

LE MENSUEL DE RÉFÉRENCE DES SCIENCES DE L'UNIVERS

L'ASTRONOMIE

L'ASTRONOMIE

N° 124 / FÉVRIER 2019

SOCIÉTÉ ASTRONOMIQUE DE FRANCE

EXCLUSIF



COURSE A LA LUNE
PEUT-ON ARRÊTER
LA CHINE ?



LA SURFACE DE
TITAN
DEVOILÉE !



OBSERVER
MESSIER 76
AUX CONFINES
DE CASSIOPEE

SUPERNOVA, TROU NOIR, PULSAR...

L'UNIVERS A HAUTE ENERGIE

10 ANS DE DECOUVERTES

BELGIQUE / LUXEMBOURG : 6,80 € - SUISSE : 10,90 CHF - MAR : 65 MAD

CNLT

M 02605 - 124 - F: 6,20 € - RD



2019 ANNÉE DU CENTENAIRE DE L'UAI





RAYONS GAMMA

FERMI : 10 ANS DE DECOUVERTES

En orbite autour de la Terre depuis juin 2008, l'observatoire spatial *Fermi* balaie le ciel pour capter les rayons gamma (γ) émis par les plus formidables accélérateurs de particules que la nature ait conçus, qu'il s'agisse d'étoiles à neutrons, de trous noirs ou d'explosions stellaires. *Fermi* a découvert plus de 5 000 sources dans le ciel. Un bilan des principaux résultats est présenté dans cet article.

Le satellite *Fermi* de la Nasa (fig. 1) a été lancé en juin 2008 pour observer le ciel en rayons γ , depuis l'espace car ces rayons sont absorbés par l'atmosphère. Il a reçu le nom du physicien Enrico Fermi, pionnier de physique nucléaire qui a le premier suggéré comment accélérer les particules cosmiques de haute énergie (baptisées rayons cosmiques).

L'instrument principal, le Large Area Telescope (LAT), est piloté par une collaboration de laboratoires américains, italiens, japonais, suédois et français. Le LAT détecte les rayons γ dans une grande gamme d'énergie allant de 0,03 à 1 000 GeV (1 GeV = un milliard d'électronvolts ou eV, et correspond à une longueur d'onde de 10^{-15} m, la taille du noyau atomique). Il n'existe pas d'optique focalisante à ces énergies. Les photons γ sont convertis en paires d'électrons et de positons (anti-électrons).



NASA

L'ESSENTIEL

L'observatoire spatial *Fermi*, qui orbite autour de la Terre depuis juin 2008, balaie le ciel pour capter les rayons gamma (γ) émis par les plus formidables accélérateurs de particules que la nature ait conçus : étoiles à neutrons, trous noirs ou encore explosions stellaires. Le 4^e catalogue Fermi-LAT qui vient de paraître dénombre 5000 sources, dont un tiers n'a pu être associé à aucun objet connu à d'autres longueurs d'onde.

Fermi a permis de nombreuses avancées dans la compréhension de phénomènes : origine des rayons cosmiques dans les restes de supernovae, étude des pulsars qui pourraient fournir un réseau d'horloges ultraprécises pour de futurs détecteurs d'ondes gravitationnelles, jets expulsés par les trous noirs des noyaux de galaxies, formation de vents des galaxies, sources transitoires associées aux ondes gravitationnelles lors des fusions de trous noirs et d'étoiles à neutrons. Signalons également l'étude des blazars, ces trous noirs supermassifs dont le rayonnement gamma s'étend jusqu'à des énergies énormes.

dans du tungstène ; puis on reconstruit les trajectoires des paires dans un trajectographe, et on mesure leur énergie dans un calorimètre afin de déduire la direction et l'énergie du photon γ incident. Le détecteur est également entouré d'un scintillateur qui signale le passage de particules chargées qui, sur l'orbite de *Fermi*, sont cent mille fois plus nombreuses que les photons γ .

La surface collectrice de 1 m² du LAT est modeste par rapport à la brillance des sources. La source la plus brillante du ciel n'envoie que 0,1 photon γ par m² et par seconde au-delà de 0,1 GeV. Mais

elle est compensée par un très grand champ de vue (20 % du ciel) et beaucoup de patience (10 ans d'observations). L'instrument balaie tout le ciel toutes les 3 heures et détecte environ un million de photons par mois. Le LAT ne peut pas capter de détails plus fins que 5° (10 fois la pleine Lune) à basse énergie, mais sa précision atteint 0,1° aux plus hautes énergies.

Fermi comporte aussi un détecteur de « sursauts γ » (Gamma-ray Burst Monitor ou GBM) qui recherche les sources transitoires sur tout le ciel entre 10 000 eV et 0,025 GeV. Ces sursauts γ ,

fugaces mais très brillants, marquent l'explosion d'une étoile très massive ou bien la fusion d'étoiles à neutrons et/ou de trous noirs.

