

# **MAX**, les pulsars et les positrons

Survol de l'état de l'art et  
quelques perspectives pour MAX

Jean-François Olive, Atelier MAX du 23 mars 2004, IAP Paris

# Les pulsars ont maintenant 35 ans..

Leur étude permet à priori de :

- Tester la **physique dans des champs magnétiques sans aucune mesure avec ceux du laboratoire ( $B \approx 10^{12-13}$  Gauss)**
  - "photon splitting", polarisation du vide, etc...
  - Confinement macroscopique de plasma ultra relativistes
- Tester les **équations d'état (EoS) de la matière ultra-compactée ( $\rho \geq \rho_{\text{nuc}} \approx 2 \cdot 10^{14} \text{ g.cm}^{-3}$ )**
  - Relation Masse-Rayon des objets compacts
  - Classiques "Etoiles à Neutrons" versus "Etranges"
- Tester la **Relativité Générale en champs forts (B, E et G) dans les parties internes de la magnétosphère**

## 35 ans, et pourtant...

- Les **sites** et les **mécanismes de production** des photons pulsés ne sont pas totalement identifiés
  - malgré la complexité extrême des modèles actuels...
- La **composition** et le **spectre de particules** du vent du pulsar sont encore largement inconnus
  - injection de positrons dans le milieu interstellaire ?
  - injection dans le rayonnement cosmique ?

# La problématique : Où sont les positrons des pulsars ?

Les pulsars sont des producteurs de positrons

$10^{33} e^+ s^{-1}$  primaires ( $10^{14} eV$ , gap),  $10^{38} - 10^{40} e^+ s^{-1}$  secondaires (cascade)

Ces positrons peuvent être annihilés :

$\ll 1''$   
Pulsé  
Red shifté  
Elargie

- sur l'étoile compacte
- dans la magnétosphère de l'étoile compacte

$\approx 1'$   
Non pulsé  
511 keV

- dans la nébuleuse entourant le pulsar (« Pulsar Wind Nebulae »)
- dans le front d'interaction vent-milieu interstellaire (« Bow Shock »)
- dans le milieu interstellaire, après diffusion

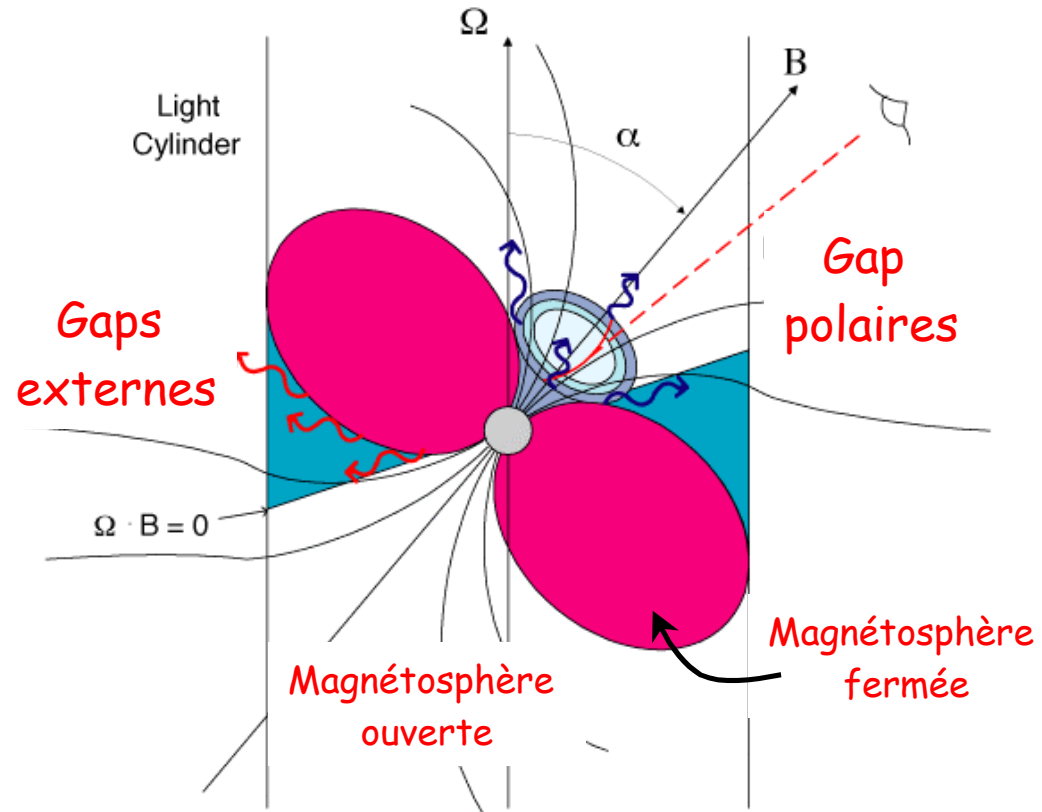
# Une étoile compacte magnétisée en rotation

Accélération primaire  
dans un « gap »  
(zone vide de charge)

Cascade  
électromagnétique  
IC, RC,  $\gamma\gamma$ ,  $\gamma B$ , etc..

