

# Emission gamma de haute énergie dans les binaires

Julien Malzac  
IRAP  
CNRS - Université de Toulouse

avec l'aide de Benoit Cerutti (Boulder) et Renaud Belmont (IRAP)

## **I -Binaires gamma: Introduction**

- Binaires compactes détectées à THE (GeV /TeV)**
- Modèles /processus radiatifs/ échelles temporelles**

## **II- Microquasars**

- Observations:**
  - Cyg X-3: le premier microquasar au GeV**
  - Cyg X-1: une detection marginale au TeV**
- Modélisation: contraintes sur l'origine de l'emission gamma**

## **III- Binaires à pulsar**

- Le modèle du vent de pulsar choqué**
- Application aux observations:**
  - PSR B1259**
  - LS5039**
  - LSI 61 303**

## **IV- Perspectives**

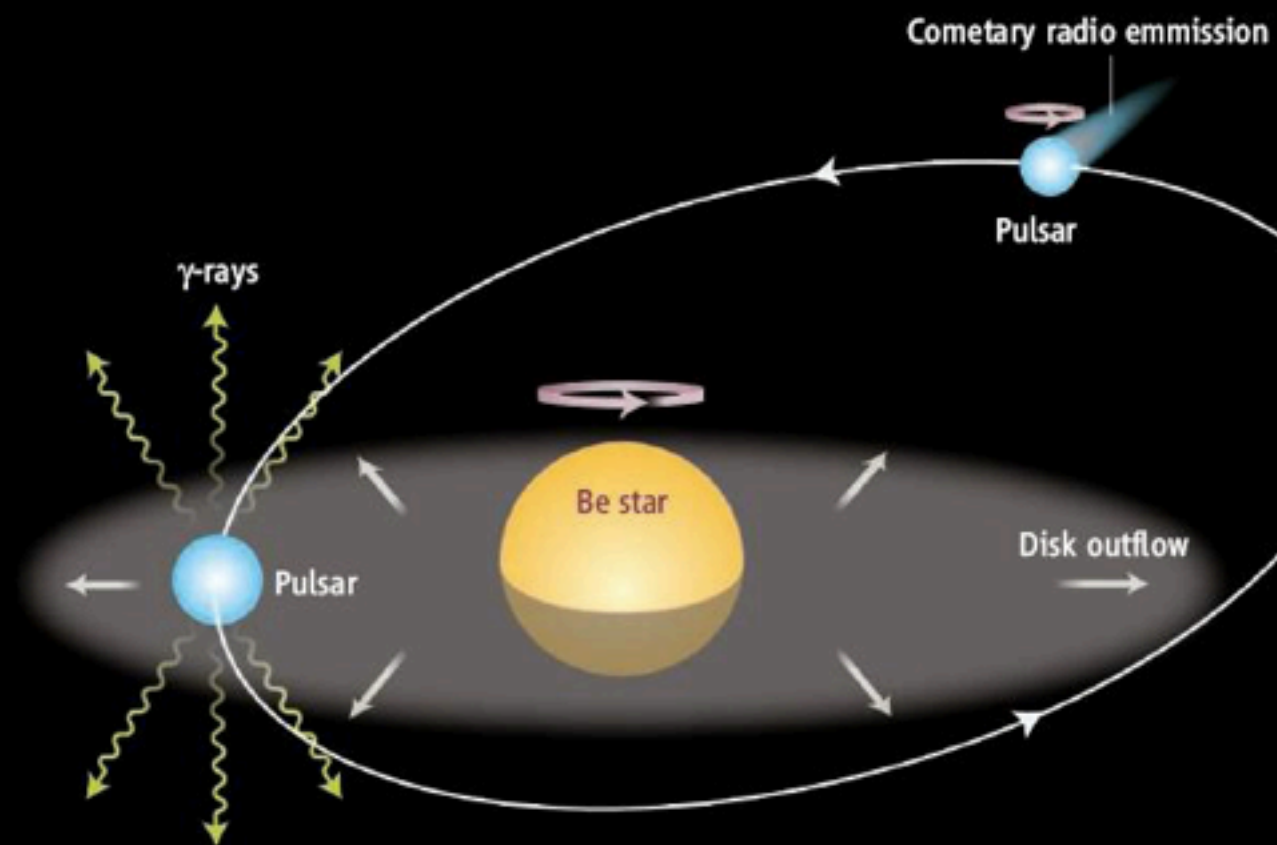
Objet	PSR B1259-63	LS 5039	LSI +61 303	Cyg X-3	Cyg X-1	HESS J0632+057	1FGL J1018.6-5856
instrument	HESS FERMI	HESS EGRET FERMI	MAGIC VERITAS EGRET FERMI	AGILE FERMI	MAGIC AGILE	HESS MAGIC VERITAS	FERMI
détection au TeV	$13\sigma$	$\sim 100\sigma$	$>10\sigma$	non	$4\sigma$	$>5\sigma$	non
signal THE	variable	périodique	périodique /variable	périodique /sursauts	sursaut	variable	périodique
Torb (jours)	1240	3.9	26	0.2	5.6	320	16.6
objet compact	NS	?	?	?	trou noir	?	?
mécanisme dissipatif	rotation (pulsar)	pulsar?	pulsar ?	accrétion (micro quasar)	accrétion (micro quasar)	?	?
Type étoile	B	O	B	WR	O	Be?	O
$L_*$ (erg/s)	$3 \cdot 10^{37}$	$7 \cdot 10^{38}$	$10^{38}$	$2 \cdot 10^{39}$	$1.3 \cdot 10^{39}$	$10^{38}$	$10^{39}$



# Deux classes de binaires gamma

## Pulsars

Etoile massive + pulsar jeune  
(Maraschi & Treves 1980,  
Dubus 2006)



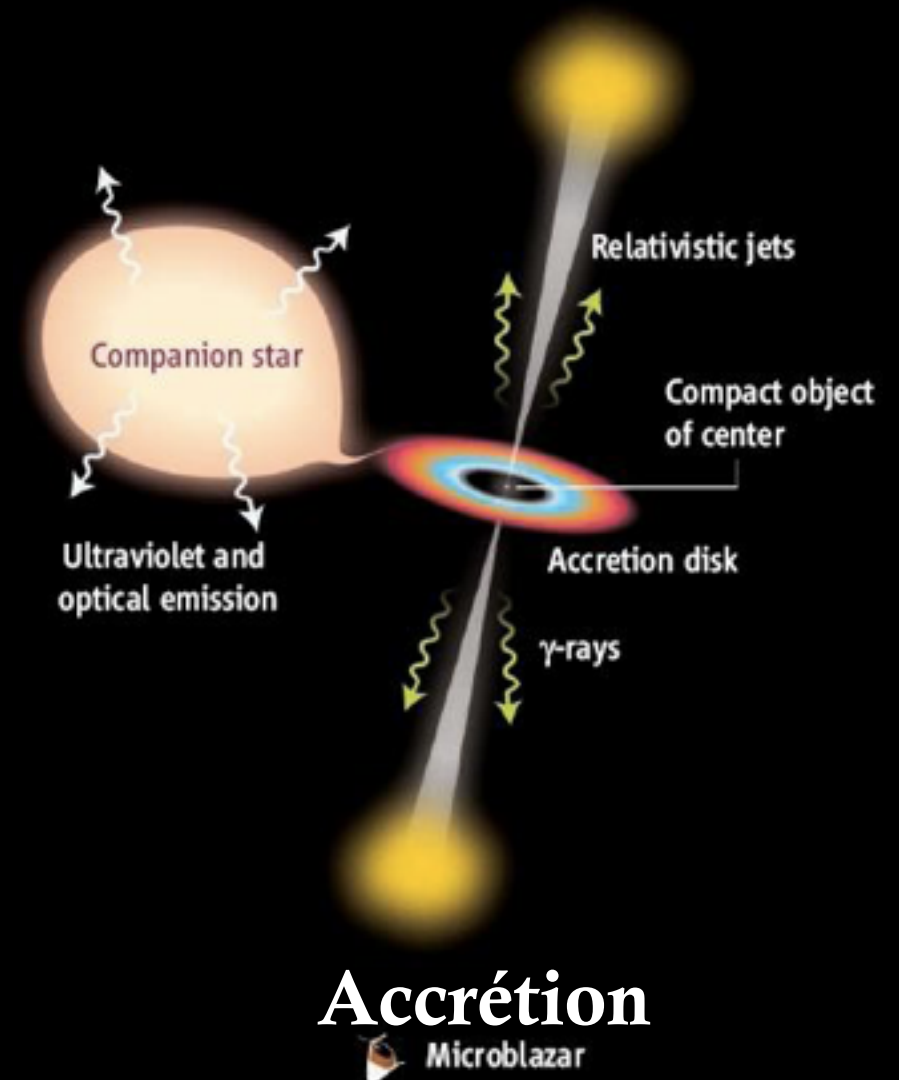
**ROTATION**

PSR B1259-63

LSI +61 303, LS 5039, (HESS J0632+057)

## Microquasar

Etoile massive +  
object compact  
accrétant



**Accrétion**

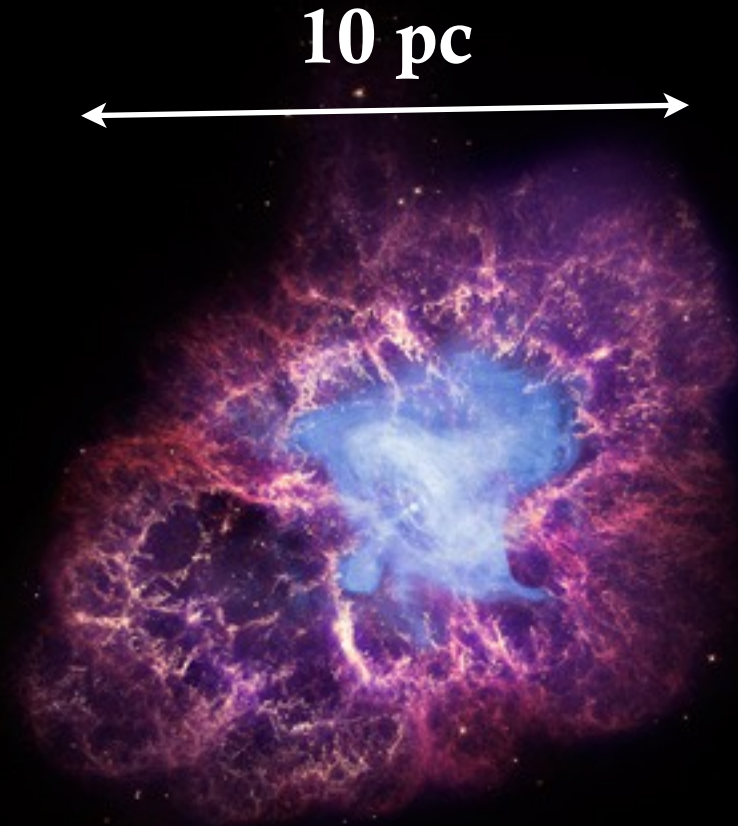
Cyg X-3

Cyg X-1

# Pourquoi est ce intéressant ?

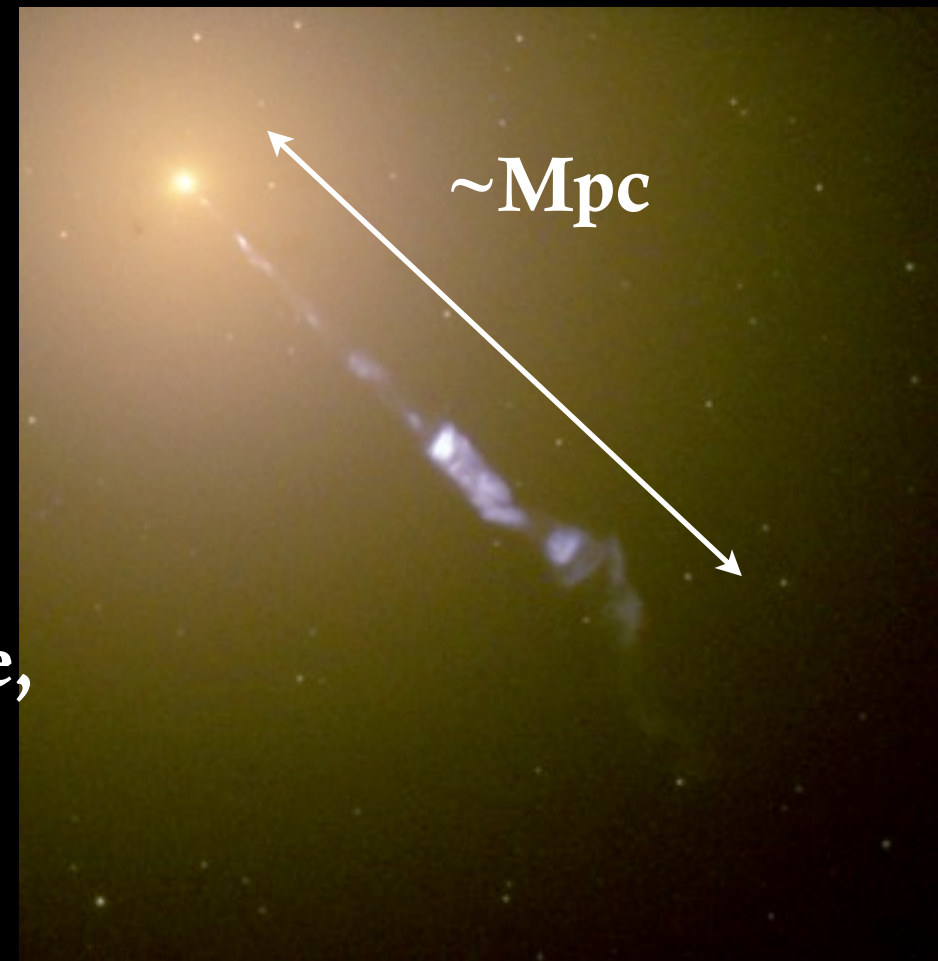
## Binaires à Pulsar

- Sonder des vents relativistes à petite échelle:  $\sim 0.1$  UA
  - ▶ Systèmes proches
  - ▶ Condition physiques bien contraintes (orbite, champs de rayonnement stellaire)
- Application aux pulsars et PWN
- Etude d'une nouvelle classe d'objet astrophysique (population, évolution).



## Microquasars

- Physique des jets relativistes, couplage accréation éjection
  - ▶ Systèmes proches
  - ▶ Condition physique bien contraintes (orbite, champs de rayonnement stellaire)
- Application aux NAGs & Sursauts gamma



# Accélération

$$r_L = \frac{\gamma m_e c^2}{qB} < R \quad \Rightarrow \quad \gamma_{\max} < \frac{RB}{m_e c^2} \simeq 8.8 \times 10^8 R_{0.1} B_1$$

$$t_{\text{acc}} = \frac{r_L}{\xi c} \simeq 5.7 \times 10^{-2} \frac{\gamma_6}{\xi B_1} \text{ s} \quad 0 < \xi < 1$$

$$t_{\text{acc}} = t_{\text{syn}} \quad \Rightarrow \quad \gamma_{\max} \simeq 1.2 \times 10^8 \xi^{1/2} B_1^{-1/2}$$

$$E_{\max} = \gamma_{\max}^2 2h\nu_B = \frac{9}{4} \xi \frac{m_e c^2}{\alpha_f} \simeq 160 \xi \text{ MeV}$$

# Processus radiatifs

- Emission Inverse Compton de paires  $e^+e^-$  sur photons de l'étoile compagnon + synchrotron

- Temps de refroidissement :

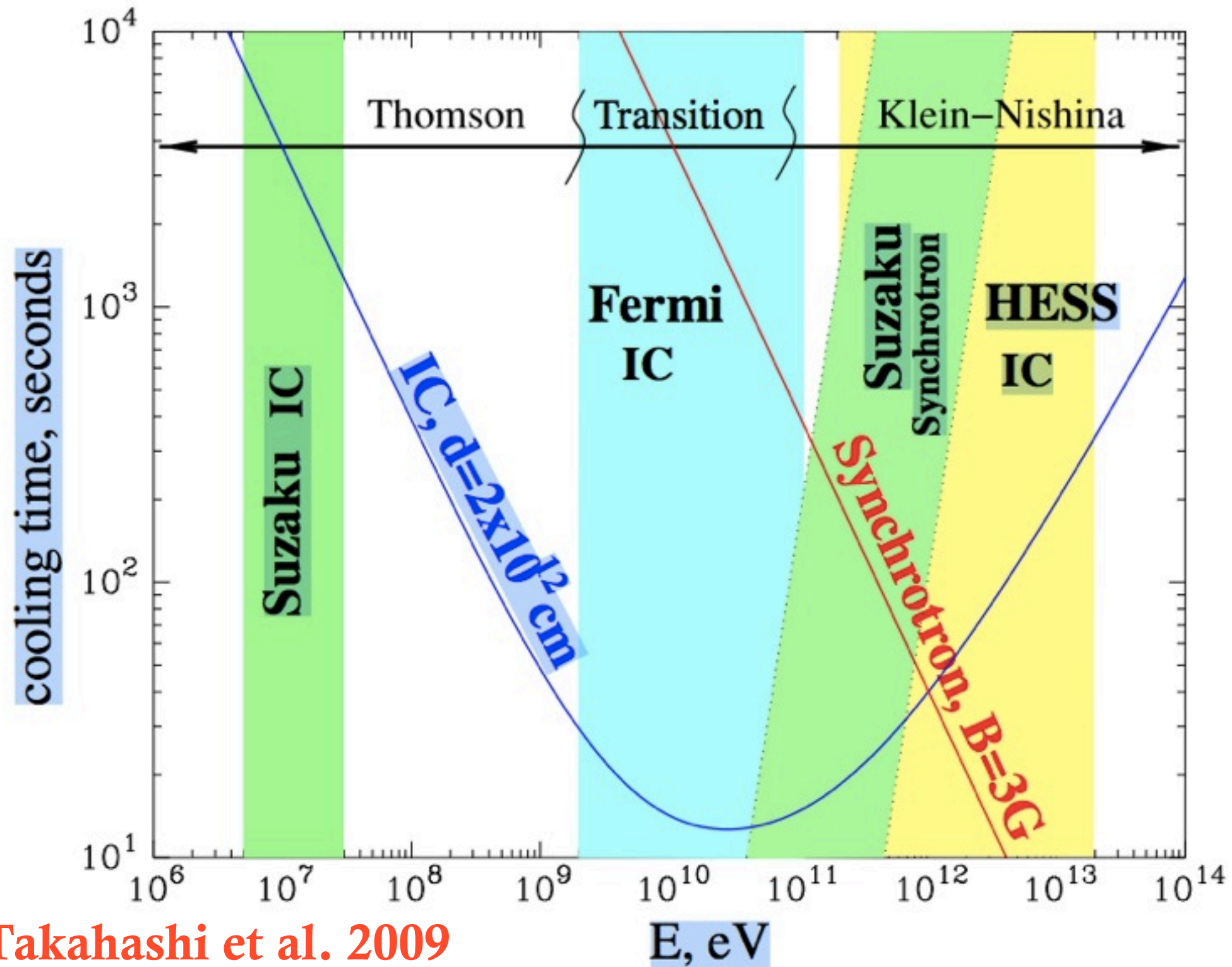
$$t_{\text{IC}} = 20 \frac{\gamma_6 d_{0.1}^2 T_{\star,4} R_{\star,4,10}}{\ln \gamma_6 + 1.3} \text{ s}$$

$$t_{\text{sync}} = 770 \gamma_6^{-1} B_1^{-2} \text{ s}$$

➡ Compton Inverse est généralement le processus de refroidissement dominant



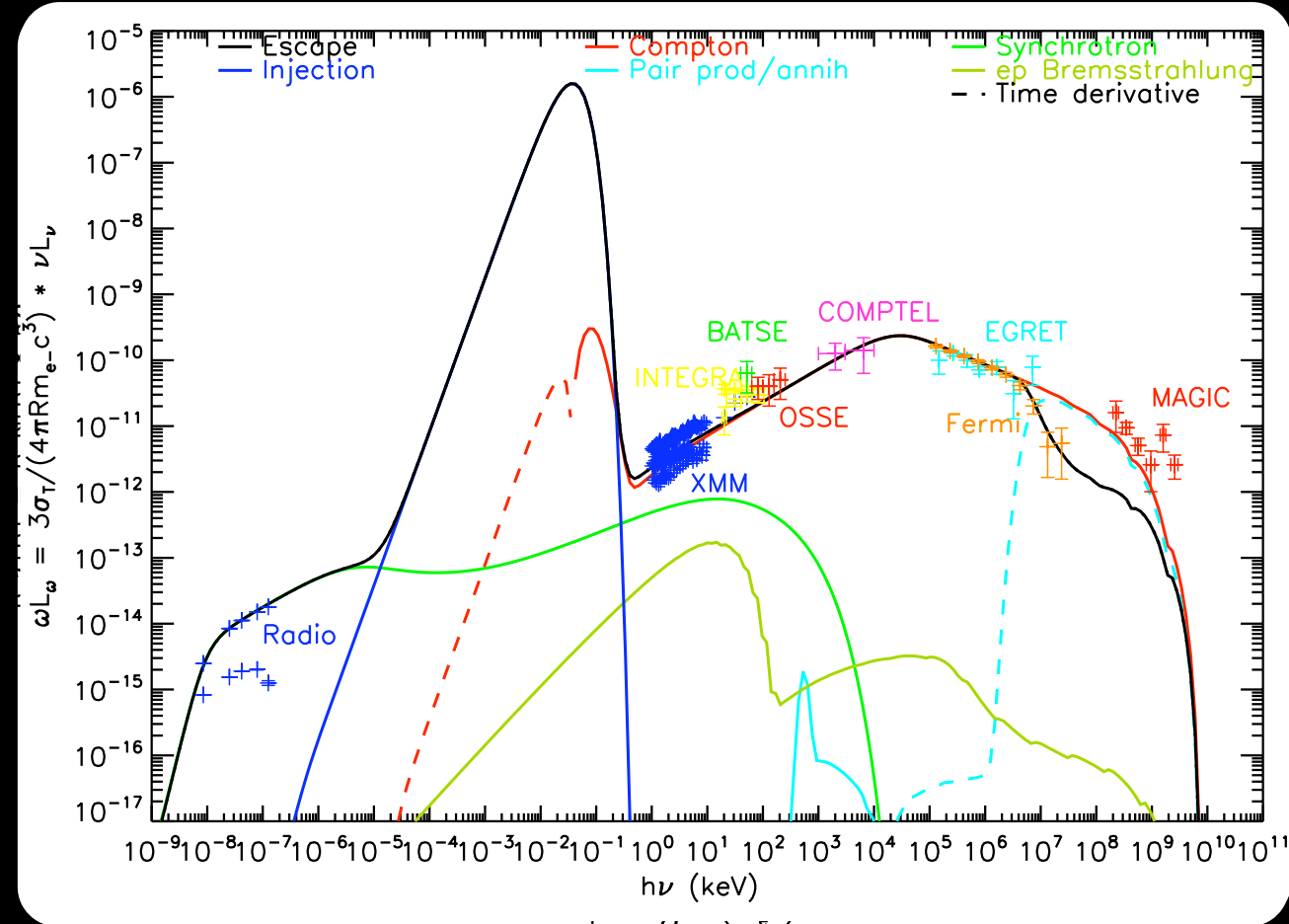
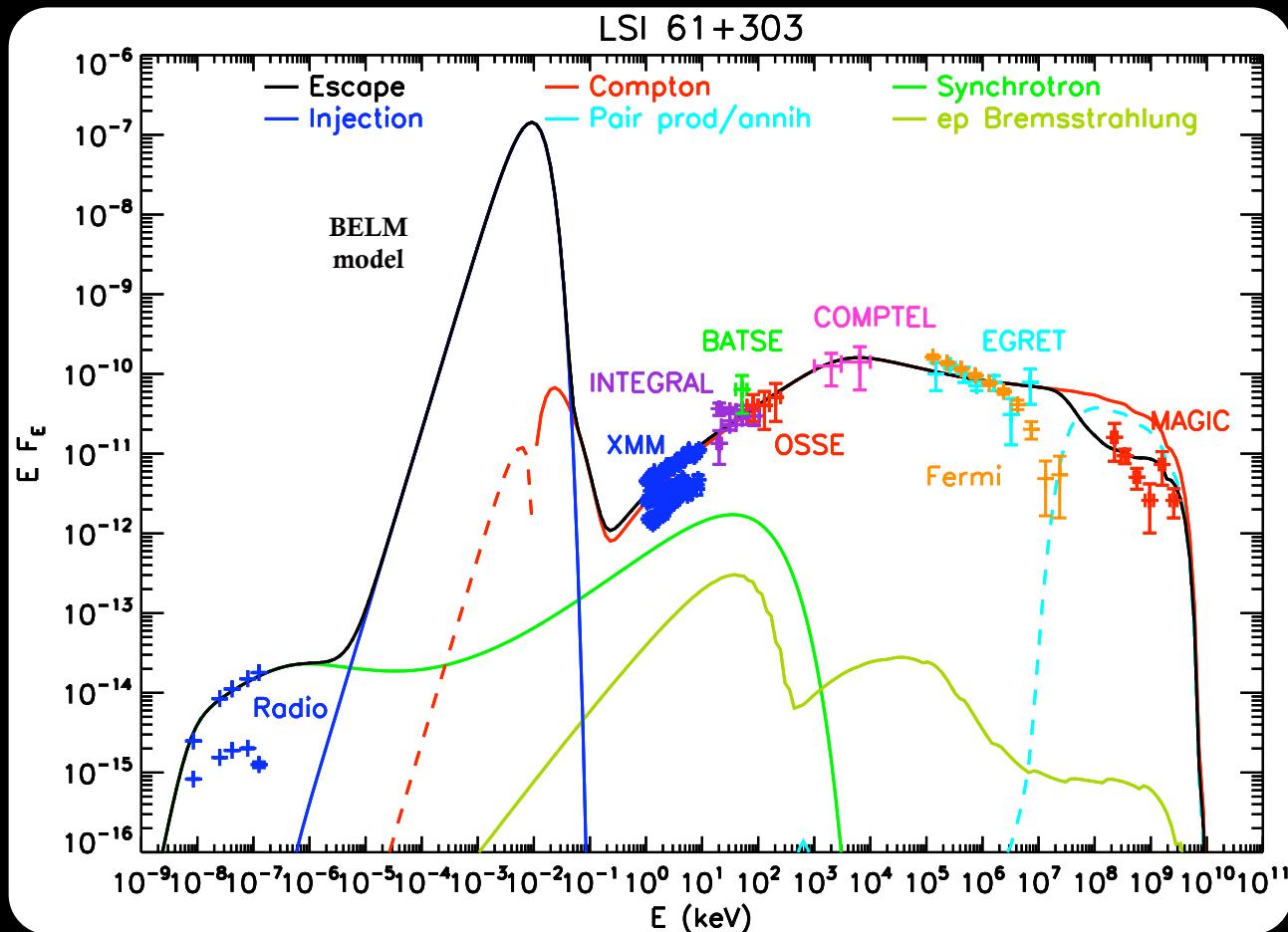
# Temps de refroidissement



Takahashi et al. 2009



# Processus d'émission: modèle à une zone



- Injection continue d'électrons en loi de puissance ( $\gamma_{\min}=400$  ,  $\gamma_{\max}=10^7$  )
- Refroidissement et thermalisation par **Inverse Compton**, synchrotron, collisions Coulomb, bremsstrahlung.
- Production de paires  $e^+e^-$
- Temps d'échappement supposé très grand devant temps de refroidissement.

