

Résultats récents en Astrophysique nucléaire



PLAN DU COURS

I - Introduction

- a - Rôle de l'astrophysique nucléaire
- b - Historique & Observations

II - Les raies gamma nucléaires

- a - Généralités et rappels
- b - Noyaux produits par nucléosynthèse stellaire
- c - Noyaux produits par des interactions à haute énergies

III - Annihilation des positrons galactiques

- a - Physique des positrons
- b - Observation des émissions d'annihilation
- c - Origines des positrons galactiques

IV - Conclusions & perspectives

I - Introduction

a - Rôle de l'astrophysique nucléaire

- Astrophysique + Physique nucléaire :

Etudier les processus de nucléosynthèse dans les sites astrophysiques

=> contraintes sur les conditions physiques dans ces sites

Taux de réaction nucléaire : $R = n \Phi \sigma$

=> Densité suffisante

=> Flux de particules suffisant

=> Energie > keV

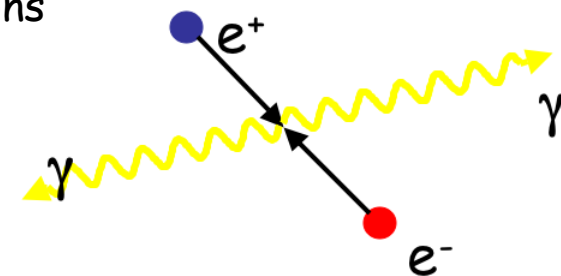
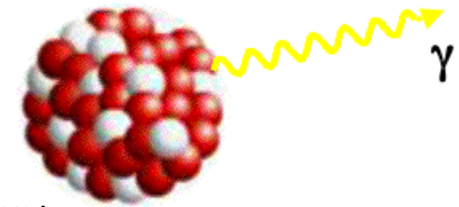
- Astronomie gamma nucléaire :

- Observation des émissions électromagnétiques des noyaux

E_γ de 20 keV à 10 MeV

- Observation de l'émission d'annihilation des positrons

$E_\gamma = m_e c^2 = 511 \text{ keV}$



I - Introduction

a - Rôle de l'astrophysique nucléaire

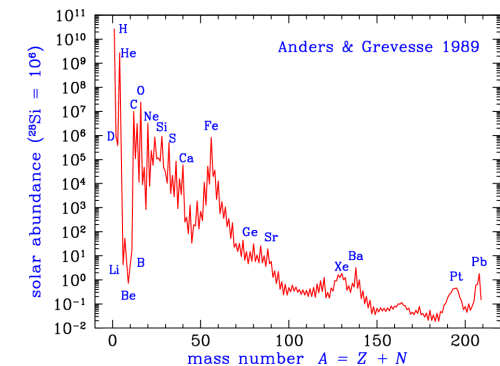
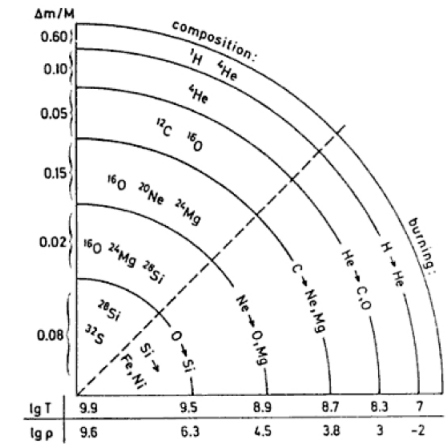
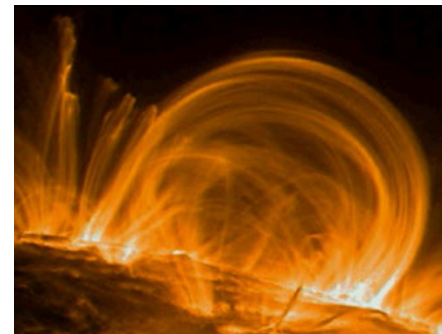
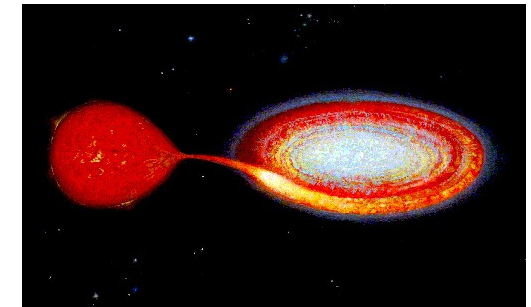
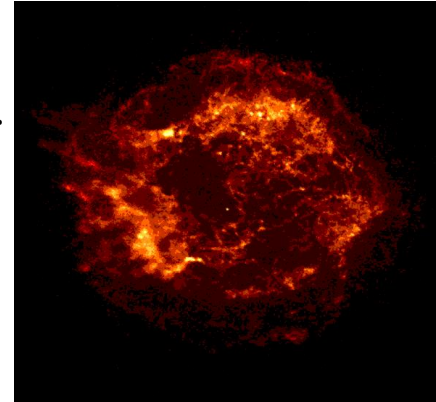
- Nucléosynthèse et physique stellaire :
abondance des éléments, modèles stellaires.

- Physique des explosions stellaires :
dynamique des SN et des novae

- Physique des objets compacts :
physique de l'accrétion

- Eruptions solaires et stellaires :
étude de l'accélération dans les éruptions

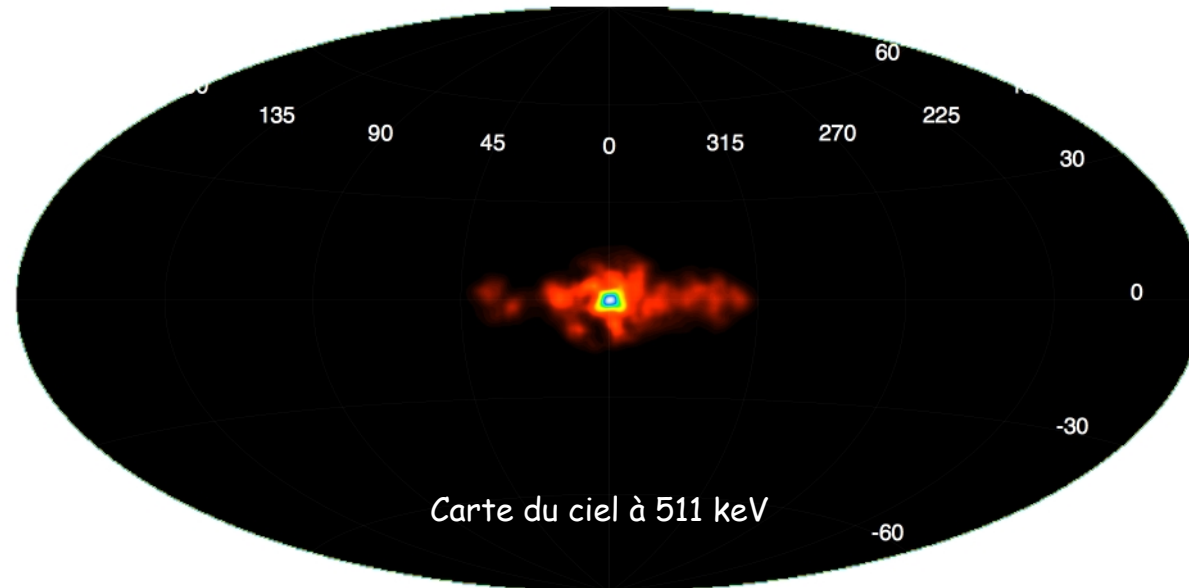
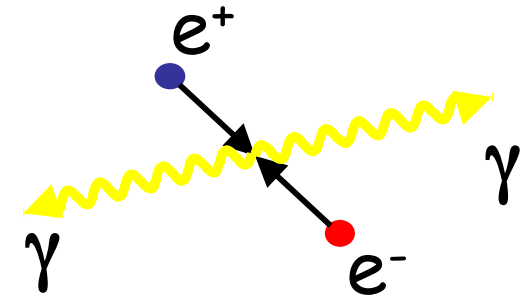
- Rayonnement cosmique et milieu interstellaire :
RC de basse énergie, abondance du RC et du MIS



I - Introduction

a - Rôle de l'astrophysique nucléaire

- Origine des positrons Galactiques



Sgr A*

Novae

Binaires X

Matière noire

Pulsars



Supernovae

Rayons cosmiques

I - Introduction

a - Rôle de l'astrophysique nucléaire

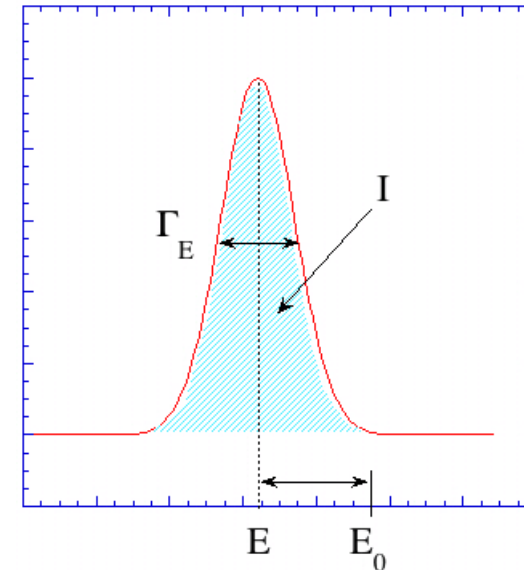
Intérêts de la spectroscopie gamma

mesure directe des produits de la nucléosynthèse

- caractéristiques spectrales
 - > quantité et nature des isotopes
 - > vitesse des émetteurs
 - > effet gravitationnel
 - > conditions physiques du milieu
- caractéristiques temporelles
 - > variabilité des sources
 - > variation de l'opacité
- caractéristiques spatiales
 - > source ponctuelle
 - > émission diffuse
 - > distribution des sources



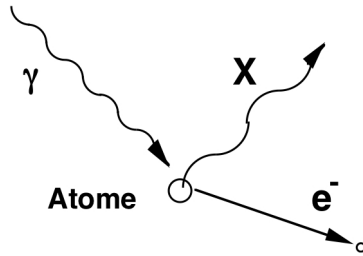
- évolution chimique de la Galaxie
- physique stellaire
- physique des éruptions/explosions
- objets compacts
- rayonnement cosmique



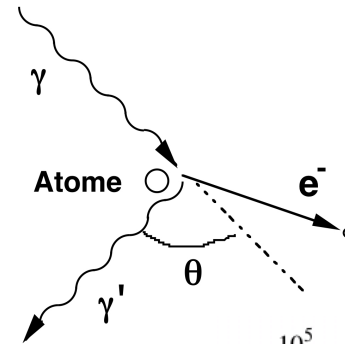
I - Introduction

Rappel : interactions des γ

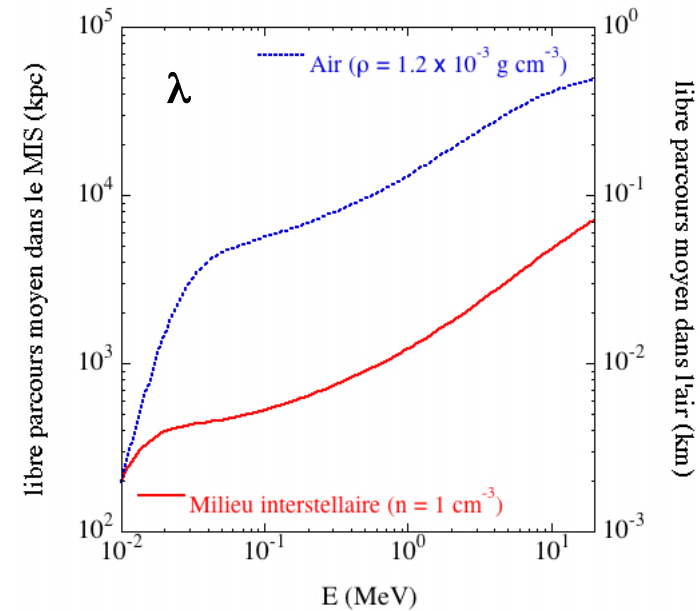
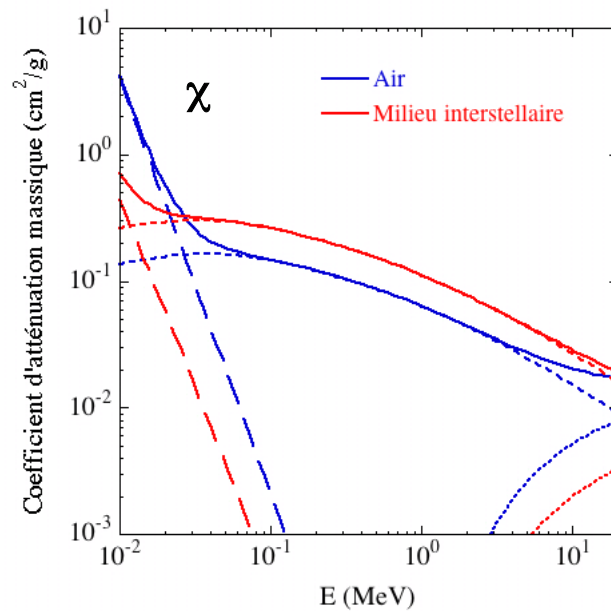
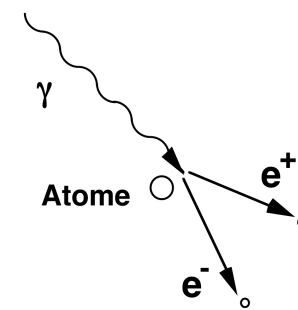
Effet photoélectrique



Diffusion Compton



Création de paires e^+e^-



Calcul du libre parcours moyen des photons :

- > la Galaxie est transparente
- > l'atmosphère est opaque

=> mesures par des instruments embarqués en satellite ou en ballon stratosphérique

$$\lambda = 1/(n \sigma) = 1/(\rho \chi)$$

I - Introduction

b - Historique & observations

1 - Historique des prédictions

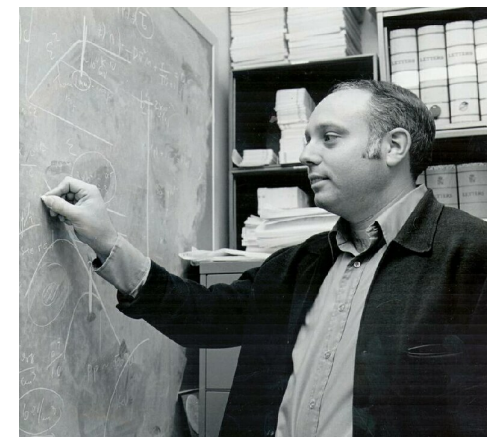
- Donald Clayton

- ^{56}Ni & ^{44}Ti des SN I (1969)
- ^{60}Fe du Milieu Interstellaire (1971)
- ^{22}Na & e^+e^- des novae (1974)
- ^7Be des novae (1981)



- Reuven Ramaty

- ^{26}Al dans le MIS (1976)
- raies gamma dans le MIS induites par l'interaction des RC (1976)



I - Introduction

b - Historique & observations

2 - Historique des observations

- Instruments embarqués en ballon stratosphérique

- 1970-1974 : spectromètre NaI Rice Expériment
 - « détection » de la raie d'annihilation e^+e^- à ~ 0.5 MeV

- > 473 ± 15 keV (Johnson, Harnden & Haymes, 1972)

- > 476 ± 24 keV (Johnson & Haymes, 1972)

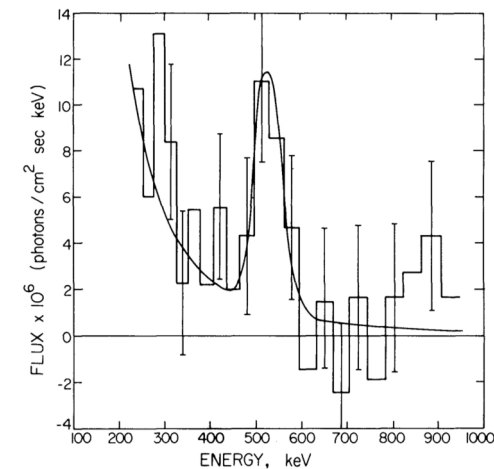
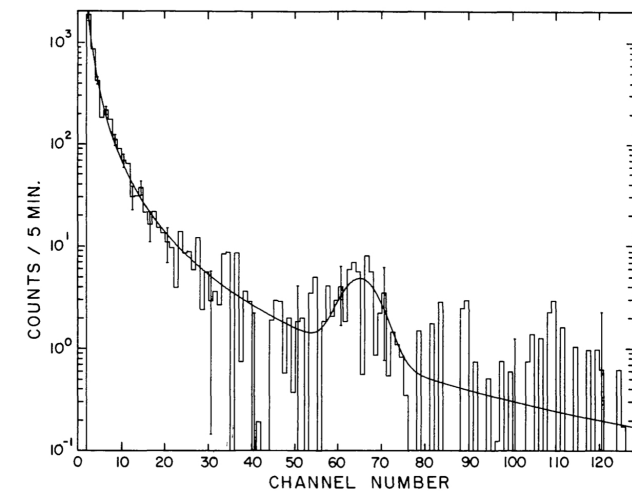
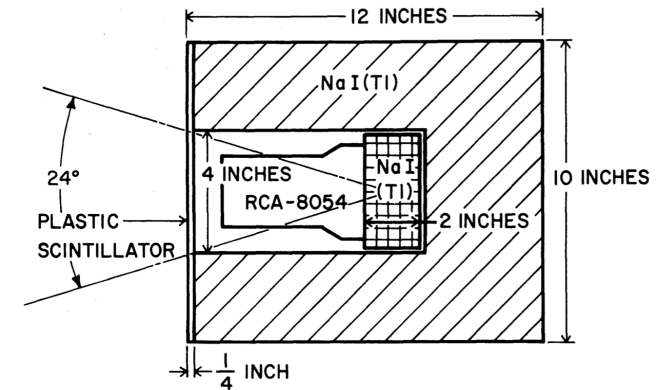
- => raie γ nucléaire ?

- => raie d'annihilation décalée (EN, TN) ?

- > 530 ± 10 keV (Haymes et al, 1975)

- => raie d'annihilation

- π^+ + isotopes β^+ produits par le RC



I - Introduction

b - Historique & observations

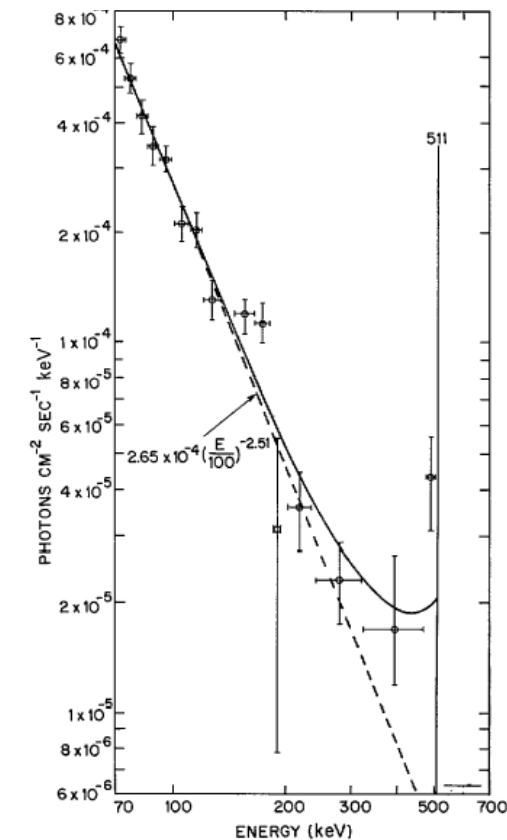
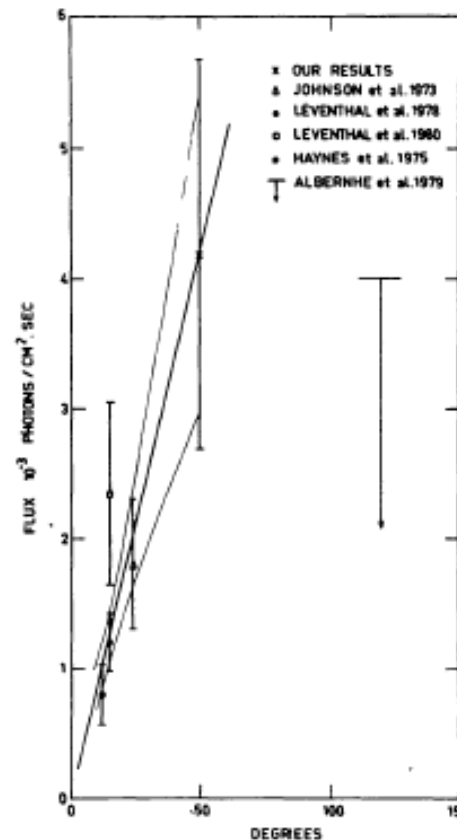
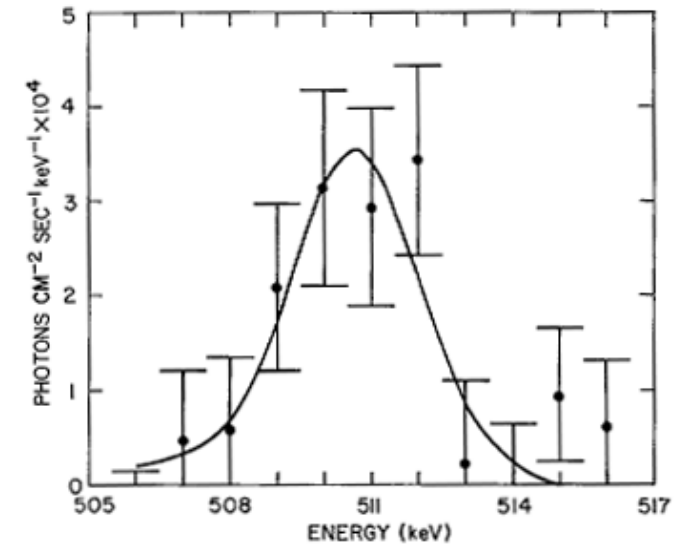
2 - Historique des observations

- 1977 : premiers détecteurs *Ge*

Confirmation de l'énergie de la raie à 511 keV et forte évidence pour un continuum de l'orthopositronium (Leventhal et al. 1978, Albernhé et al., 1981)

La corrélation entre le flux mesuré à 511 keV et le champ de vue des instruments suggère que l'émission est étendue (Albernhé et al., 1981)

=> π^+ + isotopes β^+ produits par RC
 β^+ produits par SN & novae
 e^+ produits par les pulsars

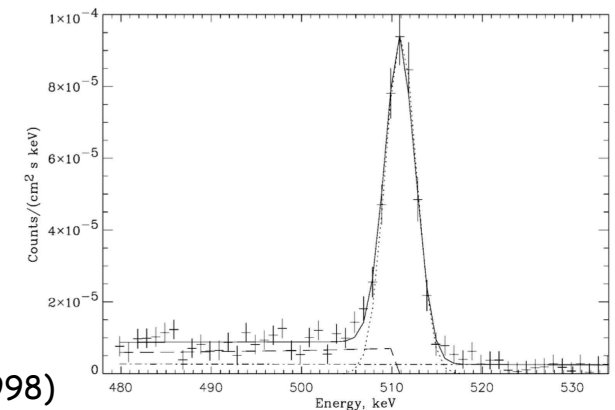
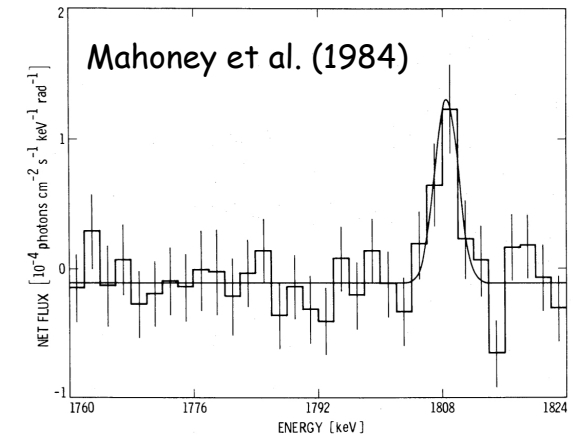
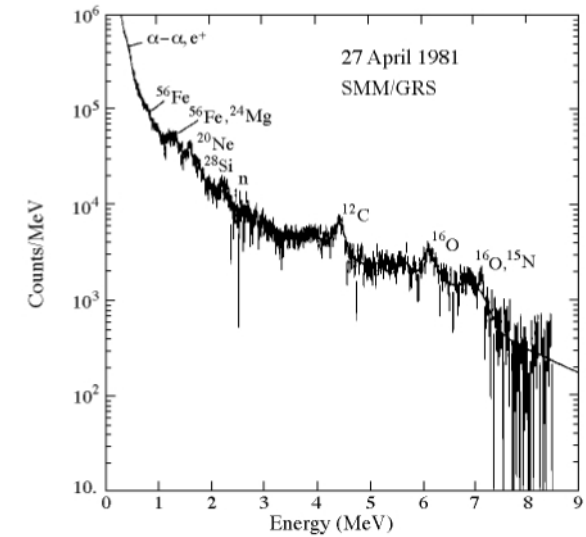


I - Introduction

b - Historique & observations

2 - Historique des observations

- Instruments embarqués en satellite
 - 1972 : OSO-7 (NaI) 1ere détection de raies gamma d'une éruption solaire : e^+e^- , ${}^1\text{H}(n, \gamma_{2,223\text{MeV}})$, ${}^{12}\text{C}^*(4.4\text{MeV})$, ${}^{16}\text{O}^*(6.1\text{MeV})$
 - 1979-1980: HEAO3 (spectromètre Ge)
 - > confirmation de la raie d'annihilation
 - > première détection de la raie à 1.8 MeV de l' ${}^{26}\text{Al}$ dans le plan galactique
 - 1980-1989 : SMM-GRS (NaI)
 - > autres raies d'éruptions solaires
 - > première détection de la raie du ${}^{56}\text{Co}$ de SN 1987A
 - 1994- : WIND-TGRS (spectromètre Ge)
 - > spectroscopie fine de la raie d'annihilation e^+e^-



Harris et al. (1998)

I - Introduction

b - Historique & observations

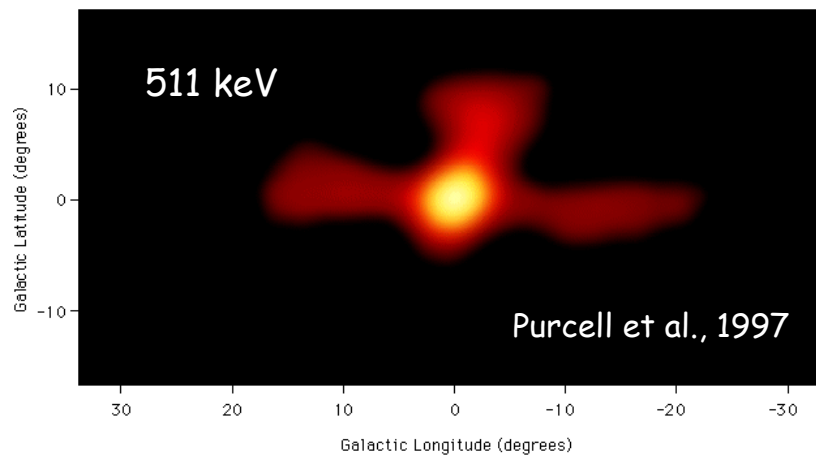
2 - Historique des observations

- 1991-2000 : CGRO, OSSE (NaI) & COMPTEL (Télescope Compton)

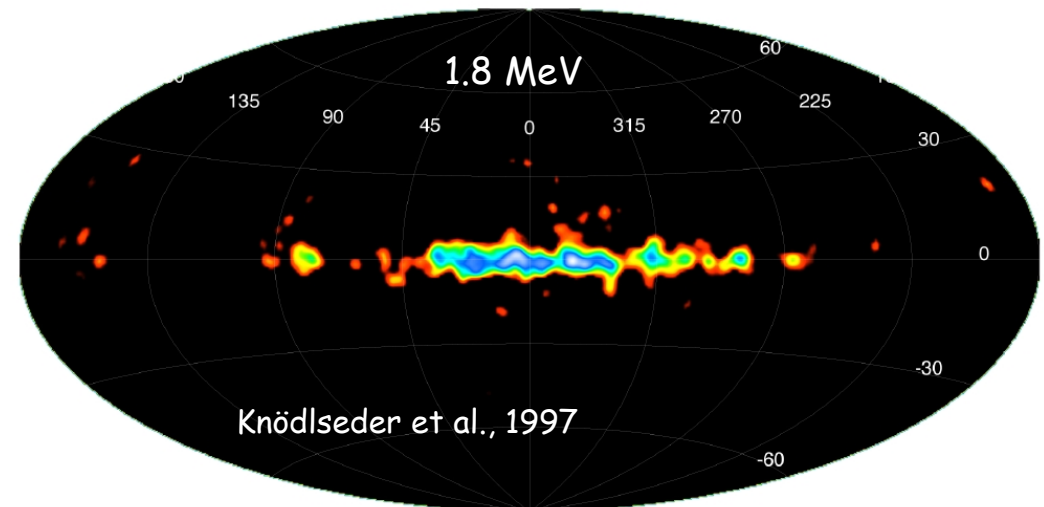
-> première détection directe du ^{57}Co d'une SN (SN 1987A) avec OSSE

-> première détection du ^{44}Ti (Cas A) avec COMPTEL

-> première images de raies gamma (e^+e^- et ^{26}Al)



