

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

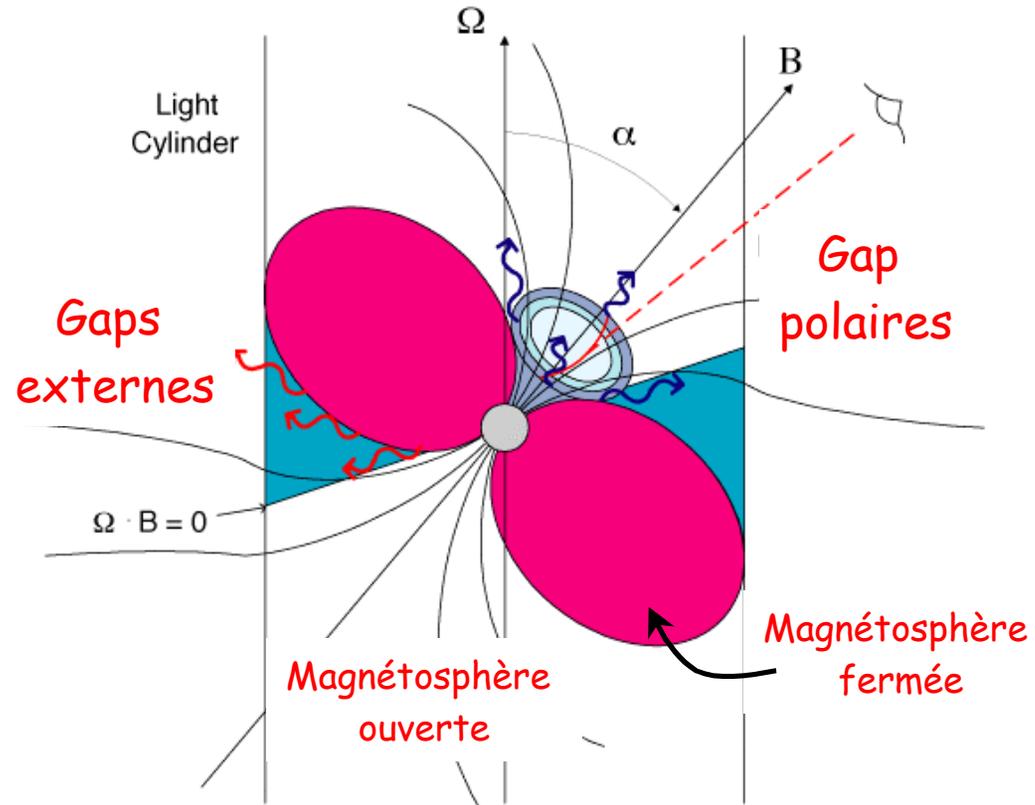
Une étoile compacte magnétisée en rotation

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

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

$e^- e^+ \gamma$

Continuum
de photons pulsés



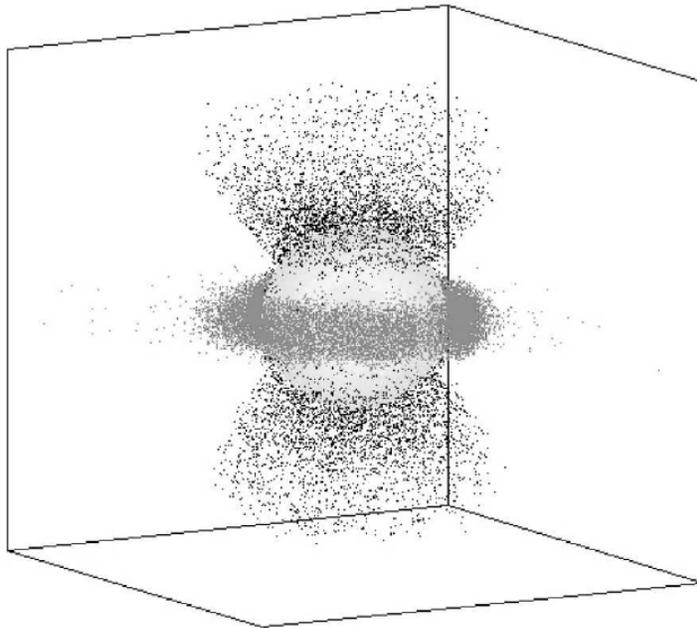
Le présence de positrons est inévitable
et nécessaire

