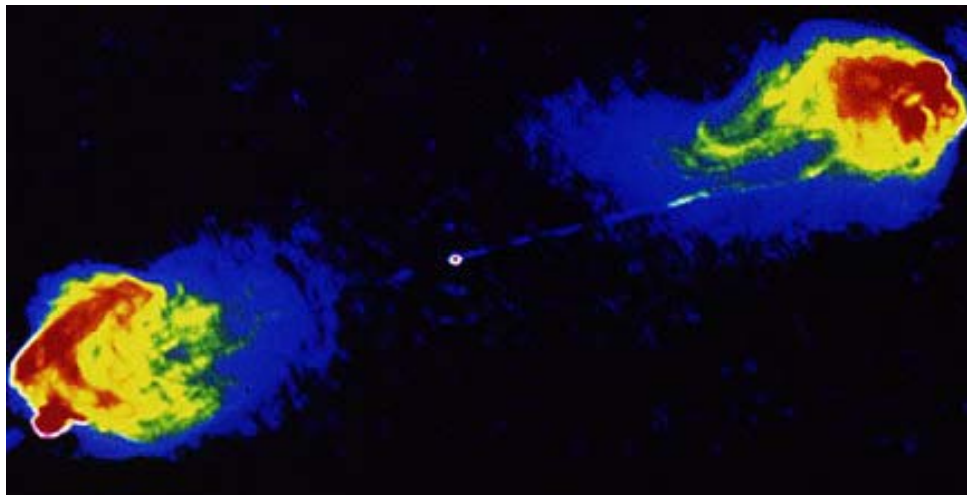




COLLÈGE  
DE FRANCE  
— 1530 —

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

## Galaxies à jets radio et optiques

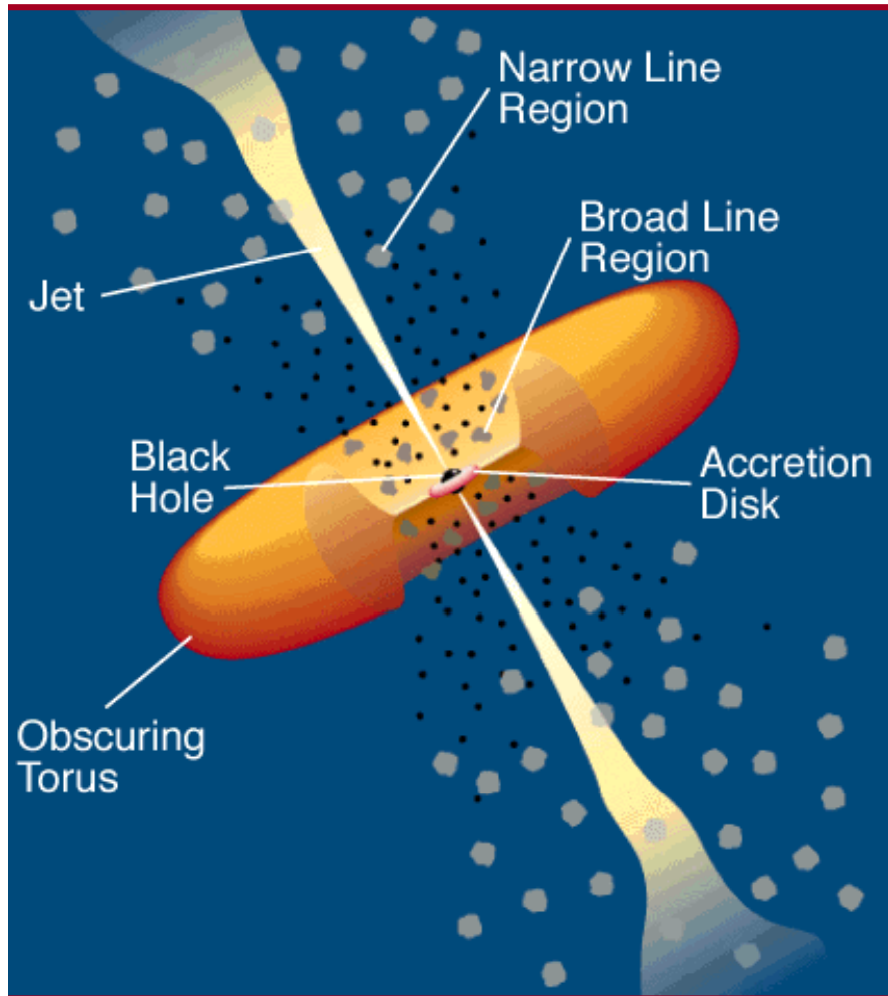


**Françoise Combes**



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

# Le jet: composant du modèle standard

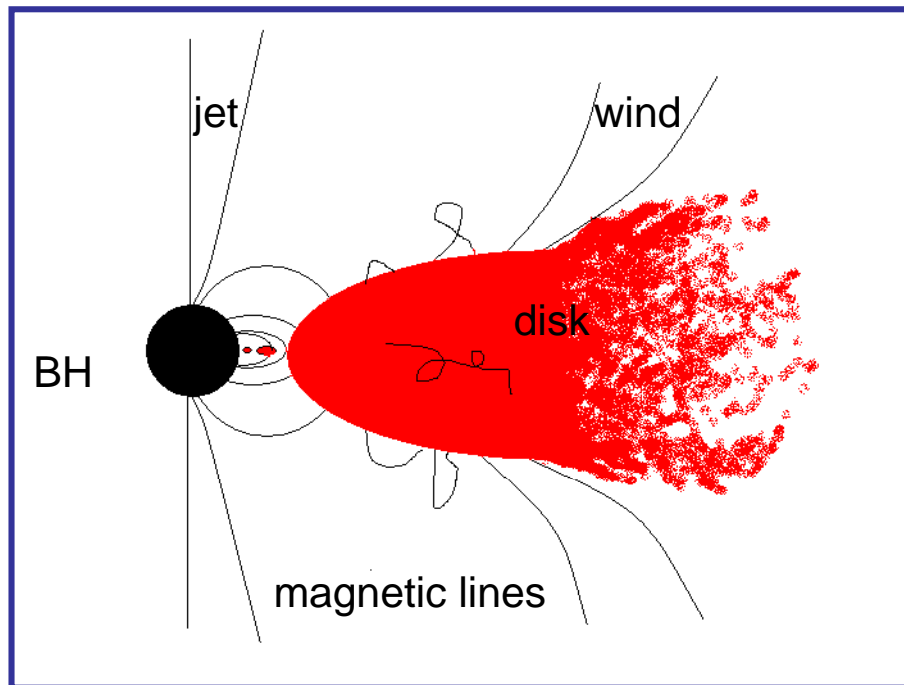


Moins de 10% des galaxies ont un noyau actif. **10% des AGN sont des jets radio (« Radio-Loud »)**  
Toutes les galaxies ont un trou noir mais la période d'activité est courte, quelques 10-40 millions d'années

Selon l'angle de la ligne de visée:  
On voit le jet, ou des mouvements relativistes, des raies larges  
Ou bien caché par le tore moléculaire (type 2, diffusion, polarisation)

# Distinction entre jet et vent

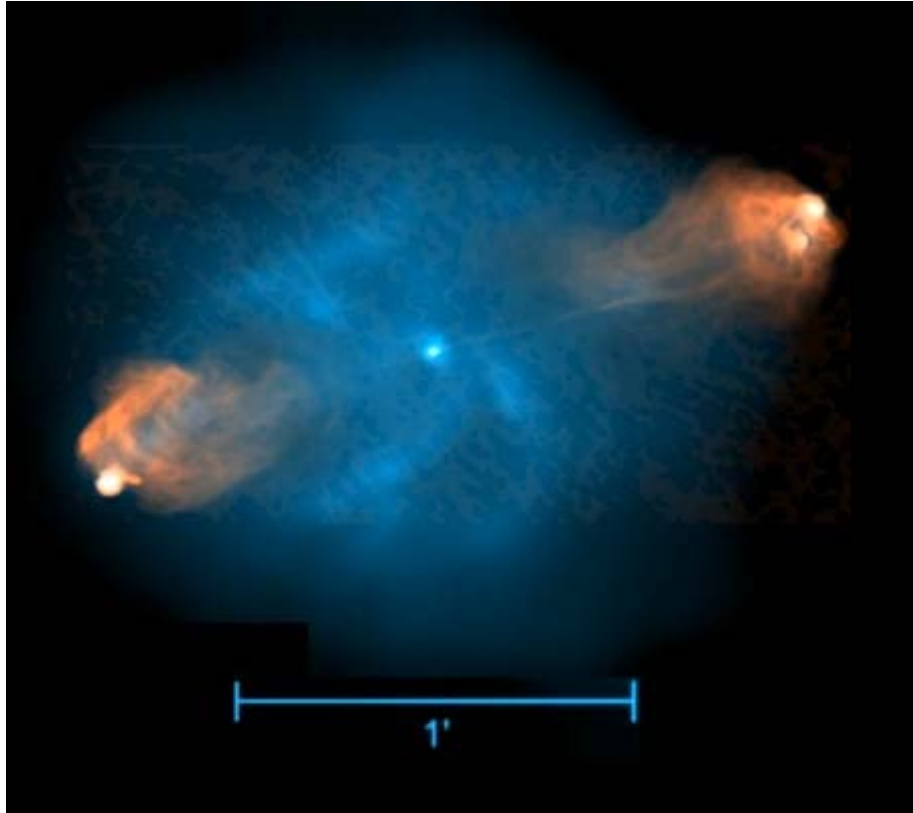
Le vent vient du disque  
Chauffé, il s'évapore  
Ou bien la pression  
magnétique est trop forte



Turbulence du disque  
Instabilité MRI



# Cycles d'activité



Séparation des lobes  $\sim 100$  kpc,  
 $V \sim 1000$  km/s

→ age  $\Delta t \sim 10^8$  ans

**Plusieurs cycles?**

Autre façon d'estimer la durée du cycle d'activité AGN

$\Delta t \sim (\text{vie de la galaxie})(\% \text{ de temps actif})$

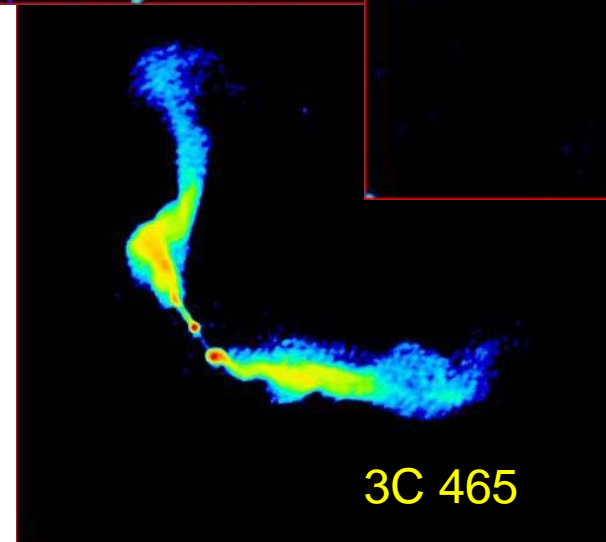
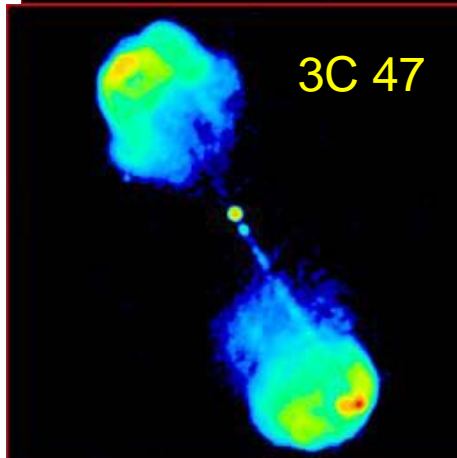
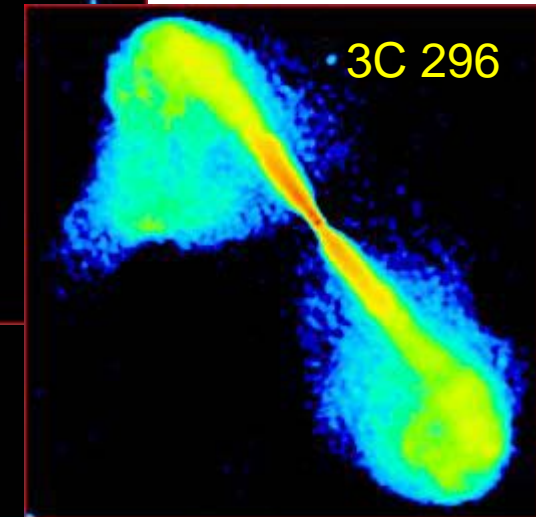
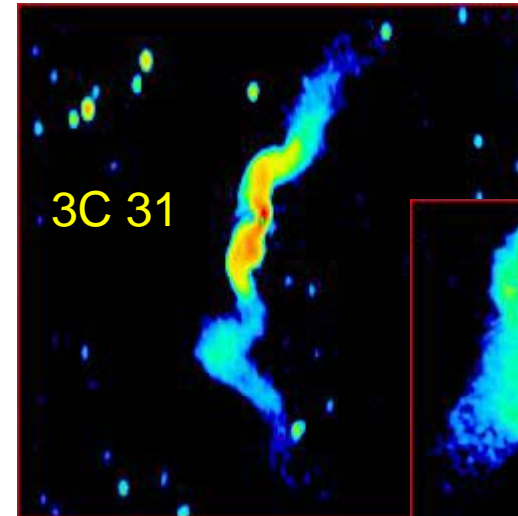
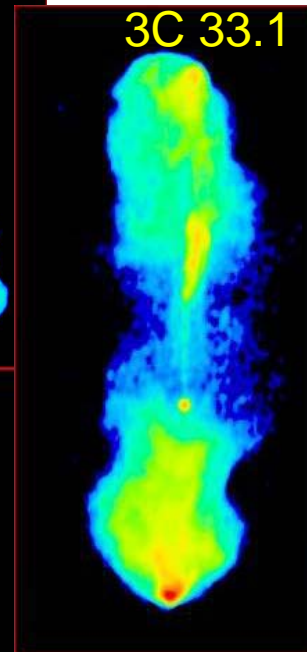
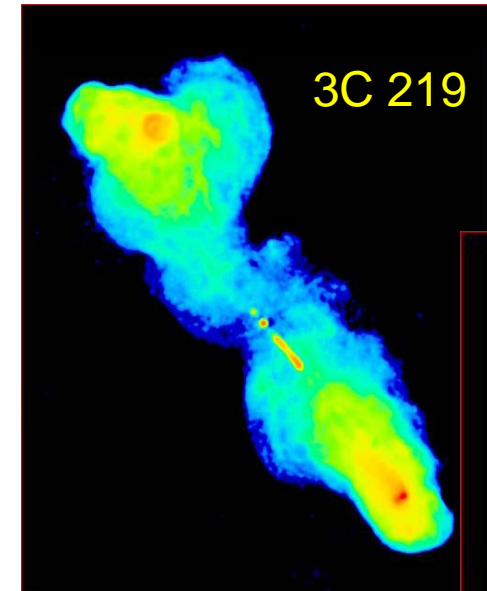
$\sim (10^{10} \text{ ans})(1\% \text{ des galaxies sont actives avec jets}) \sim 10^8 \text{ ans}$

# Deux types de morphologies pour les jets radio

FR II (*gauche*) et FR I (*droite*)

Haute luminosité

Faible luminosité

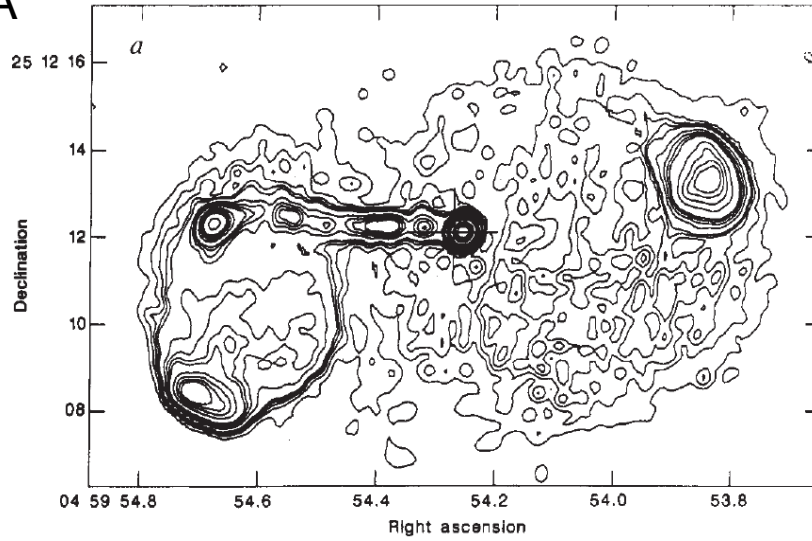


Points brillants  
au bord

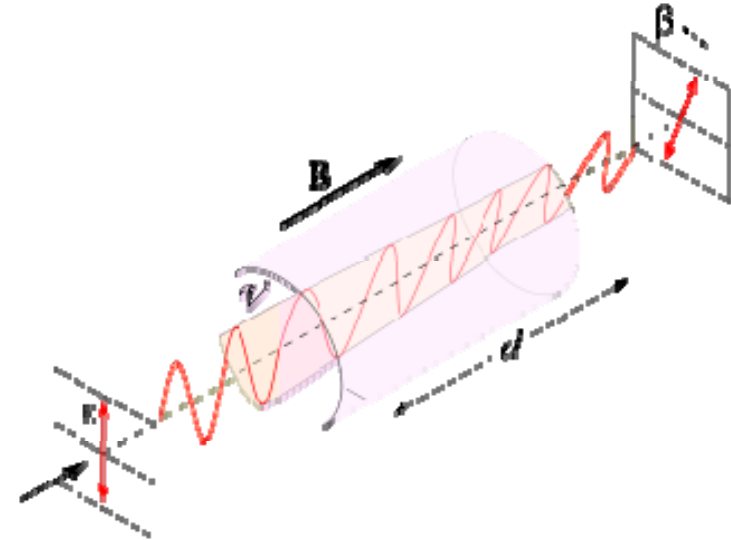
Points brillants  
au centre

# Pourquoi un seul jet?

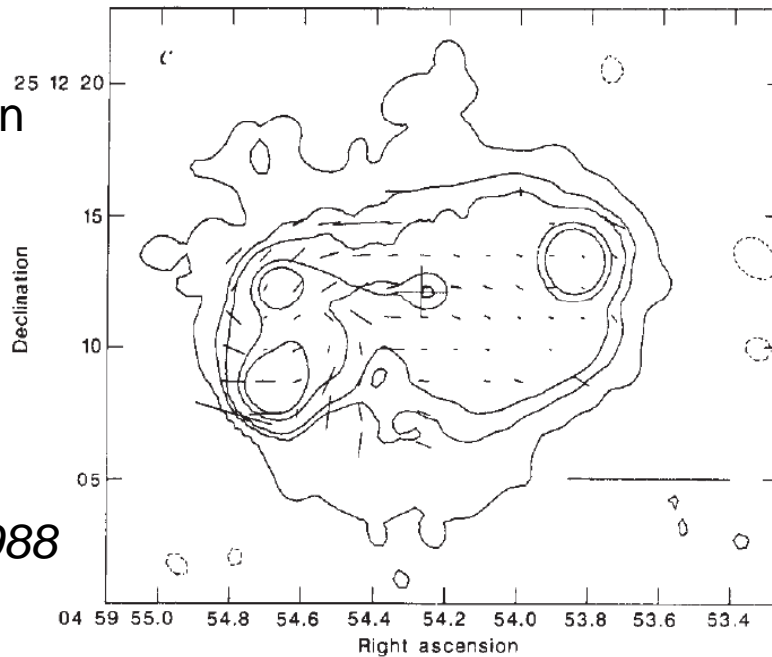
3C133  
Image VLA



Dépolarisation Faraday  $\sim \lambda^2$



3C133  
Polarisation



Laing, 1988

→ Le jet visible est toujours vers l'observateur

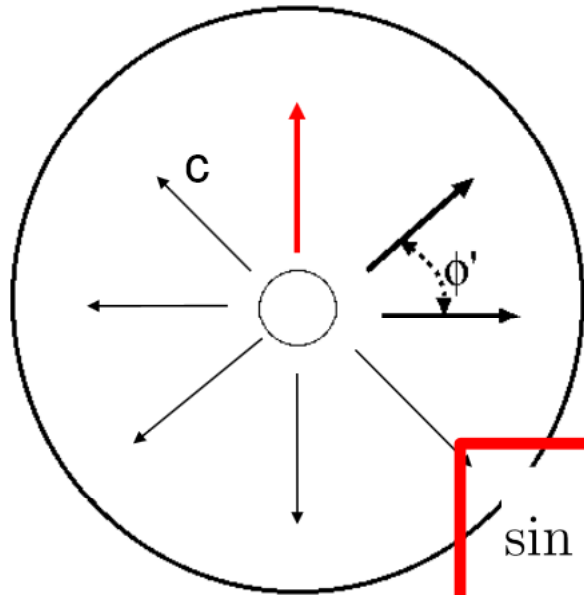
**Hypothèses éliminées**

--Le jet est alternativement d'un côté ou l'autre

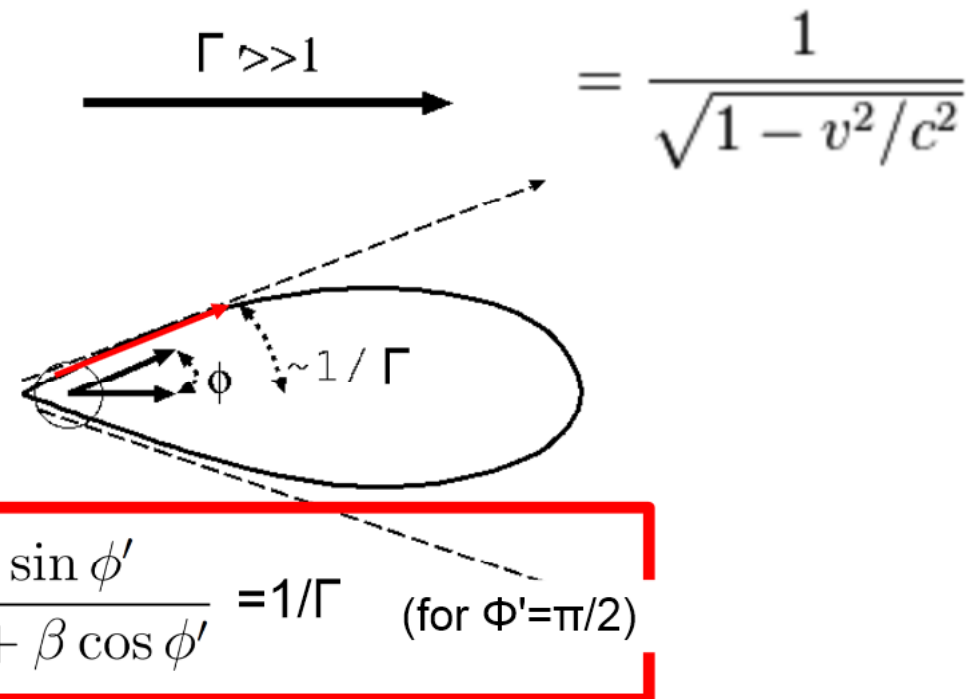
--Milieu absorbant

# Aberration relativiste, Doppler boost

Référentiel du fluide  
Emission isotrope



Référentiel observateur  
Transformation de Lorentz



→ Déjà aberration à faible vitesse (ex. pluie) -- Pour les AGN  $\Gamma \sim 5$

$$D = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)}$$

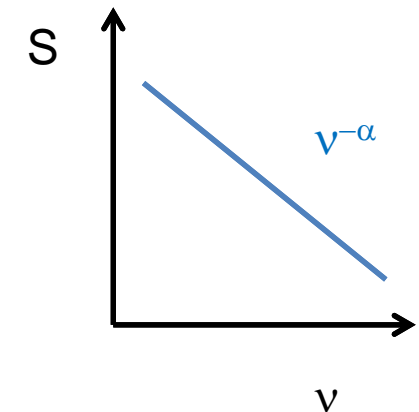
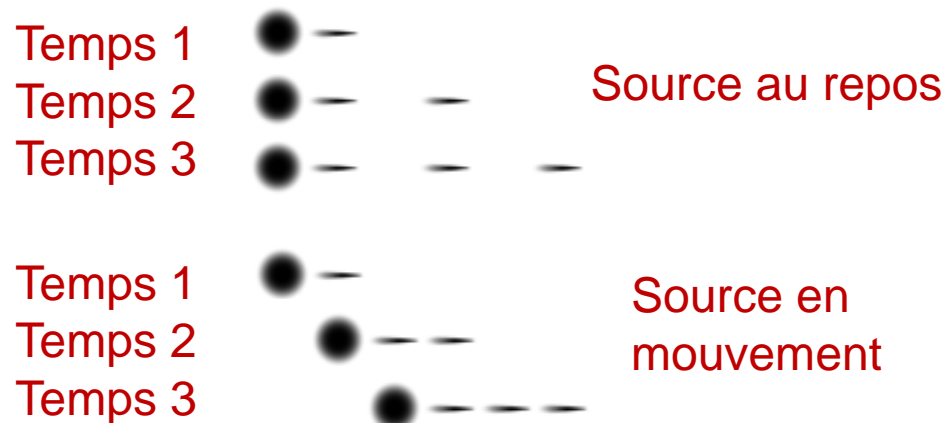
→ Flux multiplié par  $D^2$

# Effet Doppler relativiste total

Facteur Doppler  $D = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)}$       $\Gamma \sim 5$     $v/c \sim 0.98$ ,  $D \sim 9.9$

→ Aberration, Flux multiplié par  $D^2$

→ Effet de dilatation du temps, Flux multiplié par  $D$



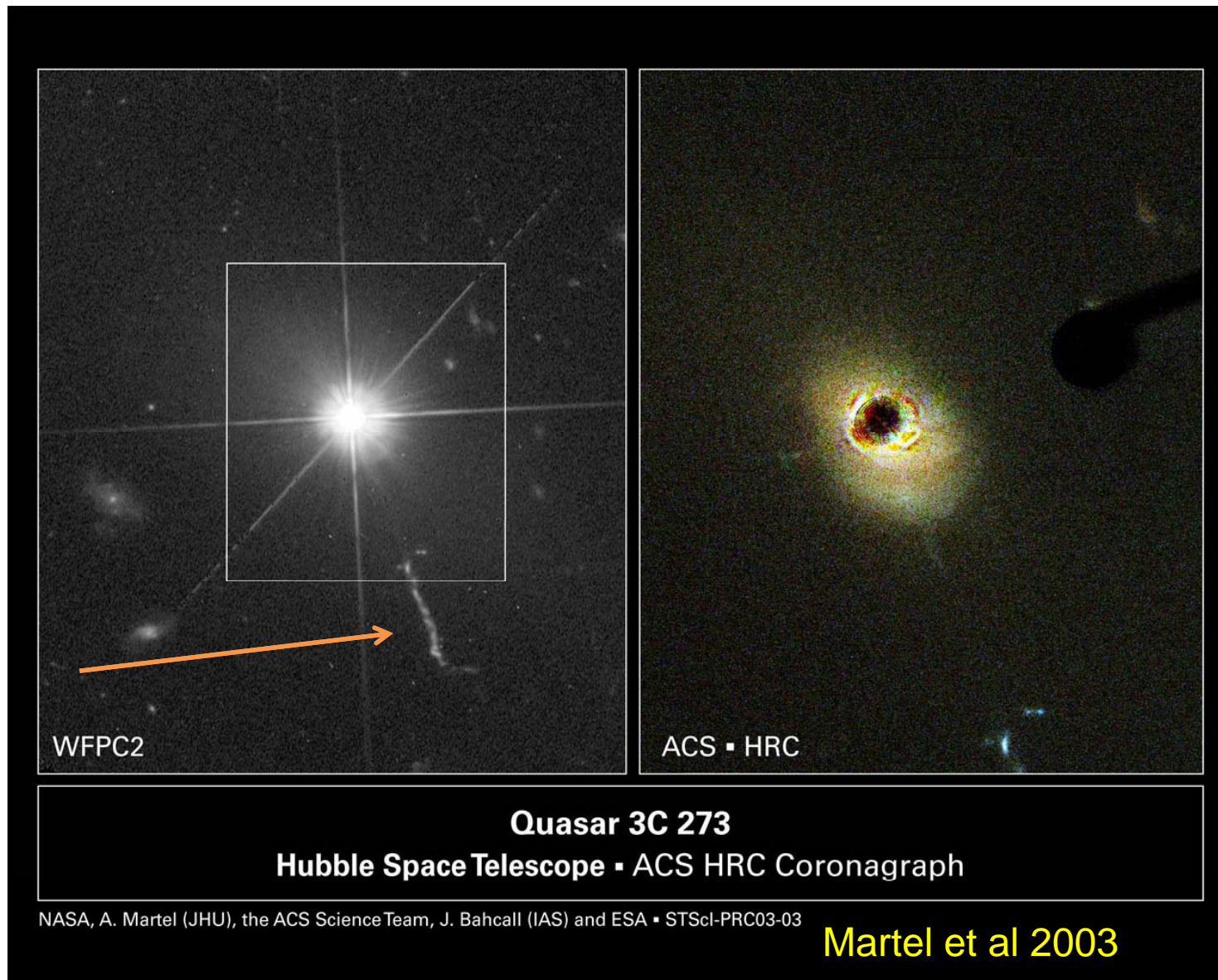
→ Effet Doppler sur les fréquences, Flux en  $\nu^{-\alpha}$  (synchrotron  $\alpha = 1$ )

Flux multiplié par  $D^{3+\alpha} \sim D^4 \sim 9600$

Des  $\Gamma$  jusqu'à 100,  $D \sim 200$ , et  $D^4 \sim 16 \cdot 10^8$  !!



