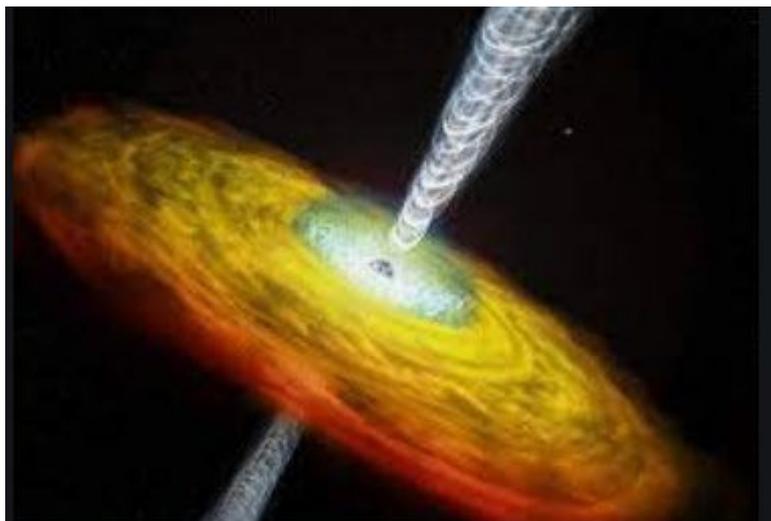




COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

*Chaire Galaxies et Cosmologie*

# Noyaux actifs variables: Blazars



Françoise Combes



# Les grandes lignes

→ Les blazars et l'orientation

→ Emission synchrotron à toute longueur d'onde  
principales sources Gamma extra-galactiques

→ Neutrinos

→ Variabilité

→ Mécanismes de rayonnement

→ Accélération de particules: UHECR  
(rayons cosmiques de ultra-haute énergie)



# Géométrie et orientation

→ Les Blazars sont des quasars, +sources radio avec jets  
Où le jet est proche de la ligne de visée

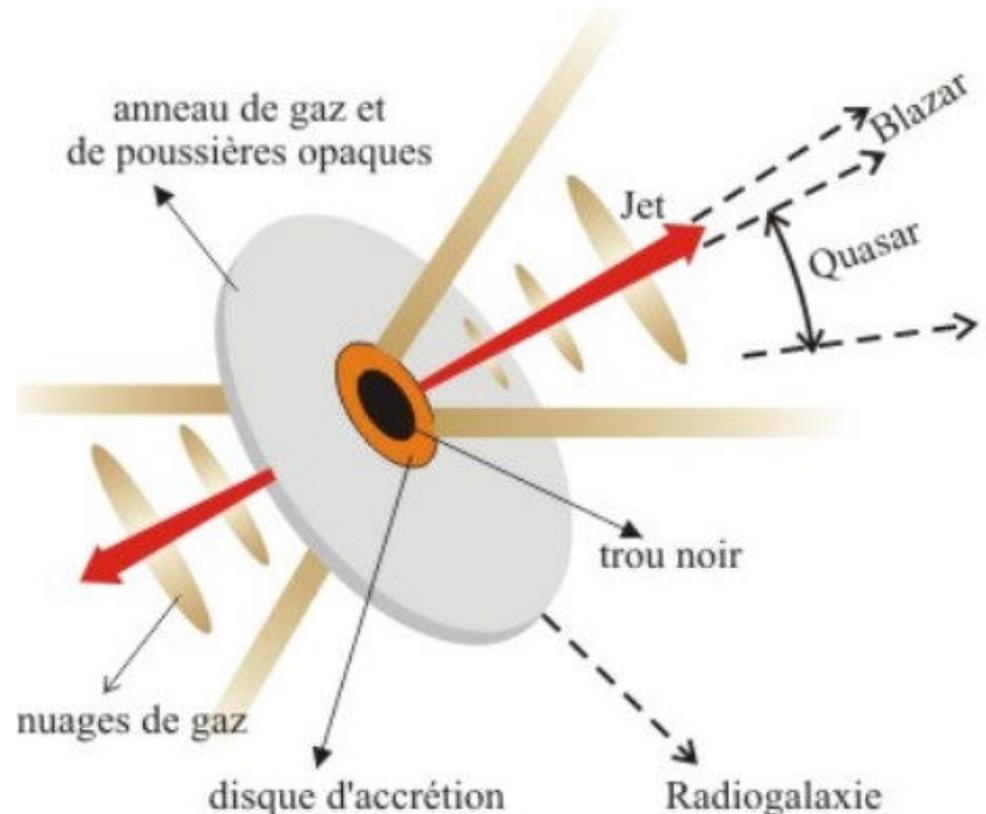
→ Bl Lac une « étoile variable » identifiée en 1929 par Cuno Hoffmeister

→ Bl Lac + quasars = Blazars

→ Emission dominée par le jet

→ Grande variabilité  
(boost 100 à 1000)

Sources Gamma  
et aussi un neutrino 300 TeV!



# Boost Doppler relativiste

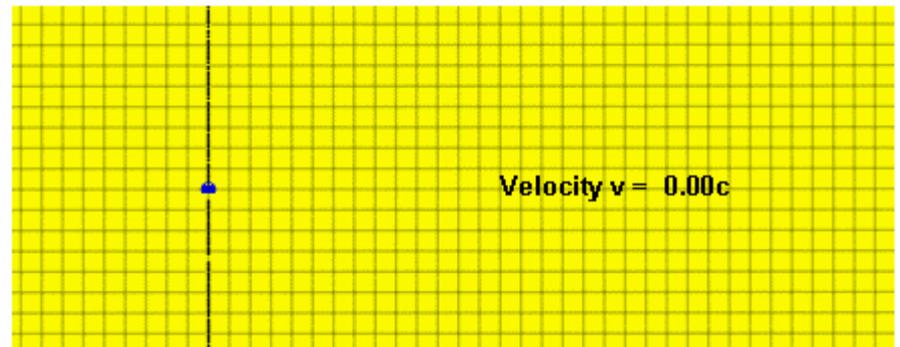
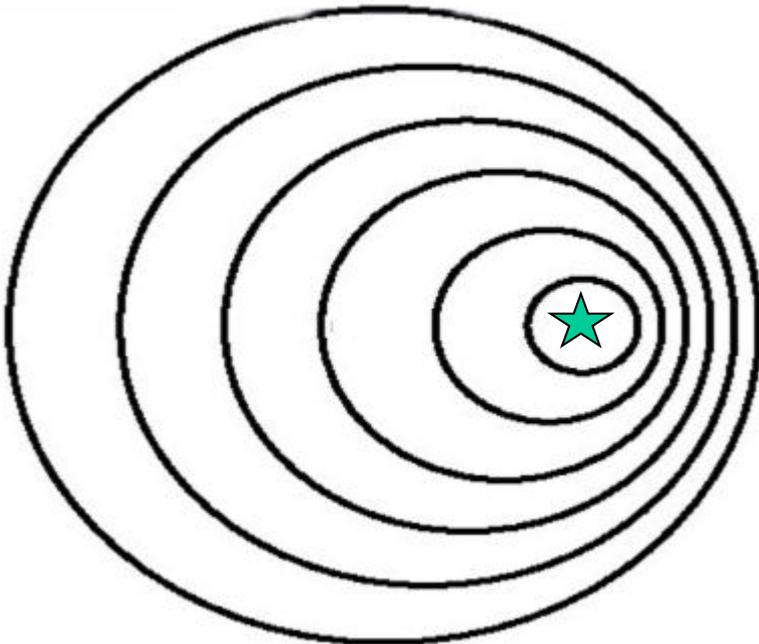
Fréquence décalée  $\beta=v/c$

$$v = v_0 \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}}$$

pour  $\cos(\theta) = 0$

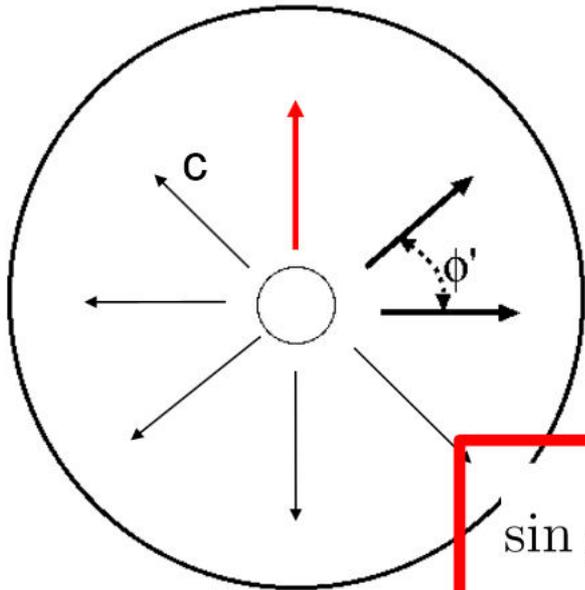
+ Aberration de la lumière

$$\Gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

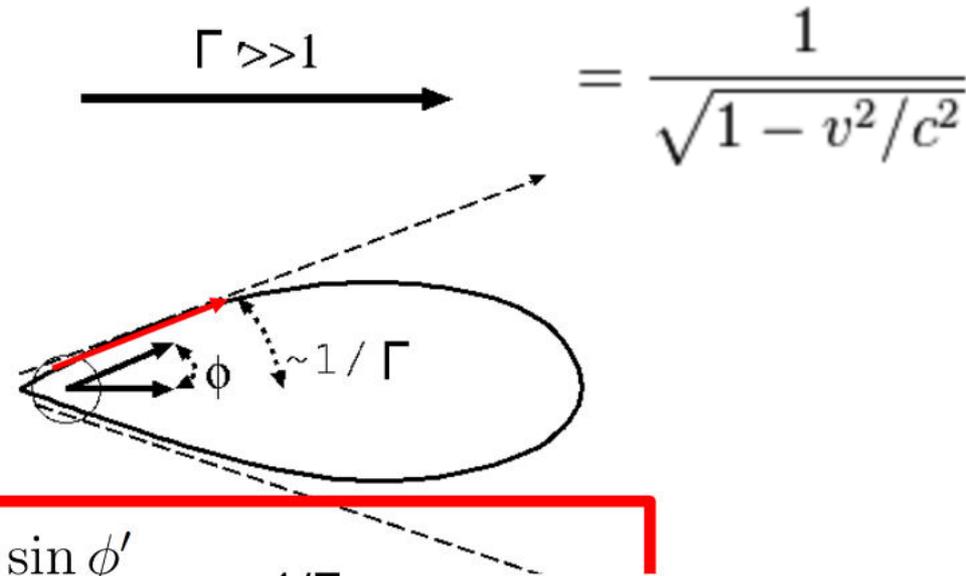


# Aberration relativiste, Doppler boost

Référentiel du fluide  
Emission isotrope



Référentiel observateur  
Transformation de Lorentz



$$\sin \phi = \frac{1}{\gamma} \frac{\sin \phi'}{1 + \beta \cos \phi'} = 1/\Gamma \quad (\text{for } \phi' = \pi/2)$$

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

$$D = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)} = v/v_0$$

→ Flux multiplié par  $D^2$

# Effet Doppler relativiste total

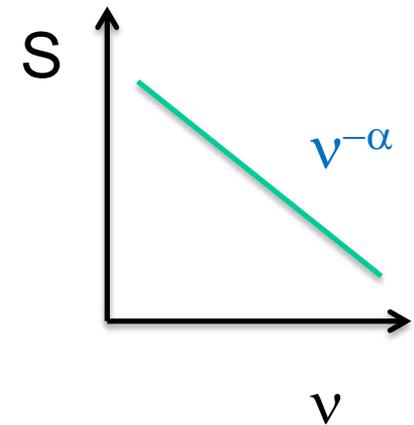
Facteur Doppler  $D = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)}$        $\Gamma \sim 5$      $v/c \sim 0.98$ ,  $D \sim 9.9$   
 $\theta \sim 10^\circ$

→ Aberration, Flux multiplié par  $D^2$

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

Source en mouvement  $\Delta T = \Gamma \Delta T_0$

Invariant de Lorentz:  $S / \nu^3$



→ 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  $D^4 \sim 16 \cdot 10^8$  !!

→ Les sources  $\gamma$  extra-galactiques sont presque toutes des blazars

# Variabilité et taille

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

$$D_{\max}^2 = (1+\beta)/(1-\beta), \text{ pour } \theta=0$$
$$5 < \Gamma < 40, \quad 30 < D < 6400$$

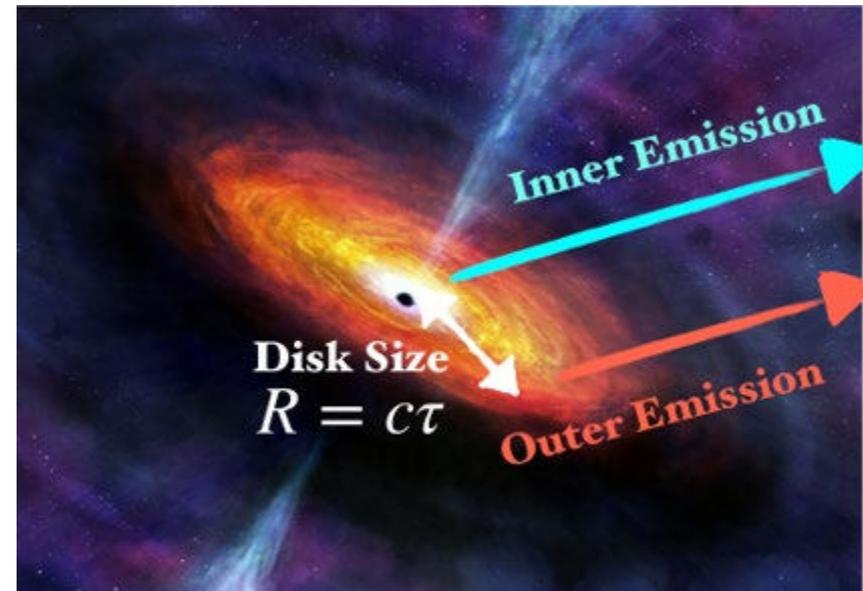
→ Les blazars sont très variables, même sur des échelles heures-jours

Cela ne peut pas être leur vraie taille, car sinon, la densité énorme d'e- induirait une perte considérable par Compton inverse

Avec le facteur D, les tailles réelles sont bien plus grandes!

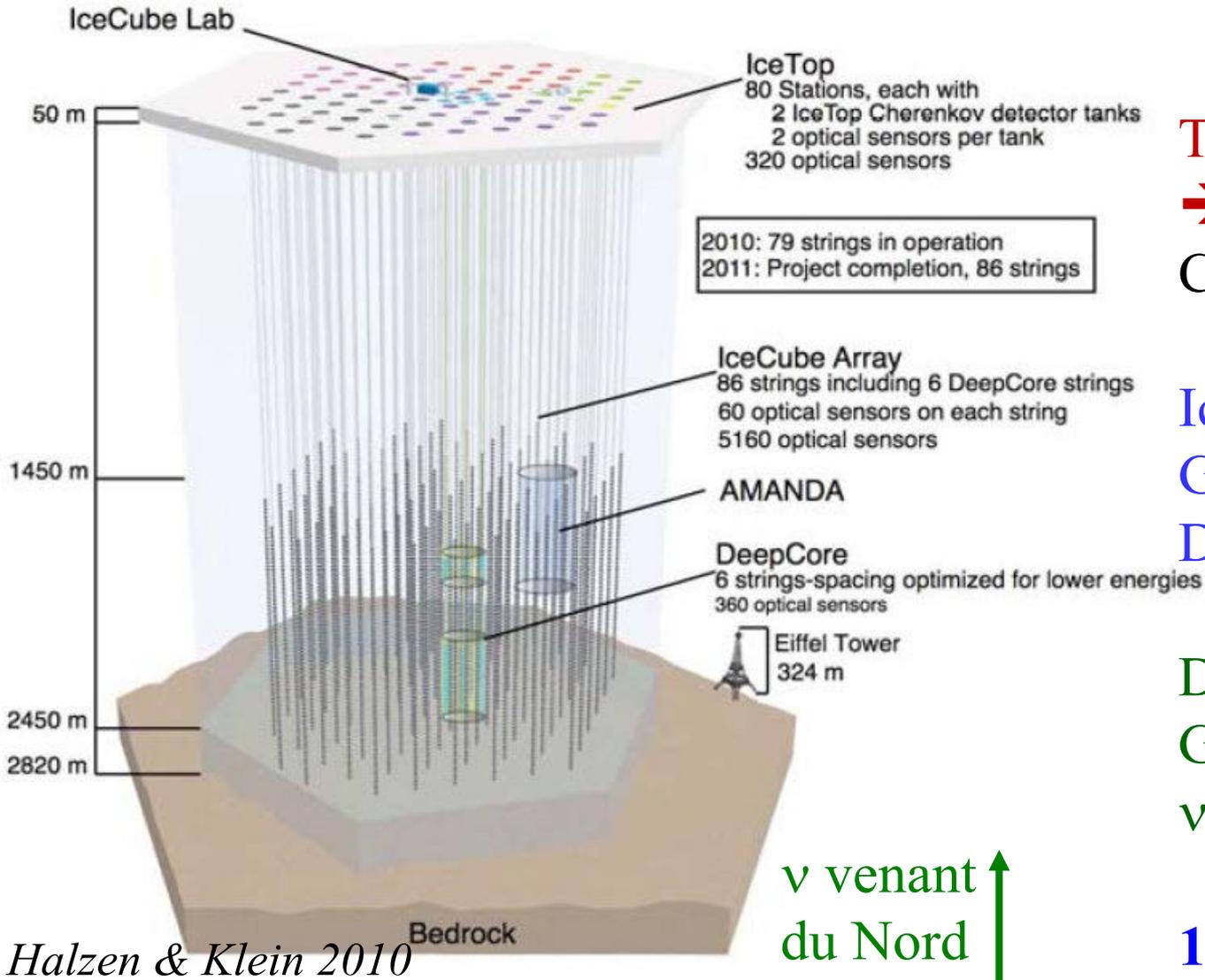
Délai entre optique et radio

→ pc, années-lumière



# Ice-cube et les neutrinos

5484 détecteurs, dans un cube d'un  $\text{km}^3$ , lumière Cherenkov  
Neutrino + glace  $\rightarrow e^-, \mu, \tau \rightarrow$  photons, détectés de façon dynamique



Trajectoire des  $\nu$

$\rightarrow$  Source

Coincidence avec  $\gamma$

Ice-top Cherenkov

Gerbes CR

Distingue  $\mu$  d'en haut

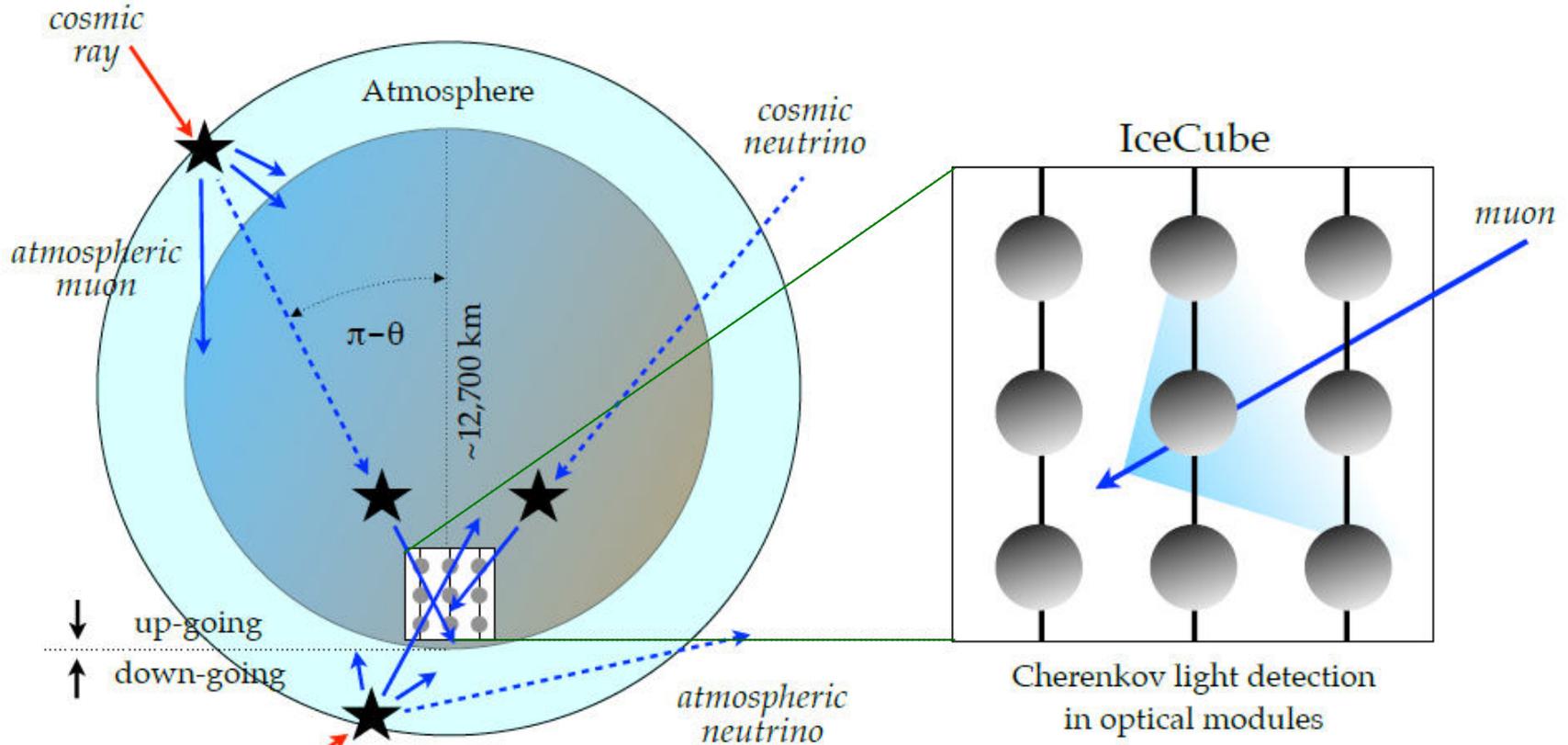
Deep core

Glace claire

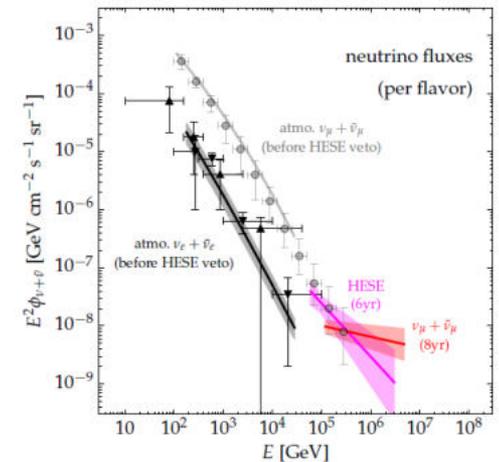
$\nu < 100 \text{ GeV}$

1 Tb /jour

# Séparation des neutrinos atmosphériques, avec les muons →



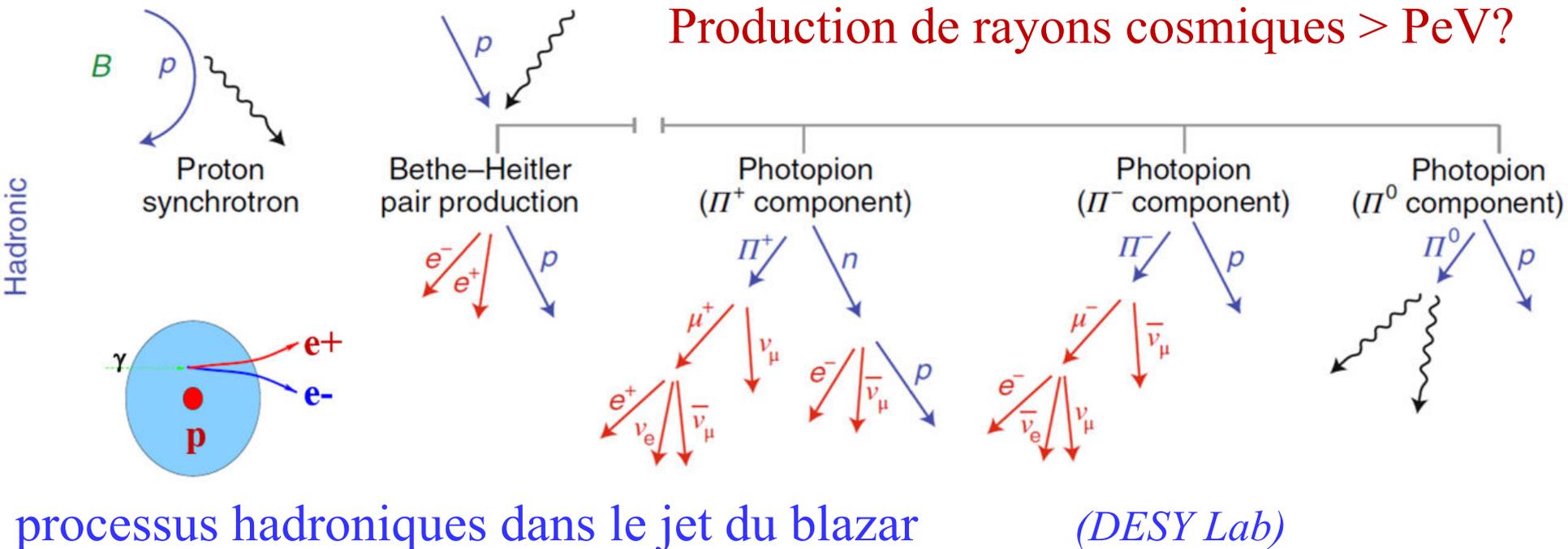
A haute énergie, les neutrinos cosmiques dominant



# Détection de neutrinos + gamma

Ice-Cube collabore avec les satellites Swift, et Fermi, sources:  
Sursauts  $\gamma$  (GRB) ou supernovae, ou blazars,  
ou encore TDE (Tidal Disruption Event): étoile avalée par un trou noir

Des dizaines de neutrinos détectés à ce jour, certainement sources  
astrophysiques, étoiles – Alertes des SNe proches



