

Mécanismes d'éjection et émission de haute énergie dans les quasars

G. Henri

Professeur à l'Université Joseph Fourier (-> 31/12/2015 !)

Future Université Grenoble Alpes

Institut de Planétologie et d'Astrophysique de Grenoble

Collège de France , 14 décembre 2015



Collège de France, 14 décembre 2015

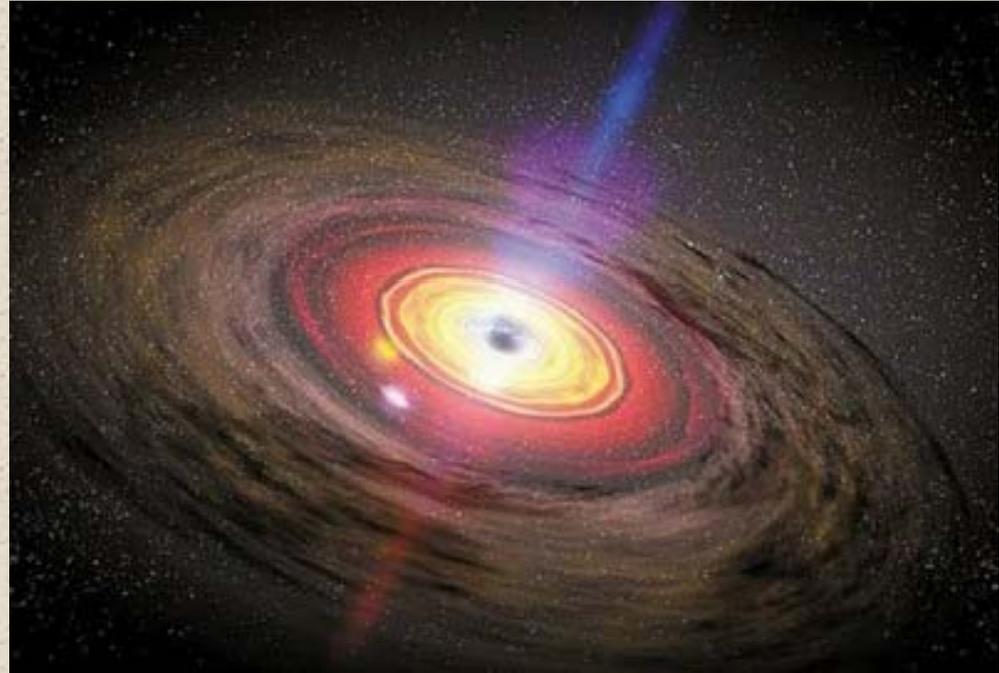
Noyaux actifs de Galaxie

Trous noirs supermassifs
 $10^6 - 10^{10} M_{\text{sol}}$

$L \sim 10^{10}$ à $10^{14} L_{\text{solaires}}$

(10^{-3} à 1 luminosité
d'Eddington)

Environnement complexe
: Disque d'accrétion, tore
de poussières, jets

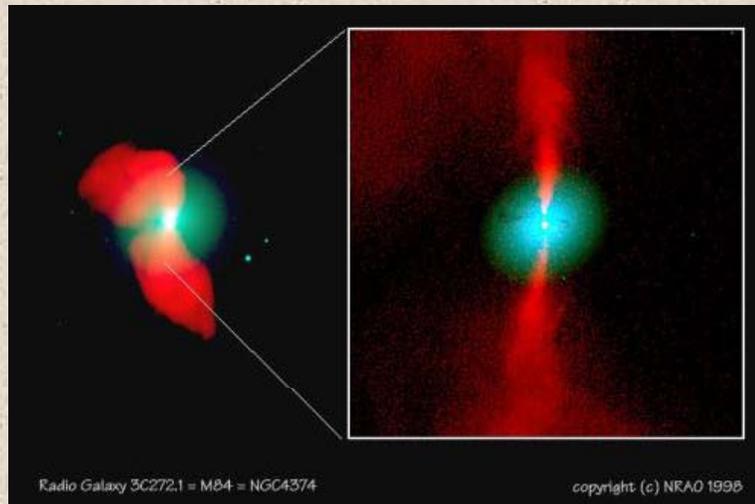


$\sim 10\%$ NAG sont *radio-louds*, émission non thermique
intense : radio \rightarrow gammas de très haute énergie (10 TeV)

Objets radio

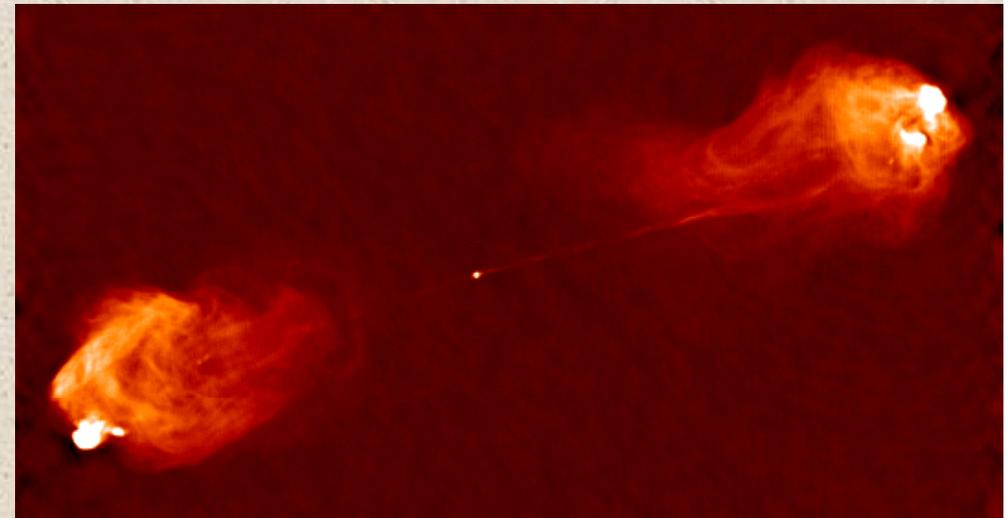
Environ ~10 % des galaxies actives

Radio galaxies :



Fanaroff Riley (FR) I (M84)

Crédit NRAO

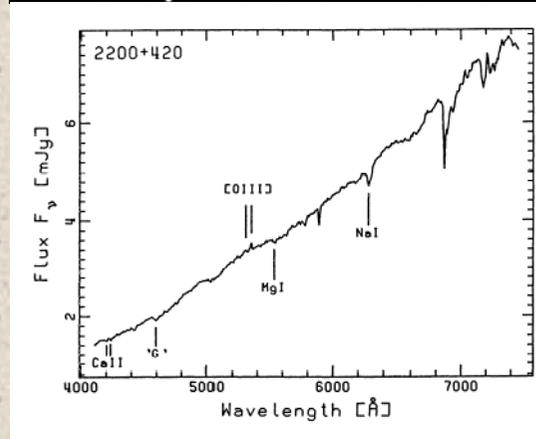
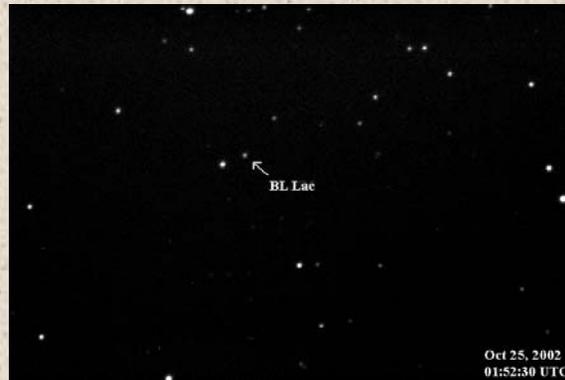


FR II (Cygnus A)

Objets radio

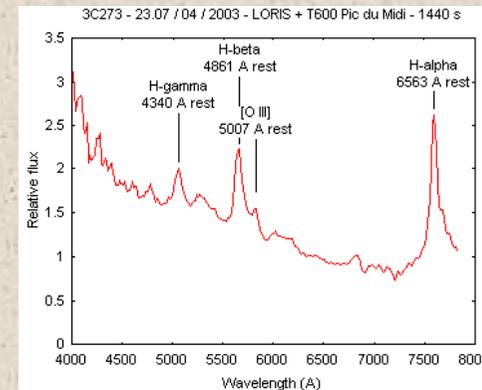
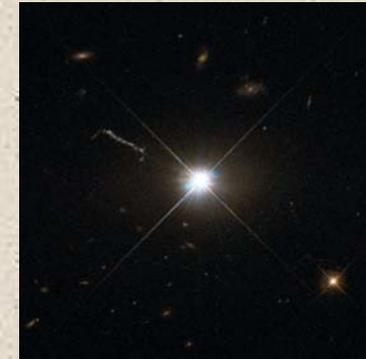
Quasars (objets quasi-stellaires) :

BL Lacs: Pas ou peu d'émission de disque et de raies



Radio quasars : Emission du disque d'accrétion intense, raies d'émission optiques

3C 273

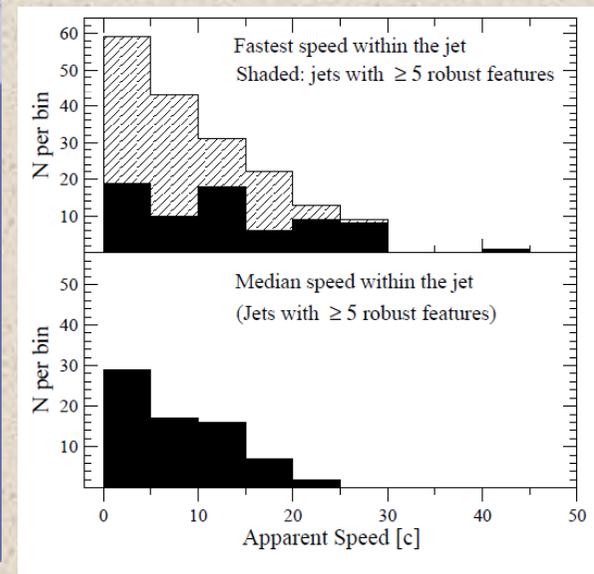
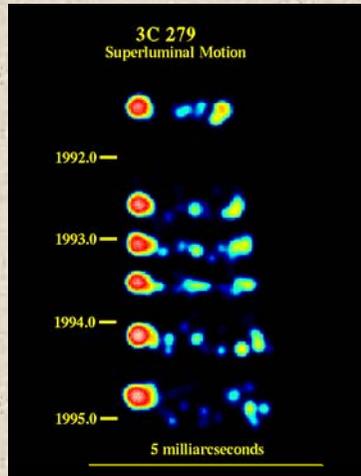


Jets relativistes

Observations VLBI révèlent des vitesses apparemment superlumines, typiquement de 5 à 10 c (-> 40 c)

3C 279

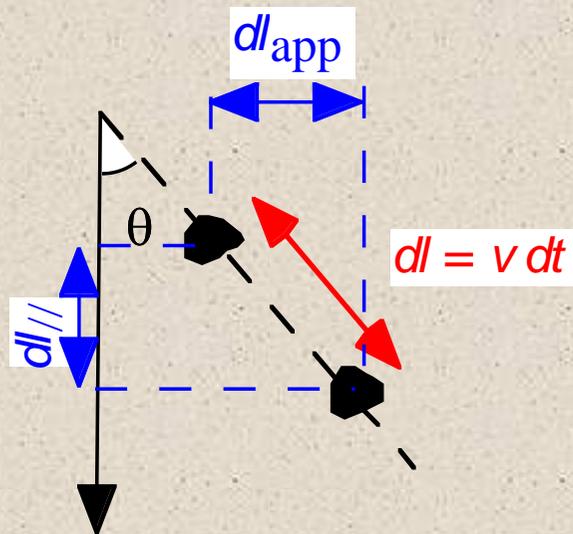
$V_{app} < \Gamma_b c \rightarrow$ constraint $\Gamma_b \sim 10$



Lister et al AJ, 2013

Jets relativistes

Vitesse superluminique ~ effet Doppler (variation du temps de trajet jusqu'à l'observateur)