# Jets optiques, diverses longueurs d'onde



WFPC2

ACS HRC

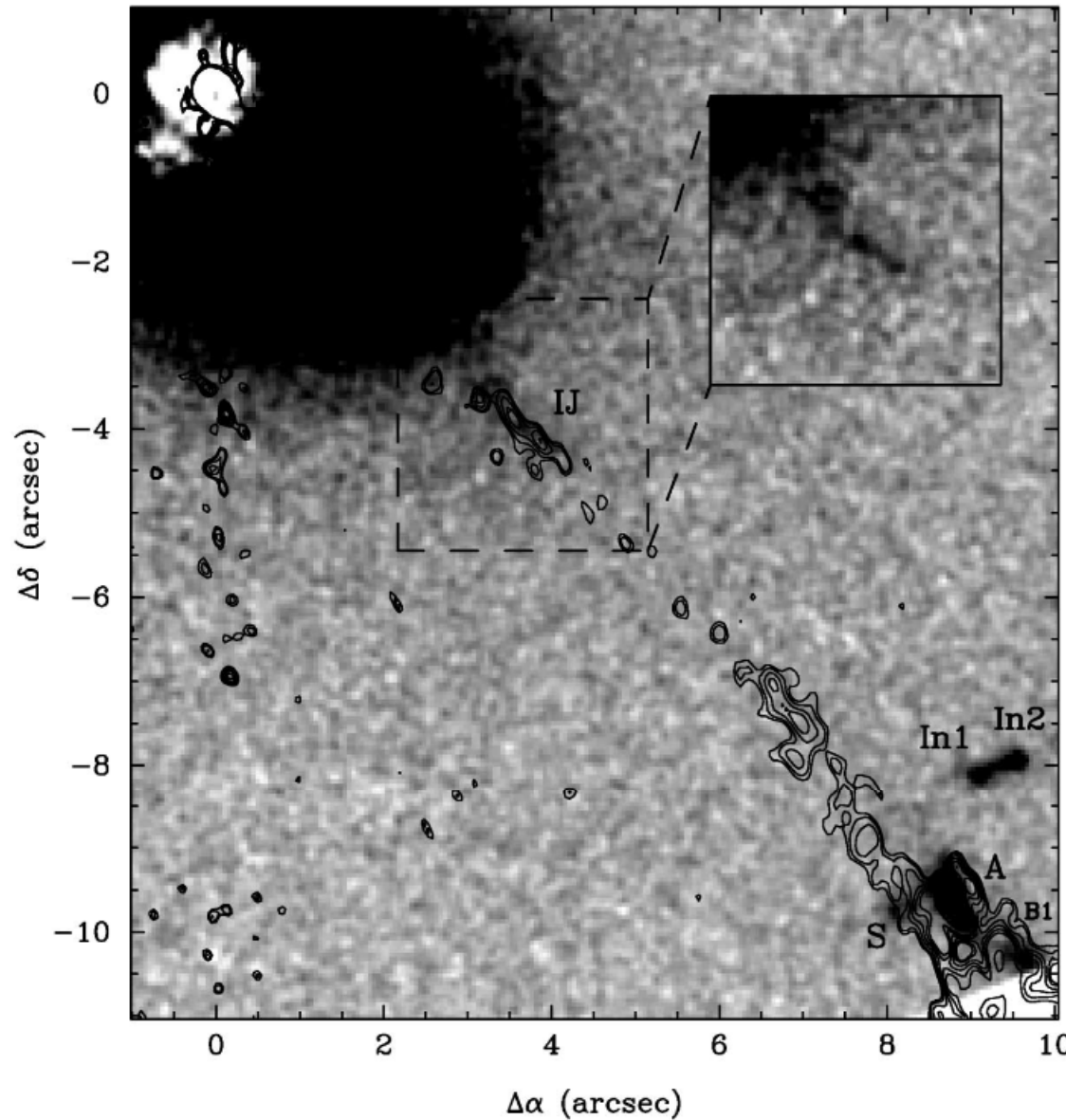
**Quasar 3C 273**

**Hubble Space Telescope - ACS HRC Coronagraph**

NASA, A. Martel (JHU), the ACS Science Team, J. Bahcall (IAS) and ESA - STScI-PRC03-03

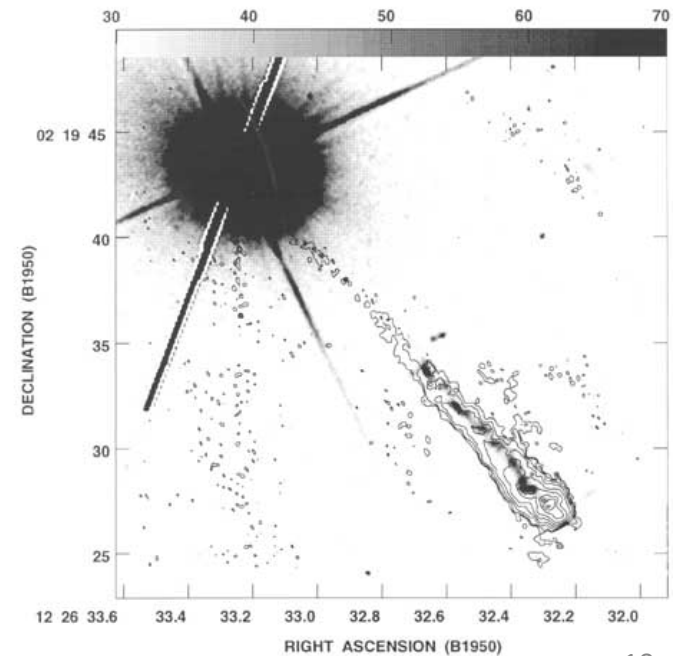
**Martel et al 2003**

# Superposition image Radio

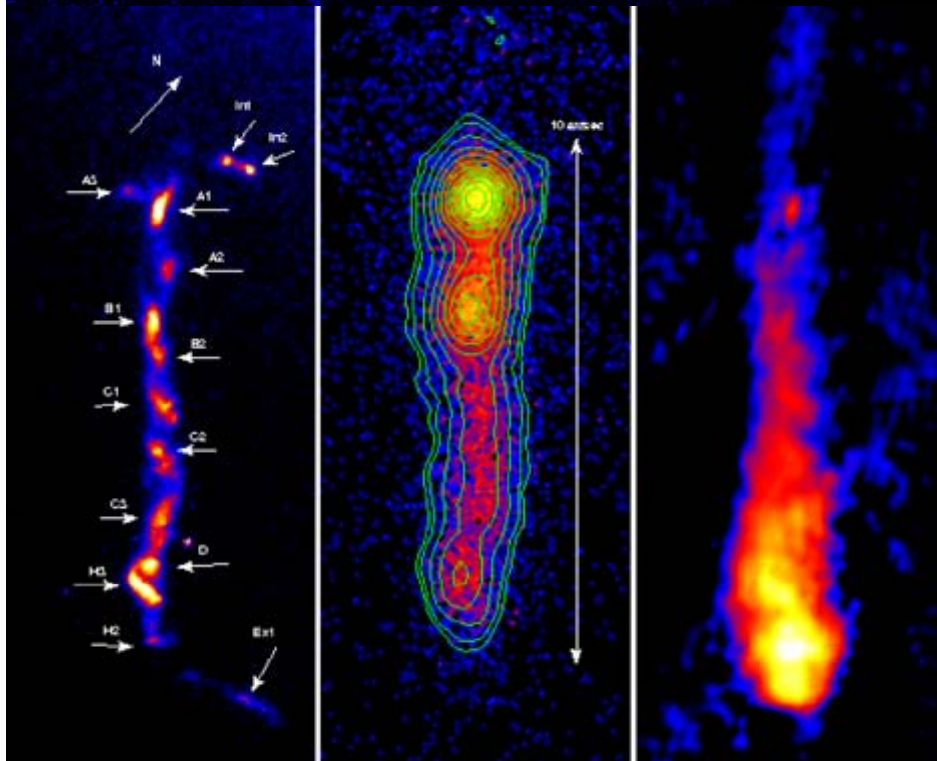
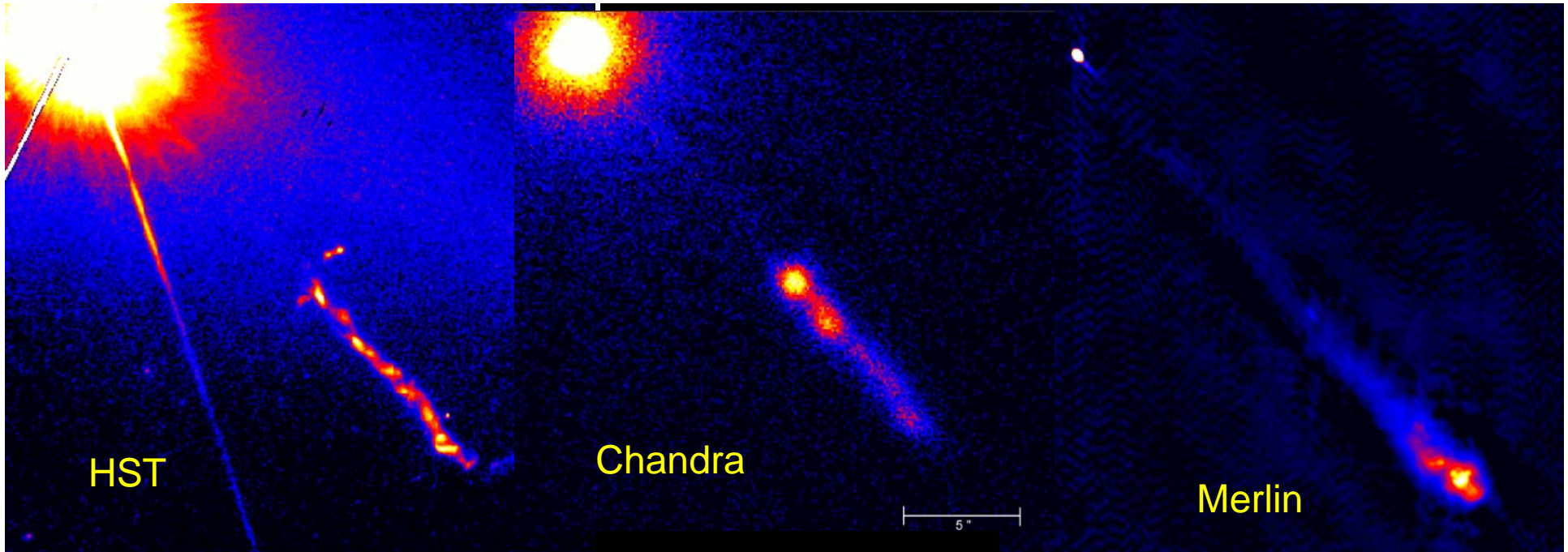


Jet radio: contours  
// jet optique (HST)

67kpc de long

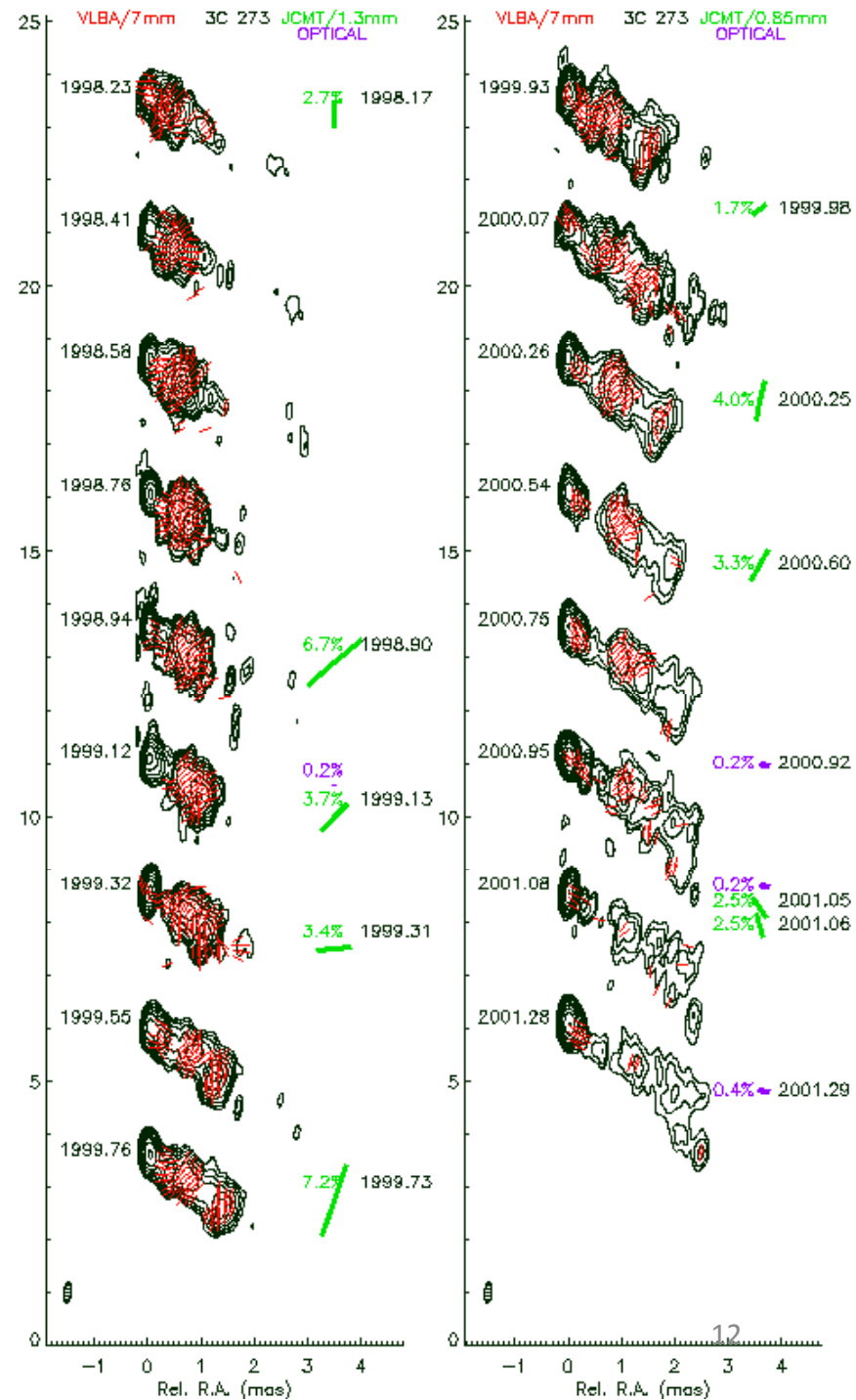
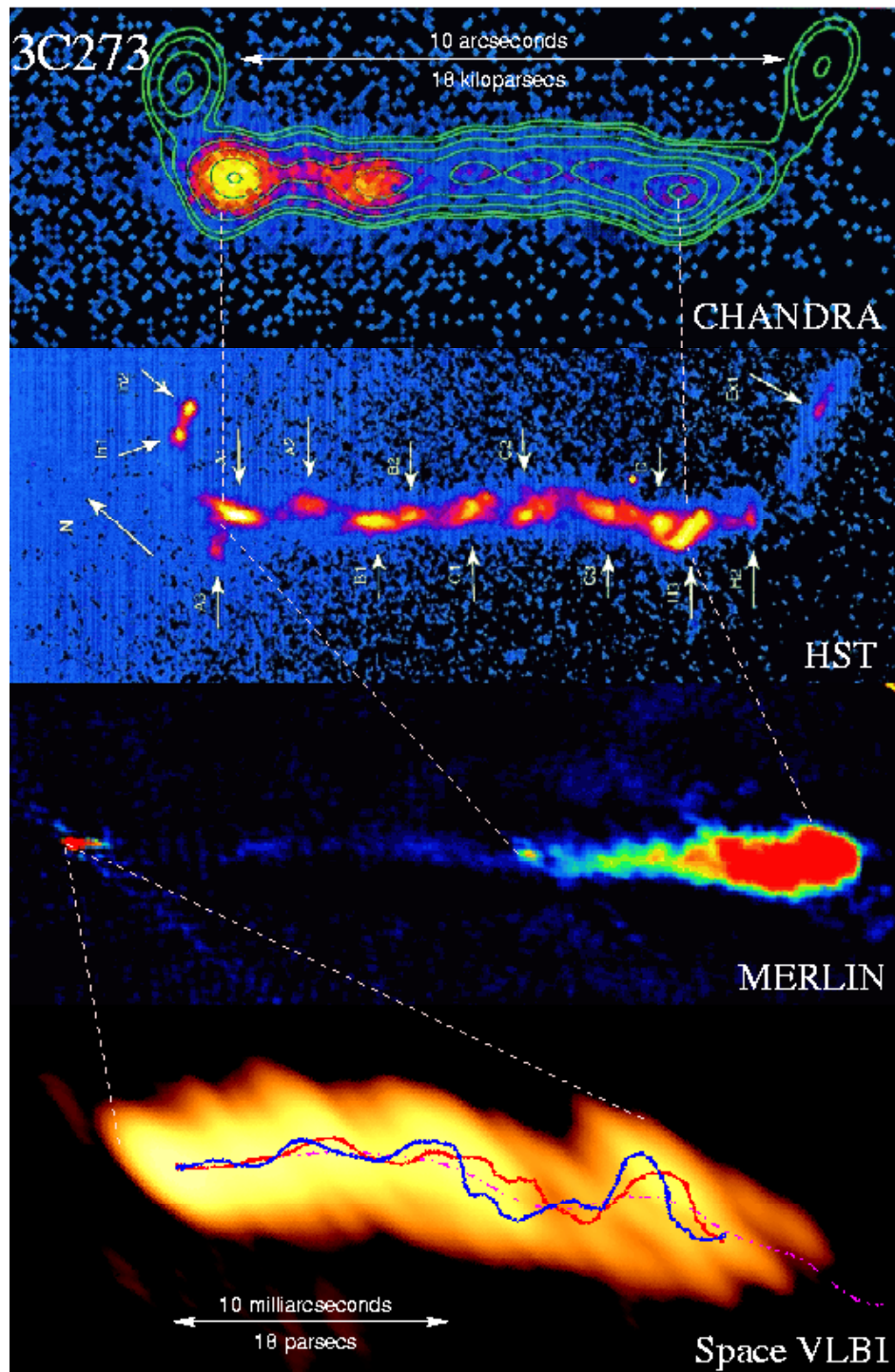


HST+Merlin



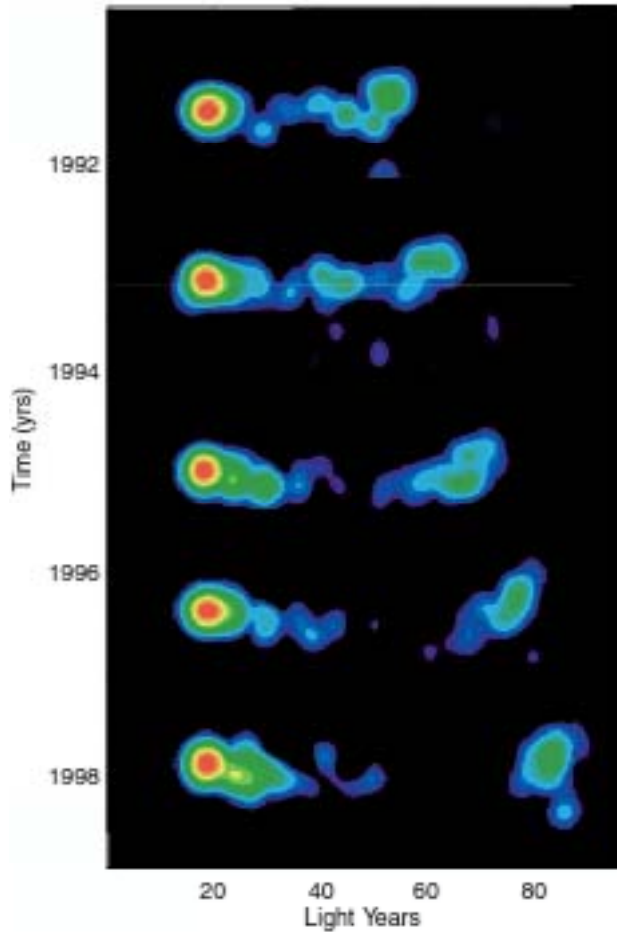
3C273, le plus proche des Quasars  
 Un jet détecté *dans toutes les*  
*longueurs d'onde*

Superposition des jets en optique  
 (HST) en rayons X (Chandra)  
 Et en radio cm (Merlin)



