

Les détectives de l'invisible

Pour en découvrir les mystères, les astronomes scrutent le ciel dans ses profondeurs de plus en plus lointaines, entre autres, à l'aide de télescopes. Malheureusement, l'air atmosphérique gêne l'observation. Ils embarquent donc leurs télescopes sur des satellites (Hubble etc.) mais la lumière est absorbée par les gaz et les poussières cosmiques et on ne voit plus rien au delà d'une certaine distance. Et puis certains objets ne rayonnent aucune lumière visible. En revanche, ils émettent d'autres rayonnements, dont des rayons X ou gamma, plus ou moins bloqués par l'atmosphère terrestre. On place donc les télescopes de l'invisible à bord d'engins spatiaux.

Les rayons gamma sont une « super-lumière » invisible, des millions de fois plus énergiques que les rayons lumineux de notre Soleil. On imagine alors l'énormité des phénomènes dont ils sont issus. Ces photons gamma sont les témoins des cataclysmes sidéraux et de leurs séquelles. Une supernova ne dure que le temps d'un éclair (mais quel éclair !). Heureusement, elle laisse une trace visible et certains noyaux atomiques qu'elle a engendrés lancent leurs rayons (en particulier gamma) longtemps dans l'Univers. L'astronome gamma (voir ScintillationS n° 41), c'est un détective de l'invisible.

Mais l'invisible n'est pas l'apanage d'objets disparus ou occultés. D'autres objets célestes sont invisibles car ils n'émettent rien. Aucun rayonnement. Et pourtant, ils sont bien présents. Ce sont les trous noirs. On ne les voit pas, mais on les débusque car, dans leurs environs immédiats, se produisent d'intenses phénomènes émettant des rayonnements divers, en particulier des rayons X (voir n° 36).

Pour « voir l'invisible », il faut des yeux adaptés aux rayonnements que l'on veut détecter. Ce numéro présente deux « yeux à rayons gamma » du satellite INTEGRAL. Il évoque en outre un œil à rayons X, du satellite Rossi X-Ray qui a découvert, il y a un an, un trou noir vagabond croisant actuellement à 6 000 années-lumière du Soleil, et dont des chercheurs viennent de reconstituer la trajectoire sur les dernières 200 millions d'années.

Ces détectives de l'invisible sont aussi des archéologues du cosmos...

Joël Martin (SPhN et ScintillationS)

INTEGRAL et l'astronomie gamma

INTEGRAL, acronyme anglais de « Laboratoire International pour l'Astronomie du Rayonnement Gamma », est un observatoire de nouvelle génération conçu pour détecter des photons d'énergie comprise entre 15 000 et 10 millions d'électron-volts (de 15 keV à 10 MeV) (voir ScintillationS n° 13 et 41). Absorbés par l'atmosphère, ces photons gamma ne sont observables que depuis l'espace. Choisi en 1993 par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), INTEGRAL sera lancé en octobre 2002. Le DAPNIA a fortement participé à la conception et la réalisation des deux « yeux » d'INTEGRAL : le spectromètre SPI et la caméra ISGRI du télescope IBIS (voir n° 45 et page 5 de ce numéro).



Figure 1 : Le modèle de vol d'INTEGRAL après livraison du Spectromètre chez Alenia en mai 2001. On reconnaît (ou non), en compagnie de gens du CNES, Bertrand Cordier, René Duc (SAP) et Stéphane Schanne (SEI)

Décoder le message des photons gamma

Pourquoi détecter des photons gamma et X cosmiques ? Pour mieux connaître leurs sources. Ces photons sont issus de phénomènes variés, allant de la radioactivité de noyaux atomiques nés des étoiles et de leurs explosions (*encadrés 1 et 2*), à l'« accréation » de matériaux autour d'un trou noir avant qu'ils n'y soient engloutis (*voir page 6 et 7*). Ces gammas et ces X nous renseignent sur ces phénomènes. Plus nos détecteurs seront sensibles et précis, mieux nous connaîtrons ces sources, mieux nous pourrions les situer et savoir quels phénomènes s'y déroulent. INTEGRAL perpétue ainsi la lignée de satellites d'astronomie gamma à participation CEA comme SIGMA/GRANAT (1989-1997), dont le DAPNIA a fourni la caméra gamma, sans oublier COS-B (1975-1982), dont le Service d'Électronique Physique (SEP) réalisa l'un des détecteurs avec le concours du STIPE¹.

Prenons l'exemple d'un noyau d'alumi-

nium-26, dont la durée de vie est d'un million d'années. Cela lui laisse le temps de s'échapper de l'étoile qui l'a engendré et d'atteindre le milieu interstellaire. En émettant un positon, il s'y transforme en magnésium-26 « excité », lequel atteint son état fondamental en seulement 0,5 picoseconde (un demi millionième de millionième de seconde), en émettant un photon gamma de 1,809 MeV que nous pouvons capter. En détectant de tels photons, on peut déterminer d'où ils viennent, et en quelle quantité. On pense actuellement que de l'aluminium-26 est produit par des étoiles massives que l'on sait être abondantes dans le centre de notre Voie lactée. Ainsi, la cartographie des sites émetteurs de photons de 1,809 MeV, un des objectifs majeurs d'INTEGRAL, permettra, grâce à sa sensibilité sans précédent, de vérifier cette hypothèse, et donc d'acquérir une meilleure connaissance des régions centrales de notre galaxie.

Par un balayage régulier du plan de la galaxie, INTEGRAL va établir d'autres cartes, comme celle des sites galactiques d'annihilation entre électrons et positons (créant des photons de 0,5 MeV). Également au menu, l'identification de sources compactes de haute énergie, l'étude des processus d'accélération de particules, l'observation des sursauts gamma et l'astronomie gamma extragalactique. Enfin, si une supernova survient lors de la mission, tous les efforts se concentreront sur elle. INTEGRAL est capable de détecter une supernova de type Ia (*encadré 2*) à plus de 50 millions d'années-lumière. De plus, en traquant systématiquement les gammas de désintégration du titane-44, caractéristiques de telles explosions, INTEGRAL espère repérer les restes d'une éventuelle supernova galactique jusqu'à 30 000 années-lumière et ainsi mesurer le rythme d'apparition des supernovae dans la Voie lactée³.

