

Observations et théorie des objets compacts: des binaires X aux Noyaux Actifs de Galaxies

Pierre-Olivier Petrucci
Laboratoire d'AstrOphysique de Grenoble

Plan

Observations

★ Les Noyaux Actifs de Galaxies (NAG):

- caractéristiques générales, zoologie
- paradigme du trou noir super massif et modèle d'unification
- Exemple 1: les Blazars
- Exemple 2: les Seyferts

★ Binaires X et Microquasars

- caractéristiques générales
- états spectraux
- variabilité et cycle d'hystérésis

Théorie

- Les différents processus radiatifs
- Le modèle SSC (application aux BL Lacs)
- La couronne thermique (application aux Seyferts)

Observations

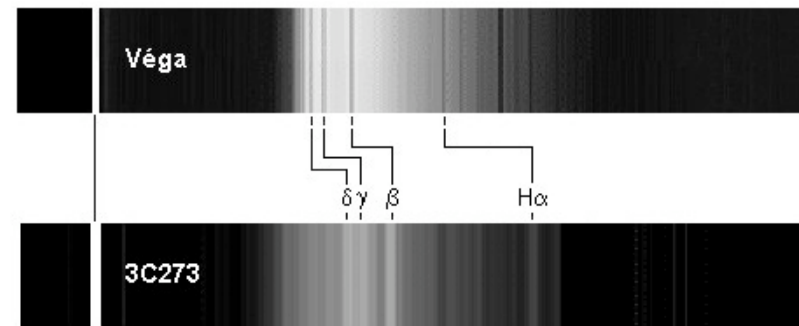
Des Premiers NAG...

Surveys radio (1950) → découverte de sources radio ponctuelles et intenses
(3rd Cambridge Catalogue 3Cxxx....)

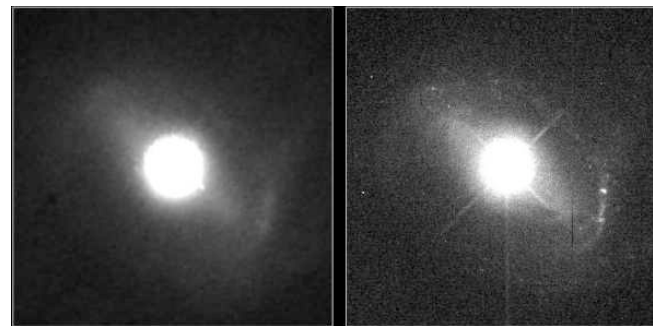
Raies d'émission inconnues → M. Schmidt reconnaît des raies de l'hydrogène très décalées vers le rouge

- ✓ distances cosmologiques
- ✓ luminosité énorme $\sim 10^{46}$ erg/s
(Voie Lactée $\sim 10^{44}$ erg/s)

QUAsi Stellar Radiosource = QUASAR



Identifiés maintenant comme le cœur
très actif de galaxies lointaines.

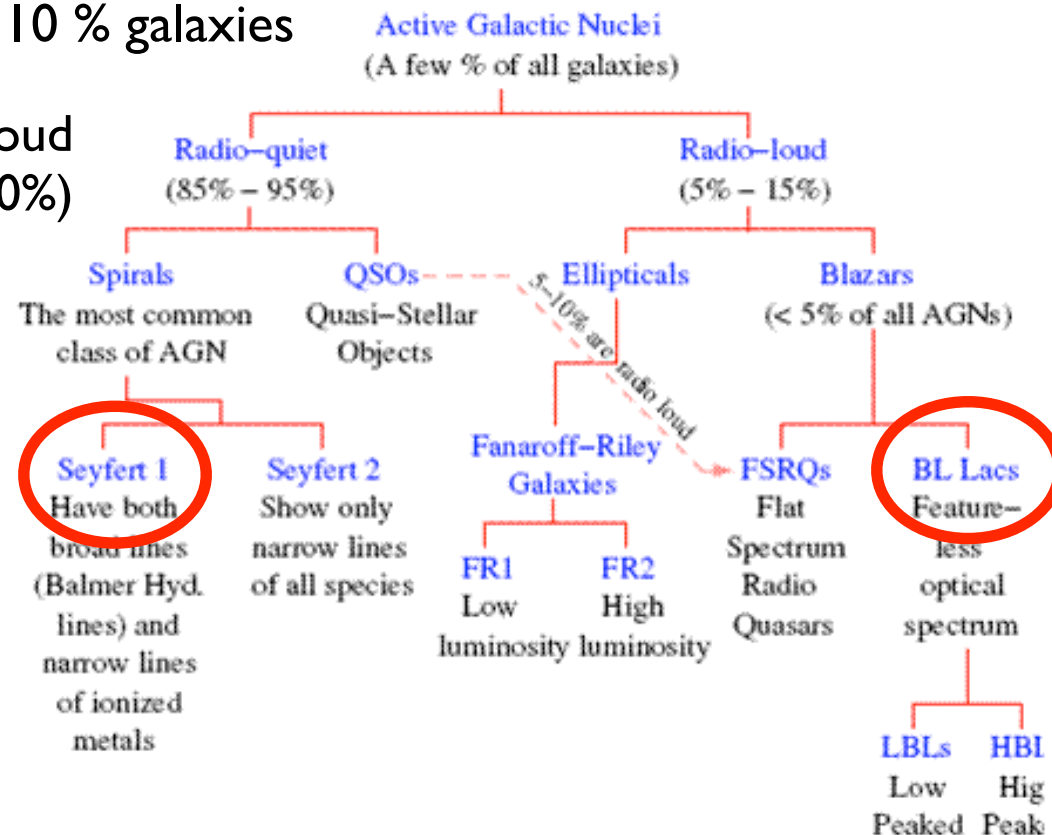


...A la zoologie actuelle!

AGNs ~ 10 % galaxies

Distinction fort (radio loud 10 %) faible (radio quiet 90%)
émetteur radio

Présence de raies
d'émission en optique-
UV



Paradigme du TN supermassif

Seule la dissipation de l'énergie gravitationnelle de matière sur un trou noir massif semble à même d'expliquer les puissances rayonnées

$$\Delta E_{acc}(erg/g) = \frac{GM}{2R} = \frac{R_G}{2R} c^2$$

avec $R_G = \frac{GM}{c^2} \simeq 10^{13} \frac{M}{10^8 M_\odot} \text{ cm}$

Alors que la fusion ($H \rightarrow He$)

$$\Delta E_{nuc}(erg/g) = 0.007 c^2$$

A.N.: Pour $M = 10^8 M_\odot$ et $\dot{M} = 1 M_\odot / an$

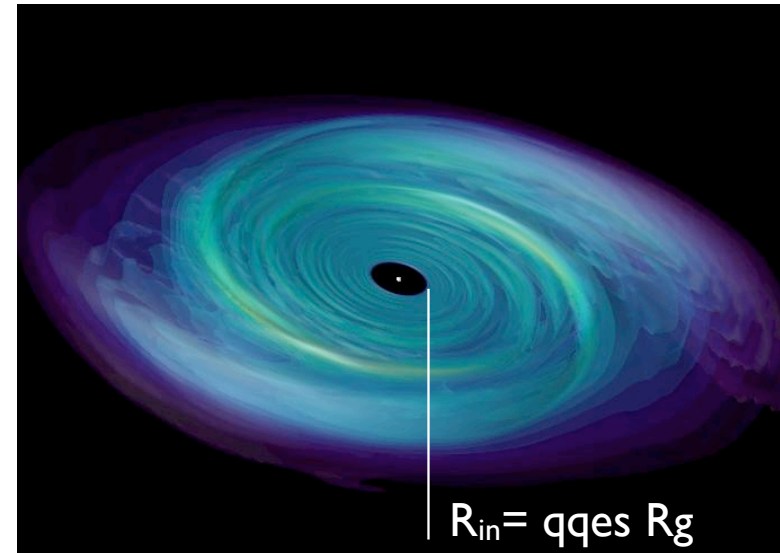
$$L_{acc} = \Delta E_{acc} \dot{M} \simeq 10^{46} \text{ erg.s}^{-1} \text{ pour } R = 6 R_G$$

Nombres Caractéristiques

- Masse trou noir: $M \sim 10^7 - 10^{10} M_{\odot}$
- Taille: $R_G \sim 0.1 - 100 \text{ u.a. } (10^{-5} - 10^{-2} \text{ pc})$
- Temps de variabilité: $T_G = R_G/c = 1000 M_8 \text{ sec } (20 \text{ min})$
- Luminosité caractéristique (équilibre pression radiation/force gravitationnelle): $L_{Edd} = \frac{4\pi G m_p c}{\sigma_T} M_{BH} = 10^{46} M_8 \text{ erg.s}^{-1}$
- Température de corps noir: $T_{eq} \simeq 5 \times 10^5 M_8^{-1/4} K$
(comparable étoile O-B)
- Champs magnétique équipartition: $B_{eq} \simeq 4 \times 10^4 M_8^{-1/2} G$
(tache solaire)

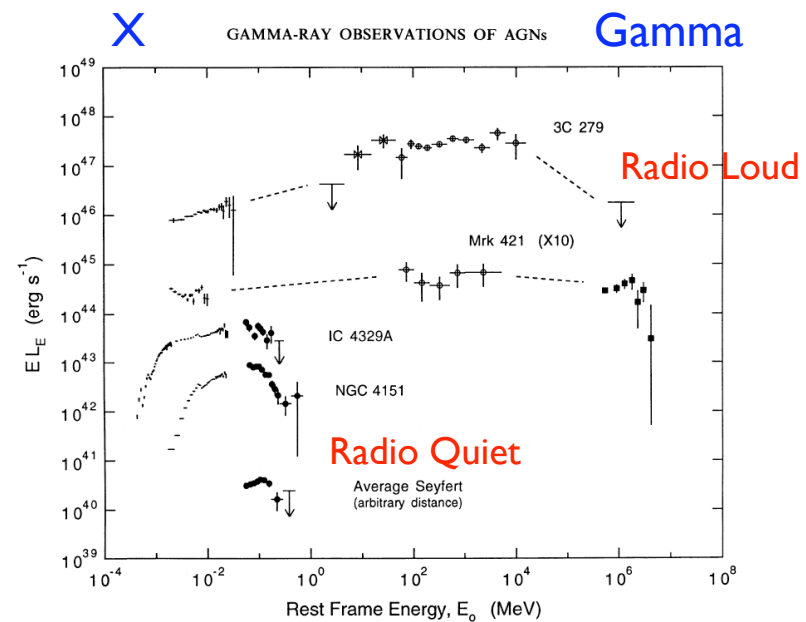
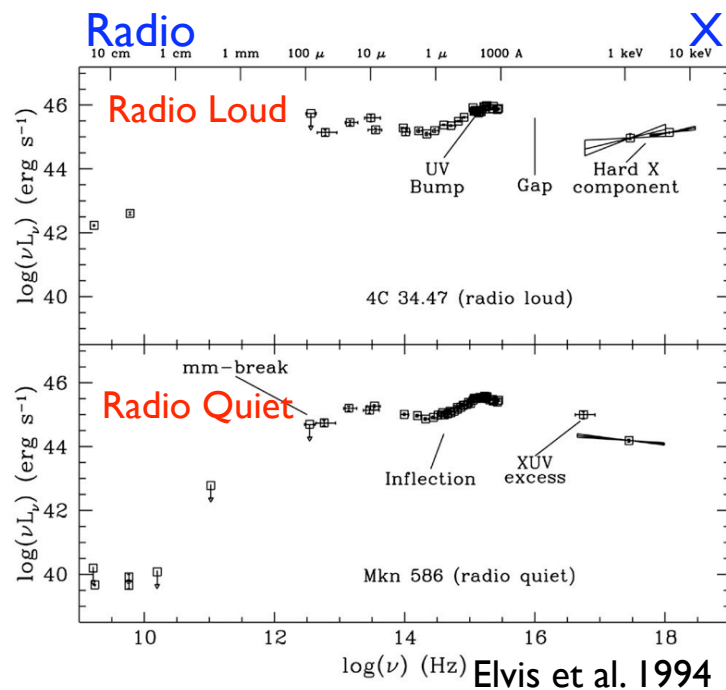
Disque d'Accrétion Standard

- Travaux de Shakura & Sunyaev et Pringle & Lynden-Bell (1973)
- Accrétion par viscosité turbulente (e.g. MRI Balbus & Hawley 1991)
- Viscosité cinématique $\nu = \alpha c_s h$
- Prédicatif :
 - Distribution température $T \propto r^{-3/4}$
 - spectre $F_\nu \propto \nu^{1/3}$



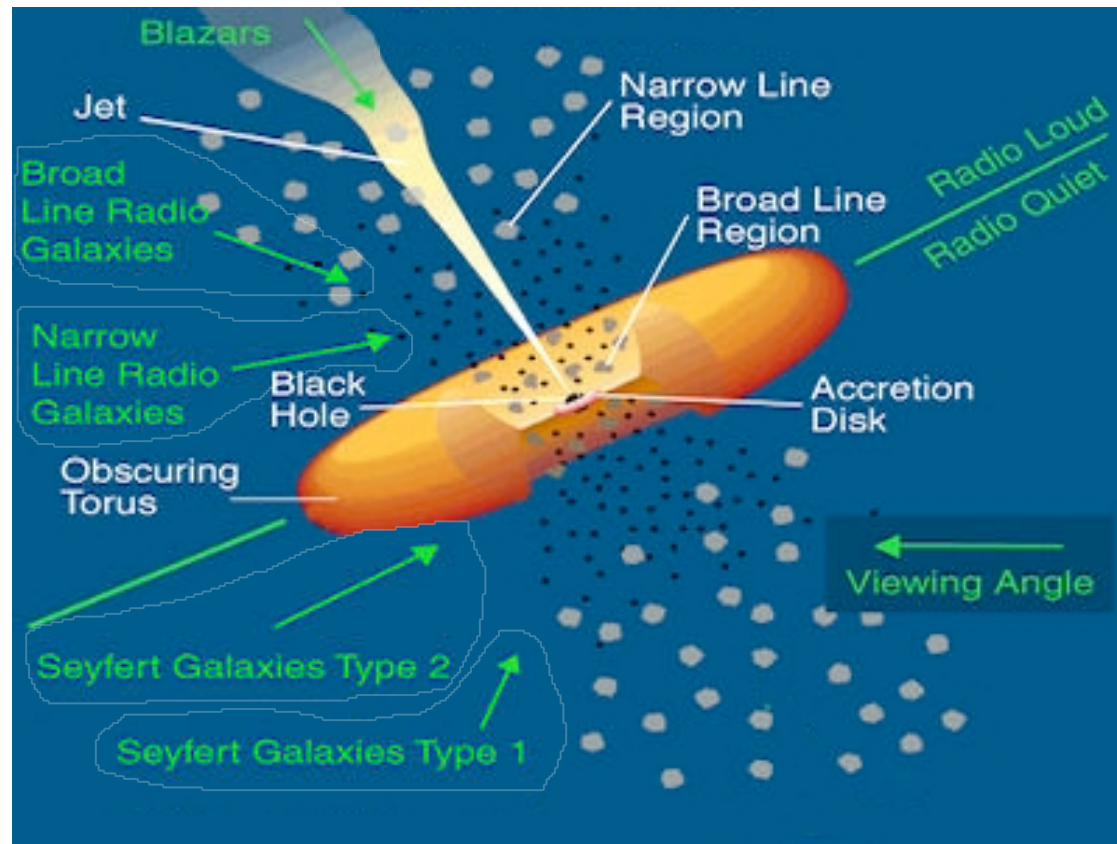
Mais n'explique pas les variabilités simultanées opt/UV/X, l'émission multi-longueur d'ondes, ni la formation des jets....

Emission Multi Longueur d'Ondes



Modèle d'Unification

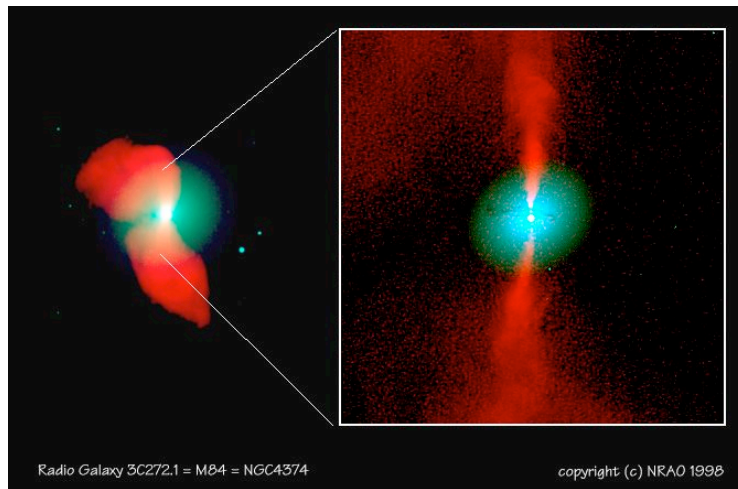
Type d'objet dépend de l'inclinaison par rapport à l'observateur
(Urry et Padovani 1995)



AGN Radio-Loud

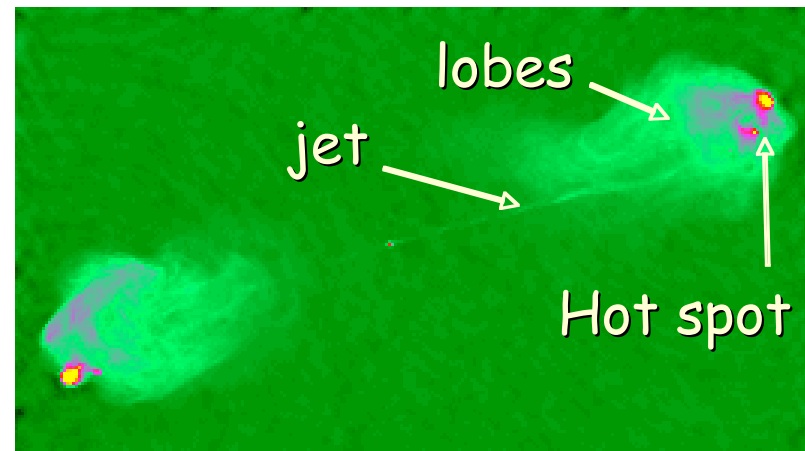
Présence de Jets

Images de grandes structures sous forme de jets, s'étendant parfois jusqu'au Mpc
(Fanaroff & Riley 1974)



FR I

- ▶ Peu puissantes ($L_{\text{rad}} < 10^{42} \text{ erg.s}^{-1}$)
- ▶ Plus brillants au cœur qu'en périphérie
- ▶ Peu collimatés
- ➡ accélération centrale?



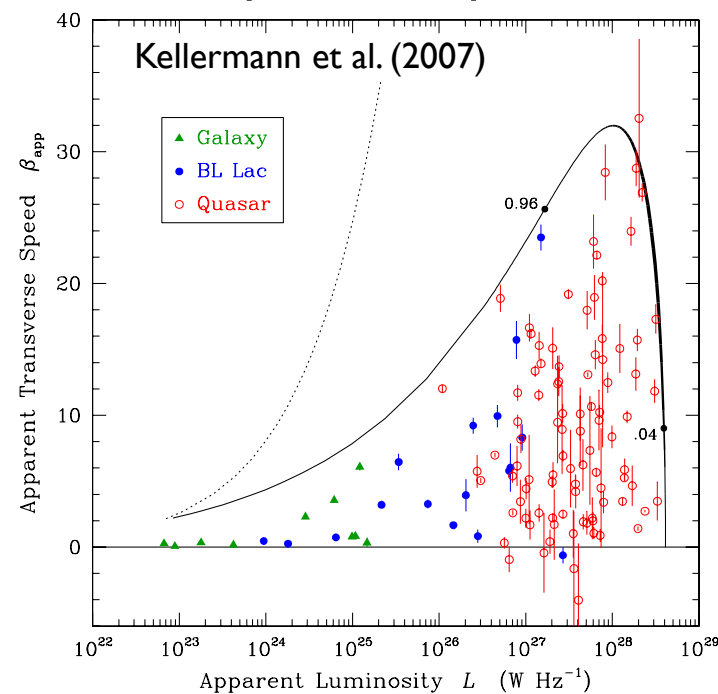
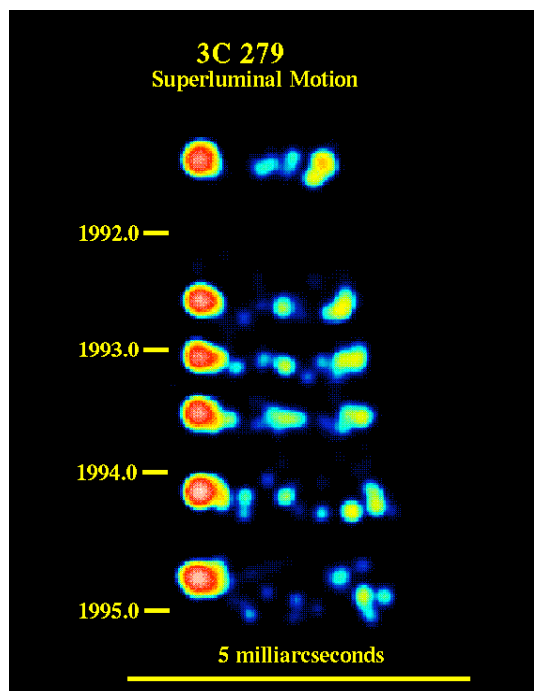
FR II

- ▶ Plus puissantes ($L_{\text{rad}} > 10^{42} \text{ erg.s}^{-1}$)
- ▶ Emission maximale à l'extrémité
- ▶ Très collimatés, peu dissipatifs
- ➡ accélération dans chocs terminaux?