# Les jets sont super-luminiques

Jet radio dans 3C279



P a la vitesse  $v$ , par rapport O

$$y = r \sin \theta \quad t = r/v$$

**La lumière venant de P met moins de temps à nous atteindre que celle de O.**

Temps observateur pour que l'objet aille de O à P

$$t_{app} = t - x/c$$

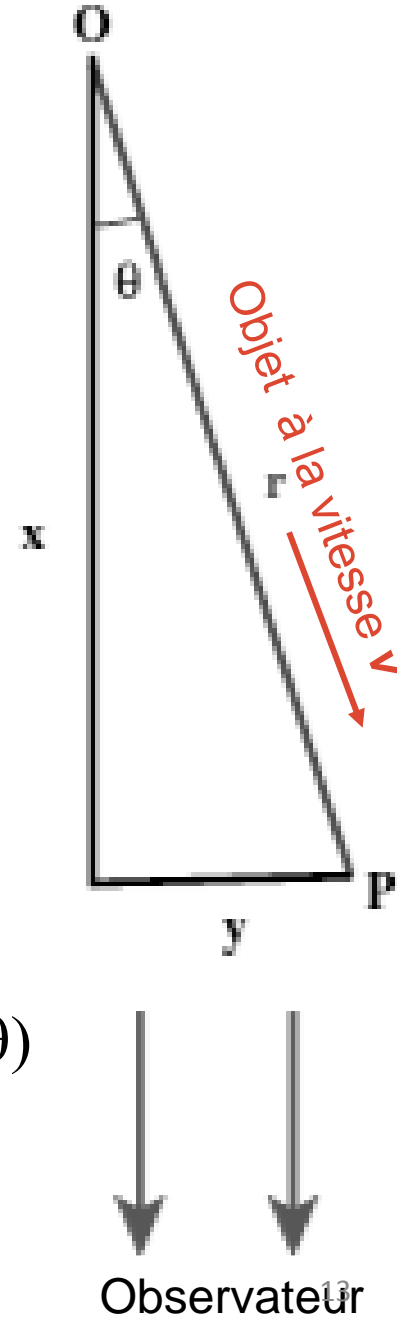
$$t_{app} = (r/v) - (r/c) \cos \theta$$

$$t_{app} = (r/v) (1 - \beta \cos \theta)$$

**V** apparente sur le ciel

$$v_{app} = y/t_{app}$$

$$v_{app} = (v \sin \theta)/(1 - \beta \cos \theta)$$

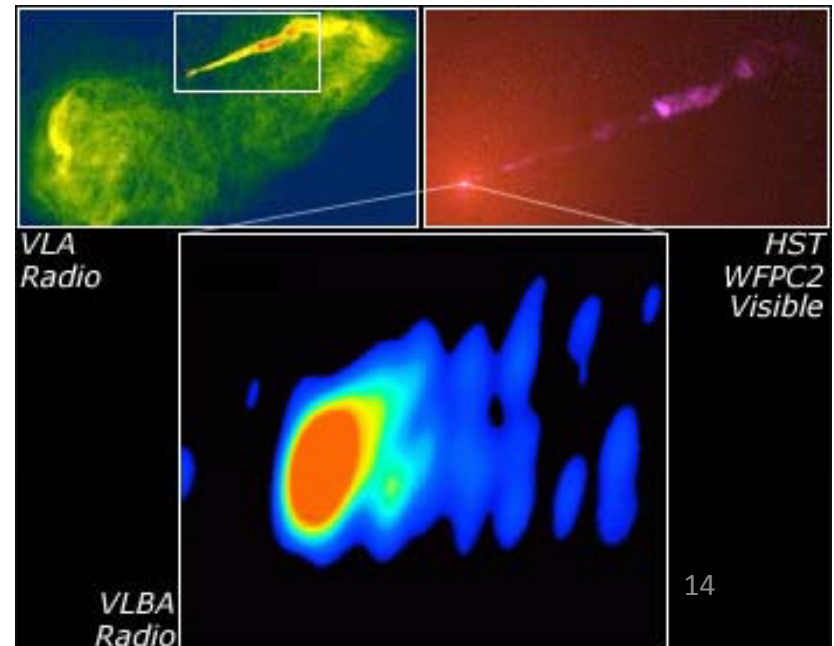
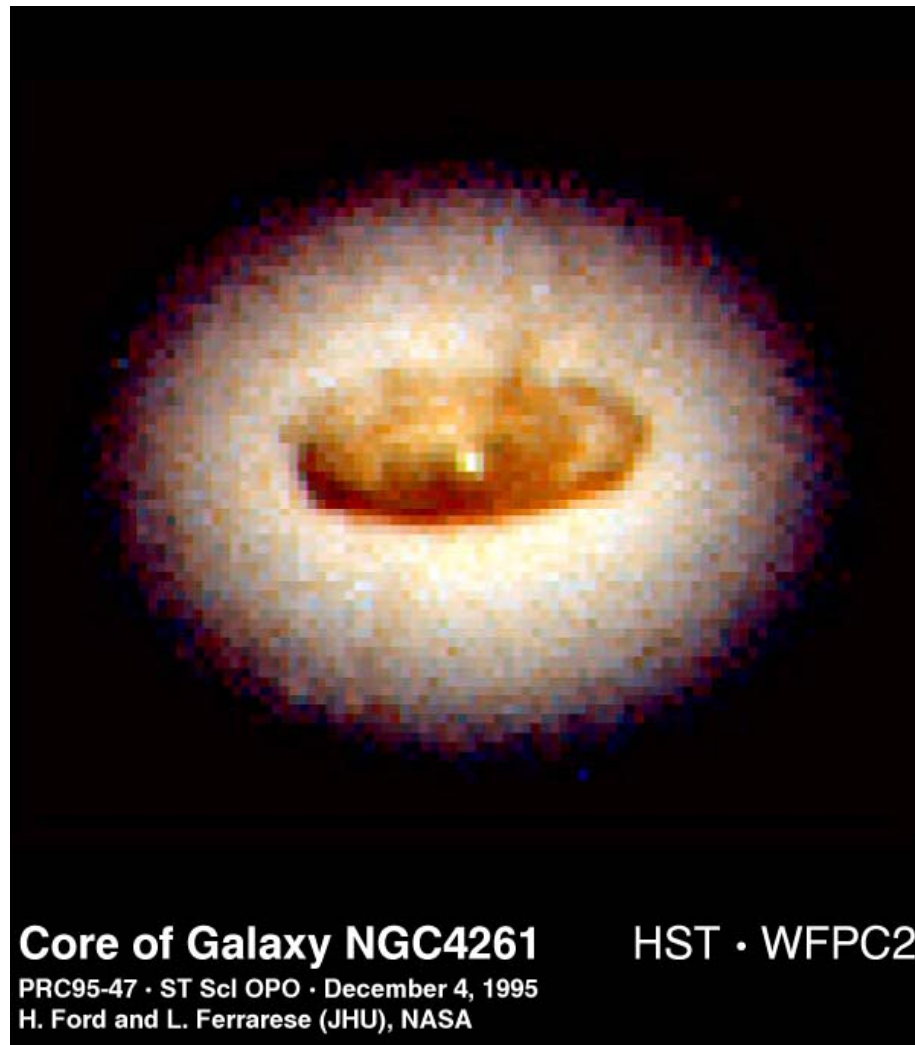


**Pour  $v \ll c$ ,  $\beta = v/c \sim 0 \rightarrow v_{app} = v \sin \theta$**

**Pour  $v \sim c$ ,  $v_{app} \gg v$  et même supérieure à  $c$**

# Jets relativistes: une grande gamme d'échelles

Haute résolution Télescope Spatial  
+ jet radio (VLA)

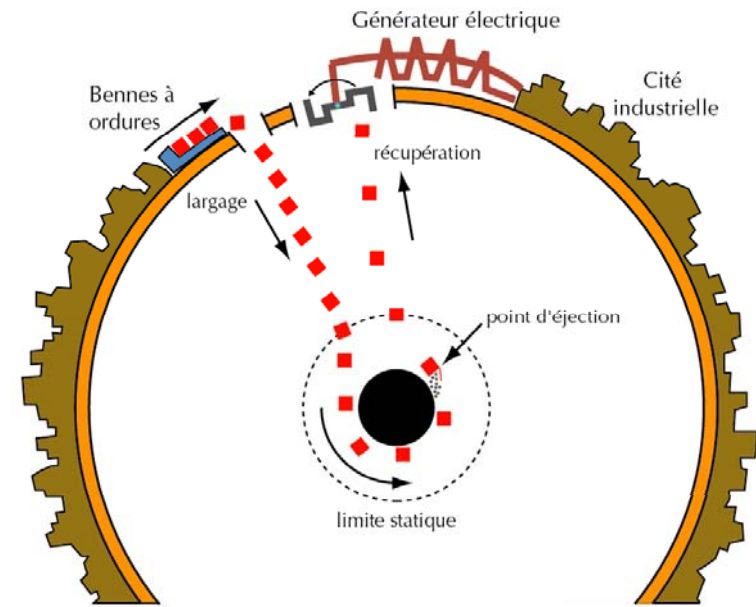
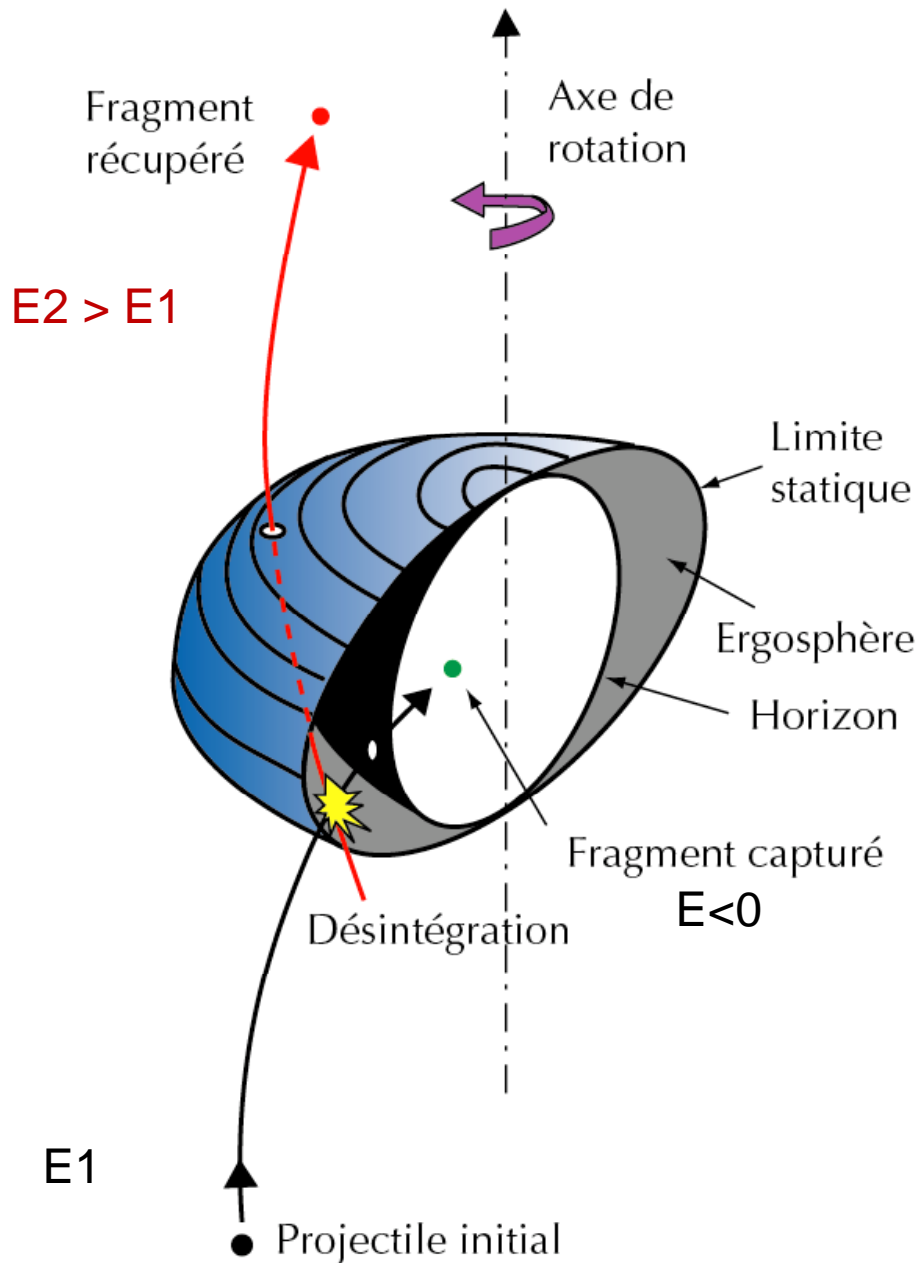


# Trou Noir en rotation: origine des Jets Radio?



Si le trou noir est en rotation, on peut en extraire de l'énergie, par le processus de Penrose

# Processus de Penrose

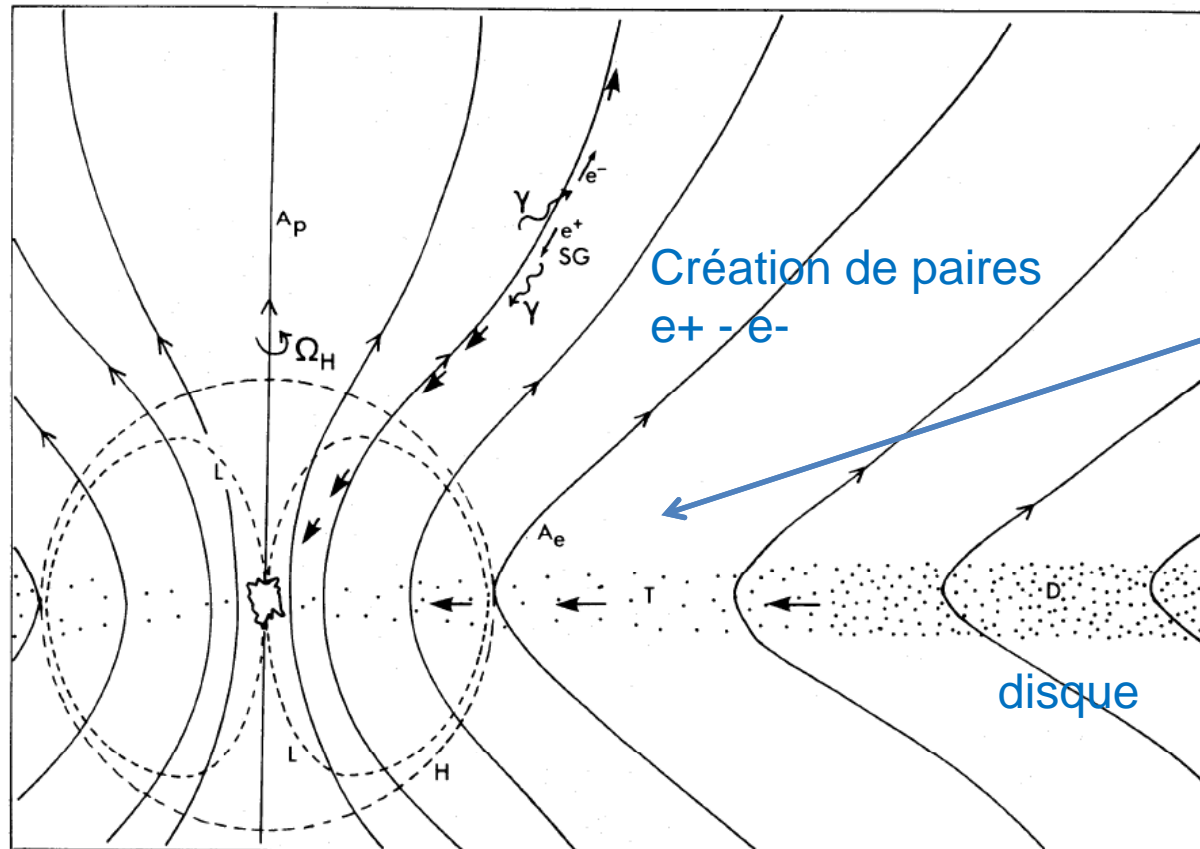


jusqu'à 29%



# Mécanisme de Blandford-Znajek

Le but est d'extraire de l'énergie et du moment angulaire du trou noir en rotation. Le champ électromagnétique autour du trou est perturbé par des courants magnéto-sphériques, qui vont produire un couple,  
→ **Ralentissant le trou noir**

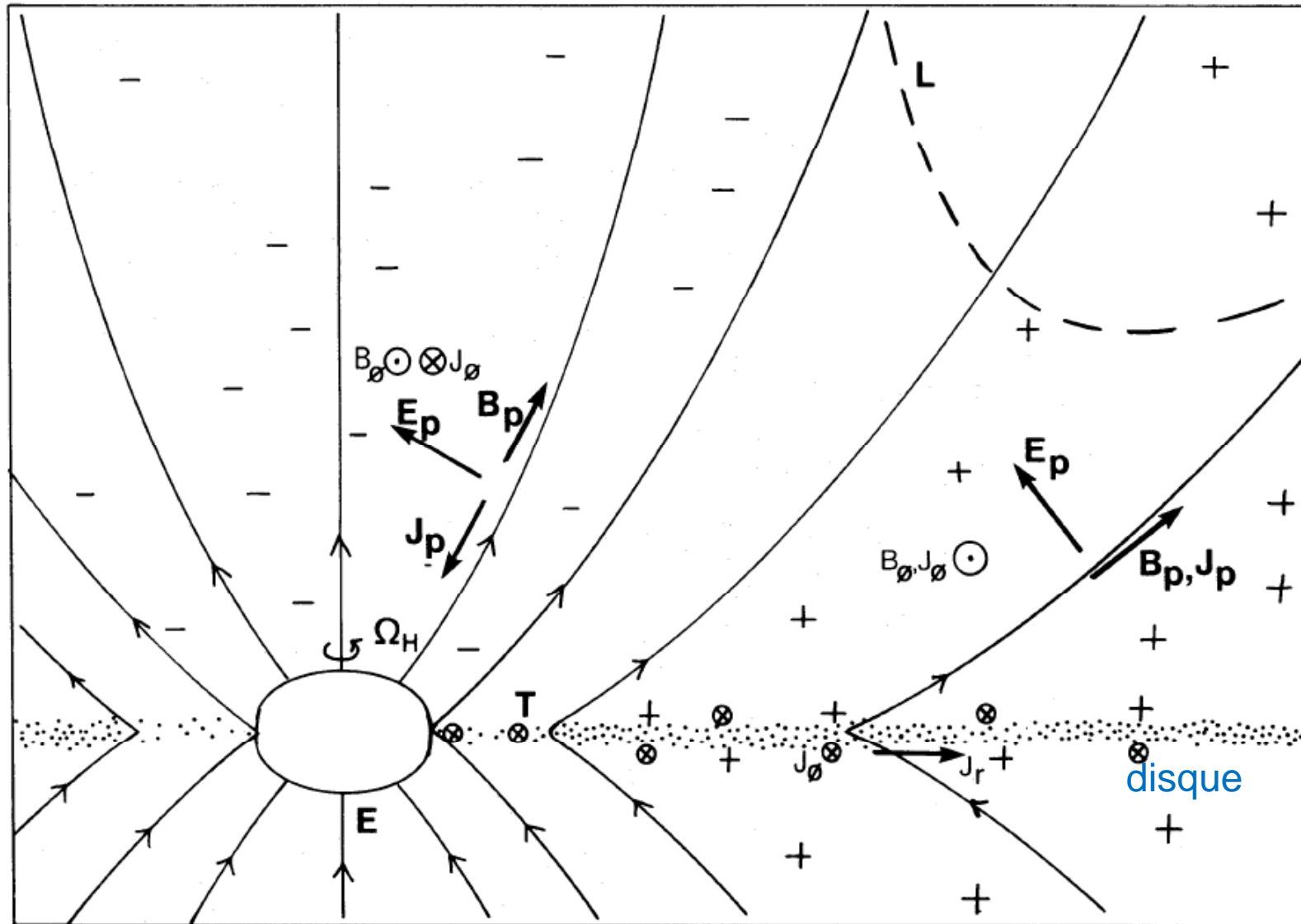


Champ B poloidal,  
 $\Omega$  et B de même sens  
Décrit par le **potentiel**  
**vecteur A**

H Horizon  
Les particules en T ne  
peuvent que tomber

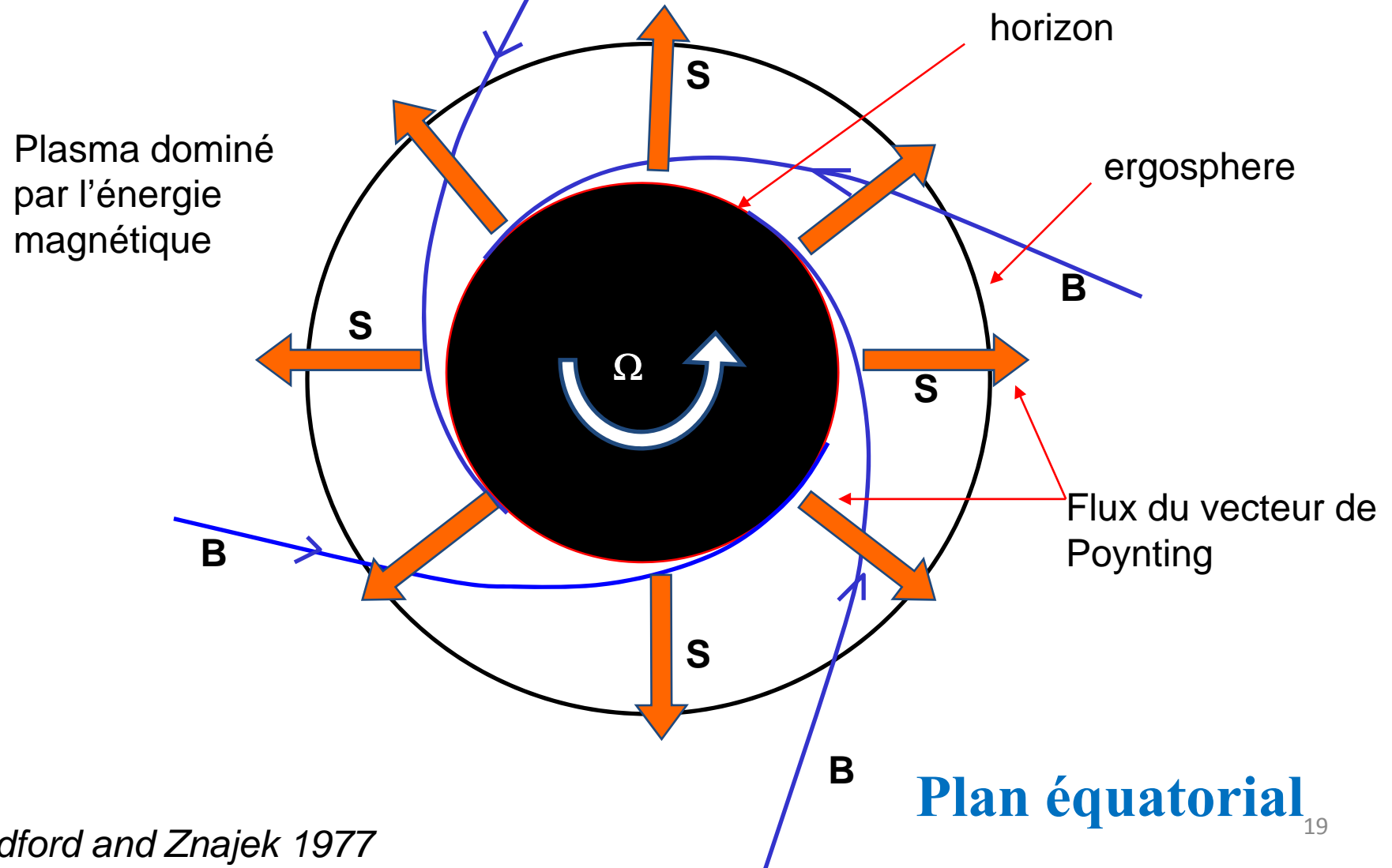
Les positrons sont vite  
absorbés par le trou,  
L'atmosphère est de  
charge négative

