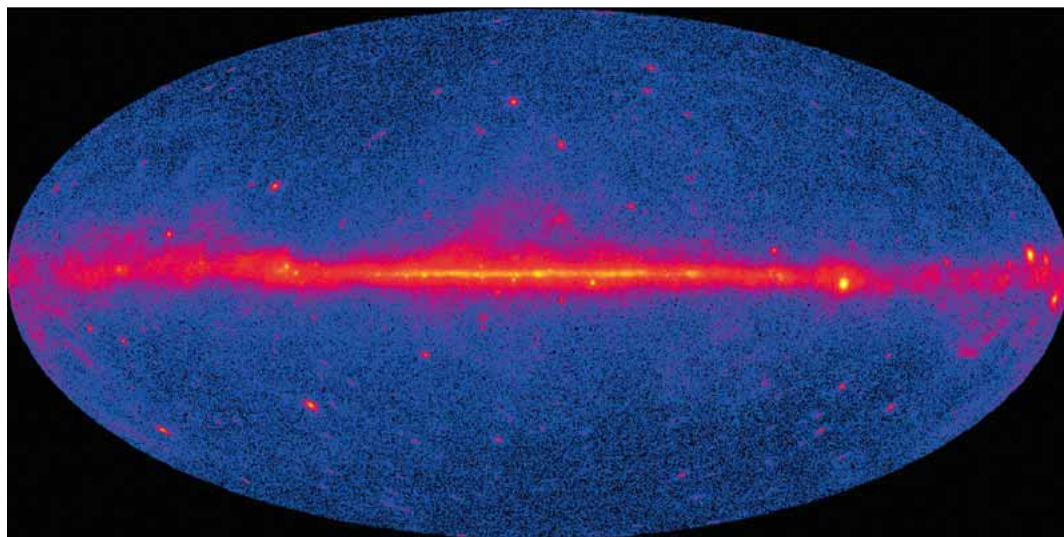


Élucider le mécanisme d'accélération des rayons cosmiques

Les galaxies baignent dans un flux de particules électriquement chargées se déplaçant à des vitesses comparables à celle de la lumière : les rayons cosmiques. Le processus de leur accélération recèle encore des mystères, mais il est communément admis que l'énergie nécessaire provient des supernovae.

Carte du ciel en rayons gamma, obtenue par le télescope Fermi. Outre les sources ponctuelles, l'essentiel provient de l'irradiation du milieu interstellaire par les rayons cosmiques. Les collisions nucléaires avec le gaz génèrent entre autres des pions neutres⁽¹⁾ puis des photons gamma. La structure observée est essentiellement celle du milieu interstellaire, avec une forte concentration dans le plan et vers le centre de la Galaxie.



Fermi/LAT (NASA) et CEA/Irfu/SAP

Les **rayons cosmiques** ont été baptisés ainsi lors de leur découverte au début du 20^e siècle. « Rayons » parce qu'ils partagent avec les **rayons X** et **gamma** (γ), découverts à la même époque, la propriété d'**ioniser** la matière. « Cosmiques » à cause de leur origine extraterrestre. En fait, cette appellation est trompeuse : il ne s'agit pas d'un **rayonnement électromagnétique** mais d'un flux de particules chargées **relativistes**, donc très énergétiques. Ce sont essentiellement des **protons**, avec une fraction d'éléments plus lourds et quelques % d'**électrons**.

Le Service d'astrophysique du CEA/Irfu s'est illustré dans les années 1980 dans l'étude de leur composition détaillée, qui nous a appris que ces rayons cosmiques sont d'origine interstellaire et ont une durée de vie dans la **Galaxie** de l'ordre de 20 millions d'années. Leur spectre en énergie se prolonge régulièrement jusque vers $3 \cdot 10^{15}$ eV. Baignant l'ensemble de la Galaxie, les rayons cosmiques entretiennent l'ionisation d'une fraction du gaz jusqu'au cœur des nuages **moléculaires**. Ces particules électriquement chargées sont déviées par le **champ magnétique** galactique, et n'apportent donc aucune information sur leur provenance. En revanche, les **photons X** et **gamma** qu'elles émettent se propagent en ligne droite, permettant aux astronomes de trouver les sources des rayons cosmiques.

Une raquette de tennis

Étant donné leur énergie totale et leur durée de vie, il faut une puissance importante pour maintenir le niveau actuel des rayons cosmiques : cela représente environ 10 % de la principale source d'énergie du

milieu interstellaire, les **supernovae**. C'est donc là, logiquement, qu'il faut chercher leur origine. En fait, ce n'est pas l'explosion elle-même qui accélère les particules, mais l'onde de choc qui en résulte (voir *Les restes de supernova*, p. 27). La théorie expliquant ce phénomène a été formalisée à la fin des années 1970. Elle s'appuie sur l'existence d'une **turbulence** magnétique dans le gaz ionisé, qui fait diffuser les rayons cosmiques. De par leur vitesse, ceux-ci traversent facilement l'onde de choc, qui ne se propage qu'à quelques milliers de km/s (soit 1 % de la vitesse de la lumière). En diffusant de part et d'autre du choc, ces particules gagnent en moyenne de l'énergie, à la manière d'une balle de tennis rebondissant sur une raquette qui avance, car le gaz n'a pas la même vitesse des deux côtés. Un choc est en effet assimilable à une discontinuité de la vitesse. Ce processus auto-amplifié – les particules accélérées excitent elles-mêmes la turbulence magnétique en amont du choc – capte une fraction importante de l'énergie cinétique disponible.