$e^- e^+ \gamma$

Continuum  
de photons pulsés



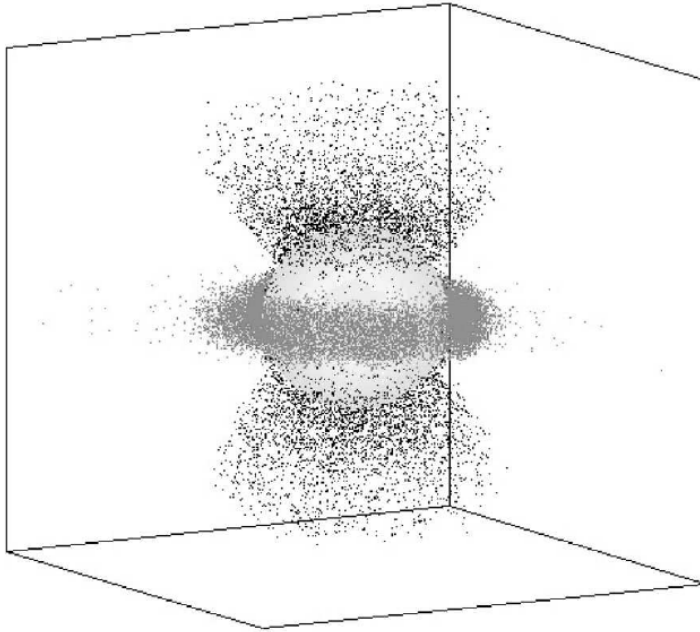
Le présence de positrons est inévitable  
et nécessaire

Polar gap :  $10^{38}$  /s max.

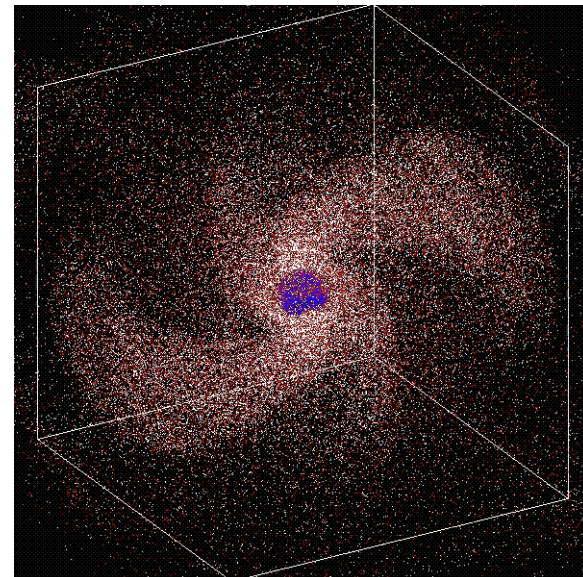
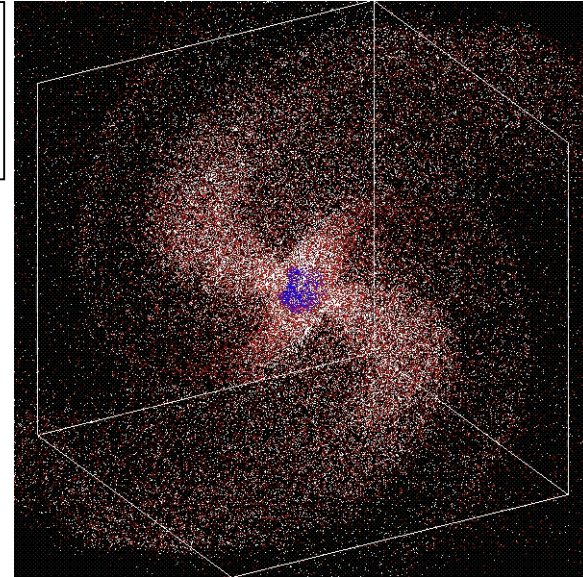
Outer gap :  $10^{38-40}$  /s

# Récentes modélisations

(Spitkovsky et Arons, 2002)

