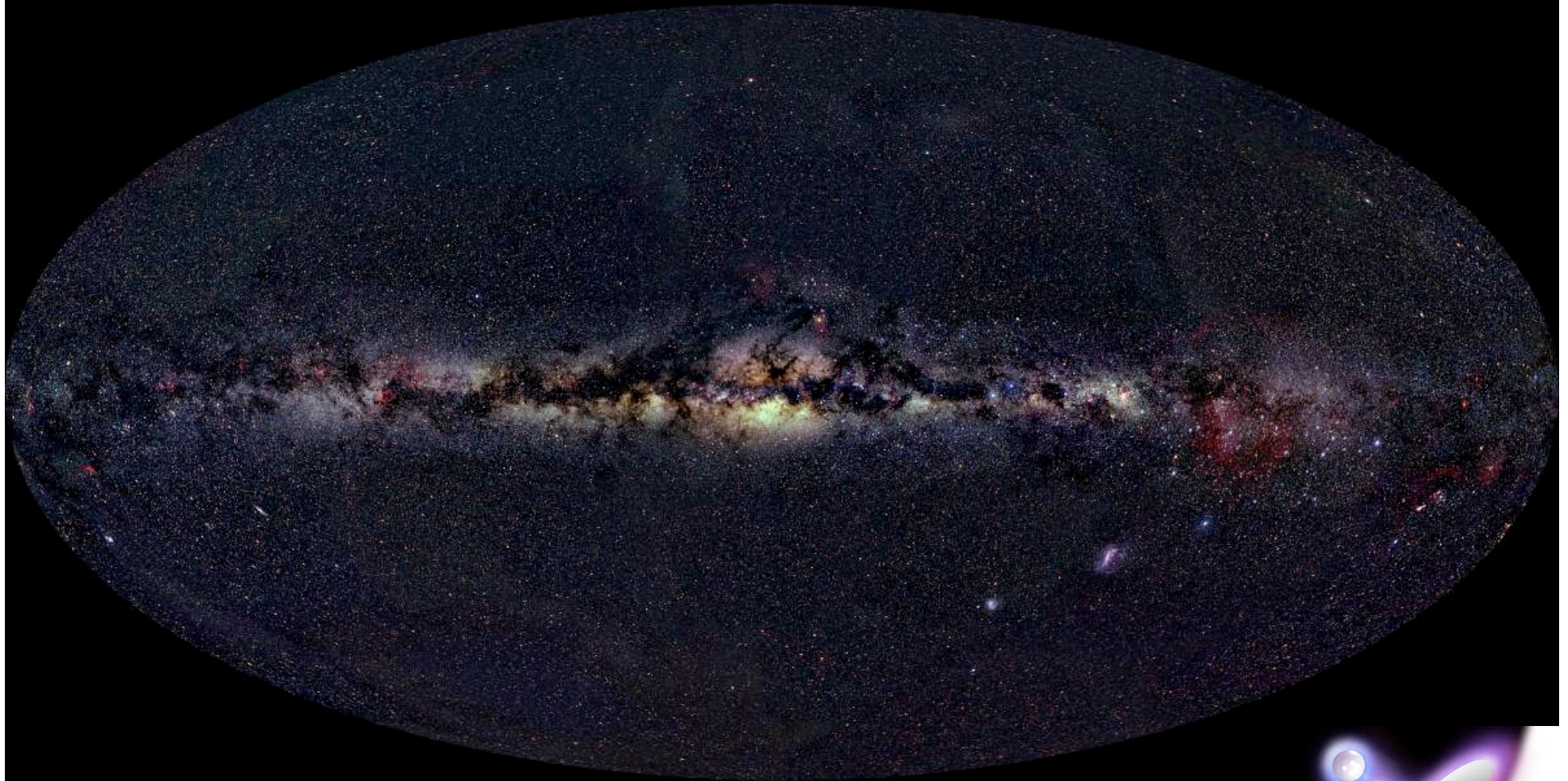


# L'antimatière dans notre Galaxie dévoilé par INTEGRAL



Jürgen Knödseder  
CESR (Toulouse)

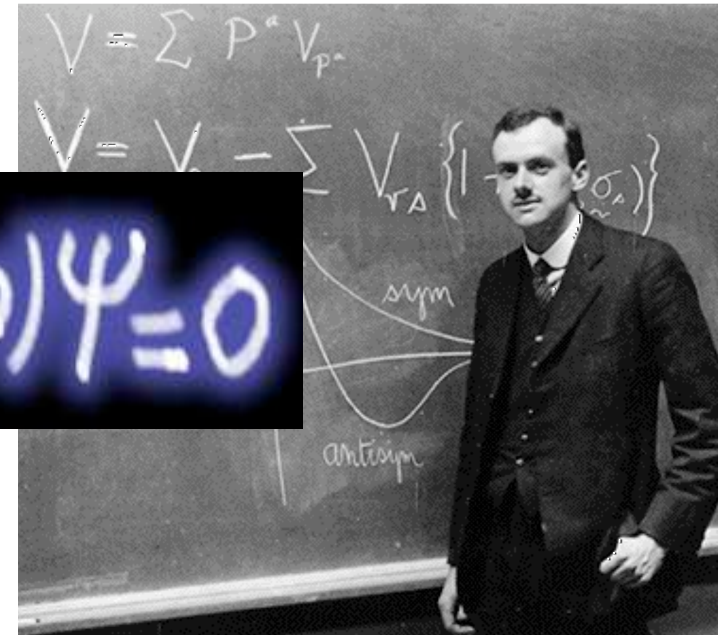


# Un drôle de monde

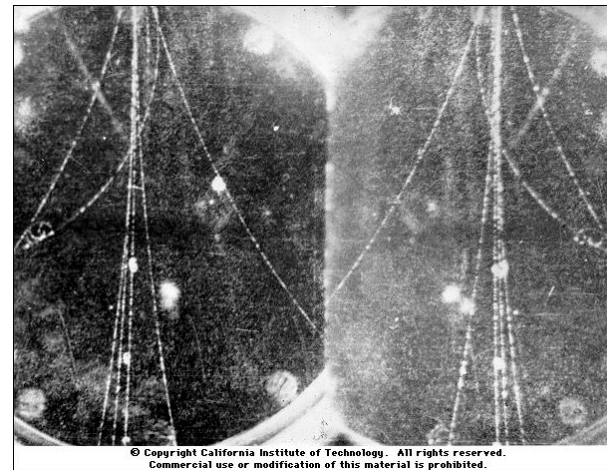
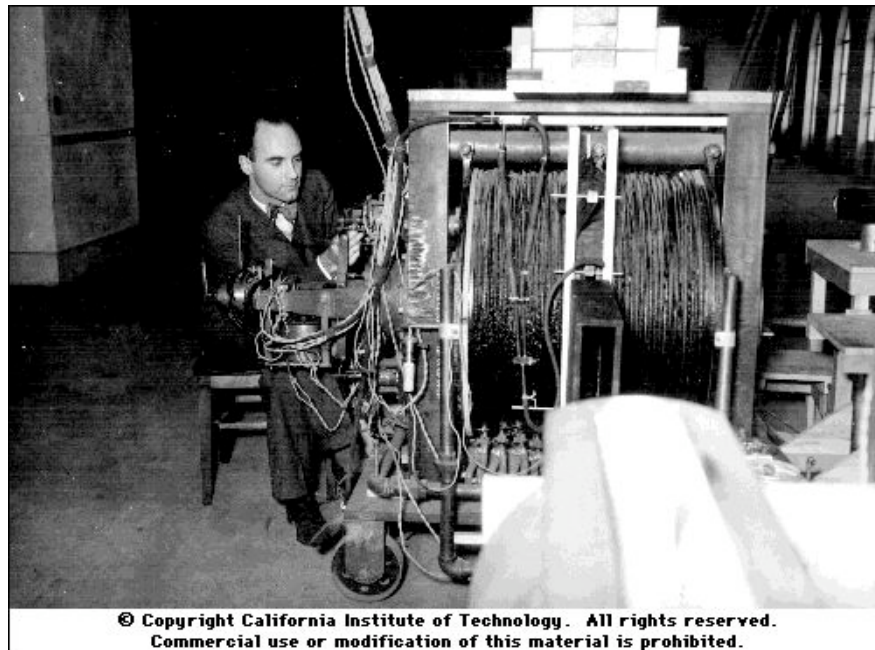
À la recherche de l'origine du spin de l'électron, Dirac trouve une dualité étrange de la nature ...

