

# Voyage dans les lumières de l'Univers

Pendant longtemps, les astrophysiciens n'ont eu à leur disposition que la lumière visible pour observer l'Univers. **Aujourd'hui, grâce aux observatoires spatiaux, ils disposent d'une panoplie d'instruments capables de capter toutes les lumières de l'Univers**, des ondes radio aux rayonnements gamma.

## 1. Micro-ondes

### ESA Planck Surveyor

Ce satellite doit cartographier le **fond diffus cosmologique**, **rayonnement** émis il y a 13,7 milliards d'années, quand l'Univers est devenu transparent à la lumière. Ce rayonnement suit la loi de répartition spectrale des corps noirs établie par le physicien allemand Max Planck (1858-1947), au début du XX<sup>e</sup> siècle.

#### Domaine spectral

Fréquences de 30 GHz à 857 GHz correspondant à des **longueurs d'onde** de 1 cm à 350 microns.

#### Description

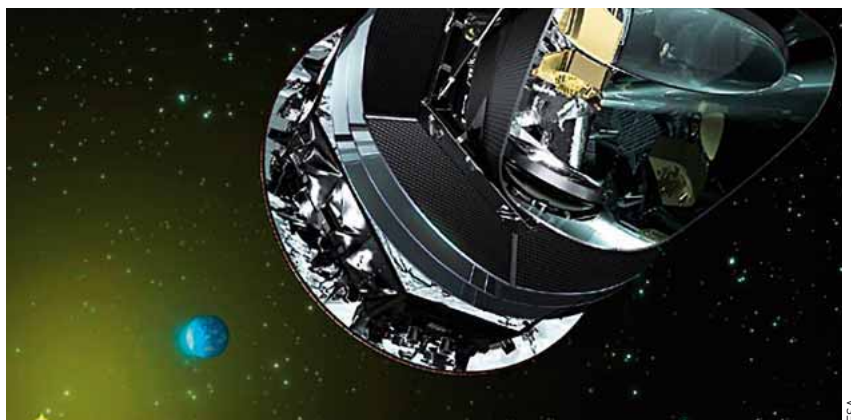
- Télescope de 1,5 m de diamètre.
- Dimensions : 4,20 m de haut et de large.
- Poids : 1,8 tonne.
- Lancement : par la fusée Ariane 5, le 14 mai 2009, à partir du Centre spatial guyanais de Kourou.
- Position : aux alentours du **point de Lagrange 2** du système Terre/Soleil (point de Lagrange métastable situé derrière la Terre, à 1,5 million de km de nous).
- Durée de vie de la mission : 21 mois.

#### Objectifs scientifiques

- Mesurer avec une précision inférieure à 1 % les paramètres du Modèle standard, appelé aussi « modèle du **big bang** ».
- Détecter d'infimes variations dans les propriétés des fluctuations du fond diffus, à 3 K, par rapport aux prédictions de ce modèle : chaque variation participant à démontrer que la physique à l'œuvre dans l'Univers **primordial** s'avérerait différente de celle que nous considérons actuellement comme la plus vraisemblable.

#### Instruments

- **High Frequency Instrument** (HFI), instrument submillimétrique développé sous maîtrise d'œuvre de l'**Institut d'astrophysique spatiale d'Orsay**. Il s'agit d'une matrice de



Vue d'artiste du satellite Planck de l'ESA.

**bolomètre** fonctionnant à une température de 0,1 K, pour une **résolution** angulaire de 5 minutes d'arc avec une sensibilité en température de 5  $\mu$ K à 100 GHz. Il observera un domaine en fréquence de 100 à 850 GHz.

- **Low Frequency Instrument** (LFI). Instrument micro-onde développé en Italie, composé de quatre bandes de 56 récepteurs radio ajustables (27 - 77 GHz) fonctionnant à une température de 20 K, sa résolution angulaire est de 10 minutes d'arc et sa sensibilité en température d'environ 12  $\mu$ K à 100 GHz.

#### Collaborations

Construit par un consortium international avec l'**Agence spatiale européenne (ESA)** comme maître d'ouvrage.

#### Rôle du CEA

Participation :

- à la mise en place de l'électronique à bas bruit pendant la phase de construction de la charge utile, en particulier en coordonnant les études de compatibilité électromagnétique de l'instrument HFI ;
- à la mise en place de logiciels sophistiqués pour l'analyse des données ;

- au traitement des données et à l'exploitation scientifique de la mission.

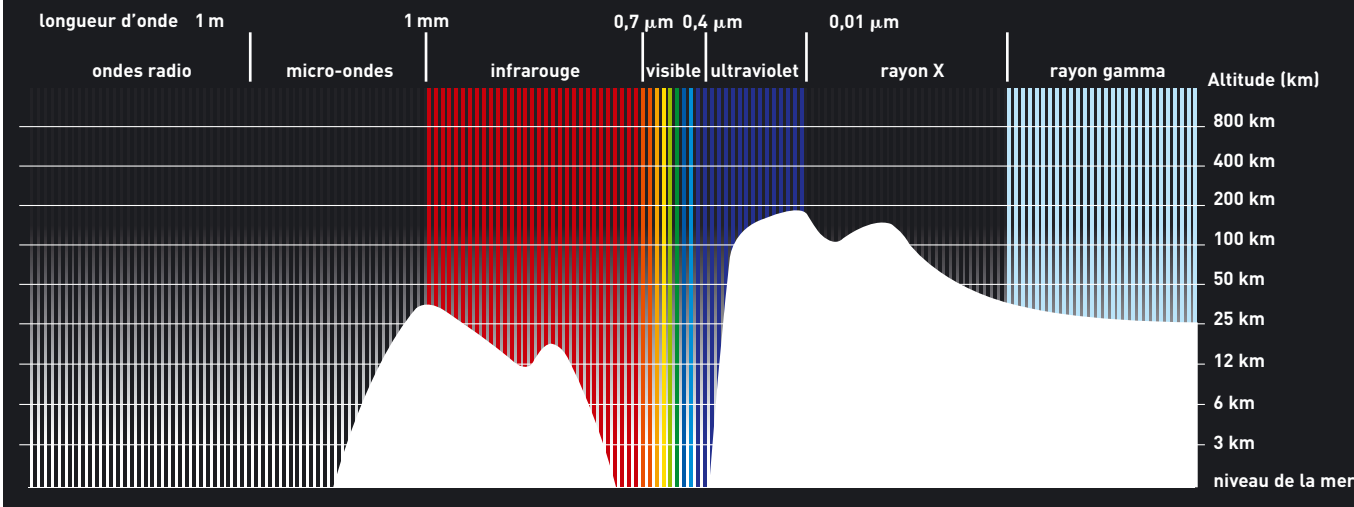
Planck réalise une cartographie des **anisotropies** du fond diffus cosmologique en balayant l'intégralité de la voûte céleste avec une résolution de cinq arcs minutes. De ces données seront déduites des informations fondamentales sur la naissance, la forme, le contenu et l'évolution de l'Univers.