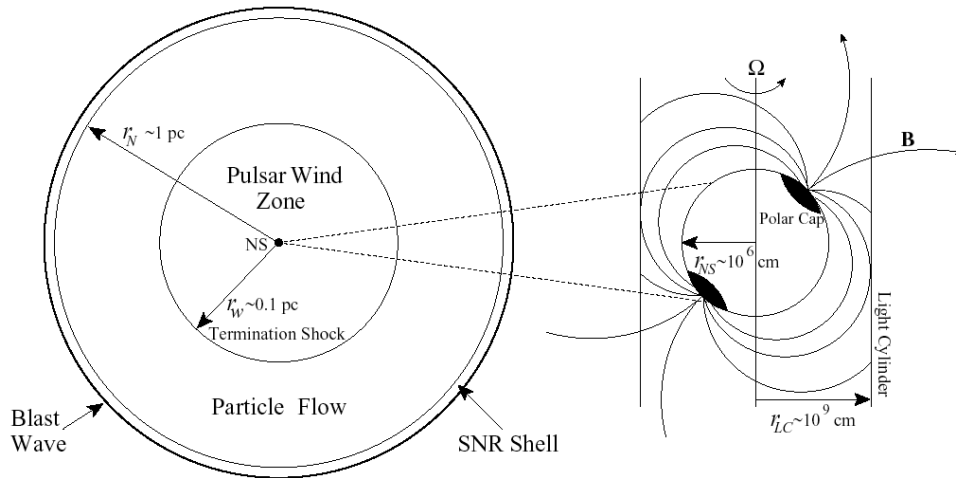


Inclinaison 60 deg  
Positrons : rouge  
Electron : blanc



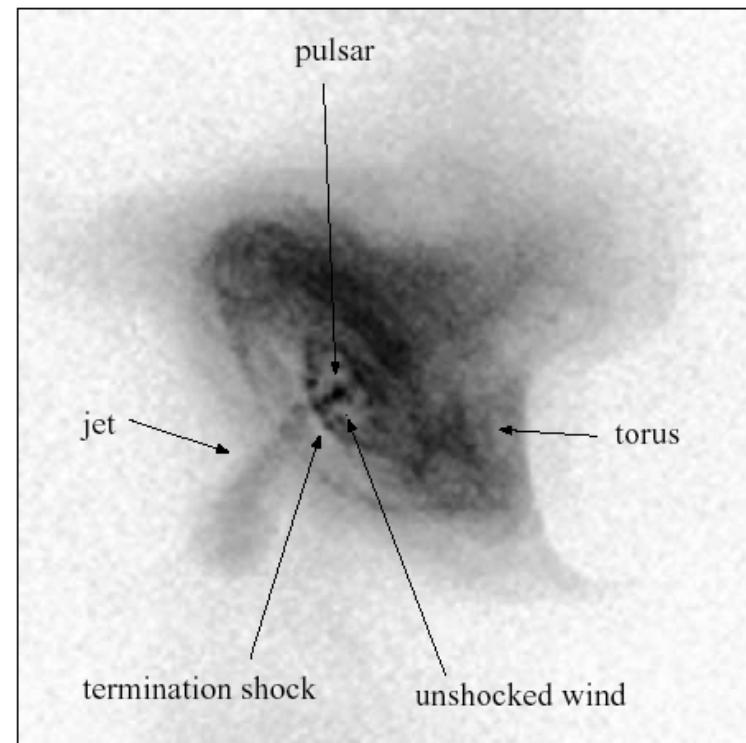
Magnétosphère réduite  
Gigantesques zones accélératrices  
2 dômes polaires, 1 tore équatorial  
Vent permanent d' $e^+/e^-$

# Les "Pulsar Wind Nebula"



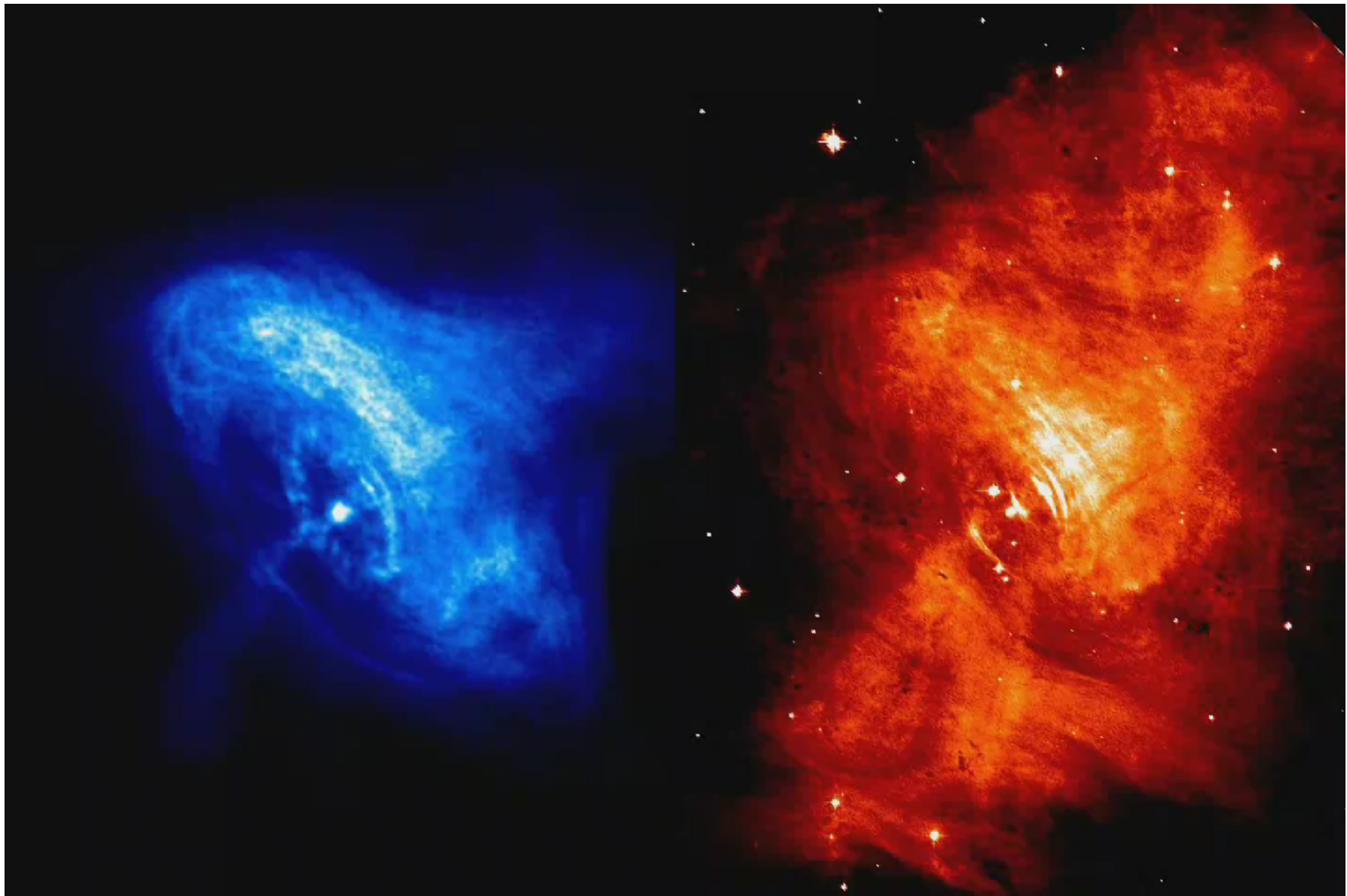
$\approx 30$  PWN détectées avec pulsar  
 $\approx 25$  PWN sans pulsar