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

Dirac (1928)



... et Anderson observe pour la première fois une antiparticule (sans le savoir)



Anderson (1933)

# Où est l'antimatière ?

ou: pourquoi existons nous ?

If we accept the view of complete symmetry between positive and negative electric charge so far as concerns the fundamental laws of Nature, we must regard it rather as an accident that the Earth (and presumably the whole solar system), contains a preponderance of negative electrons and positive protons. It is quite possible that for some of the stars it is the other way about, these stars being built up mainly of positrons and negative protons. In fact, there may be half the stars of each kind. The two kinds of stars would both show exactly the same spectra, and there would be no way of distinguishing them by present astronomical methods.

Dirac (1933), Nobel lecture



$$\beta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} \approx 3 \times 10^{-10}$$

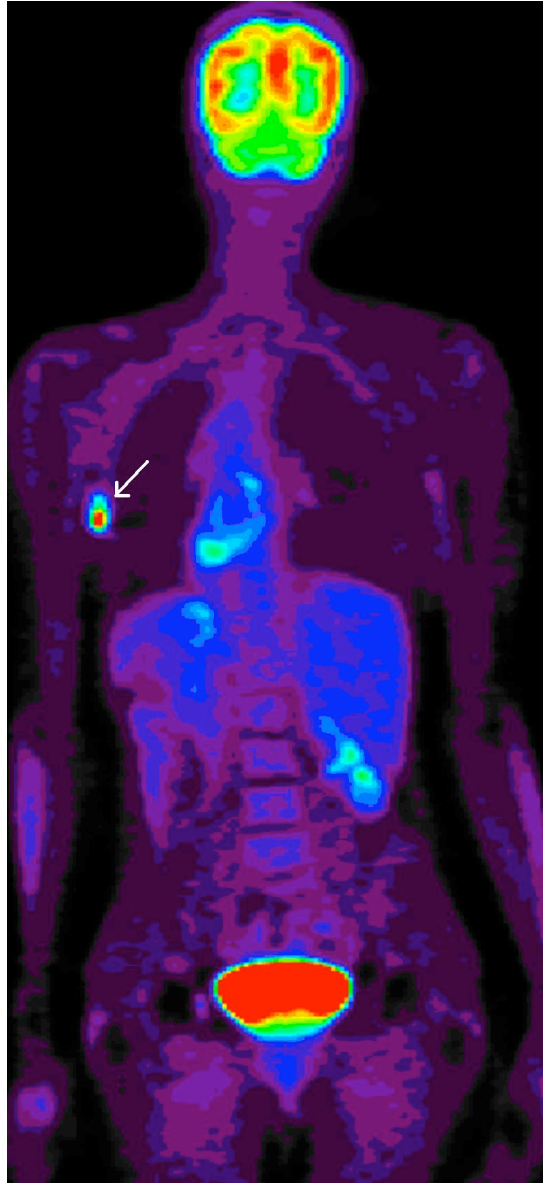


Sakharov (1967)

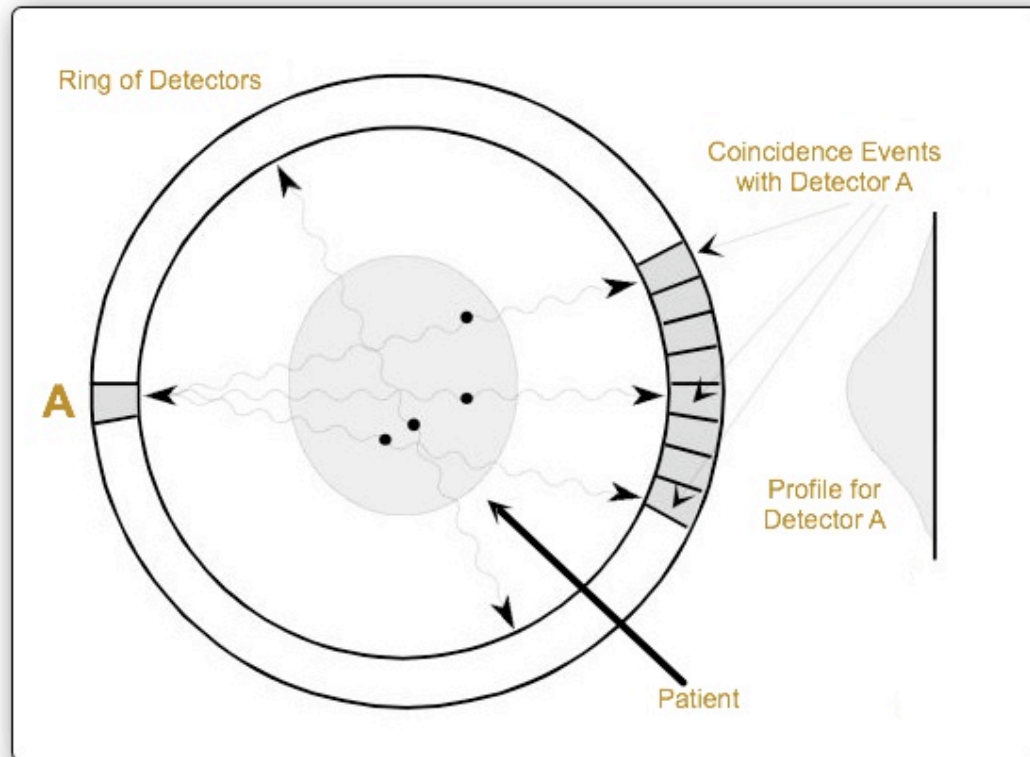
Les conditions de la baryogenèse:

1. Différence entre les interactions des particules et des antiparticules  
(violation CP observée dans mésons K et B)
2. Non-conservation de la charge baryonique B
3. Déséquilibre thermique dans l'Univers jeune

# L'antimatière est en nous !

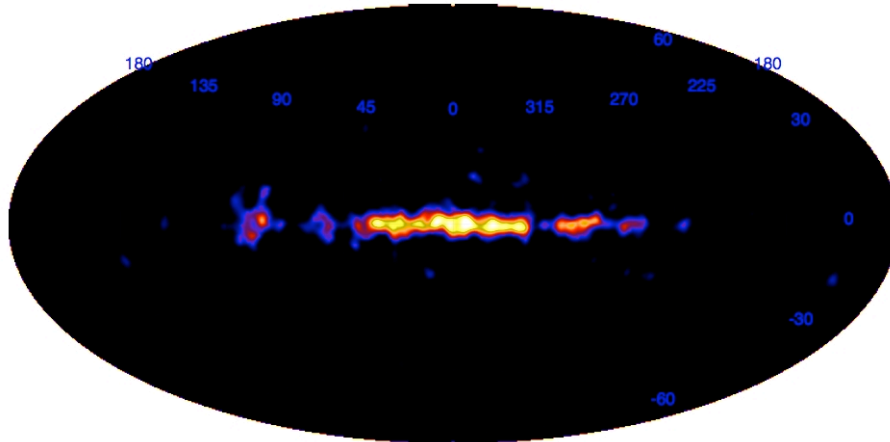


PET ou TEP (Tomographie par émission de positrons):  
Imagerie de la raie d'annihilation à 511 keV,  
produite par **radioisotopes** (e.x.  $^{18}\text{F}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$ ,  $^{15}\text{O}$ )



# Radioactivités cosmiques

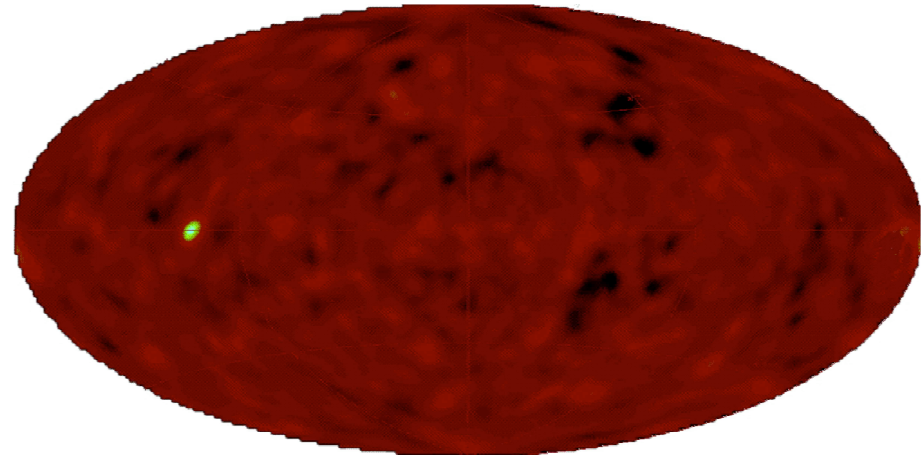
$^{26}\text{Al}$  ( $\tau \sim 10^6$  ans)



