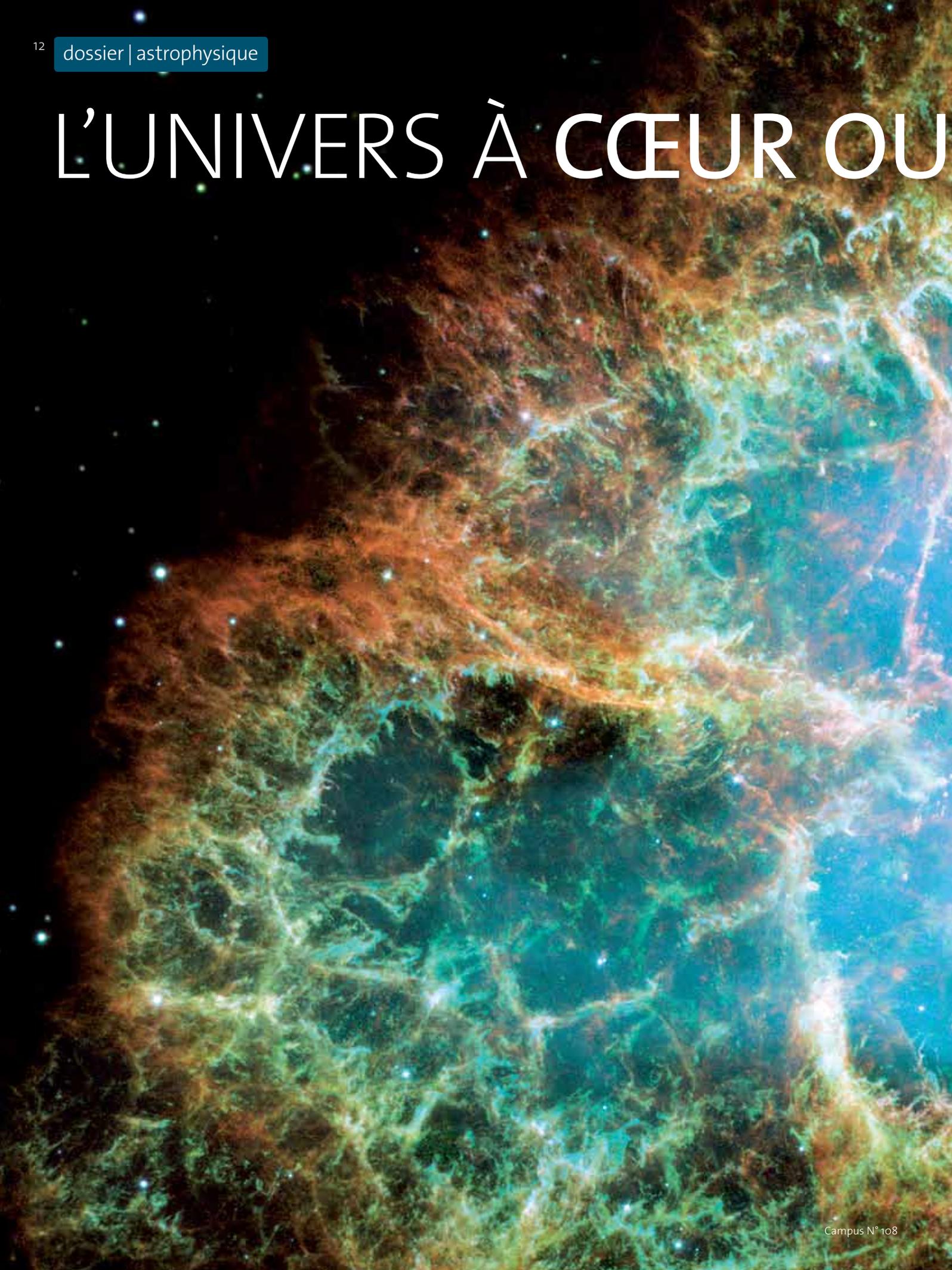


L'UNIVERS À CŒUR OU



VERT

La nébuleuse du crabe est un reste de supernova qui a explosé en 1054. Au centre se trouve un pulsar qui émet dans une très grande gamme de fréquence, depuis les ondes radio jusqu'aux rayons gamma.

CRÉDIT: NASA, ESA, J. HESTER AND A. LOLL (ARIZONA STATE UNIVERSITY)

L'astrophysique des hautes énergies est en plein essor depuis une quinzaine d'années. Les rayons X et gamma, les neutrinos et autres rayons cosmiques permettent de mettre l'univers à nu

De nombreux télescopes étudient des objets exotiques comme les supernovas, les sursauts gamma, les trous noirs supermassifs, les étoiles à neutrons, la matière et l'énergie noires, etc.

L'Université de Genève, via l'ISDC Data Centre for Astrophysics, contribue activement à cet effort en participant à une dizaine de projets internationaux

Dossier réalisé par Anton Vos et Vincent Monnet

LES SURPRISES D'UN UNIVERS V

L'Université de Genève, grâce à son centre ISDC, Data Centre for Astrophysics, attaché à l'observatoire est à la pointe de l'astrophysique des hautes énergies. Elle est aujourd'hui impliquée dans une dizaine de projets internationaux

Depuis une quinzaine d'années, l'astrophysique des hautes énergies est en plein essor. Ceux qui la pratiquent sont des habitués de termes exotiques tels que rayons X «durs», rayons gamma, rayons cosmiques, neutrinos, trous noirs supermassifs, étoiles à neutrons, sursauts gamma, matière et énergie noires, ondes gravitationnelles, etc. L'Université de Genève n'est pas absente de cet effort scientifique international. Elle y participe même très activement. L'ISDC (dont l'acronyme original est *INTEGRAL Science Data Centre*) abrite en effet depuis 1996, sur le site d'Ecogia à Versoix, le centre de récolte et de traitement des données fournies par le satellite INTEGRAL. Il s'agit d'un grand instrument, mis en orbite en 2002 par l'ESA, totalement dédié à l'étude du rayonnement électromagnétique de haute énergie issu des événements les plus cataclysmiques que connaisse l'univers. Forts de cette première expérience, les astrophysiciens genevois sont aujourd'hui impliqués dans plus d'une dizaine d'autres projets destinés à pénétrer quelques-uns des secrets les mieux gardés concernant la structure et les composants de l'univers. Rencontre avec Thierry Courvoisier, professeur au Département d'astronomie de la Faculté des sciences et directeur de l'ISDC.

Il y a une trentaine d'années, l'astrophysique des hautes énergies était encore un domaine relativement confidentiel. Aujourd'hui, il draine des milliards de francs dans le cadre de gigantesques projets scientifiques. Comment cette transformation s'est-elle opérée?

THIERRY COURVOISIER: Elle a été rendue possible grâce à une série d'avancées effectuées depuis les années 1960 et qui ont fondamentalement remis en question la manière dont on envisageait la nature et l'évolution de l'univers. L'une d'entre elles concerne les rayons cosmiques. L'existence de cette pluie de particules et de noyaux atomiques qui s'abat sur la Terre est connue depuis un siècle exactement, puisqu'elle a été découverte en 1912. C'est un

phénomène qui est longtemps resté mystérieux. Puis on s'est progressivement rendu compte que les particules provenaient de l'extérieur du système solaire, voire de l'extérieur de notre galaxie, la Voie lactée. Ensuite, après des décennies d'observations, les mesures sont devenues beaucoup plus précises, mais les mystères se sont épaissis. On s'est ainsi aperçu, au cours des années 1990, qu'il existe des rayons cosmiques mobilisant des énergies considérables. Une seule de ces particules peut en effet véhiculer une énergie comparable à celle d'une balle de tennis bien servie. Or, personne ne comprend comment il est possible de concentrer autant d'énergie dans un corps si petit. Les scientifiques sont pour le moment incapables d'avancer une théorie capable de fournir une explication quant à la source de ces particules ou aux processus d'accélération phénoménale qui sont en jeu.

Comment peut-on repérer ce genre de phénomène?

Les particules qui composent ces rayons sont filtrées par la haute atmosphère. En interagissant avec les molécules de l'air, elles produisent des gerbes de particules secondaires dont le produit parvient jusqu'au sol. C'est à partir de ces éléments fins que l'on peut reconstruire le tout. Cependant, ce genre de phénomène est très rare – les plus énergétiques surviennent environ une fois par kilomètre carré et par siècle – et donc difficile à observer.

