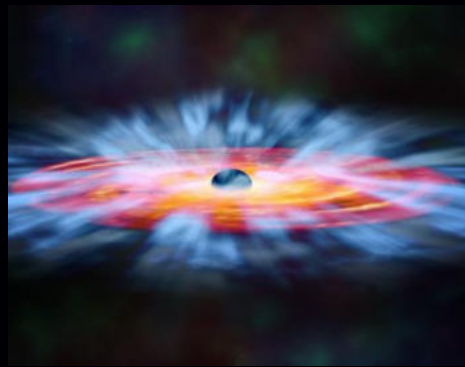


Collège de France, le 29 novembre 2021

Variabilité en rayons X des noyaux actifs de galaxies

Delphine Porquet

(CNRS, Laboratoire d'Astrophysique de Marseille)



Crédit: NASA/CXC/M.Weiss

Sommaire:

I. Introduction sur les trous noirs supermassifs

II. Les noyaux actifs de galaxies (AGN):
accrétion (disque d'accrétion + couronne chaude)
et éjection (jets, vents)

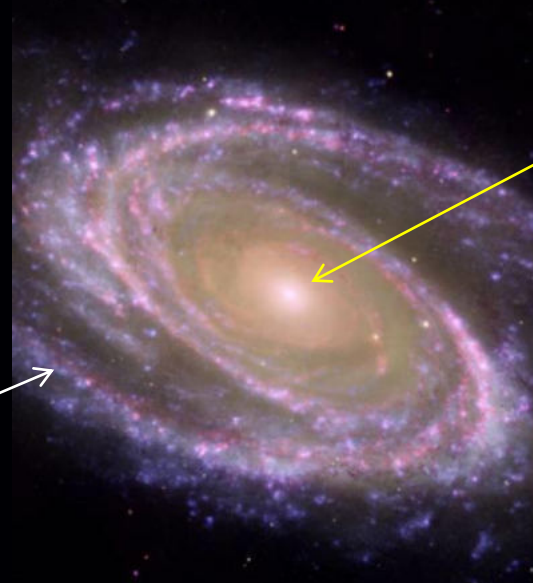
III. Les trous noirs supermassifs binaires (fusion de galaxies)

I. Introduction sur les trous supermassifs

Les trous noirs supermassifs

La plupart, voire toutes les galaxies (massives) possèdent en leur centre un trou noir supermassif d'une masse de quelques millions à quelques milliards de fois la masse du Soleil

M81
(distance ~ 11,8 millions années-lumière
Diamètre ~ 60 000 années-lumière)
[1 a.l.: 10 000 milliards de kilomètres]



Le noyau de cette galaxie contient un trou noir supermassif de ~ 60 millions de masses solaires

« La galaxie hôte »

Crédit: NASA/JPL-Caltech/ESA/Harvard-Smithsonian CfA

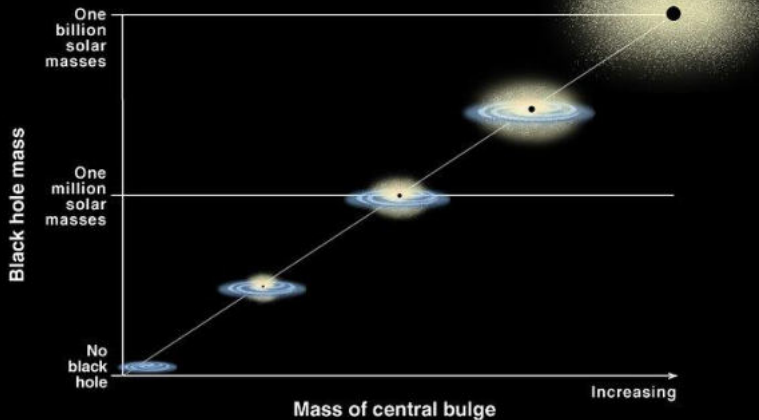
« L'horizon des événements »: $R_S \equiv 2 GM/c^2$ (« rayon de Schwarzschild ») la vitesse de libération devient supérieure à la vitesse de la lumière : aucun rayon lumineux ne peut s'échapper

Pour $M_{TN} = 1 M_{Soleil}$ → $R_S \sim 3$ km
Pour $M_{TN} = 60 \cdot 10^6 M_{Soleil}$ → $R_S \sim 180$ millions km
(masse du Soleil: $2 \cdot 10^{30}$ kg)

$R_G \equiv GM/c^2$ ("rayon gravitationnel")

Relation entre la masse du trou noir supermassif et les propriétés du bulbe de sa galaxie hôte

Correlation Between Black Hole Mass and Bulge Mass



Crédits:

Hubble/ESA; K. Cordes, S. Brown (STScI)

Masse du trou noir supermassif
~ 0.5% la masse du bulbe de sa galaxie hôte.

+ Corrélations avec la dispersion des vitesses des étoiles, la luminosité du bulbe de la galaxie, ...

⇒ Lien très étroit entre les trous noirs supermassifs et le bulbe de leurs galaxies hôtes

⇒ Liens entre leurs formations et/ou leurs évolutions :

- Phénomène de rétro-action entre les trous noirs supermassifs et leurs galaxies hôtes.
- Fusion de galaxies.

Existence des trous noirs supermassifs dans l'Univers proche et très lointain

Le plus proche:

Sgr A* (masse ~ 4 millions $\times M_{\text{Soleil}}$) situé au centre de notre Galaxie ~ 26000 a.l.
« inactif » actuellement mais présente des « éruptions » journalières.

Le plus lointain observé à ce jour

- **J 0313-1806** $z = 7.642 \pm 0.013$ (Wang al. 2021)
Age ~ 670 millions d'années après le Big Bang seulement !
Masse ~ 1.6 milliards $\times M_{\text{Soleil}}$



Vue d'artiste

Crédits: NOIRLab/NSF/AURA/ J. da Silva/Keck observatory

~ 200 quasars découverts à ce jour à $z \geq 6$ (≈ 1 milliard d'années après le Big Bang)

→ Formés quand l'Univers était extrêmement jeune.

Les noyaux de galaxies sont dits: "actifs" (Les noyaux actifs de galaxies: AGN)
ou "inactifs" (par ex. notre Galaxie)

II. Les noyaux actifs de galaxies (AGN)

Les Noyaux Actifs de galaxies (Active Galactic Nuclei: AGN)

Galaxies possédant une source centrale émettant une quantité phénoménale d'énergie
x 10 - 1000 celle de l'ensemble de la galaxie hôte

Sur l'ensemble du spectre électromagnétique
(radio → rayons gamma):

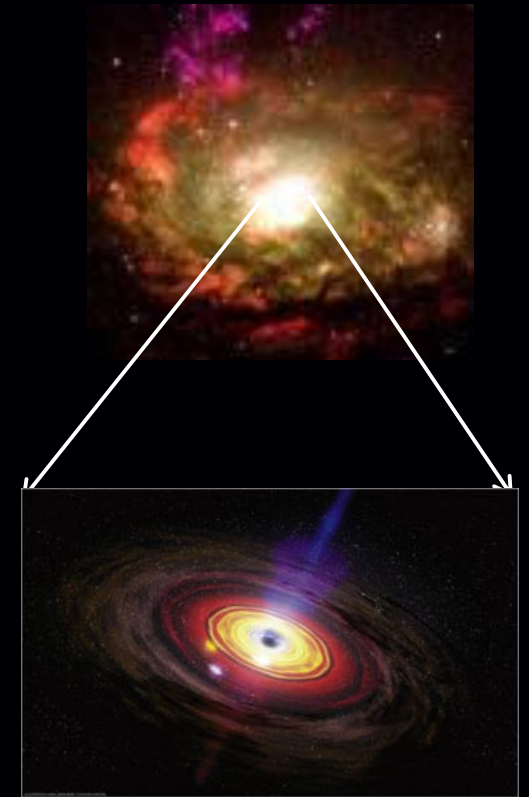
$L_{\text{bolométrique}} \sim$ quelques 10^{42} à quelques 10^{47} erg/s
(1 erg/s \equiv 10^{-7} Watts)
(un réacteur nucléaire $\sim 10^{10}$ watts)

En rayons X: $L_X \sim$ qqs 10^{41} à qqs 10^{46} erg/s

Et peut montrer une variabilité en rayons X
très rapide \Rightarrow Région très compacte

\rightarrow Accrétion d'une très grande quantité de matière
sous forme de disque autour d'un trou noir supermassif central.

