

Didier BARRET

Centre National de la Recherche Scientifique

Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements

Université Paul Sabatier

Observatoire Midi-Pyrénées, Toulouse

L'astrophysique de l'extrême: Les trous noirs et les étoiles à neutrons

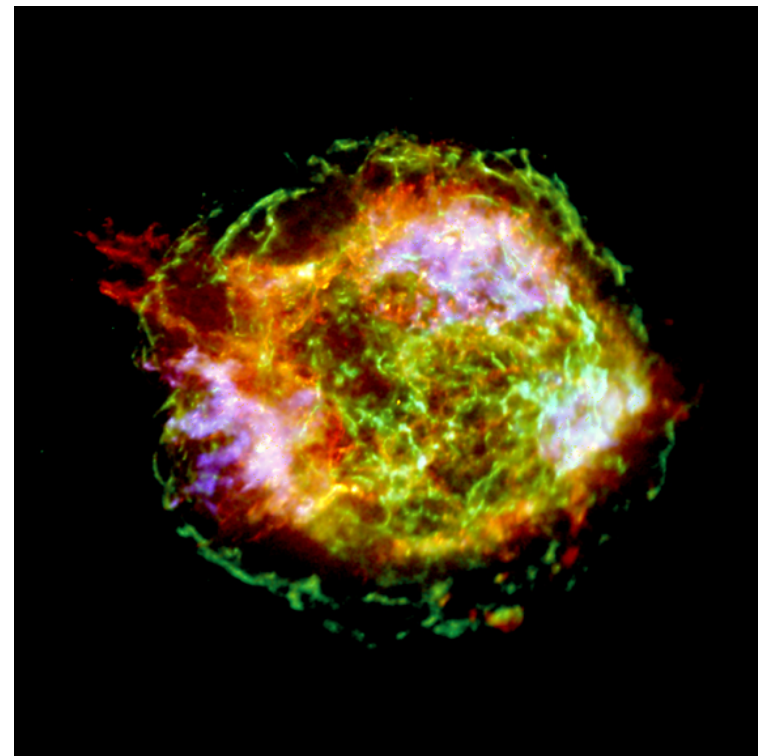
Institut d'Astrophysique de Paris, le 24 Novembre 2006

- Les astres compacts: trous noirs et étoiles à neutrons
 - ✓ Signatures de l'horizon d'événements des trous noirs
 - ✓ Scénario unifié de l'accrétion et de l'éjection
 - ✓ Mesures de spin des trous noirs
- Oscillations quasi-périodiques de hautes fréquences autour des étoiles à neutrons
 - ✓ Signature de la dernière orbite stable

Les trous noirs et les étoiles à neutrons

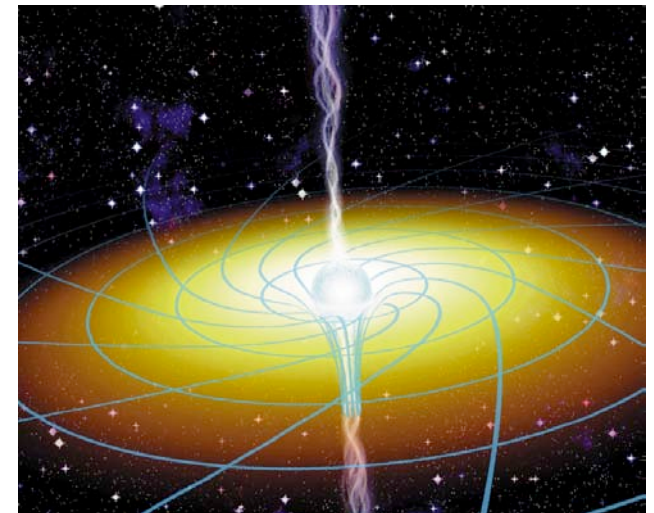
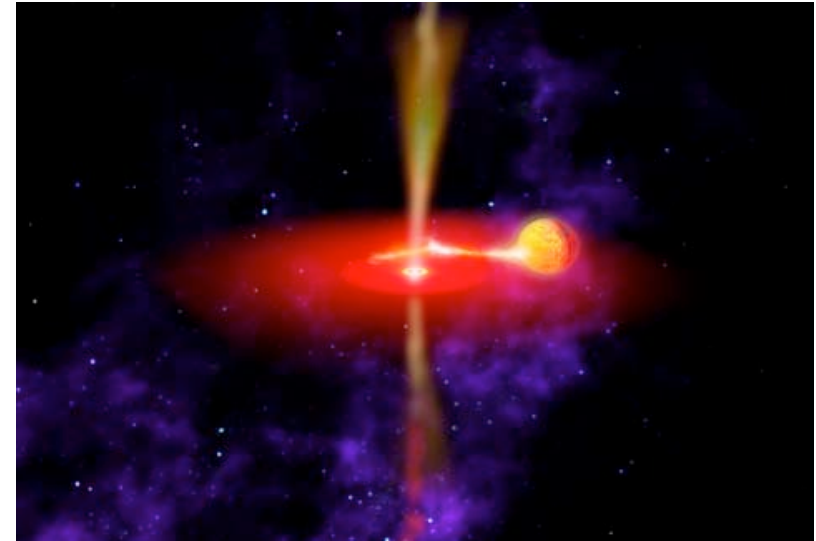
Pourquoi étudier les astres compacts?

- Phase ultime de l'évolution stellaire
- Formation associée aux plus violentes explosions dans l'Univers (supernovae & sursauts gamma)
- Responsables de l'enrichissement du milieu interstellaire en éléments lourds
- Laboratoires uniques de physique fondamentale

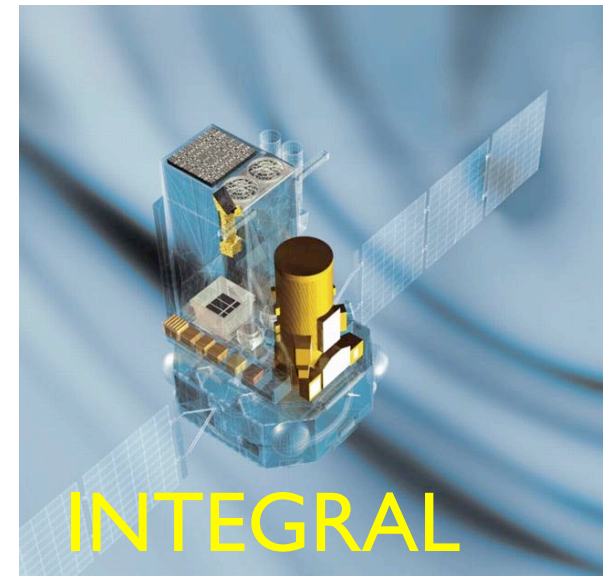


Astres compacts et accrétion

- L'accrétion de matière sur un astre compact génère des rayons X
- 90% de l'énergie rayonnée provient des 100 derniers kilomètres
- Les photons X permettent:
 - ✓ d'étudier les processus d'accrétion et d'éjection (universels et accessibles sur des échelles de temps humaines)
 - ✓ de sonder l'espace-temps et vérifier les prédictions de la Relativité Générale
 - ✓ de contraindre l'équation d'état de la matière super-condensée



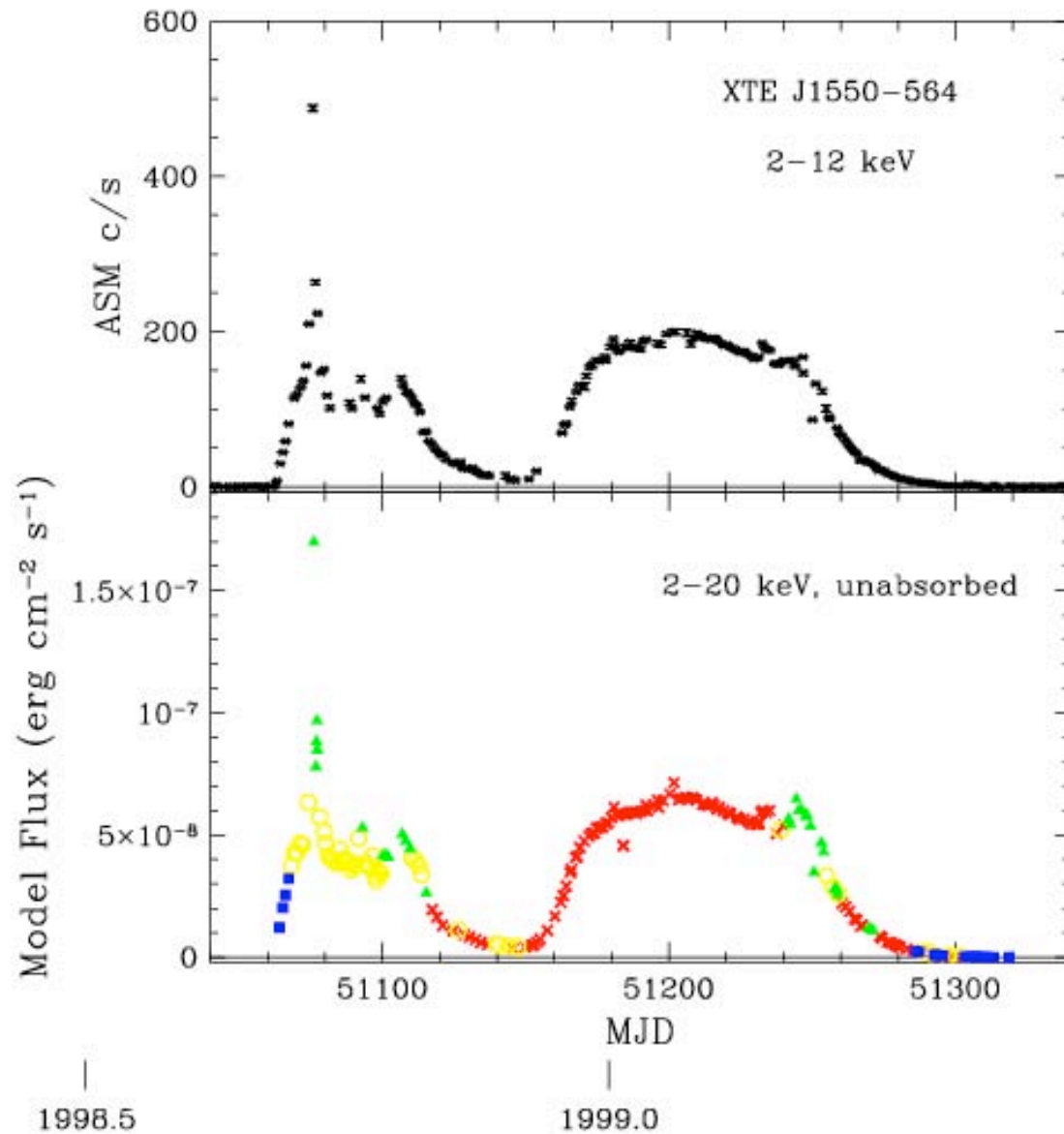
Les outils



+ observatoires sol (radio, optique)

Novae X et candidats trous noirs

- ✓ La majorité des candidats trous noirs sont détectés comme Novae X
- ✓ Sources transitoires X découvertes par les moniteurs grand champ
- ✓ Avantage: Possibilité de détecter la seconde et taux d'accrétion variable (5-6 ordre de magnitude) entre le pic de la phase active et le retour en quiescence



Le pesage des binaires X

La fonction de masse d'une binaire

$$f(M) \equiv P_{\text{orb}} K_2^3 / 2\pi G = M_1 \sin^3 i / (1 + q)^2$$

- ✓ Période orbitale (P_{orb})
- ✓ Semi-amplitude vitesse radiale (K_2)

- ✓ Masse de la primaire (M_1)
- ✓ Rapport de masse (M_2/M_1)
- ✓ Inclinaison (i)

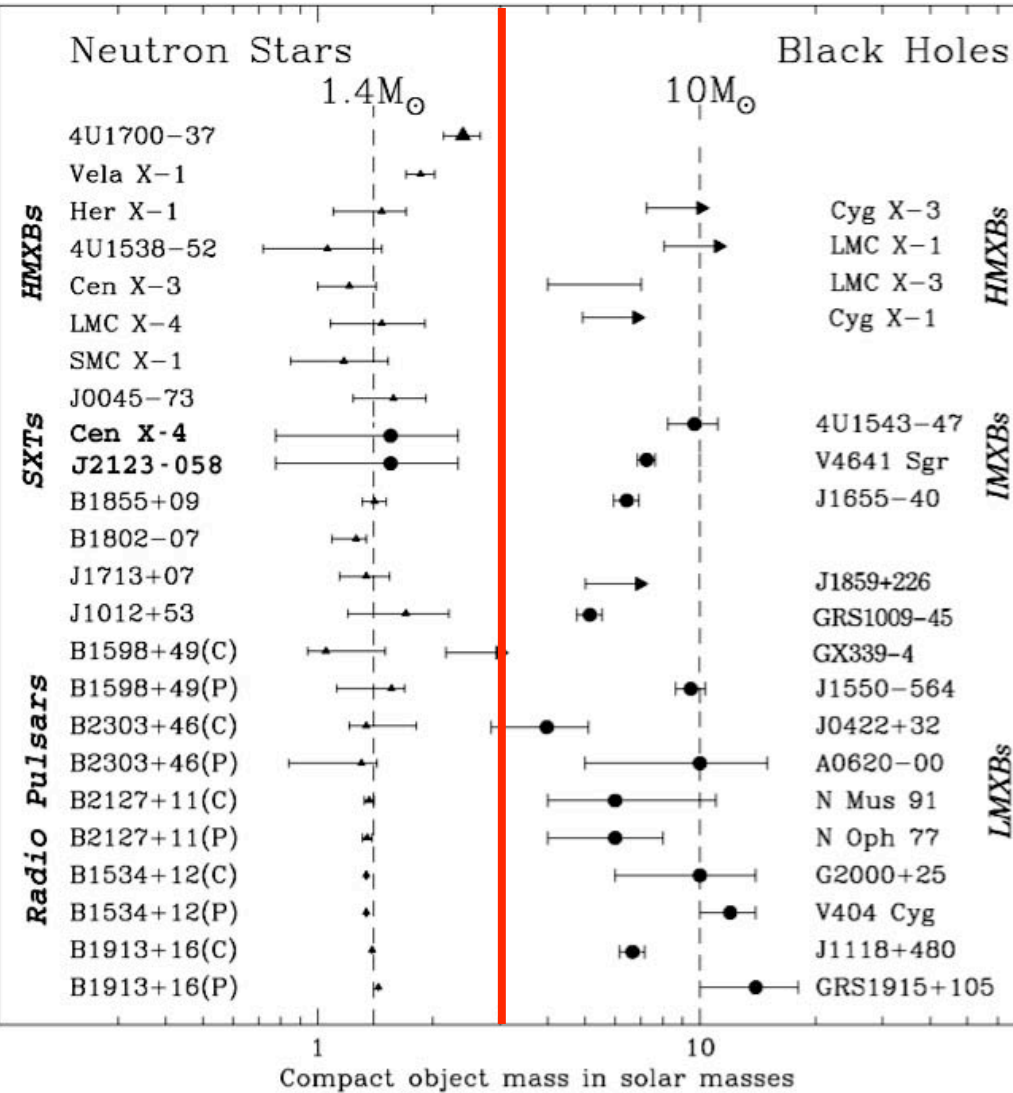
- ✓ $f(M)$ est une valeur minimum absolue de la masse du primaire
- ✓ La masse maximale des étoiles à neutrons stables (composée de matière standard) est de l'ordre de 3 masses solaires

