

Les évènements d'accrétion violents autour des trous noirs

Fabien CASSE

Laboratoire Astroparticule & Cosmologie (APC)

Université de Paris & CNRS/IN2P3

COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

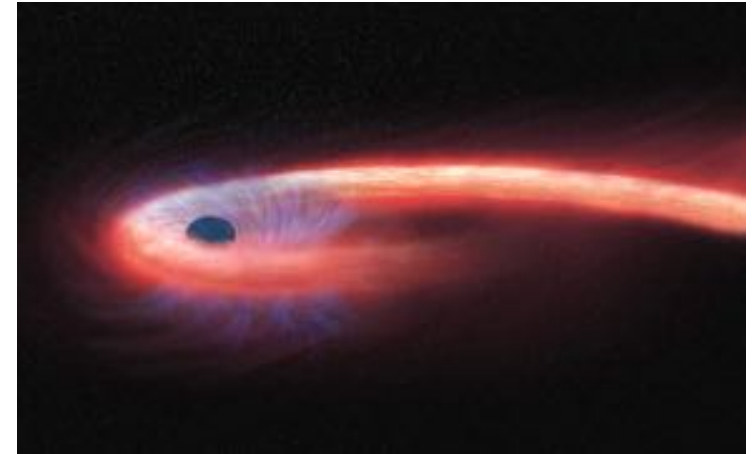


Plan de la présentation

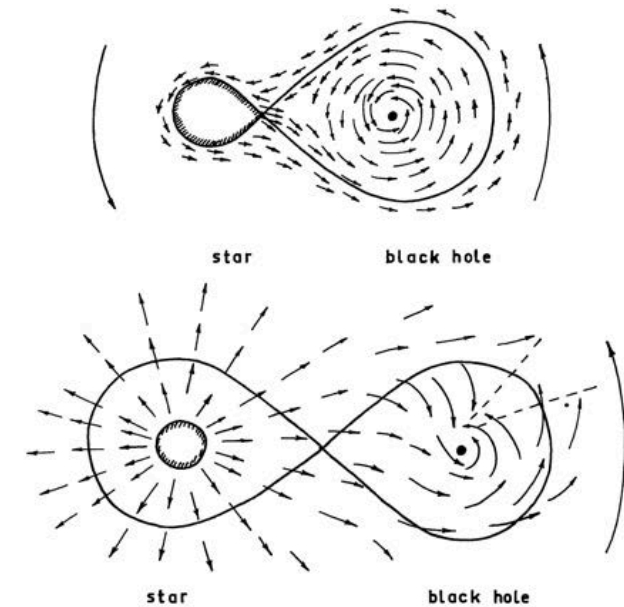
- Introduction
- Brève revue observationnelle des binaires X à trou noir
- Les oscillations quasi-périodiques (QPO) près des trous noirs stellaires et supermassifs
- Modélisation numérique des QPOs: deux modèles en vogue
- Conclusions et perspectives

Qu'est-ce que l'accrétion « violente » ?

- Interactions gravitationnelles entre TN et étoiles mènent à de l'accrétion de plasma par le TN.
- Evènements de rupture par effets de marée (TDEs) : destruction d'étoiles par la gravité du trou noir supermassif
- Quand le TN est de masse similaire à l'étoile: possibilité de création d'un système stellaire double appelé Binaire de trou noirs à rayons X (« X-ray black hole binary »)
- La matière de l'étoile est accrétée par l'un des mécanismes:
 - ➔ Débordement du lobe de Roche (RLOF)
 - ➔ Capture du vent stellaire
- Formation d'un disque d'accrétion autour du TN.

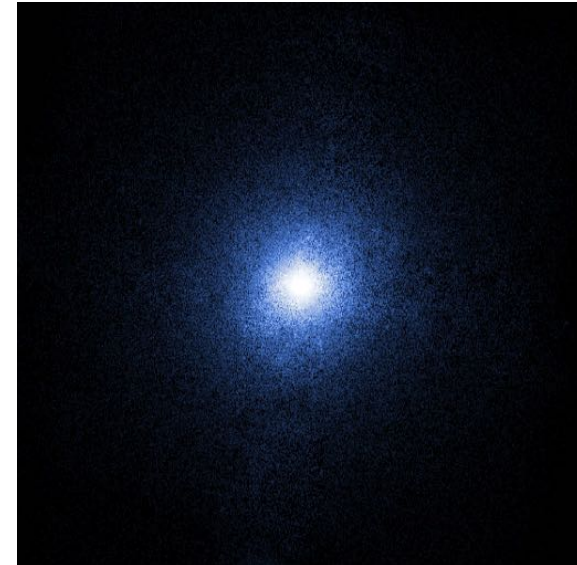


Credit: NASA / CXC / M. Weiss

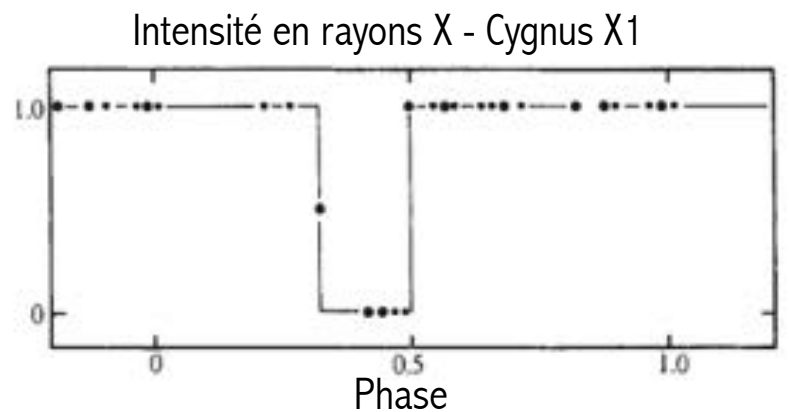


Binaires X à trou noir

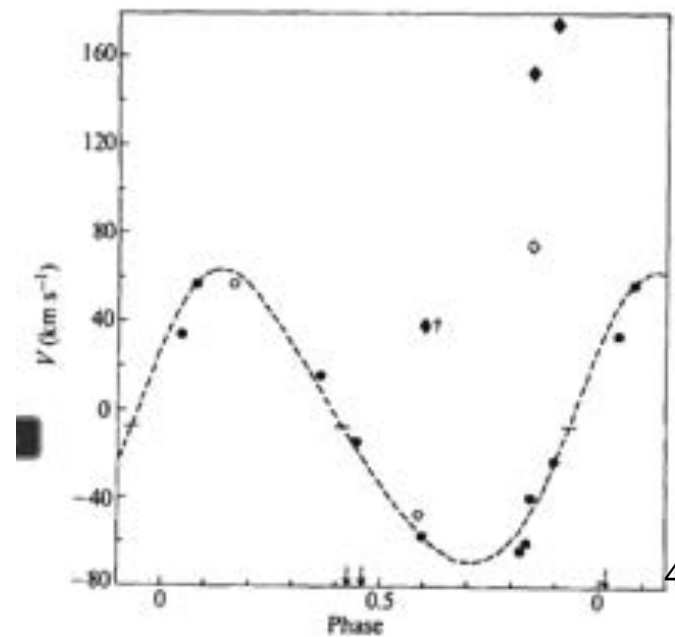
- Le premier système binaire X avec trou noir est Cygnus X-1 en 1972.
- Système stellaire présentant une forte émission X avec une composante thermique (corps noir) et une composante non thermique (émission synchrotron)
- Masse de l'astre compagnon est déduite de la vitesse radiale mesurée de l'étoile O avec $m > 2 M_{\odot}$.
- Configuration distance-masse du compagnon suggère fortement **un trou noir**...



© Chandra



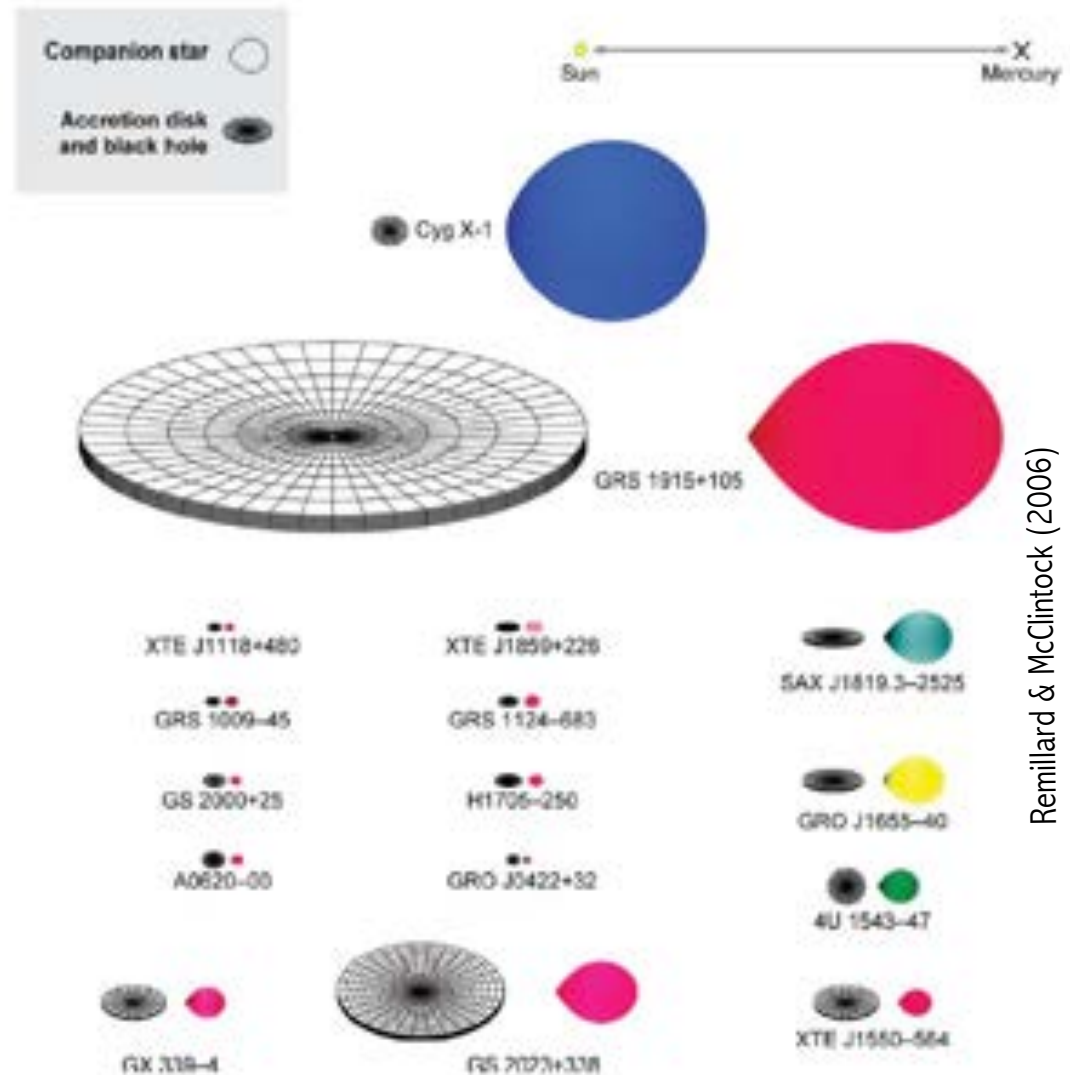
Webster & Murdin (1972)



Bolton (1972)

Binaires X à trou noir

- Parmi les binaires à rayons X, beaucoup possèdent une étoile à neutron comme objet compact.
- Différents types d'étoiles compagnon (low-mass X-ray binary vs high-mass X-ray binary)
- On estime que notre galaxie possède $\sim 10^8$ TN stellaires.
- Jusqu'à présent plus de 20 systèmes binaires ont été identifiés comme possédant un TN.
- La majorité de ces systèmes sont de forts émetteurs en rayons X.

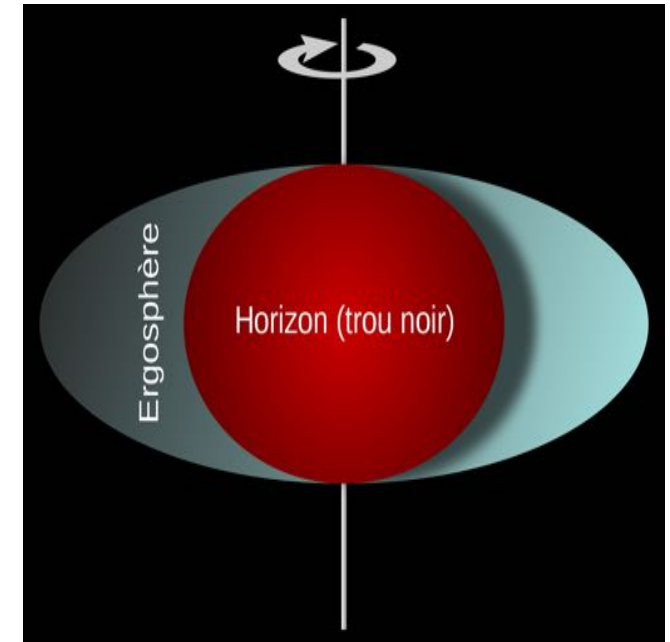


La gravité autour d'un trou noir en rotation

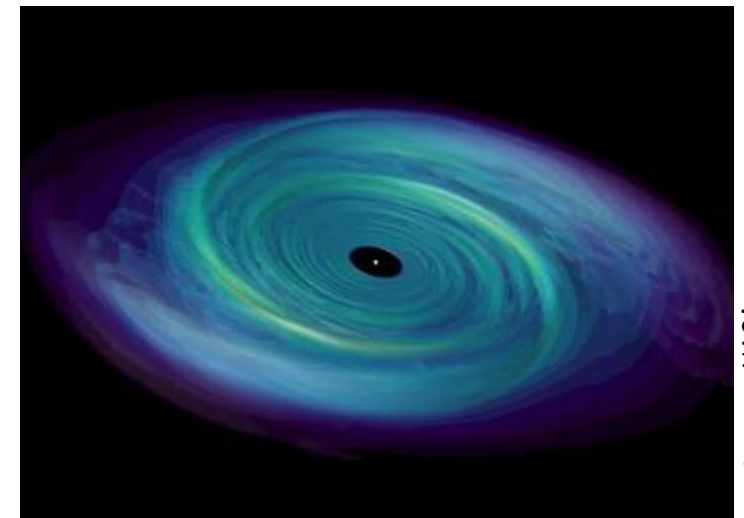
- Deux paramètres déterminent la géométrie de l'espace : la masse du TN M_{TN} et son moment angulaire \mathbf{J} (son « spin ») tel que (Kerr 1963)

$$-1 \leq a = \frac{Jc}{GM_{TN}^2} \leq 1$$

- L'ergosphère du trou noir est la région où le trou noir force toute matière à être en rotation dans le même sens que sa propre rotation (effet de Lense-Thirring).
- Les effets relativistes du TN sont principalement ressentis dans la région $r < 10 r_g$.
- Les orbites circulaires autour d'un TN dont les rayons sont inférieurs à R_{ISCO} sont instables ! $6 r_g$ ($a=0$) à r_g ($a=1$)
- Les disques autour des TN ont donc **un bord interne** dont le rayon dépend de la valeur du spin du TN.