La nébuleuse du Crabe  
 Image de 4'x4'  
 Flot équatorial dense  
 Deux jets polaires



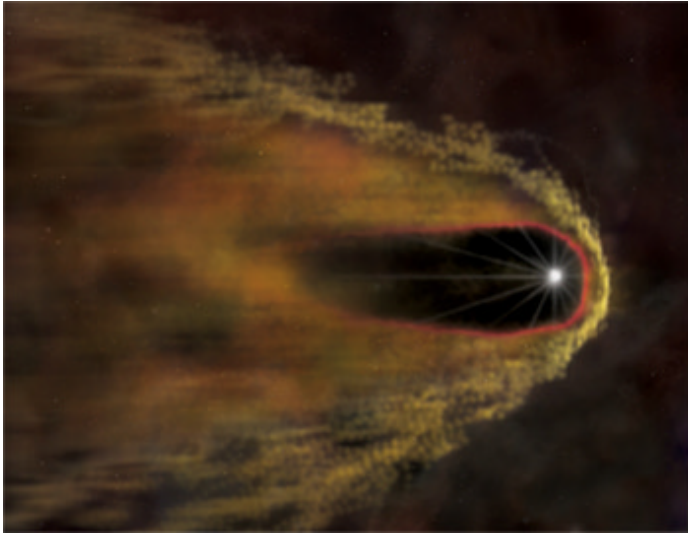


# 6 mois du Crabe par Chandra et HST



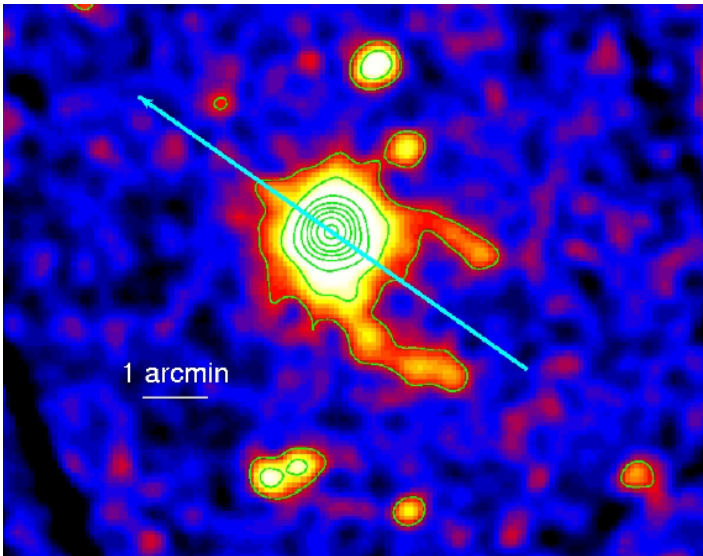


# Interaction avec le MIS : "Bow-Shock"

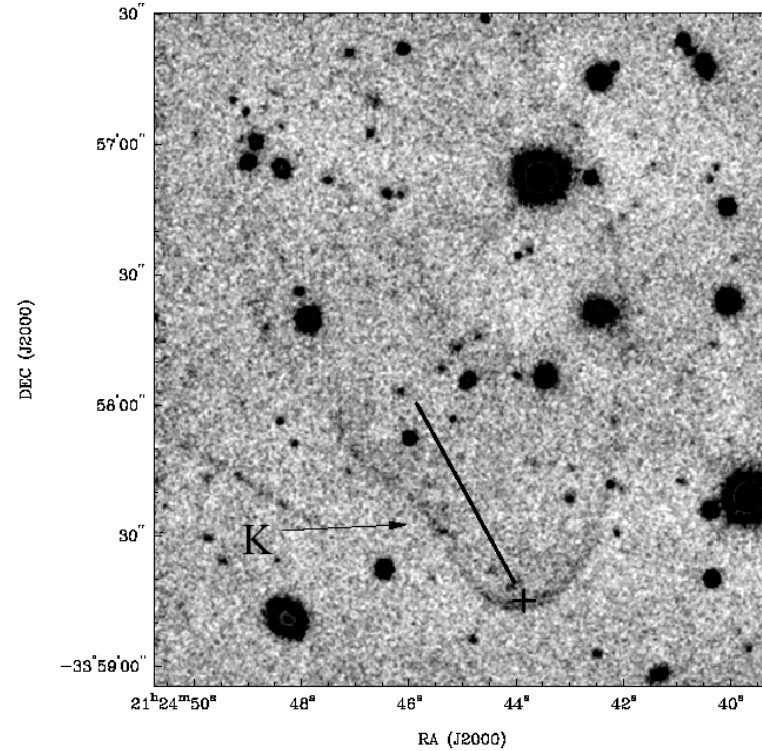