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

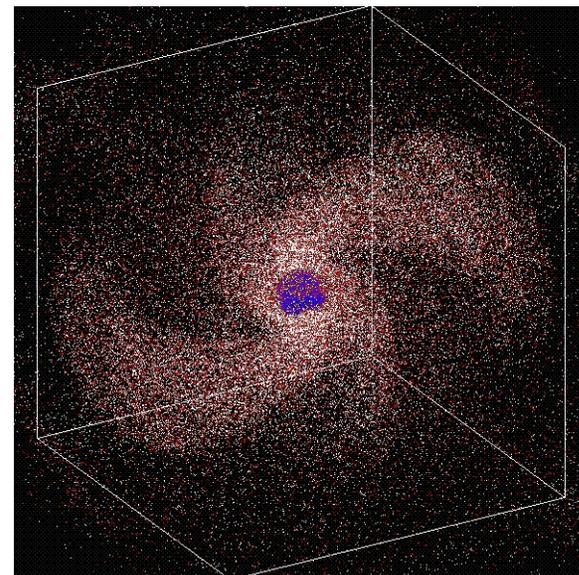
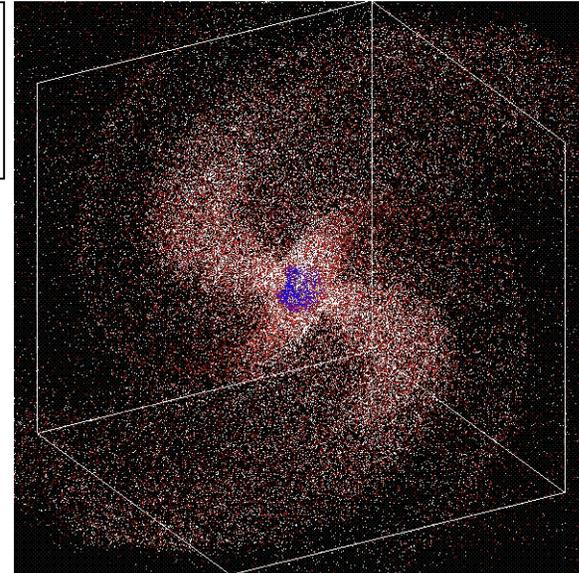
Outer gap : 10^{38-40} /s

Récentes modélisations

(Spitkovsky et Arons, 2002)