OSSE



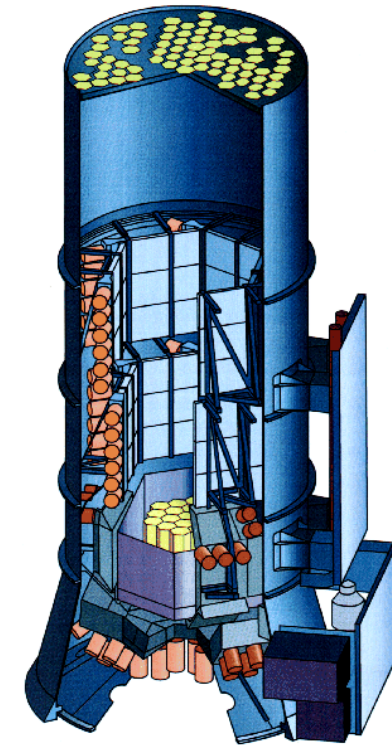
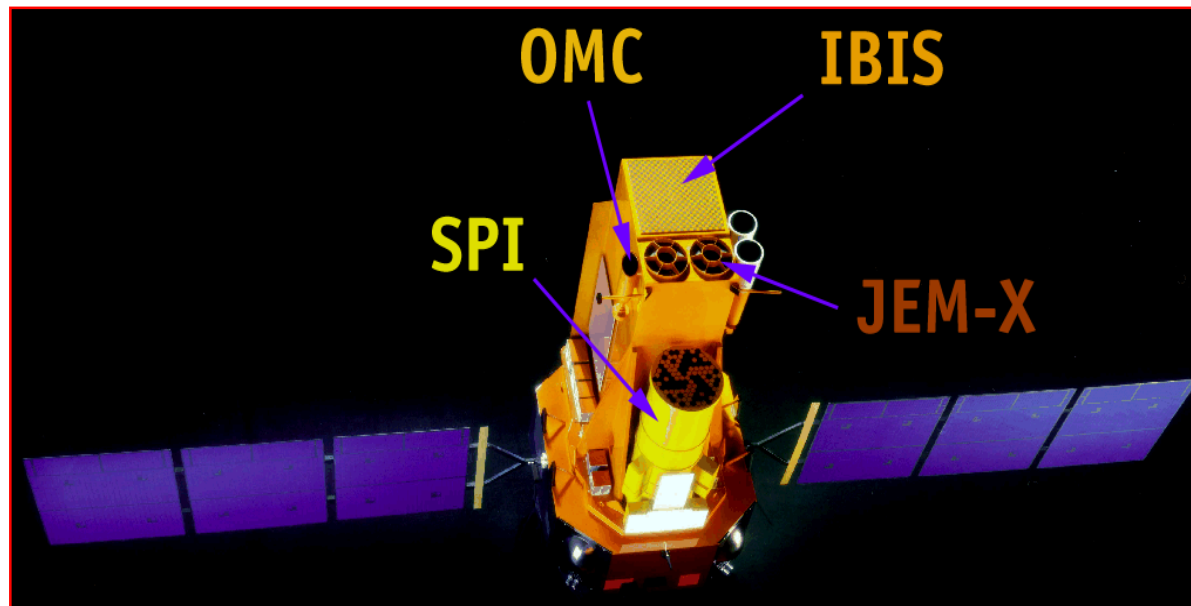
COMPTEL

I - Introduction

b - Historique & observations

3 - Observations avec SPI-INTEGRAL

ESA's INternational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory

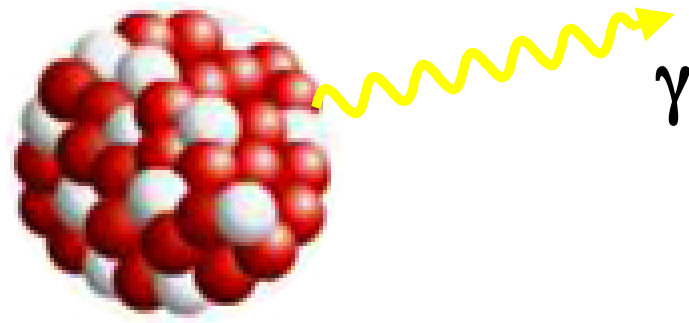


19 détecteurs en germanium
Energies : 20 keV - 8 MeV
 $\Delta E \approx 2 \text{ keV à } 1 \text{ MeV}$
Champ de vue $\approx 20^\circ$
Résolution angulaire $\approx 2^\circ$

Objectifs scientifiques de SPI : nucléosynthèse, émissions diffuses, origine des positrons

- Imagerie \Rightarrow distribution spatiale des sources
- Spectroscopie \Rightarrow conditions physiques

II - Les raies gamma nucléaires



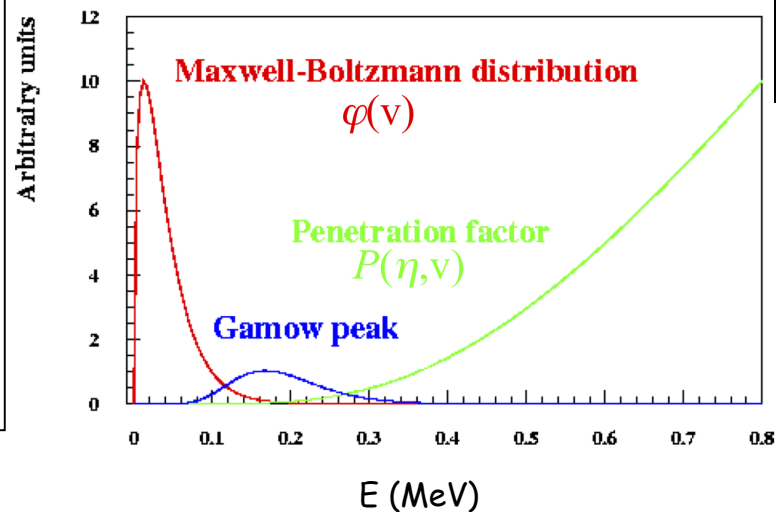
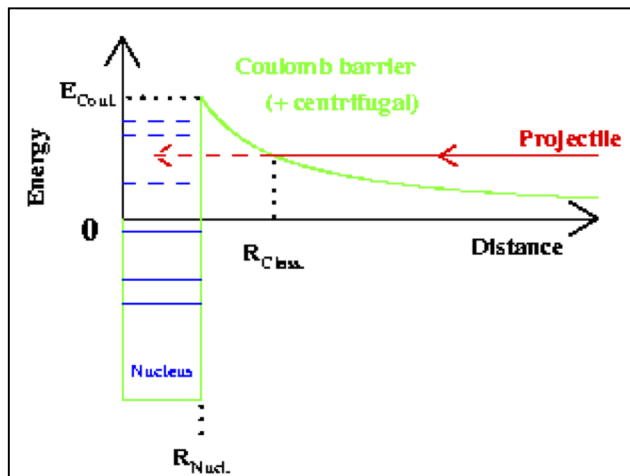
II - Les raies gamma nucléaires

a - Généralités et rappels

1 - Emissions d'isotopes radioactifs

Nucléosynthèse hydrostatique ou explosive

Taux de réaction : $R_{12} = n_1 n_2 \int \sigma(v) v \varphi(v) dv$
avec $\varphi(v)$ distribution de Maxwell-Boltzmann
et la section efficace $\sigma(v) \propto P(\eta, v)$



Kepler

Nova Cygni 1992

SN

Cat's eye nebula

AGB

WR

Nebula M1-67 around Star WR224
Hubble Space Telescope • WFPC2

$$E_{\text{Gamow}} \sim 0.1-10 \text{ keV}$$

$$T \sim 10^6-10^8 \text{ K}$$

II - Les raies gamma nucléaires

a - Généralités et rappels

1 - Emissions d'isotopes radioactifs

Nucléosynthèse hydrostatique ou explosive

Ejection dans le milieu interstellaire sur des échelles de temps \ll vie-moyenne de l'isotope.

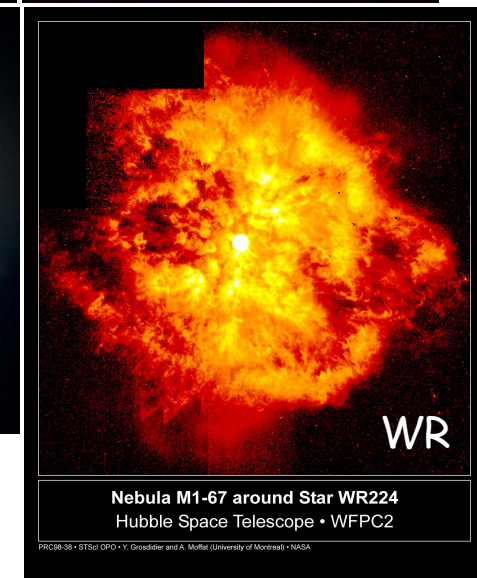
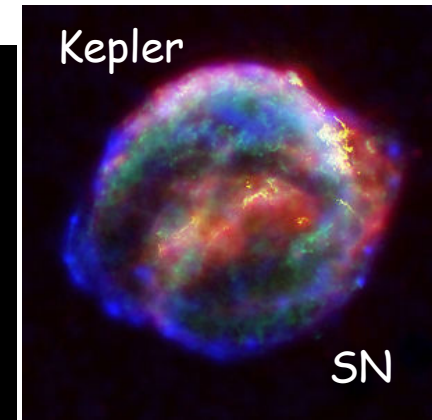
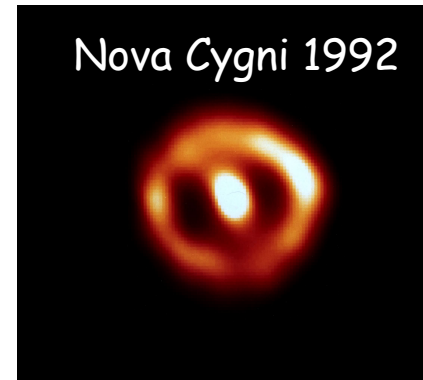
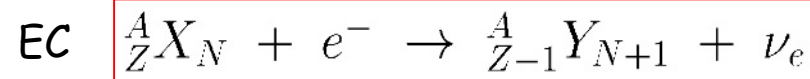
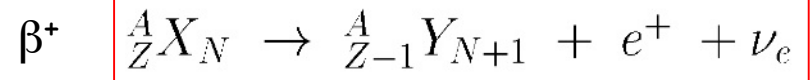
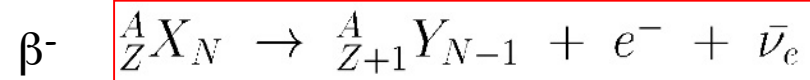


Table 1. The menu of gamma-ray lines from radioactivities that may be accessible to gamma-ray astronomy (ordered by ascending lifetime). Theoretical nucleosynthesis yield estimates are quoted for different source types; the yields for AGB stars are split into low-mass AGBs ($< 5M_{\odot}$, left column) and high-mass AGBs ($> 5M_{\odot}$, right column). Positron emitters are marked by \dagger .

Isotope	Lifetime τ	Lines (keV)	Typical yields (M_{\odot})					
			AGB	WR	SN Ia	SN Ib/c	SN II	Nova
^{57}Ni	2.14 d	1378			0.02	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	
^{56}Ni	8.5 d	158, 812			0.5	0.1	0.1	
^{59}Fe	64.2 d	1099, 1292				$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	
^7Be	77 d	478				10^{-7}	$5 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-11}$
$^{56}\text{Co}^{\dagger}$	112 d	847, 1238			0.5	0.1	0.1	
^{57}Co	392 d	122			0.02	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-3}$	
$^{22}\text{Na}^{\dagger}$	3.76 yr	1275			10^{-8}	10^{-6}	10^{-6}	$5 \cdot 10^{-9}$
^{60}Co	7.61 yr	1173, 1332				10^{-5}	10^{-5}	
$^{44}\text{Ti}^{\dagger}$	87 yr	68, 78, 1157			10^{-5}	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	
$^{26}\text{Al}^{\dagger}$	10^6 yr	1809	10^{-7}	$4 \cdot 10^{-6}$	10^{-4}	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	10^{-8}
^{60}Fe	$2.2 \cdot 10^6$ yr	1173, 1332		10^{-10}	$5 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-5}$	

II - Les raies gamma nucléaires

• Décroissances radioactives



• Loi de décroissance radioactive

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N}{\tau} + Y(t)$$

$$N(t) = Y(t) * e^{-\frac{t}{\tau}} u(t)$$

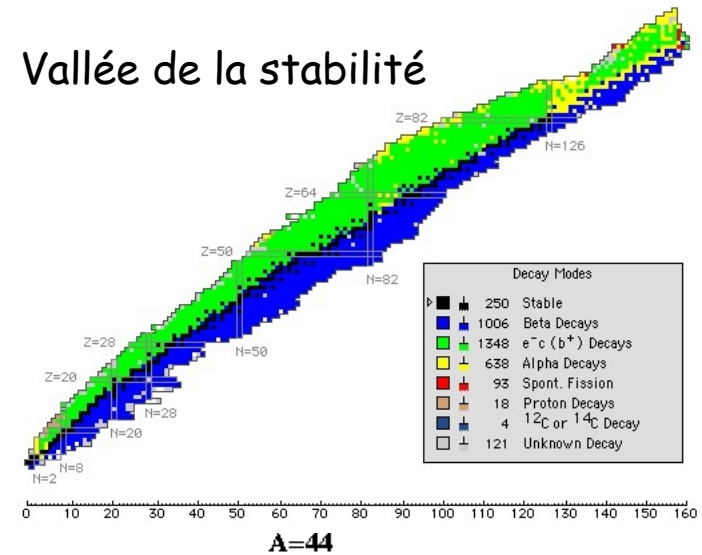
avec N le nombre d'isotope, τ la vie moyenne, Y leur taux de production (s^{-1}), u la fonction de Heaviside et * désigne le produit de convolution.

• Taux d'émission de photons gamma (s^{-1})

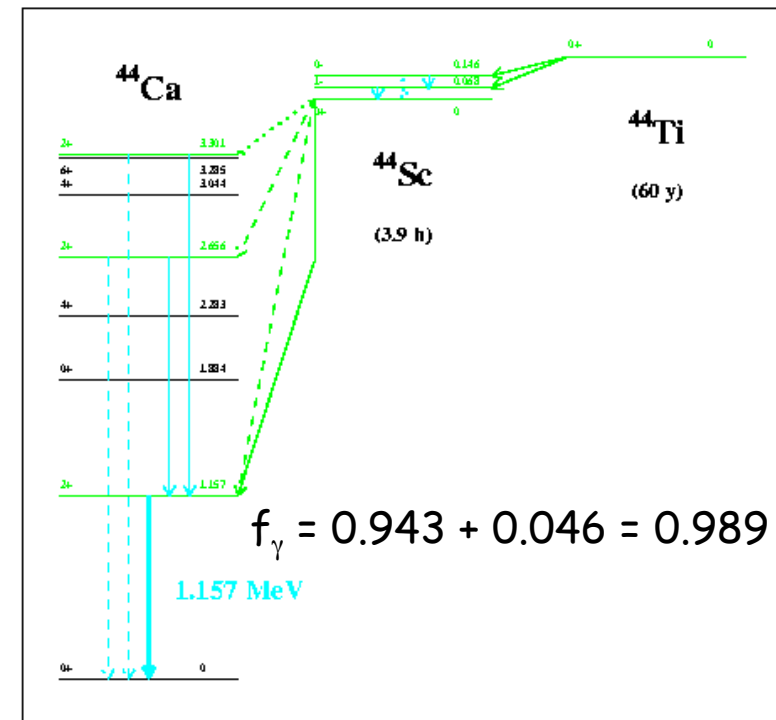
$$\dot{N}_\gamma = f_\gamma \frac{N(t)}{\tau}$$

Z
Ha
Fm
Am
Th
At
Hg
Re
Yb
Tb
Nd
Cs
Sn
Rh
Zr
Br
Zn
Mn
Ca
P
Ne
B
n

Vallée de la stabilité



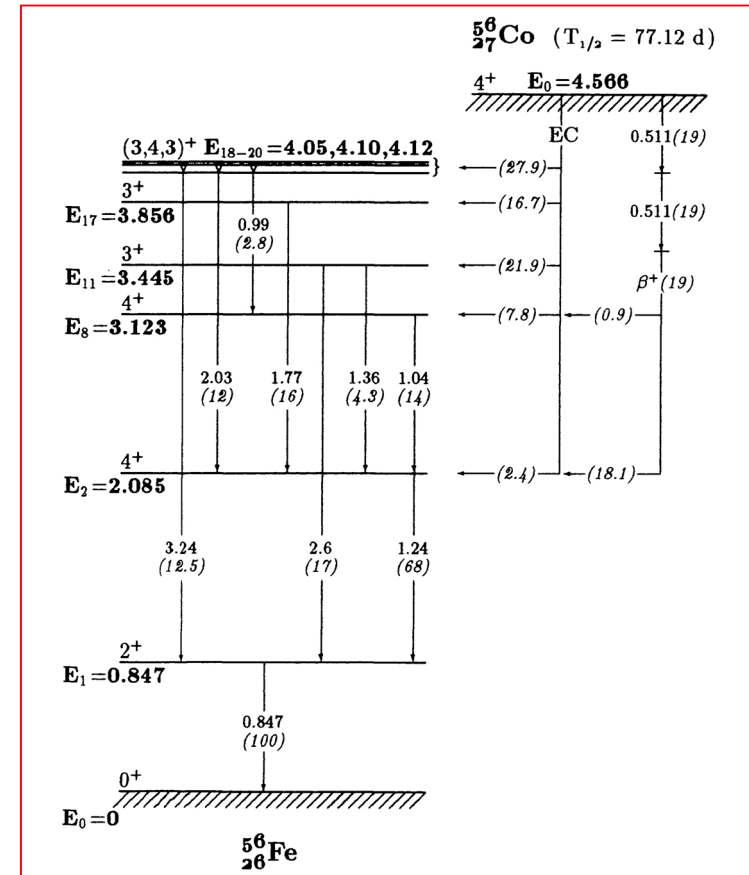
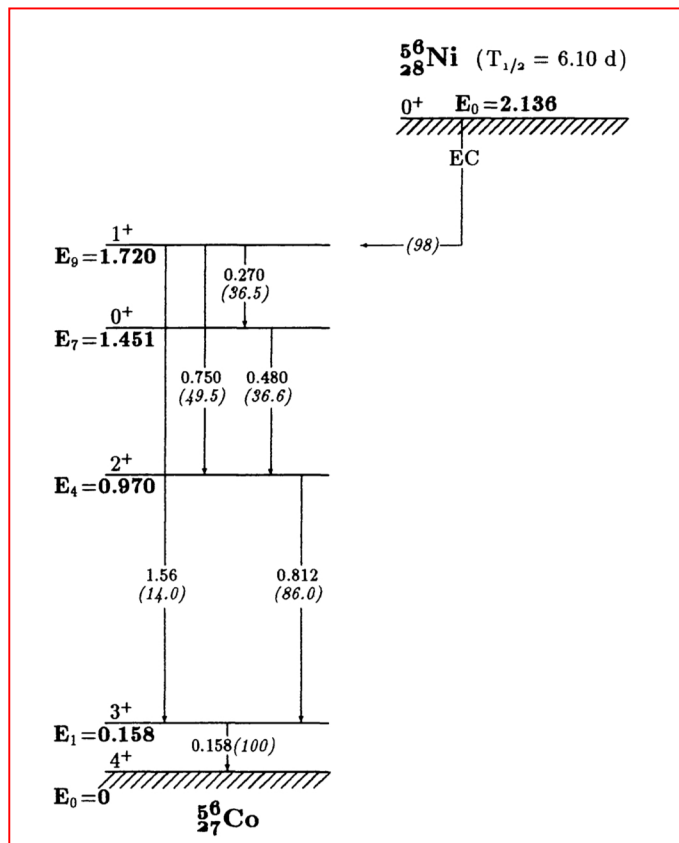
N



II - Les raies gamma nucléaires

- Cas des isotopes produits par une nova et/ou supernova : $Y(t) \sim N_{ej} \delta(t)$

Exemple : SN Ia, $^{56}\text{Ni}(\text{CE}, \tau = 8.8 \text{ j}) \rightarrow ^{56}\text{Co}(\text{CE}/\beta^+, \tau = 111.3 \text{ j}) \rightarrow ^{56}\text{Fe}(\text{stable})$

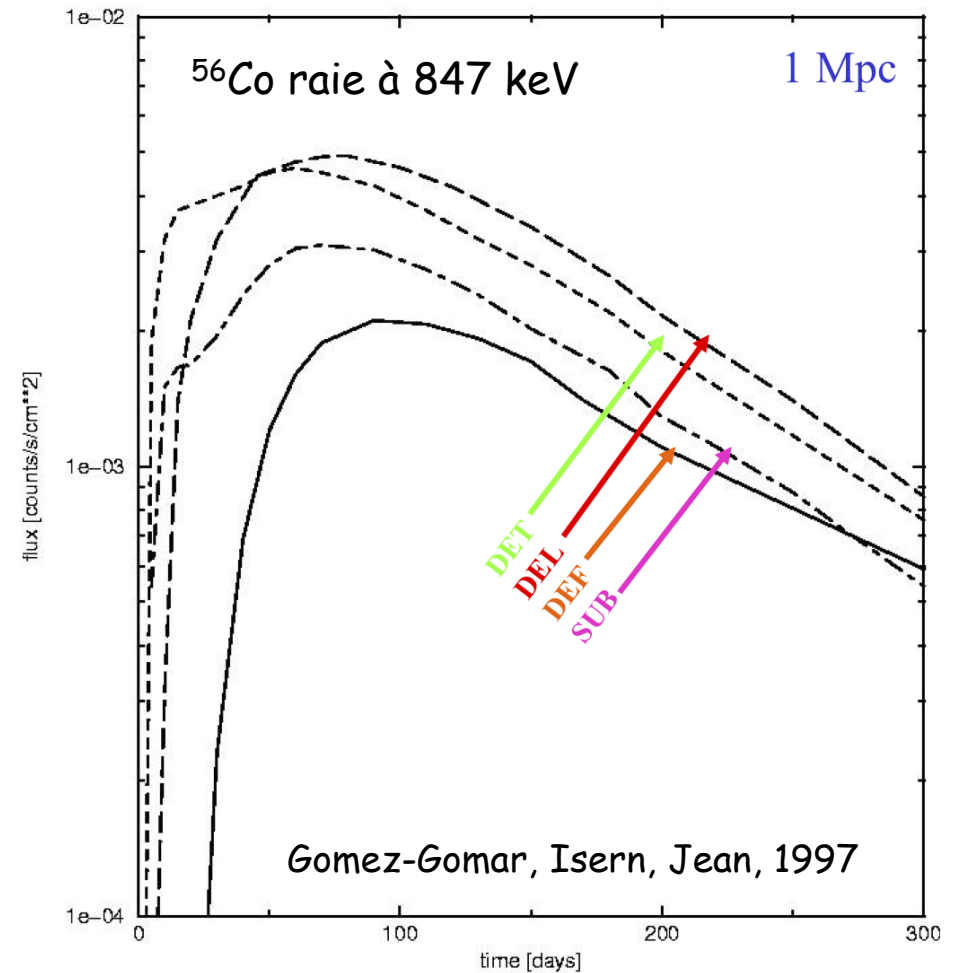
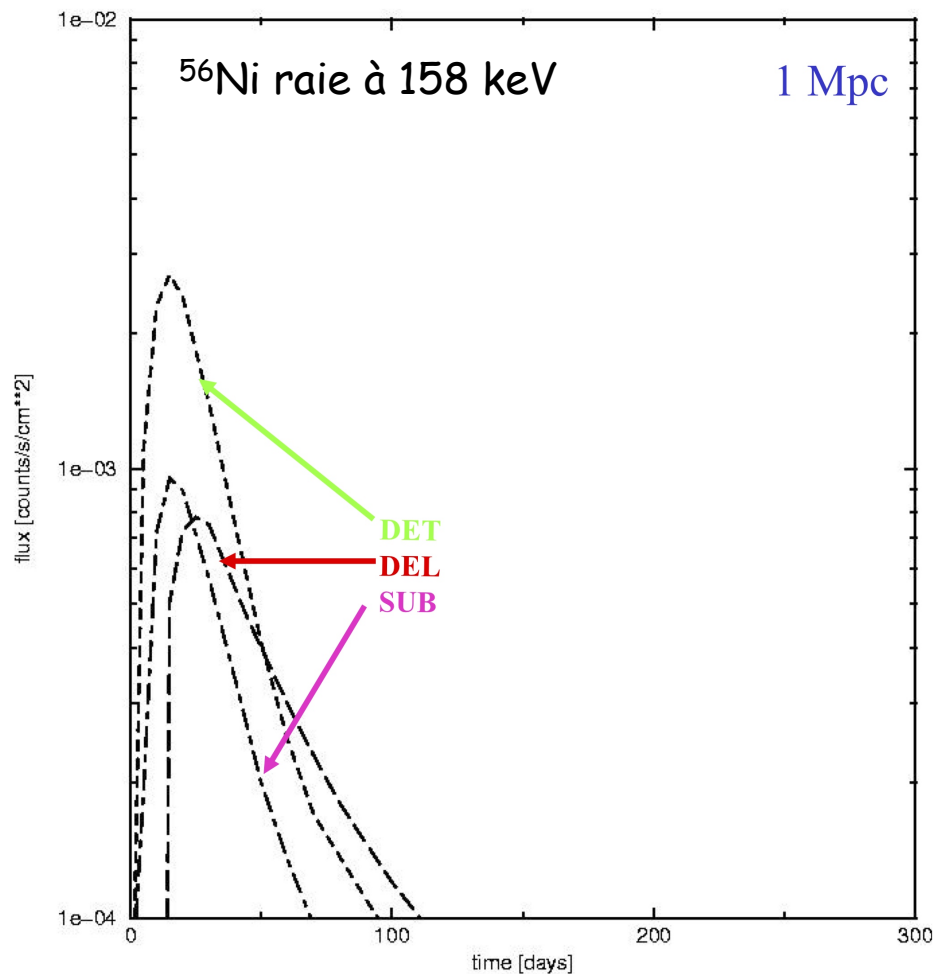


II - Les raies gamma nucléaires

- Cas des isotopes produits par une nova et/ou supernova : $Y(t) \sim N_{ej} \delta(t)$

Exemple : SN Ia, $^{56}\text{Ni}(\text{CE}, \tau = 8.8 \text{ j}) \rightarrow ^{56}\text{Co}(\text{CE}/\beta^+, \tau = 111.3 \text{ j}) \rightarrow ^{56}\text{Fe}(\text{stable})$

=> Effet de la dynamique et de l'opacité de l'éjecta sur l'émission gamma (simulations MC)



II - Les raies gamma nucléaires

- Cas de la production par les AGB et WR

$$\Rightarrow Y(t) \sim f(t)$$

Ex : l' ^{26}Al produit par les étoiles WR

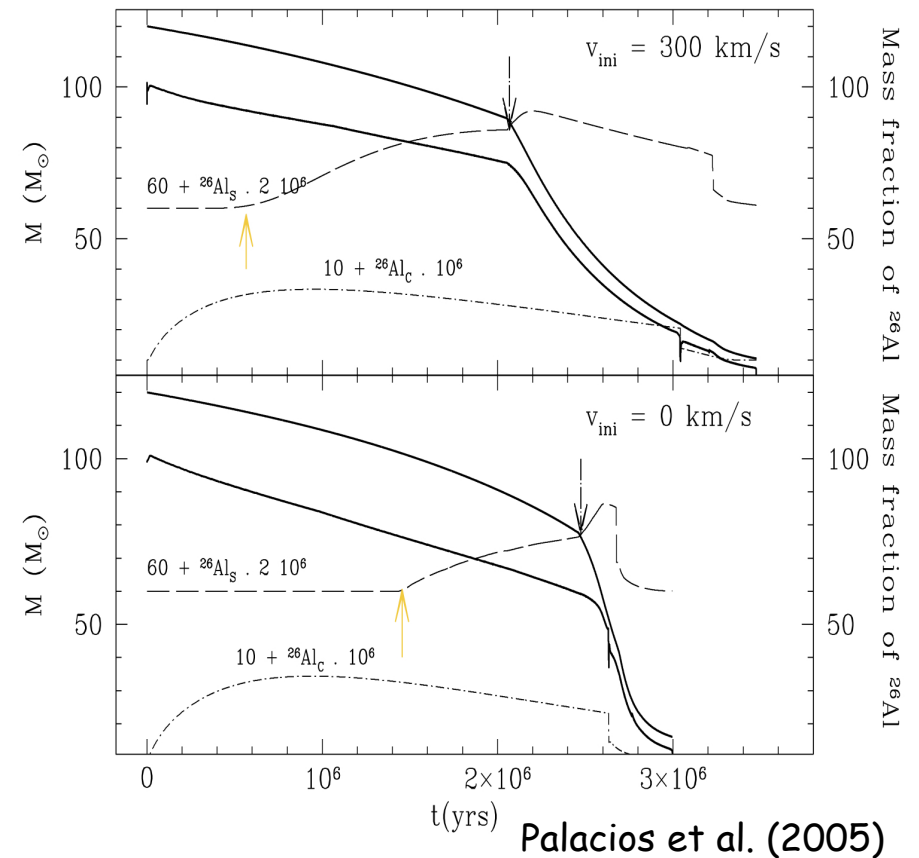
- Cas de la production cumulée dans la Galaxie

Ejection de N_{ej} isotopes de durée de vie τ
à une fréquence ν (yr^{-1})

- $\tau \nu \ll 1 \Rightarrow$ Emissions ponctuelles

- $\tau \nu \gg 1 \Rightarrow$ Emissions diffuses \Rightarrow

$$\frac{dN_{\text{Gal}}}{dt} = -\frac{N_{\text{Gal}}}{\tau} + Y_{\text{Gal}} = -\frac{N_{\text{Gal}}}{\tau} + \nu N_{ej}$$