≈ 5 Bow-Shock Nebulae détectés en H $\alpha$  ou X

PSR J2124-3358  
(Gaensler et al, 2002)



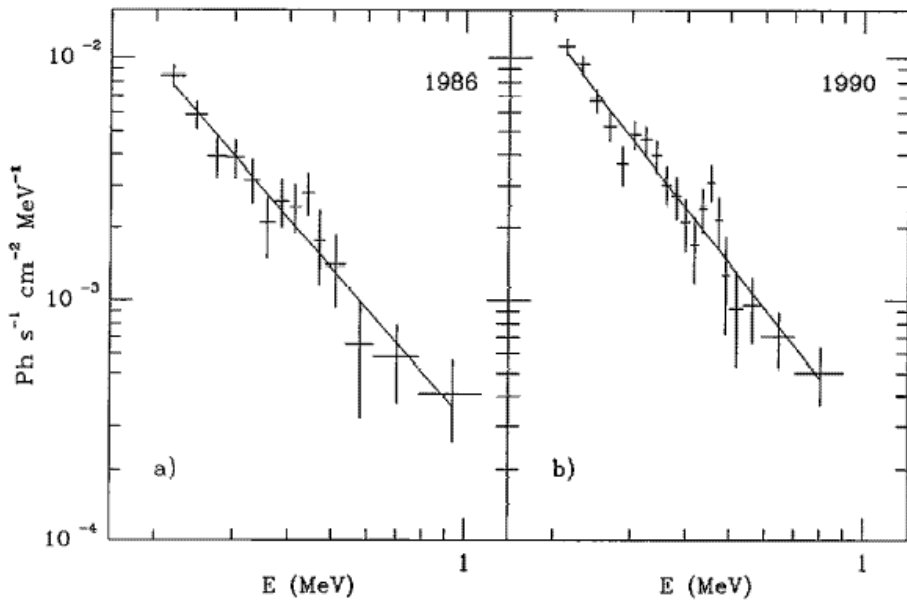
Geminga  
(Bignami et al, 2002)



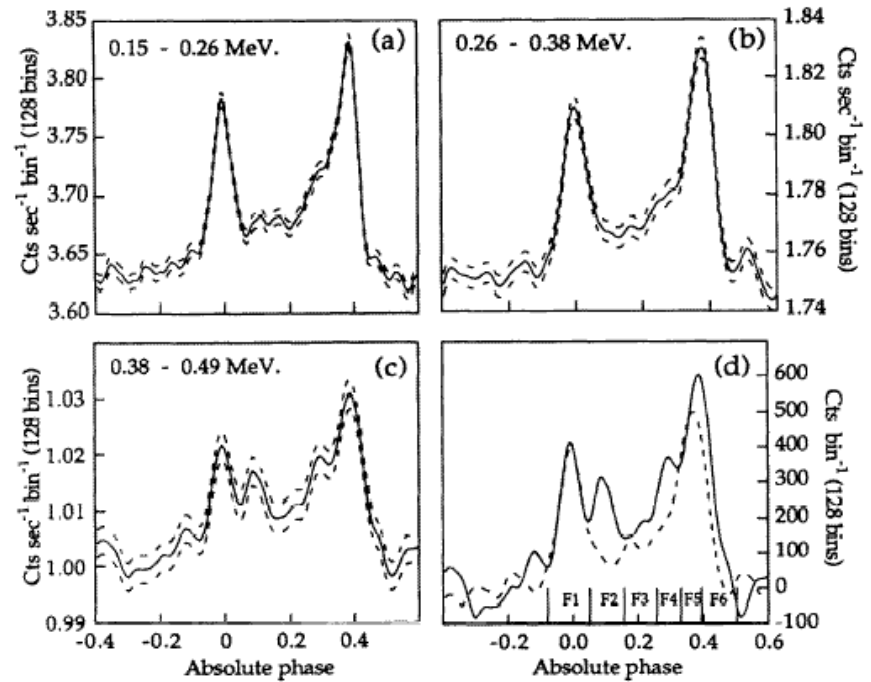
# Le pulsar du Crabe

Observation de FIGARO 1986-1990 :  
Raie d'annihilation  $e^+/e^-$   
décalée à 440 keV ?