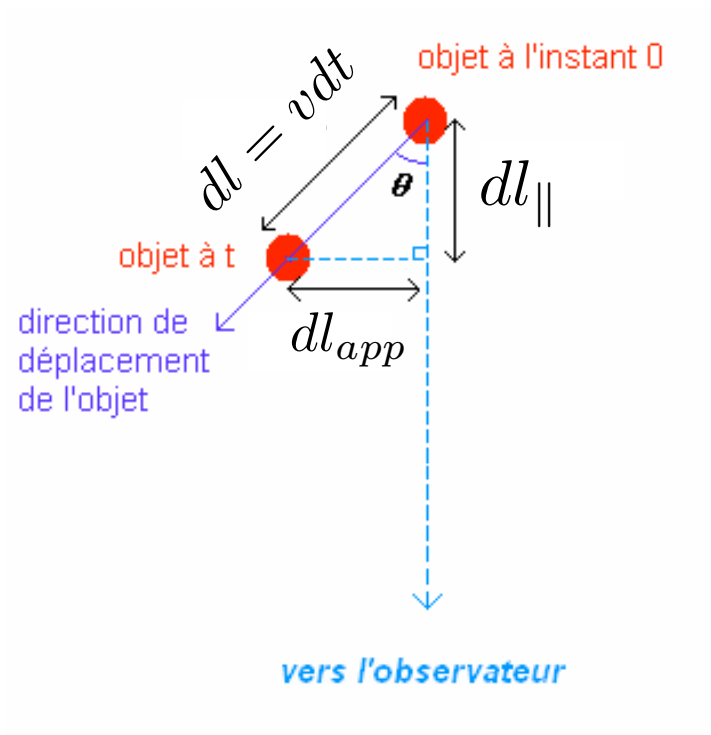
Jets relativistes

Les observations interférométriques radio (résolution angulaire < 1 mas i.e. résolution linéaire $d < \text{pc}$) permettent la vision directe de mouvements à l'échelle de l'année

Très généralement $V_{\text{app}} \sim 5$ à $10c$ i.e. mouvements superluminiques

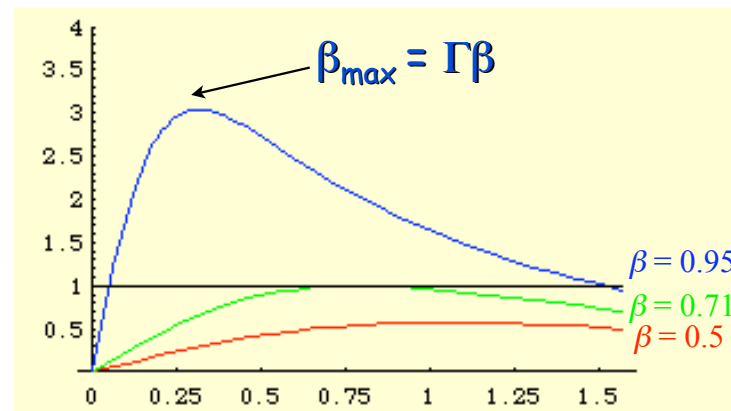


Mouvements superluminiques



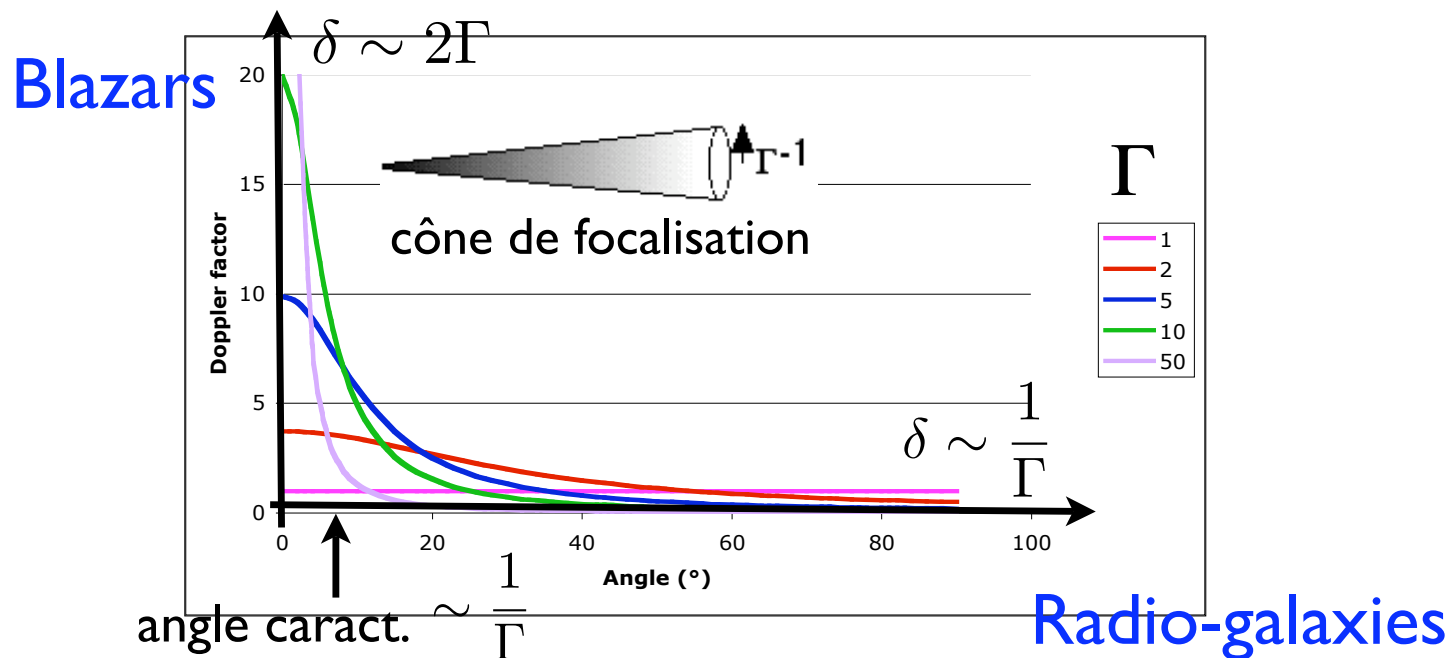
$$\begin{cases} dl_{||} = v dt \cos \theta \\ dl_{app} = v dt \sin \theta \\ dt_{app} = dt - \frac{dl_{||}}{c} = dt \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta \right) \end{cases}$$

$$\Rightarrow \beta_{app} = \frac{1}{c} \frac{dl_{app}}{dt_{app}} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}$$



Amplification Doppler

Facteur Doppler $\delta = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)}$ avec $\beta = \frac{v}{c}$ et $\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$



Amplification Doppler

Lois de transformation

Fréquence: $\nu_{obs} = \delta \cdot \nu_{em}$

Temps caractéristique: $T_{obs} = T_{em} / \delta$

Intensité spéc.: $I_{\nu,obs}(\nu_{obs}) = \delta^3 I_{\nu,em}(\nu_{em})$

Si spectre $I_{\nu} \propto \nu^{-\alpha}$

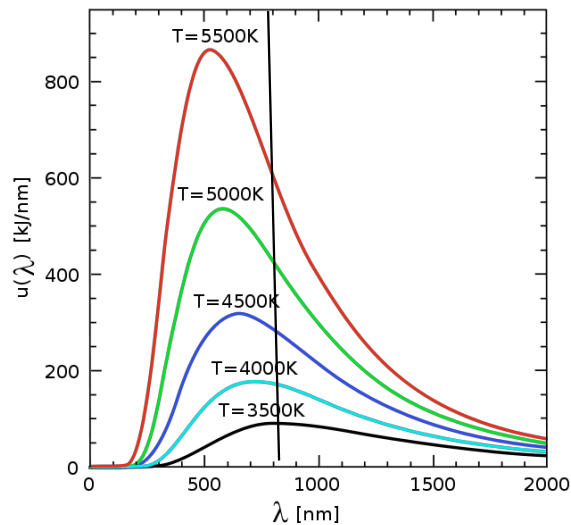
$$\hookrightarrow I_{\nu,obs}(\nu) = \delta^{3+\alpha} I_{\nu,em}(\nu)$$

Jets vus à petits angles (i.e. $\delta > 1$) seront brillants, rapidement variables et unilatéraux

$$\hookrightarrow F(\text{jet})/F(\text{contre-jet}) \simeq \Gamma^{6+2\alpha}$$

Température de Brillance

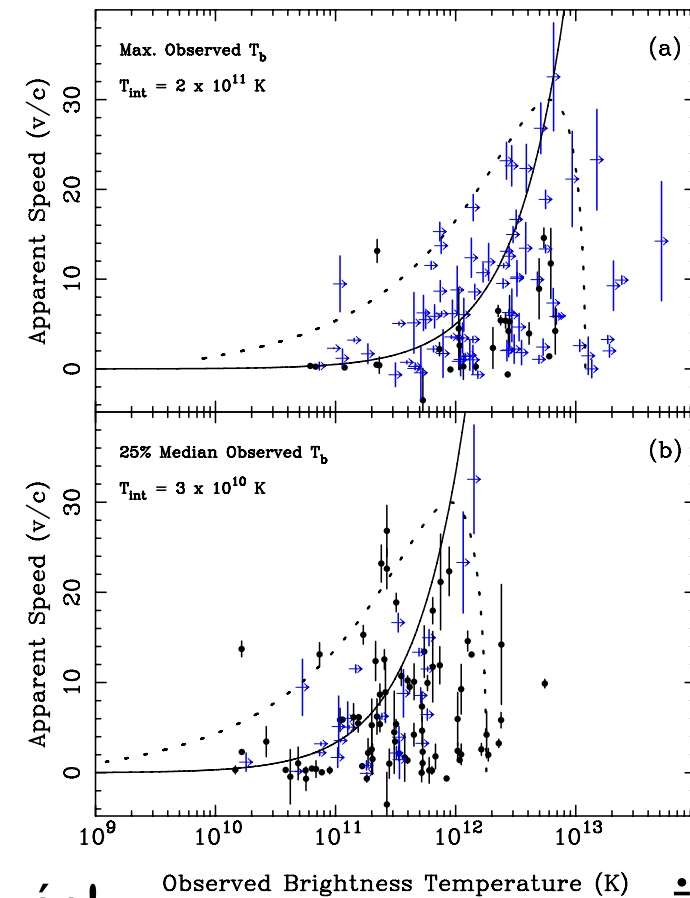
Planck's law $B_\nu(T) = \left(\frac{2h\nu^3}{c^2} \right) \frac{1}{\exp \frac{h\nu}{kT} - 1}$



T_b tel que $I_\nu^{sync} = B_\nu(T_b)$

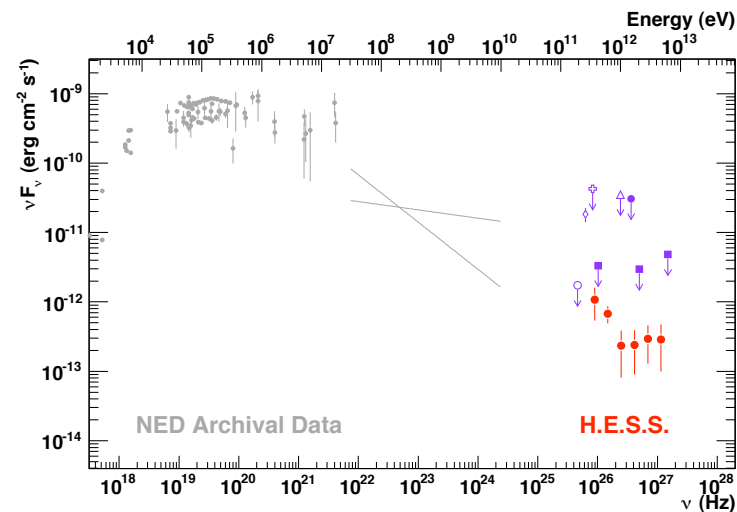
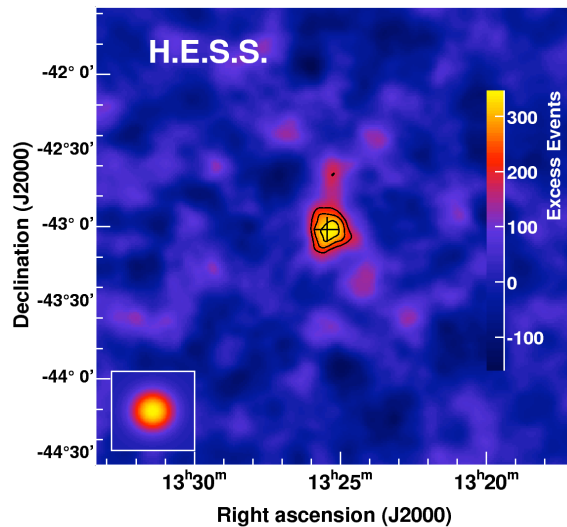
Température de brillance élevée!

Kellermann et al. (2007)



Détection UHE

- La majorité des AGNs observées par les télescopes Cerenkov sont des BL Lacs
- Observation également de radios galaxies (M87, CEN A)



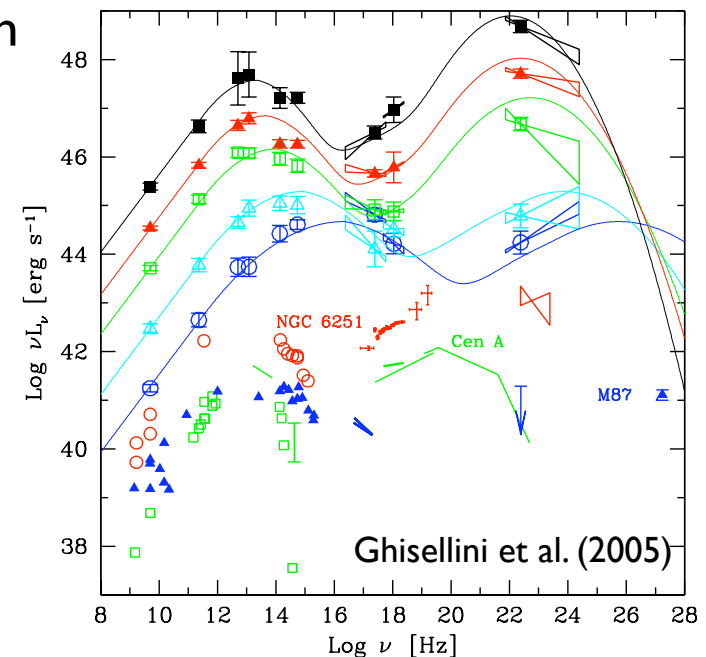
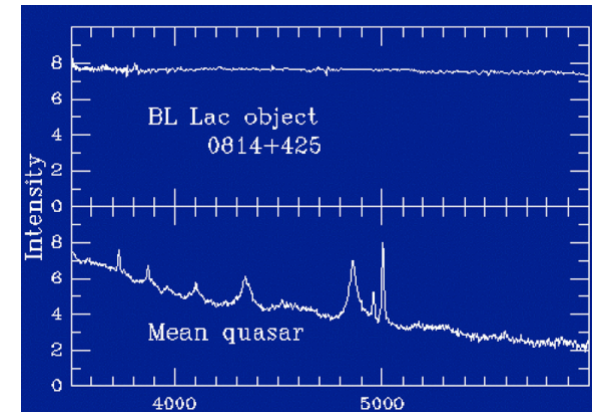
Aharonian et al. (2007)

Exemple: Les Blazars

- Peu ou pas de raie d'émission et de continuum UV intense (redshift et donc distance parfois mal connus)

- SED a deux bosses: bosse synchrotron et bosse CI

➔ Ce sont la majorité des NAGs à avoir été détectés en UHE (> 100 GeV) par les télescopes Cerenkov



Exemple: Les Blazars

- Variabilité extrêmement rapide ($\times 100$ en 1 jour)

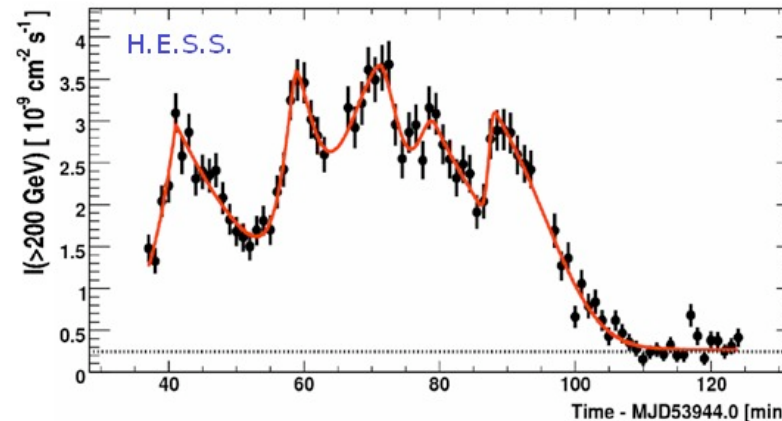
ex: PKS 2155-304 $T_{var} = 200$ sec

Condition minimaliste:

$$R_g < cT_{var}^{em} = cT_{var}^{obs} \cdot \delta$$

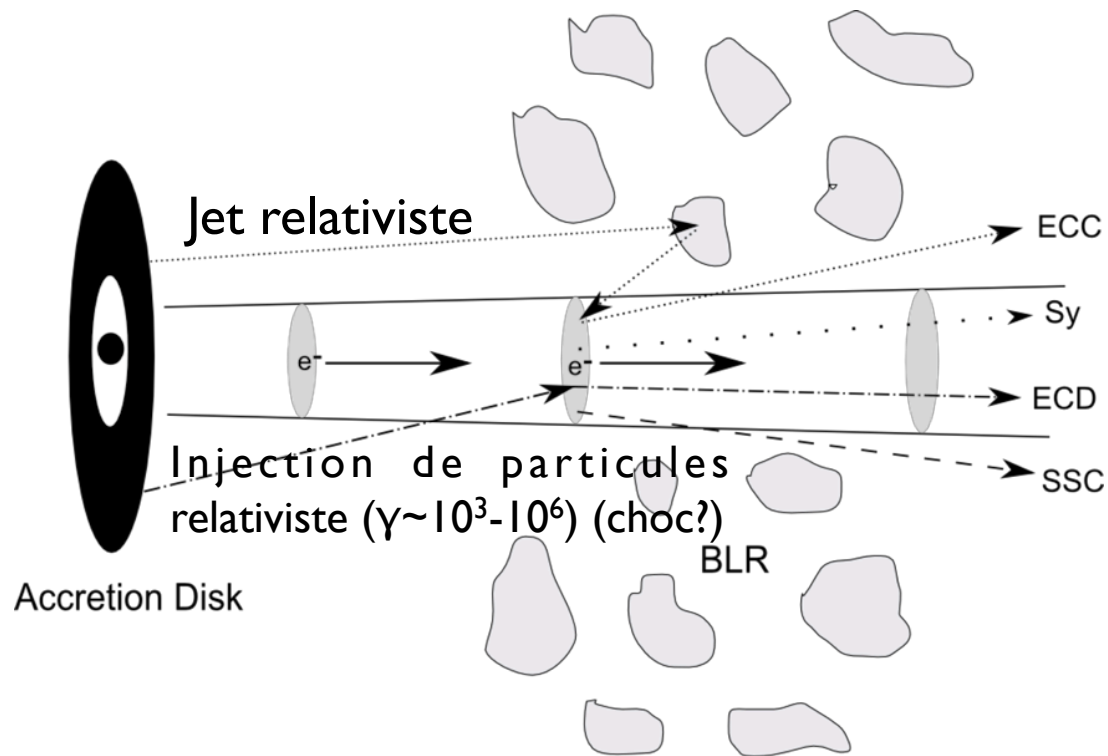
$$\rightarrow \frac{10^{13}}{cT_{var}^{obs}} \frac{M_{BH}}{10^8 M_{\odot}} < \delta$$

$$A.N. : \delta > 30 - 60$$



- Nécessite un jet relativiste à grand facteur de Lorentz Γ vu sous un petit angle

Exemple: Les Blazars

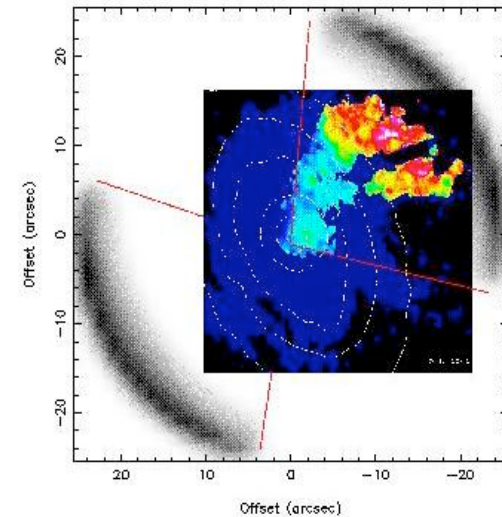
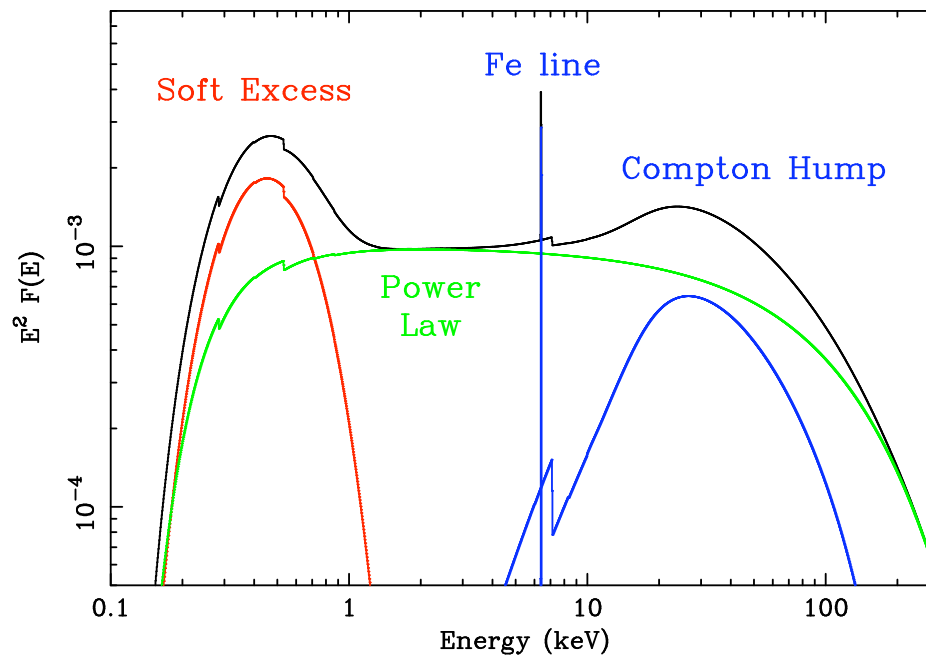


Photons de haute énergie produits par diffusion Compton sur les photons du disque-BLR/Sync/fond diffus cosmo.

