



Petit déjeuner de presse
12 juin 2003

« Dernières nouvelles du Cosmos »





Dernières nouvelles du cosmos vues du Service d'Astrophysique (Sap) du CEA

Aujourd'hui, l'astrophysique et la cosmologie vivent une phase passionnante de leur histoire, très riche en découvertes. Avancées technologiques, progrès dans le traitement du signal, utilisation de calculateurs superpuissants,...concourent à un foisonnement de résultats dans tous les domaines qui convergent vers une meilleure compréhension de l'Univers et des phénomènes qui s'y déroulent.

Qu'est ce que l'astrophysique ?

L'astrophysique consiste à comprendre les astres à partir des lois de la physique. Mais l'astrophysique permet aussi de faire progresser la physique à partir d'une meilleure compréhension des astres.

La compréhension de l'Univers avec la physique

La compréhension de l'Univers passe par l'étude aussi bien des **objets individuels** qui le composent à une échelle locale que par celle de **ses structures à grande échelle**, avec trois axes majeurs de recherches :

- **L'étude de la formation et de l'évolution des étoiles et des planètes.** Un intérêt particulier est porté au Soleil, astre « modèle » le plus proche.
- **L'étude de la fin de vie de ces astres et des phénomènes cosmiques violents de haute énergie qui en résultent** (voir plus loin : l'étude des sursauts gamma, ou à la recherche de la première étoile).
- L'étude, à une plus grande échelle, **de la cosmologie et de la formation des grandes structures de l'Univers** : formation et évolution des galaxies, des amas de galaxies et donc structuration de l'Univers (voir plus loin : Simulations numériques en cosmologie).

La physique à partir de l'Univers.

L'Univers constitue un laboratoire des conditions extrêmes (les plus grandes distances, les plus grandes durées, les plus forts champs de gravité à proximité des trous noirs, les plus grandes densités aussi bien que les plus faibles, les plus forts champs magnétiques, les particules les plus énergétiques...), qui permet de tester les limites de la physique actuelle et de trouver, le cas échéant, les indications qu'une nouvelle physique est nécessaire (on peut se demander par exemple de quoi est faite l'« énergie noire » qui semble responsable de l'accélération de l'expansion de l'Univers).

L'exploration de l'Univers lointain

L'astrophysique a tout d'abord surtout consisté à observer l'Univers proche en l'explorant successivement dans différentes longueurs d'onde, au fur et à mesure que les développements technologiques le permettaient. Cela revenait à collecter les différentes pièces du « puzzle Univers proche ».

Aujourd'hui, l'astrophysique se tourne de plus en plus vers l'Univers lointain. En effet, les instruments deviennent de plus en plus performants et permettent de détecter des signaux plus faibles, de voir plus loin dans l'espace et donc plus tôt dans l'histoire de l'Univers. De plus, l'utilisation coordonnée d'instruments complémentaires permet aujourd'hui de mieux connaître les objets en les observant en plusieurs longueurs d'ondes. La puissance croissante des calculateurs rend aussi désormais possible la simulation des phénomènes complexes mis en jeu.

Le foisonnement de résultats fait qu'il y a aujourd'hui suffisamment de « pièces du puzzle Univers », pour passer à l'étape suivante qui consiste à :

- « assembler les pièces pour reconstituer le puzzle »,
- pointer les pièces manquantes et indiquer où aller les chercher.

Toutefois, on ne connaît pas le nombre total de pièces du puzzle et lorsqu'on découvre une nouvelle pièce, elle indique souvent qu'il en manque d'autres et parfois qu'il est nécessaire d'introduire de nouveaux concepts.

Ainsi, différents grands domaines de l'astrophysique sont en train de se rejoindre et l'ensemble des résultats (étude des petits objets ou des grandes structures, nouvelles données physiques...) est en train de converger vers une compréhension d'ensemble de l'Univers : comprendre de quoi il est formé, sa structure et l'évolution de cette structure au cours du temps.

Le Service d'astrophysique du CEA, un acteur majeur des recherches en astrophysique

Le CEA, à travers son **Service d'astrophysique (SAP)**¹, est l'un des acteurs français majeurs dans la quête de la compréhension de l'Univers. **L'atout majeur du SAP réside dans la pluridisciplinarité du CEA qui lui permet de collaborer avec d'autres laboratoires (par exemple le LETI (Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information) à Grenoble pour les développements technologiques) ou d'avoir accès aux gros calculateurs du CEA.**

Historiquement, le SAP a été l'un des tous premiers laboratoires français à se lancer dans le spatial. En partenariat avec le CNES, il a participé à presque **toutes les missions d'Astronomie de l'ESA (Agence spatiale européenne), dans un contexte de collaborations internationales.** Cinq missions, auxquelles le SAP a contribué, sont actuellement en cours : la mission INTEGRAL d'observations du rayonnement gamma (lancée en 2002), la mission XMM/Newton d'observations du rayonnement X (lancée en 1999), la mission CASSINI d'observation de Saturne et de ses anneaux (lancée en 1997 et qui arrivera autour de Saturne en 2004), la mission SOHO d'observation du soleil (lancée en 1995), la mission Ulysse d'observation du rayonnement cosmique (lancée en 1990) ; la prochaine mission sera la mission

