



# Perspectives de l'astrophysique nucléaire

Jacques Paul

Service d'Astrophysique, CEA-Saclay  
Fédération de recherche APC, Paris

IAP  
Paris

Atelier MAX

23 mars  
2004

# Inventaire

L'astrophysique nucléaire : une communauté rassemblant astrophysiciens, physiciens nucléaires et théoriciens

→ Communauté interdisciplinaire par excellence  
La communauté française compte une **cinquantaine de chercheurs permanents** (CNRS, CEA, Université)

L'astrophysique nucléaire française se trouve dans un contexte favorable s'agissant des moyens d'observation

→ Spectrométrie gamma avec INTEGRAL  
Plus du **tiers de la communauté française** travaille sur l'analyse et l'interprétation des données pour l'étude de la nucléosynthèse dans l'univers local

# Astrophysique nucléaire et spectroscopie gamma

L'étude des raies gamma de désexcitation nucléaire fournit des données uniques sur les processus nucléaires et sur les interactions à haute énergie dans l'univers

## → Intensité

Abondance des isotopes émetteurs

Conditions physiques des milieux où ils sont formés

## → Décalage spectral

Distances, vitesses d'expansion

mise en évidence de puits de potentiel alentour

## → Profil

Température / turbulence des milieux émissifs

Estimation du spectre des particules excitatrices

## Conditions d'émission des raies gamma

Raies émises à la suite de décroissance de radionucléides

Radionucléides produits en abondance

Durées de vie assez courte (raies intenses)

Mais pas trop courte (opacité des milieux émissifs)

→ Très peu d'élus parmi les 917 émetteurs gamma

${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{22}\text{Na}$ ,  ${}^{26}\text{Al}$ ,  ${}^{44}\text{Ti}$ ,  ${}^{56}\text{Ni}$ ,  ${}^{57}\text{Co}$ ,  ${}^{60}\text{Fe}$

Raies émises à la suite d'excitations induites par collisions

Noyaux les plus abondants

Milieux dilués (circumstellaires, interstellaires)

Milieux irradiés par des particules accélérées

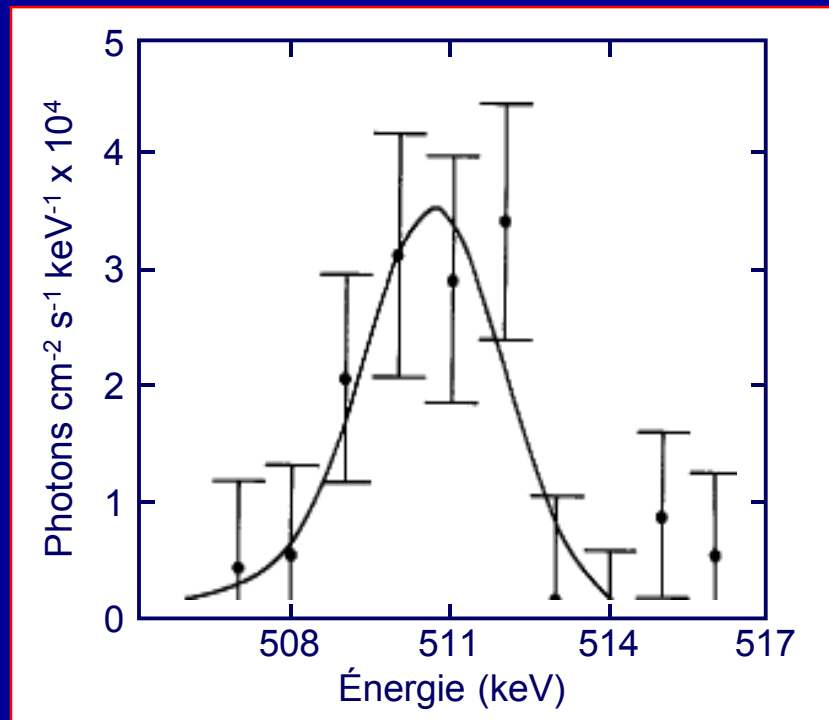
→ Éléments concernés

C, O, LiBeB (spallation / interaction alpha-alpha)