AGN Radio-Quiet

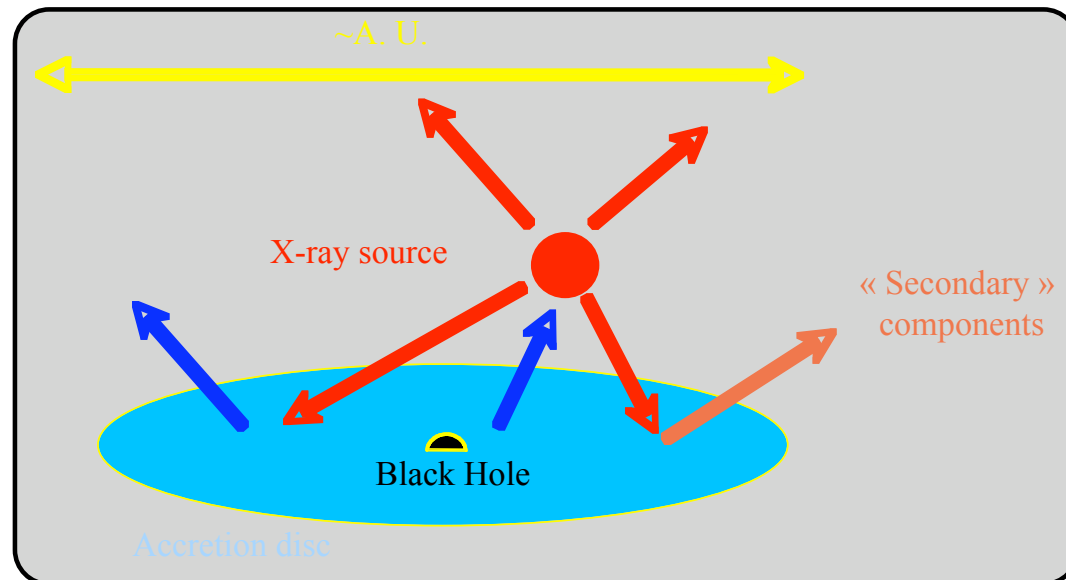
Emission X mais Absence de Jet

- Absence de jet puissants/collimaté
- Signatures de flots (jets avortés?)
- Spectre haute énergie limité aux X durs/γ mous



Flot de matière dans NGC 2992 (Veilleux et al. 2004)

Modèle Standard



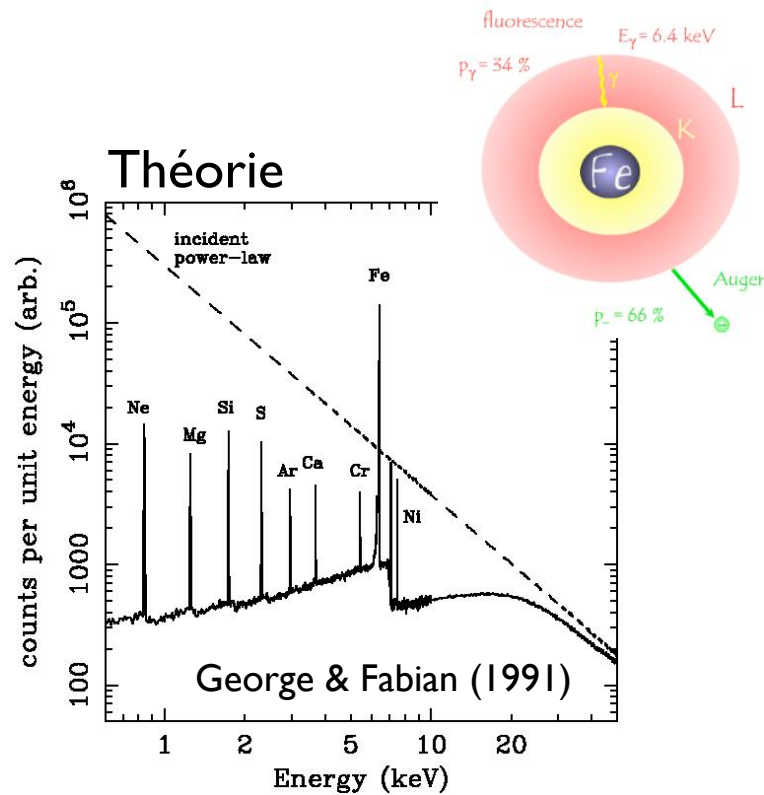
Suppose la présence de 2 phases, un plasma chaud (la couronne) et un plasma froid (le disque d'accrétion)

Equilibre radiatif entre les 2 phases

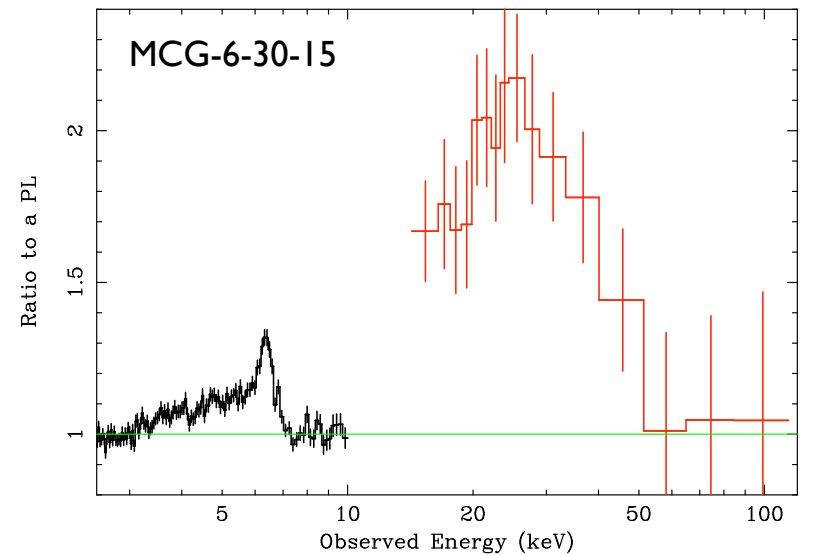
- les photons froids sont comptonisés par le plasma chaud
- les photons chauds illuminent et chauffent le disque

Une partie des photons réfléchis ($\sim 10\%$) produisent les composantes en réflexion

Composantes en Réflexion



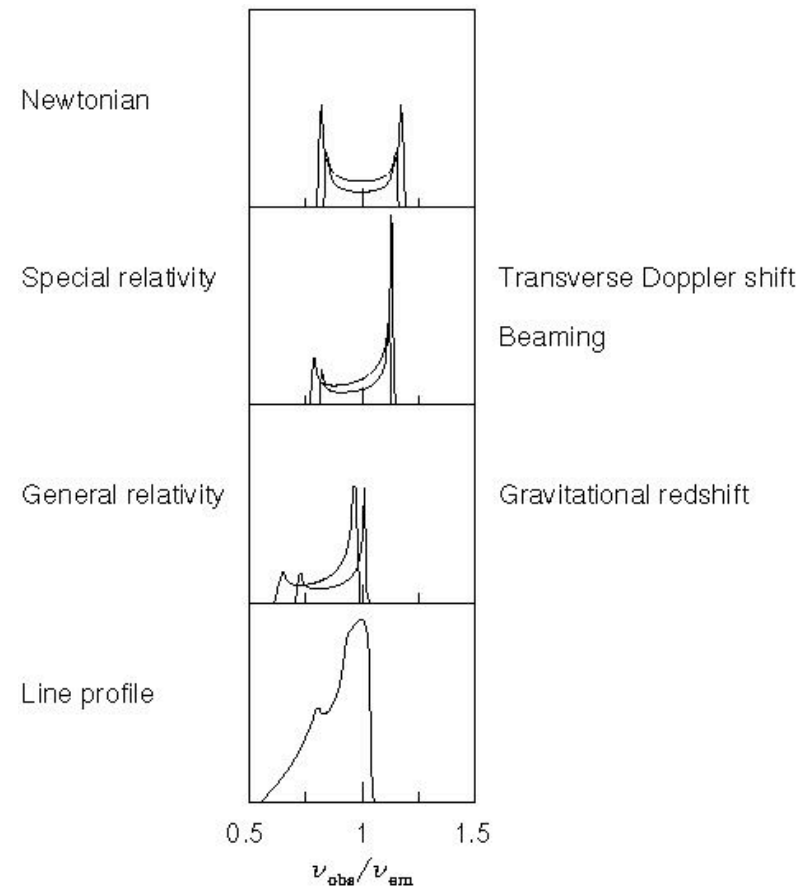
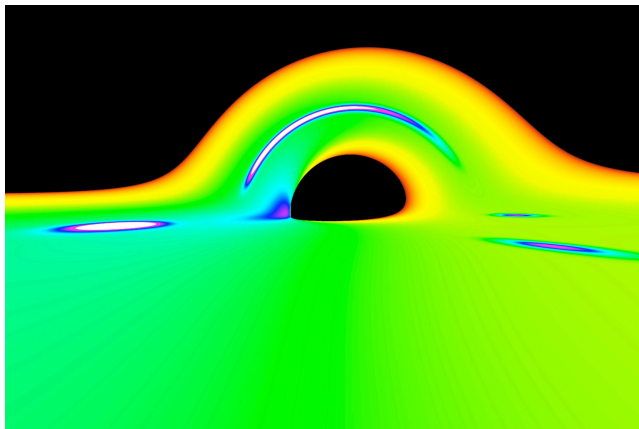
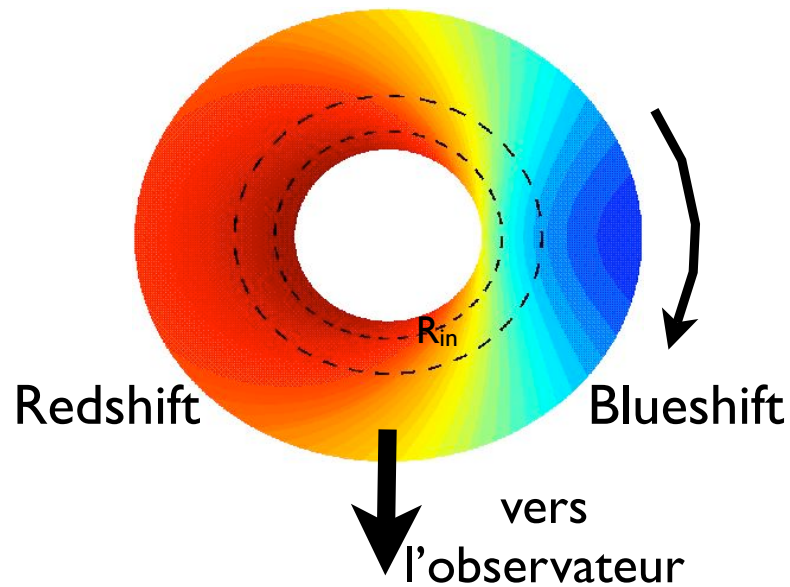
Observation



Bosse à 30 keV + raies

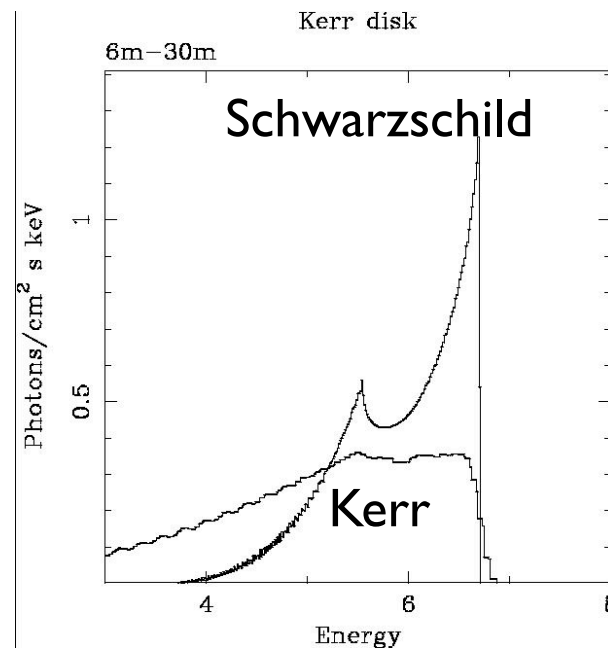
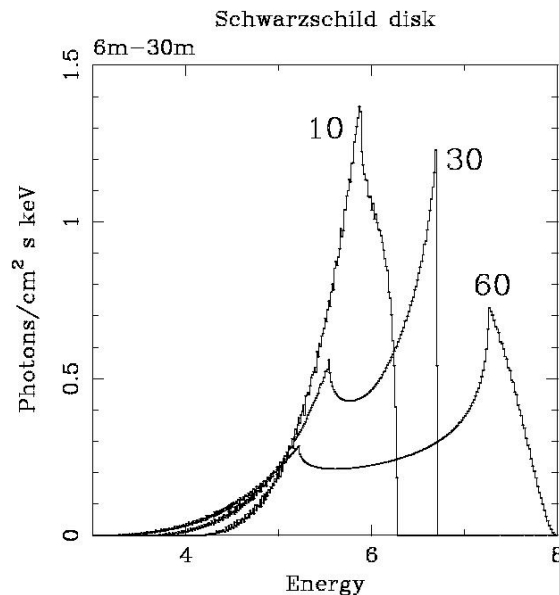
Raie du Fer

Signature des effets de RG



Raie du Fer

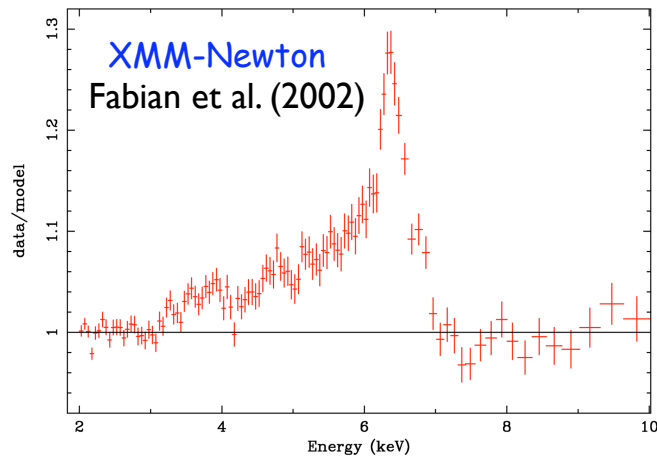
Signature des effets de RG



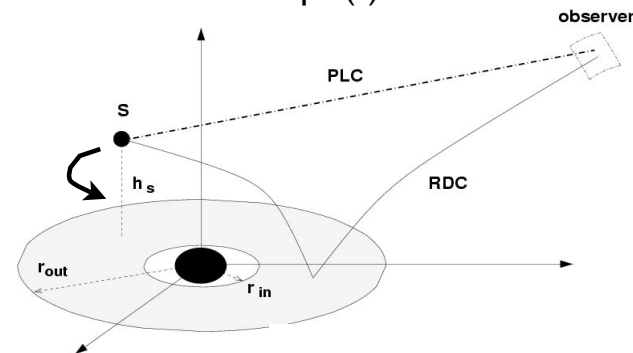
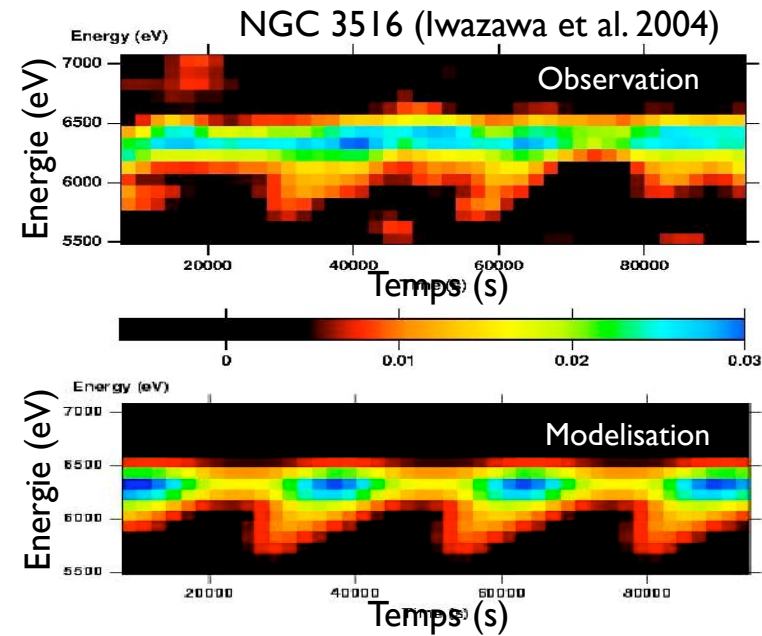
$R_{in} = 6R_G$ pour un trou noir de Schwarzschild (sans rotation)

$R_{in} = R_G$ pour un trou noir de Kerr “maximal” (avec rotation)

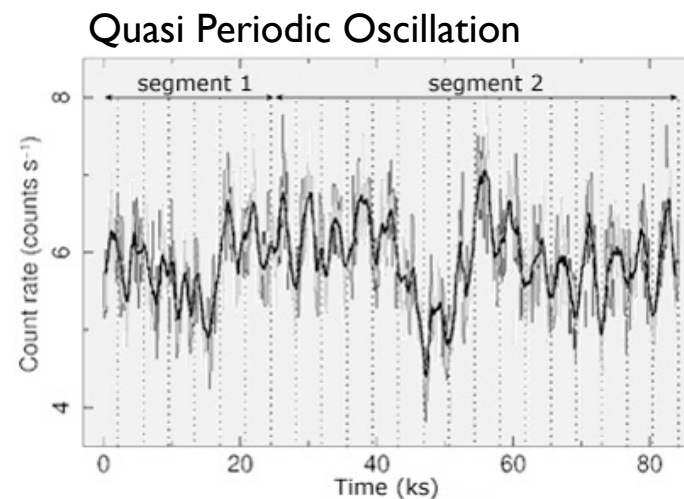
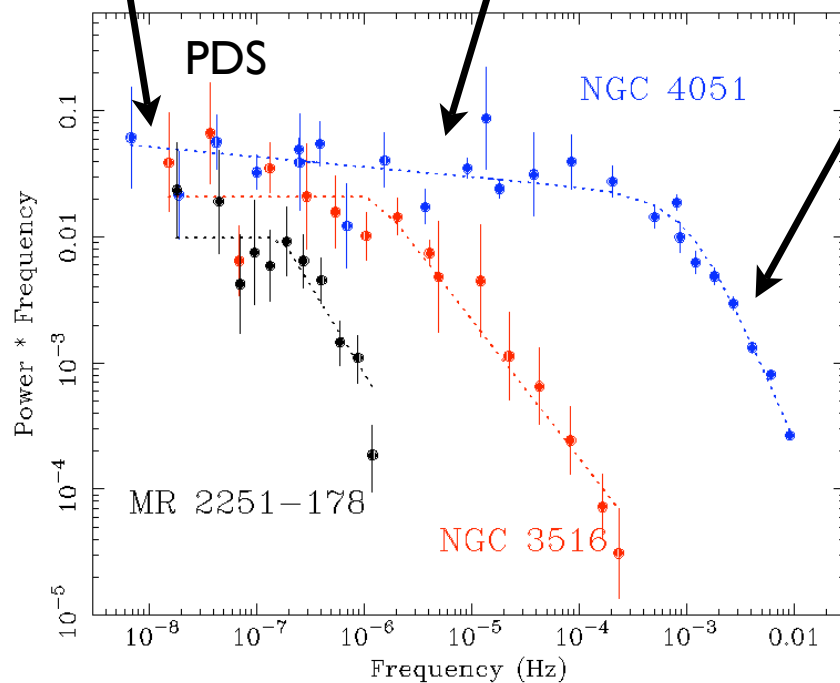
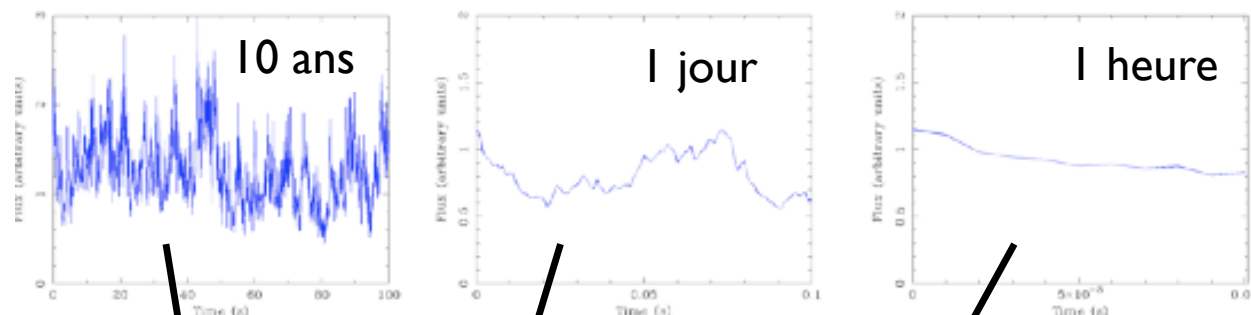
Raie du Fer: Observation



Raie large dans MCG-6-30-15
impliquant un trou noir de Kerr



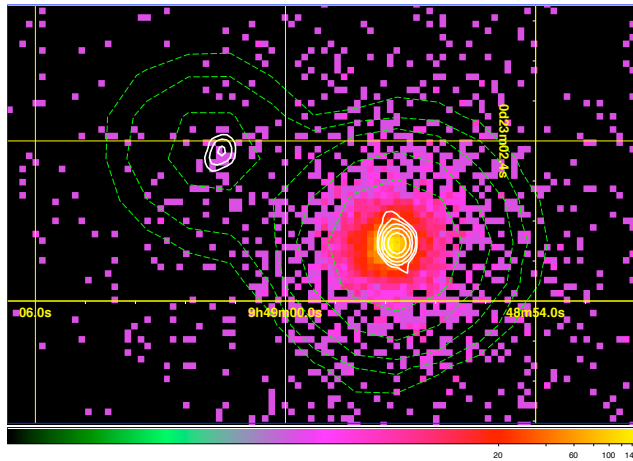
Variabilité X



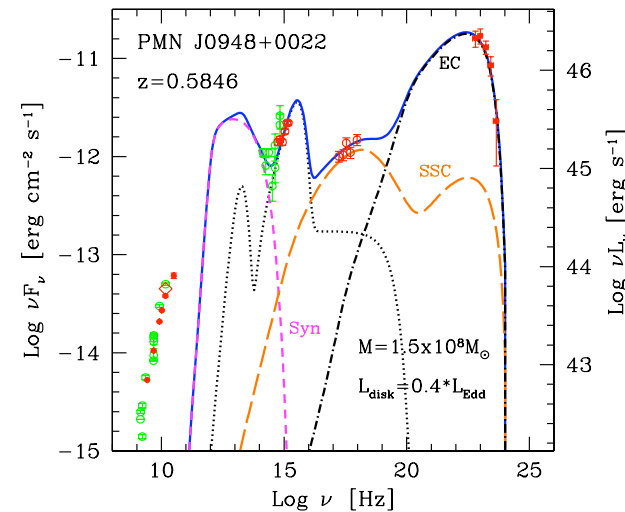
Gierlinski et al. 2008

Détection à Haute Energie

- A priori pas attendue....
- Une “Narrow Line Seyfert galaxy” a été détectée pour la 1ère fois au GeV (téléscope Fermi)

