

Un crapaud envahisseur

Après l'avoir introduit sciemment, des biologistes australiens envisagent de l'éradiquer.

Le Laboratoire australien de santé animale fait circuler dans le monde entier une lettre surprenante : il propose à tout scientifique spécialiste de pathogènes, de parasites ou de maladies des amphibiens de collaborer à «un important projet international : contrôler, voire supprimer les populations de crapauds de la cane à sucre». Le laboratoire étudie déjà les pathogènes bactériens, et il souhaite avoir accès à d'autres souches bactériennes, virales, fongales... mortelles pour les amphibiens. Le pullulement de l'animal a, certes, de quoi déplaire, mais les mesures employées sont-elles judicieuses ?

Originaire d'Amérique du Sud, le crapaud de la cane à sucre, *Bufo marinus*, est le plus grand représentant du genre *Bufo*, avec un corps de longueur parfois supérieure à 30 centimètres. Connu de longue date pour sa voracité, il a été plusieurs fois introduit, notamment en Floride, en Louisiane et dans diverses îles des Caraïbes ou du Pacifique, pour lutter contre les pullulations d'insectes. En 1932, un rapport sur les résultats encourageants obtenus à Porto Rico per-

suada les planteurs de cane à sucre australiens de son utilité, leurs plantations étant ravagées par deux espèces de hannetons. Malgré quelques protestations locales, une centaine d'individus sont relâchés en 1935 dans une dizaine de plantations disséminées sur mille kilomètres de la côte Est. Rapidement, l'expérience est, du point de vue des planteurs, un échec : *Bufo marinus* ne peut escalader les tiges de cane, où se développent les insectes ravageurs. Dédaignant ces proies inaccessibles et un milieu dont le couvert végétal ne lui convient pas toute l'année, il quitte les plantations et envahit la côte du Queensland. Vorace et opportuniste, il mange aussi bien des insectes que des amphibiens, des lézards, des serpents et, même, de petits marsupiaux. Très résistant, il s'accommode de tous les milieux, des prairies aux dunes côtières, des forêts aux faubourgs des cités. *Bufo marinus* prolifère et, 40 ans après son introduction, il occupe près d'un demi-million de kilomètres carrés. Là où il s'installe, les espèces à qui il dispute les aliments ou les sites de ponte disparaissent, ainsi que la plupart des pré-

dateurs habituels des amphibiens... qui meurent empoisonnés : le venin qu'il excrète violemment lorsqu'on le saisit est si puissant qu'il cause des troubles graves, voire mortels. Dépourvu de prédateur (seul le serpent *Amphiesma mai-rui* semble le chasser occasionnellement), très prolifique, il pullule, fragilisant des espèces endémiques sensibles. Enfin il gêne les habitants, qui subissent régulièrement ses invasions et les appels incessants des mâles, en période de reproduction.

La décision du Laboratoire australien de santé animale a donc quelques fondements, mais elle inquiète : *Bufo marinus* étant le seul représentant du genre *Bufo* en Australie, l'agent pathogène choisi ne sera sans doute pas spécifique de l'espèce, de sorte qu'un individu contaminé, qui réussira à gagner un autre continent, risquera de propager une épidémie. Même si l'exploit semble biologiquement inconcevable (*Bufo marinus*, contrairement à ce qu'indique son nom, ne survit pas aux bains d'eau de mer), des introductions plus ou moins volontaires d'animaux pourraient être désastreuses.

Or de telles introductions sauvages d'amphibiens ne sont pas rares, et la dernière en date semble avoir eu lieu en France : on rencontrerait en effet, dans la région de Bordeaux, des grenouilles dont le corps atteindrait une vingtaine de centimètres de long, à l'appétit féroce et capables de capturer de petits mammifères. L'introduction de cette grenouille taureau, *Rana catesbaiana*, ne constitue pas une tentative biologique, mais serait le fait d'un touriste qui aurait rapporté quelques spécimens d'un voyage en Amérique. La grenouille taureau qui, comme la grenouille verte européenne, est très liée au milieu aquatique, semble s'être fort bien adaptée ; son aire de répartition s'étend, et l'on craint que les faunes de grenouilles locales pâtissent de sa concurrence.

