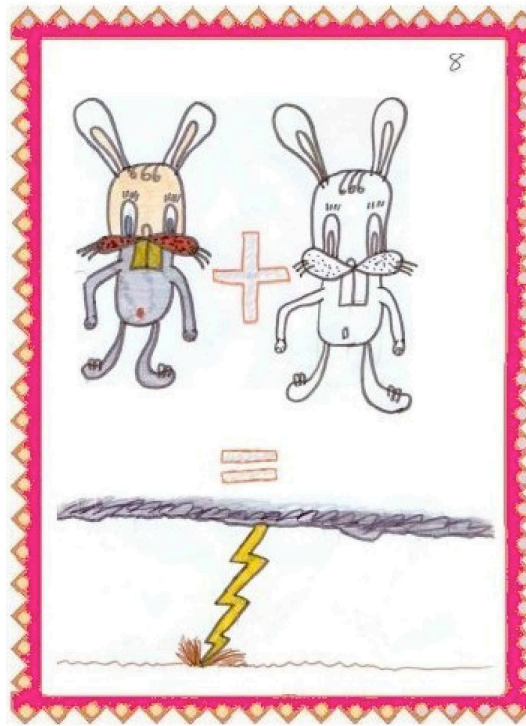


L'antimatière dans notre Galaxie dévoilé par INTEGRAL



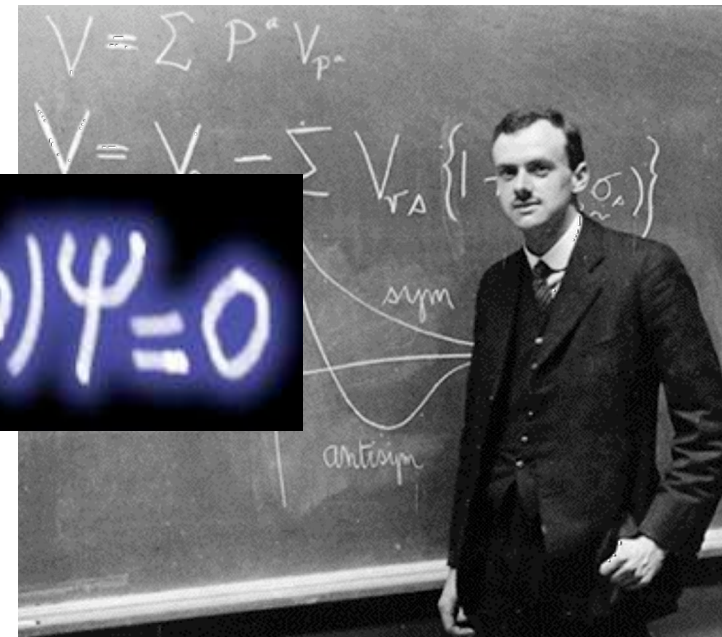
Jürgen Knödseder
CESR (Toulouse)

Un drôle de monde

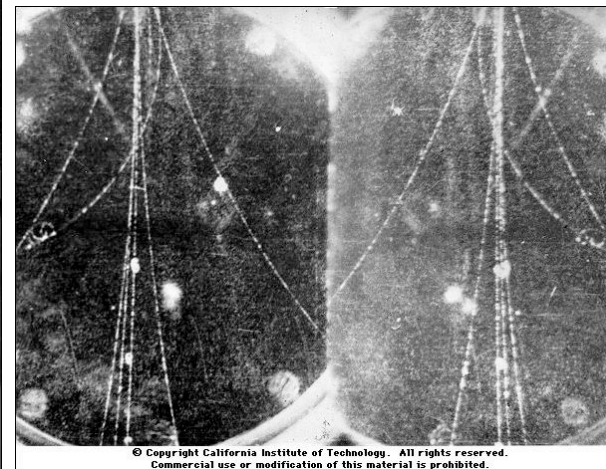
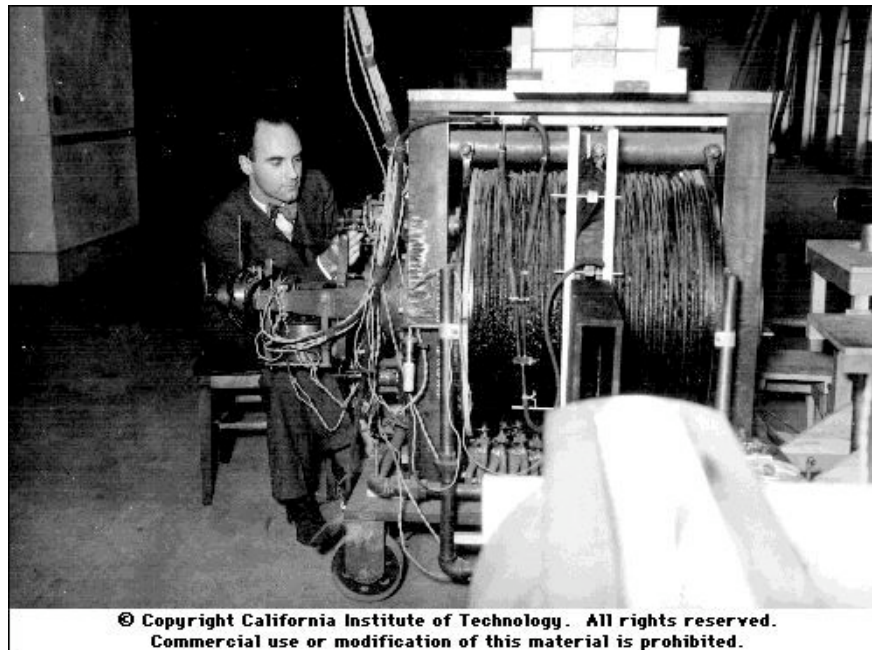
À la recherche de l'origine du spin de l'électron, Dirac trouve une dualité étrange de la nature ...

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

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



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

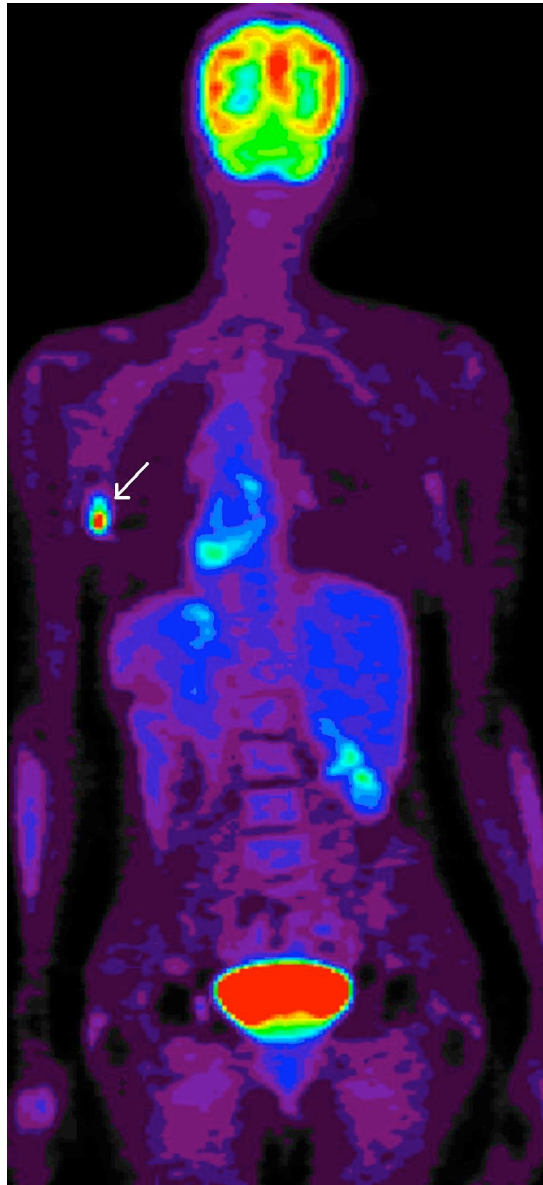


Sakharov (1967)

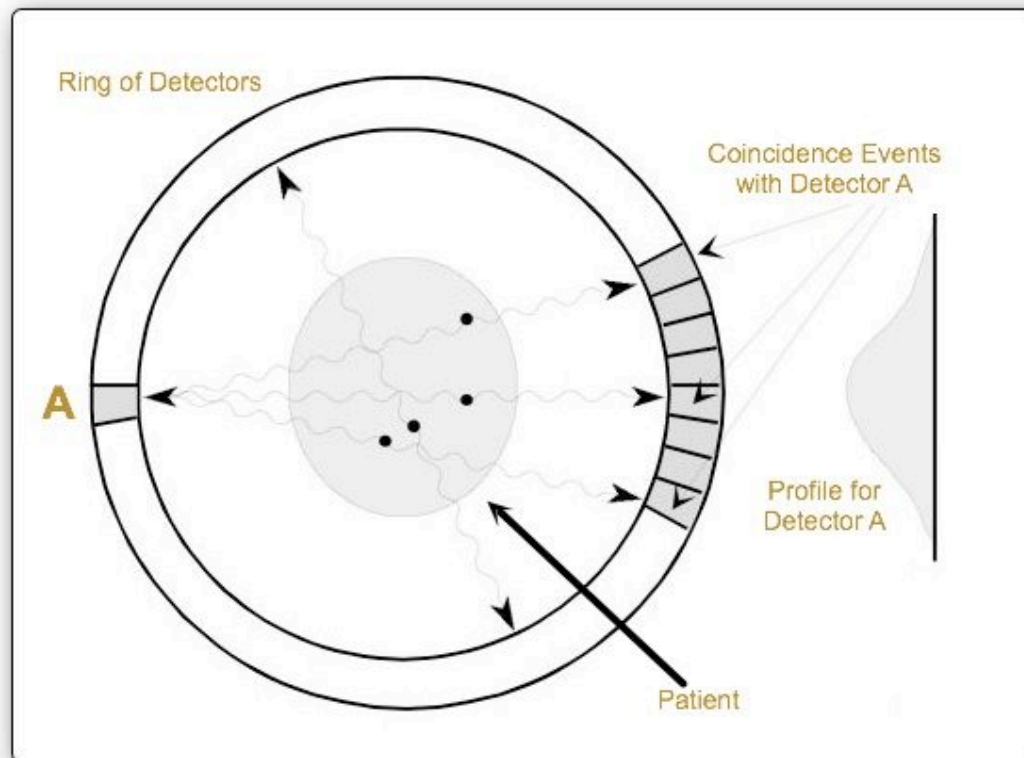
Les conditions de la baryogenèse:

1. Difference 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 !

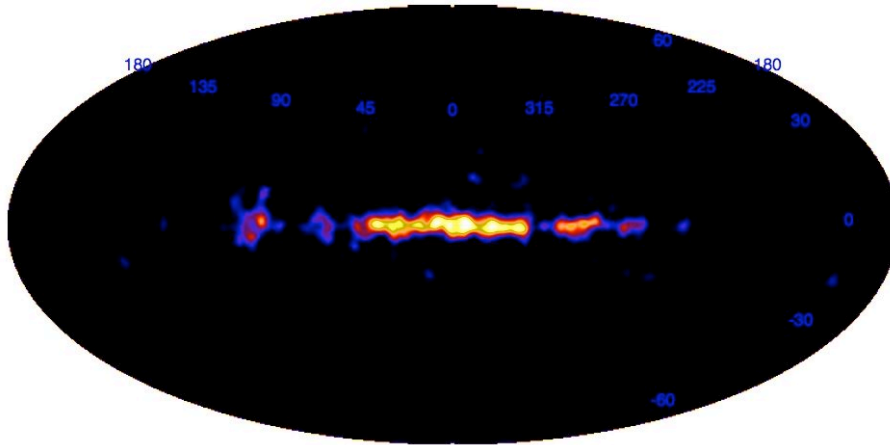


PET ou TEP (Tomographie par émission de positrons):
Imagerie de la raie d'annihilation à 511 keV,
produite par **radioisotopes** (e.x. ^{18}F , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O)



Radioactivités cosmiques

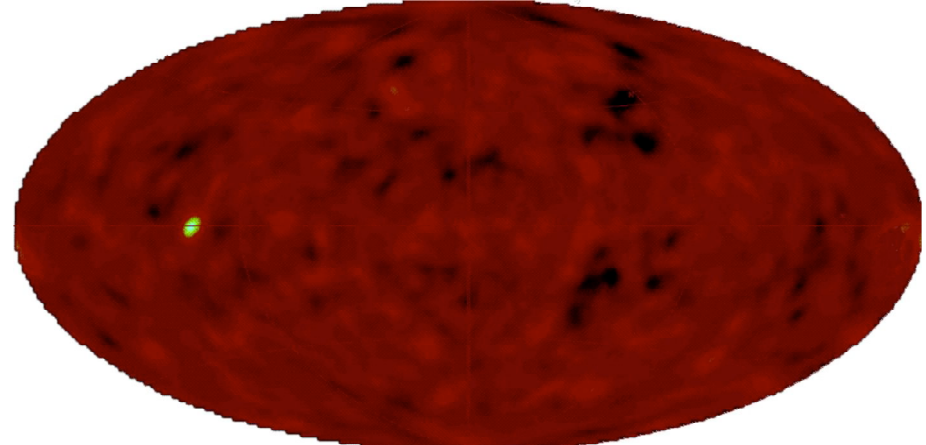
^{26}Al ($\tau \sim 10^6$ ans)



Knödlseider (1997)

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

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



Collmar (priv. comm.)