# Détection d'un neutrino Très HE

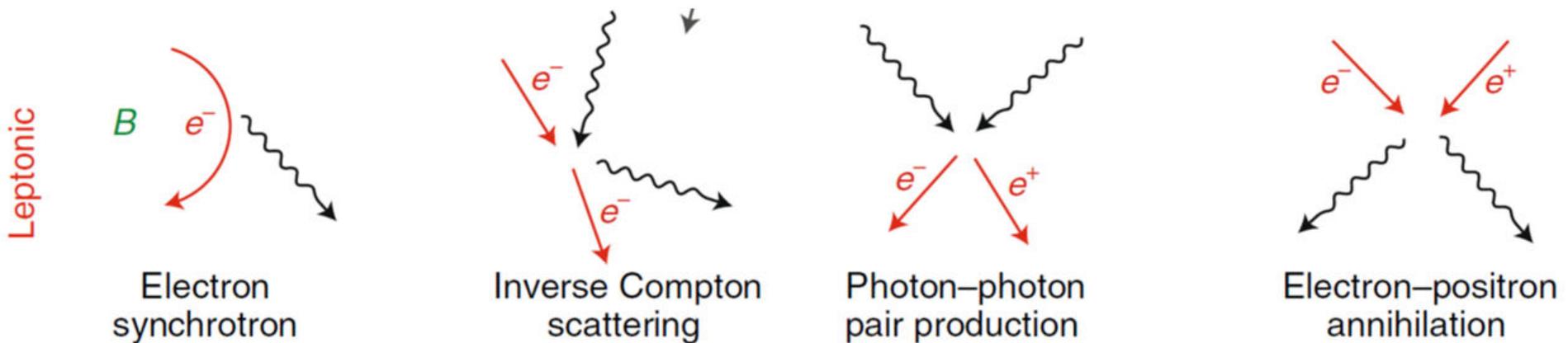
Ice-Cube détecte en 2017 un neutrino de 300 TeV

Synchronisé avec un burst gamma du blazar TXS0506+056 (970Mpc)

Premier neutrino THE venant d'un AGN

Déjà en 2014-2015 neutrinos provenant de cette région, mais pas de  $\gamma$

→ TXS0506+056 est bien la source de neutrinos de THE, il a des sursauts de forte L + X-mou, et le neutrino THE correspond à une phase de faible L+ X-dur → processus hadroniques



processus leptoniques

(DESY Lab)

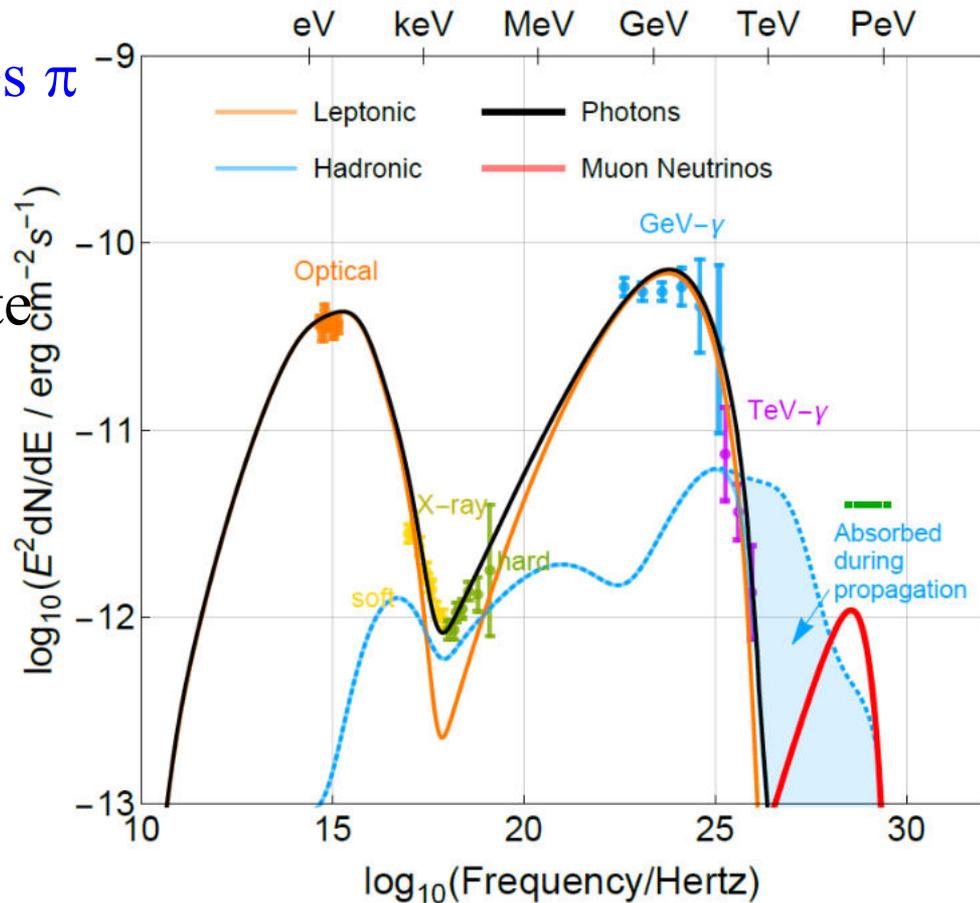
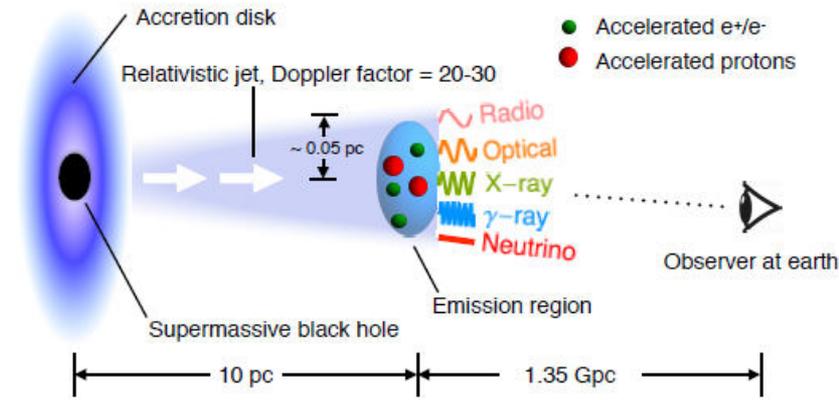
# Modélisation TXS0506+056

Processus leptonique et hadronique  
 Photons UV-Xmous  $\rightarrow \gamma$  de Fermi,  
 photons IR  $\rightarrow \gamma$  Cherenkov

3ème pic hadronique provient des  $\pi$   
 + neutrino  $\mu \rightarrow \text{PeV } \gamma$

La propagation des  $\gamma$  de très haute  
 énergie est bloquée par le  
 fond extra-galactique (EBL)  
 $\gamma + \text{photon} \rightarrow e^- + e^+$

$\rightarrow$  Contraintes EBL 10-100 $\mu$



# Variabilité

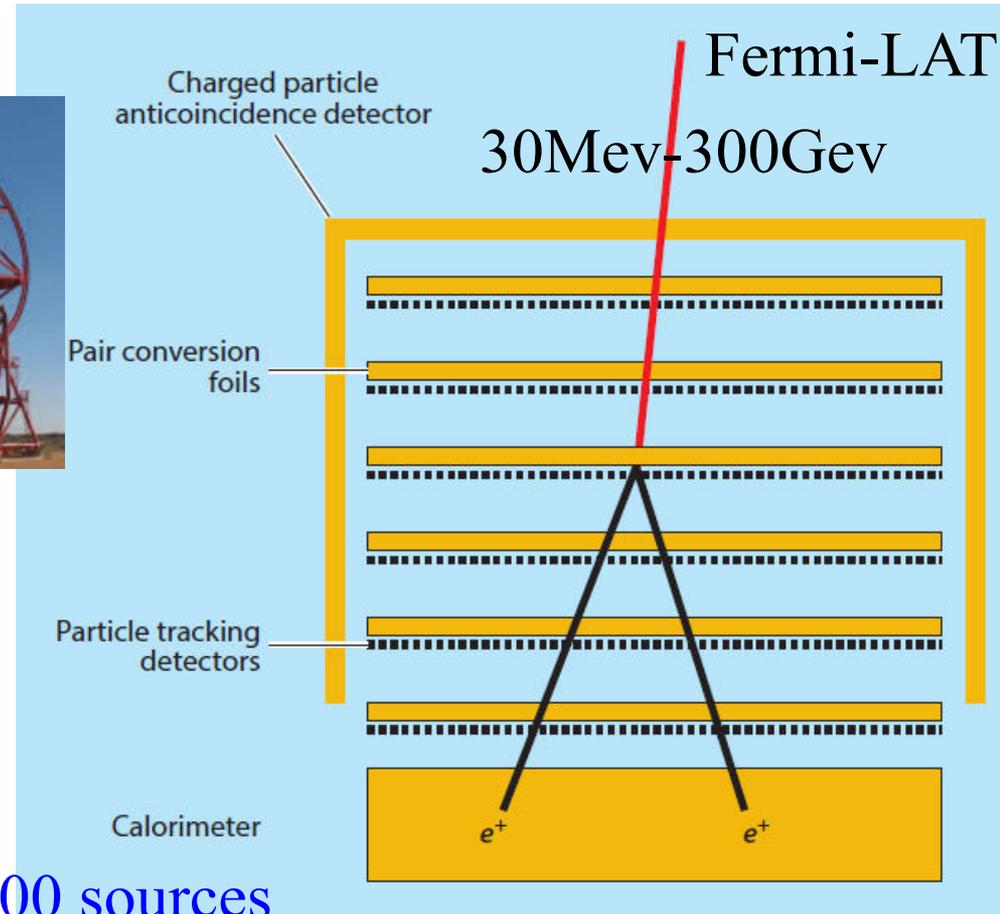
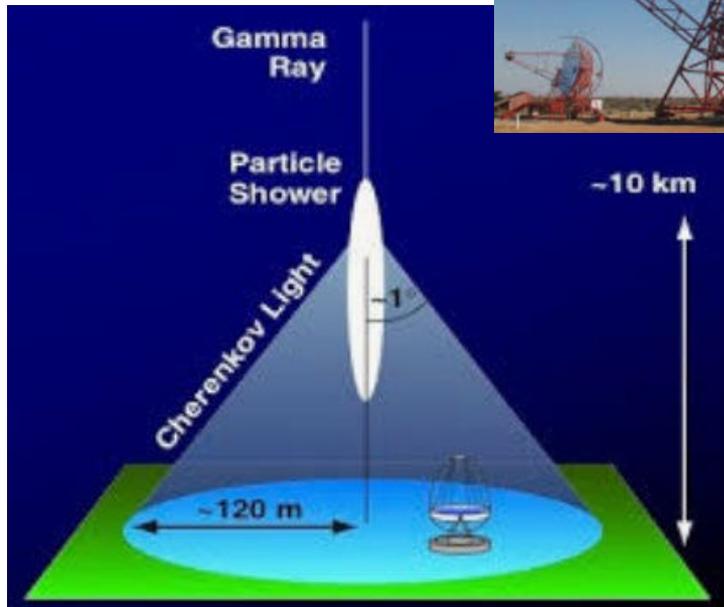
Grande variabilité, facteur 2 sur des échelles d'heures et jours

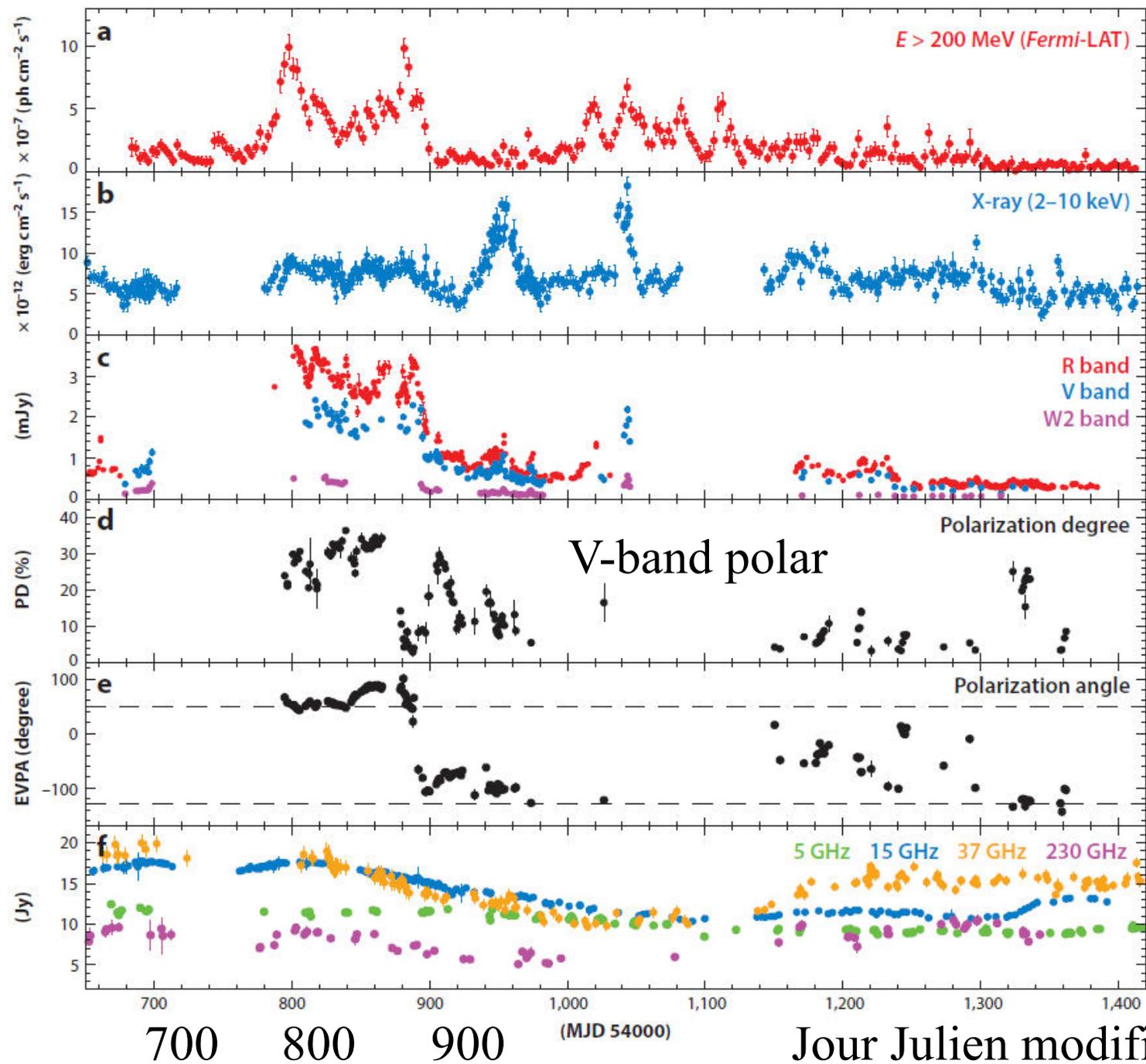
Non réelle, sinon opaque envers production de paires  $\gamma + \gamma$  (Jelley 1966)

Dans l'espace, EGRET (GRO), Fermi LAT (Large Area Telescope)

VHE  $E > 100$  GeV au sol par effet Cherenkov

MAGIC, HESS, bientôt CTA





3C279  
Blazar  
Variable à  
tts longueurs  
d'onde

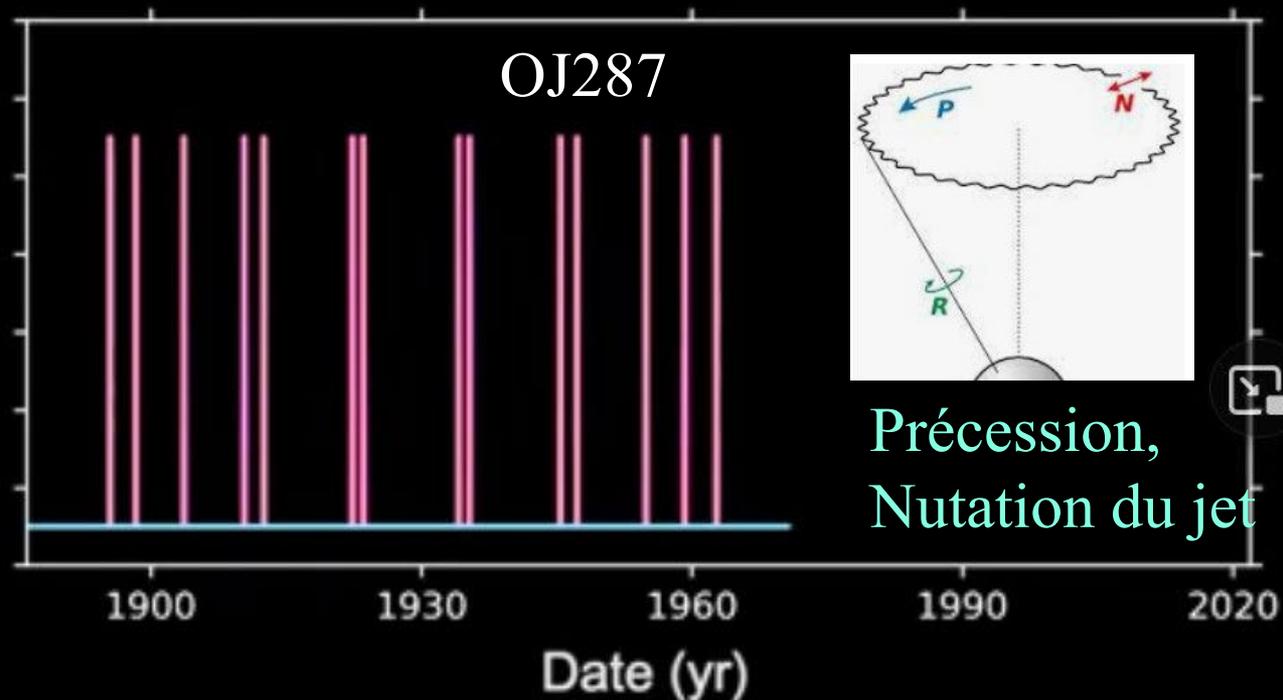
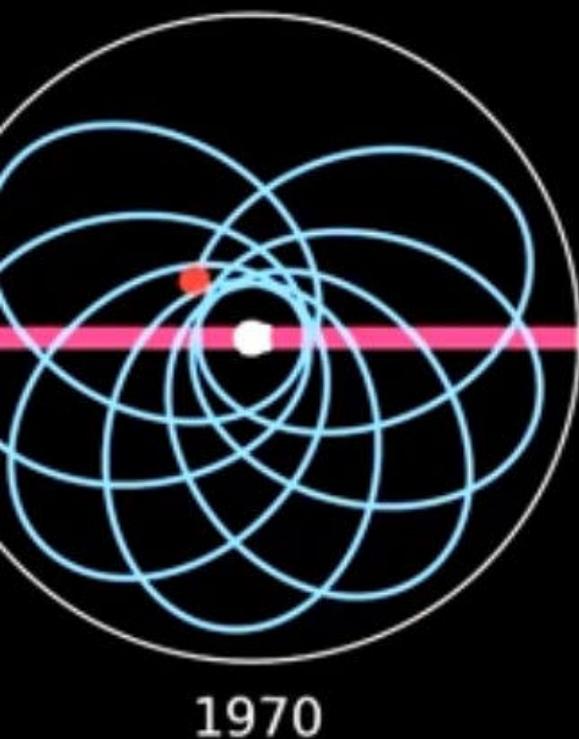
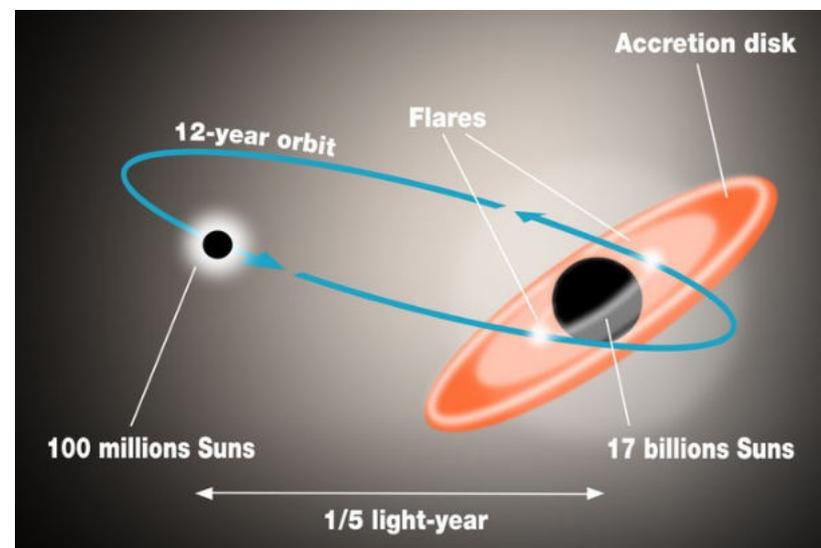
*Madejski &  
Sikora-2016*

# Pas de périodicité

Rares exceptions (binaires P=11 ans,  
**OJ287**, à 1000 Mpc de nous)

$M_{\text{BH}} 1.7 \cdot 10^{10} M_{\odot}$

Suivi depuis 120 ans!



**Périodicité complexe, avec résonances**

# Deux classes de blazars

**HBL:** « high » synchrotron peak Spectre gamma dur  $N(E) \sim E^{-\gamma}$   
 $\gamma < 2$ . pas de raies d'émission, faible luminosité

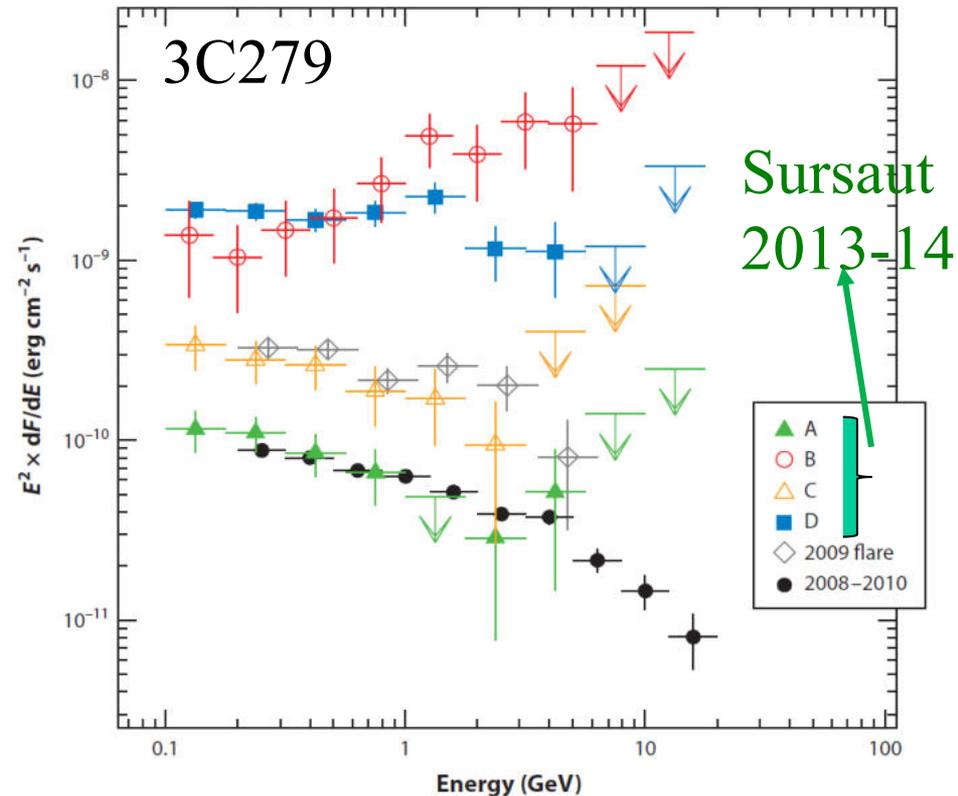
**LBL** « low » synchrotron peak. Spectre gamma mou, qqes raies d'émission, Forte luminosité (Radio quasar, spectre plat FSRQ)

Lors de sursauts, le spectre peut devenir plus dur

Difficile de calibrer, à cause des variations

**HSP-BL = HBL**

**LSP-BL = LBL**



# Emission radio synchrotron:

- Spectre de puissance décroissante (devient de plus en plus pentue)
- radiation très polarisée linéairement (30%)

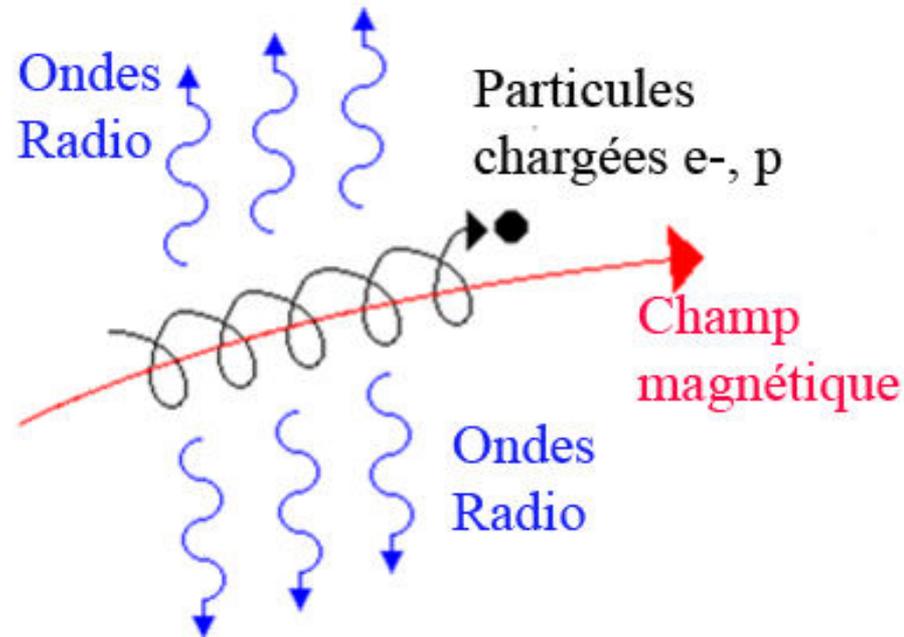
**rayonnement** émis par des électrons en mouvement relativiste dans un champ magnétique  
Pour un électron d'énergie

