

Variabilité Temporelle des Binaires-X : Observations avec *INTEGRAL*. Modélisation.

Clément Cabanac^{1 2}

¹Équipe SHERPAS
Laboratoire d'Astrophysique de Grenoble (LAOG)

²School of Physics and Astronomy
University of Southampton

26 avril 2007.

Plan Général

- 1 Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.**
- 2 Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.
- 3 Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF
- 4 Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?

Plan Général

- 1 Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.**
- 2 Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.**
- 3 Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF
- 4 Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?

Plan Général

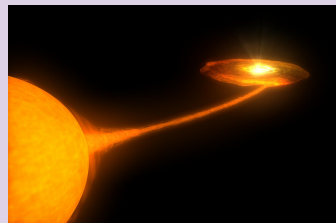
- 1 **Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.**
- 2 **Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.**
- 3 **Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF**
- 4 **Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?**

Plan Général

- 1 **Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.**
- 2 **Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.**
- 3 **Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF**
- 4 **Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?**

- 1 Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.**
 - Portrait, zoologie et observations
- 2 Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.
- 3 Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF
- 4 Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?

Qu'est ce qu'une binaire-X?

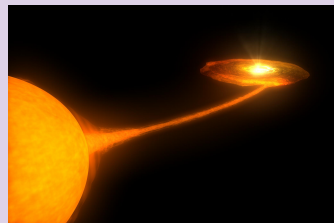


Un duo énergétique en interaction

- **Objet compact** : étoile à neutron ($M_1 \sim 1.4 - 3M_\odot$) ou trou noir stellaire ($M_1 \geq 3M_\odot$).
- **Étoile secondaire** : étoile massive (O, B) \Rightarrow HMXB ou étoile de faible masse (G, K) \Rightarrow LMXB.

Émission puissante de rayons X et Gamma

Qu'est ce qu'une binaire-X?

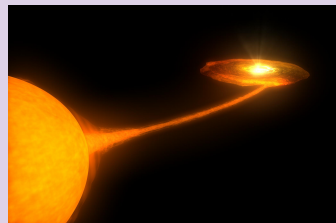


Un duo énergétique en interaction

- **Objet compact** : étoile à neutron ($M_1 \sim 1.4 - 3M_\odot$) ou trou noir stellaire ($M_1 \geq 3M_\odot$).
- **Étoile secondaire** : étoile massive (O, B) \Rightarrow **HMXB** ou étoile de faible masse (G, K) \Rightarrow **LMXB**.

Émission puissante de rayons X et Gamma

Qu'est ce qu'une binaire-X?



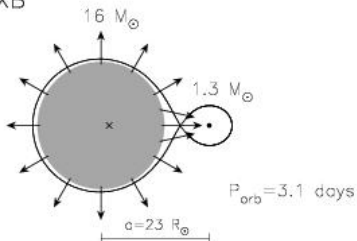
Un duo énergétique en interaction

- **Objet compact** : étoile à neutron ($M_1 \sim 1.4 - 3M_\odot$) ou trou noir stellaire ($M_1 \geq 3M_\odot$).
- **Étoile secondaire** : étoile massive (O, B) \Rightarrow **HMXB** ou étoile de faible masse (G, K) \Rightarrow **LMXB**.

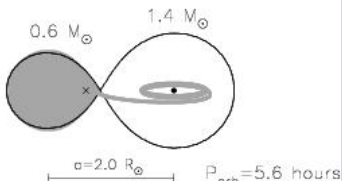
Émission puissante de rayons X et Gamma

Binaires X de grandes et faibles masses

HMXB



LMXB

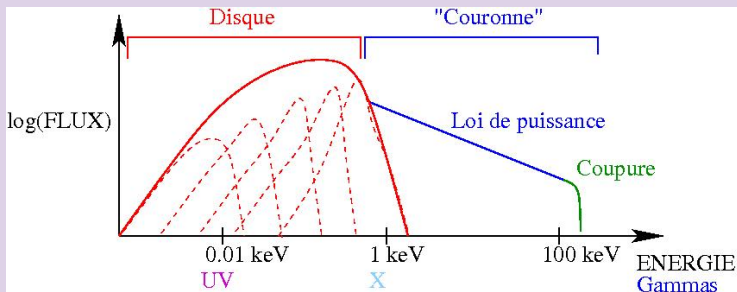


- HMXB : accrétion nourrie par le fort vent stellaire.
Émission persistante (Cyg X-1) sauf si orbite excentrique.
- LMXB : Émission transitoire lorsque la matière de l'étoile compagne remplit lobe de Roche de l'objet compact.
Formation d'un disque **d'accrétion**.

Des sources transitant par différents états

Spectres des binaires-X

Densité spectrale en énergie (SED) typiques des binaires X

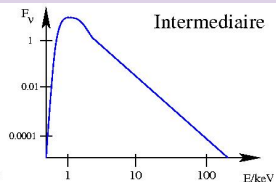
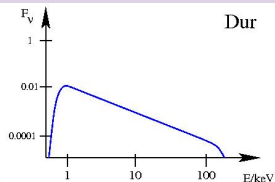
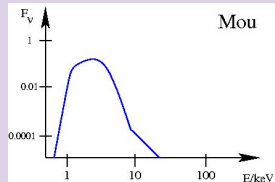


Des sources transitant par différents états

États des binaires-X

XRB à trous noirs, 3 états canoniques

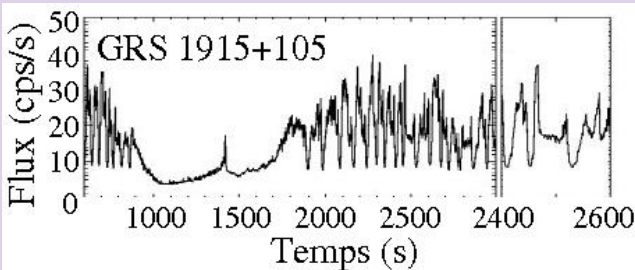
- Critères spectraux : état mou, état dur, état intermédiaire (état quiescent : état de base).
- Critères temporels : variabilité. + Comportement radio.



Des sources transitant par différents états

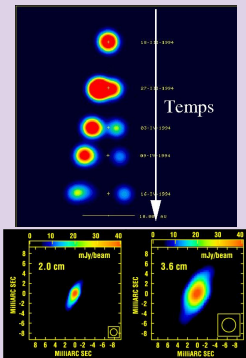
XRB à trous noirs, 3 états canoniques

- Critères spectraux : état mou, état dur, état intermédiaire (état quiescent : état de base).
- Critères temporels : variabilité. + Comportement radio.



Des microquasars?

Exemple : GRS 1915+105

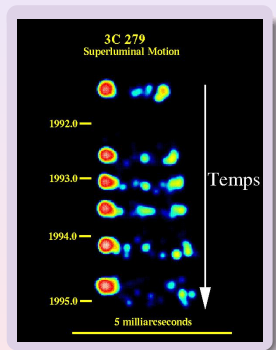


Les **microquasars** : des binaires X à jets relativistes en radio.

- Éjections discrètes. Déplacement apparent sur fond de ciel parfois **superluminique**.
- Jets compacts et permanent.

Analogie avec Noyaux Actifs de Galaxie
⇒ “Microquasars”.

Des microquasars?

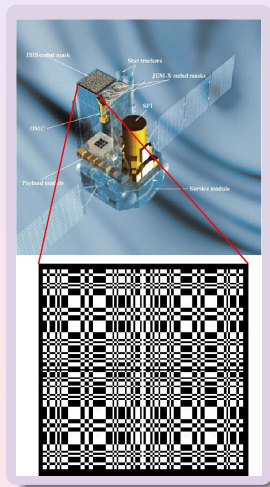


Les **microquasars** : des binaires X à jets relativistes en radio.