Population de binaires X

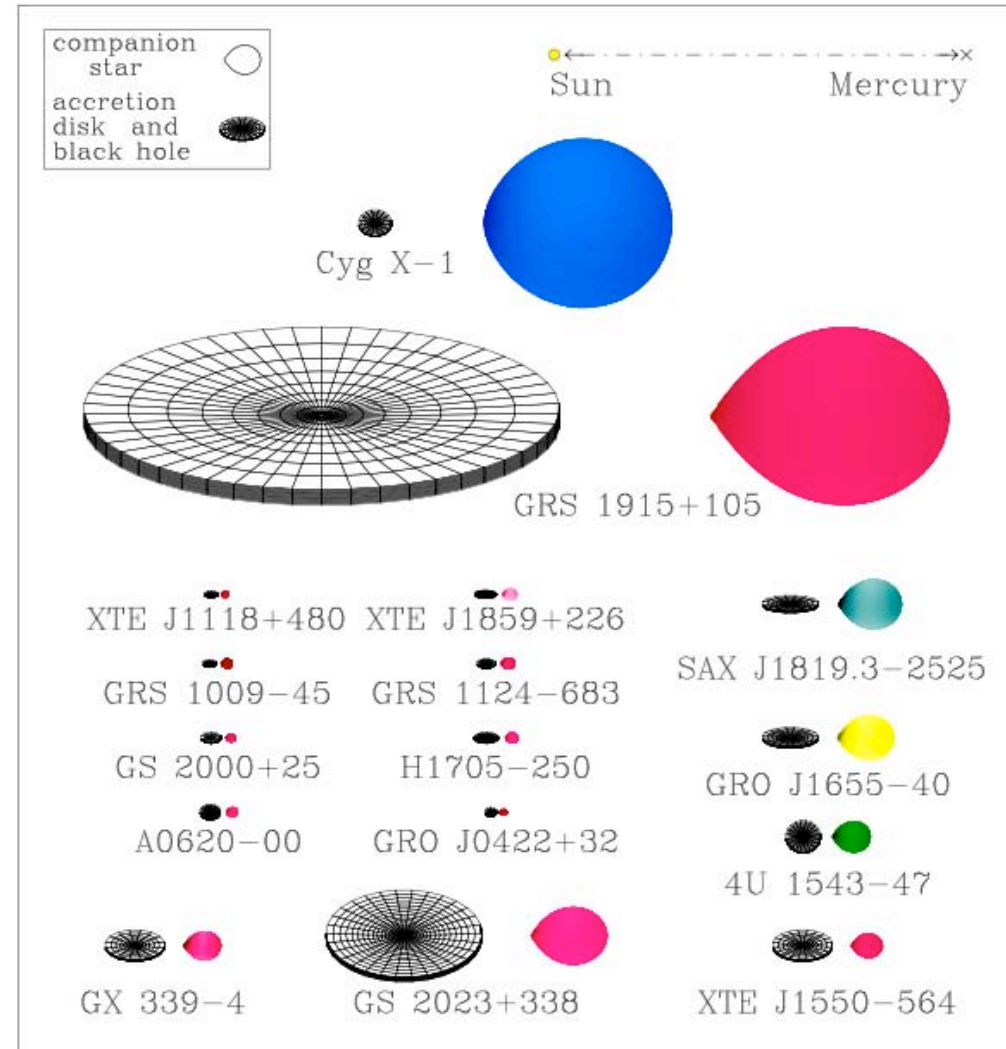
- ✓ $f(M)$ est supérieure à 3 masse solaire dans une quinzaine de systèmes (vingt autres systèmes partagent de nombreuses similarités)
- ✓ 300 millions de trous noirs stellaires (dormants) dans la Galaxie, soit environ 4% de la masse baryonique totale de la Galaxie (e.g. van den Heuvel 1992)
- ✓ ~70 systèmes identifiés avec une étoile à neutrons par la détection de sursauts X (flash thermonucléaire d'hydrogène-hélium à la surface de l'étoile) ou de pulsations X
- ✓ Environ 200 binaires X connues dans la Galaxie
- ✓ Binaires X découvertes dans les galaxies périphériques (XMM-Newton et Chandra)

Les binaires X

Charles & Coe (2006)



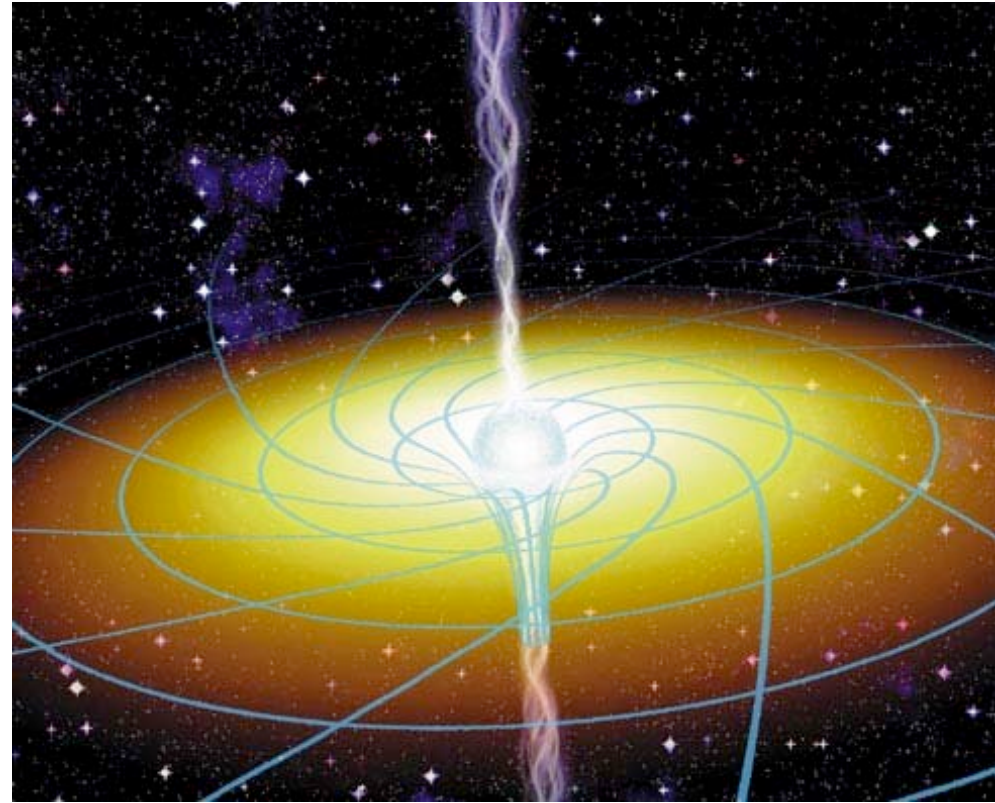
McClintock & Remillard (2006) from Orosz



L'horizon d'événements des trous noirs

L'horizon d'événements des trous noirs

- L'horizon d'événements est une surface virtuelle qui délimite la région interne de l'espace-temps autour du trou noir
- Energie et masse peuvent croiser l'horizon mais rien, ni même la lumière ne peut revenir d'au-delà de l'horizon



L'horizon d'événements des trous noirs

- En astrophysique, un trou noir est caractérisé par sa masse et son moment angulaire (son spin)
- Rayon de l'horizon pour un trou noir de Schwarzschild (spin=0)

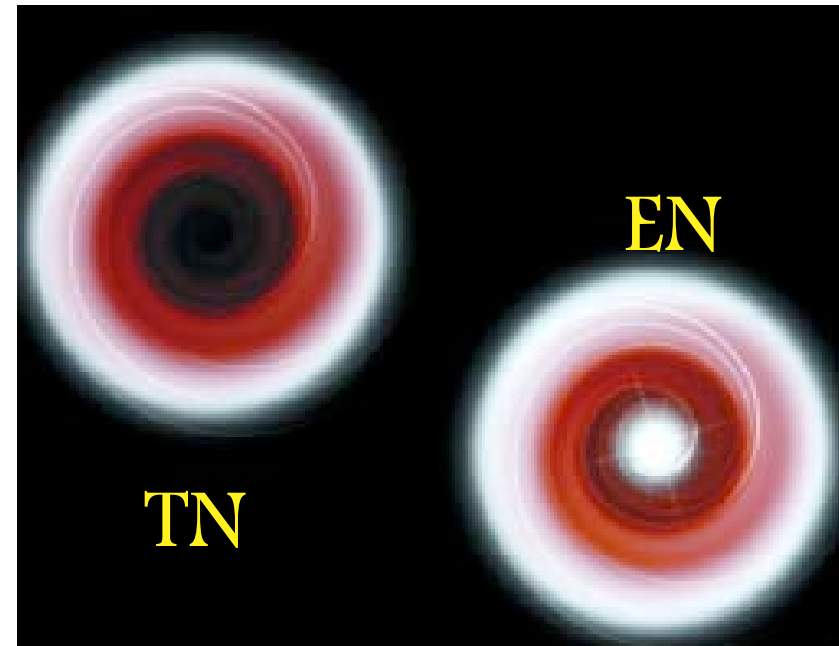
$$R_s \equiv 2R_g \equiv 2(GM/c^2) = 30 \text{ km}(M/10M_\odot)$$

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">☑ Rayon gravitationnel (R_g)☑ Masse du trou noir (M) |
|---|

- Le rayon de l'horizon d'événements d'un trou noir de Kerr (spin=1) est légèrement inférieur

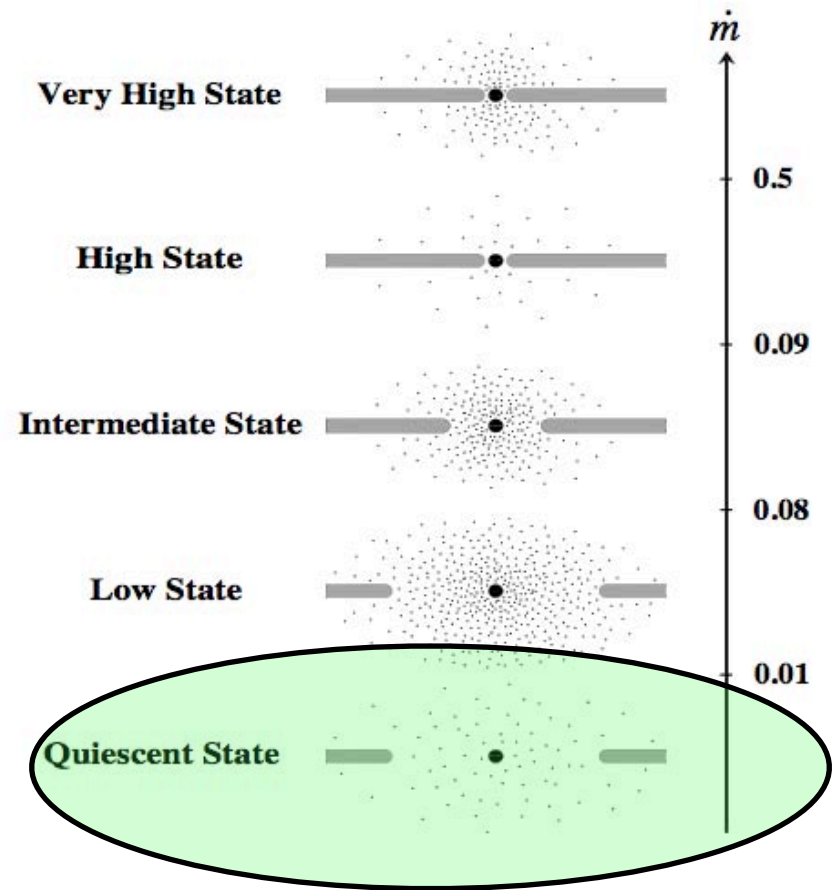
Signature de l'horizon d'événements

- Prouver qu'un objet est un trou noir nécessite de démontrer qu'il possède un horizon d'événements
- La méthode:
 - Comparer des systèmes “candidats trous noirs” avec des systèmes avec étoiles à neutrons, dotés d'une surface solide
 - Différence compatible avec la notion d'horizon d'événements pour les trous noirs?



Utilisation des sources transitoires X

- Advection-Dominated Accretion Flow (ADAF, Lasota, 1995) présent dans les phases quiescentes des transitoires X
- Energie générée par dissipation visqueuse est piégée dans le flot d'accrétion au-lieu d'être rayonnée
- Cette énergie:
 - disparaît lorsqu'elle croise l'horizon d'événements
 - rayonnée à la surface de l'étoile à neutrons

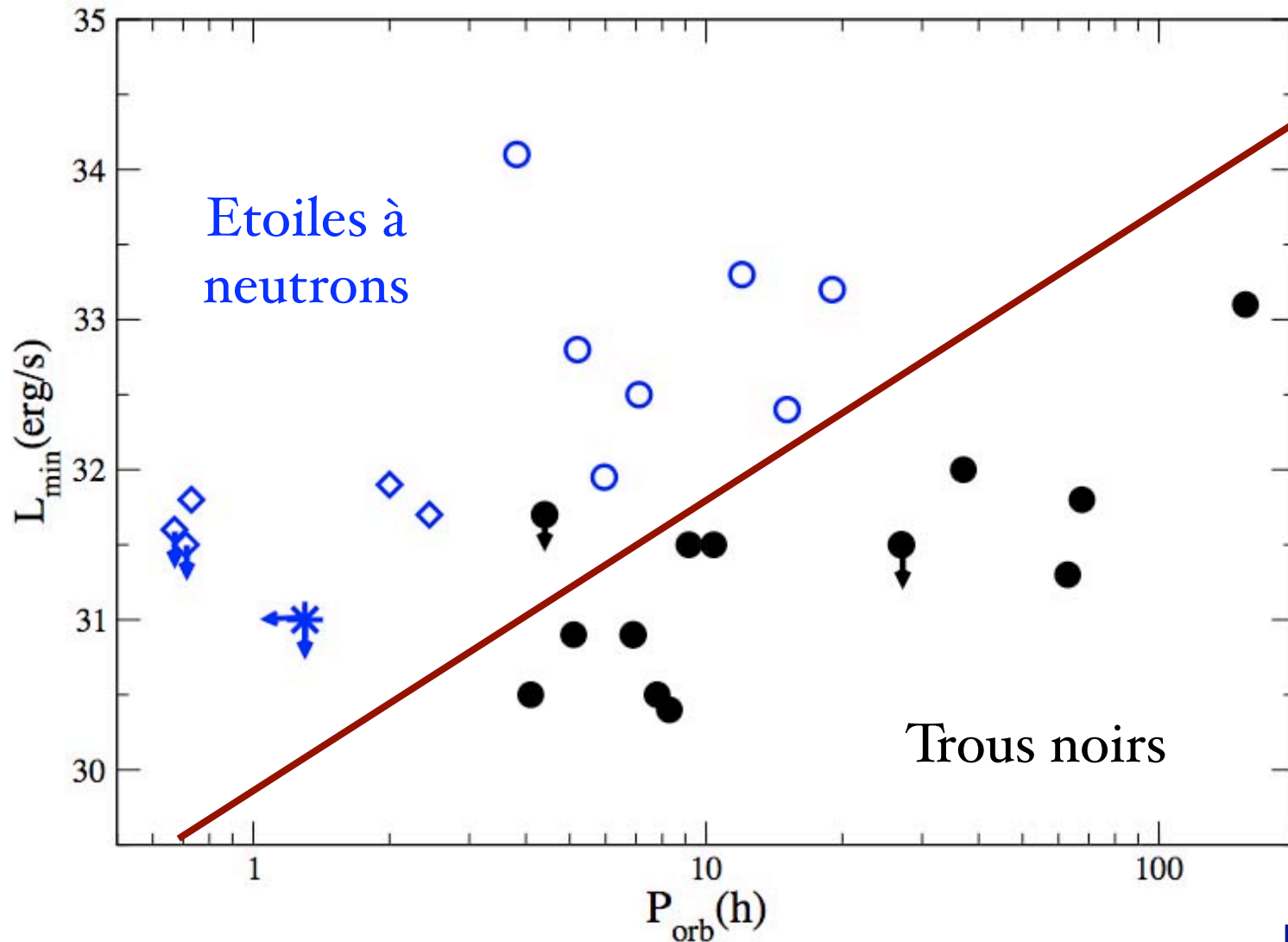


Narayan (2006), Lasota (2006)

