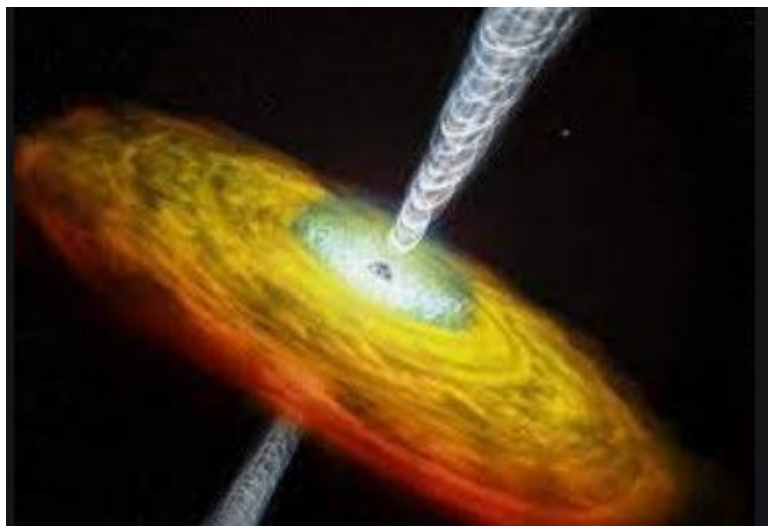




COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

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

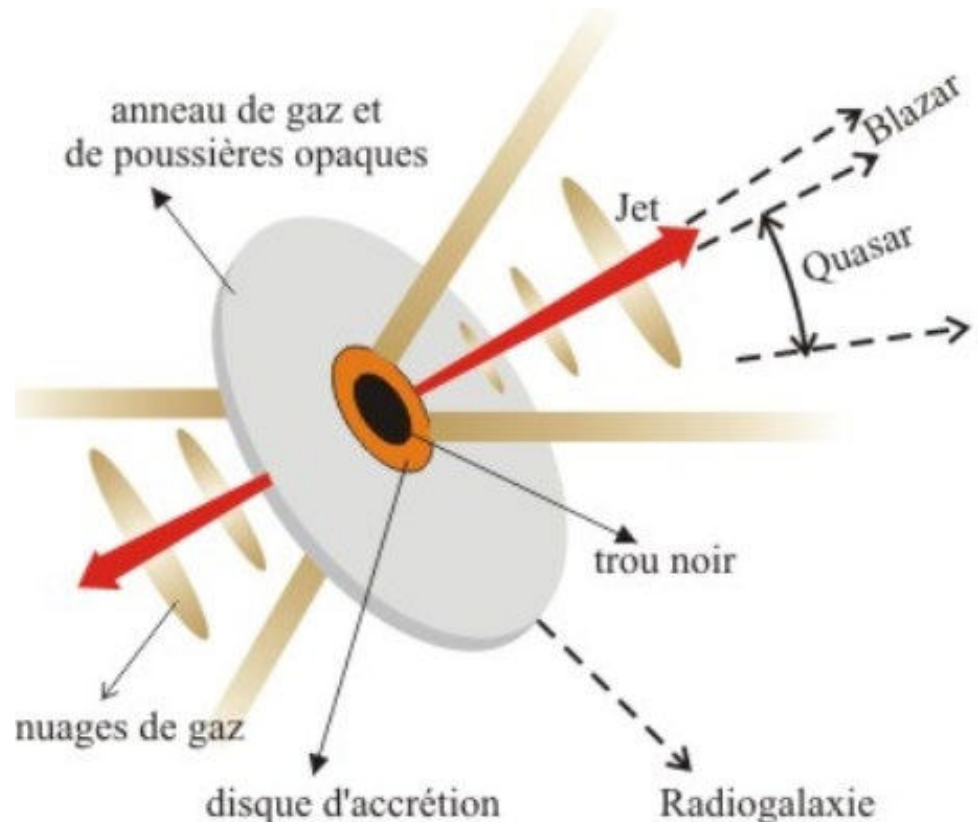
→ Bl Lac une « étoile variable » identifiée en 1929 par Cuno Hoffmeister

→ 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

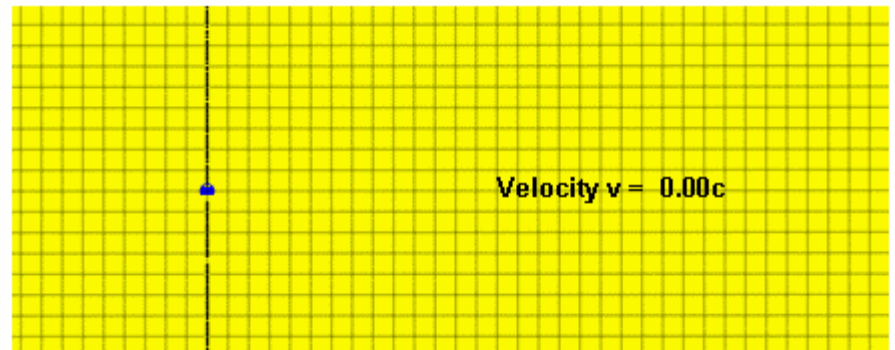
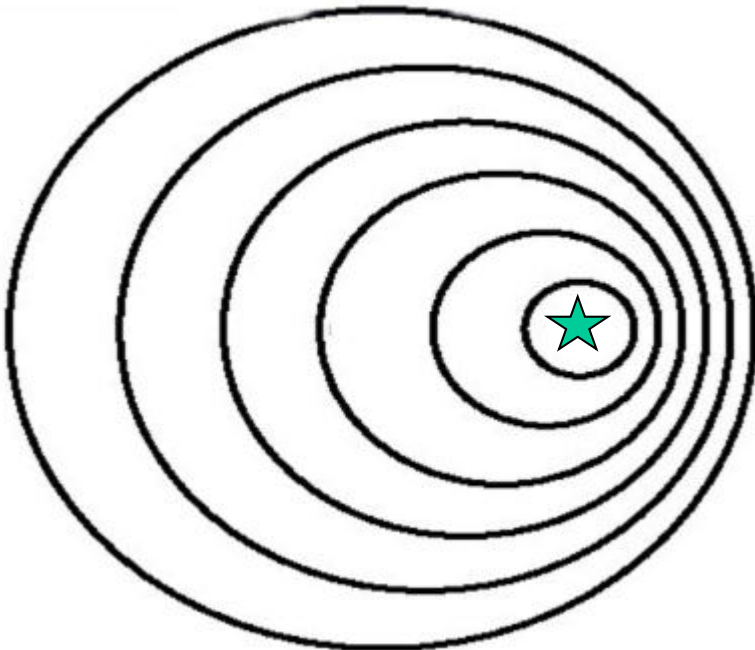
Fréquence décalée $\beta=v/c$

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

pour $\cos(\theta) = 0$

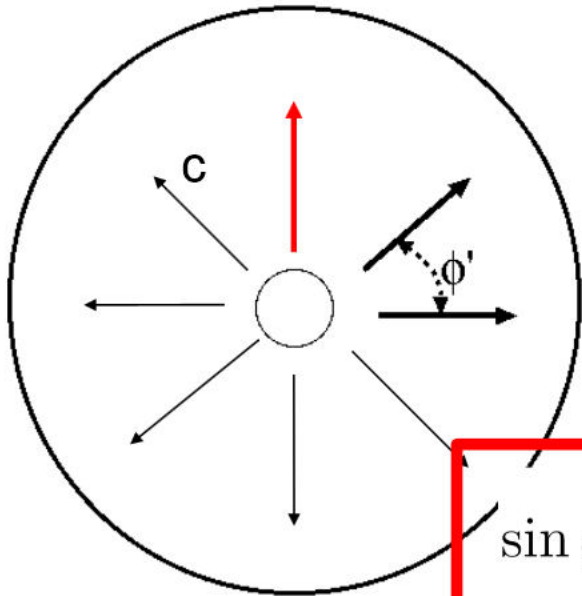
+ Aberration de la lumière

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

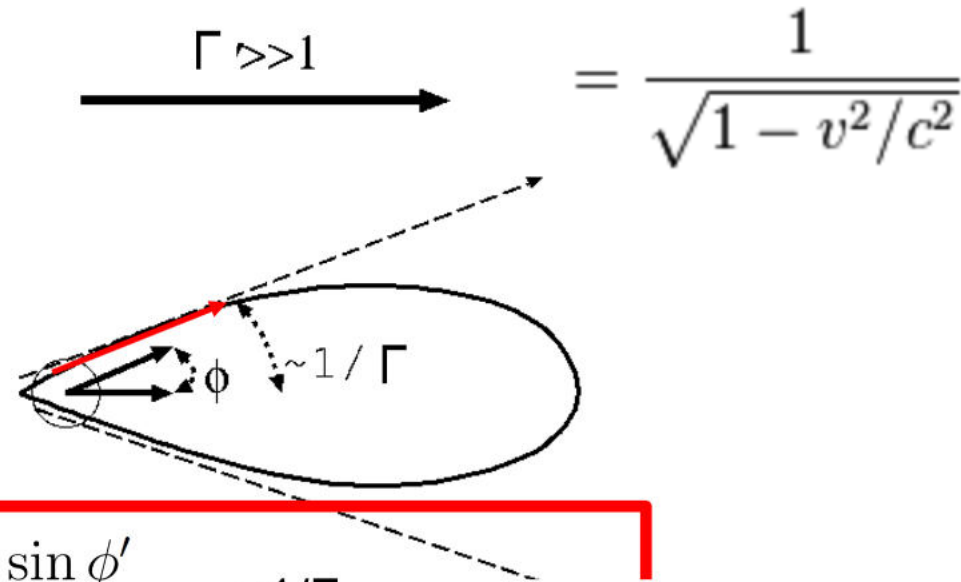


Aberration relativiste, Doppler boost

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

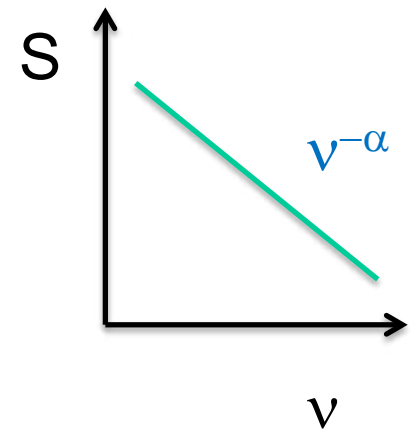
Facteur Doppler $D = \frac{1}{\Gamma(1 - \beta \cos \theta)}$ $\Gamma \sim 5$ $v/c \sim 0.98$, $D \sim 9.9$
 $\theta \sim 10^\circ$

→ 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 / ν^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 Γ jusqu'à 100, $D \sim 200$, et $D^4 \sim 16 \cdot 10^8$!!

→ Les sources γ extra-galactiques sont presque toutes des blazars

Variabilité et taille

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

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

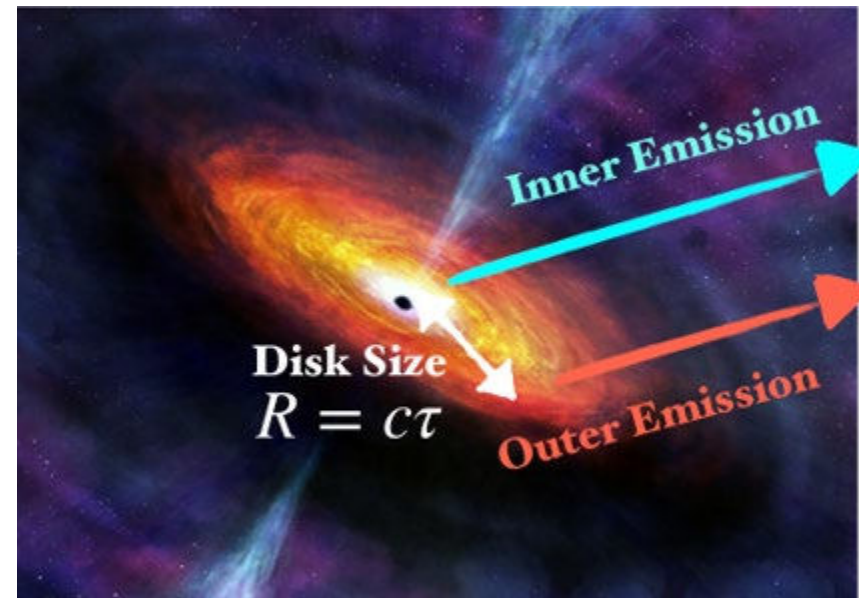
→ Les blazars sont très variables, même sur des échelles heures-jours

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!

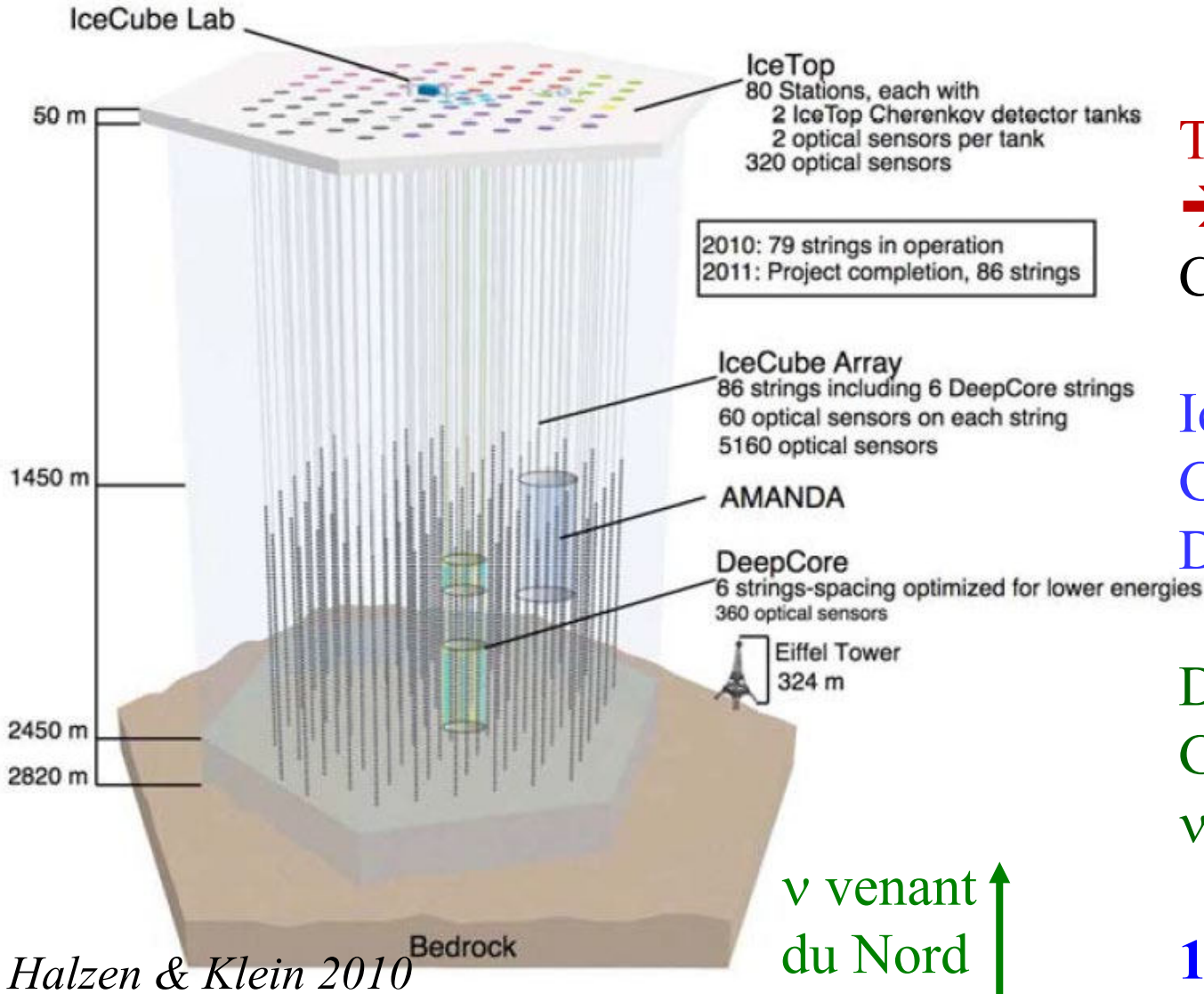
Délai entre optique et radio

→ pc, années-lumière



Ice-cube et les neutrinos

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



Trajectoire des ν

\rightarrow Source

Coincidence avec γ

Ice-top Cherenkov

Gerbes CR

Distingue μ d'en haut

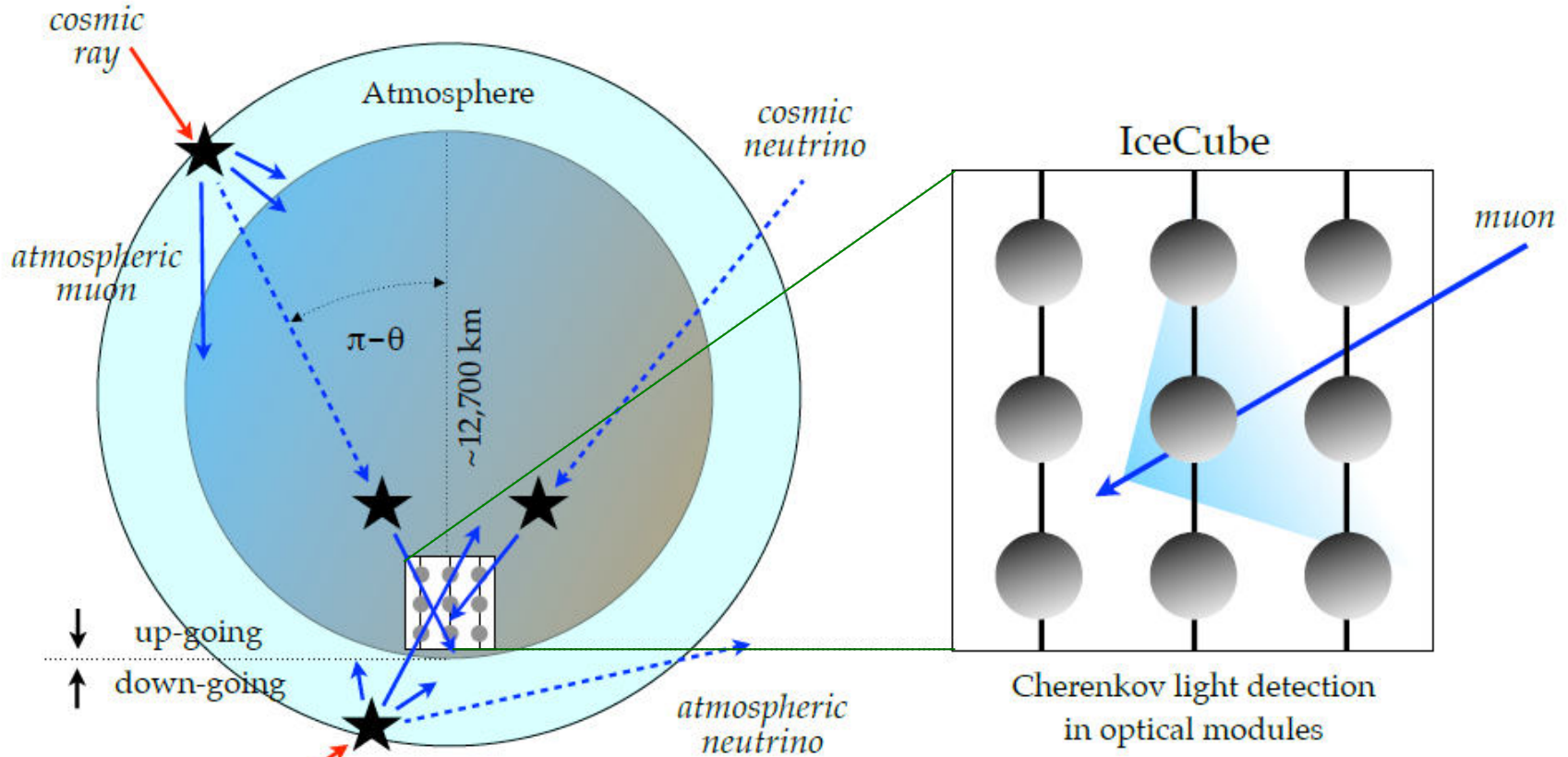
Deep core

Glace claire

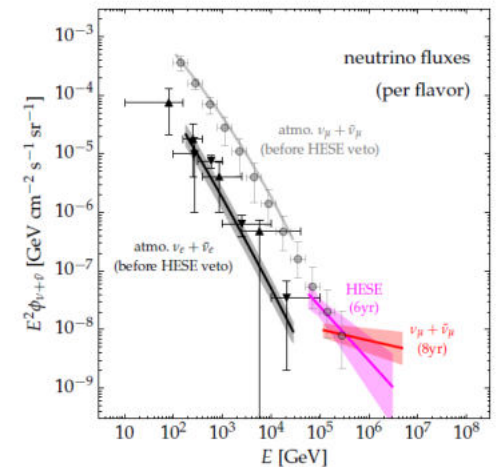
$\nu < 100 \text{ GeV}$

1 Tb /jour

Séparation des neutrinos atmosphériques, avec les muons →



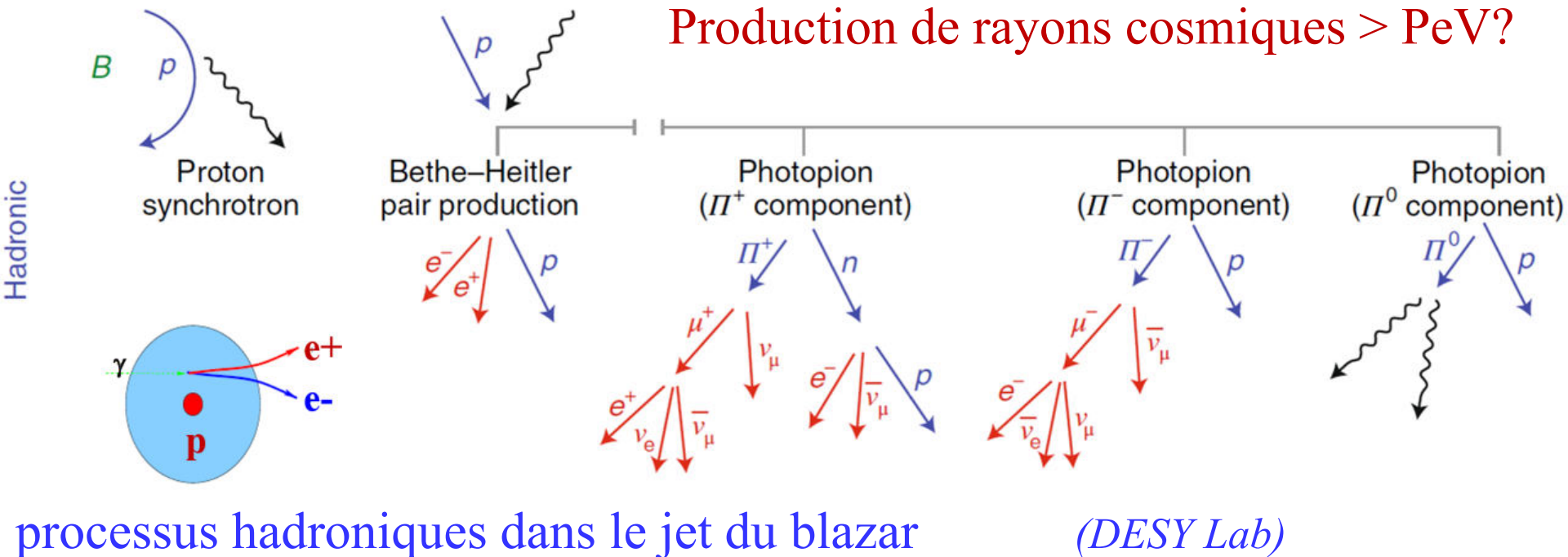
A haute énergie, les neutrinos cosmiques dominant



Détection de neutrinos + gamma

Ice-Cube collabore avec les satellites Swift, et Fermi, sources:
Sursauts γ (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