# Blandford-Znajek (suite)

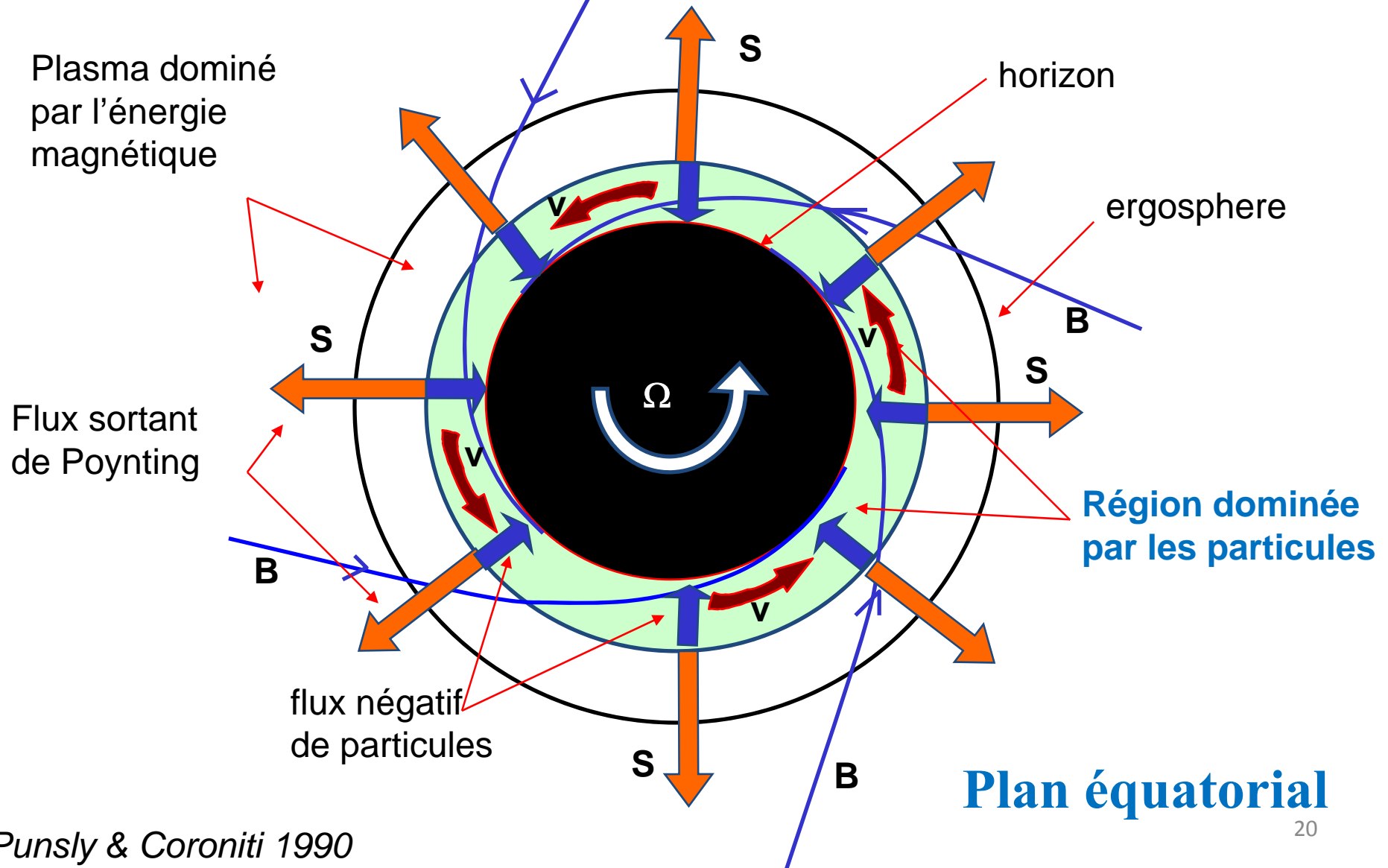


Vecteur de Poynting  $S = E \times B / \mu$

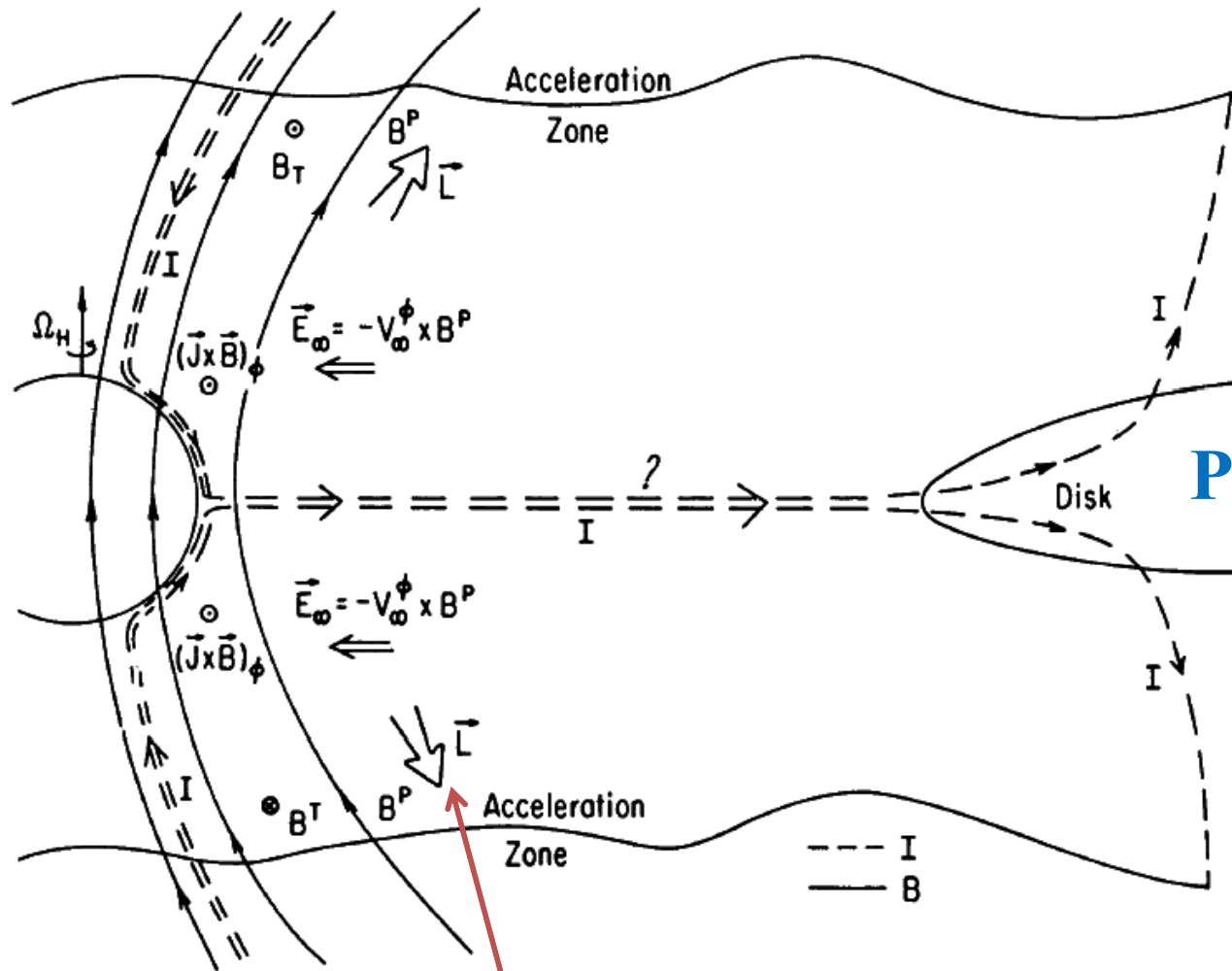
# Extraction électromagnétique de l'énergie de rotation



# Extraction MHD et pas seulement MD



# Couple ralentissant le TN : $J \times B$

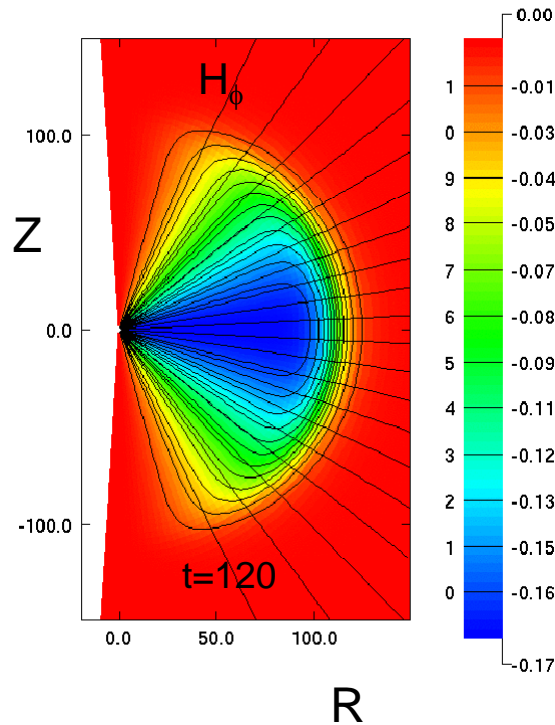


Plan méridien

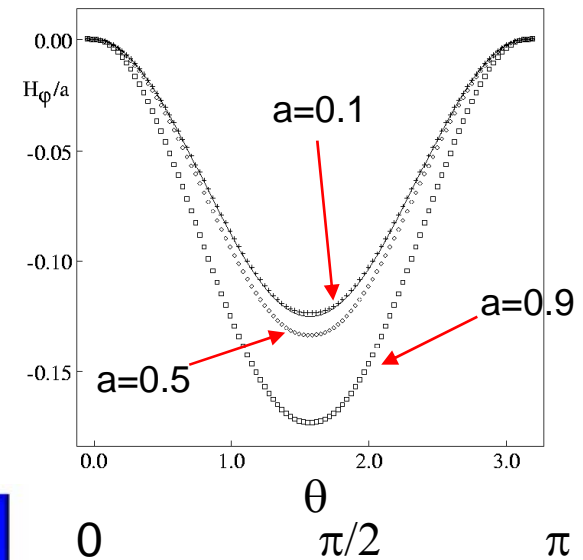
Moment cinétique L sortant

# Simulations numériques: MD & MHD

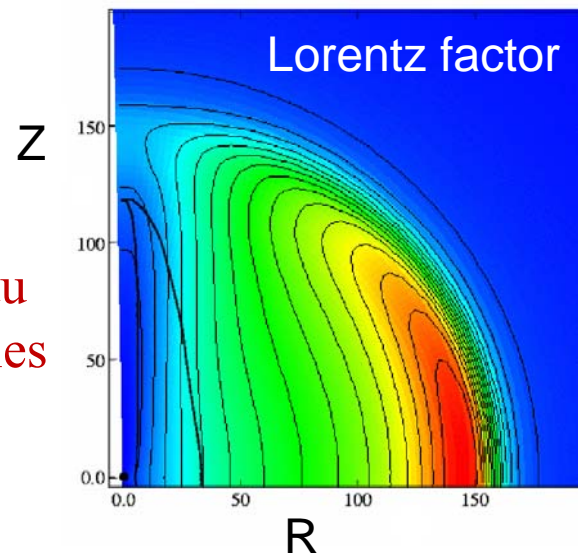
## Champ de monopole (Komissarov 2001, McKinney 2005)



• Le flux de Poynting correspond au modèle de Blandford-Znajek état stationnaire



→ L'énergie est bien extraite du TN, l'introduction des particules MHD ne change pas le phénomène MD

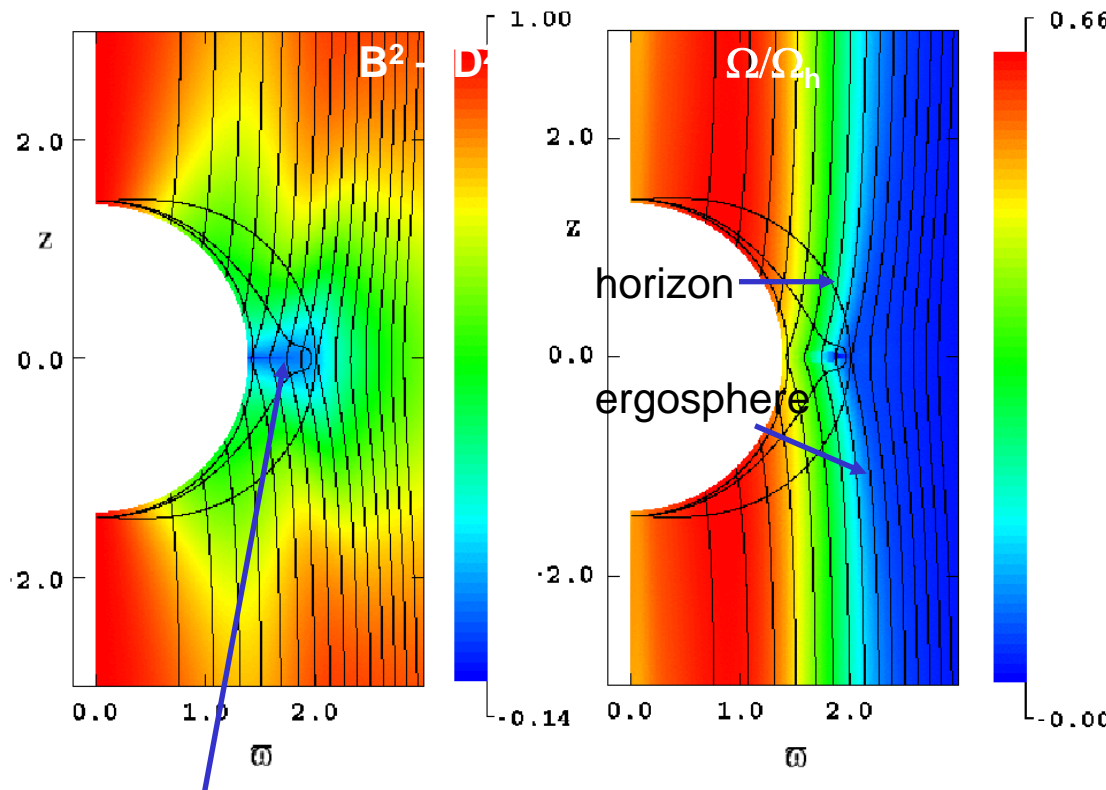


MHD très semblable Au modèle MD

$a=0.9$   
 $\Gamma$  de 0 à 14

# Ergosphère et champ B dans les simulations

Simulations MD, champ uniforme (Komissarov 2004)



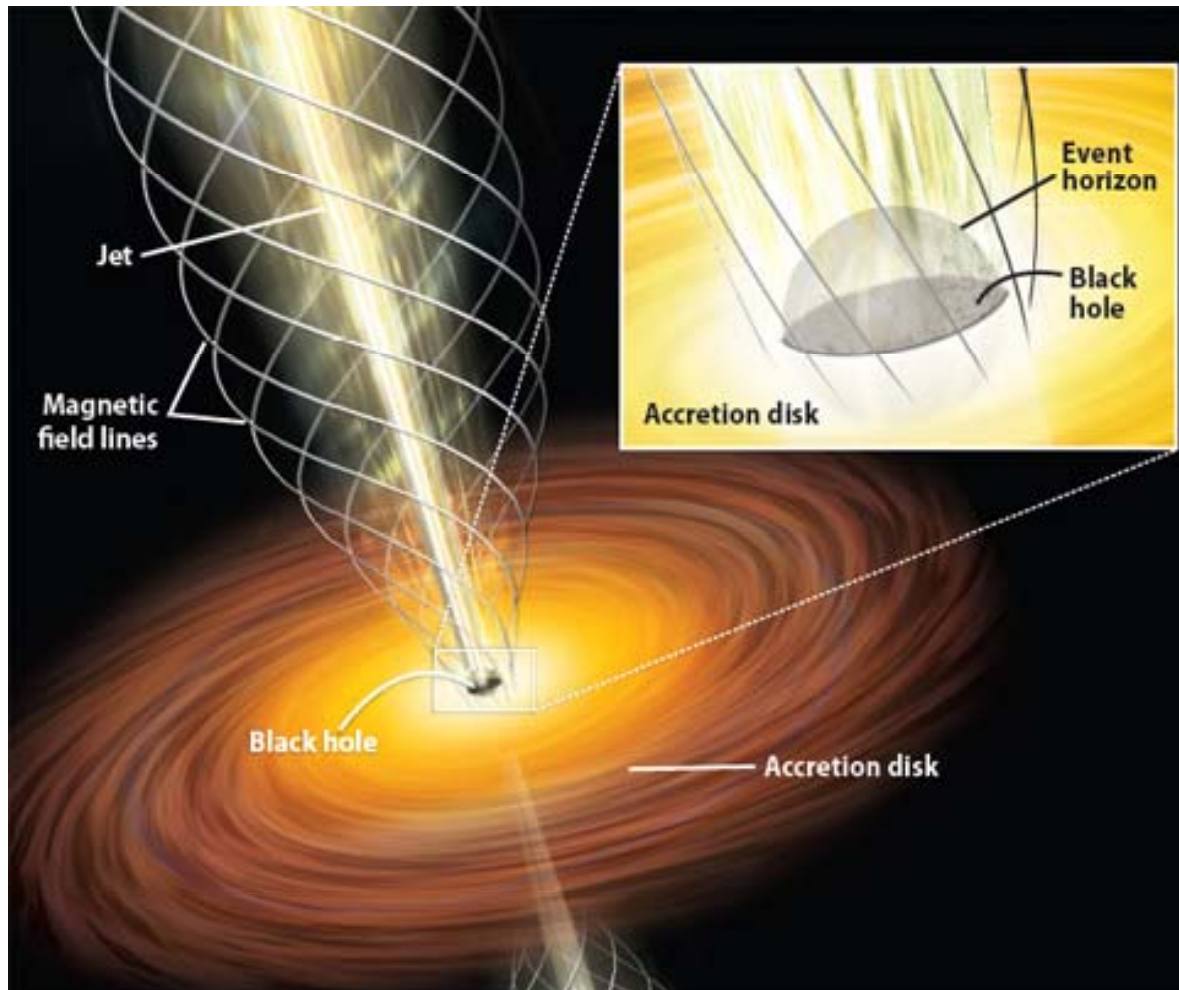
Couche dissipative

Toutes les lignes de champ qui entrent dans l'ergosphère sont en rotation, jusqu'à 0.5 fois  $\Omega$  du trou

La couche dissipative dans le plan équatorial est la source d'énergie

L'énergie est extraite de la région entre l'horizon et l'ergosphère (=processus de Penrose)

# Les jets sont confinés par des champs magnétiques



Collimation  
sur 8 ordres  
de grandeur en  
échelles

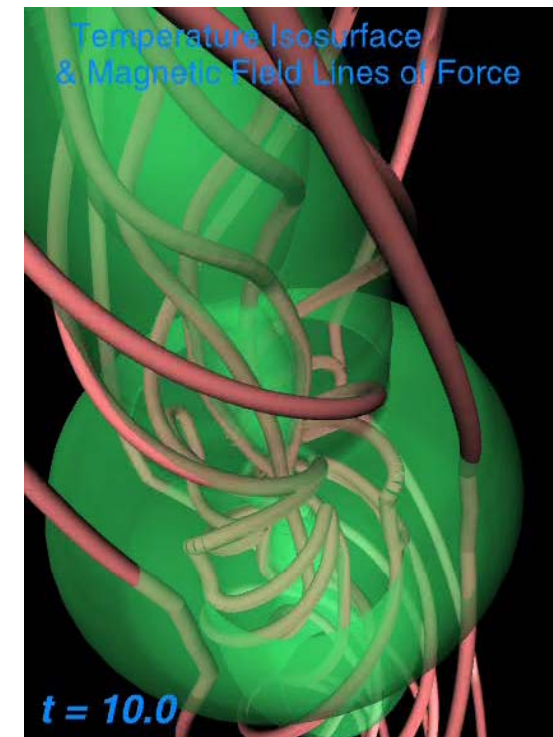
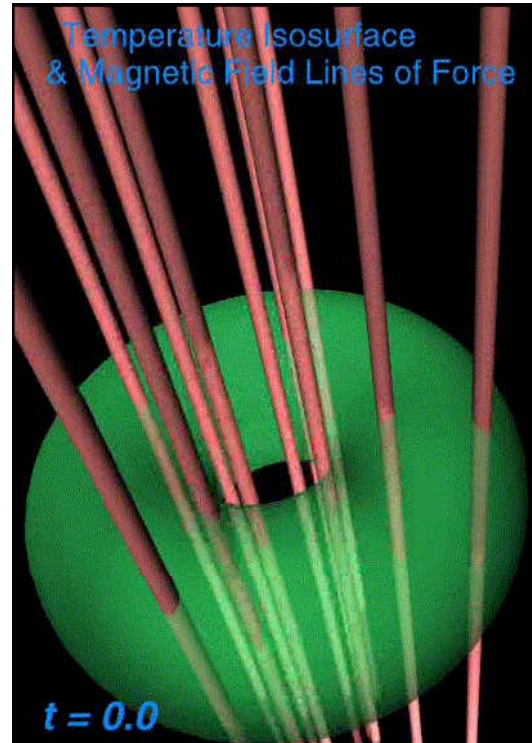


# MHD et confinement du jet

La rotation différentielle  
twiste les lignes de champ  
Ce qui ralentit la rotation  
Et permet plus d'accrétion

Pression magnétique et  
pression thermique sont  
les accélérateurs du jet

Tension magnétique collimate



Uchida et al 1999

# Mécanismes d'éjection

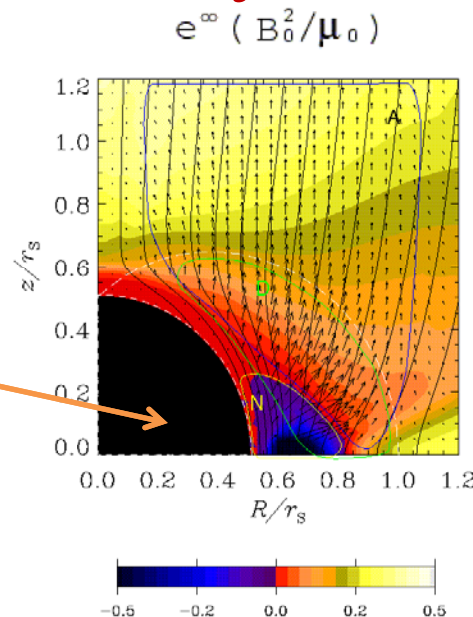
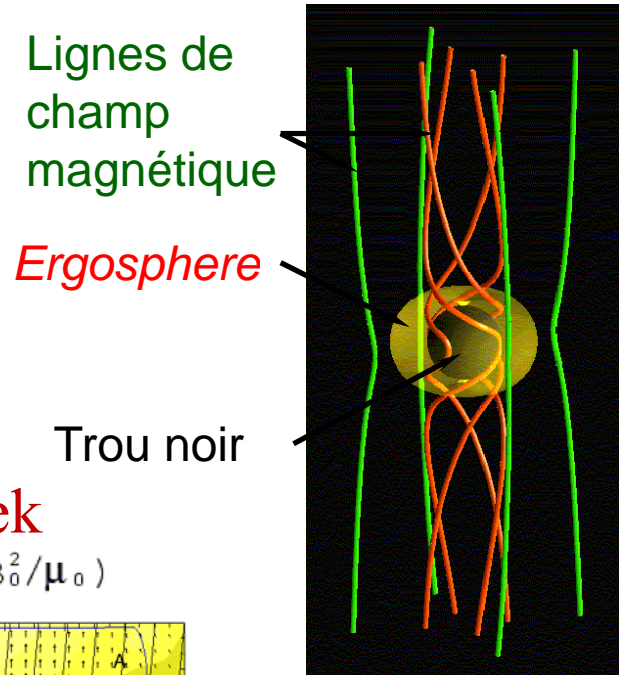
Un trou noir en rotation ( $a \sim 1$ ) accrète du gaz ionisé et magnétisé

Le gaz tombe dans le trou, et de l'énergie électromagnétique est éjectée dans la direction de l'axe de rotation

Ce flux d'énergie (Poynting) va se charger de particules, pour former un jet relativiste

→ Similarité avec processus de Blandford-Znajek

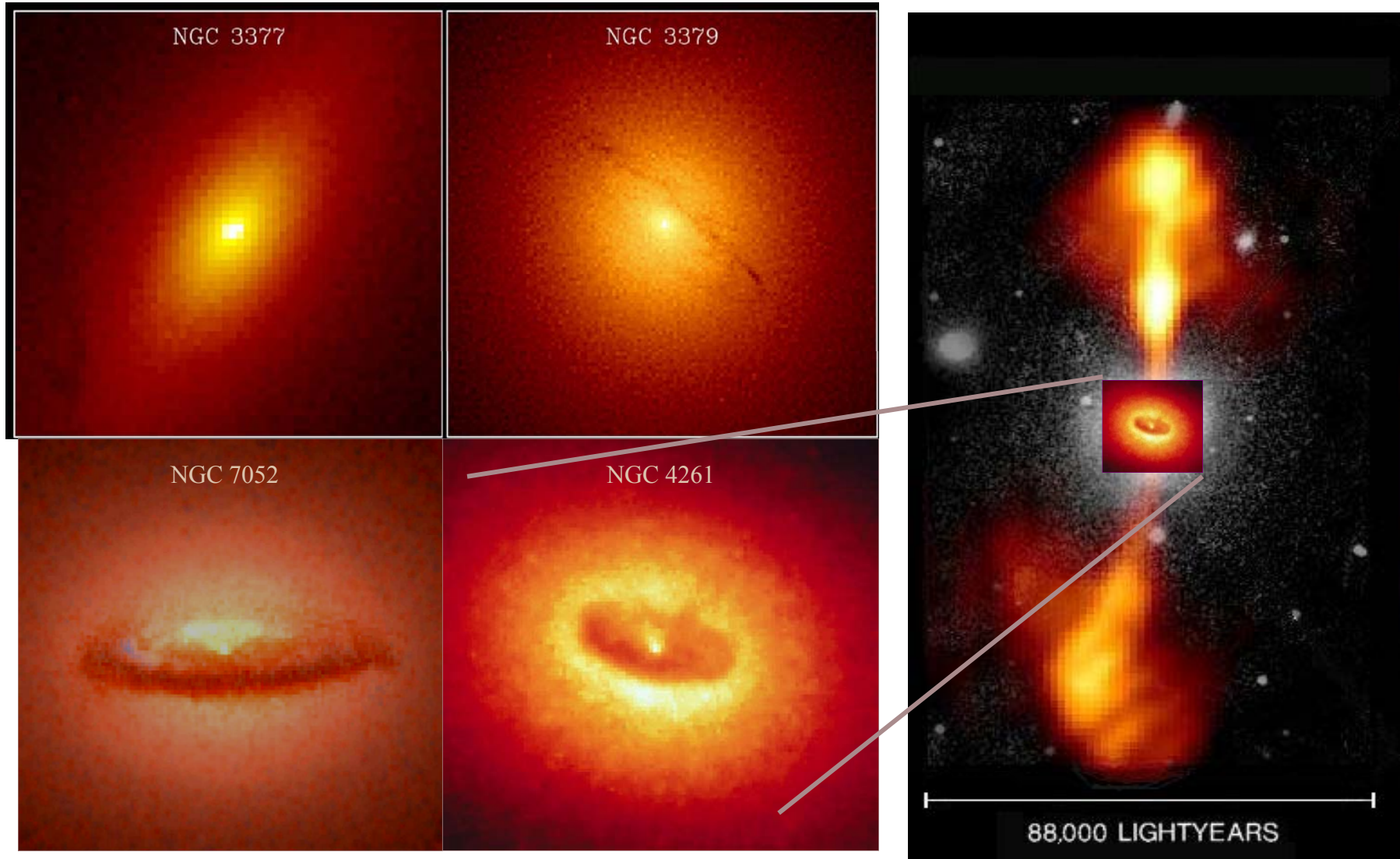
La réaction du champ magnétique est d'accélérer le plasma en contre-rotation du trou