# Processus d'émission fortement anisotropes

- Anisotropie Compton:

- ▶ collisions photon-électron frontales favorisées

si électrons isotropes: émission focalisée vers la source de photons mous

- ▶ + effets spectraux en régime KN

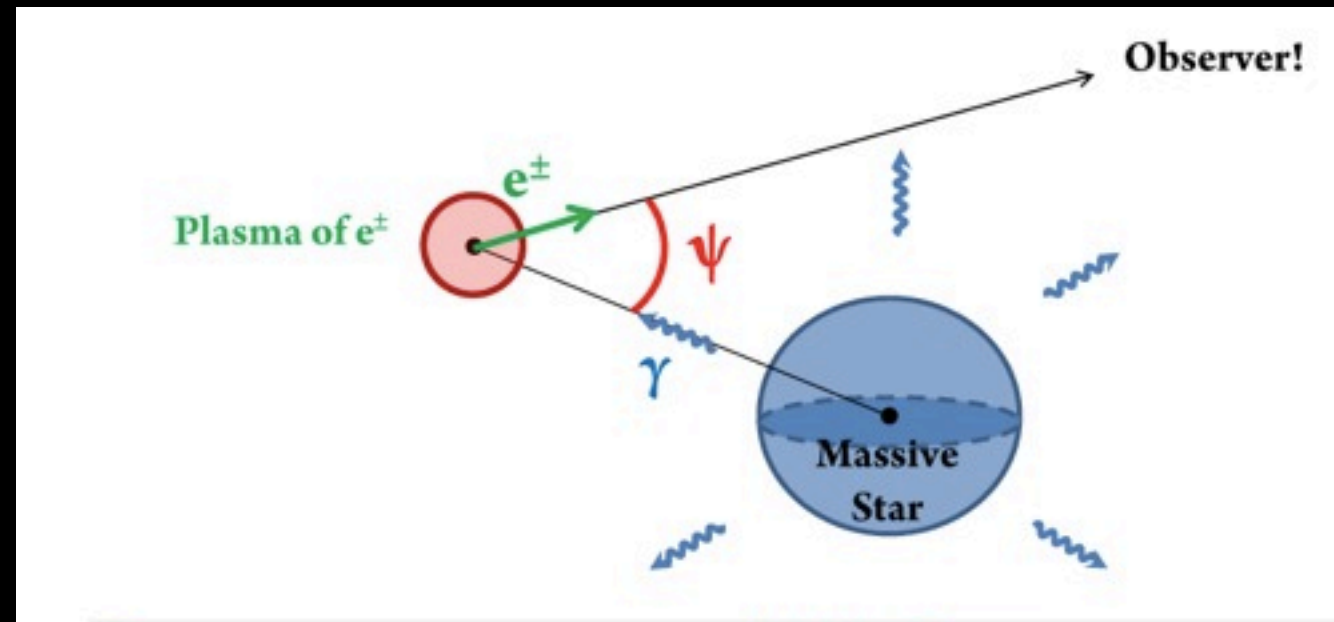
- Opacité gamma-gamma: photons Gamma plus absorbés si:

- ▶ près de l'étoile

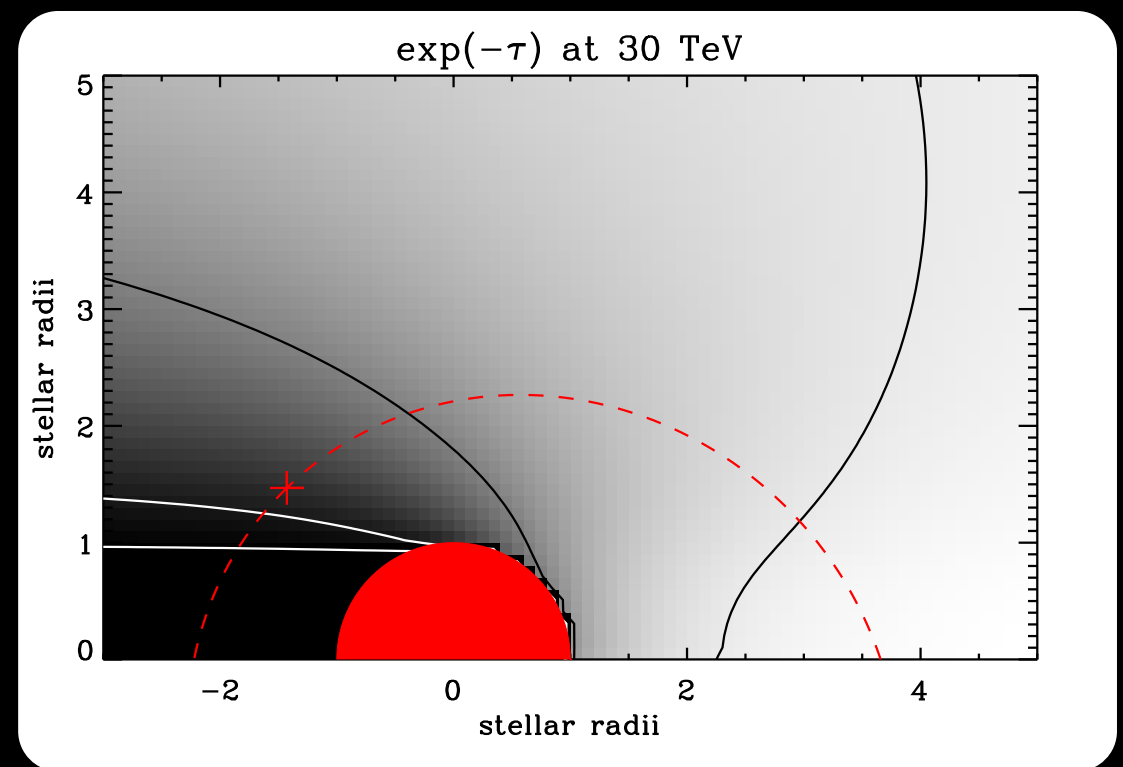
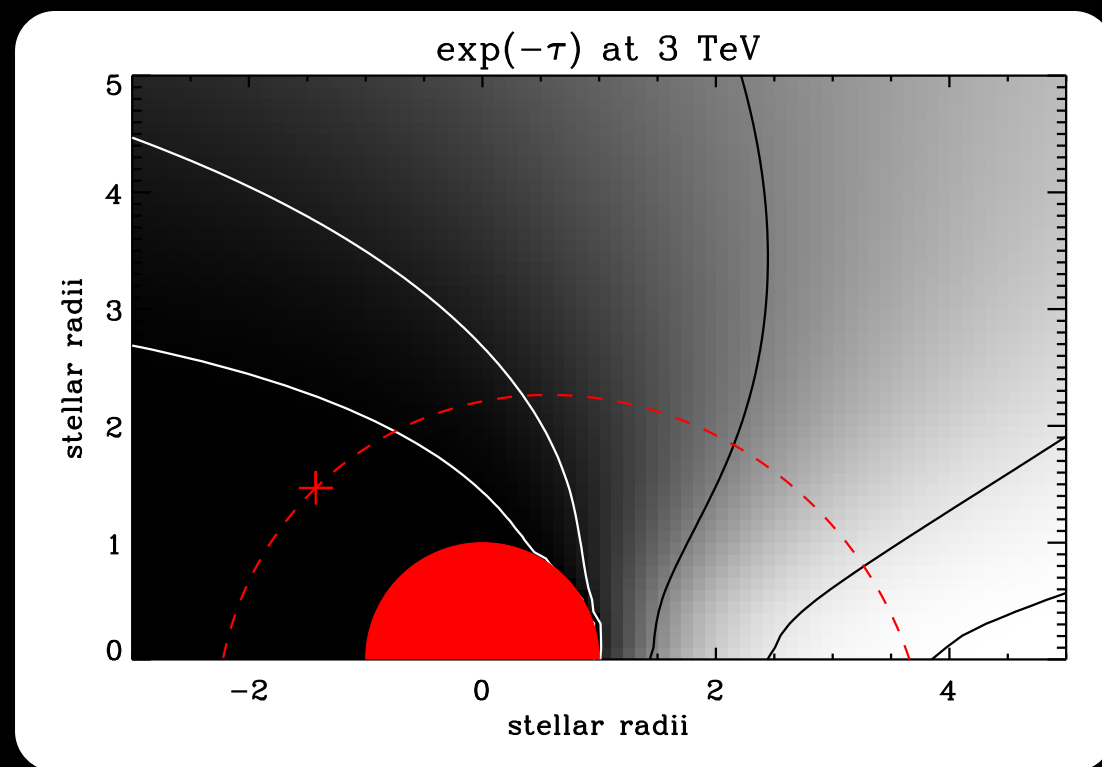
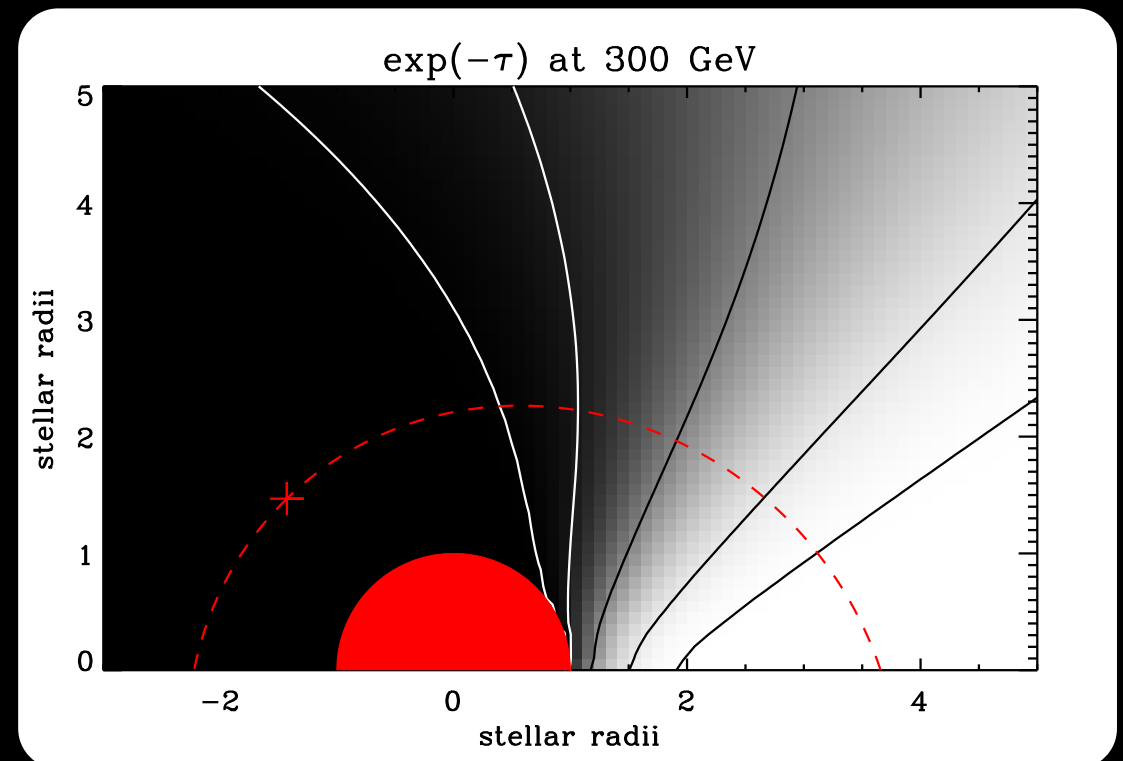
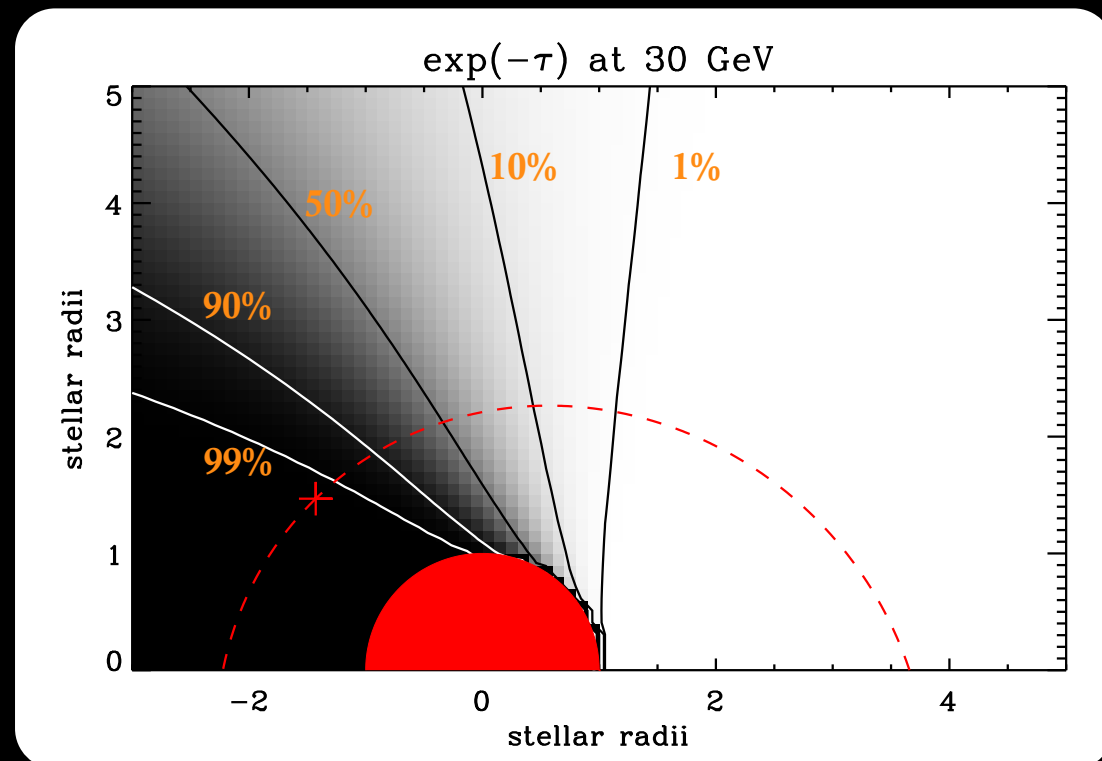
- ▶ propagation en direction de l'étoile

- Flux et spectre THE observés dépendent de la phase orbitale

(cf Dubus 2006; Dubus, Cerutti & Henri 2008)



# Opacité gamma-gamma



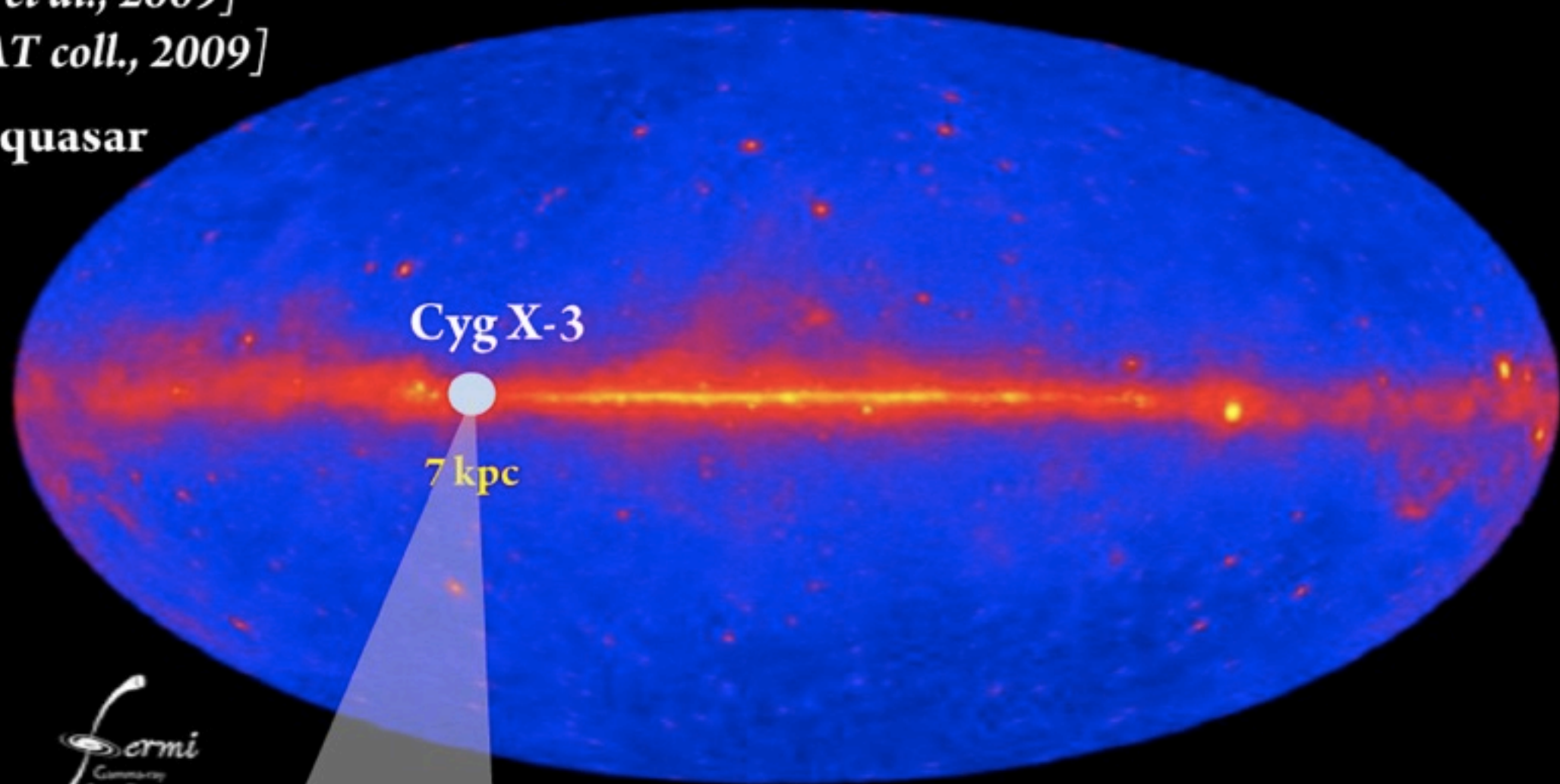
(Dubus 2006)

# Cyg X-3: le premier microquasar au GeV

[Tavani et al., 2009]

[Fermi LAT coll., 2009]

● Microquasar



©NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

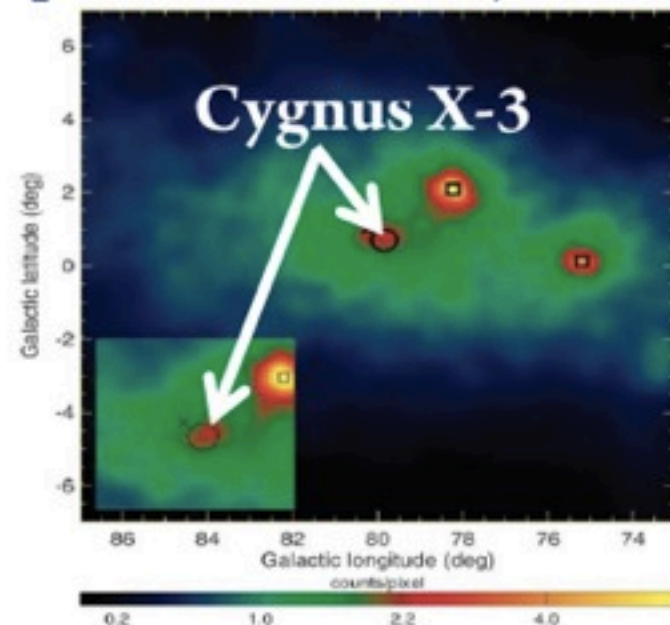


4.8 hours

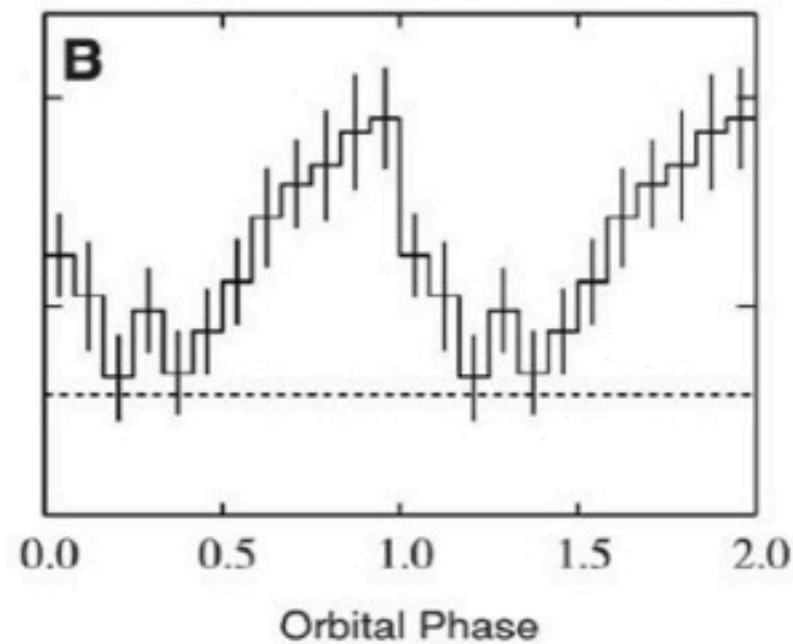


# Cyg X-3: le premier microquasar au GeV

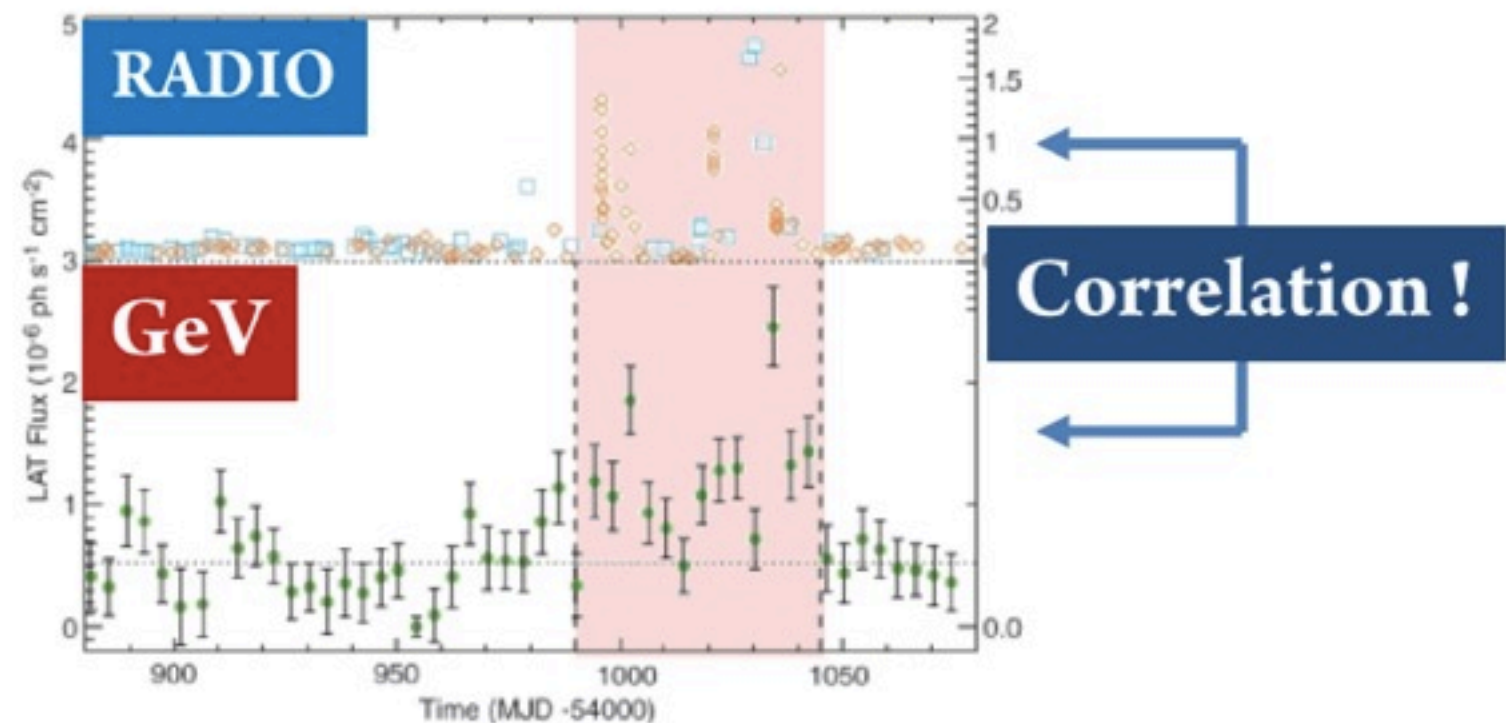
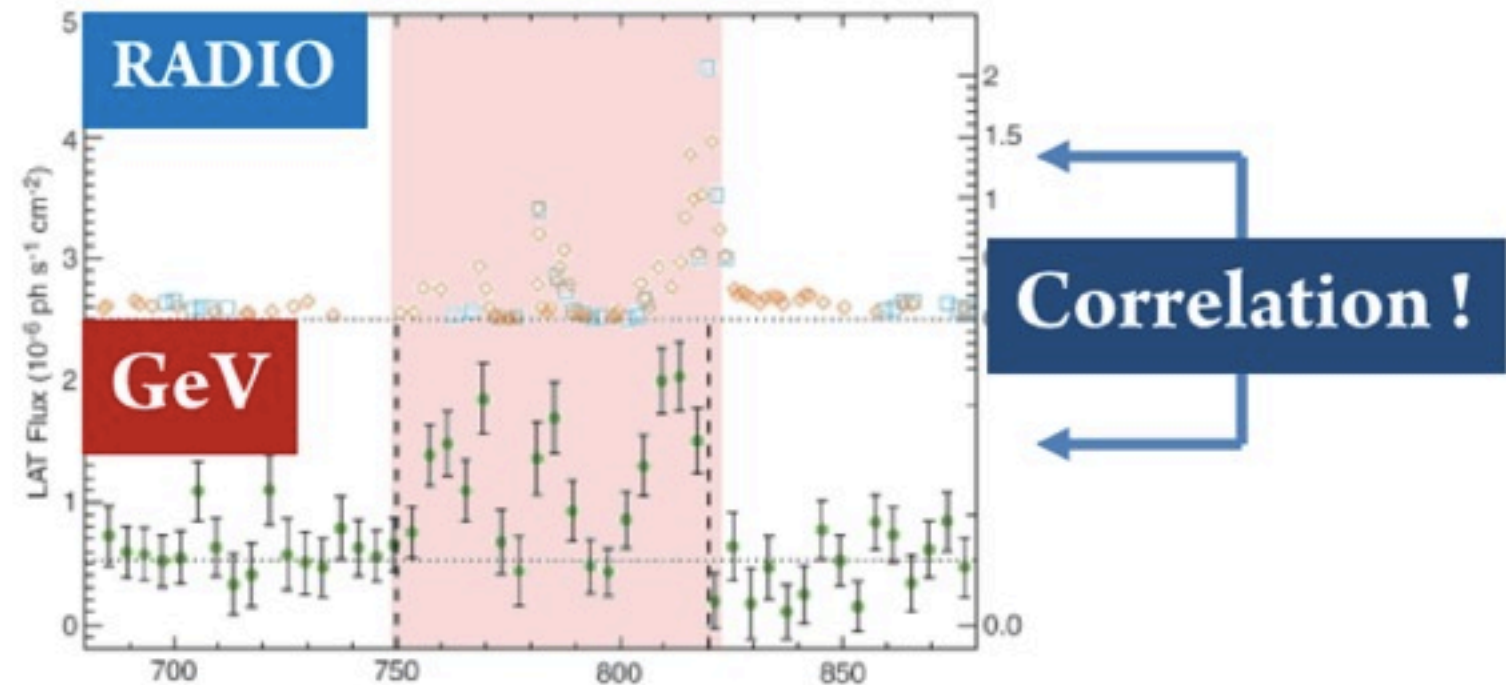
[Fermi LAT coll., 2009]



**GeV light curve**

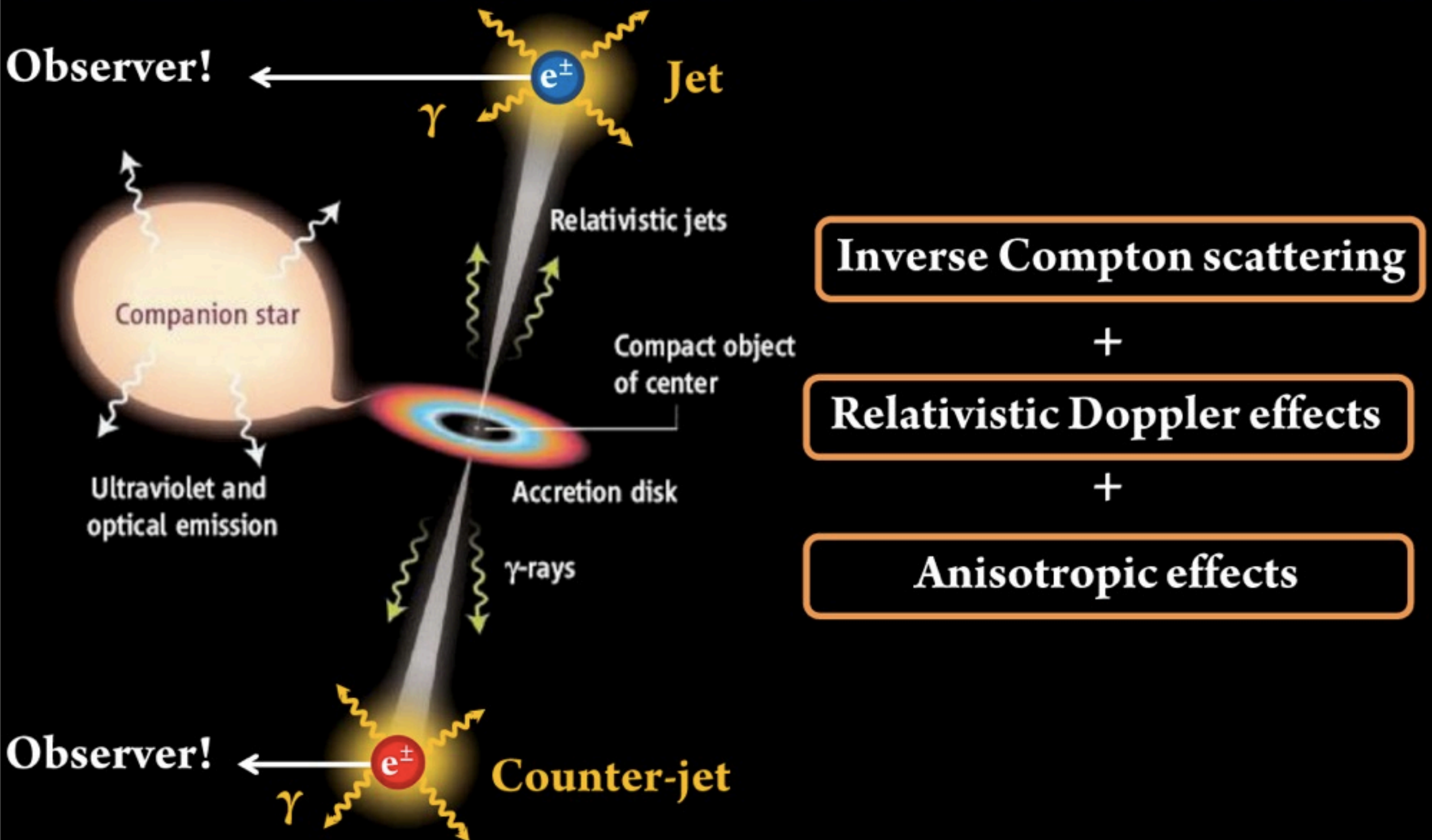


**Orbital modulation (4.8 h)**



**Gamma rays originates from the jet ?**

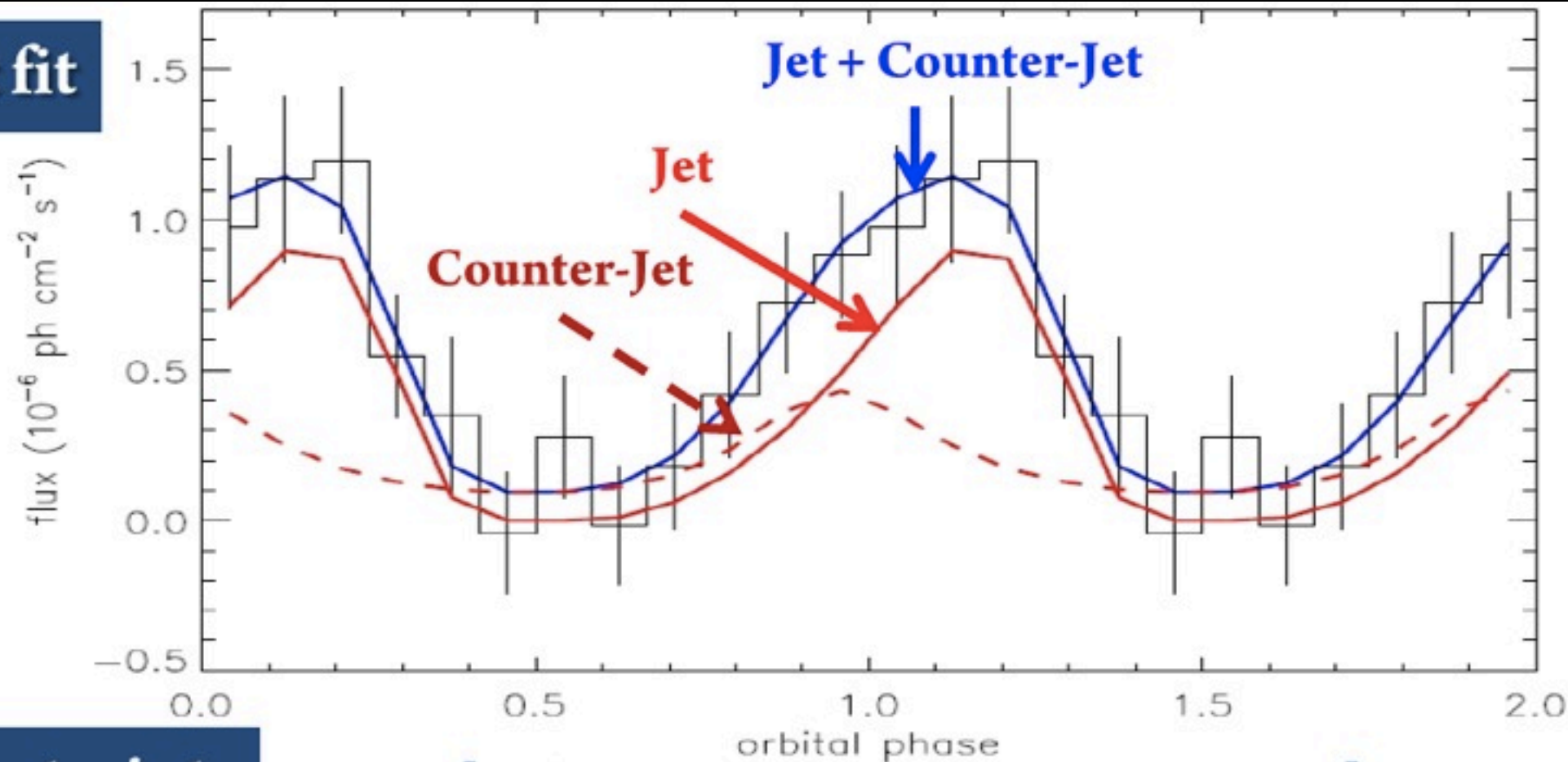
**Un modèle plausible:**  
**Rayonnement Gamma émis par paires  $e^+e^-$**   
**injectées dans un jet relativiste incliné**