¹ Département d'astrophysique, de physique des particules, de physique nucléaire et d'instrumentation associée (DAPNIA) de la DSM (Direction des Sciences de la Matière)

HERSCHEL d'observations du rayonnement sub-millimétrique (lancement prévu en 2007). Le SAp, en partenariat avec les autres services techniques du CEA, développe aussi des instruments pour les grands télescopes au sol, comme l'instrument MEGACAM (la plus grande caméra au monde d'observation de la lumière visible) qui vient d'être mis en service au Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT), ou l'instrument VISIR (dédié aux observations du rayonnement infrarouge) qui sera livré à l'ESO (European South Observatory) fin 2003 pour équiper l'un des 4 grands télescopes que l'Europe a construit sur le site du Paranal au Chili.

Le SAp a participé à la **conception**, au **financement** et à la **fabrication** de tous ces instruments, qui visent des performances ambitieuses et poussent ainsi les développements technologiques. Le SAp est aussi un utilisateur de ces instruments (et d'autres) et les observations conduites profitent à ses recherches en astrophysique, qui se font la plupart du temps en collaboration étroite avec d'autres laboratoires français et étrangers.

Le SAp est un service de 150 personnes travaillant pour moitié dans l'instrumentation et pour moitié dans l'observation et l'interprétation des résultats. Plus d'une centaine de publications paraissent chaque année dont 2 à 3 dans les prestigieuses revues Nature et Science.

Des résultats récents pour illustrer la nouvelle révolution de l'astrophysique

Comment les simulations numériques permettent, en complément d'observations, de comprendre la structuration de l'Univers à partir de ses fluctuations initiales ?

A partir des conditions initiales de l'Univers juste après le Big-Bang (remesurées avec précision en février 2003 par le satellite américain WMAP) et des lois de la physique (hydrodynamique et gravité), les astrophysiciens du SAp ont simulé sur des super-ordinateurs l'évolution de notre Univers, de son origine sous la forme d'un gaz chaud homogène jusqu'à sa structure actuelle.

Comment une approche multi instrumentale ouvre de nouvelles perspectives dans l'étude de la première génération d'étoiles de l'univers.

Une approche multi instrumentale, utilisant en particulier les satellites XMM/Newton et INTEGRAL, et menée en temps réel ouvre de nouvelles perspectives dans l'étude des sursauts gamma, ces phénomènes fugitifs de haute énergie qui se produisent à la fin de la vie des étoiles, et donc de la première génération d'étoiles, dont ils sont la trace actuelle.

Ces deux derniers exemples sont développés dans les deux fiches suivantes.

L'étude des sursauts gamma ou à la recherche de la première étoile

Qu'est ce qu'un sursaut gamma ?

Les sursauts gamma cosmiques ont été découverts à la fin des années 60 par des satellites américains qui cherchaient à détecter l'explosion de bombes thermonucléaires sur terre. Rapidement, ces satellites ont détecté des **sources intenses de rayons gamma situées au delà du système solaire : des « bouffées » de rayons gamma, d'énergie allant de quelques keV² à plusieurs dizaines de GeV¹, qui durent de quelques fractions de seconde à plusieurs minutes**. Les mesures attestent que les sursauts gamma se produisent à des distances cosmologiques (de plusieurs milliards d'années lumière)³. La quantité d'énergie rayonnée par les sursauts est donc considérable, de l'ordre d'une masse solaire convertie en énergie, ce qui en fait les **événements explosifs les plus énergétiques de l'Univers**.

Comment naissent les sursauts gamma ?

Le modèle le plus couramment admis explique l'existence de ces sursauts d'énergie intense comme la conséquence de la mort d'une étoile massive. L'effondrement du cœur d'une étoile massive aboutit à la formation d'un trou noir qui provoque une éjection de matière propulsée à des vitesses très proches de celle de la lumière [voir photo]. Dans ce scénario, les sursauts gamma sont le résultat de chocs induits au sein de l'éjection (on parle d'émission prompte) et/ou sont le résultat de la rencontre (du « frottement ») de cette matière éjectée avec le milieu interstellaire alentour (on parle d'émission rémanente).

Vue d'artiste d'un sursaut gamma selon le modèle le plus couramment admis qui met en jeu l'effondrement d'un cœur d'étoile massive aboutissant à la formation d'un trou noir ceinturé d'un tore de débris, suivie d'une éjection de matière propulsée à des vitesses très proches de celle de la lumière.



² L'électron-Volt est une unité d'énergie (elle représente l'énergie acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel de 1 Volt). 1 keV = 1 000 eV et 1 MeV = 1 000 000 eV.