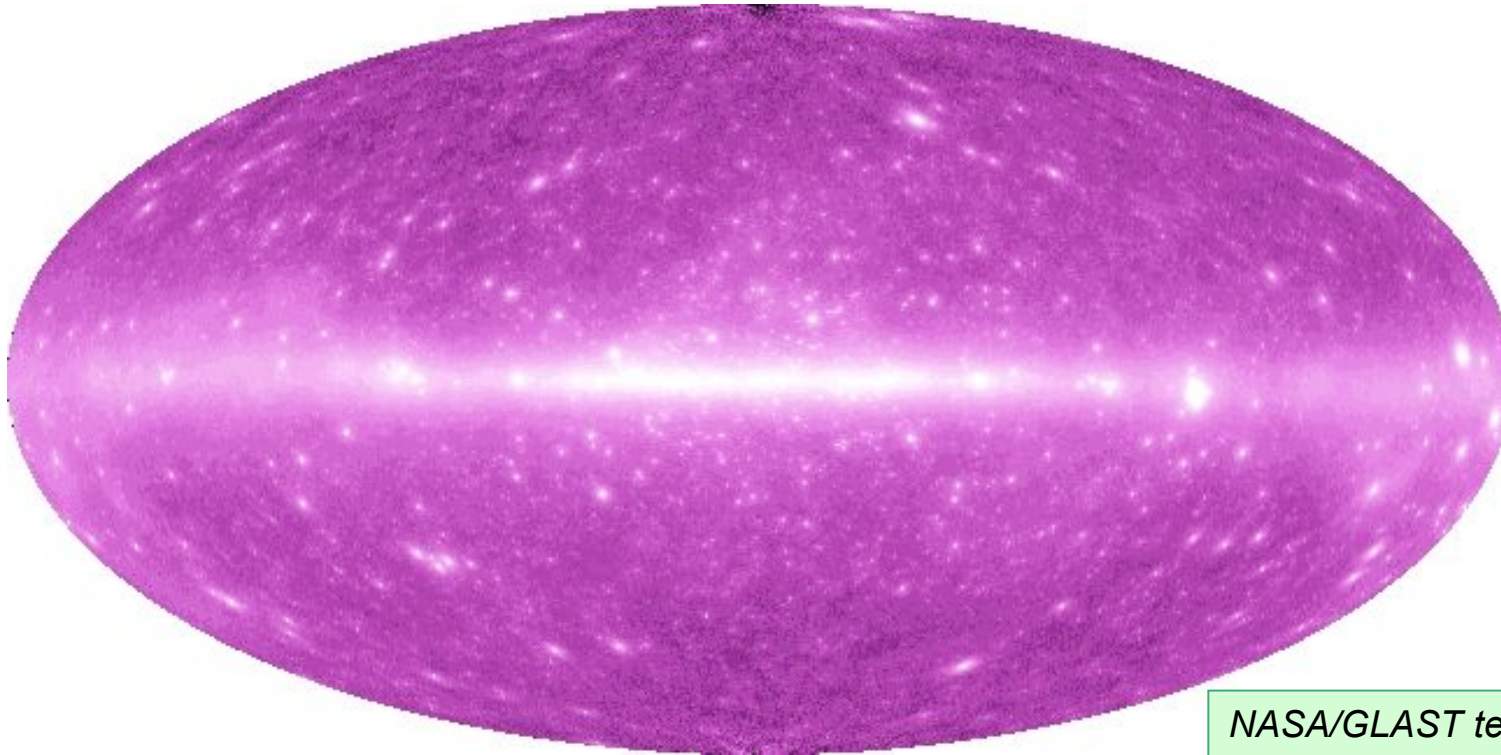
10^{-4} masses solaires ^{44}Ti par 100 ans
 $\Rightarrow 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1}$

Sources (potentiels) de radioactivités cosmiques (galactiques):

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

Accélérateurs cosmiques

$$\begin{array}{lll} p + p \rightarrow p + p + \pi^0 & \pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma & E_\gamma = 67.5 \text{ MeV} \\ p + p \rightarrow p + n + \pi^+ & \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu & \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} \end{array}$$



NASA/GLAST team

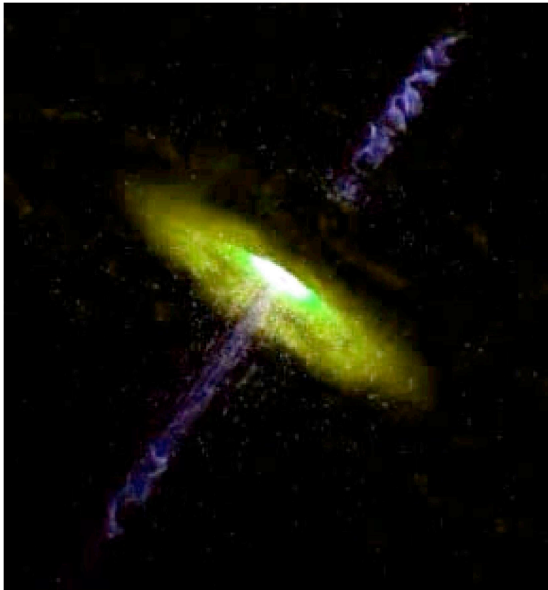
taux de production π^0 et $\pi^+ \approx 10^{42} \text{ s}^{-1}$
 $\Rightarrow 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1}$

Sources (potentiels) :

-  La Galaxie
-  Restes de supernovae
-  Sursauts solaires

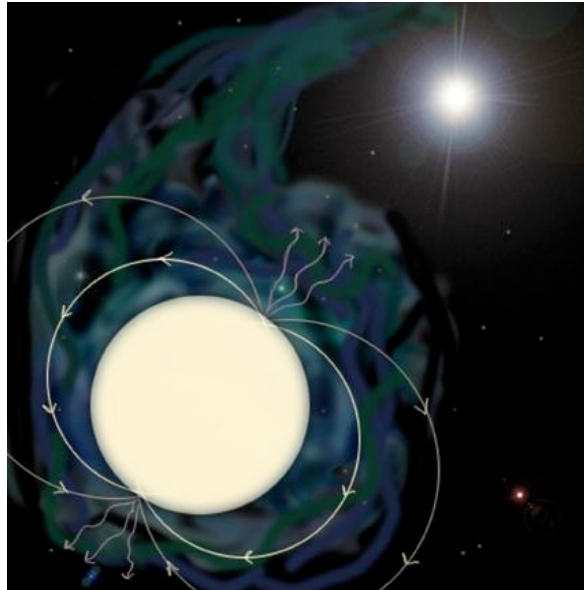
... et les positrons furent

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



Systèmes binaires:

-  Micro-quasars
-  LMXB
-  HMXB



Etoiles à neutrons:

-  Pulsars

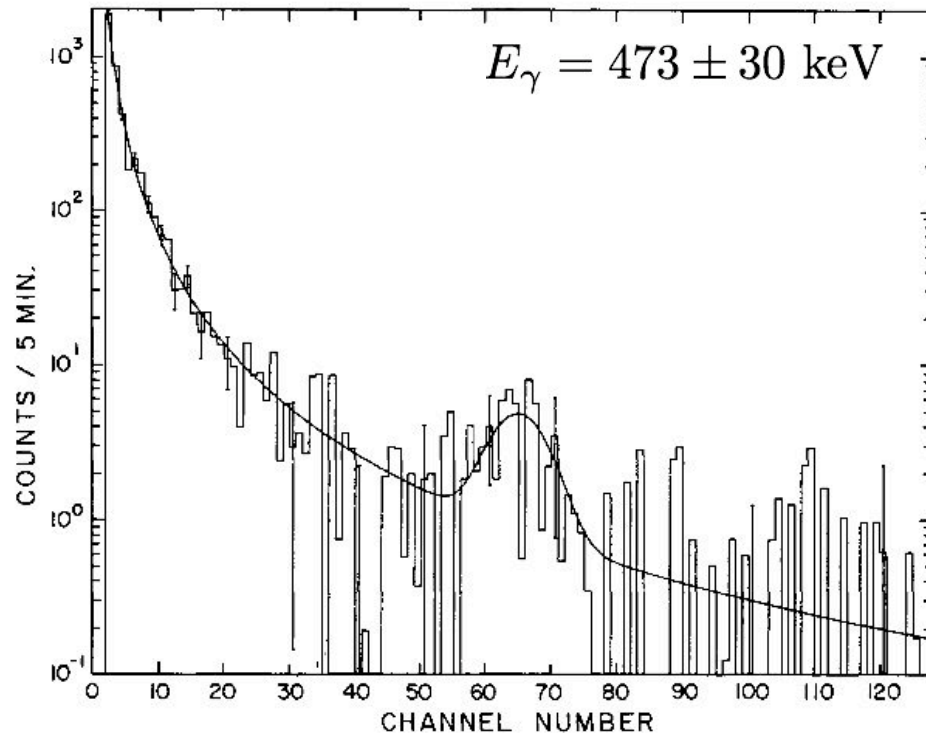


Trous noirs:

-  Centre galactique
-  NAG

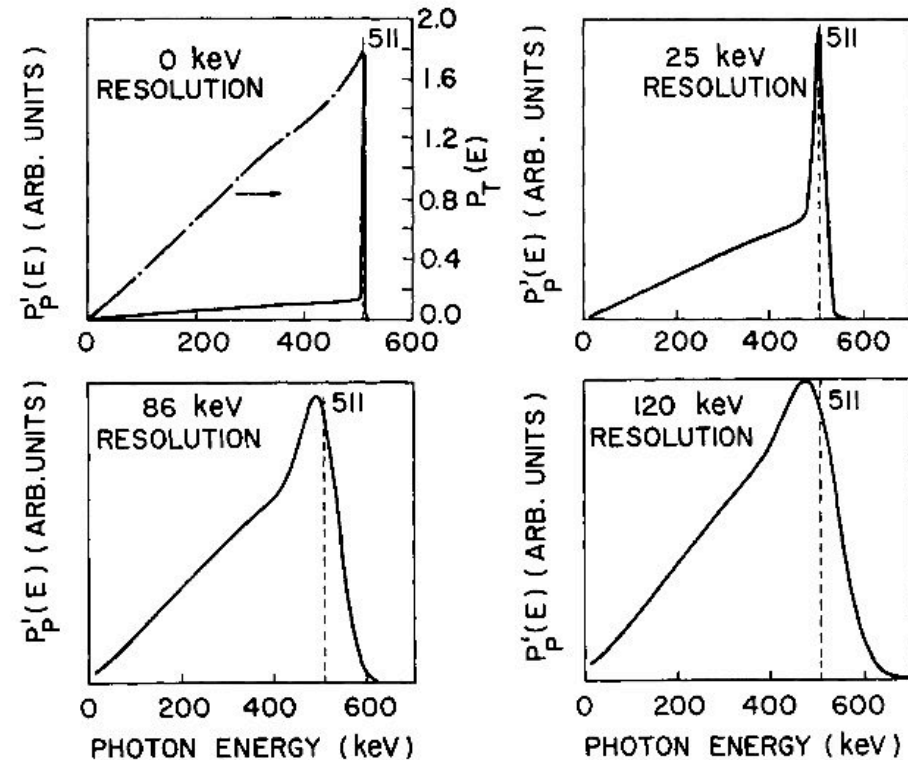
Les années `70: Premières observations

Observation du centre galactique lors d'un vol ballon avec un détecteur NaI (TI)



Johnson et al. (1972)

Décalage significatif de 511 keV:
 « it seems unlikely that the reported feature
 is associated with the positron-annihilation
 line » (Johnson et al. 1972)

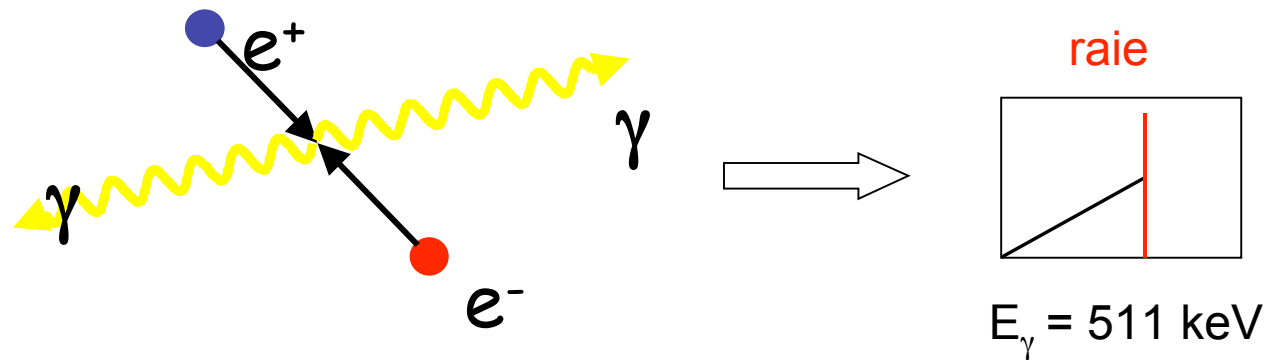


Leventhal et al. (1973)

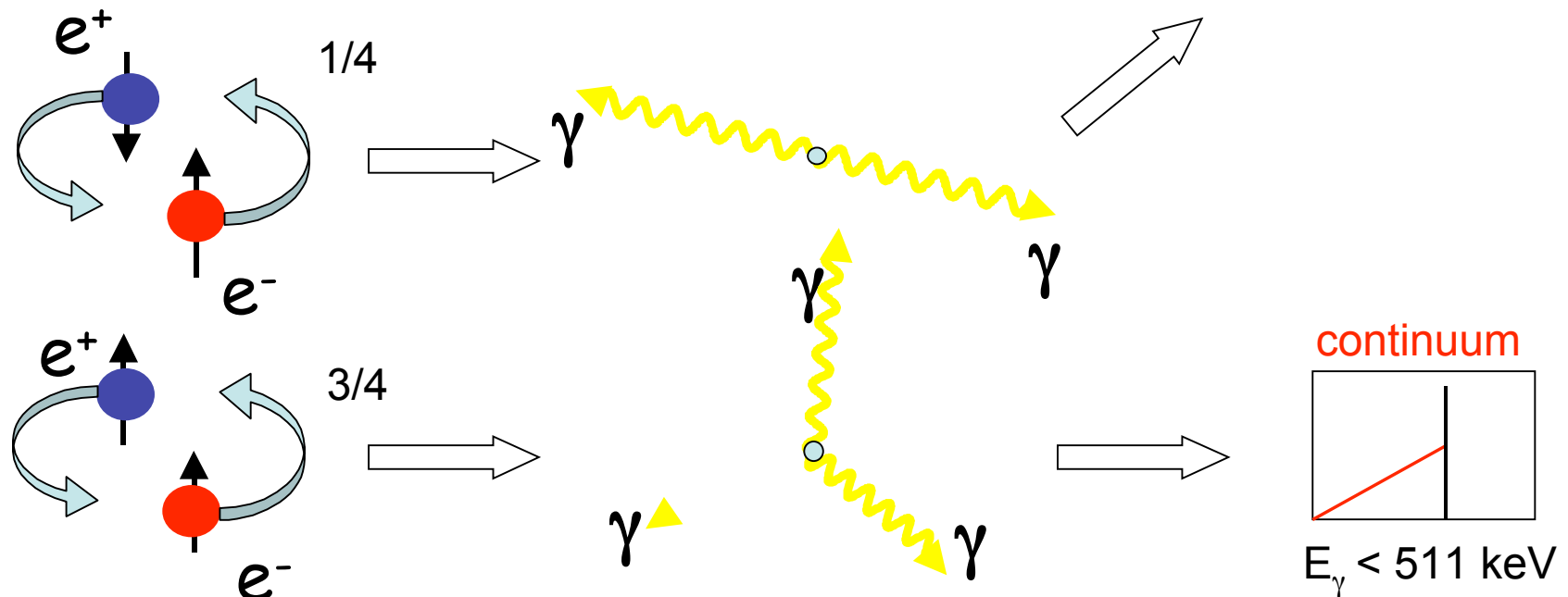
Décalage dû à la superposition de la
 raie et du continuum de Positronium.