# La précession du jet explique la modulation

Best fit

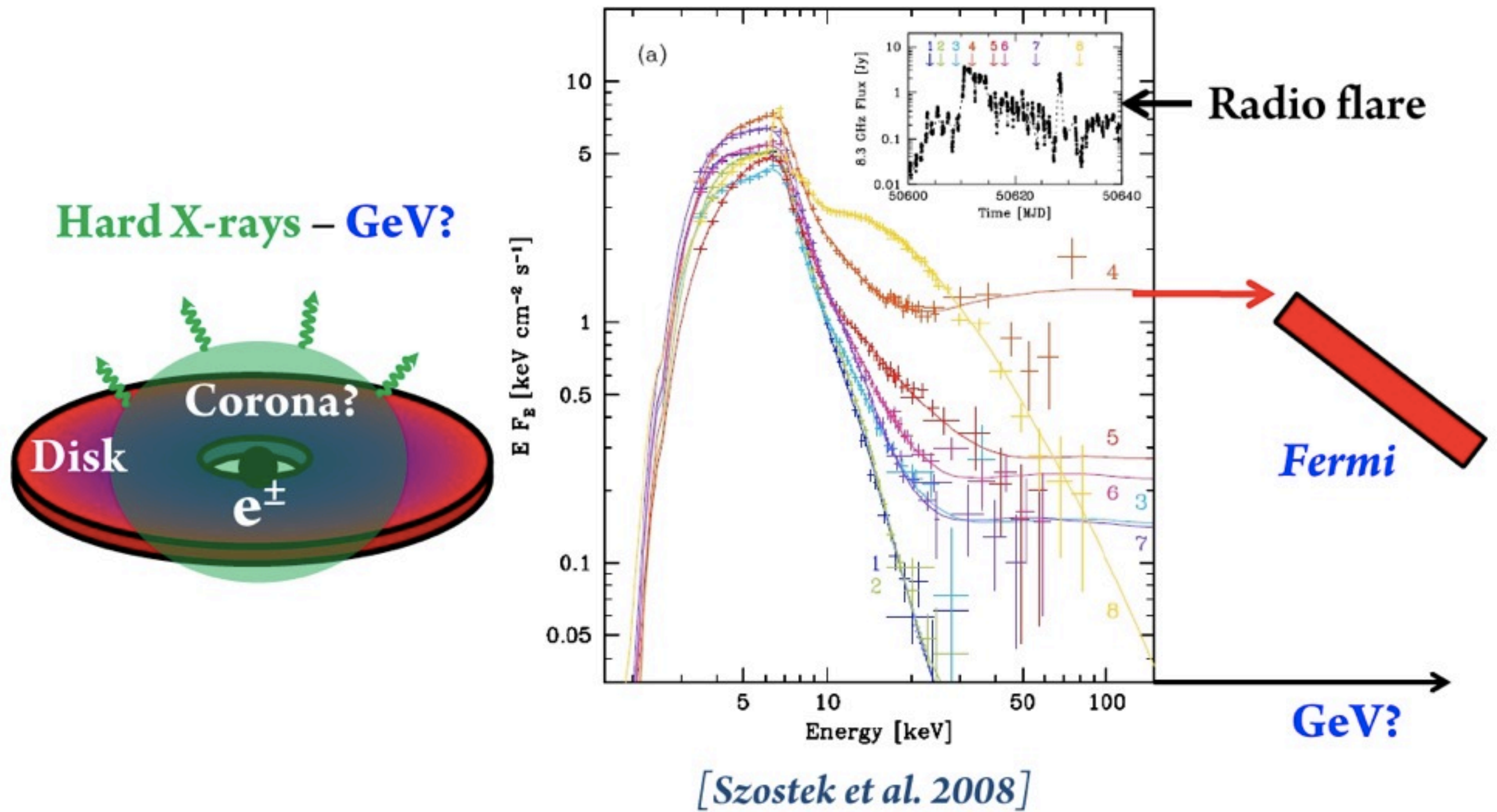


Constraints

[Dubus, Cerutti, & Henri, MNRAS 2010a]

- $e^\pm$  **not located** within the system
- Jet inclined **close to the line of sight** ( $\mu$ -blazar!)
- Jet **mildly relativistic** ( $\beta < 0.9$ )
- Black-hole **avored**
- **Precession** of the jet: **strong impact** on the modulation

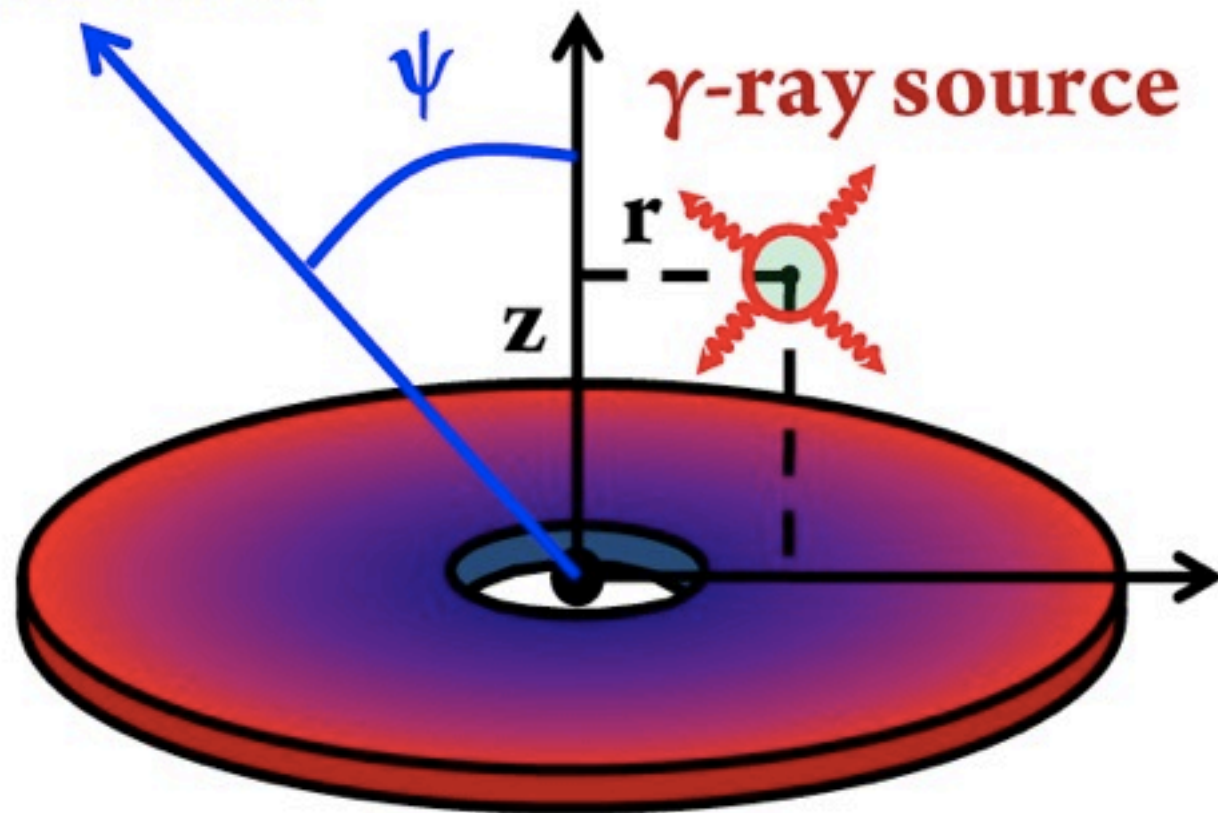
# Emission gamma provenant de la couronne ?





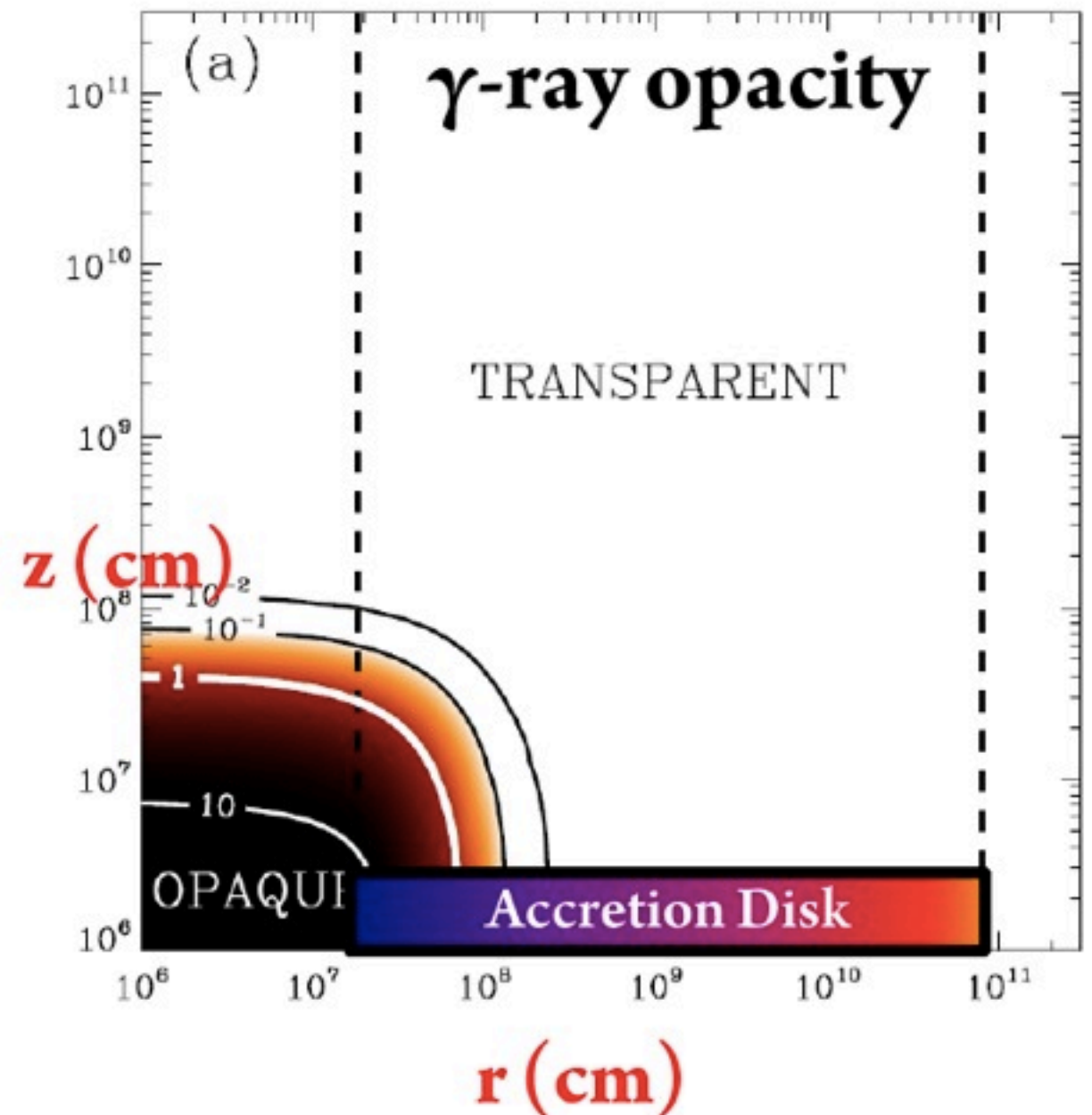
# L'émission X du disque d'accrétion absorbe les photons aux GeV

Observer



Standard accretion disk

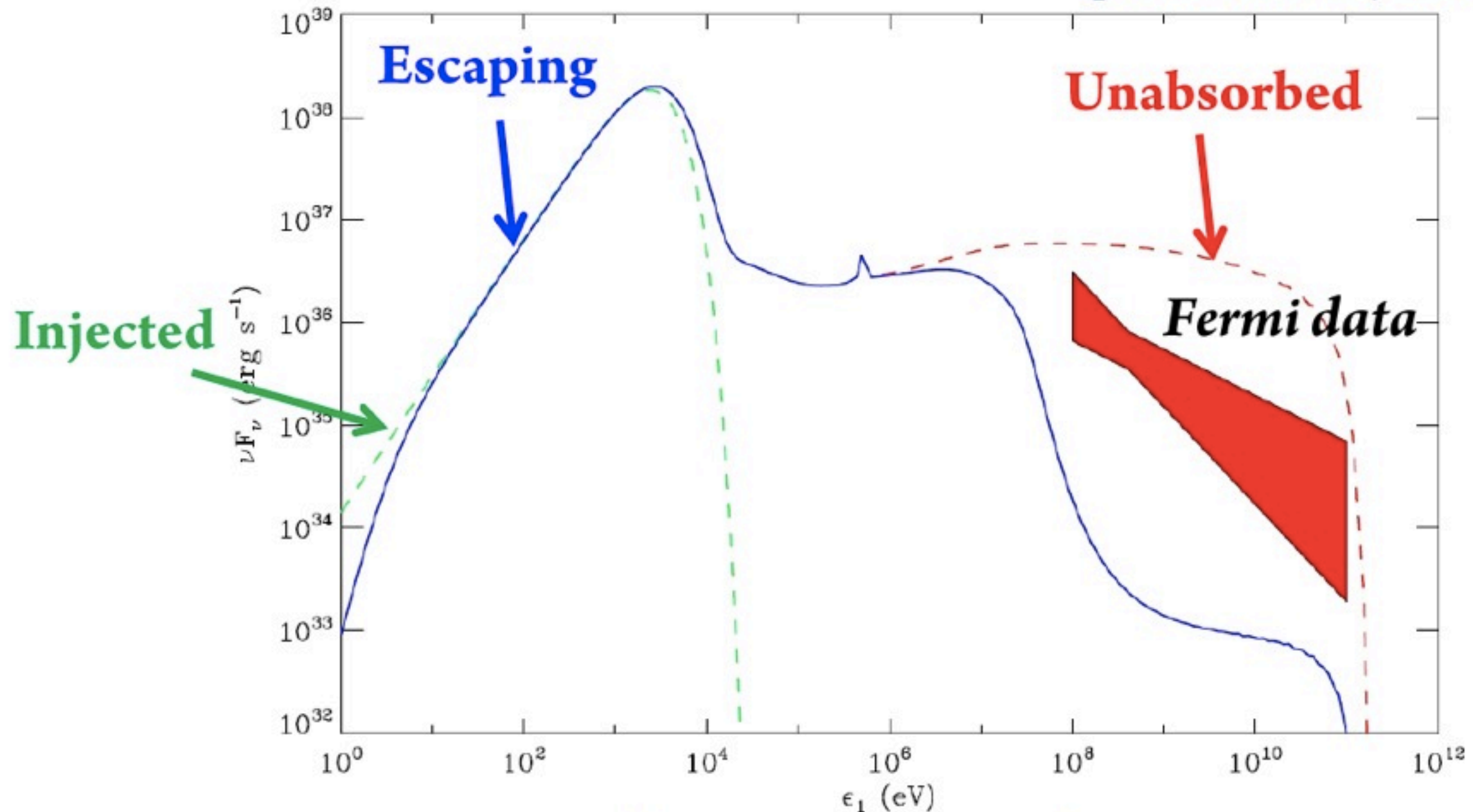
(*optically thick, geometrically thin*)



# L'émission gamma de la couronne est fortement absorbée

Escaping radiation from corona ( $R=10^8$  cm)

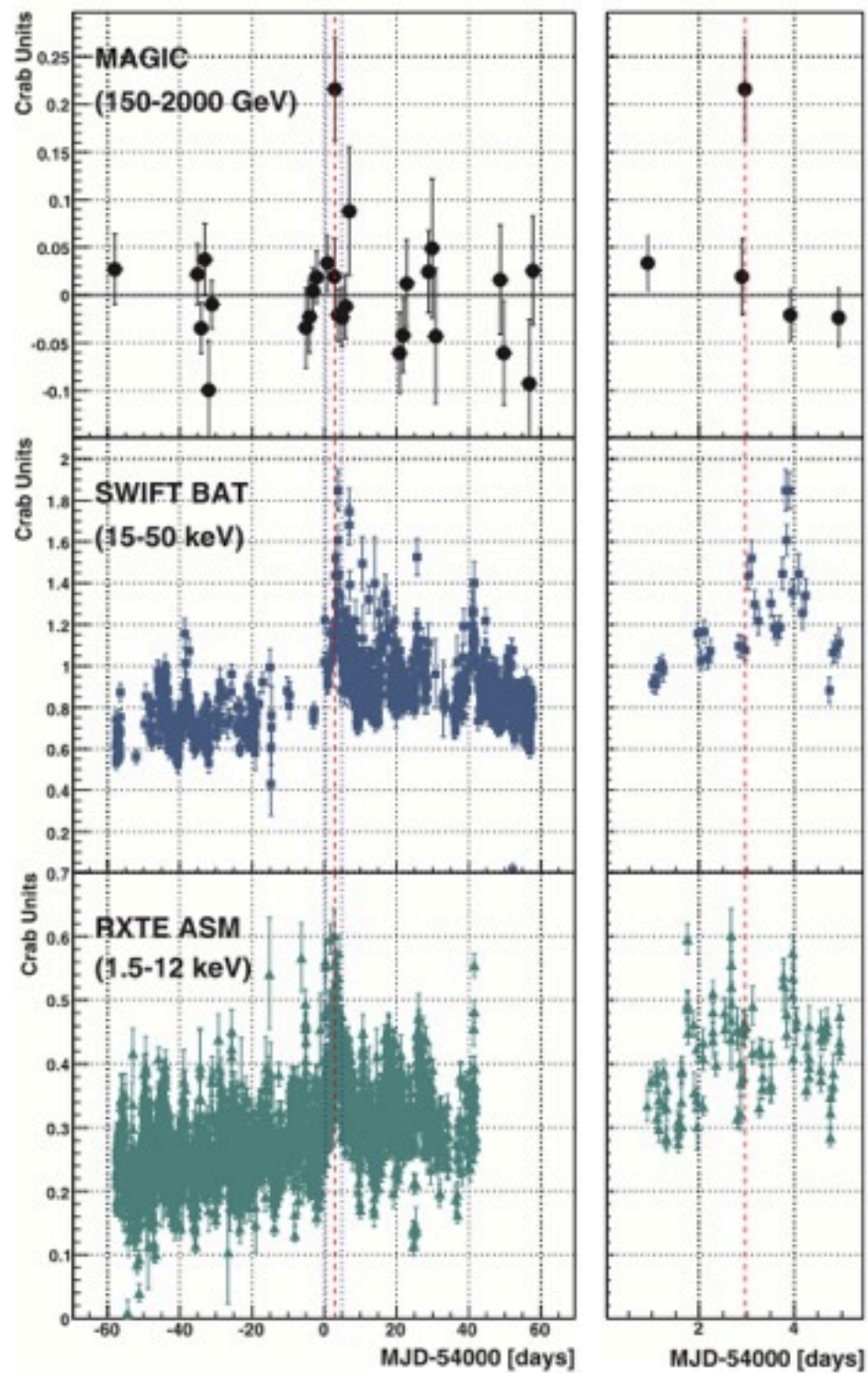
Using *Belm* code  
[Belmont et al., 2008]



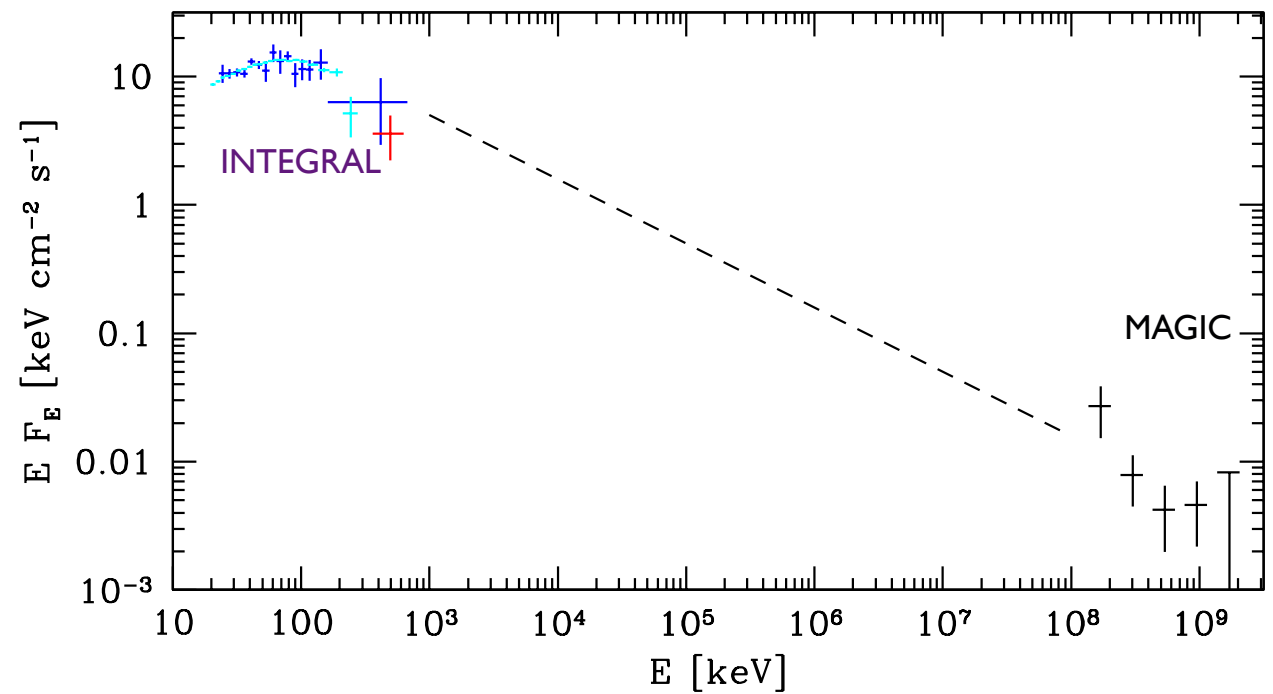
Reproduire le flux détecté par Fermi nécessite  $R_c \sim 10^{10}$  cm



# Cyg X-1: un autre microquasar en Gamma ?



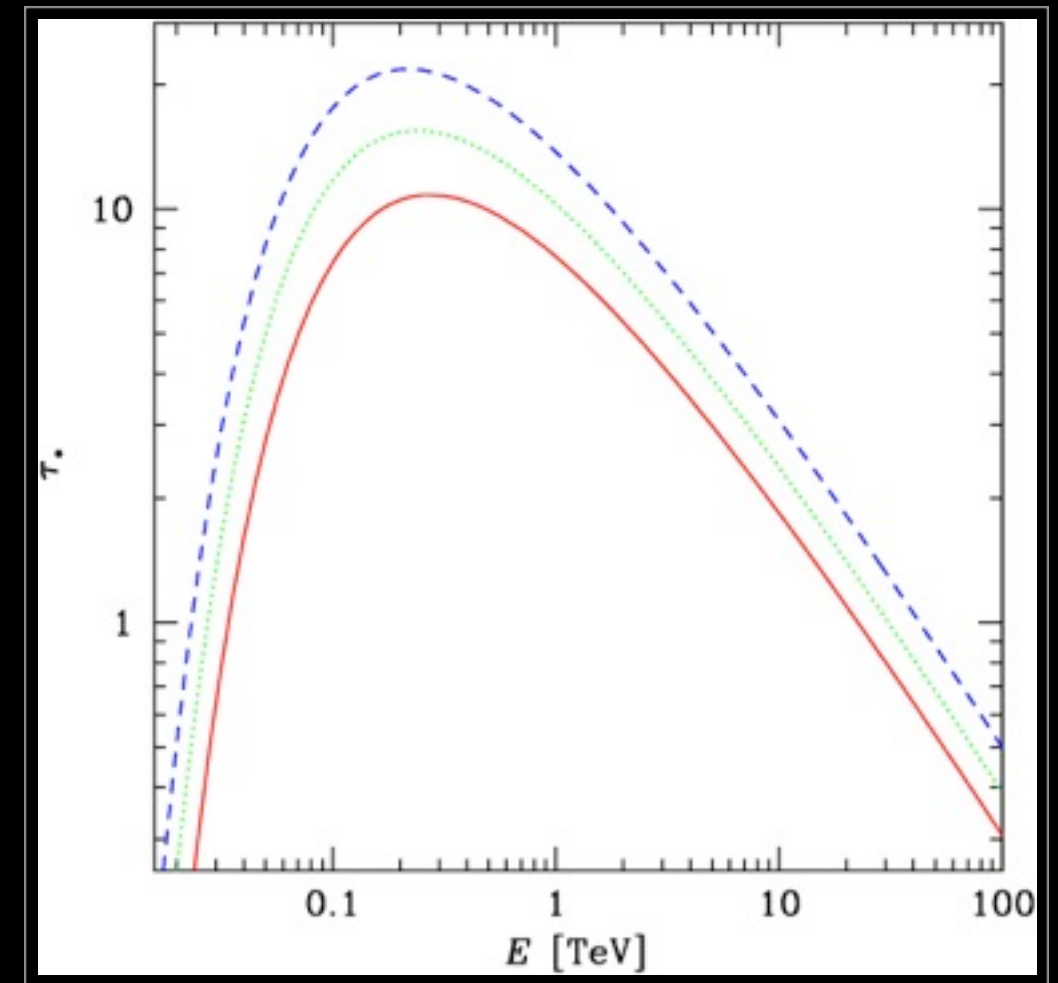
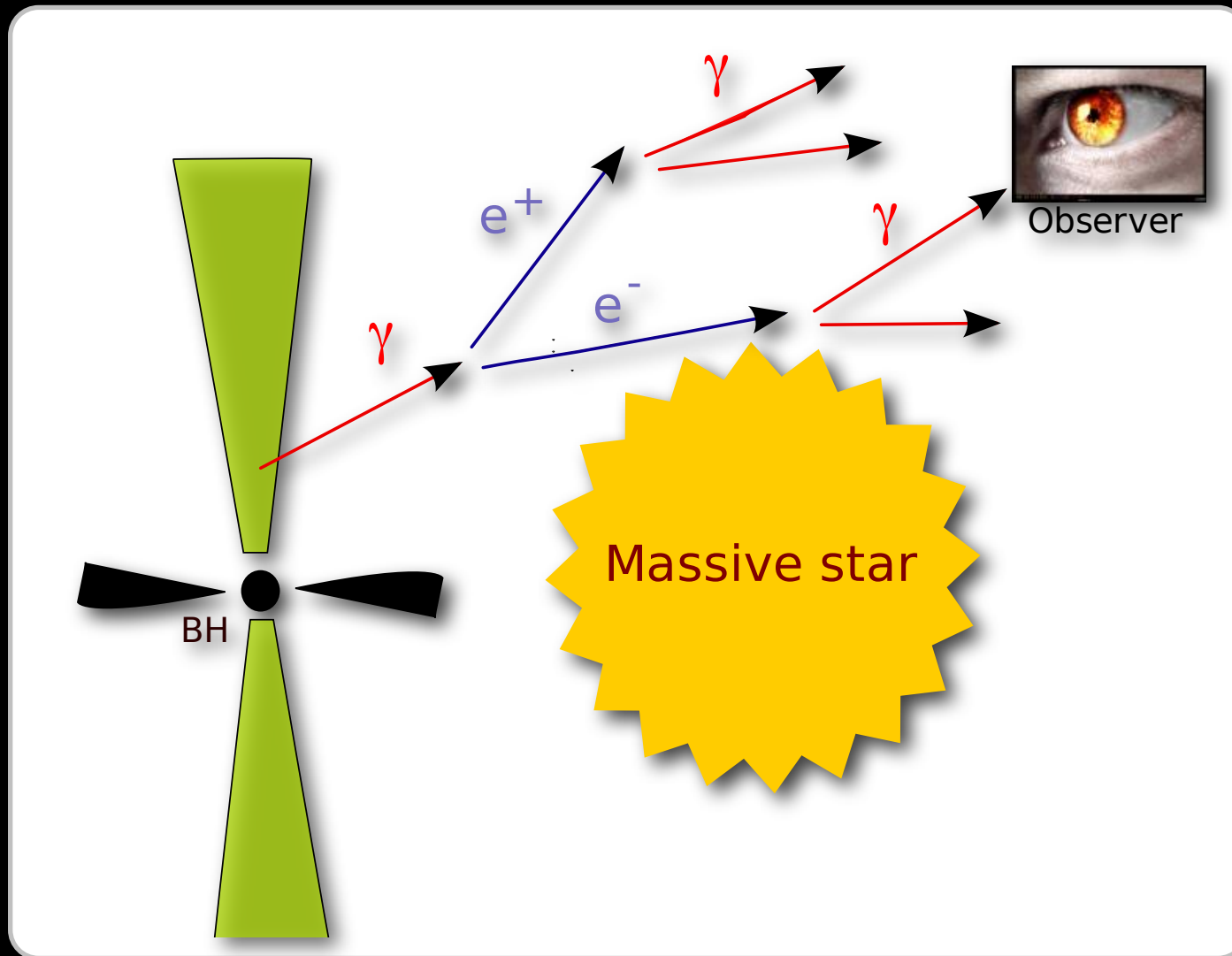
Albert et al. 2007



Malzac et al. 2008

# Absorption gamma-gamma dans Cygnus X-1

➡ Durant la détection MAGIC, le trou noir se trouvait derrière l'étoile...