Esin et al. (1997)

Luminosités quiescentes

Narayan, Garcia, McClintock (2002)



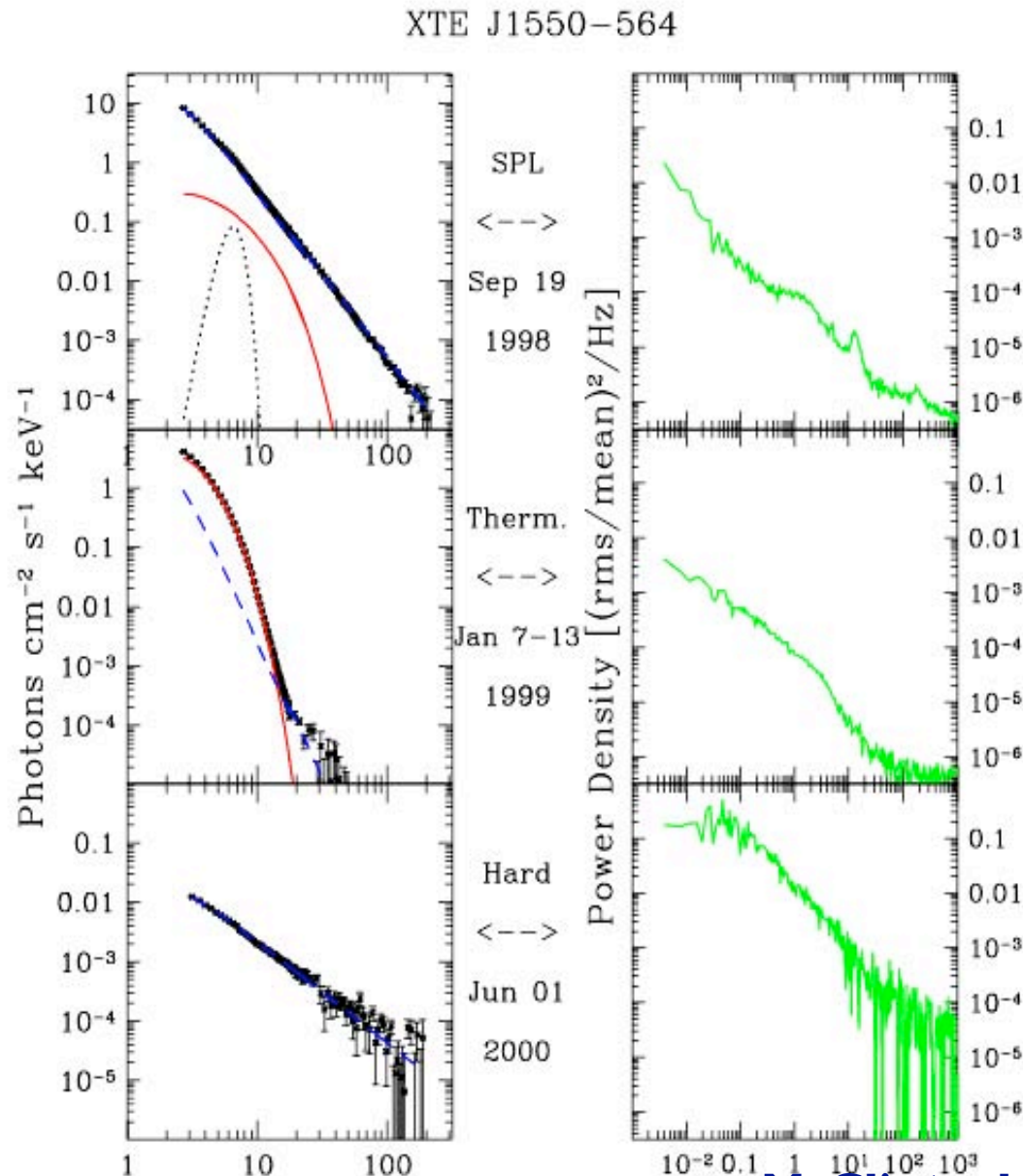
Lasota (2006)

Autres signatures

- Absence de sursauts X de type I (Naryan & Heyl 2004) :
 - nécessitent l'accumulation de matière sur une surface solide, compression, chauffage, instabilité et combustion explosive
 - Aucun candidat trou noir montre des sursauts X
- Variabilité kHz générée dans la couche limite entre le disque d'accrétion et l'étoile à neutrons (Sunyaev & Inogamov 2000)
- Différences “fines” de couleurs spectrales explicables par la présence d'une couche limite (Done & Gierlinski 2004)
- Température maximale pour les électrons thermiques, plus faible dans le cas des étoiles à neutrons (Barret et al. 2000, Barret 2001)

Accrétion et éjection

Les différents états des trous noirs



- Pas de coupure à haute énergie

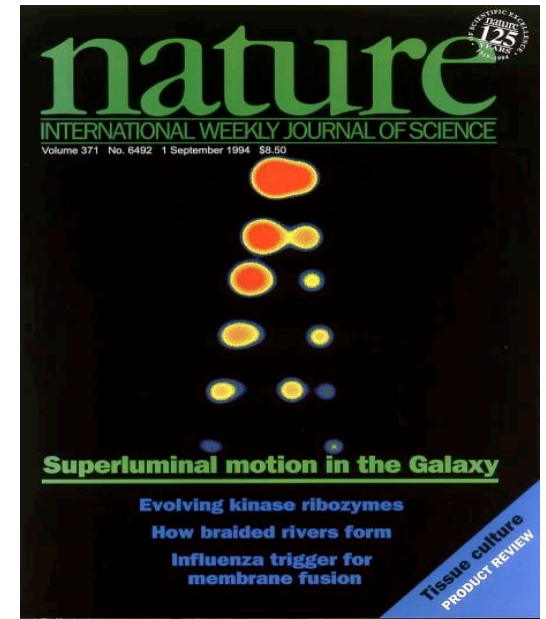
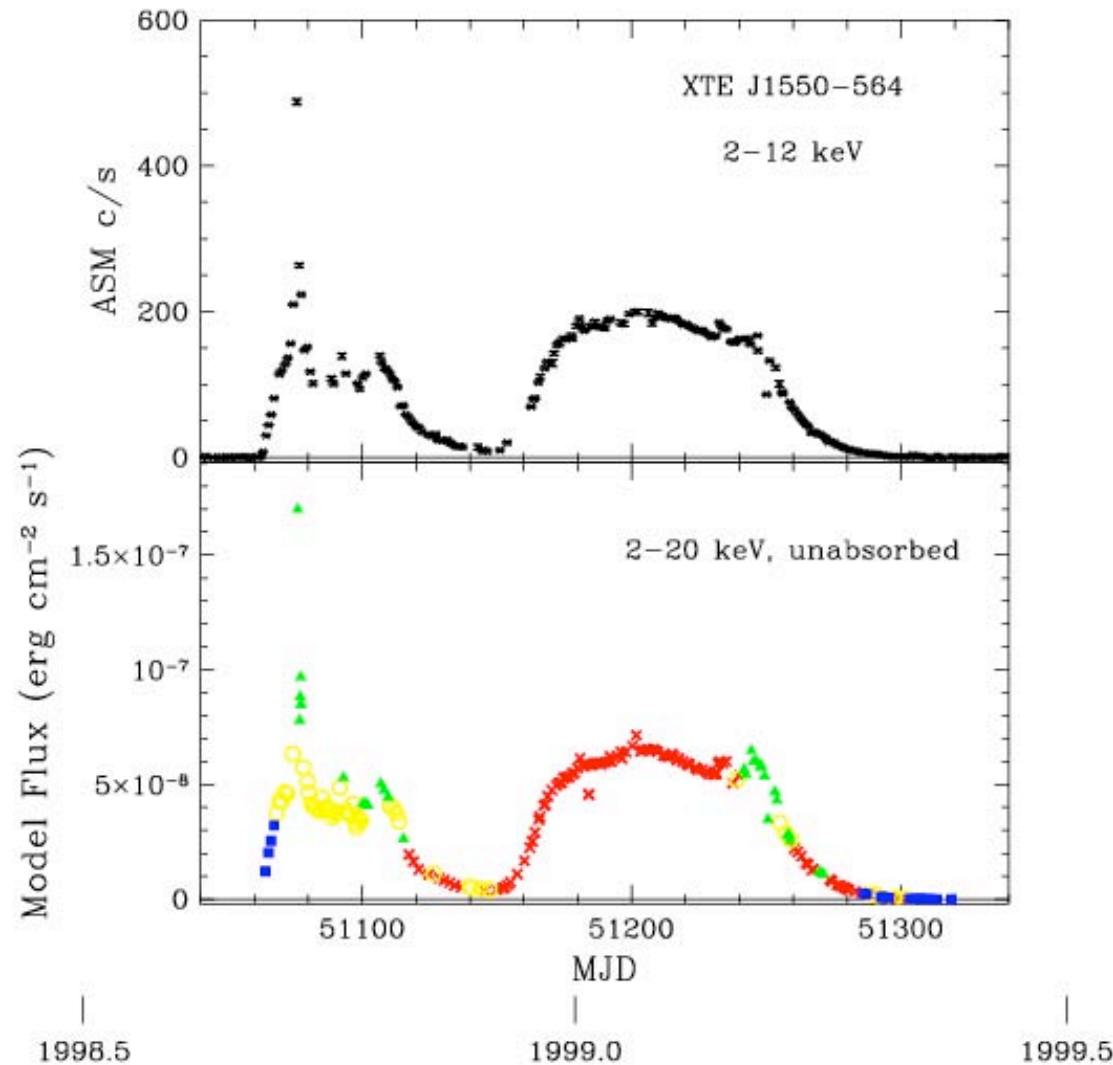
- Composante haute énergie faible

- Coupure à haute énergie

- Variabilité quasi-périodique de haute fréquence

McClintock & Remillard (2006)