Il reste difficile, en revanche, d'expliquer comment accéder à des énergies supérieures à 10^{15} eV dans un reste de supernova. L'accélération est d'autant plus efficace que l'onde de choc se déplace vite et que la turbulence magnétique est intense. Cependant, plus une particule monte en énergie, plus le temps

(1) Pion neutre : particule qui, avec les pions chargés π^+ et π^- , joue un rôle important dans la cohésion du **noyau atomique**. De masse légèrement inférieure à celle des pions chargés ($134,97 \text{ MeV}/c^2$) et d'une durée de vie beaucoup plus courte ($8,4 \cdot 10^{-17}$ s), π^0 se désintègre dans 98,79 % des cas en deux photons gamma, sinon en un photon gamma et une paire électron-positon.

d'accélération nécessaire augmente. Or, même dans les conditions les plus favorables (le champ magnétique turbulent atteignant le niveau du champ ordonné), le reste de supernova s'épuiserait avant que les particules parviennent à 10^{15} eV.

Une énergie inexplicable

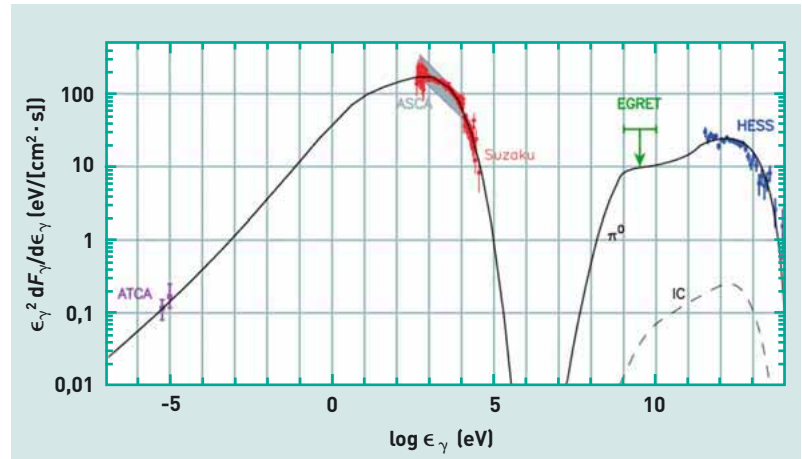
Où chercher la clé de cette énigme ? La plupart des **étoiles massives** explosent en groupe, dans un environnement profondément modifié par les **vents** de toutes ces étoiles et les premières explosions. Le choc se développe dans un milieu très raréfié, et même si le mécanisme d'accélération fonctionne, l'émission associée sera faible. Les astronomes s'intéressent donc aux supernovae isolées, qui se développent dans un milieu plus dense et plus simple et sont de ce fait plus propices à l'observation. Les restes de supernovae historiques, comme SN 1006 (figure 1), conviennent particulièrement bien à la **modélisation** parce que leur âge est connu avec précision et que leur vitesse est encore élevée.

La première grandeur observable est l'**émission synchrotron** des électrons accélérés spiralant dans le champ magnétique. Les électrons ne représentent certes que quelques % des rayons cosmiques, mais ils constituent un traceur du mécanisme d'accélération. Les électrons très énergiques (10^{13} eV) émettent des rayons X alors que les autres (vers 10^9 eV) émettent des **ondes radio** (figure 2). Au début des années 2000, les observatoires en rayons X ont montré que l'émission est concentrée dans une nappe très mince juste au niveau du choc, alors que les particules devraient être présentes, comme le gaz, plus loin à l'intérieur. Les électrons perdent donc leur énergie (à cause du rayonnement synchrotron) très vite derrière le choc. Cela signifie que le champ magnétique est très élevé, dépassant de plus de dix fois les prévisions. Les rayons cosmiques peuvent donc exciter la turbulence magnétique bien au-delà du niveau du champ ordonné. Cette amplification inattendue du champ magnétique explique que certaines particules puissent atteindre une énergie de $3 \cdot 10^{15}$ eV.



XMM-Newton (ESA) et CEA/Irfu/SAP

Figure 1. Image en rayons X du reste de la supernova de 1006 (de la taille de la Lune), acquise avec l'observatoire XMM-Newton. Le rouge correspond à l'émission thermique de l'oxygène (de 0,5 à 0,8 keV), le vert et le bleu à des émissions légèrement plus énergiques (respectivement 0,8 à 2 keV et 2 à 4,5 keV). L'émission synchrotron des électrons accélérés apparaît blanche.