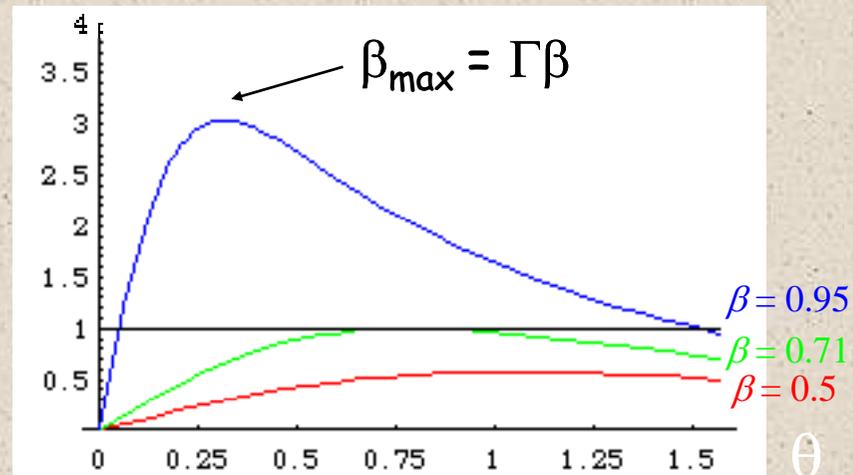


$$dl_{app} = v dt \sin \theta$$

$$dl_{//} = v dt \cos \theta$$

$$dt_{app} = dt - \frac{dl_{//}}{c} = dt \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right)$$

$$\beta_{app} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}$$



Facteur Doppler

$$\delta = 1/[\Gamma(1 - \beta \cos \theta)] \quad \text{Valeur max } \delta=2\Gamma$$

$$\text{Temps : } t_{\text{obs}} = t/\delta$$

$$\text{Fréquences : } \nu_{\text{obs}} = \nu * \delta$$

$$\text{Intensités : } I_{\text{obs}} = I * \delta^{(3+\alpha)}$$

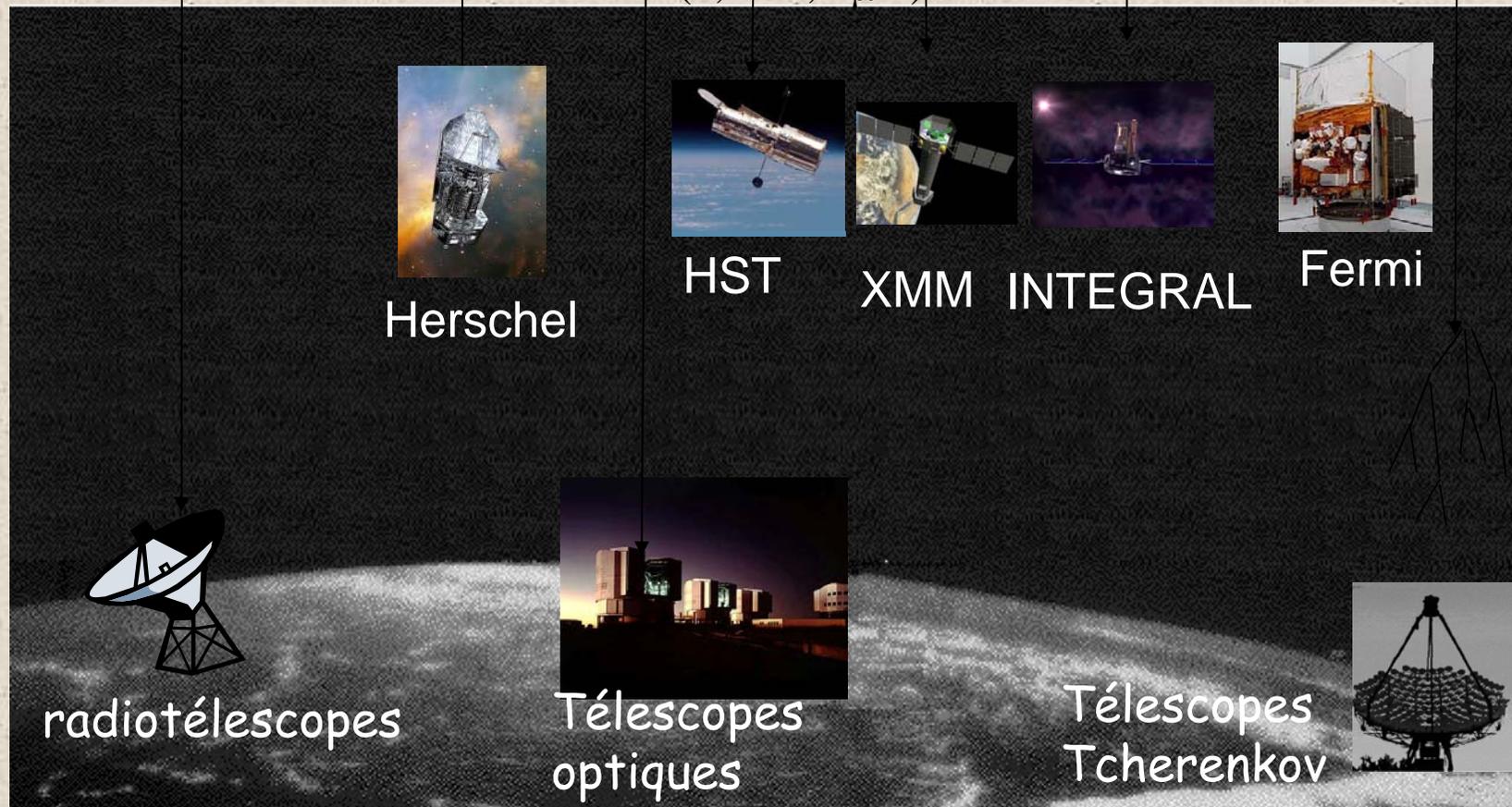
Emission par le jet amplifiée, variabilité plus rapide, focalisée dans un cône d'angle $\theta \sim 1/\Gamma$

Contre jet « désamplifié » par $1/\delta$

θ

Le spectre électromagnétique

E	1 μeV	1 meV	1 eV	1 keV	1 MeV	1 GeV
λ	1 m	1 mm	1 μm	1 nm	1 pm	1 fm



Emission de haute énergie

Lancement des satellites gamma (CGRO, AGILE, Fermi ..) -> observation gamma (0,1 MeV à 300 GeV)

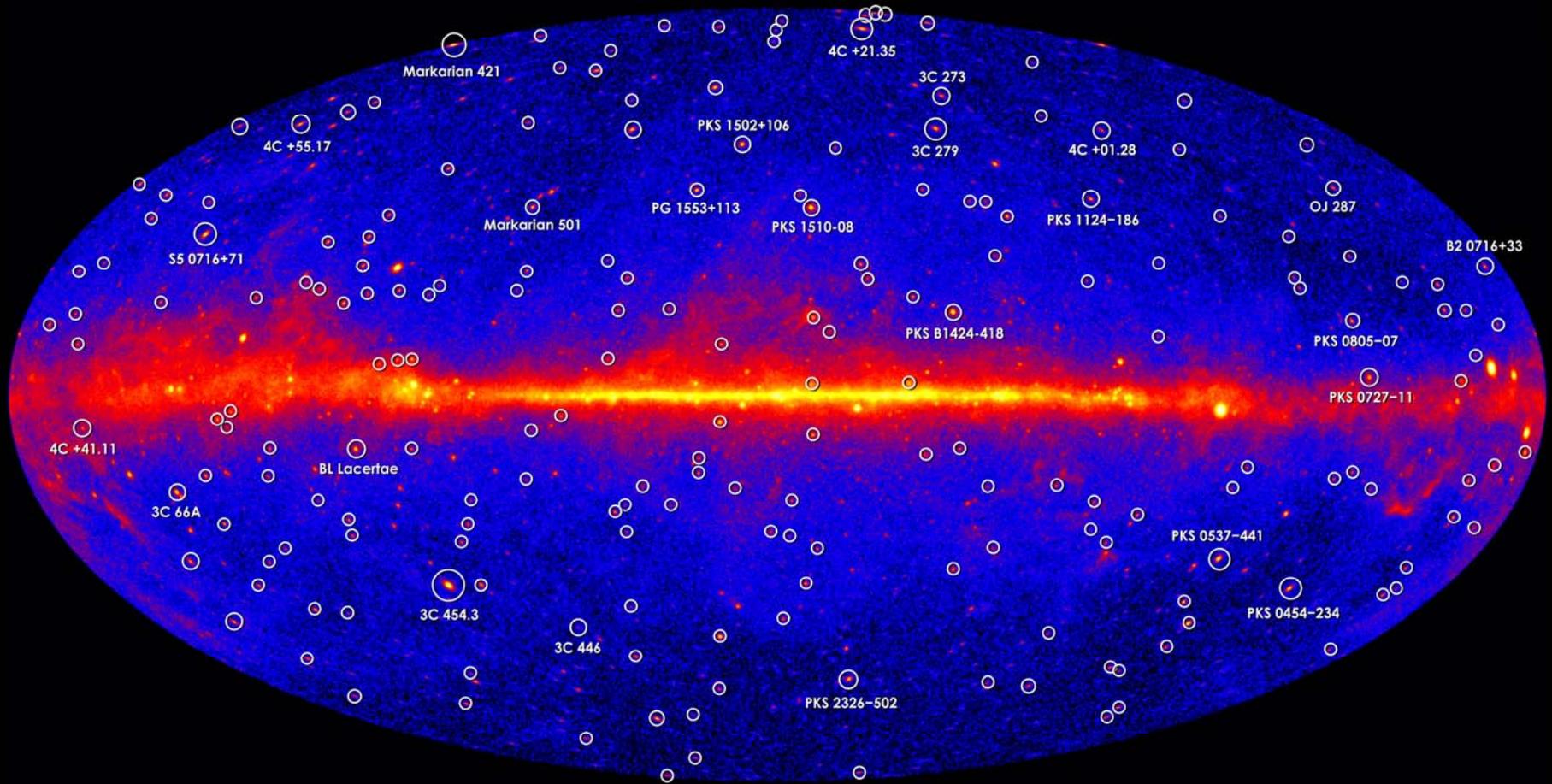


Compton Gamma Ray observatory (1990)



Fermi (2008)