Koide et al 2002

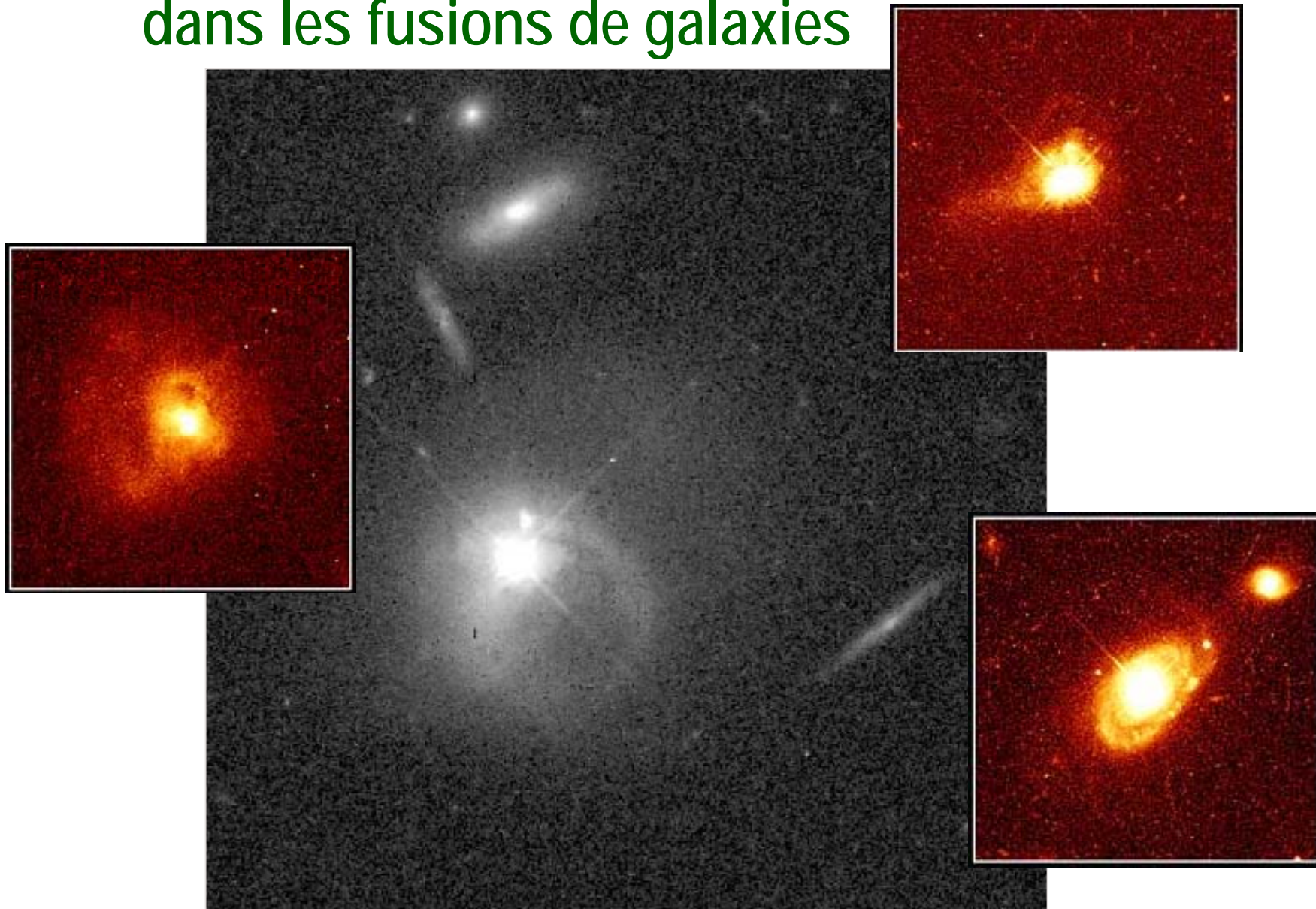
→ Arrivée de  $L < 0$

Les radio galaxies sont en général des Elliptiques,  
peut-être car  $M_{\text{BH}} \sim M_{\text{bulbe}}$





# La majorité des quasars sont observés dans les fusions de galaxies



Brassage violent du gaz → alimentation du trou noir

# Ejection de plasma: lobes radio dans les elliptiques, résultats de fusions

Cygnus A

Image radio, VLA

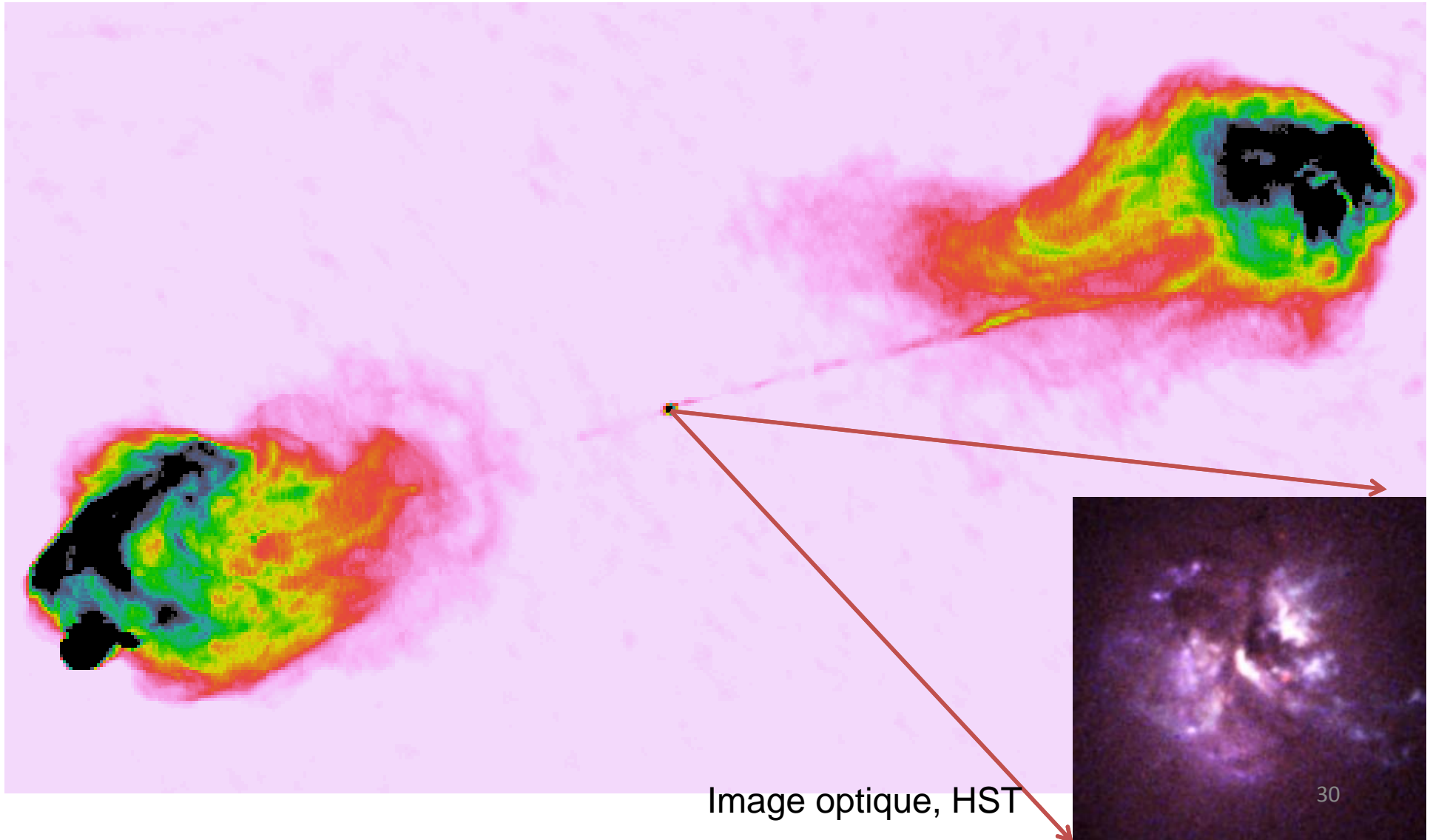
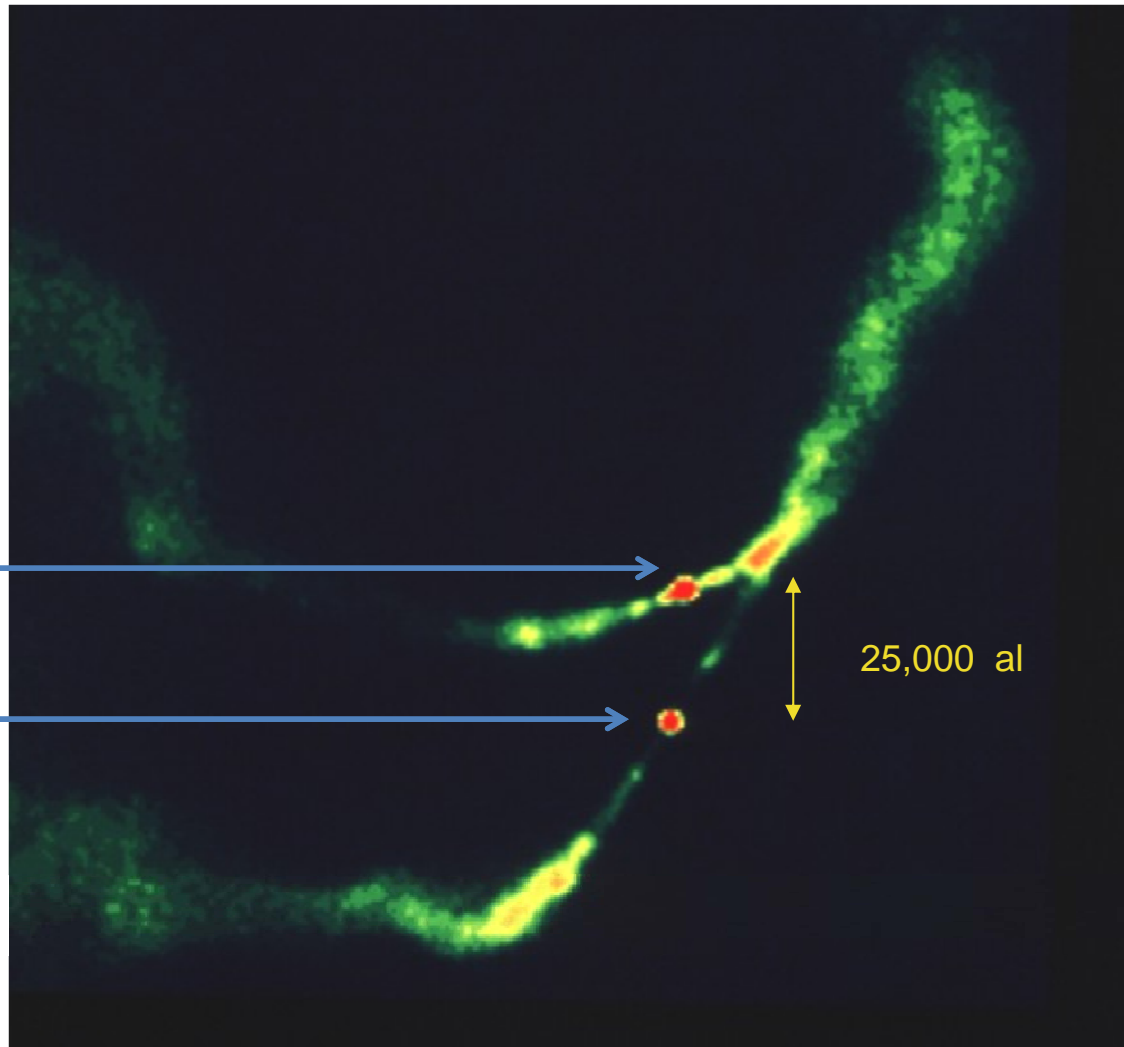
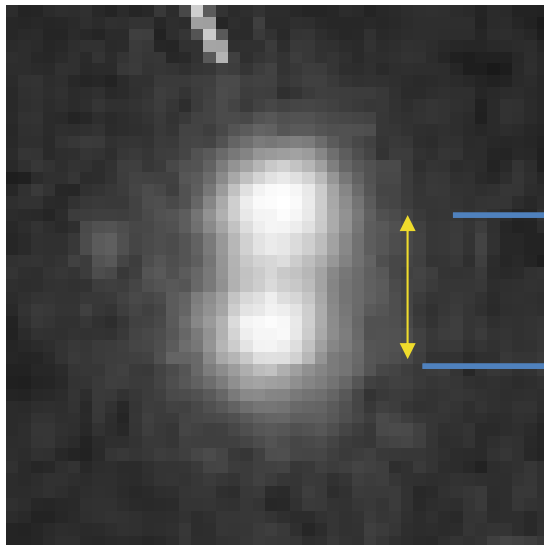


Image optique, HST

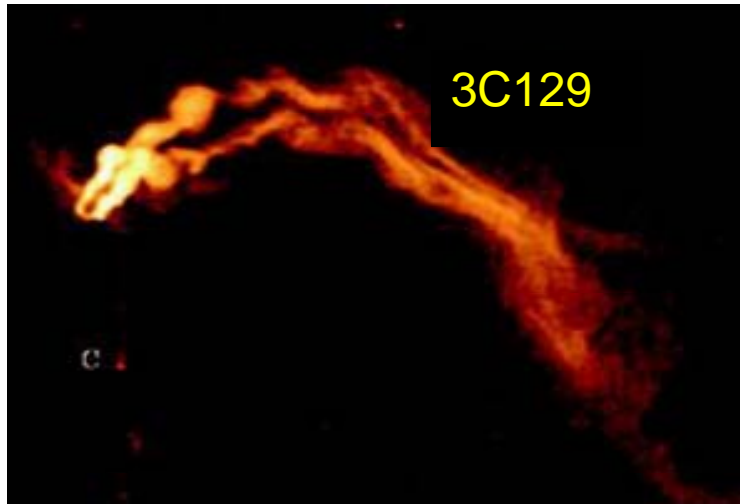
# Un quasar double, en train de fusionner: 3C75, $z=0.023$

Image radio, VLA

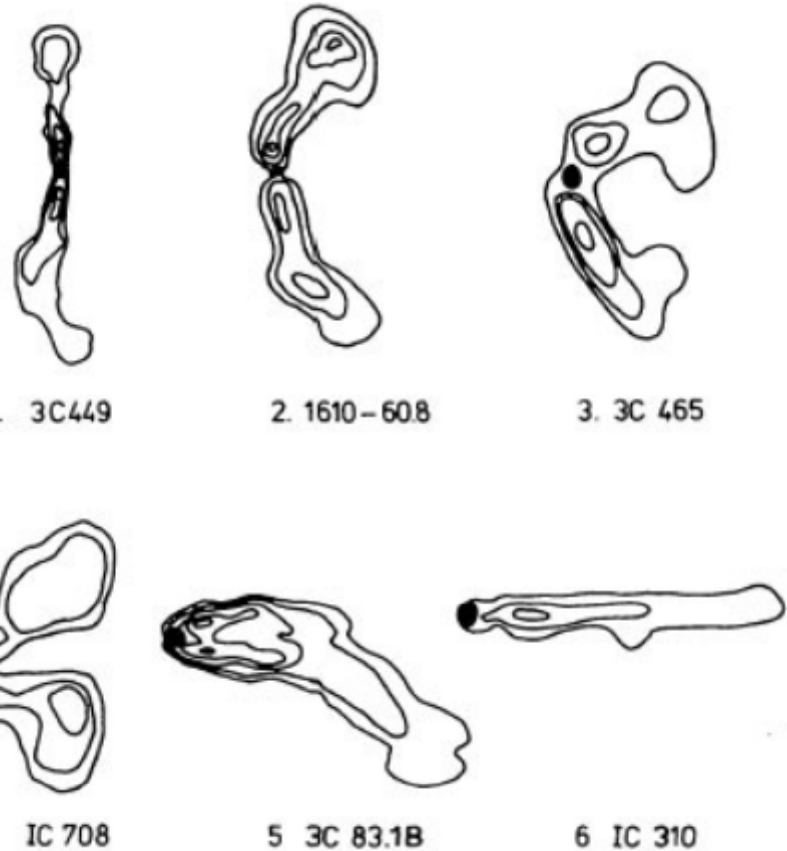
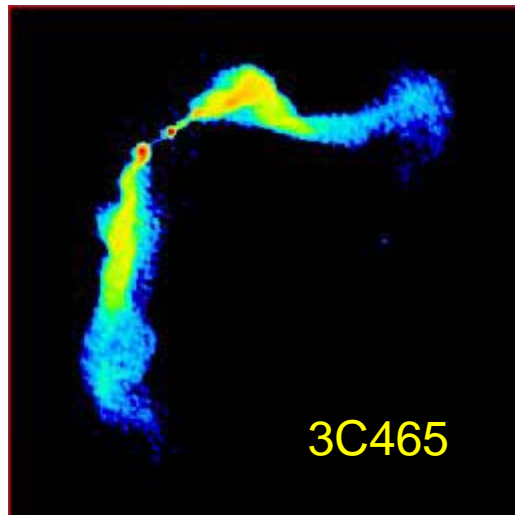
Image optique HST



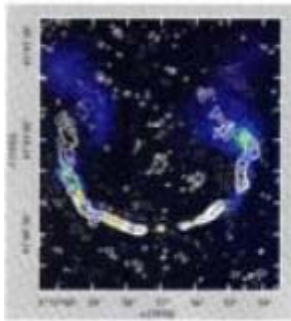
# Lobes radio, galaxies en mouvement



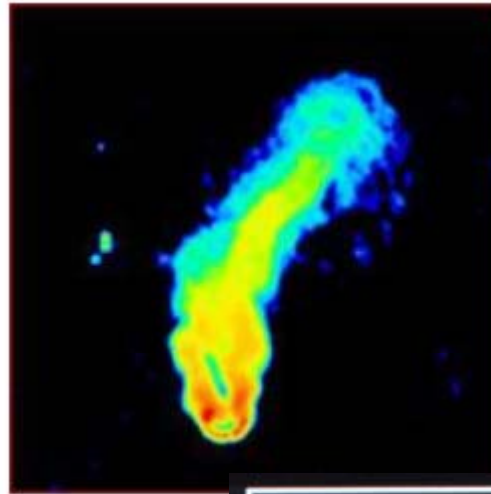
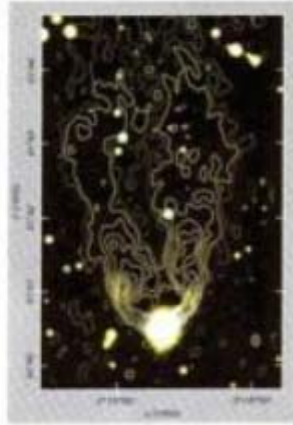
Les galaxies se déplacent jusqu'à 1000km/s dans les amas de galaxies





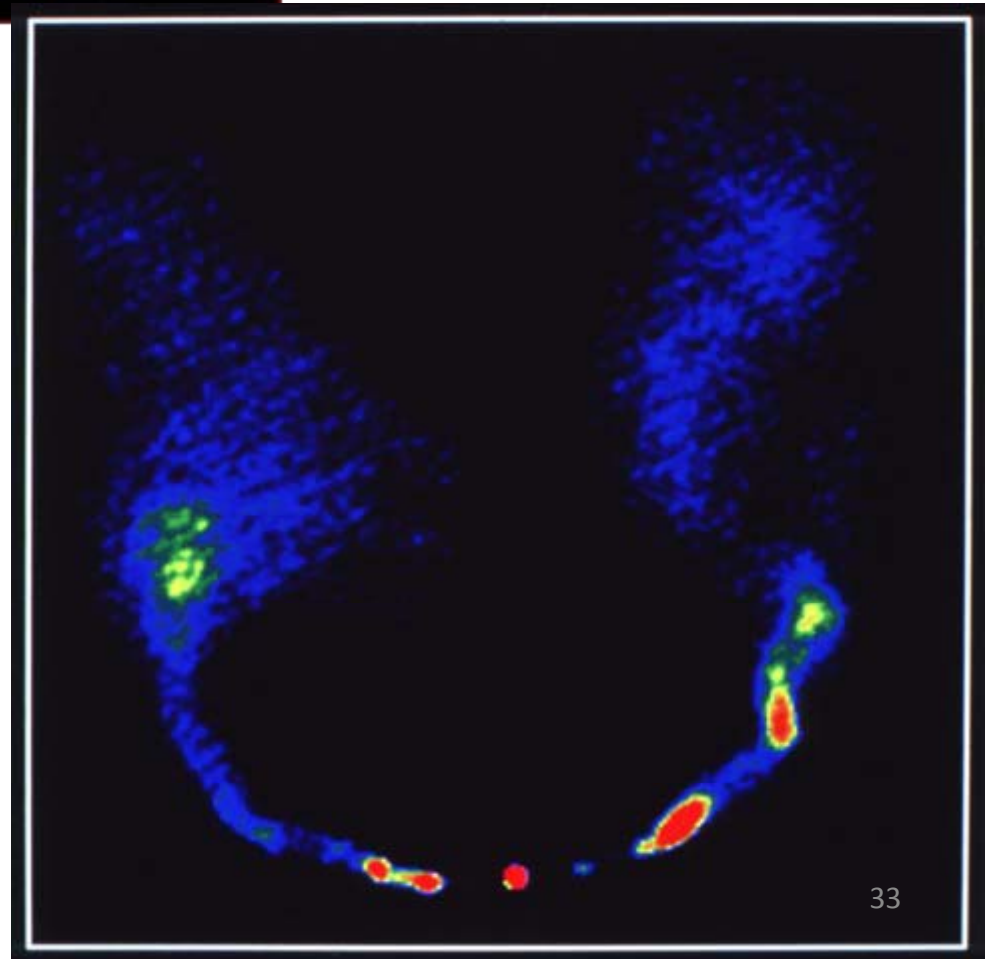
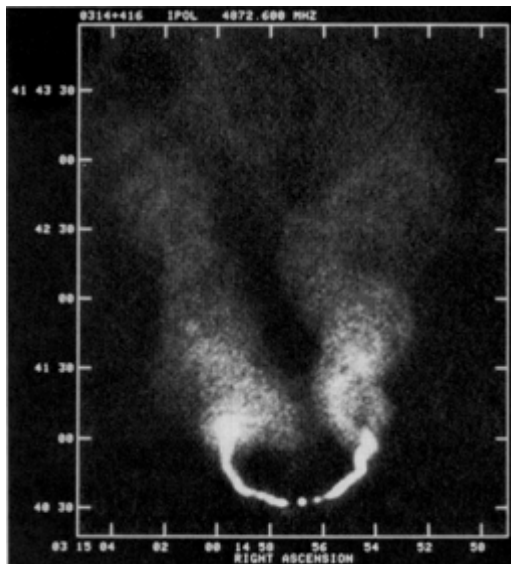


NGC 1265

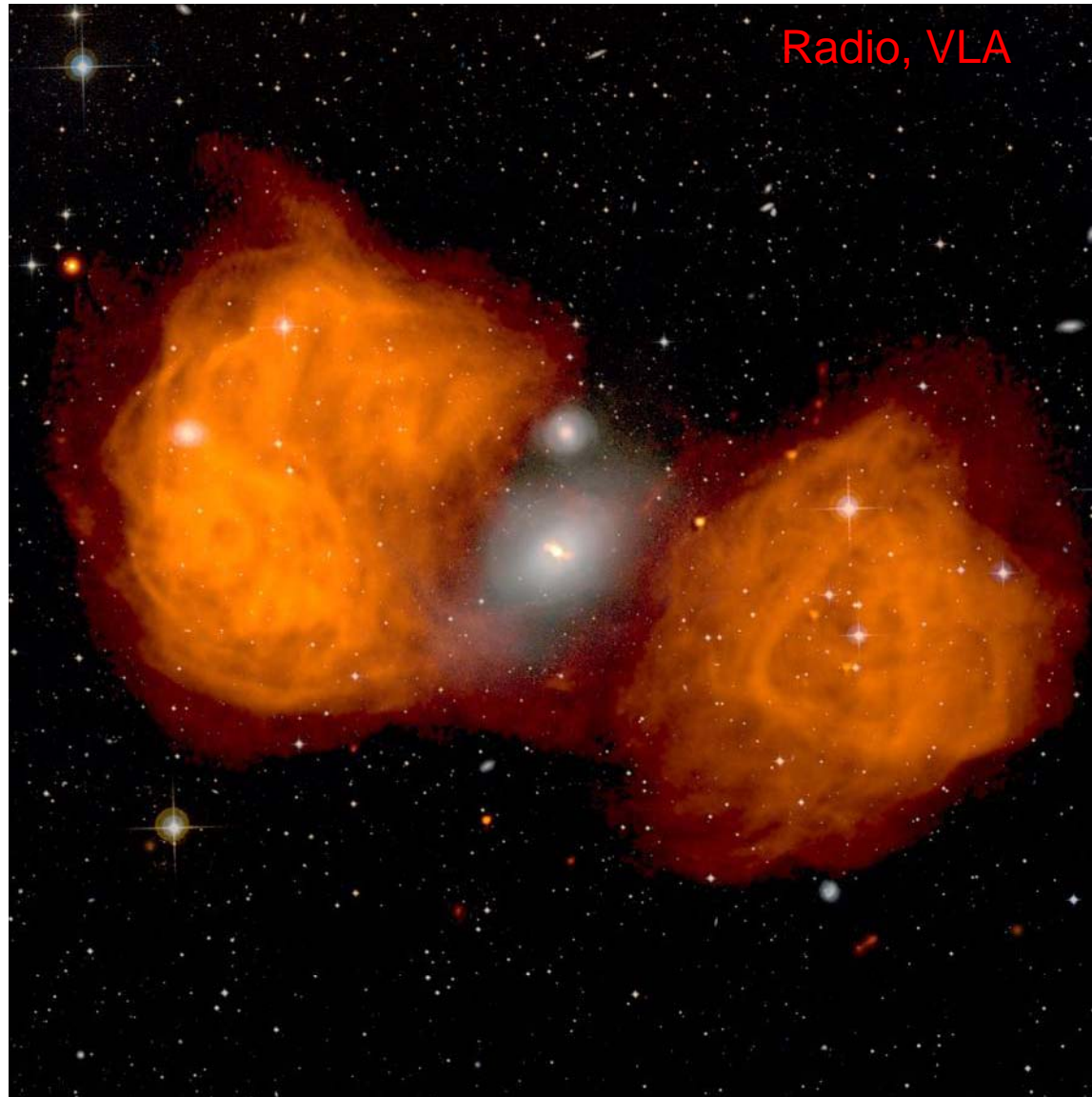


Comment 2 lobes radio  
peuvent fusionner un  
un seul

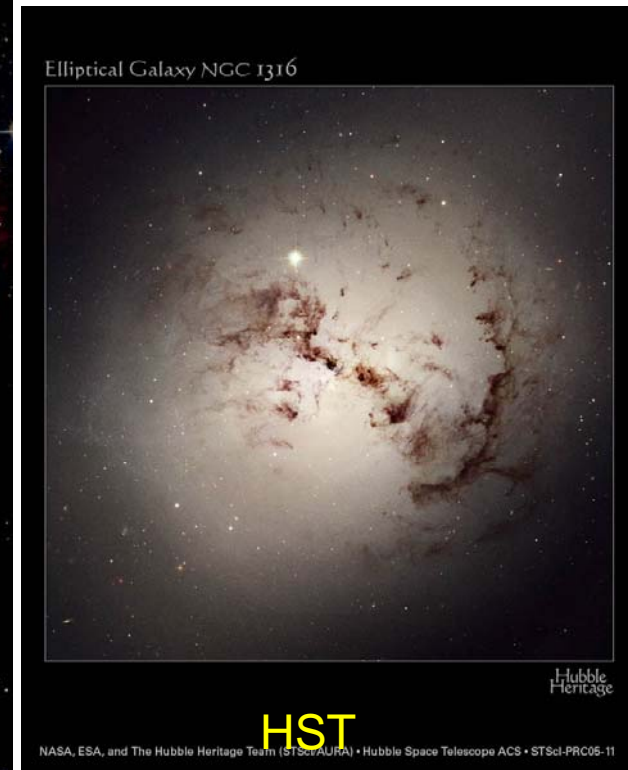
NGC 1265,  
Amas de Persée



# Radio sources plus faibles: lobes plus diffus



NGC 1316  
dans Fornax



## Origine de l'émission radio :

- Flux en spectre de puissance décroissante (pente 0 noyau, puis 1)
- radiation polarisée linéairement (au moins 30%, ce qui est beaucoup)