➡ aucune détection attendue si l'on ne prends pas en compte l'effet de la cascade de paires étendue

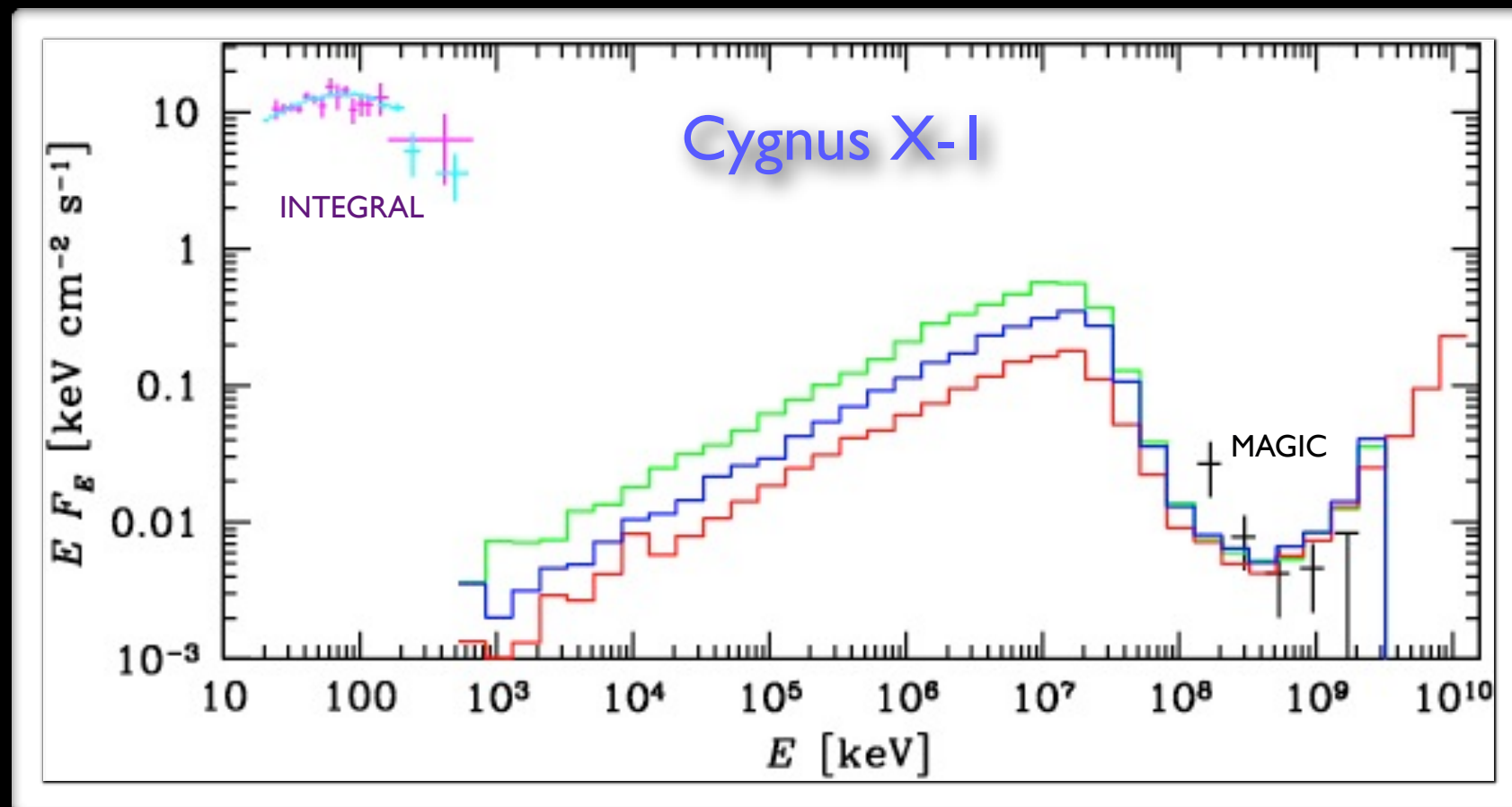


# Cascades de paires spatialement étendues

Simulations Monte-Carlo:

Développement de la cascade 3D

Inverse Compton, production de paires  $e^+e^-$ , synchrotron



(Zdziarski, Malzac, Bednarek, MNRAS, 2009)

# Binaires à pulsars

●  $\gamma$ -ray binary

LSI +61°303

2 kpc

LS 5039

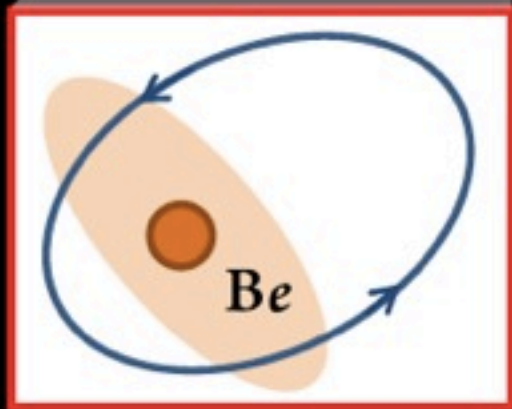
2.5 kpc

PSR B1259-63

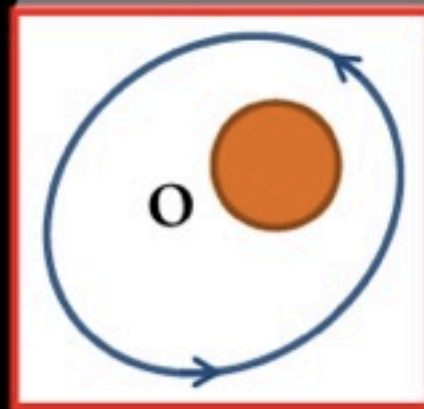
1.5 kpc



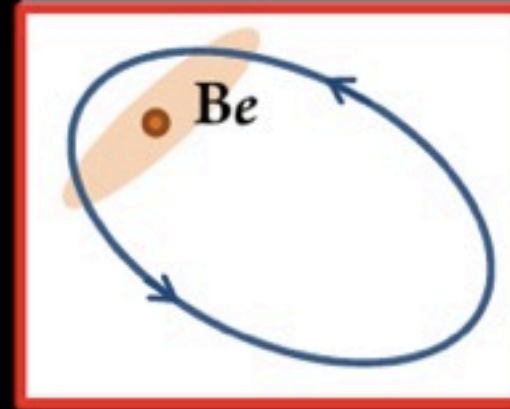
©NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration



26.5 days



3.9 days



1240 days

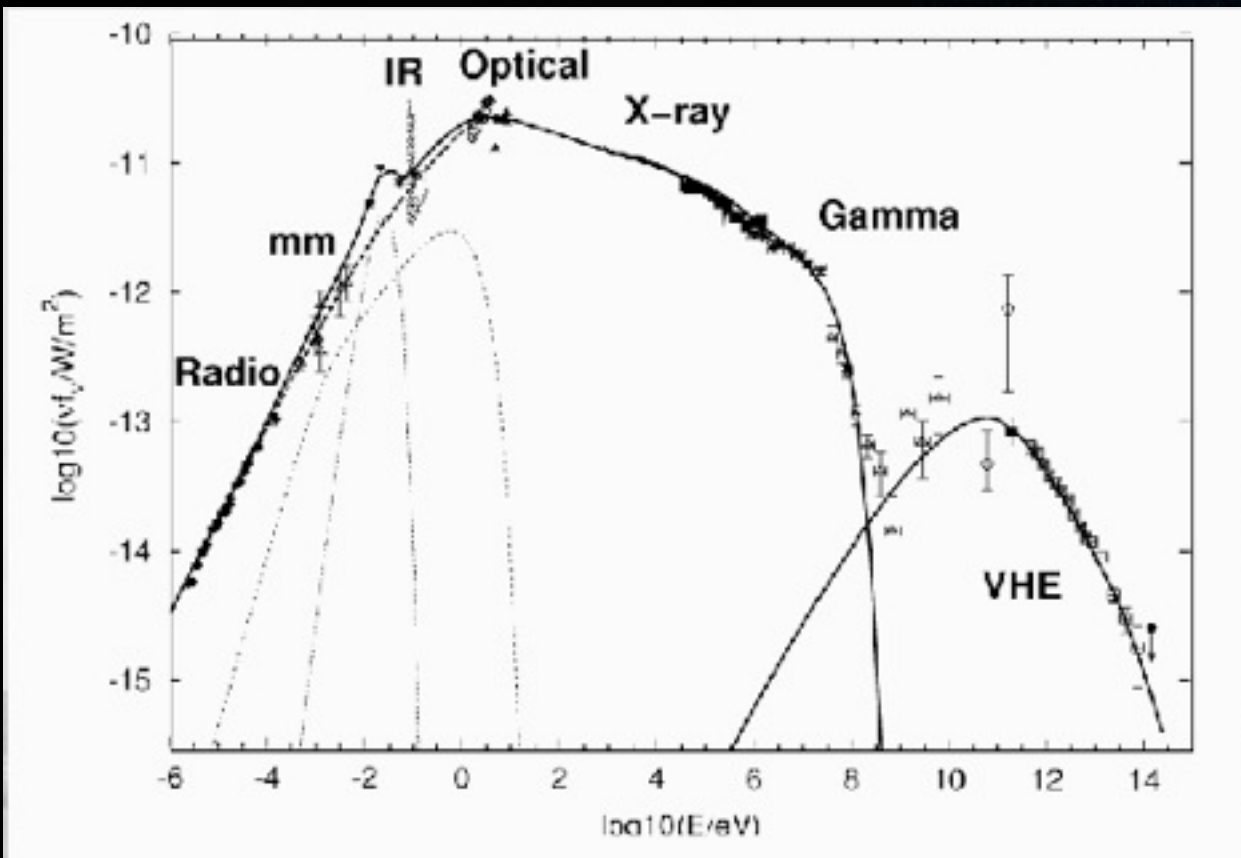
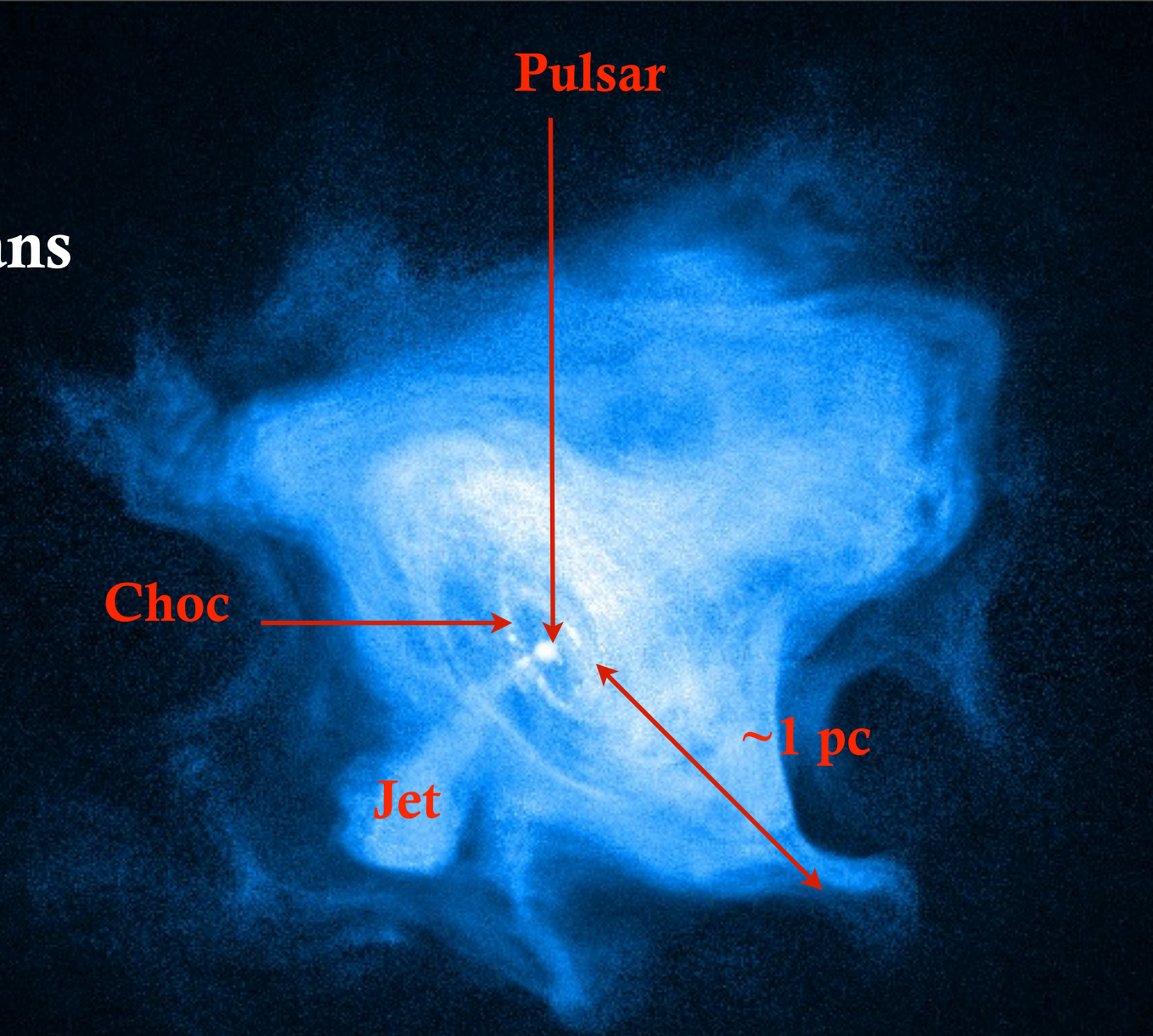
## Legend

- Massive star
- Be eq. wind
- Compact object orbit



# Vent de pulsar isolé

- paires  $e^+/e^-$  formées et accélérées dans la magnétosphère
- vent de paires relativiste, interaction avec milieu interstellaire:
  - ➔ choc terminal lorsque pression du vent = pression du gaz ambiant ( $r_s \sim 0.1$  pc)

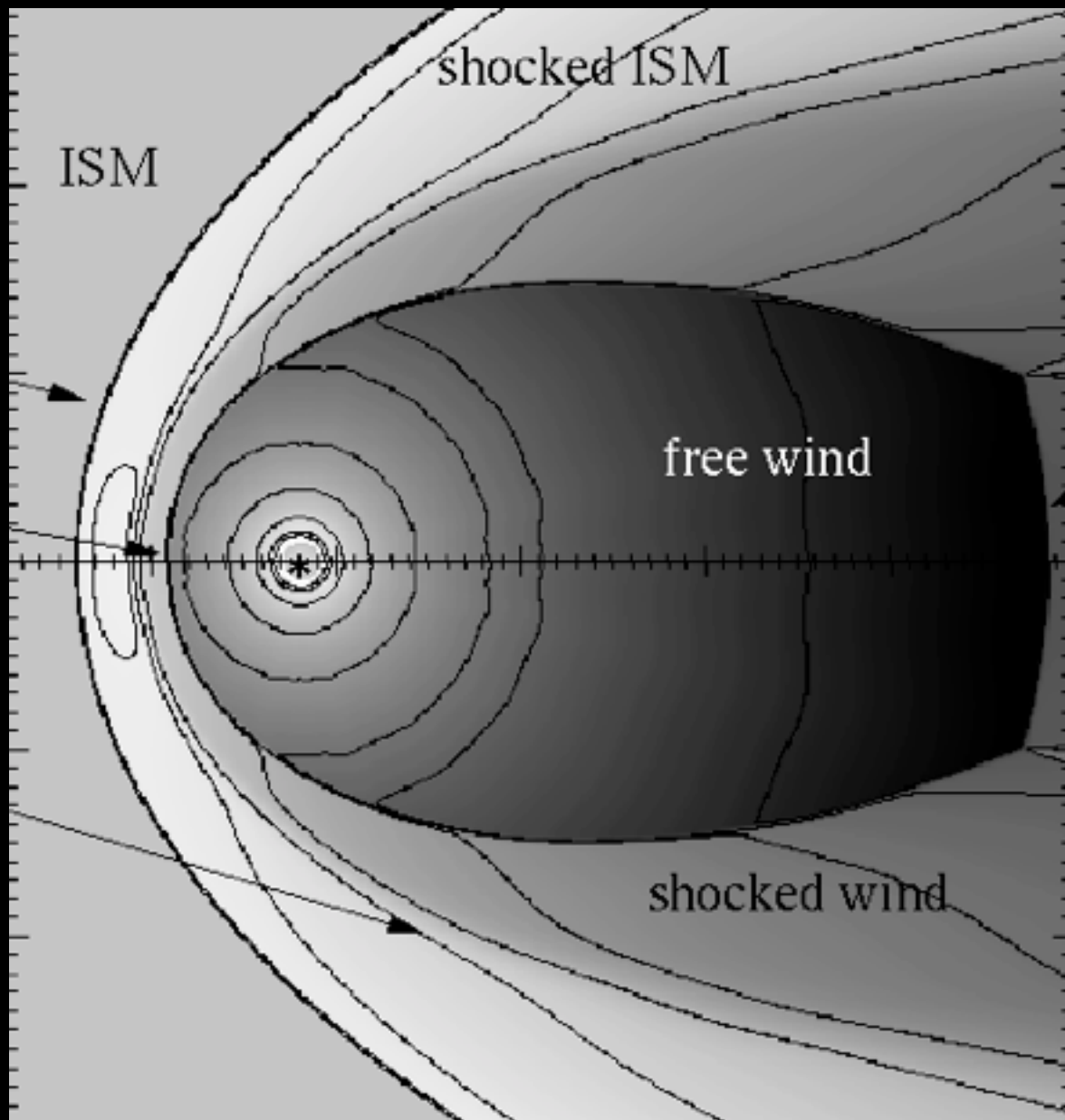


- l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie interne
  - ➔ paires accélérées: rayonnement synchrotron de la radio jusqu'aux gamma



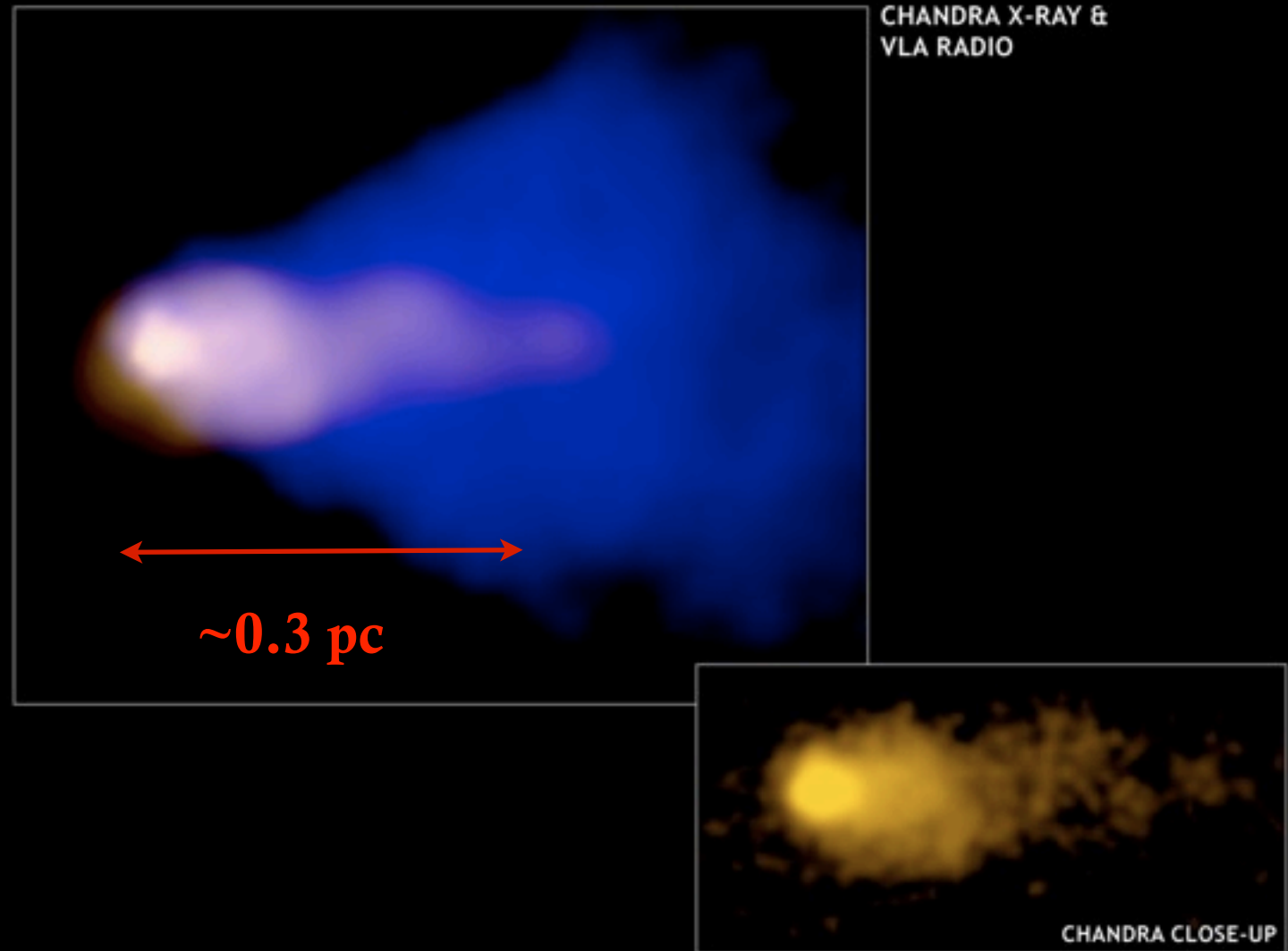
# Pulsar isolé se déplaçant dans le Milieu Interstellaire

## Vent de pulsar



←  
Vitesse du pulsar 100-1000 km/s

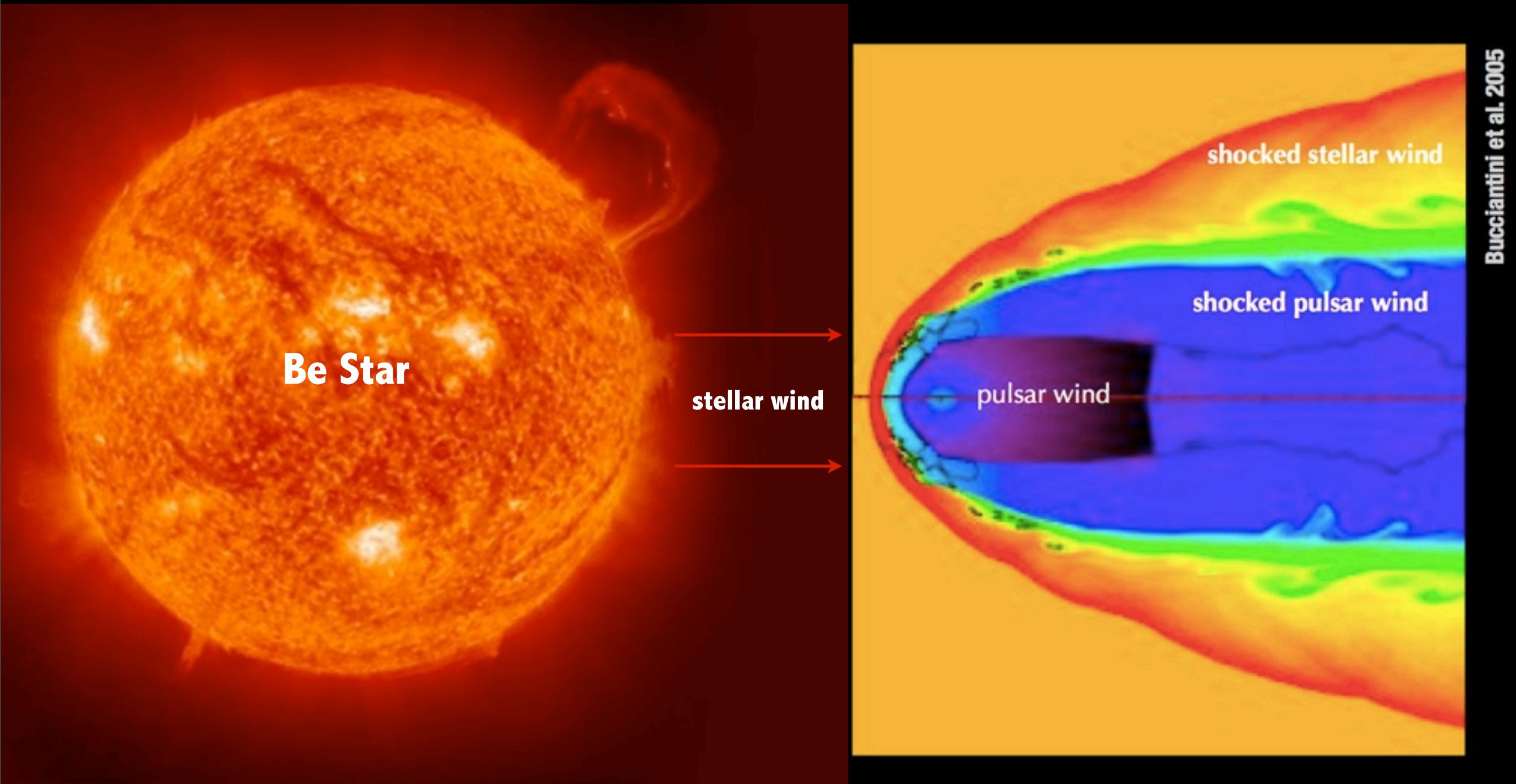
PSR J1747 (The Mouse)





# Pulsar dans un système binaire

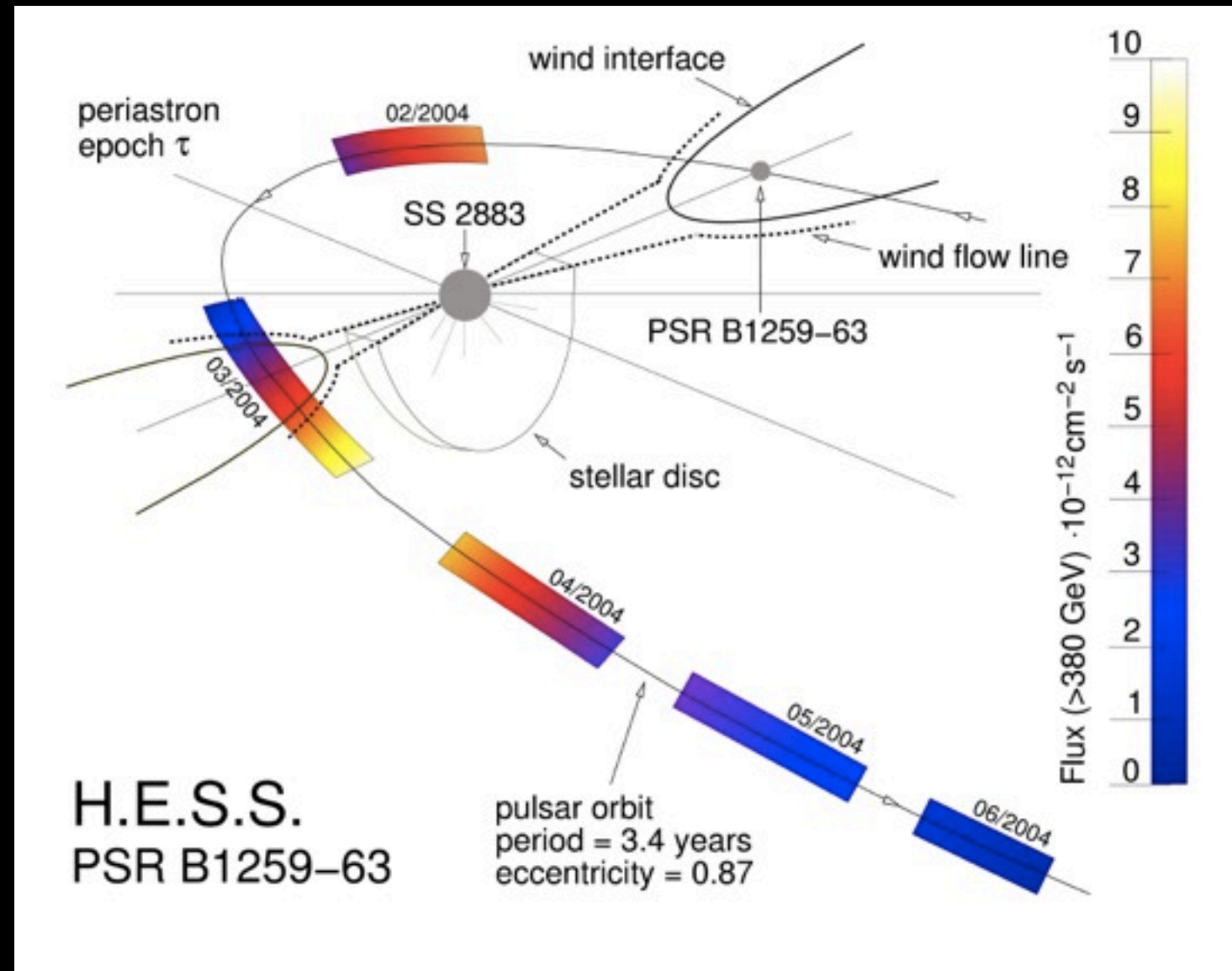
Interaction vent de pulsar / vent d'étoile



Choc très près du pulsar ( $<0.1$  UA)  
Nébuleuse de vent de pulsar “compacte”

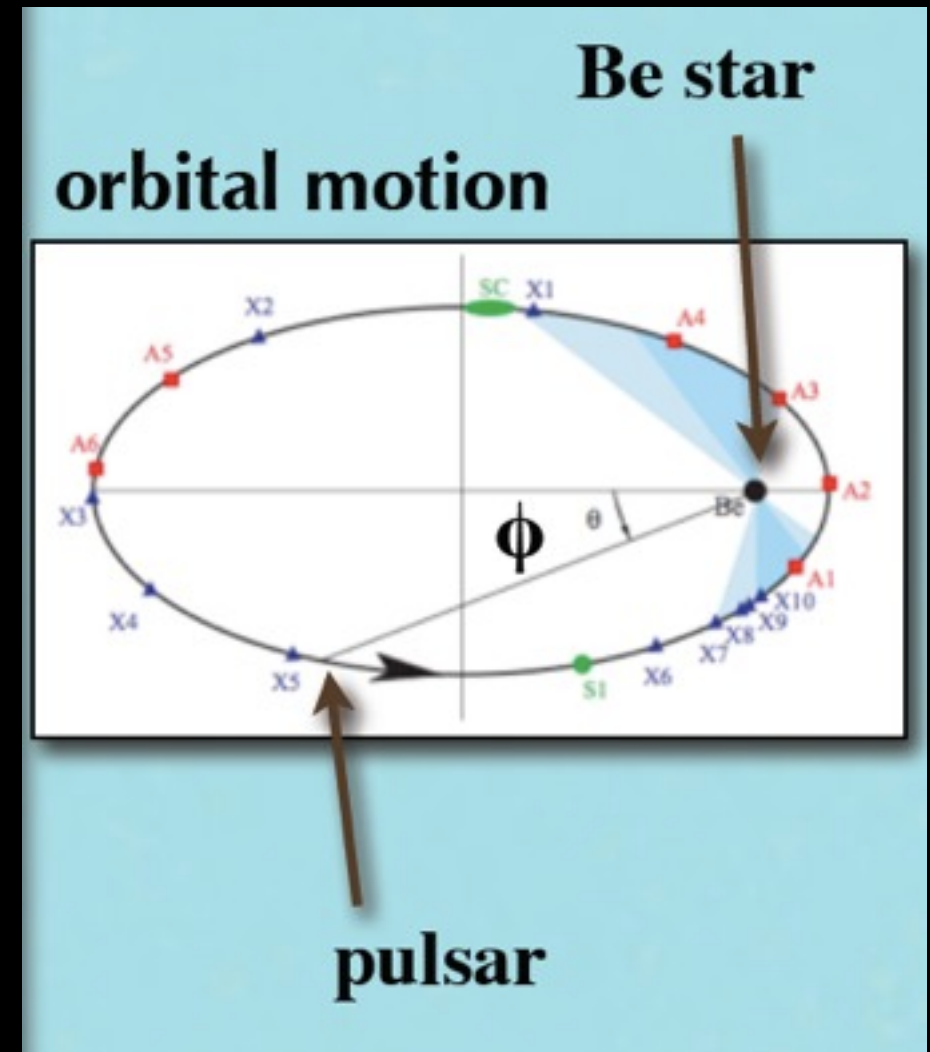
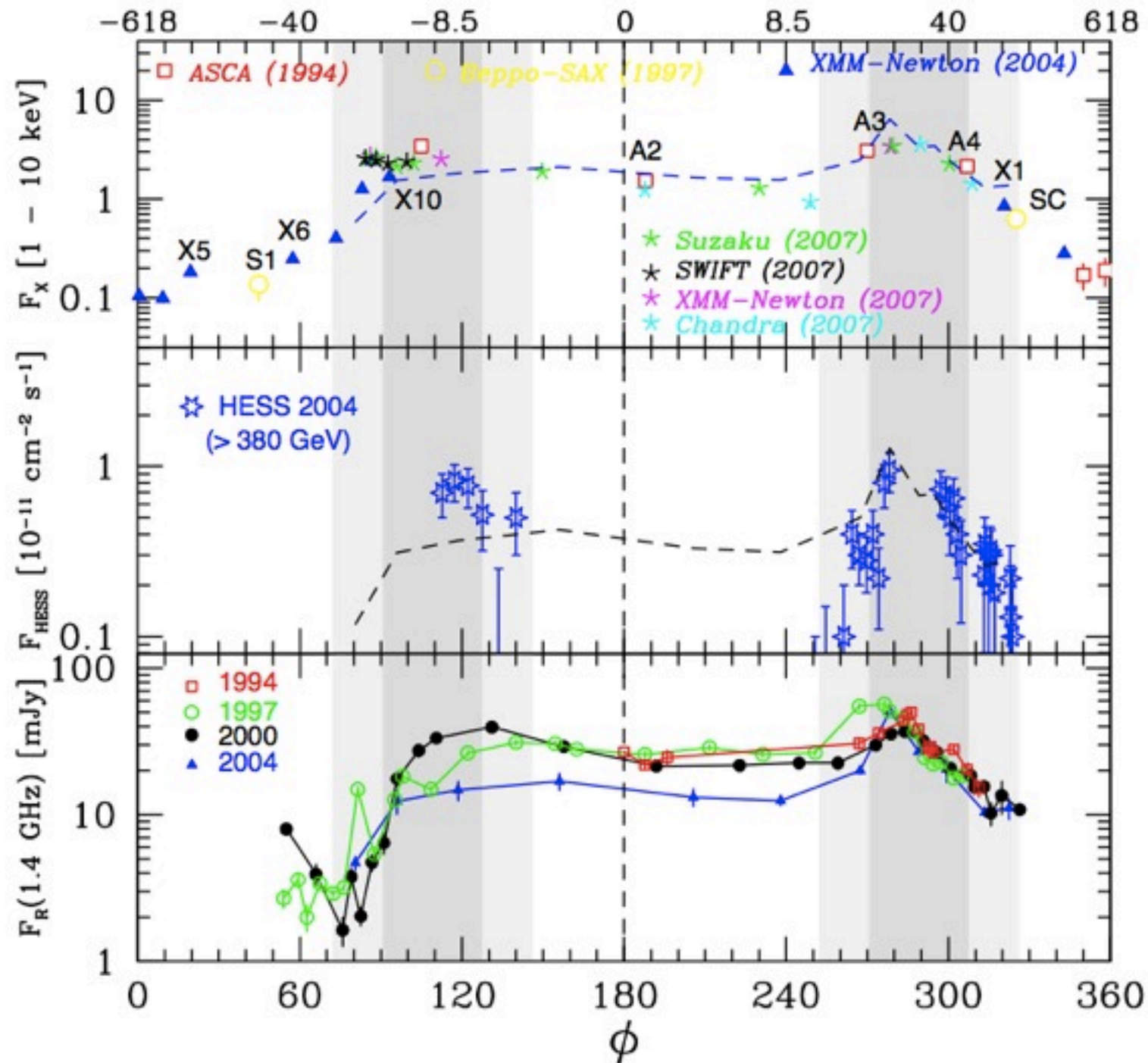
# PSR B1259-63