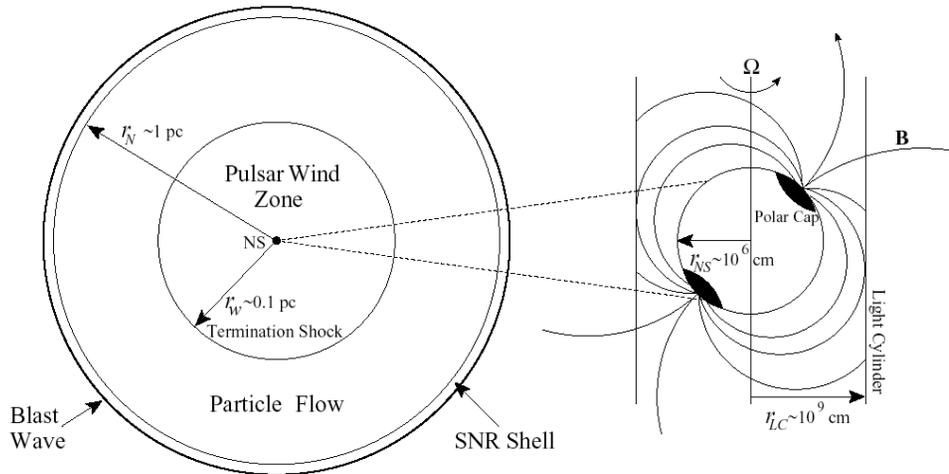


Inclinaison 60 deg
Positrons : rouge
Electron : blanc



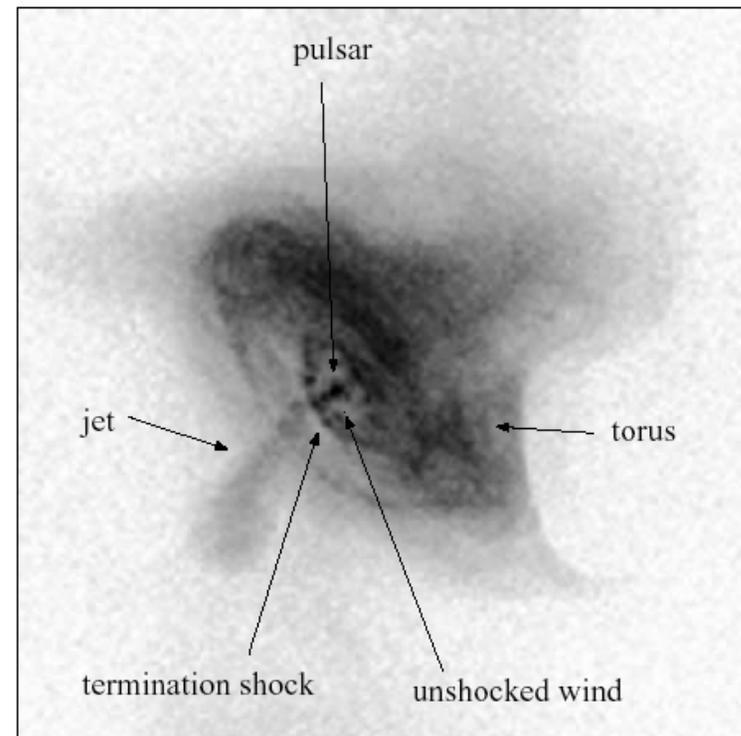
Magnétosphère réduite
Gigantesques zones accélératrices
2 dômes polaires, 1 tore équatorial
Vent permanent d' e^+/e^-

Les "Pulsar Wind Nebula"