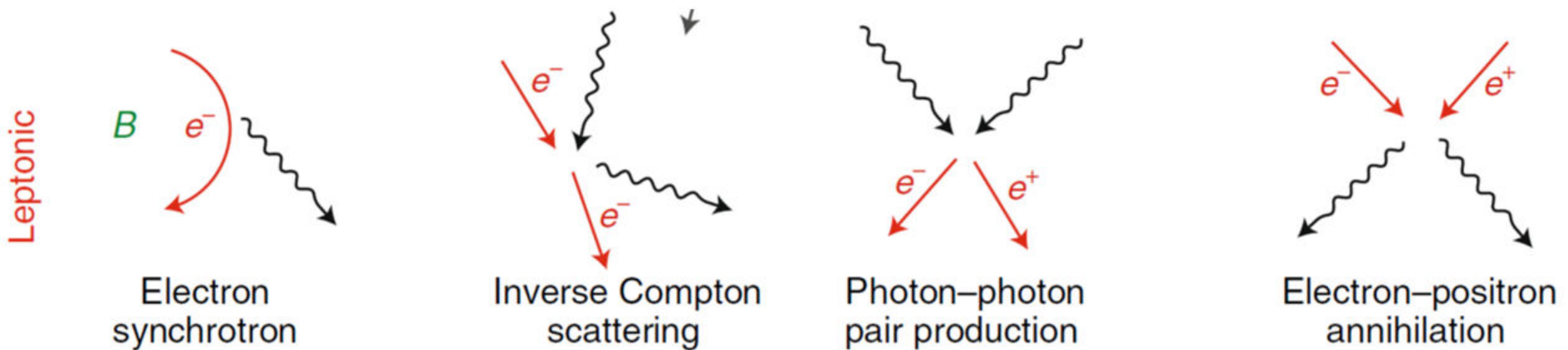
Ice-Cube détecte en 2017 un neutrino de 300 TeV

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 γ

→ 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)

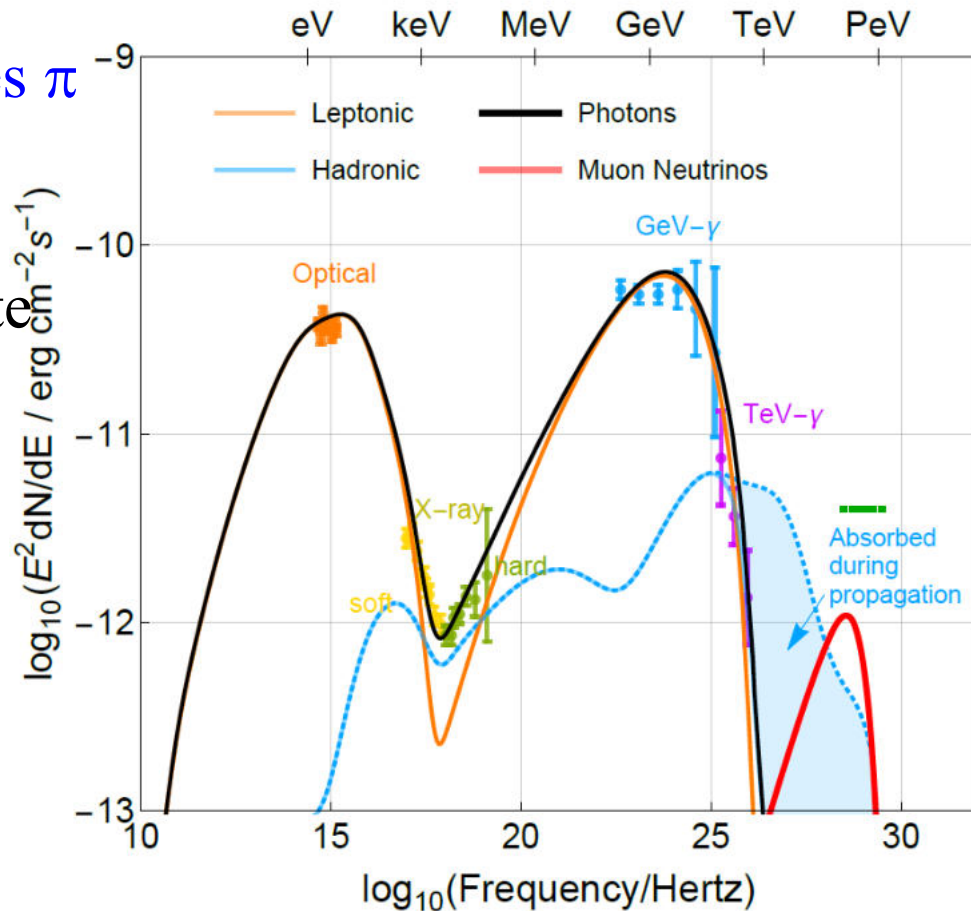
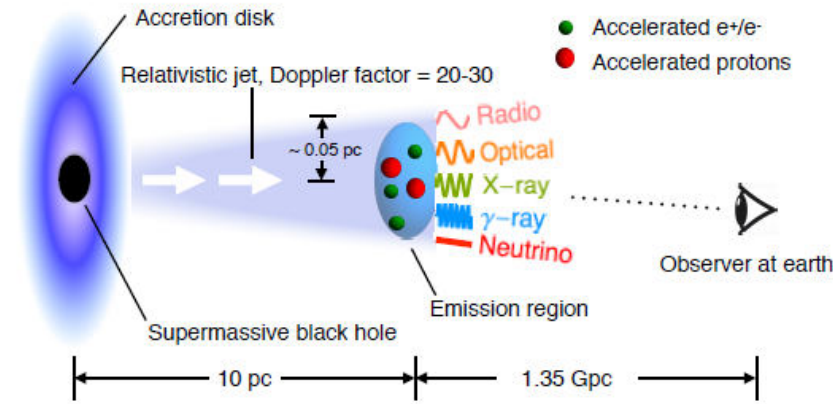
Modélisation TXS0506+056

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

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

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

\rightarrow Contraintes EBL 10-100 μ



Variabilité

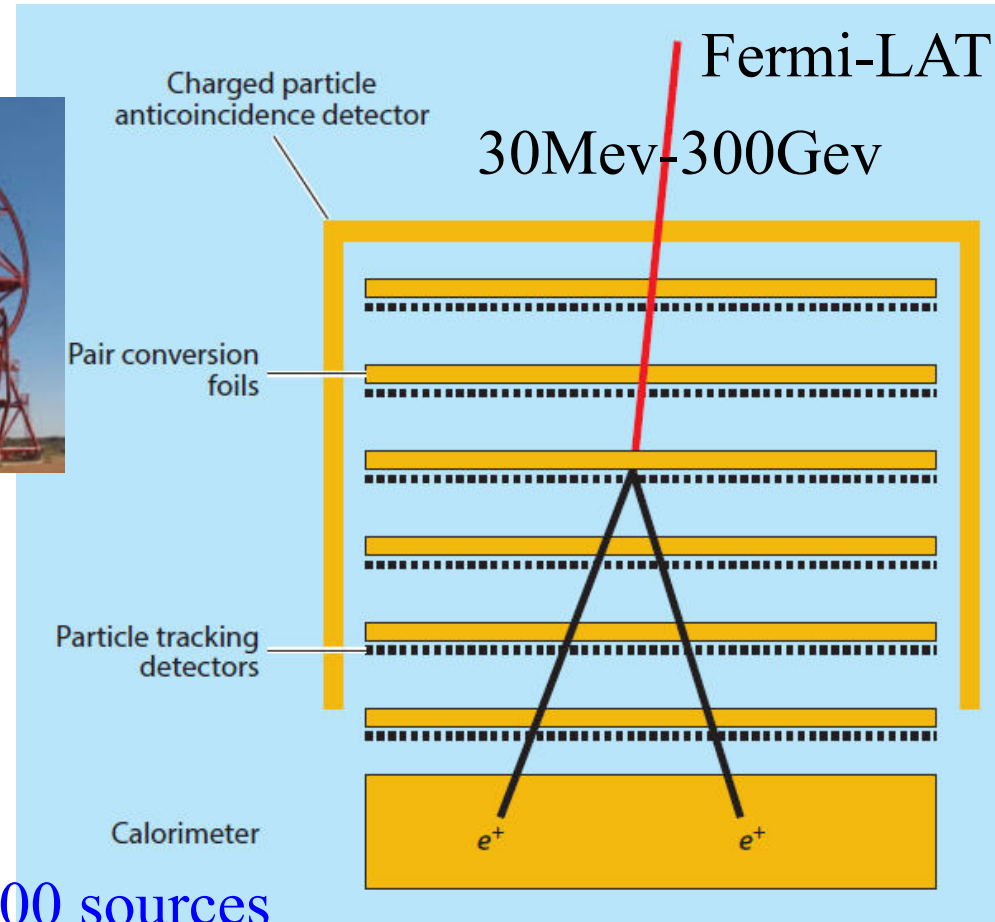
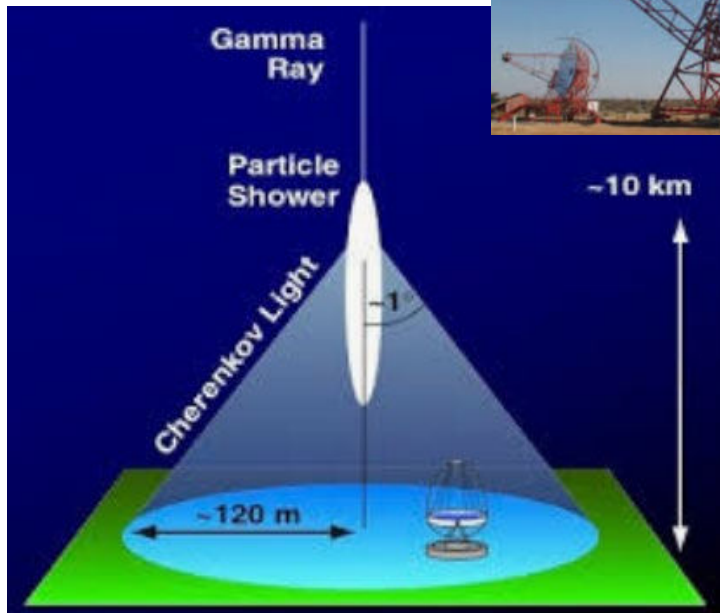
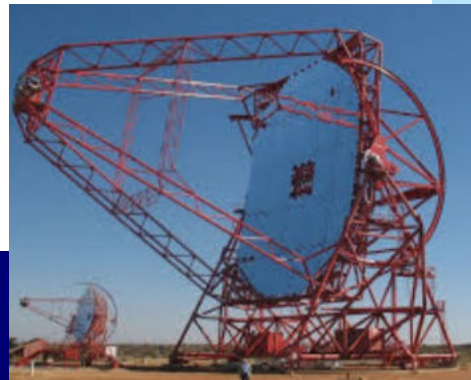
Grande variabilité, facteur 2 sur des échelles d'heures et jours

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

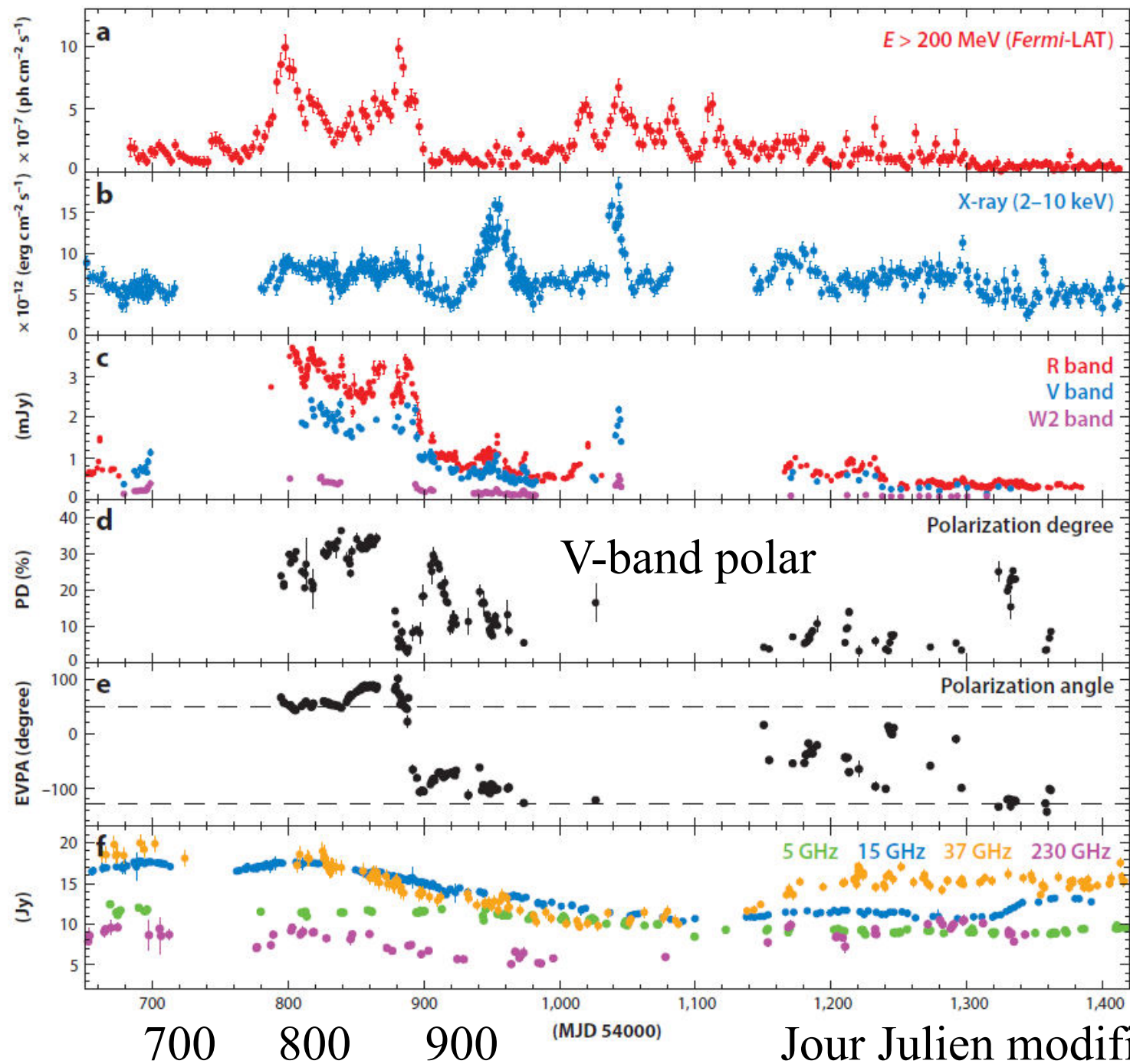
Dans l'espace, EGRET (GRO), Fermi LAT (Large Area Telescope)

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

MAGIC, HESS, bientôt CTA



~2000 sources



3C279
Blazar
Variable à
tts longueurs
d'onde

*Madejski &
Sikora-2016*

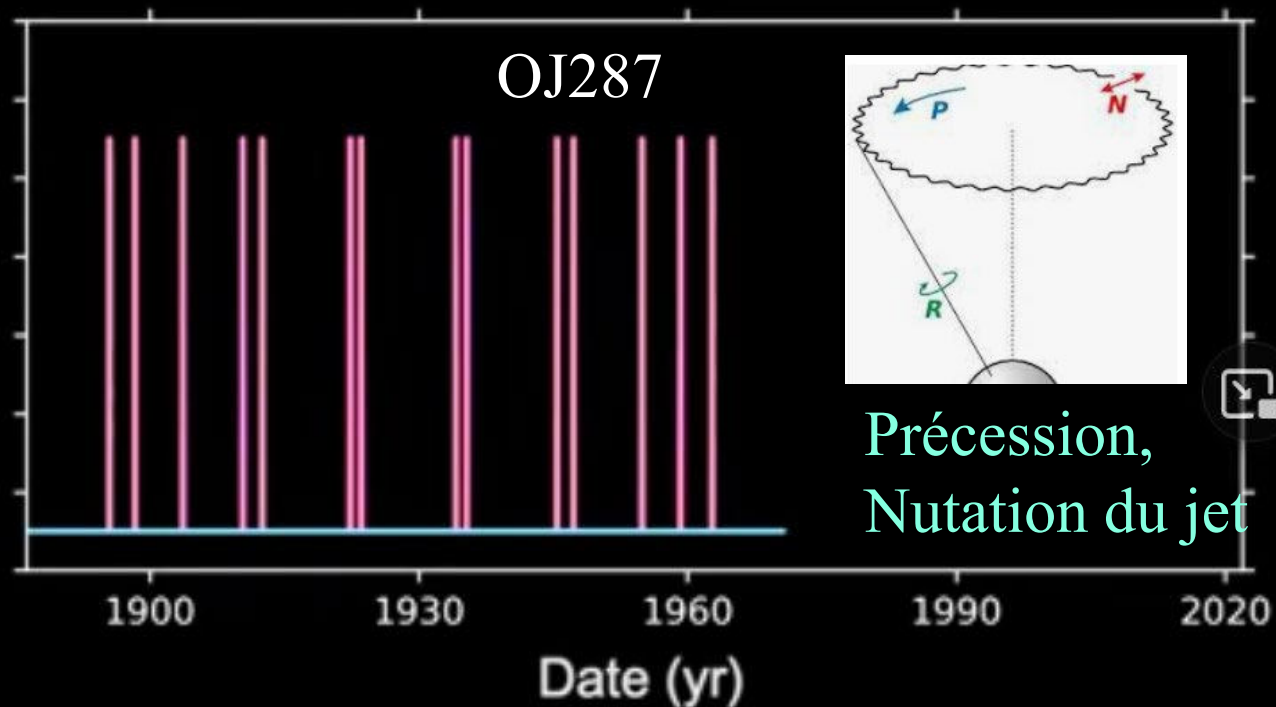
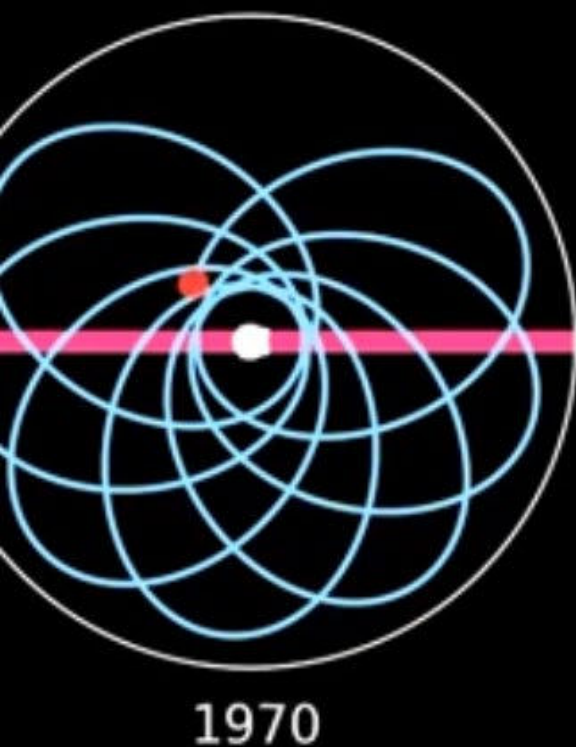
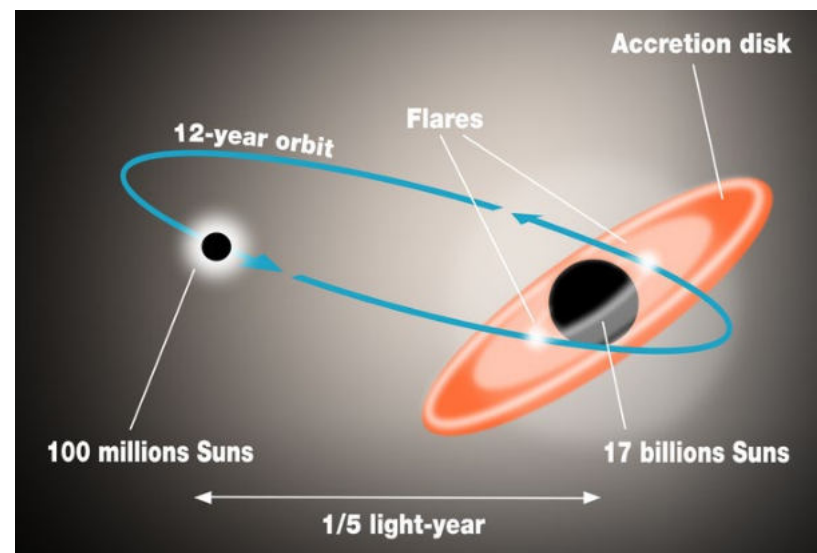
Jour Julien modifié -54000

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

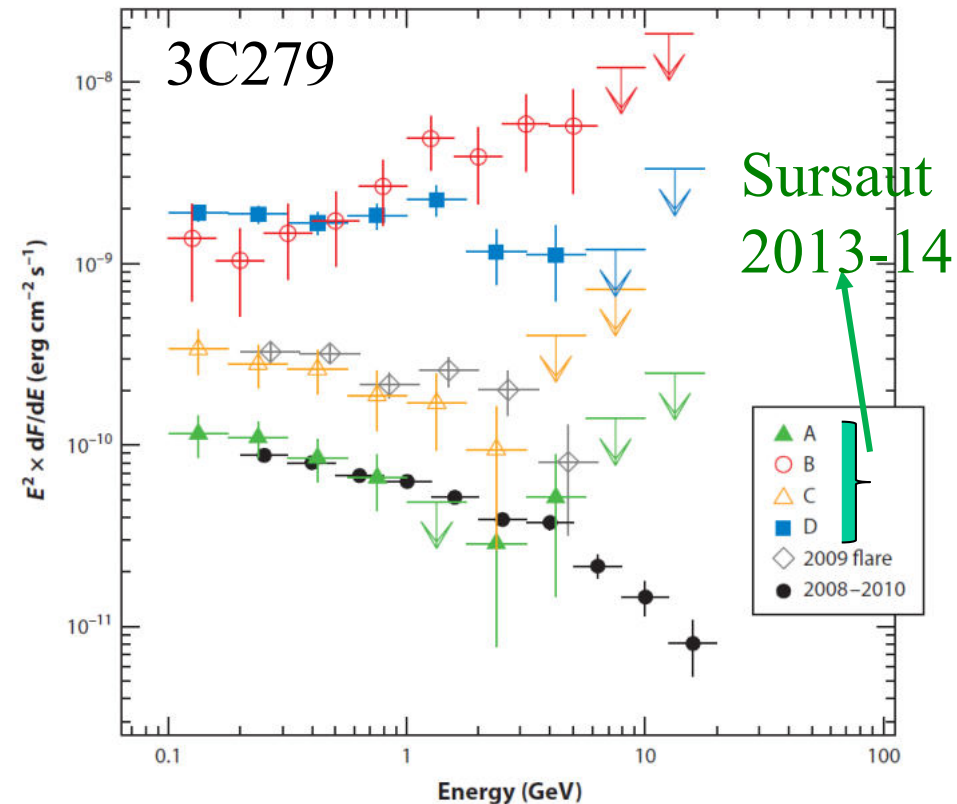
LBL « low » synchrotron peak. Spectre gamma mou, qqes raies d'émission, Forte luminosité (Radio quasar, spectre plat FSRQ)

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%)

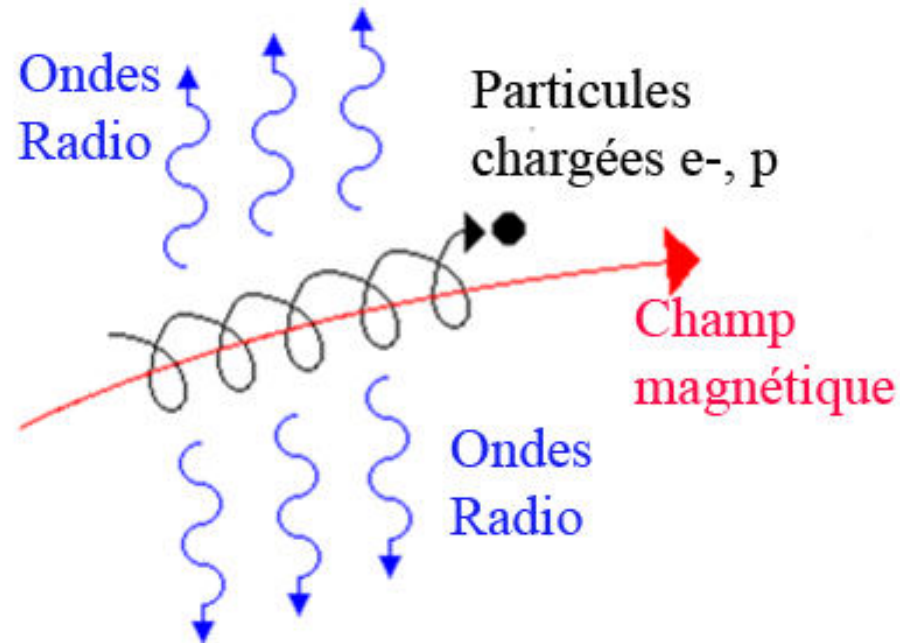
rayonnement émis par des électrons en mouvement relativiste dans un champ magnétique
Pour un électron d'énergie