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

la fréquence caractéristique d'émission vaut

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

Avec  $B$  en Gauss

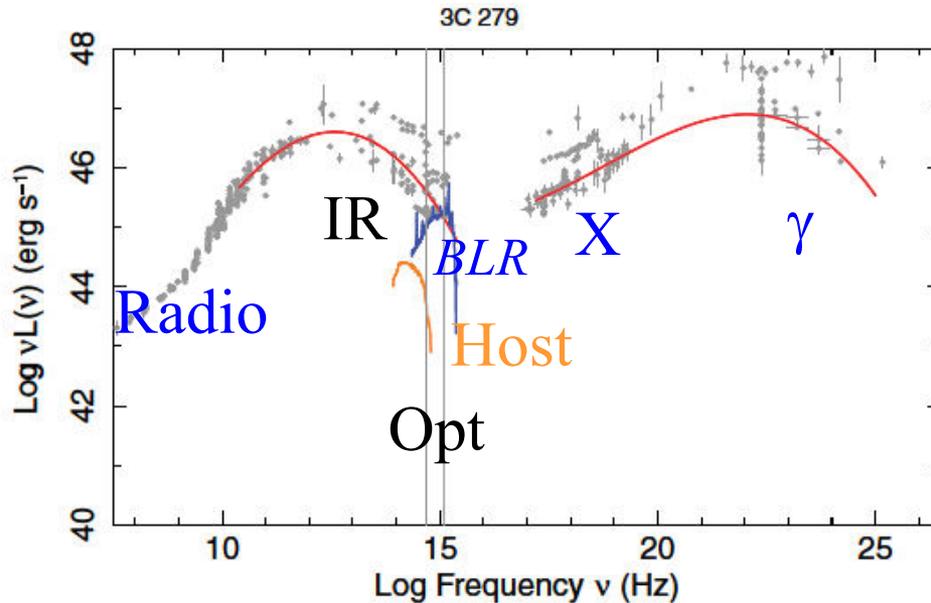


# Fréquence du pic synchrotron

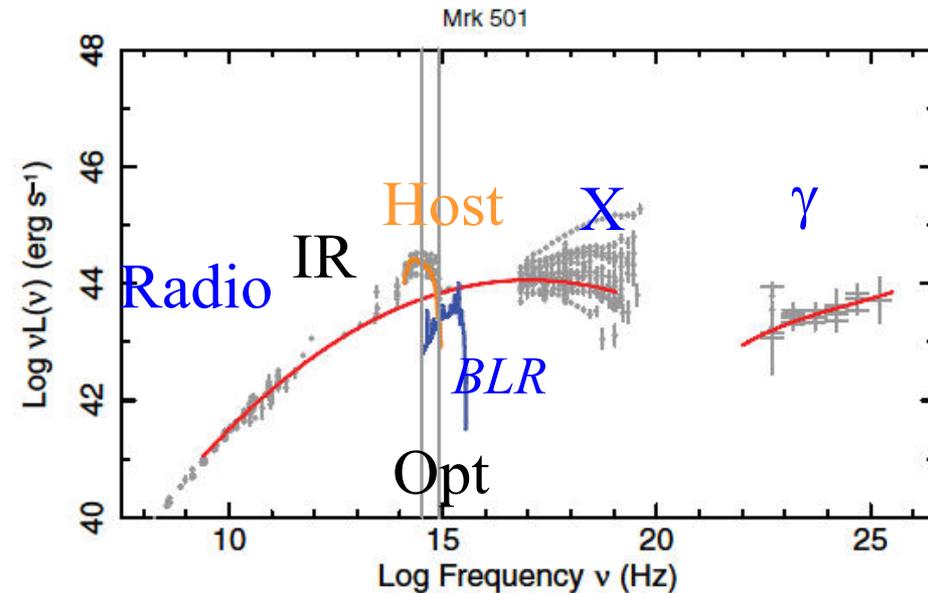
Blazars: émission dominée par le continuum du jet  
Dilue les raies *BLR* du disque d'accrétion



LSP: Low Synchrotron Peak



HSP: High Synchrotron Peak

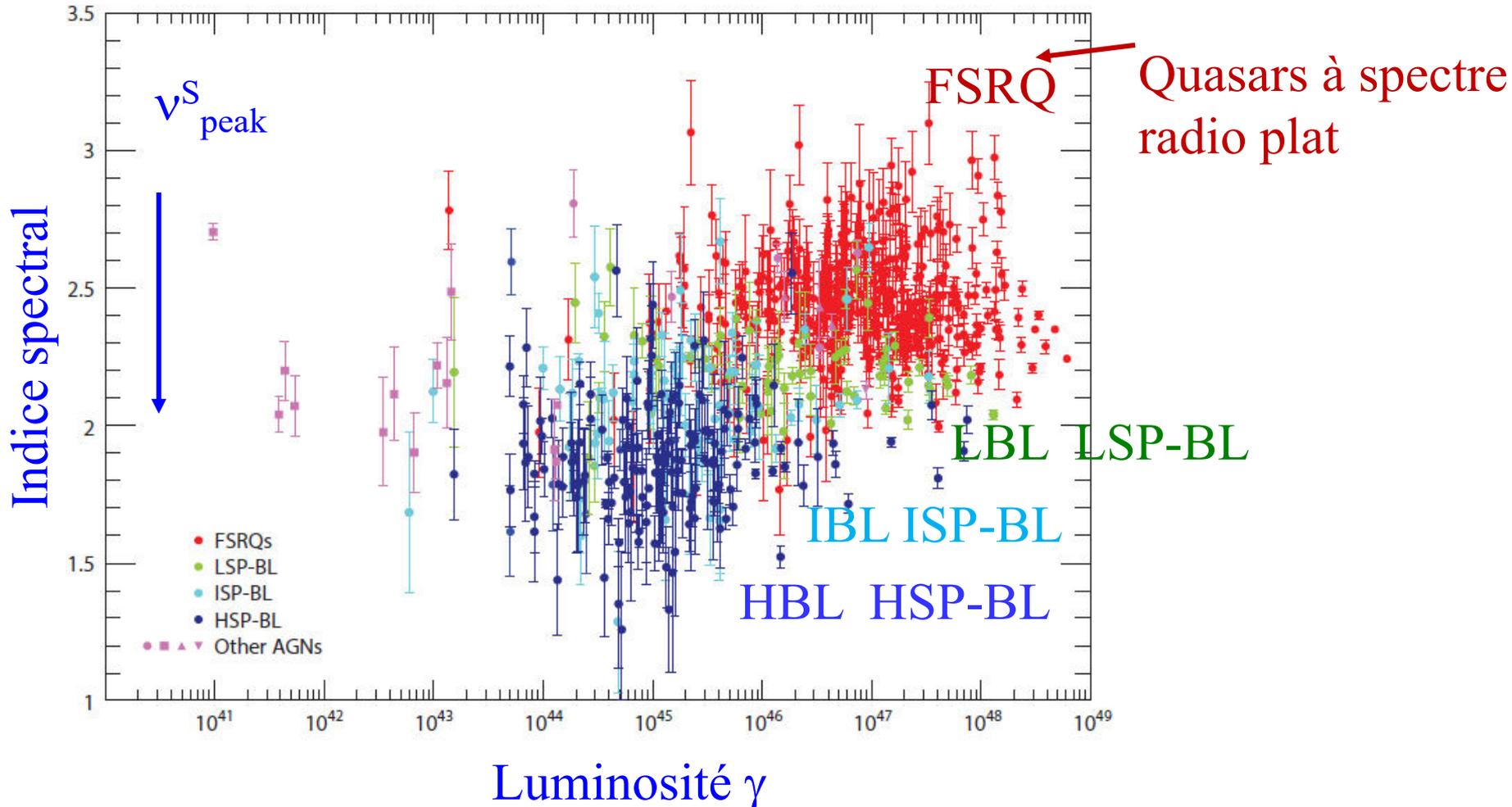


La contribution de la **galaxie hôte** est dominée dans le cas forte luminosité  $\rightarrow$  LBL

# La séquence des blazars

Anti-corrélation entre  $\nu^S_{\text{peak}}$  et la luminosité: effet de sélection?

FSRQ: boosted FR II -- Bllac: boosted FR I (*Giommi et al 2012*)

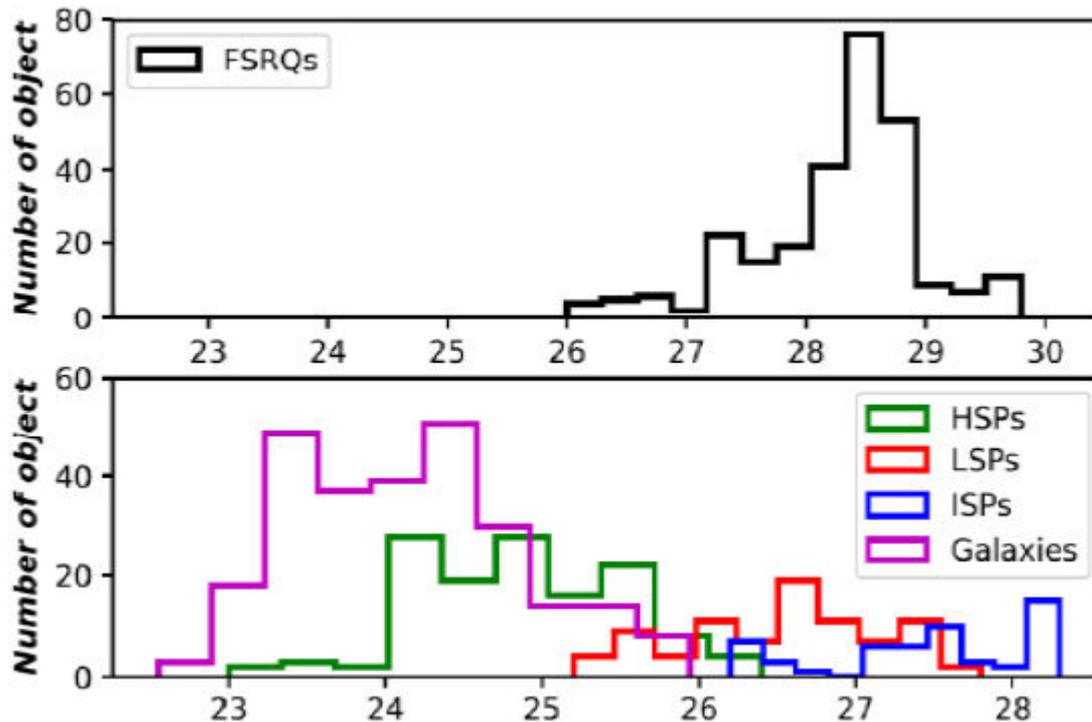


# Unification des blazars

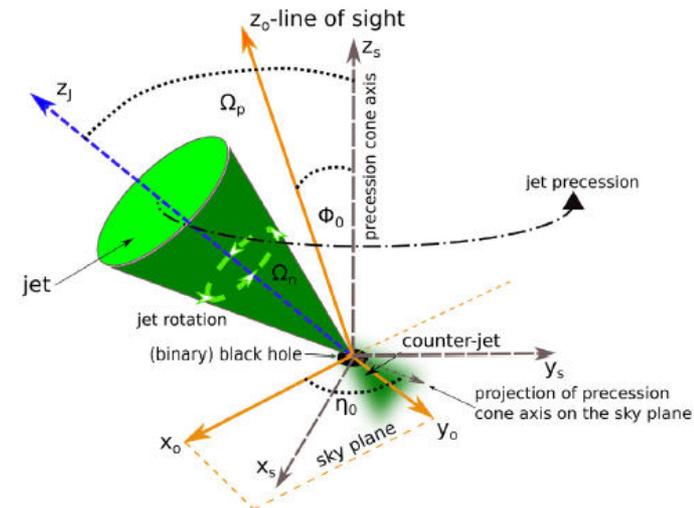
Continuité entre Radio galaxies, HSP, ISP, et LSP, FSRQ versus luminosité et dominance du cœur

Influence de l'angle sur la ligne de visée (Radio galaxies plus inclinées)

Entre  $10$  et  $30^\circ$  pour LSPs, FSRQs, ISPs, HSPs, et RG

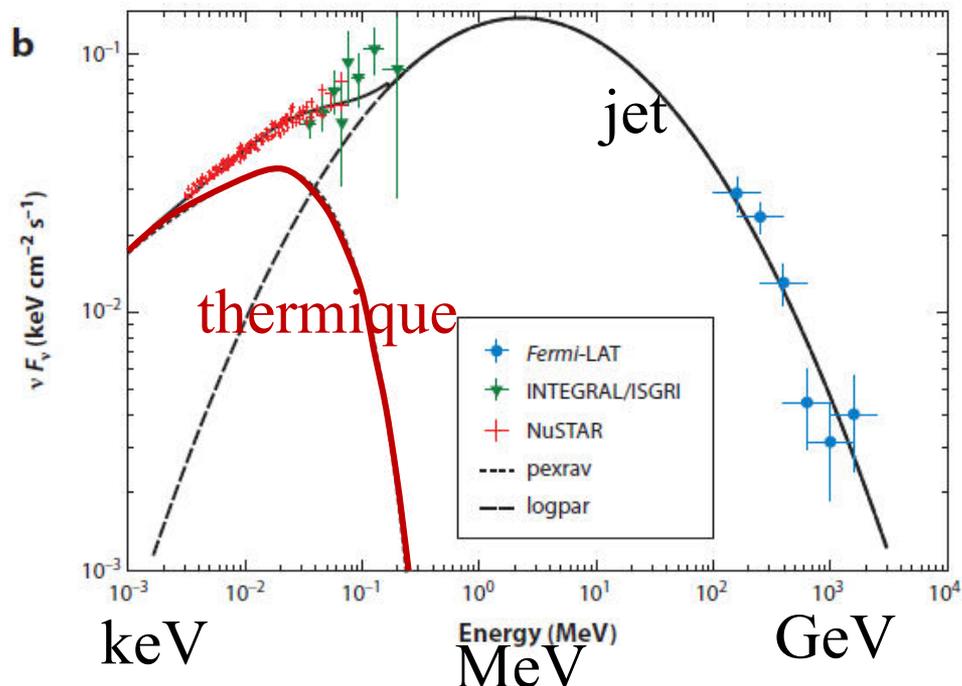
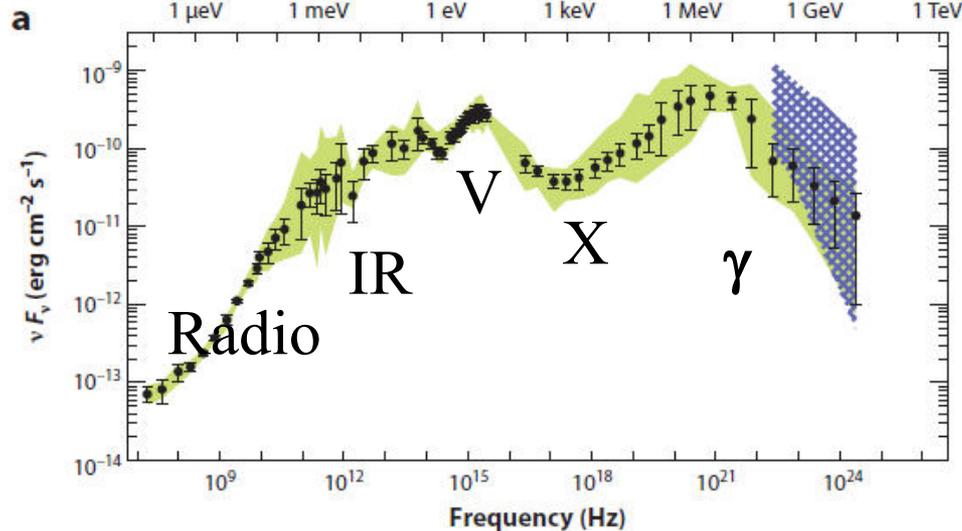


Log (Luminosité du cœur)



3C273

KeV MeV GeV



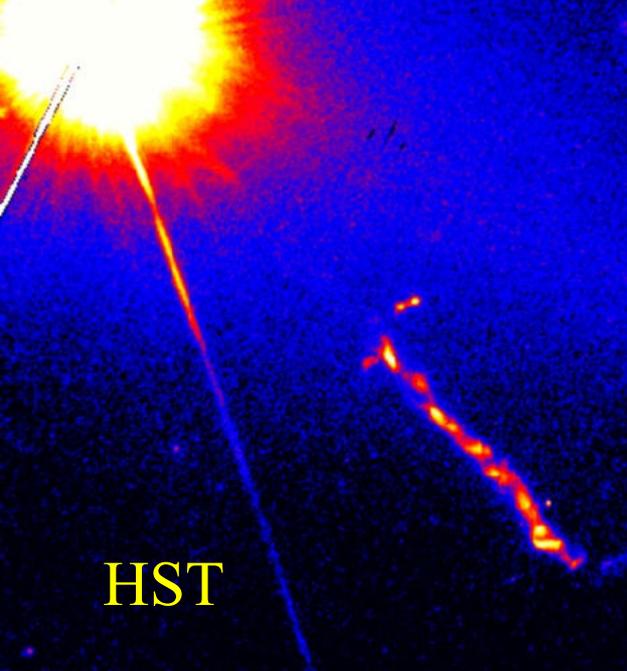
# Spectre des blazars

Deux bosses dans le spectre:  
Visible et Gamma  
Thermique et non-thermique

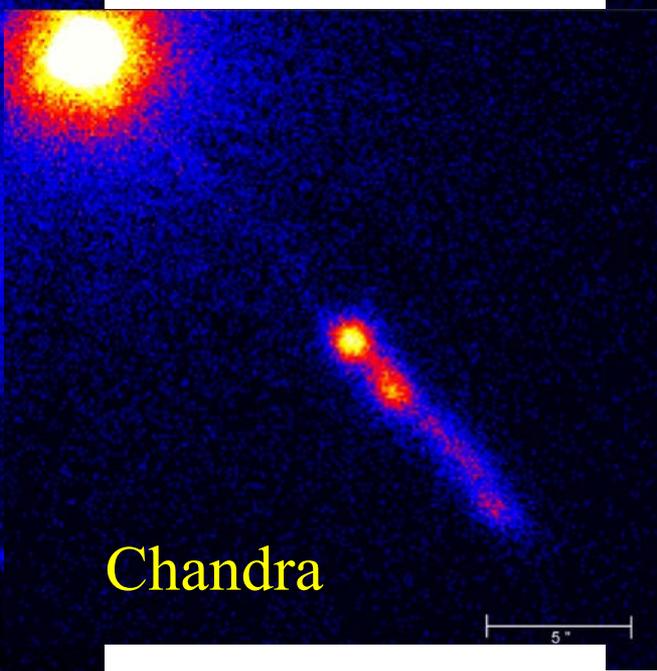
Disque d'accrétion  
Et jet domine à haute énergie  
100keV pour 3C273  
(vu sous  $\theta \sim 30^\circ$ )

Emission polarisée 2-40%  
Polarisation tourne avec sursauts

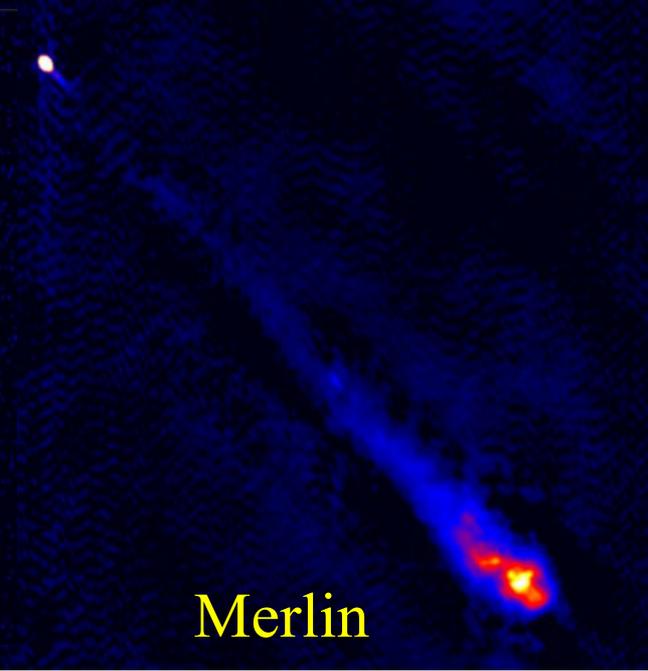
Variabilité viendrait  
de la base du jet



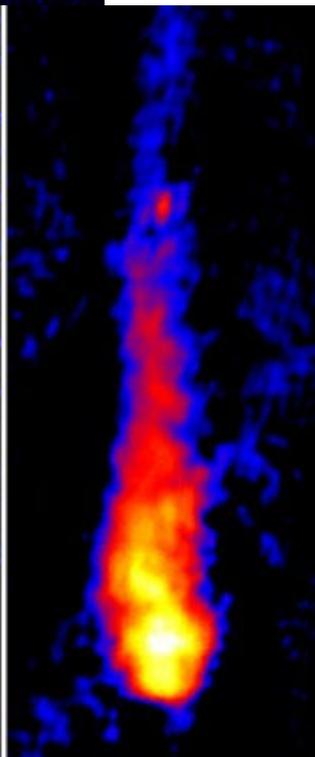
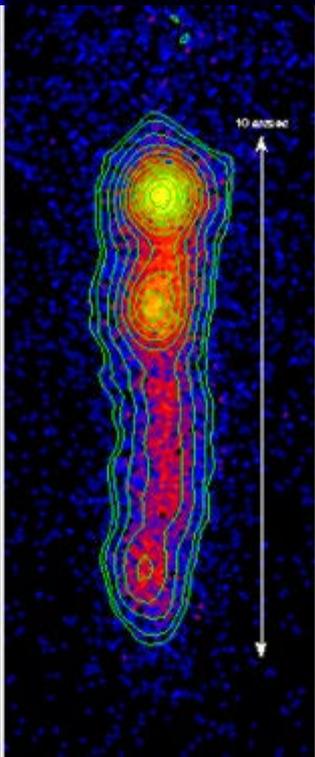
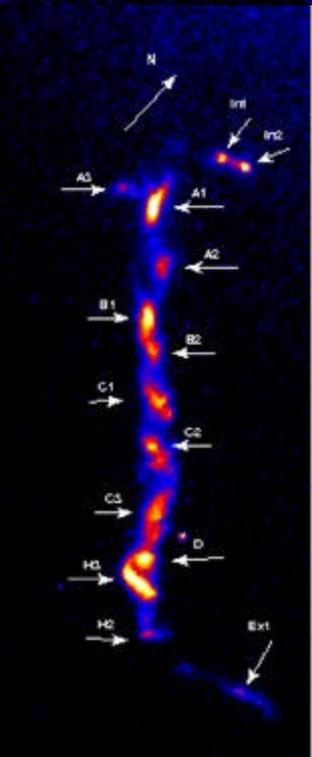
HST



Chandra



Merlin



3C273, le plus proche des Quasars  
Le plus brillant (*1000 fois une  
Galaxie comme la notre*)

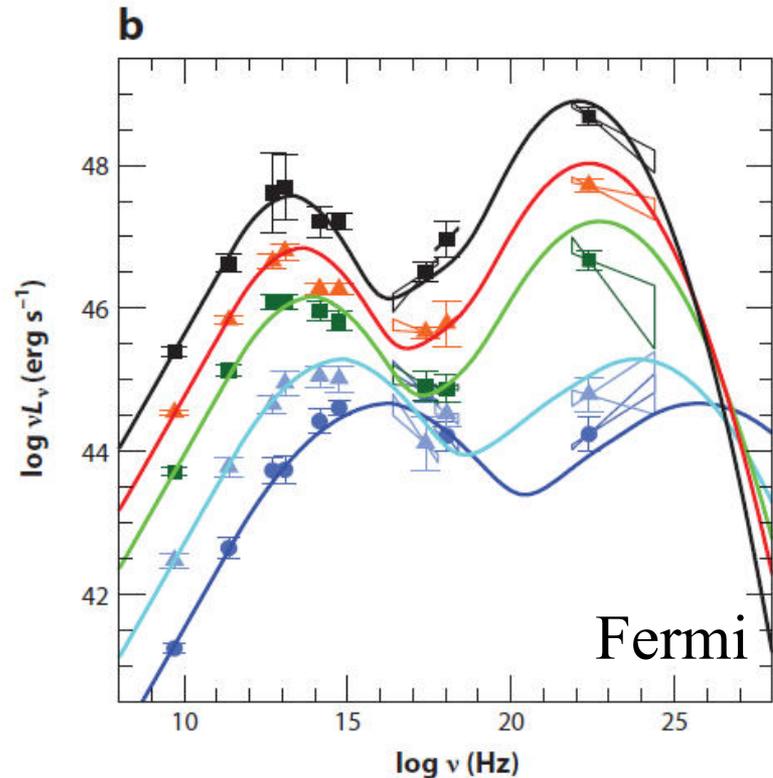
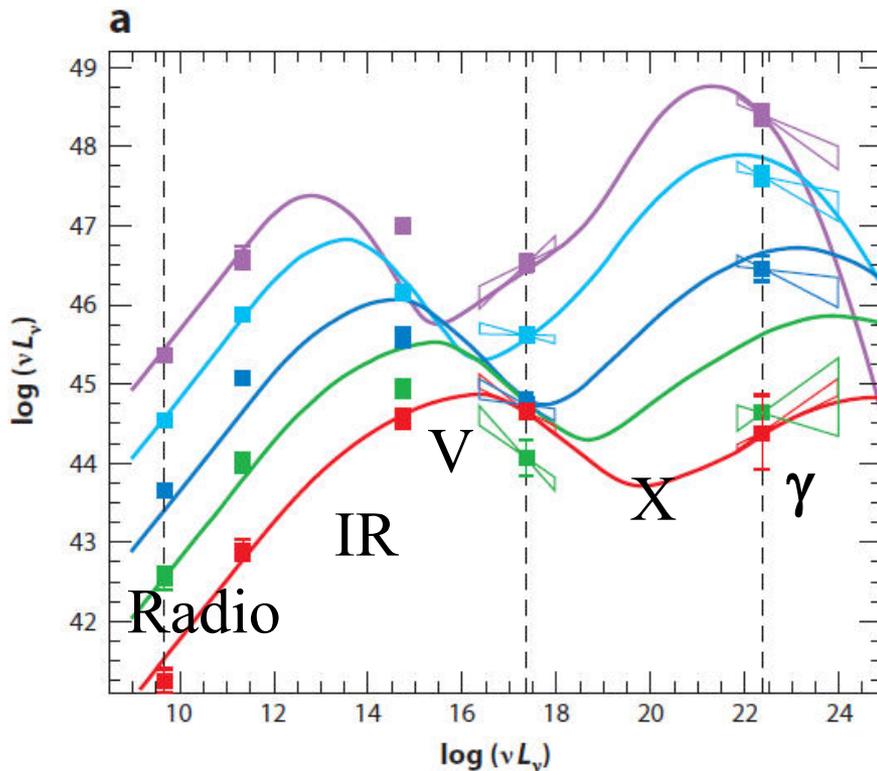
Superposition des jets en optique  
(HST) en rayons X (Chandra)  
Et en radio cm (Merlin)