Encadré 1 : La nucléosynthèse stellaire : comment les étoiles fabriquent des noyaux

Dans les profondeurs du cosmos, des nuages de matière se condensent sous l'action de leur propre poids. Au cours de cet « effondrement gravitationnel », leur température croît jusqu'à ce que se déclenchent des réactions de fusion thermonucléaires (*ScintillationS* n° 45 et « Comment ça ne marche pas », page 6). Une partie de l'énergie libérée par ces réactions contrebalance l'effondrement gravitationnel. Un système stable se forme. Une étoile est née. Le surplus

d'énergie est libéré sous forme de rayonnement. La lumière émise par une étoile n'est qu'une pâle lueur des processus qui ont lieu en son sein. Les photons « visibles » émis par l'étoile ne proviennent pas directement du chaudron nucléaire central². Au cœur de l'étoile, un noyau nouvellement produit y reste piégé. S'il est radioactif, des photons gamma de haute énergie sont produits dans sa cascade de transmutations. Dans leur fuite hors du cœur,

ces photons sont absorbés par la matière des zones périphériques de l'étoile, qu'ils chauffent jusqu'à incandescence. L'étoile brille, tout en cachant aux observateurs le processus de désintégration du noyau initial.

Ce n'est qu'après transport hors de l'étoile et dissémination du noyau dans le milieu interstellaire, suffisamment dilué pour être transparent au rayonnement, que ces photons gamma de déséxcitation peuvent atteindre nos télescopes.

L'observatoire INTEGRAL

Pour remplir ses missions, INTEGRAL a été doté de moyens sans précédent :

- son imageur IBIS muni de sa caméra ISGRI (*voir page 5*) lui confère une sensibilité jamais atteinte (dix fois meilleure que celle de SIGMA).

- son spectromètre SPI lui procure une excellente précision relative de 2 millièmes sur la mesure de l'énergie des photons grâce à ses détecteurs au germanium, et d'une sensibilité dix fois meilleure que celle de ses prédécesseurs.

Le lancement d'INTEGRAL est prévu pour octobre 2002 à partir du Cosmo-

drome de Baïkonour, au Kazakhstan, à l'aide du lanceur Proton de l'Agence Spatiale Russe. Ce point de départ permet de placer le satellite sur une orbite très excentrique, avec un apogée de 153 000 km et une période orbitale de 72 h (trois jours terrestres). Cette orbite permet d'envoyer le satellite bien au dessus des ceintures de Van Allen, (altitude : 40 000 km) pendant 90% du temps. Les instruments échappent ainsi aux particules chargées piégées dans ces ceintures, donc au bruit de fond interdisant toute mesure. Pendant les 10% où ces particules les arrosent, les détecteurs

restent en veille. Fournissant un lanceur performant qui fait gagner un temps d'observation précieux, les Russes ont droit au tiers du temps d'observation. Chacun y trouve son compte...

Pendant les 2 à 5 ans que durera sa mission, le satellite sera utilisé par des équipes du monde entier, avec 30% du temps réservé à celles qui ont réalisé les instruments. Le reste du temps est distribué à une très large communauté de scientifiques à l'issue d'un appel d'offre annuel de l'ESA.

(1) SEP et STIPE : deux services d'instrumentation des ancêtres du DAPNIA.

(2) Contrairement aux neutrinos qui traversent la matière stellaire pratiquement sans interaction et sont détectables par des expériences de type Gallex (*voir ScintillationS* n° 5, 19 et 22), auxquelles le DAPNIA participe également.

(3) Ce programme scientifique peut être complété en lisant l'article de Michel Cassé et Jacques Paul dans *ScintillationS* n° 41.

Encadré 2 : Les supernovae, creusets explosifs de noyaux lourds

Les étoiles massives ont une structure en pelure d'oignon, avec de l'hydrogène dans la couche externe et, en allant vers le cœur, des noyaux de plus en plus lourds que synthétise la fusion nucléaire. Cette synthèse s'arrête à l'isotope 56 du fer, noyau trop stable pour fusionner et qui s'accumule au centre de l'étoile (voir « Comment ça ne marche pas », page 6). Lorsqu'une certaine masse de fer s'est formée, le combustible nucléaire – non renouvelé – n'est plus assez abondant et la chaudière stellaire s'éteint. Livré à sa seule gravité, le cœur s'effondre sur lui-même. En une fraction de seconde, la température devient tellement énorme que les noyaux de fer s'éparpillent en nucléons. La pression devient si intense que les électrons sont piégés à l'intérieur des protons qui se transforment en neutrons en émettant une gigantesque bouffée de neutrinos⁴. Une étoile à neutrons est née. Lorsque le cœur entier atteint la densité de la matière nucléaire, l'effondrement est stoppé net. L'objet parvenu à son maximum de

compression se détend brutalement en répandant une formidable onde de choc à laquelle les neutrinos impriment une impulsion supplémentaire. Cette onde disperse les couches périphériques encore en effondrement et, avec le concours des neutrinos, y allume des réactions nucléaires d'un nouveau type. Des éléments plus lourds que le fer sont forgés, puis éparpillés à des distances interstellaires.

Les débris de l'étoile, dont des isotopes radioactifs émetteurs de gammas, sont portés à haute température. Il s'ensuit une gigantesque émission lumineuse, la lumière d'un milliard de soleils, faisant croire à l'apparition d'une nouvelle (nova, en latin) étoile très brillante. Il vient de se produire une supernova, dite de type II. Quelques mois plus tard, le cadavre stellaire, dilué par l'expansion, devient transparent aux rayons gamma que nous pourrions détecter et ses noyaux radioactifs projetés à des vitesses inimaginables ensemencent d'autres nuages, pépinières d'étoiles. Notre système solaire, notre environnement et

nous-mêmes, sommes faits de poussières de générations d'étoiles disparues. Nous sommes issus de chants du cygne cosmiques. Ou, plus prosaïquement, de déchets nucléaires...

