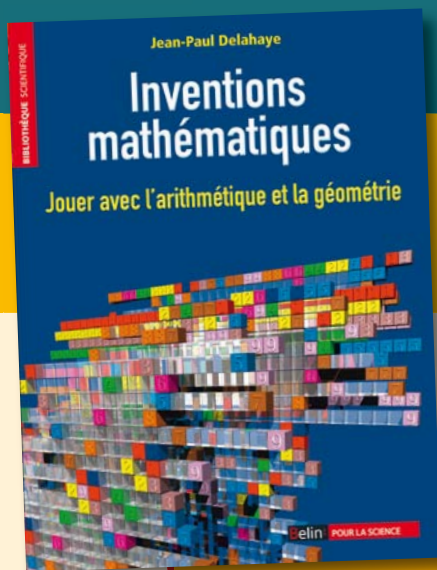


L'univers mathématique

de Jean-Paul Delahaye



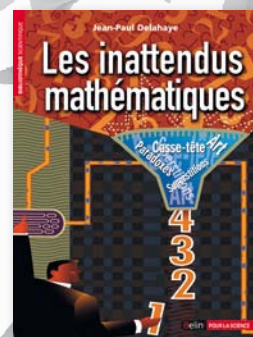
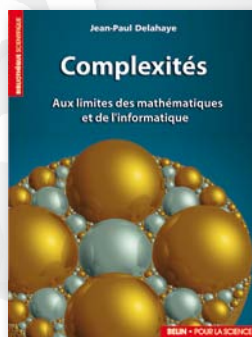
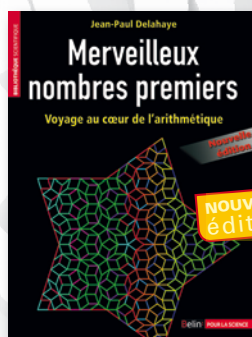
PRIX TANGENTE
2014

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.

POUR LA
SCIENCE

Pour commander ces ouvrages, rendez-vous sur
www.pourlascience.fr

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.

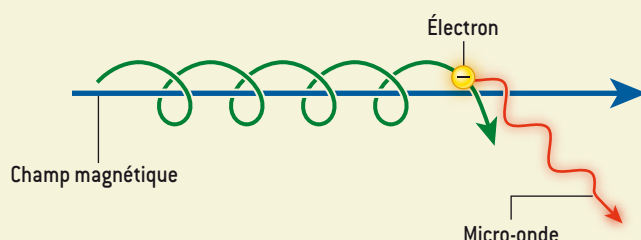
Le premier indice que quelque chose d'inattendu se déroulait au centre de la Voie lactée est venu non pas des rayons gamma, mais des micro-ondes. C'était en 2003, et je (D. Finkbeiner) travaillais sur les données du satellite WMAP (*Wilkinson Microwave*

Ben 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.

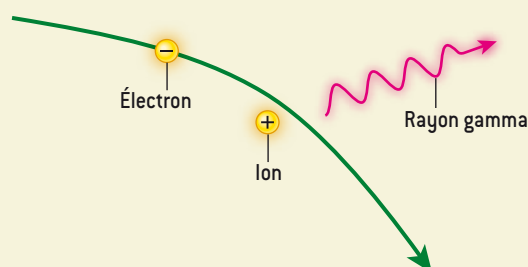
Rayonnement synchrotron

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.



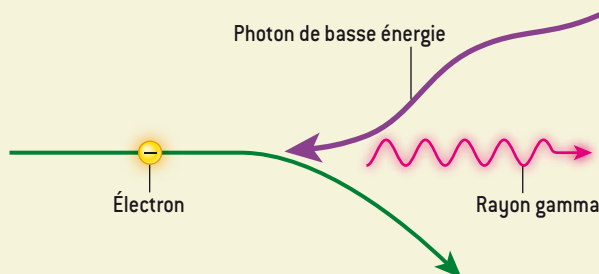
Le rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)

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).