*Knödlseeder (1997)*

3 masses solaires  $^{26}\text{Al}$  par Myr  
 $\Rightarrow 3 \times 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1}$





$^{44}\text{Ti}$  ( $\tau \sim 87$  ans)



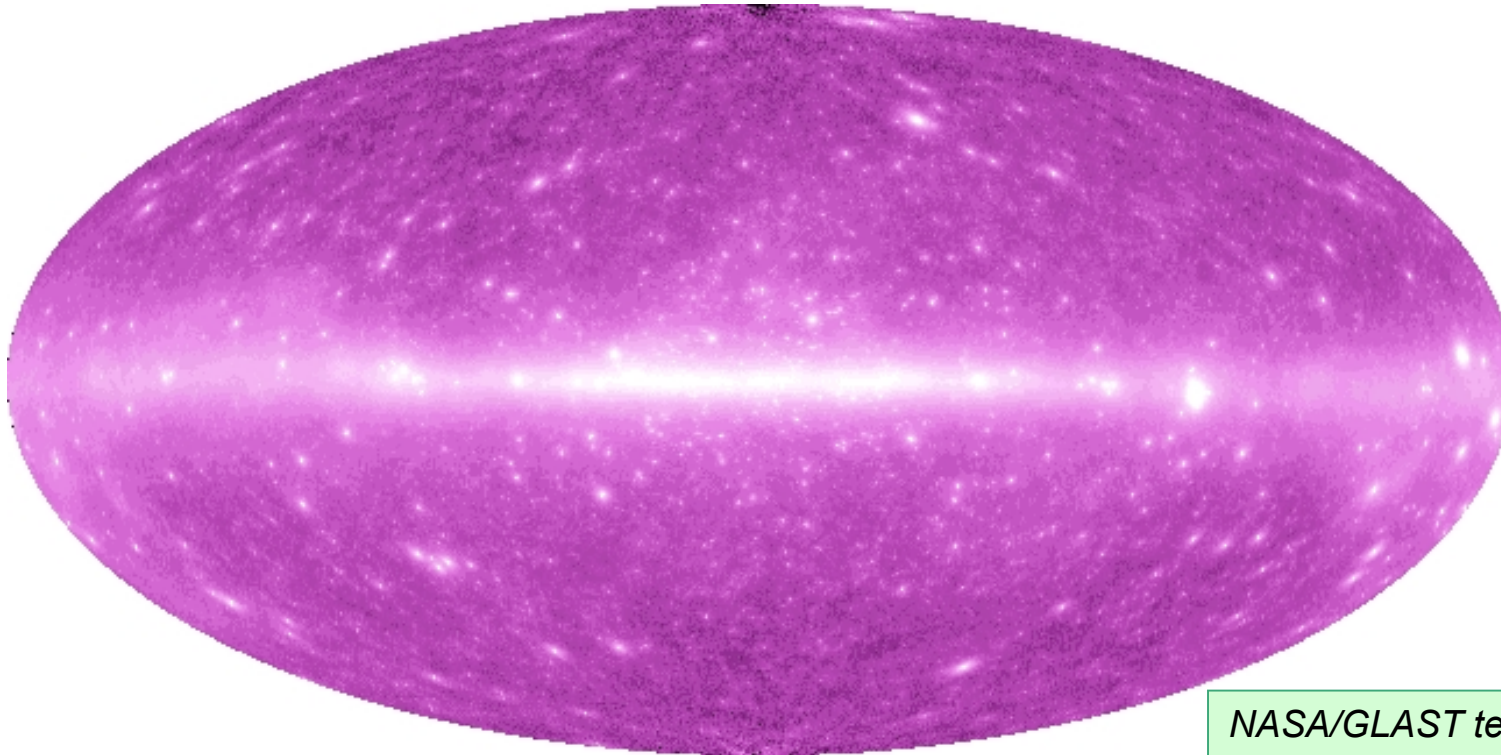
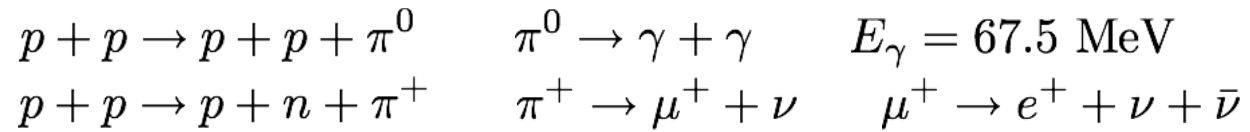
*Collmar (priv. comm.)*

$10^{-4}$  masses solaires  $^{44}\text{Ti}$  par 100 ans  
 $\Rightarrow 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1}$

Sources (potentiels) de radioactivités cosmiques (galactiques):

-  Supernovae (de tout type), Hypernovae (sursauts gamma)
-  Etoiles massives, géantes rouges
-  Novae
-  Sursauts solaires




# Accélérateurs cosmiques



NASA/GLAST team

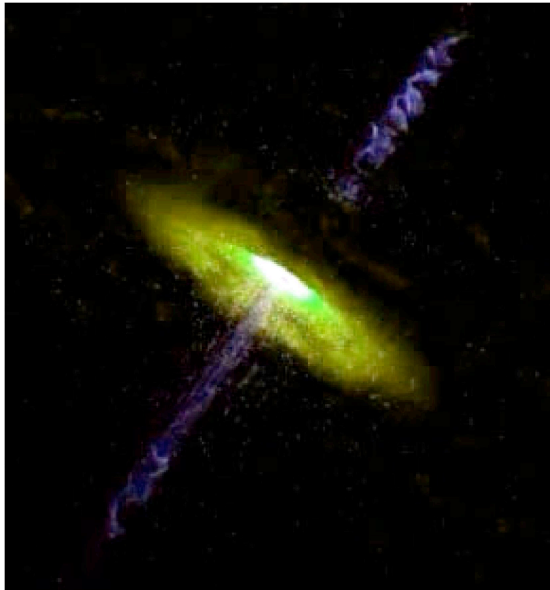
taux de production  $\pi^0$  et  $\pi^+ \approx 10^{42} \text{ s}^{-1}$   
 $\Rightarrow 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1}$

Sources (potentiels) :




-  La Galaxie
-  Restes de supernovae
-  Sursauts solaires

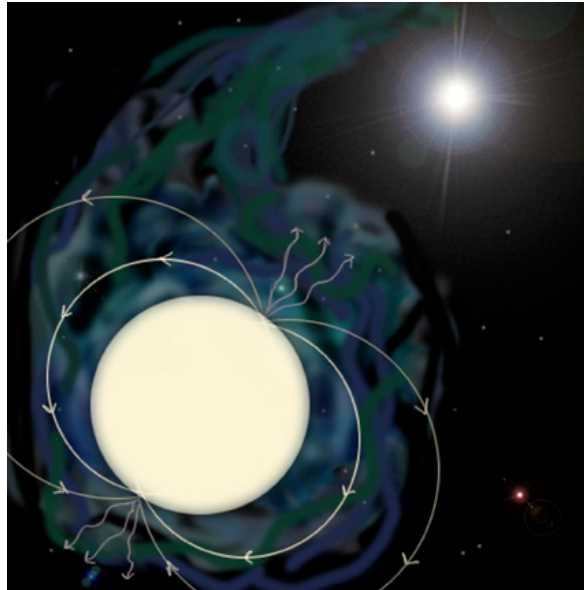
# ... et les positrons furent

$$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$$



Systèmes binaires:

-  Micro-quasars
-  LMXB
-  HMXB



Etoiles à neutrons:

-  Pulsars

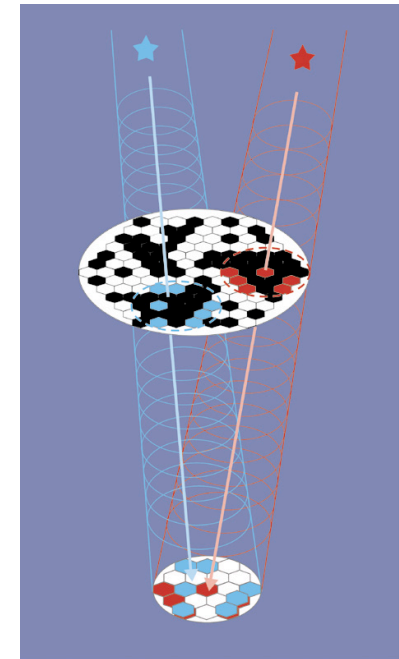
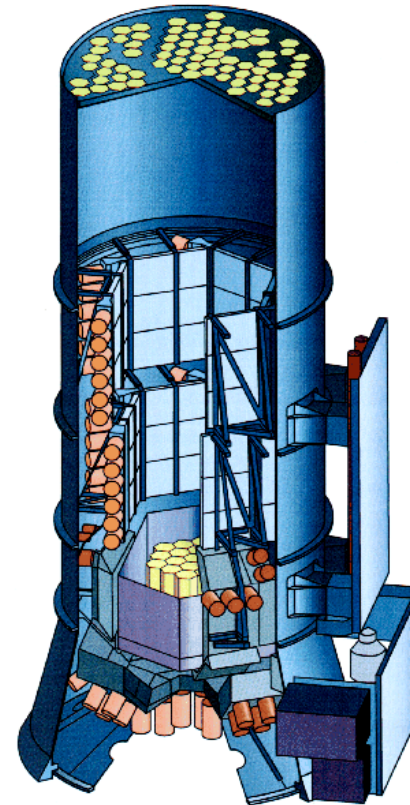


Trous noirs:

-  Centre galactique
-  NAG

# Le télescope SPI sur l'observatoire INTEGRAL

Lancement d'INTEGRAL en octobre 2002



19 détecteurs en Germanium refroidi  $\Rightarrow \Delta E \approx 2 \text{ keV @ } 511 \text{ keV}$

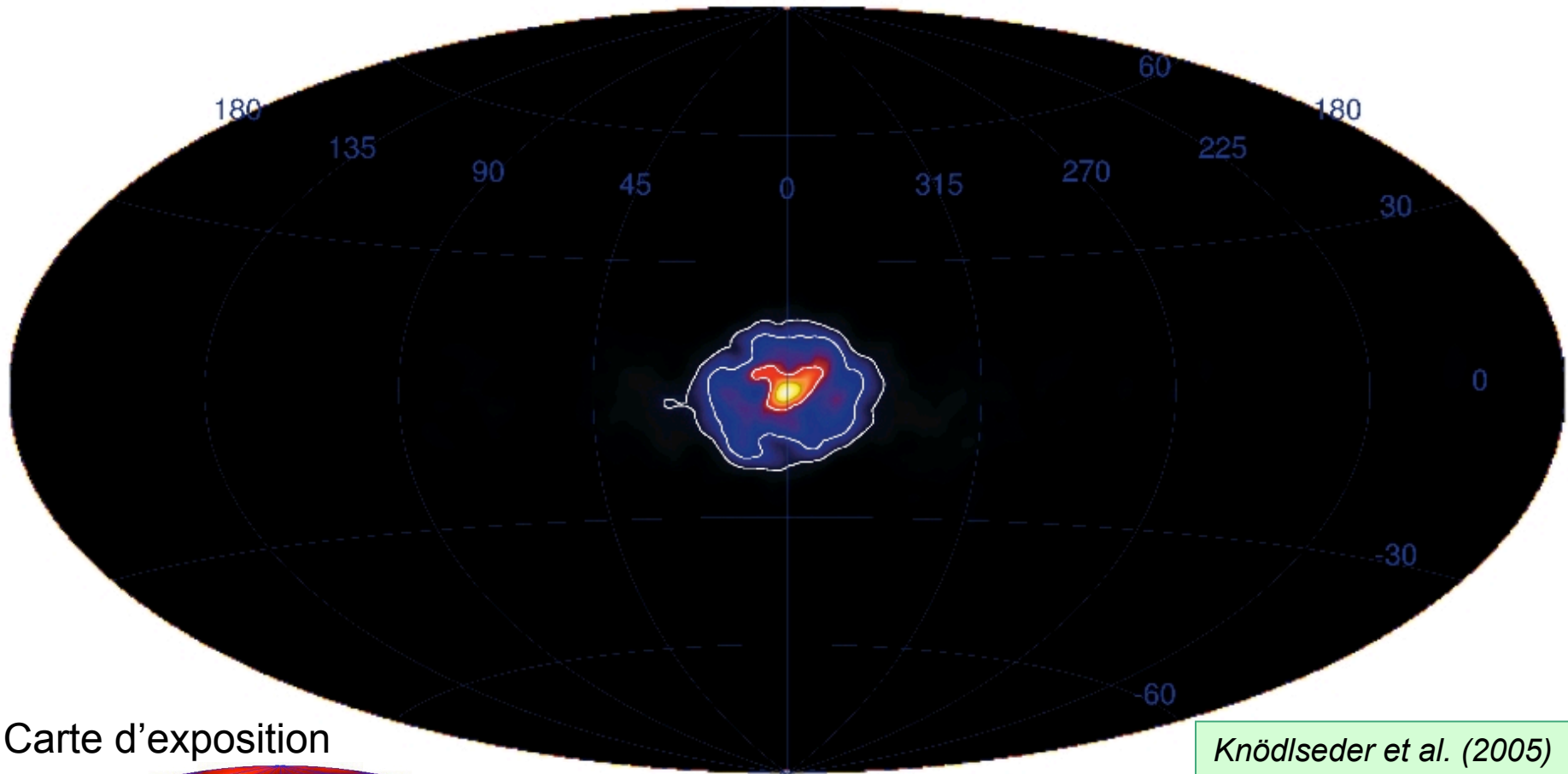
$A_{\text{geo}} \approx 500 \text{ cm}^2 \Rightarrow \Phi_{3\sigma} \geq 5 \times 10^{-5} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1} (1 \text{ Ms})$

Resolution angulaire  $\approx 3 \text{ deg}$

Première spectro-imagerie de l'annihilation des positrons !