# Evolution des spectres de blazars

Les plus lumineux, piquent à E plus faible

Synchrotron → self-Compton (SSC), ou bien photons externes (EC)

Correlation entre les 2 pics → SSC



$$\text{Power} \propto B^2 (E^2 - m^2 c^4)$$

$$\nu_c \propto \gamma^2 B$$

$$E = \gamma m_e c^2$$

# Mécanismes de rayonnement

## Emission synchrotron

Ce sont les mêmes particules dans les deux bumps

1) Électrons champ B, 2) Compton-inverse : X et  $\gamma$

→ Modèle « Synchrotron self-Compton » ou **SSC**

Les photons d'origine peuvent aussi

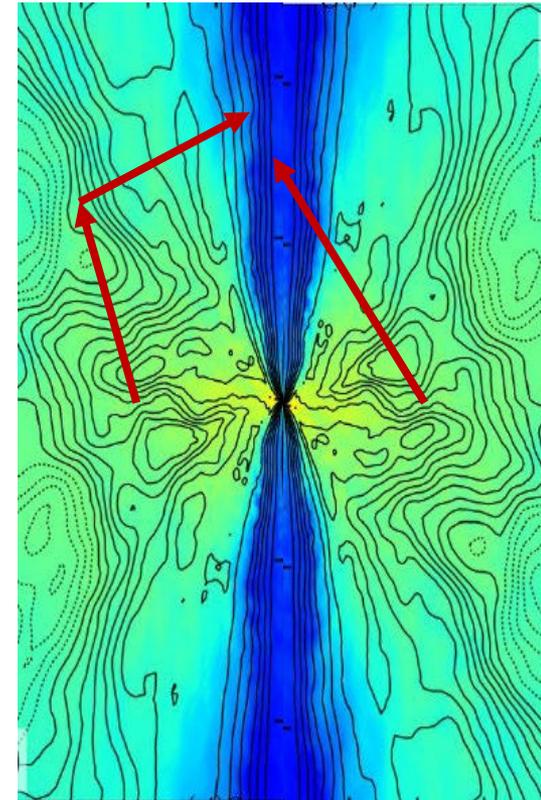
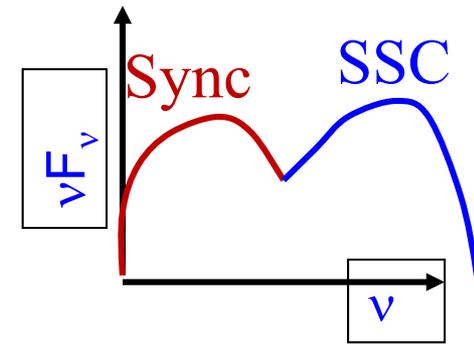
être les photons UV du **disque d'accrétion**,  
ou bien les photons **IR du tore** de poussière

→ « External Radiation Compton models » (**ERC**)

Pour FSRQ mais pas pour HSP

Modèles injectent des leptons  $N(E) \sim E^{-s}$

**Processus leptonique ou hadronique**



# Processus leptoniques dans le jet

FSRQ: facteur de Lorentz des particules  $\gamma_e \sim 1000-10000$

Alors que le  $\Gamma_{\text{jet}} \sim 15$ . Champ magnétique 0.1-0.3 G

Encore plus pour HSP-BL,  $\gamma_e \sim 10^5-10^6$

e- rayonnent plus que p à énergie égale

Equipartition avec Champ B

→ Reconnections, accélération des particules, mini-jets

Rapport Gamma/Radio jusqu'à 100!

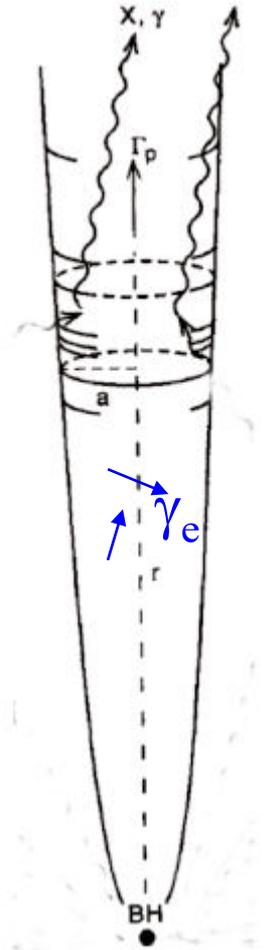
Flux Gamma croît avec le Flux X

Si  $B = \text{cste}$  Flux-gamma  $\propto$  Flux- $X^2$

Autre modèle « Spine/Sheath » = Epine dorsale/Gaine

Comme un câble co-axial  $\Gamma_{\text{spine}} \gg \Gamma_{\text{sheath}}$

Mécanismes d'accélération?



# Processus hadroniques

Autres particules dans les jets: **protons et mésons**

Emission synchrotron directe,

Ou cascades de paires e-e+

Requiert d'énormes énergies pour être efficace

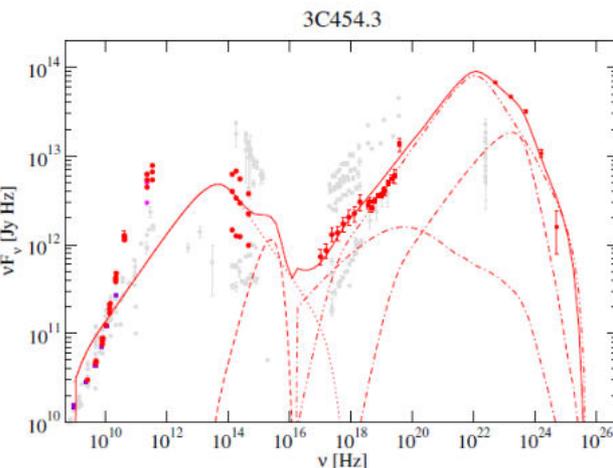
Pas seulement électrons/positrons

**Conditions**  $E_p > 10^{19}$  eV (ultra-haute énergie)

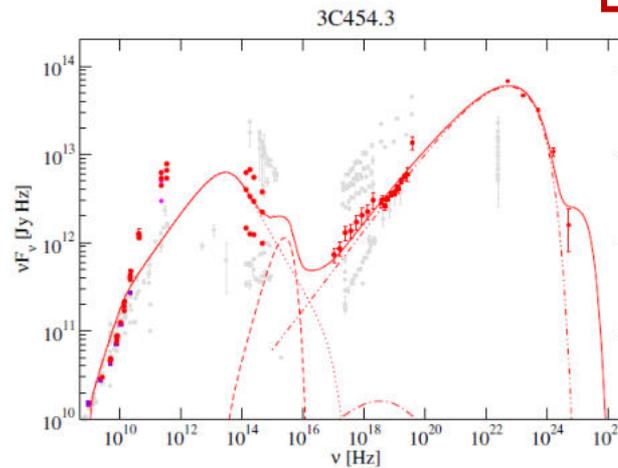
Rayon de Larmor petit  $< 0.001$  pc

$r_L \sim 3 \times 10^{16} E_{19} / B_G$  cm  $\leq 3 \times 10^{15}$  cm  $\rightarrow B \geq 10$  G

- Proton synchrotron
- $p\gamma \rightarrow p\pi^0$  ;  $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$
- $p\gamma \rightarrow n\pi^+$  ;  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$   
 $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \nu_\mu$   
 $\rightarrow \mu$ - secondaire,
- e- synchrotron
- Cascades

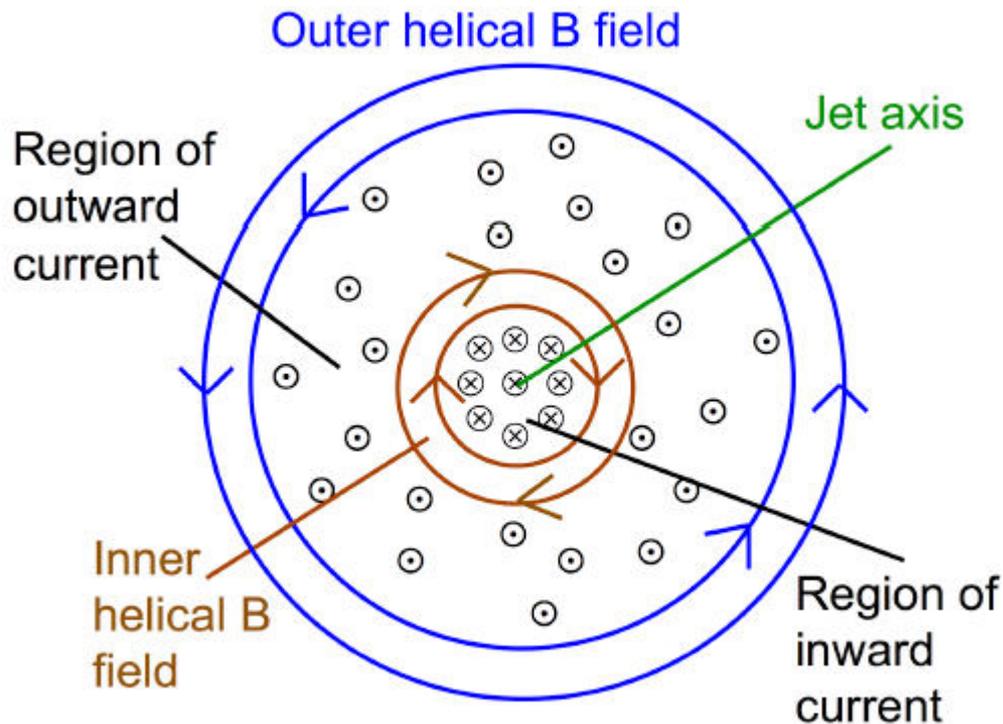


Modèle leptonique



hadronique

# Structures imbriquées



Structure interne marron

Externe en bleu

Courant interne vers le noyau

Dans un câble coaxial, le courant passe dans un sens au centre, puis dans le sens opposé dans la gaine autour

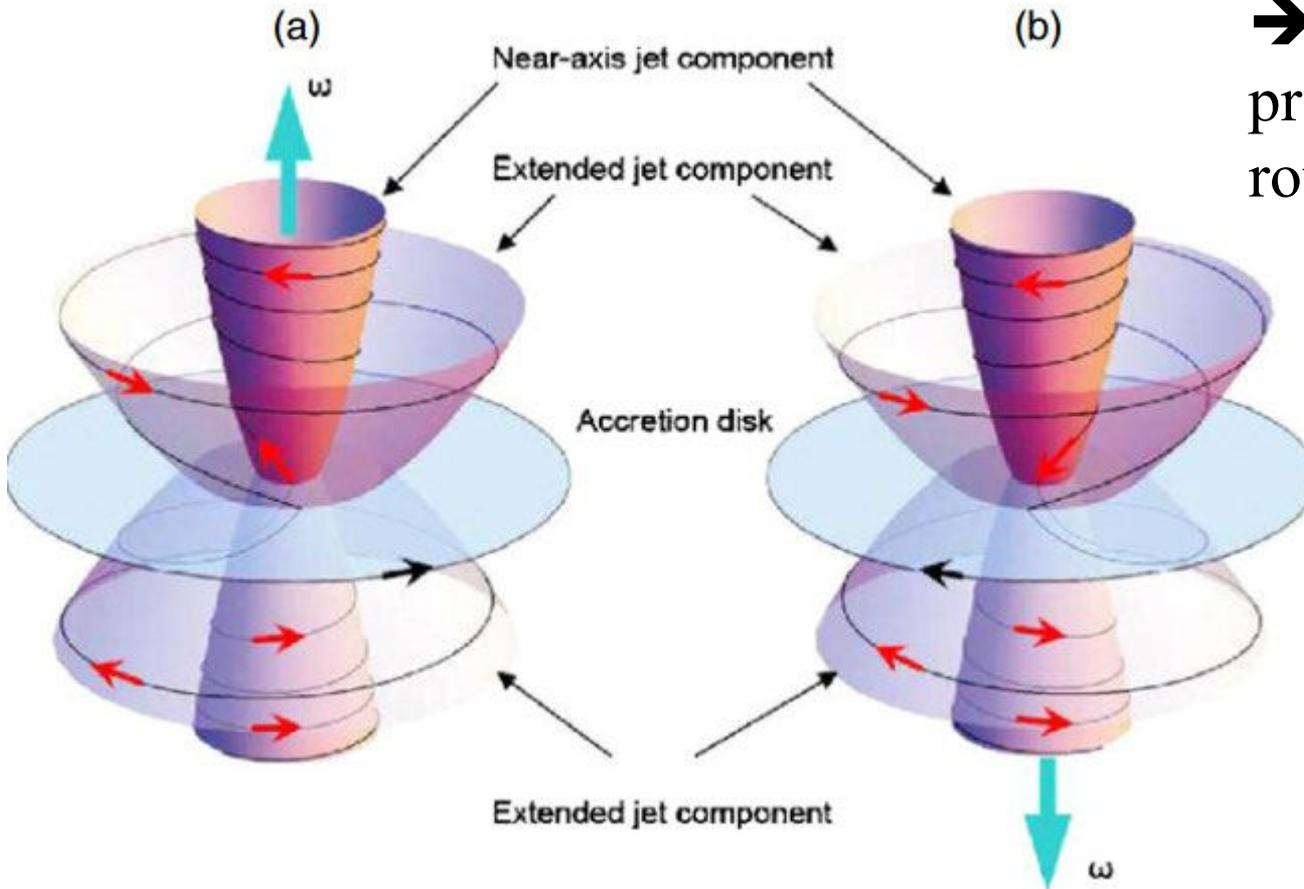
AGN: Le courant se dirige vers le noyau à l'échelle du pc,

Puis le sens contraire domine à 10pc

Se prolonge sur des kpc

# Batterie Cosmique

$e^-$  freinés par les photons  
→ Courant  $J$ , car les protons vont plus vite  
rotation azimuthale



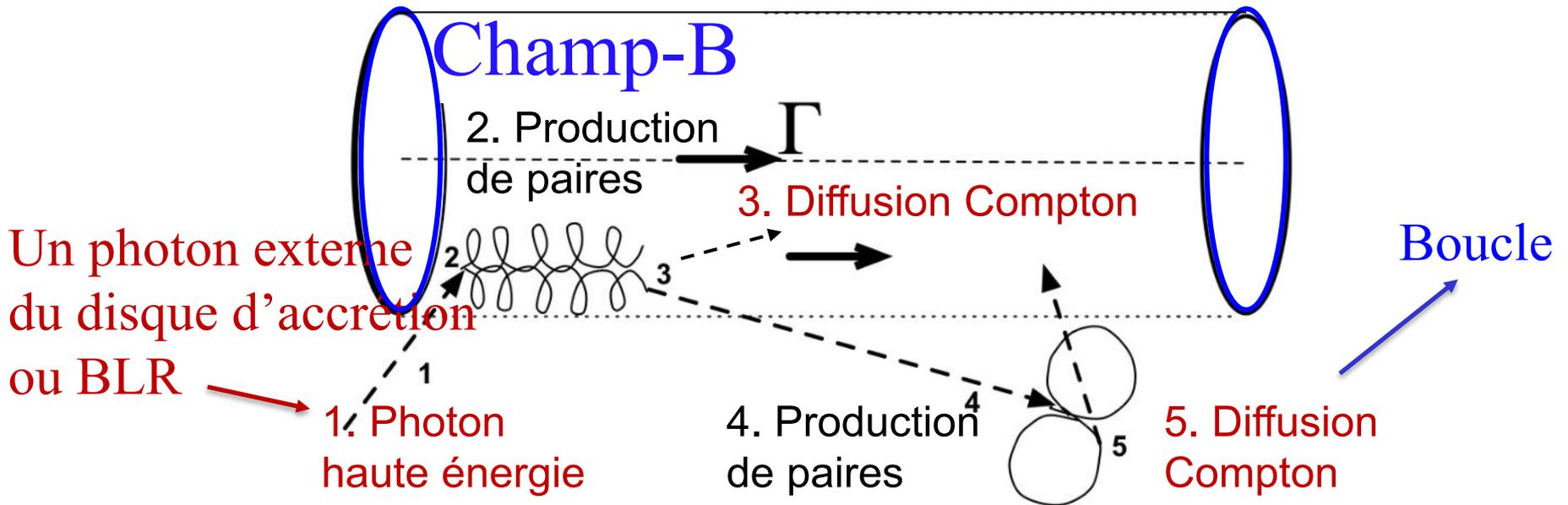
Champ toroidal

Les AGN pourraient ainsi créer des champs, et les propager à tout l'espace par les jets → graines cosmiques?

*Contopoulos et al 2009*



# Production de paires électrons-positrons



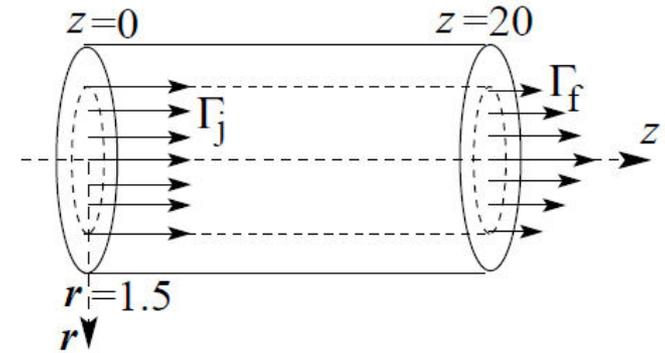
**Multiplication des  $\gamma$  de haute énergie, dès que**

- (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)*

# Où se trouve la dissipation d'énergie?

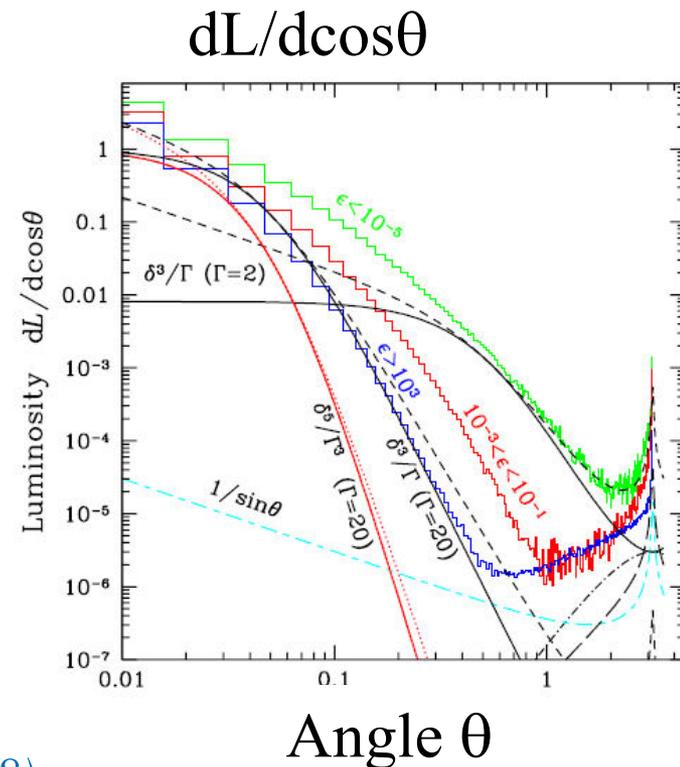
Près du trou noir, disque d'accrétion  
 E cinétique du jet  $\Gamma \sim 20$ , est transformée  
 en énergie des particules  $\gamma_e = 10^4 - 10^7$



Rayons  $\gamma$  de haute énergie (VHE): l'accélération  
 est progressive. Si dense,  $\gamma$  ne sortent plus,  
 Opaque, ou bien à  $R > 10^4 R_g$   
 $\gamma$  reliés à la rotation de la polarisation

Il existe les FSRQ avec  $L/L_{\text{edd}} > 1$ ,  
 Ou des HSP-BL (low-L) de  $L/L_{\text{edd}} = 0.01$

Les effets de cascade demandent forte L et  
 $\Gamma > 10$



# Mécanisme d'éjection

Accrétion de matière, avec  $B$  faible  $\rightarrow$  amplification de la rotation

Spin du trou noir  $\rightarrow$  impose la rotation de l'espace,

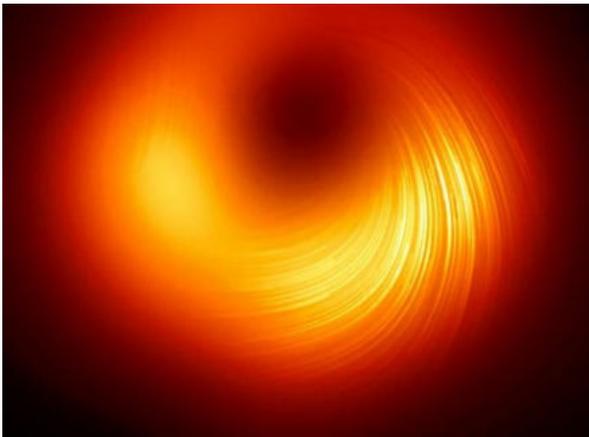
Viscosité et chocs, matière ionisée, courant  $\rightarrow$  champ  $B$

Enroulement des lignes de champ, resserrement et collimation

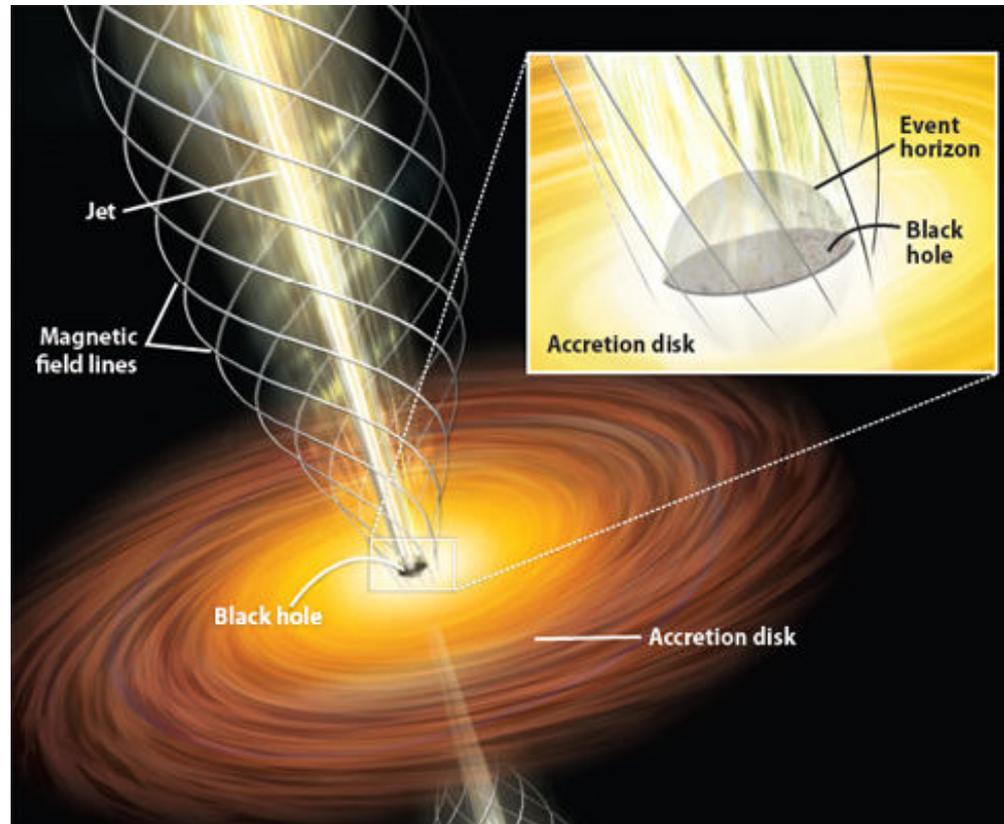
Mécanisme de Blandford-Znajek

Les couples MHD freinent  
le trou noir

25% de son énergie vient de la  
rotation



M87  
B fort  
EHT  
2021



# Instabilités et dissipation

Simulations GR-MHD: critères d'instabilité du tire-bouchon

Champ  $B_\phi / B_p > 2\pi \sin\theta$ , Kruskal–Shafranov (KS)

Le champ toroidal induit des instabilités  $\rightarrow$  shock  $\rightarrow$  dissipation