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

la fréquence caractéristique d'émission vaut

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

Avec B en Gauss



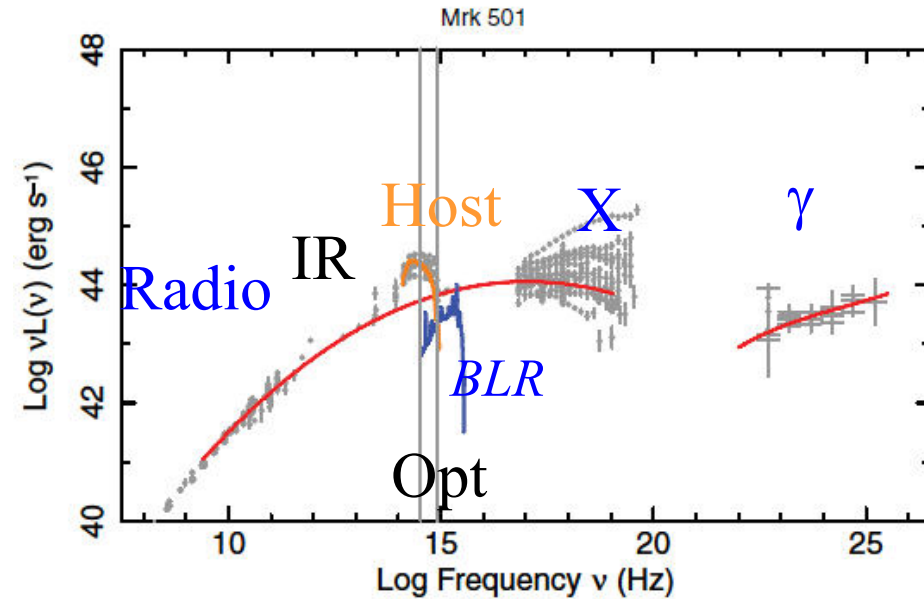
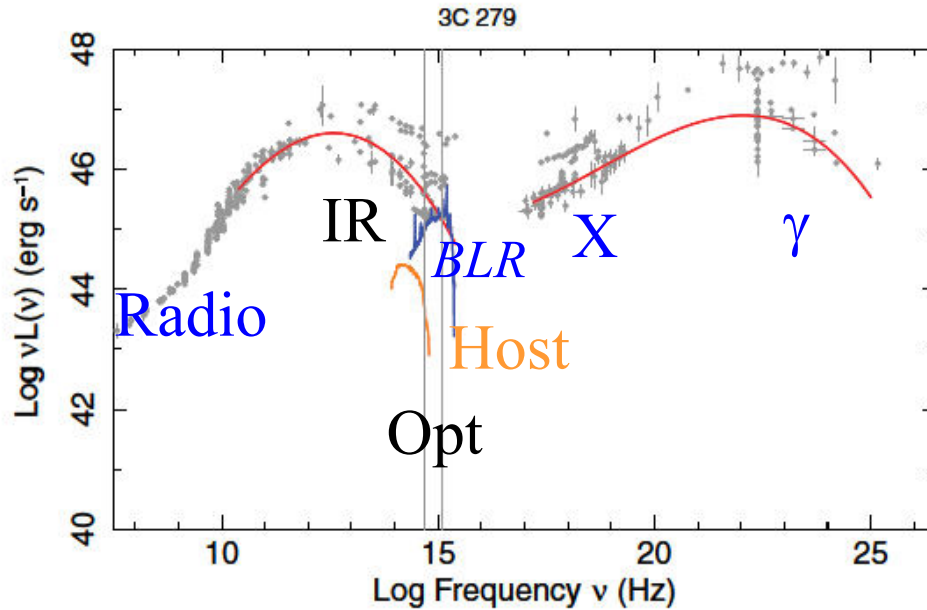
Fréquence du pic synchrotron

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



LSP: Low Synchrotron Peak

HSP: High Synchrotron Peak

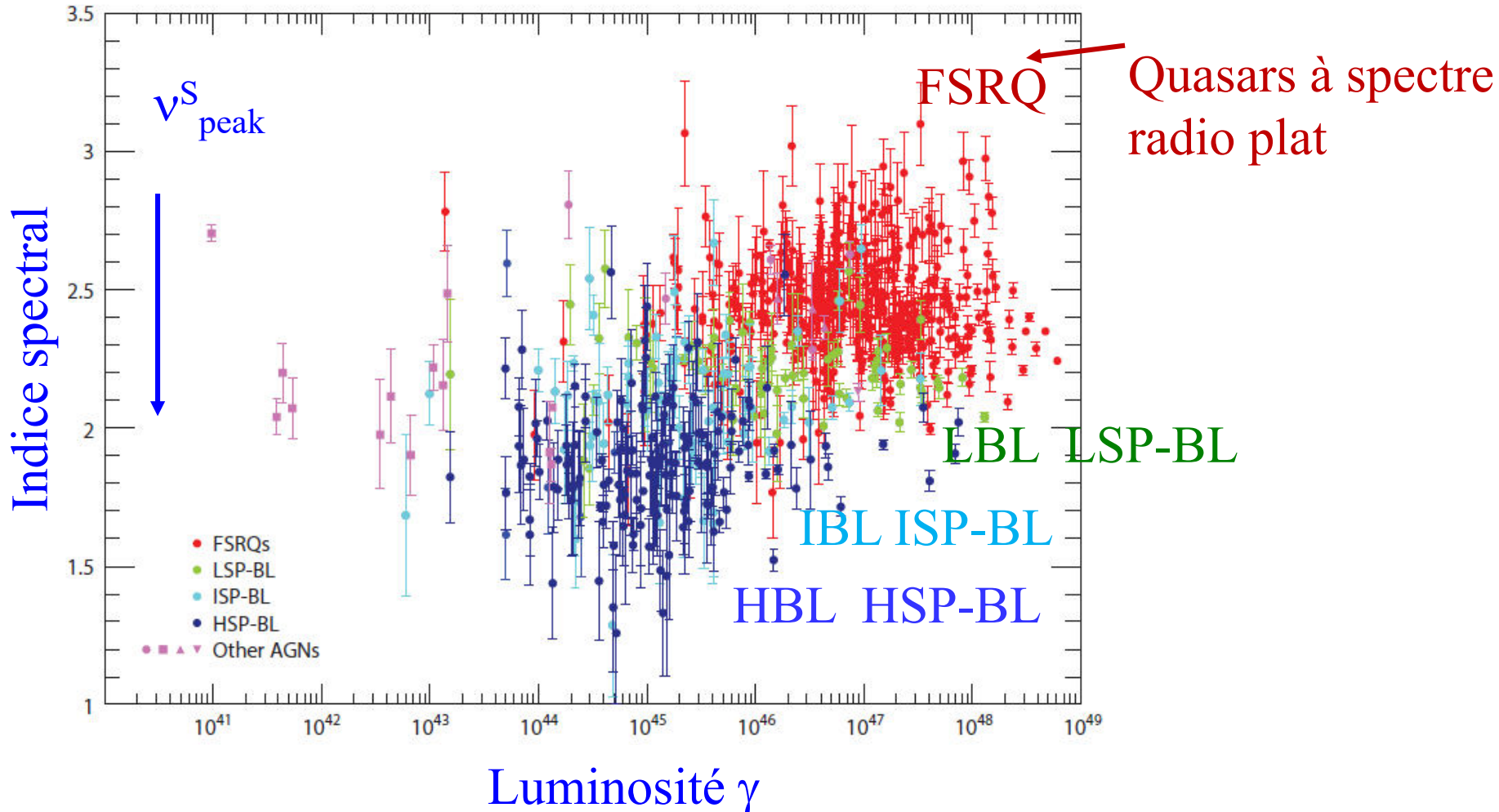


La contribution de la **galaxie hôte** est dominée dans le cas forte luminosité \rightarrow LBL

La séquence des blazars

Anti-corrélation entre ν^S_{peak} et la luminosité: effet de sélection?

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

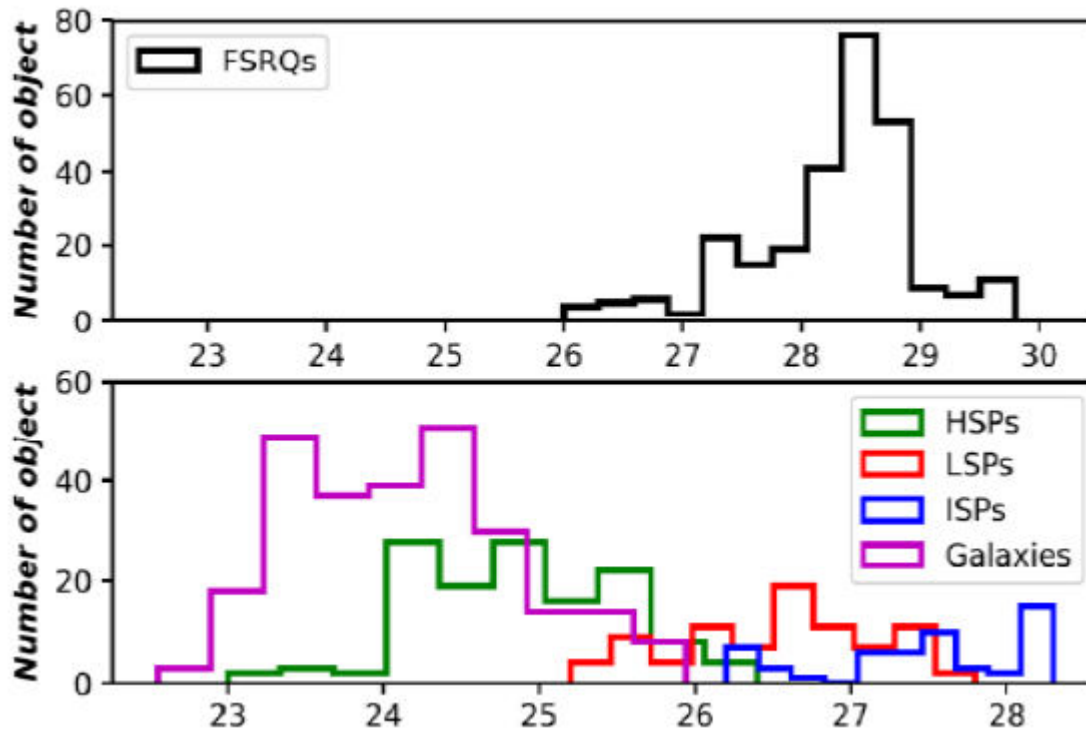


Unification des blazars

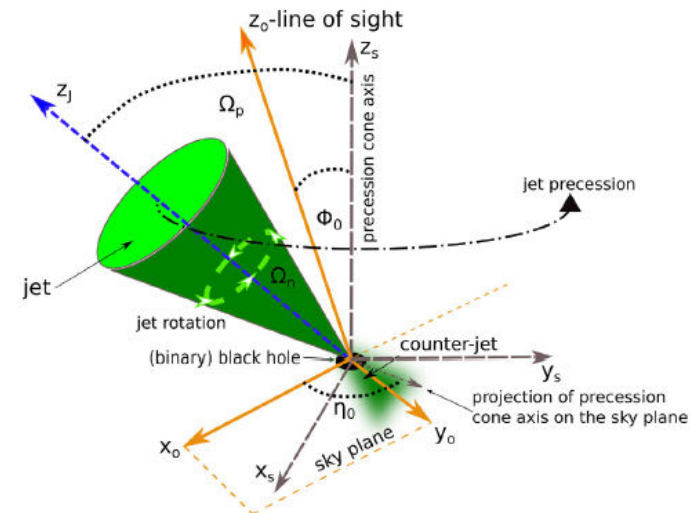
Continuité entre Radio galaxies, HSP, ISP, et LSP, FSRQ versus luminosité et dominance du cœur

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

Entre 10 et 30° pour LSPs, FSRQs, ISPs, HSPs, et RG

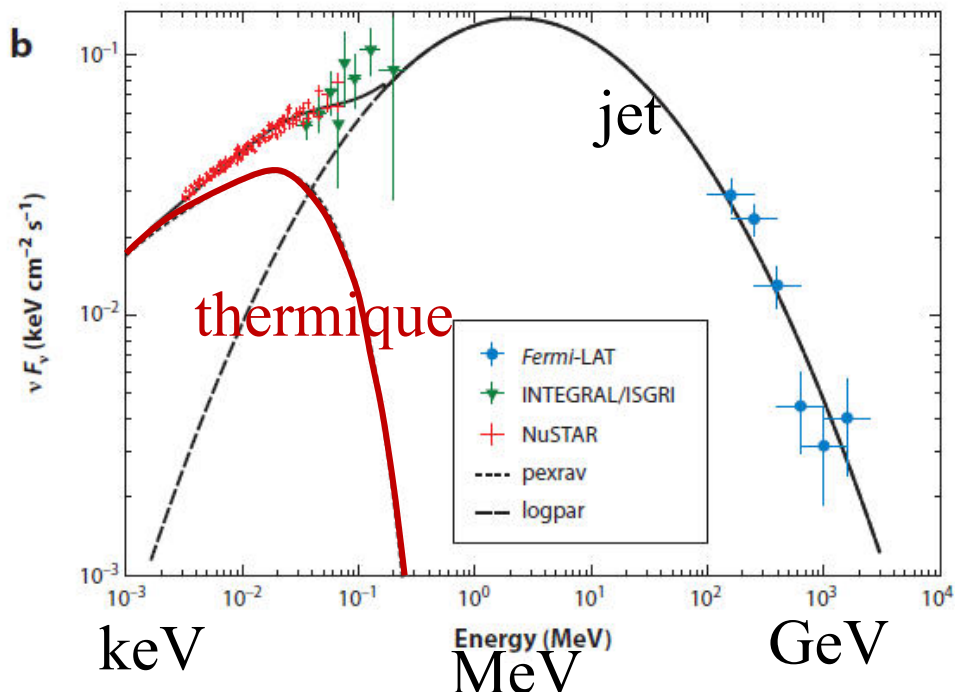
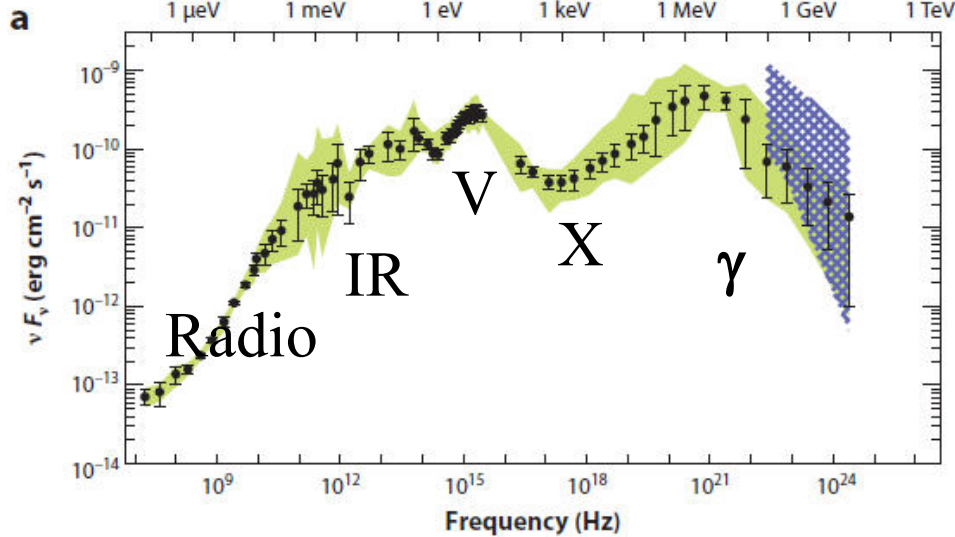


Log (Luminosité du cœur)



3C273

KeV MeV GeV



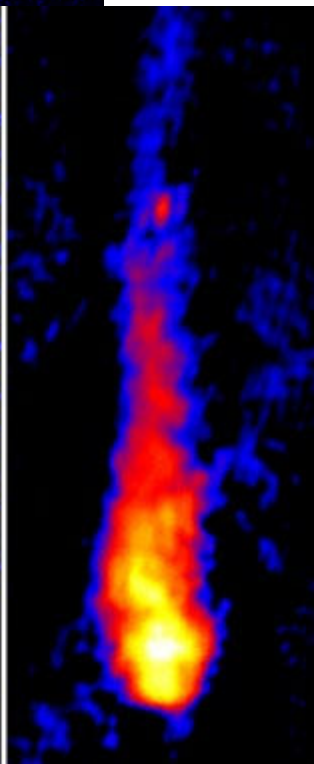
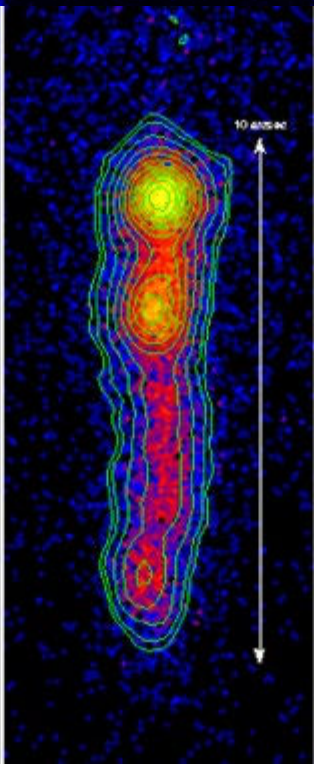
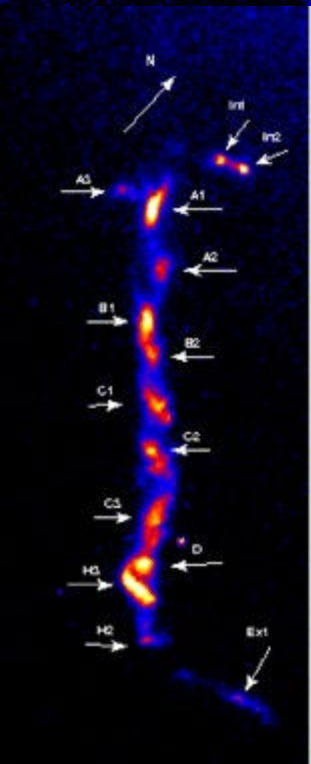
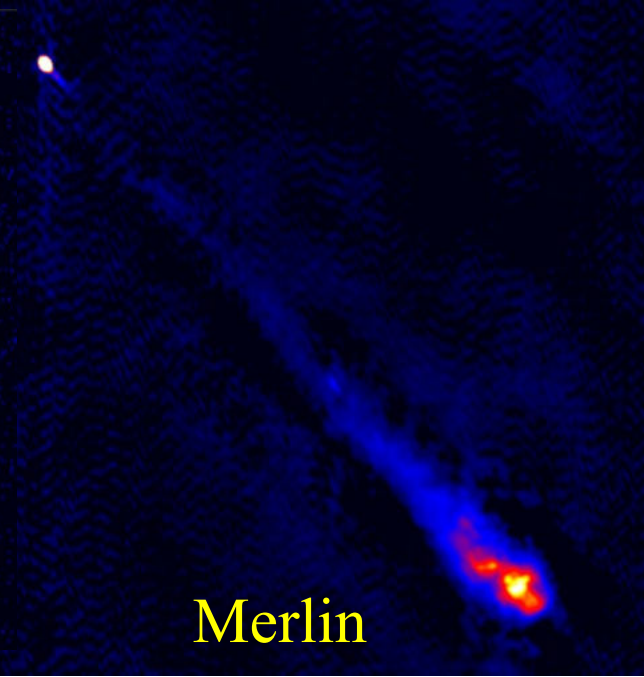
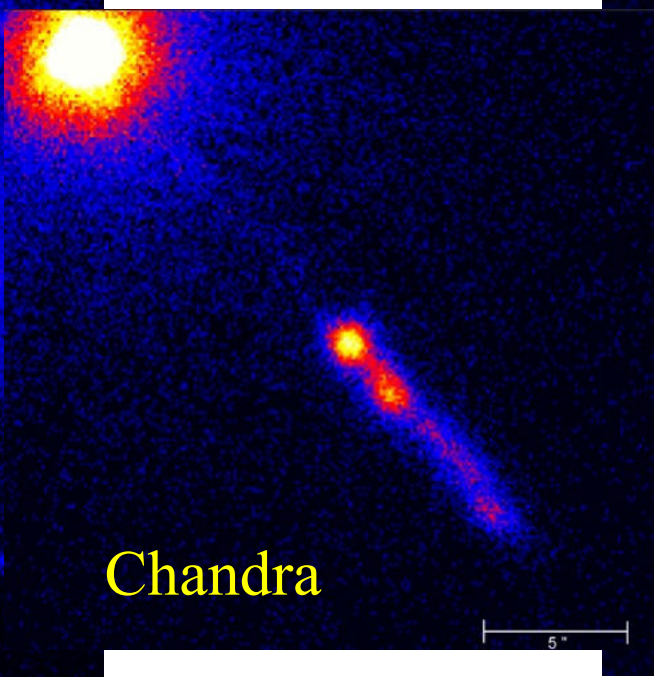
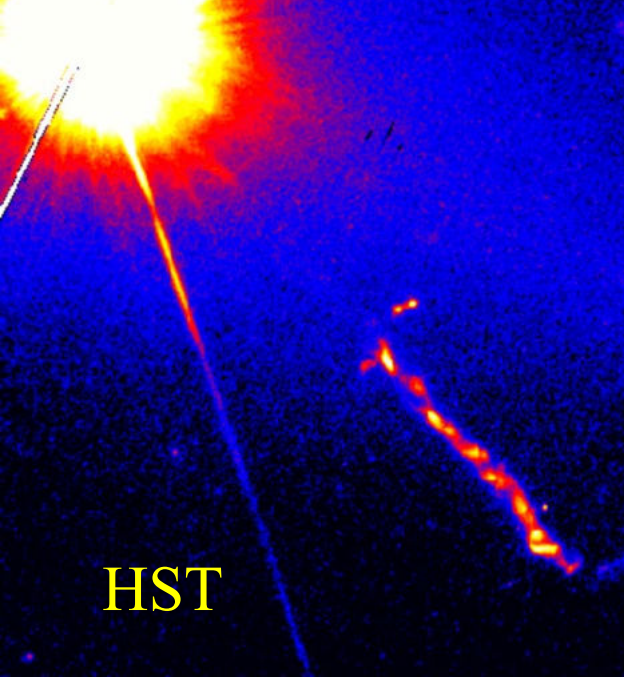
Spectre des blazars

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



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

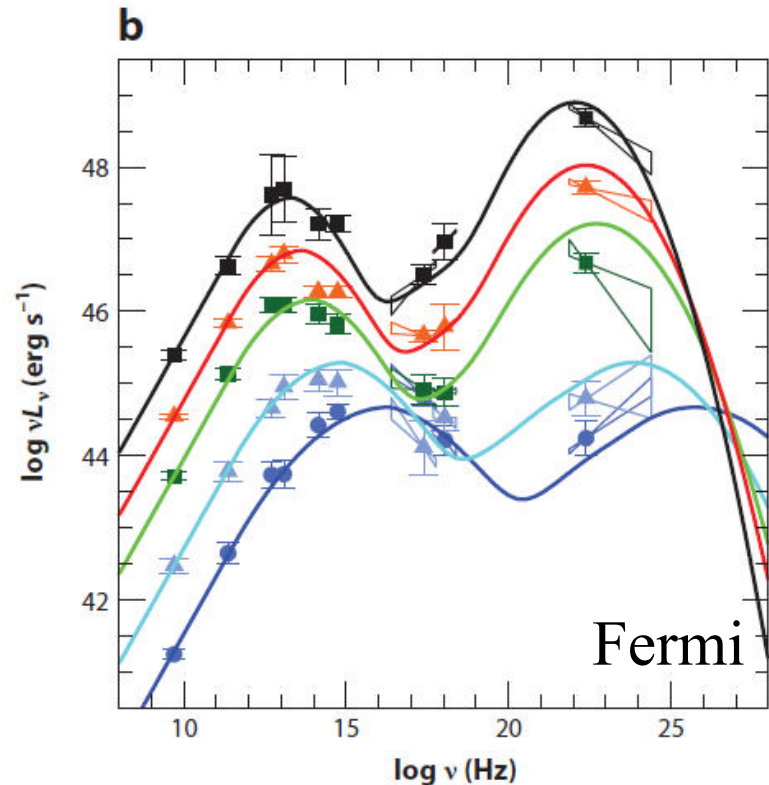
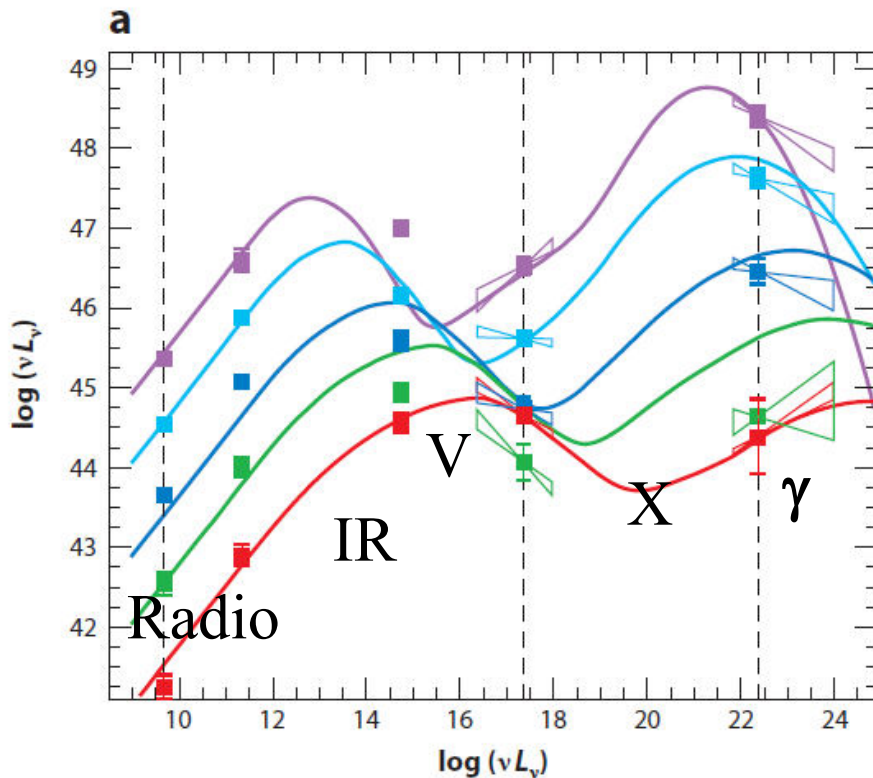
Superposition des jets en optique
(HST) en rayons X (Chandra)
Et en radio cm (Merlin)