Efficacité de la conversion de la matière en énergie autour d'un trou noir
est très élevée ($\sim 6\% \rightarrow 40\%$) \gg fusion nucléaire des étoiles ($\sim 0.7\%$)



Vue d'artiste
Crédit: NASA/Goddard Space Flight Center

L'observation en rayons X

- Propriétés de la matière autour du trou noir supermassif :

- attirée et orbite autour du trou noir (avant d'être engloutie)
- éjectée (et donc non engloutie par le trou noir)

⇒ Phénomènes d'accrétion et d'éjection (jets, vents)

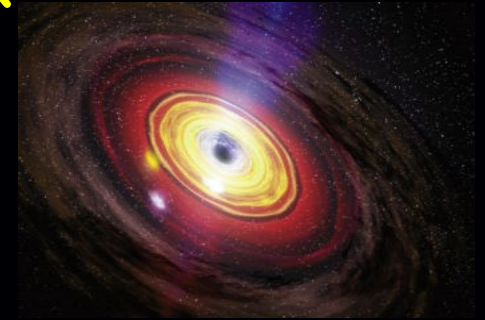
⇒ Phénomènes de rétro-action (« feedback ») entre le trou noir supermassif et sa galaxie hôte.

- Détermination du moment cinétique (« spin ») du trou noir supermassif :

⇒ Evolution des trous noirs supermassifs :

- ✓ fusion de galaxies
- ✓ mode d'accrétion (chaotique ou continue/cohérent),

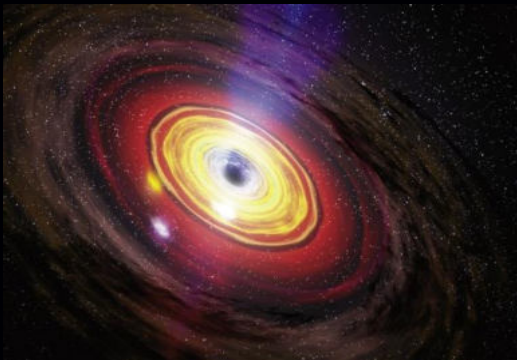
→ Importance de l'étude des trous noirs supermassifs pour comprendre l'évolution des galaxies et plus généralement celle de notre Univers.



Vue d'artiste
Crédit: NASA/Goddard Space Flight
Center

**A. Phénomènes d'accrétion:
Croissance des trous noirs supermassifs
et évolution des galaxies**

Disque d'accrétion et couronne chaude



Vue d'artiste

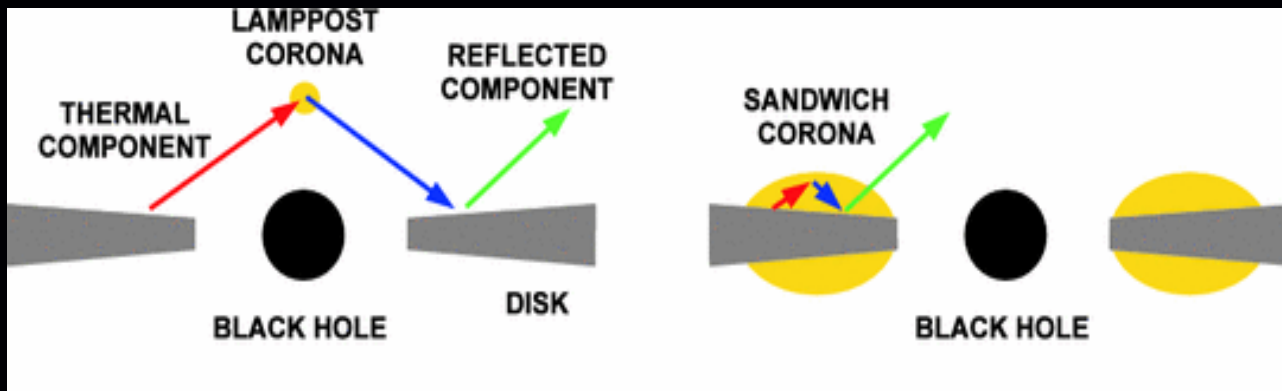
Crédit: NASA/Goddard Space Flight Center

$$T_{\text{disque}} \propto (M_{\text{TN}})^{-1/4} (R)^{-3/4} m_{\text{acc}}^{1/4} \text{ Kelvin}$$

- $M_{\text{TN}} = 10 M_{\text{Soleil}} : T_{\text{interne}} \sim 10^7 \text{ K} \rightarrow \text{X-rays}$

- $M_{\text{TN}} = 10^8 M_{\text{Soleil}} : T_{\text{interne}} \sim 10^5 \text{ K} \rightarrow \text{UV}$

Or les AGN émettent en rayons X $\sim 10\%$ de leur luminosité totale
 \Rightarrow existence d'une **couronne chaude** ($\langle kT \rangle \sim 50 \text{ keV}$, $\langle T \rangle \sim 6 \times 10^8 \text{ Kelvin}$)
mais sa géométrie est inconnue.



(Bambi 2017)

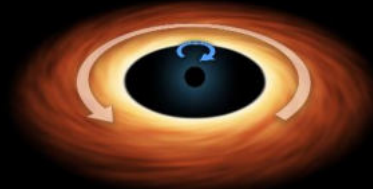
Le moment cinétique (spin) des trous noirs supermassifs

La mesure du moment cinétique du trou noir décrit l'état général de rotation

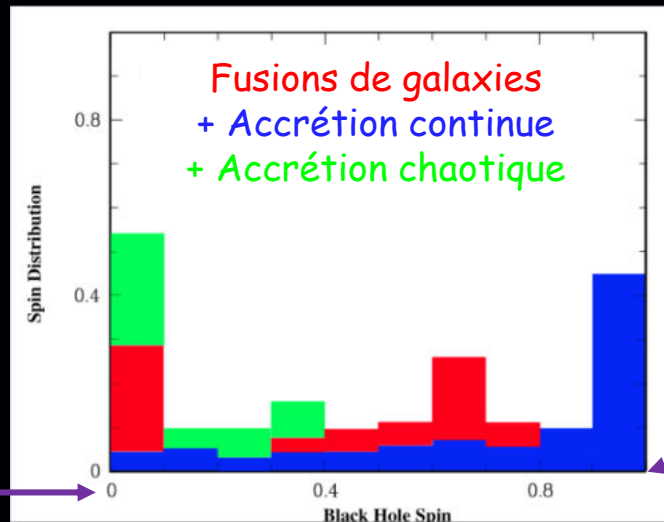
Sa distribution (détermination de sa valeur dans un grand nombre de trous noirs supermassifs) nous apporte des informations cruciales sur :

- fusion de galaxies \Rightarrow Evolution des galaxies
- la façon dont la matière a été accrétée par les trous noirs supermassifs: de façon continue/cohérente ou chaotique

Rétrograde

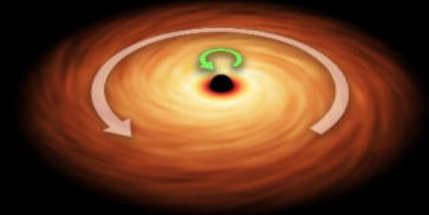


$a=0$: TN sans rotation
(« Schwarzschild »)