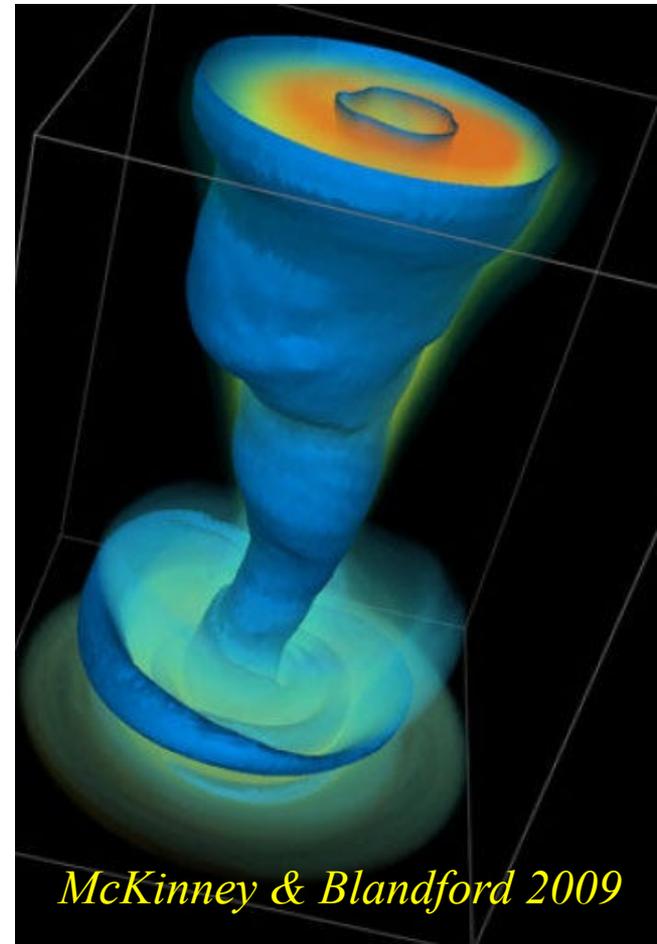
$\exp i (m\phi - nz - lR - \omega t)$  **instabilité  $m=1$**

**Dichotomie FRI**: dissipation très tôt

**FRII**, très relativiste, peu de dissipation

Sauf dans les lobes radio

Stabilisation par: gaine/sheath, ou bien  
expansion radiale, ou non-linéarité

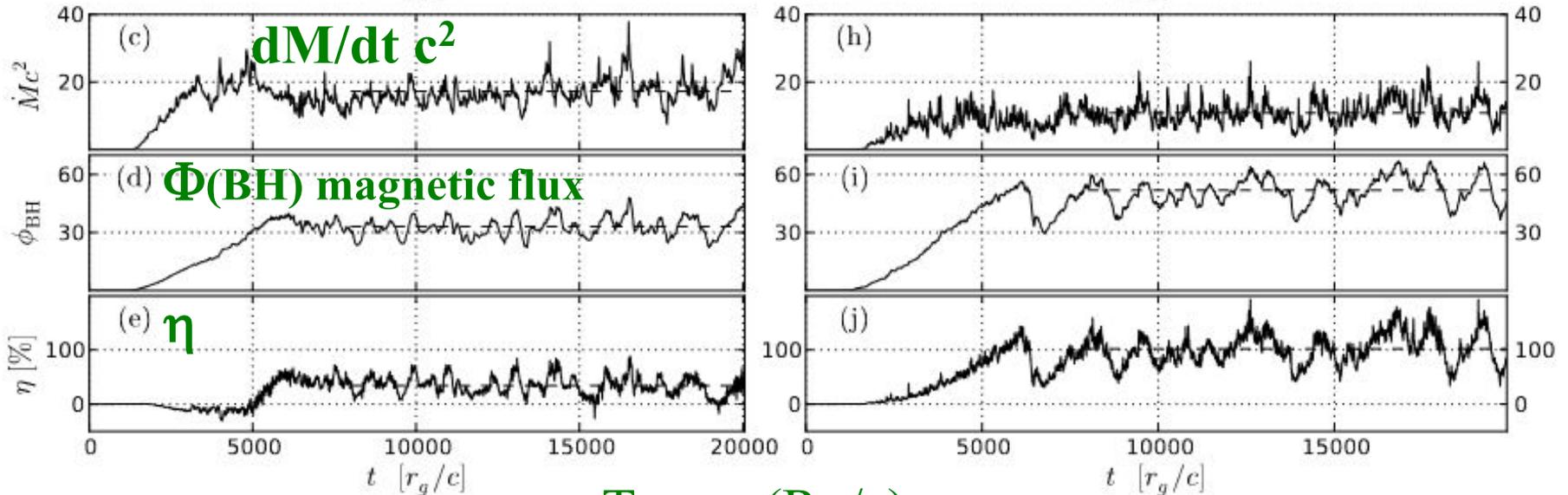
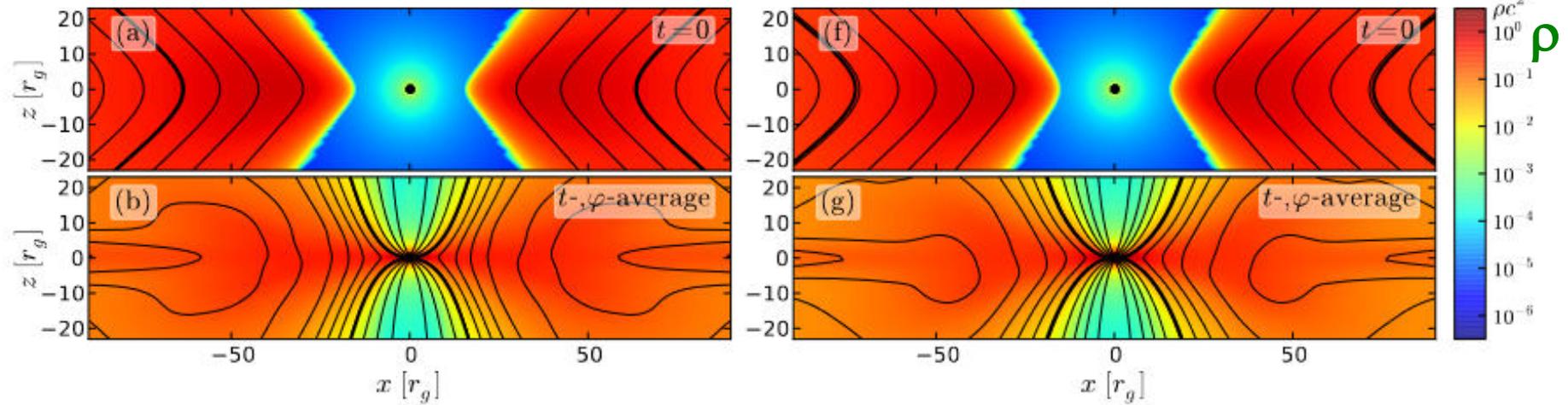


*McKinney & Blandford 2009*

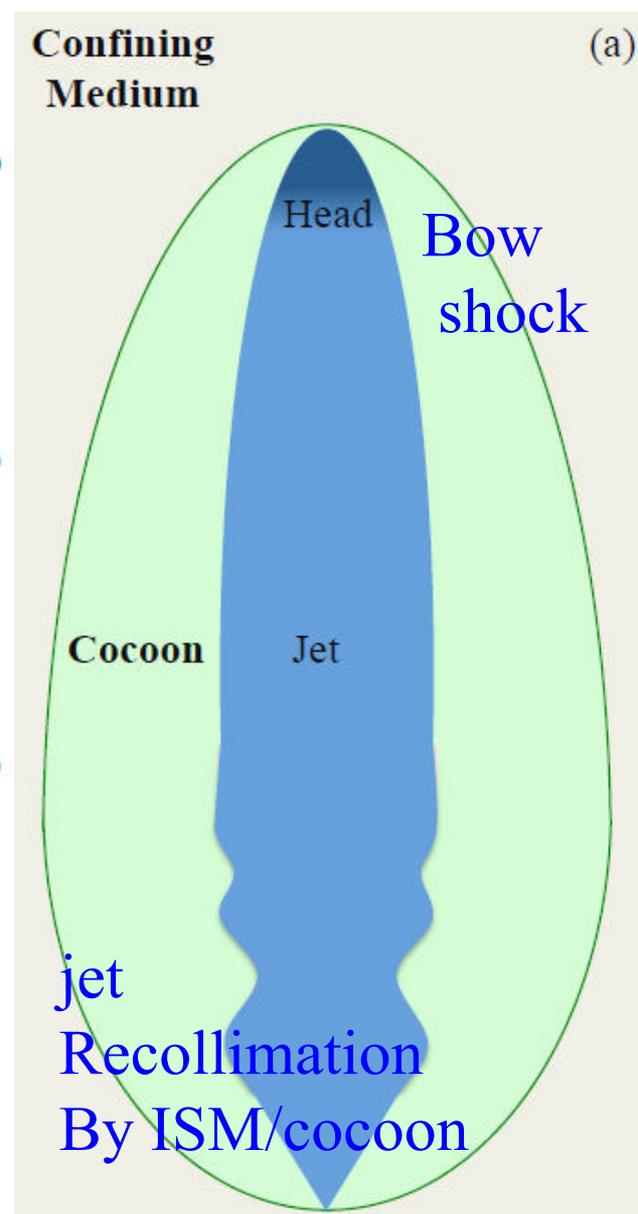
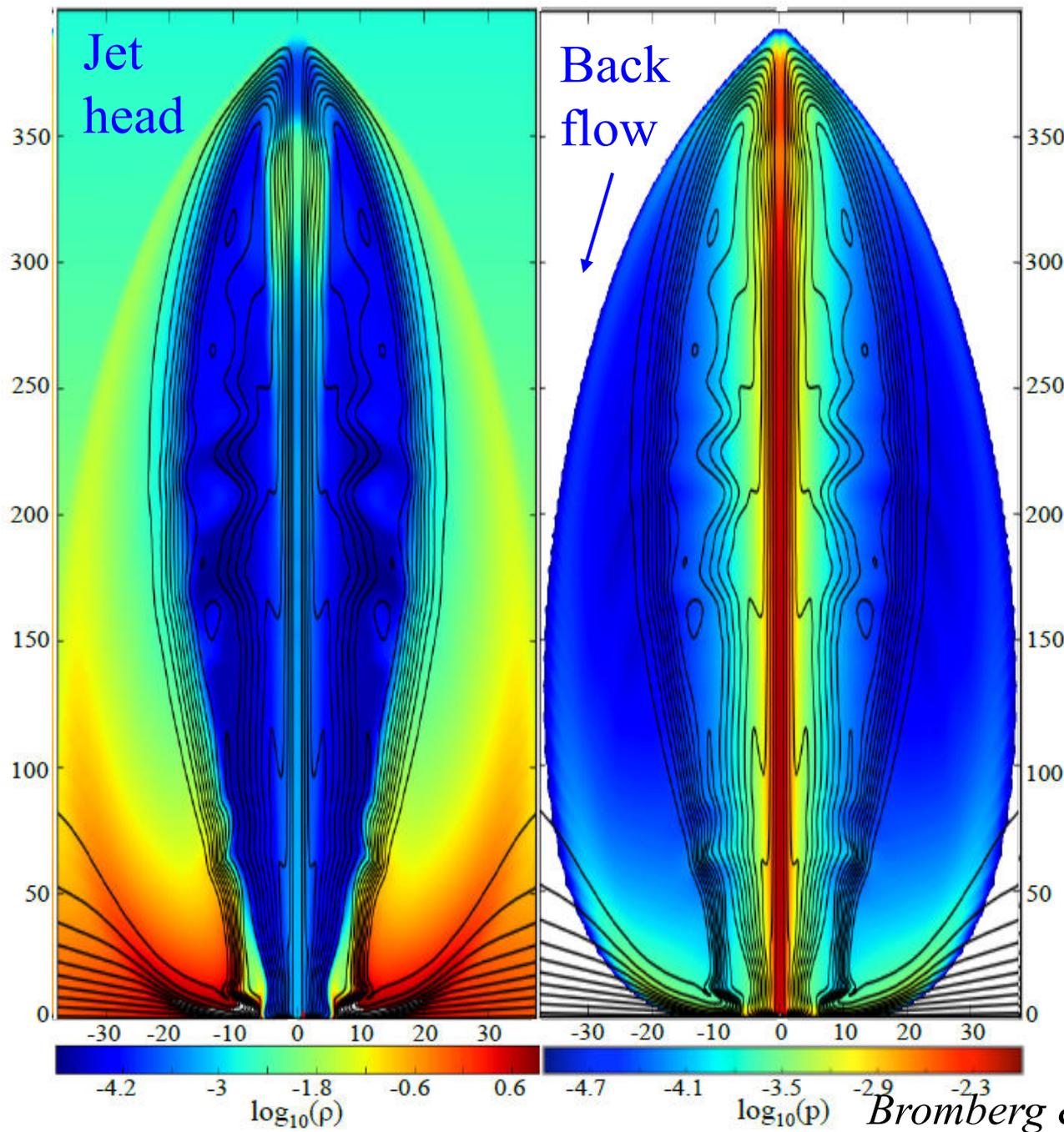
# Efficacité de l'outflow $\eta \propto P/(dM/dt)c^2$

BH spin Retrograde  $a=-0.9$   $\eta = 34\%$

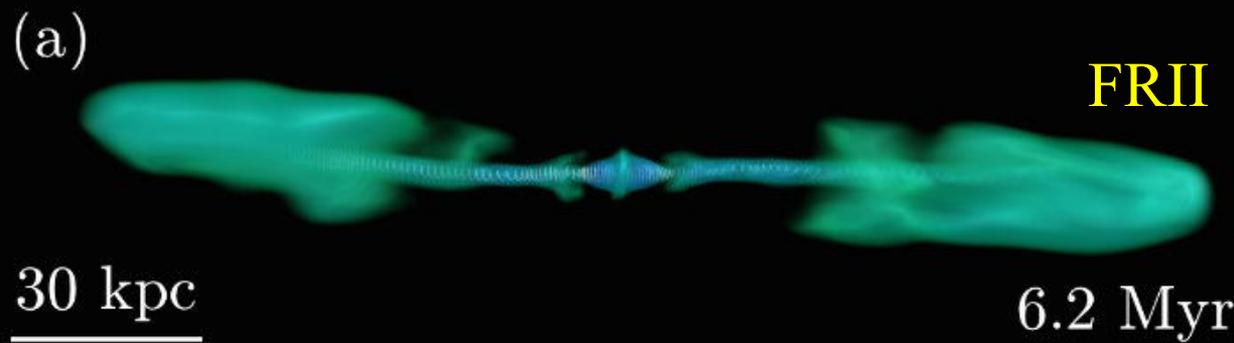
Prograde  $a=0.9$   $\eta = 102\%$



Temps ( $R_g/c$ )



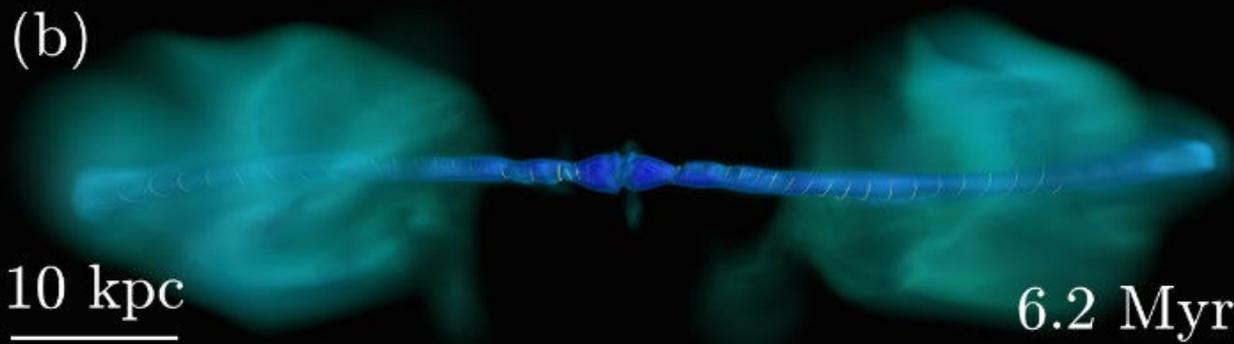
*Bromberg & Tchekhovskoy 2016*



## Instabilité MHD du Kink (tire-bouchon)

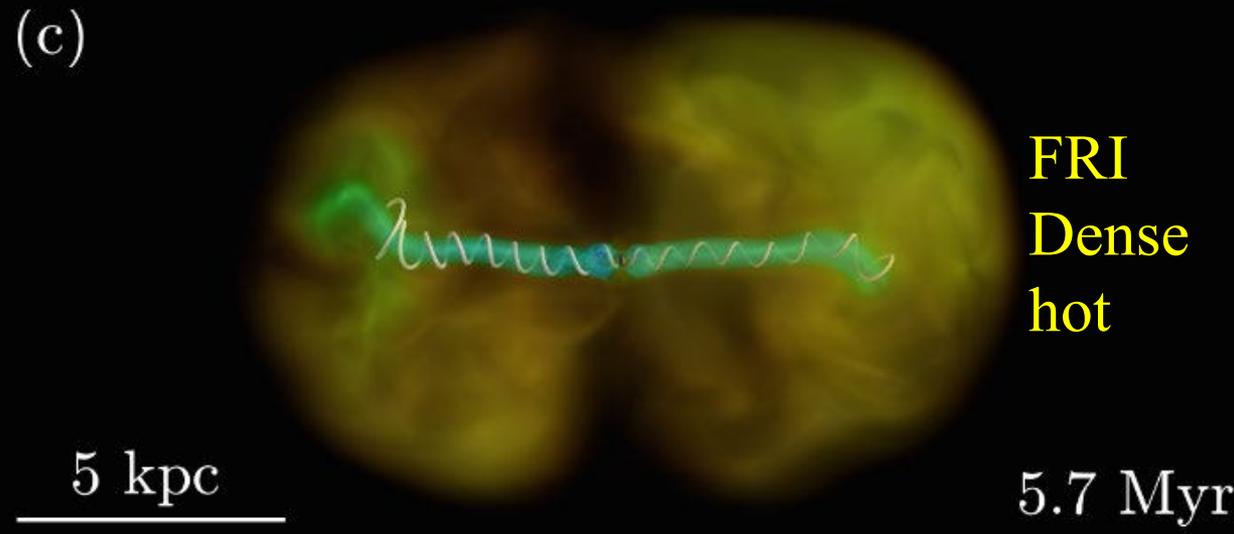
**Si  $P(\text{jet}) < P_{\text{crit}}$**

→ Cœur ralentit le jet et forme des cavités de plasma relativiste = FRI

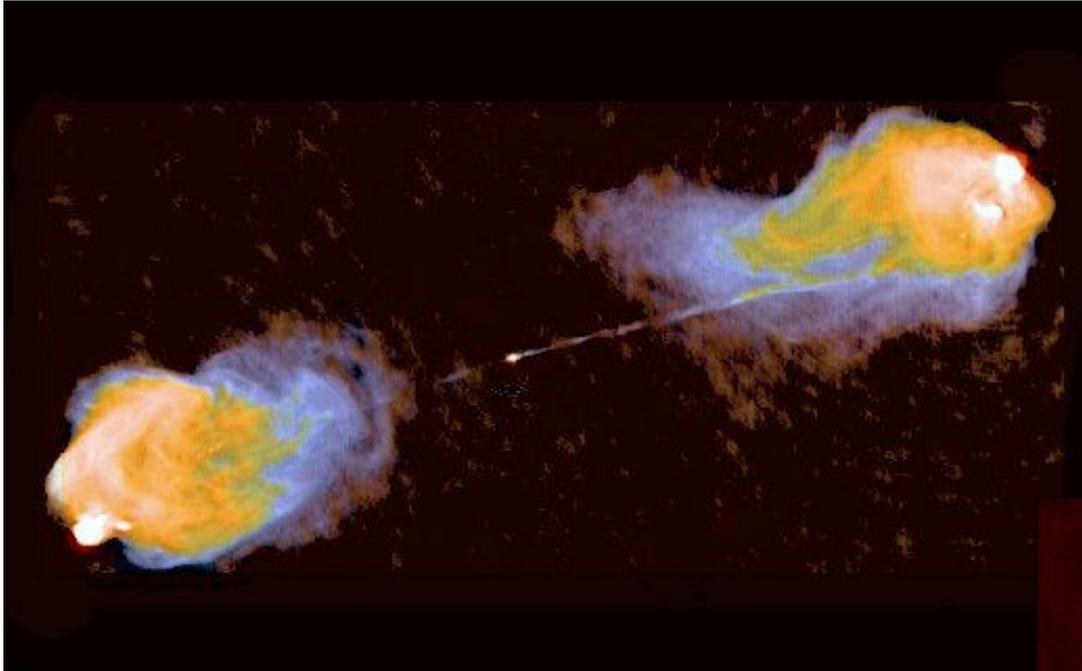


**Si  $P(\text{jet}) > P_{\text{crit}}$**

Le jet sort du cœur, se propage plus loin Puis revient (backflow)

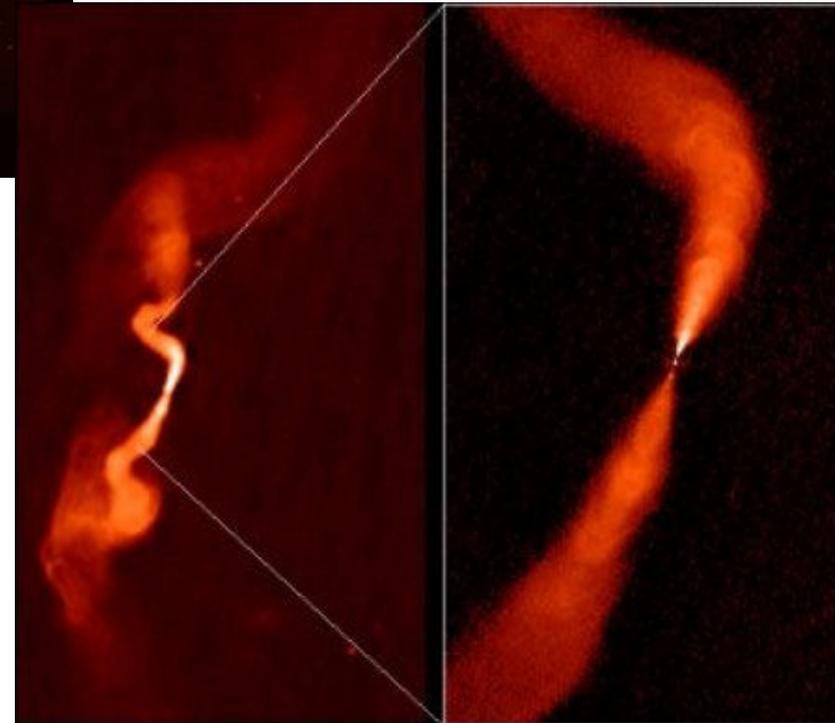


# Dichotomie FRI et FR II



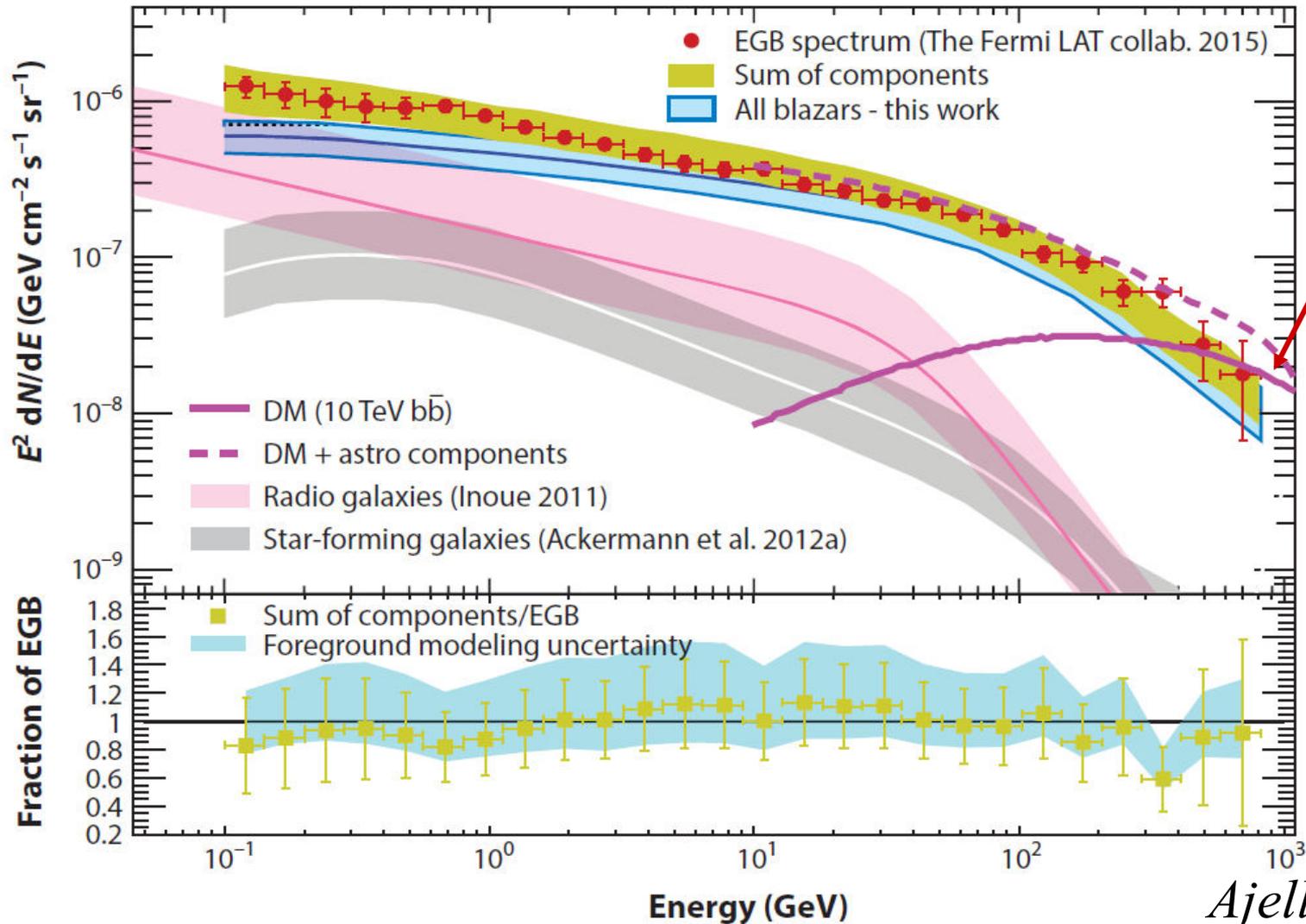
**FR II**, Haute puissance  
Brillant au bout  
(points chauds)  
Cygnus A  $> 100\text{kpc}-1\text{Mpc}$   
Plus rares

**FRI**, Faible puissance  
S'éteignant vers le bord  
3C 31  
Les plus fréquents



# Le fond Gamma extra-galactique (EGB)

Les blazars font l'essentiel + RG+ starbursts. Pas de place pour DM



EBL cut-off  
Production  
paires  $e^+e^-$

*Ajello+2015*

# Le plus lointain blazar $z > 6$

Blazar FSRQ J0309+27, observé en X à 8 mois d'intervalle (2020)  
Première période, 2 bursts de 4 minutes, à Spectre moins dur