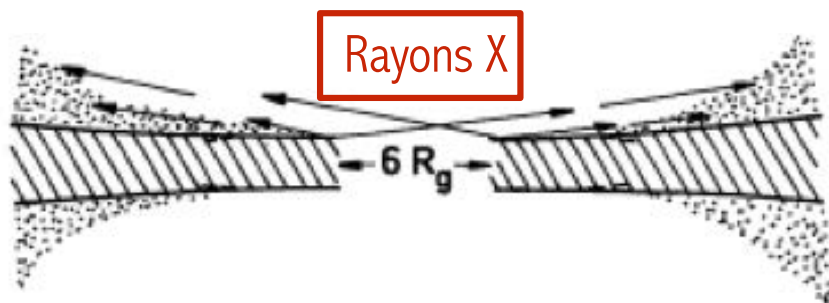
$$R_{HE} = r_g \left(1 + \sqrt{1 - a^2} \right) \text{ où } r_g = \frac{GM_{TN}}{c^2}$$



Disque d'accrétion autour des TN

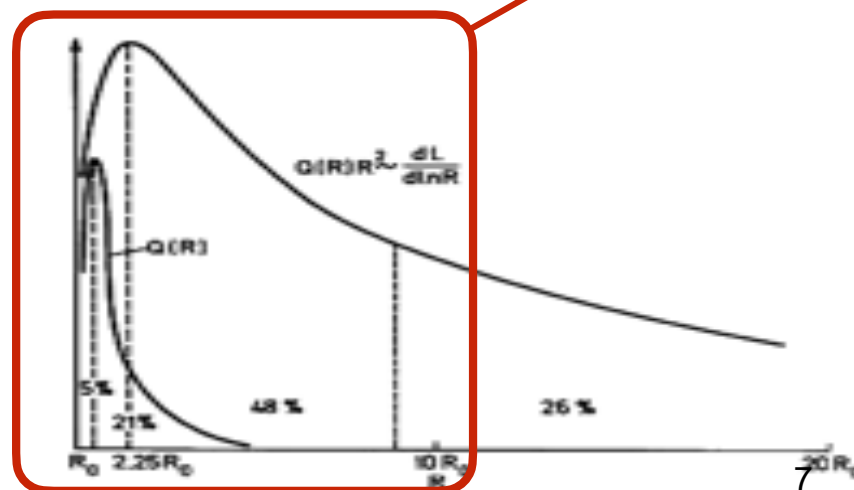
- Shakura & Sunyaev (1973) ont proposé un modèle de disque d'accrétion permettant d'expliquer les propriétés observationnelles des disques observés dans les XBHB.
- Un disque mince de matière est en rotation différentielle permettant un équilibre entre gravité et force centrifuge.
- Le transport turbulent entre anneaux du disque dissipe l'énergie cinétique du disque et crée un transfert de moment cinétique vers l'extérieur: mouvement d'accrétion vers l'objet central.
- Le profil de température du disque s'exprime comme

$$k_B T(R) = 2 \text{ keV} \left(\alpha \frac{M_{TN}}{M_\odot} \right)^{-1/4} \left(\frac{R}{6r_g} \right)^{-3/4}$$

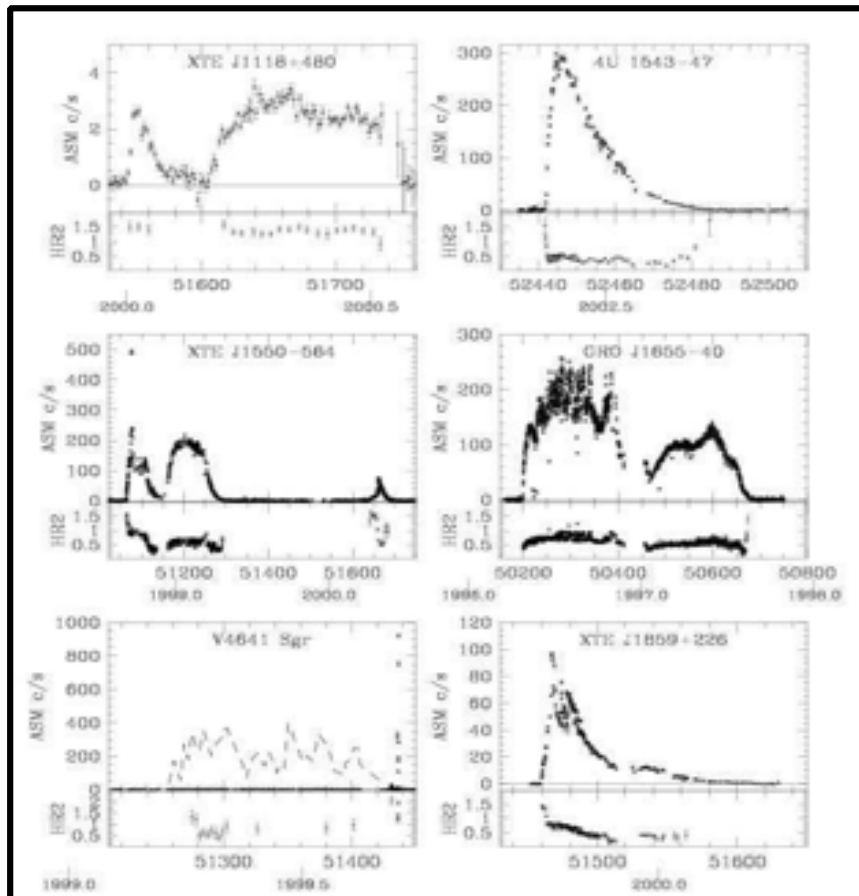


Shakura & Sunyaev (1973)

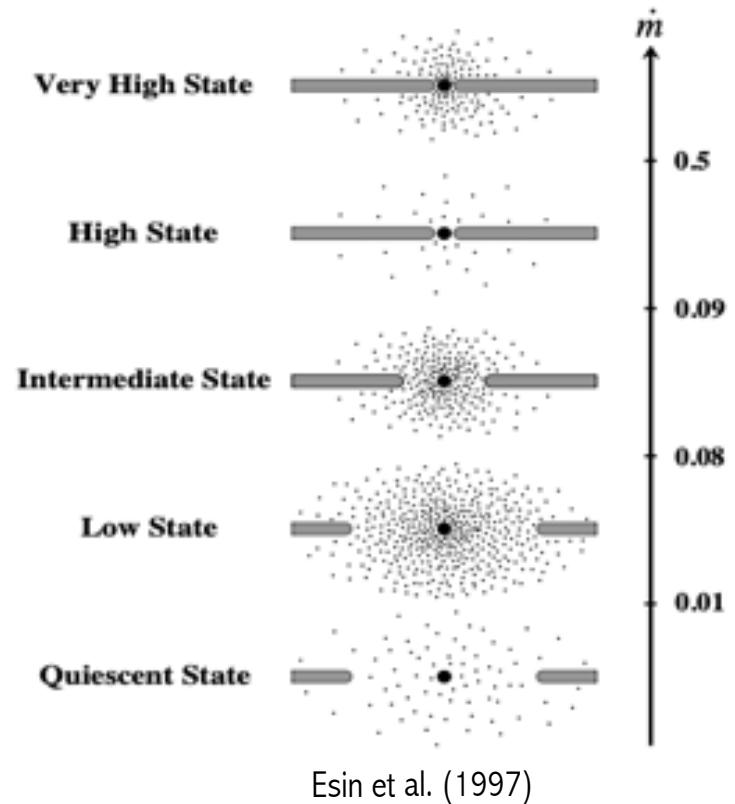
L'essentiel de l'émission du disque provient des parties internes du disque



Emission de rayons X par les binaires X à TN



McClintock & Remillard (2006)



- Les binaires X à TN montrent une grande variabilité dans leur émission en rayons X.
- Le comportement de la source varie en fonction de l'énergie des rayons X (« hardness ratio »).
- Les bouffées d'émission en rayons X peuvent durer entre 20 jours et plusieurs mois.
- Ces bouffées de rayons X sont récurrentes (entre 1 an et 60 ans) → reliées à l'état du disque

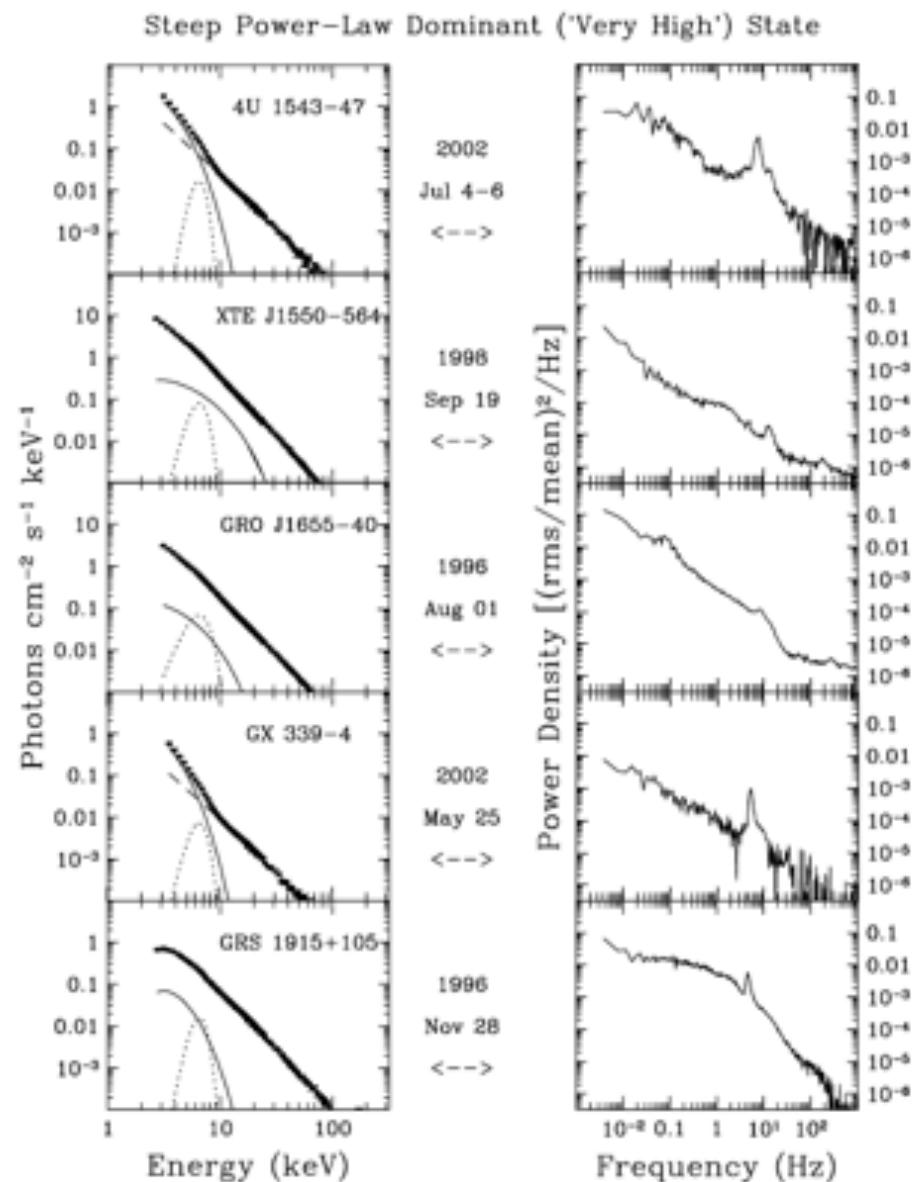
Spectre en rayons X des binaires X à TN

Spectre en énergie

- On trouve dans l'émission X de binaires X à TN deux composantes:
 - * Composante thermique émise par le disque (corps noir multi-température)
 - * Composante non-thermique modélisée par une loi de puissance
- On détecte aussi la présence d'une raie de fluorescence du Fer ainsi qu'une composante de réflexion de l'émission du disque.

Spectre en fréquence

- Présence d'oscillations quasi-périodiques transitoires selon l'état de la source
 - ➔ QPO basse fréquence (0.1-30 Hz)
 - ➔ QPO haute fréquence (30-450 Hz)
- Profil de la PDS en lorentzienne...



Classifications des états de binaires X à TN 1/2

Classification basée sur les distributions spectrales en énergie et en fréquence

Etat « thermal » (TS)

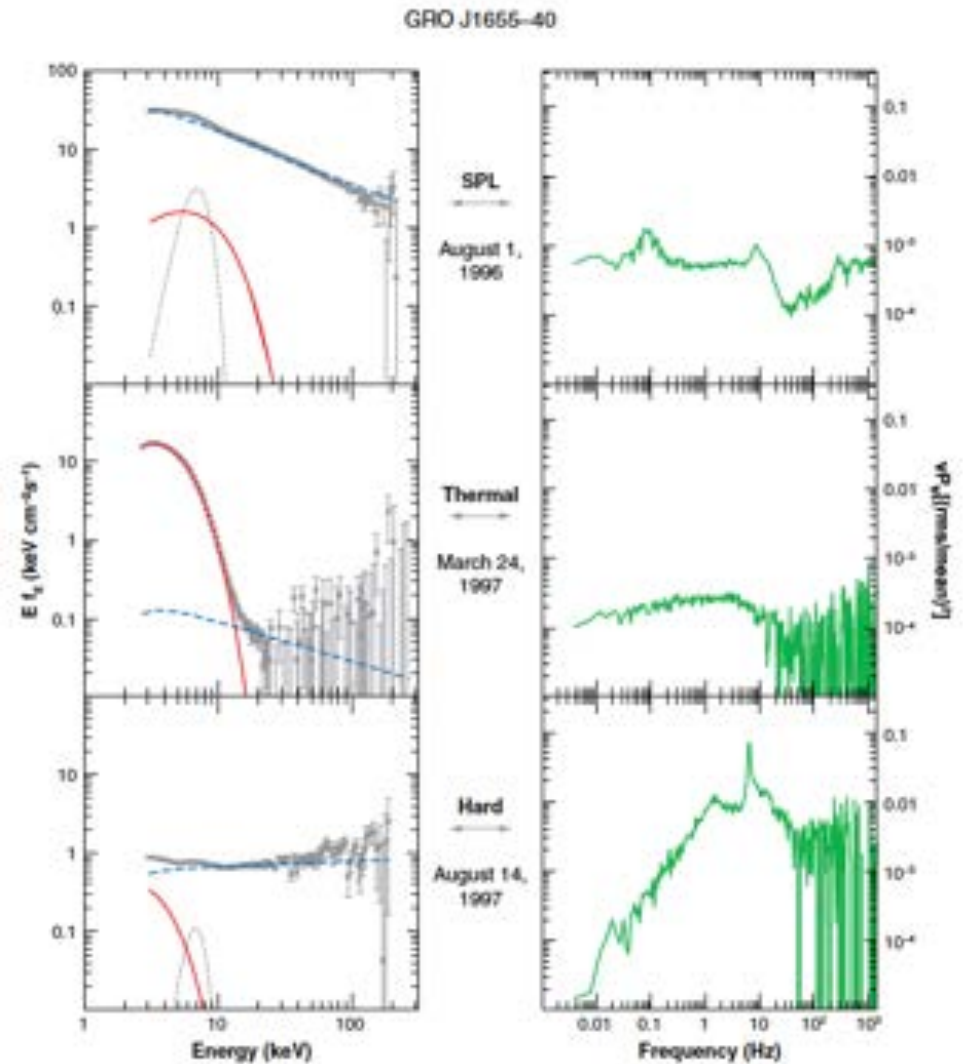
- ➔ Rayonnement du disque > 75% de l'intensité totale de la source
- ➔ Pas de QPOs présent