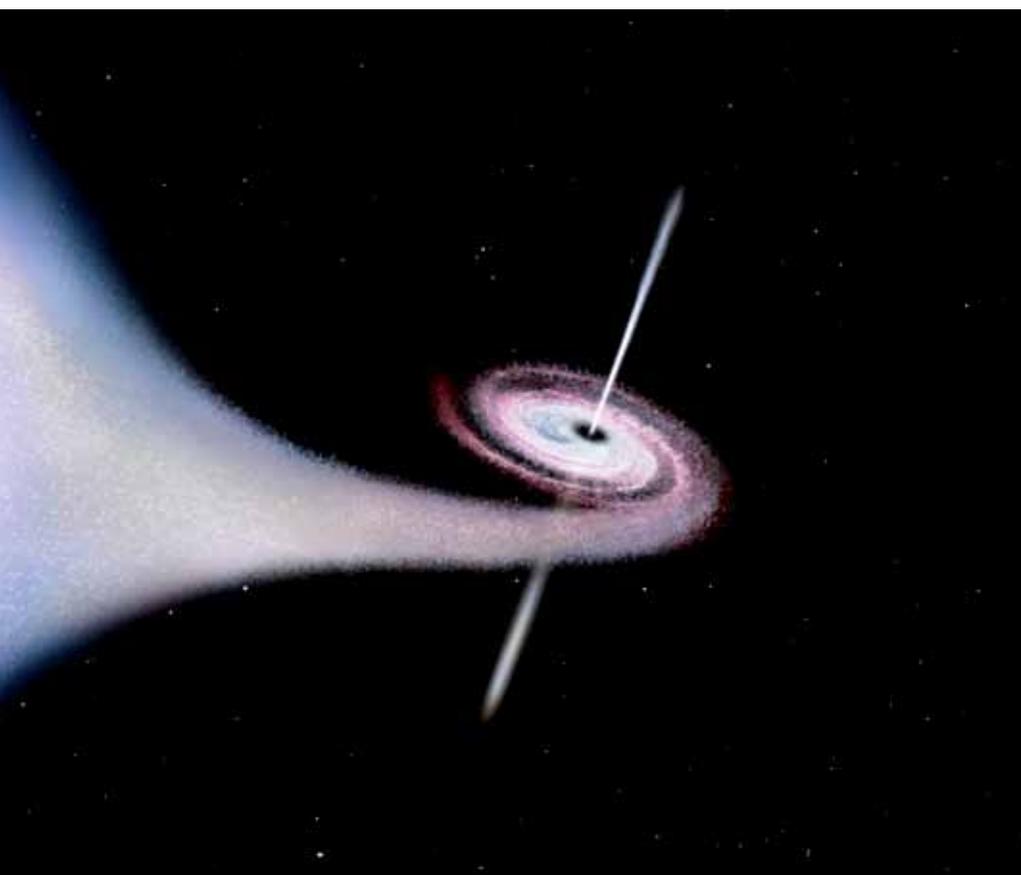
Quelles autres avancées ont eu lieu dans le domaine de l'astronomie des hautes énergies?

On peut citer la découverte de nouveaux objets célestes comme les sursauts gamma, qui sont d'énormes et brèves émissions de rayons gamma (c'est-à-dire des photons encore plus énergétiques que les rayons X) nous parvenant régulièrement depuis un point aléatoire du ciel. Elles proviennent de gigantesques explosions qui ont lieu dans d'autres galaxies que la nôtre mais qui demeurent néanmoins



facilement détectables depuis l'orbite de la Terre. La première mesure fortuite d'un sursaut gamma par des satellites américains en 1967 est le résultat d'observations qui avaient pour but la détection d'éventuelles explosions nucléaires soviétiques. Il a néanmoins fallu attendre les années 1990 pour que l'étude de ces phénomènes commence véritablement. Nous avons aujourd'hui une idée de la nature des événements qui sont à l'origine de ces sursauts (explosion d'étoiles massives ou collision de deux corps très massifs comme des étoiles à neutrons ou des trous noirs) mais ils demeurent largement mystérieux. En plus des sursauts, les astrophysiciens se sont intéressés de plus en plus à des objets exotiques émet-

U AUX RAYONS X



Vision d'artiste du système Cygnus X-1. Du gaz venant d'une étoile supergéante voisine est aspiré et tombe en spirale dans un trou noir. Une petite fraction de gaz est déviée par des champs magnétiques et éjectée dans l'espace dans de puissants jets. Le satellite INTEGRAL a réussi à mesurer de la matière sur le point d'être engloutie par le trou noir.

teurs de rayons X et gamma comme les trous noirs supermassifs, des systèmes binaires comprenant des étoiles à neutrons et des trous noirs, etc. Parallèlement, ils ont également découvert récemment que la structure de l'univers n'était pas celle que l'on pensait jusque-là.

Comment cela?

Il s'est avéré que non seulement la taille de l'univers grandit mais qu'en plus cette croissance, loin de se stabiliser, a plutôt tendance à accélérer. Cette observation a été réalisée

grâce à l'étude de supernovae et a été publiée en 1998. Elle a valu le Prix Nobel de physique 2011 aux cosmologistes Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess et a poussé les physiciens à postuler l'existence d'une énergie noire responsable de cette inflation inattendue et dont la nature exacte nous échappe pour l'instant. Cette énergie noire vient s'ajouter à la matière noire, tout aussi mystérieuse, qui a été introduite pour expliquer le mouvement des galaxies les unes par rapport aux autres tel qu'on l'observe depuis

«Les astrophysiciens se sont intéressés de plus en plus à des objets exotiques comme les trous noirs supermassifs, des étoiles à neutrons, des trous noirs, etc.»

la Terre. Ces deux grandeurs sont d'ailleurs au cœur de la future mission Euclide de l'Agence spatiale européenne (ESA) et à laquelle participe un groupe de l'ISDC (lire en page 20). Avec des sources de rayonnement X ou gamma inconnues il y a encore peu, des sursauts gamma et des trous noirs pleins de mystères et un univers rempli de matière et d'énergie noire dont on ne sait presque rien, l'astrophysique dispose aujourd'hui de tous les ingrédients pour rester une science des plus passionnantes.

Dans quelle mesure l'Observatoire de Genève a-t-il participé à ce renouvellement des connaissances?

L'Université a commencé à s'intéresser de plus près à l'astrophysique des hautes énergies dans les années 1980. Marcel Golay, directeur de l'Observatoire entre 1956 et 1992, a alors pris conscience qu'il existait des développements possibles en astronomie dans des champs d'études très différents de ceux dans lesquels Genève avait de l'expertise jusque-là (l'astronomie stellaire et galactique). C'est dans cette perspective qu'il m'a proposé de venir à Genève pour travailler sur les noyaux actifs des galaxies.

De quoi s'agit-il? ►

CAP sur les astroparticules

Les récentes découvertes effectuées dans le domaine de l'astronomie et de l'astrophysique des hautes énergies posent à la communauté scientifique de nouveaux défis intellectuels.

Pour tenter de les relever, l'UNIGE s'est dotée en mars 2011 d'un Centre d'astroparticules. Baptisée CAP-Genève, cette nouvelle structure regroupe des chercheurs des Départements de physique nucléaire et corpusculaire, de physique théorique et d'astronomie. Utilisant des approches et des outils différents, l'ensemble de ces scientifiques travaille en effet dans des disciplines dont les domaines de recherche se recoupent de plus en plus, comme c'est le cas notamment pour la physique des particules ou pour la physique théorique.

CAP-Genève leur offrira un cadre institutionnel leur permettant de discuter des projets en cours, de présenter les résultats obtenus ou encore de créer de nouvelles synergies qui n'auraient pu être imaginées dans des groupes isolés.

A terme, le CAP-Genève devrait être intégré au Centre des sciences physiques, astronomie et mathématiques qui pourrait voir le jour sur le site des Vernets.

Destiné à renforcer la capacité des chercheurs de l'UNIGE à repousser les limites des mondes connus et à explorer de nouveaux territoires scientifiques, ce futur centre a pour ambition de devenir «un modèle pour l'organisation et le développement de la recherche fondamentale du XXI^e siècle». Il devrait occuper près de 50 000 m². Outre les vastes espaces de travail répondant aux besoins des recherches, il comprendra deux auditoriums de 200 et 400 places ainsi qu'une bibliothèque. Il a été conçu pour recevoir à terme environ 600 collaborateurs et 400 étudiants.

