

# Les nouveaux résultats *Chandra* et *XMM-Newton* concernant les Noyaux Actifs de Galaxies

Delphine Porquet

CEA/DSM/DAPNIA Service d'Astrophysique F-91191  
Gif-sur-Yvette, dporquet@cea.fr

## Abstract

Il s'agit ici d'un aperçu des résultats sur les Noyaux Actifs de Galaxies (AGNs) obtenus grâce à la nouvelle génération de satellites X: *Chandra* & *XMM-Newton*.

Pour la première fois, grâce à leurs caractéristiques instrumentales (sensibilité, résolutions angulaire et spectrale) des images et des spectres de qualité sans précédent sont obtenus dans le domaine des rayons X pour les objets extragalactiques comme les Noyaux Actifs de Galaxies. Notamment une étude spectroscopique fine est dorénavant possible ce qui permet d'appliquer de puissants diagnostics de plasmas comme notamment ceux basés sur les raies des ions héliumoïdes qui donnent une estimation précise de la densité, de la température, ainsi que la mise en évidence des processus d'ionisation (photoionisation et/ou ionisation collisionnelle) qui dominent dans les plasmas chauds (e.g. "Warm Absorber") des AGNs. La sensibilité de *XMM-Newton* permet d'étudier les AGNs à très grands redshifts et/ou très fortement absorbés. La résolution angulaire ( $\sim 0.5''$ ) de *Chandra* permet d'étudier séparément les différentes composantes de ces objets: le noyau, le milieu chaud environnant ("Warm Absorber"), les jets, ainsi que le milieu interstellaire et les objets ponctuelles (binaires X, candidats trous noirs, restes de Supernovae,...) de la galaxie hôte.

Cette nouvelle ère dans le domaine des rayons X va permettre de fortement contraindre les paramètres physiques, géométriques, dynamiques ainsi que la localisation de la matière accrétante autour des trous noirs supermassifs, dans les différents types d'AGNs (Seyfert, quasars Radio-Loud et Radio-Quiet, noyaux actifs dans les amas de galaxies), en relation avec les autres composantes observées dans les autres domaines de longueurs d'onde (radio, optique, UV, etc...).

Ceci s'inscrit dans un objectif plus vaste de compréhension de l'évolution de l'ensemble des galaxies qui pour la plupart semblent contenir un trou noir supermassif en leur centre (e.g. le centre de notre propre Galaxie, M31...).

## 1. Introduction

### 1.1. Diagnostics de plasmas: ions héliumoïdes (He-like)

Afin de mieux comprendre l'impact des spectres obtenus par *Chandra* et *XMM-Newton*, voici une introduction sur de puissants diagnostics de plasmas (densité, température, processus d'ionisation) dans le domaine des rayons X qui sont **pour la première fois applicables à des objets extra-solaires, comme par exemple les AGNs** (Porquet & Dubau 2000). Ces diagnostics sont basés sur le rapport des raies des ions héliumoïdes.

Les ions héliumoïdes (He-like) émettent trois principales raies (cf. fig 1) dans le domaine des rayons X:

- la raie de résonance:  $r$
- la raie d'intercombinaison:  $i$
- la raie interdite:  $f$

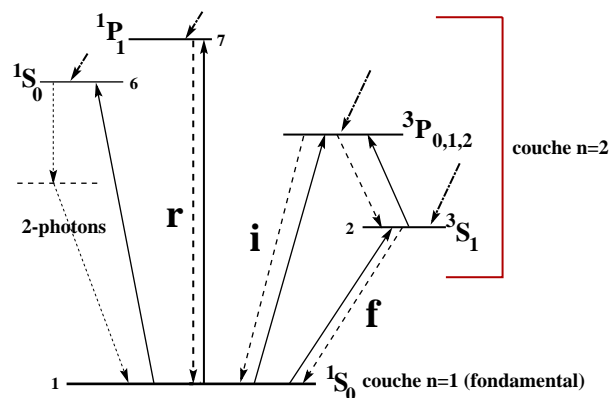


Fig. 1.— Diagramme de Gotrian représentant schématiquement la structure atomique des ions héliumoïdes. *Traits continus*: excitation collisionnelle, *tirets*: desexcitation radiatives, *tiret-pointillés*: recombinaisons radiatives et diélectroniques.

En 1969, Gabriel & Jordan ont montré que les rapports de ces raies permettent des diagnostics en densité électronique, et en température:

$$R(n_e) = f/i$$

$$G(T_e) = (f + i)/r$$

Un diagnostic de processus d'ionisation (photo-ionisation et/ou ionisation collisionnelle) est également possible grâce aux rapports de ces raies (voir Porquet & Dubau 2000). Ces diagnostics de plasmas ont été jusqu'ici très largement utilisés lors de l'étude des plasmas solaires. La sensibilité et la résolution spectrale de la nouvelle génération de satellite X, *Chandra* (*LETG*<sup>1</sup>, *HETG*<sup>2</sup>) et *XMM-Newton* (*RGS*<sup>3</sup>), nous permet d'appliquer ces diagnostics du C v ( $\sim 0.3$  keV) jusqu'au Si XIII ( $\sim 1.85$  keV).

<sup>1</sup>LETG: Low Energy Transmission Grating Spectrometer.

<sup>2</sup>HETG: High Energy Transmission Grating Spectrometer (<http://space.mit.edu/CSR/hetg.info.html>).

<sup>3</sup>RGS: Resolution Grating Spectrometer ([http://xmm.vilspa.esa.es/user/uhb/xmm\\_uhb.html](http://xmm.vilspa.esa.es/user/uhb/xmm_uhb.html)).





### 2.3. MCG-6-30-15 & Mkn 766

Ces deux galaxies de Seyfert sont classifiées comme “**Narrow Line Seyfert 1**” (NLS1<sup>6</sup>). Des observations avec *ASCA* et *BeppoSax* ont permis de mettre en évidence que ces objets ont une variabilité large et rapide. De plus, une raie large du FeK $\alpha$  a été observée dans ces deux objets. Le profil de cette raie serait cohérent avec un modèle de disque relativiste. La présence d’un “Warm Absorber” a aussi été mise en évidence.