³ Le spectre d'émission des galaxies est d'autant plus décalé vers le rouge que celles-ci sont éloignées. Ce décalage est le résultat de l'effet Doppler. En mesurant ce décalage, il est possible d'estimer la distance de ces galaxies.

Pourquoi étudier les sursauts gamma ?

Les sursauts gamma sont liés aux phases finales de l'évolution des étoiles massives. Les spécimens les plus distants témoignent sans doute de la mort de la première génération d'étoiles **de l'Univers, une population mythique qui a toujours hanté les astronomes en quête de nos lointaines origines : les premières étoiles de l'Univers ne furent pas seulement les premières sources de lumière et de chaleur après le Big Bang, mais c'est aussi en leur sein que se formèrent les premiers éléments autres que l'hydrogène et l'hélium, autrement dit, les « métaux » (pour parler comme les astronomes).**

Seuls les sursauts gamma, témoignages de l'agonie des premières étoiles, peuvent permettre d'en savoir plus sur cette population de première génération. En effet, les simulations les plus récentes montrent que le processus de formation d'étoile à partir d'un nuage de gaz primordial, donc dépourvu de « métaux », favorise les spécimens de grande masse, cent fois celle du Soleil, dont la durée de vie est extrêmement courte, quelques millions d'années. Aucune chance que certaines d'entre elles aient subsisté jusqu'à aujourd'hui. Les étoiles les plus primitives connues sont au mieux des individus de deuxième génération.

INTEGRAL et le CEA traquent les sursauts gamma

Une nouvelle ère dans l'étude des sursauts gamma, les événements les plus violents de l'univers, a débuté cette année avec la mise en service du satellite INTEGRAL (*International Gamma-Ray Astrophysics Laboratory* ou Laboratoire International pour l'Astrophysique des Rayons Gamma), mission astronomique de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) dévolue à l'exploration détaillée des sites célestes émettant des rayons gamma.

Les télescopes gamma montés à bord du satellite INTEGRAL (voir photo) présentent en effet trois caractéristiques essentielles pour approfondir l'étude des sursauts gamma :

- **Un grand champ de vue** (un soixantième de toute la voûte céleste) pour accroître la probabilité d'observer un sursaut gamma, sachant que ces événements, extrêmement fugitifs (90% des sursauts gamma ont des durées inférieures à 100 s), surviennent d'une manière totalement imprévisible en n'importe quel point du ciel ;
- **Une très grande sensibilité de détection**, quinze fois meilleure que celle des détecteurs de sursauts gamma embarqués à bord du satellite américain CGRO (*Compton Gamma-Ray Observatory*, Observatoire à Rayons Gamma Compton), afin de découvrir les spécimens les plus distants ;
- Une aptitude à mesurer la position du sursaut sur la voûte céleste **avec une précision inférieure à quelques minutes d'angle.**



Vue d'artiste du satellite INTEGRAL en orbite avec ses panneaux solaires déployés. Les deux grands instruments gamma, à la réalisation desquels le CEA a contribué, sont le télescope IBIS, la grande structure parallélépipédique avec sa face avant couverte d'une protection thermique dorée, et le spectromètre SPI, la structure cylindrique elle aussi enveloppé d'une protection thermique dorée.

Une chasse en temps réel

Le satellite INTEGRAL est capable de mesurer la position du sursaut gamma détecté et de transmettre en temps réel les données à la communauté scientifique. Les autres instruments d'observation astronomique, alors alertés, peuvent se braquer sur le sursaut détecté et multiplier les observations dans différentes longueurs d'onde (visible, infrarouge, rayons X, ondes radio,...). C'est la condition indispensable pour assurer le meilleur retour scientifique de l'observation d'un sursaut gamma (estimation de la distance, étude de la galaxie hôte, étude des milieux interstellaires qui se trouvent entre le sursaut et l'observateur, etc.).

Les télescopes gamma montés à bord du satellite, ont démontré qu'ils étaient bien les instruments propres à donner un nouvel élan aux études des sursauts gamma : ils détectent en effet les sursauts au rythme d'environ un par mois et en fournissent la position en temps quasi réel.

Quand les satellites INTEGRAL (rayons gamma) et XMM-Newton (rayons X) s'associent dans la traque aux sursauts gamma

La transmission en temps réel de la position des sursauts gamma détectés par INTEGRAL permet l'usage coordonné des grands instruments d'observation dont un premier exemple (l'utilisation couplée des deux grands observatoires européens INTEGRAL (rayons gamma) et XMM-Newton (rayons X)) laisse entrevoir le formidable champ d'investigation à la portée des astrophysiciens du CEA, fortement impliqués dans la mise au point de ces deux instruments. L'utilisation coordonnée de ces deux instruments vient de permettre la découverte d'un des sursauts gamma les plus distants (et donc issu d'une étoile des plus jeunes) jamais détecté.