II - Les raies gamma nucléaires

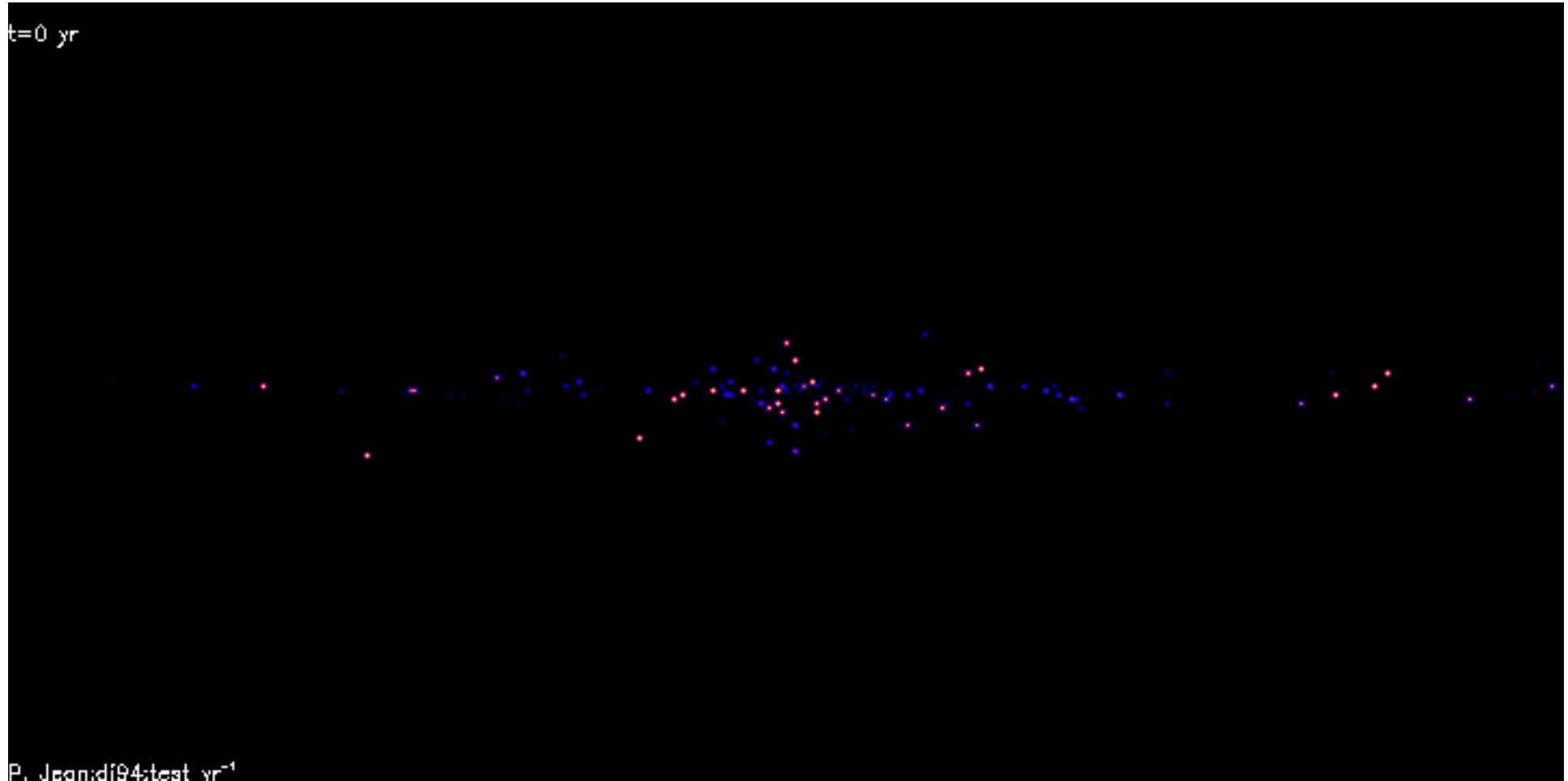
$$\tau = 3.75 \text{ yr}, \nu = 0.1 \text{ yr}^{-1}$$

t=0 yr

P. Jean:di94-test yr⁻¹

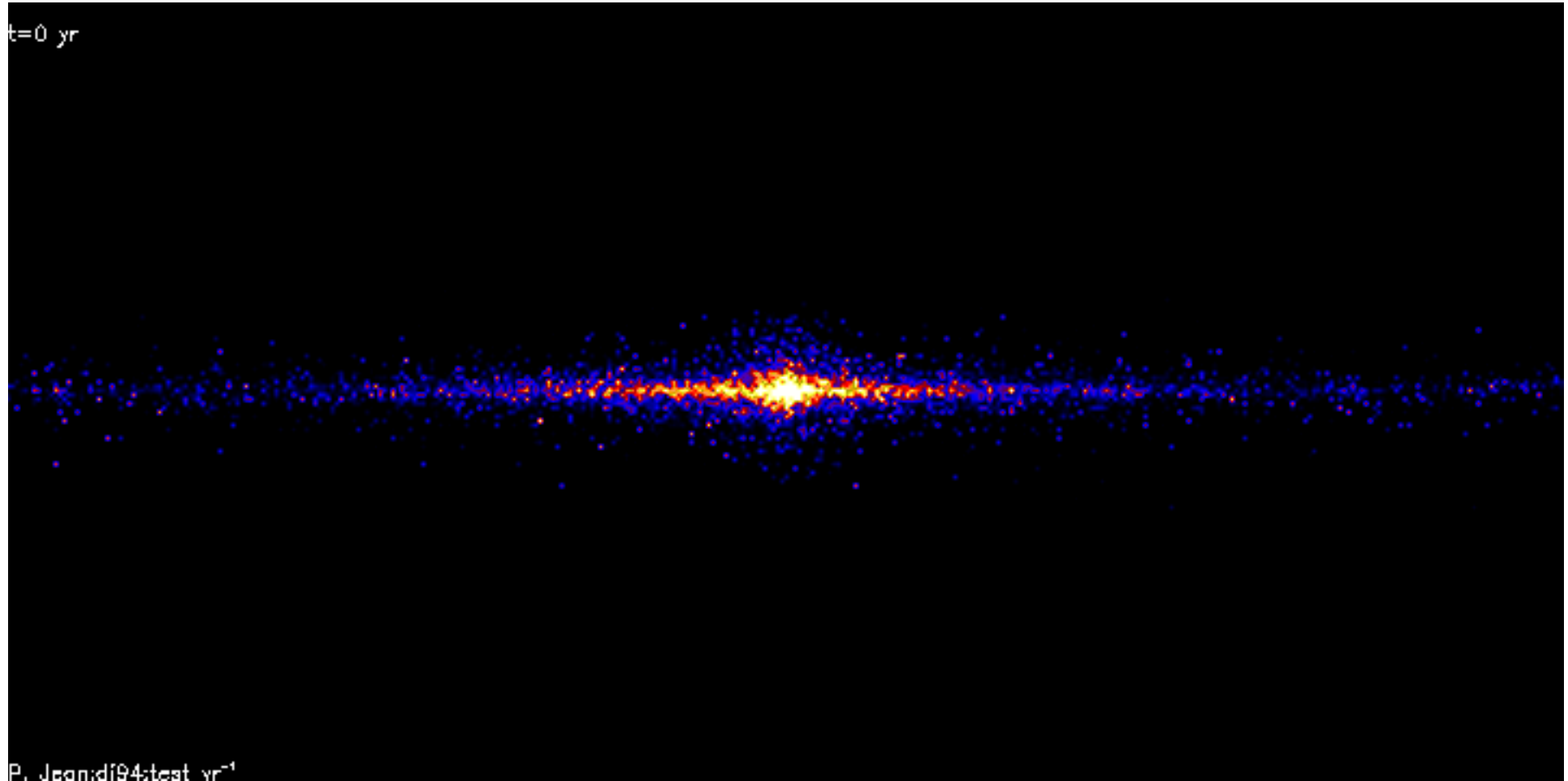
II - Les raies gamma nucléaires

$$\tau = 3.75 \text{ yr}, \nu = 10 \text{ yr}^{-1}$$



II - Les raies gamma nucléaires

$$\tau = 3.75 \text{ yr}, \nu = 1000 \text{ yr}^{-1}$$



II - Les raies gamma nucléaires

2 - Excitation de noyaux

Interaction de nucléons de haute énergie avec des noyaux

Réactions nucléaires :

spallation, excitation

$X(a,b)Y^*$ puis $Y^* \rightarrow Y + \gamma$

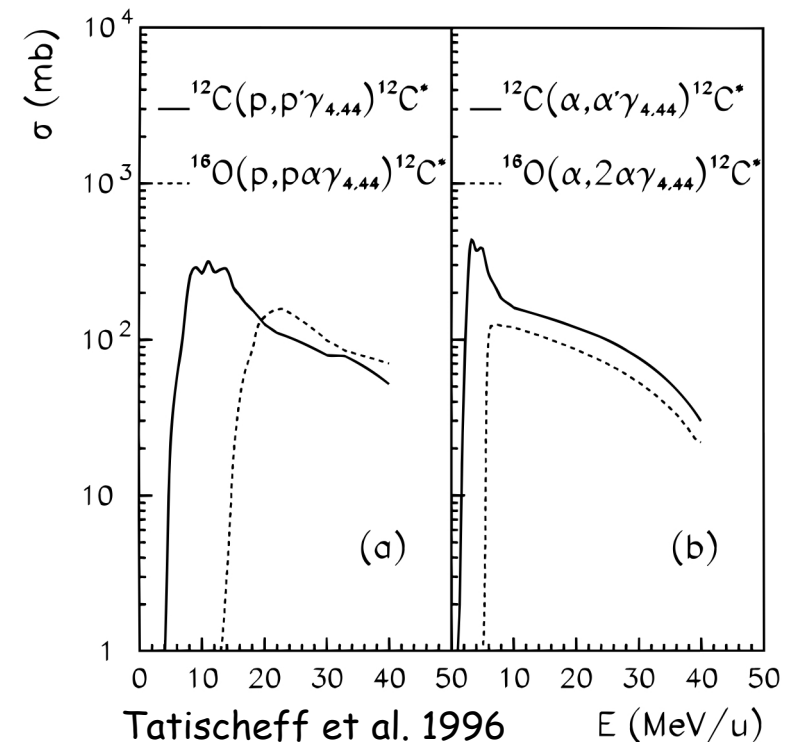
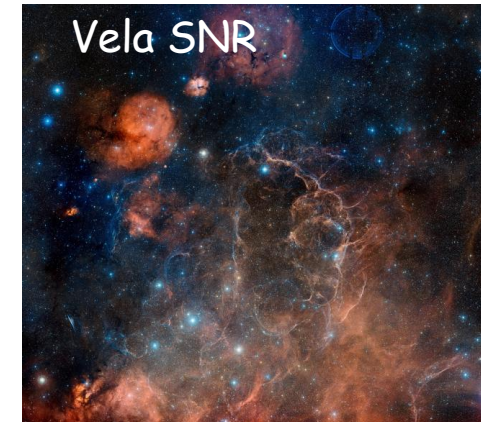
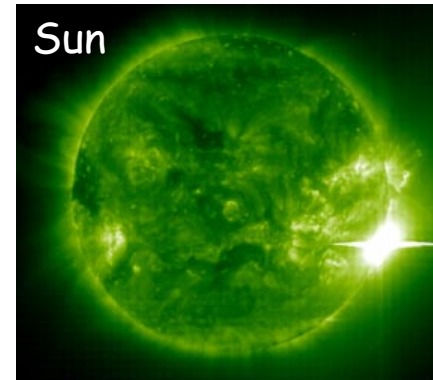
Taux d'émission de photons gamma (s^{-1})

$$\dot{N}_\gamma = n_t \int_0^\infty \frac{dN}{dE}(E) v(E) \sigma(E) dE$$

avec n_t la densité de cible (X), dN/dE la distribution en énergie des nucléons incidents (a), v leur vitesse et σ la section efficace.

Réactions endoénergétiques

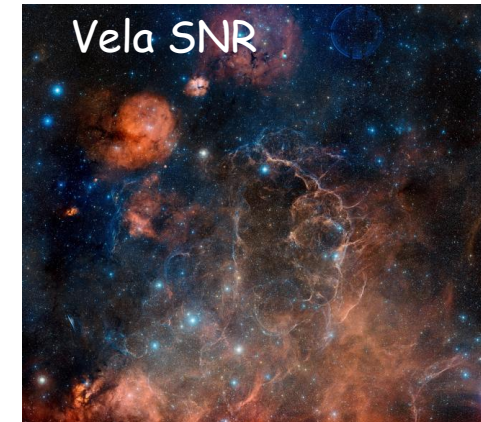
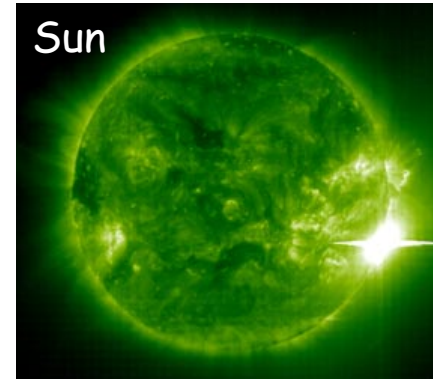
$$\Rightarrow E_{Th} = \Delta M_{X(a,b)Y^*} \times \frac{M_a + M_X}{M_X}$$



II - Les raies gamma nucléaires

2 - Excitation de noyaux

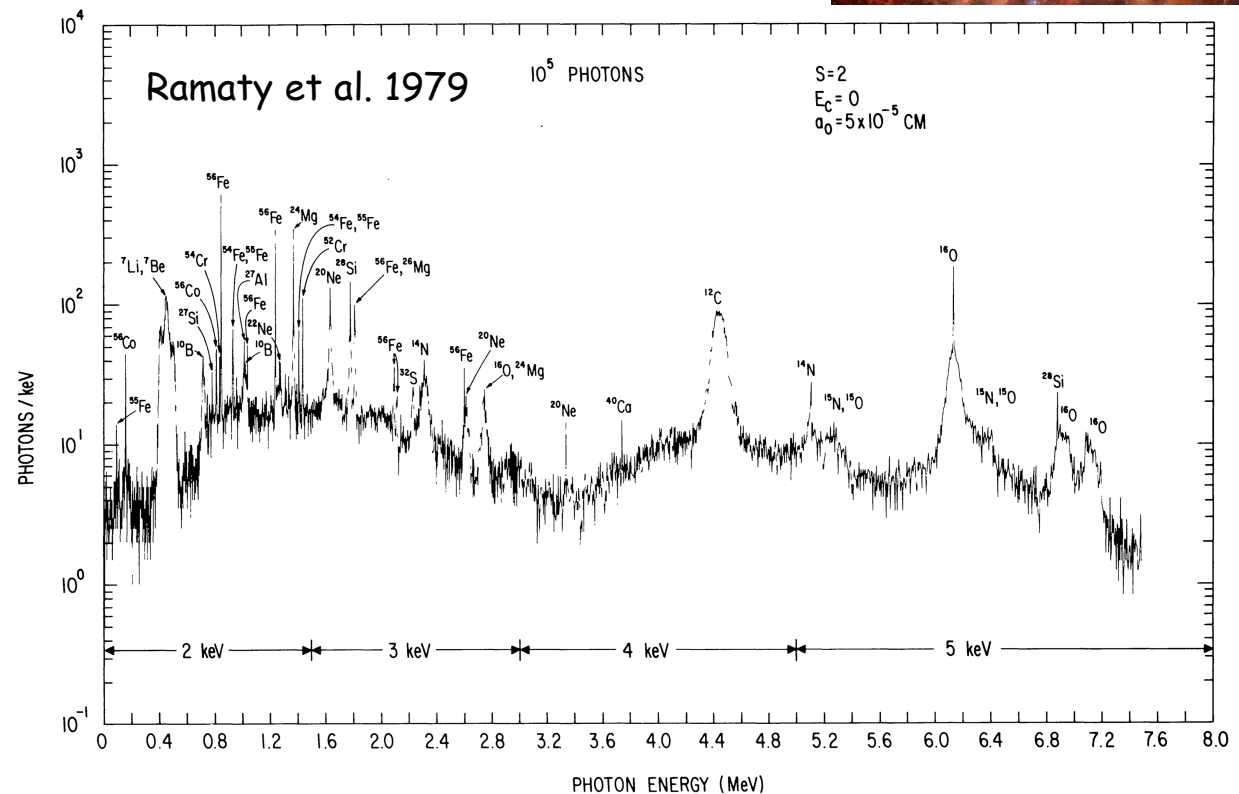
Interaction de nucléons de haute énergie
avec des noyaux



Exemple : interaction du rayonnement cosmique avec le MIS

Raie à 4.438 MeV du $^{12}\text{C}^*$

- $^{12}\text{C}(p,p')^{12}\text{C}^*$
- $^{12}\text{C}(\alpha,\alpha')^{12}\text{C}^*$
- $^{14}\text{N}(p,x)^{12}\text{C}^*$
- $^{14}\text{N}(\alpha,x)^{12}\text{C}^*$
- $^{16}\text{O}(p,x)^{12}\text{C}^*$
- $^{16}\text{O}(\alpha,x)^{12}\text{C}^*$



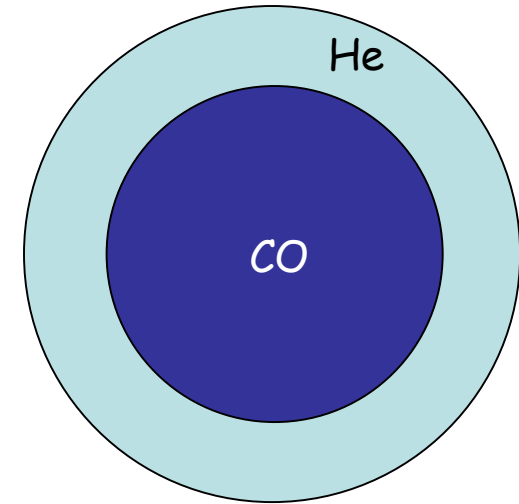
II - Les raies gamma nucléaires

b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse stellaire

1 - SN Ia : explosion thermonucléaire d'une naine blanche CO accréant de la matière dans un système binaire ($M > 1.35 M_{\odot}$)

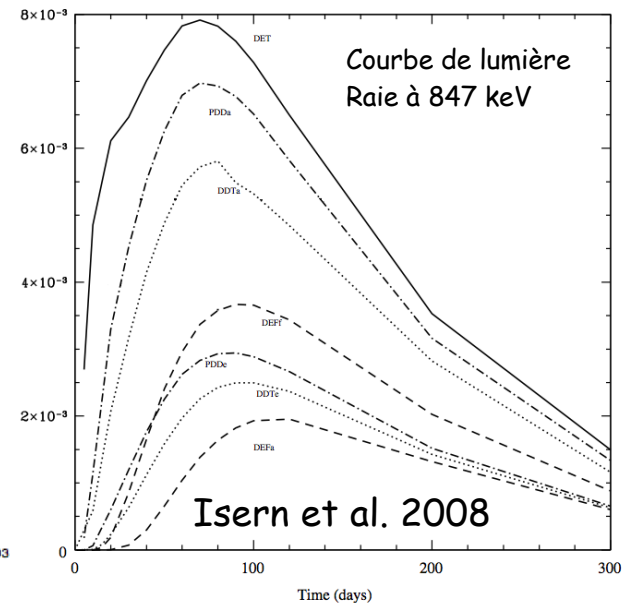
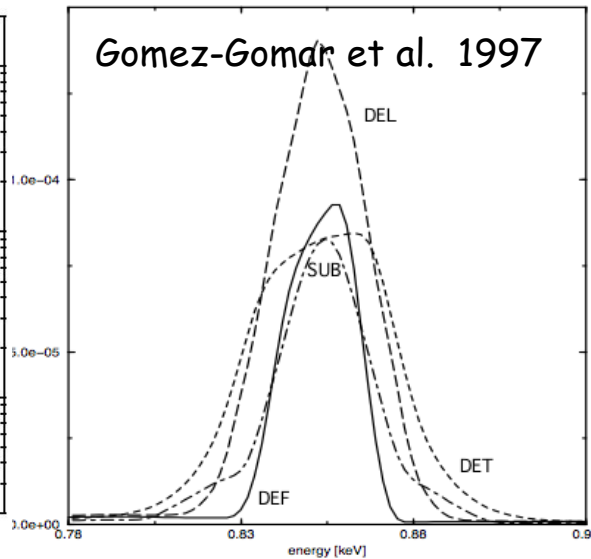
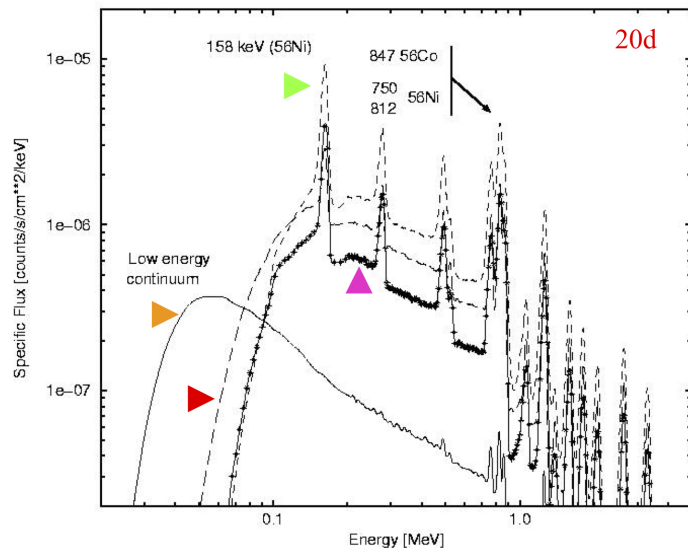
- Modèles d'explosion - détonation
 - déflagration
 - détonation retardée
 - détonation retardée pulsante
 - détonation sub-Chandrasekhar

- Isotopes produits : $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$
 $^{57}\text{Ni} \rightarrow ^{57}\text{Co} \rightarrow ^{57}\text{Fe}$



$$M_{\text{CO}} \sim 0.5 - 1.1 M_{\odot}$$

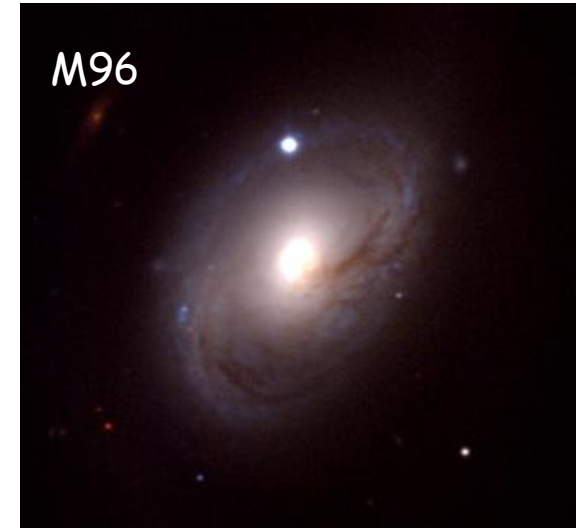
$$M_{\text{He}} \sim 0.2 - 0.3 M_{\odot}$$



II - Les raies gamma nucléaires

b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse stellaire

1 - SN Ia : explosion thermonucléaire d'une naine blanche CO accrétant de la matière dans un système binaire ($M > 1.35 M_{\odot}$)



Exemple SN 1998bu : $d = 11.3 \pm 0.9$ Mpc

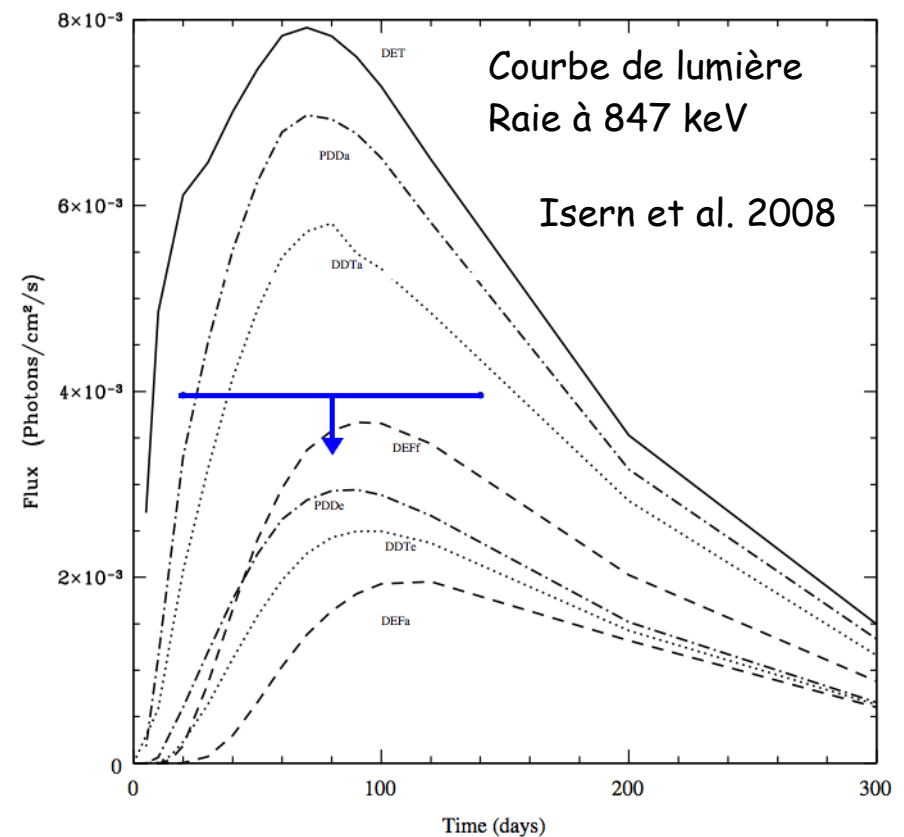
-> $M_{56\text{Ni}} \approx 0.77 M$ d'après la courbe de lumière en visible

-> Observations avec COMPTEL (CGRO)

Limite supérieure à 2σ du flux

$$F_{847\text{keV}} < 3.1 \times 10^{-5} \text{ ph/s/cm}^2$$

Réjection des modèles « détonation »

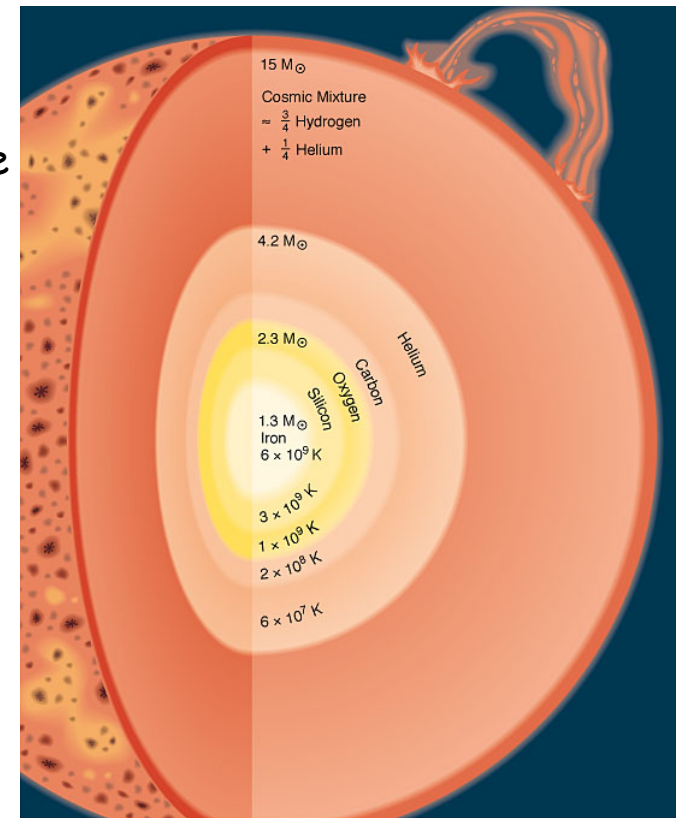
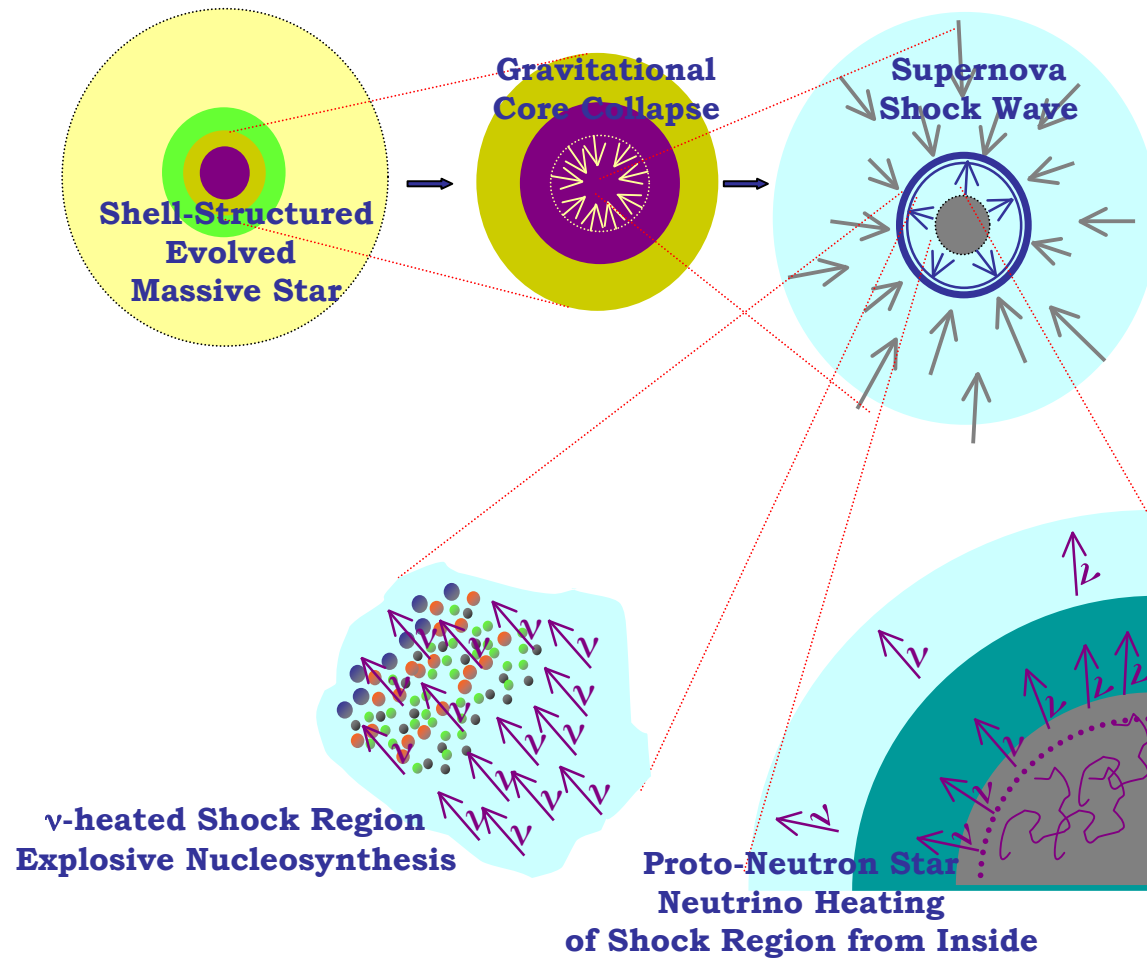


