



HAL
open science

Astronomie gamma nucléaire qu'apprend-on ?

B. Cordier

► **To cite this version:**

B. Cordier. Astronomie gamma nucléaire qu'apprend-on ?. École thématique. Ecole Joliot Curie "Astrophysique nucléaire: du microcosme au macrocosme astrophysique", Spa, (Belgique), du 10-16 septembre 2000 : 19ème session, 2000. cel-00653829

HAL Id: cel-00653829

<https://cel.hal.science/cel-00653829>

Submitted on 20 Dec 2011

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'ASTRONOMIE GAMMA NUCLEAIRE, QU'APPREND-T-ON ?

Bertrand Cordier

CEA-Saclay, DSM/DAPNIA/Service d'Astrophysique

à Robert Legrain

Résumé

L'astronomie gamma nucléaire se donne pour but l'étude détaillée de la production de noyaux radioactifs émetteurs gamma dans les étoiles, novæ, supernovae et dans les milieux interstellaires. L'intensité et le profil des raies permettent d'identifier sans ambiguïté les isotopes émetteurs, d'estimer leur abondance et d'accéder à la connaissance des conditions physiques du milieu source.

D'après les modèles de nucléosynthèse, on peut dresser la liste des noyaux émetteurs gamma susceptibles d'être détectés. Compte tenu des abondances et des propriétés de décroissance, cette liste est finalement restreinte. Tous les efforts de l'astronomie gamma nucléaire consisteront donc à détecter ces quelques traceurs.

Au cours de ces dernières années, ce domaine a connu un développement spectaculaire, grâce à l'avènement de l'ère spatiale. Nous passerons en revue les quelques observations menées à ce jour et déclinons les objectifs scientifiques prioritaires du satellite européen *INTEGRAL*, véritable fer de lance de l'astronomie gamma nucléaire future.

Summary

Nuclear gamma ray astronomy is aimed at a detail study of the production of gamma-ray emitter nuclides in stars, novae, supernovae and in the interstellar medium. The intensity and profiles of gamma ray lines permits the unambiguous identification of the emitting isotopes, the estimation of their abundance and the knowledge of the physical conditions of the source. Based on models of nucleosynthesis, we may deduce the expected gamma radio nuclides. Taking into account their abundance and their decay properties, this list is rather limited. All the effort of the nuclear gamma-ray astronomy consist in detecting these few tracers.

These last years, thanks to the space age technology, this domain has known a spectacular development. We will pass in review some of the observations performed to this day and enumerate the main scientific objectives for the European satellite *INTEGRAL*.

I. Introduction

En raison des explosions continues de supernovae et de novæ, notre galaxie est en permanence radioactive. Les photons les plus énergétiques du spectre électromagnétique constituent les indices les plus purs des mécanismes de synthèse des noyaux d'atomes dans l'univers (Clayton 1982, Cassé et Prantzos 1993, Leising 1994, Ramaty et Lingenfelter 1995). Les raies gamma sont le résultat de la désexcitation de niveaux nucléaires préalablement excités, lesquels sont peuplés, soit par la désintégration d'une espèce radioactive parente,

fraîchement synthétisée dans les étoiles et éjectée par leurs vents et explosions, soit par collision noyau-noyau dans le milieu interstellaire.

Ainsi, les processus qui se soldent par l'émission de raies gamma sont de deux sortes : la première se rattache à des processus essentiellement thermiques (nucléosynthèse hydrostatique ou explosive), la seconde à des processus non-thermiques mettant en jeu des distributions d'énergie non maxwelliennes.

II. Sources de raies gamma

La caractéristique essentielle du rayonnement gamma est son très grand pouvoir de pénétration. Le libre parcours moyen d'un photon de 1 MeV est d'environ 10 g.cm^{-2} dans l'hydrogène. Ainsi la Galaxie est transparente de part en part. Cependant la condition sine qua non pour que brillent les sources gamma nucléaires est que le rayonnement gamma ne soit point dégradé en quelque forme moins énergétique et donc que les noyaux émettent leurs photons dans des milieux de basse densité (enveloppes, débris d'étoiles ou milieu interstellaire). Cette condition est satisfaite par deux types de nucléides :

- a) les noyaux radioactifs de vie suffisamment longue pour être portés loin de leurs sources par les vents et explosions d'étoile, ceci avant de se désintégrer.
- b) les noyaux stables excités par collision nucléaire dans les milieux de basse densité. Ce mode de production de raies gamma met en jeu des faisceaux de noyaux énergétiques naturels, analogues à ceux que produisent, par exemple les éruptions solaires.

S'agissant de la deuxième catégorie, nous ne traiterons pas ici la nucléosynthèse non thermique mais nous invitons le lecteur intéressé à se rapporter à «LiBeB, cosmic rays, and related X and gamma-rays, 1999, Astron. Soc. Pac. Conf. series, V1. 171». S'agissant de la première catégorie, il ne suffit pas d'engendrer des isotopes radioactifs émetteurs gamma pour produire une source. Il convient d'y adjoindre un mécanisme d'éjection rapide et efficace, afin que les rayons gamma émanant des isotopes de vie relativement courte ne soient pas absorbés par la matière ambiante. Ce mécanisme est offert par le vent des étoiles et (ou) les explosions qu'elles déclenchent.

Les sources gamma associées aux vents sont les étoiles AGB (Branche Asymptotique des Géantes) et les Wolf-Rayet (étoiles massives à forte perte de masse). Les étoiles Wolf-Rayet laissent affleurer leur cœur convectif où sont brassés les produits de nucléosynthèse, en se dépouillant de leur enveloppe sous l'effet d'un fort vent stellaire. Le vent emporte les produits radioactifs au loin, qui une fois déposé dans le milieu interstellaire ont tout le temps de décroître. C'est le cas de l'aluminium-26.