Un autre type de supernova, dit Ia, s'opère dans un système à deux étoiles comportant une naine blanche qui phagocyte les couches externes de son compagnon. Lors de sa chute, la matière capturée s'échauffe, se comprime et, dans des conditions particulières, peut déclencher une explosion thermonucléaire de toute la naine blanche. Ce processus synthétise près d'une masse solaire de l'élément nickel-56, qui se transmute en cobalt-56 accompagné d'une formidable luminosité dans le spectre visible, puis en fer-56 avec émission de gammas qu'INTEGRAL pourra détecter. La fréquence de ces supernovae est d'environ une par siècle et par galaxie. Pendant la durée de la mission il est possible qu'on en détecte, et ce, jusque dans l'amas de galaxies de la constellation de la Vierge, situé à 50 millions d'années lumière.

SPI, le Spectromètre Pour INTEGRAL

Fruit d'une collaboration internationale où le Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements (CESR, unité mixte CNRS-Université Paul Sabatier), l'Institut Max Planck pour la Physique Extraterrestre de Garching (MPE, Allemagne), et le DAPNIA jouent les rôles principaux, le spectromètre SPI est réalisé sous la maîtrise d'œuvre du Centre National d'Etudes Spatiales (CNES)

Les détecteurs de SPI

SPI mesure 238 cm de hauteur et a une masse de 1300 kg. Le plan de détection est composé d'un réseau hexagonal de 19 détecteurs semi-conducteurs au germanium d'une surface utile de 500 cm², monté dans un cryostat au béryllium et maintenu à la température de 85 K grâce à un système de réfrigération actif et passif. Pour rendre possible la production d'images, un masque codé (voir n° 41) à base d'éléments hexagonaux en tungstène, de même surface que les détecteurs, est monté à 171 cm du plan de détection. L'image projetée de ce masque sur le plan de détection permet de reconstruire une image du ciel avec un pouvoir séparateur de 2 degrés entre deux sources voisines. Pour obtenir un rejet efficace du « bruit de fond » dû au bombardement permanent

par les rayons cosmiques, un bouclier, appelé « blindage actif », enveloppant toute la caméra a été réalisé à l'aide d'une structure de 91 blocs de scintillateurs en BGO (germanate de bismuth), lus par des photomultiplicateurs, et d'un scintillateur en plastique placé sous le masque. Ce blindage définit également de manière précise l'ouverture de 16° du « champ de vision complètement codé » de l'instrument.

Un photon gamma frappant un détecteur au germanium y libère des électrons. Un champ électrique au sein du cristal les pousse à dériver vers l'anode centrale. Cela engendre un signal électrique caractéristique de l'énergie du photon incident, qu'une électronique adaptée traduit en valeur numérique. En parallèle ce signal est analysé par une électronique de discrimination des formes d'impulsions, PSD (Pulse Shape Discriminator), qui trie les événements en vue de réduire le « bruit de fond » : lorsque l'énergie du photon incident dépasse 300 keV, elle distingue les événements qui produisent au moins deux électrons de ceux à un seul électron



Figure 2 : Vue éclatée de SPI

provenant principalement de phénomènes parasites comme la désintégration d'un noyau au sein d'un détecteur.

L'électronique numérique frontale DFEE (Digital Front End Electronics), réalisée par une équipe d'une quinzaine de personnes du DAPNIA, ainsi vouées au tri, construit en ligne les événements et les classe en catégories (un seul détecteur touché, ou plusieurs détecteurs touchés en même temps ou événement avec information PSD), mesure l'instant d'arrivée de chacun au 100 millionième de seconde près, rejette l'événement s'il s'accom-

(4) C'est le processus inverse de la radioactivité β^- lors de laquelle un neutron se transforme en proton en émettant un électron et un antineutrino. C'est en captant des antineutrinos d'un réacteur nucléaire où pullulent les neutrons, qu'en 1953, les Américains Cowan et Reines ont prouvé l'existence du neutrino, plus exactement, de son antiparticule (voir *Scintillation* n° 26).

pagne d'un signal provenant du blindage actif, et transfère les événements acceptés à l'ordinateur de bord qui les transmet au sol. Enfin, la DFEE compte les événements, calcule le temps pendant lequel l'instrument est inopérant, pour pouvoir en déduire le nombre des photons réellement captés.

Tests et étalonnage du modèle de vol

Le modèle de vol de SPI a été testé au CNES à Toulouse entre septembre 2000 et mars 2001. Les tests des performances scientifiques, définis par le Groupe de Test et d'Opérations (SPITOG), que dirige l'équipe SPI du DAPNIA, ont montré que l'instrument satisfaisait au « cahier des charges ». En utilisant différentes sources radioactives, le réglage temporel précis (à 50 milliardièmes de seconde près) des 19 canaux de détection, par rapport aux signaux de la PSD et du blindage actif, a été réalisé avec succès grâce à nos tests « maison » pendant lesquels l'instrument a fonctionné en ambiance spatiale reconstituée au CNES. Le modèle de vol a ensuite été étalonné en avril 2001 dans un centre de la Direction des Applications Militaires du CEA, à Bruyères-le-Châtel (voir « Une supernova à Bruyères-le-Châtel », page 5).

Livraison du modèle de vol

Après cette campagne, SPI a été livré à l'ESA, transporté en mai 2001 chez Alenia à Turin, et monté à bord du satellite INTEGRAL. Une phase d'étalonnage couplé de SPI et d'IBIS, pour laquelle le DAPNIA fournit un générateur X et les sources gamma, est prévue à l'ESA à Noordwijk (Pays-Bas) début 2002, avant le lancement. Pendant les deux premiers mois suivant le lancement, notre équipe participera activement à la phase d'étalonnage en vol de SPI, puis à la phase d'observations scientifiques.