RAYONS COSMIQUES ET MILIEU INTERSTELLAIRE

La Voie lactée domine le ciel γ (fig. 2, p. 25) à cause de particules de haute énergie (1-1 000 GeV) qui parcourent la Galaxie en tous sens et qu'on appelle des rayons cosmiques, bien qu'il s'agisse de particules de matière [1]. Ces rayons cosmiques produisent en effet des photons γ en interagissant avec les gaz et les

photons du milieu interstellaire qu'ils traversent. L'émission γ de la Voie lactée nous informe donc sur deux composantes clefs de l'évolution de la Galaxie : ses réserves de gaz pour former de nouvelles étoiles, et sa production de rayons cosmiques, ces derniers influant sur l'état du gaz et sa capacité à former des étoiles.

On connaît mal les sites de production des rayons cosmiques dans la Ga-

laxie, et comment ils se propagent sous l'effet des champs magnétiques interstellaires. Les données de *Fermi* indiquent que le flux de noyaux cosmiques est assez homogène sur un millier d'années-lumière autour du Soleil. Au-delà, le flux diminue globalement du centre au bord de la Galaxie, mais moins qu'attendu. Ce désaccord soulève deux problèmes intéressants : soit on sous-estime les quanti-

tés de gaz qu'ils traversent à la périphérie de la Galaxie, soit les propriétés de diffusion des rayons cosmiques varient suivant l'environnement stellaire, ce qui ouvre des perspectives de recherches intéressantes sur les couplages entre gaz et rayons cosmiques, pour étudier comment ces couplages pèsent sur l'évolution des galaxies. *Fermi* a en effet révélé l'existence d'un cocon de rayons cosmiques très énergétiques, piégés dans les cavités sculptées par des amas de centaines d'étoiles massives dans les grands nuages du Cygne. *Fermi* nous alerte donc sur la complexité de l'évolution des rayons cosmiques dans une galaxie, au-delà du fait que leur abondance semble bien suivre le taux de formation stellaire.

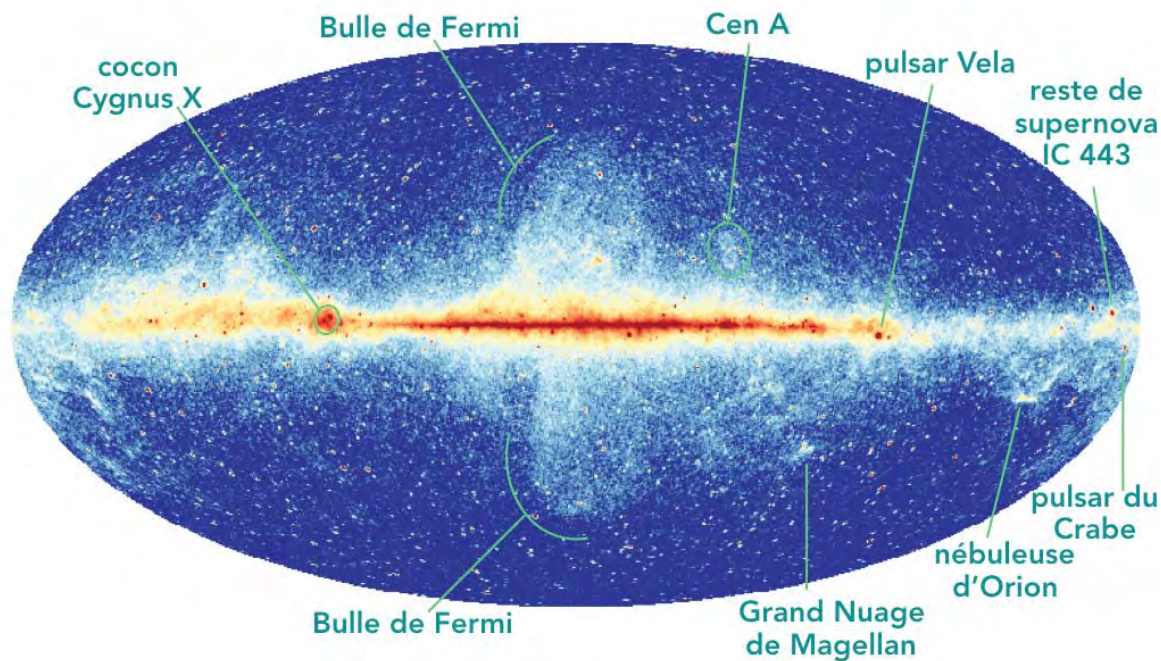
Le gaz d'une galaxie est structuré en nuages d'atomes ou de molécules d'hydrogène, plus ou moins froids et denses. Parce qu'elle résulte d'interactions nucléaires, l'émission γ fournit une mesure de la quantité totale de gaz traversée par les rayons cosmiques, quel que soit son état. On a ainsi trouvé de grandes quantités de gaz « sombre » qui échappent aux autres observations et qui pourraient doubler nos estimations des réserves de gaz d'hydrogène moléculaire de notre Galaxie. L'émission γ permet aussi d'étalonner d'autres traceurs de gaz communément utilisés, comme le rayonnement infrarouge des poussières qui révèle le gaz des galaxies lointaines auquel elles sont mélangées. Or, les données γ ont montré que les poussières rayonnent avec plus ou moins d'efficacité dans les différents types de nuages et qu'il faut corriger cet effet pour mieux estimer les réserves de gaz des galaxies.

