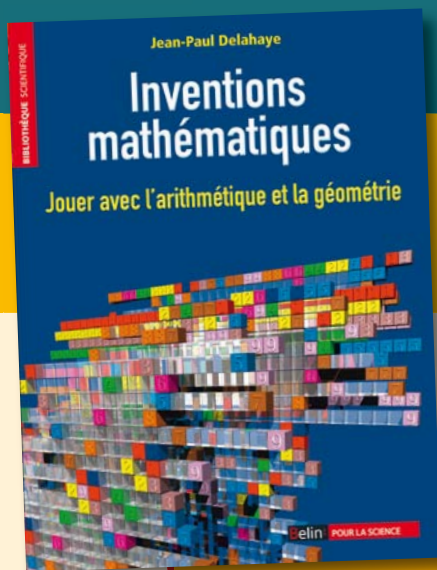


L'univers mathématique

de Jean-Paul Delahaye



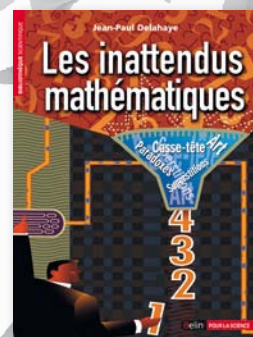
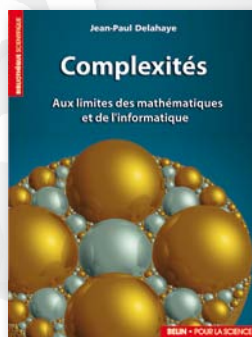
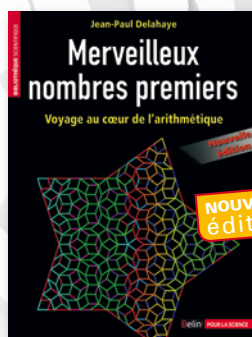
PRIX TANGENTE
2014

Inventions mathématiques

Jouer avec l'arithmétique
et la géométrie

Les mathématiques sont vivantes et l'imagination des chercheurs et des amateurs n'est jamais en repos. Sans cesse, de nouvelles idées conduisent à des inventions qui réjouissent, étonnent et instruisent. Dans ce livre, vous trouverez des figures paradoxales, des jeux classiques comme le Tangram et le cube de Rubik, des problèmes du quotidien tels le découpage d'une pizza ou l'accrochage d'un tableau, des énigmes élémentaires ou complexes, ou encore des images grises où la cryptographie cache des visages et des animaux. Vous serez étonné... à chaque page !

À l'occasion de la parution de son nouveau livre **Inventions mathématiques**, redécouvrez l'ensemble de ses ouvrages parus dans la collection Bibliothèque scientifique.



Retrouvez Jean-Paul Delahaye
chaque mois dans la rubrique
"Logique et calcul" de *Pour la Science* !

Jean-Paul Delahaye est professeur d'informatique à l'Université des sciences et technologies de Lille et chercheur au Laboratoire d'informatique fondamentale du CNRS, à Lille.

VOIE LACTÉE

Le mystère des bulles

Douglas Finkbeiner, Meng Su et Dmitry Malyshev

Par hasard, des astrophysiciens ont découvert des bulles gigantesques d'émission de rayons gamma qui s'échappent du centre de notre Galaxie. D'où viennent ces structures étonnantes ?

L'ESSENTIEL

- Les auteurs ont découvert d'immenses lobes de rayonnement qui culminent à des dizaines de milliers d'années-lumière au-dessus du centre galactique. Ils ont nommé ces structures « bulles de Fermi ».
- Les astronomes ignorent l'origine de ces bulles de Fermi, qui émettent un intense rayonnement gamma.
- Ces bulles pourraient être gonflées par un jet d'énergie issu du trou noir situé au centre de la Galaxie ou par le vent d'une nuée de supernovæ.

géantes

LES BULLES DE FERMI émettent un rayonnement gamma intense (*en rose sur cette vue d'artiste*). Elles ont la forme de lobes se situant de part et d'autre du plan galactique. Leur origine reste une énigme.