→ **rayonnement synchrotron** émis par des électrons en mouvement relativiste dans un champ magnétique

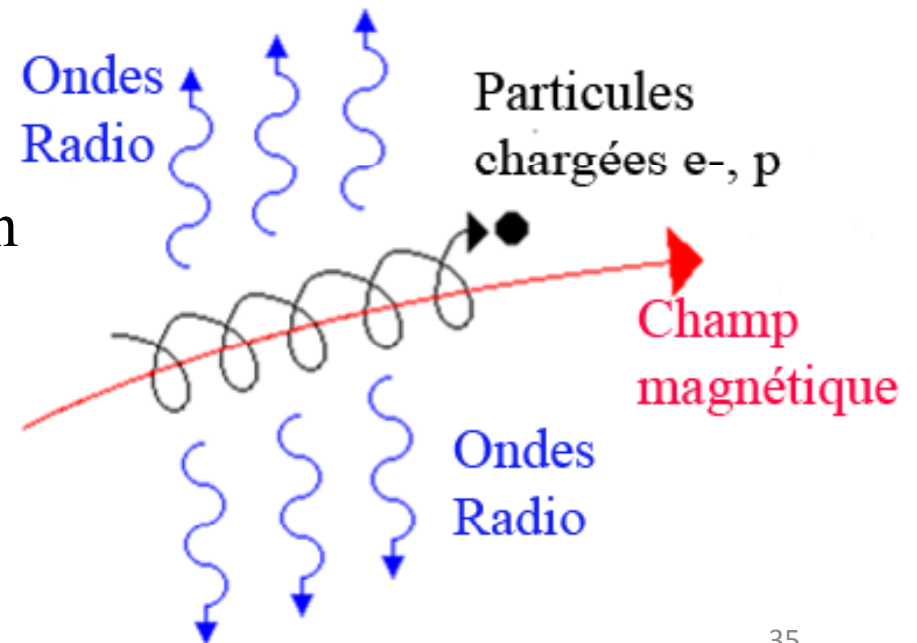
Pour un électron d'énergie

$$E = \gamma m_e c^2 \quad \text{avec} \quad \gamma = 1 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

la fréquence caractéristique d'émission vaut

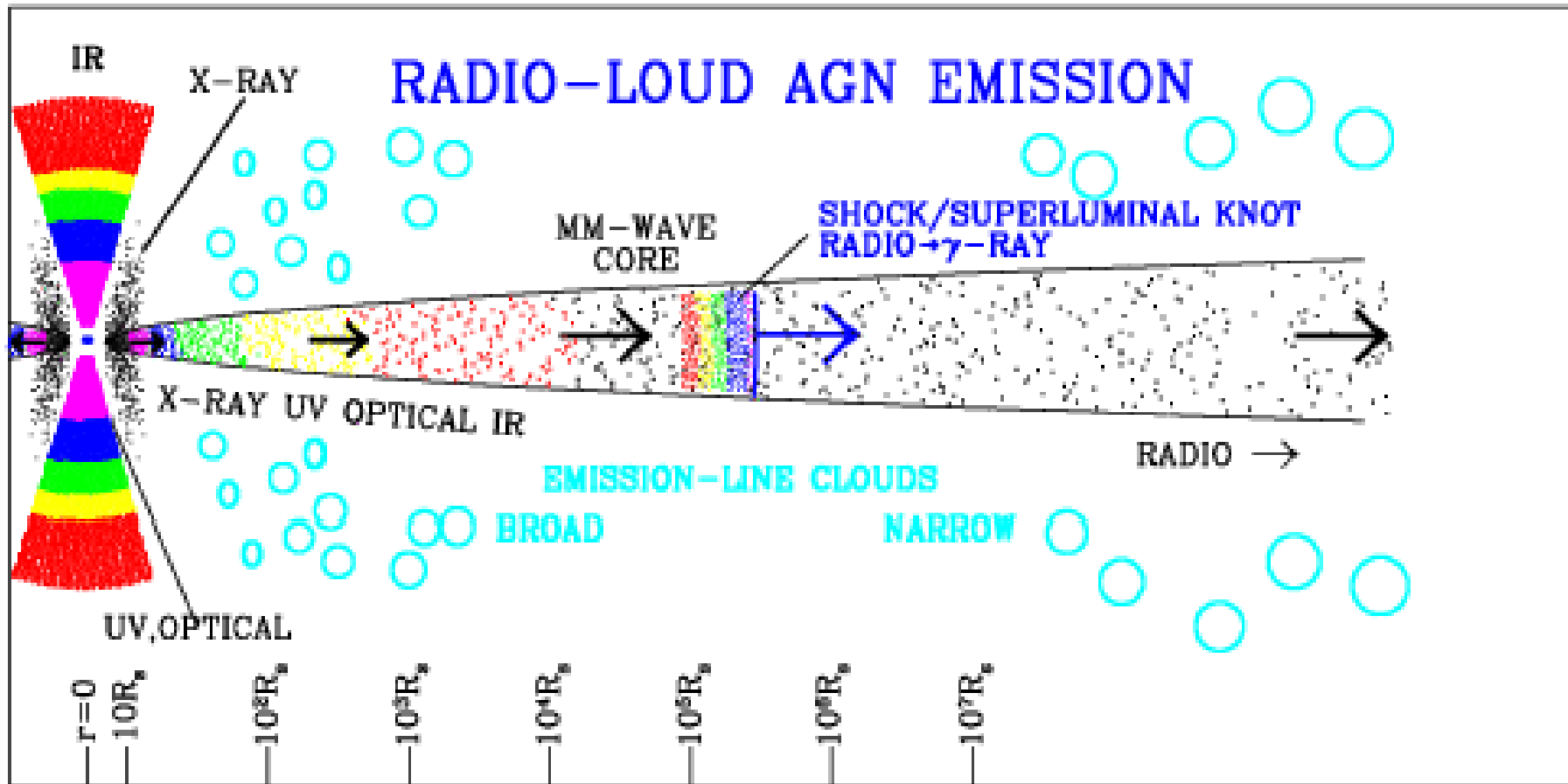
$$\nu_c \sim 4.2 \times 10^6 \gamma^2 B \text{ Hz}$$

Avec  $B$  en Gauss

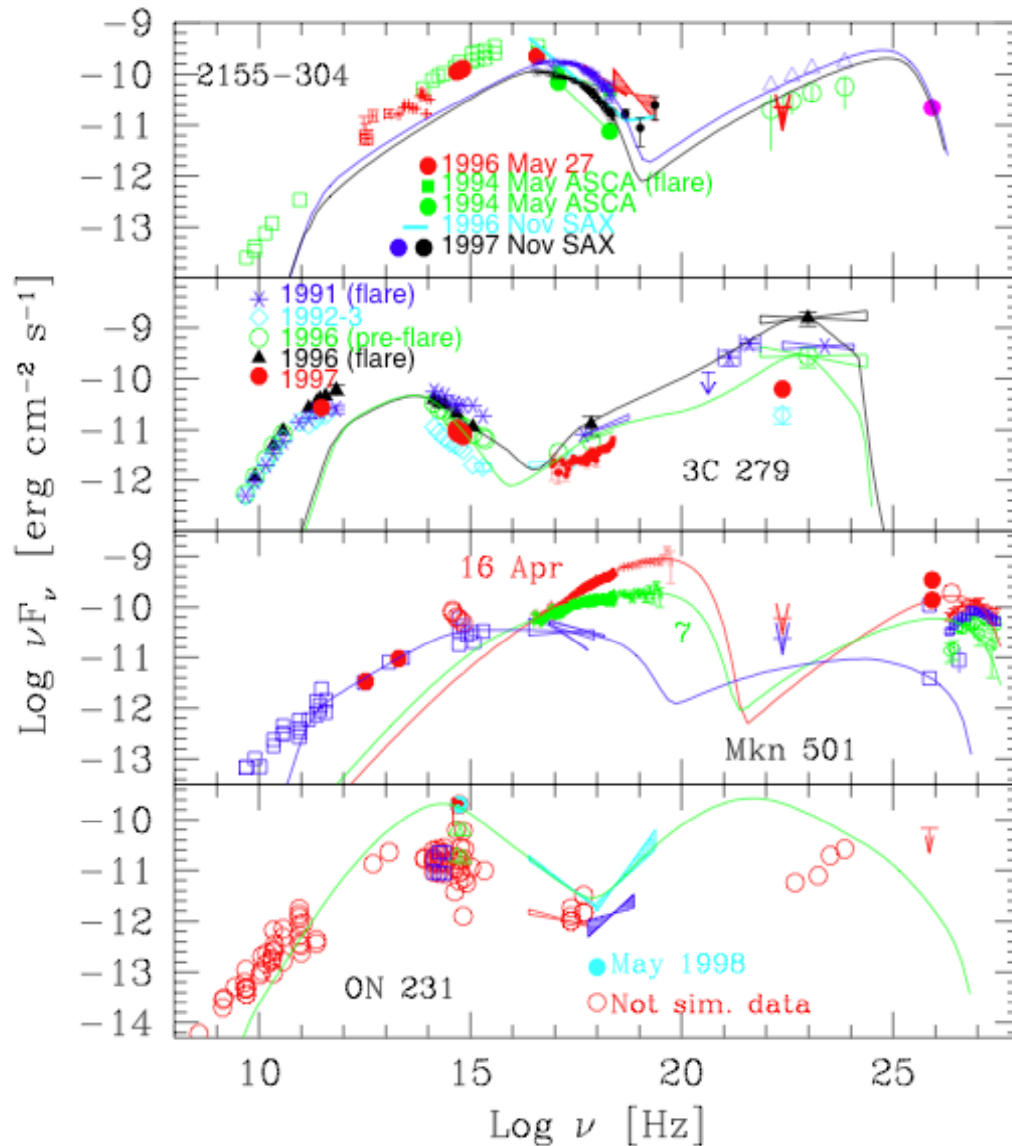


# Emission gamma (TeV) d'un blazar

Des photons de très haute énergie sont émis par les radio AGN, quand leur jet est orienté vers l'observateur → blazar & « Flat Spectrum Radio Quasar » (FSRQ) Des facteurs Doppler de 20-50!



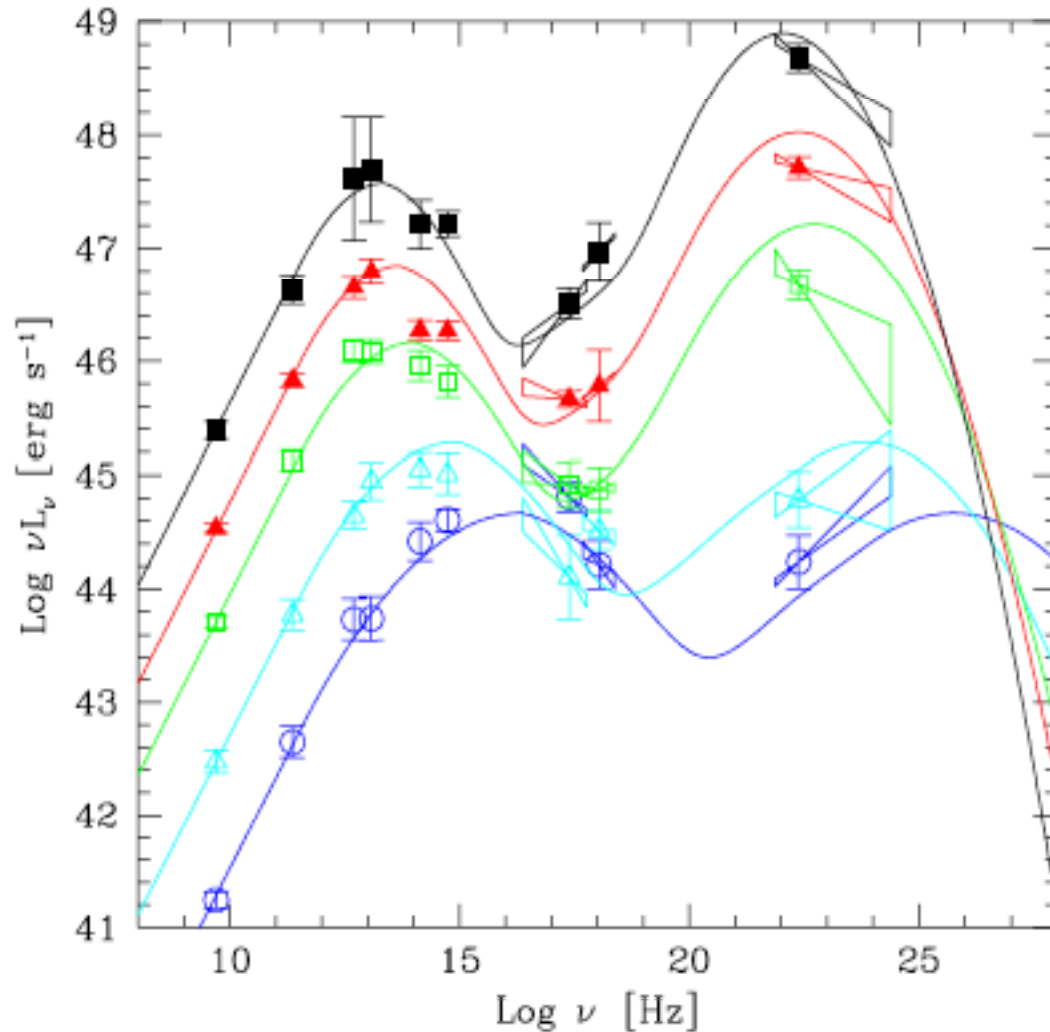
# Jets en Gamma: haute variabilité



**Mécanismes de Rayonnement:**  
 synchrotron, SSC  
 (synchrotron self-Compton)  
 & EIC (external inverse  
 Compton)  
 A faible puissance: SSC  
 A forte puissance: EIC

Variabilité sur des échelles  
 De temps jusqu'à des minutes

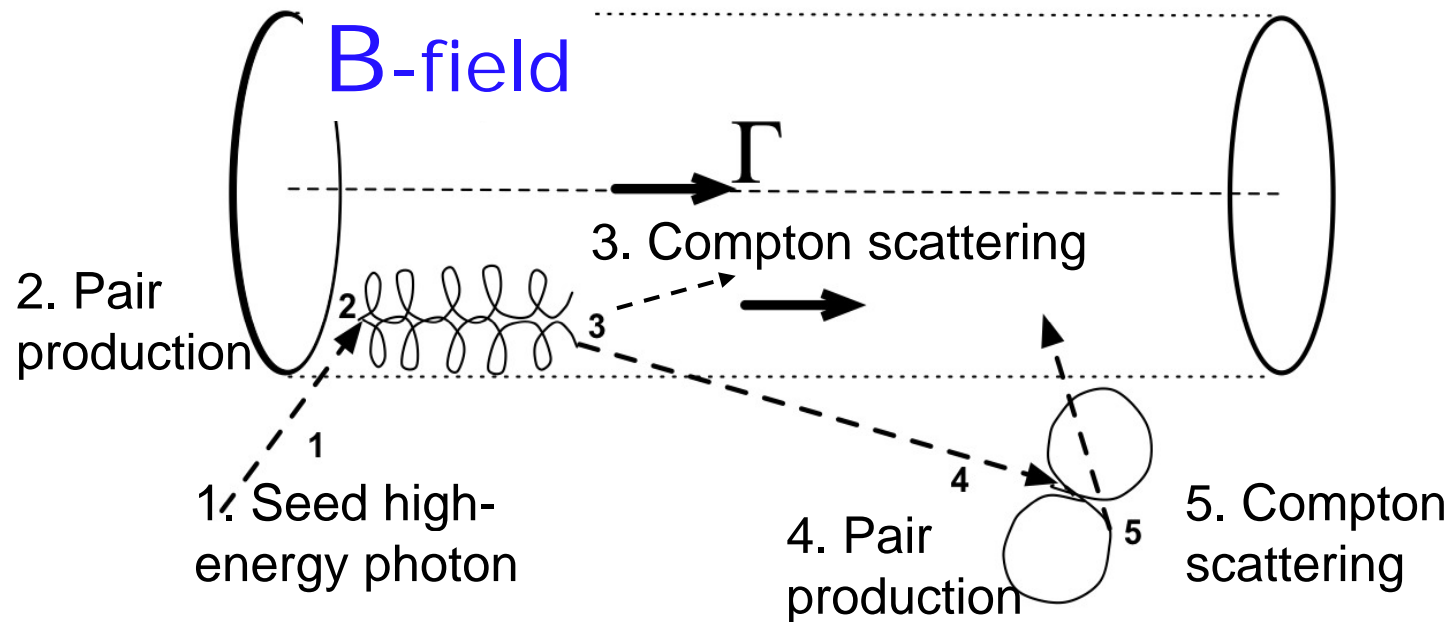
# La séquence des blazars



Les blazars de plus forte luminosité  
ont des spectres plus mous

**Electrons de haute énergie**  
Dans les objets faibles  
“injection” entre  
 $\gamma_{\min} = 10^{4-5}$  à  $10^{6-7}$   
A haute L,  $\gamma_{\min}$  est plus petit

# Mécanismes des photons en culture



**Multiplication des  $\gamma$  de haute énergie**, dès que

- (1) des photons de haute énergie sont injectés
- (2) Il existe un **champ B transverse ou chaotique**
- (3) un champ de rayonnement isotrope (BLR à  $10^{17}$  cm)
- (4) **le facteur de Lorentz du jet  $\Gamma \sim 4-10$**

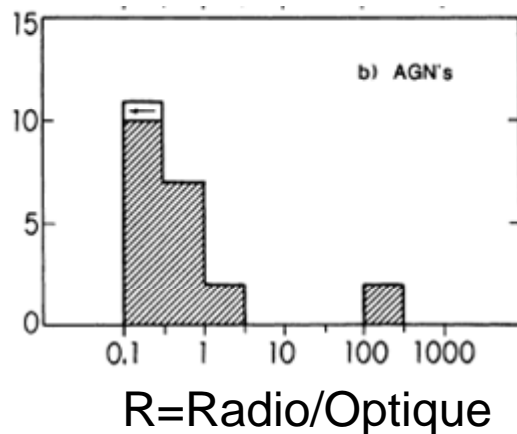
*Stern & Poutanen (2006, 2008)*

# Pourquoi certains AGN ont des jets radio d'autres non?

**Fréquences et circonstances: La plupart des AGN sont « silencieux »: 90% de « Radio-Quiet » avec pas ou peu de jets**

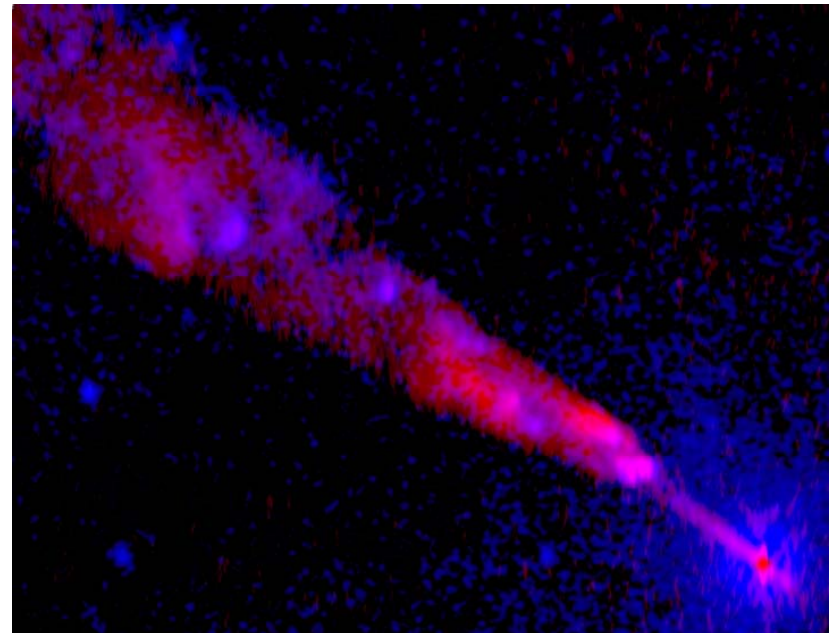
**10% de « Radio-Loud »: une vraie dichotomie**

**Est-ce des phases différentes d'une évolution universelle?**



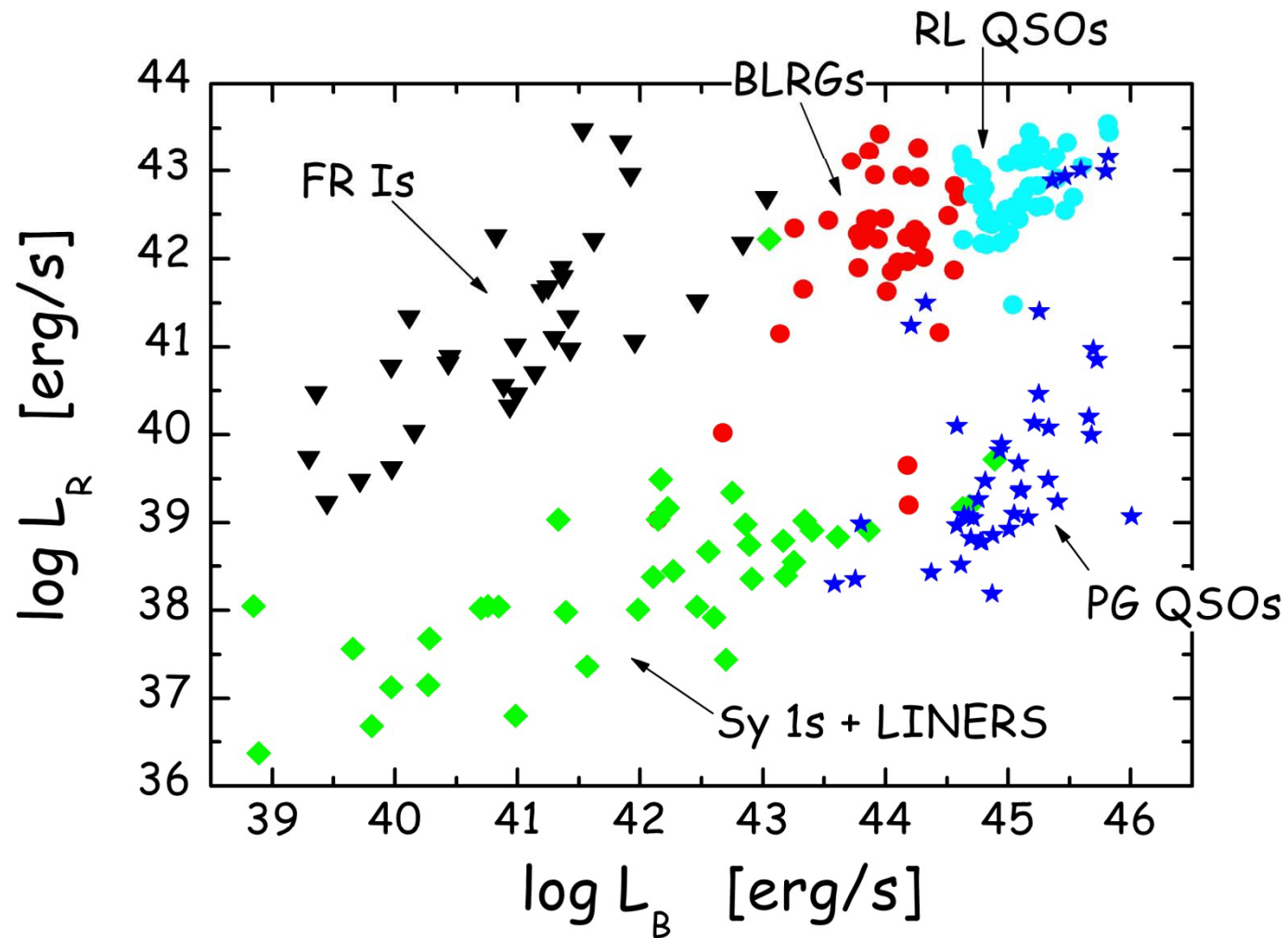
Centaurus A  
Bleu: rayons X  
Rouge: Radio