Ces noyaux actifs sont formés en leur centre de trous noirs supermassifs (plus d'un million de masses solaires) dans lesquels une quantité phénoménale de masse tombe sans cesse. Cette chute de matière libère une énorme quantité d'énergie qui est émise sous forme de rayonnement. L'objectif principal de mes recherches est de comprendre comment ce processus fonctionne. Et ce questionnement va de pair avec un intérêt pour d'autres sujets de l'astrophysique.

Pourquoi?

Les objets que nous étudions émettent à travers l'ensemble du spectre électromagnétique. Ils génèrent des ondes radio, des infrarouges, de la lumière visible, des ultraviolets, des rayons X et des rayons gamma. Par conséquent, la palette d'instruments auxquels on doit s'intéresser pour arriver à comprendre leur physique est très large. Certains sont installés au sol mais la plupart sont envoyés sur orbite pour s'affranchir de l'effet perturbateur et absorbant de l'atmosphère. Avec INTEGRAL en particulier, nous nous sommes donc aussi intéressés aux autres types d'objets que ses observations permettaient.

Et ces télescopes ne servent pas uniquement à observer les cœurs de galaxie...

Non, en effet. Pour parvenir à comprendre ce qui se passe dans le cœur d'une galaxie, il faut mettre en place des projets de recherche de très grande envergure avec des budgets qui avoisinent souvent le milliard de francs. Ces projets sont donc conçus de telle sorte qu'ils mettent à disposition des données sur d'autres types d'objets. Ce qui amène de nouvelles découvertes et de nouvelles interrogations. Il y a là un effet boule de neige.

C'est le cas notamment avec le satellite INTEGRAL, lancé en 2002 afin d'observer les rayons X et gamma en provenance de l'univers proche et lointain...

Au moment de son lancement, il n'existait pas d'appareil équivalent à INTEGRAL. C'est le premier satellite d'observation des rayons gamma de cette taille et de cette polyvalence. Nous avons eu la chance de pouvoir abriter le centre mondial de récolte et de traitement des données du satellite, l'ISDC, ce qui nous a pro-

pulsés à la pointe dans la recherche en astrophysique des hautes énergies. Nous recevons, analysons et archivons des données que des chercheurs du monde entier viennent étudier.

Quel bilan peut-on tirer d'INTEGRAL après dix ans de fonctionnement?

Du point de vue scientifique, le bilan est excellent. INTEGRAL a permis de nombreuses découvertes et ouvert de nouveaux champs de recherches. L'un des appareils de mesure monté à bord, l'imageur IBIS, a notamment permis l'identification de nouveaux types de sources de rayons gamma qui déroutent les chercheurs. Les sources dites absorbées, par exemple, sont des astres émettant des rayons X mais qui semblent être entourés par une enveloppe de gaz ou de poussière qui arrête presque toutes les autres longueurs d'onde. On ne les avait jamais observées avant INTEGRAL. D'autres sources inédites brillent durant quelques heures avant de s'éteindre pendant très longtemps. Grâce à un autre appareil installé sur le satellite, les chercheurs ont étudié la présence d'annihilation d'électrons et de positrons au centre de la galaxie (quand la particule et son antiparticule se rencontrent, elles disparaissent en relâchant deux photons très énergétiques). Cette réaction est bien connue des physiciens. Le hic, c'est que nous n'avons aucune idée d'où proviennent ces positrons et ce qu'ils font à cet endroit de la galaxie. Cela dit, grâce à INTEGRAL, nous connaissons maintenant leur nombre et leur température. Finalement, bien que cela ne figurait pas dans ses objectifs principaux, le satellite a beaucoup contribué à une meilleure compréhension des sursauts gamma.

Dans quelle mesure?

INTEGRAL a analysé pas moins de 1500 sursauts gamma depuis 2002. L'un des résultats de ces mesures c'est la remise en question du classement traditionnel de ces sursauts en deux catégories, les courts et les longs, chacune ayant une origine différente. En réalité, un de nos chercheurs qui termine actuellement sa thèse sur le sujet montre qu'il existe des sursauts de toutes les durées, des plus brefs aux plus longs en passant par tous les intermédiaires. Ce qui complique en peu plus l'explication de la nature de ces phénomènes.



NASA/ESA

M82, ou la galaxie du Cigare. Trois images sont superposées. La première, dans le domaine optique, montre une galaxie oblongue (jaune vert) à première vue sereine. La seconde, dans l'infrarouge, montre que la galaxie éjecte du gaz et de la poussière froide (rouge). La troisième, dans les rayons X, montre que le phénomène a chauffé du gaz jusqu'à des millions de degrés.

Quelle est la part propre à Genève dans l'ensemble des découvertes effectuées dans le cadre d'INTEGRAL?

Les chercheurs de l'ISDC sont représentés dans près de la moitié des publications émanant du programme INTEGRAL. L'investissement consenti par la Suisse dans le cadre de cette mission ayant été relativement modeste, les retombées sont donc très satisfaisantes.

Le programme INTEGRAL était censé durer deux ans, or il fêtera son 10^e anniversaire en octobre. Jusqu'à quand cela peut-il continuer?

En fait, même si le programme était officiellement prévu pour deux ans, le satellite était construit pour tenir cinq ans. Nous sommes finalement arrivés à le faire fonctionner deux fois plus longtemps, ce qui est une belle performance. Et ce n'est pas fini. Le programme va en effet se poursuivre au moins jusqu'en 2014. Ensuite, son financement sera rediscuté. Dans tous les cas, à un certain moment,

continuer ne fera plus sens car nous disposerons de nouveaux instruments beaucoup plus performants.

Qu'advient-il alors du centre de contrôle basé à Ecogia?

Le centre de contrôle d'INTEGRAL continuera à fonctionner normalement jusqu'à la fin des opérations. A ce moment, il faudra repasser une fois à travers toutes les données, les calibrer et les archiver de manière définitive. Cela prendra encore au moins deux ans.

Les succès engrangés par l'ISDC vous ont-ils ouvert de nouvelles portes?

Les activités de l'ISDC se sont en effet beaucoup diversifiées. Grâce aux bons résultats que nous avons obtenus, nous sommes souvent les bienvenus dans d'autres projets qui impliquent le même genre de démarches. Nous avons ainsi écrit des logiciels pour le programme Planck dont l'objectif est de mesurer le fond cosmologique de l'univers, c'est-à-dire

le rayonnement le plus ancien qui ait été émis et qui devrait nous permettre notamment de connaître l'âge et la forme de l'univers. Et ce logiciel, qui est une adaptation de celui que nous utilisons à l'ISDC, marche comme sur des roulettes. Par ailleurs, nous sommes impliqués dans plusieurs autres projets qui devraient démarrer ces prochaines années (lire en page 18). C'est à la suite de cette évolution que nous avons transformé notre nom de INTEGRAL Science Data Centre à ISDC Data Centre for Astrophysics.

A quel objectif répond la création du Centre d'astroparticules de Genève (CAP-Genève en mai dernier (lire ci-contre)?

Les nouvelles pistes ouvertes par l'astrophysique autour des trous noirs, des rayons gamma ou de l'énergie noire nous placent dans une espèce d'urgence intellectuelle, alimentée par un désir de comprendre ces problèmes. La difficulté c'est que plus on avance, plus on réalise qu'il existe dans l'univers des phénomènes qui soulèvent des questions d'astrophysique fondamentales et au sujet desquelles nos connaissances sont encore très lacunaires. D'où la nécessité de rapprocher les physiciens des particules, les astrophysiciens des hautes énergies et les cosmologistes. C'est précisément l'objectif du CAP. A terme, il me semble également que les chercheurs du CERN devraient y avoir leur place.

A ce propos, est-il envisageable de se servir de l'espace comme d'un laboratoire géant afin de vérifier les prédictions des théories sur les particules?

Il existe probablement dans l'espace des accélérateurs de particules tels que l'on ne pourra jamais en construire sur Terre. Mais pour le moment, il est très difficile de faire des liens entre ce que l'on observe dans l'espace et ce qui se fait au CERN, par exemple. Pour y parvenir, il faudrait être en mesure de surmonter deux problèmes. Le premier c'est le nombre très faible de particules hautement accélérées qui arrivent jusqu'à nous. Le second c'est la reconstruction de ce qui se passe lorsqu'une de ces particules heurte un noyau dans la haute atmosphère. Cela demeure une opération extrêmement compliquée. ■

D'Euclid à Athena

Les chercheurs de l'ISDC sont impliqués dans une dizaine de projets de recherche internationaux en collaboration avec l'Agence spatiale européenne, mais aussi le Japon et la Chine. Aperçu

► INTEGRAL

Le satellite INTEGRAL, dont le centre de traitement de données est basé à Genève, a été lancé en octobre 2002 sous l'égide de l'Agence spatiale européenne (ESA). Son but est l'observation du ciel dans le domaine des rayons X et gamma. La mission se poursuivra au moins jusqu'en 2014.