Le traitement des données représente un vrai défi. En effet, chacune des cartes obtenues contiendra de l'information provenant de différents rayonnements micro-ondes et pas uniquement du fond diffus cosmologique. Il sera donc nécessaire de séparer les informations provenant du fond diffus cosmologique des autres **rayonnements micro-ondes**.

#### > Jean-Luc Starck

Service d'électronique des détecteurs et d'informatique (Sedi)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

## les lumières de l'Univers



Une grande partie des lumières de l'Univers n'atteint pas le sol terrestre. On ne peut les observer qu'au-dessus de l'atmosphère avec ballons, fusées et satellites.

## 2. Submillimétriques et infrarouges

### ArTéMis

D'après l'acronyme d'Architecture de **bolomètres** pour les télescopes submillimétriques au sol ; cette caméra sera utilisée, entre autres, pour observer des pouponnières d'**étoiles** comme la **nébuleuse** de la constellation d'Orion (dans la mythologie grecque Orion aurait tenté de séduire la déesse Artémis).

#### Domaine spectral

Longueurs d'**onde** comprises entre 200 μm et 500 μm.

#### Description

- Dimensions : 1 mètre de haut et de large pour une profondeur de 0,5 m.
- Poids : 250 kg.
- Lancement : pas de lancement.
- Position : à 5100 m d'altitude dans les hauts plateaux du désert d'Atacama au Chili.
- Durée de vie de la mission : pas de limitation matérielle mais durée intimement liée à l'exploitation scientifique du télescope APEX (pour *Atacama Pathfinder Experiment*).

#### Objectifs scientifiques

Étudier la naissance et les phases précoces d'un large spectre d'objets astrophysiques comme les nuages moléculaires où se forment les étoiles dans la **Galaxie**, les cœurs prestellaires et les protoétoiles enfouies, les **disques** protoplanétaires autour de jeunes étoiles ainsi que les galaxies proches de type *starburst* c'est-à-dire « à flambées de formation d'étoiles » et enfin les galaxies à grand **redshift** dans l'Univers **primordial**.

#### Instruments

- Une caméra destinée au télescope APEX qui disposera de trois plans focaux pouvant observer simultanément la même région du ciel : 2 304 **pixels** à 450 μm ; 2 304 pixels à 350 μm ; 1152 pixels à 200 μm.
- Une antenne de 12 m installée au Chili.

#### Collaborations

L'**Institut d'astrophysique spatiale** d'Orsay (IAS), l'**Institut Néel** de Grenoble, l'**Institut d'astrophysique de Paris** (IAP) et le CEA.

#### Rôle du CEA

Réalisation complète de la caméra équipée de ses trois plans focaux formés de plusieurs milliers de pixels bolométriques refroidis à 0,3 **Kelvin** et développement d'une solution cryogénique autonome intégrée.

Une version prototype de la caméra (256 pixels à 450 μm) a d'abord été réalisée pour valider, dans un premier temps, la technologie novatrice du Leti en matière de bolomètres submillimétriques. Les premières images du ciel, à 450 μm, ont été obtenues avec ce prototype, en 2006, sur le télescope KOSMA (pour *Koelner Observatorium fur Submillimeter Astronomie*), installé à 3 100 m, dans les Alpes Suisses. Depuis, deux campagnes d'observation ont été réalisées sur l'antenne APEX, au Chili, et les premiers résultats scientifiques ont pu être publiés avec cette caméra prototype, préparant la venue de la future caméra ArTéMIS. Avec le prototype, les astronomes ont déjà cartographié l'émission thermique,



Le télescope APEX au foyer duquel sera installée la caméra ArTéMis.

à 450 microns des grains de poussière, à travers des régions de formation d'étoiles ainsi que les premières images, à cette longueur d'onde, de disques protoplanétaires et de disques de débris. Parmi les régions observées figurent NGC3576, G327.3-0.6, S255, NGC2264, des régions de formation d'étoiles massives, HD97048 (disque protoplanétaire) et Beta-Pictoris (disque de débris).

#### > Michel Talvard

Service d'astrophysique (SAP)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles  
(CEA-Université Paris 7-CNRS)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

## Herschel Space Observatory

Ce grand télescope spatial doit son nom à William Herschel (1738-1822), astronome anglais d'origine allemande, qui découvrit le **rayonnement infrarouge** en 1800. On lui doit aussi la découverte de la planète Uranus et de ses deux principaux satellites.

### Description

- Dimensions : 7 m de haut pour un diamètre de 4,3 m.
- Poids : 3,25 tonnes.
- Lancement : le 14 mai 2009, par une fusée Ariane 5, à partir du Centre spatial guyanais de Kourou.
- Position : au **point de Lagrange 2** du système Terre/Soleil.
- Durée de vie de la mission : 3 ans.

### Domaine spectral

Gamme de 60 à 670  $\mu\text{m}$  correspondant au **rayonnement** d'objets cosmiques froids, aux alentours de 10 **Kelvin** : nuages du milieu interstellaire, régions de formation stellaire, enveloppes d'**étoiles** à la fin de leur vie.

### Objectifs scientifiques

Identifier et étudier les premières phases de la formation des étoiles ainsi que les principales époques d'assemblage des **galaxies**.

### Instruments

- PACS (pour *Photoconductor Array Camera and Spectrometer*), composée d'un photomètre imageur avec ses deux voies de matrices de **bolomètres** refroidis à 300 mK (la plus grande caméra de bolomètres jamais réalisée) qui observera dans les longueurs d'onde de 60 à 200 microns et d'un **spectromètre** constitué de deux blocs photoconducteurs dans les bandes 57 à 210  $\mu\text{m}$ .
- SPIRE (pour *Spectral and Photometric Imaging Receiver*) doté d'un photomètre imageur sur trois bandes simultanées (250  $\mu\text{m}$ , 350  $\mu\text{m}$  et 500  $\mu\text{m}$ ) et d'un spectromètre FTS

à moyenne résolution (200-300  $\mu\text{m}$  et 300-670  $\mu\text{m}$ ) complémentaire pour couvrir les longueurs d'onde de 200 à 600 microns.