Les sources gamma explosives sont les novæ et les supernovæ. Dans la catégorie des supernovæ, on distingue deux types d'objet : les thermonucléaires et les gravitationnelles. Les novæ et les supernovæ thermonucléaires (type Ia) résultent de l'explosion thermonucléaire superficielle ou totale d'une naine blanche surchargée par la matière dérobée à un compagnon. Dans le cas des novæ, les noyaux radioactifs sont produits par des explosions de surface et se trouvent directement éjectés dans des milieux transparents aux photons gamma. Dans le cas des supernovæ thermonucléaires, l'explosion conduisant à une

incinération totale de la naine blanche produit une quantité considérable de nickel-56. La naine blanche étant de petite masse, les produits de nucléosynthèse sont expulsés dans des milieux devenant très tôt transparent aux photons gamma. Les supernovae gravitationnelles (type II) quant à elles, résultent de l'effondrement du cœur d'une étoile massive. La manière dont l'implosion du cœur se transforme en explosion n'est pas encore complètement élucidée. Mais pendant cette explosion, les couches successives de l'«oignon» stellaire qui constitue l'enveloppe de l'étoile se trouvent propulsées dans l'espace et brusquement chauffées à des températures de plusieurs milliards de degrés, ce qui provoque l'allumage de leurs combustibles encore intacts. Pendant quelques secondes la nucléosynthèse explosive altère la composition de ces couches produisant des noyaux moins stables que ceux que l'étoile avait synthétisés auparavant. Parmi ces noyaux il faut souligner la présence du nickel-56. A l'origine, les supernovae gravitationnelles ne sont pas transparentes aux rayons gamma, mais elles le deviennent progressivement en raison de l'expansion de leur enveloppe et de sa dilution.

Le test des modèles de nucléosynthèse est un objectif prioritaire de l'astronomie gamma nucléaire. D'après les modèles théoriques, on peut calculer l'abondance des noyaux synthétisés; et en fonction du scénario astrophysique estimer l'abondance des produits disséminés dans le milieu interstellaire. Nous ne détaillerons pas ici la nucléosynthèse des isotopes radioactifs noyau par noyau, site par site. Le lecteur intéressé se rapportera à Mowlavi et Meynet (2000) pour les AGB, Prantzos et Diehl (1996) pour les Wolf-Rayet, Coc (1995) et Hernanz et al. (1999) pour les novæ, Timmes et al. (1995) pour les supernovae. Il est important de rappeler que tous ces calculs sont accompagnés d'une grande incertitude, liée à l'évaluation des sections efficaces nucléaires dans des milieux aux conditions physiques extrêmes.

La liste des noyaux radioactifs d'intérêt astrophysique susceptibles d'être observés est finalement courte, car rares sont les isotopes émetteurs gamma dont la période a le bon goût de se situer dans la gamme propice, à savoir entre un jour et un million d'années, et qui sont synthétisés et éjectés dans le milieu interstellaire en quantité suffisante pour y être observés. Cette liste est donnée Table I. Les chaînes de décroissance détectées apparaissent en grisé. Les raies observées en caractère gras.

Table I : Noyaux radioactifs, demie vie, énergie des raies et site astrophysique. La $\frac{1}{2}$ vie du ^{44}Ti est encore incertaine (66 ou 96 ans).

Père	Fils	$\frac{1}{2}$ vie	Raies principales (keV)	Site astrophysique
^{56}Ni	^{56}Co	6,1 j	158, 269, 480	Supernovae
^{56}Co	^{56}Fe	79 j	847, 1238, e⁺	
^{57}Ni	^{57}Co	36 h	127, 1377, 1919	Supernovae
^{57}Co	^{57}Fe	271 j	14, 122, 136	
^{22}Na	^{22}Ne	2,6 a	511, 1274	Novae
^{44}Ti	^{44}Ca	66-96 a	68, 78, e ⁺	Supernovae
^{44}Sc	^{44}Ca	4 h	1157, e⁺	
^{60}Fe	^{60}Co	$3 \cdot 10^5$ a	1173, 1332	Supernovae
^{60}Co	^{60}Ni	5,3 a		WR, AGB
^7Be	^7Li	53 j	478	Novae
^{26}Al	^{26}Mg	$7,2 \cdot 10^5$ a	1809	Supernovae, Novae, WR, AGB

III. Les observations

L'astronomie gamma nucléaire est une science jeune, issue de la maîtrise conjointe des techniques de physique nucléaire et des techniques spatiales. Les premières observations furent réalisées lors de vol ballons stratosphériques afin de s'affranchir de l'absorption atmosphérique. Malgré des conditions très difficiles (temps limité, fort bruit de fond) ces premières observations permirent de découvrir les signatures gamma de la nucléosynthèse. Depuis deux décennies les expériences sont plutôt embarquées à bord de satellites. La technique spatiale permet d'augmenter considérablement le temps d'observation et donc d'abaisser le seuil de sensibilité. Parmi ces expériences nous mentionnerons l'observatoire américain *Compton*, composé de plusieurs instruments dont le télescope *Comptel* opérant dans un domaine propice à l'astrophysique nucléaire.

Parallèlement à l'émergence de l'astronomie gamma spatiale, la communauté scientifique a vécu un événement exceptionnel: le 23 février 1987 une supernova de type II explosait dans le Grand Nuage de Magellan. L'observation des raies gamma du cobalt-56 liées à l'explosion de SN1987A apporta une confirmation éclatante du scénario de nucléosynthèse dans une supernova gravitationnelle

Dans ce qui suit nous mettrons l'accent sur les raies gamma détectées à ce jour, à savoir celles de deux isotopes du cobalt (56 et 57), du titane-44 et de l'aluminium-26.

III.1 Raies du cobalt

L'isotope radioactif le plus abondamment produit dans les explosions d'étoiles est le nickel-56, noyau doublement magique (28 protons, 28 neutrons). Les astrophysiciens nucléaires s'étaient convaincu de longue date que tout le fer de la nature est produit dans les explosions d'étoiles sous forme de nickel radioactif en vertu d'un équilibre statistique nucléaire favorable (Arnett 1996). L'observation de SN1987A est venu vérifier cette prédiction de deux manières :

- i) Dans les premiers mois l'intensité de la lumière a décliné exponentiellement avec un temps caractéristique de 77 jours identique à la vie moyenne du cobalt-56, fils du nickel-56 (Arnett et al. 1989).

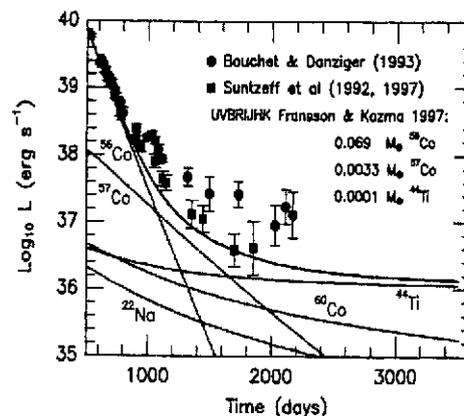


Fig. 1. Courbe de lumière de SN1987A. Les isotopes radioactifs (⁵⁶Co, ⁵⁷Co et ⁴⁴Ti) contribuent chacun à son tour à la luminosité de la supernova (Diehl et Timmes 1998).