Etat « Hard » (HS)

- ➔ Rayonnement du disque < 20% de l'intensité totale de la source
- ➔ Indice de la loi de puissance entre 1.4 et 2.1
- ➔ Variabilité > 10% et possibles **QPO BF**

Etat « Steep Power Law » (SPL)

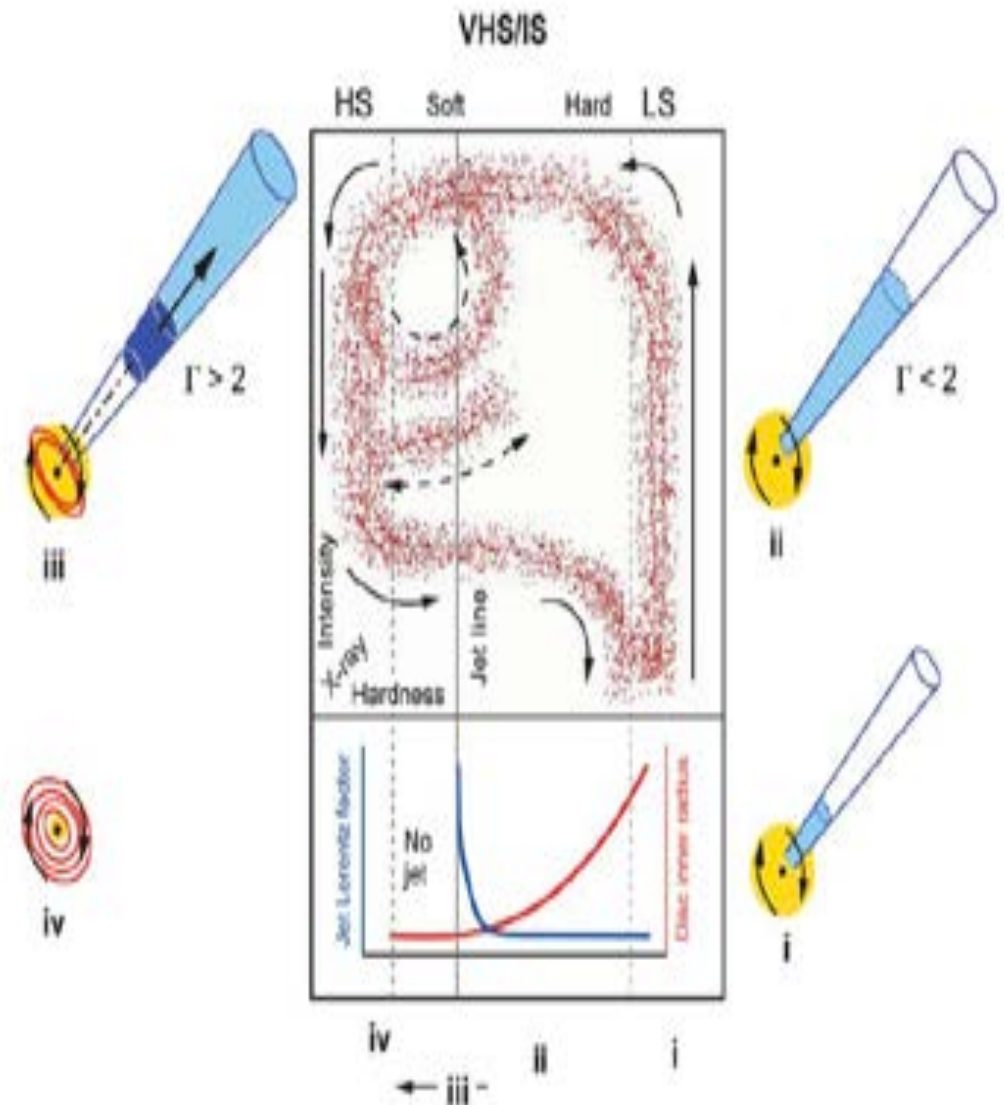
- ➔ Rayonnement du disque < 80% de l'intensité totale de la source si présence de QPOs ou < 50% sans QPO
- ➔ Indice de la loi de puissance entre > 2.4
- ➔ Présence possible de **QPO BF et HF**



Remillard & McClintock (2006)

Classifications des états de binaires X à TN 2/2

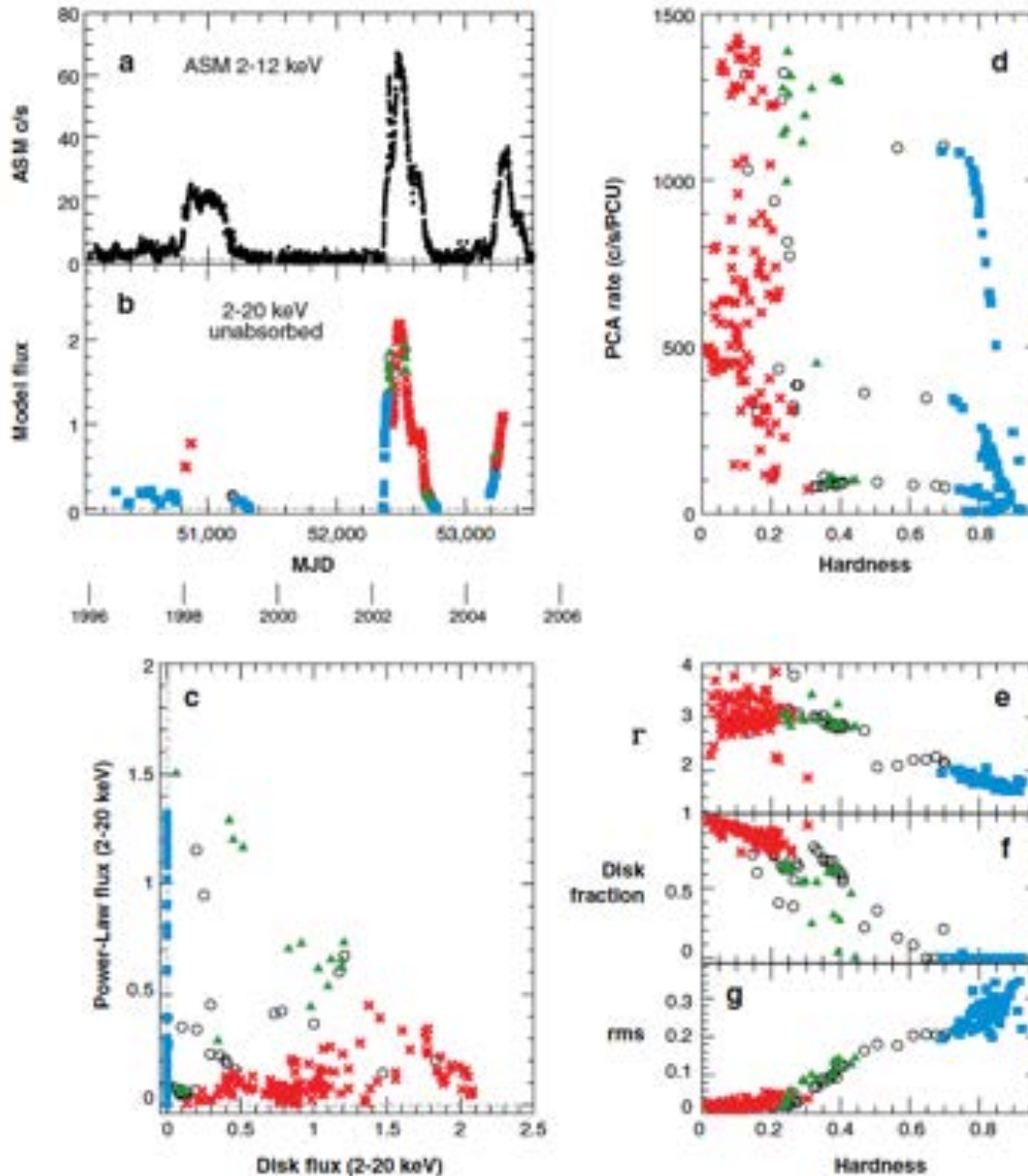
- « Hardness Intensity Diagram » (Fender, Belloni & Gallo 2004) : classification en fonction de l'intensité d'émission du système et de la répartition en X durs ou mous.
- Rapport de dureté : rapport du flux reçu dans deux gammes d'énergie en rayons X (hard/soft)
- Ce diagramme est basé sur le comportement de la source GX339-4.
- On retrouve les états de la classification précédente sur ce diagramme mais pas en ce qui concerne les états intermédiaires.
- La forme de ce diagramme dépend des gammes d'énergie choisies pour définir le rapport de dureté.



Fender, Belloni & Gallo (2004)

Binaire X à TN : Un cas d'école

GX339-4 1996-2005



- GX399-4 est une binaire X avec un TN de 5 à 10 M_{\odot} et une étoile compagnon de masse similaire au Soleil.
- Période orbitale de 1.7 jour.
- Binaire située à 27000 années-lumière dans la constellation de l'Autel.

x Thermal

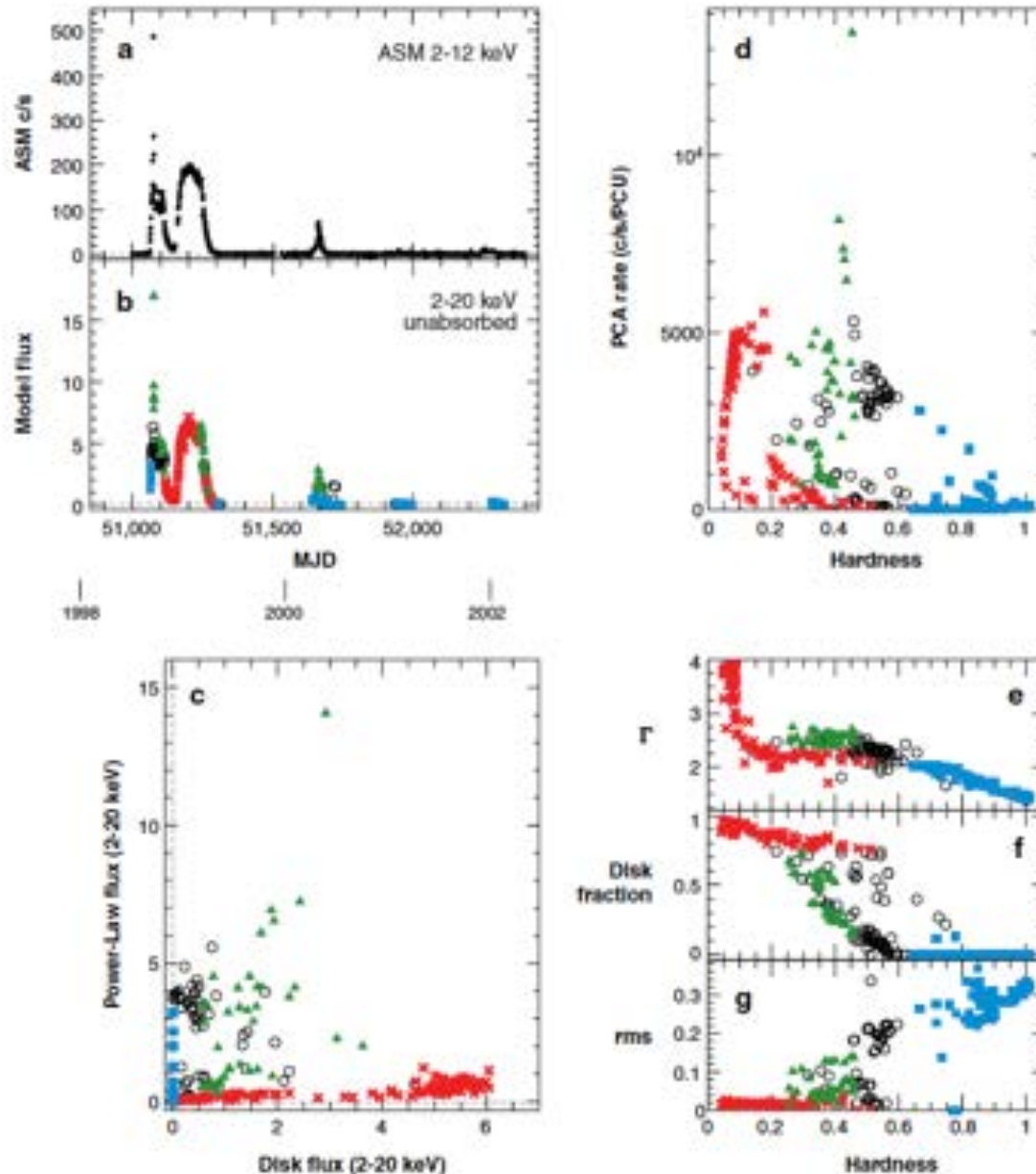
■ HS

▲ SPL

○ Intermédiaire

Binaire X à TN : un réalité plus contrastée

XTE J1550-564 1998-1999; 2000; 2001; 2002



- XTE J1550 est une binaire X avec un TN de 10 à 15 M_{\odot} et une étoile compagnon de masse similaire au Soleil.
- Période orbitale de 1.5 jour.
- Binaire située à 17 000 années-lumière dans la constellation de la Règle.