INTEGRAL

La nébuleuse du Crabe, résidu filandreux de l'explosion d'une étoile, est la seule source cosmique de rayons gamma tout à la fois très brillante, d'une dimension angulaire réduite, et d'un éclat des plus stables ; c'est l'étalon idéal auquel tout télescope gamma doit se mesurer. Le 27 février 2003 s'achève une série d'observations de la nébuleuse du Crabe menée précisément dans le but d'étalonner les télescopes gamma du satellite INTEGRAL. C'est justement ce même jour, à 8h 42m TU (Temps Universel), **que le télescope IBIS du satellite INTEGRAL détecte l'apparition d'un sursaut gamma** [voir photo].

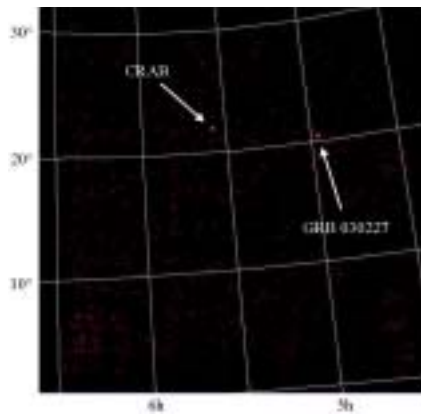


Image du champ de GRB 030227 enregistrée par la caméra gamma de nouvelle génération ISGRI du télescope IBIS à bord du satellite INTEGRAL dans la bande spectrale de 15 keV à 40 keV

XMM-Newton

La communauté scientifique internationale est rapidement avertie de la découverte par INTEGRAL d'un nouveau sursaut gamma, dénommé GRB 030227, et de la mesure de sa position. Le centre des opérations scientifiques du satellite XMM-Newton envisage alors de pointer ce grand télescope à rayons X de l'ESA (Agence Spatiale Européenne) en direction de GRB 030227.

Moins de huit heures après l'apparition de GRB 030227, le satellite XMM-Newton entame l'observation du champ du sursaut gamma [voir photo] : **une source brillante se manifeste bien dans la zone du ciel signalée par INTEGRAL. Son éclat décroît régulièrement tout au long de l'observation XMM-Newton : cette source est donc sans doute associée à l'émission rémanente de GRB 030227.**



Vue d'artiste du satellite XMM-Newton en orbite avec, au premier plan, les trois gros télescopes à incidence rasante qui concentrent le rayonnement X vers le module de détection situé à l'opposé et où se trouve la caméra EPIC à laquelle le CEA a contribué

Télescopes terrestres des Canaries et de Hawaï

La position beaucoup plus précise du sursaut gamma, déduite de l'image XMM-Newton, ouvre alors la possibilité de traquer l'émission rémanente de GRB 030227 dans la bande visible avec les plus gros télescopes de la planète. Douze heures après l'apparition du sursaut gamma, un modeste télescope (deux mètres cinquante de diamètre) de l'observatoire des Canaries détecte le premier une éventuelle émission rémanente dans le visible. Neuf heures plus tard, le télescope géant Keck II (dix mètres de diamètre) de l'observatoire d'Hawaï détecte à son tour l'émission repérée par le télescope des Canaries ; elle s'avère déjà 10 fois plus faible. Le lendemain 1^{er} mars, une dernière observation du télescope Keck II confirme la décroissance de la source, attestant ainsi son identification en tant que rémanent du sursaut gamma.

Premier résultat tangible de l'association des observations des satellites INTEGRAL et XMM-Newton

Le fait d'avoir mené une observation dans la bande X si rapidement après la découverte de GRB 030227 permet de bâtir un spectre suffisamment précis de son émission rémanente pour qu'il soit possible de détecter une raie spectrale caractéristique du Fer. La position de cette raie, si elle est bien due au fer, est compatible avec un décalage spectral vers le rouge de l'ordre de 3, ce qui fait de GRB 030227 l'un des sursauts gamma parmi les plus distants (et donc issu d'une étoile des plus jeunes) jamais détecté.

REM : le chaînon manquant entre INTEGRAL et le VLT

Le télescope IBIS à bord d'INTEGRAL est en mesure de fournir, en moins de vingt secondes, la position sur la voûte céleste, avec une précision de quelques minutes d'angle, de tout sursaut gamma survenant dans son champ de vue. INTEGRAL offre de plus l'avantage de détecter aussi bien les sursauts « courts » que les « longs »⁴.

⁴ Jusqu'à présent, les études approfondies n'ont pu se développer que dans le cas des sursauts avec des durées supérieures à deux secondes (sursauts « longs ») et aucune contrepartie d'un sursaut « court » (durée inférieure à une seconde) n'a encore été détectée.