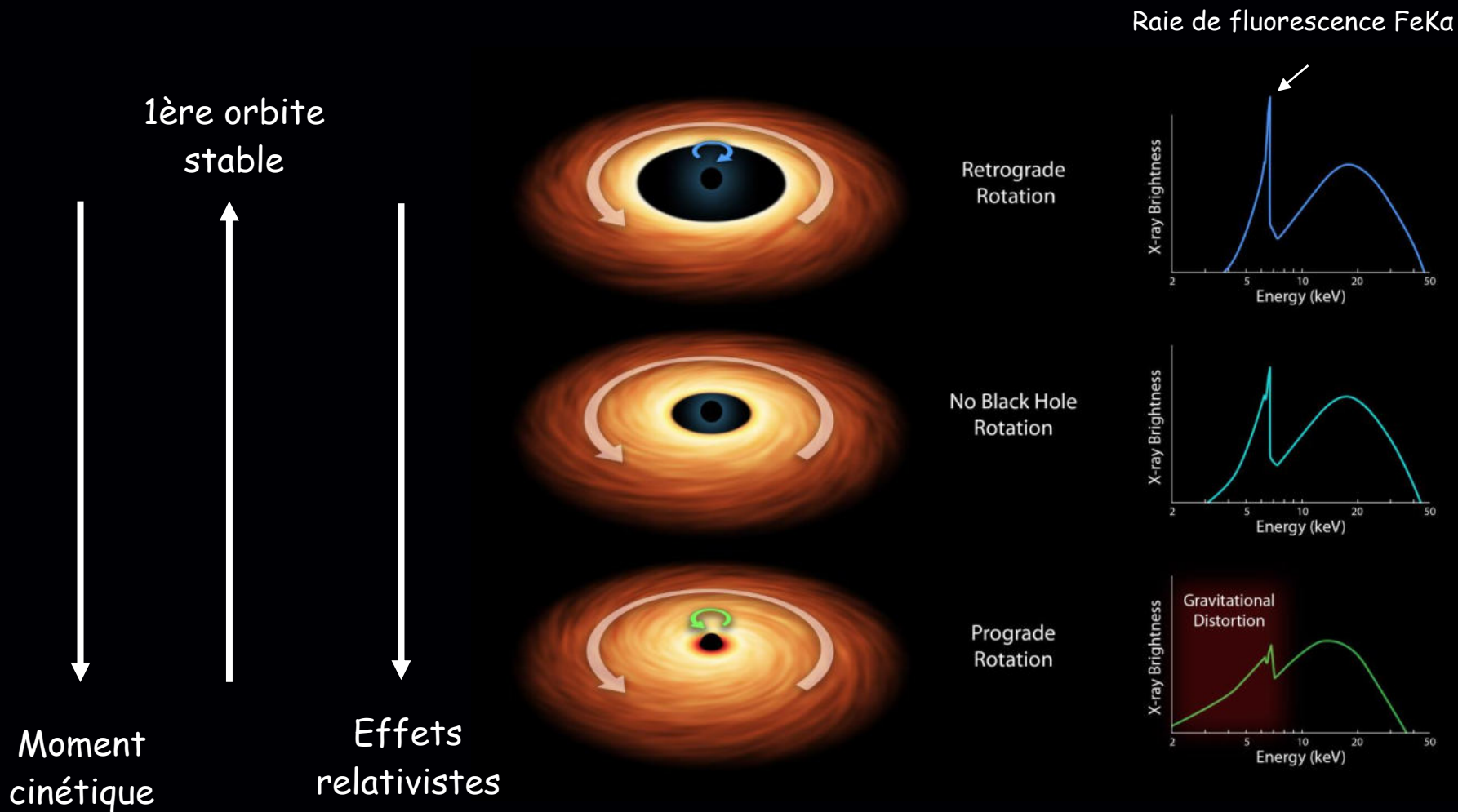
(Adapté de Berti & Volonteri 2008)

Prograde



$a=0.998$: TN en rotation maximale ("Kerr")

Mesure du moment cinétique du trou noir: Impact des effets relativistes sur le spectre en rayons X



Crédit: NASA/JPL-Caltech

Ark 120

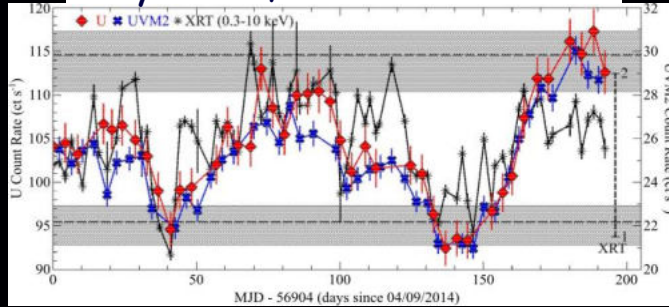
(Seyfert 1; $z=0.03271$; $M_{\text{TN}} \sim 1.5 \times 10^8 M_{\text{Soleil}}$)

Courbe de lumière (Swift)

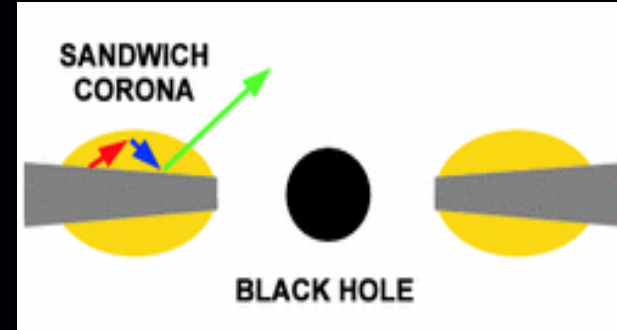
Rayons X, UV et visible

flux
"haut"

flux
"bas"



(Porquet et al. 2019)



(Bambi 2017)

2 observations simultanées avec les satellites XMM-Newton (0.3-10 keV; ESA) et NuSTAR (3-79 keV; NASA) :

flux "bas" (2013) et flux "haut" (2014): \sim un facteur 2 entre les deux observations.

En tenant compte de l'énergétique du système disque d'accrétion (visible, UV) et couronne chaude (rayons X):

- Angle d'inclinaison du système par rapport à notre ligne de visée ~ 30 degrés
- Rétrécissement de la couronne: $R \sim 85 R_G$ (flux "bas") et $R \sim 14 R_G$ (flux "haut")

[$R_G \equiv GM/c^2$; pour $M_{\text{TN}} \sim 1.5 \times 10^8 M_{\text{Soleil}}$: $R_G \sim 2.2 \times 10^8$ km (~ 1.5 u.a.)]

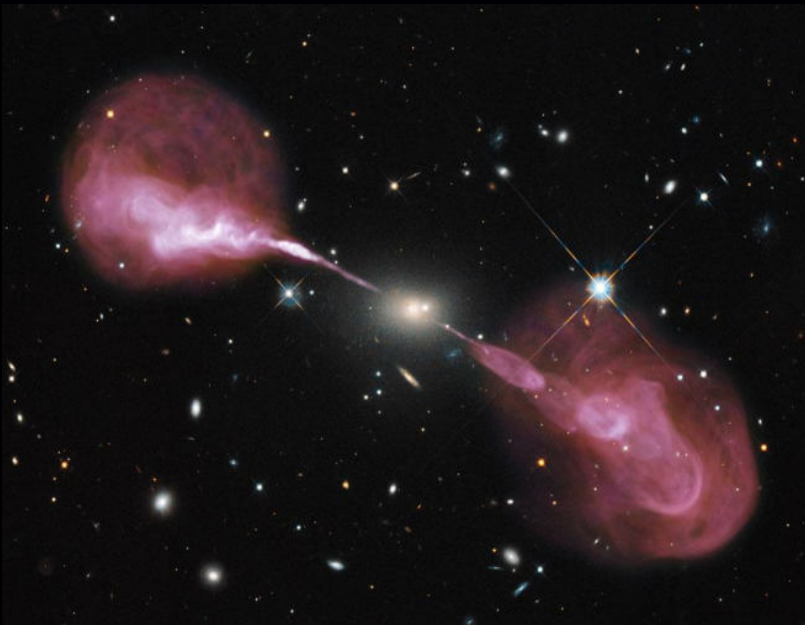
- Moment cinétique $\sim 0.83 \Rightarrow$ accrétion continue

**B. Ejection de matière:
jets, vents**

Mais les trous noirs ne font pas qu'attirer de la matière.