Fermi a aussi révélé l'existence de deux grandes « bulles de *Fermi* » (fig. 2), remplies de particules de 100-1 000 GeV, qui s'élèvent hors du disque de la Galaxie, sur 30 000 années-lumière de chaque côté¹. Leur origine au centre de la Galaxie est probable, mais reste à prouver. On ignore si elles proviennent d'anciennes éruptions ou de jets issus du trou noir central et/ou si elles font partie du vent Galactique². La surproduction d'étoiles et de rayons cosmiques dans les régions centrales fournit en effet assez de pression pour souffler un vent de gaz et de rayons cosmiques hors de la Galaxie.



1. Le satellite *Fermi* avant le lancement.

Le LAT est le gros parallélépipède gris au sommet. On voit les modules du GBM (disques blancs barrés de rouge) sur les côtés du module de service. (Nasa)



2. Carte du ciel en rayons γ en coordonnées galactiques, obtenue par *Fermi*. Le code couleur correspond à l'intensité du rayonnement qui croît du bleu sombre au blanc. En plus des sources ponctuelles, l'essentiel du signal provient de la Voie lactée (horizontale) à cause de l'irradiation du gaz interstellaire par les rayons cosmiques. (NASA/Fermi LAT Collaboration et CEA/AIM)

On observe un excès de rayons γ sur quelques degrés autour du centre Galactique. Celui-ci a suscité de nombreuses interprétations quant à l'interaction de particules de matière noire qui s'accumuleraient au centre de la Galaxie. La découverte de ces particules permettrait d'expliquer la grande quantité de masse manquante dans l'Univers [2], mais les mesures γ actuelles ne prouvent pas leur existence, elles ne font que contraindre leurs éventuelles propriétés d'interaction. L'excès observé peut en effet tout aussi bien provenir de toute l'activité des régions centrales de la Galaxie (trou noir central, base des bulles de *Fermi*, formidables amas stellaires, vieux pulsars amoncelés là-bas au cours de l'histoire de la Galaxie).

Maintenir le flux actuel de rayons cosmiques dans la Galaxie, étant donné leurs énergies et leurs durées de vie, nécessite une puissance importante, soit environ 10 % de la principale source d'énergie du milieu interstellaire que

sont les explosions d'étoiles (supernovae). Les particules peuvent être accélérées par l'onde de choc de l'explosion qui se propage pendant des milliers d'années à des vitesses de l'ordre de 1 000 km/s. La théorie en a été formalisée à la fin des années 1970 sur la base des travaux d'Enrico Fermi en 1949. Elle s'appuie sur l'existence de turbulences magnétiques qui font diffuser les particules de nombreuses fois de part et d'autre de l'onde de choc, leur faisant gagner de l'énergie à chaque passage. Le processus permet de transférer aux particules une fraction importante de l'énergie cinétique produite lors de l'explosion de l'étoile.

LES RESTES DE SUPERNOVAE

Pour tester la théorie, on attendait avec impatience l'observation des rayons γ produits lors des interactions des noyaux accélérés avec le gaz proche de l'onde de choc, mais elle avait défié les instruments précédents. *Fermi* a réussi

à détecter une cinquantaine des 300 restes de supernovae connus dans la Galaxie et à prouver sur plusieurs exemples que le spectre d'émission γ mesuré autour du GeV suit très bien la forme prédite. La fraction d'énergie (10 %) transmise aux particules accélérées est approximativement celle attendue.

Fermi a de plus inopinément détecté une demi-douzaine de novae dues à des explosions thermonucléaires à la surface d'étoiles (de type naine blanche). Ces explosions sont un million de fois plus faibles que celles des supernovae et ne détruisent pas l'étoile. Elles conduisent aussi à une onde de choc et à l'accélération de particules, mais sur des échelles de temps de quelques semaines qui permettent de suivre en direct l'évolution des capacités d'accélération. Les données γ ont de plus montré que la lumière visible de l'explosion, qu'on associait entièrement aux phénomènes thermonucléaires, provient aussi en partie des particules accélérées par l'onde de choc.

Carte du ciel des 10 ans de Fermi

Cette vue totale du ciel centrée sur notre Voie lactée est le portrait le plus détaillé et le mieux résolu à ce jour du ciel gamma. Elle inclut les observations du satellite *Fermi* de la Nasa d'août 2008 à août 2018, pour des énergies plus grandes qu'un milliard d'électronvolts (GeV). Par comparaison, l'énergie de la lumière visible varie entre 2 et 3 électronvolts.

NASA/DOE/Fermi-LAT collaboration

GRB 130427A

Sursaut gamma issu d'une étoile mourante située dans une galaxie lointaine, détecté le 27 avril 2017 par *Fermi*, à une énergie de 95 GeV, le rayonnement le plus énergétique jamais détecté pour un tel sursaut.

NASA/DOE/Fermi-LAT collaboration

Sursaut solaire

Flash gamma détecté par *Fermi* le 7 mars 2012, issu de particules accélérées tombant sur le côté du Soleil face à la Terre, alors que le sursaut avait eu lieu sur la face opposée.