Etat plus tranquille: jet et Comptonization de l'UV sur électrons du jet  
→ Bas flux, spectre plus dur

Bursts doivent venir d'une région  $\ll$  taille BLR

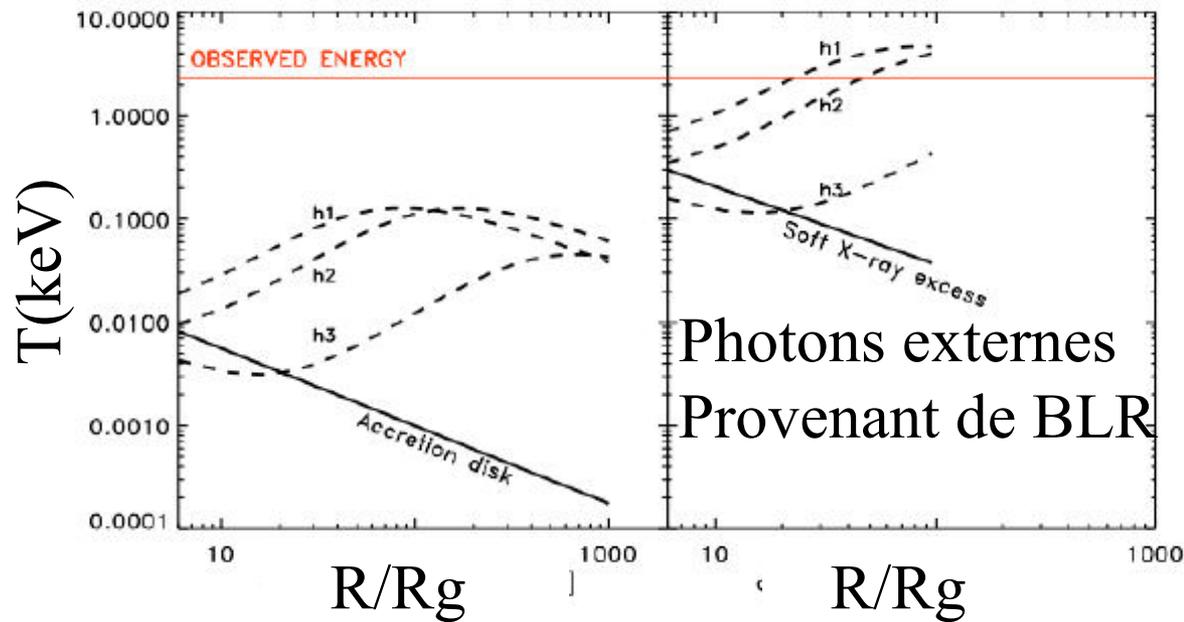
Les photons BLR servent de graines, sont accélérés jusqu'à  
 $\Gamma = 100$ , dans une coquille de taille  $\sim 10^{16}$  cm,

soit  $\sim 100 R_{\text{horizon}}$

$h1 = 50 R_g$  dans le jet

$h2 = 100 R_g$

$h3 = 400 R_g$

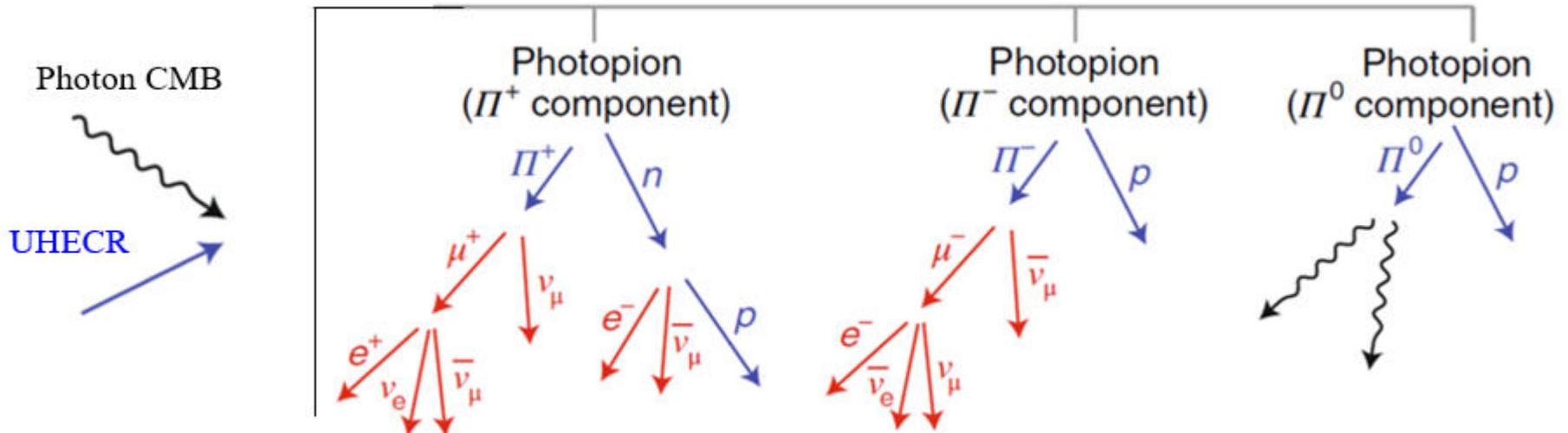


# Rayons cosmiques de Ultra Haute Energie

Photons Radio ( $\lambda \sim 1\text{km}$ ) jusqu'à  $\gamma$  TeV ( $\lambda \sim 10^{-16}\text{cm}$ ), 21 ordres  
Soit 70 octaves ( $2^{70} = 10^{21}$ )

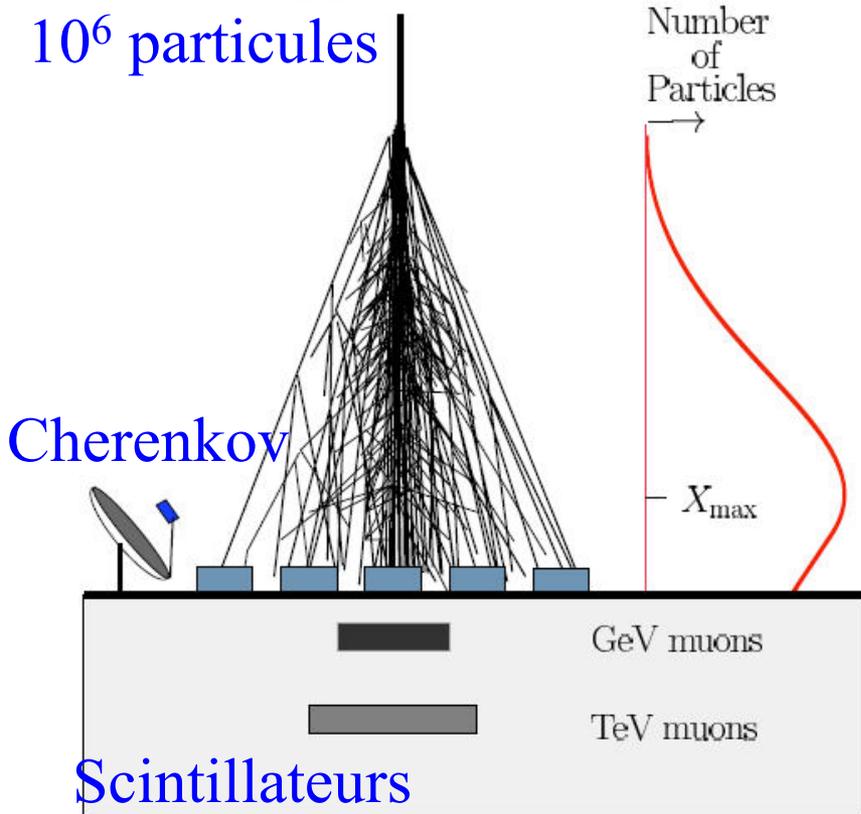
UHECR  $E > 10^{18}\text{eV}$  ( $10^6$  TeV), 7 ordres de plus que le faisceau LHC  
→ Accès à des énergies inconnues sur Terre

GZK (Greisen; Zatsepin & Kuzmin 1966) après la découverte du CMB  
Interactions CR + photons = photopion, pour  $E > 3 \cdot 10^{10}$  GeV



# Détecteurs de particules UHE

Gerbe de qq 100m  
 $10^6$  particules



Cherenkov

Telescope à  
Fluorescence  
HEAT



Pierre Auger (hémisphère Sud, Argentine)  
1600 détecteurs sur  $3000\text{km}^2$   
TA (Telescope Array) Nord  
**1 part/ $\text{km}^2$ /siècle  $E=10^{20}\text{eV}$**

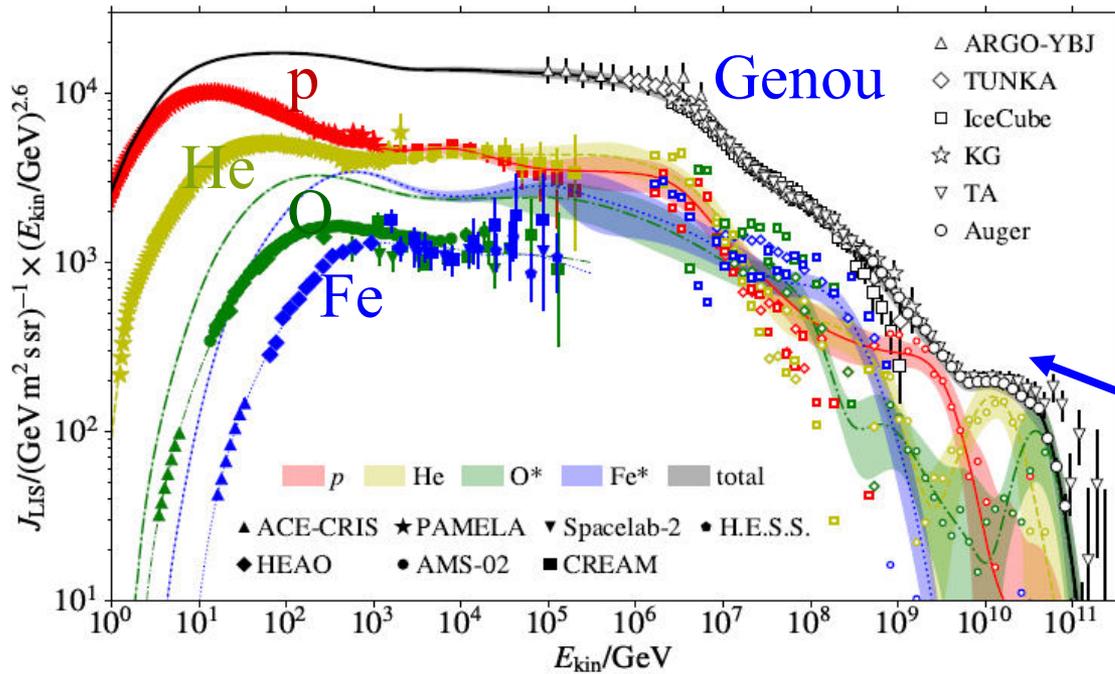
# Spectre d'énergie

Genou à  $10^{15}$  eV

CR sortent de la Galaxie?  
+ autre accélération

Cheville à  $10^{18.5}$  eV

GZK



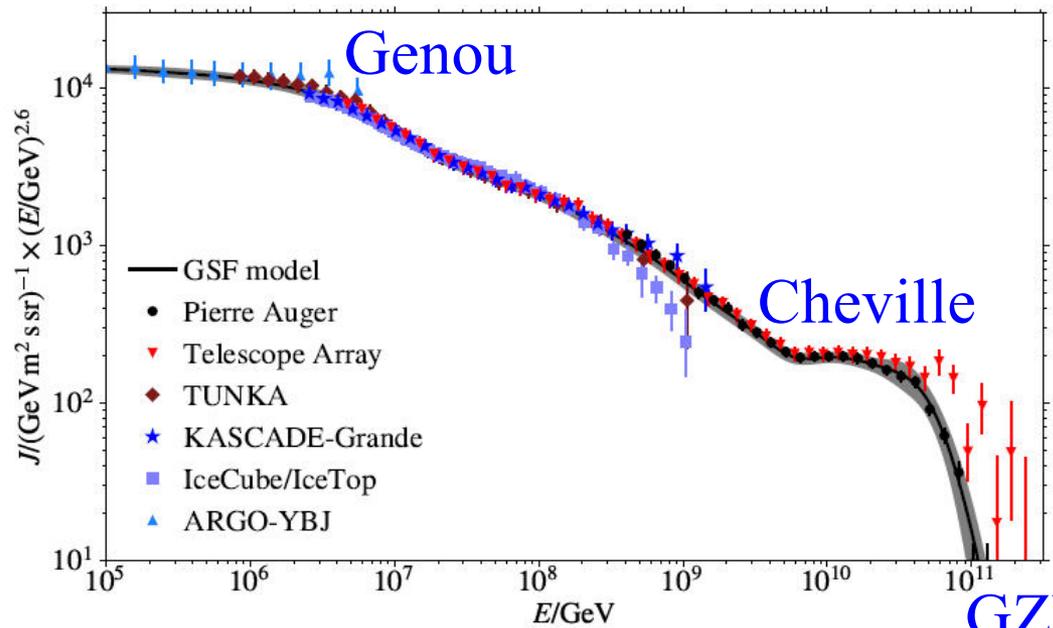
Flux  $\propto 1/E^\alpha$

$\alpha = 2.7$   $10^{15}$  eV  $> E > 10^9$  eV

$\alpha = 3.1$   $10^{18.5}$  eV  $> E > 10^{15}$  eV

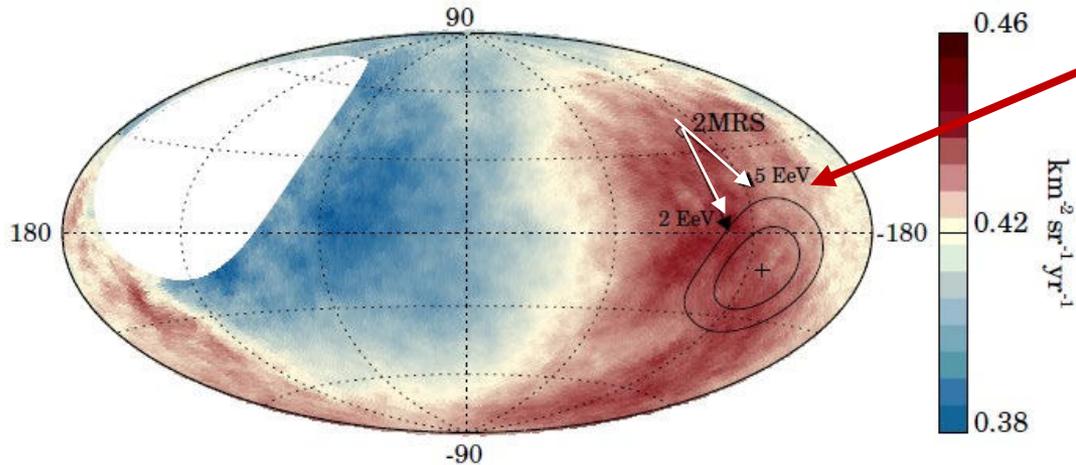
$\alpha \approx 2.7$   $E > 10^{18.5}$  eV

Après le cut-off  $\alpha > 4$



# Localisation des sources

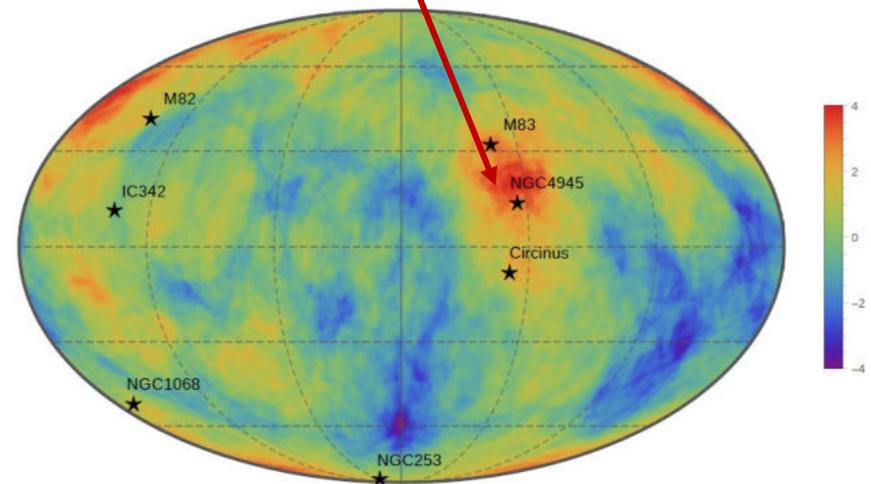
Anisotropie détectée: due à la déflexion par le Champ B galactique?



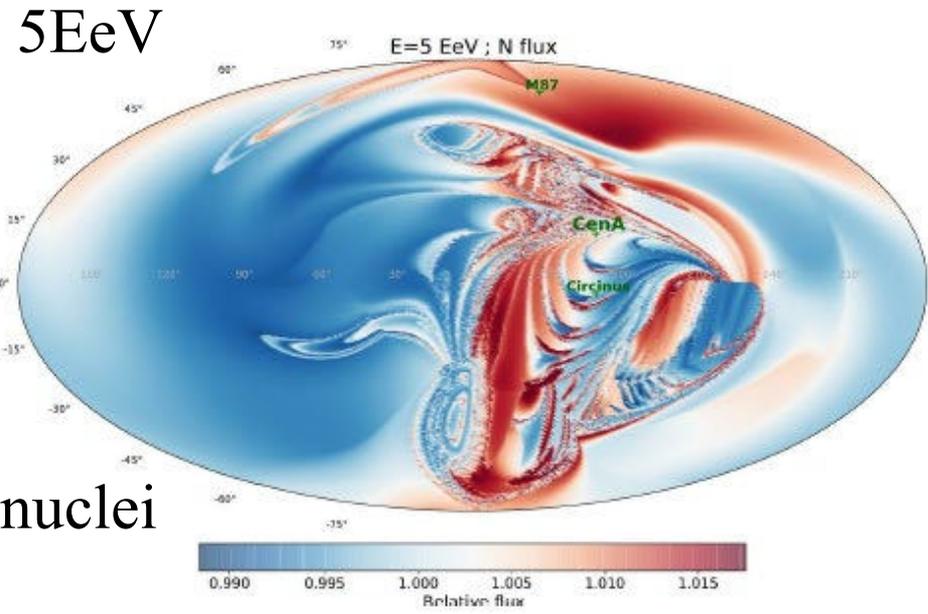
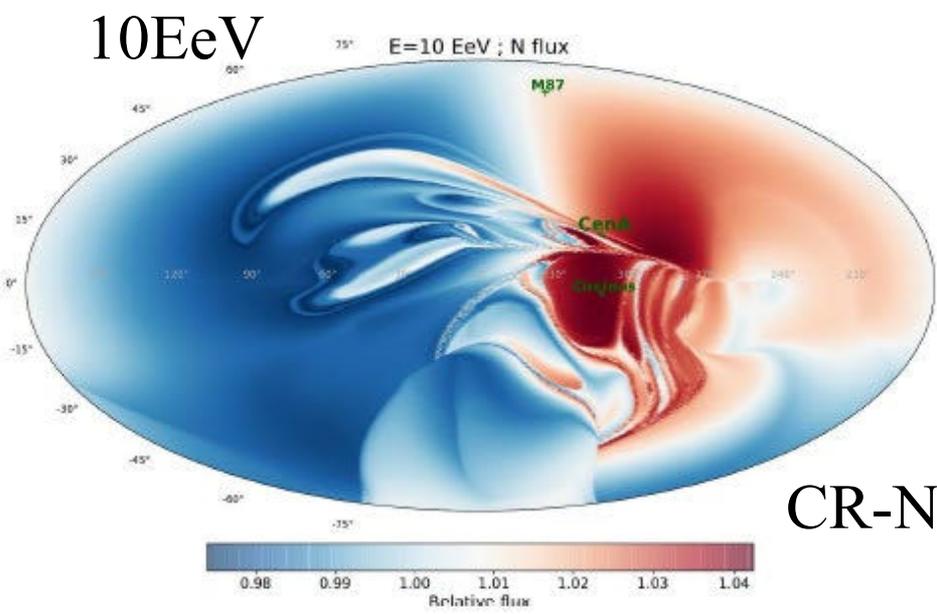
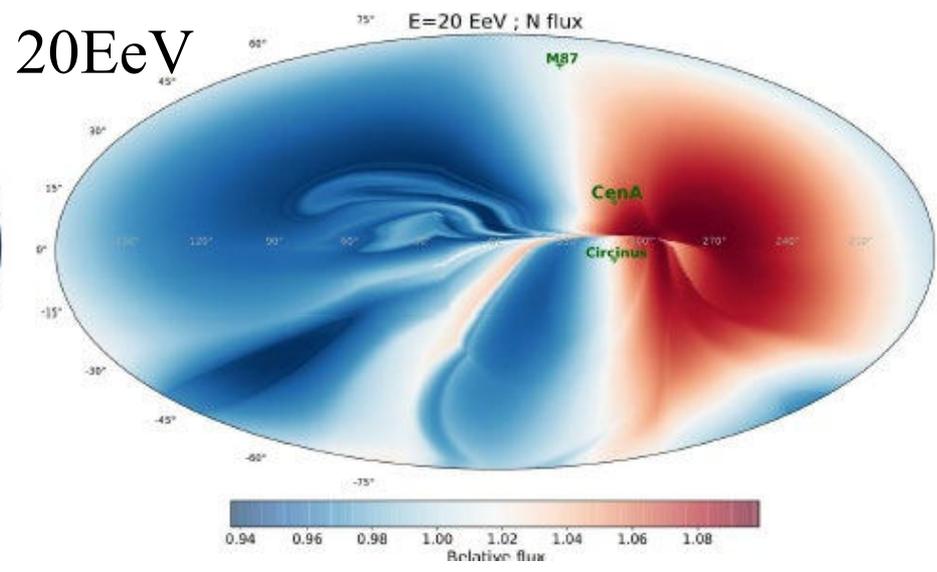
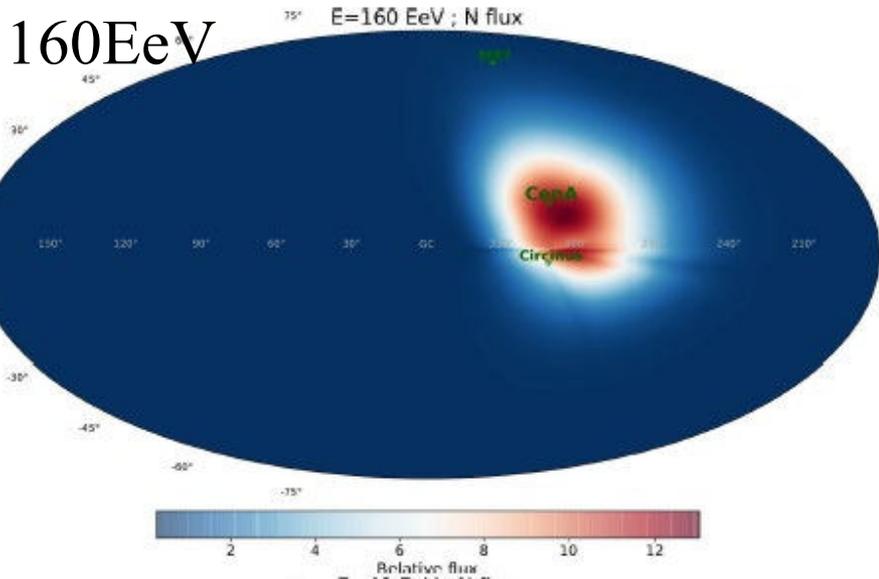
2MASS survey: dipole des galaxies proches  
+ deflection pour 2-5 EeV  
(Aab et al 2017)

Galaxies starbursts + AGN  
M87, CenA, N1068, N4945

Auger détecte une concentration dans CenA, mais pas M87  
5 fois plus loin  
Localisation à  $E \propto Ze$ , et aussi e



# Deflection par le champ B galactique $\propto BZ/E$



CR-N nuclei

# Accélération de particules

Champ B variable  $\rightarrow$  champ E  $\rightarrow$  accélération rapide  
(rotation naines blanches, pulsars..) Mais forte densité et fortes pertes

Mécanismes stochastiques: processus lent, non confiné  
Choc dans les Supernovae, AGN et Galaxies starbursts  
GRB, pulsars