Saurons-nous tirer à temps les leçons de la triste histoire de *Bufo marinus* ; ayant appris à mesurer les conséquences d'une introduction malheureuse, serons-nous plus prudents ? L'exemple de la vente, toujours légale en France, de «tortues de Floride», dont on sait le danger qu'elles représentent, ou la récente décision de l'Australie d'introduire une nouvelle espèce de scarabée, afin d'éliminer les déjections canines des plages, dénotent une même vision à court terme et n'incitent guère à l'optimisme.

Sylvain DUFFAUD

Laboratoire de paléontologie des vertébrés et de paléontologie humaine, Université Pierre et Marie Curie, Paris VI



Le crapaud *Bufo marinus* envahit l'Australie. Ici deux animaux s'accouplent.

Molécule de sommeil

Des lipides synthétisés dans le cerveau sont des narcotiques.

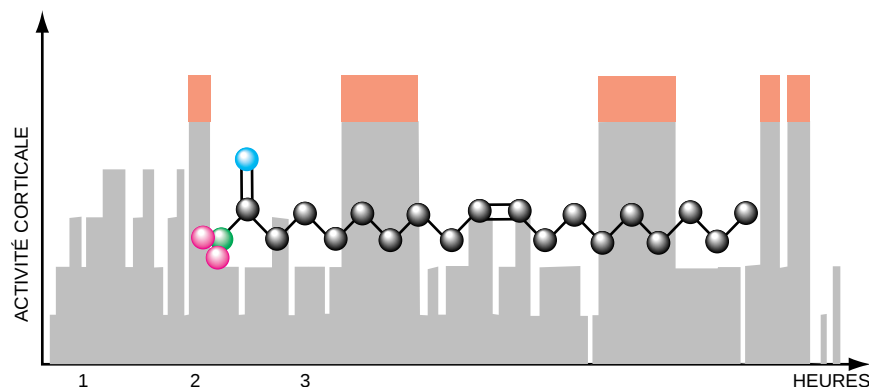
En 1994, Richard Lerner et ses collègues de la Clinique Scripps ont isolé du liquide céphalo-rachidien de chats privés de sommeil pendant 22 heures une molécule formée d'un long acide gras (une chaîne dont le squelette est composé seulement d'atomes de carbone, liés à des atomes d'hydrogène), terminé par un groupe amide. Après une difficile analyse chimique, l'administration à des animaux de laboratoire d'une molécule conforme à la formule identifiée a provoqué le sommeil. On a alors montré que la molécule est rapidement dégradée, dans le cerveau, en acide oléique.

Ainsi se confirme une intuition du Français Henri Piéron, qui, au début du siècle, avait postulé l'existence d'une substance somnifère endogène, qui s'accumulerait progressivement au cours de la journée, déclencherait le sommeil au-delà d'un seuil de concentration et serait détruite lors du sommeil (Piéron avait recueilli du liquide céphalo-rachidien de chiens qui avaient été privés de sommeil, et l'avait injecté dans le cerveau d'autres chiens, obtenant leur endormissement dans les deux à six heures).

Toutefois la découverte de R. Lerner ne résout pas le problème de l'endormissement. Il y a une trentaine d'années, Michel Jouvet étudiait déjà des molécules analogues, mais beaucoup plus courtes (quatre atomes de

carbone au lieu de 17, sur le squelette), qui provoquaient le sommeil paradoxal (caractérisé par des mouvements oculaires rapides) chez le chat, et, depuis, les physiologistes ont découvert de nombreuses molécules qui induisent un sommeil analogue au sommeil naturel, avec les alternances de sommeil paradoxal et de sommeil léger : la prostaglandine D, le peptide somnifère delta, l'interleukine 1, l'interféron alpha 2, la sérotonine, le facteur de nécrose des tumeurs... Simultanément on observait que les barbituriques et l'alcool éthylique, au contraire, suppriment le sommeil paradoxal, et que les benzodiazépines réduisent le sommeil léger. Des centres cérébraux variés sont activés par les diverses substances, et des injections de composés qui bloquent les récepteurs de ces dernières, ou inhibiteurs, provoquent des insomnies.