Quand la nuit est claire, loin des lumières de la ville, la Voie lactée, notre galaxie, dessine une magnifique traînée blanchâtre sur la voûte céleste. La mythologie grecque l'attribuait au lait versé du sein de la déesse Héra alors qu'Héraclès, enfant, était venu s'y nourrir. Il a fallu attendre Galilée, au XVII^e siècle, pour comprendre que la Voie lactée est constituée d'une myriade d'étoiles. Sa structure a été précisée au fil des siècles et des observations. Nous savons aujourd'hui qu'il s'agit d'une galaxie spirale de plus de 100 000 années-lumière de diamètre et contenant de l'ordre de 200 milliards d'étoiles. Mais notre vision de son architecture doit de nouveau être modifiée.

Les astrophysiciens ont découvert des structures qui surplombent le centre galactique et s'étendent sur des dizaines de milliers d'années-lumière. Si ces lobes lumineux – que nous nommons bulles de Fermi – sont passés inaperçus pendant si longtemps, c'est parce qu'ils brillent surtout dans le domaine des rayons gamma, auxquels l'atmosphère terrestre n'est pas transparente.

Nous ne savons pas encore ce qui crée ces bulles ni même de quoi elles sont faites. Elles semblent cependant régies par des processus se déroulant près du centre de la Voie lactée, une région chaotique où un trou noir supermassif brasse des tourbillons de gaz brûlant, tandis que de violentes supernovæ – des explosions d'étoiles massives – s'y produisent fréquemment.

Une découverte inattendue

Beaucoup de découvertes sont fortuites, et cela a été le cas avec les bulles de Fermi. Mais maintenant que nous les avons trouvées, nous avons commencé à répertorier avec soin leurs caractéristiques. Les bulles géantes de la Voie lactée promettent de révéler des informations inédites sur la structure et l'histoire de la Galaxie.

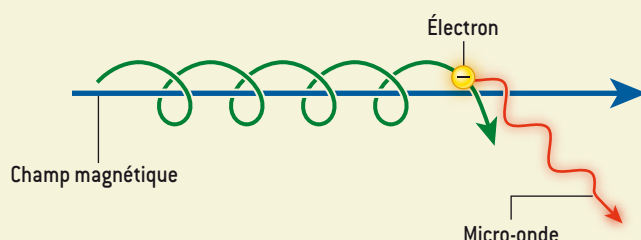
Le premier indice que quelque chose d'inattendu se déroulait au centre de la Voie lactée est venu non pas des rayons gamma, mais des micro-ondes. C'était en 2003, et je (D. Finkbeiner) travaillais sur les données du satellite WMAP (*Wilkinson Microwave*

Ron Miller

Le travail des astrophysiciens qui étudient l'espace interstellaire consiste principalement à déterminer l'origine du rayonnement électromagnétique qu'ils détectent. Les processus d'émission de rayonnement décrits ci-dessous ont tous les trois été pris en considération dans les travaux des auteurs sur les bulles de Fermi de la Voie lactée.

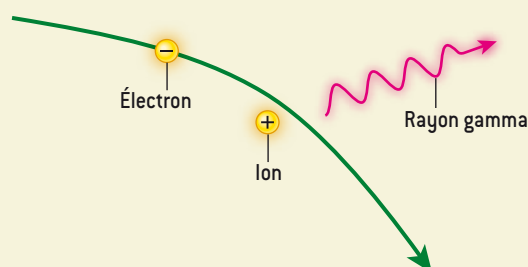
Rayonnement synchrotron

Quand une particule chargée, un électron par exemple, change de direction, elle subit une accélération et émet un rayonnement dit synchrotron. Dans la partie centrale de la Voie lactée, de forts champs magnétiques confèrent une trajectoire hélicoïdale aux électrons, qui émettent un rayonnement synchrotron, essentiellement dans la gamme des micro-ondes dans ce cas.



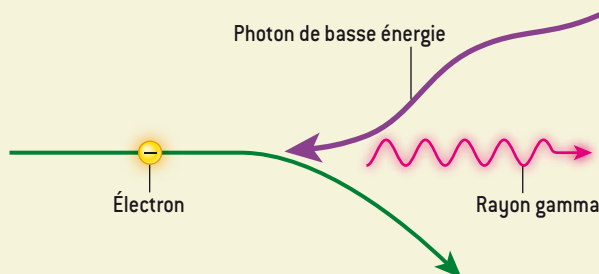
Le rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)

Si un électron énergétique passe à côté d'une autre particule chargée, l'électron ralentit souvent, perdant de l'énergie dans le processus. Cette énergie est libérée sous la forme d'un rayonnement continu dit de freinage. Ce processus produit en particulier des rayons gamma.