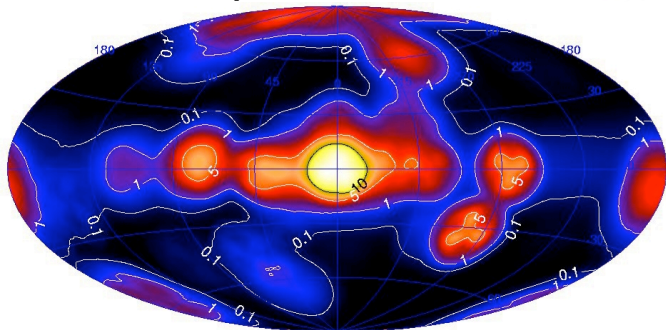


# SPI dévoile le ciel à 511 keV



Carte d'exposition

*Knödlseeder et al. (2005)*

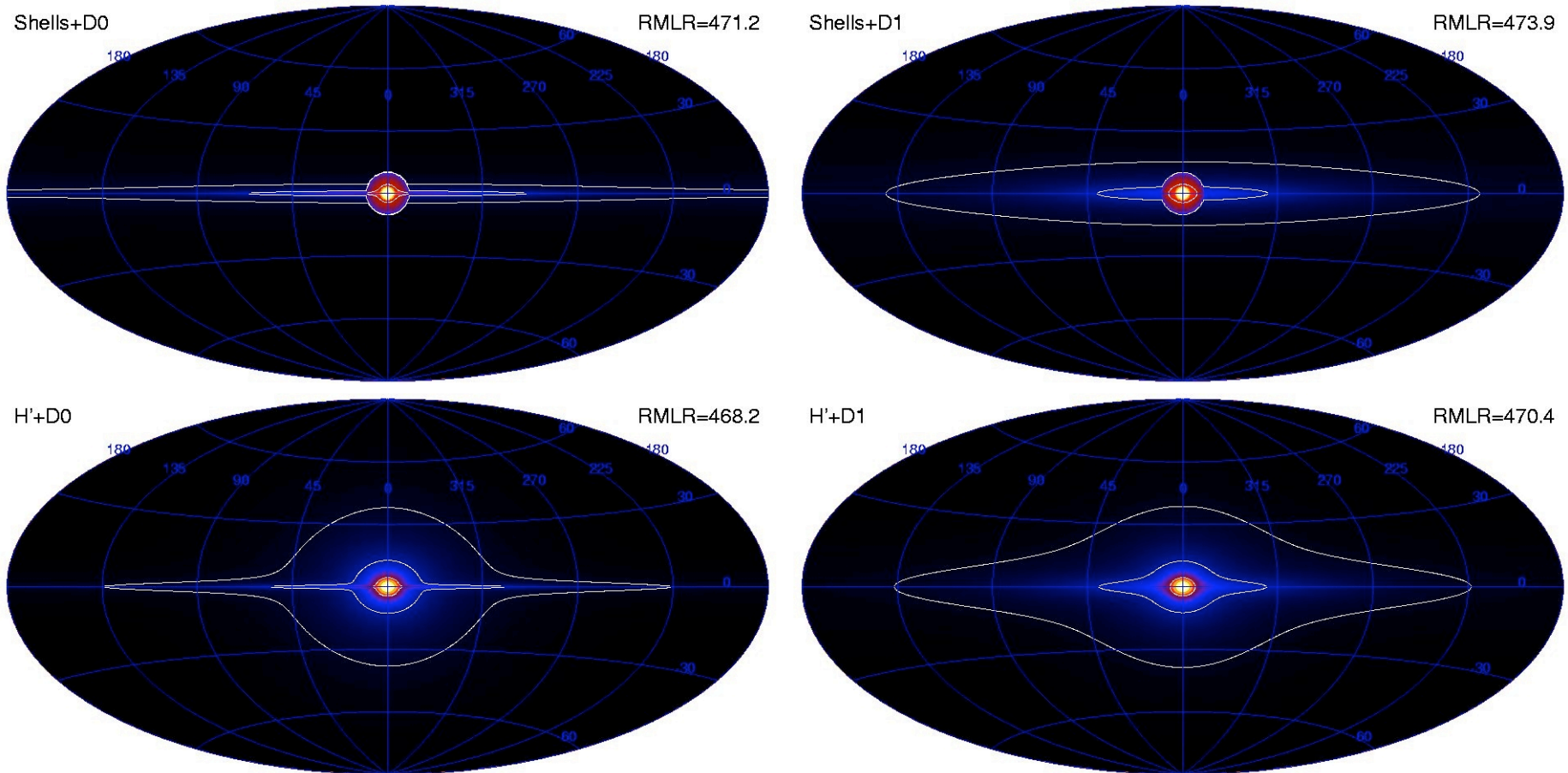


Un an d'observations INTEGRAL

- Emission sphérique, concentre vers le CG
- Absence du disque

# Voir l'invisible ...

Ajustement de modèles de distributions 511 keV aux données

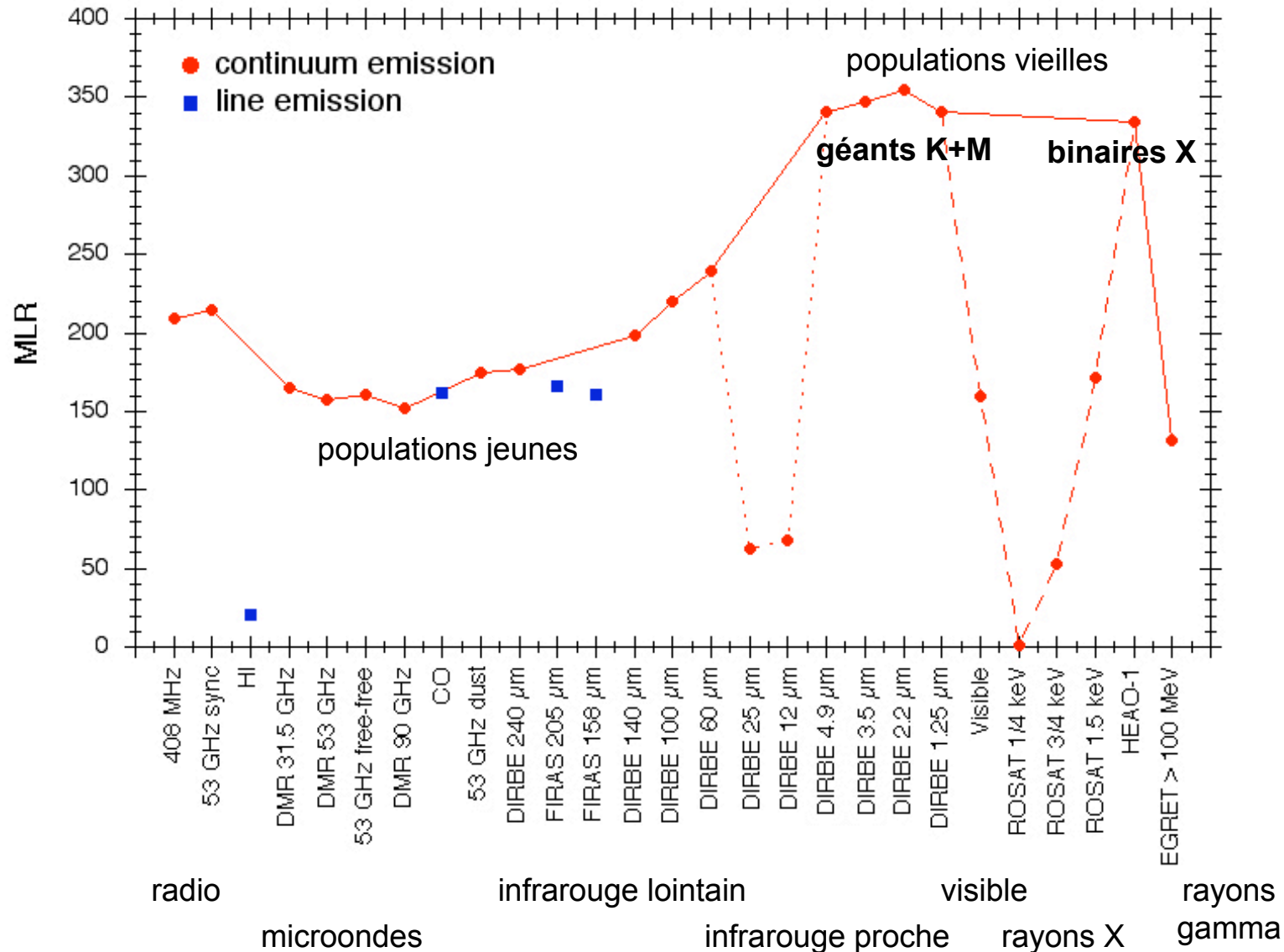


$$\begin{aligned}L_{\text{total}} &= (17.0 - 23.1) \times 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1} \\L_{\text{spheroid}} &= (13.9 - 19.8) \times 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1} \\L_{\text{disque}} &= (1.5 - 5.1) \times 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1}\end{aligned}$$

$$\frac{L_{\text{spheroid}}}{L_{\text{disque}}} \approx 3 - 9$$

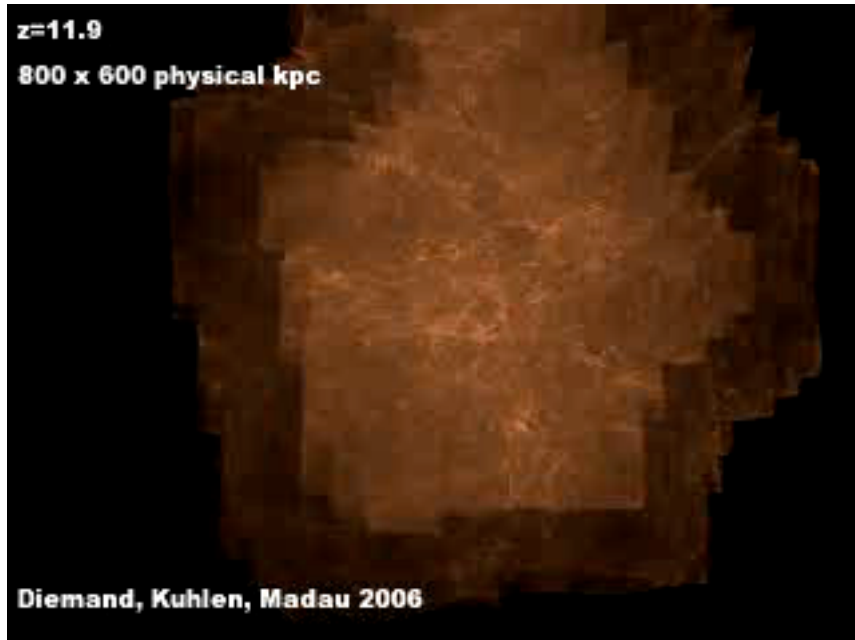
# A quoi ressemble le ciel 511 keV ?