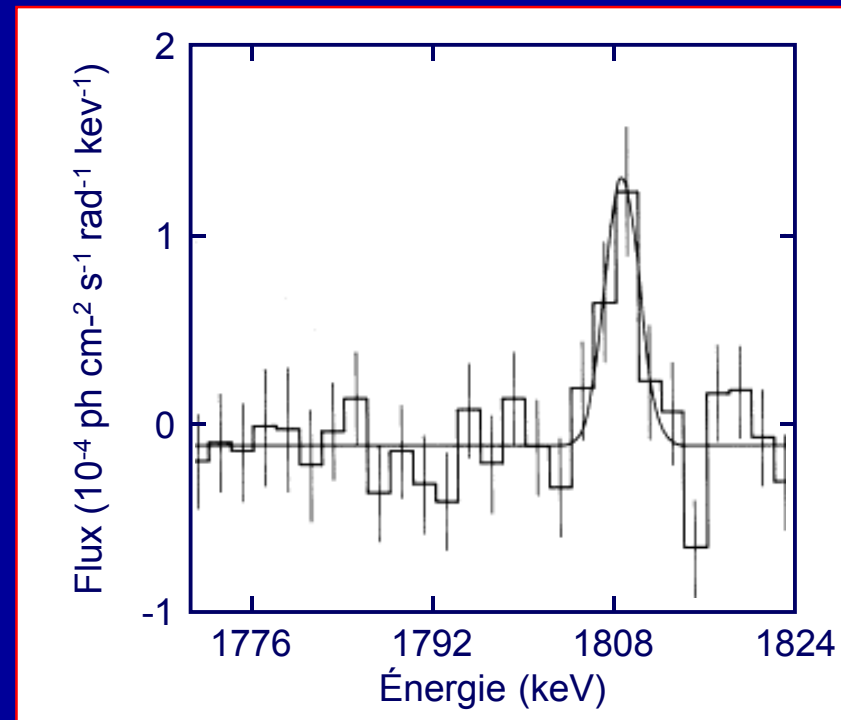
## Premiers repères

**1978** Première mesure précise de la raie d'annihilation des positons en direction du centre de la Galaxie

**1982** Première raie nucléaire observée au delà du Soleil

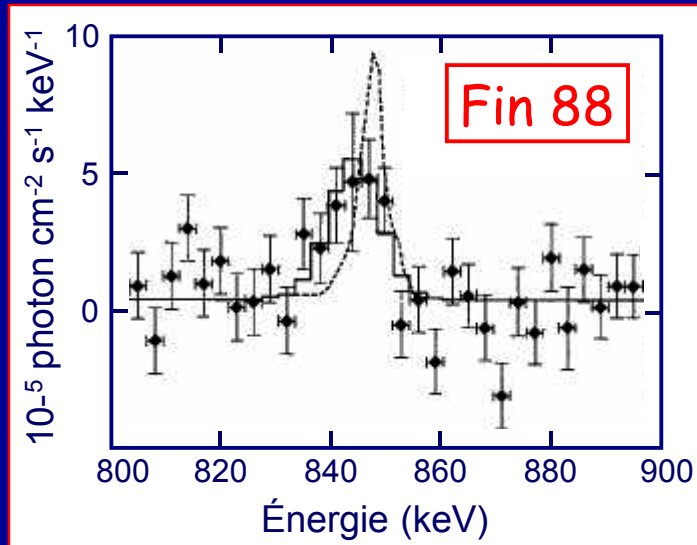


D'après Leventhal et al. (1978)



D'après Mahoney et al. (1983)

# SN 1987a : la supernova radioactive



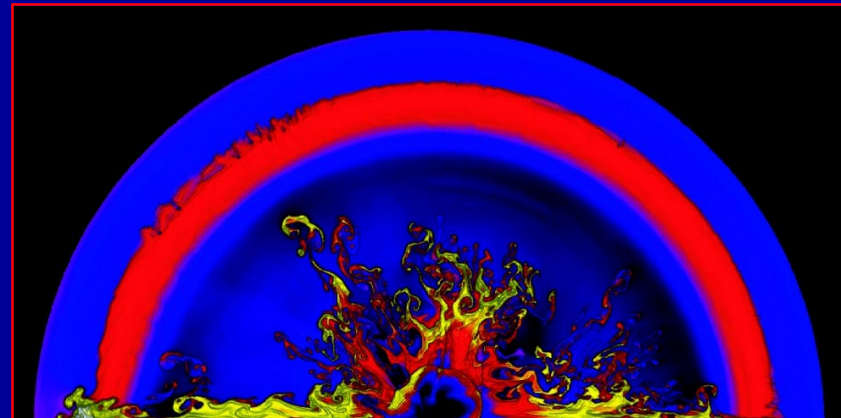
D'après Tueller et al. (1990)

Confirmation des théories de la nucléosynthèse explosive, mais :  
raie plus large que prévu  
raie détectée plus tôt que prévu  
(~ 6 mois)

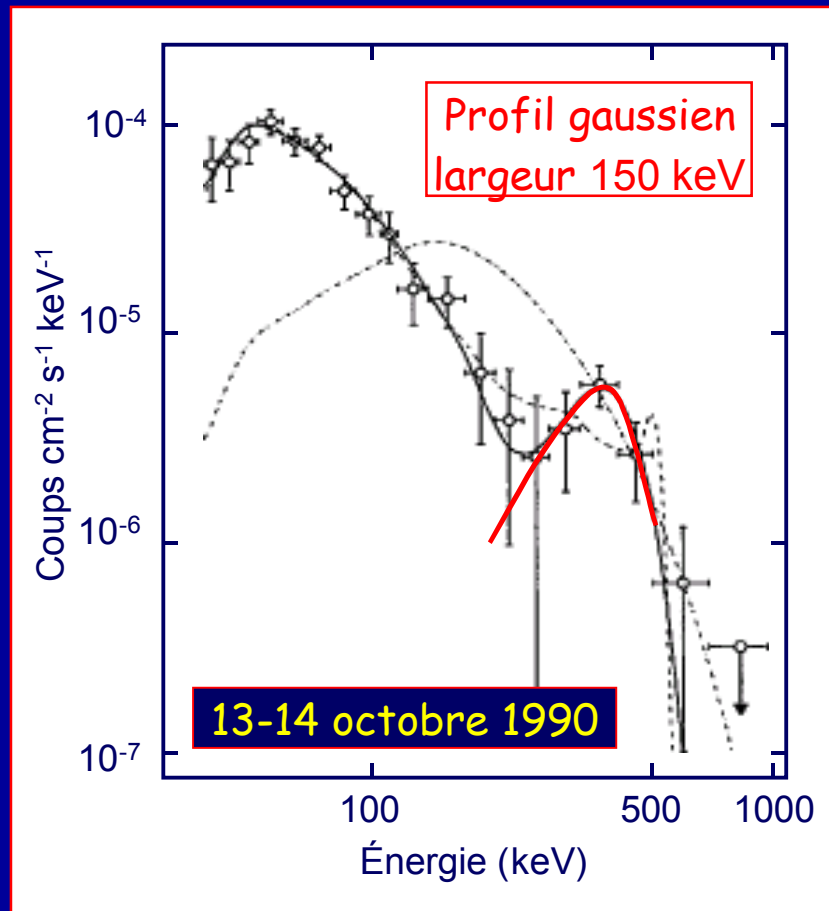
**Le modèle 1D « en pelure d'oignon » ne tient plus !**

Explosion asymétrique ?