NASA/SDO

PSR J1744-7619

Découvert par le projet *Einsein@home*, un projet collaboratif de calcul qui analyse les données de *Fermi* grâce aux ordinateurs personnels, il s'agit du premier pulsar milliseconde gamma n'ayant pas de contrepartie radio détectable.

NASA/DOE/Fermi-LAT collaboration/SSU/A. Simonnet

ASASSN-16ma

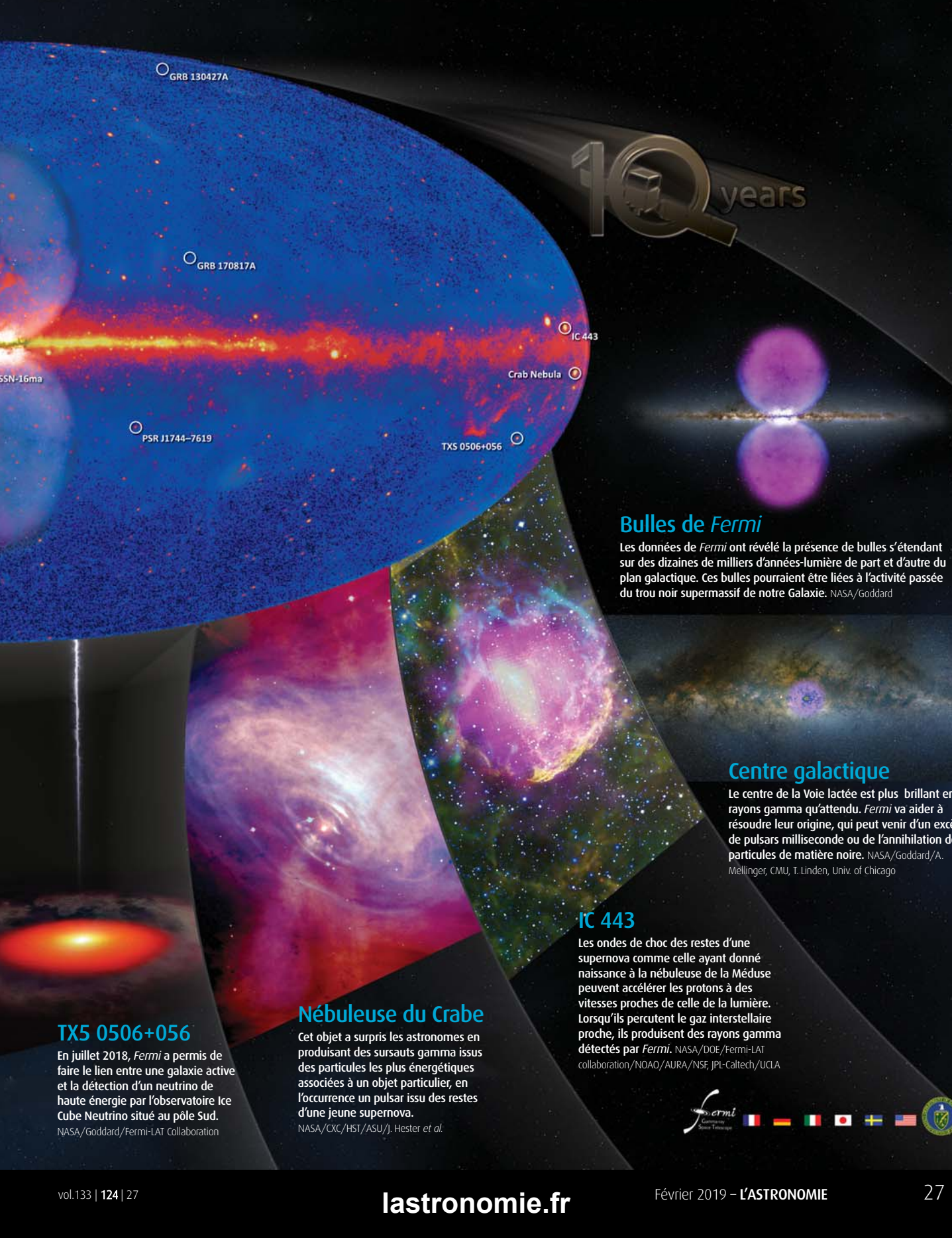
Fermi a détecté plusieurs novae, des sursauts provoqués par des éruptions thermonucléaires à la surface des naines blanches. Ce sursaut montre que des rayons gamma et de la lumière visible semblent être produits par le même processus.

NASA/DOE/Fermi-LAT collaboration

GRB 170817A

Fermi a détecté cet événement qui coïncide avec un signal capté par Ligo et Virgo sous la forme d'ondes gravitationnelles émises lors de la fusion d'étoiles à neutrons.

