe toutefois une BLR étendue 30 al et massive, qui existait avant l'événement

Recensement L-z

Très riche en enseignements sur l'évolution des AGN

➔ Les télescopes de « Time domain » vont en faire des catalogues

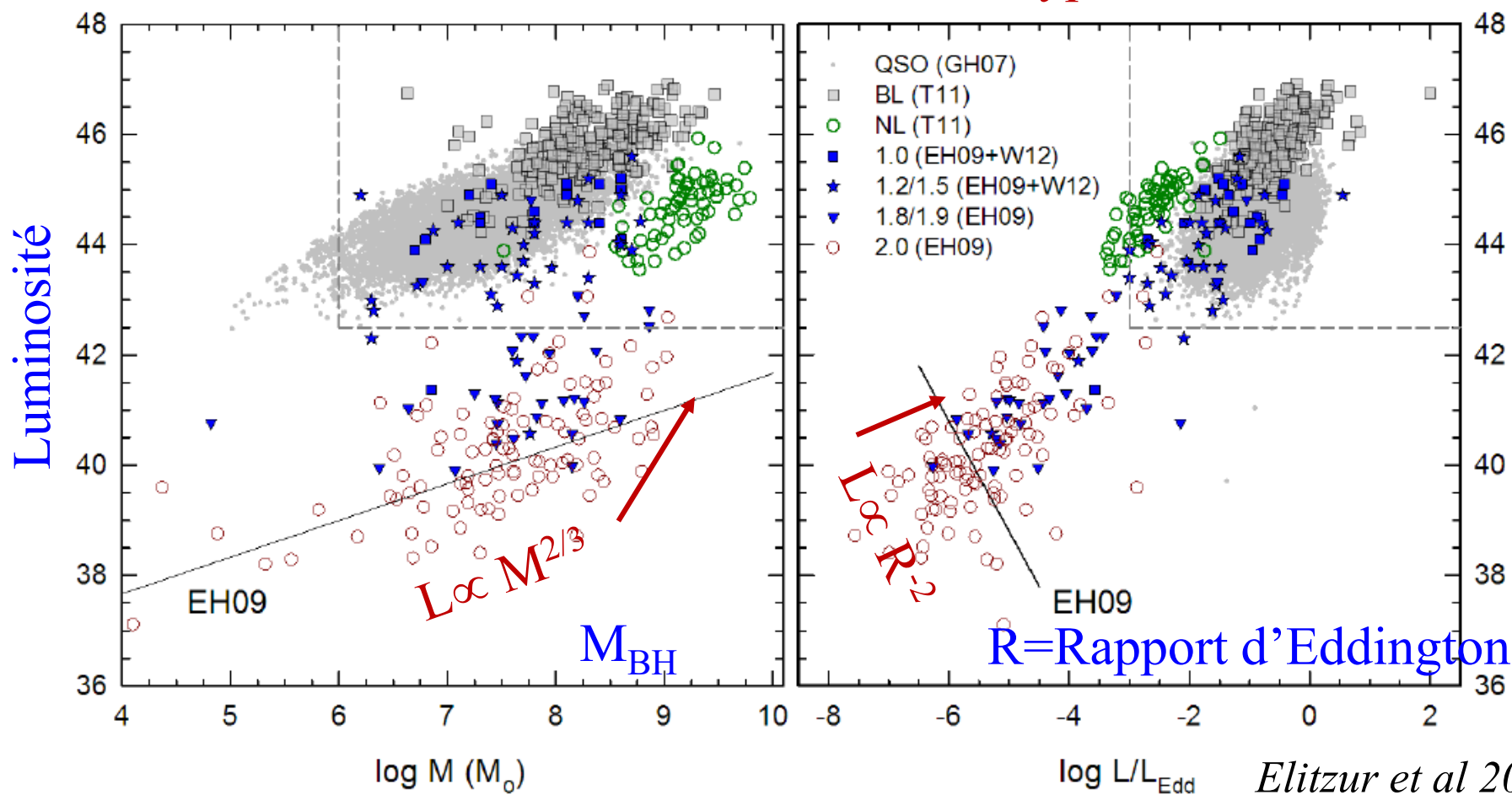


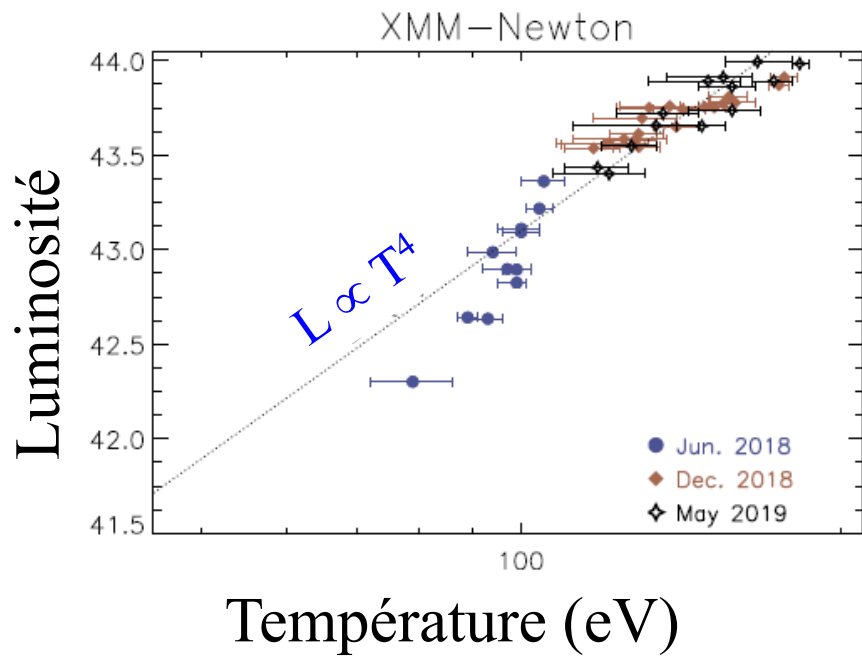
Interprétation $L \propto M^{2/3}$

Il est possible que la luminosité de l'AGN (donc $\dot{m}/\dot{m}_E$) ionise plus ou moins une BLR, qui n'émet pas à faible taux d'accrétion

Type 1 $\rightarrow$ 1.2-1.5 $\rightarrow$ 1.8-1.9 $\rightarrow$ 2

$\rightarrow$ La luminosité a une forte contribution au type d'AGN



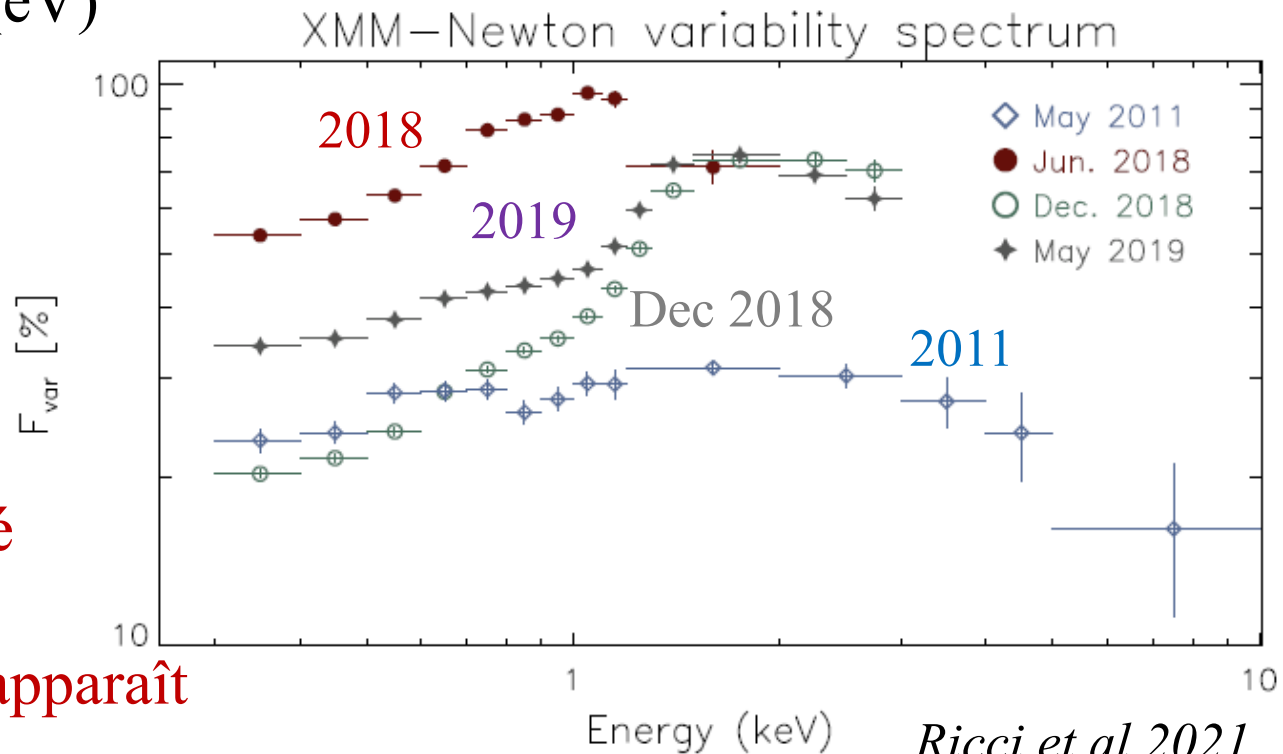


1ES 1927+654 se réveille

Change de spectre et flux en 2018,
développe une BLR
 $z=0.019$ 450 jours de suivi