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 γ

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

Les photons d'origine peuvent aussi

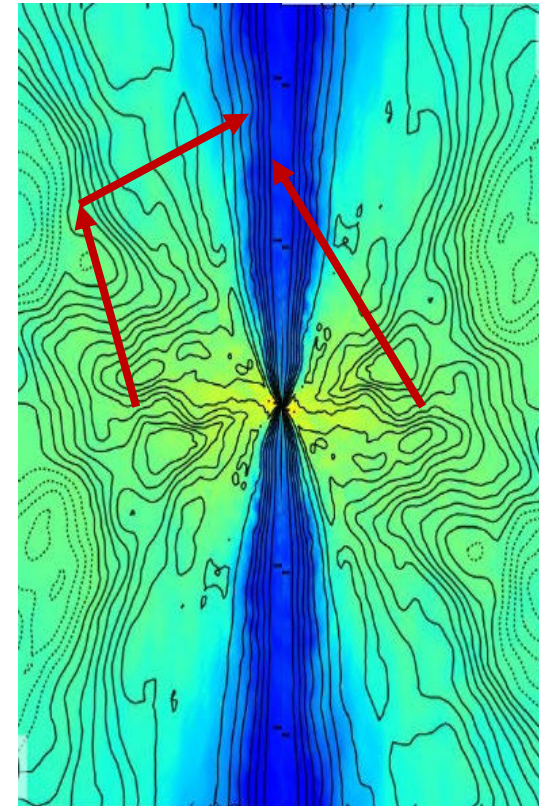
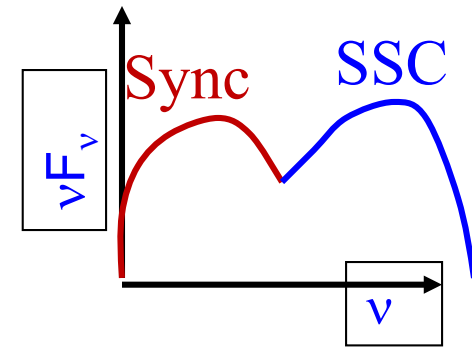
être les photons UV du **disque d'accrétion**,
ou bien les photons **IR du tore** de poussière

→ « 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!

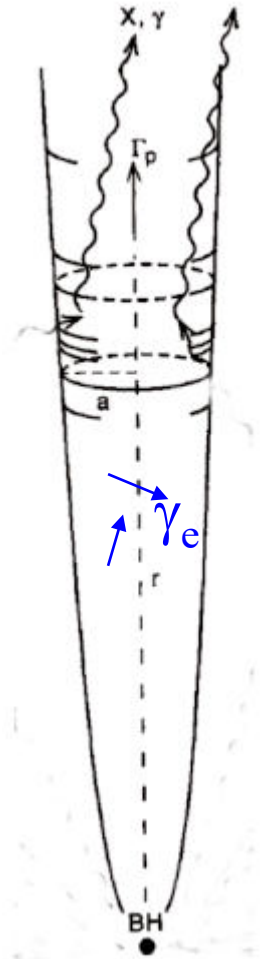
Flux Gamma croît avec le Flux X

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

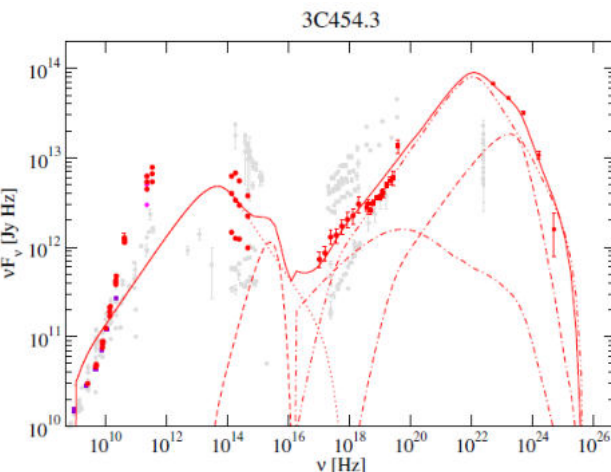
Pas seulement électrons/positrons

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

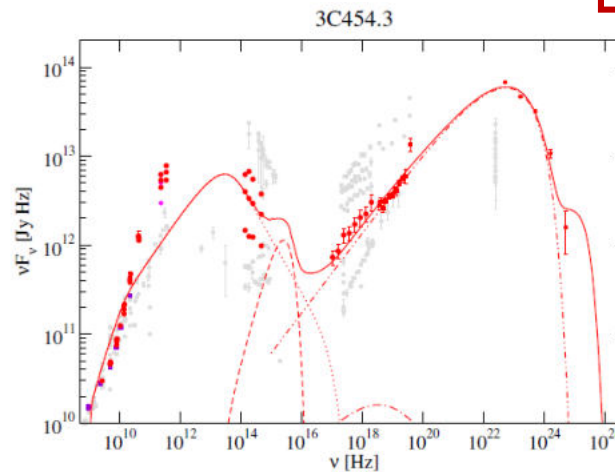
Rayon de Larmor petit < 0.001 pc

$r_L \sim 3 \times 10^{16} E_{19} / B_G$ 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

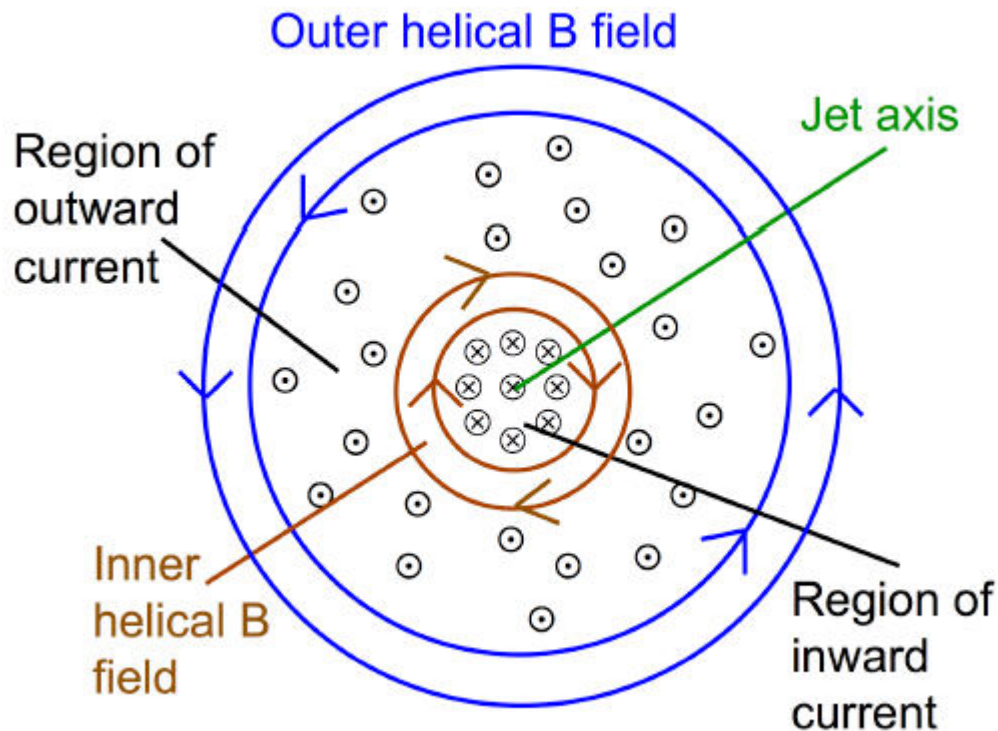


Modèle leptonique



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

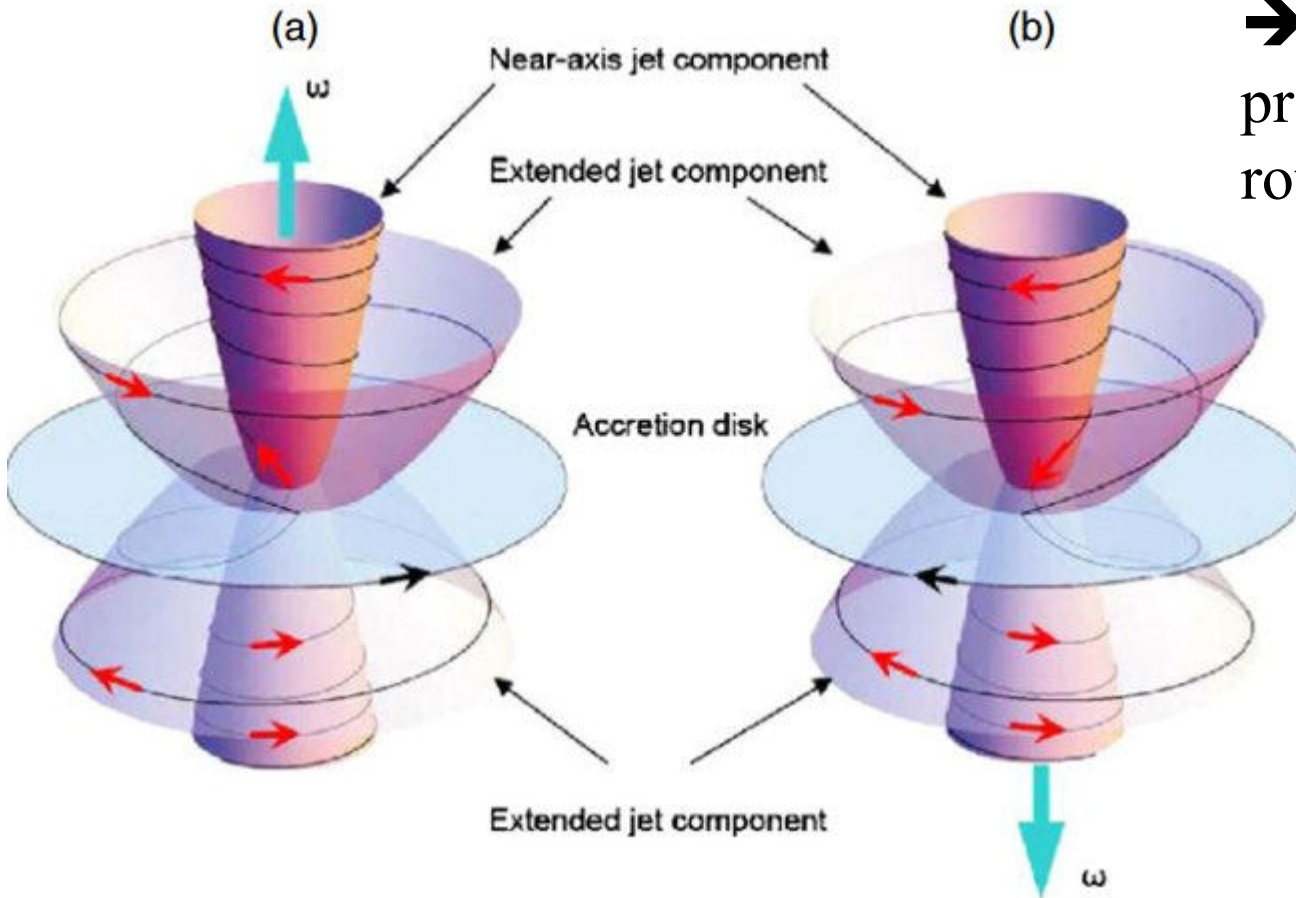
AGN: Le courant se dirige vers le noyau à l'échelle du pc,

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

Contenu des jets: γ e^+ e^- p π μ ν

Plasma e^- p , mais combien de paires e^+e^- ?

Jusqu'à un facteur 10 de plus

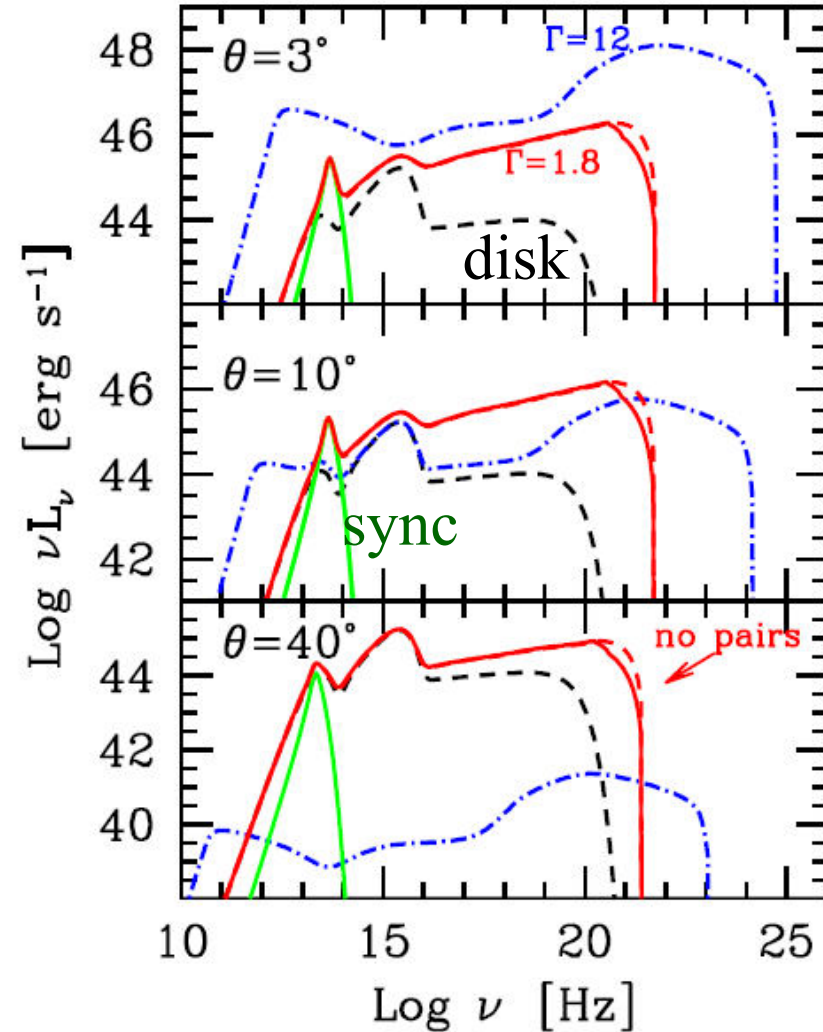
La durée de vie d'une particule émettant en synchrotron $\propto m^{5/2}$

Les protons sont plus robustes
Même si ré-accélérations des e^- dans les chocs le long du jet

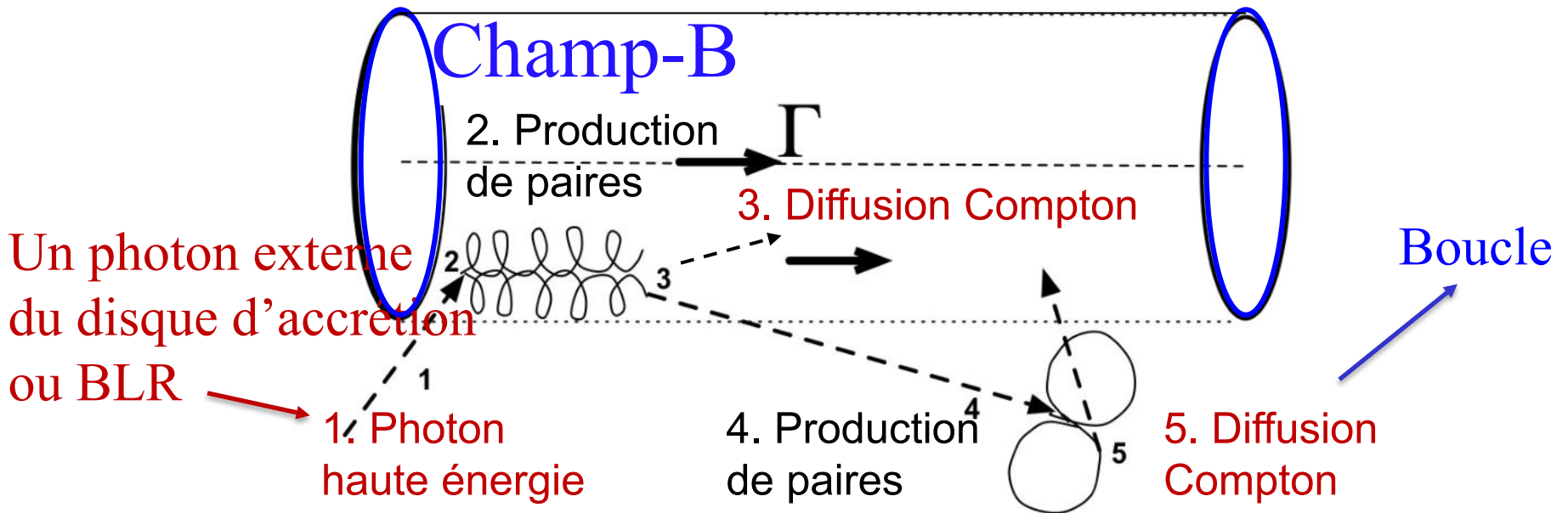
Les transformations de paires $\leftrightarrow \gamma$ permettent de dissiper l'énergie cinétique du jet en lumière (80%)

10Rs jet

1000Rs jet



Production de paires électrons-positrons



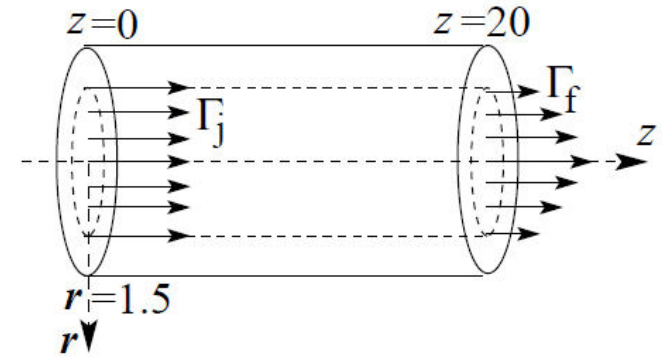
Multiplication des γ de haute énergie, dès que

- (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?

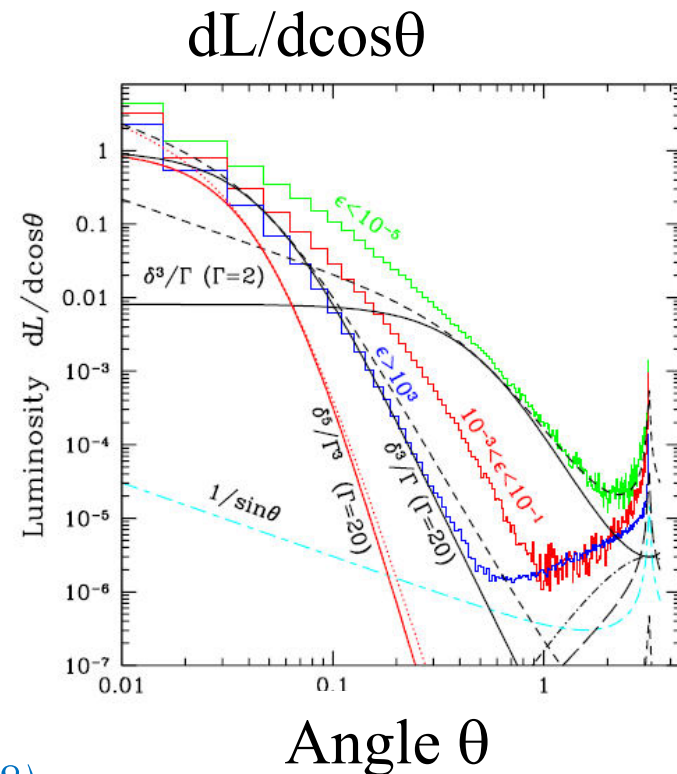
Près du trou noir, disque d'accrétion
 E cinétique du jet $\Gamma \sim 20$, est transformée
 en énergie des particules $\gamma_e = 10^4 - 10^7$



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

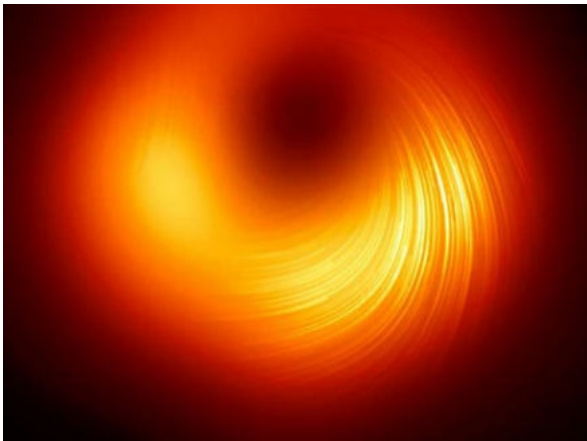
Viscosité et chocs, matière ionisée, courant \rightarrow champ B