Branduardi-Raymont et al. (2000) ont réalisé l’étude de ces deux objets grâce au spectromètre *RGS* (*XMM-Newton*). Leurs spectres sont similaires. Aucune transition de la couche L du fer, ni d’ion héliumöide n’est observée. Cependant des raies d’ions hydrogénoïdes (C VI, N VII, O VIII) sont clairement détectées dans le spectre *RGS*. Le degré d’ionisation de ces raies semble montrer qu’il s’agit de recombinaisons radiatives d’ions complètement ionisés qui rentrent en jeu dans ce plasma. Des seuils en absorption sont également détectés. S’ils sont dus aux ions O VII et O VIII, ils sont alors fortement décalés vers le rouge ( $v \sim 16\,000\text{ km s}^{-1}$ ). L’étude des raies en absorption de ces mêmes ions permet également de contraindre la vitesse du milieu ( $v \leq 60\text{ km s}^{-1}$ ), or cette vitesse n’est pas cohérente avec le décalage apparent des seuils en absorption. Par conséquent, Branduardi-Raymont et al. (2000) ont éliminé l’interprétation du spectre dans le domaine des X-mous par un milieu de type “Warm Absorber” sur la ligne de visée. Ils ont testé un autre modèle basé sur une loi de puissance absorbée et des **raies émises par un disque relativiste autour d’un trou noir de Kerr** (en rotation). L’ajustement entre les données et le modèle est reporté figure 4. Les paramètres du modèle du disque relativiste sont reportés Table 1.

## 3. Les galaxies de type 1.5 et 2

### 3.1. NGC 4151

NGC 4151 est une galaxie de type 1.5 (intermédiaire entre les types 1 et type 2). Le satellite *Chandra* grâce à sa résolution angulaire (0.5”) permet pour la première fois d’observer la région centrale de NGC 4151 et le milieu chaud qui l’entoure, et d’effectuer des **comparaisons fines avec d’autres domaines de longueurs d’onde**, comme par exemple l’optique. La figure 5 montre une comparaison de l’émission X et de l’émission optique (HST). La région dont provient l’émission X est plus étendue sur le cône dirigé vers l’observateur (sud-ouest) que sur le cône opposé, ce qui suggère que la région du cône dirigé vers l’arrière est obscurci, comme dans le cas de l’émission optique.

Le spectre obtenu par Ogle et al. (2000) grâce au *HETG* (figure 6) semble montrer que le “**Warm Absorber**” est dominé par des raies en émis-

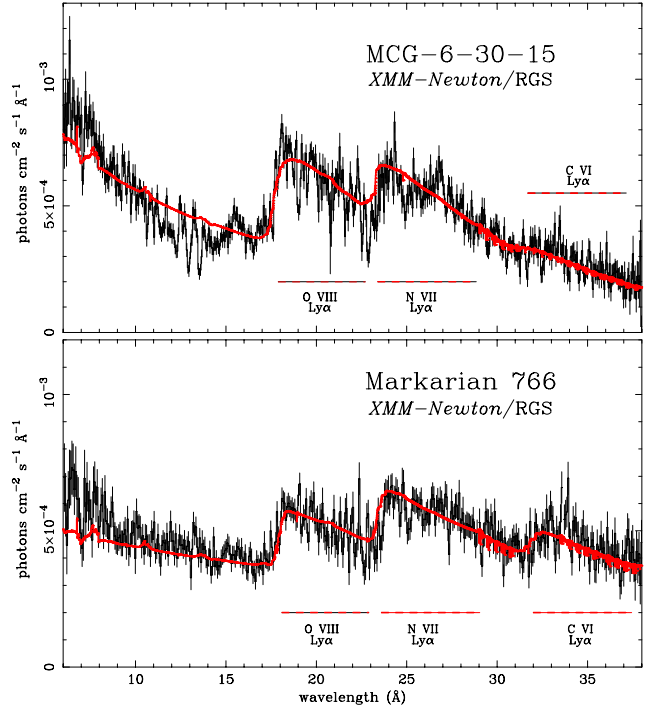


Fig. 4.— Spectre *XMM-Newton* (*RGS*) de MCG-6-30-15 et Mkn 766 (NLS1s). L’ajustement est réalisé par un modèle de trou noir de Kerr (en rotation). Les paramètres de modèle sont reportés table 1.

Table 1: Paramètres d’ajustement entre les données observationnelles obtenues avec *XMM-Newton* (*RGS*) pour MCG-6-30-15 et Mkn 766 et un modèle de disque relativiste autour d’un trou noir de Kerr.  $\Gamma$  est l’indice en photon de la loi de puissance.  $i$  est l’inclinaison du disque et  $q$  est la pente du profil d’émissivité radiale du disque.  $R_{in}$  et  $R_{out}$  sont respectivement la limite interne et externe du disque (exprimées en rayon de Schwarzschild).

	MCG-6-30-15	Mkn 766
$\Gamma$	$1.33 \pm 0.012$	$1.68 \pm 0.03$
$i$ (inclinaison)	$40.3^\circ \pm 0.3^\circ$	$35.6^\circ \pm 0.9^\circ$
$q$ (émissivité)	$3.78 \pm 0.05$	$3.56 \pm 0.09$
$R_{in}$	$1.24^{+0.7}_{-0.0}$	$1.24^{+0.8}_{-0.0}$
$R_{out}$	$110^{+90}_{-60}$	$60^{+60}_{-15}$

sion étroites, notamment d’ions héliumöides de O VII à Si XIII (séparation des “triplets”) et d’ions hydrogénoïdes du N VI à Si XIV, d’un milieu fortement ionisé résolu spatialement (1.6 kpc). En effet contrairement aux galaxies de Seyfert de type 1 comme NGC 5548 et NGC 3783, l’émission directe provenant du noyau est fortement absorbée et par conséquent permet une très bonne observation de la “Narrow Line

<sup>6</sup>Les galaxies appelées Narrow Line Seyfert 1 (NLS1) constituent une sous-classe qui se différencie des Seyfert 1 dites “normales” à raies larges (ou également appelées Broad Line Seyfert 1). Leurs raies permises optiques et UV sont significativement plus étroites ( $500 < \text{FWHM} < 2\,000\text{ km s}^{-1}$ ) que celles observées dans les BLS1 ( $2\,000 < \text{FWHM} < 20\,000\text{ km s}^{-1}$ ) mais sont plus larges que les raies étroites provenant de leur propre NLR.

Region” (cf. figure 2). La région du “Warm Absorber” émettant les raies étroites en X est “hybride” puisqu’elle est constituée à la fois d’une **composante photoionisée** et d’une **composante ionisée collisionnellement** (Ogle et al. 2000). Ceci a été mis en évidence grâce aux rapports des raies des ions héliumoides qui pour le cas de l’ion O VII correspondent à un plasma photoionisé contrairement aux autres ions tels que Ne IX, Mg XI dont les rapports de raies correspondent à un milieu où l’excitation collisionnelle est importante (voir Porquet & Dubau 2000 pour les valeurs théoriques). Il y a également d’autres indications d’une composante photoionisée tel que le continu dû à la recombinaison radiative (N VII, O VII, O VIII, Ne IX et Mg XI) qui semble indiquer une température de l’ordre de  $2-4 \times 10^4$  K. De même, l’observation de transitions, entre la couche de nombre quantique principal  $n = 3$  et le niveau fondamental ( $n=1$ ), relativement intenses des ions N VI, Ne IX, and Mg XI indique une photoionisation de ces ions. Les raies intenses en émission de la couche K des ions O, Ne, Mg et Si et l’émission relativement faible des raies de la couche L du Fer sont les caractéristiques supplémentaires d’un milieu photoionisé (Liedahl 1999). **Les nuages photoionisés de la “Narrow-Line Region” doivent posséder un large domaine d’état d’ionisation de façon à expliquer à la fois les raies en émission dans l’optique (ex: O I-O III) et les raies émises dans les X (O VII).**

Quant aux raies Ly $\alpha$  des ions O VIII, Ne X, and Mg XII, elles proviennent d’une large part d’un plasma ionisé collisionnellement. Le domaine de température de ce plasma chaud est de l’ordre de  $0.3-1 \times 10^7$  K.