Néanmoins, une telle précision de localisation n'est pas suffisante pour pointer rapidement dans la direction du sursaut un grand télescope équipé d'un spectrographe à haute résolution. Or, quelques minutes après l'événement, l'émission rémanente d'un sursaut est encore très brillante. Pour obtenir un spectre du sursaut gamma avec la plus haute résolution spectrale possible, il faut pointer rapidement un très grand télescope dans la bonne direction. Pour cela, trois étapes sont nécessaires :

- Première étape : INTEGRAL, opérant dans l'espace, détecte le sursaut gamma avec une erreur de localisation de l'ordre de quelques minutes d'angle.
- Deuxième étape : Un petit télescope robotisé, opérant au sol sur la base de l'information transmise par INTEGRAL, détecte l'émission rémanente dans le visible et surtout dans le proche infrarouge avec une erreur de localisation de l'ordre d'une seconde d'angle. Il est important de mener de telles observations dans le proche infrarouge car près de la moitié des sursauts gamma avec rémanence X restent sans contrepartie notable dans le visible. Or ces spécimens sont particulièrement intéressants car la non détection dans le visible peut être due soit à une très forte absorption locale par des poussières dans la galaxie hôte, soit à un décalage vers le rouge de l'émission de rémanence due à l'éloignement du sursaut. Or c'est précisément si loin dans l'univers, donc si loin dans le temps, que l'on s'attend à trouver la trace des premières étoiles.
- Troisième étape : **L'instrument robotisé ayant confirmé la présence d'une émission rémanente dans le visible et/ou le proche infrarouge et ayant fourni une position très précise de cette rémanence, les conditions sont réunies pour mener une observation spectroscopique à haute résolution avec un grand télescope, comme le VLT (sigle pour *Very Large Telescope*, Très Grand Télescope) installé au Chili, sur le site du Mont Paranal de l'Observatoire Européen Austral [voir photo].**

Le télescope ANTU, l'un des quatre grands télescopes de huit mètres du VLT installé au Chili, sur le site du Mont Paranal de l'Observatoire Européen Austral.



Pour voir aboutir cette stratégie, le Département d'Astrophysique, de physique nucléaire et de l'instrumentation associée (DAPNIA) du CEA participe, dans le cadre de la Fédération de recherche APC (Astroparticule et Cosmologie), à la mise en œuvre du télescope robotisé REM (*Rapid Eye Mount* ou Œil à Monture Rapide). Il s'agit d'un télescope Ritchey-Chretien avec un miroir primaire de soixante centimètres [voir photo]. Le télescope est équipé d'une camera opérant dans l'infrarouge proche et d'un spectrographe opérant dans le visible. REM est actuellement en cours de montage au Chili, sur le site de la Silla de l'Observatoire Européen Austral ; la première lumière est attendue avant la fin du mois de juin.



Le télescope robotisé REM en cours de montage dans les locaux de l'observatoire astronomique de Brera en Italie

**L'événement du 1^{er} mai 2003:
un exemple de la capacité record d'INTEGRAL à alerter très rapidement
la communauté scientifique lors de la détection d'un sursaut gamma**

Petit matin du premier mai 2003, dans les charmants locaux de l'ISDC (*INTEGRAL Science Data Center*, centre des données scientifiques INTEGRAL) installé en Suisse, à Versoix, près de Genève [voir photo]. Dans la grange, l'un des trois bâtiments du Centre, une batterie d'ordinateurs moulinent le flot de données provenant de l'ESOC (*European Space Operation Center*, Centre Européen des Opérations Spatiales) établi en Allemagne, à Darmstadt. C'est là que sont collectées les informations transmises par INTEGRAL évoluant à plus de cent cinquante mille kilomètres de la Terre.



Vue du « château », le bâtiment principal de l'ISDC, le Centre des Données Scientifiques INTEGRAL installé en Suisse, à Versoix, près de Genève.

Comme chaque nuit, les opérations de traitement des données se déroulent à l'ISDC d'une manière totalement automatique, lorsque peu après 3h TU (Temps Universel), soit cinq heures du matin, en heure locale, le logiciel IBAS (*INTEGRAL Burst Alert System*, Système d'Alerte des Sursauts INTEGRAL), détecte un brusque accroissement du taux de comptage des rayons gamma qu'enregistre le détecteur ISGRI du télescope IBIS à bord du satellite INTEGRAL.

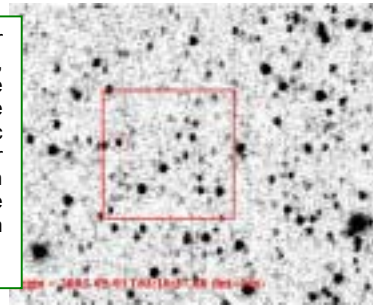
Le logiciel IBAS déroule aussitôt la procédure pré-programmée qui consiste à valider la présence d'une source nouvelle dans le champ du télescope IBIS, à en mesurer la position sur la voûte céleste et à transmettre un message d'alerte à tous les instituts scientifiques qui avaient exprimés le désir d'être informés de la détection d'un sursaut gamma par le satellite INTEGRAL.

Le message en question, qui fournissait les coordonnées célestes de la position du sursaut avec une marge d'erreur de trois minutes d'angle, fut émis à 3h 10m 34s TU, soit dix secondes après le début du sursaut. Certains des instituts abonnés aux messages d'alerte IBAS les utilisent pour piloter automatiquement de petits télescopes robotisés afin qu'ils se pointent au plus vite dans la direction du sursaut.