En effet avant de tomber dans le trou noir, une partie de la matière peut être éjectée sous forme ... de **jet** (radio et/ou rayons X)

~10% des galaxies actives sont de très forts émetteurs en radio (jets)



Crédits: NASA, ESA, S. Baum & C. O'Dea (RIT), R. Perley and W. Cotton (NRAO/AUI/NSF), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Exemple:

Hercules A (3C 348; galaxie elliptique) :

Distance de 2 milliards d'années-lumière ($z=0.155$).

$M_{\text{TN}} \sim 6 \times 10^9 M_{\text{Soleil}}$

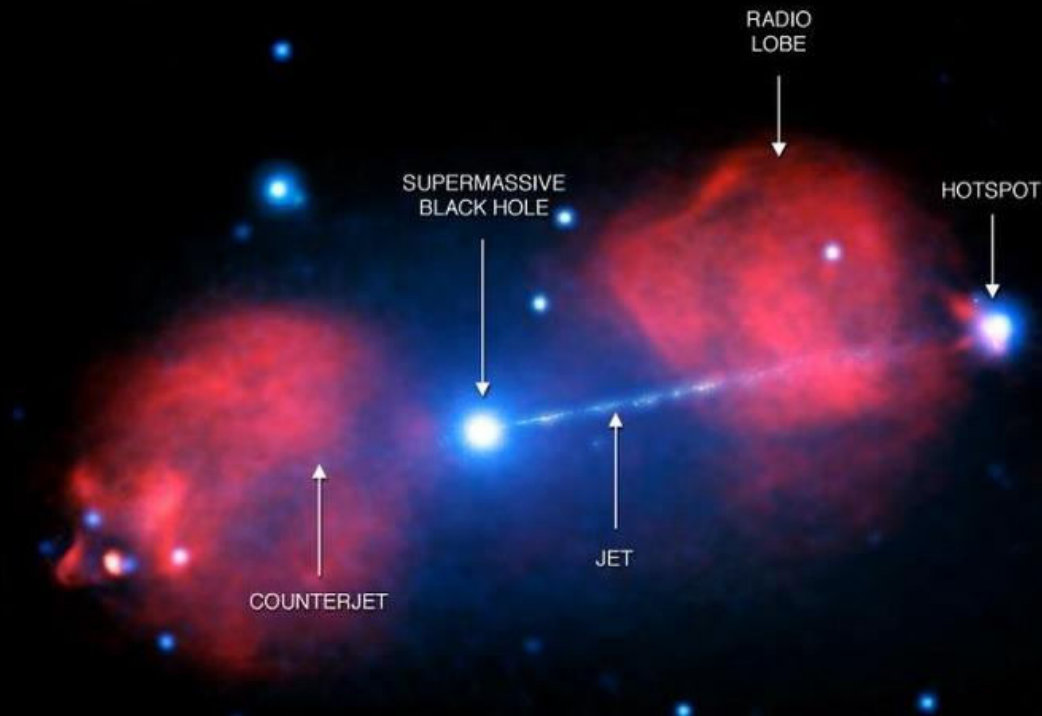
Source radio ~ un milliard de fois plus intense que le Soleil.

C'est une des galaxies les plus brillantes en radio.

Jets ~ 1.5 millions d'années-lumière.

Pictor A : Galaxie radio de type FR II
Distance ~ 460 millions d'a.l. (z=0.035)

Image composite en rayons X et Radio

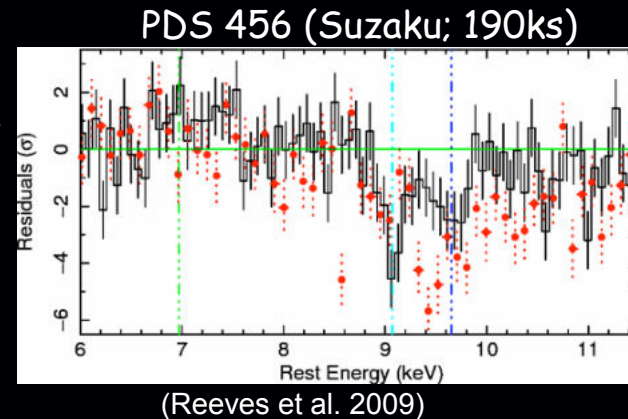


Longueur du jet : ~300 000 années-lumière

$M_{\text{TN}} \sim 600$ millions de M_{Soleil}

(Crédits: X-RAY: NASA/CXC/UNIV OF HERTFORDSHIRE/M.HARDCASTLE ET AL., RADIO: CSIRO/ATNF/ATCA)

Ejections sous forme de vents provenant des régions internes du disque de matière « Ultra-fast outflows » (UFOs)



Raies en absorption du fer très ionisé FeXXV et FeXXVI
Décalées à plus haute énergie
⇒ très grandes vitesses (éjection)

Observés en rayons X dans $\sim 40\text{-}50\%$ de tous les AGN proches radio-quiet et radio-loud (Tombesi et al. 2010, 2014).

+ AGN à grand décalage cosmologique : $z \sim 1.4\text{-}3.9$ (Chartas +21).

Ultra-fast outflows ("UFOs")



Vue d'artiste
Crédit: NASA/CXC/M.Weiss

Vitesse $\sim 0.03-0.3 c$ ($\sim 9\,000 - 90\,000$ km/s)
Luminosité cinétique de ces UFOs
 $\sim 5-10\%$ de luminosité totale de l'AGN
 \Rightarrow peut impacter significativement la galaxie hôte

Ces vents pourraient expliquer les phénomènes de rétro-action entre le trou noir supermassif (accrétion et éjection) et sa galaxie hôte.

\Rightarrow Peut influencer de façon très importante le taux de formation d'étoiles dans la galaxie hôte : en l'inhibant par exemple.

\Rightarrow Pourrait expliquer la relation entre la masse des trous noirs supermassifs et la masse (et les autres propriétés) du bulbe de leurs galaxies hôtes:

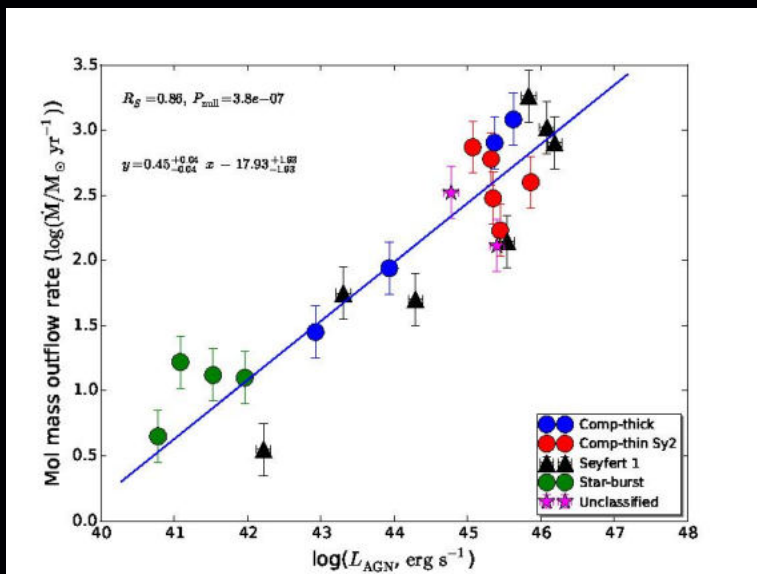
[Masse du trou noir supermassif $\sim 0.5\%$ de la masse du bulbe de sa galaxie hôte]

Rétro-action entre les trous noirs supermassifs et leurs galaxies hôtes: du milli-parsec au Mpc