Les raies X ont des vitesses, largeurs et étendues spatiales similaires aux raies optiques émises pas la “Narrow Line Region” montrant qu’elles proviennent de la même région.

*Chandra* apporte ici la première évidence directe d’émission de raies X d’un plasma très chaud ( $T \sim 10^7$  K) qui pourrait permettre le confinement par pression des nuages photoionisés plus froids de la “Narrow Line Region” (observés en optique) et ayant un large domaine d’état d’ionisation. Une possible alternative est que le gaz chaud soit confiné par des chocs<sup>7</sup> entre les nuages de la “Narrow Line Region” et le milieu interstellaire de la galaxie hôte. **L’émission X démontre que les processus de hautes énergies sont importants dans cet objet à des distances de 70-800 pc du centre de la galaxie.**

### 3.2. Mkn 3

Mkn3 est l’une de ces galaxies de Seyfert 2 pour lesquelles des raies larges optiques ont été détectées en lumière polarisée, ce qui semble confirmer le modèle du schéma unifié (cf. figure 2). L’étude multi-longueurs d’onde a montré que cette galaxie était sujette à une intense activité, comme les jets radio bipolaires forte-

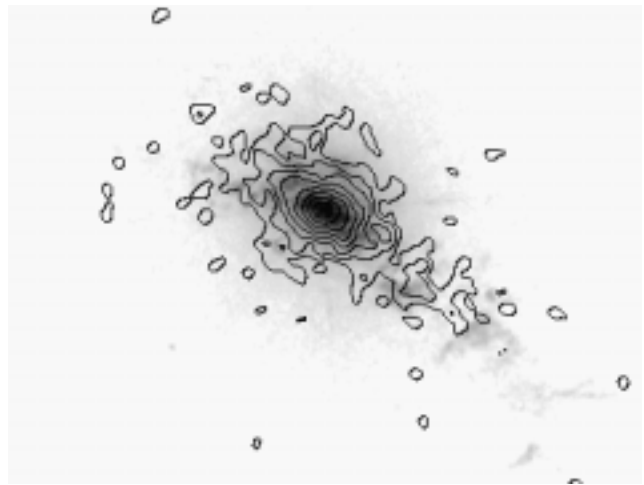


Fig. 5.— Comparaison de l’émission X (*Chandra*) et optique (HST) de la région étendue de la “Narrow Line Region” dans NGC 4151 (Ogle et al. 2000). Les contours (0.4-2.5 keV) sont superposés à l’image HST de [O III]5007 Å (ils sont séparés par un facteur 2 en intensité de surface). Le nord est en haut, l’est est à gauche. Le cône sud-ouest (devant) est plus étendu que celui du nord-est (derrière) dans les deux domaines de longueurs d’onde (X et optique).

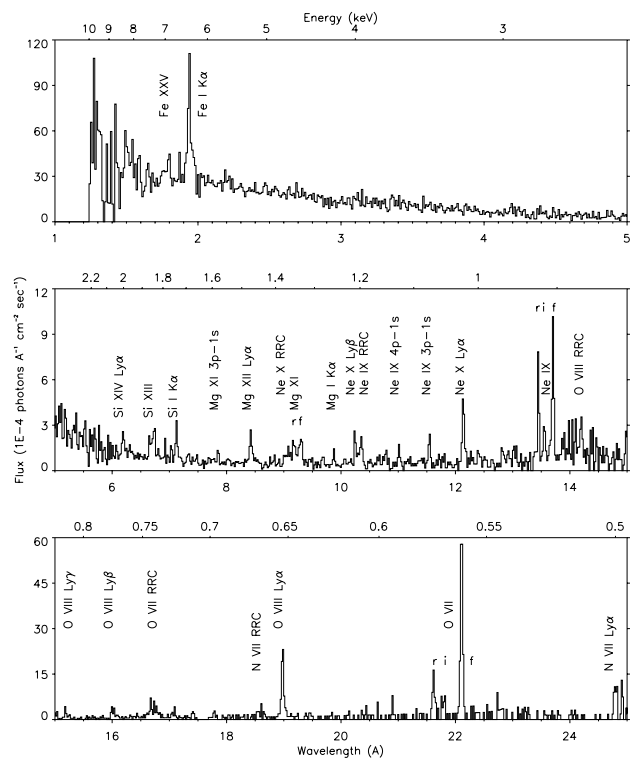


Fig. 6.— Spectre de NGC 4151 (Seyfert 1.5) dans le domaine des rayons X (1-25 Å; 0.4-8.7 keV) obtenu avec *Chandra* (Ogle et al. 2000).

ment collimatés (Kukula et al. 1993), les régions binocales émettant la raie [O III] (Pogge & De Robertis 1993). L’émission X-durs montre une forte évidence de réflexion sur le tore moléculaire. De même l’émission dans les X-mous observée précédemment par ASCA a

<sup>7</sup>Une morcellement du gaz (“clumpy”) est observée par *Chandra* et correspond aux nuages émettant en optique.

montré de nombreuses caractéristiques spectrales qui ont été attribuées à l'émission d'une région photoionisée.

Le spectre obtenu par le satellite *Chandra* (HETG; Sako et al. 2000) montre la **détection d'un très grand nombre de raies d'ions hydrogénoïdes et héliumoïdes des éléments O, Ne, Mg, Si, S et Fe, des raies de fluorescence des éléments Mg, Si, S et Fe et des transitions de la couche L du fer.** L'énergie de la raie du fer  $K\alpha$  est estimée à 6.39 keV, ce qui correspond au fer froid ou très faiblement ionisé (i.e. <XIX).

Le rapport du **triplet de l'ion O VII** est cohérent avec la valeur dans le cas d'une **photoionisation pure** (Porquet & Dubau 2000). L'intensité de la couche L du fer semble indiquer que ces raies sont formées principalement par photo-excitation du milieu entourant la source centrale.