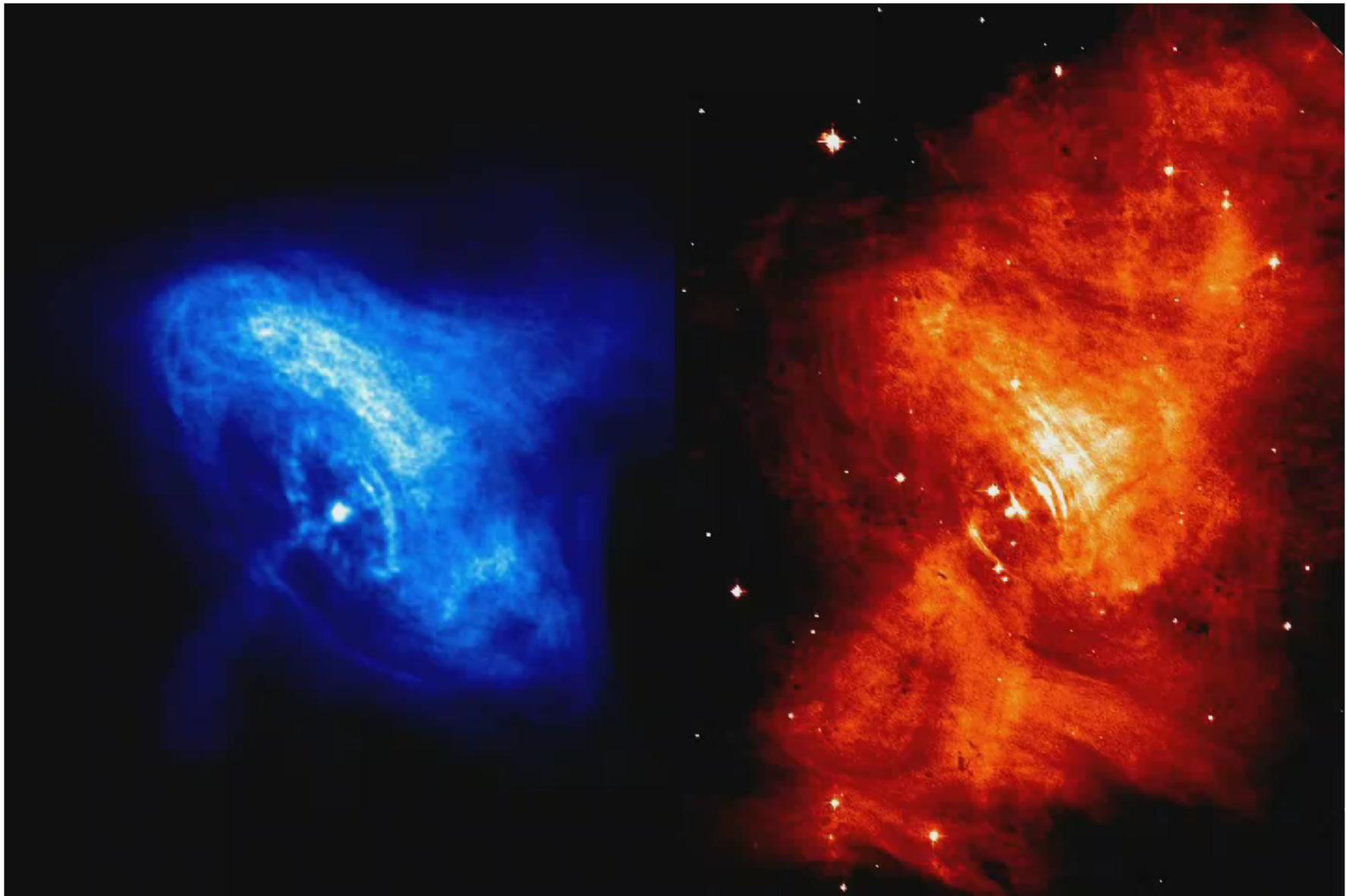


≈ 30 PWN détectées avec pulsar
 ≈ 25 PWN sans pulsar

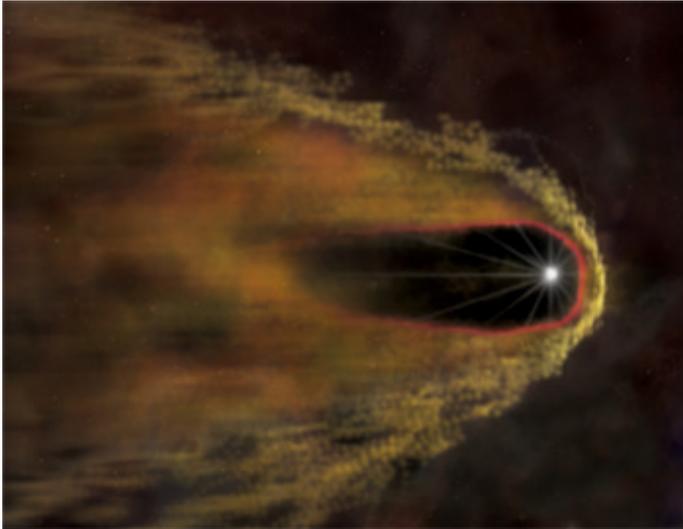
La nébuleuse du Crabe
 Image de 4'x4'
 Flot équatorial dense
 Deux jets polaires



6 mois du Crabe par Chandra et HST

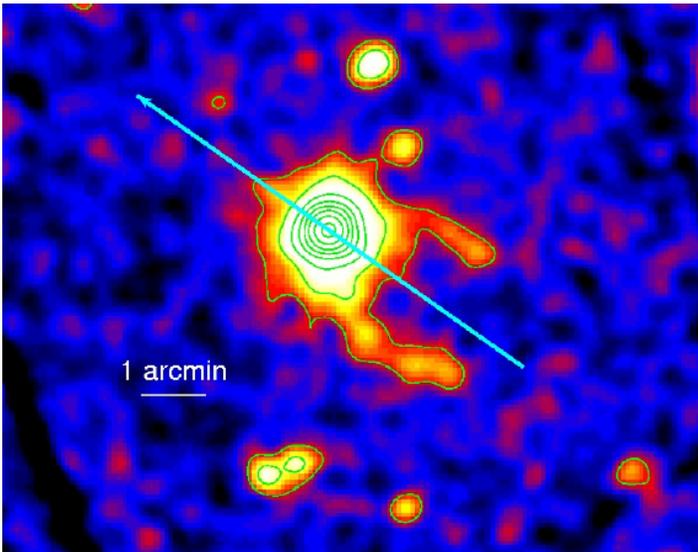


Interaction avec le MIS : "Bow-Shock"