- ii) Les raies gamma de 847 et 1238 keV résultant de la transmutation du cobalt-56 en fer-56 ont été effectivement détectées (Tueller et al. 1991, Teegarden 1994) ainsi que les X de comptonisation de ces raies (Sunyaev et al. 1987, Donati et al. 1988). La quantité de fer-56 (nickel-56) produite et éjectée dans l'espace par l'explosion a pu même être déterminée ($0,07 M_{\odot}$).

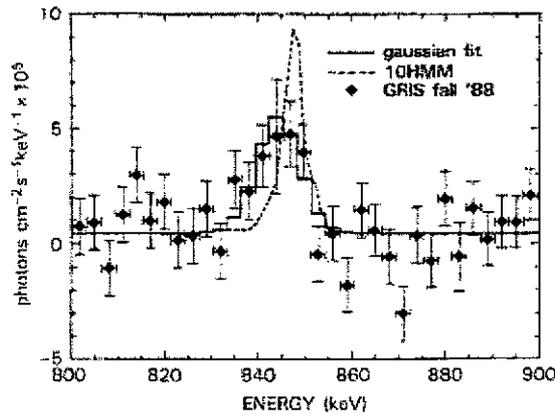


Fig. 2. Raie gamma à 847 keV en provenance de SN1987A enregistrée par le ballon GRIS (Tueller et al. 1991).

La raie gamma de désintégration du cobalt-57 en fer-57 (122 keV) a également été mise en évidence (Kurfess et al. 1992), ce qui a permis de déterminer le rapport isotopique $57/56$ à la sortie du four stellaire et éclairé sa synthèse (Clayton et al. 1992). Celui-ci est proche du rapport $^{57}\text{Fe}/^{56}\text{Fe}$ mesuré dans le système solaire, ce qui accrédite l'idée que la synthèse des isotopes du fer est redevable essentiellement de supernovae émanant d'étoiles massives (SNII) comme SN1987A. Néanmoins la statistique de cette détection est assez faible comme on peut le constater Figure 3. Il est donc imprudent dans ces conditions de tirer des conclusions astrophysiques définitives.

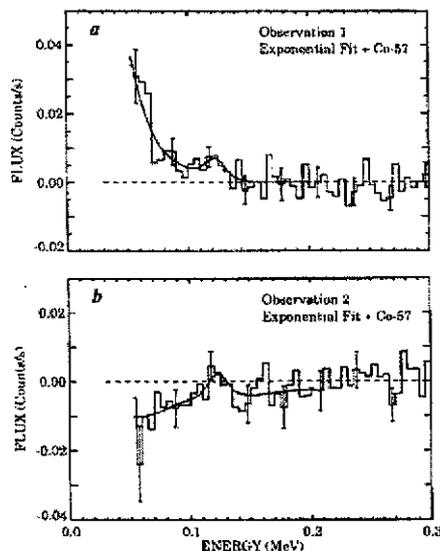


Fig. 3. Raie gamma de désintégration du ^{57}Co à 122 keV en provenance de SN1987A enregistrée par OSSE (Kurfess et al. 1992).

La luminosité gamma est le produit de deux exponentielles, la première exprime le taux d'émission instantané ($No e^{-\lambda t}$, où λ est la constante radioactive, No le nombre de noyaux radioactifs synthétisés et t le temps compté à partir de l'explosion), la seconde (e^{-x}) exprime l'absorption des photons (x est la profondeur « optique » qui décroît au fil du temps). Le maximum d'émission gamma est atteint lorsque l'enveloppe cesse d'être opaque au rayonnement de 847 keV émanant de la désintégration du cobalt-56 en fer-56. Avant le maximum, le taux d'émission est fort mais les photons gamma sont absorbés, Après le maximum, l'émission décroît exponentiellement au rythme prescrit par la vie moyenne de l'isotope radioactif incriminé. Ce raisonnement simple a cependant dû être amendé pour tenir compte d'un brassage interne de matière, car l'émission gamma a été détectée six mois plus tôt que prévu. La largeur de la raie à 847 keV, mesurée par un détecteur au germanium (Tueller et al. 1991) a posé par ailleurs des problèmes d'interprétation délicats (Fryxel et al. 1991). Des modèles complexes ont été développés pour rendre compte des hétérogénéités internes.

Dans le cas de SN1987A, la mise en évidence de l'émission gamma, s'ajoutant à celle des neutrinos (Arnett et al. 1989, pour une revue) est venue confirmer que l'explosion des supernovae gravitationnelles était bien comprise, aux effets d'instabilité et de turbulence près.

Les astronomes gamma fondent de grands espoirs sur les supernovae thermonucléaires Höflich et al. (1998), Isern et al. (1999). Bien que moins fréquentes, ces objets produisent une quantité considérable de nickel-56. L'expérience *Comptel* a marginalement détecté SN1991T, une SNIa très particulière (Ruiz-Lapuente et al. 1993) située dans la galaxie NGC 4527 à une distance de 13-17 Mpc. Comme on peut le voir en Figure 4, la signification statistique de cette détection n'est pas élevée (Schoenfelder et al. 1996) et les flux gamma associés sont accompagnés d'importantes incertitudes. Il est difficile dans ces conditions de tirer des conclusions astrophysiques d'autant plus que la même expérience n'a donné qu'une limite supérieure pour la détection de SN1998BU, supernova de type Ia située à une distance de 8Mpc (Georgii et al. 2000).

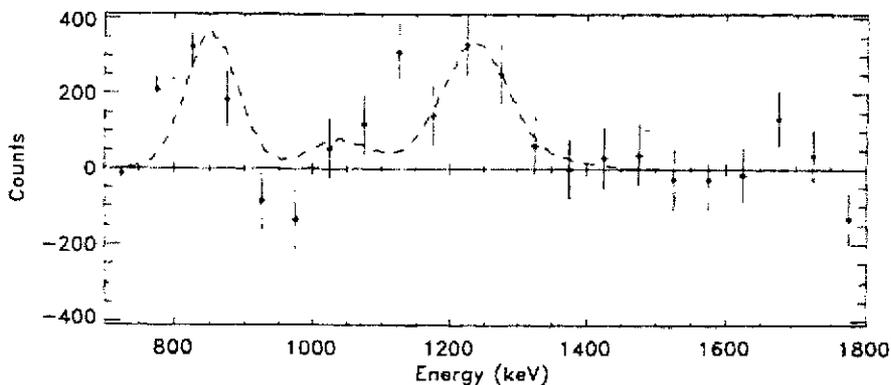


Fig. 4. Raies gamma de désintégration du ^{56}Co à 847 keV et 1238 keV en provenance de SN1991T enregistrées par le télescope *Comptel* (Schoenfelder et al. 1996).