II - Les raies gamma nucléaires

b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse stellaire

2 - Supernovae gravitationnelles (« core-collapse SNe »)

Etoiles massives : $M > 10 M_{\odot}$



Combustion du Si (NSE)
Production d'éléments lourds
Ejection des couches

II - Les raies gamma nucléaires

b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse stellaire

2 - Supernovae gravitationnelles (« core-collapse SNe »)

→ $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$ ($\tau \sim 112$ d) → ^{56}Fe ($E_\gamma = 847, 1238$ keV)

→ $^{57}\text{Ni} \rightarrow ^{57}\text{Co}$ ($\tau \sim 392$ d) → ^{57}Fe ($E_\gamma = 122$ keV)

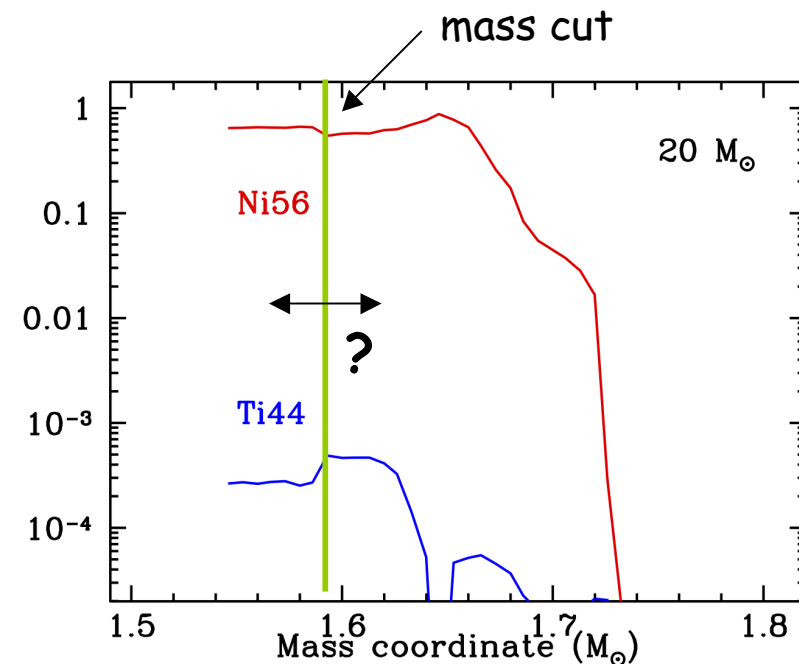
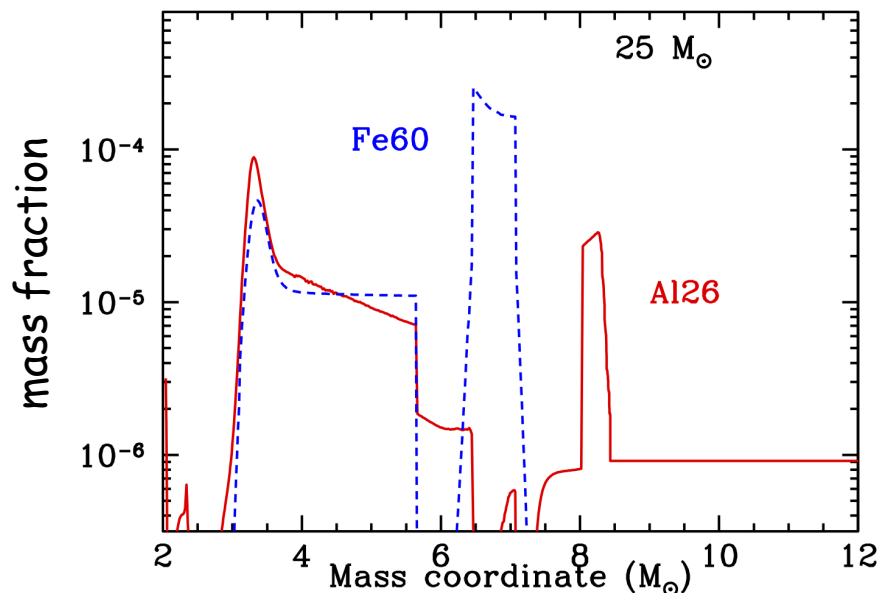
→ ^{44}Ti ($\tau \sim 87$ yr) → ^{44}Sc ($E_\gamma = 68, 78$ keV) → ^{44}Ca ($E_\gamma = 1157$ keV)

→ ^{26}Al ($\tau \sim 1$ Myr, $E_\gamma = 1809$ keV)

→ ^{60}Fe ($\tau \sim 2$ Myr) → ^{60}Co → ^{60}Ni ($E_\gamma = 1173, 1332$ keV)

$$\nu_{\text{ccSN}} \sim 0.03 \text{ yr}^{-1}$$

$\nu_{\text{ccSN}} \times \tau \gg 1 \Rightarrow \text{émissions diffuses}$



Diehl, Prantzos & von Ballmoos (2005)

II - Les raies gamma nucléaires

b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse stellaire

2 - Supernovae gravitationnelles (« core-collapse SNe »)

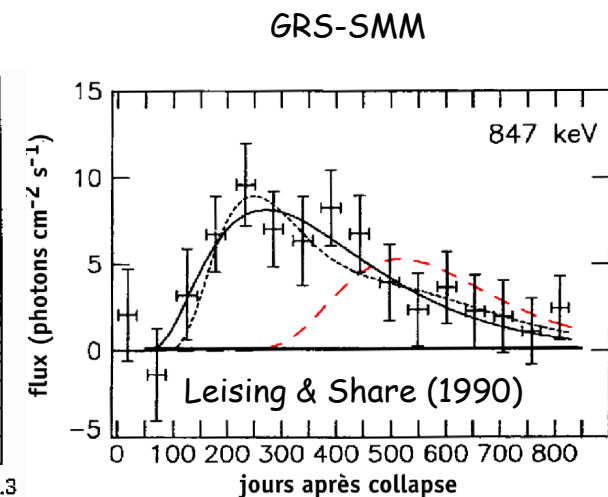
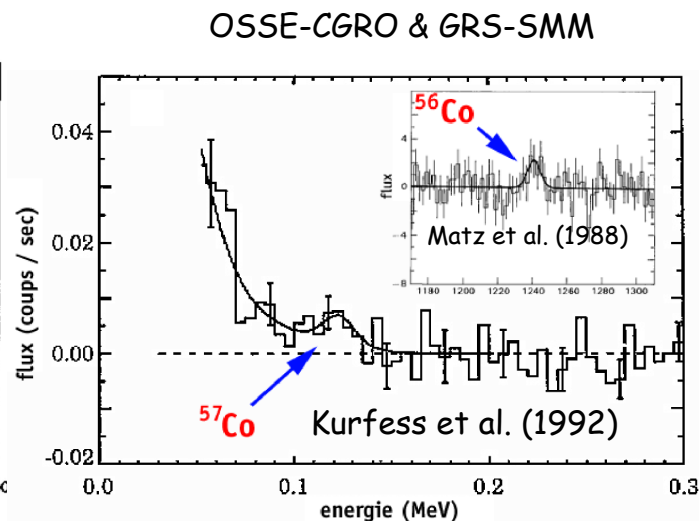
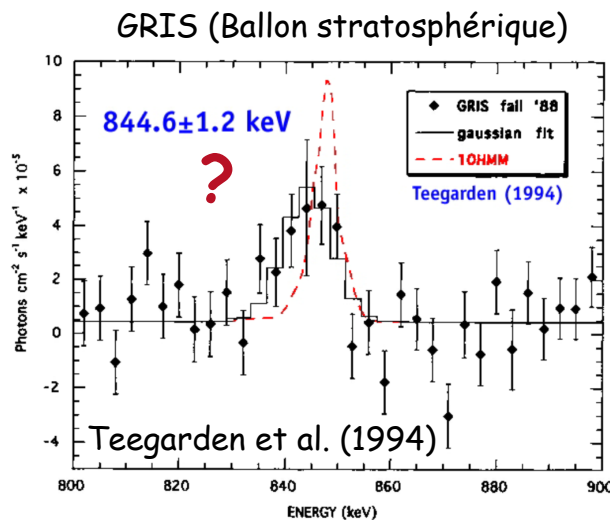
→ $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co}$ ($\tau \sim 112$ d) → ^{56}Fe ($E_\gamma = 847, 1238$ keV)

→ $^{57}\text{Ni} \rightarrow ^{57}\text{Co}$ ($\tau \sim 392$ d) → ^{57}Fe ($E_\gamma = 122$ keV)

SN1987A : $d \sim 50$ kpc, masse du progéniteur $\sim 18\text{-}20 M_\odot$

- Première preuve directe de la nucléosynthèse du ^{56}Ni dans une SN
- Confirmation des modèles de nucléosynthèse : $(^{57}\text{Ni}/^{56}\text{Ni}) \sim 1.5\text{-}2 (^{57}\text{Ni}/^{56}\text{Ni})_\odot$.
- Différence avec les modèles de courbes de lumière à 847 keV suggèrent que du ^{56}Ni est transporté vers l'extérieur par de la turbulence.

SN1987A



II - Les raies gamma nucléaires

b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse stellaire

2 - Supernovae gravitationnelles (« core-collapse SNe »)

→ $^{44}\text{Ti}(\tau \sim 87 \text{ yr}) \rightarrow ^{44}\text{Sc} (E_\gamma = 68, 78 \text{ keV}) \rightarrow ^{44}\text{Ca}(E_\gamma = 1157 \text{ keV})$

Exemple : Cas A, $d \sim 3.4 \text{ kpc}$, explosion en 1671

$$F_{68,78} = (2.5 \pm 0.3) \times 10^{-5} \text{ } \gamma/\text{s}/\text{cm}^2$$

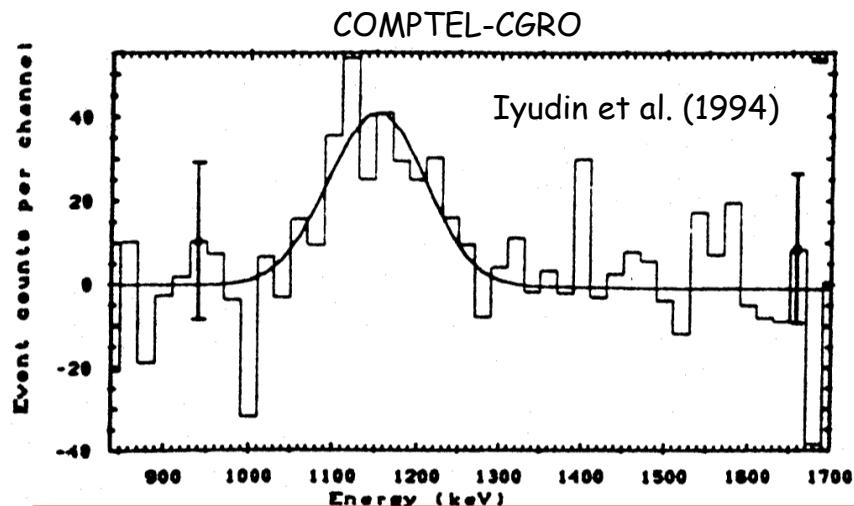
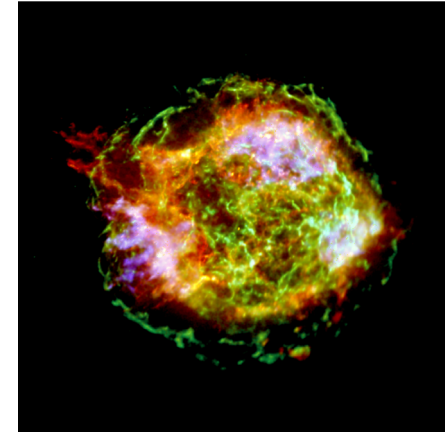
$$M_{44} \sim 1.6 \times 10^{-4} M_\odot$$

Masse de ^{44}Ti plus grande que prévue

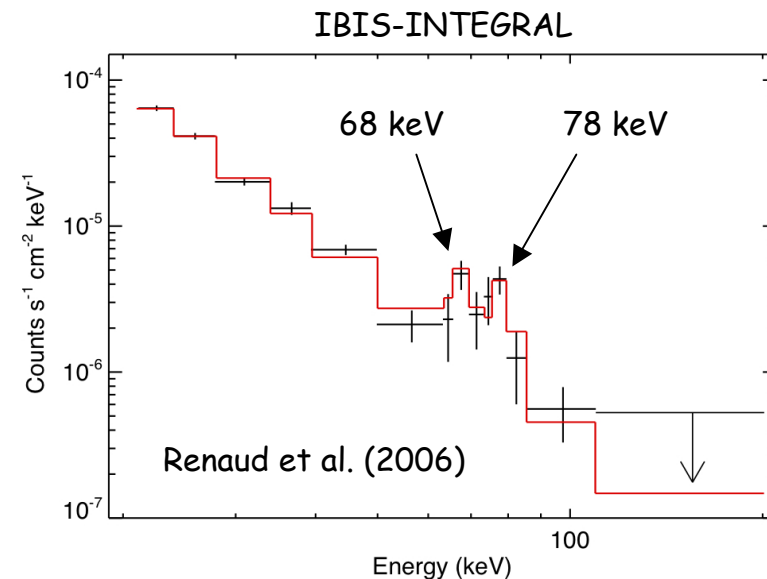
=> débats sur la masse du progéniteur ($20 M_\odot$, $> 60 M_\odot$?)

=> explosion asymétrique, révision de la σ de la réaction $^{40}\text{Ca}(\alpha, \gamma)^{44}\text{Ti}$, ...

Cas A



$$\text{FWHM}_1 \sim (85 \pm 24) \text{ keV} \Rightarrow V_{ej} = (11000 \pm 3100) \text{ km/s}$$



II - Les raies gamma nucléaires

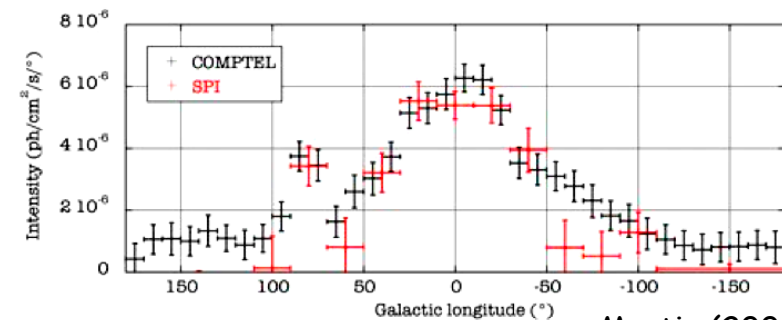
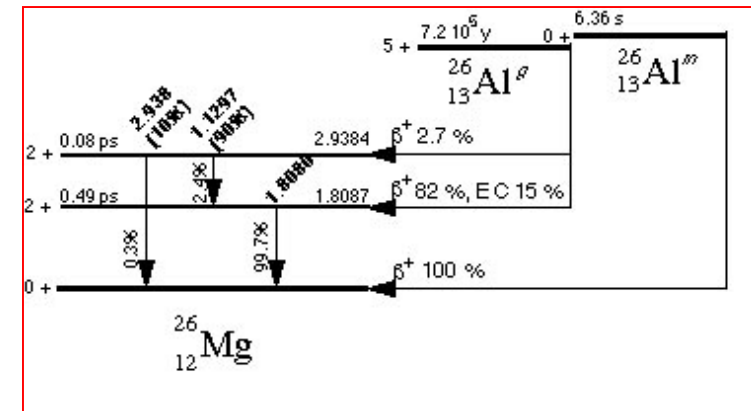
b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse

3 - Emissions diffuses cumulées

-> ^{26}Al ($\tau \sim 1 \text{ Myr}$, $E_\gamma = 1809 \text{ keV}$)

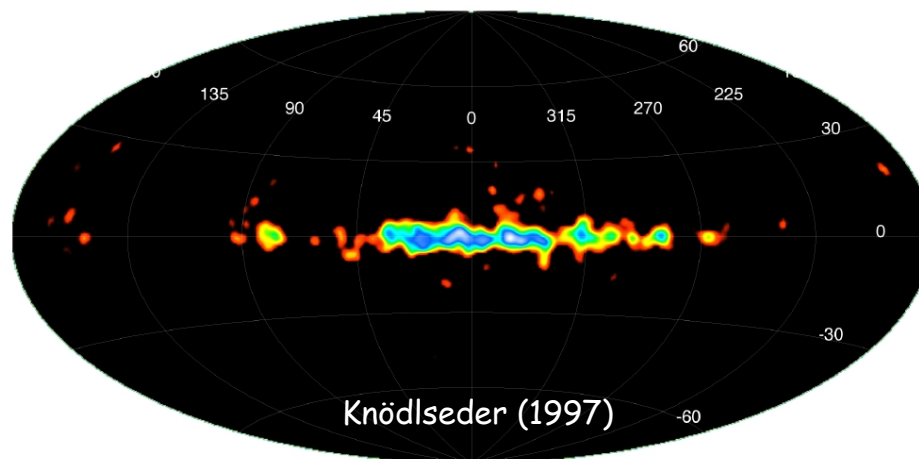
Sources : étoiles massives (WR, SN)

- Correlation avec l'émission free-free du gas ionisé par les étoiles massives.
- Qu'elle est la source de production dominante ?
- Comment se propage-t-il dans le MIS ?

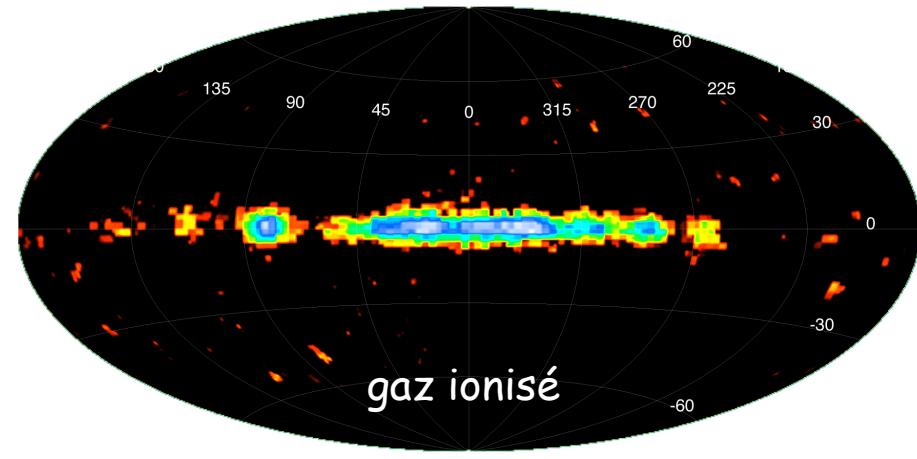


Martin (2008)

COMPTEL-CGRO



DMR-COBE



II - Les raies gamma nucléaires

b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse

3 - Emissions diffuses cumulées

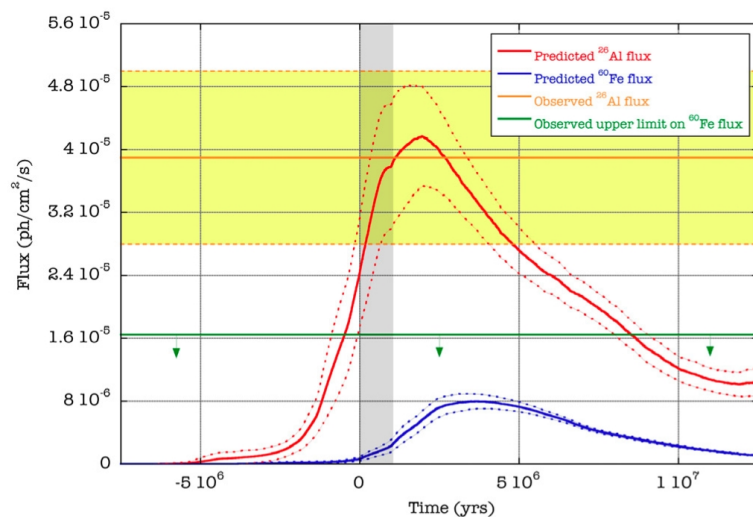
-> ^{26}Al ($\tau \sim 1 \text{ Myr}$, $E_\gamma = 1809 \text{ keV}$)

- Détection du décalage Doppler (rotation Galactique)

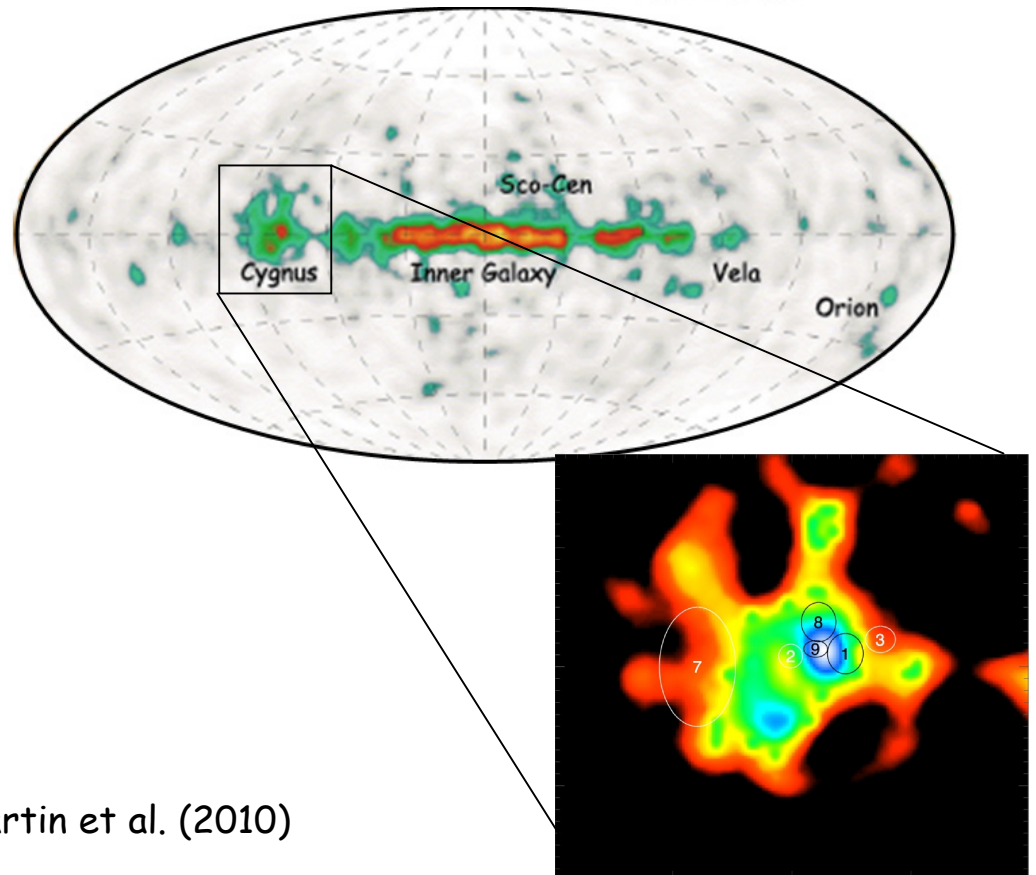
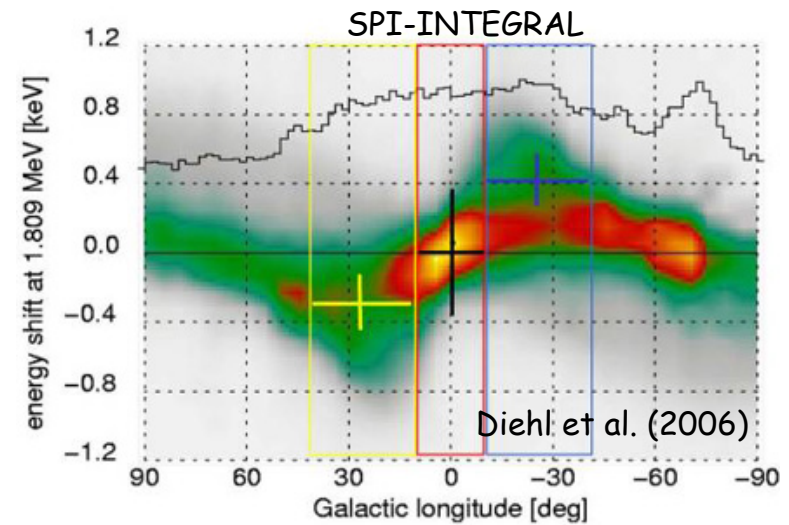
- Masse : $(2.8 \pm 0.8) M_\odot$ dans la Galaxie

Emission « locale »

- Région du Cygne : $d \sim 2 \text{ kpc}$, ~ 200 étoiles O
1 seule SN => WR sont les principales sources



Martin et al. (2010)



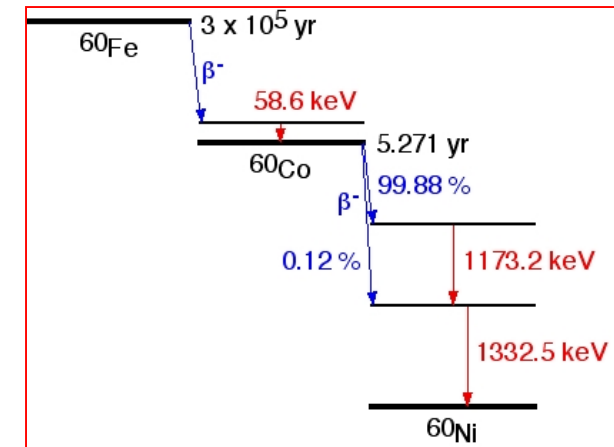
II - Les raies gamma nucléaires

b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse stellaire

3 - Emissions diffuses cumulées

-> $^{60}\text{Fe}(\tau \sim 2 \text{ Myr}) \rightarrow ^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}(E_\gamma = 1173, 1332 \text{ keV})$

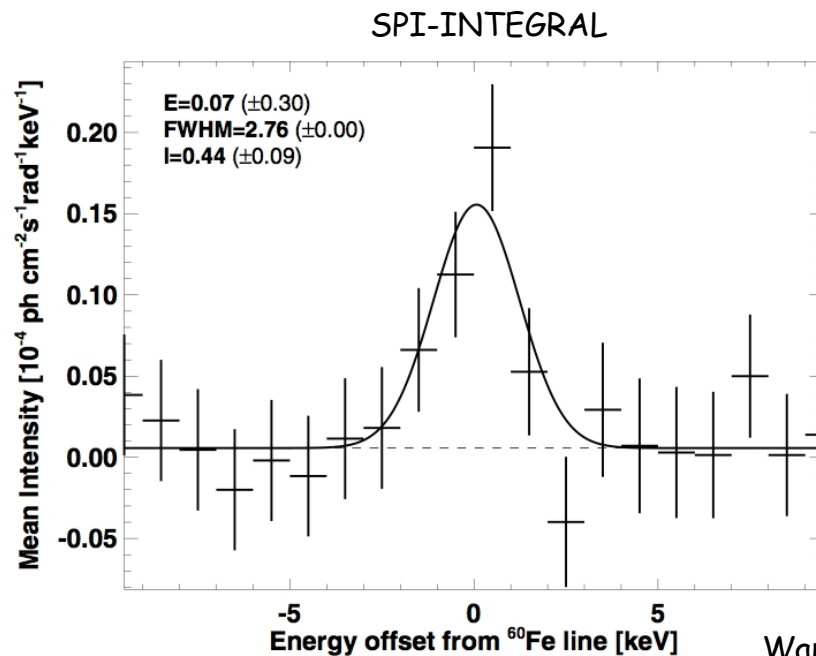
- 1er "détection" avec RHESSI (Smith 2004)
- détection avec SPI (Harris et al. 2005)
- mesure SPI après 3 ans d'observation (Wang et al. 2007)



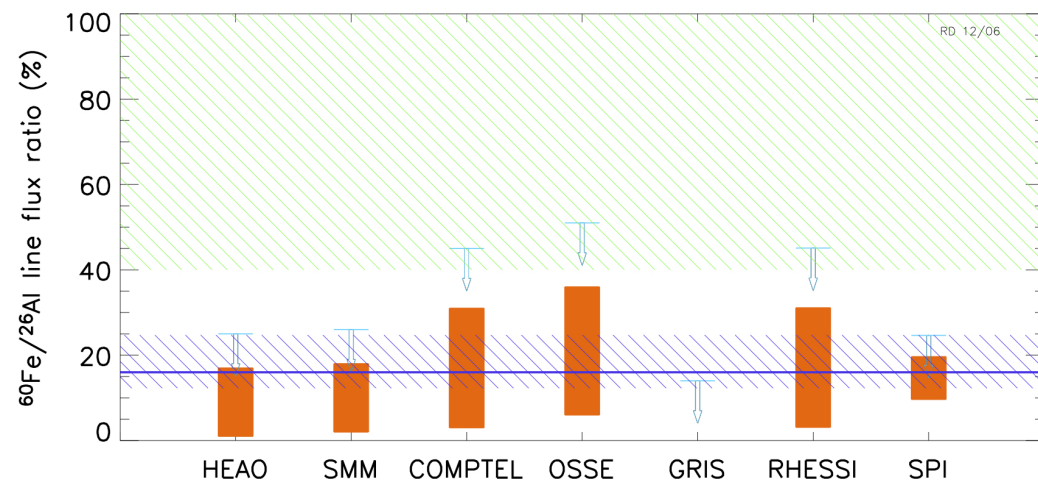
Combinaison des spectres

$$\Rightarrow F_{60} = (4.4 \pm 0.9) \times 10^{-5} \text{ ph/s/cm}^2$$

$$\Rightarrow F_{60}/F_{26} = 0.148 \pm 0.06$$



Wang et al. (2007)



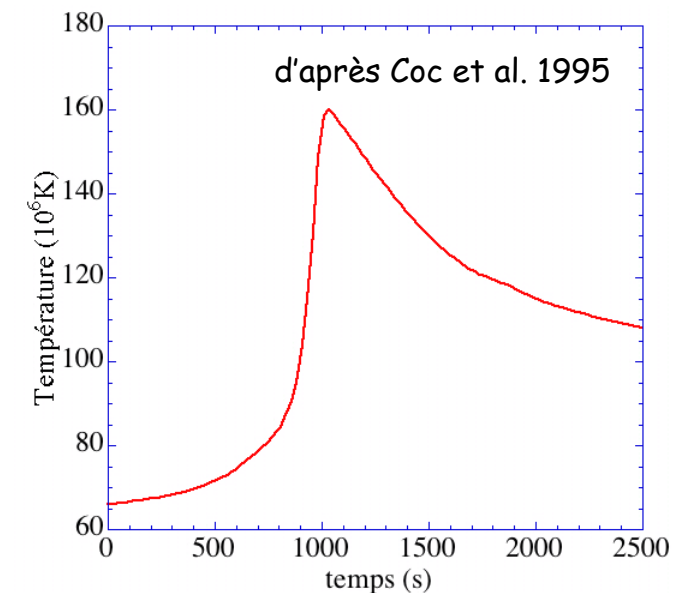
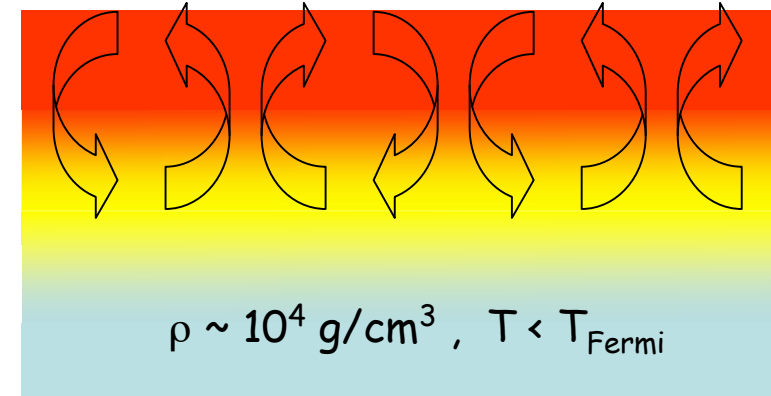
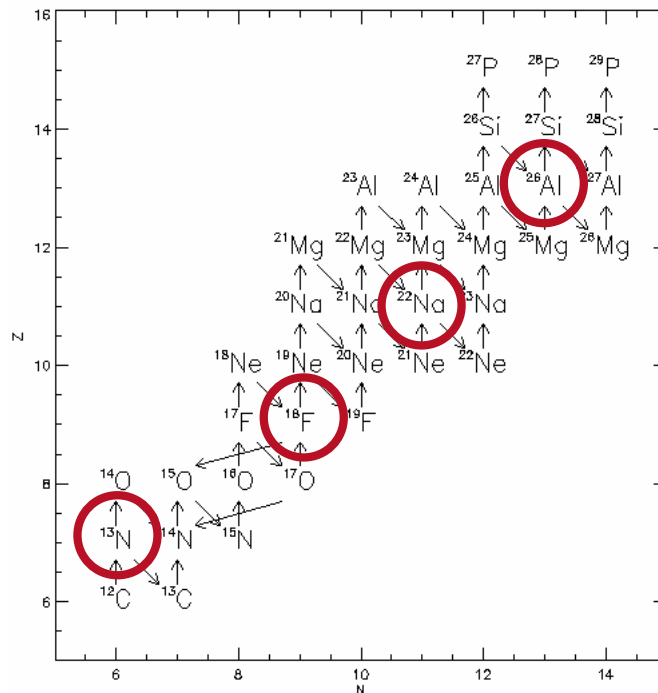
II - Les raies gamma nucléaires

b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse stellaire

4 - Novae classiques

Explosion thermonucléaire à la base de l'enveloppe enrichie en CNO, d'une naine blanche CO ou ONe accrétante dans un système binaire serré.