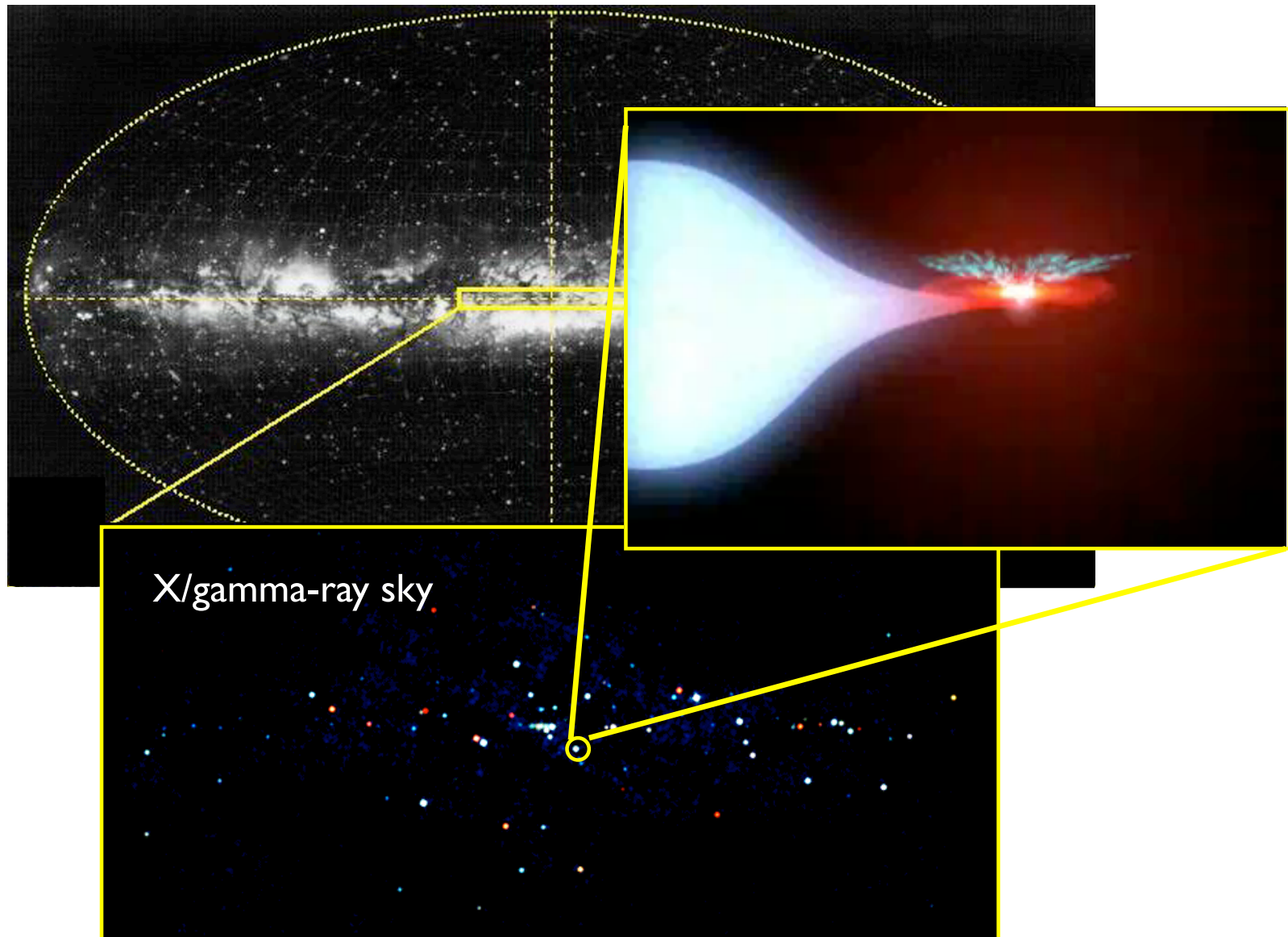


Abdo et al. (2009)

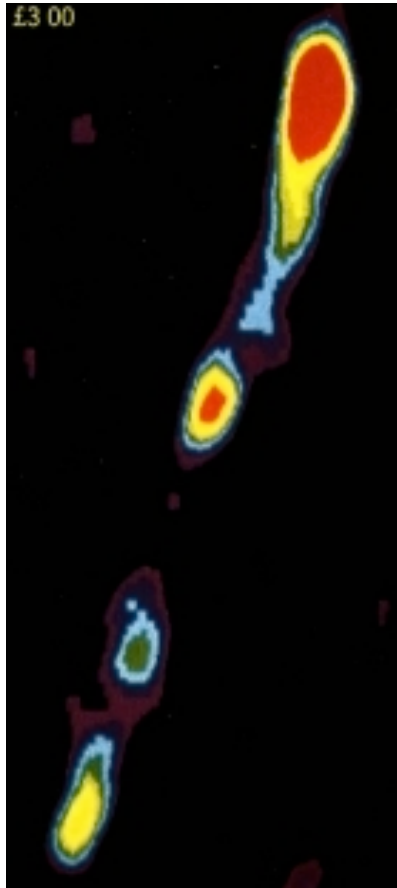


Mais, finalement, possède une forte émission radio et une température de brillance élevée signature de jet!! Nouveau type d'objet?

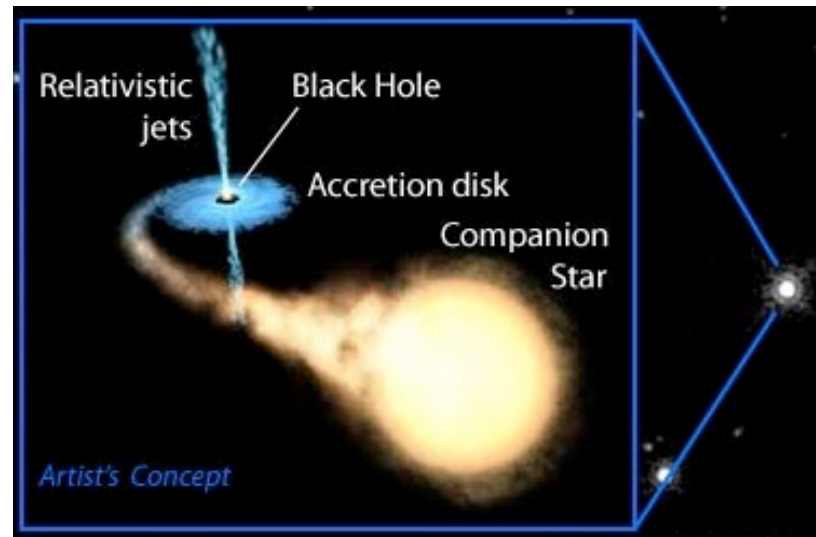
Les Binaires X



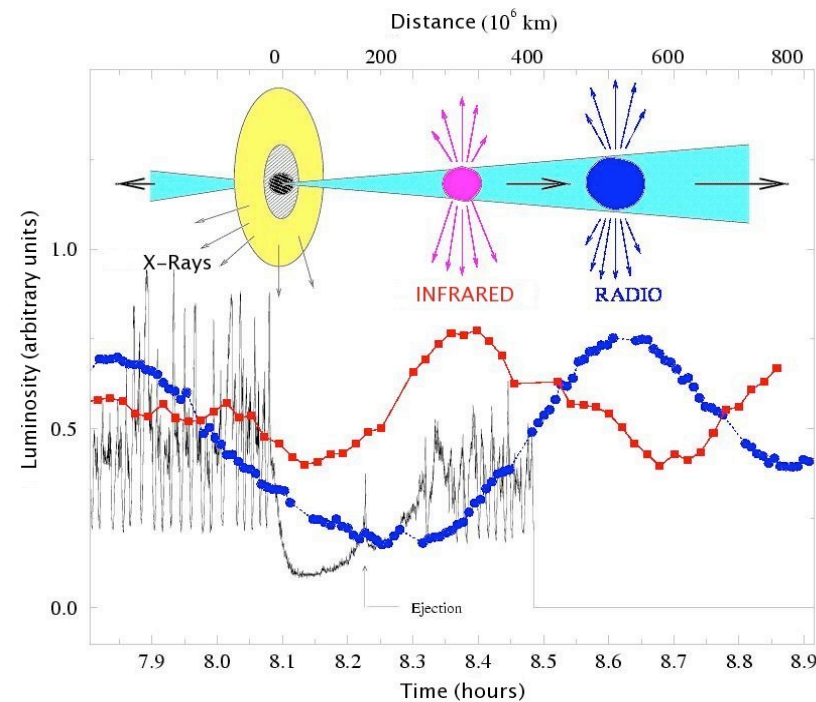
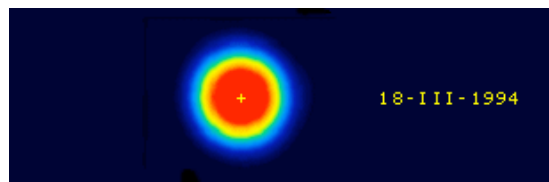
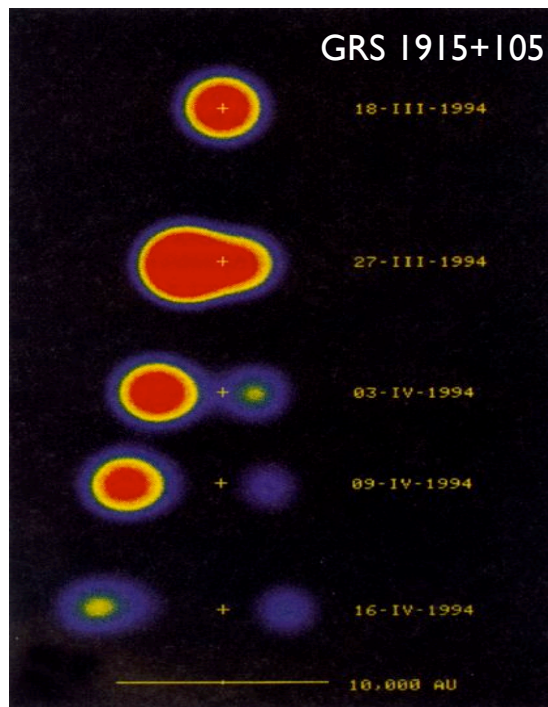
Microquasars = XrB avec Jets



En 1992 IE 1740.9-2942 est la première source galactique avec des jets (Mirabel et al. 1992)



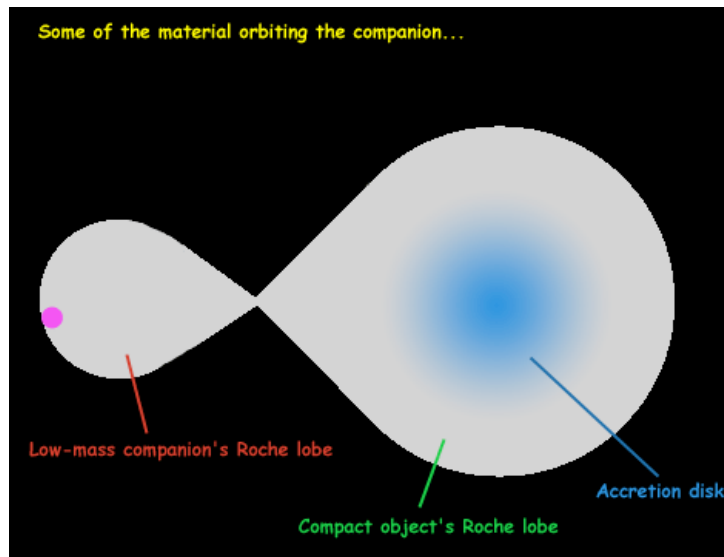
Ejections Superluminiques



En 1994 GRS 1915+105 est la première source galactique avec des jets superluminiques (Mirabel & Rodriguez 1994)

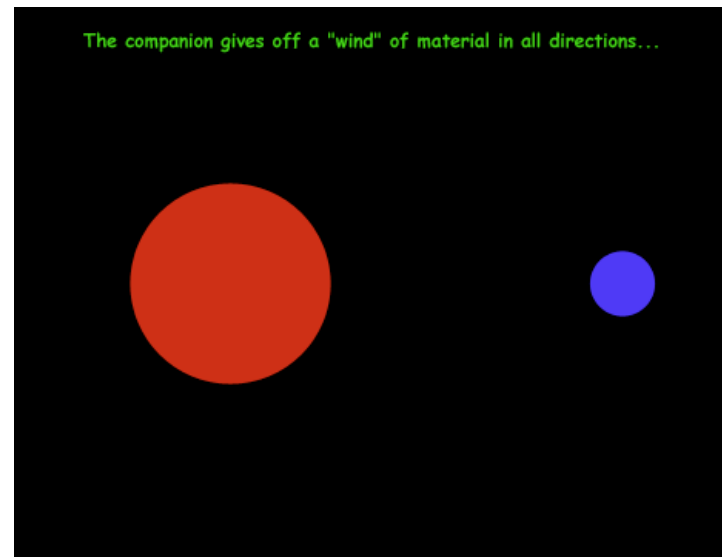
Deux Types de XrB

Low Mass X-ray Binary



- Le compagnon est une étoile de faible masse ($< 2 M_{\text{sol}}$)
- L'accrétion se fait par débordement du lobe de roche

High Mass X-ray Binary



- Le compagnon est une étoile massive ($> 10 M_{\text{sol}}$)
- L'accrétion se fait par capture du vent solaire émis par la secondaire

Quelques noms connus

A peu près 150-200 XrB connues, 20 avec un BH confirmé dynamiquement

Coordinate Name	Common ^b Name/Prefix	Year ^c	Spec.	P_{orb} (hr)	$f(M)$ (M_{\odot})	M_1 (M_{\odot})
0422+32	(GRO J)	1992/1	M2V	5.1	1.19 ± 0.02	3.7–5.0
0538–641	LMC X–3	–	B3V	40.9	2.3 ± 0.3	5.9–9.2
0540–697	LMC X–1	–	O7III	93.8 ^d	0.13 ± 0.05^d	4.0–10.0: ^e
0620–003	(A)	1975/1 ^f	K4V	7.8	2.72 ± 0.06	8.7–12.9
1009–45	(GRS)	1993/1	K7/M0V	6.8	3.17 ± 0.12	3.6–4.7: ^e
1118+480	(XTE J)	2000/2	K5/M0V	4.1	6.1 ± 0.3	6.5–7.2
1124–684	Nova Mus 91	1991/1	K3/K5V	10.4	3.01 ± 0.15	6.5–8.2
1354–64 ^g	(GS)	1987/2	GIV	61.1 ^g	5.75 ± 0.30	–
1543–475	(4U)	1971/4	A2V	26.8	0.25 ± 0.01	8.4–10.4
1550–564	(XTE J)	1998/5	G8/K8IV	37.0	6.86 ± 0.71	8.4–10.8
1650–500 ^b	(XTE J)	2001/1	K4V	7.7	2.73 ± 0.56	–
1655–40	(GRO J)	1994/3	F3/F5IV	62.9	2.73 ± 0.09	6.0–6.6
1659–487	GX 339–4	1972/10 ⁱ	–	42.1 ^{j,k}	5.8 ± 0.5	–
1705–250	Nova Oph 77	1977/1	K3/7V	12.5	4.86 ± 0.13	5.6–8.3
1819.3–2525	V4641 Sgr	1999/4	B9III	67.6	3.13 ± 0.13	6.8–7.4
1859+226	(XTE J)	1999/1	–	9.2: ^e	$7.4 \pm 1.1:e$	7.6–12.0: ^e
1915+105	(GRS)	1992/Q ^l	K/MIII	804.0	9.5 ± 3.0	10.0–18.0
1956+350	Cyg X–1	–	O9.7Iab	134.4	0.244 ± 0.005	6.8–13.3
2000+251	(GS)	1988/1	K3/K7V	8.3	5.01 ± 0.12	7.1–7.8
2023+338	V404 Cyg	1989/1 ^f	K0III	155.3	6.08 ± 0.06	10.1–13.4

HMXB



Remillard & McClintock (2006)

Comment savons-nous qu'il y a un trou noir?

Vitesse radiale de la secondaire

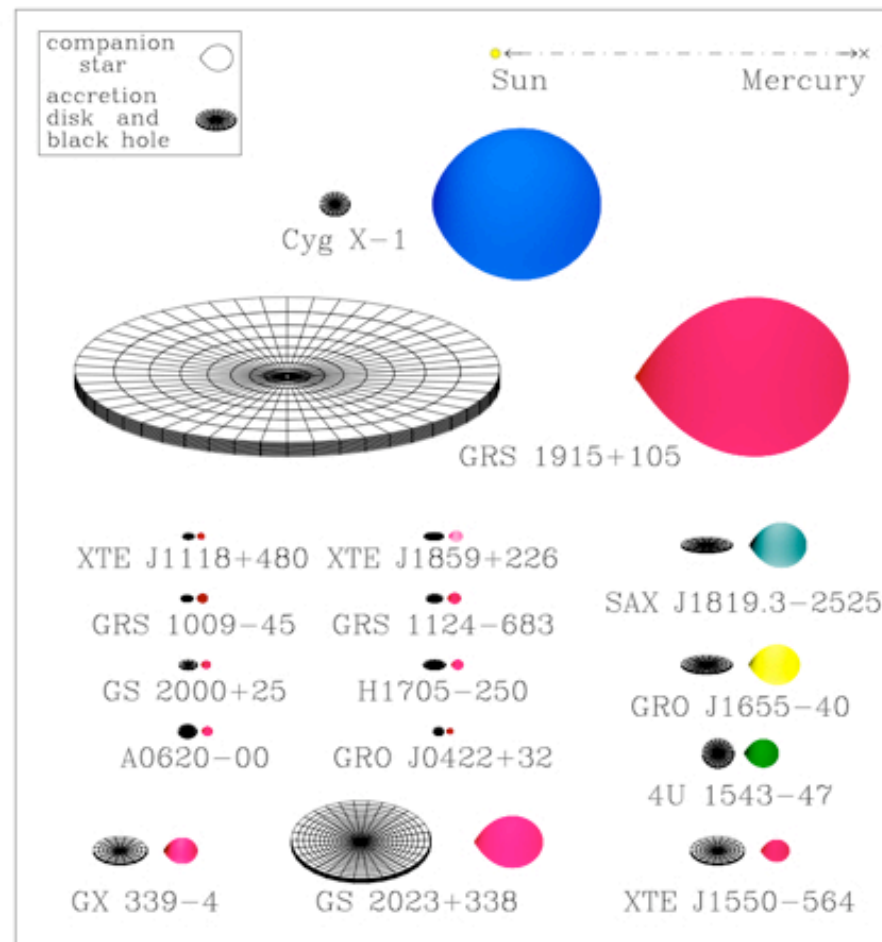
$$f(M) = \overset{\substack{\uparrow \\ \text{Période orbitale}}}{P_{orb}} \overset{\substack{\downarrow \\ \text{Vitesse radiale de la secondaire}}}{K_2^3} / 2\pi G = M_1 \sin^3 i / (1 + M_2/M_1)^2 < M_1$$

Inclinaison de la binaire

BH si $M_1 > 3M_{\odot}$ masse maximale de stabilité d'une étoile à neutron

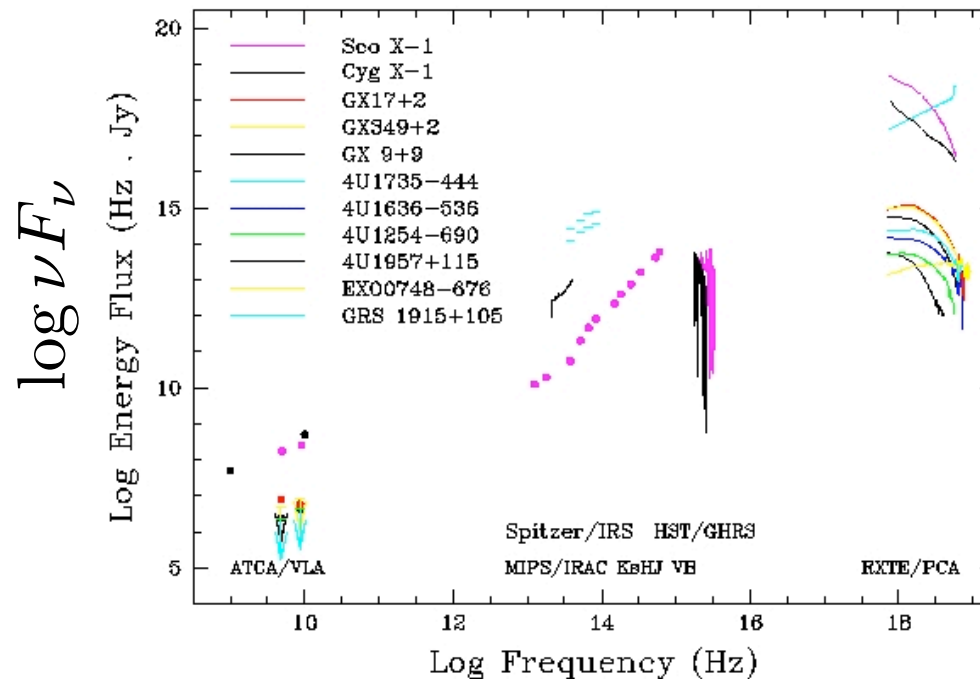
Quelques systemes...