Après le sursaut,
Le X non-thermique
disparaît
→ Seulement $L \propto T^4$

Mais ensuite, la dureté
augmente avec L
Le non-thermique ré-apparaît



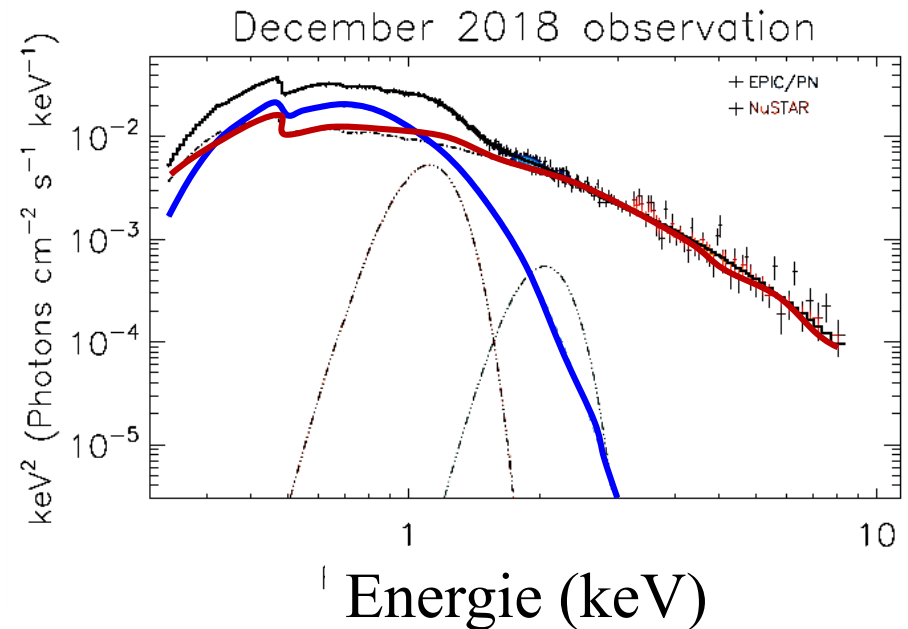
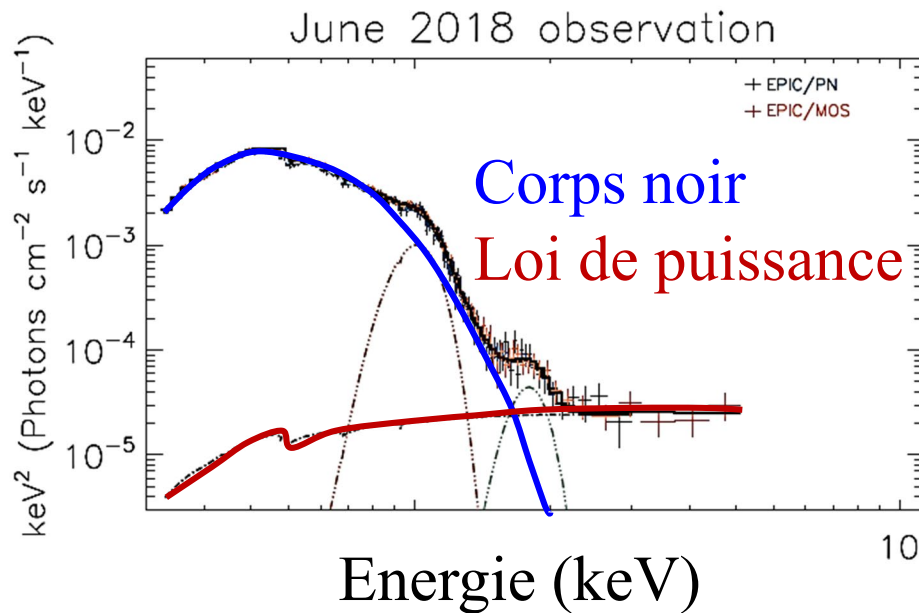
Ricci et al 2021

Diverses composantes 1ES 1927+654

Juste après l'apparition en optique de la BLR, les rayons X montrent une émission de **corps noir (X mous)** (+ Gauss raies d'émission)

Auparavant (type-2) et après, la loi de puissance revient

Loi de puissance due à la corona



➔ L'événement violent (TDE?) détruit la corona, qui se reforme ensuite

Variation dans une journée

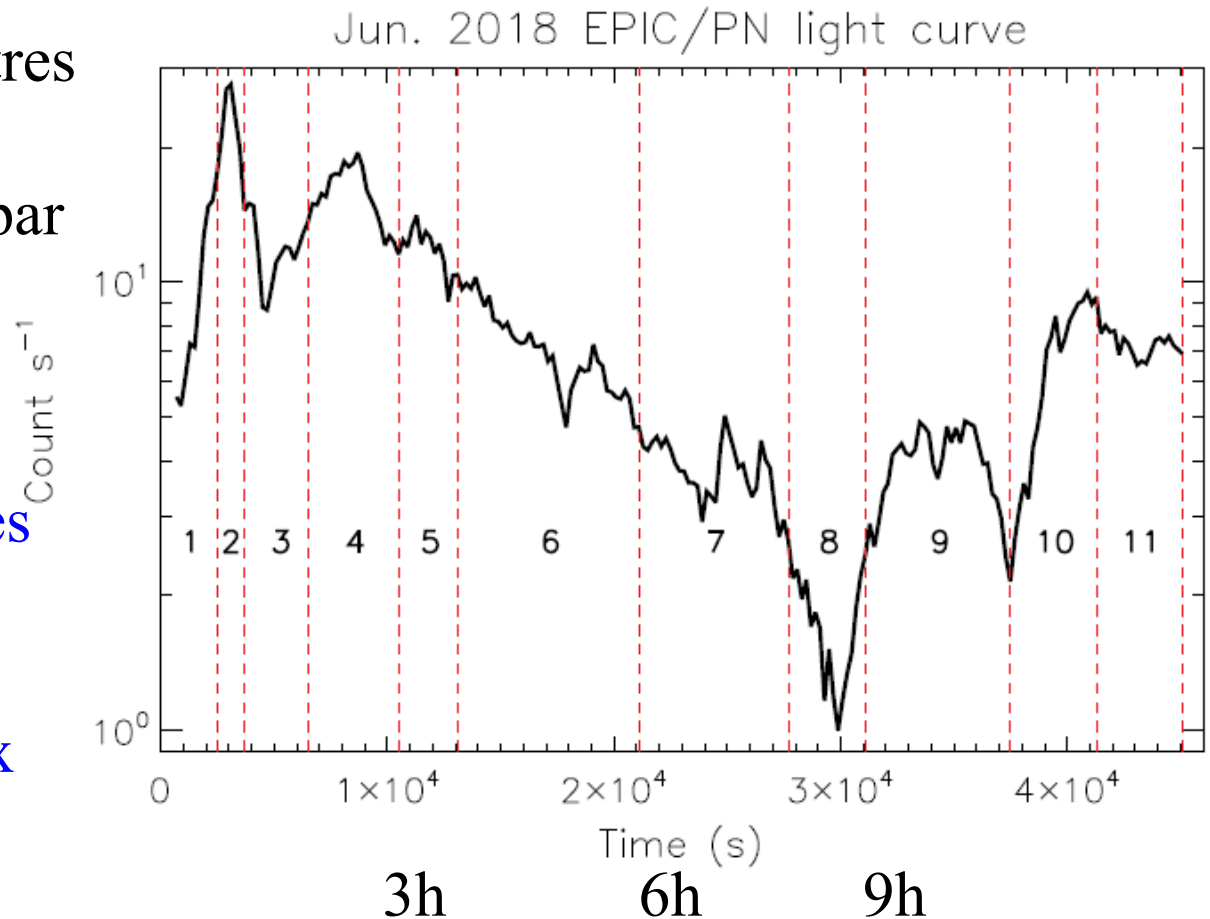
1ES 1927+654 $M_{\text{BH}} = 10^6 - 10^7 M_{\odot}$ $R_{\text{BLR}} = 5 \text{ j-lumière}$