- Éjections discrètes. Déplacement apparent sur fond de ciel parfois **superluminique**.
- Jets compacts et permanent.

Analogie avec Noyaux Actifs de Galaxie
⇒ “Microquasars”.

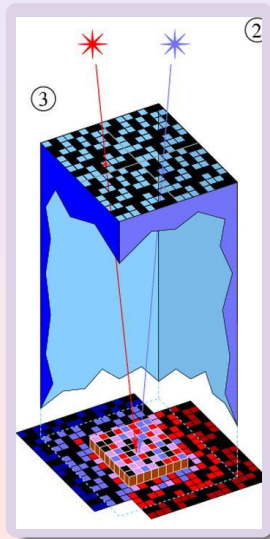
La mission *INTEGRAL*. 4 masques codés.



L'imagerie à haute énergie : une gageure.

- Difficulté de focalisation des X de hautes énergies. Utilisation de masques codés.
- Connaissance du motif du masque. Accession à l'image du champ de vue par déconvolution (non trivial).
- Satellite *INTEGRAL* : IBIS (15 keV-1 MeV), SPI (20 keV-10 MeV) et JEM-X 1 et 2 (3-35 keV).

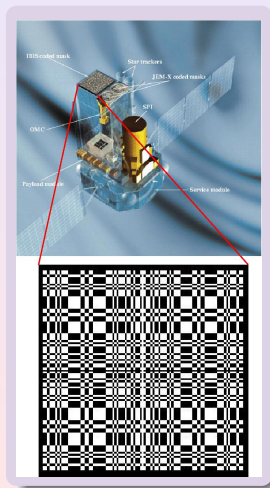
La mission *INTEGRAL*. 4 masques codés.



L'imagerie à haute énergie : une gageure.

- Difficulté de focalisation des X de hautes énergie. Utilisation de masques codés.
- **Connaissance du motif du masque. Accession à l'image du champ de vue par déconvolution (non trivial).**
- Satellite *INTEGRAL* : IBIS (15 keV-1 MeV), SPI (20 keV-10 MeV) et JEM-X 1 et 2 (3-35 keV).

La mission *INTEGRAL*. 4 masques codés.



L'imagerie à haute énergie : une gageure.

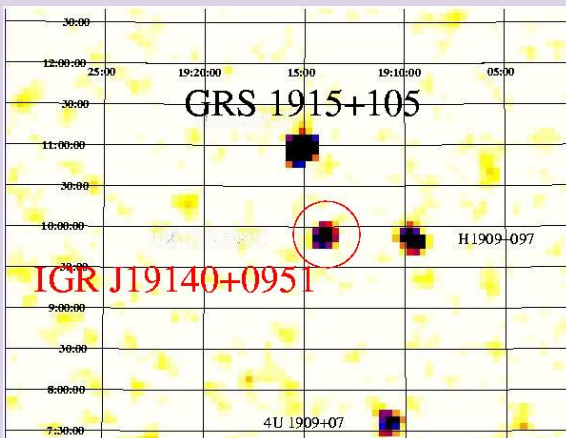
- Difficulté de focalisation des X de hautes énergie. Utilisation de masques codés.
- Connaissance du motif du masque. Accession à l'image du champ de vue par déconvolution (non trivial).
- Satellite *INTEGRAL* : IBIS (15 keV-1 MeV), SPI (20 keV-10 MeV) et JEM-X 1 et 2 (3-35 keV).

- 1 Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.
- 2 **Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.**
 - Premières observations, affinement de la position
 - Analyse spectro-temporelle
- 3 Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF
- 4 Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?

Phase de découverte

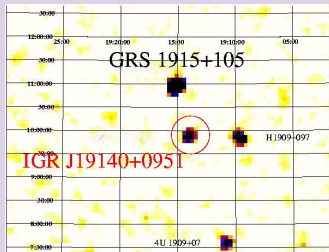
Découverte de la source

Champ de vue d'IBIS/ISGRI



Découverte de la source

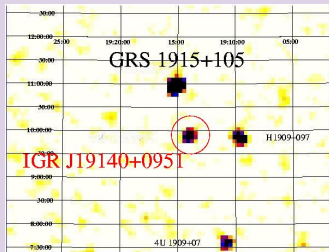
Champ de vue d'IBIS/ISGRI



- Détectée dans le champ de GRS 1915+105. 1^{ère} observation par IBIS/ISGRI Mars 2003. Région du bras du Sagittaire.
[Hannikainen et al., 2003a, IAUC 8088].
- Observée rapidement par RXTE (ToO, 2 ks). $N_H = 6.10^{22} \text{ cm}^{-2}$.
[Swank & Markwardt, 2003]
- Observations systématiques RXTE, INTEGRAL par la suite.
[Rodriguez et al., 2005].
- Puis Chandra, NTT
[In't Zand et al., 2006],
[Nespoli et al., 2007] et enfin UKIRT
[Hannikainen et al., 2007].

Découverte de la source

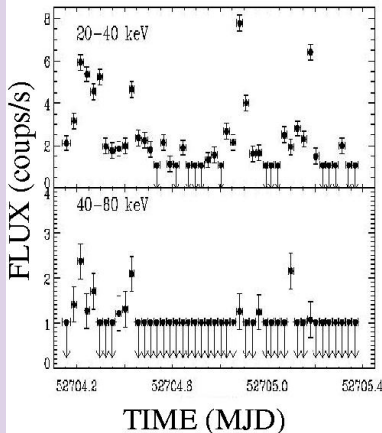
Champ de vue d'IBIS/ISGRI



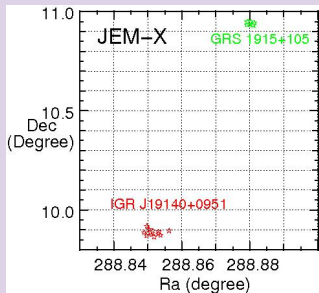
- Détectée dans le champ de GRS 1915+105. 1^{ère} observation par IBIS/ISGRI Mars 2003. Région du bras du Sagittaire.
[Hannikainen et al., 2003a, IAUC 8088].
- Observée rapidement par RXTE (ToO, 2 ks). $N_H = 6.10^{22} \text{ cm}^{-2}$.
[Swank & Markwardt, 2003]
- Observations systématiques RXTE, INTEGRAL par la suite.
[Rodriguez et al., 2005].
- Puis Chandra, NTT
[In't Zand et al., 2006],
[Nespoli et al., 2007] et enfin UKIRT
[Hannikainen et al., 2007].

Caractéristiques générales

- Source détectée à plus de 3σ sur 70% de la révolution n° 48 dans la gamme 20-40 keV.
- Flux variable dans la gamme 20-40 keV et à l'échelle de la fenêtre d'observation (2 ks) : depuis le seuil de détection, i.e 9 mCrab jusqu'à 70 mCrab.



Affinement de la position



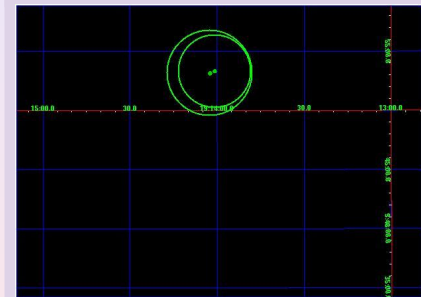
Utilisation conjointe d'ISGRI et JEM-X

- Position IAU : premières versions du logiciel de traitement des données (OSA). Uniquement ISGRI. Retraitement des données.
- Utilisation d'un logiciel non standard pour les données JEM-X + GRS 1915+105 sert "d'ancre".

Affinement de la position

Combinaison des deux positions

Moyenne pondérée des positions ISGRI et JEM-X par les erreurs sur chaque mesure (dispersion).