Un drôle d'atome

Cas 1: Annihilation directe entre un positron et un électron

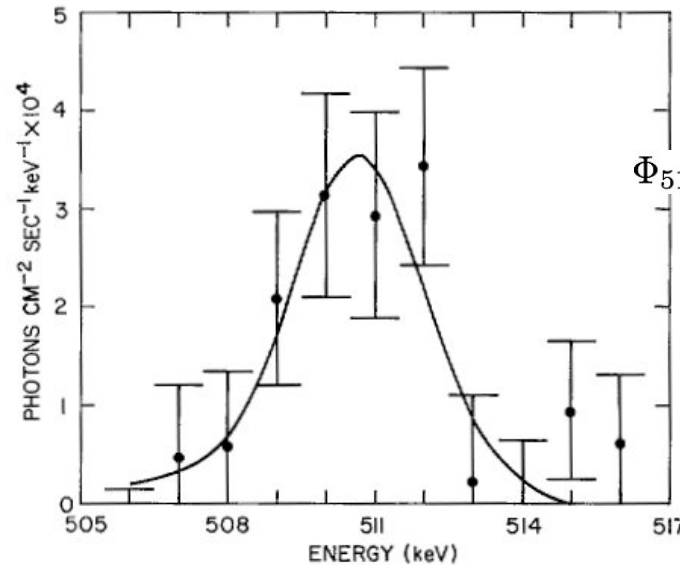
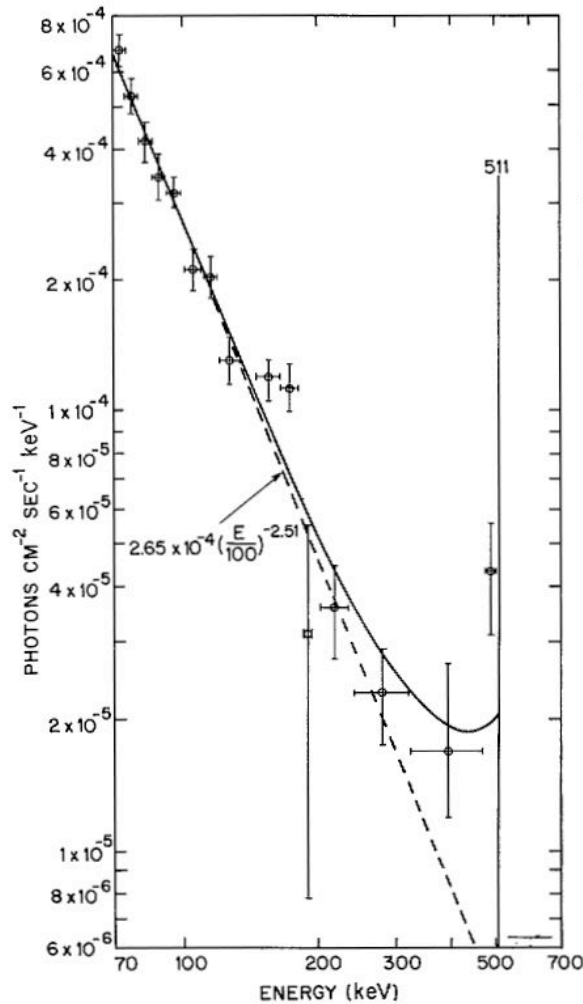


Cas 2: Formation du Positronium (f_p)



Les années `70: Premières observations

Observation du centre galactique lors d'un vol ballon avec un détecteur Ge



$$\Phi_{511} = (1.22 \pm 0.22) \times 10^{-3} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$E_{\gamma} = 510.7 \pm 0.5 \text{ keV}$$

$$f_p = 0.92$$

Si annihilation au centre galactique:

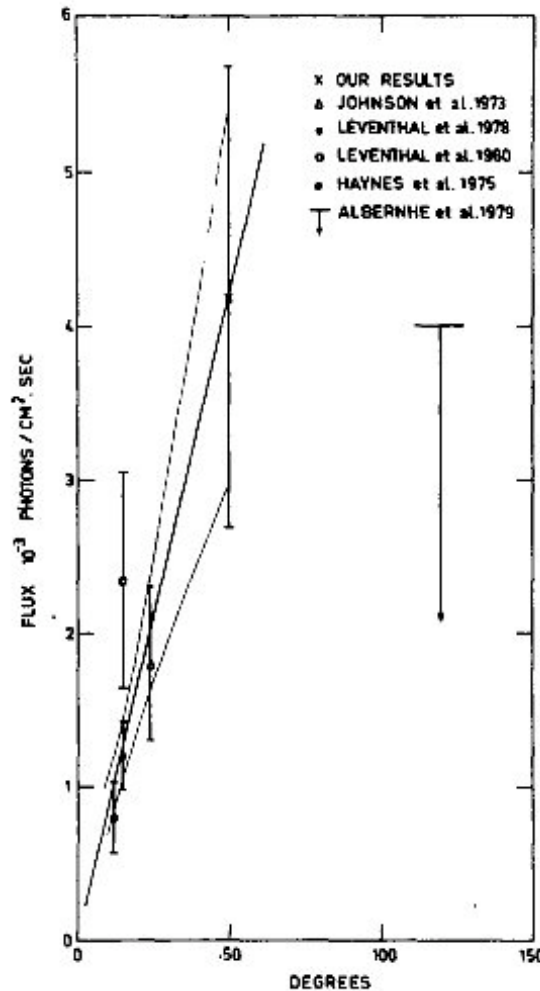
$$L_{e^+} = (1.69 \pm 0.31) \times 10^{43} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1}$$

⇒ bien trop important que les 10⁴² produits par RC

Le mystère de l'origine des positrons galactique naquit !

Leventhal et al. (1978)

Les années `80: Surprises et contradictions



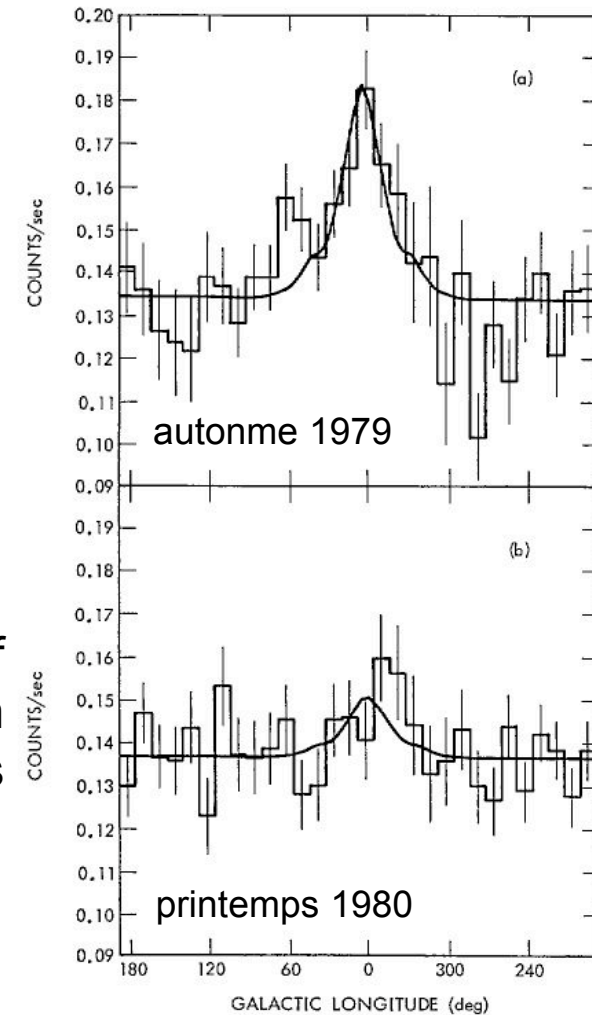
Albernhe et al. (1981)

Correlation entre
champ de vue et
flux observé

⇒ émission étendue

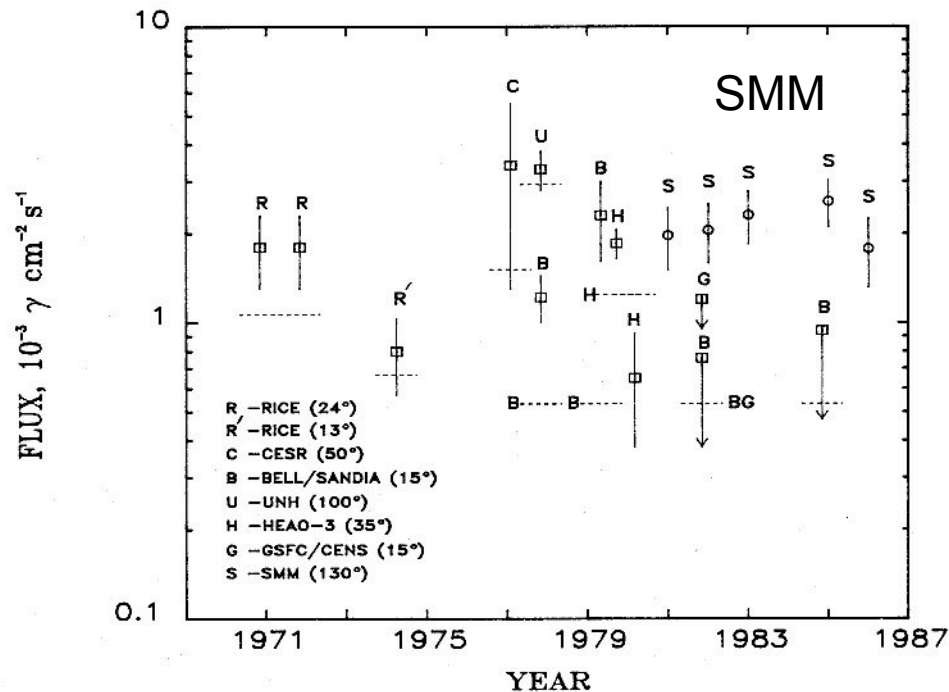
Changement significatif
du flux 511 keV dans un
intervalle de 6 mois

⇒ émission compacte
(< 0.3 pc)



Rieger et al. (1981)

Les années `80: Surprises et contradictions

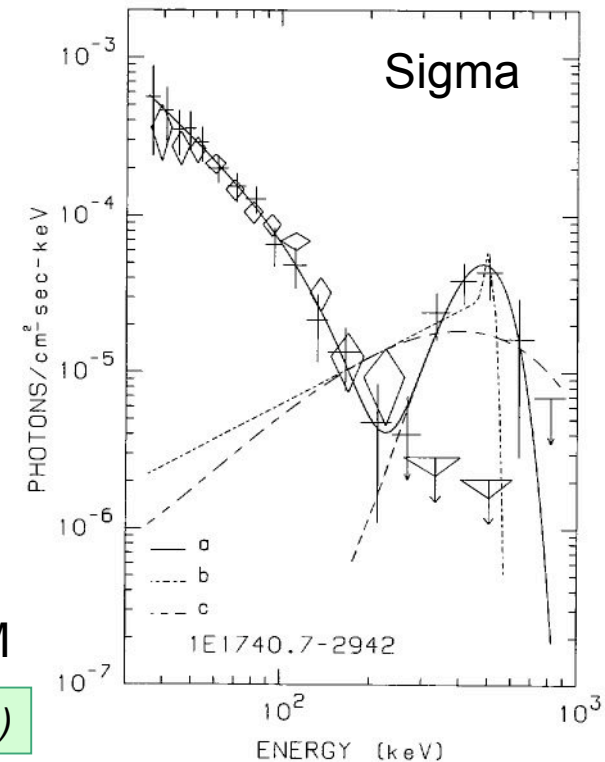


- Flux 511 keV stable durant 5 ans
- Observations ballons contemporaines contradictoires
⇒ effet de champ de vue ?

Share et al. (1988)

- Observation de raies transitoires larges avec SIGMA:
 - 1E1740.7-2942 ($E \approx 380 \text{ keV}$, FWHM $\approx 110\text{-}340 \text{ keV}$)
 - Nova Muscae 1991 ($E \approx 480 \text{ keV}$, FWHM $\approx 60 \text{ keV}$)
 - Nébuleuse du Crabe ($E \approx 540 \text{ keV}$, FWHM $\approx 40 \text{ keV}$)
- Phénomène non-confirmé par OSSE, BATSE et SMM
⇒ artefacts ou réalité ?

Bouchet et al. (1991)

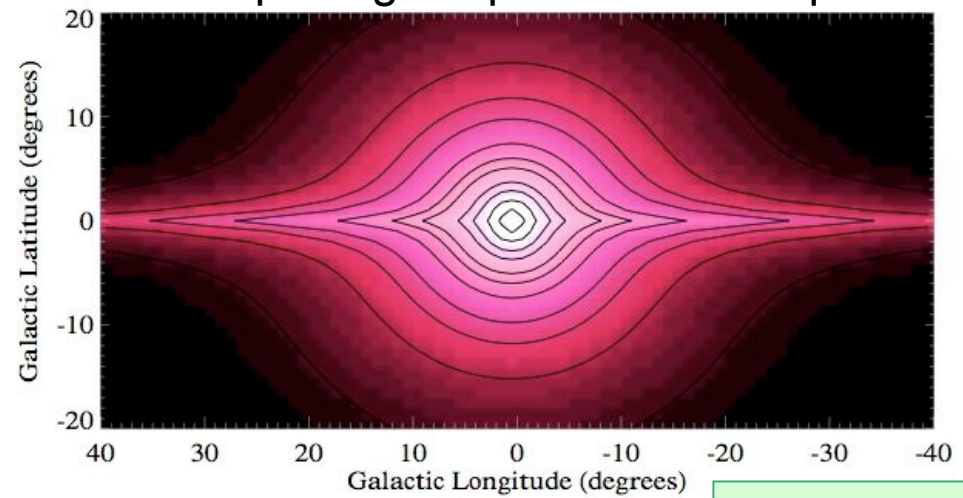


Les années `90: l'âge de raison

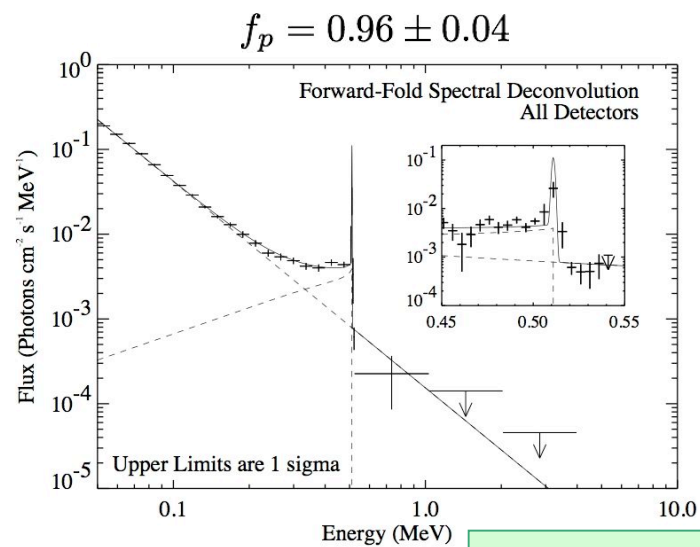
Lancement de CGRO en avril 1991



Morphologie: sphéroïde + disque

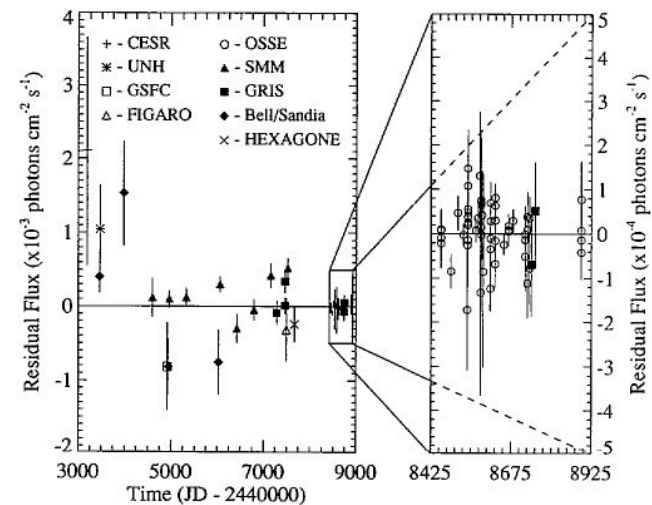


Purcell (1995)