- Periode 3.4 ans ( $e=0.87$ )
- $R_{orb}=0.7$  UA au périastre
- LS2883 Be2 (10 Msun)
  - ▶ disque circumstellaire
- Pulsar
  - ▶ Pulsation: 48 ms
  - ▶ Pulsation disparaît près du périastre
  - ▶  $L_{spin-down} = 8 \cdot 10^{35}$  erg /s





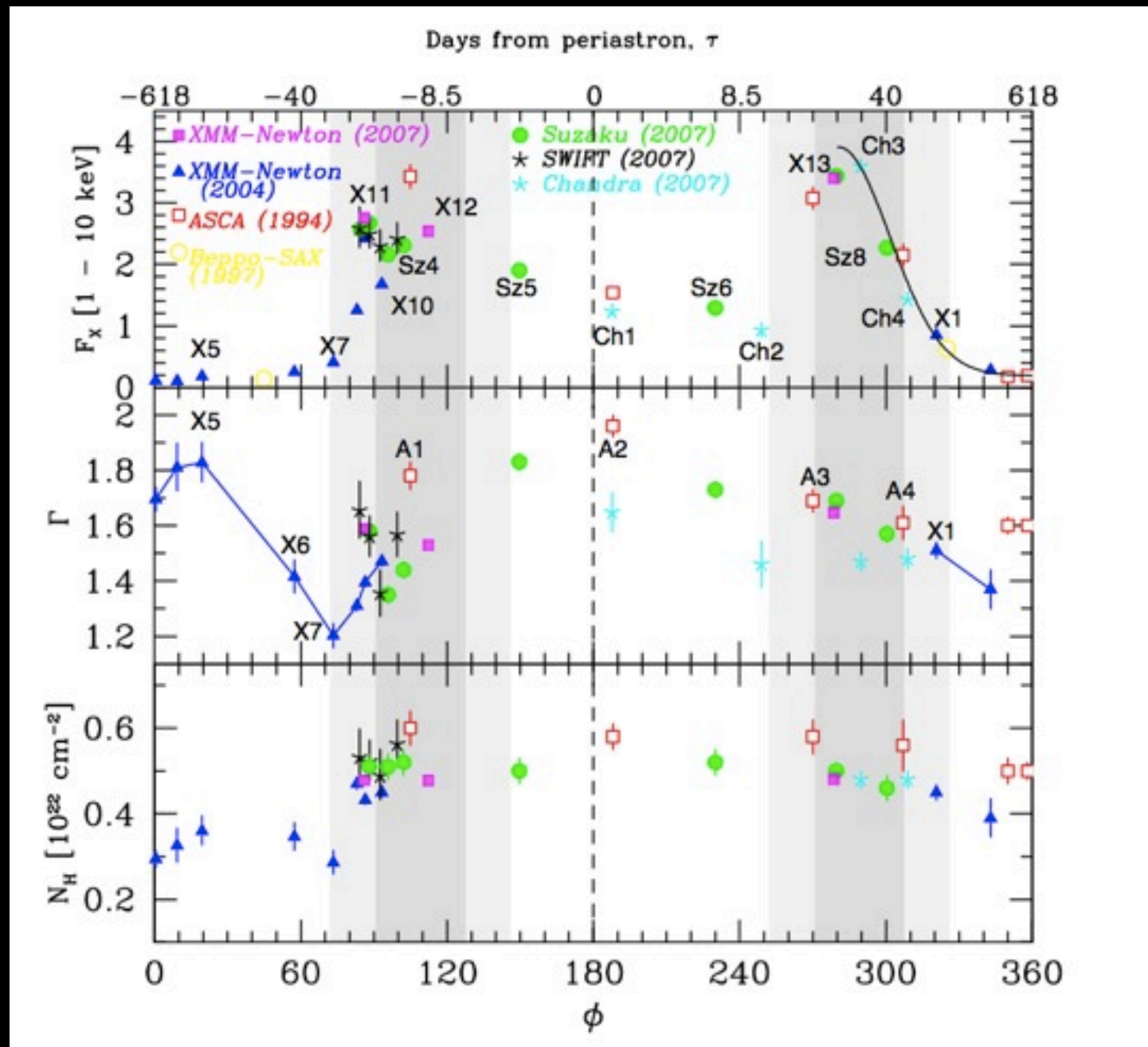
# PSR B1259-63: courbes de lumière



Chernyakova et al. 2009



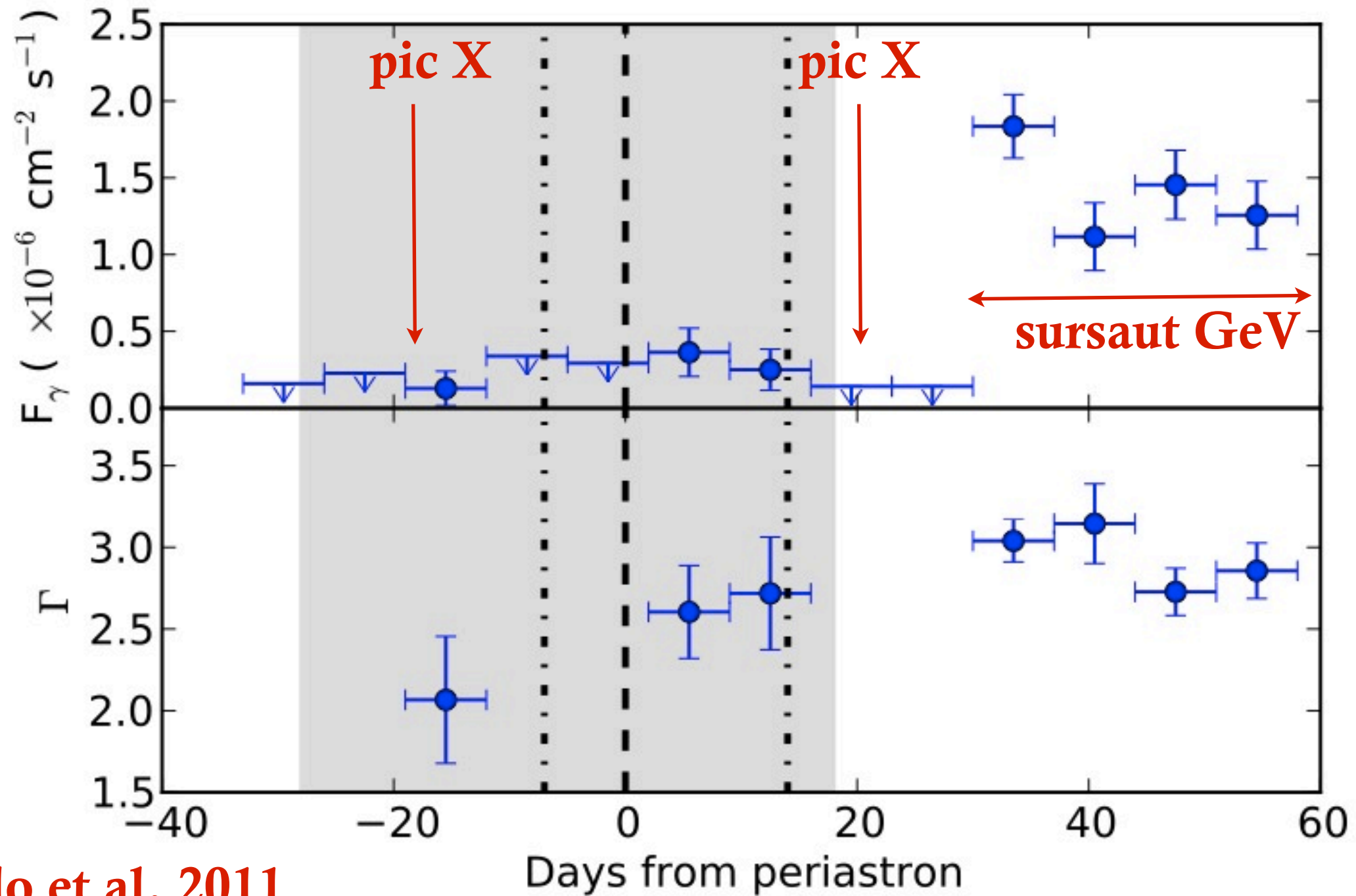
# PSR B1259-63: évolution spectrale en X



- **Loi de puissance:**
  - ▶  $\Gamma = 1.2 - 2$
  - ▶  $\Delta p = 1.6$
- **Absorption:**
  - ▶ faible  $N_H$
  - ▶ augmente dans le disque
- **Pas de pulsation détectée**

# PSR B1259-63: observation Fermi

Dernier passage au périastre: 15 Dec 2010



Abdo et al. 2011

# PSR B1259-63: Distribution Spectrale d'Energie

- Coupure au GeV + Variabilité spectrale détectées

- Interprétation de la SED n'est pas unique

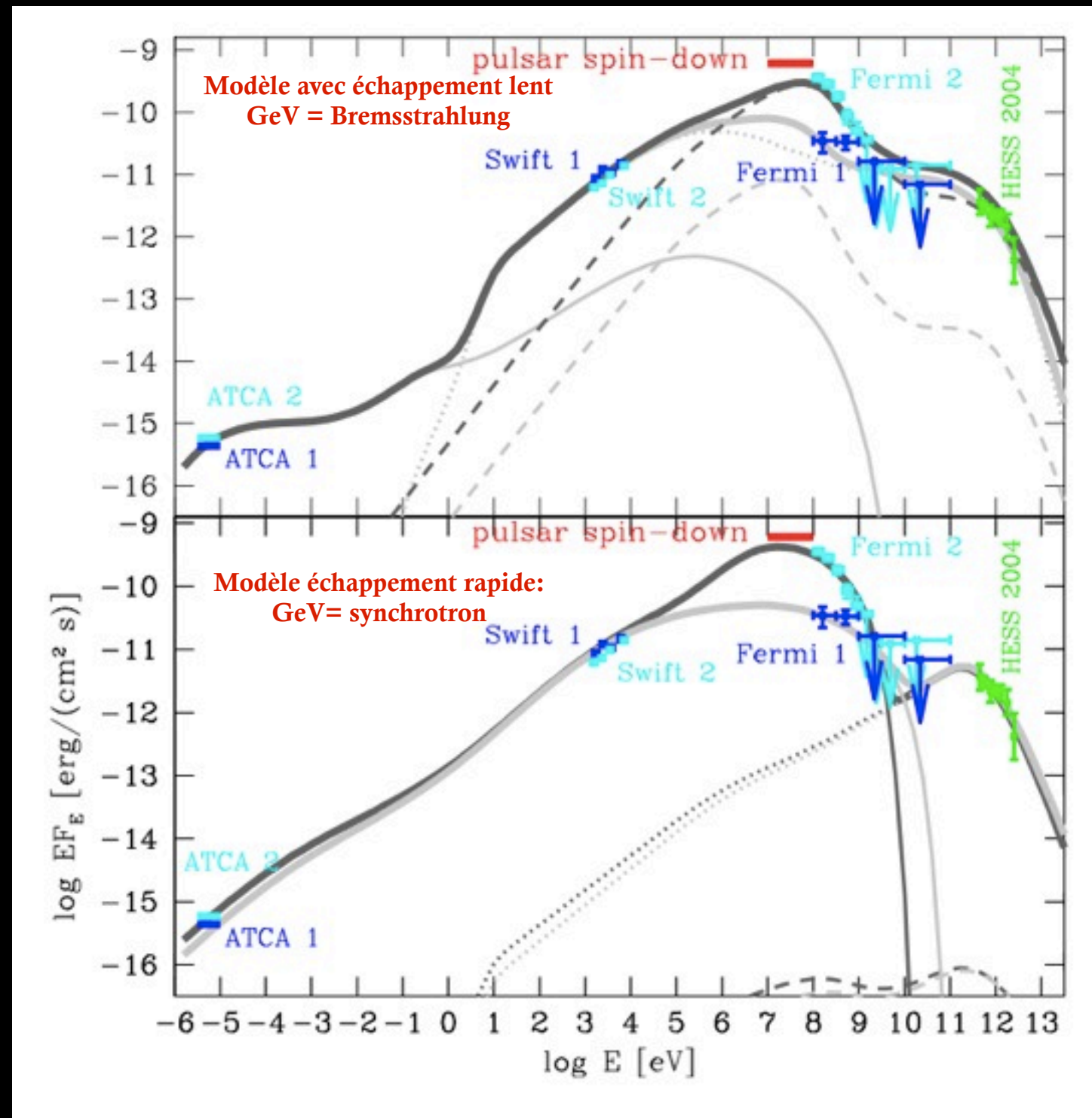
- Si synchrotron au GeV  
→ accélération extrême  
 $t_{\text{acc}} \sim r_L / c$

- Autres interprétations de l'émission au GeV:

- origine magnetosphérique
- composante vent non choquée

(Cerutti et al. 2008)

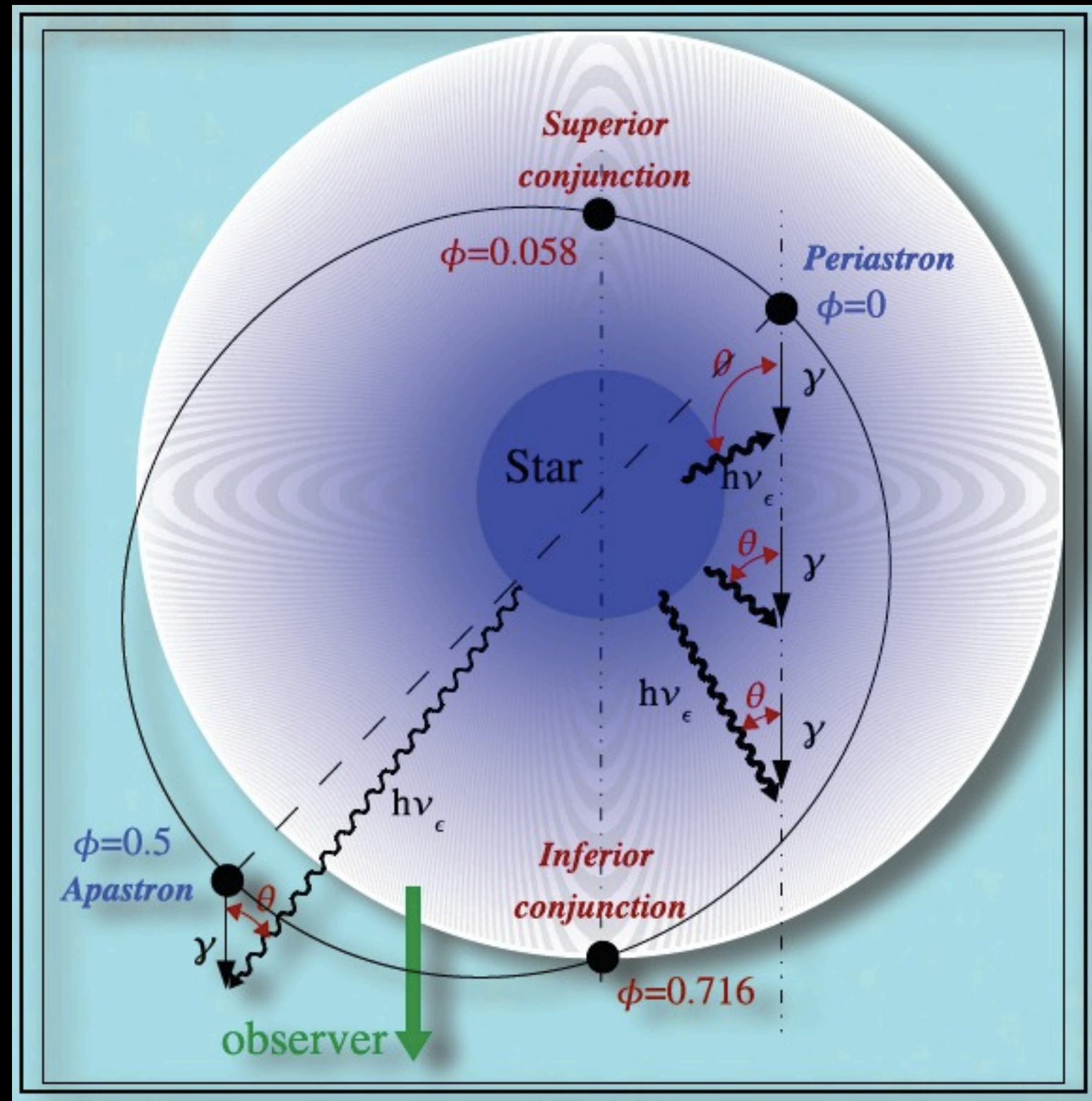
- 'striped' pulsar wind  
(Pétri & Dubus 2011)



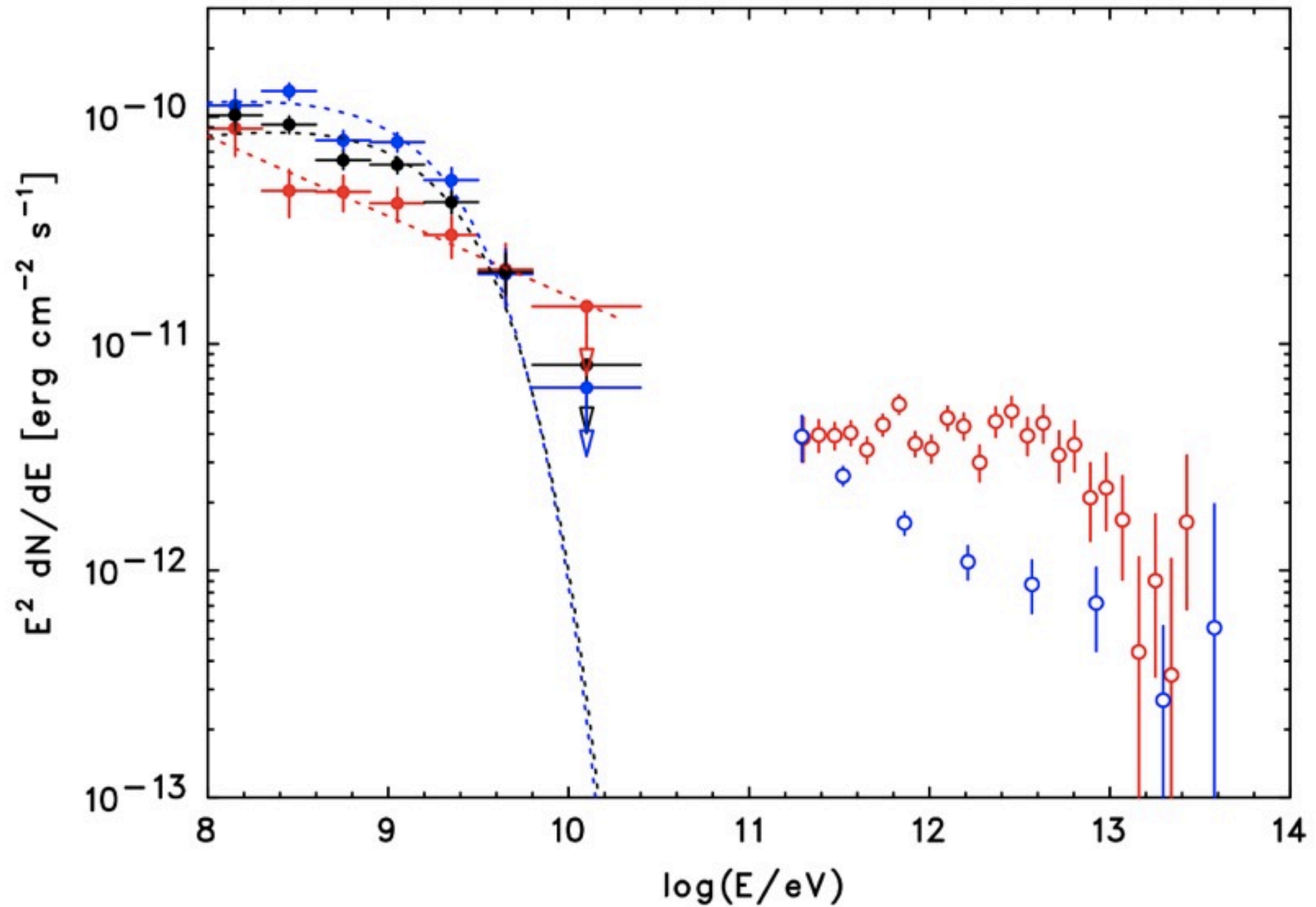


# LS 5039

- Periode 3.9 jours ( $e=0.3$ )
- $R_{\text{orb}}=0.1 \text{ UA}$
- O6.5V ( $\sim 20 \text{ Msun}$ )
- Objet Compact:
  - inconnu (1.5-5  $\text{Msun}$ )
- Vent relativiste:
  - s'étendant jusqu'à  $\sim 10 \text{ UA}$
- Pas d'indication d'un disque d'accrétion

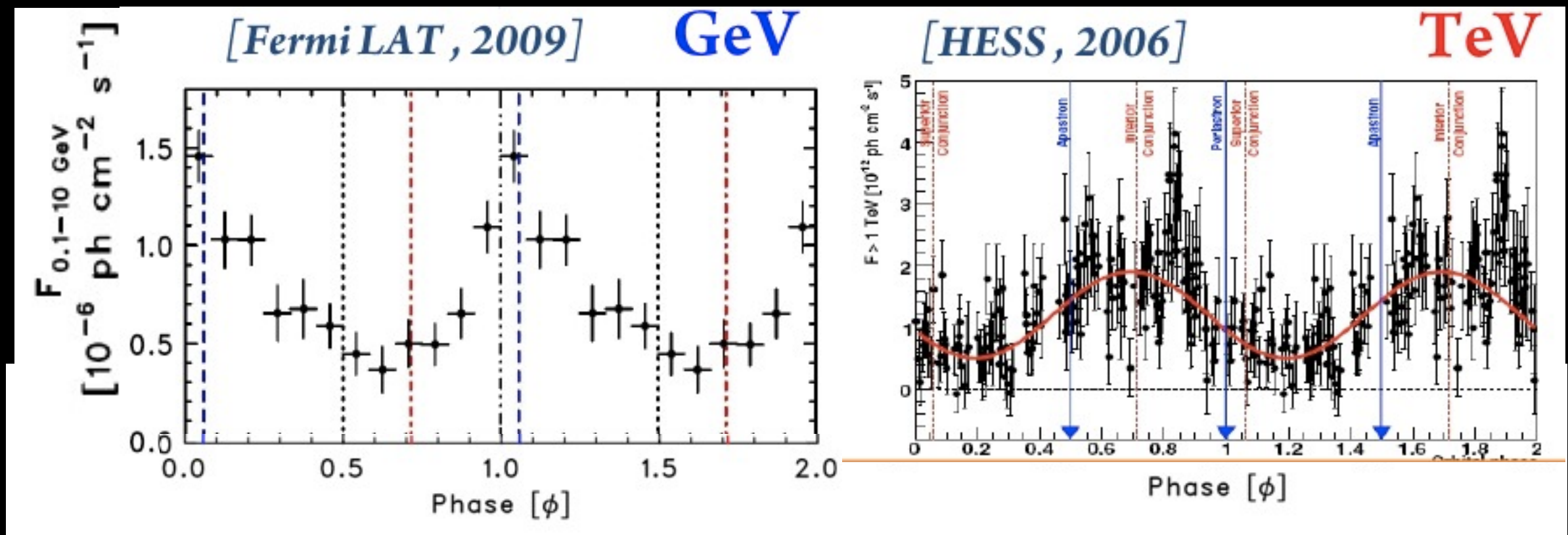
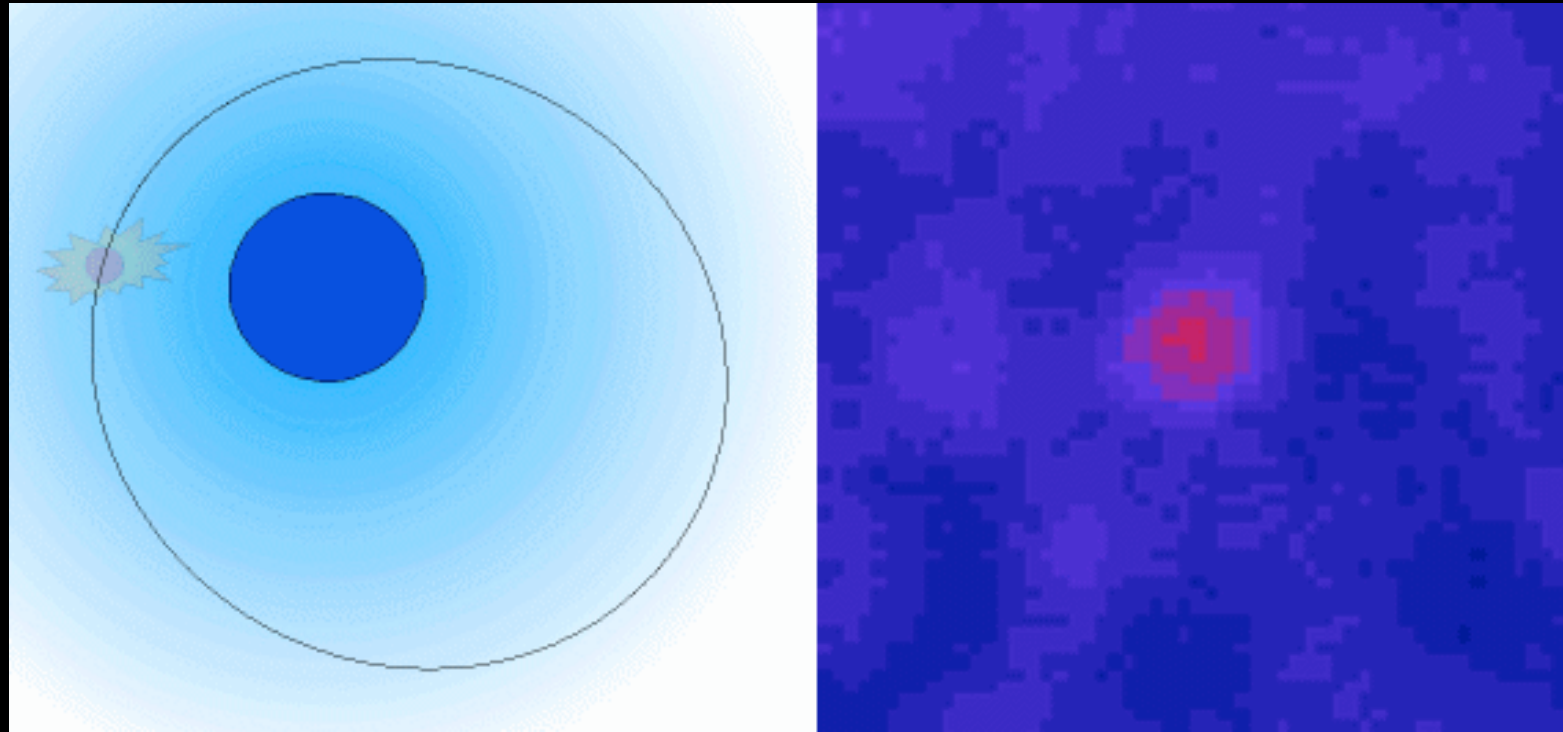