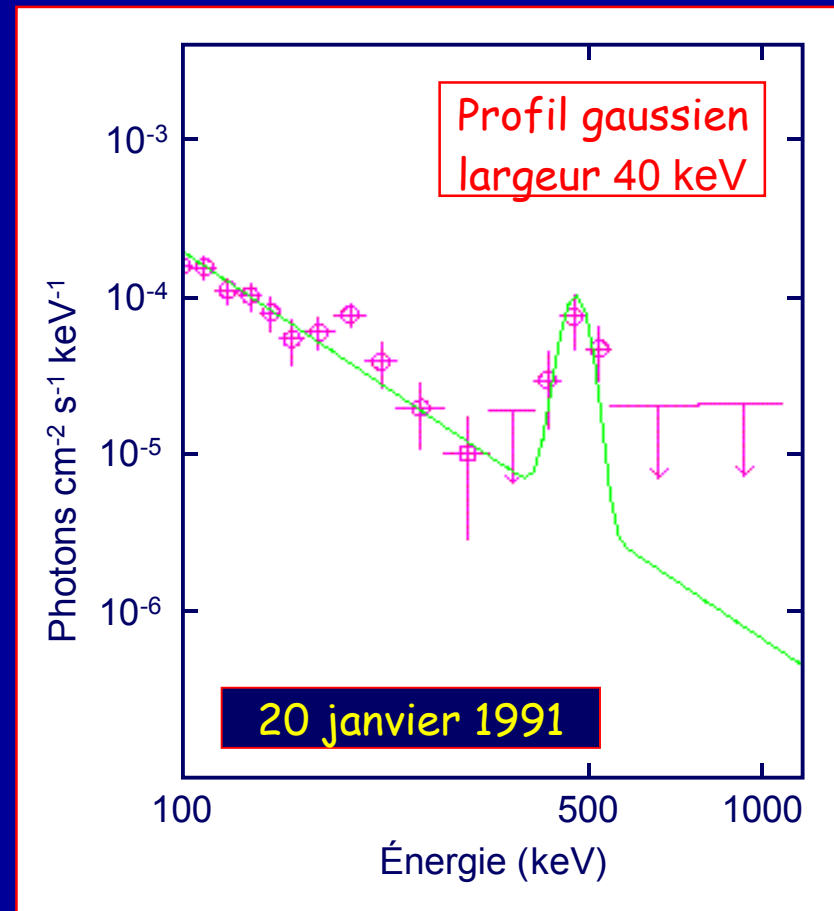
Instabilités hydro au cœur de l'explosion ?



# Raies émises par des trous noirs accrétants



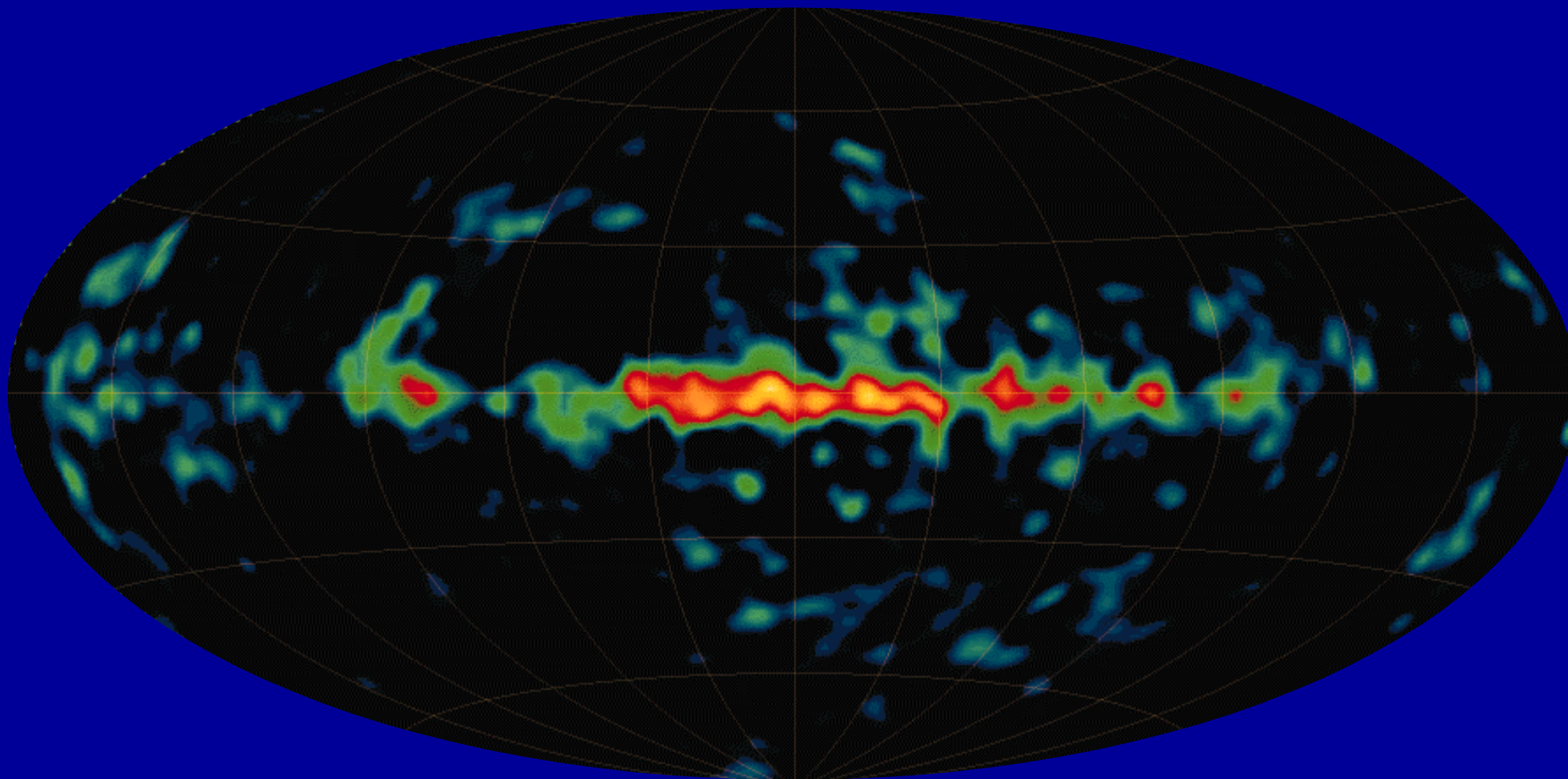
D'après Sunyaev et al. (1991)



D'après Goldwurm et al. (1993)