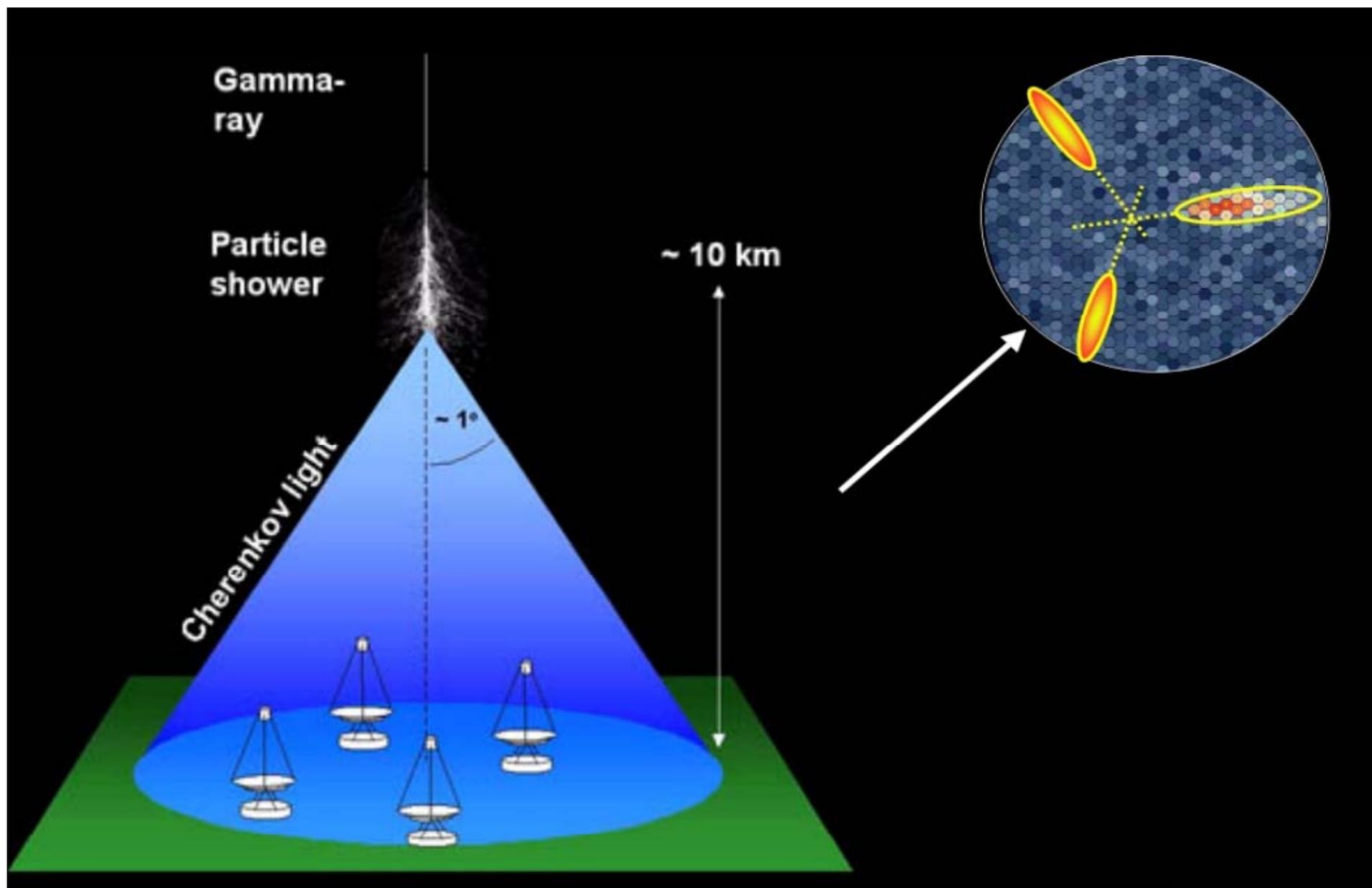
5 années d'observations par Fermi



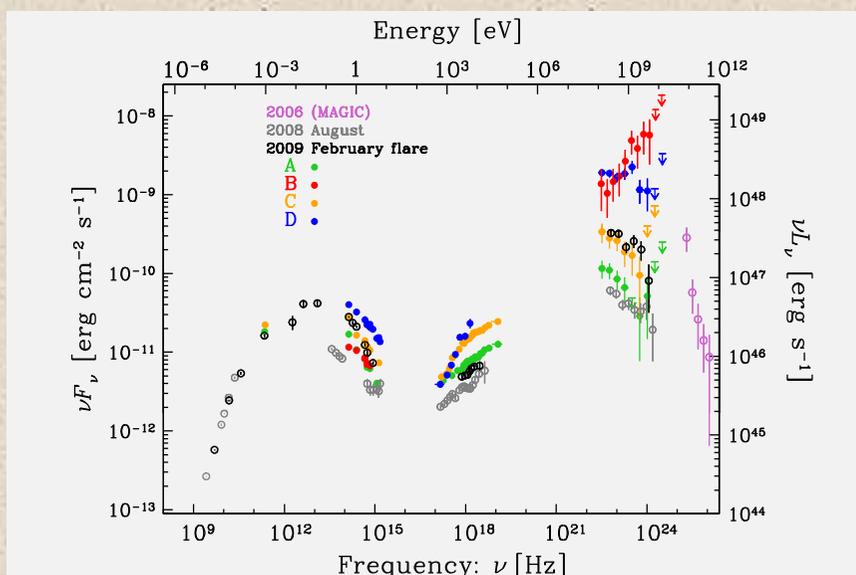
Télescopes Tcherenkov atmosphériques

Site de H.E.S.S (Namibie)





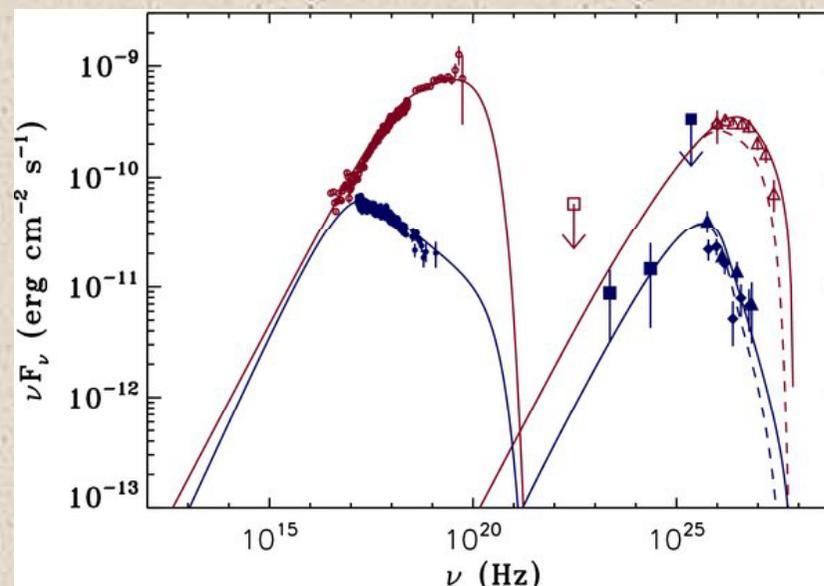
Spectres non thermiques



3C279 (Hayashida et al.2015)

Basse énergie : radio -opt-UV
Haute énergie : X- γ (GeV)

Radio quasars
(raies optiques, disque d'accrétion)



Mrk 501 (Acciari et al. 2011)

Basse énergie : radio opt-X
Haute énergie : γ (-> TeV)

BL Lacs (raies faibles ou
absentes)

Un objet spectaculaire au TeV : PKS 2155 - 304

An Exceptional VHE Gamma-Ray Flare of PKS 2155–304

5

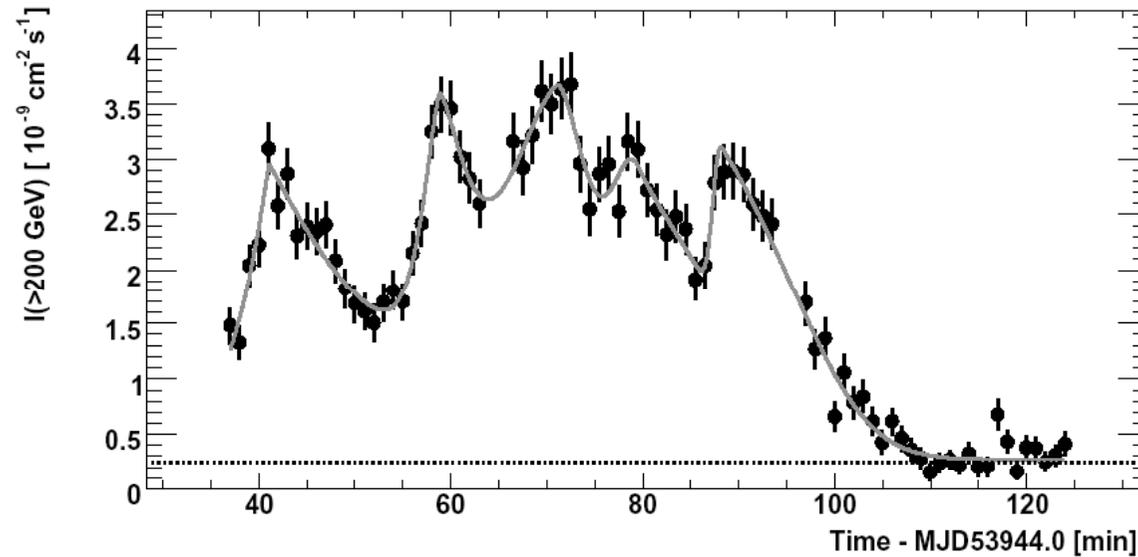
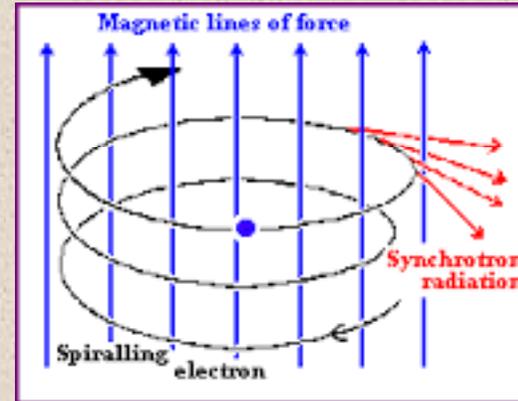


FIG. 1.— The integral flux above 200 GeV observed from PKS 2155–304 on MJD 53944 versus time. The data are binned in 1-minute intervals. The horizontal line represents $I(>200 \text{ GeV})$ observed (Aharonian et al. 2006) from the Crab Nebula. The curve is the fit to these data of the superposition of five bursts (see text) and a constant flux.

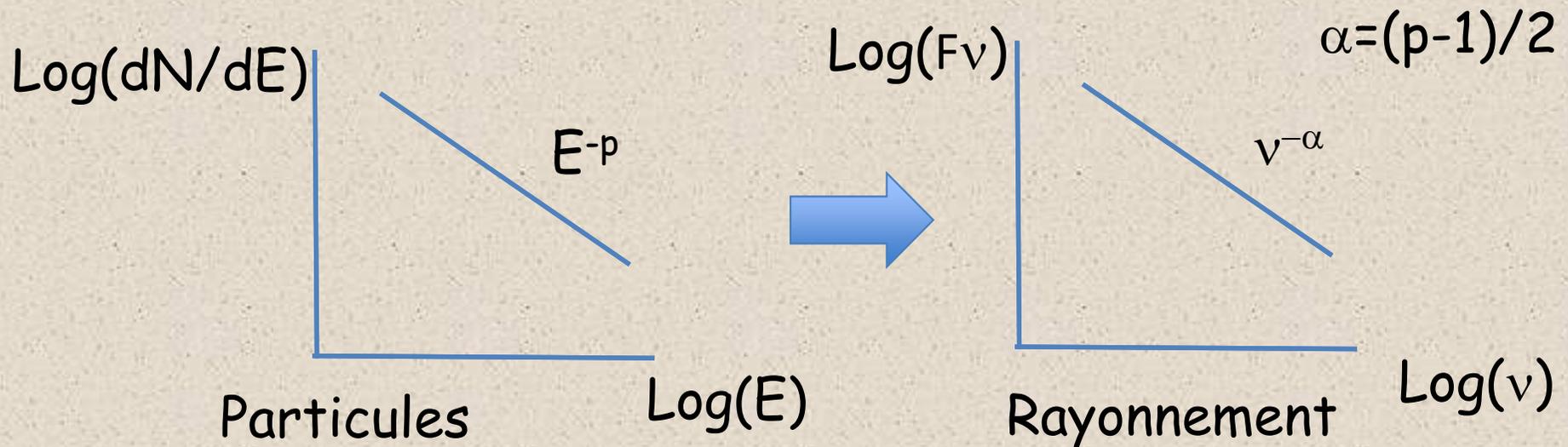
Emission très intense et rapidement variable ...
forte contrainte sur le mouvement relativiste de
la source ($\Gamma > 30$?)

Processus radiatifs : émission synchrotron

Électrons relativistes ($v \sim c$)
dans un champ magnétique



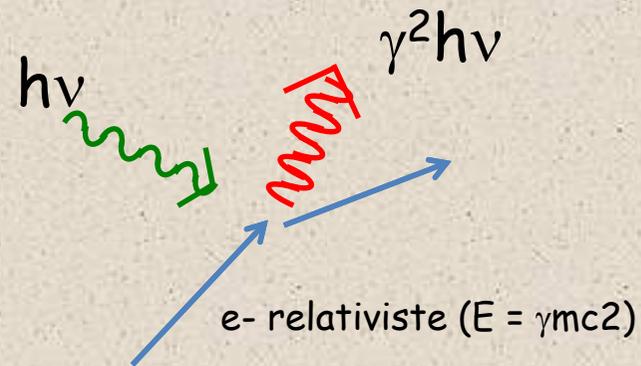
Émission synchrotron -> radio jusqu'à X durs



Distribution en énergie en loi de puissance (non thermique) ->
spectre en loi de puissance

Processus radiatifs : émission Compton Inverse

Électrons relativistes ($v \sim c$, grand γ) + photons de basse énergie (optiques ou synchrotron)



Émission Compton inverse \rightarrow X à gammas (TeV)

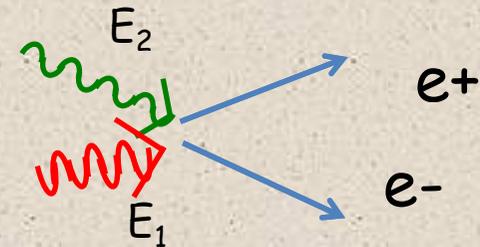
Sources de photons :

- * synchrotron (processus Synchrotron Self Compton ou SSC)
- * photons du disque d'accrétion, tore, raies d'émission... (processus Compton externe)

Création de paires e^+/e^-

Photons gammas absorbés par des photons de basse énergie si $E > mc^2 = 511 \text{ keV}$

(efficacité maximale si $E_2 \sim (mc^2)^2/E_1$)