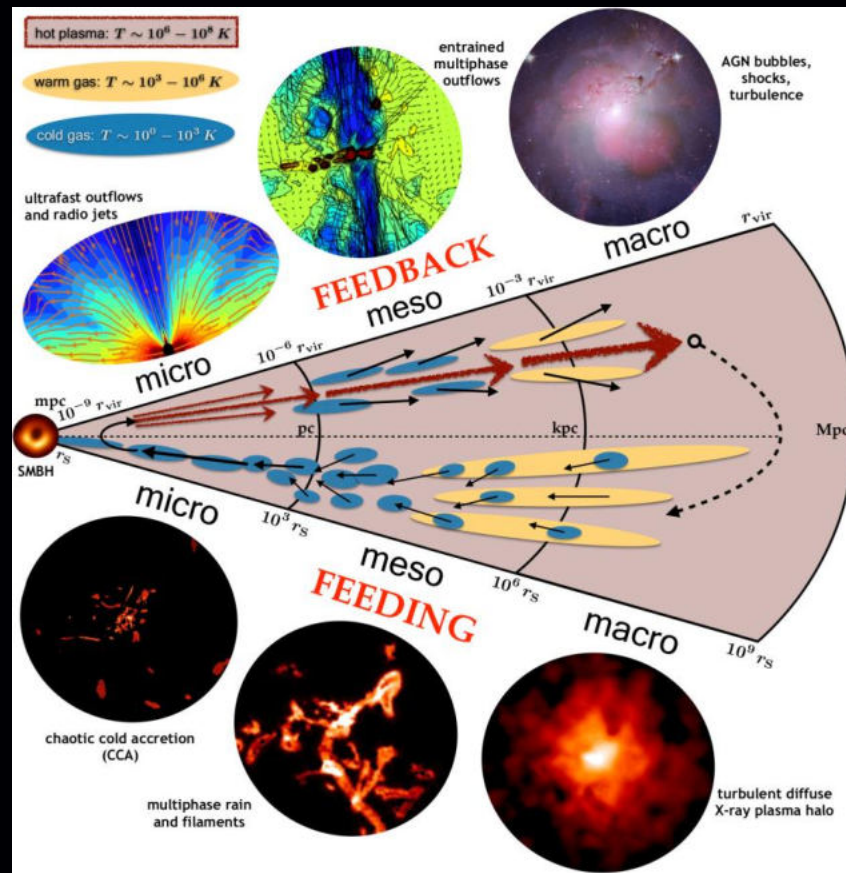
Nombre croissant d'AGN présentant à la fois la présence d'éjections ultra-rapide en rayons X UFOs (milli-parsec) et de flots de gaz moléculaires (kpc; millimétrique/sub-mm: ALMA, IRAM, ...)

micro: milliparsec - parsec
 meso: pc to kpc
 macro: kpc to Mpc

~9 ordres de grandeur



Taux de masse des flots de gaz moléculaires en fonction de la luminosité des AGN (Laha +18)



(Gaspari+20)

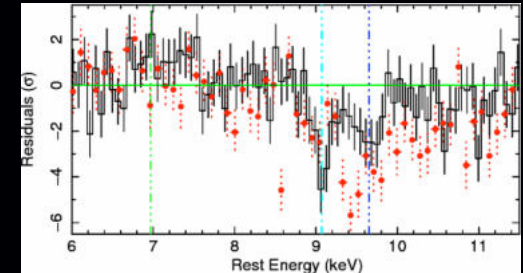
[1 milli-pc ~ 206 u.a.]

[1 pc ~ 3.26 a.]

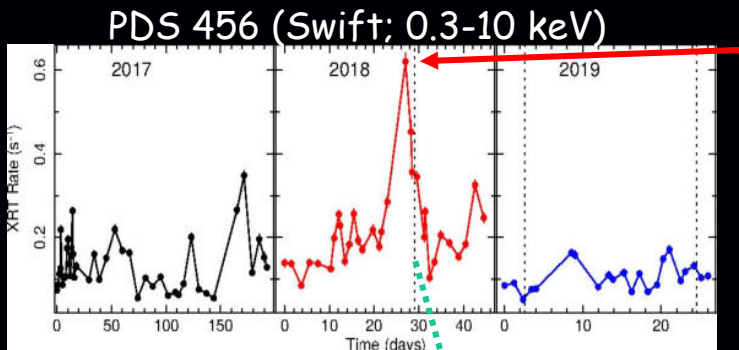
PDS 456 ($z=0.164$): connection entre les UFOs et les éruptions en rayons X

- AGN le plus lumineux dans notre Univers proche : $L_{\text{bol}} \sim 10^{47}$ erg/s
- $M_{\text{TN}} \sim 10^9 M_{\text{Soleil}}$
- Fréquentes éruptions en rayons X
- UFOs : $v \sim 0.3 c$

PDS 456 (Suzaku/JAXA; 190ks)



(Reeves et al. 2009)



Reeves, Braitto, Porquet et al. 2021)

En septembre 2018, observation d'une éruption:

- L_X a augmenté d'un facteur ~ 4 en 5 jours
- $\Rightarrow d \lesssim 30 R_G$ (région très compacte)
- $L_X \sim 2 \times 10^{51}$ erg ! (durant la totalité)
- Aucune variation en UV et visible
- \rightarrow variation provient de la couronne chaude (injection d'énergie puis refroidissement)

Observé par XMM-Newton (0.3-10 keV; ESA) et NuSTAR (3-79 keV; NASA) durant le déclin de la luminosité $\sim 1-3$ jours après le pic de l'éruption

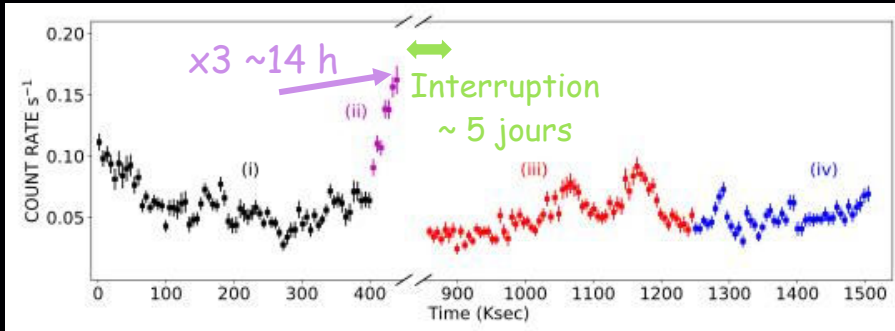
\Rightarrow Analyse spectrale : Aucun UFOs détecté !

\Rightarrow UFOs absent ? ou non détectable (complètement ionisé) ?

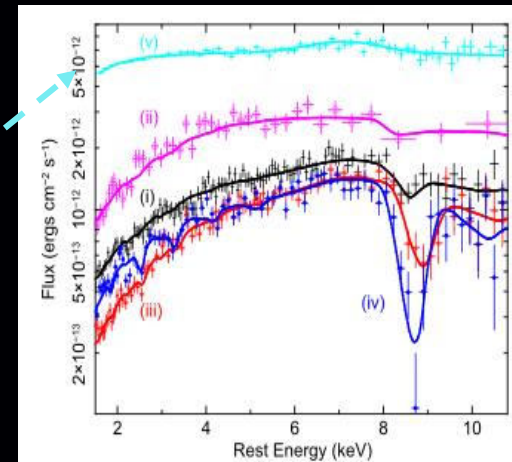
PDS 456 ($z=0.164$): connection entre les UFOs et les éruptions en rayons X

Comparaison avec d'autres éruptions en rayons X dans le passé de PDS 456

PDS 456 (2013; Suzaku, $\Delta t \sim 17$ jours)