*Kellerman 1989*



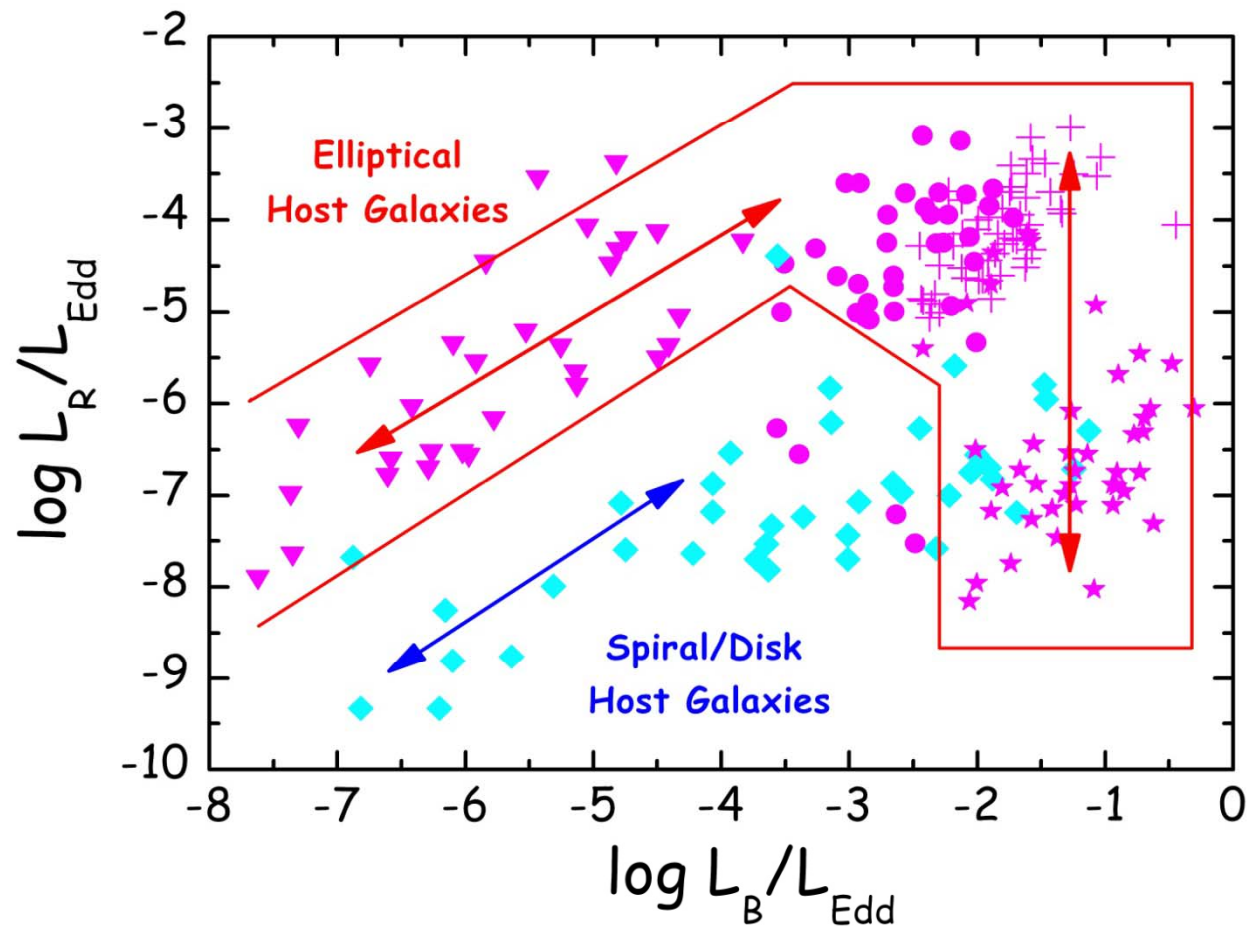


# Deux séquences dans le plan $L_B-L_R$

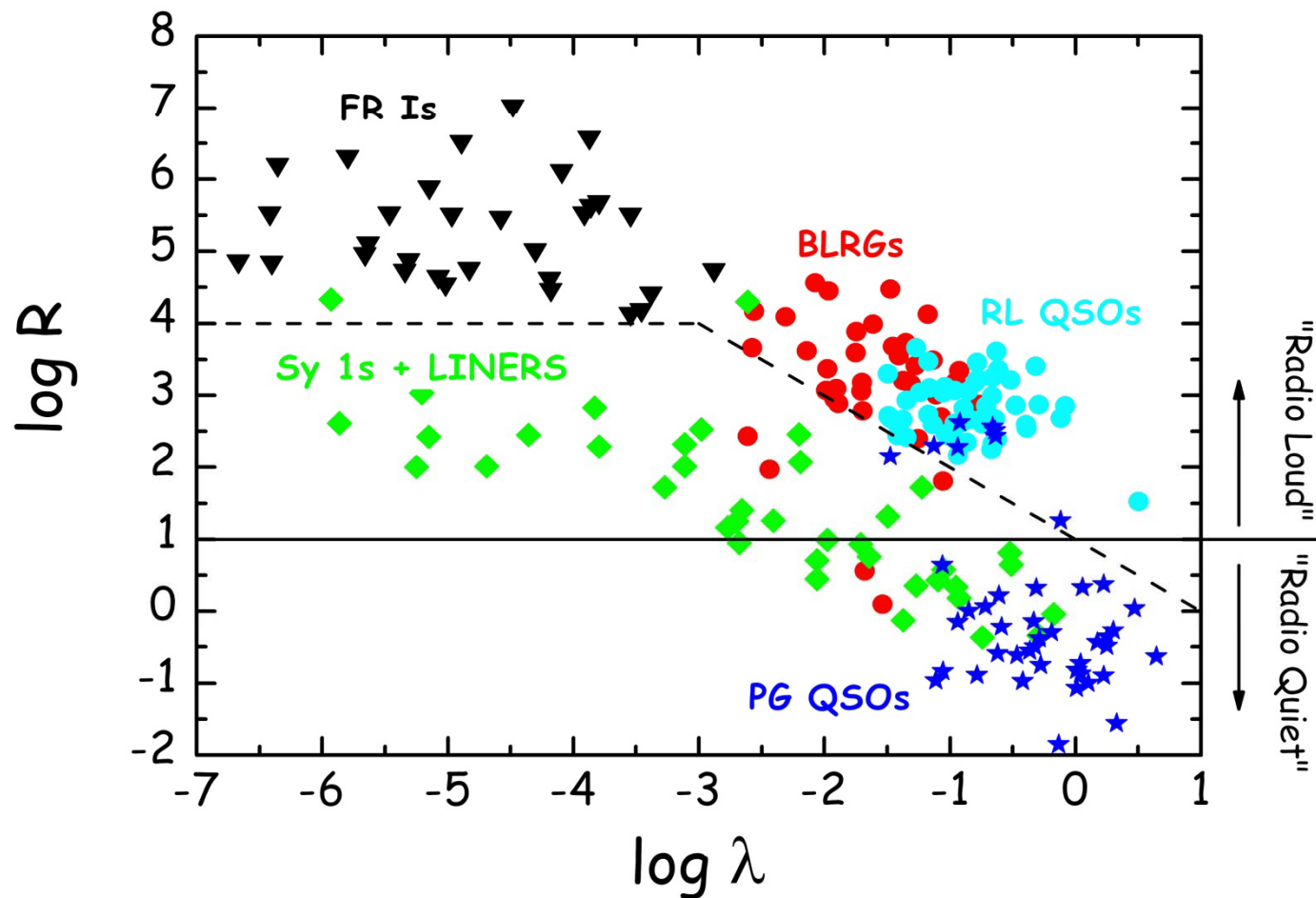


# Même séquences dans $(L_B/L_{\text{Edd}})$ - $(L_R/L_{\text{Edd}})$

Cette fois normalisé à  $L_{\text{Edd}} \approx 10^{38} \times (M_{\text{BH}}/M_{\odot})$  erg/s



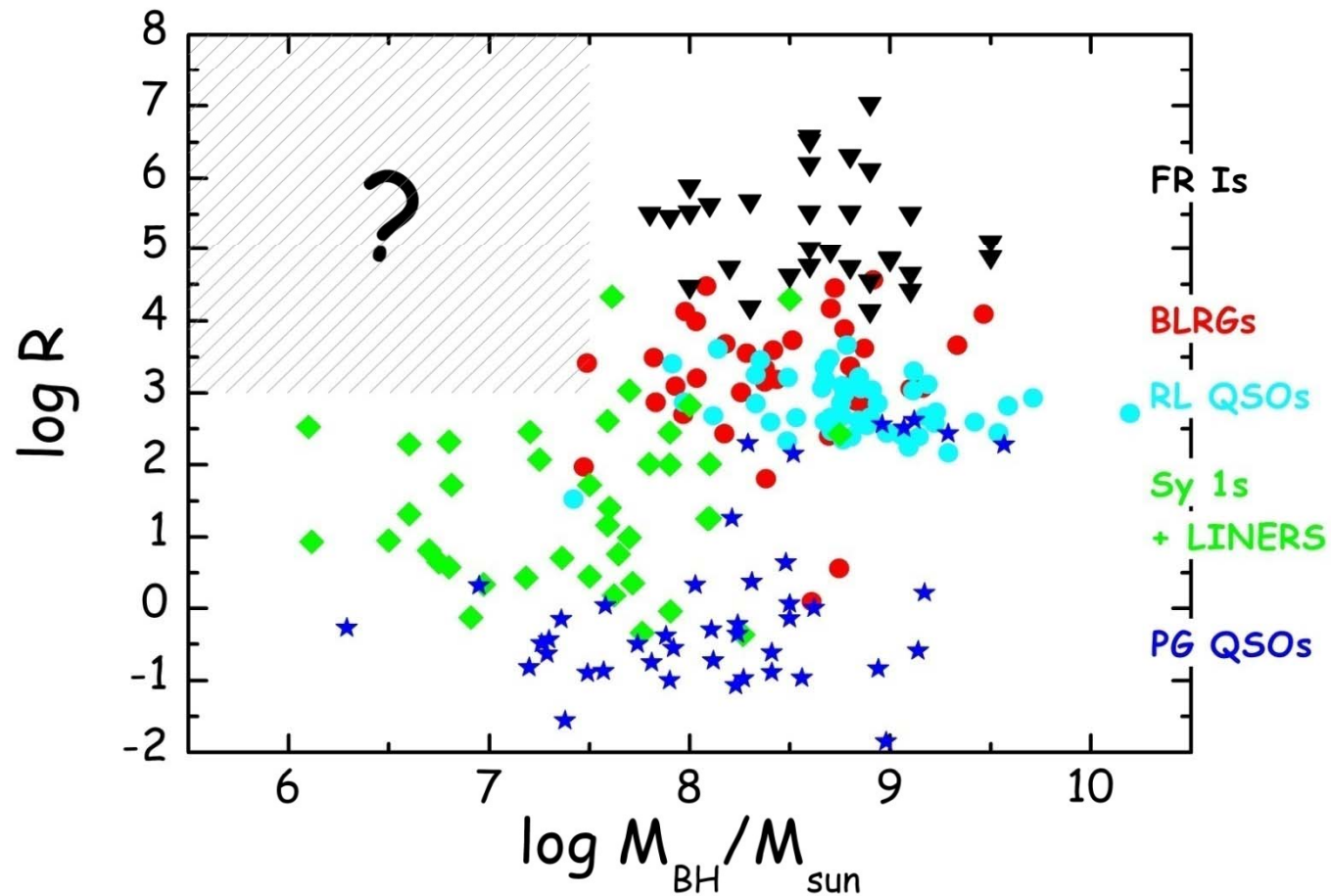
$$R \sim L_R/L_B, \lambda \text{ taux accrétion} \sim L_{\text{acc}}/L_{\text{Edd}}$$



# Critères pour les jets radio

- 1) Le paramètre **R** croît lorsque le taux d'accrétion  $\lambda = L_{\text{acc}}/L_{\text{Edd}}$  décroît
- 2) Ceci est vérifié à la fois par les deux séquences « radio-loud » et « radio-quiet »
- 3) Une saturation du paramètre **R** survient à faible taux d'accrétion  $\lambda < 10^{-3}$

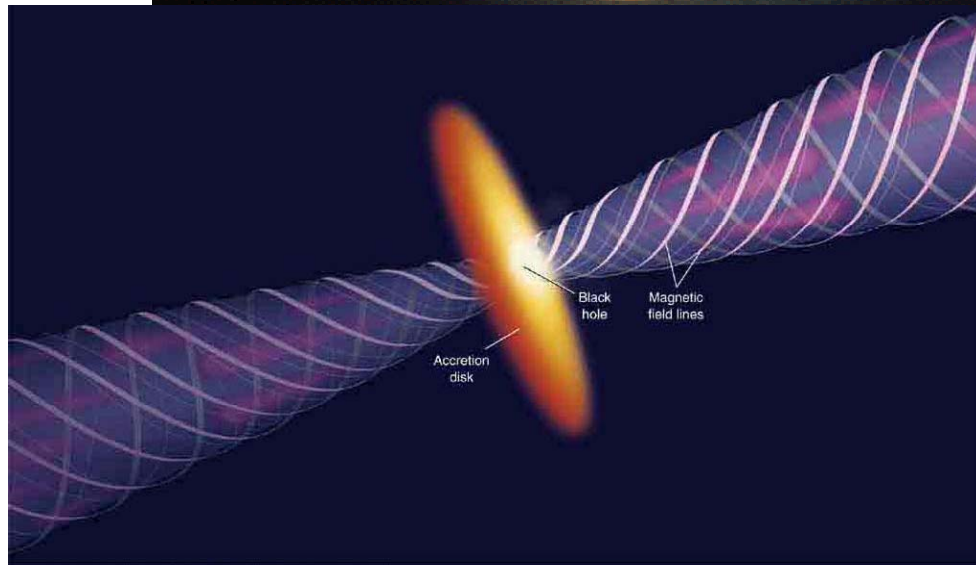
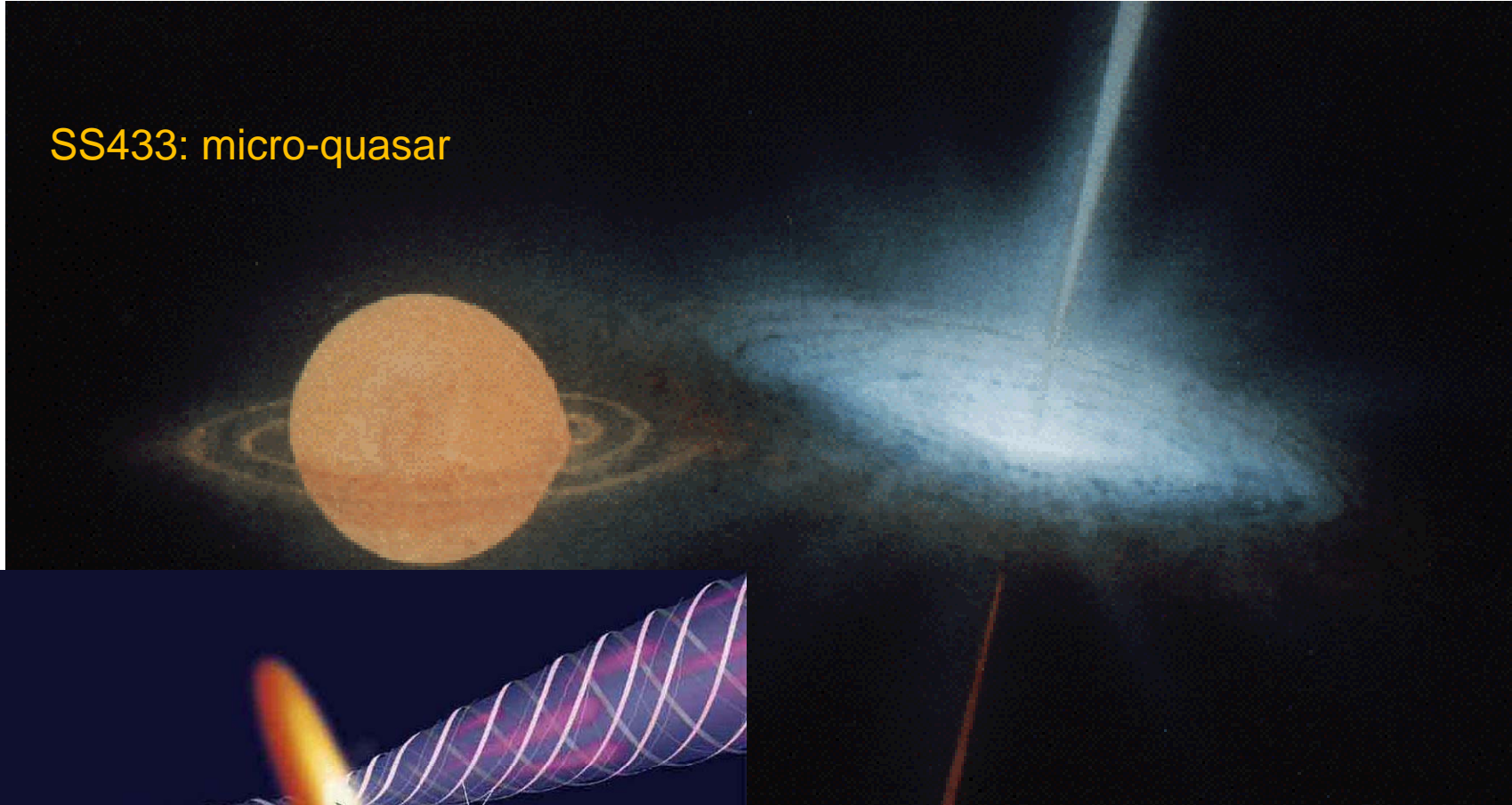
# Dépendance de R envers la masse du trou



Pour des jets radio puissants,  $M_{BH}$  doit être  $> 10^8 M_{\odot}$

# Les micro-quasars dans notre Galaxie: proches, variables à échelle humaine

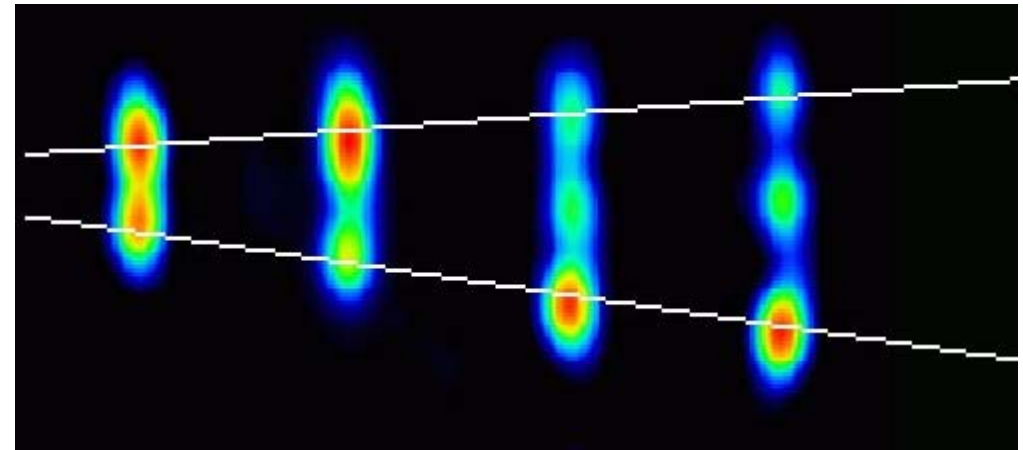
SS433: micro-quasar



Objets de masses stellaires  
Fin de vie des étoiles massives  
**Rotation du trou noir 1000 fois  
par seconde**



# Micro-quasar GRS 1915 Vitesse superluminique

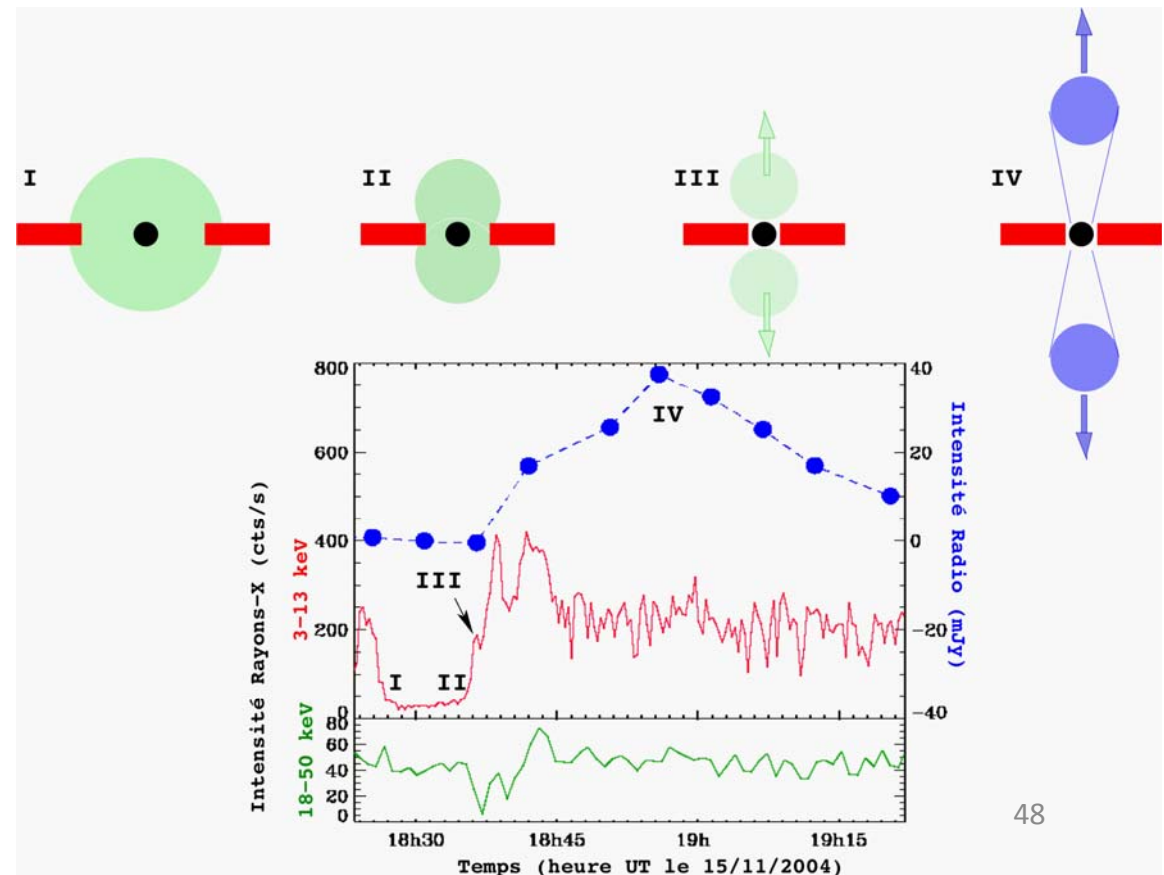


← Echelle: un mois →

Rayons-X: rouge  
Rayons gamma: vert  
Radio : bleu

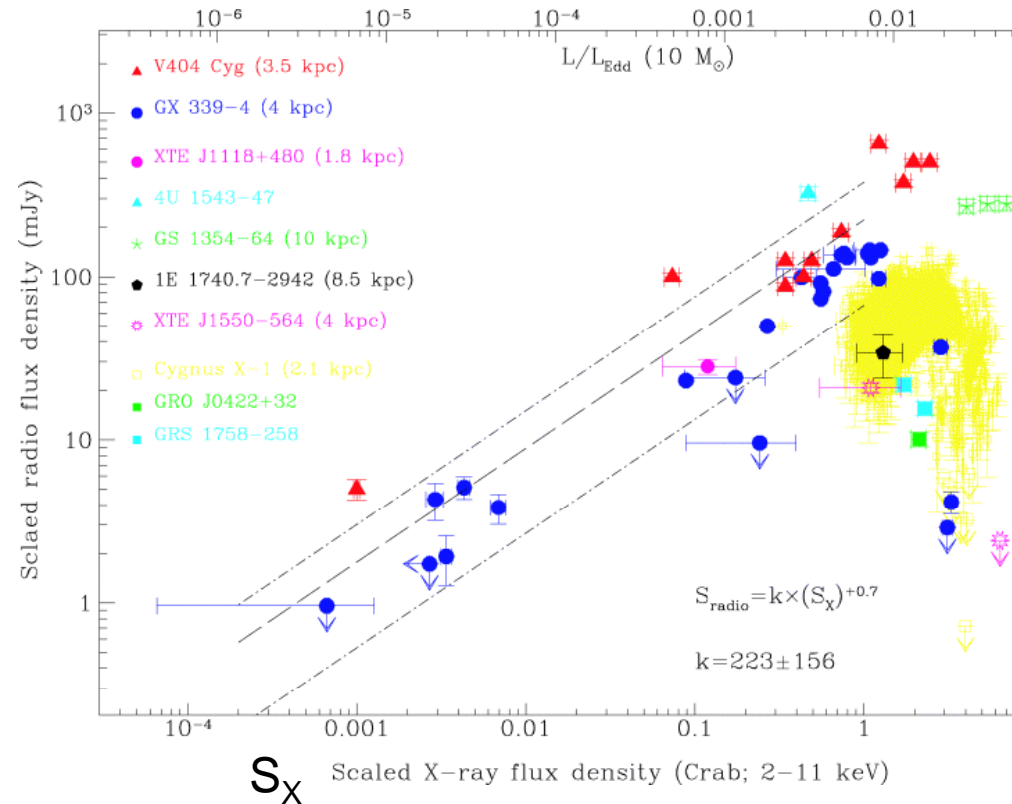
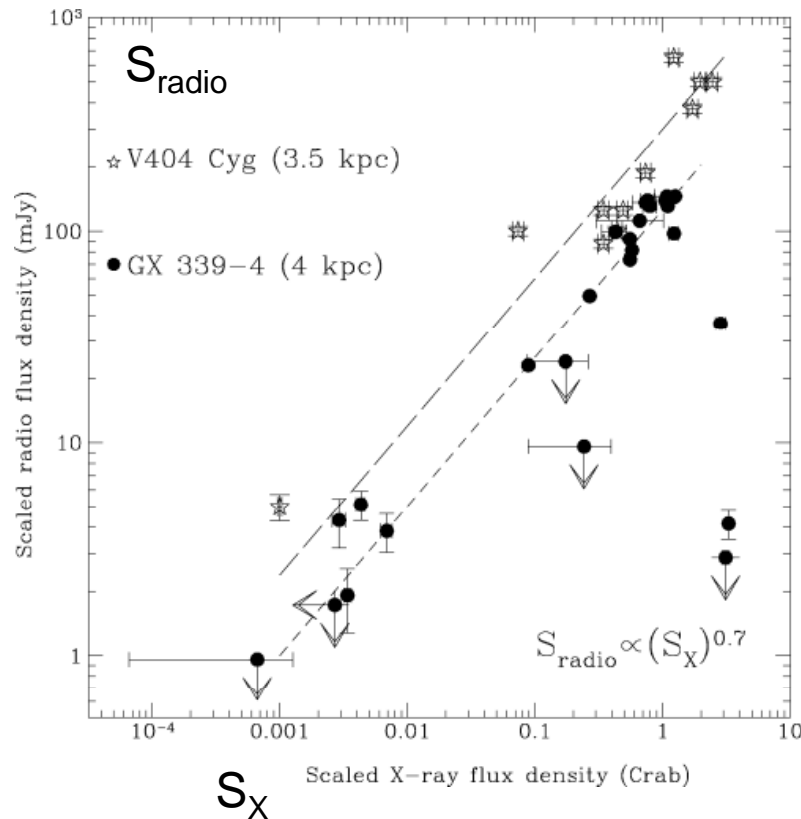
Cycles d'éjection  
d'une heure environ

