

Astronomie gamma avec HESS

Rayonnement γ : modes et sites de production

Détection: les télescopes à effet Cerenkov

Motivations et résultats

- rayonnement cosmique
- phénomènes violents dans l'Univers
- cosmologie

L'avenir du domaine

L'astronomie γ

Observation du **rayonnement électromagnétique** du **ciel** pour des énergies supérieures à **100 keV**.

- **Satellites** pour $100 \text{ keV} < E < 30 \text{ GeV}$:
COS-B, CGRO (EGRET), INTEGRAL
A venir: GLAST, AMS,...
- Détecteurs au sol (**Télescopes à effet Cerenkov**) sont les plus adéquats pour $E > 30 \text{ GeV}$.



Telescope Whipple (E.U., 1982)

Production des γ_{TeV}

□ Processus de production de γ de $E > 30 \text{ GeV}$:

▪ Electrons:



Rayonnement **synchrotron** si champ B, $E_{\text{max}} \sim \text{MeV}$ (radio&X)
Rayonnement de **freinage** si matière (faible)

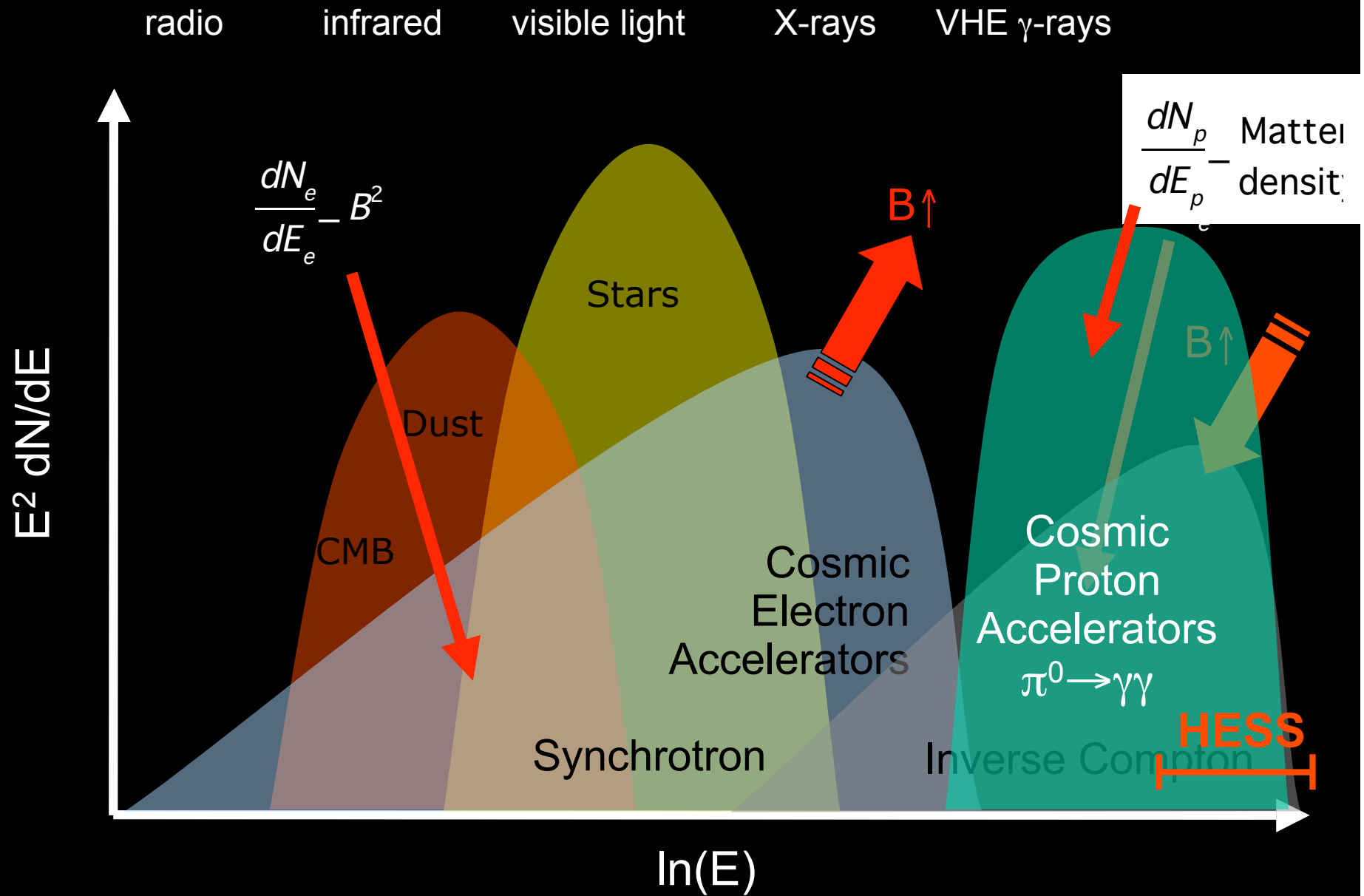
▪ Hadrons :



▪ Sources exotiques:



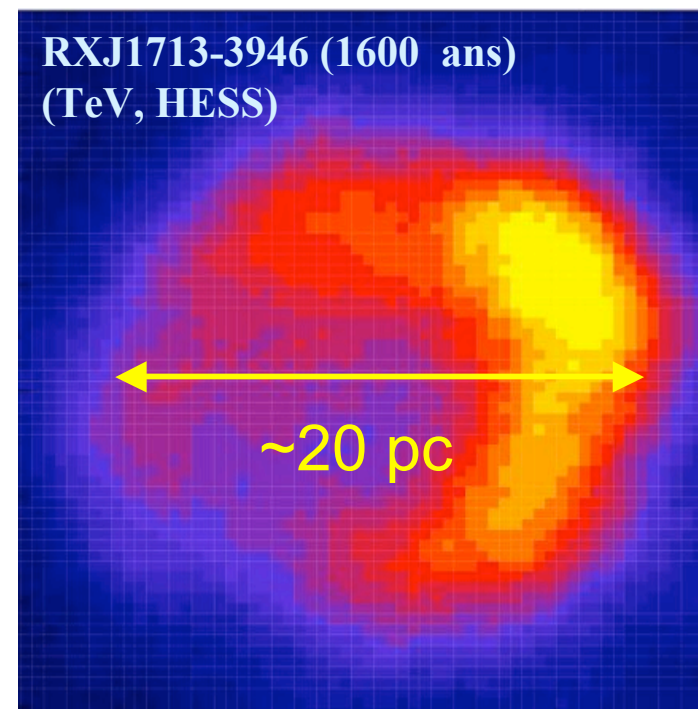
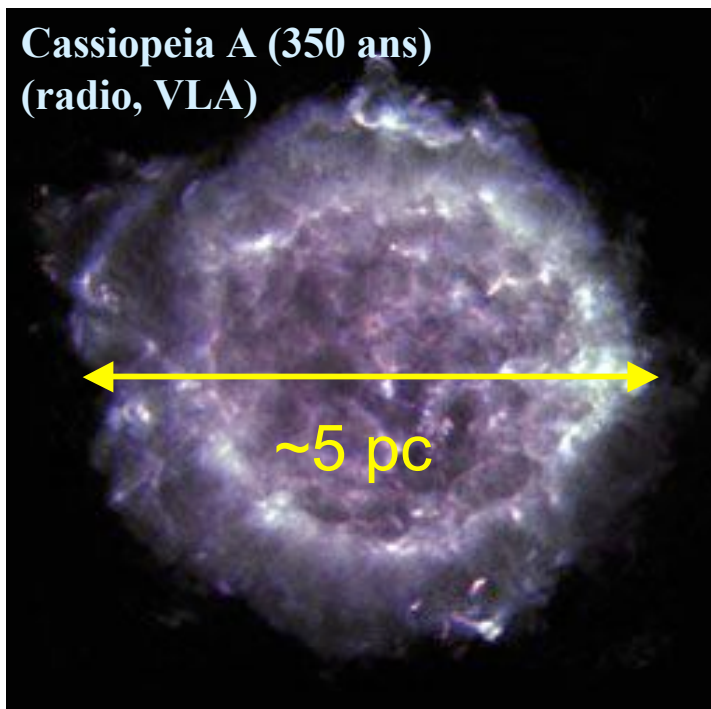
Electron or Hadron Accelerator?



Les sources γ

Sources galactiques:

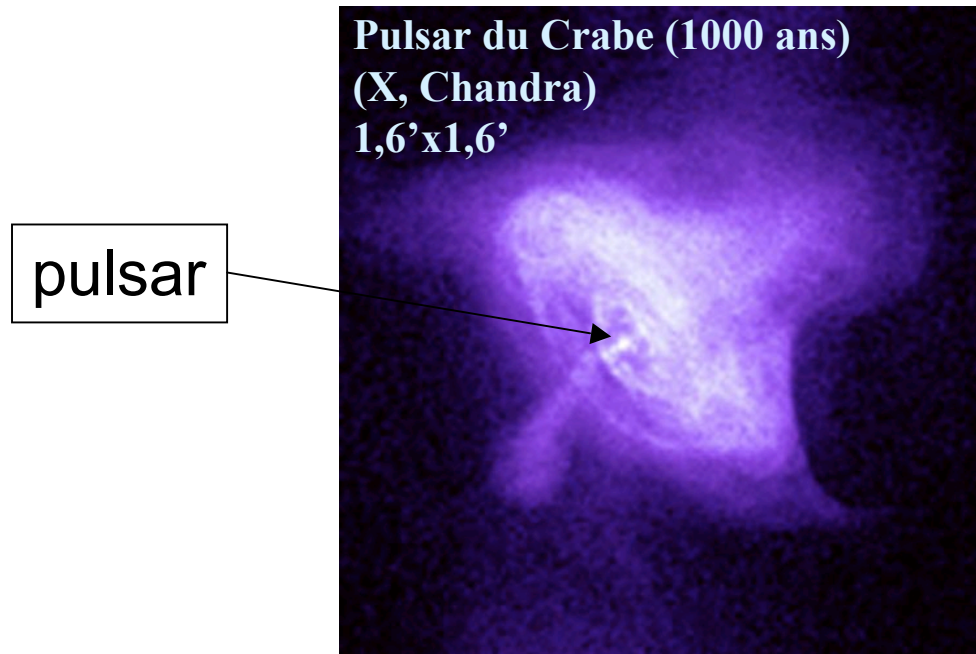
- Vestiges de supernovae (~ 10 au TeV)
- Pulsars
- Plérions



Les sources γ

Sources galactiques:

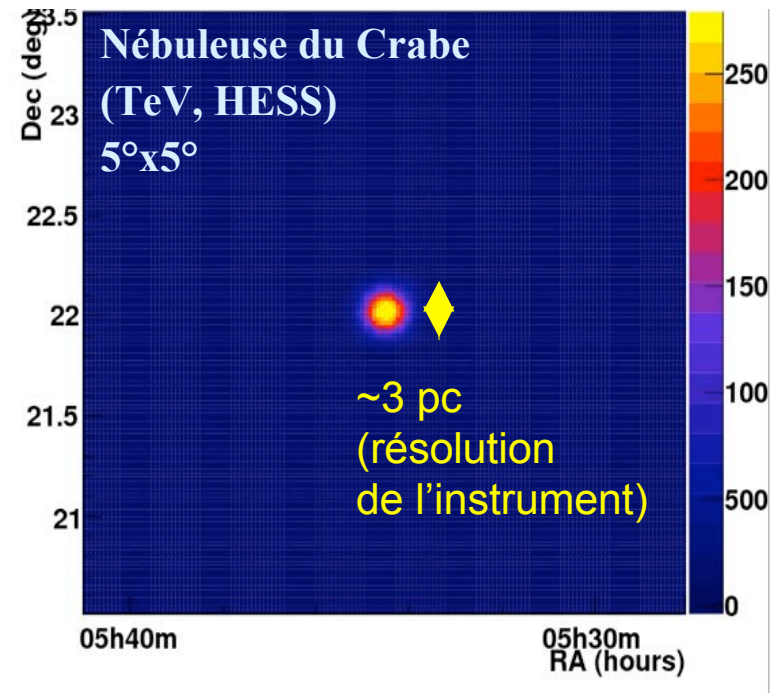
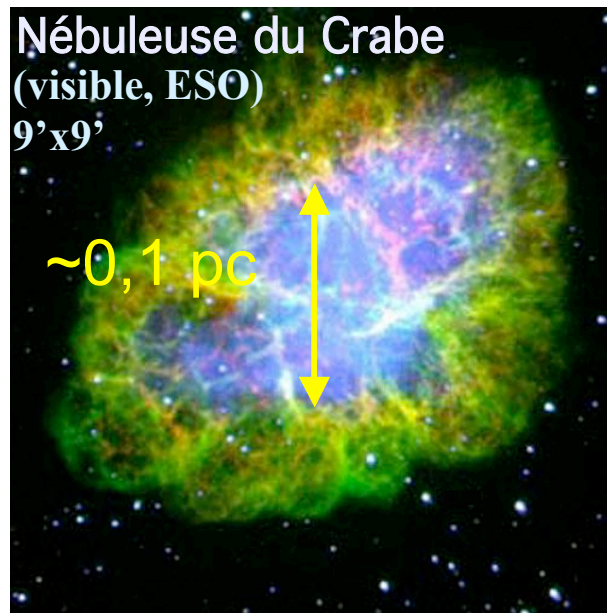
- Restes de supernovae
- Pulsars (0 au TeV)
- Plérions



Les sources γ

Sources galactiques:

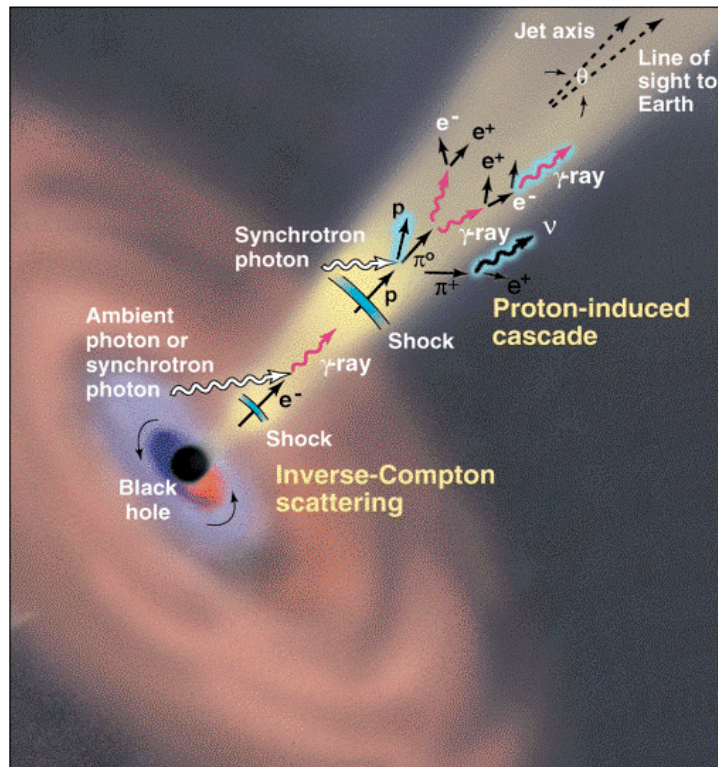
- Restes de supernovae
- Pulsars
- Plérions (~10 au TeV)



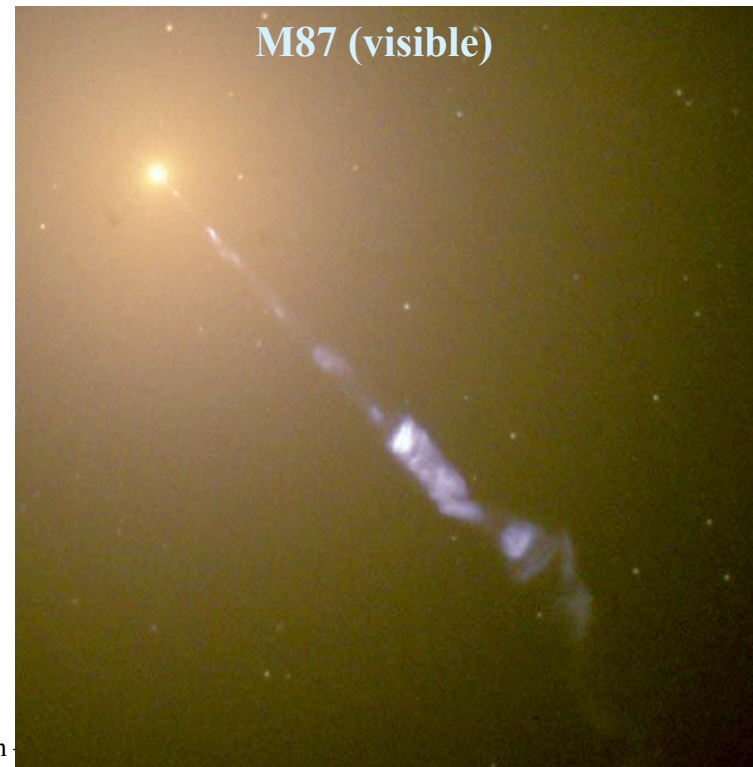
Les sources γ

Sources extragalactiques

- Noyaux actifs de galaxies (~20 au TeV)
- Sursauts gammas
- Clusters de galaxies



Huynh



Les sources γ

Sources extragalactiques

- Noyaux actifs de galaxies
- Sursauts gammas (0 au TeV)
- Amas de galaxies (0 au TeV)



Les sources γ

- Emission diffuse (1 au TeV)
- Halos de matière noire (0)



Récapitulatif

Astronomie γ au TeV: une sonde pour les phénomènes violents de l'Univers

Combinée aux observations aux autres longueurs d'onde,
elle permet de comprendre ces objets
et les phénomènes violents associés.