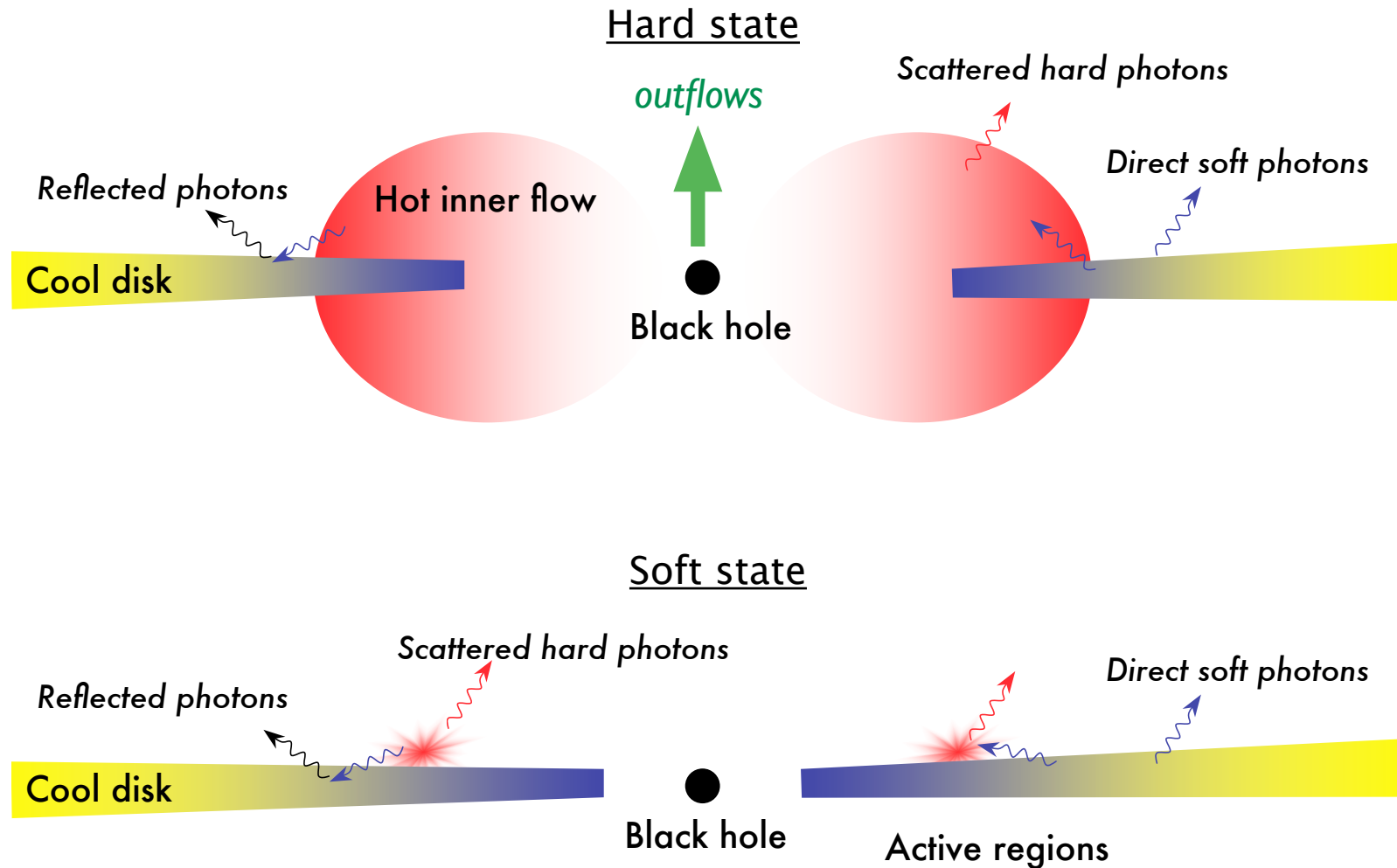
Accrétion et éjection



état dur (jet)
état intermédiaire
état spectral mou (HF QPOs)
état thermique

Scénario d'accrétion unifié

Comptonization+réflexion+émission du disque



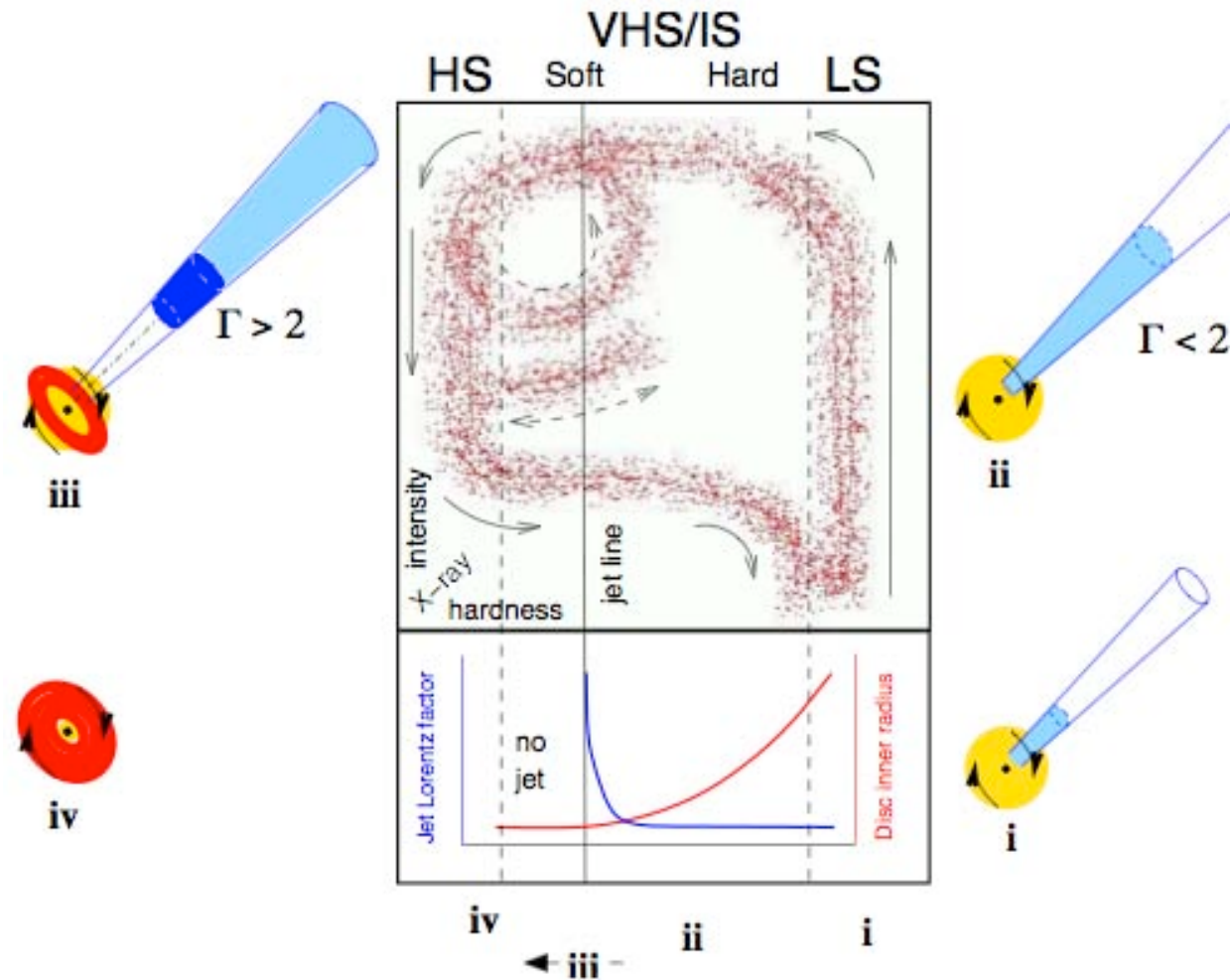
Zdziarski (2004), Barret (2003)

Scénario d'accrétion/éjection unifié

- Fort couplage entre les propriétés des éjections (jets) et propriétés spectrales (accrétion)

"The jet launching mechanism is unknown. This is rather embarrassing and some well-intentioned authors prefer to write that it is the details of this mechanism that are unknown, but this is a rather huge understatement." Jean-Pierre Lasota (2006)

- Extraction de l'énergie de rotation du trou noir ~ Blandford-Znajek



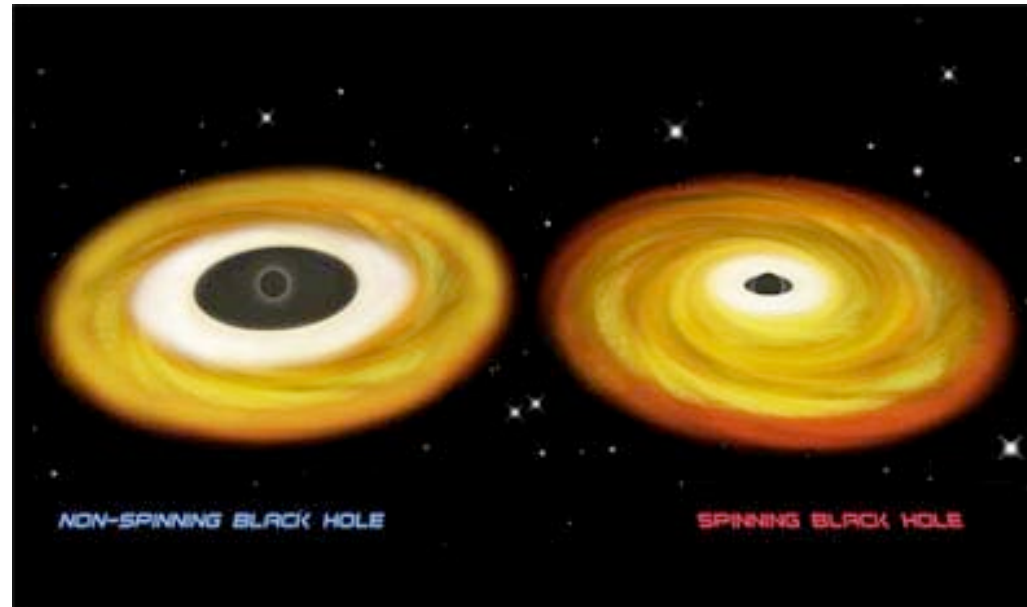
Fender, Belloni & Gallo (2005)

Mesure du spin

Mesures de spin

- Trois méthodes:
 - Modélisation du continuum spectral
 - Modélisation de la raie élargie du Fer
 - Association de fréquences caractéristiques de la variabilité temporelle avec des fréquences relativistes
- Il y a encore débat
- mais les résultats convergent tous vers un spin élevé pour les trous noirs

Le continu et la dernière orbite stable



- Le rayon de l'ISCO dépend de la valeur du spin du trou noir:
 - Rayon 6 fois plus petit dans le cas d'un trou noir de Kerr par rapport à un trou noir de Schwarzschild (énergie de liaison 7 fois plus grande)
 - Se traduit dans la dureté du spectre et dans l'efficacité radiative (conversion de l'énergie de masse accrétée en rayonnement)

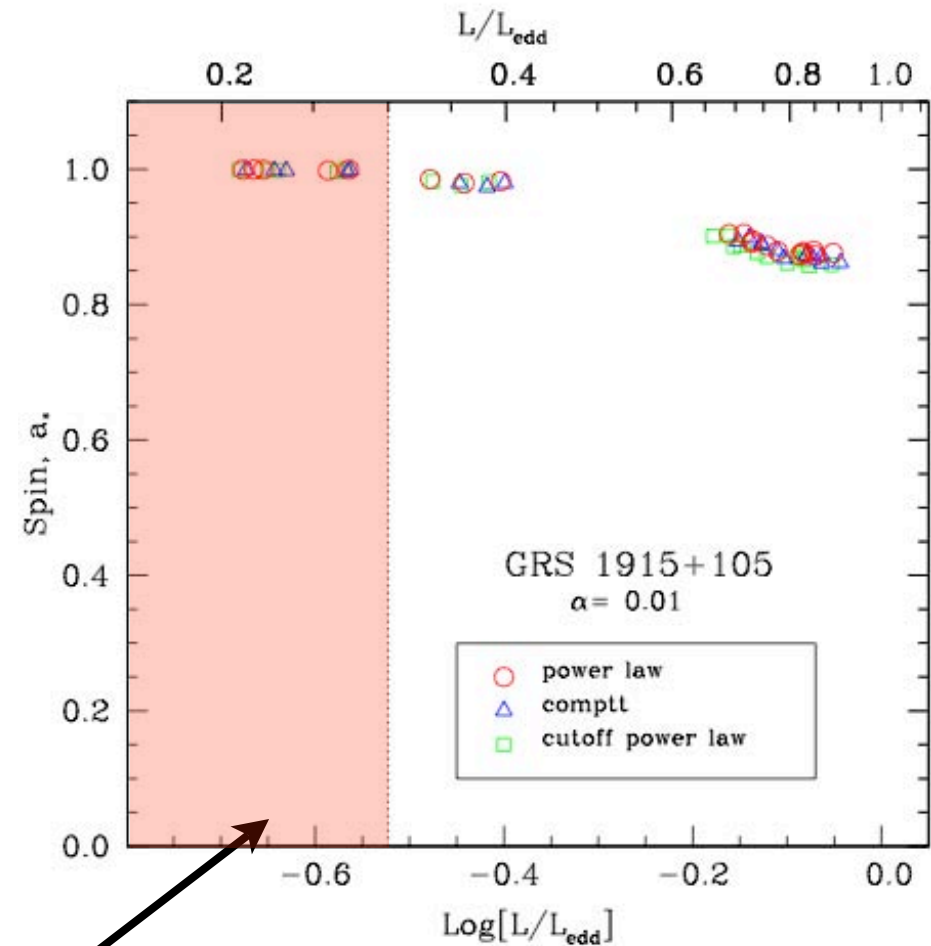
Mesures de spin: continuum spectral

● Hypothèses:

- [Le disque se termine au rayon de la dernière orbite circulaire stable
- [Disque mince
- [Pas de couple entre le disque et l'ISCO

● Utilisation de modèle relativiste de disque d'accrétion ~ Application aux données RXTE

McClintock et al. (2006)

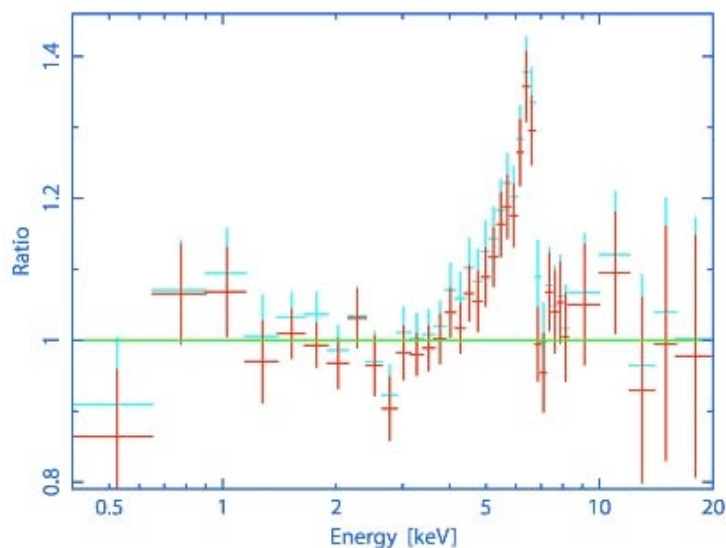
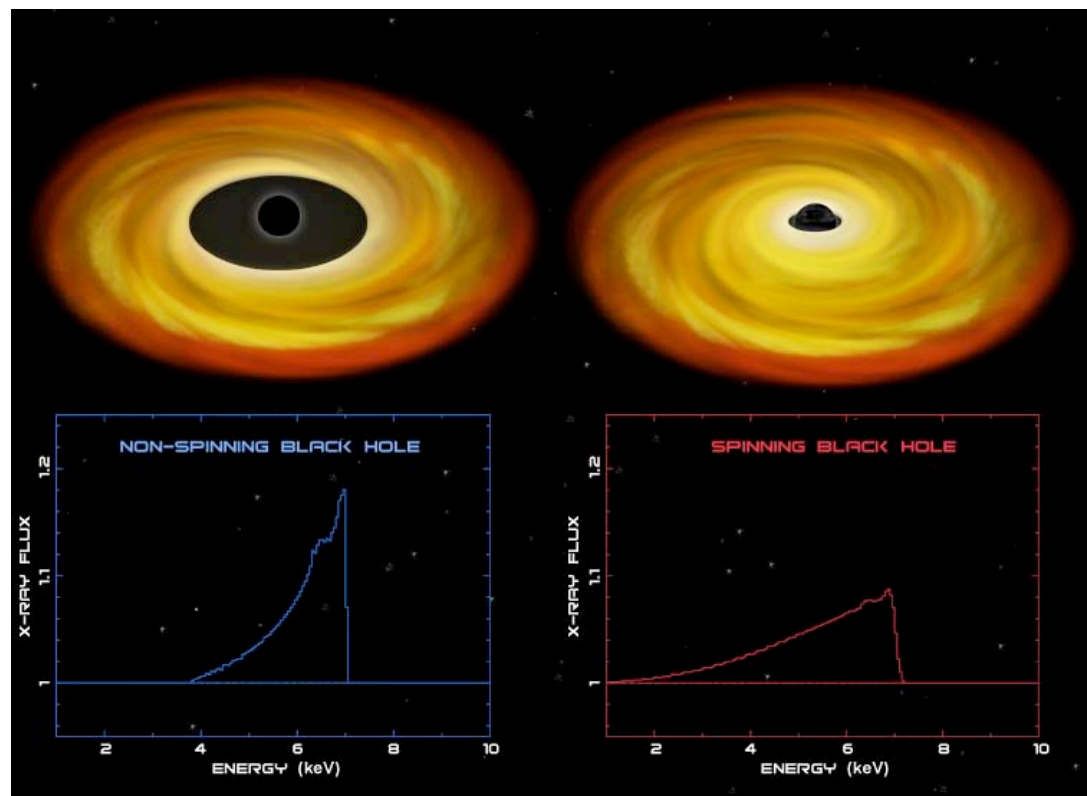


Zone d'application du modèle

McClintock et al. (2006)

Mesures de spin: raie du Fer

- Irradiation des parties internes du disque produit une raie du Fer par fluorescence
- La raie est sensible aux décalages Doppler et rougissement gravitationnel
- Peut-être utilisé pour contraindre le spin du trou noir