NSF/LIGO/SSU/A. Simonnet



10 years

Bulles de Fermi

Les données de *Fermi* ont révélé la présence de bulles s'étendant sur des dizaines de milliers d'années-lumière de part et d'autre du plan galactique. Ces bulles pourraient être liées à l'activité passée du trou noir supermassif de notre Galaxie. NASA/Goddard

Centre galactique

Le centre de la Voie lactée est plus brillant en rayons gamma qu'attendu. *Fermi* va aider à résoudre leur origine, qui peut venir d'un excès de pulsars milliseconde ou de l'annihilation de particules de matière noire. NASA/Goddard/A. Mellinger, CMU, T. Linden, Univ. of Chicago

IC 443

Les ondes de choc des restes d'une supernova comme celle ayant donné naissance à la nébuleuse de la Méduse peuvent accélérer les protons à des vitesses proches de celle de la lumière. Lorsqu'ils percutent le gaz interstellaire proche, ils produisent des rayons gamma détectés par *Fermi*. NASA/DOE/Fermi-LAT collaboration/NOAO/AURA/NSF, JPL-Caltech/UCLA

Nébuleuse du Crabe

Cet objet a surpris les astronomes en produisant des sursauts gamma issus des particules les plus énergétiques associées à un objet particulier, en l'occurrence un pulsar issu des restes d'une jeune supernova.

NASA/CXC/HST/ASU/J. Hester et al.

TXS 0506+056

En juillet 2018, *Fermi* a permis de faire le lien entre une galaxie active et la détection d'un neutrino de haute énergie par l'observatoire Ice Cube Neutrino situé au pôle Sud.

NASA/Goddard/Fermi-LAT Collaboration



LES PULSARS γ

Le ciel γ clignote de toutes parts. Plus de 230 étoiles à neutrons, tournant comme des toupies effrénées, projettent des faisceaux de rayons γ que nous interceptons par intermittence mais à un rythme régulier, à l'instar des phares de marine. D'où leur nom de pulsar pour « pulsating star ». Les plus lentes (quelques tours par seconde) sont jeunes, avec des âges du millier au million d'années. Les plus rapides, bien plus vieilles, ont été réaccélérées jusqu'à faire un tour en quelques millisecondes grâce au transfert de matière³ d'une étoile compagne. Les observations de *Fermi* ont révolutionné ce domaine en faisant passer le nombre de pulsars γ connus de 6 à plus de 200 et en découvrant contre toute attente autant de vieux pulsars γ milliseconde que de jeunes. Parmi eux, une vingtaine de pulsars milliseconde en flagrant délit d'érosion de leur compagne. Les observations ont révélé d'étranges variabilités dans plusieurs objets et ont étoffé le réseau de pulsars³ qui sert à chercher les ondes gravitationnelles générées par la coalescence de cou-

ples de trous noirs supermassifs. Les observations γ ont fait nettement progresser nos connaissances sur l'environnement des pulsars où règnent des conditions extrêmes (champs magnétiques de 10^8 à 10^{11} teslas, forces électromotrices de 10^{15} à 10^{17} volts, particules de milliers de GeV), mais les modèles n'arrivent pas encore à repro-

Les éruptions à répétition du jeune pulsar du Crabe ont créé une énorme surprise.

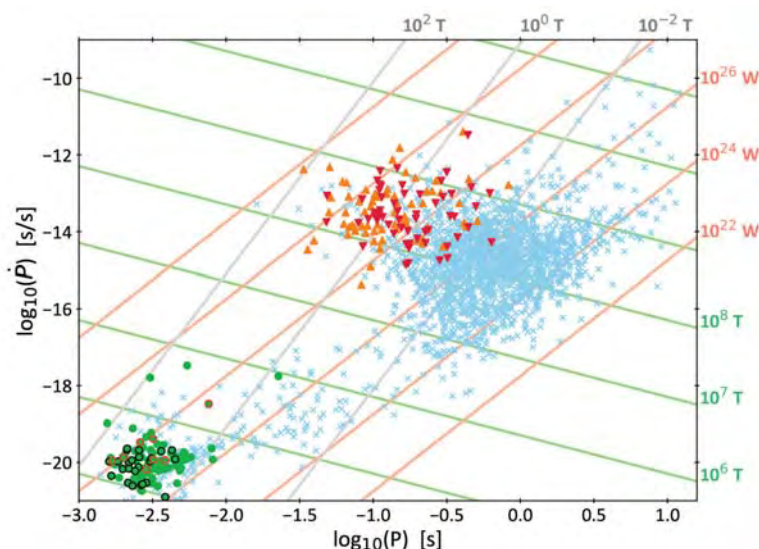


duire la grande diversité de clignotements observés, ni la pyramide d'âge des pulsars γ , ni pourquoi l'émission radio persiste longtemps après l'extinction probable de l'émission γ ($< 10^{26}$ watts sur la fig. 3).