Diffusion Compton inverse

Un électron qui traverse la Galaxie peut aussi interagir avec un photon à proximité, en le heurtant de front. Ce dernier repart alors avec une énergie bien supérieure à celle qu'il avait initialement et devient, par exemple, un rayon gamma.



Anisotropy Probe). J'étais alors à l'Université Princeton, et j'étudiais comment la poussière interstellaire obscurcit ce qui nous intéressait principalement dans les données de WMAP : le fond diffus cosmologique, un rayonnement émis par l'Univers quand il était âgé de 370 000 ans et qui nous parvient aujourd'hui sous la forme de micro-ondes. La poussière est intéressante en elle-même, mais, pour un cosmologiste, elle est l'équivalent des taches sur un pare-brise : quelque chose à soustraire des données.

Un autre signal parasite était aussi à éliminer, celui des particules énergétiques – tels les électrons – qui se propagent à grande vitesse dans la Galaxie. Ces particules émettent un rayonnement qui se mélange au rayonnement du fond diffus cosmologique. En 2003, les astronomes avaient une compréhension assez détaillée de ces signaux, mais quelque chose n'allait pas. J'arrivais à modéliser l'essentiel de l'émission galactique, mais quand j'essayais de la soustraire dans la partie centrale de la galaxie, il y avait toujours un excès résiduel. J'ai surnommé « brume de micro-ondes » ce reliquat de signal (*microwave haze* en anglais).

Une brume persistante

Ce signal provenant du centre de la Galaxie n'avait pas d'explication connue, mais plusieurs groupes d'astrophysiciens ont rapidement avancé des idées. Selon la plus fascinante d'entre elles, cette brume trahissait la présence de matière noire. Personne ne connaît, aujourd'hui, la nature de la matière noire ni ses caractéristiques précises, en dehors du fait qu'elle exerce une influence gravitationnelle sur la matière ordinaire. La matière noire devrait en particulier s'accumuler dans la région centrale de la galaxie. Sa densité y serait alors assez élevée pour que des particules de matière noire entrent parfois en collision et s'annihilent, créant ainsi des paires particule-antiparticule, des paires électron-positron par exemple.

Même si nous ne pouvons pas détecter la matière noire, nous devrions être capables d'observer le résultat de ces annihilations. Les particules chargées se déplacent à grande vitesse et changent de direction au gré des champs magnétiques ambiants. Elles devraient alors émettre un rayonnement dit synchrotron, caractéristique des particules chargées dont la trajectoire est courbe (voir l'encadré ci-contre).

La brume de micro-ondes que nous observons pouvait être un artefact du rayonnement synchrotron engendré par l'annihilation de la matière noire. Mais comment en être certain ? Les électrons produisant les micro-ondes synchrotron devraient se manifester d'une seconde façon : ils interagiraient aussi avec les photons présents dans cette région et leur communiqueraient de l'énergie pour en faire des rayons gamma de haute énergie, dans un processus dit de diffusion Compton inverse (voir l'encadré page 52).

Un consensus est rapidement apparu : si la brume de micro-ondes était due à des électrons très énergétiques, nous devrions aussi trouver des rayons gamma. Nous avons alors utilisé les données du télescope spatial *Fermi*, conçu spécifiquement pour détecter les rayons gamma (voir l'encadré page 54).

Les mesures du satellite *Fermi* ont été rendues publiques en août 2009. Avec mon collègue Gregory Dobler, nous avons analysé ces données pour établir nos premières cartes en rayons gamma de la Voie lactée. Nous avons effectivement trouvé un excès diffus de rayons gamma au centre de la Galaxie qui semblait correspondre à la brume de micro-ondes. Avec d'autres physiciens, nous avons écrit un article établissant un lien entre ces signaux et nous affirmions qu'ils étaient probablement tous les deux la conséquence de l'existence d'une population d'électrons très énergétiques au centre de la Galaxie, mais nous ne faisons aucune hypothèse quant à la source de ces électrons.