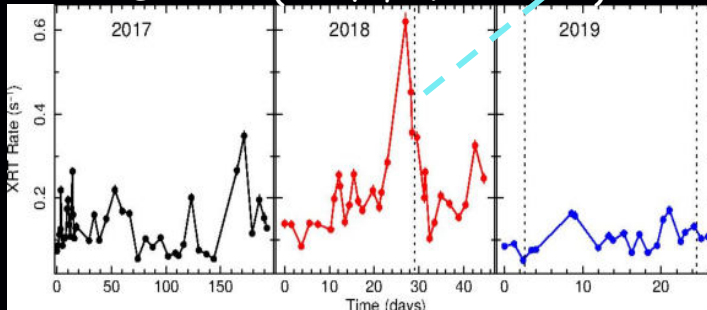


(Reeves, Braitto, Porquet et al. 2021)



(Reeves, Braitto, Porquet et al. 2021)

PDS 456 (Swift; 0.3-10 keV)



(Reeves, Braitto, Porquet et al. 2021)

Présence et propriétés des UFOs liées à la couronne chaude:
 flux (photons) ? matière éjectée ?
 ⇒ Besoin de nouvelles observations spectrales et temporelles avant, pendant et après une éruption sur des échelles dynamiques bien plus rapides (XMM-Newton, NuSTAR, ...)
 ⇒ Processus à l'origine des UFOs

Rayons X: Le satellite Athena (ESA, L2)

Advanced Telescope for High-ENERgy Astrophysics



Sélection par l'Agence Spatiale Européenne de « *l'Univers chaud et énergétique* » comme thème scientifique de sa future grande mission spatiale L2. Lancement prévu en 2034.

Les 2 principaux objectifs sont de comprendre :

- Comment la matière ordinaire s'assemble dans les grandes structures de l'Univers (groupes et amas de galaxies);
- Comment les trous noirs croissent et influent sur leur environnement.

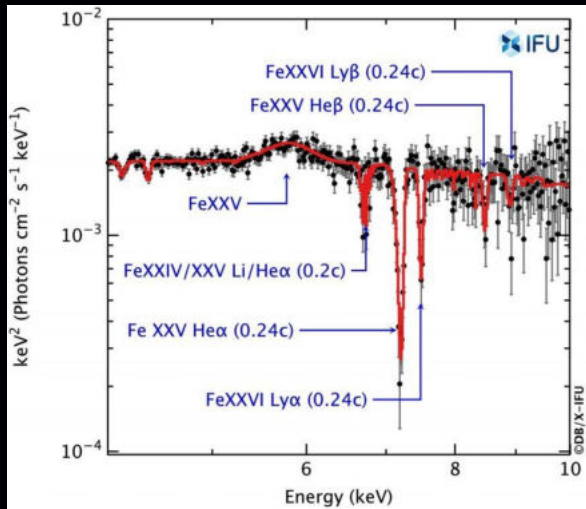
2 instruments : Imageur grand-champ (WFI) et le spectromètre X-IFU

Simulations Athena/X-IFU d'UFOs

Grâce à sa très grande surface collectrice et résolution spectrale ATHENA/X-IFU
⇒ mesurer les possibles changements des propriétés des "UFOs" (vitesses, degrés d'ionisation, densité de colonne, ...) sur des échelles dynamiques de seulement quelques rayons gravitationnels !

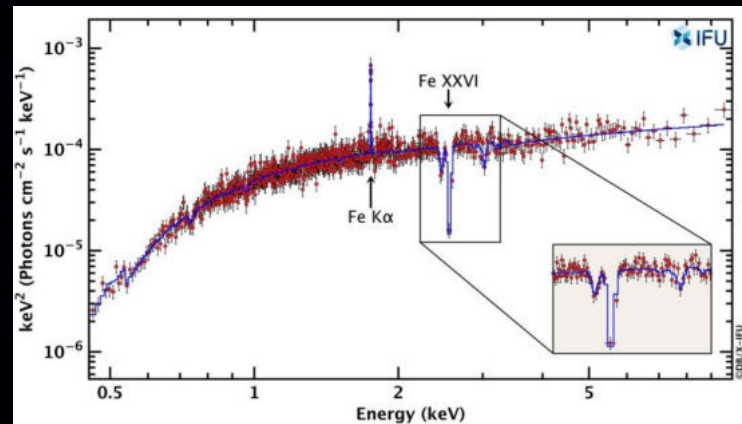
Et cela jusqu'à de grands décalages cosmologiques $z \sim 4$

PDS 456 ($z=0.184$; $L_{\text{Bol}} \sim 10^{47}$ erg/s)



(Simulation: D. Barret et X-IFU AT 2019)

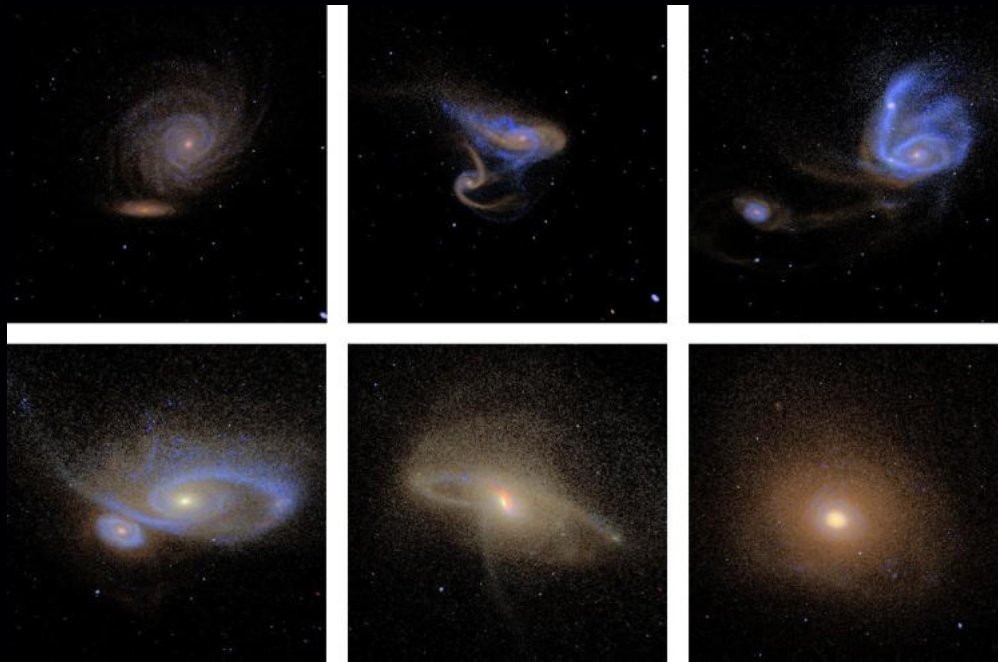
QSO MG J0414+0534 ($z=2.6$; $L_{\text{Bol}} \sim 10^{46}$ erg/s)



(Simulation: D. Barret et X-IFU AT 2019)

III. Les trous noirs supermassifs binaires: Fusion de galaxies

Fusions de galaxies



Simulations de la fusion de deux galaxies spirales

Echelle de temps entre le début et la fin de la fusion
~ milliards d'années

(Crédits: modification of work by P. Jonsson (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics), G. Novak (Princeton University), and T. J. Cox (Carnegie Observatories))

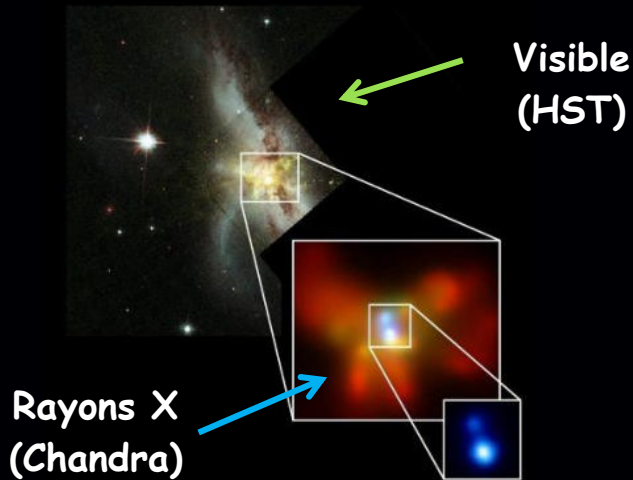


Crédit: NASA

Fusion de galaxies → trous noirs supermassifs binaires

NGC 6240

(distance ~ 102 Mpc; $z=0.0243$)



Les deux trous noirs supermassifs observés en rayons X sont ici séparés ~ 900 parsec, (~ 1.8" sur le ciel; 2900 a.l.)