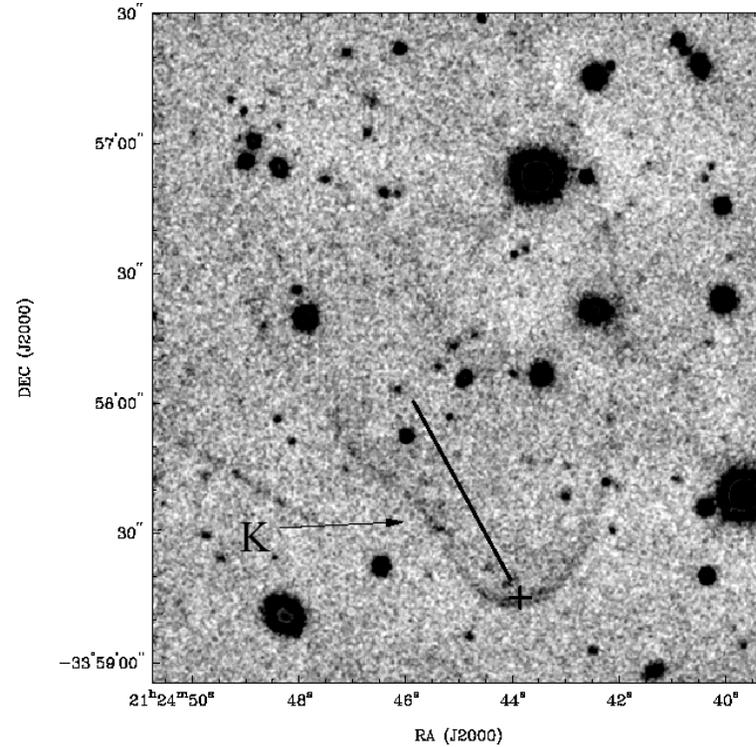


≈ 5 Bow-Shock Nebulae détectés en H α ou X

PSR J2124-3358
(Gaensler et al, 2002)



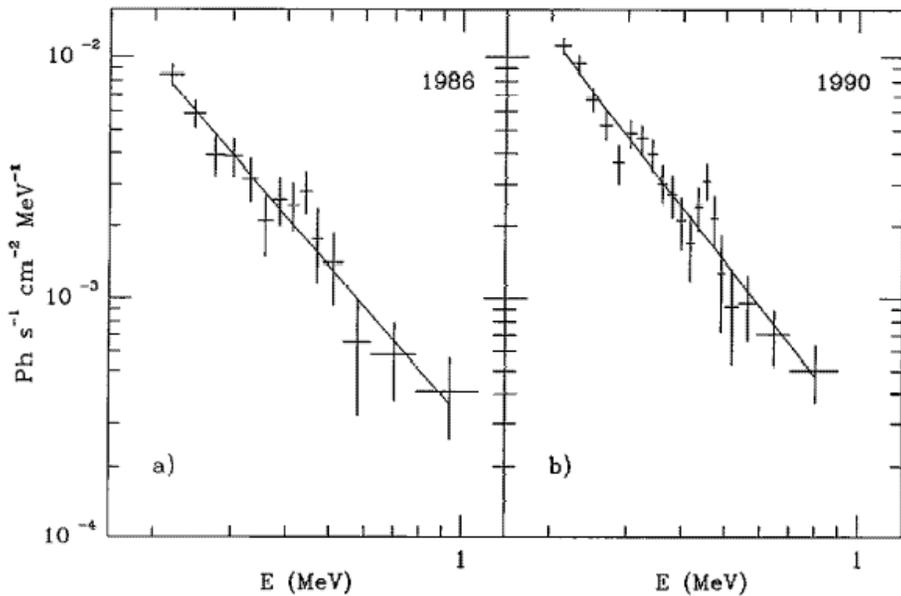
Geminga
(Bignami et al, 2002)