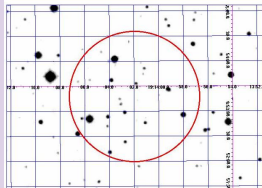
**Nouvelle position à 2.3' de l'ancienne : RA = 19^h14^m02^s,
Dec = +9°53.3' (±1.3' J2000).**

[Cabanac et al., 2004, Hannikainen et al., 2004]

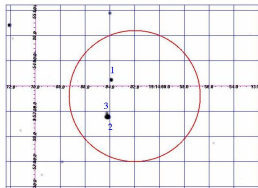
Recherche d'une contrepartie optique

De 20 contreparties... à 1!

POSSIL J.



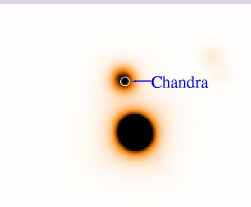
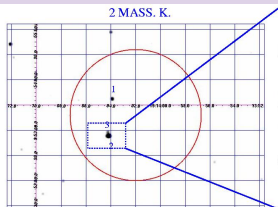
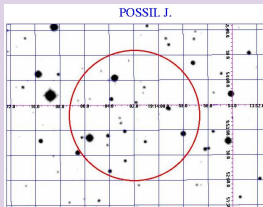
2 MASS. K.



- 20 contreparties optiques (plaque E : rouge). Mais 3 contreparties 2 MASS...
- Observations Chandra et NTT. 1 contrepartie!

Recherche d'une contrepartie optique

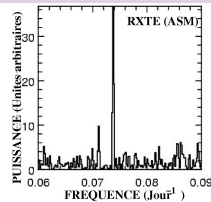
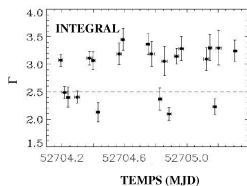
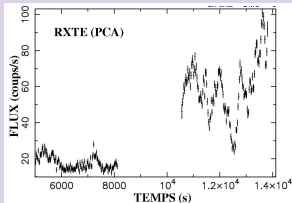
De 20 contreparties... à 1!



- 20 contreparties optiques (plaque E : rouge). Mais 3 contreparties 2 MASS...
- Observations Chandra et NTT. 1 contrepartie!

- 1 Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.
- 2 **Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.**
 - Premières observations, affinement de la position
 - **Analyse spectro-temporelle**
- 3 Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF
- 4 Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?

Comportement temporel



- Forte variabilité du flux X sur des échelles de 200 à 2000 s dans les données RXTE/PCA.
- Variation significative de la pente du spectre (Γ) à l'échelle de 2ks (données *INTEGRAL*).
- Analyse archives RXTE/ASM depuis 1996 : modulation sinusoïdale à 13.558 ± 0.004 jours persistente.
- IGR 19140+0951 : binaire X galactique. [Cabanac et al., 2004] et [Hannikainen et al., 2004].

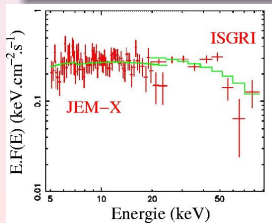
Comportement spectral

Combinaison des données *INTEGRAL* et RXTE

Évolution des propriétés spectrales sur un an

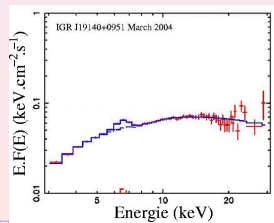
INTEGRAL : forte luminosité

- Spectre mou : $\Gamma = 2.13 \pm 0.07$, pas de corps noir.
- Coupure haute énergie nécessaire (>99.99%), $E_{cutoff} = 49 \pm 3 \text{ keV}$ et $E_{fold} = 18 \pm 9 \text{ keV}$.



RXTE : faible luminosité

- Forte absorption variant rapidement : $N_H \in [3, 10] 10^{22} \text{ cm}^{-2}$.
- $\Gamma = 1.59 \pm 0.03$, $E_{cutoff} = 10 \pm 1 \text{ keV}$ et $E_{fold} = 29 \pm 7 \text{ keV}$.



Énergie de coupure si basse rarement observée dans les binaires X trous noirs.

Analyse spectro-temporelle

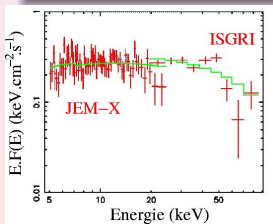
Comportement spectral

Combinaison des données *INTEGRAL* et RXTE

Évolution des propriétés spectrales sur un an

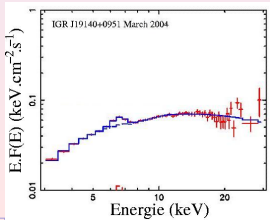
INTEGRAL : forte luminosité

- Spectre mou : $\Gamma = 2.13 \pm 0.07$, pas de corps noir.
- Coupure haute énergie nécessaire (>99.99%), $E_{cutoff} = 49 \pm 3 \text{ keV}$ et $E_{fold} = 18 \pm 9 \text{ keV}$.



RXTE : faible luminosité

- Forte absorption variant rapidement : $N_H \in [3, 10] 10^{22} \text{ cm}^{-2}$.
- $\Gamma = 1.59 \pm 0.03$, $E_{cutoff} = 10 \pm 1 \text{ keV}$ et $E_{fold} = 29 \pm 7 \text{ keV}$.



Énergie de coupure
si basse rarement
observée dans les
binaires X à trous
noirs.

Critère de luminosité

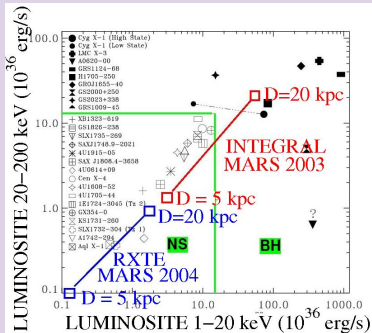


Figure adaptée de

[Barret et al., 1996], utilisée dans
[Rodriguez et al., 2005].

- 2 régions relativement séparées entre les XRB à trou noirs et à étoile à neutrons .
- IGR 19140+0951 située dans la zone des étoiles à neutron sauf si la source est située à plus de 11 kpc (Bras du Sgr : 2-6 kpc).

Résultats

Une HMXB...

- Absorption intrinsèque et variable dans le temps, similaires à d'autres HMXB : IGR J16320-4751 et 4U 1700-37.
- Période orbitale de 13.55 jours longue pour une LMXB.
- Contrepartie optique détectée : étoile de type B0 I, supergéante [Hannikainen et al., 2007].

... à étoile à neutrons.

- Faible énergie de coupure du spectre. États spectraux différents des binaires à trous noirs.
- Basses luminosités bolométriques [Rodriguez, Cabanac et al. 2005].

Résultats

Une HMXB...

- Absorption intrinsèque et variable dans le temps, similaires à d'autres HMXB : IGR J16320-4751 et 4U 1700-37.
- Période orbitale de 13.55 jours longue pour une LMXB.
- Contrepartie optique détectée : étoile de type B0 I, supergéante [Hannikainen et al., 2007].

... à étoile à neutrons.

- Faible énergie de coupure du spectre. États spectraux différents des binaires à trous noirs.
- Basses luminosités bolométriques [Rodriguez, Cabanac et al. 2005].

Analyse spectro-temporelle

Résultats

Allure du système



- 1 Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.
- 2 Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.
- 3 Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF**
 - Principes de la méthode
 - Résultats : test de la méthode et applications
- 4 Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?

Analyses temporelles standards

Données brutes

Fichiers

“évènements”

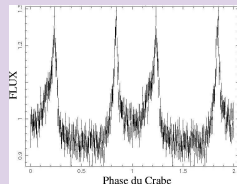
Temps d'arrivée t_k
des photons,
énergie, position
sur le détecteur.