# La Voie lactée radioactive

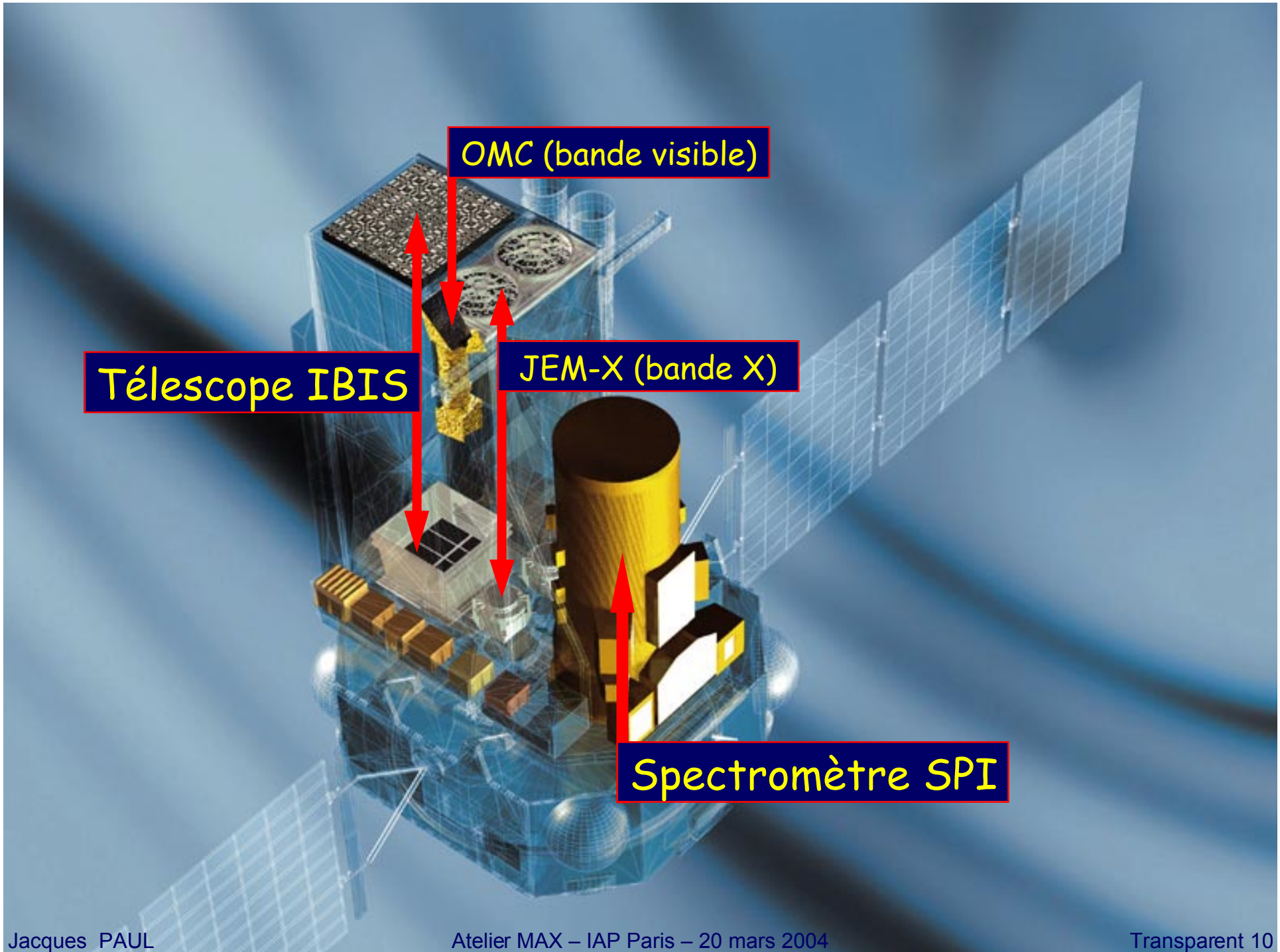


Carte de l'émission de la décroissance de l'aluminium-26  
D'après Oberlack et al. 1997









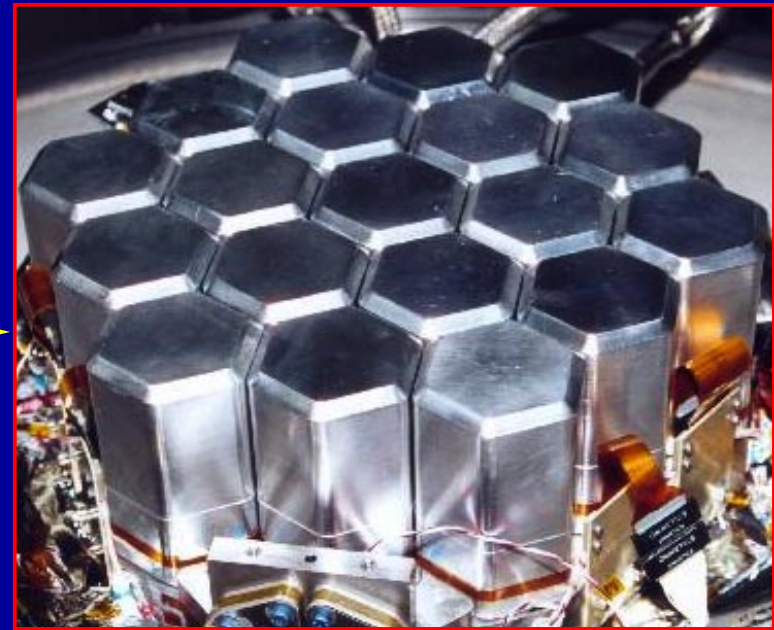
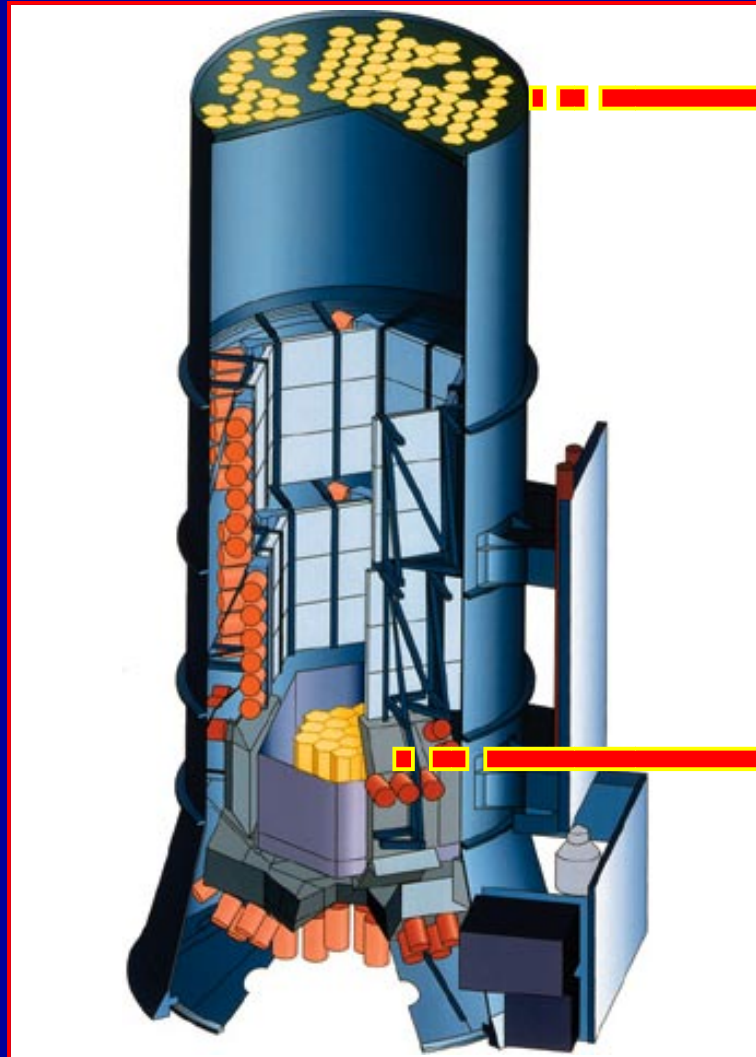
Télescope IBIS