Ces deux instruments ne peuvent fonctionner qu'à une température proche du zéro. Aussi, un cryostat assure-t-il une température moyenne de 2°K (-271 °C) à Herschel tandis que des **cryoréfrigérateurs** refroidissent les bolomètres de PACS et SPIRE à 0,3°K (-272,85 °C). La maîtrise du froid se justifie doublement. D'abord pour refroidir les structures afin que leur température ne dépasse pas celle des objets à détecter et ensuite pour que le fonctionnement des bolomètres repose sur la mesure de variations de températures : lorsqu'ils absorbent les **photons** du rayonnement, leur température s'élève et donc, en utilisant une structure froide, la moindre absorption de photons pourra être détectée.

- HIFI (pour *Heterodyne Instrument for Far-Infrared*), un spectromètre à très haute résolution spectrale, utilisant les techniques plus classiques de la radio-astronomie et couvrant le domaine 170-625  $\mu\text{m}$ .

### Collaborations

Construit par un consortium européen de laboratoires spatiaux avec l'**Agence spatiale européenne (Esa)** comme maître d'ouvrage.

### Rôle du CEA

Conception :

- de la caméra PACS et de ses détecteurs ;
- de l'électronique de l'instrument SPIRE.

En complément des systèmes de détection, l'Irfu a développé les fonctions électroniques indispensables à leur mise en œuvre. En effet, en raison de la réduction ou de l'absence de rayonnement parasite, l'environnement spatial permet l'accès à des mesures de très faible niveau de bruit. Le bruit propre de l'électronique embarquée doit donc demeurer inférieur au bruit de détection, ce qui nécessite,



Vue d'artiste du télescope Herschel.

en particulier, l'utilisation de détecteurs dotés de moyens de refroidissement cryogéniques et donc le développement des fonctions électroniques associées. SPIRE possède une unité d'électronique comprenant 350 voies à très bas bruit (quelques milliardièmes de volt) et à forte dynamique (plus d'un million) conçue en collaboration avec le **Jet Propulsion Laboratory (JPL)** tandis que PACS utilise une unité d'électronique analogique entièrement développée par le SAp. Cette unité comprend, outre les 160 voies de traitement analogique des signaux, les fonctions de polarisation du détecteur et les fonctions associées au système cryogénique. Des voies de mesures de températures ont fait l'objet d'un développement avec l'Institut nanosciences et cryogénie (Inac). Une résolution de 10  $\mu\text{K}$  à -273°C a pu être atteinte. Afin d'assurer la communication de cette unité avec le reste de l'instrument, une interface au standard ESA *SpaceWire* a été développée par le SAp sous la forme d'un module de propriété intellectuelle et a été diffusée au sein du consortium PACS.

### > Marc Sauvage et Christophe Cara

Service d'astrophysique (SAp)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

## VLT-VISIR

Visir est une caméra-**spectromètre** infrarouge qui équipe le troisième télescope du VLT européen situé au Chili : des acronymes *Very Large Telescope (VLT)* et *Imager and Spectrometer for the Infra Red (VISIR)*.

### Domaine spectral

**Infrarouge moyen** avec deux fenêtres d'observation à partir du sol : longueurs d'**onde** entre 8 et 13 micromètres et entre 17 et 24 **micromètres**.

### Description

- Dimensions : 1,2 m de diamètre pour 1m de hauteur.
- Poids : 1,6 tonne.
- Lancement : pas de lancement ; au sol.
- Position : caméra-spectromètre placée au foyer du télescope numéro 3 du VLT

(dénommé MELIPAL) installé au nord du Chili, sur le mont Paranal, à 2 600 mètres d'altitude.

- Durée d'opération : jusqu'en 2014, date à laquelle VISIR sera dépassé par l'instrument MIRI (pour *Mid Infra Red Instrument*) du JWST (pour *James Webb Space Telescope*).

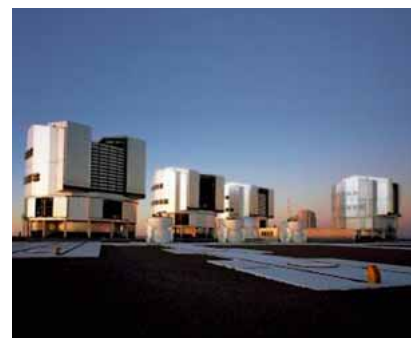
### Objectifs scientifiques

Observer les poussières et les gaz tièdes (entre 50 et 500 K) de l'Univers : des **comètes** aux **quasars** avec un accent mis sur l'observation des **disques** circumstellaires dans lesquels se forment les **planètes**.

### Instruments

Une caméra et un spectromètre placés dans un cryostat pour être refroidis à 15°K (-258 °C) pour la structure mécanique et les

optiques, à 8°K (-265 °C) pour les détecteurs. VISIR est solidaire du télescope et tourne avec lui pour viser l'objet étudié.



Les quatre télescopes de 8 mètres de diamètre du programme VLT de l'ESO.

## Cassini-CIRS

CIRS (pour *Composite Infrared Spectrometer*) est un des instruments de la mission Cassini qui étudie Saturne, ses anneaux et son système de satellites. Cette sonde fut ainsi nommée pour rappeler que l'on doit à l'astronome Jean-Dominique Cassini (1625-1712) la découverte des quatre principaux satellites de Saturne ainsi qu'une division dans ses anneaux.

### Domaine spectral

Lumière infrarouge émise par la planète Saturne, ses anneaux et ses satellites (7-9  $\mu\text{m}$ , 9-17  $\mu\text{m}$ , 17-1 000  $\mu\text{m}$ ).

### Description

- Dimensions : télescope de 50,8 cm de diamètre.
- Poids : 40 kg.
- Lancement : embarqué sur la sonde Cassini-Huygens, lancée en 1997 à Cap Canaveral.
- Position : mis en orbite autour de la planète Saturne après plus de six ans et demi de voyage interplanétaire.
- Durée de vie de la mission : les 78 révolutions effectuées pendant la mission nominale (2004-2008) et les 250 révolutions au cours de la mission étendue (2010-2017).