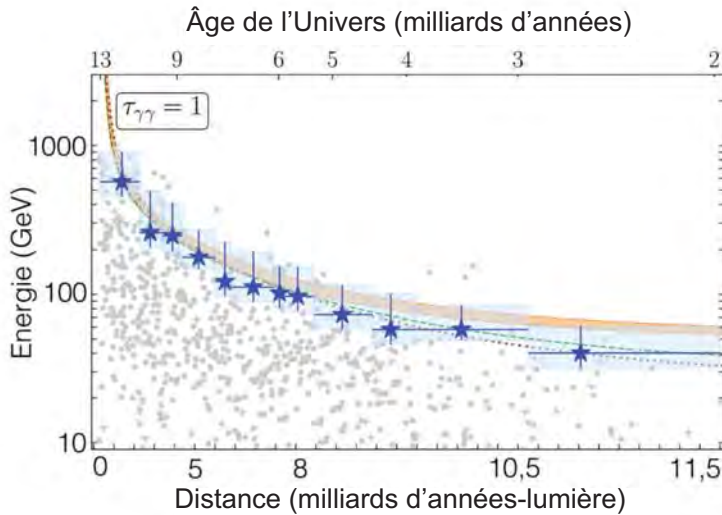
Les éruptions à répétition du jeune pulsar du Crabe ont créé une énorme surprise... et la perte de la principale source d'étalonnage des télescopes X et γ ! Elles sont brusques (heures), donc localisées; elles n'apparaissent qu'en rayons γ et produisent une émission non pulsée qui nécessite sans doute de réorganiser brutalement la nappe de champ magnétique qui s'enroule autour de l'étoile à chaque tour de rotation. Mais il reste à comprendre où, pourquoi et comment.

LES TROUS NOIRS SUPERMASSIFS

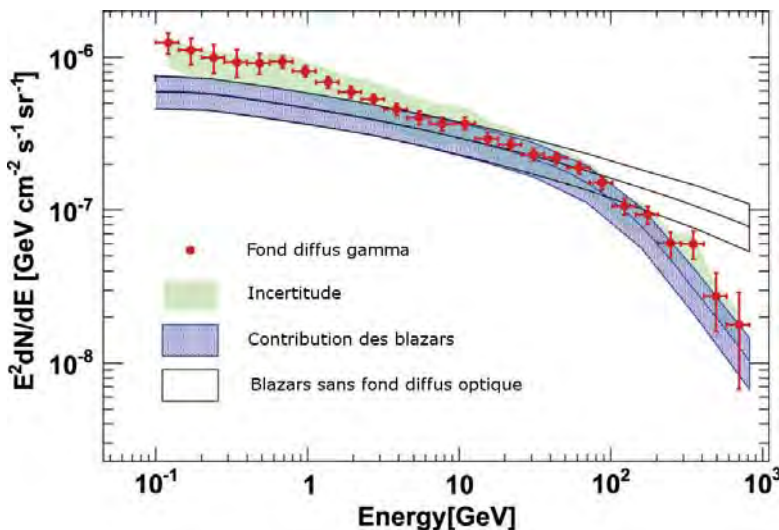
Parmi les 5 000 sources du 4^e catalogue *Fermi*-LAT, un tiers n'a pu être associé à aucun objet connu à d'autres longueurs d'onde. Moins de 10 % sont des sources Galactiques comme les pulsars ou les restes de supernovae. Les autres sont des sources extragalactiques lointaines, pour la plupart des noyaux actifs de galaxies, c'est-à-dire des trous noirs de cent millions à un milliard de fois la masse du Soleil, situés au centre des galaxies. Ils attirent la matière environnante qui tombe vers eux en spirale avant de disparaître dans le trou noir. Juste avant l'horizon, une partie du gaz chaud est éjectée en un étroit jet, propulsé à des vitesses relativistes le long de l'axe du disque.



3. Distribution des périodes de rotation (P) et du taux de ralentissement ($\dot{P} = dP/dt$) des pulsars jeunes vus en γ (triangles rouges), ou vus en γ et en radio (triangles orange), ainsi que des vieux pulsars milliseconde vus en γ et en radio (ronds verts). Les pulsars cerclés de noir cannibalisent leur étoile compagne. Les autres pulsars radio (bleu clair) ne sont pas vus en γ , soit parce que les faisceaux γ pointent ailleurs que vers la Terre, soit parce qu'ils sont trop vieux pour accélérer des particules à très haute énergie. Les droites indiquent la puissance cinétique de rotation du pulsar (marron), les valeurs du champ magnétique près des pôles de l'étoile (vert), et celles près des zones présumées d'émission γ (bleu). (D'après Grenier & Harding 2015, *CRPhy* 16, 641)



4. Énergies des photons γ les plus énergétiques détectés par *Fermi* pour tous les blazars de distance connue (en abscisse). On observe une perte brutale de photons γ au-delà de l'horizon attendu par l'absorption des photons γ par la lumière visible et infrarouge des galaxies (les différentes courbes sont prédites par différents auteurs). Les points bleus indiquent la mesure moyenne de l'horizon vu par *Fermi*: les photons γ de moins de 30 GeV peuvent aisément parcourir plus de 11 milliards d'années-lumière tandis que ceux de plus de 500 GeV ne peuvent provenir que de sources situées à moins de 2 milliards d'années-lumière. L'échelle du haut donne l'âge de l'Univers quand le photon a été émis. (D'après Abdollahi et al. 2018, *Science*, sous presse.