► EUCLID

Mission appartenant au programme *Cosmic Vision* (2015-2025) de l'ESA, Euclid est un télescope spatial de 3,1 mètres de diamètre dont l'objectif est de mesurer la distribution de la matière noire dans l'univers et la manière dont cette répartition a évolué depuis le Big Bang. En cours de développement, Euclid devrait être opérationnel à partir de 2019.

► PLANK

Egalement construit sous l'égide de l'ESA, le satellite Plank a été lancé en mai 2009. Son principal objectif est l'étude détaillée du rayonnement de fond cosmologique émis seulement 380 000 ans après le Big Bang (le rayonnement fossile). Ce rayonnement émis il y a 13,7 milliards d'années est un élément clé pour comprendre les constituants fondamentaux de l'univers et son évolution, du big bang à la formation des premières galaxies et des étoiles.

► GAIA

Mission astrométrique elle aussi conduite par l'ESA, Gaïa a pour ambition d'observer plus d'un milliard d'étoiles afin de clarifier la composition, la formation et l'évolution de notre Galaxie, la Voie lactée, mais également apporter des contributions significatives concernant les planètes extrasolaires, le système solaire, les galaxies extérieures et la physique fondamentale. Rassemblant un consortium de 400 chercheurs et ingénieurs, Gaïa constituera l'analogue d'un observatoire complet en orbite. Son lancement est prévu en août 2013.

► FACT

Fruit d'une collaboration entre l'Université de Genève, l'EPFL, l'EPFZ et les universités de Dortmund et Würzburg, le projet FACT repose sur la construction d'une nouvelle génération de télescopes Cherenkov capables d'observer des flashes de lumière produits par les rayons gamma dans l'atmosphère. L'observation de ces flashes, particulièrement brefs, nécessite des caméras sensibles et ultrarapides capables d'enregistrer jusqu'à plusieurs milliards d'images par seconde. Cette technologie est testée depuis un an environ aux îles Canaries. Ce programme vise à mieux comprendre les accélérateurs cosmiques, en particulier les trous noirs super-massifs au cœur des galaxies, qui présentent des variations rapides d'émissions gamma.

► CTA

Le projet CTA (*Cherenkov Telescope Array*), qui regroupe 34 instituts de recherche issus de 14 pays, est une extension de FACT. Il vise à mettre sur pied un grand réseau de télescopes Cherenkov de nouvelle génération sur un site qui reste à déterminer.

► ASTRO-H

Conduite par l'Agence spatiale japonaise, avec la collaboration de la NASA et de l'ESA, la mission Astro H repose sur le développement d'un télescope spatial à rayons X dont le lancement est prévu en 2014. Il constitue la suite directe d'INTEGRAL.

► POLAR

Le programme POLAR vise à placer un détecteur de rayons gamma développé par les chercheurs de l'ISDC sur la station spatiale chinoise actuellement en cours de construction. L'appareil est destiné à mesurer la polarisation des photons émis par les sursauts gamma.

► LOFT

Le *Large Observatory for X-ray Timing* (LOFT) est un projet de télescope spatial à rayons X de l'ESA dont l'objectif est d'observer les trous noirs et les étoiles à neutrons. Il doit notamment permettre l'étude des dernières orbites de la matière autour des trous noirs. Le projet pourrait débuter en 2022 s'il est retenu.

► SPICA/SAFARI

SPICA (*Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics*) est un projet de télescope spatial infrarouge proposé par l'agence spatiale japonaise en collaboration avec l'ESA. L'un de ses instruments de mesure, SAFARI, est un spectromètre imageur en infrarouge dans le développement duquel l'ISDC est fortement impliqué. Son objectif est d'étudier la formation et l'évolution des systèmes planétaires, le cycle de vie de la poussière interstellaire et la formation et l'évolution des galaxies. Le début de la mission est prévu au mieux pour 2018.

► ATHENA

ATHENA est un projet de l'ESA encore en compétition axé sur l'étude des rayons X. Il est actuellement en concurrence avec le projet LISA, centré, lui, sur la mesure des ondes gravitationnelles à l'aide de deux satellites placés à un million de kilomètres l'un de l'autre. Si le premier, dans lequel la participation de l'ISDC est acquise, devait ne pas se concrétiser, les chercheurs genevois seraient très probablement appelés à jouer un rôle dans le second.

► JEM'EUSO

JEM'EUSO est un instrument japonais conçu pour être installé, si ce projet est retenu, sur la Station spatiale internationale. Son but est de mesurer les rayons cosmiques les plus énergétiques en observant depuis l'espace leur interaction avec l'atmosphère.

SUR LA TRACE BLEUE DES RAYONS COSMIQUES

Des photons de très haute énergie frappent l'atmosphère et génèrent une couleur bleue, le rayonnement Cherenkov, que détecteront les télescopes du projet CTA

Les rayons cosmiques ont été découverts il y a un siècle. Issue pour une partie du Soleil et pour le reste du fin fond de l'espace, une pluie intense de particules chargées tombe sans interruption sur la Terre. Pour l'avoir détectée le premier en 1912 dans des voyages en ballon à haute altitude, le physicien autrichien Victor Hess a reçu en 1936 le Prix Nobel de physique*.

Bien que cent ans se soient écoulés depuis leur découverte, une partie de ces rayons cosmiques cachent toujours son origine sous un épais voile de mystère. Il s'agit surtout des particules qui percutent les molécules de l'atmosphère avec la plus grande énergie. Une énergie telle que les astrophysiciens se perdent en conjectures pour imaginer quel phénomène cosmique pourrait bien être capable d'accélérer ces électrons et ces protons à des vitesses aussi phénoménales. Le futur réseau de télescopes CTA (*Cherenkov Telescope Array*), un projet auquel participent des chercheurs de l'Observatoire de Genève, devrait pouvoir soulever un coin du voile. Son entrée en fonction est prévue pour 2018.

BALLE DE TENNIS BIEN SERVIE

«Ces particules ultrarapides possèdent une énergie qui se compte parfois en centaines d'exa-électronvolts, explique Roland Walter, Maître d'enseignement et de recherche au Département d'astronomie et membre du projet CTA. *Autrement dit, elles possèdent une énergie des dizaines de millions de fois plus importante que les protons circulant dans le collisionneur LHC du CERN, le plus puissant jamais construit sur Terre.*» Bref, une seule de ces particules véhicule autant d'énergie qu'une balle de tennis bien servie.

De plus, ces grains élémentaires de matière sont électriquement chargés et leur trajet dans l'univers croise de multiples champs magné-

tiques générés par les étoiles, les galaxies, etc. Ces champs dévient leur course à tel point qu'en arrivant sur Terre, les rayons cosmiques ont perdu presque toute signature permettant de retracer leur lieu d'origine.

C'est pourquoi CTA est conçu pour s'intéresser essentiellement aux rayons gamma, qui sont des photons, ou des grains de lumière. «*Les événements qui sont à l'origine de l'accélération des particules émettent forcément des rayons gamma qui sont eux aussi très énergétiques,*» précise Roland

Walter. L'avantage, c'est qu'au contraire des électrons et des protons, les photons ne sont pas déviés de leur course et arrivent sur Terre en ligne droite. On peut donc localiser leur source dans le ciel.»

cade de réactions qui se termine par une gerbe d'électrons et de positrons (antiélectrons). Ces derniers sont tellement rapides qu'ils se déplacent plus vite que la lumière dans l'air (la vitesse de la lumière diminue lorsqu'elle traverse un milieu autre que le vide et peut ainsi être dépassée). Cela génère une lumière bleue caractéristique, appelée rayonnement Cherenkov. C'est ce flash, extrêmement bref, qui sera détecté par les télescopes de CTA. Pour y parvenir, ils seront capables de prendre des milliards d'images par seconde.

Des simulations permettent de reconstruire, à partir d'un flash de rayonnement Cherenkov, la direction et l'énergie du photon d'origine, souligne Roland Walter.

UNE CENTAINE DE TÉLESCOPES

La technologie qui sera utilisée par CTA est actuellement à l'essai dans le cadre du projet FACT. Installé à La Palma aux Canaries, le télescope est en fonction depuis octobre 2011. CTA, pour lequel il existera deux sites, l'un dans l'hémisphère Sud, l'autre dans le Nord, comptera en tout une centaine de télescopes.