Black Hole Binaries in the Milky Way



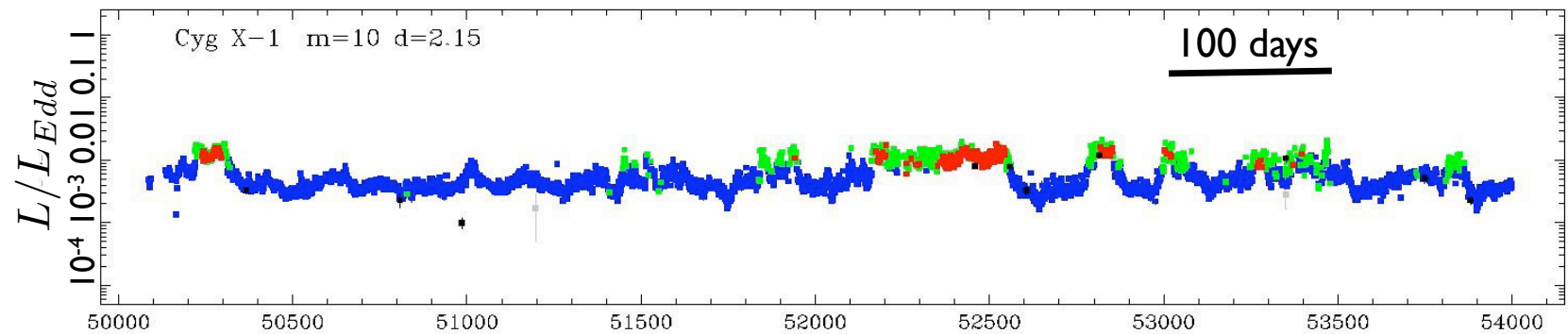
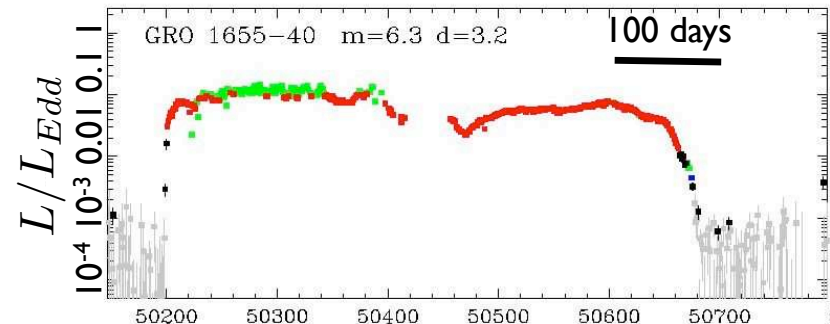
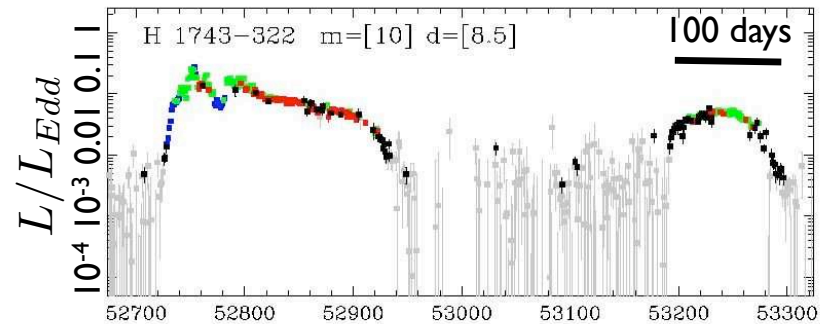
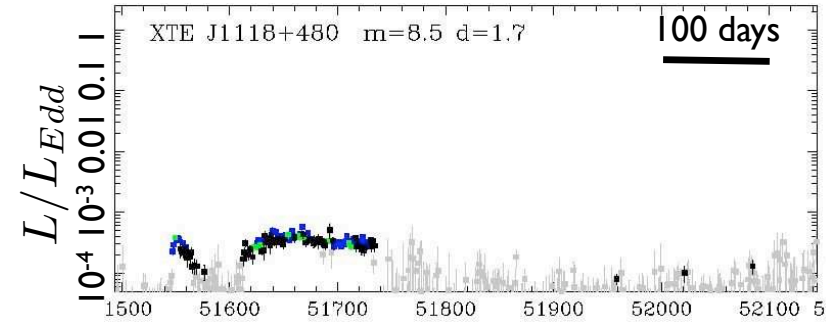
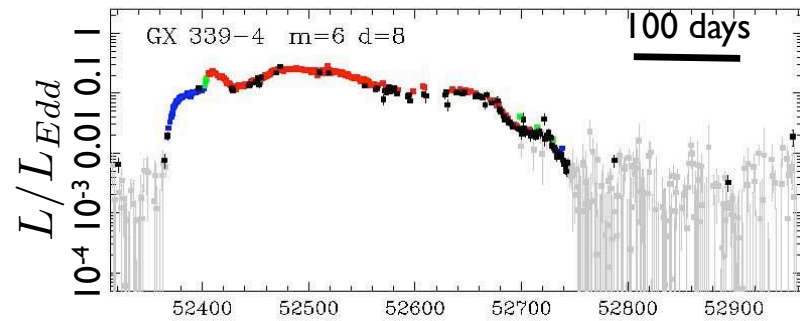
Luminosité X

Les binaires X sont dans un état quiescent la majorité du temps ($L < 10^{-8} L_{\text{edd}}$ i.e. indétectable), mais quand elles entrent dans un état de flare ($L \sim L_{\text{edd}}$) leur spectre est dominé par les X.



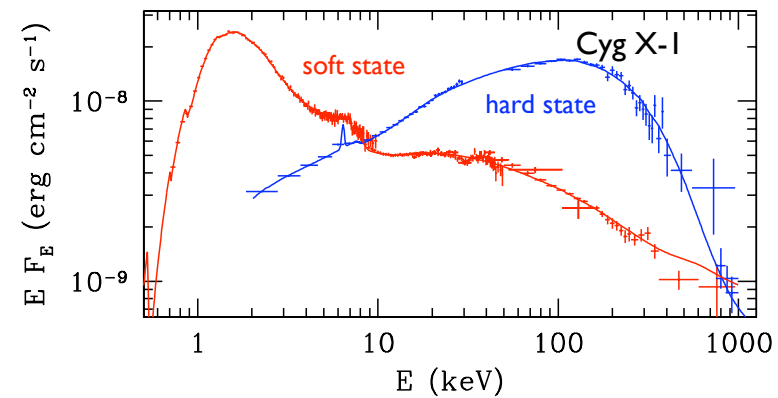
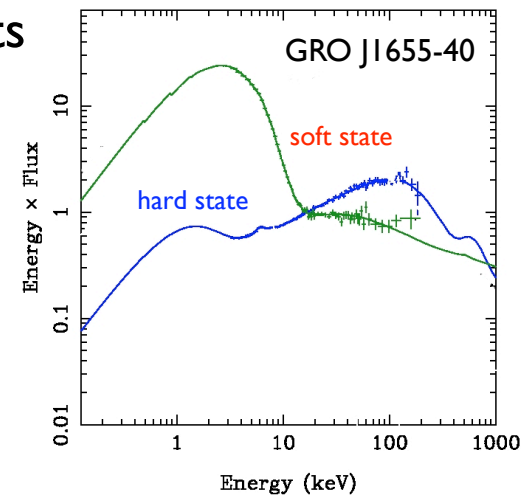
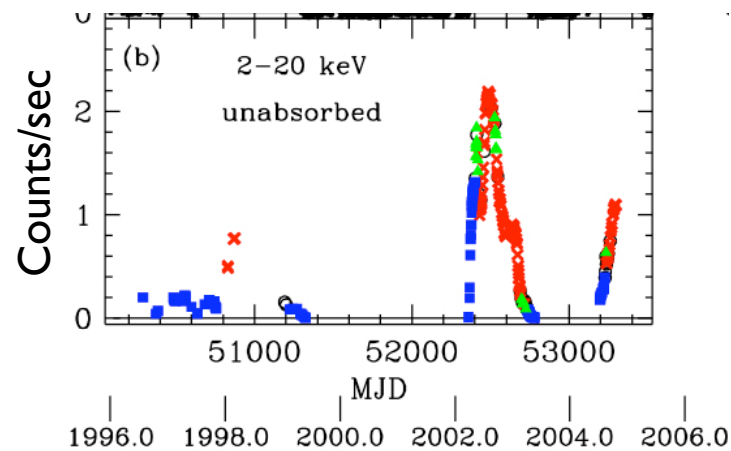
Saeqa Dil Vrtilek Home page

Variabilité X

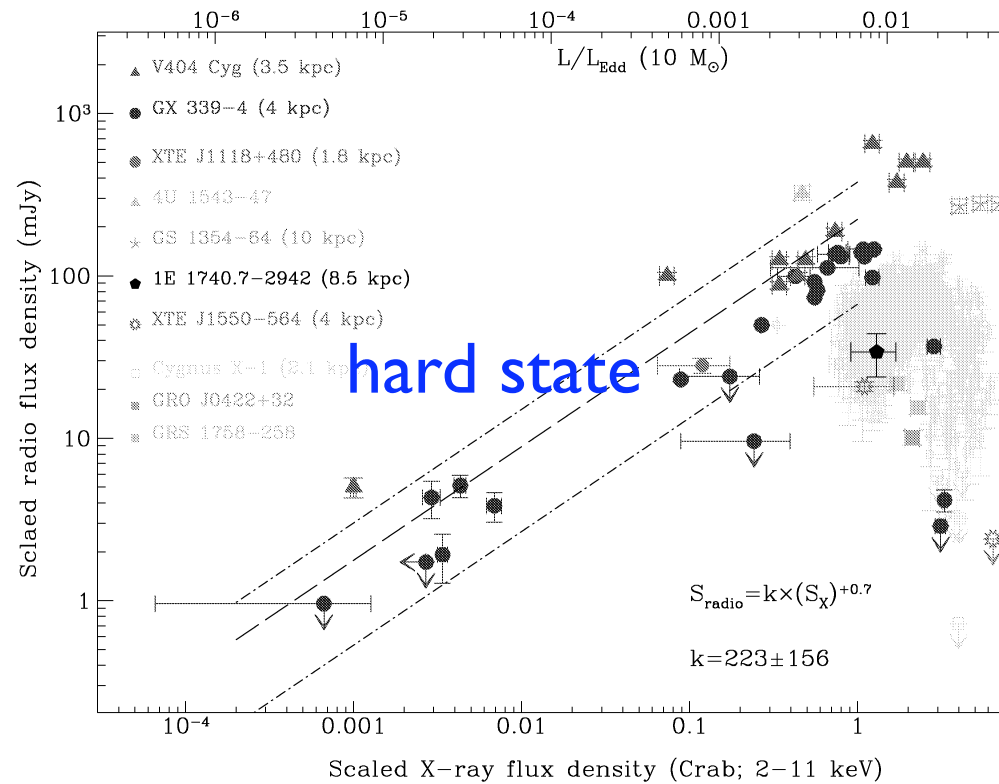


Etats Spectraux

Forte variabilité spectrale durant les sursauts



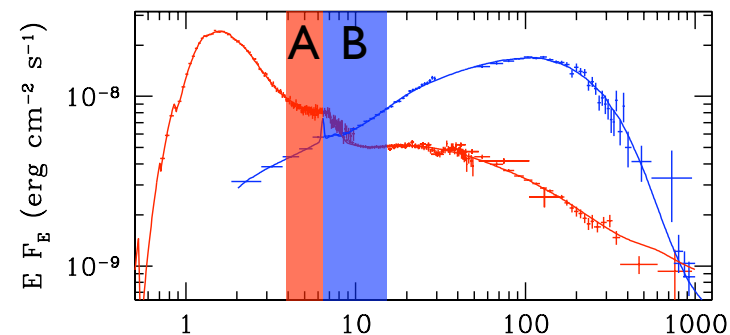
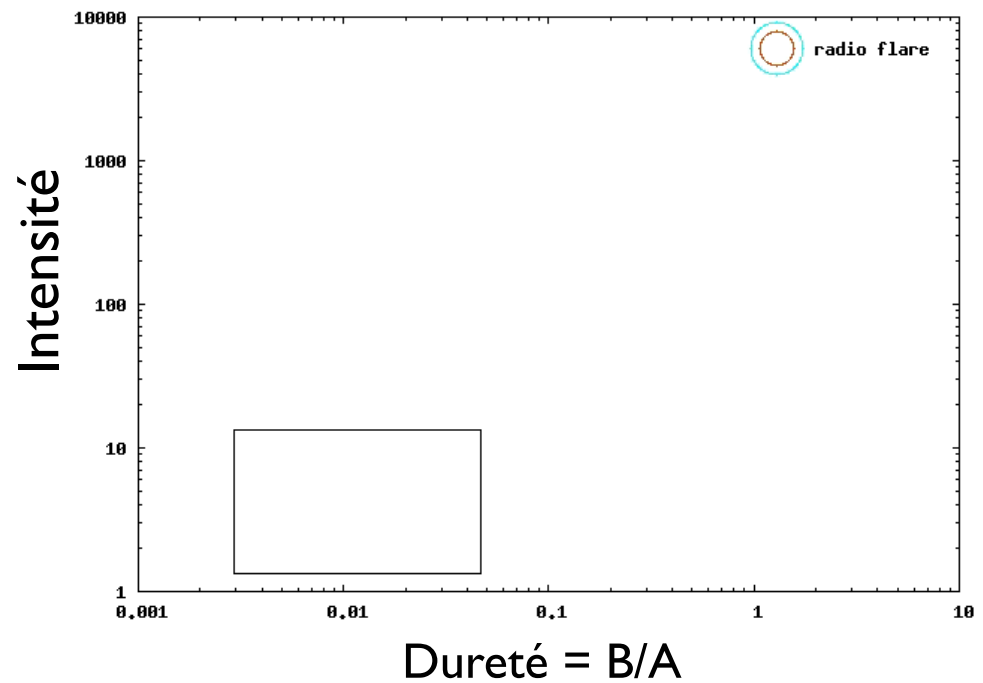
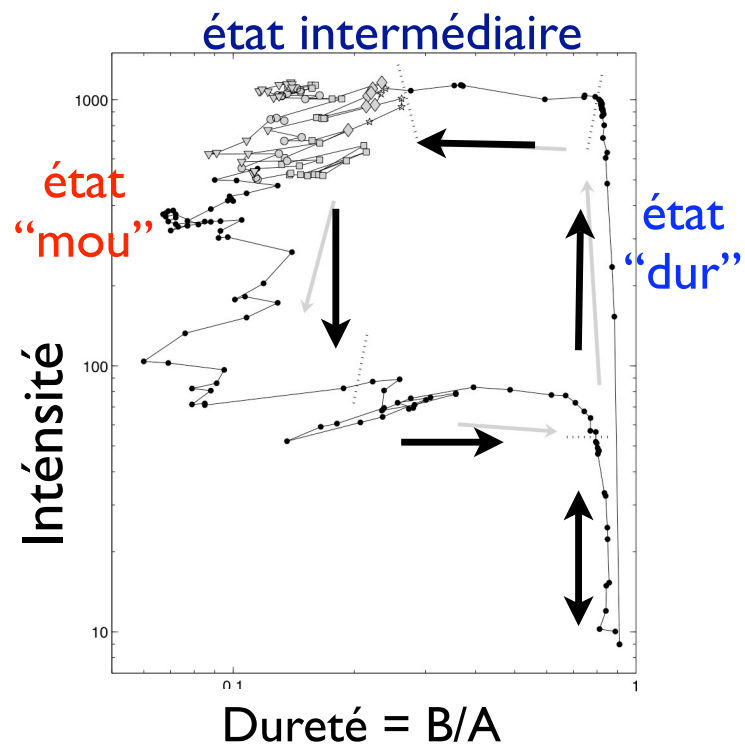
Ejection



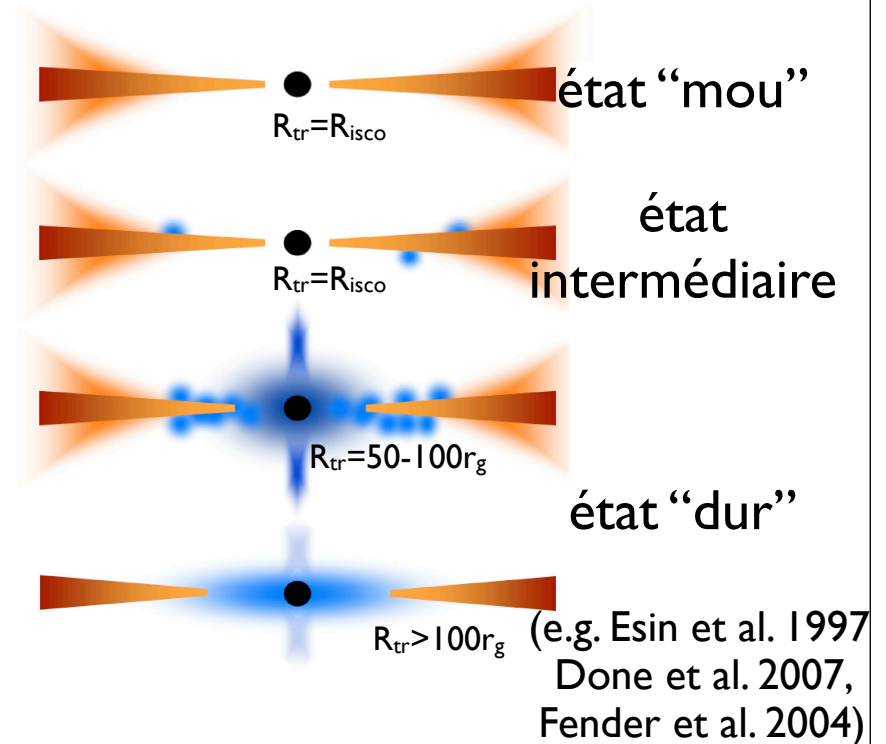
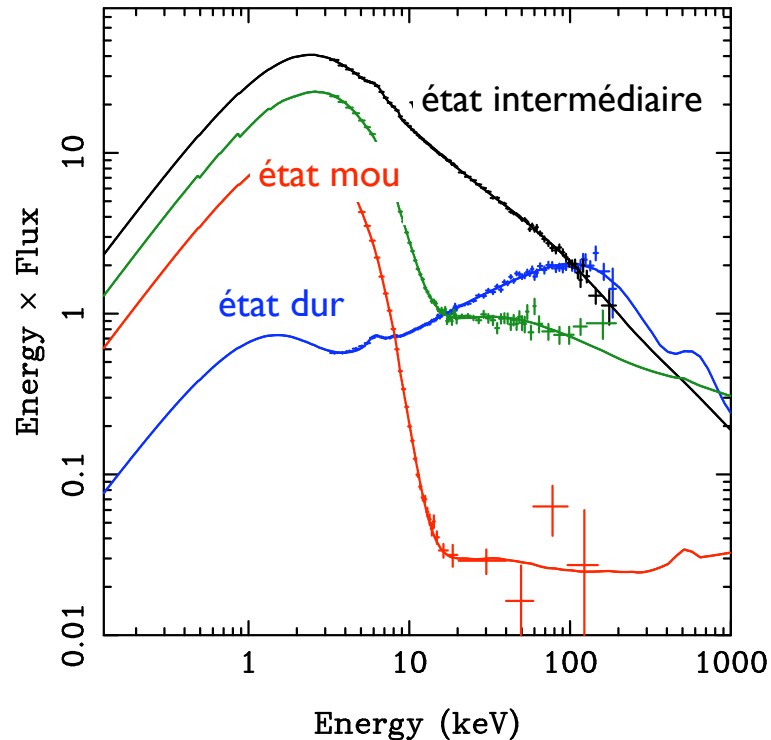
Etat dur (hard): forte émission radio → jet

Etat mou (soft): faible/absence d'émission radio → pas de jet

Cycle d'Hystérésis

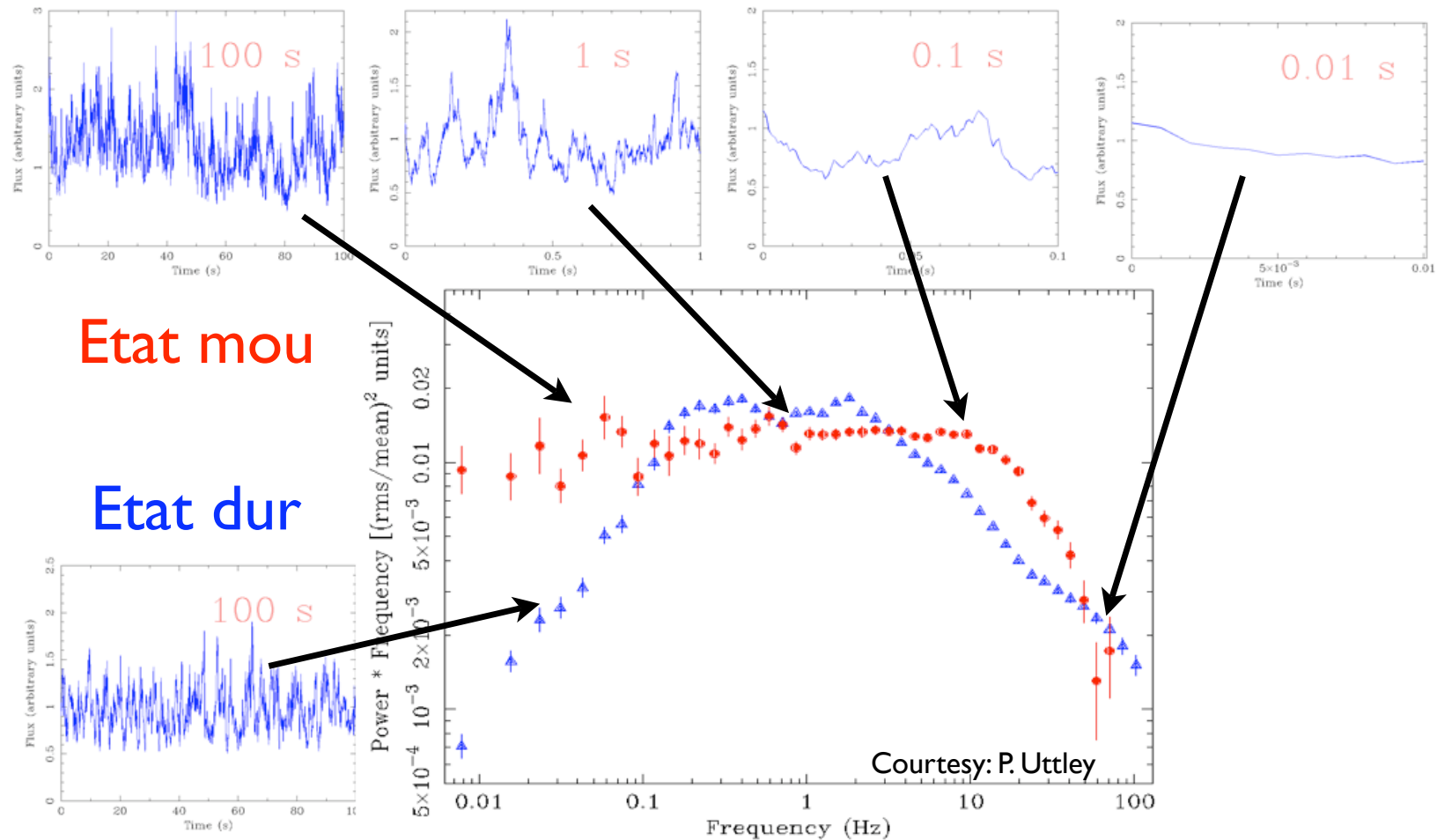


Le Scénario Standard

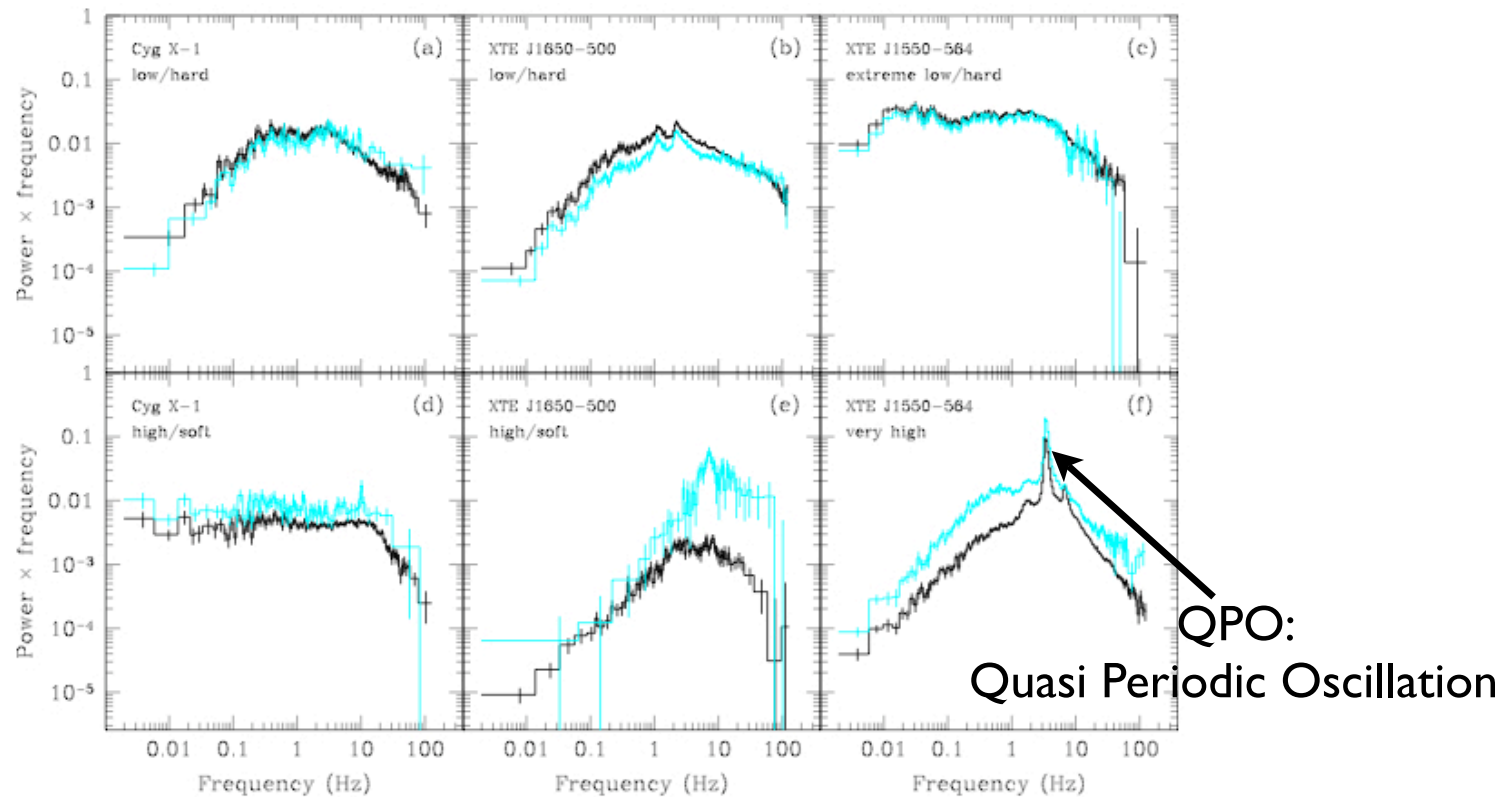


Existence d'un rayon de transition variable entre un disque d'accrétion standard externe et un plasma chaud et lumineux interne