L'amide découvert par R. Lerner et ses collègues n'est-il qu'une molécule de plus dans la longue liste des somnifères endogènes ? Selon Jean-Pierre Sastre, de l'Université Claude Bernard, à Lyon, la molécule marque une nouvelle étape dans l'étude de ces composés : après 30 ans d'éclipse, les lipides réapparaissent en physiologie du sommeil (les acides gras sont des lipides). En outre, W. Dement et ses collègues ont observé qu'un autre amide acide carboxylique à longue chaîne suscite les mêmes réactions physiologiques et comportementales que la molécule active de la marijuana et du haschisch, dont la structure est différente. On sait que les membranes cérébrales peuvent synthétiser ce nouvel amide à partir des molécules de phospholipides qui constituent les membranes cellulaires, de sorte que, si l'on a perdu l'espoir de trouver un centre du sommeil unique, dans le cerveau, on espère néanmoins élucider une voie de biosynthèse d'une molécule somnifère de l'organisme.



Une molécule constituée d'un long acide gras (les boules noires représentent les atomes de carbone) et d'un groupe amide (à gauche) est somnifère. Elle provoque un sommeil normal, avec une alternance de phase de sommeil léger et de sommeil paradoxal (en orange).

Microscopie et chimie

Des programmes aident à interpréter les images de molécules formées par microscope à effet tunnel.

Les chimistes ont cru que le microscope à effet tunnel, inventé par H. Rohrer et G. Binnig, aux Laboratoires de recherche *IBM* à Zurich, réaliserait un vieux rêve : leur montrer les molécules avec une résolution quasi atomique. Pourtant l'étude de molécules même simples les a surpris : le benzène, molécule hexagonale, est apparu sous la forme d'un motif triangulaire, l'éthylène, qui comprend deux atomes de carbone, ne montre qu'une bosse dans l'image. Alors ?

Alors les physiciens ont progressivement compris que le microscope à effet tunnel ne fournit pas une image de la forme des molécules, mais une représentation complexe de leur structure électronique. Le problème de l'interprétation des images a limité son application à la chimie jusqu'à ce que, récemment, des techniques de simulation permettent d'interpréter ces images et de comprendre comment l'aspect du motif moléculaire est relié à la structure et à la nature chimique des molécules étudiées.

Dans les nouveaux microscopes à effet tunnel, une pointe très fine (quelques atomes de diamètre à l'extrémité) est approchée d'un échantillon, de sorte qu'un courant électrique «tunnel»

s'écoule entre la pointe et le matériau : en mesurant ce courant, qui augmente quand la pointe se rapproche de l'échantillon, on détermine le relief de ce dernier. Par un balayage de la pointe au-dessus de la surface, on obtient des cartes de l'objet étudié.

Ces cartes ne représentent pas exactement le relief atomique, car ce sont des «vues électroniques», qui dépendent à la fois de la géométrie des surfaces et de la probabilité de présence, sur la pointe, des électrons de conduction issus du matériau. Ainsi S. Chiang et ses collègues du Centre de recherche *IBM* d'Almaden ont étudié un arrangement ordonné de molécules de benzène (molécule hexagonale) sur du rhodium : chaque motif observé représentait une molécule de benzène, mais il comportait trois lobes arrangés en triangle équilatéral, avec une petite dépression en son centre. Pourquoi ne voyait-on pas plutôt un hexagone à six lobes ?