Contrairement aux autres
AGN-CL

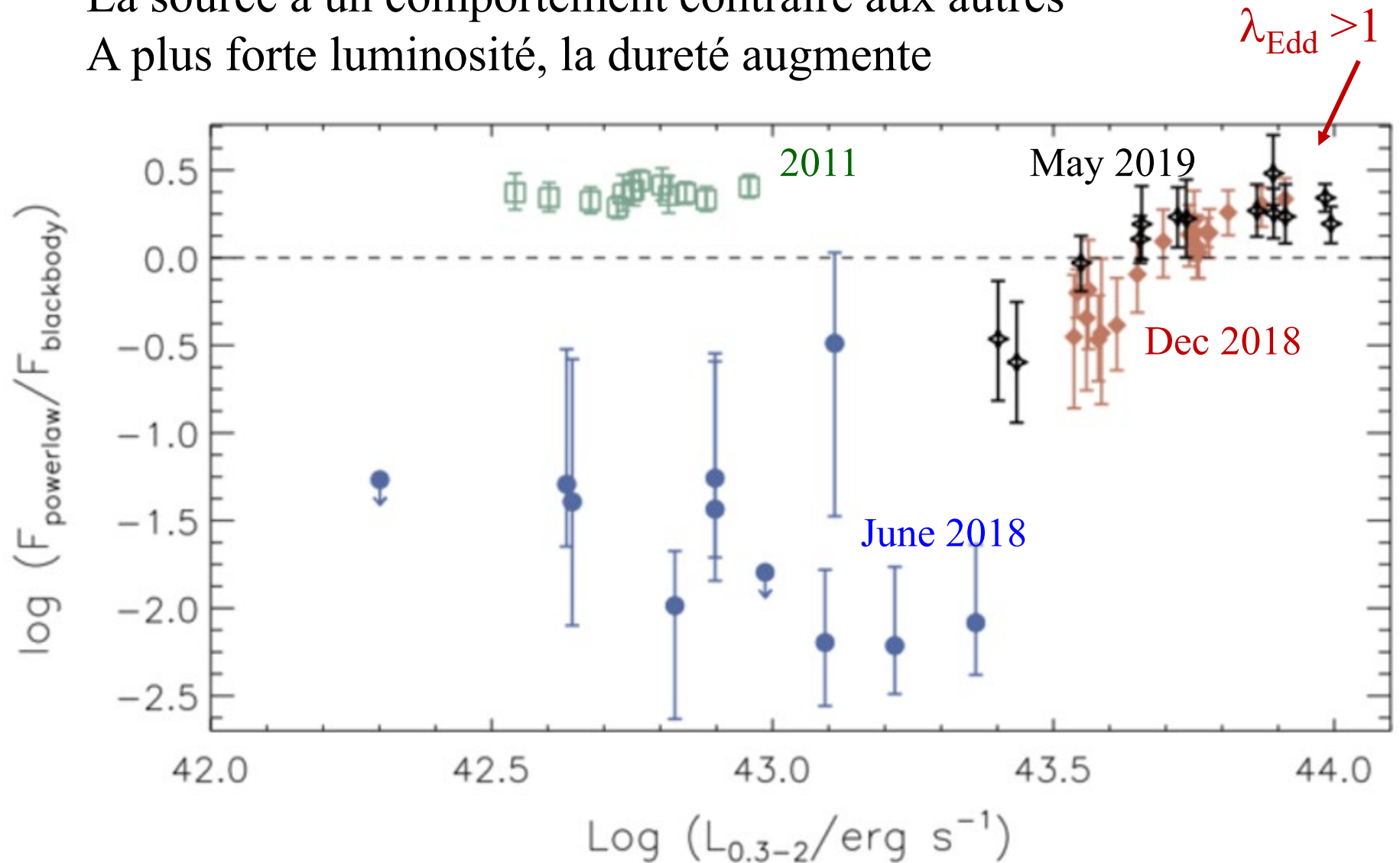
Emission X dominée par
Un corps noir 100eV

Pic de variabilité croît
vers les hautes énergies
à grand flux

X plus durs à haut flux



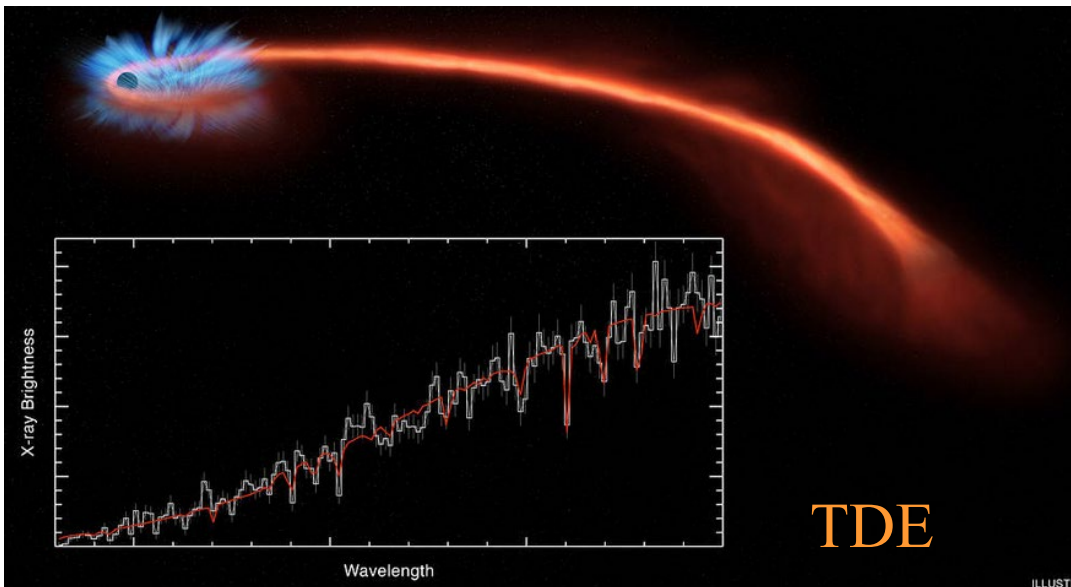
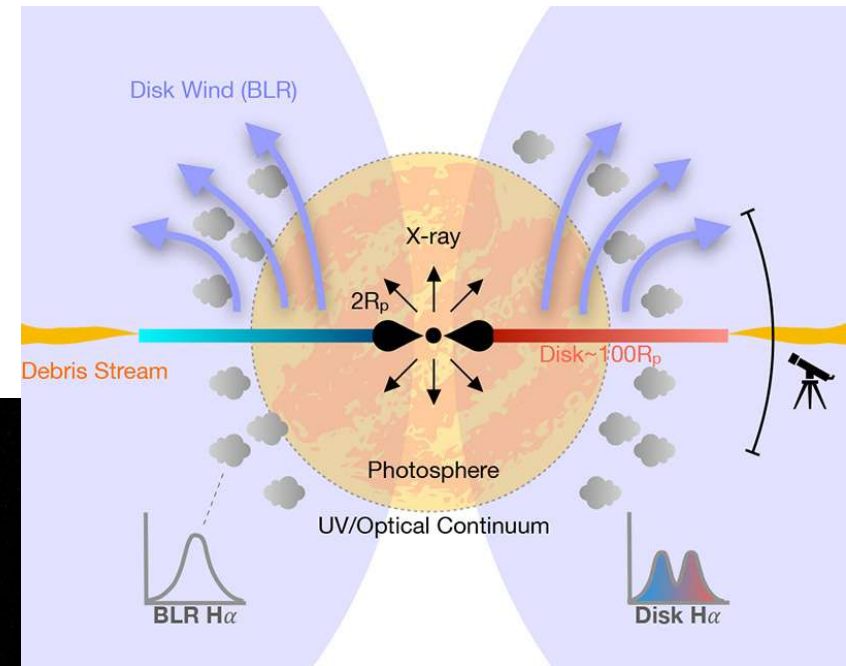
La source a un comportement contraire aux autres
A plus forte luminosité, la dureté augmente



Interprétation: chute d'une étoile?

Coupure du spectre au-delà de 2keV
Destruction de la Corona ?