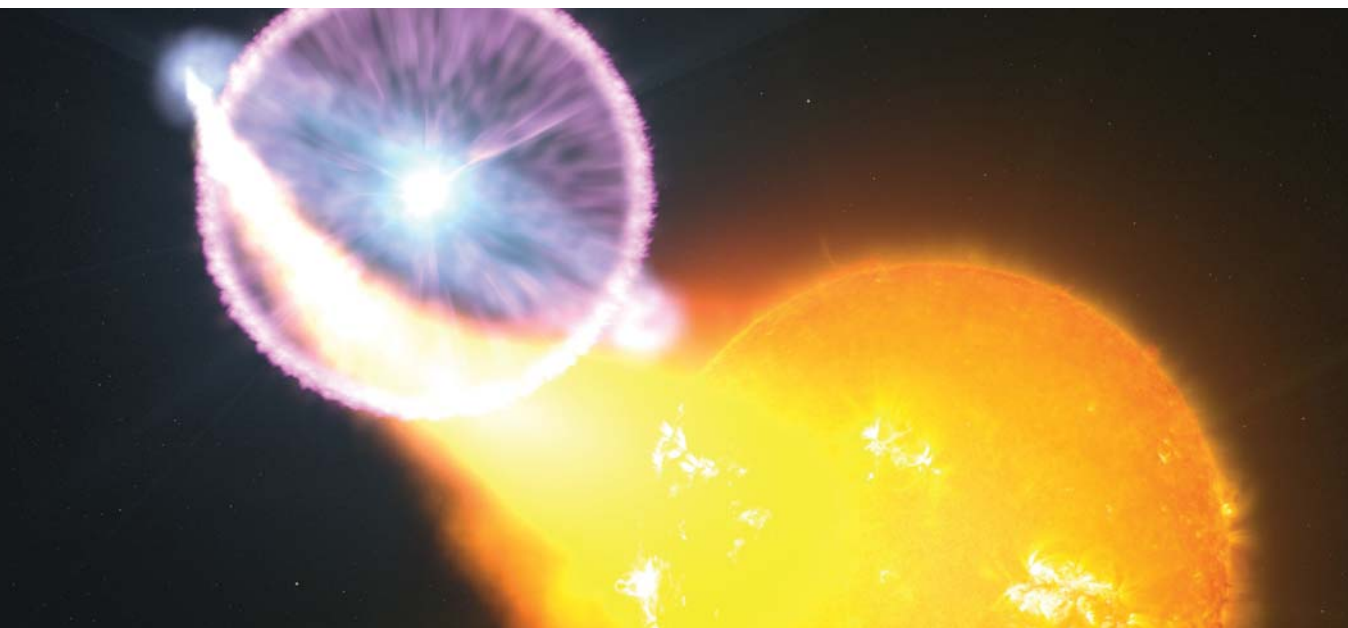


5. Spectre du fond diffus γ observé par *Fermi*. Cette émission est probablement la somme d'un très grand nombre de sources qui ne peuvent être détectées individuellement. L'extrapolation aux sources plus faibles et/ou plus lointaines des blazars observés individuellement indique qu'ils forment la majorité de ce fond diffus au-dessus de quelques GeV. La contribution manquante à basse énergie pourrait provenir soit des galaxies elles-mêmes, soit des jets de noyaux de galaxies vus hors axe. La cassure observée vers 100 GeV correspond à l'absorption des photons γ par la lumière visible des galaxies (fig. 4). (D'après Ajello et al. 2015, *ApJ* 800, L27)

Alors que les rayons X ou visibles nous renseignent sur le gaz chaud qui tombe dans le disque, on observe les jets en rayons γ et en radio. Les jets vus par *Fermi* sont ceux qui pointent en direction de la Terre. Dans cette configuration particulière, assez rare, le trou noir s'appelle un « blazar » et son jet nous apparaît très lumineux. Des effets relativistes, comme la forte amplification de l'intensité lumineuse dans l'axe du jet et le décalage Doppler de la lumière vers le bleu (γ de plus haute énergie), rendent ces jets très lumineux et nous permettent de les détecter à de grandes distances.

Les sources les plus puissantes sont observées à plus de 10 milliards d'années-lumière. Pour des distances aussi considérables, les photons γ de haute énergie ont une probabilité non négligeable d'interagir avec la lumière visible et proche infrarouge issue des galaxies. Les deux photons disparaissent dans l'interaction pour créer une paire électron-positon. Il existe donc un horizon au-delà duquel les rayons γ sont absorbés par la lumière des galaxies et ne peuvent plus nous parvenir (fig. 4). Le nombre de blazars γ détectés est maintenant assez grand pour mesurer l'intensité moyenne de la lumière intergalactique provenant de toutes les galaxies de l'Univers (ce qu'on ne peut pas faire directement dans le domaine visible). Le résultat correspond à ce qu'on obtient en comptant les galaxies avec le télescope *Hubble*.