Astronomie gamma avec HESS

Rayonnement γ : modes et sites de production

Détection: les télescopes à effet Cerenkov

Motivations et résultats

- rayonnement cosmique
- phénomènes violents dans l'Univers
- cosmologie

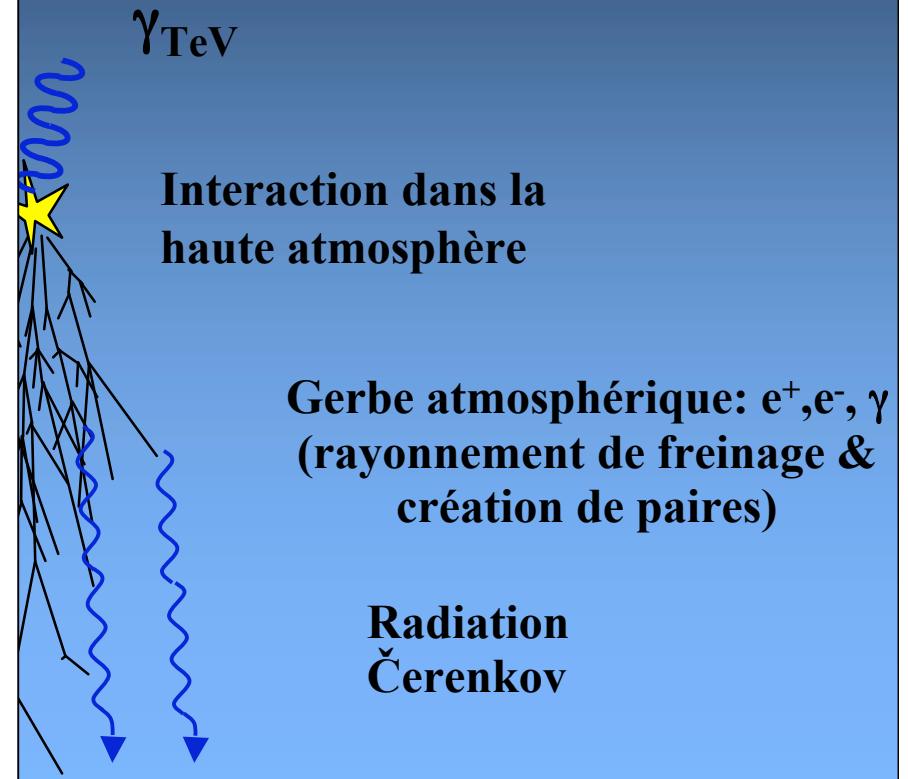
L'avenir du domaine

Détection indirecte des γ_{TeV}

Gerbes electromagnétiques

Ordres de grandeur pour $E_{\gamma} \sim 1 \text{ TeV}$:

- Max de la gerbe:
 - alt $\sim 10 \text{ km}$
 - $\sim 10^3$ particules chargées
- Ray. Cerenkov:
 - $\theta_{\text{Cerenkov}} \sim 1^\circ$
 - Front Cerenkov $< 10 \text{ ns}$
 - $\sim 10 \gamma_{\text{Cerenkov}} / \text{m/e}$ (UV proche)
- «Tâche» Cerenkov au sol:
 - $R \sim 100 \text{ m}$
 - $\sim 1000 \gamma_{\text{Cerenkov}} / \text{m}^2$



Détection

Contraintes

Caractéristiques

1. Signal **très faible** et bref
2. **Bruit de fond** lumineux (ciel) et physique (hadrons et muons)
3. Mesure **indirecte** du γ_{TeV} initial.

Contraintes

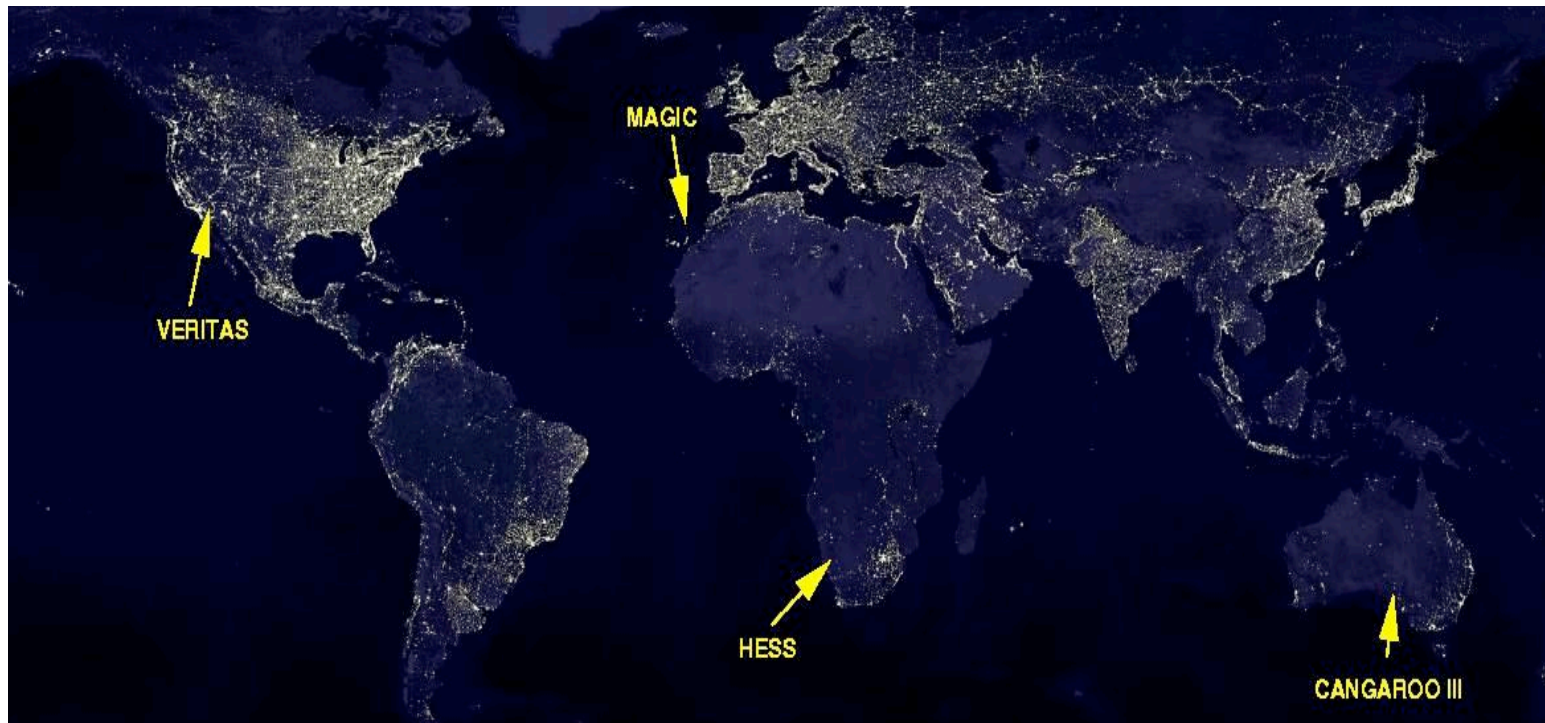
Détection/seuil

Reconstruction
(direction et énergie)

Détection

Choix du site

- ❑ Atmosphère pure et climat peu nuageux (1)
- ❑ Pollution lumineuse minimale... et observation par nuit noire (2)
- ❑ Altitude élevée (>1000m) (3)



Détection

Télescope à effet Cerenkov

Grande
colle
S~100
360
(ϕ =

Montage
(suivi des



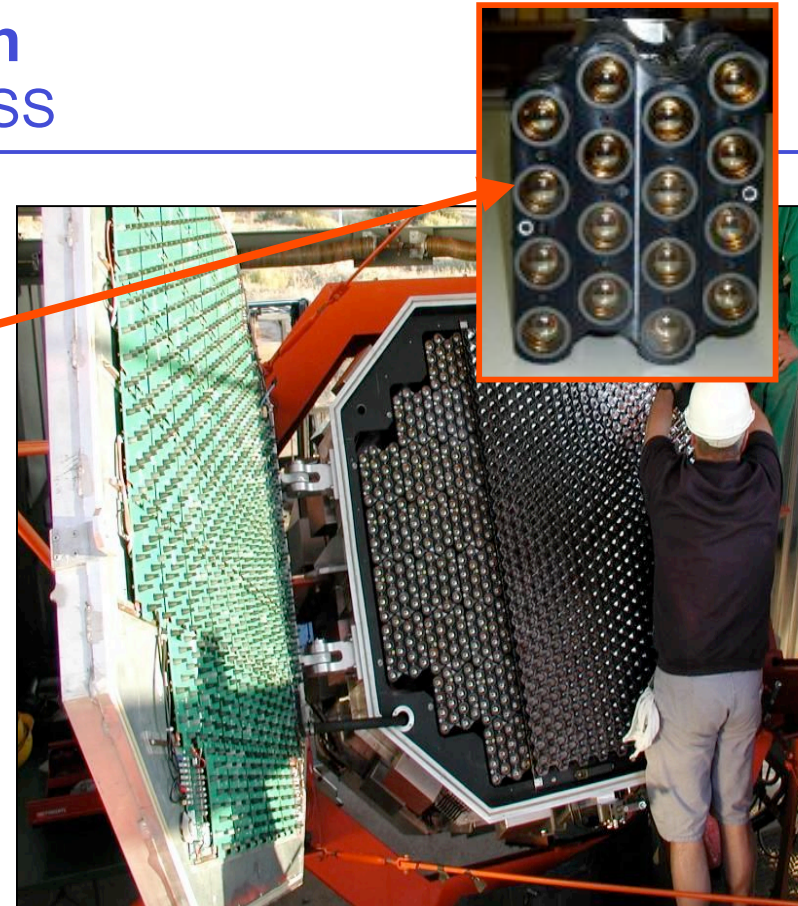
Camera
la focale
(f=15m)

Abri
caméra

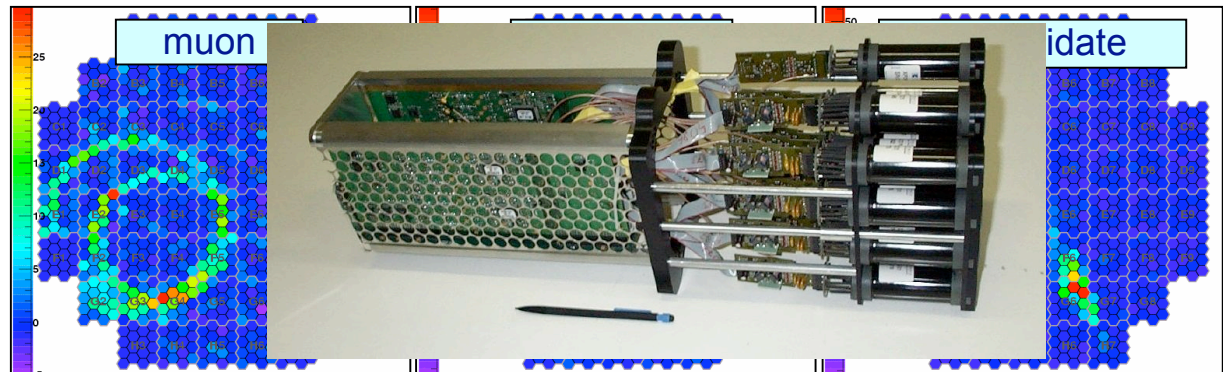
Détection

Caméra HESS

- ❑ 960 photomultiplicateurs (1)
- ❑ $\Omega_{PM} \sim 0,15^\circ \Rightarrow$
image fine de la gerbe (2&3)
- ❑ Echantillonnage au GHz (2)
- ❑ Déclenchement optimisé (2)

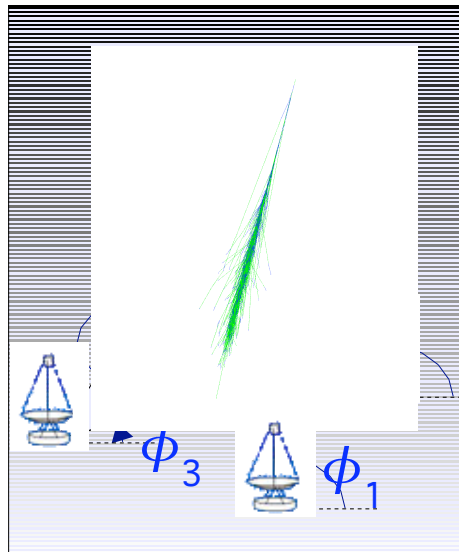


- ✓ Structure modulaire (tiroirs)
- ✓ Electronique compacte et embarquée.

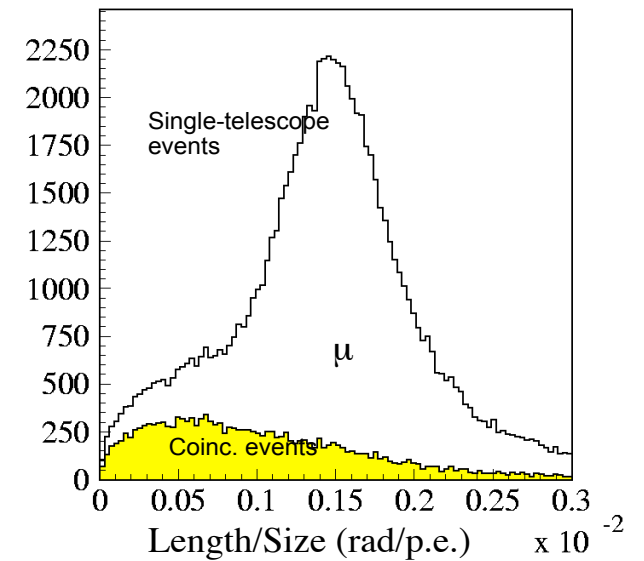


Détection Stéréoscopie

□ HESS: 4 détecteurs



Améliore la
reconstruction des
gerbes et le rejet des
muons (2&3)

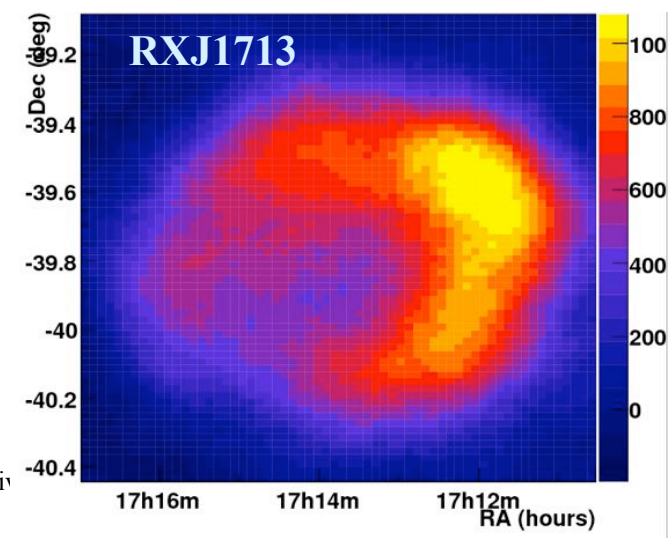
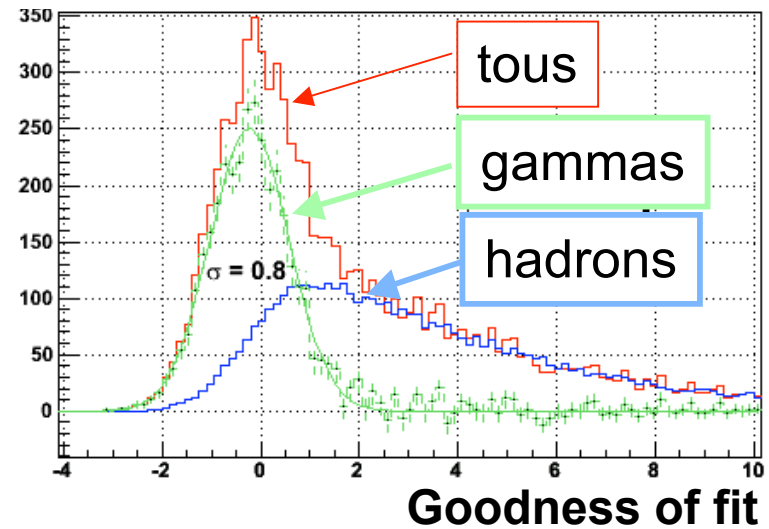


Reconstruction

- Pour chaque événement, détermination de:
 - la **direction d'origine** de la gerbe
 - la **nature** du primaire (variable discriminante)
 - **L'énergie** du primaire

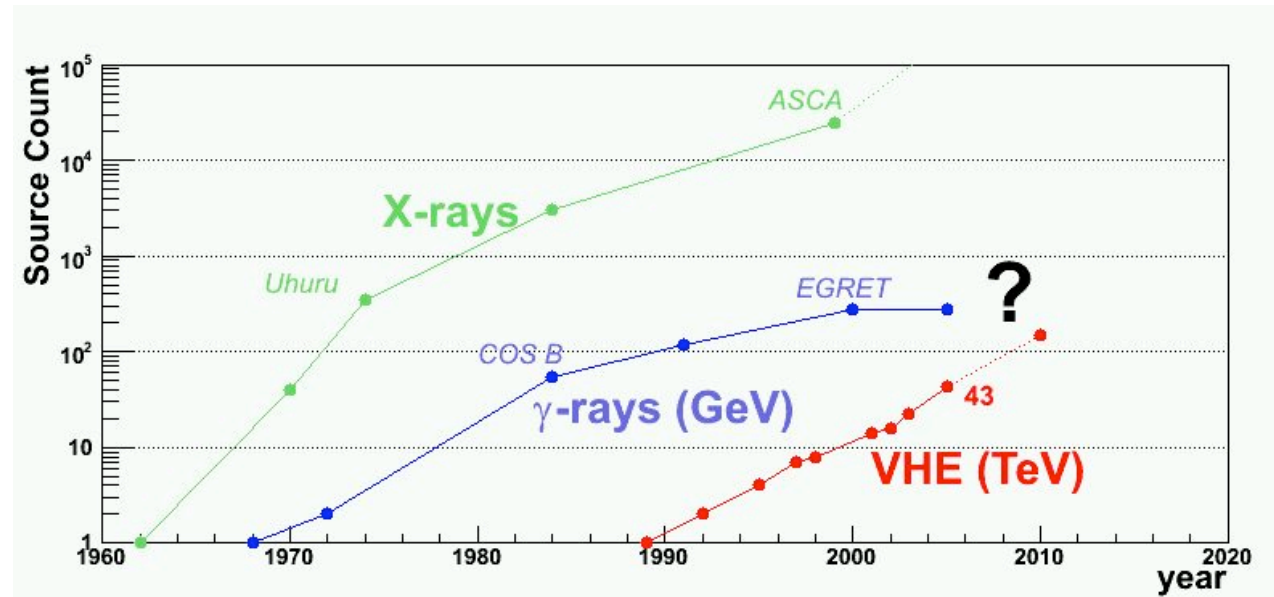
- Création de **cartes d'excès ou de significativité**, spectres, etc...