Repliement de phase

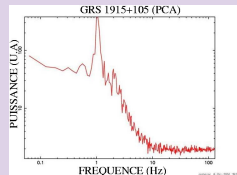
Échantillonnage
temporel

Courbes de lumière
Analyse de Fourier.

Profil de phase



PSD



Analyses temporelles standards

Données brutes

Fichiers

“évènements”

Temps d'arrivée t_k
des photons,
énergie, position
sur le détecteur.

Repliement de phase

Échantillonnage
temporel

Courbes de lumière
Analyse de Fourier

Profil de phase

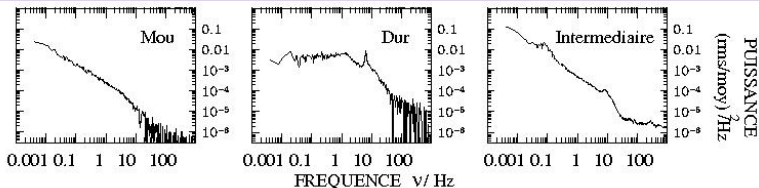
PSD

TEST DE RAYLEIGH

$$S_\omega = \sum_k \cos(\omega t_k) + i \sin(\omega t_k)$$

Des QPOs avec RXTE... et *INTEGRAL*?

PSD obtenus avec RXTE(3-60 keV) pour GRO J1655-40



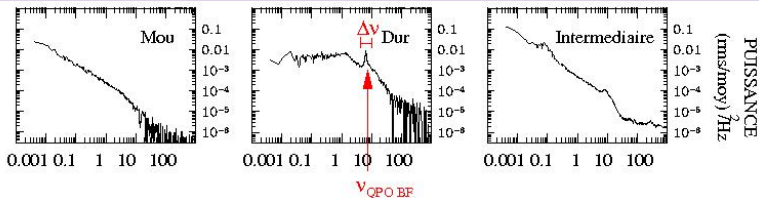
Definitions

- Oscillations Quasi-Périodiques (QPO) : pic centré à ν_{QPO} , de largeur $\Delta\nu$.
- Apériodique : bande limitée (BLN) $\rightarrow \nu_b$ ou en loi de puissance.

QPOs à plus hautes énergies? Utilisation d'*INTEGRAL*...

Des QPOs avec RXTE... et *INTEGRAL*?

PSD obtenus avec RXTE(3-60 keV) pour GRO J1655-40



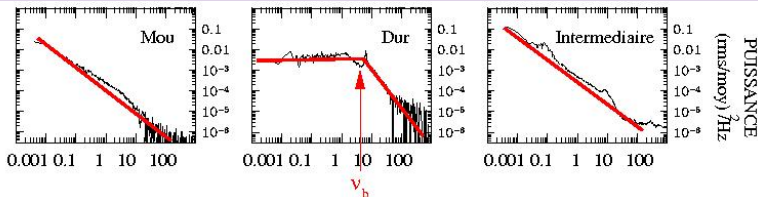
Definitions

- Oscillations Quasi-Périodiques (QPO) : pic centré à ν_{QPO} , de largeur $\Delta\nu$.
- Apériodique : bande limitée (BLN) $\rightarrow \nu_b$ ou en loi de puissance.

QPOs à plus hautes énergies? Utilisation d'*INTEGRAL*...

Des QPOs avec RXTE... et *INTEGRAL*?

PSD obtenus avec RXTE(3-60 keV) pour GRO J1655-40



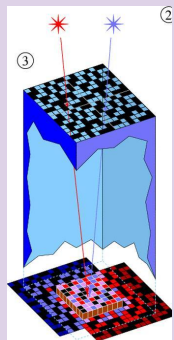
Definitions

- Oscillations Quasi-Périodiques (QPO) : pic centré à ν_{QPO} , de largeur $\Delta\nu$.
- Apériodique : bande limitée (BLN) $\rightarrow \nu_b$ ou en loi de puissance.

QPOs à plus hautes énergies? Utilisation d'*INTEGRAL*...

Problèmes avec les instruments à masque codé.

2 sources
dans le
champ de
vue



Pixel illuminé par 2 sources en
même temps

Oscillation de la **source 1** à la
fréquence ν_1 ET oscillation de la
source 2 à la fréquence ν_2 .

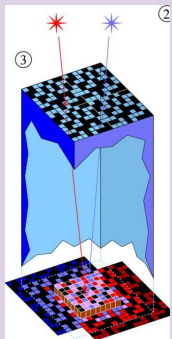
PSD sur tout le détecteur

Problem

*"Mélange"
du signal
des 2
sources*

Problèmes avec les instruments à masque codé.

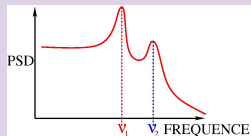
2 sources
dans le
champ de
vue



Pixel illuminé par 2 sources en
même temps

Oscillation de la **source 1** à la
fréquence ν_1 ET oscillation de la
source 2 à la fréquence ν_2 .

PSD sur tout le détecteur



Problem

*“Mélange”
du signal
des 2
sources*

Analyse des données d'ISGRI avec OSA : 2 méthodes

Génération d'une courbe de lumière = déconvolution

- Traitement par routines successives : **déconvolution de l'ombre du masque** → image, jusqu'au stade courbe de lumière.
- Nécessité de grand nombre de photons par échantillon temporel. Coûteux en temps.
- Perte information sur variabilité inférieure au temps d'échantillonnage.

Extraction des événements... et des PIFs

- Possibilité d'utilisation d'ISGRI comme collecteur de photons. Et analyse direct sur leur temps d'arrivée.
- Méthode des PIFs...

Analyse des données d'ISGRI avec OSA : 2 méthodes

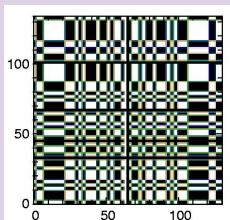
Génération d'une courbe de lumière = déconvolution

- Traitement par routines successives : **déconvolution de l'ombre du masque** → image, jusqu'au stade courbe de lumière.
- Nécessité de grand nombre de photons par échantillon temporel. Coûteux en temps.
- Perte information sur variabilité inférieure au temps d'échantillonnage.

Extraction des événements... et des PIFs

- Possibilité d'utilisation d'ISGRI comme collecteur de photons. Et analyse direct sur leur temps d'arrivée.
- Méthode des PIFs...

Vous avez dit “PIF”?



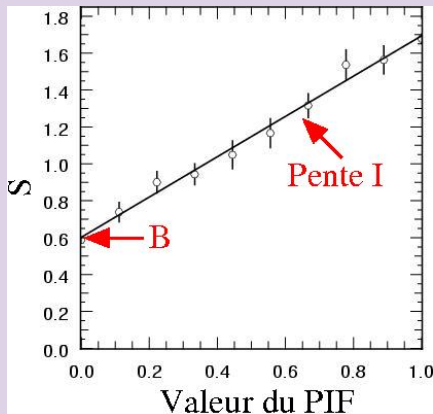
Definition

PIF (Pixel Illumination Factor) :
fraction d'illumination théorique d'un
pixel par une source donnée. $PIF \in [0, 1]$.

Un pixel donné : une valeur de PIF
pour chacune des sources du champ
du vue. Ex : pixel éclairée totalement
par 1ère source et à moitié par la
2ème, $PIF_1 = 1$, $PIF_2 = 0.5$.

Vous avez dit “PIF”?