La destruction de l'étoile a entraîné
celle d'une partie du disque d'accrétion



Energie d'accrétion minimum

Simulation de la chute du taux d'accrétion

Passage Sy1 $\rightarrow$ Sy1.9, $L/L_{\text{Edd}} 0.08 \rightarrow 0.006$

Excès de rayons X mous tombe plus brutalement que les X durs

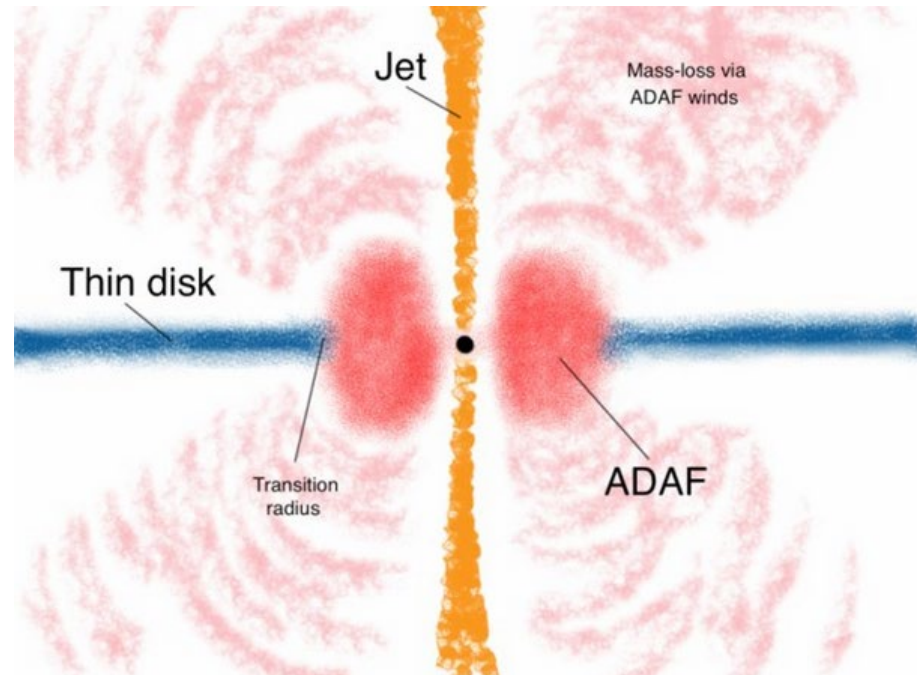
Ionization tombe $\rightarrow$ BLR disparaît

Etat de faible flux $\rightarrow$ spectre X plus dur

La partie interne du disque
d'accrétion s'évapore

$\rightarrow$ ADAF

Semblable aux binaires X
mais Prad plus importante



Modélisation du spectre de Mrk1018

Le flux chute d'un facteur 25

Modèle comprenant le torus
Compton-inverse, host

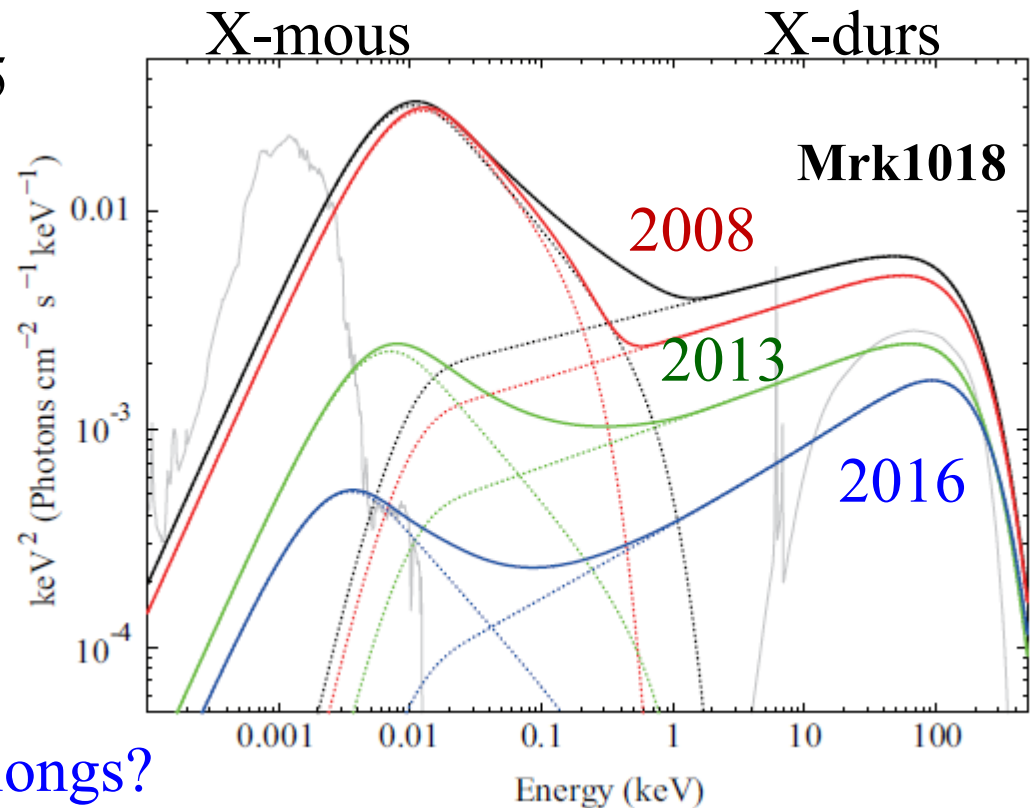
Une fois l'obscurité+
rougissement soustraits

La disparition du disque
nécessiterait des temps plus longs?

Disques dominés par la pression de radiation,
+ $B^2 \rightarrow$ Vitesse du son plus élevée

ADAF dès $L/L_{\text{Edd}} < 0.02$

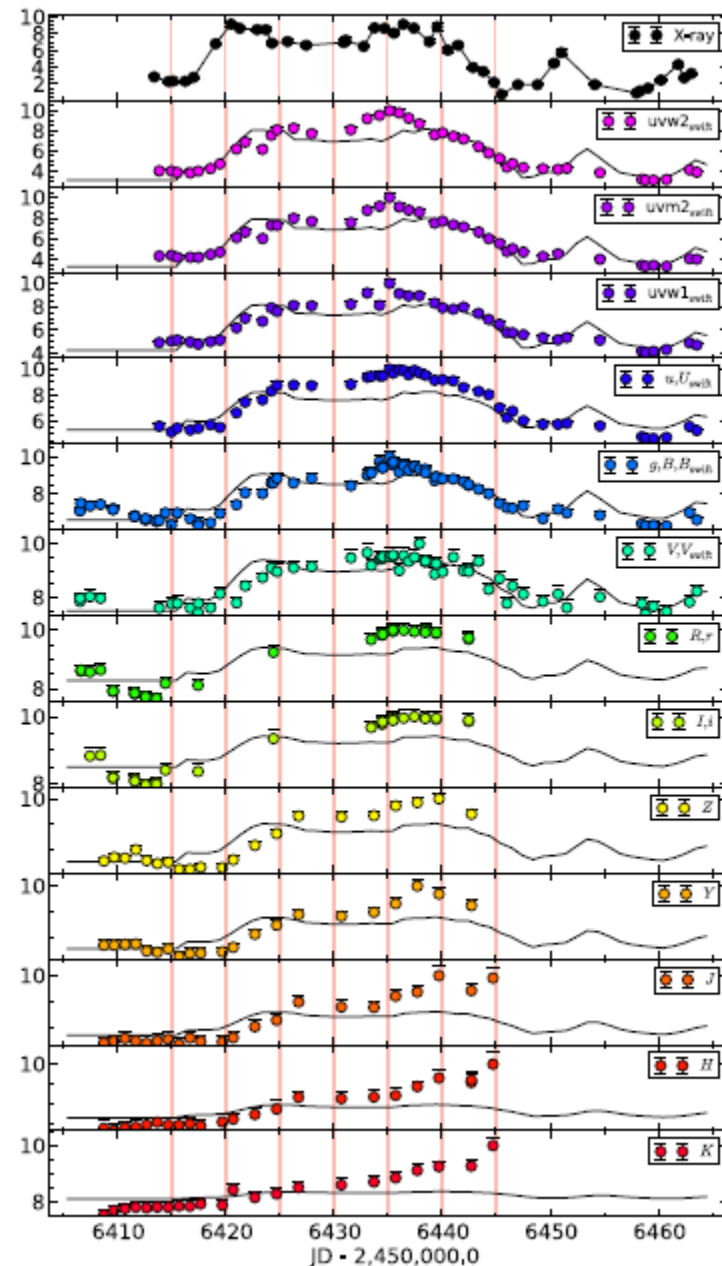
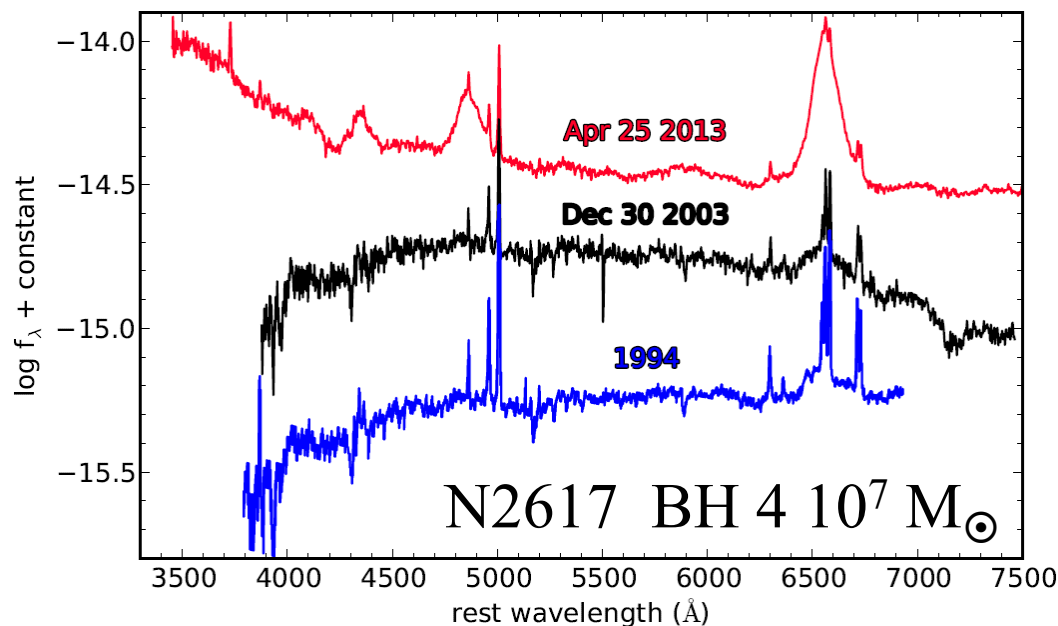
Noda & Done 2018