L'ASIC numérique

Le cœur de la DFEE de SPI, est constitué par un circuit intégré ASIC (Application Specific Integration Circuit), conçu au SEI et fabriqué par TEMIC/Atmel à Nantes dans une technologie choisie pour sa tenue aux rayonnements cosmiques. Ce circuit permet de loger 200 000 « cellules logiques » sur un centimètre carré (figure 3). Il comporte 256 connecteurs, est alimenté par une tension de 5 volts et sa fréquence de fonctionnement est de 20 mégahertz. Une seule puce ASIC fait le travail d'une dizaine de cartes électroniques de l'ancienne génération !

Les premiers circuits nous ont été livrés début août 1999 (figure 4) et les modèles

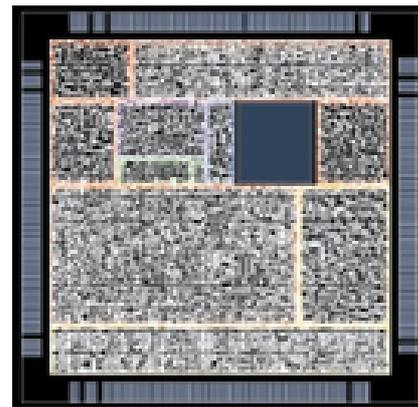


Figure 3 : Les 200 000 cellules de l'ASIC numérique tiennent sur 1 centimètre carré.

de vol en octobre 1999, après avoir passé les tests requis par l'ESA chez le fabricant. Le modèle de vol de la DFEE a été livré au CNES en avril 2000, après une campagne de test en vibration et en ambiance spatiale.

Validation de la DFEE

Dès leur arrivée, les premiers ASIC ont été testés à l'aide d'un système conçu dans ce but. Un générateur de stimuli d'entrée à la DFEE, capables de simuler toutes les impulsions et anomalies que produiront effectivement les détecteurs au cours de la mission a été réalisé par le SIG (voir n° 41), et les signaux issus de la DFEE ont été enregistrés à l'aide d'un système développé au SEI. Avant de lancer la fabrication, nous avons mené des simulations qui nous ont donné pleinement confiance dans le bon fonctionnement des ASIC et notre modèle de circuit réel, programmable dans l'environnement de test que nous avons développé, nous a permis de corriger des imperfections du système entier. Ce modèle a également servi, dans le cadre du modèle d'ingénierie de SPI au CNES à Toulouse, à mettre au point les procédures de test employées pour valider le modèle de vol de SPI. Les résultats ont été si concluants qu'aucune correction ni deuxième fabrication n'ont été nécessaires.

Capable de traiter des signaux produits par d'excellents ersatz de photons cosmiques comme si c'était des vrais, INTEGRAL semble fin prêt pour détecter les gammas galactiques.

*Stéphane Schanne,
pour l'équipe SPI du DAPNIA.*

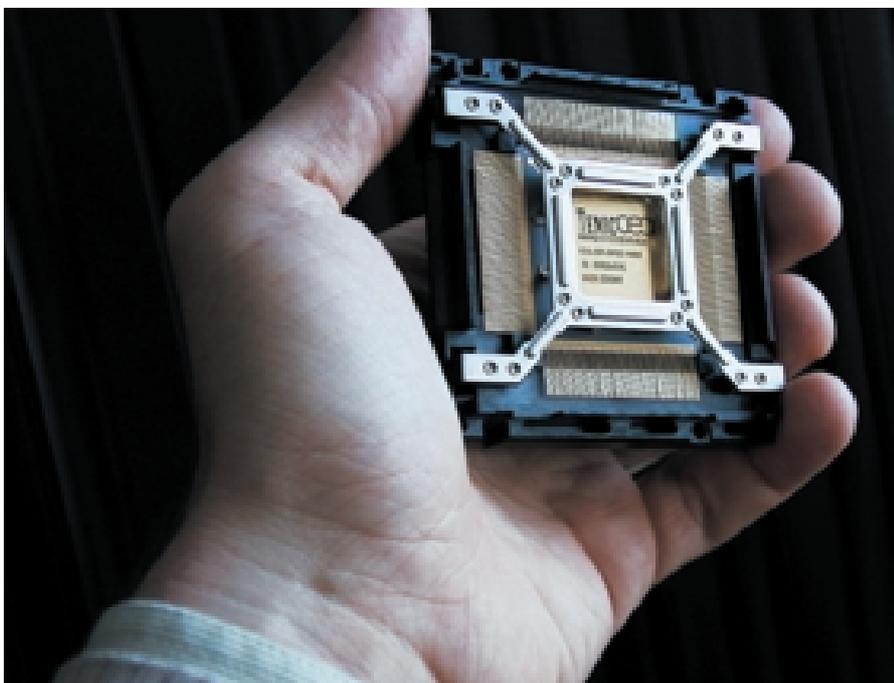


Figure 4 : L'ASIC numérique est livrée sur un support qui permet de l'enclencher dans l'environnement de test, avant de plier ses pattes. Cette puce propose de superbes pattes..

Sites pour faire des balades :

<http://astro.estec.esa.nl/Integral>, site INTEGRAL de l'ESA,

<http://isdc.unige.ch>, centre de traitement des données d'INTEGRAL à Genève

http://www-dapnia.cea.fr/Phys/Sei/externe/realisations/astrophysique/dfec_www/dfec.html, site du SEI sur l'électronique numérique de SPI,

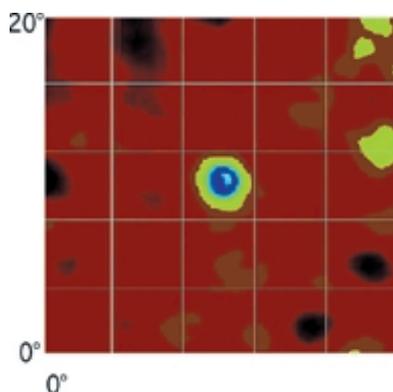
Une supernova à Bruyères-le-Châtel !