Purcell et al. (1992)

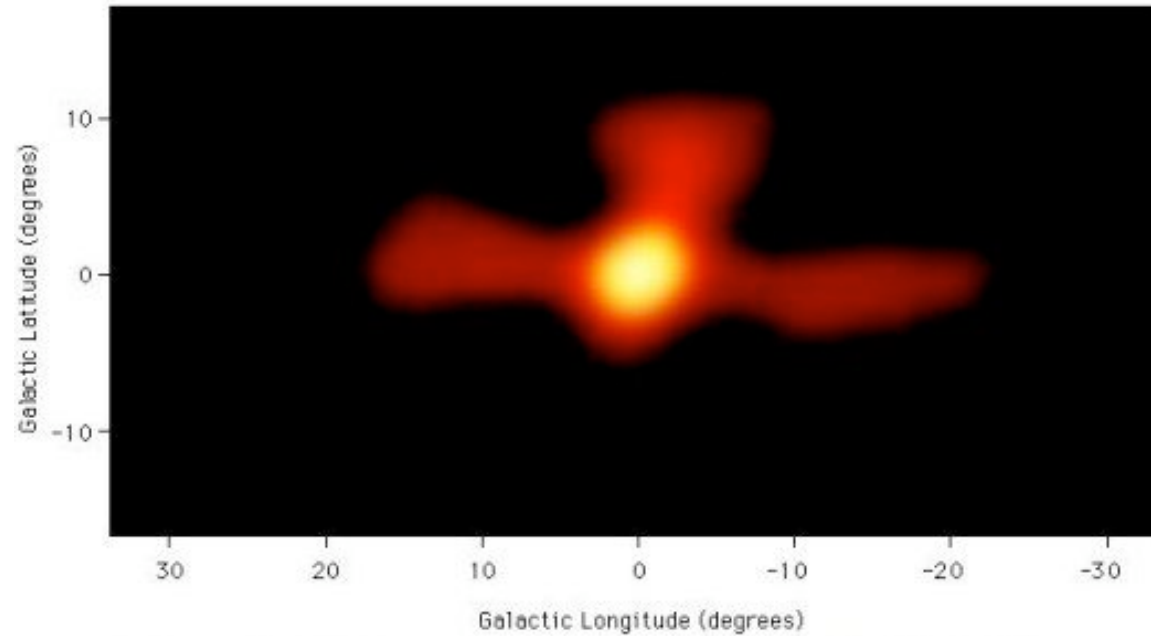
Flux 511 keV stable



Purcell et al. (1993)

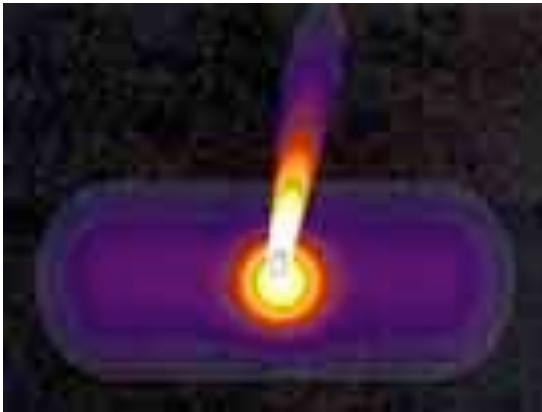
Les années `90: l'âge de raison ?

Première cartographie de la raie 511 keV

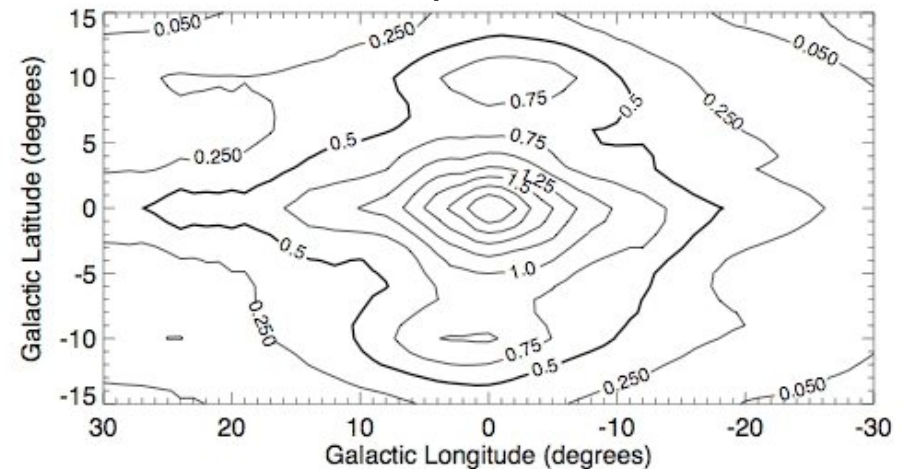


Purcell et al. (1997)

Une « fontaine » d'antimatière ?

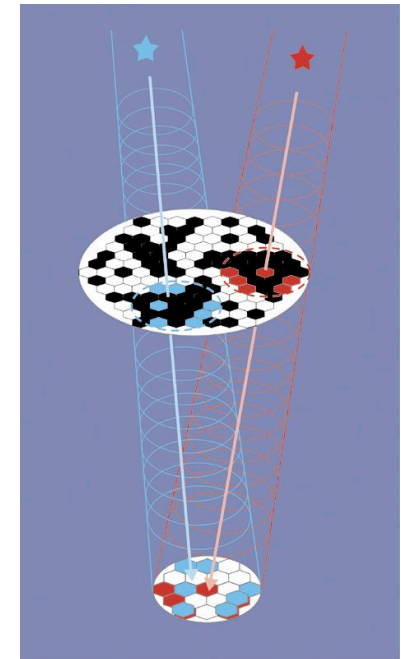
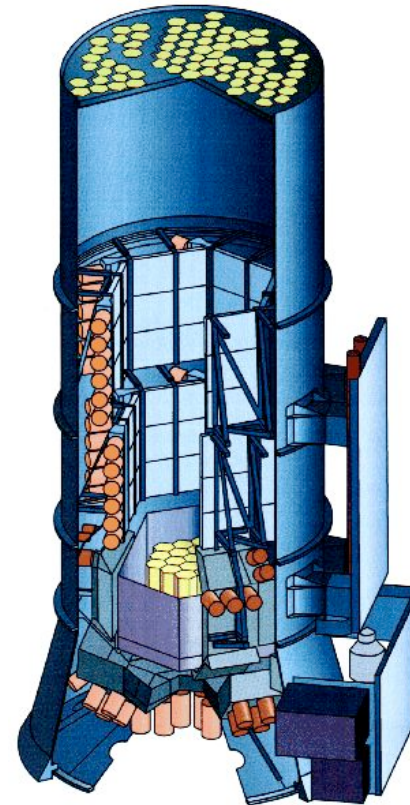


Carte d'exposition d'OSSE



Les années 2000: les promesses d'INTEGRAL

Lancement d'INTEGRAL en octobre 2002



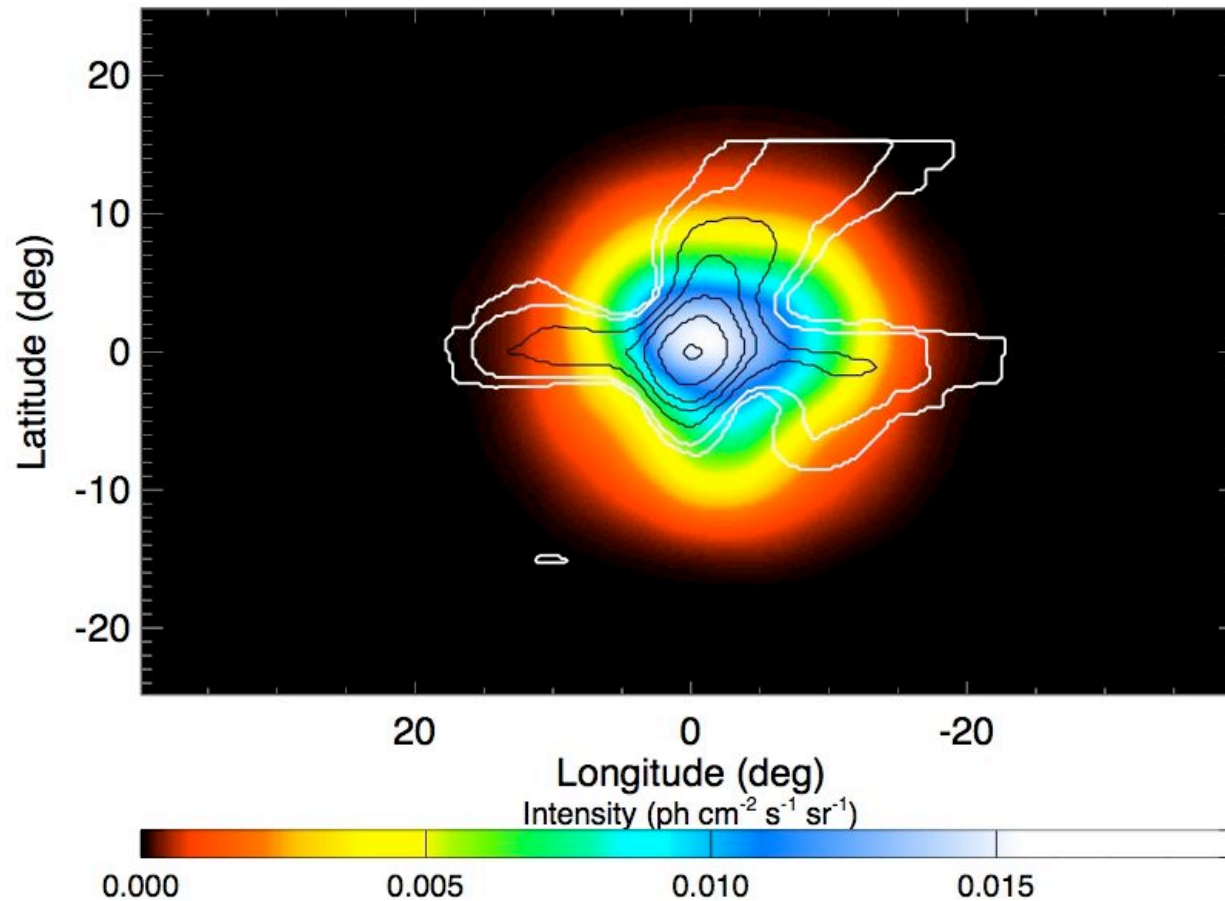
19 détecteurs en Germanium refroidi $\Rightarrow \Delta E \approx 2 \text{ keV} @ 511 \text{ keV}$

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

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

Première spectro-imagerie de l'annihilation des positrons !

Première lumière

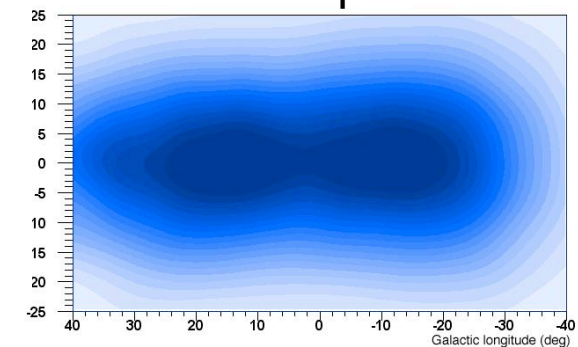


Knödlseeder et al. (2003)