Photons à $\sim 1 \text{ TeV}$ \rightarrow absorbés par photons de 1 eV (Infrarouge)

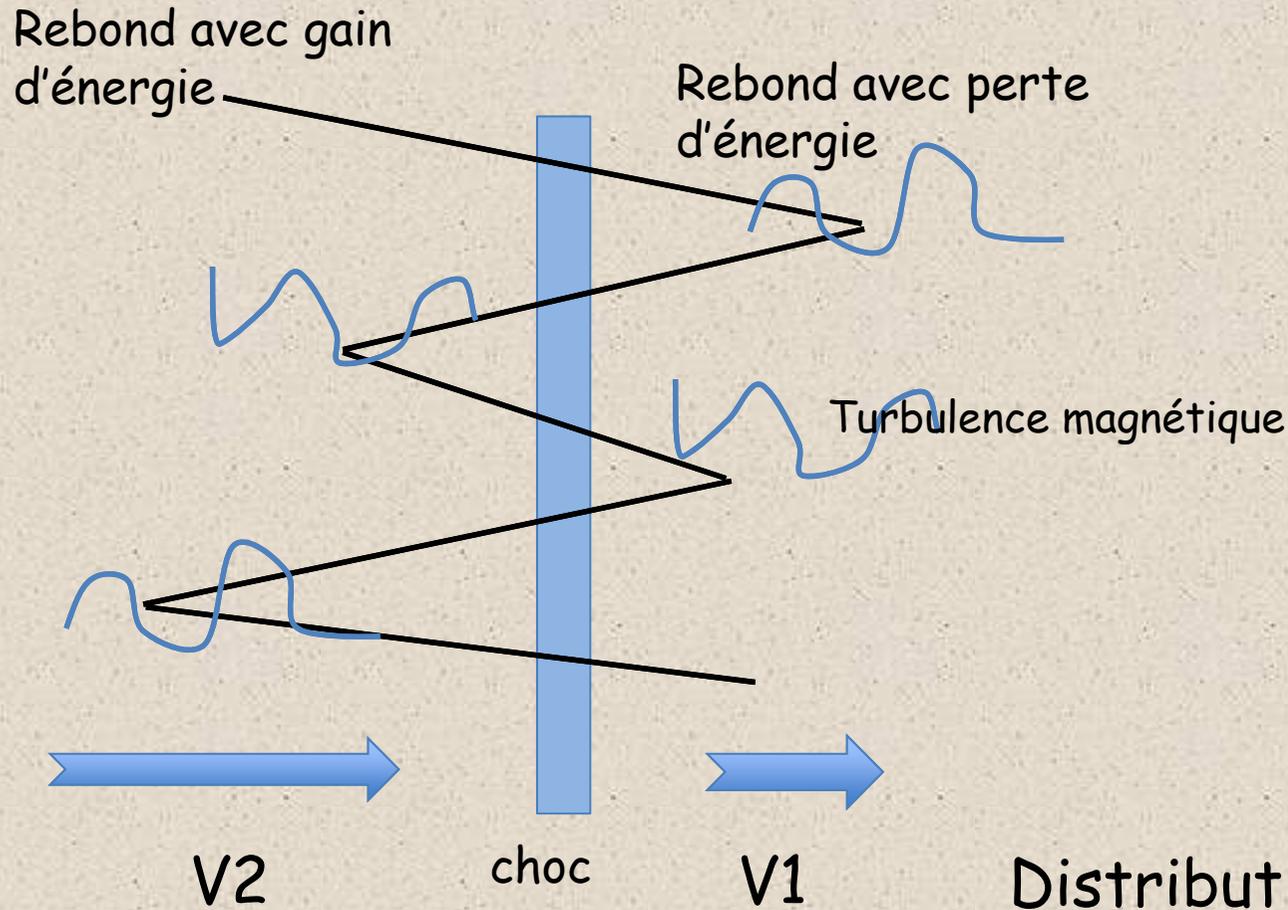
Photons à $\sim 100 \text{ GeV}$ \rightarrow absorbés par photons de 10 eV (UV)

- \rightarrow Photons ne peuvent pas sortir d'une source trop lumineuse et trop compacte
- \rightarrow Problème de l'absorption interne \rightarrow amplification relativiste nécessaire (grand facteur de Lorentz)
- \rightarrow densité moins grande dans le référentiel en mouvement

Conclusions

- L'émission gamma ne peut provenir que du jet relativiste avec un grand facteur de Lorentz
- Si il existe un champ de photons \sim isotrope (cas des quasars), elle doit avoir lieu assez loin de la source)
- Contraintes parfois difficiles à concilier avec une grande variabilité
- Parfois également incompatible avec de faibles vitesses superluminiques observées en radio (BL Lacs)
- Il existe aussi une absorption extragalactique limitant la visibilité de ces objets au TeV (horizon)

Accélération de Fermi 1^{er} ordre



$$\frac{\Delta E}{E} \simeq \frac{|V_2 - V_1|}{c}$$

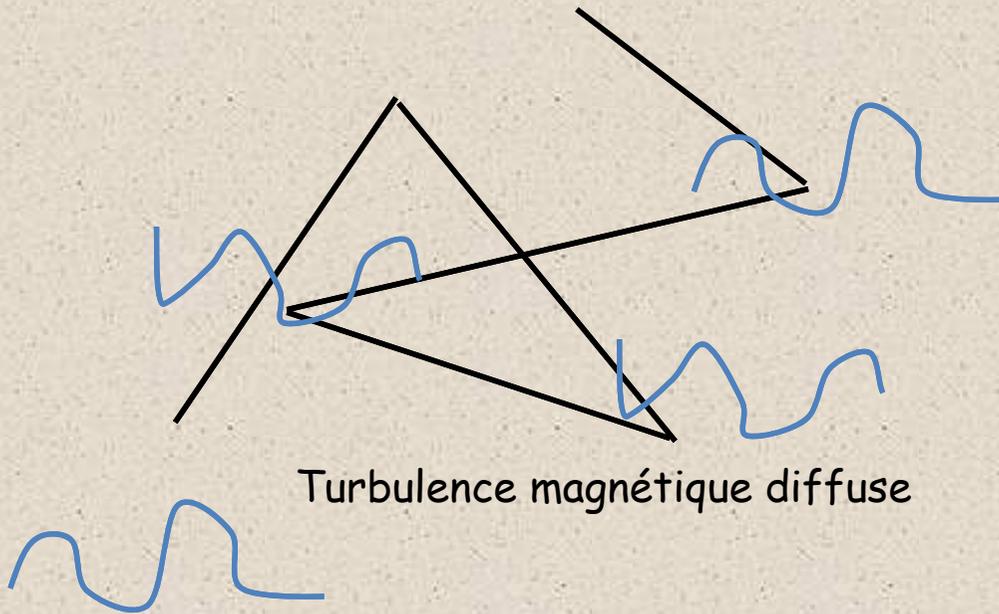
$$\frac{dN}{dE} = K E^{-p}$$

$$p = \frac{r + 2}{r - 1} \rightarrow 2$$

quand $r = \frac{V_2}{V_1} \rightarrow 4$

Distribution en énergie en « loi de puissance » (non thermique)

Accélération de Fermi 2nd ordre

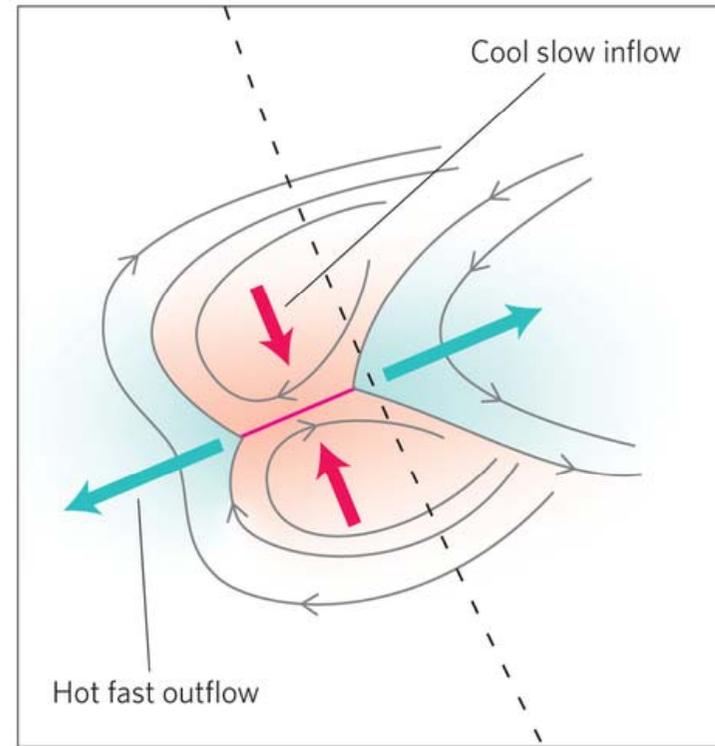
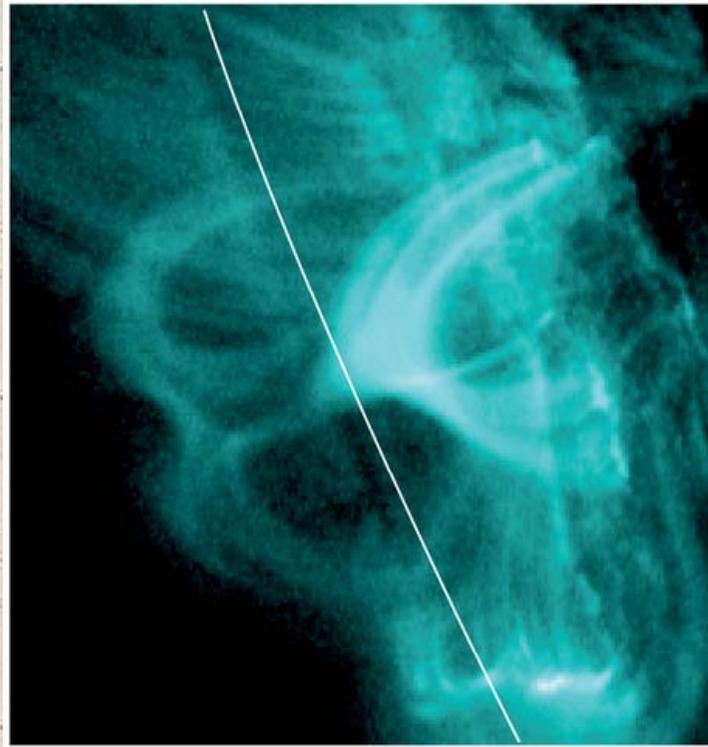


$$\frac{\Delta E}{E} \simeq \left(\frac{v_A}{c}\right)^2$$

$$\frac{dN}{dE} = K E^2 \exp(-E/E_0)$$

Distribution en énergie en « maxwellienne relativiste »

Reconnexion magnétique



Forbes, Nature Physics, 2013

Quelques questions ouvertes :

- Mécanisme d'éjection des jets relativistes
- Nature des particules énergétiques : leptons (e^- ou e^+/e^-)
Ou protons?
- Mécanisme de rayonnement ?
- Sites d'accélération ?
- Mécanisme d'accélération ?
- Origine de la variabilité ?