Paul Weiss et Don Eigler, également à Almaden, ont obtenu des images de la même molécule, mais isolées sur une surface de platine (voir la figure 1) : une première image ressemble à celle qui avait été obtenue par S. Chiang, avec trois bosses en triangles ; une deuxième

image est une simple bosse ; et la troisième est comme un volcan cylindrique, avec une petite dépression à son sommet. Le même problème d'images multiples et difficiles à interpréter se pose pour le monoxyde de carbone.

DES ÉLECTRONS PROPAGÉS

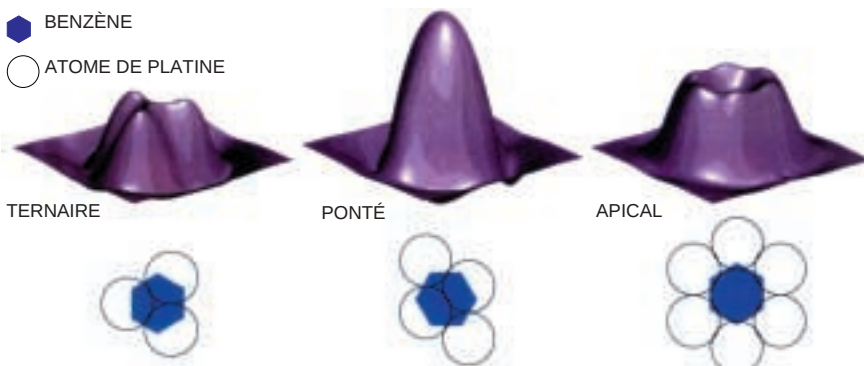
Afin d'explorer de tels mystères, Christian Joachim, du CNRS à Toulouse, et nous-mêmes avons mis au point une méthode de simulation numérique qui calcule le courant tunnel entre une pointe et une surface où a été placée une molécule. Nous considérons que le courant tunnel résulte de la diffusion des électrons et nous calculons la probabilité que ces électrons soient réfléchis ou transmis dans l'espace pointe-surface. Ainsi que le montre la figure 2, nous représentons l'échantillon comme la répétition semi-infinie d'une cellule de base, avec au-dessus une couche de surface et la molécule. La pointe est constituée par un agrégat (4 à 13 atomes), surmonté par d'autres répétitions de la cellule de base. On «recolle» les extrémités gauche et droite afin d'éviter les effets de bord.

À cette échelle, la nature quantique des phénomènes impose de calculer la probabilité de transmission à partir de la fonction d'onde associée aux électrons de conduction. Pour simplifier le calcul, on utilise des «propagateurs spatiaux», qui permettent, quand on connaît la fonction d'onde d'un électron sur une partie du système, d'obtenir de proche en proche la valeur de la fonction d'onde sur la totalité de celui-ci. Cette approche permet de déterminer la valeur du courant tunnel tout en évitant de résoudre complètement l'équation de Schrödinger. On effectue alors un balayage de la pointe au-dessus de la surface, à l'identique de la procédure expérimentale, calculant le courant tunnel à chaque position pour constituer l'image simulée.