- > Masse accrétée induit $P > \sim 10^{20}$ dynes cm^{-2} .
- > Combustion de l'H par la chaîne CNO
- > Ejection de l'enveloppe

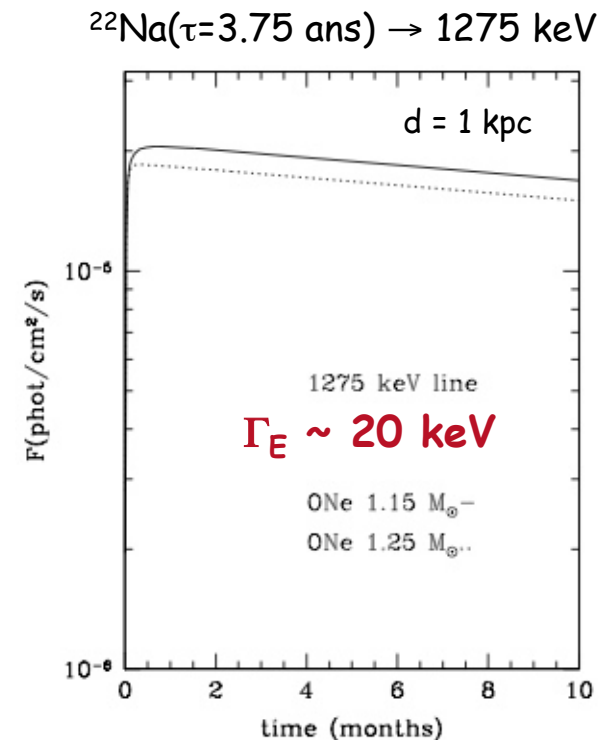
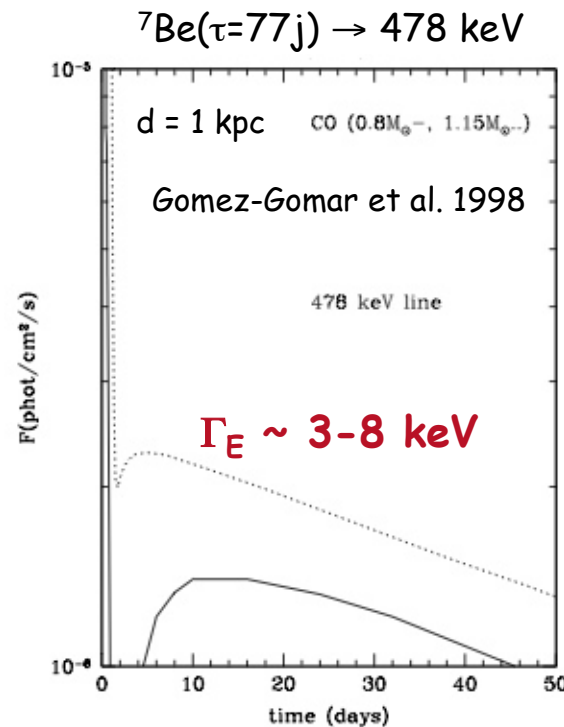
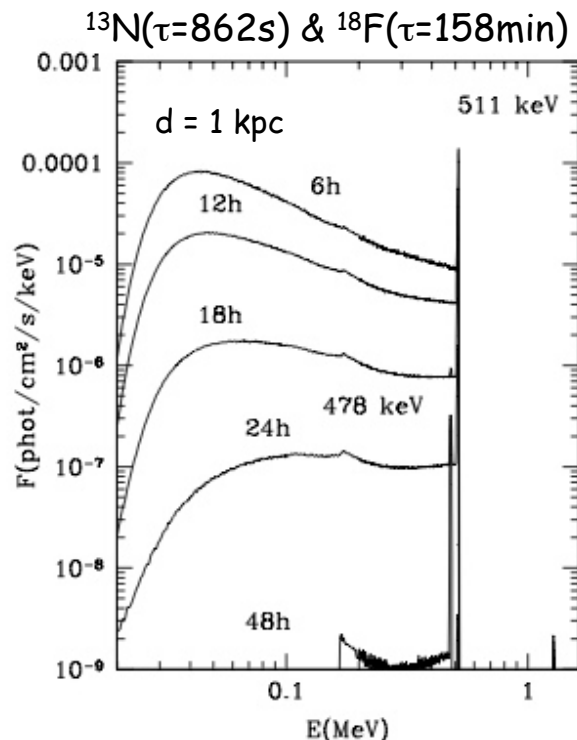
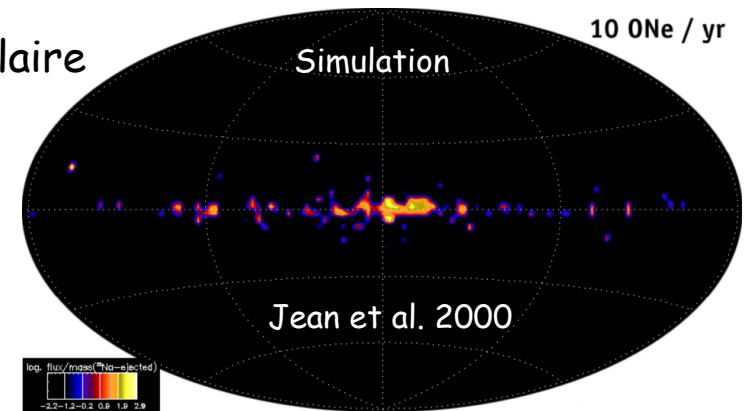


II - Les raies gamma nucléaires

b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse stellaire

4 - Novae classiques

- Physique de l'explosion ?
- Origine du mélange entre le cœur et l'enveloppe ?
- Fréquence ($35 \pm 10 \text{ yr}^{-1}$?) et distribution des novae ?
- Prédictions : $M_{7\text{Be}} \sim 10^{-10} - 10^{-11} M_{\odot}$, $M_{22\text{Na}} \sim 10^{-8} M_{\odot}$



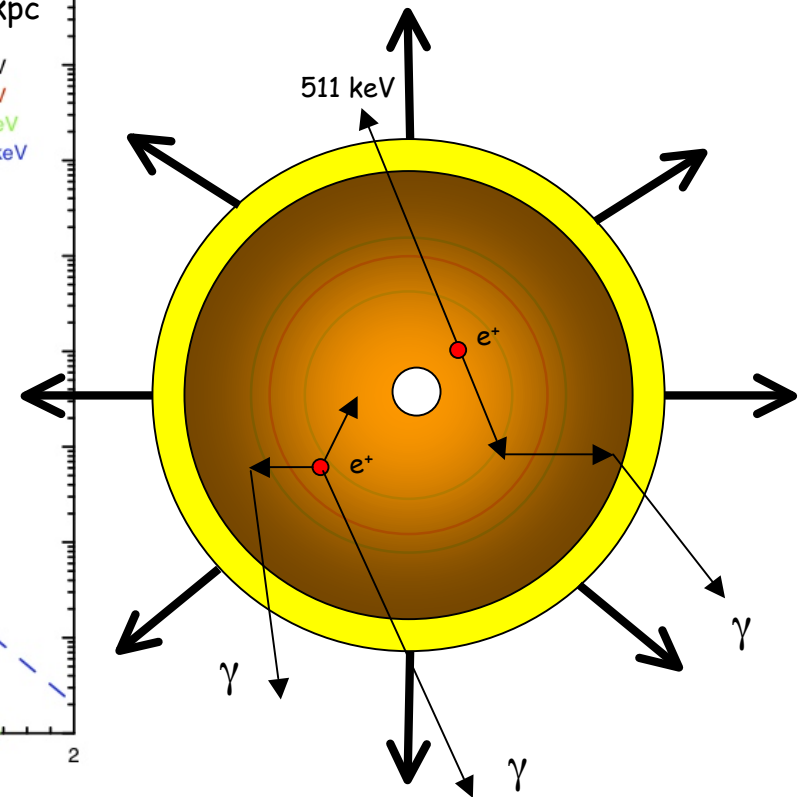
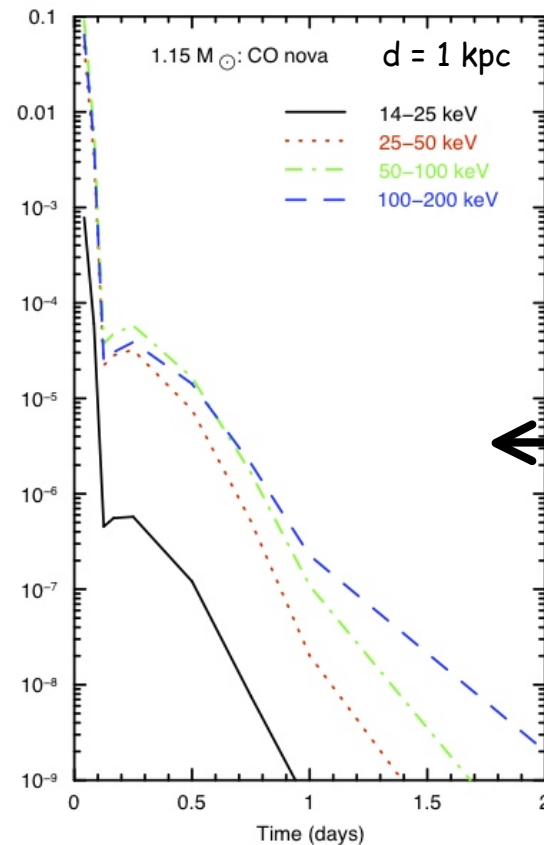
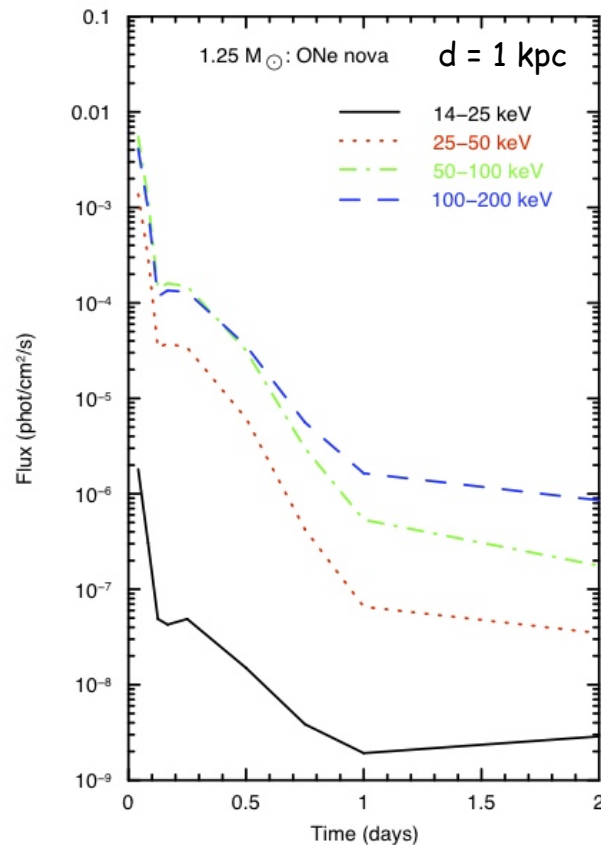
Recherche du ^7Be & ^{22}Na avec SPI-INTEGRAL \rightarrow ToO pour une nova à $d \leq 1\text{kpc}$

II - Les raies gamma nucléaires

b - Noyaux radioactifs produits par nucléosynthèse stellaire

4 - Novae classiques

^{13}N & ^{18}F \rightarrow 511 keV + continuum (diffusion Compton & positronium)



Recherche de l'émission avec BAT-Swift \rightarrow 2 à 5 détections en 10 ans

Senziani, Skinner, Jean & Hernanz (2008)

II - Les raies gamma nucléaires

c - Noyaux produits par les interactions à haute énergie

1 - Eruptions solaires & stellaires

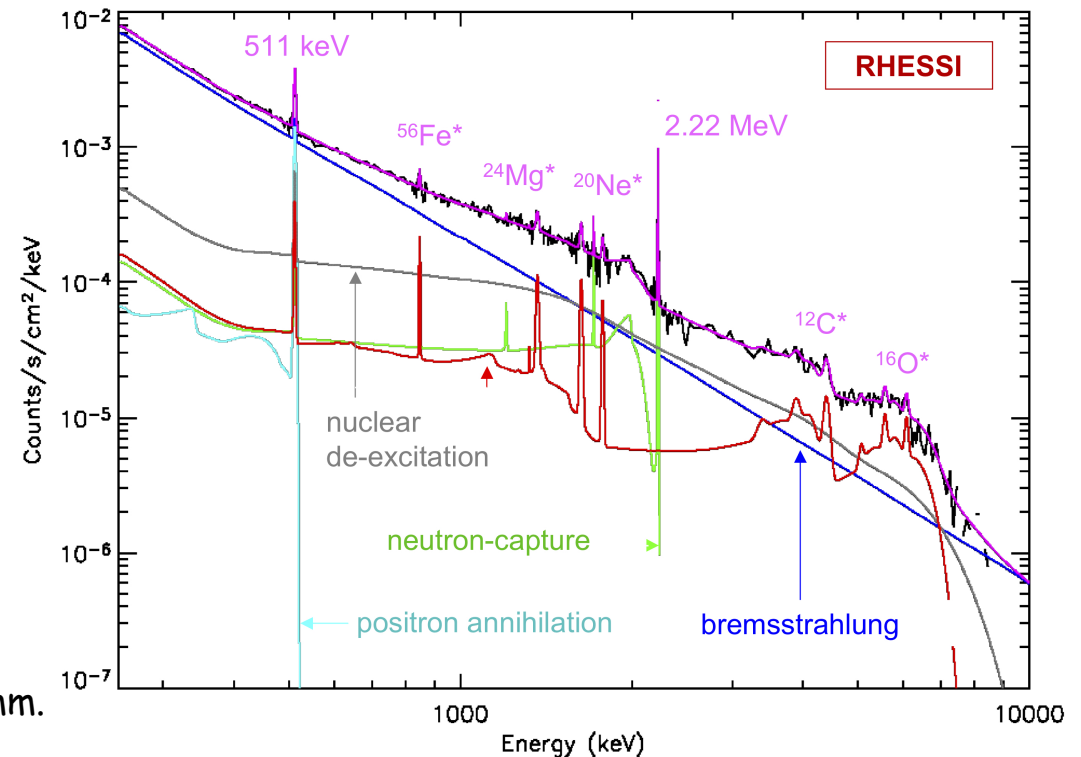
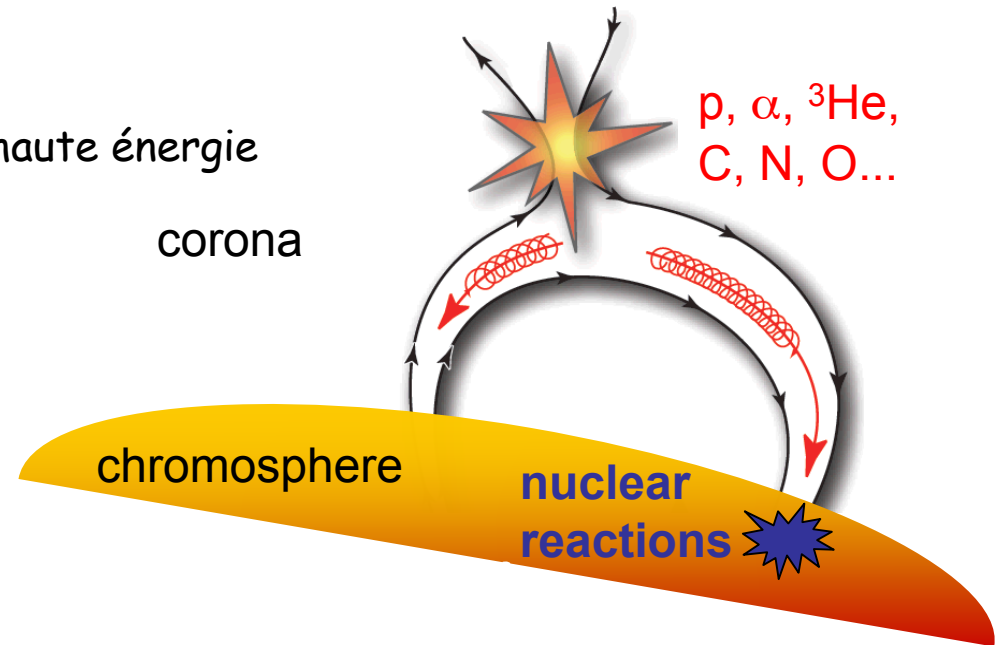
Accélération de noyaux lors de la reconnexion de lignes de champ magnétique.

-> excitation de noyaux

-> production de $n \rightarrow {}^1\text{H}(n, \gamma_{2223\text{keV}}){}^2\text{H}$

-> production de noyaux radioactifs

Les émissions gamma nucléaires apportent des informations sur les noyaux accélérés et l'abondance isotopique à la surface.



Tatischeff, priv. comm.

II - Les raies gamma nucléaires

c - Noyaux produits par les interactions à haute énergie

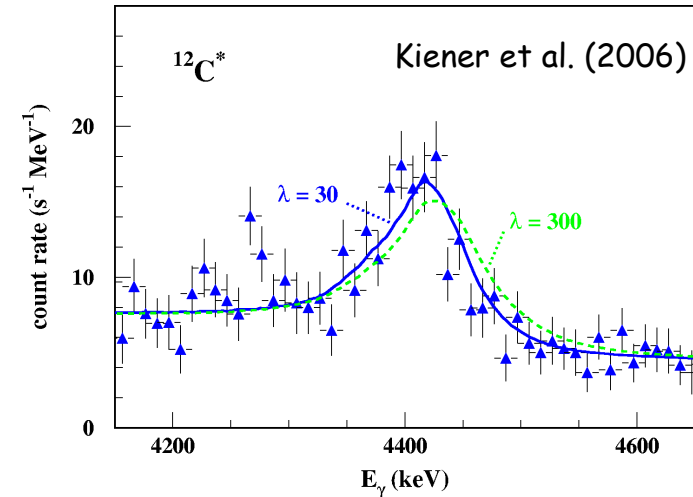
1 - Eruptions solaires & stellaires

Modélisation de l'irradiation en hypothèse cible épaisse

=> contraintes sur les paramètres :

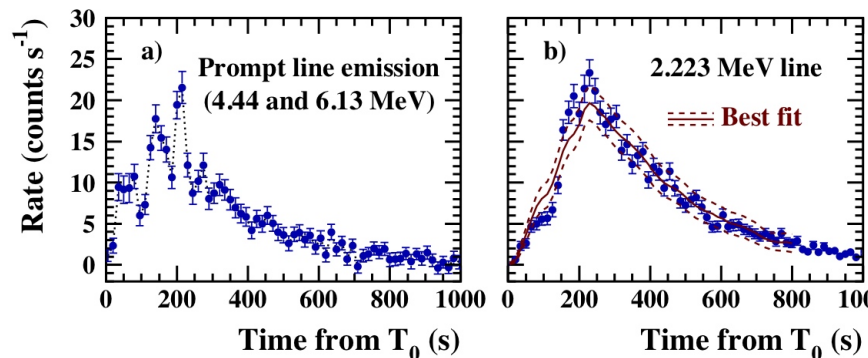
- spectre des noyaux accélérés (e.g. pente)
- α/p
- $^3\text{He}/\text{H}$
- diffusion du pitch angle (λ)
- distribution angulaire de l'irradiation

SPI-INTEGRAL

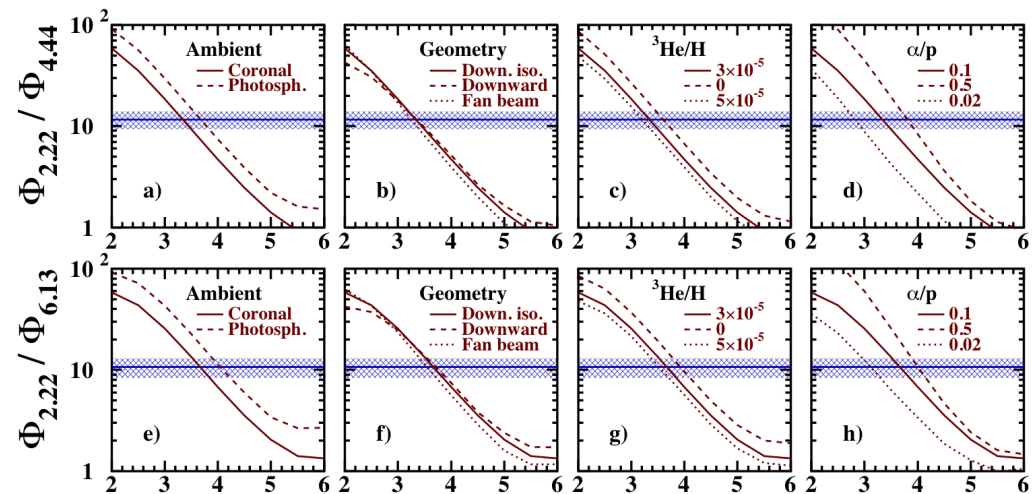


Exemple : Eruption solaire du 28 oct. 2003

SPI-INTEGRAL



Tatischeff et al. (2005)



Power Law Spectral Index, S

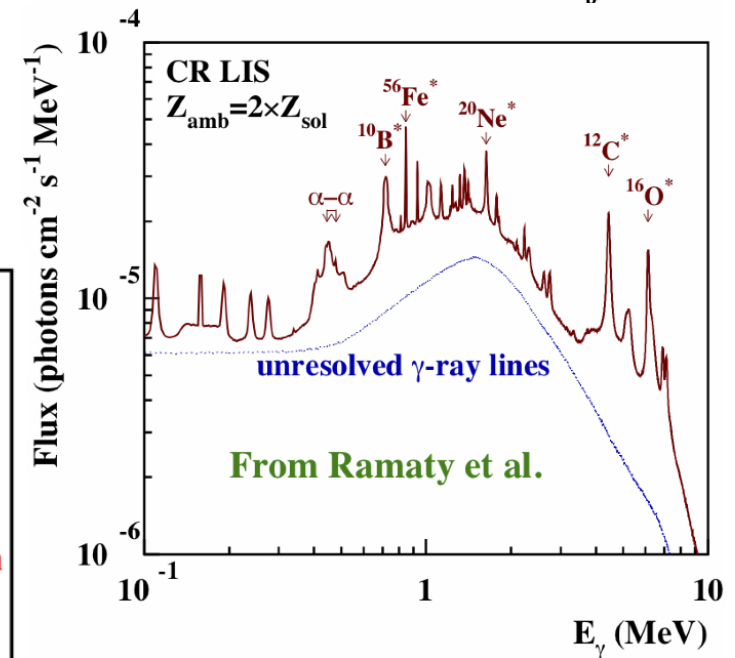
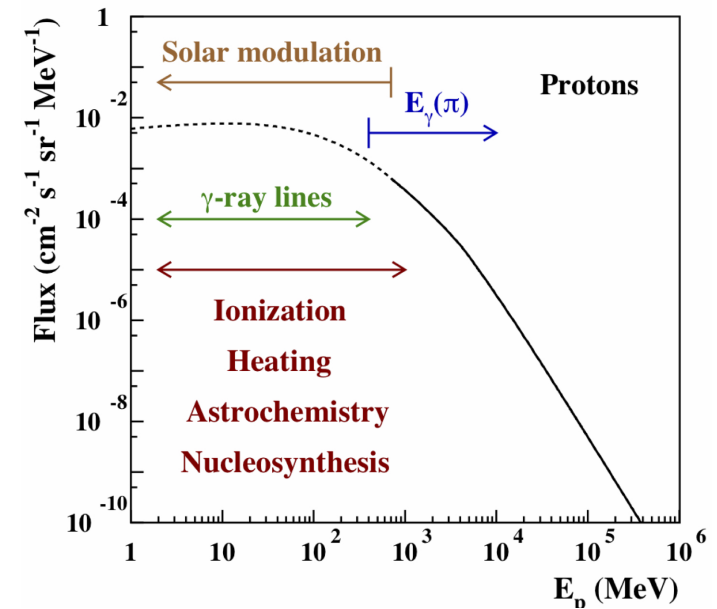
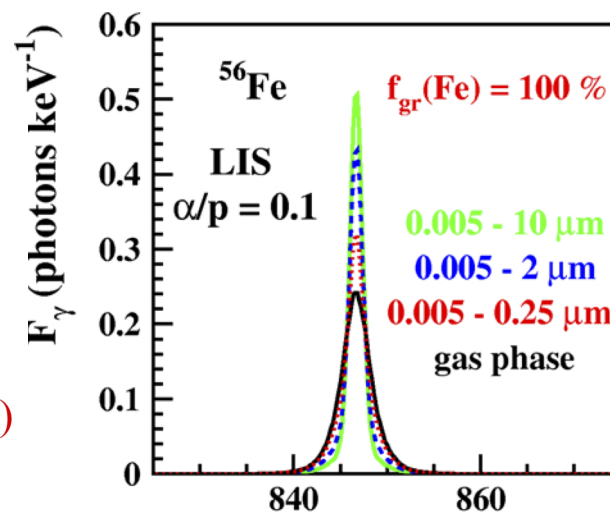
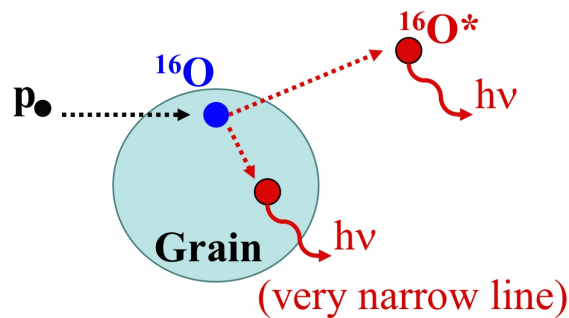
II - Les raies gamma nucléaires

c - Noyaux produits par les interactions à haute énergie

2 - Rayonnement cosmique

L'émission gamma nucléaire des RC avec le MIS
est l'unique moyen pour sonder :

- la composante basse énergie du RC
- les grains de poussières dans le MIS.



Tatischeff, priv. comm.