En octobre 2009, j'étais dans mon bureau en train de mettre à jour certains résultats de notre premier article avec les plus récentes

■ LES AUTEURS

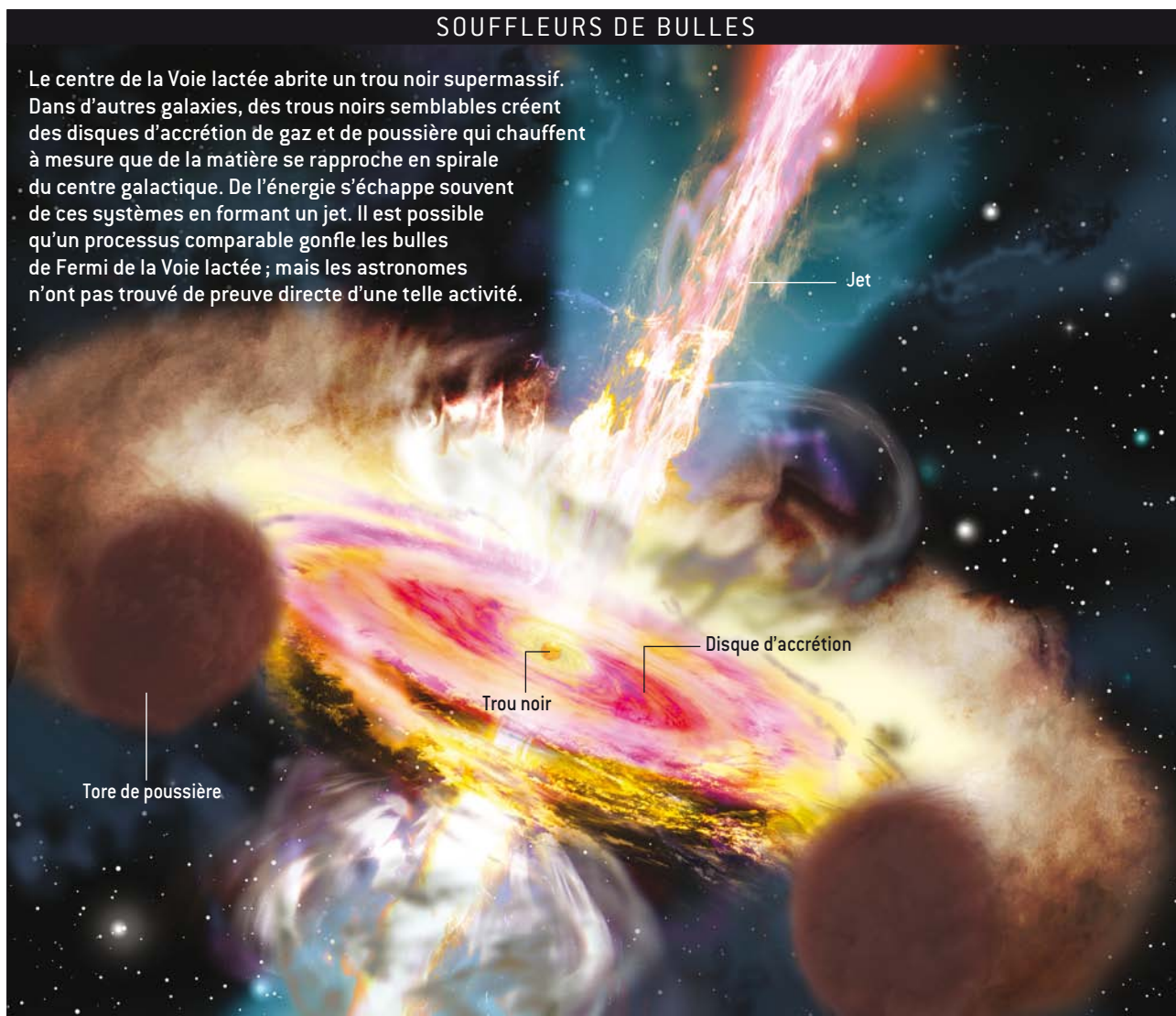
Douglas FINKBEINER est professeur d'astronomie et de physique à l'Université Harvard. Il est membre de l'Institut de théorie et de calcul au Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian.

Meng SU est postdoctorant à l'Institut de technologie du Massachusetts et à l'Institut Kavli d'astrophysique et de recherche spatiale.

Dmitry MALYSHEV est postdoctorant à l'Université Stanford et au Laboratoire de l'accélérateur américain SLAC. Il est membre de l'équipe du télescope spatial *Fermi*.

SOUFFLEURS DE BULLES

Le centre de la Voie lactée abrite un trou noir supermassif. Dans d'autres galaxies, des trous noirs semblables créent des disques d'accrétion de gaz et de poussière qui chauffent à mesure que de la matière se rapproche en spirale du centre galactique. De l'énergie s'échappe souvent de ces systèmes en formant un jet. Il est possible qu'un processus comparable gonfle les bulles de Fermi de la Voie lactée ; mais les astronomes n'ont pas trouvé de preuve directe d'une telle activité.