L'étalonnage de SPI, le spectromètre d'INTEGRAL

Une étoile géante qui explose, des noyaux de cobalt, un centre de la DAM.. S'agit-il de l'expérimentation top-secrète d'un rayon de la mort ? SPI est-il le nom de code d'un eSPION ? James Bond peut rester chez lui. La Direction des Applications Militaires du CEA n'a fait qu'aimablement prêter son site de

Avant d'envoyer leurs « yeux » perfectionnés dans l'espace, les astrophysiciens doivent, comme on vient de le voir, vérifier qu'ils fonctionnent comme attendu.

SPI s'est ainsi retrouvé, en avril 2001, dans un local de la DAM à Bruyères-le-Châtel, réaménagé pour l'occasion. Le grand parc qui entoure ce local a permis



La première image reconstruite de " l'étoile gamma artificielle " au ^{24}Na Précision angulaire: 2°. La source était à 125 mètres de SPI

d'installer à 125 mètres de SPI (quasiment l'infini vu les caractéristiques du détecteur) un lourd « château » de plomb où l'on place des sources radioactives. Ces sources sont des échantillons de noyaux radioactifs émettant des gammas, comme le cobalt-60 ou le sodium-24. On dispose ainsi d'ersatz de supernova (heureusement miniaturisées) car, contenant des noyaux semblables à ceux que produisent les explosions stellaires, ces sources émettent des photons gamma semblables à ceux que rencontrera SPI.

Autre avantage, la DAM dispose d'un accélérateur de protons Van de Graaf grâce auquel on peut produire des photons dans une gamme d'énergie correspondant à la plage haute de détection de SPI. Pour être précis, les sources permettent d'étalonner de 50 keV à 2,7 MeV, et le Van de Graaf fournit des photons jusqu'à 8 MeV, complétant ainsi la gamme d'énergie que peut détecter SPI.



Long de 2,38 m et pesant 1300 kg, le spectromètre SPI est monté sur son dispositif d'étalonnage installé à Bruyères-le-Châtel.

Les essais ont été couronnés de succès et lors d'un déjeuner (fort bon) de presse (*ScintillationS* était là !) le 26 avril 2001, de superbes images de « la première étoile gamma de SPI » ont été dévoilées à nos yeux éblouis.

Comme on dit à la DAM : « *SPI est bon pour le service !* »

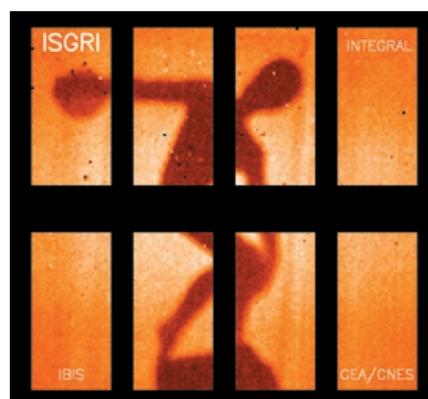
Sources (non radioactives) :
Michel Cassé, Bertrand Cordier,
Jacques Paul (SAP)
et Stéphane Schanne (SEI)

Livraison du modèle de vol de la caméra ISGRI

Le 6 juillet 2001 a eu lieu la « revue de livraison » du modèle de vol de la caméra gamma ISGRI. Cette caméra équipera le télescope IBIS d'INTEGRAL. Haute sensibilité, finesse des images et performances spectroscopiques font d'ISGRI un élément clef du programme d'INTEGRAL. Couvrant plus de 2600 cm², elle est la première caméra gamma au monde utilisant des détecteurs semiconducteurs non-refroidis. Les plus de 16 000 détecteurs indépendants en tellurure de cadmium (CdTe) de cet instrument exceptionnel, réalisé par le CEA avec le soutien du CNES, bénéficient des derniers développements de la cristalllogénèse et de la microélectronique. ISGRI a été livrée le 12 juillet à Milan pour y être montée dans IBIS.

Pour la revue de livraison, les huit modules constituant le plan détecteur de la caméra avaient été montés sur une plate-forme de test avec de larges espaces entre eux pour en faciliter le montage. Lors de l'assemblage final sur le télescope IBIS, les modules seront montés

à côté de telle sorte que les zones mortes seront dix fois moins étendues. La caméra s'est révélée en parfait état de marche, témoin cette superbe image d'une copie du discobole, Cette statuette en bronze avait été placée entre ISGRI et une source radioactive de cobalt-57 produisant des photons gamma de 122 keV. Les photons peinent à traverser le bronze, très absorbant à cette énergie, et l'ombre de la statuette se projette en ombre chinoise sur le plan des modules ISGRI. Notons que le disque, plus mince, absorbe moins les photons que le bras, plus épais, de l'athlète. La source est placée à 60 cm au dessus du centre de la caméra, et l'on observe que l'éclairement (proportionnel au nombre de photons reçus par unité de surface) décroît sensiblement du centre aux bords, plus éloignés de la source. Les points noirs dans l'image correspondent aux pixels défaillants (détecteurs bruyants). Leur faible nombre, une centaine, soit moins de 0,6%, justifie la confiance en ce type de détecteurs et illustre la



qualité de la fabrication : la spécification était d'avoir moins de 5% de détecteurs bruyants.

L'astronome parfois se fait poète : ce discobole, symbole de l'intense effort précédant le lancement, baigne dans la lumière annonciatrice d'une aube nouvelle pour l'astronomie gamma.