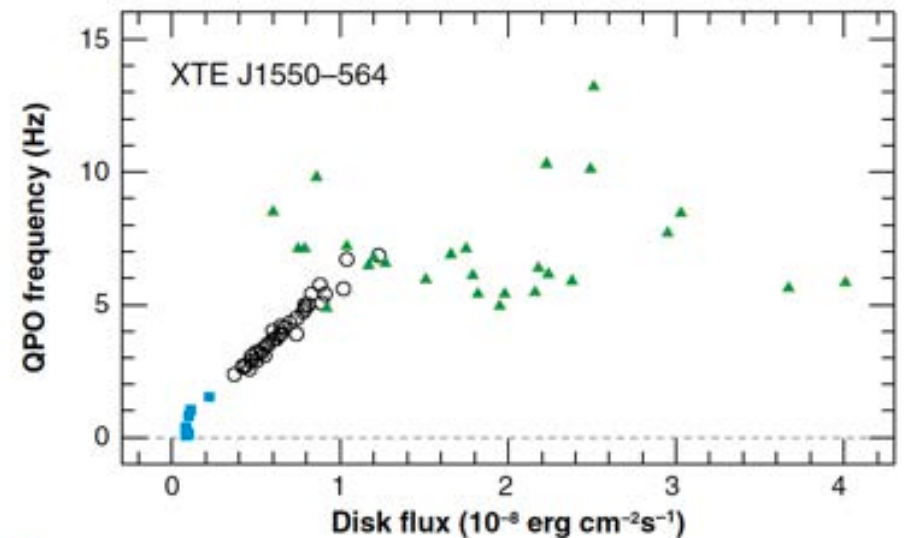
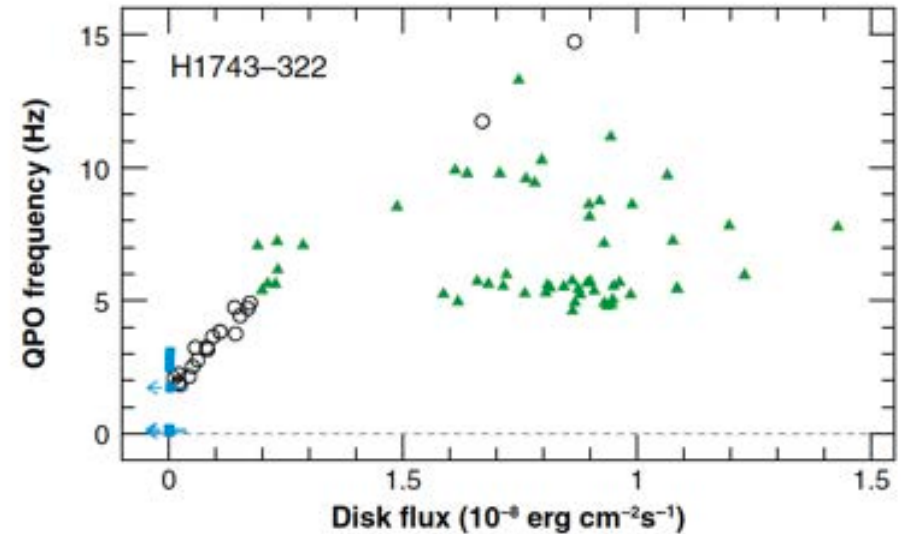
➔ **Classification des états pas encore optimale ...**

- X** Thermal
- HS
- ▲** SPL
- Intermédiaire

QPO Basse Fréquence dans les binaires X à TN

- Corrélation de la fréquence des QPO avec les paramètres d'émission de la source
- QPO BF sont détectables dans les états SPL, Hard et intermédiaires Hard/SPL dans la majorité des binaires X à TN.
- La fréquence des QPO BF peut varier dans le temps (< 30 Hz).
- Présence stable dans le temps suggère une connection au flot d'accrétion.
- La gamme de fréquence des QPO BF indique qu'un phénomène se produit dans le disque mais pas à la dernière orbite stable.

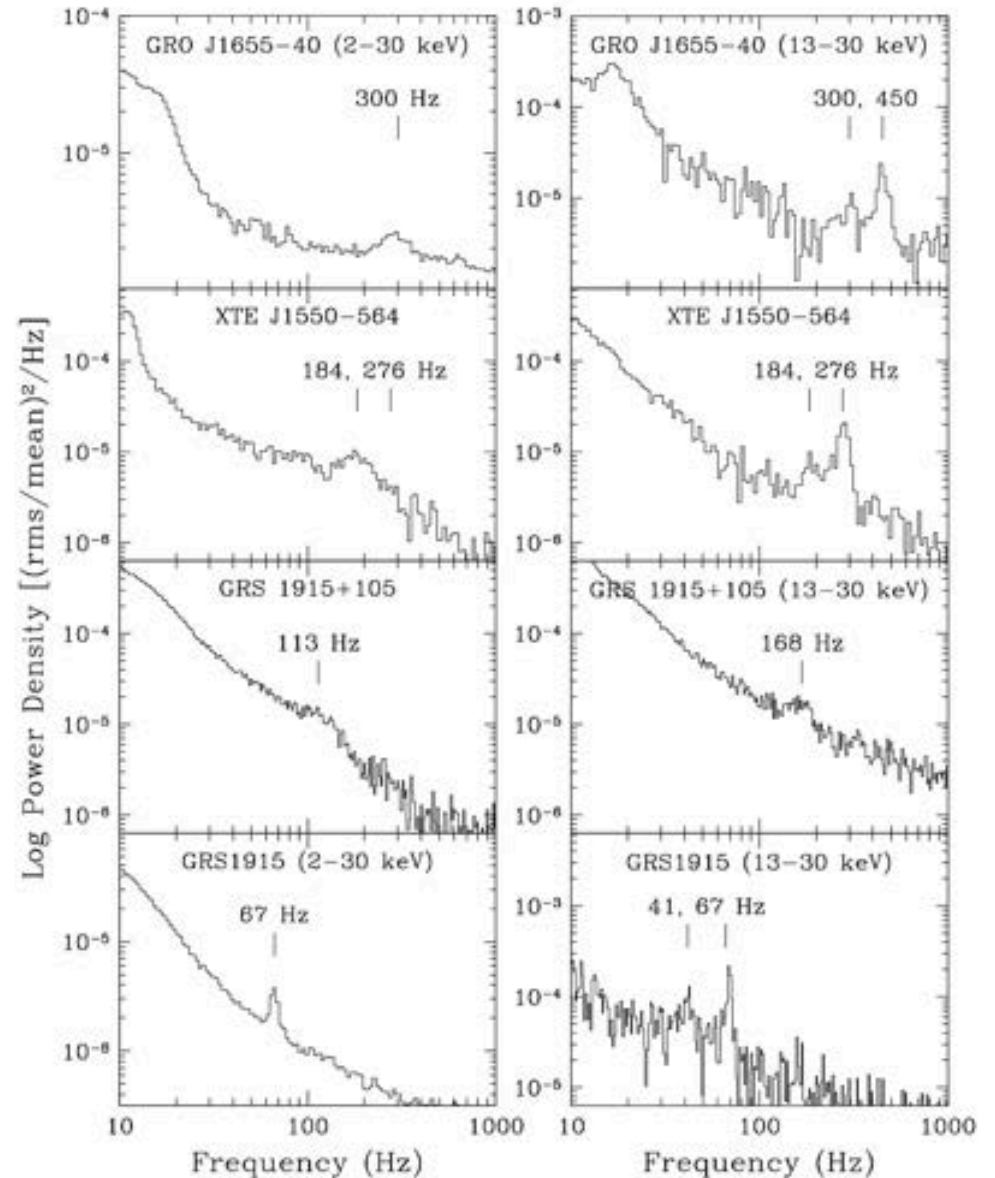
$$T_{\text{orb},\infty}^{-1}(r) \simeq \frac{219 \text{ Hz}}{\left[\frac{a}{6^{3/2}} \pm \left(\frac{r}{6r_g} \right)^{3/2} \right]} \left(\frac{10M_{\odot}}{M_{\text{TN}}} \right)$$



QPO Haute Fréquence dans les binaires X à TN

- Les QPO HF possèdent un caractère transitoire et de faibles amplitudes.
- QPO HF ne sont pas détectés dans toutes les binaires X à TN.
- La fréquence des QPO HF varie peu dans le temps: lien avec les propriétés du TN central !
- La gamme de fréquence des QPO HF indique qu'un phénomène se produit dans le disque mais **près de la dernière orbite stable du disque**.
- Présence de paires de QPO HF avec un **rapport entier** de fréquence 3:2 mais aussi d'autres rapports 4:3 .

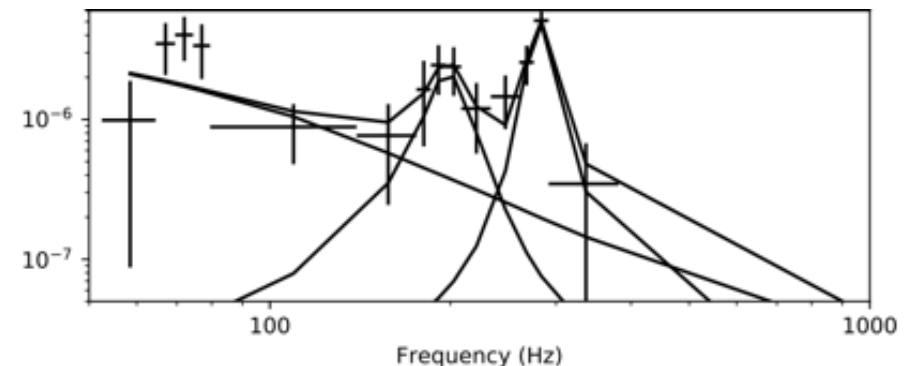
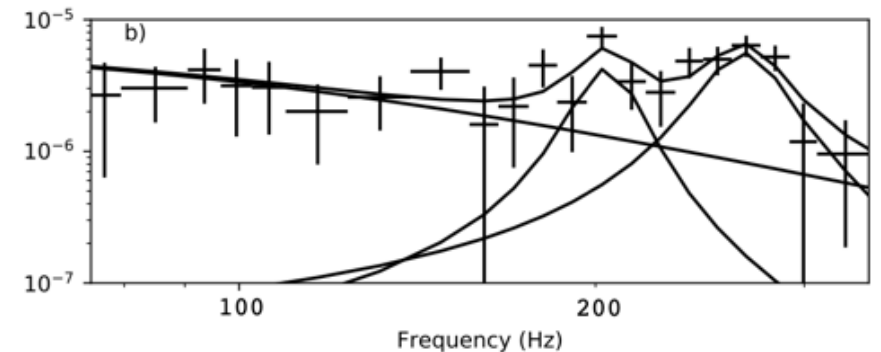
$$T_{\text{orb},\infty}^{-1}(r) \simeq \frac{219 \text{ Hz}}{\left[\frac{a}{6^{3/2}} \pm \left(\frac{r}{6r_g} \right)^{3/2} \right]} \left(\frac{10M_{\odot}}{M_{\text{TN}}} \right)$$



QPO Haute Fréquence dans les binaires X à TN

- La gamme de fréquence des QPO HF indique qu'un phénomène se produit dans le disque mais **près de la dernière orbite stable du disque**.
- Présence de paires de QPO HF avec un **rapport entier** de fréquences 3:2 mais aussi d'autres rapports 4:3 .
- Les QPO HF sont souvent détectés en conjonction avec des QPO BF.
- Les modèles astrophysiques doivent pouvoir expliquer la présence des deux types de QPO en même temps !
- Les QPO HF sont les traceurs de l'accrétion « violente » de plasma sur les TN ...

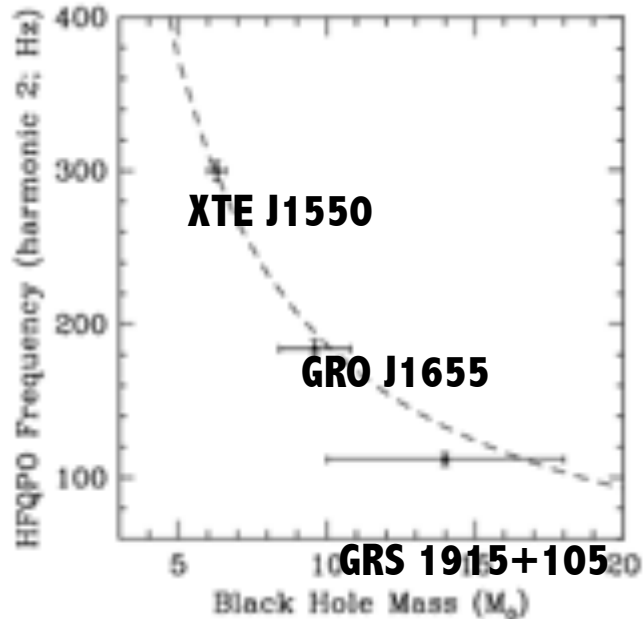
XTE J1550



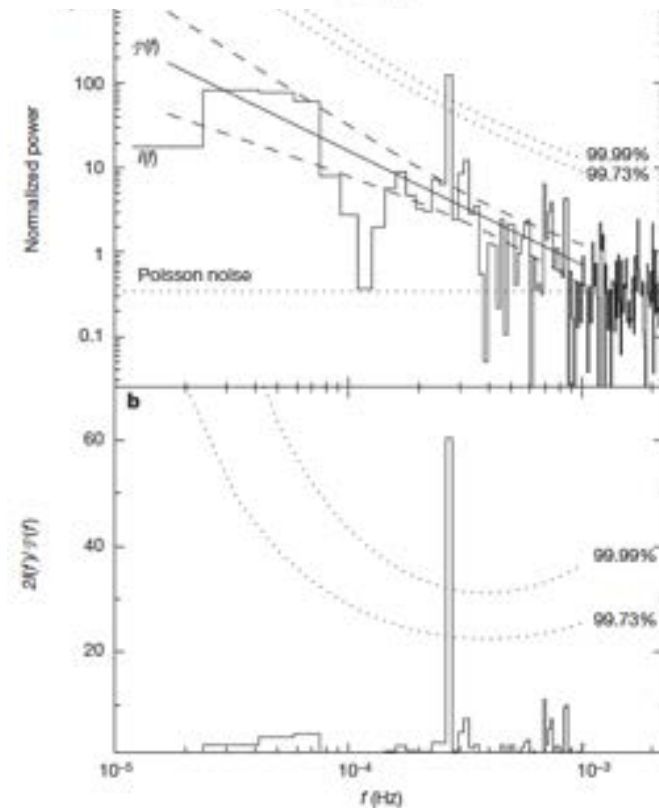
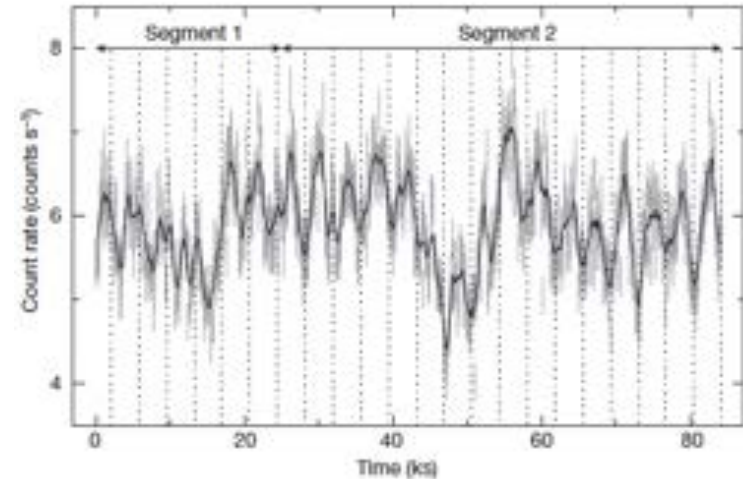
Varniere & Rodriguez (2018)

QPO autour des TN supermassifs

- Des QPO ont également été observés dans des galaxies actives avec des fréquences très inférieures à celles de QPO dans les binaires X.
- QPO de fréquence 2.7×10^{-4} Hz dans la galaxie RE J1034+396 observé avec XMM dans l'émission X (0.3 - 10 keV) de cette galaxie.
- QPO assimilable à un QPO HF mais pour un TN de $M \sim 2 \times 10^6 M_{\odot}$.