Densité spectrale d'énergie



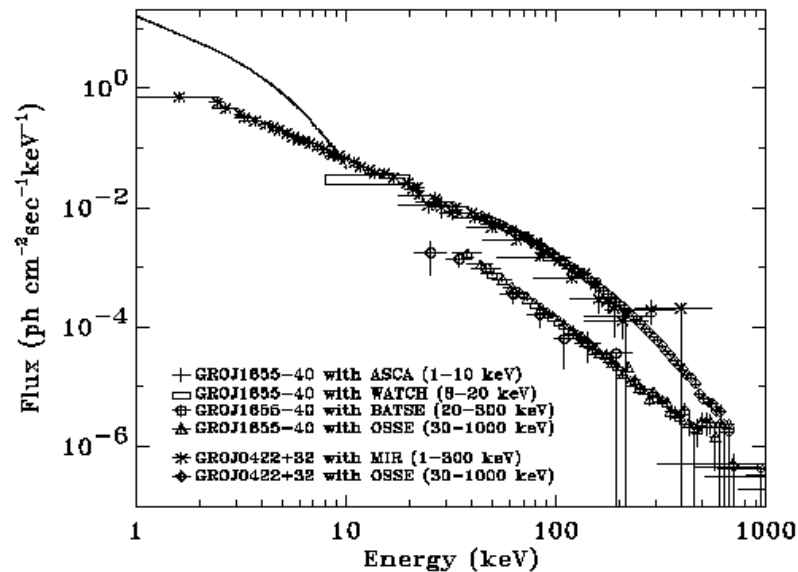
Quelques Exemples



Done & Gierlinski 2005

Emission gamma

- La plupart des spectres observés le sont dans le domaine X - gamma mou
- Loi de puissance non thermique observée dans les états mous

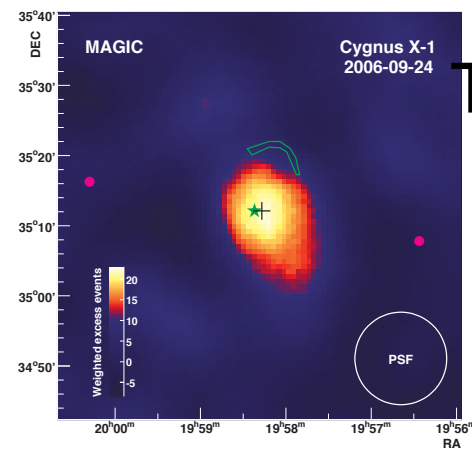


Coupure inconnue .
possibilité d'émission
gamma VHE

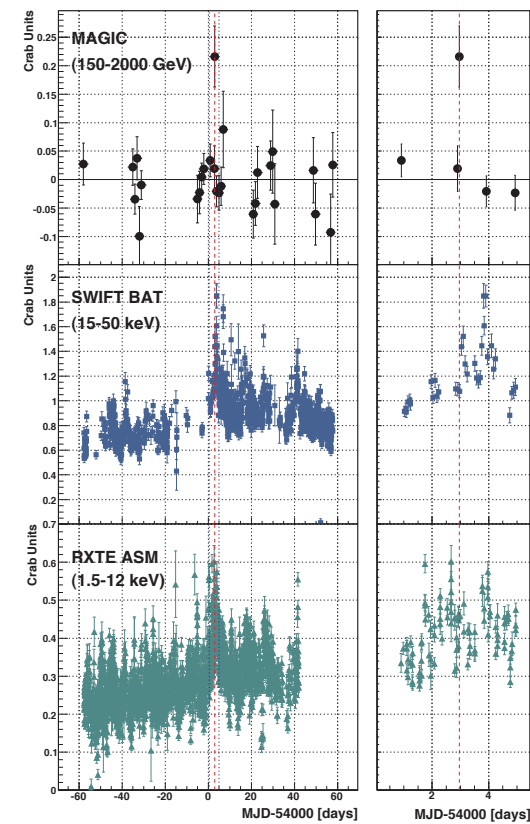
FIGURE 1. Broad band high energy spectra of GROJ1655-40 [115] (Zhang *et al.* 1997) and GROJ0422+32 [56] (Kroeger *et al.* 1996).

Emission UHE

Détection limite a $\sim 4\sigma$ de Cyg X-1 par MAGIC

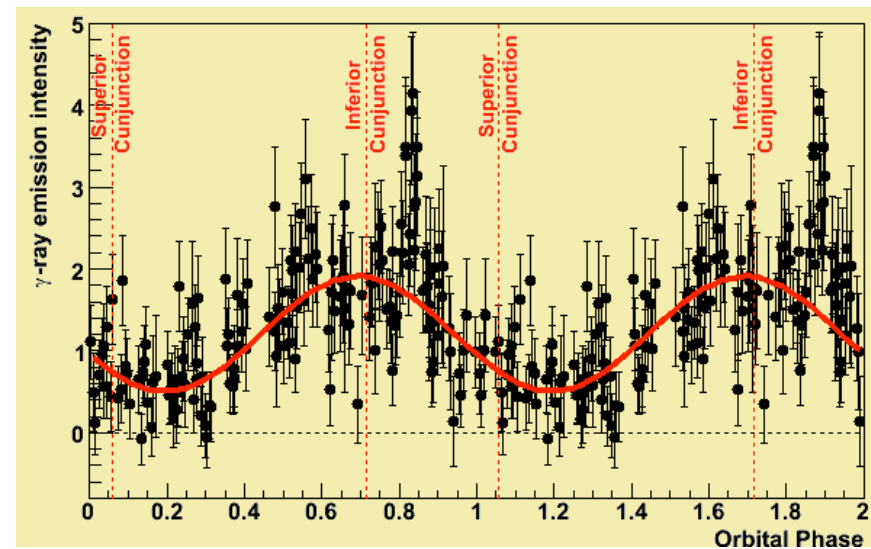
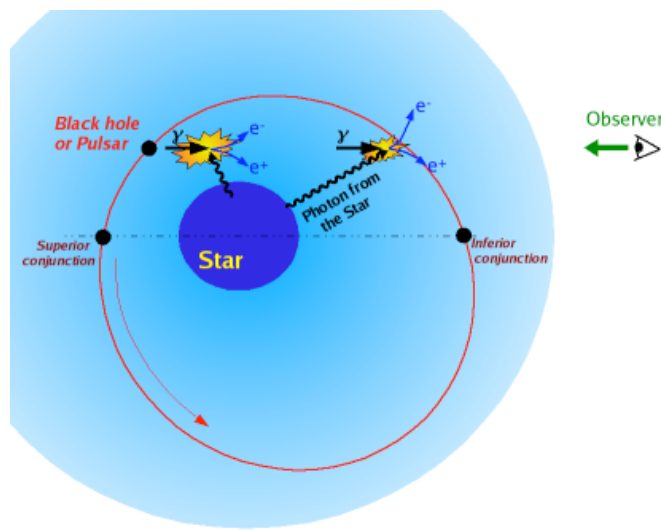


Text



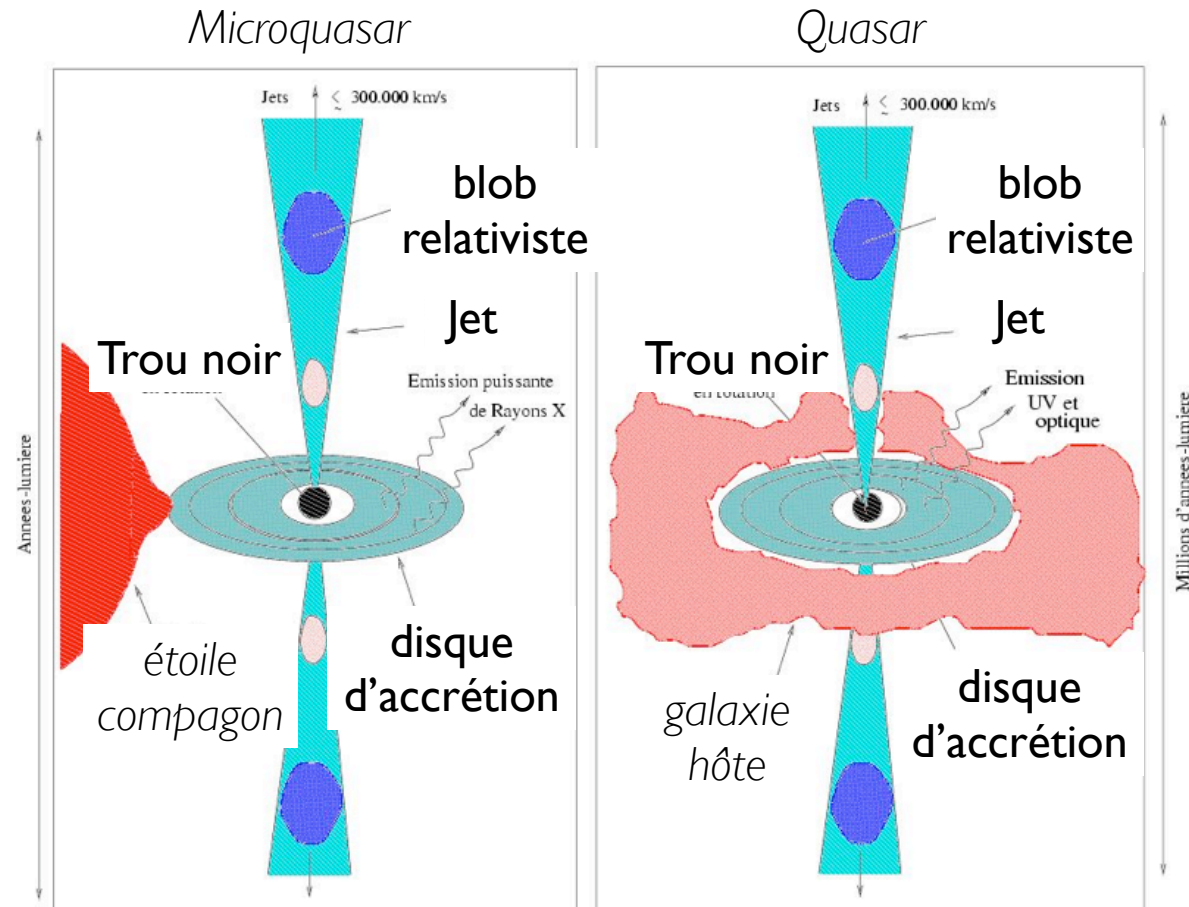
Emission UHE

- Binaires compactes détectées par HESS : 1 pulsar PSR1259-63 et deux objets controversés : LS 5039 et LSI+61°303
- Détection d'une émission au TeV avec modulation orbitale dans LS5039



Aharonian et al A&A 2006

Analogie NAG/Microquasar



Comparaison NAG/Microquasar

	AGN	microquasar
Distance	Mpc/Gpc	10 kpc
$M_{\text{BH}}/M_{\text{sol}}$	$10^8 - 10^{10}$	10
T_{var}	100-1000 sec	1 ms
M_{acc}	1 M_{sol}/an	$10^{-8} - 10^{-5} M_{\text{sol}}/\text{an}$

Théorie

Processus

L'émission de X/gamma des NAGs et binaires X nécessite des particules très énergétiques ($\gamma > 10^6$ dans le cas des blazars TeV)

2 principales classes de modèles :

Energie primaire injectée...

- ... dans des leptons avec processus purement électromagnétiques
- ... dans des protons avec processus hadroniques

Synchrotron

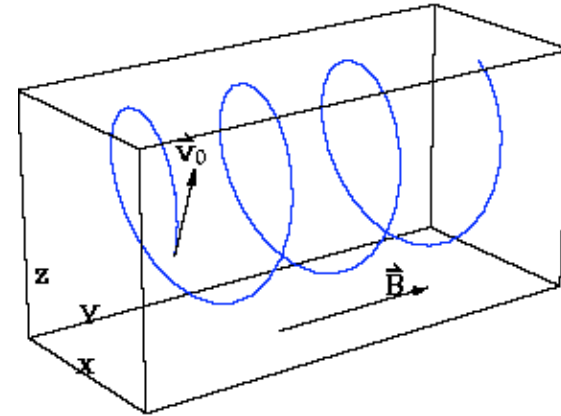
Emission Synchrotron

- Rayonnement de freinage dans le champ magnétique

- Particule d'énergie $E = \gamma mc^2$

- Mouvement hélicoidal de fréquence

$$\nu_{gyr} = \frac{eB}{\gamma 2\pi m} = \frac{\nu_c}{\gamma}$$



- Puissance émise/particule $P = -\dot{E} = 2\gamma^2 \sigma_T c \frac{(B \sin \alpha)^2}{2\mu_0}$

En moyenne sur les angles ($\langle \sin^2 \alpha \rangle = 2/3$)

$$\Rightarrow P = -\dot{E} = \frac{4}{3} \gamma^2 \sigma_T c \frac{B^2}{2\mu_0} = \frac{4}{3} \gamma^2 \sigma_T c W_B$$

$$\Rightarrow t_{syn} = \frac{E}{\dot{E}} \propto \frac{1}{E}$$

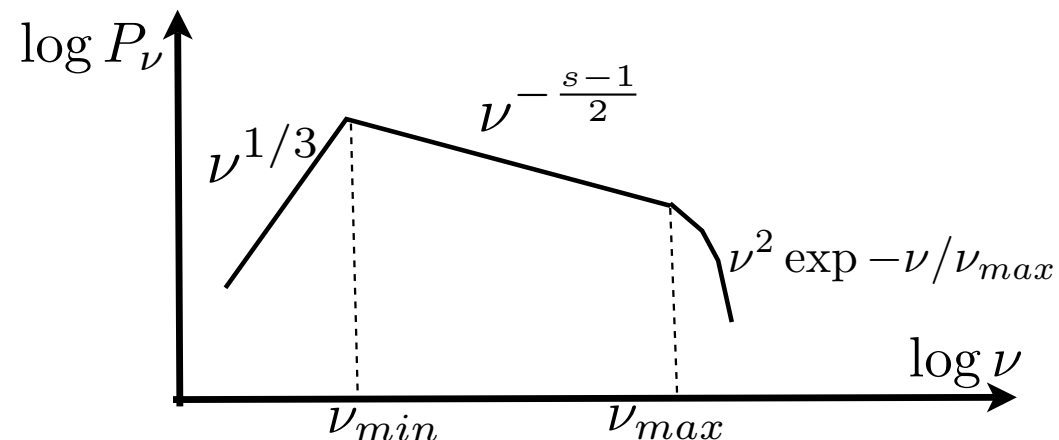
Spectre Synchrotron

- Fréquence synchrotron typique $\nu_s = \gamma^2 \frac{eB}{2\pi m}$
- Si distribution en loi de puissance $\frac{dn}{d\gamma} = N_0 \gamma^{-s} \quad (\gamma_{min} < \gamma < \gamma_{max})$

$$P_\nu = P_0 \nu^{-p} \quad (\nu_{s,min} < \nu < \nu_{s,max}) \quad \text{avec} \quad p = \frac{s-1}{2}$$

$$P_\nu \propto \nu^{1/3} \quad \text{si } \nu \ll \nu_{s,min}$$

$$P_\nu \propto \exp(-\nu/\nu_{s,max}) \quad \text{si } \nu \gg \nu_{s,max}$$



Fréquence synchrotron maximale

- Coupure haute énergie $\nu_{s,max} = \gamma_{max}^2 \frac{eB}{2\pi m}$

γ_{max} déterminé en général par le temps d'accélération et le temps de perte le plus rapide

- Valeur maximale quand $t_{syn} < t_{gyr} = 1/\nu_{gyr}$

$$\nu_{gyr} = \frac{eB}{\gamma 2\pi m} = \frac{\nu_c}{\gamma} \quad t_{syn} = \frac{E}{\dot{E}} = \frac{mc}{\gamma \sigma_T W_B}$$

- Ce qui fournit :

$$h\nu_{max} = mc^2/\alpha \quad \text{où } \alpha=1/137 \text{ est la constante de structure fine.}$$

➡ $h\nu_{max} = 60 \text{ MeV}$ pour des leptons (e-/e+) et $\sim 120 \text{ GeV}$ pour protons
(NB doit être x facteur Doppler δ si mouvement relativiste)

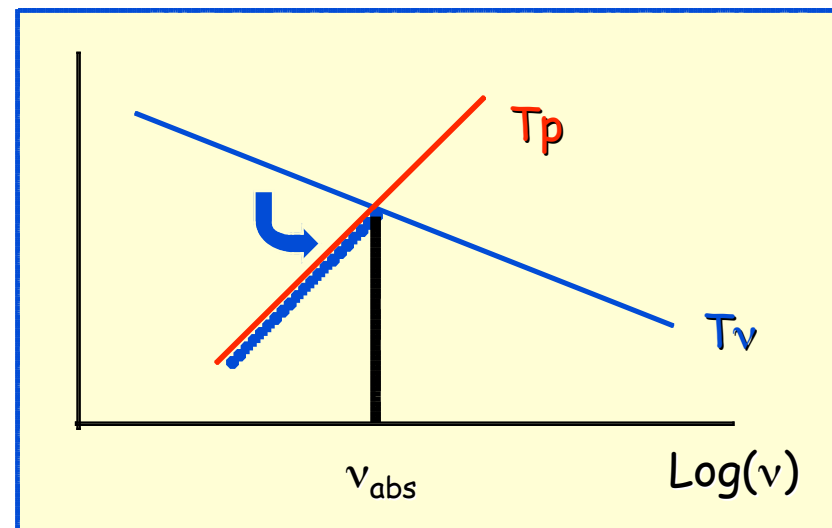
Synchrotron Auto-absorbé

- Le plasma devient opaque à sa propre émission synchrotron
- Réabsorption synchrotron intervient lorsque la température de rayonnement $kT_\nu = \frac{c^2}{2\nu^2} I_\nu$ excède la « température particulaire »
 $kT_p = \gamma mc^2$

- Pour une distribution thermique de particules $I_{\nu < \nu_{abs}} \propto \nu^2$

- Pour une distribution non-thermique de particules

$$I_{\nu < \nu_{abs}} \propto \nu^{5/2}$$



Comptonisation Thermique

Comptonization thermique

- Découvert par A.H. Compton en 1923
- gain/perte d'énergie d'un photon par collision avec une électron

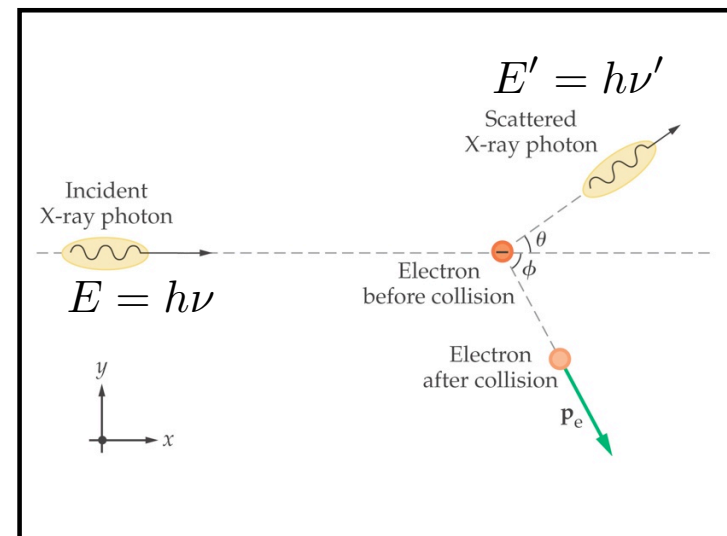
Si l'électron est au repos:

$$\begin{aligned}\Delta E &= E' - E \\ &\simeq -\frac{E^2}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)\end{aligned}$$

