# Observation des raies y nucléaires et des émissions diffuses avec SPI/INTEGRAL



P. JEAN (IRAP, Université de Toulouse)

#### PLAN

Introduction

- Les objectifs scientifiques du spectromètre SPI
- Le spectromètre SPI
- L'analyse des données
- Résultats : observations des raies gamma nucléaires
  - 26Al
  - 60Fe
- Résultats : Annihilation des positrons galactiques
  - Observation des émissions d'annihilation
  - Origines des positrons galactiques
- Conclusions & perspectives

#### Les raies gamma nucléaires astrophysiques

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 $\tau$	Lines (keV) Typical yields $(M_{\odot})$					ds $(M_{\odot})$		
			A	GB	WR	SN Ia	SN Ib/c	SN II	Nova
<sup>57</sup> Ni	2.14 d	1378				0.02	$510^{-3}$	$510^{-3}$	
<sup>56</sup> Ni	$8.5 \mathrm{d}$	158, 812				0.5	0.1	0.1	
$^{59}$ Fe	$64.2 \mathrm{~d}$	1099, 1292					$510^{-5}$	$510^{-5}$	
$^{7}\mathrm{Be}$	77 d	478					$10^{-7}$	$510^{-7}$	$510^{-11}$
$^{56}\mathrm{Co}^{\dagger}$	112 d	847, 1238				0.5	0.1	0.1	
$^{57}$ Co	392 d	122				0.02	$510^{-3}$	$510^{-3}$	
$^{22}Na^{\dagger}$	$3.76 \ \mathrm{yr}$	1275				$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$510^{-9}$
$^{60}$ Co	7.61 yr	1173, 1332					$10^{-5}$	$10^{-5}$	
${}^{44}\mathrm{Ti}^{\dagger}$	87 yr	68, 78, 1157				$10^{-5}$	$510^{-5}$	$510^{-5}$	
$^{26}Al^{\dagger}$	$10^6$ yr	1809	$10^{-7}$	$410^{-6}$	$10^{-4}$		$510^{-5}$	$510^{-5}$	$10^{-8}$
$^{60}$ Fe	$2.210^6~{ m yr}$	1173, 1332			$10^{-10}$	$510^{-3}$	$510^{-5}$	$510^{-5}$	

L'observation des raies gamma nucléaires apporte des contraintes sur :

- les modèles de nucléosynthèse stellaire
- la dynamique des éjecta des explosions d'étoiles
- l'évolution chimique des éléments dans la Galaxie
- la physique des éruptions solaires
- le rayonnement cosmique de basse énergie

## Les raies gamma nucléaires astrophysiques

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 $\tau$	Lines (keV)	Typical yields $(M_{\odot})$						
			A	GB	WR	SN Ia	SN Ib/c	SN II	Nova
<sup>57</sup> Ni	2.14 d	1378				0.02	$510^{-3}$	$510^{-3}$	
<sup>56</sup> Ni	$8.5 \mathrm{d}$	158, 812				0.5	0.1	0.1	
$^{59}$ Fe	$64.2 \mathrm{d}$	1099, 1292					$510^{-5}$	$510^{-5}$	
<sup>7</sup> Be	77 d	478					$10^{-7}$	$510^{-7}$	$510^{-11}$
${}^{56}\mathrm{Co}^{\dagger}$	112 d	847, 1238				0.5	0.1	0.1	
<sup>57</sup> Co	392 d	122				0.02	$510^{-3}$	$510^{-3}$	
$^{22}Na^{\dagger}$	3.76 yr	1275				$10^{-8}$	$10^{-6}$	$10^{-6}$	$510^{-9}$
<sup>60</sup> Co	7.61 yr	1173, 1332					$10^{-5}$	$10^{-5}$	
$^{44}\mathrm{Ti}^{\dagger}$	87 yr	68, 78, 1157				$10^{-5}$	$510^{-5}$	$510^{-5}$	
$^{26}Al^{\dagger}$	$10^6 \text{ yr}$	1809	$10^{-7}$	$410^{-6}$	$10^{-4}$		$510^{-5}$	$510^{-5}$	$10^{-8}$
<sup>60</sup> Fe	$2.210^6~\mathrm{yr}$	1173,1332			$10^{-10}$	$510^{-3}$	$510^{-5}$	$510^{-5}$	



### Emission d'annihilation des positrons



OSSE+SMM+TGRS

## Origine des positrons ?

- Supernovae
- Binaires X
- Pulsars
- Rayons cosmiques
- Matière noire





- ...