1 source dans le champ de vue

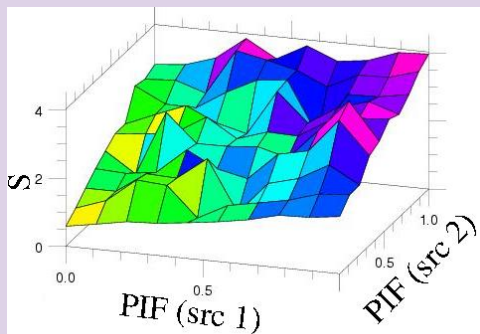


$$S = B + I \times PIF$$

- Existence de bruit de fond, ordonnée à l'origine B : valeur du bruit.
- Pente : intensité de la source I .

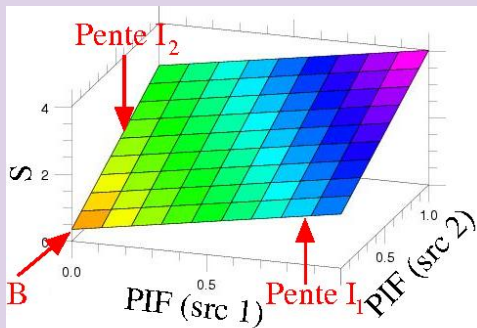
Vous avez dit “PIF”?

2 sources dans le champ de vue



Vous avez dit “PIF”?

2 sources dans le champ de vue



$$S = B + I_1 \times PIF_1 + I_2 \times PIF_2.$$

- B : valeur du bruit.
- I_1, I_2 .

La méthode Rayleigh-PIF

Combinaison Rayleigh-PIF

Principe pour 2 sources : $S_\omega = B_\omega + I_{1,\omega} \times PIF_1 + I_{2,\omega} \times PIF_2$.

- $I_j \rightarrow I_{j,\omega}$: amplitude de la modulation de la source numéro j à ω .
- $B \rightarrow B_\omega$: amplitude de la modulation du fond à ω .

Obtention de la puissance de Rayleigh

Puissance de Rayleigh pour la source j et le fond :

$$P_{r,j} \propto |I_{j,\omega}|^2$$

$$P_{r,\text{fond}} \propto |B_\omega|^2$$

La méthode Rayleigh-PIF

Combinaison Rayleigh-PIF

Principe pour 2 sources : $S_\omega = B_\omega + I_{1,\omega} \times PIF_1 + I_{2,\omega} \times PIF_2$.

- $I_j \rightarrow I_{j,\omega}$: amplitude de la modulation de la source numéro j à ω .
- $B \rightarrow B_\omega$: amplitude de la modulation du fond à ω .

Obtention de la puissance de Rayleigh

Puissance de Rayleigh pour la source j et le fond :

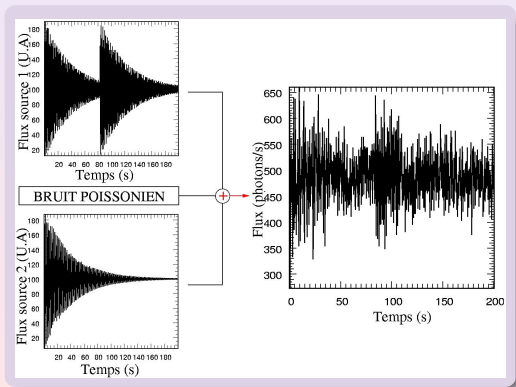
$$P_{r,j} \propto |I_{j,\omega}|^2$$

$$P_{r,\text{fond}} \propto |B_\omega|^2$$

- 1 Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.
- 2 Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.
- 3 Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF**
 - Principes de la méthode
 - Résultats : test de la méthode et applications
- 4 Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?

Résultats : test de la méthode et applications

Données simulées



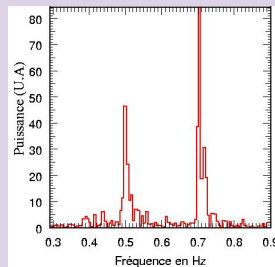
Simulation de deux sources oscillantes

- Génération de photons provenant de deux sources écartées de 1° et oscillant à $\nu_1 = 0.7 \text{ Hz}$ et $\nu_2 = 0.5 \text{ Hz}$. Traversée du masque (méthode de type Monte-Carlo).
- Génération d'un bruit poissonien.
- Addition des photons de chaque source et du bruit.

Résultats : test de la méthode et applications

Données simulées

Test de Rayleigh brut...

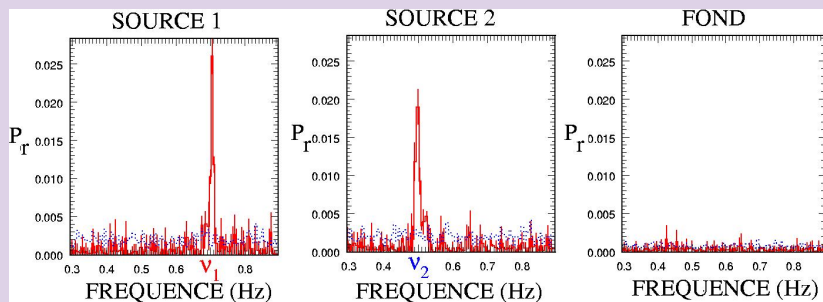


2 pics présents dans le “fréquencegramme”

Résultats : test de la méthode et applications

Données simulées

... et méthode Rayleigh-PIF



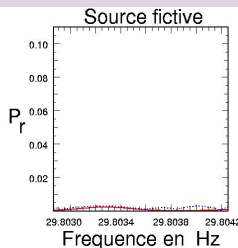
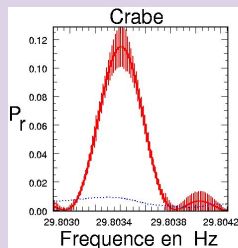
Séparation des signaux de chaque source et du fond dans les "fréquencegrammes"...

Résultats : test de la méthode et applications

Tests sur le Crabe et Vela X-1

Crabe : ajout d'une source fictive dans le catalogue...

Normalement, aucune autre source dans le champ de vue.



Dissociation des signaux

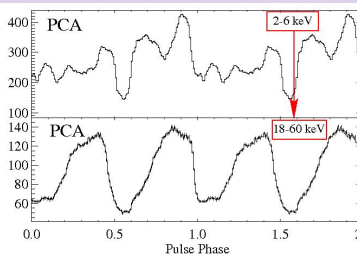
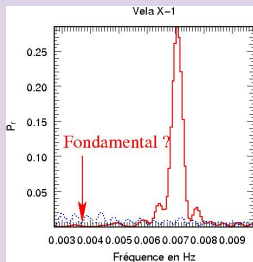
- Bande 20-25 keV.
- : limite à 5σ .

Fréquence relevée cohérente avec les éphémérides radio.

Résultats : test de la méthode et applications

Tests sur le Crabe et Vela X-1

Vela X-1 : absence du fondamental à 3.5 mHz (20-25 keV).



Explication

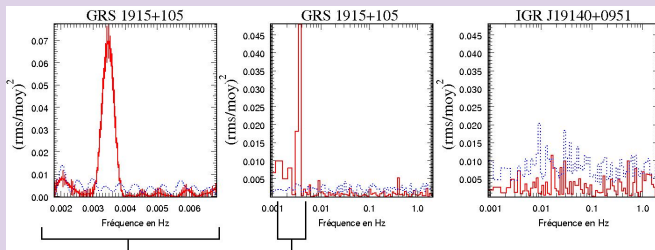
À haute énergie, rapprochement du profil de phase d'une sinusoïde. Double pulse de période $T_1 \Rightarrow$ 1 seul pulse de période $T_1/2$.

[Kreykenbohm et al., 2002]

Résultats : test de la méthode et applications

Détection et étude d'un QPO très basse fréquence dans GRS 1915+105

Un QPO à 3 mHz détecté dans les données ISGRI



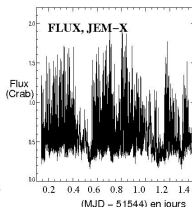
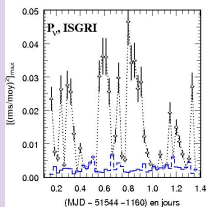
$\nu_{\max} = 3.47 \pm 0.02 \text{ mHz}$: valeur consistante avec les données des observations JEM-X [Hannikainen et al., 2003b].