Spectre du second pic



(Massaro et al, 1991, 1998)



Distribution en phase complexe

(Olive et al, 1993)

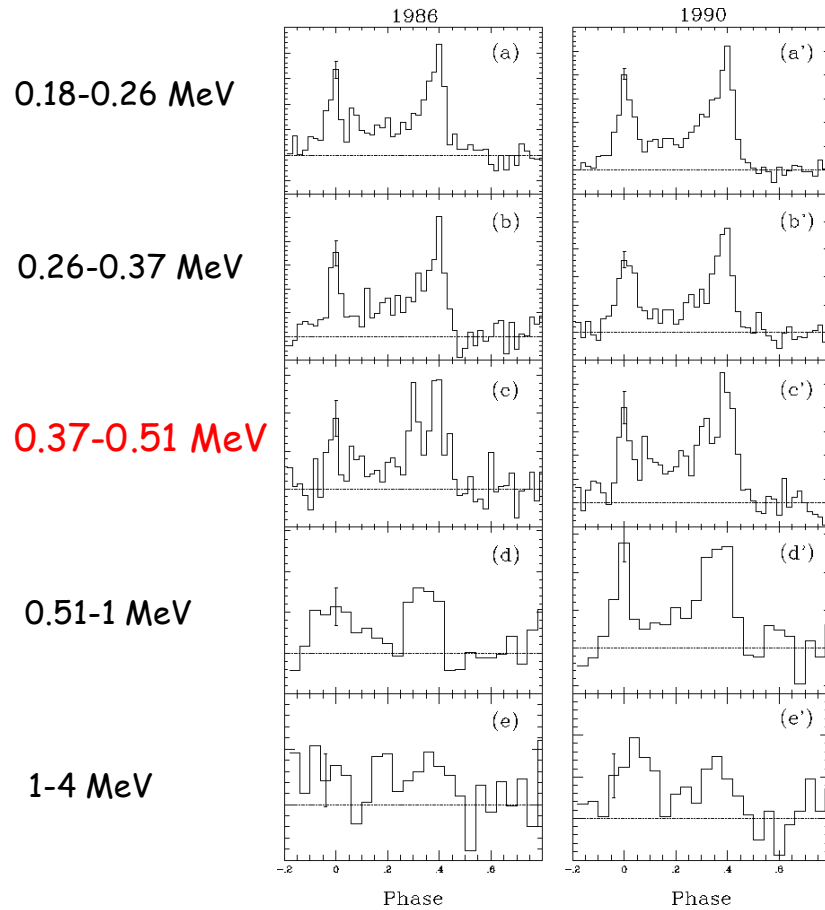
$8 \cdot 10^{-5} \text{ ph/cm}^2/\text{s} @ 440 \text{ keV}$

$10^{40} \text{ annihilations/s}$

# Une raie à 440 keV ??

FIGARO : 0.18-4 MeV

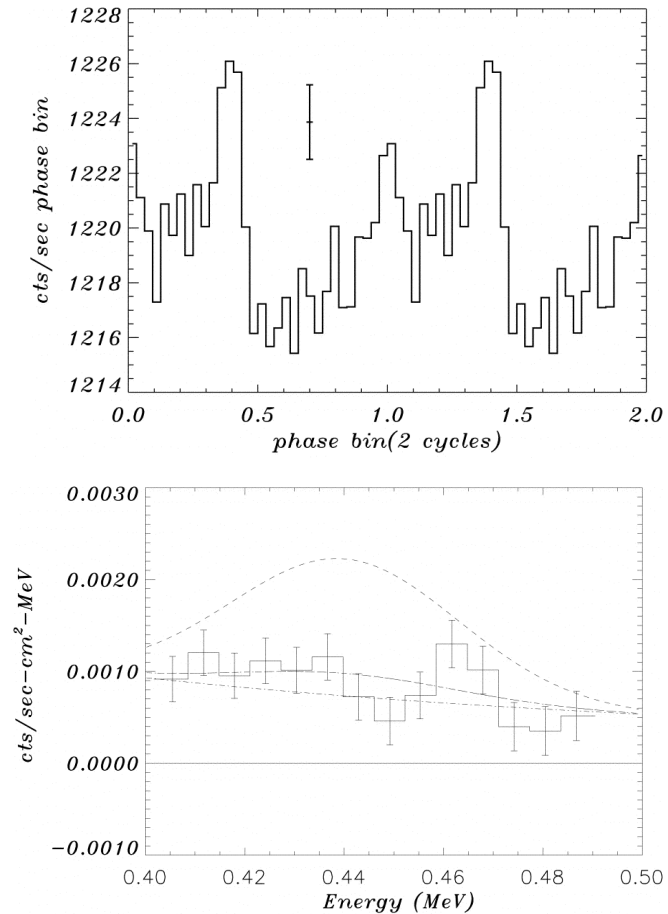
6 heures



(Massaro et al, 1998)