## SPI : Le spectromètre d'INTEGRAL

## ESA's <u>INTE</u>rnational <u>Gamma-Ray</u> <u>A</u>strophysics <u>Laboratory</u>



Lancé le 17 octobre 2002 depuis Baïkonour



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

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

- Imagerie

=> distribution spatiale des sources

- Spectroscopie

=> conditions physiques des sites émetteurs

### Analyse des données de SPI

- Bruit de fond instrumental produit par les rayons cosmiques
  - activation des matériaux
  - des noyaux sont excités localement
  - des positrons sont produits localement

Spectre de bruit de fond instrumental

- $\Rightarrow$  continuum et raies parasites
- $\Rightarrow$  signal/bruit ~ quelques %



n+

Weidenspointner et al. (2004)

p+

Y



#### Analyse des données de SPI

· Déconvolution des données de SPI

Modélisation du bruit de fond :

- Traceur du bruit de fond : e.g.  $R_{bruit}(t) = GEDSAT(t) et/ou ACSSAT(t)$
- Activation radioactive





Les raies gamma nucléaires



<sup>26</sup>**Α|** τ ~ 1 Myr, E<sub>γ</sub> = 1809 keV



- Détection du décalage Doppler (rotation Galactique)
- Masse d'^26 Al : (2.8±0.8)  $M_{\odot}$  dans la Galaxie  $\Rightarrow$  (1.9 ± 1.1) ccSN/siècle
- Flux asymétrique dans le quadrant central :  $F_{-}/F_{+}$  = 1.3 ± 0.2







<sup>60</sup>Fe

 $\tau$  ~ 2.2 Myr,

- E<sub>γ</sub> = 1173, 1332 keV
- 1ère "détection" avec RHESSI (Smith 2004)

- détection à  $3\sigma$  après 3 ans d'observation SPI (Harris et al. 2005)

- mesure SPI après 3 ans d'observation (Wang et al. 2007)

En accord avec les prédictions théoriques.

Origine : SN d'étoiles massives



Combinaison des spectres => F<sub>60</sub> = (4.4±0.9) × 10<sup>-5</sup> ph/s/cm<sup>2</sup> => F<sub>60</sub>/F<sub>26</sub> = 0.148 ± 0.06



Annihilation des positrons Galactiques



## Emissions d'annihilation

Processus de production des positrons

- isotopes β⁺	-> SNe, WR, novae Xp -> Xn + e <sup>+</sup> + v <sub>e</sub>	-> E <sub>e+</sub> ~ 1 MeV
- décroissance π⁺	-> interactions CR - MIS p + p -> p + n + π <sup>+</sup> & π <sup>+</sup> -> μ <sup>+</sup> -> e <sup>+</sup>	-> E <sub>e+</sub> ~ 10-100 MeV
- production paire e⁺e⁻	-> disques d'accrétion & jets γ + γ -> e <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> -> magnétosphère de pulsar γ + γ -> e <sup>+</sup> + e <sup>-</sup>	-> E <sub>e+</sub> ≤ 1 MeV -> E <sub>e+</sub> ~ 1-1000 GeV
- processus exotiques	-> e.g. matière noire, dm + dm -> e⁺ + e⁻	-> E <sub>e+</sub> ~ ? MeV





## Emissions d'annihilation



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

Emissions d'annihilation

- No point sources detected
- Analysis by model fitting method

Uncertainties in the morphology
2 bulges (~3° & ~11° FWHM) & thick disk
or

Extended halo & thin disk

```
    Annihilation rates

            (1 - 3) × 10<sup>43</sup> s<sup>-1</sup> in the bulge
            (0.8 - 0.5) × 10<sup>43</sup> s<sup>-1</sup> in the disk

    ⇒ B/D ~ 1.4 - 6: Old star population favored
```