Discrimination hadrons/ γ
Analyse Modèle (de Naurois et al., 2002)



Performances HESS

- ❑ Taux de déclenchement ~ 400 Hz par télescope
- ❑ Temps mort ~ 10%
- ❑ Seuil ~ 100 GeV au zénith
- ❑ **Champ de vue de 5°**
- ❑ **Résolution angulaire ~ 0,1° gerbe à gerbe**
- ❑ Résolution en énergie ~ 15%
- ❑ Sensibilité (au zénith)
 - **0,01 Crabe : ~25 h**
 - **1,00 Crabe : ~10 s**



**MPI Kernphysik, Heidelberg
Humboldt Univ. Berlin
Ruhr-Univ. Bochum
Univ. Hamburg
Landessternwarte Heidelberg
Ecole Polytechnique, Palaiseau
APC Paris
LPNHE Univ. Paris VI-VII
CEA Saclay
CESR Toulouse
LPTA Montpellier
LAOG Grenoble
LAPP Anecy
Observatoire de Paris
Durham Univ.
Dublin Inst. for Adv. Studies
Charles Univ., Prag
Yerewan Physics Inst.
North-West Univ., Potchefstroom
Univ. of Namibia, Windhoek**

H.E.S.S.



Astronomie gamma avec HESS

❑ Rayonnement γ : modes et sites de production

❑ Détection: les télescopes à effet Cerenkov

❑ Motivations et résultats

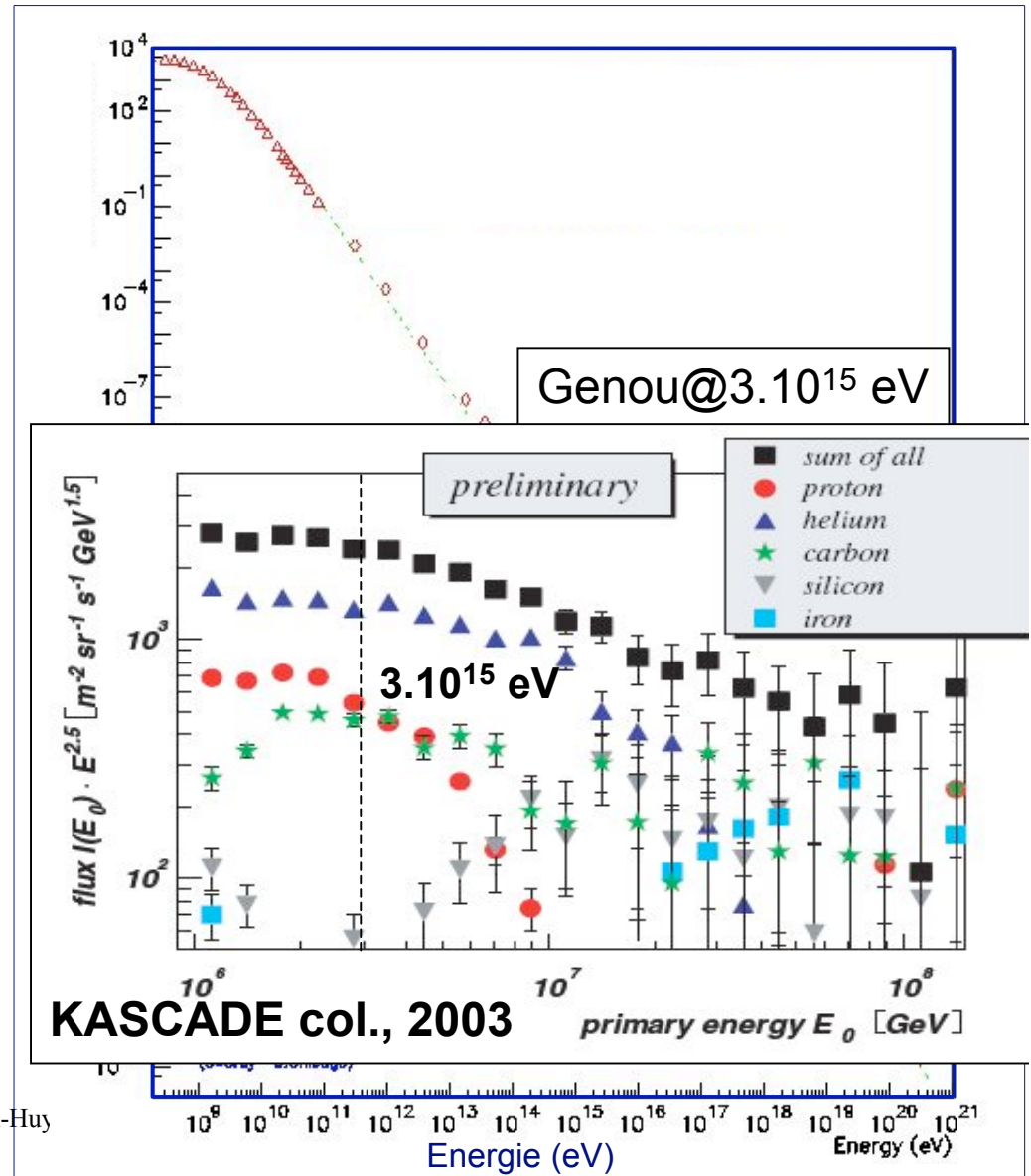
- rayonnement cosmique
- phénomènes violents dans l'Univers
- cosmologie

❑ L'avenir du domaine

Rayons cosmiques

□ Rayons cosmiques

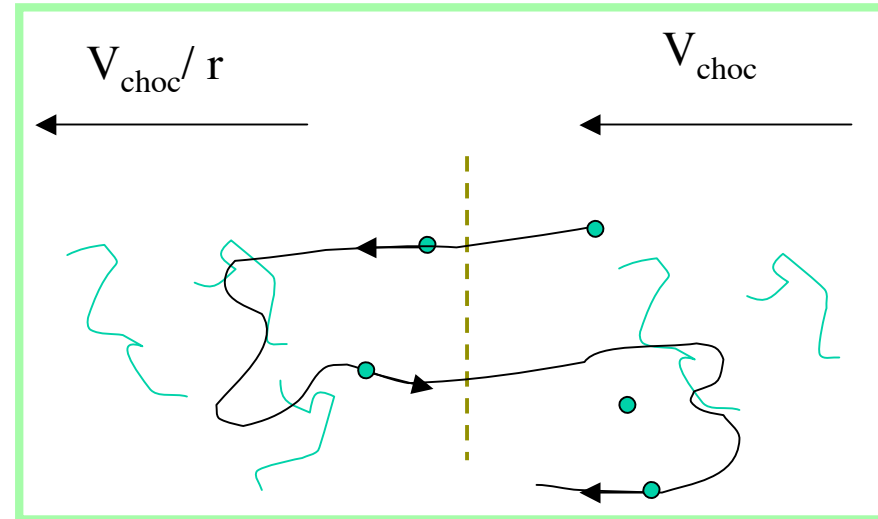
- Mis en évidence en 1912 (V. HESS)
- **Spectre très uniforme** $\propto E^{-2,7}$ sur 10 ordres de grandeur
- **Isotrope**
- **Hadrons** principalement
- **Transition p→Fe** au niveau du genou (KASCADE)



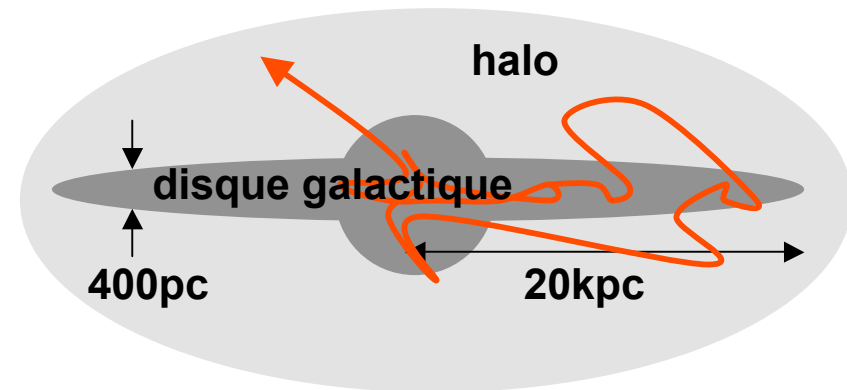
Origine présumée des RCs (1960)

Jusqu'au genou:

- ❑ Origine **galactique** des RCs
- ❑ Accélération par mécanisme de **Fermi du 1^{er} ordre**.
- ❑ Sites probables: **vestiges de supernovae** (argument énergétique)
- ❑ **Diffusion** dans le halo galactique ($\tau \sim 10^7$ ans) (LiBeB)



Mécanisme de Fermi du 1er ordre



Beaucoup de questions en suspens...

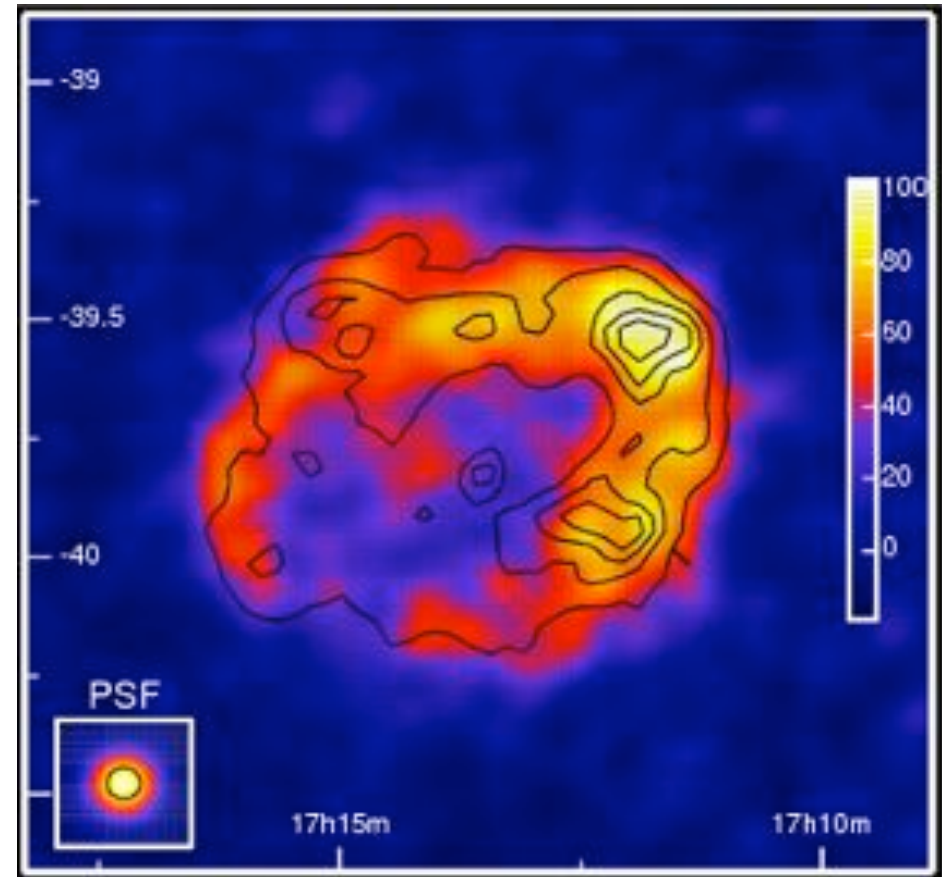
- ❑ Modèles alternatifs
 - Une SN proche et récente
Erlykin et Wofendale, J. Phys. G23 (1997)
 - « Cannonball model »
Dar et de Rujula, astro-ph/0606199

- ❑ Origine des rayonnements au-delà de $3 \cdot 10^{15}$ eV?
 - Transition RCs galactiques-extragalactiques?
 - Sites accélérateurs pour $E > 3 \cdot 10^{15}$ eV?

- ❑ Rayonnement d'ultra haute energie ($E > 10^{19}$ eV)?
 - Nature?
 - Origine?

RXJ1713.7-3946 au TeV

- ❑ Vestige de SN de ~ 1600 ans, distant de 1kpc.
- ❑ Emission TeV vue par CANGAROO (2000)
- ❑ Observation HESS (depuis 2003)
 - ~ 90 h live
 - 53σ
 - **Morphologie résolue** (1^{ère} au TeV):
 - **Structure en coquille**
 - Coïncidence forte avec l'émission X (ASCA)

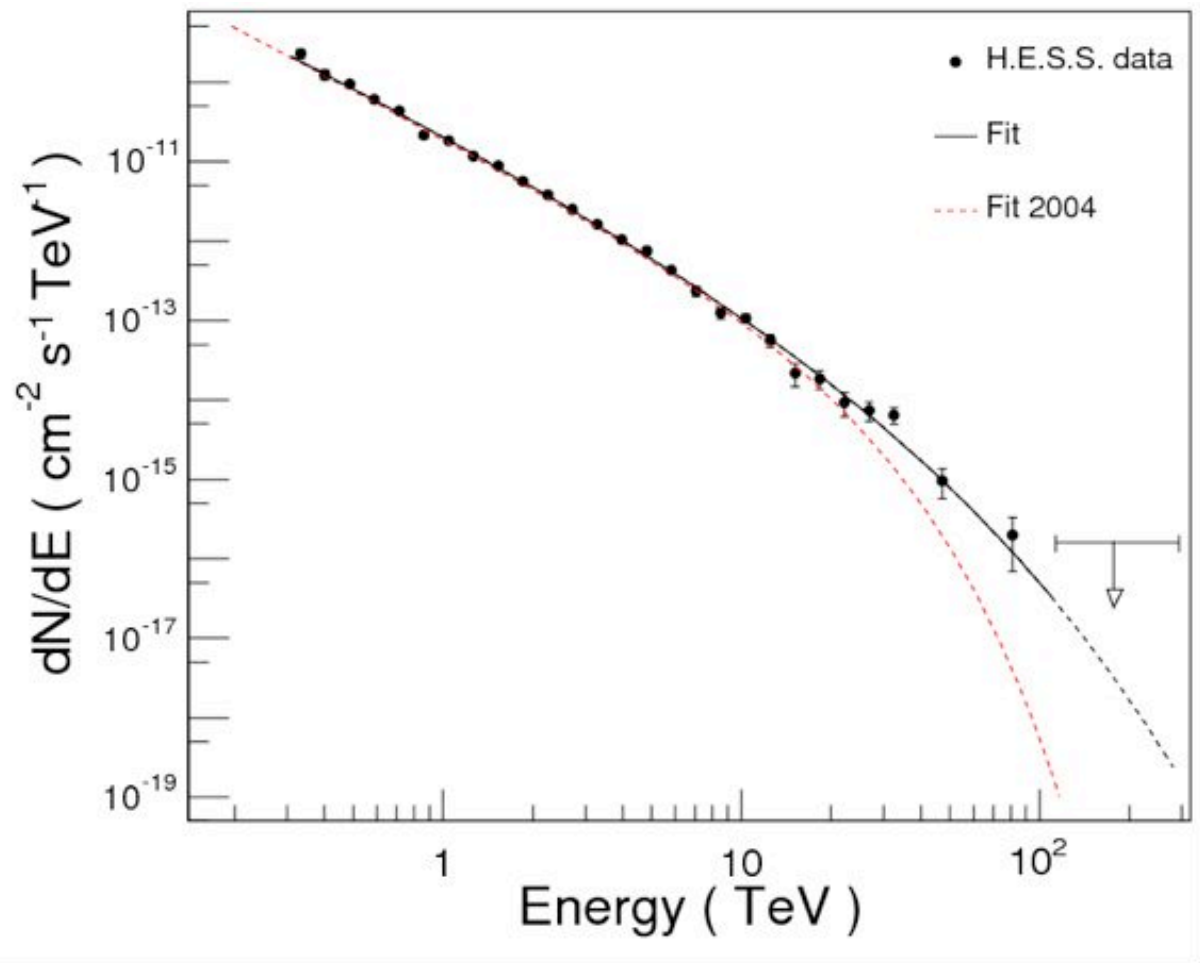


Aharonian et al., 2006 (astro-ph/0611813)

RXJ1713.7-3946 au TeV

□ Spectre:

- $E_{\gamma}^{\max} \sim 50 \text{ TeV} \Rightarrow$
 $E_{\text{part}} \sim 100 \text{ TeV}$
- S'écarte d'une loi de puissance pure à HE.
- $\Gamma \sim 2$ (cf Fermi)
- $E_{\text{cut-off}} > 2 \text{ TeV}$



RXJ1713.7-3946 au keV

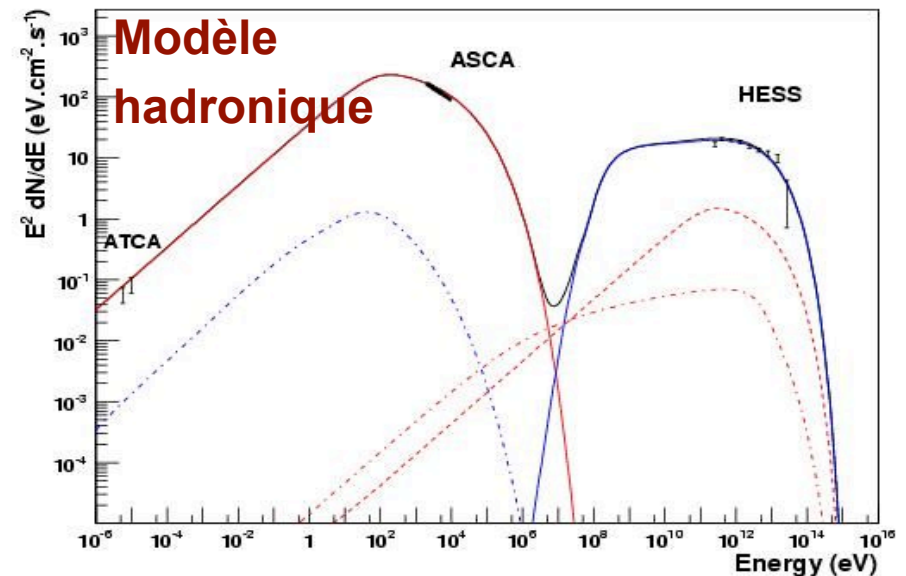
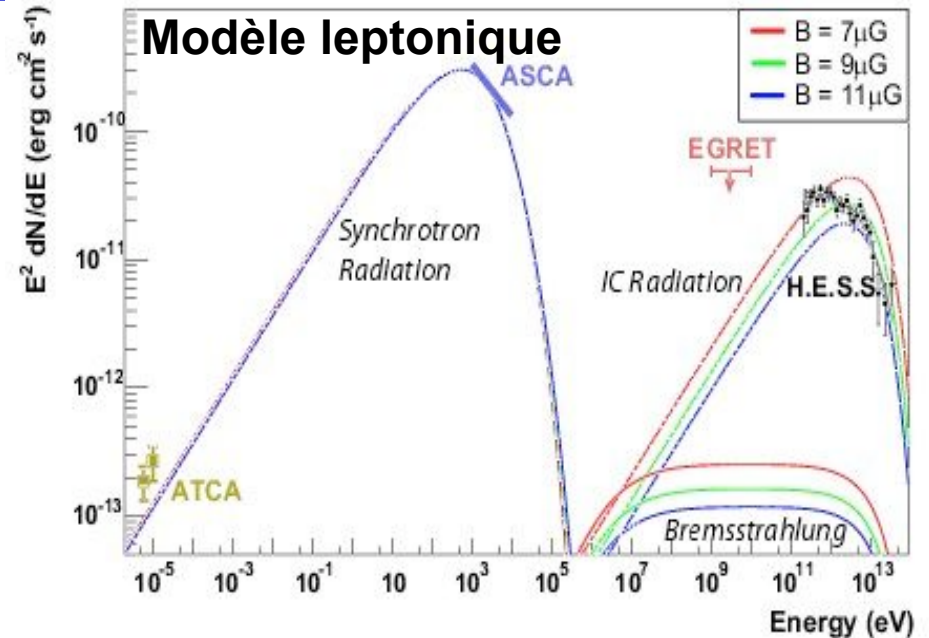
Observation par ASCA:
(rayons X, dûs au synchrotron)