III. 2 Titane-44

La raie gamma nucléaire caractéristique de la désintégration du scandium-44 (1157 keV), fils du titane-44, a été détectée dans la direction de Cassiopée A, le vestige de supernova le plus jeune de la Galaxie. L'intensité observée (Iyudin et al. 1994) implique que la masse de titane-44 synthétisée est de 2 ou de $5 \cdot 10^{-4} M_{\odot}$ selon la demie vie du titane-44 adoptée (96 ou 66 ans), ce qui est notoirement supérieur à la valeur calculée sur la base des modèles de nucléosynthèse explosive (Hashimoto et al. 1989), mais en bon accord avec l'estimation de la quantité de titane-44 nécessaire pour stabiliser la courbe de lumière de SN1987A au delà du mille cinq centième jour (Lehoucq et al. 1990).

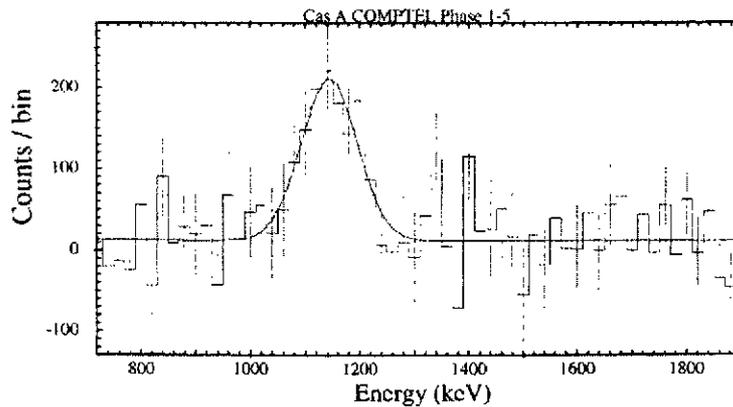


Fig. 5. Spectre du vestige de supernova Cassiopée A dans la région de la raie d'émission du ^{44}Ti à 1157 keV (Iyudin et al. 1994).

Cette détection a fourni la première estimation directe de la quantité de titane-44 produite lors de l'explosion d'une étoile. Connaissant la distance des objets émetteurs de raies gamma nucléaires (SN1987A, 50 kpc; Cas A, $2,8 \pm 0,2$ kpc), on a pu déduire de l'intensité des raies observées, les quantités de ^{56}Fe (^{56}Ni), ^{57}Fe (^{57}Ni) et ^{44}Ca (^{44}Ti) synthétisées dans l'explosion des supernovae de type II, soit 0,07 ; $2,7 \cdot 10^{-3}$ et $1,5\text{-}3 \cdot 10^{-4} M_{\odot}$ respectivement.

L'abondance de titane-44 et de nickel-56 en fonction de la masse sous jacente à l'intérieur d'une étoile de $25 M_{\odot}$ est montrée Figure 6 (Höffman et al. 1995). La coupure de masse est représentée par une ligne verticale. Toute matière comprise à l'intérieur de la coupure de masse est piégée dans l'étoile à neutrons, toute matière comprise à l'extérieur de la coupure de la coupure de masse devrait être éjectée, ceci dépendant bien sûr d'un mécanisme très compliqué qui par création d'une onde de choc à la surface de l'étoile à neutrons permet d'expulser les couches externes qui s'effondrent. Ce dernier mécanisme n'est pas encore bien compris notamment dans les étoiles très massives. Néanmoins si du titane-44 est éjecté, alors du cobalt-56 l'est aussi. Le noyau de ^{56}Co est synthétisé dans la même zone de masse que celui de ^{44}Ti mais d'une manière beaucoup plus abondante avec trois ordres de grandeur de différence. Une grande quantité de nickel-56 éjectée implique une supernova intense. Une éjection d'environ $10^{-4} M_{\odot}$ de titane-44 devrait s'accompagner de l'éjection de $0,05 M_{\odot}$ de nickel-56. Avec ou sans enveloppe d'hydrogène une telle supernova devrait avoir un pic de luminosité plus intense que les $10^{42} \text{erg.s}^{-1}$ observés pour SN1987A. Si aucune absorption ne vient atténuer cette courbe de lumière, la supernova de Cas A aurait dû atteindre la magnitude -4 . Or personne n'a mentionné cet événement dans une région du ciel toujours visible dans l'hémisphère nord. Pour rendre l'observation de titane-44 compatible avec la non détection de cette supernova, une extinction visuelle de magnitude 10 est nécessaire. Plusieurs hypothèses

ont été avancées pour expliquer cette extinction. La plus naturelle est de supposer la présence d'une coquille de poussière entourant la présupernova. Comme envisagé dans le scénario de SNIb, cette coquille est composée de matière emportée par un mécanisme de vent stellaire bien avant l'explosion. L'onde de choc de la supernova pourrait avoir détruit la plupart de la poussière en se propageant à travers la coquille. Ce scénario pourrait expliquer l'absence de détection dans le visible à l'époque présumée de l'explosion (1688).

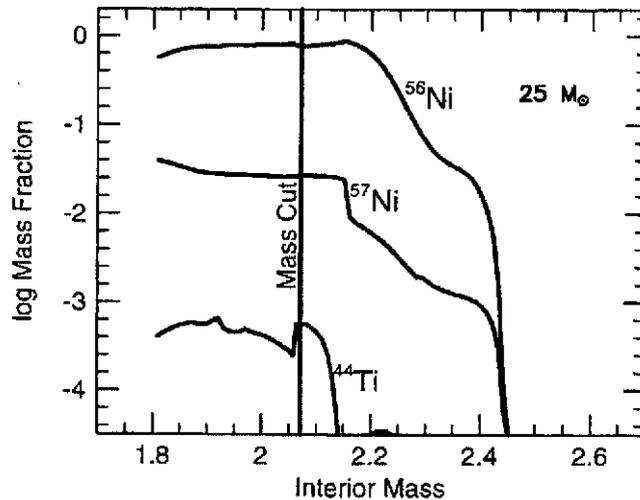


Fig. 6. Profile de masse de ^{44}Ti et ^{56}Ni pour une supernova gravitationnelle de $25 M_{\odot}$ (Hoffman et al. 1995).