## 4. Les quasars

### 4.1. Mkn 205

La sensibilité des instruments *EPIC*<sup>8</sup> de *XMM-Newton* offre dès à présent la possibilité d'observer la raie  $K\alpha$  du fer en détail dans les quasars et ainsi d'étudier le flux et l'état physique de la matière de ces objets les plus puissants. Notamment, Reeves et al. (2001a) viennent de découvrir dans **Mkn 205**<sup>9</sup> **une raie atypique dont le profil est non pas élargie vers le rouge mais vers le bleu.** Le spectre à haute énergie obtenu par *XMM-Newton* montre un complexe de la raie du Fe- $K\alpha$  constitué (au moins) de deux composantes: un composante étroite à 6.4 keV (<FeXIX), et une composante large à 6.7 keV qui est due à l'émission du fer très ionisé (He-like):

- La composante étroite à 6.4 keV: Un milieu froid semble être présent et doit se situer hors de la ligne de visée puisque le spectre X ne semble subir aucune absorption et serait donc vu par réflexion. La localisation la plus probable d'un tel milieu pourrait être le tore moléculaire, comme dans le cas des galaxies de Seyfert de type 2 où de très intenses raies du fer ont été observées. Jusqu'à présent une telle observation de l'émission X provenant du tore dans le cas des quasars n'avait pas été réalisée.

- La composante large à 6.7 keV: Ce type de profil n'est pas compatible avec un profil de raie provenant d'un disque relativiste autour du trou noir supermassif car dans ce cas il y aurait présence d'une aile élargie vers le rouge. La raie est formée dans un milieu où l'ionisation est assez grande pour produire du fer héliumoïde. La présence d'une raie du fer fortement ionisé ( $\sim 6.7$  keV) a été mentionnée dans plusieurs quasars Radio-Quiets d'après les données du satellite *ASCA* (Reeves & Turner 2000). Ceci pourrait être une indication que le niveau d'ionisation de la partie interne

du disque augmente avec le taux d'accrétion (Matt et al. 1993). En effet l'aile rouge du profil de la raie du fer doit disparaître si le milieu localisé dans les parties les plus internes du disque devient complètement ionisé. Il se peut également qu'il s'agisse d'un mélange de plusieurs raies du fer de différents états d'ionisation qui pourrait être formées dans une région comme le "Warm Absorber".

### 4.2. PKS 0637-752

L'observation du quasar Radio-Loud, PKS 0637-752 ( $z=0.654$ ) a permis de découvrir, durant la phase de vérification et de calibration de *Chandra*, la **présence d'un jet émettant dans le domaine des rayons X** (Chartas et al. 2000). **Le jet s'étend jusqu'à 10 arcsec ( $\sim 100$  kpc) à l'ouest du noyau. Il s'agit du jet le plus étendu et le plus lumineux ( $\sim 4.10^{44}$  ergs<sup>-1</sup>) observé à ce jour dans le domaine des rayons X.** De plus au moins quatre points chauds émettant en X ont été résolus le long du jet. Ils représentent à peu près 5% de la luminosité totale en X de cet objet. Des observations précédentes dans le domaine radio (Tingay et al. 1998) ont permis d'identifier un jet radio s'étendant également à l'ouest du quasar. **Les jets radio et X sont similaires en forme, distribution d'intensité, et en structure angulaire jusqu'à à peu près 9 arcsec,** au-delà l'intensité en X décroît plus rapidement et le jet radio tourne abruptement vers le nord.

Ces observations de *Chandra* ont permis à Schwartz et al. (2000) d'éliminer l'origine des points chauds ("hot spots") émettant en X due à de l'émission synchrotron ou à un bremsstrahlung thermique (à moins qu'il n'y ait plusieurs composantes ou une géométrie très particulière). Ces points chauds seraient dus à de l'émission "synchrotron self-Compton" à l'instar des points chauds détectés dans 3C295 (Harris et al. 2000, voir §5.4).

### 4.3. PKS 0537-286

**PKS 0537-286** est un quasar Radio-Loud à **grand redshift ( $z=3.14$ ).** Le spectro-imageur *EPIC* à bord de *XMM-Newton* vient de permettre d'obtenir à ce jour le spectre avec le **plus fort rapport signal sur bruit d'un quasar à grand redshift** (Reeves et al. 2001b). L'observation montre que cet objet est extrêmement lumineux dans le domaine des rayons X ( $L_X=2 \times 10^{47}$  erg s<sup>-1</sup>). **Aucune détection d'absorption intrinsèque** à cet objet n'a été détectée, contrairement à ce qui avait été avancé auparavant dans ce même objet et dans d'autres quasars à grands redshifts. En effet, la loi de puissance s'étend jusqu'à 0.2 keV sans absorption. Une possibilité est que l'absorption est variable comme c'est le cas pour le "Warm Absorber" dans certains AGNs à faibles redshifts.

La grande sensibilité de *EPIC* permet **d'observer la raie du fer la plus "lointaine" à ce jour:**

<sup>8</sup>*EPIC*: European Photon Imaging Camera ([http://xmm.vilspa.esa.es/user/uhb/xmm\\_uhb.html](http://xmm.vilspa.esa.es/user/uhb/xmm_uhb.html)).

<sup>9</sup>Mkn 205 est un quasar Radio-Quiet (émet très peu en radio) situé à  $z=0.071$ . Cet objet a été jusqu'à présent très peu observé.  $L_X=2 \times 10^{44}$  ergs<sup>-1</sup>,  $L_{bol} \sim 5 \times 10^{45}$  ergs<sup>-1</sup>.

$E \sim 6.15 \text{ keV}$ ,  $EW^{10} = 33 \text{ eV}$  (dans le référentiel du quasar). Bien que l'énergie de la raie est cohérente avec un milieu neutre, le décalage apparent vers le rouge de la raie pourrait indiquer une origine provenant de la partie interne du disque d'accrétion du quasar, ou de l'interaction du rayonnement avec la matière tombant sur le trou noir. Ils ont également déterminé la valeur du continu réfléchi  $R = \Omega/2\pi = 0.25$  ce qui semble indiquer que le milieu réfléchissant sous-tend un angle solide inférieur à  $2\pi$  stéradians attendu dans la cas d'une accrétion sous forme de disque. De plus, la distribution spectrale en énergie (SED) est extrême lorsqu'elle est comparée à celle d'un quasar Radio-Loud. **La majorité de l'émission observée du PKS 0537-286 est émise dans le domaine des rayons X**, tandis que généralement dans les AGNs l'émission X constitue seulement 5% de la luminosité bolométrique (Elvis et al. 1994).

Une interprétation possible est que l'émission X soit principalement due à de l'émission Compton inverse associée à un **jet relativiste**. Deux composantes peuvent être observées dans cet objet: un composante semblable aux galaxies de Seyfert 1, responsable de la raie du fer et la composante dure provenant du jet qui diluerait considérablement la réflexion sur le disque et les raies. Un bon ajustement des données est d'ailleurs obtenu quand une composante semblable aux galaxies de Seyfert est 4-5 fois plus faible que la composante du jet.