- ❑ Structures fines dans la morphologie semblent indiquer $B > 100 \mu\text{G}$
- ❑ Or flux X et TeV relatifs nécessitent $B \sim 10 \mu\text{G}$ (car $\sigma_{\text{IC}}/\sigma_{\text{Synch}} \propto B^{-2}$)

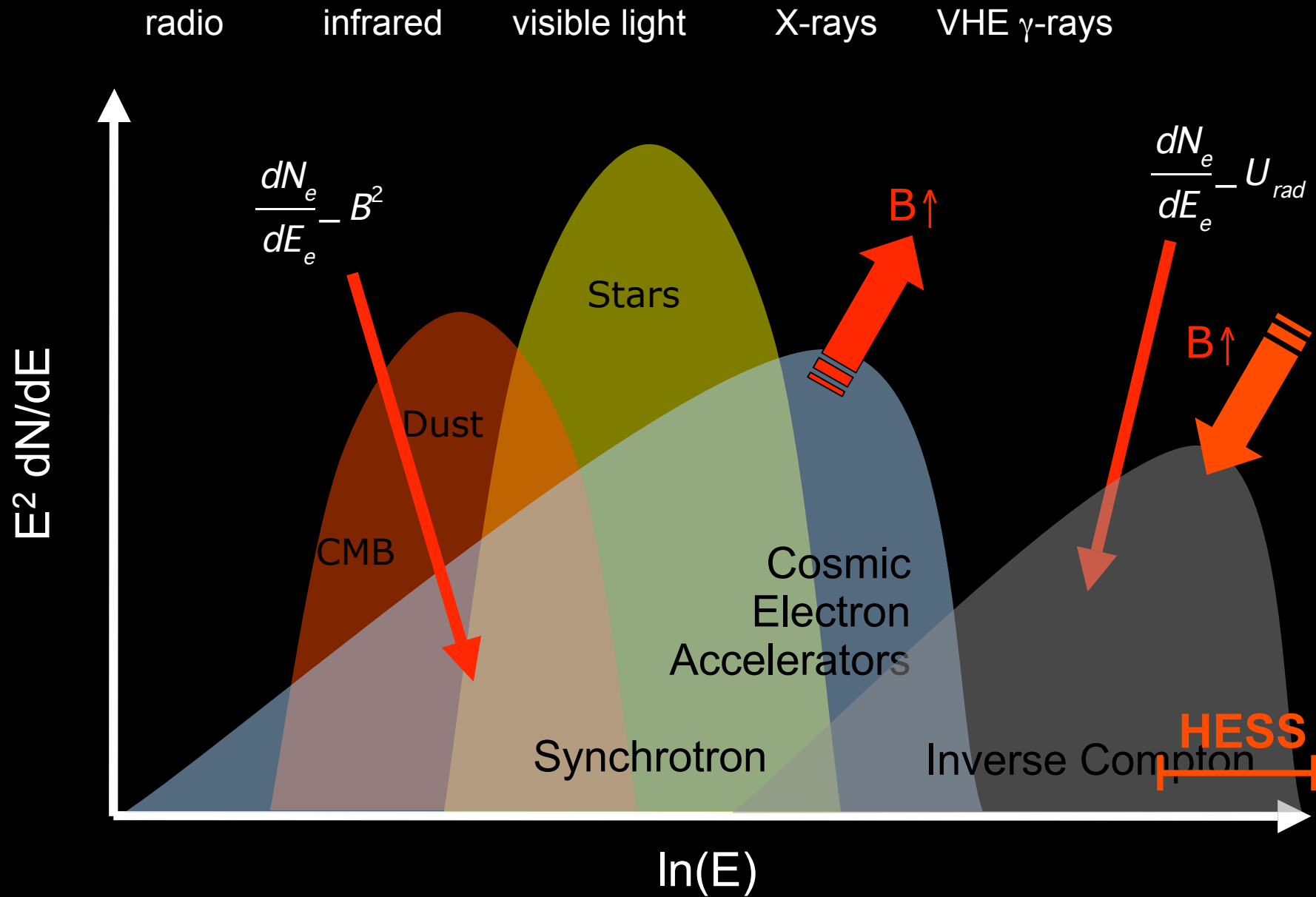
➔ **Modèle hadronique favorisé**

Encore beaucoup de questions ouvertes:

- ❑ confirmation du modèle hadronique
- ❑ autres SNRs brillantes au TeV? (cf scan)
- ❑ autres zones d'émissions galactiques à plus haute énergie (superbulles)?

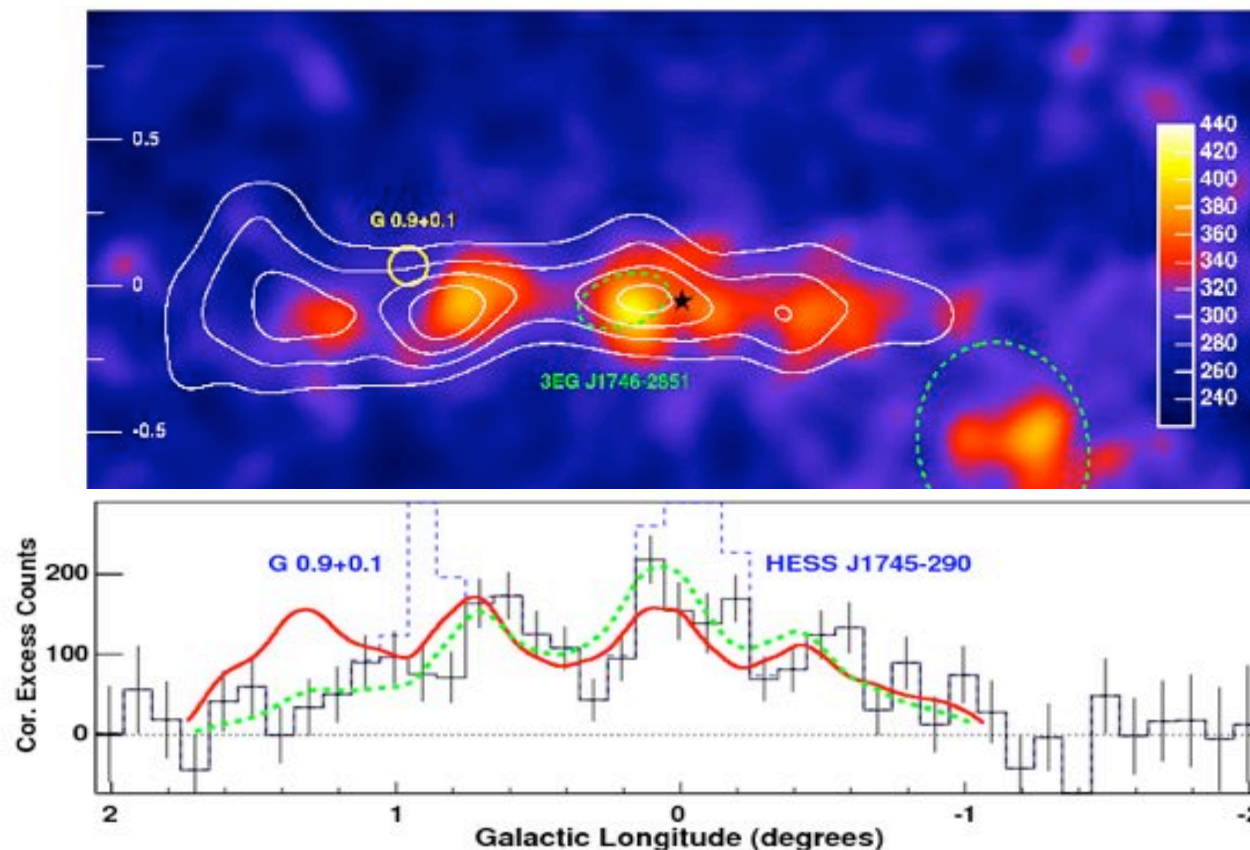


Electron or Hadron Accelerator?



Propagation des rayons cosmiques

- ❑ Diffusion de RCs doit induire une **émission γ_{TeV} diffuse** (interaction avec le milieu intragalactique)
- ❑ **Emission étendue** autour du centre galactique (HESS 2005), **corrélée à la densité de matière.**

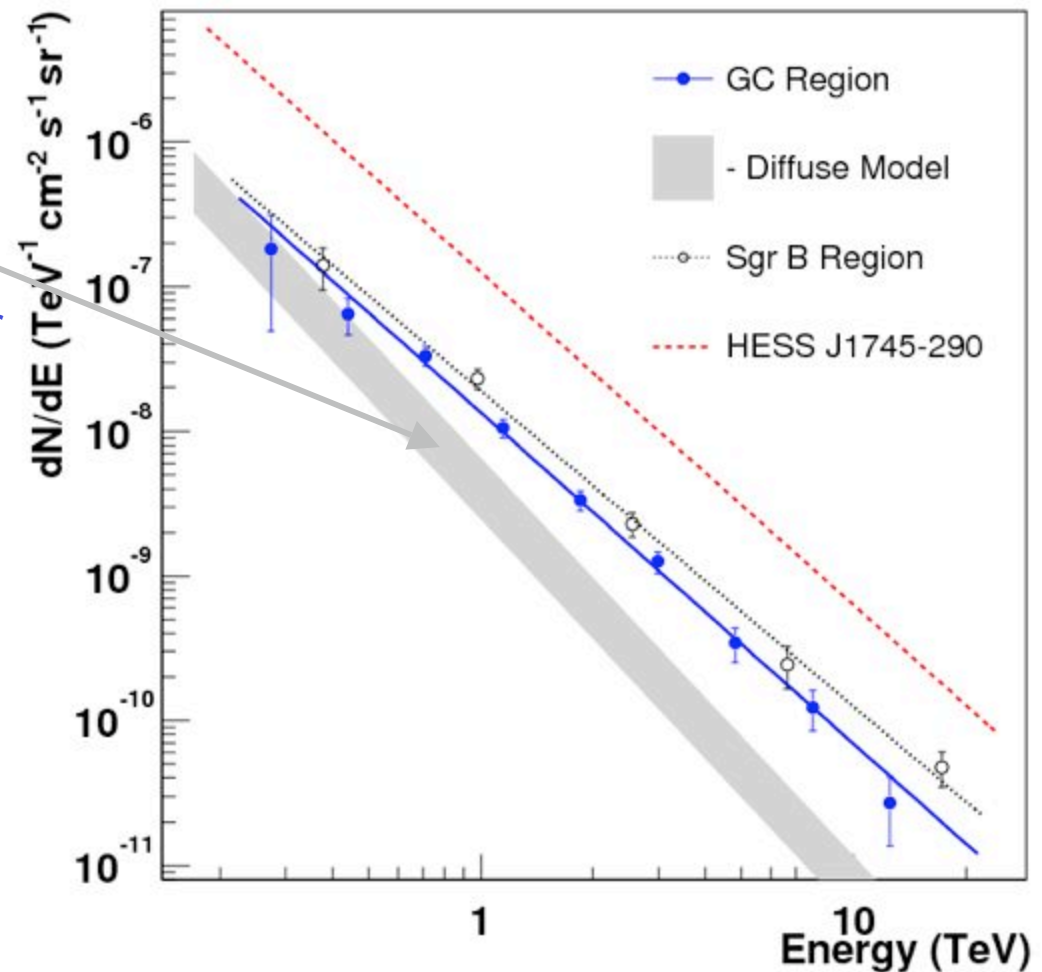


Propagation des rayons cosmiques

□ Spectre:

- $\Gamma \sim 2,3$
- **Plus dur que celui attendu pour les RCs**
- Proche de celui attendu pour des vestiges de SN.

Probablement produit par des **rayons cosmiques jeunes** ($< 10^4$ ans).



Quelques objets étudiés par HESS...

- ❑ Scan galactique
 - 17 sources... dont 14 nouvelles!
 - Aharonian et al., [astro-ph/0510397](#)

- ❑ Sources galactiques variables
 - PSR B1259 (1^{ère} source variable au TeV)
Aharonian et al., [astro-ph/0506280](#)
 - LS 5039 (1^{ère} source périodique au TeV)
Aharonian et al., [astro-ph/0607192](#)

- ❑ Sources extragalactiques
 - M87 (1^{er} AGN non blazar au TeV)
Aharonian et al., [astro-ph/0612016](#)
 - 1ES1101 (blazar le plus distant vu au TeV)

Scan galactique

- ❑ Scan entre $\pm 30^\circ$ de latitude galactique ($\pm 3^\circ$ long.)
- ❑ **14 nouvelles sources** en 230 heures d'observation
- ❑ Etude **statistique** de cette population

Radio (atomic hydrogen)

Radio

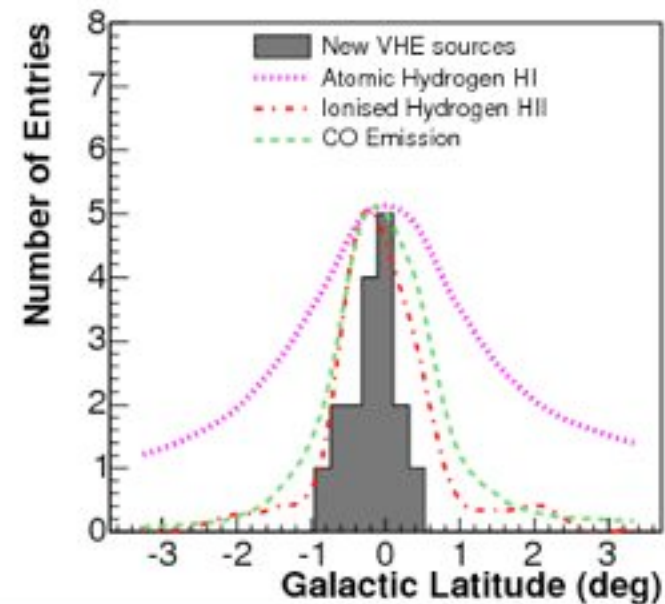
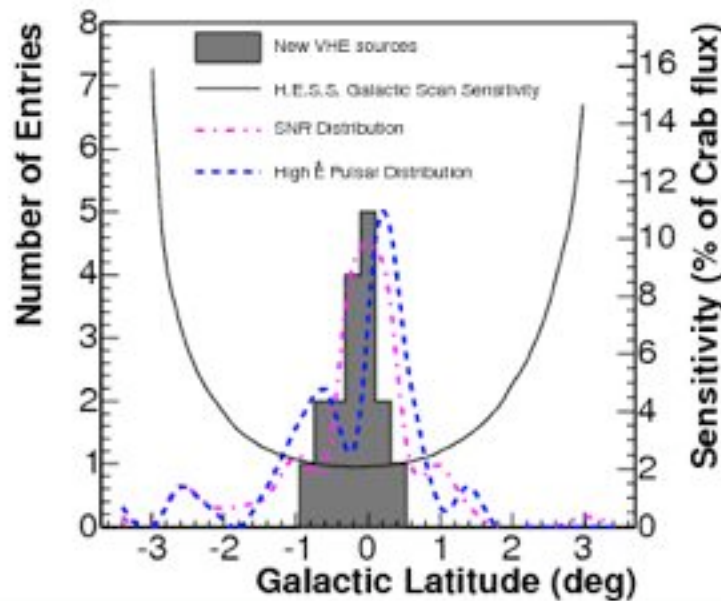
Infra

Optic

Softs

Hard

Gamma



Gamma (TeV)