Pour des particules en mouvement

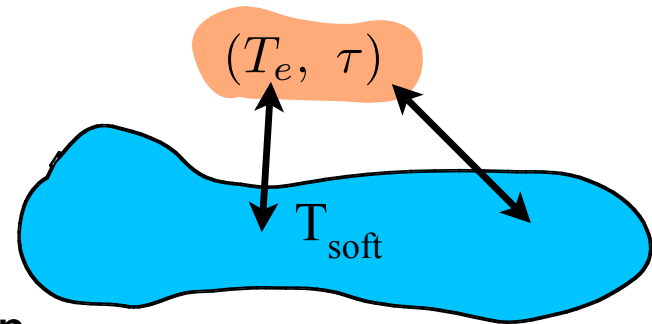
$$\Delta E < 0 \rightarrow \text{Compton}$$

$$\Delta E > 0 \rightarrow \text{Inverse Compton}$$



Comptonization thermique

- Comptonization d'un champ de photons "mous" par un plasma d'électrons caractérisé par une température T et une profondeur optique τ



- ✓ - Gain moyen d'énergie par collision

$$\frac{\Delta E}{E} \simeq \left(\frac{4kT}{mc^2} \right) + 16 \left(\frac{kT}{mc^2} \right)^2 \quad \text{pour } E \ll kT$$

$$\leq 0 \quad \text{pour } E \gtrsim kT$$

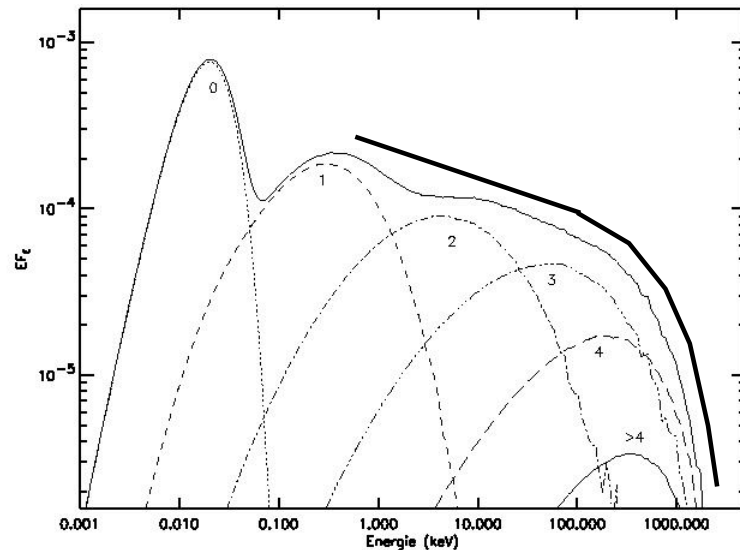
- ✓ - Nombre moyen de diffusions

$$N \simeq (\tau + \tau^2)$$

➡ paramètre Compton $y = \frac{\Delta E}{E} N$

Rybicki et Lightman (1979)

Comptonization thermique



(Courtesy: J. Malzac)

$$F_E \propto E^{-\Gamma(kT, \tau)} \exp \left(-\frac{E}{E_c(kT, \tau)} \right)$$

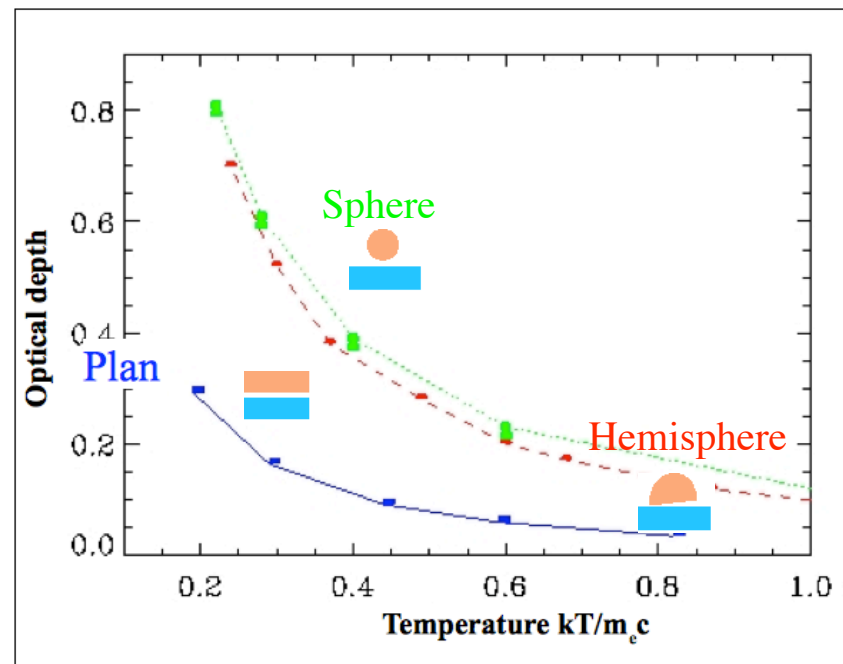
Ex.: for $\tau \sim 1$

$$\begin{cases} \Gamma \simeq -\frac{\log(\tau)}{\log \left(1 + \frac{\Delta E}{E} \right)} \\ E_c \simeq kT \end{cases}$$

$\Gamma(kT, \tau)$ ➡ dégénérescence spectrale, différents (kT, τ) pouvant donner le même Γ

Equilibre Radiatif

Si les 2 phases sont en équilibre radiatif, la température et profondeur optique de la couronne suivent une relation univoque, pour une géométrie donnée (Haardt & Maraschi 1991, 1993).



Comptonisation non-thermique

Principales Caractéristiques

- Transfert d'énergie par collision très efficace $\Delta E \simeq \gamma^2 E$

- Puissance émise dans un champ de photon isotrope $P = -\dot{E} = \frac{4}{3}\gamma^2 \sigma_T c W_{ph}$

- Temps de perte CI $t_{IC} = \frac{E}{\dot{E}} = \frac{mc}{\gamma \sigma_T W_{ph}} \propto \frac{1}{E}$

pour AGN/ μ quasar $t_{IC} \ll \frac{R}{c}$ i.e. refroidissement CI très rapide !!!

- Production d'un spectre non-thermique

$$n(\gamma) \propto \gamma^{-s} \Rightarrow F(\nu) \propto \nu^{-\frac{s-1}{2}}$$

Thomson vs Klein-Nishina

Soit $\varepsilon_s mc^2$ l'énergie du photon dans le référentiel du laboratoire (\mathcal{R})

Dans le référentiel de l'électron (\mathcal{R}_e) l'énergie du photon devient $\sim \gamma \varepsilon_s mc^2$

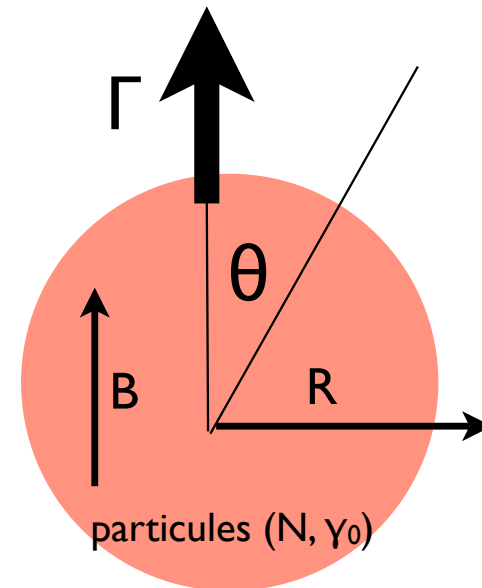
Deux régimes

- Régime Thomson (classique) : $\gamma \varepsilon_s \ll 1$ (i.e. énergie dans (\mathcal{R}_e) < 511 keV)
 - photon diffusé sans perte d'énergie (dans \mathcal{R}_e)
 - section efficace Thomson constante σ_T .
 - Dans (\mathcal{R}), énergie finale $\sim \gamma^2 \varepsilon_s mc^2$ (faible perte d'énergie pour l'électron)
- Régime Klein Nishina (quantique) : $\gamma \varepsilon_s \gg 1$ (i.e. énergie dans (\mathcal{R}_e) > 511 keV)
 - diffusion inélastique (dans \mathcal{R}_e)
 - section efficace totale KN $\sigma_T \ln(\gamma \varepsilon_s) / \gamma \varepsilon_s \ll \sigma_T$
 - Dans (\mathcal{R}), énergie finale $\sim \gamma mc^2$ i.e. perte d'énergie catastrophique pour l'électron

Application au Cas des Blazars

Le Modèle SSC I-zone

- Effet Compton sur les photons synchrotron (Synchrotron Self-Compton)
- Un blob sphérique homogène, rempli par un champ magnétique et un plasma de particules ayant une énergie caractéristique γ_0
- 5 paramètres : R , B , N , γ_0 , et δ



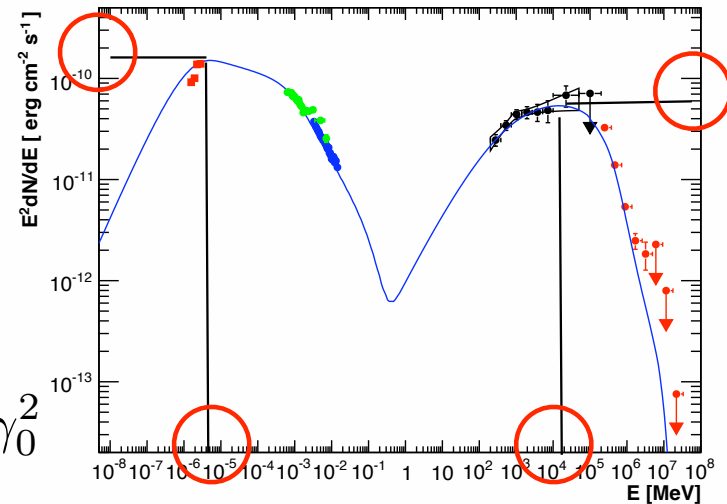
Dégénérescence

- 4 contraintes: fréquences et intensité des deux pic synchrotron et CI

Hyp: diffusion thomson

- Pic Synchrotron $\gamma_0^2 B \delta$
- Pic Compton inverse $\gamma_0^4 B \delta \rightarrow \gamma_0$ et $B \delta$
- Luminosité synchrotron $N \gamma_0^2 B^2 \delta^4 \rightarrow N \gamma_0^2$
- Luminosité Compton Inverse

$$N \gamma_0^2 W_{syn} \delta^4 = N^2 \gamma_0^4 B^2 \delta^4 / R^2 \rightarrow R \delta$$



La dégénérescence peut être levée par l'utilisation d'une autre contrainte indépendante ou en se fixant l'un des paramètres (ex δ)

Opacité γ - γ

- Photons d'énergie $\epsilon m_e c^2$ principalement absorbés par les photons d'énergie $(1/\epsilon)m_e c^2$ (seuil de création de paires dans le référentiel du cm.)

$$\text{nb photons émis} = \text{nb photons produits} \times e^{-\tau_{\gamma\gamma}(\epsilon)}$$

➡ Si $\tau_{\gamma\gamma} > 1$ les photons gamma ne peuvent pas sortir de la source et donc être détectés

- Avec une densité de photons par unité de volume et d'énergie $n(\epsilon)$, et une source sphérique de rayon R . ➡ $\tau_{\gamma\gamma}(\epsilon) \simeq \frac{1}{\epsilon} n \left(\frac{1}{\epsilon} \right) \sigma_T R$

$$\text{Avec } n(\epsilon) = \frac{L(\epsilon)}{\epsilon m_e c^2 4\pi R^2 c} \quad \Rightarrow \quad \tau_{\gamma\gamma}(\epsilon) \simeq \frac{\sigma_T}{4\pi m_e c^3} \frac{L(1/\epsilon)}{R}$$

- Pour une source statique, borne supérieure sur R par la variabilité : $R < cT_{\text{var}}$ et donc valeur min de $\tau_{\gamma\gamma}$

Cas de PKS 2155-304

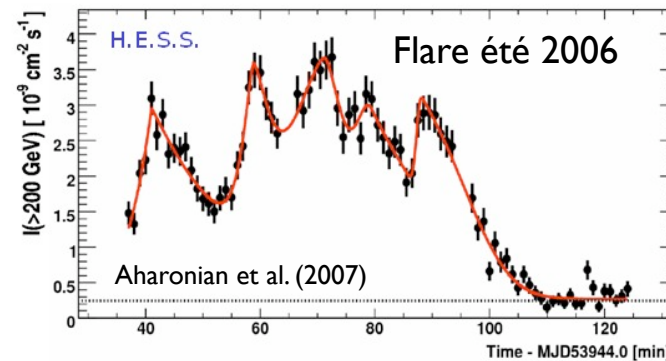
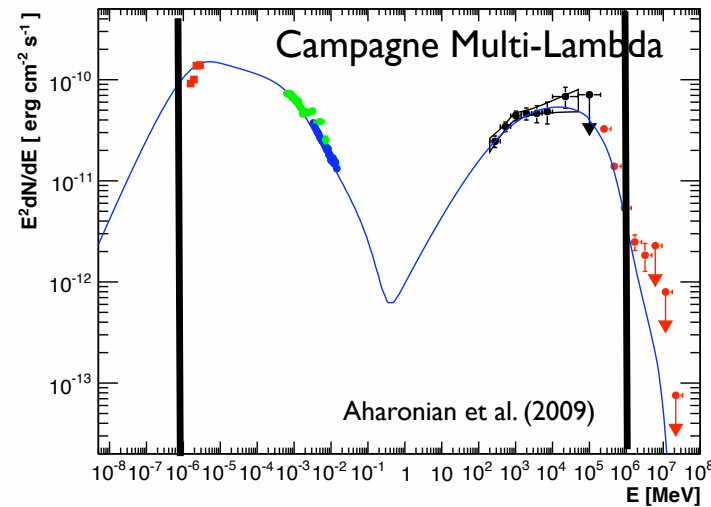
Photons d'énergie E (TeV) absorbés par les photons de longueur d'onde $\lambda(\mu\text{m}) = E$ (TeV).

$$L(1\mu\text{m}) \simeq 10^{47} \text{ erg.s}^{-1}$$

$$T_{var} = 200 \text{ sec}$$

$$\Rightarrow \tau_{\gamma\gamma} > 5 \times 10^4 !!!$$

Source statique impossible \Rightarrow jet relativiste



Limite de Puissance SSC

- On a: $\frac{P_{IC}}{P_{syn}} = \frac{\frac{4}{3}\gamma^2\sigma_T c W_{ph}}{\frac{4}{3}\gamma^2\sigma_T c W_B} = \frac{W_{ph}}{W_B}$

- Générations Compton Inverse successives produiront des photons dont les rapports de puissance successifs sont constants

$$\dots = \frac{P_{IC}^{(2)}}{P_{IC}^{(1)}} = \frac{P_{IC}^{(1)}}{P_{syn}} = \frac{W_{ph}}{W_B}$$

- Les pertes deviennent catastrophiques si $W_{ph}/W_B > 1$, i.e. $P_{IC} > P_{syn}$

$$\frac{P_{IC}}{P_{syn}} \simeq \left[\frac{T_b}{10^{12} \text{K}} \right]^5 \left(\frac{\nu}{10^{8.5} \text{Hz}} \right)$$

➡ Limite la température de brillance $T_n < 10^{12} \text{K}$ (source statique)

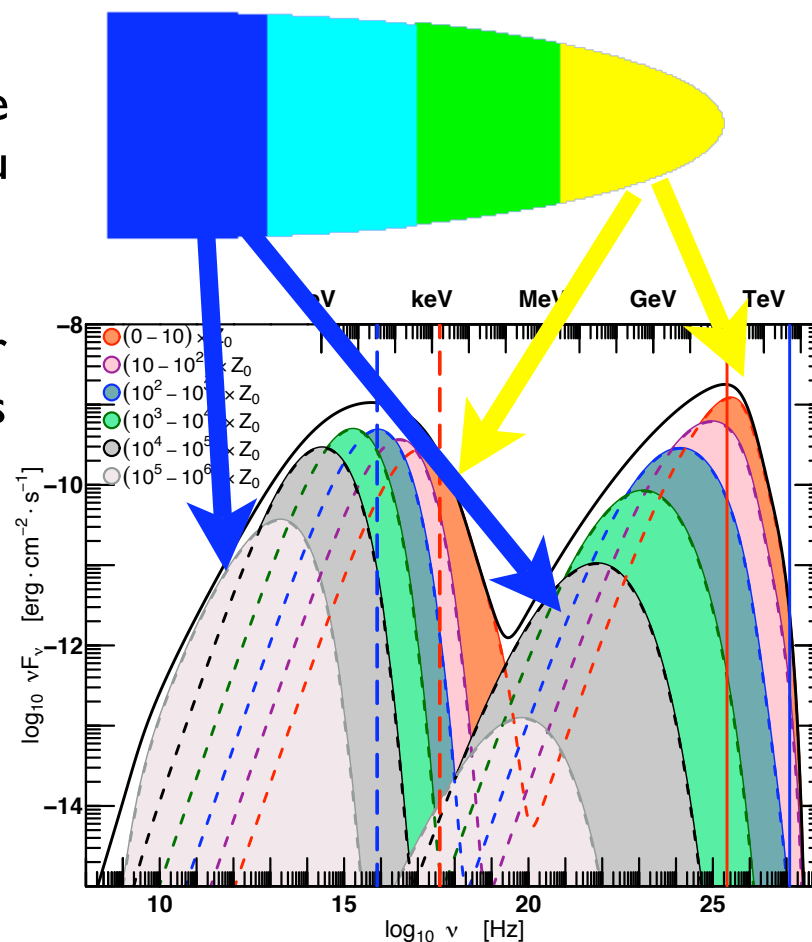
➡ Observation de $T_n \sim 10^{15} \text{K}$ ➡ amplification Doppler .

Jet Stratifié ?

- Les rayonnements IR et TeV ne sont pas émis au même endroit du jet

- Relache la contrainte sur l'opacité et permet d'obtenir des δ plus faibles (~ 10)

(e.g. Boutelier et al. 2008)



Une Crise du Facteur de Lorentz

- Pour les blazars du TeV (Mrk 501, PKS 2155), les estimations fournissent de grands facteurs de Lorentz (30 to 50, voire 100)

Mais

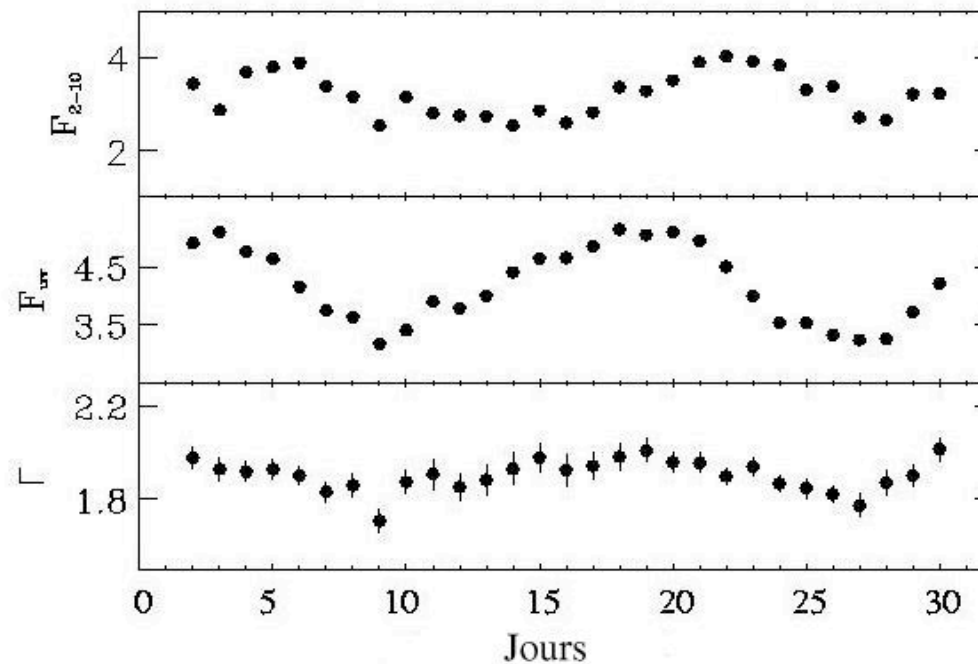
- Bien supérieurs aux vitesses superluminiques (< 10)
- Bien supérieurs aux modèles d'unification statistique ET contraste de luminosité suggèrent plutôt 3 à 5
- Incompatibles avec la détection de radiogalaxies (M87, CEN A)
- Difficiles à justifier théoriquement !!!

➡ Modèles I-zone probablement trop simples, mais même modèles de jets stratifiés ne peuvent pas reproduire les variabilités très rapides.