Raie élargie observées des noyaux actifs de galaxies

Mesures de spin: raie du Fer

● Ajustement du spectre semble indiquer un spin élevé pour le trou noir

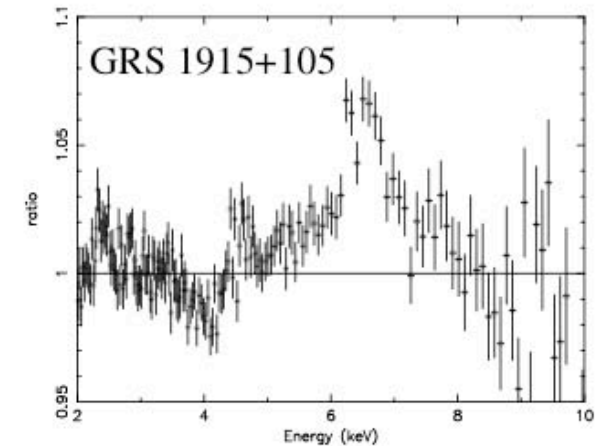
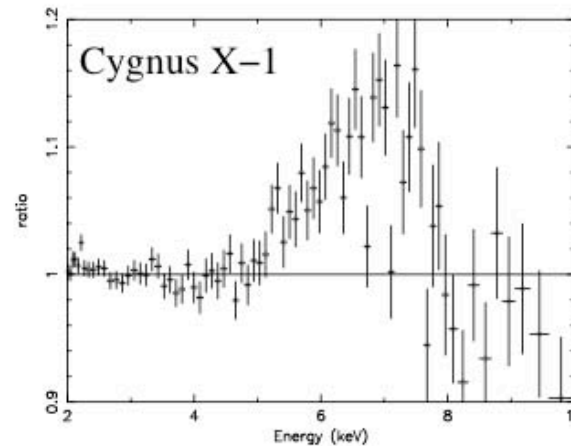
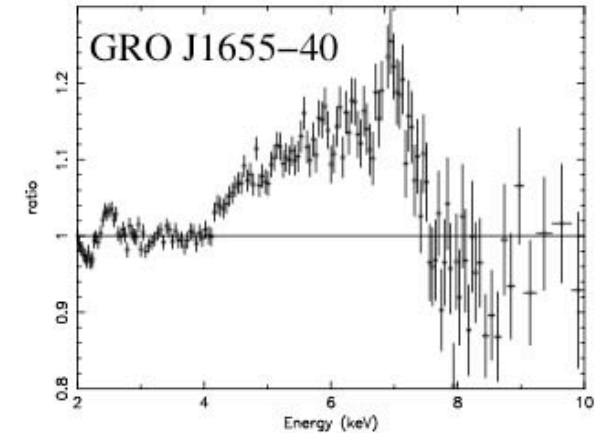
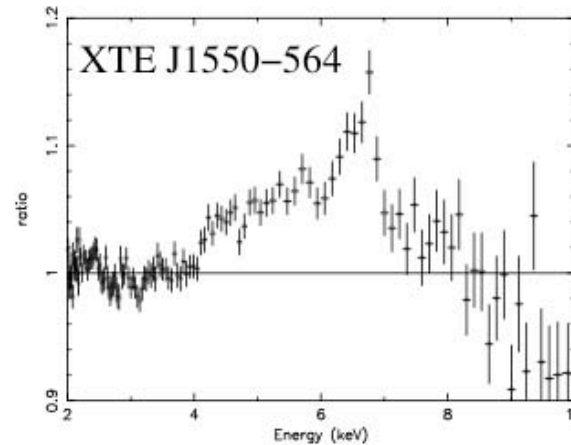
✓ 4 candidats trou noir observés par ASCA

✓ Résidus ~ raie large moins continuum

✓ Spectres complexes par la présence de raies d'absorption (Fer et Carbone)

✓ Raies confirmées avec XMM-Newton

✓ Sensibilité au continuum choisi



Miller et al. (2006)

Mesures de spin: variabilité temporelle

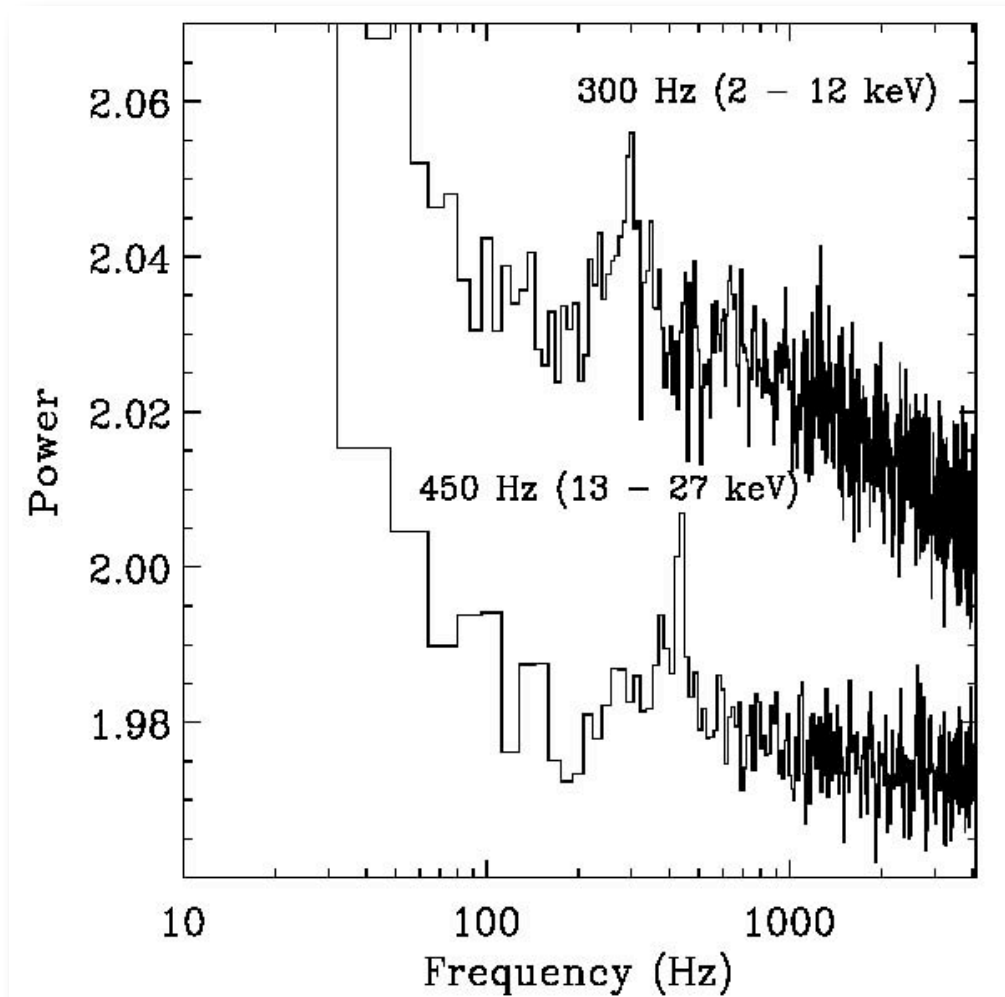
✓ Spectres de Fourier de l'émission X/X-dur d'un candidat trou noir mesurés par le Rossi X-ray Timing Explorer

✓ 2 pics: oscillations quasi-périodiques de haute fréquence

✓ Rapport 3:2

✓ Observé dans une poignée d'autres candidats trous noirs

✓ Signaux à la limite de sensibilité ~ identification ambiguë ~ mécanisme de modulation non compris



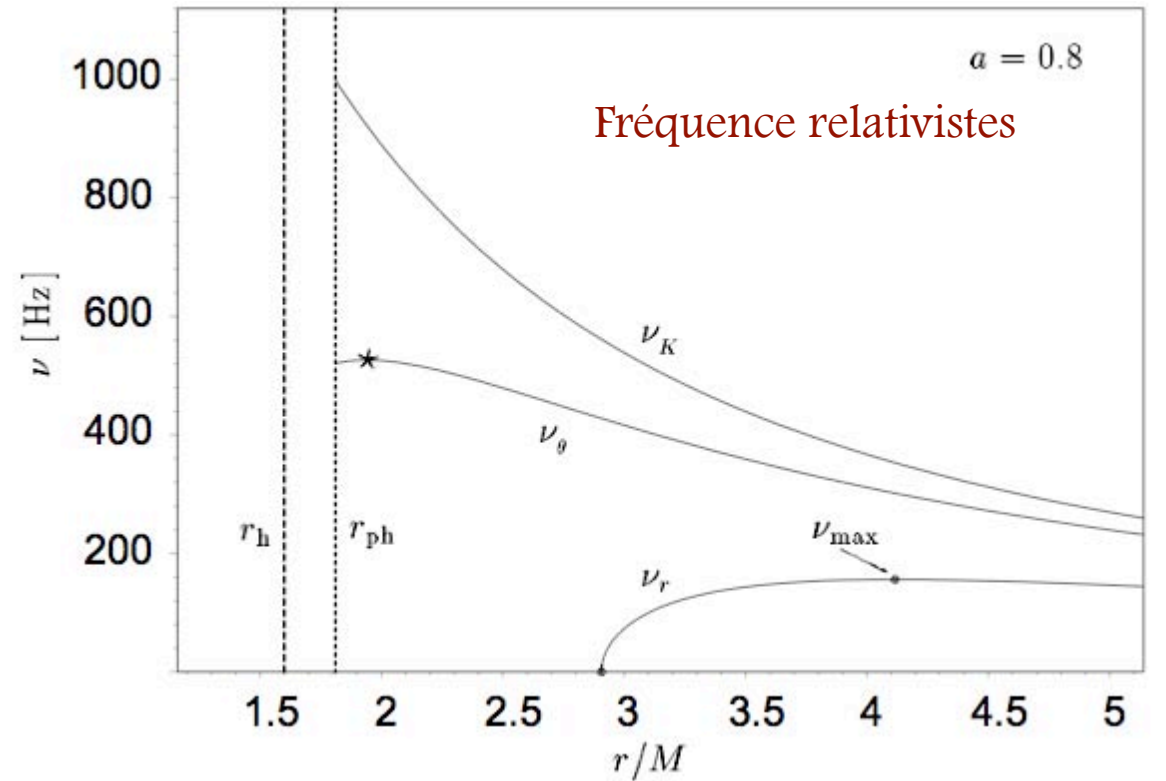
Strohmayer (2002)

Mesures de spin: variabilité

✓ En relativité générale une particule test est caractérisée par trois fréquences; Azimutale, épicyclique radiale, épicyclique verticale

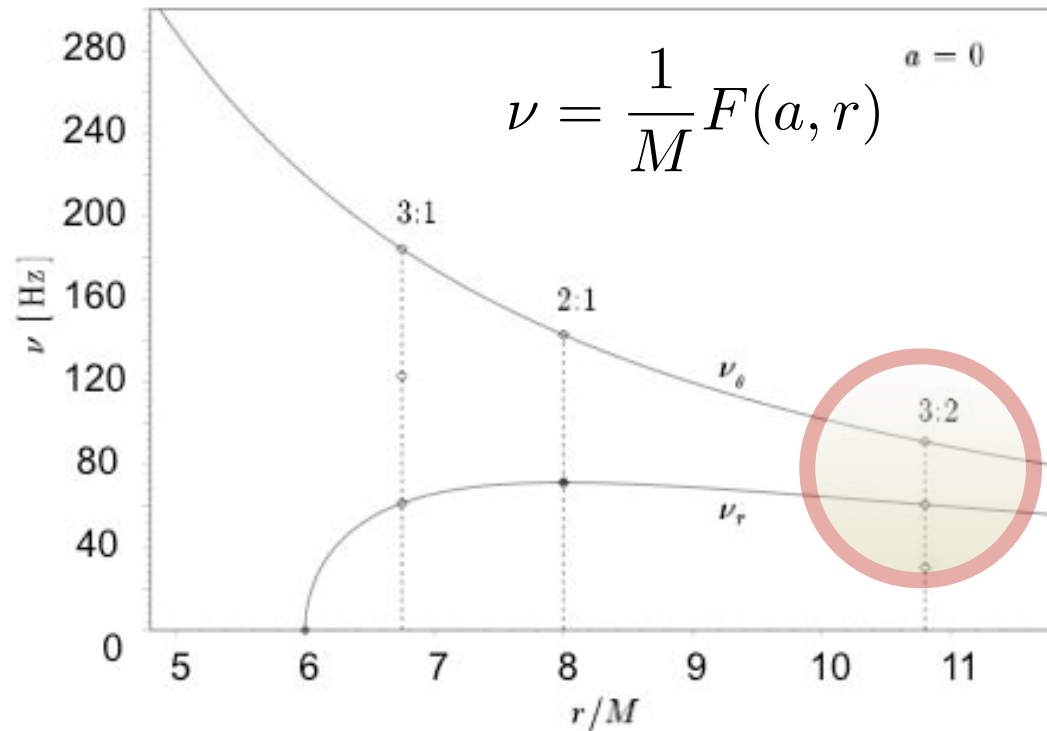
✓ Fréquences dépendent de la masse, du spin et du rayon

$$\nu = \frac{1}{M} F(a, r)$$



Abramowicz & Kluzniak (2004)

Mesures de spin et résonance



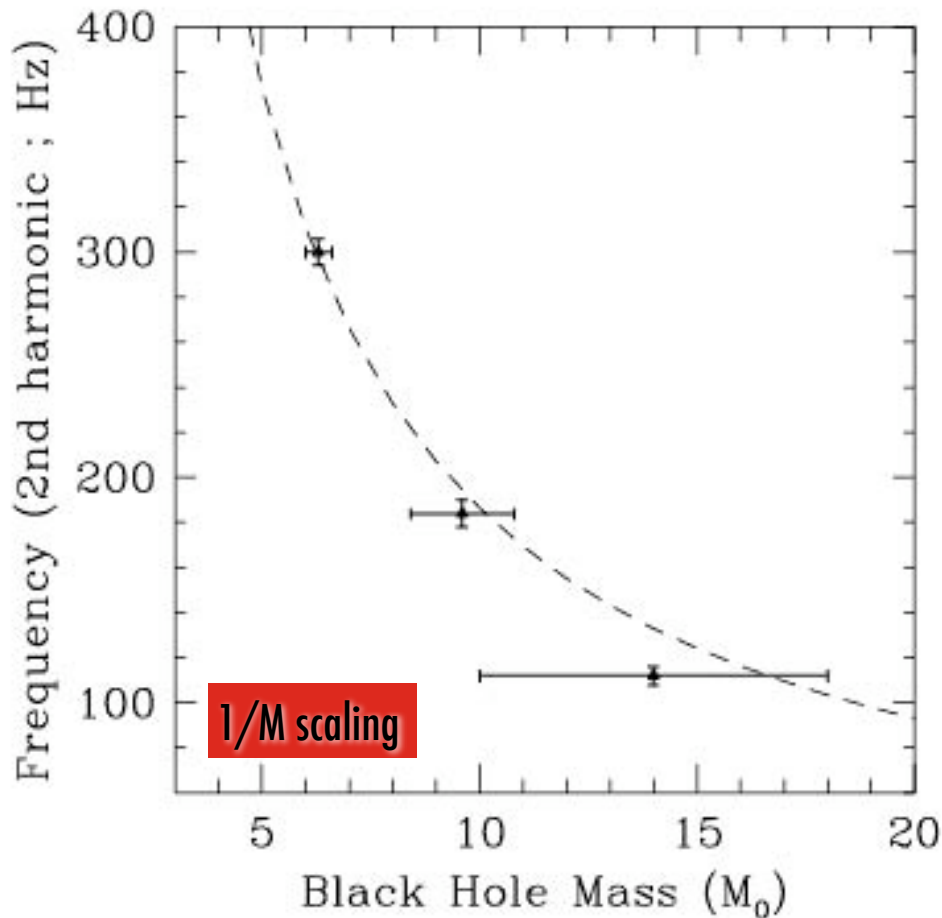
Phénomène de résonance à un rayon du disque où deux fréquences relativistes ont un rapport 3:2

Le rayon est alors fixé

Dépendance en $1/M$ pour a fixé

Abramowicz & Kluzniak (2004)