#### 4.4. SDSSp J104433.04-012502.2

L'observation dans le domaine X des quasars à très grands redshifts doit révéler les conditions physiques dans le voisinage immédiat de leur trou noir central. Il y a eu quelques observations de quasars avec  $z \leq 2.5$ , mais jusqu'à présent, il a été seulement possible d'obtenir les spectres X de 4 quasars (Radio-Loud Blazars) avec  $z > 4$ .

SDSSp J104433.04-012502.2 a été découvert par le "Sloan Digital Sky Survey" (voir York et al. 2000) et est un quasar Radio-Quiet optiquement brillant. D'après une observation faite par Brandt et al. (2000) avec le satellite *XMM-Newton*, il est à l'heure actuelle **l'objet le plus distant détecté dans le domaine des rayons X ( $z=5.80$ )**. D'après la limite d'Eddington, cette objet semble contenir un **trou Noir Supermassif ( $\geq 1.6 \times 10^9 M_{\odot}$ ) formé à moins de  $10^9$  années du Big Bang**. Cet objet émet plus faiblement dans le domaine des rayons X comparé aux autres quasars sélectionnés optiquement ( $L[3.4-13.6 \text{ keV}] \sim 1.8 \times 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ ). La raison la plus probable de cette faible émission observée en X semble être due à une **forte absorption** ( $N_H \geq 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ ), comme cela a été observé dans les quasars appelés "Broad Absorption Line quasars". La recherche d'absorption décalée vers le bleu de CIV (UV) devrait permettre d'élucider l'origine de cette faible émission observée dans ce domaine, comme dans le cas des

quasars à faibles redshifts émettant faiblement en X qui subissent une forte absorption dans les X et qui montrent des caractéristiques en absorption dans l'UV significativement décalées vers le bleu.

## 5. Les Noyaux Actifs de Galaxies au centre des amas

### 5.1. L'amas de la Vierge et M87

**L'amas de la Vierge (Virgo) est un amas riche proche ( $z=0.0043$ ,  $\sim 17 \text{ Mpc}$ ) et irrégulier ( $\sim 2000$  galaxies de différent types)**. La plupart des galaxies elliptiques sont près de son centre, tandis que la majorité des galaxies spirales sont localisées vers l'extérieur de cet amas. La masse de ces galaxies ne représente qu'environ 5% de la masse "lumineuse" de l'amas. Entre les galaxies, il existe un milieu chaud appelé milieu intra-amas qui a une température de  $T \sim 10-100 \text{ MK}$ . Et ce gaz chaud représente à lui seul près de la majorité de la masse "lumineuse" de Virgo.

Cette galaxie possède une **galaxie "dominante" nommée M87**. Cette galaxie est **géante, active et elliptique**. M87 a été l'une des premières sources radios extragalactiques connues, de même que **son halo fut l'une des premières sources d'émission X extragalactiques identifiées**. La très grande sensibilité des instruments d'*EPIC (MOS et pn)* à bord de *XMM-Newton* a permis une analyse détaillée de la température radiale et de la distribution en abondance de 6 éléments. Les données ne révèlent aucune indication d'une structure multi-températures au-delà d'un rayon de 2 arcmin, contrairement à ce qui avait été déduit des données obtenues avec le satellite Einstein. Ceci contredit les modèles actuels de courant de refroidissement ("cooling flow") pour lesquels un milieu multi-températures est attendu à large rayon ainsi qu'un plus grand domaine de température pour la région interne. Pour la première fois, Böhringer et al. (2001), ont pu obtenir séparément les spectres X du noyau et du jet de M87 (figure 4 dans Böhringer et al 2001). Le halo en rayons X a une forme quasi-sphérique, excepté à deux endroits coïncidants avec les lobes radios internes. L'image obtenue par le télescope optique à bord de *XMM-Newton* ("Optical Monitor": OM) montre très distinctement plusieurs points chauds dans le jet dont l'un d'entre eux est plus brillant que le noyau. **Le spectre X du noyau et du jet semble être bien ajusté par un spectre en loi de puissance et ne montre pas de caractéristique d'émission thermique**. La distribution en température du halo de M87 déterminée d'après les données de *XMM-Newton* est en accord parfait avec les résultats obtenus par les satellites *ASCA* et *BeppoSax*.

Le profil en abondance peut être caractérisé par une décroissance avec le rayon (au-delà de 1.5 arcmin), excepté pour l'oxygène qui est presque constant. L'un des résultats les plus intéressants est la **diminution très importante de l'abondance vers le centre à l'intérieur d'un rayon 1-1.5 arcmin, qui coïncide avec la forte décroissance du profil en température dans la même région**. Ce comporte-

<sup>10</sup>Cette émission de la raie du fer est considérablement plus faible que celle observée dans les galaxies de Seyfert 1 ( $\langle EW \rangle \sim 150 \text{ eV}$ ) et que dans certains quasars Radio-Loud.

ment en abondance est probablement dû à du “resonant scattering” ( $N_e \sim 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ ). La décroissance en abondance dans les régions externes semble proportionnelle à la masse de l’élément. Ceci peut être expliqué par la contribution d’une distribution homogène de Supernovae de type II qui sont des sources principales d’oxygène et de Supernovae de type Ia produisant principalement les éléments lourds localisés dans le centre du halo de M87.

Les **deux lobes X** ont été étudiés en détails par Belsole et al. (2001). Leurs résultats montrent **une différence en température de ces lobes par rapport à la matière diffuse environnante** ( $T_{lobe} < T_{milieu}$ ), de plus ils ont mis en évidence un **non-alignement des composantes X et radio** dans cet objet. Le spectre X de ces lobes montre des raies proéminentes (complexe du Fe-L), ce qui semble **éliminer une forte composante non-thermique**. On note l’absence des raies Fe- $K_\alpha$  dans les lobes tandis qu’à une distance similaire du centre la raie Fe- $K_\alpha$  est clairement détectée dans le milieu ambiant.

De même dans l’amas de la Vierge, une étude faite par Finoguenov & Jones (2000) de la **galaxie elliptique M 84** d’après les données obtenues par *Chandra* montre **l’interaction entre lobes radios et le milieu diffus X**. L’expansion des lobes radio semble avoir créée des cavités dans l’émission X-mous qui sont entourées par des coquilles de matière plus denses. De plus, les données semblent suggérer que le centre de **M 84 abrite un noyau actif** qui serait responsable du chauffage du gaz chaud diffus observé dans les X-durs (<10 kpc).

## 5.2. L’amas de Persée et NGC 1275

Persée<sup>11</sup> ( $z=0.0183$ ,  $D \sim 100 \text{ Mpc}$ ) est **l’un des amas les plus brillants dans le domaine des rayons X et possède un important courant de refroidissement en son centre (“cooling flow”) ainsi qu’une galaxie active NGC 1275**.