Modèle « standard » leptonique (e^-)

Approximation une zone : leptons + B remplissant une zone sphérique homogène

Bosse à basse énergie:
Rayonnement synchrotron
 $e^- + B$

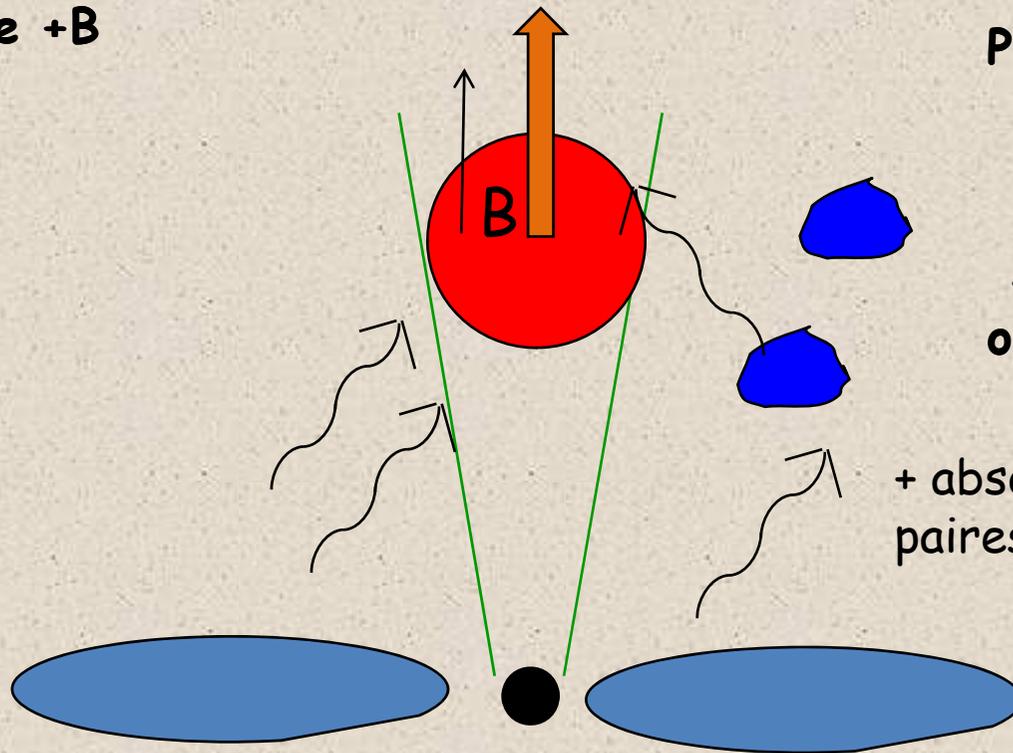
Bosse à haute énergie:
Inverse Compton $e^- + h\nu$

Photons provenant de $h\nu$:

- synchrotron (SSC)

- champs externes: disque, raies optiques, tore de poussière (IR)

+ absorption secondaire par création de paires



Alternative : modèles « hadroniques » (protons relativistes)

Supposent l'injection de protons (cosmiques) de très haute énergie (PeV, $\gamma \sim 10^7 - 10^8$)

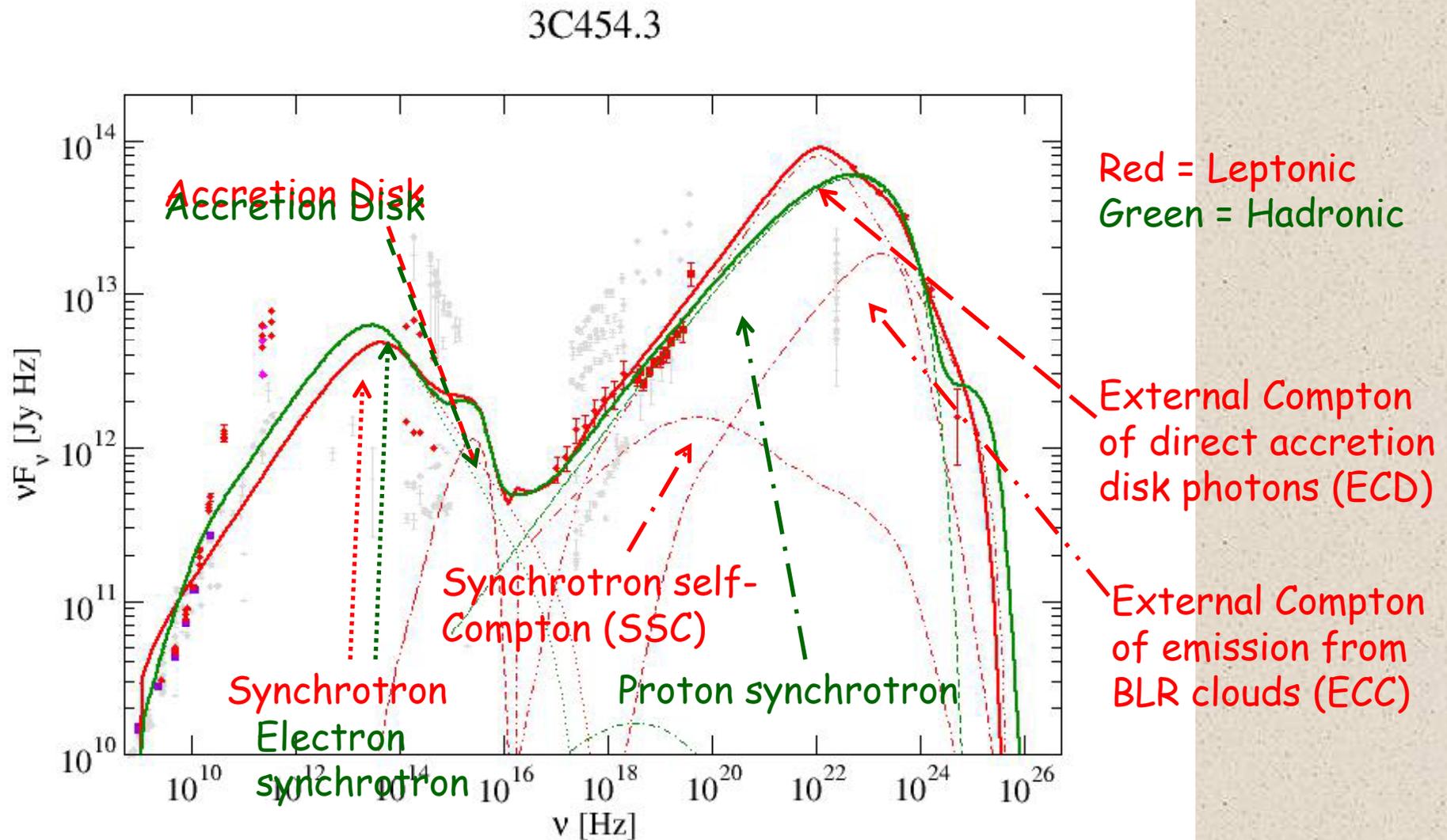
Interaction par collisions p-p, p-photons, ou p-B (synchrotron, électromagnétique)

Production secondaire particules π : $\pi^0 \rightarrow 2 \gamma$, $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \rightarrow e^\pm$

Mélange de processus complexes, demande des simulations lourdes Monte Carlo : peu de comparaisons détaillées avec des données.

Modèles « Mixtes » possibles, mais la composante hadronique n'est pas dominante (Cerruti et al. 2012)

Comparaison leptonique/hadronique (Böttcher, Reimer et al. 2013)



Formation des jets : Blandford contre Blandford

- Mécanisme Blandford Znajek (1977)

Rotation rapide d'un trou noir magnétisé

- exige un horizon (ergosphère) (\neq étoile à neutrons)
- Produit une éjection dominée par le flux de Poynting sur l'axe et un flux faiblement relativiste à grand angle

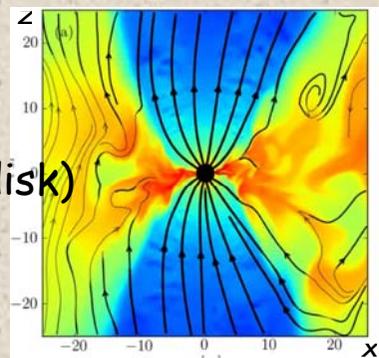
- Mécanisme Blandford & Payne (1982)

- disque d'accrétion magnétisé (BH, NS, YSO...)
- Ne peut produire que des jets faiblement relativistes, mais bien collimatés

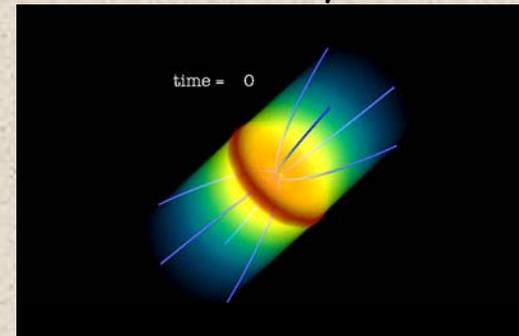
Version « MAD »

(magnetically arrested disk)

, Tchekhovskoy et al...



De Villiers, Hawley, Krolik 2005



Zanni, PhD thesis

Quelques problèmes pour le modèle BZ (trou noir en rotation rapide)

- Ne marche qu'avec un trou noir (ergosphère) : quid des jets autour des étoiles jeunes et des étoiles à neutrons ?
- Collimation des jets relativistes difficile
- Trous noirs en rotation rapide mesurés pour des objets sans jets puissants (Galaxies de Seyferts)
- Différents états des « microquasars », avec ou sans jet, pour la même rotation du trou noir !
- Problème du « Compton drag »

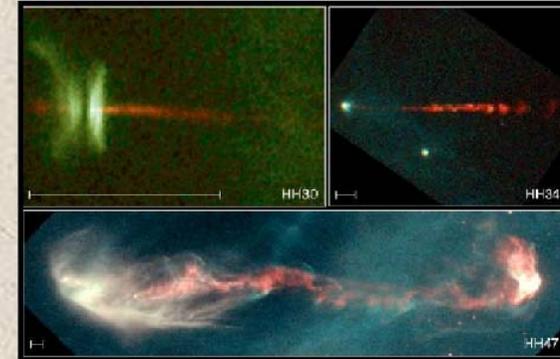
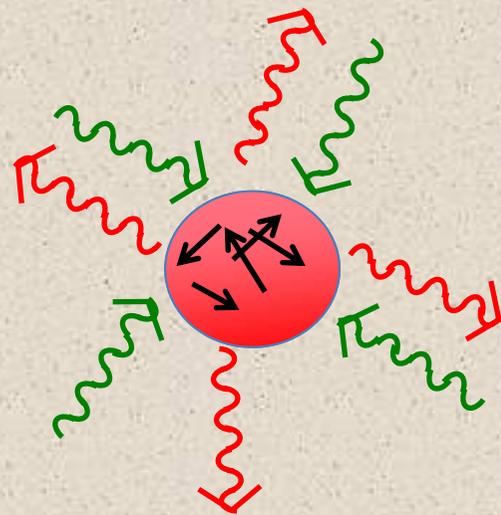


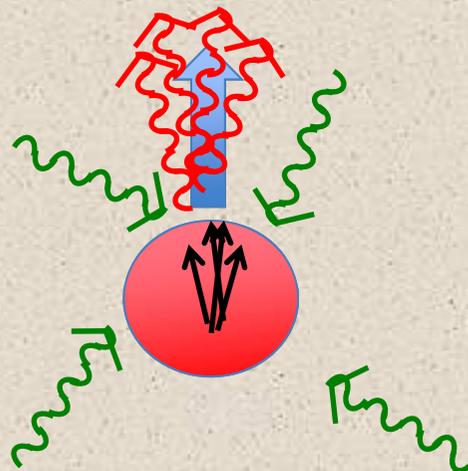
Photo credits: NASA.

Problème du « Compton drag » (freinage Compton)

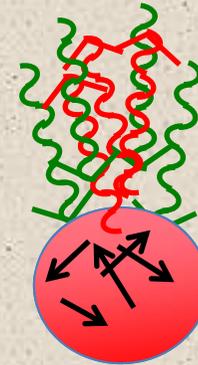
Emission Compton inverse : diffusion des photons par des e^- relativistes



Source statique +
photons isotropes



Source en mouvement
(référentiel de
l'observateur)

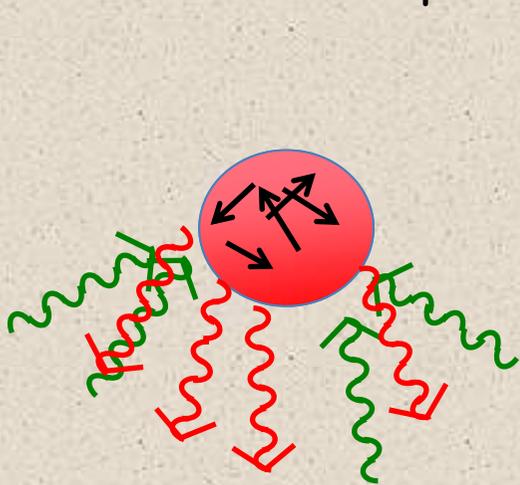


Source en
mouvement
(référentiel de la
source)

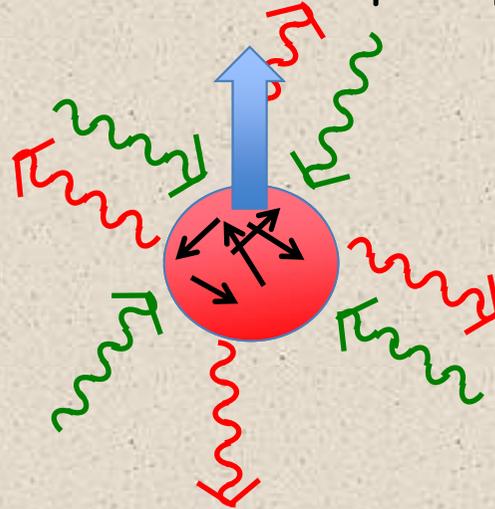
Déplacement relativiste -> force de freinage très forte
« Mélasse optique »...