OSSE : 0.4-0.5 MeV

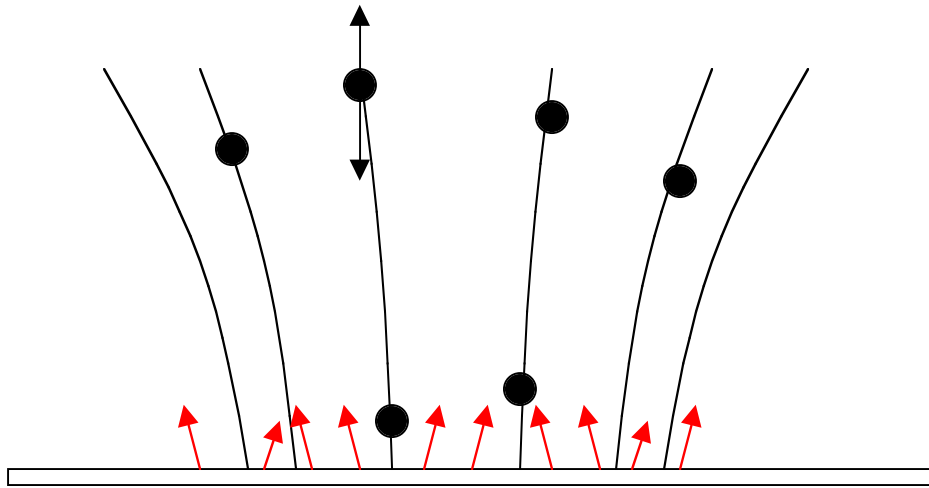
14 jours



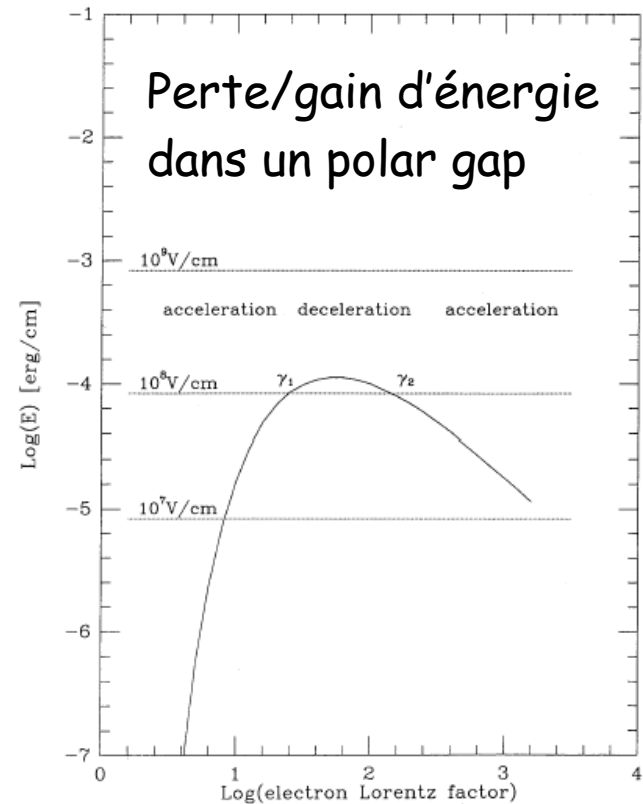
(Ulmer et al, 2001)

# Annihilation à la surface...

Accélération dans un gap polaire  
 Equilibre accélération-force radiative  
 Secondaires d'énergie modérés  
 Pénétration dans la croûte faible  
 Emission 511 keV red-shiftée, élargie