### Objectifs scientifiques

Étudier la dynamique et la structure des particules constituant les anneaux de Saturne, identifier les composants chimiques et expliquer la météorologie des atmosphères de la planète et de son satellite Titan.

### Instruments

CIRS observe à travers un spectromètre sur trois détecteurs :

- le premier, nommé FP 1 (pour plan focal) couvre le domaine submillimétrique (20-1000  $\mu\text{m}$ ) ;
- les deux autres, nommés FP 3 et FP 4,

renferment chacun une barrette de dix détecteurs et observent dans l'infrarouge moyen, de 7 à 18  $\mu\text{m}$ .

La finesse de mesure de ces instruments est dix fois meilleure que celle de son prédécesseur, le spectromètre IRIS des sondes *Voyager*, et leur sensibilité au moins mille fois plus grande.

### Collaborations

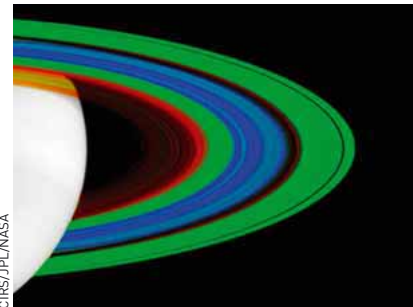
États-Unis, Grande-Bretagne et France.

### Rôle du CEA

Réalisation :

- de la barrette du détecteur du plan focal FP4 et de son électronique de traitement. Cette barrette se compose de 10 détecteurs photovoltaïques de très haute détectivité dans le domaine 7-9  $\mu\text{m}$ . Le développement de barrettes de très haute sensibilité a constitué un réel challenge, surtout pour éliminer les défauts dans le matériau générateurs de bruit ;
- de l'électronique de traitement du signal composée de filtres très discriminants.

Les anneaux de Saturne ont été observés comme jamais auparavant : sous différents angles de vue, régulièrement, à l'échelle de quelques heures, de quelques mois ou de plusieurs années, afin de suivre les effets saisonniers. Pour la première fois, l'instrument CIRS a mesuré la température des anneaux, sur la face sud éclairée par le Soleil et sur la face nord à l'ombre. Le contraste de température permet de sonder la structure verticale du disque. Par ailleurs, il s'avère que les particules des anneaux présentent un hémisphère plus froid que l'autre, mettant indirectement en évidence qu'une fraction d'entre elles tournent lentement autour d'elles-mêmes. Une variation de l'émission thermique a également été détectée tout au long de l'anneau A, le plus éloigné de la



La température des anneaux de Saturne déterminée par le spectromètre infrarouge CIRS : de la plus froide (en bleu) vers la plus chaude (en rouge). L'anneau bleu, le plus épais, est le plus froid, les particules se cachant plus facilement du Soleil, la source de chauffage.

planète. Elle s'explique par la présence de grumeaux de particules, appelés ondes d'auto-gravité, lesquels se forment à la périphérie des anneaux, là où les effets de marée sont suffisamment faibles pour que les particules arrivent à s'attirer mutuellement sous l'effet de la gravitation. Les mesures de CIRS permettent de déterminer, très précisément, la taille de ces structures, à peine hautes et larges d'une dizaine de mètres, bien en deçà de la résolution spatiale de l'instrument, de l'ordre de plusieurs milliers de kilomètres. L'année 2009 a vu l'équinoxe de Saturne, au cours de laquelle le Soleil est passé de la face sud à la face nord des anneaux, une opportunité rare d'étudier leur structure.

### > Cécile Ferrari et Louis Rodriguez

Service d'astrophysique (SAp)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

### Collaborations

Franco-hollandaise dans le cadre d'un contrat avec l'*European Southern Observatory (ESO)*.

### Rôle du CEA

- Maîtrise d'œuvre du projet.
- Responsabilité scientifique.
- Conception et réalisation de l'ensemble de l'instrument, exception faite du spectromètre, réalisation hollandaise.
- Conception d'un actuateur original pour assurer le mouvement des différentes roues dans l'instrument (roue à filtre, champs de vue...) et le positionnement, très précis, des éléments optiques ; actuateur fonctionnant aussi bien à température ambiante qu'à basse température (-253 °C).

Dès le début du programme VLT, l'ESO a prévu un ambitieux plan d'instrumentation pour

équiper les télescopes. Il a donc lancé un appel à la communauté astrophysique européenne pour cibler les instruments les plus pertinents. Les astrophysiciens du CEA, pionniers en Europe pour leurs observations d'imagerie dans l'infrarouge moyen à partir du sol, ont alors proposé VISIR qui fut sélectionné. L'étude et la réalisation de cet instrument a demandé 10 ans et mis en jeu de nombreux métiers dans les différents services de l'Irfu (management, contrôle projet, ingénierie des systèmes, optique, mécanique, vide, cryogénie, contrôle commande, électronique, détection...). Les instruments infrarouge devant être refroidis pour ne pas émettre de lumière infrarouge, nécessitent d'être placés dans une enceinte à vide qui les isole thermiquement de l'environnement. Trois machines frigorifiques très performantes permettent d'atteindre les

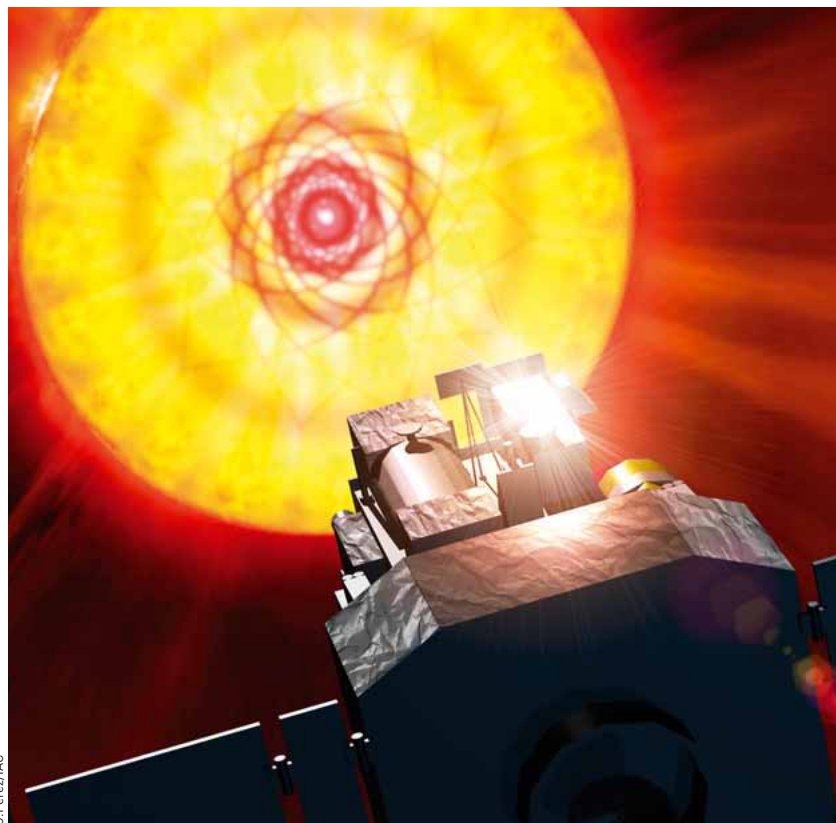
basses températures requises. Il s'agit d'une matrice, de 256 x 256 pixels, fabriquée par Boeing. Après des tests intensifs réalisés au CEA/Saclay, VISIR a été livré, en 2004, et délivre depuis des images avec une finesse de détail dix fois supérieure à celle des petits télescopes spatiaux, comme le satellite Spitzer de la NASA. En revanche, sa sensibilité, limitée par le fort fond de lumière infrarouge émis par le télescope et l'atmosphère, s'avère bien moindre.