20 jours d'observations
des régions centrales
de notre Galaxie

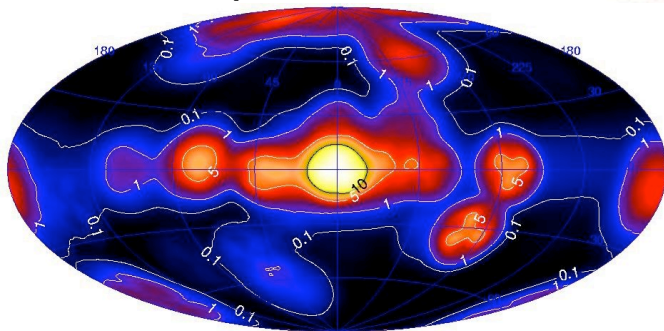
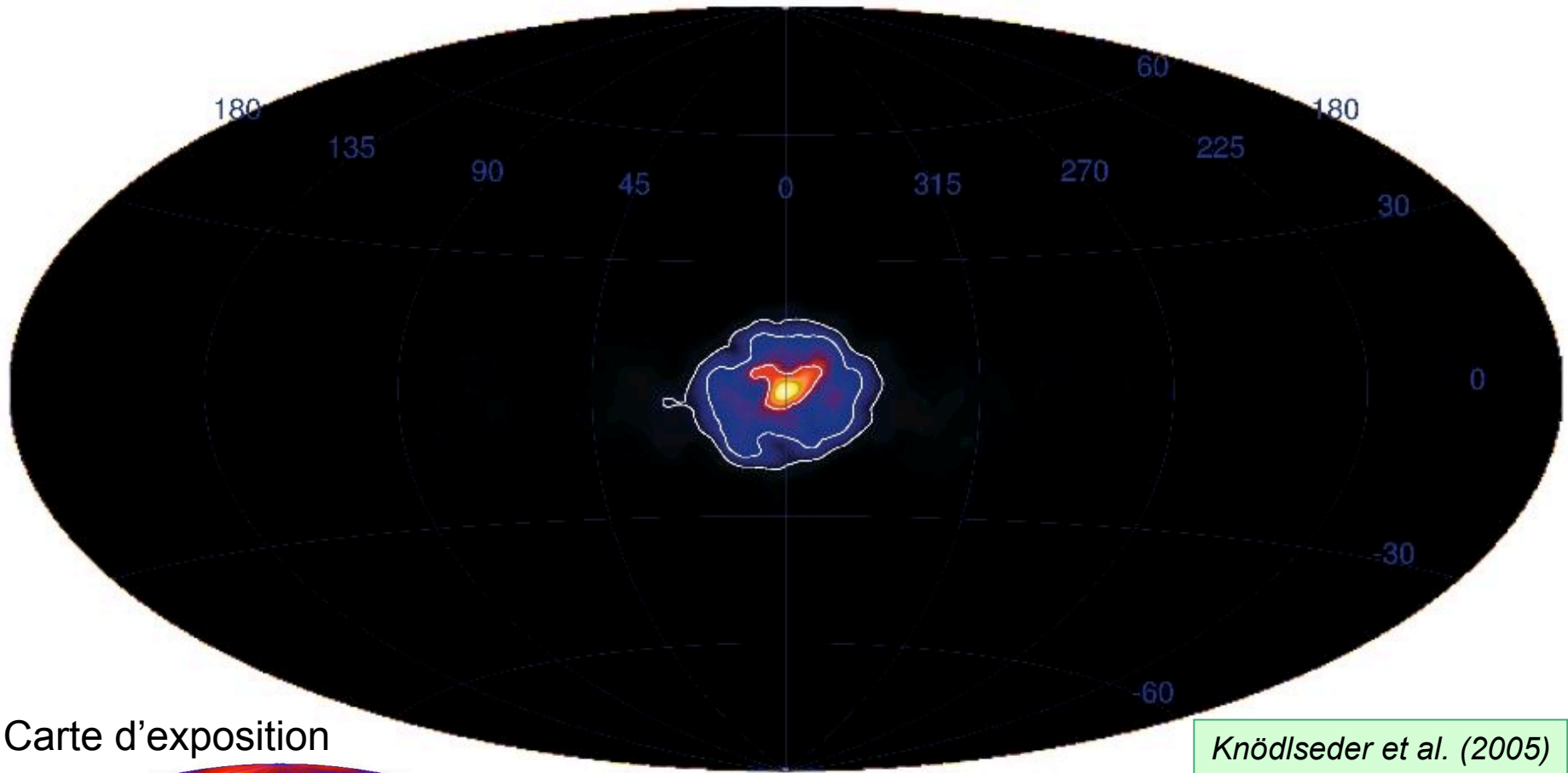
- Morphologie sphérique
- Absence du disque
- Absence de la fontaine

Carte d'exposition



L'image OSSE a été biaisé par l'exposition; la fontaine n'existe pas !

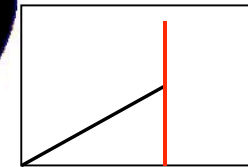
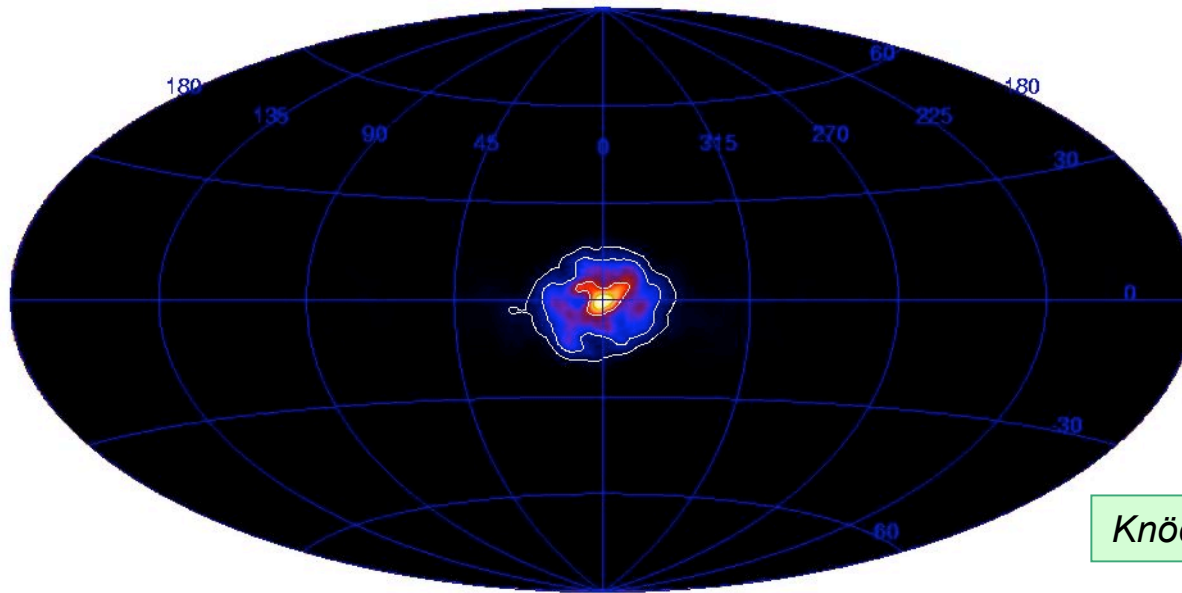
Enfin le ciel dévoilé ...



Un an d'observations INTEGRAL

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

Raie et continuum



Knödlseider et al. (2005)

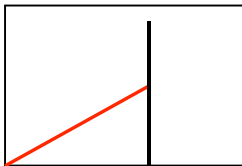
$$l_0 = -0.6^\circ \pm 0.3^\circ$$
$$b_0 = +0.1^\circ \pm 0.3^\circ$$

centrée

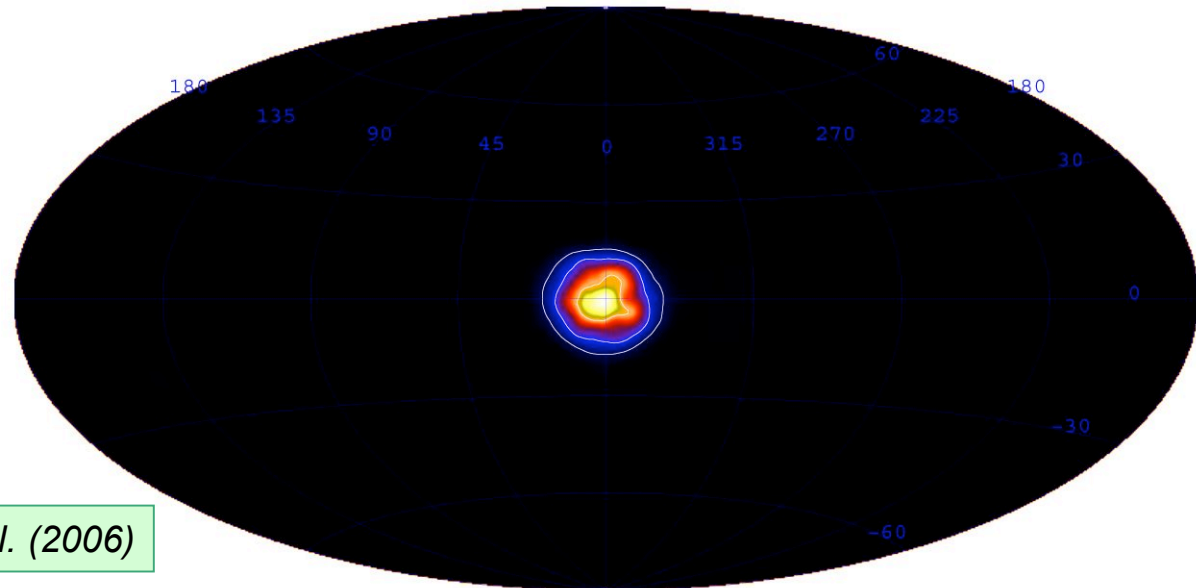
$$\Delta l = 8.1^\circ \pm 0.9^\circ$$

$$\Delta b = 7.2^\circ \pm 0.9^\circ$$

$$\Delta b / \Delta l = 0.89 \pm 0.14$$

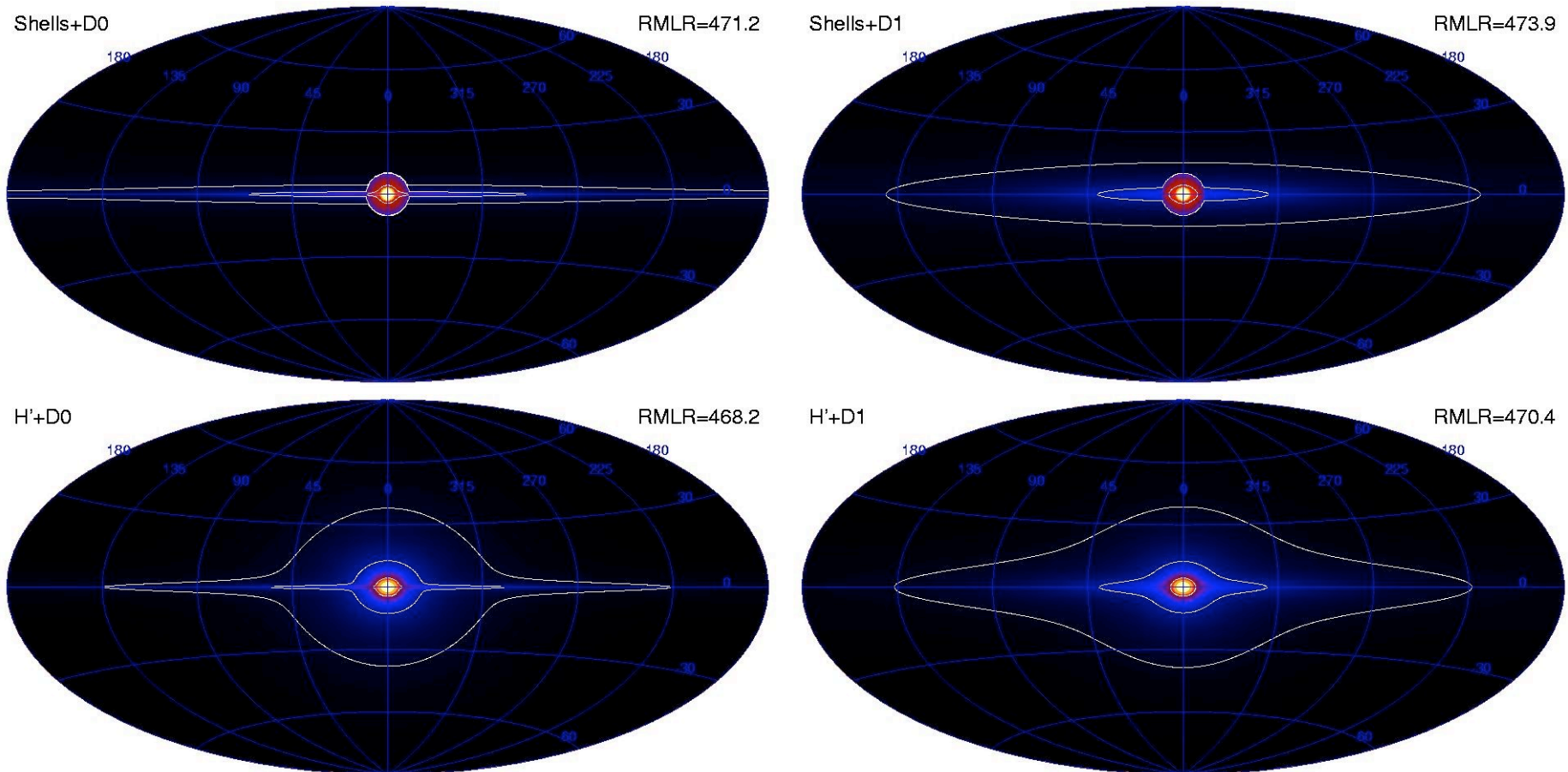


Weidenspointner et al. (2006)



Voir l'invisible ...

Ajustement de modèles de distributions 511 keV aux données

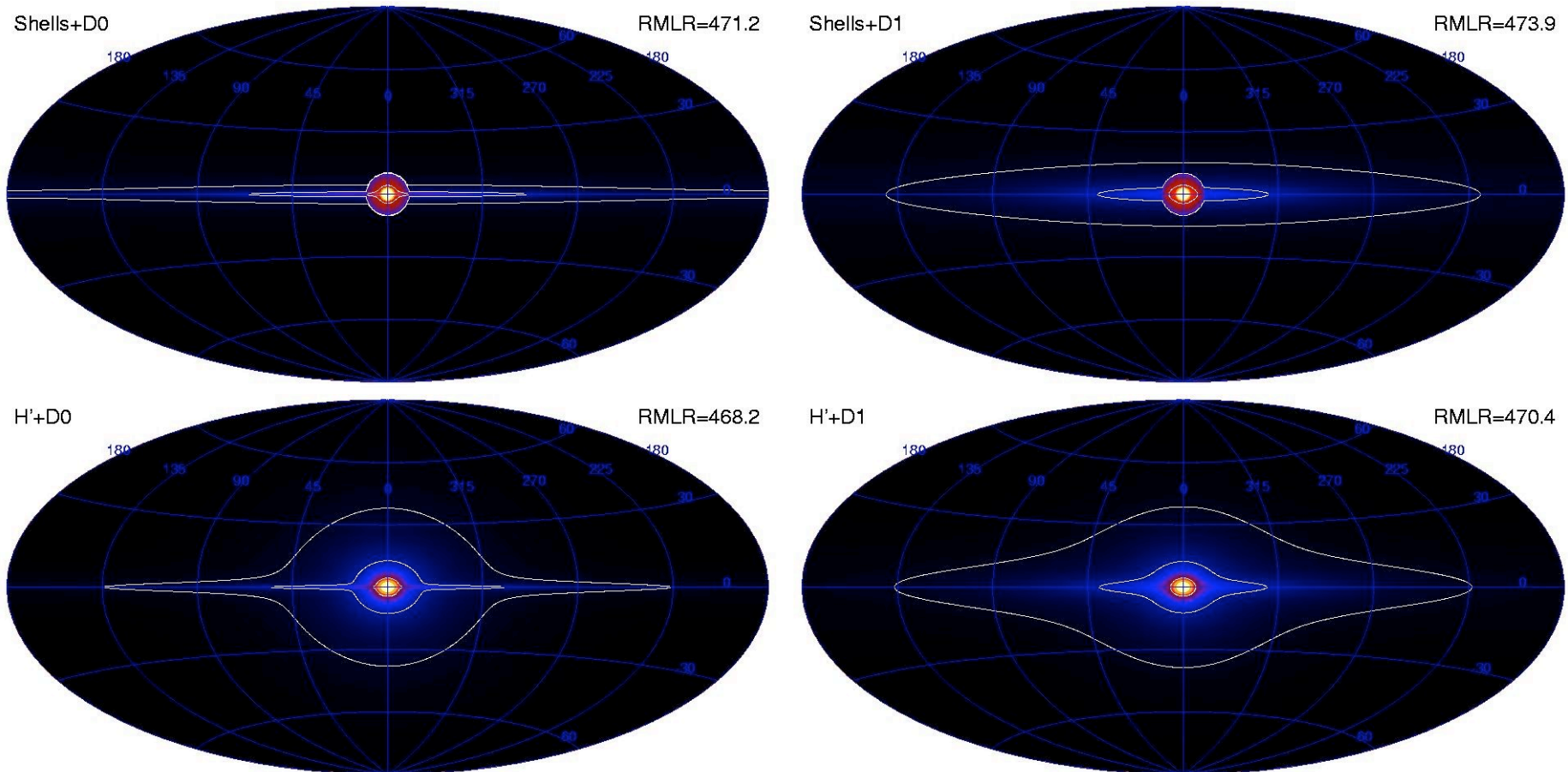


$$\begin{aligned}\Phi_{\text{total}} &= (1.5 - 2.4) \times 10^{-3} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \\ \Phi_{\text{spheroid}} &= (1.0 - 1.6) \times 10^{-3} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \\ \Phi_{\text{disque}} &= (0.4 - 1.1) \times 10^{-3} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}\end{aligned}$$

$$\frac{\Phi_{\text{spheroid}}}{\Phi_{\text{disque}}} \approx 1 - 3$$

Voir l'invisible ...