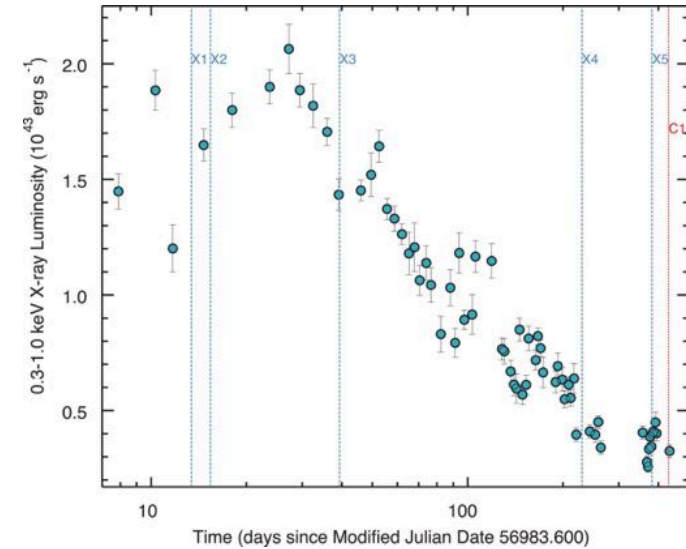
! Courbe valide si même spin ...



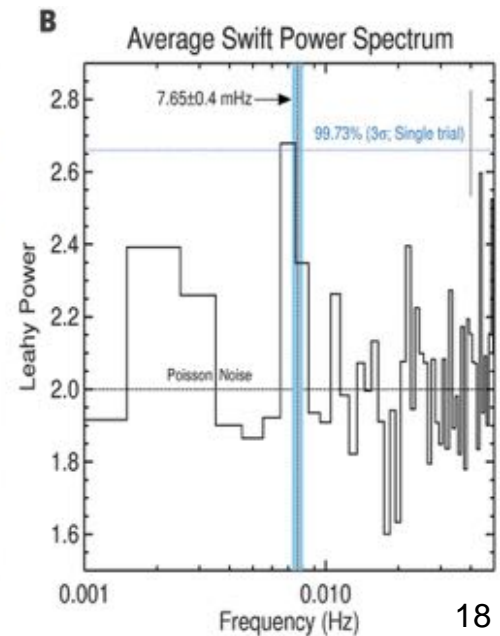
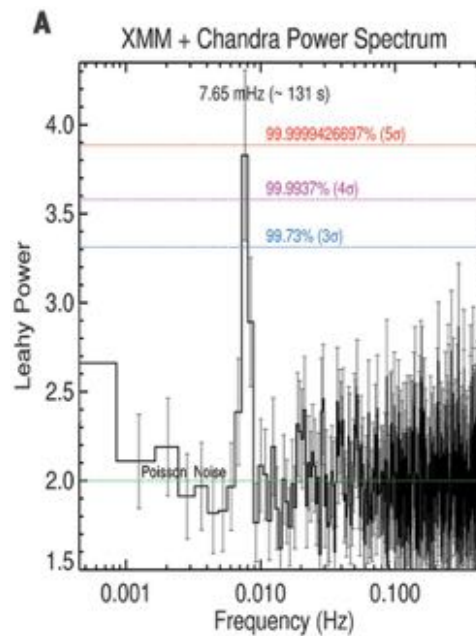
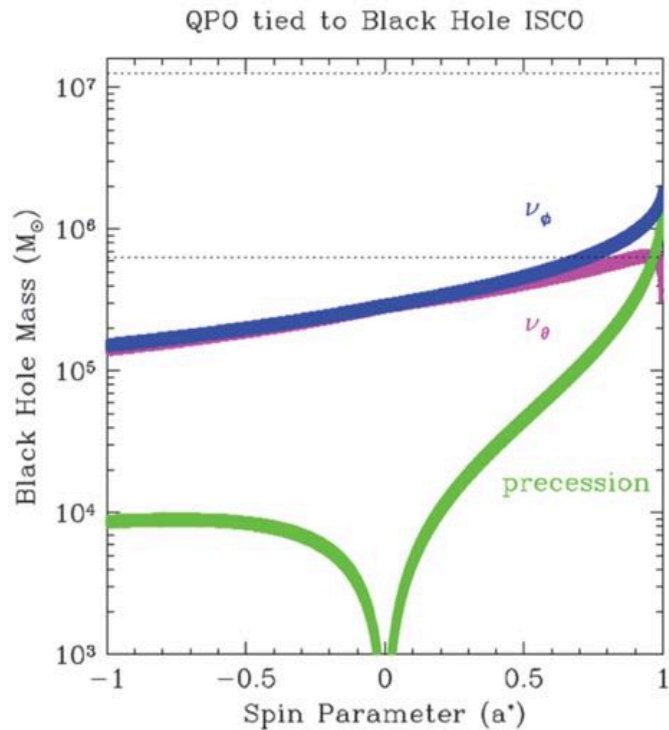
Gierlinski et al (2008)

QPO autour des TN supermassifs

- QPO ont également été observés près de TN supermassif durant un TDE ASASSN-14li.
- QPO de fréquence 7.6×10^{-3} Hz observé avec XMM dans l'émission X (0.3 - 1 keV)
- QPO assimilable à un QPO HF pour un TN de $M \sim 10^6 M_{\odot}$ et de spin $a > 0.7$.



Pasham et al (2019)



Modélisation des QPO autour des TN

- Il y a un consensus sur le fait que les QPO (BF et HF) proviennent de phénomènes se produisant dans le flot d'accrétion avec un possible lien avec la couronne.
- Beaucoup de modèles se sont concentrés pour expliquer un aspect d'un type de QPO mais sans donner de description globale du processus, par exemple: disco-sismologie (e.g. Titarchuk & Osherovich 2000), propagation radiale de chocs dans le disque (e.g. Chakrabarty & Manickam 2000), instabilité entre disque et couronne (e.g. Nobili et al 2000), etc.
- Modélisation du flot d'accrétion et de l'impact de la gravité du trou noir sur le plasma nécessite l'emploi de simulations numériques haute performance de magnétohydrodynamique en relativité générale.
- L'impact de la gravité ne se limite pas à la dynamique du plasma, il faut également prendre en compte l'impact de la relativité sur l'émission radiative !

Simulations numériques MHD en relativité générale de disque d'accrétion autour des TN avec QPO

@ Les disques inclinés vs spin de TN

**@ L'instabilité par ondes de Rossby à la dernière
orbite stable d'un disque d'accrétion autour d'un TN**

Magnétohydrodynamique en relativité générale

- La MHD d'un plasma dans un espace-temps quelconque est décrite par un tenseur énergie-impulsion de la forme

$$T_{\text{MHD}}^{\mu\nu} = (\rho h + b^2)u^\mu u^\nu + \left(P + \frac{b^2}{2} \right) g^{\mu\nu} - b^\mu b^\nu$$

où le tenseur métrique décrit la façon dont le trou noir affecte la géométrie de l'espace-temps

$$g_{\mu\nu} = \begin{bmatrix} -(\alpha^2 - \beta^2) & \beta_1 & \cdots & \beta_3 \\ \beta_1 & \gamma_{11} & \cdots & \gamma_{13} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_3 & \gamma_{31} & \cdots & \gamma_{33} \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} \alpha &\equiv \frac{\text{Temps local}}{\text{Temps observateur}} \\ \beta_\mu &\equiv \text{effet Lense - Thirring} \\ \gamma_{ij} &\equiv \text{métrique spatiale} \end{aligned}$$

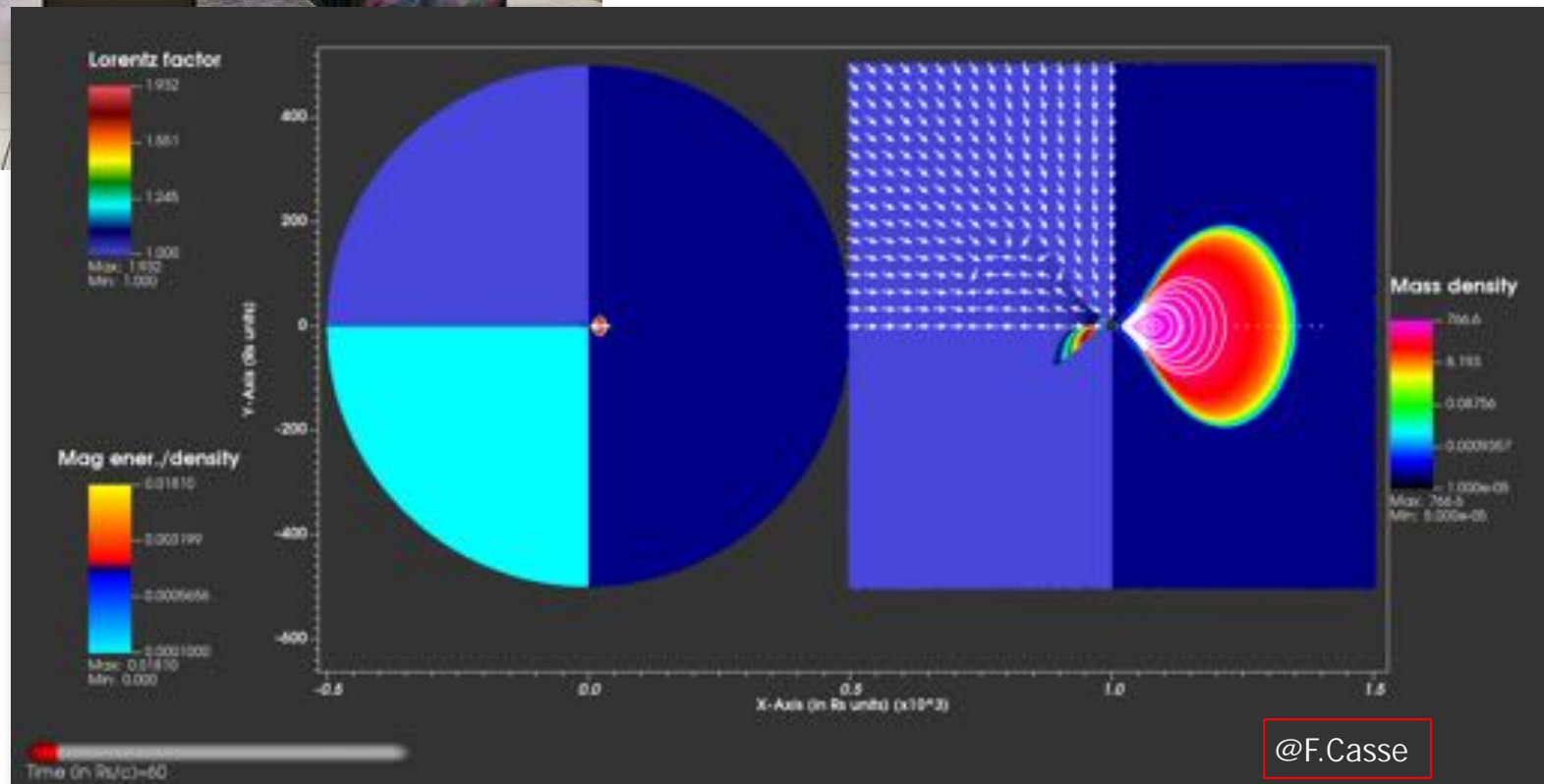
Les équations de conservation de la GRMHD (masse, quantité de mouvement, énergie) ainsi que les équations de Maxwell s'expriment comme

$$D_\mu T^{\mu\nu} = D_\mu (T_{\text{EM}}^{\mu\nu} + T_{\text{fluid}}^{\mu\nu}) = 0$$

L'astrophysique à l'ère de la simulation numérique haute performance



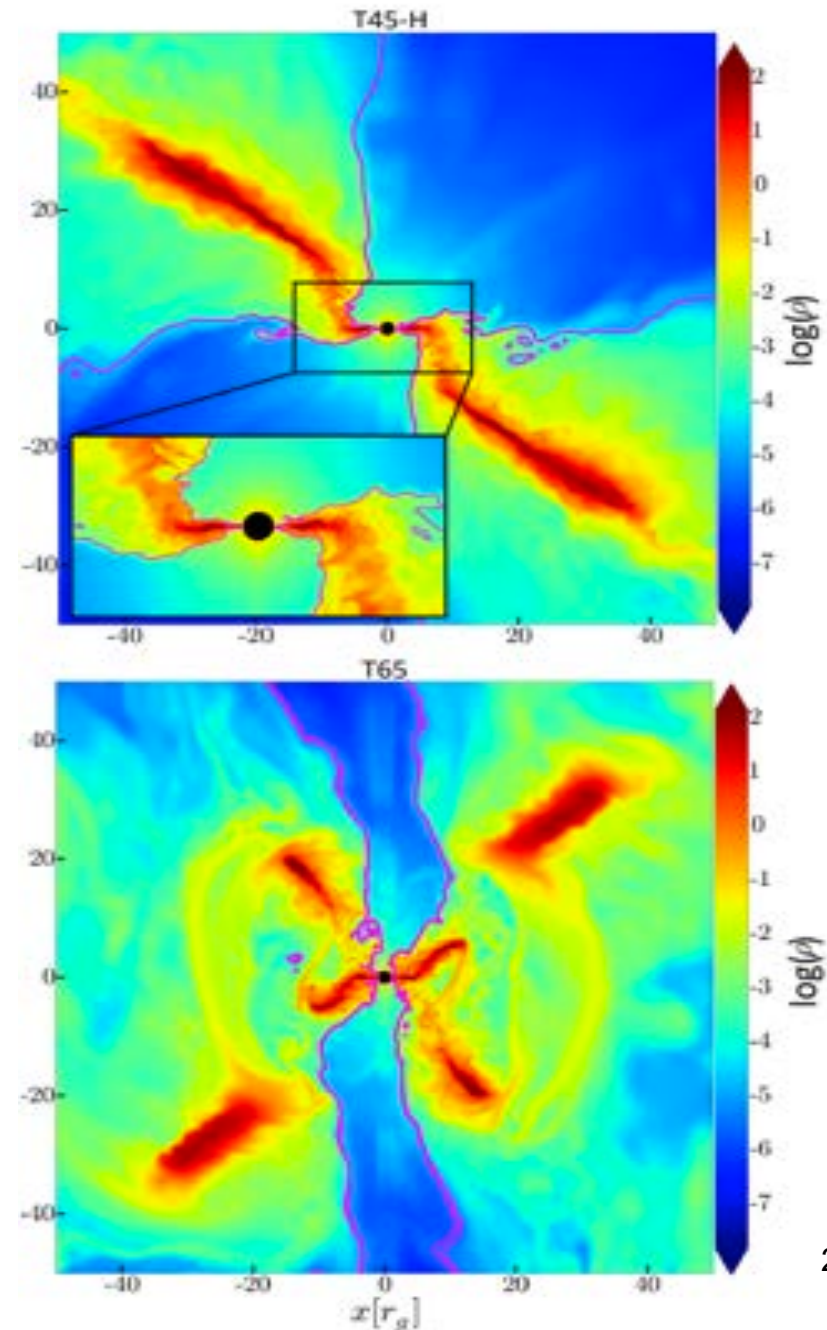
Les simulations numériques astrophysiques complexes et à grande échelle incorporent des techniques de calcul avancées comme la parallélisation massive, l'accélération par GPU ainsi que des grilles adaptatives.