C'est le cas du télescope TAROT (Télescope à Action Rapide pour les Objets Transitoires), un télescope de vingt cinq centimètres de diamètre installé sur le site du [plateau du Calern](#) de l'Observatoire de la Côte d'Azur, par une collaboration d'instituts dirigée par Michel Boër du Centre d'Étude Spatiale des Rayonnements à Toulouse.

Là aussi, tout est complètement automatisé, depuis les opérations de prise de vue jusqu'à la sauvegarde et au traitement des données. Alerté donc par IBAS, TAROT débutait ses observations à 3h 10m 37s TU, moins de vingt secondes après le début du sursaut. C'est la première fois qu'un instrument robotisé enregistre avec un délai aussi bref l'image d'un champ du ciel où un sursaut gamma est encore actif, le sursaut du premier mai s'étant avéré d'une durée d'environ soixante-dix secondes ! Hélas, notre sursaut s'est malencontreusement produit en arrière plan de la Voie lactée, une bande de ciel riche en nuages interstellaires et l'objet non identifié repéré dans l'image enregistrée par TAROT dans la bande visible [voir photo] s'est avéré n'être qu'une étoile banale, à l'éclat fortement atténué par l'absorption interstellaire.

Image du champ de GRB 030501 enregistrée par TAROT dans la bande visible. L'enregistrement, d'une durée de trente secondes, a débuté moins de vingt secondes après le début du sursaut. Le carré rouge dénote la boîte d'erreur de cinq minutes d'arc de côté associée à la position du sursaut fournie par INTEGRAL. Le cercle rouge signale un objet non catalogué qui s'est avéré n'être qu'une banale étoile à l'éclat fortement atténué par l'absorption interstellaire



Retour à l'ISDC. A six heures, en heure locale, l'astronome d'astreinte arrive à la grange où il prend connaissance des données enregistrées durant la nuit. Les résultats IBAS sont alors « manuellement » confirmés, une circulaire GCN (*Gamma-ray burst Coordinates Network*, Réseau de Coordonnées des Sursauts gamma) est envoyée peu après (GCN 2183), le sursaut du premier mai figurant désormais sous son nom de code officiel, à savoir GRB 030501. Plus tard dans la matinée, les astronomes de l'ISDC analysaient les données enregistrées par spectromètre SPI et produisaient une image où GRB 030501 est parfaitement visible, bien que détecté en bord de champ [voir photo]. Fin de l'épisode et rendez-vous au prochain sursaut...

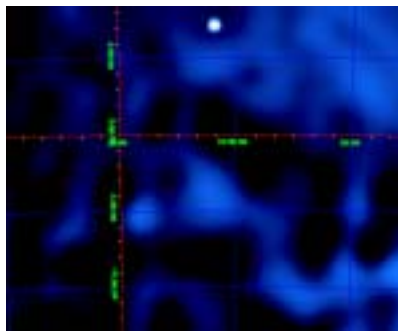


Image du champ de GRB 030501 enregistrée par le spectromètre SPI à bord du satellite INTEGRAL dans la bande spectrale de 20 keV à 200 keV



Simulations numériques en cosmologique

L'objectif des simulations numériques en cosmologie est d'affiner notre compréhension des phénomènes physiques à l'origine de la formation des structures dans l'Univers. Le modèle standard permet d'expliquer *dans les grandes lignes* l'histoire de l'Univers, depuis le Big-Bang primordial jusqu'aux galaxies et aux étoiles qui naissent aujourd'hui dans notre voisinage direct. Quelques étapes de cette épopée nous échappent encore, et non des moindres : comment se sont formées les premières étoiles ? pourquoi se sont-elles rassemblées au sein de galaxies spirales ? d'où proviennent les galaxies elliptiques ? Autant de questions auxquelles les astrophysiciens essayent de répondre depuis plusieurs décades, et pour lesquelles les simulations numériques tentent d'apporter un éclairage fondamental.

Comment se structure notre univers ?

Le scénario standard de formation des structures commence avec l'apparition des premières étoiles, celles-ci s'assemblent ensuite en galaxies naines puis en galaxies spirales. Ces galaxies entrent en collision pour former des galaxies elliptiques, puis plus tard des objets plus vastes encore que sont les amas de galaxies. Ces amas sont les structures les plus massives que l'on observe aujourd'hui. Ils pourraient néanmoins se rassembler dans le futur au sein de structures gigantesques : les super amas.

Juste après le Big-Bang, l'Univers est un gaz chaud, relativement homogène, en expansion : comment à partir de ce gaz, les différentes structures de l'Univers sont-elles apparues ? Comment sont nées successivement étoiles, galaxies et amas de galaxies ?