**Processus de Fermi:** particules accélèrent à chaque passage,  
Maintenues par des miroirs magnétiques

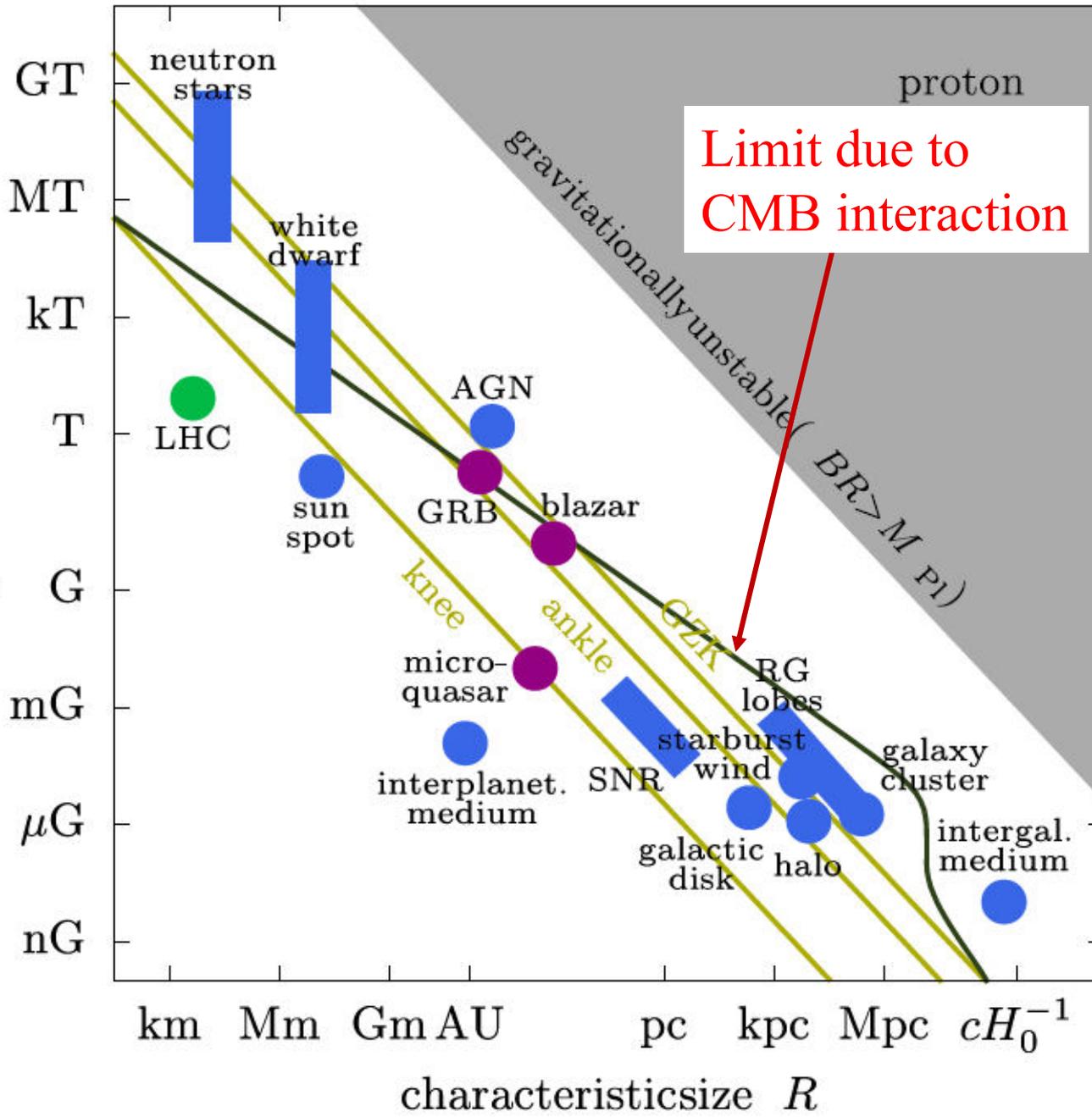
Rayon de Larmor  $R = 1 \text{ kpc} / Z (E / 10^9 \text{ GeV}) (\mu\text{G} / B)$

**Taille de l'accélérateur  $\rightarrow E_9 < Z B(\mu\text{G}) R(\text{kpc})$**



# Hillas Plot: taille de l'accélération > Rlarmor

**Champ B**



**Sources de CR**

$$E_{\max} \propto Z BR$$

**Jets blazars GRB**

**LHC**

Lim BR pour protons

Knee  $10^{6.6}$  GeV

Ankle  $10^{9.7}$  GeV

GZK  $10^{10.6}$  GeV

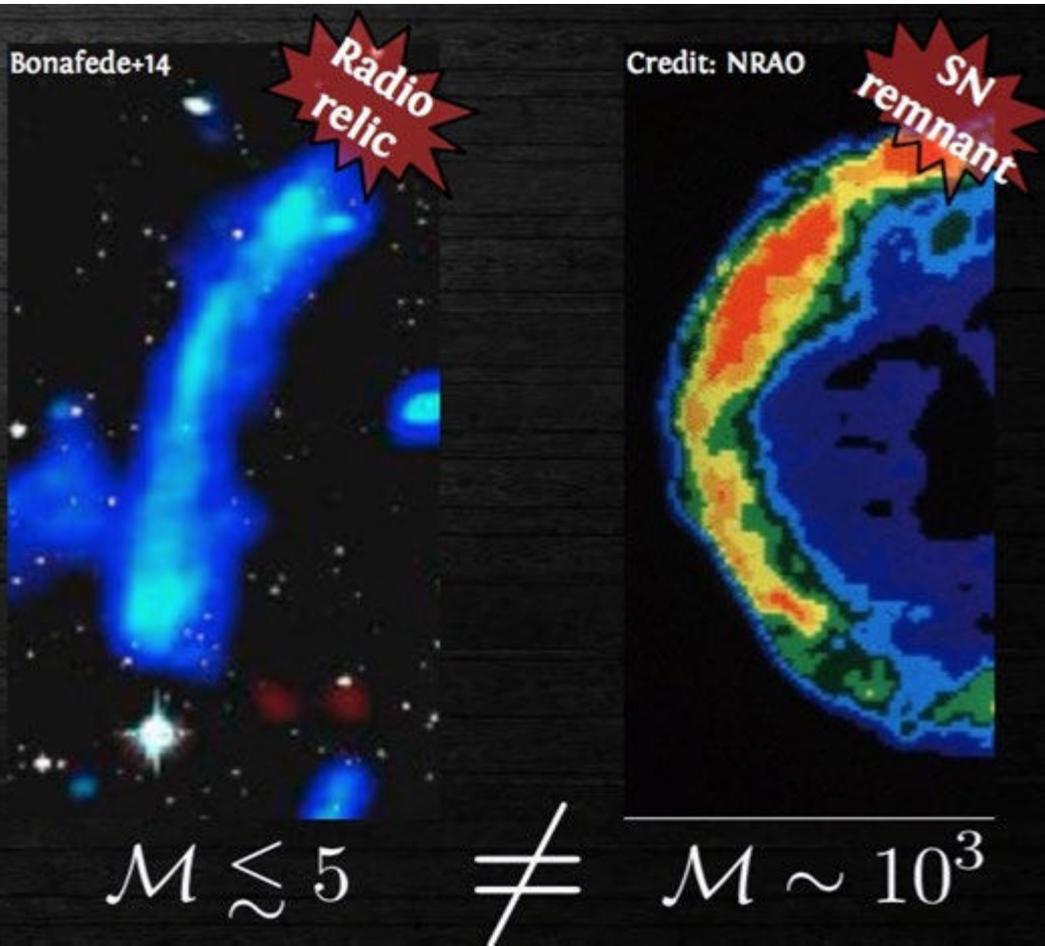
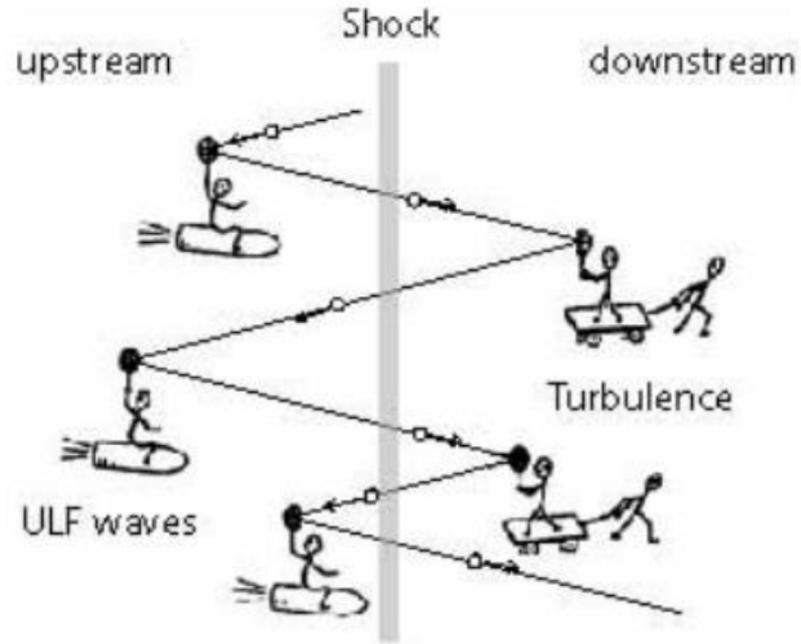
Fermi accélération

$$M_{\text{BH}} = 10^8 M_{\odot}$$

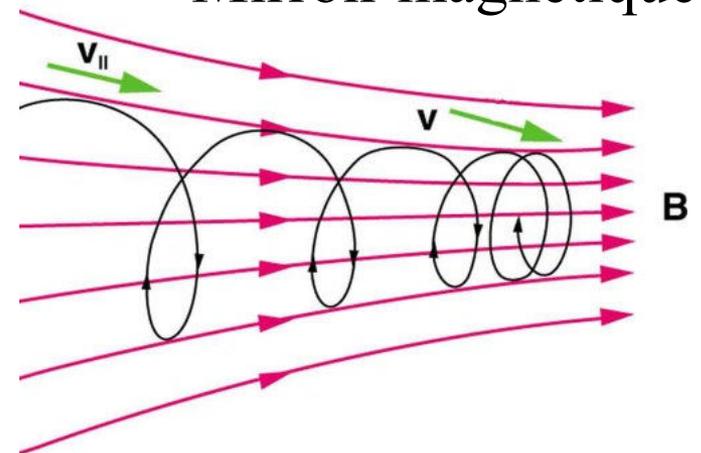
*Anchordoqui 2019*

# Accélération dans les chocs

Les particules sont diffusées par des inhomogénéités magnétiques



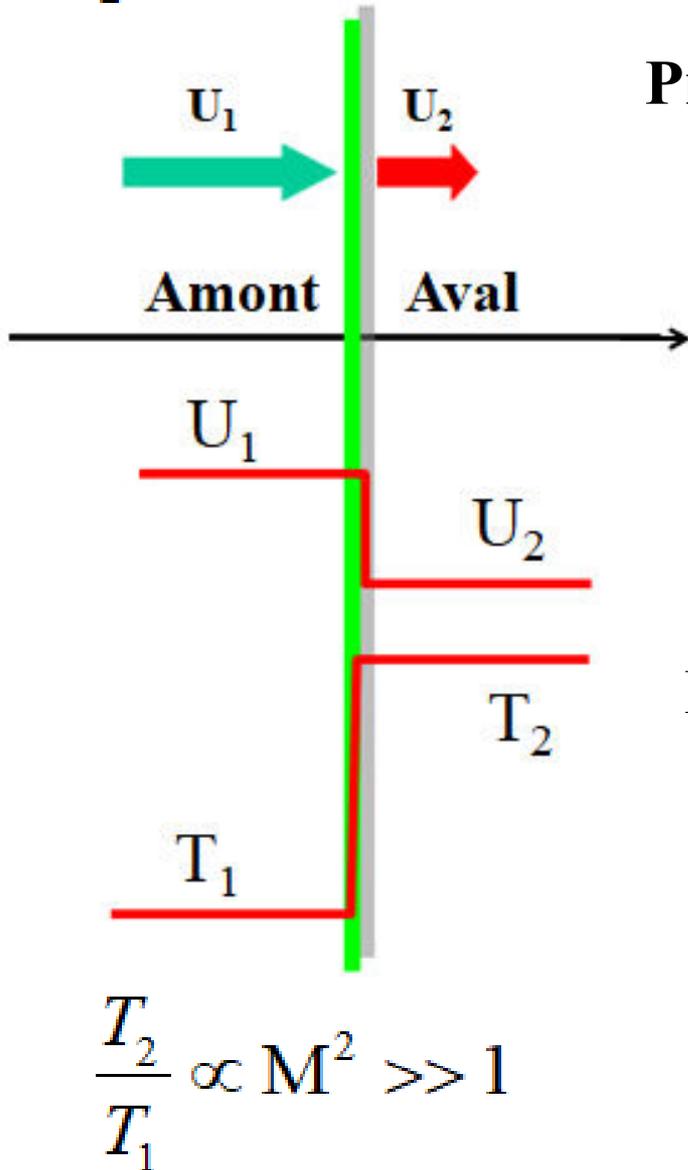
Mirrored magnetic



# Accélération dans les chocs

*Diffuse Shock Acceleration (DSA)*

$$\frac{U_1}{U_2} \rightarrow 4 \quad \gamma=5/3$$



**Processus de Fermi:** particules sans collisions (lpm  $\sim$  1kpc), sinon  $\rightarrow$  thermalisées

**Fermi I:** Mirroir magnétique

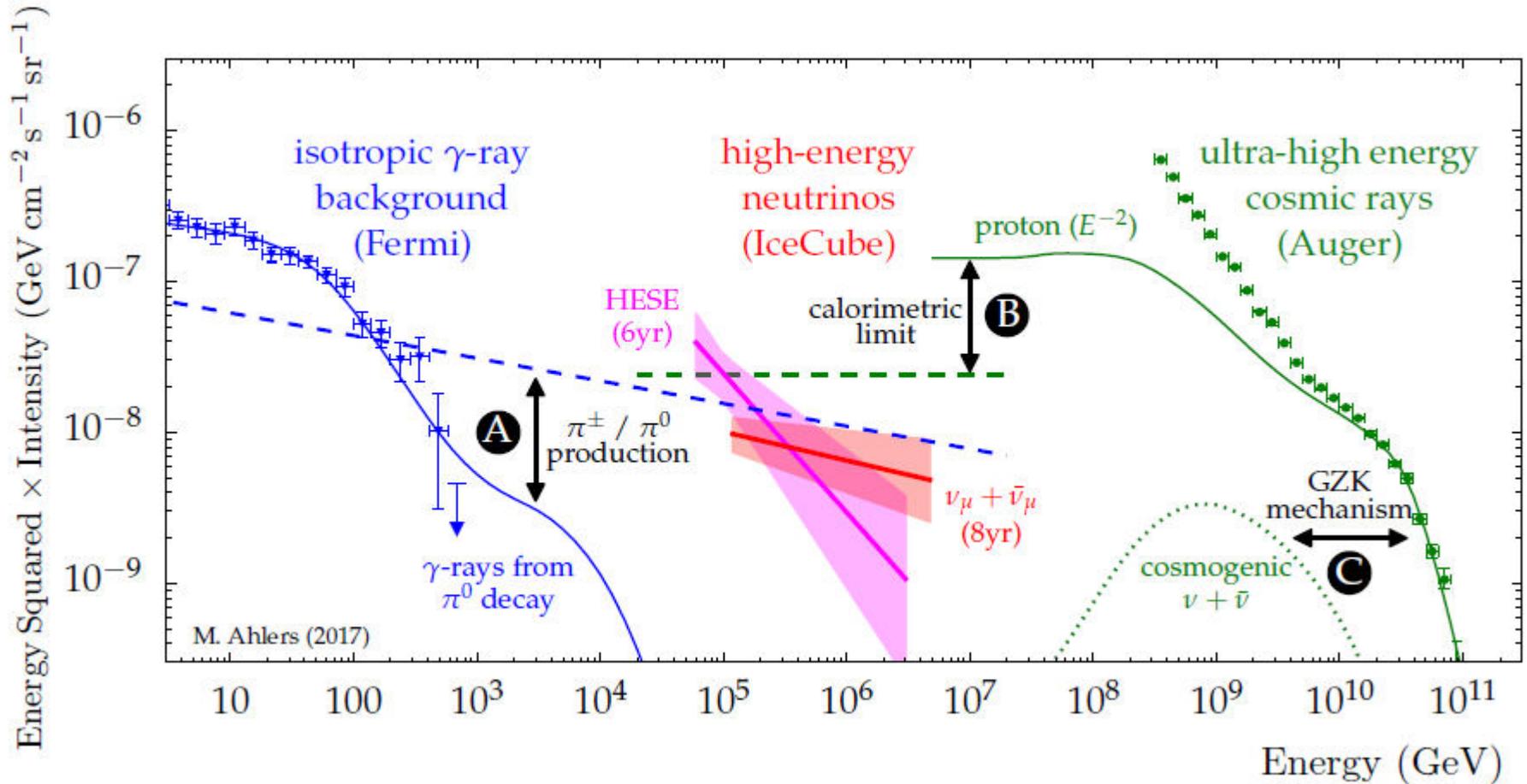
Reflections  $\rightarrow$  plusieurs traversées du choc  
gain d'énergie de  $\beta=(u_2-u_1)/c$  au 1er ordre

**Fermi II:** nuages magnétisés en mouvement  
Les miroirs magnétiques aléatoires  
(turbulence)

gain en énergie  $\sim \beta^2$

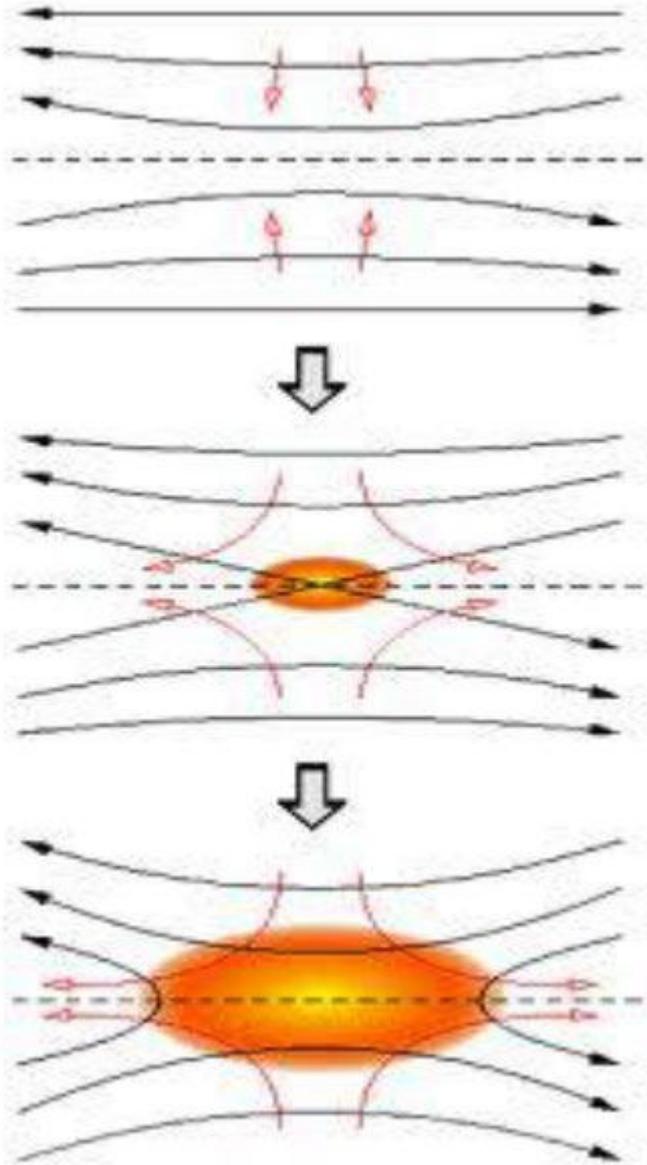
Processus de second ordre  
(Fermi 1949)

# Contraintes Multi-messagers



- A- CR interactions  $\rightarrow$  pions  $\rightarrow$   $\gamma$  et  $\nu$  ----
- B- CR  $\rightarrow$  limite en énergie des protons (-----)
- C- UHECR+CMB  $\rightarrow$   $\nu$  ----- cosmogenic

# Reconnection magnétique



Deux tubes de champ B de polar opposée  
s'approchent et se reconnectent  
Résistivité non nulle  $\eta \sim 1/\text{conductivité}$

## Paramètre de magnétisation $\sigma$

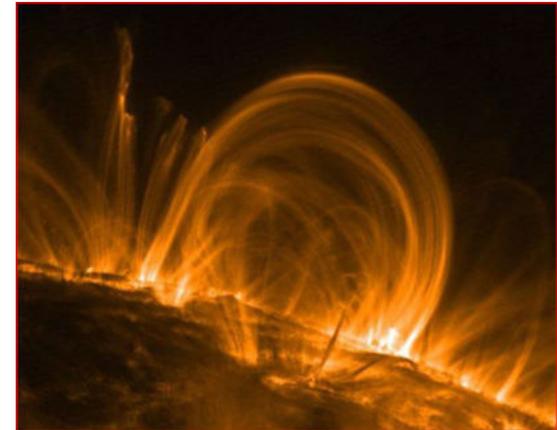
$$\sigma = B^2 / [4\pi (nmc^2 + P)]$$

Si  $\sigma \gg 1$  L'énergie de B est plus forte que  
Celle des particules

→ Le champ va accélérer les particules

$$v_A = c [\sigma / (1 + \sigma)]^{1/2} \sim c$$

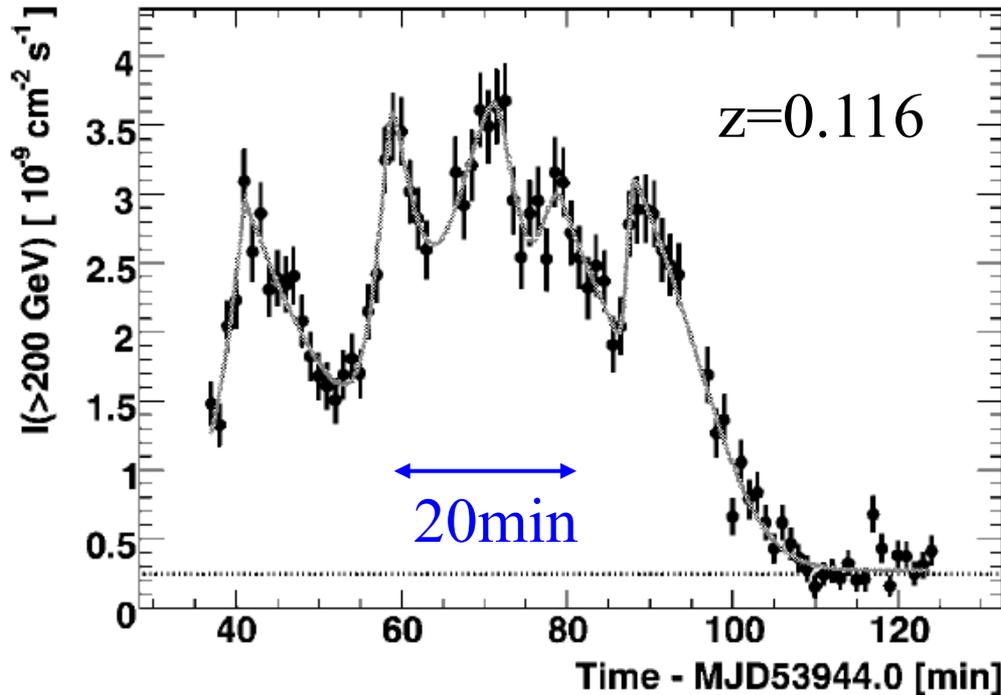
→ ultra-relativiste



# Accélération par reconnection

Fermi: processus lent -- Il existe dans les observations évidence de processus rapides → reconnection

E(part) linéaire en temps -- Fermi en (temps)<sup>1/2</sup>



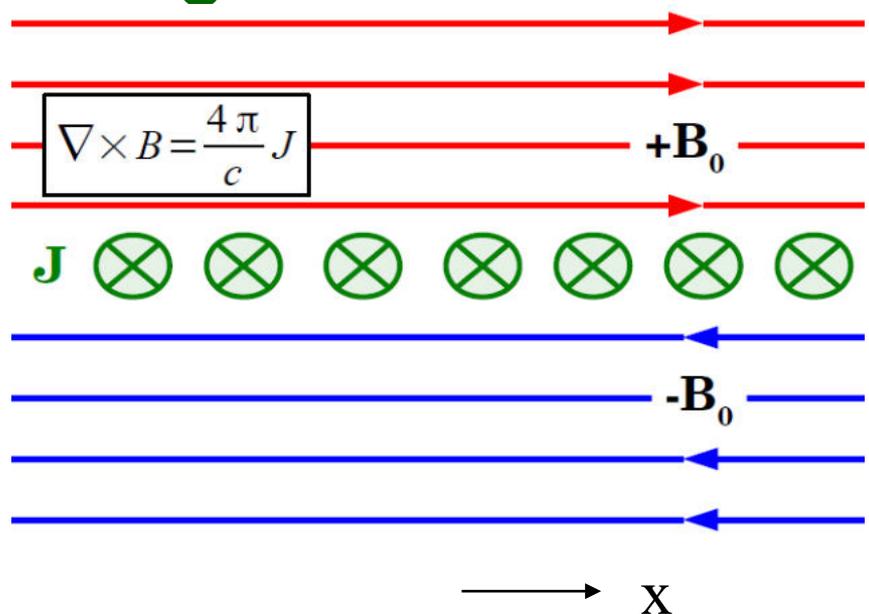
Blazar PKS2155-304  
Hautement variable sur  
une échelle de la minute  
Sursaut  $\times 10 I(>200 \text{ GeV})$   
5x rapide que Mrk421