Ron Miller

données disponibles de *Fermi* quand j'ai remarqué que les mesures initiales des rayons gamma dessinaient un vague contour, au-delà duquel le signal diminuait rapidement.

En astronomie, des limites nettes sont généralement associées à des événements transitoires. Par exemple, quand une étoile explose en supernova, l'onde de choc dessine un bord net en se propageant puis, avec le temps, la structure s'estompe.

Mais dans le scénario de la matière noire, nous n'avons pas affaire à un phénomène transitoire et le rayonnement gamma issu de l'annihilation de ces mystérieuses particules devrait suivre la densité de matière noire et décroître progressivement à mesure que l'on s'éloigne du centre galactique.

Dans le premier lot de données de *Fermi*, les contours étaient mal définis et pouvaient

être interprétés comme du bruit de fond dans le signal. Mais ils étaient toujours présents dans les nouvelles données, et je commençais à me poser des questions. J'ai montré ces contours à mes étudiants en thèse Meng Su et Tracy Slatyer, qui furent aussi d'avis qu'ils étaient bien réels. M. Su s'est alors mis au travail pour déterminer la forme exacte des contours. En quelques jours, nous avons changé d'avis quant à leur interprétation. La matière noire était disqualifiée. Les bulles entraient en scène. En mai 2010, M. Su, T. Slatyer et moi soumettions un nouvel article décrivant ces structures et les nommions « bulles de Fermi ».

Même si personne ne s'attendait à trouver de grosses bulles jaillissant sur des dizaines de milliers d'années-lumière hors du plan de la Voie lactée, ce n'était, en y réfléchissant

après coup, peut-être pas si incroyable que cela. De nombreuses autres galaxies présentent elles aussi des bulles. Nous pouvons les voir en rayons X et en ondes radio, et si nous disposions de meilleurs télescopes à rayons gamma, nous les verrions probablement briller aussi dans cette portion du spectre électromagnétique.

Nous comprenons les processus à l'origine des bulles dans nombre de ces galaxies. Dans certains cas, les bulles ont pour origine un trou noir géant, souvent d'une masse équivalente à plusieurs milliards de soleils, au centre de la galaxie. Quand de la matière tombe vers le trou noir, elle se met à tourbillonner comme l'eau qui s'écoule d'une baignoire. Ce tourbillon de gaz et de poussière brûlants crée des champs magnétiques intenses qui entraînent des jets de rayonnement et de particules cosmiques perpendiculaires au plan galactique.

Nous savons que la Voie lactée abrite elle aussi un trou noir supermassif en son centre, mais nous n'avons jamais observé un quelconque jet puissant de rayonnement intense émis de son centre. Ainsi, nous n'avons pas de preuve directe que c'est ce processus qui gonfle les bulles de Fermi.

Un œil braqué sur les rayons gamma

L'atmosphère terrestre bloque les rayons gamma, dont l'énergie est des milliards de fois supérieure à celle de la lumière visible. Pour les observer directement, les astrophysiciens utilisent des télescopes spatiaux.

Le télescope spatial *Fermi* est l'observatoire de rayons gamma le plus puissant jamais mis en orbite. Il comporte deux instruments principaux : un moniteur de sursauts qui surveille l'ensemble du ciel à l'affût de traces de bouffées transitoires de rayons gamma, et le LAT (*Large Area Telescope*), qui est le détecteur de rayons gamma doté de la plus grande sensibilité et de la meilleure résolution jamais envoyé dans l'espace.

Le LAT est différent des télescopes optiques : il n'a ni miroirs ni lentilles. Il fonctionne plutôt comme une expérience de physique des particules. Chaque photon gamma incident qui interagit avec un noyau atomique à l'intérieur du télescope est transformé en un positron et un électron. Ces particules sont alors suivies à

travers des détecteurs embarqués et un calorimètre mesure leur énergie. Au sol, les astrophysiciens utilisent ces données pour reconstruire la direction et l'énergie du rayon gamma initial.