(Komossa et al. 2003)

Une étude récente dans le visible a montré qu'en fait il y aurait 3 trous noirs supermassifs dont deux dans la zone sud séparés seulement de 198 parsec (~0.42")

(masse : [90-700] millions $\times M_{\text{Soleil}}$)

(Kollastchny et al. 2020)

La fusion des trous noirs devraient avoir lieu dans moins de 55 millions d'années.

(Sobolenko et al. 2021)

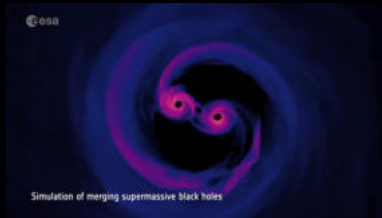
Crédits : X-ray: NASA/CXC/MPE/S.Komossa et al.; Optical: NASA/STScI/R.P.van der Marel & J.Gerssen)

Les trous noirs supermassifs binaires: fusion de galaxies

Lors de la fusion de galaxies, les deux trous noirs supermassifs au centre de chacune des galaxies vont tourner l'un autour de l'autre avant de fusionner.

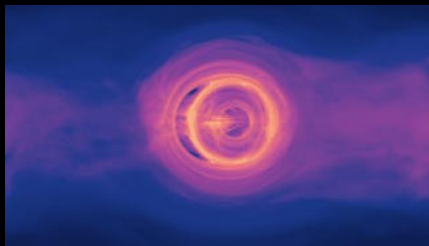
A l'échelle de quelques milli-parsecs entre les deux objets : pas de possibilité de les résoudre spatialement ($\sim \mu$ -arsec) \rightarrow Détection indirecte (variabilité)

Système vu de face



Crédit: ESA

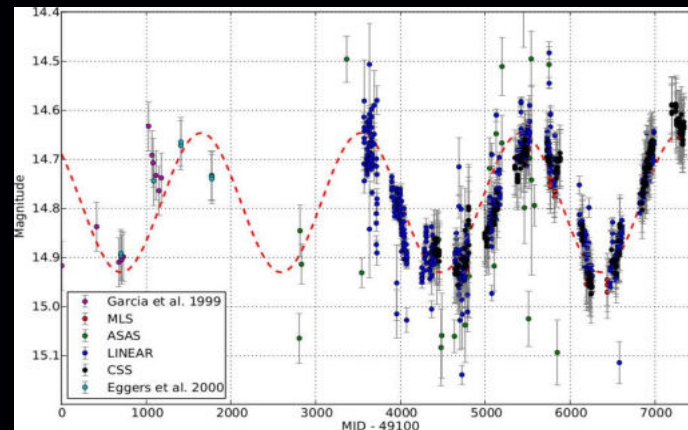
Système vu par la tranche



Crédit: NASA's Goddard Space Flight Center

PG 1302-102 ($z=0.2784$)

D: 1079 Mpc (~ 3.1 milliards d'a.l.)



(Graham et al. 2015, Nature)

Courbe de lumière dans le visible \sim sinusoïde

Période ~ 5.2 ans ($M_{\text{totale}} \sim 10^9 M_{\text{Soleil}}$)

\rightarrow Doppler boosting (D'Orazio et al. 2015, Nature)

Doppler boosting

Quand un objet se déplace à des vitesses relativistes → effets de la relativité restreinte.

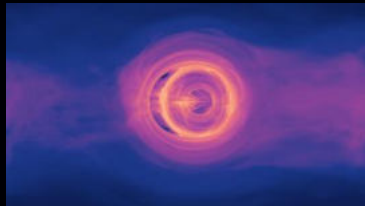
Amplification Doppler-Fizeau relativiste: la luminosité apparente de l'objet (constante dans son référentiel) va augmenter quand il se déplace vers nous et diminuer lorsqu'il s'éloigne de nous.

Système vu de face



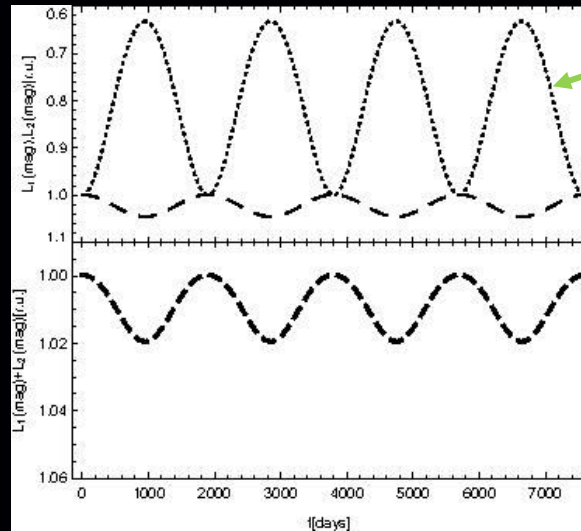
Crédit: ESA

Système vu par la tranche



Crédit: NASA's Goddard Space Flight Center

Courbe de lumière modélisée (magnitude visible)



(Kovacevic et al. 2019)

$M_1 = 10^8 M_{\text{Soleil}}$

$M_2 = 10^9 M_{\text{Soleil}}$

Courbe de
lumière totale

P (circulaire) = 1899 jours
(~ 5.2 ans)

d = 15 milli-parsec

D'après des simulations hydrodynamiques le trou noir le **moins massif** accrète ~ 10-20 fois plus que l'objet le plus massif → **plus lumineux** (Farris et al. 2014).

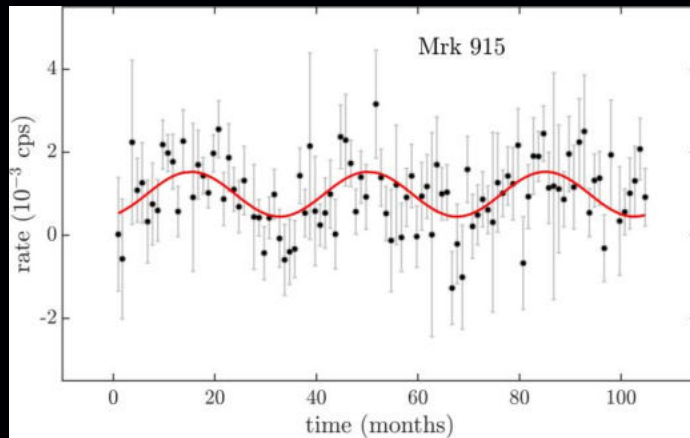
L'amplitude de la variation de la luminosité est \propto à la vitesse du système et à son inclinaison par rapport à notre ligne de visée \Rightarrow maximale pour un système vu par la tranche (D'orazio et al. 2015).

Courbes de lumière en rayons X de candidats de trous noirs supermassifs binaires

Satellite Swift/BAT: 15-150 keV

Mrk 915 (Seyfert 1.5; $z=0.024109$)

D: 94 Mpc (~300 millions d'a.l.)



(Serafinelli et al. 2020)

Période = 35 ± 2 mois

(fréq. = 11 ± 2 nHz)

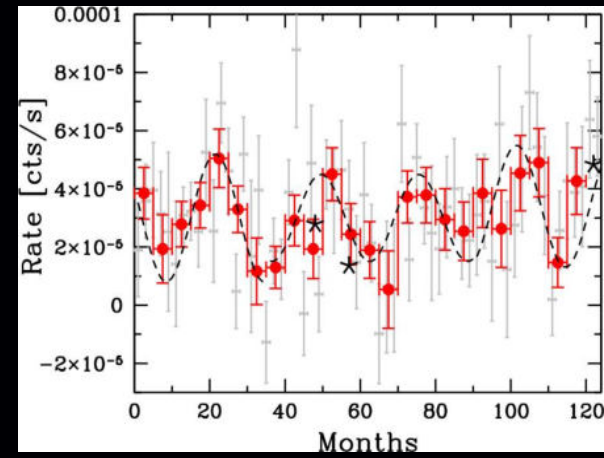
d: 5 ± 1 milli-parsec (~1 000 u.a.)