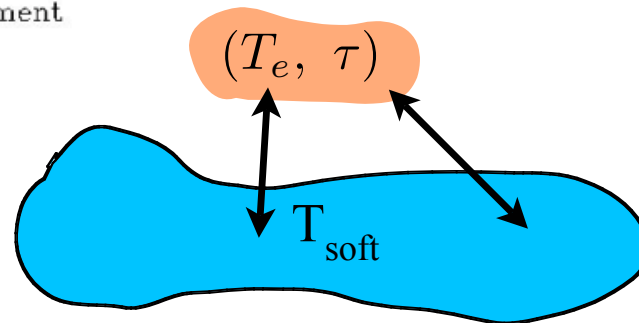
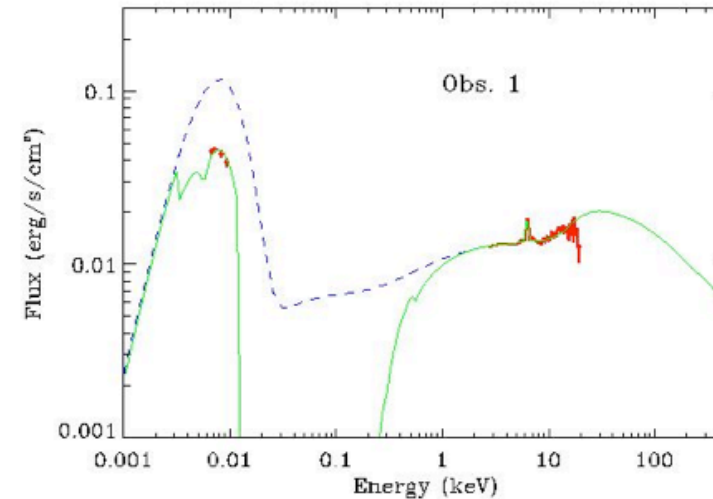
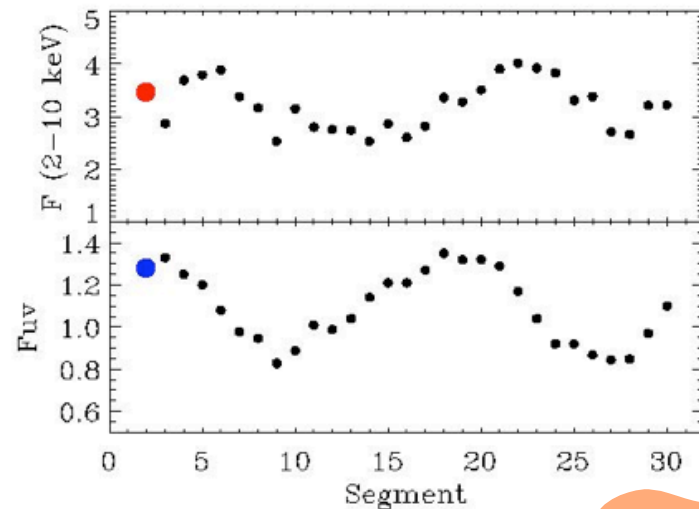
Application au Cas des Seyferts

La Couronne Thermique dans NGC 7469

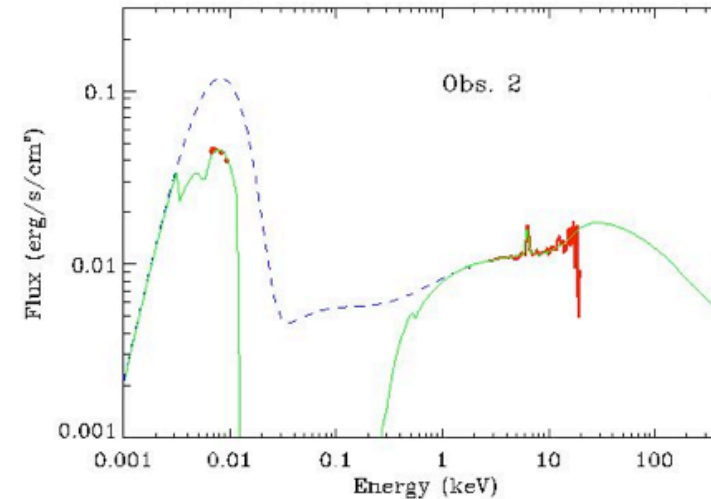
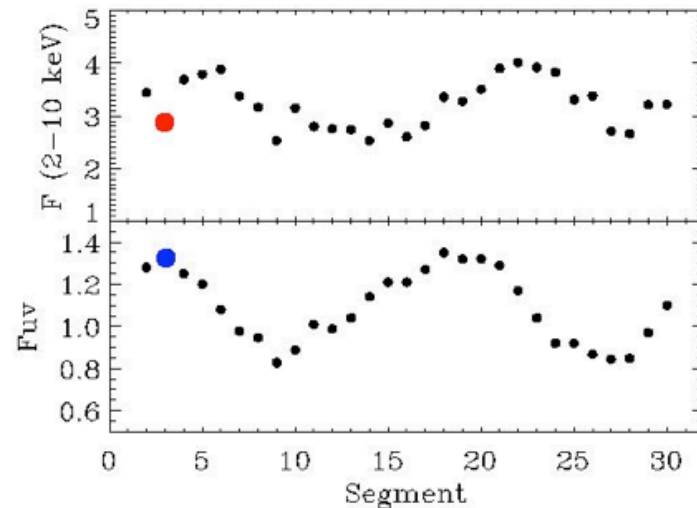
NGC 7469 a été observé durant 30 jours par IUE et XTE



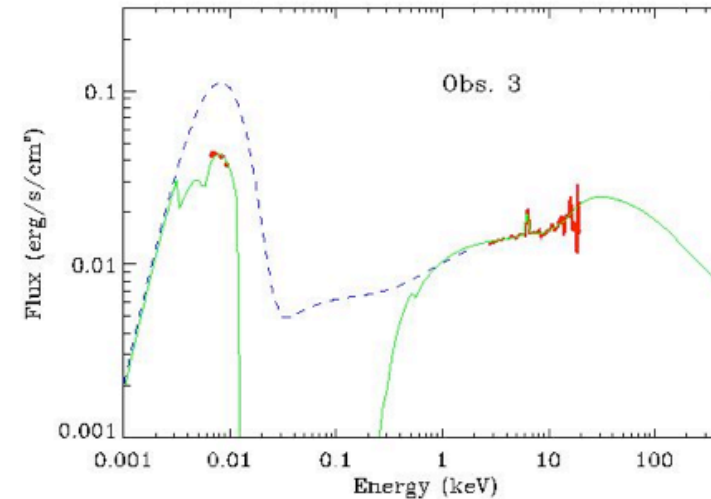
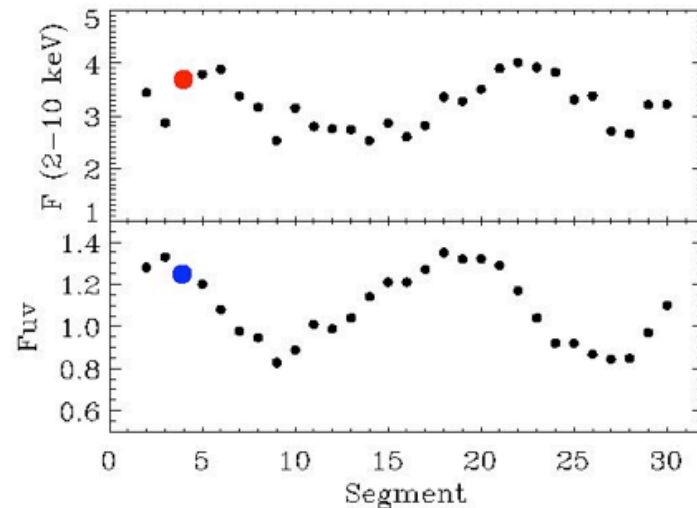
Modèle de Comptonisation Thermique



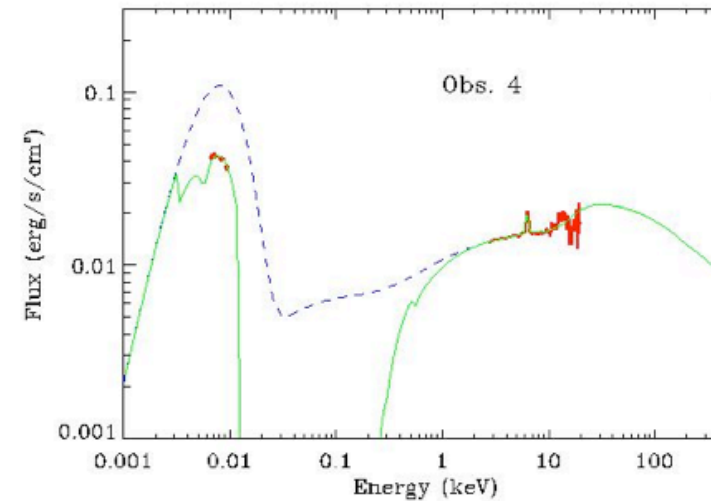
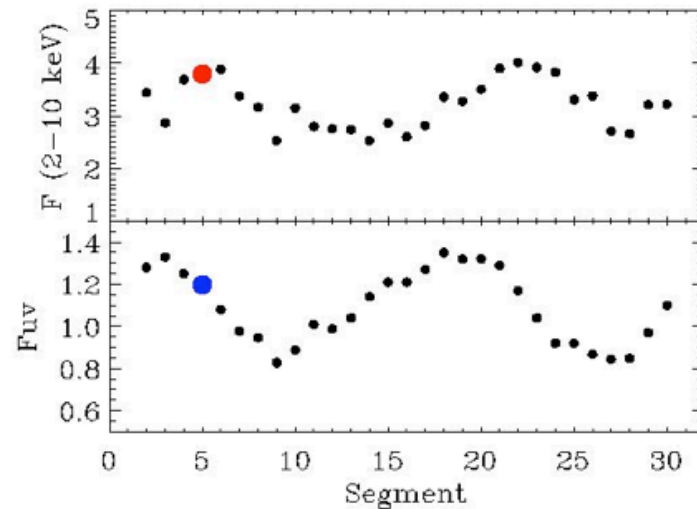
Modèle de Comptonisation Thermique



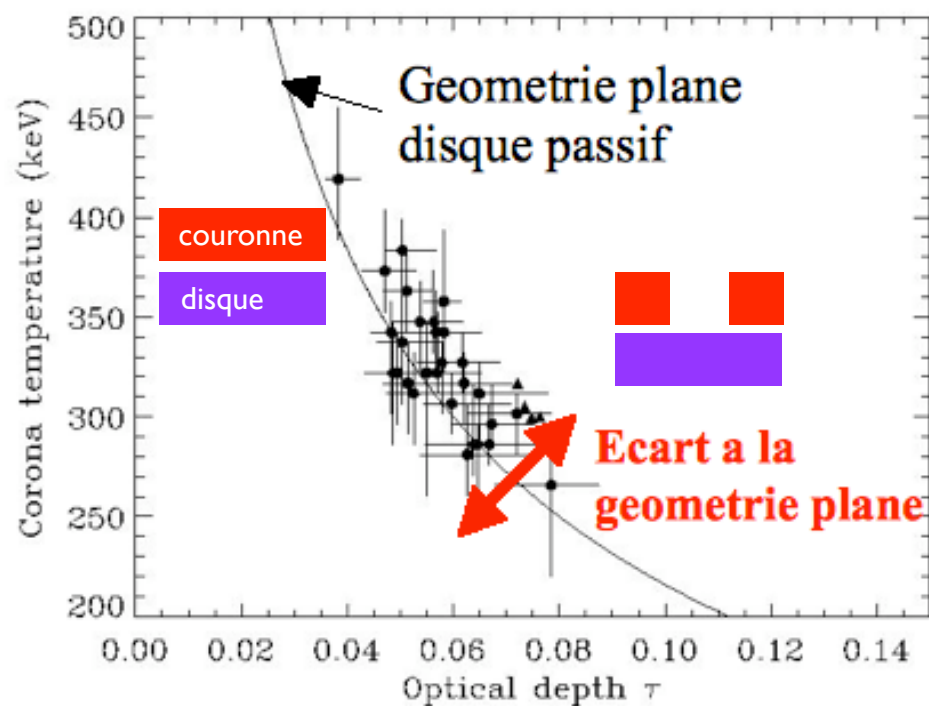
Modèle de Comptonisation Thermique



Modèle de Comptonisation Thermique



Une Couronne Variable

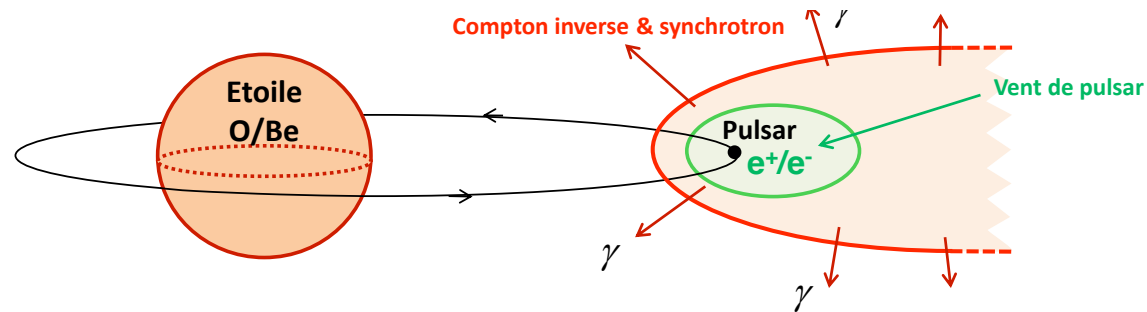


Une interprétation possible: une couronne qui se « morcelle »

Petrucci et al. (2004)

Application aux Binaires gamma

Vent de Pulsar



Flux gamma modulé par l'absorption de paires

14

Guillaume Dubus: Gamma-ray binaries: pulsars in disguise ?

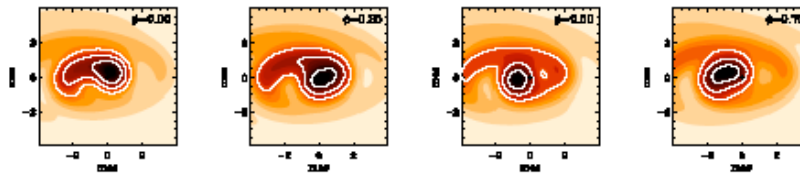
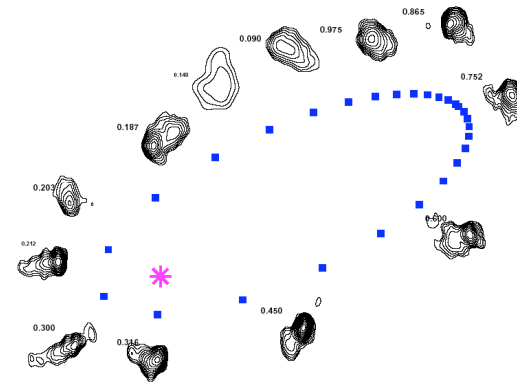


Fig. 7. Orbital evolution of the 5 GHz radio emission from the pulsar nebula in LS 5039. The maps were composed by summing

(Dubus 2006, 2007, Cerutti et al. 2008)



Observations VLBA de LSI+61°303
(Dhawan et al. 2006)

Prospective

- Radio-loud: accumuler les détections (blazar, radio galaxies,...) pour tester le modèle d'unification. Les variabilités multi-lambda sont aussi très contraignantes pour les modèles.
- Radio-quiet: a priori on ne s'attend pas à une détection. La NLSyI est peut être un objet intermédiaire entre radio-loud/radio quiet
- Microquasar: pas de détection claire.... mais serait un résultat majeur...

Bibliographie

Titre: Modelling the behaviour of accretion flows in X-ray binaries. Everything you always wanted to know about accretion but were afraid to ask

Auteurs: Done, Chris; Gierliński, Marek; Kubota, Aya
The Astronomy and Astrophysics Review, Volume 15, Issue 1, pp.1-66

Titre: X-Ray Properties of Black-Hole Binaries

Auteurs: Remillard, Ronald A.; McClintock, Jeffrey E.
Annual Review of Astronomy & Astrophysics, vol. 44, Issue 1, pp.49-92

Titre: Unified Models for Active Galactic Nuclei and Quasars

Auteur: Antonucci, R.
Annual Reviews in Astronomy and Astrophysics 31 (1): 473–521. 1993

Titre: An Introduction to Active Galactic Nuclei (Broché)

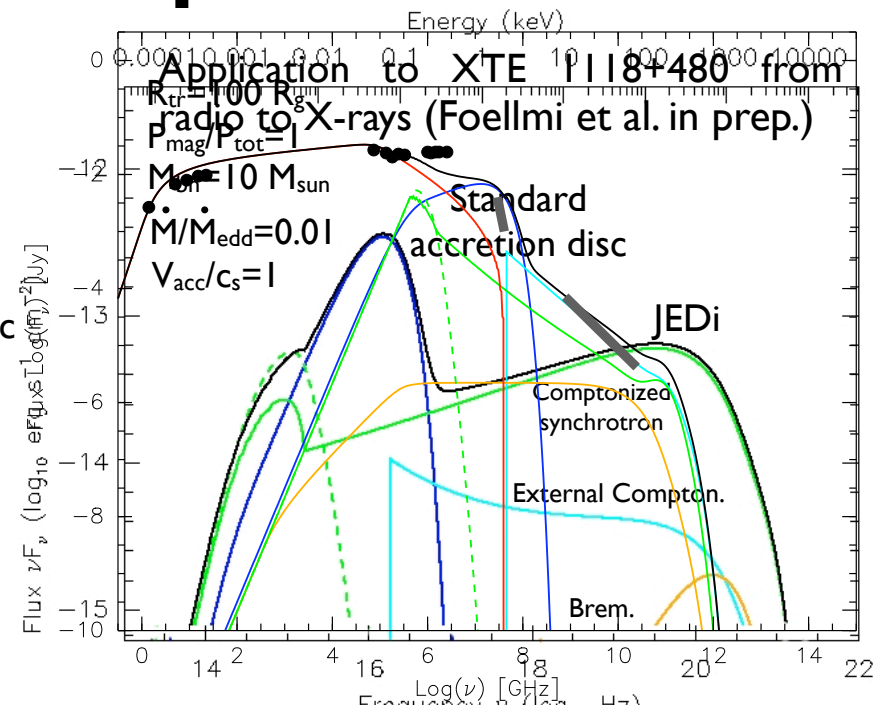
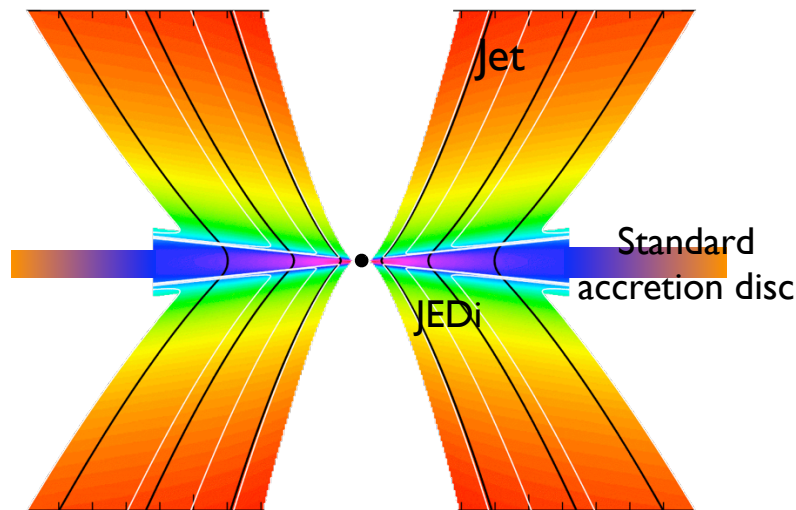
Auteur: Bradley M. Peterson
Cambridge University Press (13 février 1997)
ISBN-10: 0521479118

Titre: Physics of Active Galactic Nuclei at All Scales

Auteurs: Danielle Alloin, Rachel Johnson, Paulina Lira
Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K (mars 2006)
ISBN-10: 3540312072

Merci !

Jet et Couronne dans les microquasars

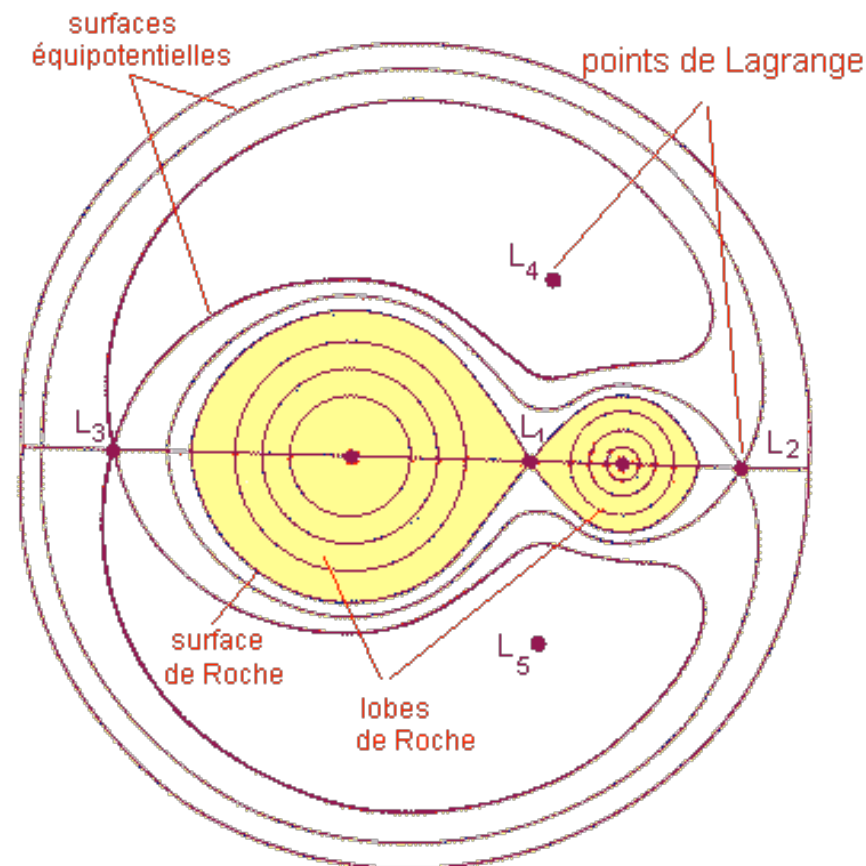


Origine des photons mous

Electrons relativistes diffusent sur tous les photons dans le régime Thomson (régime KN regime moins efficace)

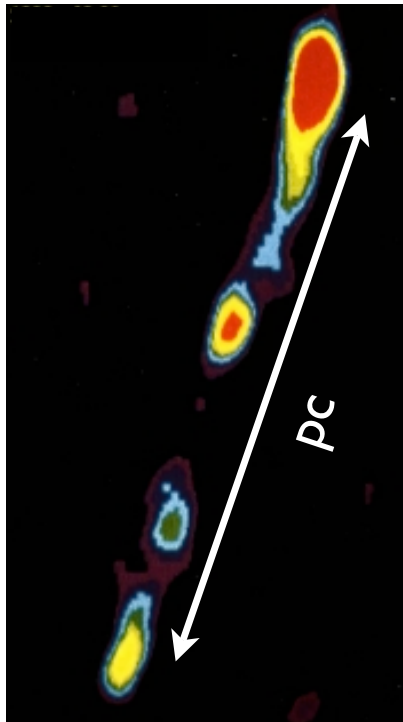
- Photons émis par la matière extérieure (disque, raies) :
 - ↳ Compton Externe
- Photon synchrotrons :
 - ↳ Synchrotron Self Compton (SSC)
- Photons du rayonnement cosmologique à 2.7 K

Lobe et surface de Roche



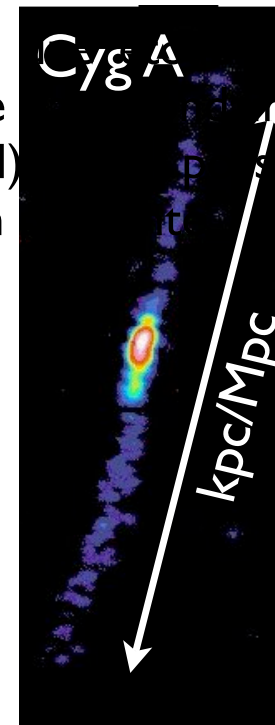
**Potentiel de gravitation
dans un système binaire**

Microquasars = XrB avec Jets



Le 1er microquasar a été découvert en 1992: I E 1740.7–2942 près du centre galactique (Mirabel et al. 1992)

Un microquasar est composé d'une étoile normale compacte (Naine Blanche ou Noir) et d'un objet compact (Naine Blanche ou Noir) qui possède la signature claire d'une éjection relativiste observée dans les AGNs



Cyg A est une galaxie composée d'une étoile normale compacte (Naine Blanche ou Noir) et d'un objet compact (Naine Blanche ou Noir) qui possède la signature claire d'une éjection relativiste observée dans les AGNs

Variabilité

Model d'ordre zéro

Accretion rate fluctuations at various disk radii