IGR J19140+0951 : pas de QPO à 3σ .

Résultats : test de la méthode et applications

Détection et étude d'un QPO très basse fréquence dans GRS 1915+105

Un QPO d'intensité variable (20-25 keV).

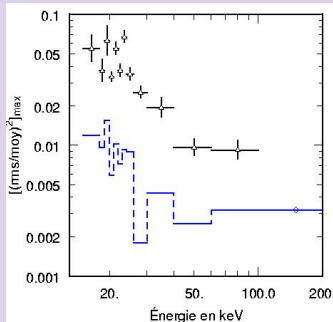


- Alternance de longues périodes (20 ks) avec détection forte du QPO (20% de la valeur moyenne) et de non détection (10 ks, seuil à 3σ).
- Consistance avec la variabilité de la courbe de lumière à plus basse énergie (JEM X-2, [Hannikainen et al., 2003b]).

Résultats : test de la méthode et applications

Détection et étude d'un QPO très basse fréquence dans GRS 1915+105

“Spectre du QPO”



Une détection à haute énergie...

- Détection du QPO → bande 60-100 keV.
- Comportement relativement constant jusqu'à 25 keV puis décroissance progressive, **mais pas de coupure avant 100 keV**.
- Différent du QPO BF de [\[Rodriguez et al., 2002\]](#) : coupure après 40 keV.

Autres sources et conclusions

Sondage préliminaire de quelques binaires-X

- Pas de détection de QPO (5σ , durée 2 ks) dans les sources suivantes : GRO 1655-40, XTE J1550-564, SS 433, . . .
- Cyg X-1 : Intéressantes modulations à 2.9 mHz et 61 mHz (à confirmer).

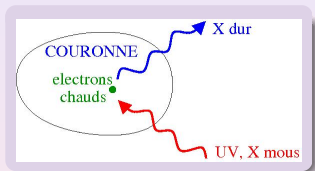
Autres sources et conclusions

Perspectives (1)

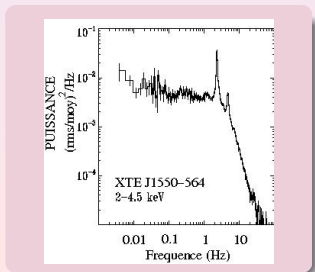
- Vers la détection de QPOs à plus haute fréquence?
- Sondage systématique du plan galactique (+ AGN).
- [Cabanac et al., 2007a, en prép]

- 1 Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.
- 2 Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.
- 3 Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF
- 4 **Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?**
 - Vision générale du modèle
 - Simulations Monte-Carlo du flux émis

Enjeux du problème : unification du comportement spectral et temporel

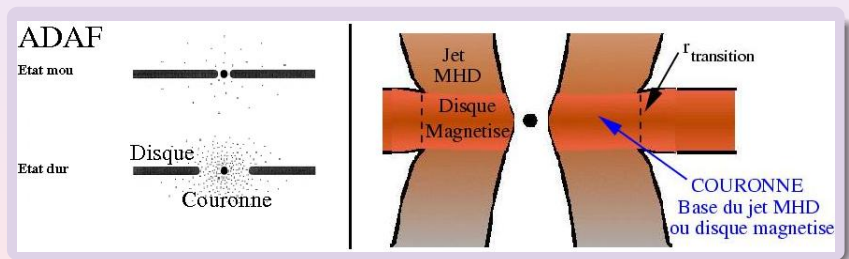


- X dur \rightarrow 100 keV (T_{disque} maximale \sim 1 keV).
- Modèles de couronne.



- QPO hautes fréquences : v_{Kepler} .
- QPO, bruit basses fréquences : ?

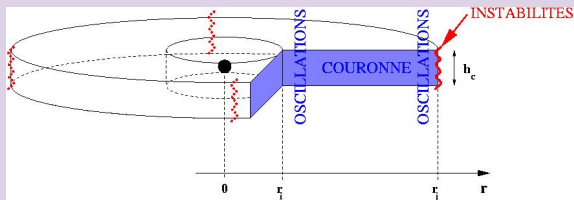
Enjeux du problème : unification du comportement spectral et temporel



- 1 Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.
- 2 Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.
- 3 Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF
- 4 **Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?**
 - Vision générale du modèle
 - Simulations Monte-Carlo du flux émis

La couronne agirait-elle comme un filtre?

Allure générale du modèle

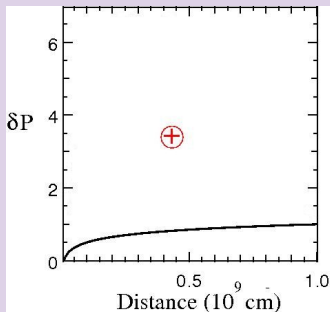


Couronne en géométrie cylindrique et aux dimensions bornées.

- Excitation d'une onde de pression en r_j : bruit blanc.
- Annulation de la perturbation en r_i (réflexion totale) \Rightarrow onde stationnaire.
- Adiabatique \Rightarrow onde en température et densité \Rightarrow modulation de l'efficacité de la comptonisation, **flux**.

Pourquoi un caractère filtrant?

Dépendance de δP en fonction de r et ν

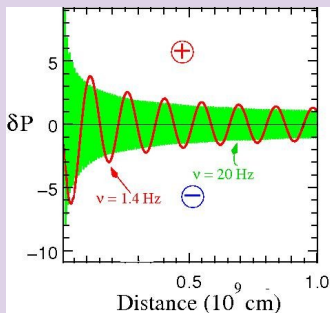


Comportement attendu

- À basses fréquences, δP garde le même signe $\forall r$. \Rightarrow oscillation d'ensemble de la couronne. Grande rms et constante.
- À hautes fréquences, δP change de signe à plusieurs reprises. Intégré sur toute la couronne, brouillage de l'effet de l'oscillation. \searrow de la rms
- Résonances du fait des conditions aux limites fixes (cavité) pour certaines fréquences.

Pourquoi un caractère filtrant?

Dépendance de δP en fonction de r et ν

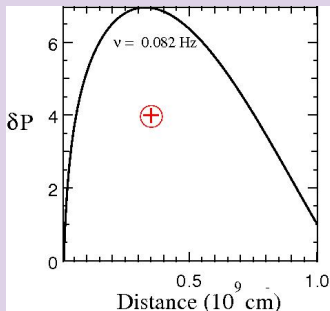


Comportement attendu

- À basses fréquences, δP garde le même signe $\forall r$. \Rightarrow oscillation d'ensemble de la couronne. *Grande rms et constante.*
- À hautes fréquences, δP change de signe à plusieurs reprises. Intégré sur toute la couronne, brouillage de l'effet de l'oscillation. \searrow de la rms
- Résonances du fait des conditions aux limites fixes (cavité) pour certaines fréquences.

Pourquoi un caractère filtrant?

Dépendance de δP en fonction de r et ν



Comportement attendu

- À basses fréquences, δP garde le même signe $\forall r$. \Rightarrow oscillation d'ensemble de la couronne. *Grande rms et constante.*
- À hautes fréquences, δP change de signe à plusieurs reprises. Intégré sur toute la couronne, brouillage de l'effet de l'oscillation. \searrow de la rms
- **Résonances** du fait des conditions aux limites fixes (cavité) pour certaines fréquences.