Ajustement de cartes du ciel multi-longueurs d'onde 511 keV aux données

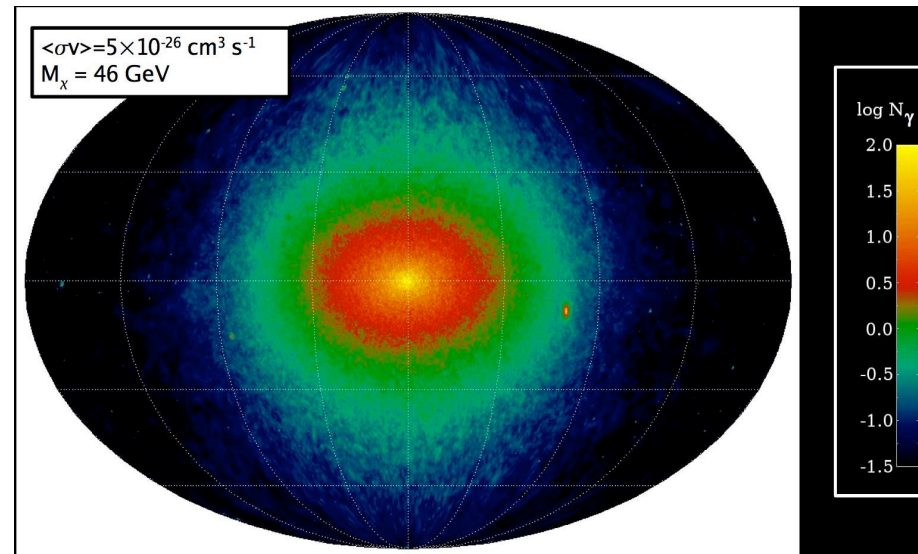


# Et si c'était vrai ...

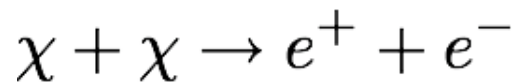
La matière noire pourrait avoir la bonne distribution spatiale



Diemand et al. (2006)



Kuhlen et al. (2007)



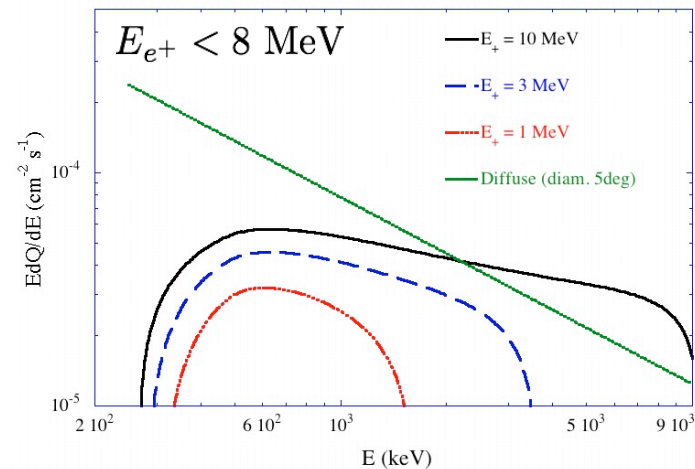
Annihilation de WIMPs (p.e. Neutralinos):

Avec  $m_\chi \sim 0.1 - 1 \text{ TeV}$  d'autres canaux d'annihilation deviennent possible:

$\chi + \chi \rightarrow W^+ + W^-$ ,  $\chi + \chi \rightarrow Z + Z \dots$

**Emission HE non-observé !**

Annihilation en vol



# Et si c'était plus léger ?

La matière noire légère - une alternative

Pour la matière noire bosonique, la densité relique n'impose pas de contrainte sur la masse des particules  $\Rightarrow m_\chi < 100 \text{ MeV}$  permis !

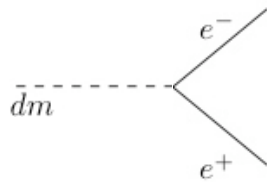
*Boehm et al. (2004)*

Contraints par la morphologie:

$$\rho_{\text{dm}}(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_0)^\gamma [1 + (r/r_0)^\alpha]^{(\beta-\gamma)/\alpha}}$$

MW	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$r_0$ (kpc)	$\rho_0$ (GeV cm <sup>-3</sup> )
ISO	2	2	0	4.0	1.655
BE	1	3	0.3	10.2	1.459
NFW	1	3	1	16.7	0.347
M99	1.5	3	1.5	29.5	0.0536

1. Décroissance:  $R_{e^+}(r) = \Gamma_d \times \rho_{\text{dm}}(r)$

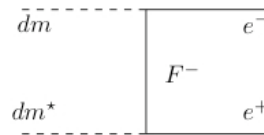


*Ascasibar et al. (2006)*

2. Annihilation:  $R_{e^+}(r) = \langle \sigma v \rangle \times \rho_{\text{dm}}^2(r)$

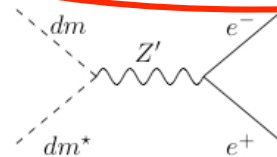
Seul le profil NFW avec un échange fermionique ( $b \sim 0$ ) est compatible avec les données INTEGRAL.