Enroulement des lignes de champ, resserrement et collimation

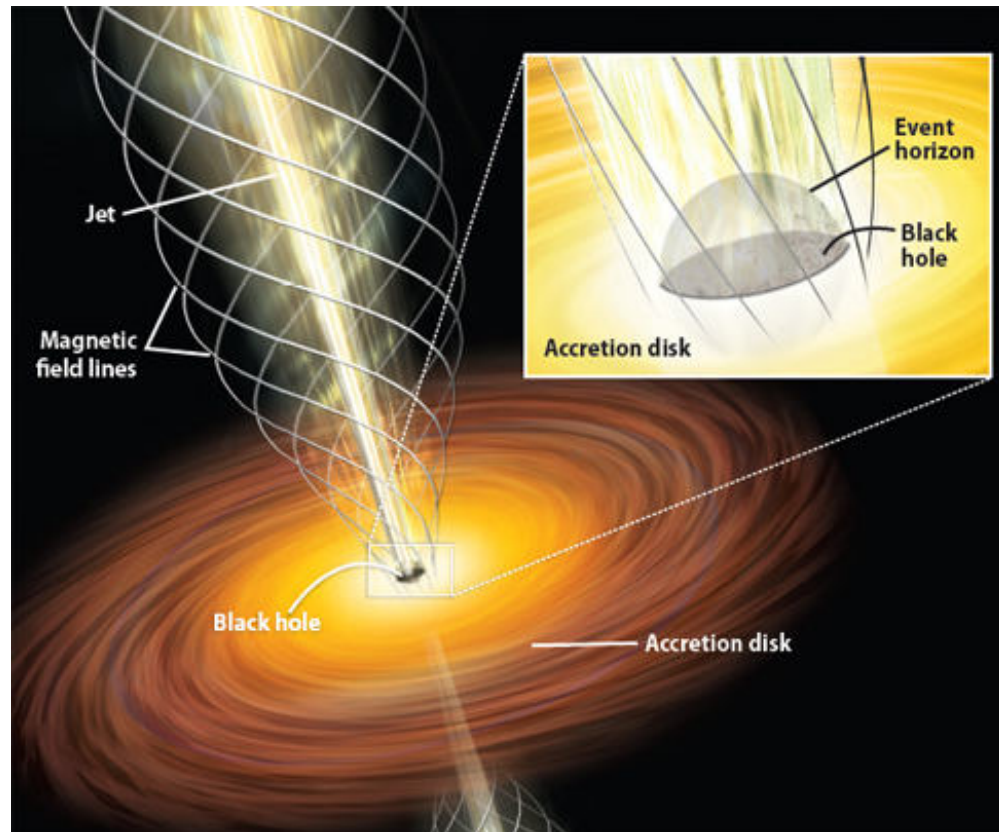
Mécanisme de Blandford-Znajek

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

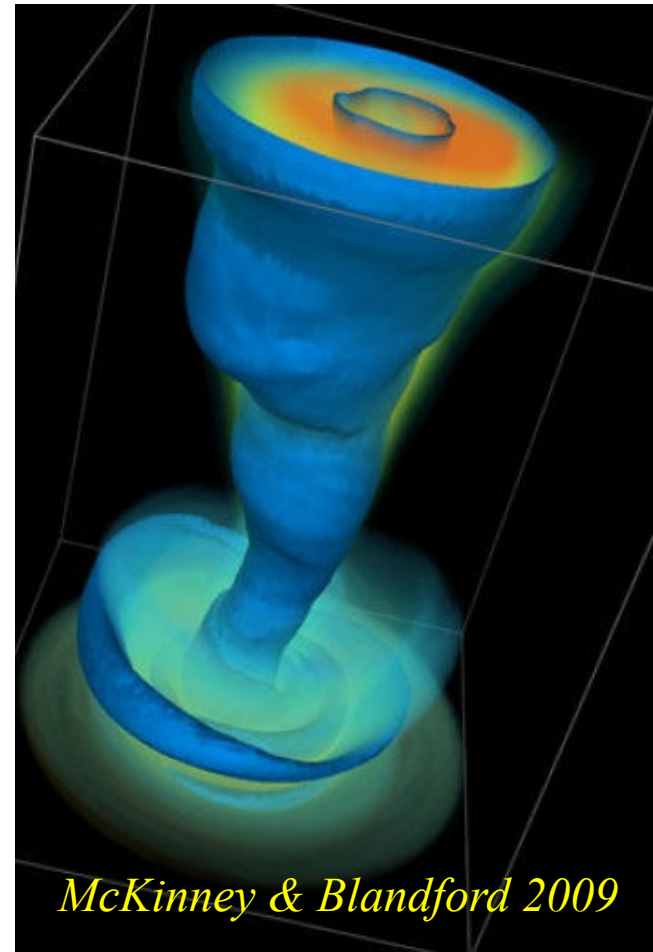
$\exp i (m\phi - nz - lR - \omega t)$ **instabilité $m=1$**

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

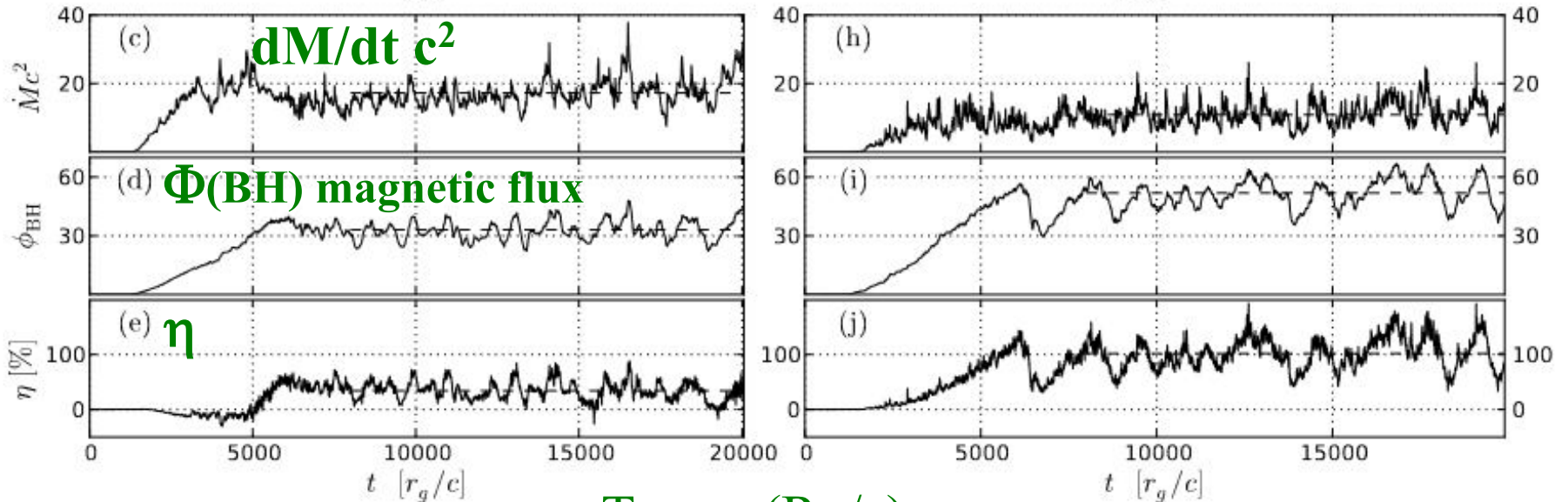
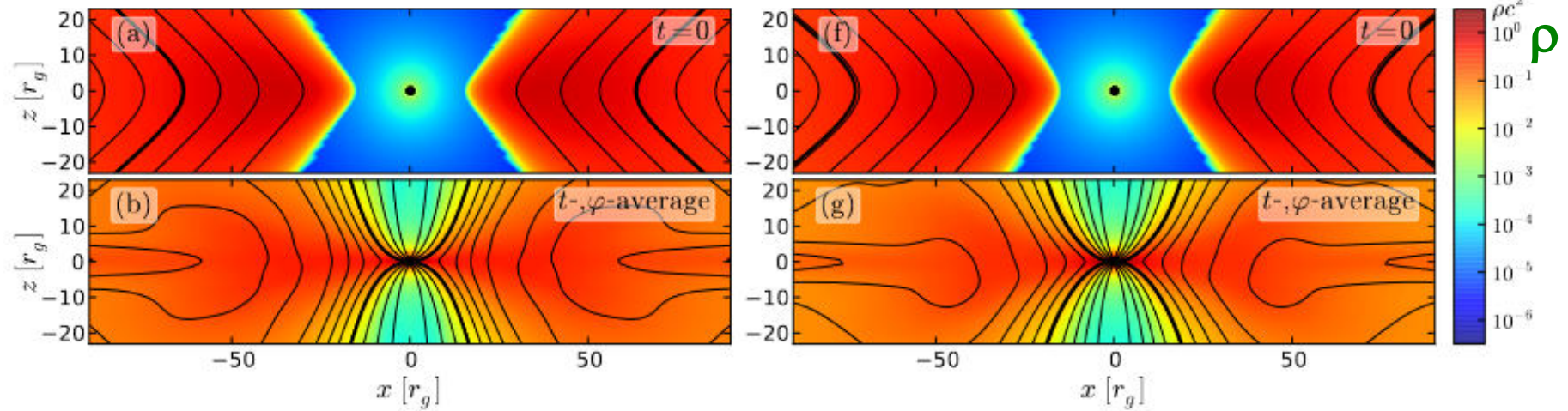


McKinney & Blandford 2009

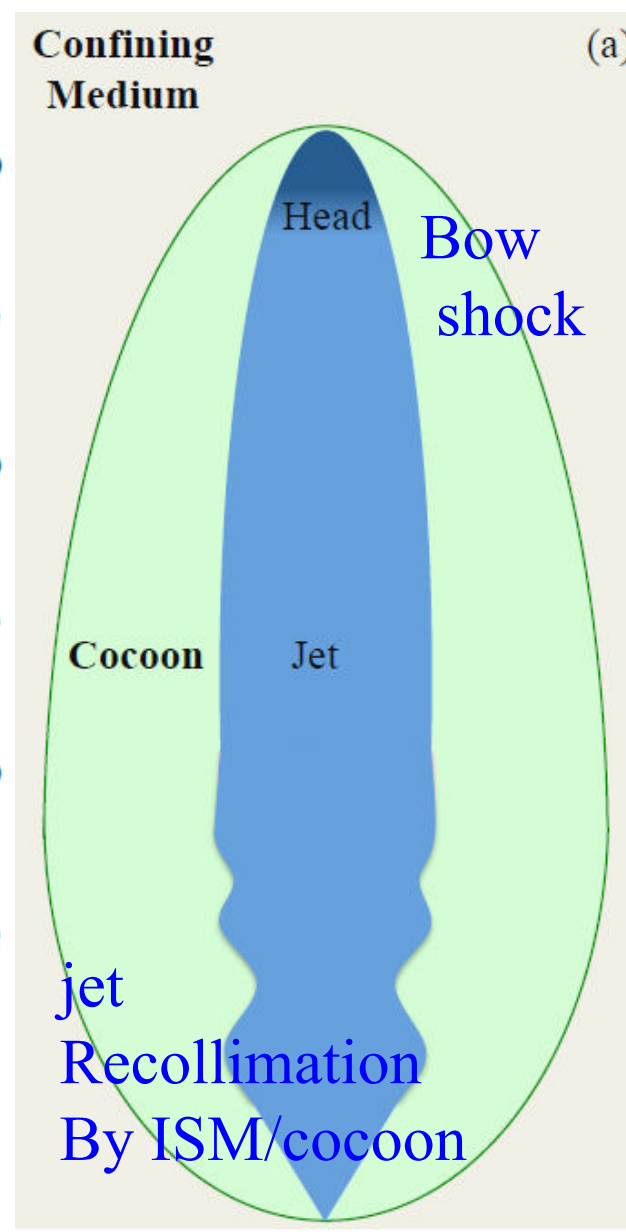
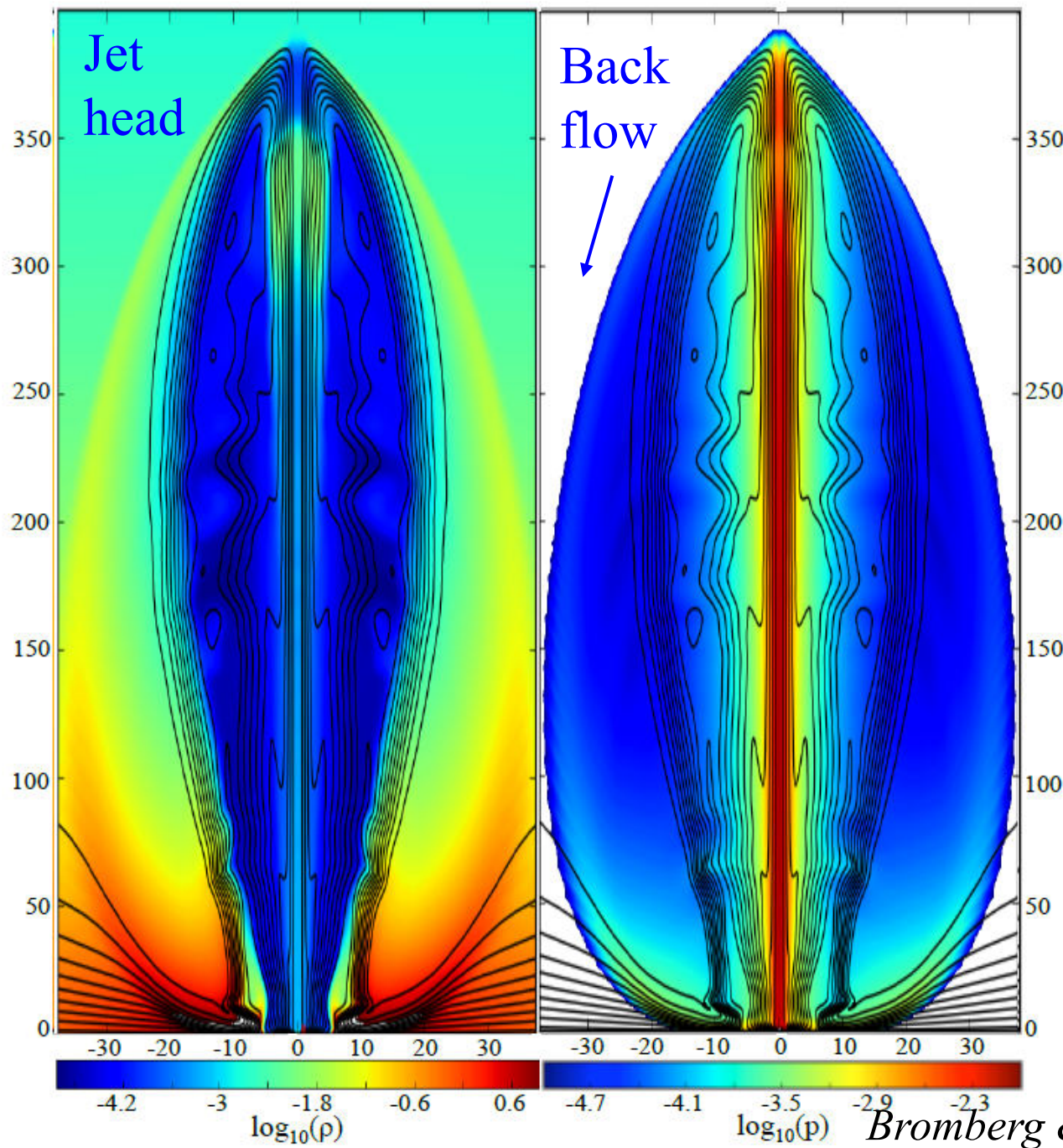
Efficacité de l'outflow $\eta \propto P/(dM/dt)c^2$

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

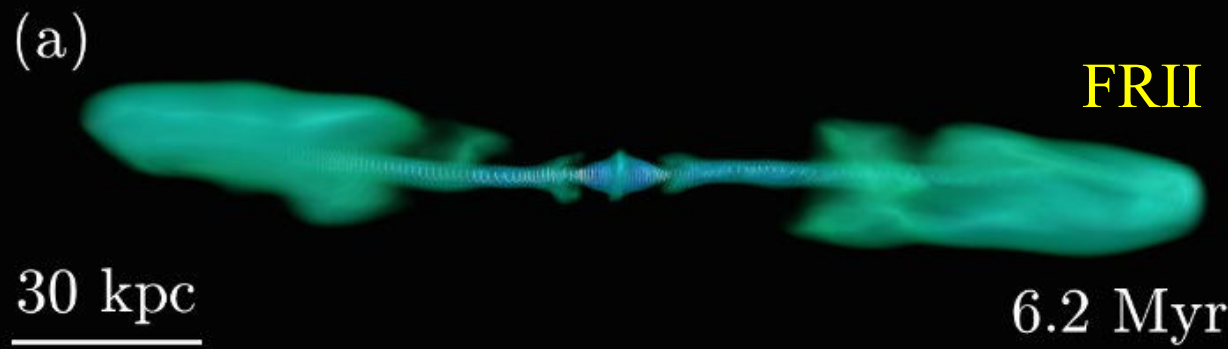
Prograde $a=0.9$ $\eta = 102\%$



Temps (R_g/c)

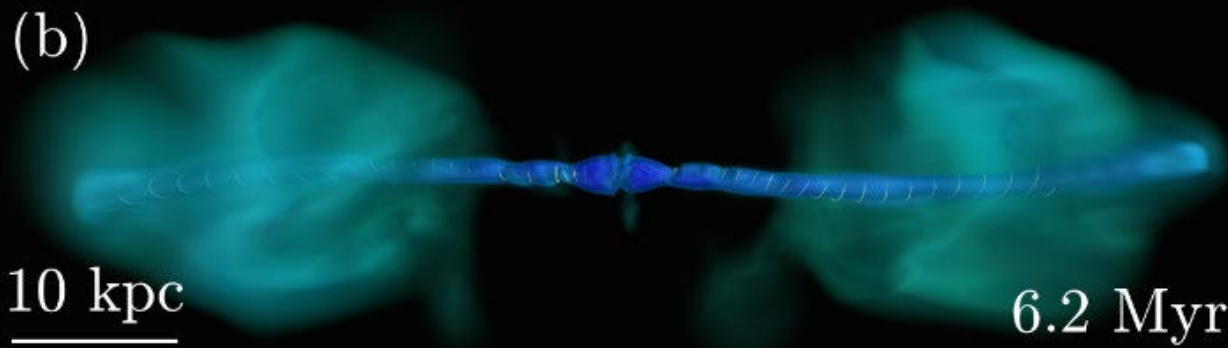


Bromberg & Tchekhovskoy 2016

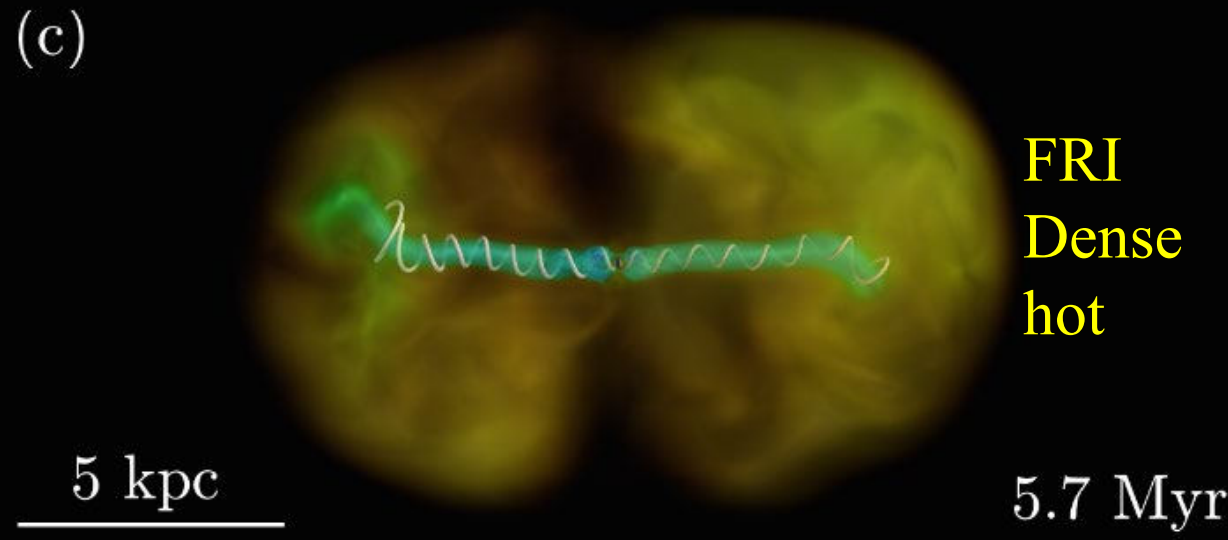


Instabilité MHD du Kink (tire-bouchon)

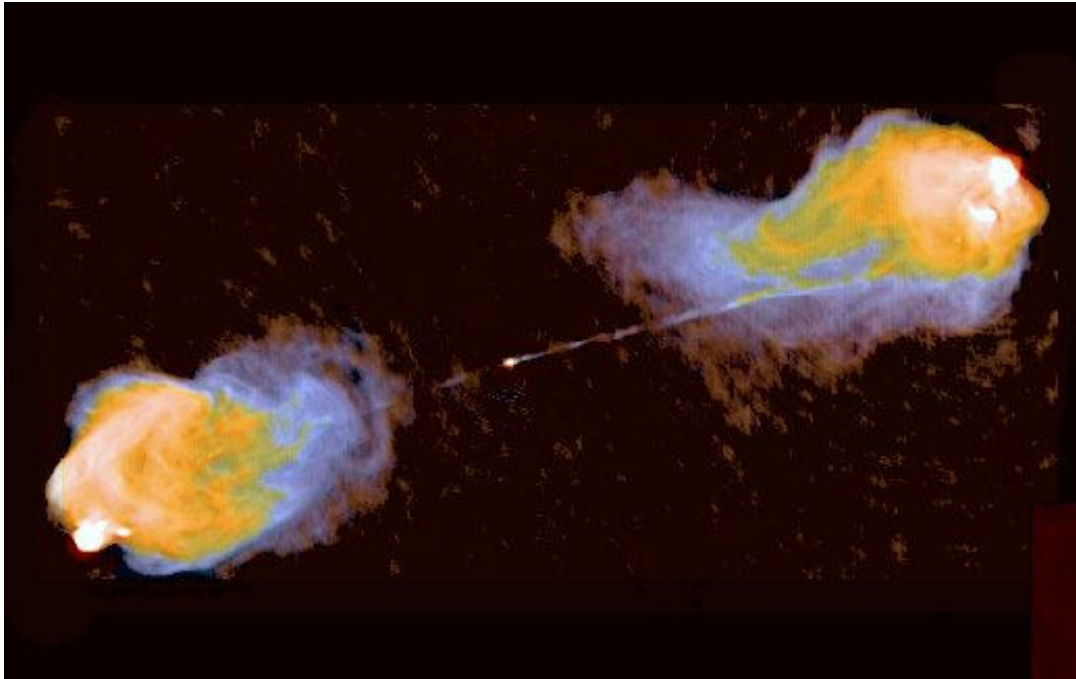
Si $P(\text{jet}) < P_{\text{crit}}$
→ Cœur ralentit le jet et forme des cavités de plasma relativiste = FRI



Si $P(\text{jet}) > P_{\text{crit}}$
Le jet sort du cœur, se propage plus loin Puis revient (backflow)



Dichotomie FRI et FR II



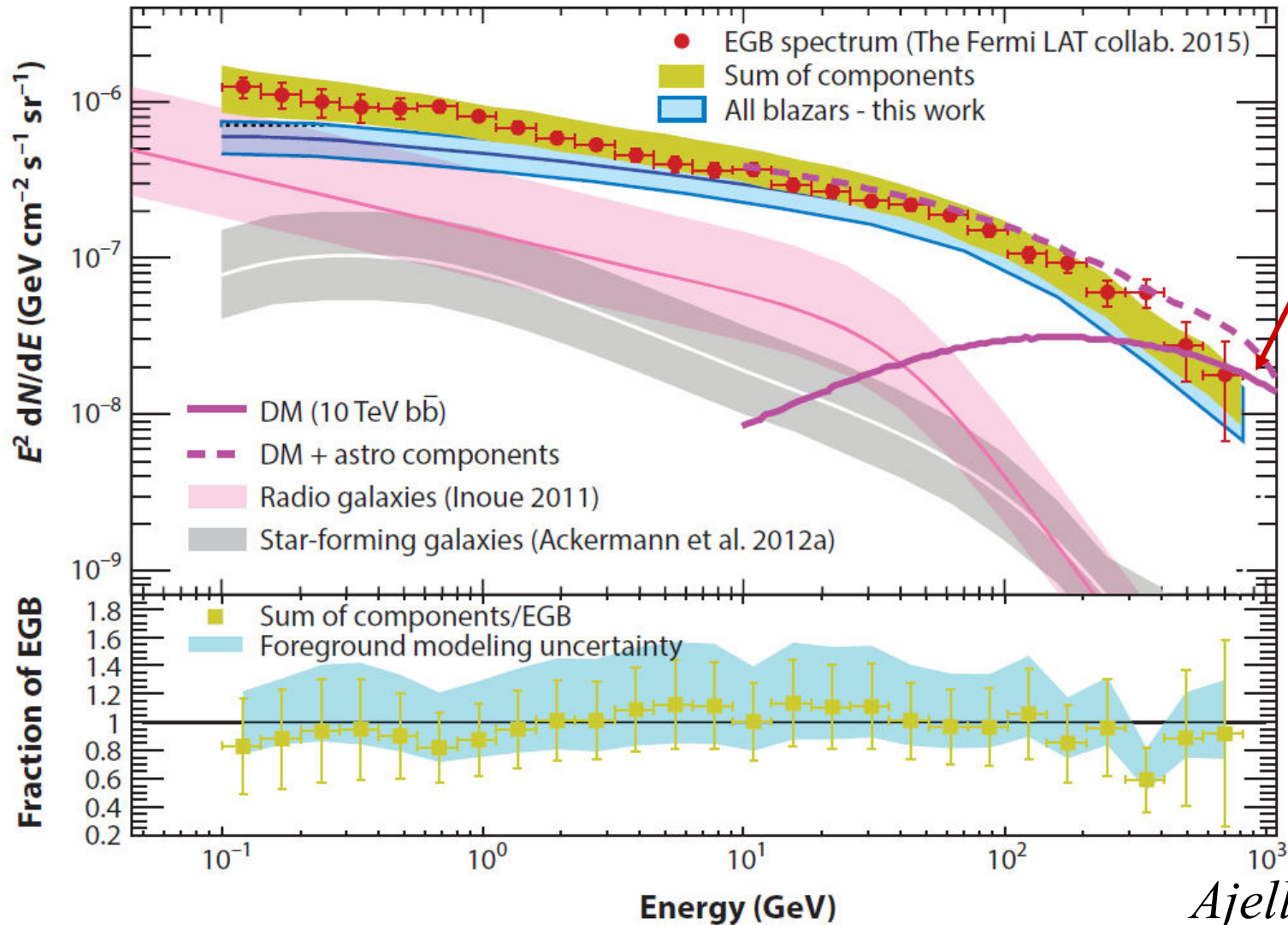
FR II, Haute puissance
Brillant au bout
(points chauds)
Cygnus A $> 100\text{kpc}-1\text{Mpc}$
Plus rares