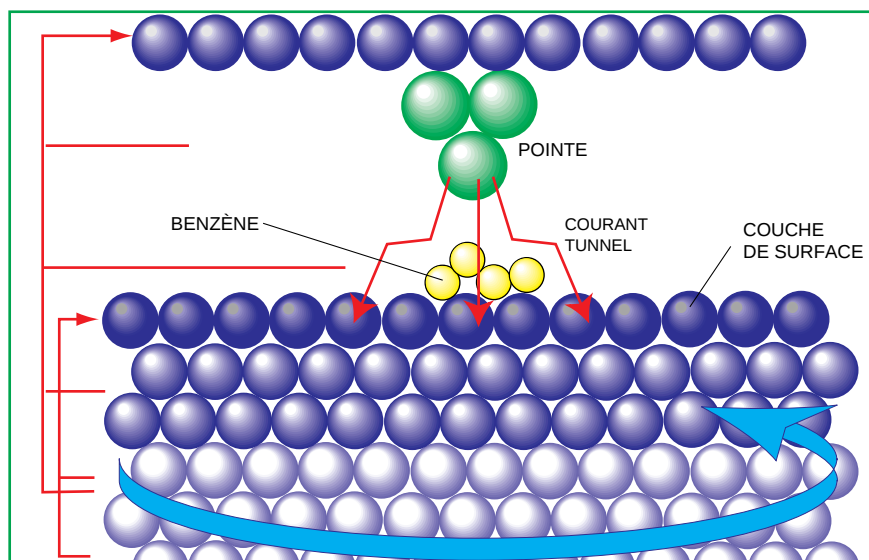
Par notre programme, nous avons calculé les images correspondant à de nombreuses observations : atomes de soufre sur des surfaces de rhénium et de platine, molécules de benzène sur du rhodium, monoxyde de carbone sur du platine, etc. Nous examinerons ici comment ces calculs expliquent les images obtenues par l'étude du benzène sur du platine.

BENZÈNE SUR PLATINE

Pourquoi le benzène peut-il former trois types d'images différentes ? Parce qu'il peut se disposer de plusieurs façons sur une surface. La physico-chimie des sur-



1. Trois calculs par ordinateur de l'image de la molécule de benzène qui devrait être donnée par la microscopie à effet tunnel. Pour chaque image, on considère l'adsorption du benzène en un site différent du réseau métallique : site ternaire, ponté ou apical. Ces images ont une taille latérale de 1,2 nanomètre de côté et leur hauteur est respectivement 0,05, 0,1 et 0,06 nanomètre. Elles démontrent que l'image d'une molécule n'est pas univoque, mais dépend fortement de la symétrie de son interaction avec la surface.



2. Pour calculer le courant tunnel, on représente les solides comme une répétition d'un motif de base. On recolle les bords latéraux afin d'éviter les conditions aux limites et l'on calcule la fonction d'onde des électrons de proche en proche, groupe d'atomes par groupe d'atomes (flèches rouges à gauche).

faces indique que la molécule se place à plat sur le platine, car cette position correspond à une énergie d'interaction minimale. Cependant les monocristaux de platine ne sont pas parfaitement plats et uniformes, à l'échelle atomique : dans les cristaux utilisés par D. Eigler, la surface apparaît comme un arrangement triangulaire d'atomes. Ainsi la molécule de benzène peut disposer son motif hexagonal au-dessus de plusieurs sites (de symétries différentes) du platine.

Les positions de haute symétrie, qui minimisent l'énergie d'interaction entre le benzène et la surface, sont : un site ternaire, où le benzène est lié à trois atomes de platine ; un site « ponté », où le benzène est lié à deux atomes ; et un site « apical », où la molécule est au-dessus d'un atome de platine seulement. Pour chaque site, plusieurs orientations du benzène sont possibles, mais l'examen des modèles atomiques ne prévoit pas de déformation du benzène sur les différents sites, alors que les trois images expérimentales sont très différentes.

Les simulations expliquent les images : avec les sites ternaires, on obtient des images simulées qui possèdent une forte symétrie d'ordre trois ; pour une orientation du benzène par rapport au métal, on obtient des images à trois lobes, et, pour une autre orientation, l'image calculée présente une seule bosse, mais de forme triangulaire. Lorsque la molécule est en position pontée, l'image présente une bosse simple très proche de la deuxième image expérimentale, tandis que le site apical conduit à une image avec une symé-

trie d'ordre six et une apparence proche d'un volcan.