PSR B1259-63

Etoile

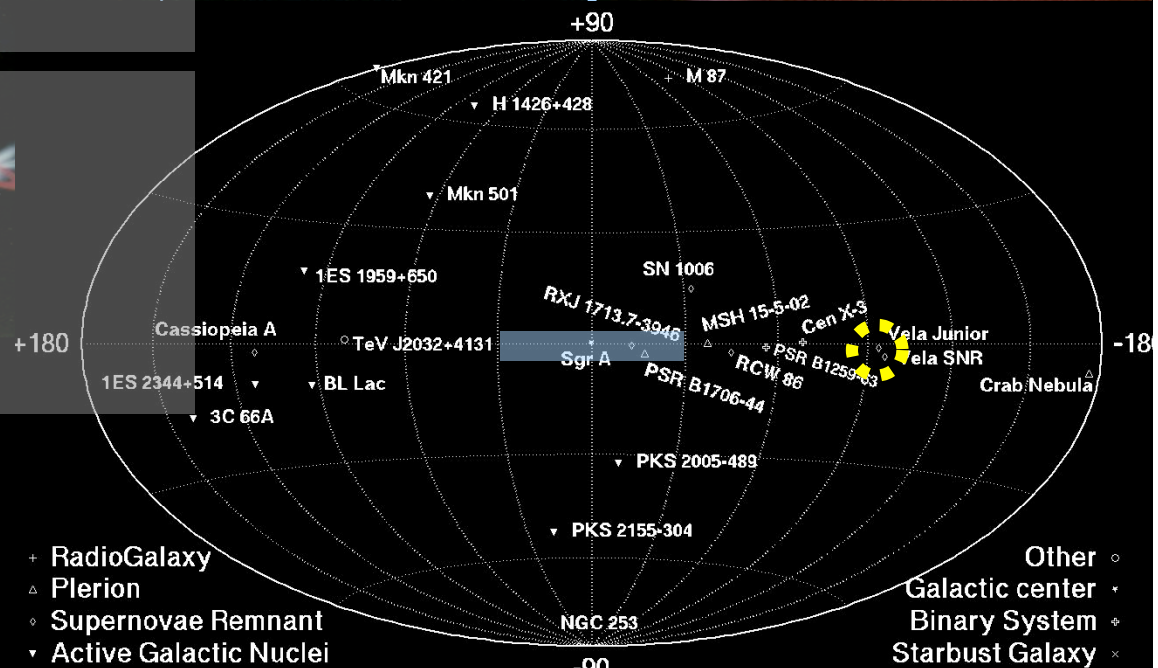
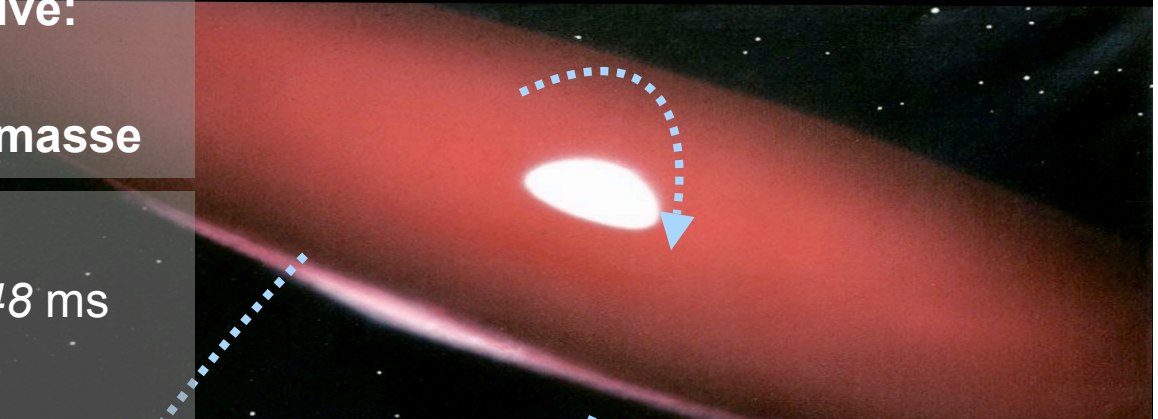
- ▶ **Etoile Be lumineuse et massive:**
 $L_* = 10^4 L_S$, $M = 10 M_S$
- ▶ **Disque stellaire, ejection de masse**

Pulsar

- ▶ **Radio pulsar de période $P = 48$ ms**
- ▶ **Lumiosité spin down**
 $L_p = 8 \cdot 10^{35}$ erg/s (10^{-3} Crabe)

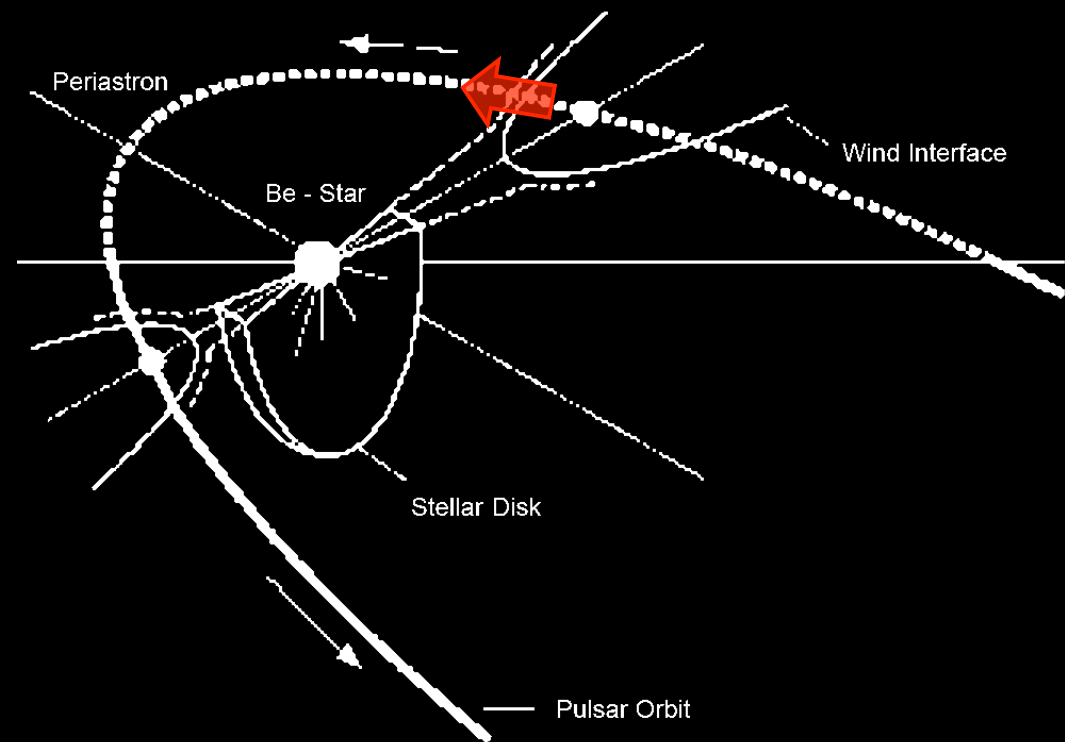
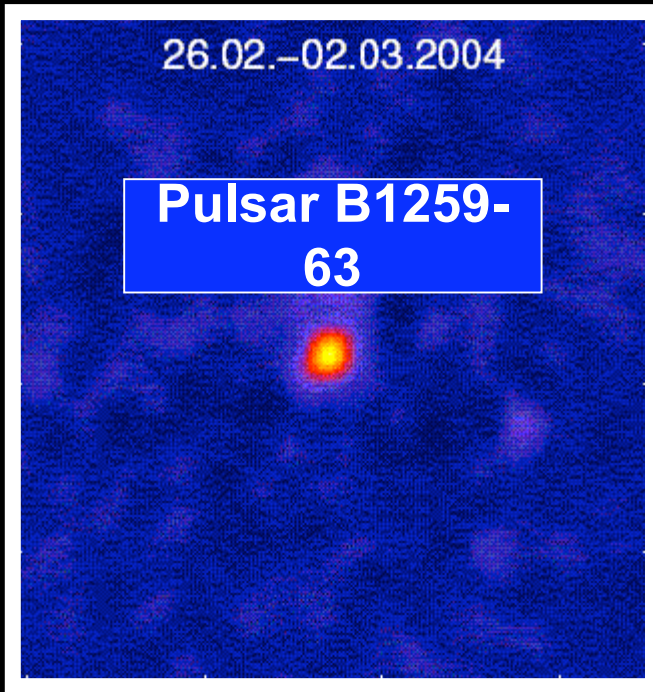
Orbite

- ▶ **Periode** **3.4 ans**
- ▶ **Inclination** **35°**
- ▶ **Periastron** **10^{11} m (proche)**
- ▶ **Distance** **1.5 kpc (proche)**