### > Pierre-Olivier Lagage

Service d'astrophysique (SAp)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

## 3. Visible

### SoHo-GOLF



G. Perez/AC

Vue d'artiste du satellite SoHo observant le Soleil.

Le satellite SoHo observe le **Soleil**, en continu, depuis l'espace. À son bord, l'instrument GOLF est plus particulièrement chargé de suivre les **oscillations** de notre **étoile** pour en déduire les conditions qui y règnent à l'intérieur (des acronymes *Solar and Heliospheric Observatory* et *Global Oscillations at Low Frequencies*).

#### Domaine spectral

Visible : doublet du Sodium Na D1 (589,6 nm) et D2 (596 nm).

#### Description

- Dimensions : 800 mm de long sur 325 de large et 170 de hauteur.
- Poids : 90 kg.

#### Lancement

GOLF est un des instruments du satellite SoHo, lancé par une fusée Centaur, en 1995, à partir du Centre spatial Kennedy (Cap Canaveral).

#### Position

**Point de Lagrange 1**, à environ 1,5 million de km de la Terre en direction du Soleil ; cette position privilégiée lui permet de regarder en permanence le Soleil, contrairement aux instruments placés sur Terre qui doivent être

dupliqués et placés à différentes longitudes dans des observatoires autour de la Terre pour assurer la continuité de la prise des données.

**Durée de vie de la mission** : jusqu'en 2009 au moins.

#### Objectifs scientifiques

Mesurer les déplacements de la surface du Soleil générés par les modes d'oscillation solaires, en observant l'**étoile** globalement à partir de la **vitesse Doppler** entre le satellite et le Soleil dans la raie d'**absorption** du sodium. Ainsi peuvent se détecter les modes les plus pénétrants (modes radiaux, monopolaires, dipolaires...) riches d'informations sur la région nucléaire du Soleil. De plus, GOLF va tester la **modélisation** stellaire dans la première phase d'évolution, en y introduisant des phénomènes dynamiques absents de l'évolution stellaire classique.

#### Instruments

GOLF est un spectrophotomètre à dispersion résonante mesurant le décalage des raies par rapport à une référence absolue, celle donnée par la vapeur du sodium contenue dans une cellule se trouvant dans l'instrument.

Les **photons** solaires traversant cette cellule sont absorbés et réémis puis mesurés par deux détecteurs. La cellule est placée dans un **champ magnétique** d'environ 5 000 Gauss et la raie réémission divisée en deux composantes grâce à l'**effet Zeeman**. De plus, un champ magnétique variable ( $\pm 100$  Gauss) permet de faire un petit décalage supplémentaire.

#### Collaborations

Franco-espagnole.

#### Rôle du CEA

- La détection par photomultiplicateur et l'électronique associée.
- L'architecture électronique d'ensemble.
- L'électronique de chauffage de la cellule et de modulation magnétique de l'aimant.
- La réalisation de l'ordinateur de vol et du logiciel associé.
- Le support informatique de gestion des données et de communication avec le sol.
- La responsabilité scientifique de l'interprétation des données en termes de modélisation du Soleil.

GOLF a permis de progresser dans la connaissance de la structure et de la dynamique interne du Soleil et de résoudre notamment le problème des neutrinos solaires, tout cela grâce à la mesure des modes acoustiques (modes p) de bas degrés. Ces **ondes** se propagent dans l'ensemble du Soleil mais contiennent de moins en moins d'information sur les couches de plus en plus profondes. Pour pouvoir sonder l'intérieur du cœur nucléaire du soleil, les physiciens ont dû traquer un autre type d'ondes : les **modes de gravité** non mesurés avant SoHO. GOLF fut le premier à mettre en évidence la signature de certaines des propriétés de ces modes de gravité, après la détection des candidats potentiels. Il s'agit d'une avancée importante. La détection de plusieurs modes de gravité aura pour impact de mieux connaître la dynamique et la structure interne du Soleil et en particulier de son cœur. GOLF semble montrer que la vitesse de rotation de ce cœur solaire, en moyenne, s'élève de 3 à 5 fois comparé au reste de la zone **radiative**, un résultat inconnu jusque-là.

#### > Rafael-A. Garcia

Service d'astrophysique (SAP)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles  
(CEA-Université Paris 7-CNRS)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

## 4. Rayons X

### XMM-Newton

Ce télescope spatial (de l'acronyme *X Rays multi Mirror Mission*) observe l'Univers dans la gamme des rayons X. Pour cela, il est doté d'un système multimiroirs à incidence rasante capable de former des images à ces hautes énergies. Il s'agit du télescope en rayons X le plus sensible jamais envoyé dans l'espace.

#### Domaine spectral

Bande entre 0,3 et 14 KeV.

#### Description

- Dimensions : 10 m de longueur, 16 m d'envergure pour 4 m de diamètre.
- Poids : 3,8 tonnes.
- Lancement : en 1999, par la fusée Ariane 5, à partir de la base de Kourou.
- Position : 7 000 km de périégée et 114 000 km d'apogée.
- Durée de vie de la mission : 10 ans de vie nominale.