(tiré de E.G. Berezhko et H. J. Volk, *Astronomy & Astrophysics*, 492, p. 695, 2008)

Figure 2. Spectre du reste de supernova RX J1713.7-3946 sur tout le domaine électromagnétique. Les points de mesure (en couleur) sont dans les domaines radio, X et gamma. La première bosse (des ondes radio aux rayons X) correspond à l'émission synchrotron des électrons accélérés. La deuxième bosse (en gamma) est composée de l'**émission Compton inverse** des électrons (IC) et de la désintégration des pions⁽¹⁾ produits lors d'interactions nucléaires entre le gaz et les protons accélérés (π^0). EGRET était le prédécesseur de Fermi. Le modèle superposé (la courbe pleine) privilégie l'émission gamma des protons, mais il est aussi possible de construire un modèle dominé par l'émission des électrons en gamma (courbe en tirets).

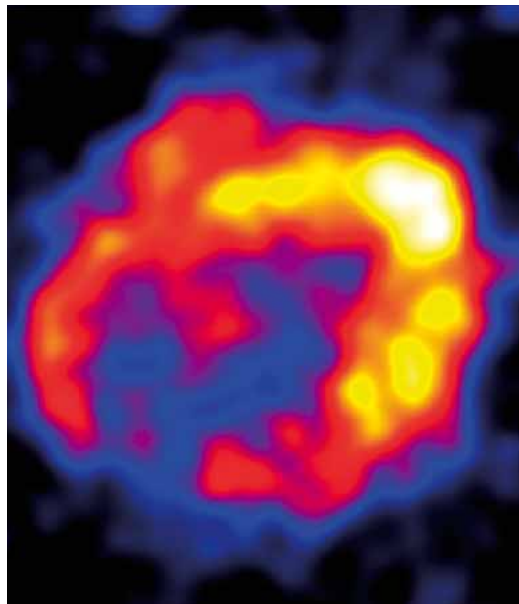
Des questions en suspens

Les astrophysiciens commencent donc à bien cerner le mécanisme d'accélération des rayons cosmiques, d'autant que l'observation de plusieurs restes de supernovae, dont SN 1006 en 2008, en rayons gamma par l'instrument HESS (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90) fournit de nouvelles données (figure 3). Plusieurs questions demeurent néanmoins. Tout d'abord, existe-t-il vraiment des protons accélérés, et pas seulement des électrons ? La nature de l'émission gamma détectée par HESS reste ambiguë (figure 2). Ensuite, quel est le rendement du processus ? Quelle fraction de l'énergie cinétique disponible passe dans les rayons cosmiques ? Pour répondre, il faudra détecter les protons, qui sont la composante dominante, et mesurer la densité du gaz. Le flux de rayons gamma donnera alors une idée de la quantité de protons accélérés.

Enfin, dernière question : en quoi l'accélération dépend-elle de l'orientation du champ magnétique ? Dans SN 1006, l'émission synchrotron n'est pas uniforme mais concentrée dans deux croissants (figure 1). Cette structure provient certainement de l'orientation du champ magnétique avant l'explosion. L'émission X très faible au centre de SN 1006 indique que les croissants sont plutôt des calottes situées aux pôles magnétiques, et que l'accélération fonctionne lorsque le choc se propage le long du champ magnétique. Or des études statistiques dans le domaine radio tendent à prouver que l'émission se produit plutôt dans une ceinture équatoriale. Et, pour ne rien simplifier, il existe des théories expliquant les deux situations !

Des progrès menés de front

La théorie de l'accélération au choc par diffusion progresse en même temps que les observations. Des **modèles**, prenant en compte à la fois la génération de turbulence par les rayons cosmiques et leur rétroaction sur la structure du choc, se développent. Les astrophysiciens du CEA/Irfu les intègrent dans



collaboration HESS et CEA/Irfu/SAP

Figure 3.
Le reste de supernova RX J1713.7-3946 vu par l'instrument HESS dans la gamme des rayons gamma de très haute énergie (TeV). Les pics d'émission observés sont dus à la structure du gaz interstellaire.

un modèle global de reste de supernova. Ils vont dès maintenant approfondir leurs études en rayons X et, dans le cadre d'un grand projet sur SN 1006, sonder ce reste de supernova avec l'observatoire XMM-Newton, dont la sensibilité devrait apporter des réponses sur la rétroaction et l'orientation du champ magnétique (voir *Voyage dans les lumières de l'Univers*, p. 90). Les questions sur les protons et le rendement reposent essentiellement sur l'astronomie gamma. Si la **résolution spatiale** dans ce domaine reste limitée, en revanche la gamme d'énergie va s'étendre considérablement. En effet, les instruments HESS 2 (mise en service début 2010) et l'observatoire Fermi (lancé en 2008) couvriront à eux deux la bande gamma de 100 **MeV** à 10 **TeV**, et permettront de distinguer les composantes provenant des électrons et des protons.

➤ **Jean Ballet, Anne Decourchelle et Isabelle Grenier**

Service d'astrophysique (SAP)
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu)
Direction des sciences de la matière (DSM)
Unité mixte de recherche astrophysique
interactions multi-échelles (CEA-Université Paris 7-CNRS)
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)