Mesures de spin: variabilité



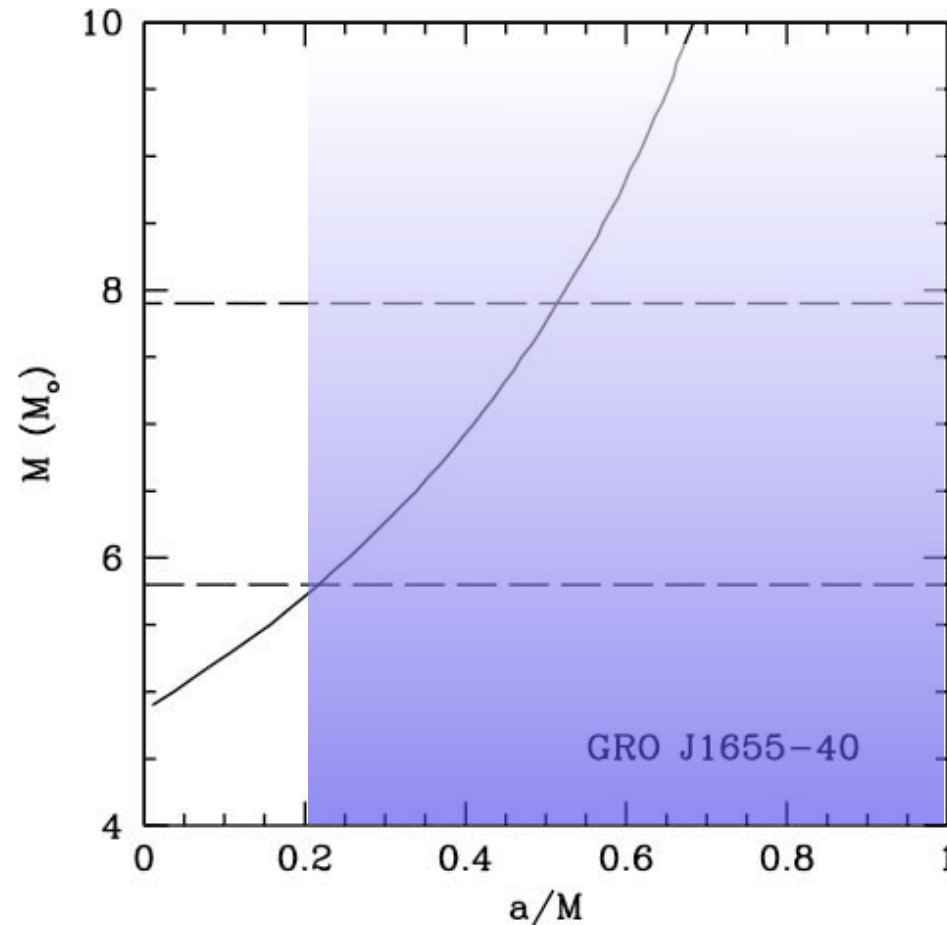
Comparaison masse-
fréquence pour trois
candidats trous noirs ~
dépendance en $1/M$

Valeurs de spin supérieures
entre 0.4 et 1.0 suivant
l'identification de fréquences

Remillard (2005)

Contraintes directes

$$\nu_{\text{QPO}} \leq \nu_k(R_{\text{ISCO}}) \implies a/M > 0.2$$



Psaltis (2004)

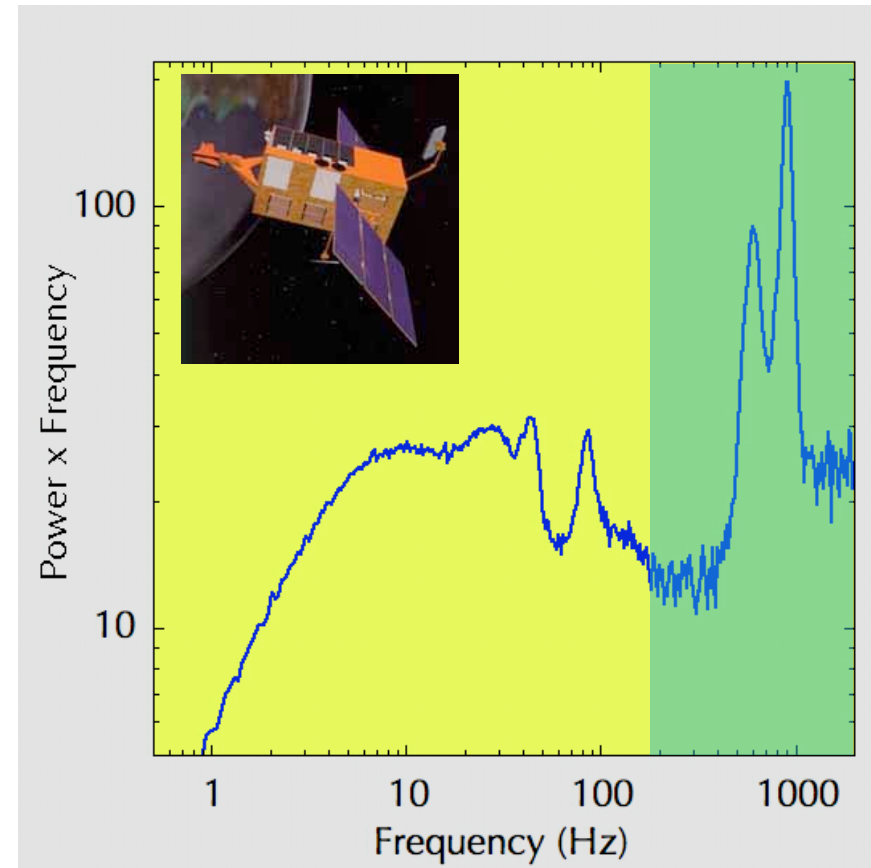
Oscillations quasi-périodiques de hautes fréquences des étoiles à neutrons

Oscillations quasi-périodiques à 1000 Hz

- Découvertes par le Rossi X-ray Timing Explorer (1995)

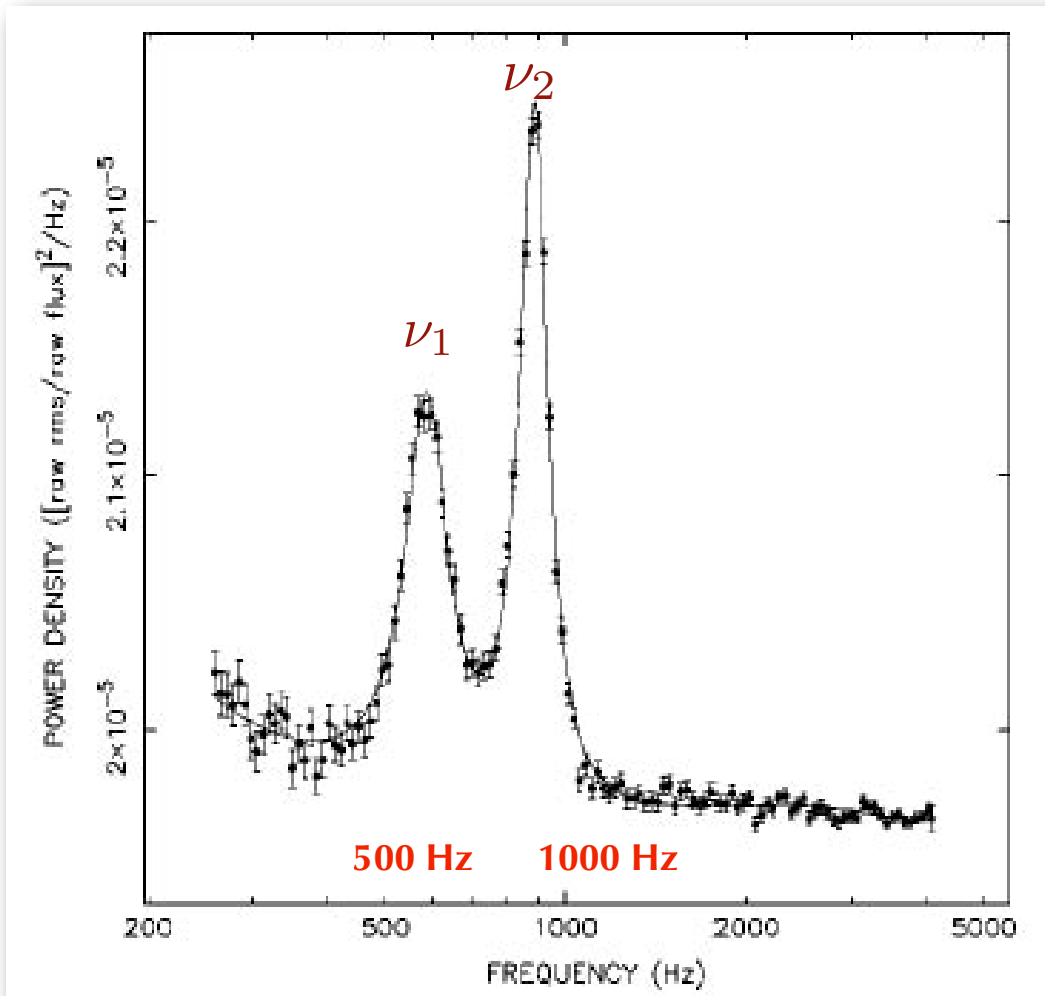
$$r_{orb} = 20 \text{ km} \frac{\nu_{orb}}{800 \text{ Hz}}^{-2/3} m_{1.4}^{1/3}$$

- Variabilité structurée sur les échelles de temps dynamiques du disque interne
- Sondes de l'espace-temps relativiste
- Contraintes sur la compacité de l'étoile à neutrons



Oscillations quasi-périodiques

Spectre des puissances de Fourier

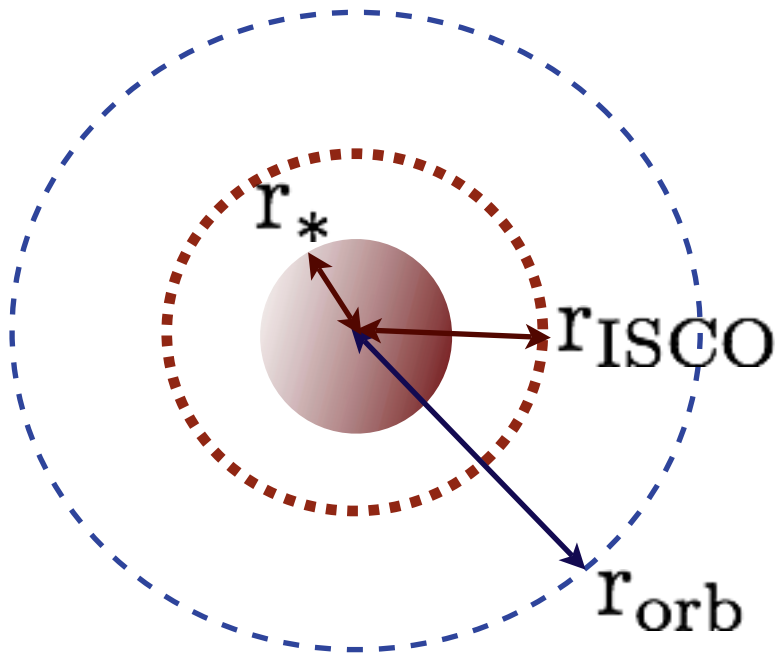


- Pics étroits ($Q_{\max} \sim 200$) entre 300 et 1300 Hz
- ~ 25 binaires X avec étoile à neutrons
- Fréquences variables \sim dizaines de secondes \sim amplitudes variables
- Lien avec le spin de l'étoile à neutrons

$$\Delta\nu \sim \nu_{spin} \text{ ou } \nu_{spin}/2.$$

Van der Klis (2006)

Importance des QPOs



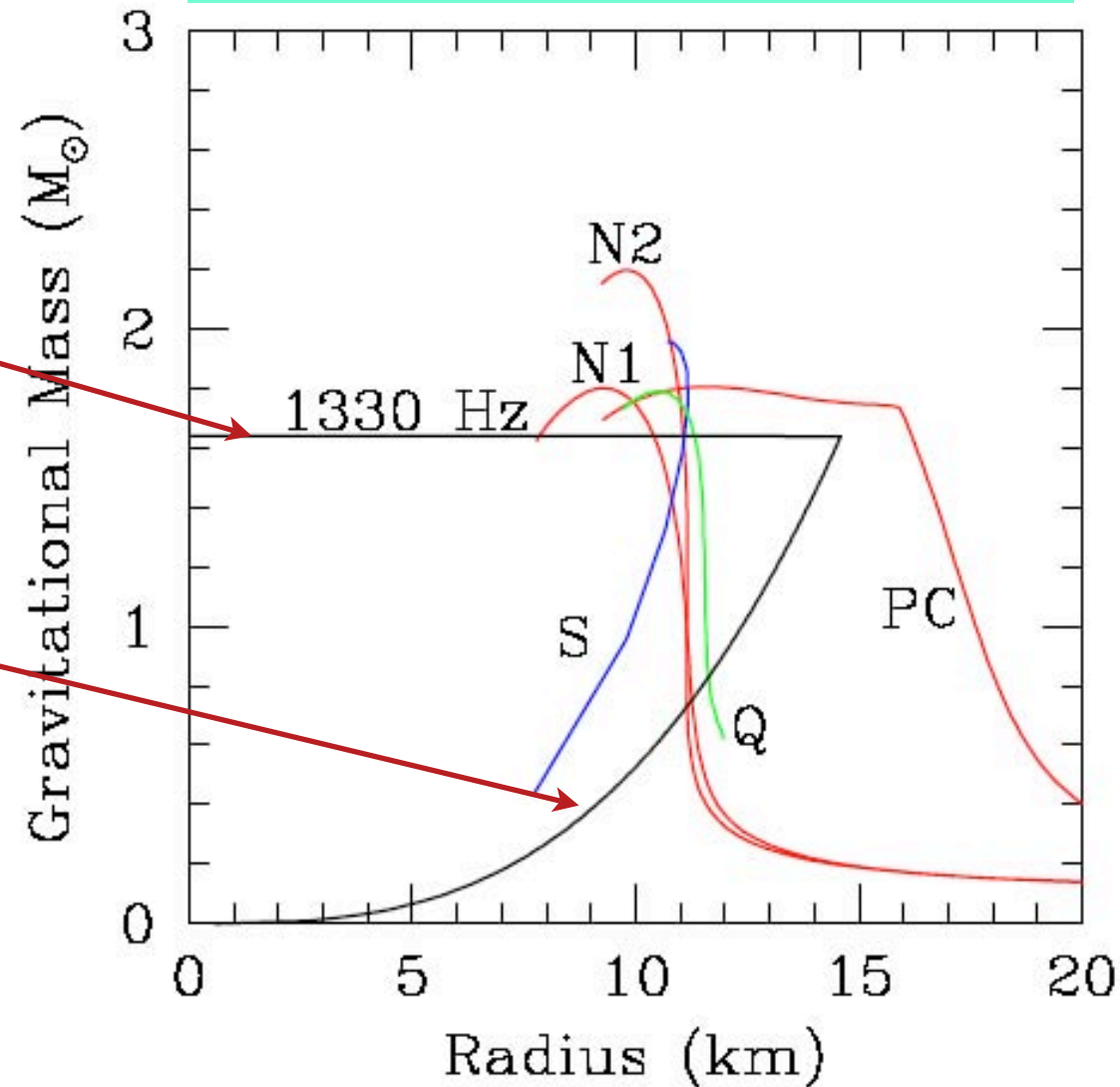
$$\nu_{\text{orb}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{GM_*}{r_{\text{orb}}^3}} \implies r_{\text{orb}}$$