En plus des supernovas, qui sont des explosions d'étoiles, les futures cibles de CTA sont des sources qui sont susceptibles de générer des champs électriques jusqu'à la centaine de milliards de milliards de volts. Parmi les candidats se trouvent les sursauts gamma (explosions phénoménales qui ont lieu dans d'autres galaxies que la nôtre), les magnétars (des étoiles à neutrons possédant un champ magnétique puissant), les quasars (noyaux actifs de galaxie), etc. CTA tentera aussi de détecter des phénomènes encore plus exotiques comme l'annihilation de matière noire, le champ magnétique cosmologique ou encore la structure quantique de l'espace-temps. Joli programme. ■

* Albert Gockel, professeur à l'Université de Fribourg, a découvert en 1909, grâce à des ballons sondes de l'ancêtre de Météosuisse, que la radioactivité produite par la Terre ne diminuait pas avec l'altitude comme prévu. Il en a déduit qu'il existait une source dans l'espace et a ouvert ainsi la voie à la découverte de Victor Hess.



Télescope Cherenkov de FACT, aux îles Canaries.

Walter. L'avantage, c'est qu'au contraire des électrons et des protons, les photons ne sont pas déviés de leur course et arrivent sur Terre en ligne droite. On peut donc localiser leur source dans le ciel.»

Cependant, l'énergie de ces rayons gamma «durs de durs» surpasse de plusieurs milliers de fois celle que les meilleurs télescopes spatiaux actuels peuvent mesurer. En plus, les événements sont extrêmement rares, de l'ordre d'un par minute et par kilomètre carré pour les sources les plus intenses. Impossible à détecter avec un détecteur d'un mètre carré, à l'exemple du satellite FERMI, lancé en 2008 par la NASA.

Pour y remédier, CTA utilise l'atmosphère comme détecteur primaire, soit une surface effective d'environ 100 km². Quand un photon de très haute énergie interagit avec une molécule d'air, il déclenche une véritable cas-

DU CÔTÉ SOMBRE DE L'UNIVERS

L'espace contient de la matière et de l'énergie noires. Sans elles, il serait impossible d'expliquer le mouvement des galaxies, la platitude de l'univers et son expansion accélérée. Le satellite européen Euclid tentera d'y voir plus clair dès 2019

Il y a quelque chose qui cloche avec l'univers. Si l'on s'en tient aux meilleures estimations concernant la quantité de masse et d'énergie qu'il contient, il ne fait aucun doute que les galaxies, leurs bras surtout, tournent trop vite et que leurs trajectoires ne sont pas orthodoxes. En plus, il est trop plat et sa taille augmente trop vite. En d'autres termes, à très grande échelle, les corps et les structures célestes semblent ne plus obéir aux lois de la nature, pourtant maintes fois confirmées. En fait, ce qu'il manque, pour réparer cette discordance, c'est de la masse et de l'énergie. Vingt fois plus que ce que l'on observe, pour être précis.

C'est donc pour réconcilier théorie et observation que les astrophysiciens ont introduit l'existence de la «matière noire» d'abord, puis de l'«énergie noire». Le problème, c'est qu'on ignore totalement de quoi il s'agit et que ces deux grandeurs, comme leurs noms l'indiquent, ne sont visibles par aucun télescope.

En revanche, raisonnent les chercheurs, s'il existe réellement de la matière et de l'énergie noires, elles doivent exercer une influence sur leur environnement, notamment sur la courbure de l'espace et donc, par exemple, sur la trajectoire de la lumière émise par les galaxies lointaines. Détecter cet effet est justement l'un des objectifs d'Euclid, un projet que l'Agence spatiale européenne (ESA) a récemment décidé de réaliser. Le lancement du satellite est prévu pour 2019 et l'Université de Genève fait partie de l'aventure.

Stéphane Paltani, maître d'enseignement et de recherche au Département d'astronomie, est en effet responsable du développement d'une partie de l'instrument VIS (*Visual imager*) d'Euclid, qui produira des images optiques de haute qualité. Il est également chargé de développer un certain nombre d'algorithmes ainsi que de

mettre sur pied le centre suisse de traitement de données d'Euclid. Martin Kunz, chercheur au Département de physique théorique, coordonne, quant à lui, le groupe de travail sur la théorie relative à la matière et à l'énergie noires.

L'origine de la matière noire remonte à plusieurs décennies. C'est le mouvement des étoiles proches puis, surtout, celui des galaxies lointaines qui ont d'abord mis la puce à l'oreille des chercheurs. Leurs vitesses sont en effet bien trop élevées pour être expliquées par la force d'attraction exercée par la masse lumineuse qui les entoure, la seule observable depuis la Terre à l'époque. Depuis que l'on parvient à détecter les gaz interstellaires avec les télescopes X, on a remarqué qu'il existe dix fois plus de gaz que de galaxies. Mais cela ne suffit toujours pas. Pour expliquer les vitesses excessives des galaxies, il faudrait encore dix fois plus de masse.

HALO DE MATIÈRE INVISIBLE

Ensuite, c'est le mouvement des bras des galaxies spirales qui a étonné les chercheurs. La vitesse de rotation de leur extrémité est quasiment aussi élevée que celle des parties internes alors que la mécanique céleste élémentaire prédit qu'elle devrait être beaucoup plus faible. C'est un peu comme si chaque galaxie était englobée dans un halo de matière non visible, représentant à lui seul dans certains cas jusqu'à 90% de la masse de l'ensemble.

A cela s'ajoute un problème plus global: l'univers est désespérément plat. Aussi loin que l'on

Cette image composite d'un amas de galaxies prise par le télescope spatial Hubble représente la preuve la plus convaincante de l'existence de la matière noire. On y voit, en surimpression, un anneau bleu qui est censé représenter la distribution de matière noire calculée par les astrophysiciens à partir de la déformation des galaxies contenues dans l'image.



regarde, aussi finement que l'on mesure, l'espace ne présente aucune courbure détectable. Cette situation, selon les modèles théoriques en vigueur, n'est possible que si la densité de matière et d'énergie de l'univers atteint un seuil critique. Le souci, c'est que les astrophysiciens ont une idée assez précise de cette densité, en tout cas en ce qui concerne la matière ordinaire. Et ce, grâce à la mesure de l'abondance de l'hélium, dont on connaît exactement la proportion par rapport aux autres éléments de l'univers. Il en ressort que les baryons (le terme scientifique qui désigne les particules de la matière ordinaire) ne contribuent qu'à hauteur de 4,5% de cette densité critique. Cela signifie que s'il n'existait que ce type de matière, l'univers aurait une courbure – négative – spectaculaire.

Il n'y a donc pas le choix: pour expliquer la platitude du cosmos, il faut de la matière noire, et en grande quantité. «On ne sait pas ce qu'est

S'il n'existait que de la matière ordinaire, l'univers aurait une courbure spectaculaire

la matière noire, admet Stéphane Paltani. Ce que l'on sait, en revanche, c'est ce qu'elle n'est pas. Elle n'est pas ordinaire, on l'a vu. Elle n'est pas sensible à la force forte, sinon elle exercerait un effet mesurable sur les phénomènes de fusion nucléaire. Elle n'est pas électriquement chargée non plus, sinon elle ne serait pas noire mais visible. On a pensé un temps qu'il pouvait s'agir de neutrinos, mais même s'ils sont très nombreux, ils sont trop légers et trop rapides pour faire l'affaire. Il doit en réalité plutôt s'agir de particules lourdes.»

PARTICULES SUPERSYMMÉTRIQUES

De grands espoirs ont été placés dans la théorie supersymétrique, qui attribue à chaque particule connue une particule supersymétrique. Ces dernières, dont la masse pourrait être suffisante, ont toutefois récemment subi un revers. Les premiers résultats obtenus avec l'accélérateur de particules du CERN, le LHC, ont en effet exclu la validité des théories les plus simples de la supersymétrie. Le mystère reste donc total.

Il s'épaissit même par le fait que l'univers renferme probablement aussi de l'énergie noire. Car il y a encore un point qui turlupine les astrophysiciens, c'est que l'univers, contre toute attente, est en pleine expansion et que cette dernière, loin de se stabiliser, semble bien s'accélérer. «Quelque chose» pousse l'espace à s'agrandir. Et les physiciens l'expliquent par l'introduction du concept d'énergie noire. Selon le consensus actuel, l'univers serait composé, en gros, de 5% de matière ordinaire, de 25% de matière noire et de 70% d'énergie noire.

