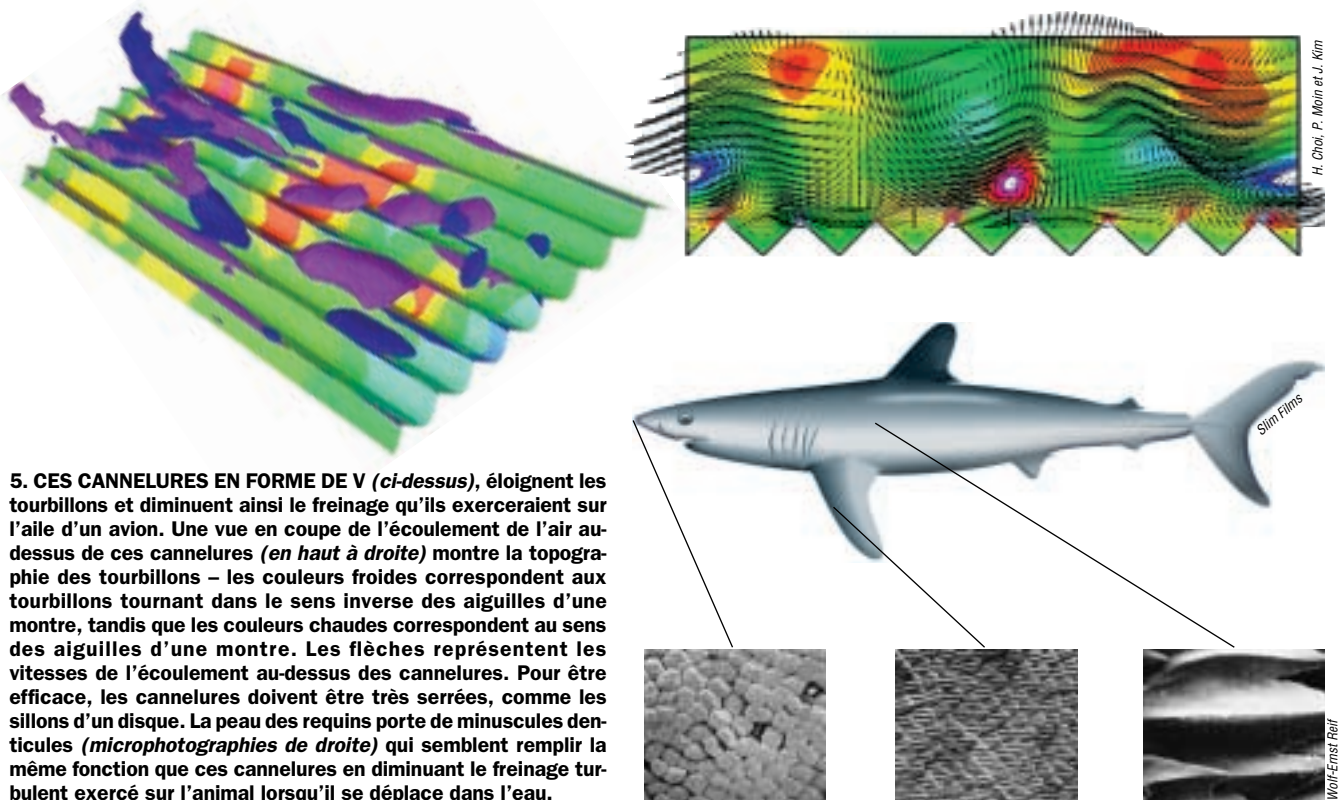




5. CES CANNELURES EN FORME DE V (ci-dessus), éloignent les tourbillons et diminuent ainsi le freinage qu'ils exerceraient sur l'aile d'un avion. Une vue en coupe de l'écoulement de l'air au-dessus de ces cannelures (en haut à droite) montre la topographie des tourbillons – les couleurs froides correspondent aux tourbillons tournant dans le sens inverse des aiguilles d'une montre, tandis que les couleurs chaudes correspondent au sens des aiguilles d'une montre. Les flèches représentent les vitesses de l'écoulement au-dessus des cannelures. Pour être efficace, les cannelures doivent être très serrées, comme les sillons d'un disque. La peau des requins porte de minuscules denticules (microphotographies de droite) qui semblent remplir la même fonction que ces cannelures en diminuant le freinage turbulent exercé sur l'animal lorsqu'il se déplace dans l'eau.

séparant ces cannelures doit être très petit, de l'ordre de 40 micromètres, comme les sillons d'un disque ; des cannelures plus espacées augmenteraient la traînée.