OMC (bande visible)

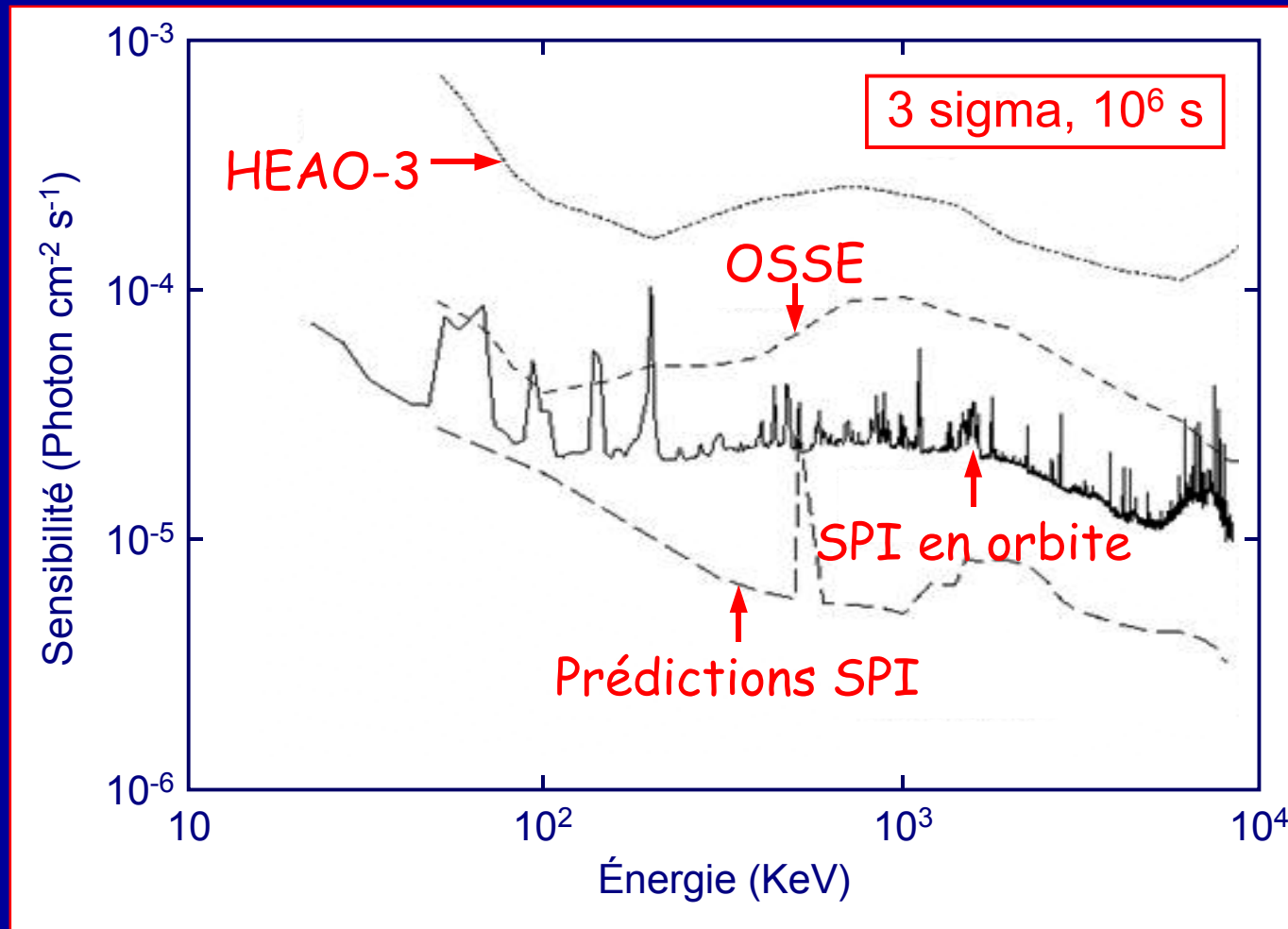
JEM-X (bande X)