#### Objectifs scientifiques

Étudier les **étoiles** jeunes au cœur des nuages denses, les **trous noirs** et les **étoiles à neutrons**, la production et la circulation des éléments lourds, la formation et l'évolution des grandes structures ou encore la nature du **fond diffus X**.

#### Instruments

- Trois miroirs à incidence rasante travaillant dans le domaine des rayons X. Tous sont dotés d'un spectro-imageur CCDs (pour *Charge Coupled Devices*), fonctionnant de façon similaire aux appareils photographiques numériques. Ces instruments permettent d'acquérir les spectres de régions choisies du ciel et les images indispensables pour déterminer la température ou la nature de l'émission du gaz chaud dans les restes de **supernovae** ou dans les **amas de galaxies**.

- Un télescope optique optimisé dans le bleu et le proche ultraviolet.

#### Collaborations

Observatoire de l'**Agence spatiale européenne (ESA)** et pour la construction d'EPIC (pour *European Photon Imaging Camera*), un consortium de laboratoires venant d'Allemagne, Italie, Grande-Bretagne et France.

#### Rôle du CEA

- Mise au point puis étalonnage des caméras.
- Fourniture de l'électronique dédiée pour étudier en temps réel l'interaction de chaque photon X.
- Calcul d'une dizaine de paramètres pour déterminer, au sol, l'énergie du **photon** incident. Ce traitement, réalisé à bord, permet de transmettre au sol toute l'information scientifique utile et elle seule.

Les différences majeures dans le fonctionnement des détecteurs CCDs X et « optiques » tiennent à ce que les **rayonnements visibles** reçoivent un flux de lumière dont les astrophysiciens se contentent de faire une image alors que, dans la bande des rayons X, ils peuvent détecter et mesurer les photons un par un et ainsi faire, à la fois, des images et des spectres. Si, pour les rayonnements visibles, les CCDs s'utilisent comme des imageurs, ils font office de spectro-imageurs pour les rayons X. Dans une telle utilisation, les CCDs se lisent donc aussi vite que possible afin d'éviter les empilements de photons. Autrement dit, le temps de pose élémentaire est le plus court possible, l'observation proprement dite étant la somme de toutes ces poses élémentaires. Dans ces conditions, le détecteur permet de déterminer l'énergie, la date d'arrivée et la direction incidente de chaque photon incident. Les images et les spectres sont fabriqués ultérieurement à l'aide de la liste des photons reçus pendant l'observation. En conclusion, XMM-Newton est un observatoire en rayons X très sensible, en fonctionnement continu depuis bientôt dix ans, que la communauté scientifique européenne espère bien voir fonctionner jusqu'en 2020.

#### > Jean-Luc Sauvageot

Service d'astrophysique (SAp)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche astrophysique interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)



NASA

Vue d'artiste du satellite XMM.

## 5. Rayons gamma

### INTEGRAL

La lumière de haute énergie traverse facilement la matière et sa focalisation requiert des miroirs à très longue distance focale et dont l'état de surface est comparable à celui d'un plan cristallin. Il s'avère donc extrêmement difficile de former des images par réflexion ou réfraction. Pour contourner ces difficultés, les télescopes de l'observatoire spatial INTEGRAL (pour *International Gamma Ray Astrophysics Laboratory*) utilisent des « masques codés ». Il s'agit d'un dispositif qui s'inspire de la chambre noire des premiers photographes et tire avantage des possibilités de calcul contemporaines.

#### Description

- Dimensions : 4 m de diamètre. et 5 m de hauteur.
- Poids : 4 tonnes.
- Lancement : en 2002, depuis la base russe de Baïkonour, par une fusée Proton.
- Position : orbite excentrique 10 000/150 000 km.
- Durée de vie de la mission : 2 ans mais dimensionnée pour 5 ans et budgétisée jusqu'en 2012.

#### Domaine spectral

15 KeV à 10 MeV

#### Objectifs scientifiques

Exploration approfondie par l'imagerie, la **spectrométrie** et la polarimétrie, des sites célestes émettant des **rayons gamma** de basse énergie.

#### Instruments

- IBIS (pour *Imager on Board the INTEGRAL Satellite*) pour fournir des images à haute résolution angulaire et une information spectrale à moyenne résolution.
- SPI (*Spectrometer for INTEGRAL*) chargé de la spectrométrie gamma à très haute résolution.
- Deux petits instruments d'accompagnement : JEM-X (pour *Joint European Monitor*) et OMC (pour *Optical Monitor Camera*) opérant respectivement dans la bande des rayons X et dans le domaine visible.

#### Collaborations

Observatoire de l'**Agence spatiale européenne (Esa)** et, pour la construction des instruments, un consortium de laboratoires situés en Allemagne, au Danemark, en Espagne, en France, en Irlande, en Italie, en Norvège, en Pologne et en Russie.

#### Rôle du CEA

- Conception et coresponsabilité de l'instrument IBIS.



Vue d'artiste d'INTEGRAL.

- Simulation du dispositif expérimental et calcul de la réponse spectrale de l'instrument IBIS.
- Étude, développement et maîtrise d'œuvre de la caméra ISGRI (pour *INTEGRAL Soft Gamma-Ray Imager*) de nouvelle génération, le plan supérieur du télescope IBIS.
- Développement et maintenance des logiciels d'analyse scientifique d'IBIS et ISGRI.
- Fourniture de l'électronique digitale de proximité du spectromètre SPI.
- Responsabilité de l'étalonnage de SPI auprès de l'accélérateur tandem installé sur le centre CEA de Bruyères-le-Châtel.
- Conception de l'étalonnage du satellite INTEGRAL, fourniture d'un générateur X et de sources radioactives.