Des biologistes soviétiques avaient étudié des structures analogues à la surface de la peau des requins, qui réduisent la turbulence. La nature avait-elle ainsi découvert les cannelures anti-traînée ? La simulation directe de l'écoulement turbulent le long de ces rainures confirma que les structures naturelles inhibent l'action des tourbillons en les empêchant de s'approcher trop de la surface (elles les maintiennent à une distance d'environ 50 micromètres).

La simulation numérique directe a également été utilisée pour la commande active (et non passive, comme avec les cannelures) de la turbulence : on envisage notamment de déformer la surface des ailes d'avion en réaction aux fluctuations de la turbulence du fluide. En pratique, la surface de l'aile serait constituée de composants comprenant des millions de capteurs et de microvolets qui réagiraient aux fluctuations de pression et de vitesse de l'air de manière à agir sur les petits tourbillons responsables du freinage turbulent (voir la figure 4).

Il y a trois ans seulement, cette technique semblait irréaliste ; grâce à l'avènement des techniques microélectro-

mécaniques, elle est aujourd'hui sur le point d'aboutir : par ces techniques, on fabrique aujourd'hui des circuits intégrés contenant les capteurs, l'électronique de commande et les microvolets. La commande active de la turbulence au voisinage de la surface d'une aile a été observée chez les dauphins, dont la remarquable propulsion est probablement due à des mouvements de la peau.

Revenons aux balles de golf, qui montrent bien comment la texture d'une surface permet de contrôler avantageusement l'écoulement de l'air (voir la figure 3). Le freinage le plus important auquel est soumise une balle de golf est dû à la pression de l'air ; il survient lorsque la pression devant la balle est notablement supérieure à la pression derrière elle. Grâce à la turbulence engendrée par ses bosselures, une balle de golf peut être projetée environ deux fois et demie plus loin qu'une balle de taille identique, mais de surface parfaitement lisse.

La mécanique des fluides numériques s'impose aujourd'hui pour l'étude de la turbulence, parce qu'elle donne enfin les résultats escomptés. Ces prochaines années, lorsque la vitesse des superordinateurs dépassera mille milliards d'opérations en virgule flottante par seconde, les mécaniciens des fluides aborderont des écoulements turbulents plus complexes, avec des nombres de

Reynolds supérieurs. Peut-être alors parviendront-ils à simuler l'écoulement de l'air à travers les passages cruciaux d'un réacteur d'avion et à obtenir une visualisation réaliste de l'ensemble piston-cylindre d'un moteur à combustion interne, de l'admission et de la combustion du mélange combustible, ainsi que de l'échappement des gaz à travers les soupapes. Ce type de simulations permettra enfin de commencer à éclairer les équations découvertes par Navier et Stokes il y a plus d'un siècle.

Parviz MOIN dirige le Centre de recherche sur la turbulence de l'Université Stanford. John KIM enseigne l'ingénierie à l'Université de Los Angeles.

P. SAGAUT, T.H. LÊ et P. MOSCHETTI, *Large Eddy Simulation and Direct Numerical Simulation*, in *New Tools in Turbulence Modelling*, École des Houches, mai 1996.

D.J. TRITTON, *Physical Fluid Dynamics*, Oxford Science Publications, 1988.

Tom MULLIN, *Turbulent Times for Fluids*, in *Exploring Chaos : A Guide to the New Science of Disorder*, sous la direction de Nina Hall, W.W. Norton, 1993.

Parviz MOIN et Thomas BEWLEY, *Feedback Control of Turbulence*, in *Applied Mechanics Reviews*, vol. 47, n° 6, deuxième partie, pp. S3-S13, juin 1994.

Les rayons cosmiques

J. CRONIN • T. GAISSER • S. SWORDY

Ces noyaux atomiques provenant de l'espace ont une énergie supérieure à celle que pourraient communiquer les plus gros accélérateurs de particules. Les astrophysiciens recherchent leur origine.

Une fois par seconde, un noyau atomique pénètre dans l'atmosphère terrestre avec autant d'énergie qu'une pierre lancée vigoureusement. Appliquée à un proton, cette même énergie est 100 millions de fois supérieure à celle qu'imprimerait les accélérateurs terrestres les plus puissants. Quels mécanismes accélèrent-ils des noyaux atomiques et où se produisent-ils ?