Modélisation de N2617

Continuum +BLR apparaissent en 2013
Sy2 $\rightarrow$ Sy 1

Pour la première fois
La succession $X \rightarrow UV (2-3j) \rightarrow NIR (6-9j)$
est claire: Chauffage progressif



Shappee et al 2014

2010, X-emission x **240!** $z=0.018$ $M_{\text{BH}} = 4 \cdot 10^5 M_{\odot}$

GSN 069
Sy2 en 1994

2018, 54 jours de suivi
Sursauts $\sim 1\text{h}$
X mous $T=120\text{eV}$

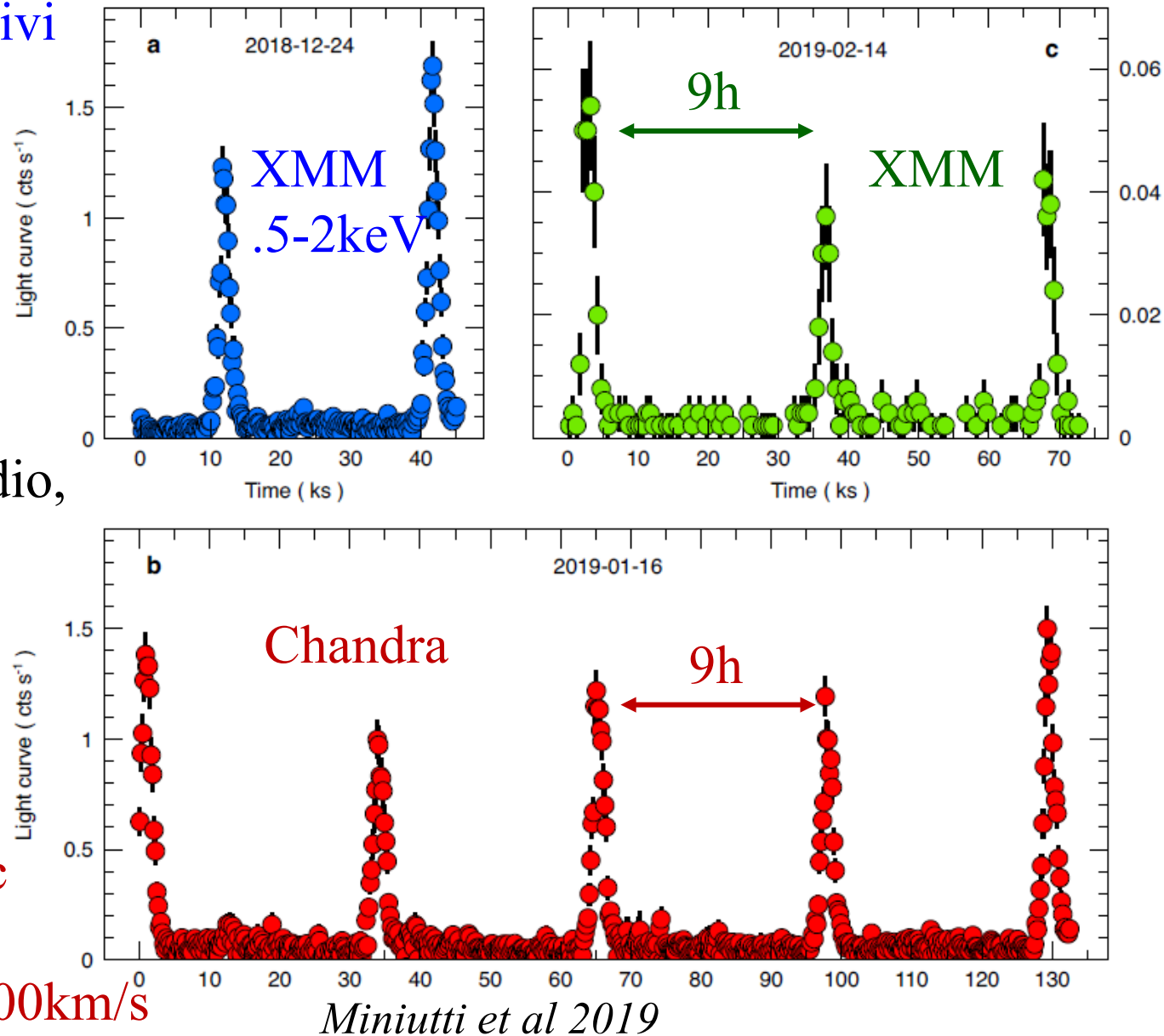
Amplitude sursauts
diminue, P croît

Sy2, détectée en radio,
Mais non-variable

TDE? Instabilité
à cycle limite

QPE Quasi periodic
Eruptions

$\rightarrow R \sim 1\text{AU}$, $V=20\,000\text{km/s}$



GSN 069 –QPE (pas de BLR)



Les sursauts à **haute énergie** commencent plus tôt, sont plus courts, et ont plus d'amplitude Max/min

Peu variable $E < 0.1\text{keV}$

Sursauts ne concernent que le centre du disque d'accrétion

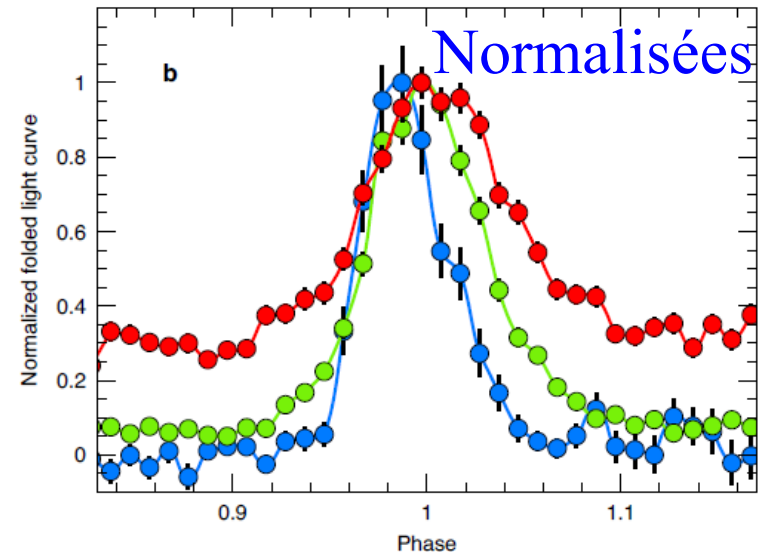
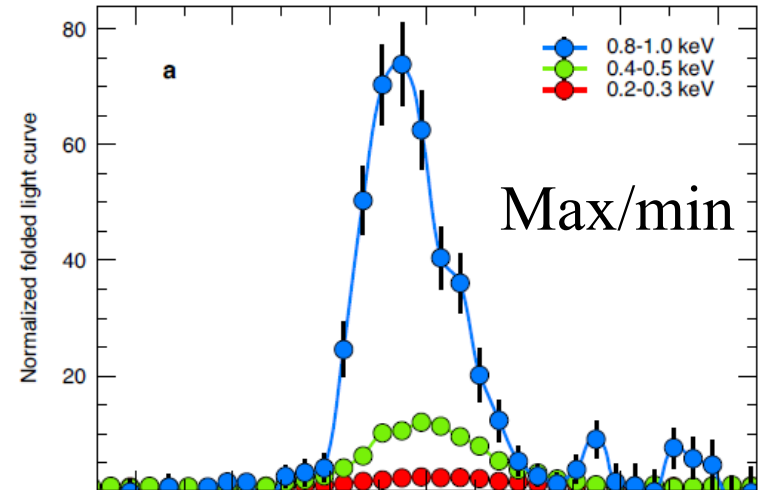
$$L/L_{\text{Edd}} = 0.5$$