- 1 Les Binaires-X : des Laboratoires pour la Physique des Hautes-Énergies.
- 2 Suivi d'une Nouvelle Source INTEGRAL : IGR J19140+0951.
- 3 Une nouvelle méthode d'analyse temporelle des données d'INTEGRAL : la méthode Rayleigh-PIF
- 4 **Un modèle de couronne oscillante pour décrire la variabilité temporelle?**
 - Vision générale du modèle
 - **Simulations Monte-Carlo du flux émis**

Un code linéaire de comptonisation

Modification d'un code de comptonisation existant

Ajout d'une dimension temporelle au code de [Malzac, 1999].

- Effets pris en compte : régime relativiste du plasma , section Klein-Nishina.
- Photons mous thermiques, pas synchrotrons.

Un code linéaire de comptonisation

Organigramme des simulations

Choix de la fréquence ν et des paramètres d'entrées
(kT_e , kT_{mous} , τ)

Simulation Monte-Carlo (parallélisé : ICARE)

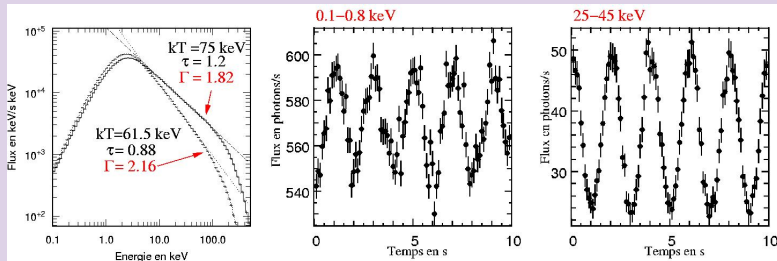
Génération de courbes de lumières par bande d'énergie

Ajustement par sinusoides \Rightarrow amplitude $A(\nu)$, $P(\nu) \propto |A(\nu)|^2$

$\nu \rightarrow \nu + \Delta\nu$ et reprise des simulations MC.

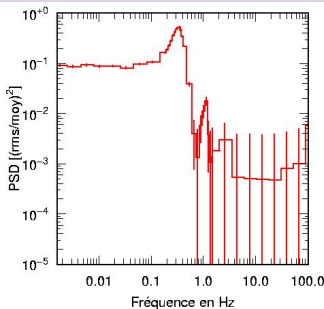
Simulations Monte-Carlo du flux émis

Premiers résultats : SED et courbes de lumières obtenues



- 1 SEDs obtenues : Γ conformes aux valeurs couramment observées dans les états durs des binaires-X.
- 2 Déphasage de π entre hautes et basses énergies : conservation du nombre de photons total lors de l'interaction Compton. Si kT et $\tau \nearrow$, nombre de photons X durs \nearrow et X mous \searrow .

Simulations Monte-Carlo du flux émis

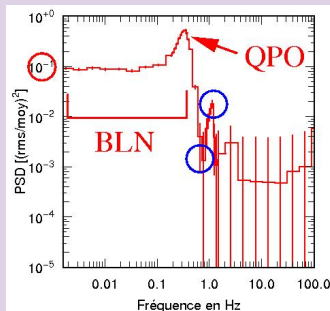
Spectres de puissances obtenus :
caractéristiques de l'état dur?

Allure générale

- RMS constante à basse fréquence puis chute : “BLN”...
- Pic dans le spectre de puissance : “QPO”...
- Mais “creux” dans le PSD et pic secondaire \neq harmonique. Dûes à la forme de la fonction δP (C.L de fonctions de Bessel).
- Niveau du BLN : 30%/moy (avec $\Delta T/T = 10\%$).

PSD obtenu avec $c_s = 2 \cdot 10^8 \text{ cm.s}^{-1}$,
 $\Delta T/T = 10\%$, $r_j = 3 \cdot 10^8 \text{ cm}$, $r_i = 3 \cdot 10^6 \text{ cm}$.

Simulations Monte-Carlo du flux émis

Spectres de puissances obtenus :
caractéristiques de l'état dur?

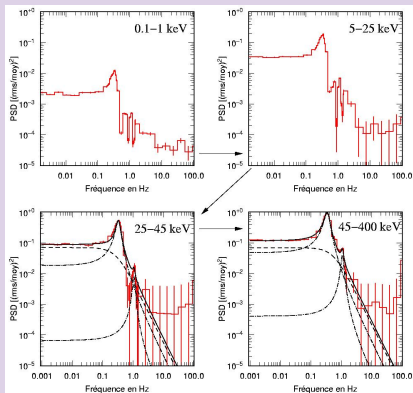
Allure générale

- RMS constante à basse fréquence puis chute : **“BLN”** ...
- Pic dans le spectre de puissance : **“QPO”** ...
- Mais “creux” dans le PSD et pic secondaire \neq harmonique. Dûes à la forme de la fonction δP (C.L de fonctions de Bessel).
- Niveau du BLN : 30%/moy (avec $\Delta T/T = 10\%$).

PSD obtenu avec $c_s = 2 \cdot 10^8 \text{ cm.s}^{-1}$,
 $\Delta T/T = 10\%$, $r_j = 3 \cdot 10^8 \text{ cm}$, $r_i = 3 \cdot 10^6 \text{ cm}$.

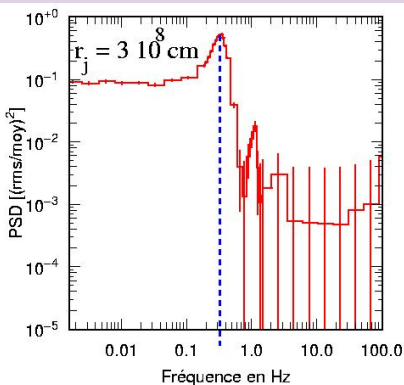
Simulations Monte-Carlo du flux émis

Évolution des PSD en fonction de l'énergie.



- Augmentation progressive de la variabilité globale (BLN+QPO) avec l'énergie. Pas de coupure notable vers 40 ou 100 keV.
- Ajustement possible avec des lorentziennes, surtout vers les hautes énergies.

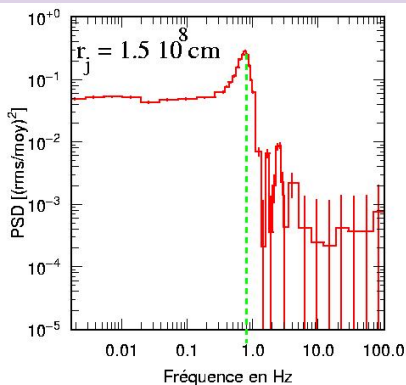
Évolution en fonction de la taille de la couronne.



Tendances lorsque $r_j \searrow$ (c_s constant)

- Augmentation de ν_{QPO} et ν_b .
- Légère baisse de la variabilité.
- Cohérence avec modèles explicitant les transitions spectrales "état dur", "état mou".

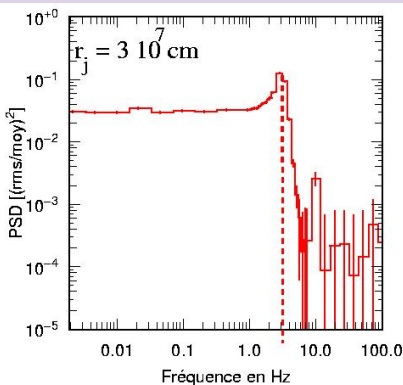
Évolution en fonction de la taille de la couronne.



Tendances lorsque $r_j \searrow$ (c_s constant)

- Augmentation de ν_{QPO} et ν_b .
- Légère baisse de la variabilité.
- Cohérence avec modèles explicitant les transitions spectrales "état dur", "état mou".

Évolution en fonction de la taille de la couronne.