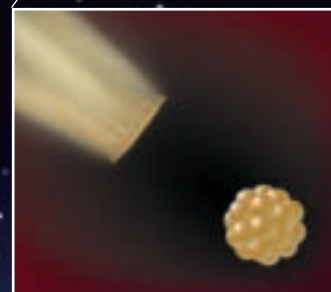
Cette question préoccupe les physiciens depuis la découverte des rayons cosmiques, en 1912. À l'époque, on ignorait la nature particulière des rayons cosmiques, d'où leur nom impropre, qui a subsisté. Le milieu interstellaire contient des noyaux atomiques de tous les éléments, qui se déplacent dans des champs électriques et magnétiques. Sans la protection de l'atmosphère terrestre, beaucoup plus de rayons cosmiques arriveraient jusqu'au sol. Les populations des régions montagneuses ou les personnes qui prennent fréquemment l'avion ont au-dessus d'elles une épaisseur d'atmosphère moindre et reçoivent plus de radiations que les autres.

La caractéristique la plus remarquable des rayons cosmiques est l'absence apparente de limite à l'énergie maximale de ces particules. La plupart des sources connues de particules électriquement chargées, tel le Soleil, émetteur de protons dans le vent solaire, ne produisent aucune particule d'énergie supérieure à une limite spécifique.

Certes, le nombre de rayons cosmiques observés décroît avec l'énergie, mais on en détecte jusqu'aux énergies les plus élevées mesurables. Aux énergies supérieures à 300 milliards de fois la masse au repos du proton (la masse est équivalente à l'énergie, selon la relation d'Einstein), les rayons cosmiques sont si rares qu'il n'existe pas encore de détecteur assez gros pour mesurer leur flux extrêmement faible.

Toutefois, des rayons cosmiques de très haute énergie sont observés indirectement, à raison de un toutes les quelques années : lorsque ces rayons cosmiques percutent l'atmosphère, ils créent des myriades de particules secondaires, qui sont plus faciles à détecter. Le 15 octobre 1991, par exemple, un observatoire de rayons cosmiques installé dans le désert de l'Utah a enregistré une gerbe de particules secondaires créée par un rayon cosmique d'énergie égale à 50 joules (3×10^{20} électronvolts). Le flux de rayons cosmiques diminue régulièrement jusqu'à environ 10^{16} électronvolts, puis la diminution s'accroît aux énergies supérieures, ce qui indique que les rayons cosmiques d'énergie supérieure sont d'origine différente.

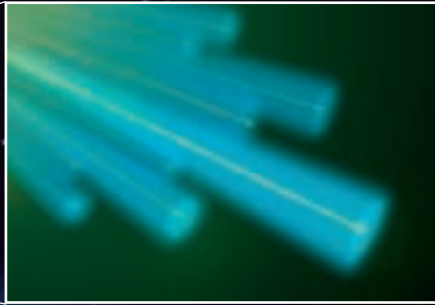
En 1960, à l'Institut Tata de Bombay, Bernard Peters proposa que les rayons cosmiques de faible énergie naissent principalement au sein de notre Galaxie, tandis que ceux d'énergie supérieure sont émis par des sources extragalactiques. En effet, les protons



Les rayons cosmiques, qui sont des noyaux atomiques se déplaçant presque à la vitesse de la lumière, vivent dans un univers étrange : leur temps s'écoule plus lentement que le nôtre en raison d'un phénomène bien décrit par la théorie de la relativité restreinte. Quand ils atteignent la Terre, ces noyaux percutent les noyaux atomiques du gaz atmosphérique à très haute altitude. Une partie importante de l'énergie incidente est transformée en particules subatomiques, tels des muons, qui, à leur tour, heurtent violemment d'autres atomes de l'atmosphère, ce qui crée une «gerbe atmosphérique». Des rayons gamma sont également émis.

Michael Goodman

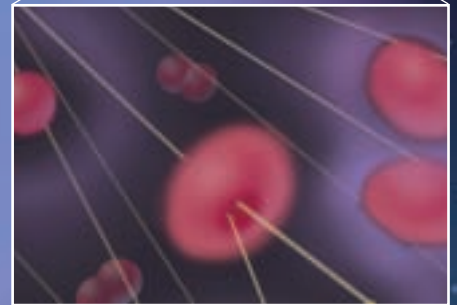
La vie d'un rayon cosmique



Les premières particules créées après la collision se propagent à des vitesses supérieures à la vitesse de la lumière dans l'atmosphère (inférieure à la vitesse de la lumière dans le vide) et, de ce fait, émettent des rayons gamma Cerenkov (cet effet est l'analogie optique du bang créé par les avions qui franchissent le mur du son).