II - Les raies gamma nucléaires

c - Noyaux produits par les interactions à haute énergie

3 - Binaires X serrées

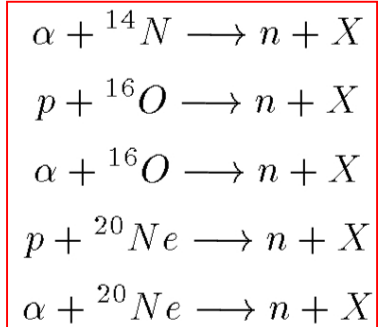
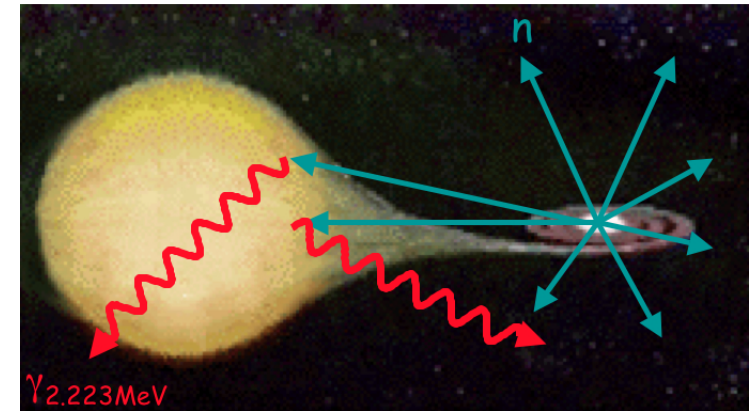
- A la surface d'une étoile à neutrons accrétante
 - raies du ^{12}C et ^{16}O (Bildsten et al. 1992)
 - raie du ^2H à 2.223 MeV (Bildsten et al. 1993)

-> raie large et décalage gravitationnel

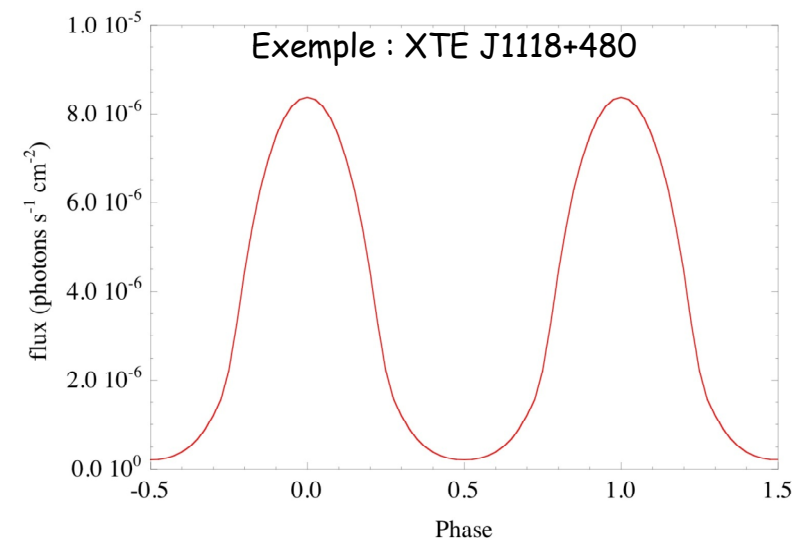
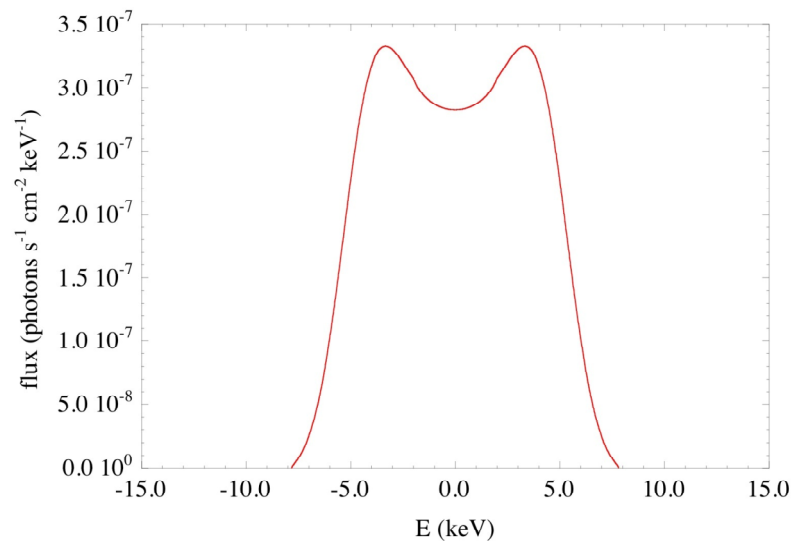
$$\Delta E/E_0 = 2GM/Rc^2 \Rightarrow E \sim 1.3-1.7 \text{ MeV}$$

- A la surface de l'étoile secondaire

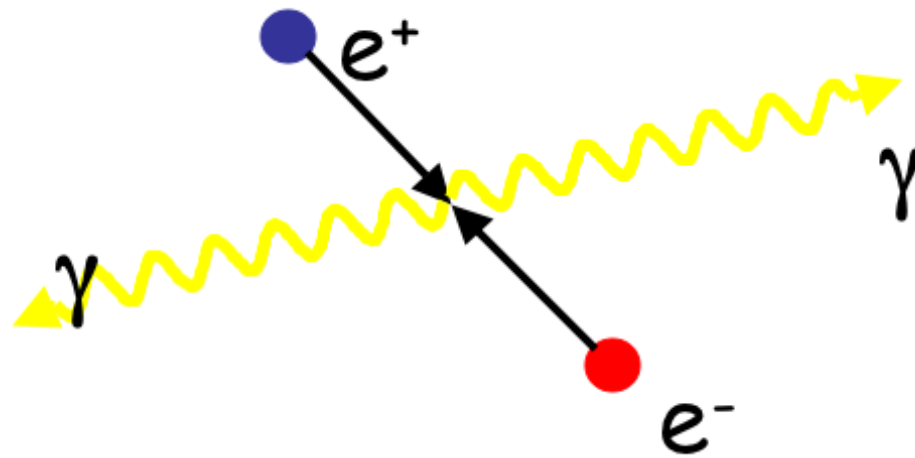
raie du ^2H : capture par l'H de n produits dans le disque d'accrétion de l'objet compact => contraintes sur les modèles d'accrétion



Jean & Guessoum (2001) et Guessoum & Jean (2002)



III - Annihilation des positrons Galactiques



III - Annihilation des positrons Galactiques

a - Physique des positrons

1 - Processus de production des positrons

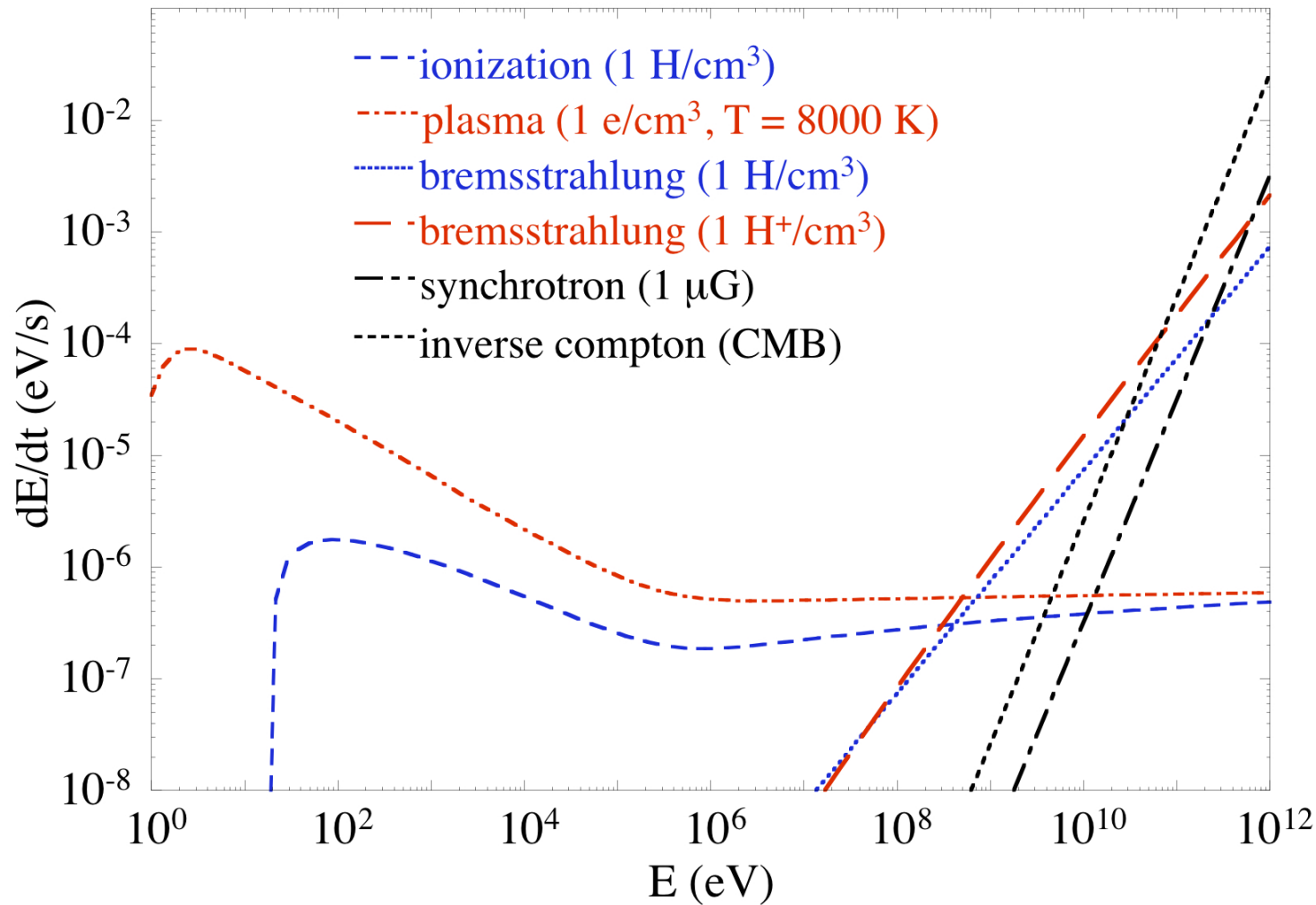
- | | | |
|-----------------------------|--|---|
| - isotopes β^+ | -> SNe, WR, novae ...
$Xp \rightarrow Xn + e^+ + \nu_e$ | -> $E_{e^+} \sim 1 \text{ MeV}$ |
| - décroissance π^+ | -> interactions CR - MIS
$p + p \rightarrow p + n + \pi^+$
& $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ | -> $E_{e^+} \sim 10\text{-}100 \text{ MeV}$ |
| - production paire e^+e^- | -> disques d'accrétion & jets
$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ | -> $E_{e^+} \leq 1 \text{ MeV}$ |
| | -> magnétosphère de pulsar
$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ | -> $E_{e^+} \sim 1\text{-}1000 \text{ GeV}$ |
| - processus exotiques | -> e.g. matière noire, ...
$dm + dm \rightarrow e^+ + e^-$ | -> $E_{e^+} \sim ? \text{ MeV}$ |

III - Annihilation des positrons Galactiques

a - Physique des positrons

2 - Interaction des positrons dans le milieu interstellaire

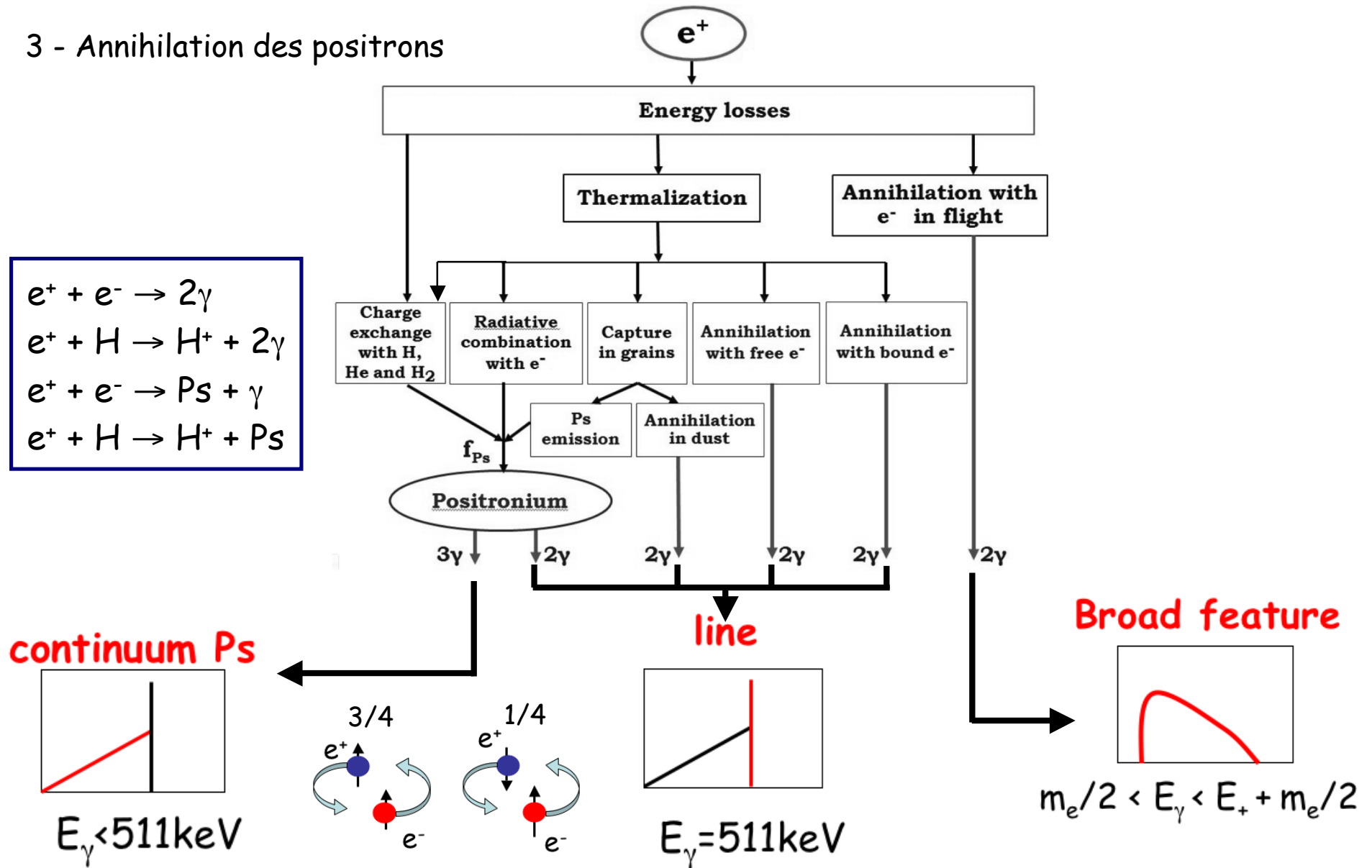
$$\begin{aligned} \left(\frac{dE}{dt}\right)_{IC} &= -2.6 \times 10^{-14} u_{\text{rad}} \gamma^2 \beta^2 \\ \left(\frac{dE}{dt}\right)_{SY} &= -9.9 \times 10^{-16} B^2 \gamma^2 \beta^2 \sin^2(\alpha) \\ \left(\frac{dE}{dt}\right)_{BRi} &= -3.6 \times 10^{-11} Z(Z+1) n \gamma \left[\ln(2\gamma) - \frac{1}{3}\right] \\ \left(\frac{dE}{dt}\right)_{BRn} &= A n \gamma \\ \left(\frac{dE}{dt}\right)_{COU} &= -7.7 \times 10^{-9} \frac{n_e}{\beta} \left[\ln\left(\frac{\gamma}{n_e}\right) + 73.6\right] \\ \left(\frac{dE}{dt}\right)_{ION} &= -7.7 \times 10^{-9} \frac{nZ}{\beta} \left[\ln\left(\frac{(\gamma-1)\gamma^2\beta^2 m^2 c^4}{2I^2}\right) + \frac{1}{8}\right] \end{aligned}$$



III - Annihilation des positrons Galactiques

a - Physique des positrons

3 - Annihilation des positrons



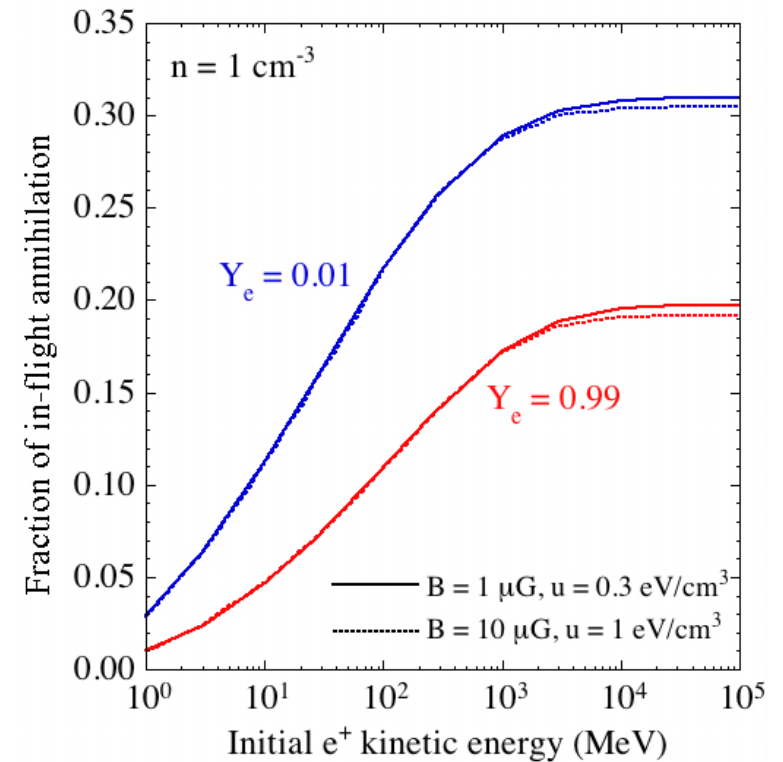
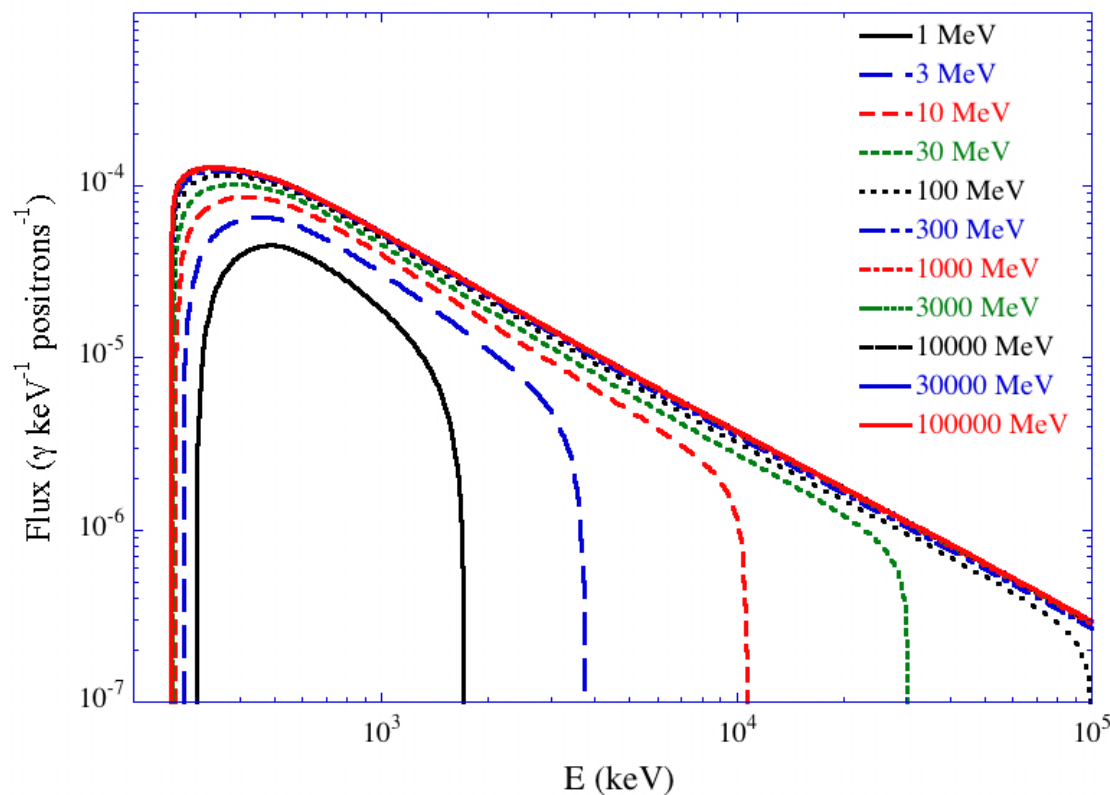
III - Annihilation des positrons Galactiques

a - Physique des positrons

3 - Annihilation des positrons

Fraction of inflight annihilation : $f = 1 - P_{E_0 \rightarrow E}$

$$P_{E_0 \rightarrow E} = \frac{N(E)}{N(E_0)} = \exp \left(-n_H \int_E^{E_0} \sigma(E') \frac{dE'}{|dE'/dx|} \right)$$



Spectral distribution
in the stationary state case

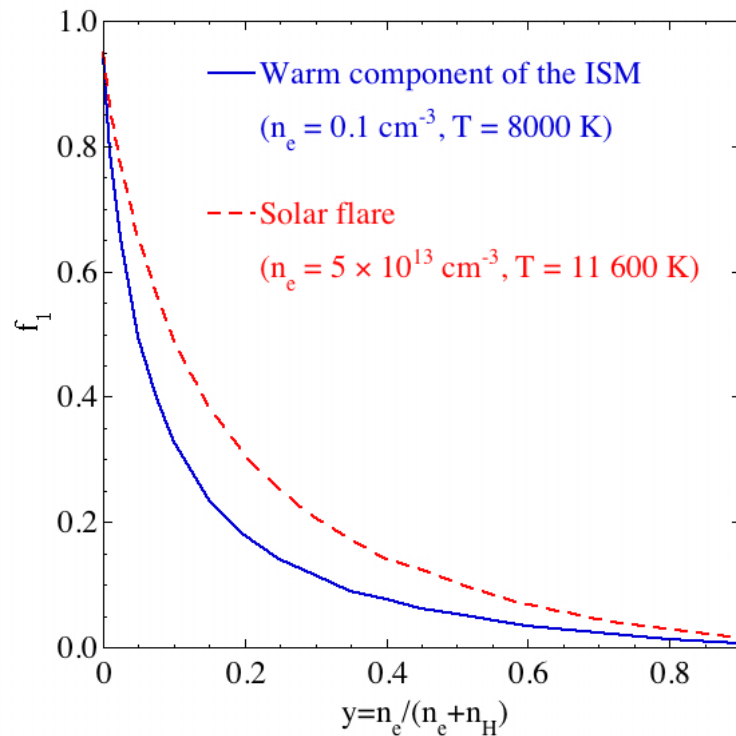
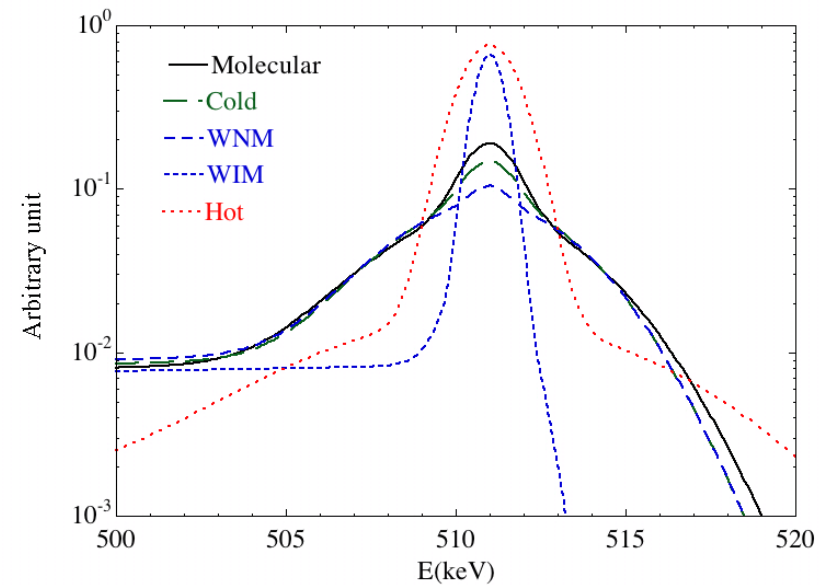
$$\frac{d\Phi_{IA}}{dk} = \frac{\Phi_{0.511}}{1 - 3f/4} \frac{n_H}{P} \int_E^{E_0} P_{E_0 \rightarrow E} \frac{1}{2} \frac{d\sigma}{dk} \frac{dE}{|dE/dx|}$$

III - Annihilation des positrons Galactiques

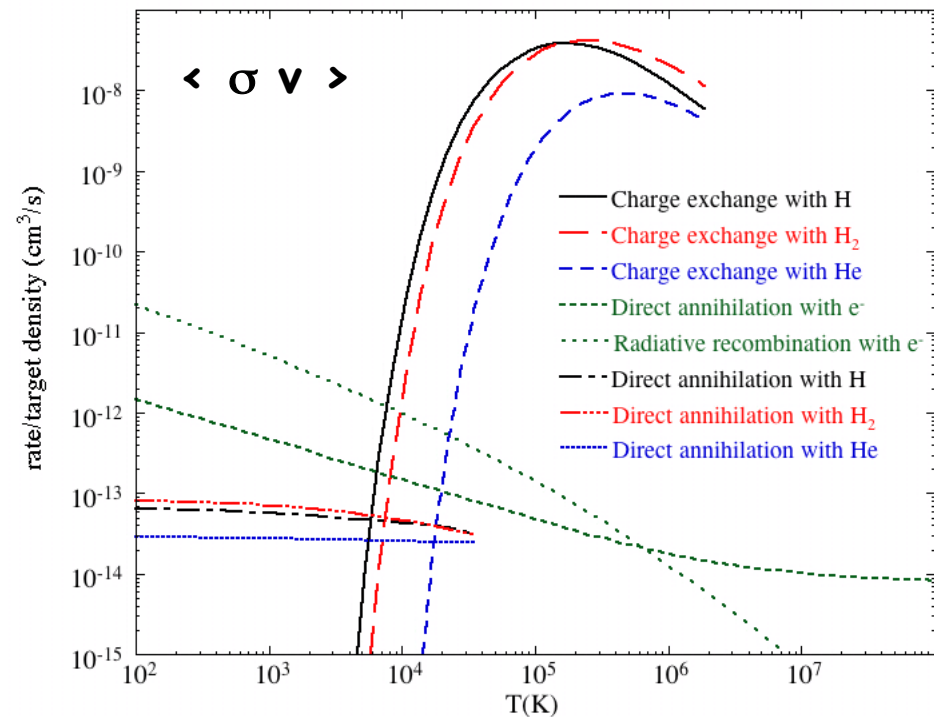
a - Physique des positrons

3 - Annihilation des positrons

La distribution spectrale de l'émission d'annihilation dépend des conditions physiques du milieu d'annihilation



Fraction of charge exchange in flight



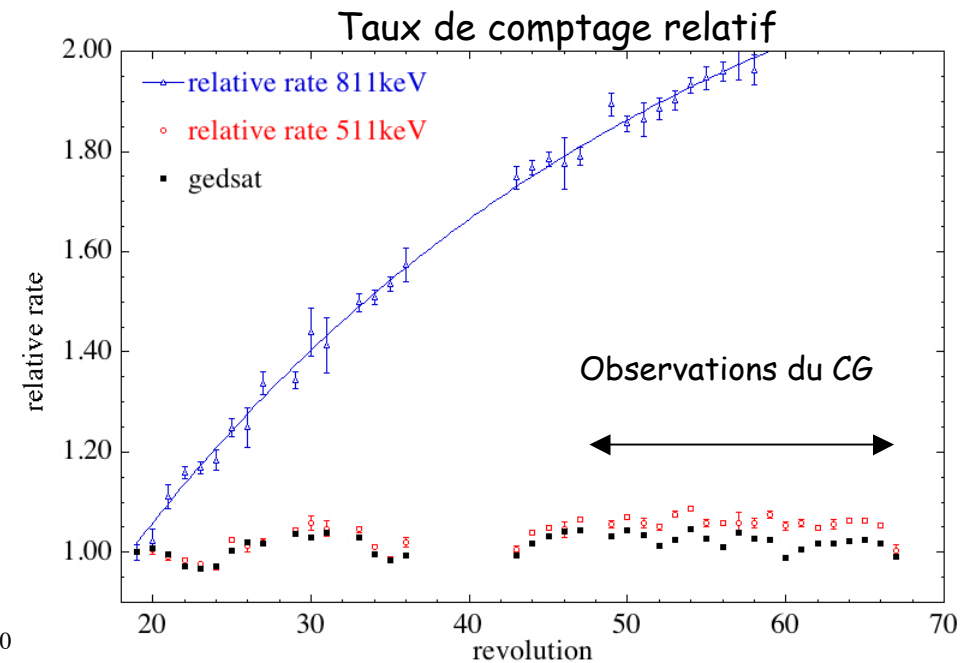
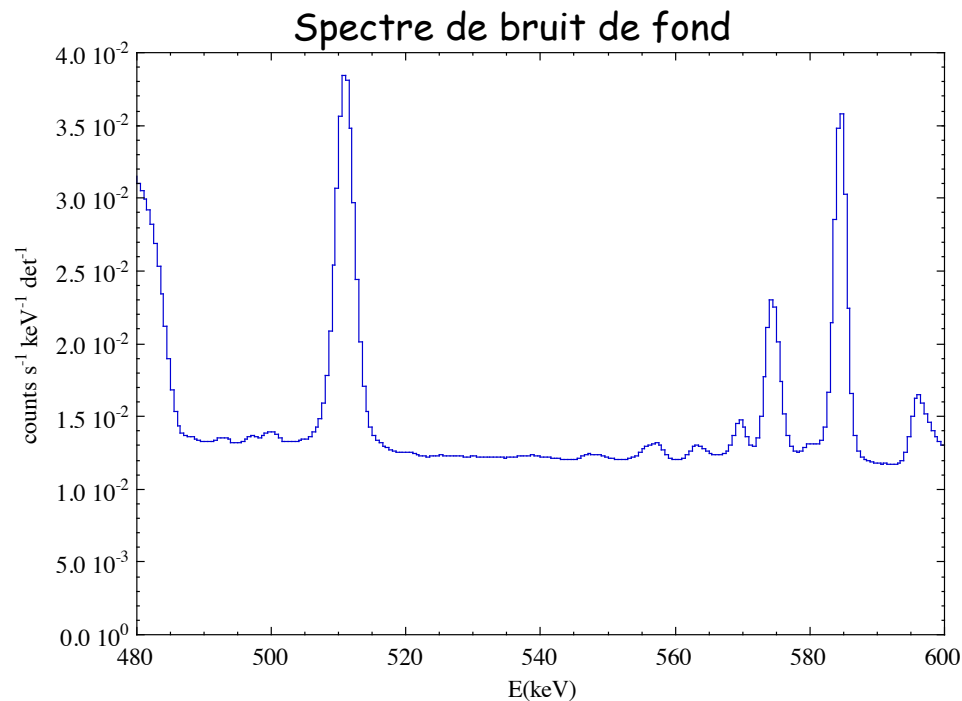
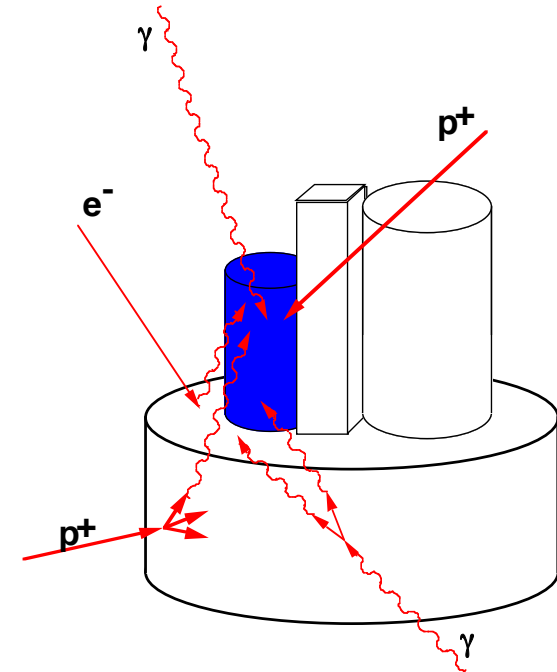
Annihilation rate of thermalized e⁺