«L'énergie noire est un concept contre-intuitif, explique Stéphane Paltani. Quand l'univers enflé, au lieu de voir la pression de l'énergie noire qu'il contient diminuer (ce qui serait logique), elle augmente. L'énergie noire ne se dilue pas comme la matière. S'il était possible d'avoir une bouteille d'un litre d'énergie noire et de la vider dans une baignoire de 100 litres, l'énergie noire remplirait toute la baignoire tout en conservant sa densité d'avant.»

Ce concept, qui s'apparente à une pression négative, est autorisé par l'équation principale de la relativité générale qui relie la forme de l'univers à l'énergie qu'il contient. Il se trouve

que l'on peut ajouter à cette équation une constante dite cosmologique. On a longtemps pensé qu'elle devait valoir zéro. Mais avec la prise de conscience que l'univers subit une expansion accélérée, elle pourrait justement prendre une valeur non nulle et témoigner ainsi, de manière mathématique du moins, de la présence de la fameuse énergie noire, qui deviendrait ainsi une propriété intrinsèque de l'univers.

L'énergie noire devrait avoir comme effet, avec le temps, d'accélérer sans cesse l'expansion de l'univers et donc d'éloigner les galaxies les unes des autres. «Notre Voie lactée est un système qui tient bien ensemble par la force de gravitation, précise Stéphane Paltani. Elle ne sera pas écartelée par l'action répulsive de l'énergie noire, qui n'est, pour l'instant en tout cas, pas assez forte pour cela. Celle-ci ne peut avoir d'effet que sur une plus grande échelle, lorsque la densité de matière moyenne devient suffisamment basse. L'effet de la constante cosmologique (ou énergie noire) aurait d'ailleurs été indétectable au tout début de l'univers, quand la densité de matière était encore très importante. En revanche, si l'on se projette plusieurs milliards d'années dans l'avenir, la Voie lactée existera encore sans doute mais, mis à part les Nuages de Magellan, la galaxie d'Andromède, M33 et quelques galaxies naines, pratiquement plus aucune autre galaxie ne sera visible dans le ciel. Les astrophysiciens du futur ne pourront donc jamais comprendre l'univers comme nous le comprenons aujourd'hui. Ils croiront être en son centre, puisqu'il n'y aura plus rien d'autre autour de la Voie Lactée. En tant qu'astrophysiciens, nous vivons juste au bon moment.»

UN MILLIARD DE GALAXIES

La mission d'Euclid consistera à détecter les effets de la présence de la matière et de l'énergie noires. Le satellite mesurera, à l'aide d'un télescope optique, la déformation de l'image de galaxies lointaines, ce qui est la signature de la présence, entre la source et l'observateur, d'une masse assez importante pour être capable de courber l'espace. En réalisant des statistiques sur les clichés de près d'un milliard de galaxies, les chercheurs devraient pouvoir tracer une carte précise de la distribution de la matière noire dans l'univers et reconstituer son évolution dans le temps.

Euclid va aussi mesurer la taille de structures supragalactiques très spécifiques à des distances différentes de la Terre. Comme regarder loin dans l'espace revient à regarder dans le passé, les chercheurs pourront se faire une idée de la variation de la taille de ces structures au cours du temps. Autrement dit, ils pourront retracer l'évolution de l'univers et y déceler l'éventuel effet de la constante cosmologique, c'est-à-dire de l'énergie noire. ■

<http://sci.esa.int/euclid>



NASA, ESA, M. JEE AND H. FORD (JOHNS HOPKINS UNIVERSITY)

POLAR SUR LA STATION SPATIALE CHINOISE

Conçu par des chercheurs genevois pour mesurer la polarisation du rayonnement des redoutables sursauts gamma, le détecteur POLAR a intégré le programme spatial chinois. Il devrait être envoyé dans l'espace en 2014.

Un sursaut gamma est une explosion cosmique qui a lieu en moyenne une fois par jour sur un point aléatoire de la voûte céleste. Il envoie dans l'espace une bouffée brève mais phénoménale de rayonnement de très haute énergie. L'événement est tellement violent que même si son origine est toujours une galaxie lointaine, il est facilement détectable depuis l'orbite terrestre, où il arrive sous forme de rayonnement gamma. Les scientifiques ont proposé plusieurs modèles pour comprendre ce phénomène extrême. Mais malgré toutes les mesures réalisées depuis des années sur ces objets, notamment grâce aux satellites INTEGRAL, HETE-2, SWIFT, FERMI et autres, ils n'en connaissent toujours pas la nature exacte.

Il est possible, toutefois, que le futur détecteur POLAR apporte enfin de précieux éclaircissements au sujet des sursauts gamma. L'appareil, dont le lancement est prévu pour 2014, a été conçu par des chercheurs de l'ISDC Data Centre for Astrophysics, rattaché à l'Observatoire de Genève, en collaboration avec des collègues du Département de physique nucléaire et corpusculaire de la Faculté des sciences. Il doit mesurer la polarisation de la lumière émise par ces explosions cosmiques, une mesure délicate mais dont le résultat permettrait de faire le ménage dans la poignée de modèles se faisant actuellement concurrence sur les tables des physiciens théoriciens.

CAS PARTICULIERS

«On pense que le sursaut gamma précède de peu la formation d'un trou noir, explique Nicolas Produit, chercheur à l'ISDC et concepteur de POLAR. Il peut s'agir de l'effondrement d'une étoile géante, de la collision de deux étoiles à neutrons ou autre. Mais plus les astrophysiciens mesurent des sursauts gamma, plus ils découvrent des cas particuliers qui rendent difficile l'élaboration d'une théorie.»

POLAR, faisant partie du volet humain du programme spatial chinois, relève des affaires militaires dont le contenu est soumis au secret défense

Les mesures traditionnelles des sursauts gamma enregistrent la localisation de la source ainsi que l'intensité et la «couleur» de la lumière émise. En mesurant la polarisation – ou l'absence de polarisation – du rayonnement, POLAR ajoute donc un quatrième paramètre qui doit permettre de se faire une idée de la taille de la source et de la présence d'un champ magnétique structuré ou chaotique.

Deux informations qui, selon le résultat, seront à même d'écarter un certain nombre de modèles théoriques.

«CONTACTS AGRÉABLES»

Réunissant des chercheurs suisses, français et polonais, le projet POLAR possède une autre particularité: il est prévu qu'il soit lancé dans l'espace avec une fusée chinoise avant d'être installé sur la future station spatiale de l'Empire du Milieu, Tiangong 2 (palais céleste). Il s'agit même de la seule expérience étrangère à avoir reçu cet honneur.

«Nous sommes ravis de travailler avec les Chinois, précise Nicolas Produit. Les ingénieurs sont très compétents et les contacts sont très agréables. Par rapport à ses homologues du reste du monde, l'Agence spatiale chinoise est de loin celle qui dispose de la meilleure dynamique actuellement.»

Les seules difficultés viennent du fait que POLAR, étant censé être installé sur la station spatiale, fait partie du volet humain du programme spatial chinois. Et ce volet relève des affaires militaires dont le contenu est soumis la plupart du temps au secret défense.

«Il est très important pour nous de connaître à l'avance les spécificités sur l'environnement direct de POLAR une fois qu'il sera installé sur la station spatiale Tiangong 2, souligne Nicolas Produit. Les ingénieurs chinois nous ont volontiers fourni les niveaux de radiation et d'accélération auxquels sera soumis notre appareil. Mais dès qu'il s'agit de transmettre des plans un peu plus précis de la station juste autour de notre détecteur, le refus est systématique.»

Les chercheurs genevois semblent néanmoins dans les petits papiers de l'Agence spatiale chinoise car cette dernière a émis le vœu de continuer à travailler avec eux pour des expériences qui pourraient trouver une place dans les versions ultérieures – et plus grandes – de la station spatiale. ■

UN FRIGO DANS L'ESPACE

Une équipe genevoise collabore à un projet d'observatoire spatial qui doit être envoyé en orbite en 2014 afin d'étudier le ciel dans le domaine des rayons X. Sa cible principale: les amas de galaxies, soit les plus grandes structures connues de l'univers

Le jour où le satellite Astro-H sera lancé dans l'espace – en 2014 –, on pourra dire qu'un frigo aura été placé en orbite. Ou plutôt plusieurs frigos disposés les uns dans les autres comme des poupées russes. C'est la solution qui a été trouvée pour conserver un minuscule détecteur à quelques fractions de degré au-dessus du zéro absolu (-273,2° C), sa température de fonctionnement. Malgré sa petite taille, cet appareil, un calorimètre, servira à étudier, entre autres, les plus grandes structures de l'univers: les amas de galaxies et, surtout, les gigantesques quantités de gaz dans lesquelles ils baignent.