$$r_* \leq r_{\text{orb}}$$

$$r_{\text{ISCO}} = 6 \frac{GM}{c^2} \leq r_{\text{orb}}$$

QPOs et équation d'état

Relations masse-rayon pour différentes équations d'état



$$M_* \leq 2.2(\nu/1000 \text{ Hz})^{-1} M_\odot$$

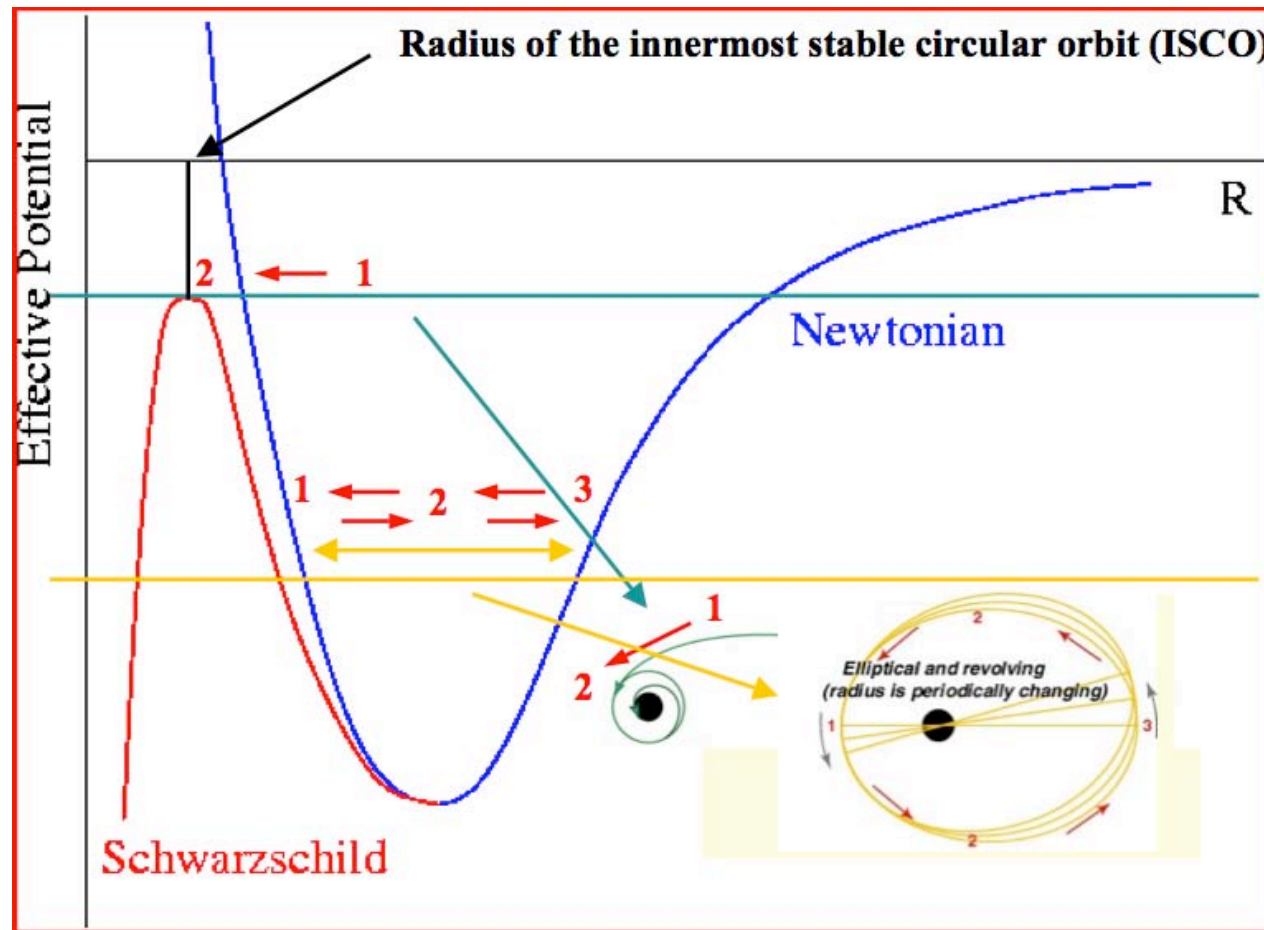
$$R_* \leq 14.6(M_*/M_\odot)^{1/3}(\nu/1000 \text{ Hz})^{-2/3} \text{ km}$$

Miller (2004)

Signature de la dernière orbite stable

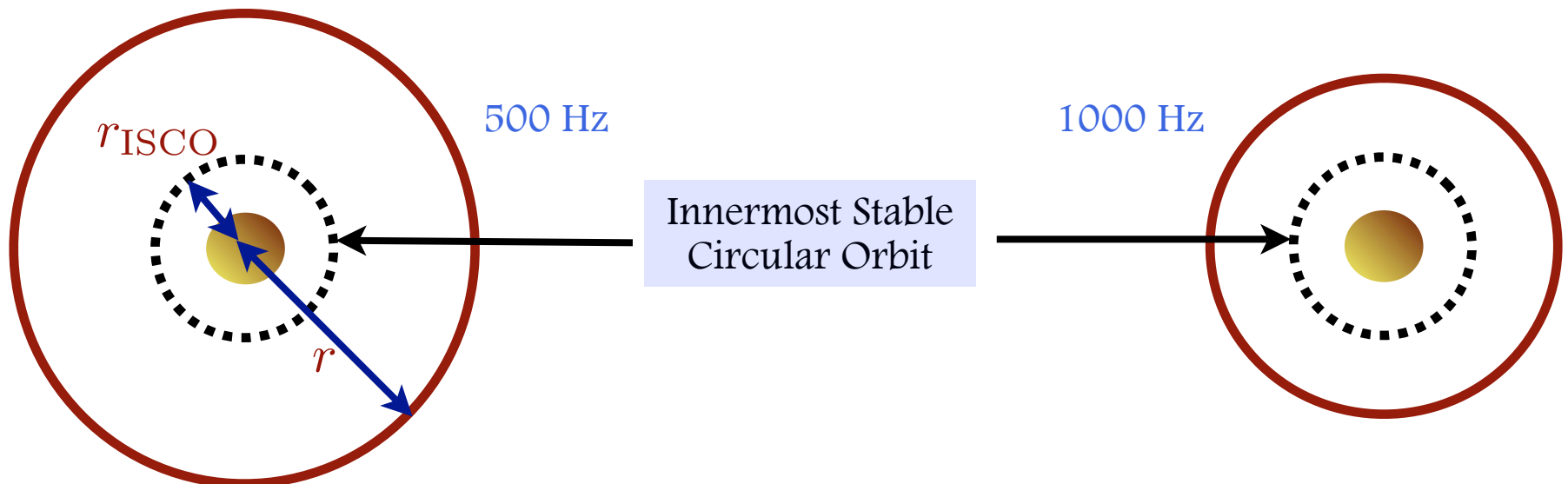
Une prédiction de la relativité générale

Propriété unique



QPOs et ISCO

- La structure du flot d'accrétion change au rayon de la dernière orbite stable (orbite Keplerienne \Leftrightarrow chute libre)
- Les signaux sont générés dans le disque d'accrétion proche de l'ISCO
- Effets anticipés à l'approche de l'ISCO:
 - Fréquence limite ~ effet de saturation
 - Diminution d'amplitude
 - **Perte de cohérence**



Un effet reproductible

1 point = 1 observation

QPO unique

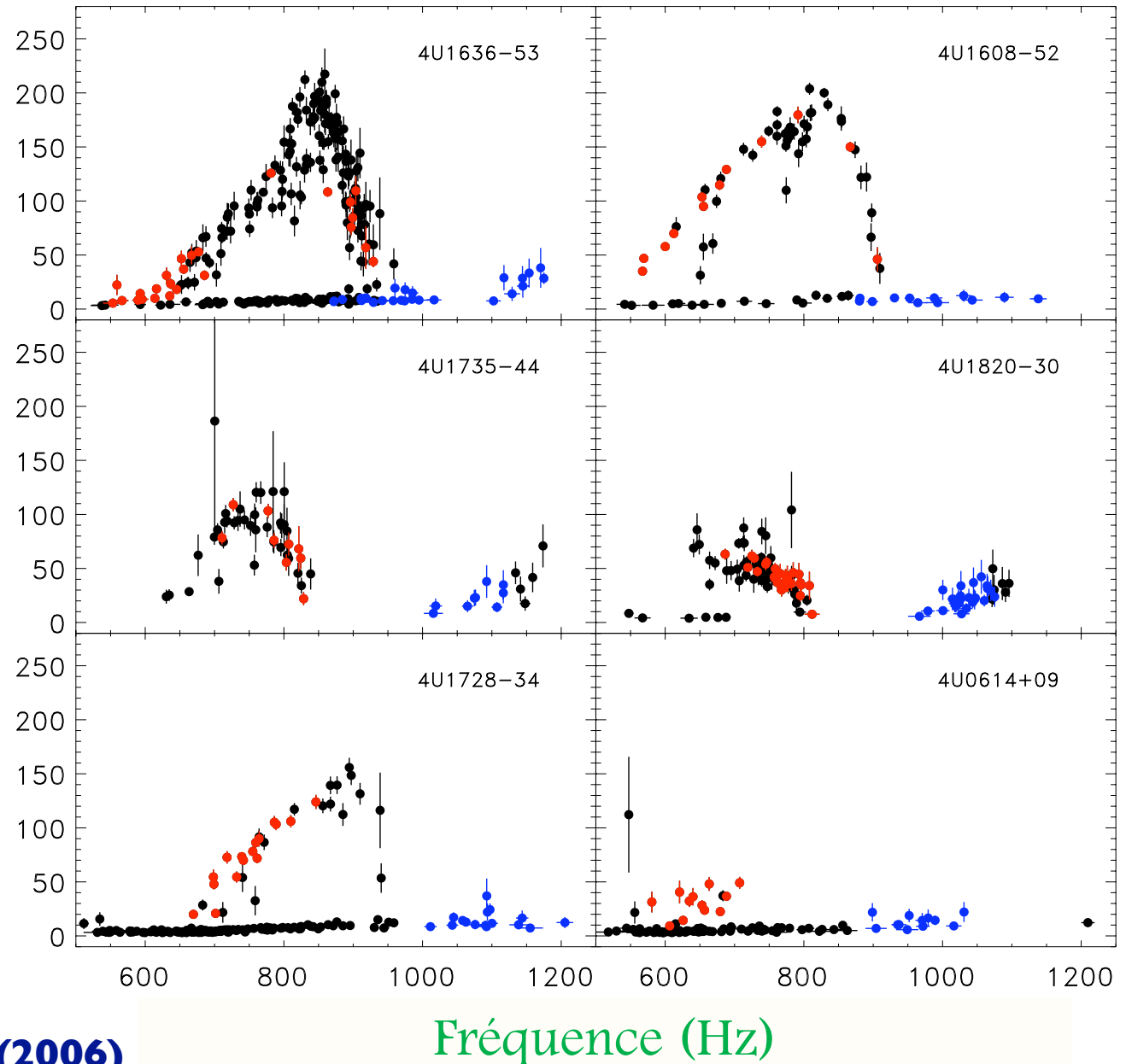
QPO jumeaux

● rouge QPO₁

● bleu QPO₂

Facteur de qualité

2 branches



Barret, Olive, Miller (2006)