Spectre thermique (corps noir)

Facile à détecter car $P=9\text{j}$

Pour des AGN plus massifs $> 30j$

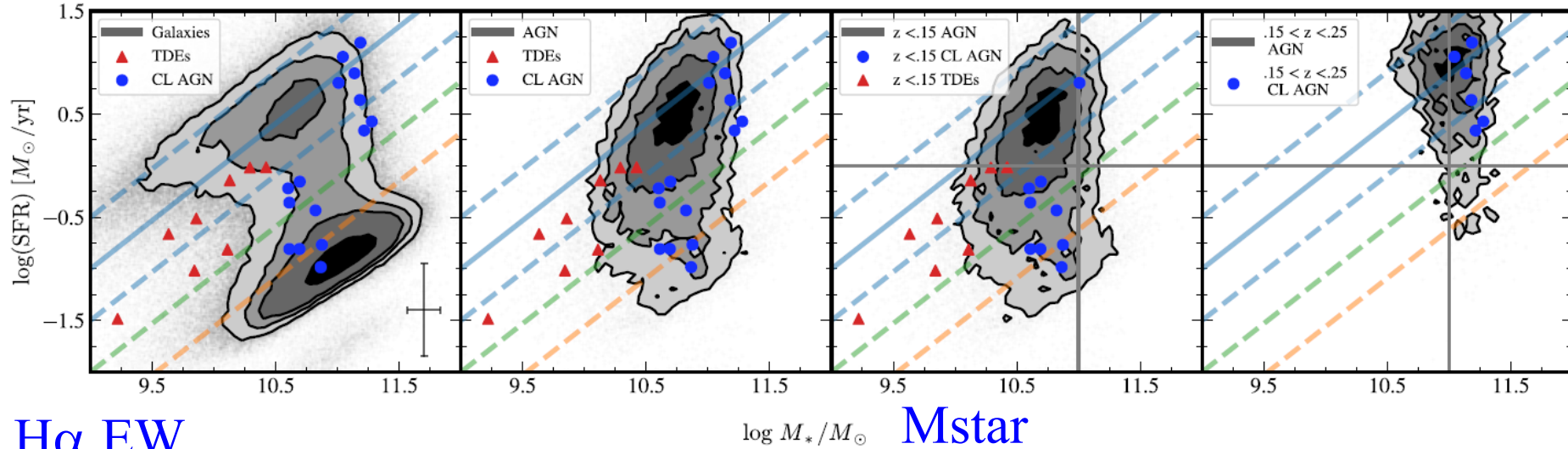
Courbes repliées



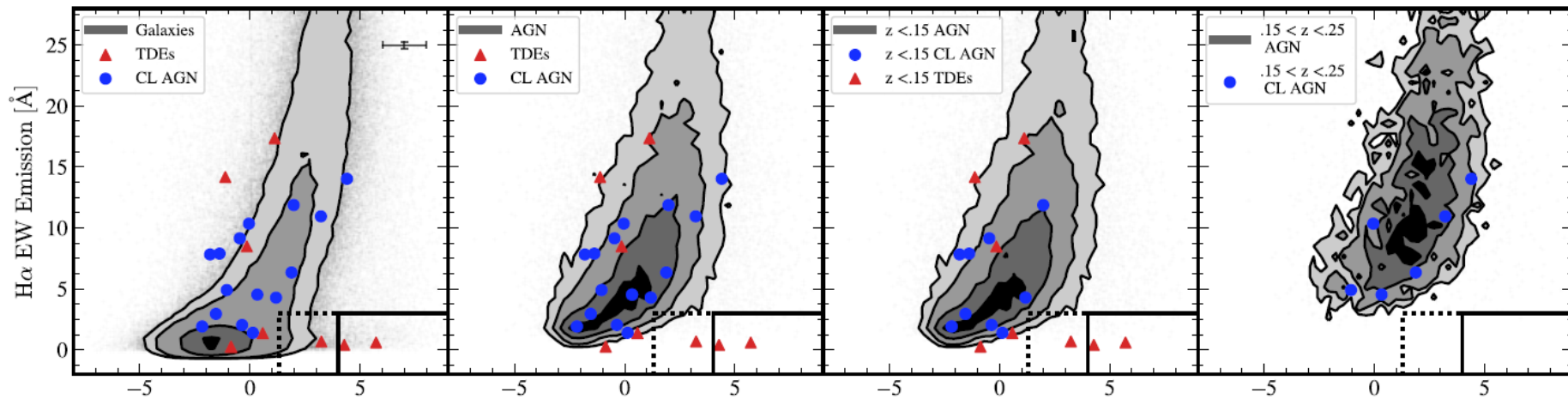
Etude des galaxies hôtes

Séquence principale, plutôt dans la vallée verte

SFR



H α EW



Dodd et al 2021

Lick H δ_{A} Absorption [$\text{\AA}$]