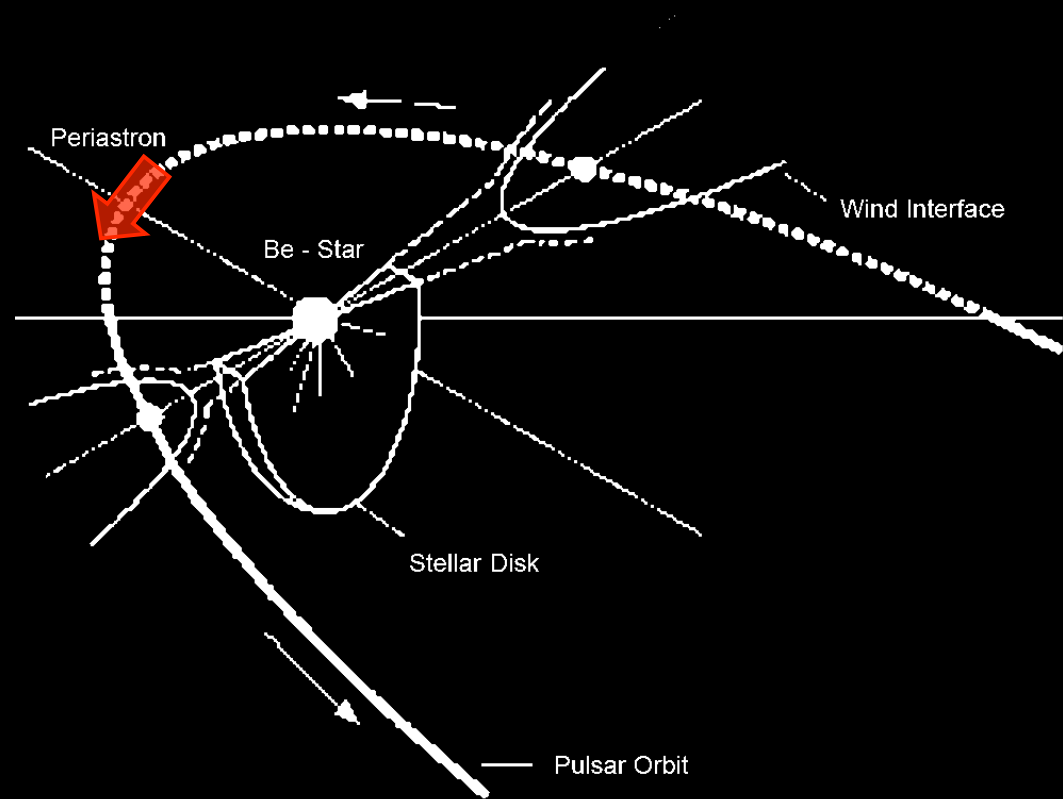
26.02.-02.03.2004

**Pulsar B1259-
63**



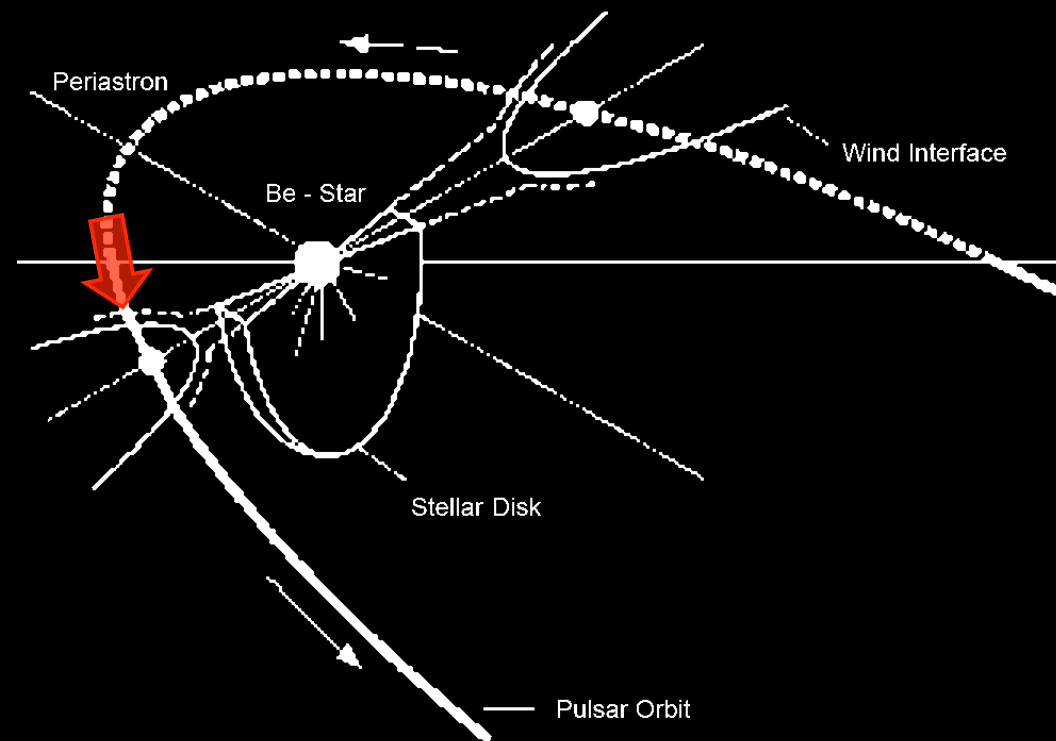


Full moon, no observation



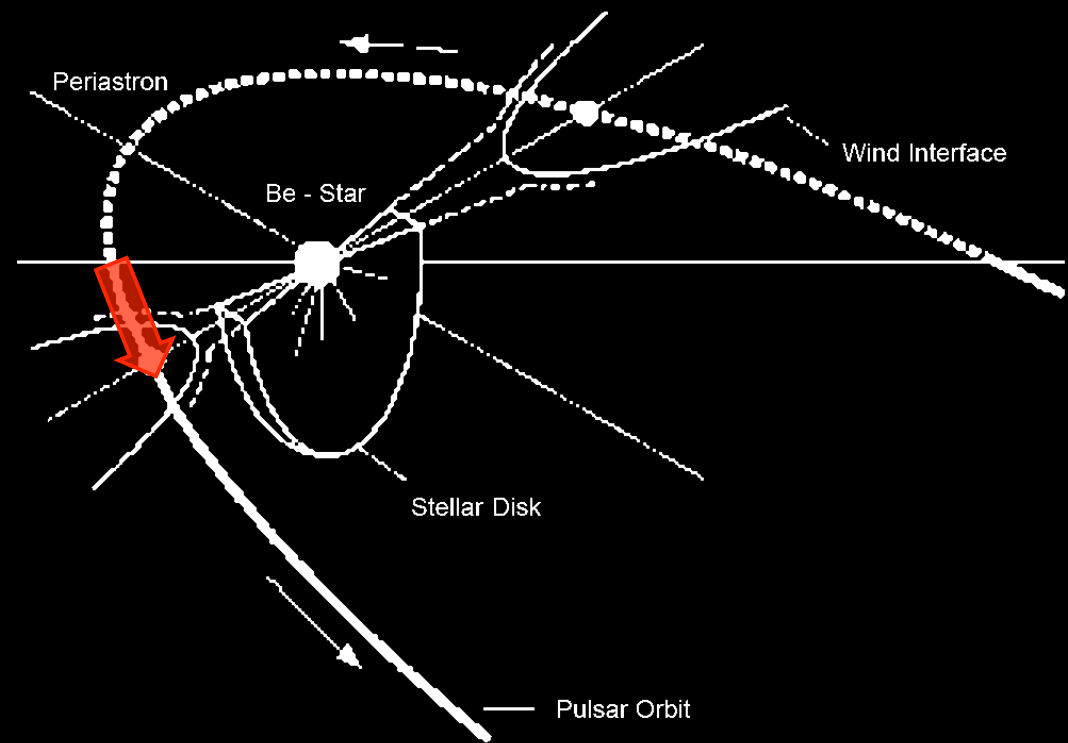
03.03.-22.03.2004

Pulsar B1259-63

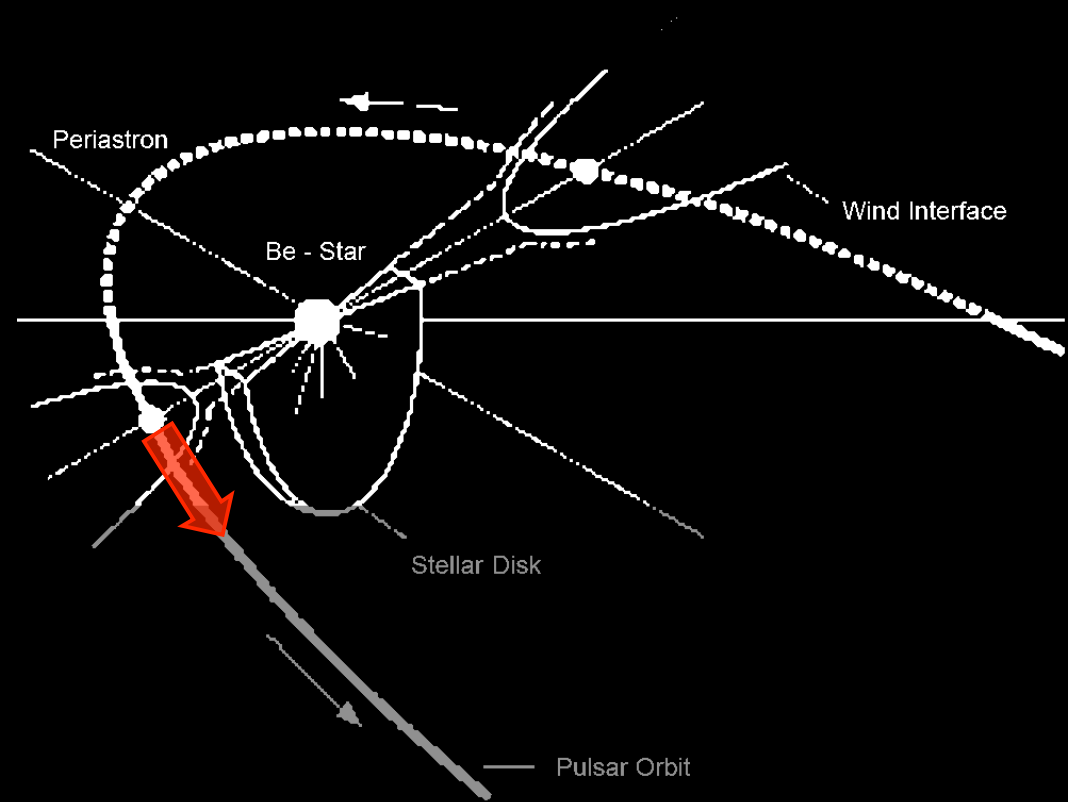


22.03.-24.03.2004

**Pulsar B1259-
63**

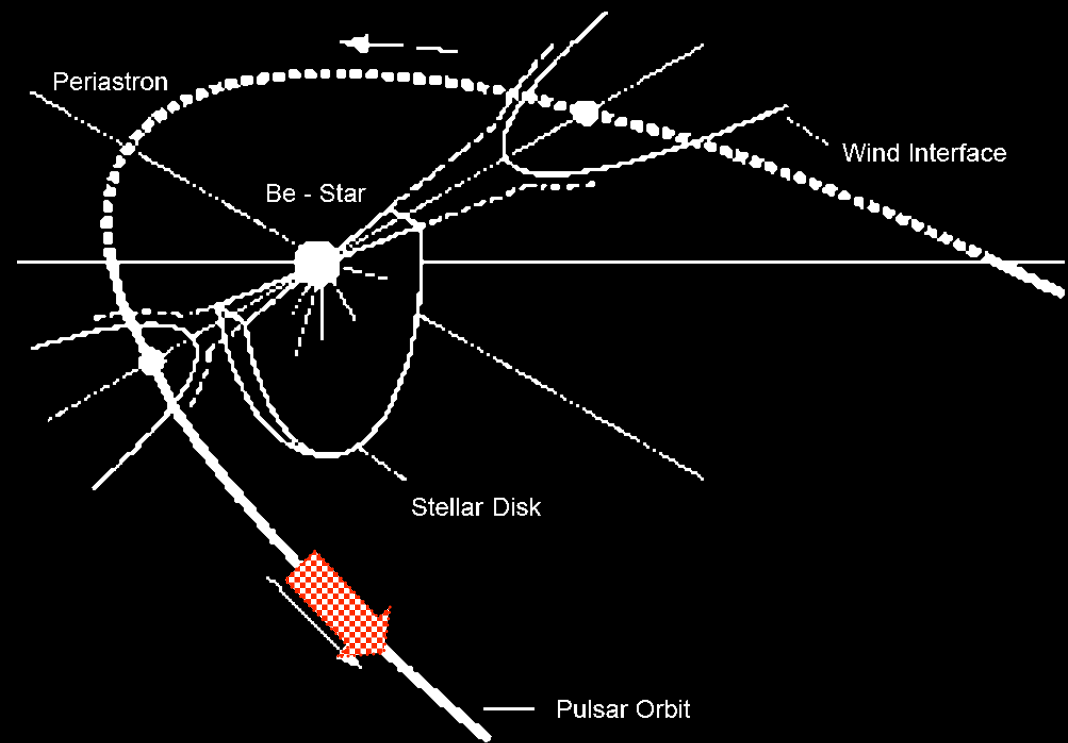
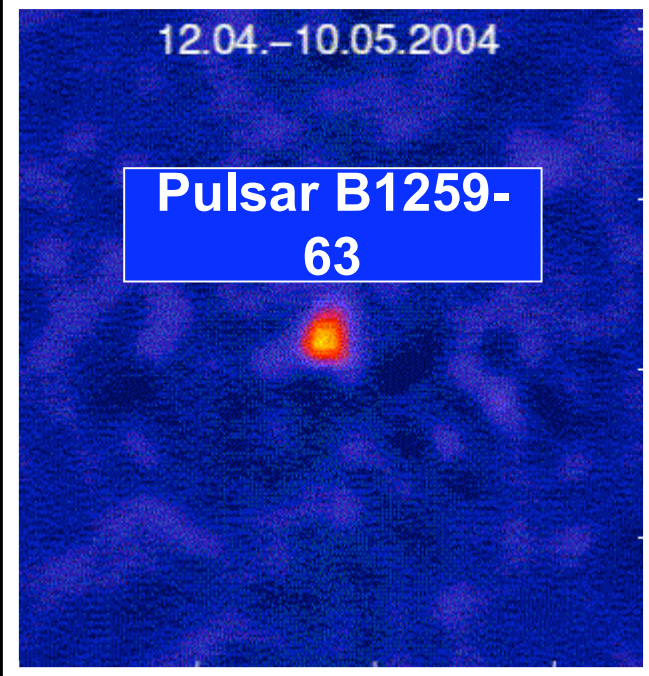


**Pulsar B1259-
63**



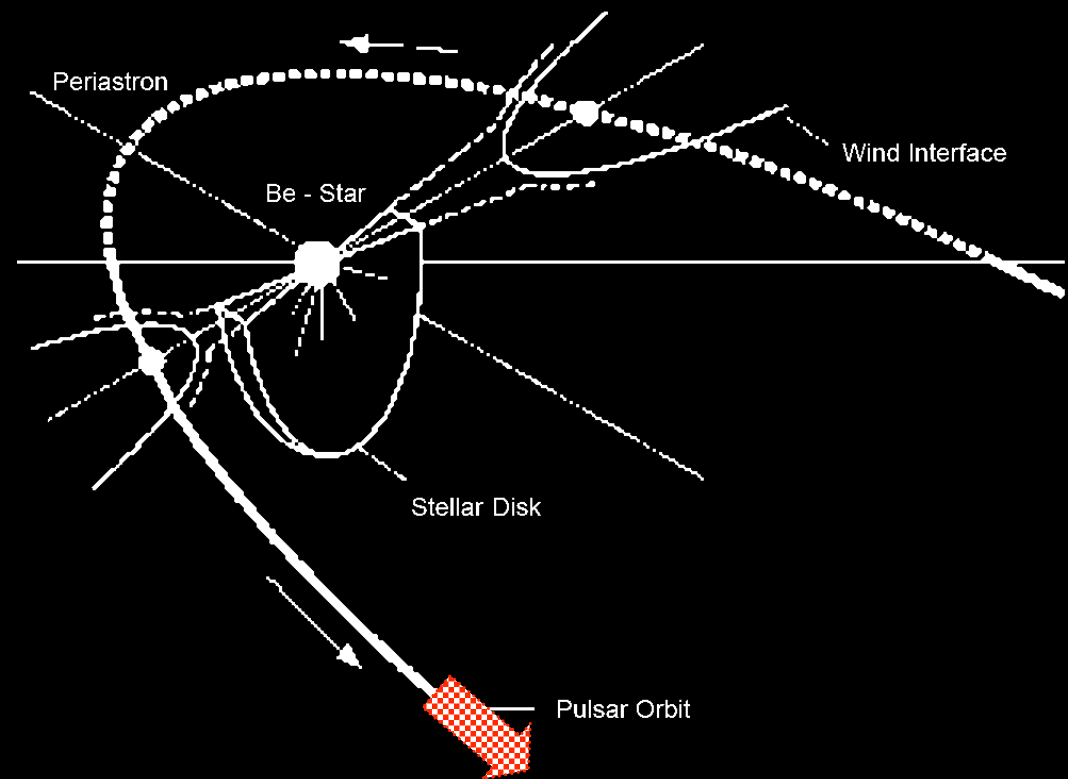
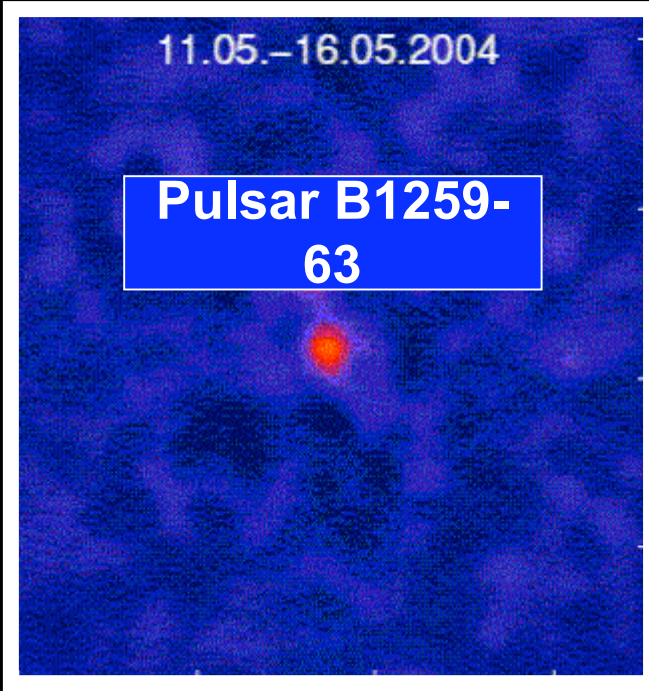
12.04.-10.05.2004

**Pulsar B1259-
63**



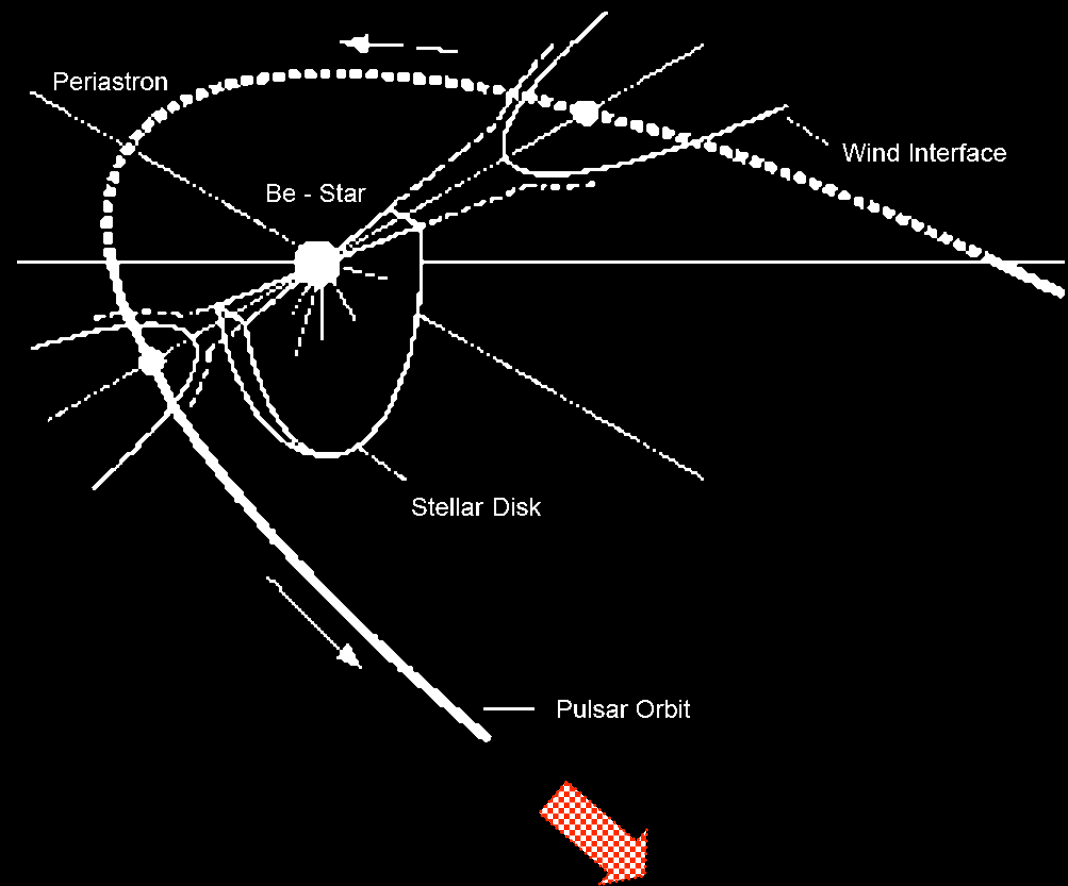
11.05.-16.05.2004

**Pulsar B1259-
63**



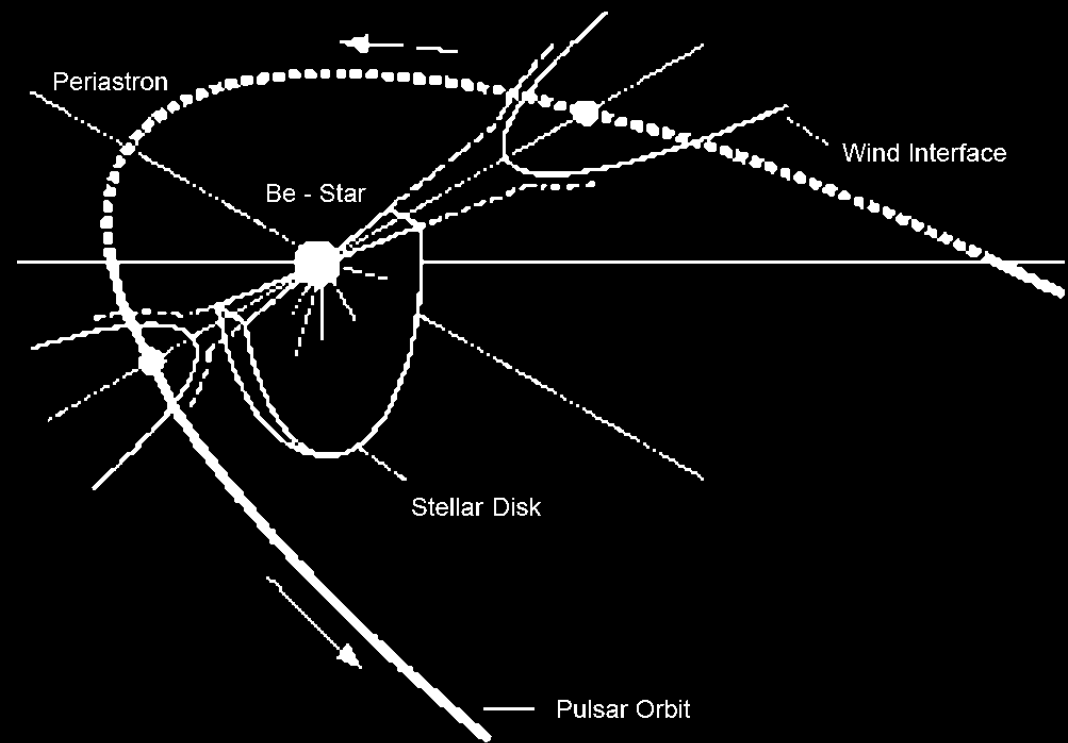
16.05.–11.06.2004

**Pulsar B1259-
63**

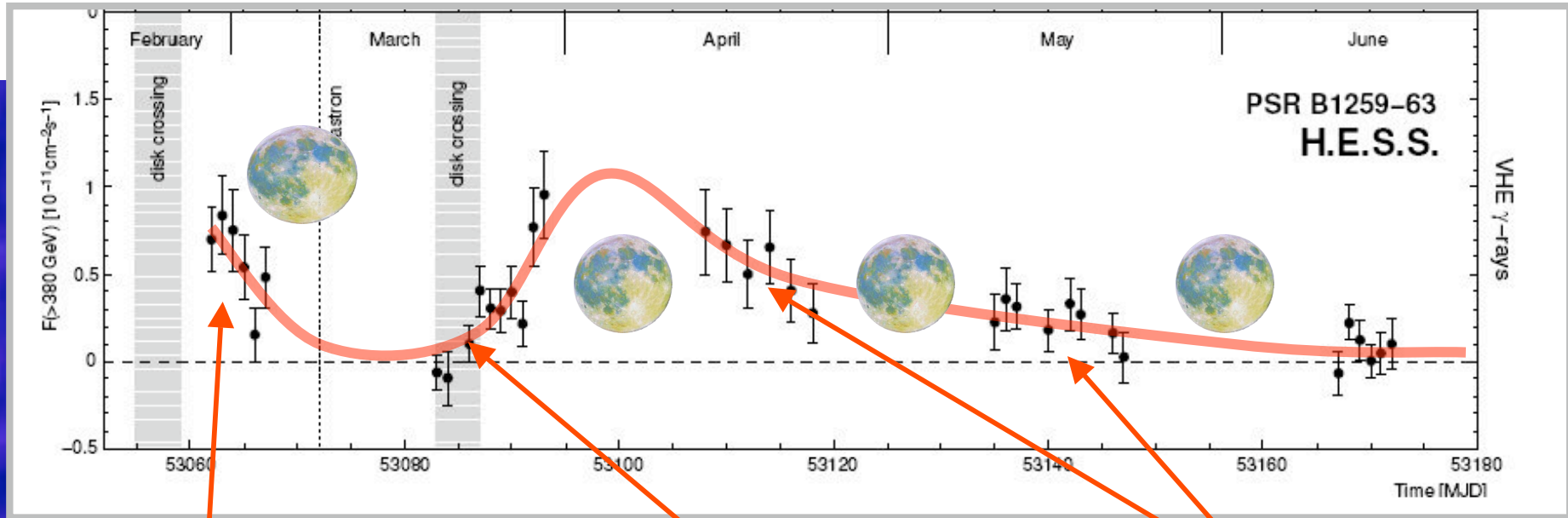


12.06.–15.06.2004

**Pulsar B1259-
63**



PSR B1259-63



fév. 04

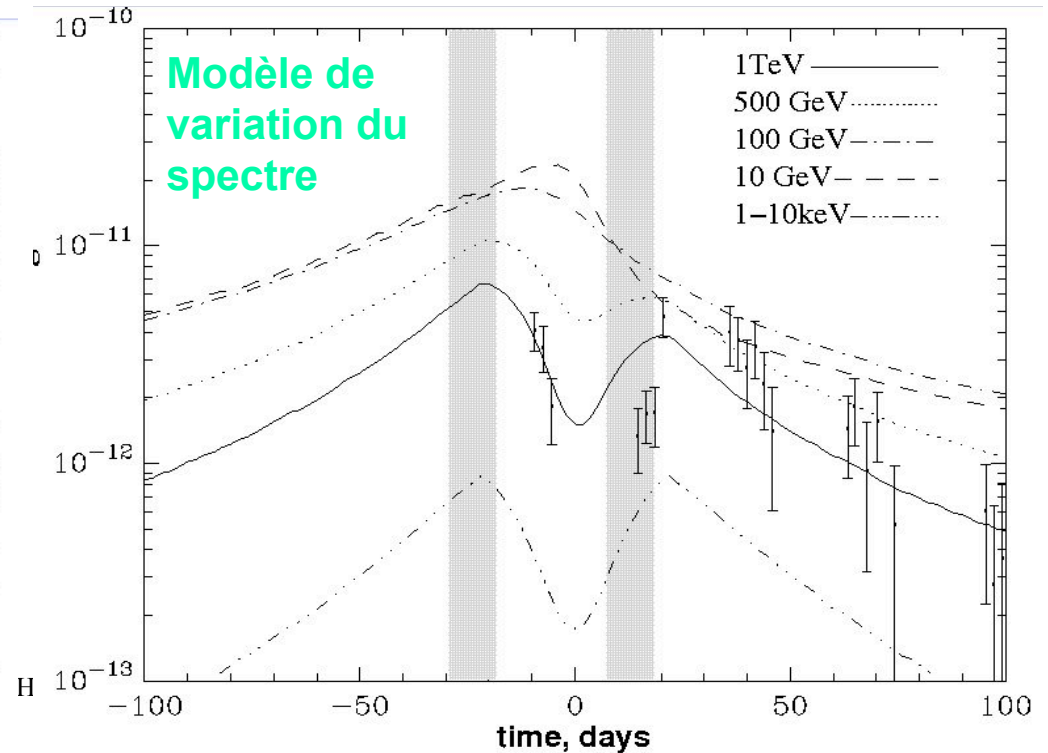
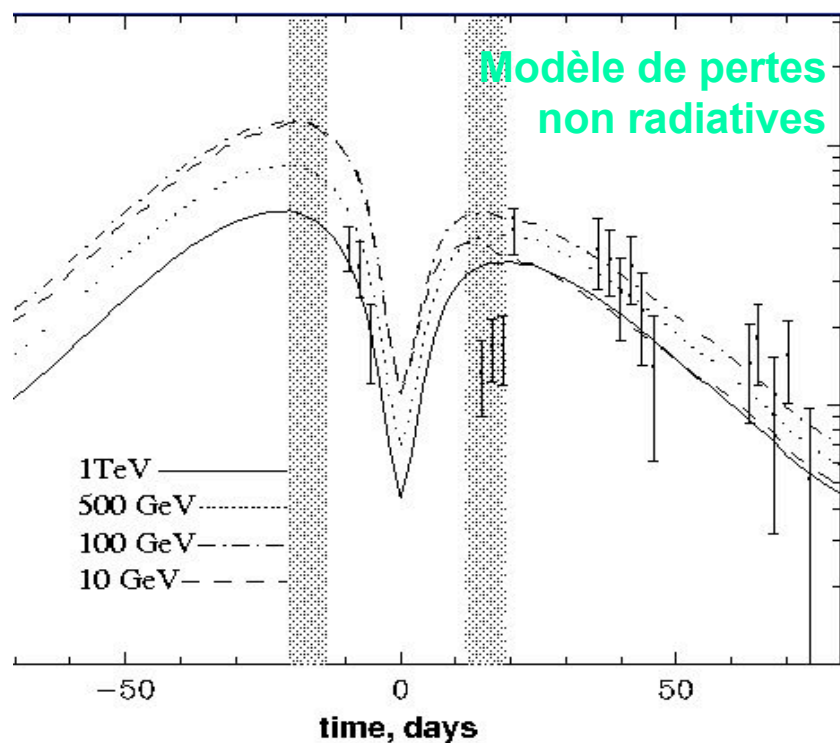
début mars 04