Les astrophysiciens s'intéressent depuis longtemps aux processus physiques à l'origine de la formation des structures de l'Univers. Ils tentent de modéliser, par des calculs complexes de mécanique des fluides autogravitants⁵, l'évolution de l'Univers depuis le Big-Bang jusqu'à nos jours. Ils pensent aujourd'hui que de petites hétérogénéités dans le plasma originel sont à l'origine de la formation des galaxies et des amas de galaxies au cours de son expansion. Ce sont ces « grumeaux » de l'Univers primordial qui conditionnent son évolution vers la structure complexe que l'on observe aujourd'hui.

En variant les conditions initiales, c'est-à-dire en choisissant différents états de l'Univers juste après le Big-Bang, et en lui appliquant les effets de processus physiques connus (les lois de l'hydrodynamique et de la gravité), ils essaient de retrouver un Univers dont les grandes structures et la répartition de matière ressemblent au nôtre.

⁵ La mécanique des fluides (hydrodynamique) est couramment utilisée pour décrire les écoulements d'air autour des ailes d'avion ou dans les réacteurs. En astrophysique, on utilise des techniques semblables, mais en tenant compte de la gravité qui y joue un rôle dominant.

Récemment : on a précisé les conditions initiales

Depuis septembre 2002 le problème s'est très largement simplifié : les mesures réalisées par le satellite COBE en 1992 ont été précisées, en septembre 2002, par celles de l'expérience française embarquée sur un ballon, Archéops⁶, puis en février 2003 par celles du satellite américain WMAP⁷. Elles ont permis d'établir très précisément les conditions initiales de l'Univers juste après le Big-Bang : les astrophysiciens possèdent désormais une cartographie fine des hétérogénéités initiales de l'Univers.

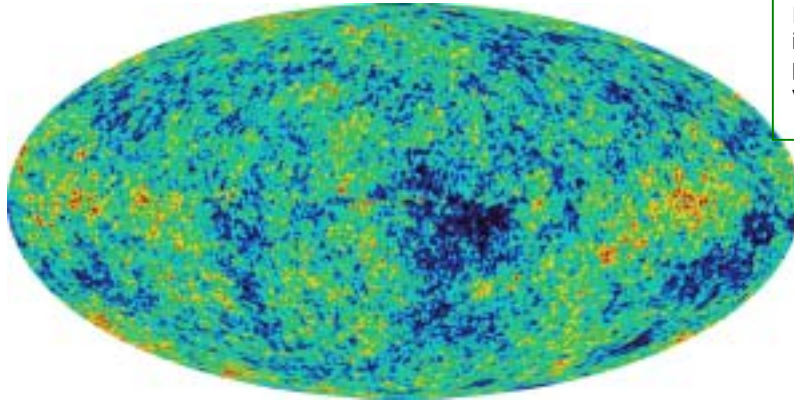
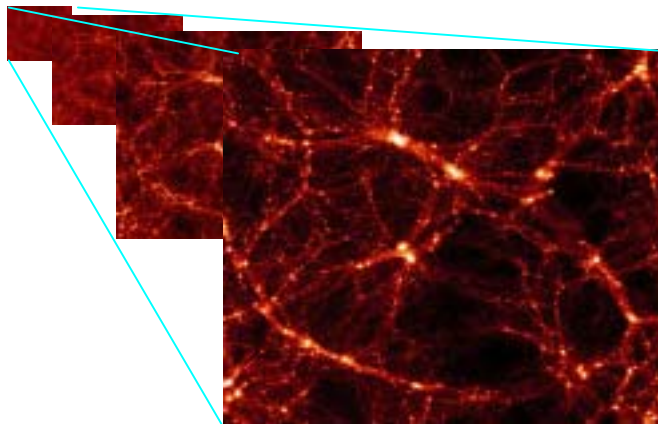


Image des fluctuations initiales du plasma primordial de l'Univers vue par WMAP

Dès lors, en appliquant à ces conditions initiales connues, les lois, connues elles aussi, de l'hydrodynamique et de la gravité, les astrophysiciens sont en mesure de simuler sur de super-ordinateurs l'évolution de notre Univers, depuis son origine sous la forme d'un gaz chaud homogène jusqu'à sa structure actuelle.



Un scénario hiérarchique : formation des premières étoiles aux petites échelles, puis apparition des galaxies aux échelles intermédiaires, qui coalescent entre elles pour former les amas de galaxies aujourd'hui

⁶ Archéops = L'expérience Archéops a permis de tester pour la première fois et avec succès un certain nombre d'éléments à la pointe de la technologie qui seront utilisés sur le satellite Planck. Les résultats d'Archéops ont été obtenus avec deux détecteurs ayant fonctionné pendant 12 h. Par comparaison, Planck prendra des données sur le ciel pendant un an avec 94 détecteurs, ce qui lui permettra d'obtenir une précision plus de 100 fois meilleure que celle d'Archéops.