Une dizaine par jour





# Radio versus X pour les micro-quasars



Pour des **taux d'accrétion faibles**, la luminosité radio croît avec le taux d'accrétion ( $L_X$ ) comme  $L_R \propto L_X^{0.7}$  (Gallo et al. 2003)

Mais à des taux d'accrétion plus élevés  $\geq 0.01$  Edd, la production de jet devient **intermittente** (Fender et al., 2004)

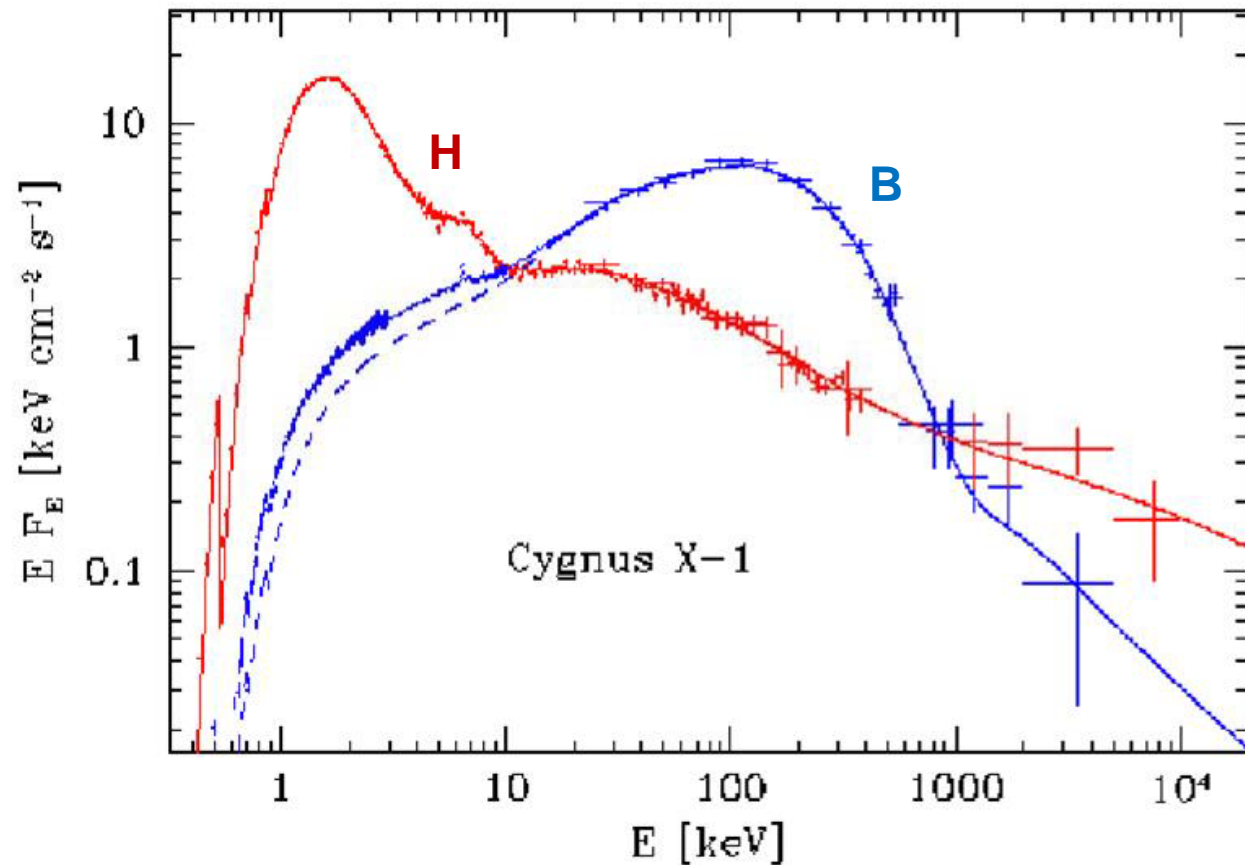
# Les phases d'accrétion varient exemple Cyg X-1

Accrétion Haute (H)  
(petit rayon de  
Troncature)

Accrétion basse (B)  
(plus grand rayon  
de troncature)

Transitions

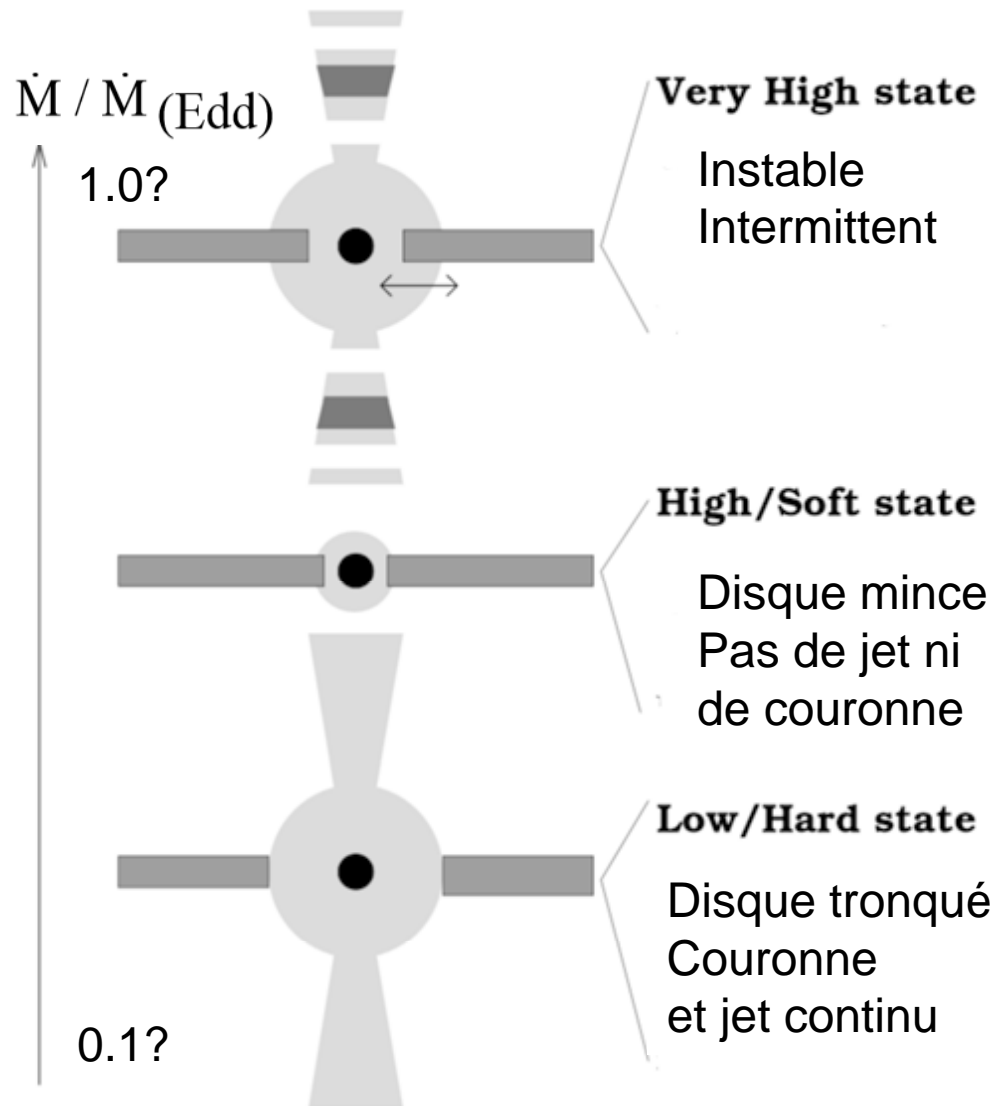
→ Energie emise  
en photons Compton



# Les différentes phases

## Micro-quasars et AGN

Fender 1999



Les X-durs sont corrélés avec l'émission radio

Dans la phase haute luminosité, le disque rayonne efficacement, et les électrons ne sont pas émis

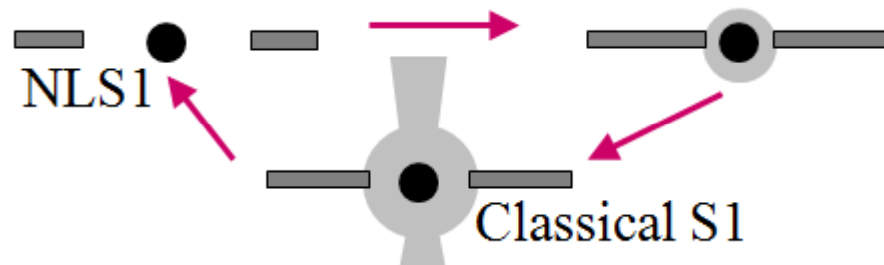
Dans la phase faible, ADAF  
Troncation du disque, formation d'une couronne où sont comptonisés les photons (rayons X durs)

→ La couronne est la base du jet

# Plusieurs phases pour les Seyfert

Les Seyferts 1 en général accrètent à la limite d'Eddington

- Ce qui correspond à un taux d'accrétion haut, instable
- Temps d'oscillation de  $\sim 2 \text{ yr} (M/10^6 M_{\odot})$



Certaines galaxies de Seyfert n'ont plus de raies larges

“Narrow Line S1” [exemple NLS1 PKS 2004-447](#)

- $M = 5 \times 10^6 M_{\odot}$ ; pourrait devenir une S 1 classique en  $< 10 \text{ yr}$
- AGN plus brillant, raies plus larges

# Critères pour des jets radio

→ Pour les AGNs comme pour les micro-quasars,  $L_R$  et  $L_{acc}$  sont reliés pour les faibles taux d'accrétion, et pour les forts taux d'accrétion, la production de jets devient intermittente (*e.g.*, *Merloni et al., 2003, Nipoti et al., 2005*)

Mais les relations sont vérifiées séparément pour les spirales et elliptiques, comme dans deux relation parallèles

→ Il existe un autre paramètre, qui est lié à la formation de ces galaxies, et de leur trou noir central  
Le spin du trou noir?

# Le rôle du Spin des trous noirs

Si les jets sont produits par extraction de l'énergie rotationnelle des trous noirs

Et que les galaxies elliptiques ont des jets radio plus lumineux

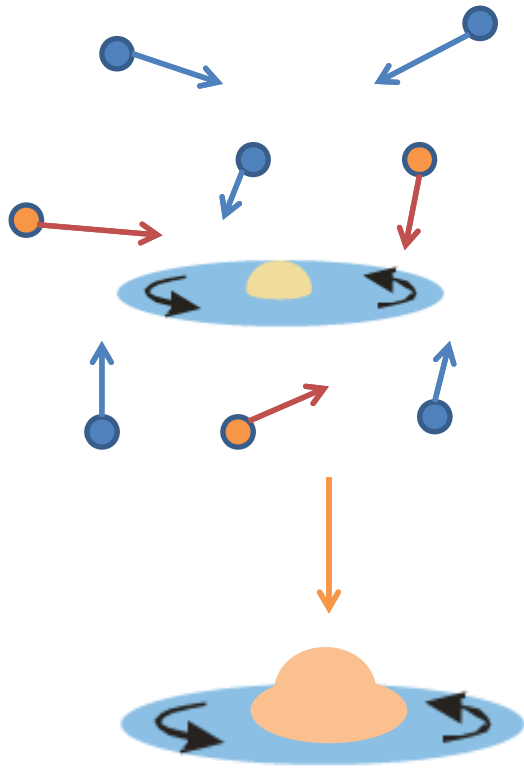
-- est-ce parce que les elliptiques n'ont pas de gaz pour stopper les jets?

-- ou bien les elliptiques ont des paramètres de spin ( $a$ ) plus grands?

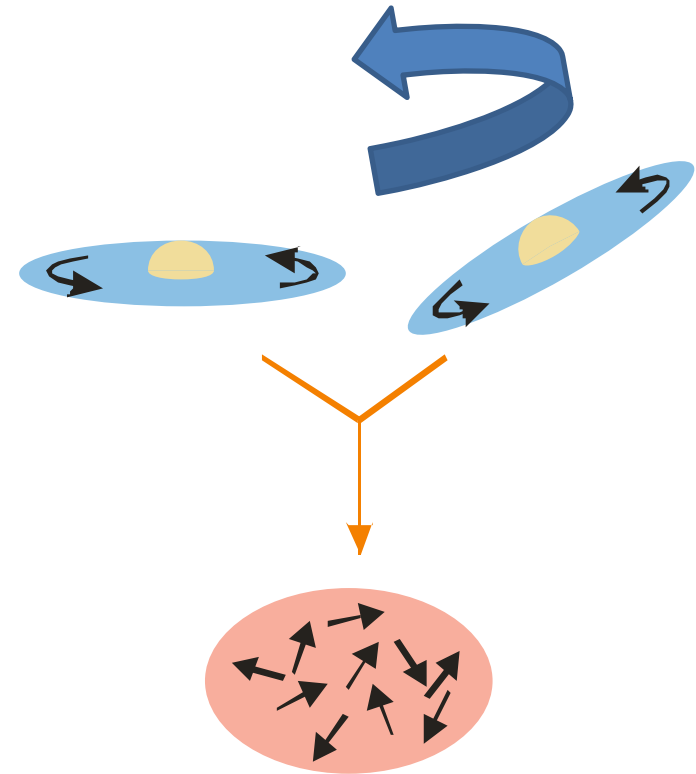
Les elliptiques sont formées par fusion de galaxies plus petites  
souvent pas des fusions majeures

Un grand nombre de fusions mineures pourrait arriver au même état final, mais le spin serait annulé statistiquement

# Fusions mineures et majeures



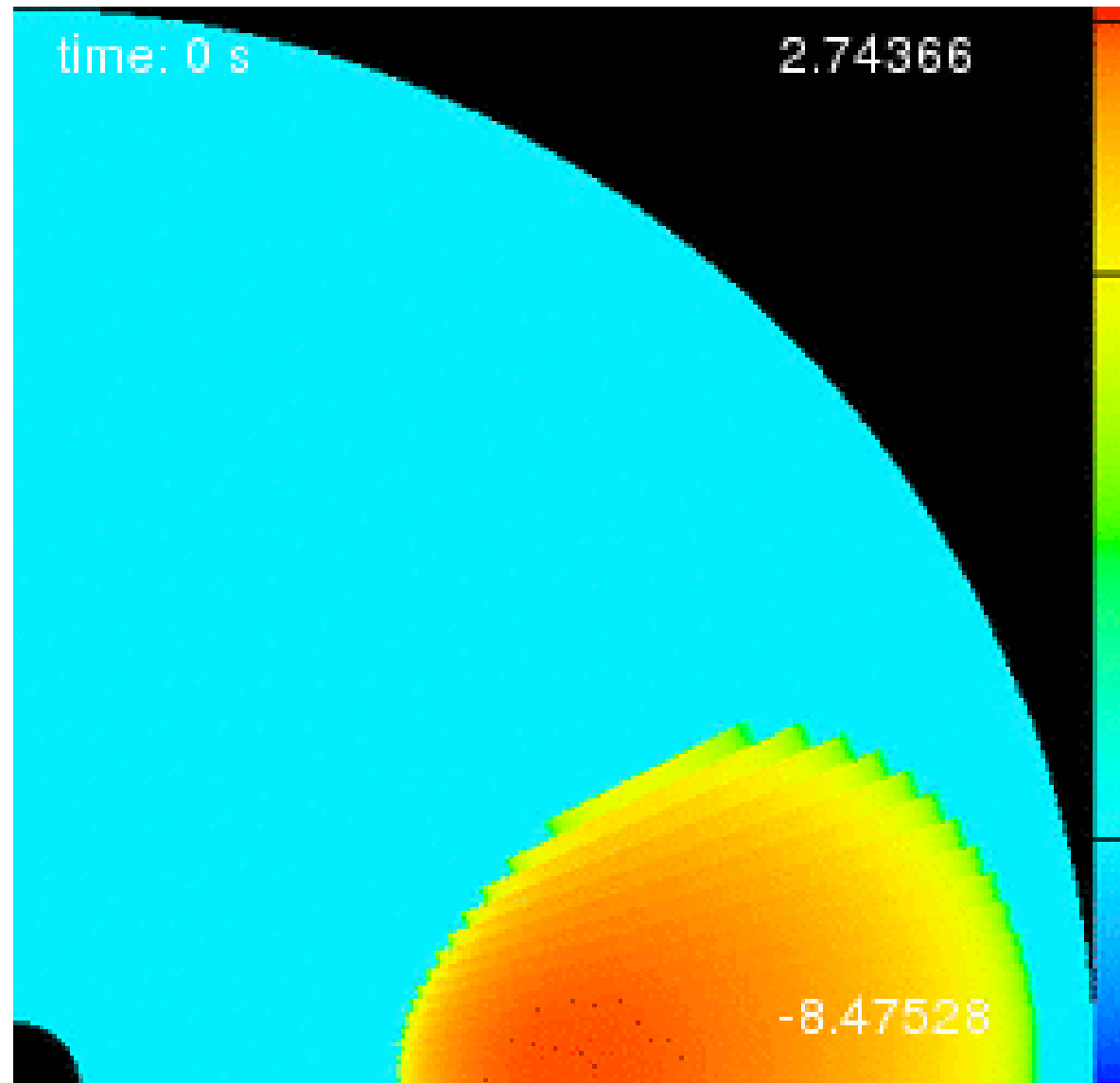
Le moment angulaire résultant provenant de plusieurs trous noirs de direction aléatoire, s'annule



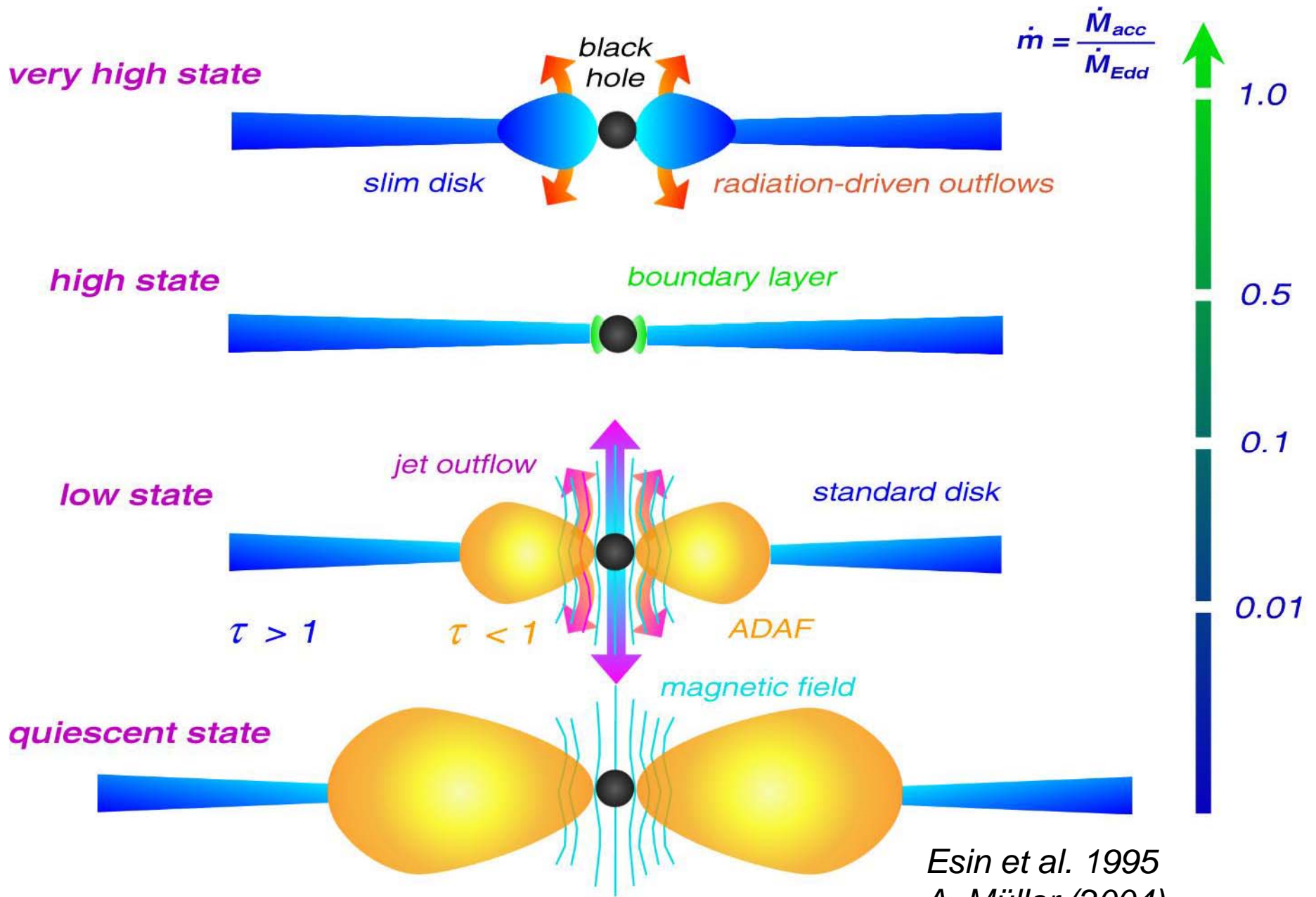
Un spin résiduel est attendu pour le trou noir résultat de la fusion

# Simulations de Formation de jet

*Brinkmann &  
Camenzind 2004*

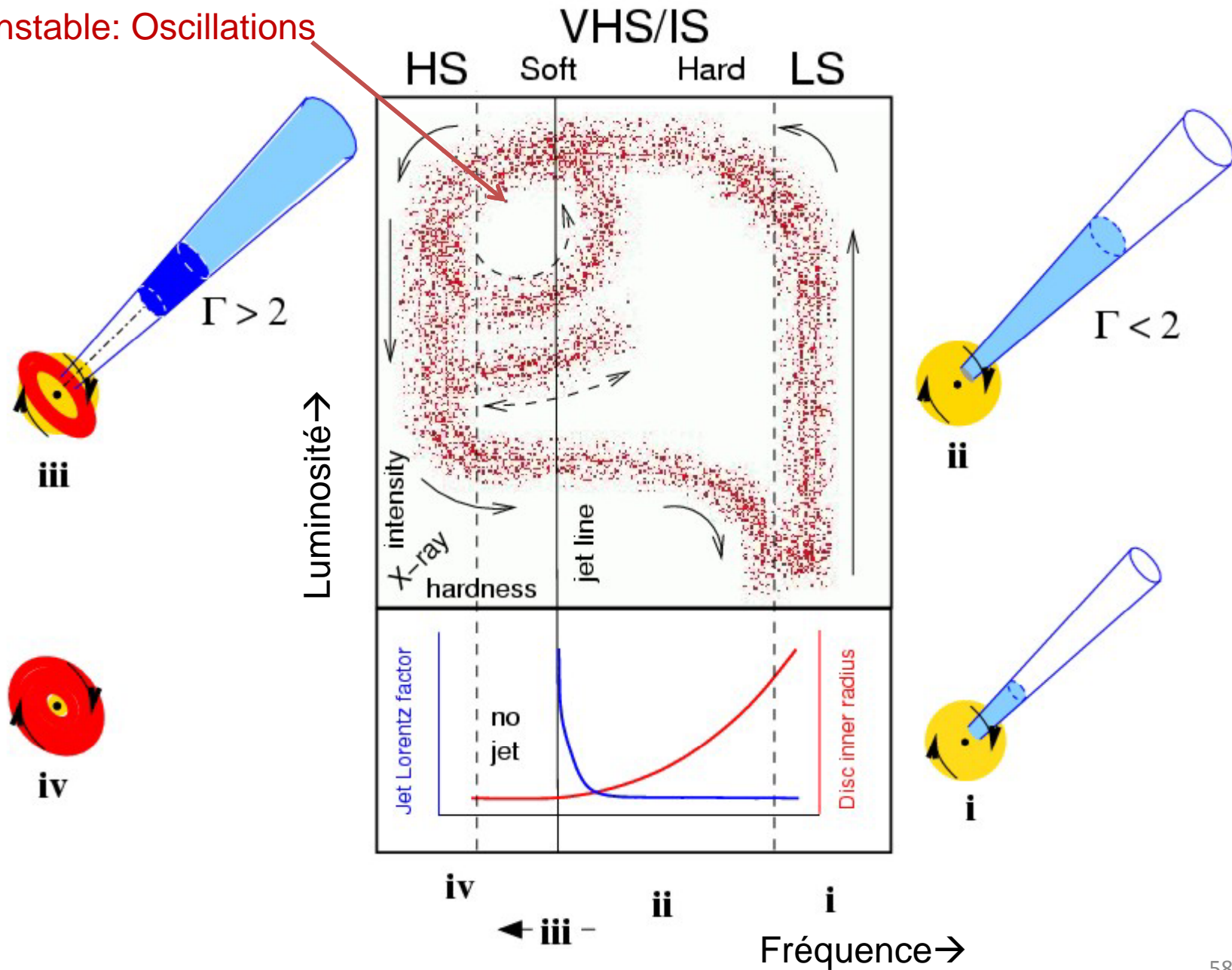






Esin et al. 1995  
 A. Müller (2004)

Instable: Oscillations



# Conclusions

## Propriétés des jets

- Boost relativiste, disymétrie
- jets superluminiques
- analogie avec micro-quasars
- La puissance radio est 3 ordres de grandeur supérieure dans les elliptiques par rapport aux spirales

## Comment se forment les jets?

- Extraction d'énergie rotationnelle du trou noir (Blandford-Znajek) (processus de Penrose + champ B)
- Puissance radio croît quand le taux d'accrétion décroît
- Les Elliptiques ont des trous avec plus de spin ( $a \sim 1$ )  
Pourrait être dû à leur formation par fusion