avril-mai 04

PSR B1259-63

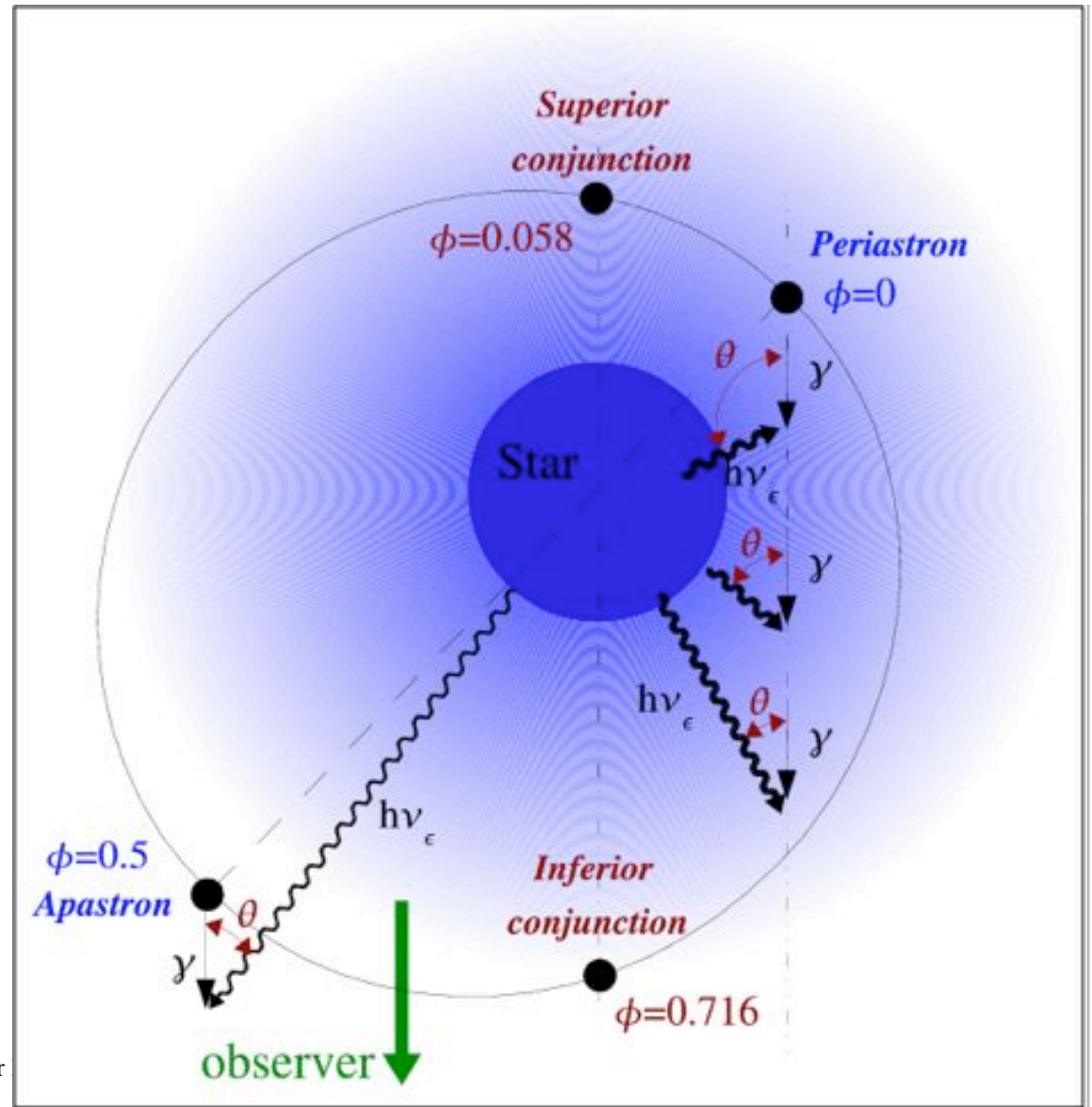
□ Interprétation

- Emission TeV très probablement associée à un processus **Compton inverse** des électrons émis par le pulsar sur les photons de l'étoile
- Courbe de lumière: 2 hypothèses (**Khangulyan et al., astro-ph/0605663**)
 - Rôle des **pertes non radiatives** d'électrons (échapement et pertes adiabatiques $\propto 1/R$)
 - **Variation du spectre électronique & de la densité de photons au cours du temps**



LS 5039

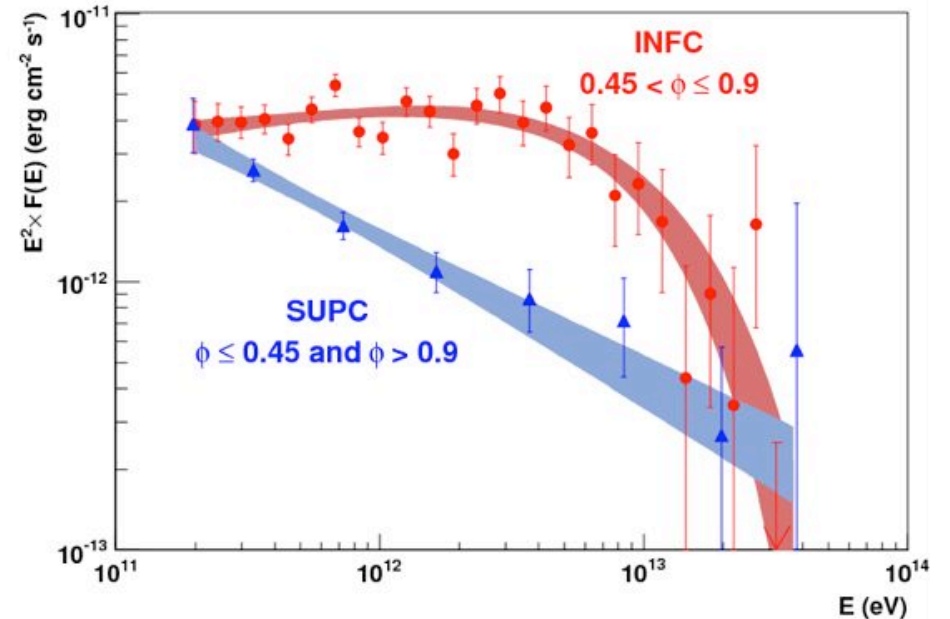
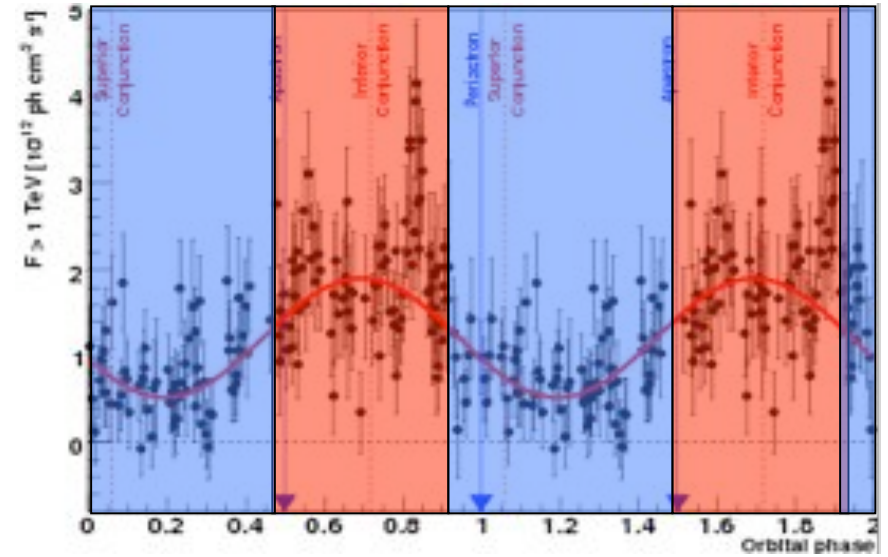
- ❑ Système binaire X: objet compact (nature?)+ étoile massive. $d \sim 2,5 \text{ kpc}$
- ❑ Orbite elliptique (période: 3,9 jours)
- ❑ Distance minimale d'approche: $1,5 \cdot 10^{10} \text{ m}$



LS 5039

□ Observation HESS

- 70h d'obs.
- Signal à 40 s.
- Emission TeV périodique
 - période=3,9 jours
 - Max. en conjonction inférieure
 - Spectres différents suivant la phase




LS 5039

□ Interprétation:

- Rôle important de l'absorption des γ TeV

 Production des γ_{TeV} **proche de l'étoile** (<10UA)

- Encore beaucoup de questions:
Pourquoi un flux stable à 0,2 TeV?

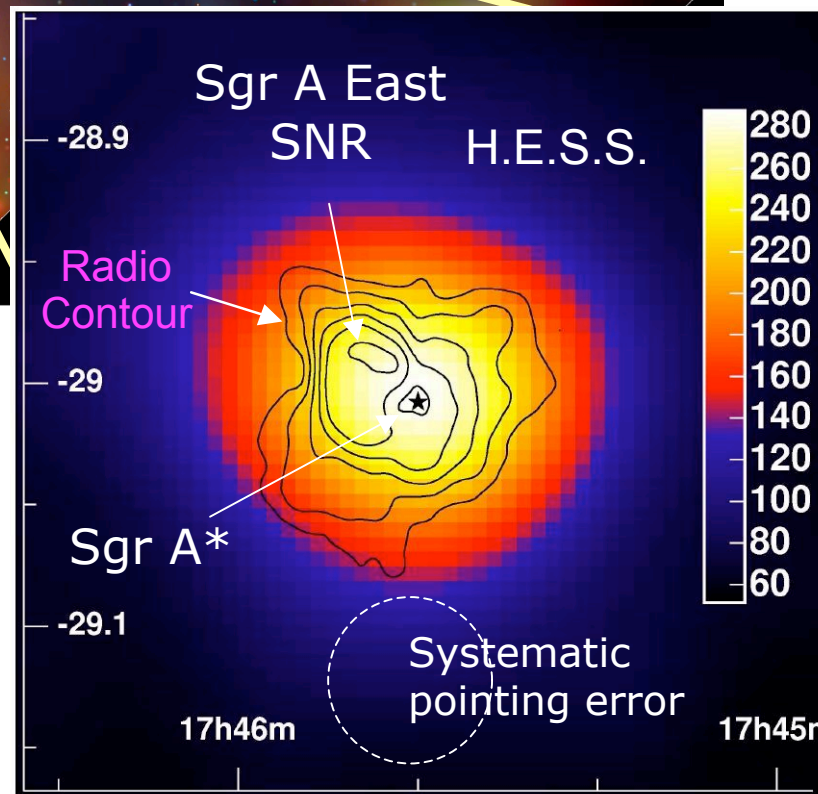
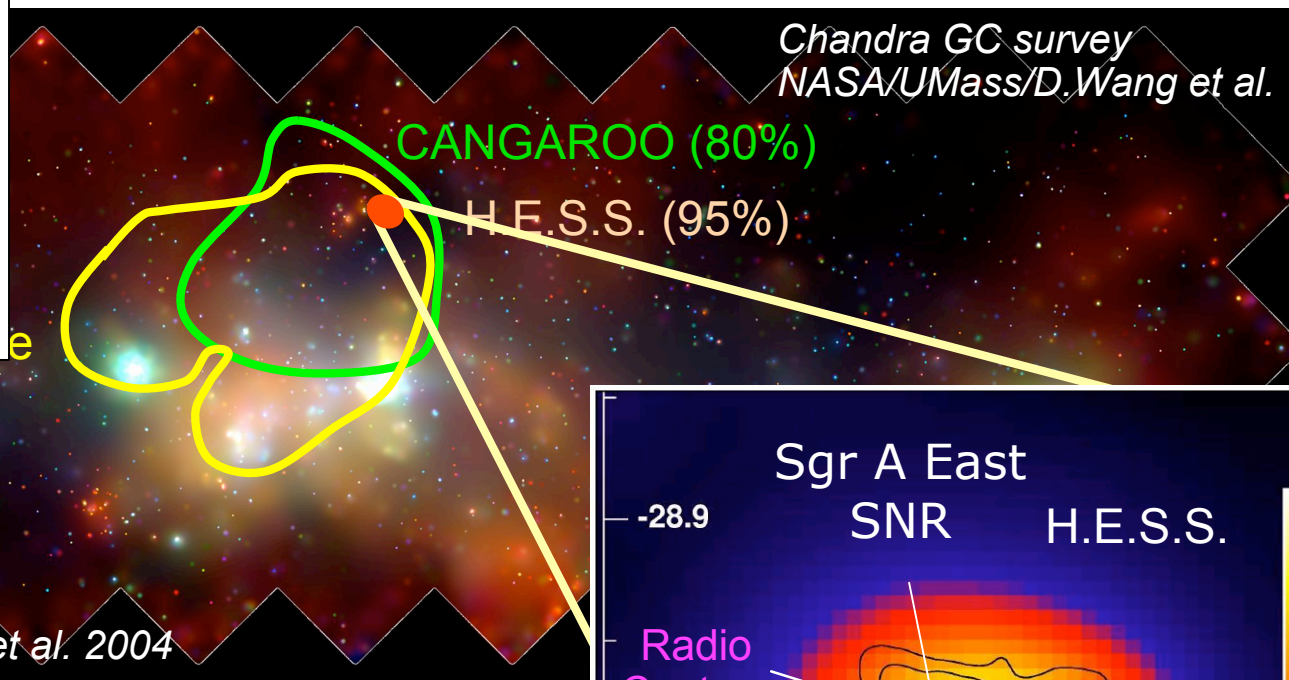
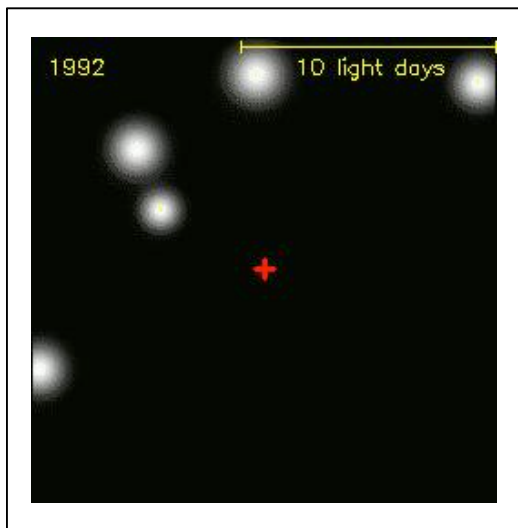
 **Autres processus que l'absorption nécessaires!**

- Cascades de particules?
- Variation de l'énergie des part. accélérées?

Production hadronique ou leptonique?

Bednarek, astro-ph/0611291 ou Aharonian et al., Jour. Phys Conf. Ser. 39,408

Centre galactique : la source TeV ponctuelle

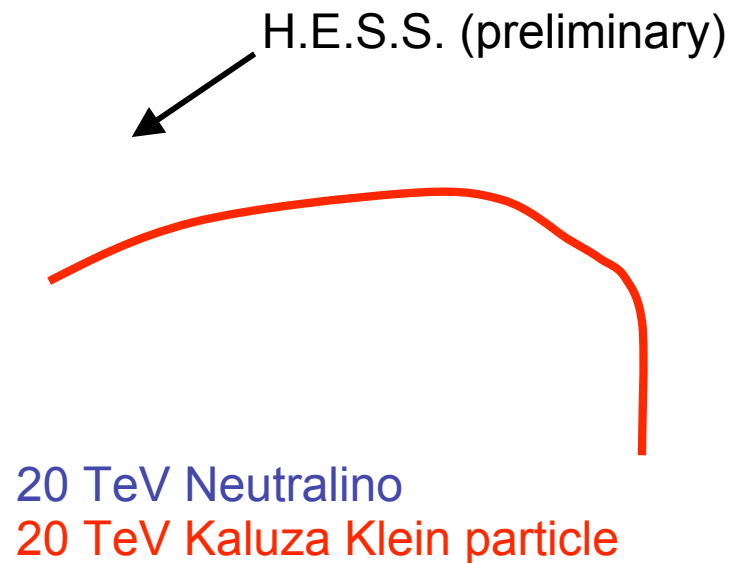


Source astrophysiques candidates:

- Trou noir central $m \sim 3 \cdot 10^6 M_{\odot}$ Sgr A**
- Vestige de SN Sgr A East

Annihilation de matière noire?