# LS 5039: les SED à haute énergie



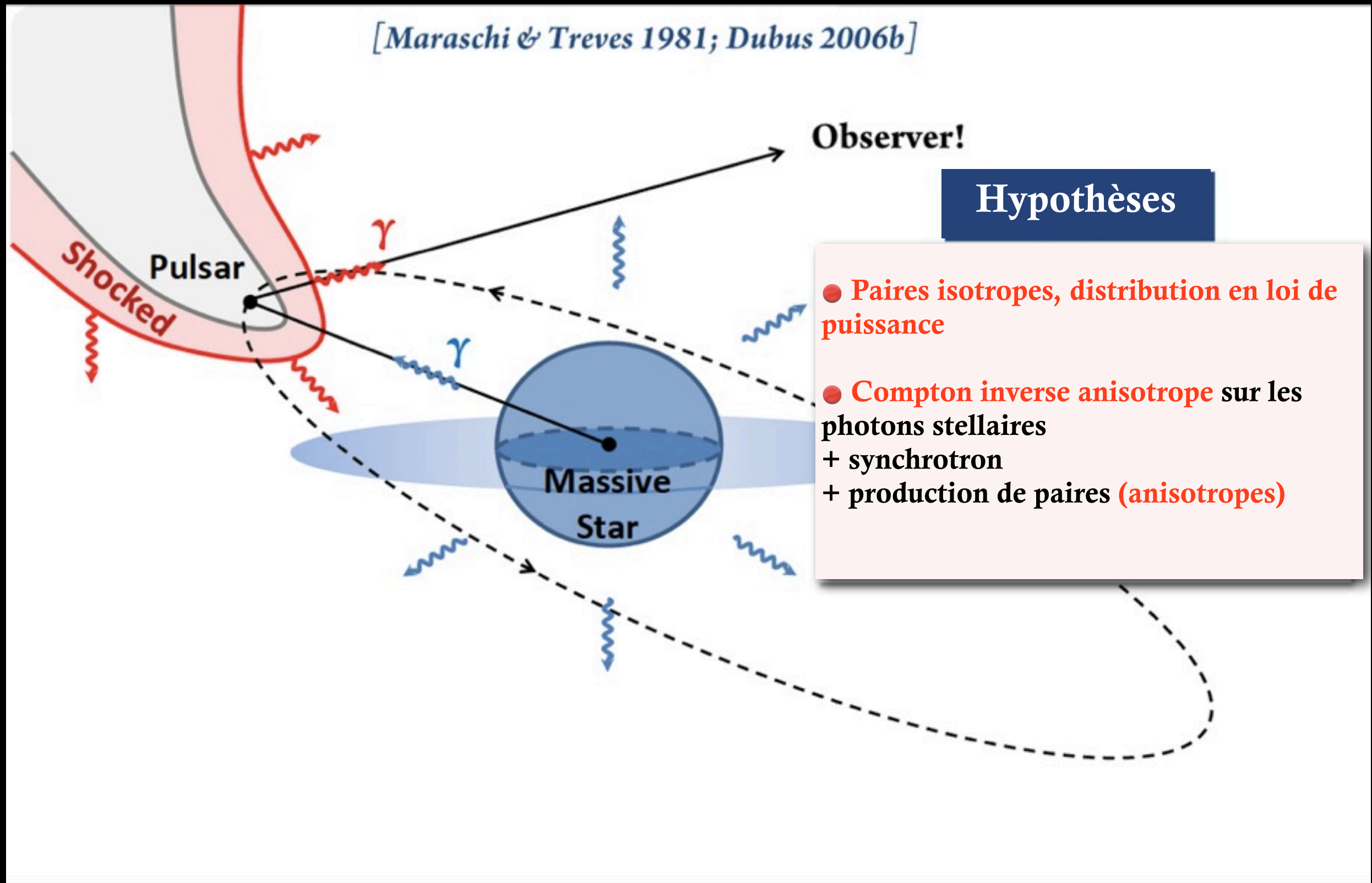


# L'émission gamma est modulée à la période orbitale



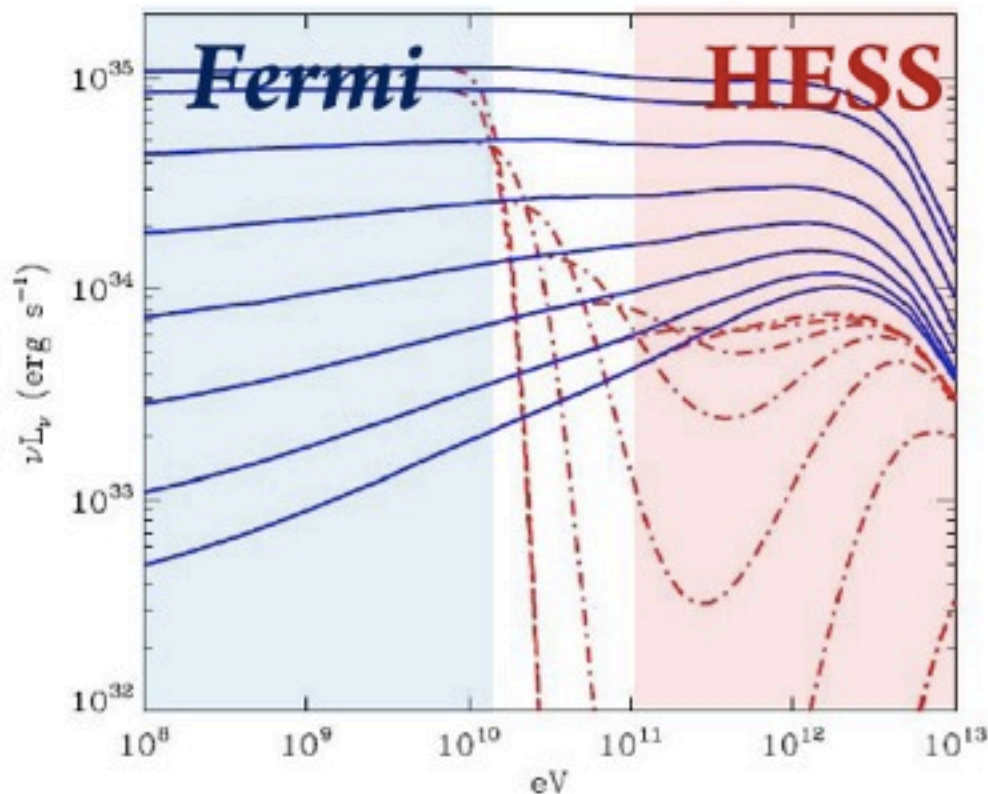


# Modélisation de la modulation orbitale



# Résultats de la modélisation

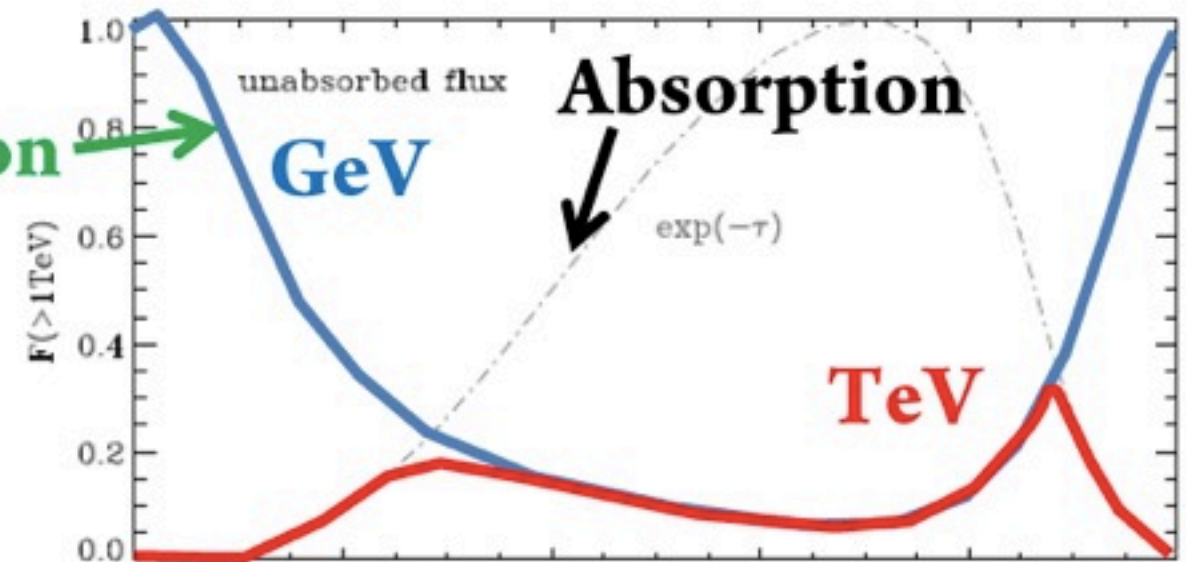
## Spectra



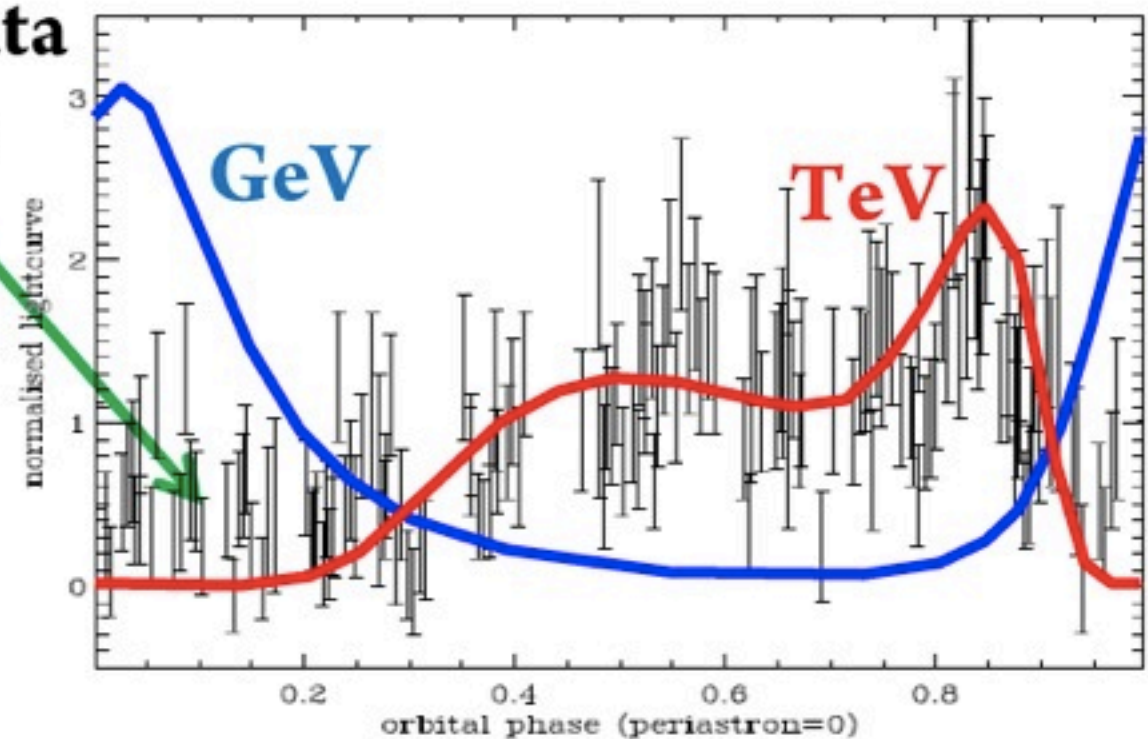
- **High inclination** favored
  - ➔ compact object = **pulsar**
  - **GeV/TeV anti-correlation predicted!** (due to absorption)
- [see also Bednarek 2006, Khangulyan et. al 2008]

## $\gamma$ -ray flux: absorption & Compton

Emission



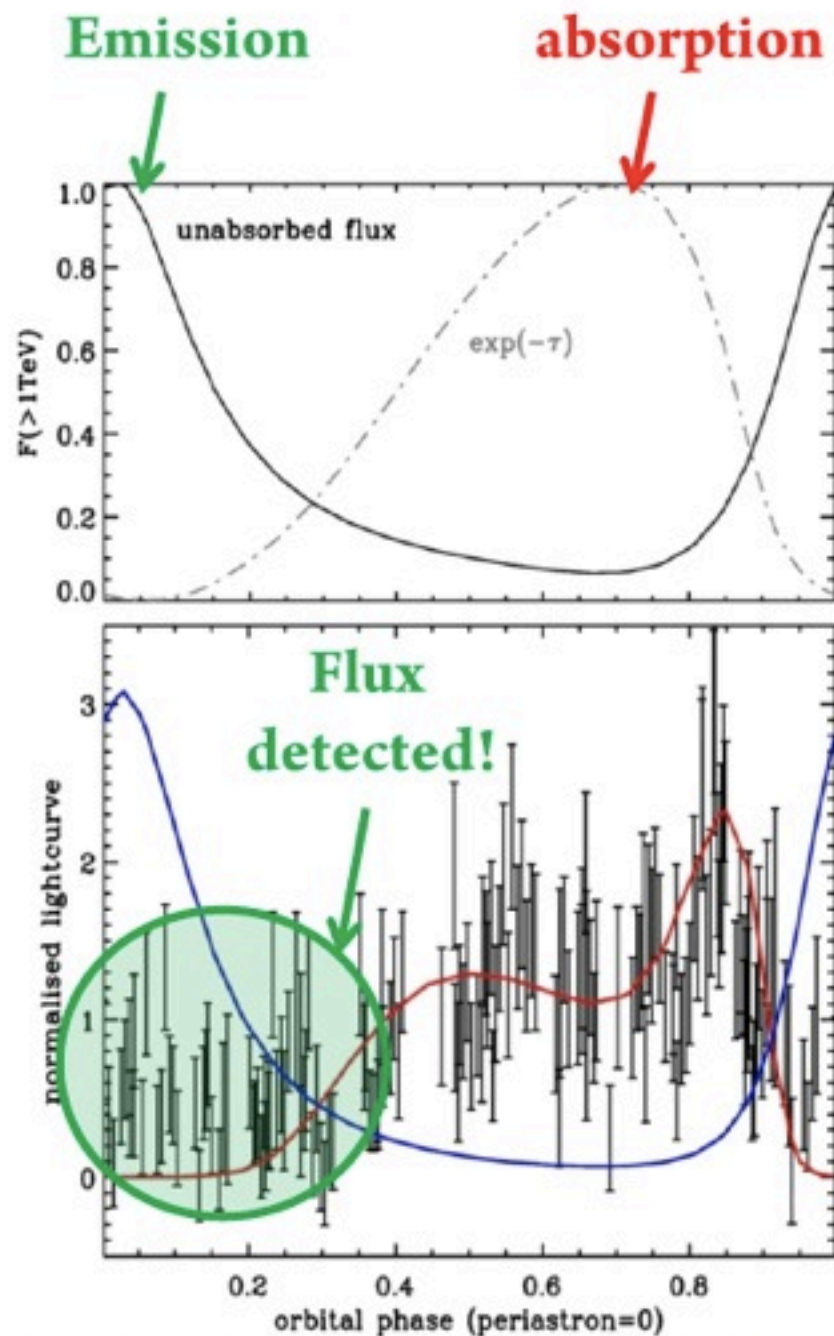
HESS data points



[Dubus, Cerutti & Henri, A&A 2008]



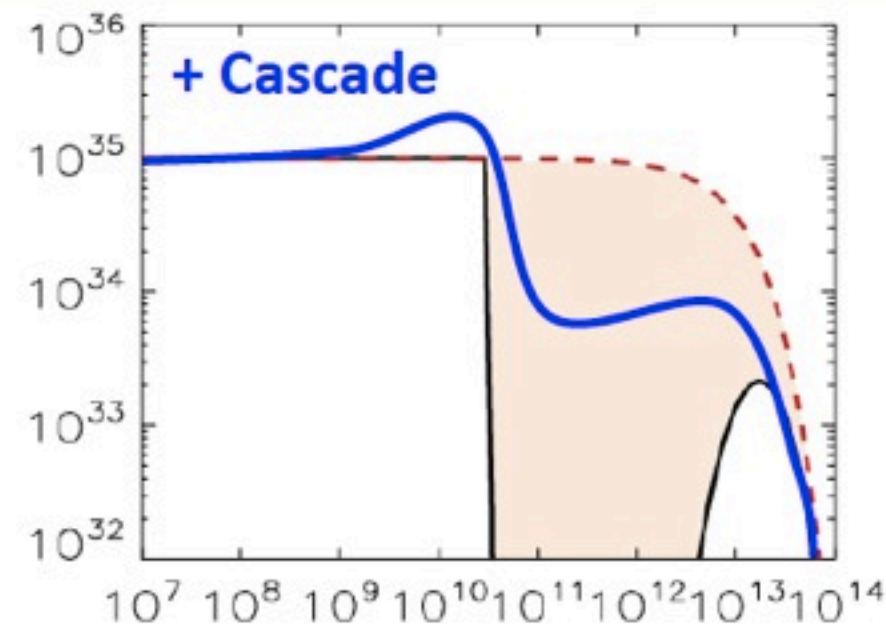
# LS 5039: cascade de paires



[Dubus, Cerutti & Henri, A&A 2008]

- **Model: Huge absorption** at superior conjunction  $\rightarrow$  no TeV flux...
- ... but, **excess** measured by HESS!

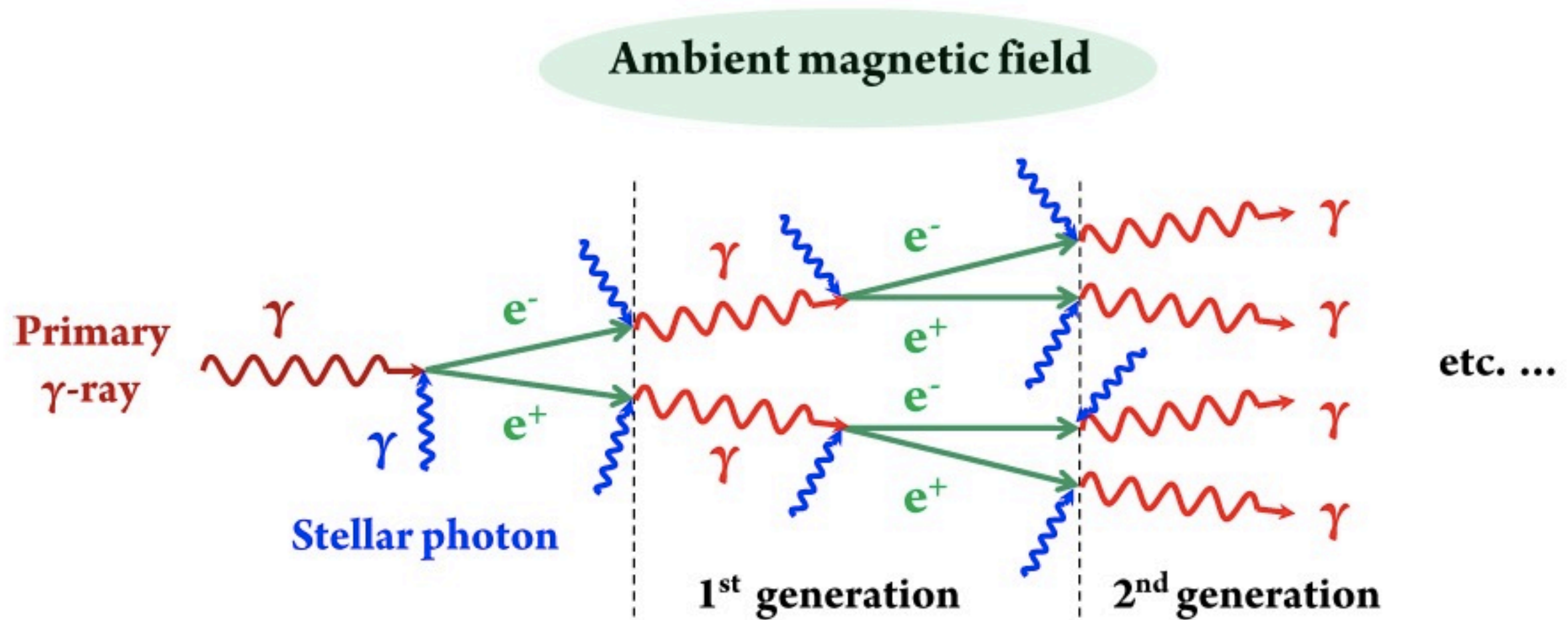
**Solution: Pair cascade emission!**



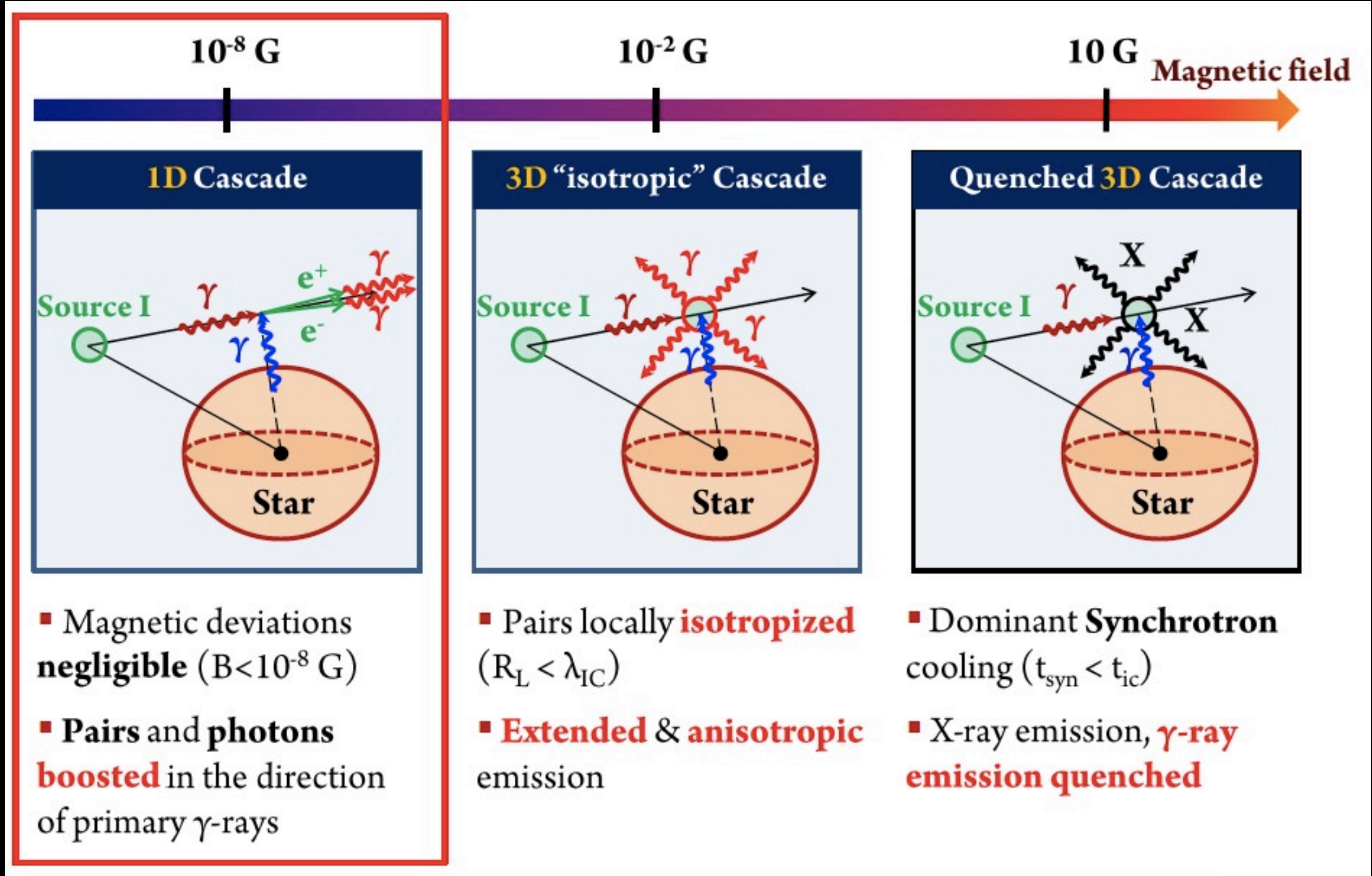
- Absorbed energy **recycled**  
 $\rightarrow$  Emission of new generations of pairs
- Increase the **transparency** of the source at superior conjunction.



# Physique des cascades de paires



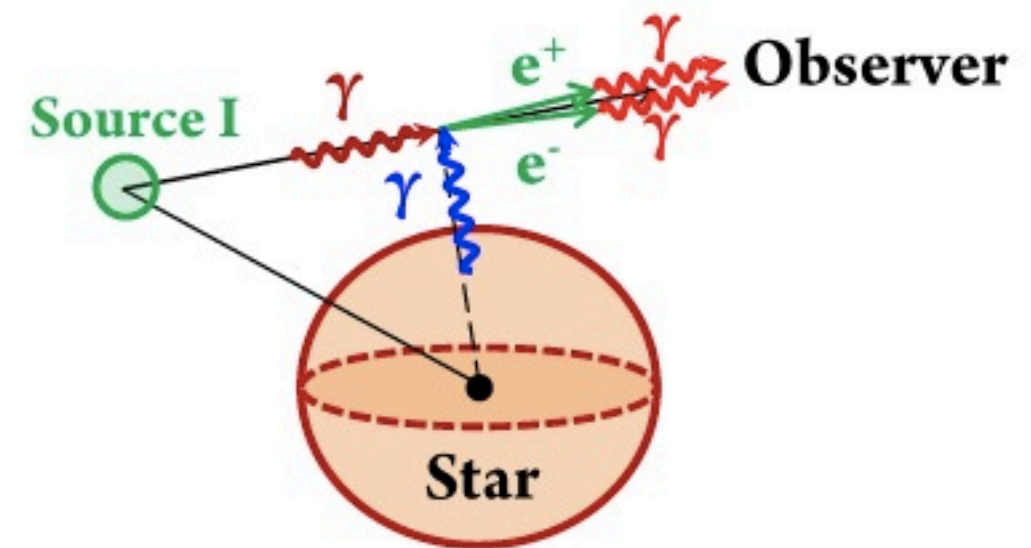
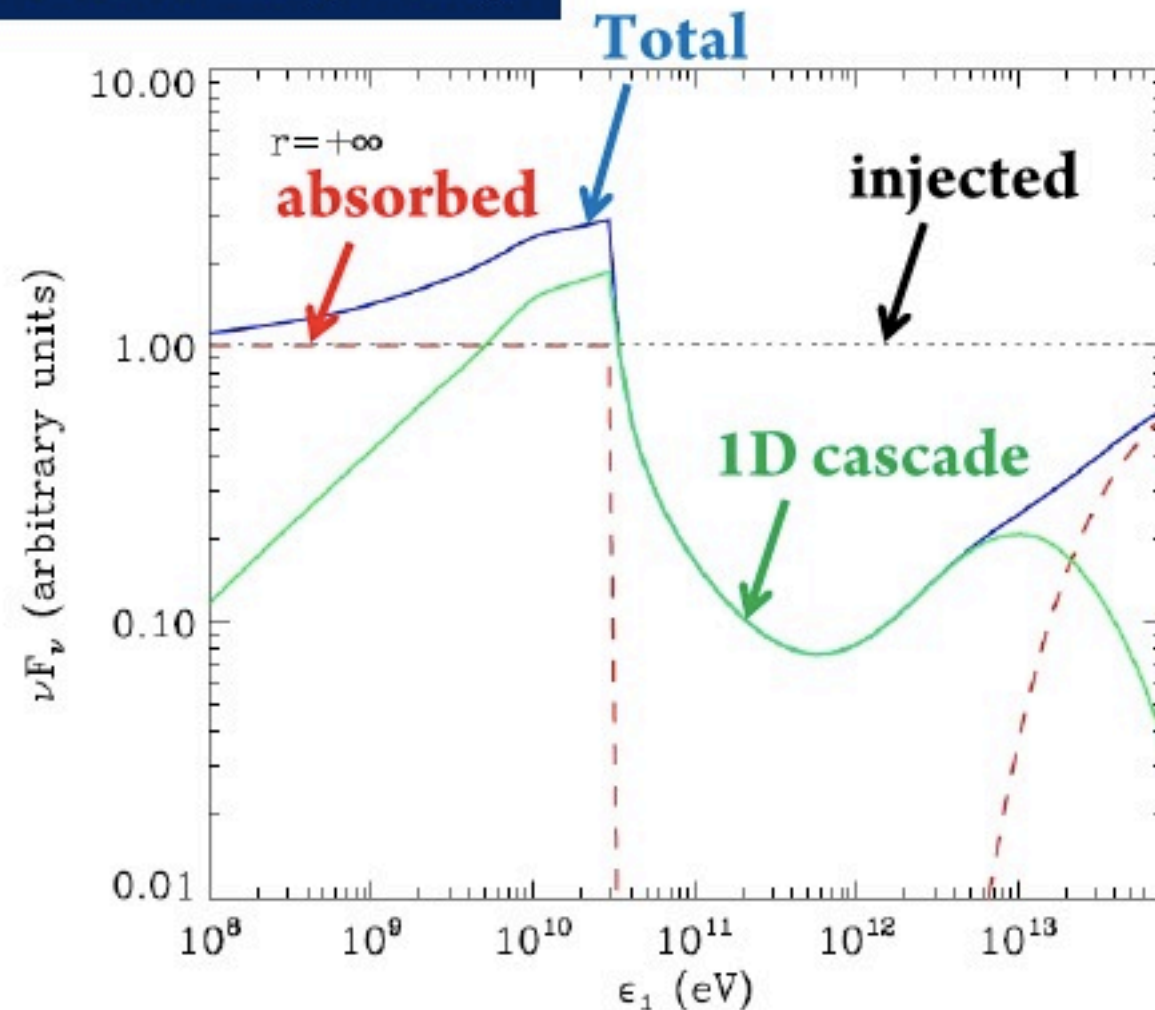
# Différents régimes de cascades



# Cascade 1D

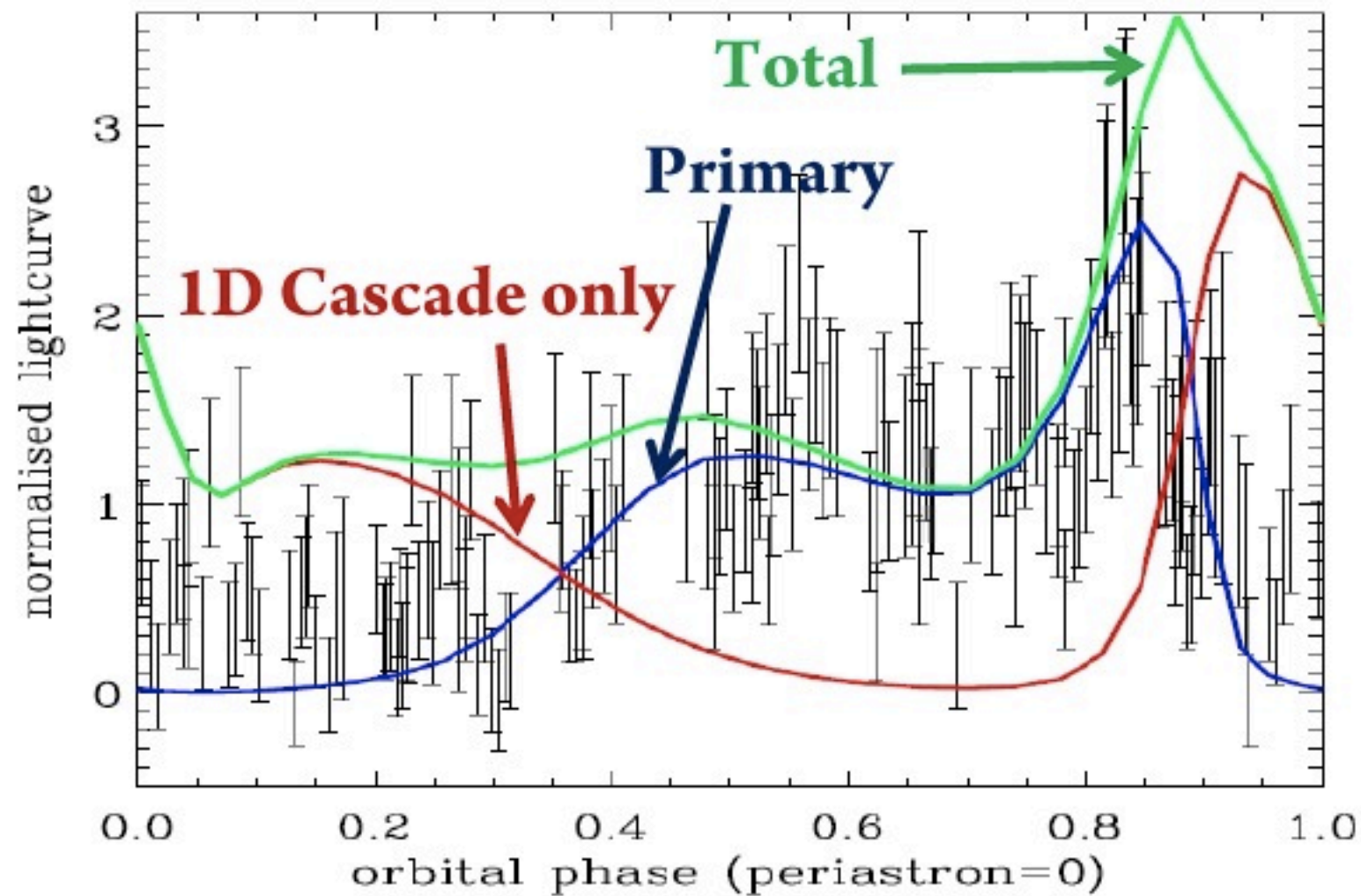
- **No magnetic field** (or  $B < 10^{-8}$  Gauss)
- Cascade develops **along the line of sight** → **High anisotropy**
- **Complete and accurate** semi-analytical calculation possible (all generations)

Ex: LS 5039 at sup. conj.