Cet amas a été observé avec *Chandra* par Fabian et al. (2000). La résolution angulaire de *Chandra* (0.5”) permet de pouvoir observer en détail chacune des composantes de l’objet. Fabian et al. n’ont observé aucun gradient en température, excepté en ce qui concerne le noyau et une région d’émission d’X-durs. L’image *Chandra* de l’amas de Persée montre nettement **deux zones peu brillantes associées aux lobes radios internes** de 3C84, ainsi qu’une autre plus large située au nord-ouest qui avait déjà été mise en évidence par le satellite *Einstein* (fig. 7). Ces régions semblent être entourées par des bords (“rims”) brillants. L’analyse de l’image couleur (voir la figure 3 dans Fabian et al. 2000), montre que le noyau de NGC1275 (au centre de l’image 7) apparaît légèrement étendu et émet dans les X-durs. **Les cavités ne sont pas dues à de l’absorption. Aucune caractéristique de choc n’est observée** (comme par exemple un fort gradient de température) **contrairement à la prédiction**

**faite par Heinz et al. (1998) dans le cas où les cavités s’étendraient de façon supersonique.**

Des cartes très précises en température, colonne densité, pression, et temps de refroidissement ont pu être réalisées pour cet objet (figures 5 et 6 dans Fabian et al. 2000) et ont permis notamment de mettre en évidence que le temps de refroidissement est inférieur à 6 Gyr sur toute la région ( $\sim 5.4' \times 25''$ ) et est inférieure à 1 Gyr pour la région la plus centrale. Le gaz semble être une part d’un courant de refroidissement. De plus l’émission la plus brillante est due à un gaz ayant une température de l’ordre de 2.7 keV ce qui est deux fois plus faible que la température du gaz externe ( $T \sim 6.5 \text{ keV}$ ).

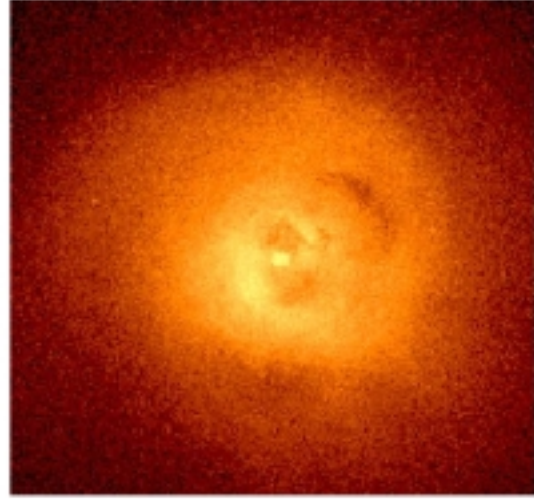


Fig. 7.— Image de la région centrale de Persée centrée sur NGC 1275 obtenue par Fabian et al. (2000) avec le satellite *Chandra* ( $6.5' \times 6.5'$ ) [0.5-7 keV]. La taille du pixel est de 1”. Le nord se trouve en haut et l’est sur la gauche.

## 5.3. A780 et Hydra A

**A780<sup>12</sup>** est un amas de galaxies pauvre ( $z \approx 0.052$ ,  $D=217 \text{ Mpc}$ ). Sambruna et al. (2000), ont pu mettre en évidence grâce au satellite *Chandra* que **la galaxie radio de type FRI Hydra A possède en son centre un noyau actif de faible luminosité<sup>13</sup>**. En effet, pour la **première fois<sup>14</sup> dans cet objet, une source ponctuelle a été détectée à des énergies supérieures à 2 keV superposée au coeur radio compacte (fig. 8), enfouie dans une émission thermique ( $\sim 1 \text{ keV}$ ) diffuse**. Le spectre de la source ponctuelle est bien ajusté par une loi de puissance fortement absorbée ( $N_H \sim 3.10^{22} \text{ cm}^{-2}$ ,  $\Gamma=1.7$ ). La luminosité intrinsèque entre 2 et 10 keV est d’environ  $1.3.10^{42} \text{ erg.s}^{-1}$ . Ces résultats permettent d’obtenir

<sup>12</sup>  $L_X(0.5-4.5) = 2.2 \times 10^{44} \text{ erg.s}^{-1}$  et  $\langle T \rangle \sim 4 \text{ keV}$ , un courant de refroidissement (“cooling flow”) est présent.

<sup>13</sup> “Low-luminosity active galactic nuclei” (LLAGN).

<sup>14</sup> grâce à la très bonne résolution angulaire du satellite *Chandra* (0.5”).

<sup>11</sup> Perseus, A426.



une forte évidence qu'un noyau actif est présent dans la région centrale de Hydra A. L'absorption X du noyau de Hydra A est 10 fois plus importante que l'extinction (optique-UV) de l'émission nébulaire. Cela suggérerait que l'absorbant X est très proche du trou noir. Un candidat possible est le tore moléculaire (échelle du parsec) introduit dans le cadre des modèles d'unification (Urry & Padovani 1995). En effet, les observations radios et optiques indiquent que Hydra A est vu par le côté ("edge-on") de telle façon que le tore dissimule la partie centrale de Hydra A. Leurs résultats semblent donc **confirmer les schémas d'unification actuels pour les sources Radio-Loups, en particulier la présence d'un tore moléculaire dans les galaxies de type FRI.**

**Des corrélations spatiales entre les émissions X, optique et radio sont présentes en deçà de 20 kpc** (fig. 2 dans McNamara et al. 2000).

D'après une estimation indirecte de la masse du trou noir ( $\sim 4.10^9 M_{\odot}$ ) d'après Magorrian et al. (1998), Sambruna et al. (2000) ont pu estimer que le taux d'accrétion est faible, suggérant que le flux est dominé par l'advection (ADAF<sup>15</sup>). L'observation de cet objet par le satellite *XMM-Newton* permettra, grâce à sa très grande sensibilité, l'étude détaillée des propriétés X du noyau, et permettra de déterminer si une raie du fer  $K_{\alpha}$  est présente entre 6.4 et 7 keV. L'énergie et le profil de la raie devraient permettre de pouvoir déterminer s'il s'agit d'un disque d'accrétion du type trouvé dans les galaxies de Seyfert ou alors d'un disque dominé par l'advection (ADAF).

Aucune émission de rayonnement X n'est détectée ni dans les jets ni dans les lobes, au contraire **les structures radios étendues semblent occuper des régions relativement déficientes en photons X** ce qui est opposé à ce qui a été récemment détecté avec *Chandra* dans la galaxie FRII 3C295 (cf. §5.4). Les observations obtenues par *Chandra* de Hydra A montrent des zones peu lumineuses en X d'environ 25-35 kpc de diamètre et qui coïncident avec les lobes radios de Hydra A comme dans le cas de l'amas de Persée (cf. §5.2), il n'y a **aucune indication que le gaz entourant les lobes radios soit chauffé par des chocs.** McNamara et al. (2000) suggèrent que **les lobes radios s'étendent à des vitesses subsoniques créant ainsi des cavités.**

Les données requièrent une composante thermique pour les photons X-mous dont l'origine pourrait être due soit au halo de la galaxie hôte soit à un courant de refroidissement ("cooling flow").