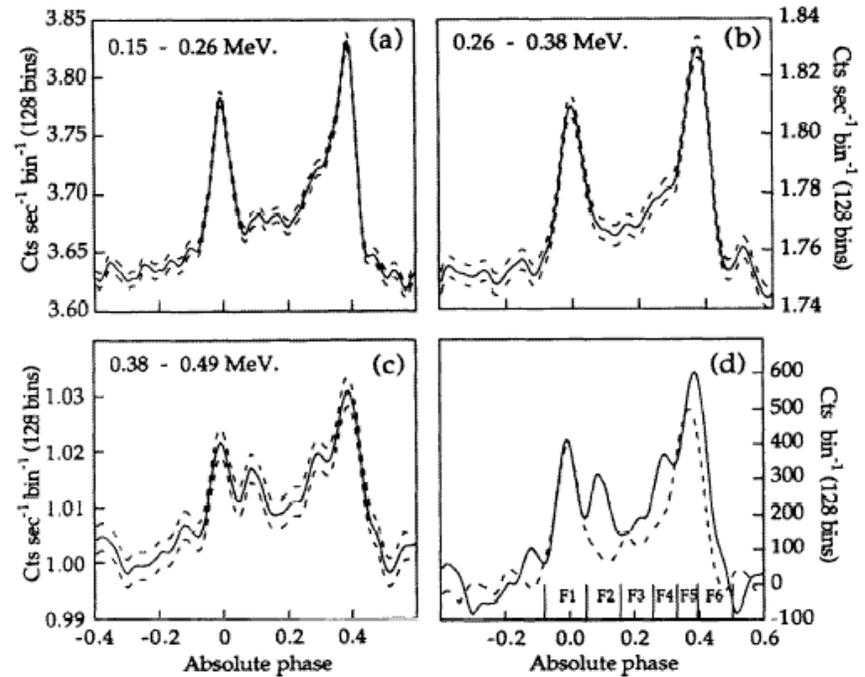
Le pulsar du Crabe

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

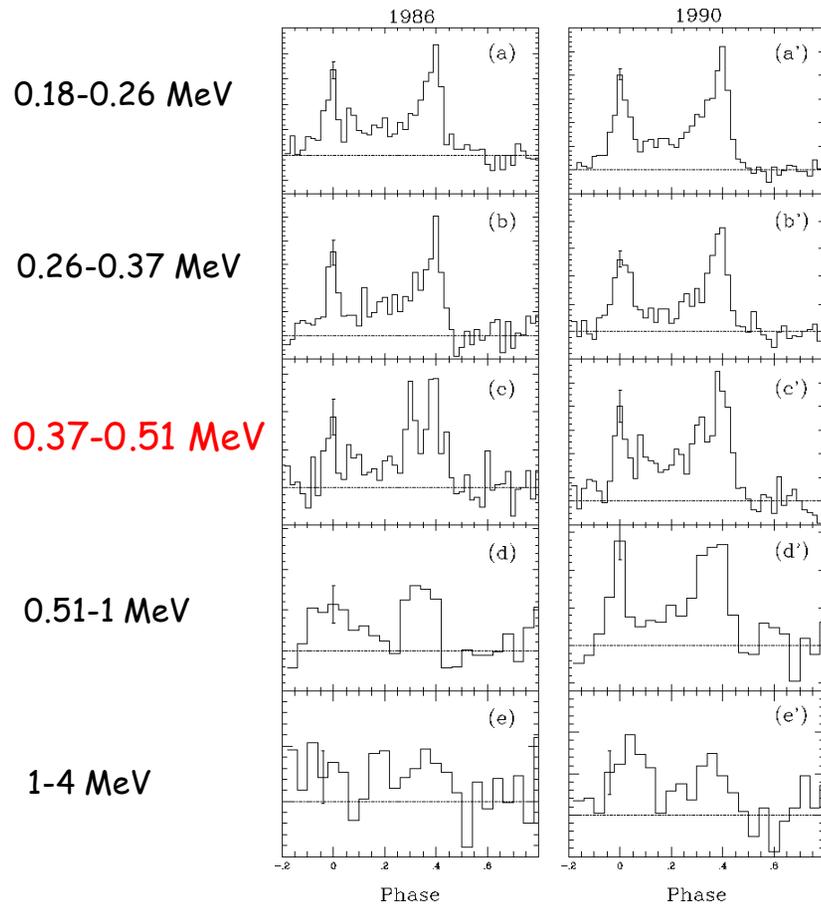
(Olive et al, 1993)

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

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

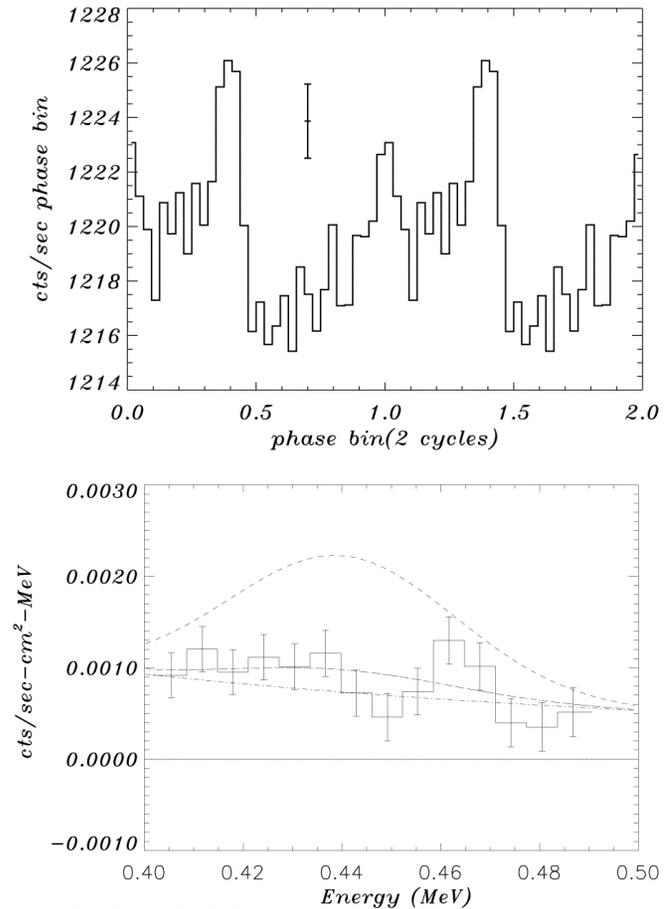
Une raie à 440 keV ??