La plupart des télescopes ne peuvent couvrir qu'une minuscule fraction du ciel à un instant donné, et les astronomes se donnent beaucoup de mal pour déci-

der quelles parties du ciel observer. La concurrence pour le temps de télescope est rude, et il n'est généralement pas possible d'observer de larges bandes de ciel dans lesquelles on n'attend rien de particulièrement intéressant. En revanche, *Fermi* a un champ de vue qui couvre un cinquième du ciel, ce qui permet d'observer l'intégralité de la voûte céleste toutes les trois heures. Cette couverture complète du ciel donne aux astronomes la chance de trouver d'immenses structures peu lumineuses telles que les bulles de Fermi.

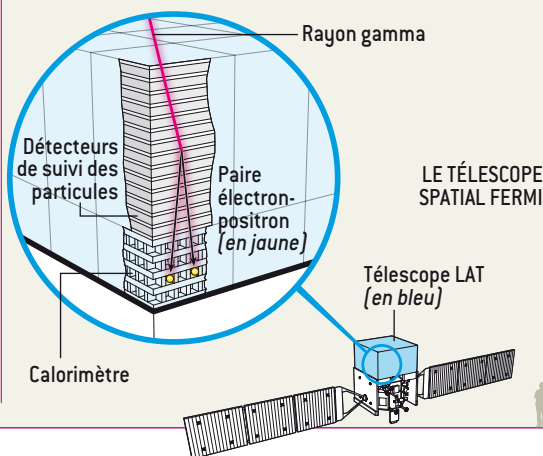
- D. F., M. S. et D. M.

Un jet de lumière galactique

Par ailleurs, ce que nous pouvons voir dans la Galaxie est un nuage de gaz, nommé courant magellanique, qui forme une arche très haut au-dessus du centre galactique. Si un rayonnement intense l'atteignait, il arracherait temporairement les électrons des atomes du nuage. Et en se recombinant, les électrons et les ions produiraient ce qu'on nomme un rayonnement de recombinaison.

Or c'est ce que les astronomes ont trouvé. Il est possible qu'un épisode intense d'accrétion autour du trou noir central de la Galaxie se soit produit il y a environ un million d'années ; il aurait engendré des jets de haute énergie et du rayonnement ultraviolet, qui auraient perturbé les électrons du courant magellanique. Cet événement aurait pu créer les bulles de Fermi.

Les observations de certaines galaxies, telle M82, ouvrent une seconde piste : ces galaxies présentent des bulles qui résultent d'une intense activité de formation d'étoiles près de leur centre. Dans les pouponnières stellaires, il se forme des étoiles de toutes tailles. Plus une étoile est massive, plus elle consomme vite son combustible nucléaire.



Quand le combustible se fait rare, le cœur de l'étoile s'effondre et libère une énorme quantité d'énergie qui arrache les couches externes de l'étoile dans une explosion de supernova, pouvant laisser derrière elle une étoile à neutrons ou un trou noir. Ces supernovæ créent un vent de particules qui peut gonfler des bulles autour d'un centre galactique.

Nous savons que le centre de la Voie lactée a été une région de formation stellaire intense dans un passé proche. Plusieurs milliers d'étoiles d'à peine six millions d'années entourent la région du trou noir central. Des étoiles suffisamment massives formées à la même période auraient eu le temps d'exploser en supernovæ. Elles auraient alors entraîné un vent de gaz chaud s'élevant de la partie centrale de la Galaxie, un souffle assez puissant pour gonfler les bulles.

Comme nous le voyons, l'histoire des bulles de Fermi est étroitement liée à l'histoire et à l'évolution de la Voie lactée. Les bulles peuvent nous permettre de comprendre les processus physiques par lesquels les trous noirs attirent la matière

■ BIBLIOGRAPHIE

A. Franckowiak et S. Funk, **Giant gamma-ray bubbles in the Milky Way**, *Physics Today*, vol. 67, pp. 60-61, juillet 2014.

W. Atwood et al., **Fermi : une fenêtre sur l'Univers extrême**, *Dossier Pour la Science*, n° 71, avril-juin 2011.

Meng Su et al., **Giant gamma-ray bubbles from Fermi-LAT : Active galactic nucleus activity or bipolar galactic wind ?**, *The Astrophysical Journal*, vol. 72(2), pp. 1044-1082, 2010.

environnante, et comment les rayons cosmiques de haute énergie interagissent avec le gaz interstellaire. Bien qu'il existe des structures semblables aux bulles de Fermi dans d'autres galaxies, les bulles de la Voie lactée permettent d'étudier ces systèmes de plus près.