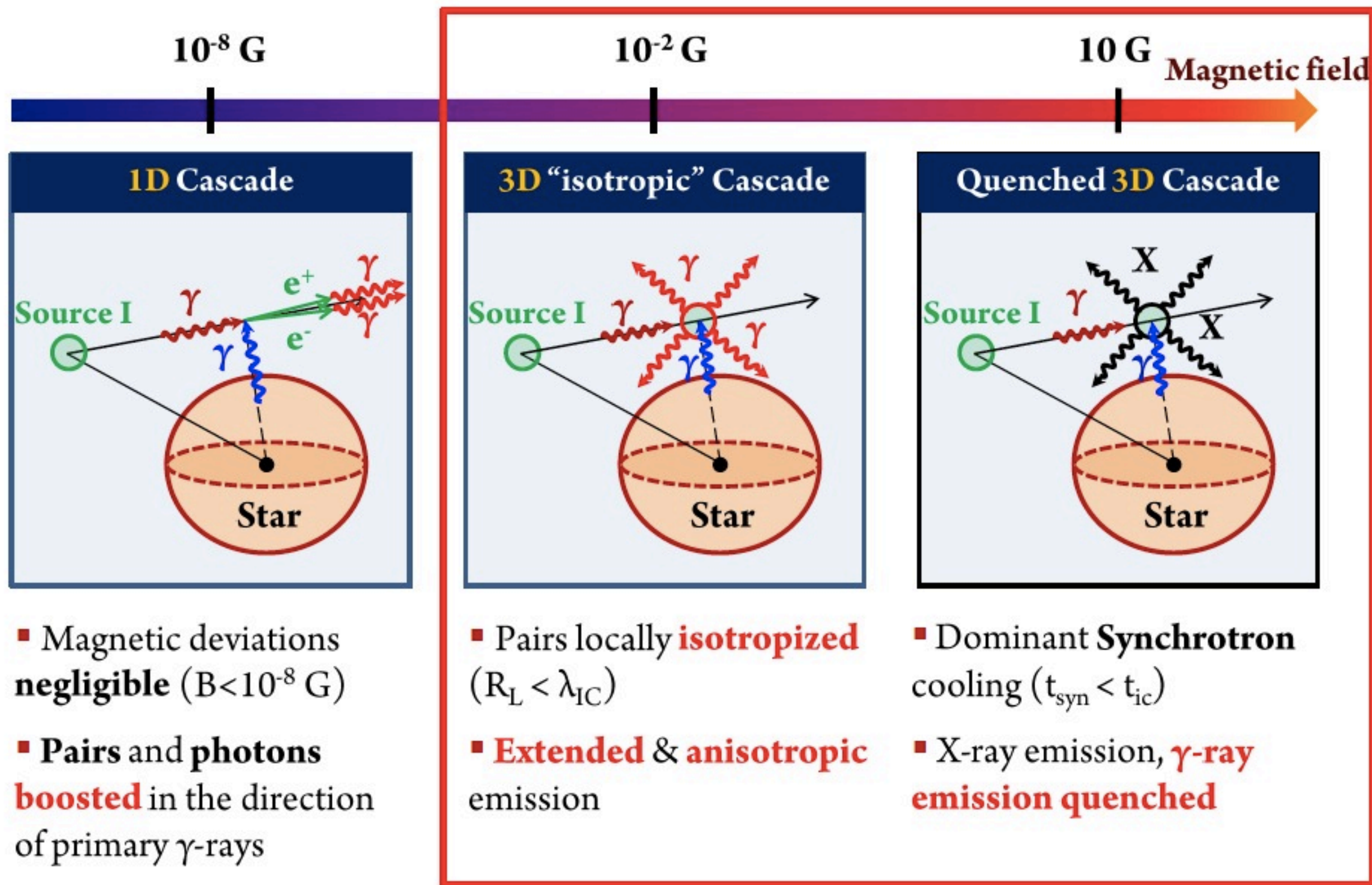
# Physique des cascades de paires



[Cerutti, Dubus & Henri, A&A 2009]

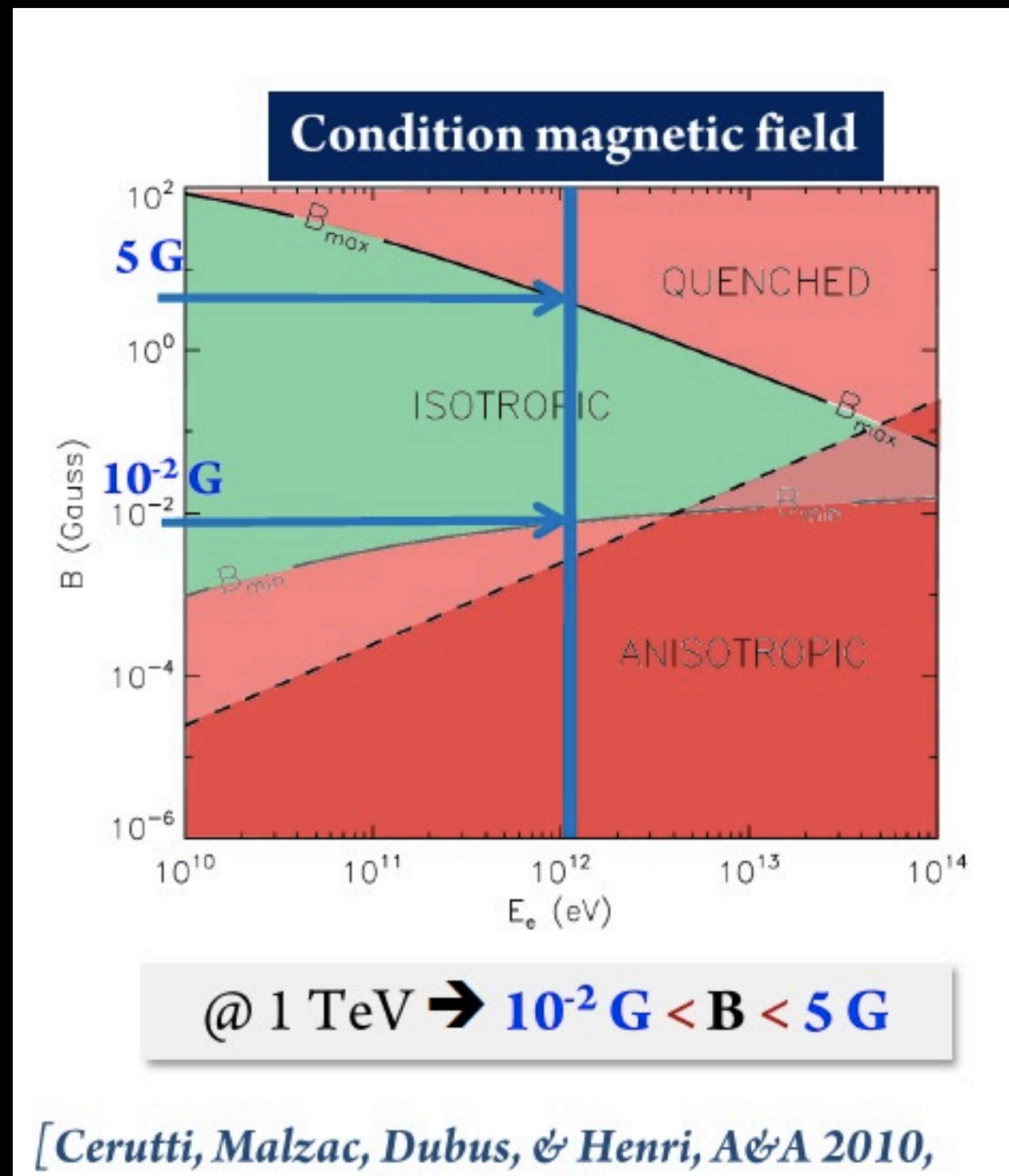
- Contribution too high from the cascade  
→ Cascade 1D excluded!
- Upper limit for the cascade contribution @ superior conjunction  
→ Cascade 3D not excluded

# Physique des cascades de paires



# Cascades 3D

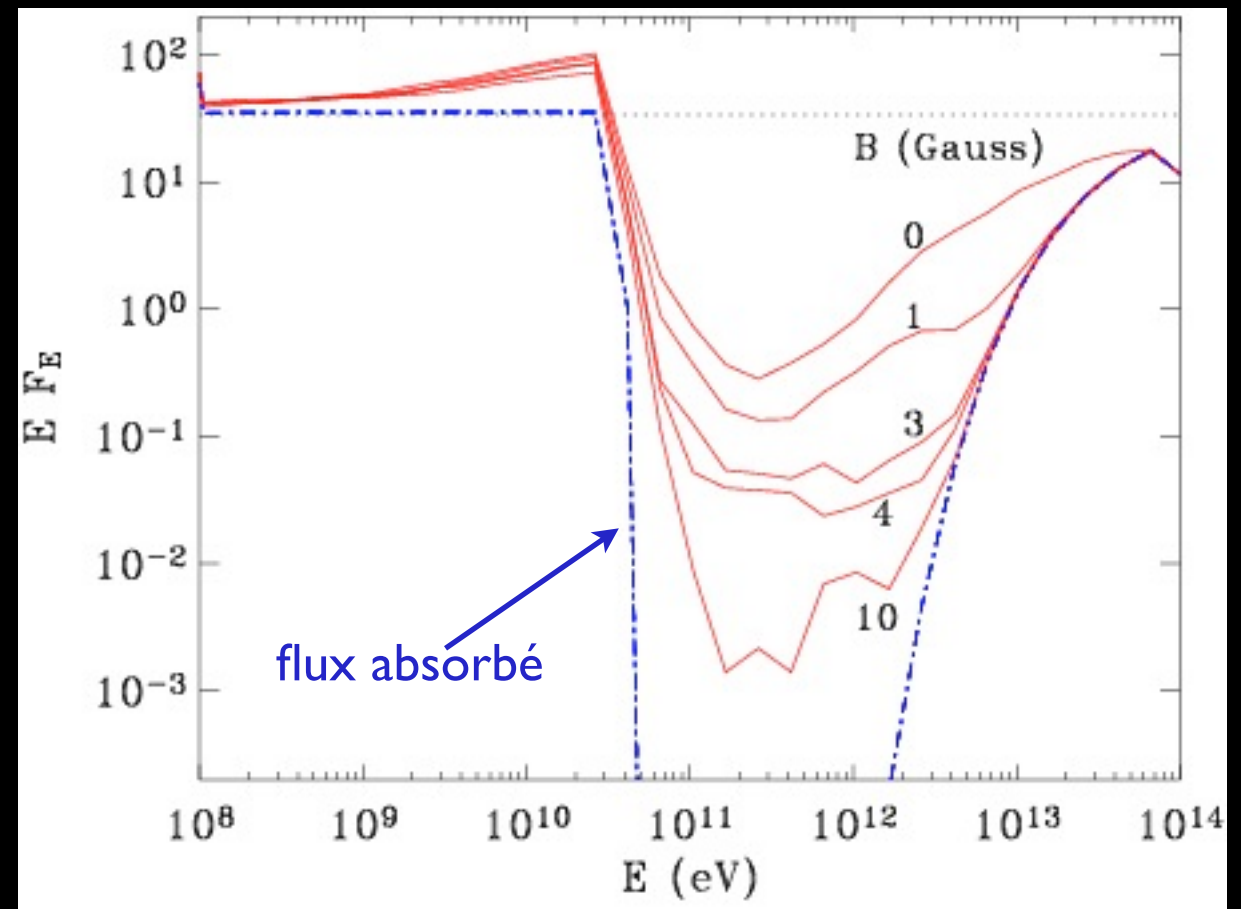
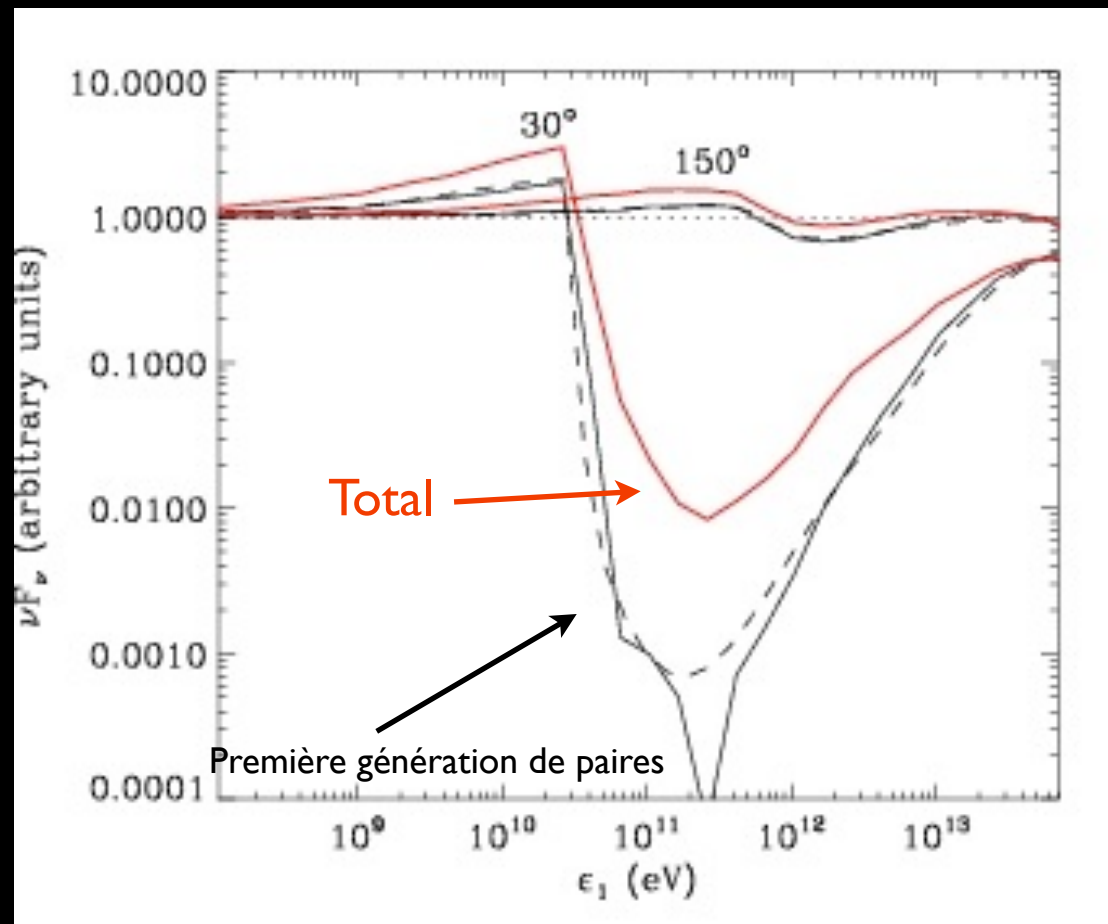
- Paires instantanément “isotropizées”
- Emission et refroidissement Compton & synchrotron
- Calcul analytique explicite impossible  
► Simulations Monte-Carlo 3D





# Cascades 3D magnétisées

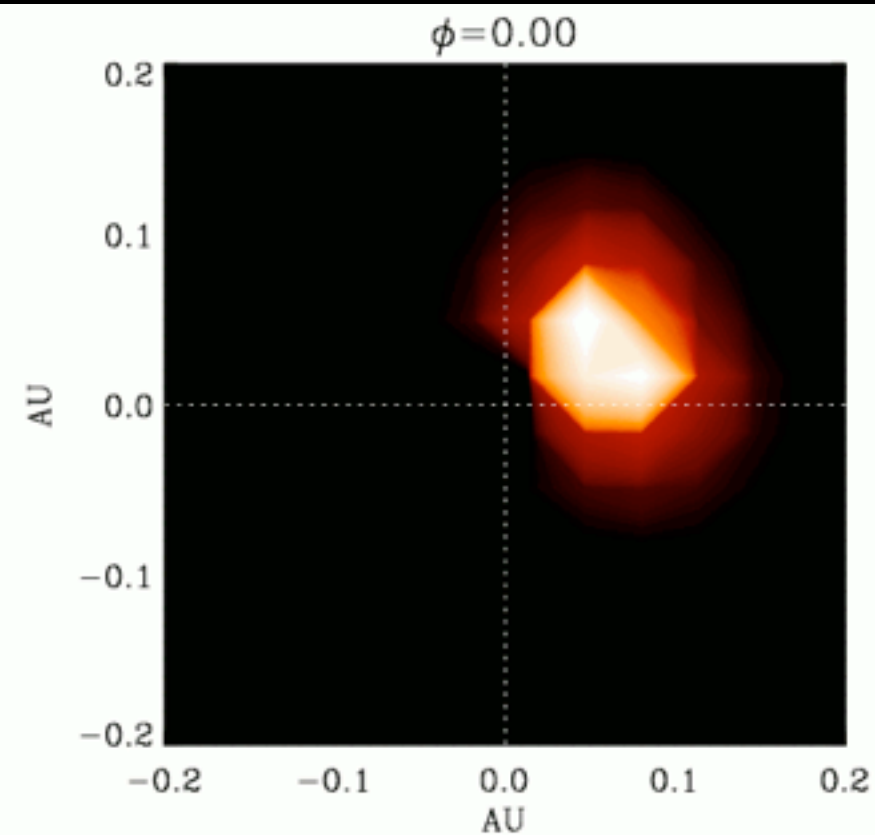
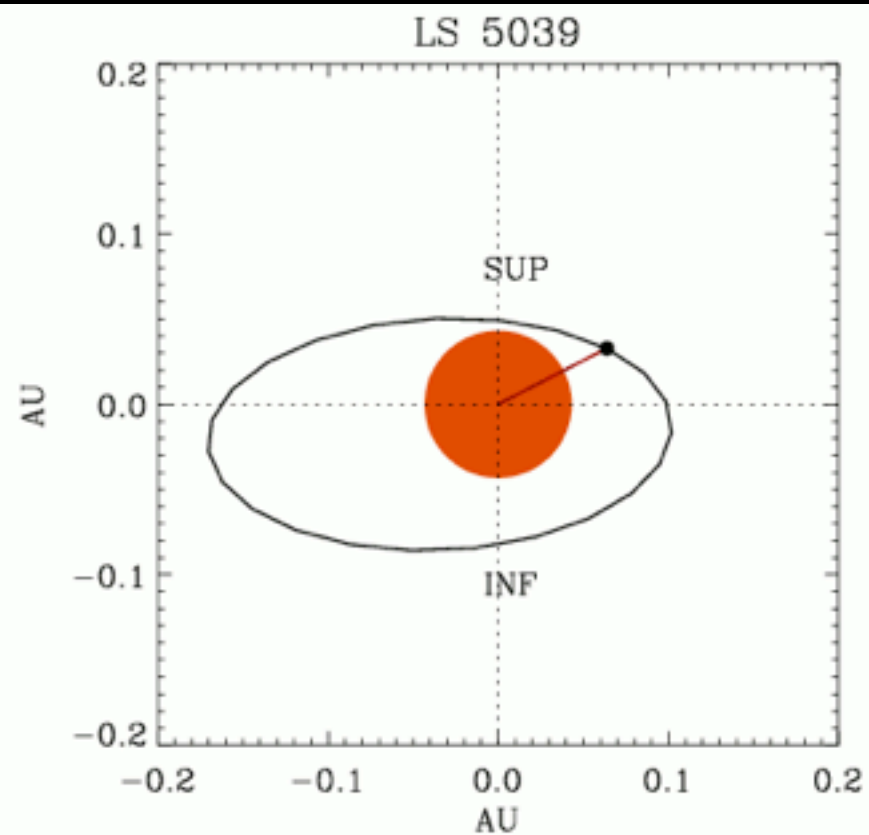
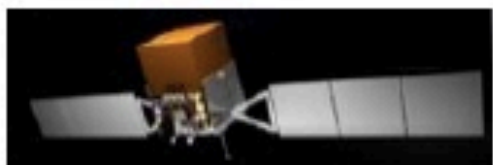
Injection de photons (loi de puissance) à la position de l'objet compact



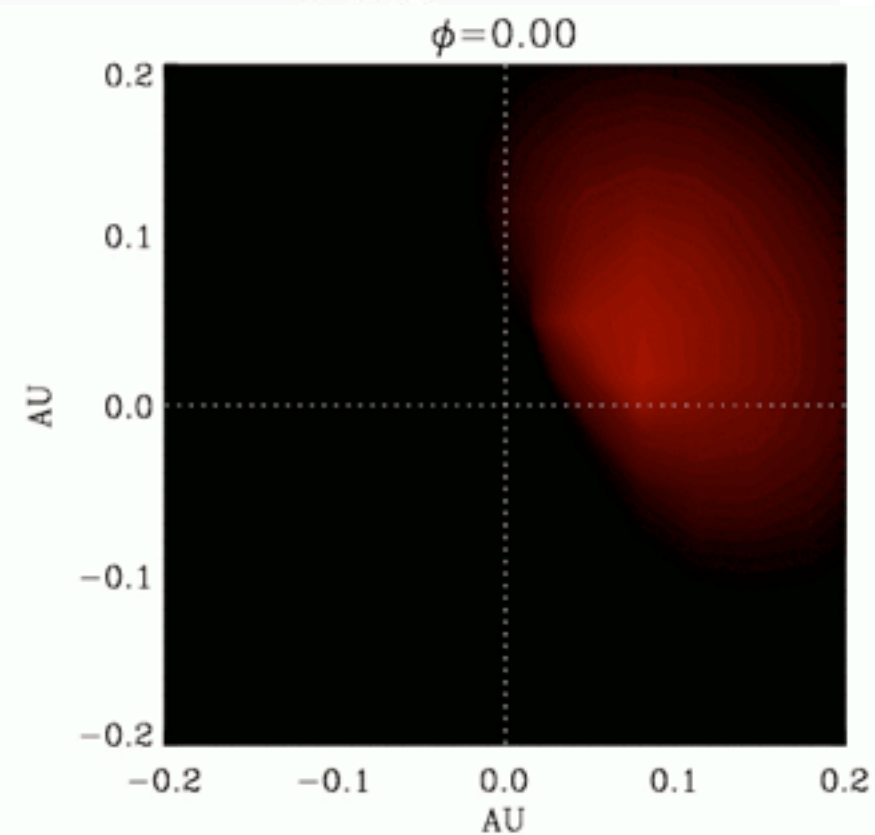
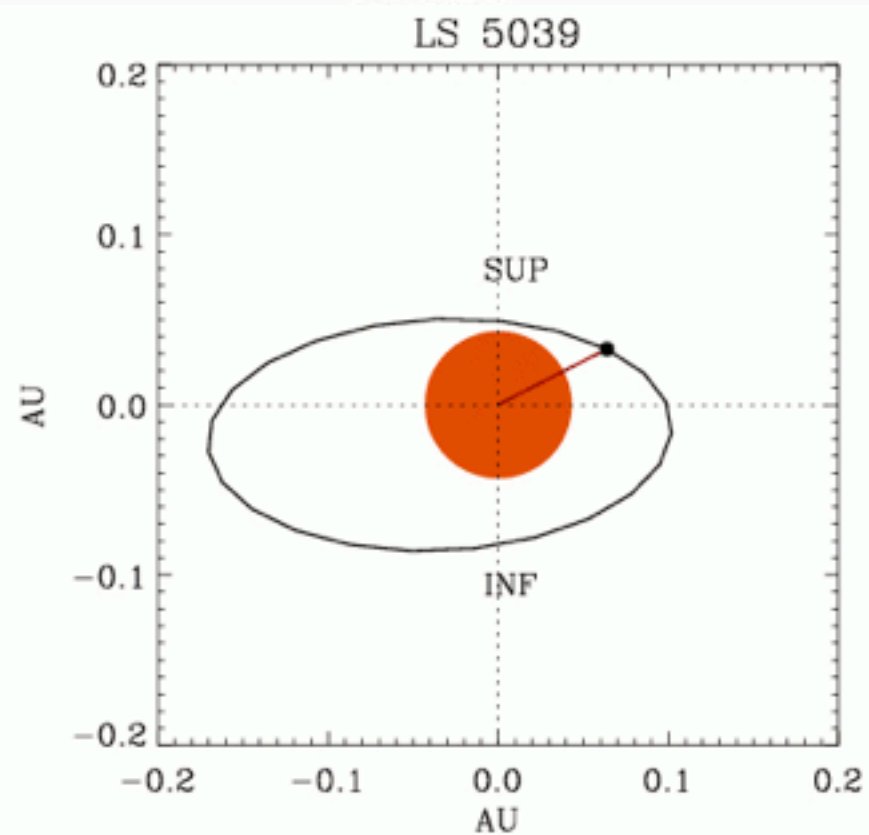
Le champs magnétique supprime  
l'émission au TeV  
et ne peut pas être trop fort