Un autre excès à 1157 keV (GRO J0852-46) a été détecté par *Comptel* dans la région des Voiles. L'association de cette nouvelle source gamma avec une source X et une source radio étaye l'idée de la détection d'une jeune supernova (≈ 680 ans) proche (≈ 200 pc). Cet excès à la limite de sensibilité de *Comptel* demande à être confirmé. La mesure du profile de raie permettrait de lier les quantités d'aluminium-26 et de titane-44 synthétisées par cet objet. Il représente une pièce importante du puzzle que constitue la région des Voiles, région qui abrite plusieurs objets supposés être des sites de nucléosynthèse comme γ^2 Velorum, l'étoile Wolf-Rayet la plus proche.

Par analogie avec les galaxies extérieures de même type, on pense que les supernovae se succèdent dans la Voie Lactée au rythme de 2 à 4 par siècle. L'observation de la raie gamma résultant de la désintégration du titane-44 semble être la meilleure manière de repérer et de compter les supernovae récentes cachées dans ou par les nuages interstellaires. Si le titane-44 est une signature de toutes les supernovae gravitationnelles alors *Comptel* aurait dû détecter 3 à 4 sources, ce qui n'est pas le cas. Il est important de confirmer ce manque de détection car soit le taux d'explosion de supernova dans notre Galaxie est inférieure, soit l'éjection de titane-44 lors de l'explosion de supernova gravitationnelle est un phénomène plutôt atypique.

III. 3 Aluminium-26

L'aluminium-26 est un noyau instable d'un million d'années de vie moyenne dont l'importance pour l'astronomie gamma a été soulignée par Ramaty et Lingenfelter (1977) bien avant que l'on découvre dans le plan de la Galaxie l'indice clair de sa présence (Mahoney et al. 1984). En vérité, l'ère de l'aluminium avait été ouverte un an auparavant par la découverte d'une

concentration anormale de Magnésium-26, produit de décroissance de l'aluminium-26 dans les inclusions réfractaires de la météorite Allende (Lee et al. 1976). De nombreux travaux théoriques furent consacrés à la nucléosynthèse de l'aluminium-26 dès la fin des années 70. Sa formation s'avéra possible dans tous les sites astrophysiques envisagés (AGB, WR, novae et supernovae). Les mécanismes détaillés de production et destruction de ce nucléide ne peuvent être décrites ici. Sachez que sa synthèse se complique en raison de l'existence d'un état métastable de courte durée de vie (Ward et Fowler 1987). Il suffit de retenir, pour notre propos, que son mode principal de production est $^{25}\text{Mg} (p,\gamma) ^{26}\text{Al}$ et que cette réaction est susceptible de s'engager :

- i) lors de la fusion de l'hydrogène dans le cycle Na-Mg-Al (AGB, WR, novae).
- ii) lors de l'explosion des supernovae massives dans les couches d'hélium et de carbone.

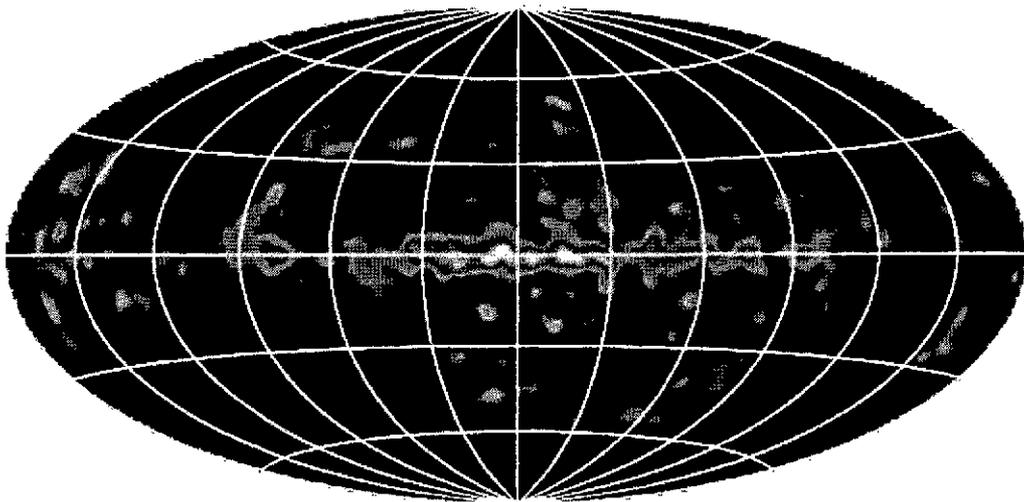


Fig. 7. Carte de la Galaxie dressée par *Comptel* dans la raie à 1809 keV de ^{26}Al (Diehl et al. 1995).

La nucléosynthèse de l'aluminium-26 dans les novae et supernovae est détaillée par Coc et al. (1995) et Timmes et al. (1996), respectivement. Sa formation dans les AGB est obscure, on peut trouver une description dans Mowlavi et Meynet (2000). Notez que l'aluminium-26 est l'un des seuls isotopes de la nature, avec le lithium-7, d'origine présumée plurielle. AGB, WR, novae, supernovae sont toutes des sources potentielles de cet isotope dont les mérites relatifs sont difficiles à établir sur la seule base de modèles théoriques. Aussi convient-il de se tourner vers la cartographie gamma afin d'identifier les sources d'aluminium radioactif et lever l'ambiguïté sur son origine. Le sujet ayant été abondamment discuté (Chen et al. 1996, Knödlseeder 1999), nous nous bornerons à quelques commentaires généraux. L'omniprésence d'aluminium-26 dans le milieu interstellaire a été mise en évidence par le satellite américain *HEAO-3* (Mahoney et al. 1984). Cette émission a par la suite été cartographiée par l'expérience *Comptel* (Oberlack et al., 1994, Diehl et al. 1995). On a pu en déduire, moyennant des hypothèses raisonnables sur la distribution des sources, le contenu total d'aluminium-26 de la Galaxie (1,7-3,0 M_{\odot}). L'émission est concentrée le long du plan de la galaxie (Figure 7), ce qui exclut une origine purement locale, mais elle est si lacunaire qu'il semble illusoire de vouloir se servir de celle-ci pour délimiter avec précision les bras

galactiques (Chen et al. 1996). Tout au plus peut-elle servir d'indice qualitatif de structure. On peut discerner des motifs structurés qu'il est tentant d'associer, pour certains à des bras spiraux vus en enfilade (Diehl et al. 1995, Prantzos et Diehl 1996). Les renforcements de brillance correspondent bien à des directions tangentes de bras galactiques, mais ils n'ont aucune contrepartie dans les régions de longitude positive. Le renforcement de la brillance dans la partie centrale de la Galaxie témoigne de la forte émissivité de l'anneau à 4 kpc, bien connu des radioastronomes. Les étoiles WR sont supposées y être plus nombreuses qu'ailleurs, et ceci pour deux raisons :

- i) parce que le taux de formation d'étoiles massives y est particulièrement élevé, comme le montrent les observations infrarouge.
- ii) parce que les vents stellaires y sont plus intenses qu'ailleurs en raison de la plus forte métallicité (Maeder 1992).