Ces études ne se limitent pas à expliquer les images surprenantes qui avaient été obtenues ; elles révèlent en outre les mécanismes de la formation des images et, notamment, du courant tunnel. Ce dernier est composé de deux parties : le courant qui « passe par la molécule », c'est-à-dire qui résulte de l'interaction de la pointe avec les orbitales de la molécule adsorbée, et qui n'est important que lorsque la pointe est juste au-dessus de la molécule, et le courant qui « passe par la surface », uniforme loin de la molécule, mais modifié à son voisinage. L'image donnée par le microscope résulte de la combinaison de ce courant par la surface et du courant par la molécule, lequel dépend de son interaction avec les atomes de la surface et explique la structure du motif moléculaire en fonction de la symétrie du site.

Cet exemple démontre que les simulations donnent plus à voir que les images seulement : assistée par la simulation, la microscopie à effet tunnel est une sonde exceptionnelle, qui renseigne indirectement sur la constitution atomique des surfaces et de leurs adsorbats. Elle indique, en outre, la probabilité de présence électronique pour les niveaux moléculaires proches de l'énergie de Fermi de la surface. Cette information est cruciale pour comprendre la réactivité potentielle de la molécule et les mécanismes atomiques des réactions chimiques sur les surfaces.

Philippe SAUTET et Marie-Laure BOCQUET

École normale supérieure de Lyon et Institut de recherches sur la catalyse

FRANCE
culture

Palais
de la
découverte

POUR LA
SCIENCE

VOUS INVITENT
À L'ENREGISTREMENT
PUBLIC
DE L'ÉMISSION :
L'IMPOSSIBLE

**Les impossibles
de
l'agriculture**

avec
GUY PAILLOTIN,
président de l'I.N.R.A.

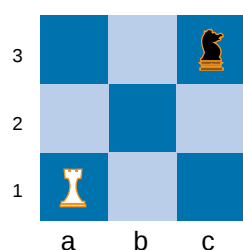
LE SAMEDI 9 MARS 1996
À 15 HEURES
AU PALAIS DE LA DÉCOUVERTE
SALLE DE CINÉMA
AVENUE FRANKLIN D. ROOSEVELT
75008 PARIS

JEU-CONCOURS

par Pierre TOUGNE N°20

TOUR CONTRE CAVALIER

Aux échecs, le Cavalier, du fait de son déplacement particulier, échappe toujours, sauf dans quelques positions particulières, à une pièce à longue portée comme la Tour. Cependant, sur un échiquier plus petit, il n'en est pas de même. Ainsi sur un échiquier 3×3 , la Tour étant sur la case a1 et jouant la première prend un Cavalier situé sur la case c3 en au plus trois mouvements.



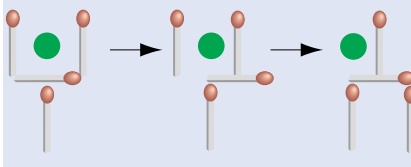
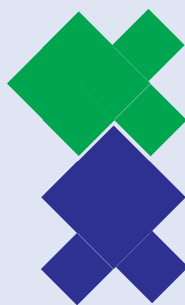
1. Tc1;Ca2
2. Tc2;Cc2 (ou Cc3)
3. Tx.C.

Pour ce jeu-concours, sauriez-vous trouver le nombre maximal de mouvements et la stratégie d'une Tour jouant la première à partir de la case en bas et à gauche de l'échiquier pour capturer un Cavalier partant de la case en haut et à droite de l'échiquier sur des échiquiers 4×4 , 5×5 et 6×6 ?

Envoyez vos réponses à *Pour la Science*, 8, rue Férou, 75006 Paris. Parmi les réponses reçues en février 1996, dix gagnants recevront un livre.

RÉPONSE AU JEU-CONCOURS N°18

Au premier problème, les lecteurs ont trouvé une autre solution, symétrique, mais pas superposable.