# Modulation de la cascade 3D dans LS 5039

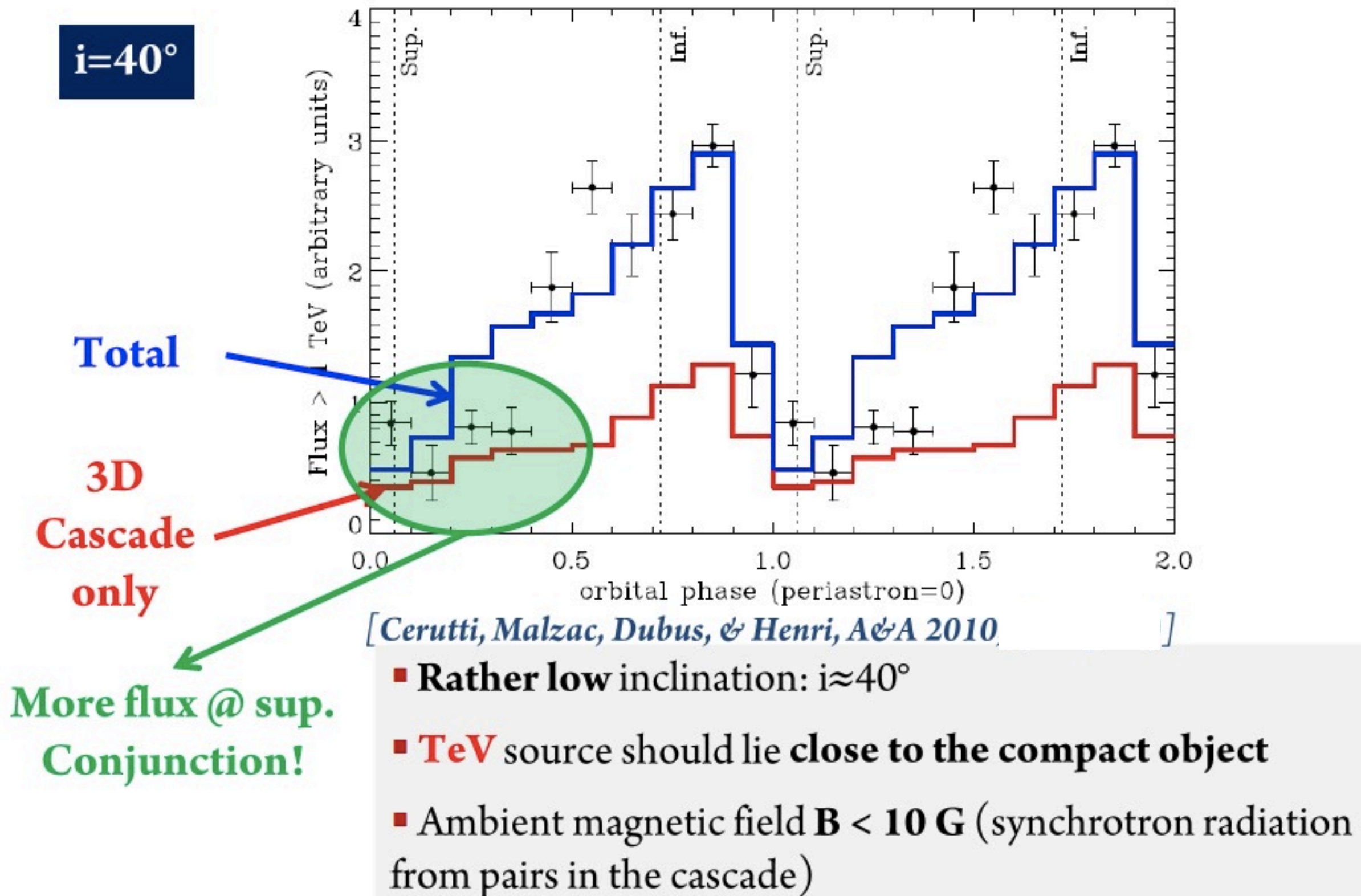
*Fermi*



**HESS**

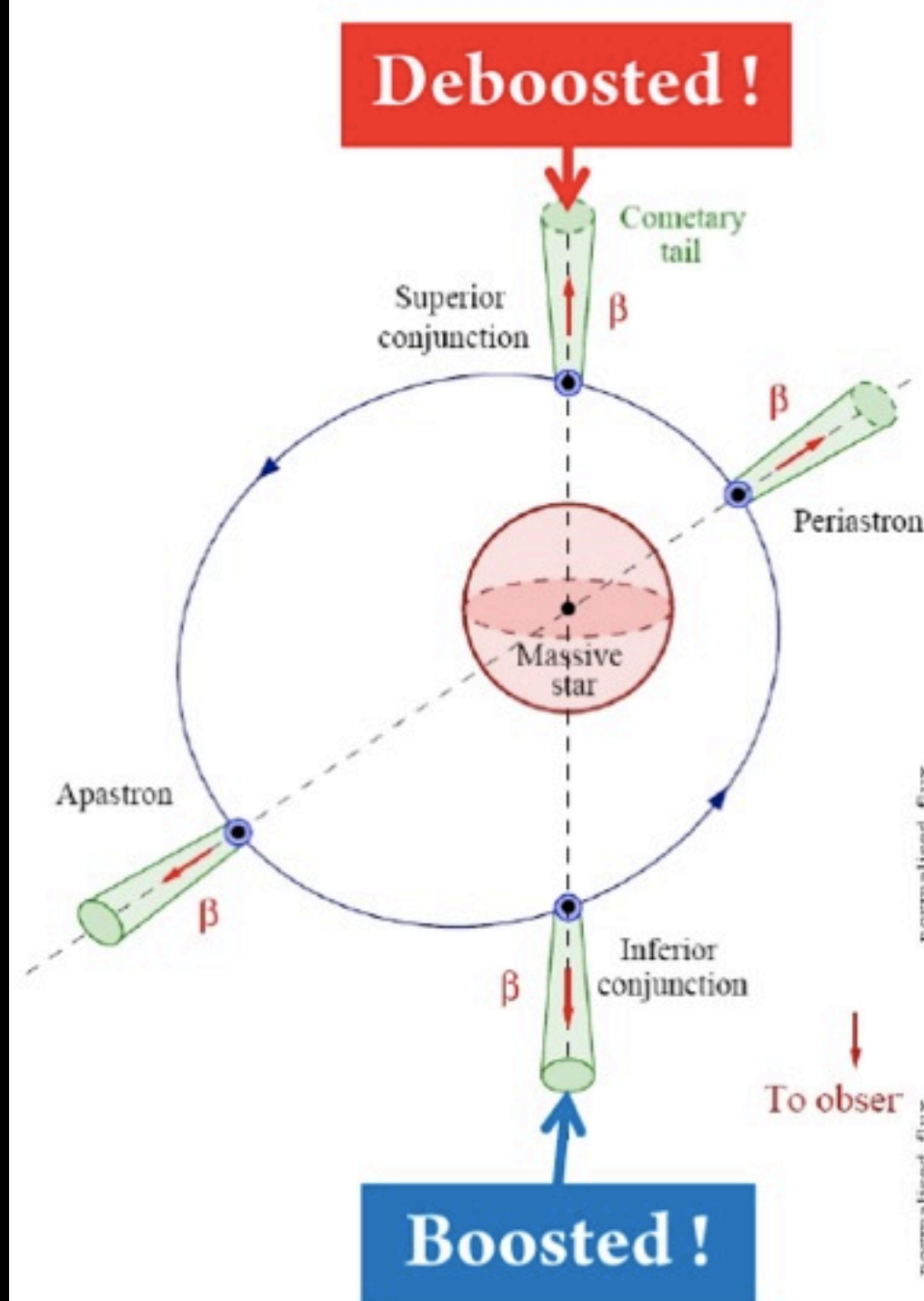


# Modulation de la cascade 3D dans LS 5039



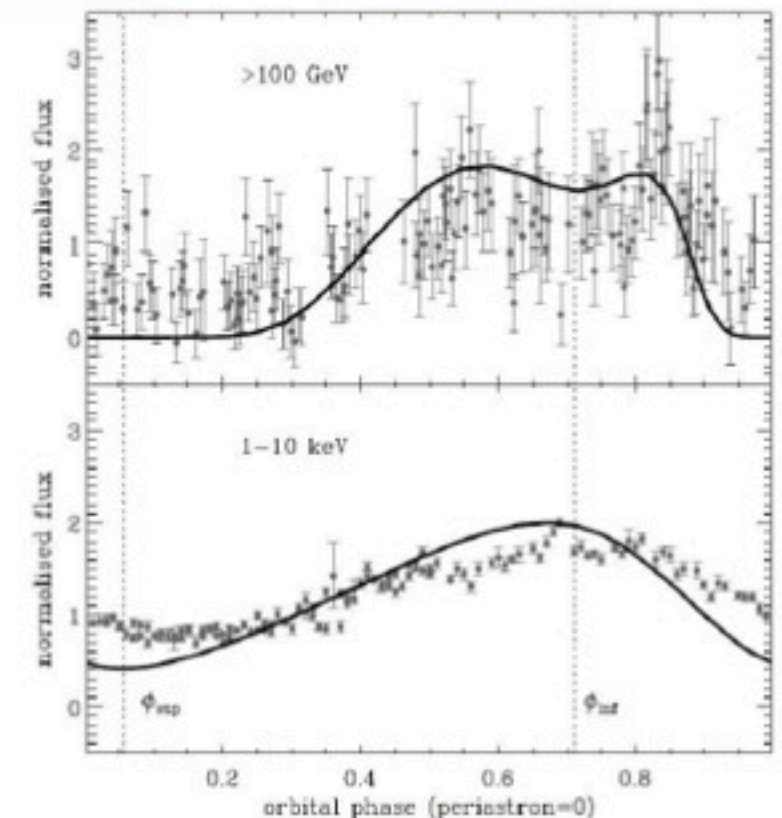
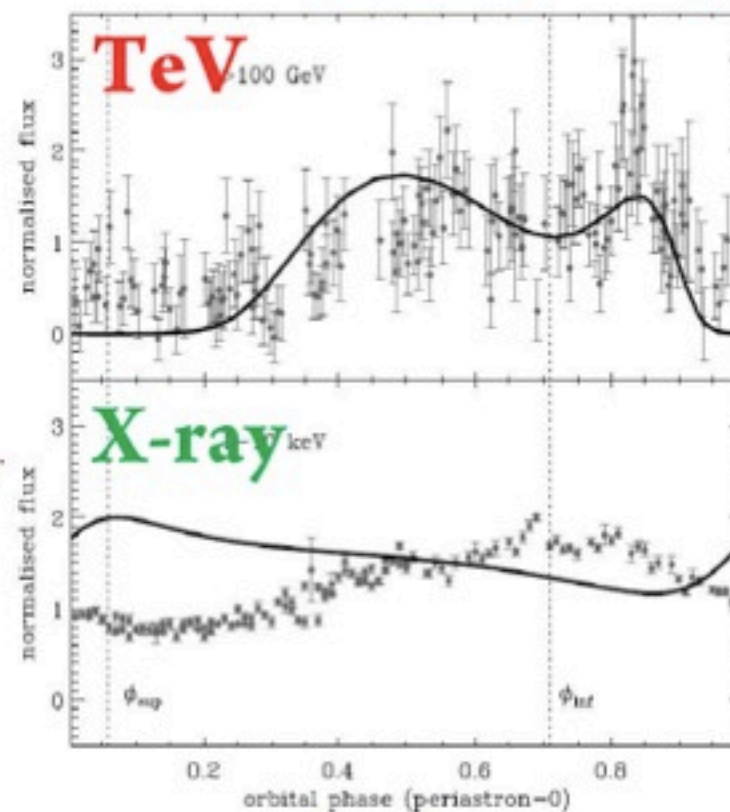


# Effet de la focalisation Doppler dans le vent du pulsar de LS5039



- Shocked pulsar wind  $\approx$  **radial**  
(*stellar wind speed*  $\gg$  *orbital motion pulsar*)
- Mildly** relativistic wind  $\beta=1/3$  ( $=v/c$ )
  - **TeV** modulation  $\approx$  **unchanged**
  - **X-ray** modulation  $\approx$  **reproduced**

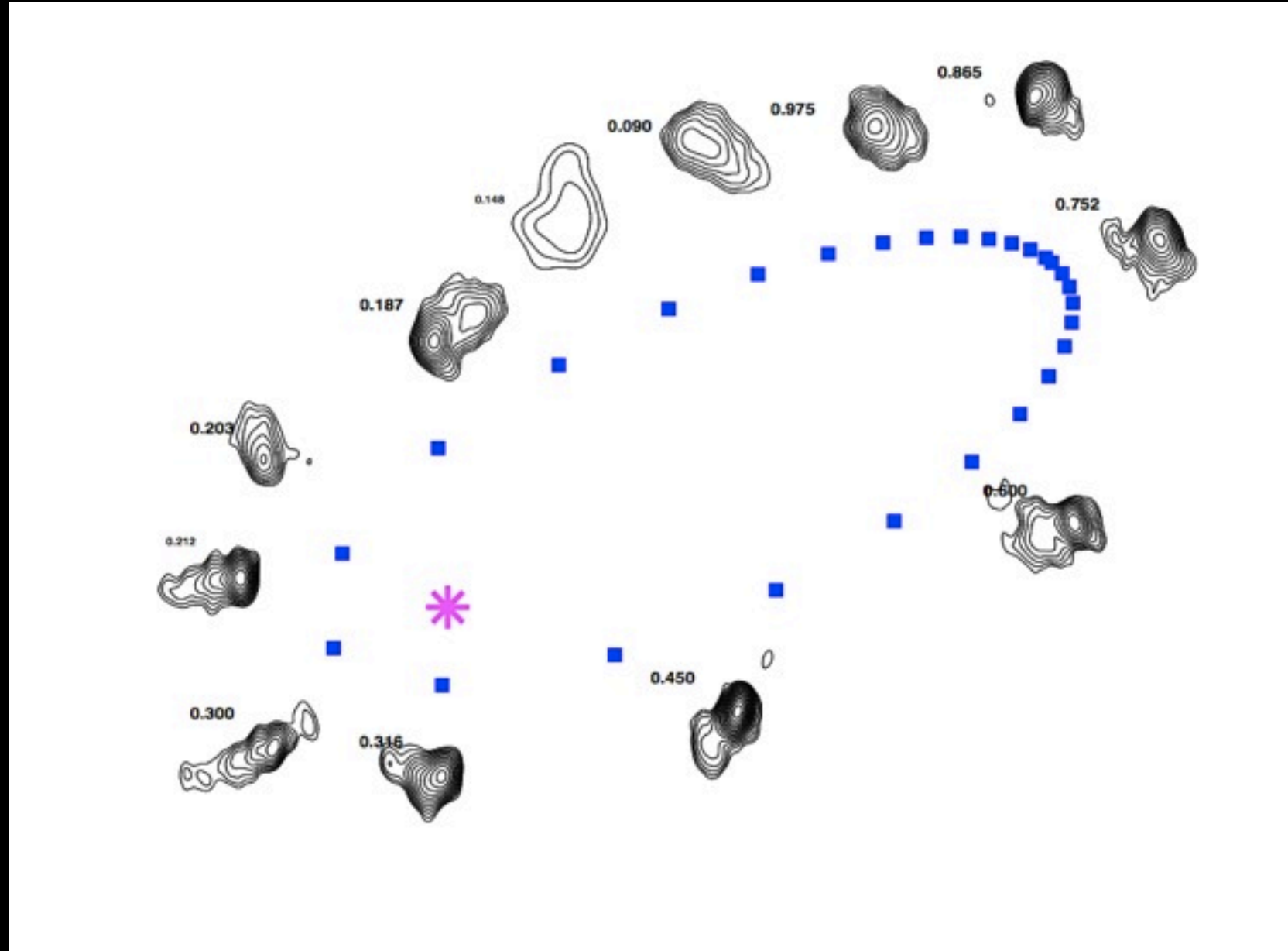
$\beta=0$   $\xrightarrow{\text{Boost}}$   $\beta=1/3$



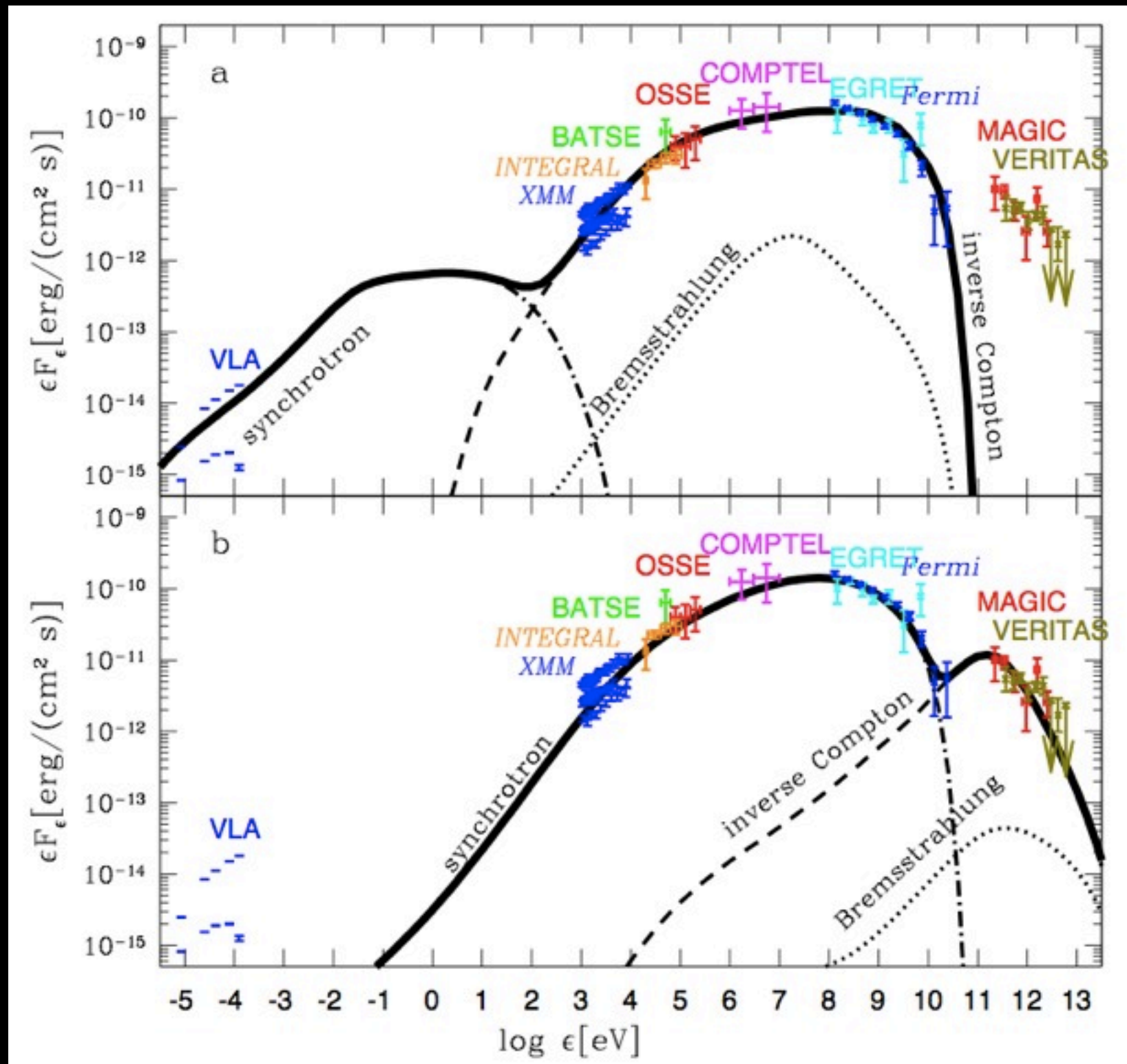
[Dubus, Cerutti, & Henri 2010b]

# LS I +61 303

- Periode 26.5 jours ( $e=0.54$ )
- $R_{\text{orb}} = 0.2$  UA
- B0 V ( $\sim 13 M_{\text{sun}}$ )
  - ▶ disque circumstellaire
- Objet Compact:
  - ▶ inconnu
- Vent relativiste:
  - ▶ morphologie radio dépend de la phase orbitale
- Pas d'indication d'un disque d'accrétion



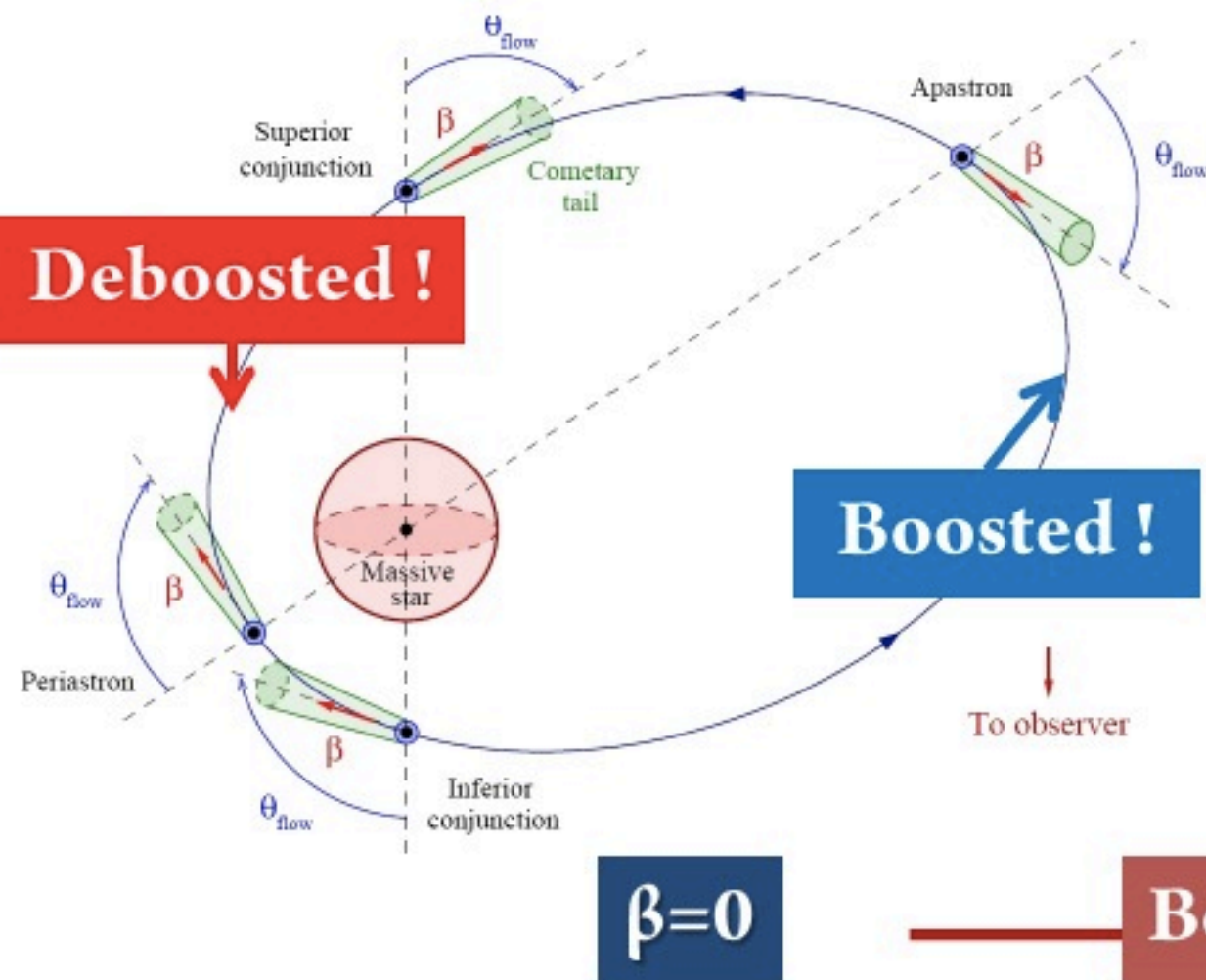
# LS I +61 303: modèle de vent de pulsar compact



Zdziarski et al. 2010



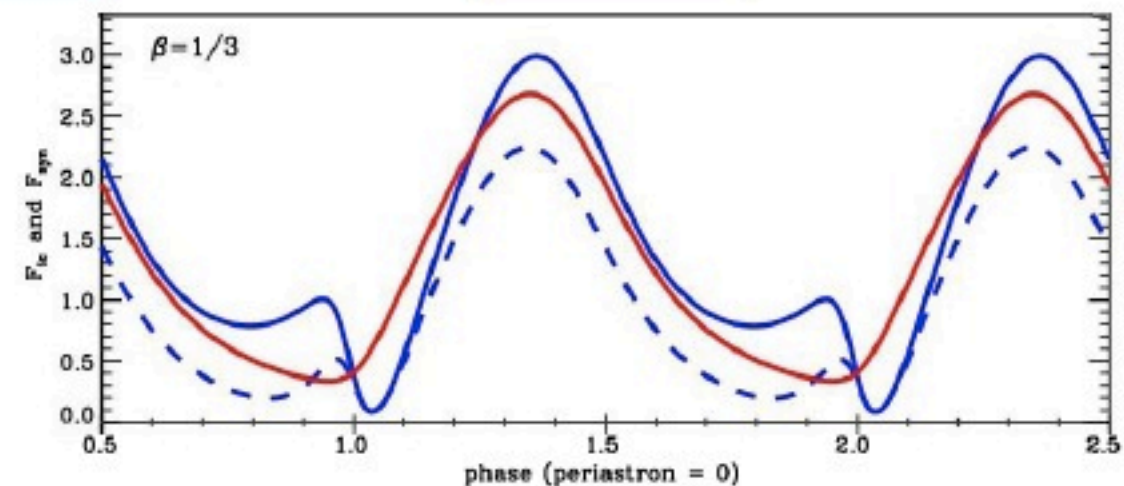
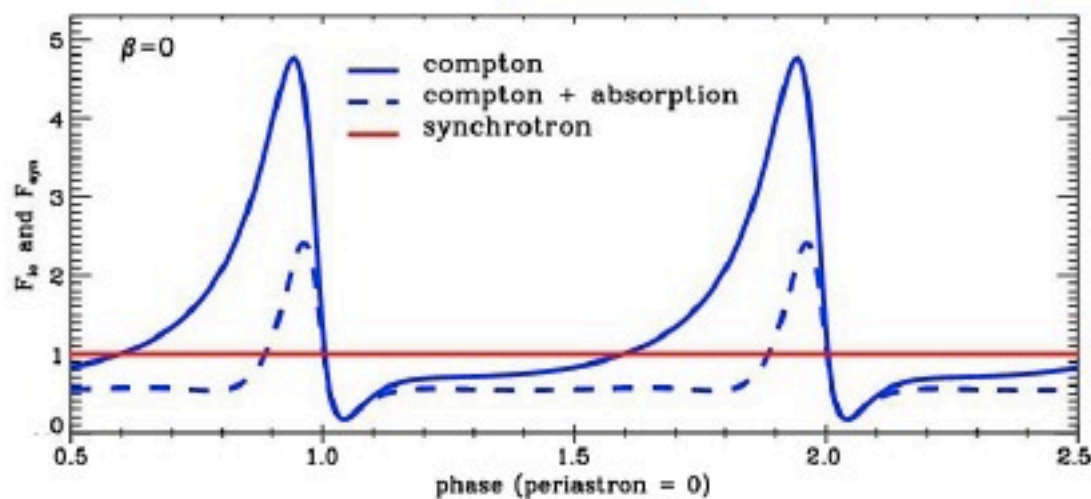
# Focalisation Doppler dans LS I +61 303



■ **Model:** Pulsar wind **trailing** in the Be Keplerian disk

■ **Mildly relativistic wind  $\beta=1/3$ :**

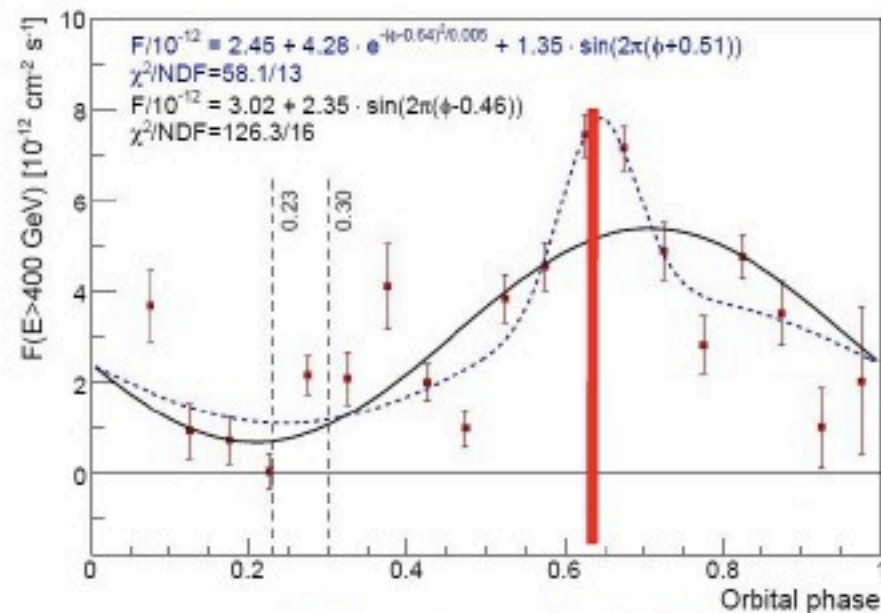
**X-ray** and **TeV** both **correlated** and **maximum close to apastron**



[Dubus, Cerutti, & Henri 2010b]

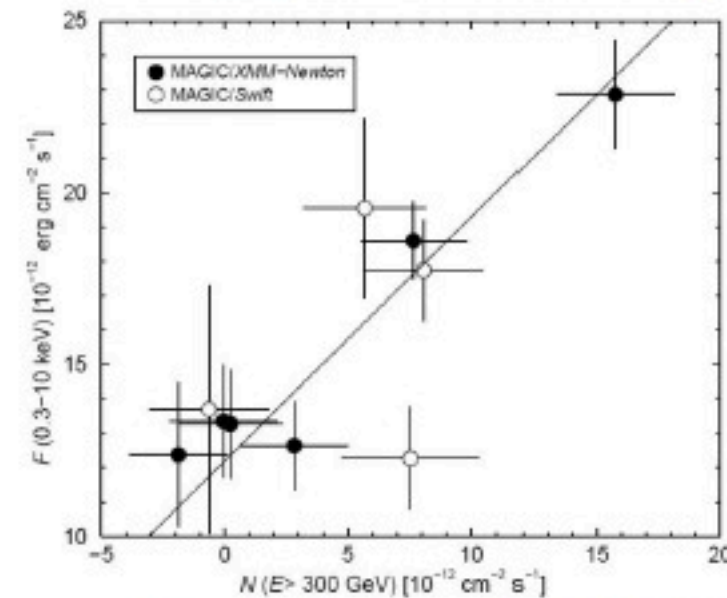
# Focalisation Doppler dans LSI +61 303

## MAGIC lightcurve



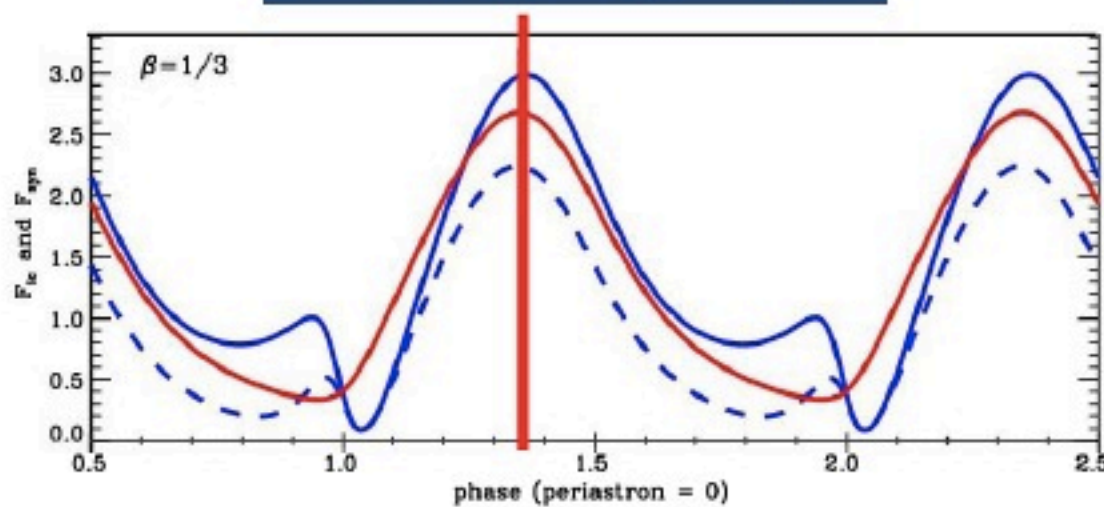
[Albert et al. 2009]

## X- $\gamma$ correlation



[Anderhub et al. 2009]

## Model for $\beta=1/3$



[Dubus, Cerutti, & Henri 2010b]

- The Boost in **LSI +61°303** could explain **TeV** and **X-ray modulations** !
- Same model for **PSR B1259-63**  
➔ **small impact**

## Autres effets potentiellement importants:

- Source étendue/gradients/composantes multiples
- Propagation des paires  $e^+e^-$  dans le champs magnétique
- Entrainement et diffusions des paires dans les vent du pulsar/étoile
- Effets hadroniques
- ...

## Méthode:

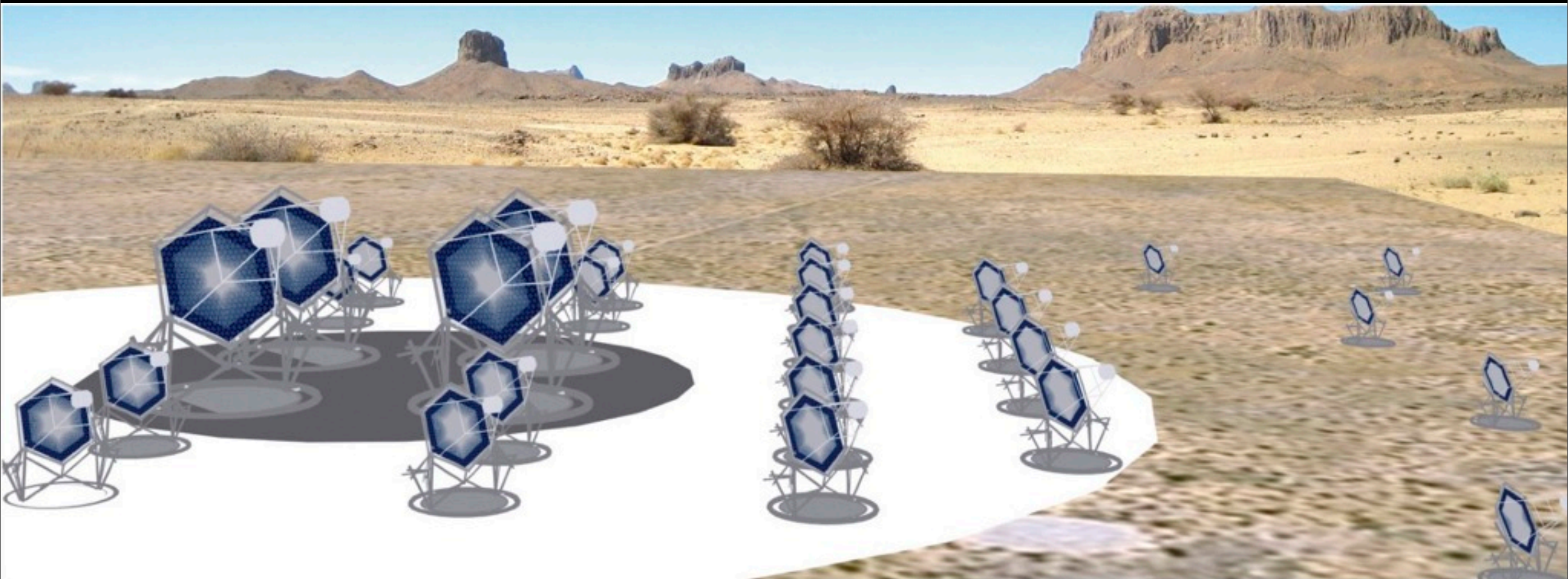
- Modèles dynamiques et simulations (hydro/MHD)
  - ➔ contraintes sur la géométrie et paramètres physiques
- Prédictions détaillées spectres en fonction de la phase
- Comparaisons au données THE et multi-lambda



# Conclusions

- L'étude des binaires gamma en évolution rapide, nouvelles sources détectées, passage de la détection à leur étude physique détaillée
- Une modélisation détaillée de l'émission des binaires gamma couplées à des observations permettra de déterminer:
  - ➡ la nature de l'émission au GeV
  - ➡ géométrie de la source
  - ➡ champ magnétique
  - ➡ distribution des particules accélérées
- Contraintes sur la physique des jets/vents, chocs, d'accélération ...

# Cherenkov Telescope Array



- Découverte de nouvelles sources
- Détection de microquasars au TeV ?
- Large bande ( $10-10^5$  GeV) + sensibilité:
  - ➔ spectroscopie résolue en temps
  - ➔ spectres en fonction de la phase orbitale

# LS 5039: Evolution du spectre dans la bande CTA