Freinage ou « fusée » Compton ?

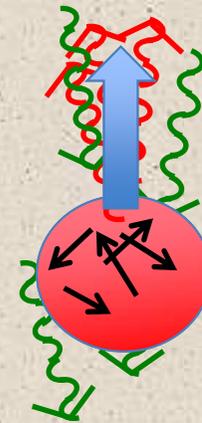
Emission Compton inverse sur un champ de photons *anisotrope*



Source statique +
photons anisotropes



Source en mouvement
($\Gamma = \Gamma$ équilibre)



Source en
mouvement Γ élevé
(référentiel de la
source)

Champ de photons anisotrope -> accélération jusqu'à une vitesse d'équilibre (vitesse du « vent » de photons)
Effet « fusée Compton »

Dynamique d'un plasma de paires e^+/e^-

Dans l'environnement d'un trou noir très dense en photons, la dynamique du plasma de paires est dominée par les effets radiatifs ($\neq e^- p^+$)

$$t_{IC} = -\gamma/\dot{\gamma} = 3m_e c^2 / (4c\sigma_T \gamma U_{ph})$$

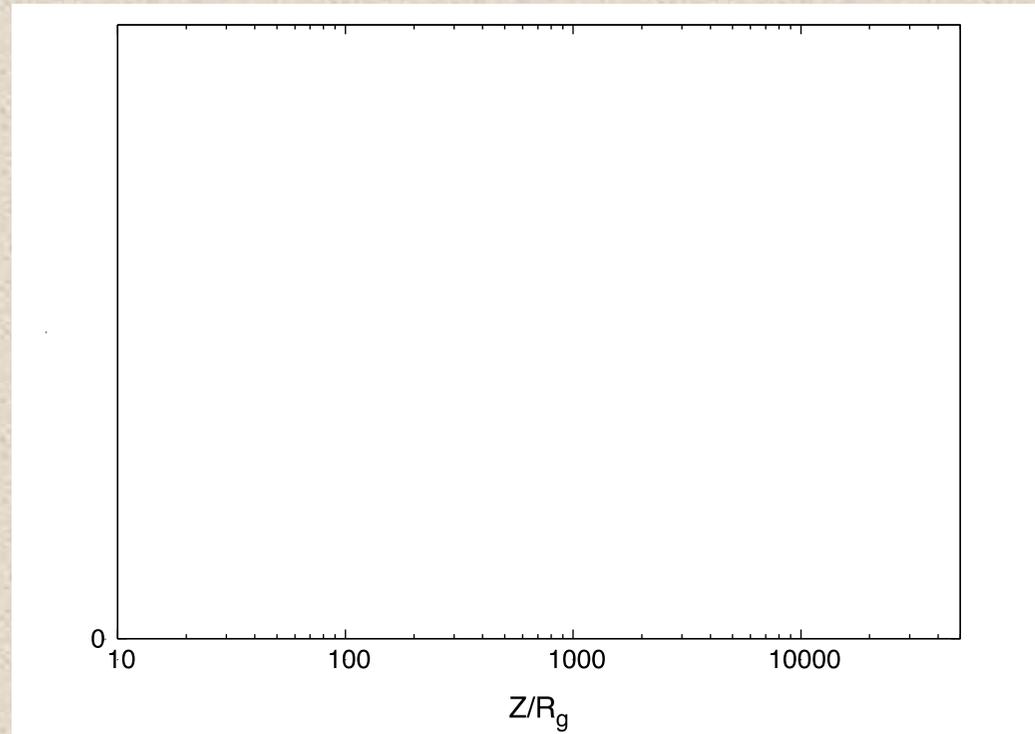
Où la densité d'énergie $U_{ph} = L / (4\pi R^2 c)$ Pour une source isotrope

En introduisant la *compacité*

$$l_s = \frac{L\sigma_T}{4\pi m_e c^3 R} = \frac{m_p}{m_e} \frac{L}{L_{edd}} \frac{R_g}{R} \simeq 10^2 - 10^3 \quad \text{Pour } L \sim L_{edd}$$

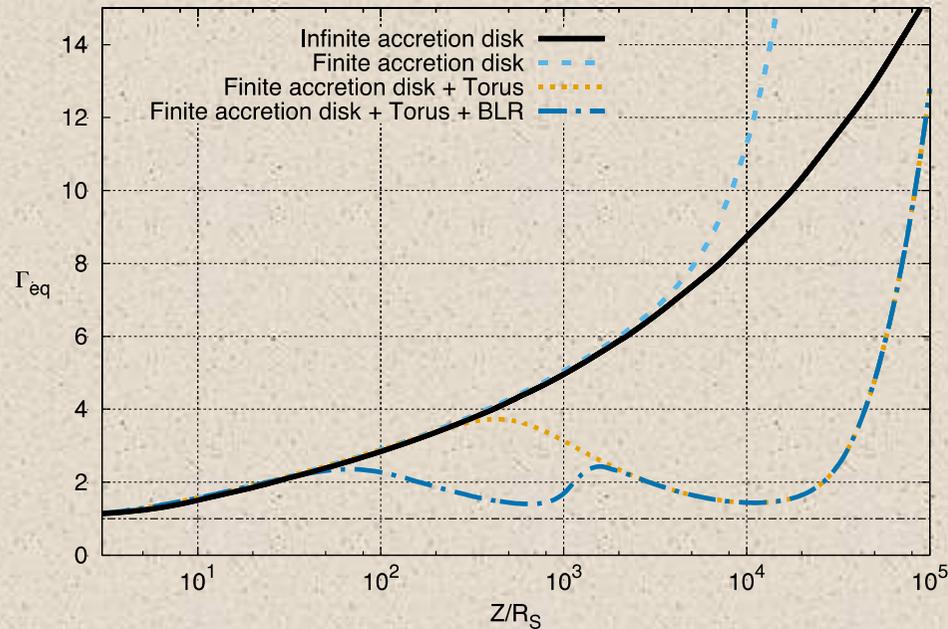
$$\text{On a } t_{IC} = \frac{1}{\gamma} \frac{R}{c} \ll \frac{R}{c}$$

Accélération d'un plasma de paires possibles uniquement à grande distance, et seulement si elles sont maintenues très énergétiques



Thèse T. Vuillaume

Comportement plus compliqué en présence d'un champ de photons complexe ... (raies optiques, tore de poussière...)



Thèse T. Vuillaume

Grands facteurs de Lorentz possibles si réaccélération suffisante à grande distance !!

Différentes vitesses d'éjection ...

Coexistence de composantes super et subluminiques (ou stationnaires)

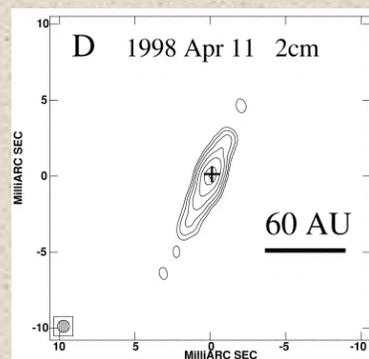
Budget énergétique à grande échelle

Evidence de gradients de vitesse transversaux (VLBI) ou longitudinaux

Observation d'émission gamma à grande échelle (lobes Centaurus A)

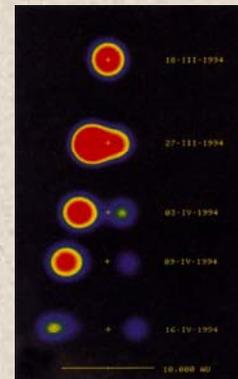


GRS 1915+105 (micro quasar)



Jet compact observé pendant les états « low hard »

Contraste jet/contre jet $\rightarrow v \sim 0.1$ à $0.5 c$ (Dhawan '00)



Ejections superluminiques pendant des éruptions $\Gamma > 2$ (Mirabel Rodriguez '94)

Le modèle à deux fluides

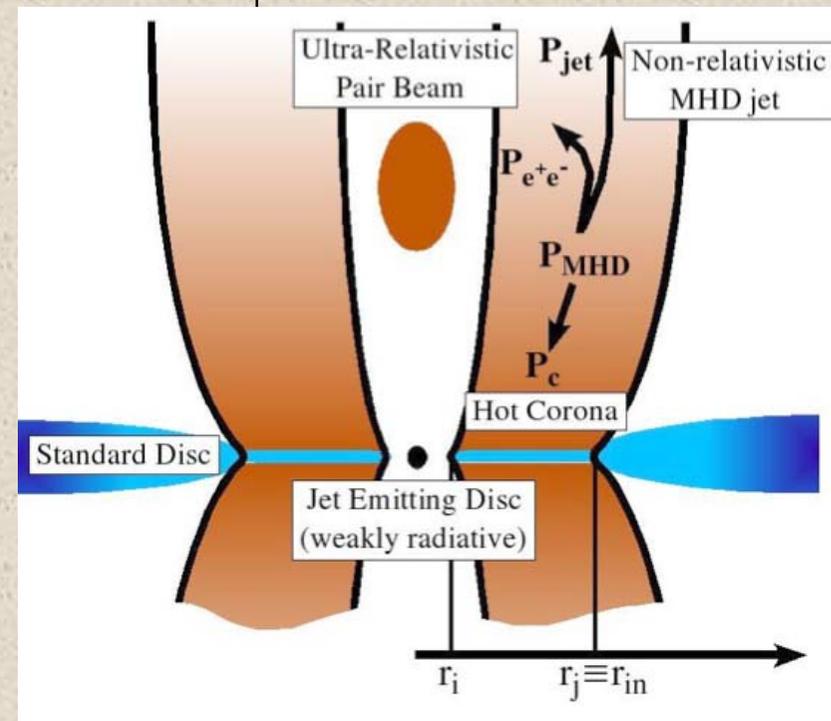
Modele « Two flow » (Sol, Pelletier, Asséo '85, H. & Pelletier '91) introduit originellement pour décrire les observations radio petite échelle (pc) vs grande échelle (kpc) : suppose deux écoulements distincts

Le « Jet MHD » : $e^- p^+$ à la Blandford & Payne :

- * moyennement relativiste :
- * transporte l'essentiel de la puissance
- * alimenté par le disque d'accrétion
- * explique jets grande échelle, chocs terminaux

Le « faisceau de paires $e^- e^+$:

- * Engendré à l'intérieur du précédent
- * Produit l'émission gamma et les mouvements superluminiques
- * Moins important énergétiquement
- * Confiné par le jet MHD extérieur

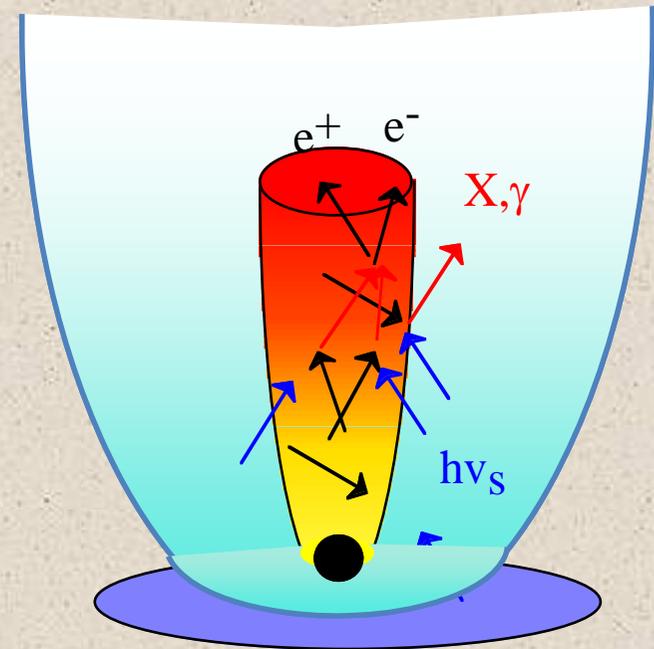


Formation du faisceau de paires

Génération « in situ » dans le jet MHD (H.& Pelletier 91, Marcowith et al. '95)

Paires produites par l'annihilation γ - γ

- accélération initiale de particules
- Production de X et γ par Compton Inverse
- annihilation γ - γ produit de nouvelles paires
- Réaccélération des paires produites.
- Mécanisme saturé par l'énergie libre disponible dans la turbulence.