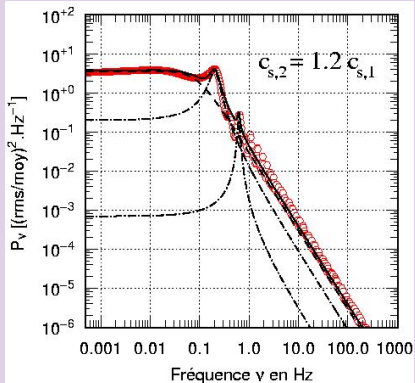


Tendances lorsque $r_j \searrow$ (c_s constant)

- Augmentation de ν_{QPO} et ν_b .
- Légère baisse de la variabilité.
- Cohérence avec modèles explicitant les transitions spectrales “état dur”, “état mou”.

Simulations Monte-Carlo du flux émis

Solutions analytiques dans l'approximation linéaire.



Transmission de l'onde en r_i .

Résultats : réglage de l'amplitude du QPO.

Dépendance en fonction du rapport des vitesses du son :

- Si $c_{s,1} \gg c_{s,2}$ ou $c_{s,1} \ll c_{s,2}$, présence de pics très prononcés.
- Si $c_{s,1} \sim c_{s,2}$, diminution de l'amplitude du QPO (et des creux). Quand $c_{s,1} = c_{s,2}$, absence de QPO.

Conclusions. Discussions du modèle

Principaux résultats (1)

- Capacité de filtre d'une couronne en géométrie cylindrique avec conditions aux limites fixées : modélisation du comportement basse fréquence des PSD des XRB dans l'état dur (BLN, QPO BF).
- Ordres de grandeurs de fréquences et variabilité compatibles avec les valeurs observées.
- Évolution des spectres de puissance lorsque r_j diminue : augmentation des fréquences et diminution légère de la variabilité.
- Modèles plus élaborés : réglage de l'amplitude du QPO.

Conclusions. Discussions du modèle

Discussion des hypothèses, modélisations, résultats. (1)

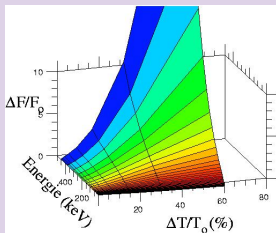
- États mous ou certains états intermédiaires : pas de BLN, bruit en loi de puissance. Difficulté de les modéliser.
- Modèle très simple
 - Rotation Képlérienne négligée. Effet Doppler sur la fréquence perçue pourrait “lisser” spectres de puissances (creux et pics secondaires).
 - Vitesse du son constante : approximation.
 - Couronne : milieu magnétisé. Mais valeurs des vitesses magnétosoniques lente et rapides proches de celles utilisées (équipartition).
 - Bruit blanc.

Conclusions et Perspectives

- **IGR J19140+0951** : une HMXB à étoile à neutrons.
- Méthode **Rayleigh-PIF** : méthode prometteuse pour les recherches de périodicités/QPO dans les binaires-X, pulsars.
- Modèle de **couronne oscillante** : description qualitative des PSD des binaires-X dans leur état dur.
- Perspectives
 - Application systématique de la méthode Rayleigh-PIF aux sources du champ galactique (+ AGN). Amélioration du modèle (géométrie, etc. . .)
 - Post-Doc : Southampton. Rayleigh-PIF : ex. nébuleuse à pulsar. Variabilité, code transfert radiatif (Grenoble, Soton). Étude multi- λ XRB.

Domaine de linéarité du transfert radiatif

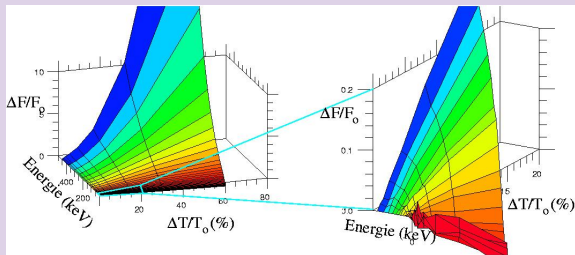
Analyse de la variation du flux émis en fonction de l'amplitude de la perturbation



Comportement quadratique à hautes énergies... Mais linéaire pour les basses énergies.

Domaine de linéarité du transfert radiatif

Analyse de la variation du flux émis en fonction de l'amplitude de la perturbation



Comportement quadratique à hautes énergies. . . Mais linéaire pour les basses énergies.

Domaine de linéarité du transfert radiatif

Plus précisément...

- Amplitude relative de la perturbation en température en entrée : $\Delta T/T$.
- Développement limité à l'ordre 2 de la variation relative du flux émis $\Delta F/F_0$ en fonction de $\Delta T/T$.
- Comparaison du terme quadratique en $\Delta T/T$ avec le terme linéaire. Contraint les zones de linéarités.

Domaine de linéarité du transfert radiatif

Plus précisément...

- Amplitude relative de la perturbation en température en entrée : $\Delta T/T$.
- Développement limité à l'ordre 2 de la variation relative du flux émis $\Delta F/F_0$ en fonction de $\Delta T/T$.
- Comparaison du terme quadratique en $\Delta T/T$ avec le terme linéaire. Contraint les zones de linéarités.

Domaine de linéarité du transfert radiatif

Plus précisément...

- Amplitude relative de la perturbation en température en entrée : $\Delta T/T$.
- Développement limité à l'ordre 2 de la variation relative du flux émis $\Delta F/F_0$ en fonction de $\Delta T/T$.
- Comparaison du terme quadratique en $\Delta T/T$ avec le terme linéaire. Contraint les zones de linéarités.

Domaine de linéarité du transfert radiatif

Résultats des simulations

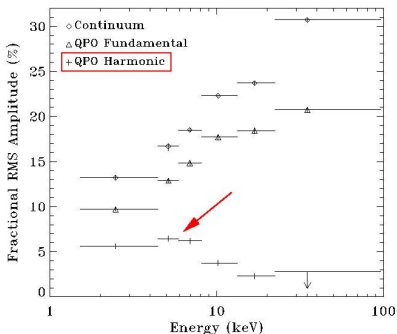
- **Linéarité** : très basses énergies (corps noir) et intermédiaires ($\sim 10\text{-}200$ keV).
- **Non linéarité** : au dessus de 200 keV, mais aussi dans une petite bande entre 2 et 10 keV.

Domaine de linéarité du transfert radiatif

Résultats des simulations

- **Linéarité** : très basses énergies (corps noir) et intermédiaires ($\sim 10\text{-}200$ keV).
- **Non linéarité** : au dessus de 200 keV, **mais aussi dans une petite bande entre 2 et 10 keV.**

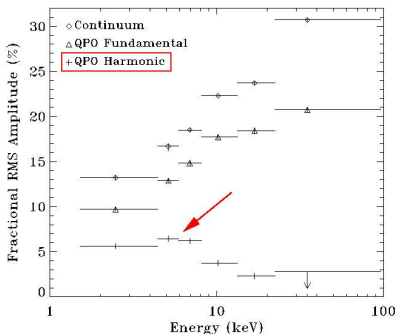
Domaine de linéarité du transfert radiatif



Comparaison avec les observations

- Maximum d'amplitude de la 1^{ère} harmonique du QPO de XTE J1550-564 observée autour de 5-6 keV [Cui et al., 1999]
- Harmonique de QPO basse fréquence dûe au transfert radiatif?


Domaine de linéarité du transfert radiatif



Comparaison avec les observations

- Maximum d'amplitude de la 1^{ère} harmonique du QPO de XTE J1550-564 observée autour de 5-6 keV [Cui et al., 1999]
- Harmonique de QPO basse fréquence dûe au transfert radiatif?

Pour en savoir plus

 Mirabel, I.F. et Rodriguez, L.F. 1994,
A Superluminal Source in the Galaxy
Nature **371**, 46.

 **371**, 46.

 **371**, 46.

 **371**, 46.

 **371**, 46.

 **371**, 46.