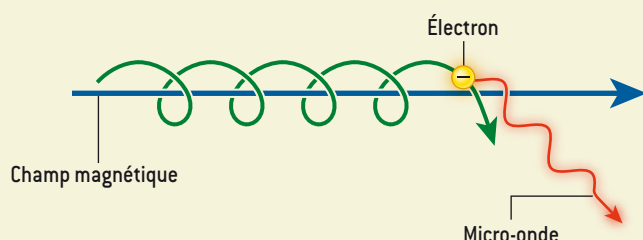


Le travail des astrophysiciens qui étudient l'espace interstellaire consiste principalement à déterminer l'origine du rayonnement électromagnétique qu'ils détectent. Les processus d'émission de rayonnement décrits ci-dessous ont tous les trois été pris en considération dans les travaux des auteurs sur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

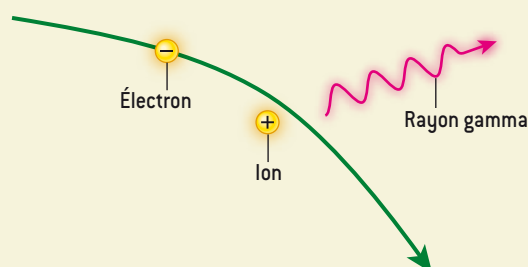
Rayonnement synchrotron

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.



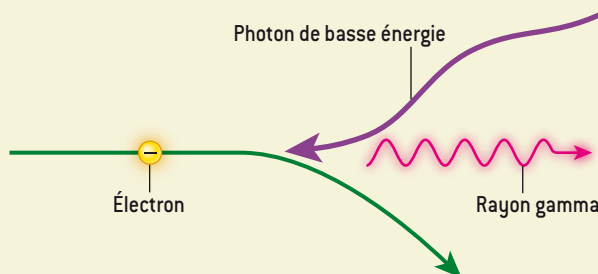
Le rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)

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

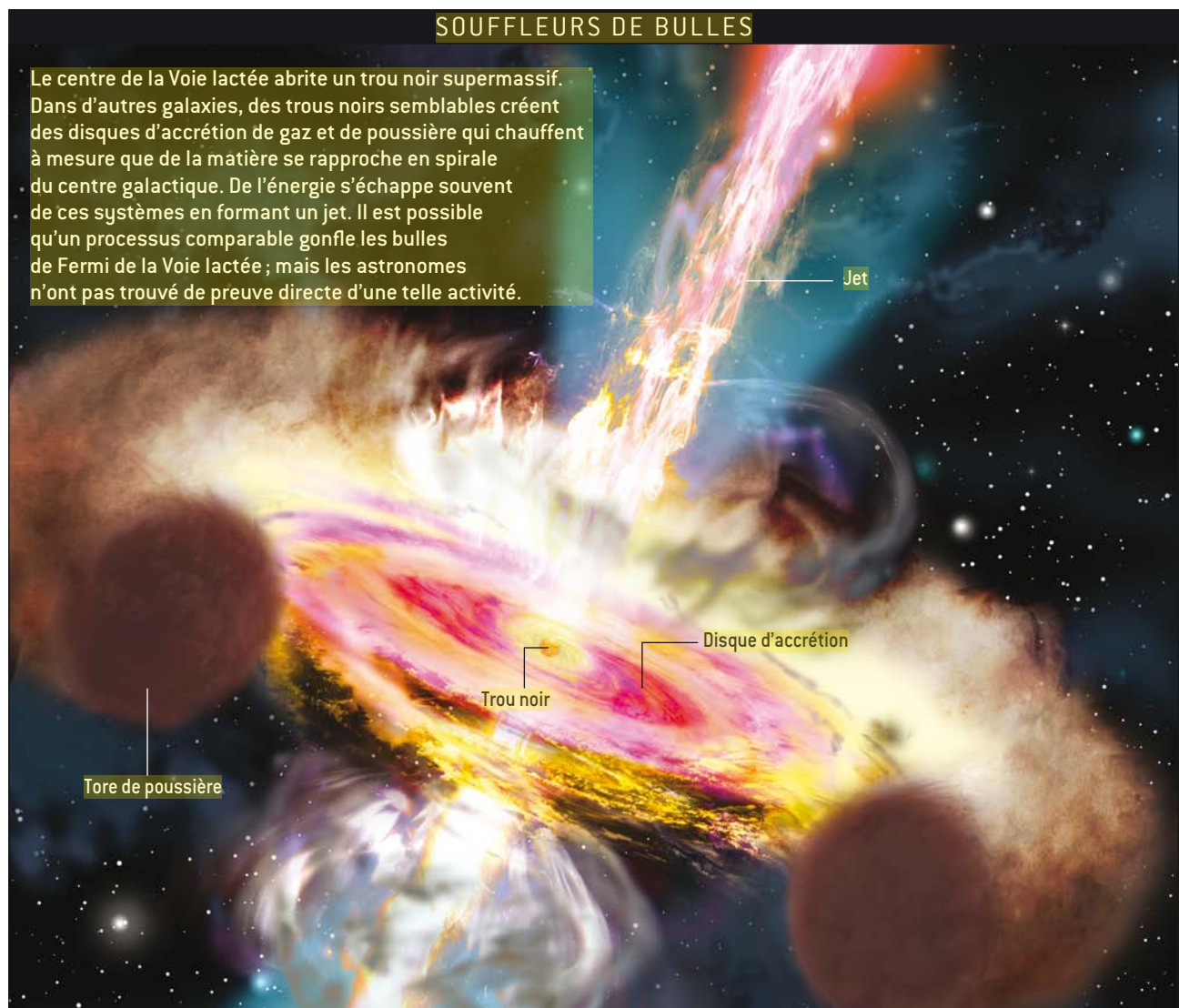
Douglas FINKBEINER est professeur d'astronomie et de physique à l'Université Harvard. Il est membre de l'Institut de théorie et de calcul au Centre d'astrophysique Harvard-Smithsonian.

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.



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 avions 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.

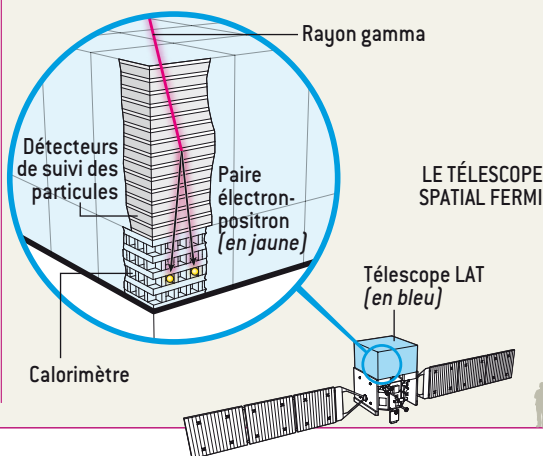
Le LAT est différent des télescopes optiques : il n'a ni miroirs ni lentilles. Il fonctionne plutôt comme une expérience de physique des particules. Chaque photon gamma incident qui interagit avec un noyau atomique à l'intérieur du télescope est transformé en un positron et un électron. Ces particules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