Si taille  $R_s$  ( $M_{\text{BH}}=10^9 M_{\odot}$ )  
→  $D > 100$

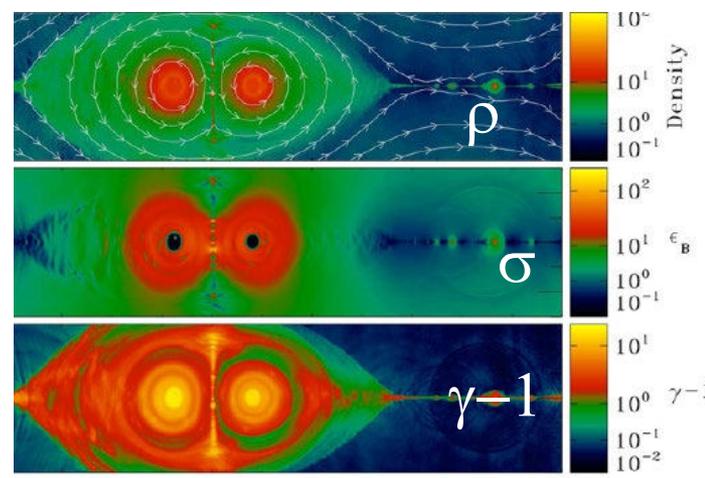
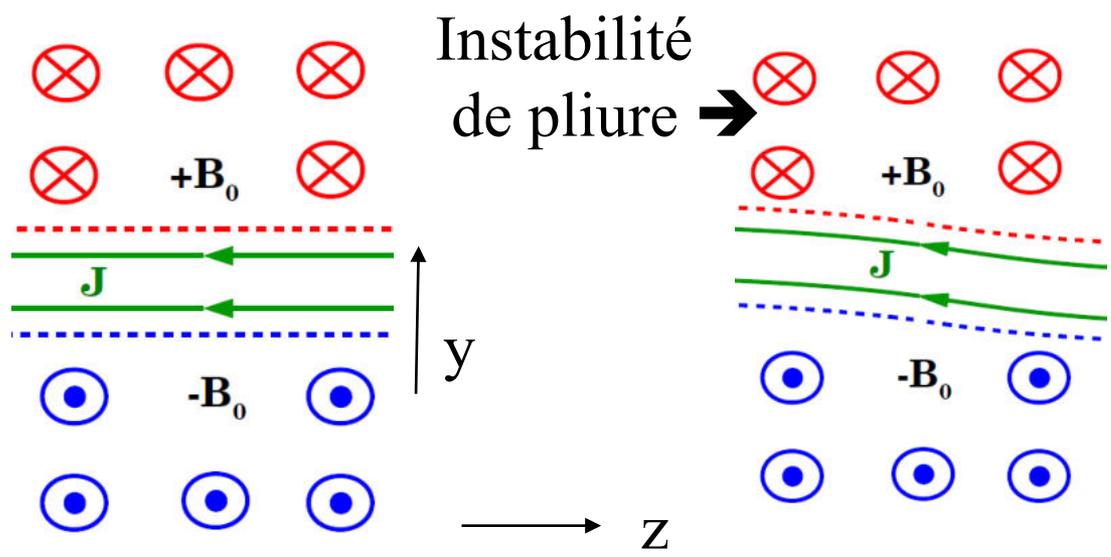
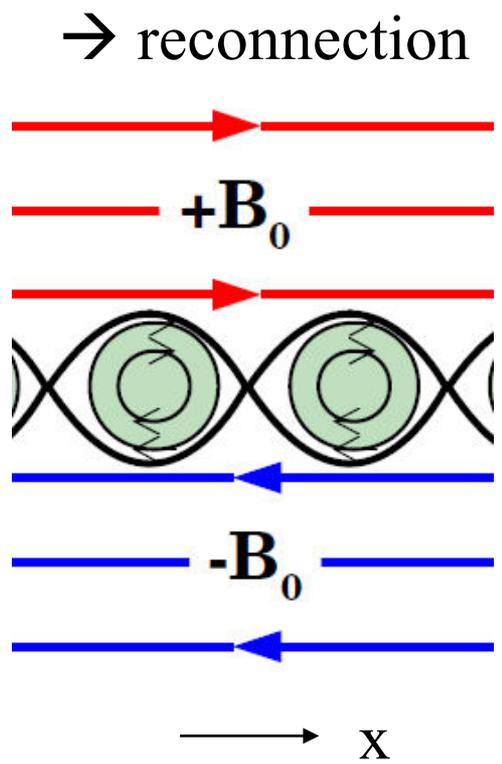
*HESS telescope (Namibie)*

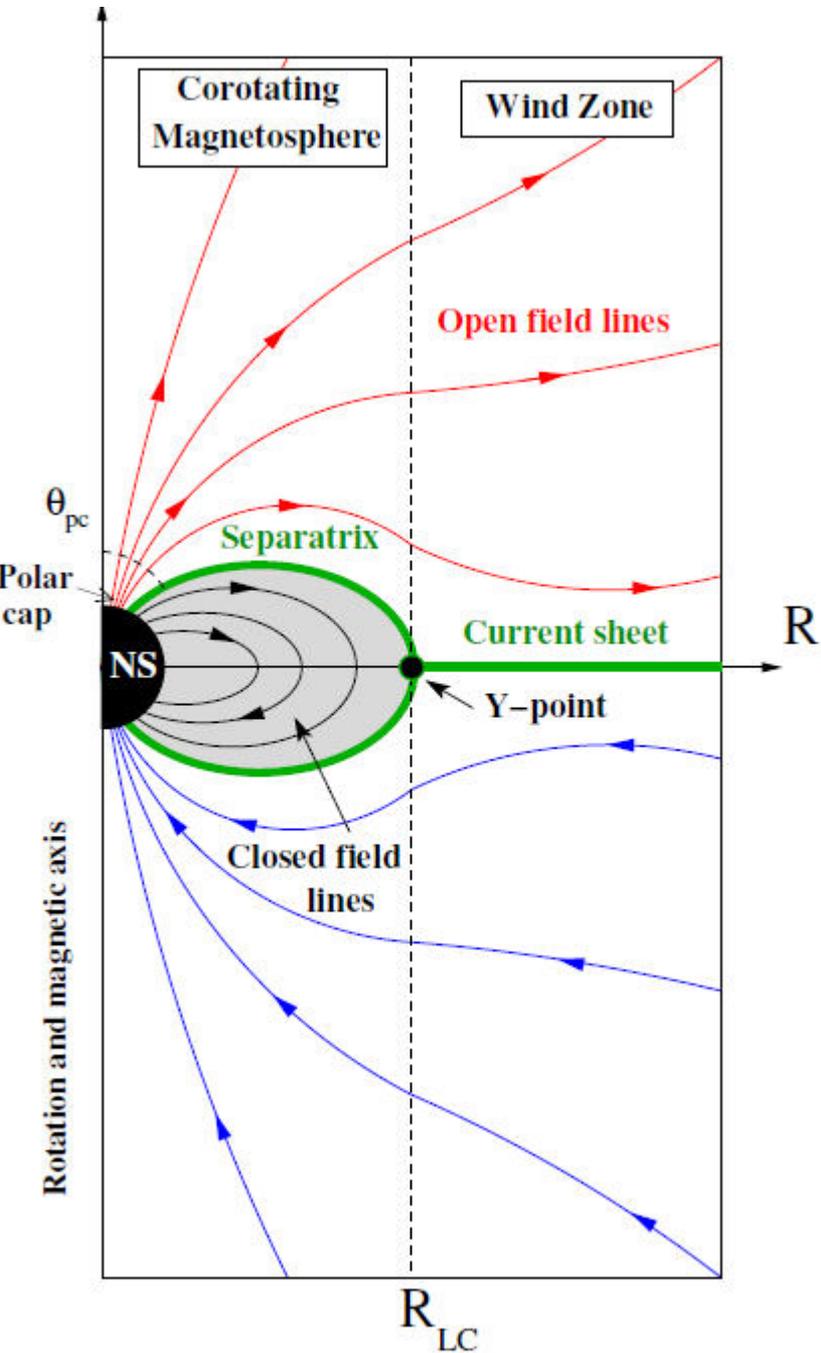
*Aharonian et al 2007*

# Configurations

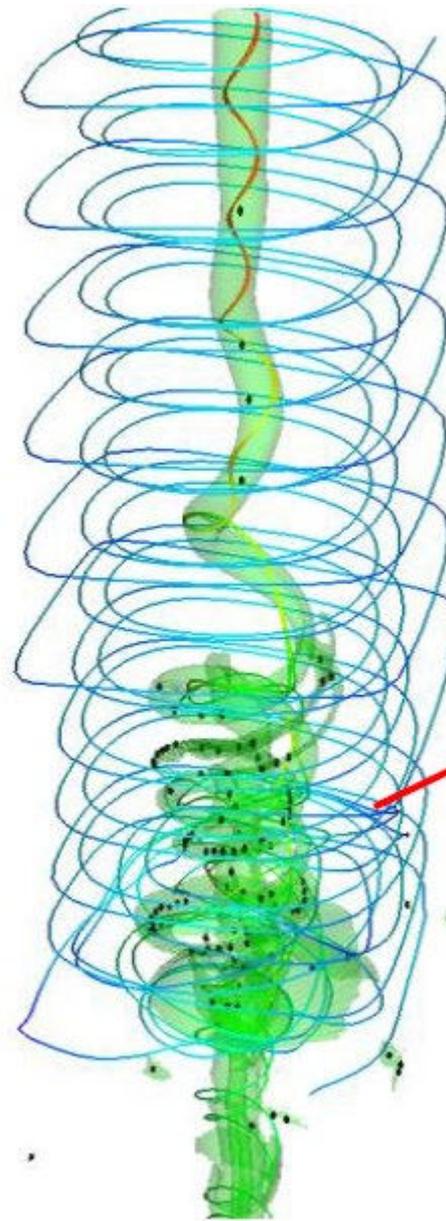


Instabilité de cisaillement →





*Cerutti & Beloborodov 2017*



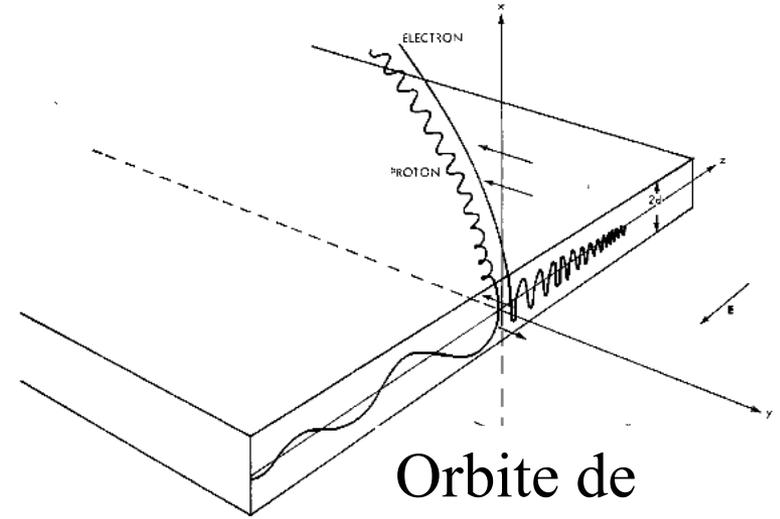
**Nappe 2D de courant (pulsar) ou bien jet (1D)**

**Reconnection et Accélération de particules**

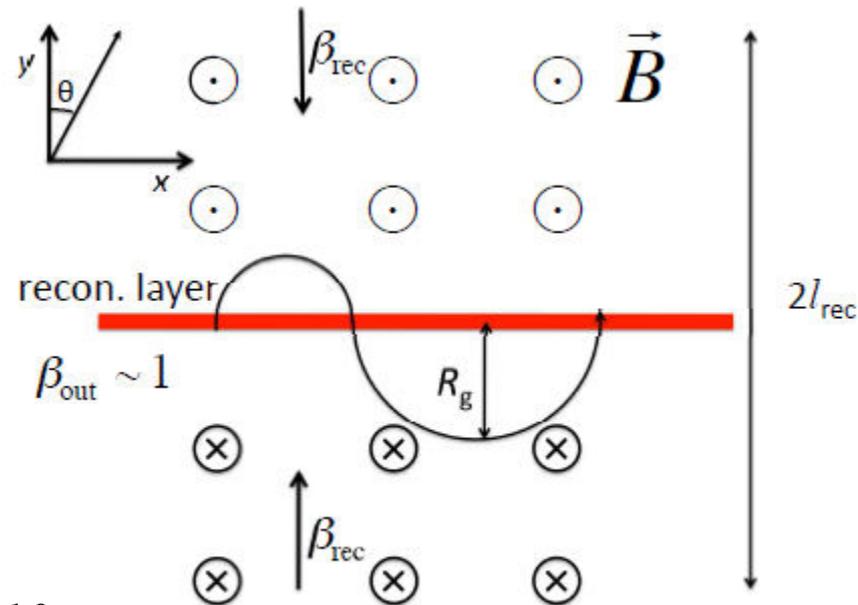
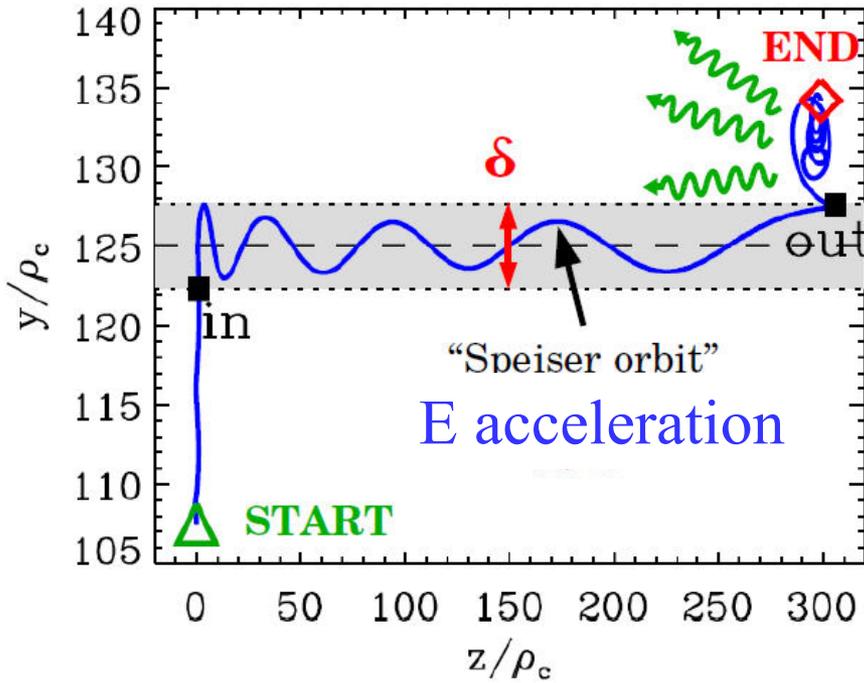
*Singh et al 2016*

# Reconnection magnétique

Les particules sont directement accélérées par le champ  $E$ , dans la nappe de courant, puis éjectées



Orbite de Speiser (1965)

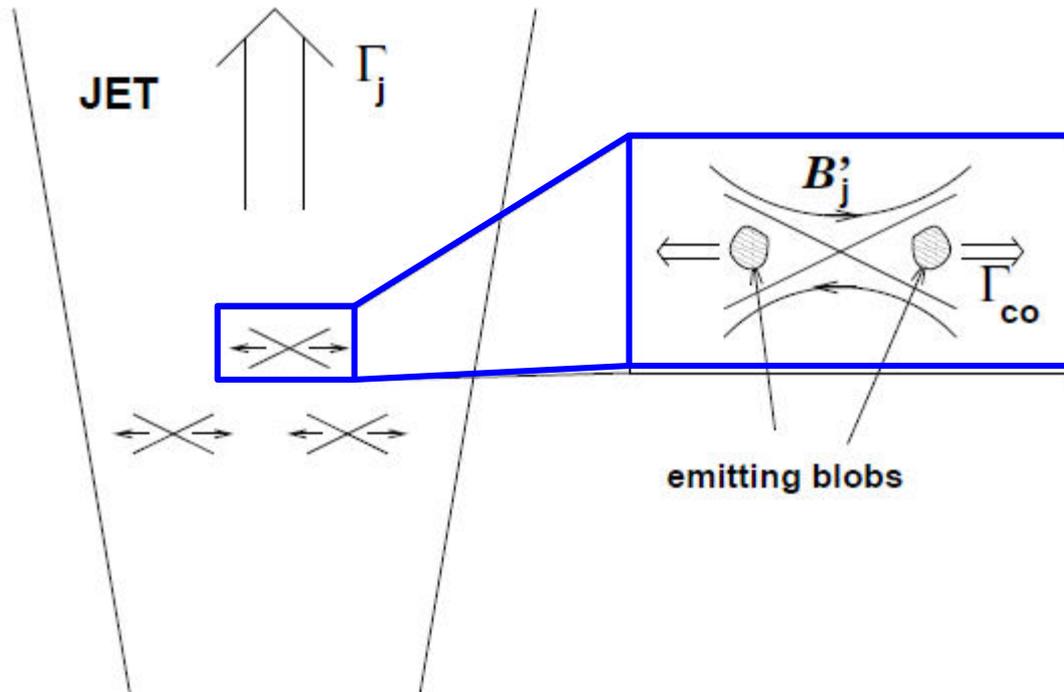


# Un jet dans le jet

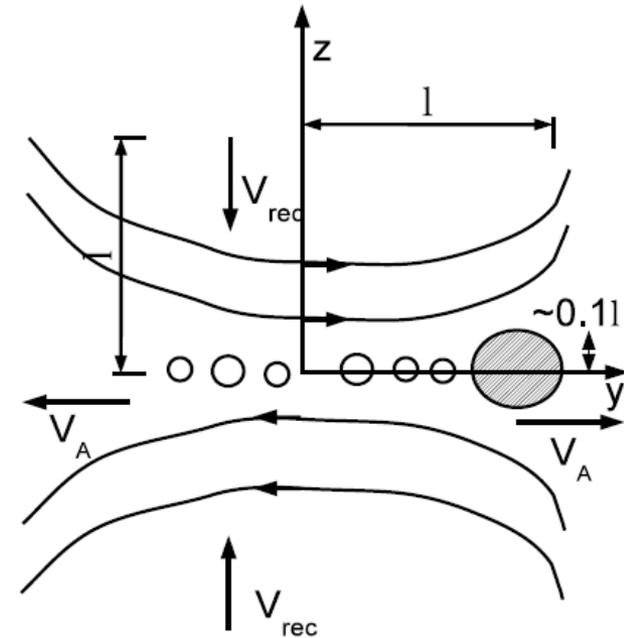
Pour expliquer la variabilité  $\Gamma \sim 100$ , mais  $\Gamma_{\text{jet}} < 10$

Il faut des fragments compacts avec  $\Gamma \sim 100$  dans le jet principal

Émettant synchrotron, self-Compton, X et  $\gamma$



*Giannios et al 2009, 2013*



$$V_{\text{rec}} \sim V_A = B/(4\pi\rho)^{1/2}$$

# CR, gamma et neutrinos

Les UHECR sont à l'origine des  $\gamma$  &  $\nu$  de très haute énergie

$p + \text{photon} \rightarrow \pi + p$  (processus hadronique)

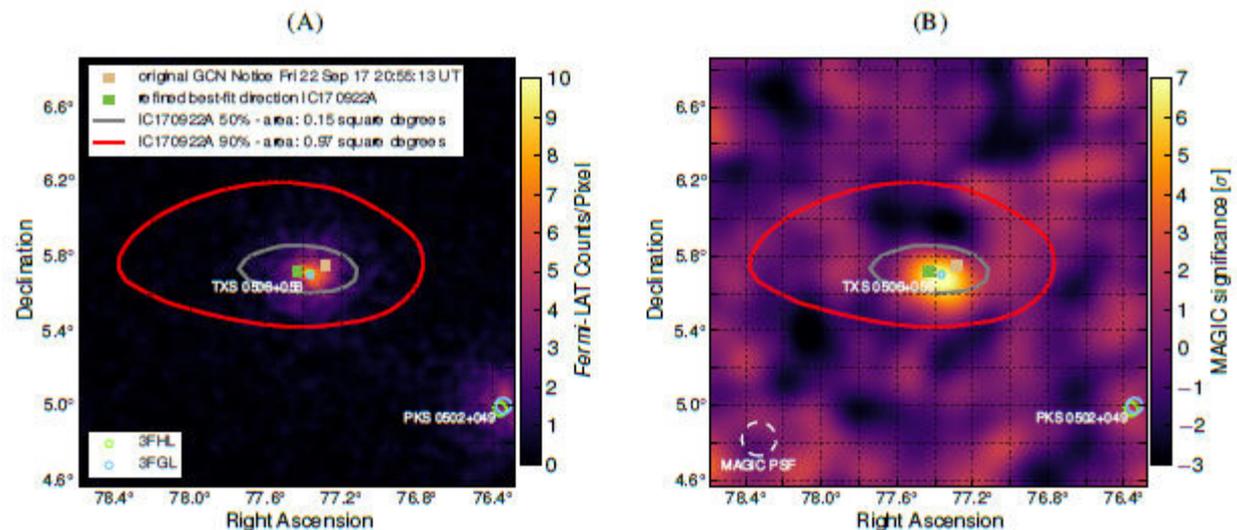
$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu$

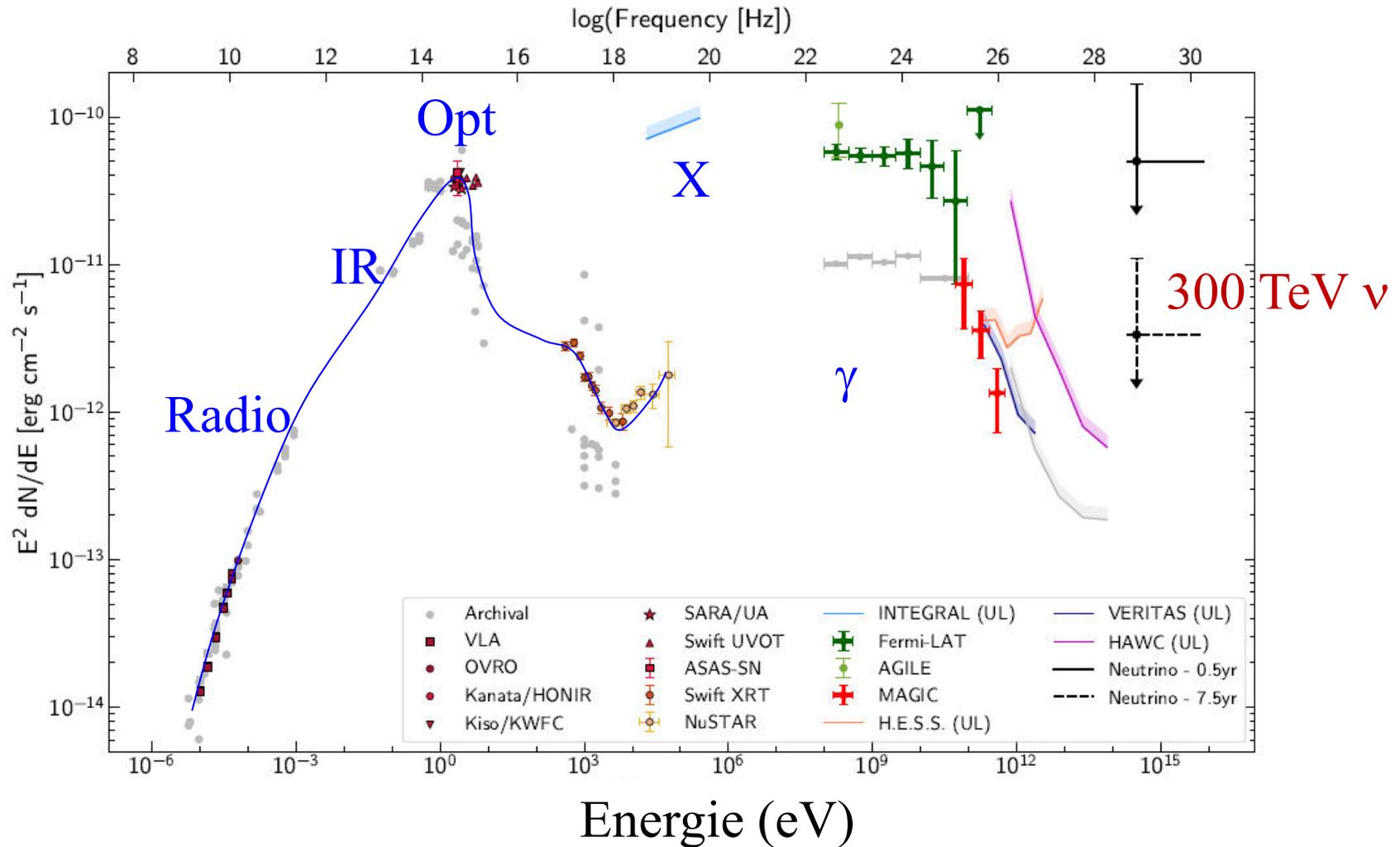
En sep 2017, detection d'un  $\nu$  de 300 TeV  
vers le blazar TXS 0506+056

Coincidence avec radio  $\leftrightarrow$  gamma

IceCube-170922A



# Spectre multi-longueur-d'onde



# Résumé

Plusieurs milliers de blazars connus

Surtout rayons  $\gamma$ , puis toutes longueurs d'onde

CR haute énergie, neutrinos

facteur Doppler  $D = 5- 100$

Energie dans le jet  $\sim$ disque d'accrétion

SSC synchrotron,-self-Compton

(leptonique, hadronique)

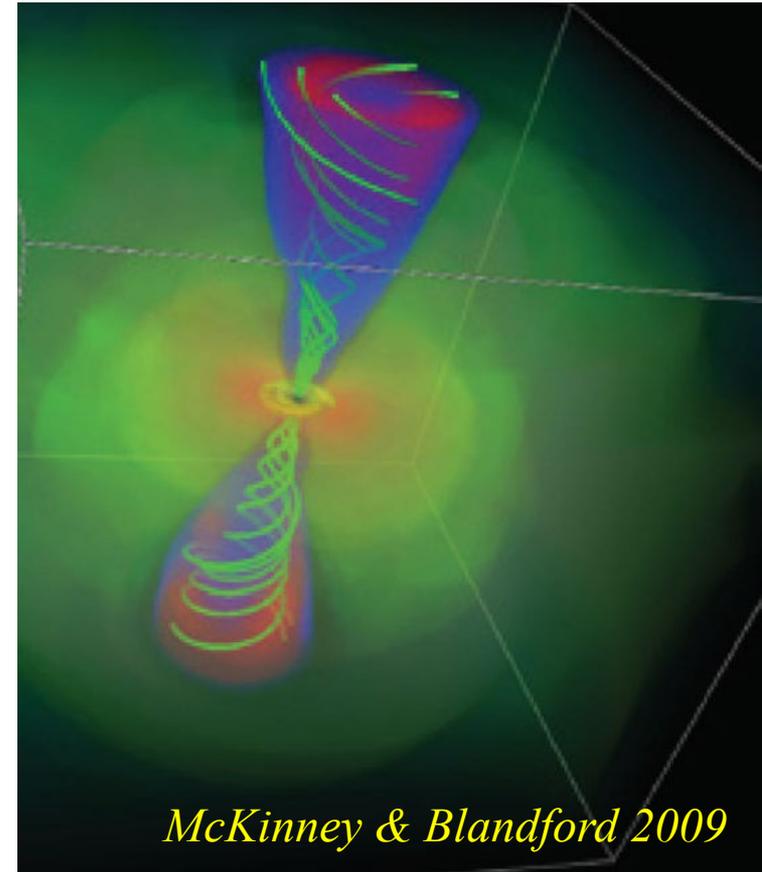
Les phénomènes variables accentués,

Dissipation à 5000  $R_g$

→ Phénomènes magnétiques, collimation

→ Instabilités (plis): courant/jet plasma

→ UHECR, accélération de particules



*McKinney & Blandford 2009*