Astro-H est un projet japonais auquel les Etats-Unis apportent leur contribution. Des chercheurs de l'Observatoire de Genève ont aussi réussi à y mettre un pied. Stéphane Paltani, maître d'enseignement et de recherche au Département d'astronomie, est en effet chargé du développement d'un système destiné à la calibration du calorimètre et au filtrage des rayons X que l'observatoire spatial Astro-H est appelé à détecter tout au long de sa mission.

PLASMA TRÈS CHAUD

Les principales cibles sont les nuages de gaz qui enveloppent les amas de galaxies. Il s'agit en réalité de plasma, c'est-à-dire du gaz ionisé (dont les atomes ont perdu un ou plusieurs électrons). Bien que très ténu, ce plasma, qui représente une masse dix fois plus importante que les galaxies, est très chaud: sa température varie entre 10 et 100 millions de degrés et émet de ce fait un rayonnement dans le domaine des rayons X (*Bremsstrahlung*) que les astrophysiciens connaissent depuis longtemps.

«La nouveauté avec Astro-H, c'est que l'on pourra, pour la première fois, tracer avec une précision inédite les cartes des propriétés physiques (température, abondance...) de ce plasma, explique Stéphane Paltani. Cela nous fournira des informations précieuses sur la formation de ces structures gigan-

tesques et, partant, de l'univers lui-même.»

Le problème, c'est que la réalisation d'une image du ciel vu sous l'angle des rayons X représente un défi technologique.

Contrairement à la lumière visible, les photons très énergétiques ne peuvent en effet pas être déviés de leur course à l'aide de lentilles optiques. Pour connaître leur énergie (ce qui pourrait correspondre à leur «couleur») de manière précise, il faut recourir à un dispositif de diffraction qui a l'inconvénient de réduire considérablement la sensibilité et d'empêcher pratiquement toute résolution spatiale.

CARTOGRAPHIE DU CIEL AUX RAYONS X

Le calorimètre embarqué sur Astro-H permet de résoudre cette difficulté. Il est formé d'un certain nombre de pixels maintenus à une température d'environ 50 millidegrés kelvin (0,05° K). Dès qu'un photon X venu des amas de galaxies lointains frappe l'un d'eux, celui-ci voit, sous l'effet de l'absorption, sa température monter durant un petit laps de temps. Ce réchauffement est mesuré et permet de calculer l'énergie du photon. Un calorimètre permet donc aux astrophysiciens de connaître l'origine de chaque rayon X sur la voûte céleste, son énergie et le moment auquel il a été détecté. Quatre paramètres essentiels pour réaliser une cartographie du ciel.

Le calorimètre qui sera monté sur Astro-H comptera 36 pixels en tout. C'est peu mais c'est quasiment le maximum que la technologie actuelle peut réaliser. «Par le passé, seulement deux autres tentatives visant à placer des calorimètres en orbite ont eu lieu, rappelle Stéphane Paltani. Elles se sont soldées par des échecs. La première était le satellite Astro E qui est tombé dans l'océan juste après son lancement en 2000. Et la seconde, Astro E



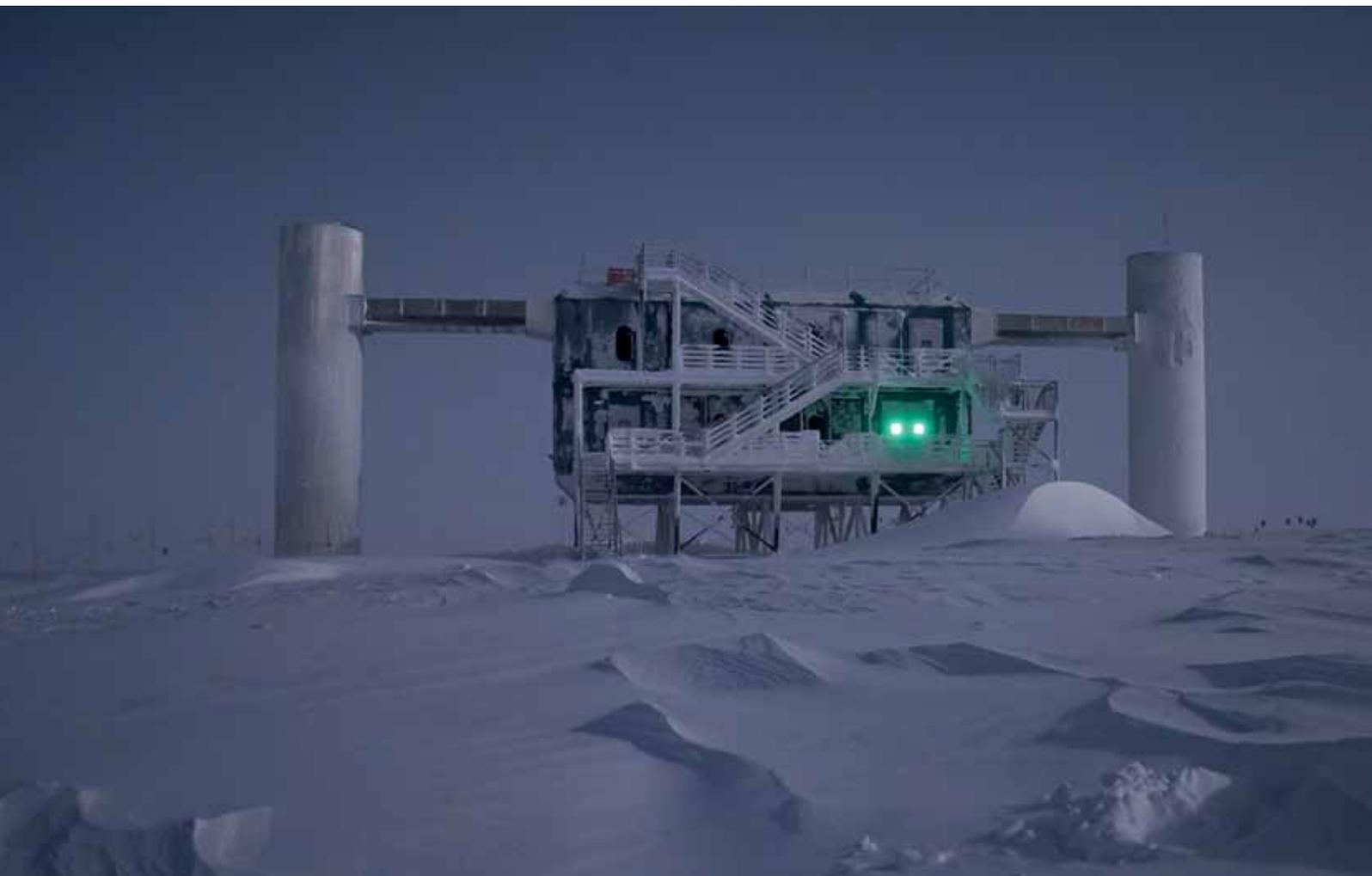
Vue d'artiste d'Astro-H. Au loin, une étoile géante et un trou noir.

Il lancé en 2005, au moment de déployer son dispositif de mesure, a vu l'hélium liquide servant à refroidir le détecteur soudainement s'évaporer, rendant le calorimètre inopérant.»

Pour Astro-H, les ingénieurs ont pris des mesures (dont les cinq appareils frigorifiques concentriques et des circuits de refroidissement actifs et indépendants) pour qu'une telle panne ne se reproduise plus.

La mission japonaise vient aussi à point pour prendre la relève des satellites européens vieillissants, bien que toujours opérationnels, que sont XMM-Newton et INTEGRAL. Le premier, actif dans toute la gamme des rayons X, a été lancé en 1999 et le second, sensible aux rayons X «durs» et aux rayons gamma, a été mis en orbite en 2002. Leurs jours sont désormais comptés et le prochain projet d'étude des rayons X cosmiques dans le programme de l'Agence spatiale européenne (ESA) est Athena qui, s'il est choisi, ne sera pas lancé avant 2022. Astro-H, 100 fois plus sensible qu'INTEGRAL dans le domaine des rayons X durs, vient donc opportunément combler le vide d'une décennie qui menaçait d'apparaître.

Partenaires du projet, les astrophysiciens genevois auront un accès privilégié aux données fournies par le satellite. Ils serviront également de relais pour tous les utilisateurs potentiels d'Astro-H basés en Europe et désireux d'obtenir du temps d'observation ou des réponses à des questions techniques concernant la marche à suivre ou l'analyse de données. Un service précieux pour une mission où la plupart des documents risquent d'être rédigés en japonais. ■



Le IceCube lab, prêt à affronter la nuit polaire.