L'une des propriétés les plus extraordinaires de ces bulles est qu'elles sont énormes et brillantes en rayons gamma, mais presque invisibles aux autres fréquences. Nous espérons que les nouvelles données du satellite *Planck*, qui a cartographié le rayonnement micro-onde sur l'ensemble du ciel, apporteront des indices importants. Nous essayons aussi de cartographier les bulles en rayons X, mais le champ de vue réduit des instruments actuels représente un sérieux défi pour des structures aussi vastes.

Après la découverte par Galilée de la nature de la Voie lactée, les astronomes ont mis trois siècles pour comprendre que notre Galaxie n'en est qu'une parmi des milliards d'autres. Avec un peu de chance, nous mettrons moins longtemps à comprendre la signification des bulles de Fermi. ■

france culture **C'EST POUR VOUS**

LA MARCHÉ DES SCIENCES

AVENTURES SAVANTES AU FIL DE L'HISTOIRE
AURÉLIE LUNEAU / JEUDI 14H - 15H

EN PARTENARIAT AVEC **POUR LA SCIENCE**

écoutez, réécoutez et podcastez l'émission sur franceculture.fr

QR code and social media icons (Facebook, Twitter)

TRÉSORS de la Terre

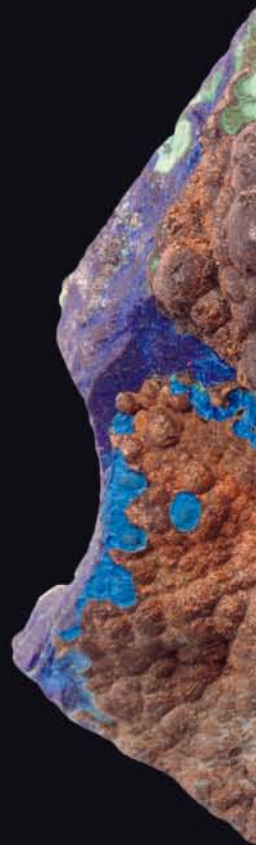
La Galerie de minéralogie du Muséum,
à Paris, rouvre ses portes au public
avec une exposition de plusieurs centaines
de ses plus beaux spécimens.
Aperçu sur quelques-uns de ces joyaux.

Maurice Mashaal

Parmi les plus importantes au monde, la collection de minéralogie du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, est riche de près de 130 000 spécimens. Le public va pouvoir en admirer certains des plus beaux : après une fermeture de dix ans pour travaux de rénovation, la Galerie de minéralogie a rouvert ses portes le 19 décembre 2014 en exposant environ 600 échantillons de minéraux et de météorites.

Le choix des pièces s'est fait sur des critères esthétiques, scientifiques ou historiques. Les visiteurs pourront contempler des minéraux bruts, des gemmes taillées ou non, une vingtaine de cristaux géants, des joyaux historiques tels que le Grand saphir de Louis XIV, des objets sculptés, des tables florentines... Un échantillonnage qui reflète la grande diversité de la collection de minéralogie, constituée et enrichie depuis près de quatre siècles grâce à des achats, des expéditions naturalistes, des dons ou des opérations de mécénat.

Cette collection et celles de géologie (quelque 334 000 spécimens de roches, 4 000 morceaux provenant de 1 500 météorites, un total de huit kilomètres de carottes de sédiments) sont conservées pour leur majeure partie dans la Galerie de minéralogie [et de géologie]. Ce bâtiment long de près de 200 mètres et datant des années 1830 est le premier, en France, à avoir été construit pour servir de musée. Sa réouverture au public n'est que partielle, l'espace de l'actuelle exposition n'occupant qu'une petite partie (250 mètres carrés) de la Galerie. Pour le reste, il faudra patienter encore quelques années ! ■



AZURITE ET MALACHITE

Cette pièce d'une dizaine de centimètres a été polie pour mettre en valeur les structures concentriques formées par l'azurite, bleue, et la malachite, verte. L'échantillon provient du gisement de Morenci, dans l'Arizona. Il fait partie de la donation Pierpont Morgan, un ensemble de plusieurs centaines de minéraux américains offerts au Muséum au début des années 1900 par John Pierpont Morgan (1837-1913), magnat de l'acier et du transport maritime, et qui fut propriétaire du *Titanic*.

Sauf mention contraire, toutes les photographies sont de Bernard Faye/MHN