On observe aussi un fond de lumière γ diffuse sur tout le ciel (ce qui reste quand on a enlevé l'émission Galactique et toutes les sources individuelles). On peut étudier la population de blazars γ détectés et extrapoler cette population à des sources non détectables individuellement car trop lointaines. Ce calcul prédit que la majorité du fond γ diffus est due à des blazars lointains (fig. 5). Le reste doit provenir de jets de noyaux actifs de galaxies observés un peu hors axe (plus nombreux mais moins lumineux), et de la lumière cumulée de toutes les galaxies qui rayonnent en γ , comme la nôtre. Ces deux populations devraient rayonner à une énergie un peu plus basse que celle des blazars, mais on n'a pas encore observé assez d'individus pour prédire fermement l'émission de toute leur population. Le fond γ diffus montre également les effets de l'horizon à haute énergie (fig. 5).



NASA/DOE/Fermi-LAT collaboration

AUTRES SOURCES DE RAYONS γ

Cet article ne se veut pas exhaustif. D'autres types d'objets ont été détectés, comme les sources binaires γ (systèmes composés d'une étoile massive et d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir) ou les nombreux sursauts γ vus à basse énergie par le GBM, et parfois au GeV par le LAT. Ces bouffées de rayons γ de quelques secondes sont dues à l'explosion d'étoiles très massives en fin de vie et à la coalescence d'étoiles à neutrons. Enfin, comme il balaie le ciel en permanence, *Fermi* signale l'apparition de sources transitoires vers lesquelles il est intéressant de pointer des instruments à d'autres longueurs d'onde. C'est ainsi que le GBM a pu détecter et localiser la première contrepartie lumineuse d'une coalescence d'étoiles à neutrons dont on a capté les ondes gravitationnelles avec Ligo et Virgo (GW170817).

PERSPECTIVES

Fermi n'utilise pas de consommables qui limiteraient sa durée de vie. Les équipements et les instruments vieillissent, mais sur une échelle de temps de dizaines d'années. Le financement des opérations est prévu au moins jusqu'en 2020. Il n'existe pas de remplaçant à court terme, mais la communauté mondiale propose aux différentes agences spatiales un projet d'observatoire qui couvrirait la

gamme très peu explorée de 0,1 MeV à 3 GeV pour compléter l'importante moisson de résultats de *Fermi*. Les progrès futurs viendront également de l'observatoire γ au sol Cherenkov Telescope Array (CTA), un projet mondial dont la construction s'échelonne jusqu'à 2021 et qui couvrira la gamme au-dessus de *Fermi*, de 20 à 300 000 GeV, en utilisant l'atmosphère terrestre comme détecteur.

CONCLUSION

Après dix ans d'observations, *Fermi* a largement tenu ses promesses. Les données ont conforté l'origine des rayons cosmiques dans les restes de supernovae, et montré leur couplage complexe avec les sites de formation d'étoiles. Les pulsars γ ont surpris par leur diversité et leur variabilité, en plus de fournir un réseau d'horloges précises pour de futurs détecteurs d'ondes gravitationnelles. En combinaison avec les radiotélescopes, *Fermi* a permis de sonder toutes les catégories de jets expulsés par les trous noirs des noyaux de galaxies, en remontant jusqu'à un Univers quatre fois plus jeune qu'aujourd'hui. La découverte surprise de jets ou de vents relativistes s'échappant du noyau de notre Galaxie conforte l'idée que les rayons cosmiques jouent un rôle important dans les vents des galaxies ou que notre trou noir central a vécu des phases beaucoup plus actives. Enfin, le balayage permanent du ciel révèle toutes

sortes de sources transitoires, dont les contreparties lumineuses des sources d'ondes gravitationnelles lors des fusions de trous noirs et d'étoiles à neutrons. ■

Références

- [1] J. Paul, *Une brève histoire des rayons cosmiques* : www.parizot.eu/iWebs/Recherche/Pages/Realisations2_files/01_JacquesPaul.pdf
- [2] « La matière noire » : home.cern.fr/science/physics/dark-matter
- [3] J. Ballet, A. Decourchelle et I. Grenier, « Élucider le mécanisme d'accélération des rayons cosmiques », *Clefs CEA* n° 58, p. 50 (2009). Pour en savoir plus : B. Degrange et H. Sol, « L'astronomie gamma de haute énergie », *Pour la Science* n° 62 (2009); J. Paul, « L'astronomie gamma », chapitre 28 de l'ouvrage *Le Ciel à découvert*, CNRS Éditions (2010); K. Kotera, « Cent ans de rayons cosmiques », *Reflète de la physique* n° 32 (2013); dossier en anglais « Gamma-ray astronomy », *CRPhy* 16, 587-704 et 17, 581-678; *Fermi* à la NASA (en anglais) : <https://fermi.gsfc.nasa.gov/>

Notes

- 1. La Galaxie a un rayon d'environ 150 000 années-lumière.
- 2. Nous avons pris la notation des auteurs, somme toute logique, en mettant une majuscule à l'adjectif galactique quand il s'agit de notre Galaxie [NDLR].
- 3. La matière tombe en spiralant vers l'étoile à neutrons, en tournant de plus en plus vite (selon la loi de Kepler qui fait que les planètes proches du Soleil tournent plus vite). À l'arrivée, cette rotation est transmise à l'étoile à neutrons.
- 4. www.iptah4gw.org/