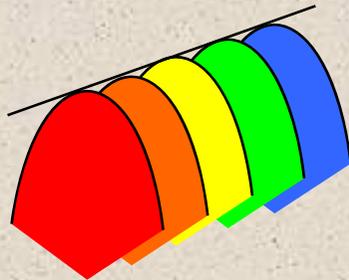
Distribution en énergie des particules

Accélération par chocs Fermi 1^{er} ordre -> loi de puissance (modèle une zone)

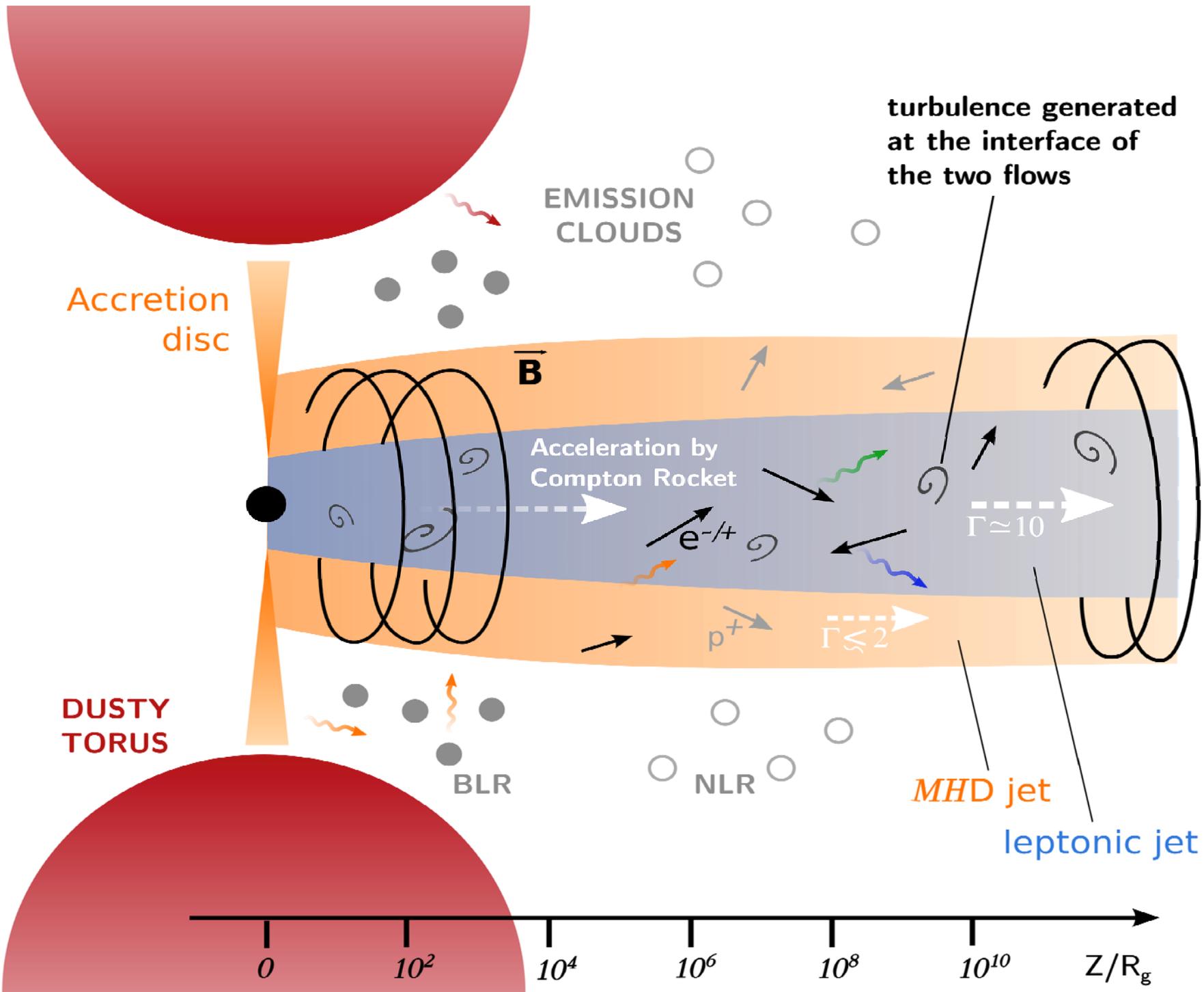
Accélération diffuse par la turbulence -> distribution en « pile-up » piquant à γ_0 tel que $t_{cool}(\gamma_0) = t_{acc}(\gamma_0)$

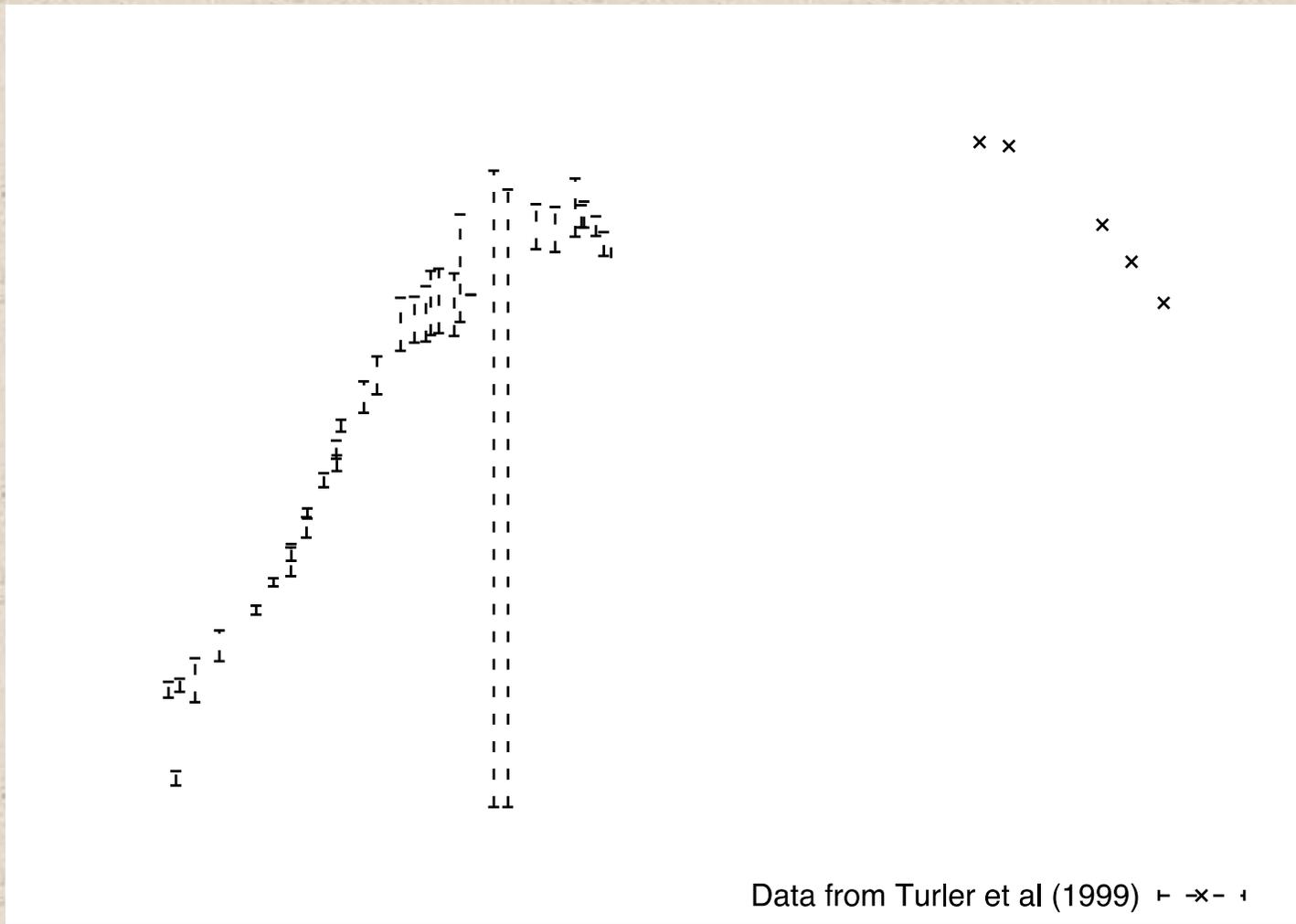
$$n(\gamma; z; t) = n_0(z; t) \gamma^2 \exp\left(-\frac{\gamma}{\gamma_0(z; t)}\right)$$

Loi de puissances peuvent être reproduites en partie par superposition spatiale de spectres « mono énergétiques » :



Nécessite une réaccélération continue le long du jet !