Lorsque les particules créées lors de la collision initiale frappent des noyaux atmosphériques, elles engendrent d'autres particules ainsi que du rayonnement électromagnétique de haute énergie. En raison de la conservation de la quantité de mouvement, la majeure partie de la matière produite se propage dans la même direction que le rayon cosmique incident ; en revanche, les rayonnements électromagnétiques sont émis dans toutes les directions.



Les muons et les autres particules qui demeurent à la fin de la gerbe atmosphérique perdent enfin assez d'énergie pour que leur interaction avec l'atmosphère produise principalement du rayonnement ultraviolet, dû à l'excitation de l'azote atmosphérique. Ce rayonnement peut être détecté par des photomultiplicateurs sensibles. Au cours d'un événement particulièrement violent, certaines particules de la gerbe atteignent le sol, où elles peuvent aussi être détectées.

d'énergie supérieure à 10^{19} électronvolts sont très peu déviés par les champs magnétiques de notre Galaxie. Si ces particules provenaient de notre Galaxie, leur répartition varierait selon la direction, car la Galaxie ne s'étend pas symétriquement autour de nous. Or, la répartition est isotrope.

Naissance dans les supernovae

Ce raisonnement montre à quel point les rayons cosmiques restent mystérieux. Les astrophysiciens ont émis des hypothèses sur les mécanismes de leur production, mais aucune n'est complètement satisfaisante. La difficulté tient en partie à la médiocre connaissance des conditions (très différentes de celles que l'on connaît sur la Terre) qui règnent dans les régions où naissent ces particules. Notamment, l'espace interstellaire ne contient qu'un atome par centimètre cube, une densité bien inférieure à celle du meilleur vide que l'on sache créer. En outre, dans ces régions, les champs électriques et magnétiques interagissent avec une population diffuse de particules char-

gées, encore moins nombreuses que les atomes neutres.

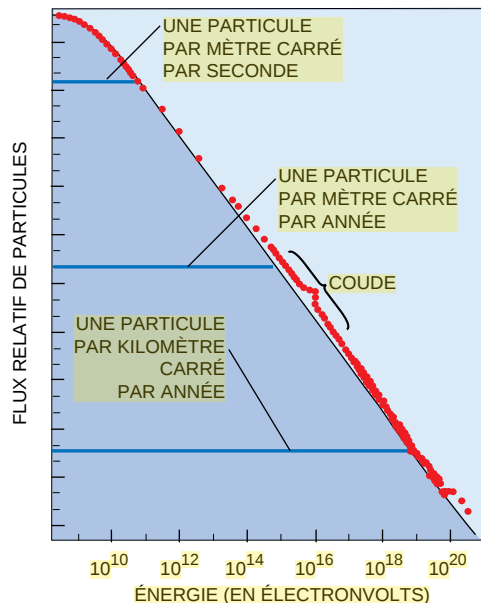
Ce milieu est moins calme qu'il n'y paraît : la matière est si rare que les forces électriques et magnétiques agissent sur de grandes distances sans être notablement amorties. Dans notre Galaxie, l'espace contient ainsi un plasma énergétique et turbulent, composé d'atomes partiellement ionisés. Les mouvements sont difficiles à détecter à l'échelle de temps humaine en raison des grandes distances qui nous en séparent, mais ces mêmes distances permettent à des forces modérées de produire des résultats impressionnants : une particule n'est habituellement accélérée que pendant quelques secondes dans les accélérateurs de particules, mais elle pourrait demeurer des années ou même des millénaires au sein d'un «accélérateur cosmique».