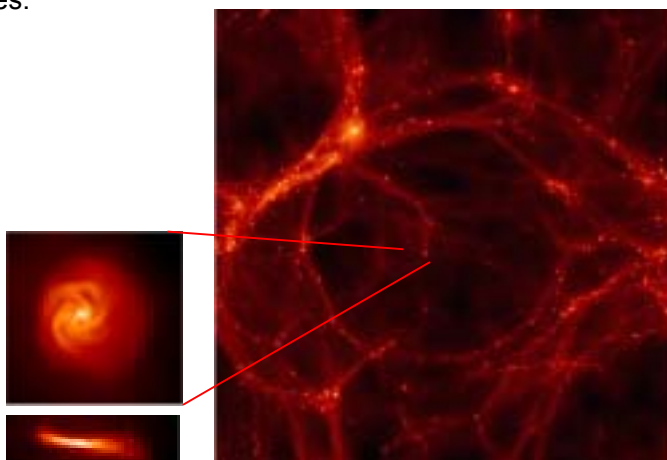
⁷ Wilkinson Microwave Anisotropy Probe : http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm.html

La cosmologie numérique au CEA

Le CEA offre un environnement exceptionnel pour aborder et résoudre les problèmes de simulation numérique puisqu'il rassemble les compétences en mathématiques appliquées et la puissance de calcul nécessaire à la résolution de problèmes complexes, notamment grâce aux moyens de calcul du programme Simulation⁸ de sa Direction des applications militaires (DAM). Le Service d'astrophysique de la Direction des sciences de la matière du CEA, qui rassemble observateurs et expérimentateurs, développe une équipe de simulation numérique susceptible de tirer parti de cet environnement exceptionnel unique en Europe.

Simuler la naissance d'une galaxie...

Pour simuler numériquement l'évolution de l'Univers, les astrophysiciens découpent l'espace et le temps en mailles, et résolvent, pour chacune d'elles des équations mathématiques. Mais plus les mailles sont petites, plus elles sont nombreuses, et plus les calculs nécessaires pour rendre compte de l'évolution du système sont longs. Les astrophysiciens utilisent alors la méthode du « maillage adaptatif » (classique pour les simulations numériques dans tous les domaines scientifiques) consistant à ajuster la taille des mailles en fonction du détail nécessaire pour décrire le système : les grands espaces de vide intersidéral homogène ne nécessiteront que peu de mailles pour être correctement décrits, tandis que pour simuler l'évolution d'une galaxie, il faudra affiner le maillage. Les simulations récentes, bénéficiant des puissances de calcul exceptionnelles parviennent, sur un « volume d'Univers » d'une centaine de Mégaparsecs⁹, à reconstituer la naissance d'une galaxie (une dizaine de kiloparsecs). Plusieurs centaines de millions de mailles et des milliers d'heures de calculs sont alors nécessaires.



Formation des galaxies: le «Graal» de la cosmologie numérique

⁸ Le programme Simulation vise à garantir la fiabilité et la sûreté des armes constituant la force de dissuasion française : en l'absence de d'essais nucléaires, les physiciens cherchent à reproduire par le calcul les différentes étapes du fonctionnement d'une arme. Pour réaliser ces simulations numériques complexes la DAM du CEA dispose du supercalculateur Tera, le plus puissant d'Europe et le 7ème au monde, installé depuis décembre 2001 au CEA DAM de Bruyères-Le-Châtel (Essonne).

⁹ Le parsec est une unité de distance, plus souvent utilisée par les professionnels. Il correspond à la distance d'un corps qui aurait une parallaxe annuelle de une seconde arc (d'ou le nom: PAR SEConde d'arc). Ou : la distance à laquelle la distance moyenne Terre - Soleil apparaît sous un angle de une seconde d'arc. Un parsec correspond ainsi à 31 milliards de km ou 3,262 années-lumière ou à peu près 206 000 fois la distance Terre - Soleil. Un mégaparsec = 1 million de parsecs. Un kiloparsec = 1 millier de parsecs.

...Et la naissance d'une étoile

Si les simulations numériques parviennent à rendre compte de la formation d'une galaxie avec un certain réalisme (bonne finesse du maillage), la difficulté est maintenant de monter encore une marche dans la complexité en parvenant à simuler numériquement la formation des étoiles, étroitement liées à la nature du milieu interstellaire. Les numériciens se trouvent ainsi à la frontière entre deux sciences, à la frontière entre deux échelles d'espace et de temps, entre la cosmologie (les grandes structures de l'Univers) et l'étude du milieu interstellaire (à l'échelle d'une étoile).

D'un point de vue cosmologique, notre compréhension de la formation des structures dans l'univers s'est donc éclaircie, grâce notamment à notre connaissance accrue de ses conditions initiales. Ceci ouvre de nouveaux horizons pour les simulations numériques en cosmologie : comprendre la formation des étoiles au sein des galaxies. Ce nouveau chantier est aujourd'hui rendu possible par l'augmentation très rapide de la puissance de calcul des ordinateurs et la prise en compte de nouveaux processus physiques issus de l'étude du milieu interstellaire.