Notre **Galaxie** est-elle une **Voie lactée** à proprement parler, autrement dit son émission est-elle due à des **nébuleuses** ou à des **étoiles** ? Depuis Galilée, on sait que les étoiles dominent l'émission visible. En revanche, il a fallu attendre INTEGRAL pour savoir ce qu'il en est dans le domaine des **photons** gamma de basse énergie. La réponse dépend de l'énergie des photons. En dessous de 200 keV, IBIS a montré que l'émission de notre Galaxie s'avère totalement dominée par celle des **systèmes binaires accrétants**. Ceux-ci sont formés d'un **trou noir** ou d'une **étoile à neutrons** qui arrache de la matière à son compagnon. C'est l'émission de cette matière, portée à 100 millions de degrés, qu'IBIS a

détectée. S'il y a une émission interstellaire, elle est beaucoup plus faible dans ce domaine d'énergie. En revanche, les systèmes binaires émettent peu au-delà de 200 keV et c'est probablement l'émission de décroissance du positronium, pseudo-**atome** formé d'un **électron** et d'un **positon**, dans le milieu interstellaire, qui domine celle de la Galaxie. C'est le cas à 511 keV, où les performances spectrométriques de SPI ont permis de mettre en évidence la morphologie de l'émission. Celle-ci se compose d'un sphéroïde de 8° d'extension trônant au centre de notre Galaxie et d'un disque de **luminosité** comparable. Il semble que l'on trouve plus d'émission à 511 keV du côté où l'on trouve aussi plus de systèmes binaires X. Cette différence est-elle réelle ? Y-a-t-il un lien de cause à effet ou ces deux constatations résultent-elles simplement d'une asymétrie plus générale de notre Galaxie ? Telles sont quelques-unes des questions auxquelles INTEGRAL doit encore apporter ses lumières dans les années à venir.

#### > François Lebrun

Service d'astrophysique (SAP)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche (CNRS-Université de Paris7-CEA-Observatoire de Paris)  
Laboratoire astroparticules et cosmologie (CNRS-Université de Paris 7- CEA)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

## Fermi Gamma-Ray Space Telescope

Capable de capter un **rayonnement** de très haute énergie, le télescope Fermi est dédié à l'étude de l'accélération des particules. Il doit son nom à Enrico Fermi (1901-1954), physicien italien qui a proposé un mécanisme d'accélération des particules par **onde de choc**, à l'œuvre dans de nombreux astres.

### Domaine spectral

Bande d'énergie comprise entre 20 MeV et 300 GeV.

### Description

- Dimensions : 2 m sur 2 m.
- Poids : 2,8 tonnes.
- Lancement : en 2008, du Centre spatial Kennedy [Cap Canaveral].
- Position : 565 km d'altitude.
- Durée de vie de la mission : 5 ans, voire 5 ans de plus.

### Objectifs scientifiques

Étudier l'accélération de particules auprès :

- des **trous noirs** d'origine stellaire (**micro-quasars**) ;
- des trous noirs géants tapis au centre des galaxies (**quasars**) ;
- des **étoiles à neutrons** (**pulsars**) et de leurs vents de particules ultra-relativistes ;
- des vestiges d'explosion de **supernovae** dont l'onde de choc accélère probablement les **rayons cosmiques** ;
- des explosions d'hypernovae à l'origine des **sursauts  $\gamma$** .

Étudier les nuages interstellaires irradiés par les rayons cosmiques et cachant du gaz noir invisible.

### Instruments

- Un télescope sensible aux rayons  $\gamma$  (20 MeV à 300 GeV) constitué d'un trajectographe en pistes de silicium interlacées de feuilles de tungstène servant à convertir les rayons  $\gamma$  en paires d'**électron-positon**, puis à suivre leurs traces pour reconstituer la direction des rayons  $\gamma$  incidents. Sous le trajectographe se trouve un ensemble de cristaux scintillants en iodure de césium où les paires déposent leur énergie, ce qui permet de remonter à celle du rayon  $\gamma$  d'origine. L'ensemble du dispositif est entouré de plaques de scintillateurs plastiques pour repérer le passage des nombreuses particules chargées qui frappent le télescope, et sont ainsi rejetées, pour ne garder que les rares rayons  $\gamma$ . L'ensemble présente un champ de vue exceptionnel (2 sr), capable de couvrir tout le ciel toutes les 3 heures.
- Un détecteur de sursauts  $\gamma$  fonctionnant de 8 keV à 30 MeV.

### Collaborations

États-Unis, France, Italie, Allemagne, Japon, Suède.



NASA

L'observatoire Fermi dans sa coiffe, avant d'être installé dans la fusée qui l'a mis en orbite.

### Rôle du CEA

Responsabilité totale ou partielle d'éléments fondamentaux de l'analyse des données : catalogue des sources, modèle d'émission de la **Voie lactée**.

Les performances instrumentales de GLAST-Fermi sont à la hauteur des espérances. La carte du ciel obtenue après seulement 3 mois d'observations révèle déjà plus de détails que les 9 années d'observations du précédent satellite EGRET (pour *Energetic Gamma Ray Experiment Telescope*). Des centaines de sources ont été détectées et le piqué des images a été amélioré d'un facteur 2. Le gain en sensibilité montre un ciel très animé, rythmé par les clignotements rapides des pulsars qui tournent sur eux-mêmes des dizaines ou centaines de fois par seconde, par les fréquentes éruptions des quasars au fil des heures et des jours, et par la lente

périodicité des systèmes binaires sur les mois que prend le trou noir ou pulsar pour tourner autour de son **étoile** compagnon. Fermi a déjà découvert les pulsations  $\gamma$  de plusieurs dizaines de pulsars dont certains étaient inconnus à d'autres longueurs d'onde, ainsi que des dizaines de nouveaux quasars non actifs du temps d'EGRET. Le plus lointain, situé à presque 12 milliards d'**années-lumière**, illustre la grande portée du télescope qui a également détecté (jusqu'à 10 GeV) le sursaut  $\gamma$  le plus puissant jamais vu, à 12,4 milliards d'années-lumière.

### > Isabelle Grenier

Service d'astrophysique (SAP)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales  
de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
Unité mixte de recherche astrophysique  
interactions multi-échelles  
(CEA-Université Paris 7-CNRS)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

## HESS



Les quatre télescopes de 12 m de diamètre de la phase 1 de HESS, installés en Namibie.

HESS (pour *High Energy Stereoscopic System*) est un ensemble de télescopes terrestres capables de détecter le **rayonnement gamma** de très haute énergie. Il doit son nom au physicien Victor Hess (1883-1964) qui découvrit, en 1912, que la Terre était bombardée, en permanence, par un flux de particules cosmiques de haute énergie.

#### Domaine spectral

Pour HESS : rayonnement gamma de très haute énergie (100 GeV - 50 TeV) observable depuis le sol par son interaction avec la haute atmosphère qui produit un très faible éclair de lumière bleue, appelé aussi **lumière Cherenkov**. Pour HESS 2 : (20 GeV - 50 TeV).