- ❑ Distribution angulaire des événements H.E.S.S. consistante avec un profile de matière noire
- ❑ Spectre dur et pas de cut-off...

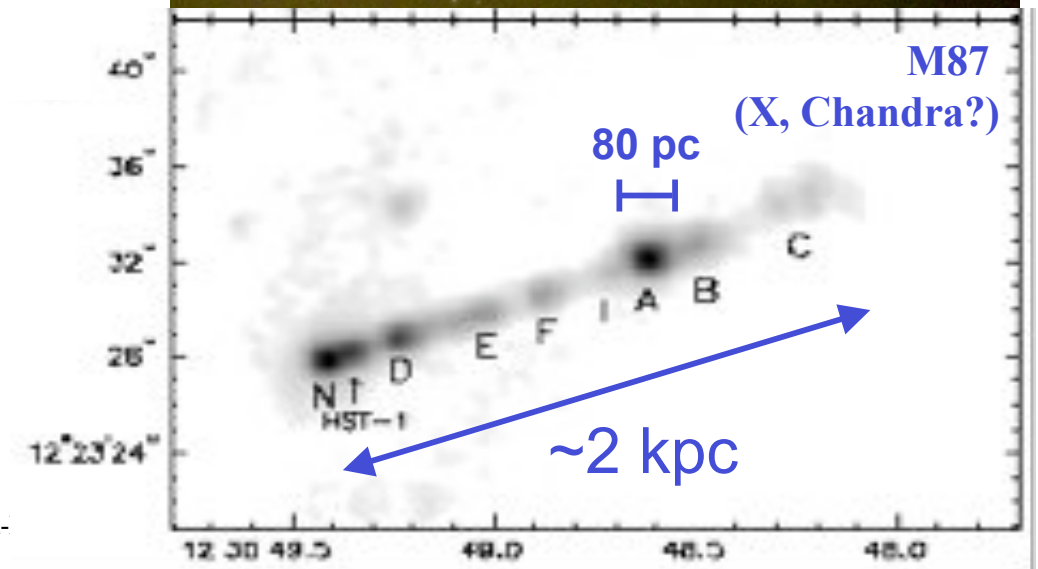


no visible cut-off \Rightarrow
rather large mass
measured flux \Rightarrow
large cross-section
and/or DM density

**Matière noire très
peu probable!**

M87

- ❑ **Galaxie radio (AGN)** dans l'amas de la Vierge (~16 Mpc)
- ❑ **Trou noir central** de $\sim 3 \cdot 10^9 M_{\odot}$
- ❑ Emission radio, visible, X et **TeV** (HEGRA 1999)
- ❑ **Jets à 30°/Terre**

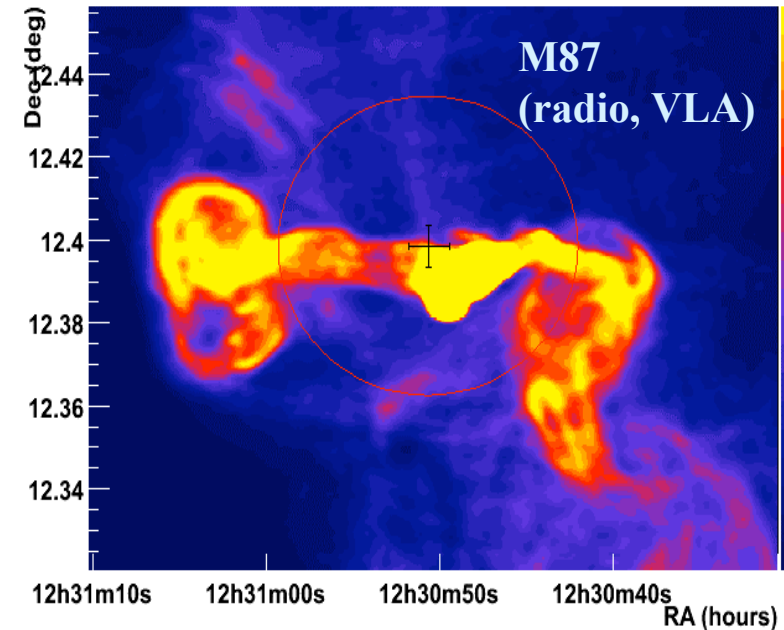


M87

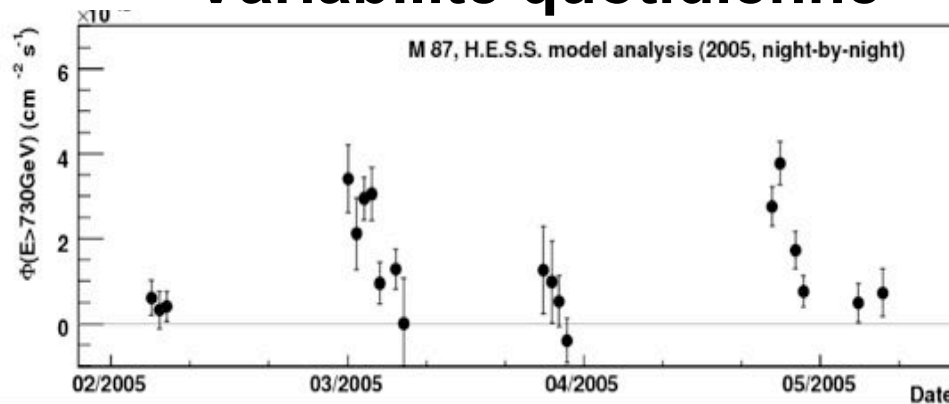
□ Observation HESS

Aharonian et al. astro-ph/0612016

- ~90 h obs.
- Signal à 13σ .
- Position de l'excès compatible avec le trou noir central
- Spectre dur ($\Gamma \sim 2,2$)



Variabilité quotidienne



→ Zone d'émission réduite à: $R < c \times \delta$
x1jour $\sim 0,1 \text{ pc}$

→ Emission proche du noyau

M87

Contraintes:

- ❑ Variabilité rapide et non corrélée aux autres longueurs d'ondes
- ❑ Spectre très dur
- ❑ Emission ne provient pas des jets ni des noeuds!

Solutions:

Modèles d'émission TeV possibles:

- leptoniques: **auto Synchro-Compton** à la **base du jet**.
- hadroniques: si **protons de 10^{20} eV** à la base des jets:
 - rayonnement synchrotron
 - photoproduction de π^0 : $p+\gamma \longrightarrow \Delta^+ \longrightarrow p+\pi^0 \longrightarrow p+2\gamma_{\text{TeV}}$
 - radiation de courbure des protons (si $B \sim 10^4$ G)

Fond diffus infrarouge

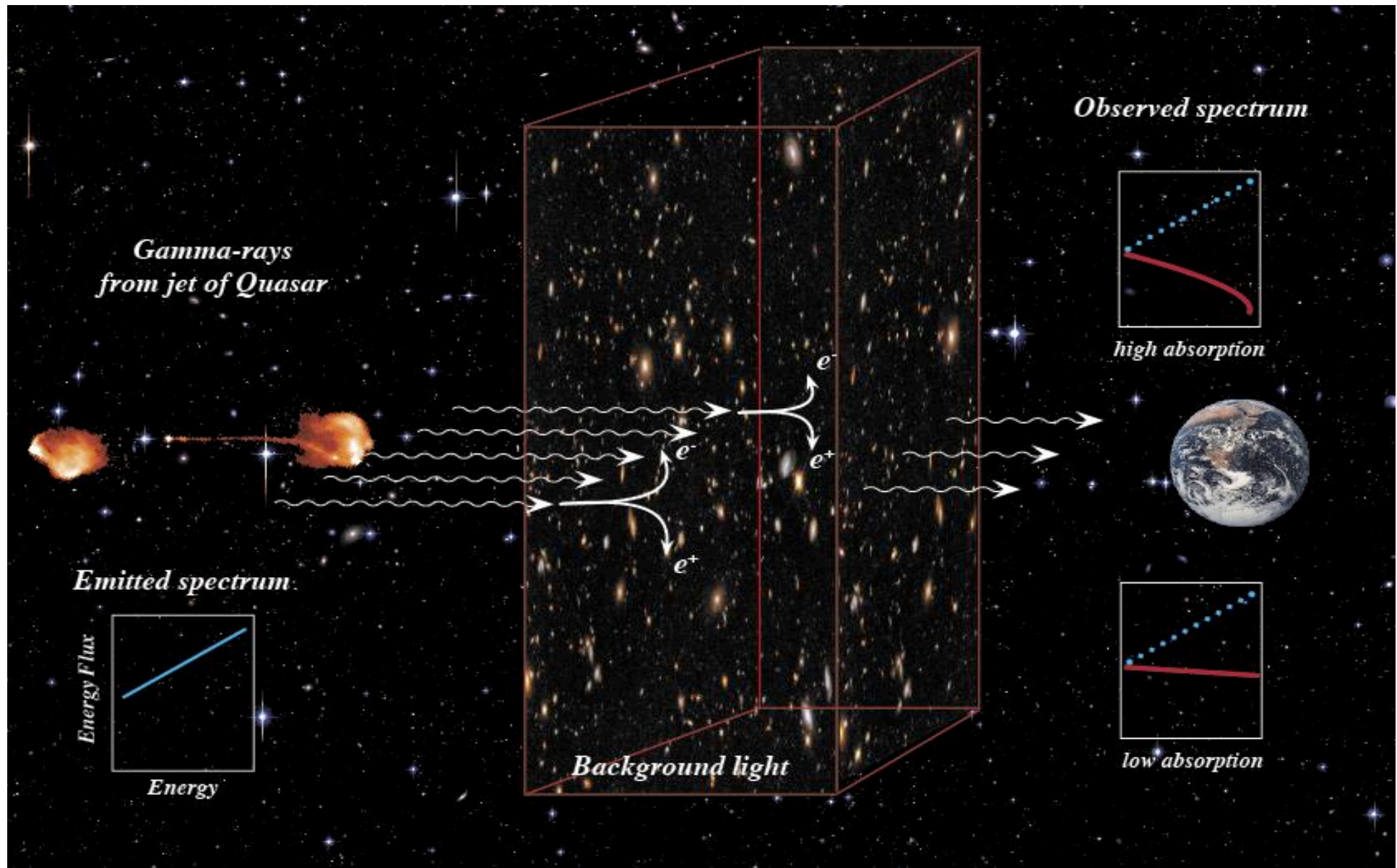
- ❑ Emission thermique par les étoiles & poussières depuis leur création
 - NIR: $\lambda \sim 1\text{-}2\mu\text{m}$ & FIR $\lambda \sim 100\text{-}200\mu\text{m}$

- ❑ Puissant **outil d'étude de la formation des galaxies**

- ❑ Mesures directes:
 - Très difficile!
 - Nécessite 0 bruit de fond (atmosphère, sources galactiques...)
 - IRAS (84), COBE (92), NIRS (95)

- ❑ Mesures indirectes
 - Comptage (limite inférieure)
 - Absorption des γ_{TeV}

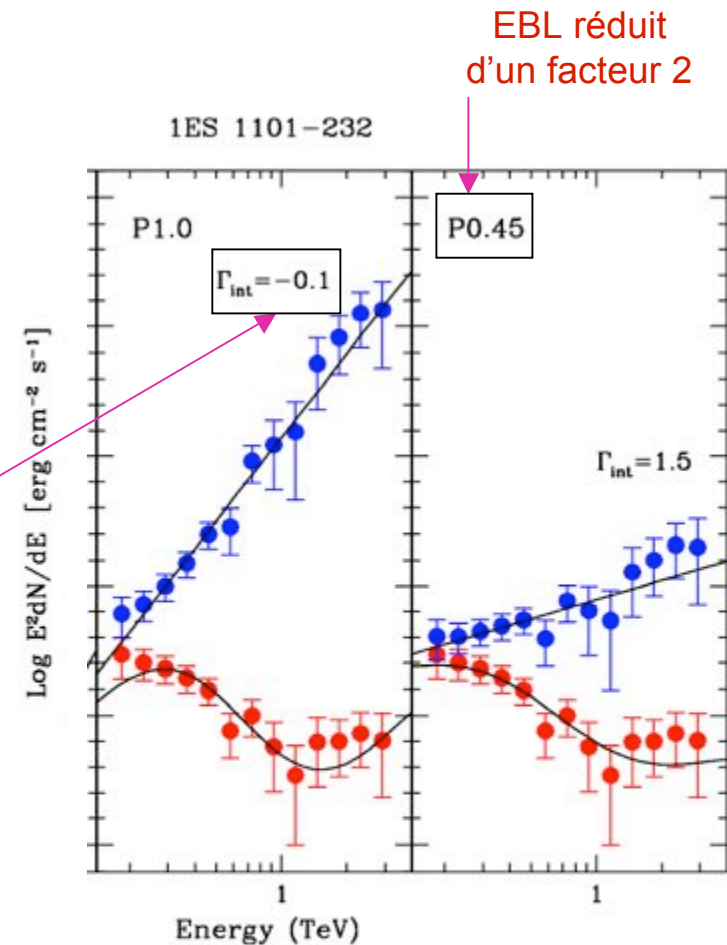
Absorption γ_{TeV}



Astronomie γ et fond diffus infrarouge

□ HESS:

- Détection de 2 blazars lointains
 - H2356-309 ($z=0,165$, $\Gamma\sim 3$)
 - 1ES1101 ($z=0,186$, $\Gamma\sim 2,9$)
- Modélisation de l'absorption des γ_{TeV} sur leur trajet: $\gamma_{\text{TeV}} \gamma_{\text{IR}} \rightarrow e^+e^-$
- Spectre à la source... trop dur!
- Explication la plus plausible: **CIB plus faible** (~facteur 2) qu'attendu par mesures directes... assez proche des limites obtenues par comptage.



Astronomie gamma avec HESS

Rayonnement γ : modes et sites de production

Détection: les télescopes à effet Cerenkov

Motivations et résultats

- rayonnement cosmique
- phénomènes violents dans l'Univers
- cosmologie

L'avenir du domaine

HESS II

□ Les γ de 10 GeV: quel intérêt?

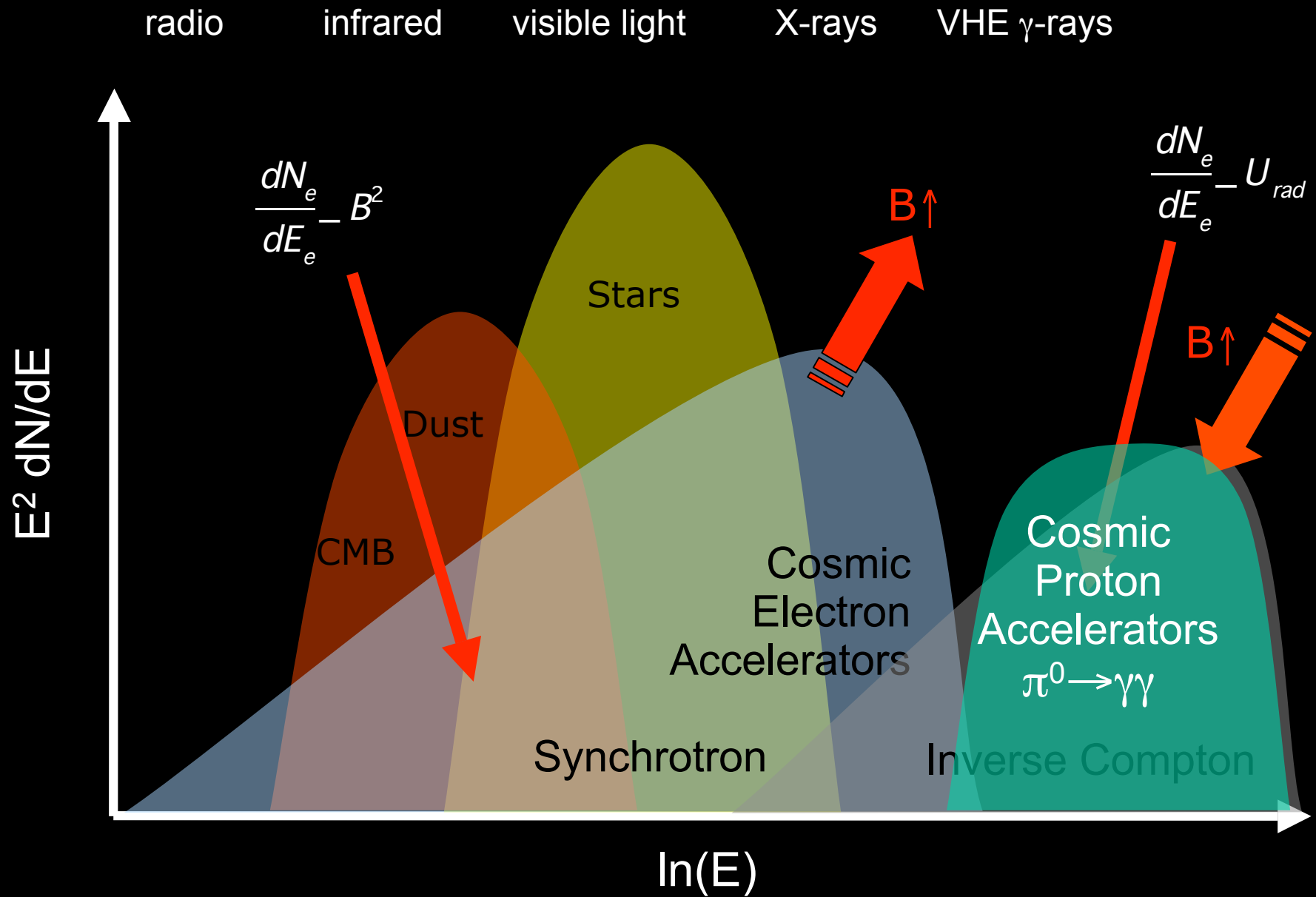
- **Sources potentielles nombreuses:**
 - pulsars
 - sursauts gamma
 - matière noire

- **Meilleure discrimination entre modèles hadroniques et leptoniques**

- **Détection de pulsars lointains (cosmologie)**

- **Observations combinées avec GLAST**

Electron or Hadron Accelerator?



HESS II

□ Réalisation: HESS II

- Un **télescope de $\phi=28\text{m}$** au centre du réseau HESS I
 - Optimisation caméra & électronique



HESS II

- Performances attendues:
 - seuil de **~10-20 GeV**
- Construction en cours

Premières données
en 2008!