Simulation GRMHD d'un tore magnétisé autour d'un trou noir de Kerr

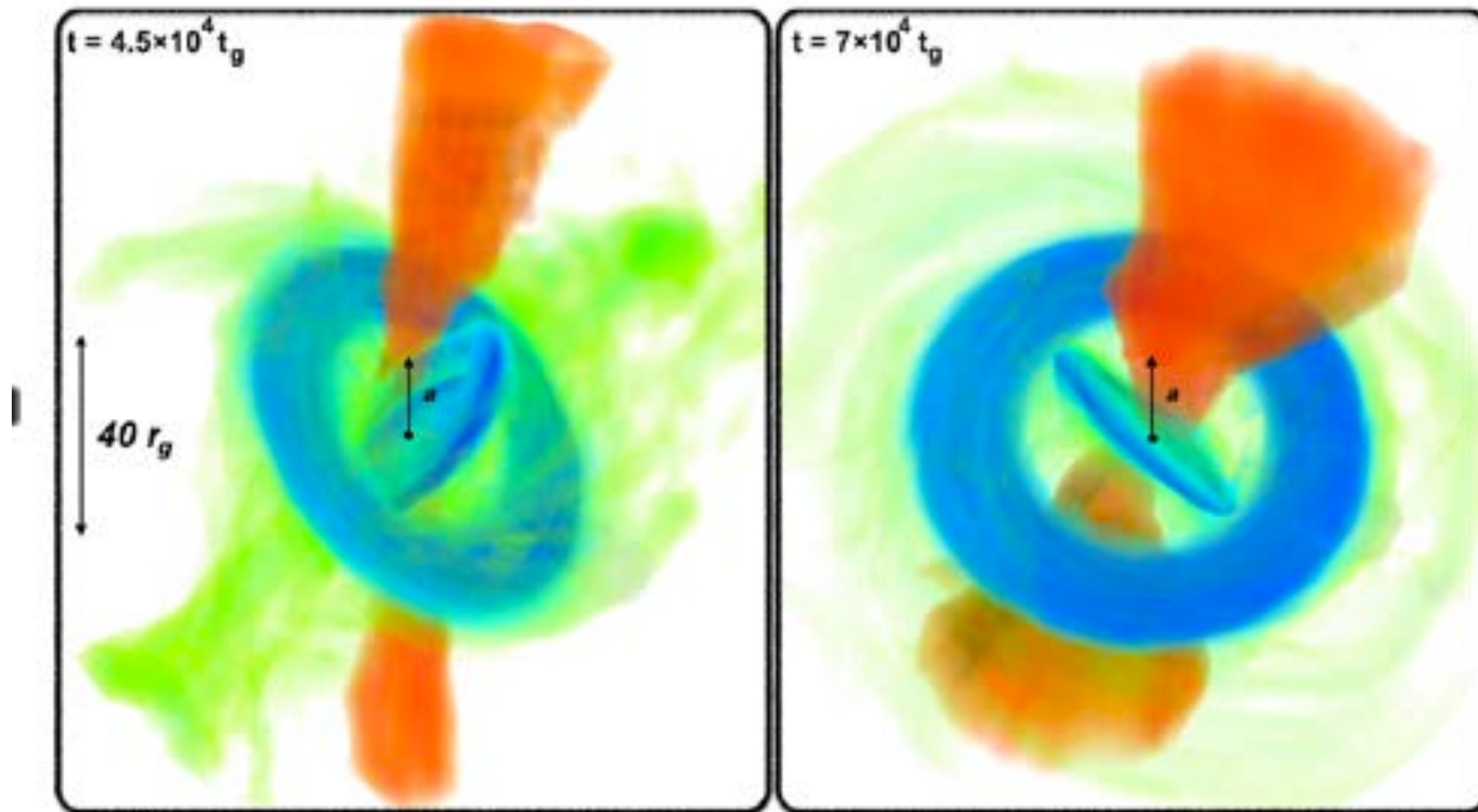
Disques inclinés versus spin du TN

- Liska et al. (2021) ont récemment réalisé des simulations GRMHD de grande ampleur de disques minces ayant une inclinaison par rapport au spin du TN
- Le phénomène de réalignement de Bardeen-Petterson conduit à un réalignement de la partie interne du disque d'accrétion et à une dislocation du disque
- La précession entre disque interne et disque(s) externe(s) pourrait amener à créer des fluctuations de l'émission du disque, i.e. QPO BF.
- Il manque encore une prise en compte de l'émission radiative avant de pouvoir réaliser des courbes de lumière



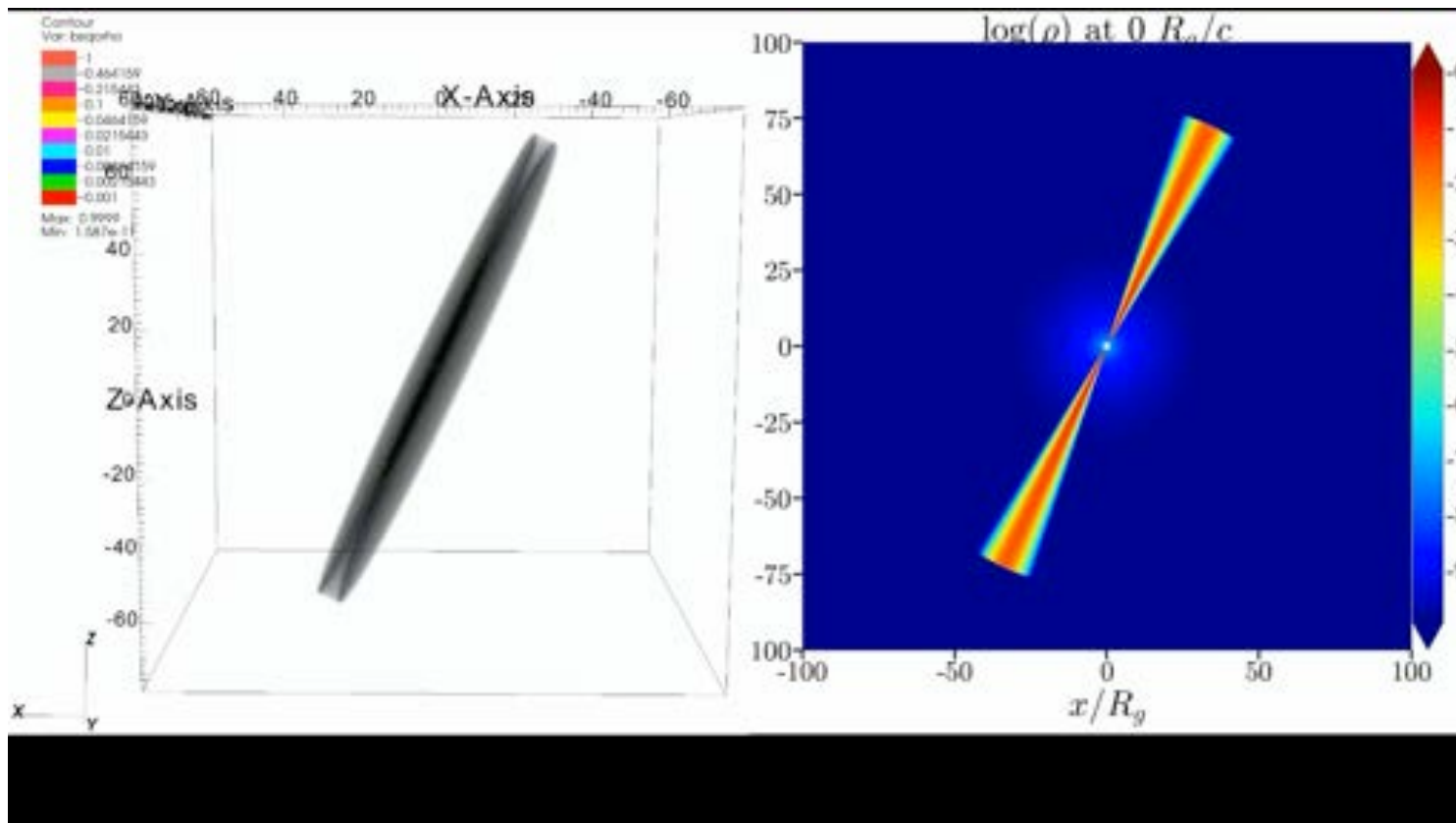
Disques inclinés versus spin du TN

- Liska et al. (2021) montre également la persistance de l'existence de jets astrophysiques durant les différentes phases de précession du disque interne
- Précession de la base du jet qui peut également amener à des fluctuations dans le jet ...



Disques inclinés versus spin du TN

- Liska et al. (2021) montre également la persistance de l'existence de jets astrophysiques durant les différentes phases de précession du disque interne
- Précession de la base du jet qui peut également amené à des fluctuations dans le jet ...



L'instabilité par ondes de Rossby autour des TN



- L'instabilité par ondes de Rossby (RWI) est une instabilité (magnéto-)hydrodynamique se produisant dans les fluides en rotation différentielle (atmosphères planétaires, disques d'accrétion, etc)
- RWI se déclenche si la « vortensité » du fluide présente un extremum → création de tourbillons
- Ce critère est toujours vérifié près de la dernière orbite stable d'un disque d'accrétion ...

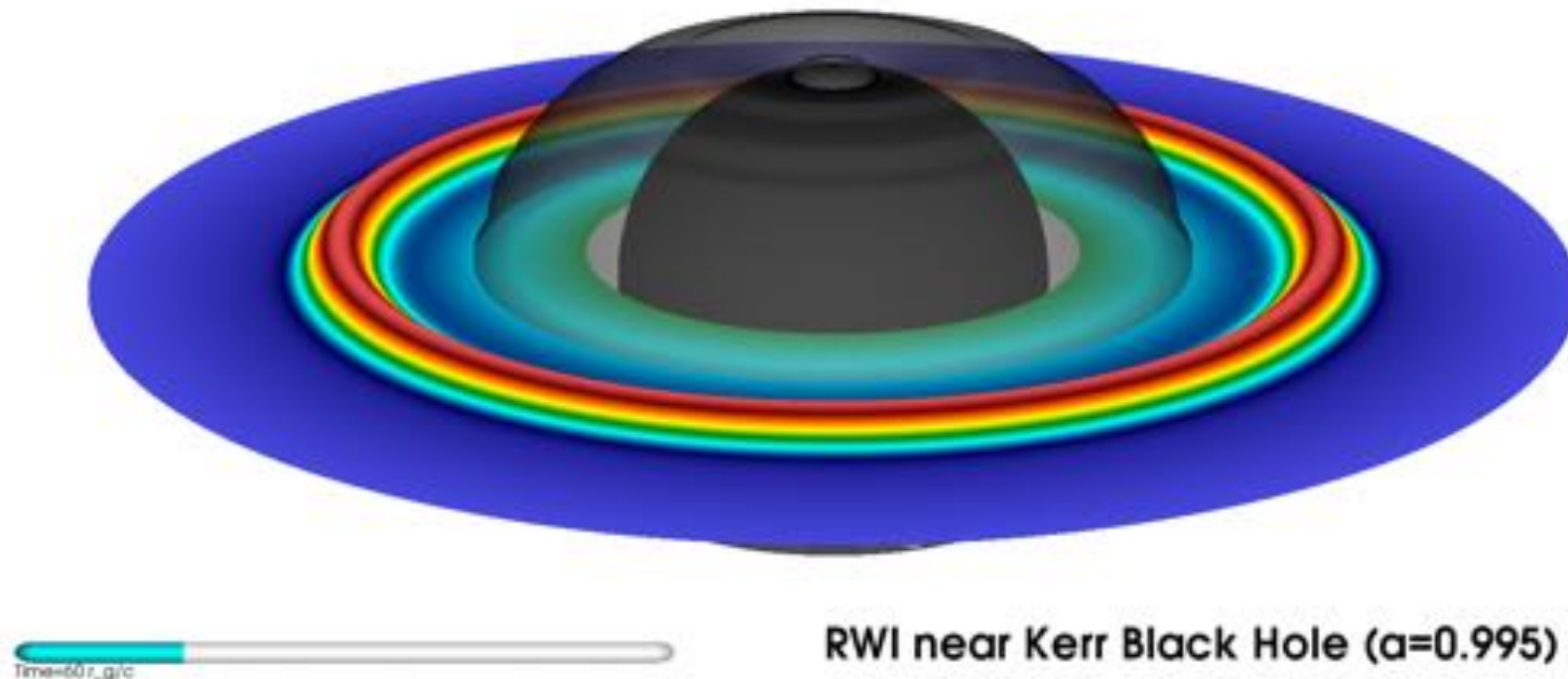
$$\mathcal{L} = \frac{v_{;\phi}^r - v_{;r}^\phi}{\sigma}$$

σ : densité de surface du disque

La RWI près des TN en rotation

- Développement du premier code GRMHD dans la communauté française (GRAMRVAC).
- Casse et al. (2017,2018) → RWI peut être déclenchée à tout $r \geq r_{\text{ISCO}}$
- RWI peut produire plusieurs modes azimuthaux ($m=1$ to 19 dans cette simulation).
- Le nombre de tourbillons présents permet d'expliquer la présence de fréquences de QPO avec un rapport de nombres entiers ...