• Asymmetry

```
Strong evidence (4\sigma)
```

```
Offset of ~1° of the wide bulge component
and/or
Asymmetric disk : F(l < 0°) > F(l > 0°)
```



Weidenspointner et al. (2008)



Emissions d'annihilation

#### 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
In	(0.72 ± 0.12 ± 0.02) 10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
$\Gamma_{n}$	1.32 ± 0.35 ± 0.02 keV
I <sub>b</sub>	(0.35 ± 0.11 ± 0.02) 10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
$\Gamma_{\sf b}$	5.36 ± 1.22 ± 0.06 keV
Ι <sub>3γ</sub>	(4.23 ± 0.32 ± 0.03) 10 <sup>-3</sup> s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup>
A <sub>c</sub>	(7.17 ± 0.80 ± 0.06) 10 <sup>-6</sup> s <sup>-1</sup> cm <sup>-2</sup> keV <sup>-1</sup>

Spectre du bulbe Galactique χ<sup>2</sup> ~ 171.3 (d.o.f. 148) Broad line (3.2σ) ~1/3 of the 511 keV flux => detection of Ps formed in-flight

Total 511 keV flux : (1.07±0.03) 10<sup>-3</sup> γ/s/cm<sup>-2</sup>

Ps fraction : 96.7±2.2 %

Emissions d'annihilation

#### 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<sub>i</sub> : contribution of phase i



Parameters	Measured values
$\mathbf{f}_m$ (Molecular)	$0.00 \stackrel{+0.08}{-0.00} \stackrel{+0.02}{-0.00}$
$f_c$ (Cold)	$0.00 \stackrel{+0.23}{_{-0.00}} \stackrel{+0.04}{_{-0.00}}$
$\mathbf{f}_{wn}$ (Warm Neutral)	$0.49 \stackrel{+0.02}{-0.23} \stackrel{+0.02}{-0.04}$
$\mathbf{f}_{wi}$ (Warm Ionized)	$0.51 \begin{array}{c} +0.03 \\ -0.02 \end{array} \begin{array}{c} +0.02 \\ -0.02 \end{array}$
$\mathbf{f}_h$ (Hot)	$0.00 \stackrel{+0.005}{-0.00} \stackrel{+0.00}{-0.00}$
$\mathbf{x}_{gr}$ (Grain fraction)	$0.00 \stackrel{+1.20}{_{-0.00}} \stackrel{+0.20}{_{-0.00}}$

## 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±4% Kinzer et al. 2001 94±4% Harris et al. 1998 94±6% Churazov et al. 2005

Positrons annihilate in warm phases



#### Emissions d'annihilation



If positrons are produced in a **steady state** in the GC then their initial kinetic energy should be < 8 MeV else the inflight annihilation emission would be detected at high energy (Aharonian & Atoyan 1981, Beacom & Yuksel 2006, Sizun et al. 2007) Recently, Chernyshov et al. (2009) showed that this conditions holds when B < 0.4 mG in this region.

Origine des positrons Galactiques :

- (2 4)  $\times$  10<sup>43</sup> e<sup>+</sup>/s
- B/D ~ 1 6
- annihilation dans les milieux tièdes (~8000K)

- pas d'émission d'annihilation en vol à haute énergie dans le bulbe.

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

## Conclusions

• Quelques résultats principaux de SPI/INTEGRAL

- annihilation des positrons : imagerie et spectroscopie fine
- <sup>26</sup>Al : décalage doppler, région du Cyg, émission dans Sco-Cen
- découverte des raies du <sup>60</sup>Fe
- émission diffuse de la Galaxie (voir Bouchet et al., 2011)
- Quelques résultats attendus/espérés
  - raies gamma d'une SN Ia proche
  - raies gamma d'une nova proche
  - émission locale à 511 keV (e.g. Cygne)
  - ...

• Besoin d'un futur spectromètre gamma pour la gamme 200 keV - 10 MeV