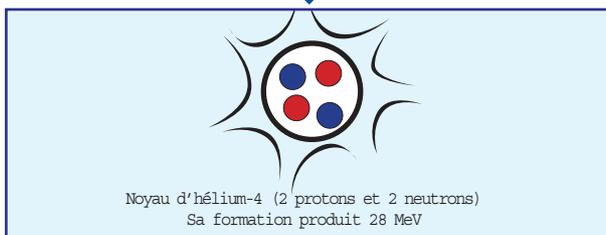
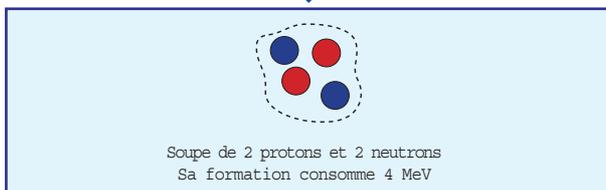
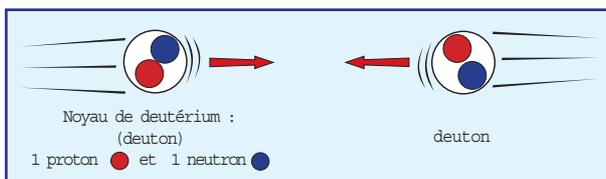
François Lebrun (SAP)

Comment ça (ne) marche (pas) ...

Pourquoi les étoiles ne forgent-elles pas de noyaux plus gros que le fer-56 ?

Une étoile fonctionne à l'énergie nucléaire. Lorsque le nuage d'où naîtra l'étoile se contracte sur lui-même sous l'effet de son propre poids, ses constituants, essentiellement des noyaux d'hydrogène, se rapprochent. Le tout s'échauffe comme l'air d'une pompe à vélo quand on appuie sur son piston. Plus ce gaz est dense, plus les noyaux sont voisins et plus il est chaud, plus les noyaux vont vite¹, au point d'arriver à vaincre leur répulsion électrique mutuelle (ils portent tous des charges positives). Ils peuvent alors se télescoper et se fondre en un seul noyau. Dans une étoile, ces premières fusions impliquent des noyaux « légers ». Elles produisent de l'énergie et la chaudière stellaire s'amorce. Les noyaux produits fusionnent à leur tour en noyaux de plus en plus gros et ainsi de suite.

Cette suite a une fin : un des noyaux forgés, le fer-56 (56 nucléons : 26 protons et 30 neutrons), est im-
propre à cette combustion



La fusion de 2 deutrons en hélium-4 produit 24 MeV

Lors de leur fusion, les deux noyaux perdent leur individualité et se désagrègent en une sorte de soupe de nucléons (protons et neutrons). Les deux soupes se mélangent intimement et un nouveau noyau se forme, fait de l'ensemble des nucléons apportés. Par exemple, lorsque deux deutons (noyaux de deutérium, hydrogène lourd) se rencontrent, chacun apporte le proton et le neutron dont il est fait. Ces deux protons et ces deux neutrons se soudent en un noyau d'hélium-4. Et cette soudure fournit de l'énergie ! Bizarre, mais compréhensible : vaincre la cohésion du noyau en séparant ses nucléons demande de l'énergie mais quand le noyau se reconstitue, il « rend » la même énergie. Or l'hélium-4 est beaucoup plus solide que le deutérium : il rend plus d'énergie en s'agréant : un peu plus de 28 MeV, que les deux deutons, plus fragiles, n'en ont puisé en se désagréant : environ 2 MeV chacun. Bilan : l'étoile possède toujours le même nombre de protons et de neutrons et elle a gagné 24 MeV (28 moins 2 fois 2). Le tout produit par un phénomène qui n'a mis en jeu qu'une masse d'environ $7 \cdot 10^{-24}$ grammes, soit *presque 600 milliards de joules par gramme de matière* !²

D'une façon générale, la fusion produit de l'énergie lorsque les noyaux initiaux sont plus fragiles que le noyau final. Dans le cas contraire, elle en consomme. Or, de tous les noyaux produits en abondance dans les étoiles, le fer-56 est le plus solide (*stable*, disent les physiciens). Comme l'étoile ne gagnerait plus d'énergie en fusionnant ce noyau avec un autre, elle n'en forge pas de plus lourd et le fer-56 s'y accumule.

Mais si l'astre meurt par supernova, le milieu devient si riche en neutrons (*encadré 2, page 3*) que les noyaux présents en capturent à foison. Certains neutrons capturés deviennent protons. Ainsi se forgent des noyaux de plus en plus lourds, jusqu'à l'uranium.

Joël Martin (SPhN et ScintillationS)

Un trou noir vagabond a « frôlé » le soleil

Dans un article paru le 13 septembre dans *Nature*, des chercheurs, dont Félix Mirabel et Irapuan Rodriguès, du SAp, annoncent qu'ils ont reconstitué la trajectoire d'un trou noir très ancien qui est passé à quelques 6000 années-lumière de notre système solaire et qui dévore lentement son étoile compagnon³.

Sept fois plus massif que le soleil, cet objet, appelé XTE J1118+480, a été identifié en mars 2000 grâce au satellite Rossi X-Ray Timing Explorer. On a pu depuis, à l'aide de télescopes optiques ou radiométriques, mesurer sa vitesse, très grande, voisine de 145 km/s par rapport au Soleil. Des calculs

tenant compte de la distribution de matière dans et autour de la Galaxie ont permis de reconstituer sa trajectoire, en remontant quelque 200 millions d'années en arrière. Le point remarquable est que cette trajectoire n'est pas confinée dans le plan de la galaxie (*Fig. 1*), mais parcourt son halo, comme le font

(1) La température d'un gaz est la manifestation « macroscopique » de la vitesse moyenne de ses constituants. Une température plus élevée signale une plus grande vitesse d'agitation. La température du cœur d'une étoile dépasse la dizaine de millions de degrés. L'énergie cinétique des noyaux dépasse alors l'énergie de leur répulsion électrique.

(2) C'est comme dans une chaudière ordinaire : un atome de carbone fusionne avec deux atomes d'oxygène pour donner du CO₂ et de la chaleur. L'analogie s'arrête là : un gramme de charbon produit dans les 2 500 joules.