#### 5.4. 3C295

**3C295** est l'un des amas de galaxies les plus distants ( $z \simeq 0.461$ ,  $D = 2.57$  Gpc). La source d'émission radio localisée au centre de cet amas a été identifiée comme provenant d'une **galaxie elliptique géante.** **Chandra a découvert que cette galaxie centrale est une source X intense et complexe.** *Chandra*

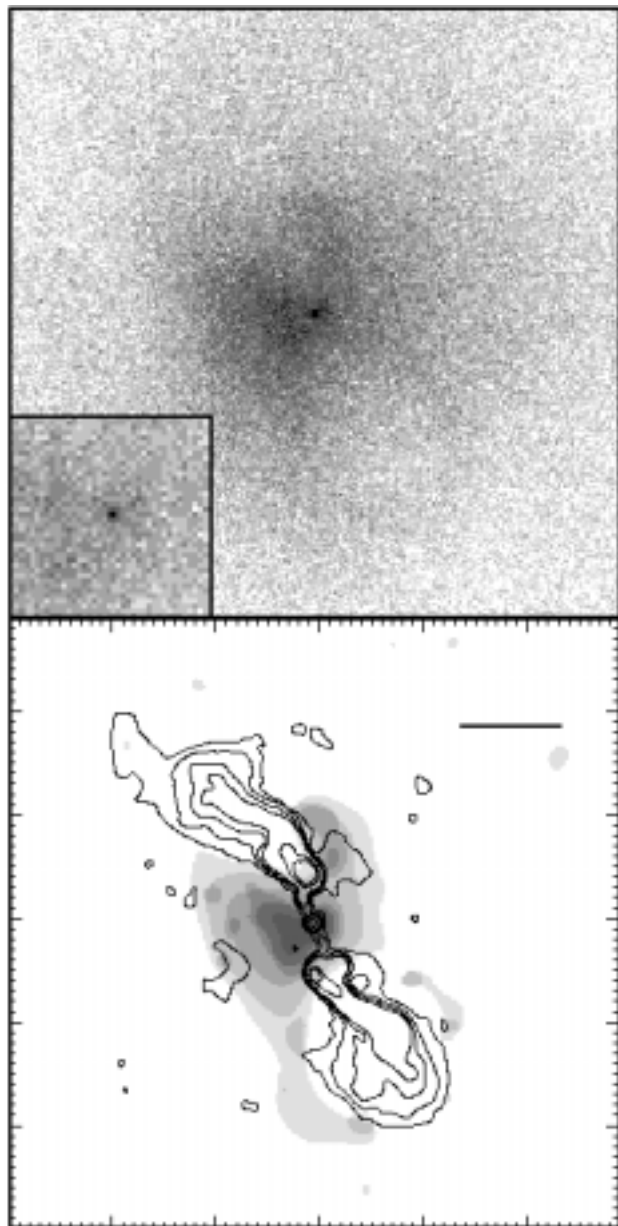


Fig. 8.— **Hydra A** ( $118'' \times 118''$ ), McNamara et al. (2000). *Image du haut*: Image dans le domaine des rayons X (*Chandra*). *Image du bas*: même image dans le domaine des rayons X après un filtrage par ondelettes superposée à l'image radio (6 cm VLA).

permet de séparer l'émission X du gaz de l'amas, du coeur et des points chauds ("hot spots"). Harris et al. (2000) ont pu pour la première fois étudier séparément l'émission X (images et spectres) provenant de différentes régions. **La région centrale de l'amas montre un coeur émettant en X ainsi que deux régions externes alignées avec les points chauds radios** (cf. figure 9). L'origine la plus probable des points chauds émettant en X est l'émission "synchrotron self-Compton" (voir Harris et al. 2000).

<sup>15</sup>ADAF: Advection-dominated Accretion Flow.

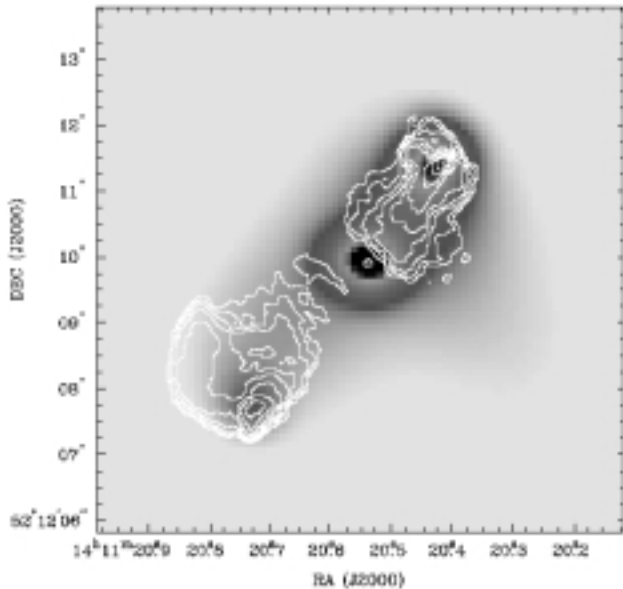


Fig. 9.— 3C295 ( $z=0.461$ ): *Chandra* + 20 cm MERLIN, Harris et al. (2000).

## 6. Perspectives

Pour la première fois, grâce aux caractéristiques instrumentales (sensibilité, résolutions angulaire et spectrale) de la nouvelle génération de satellite X, *Chandra* & *XMM-Newton*, des images et des spectres de qualité sans précédent sont obtenus dans le domaine des rayons X pour les objets extragalactiques comme les AGNs.

Notamment, une étude spectroscopique fine (raies étroites en absorption et en émission) de ces objets est possible grâce à la très grande résolution spectrale des spectromètres à bord de ces deux satellites. Ceci permet d'appliquer de puissants diagnostics de plasmas comme ceux basés sur les raies des ions héliumoides qui donnent une estimation précise de la densité, de la température, ainsi que la mise en évidence des processus d'ionisation qui dominent dans les plasmas chauds ("Warm absorber") des AGNs (Porquet & Dubau 2000). De même, il est possible d'obtenir des informations sur la dynamique (décalage spectrale des raies) du plasma chaud en accréation autour du trou noir central.

La sensibilité de *XMM-Newton* permet de découvrir et d'étudier un très grand nombre (étude statistique) d'AGNs à très grands redshifts et/ou très fortement absorbés, et permet par exemple de déterminer la ou les régions responsables de l'émission de la raie  $K_{\alpha}$  du fer (vers 6.4-7 keV).