Spectromètre SPI

# SPI : Un spectromètre apte à faire des images

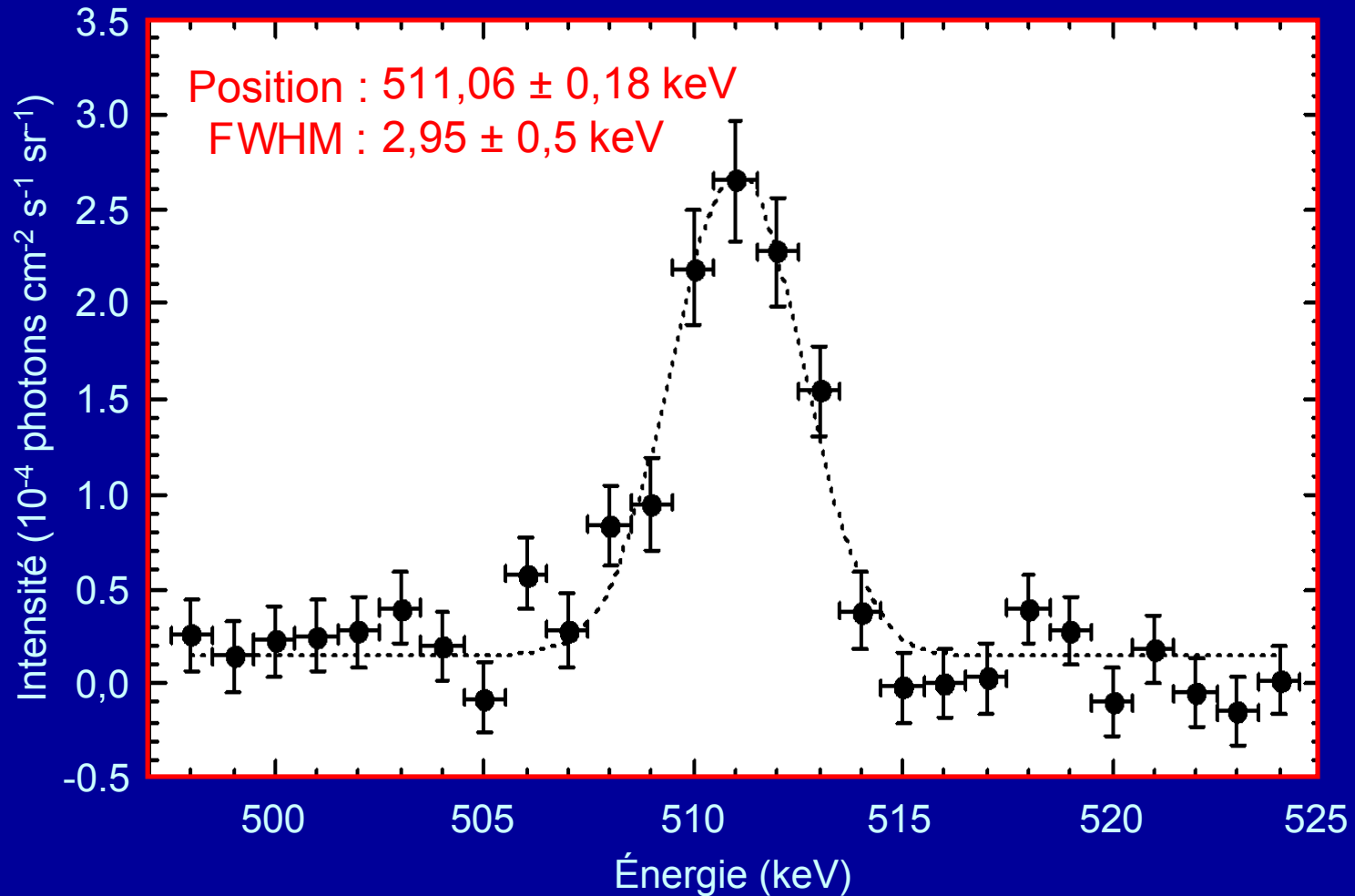


# Sensibilité de SPI aux raies fines



D'après Roques et al. (2003)

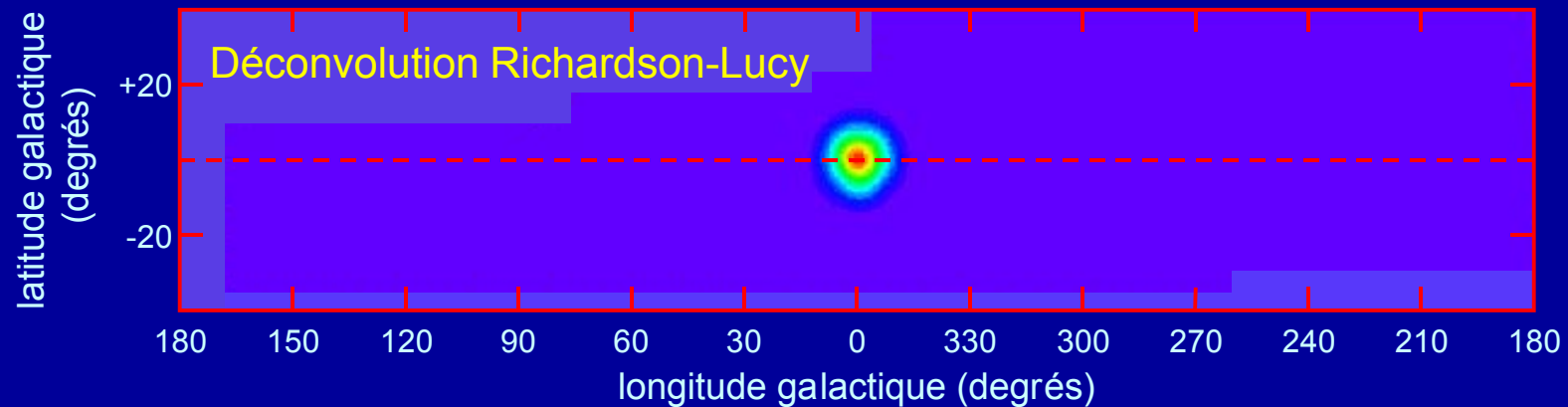
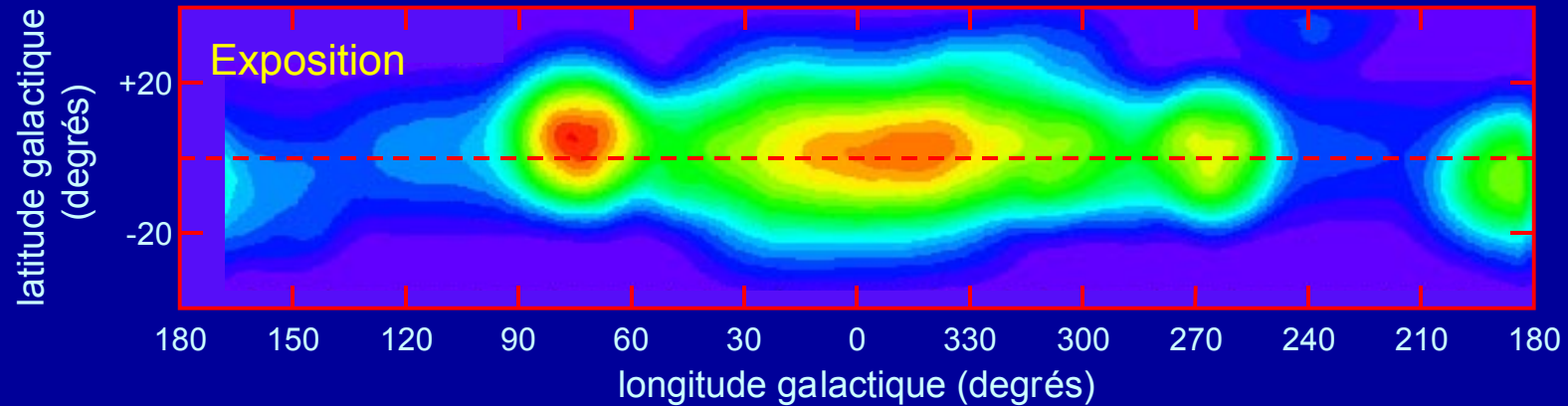
# Spectre SPI des régions centrales de la Galaxie