Ajustement de modèles de distributions 511 keV aux données

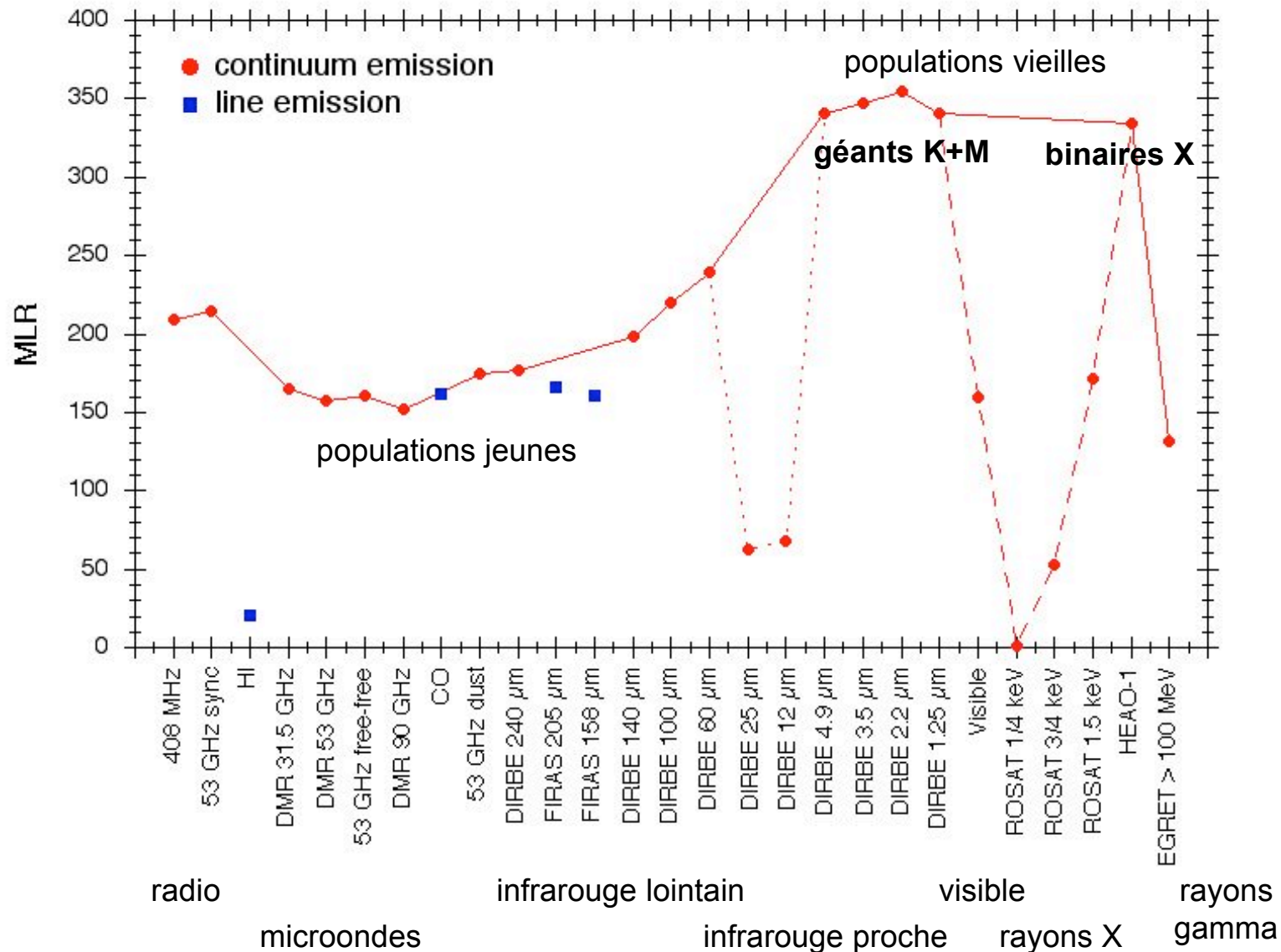


$$\begin{aligned}
 L_{\text{total}} &= (17.0 - 23.1) \times 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1} \\
 L_{\text{spheroid}} &= (13.9 - 19.8) \times 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1} \\
 L_{\text{disque}} &= (1.5 - 5.1) \times 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1}
 \end{aligned}$$

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

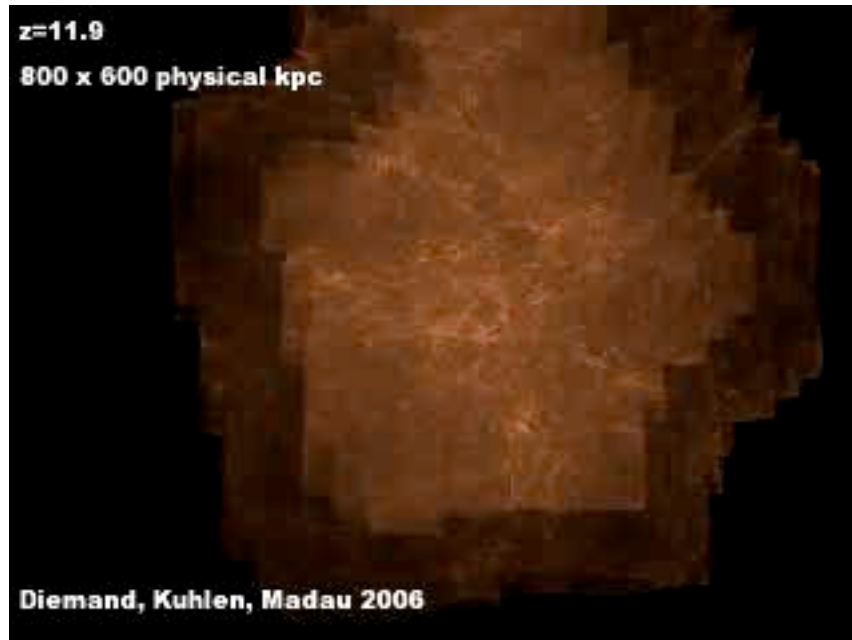
A quoi ressemble le ciel 511 keV ?

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

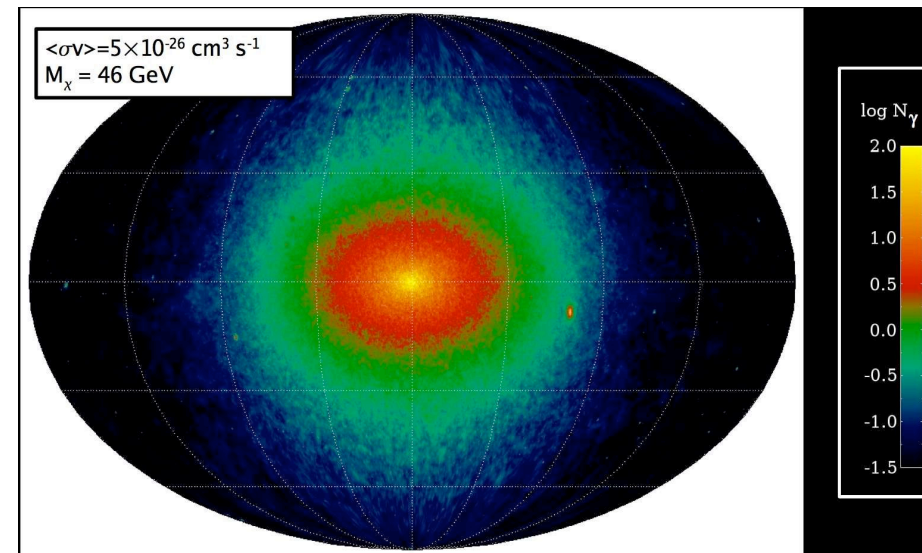


Et si c'était vrai ...

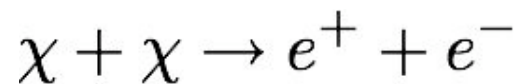
La matière noire pourrait avoir la bonne distribution spatiale



Diemand et al. (2006)



Kuhlen et al. (2007)



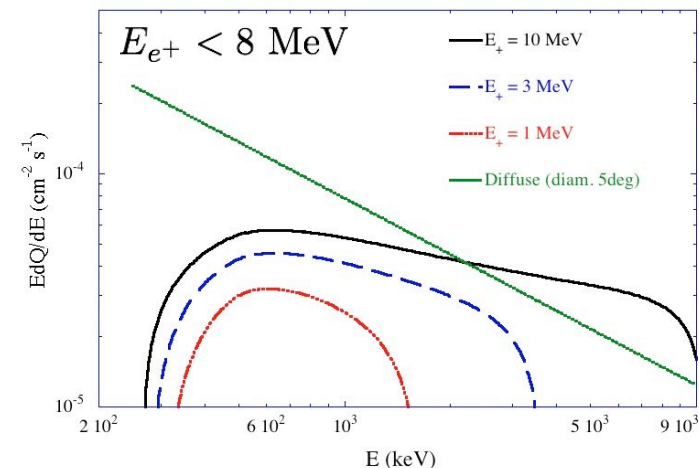
Annihilation de WIMPs (p.e. Neutralinos):

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

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

Emission HE non-observé !

Annihilation en vol



Et si c'était plus léger ?

La matière noire légère - une alternative

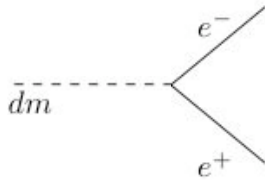
Pour la matière noire bosonique, la densité relique n'impose pas de contrainte sur la masse des particules $\Rightarrow m_\chi < 100 \text{ MeV}$ permis !

Boehm et al. (2004)

Contraints par la morphologie:

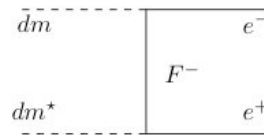
$$\rho_{\text{dm}}(r) = \frac{\rho_0}{(r/r_0)^\gamma [1 + (r/r_0)^\alpha]^{(\beta-\gamma)/\alpha}}$$

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



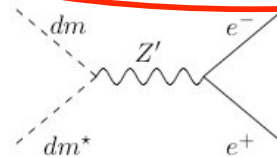
2. Annihilation: $R_{e^+}(r) = \langle \sigma v \rangle \times \rho_{\text{dm}}^2(r)$

2.1. échange fermionique



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

2.2. échange bosonique



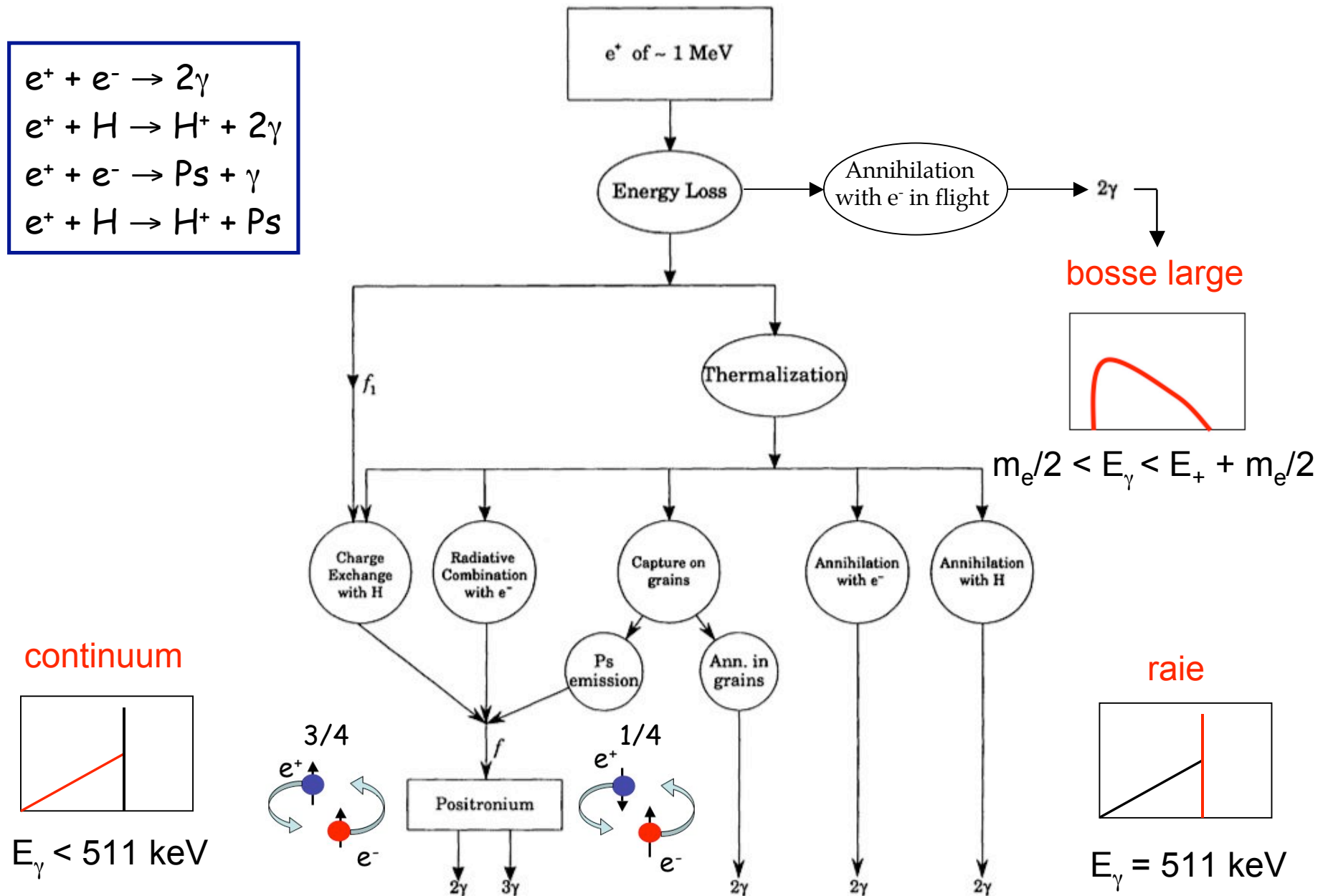
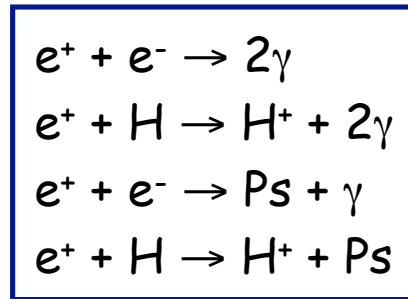
$$\langle \sigma v \rangle = bv^2$$