FIGARO : 0.18-4 MeV
6 heures



(Massaro et al, 1998)

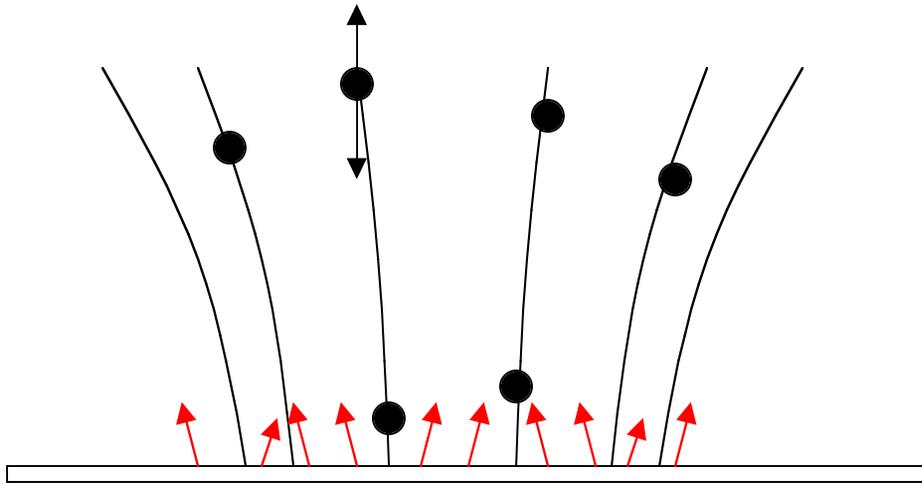
OSSE : 0.4-0.5 MeV
14 jours



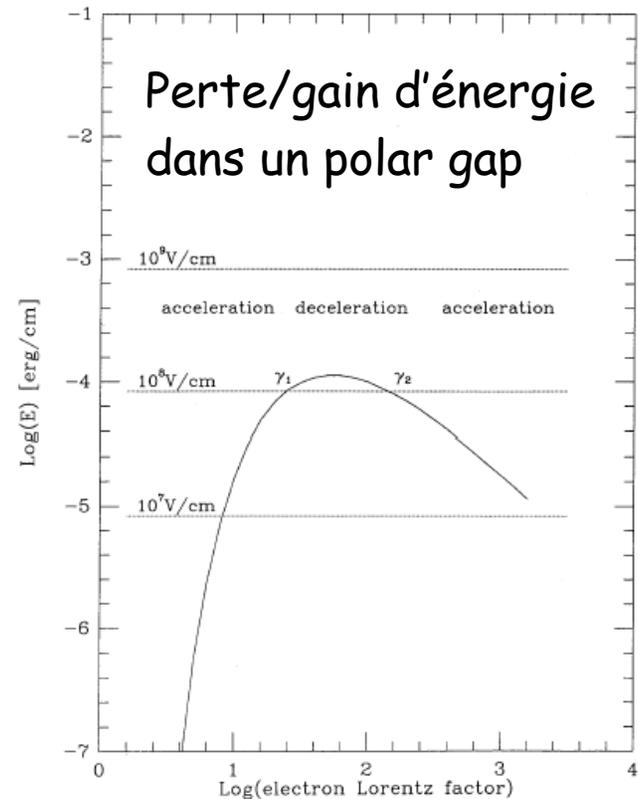
(Ulmer et al, 2001)