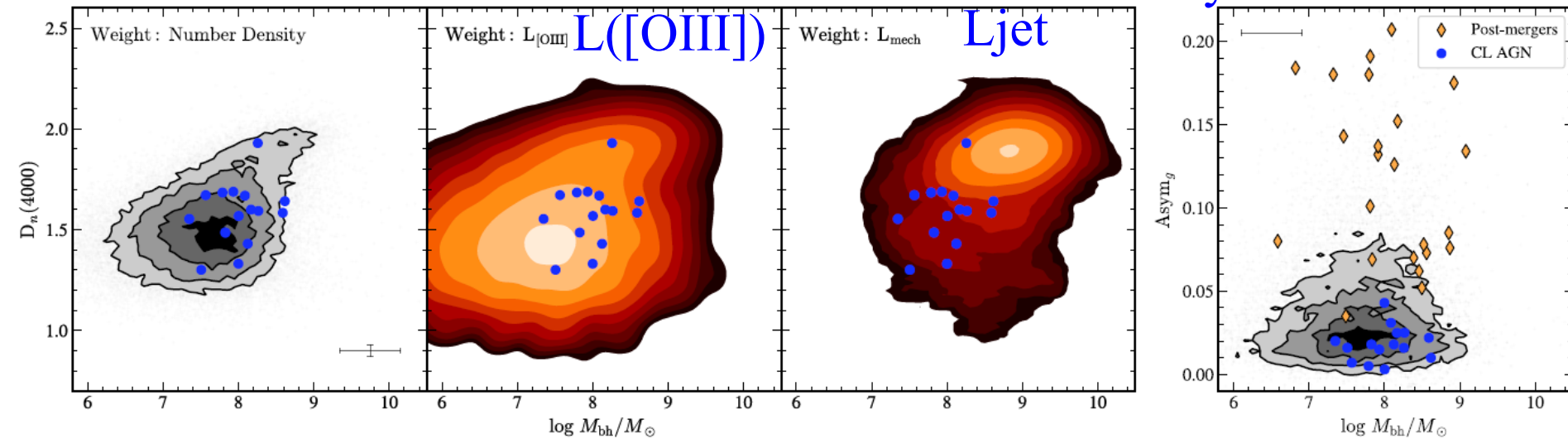
H δ Abs $\rightarrow$ post-starburst

Etude des galaxies hôtes

Pas d'asymétrie, le gaz alimentant l'AGN vient de l'évolution séculaire

$D_n(4000\text{\AA})$

Asymétrie



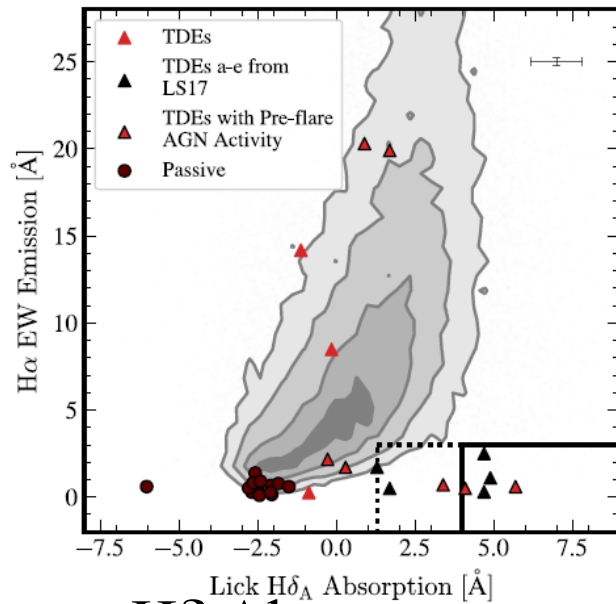
$M(\text{BH})$

Associé aux LINERS et pseudo-bulbes

Etude des galaxies hôtes

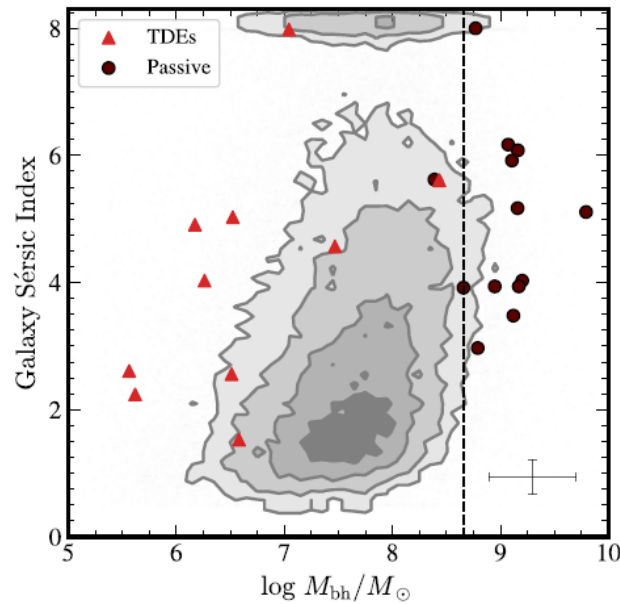
Grand index de Sérsic, bulbes massifs

H α EW

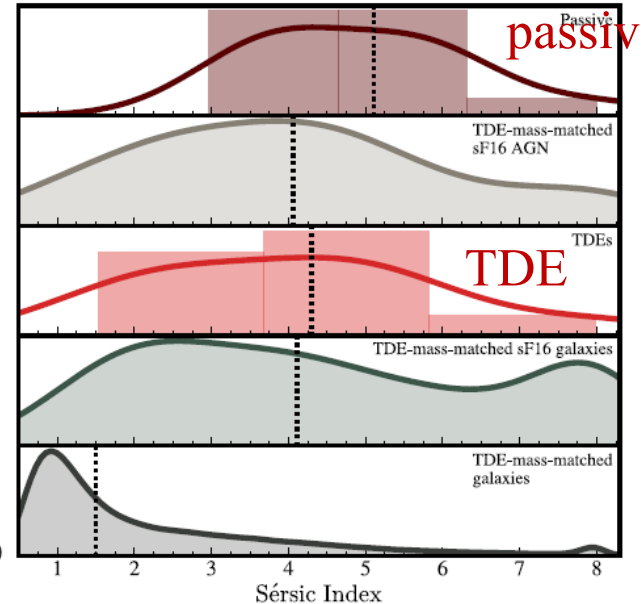


H δ Abs

Sérsic index



M(BH)



Sérsic index

AGN Radio changeants

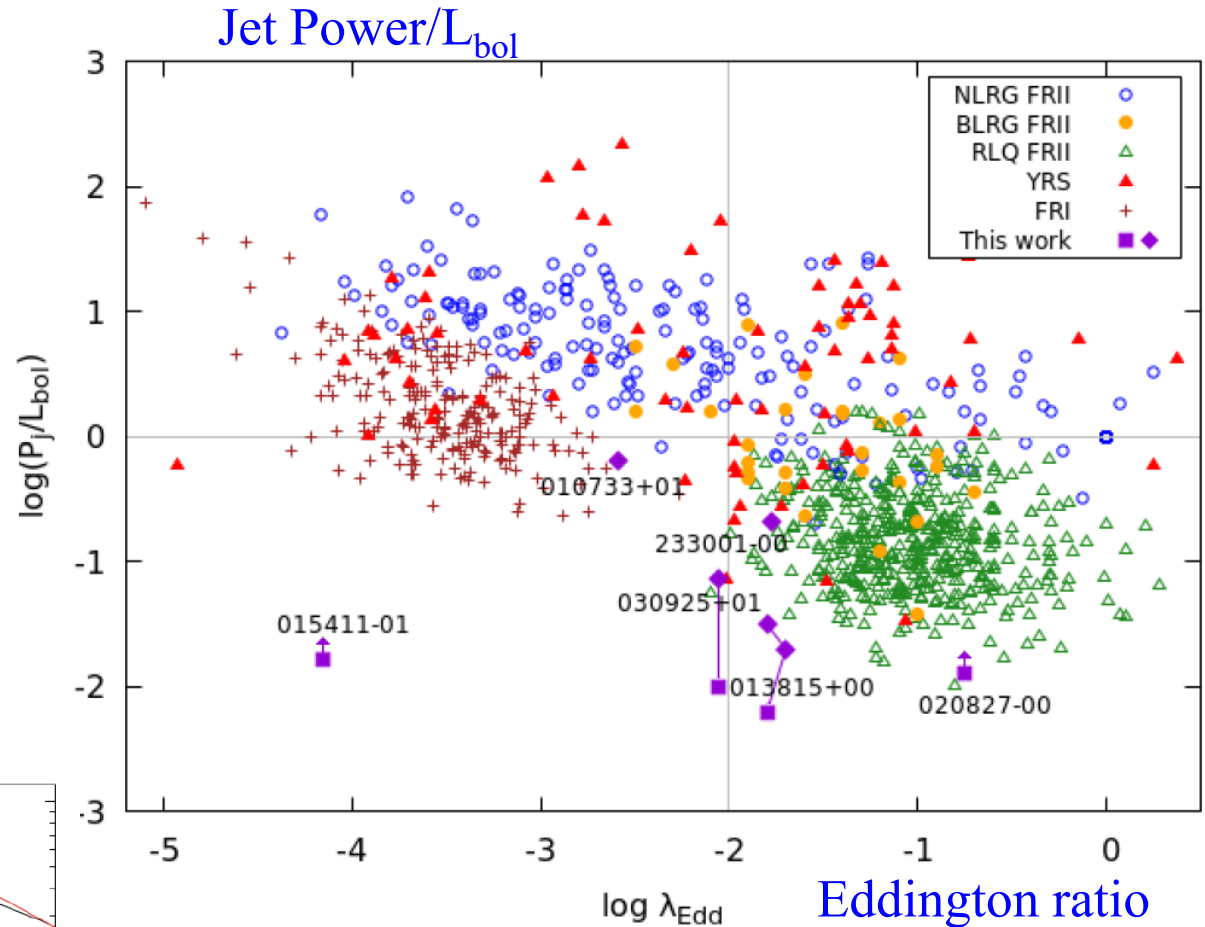
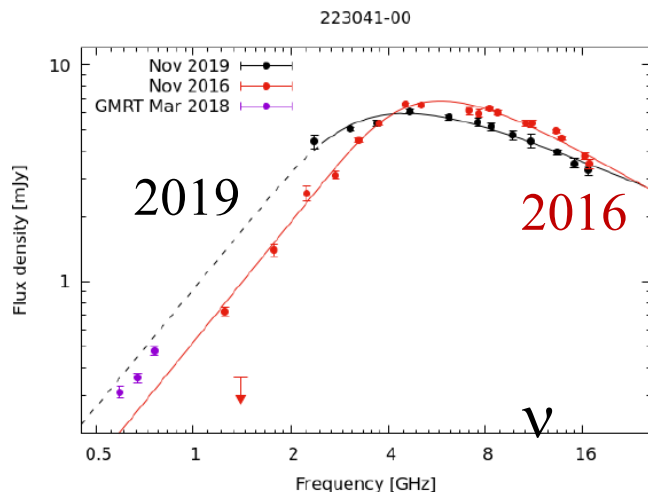
Les jets sont d'abord
enfouis dans le MIS