III - Annihilation des positrons Galactiques

b - Observation des émissions d'annihilation

1 - Analyse des données de SPI

- Bruit de fond instrumental induit par les RC
 - continuum parasite
 - des positrons sont produits localement
 - > raie parasite instrumentale
 - => $S/B \sim$ quelques %



III - Annihilation des positrons Galactiques

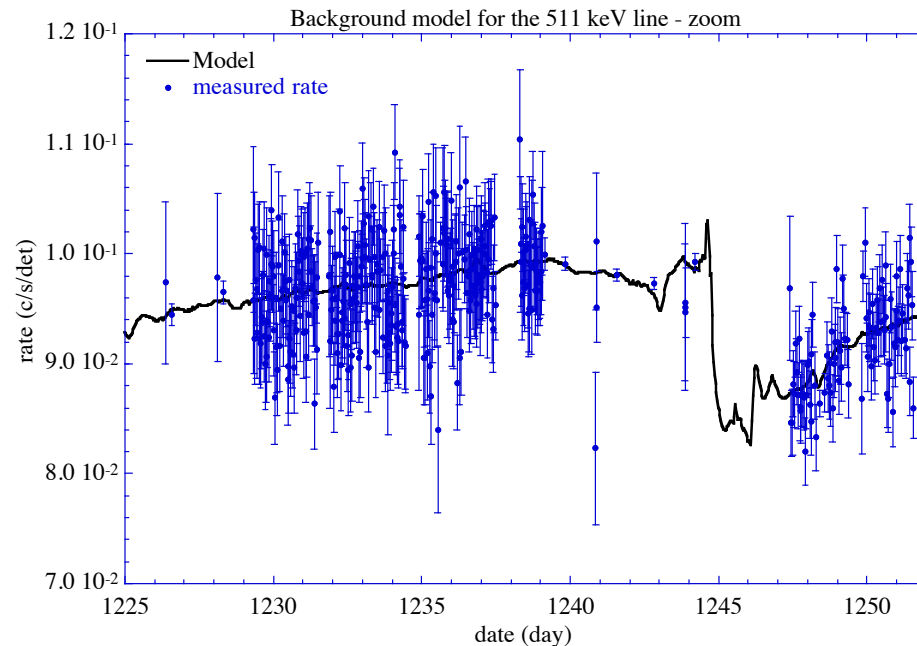
b - Observation des émissions d'annihilation

1 - Analyse des données de SPI

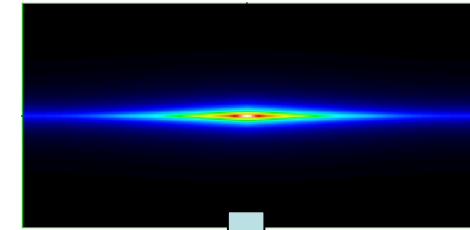
- Model fitting

$$R_{\text{source}}(E,d,t) = I(l,b) * H(E,t(l,b),d)$$

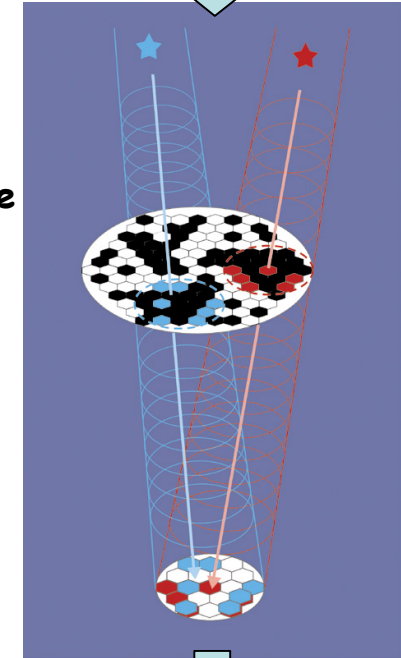
$$R_{\text{données}}(E,d,t) = a(E,d,\text{orb}) \times R_{\text{bruit}}(t) + f_{\text{source}} R_{\text{source}}(E,d,t)$$



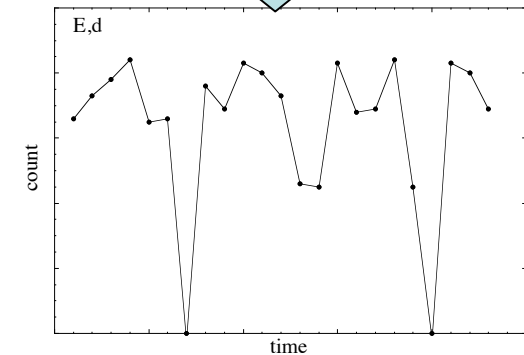
Distribution
 $I(l,b)$



Liste de pointage
&
Réponse de
l'instrument
 $H(E,t(l,b),d)$



Ajustement de
 $a(E,d,\text{orb})$
 f_{source}

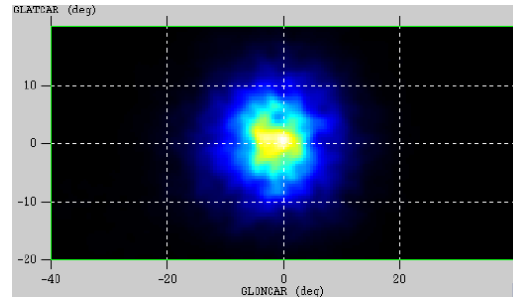


III - Annihilation des positrons Galactiques

b - Observation des émissions d'annihilation

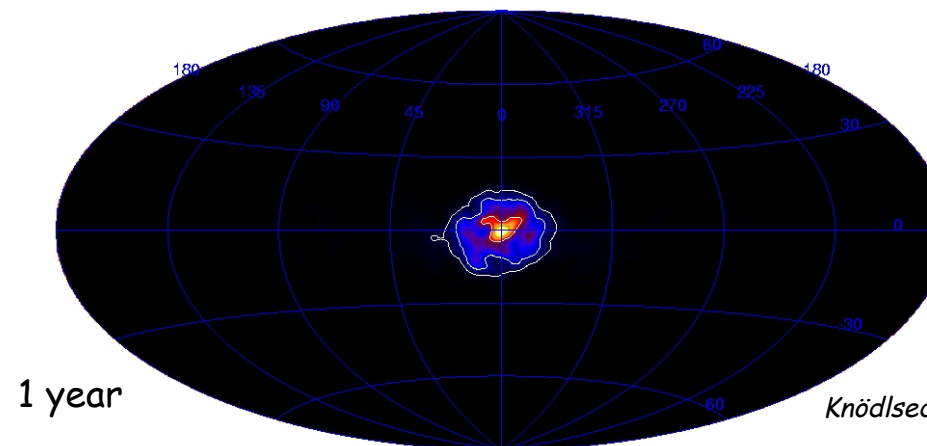
2 - Imagerie

- Richardson-Lucy 2 months



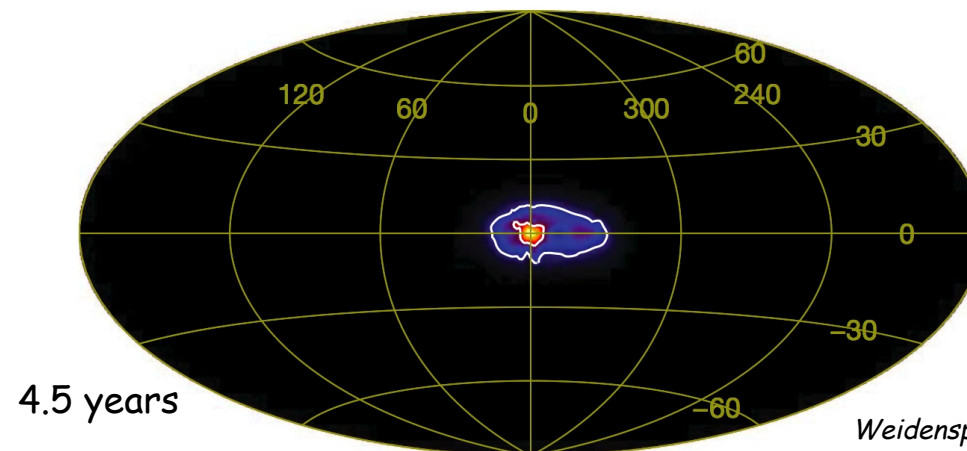
Detection of the bulge emission

Jean, Knödlseeder, Lonjou et al., 2003



First all-sky map
Detection of the disk

Knödlseeder, Jean, Lonjou et al., 2005



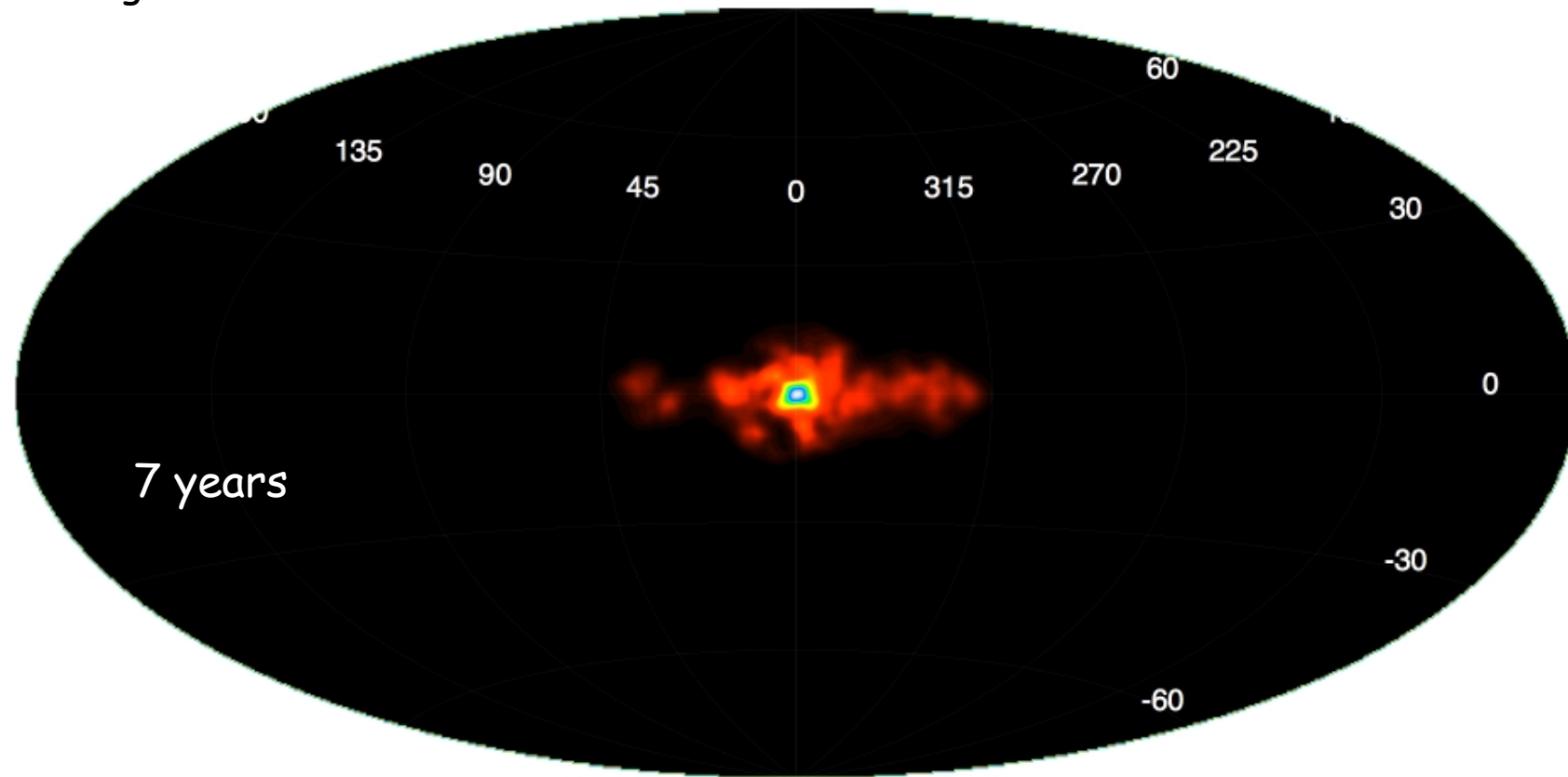
Asymmetric emission

Weidenspointner, Skinner, Jean et al., 2008

III - Annihilation des positrons Galactiques

b - Observation des émissions d'annihilation

2 - Imagerie



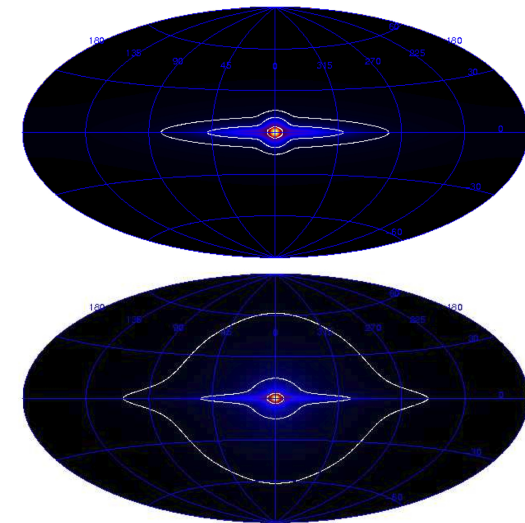
Richardson-Lucy image
(30 iterations)
Skinner et al., 2010

III - Annihilation des positrons Galactiques

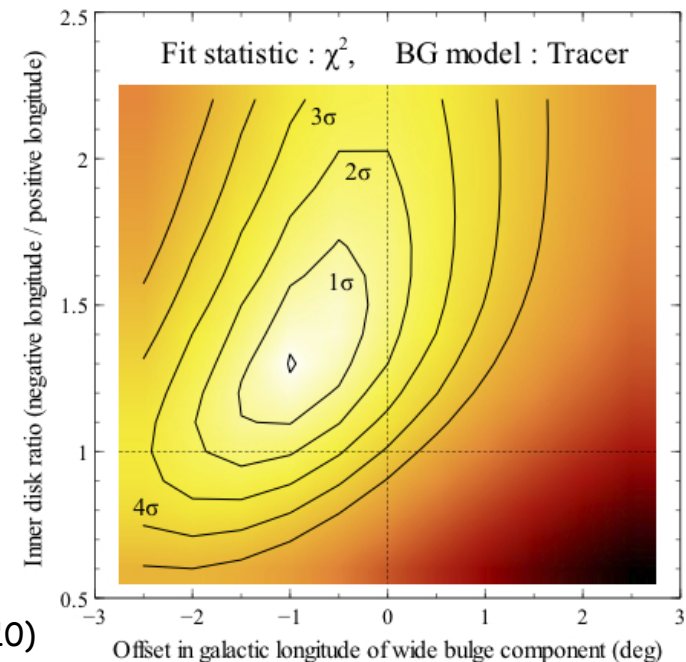
b - Observation des émissions d'annihilation

2 - Imagerie

- No point sources detected
- Analysis by model fitting method
 - Uncertainties in the morphology
2 bulges ($\sim 3^\circ$ & $\sim 11^\circ$ FWHM) & thick disk
or
Extended halo & thin disk
 - Annihilation rates
 $(1 - 3) \times 10^{43} \text{ s}^{-1}$ in the bulge
 $(0.8 - 0.5) \times 10^{43} \text{ s}^{-1}$ in the disk
 $\Rightarrow B/D \sim 1.4 - 6$: Old star population favored
- Asymmetry
 - Strong evidence (4σ)
 - Offset of $\sim 1^\circ$ of the wide bulge component
and/or
Asymmetric disk : $F(l < 0^\circ) > F(l > 0^\circ)$



Weidenspointner et al. (2008)



Skinner et al. (2010)

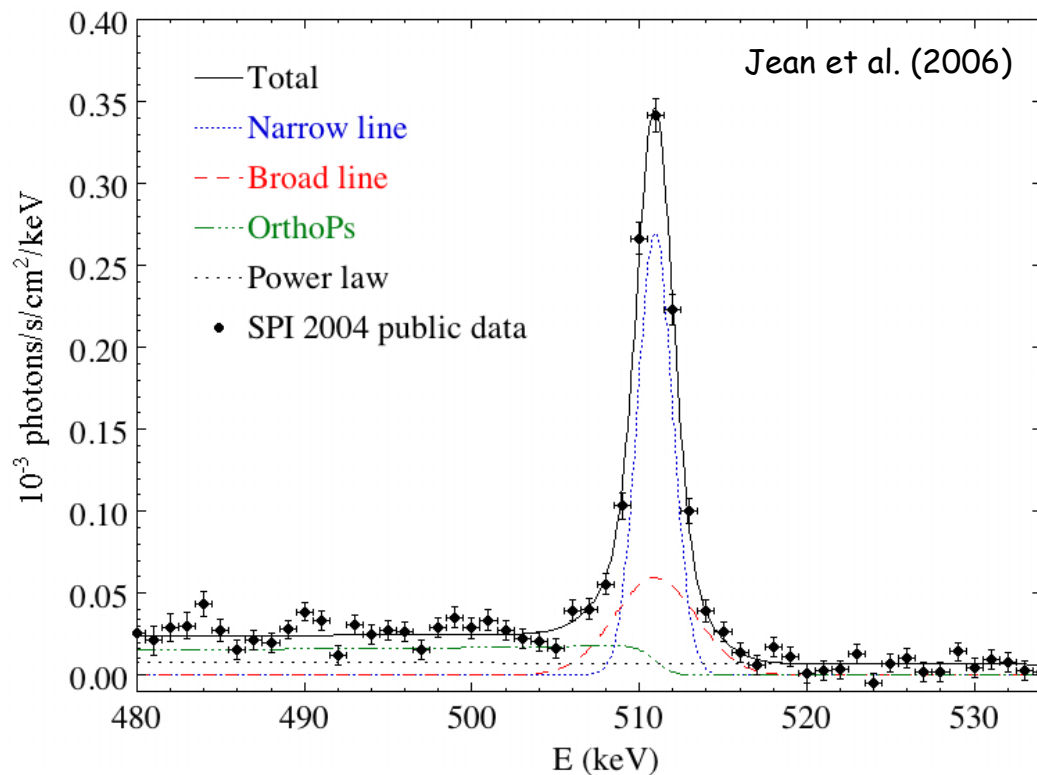
III - Annihilation des positrons Galactiques

b - Observation des émissions d'annihilation

3 - Spectroscopie

$$S_l(E) = I_n \times G(E, \Gamma_n) + I_b \times G(E, \Gamma_b) + I_{3\gamma} \times O(E) + A_c \left(\frac{E}{511} \right)^s$$

Param.	Measured values
I_n	$(0.72 \pm 0.12 \pm 0.02) 10^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
Γ_n	$1.32 \pm 0.35 \pm 0.02 \text{ keV}$
I_b	$(0.35 \pm 0.11 \pm 0.02) 10^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
Γ_b	$5.36 \pm 1.22 \pm 0.06 \text{ keV}$
$I_{3\gamma}$	$(4.23 \pm 0.32 \pm 0.03) 10^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$
A_c	$(7.17 \pm 0.80 \pm 0.06) 10^{-6} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ keV}^{-1}$



Spectre du bulbe Galactique

$$\chi^2 \sim 171.3 \text{ (d.o.f. 148)}$$

Broad line (3.2σ)
 $\sim 1/3$ of the 511 keV flux
 \Rightarrow detection of Ps
 formed in-flight

Total 511 keV flux :
 $(1.07 \pm 0.03) 10^{-3} \text{ } \gamma/\text{s}/\text{cm}^{-2}$

Ps fraction : $96.7 \pm 2.2 \%$

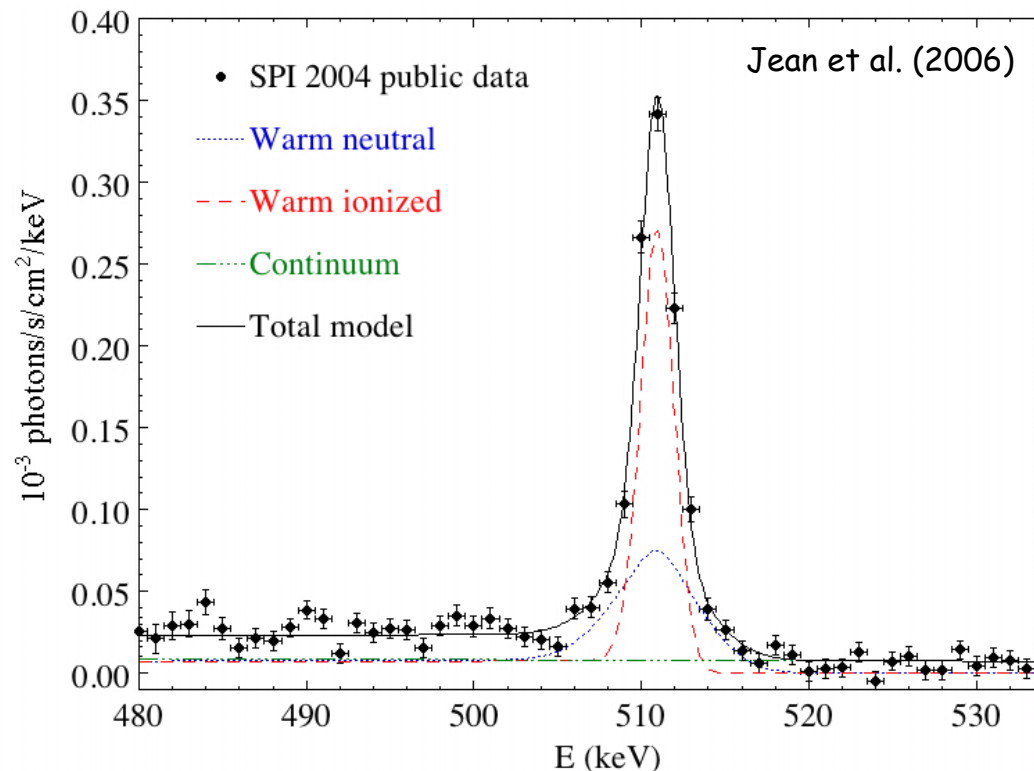
III - Annihilation des positrons Galactiques

b - Observation des émissions d'annihilation

3 - Spectroscopie

$$S_{ISM}(E) = I_{e+e-} \times \sum_{i=1}^5 f_i \times S_i(E, x_{gr}) + A_c \left(\frac{E}{511} \right)^s$$

f_i : contribution of phase i



Parameters	Measured values		
f_m (Molecular)	0.00	$+0.08$ -0.00	$+0.02$ -0.00
f_c (Cold)	0.00	$+0.23$ -0.00	$+0.04$ -0.00
f_{wn} (Warm Neutral)	0.49	$+0.02$ -0.23	$+0.02$ -0.04
f_{wi} (Warm Ionized)	0.51	$+0.03$ -0.02	$+0.02$ -0.02
f_h (Hot)	0.00	$+0.005$ -0.00	$+0.00$ -0.00
x_{gr} (Grain fraction)	0.00	$+1.20$ -0.00	$+0.20$ -0.00

Spectre du bulbe Galactique

$\chi^2 \sim 176.4$ (d.o.f. 148)

Ps fraction : $93.5^{+0.3}_{-1.6} \pm 0.3\%$

In agreement with :
 $93 \pm 4\%$ Kinzer et al. 2001
 $94 \pm 4\%$ Harris et al. 1998
 $94 \pm 6\%$ Churazov et al. 2005

Positrons annihilate in warm phases

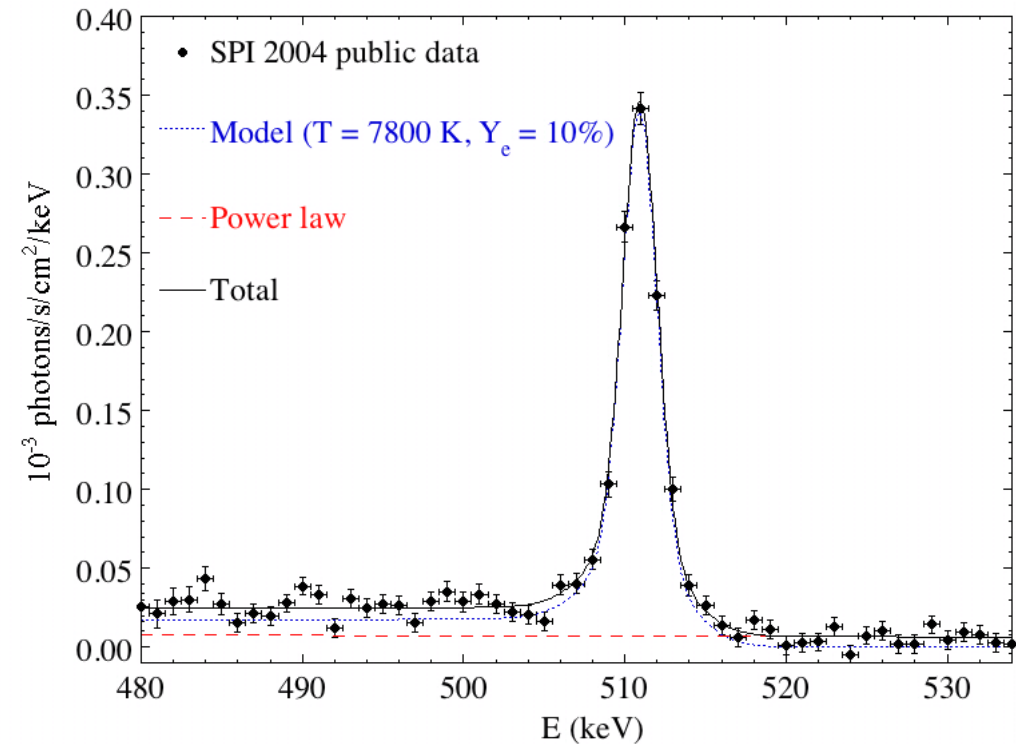
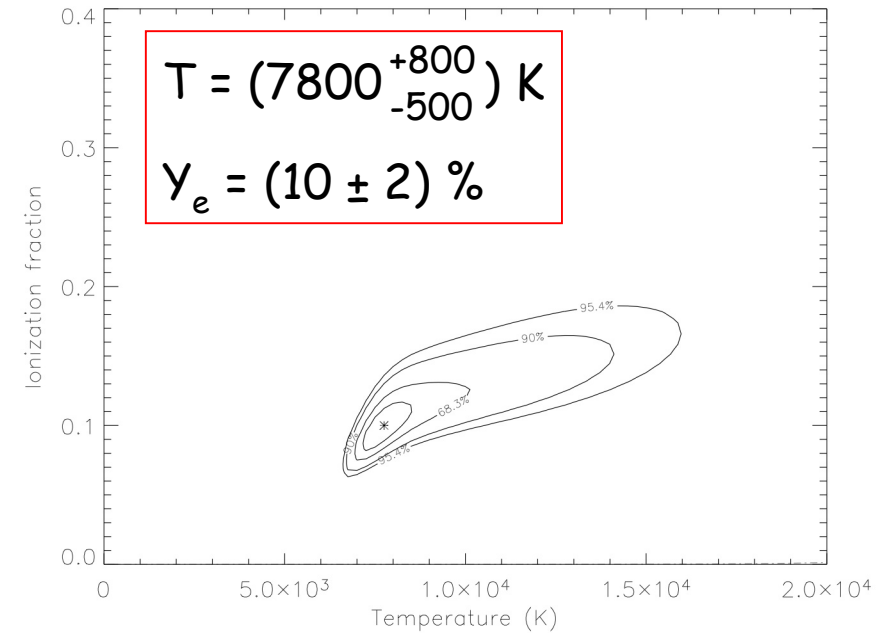
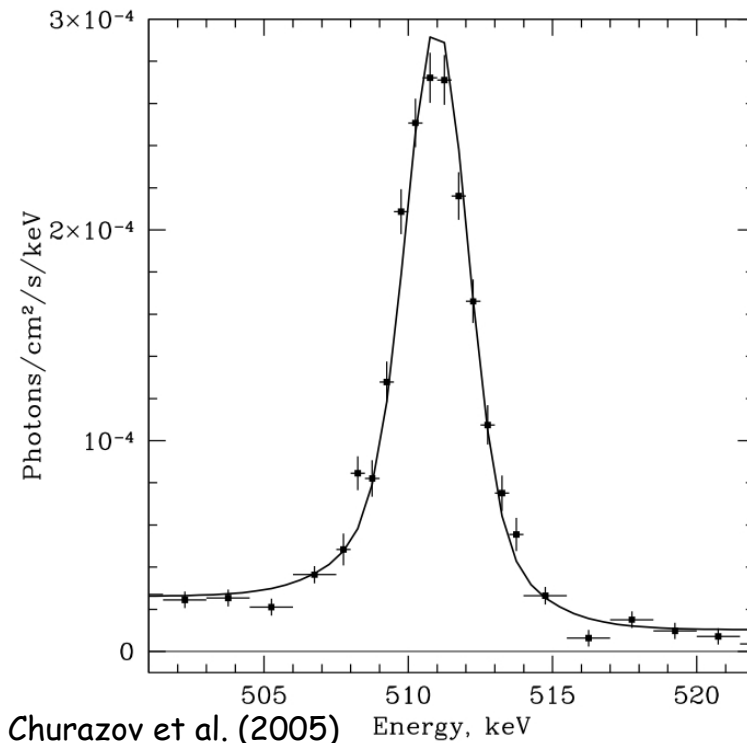
III - Annihilation des positrons Galactiques

b - Observation des émissions d'annihilation

3 - Spectroscopie

Spectre du bulbe Galactique

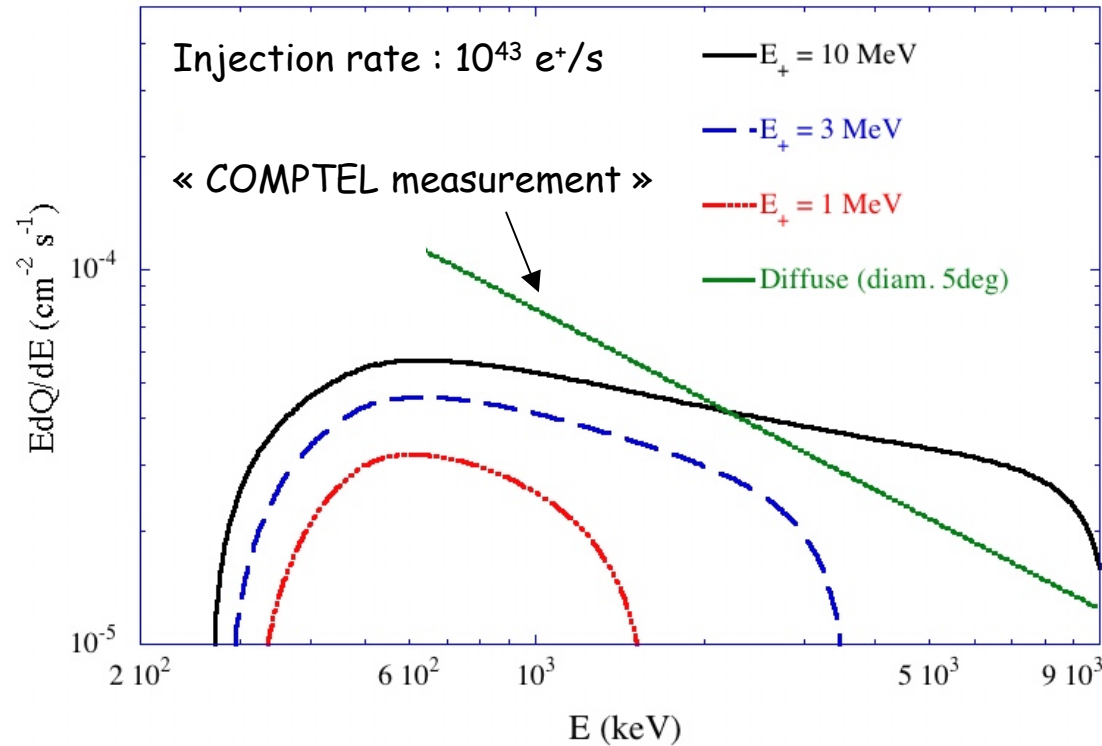
$$S_{ISM}(E) = I_{e^+e^-} \times S(E, T, Y_e) + A_c \left(\frac{E}{511 \text{keV}} \right)^s$$



III - Annihilation des positrons Galactiques

b - Observation des émissions d'annihilation

3 - Spectroscopie



If positrons are produced in a **steady state** in the GC then their initial kinetic energy should be $< 8 \text{ MeV}$ else the inflight annihilation emission would be detected at high energy (Aharonian & Atoyan 1981, Beacom & Yüksel 2006, Sizun et al. 2007)

Recently, Chernyshov et al. (2009) showed that this conditions holds when $B < 0.4 \text{ mG}$ in this region.