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

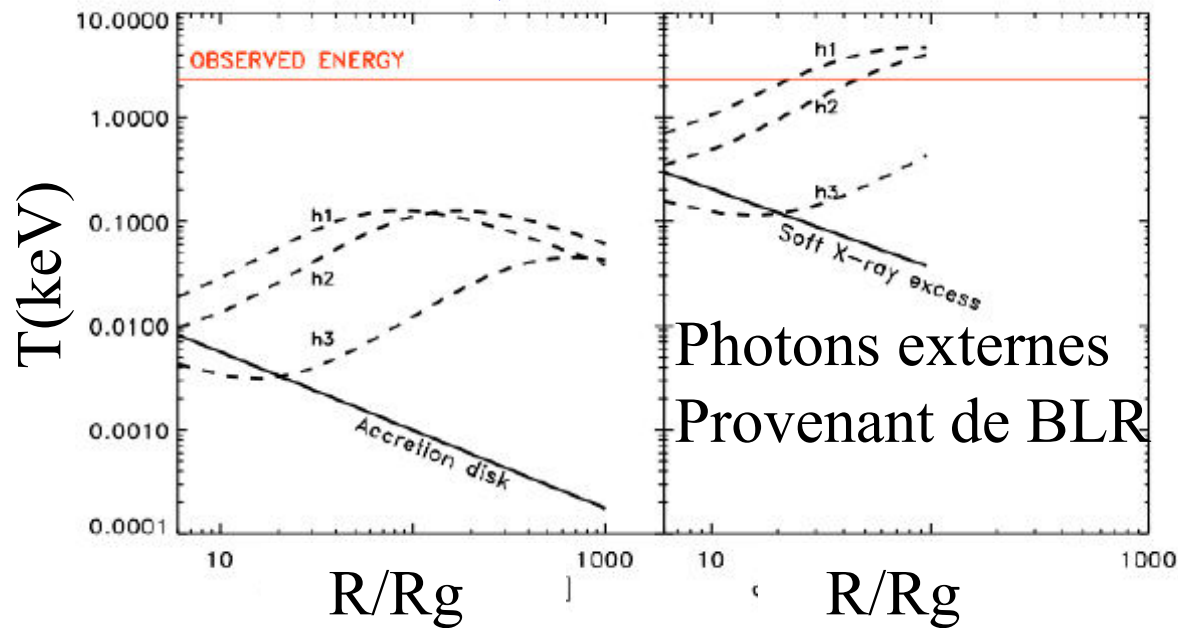
Les photons BLR servent de graines, sont accélérés jusqu'à
 $\Gamma = 100$, dans une coquille de taille $\sim 10^{16}$ cm,

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

h1=50Rg dans le jet

h2=100 Rg

h3=400Rg

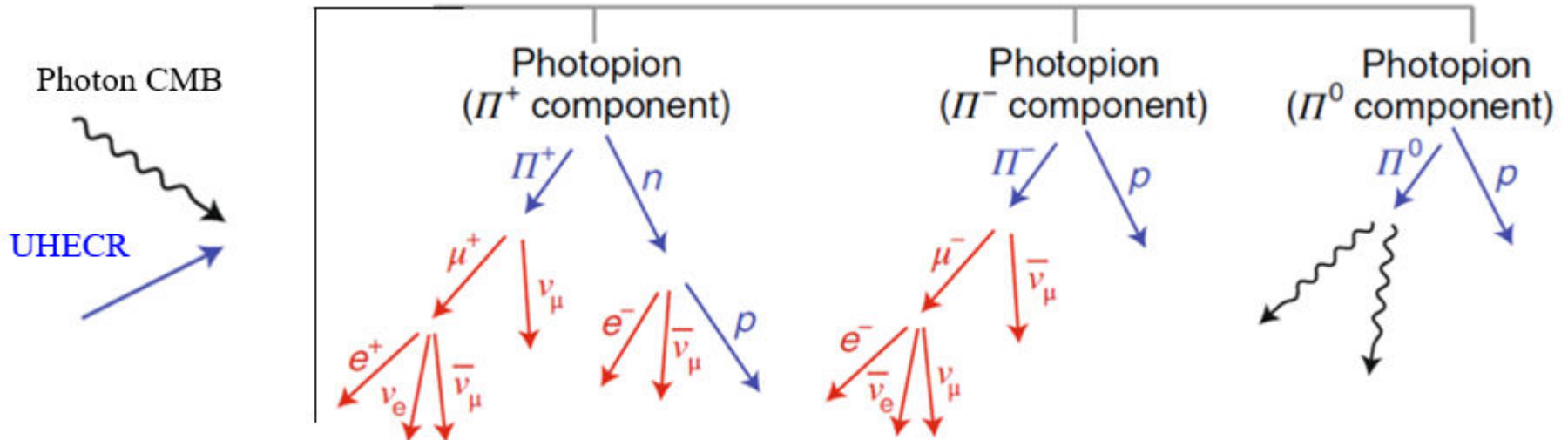


Rayons cosmiques de Ultra Haute Energie

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

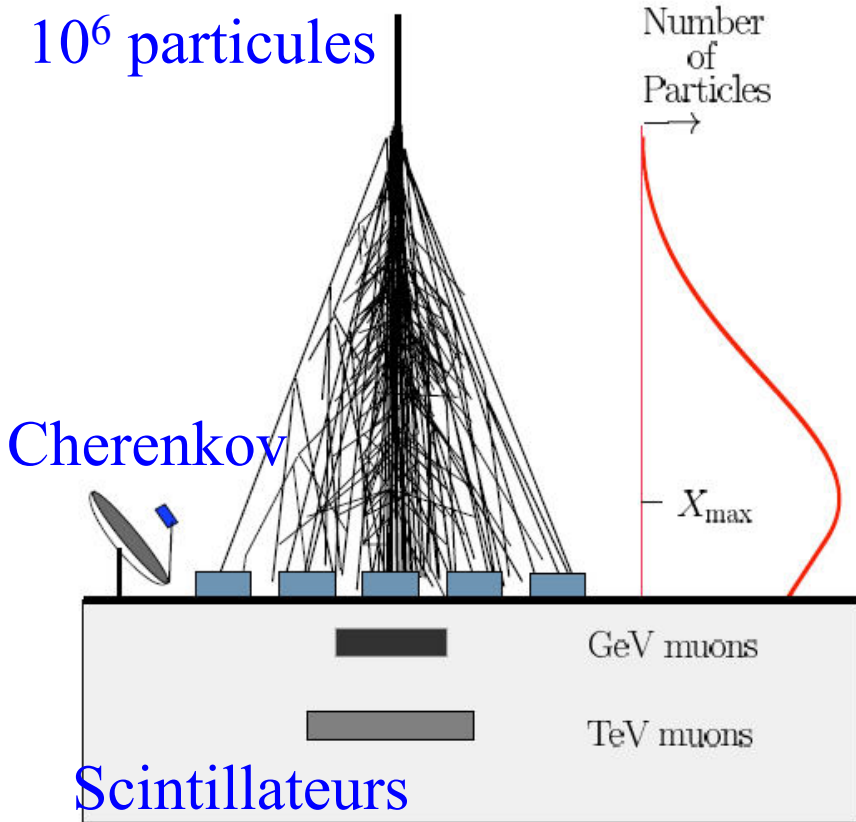
UHECR $E > 10^{18}\text{eV}$ (10^6 TeV), 7 ordres de plus que le faisceau LHC
→ Accès à des énergies inconnues sur Terre

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 3000km^2
TA (Telescope Array) Nord
1 part/ km^2 /siècle $E=10^{20}\text{eV}$

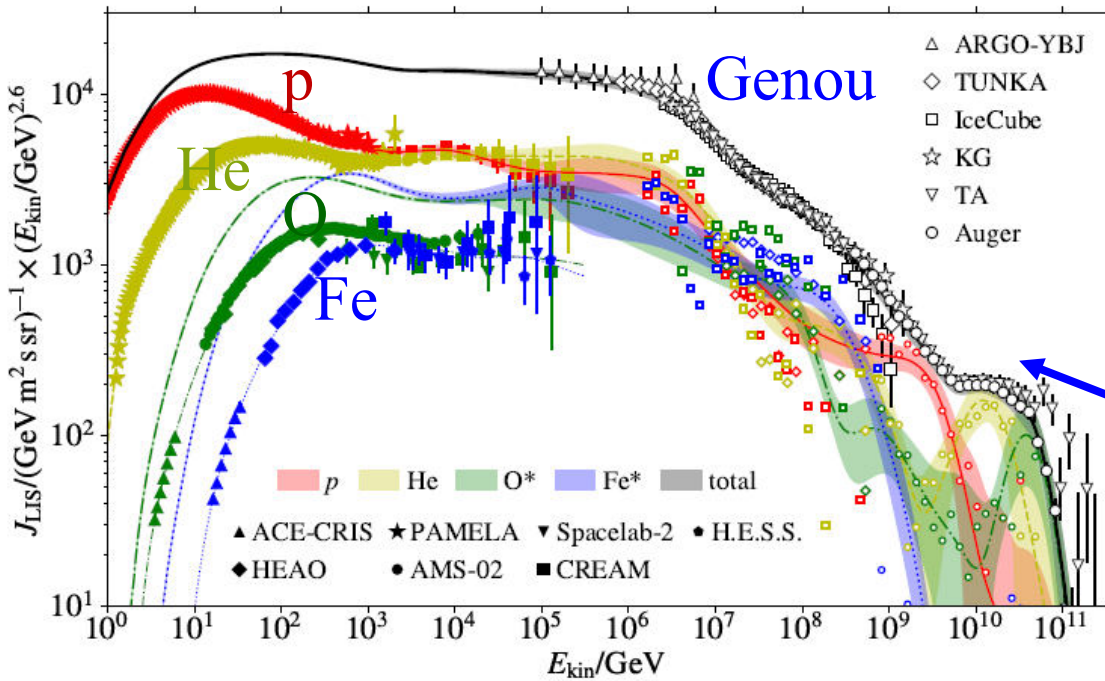
Spectre d'énergie

Genou à 10^{15} eV

CR sortent de la Galaxie?
+ autre accélération

Cheville à $10^{18.5}$ eV

GZK



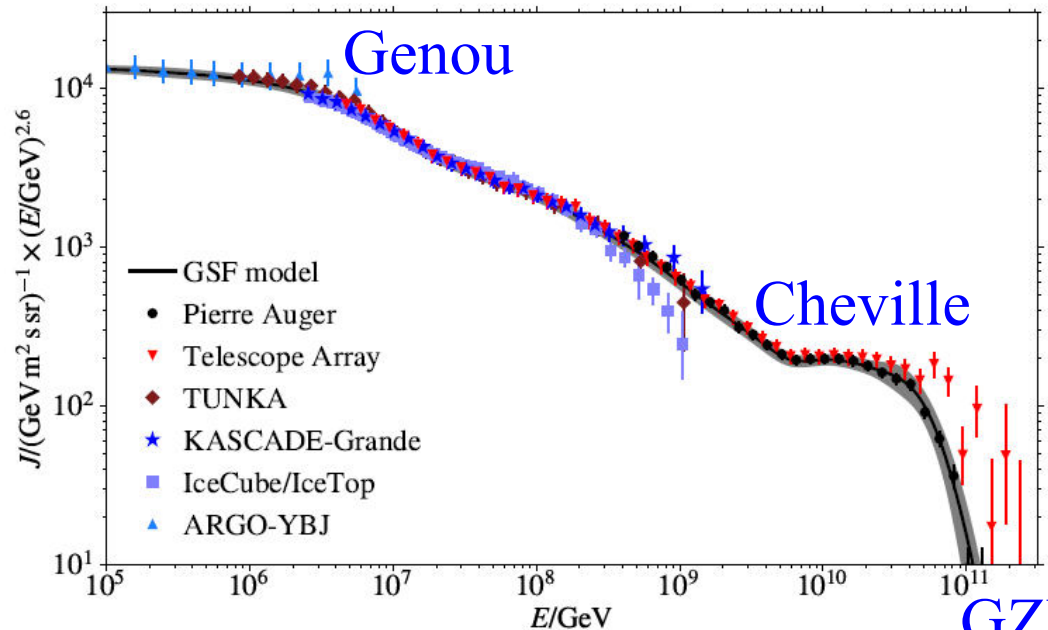
Flux $\propto 1/E^\alpha$

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

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

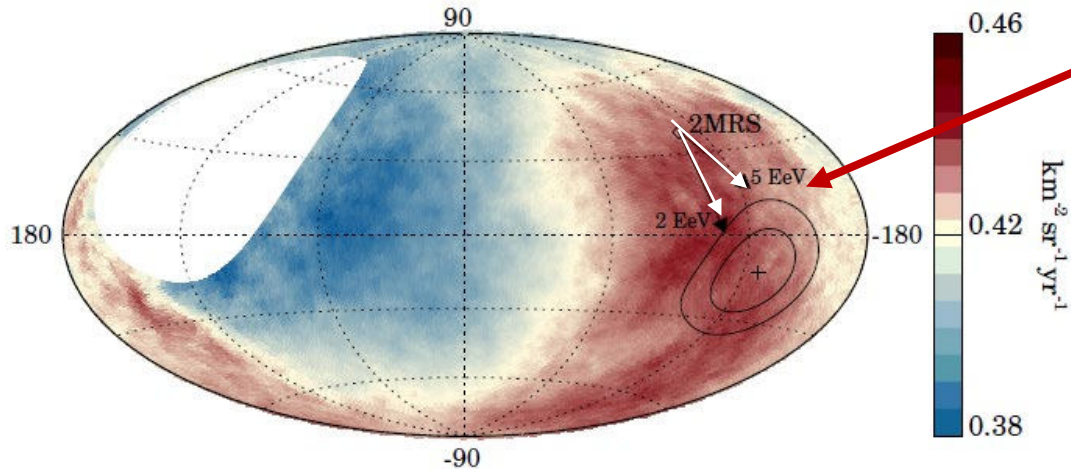
$\alpha \approx 2.7$ $E > 10^{18.5}$ eV

Après le cut-off $\alpha > 4$



Localisation des sources

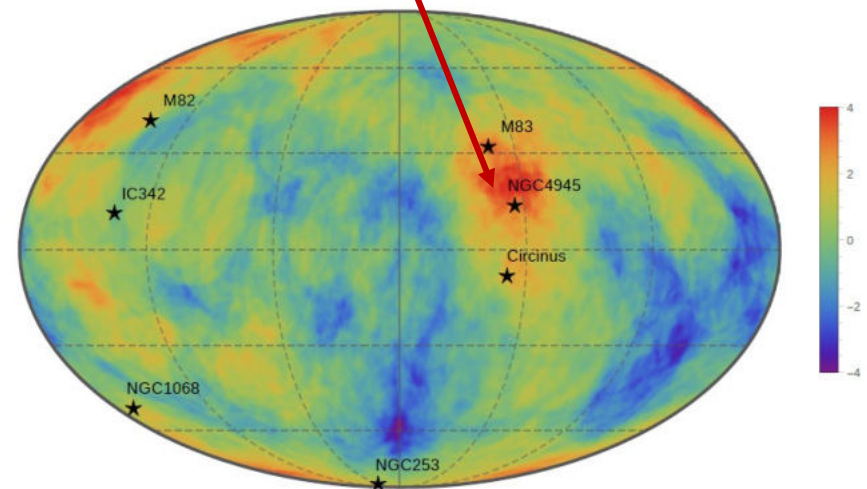
Anisotropie détectée: due à la déflexion par le Champ B galactique?



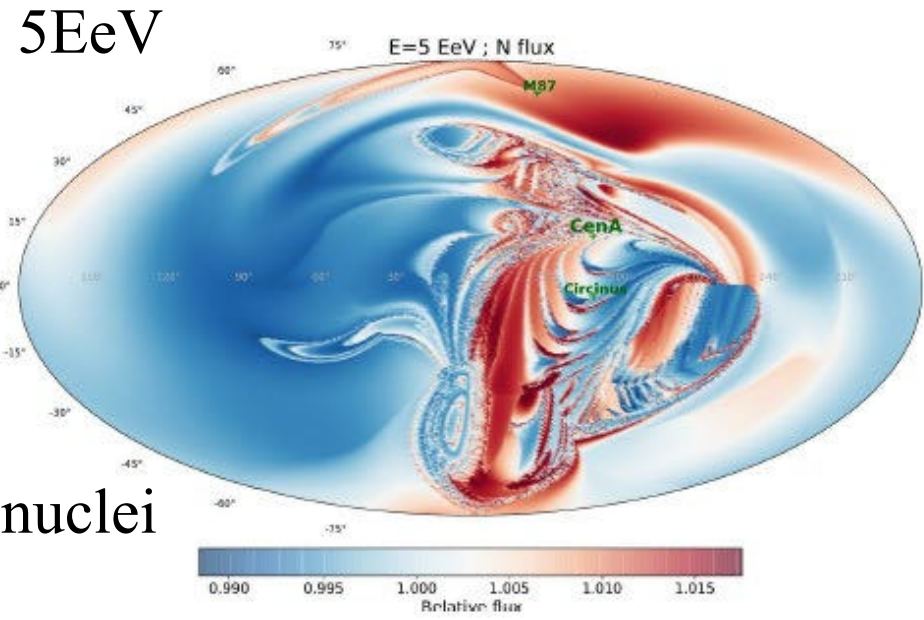
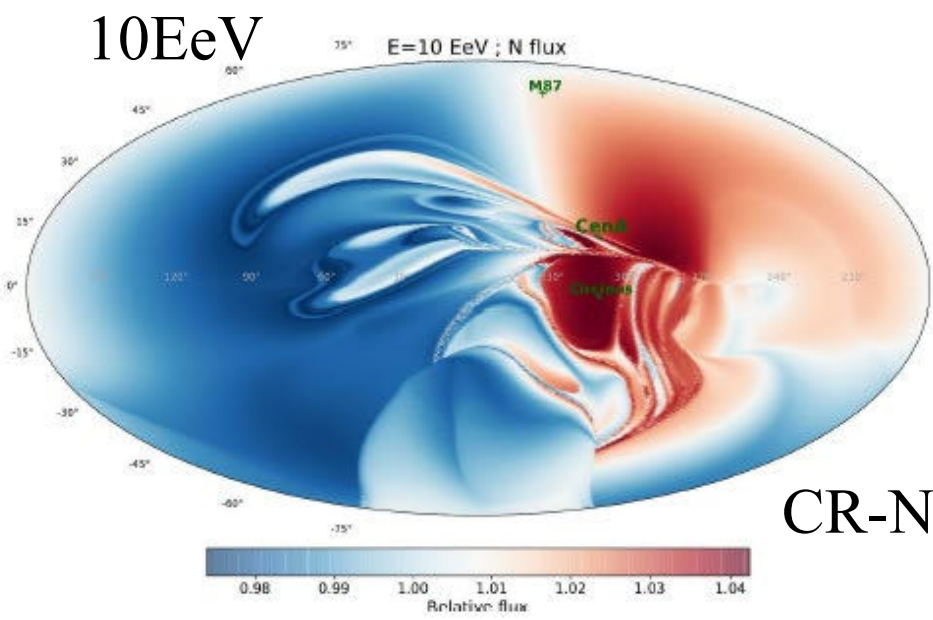
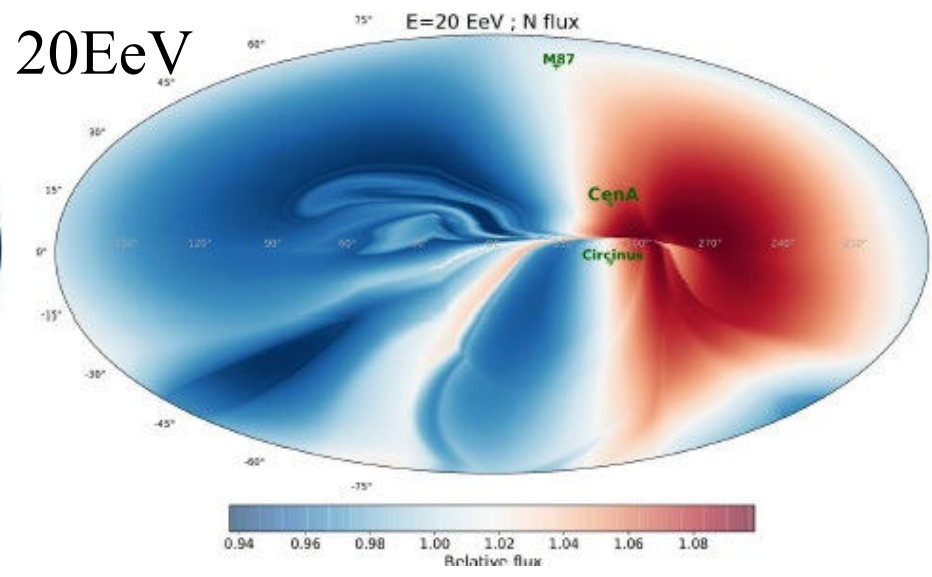
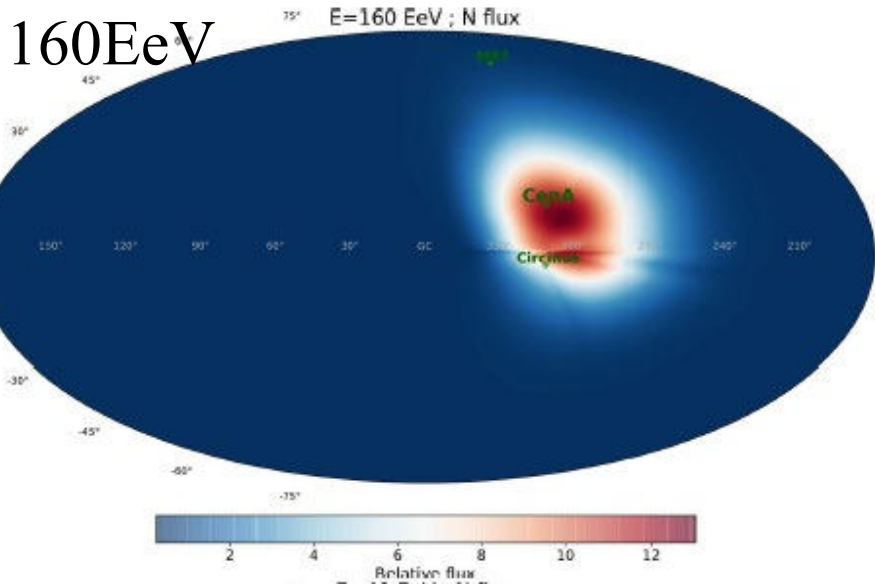
2MASS survey: dipole des galaxies proches
+ deflection pour 2-5 EeV
(Aab et al 2017)