2.1. échange fermionique



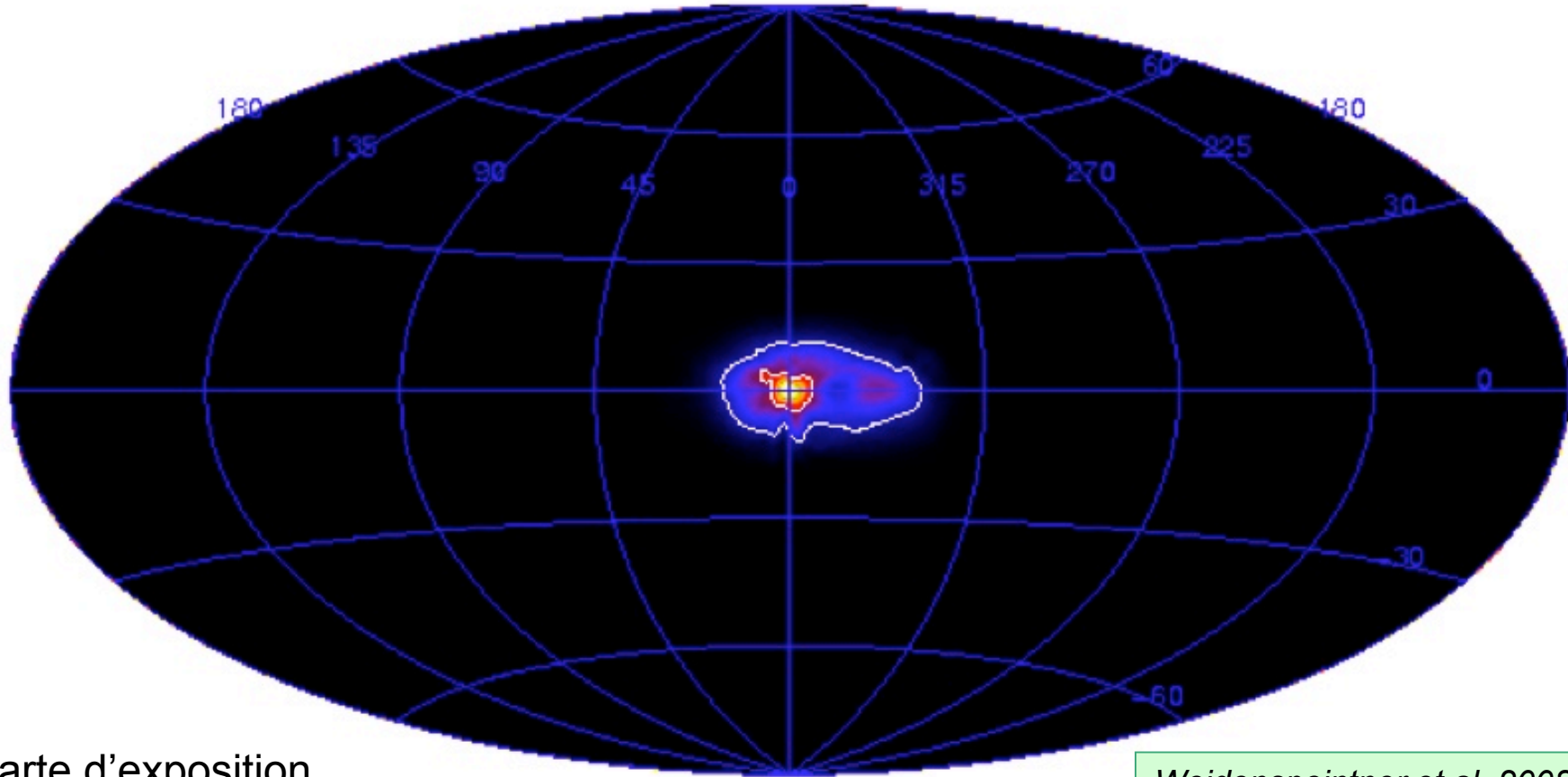
$$\langle \sigma v \rangle = a + bv^2$$

2.2. échange bosonique

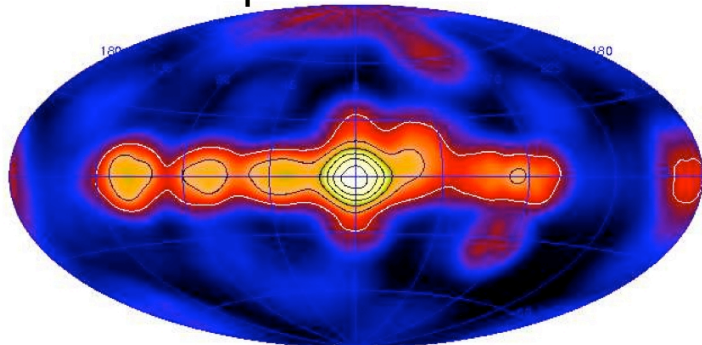


$$\langle \sigma v \rangle = bv^2$$

# Enfin le disque ... mais quel disque !



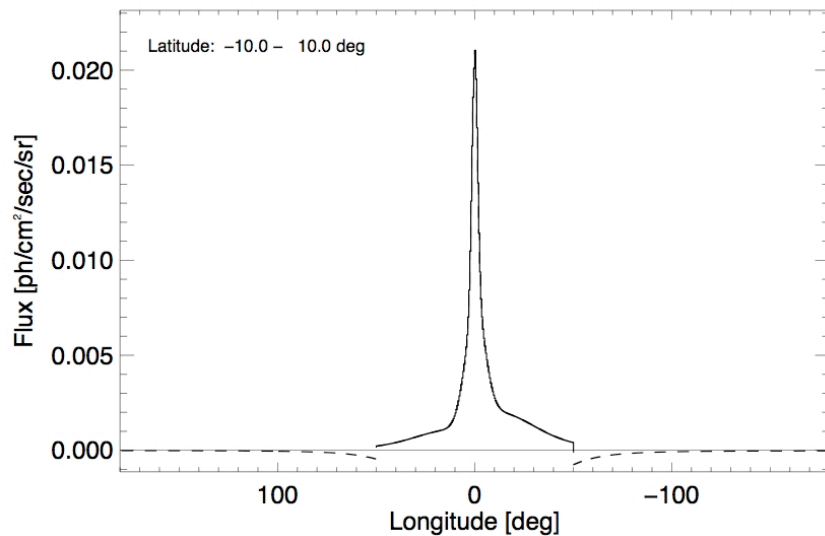
Carte d'exposition



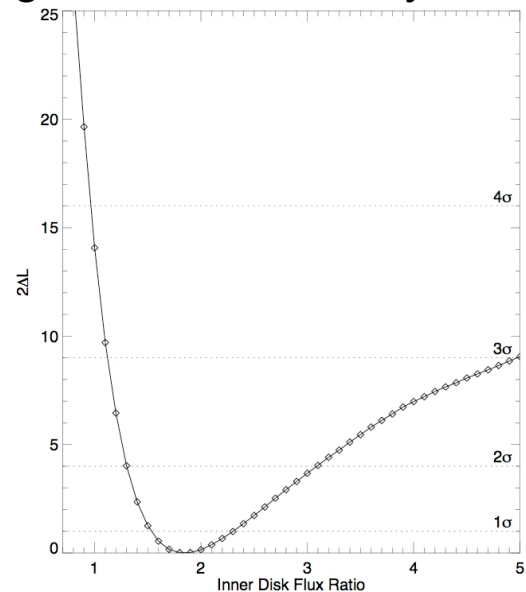
*Weidenspointner et al. 2008*

# Est-ce bien raisonnable ?

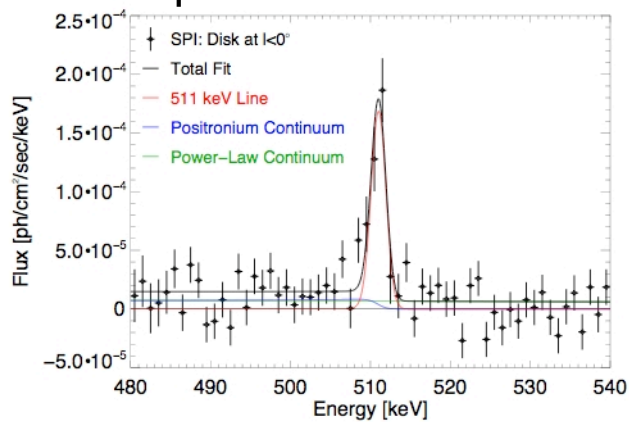
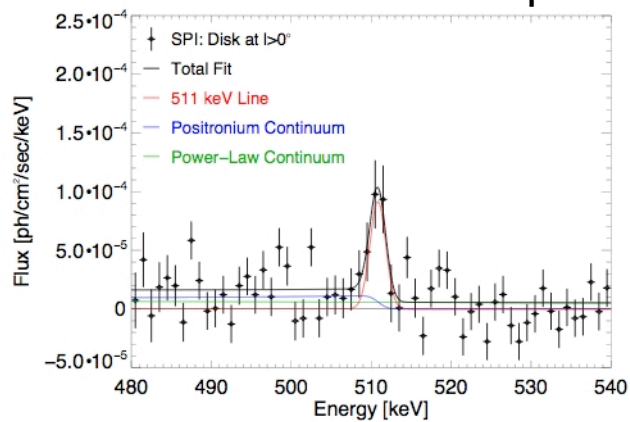
## Profil en longitude galactique