III - Annihilation des positrons Galactiques

c - Origine des positrons Galactiques

Comment produire $\sim 2-3 \times 10^{43} e^+/s$?

- β^+ isotopes produced in stars

-> ^{26}Al : SNII, WR

-> ^{44}Ti : SNII

-> ^{56}Co : SNe

-> ^{22}Na : O-Ne Novae

Not enough e^+
(Hernanz et al. 1999)

- Compact sources

-> Black-holes

-> Pulsars

Not enough e^+
(Harding & Ramaty 1987)
 $E_+ > 10 \text{ MeV}$

- Cosmic-rays

-> $p + p \rightarrow p + n + \pi^+$ and $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$

- Dark matter

} $E_+ > 10 \text{ MeV}$

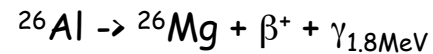
III - Annihilation des positrons Galactiques

c - Origine des positrons Galactiques

1 - Estimations

- Decay of ^{26}Al

^{26}Al produced in SNII/Ib & WR



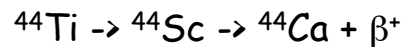
$$T_{1/2} \sim 0.7 \text{ Myr}$$

-> Contribution of ^{26}Al :

$$F_{1.8\text{MeV}} \Rightarrow M_{26} \sim 2 - 3 M_{\star} \Rightarrow R_{e^+} \sim 3 \times 10^{42} \text{ s}^{-1}$$

- Decay of ^{44}Ti

^{44}Ti produced in SNs



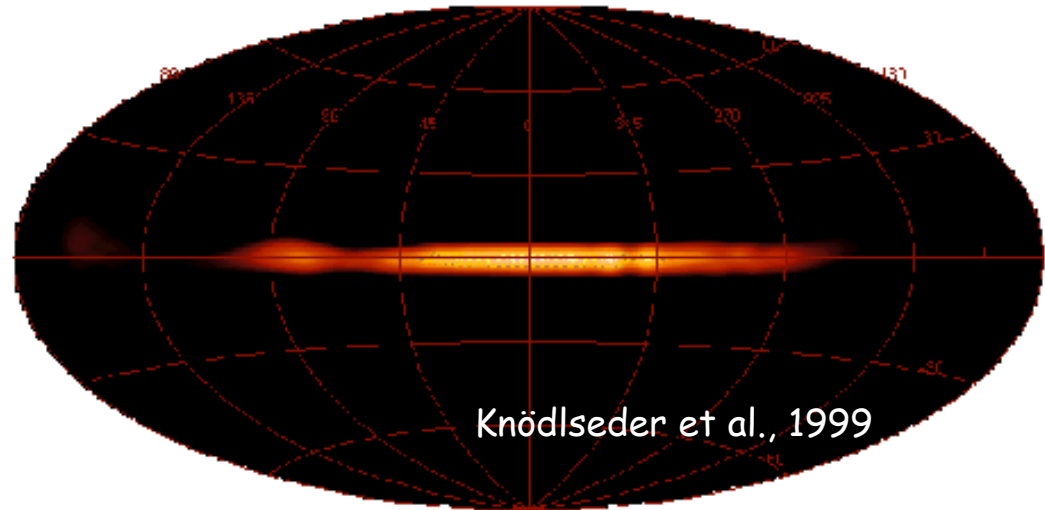
$$(T_{1/2} \sim 60 \text{ yr})$$

-> Contribution of ^{44}Ti (Milne et al., 2002)

Solar abundance of ^{44}Ca

$$\Rightarrow M_{44} \sim (3 \pm 1) \times 10^{-6} M_{\star} \text{ (Timmes et al., 1996)}$$

$$\Rightarrow R_{e^+} \sim 2 \times 10^{42} \text{ s}^{-1}$$



Sky-map of the 1.8 MeV line (COMPTEL)

^{26}Al & ^{44}Ti could explain all or a fraction of the disk emission ($5-8 \times 10^{42} \text{ s}^{-1}$)

III - Annihilation des positrons Galactiques

c - Origine des positrons Galactiques

1 - Estimations

• Type Ia supernovae

- A fraction f of e^+ from ^{56}Co escape the ejecta

Galactic rate : $R_{e^+} \propto f \times v_{\text{SNIa}} \times M_{56}$

$M_{56} \sim 0.6 M_{\odot}$ & $v_{\text{SNIa}} \sim 0.003 \text{ yr}^{-1}$

-> $f \sim 5\%$ (Milne, The & Leising, 2001)

$\Rightarrow R_{e^+} \sim 10^{43} \text{ s}^{-1}$.

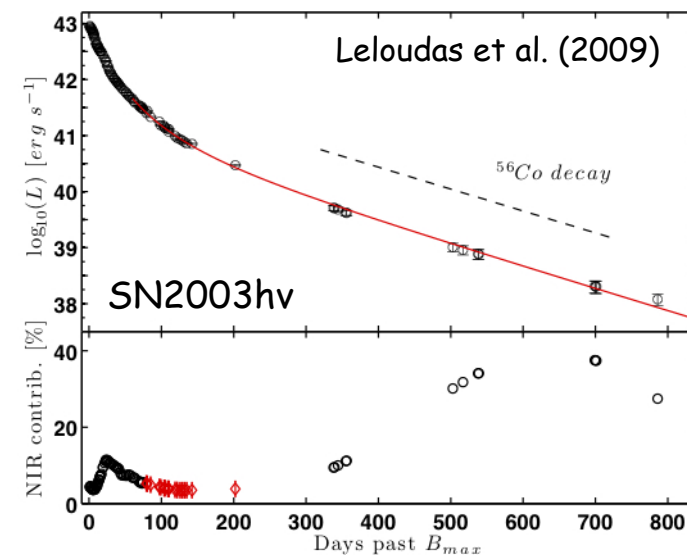
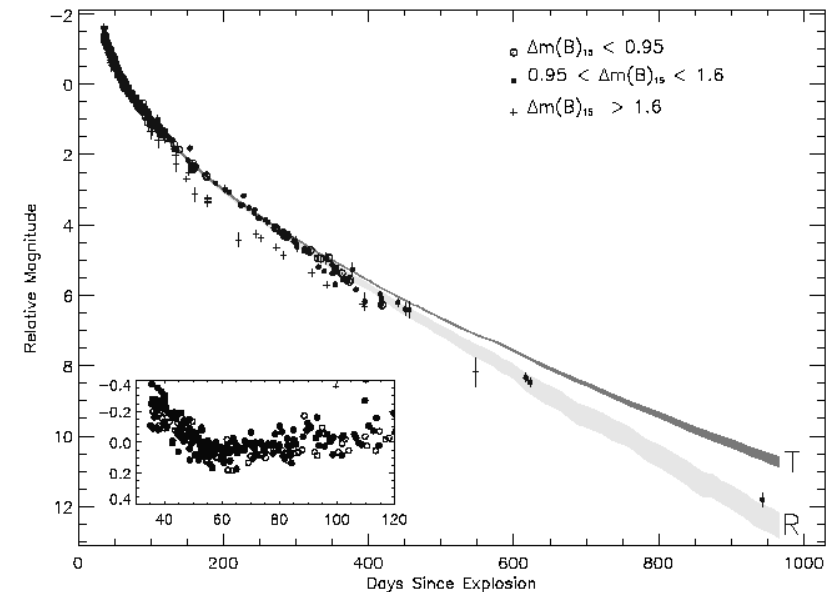
- Recent observations of bolometric late light curves suggested $f \approx 0$

(e.g. Sollerman et al. 2004, Leloudas et al. 2009)

- Although SNeIa belong to the old population their distribution seems to give $(B/D)_{\text{SNeIa}} < 1$

-> Prantzos (2005) suggested that a fraction of e^+ from ^{56}Co in the disk propagate and annihilate in the bulge (see also Higdon et al. 2009)

Milne, The & Leising (2001)



III - Annihilation des positrons Galactiques

c - Origine des positrons Galactiques

1 - Estimations

• Core-Collapse supernovae

- SNII → e^+ from ^{56}Co do not escape ejecta
(Chan & Lingenfelter 1993, Martin et al. 2010)
- SNIc → aspherical WR explosion, ^{56}Co or fireball
(Cassé et al. 2004, Parizot et al. 2005)

However massive stars are located mostly in the disk

• LMXB/Microquasars

e^+ produced in the inner regions of accretion disks through $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$ ($T \sim 10^9$ K). Positrons could be ejected through jets or winds.

- ~ 100 microquasars :

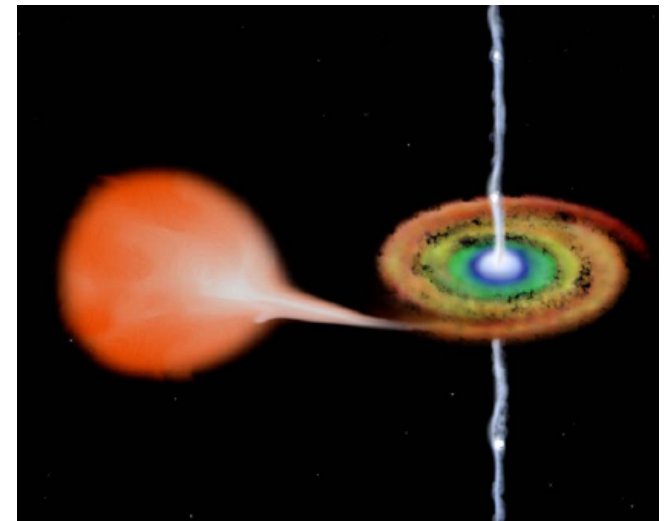
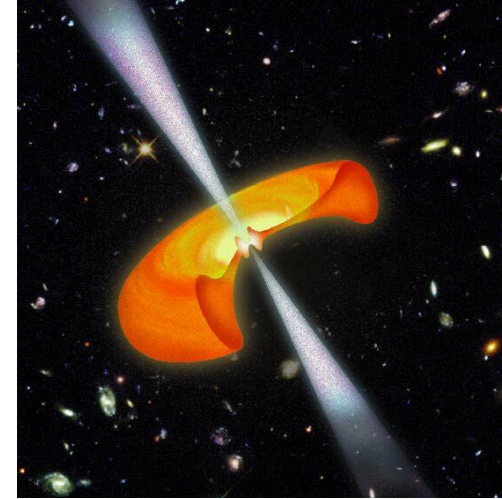
Guessoum, Jean & Prantzos (2006)

$$\Rightarrow R_{\text{bulge}} \sim 5 \times 10^{42} e^+/s$$

$$\Rightarrow R_{\text{disk}} \sim 6 \times 10^{42} e^+/s$$

- ~300-3000 faint LMXBs could explain bulge's emission (Bandyopadhyay et al. 2008)

- However :
 - Nature of jet (leptonic, hadronic) is not known.
 - Do e^+ escape the inner regions of the accretion disk?



III - Annihilation des positrons Galactiques

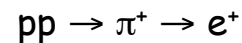
c - Origine des positrons Galactiques

1 - Estimations

• Sgr A*

- Cheng et al. (2006 & 2007)

Disruption of stars in the vicinity of the supermassive black hole every 10^{4-5} yrs



- Totani (2006)

Steady state production by the accretion disk.
Accretion interrupted by the expansion of the Sgr A East SNR 300 yr ago.

• Dark matter

A lot of exotic processes have been proposed.

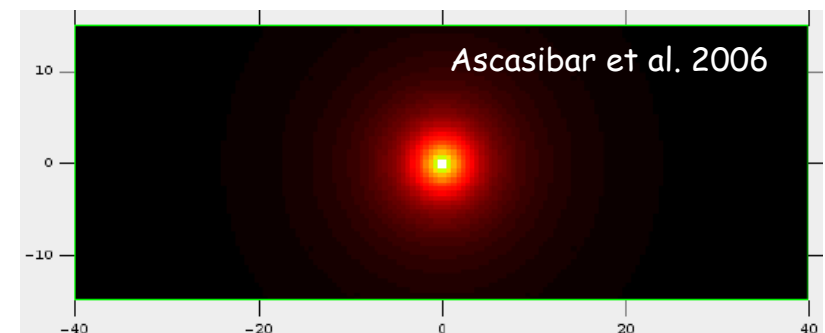
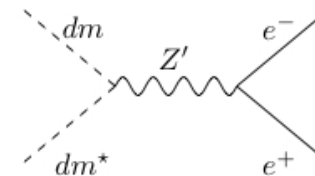
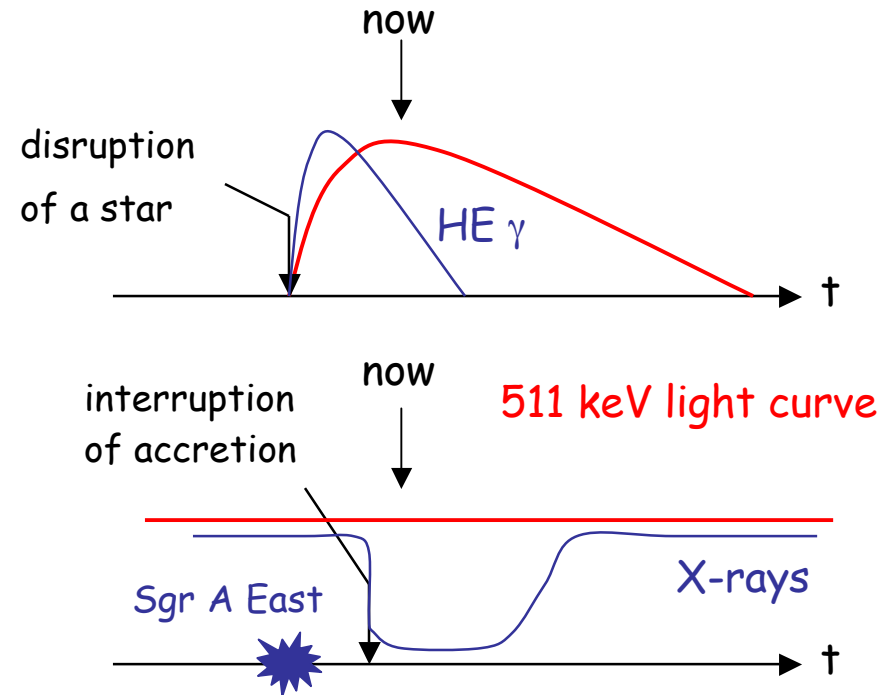
Steady state production of high-energy e^+

=> HE γ expected

Annihilating light particles favored : $M_{\text{dm}} < \text{few MeV}$

(Boehm et al. 2003)

but DM spatial distribution would be more peaked than those observed in external galaxies.



III - Annihilation des positrons Galactiques

c - Origine des positrons Galactiques

1 - Estimations

• Résumé

Sources	Yield	Morph.	Comments
SNIa (^{56}Co)	0-100%	B/D<1	Difficulty for e^+ to escape the ejecta
SNII, WR (^{26}Al)	~15%	D	Could explain a fraction of the disk emission
SNII (^{44}Ti)	~10%	D	Could explain a fraction of the disk emission
LMXBs ($\gamma\gamma$)	0-50%	B/D~1	Could explain the disk emission
Sgr A* burst (π^+)	0-100%	B	Could explain the bulge emission
Novae (^{22}Na)	~1%	B/D<1	Not enough positrons
Pulsars ($\gamma\gamma_B$)	~0.1%	D	High energy positrons & not enough positrons
Cosmic-rays (π^+)	~5%	D	High energy positrons & not enough positrons
Dark matter ($\chi\chi$)	?%	B	High energy positrons
SNII (^{56}Co)	0%	D	Positrons cannot escape the ejecta

Est ce que la distribution de l'émission d'annihilation trace la distribution des sources ?

Est ce que les positrons produits dans le disque peuvent s'annihiler dans le bulbe ?

=> Comment se propagent les positrons dans le MIS ?

III - Annihilation des positrons Galactiques

c - Origine des positrons Galactiques

2 - Propagation des positrons

Les positrons $E < 10$ MeV ne diffusent pas sur les ondes MHD dans le MIS car $r_L \ll \lambda$ (voir présentation de M. Lemoine)

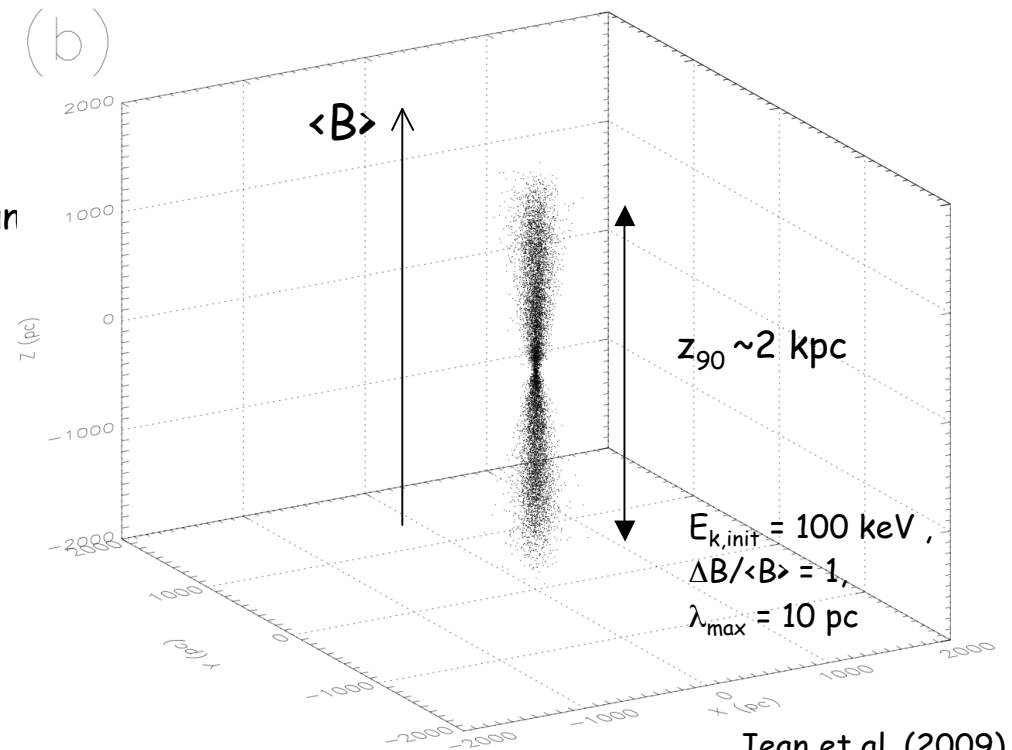
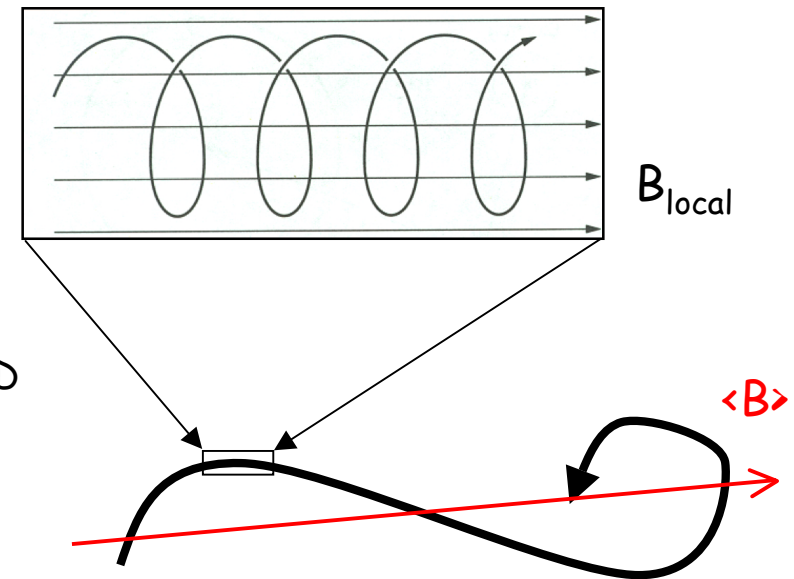
-> mouvement balistique le long de la ligne de champ

-> variation du pitch angle lors des collisions

=> transport collisionnel

Calcul par la méthode Monte Carlo en simulant un champ magnétique turbulent

-> $d \sim 20$ kpc !! pour $E = 1$ MeV dans $n = 1 \text{ cm}^{-3}$



Jean et al. (2009)

III - Annihilation des positrons Galactiques

c - Origine des positrons Galactiques

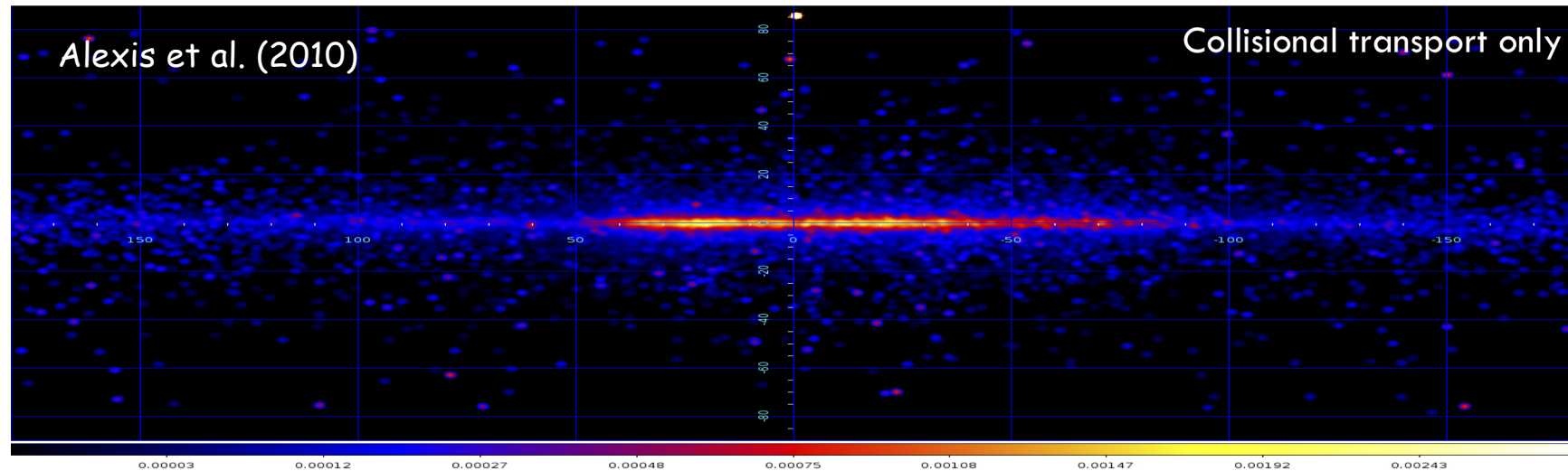
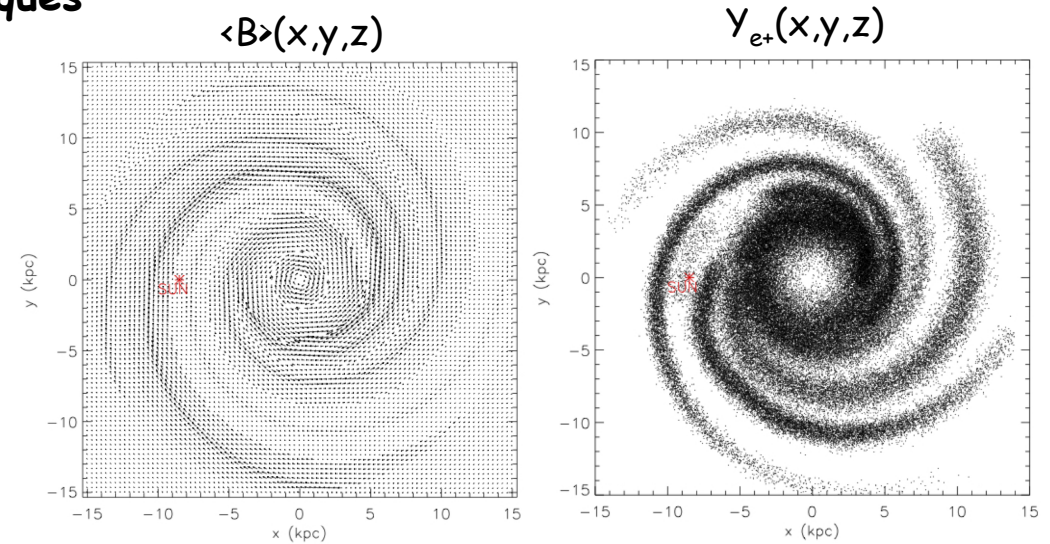
2 - Propagation des positrons

Simulation de la propagation des positrons produits par l' ^{26}Al dans le disque Galactique.

-> parcours moyen des positrons : ~ 2 kpc

-> distribution de l'émission \approx distribution des sources

-> fraction de e^+ migrant dans le bulbe : $\sim 1\%$



Prochaine étape : Simulation de la propagation des e^+ produits par le ^{56}Co des SN Ia du disque Galactique

IV - Conclusions

A - Les raies gamma nucléaires

- Outil unique en Astrophysique
- Raies à observer/découvrir (RC, novae, objets compacts, ...)
- Observation à approfondir (^{60}Fe , ^{44}Ti , ^{26}Al , ...)
- Espoir d'observer une SN ou nova avant la fin de la mission INTEGRAL (2014)
- Problème pour les futures observations (voir présentation de P. von Ballmoos)

B - Les positrons Galactiques

- Observations :
 - taux d'annihilation : $2-3 \times 10^{43} \text{ s}^{-1}$,
 - B/D $\sim 1.4-6 \Rightarrow$ vieille population ; distribution asymétrique
 - les e^+ s'annihilent dans la phase tiède
 - futur : spectro-imagerie, émission localisée (Cygne)
- Solutions populaires :
 - ^{44}Ti et ^{26}Al dans le disque ; LMXBs ?
 - Sgr A* et/ou faint LMXBs Dans le bulbe ?
 - disque & bulbe : ^{56}Co des SN Ia & propagation
- Les grandes questions :
 - propagation des e^+ dans le MIS
 - fraction d'échappement des e^+ dans les SN Ia
 - production et échappement des e^+ dans les LMXB

- évolution chimique de la Galaxie
- physique stellaire
- physique des éruptions/explosions
- objets compacts
- rayonnement cosmique