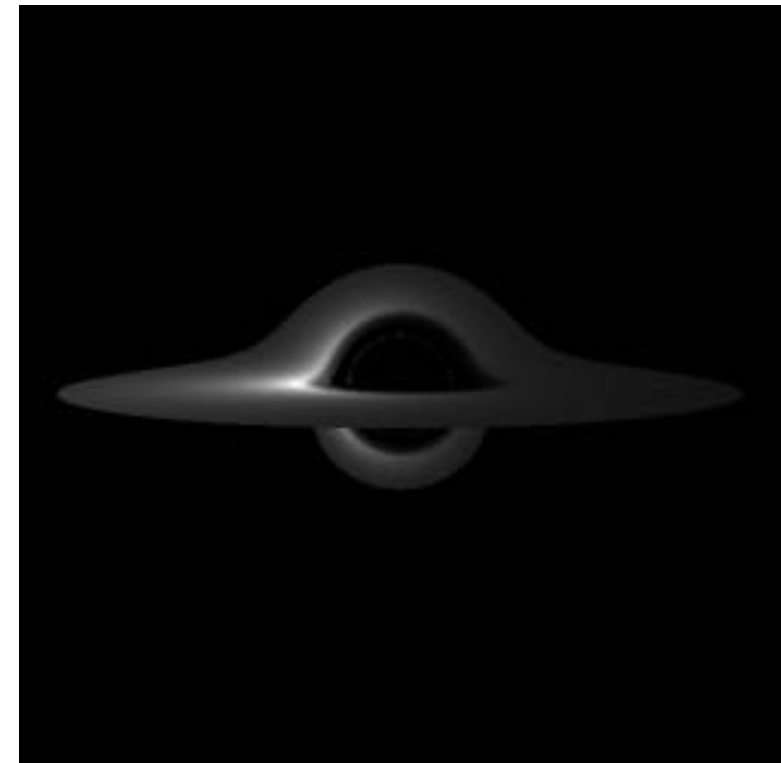
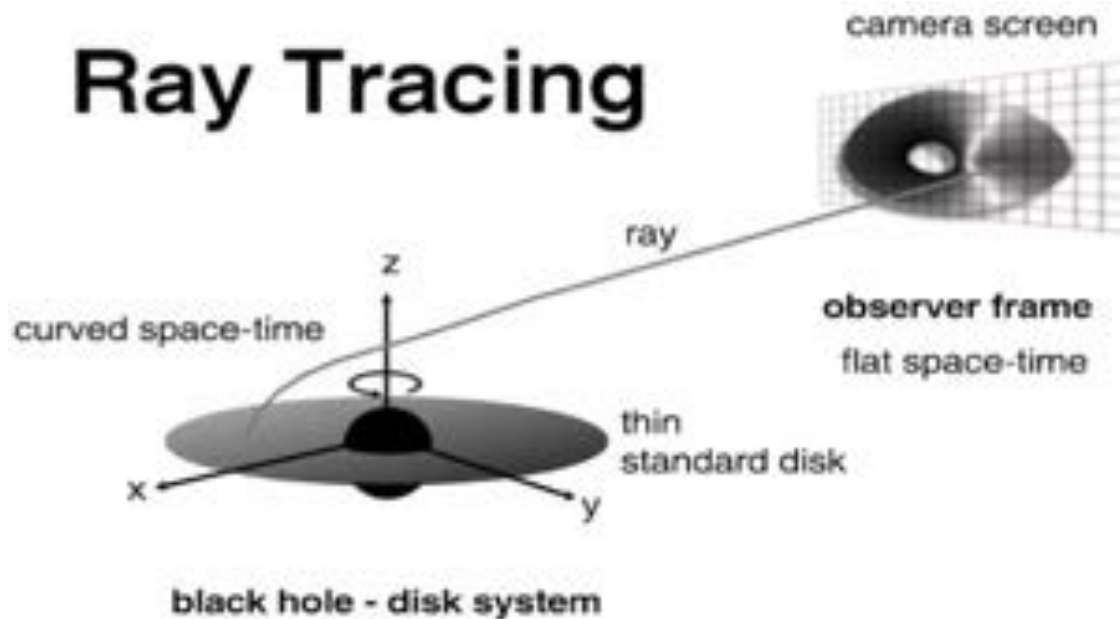
Casse & Varniere



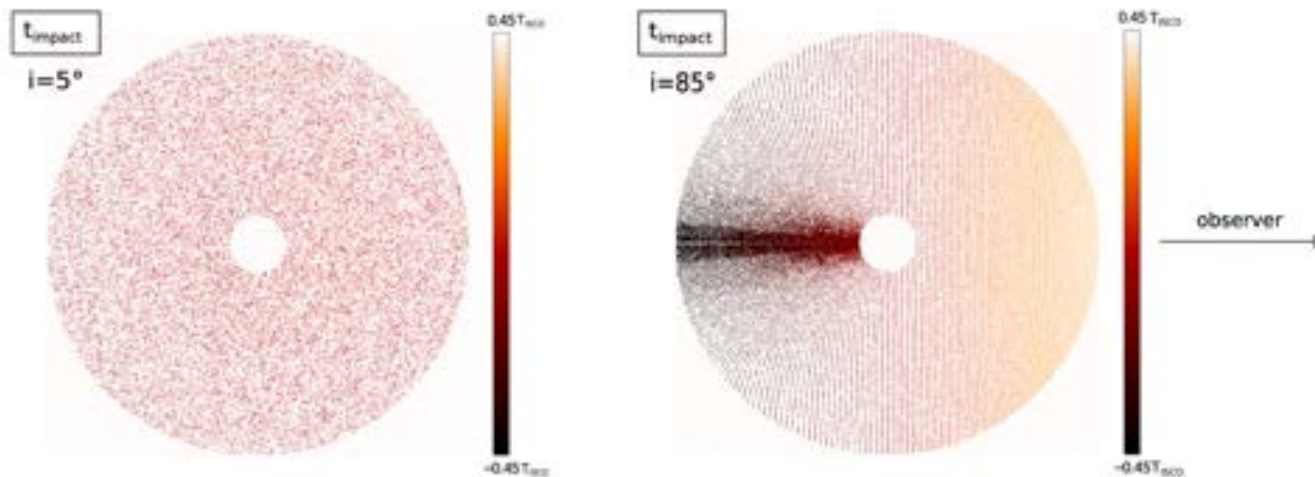
Casse & Varniere (2018)

Tracé de rayons en relativité générale

Ray Tracing



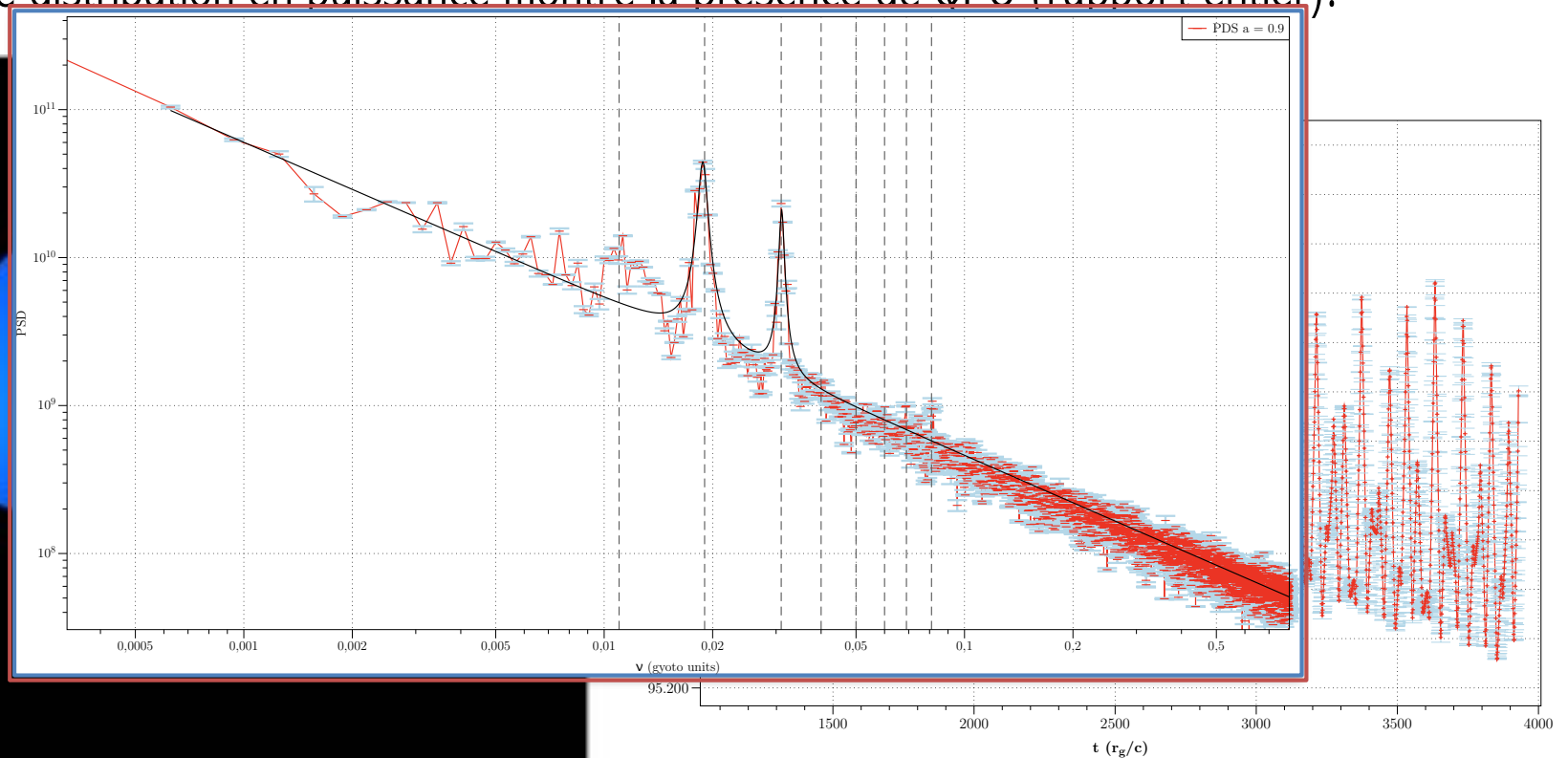
Casse et al. (2017)



- La gravité du TN altère l'image reçue par un observateur lointain.
- La gravité du TN peut retarder l'arrivée des photons émis par la face opposée du disque.

Observations synthétiques par simulations GRHD

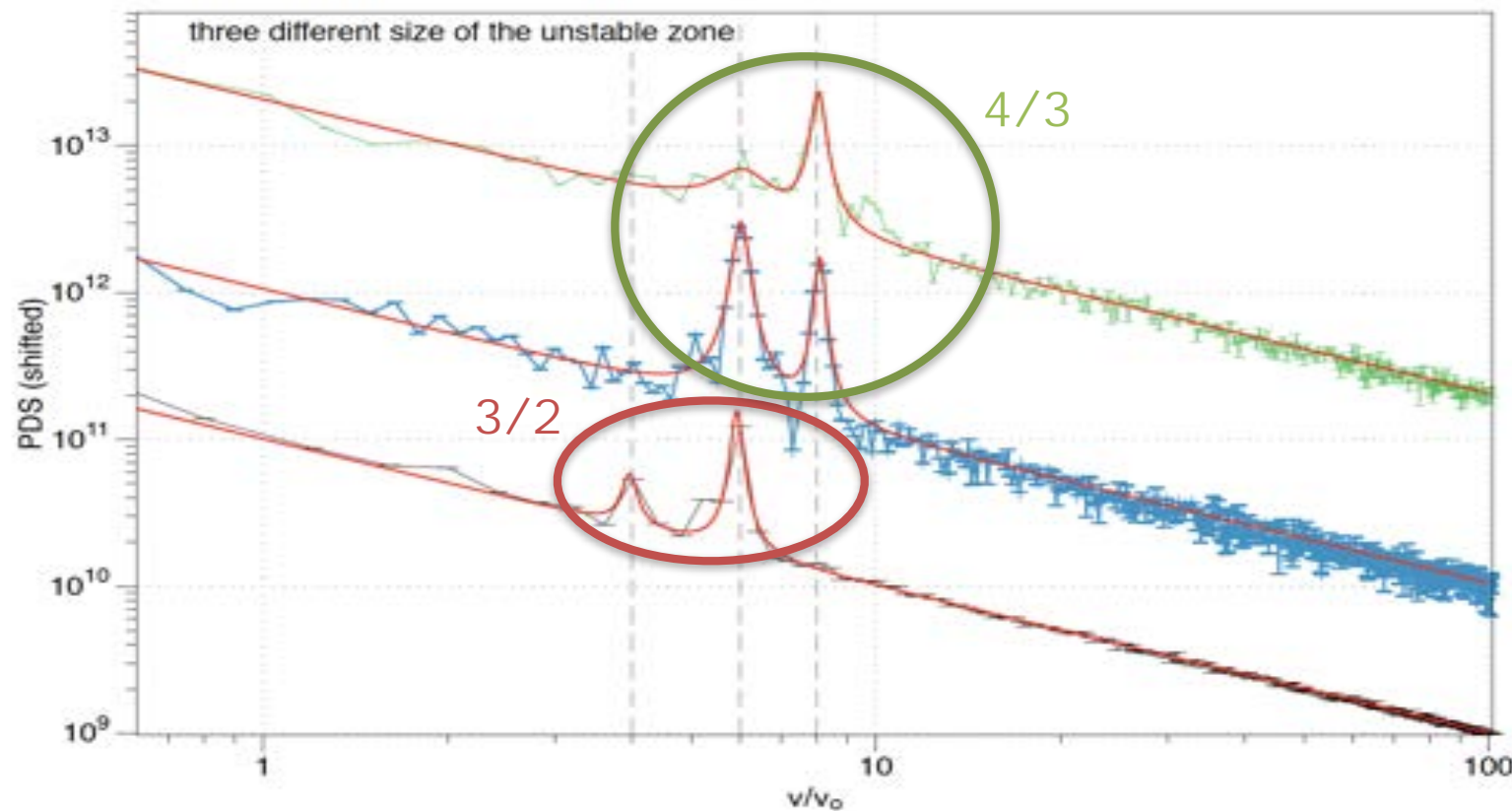
- Couplage du code GRMHD GRAMVAC avec le code de tracé de rayons en relativité générale GYOTO (F.Vincent @ Obs. de Paris).
- La présence de tourbillons créés par la RWI module le flux d'émission X du disque d'accrétion.
- Le spectre de distribution en puissance montre la présence de QPO (rapport entier).



0.029 0.087 0.2 0.44 0.91 1.8 3.7 7.4 15

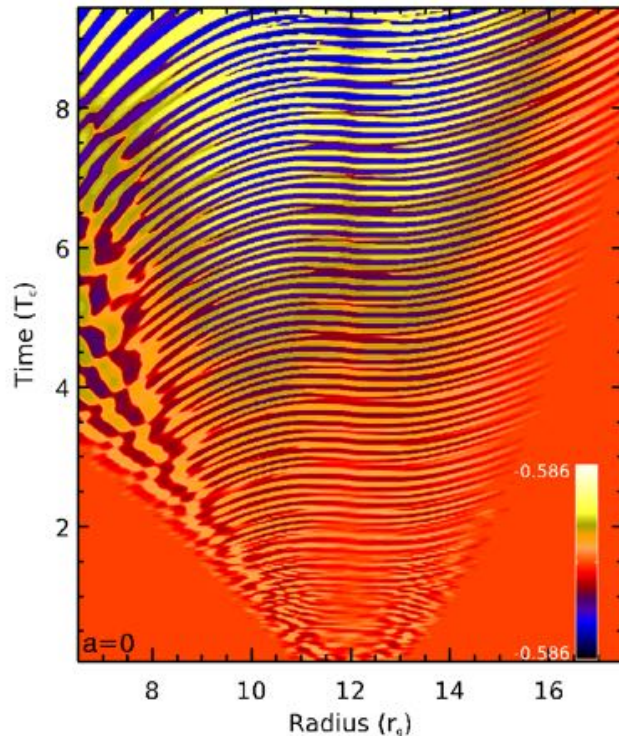
Observations synthétiques par simulations GRHD

- La RWI peut produire des QPO HF de **n'importe quel** rapport de fréquence entier
- Ce rapport est contrôlé par le taux de croissance du mode le plus instable.