La proximité des régions d'émission, aussi bien que leur activité, semblent jouer un rôle déterminant dans l'apparition des sources de photons de 1809 keV. La source de la région des Voiles en est un vivant témoignage. Celle-ci, abritant à la fois l'étoile Wolf-Rayet la plus proche et un vestige célèbre de supernova, ne permet pas de trancher en faveur de l'une ou de l'autre.

IV. Le défi instrumental

Quelques données instrumentales ont permis de confirmer qualitativement la théorie de la nucléosynthèse stellaire. Cependant, comme nous venons de le voir, les observations souffrent terriblement de précision et de statistique. La qualité des données en astronomie gamma est liée à la difficulté de l'exercice. D'une part on s'intéresse à un domaine de longueur d'onde pour lequel on ne peut que marginalement focaliser les photons, d'autre part on doit s'affranchir de l'atmosphère terrestre et de ce fait satelliser les expériences. Cette dernière contrainte complique considérablement la réalisation des télescopes et oblige les expériences à évoluer dans des milieux très hostiles, notamment en présence du rayonnement cosmique. Ce rayonnement induit un bombardement permanent des détecteurs par des protons de haute énergie (≈ 1 GeV) qui ont pour effet de dégrader les détecteurs et d'activer tout le satellite. Dans le cas d'une expérience gamma, l'activation se traduit par une augmentation considérable du bruit de fond.

Ainsi, la conception et la réalisation d'une future mission d'astronomie gamma est un véritable défi instrumental. En effet, pour pouvoir progresser, c'est à dire localiser avec plus de précision et identifier les raies gamma avec plus de détails, il faut impérativement améliorer la résolution angulaire ainsi que la résolution en énergie. De plus, pour améliorer la sensibilité et donc pouvoir détecter des flux plus faibles, il faut impérativement maîtriser le bruit de fond. En astronomie gamma le rapport signal sur bruit est excessivement défavorable. La réduction du bruit de fond par des méthodes passives ou actives est la clef de la réussite d'une mission.

IV.1 La mission *INTEGRAL*

La mission *INTEGRAL* (*International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*) a été sélectionnée en juin 1993 par le Comité des Programmes Scientifiques de l'Agence Spatiale Européenne. Le lancement du satellite est prévu en avril de 2002. *INTEGRAL* a pour but principal l'exploration approfondie des sites célestes émissifs dans la bande spectrale de 15 keV à 10 MeV. La mission est basée sur la mise en œuvre simultanée du télescope IBIS (*Imager on Board the INTEGRAL Satellite*), apte à fournir des images à haute résolution angulaire et une information spectrale à moyenne résolution, et du spectromètre SPI (*Spectrometer for INTEGRAL*) chargé de la spectroscopie gamma à très haute résolution. La mission *INTEGRAL* inclut également les deux instruments complémentaires JEM-X (*Joint European Monitor*) et OMC (*Optical Monitor Camera*), opérant respectivement dans la bande des rayons X au-delà de 2-3 keV et dans le domaine visible, de 550 à 850 nm.

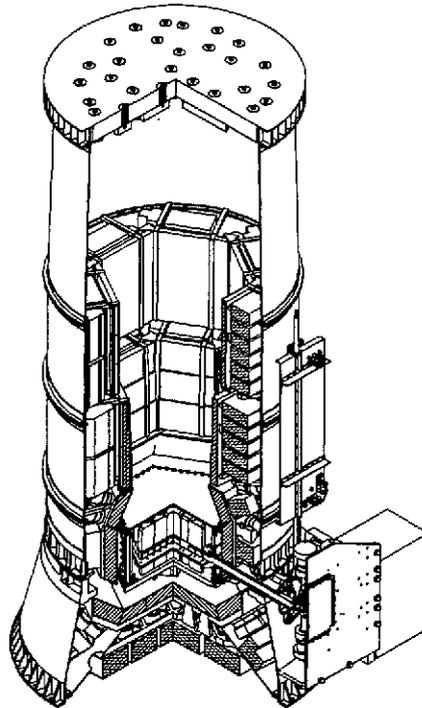


Fig. 8. Le spectromètre SPI de la mission *INTEGRAL*.

Le spectromètre SPI est l'instrument d'*INTEGRAL* dédié à l'astronomie gamma nucléaire. Motivés par les résultats de l'observatoire à rayons gamma *Compton* relatifs aux sources interstellaires de raies gamma, les laboratoires européens et américains impliqués dans la conception du spectromètre SPI ont adopté un champ de vue le plus vaste possible au détriment du pouvoir séparateur, l'effort portant avant tout sur la résolution en énergie dans la gamme 15 keV-10 MeV. Le plan détecteur de SPI est constitué d'un réseau hexagonal de 19 semi-conducteurs de germanium couvrant une surface utile de 500 cm². Les détecteurs germanium sont montés dans un cryostat qui les maintient à une température de 85 kelvins par une combinaison de dispositifs réfrigérants actifs et passifs. Ces détecteurs seront soumis

à un bombardement permanent de protons et de neutrons secondaires, qui vont induire au cours du temps une dégradation significative des performances. Pour pallier ce problème, il est prévu de recuire les détecteurs en vol. D'après les flux attendus on estime le nombre de recuit nécessaire à un par an. Les qualités de spectrométrie du germanium confèrent à SPI un pouvoir de résolution $E/\Delta E \approx 650$ à 1332 keV, quinze fois meilleur que celui du spectromètre OSSE à bord de l'observatoire à rayons gamma *Compton*.