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

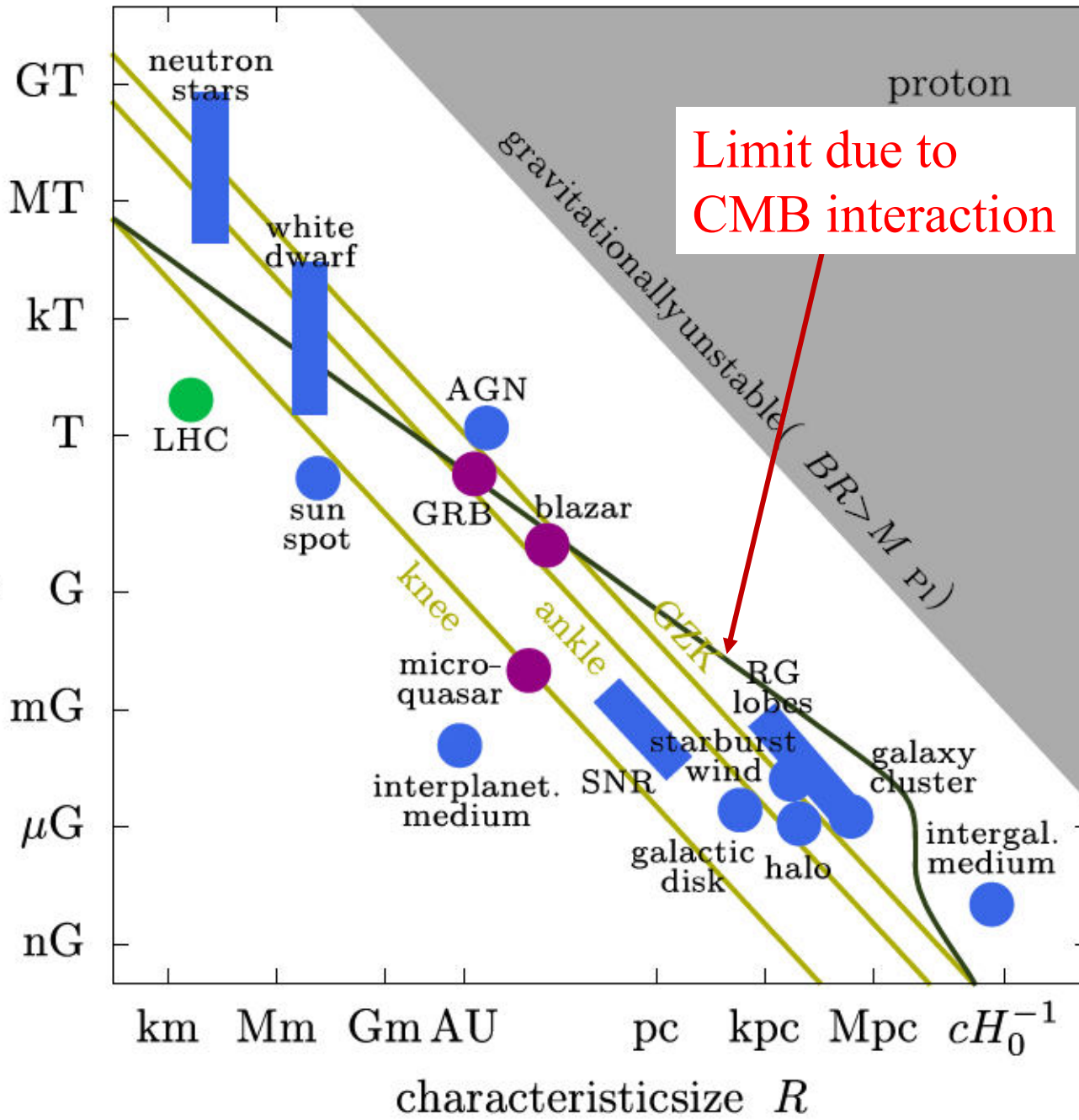
Rayon de Larmor $R = 1 \text{ kpc} / Z (E / 10^9 \text{ GeV}) (\mu\text{G} / B)$

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

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

Jets blazars GRB

LHC

Lim BR pour protons

Knee $10^{6.6}$ GeV

Ankle $10^{9.7}$ GeV

GZK $10^{10.6}$ GeV

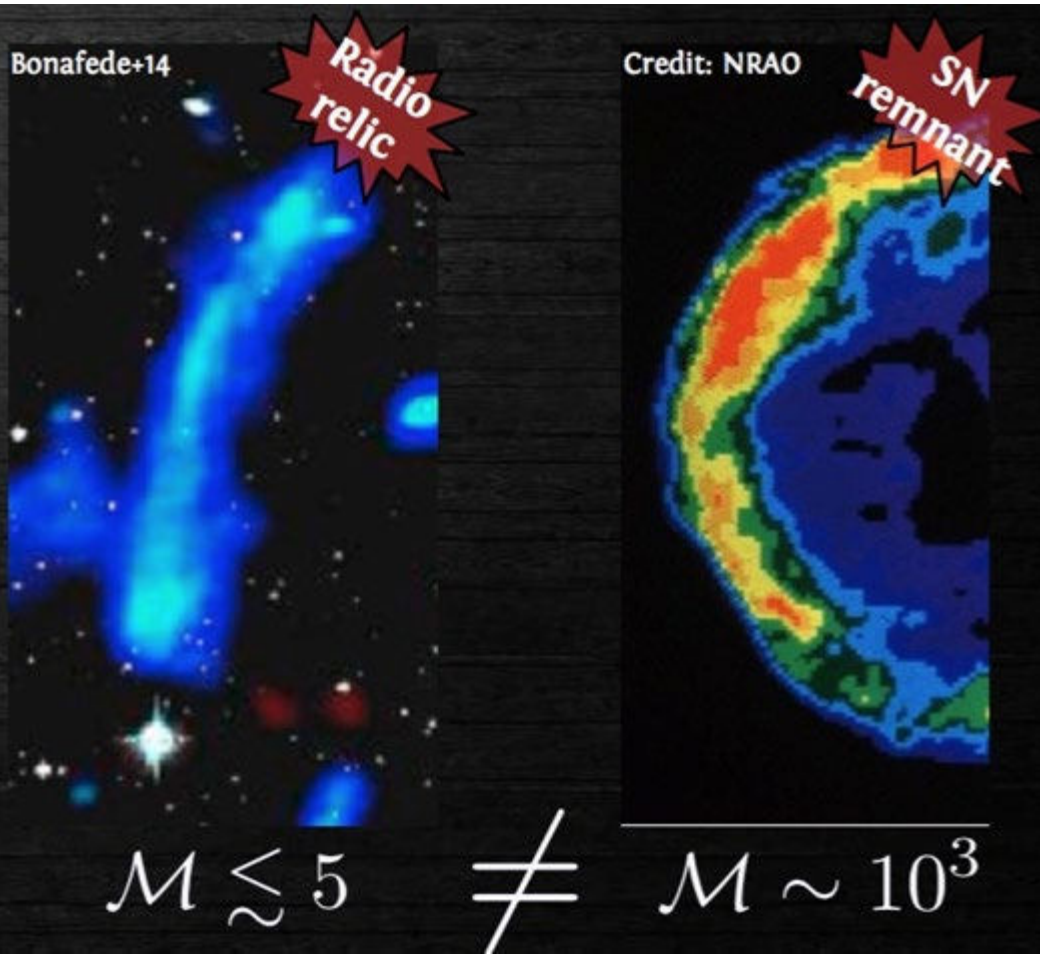
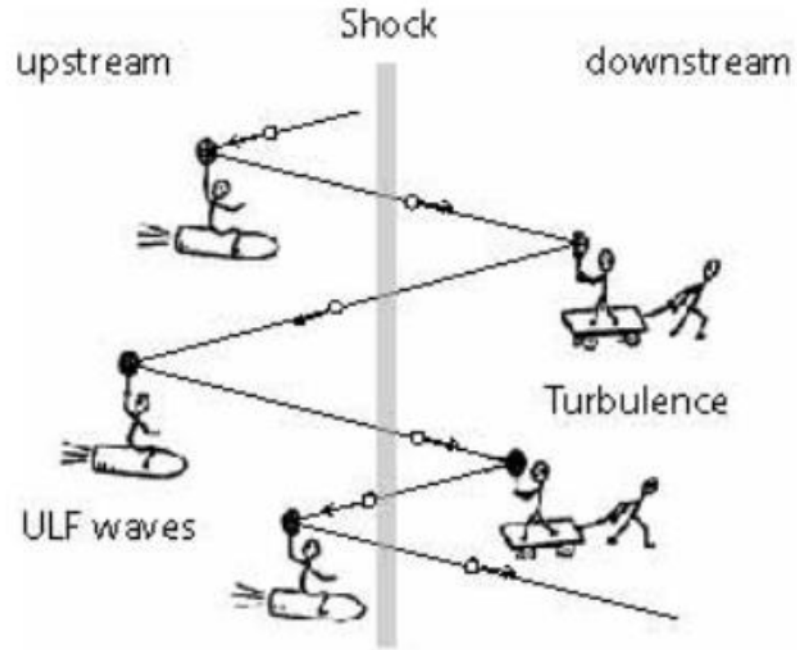
Fermi accélération

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

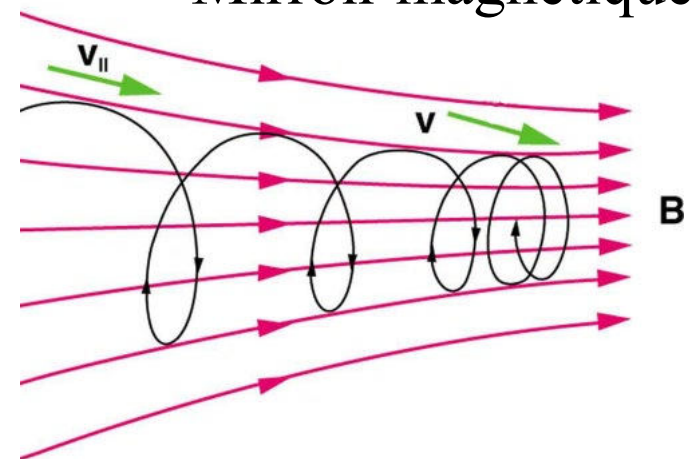
Anchordoqui 2019

Accélération dans les chocs

Les particules sont diffusées par des inhomogénéités magnétiques



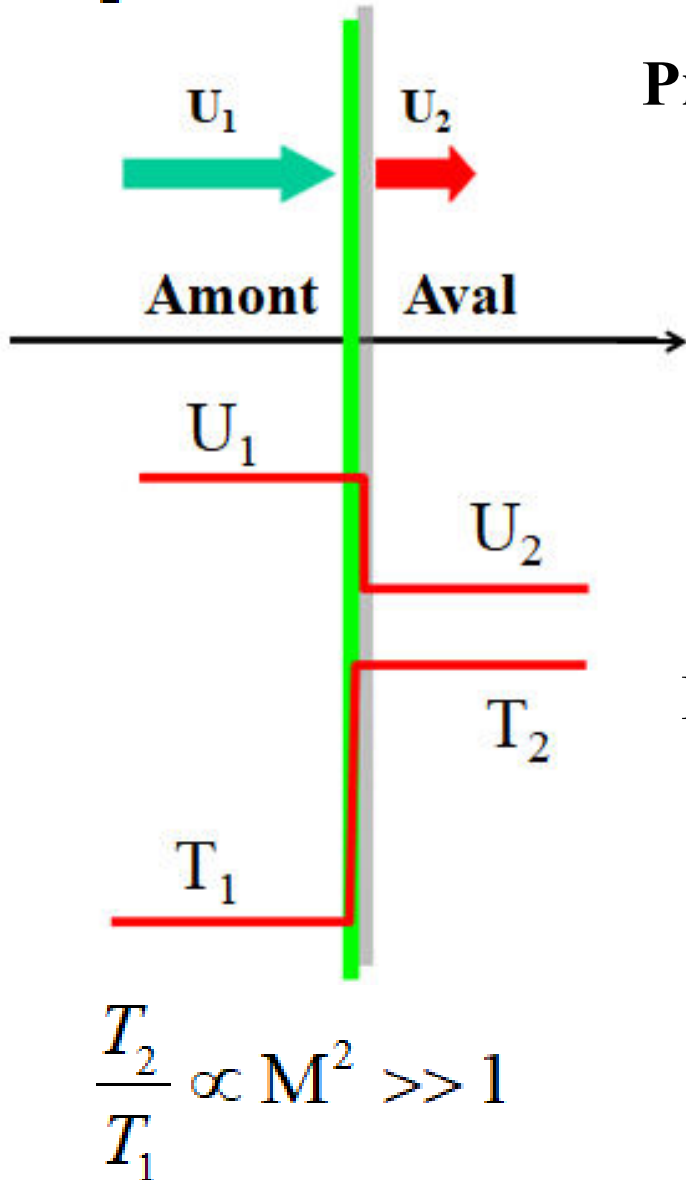
Miroir magnétique



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

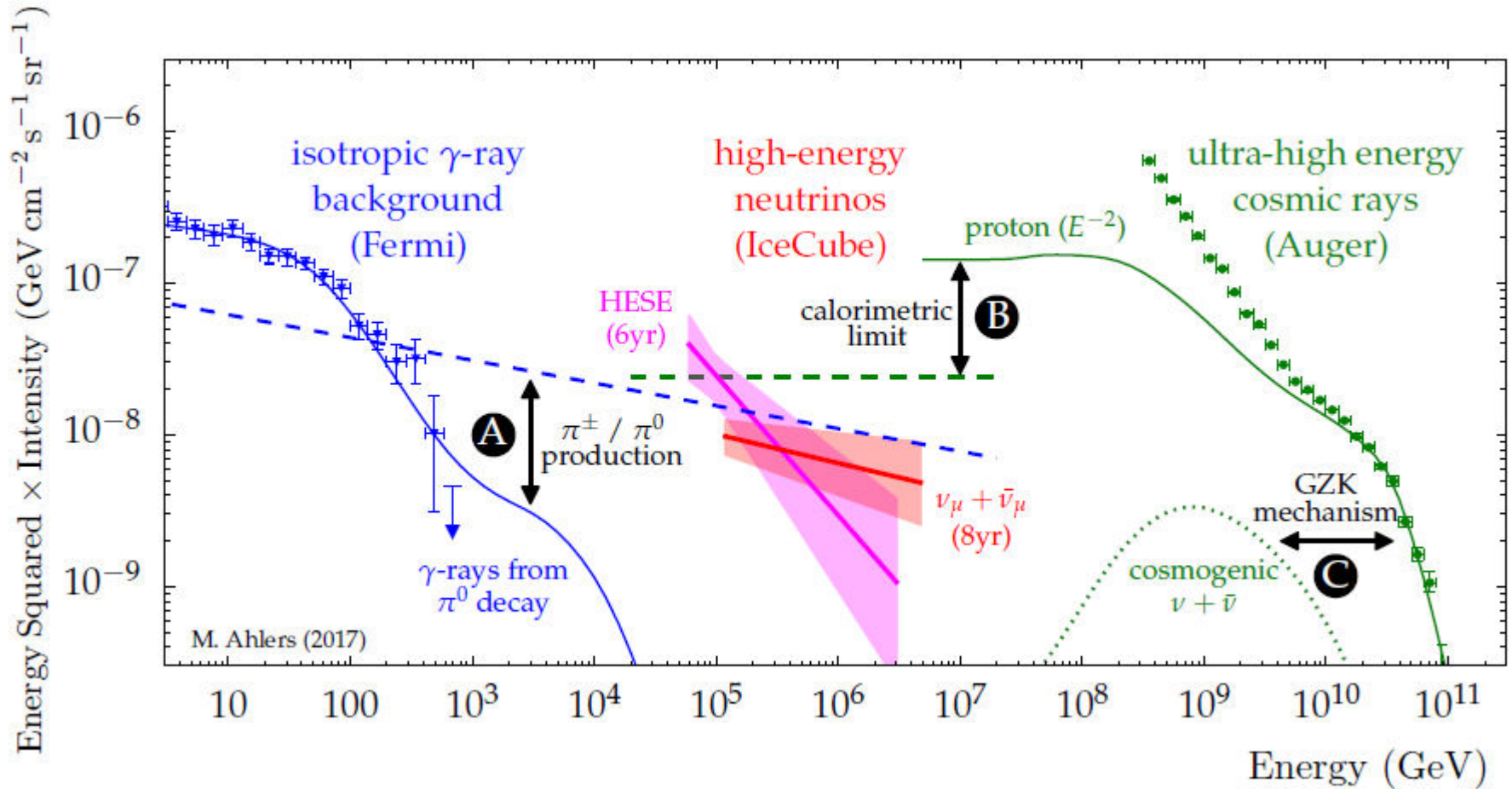
Reflections \rightarrow plusieurs traversées du choc
gain d'énergie de $\beta=(u_2-u_1)/c$ au 1er ordre

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

gain en énergie $\sim \beta^2$

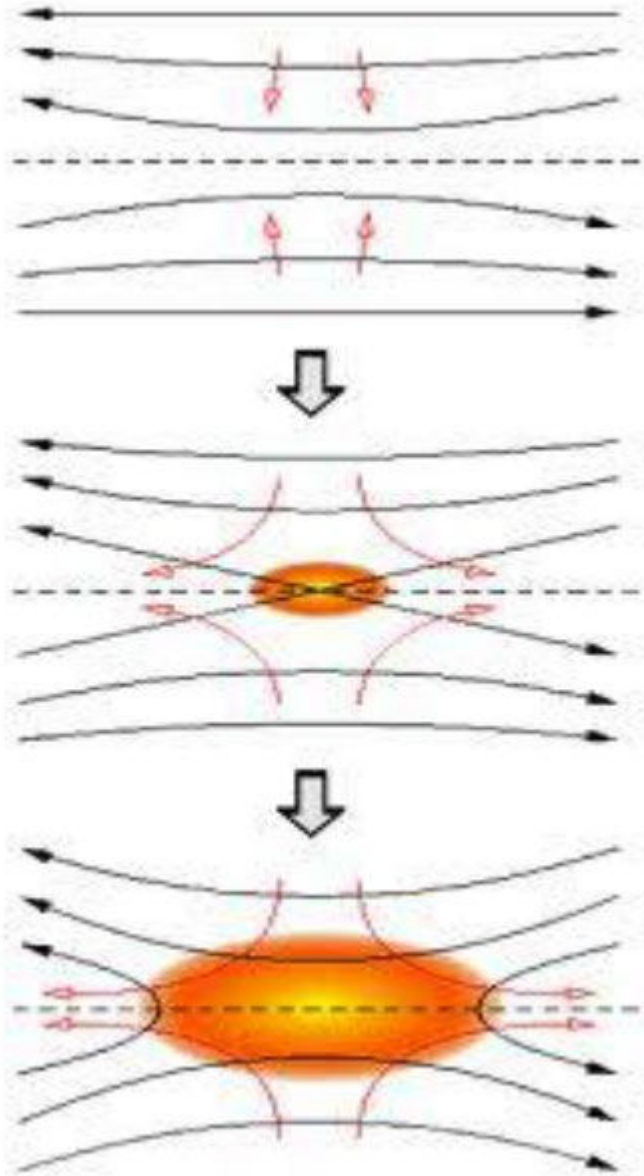
Processus de second ordre
(Fermi 1949)

Contraintes Multi-messagers



- A- CR interactions \rightarrow pions \rightarrow γ et ν ----
- B- CR \rightarrow limite en énergie des protons (----)
- C- UHECR+CMB \rightarrow ν ----- 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 σ

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

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

→ Le champ va accélérer les particules

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

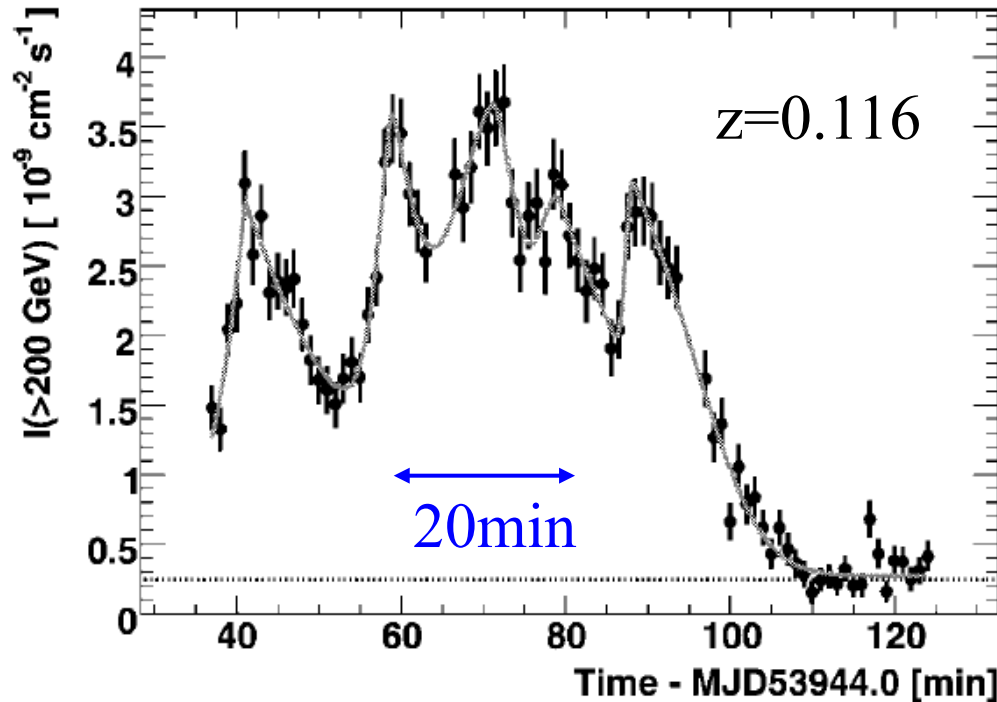
→ ultra-relativiste



Accélération par reconnection

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

E(part) linéaire en temps -- Fermi en (temps)^{1/2}



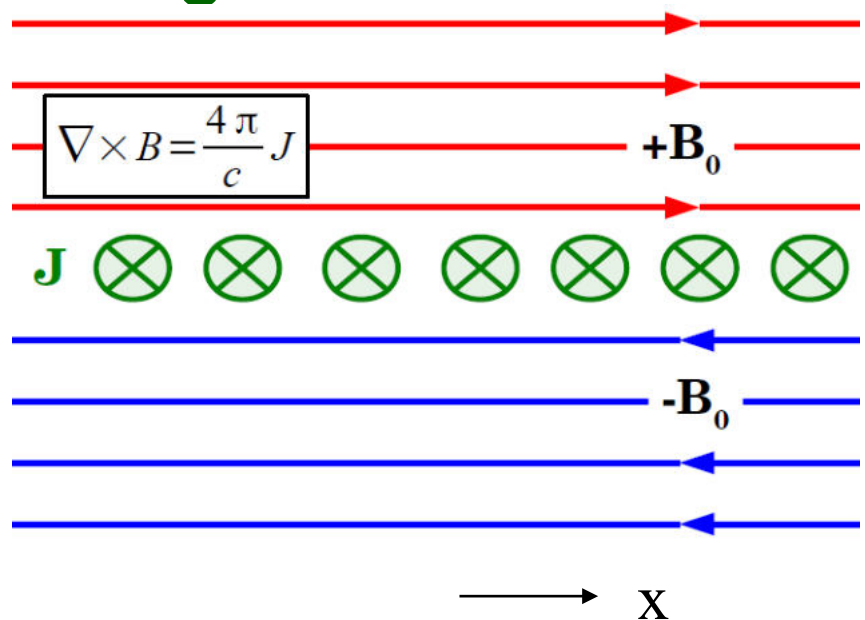
Blazar PKS2155-304
Hautement variable sur
une échelle de la minute
Sursaut $\times 10 I(>200 \text{ GeV})$
5x rapide que Mrk421

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

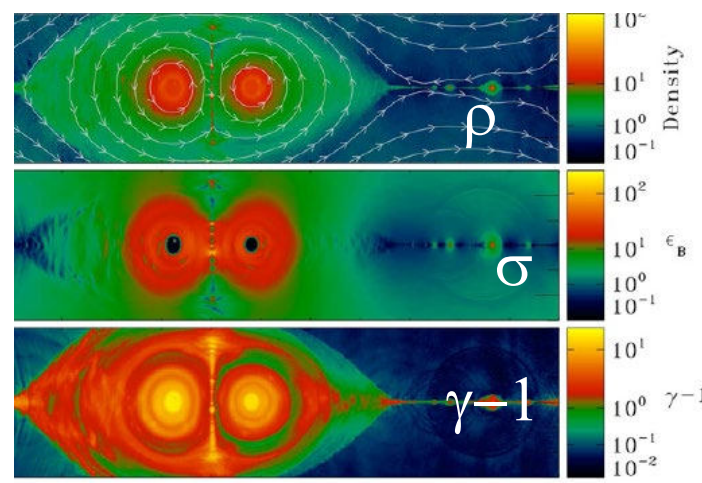
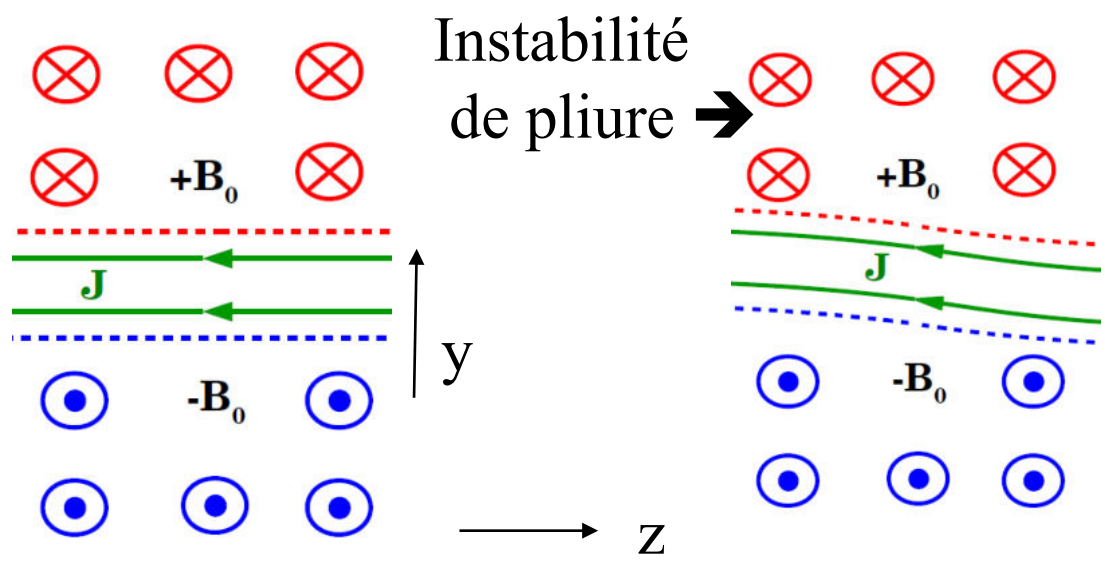
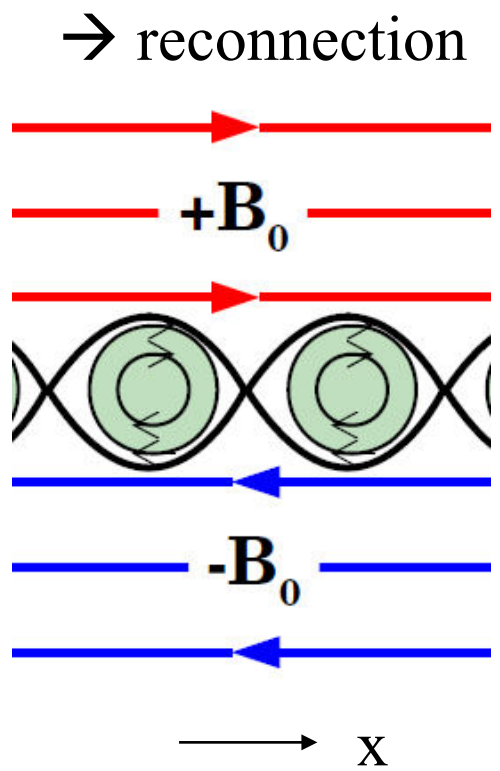
HESS telescope (Namibie)