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

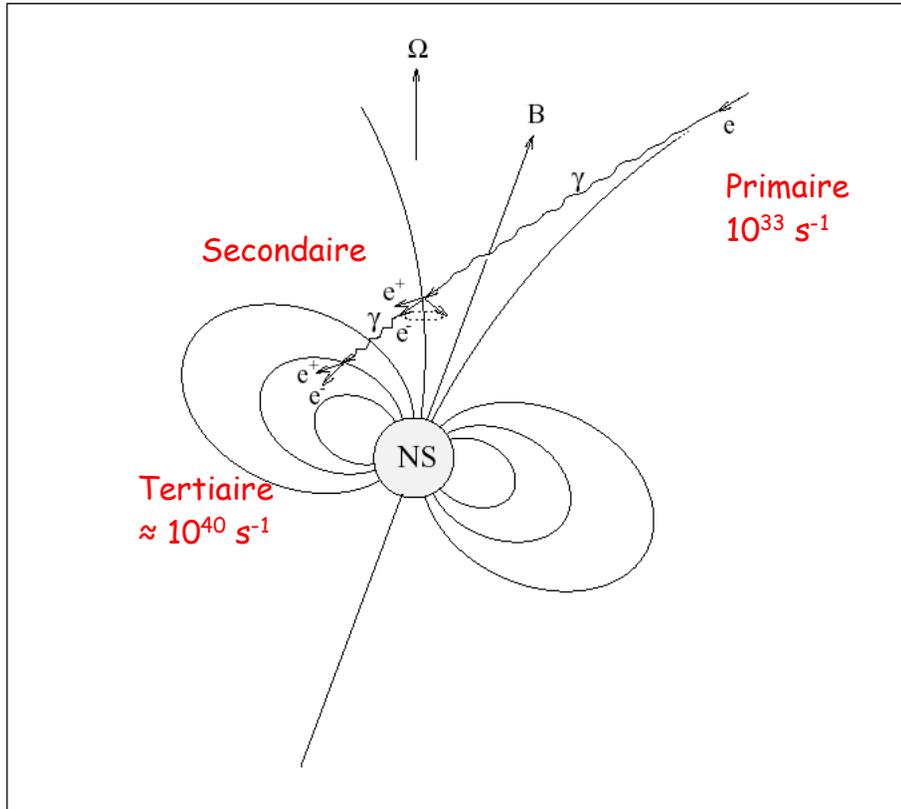


$kT \approx 1 \text{ keV}$ implique $\Delta E \approx 30 \text{ keV}$
 $\Delta E/E \approx 0.35 B/B_{\text{crit}}$ implique $\Delta E \approx 25 \text{ keV}$



Bednarek et al, 1992

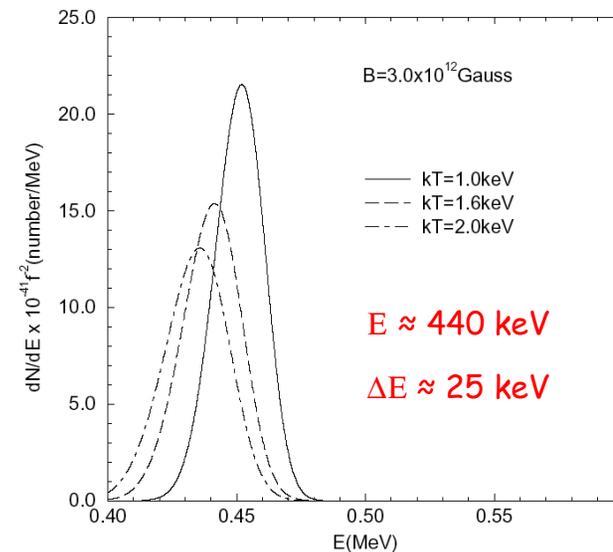
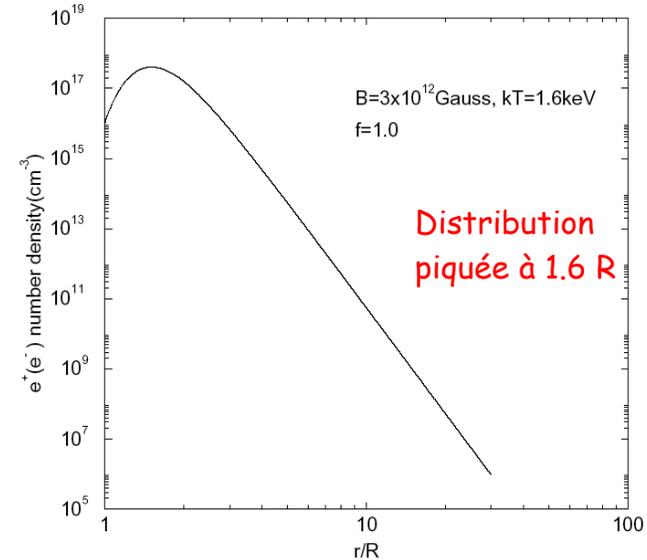
Annihilation dans la magnétosphère...



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 ?