MW	α	β	γ	r_0 (kpc)	ρ_0 (GeV cm ⁻³)
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

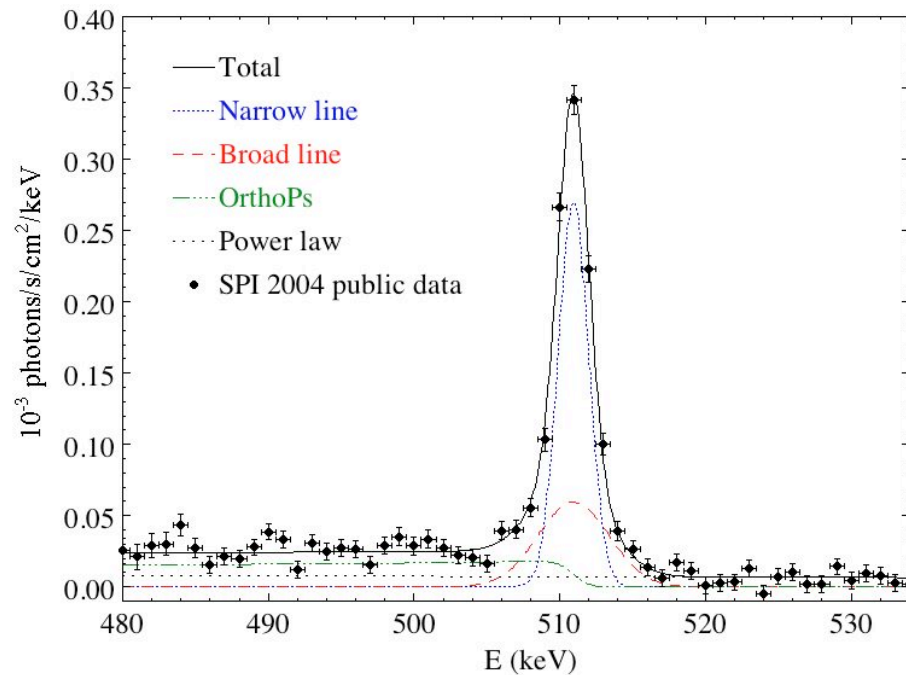
Ascasibar et al. (2006)

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

La physique de l'annihilation



Le positron comme sonde du MIS



Jean et al. (2006)

----- Fraction des grains -----

Phase	$x_{\text{gr}} = 1$	$x_{\text{gr}} = 0$	$x_{\text{gr}} = 10$
Molecular	2.39	2.39	2.39
Cold	3.00	3.00	2.92
Warm neutral	4.78	4.76	4.74
Warm ionized	1.02	1.00	1.19
Hot	1.99	11.0	1.96
Combined	2.26 (1.18)	2.17 (1.15)	2.17 (1.37)

$$\Phi_n = (7.2 \pm 1.2) \times 10^{-4} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

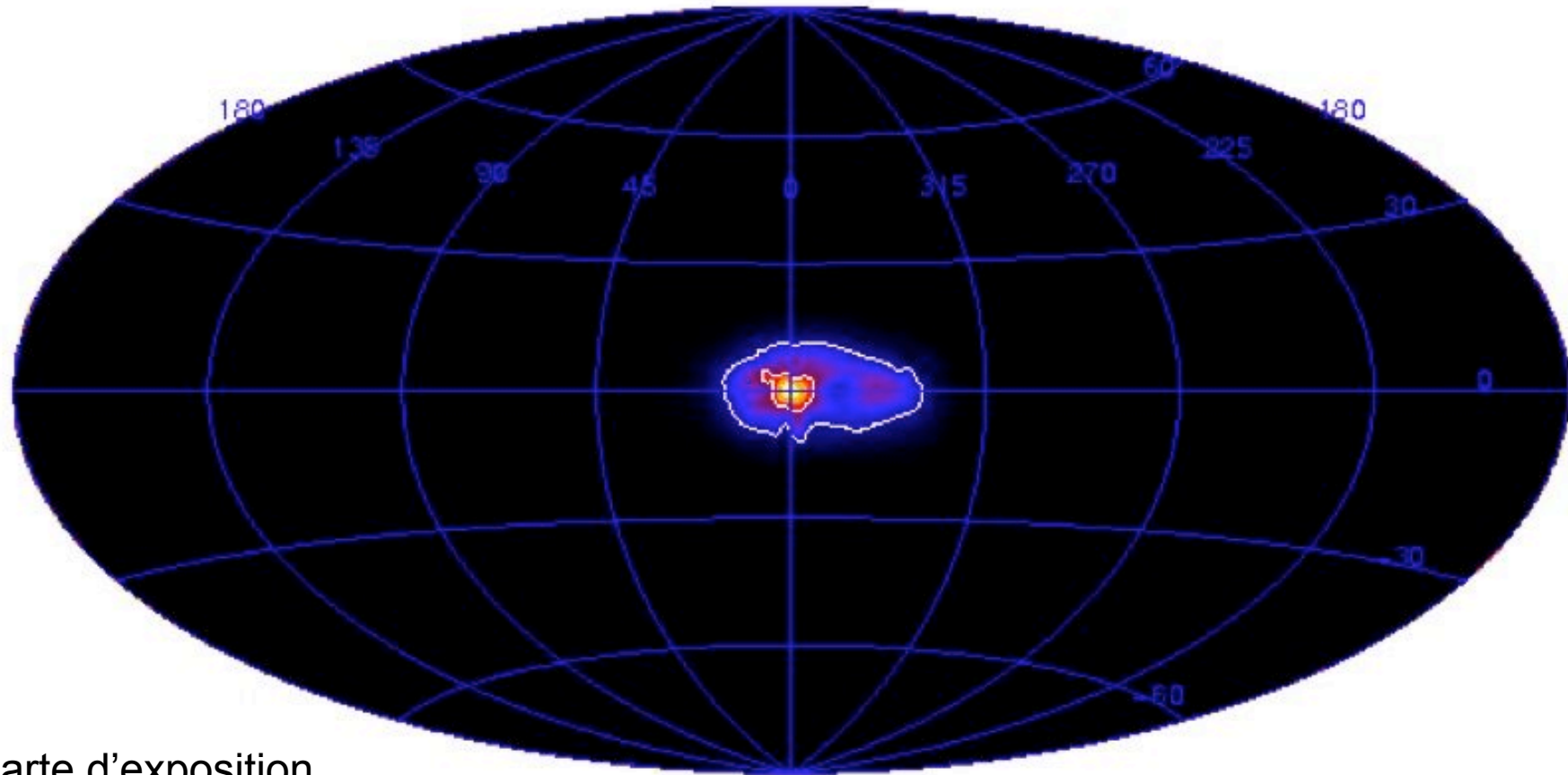
$$\Gamma_n = 1.32 \pm 0.35 \text{ keV}$$

$$\Phi_b = (3.5 \pm 1.1) \times 10^{-4} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

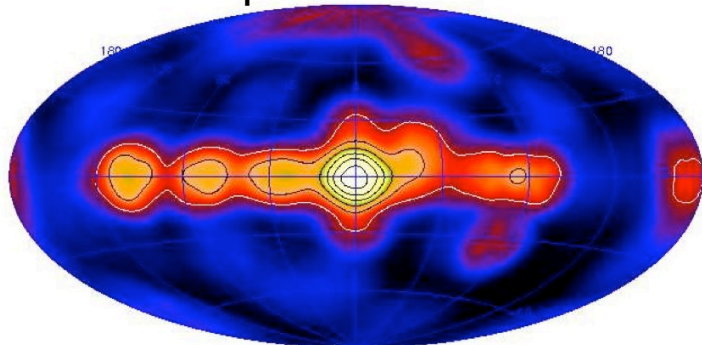
$$\Gamma_b = 5.36 \pm 1.22 \text{ keV}$$

$$f_p = 0.97 \pm 0.02$$

Enfin le disque ... mais quel disque !



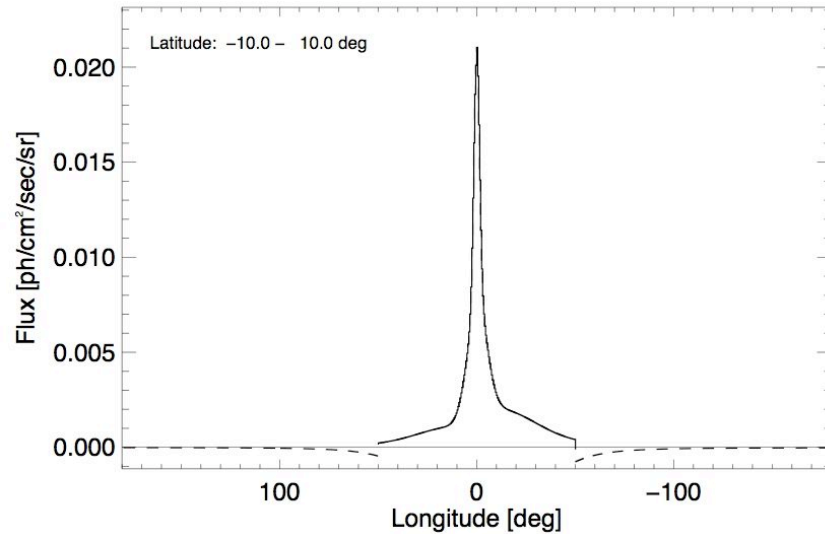
Carte d'exposition



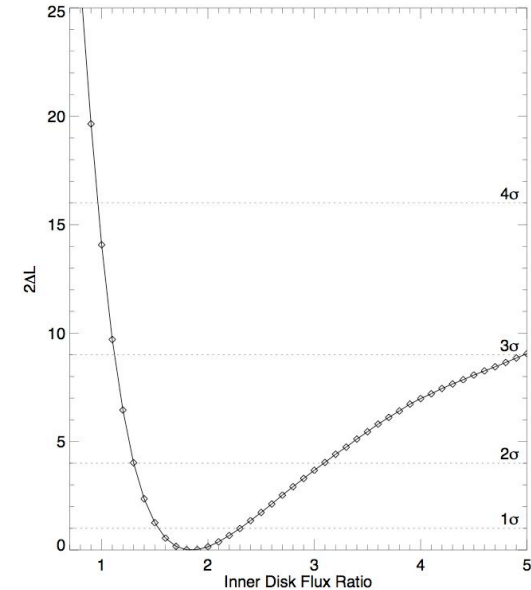
Weidenspointner et al., Nature, en presse

Est-ce bien raisonnable ?

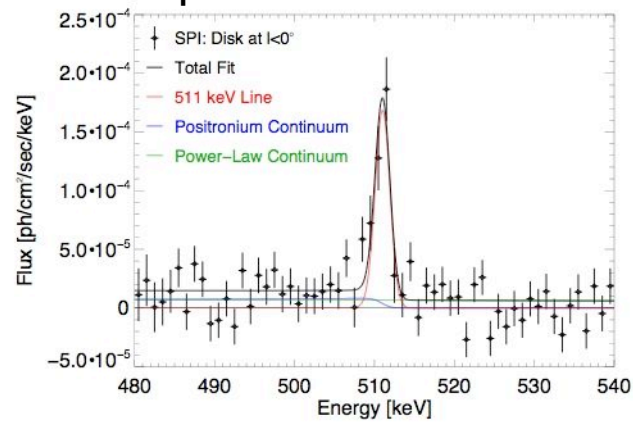
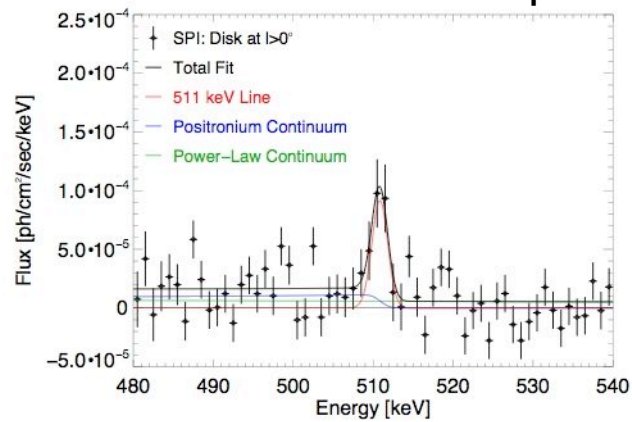
Profile en longitude galactique