GPS et CSS jeunes

Max pour $\nu=1$ GHz

ν_{max} anti-corrélé avec
la taille

→ Self-synchrotron abs



Variabilité due à l'expansion des jets
+ shock dans les jets

Sources radio changeantes

GPS: jeunes, petites

CSS: Compact Steep
Spectrum

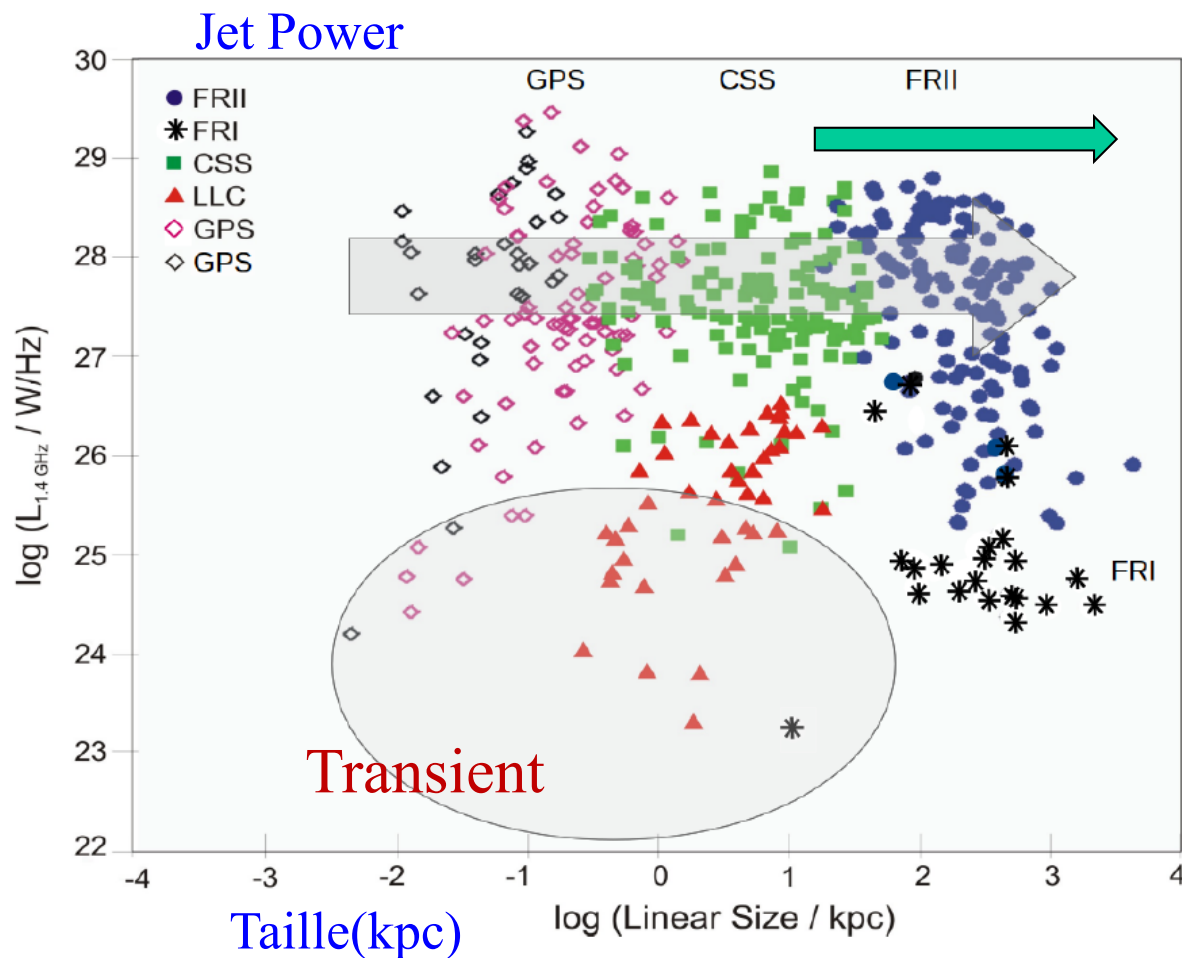
LLC Low-Lum Compact

→ Grandes FRII, FRI

Certaines sont de courte
durée de vie 10^4 - 10^5 an

D'autres varient sur
5-20 ans

De spectre convexe
→ spectre plat



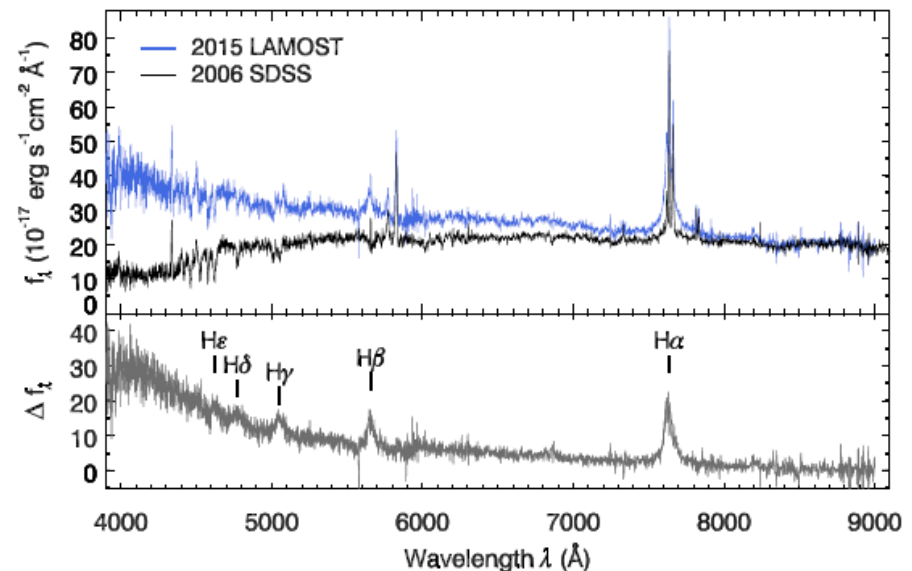
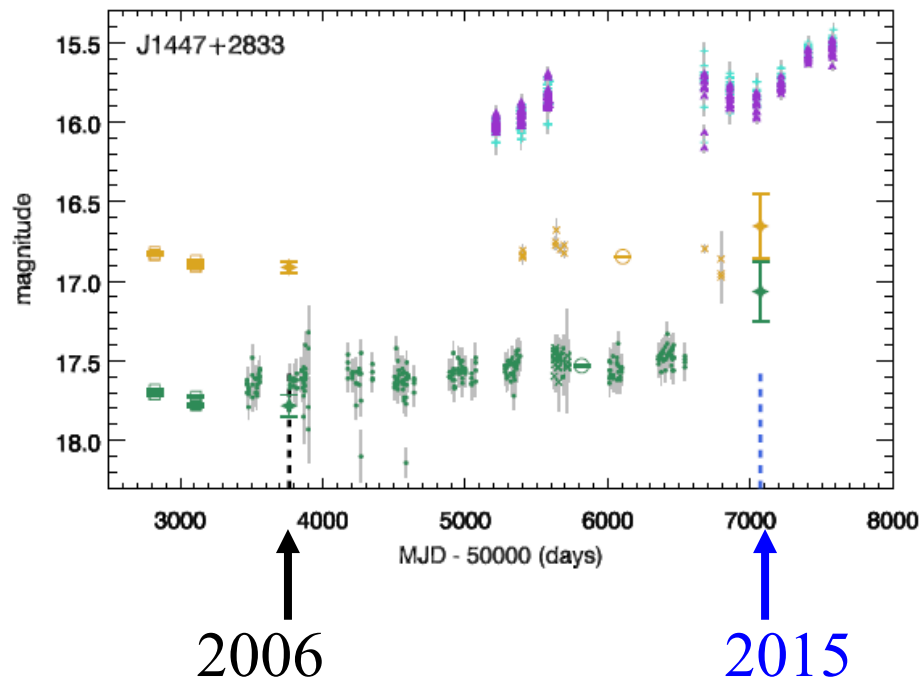
Statistiques avec les grands relevés

SDSS, LAMOST, ZTF, Vera Rubin dans le futur proche

21 Nouveaux cas CL-AGN $0.08 < z < 0.58$

Yang et al (2018) doublent le nombre connu

➔ Plus bleus à haute luminosité, mais aussi plus de mid-IR



IR-opt: incompatible avec de l'obscurisation

Yang et al 2018

Résumé

➔ Les changements rapides Sy1 → Sy2 → Sy1 montrent que l'orientation/obscurisation n'est pas le seul facteur

➔ Le taux d'accrétion est fondamental, et peut engendrer les différentes phases d'activité

➔ La vitesse du changement est plus rapide que le temps de chute libre du gaz

➔ Instabilités, excitation du gaz présent, sublimation de la poussière

➔ Occasion de mieux connaître la structure à petite échelle