D'après Jean et al. (2003)

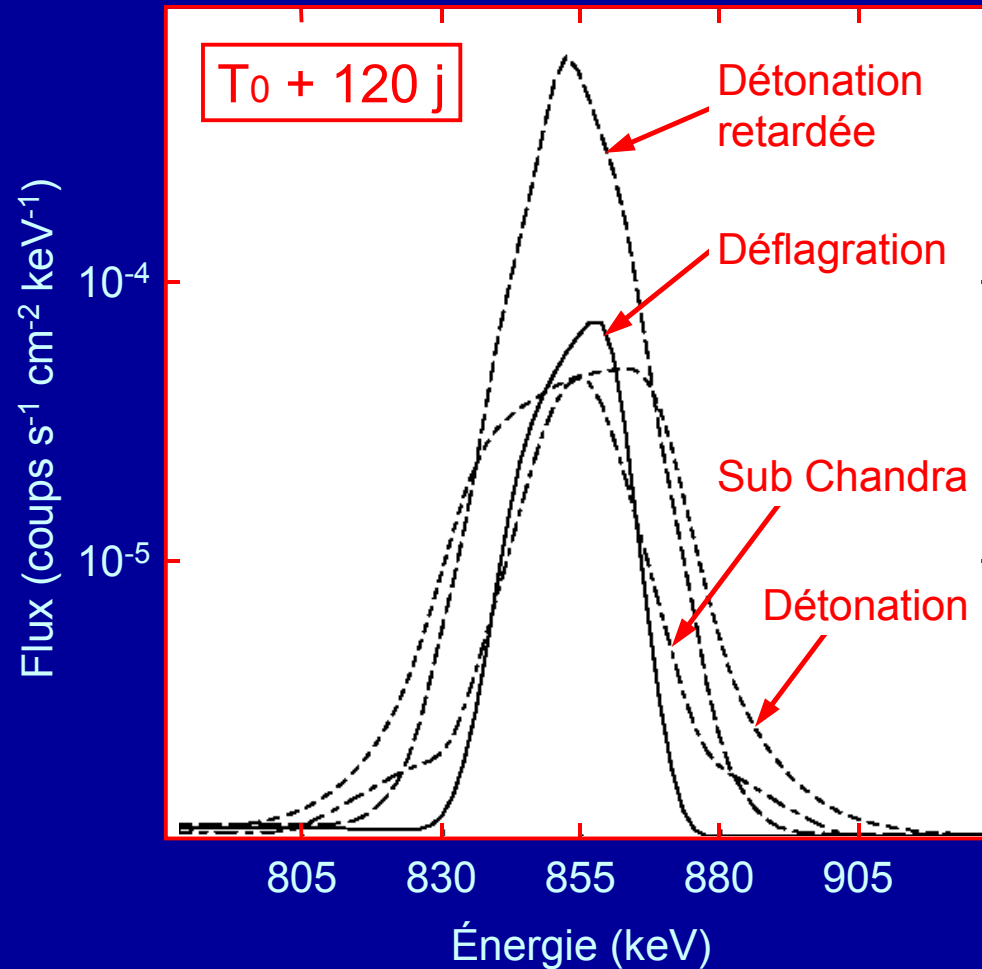


# Image INTEGRAL à 511 keV de la Voie lactée



L'émission observée à 511 keV ( $10^{-3}$  photons  $s^{-1}$ ) implique l'injection de  $10^{43}$  positons par seconde dans le bulbe galactique