Le spectromètre SPI comporte un masque codé à base d'éléments de tungstène monté à 1,7 m du plan de détection. Ce dispositif lui procure un pouvoir séparateur assez modeste (~ 2 degrés), bien meilleur toutefois que celui du spectromètre OSSE, ainsi qu'un champ de vue à mi-sensibilité de 490 degrés carrés. Un ensemble de scintillateurs BGO enveloppe presque complètement le dispositif de détection afin de réduire le bruit de fond de l'appareil. Un dispositif actif de reconnaissance de forme de l'impulsion en sortie des détecteurs devrait permettre de discriminer les photons gamma des désintégrations β résultant de l'activation des détecteurs Germanium. Ce dispositif devrait améliorer la sensibilité d'un facteur 2 dans la gamme 300 keV 2 MEV. On peut envisager ainsi une sensibilité de détection des raies gamma les plus fines accrue de plus d'un ordre de grandeur par rapport à celle du spectromètre OSSE.

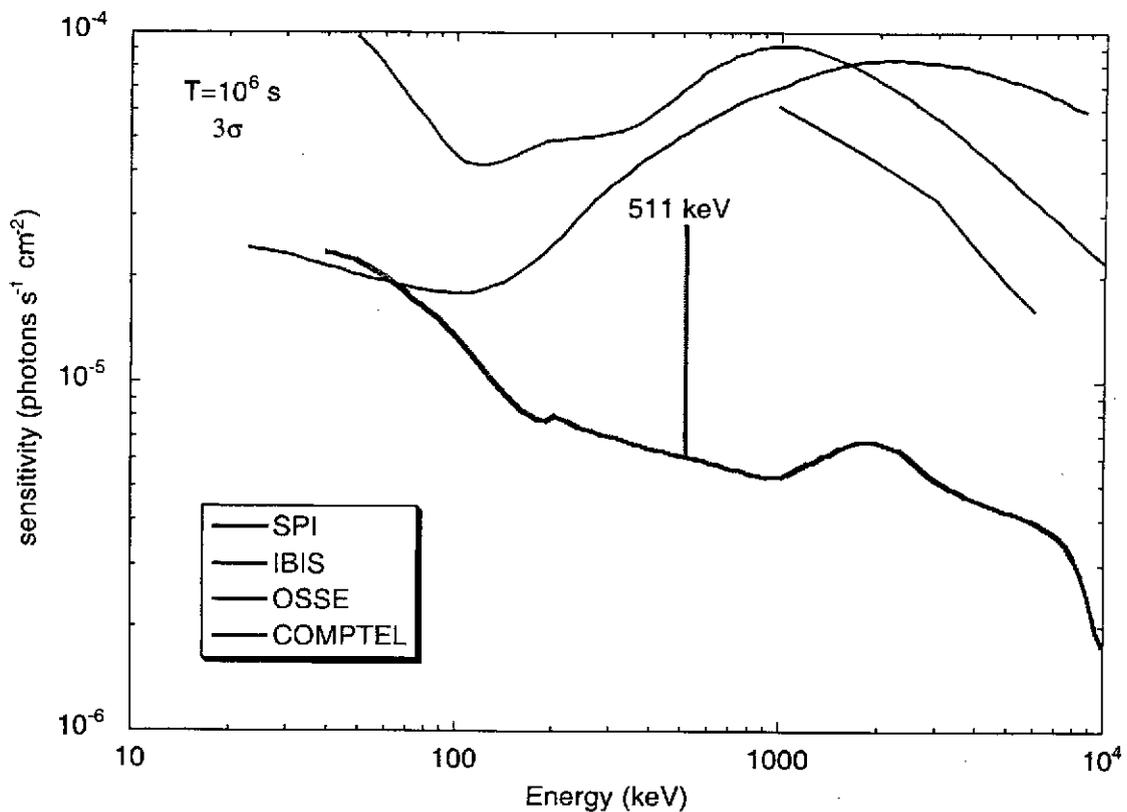


Fig. 9. Courbe de sensibilité aux raies fines du spectromètre SPI comparée à d'autres instruments (d'après Jean et al. 2000).

IV.2 Perspectives d'*INTEGRAL*

Malgré une sensibilité sans précédent dans la gamme d'énergie de la chaîne de décroissance du Ni-Co-Fe, *INTEGRAL* a une faible probabilité d'observer une supernova gravitationnelle. En effet par rapport au quantité de nickel éjectée, un tel objet ne pourra être détecté que si sa distance est inférieure à quelques Mpc. Par contre le spectromètre d'*INTEGRAL* a la sensibilité requise ($2-6 \cdot 10^{-6}$ photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) pour observer les supernovae thermonucléaires (type Ia) jusqu'à la distance de l'amas de la Vierge. Les différents scénarios aboutissant à l'explosion des SNIa se soldent par des signatures gamma distinctes (évolution temporelle, intensité et rapports de raies). De ce fait l'observation des raies gamma pourrait réduire et même lever l'ambiguïté sur les mécanismes à l'œuvre dans les SNIa. Les différences sont essentiellement dues à la masse de nickel-56 engendrée et à la distribution de vitesse. S'agissant des SNIa proches, la spectroscopie gamma offre la possibilité d'étudier les effets dus à la métallicité initiale de la naine blanche explosive, du mélange interne, et de la dissymétrie éventuelle de l'explosion.

Les raies gamma fournissent le moyen le plus sûr de calibrer les supernovae thermonucléaires, ce qui est d'un intérêt considérable, sachant le rôle qu'on leur fait jouer dans la cosmologie contemporaine (mesure du paramètre de Hubble et du paramètre de décélération). Plus spécifiquement, il est apparu au cours des dernières années que les SNIa ne constituent pas un groupe homogène. Afin d'en extraire les propriétés caractéristiques, il est nécessaire de constituer un échantillon statistique significatif.

Le spectromètre d'*INTEGRAL* a la sensibilité requise ($2-6 \cdot 10^{-6}$ photons $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$) pour observer les vestiges d'explosion vieux de 500 ans et moins, jusqu'à une distance de 10 kpc, et ainsi mesurer directement le taux réel d'explosions de supernovae dans la Voie Lactée, paramètre qui influe considérablement sur l'évolution chimique de la Galaxie. De telles observations seront par ailleurs utilisables pour contraindre les modèles détaillés d'explosion d'étoiles massives. Outre Cas A et la région des Voiles, les vestiges des supernovae historiques (Kepler, Tycho, le Crabe, SN1006) seront des cibles de choix pour *INTEGRAL*.