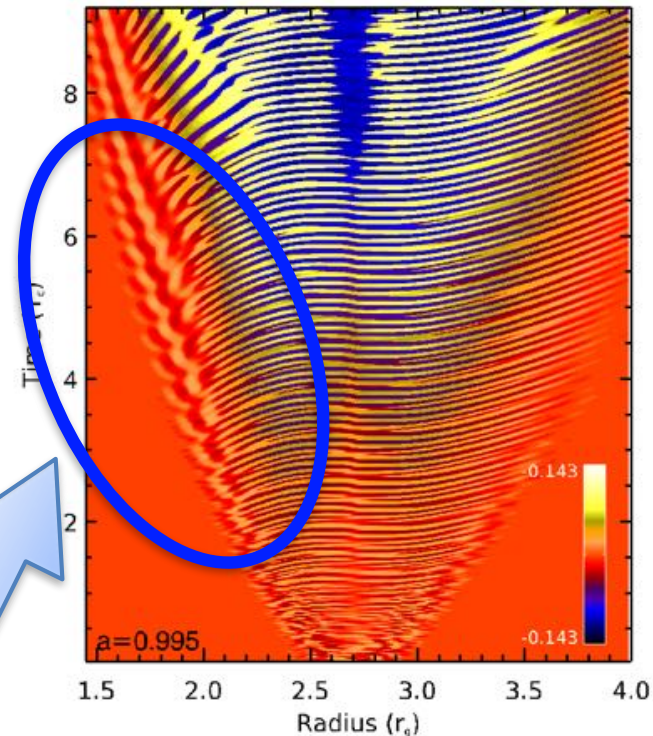


Varniere, Vincent & Casse (2020)

La RWI près des TN en rotation



RWI près de la dernière orbite stable d'TN de Schwarzschild

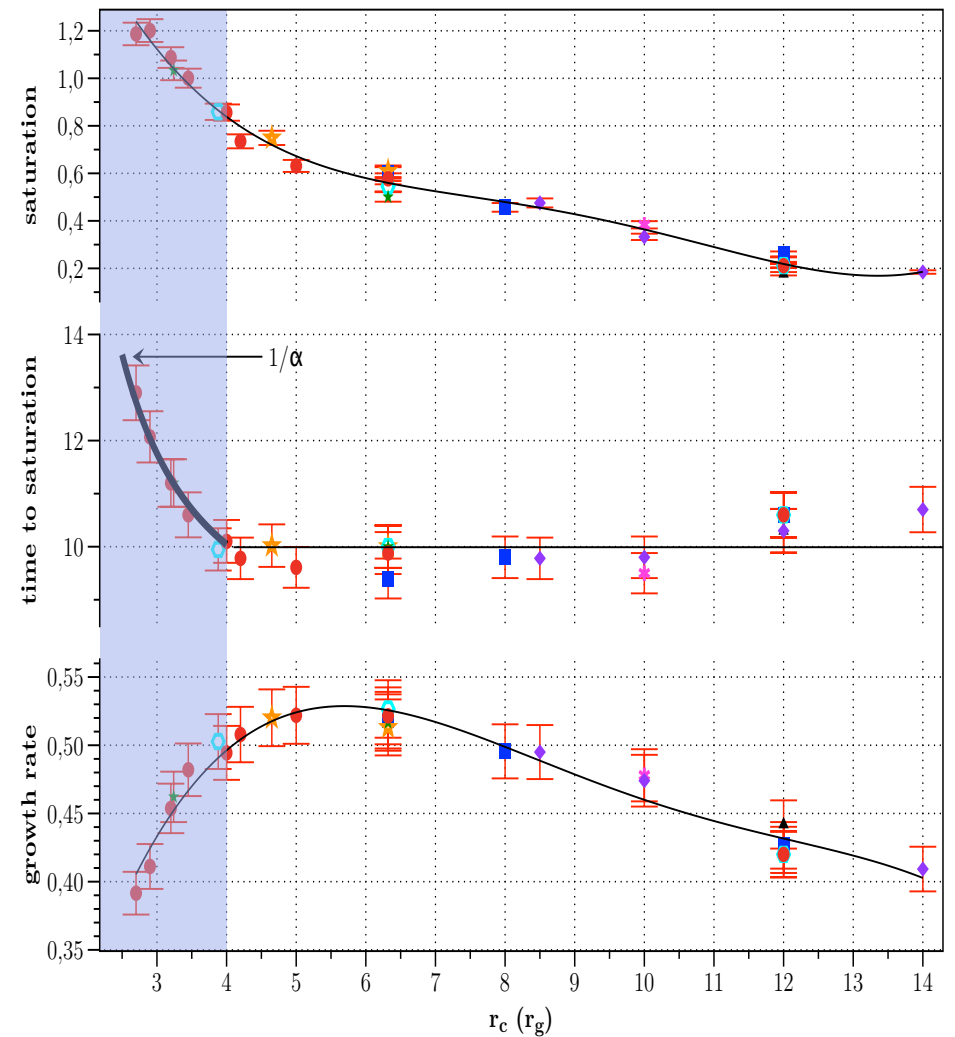
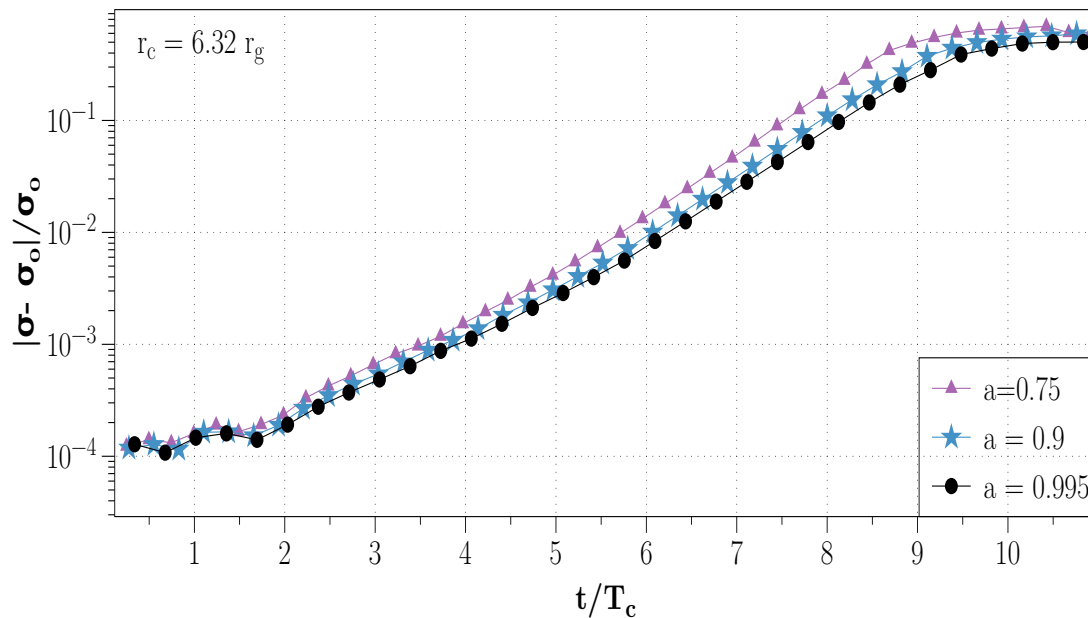


RWI près de la dernière orbite stable d'un TN en rotation rapide ($a=0.995$)

La dilatation du temps se produisant dans l'ergosphère d'un TN en rotation affecte beaucoup la propagation des ondes de Rossby
→ L'instabilité atteint alors un niveau de saturation bien plus élevé !

La RWI près des TN en rotation

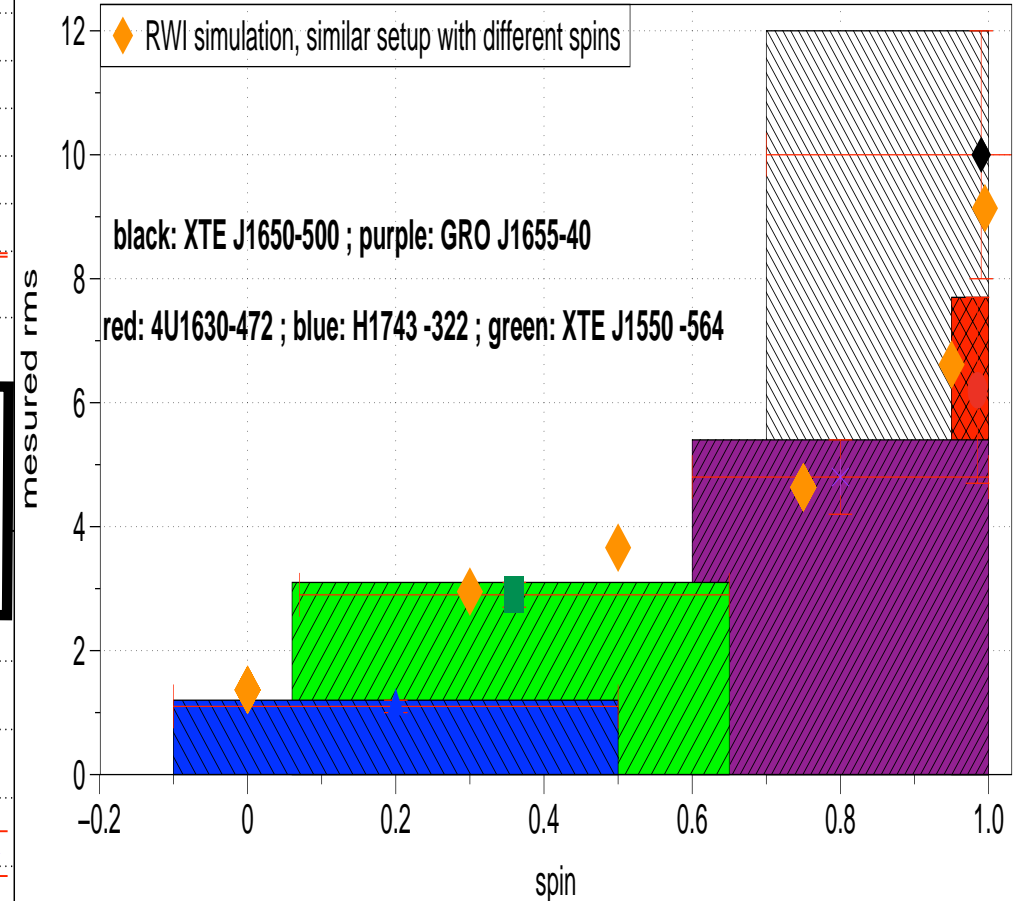
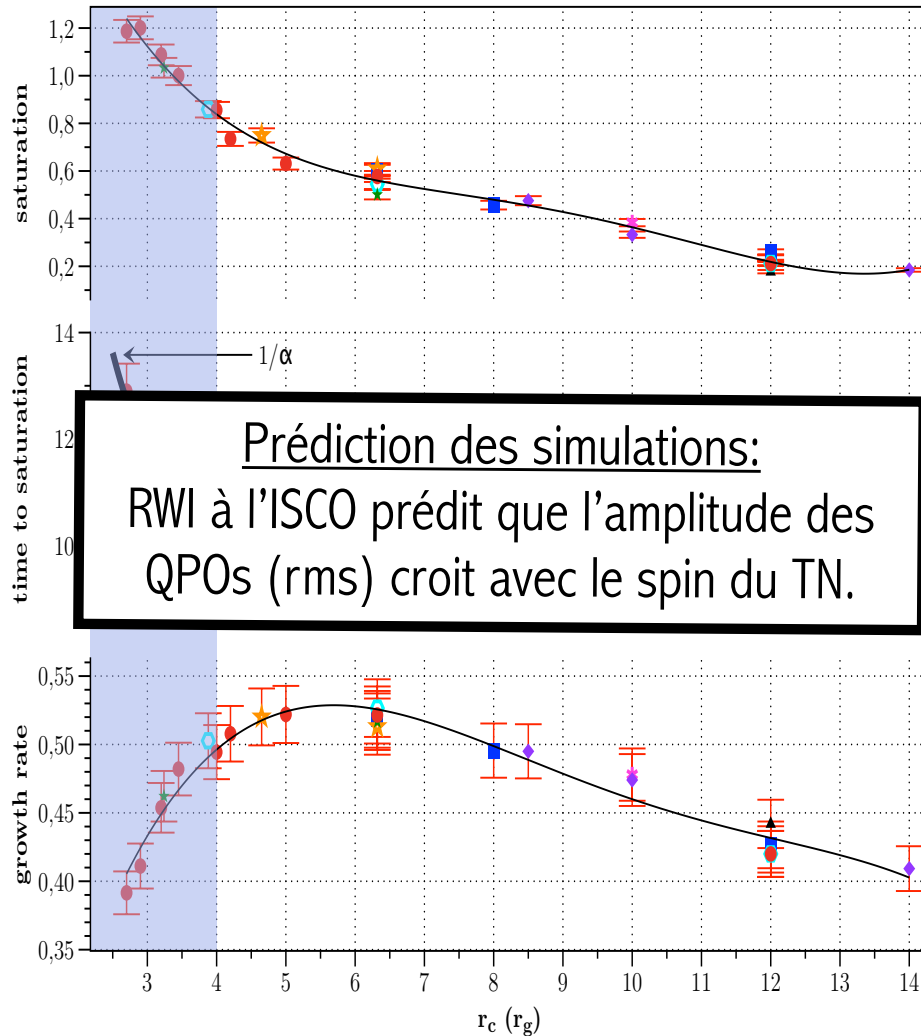
- La croissance de la RWI est altérée près des TN dont le spin $a > 0.9$ et si l'instabilité se déclenche en $r < 4 r_g$
- Des niveaux de saturation plus élevés sont alors obtenus.
- Est-ce une tendance observée ?



Casse & Varniere (2018)

Observations synthétiques vs données observationnelles

Casse & Varniere (2018)



Observations RXTE

Varniere, Vincent & Casse (2020)

L'amplitude des QPO est effectivement bien liée au spin du TN !

Conclusions et perspectives

- L'observation en rayons X et gamma des systèmes abritant des TN permet de d'étudier la façon dont les TN accrête la matière mais également de mettre à l'épreuve nos connaissances sur la relativité générale.
- On retrouve des oscillations quasi-périodiques dans tous les types de TN connus (binaires X, TN supermassifs). Ces QPO sont des traceurs de de l'accrétion « violente » engendrée par les TN.
- Notre compréhension de ces phénomènes a progressé mais il reste encore beaucoup de chemin à parcourir avant d'obtenir une vision globale et cohérente de ces systèmes astrophysiques.
- Nous sommes en attente de nouveaux moyens d'observations en rayons X avec des capacités plus performantes (NICER, Athena).
- Ces travaux vont également permettre de mieux comprendre comment la matière est accrêtée dans les systèmes de TN binaires proches de la fusion de TN.
- Les environnements étudiés sont également de potentiels émetteurs d'astroparticules (neutrinos, rayons cosmiques, ondes gravitationnelles): ils seront visibles au travers des différentes fenêtres qui s'ouvrent sur l'Univers.