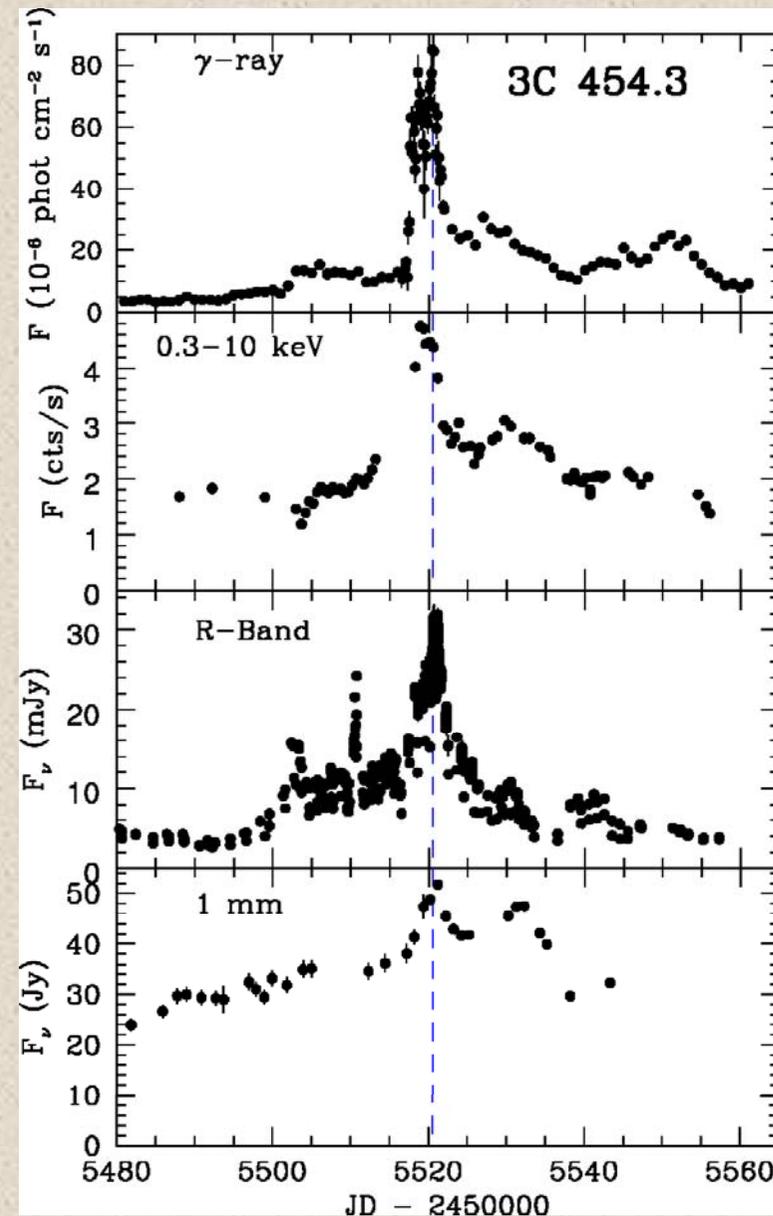


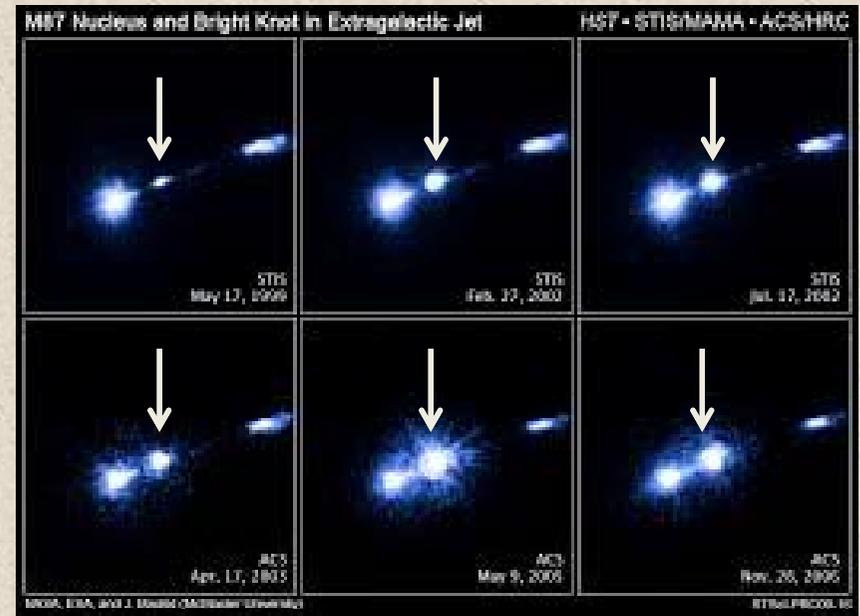
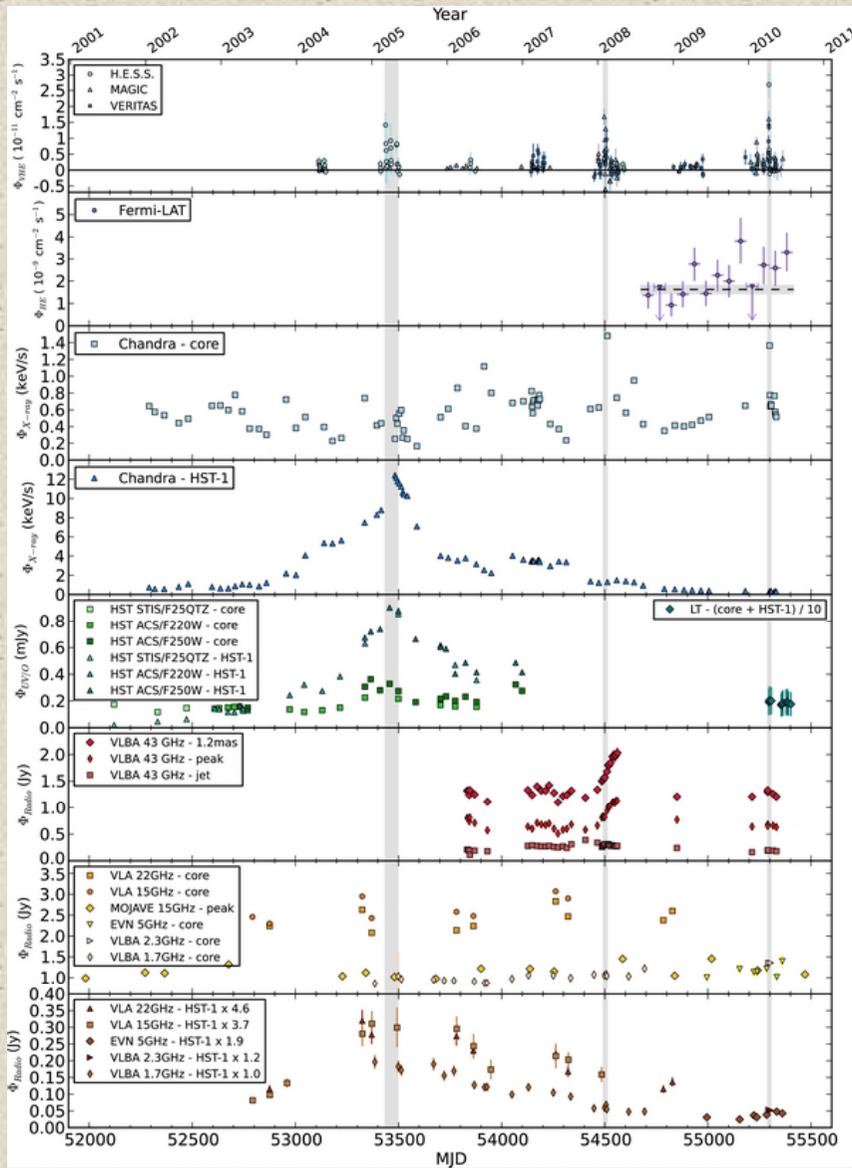


Thèse T. Vuillaume

Variabilité

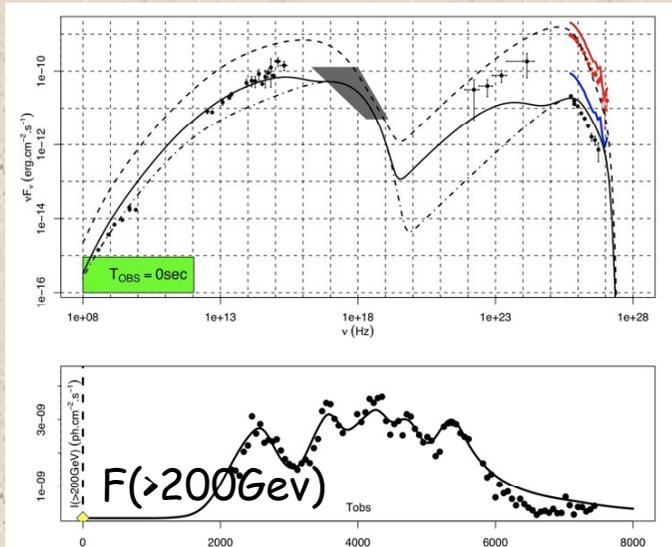
- Émission gamma souvent associée à une forte variabilité, périodes actives avec des éruptions intenses et rapidement variables (~ minutes)
- Lien avec les autres longueurs d'onde complexe et pas toujours reproductible (corrélation ou non avec l'émission de composantes VLBI, la variabilité X, optique, éruptions « orphelines » ...)





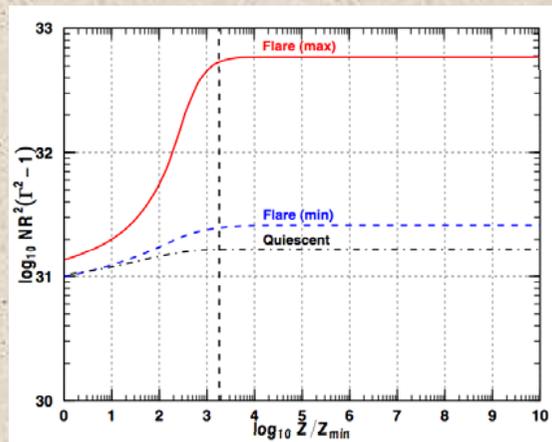
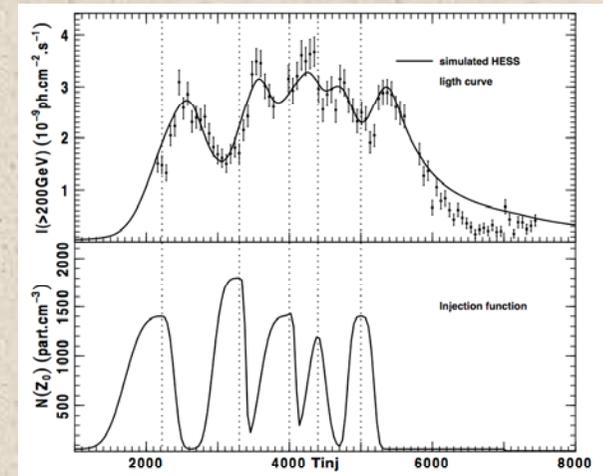
Eruption de la
composante
HST 1 de M87 associée à
une éruption gamma

Un modèle dépendant du temps



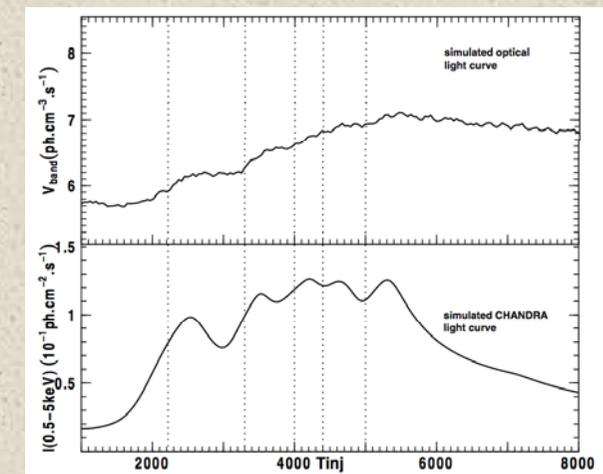
TeV

injection



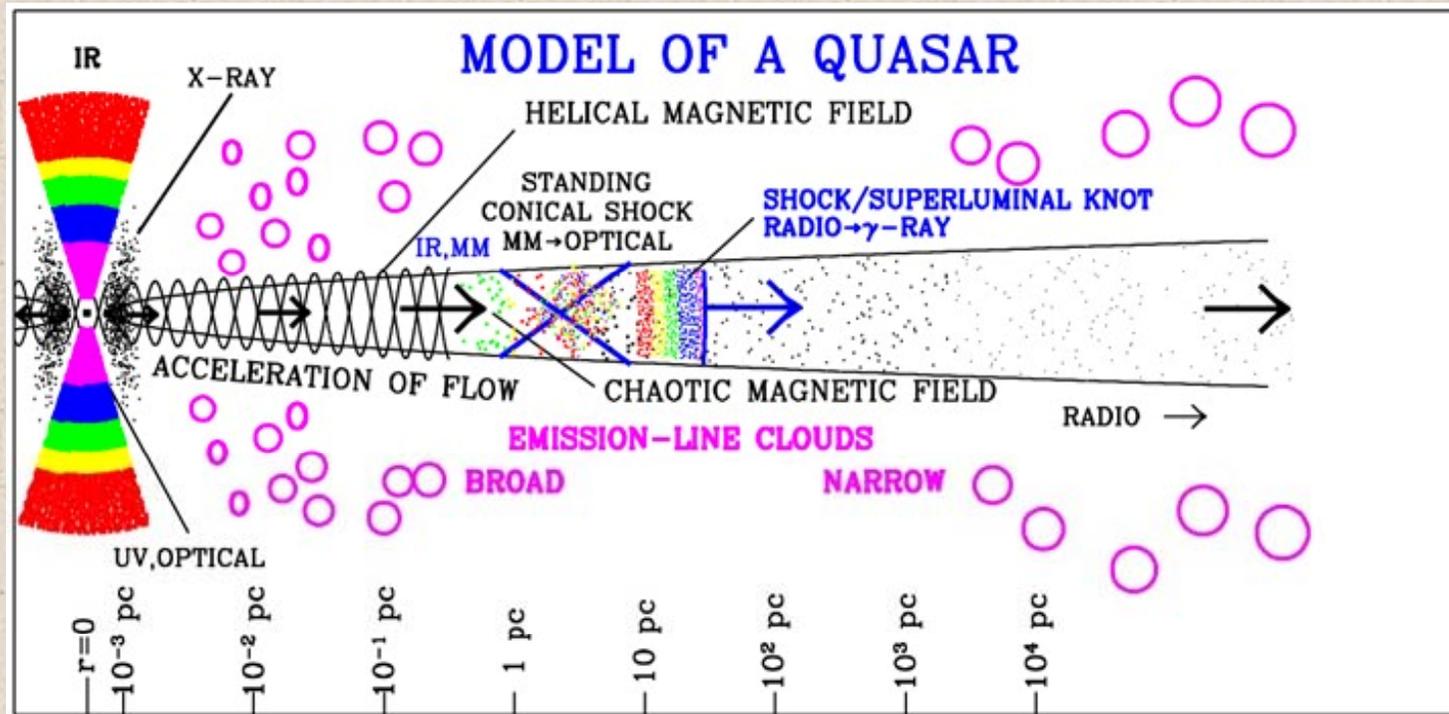
optique

X-ray



Densité de paires le long du jet

Sites de réaccélération à grande distance ?



(d'après A. Marscher)

Esquisse d'une « big picture » ?

- Mécanisme double B-P (disque+jet magnétisé) + injection centrale de paires, par B-Z ou non.
- Dynamique du jet essentiellement magnétique, dynamique du faisceau de paires essentiellement radiative
- Possibilité d'évolution lente de l'activité (instabilités du disque) + éruptions rapides dues à la production de paires explosive
- Possibilité de réaccélérations à grande distance introduisant un comportement spatial et temporel complexe
- Encore beaucoup d'observations coordonnées et de simulations nécessaires pour comprendre le comportement de ces objets !

Merci et bonnes fêtes !