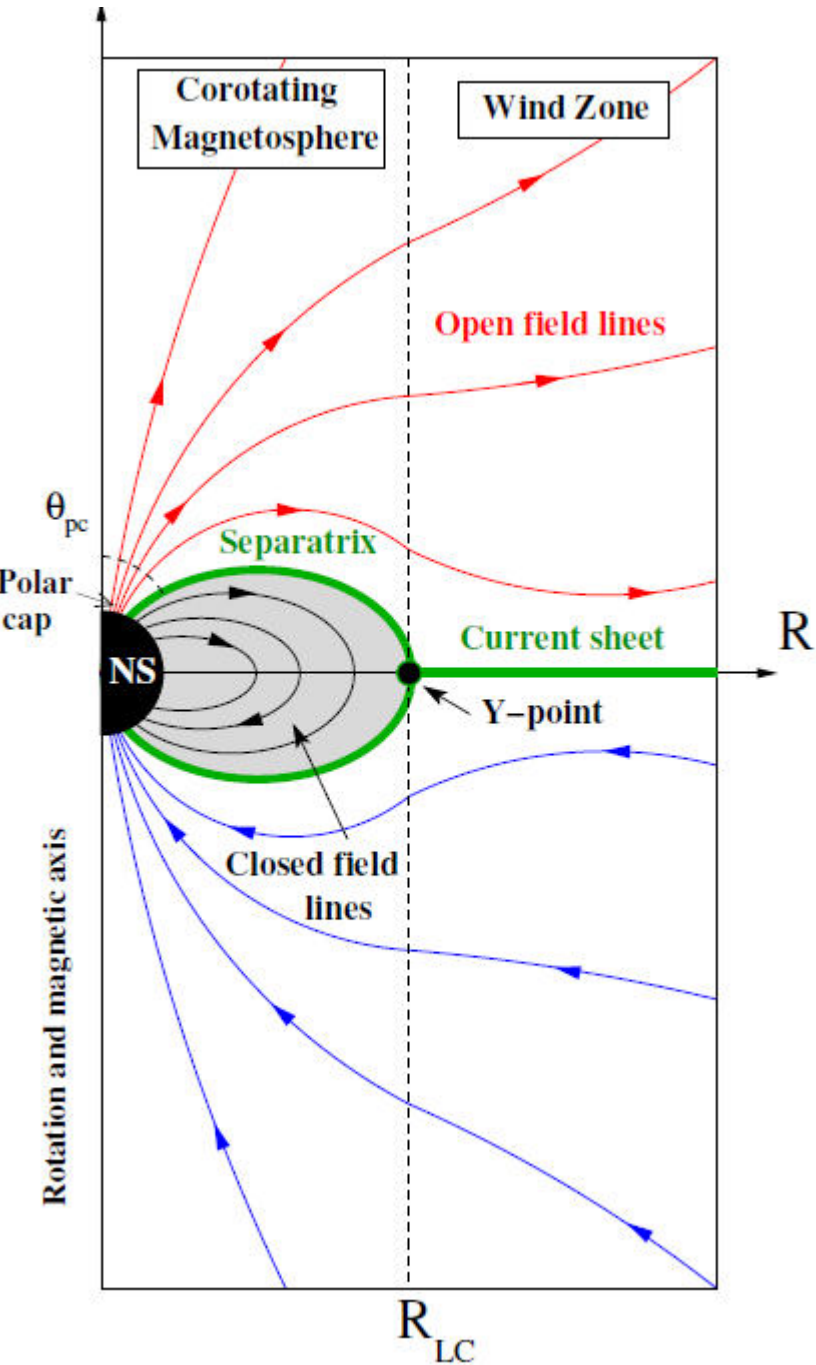
Aharonian et al 2007

Configurations

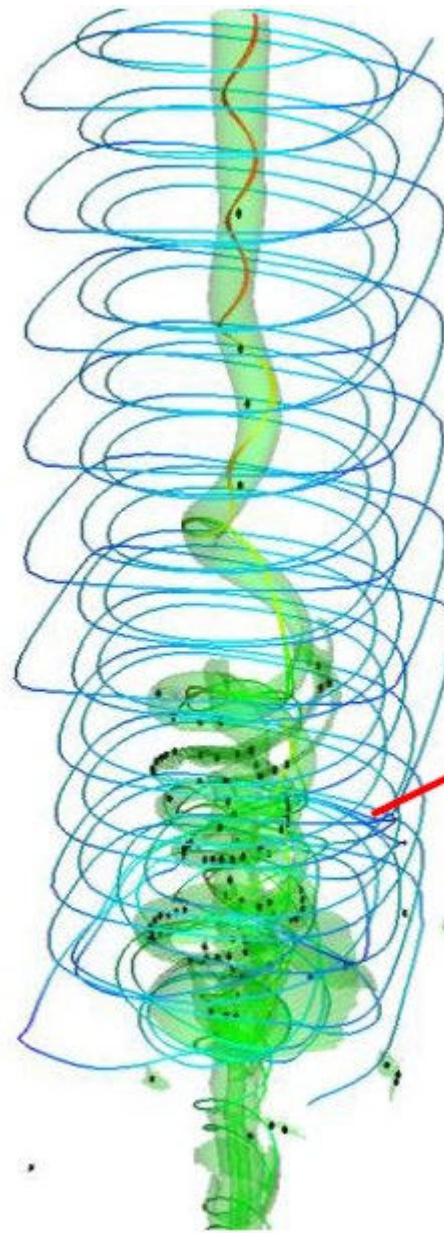


Instabilité de cisaillement →





Cerutti & Beloborodov 2017



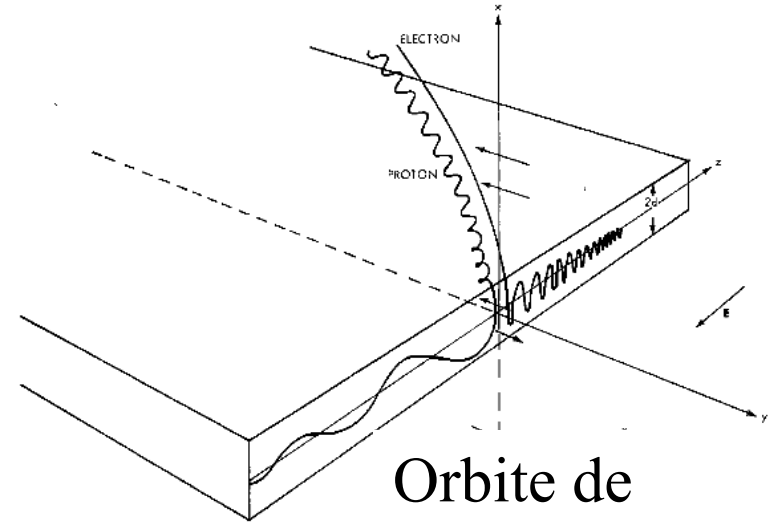
Nappe 2D de courant (pulsar) ou bien jet (1D)

Reconnection et Accélération de particules

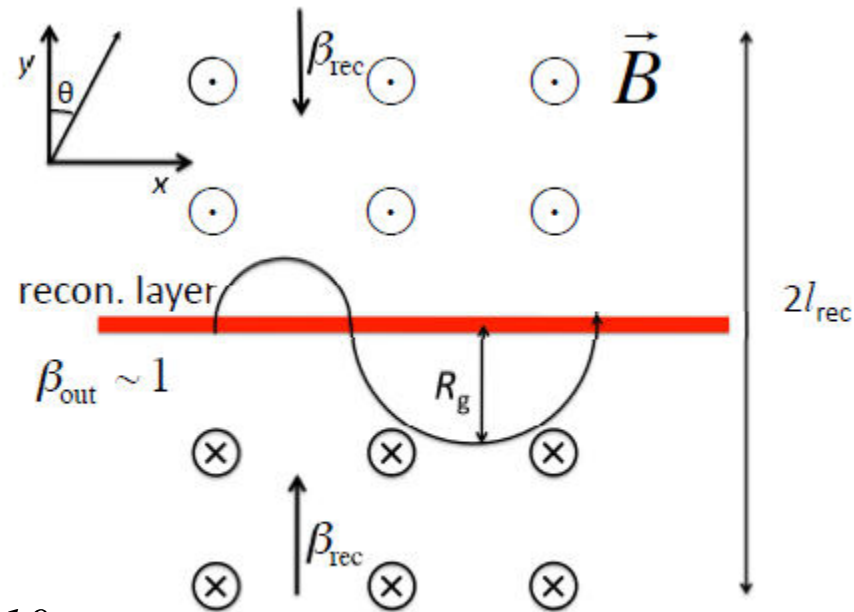
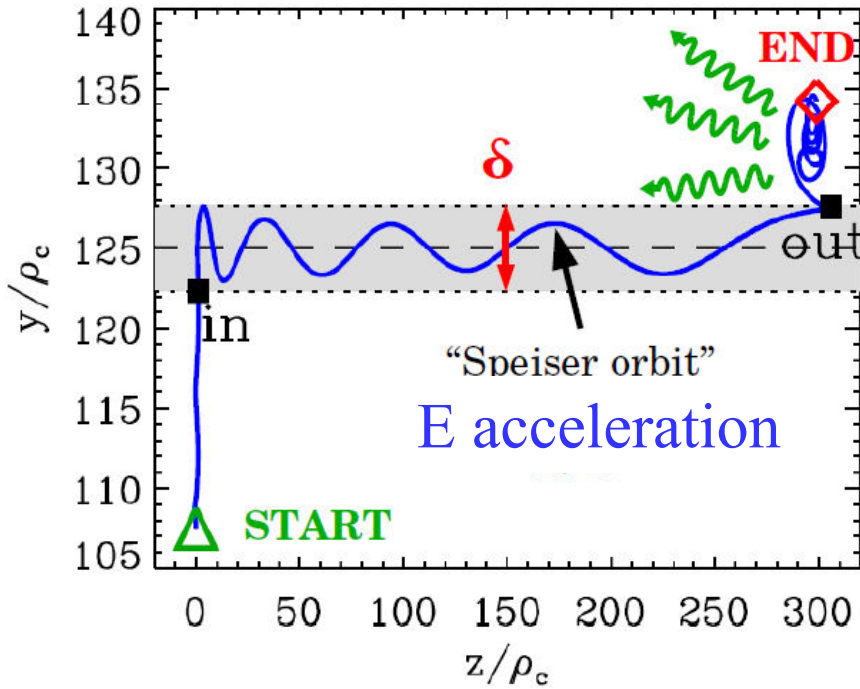
Singh et al 2016

Reconnection magnétique

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



Orbite de Speiser (1965)

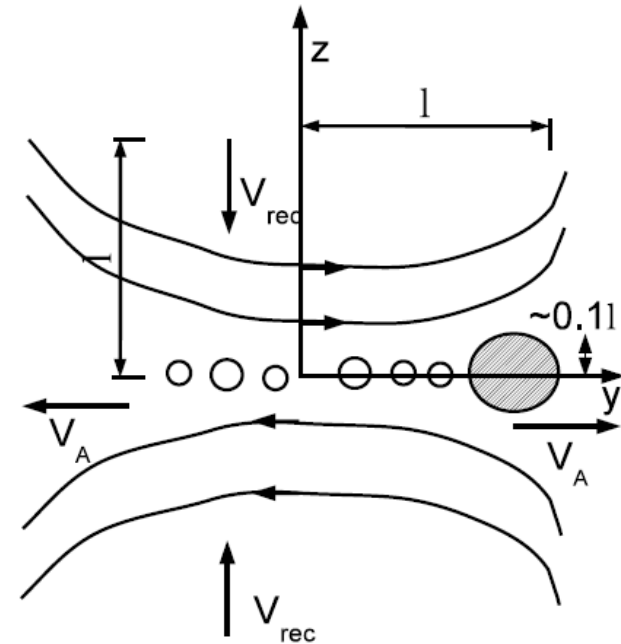
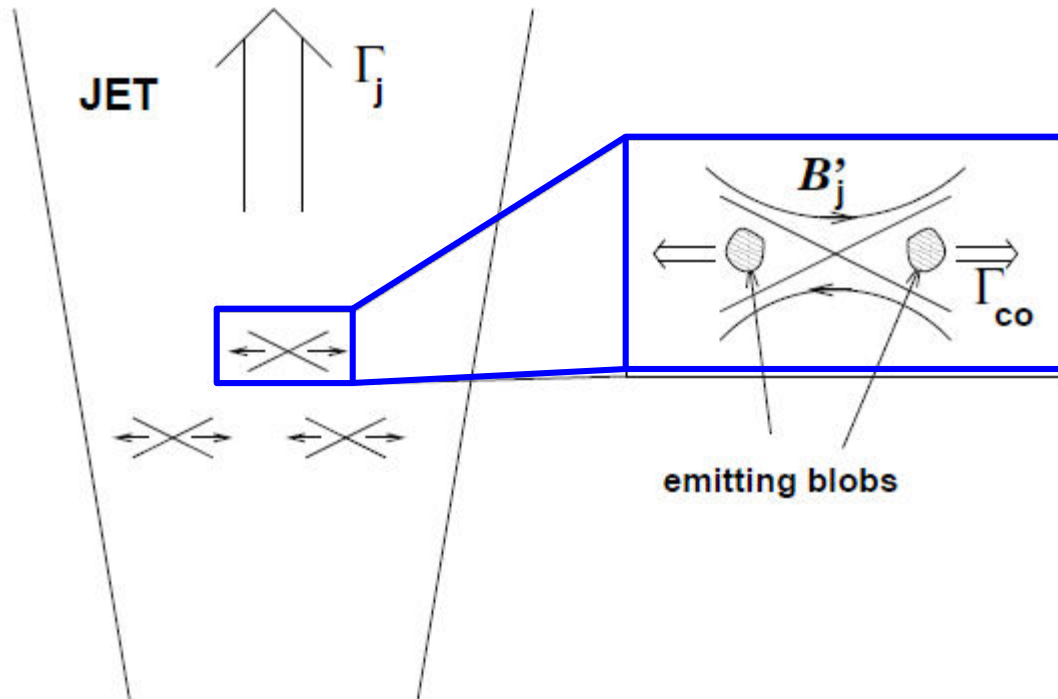


Un jet dans le jet

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 γ



Giannios et al 2009, 2013

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

CR, gamma et neutrinos

Les UHECR sont à l'origine des γ & ν de très haute énergie

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

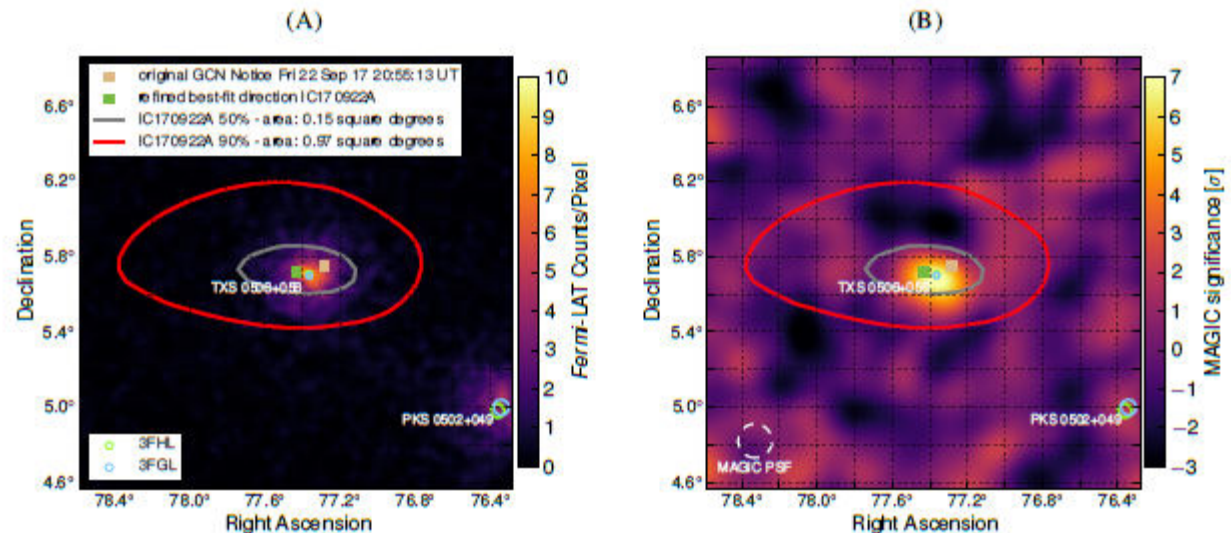
$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$

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

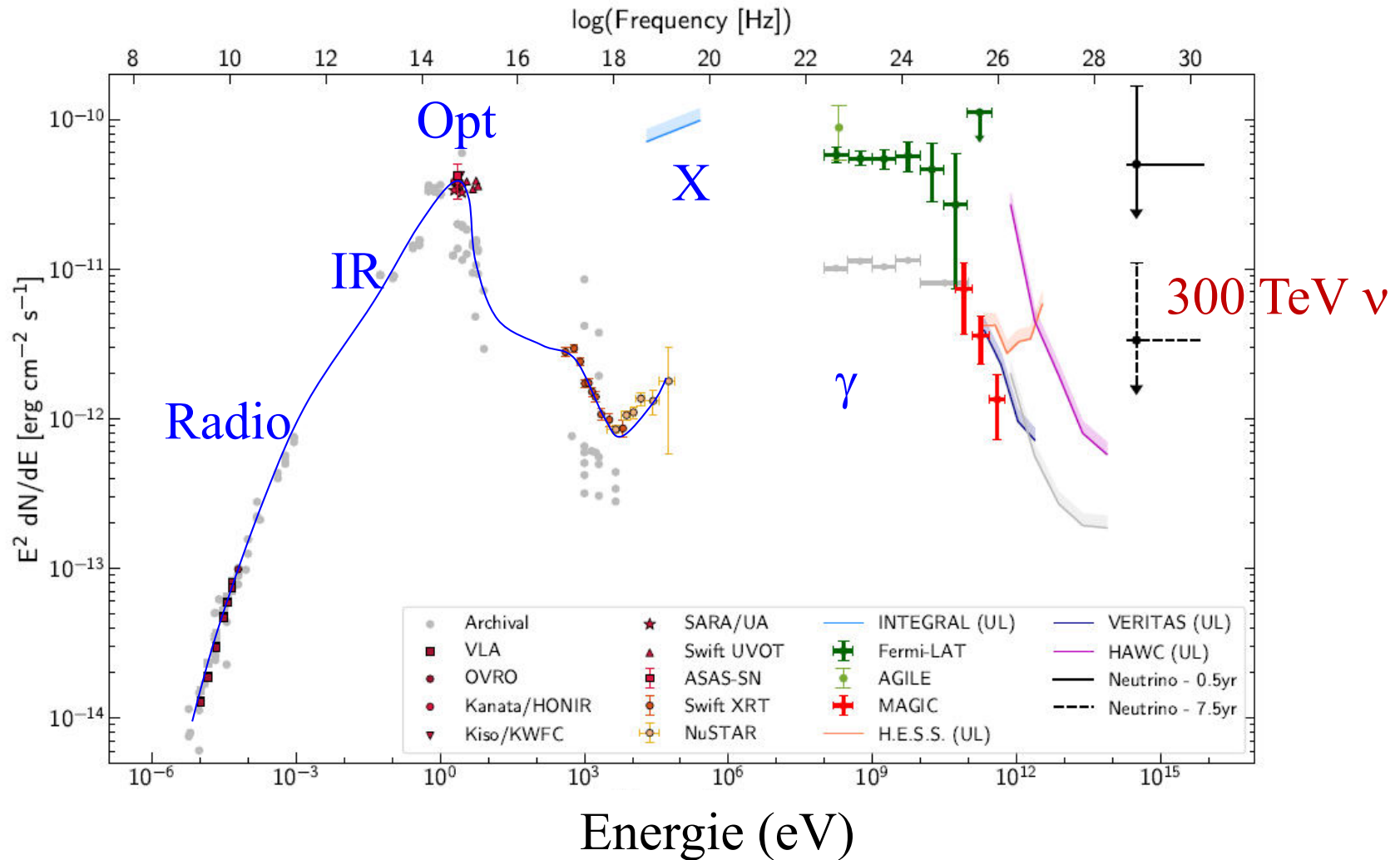
En sep 2017, detection d'un ν de 300 TeV
vers le blazar TXS 0506+056

Coincidence avec radio \leftrightarrow gamma

IceCube-170922A



Spectre multi-longueur-d'onde



IceCube Coll 2018

Excès de ν dans cette direction en 2014-15

Résumé

Plusieurs milliers de blazars connus

Surtout rayons γ , 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)

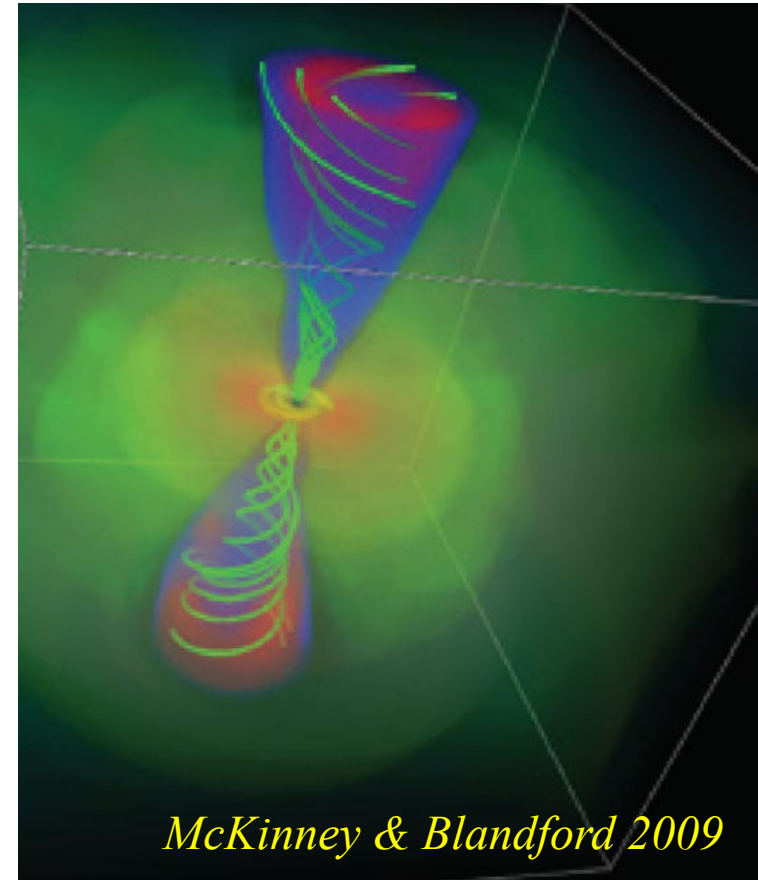
Les phénomènes variables accentués,

Dissipation à 5000 R_g

→ Phénomènes magnétiques, collimation

→ Instabilités (plis): courant/jet plasma

→ UHECR, accélération de particules



McKinney & Blandford 2009