LES NEUTRINOS QUI VENAIENT DU FROID

Un gigantesque détecteur enfoui dans les glaces du pôle Sud fait la chasse aux particules les plus fantomatiques que l'on connaisse, les neutrinos, dont certains viennent du fin fond de l'univers. Teresa Montaruli, professeure récemment arrivée à Genève, participe à ce projet baptisé IceCube

A deux pas du pôle Sud, en face du nouveau bâtiment de la station américaine Amundsen-Scott, on capture des neutrinos à la pelle. Chaque jour, environ 200 particules sont prises dans le gigantesque filet que les chercheurs ont déployé sous la glace de l'Antarctique. IceCube – c'est le nom du détecteur – est en effet composé de plus de 5000 détecteurs optiques distribués dans un volume de 1 km³ situé entre 1,5 et 2,5 km de profondeur. Il n'en

faut pas moins pour étudier «ces quantités de réel les plus ténues jamais imaginées par l'homme», comme les qualifiait le physicien américain Frederick Reines, codécouvreur du premier neutrino en 1956.

«Les neutrinos ont la particularité de pouvoir traverser l'espace et la matière quasiment sans subir d'interactions», explique Teresa Montaruli, professeure au Département de physique nucléaire et corpusculaire à la Faculté des

sciences et membre du projet IceCube. *Ils ne sont pas absorbés, contrairement aux grains de lumière que sont les photons, ni déviés de leur route par des champs magnétiques, comme le seraient les particules chargées. Créés dans les étoiles, lors des supernovas, aux abords des trous noirs ou encore quand les rayons cosmiques de haute énergie frappent l'atmosphère, les neutrinos représentent donc des messagers de l'univers profond extrêmement précieux.»*

Le neutrino est venu à la connaissance des humains de manière peu conventionnelle. Bien avant d'avoir été vu, son existence est proposée en 1930 par le physicien américain d'origine italienne Enrico Fermi. Les expériences nucléaires d'alors ont en effet mis en évidence la disparition d'une petite quantité d'énergie lorsqu'un neutron se désintègre en un proton et un électron. Pour corriger cette anomalie, Fermi imagine une nouvelle particule, le «neutrino», émise lors de la réaction et qui permettrait de sauver le principe de la conservation de l'énergie (rien ne se perd, rien ne se gagne, tout se transforme).

TROIS SAVEURS

Il faut attendre 1956 pour que Frederick Reines et Clyde Cowan fassent passer le neutrino de la fiction à la réalité. Ils y parviennent en installant un détecteur spécial juste à côté

d'un réacteur nucléaire, gros émetteur de neutrinos. Par la suite, des expériences menées aux Etats-Unis, en Europe et au Japon précisent progressivement le portrait de la particule. Il s'avère qu'elle existe sous trois saveurs (appelées neutrino-électron, neutrino-muon et neutrino-tau), qu'elle n'a pas de charge électrique et que sa masse, bien que non nulle, est très faible. Elle n'est sensible qu'à une seule des quatre forces de la nature, la force faible, celle qui est responsable de certaines réactions nucléaires et dont la portée est très courte – elle ne dépasse guère le rayon du noyau atomique. En d'autres termes, une fois que le neutrino est créé, quasiment plus rien ne l'arrête.

Pour s'en convaincre, il suffit de préciser que chaque centimètre carré de la Terre reçoit, par seconde, plus de 65 milliards de neutrinos, principalement produits par le Soleil. Le volume de la planète étant principalement composé de vide si on l'observe à l'échelle atomique, tous traversent la planète comme si elle était transparente. Seuls quelques-uns, un sur 10 milliards environ pour ce qui concerne les neutrinos solaires de loin les plus abondants, entrent par hasard en collision avec des noyaux atomiques. Ces accidents fortuits provoquent une réaction mesurable.

Les propriétés particulières des neutrinos représentent un avantage indéniable pour

l'astrophysique. Dans le cas d'une supernova, par exemple, ils emportent avec eux environ 99% de l'énergie libérée. De plus, s'ils sont créés au cœur d'une telle explosion ou simplement au centre d'une étoile, ils peuvent s'échapper sans être réabsorbés par la matière environnante. Ils traversent de la même manière n'importe quel nuage de poussière. Les neutrinos cosmologiques qui arrivent sur Terre sont donc souvent des messagers directs d'événements lointains alors que les photons sont en général issus d'un rayonnement secondaire, produit à la surface d'un astre.

«Lors de la supernova de 1987, qui a explosé dans la galaxie voisine du Grand Nuage de Magellan, les neutrinos sont arrivés plusieurs heures avant la lumière visible qui était, elle, emprisonnée durant un certain temps par la matière en expansion, explique Teresa Montaruli. Les neutrinos peuvent donc être utilisés comme une alerte, indiquant aux astronomes qu'une supernova a éclaté. Cela leur laisse le temps de pointer leurs télescopes optiques dans la bonne direction pour observer le phénomène en direct.»

L'avantage des neutrinos, leur furtivité, devient un désavantage quand il s'agit de les détecter. Pour les arrêter, il faut un détecteur gigantesque, contenant beaucoup de noyaux atomiques afin d'augmenter les probabilités de collision. D'où la taille démesurée d'IceCube. Le détecteur du pôle Sud est composé de 86 puits de forage de 2,5 km de profondeur creusés dans la glace et disposés sous forme d'hexagone. Dans chaque puits, un «collier» de 60 détecteurs, espacés de 17 m, a été introduit. Les travaux ont duré cinq ans et, depuis décembre 2010, les 5160 «modules optiques digitaux» remplissent un volume de 1 km³.

L'avantage des neutrinos, leur furtivité, devient un désavantage quand il s'agit de les détecter.

Teresa Montaruli s'est rendue une fois en Antarctique pour assister au forage des puits et à l'installation de détecteurs. Les conditions de travail sont souvent difficiles: même s'il fait beau 24 heures sur 24 durant la «belle saison», le thermomètre ne monte que rarement au-dessus de -15° C (-75° durant la nuit polaire) et le vent balaye sans cesse un plateau gelé situé à plus de 2800 m d'altitude.

COMPORTEMENT EXCENTRIQUE

«Il n'est pas rare qu'en raison du manque d'oxygène et des conditions météorologiques extrêmes, des chercheurs commencent à se comporter bizarrement, de manière un peu excentrique», note-t-elle. La saison s'arrête avec l'unique crépuscule annuel. Le 15 février, tout le monde doit avoir quitté la station, sauf l'équipe réduite qui hiverne. Au-delà de cette date, l'avion muni de skis qui fait la navette avec la côte ne peut plus voler à cause du froid. Ensuite, une nuit de six mois recouvre la Station Amundsen-Scott.

La glace offre un médium intéressant pour la chasse aux neutrinos. Elle est transparente et, à cette profondeur, il fait très noir. Ce point est crucial car lorsqu'un neutrino cosmique rencontre un atome de glace, il produit en général une particule élémentaire spéciale, un muon. Ce dernier, une espèce de gros électron éphémère, possède d'emblée une très grande vitesse qui dépasse celle de la lumière dans la glace (pas dans le vide). Il émet alors une lumière bleue caractéristique (dite de Cherenkov) qui est détectée par les détecteurs d'IceCube.

«L'autre avantage de la glace est qu'elle est très homogène, précise Teresa Montaruli. A cette profondeur, la pression a expulsé toutes les bulles d'air. Seulement, ce que nous n'avions pas prévu, c'est qu'il existe une mince couche de cendre qui traverse IceCube à peu près en son milieu. Il s'agit des retombées d'un volcan qui est entré en éruption il y a des dizaines de milliers d'années et qui perturbent la réponse d'un certain nombre de détecteurs.»

Dirigés vers le centre de la Terre, les détecteurs d'IceCube s'intéressent avant tout aux neutrinos venus de l'espace lointain et ayant traversé sans encombre la planète. Ils étudieront également ceux qui sont produits dans l'atmosphère à la suite de chocs provoqués par des rayons cosmiques (formés de particules chargées comme des protons) de très haute énergie avec les atomes de l'air. Finalement, IceCube pourrait également apporter des éclairages sur la nature de la matière sombre ou encore sur l'habileté curieuse des neutrinos à «osciller», c'est-à-dire à changer spontanément d'identité en passant d'un type de neutrino à un autre. ■