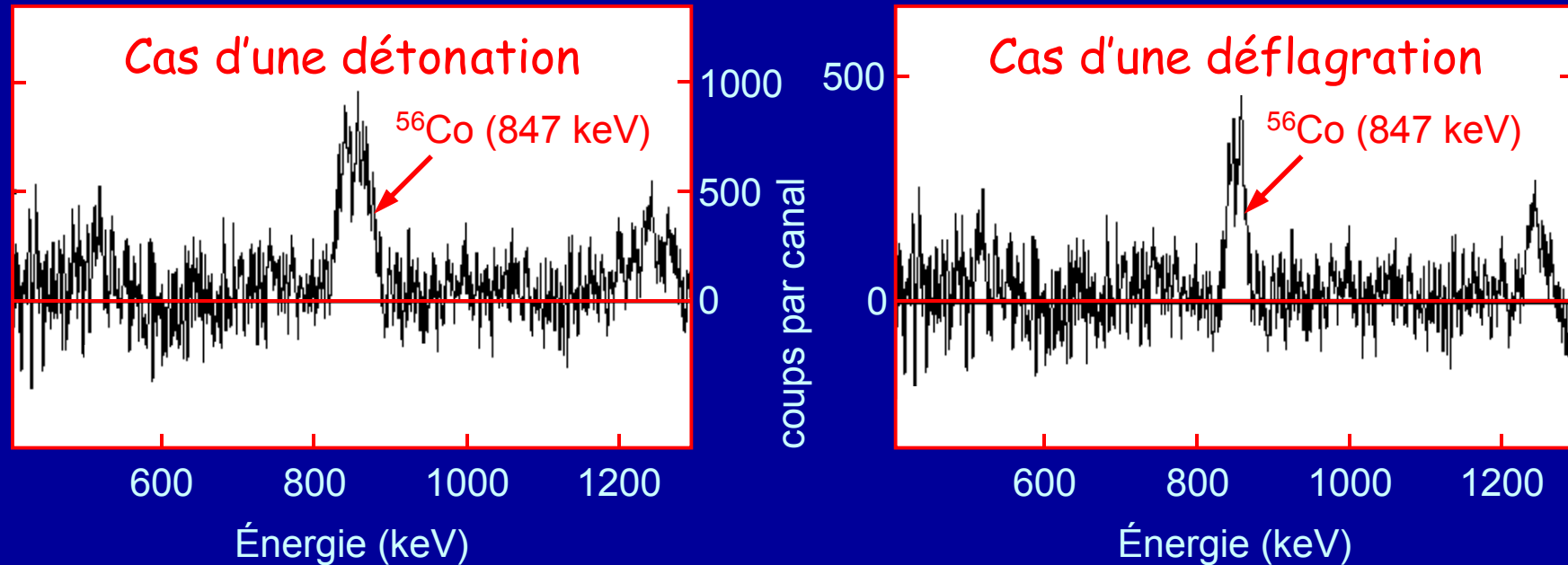
# Les raies gamma : la clé des SN Ia



Profil de la raie à 847 keV émise par une SN Ia à 1 Mpc



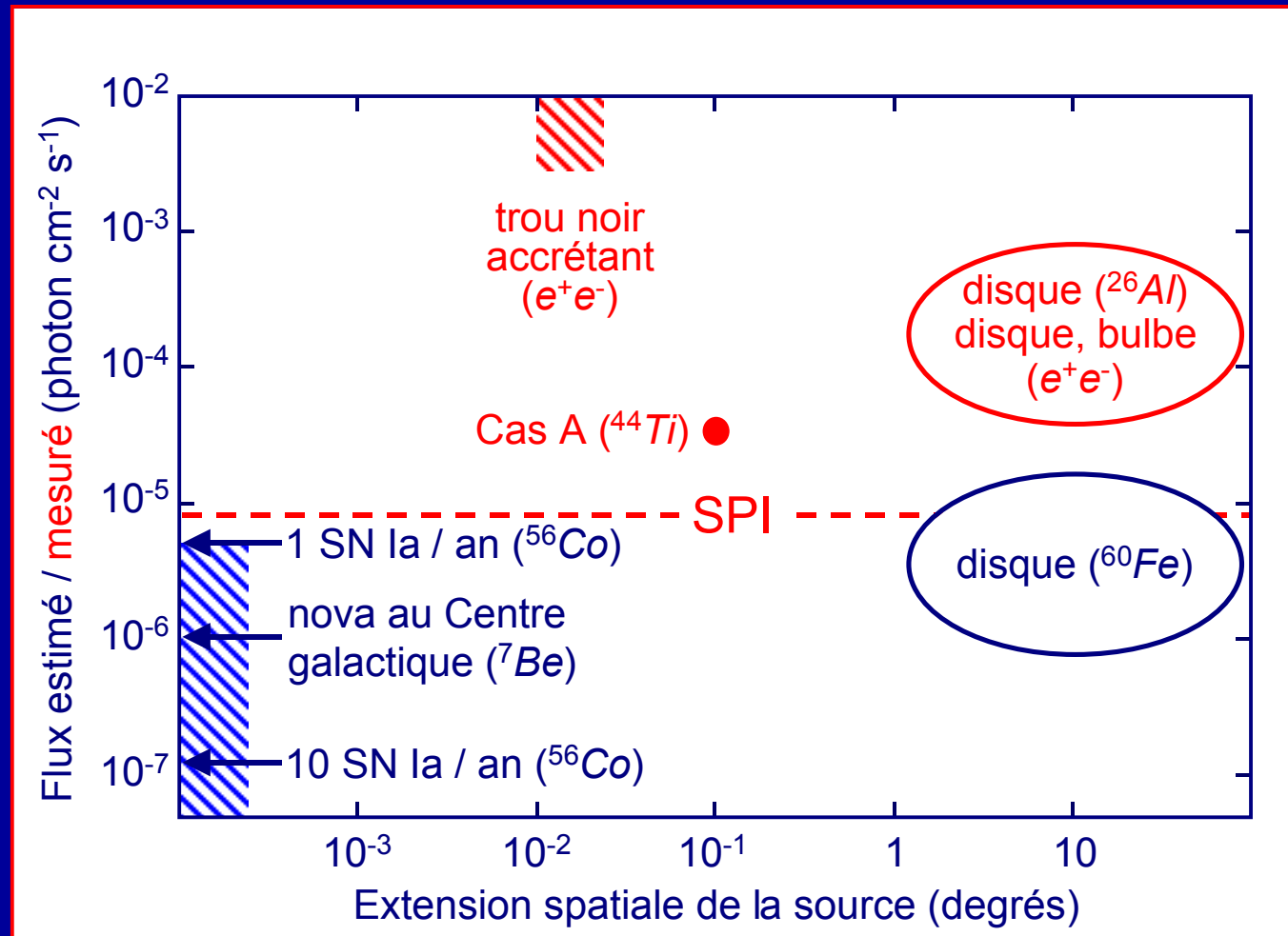
# SPI et les SN Ia



Spectre SPI simulé d'une SN Ia à 2 Mpc ( $10^6$  s)  
D'après Gómez-Gomar et al. (1998)

SPI ne pourra étudier que des SN Ia dont la distance est inférieure à quelques mégaparsecs

# Quelle stratégie pour le futur ?



D'après von Ballmoos (1997)