Significativité de l'asymetrie

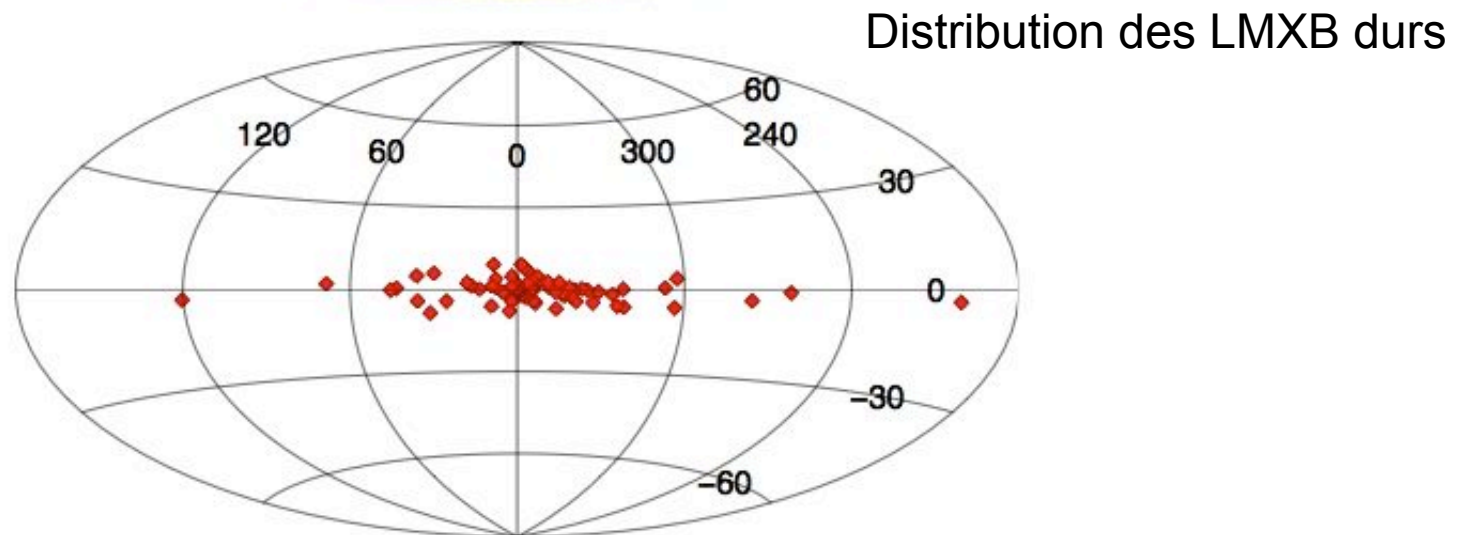
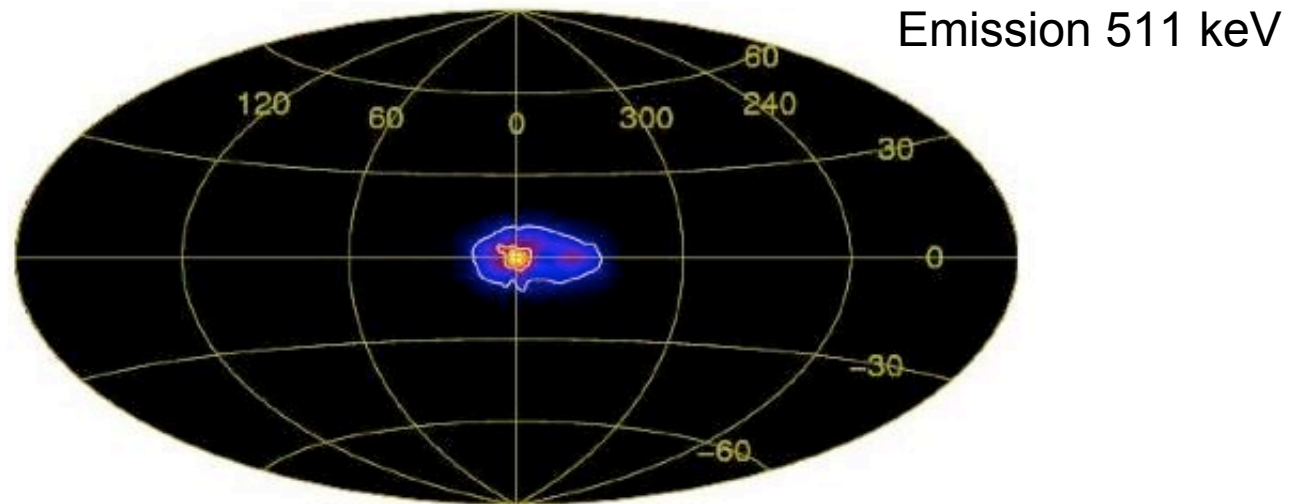


Spectres du disque



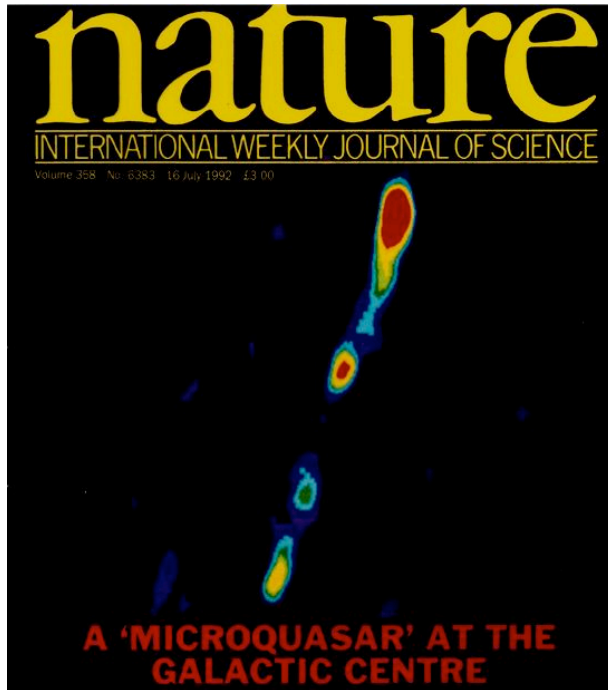
Weidenspointner et al., Nature, en presse

A quoi ressemble ce disque ?



Weidenspointner et al., Nature, en presse

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 :

$$\begin{array}{l} R_{e^+} \sim 10^{41} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1} \\ E_{e^+} \leq 1 \text{ MeV} \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} \sim 1\% L_{X-\text{dur}} \\ \Phi_{\text{LMXB}} \sim 10^{-5} \text{ ph cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ at } d = 8.5 \text{ kpc} \end{array}$$

Nombre :

71 LMXB durs dans catalogue IBIS

100 μ quasars estimés pour la Galaxie (Paredes 2005)

$$R_{e^+} \approx 10^{43} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1} \quad \text{😊} \quad \begin{array}{l} L_{\text{spheroid}} = (13.9 - 19.8) \times 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1} \\ L_{\text{disque}} = (1.5 - 5.1) \times 10^{42} \text{ e}^+ \text{ s}^{-1} \end{array}$$

Morphologie:

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



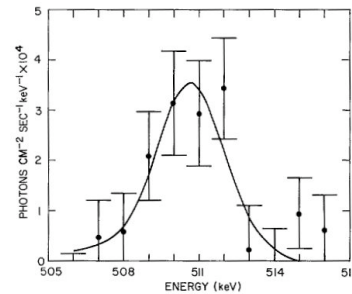
$$\frac{L_{\text{spheroid}}}{L_{\text{disque}}} \approx 3 - 9$$

LMXB peuvent aisement expliquer l'émission du disque !

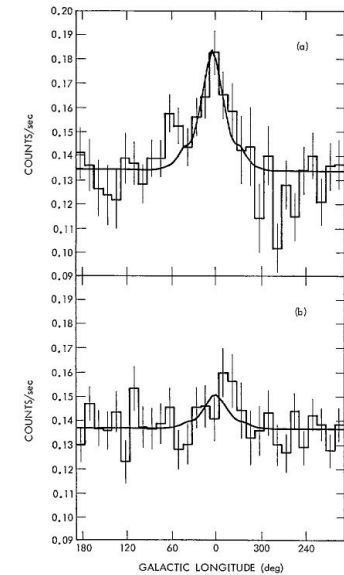
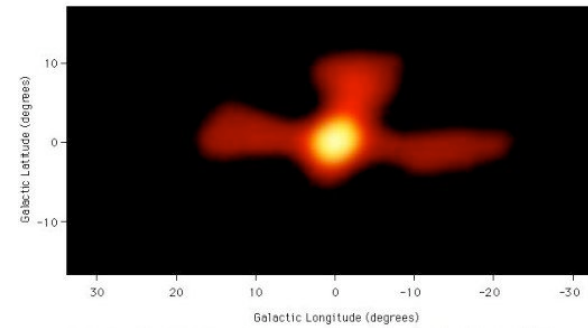
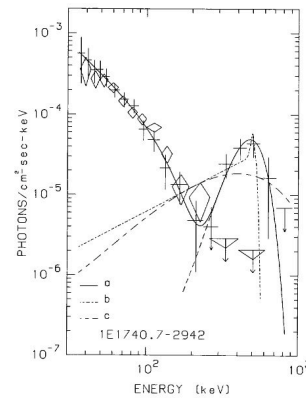
LMXB peuvent expliquer ~30% de l'émission du sphéroïde; une autre source de positrons semble indispensable !

Pour conclure ...

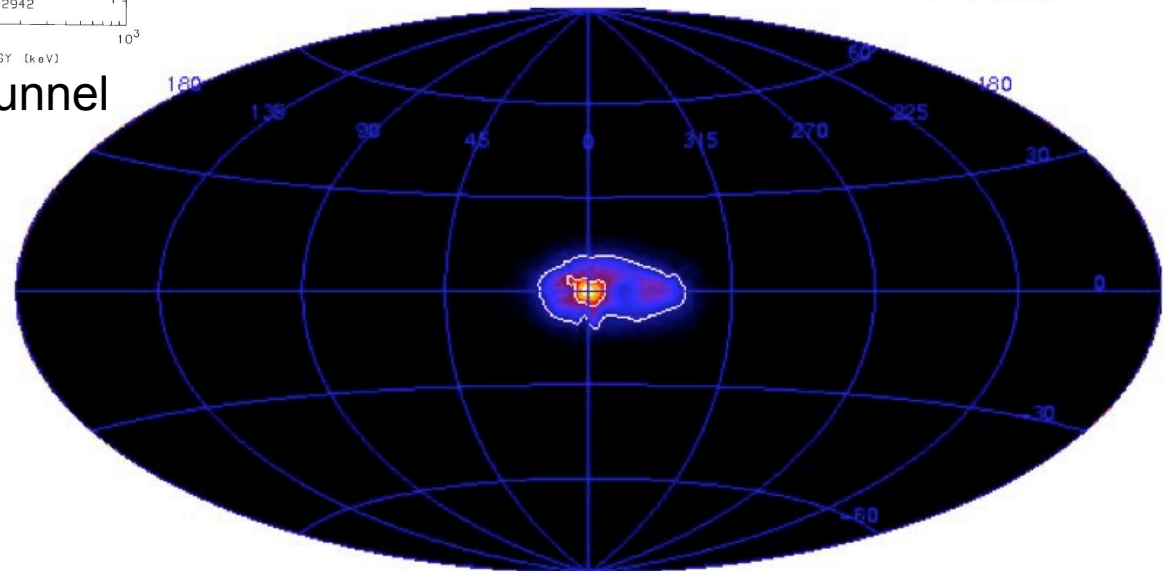
35 ans d'histoire ...

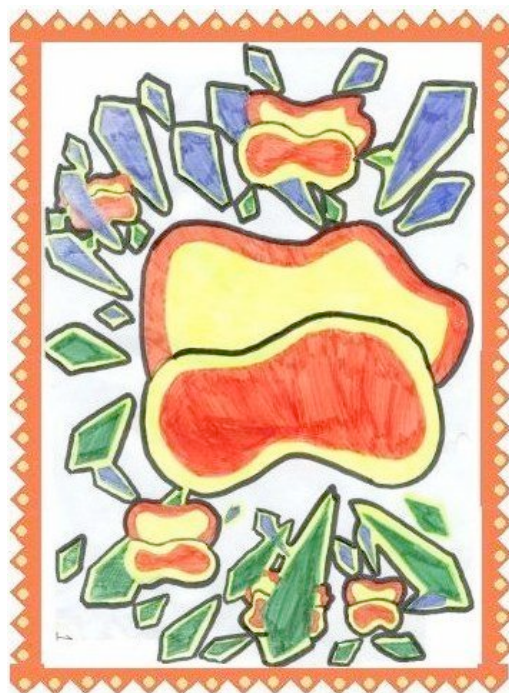


... avec des rebonds



... et de la lumière au bout du tunnel



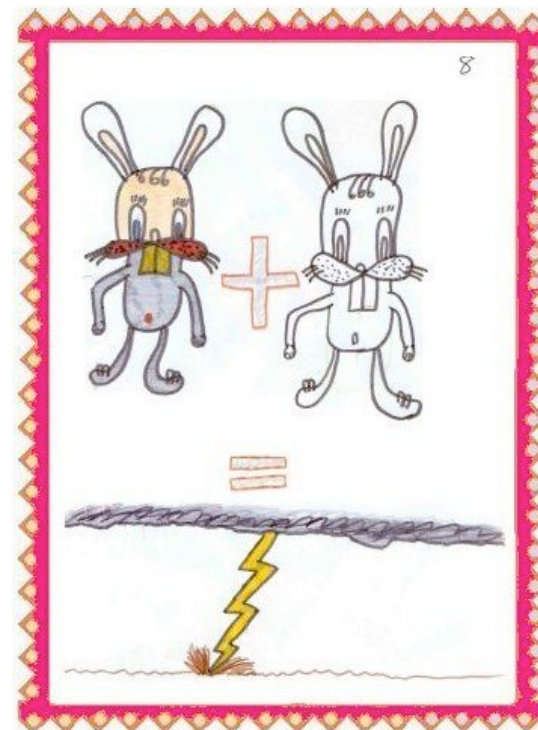


Amy Anderson, age 12

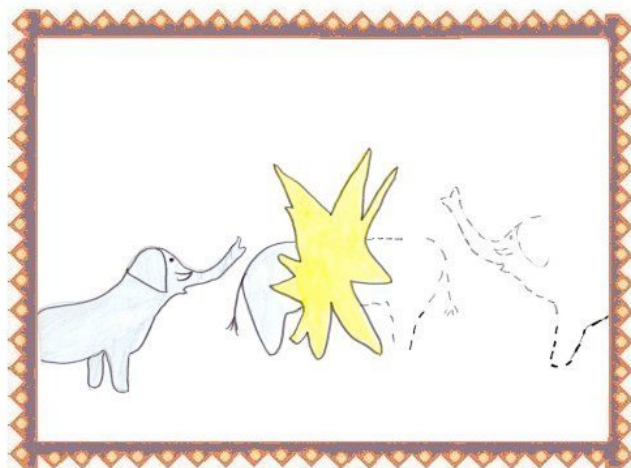
GRAND CONCOURS DE DESSIN
POUR ENFANTS

"DESSINEZ UNE COLLISION
ENTRE LA MATIERE
ET
L'ANTI-MATIERE"

INScrivez-vous au Bâtiment 40
Dernier délai pour déposer vos dessins : 17h00 !
TROIS CATEGORIES: 5 à 7 ans, 8 à 10 ans, 11 à 15 ans
Les cinq premiers de chaque catégorie seront récompensés



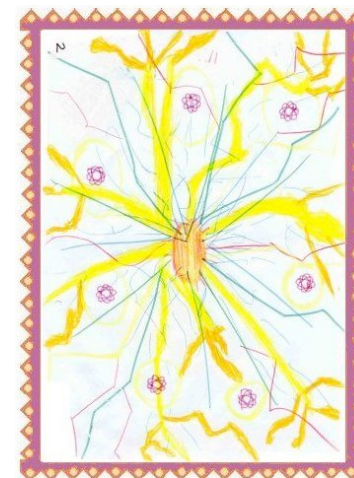
Antoine Clerc, age 13



Antoine Florelle, age 10



Clerc Romani, age 9



Julien Dorel, age 11