## Significativité de l'asymétrie

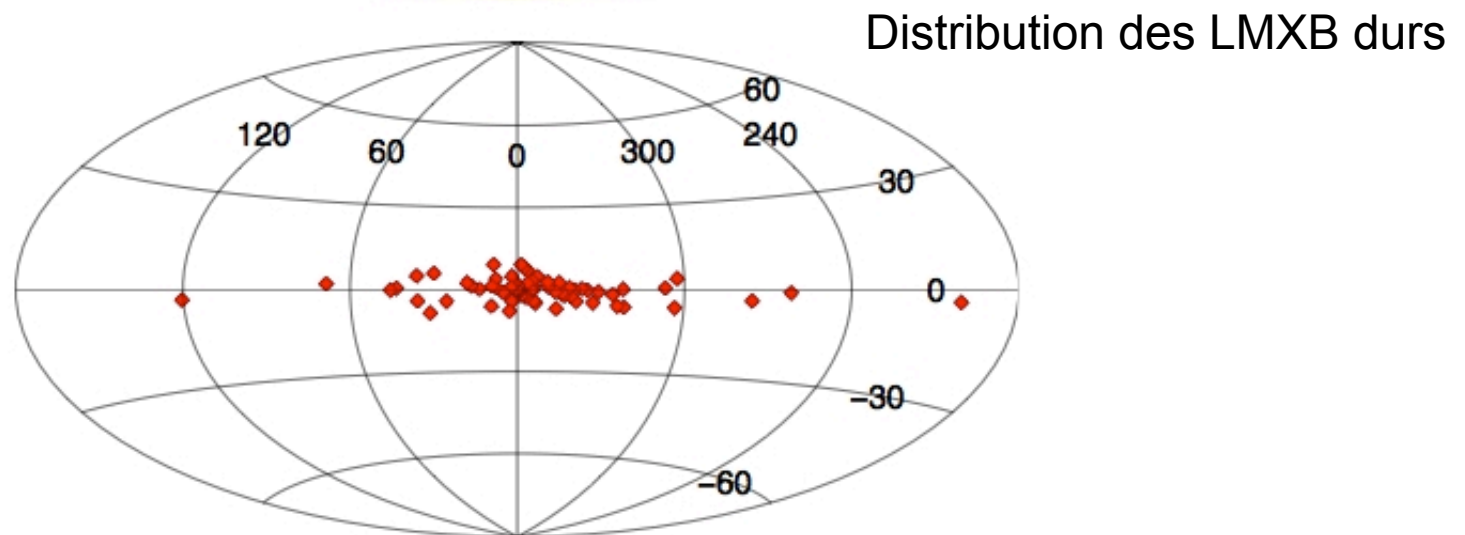
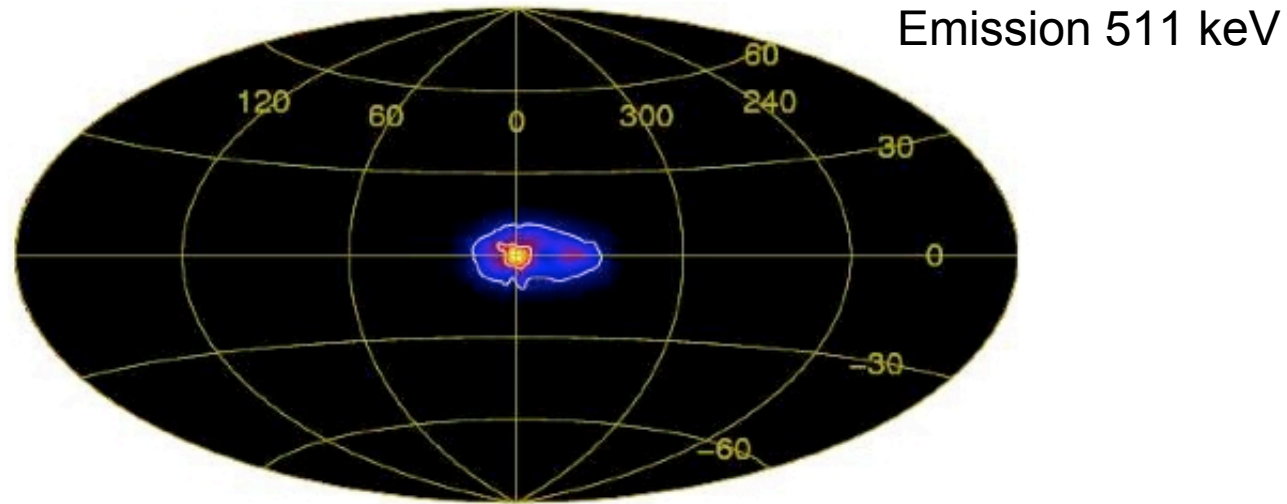


## Spectres du disque



Weidenspointner et al. 2008

# A quoi ressemble ce disque ?



*Weidenspointner et al. 2008*



# LMXB, la source des positrons ?



Positrons produits dans les régions centrales chaudes du disque d'accrétion via  $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$

Ejection des positrons dans le MIS via jets ou vents

Taux de production  $e^+$  mal contrainte :

$$R_{e^+} \sim 10^{41} e^+ s^{-1} \quad \Rightarrow \quad \sim 1\% L_{X\text{-dur}}$$

$$E_{e^+} \leq 1 \text{ MeV} \quad \Rightarrow \quad \Phi_{\text{LMXB}} \sim 10^{-5} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ at } d = 8.5 \text{ kpc}$$

Nombre :

71 LMXB durs dans catalogue IBIS

100  $\mu$ quasars estimés pour la Galaxie (Paredes 2005)

$$R_{e^+} \approx 10^{43} e^+ s^{-1} \quad \text{😊} \quad L_{\text{spheroid}} = (13.9 - 19.8) \times 10^{42} e^+ s^{-1}$$

$$L_{\text{disque}} = (1.5 - 5.1) \times 10^{42} e^+ s^{-1}$$

Morphologie:

$$\frac{N_{\text{spheroid}}}{N_{\text{disque}}} \sim 0.9$$

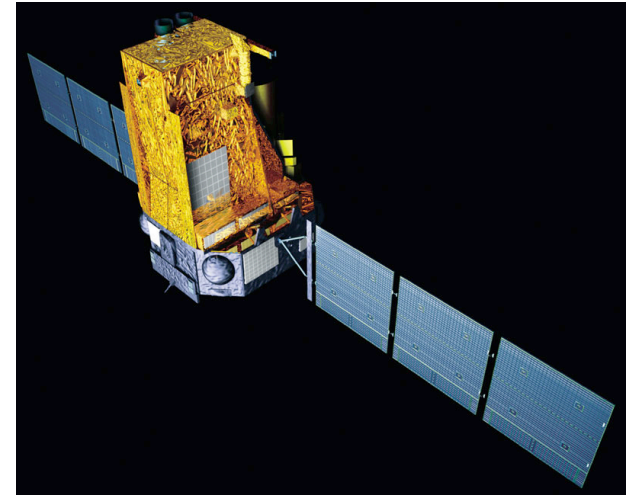
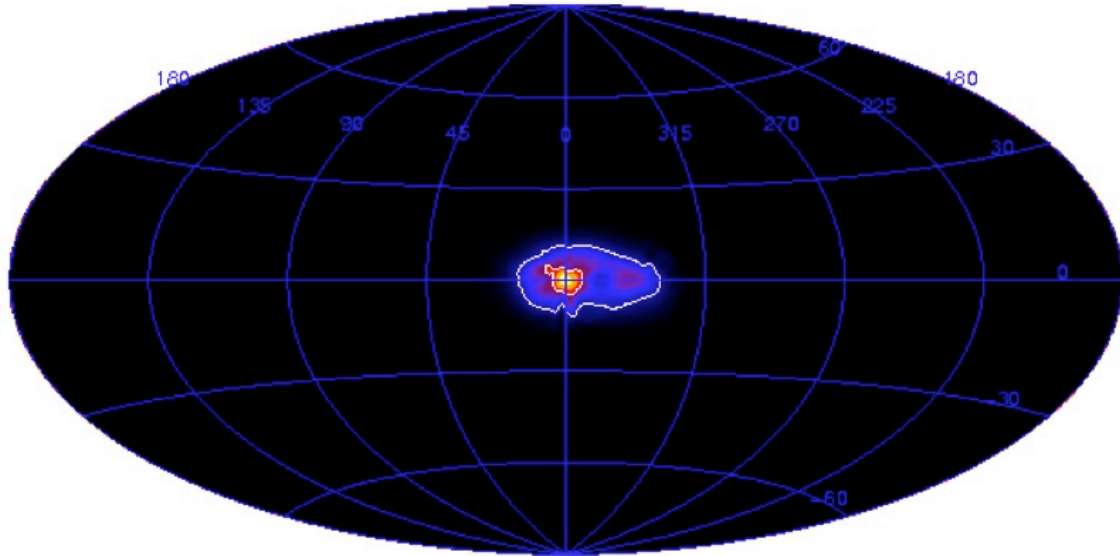


$$\frac{L_{\text{spheroid}}}{L_{\text{disque}}} \approx 3 - 9$$

LMXB peuvent aisement expliquer l'émission du disque !

LMXB peuvent expliquer  $\sim 30\%$  de l'émission du sphéroïde; une autre source de positrons semble indispensable !

# Conclusions



Le satellite INTEGRAL dévoile l'annihilation de l'antimatière dans notre Galaxie

Annihilation de 9 milliards de tonnes de positrons par seconde au centre de la Voie Lactée

Origine des positrons incertain (LMXB plausible pour émission du disque)

Objectif : Observation de la raie 511 keV dans un objet individuel (binaire X, SNR, pulsar, ...)