(3) Rassurez-vous, bonnes gens, le frôlement est relatif : ces 6000 années-lumière sont à comparer au rayon de notre système solaire : environ 40 heures-lumière.

par exemple les amas globulaires groupant des myriades d'étoiles très anciennes. Ce trou noir serait le résidu d'une étoile très massive apparue en même temps que notre galaxie, il y a environ sept milliards d'années.

C'est la première fois que la trajectoire d'un trou noir est ainsi reconstituée. Le fait qu'en prime ce trou noir soit aussi ancien que la Voie lactée donne l'espoir de mieux comprendre la formation de notre galaxie et des objets très compacts qu'elle contient, trous noirs et étoiles à neutrons.

Sources : Félix Mirabel (Sap)
et le communiqué de presse
d'Etienne Klein (DSM/DIR)

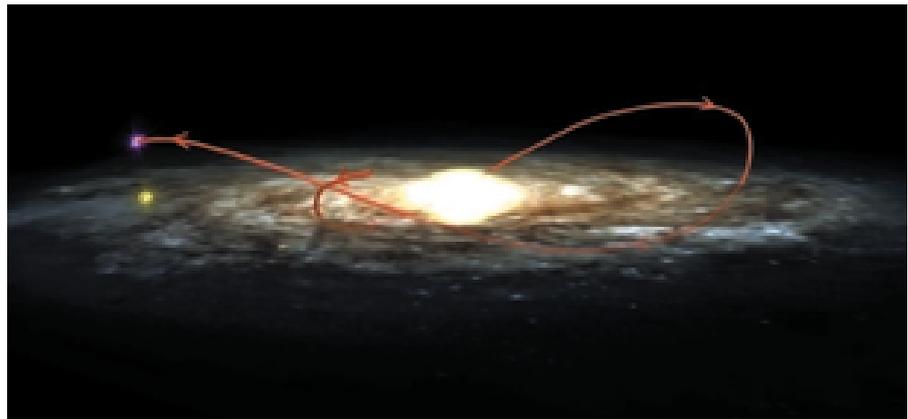


Fig. 1 : Enroulée autour de notre galaxie, la trajectoire (en rouge) du trou noir (le point mauve). Le point jaune est notre Soleil. On peut voir s'animer cette superbe image sur le site <http://www.iafe.uba.ar/astrofísica/mirabel.html>

Les trous noirs sont des corps célestes si denses que l'énorme gravité qu'ils induisent attire et capture définitivement tout objet qui s'en approche de trop près (voir ScintillationS n° 36 et 50). Même la lumière ne peut s'en échapper, car la vitesse nécessaire pour vaincre leur attraction serait supérieure à 300 000 km/s, impossibilité physique. Voilà pourquoi ces astres sont invisibles. Mais leur voisinage est très reconnaissable car, avant de plonger dans ces gouffres sidéraux, les objets sont démesurément accélérés et comprimés dans une spirale infernale. Ils subissent alors un tel échauffement que, tels de « super charbons ardents », ils émettent cette « super lumière » que sont les rayons X. Ce phénomène est particulièrement visible lorsque le trou noir est voisin d'une étoile compagnon qu'il dévore morceau par morceau. Ce sont ces lambeaux d'étoile qui jettent leurs derniers feux avant de s'engloutir dans les entrailles de l'ogre cosmique.

Le DAPNIA communique

Début 2001, Joël Feltesse propose à Jean-Luc Sida (SPhN) de prendre la relève d'Yves Sacquin qui souhaite consacrer plus de temps à la physique. ScintillationS s'est entretenu avec le nouvel animateur de la commu-

ScintillationS – Jean-Luc Sida, comment avez-vous réagi à cette proposition ?



Jean-Luc Sida – Je me suis demandé ce qu'on pouvait encore améliorer : ScintillationS est une réussite¹, des gens du DAPNIA sont sollicités par les médias, les

journaux du CEA et parfois la grande presse font état de nos recherches. Pour le savoir, j'ai rencontré les chefs de service, le CU du DAPNIA, le comité éditorial de ScintillationS et discuté avec des collègues d'un peu tous les services.

Sc. – Qu'ont donné ces discussions ?

J.-L. S. – J'ai mieux cerné mon rôle. Plus que « responsable » de la communication du DAPNIA (elle se fait très bien sans structure ni supervision à l'échelon du département) je me sens animateur d'« aides à la communication ».

Sc. – Lesquelles ?

J.-L. S. – Une équipe s'est constituée. Joël Martin peut aider à peaufiner² les textes destinées au grand public, à des journalistes. Une équipe, autour de Thierry Pussieux, rénove le WEB du DAPNIA. Elle peut vous aider dans la création de vos propres pages.

Yves Sacquin continuera à nous faire bénéficier de ses liens avec les journalistes et nous guider dans nos relations avec l'extérieur du CEA. Christine Marteau et Jean-Gabriel Noze, infographistes, et l'équipe photo-vidéo de Jean-Jacques Bigot peuvent prêter leurs talents à vos posters, retouches photos, logos. Un représentant de chaque service vient compléter cette équipe.

Sc. – Vos perspectives ?

J.-L. S. – Pallier certaines lacunes : peu de contacts avec la hiérarchie du DAPNIA, pas de séminaires pour tous, liens relâchés avec les autres départements, pas d'activités hors travail, disparition des Journées du DAPNIA, etc ; A l'extérieur, inquiétante diminution des étudiants dans les disciplines scientifiques. Les propositions de chacun ont abouti à un programme d'action.

Suspense insoutenable : ce programme sera dévoilé dans notre prochain numéro.

L'équipe Communication du DAPNIA

Vulgarisation de documents écrits	Joël Martin	73 88
Réalisation de pages WEB	Thierry Pussieux	33 68
Communication extérieure au CEA	Yves Sacquin	60 81
Communication intérieure au CEA	Jean-Luc Sida	24 80/30 00
Documentation DAPNIA	Angèle Séné	30 01

(1) Quel excellent lecteur ! (Note du Chef de la Publicité) – Nous préférons ne pas fâcher le lecteur (NDLR).