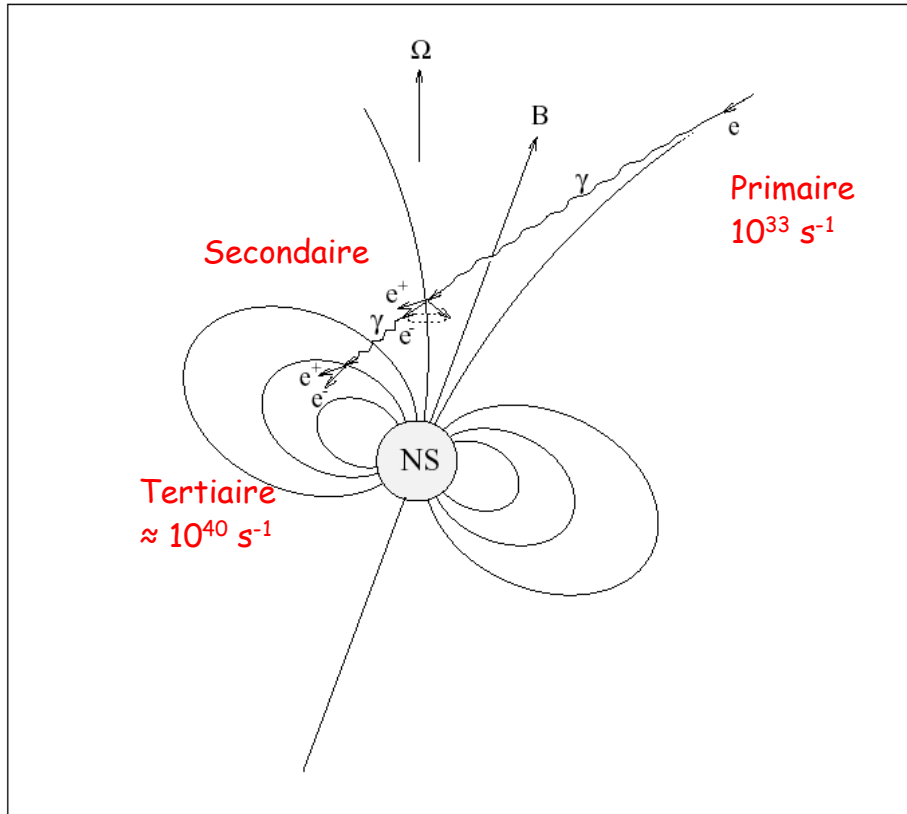


$kT \approx 1 \text{ keV}$  implique  $\Delta E \approx 30 \text{ keV}$   
 $\Delta E/E \approx 0.35 B/B_{\text{crit}}$  implique  $\Delta E \approx 25 \text{ keV}$



Bednarek et al, 1992

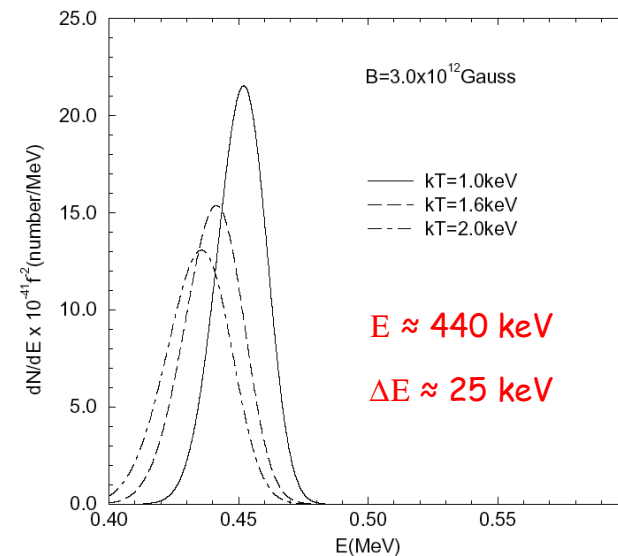
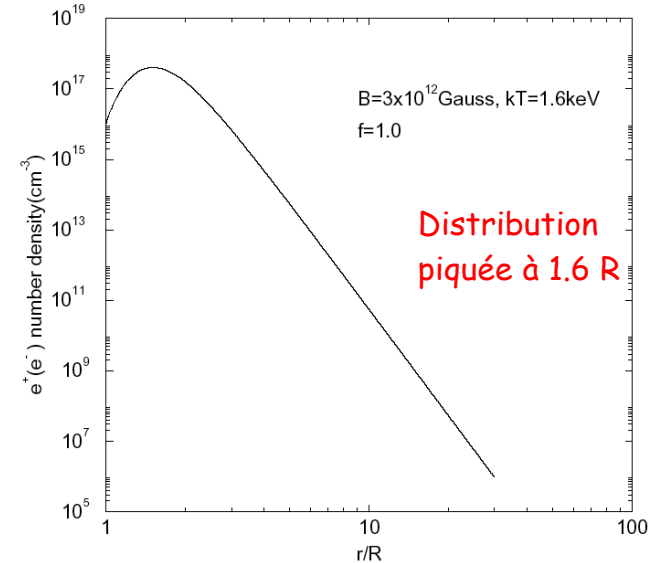
# Annihilation dans la magnétosphère...



Dans le cadre du modèle de gap externe...

Zhu et Ruderman, 1997

## Equilibre Gravité-Pression de radiation



# Conclusion

Bilan sur les différents sites :

- Etoile compacte

(+ : annihilation immédiate, - : largeur probable, photon splitting, problèmes théoriques)

- Magnétosphère de l'étoile compacte

(+ : compatible avec Outer Gap, - : largeur probable, redshift différentiel)

- Pulsar Wind Nebulae

+ : prometteur, une bonne fraction du spin-down power est émis dans les PWN donc une bonne fraction des particules du vent sont susceptibles de s'annihiler, pas de redshift

- Front d'interaction vent-milieu interstellaire (« Bow shock »)

Quel est le spectre des particules incidentes ?