#### Description

- Dimensions : miroirs de 12 mètres de diamètre pour HESS et de 28 mètres de diamètre pour HESS 2.
- Poids : télescopes de 50 tonnes, caméra d'une tonne (HESS).
- Lancement : pas de lancement.
- Position : au sol, sur le plateau de Khomas (Namibie), près du Gamsberg, à une altitude de 1 800 mètres.
- Durée de vie de la mission : au moins 5 ans.

#### Objectifs scientifiques

Étude des processus d'accélération régnant dans des objets aussi variés que les vestiges de **supernovae** ou les **noyaux** actifs de **galaxies**. Recherche de processus exotiques de production de **photons** tels que les annihilations de **matière noire** sous forme de particules. Pour HESS 2, il s'agira d'accéder à des énergies de quelques dizaines de GeV.

#### Instruments

- Pour HESS : 4 télescopes de 12 mètres de diamètre répartis aux coins d'un carré de 120 mètres de côté. Pour HESS 2, un télescope de 28 mètres de diamètre au centre des quatre précédents.

- Pour HESS : 4 miroirs segmentés (380 petits miroirs sphériques de 60 cm de diamètre) de 2 mètres de diamètre. Pour HESS 2 : 600 miroirs hexagonaux de 1 m<sup>2</sup>.
- Pour HESS : 4 caméras (1,6 m de diamètre, 1,5 m de longueur et d'un poids de 800 kg), chacune dotée de 960 photomultiplicateurs (dispositifs sensibles à la lumière bleue et dont le temps de réponse est extrêmement rapide, de l'ordre de la nanoseconde), couvrant un champ de vue de 5°. Pour HESS 2 : une caméra de 3 tonnes, dotée de 2 048 photomultiplicateurs, couvrant un champ de vue de 3°.

#### Collaborations

Environ 150 membres majoritairement allemands et français.

#### Rôle du CEA

- Électronique du circuit intégré spécifique nommé ARSO (pour *Analogous Ring Sampler*) initialement développé pour l'expérience Antarès. Seuls quelques laboratoires au monde sont capables de travailler sur les mémoires analogiques rapides. Pour les besoins du futur télescope HESS 2, l'ARSO sera remplacé par SAM (pour *Swift Analogous Memory*) fonctionnant sur le même principe mais avec une capacité de lecture de l'ordre de 105 événements/seconde.
- Responsabilité de la conception et de la construction de la carte de déclenchement du niveau deux de HESS 2. Cette carte de déclenchement est un composant crucial pour obtenir des photons de moins de 50 GeV.

Les photons de plusieurs centaines de GeV détectés par HESS proviennent généralement de sources de **rayonnement** non-thermique comme les **nébuleuses** de **pulsars**, les restes de supernovae, les noyaux actifs de galaxies. Leur émission résulte de collisions d'**électrons** et de **positrons** rapides sur

des photons ambiants (**effet Compton** « inverse ») ou de la désintégration de pions neutres produits dans des collisions de protons. Le **spectre** en énergie de ces deux processus atteint son maximum entre quelques GeV et quelques TeV, c'est-à-dire dans les domaines d'énergie couverts par le satellite Fermi et par HESS. De l'étude combinée de leurs données viendra, peut-être, la preuve que les restes de supernovae sont des accélérateurs de protons et donc des sources de **rayons cosmiques**. Grâce à sa **résolution** angulaire, HESS fut le premier à cartographier, en détail, des sources de photons de très haute énergie du plan galactique. La plupart de ces sources sont des restes de supernovae ou des nébuleuses de pulsars. HESS a également découvert de nouvelles classes d'objets cosmiques émetteurs de rayons gamma comme les **étoiles binaires** LS5039 et PSR B1259-63 ou encore l'**amas d'étoiles** jeunes Westerlund 2. D'autres sources plus exotiques de photons de très haute énergie sont également recherchées, dont l'annihilation d'hypothétiques particules de matière noire, prédites par les extensions du **Modèle standard** de la physique des particules. Prévues pour 2010, l'expérience HESS 2 devrait permettre d'accéder à des énergies de quelques dizaines de GeV. Aux quatre premiers télescopes installés au cours de la première phase, démarrée en 2003, s'en ajoutera un cinquième, doté d'un miroir de 28 mètres de diamètre et d'une caméra de 2 000 photomultiplicateurs.

#### ► Jean-François Glicenstein

Service de physique des particules (SPP)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales  
de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)

## EDELWEISS

De l'acronyme Expérience pour détecter, en site souterrain, les *Weakly Interacting Massive Particles* (WIMPS).

Ni sur terre ni dans l'espace, cet instrument destiné à identifier la nature de la **matière noire** (25 % de la masse de l'Univers) a été installé à 1 700 m sous terre, dans le hall du Laboratoire souterrain de Modane (LSM), situé le long du tunnel routier du Fréjus. La raison en est que, selon l'hypothèse la plus consensuelle, la matière noire se composerait de particules nommées **Wimps**. Or, les théories de supersymétrie (SUSY), en physique subatomique, prédisent l'existence d'un nouveau type de particules, les **neutralinos** qui coïncideraient avec les Wimps.

Ces particules fossiles du **big bang**, évanescentes, se concentreraient dans les galaxies en formant un **halo**, notamment autour de notre **Voie lactée** où « baigne » le système solaire et donc la Terre. Si ces particules s'avèrent si difficiles à détecter, c'est en raison de leur très faible interaction avec la matière ordinaire et donc, *a fortiori*, avec les détecteurs. D'où la nécessité de protéger ces détecteurs des parasites, notamment le **rayonnement cosmique** et la **radioactivité naturelle** (celle émanant, entre autres, du corps humain, des roches, des matériaux...). Ce qui explique l'installation souterraine de l'expérience, l'utilisation de matériaux d'une pureté radioactive extrême et le blindage multiple des détecteurs (80 tonnes de plomb et

polyéthylène). Grâce à son cryostat unique au monde par son volume (100 litres) et ses détecteurs ultra-sensibles (des **bolomètres** en **germanium** fonctionnant à 20 mK), les physiciens peuvent mesurer la très faible élévation de la température (à peine un millionième de degré) produite par les **chocs** infimes laissés par les WIMPS. Cette expérience a nécessité la coopération de neuf laboratoires, dont six français, deux allemands et un russe.

### > Gilles Gerbier

Service de physique des particules (SPP)  
Institut de recherche sur les lois fondamentales  
de l'Univers (Irfu)  
Direction des sciences de la matière (DSM)  
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)



Le cryostat d'Edelweiss ouvert pendant le montage du détecteur.