(2) C'est notre joie, peaufiner ! (NDLR)

Dernière minute

Un « copier-coller » a privé la liste des membres de notre département, figurant dans la nouvelle plaquette, des noms des 19 derniers, par ordre alphabétique.

C'est encore la faute à l'ordinateur ! Nos puces sont imprévisibles...

Par le canal contrit de ScintillationS, nous présentons nos vives excuses à Michel WALLET, Christian WALTER, Gongli WANG, Christian WANNEPAIN, Michel WINKLER, Wojciech WLAZLO, Isabelle YAO, Christophe YÈCHE, Dominique YVON, Henri ZACCONE, Gérard ZAFFANELLA, Hamid ZAGHIA, André ZAKARIAN, Anne ZEITOUN, Laurence ZEITOUN, Marco ZITO, Éric ZONCA, Janos ZSEMBERY et Armand ZYLBERSTEJN et leur confirmons la bonne nouvelle : ils font toujours ou ont fait partie du DAPNIA.

Un grand physicien des particules



Paul Falk-Vairant 1921-2001

Paul Falk-Vairant est un nom peu connu au DAPNIA. Mais pour les physiciens des particules, c'est un artisan majeur du rayonnement du CERN qui s'est éteint le 9 mars 2001.

Né en 1921, il entre en 1947 à l'Institut du radium de Paris pour y faire sa thèse. Puis il passe par le CNRS, le CEA et l'Université de Paris jusqu'en 1973. Il y sera l'un des pionniers de la physique au PS, le premier synchrotron à protons de 28 GeV du CERN. Il préside le groupe de travail sur la physique au futur SPS (Super Proton Synchrotron) de 400 GeV. Directeur de la recherche au CERN jusqu'en 1978, il contribue au développement d'une source d'antiprotons menant à des expériences de collisions matière-antimatière qui vaudront le Prix Nobel à Carlo Rubbia et de Simon Van der Meer. De 1981 à 1987, Paul Falk-Vairant est directeur scientifique adjoint de l'IN2P3 (Institut national de physique nucléaire et de physique des particules). Il en pilotera la participation au LEP.

Paul Falk-Vairant était un grand bonhomme.

Pan ! Sur le becquerel !

Le « *Comment ça marche* » du numéro 51 (encadré page 6) donne une fausse vitesse de la soucoupe volante de Xugloub relativement à Claudie qui voit l'horloge de son collègue tourner deux fois moins vite que la sienne. En effet, dans ce cas ($\gamma = 2$), la vitesse en question est égale à $(\sqrt{3}/2)$ fois la vitesse de la lumière, c'est à dire 1,732/2 fois 300 000 km/s. Le porte-parole de service s'est cru capable calculer ça de tête alors qu'il avait besoin de vacances. Résultat : il a attribué la valeur 0,816 à la moitié de 1,732, alors que c'est 0,866. Hou ! Xugloub ne fait pas du 248 800, mais du 259 800 km/s.

Le coupable devra réviser sa table de division par 2. Patron, un autre demi!!

Plume du dapnia

James Rich (SPP) vient de publier chez Springer Verlag : *Fundamentals of Cosmology*

Fruit de nombreuses années de cours donnés en DEA et à l'Ecole Polytechnique, co-éditeur, cet excellent traité agrémenté de nombreux exercices est destiné aux étudiants et physiciens désireux de comprendre, à travers les bases de la cosmologie et de la relativité générale, les plus récents résultats théoriques et observationnels. A découvrir ! Cet aimable Rich mérite un bon coup de main.

Yves Sacquin (SPP)

Va-et-vient

Juin 2001 – Côté départs, deux mutations : Jean De Kat (SEI) part au CESTA et François Meigner (SAP), à BIII ; et une retraite : Gilbert Grasso (SEI). Ramène-nous de belles photos, Gilbert ! Côté arrivées, cinq mutations : Marie-Cécile Aubert (RSN/SAGD vers SDA), Jean-Marc Baze (SEMT vers SGPI), Eric Berthoumieux (LPS vers SPhN, un retour au bercail), Nathalie Le Dévedec (DCS/FAR vers SEI) et Alain Le Saux (DPI/STL vers SDA). Nos meilleurs souhaits aux partants et aux arrivant(e)s

Juillet 2001 – Cinq départs, en cette trêve estivale (3 retraites et 2 départs négociés) : Monique Beaubeau (SEI), Josiane Deniau (SED), Françoise Haroutel (SDA), Jean Derégel (STCM) et Alain Poupel (STCM). Ces cinq départs sont tempérés par une mutation interne avec passage en Annexe 1 : Denis Bouziat (du SIG vers le STCM), et quatre autres passages en annexe 1 : Michel Arnaud (STCM), Stéphan Aune (SED), Christian Brouzeng (SDA) et Gérard Congretel (SEA). Meilleurs vœux ou bravo, selon le cas.

Août 2001 – L'été se poursuit avec quatre départs en retraite : Pierre Clay (STCM), Guy Leblanc (SDA), Louis Gosset (SGPI), Jean-Pierre Rodriguez (SEA), et la mutation interne de Nathalie Colombel, du SGPI au SAP. Bonne continuation à toute et à tous !

CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Joël FELTESSE

COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole), Claire ANTOINE, Joël BELTRAMELLI, François BUGEON, Rémi CHIPAUX, Philippe CONVERT, Françoise GOUGNAUD, Christian GOUFFES, Christophe MAYRI, Xavier-François NAVICK, Yves SACQUIN, Jean-Luc SIDA, Angèle SÉNÉ, Didier VILANOVA

MAQUETTE : Christine MARTEAU

MISE EN PAGE : GRAPHOTEC

CONTACT : Joël MARTIN Tél. 01 69 08 73 88 – Fax : 01 69 08 75 84 – E.mail : jmartin@dapnia.cea.fr

<http://www-dapnia.cea.fr/Scintillations/>

Dépôt légal octobre 2001