Les astronomes pensent depuis longtemps que la majorité des rayons cosmiques – ceux dont l'énergie est inférieure à environ 10^{16} électronvolts – provient des supernovae, c'est-à-dire des explosions d'étoiles. En effet, la puissance totale des rayons cosmiques observés n'est que légèrement inférieure

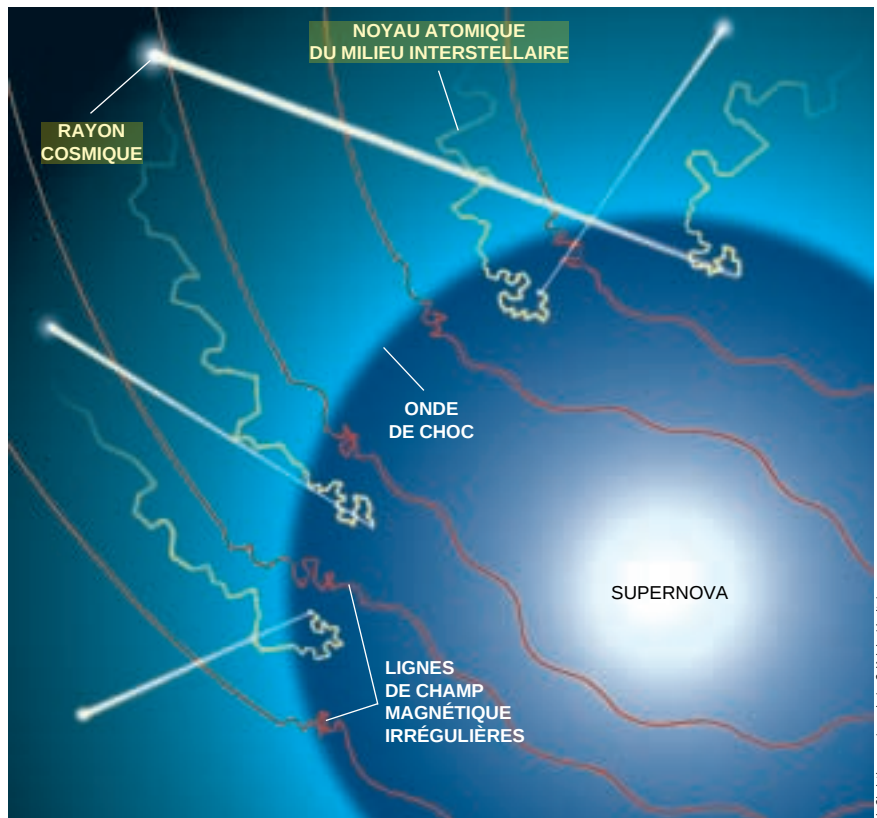
à celle libérée dans le milieu galactique par les supernovae, au nombre de trois par siècle en moyenne. Peu de sources ont cette puissance dans notre Galaxie.

Lors de l'effondrement d'une étoile massive, les couches externes de l'étoile sont éjectées à plus de 10 000 kilomètres par seconde. De même, une quantité considérable d'énergie est libérée lorsqu'une naine blanche se désintègre, lors d'une explosion thermonucléaire. Dans ces deux types de supernovae, la matière est éjectée à des vitesses supersoniques, ce qui crée une puissante onde de choc dans le milieu interstellaire. Cette onde de choc accélère les noyaux de la matière qu'ils traversent, les transformant en rayons cosmiques. Les rayons cosmiques étant électriquement chargés, ils ont des trajectoires tortueuses à travers les champs magnétiques interstellaires, de sorte que leur direction d'arrivée sur la Terre ne fournit aucune indication de leur origine.

En étudiant le rayonnement synchrotron parfois associé aux restes de supernovae, les astrophysiciens ont découvert des indications plus directes du rôle accélérateur des supernovae. Le rayonnement synchrotron est caracté-



1. LES SUPERNOVAE semblent être les accélérateurs de particules qui engendrent les rayons cosmiques. Lors de la traversée de l'onde de choc en expansion créée par l'éjection de matière des supernovae, les particules cosmiques gagnent un peu d'énergie. Les champs magnétiques environnants sont si irréguliers que les particules peuvent traverser l'onde de choc des centaines, voire des milliers de fois, jusqu'à ce qu'elle s'échappe sous la forme de rayons cosmiques. La plupart des noyaux seraient peu accélérés. Cette description est corroborée par la forme générale du spectre d'énergie des rayons cosmiques (à gauche), qui décroît lorsque l'énergie aug-



mente. Le «coude» dans la courbe indiquerait que la plupart des noyaux sont accélérés par un mécanisme incapable de fournir plus de 10^{15} électronvolts environ. Les noyaux ayant des énergies supérieures seraient produits par une source dont on ignore encore la nature.