L'origine des rayons cosmiques

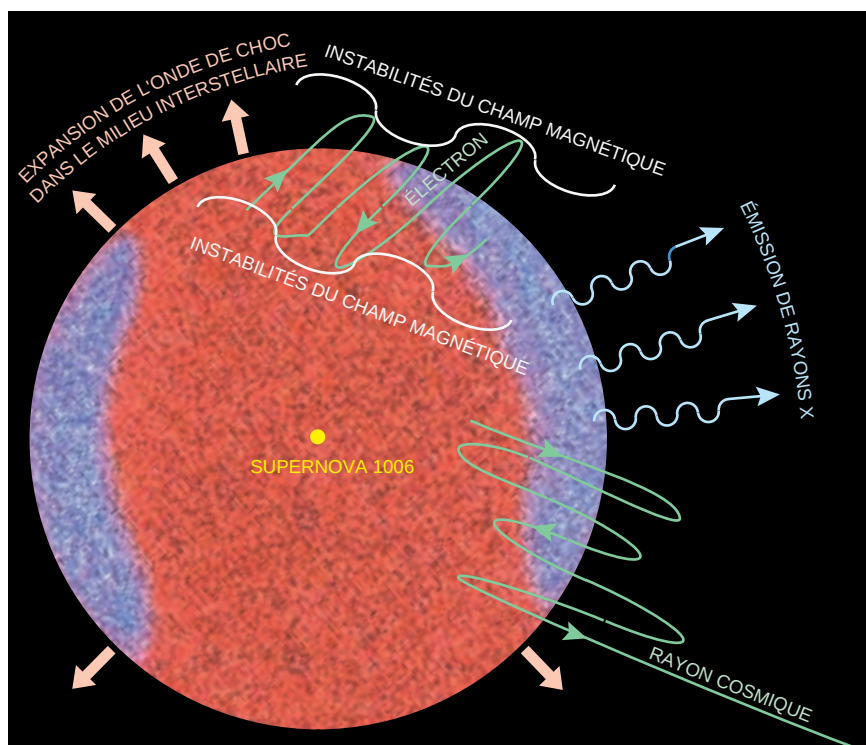
Les supernovae sont des sources de rayons cosmiques de haute énergie.

Malgré leur nom trompeur, les rayons cosmiques sont des particules ; ce sont même les particules les plus énergétiques de l'Univers. Depuis leur découverte au début du siècle, deux mystères ont confondu les astrophysiciens. Le premier est l'origine des rayons cosmiques galactiques, et le second, la cause de leurs fabuleuses énergies. En utilisant le satellite X japonais ASCA pour observer les restes d'une étoile qui a explosé en l'an 1006, K. Koyama et ses collègues ont détecté, au bord de la sphère dispersée lors de la supernova, ou explosion stellaire, des rayons X engendrés par des électrons accélérés jusqu'à 10^{14} électronvolts.

Les rayons cosmiques galactiques sont des noyaux atomiques, principalement d'hydrogène (des protons), mais

aussi de tous les autres éléments de la Classification périodique ; des électrons et quelques antiparticules sont également présents dans ce flux cosmique. Sur la Terre, le nombre de ces particules par unité de surface et par unité de temps est proportionnel à leur énergie à la puissance $-2,7$ (loi de puissance), à partir d'une énergie de l'ordre de 10^8 électronvolts (aux énergies inférieures, ils sont noyés dans le flot de particules produites par le Soleil), jusqu'à plus de 10^{20} électronvolts, soit une dizaine de joules. Une telle énergie est inégalée sur la Terre : l'énergie maximale à laquelle le futur grand collisionneur européen accélérera les particules est dix millions de fois inférieure.

On détecte les rayons cosmiques soit à partir de satellites, soit, pour les plus énergétiques, par les produits de leurs



L'onde de choc de la supernova 1006 (*bord du disque*) se propage à grande vitesse dans le milieu interstellaire. Des rayons cosmiques (*flèches vertes*), créés par la supernova, sont accélérés en rebondissant de part et d'autre de l'onde de choc, entre des instabilités du champ magnétique. Les électrons ainsi accélérés émettent des rayons X (*zones violettes*) par un mécanisme différent de celui qui s'observe au centre du reste de supernova (*zone rouge*). Les rayons cosmiques finissent par s'échapper de la région accélératrice.