INTEGRAL aura la sensibilité requise pour dessiner les contours de l'émission de l'aluminium-26 avec des détails beaucoup plus fins. De surcroît, la mesure précise du décalage Doppler de la raie d'émission de l'aluminium-26 (1809 keV dans le laboratoire), pourrait fournir, pour la première fois, un critère de distance permettant d'établir la répartition en trois dimensions des zones d'émission. Par comparaison avec les distributions des éventuels progéniteurs dans les régions relativement proches (Wolf-Rayet, étoiles massives O et B, novae, supernovae, pulsars et géantes rouges de la branche asymptotique des géantes) des corrélations significatives pourront être établies. Ainsi espère-t-on identifier de manière statistique les sources de l'aluminium radioactif et parfaire notre connaissance des mécanismes de sa formation.

Les novae, et particulièrement celles qui sont riches en oxygène, néon et magnésium, produiraient des quantités significatives de néon-22 et d'aluminium-26 calculées par Politano et al. (1995) et Coc et al. (1995). Le spectromètre d'*INTEGRAL* a la capacité d'observer les raies gamma de désintégration du néon-22 jusqu'à une distance de 1 kpc. L'observation de novæ proches améliorerait substantiellement notre compréhension de ce type d'objets, ceci en donnant accès aux quantités d'isotopes produits et à la dynamique de leur enveloppe en expansion.

V. Conclusion

Après une phase à dominante américaine, l'astronomie gamma nucléaire devrait devenir l'apanage des européens. La pièce maîtresse de la stratégie européenne est le satellite *INTEGRAL*, développée sous l'égide de l'Agence Spatiale Européenne. Au sein de cette mission, l'instrument dédié à l'astrophysique nucléaire est le spectromètre SPI, développé sous la maîtrise d'œuvre du CNES en symbiose avec les laboratoires français, notamment le Service d'Astrophysique à Saclay et le CESR à Toulouse. Les observations spectroscopiques à haute résolution de cet instrument devraient éclairer quelques unes des questions les plus fondamentales touchant à la nucléosynthèse stellaire et interstellaire. Malgré de nombreux travaux, les observations disponibles sur les sources de rayons gamma sont loin d'avoir reçu une explication détaillée et quantitative. Il est indispensable que la future mission *INTEGRAL* puisse être soutenue et complétée par un effort théorique commensurable avec les moyens expérimentaux mis en œuvre.

Remerciement

Je remercie E. Vangioni-Flam, M. Cassé et J. Paul pour les conseils et l'aide qu'ils m'ont apportés pendant la préparation de ce cours

Références

- Arnett, W.D., 1996, "Supernovae and nucleosynthesis", Princeton University Press
 Arnett, W.D. et al., 1989, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 27, 629
 Cassé, M. & Prantzos, N. 1993, in "Origin and Evolution of the Elements", N. Prantzos, E. Vangioni-Flam, M. Cassé, Cambridge University Press, p. 349
 Cassé, M., Lehoucq R. & Vangioni-Flam, E. 1995, Nature, 373, 318
 Cassé, M., Vangioni-Flam, E. and J. Paul, 1999, Nucl. Phys., A654, 895
 Coc A., Mochkovitch R., Oberto Y., Thibaut J.P., Vangioni-Flam E., 1995, A&A, 299, 479
 Chen, W., Gehrels, N. & Diehl, R. 1996 ApJ. 440, L57
 Clayton, D.D. 1982, "Essays in Nuclear Astrophysics", Eds. C Barnes, D. Clayton & D. Schramm, Cambridge University Press, p. 401
 Clayton, D. D. et al., 1992, ApJ. 399, L 141
 Donati, T. et al., 1988, Nature, 330, 230
 Diehl, R. et al., 1995, A&A, 298, 445
 Diehl, R. et Timmes, F., 1998, Publication of the Astr. Soc. Pac., 110, 637
 Donati, T. et al., 1988, Nature, 330, 230
 Fryxel, B. et al. 1991, APJ. 367, 619
 Hashimoto, M., Nomoto, K and Shigeyama, T. 1989, A&A, 210, L5
 Isern J. et al., 1999, Astrophysical letters & communications, vol 38, Pat1, 411
 Gorgii et al., 2000, Proceeding of the fifth Compton symposium, AIP, vol. 510, 49
 Hernanz, M. et al., 1999, Astrophysical letters & communications, vol 38, Pat1, 407
 Höffmann et al., 1995, in the Gamma-ray Sky with Compton GRO and SIGMA, Dordrecht : Kluwer, 267
 Höflich, P. Wheeler, J.C. and Khokhlov, 1998, ApJ, 492, 228
 Iyudin A. et al. , 1994, A&A, 284, L1

- Jean et al., 2000, Proceeding of the fifth Compton symposium, AIP, vol. 510, 708
- Lee et al., 1976, Geophysical Research Letters, vol.3, p.41-44.
- Lehoucq, R., Cassé, M. & Cesarsky, C.C., 1990, A&A, 224, 147
- Knöddselder, J. et al., 2000, Proceeding of the fifth Compton symposium, AIP, vol. 510, 40
- Kurfess, J.D. et al., 1992, ApJ. Lett. 339, L137
- Leising, 1994, ApJS, 424, 200
- Maeder, A. 1992, A&A. 264, 105-120
- Mowlavi, N. et Meynet, G., 1999, « Astronomy with radioactivities », workshop proceedings, Ringberg castle, edited by R. Diehl and D. Hartmann, MPE report 274,105
- Oberlack, U. et al. 1994, ApJS. 92, 433
- Prantzos, N. & Diehl, R. 1996, Phys. Rep. 267, 1
- Politano, M. et al. 1995, ApJ. 448, 807
- Mahoney, W.A. et al. 1984, ApJ. 286, 578
- Prantzos, N. and Diehl R., 1996, Phys. Rep. 267,1
- Ramaty, R. & Lingenfelter, R.E. 1977, ApJ. 213, L5
- Ramaty, R. & Lingenfelter, R.E. 1995, " The analysis of emission lines", Eds. R. Williams and M. Livio, Cambridge University Press, p. 180
- Ruiz-Lapuente, P. et al., 1993, ApJ. 417, 547
- Schoenfelder, V. et al., 1996, Third Compton Symposium, A&A Suppl. Ser. 120, 13
- Sunyaev, R. et al., 1988, Nature 330, 227
- Teegarden, B. 1994, ApJS, 92, 263
- Timmes, F. et al. S.E. 1996, ApJ. 449, 204
- Tueller, J. et al., 1991, ApJ. 351, L41