Quant au satellite *Chandra*, sa résolution angulaire ( $\sim 0.5''$ ) permet d'étudier les différentes composantes de ces objets: le noyau, le milieu chaud environnant ("Warm Absorber"), les jets, ainsi que la composante chaude du milieu interstellaire et des objets ponctuelles (binaires X, candidats trou noir, restes de Supernovae,...) de la galaxie hôte (e.g. Centaurus A, Kraft et al. 2000).

Cette nouvelle ère dans le domaine des rayons X devrait nous permettre de fortement contraindre les paramètres physiques, géométriques, dynamiques, ainsi que la localisation de la matière accrétante autour des trous noirs supermassifs, dans les différents types d'AGNs (Seyfert, quasars Radio-Louds et Radio-Quiets, noyaux actifs dans les amas de galaxies), en relation avec les autres composantes ("Broad line Region", "Narrow Line Region, tore moléculaire, jets...") observées dans les autres domaines de longueurs d'onde (radio, optique, UV, etc...). De même, ces observations vont permettre de confirmer ou infirmer les schémas d'unification actuellement proposés pour les différents types de galaxies "actives".

Ceci n'est que le début d'une nouvelle ère de la compréhension de notre Univers grâce au domaine des rayons X (*AstroE-2*<sup>16</sup>, *Constellation-X*<sup>17</sup>, *XEUS*<sup>18</sup>, ...) qui s'inscrit dans un objectif de compréhension de l'évolution des galaxies qui pour la plupart semblent contenir un trou noir supermassif en leur centre (e.g. le centre de notre propre Galaxie, M31....).

## REFERENCES

- Antonucci R.R.J. & Miller J.S., 1985, *ApJ*, 297, 621  
 Belsole E. et al. 2001, *A&A*, 365, L188  
 Böhringer H. et al., 2001, *A&A*, 365, L181  
 Brandt W.N. et al. 2000, *AJ*, sous presse (astro-ph/0010328)  
 Branduardi-Raymont et al. 2000, *A&A*, 365, L140  
 Crenshaw D.M. & Kraemer S.B., 1999, *ApJ*, 521, 572  
 Elvis M., et al. 1994, *ApJS*, 95, 1  
 Fabian A.C., Sanders J.S., Ettori S. et al., 2000, *MNRAS*, 318, L65  
 Finoguenov A., Jones C. 2000, *ApJ Letters*, sous presse (astro-ph/0010450)  
 Gabriel A.H. & Jordan C., 1969, *MNRAS*, 145, 241  
 Harris D.E. et al. 2000, *ApJ*, 530, L84  
 Heinz, S., Reynolds, C.S. & Begelman, M.C. 1998, *ApJ*, 501, 126  
 Kaastra J.S., Mewe R., Liedahl D.A., Komossa S., Brinkman A.C. 2000, *A&A*, 354, L83  
 Kaspi S., Brandt W.N., Netzer H., Sambruna R., Chartas G., et al. 2000, *ApJ*, 535, L17  
 Kraft R.P. et al., 2000, *ApJL*, 531, L9

<sup>16</sup> *Astro-E2* est un satellite japonais et américain (lancement prévu en 2003-2004) qui permettra d'observer dans le domaine X de 0.4 à 700 keV, il s'agira du premier microcalorimètre à bord d'une mission spatiale.

<sup>17</sup> *Constellation-X* est une mission de la NASA dont le but est l'étude de la structure et de l'évolution de l'Univers (<http://constellation.gsfc.nasa.gov/>).

<sup>18</sup> *XEUS*: The X-ray Evolving Universe Spectroscopy mission est un projet successeur de *XMM-Newton* (ESA), qui aura une sensibilité comparable aux observatoires NGST, ALMA and FIRST (<http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/XEUS/>).

- Kukula M.J., Ghosh T., Pedlar A., Schilizzi R.T., Miley G.K. et al., 1993, MNRAS, 264, 893
- Liedahl D.A., 1999, in X-rays Spectroscopy in Astrophysics, EADN School proceeding, 1997, J.A. van Paradijs, J.A.M Bleeker (eds.), p.189
- Magorrian J. et al. 1998, AJ, 115, 2285
- Matt G., Fabian A., Ross R.R., 1993, MNRAS, 262, 179
- McNamara B.R., Wise M., Nulsen P.E.J., David L.P., Sarazin C.L. et al. 2000, ApJL, 534, L135
- Mewe R., Porquet D., Raassen A.J.J., Kaastra J., Dubau J., 2001, en préparation
- Mouchet M., Abrassart A., Porquet D., Dumont A.-M., Collin S., 2000, dans "AGN in their Cosmic Environment", Eds. B. Rocca-Volmerange & H. Sol, EDPS Conf. Series in Astron. & Astrophysics, sous presse (astro-ph/0003168)
- Nandra K., George I.M., Mushotzky R.F., Turner, T.J., Yaqoob, T. 1997, ApJL, 488, L91
- Ogle P.M., Marshall H.L., Lee J.C., Canizares C.R., 2000, ApJL, sous presse (astro-ph/0010314)
- Pogge R.W. & de Robertis M.M., 1993, ApJ, 404, 563
- Porquet D. 1998, *XMM et les Noyaux Actifs de Galaxies*, dans "Atelier 1998 du GdR Accretion, Disques et Jets: L'apport de XMM et Integral à la physique de l'accrétion et des jets", Ed. J.-M. Hameury, p65
- Porquet D., Dumont A.-M., Collin S., Mouchet M., 1999, A&A, 341, 58
- Porquet D. & Dubau J. 2000, A&AS, 143, 495
- Reeves J.N. & Turner M.J. L., 2000, MNRAS, 316, 234
- Reeves J.N, Turner M.J.L, Pounds K.A., O'Brien P.T., Boller Th., Ferrando P., Kendziorra E., Vercellone S., 2001a, A&A, 365, L134
- Reeves J.N., Turner M.J.L., Bennie P.J., Pounds K.A., Short A., O'Brien P.T., Boller Th., Kuster M., Tiengo A., 2001b, A&A, 365, L116
- Sako M., Kahn S.M., Paerels F., Liedahl D.A., 2000, ApJ, 543, 115
- Sambruna R.M., Chartas G., Eracleous M., Mushotzky R.F., Nousek J.A., 2000, ApJL, 532, L91
- Schwartz D.A. et al. 2000, ApJL, 540, L69
- Tingay S.J. et al. 1998, ApJ, 497, 594
- Urry C.M. & Padovani P., 1995, PASP, 107, 803
- Yaqoob T., George I.M., Nandra K., Turner T.J., Serlemitsos P.J., Mushotzky R.F., 2000, ApJ, sous presse (astro-ph/0008471)
- York D.G. et al., 2000, AJ, 120, 1579