$\Delta v = 0.034 \pm 0.007 c$

(3.7σ de niveau de confiance)

MCG+11-11-032 (Seyfert 2; $z=0.0362$)

D: 154 Mpc (~500 millions d'a.l.)



(Severgnini et al. 2018)

Période = 26.2 ± 2 mois

(fréq. = 15 ± 2 nHz)

d: 6.5 ± 1.5 milli-parsec (~1300 u.a.)

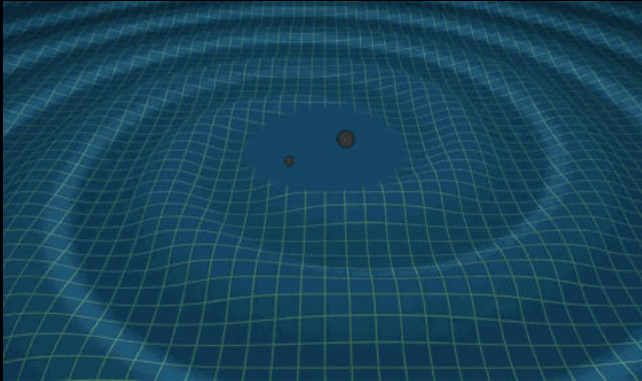
$\Delta v = 0.06 \pm 0.02 c$

(2.6σ de niveau de confiance)

⇒ Nécessité d'un bon échantillonnage et sur plusieurs périodes de rotation du système, d'autres longueurs d'ondes (visible, UV) et impacts sur les raies en émission (H_β , $FeK\alpha$, ...)

Trous noirs supermassifs binaires et ondes gravitationnelles

Le 14 septembre 2015: première détection directe d'ondes gravitationnelles (GW150914)



Crédit: LIGO/T. Pyle



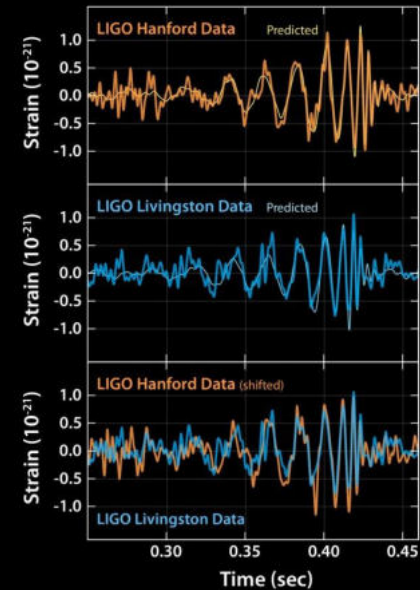
LIGO (USA):
2 interféromètres
séparés par ~ 3000 km



VIRGO
(Europe)

Fusion de 2 trous noirs "stellaires"

$$M_1 \sim M_2 \sim 30 M_{\text{Soleil}}$$



(Crédit: Caltech/MIT/LIGO)

Depuis cette première détection:
~ 90 événements :
trou noir stellaire + trou noir stellaire,
trou noir stellaire + étoile à neutrons
étoile à neutrons + étoile à neutrons

Détection d'ondes gravitationnelles de trous noirs supermassifs binaires

→ fréquences bien plus basses que pour les trous noirs de type stellaire

LISA (Laser Interferometer Space Antenna; ESA) mission spatiale de détection d'ondes gravitationnelles

3 satellites placés en orbite héliocentrique formant un triangle équilatéral de 2,5 millions de km de côté.

Ils sont "reliés" par des liens optiques composés de faisceaux laser. La formation suit la Terre avec un retard de 20° , ~ 50 millions de km. Lancement: 2037

(Crédit: Nicolas Douillet - Artémis)

Vue stylisée des déformations induites au passage d'une onde gravitationnelle polarisée sur les bras laser de l'interféromètre LISA. Mesure des variations de distances de 10 picomètres (10^{-12} m) entre deux masses de référence (« test mass »).

(Crédit: Nicolas Douillet - Artémis)

Ondes gravitationnelles de trous noirs supermassifs binaires jusqu'à $z \sim 20$
(~ 200 millions d'années après le Big Bang)

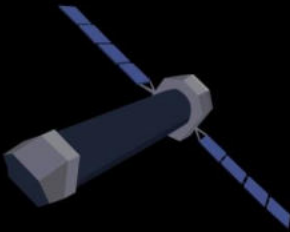
⇒ Mesure des masses [10^4 - $10^7 M_{\text{Soleil}}$] et moments cinétiques:
1% de précision

Indépendamment des ondes électro-magnétiques (présence de matière).

Athena (rayons X) et LISA (ondes gravitationnelles): Les deux grandes missions astrophysiques de l'ESA des années 2030

⇒ Etude de l'Univers multi-messagers:
ondes électro-magnétiques (photons), ondes gravitationnelles, ...

→ TWO MISSIONS TO PROBE THE EXTREME UNIVERSE

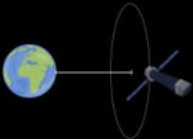


Athena

Advanced Telescope for High-ENERgy Astrophysics

X-rays
The largest X-ray observatory ever
Focal length: **12 m**
Effective area: **1.4 m²** (at 1 keV)

Instruments: **X-ray Integral Field Unit (X-IFU)** and **Wide Field Imager (WFI)**



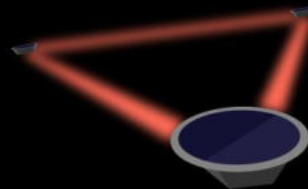
1.5 million km from Earth

2034 Planned launch date

Predecessors: EXOSAT, XMM-Newton

Core science goals

- Supermassive black holes at the centre of galaxies
- Hot gas in the cosmic web
- High-energy astrophysical events




LISA

Laser Interferometer Space Antenna

Gravitational waves
The first gravitational wave observatory in space

50 million km from Earth

3 spacecraft separated by **2.5 million km** in triangular formation



Following Earth in its orbit around the Sun

2037 Planned launch date

Predecessors: LISA Pathfinder (technology demonstration)

Core science goals

- Mergers of supermassive black holes at the centre of galaxies
- White dwarf binaries in the Milky Way
- Stellar-origin black holes falling into supermassive black holes

Résumé

- Les trous noirs supermassifs (TNSM) ont un rôle central dans l'évolution des galaxies et plus généralement de notre Univers (proche et lointain)
- Liens très étroits entre la masse des TNSM et les propriétés du bulbe de leurs galaxies hôtes (masse, luminosité, dispersion de vitesses des étoiles, etc..)
- Les AGN émettent des quantités phénoménales d'énergie par rapport à leur galaxie hôte
⇒ Matière qui est attirée et accrète sous forme de disque d'accrétion (incluant une couronne chaude: rayons X)
- Phénomènes de rétro-action (« feedback ») entre le TNSM et sa galaxie hôte:
⇒ Matière qui est éjectée sous forme :
 - de jets : ~10% des AGN
 - de vents relativistes provenant des régions internes du disque d'accrétion
~ 40-50% dans les AGN proches voire plus dans les AGN plus lointains.
- Le moment cinétique (« spin ») des TNSM nous informe sur :
 - La fusion des galaxies
 - Le mode d'accrétion des TNSM (continue/cohérente ou chaotique)
- Lors de la fusion des galaxies: fusion des TNSM (ondes électro-magnétiques + ondes gravitationnelles): 2 grandes missions de l'ESA (Athena et LISA)
⇒ Astrophysique multi-messagers