Un effet reproductible

1 point = 1 observation

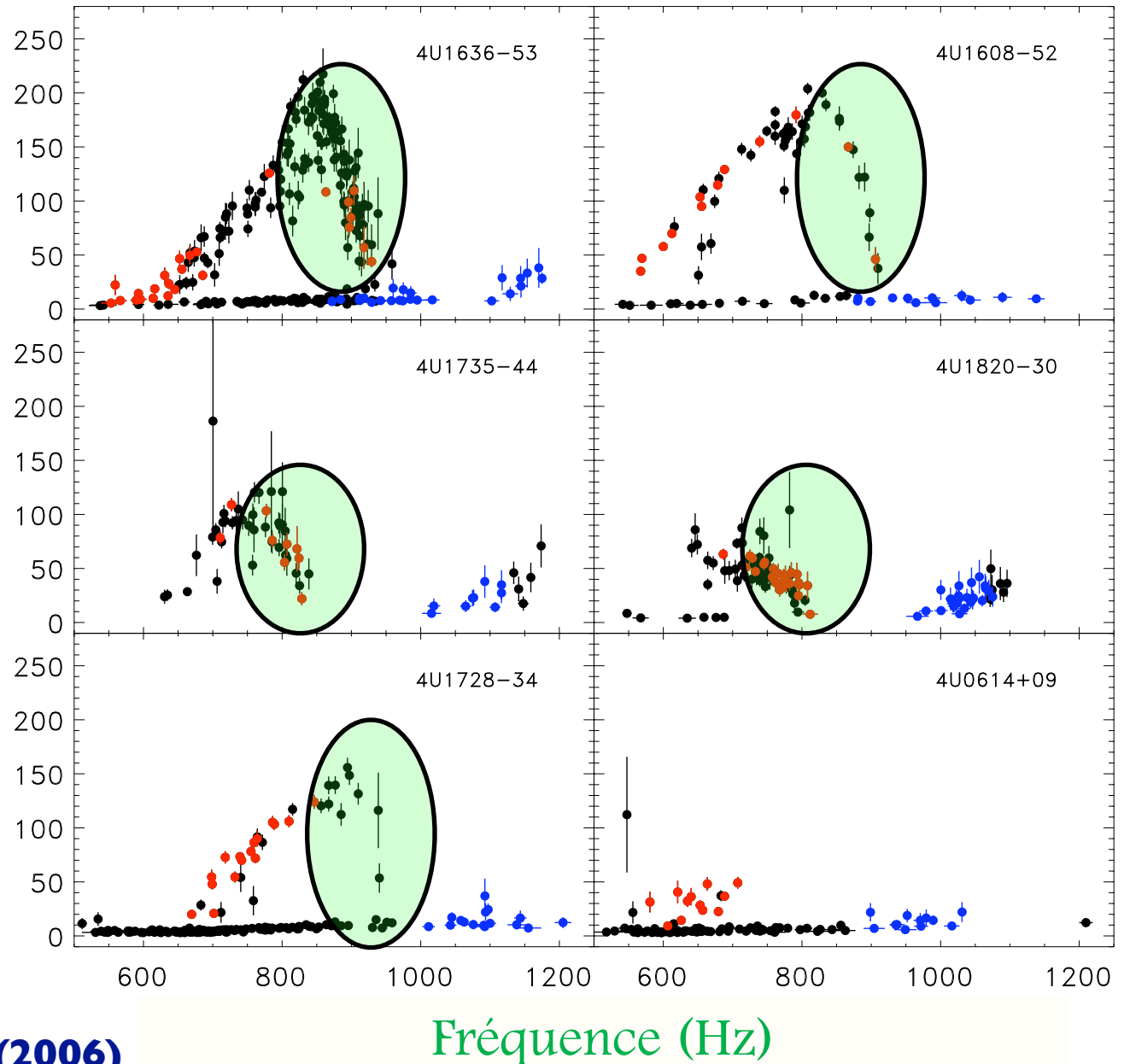
QPO unique

QPO jumeaux

- rouge QPO₁
- bleu QPO₂

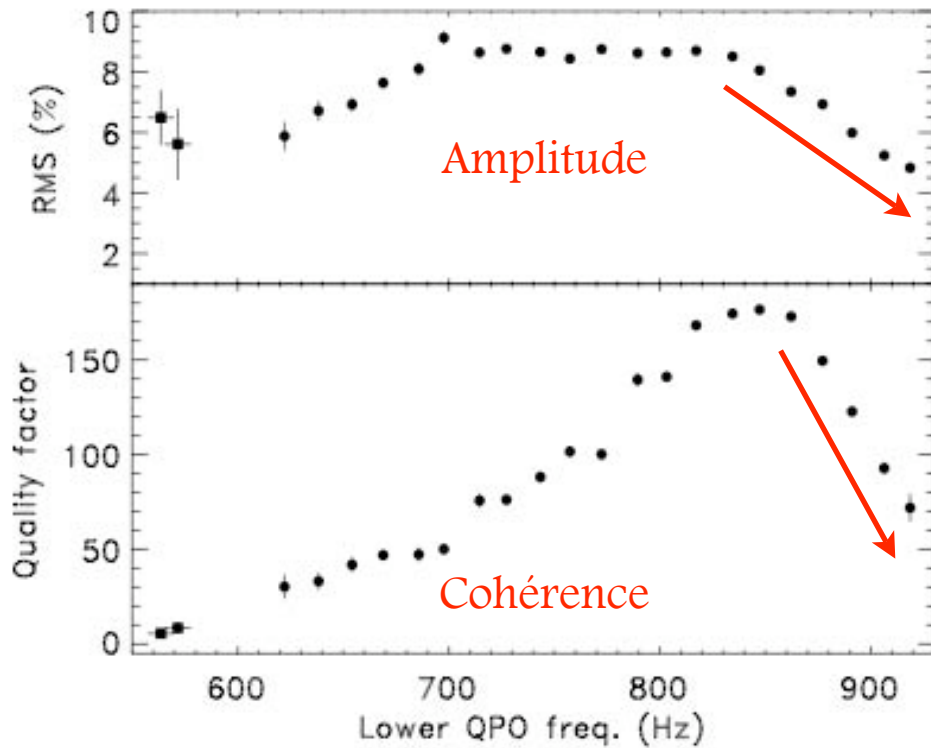
Facteur de qualité

2 branches

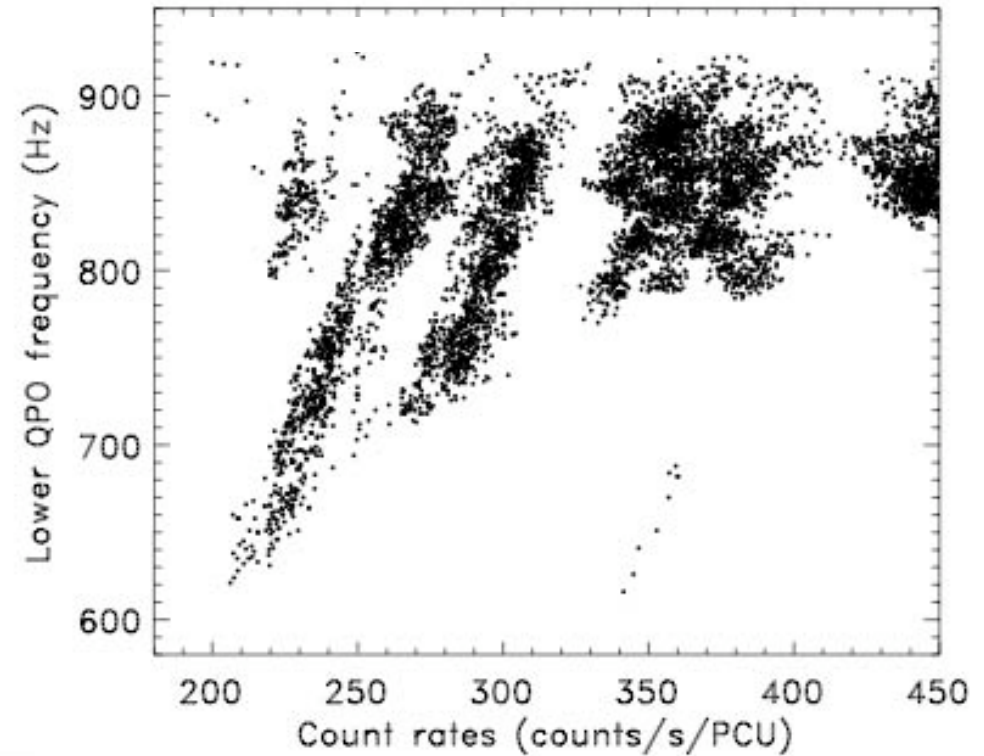


Barret, Olive, Miller (2006)

QPOs à l'ISCO

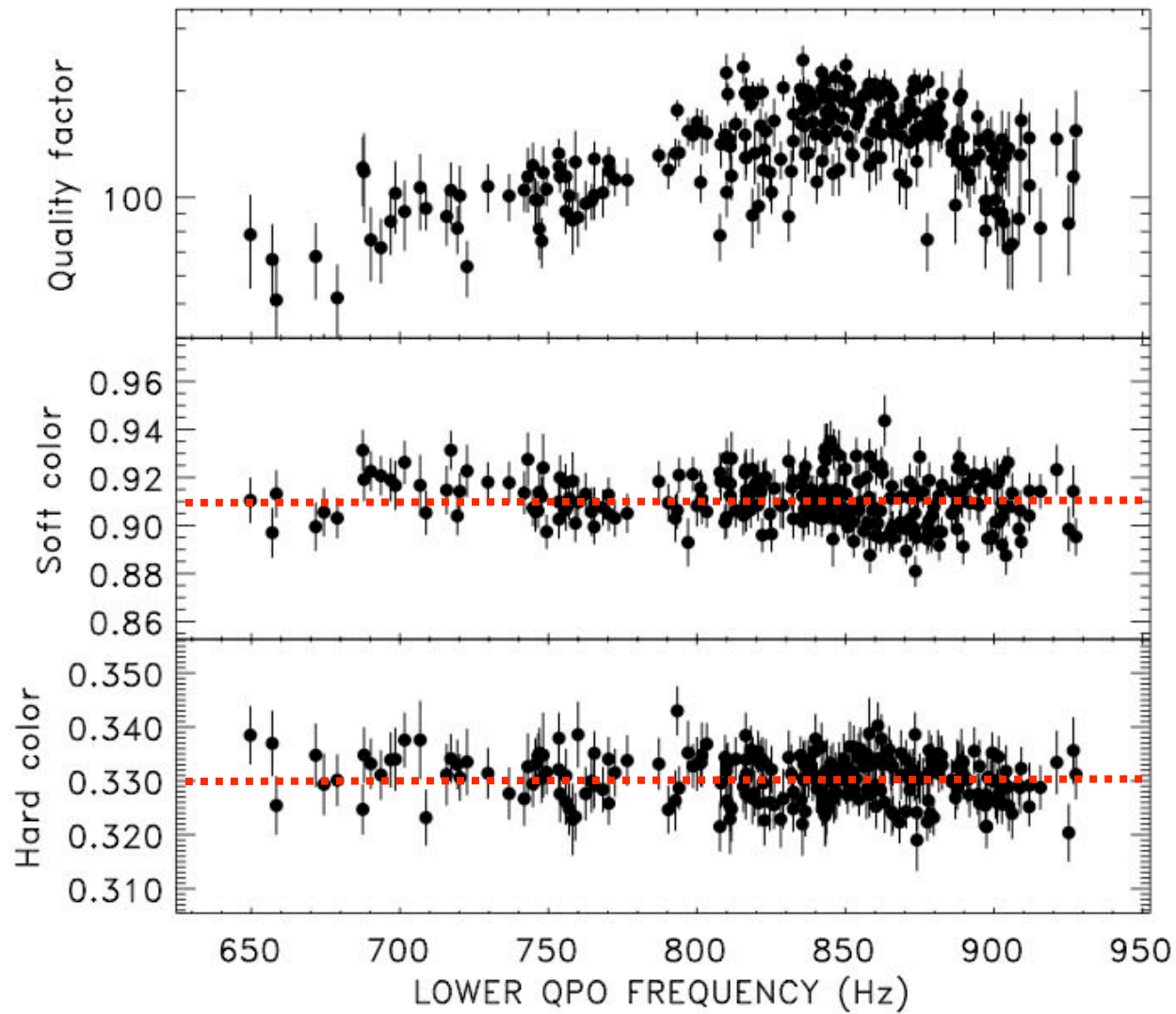


Saturation de fréquence



Barret, Olive, Miller (2005)

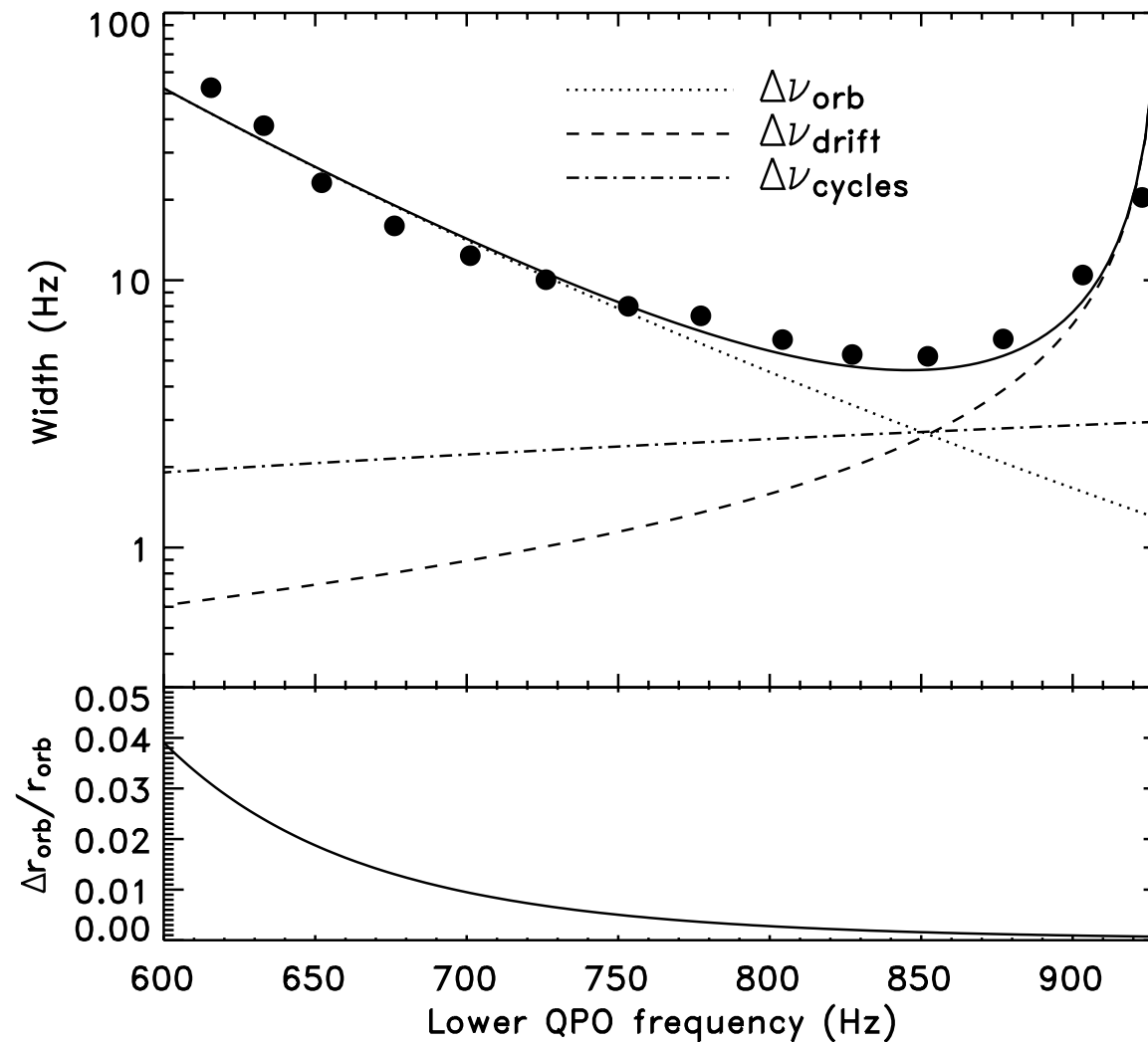
Stabilité du spectre en énergie



Barret, Olive, Miller (2007)

Modélisation

$$\Delta\nu_{\text{total}} = \sqrt{(\Delta\nu_{\text{drift}})^2 + (\Delta\nu_{\text{orb}})^2 + (\Delta\nu_{\text{life}})^2}$$



Barret, Olive, Miller (2006)

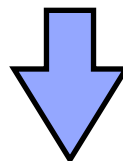
ISCO et masse des étoiles à neutrons

Quelle est la fréquence à l'ISCO?

$$\nu_{ISCO} = \nu_K = \nu_{1,Q \rightarrow 0} + \nu_{spin}(\nu_{spin}/2)$$

Relation masse-fréquence (fréquence Keplerienne)

$$M \approx 2.2 M_{\odot} (1000 \text{ Hz} / \nu_{ISCO}) (1 + 0.75j), j \equiv cJ / (GM^2) \sim 0.1 - 0.2$$



$$\nu_{ISCO} = 1200 - 1300 \text{ Hz} \implies M = 1.8 - 2.2 M_{\odot}$$

Masses supérieures aux masses des pulsars binaires, mais consistantes avec les masses récentes mesurées dans les binaires semi-détachées et les dernières équations d'état, et les modèles d'évolution

Nice et al.(2005), Kluhan et al. (2006), Popov et al. (2006)

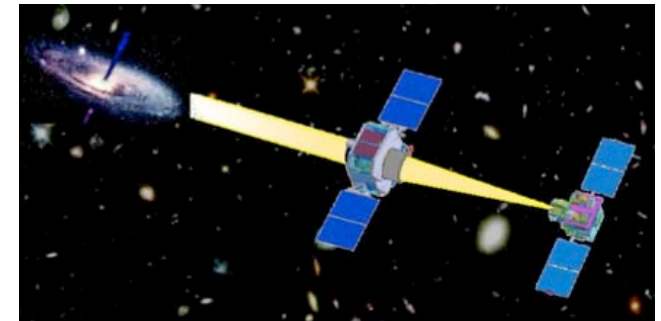
Le futur après 2010

Le futur proche et plus lointain

ECLAIRS: Microsatellite CNES pour l'étude de la formation des premiers trous noirs dans l'Univers au travers de l'observation multi-longueurs d'onde des sursauts gamma- Phase A en 2007



SIMBOL X: Elucider l'origine et la physique de l'émission non-thermique autour des objets accréteurs et dans les sites d'accélération de particules- Phase A en 2007



XEUS: Tester la Relativité Générale en champs gravitationnels extrêmes et contraindre l'équation d'état de la matière super-condensée. [Thématiques prioritaires du programme CV 2015-2025 de l'ESA](#) - Instrument "timing" post-RXTE



Mes conclusions

- ✓ L'astrophysique relativiste observationnelle progresse
- ✓ De possibles signatures de l'horizon d'événements des trous noirs ont été observées
- ✓ Les premières mesures de spin des trous noirs stellaires convergent vers des valeurs élevées (trous noirs de Kerr)
- ✓ Une signature de la dernière orbite circulaire stable a été proposée en étudiant les oscillations quasi-périodiques de haute fréquence avec étoile à neutrons
- ✓ Ces résultats sont obtenus aux limites de sensibilité des instruments actuels, en combinant au mieux les informations spectrales et temporelles
- ✓ Il est temps de préparer le futur: ECLAIRS, SIMBOLX, [LISA](#), XEUS, ...

